

論文の内容の要旨

論文題目 Study of relation between emission of supernova shock breakout and central engine activity

(超新星ショックブレイクアウトと中心エンジンの活動性との関係について)

氏名 大谷 友香理

本論文では、重力崩壊型超新星の爆発の際、最初に放射される X 線あるいはガンマ線（ショックブレイクアウト）の性質について、理論的な予想を行った。

大質量星は進化の最終段階においてその中心核が重力崩壊を起こし、このとき重力エネルギー ($\approx 10^{53}$ erg) の約 99% がニュートリノ生成に、残る 1% 程度が衝撃波の運動エネルギーに変換される。その後、衝撃波が星の表面にまで到達してその前方が透明になったとき、下流から熱放射が脱出し始める (図 1)。ショックブレイクアウトと呼ばれるこの段階は、星が破壊される上で不可欠のものと広く認識されてきた。放射の継続時間は親星のサイズに、エネルギーは衝撃波の運動に依存するという性質があることから、ショックブレイクアウトの観測で得られる光度曲線やスペクトルは超新星爆発の様子を知る重要な手掛かりと言える。本論文ではショックブレイクアウト放射の性質から衝撃波伝播の様子を知り、それを通して親星の爆発メカニズムについて情報を得るための理論的な研究を行った。

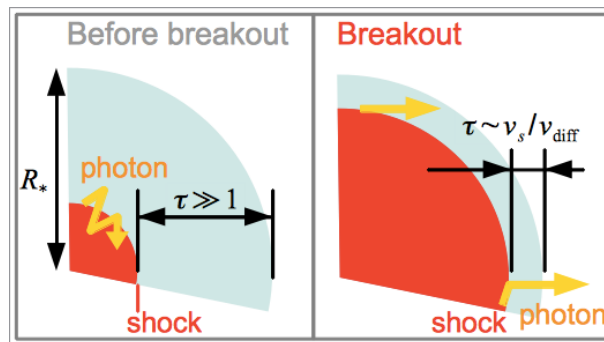


図 1: 超新星ショックブレイクアウトの仕組み。衝撃波が星の奥深くにあるときは、その前後で放射が拡散する (上)。衝撃波が星表面に十分近づくと、放射は星の外へ脱出する (下)。

第2章では、光速の99%以上の速度をもつ(超相対論的)衝撃波が星表面を通過した場合について放射のスペクトル形状を予想した。また、一部の超新星観測ではガンマ線バースト(GRB)と呼ばれる数秒以上の放射が確認されるが、その発生メカニズムは超新星付随現象の重要問題の一つとされる。本研究では超相対論的ショックブレイクアウト放射とGRBとの間に関係があるかを考察するため、両者の特徴を比較した。第3章では、超相対論的速度の衝撃波が高密度な星周物質の中を伝播する場合に、放射がもつ特徴を調べた。星周物質を通過する衝撃波の運動は、超新星の中心エンジンからのエネルギー供給率と直接的に関係することが知られる。そこで、ショックブレイクアウト放射の性質から衝撃波の伝播の様子を理論的に調べることで、謎に包まれた中心エンジンの稼働の仕方についての情報を得ることが可能と考えられる。本研究では星周物質内部における超相対論的ショックブレイクアウトと衝撃波の運動との関係を明らかにし、放射の性質から衝撃波の様子についての制限付けが可能かを調べた。第4章では、光速の数%程度の速度の(準相対論的)衝撃波が非球対称的な形状をもつ場合に、ショックブレイクアウト放射のスペクトルと光度曲線がどのように変化するか明らかにした。さらに、実際の観測例であるX線アウトバースト(XRO)080109(SN2008Dに付随)との比較を行うことにより、衝撃波の形状や速度について観測から如何なる情報が得られるか示した。

以下ではそれぞれの研究について述べる。

第2章は星表面での超相対論的ショックブレイクアウトに対する電子散乱の影響を調べた。超新星の中でも特に明るく膨張速度の速い極超新星では、崩壊の際に超相対論的速度のジェットが生じると考えられている。原理的には、相対論的ジェットの内部においてもショックブレイクアウトが起こるはずであり、その際に衝撃波前後での電子散乱(パルク・コンプトン)を通して、スペクトル形状が元の熱放射の分布から有意に変化すると予想される。けれども、散乱がスペクトル形状へ与える影響を調べた先行研究はなかった。

