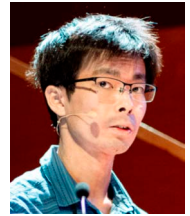


超新星シミュレーションを活かした 素粒子標準模型を超えた物理の探索

森 寛 治

〈慶應義塾大学理工学部物理学科 〒223-0061 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1〉

e-mail: kanji.mori@rk.phys.keio.ac.jp



超新星爆発は素粒子標準模型を超えた新しい物理を探索する有用なツールとして伝統的に活用されてきた。一方で近年では、計算機の急速な発展により、多次元超新星シミュレーションに基づいて観測可能性を予言することが可能になっている。そこで筆者は、いまだ発見されていない仮説上の素粒子の効果を検討した超新星爆発シミュレーションを実現してきた。本記事では特に暗黒光子とアクシオン様粒子を例にとり、こうした新粒子が超新星爆発に与える影響を議論する。これらの粒子は超新星爆発を妨げたり助けたりするため、モデルと観測を比較することで未知の粒子の性質に関する情報を得ることができるだろう。

1. はじめに

物理学の歴史を振り返ってみると、宇宙は地上では観察することが難しい物理現象を見せてくれる「実験室」として機能してきたことに気がつく。たとえば、17世紀には惑星の運動を記述するケプラーの法則に基づきニュートン力学が成立したことは有名である。20世紀に入ると宇宙線の観測によって陽電子 [1] やミューオン [2]、パイオン [3] といった粒子が相次いで発見され、素粒子・原子核物理学の進歩をもたらした。より最近では、2015年にLIGOにより連星ブラックホール起源の重力波GW150914が直接的に検出されたことは記憶に新しい [4]。この発見によって、一般相対性理論の予言がまた一つ確認されることになった。

現在では、私たちの世界を記述する最も基本的な枠組みである素粒子物理学の標準模型 (Standard Model) が確立している。この標準模型は地上実験による様々なテストをクリアしており、素

粒子の振る舞いを正確に記述する優れた理論といっていよう。一方で、この標準模型にはいくつかの問題が知られている。たとえば、標準模型においてはニュートリノは質量ゼロの素粒子として導入されるが、ニュートリノ振動の発見 [5, 6] により、ニュートリノは小さいが有限の質量をもつことが判明している。また、この宇宙のエネルギー密度の大部分を占める暗黒物質や暗黒エネルギーを説明するためには、標準模型を超えた物理が必要であると考えられている [7]。このような新しい物理が発見されればノーベル賞に値する大成果であるため、加速器等を用いた新物理の探索は実験素粒子物理学の一大分野となっている。ただし、人間社会が基礎科学のために負担できるコストが有限であることを考えると、巨大実験施設を用いた直接探索にもいつか限界が訪れてしまうかもしれない。

そこで注目を浴びているのが天体現象を用いた探索手法であり、中でも最も有用な天体の一つが重力崩壊型超新星である。重力崩壊型超新星はお

よそ $8 M_{\odot}$ より質量の大きい大質量星がその一生の最後に起こす大爆発である。超新星爆発のコアでは約 10^{11} K もの高温と 10^{14} g/cm³ もの高密度が実現しているため、地上実験で発見することが困難な新しい物理現象が現れる可能性がある。一方で、大規模数値シミュレーションに基づく超新星爆発の研究は、近年のスーパーコンピュータの進歩に歩調を合わせて急速に進展している。本記事では、そうした超新星爆発研究そのものの進展を踏まえた上で、超新星爆発を用いて標準模型を超えた物理を探索しようとする最近の試みについてご紹介したい。

2. 超新星爆発の標準シナリオ：ニュートリノ加熱による爆発

重力崩壊型超新星爆発のメカニズムとして最も有望とされているのが、ニュートリノ加熱による爆発機構である。1980年代にベータとウィルソンがこのニュートリノ加熱メカニズムに基づき計算機上で超新星爆発を再現 [8] して以来、微視的物理解の取り扱いをより精緻にしたシミュレーションの努力が現在まで続いている。本章では、そうしたシミュレーション研究によって得られた標準的な理解について概説する。より包括的なレビューについては文献 [9–12] を参照されたい。

2.1 コア反跳と衝撃波の停滞

大質量星は進化の過程で核融合反応を通してより重い元素を合成し、最終的には鉄コアを形成する。鉄は結合エネルギーが大きい元素であるため、核融合を通してエネルギーを生成することができない。鉄コアの温度は約 10^{10} K と非常に高いため、むしろ吸熱反応である鉄の光分解が起こり、ついにはコアが重力崩壊を始める。コアが崩壊を始めると、中心密度が急激に上昇する。中心密度が原子核飽和密度（約 10^{14} g/cm³）に達すると核子の間に働く斥力の効果が重要となり、ガスの圧力が増大する。するとコア中心部の崩壊が止まり、コア反跳（core bounce）が起こる。一方

