

成果に関連して出版、もしくは印刷、投稿中の論文リスト

(1) このプロジェクト（同様の過去のプロジェクトも含む）での成果

今年度中に出版された論文、国際会議集録、国際会議、学会、研究会発表、その他出版物（印刷中、投稿中の場合はその旨を記載すること）

(2) これまでのプロジェクトの今年度中の成果

今年度中に出版された論文、国際会議集録、国際会議、学会、研究会発表、その他出版物（印刷中、投稿中の場合はその旨を記載すること）

評価資料として利用いたしますので、様式・順序は任意ですが、学術論文については題名、著者、発行年月、雑誌名、巻、ページが記載されていること。

1. 中里健一郎，住吉光介，山田章一；

“ ニュートリノ輸送を考慮した Pop III 大質量星の重力崩壊 ”

日本天文学会，明星大学，2005 年 3 月（投稿中）

成果の概要

(必要に応じてページを加えて下さい。)

Population III 大質量星の重力崩壊とニュートリノ放出

グループ：rkn60c 代表者：中里 健一郎

1 導入

宇宙が生まれた後、一番最初に出来たと考えられる Population III (Pop III) の星に関する研究は、それ以降の宇宙の化学進化、ひいては宇宙全体の歴史を理解する上で避けて通れない問題である。これらの星に関する研究は、最近、WMAP や Pop II の観測により、観測的にさまざまなことがわかり始めている。一方、理論的には、Pop III の星には、太陽質量の数 100 ~ 1000 倍程度の星が多くあった可能性が指摘され、これらの星は質量放出をすることなくほとんどそのままの質量で進化し、最後は重力崩壊を起こして Pair Instability Supernova になるかブラックホールになる、とされている。ただし、この予測では Initial Mass Function (IMF) や star formation rate については、大きな不確実性が残っている。

また、Pop III の大質量星がどのような進化を遂げるのかは 40 年以上の歴史をもつ古くからある研究対象である。そして現在では、以下のような推測がなされている (Woosley, Heger, & Weaver 2002)。まず中心部で He 燃焼が起きている phase において、電子陽電子の対生成が起こる。これにより、圧力を支えるために使われていたエネルギーが、電子陽電子対の静止質量エネルギーに使われてしまうので、重力的に不安定になる。これを Pair-Instability と呼ぶ。この崩壊によってコアは圧縮され温度が上昇し、炭素より重い元素の核燃焼が起きる。その結果、初期質量が $260M_{\odot}$ 以下であれば、燃焼で得られたエネルギーにより、崩壊をはねかえして星は超新星爆発を起こすが、 $260M_{\odot}$ 以上であればはねかえせずに、逆に光分解不安定性を生じて崩壊は加速され、星はブラックホールになってしまう。

今回の研究課題では、最終的にブラックホールを形成するような星から放出されるニュートリノのエネルギーやスペクトルが、どのような振舞を示すかを見積もった。しかし、このプロジェクトの最終目標は Pop III の星がこのような重力崩壊を起こすとき大量に発生するニュートリノを用いて、こうした大質量星の終末進化に関して何が観測的に検証可能か、また逆に、観測結果から IMF 等にたいしてどのような制限が与えられるかを議論することにある。

これまでに、Pop III の大質量星から放出されるニュートリノのルミノシティ (Fryer, Woosley, & Heger 2001) やエネルギースペクトル (Iocco et al. 2004) を評価した研究はあったが、これらの研究ではニュートリノ輸送はすべてのニュートリノが平均エネルギーを持つと仮定して計算しており、エネルギースペクトルも放出されるニュートリノの総量をもっともらしい分布関数で規格化することで評価している。また、一般相対論的な効果も完全に取り入れられていない。一方、重力崩壊する大質量星から放出されるニュートリノを一般相対論とニュートリノ輸送をきちんと考慮して計算した研究はあった (Linke et

al. 2001) が、対象としている親星の質量が $10^5 M_{\odot}$ と、現在示唆されているような Pop III の IMF の範囲からは大きく離れており、別の星形成のシナリオを必要とする。