本研究では超相対論的衝撃波への付随が期待されるガンマ線のショックブレイクアウトの将来観測に向け、パルク・コンプトン散乱が放射に対して与える影響を予想した。まずは星表面におけるショックブレイクアウトについて調べた。このとき密度勾配が大きいために、衝撃波は加速伝播するよう、一意に運動が決まる。図2に結果のスペクトルの一例を示した。光子が衝撃波から脱出し始める時刻と衝撃波が星表面にたどり着き消滅する時刻との間隔は、僅か1秒以下である。この間に散乱された光子は高エネルギー成分(E_{HE} ; $\approx 10^6$ eV以上)を作る。残りの光子は熱放射的な特徴を保ち、低エネルギー成分(E_{LE} ; $\approx 10^6$ eV以下)として残される。ショックブレイクアウトの瞬間に衝撃波の速度が低いほど、また、星表面との距離が大きいほど、エネルギーの比率 E_{HE}/E_{LE} は大きい。 E_{HE}/E_{LE} がおおよそ20-30倍以上大きい場合はスペクトルの持つピークは2つとなり、比がそれよりも小さい場合は1つとなった。なお考察の一環として、同じく相対論的ジェットに付随するガンマ線バースト(GRB)の特徴との比較を行った。その結果、モデルによってはスペクトルの一部がGRBのそれ(Band関数)と似た形状を持つが、一方で、継続時間および全放射エネルギーは1桁以上小さいスケールとなることが分かった。

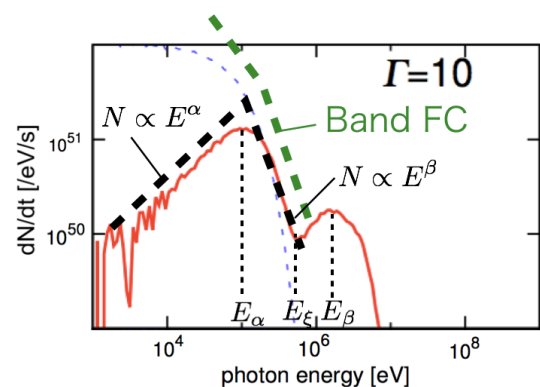


図2: 星表面における相対論的ショックブレイクアウト放射のスペクトル計算の一例(赤実線)と、GRBのBand分布(緑点線)。

第3章は星周物質における超相対論的ショックブレイクアウトと中心エンジンの稼働性との関係について調べた。高密度のガス(星周物質)に囲まれた星が爆発する場合、ショックブレイクアウトは星周物質の内

部でも発生する。(実際に、後述する XRO 080109/SN2008D の観測により確認されている。)このとき星周物質内部での衝撃波の動きを決めるものは、星周物質の密度分布とエネルギー供給 $L(t)$ の時間依存性であり、自己相似解によって与えられる。星周物質が定常的な星風によって形成されたと仮定すれば、 $dL/dt > 0$ の場合に衝撃波は加速伝播し、 $dL/dt < 0$ の場合に減速する。

本研究ではショックブレイクアウト放射の特徴と衝撃波の運動を調べ、衝撃波が超相対論的速度で加速するときと減速するときとで放射にどのような違いが現れるかを調べた。図 3 は、計算で得られた光度曲線(上)とスペクトル(下)の例である。衝撃波が加速する場合(左)には、スペクトルの時間変化(塗りつぶし無/有の三角)は少ない。これに対して衝撃波が減速する場合(右)は、約 10^6 eV 以上のエネルギーを持つ放射が早い時期(塗りの無い三角)に現れる傾向が見られた。その原因は、減速衝撃波の運動エネルギーが時間とともに減少し、それにより、光子が電子散乱を通して得るエネルギーが次第に減ったためである。以上の結果により、原理的には、ショックブレイクアウトの観測的特徴を元にしてジェットを中心エンジンの稼働性に関する情報を得ることが可能と分かった。