で鉄コアの比較的外側の部分は超音速で落下しているため、コア反跳の情報が伝わらず、質量降着が続く。そのためコア内で流体がぶつかり合い、衝撃波が出現する。

この衝撃波がコアを突き抜け外層を伝播し星の表面に達すると、その星は明るく光り輝くことになる。したがって、超新星爆発が成功するためには、衝撃波が星の外側に向かって進むことが必要である。ところが、降着する物質は衝撃波を通過する際に光分解を起こし、エネルギーを吸収してしまう。また質量降着によるラム圧も衝撃波をコアに閉じ込めようとする。こうした過程が衝撃波の伝播を妨げるため、このままでは衝撃波が停滞してしまうことが流体シミュレーションからわかっている。

2.2 ニュートリノ加熱による停滞衝撃波の復活

ここで重要になるのがニュートリノによる加熱である。コアの中心部約 10 km 以内では物質密度が極めて高いため、「幽霊粒子」とも呼ばれる

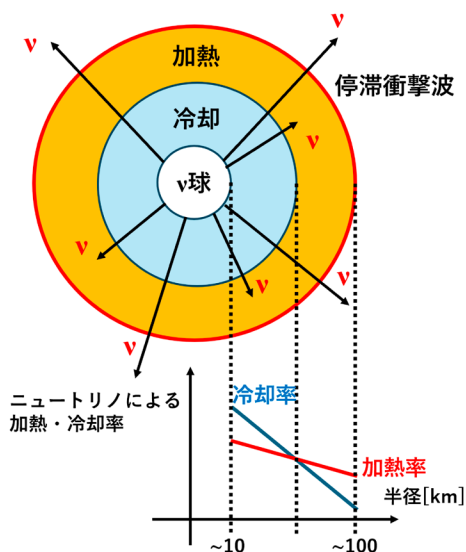


図1 ニュートリノ加熱メカニズムの模式図。中心部のニュートリノ球（ν球）からは大量のニュートリノが放出されており、その一部が加熱に寄与する。星の中心付近では温度が高いためニュートリノ生成による冷却が支配的だが、停滞衝撃波付近では加熱の効果が上回る。

ニュートリノですら逃げ出すことができない領域が出現する．この領域はニュートリノ球 (neutrinosphere) と呼ばれている．このニュートリノ球の表面からは大量のニュートリノが放射される．ニュートリノと物質の相互作用は極めて弱いいため、ニュートリノの99%は星の外に逃げ出してしまふ．しかし、1%のニュートリノは衝撃波背面の核子と相互作用し、物質を加熱する (図1)．この加熱効果によって停滞衝撃波が復活し、超新星が成功裡に爆発するというのがニュートリノ加熱シナリオである．実際超新星 SN 1987A のニュートリノ観測 [13–15] により、超新星爆発からは 10^{53} erg ものニュートリノが放出されることがわかっている．このうち1%が爆発に寄与する場合、超新星の典型的な爆発エネルギー 10^{51} erg を確かに説明できることになる．

このシナリオを検証するため、ニュートリノの輸送を考慮した流体シミュレーションに基づく理論研究が進められてきた．一般にこうした天文シミュレーション研究は、計算量を削減するために人工的に球対称性を仮定した1次元計算から始めることが多い．しかし、世界中の研究グループが微視的物理過程を改良しつつ超新星の1次元計算を実行した結果、1次元のセットアップでは停滞衝撃波の復活が一般的には起こらないというコンセンサスが得られた [16]．一方で、軸対称性を仮定した2次元計算や、人工的な仮定を課さない3次元計算では、衝撃波の復活が起こり得ることがわかってきた [17–22]．こうした多次元の状況では、衝撃波背面の物質が対流を起こすことでニュートリノ加熱がより効率的に進むことや、定在衝撃波不安定性 (standing accretion shock instability) のような流体力学的な不安定性が発達することが爆発を成功させる上で重要であると考えられている．

2.3 最近のいくつかのトピック

現在では、このシナリオに基づいた多次元シミュレーションの結果が世界中の研究グループに

よって先を争うように発表されている．その結果、超新星の爆発エネルギーやニッケル質量、中性子星質量などの観測可能量の予言が揃いつつあり、現実の超新星イベントと比較しても定性的には整合した値が得られている．一方で、最先端の超新星モデルにおいても様々な近似や不定性が存在することも事実である．ここではそれらを網羅的に紹介することはできないが、筆者が最近注目している3つのトピックについてコメントしておきたい．

