

スカラーテンソル理論における大質量星コアの重力崩壊で放射される スカラー重力波の数値シミュレーション

浅川 直道 (宇宙物理学教室)

一般相対性理論はこれまで多くの実験をクリアしている重力理論であるが、宇宙の加速膨張の説明にはダークエネルギーが必要になることや、繰り込み不可能なため重力場を量子化することができないといった問題点も存在する。このような一般相対性理論の問題点の解決に向けた取り組みとして、一般相対性理論の拡張を考えることは重要である。本研究では拡張重力理論の中でもスカラーテンソル理論を扱う。

スカラーテンソル理論はスカラー場と重力場の非最小結合項を含む作用で与えられる理論である。スカラーテンソル理論を考える動機として弦理論の低エネルギー極限で作用にスカラー場が現れるなど、高次元重力理論とのシナジーを有すること、スカラー場が宇宙の加速膨張を引き起こせることが挙げられる。一般に拡張重力理論では重力波の偏極モードの数が増加し、スカラーテンソル理論では一般相対性理論で放射可能なプラスモードとクロスモードに加えて、スカラーモードの重力波(スカラー重力波)が放射される。スカラー重力波が観測されれば強重力場における一般相対性理論の綻びの証拠となる。

スカラー重力波の検出には重力波検出器が 4 台あれば可能となる。重力波検出器は現行の Advanced-LIGO と Advanced-VIRGO、KAGRA に加えて、LIGO-India が 2020 年代後半から観測に参加する予定であるため、近い将来にスカラー重力波を検出できる環境になる。そのためスカラー重力波の検出に先駆けて、スカラー重力波の理論波形計算が重要になる。

そこで本研究では有望な重力波源の 1 つである重力崩壊に着目し、重力崩壊で放射されるスカラー重力波を調べることを目的とする。スカラー重力波は球対称でも放射されるので、まず初めに球対称重力崩壊計算が可能なスカラーテンソル理論 1 次元数値コードを構築した。構築したコードを用いて球対称重力崩壊の数値シミュレーションを行ない、放射されるスカラー重力波のスカラー場と重力場の結合関数への依存性を調べた。その結果、スカラー場と重力場の結合が強くなるほど放射されるスカラー重力波の characteristic strain が増加する傾向が得られた。

Neutrino driven wind における r-process 元素合成の Hypernova への適用

田中 亮哉 (宇宙物理学教室)

自然界には 94 種類の安定元素が存在している。その中で水素、ヘリウム、リチウムなどの軽い元素はビッグバン元素合成によって作られ、鉄族までは恒星内部の核融合で合成される。これ以降の重元素は中性子捕獲による元素合成によって生成されたと考えられている。重元素のうち中性子捕獲のタイムスケールが β 崩壊に対して遅い s-process で合成されるものは、漸近巨星分枝内部で起こっている事が明らかになっている。一方で、中性子捕獲のタイムスケールが β 崩壊に対して速い r-process 元素合成の起源天体に関しては長い間議論が続いていた。

2017 年に連星中性子星合体(BNS)からの重力波に付随する電磁波対応天体の初観測に成功し、多波長観測の結果から r-process の生成環境の直接観測に成功した。この観測により BNS が r-process の生成環境であることの観測的証拠が得られた。しかし、BNS による r-process では説明出来ない組成を持つ天体も観測されており、BNS 以外の生成環境について調べる必要がある。

そこで本研究では、BNS とは別の r-process 生成環境として、超新星爆発やさらに高エネルギーな爆発現象である Hypernova のニュートリノ風による元素合成に着目した。中性子星からのニュートリノ風を一般相対論的流体の定常解を求める事で構築し、その流体場における r-process 元素合成を行った。そのために、SkyNet という open source software とニュートリノ風の定常解を組み合わせることで元素合成計算が実行できるコードを構築した。

構築したコードを Hypernova へ適用し、質量が太陽質量の 2 倍でニュートリノ光度が 10^{52} erg/s の中性子星からのニュートリノ風における r-process 元素合成計算を行い、電子モル分率として $Y_e=0.4, 0.45, 0.49$ での結果の比較を行った。その結果、 $Y_e=0.4, 0.45$ では BNS と似た組成が得られるが、 $Y_e=0.49$ では BNS での組成とは異なる組成になる事が分かった。

相対論的制動放射

安田 萌乃 (宇宙物理学教室)