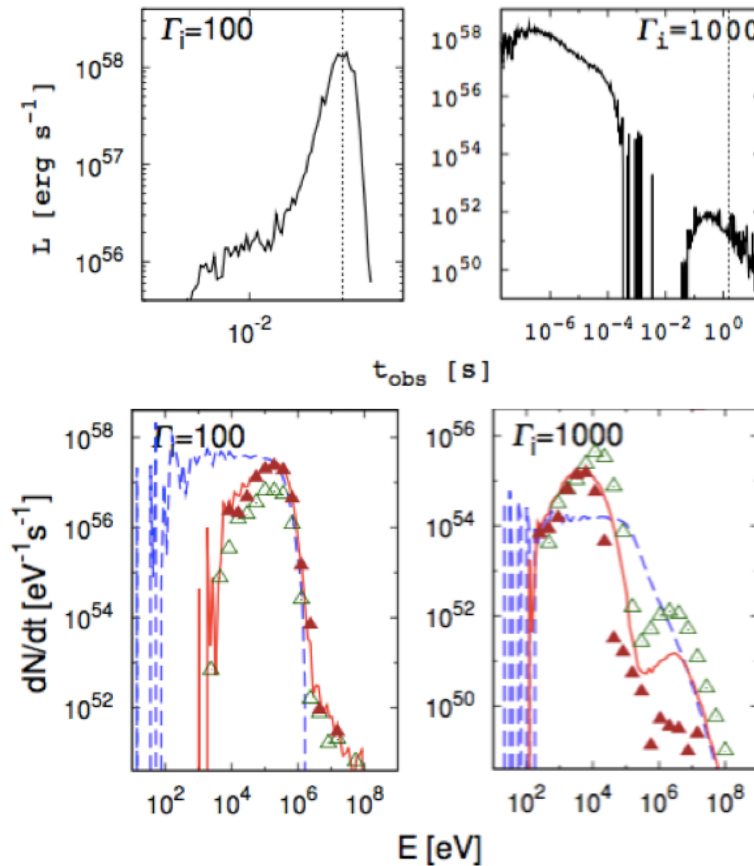


図 3: 星周物質内部の相対論的ショックブレイクアウトの光度曲線(上)とスペクトル(下)。下パネルの実線では全ての光子を反映した。塗りのない三角は最初に届く 50%の光子で、塗りつぶした三角は残りの光子を示す。衝撃波が加速する場合(左)と減速する場合(右)を比較した。

第 4 章は衝撃波の非球対称性と放射の特徴の関連性について調べた。XRO 080109/SN 2008D は詳細な(スペクトルを含めた)ショックブレイクアウトの貴重な観測例である。スペクトルや光度曲線の形状等を解析した先行研究により、この放射の発生源は光速の約 30%以上の速度を持つ準相対論的な衝撃波であり、また、衝撃波は非対称的な形状であった可能性が高いと考えられている。なお、継続時間(約 600 秒)の長さから、星の表面でなく星周物質内部でショックブレイクアウトが起こったと言われる。一連の先行研

究は SN 2008D の特徴について多くの重要な指摘をなしたものの、1つのモデルだけを使ってスペクトルと光度曲線の両方を説明したものはなかった。

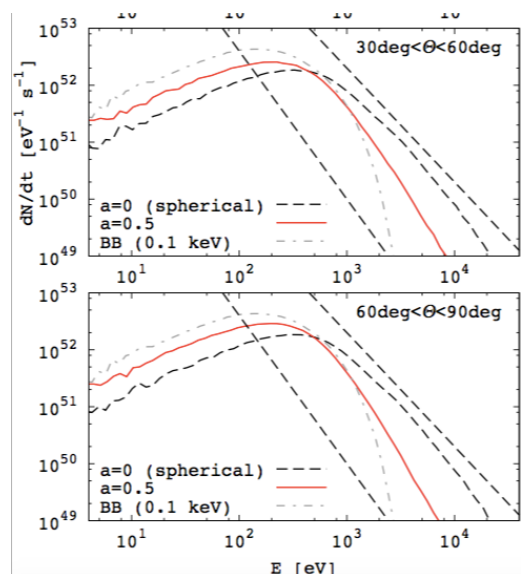


図 4: 軸対称形状の衝撃波からの放射のスペクトル (赤実線)。上は対称軸と視線方向のなす角度 θ が $30 \text{ deg} < \theta < 60 \text{ deg}$ 、下は θ が $60 \text{ deg} < \theta < 90 \text{ deg}$ の場合。直線の示す勾配は XRO 080109 のスペクトル指数の上限と下限。

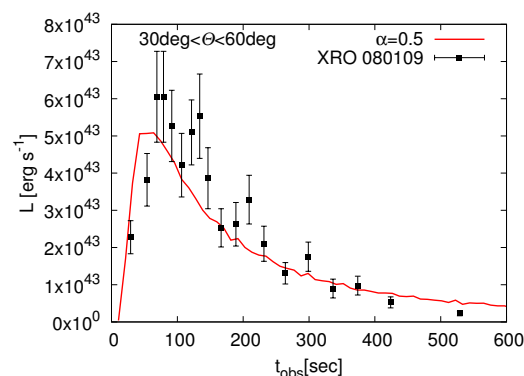


図 5: 図 4 上に対応する光度曲線。

本研究では、ショックブレイクアウトの瞬間に衝撃波の速度が次式のような軸対称性をもつモデルを考え、スペクトル及び光度曲線を計算した。

$$v_{ej}(\alpha, \theta) = \frac{v_{ej}(\alpha, 0)}{1 + (T_{em}(\alpha, \theta)v_{ej}(\alpha, 0)/R_b)}, \quad \text{ただし} \quad T_{em}(\alpha, \theta) = 65\alpha(1 + 3.6\alpha)(\sin^2 \theta - 0.2 \sin^4 \theta).$$

非対称性の度合いは $\alpha (> 0)$ が大きいほど強まる。 θ は対称軸と視線方向のなす角度を示す。図 4 はスペクトルの一例 (赤実線) であり、 α が大きいほど、また θ が大きいほどバルク・コンプトン効果が弱まる結果となった。光度曲線 (図 5) の形状に現れる α, θ 依存性と照らし合わせたところ、例えば XRO 080109 の場合、衝撃波はある程度 ($\alpha \approx 0.5$) の非球対称性があり、視線方向における衝撃波の速度は光速の 50% 以上であるとの制限がつけられた。また、対称軸と視線方向のなす角度は 30 度以上と想像される。