一つ目は長時間計算の重要性である．最先端の3次元計算は莫大な計算資源を必要とするため、多くのシミュレーションではコア反跳後1秒前後までの計算が行われてきた．ところが、反跳後数秒にわたる長時間3次元計算を実現した研究 [20, 21] によると、爆発エネルギーなどの観測可能量が長時間にわたり変化し続けるようすが観察された．したがってシミュレーションと観測を定量的に比較するためには、そうした長時間計算を実行する必要があるだろう．現在のところこのような計算例は限られているため、今後は様々なセットアップで長時間3次元計算を実現していくことが一つのトレンドであろう．

二つ目はニュートリノ振動の影響である．ニュートリノには電子型・ミュー型・タウ型の3種類があり、特に電子型ニュートリノが超新星コアでの加熱に寄与していることが知られている．一方で、超新星コアには非常に数密度の高いニュートリノのガスが存在する．そのような状況ではニュートリノどうしの自己相互作用に起因する集団振動 (collective oscillation) が起こり、ニュートリノの種類が互いに移り変わる可能性がある．特に、ある条件を満たすと高速フレーバー不安定性 (fast flavor instability) [23] や衝突フレーバー不安定性 (collisional flavor instability) [24] などによりニュートリノの種類が劇的に変化することが理論的に指摘されている．これらの効果を第一原理的にシミュレーションに取り入れ

ることは困難であるものの、筆者らを含め複数のグループによって、様々な処方箋のもとでシミュレーションを行う試みが始まっている [25–28]. 詳しくは文献 [29] を参照されたい.

最後はニュートリノのカイラリティの効果である [30]. 標準模型ではニュートリノはスピンと運動量の向きが逆であることが知られており, 「ニュートリノは左巻き (left-handed) である」と表現する. 超新星コアでは陽子が左巻きの電子を捕獲することで大量の左巻きニュートリノが生成され, 星の外へ失われるため, 結果としてコアには右巻きの電子が左巻きより多く存在することになる. このような不均衡な状況では中性子星の磁場が増幅される可能性がある [31–33] ほか, ニュートリノ輸送にも影響がありうる [34]. しかしながら, これらの効果がどの程度爆発メカニズムに影響を及ぼすのかは明らかになっておらず, 今後の研究を俟つ必要がある.

3. 暗黒光子の生成を考慮した超新星シミュレーション

ここまで述べたように, 超新星爆発のニュートリノ加熱メカニズムには多くの不定性が残るものの, ひとまず標準的な枠組みとして広く受け入れられている. それではこのパラダイムのもとで, もし標準模型を超えた新しい粒子が存在した場合に, その粒子が超新星爆発に与える影響を考えてみたい.

一口に新しい粒子といっても様々なモデルがありうるが, ここではまず暗黒光子 (dark photon, γ') [35, 36] を取り上げる. 暗黒光子は通常的光子と似た性質 (スピン 1) をもつのだが, 標準模型に含まれる既知の粒子とはほとんど相互作用をしない. なぜ暗黒光子に注目するかといえば, この粒子が暗黒物質の候補としても知られているからである. 暗黒物質候補として最も有名なものは

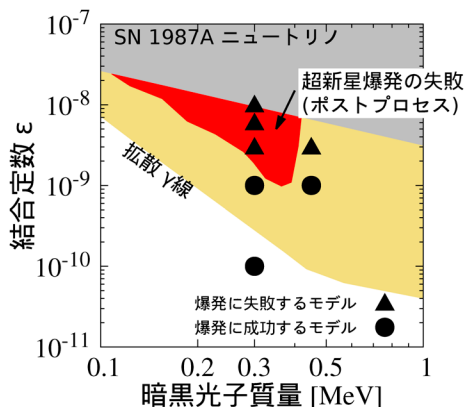


図2 暗黒光子のパラメータ平面 [37]. 色付きの領域はこれまでに排除されたパラメータを示す. 点は筆者らのシミュレーションで採用したパラメータであり, ●は爆発に成功したモデル, ▲は失敗したモデルを示す.

weakly interacting massive particle (WIMP) とアクシオン (axion) である [7]. これまで WIMP やアクシオンを発見しようという努力が続けられてきたものの, 現在のところ確たる証拠は報告されていない. そこで最近では, これらの粒子にこだわらずに幅広い暗黒物質候補を探索していこうという機運が高まっている. その一つがここで取り扱う暗黒光子である.

暗黒光子は通常物質とほとんど相互作用をしないが, 通常的光子とはわずかに相互作用しうると考えられている. この暗黒光子・光子相互作用を通じて, 超新星爆発において暗黒光子が生成される可能性がある. そこで, 暗黒光子・光子相互作用の強さを定義する結合定数 ϵ に対して, 超新星爆発を用いて制約を付けることが我々の目標である.