宇宙の物質はバリオンとダークマターによって構成されており、バリオンの大半は電離状態にある。プラズマがエネルギーを放出するとき、最も主要な放射過程のひとつが制動放射である。一般に制動放射は高温になるほど重要となるので、相対論的な効果に注意する必要がある。例えば、温度 $T \approx 10^8 \text{K}$ の熱的プラズマに対しては、陽子をはじめとするイオンの平均速度は光速の 1% 以下なので非相対論が良い近似だが、電子の平均速度は光速の 20% を超えるため相対論的な効果が無視できなくなる。宇宙には、これよりも高温の熱的粒子や、さらに高エネルギーの非熱的粒子が存在するので、本研究ではそれらの基礎的な放射過程として、制動放射を相対論的に記述する。また、銀河団には熱的粒子と非熱的粒子がどちらも存在することから、本研究では具体例として銀河団のパラメーターを想定して放射スペクトルを算出した。

銀河団に対しては、X線およびミリ波における観測から、3億度を超える高温の熱的電子の存在が示唆されている。また、センチ波ではシンクロトロン放射が観測され、非熱的電子の存在も確認されている。ただし、非熱的電子についての情報はシンクロトロン放射からのものが大半のため、その起源などは未だ不明であり、他の放射過程による今後の観測が重要視されている。非熱的制動放射は、先行研究で予言されている非熱的スニヤエフ・ゼルドビッチ効果と同じエネルギー領域の電子に起因するので、両者を組み合わせることで得られる情報も多いと期待される。

結果として、まずは制動放射の相対論的な定式化を行い、解析的にその放出率を導いた。また、電子のエネルギー分布を考えた上でエネルギー放出率を数値的に求め、放射スペクトルを算出し、非相対論的な場合と比較した。 $T = 5 \times 10^8 \text{K}$ の熱的電子では、非相対論的な放出率に対する相対論的な放出率の増加率は、エネルギー $E = 10 \text{keV}$ で 10% 程度、 $E = 100 \text{keV}$ で 50% 程度となり、更に高エネルギーでは指数関数的に増加した。この比率は、電子の温度が上がると更に増加した。また、非熱的電子が存在する場合のスペクトル形状を確認すると、 $T = 5 \times 10^8 \text{K}$ の時、 $E = 4 \times 10^5 \text{eV}$ 程のエネルギー領域から非熱的電子による影響が現れ始めた。更に、非熱的電子が様々な過程により冷却することをふまえて、非熱的電子のエネルギー分布の時間発展も取り入れたスペクトルを算出して考察した。

銀河団における重元素輝線の共鳴散乱

岡戸 悠一郎 (宇宙物理学教室)

銀河団は高温で希薄な高階電離ガスで満たされており、高階電離した重元素イオンによる輝線放射から、ガス運動・イオン温度・重元素量などの情報を得ることができる。一般に銀河団ガスは、トムソン散乱に対しては光学的に薄いですが、一部の重元素輝線に対しては、光学的に厚くなり得るため、吸収や散乱の効果が無視できない事が示唆されている。特に、高階電離した重元素イオンからの共鳴線は、放射強度が他の遷移線と比べて強いことから観測的に重要であるが、共鳴散乱によって輝線の形状や放射強度が変化し得ることに、注意が必要である。2016年に打ち上げられたX線観測衛星Hitomiは、ペルセウス座銀河団中心部からの放射スペクトルを初めて精密に分光し、共鳴散乱の兆候を得たが、現状のデータはヘリウム型鉄イオンのみに限られている。次世代のX線観測衛星では、より多くの重元素輝線が観測され、重元素量やイオン温度の測定精度の向上に繋がる事が期待されている。したがって、複数の重元素イオンに対する共鳴散乱の効果を評価することは、観測技術の向上に伴って重要性が増している。

そこで本研究では、鉄に加えて硫黄・シリコン・マグネシウム・ネオン・酸素のヘリウム型イオンの共鳴線に対して、散乱の非等方性を考慮した輻射輸送方程式を解き、様々な温度領域の銀河団ガスに対して球対称分布を仮定して、詳細な計算を行った。その結果、散乱の度合いを示す光学的厚さは、温度と視線速度分散に強く依存することがわかった。特に中心温度が keV 程度の場合は鉄・硫黄・シリコンのヘリウム型イオンが光学的に厚くなり、より低温になると鉄イオン以外のヘリウム型イオンが光学的に厚くなる。中心温度が数 keV 程度で乱流運動が存在しない場合のヘリウム型鉄イオンの放射強度は、光学的に薄い場合と比べて、数十%減少することがわかった。また、音速の半分程度の乱流が一様に存在する場合は、共鳴散乱が抑制され、光学的に薄い場合と放射強度がほぼ一致することがわかった。

さらに、検出器のエネルギー分解能の影響について考察した。近い将来に予定されているエネルギー分解能 (2.5~5.0 eV) では、約 1 keV 程度以下のエネルギー帯の輝線(酸素・ネオン・マグネシウム)は、分解能が十分でないので、フラックスの変化のみが重要になる。一方で約 1 keV を超えるエネルギー帯の輝線(シリコン・硫黄・鉄)は、形状が分解できるので、イオン温度や乱流速度の測定に利用できる事が期待される。