図2は, これまでの研究で得られた暗黒光子に対する制限を示す. 「SN 1987A ニュートリノ」と書かれた領域では, 暗黒光子が原始中性子星^{*1}から大量に飛び出し強い冷却が働く. そのために超新星のニュートリノ光度が SN 1987A の観測値

^{*1} 原始中性子星 (protoneutron star) は中性子星の赤ちゃんであり, 超新星爆発の中心に鎮座している. 通常の中性子星より温度が高い ($\sim 10^{11}$ K) ことが特徴である.

より小さくなってしまうため、この領域に暗黒光子が存在することはできないと考えられる。また「拡散 γ 線」と書かれた領域では、暗黒光子が光子に崩壊する現象 ($\gamma' \rightarrow 3\gamma$) に着目し、過去の超新星爆発が放出してきた暗黒光子に由来する拡散 γ 線の観測から、暗黒光子の性質に対して制限を課している。

このように、超新星ニュートリノや、粒子の崩壊に由来する電磁波を通して未発見の粒子を探索する手法は、天体を用いた未知粒子探索の分野では常套手段として広く用いられている。一方で、「超新星爆発の失敗」と書かれた領域は暗黒光子に特有のものである^{*2}。最近の研究 [40] によると、暗黒光子がこの領域の中に存在した場合には超新星爆発が起こらずにブラックホールとして崩壊してしまうため、現実の宇宙と矛盾が生じる。したがって、暗黒光子はこの領域内に存在しないと主張されている。ここで注意しなければならないのは、文献 [40] では超新星モデルを単なる背景場として用いるいわゆるポストプロセス手法が用いられていることである。ところが、超新星爆発の成功と失敗をシミュレーションなしで判定する方法は今のところ確立していない。したがって、この制限を確立するためには、暗黒光子による冷却効果を取り入れた超新星シミュレーションを実現する必要がある。以下では、筆者らによるそのような計算の結果 [37] をご紹介したい。

今回の研究では、超新星爆発シミュレーションのために開発されたニュートリノ輻射流体コード 3DnSNe[41] を用いて2次元軸対称計算を実行した。このコードに暗黒光子の生成による冷却効果を実装した。SN 1987Aの爆発を模擬するため、初期条件としてはSN 1987A親星の観測的特徴をよく再現するとされる文献 [42] のものを採用した。

図3はシミュレーションの結果として得られた超新星モデルの衝撃波半径を示す。実線は暗黒光

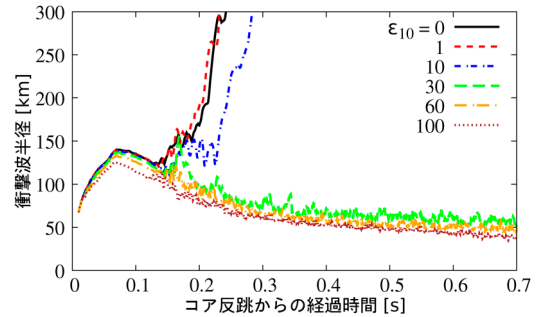


図3 超新星モデルの(角度平均された)衝撃波半径 [37]. $\epsilon_{10}=10^{10} \epsilon$ は暗黒光子・光子結合定数の値であり、実線 ($\epsilon_{10}=0$) は暗黒光子の存在を仮定しない通常モデルである。暗黒光子質量としては0.3 MeVを仮定している。

子を仮定しないモデル、破線は暗黒光子質量を0.3 MeVに固定し、結合定数 $\epsilon_{10}=10^{10} \epsilon$ の値を様々な仮定したモデルである。まず、暗黒光子なしのモデルでは衝撃波が復活しており、超新星爆発に成功していることがわかる。また、 $\epsilon_{10} \leq 10$ と比較的結合定数が小さい場合にも、やはり爆発が成功している。一方で ϵ_{10} の値を30以上にすると、計算終了時まで衝撃波の復活が起こっていない。このような場合には超新星爆発が起こらず、やがて星はブラックホールに崩壊してしまうものと考えられる。実際にはSN 1987Aが爆発したことはよく知られた観測事実であるので、このシミュレーションを信じる限り、結合定数に対して $\epsilon_{10} < 30$ という上限を得ることができる。

それではなぜ暗黒光子は超新星爆発を妨げるのであろうか。実は、暗黒光子と光子の結合定数 ϵ は、背景の物質の存在によって実効的に上昇することが指摘されている [43, 44]。大雑把に言えば、暗黒光子質量がプラズマ中の光子の有効質量(いわゆるプラズマ振動数)に近いときに共鳴が起き、 ϵ が増大する。この共鳴によって、星の中心の原始中性子星だけではなく、中心から外れたところでも暗黒光子が生成されうる。図4は、超

^{*2} ただし、質量がeVスケールのステライル・ニュートリノ (sterile neutrino) が存在した場合にも超新星爆発が失敗する場合があることが指摘されている [38, 39]。

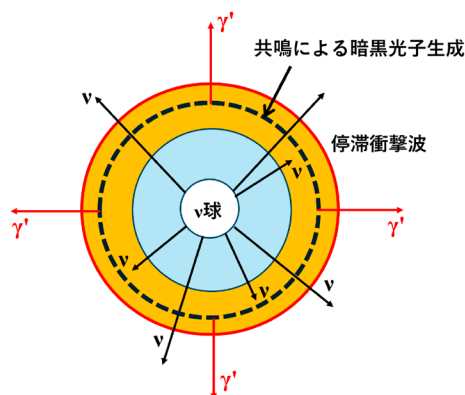


図4 超新星爆発での暗黒光子 (γ') の生成のようすを表す模式図。暗黒光子は衝撃波背面のニュートリノ加熱領域で共鳴を通して生成される。生成された暗黒光子は星の物質とほとんど相互作用をせず星を脱出する。

新星における暗黒光子生成のようすを示している。この図のように、暗黒光子の質量が0.3 MeV前後の場合には、共鳴がちょうどニュートリノ加熱領域内部に出現する。このために暗黒光子が大量に生成されて冷却過程として働き、ニュートリノによる加熱を相殺してしまう。これが、暗黒光子が超新星爆発を阻害するメカニズムである。

本章では、暗黒光子の質量が0.3 MeV前後の場合を議論した。一方で、暗黒光子の探索という文脈では、さまざまな質量の暗黒光子を考えることも重要である。暗黒光子の質量を変化させると星の中で暗黒光子が生成される領域が変化するため、超新星の振る舞いも大きく変わると考えられる。また、暗黒光子の質量が約1 MeVを超えると電子・陽電子対に崩壊する過程が生じる。こうした場合には暗黒光子は冷却だけではなく加熱にも寄与するだろう。今後は、このように広いパラメータを考慮した研究を進めていくことが必要であろうと考えている。

4. アクシオン様粒子の生成と崩壊を考慮した超新星シミュレーション

暗黒光子の場合とは対照的に、超新星爆発を助けるような粒子もある。そのような例としてアクシオン様粒子 (axionlike particle; ALP) を取り上げたい [45, 46]。アクシオンとはもともと、強いCP問題と呼ばれる場の量子論の理論的な問題を解決するために、1970年代にウィルチェックやワインバーグによって導入された仮説的な素粒子である [47, 48]。先述のようにアクシオンは暗黒物質の有力候補でもあるため、探索実験が活発に進められている。

このオリジナルのアクシオンでは、質量と物質との結合定数との間に比例関係がある。一方で、そうした関係式を一旦忘れて質量と結合定数のパラメータ平面の全領域を調査し、より豊かな現象論を探索しようという研究潮流がある。このより広いクラスの粒子をALPと呼ぶことが多い。以下では、光子 (のみ) と相互作用するALPが超新星爆発に対して与える影響を議論する^{*3}。

ALPは一般性の高い粒子のクラスであり、その質量にも今のところ制限がない。そこで以下では100 MeV前後の質量をもつALPを考える。その理由の一つは、この質量のALPを深く探索する手法としては超新星爆発がほぼ唯一の手段であるということである。加速器実験による探索では、今のところALP・光子結合定数 $g_{ay} \sim 10^{-7} \text{ GeV}^{-1}$ までの探索が行われている [52]。一方、超新星爆発を用いた探索では $g_{ay} \sim 10^{-9} - 10^{-11} \text{ GeV}^{-1}$ の探索が進んでおり、実験に比べて2桁から4桁ほど小さい結合定数に迫ることができる [53–55]。

超新星爆発の観点から見たこの質量のALPの面白い点は、この粒子が2つの光子に崩壊する不安定粒子であるということである。原始中性子星

^{*3} オリジナルのアクシオンが超新星爆発に影響を与え得ないということではない。たとえばアクシオンの質量がおおよそ10 meV以上の場合、アクシオンが原始中性子星を冷却し、ニュートリノ光度を著しく低下させることが指摘されている [49–51]。

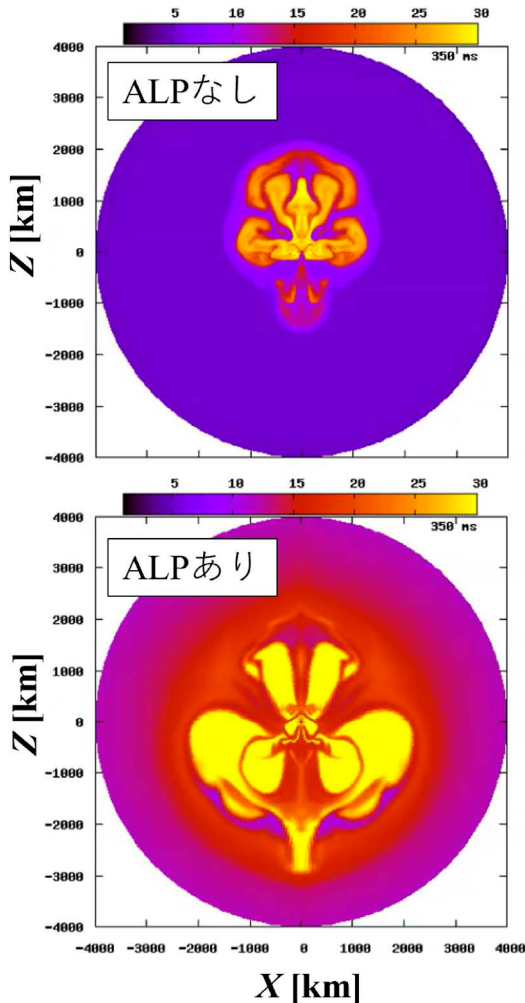


図5 超新星モデルの断面図。上図はALPなしのモデル、下図は質量200 MeV, $g_{ay}=1 \times 10^{-9} \text{ GeV}^{-1}$ のALPを仮定したモデルである。色はエントロピーを示している。時刻はコア反跳後0.35秒後である。

内部で生成されたALPは、星の中を進むうちに光子に崩壊する ($a \rightarrow 2\gamma$)。その光子は周りの物質にただちに吸収されるため、ALPがニュートリノと同様の加熱源として寄与することができる。この効果が超新星爆発に与える影響を調べるために、筆者らはニュートリノ輸送に加えてALPの輸送をも考慮した2次元超新星シミュレーションを実現した [56]。なお、本計算では文献

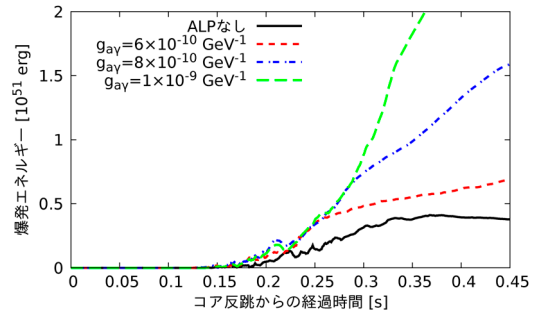


図6 超新星モデルの爆発エネルギー [56]。実線はALPを仮定しない通常モデルであり、破線はALPありのモデルである。ALP質量としては200 MeVを仮定している。

[57] の20 $M_{\odot}$ の親星モデルを用いた。

図5は本研究で得られた超新星モデルの断面図である。色はエントロピーを示しており、上下の図はそれぞれALPなし、ありのモデルである。この2つの図を比較すると、ALPありのモデルでは反跳衝撃波の半径がより大きくなっていることがわかる。つまり、ALPが爆発を手助けしているのである。

図6は超新星モデルの爆発エネルギーのようすである。実線はALPを仮定しないモデル、破線はALP質量を200 MeVに固定し、ALP・光子結合定数の値を様々に仮定したモデルである。ALPなしの通常モデルでは、爆発エネルギーはおよそ $0.4 \times 10^{51} \text{ erg}$ に落ち着く。一方でALPありのモデルでは、ALPの崩壊による加熱効果によって爆発エネルギーが増大していることが見て取れる。結合定数を $g_{ay}=1 \times 10^{-9} \text{ GeV}^{-1}$ まで大きくすると、爆発エネルギーは $2 \times 10^{51} \text{ erg}$ という大きな値を超えてさらに成長していることもわかる。こうした巨大な爆発エネルギーは典型的な超新星イベントの観測値をはるかに上回ってしまうため、そのような爆発をもたらすALPが実在するとは考えにくい。したがって、爆発エネルギーに基づき g_{ay} に何らかの上限をかけられることが期待される。

一方で、実際に観測されている超新星イベント

の爆発エネルギー分布には大きな分散があり、サーベイ観測に基づく研究 [58] によると $(0.15\text{--}1.4)\times 10^{51}$ erg という1桁にわたる広がりがある。報告されている。こうした状況では、図6の理論モデルと観測をどのように比較してALPの制限につなげればよいか、ということが自明ではない。最近の研究 [54] では「ALPの加熱効果による爆発エネルギーの増加量が、弱い超新星の爆発エネルギー $\sim 0.1\times 10^{51}$ ergを上回ってはいけない」という基準が提案され、ALPのみならず様々な粒子に対して適用され始めている。とはいえ、親星の質量や回転などの個々の超新星の個性がALPの放射に与える影響を調べることも依然として重要であろうと筆者らは考えており、手始めとして親星モデルを変えたシミュレーションを実行している [59]。

5. 今後の展望

本稿では、標準模型を超えた新粒子を超新星爆発を用いて探索する最近の試みについて紹介した。筆者らは主に2次元シミュレーションをもとに研究を進めているが、理想をいえばやはり3次元シミュレーションが実現できれば望ましい。計算資源の制約によりモデル数が限られてしまうことが難点ではあるが、3次元モデルに基づく研究も工夫して進めたいと考えている。また、本稿では暗黒光子とアクシオン／ALPに関する研究について述べたが、注目される新物理がこれらに限られるわけではない。たとえば、暗黒物質の候補としては質量keVスケールのステライル・ニュートリノがしばしば挙げられる [7]。もしそうした新種のニュートリノが存在した場合は、ニュートリノ振動を介して超新星爆発においても出現しうる。この効果をニュートリノ輻射輸送計算に取り込むためには定式化を工夫する必要があるものの、チャレンジングな課題として今後検討したい。

天体を用いて新しい物理を探索する手法は多様であり、超新星爆発以外の手法に目を向けること

もまた重要である。たとえば未知の粒子の質量がkeVより軽い場合には、通常の恒星からもそのような粒子が放出される可能性がある。実際、太陽からやってくるアクシオンを直接検出しようという試みは長年行われており [60, 61]、アクシオンの性質を強く制約することに成功している。また、新粒子の生成による冷却が恒星進化に与える影響も、長く議論されている伝統的な話題である [62–65]。現在ではオープンソースの恒星進化コード [66] が利用可能であるため、こうしたトピックは比較的新規参入がしやすいと思われる。

最後に、天文学的な新物理探索は高エネルギー天体や宇宙論分野の専売特許ではなく、天文学の幅広い領域との関連がありうることを強調したい。たとえば近年では、原始惑星系円盤の偏光観測によってアクシオン暗黒物質を探索する試みが注目を集めている [67, 68]。次の革新的なアイデアは、近隣分野の研究者との自由な議論の中から生まれてくるのかもしれない。

謝 辞

本記事の執筆を助めてくださった天文月報編集委員の守屋亮さんに感謝を申し上げる。また、この場をお借りして、共同研究者の滝脇知也さん、固武慶さん、堀内俊作さん、郡和範さん、長倉洋樹さん、高田剣さん、中村航さん、森正光さんにお礼申し上げる。本記事で紹介した研究は国立天文台天文シミュレーションプロジェクトのCray XC50およびHPE Cray XD2000を用いて行われた。本研究はJSPS科研費JP23K13107, JP23KJ2147, JP25H02194の助成を受けている。

参考文献

- [1] Anderson, C. D., 1933, *Phys. Rev.*, 43, 491
- [2] Neddermeyer, S. H., & Anderson, C. D., 1937, *Phys. Rev.*, 51, 884
- [3] Lattes, C. M. G., et al., 1947, *Nature*, 159, 694
- [4] Abbott, B. P., et al., 2016, *Phys. Rev. Lett.*, 116, 061102
- [5] Fukuda, Y., et al., 1998, *Phys. Rev. Lett.*, 81, 1562
- [6] Ahmad, Q. R., et al., 2001, *Phys. Rev. Lett.*, 87,

071301

- [7] 川崎雅裕, 2025, ダークマター (日本評論社)
- [8] Bethe, H. A., & Wilson, J. R., 1985, ApJ, 295, 14
- [9] 山田章一, 2016, 超新星 (日本評論社)
- [10] 滝脇知也, 2017, 天文月報, 110, 710
- [11] 住吉光介, 2018, 原子核から読み解く超新星爆発の世界, 基本法則から読み解く物理学最前線 (共立出版)
- [12] 長倉洋樹, 山田章一, 2023, 日本物理学会誌, 78, 13
- [13] Bionta, R. M., et al., 1987, Phys. Rev. Lett., 58, 1494
- [14] Hirata, K., et al., 1987, Phys. Rev. Lett., 58, 1490
- [15] Alekseev, E. N., et al., 1987, Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters, 45, 589
- [16] O'Connor, E., et al., 2018, J. Phys. G Nucl. Phys., 45, 104001
- [17] Müller, B., et al., 2017, MNRAS, 472, 491
- [18] Ott, C. D., et al., 2018, ApJ, 855, L3
- [19] O'Connor, E. P., & Couch, S. M., 2018, ApJ, 865, 81
- [20] Bollig, R., et al., 2021, ApJ, 915, 28
- [21] Burrows, A., et al., 2024, ApJ, 964, L16
- [22] Nakamura, K., et al., 2025, MNRAS, 536, 280
- [23] Sawyer, R. F., 2005, Phys. Rev. D, 72, 045003
- [24] Johns, L., 2023, Phys. Rev. Lett., 130, 191001
- [25] Ehring, J., et al., 2023, Phys. Rev. Lett., 131, 061401
- [26] Mori, K., et al., 2025a, PASJ, 77, L9
- [27] Wang, T., & Burrows, A., 2025, ApJ, 986, 153
- [28] Akaho, R., et al., 2026, Phys. Rev. Lett., 136, 191002
- [29] 赤穂龍一郎, 2025, 天文月報, 118, 158
- [30] 山本直希, 2025, 日本物理学会誌, 80, 395
- [31] Masada, Y., et al., 2018, Phys. Rev. D, 98, 083018
- [32] Matsumoto, J., et al., 2022, Phys. Rev. D, 105, 123029
- [33] Dehman, C., & Pons, J. A., 2025, Phys. Rev. Res., 7, 033231
- [34] Yamamoto, N., & Yang, D.-L., 2020, ApJ, 895, 56
- [35] Fabbrihesi, M., et al., 2020, arXiv e-prints, arXiv: 2005.01515
- [36] Caputo, A., et al., 2026, Phys. Rev. D, 113, 075001
- [37] Mori, K., et al., 2026, Phys. Rev. D, 113, L041303
- [38] Wu, M.-R., et al., 2014, Phys. Rev. D, 89, 061303
- [39] Mori, K., et al., 2025b, Phys. Rev. D, 111, 083046
- [40] Caputo, A., et al., 2025, Phys. Rev. Lett., 134, 151002
- [41] Takiwaki, T., et al., 2016, MNRAS, 461, L112
- [42] Urushibata, T., et al., 2018, MNRAS, 473, L101
- [43] An, H., et al., 2013, Phys. Lett. B, 725, 190
- [44] Chang, J. H., et al., 2017, J. High Energy Phys., 2017, 107
- [45] Caputo, A., & Raffelt, G., 2024, PoS, COSMICWISPers, 041
- [46] Carenza, P., et al., 2025, Phys. Res., 1117, 1
- [47] Weinberg, S., 1978, Phys. Rev. Lett., 40, 223
- [48] Wilczek, F., 1978, Phys. Rev. Lett., 40, 279
- [49] Burrows, A., et al., 1989, Phys. Rev. D, 39, 1020
- [50] Fischer, T., et al., 2016, Phys. Rev. D, 94, 085012
- [51] Mori, K., & Mori, M., 2025, J. Cosmol. Astropart. Phys., 2025, 081
- [52] Alekhin, S., et al., 2016, Rep. Prog. Phys., 79, 124201
- [53] Lucente, G., et al., 2020, J. Cosmol. Astropart. Phys., 2020, 008
- [54] Caputo, A., et al., 2022, Phys. Rev. Lett., 128, 221103
- [55] Hoof, S., & Schulz, L., 2023, J. Cosmol. Astropart. Phys., 2023, 054
- [56] Mori, K., et al., 2023, Phys. Rev. D, 108, 063027
- [57] Woosley, S. E., & Heger, A., 2007, Phys. Rep., 442, 269
- [58] Martinez, L., et al., 2022, A&A, 660, A41
- [59] Takata, T., et al., 2025, Phys. Rev. D, 111, 103028
- [60] Inoue, Y., et al., 2008, Phys. Lett. B, 668, 93
- [61] Anastassopoulos, V., et al., 2017, Nat. Phys., 13, 584
- [62] Raffelt, G. G., & Dearborn, D. S. P., 1987, Phys. Rev. D, 36, 2211
- [63] Friedland, A., et al., 2013, Phys. Rev. Lett., 110, 061101
- [64] Ayala, A., et al., 2014, Phys. Rev. Lett., 113, 191302
- [65] Mori, K., et al., 2020, ApJ, 901, 115
- [66] Paxton, B., et al., 2011, ApJS, 192, 3
- [67] Fujita, T., et al., 2019, Phys. Rev. Lett., 122, 191101
- [68] Narita, K., et al., 2026, arXiv e-prints, arXiv:2602.15611

Exploring Physics beyond the Standard Model through Core-collapse Supernova Simulations

Kanji Mori

Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Keio University, 3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa 223-8522, Japan

Abstract: Core-collapse supernovae have been recognized as a powerful laboratory to explore physics beyond the Standard Model. The recent growth of computational resources has enabled us to predict observables based on multi-dimensional supernova simulations. Following this trend, I have developed simulations that incorporate the effects of hypothetical particles. This article focuses specifically on dark photons and axionlike particles and discusses how such new physics can affect the explosion mechanism. Comparing our models with observational data allows us to investigate the properties of exotic particles.