今回、我々が具体的に行なったのは、初期質量が Pop III の大質量星として典型的と考えられる $375 M_{\odot}$ の球対称なモデルにたいして、NSE の状態にある鉄コアから重力崩壊の計算を始め、その過程をブラックホールの形成が確認されるまで追うことである。今回の計算では、一般相対論的な重力崩壊をニュートリノ輸送とカップルさせて解き、その際ニュートリノの分布関数は、各ニュートリノ species のエネルギー・角度分布を離散化して評価した。その結果、放出されるニュートリノの全エネルギーは 10^{54} erg 以上に達し、平均エネルギーは 10 MeV 程度になることがわかった。また、ニュートリノ輸送を考慮する場合としない場合では、重力崩壊の結果そのものにも大きな違いが見られることも明らかとなった。

2 初期モデルと数値コード

$260 M_{\odot}$ 以上の Pop III 大質量星は Pair-Instability によって重力崩壊を始め、その崩壊の途中で連続的に酸素燃焼・シリコン燃焼を起こし、鉄コアを形成して最終的にはブラックホールになると考えられている。Bond、Arnett と Carr (1984) の研究によると、その際に形成される鉄コアは等エントロピー的であり、その値は星の初期質量によって決まるとされている。ただし、水素燃焼によって生じたヘリウムのうち、どの程度の割合が酸素に燃焼されるのかははっきりしていない。しかしこれについては、最近の数値計算の結果 (Umeda, & Nomoto 2002) などから、ヘリウムの大部分が酸素になることが分かってきているので、この部分は一律に 90% と仮定すると、Bond、Arnett と Carr の論文で見積もられた初期質量と鉄コアのエントロピーの対応関係は表 1 のようになる。

今回、我々は初期モデルとして等エントロピー的で不安定な平衡形状にある鉄コアを与えた。本来、鉄コアは重力崩壊の途中で形成されるため、ある程度の初速度を持っていないければならないが、今回考えるモデルは最終的に光速と同程度まで加速されて崩壊していくので、この差は無視できると考えられる。また 1 バリオンあたりのエントロピーの値は $17.5 k_B$ とした。ここに k_B はボルツマン定数である。この値は初期質量では $375 M_{\odot}$ に対応する。平衡形状の計算は Oppenheimer-Volkoff 方程式

$$\frac{dp}{dr} = - \frac{G(m + \frac{4\pi r^3 p}{c^2})}{r^2} \frac{\rho + \frac{p}{r^2}}{1 - \frac{2Gm}{c^2 r}} \quad (1)$$

で行ない、その際の状態方程式は Shen ら (1998) によるものを用いた。この状態方程式は重力崩壊の計算にも用いた。そしてその初期モデルが不安定な平衡形状からの数値的なずれにより重力崩壊していく様子を計算した。重力崩壊の計算は、一般相対論の下で流体の方程式とニュートリノに関する輸送方程式を implicit 法により同時に解くコード (Yamada 1997, Yamada, Janka, & Suzuki 1999) を用いた。このコードでは、時空のスライス Misner と Sharp (1964) によるものに取り、時空の時間発展も同時に解いている。この計量で線素は

$$ds^2 = e^{2\phi(t,m)} c^2 dt^2 - e^{2\lambda(t,m)} \left(\frac{G}{c^2} \right)^2 dm^2 - r^2(t,m) (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \quad (2)$$

のようになっていて、ここに t は十分遠方にいる観測者にあわせられた時間座標、 m はバリオン質量座標、 r は周長半径である。

3 数値計算の結果

まずニュートリノの効果を調べるために、同じモデルにたいしてニュートリノの計算をしない場合と計算をする場合の比較を行なった。その結果、ニュートリノを計算するモデルでは計算しないモデルと比べて、中心部におけるニュートリノ冷却がよく効き、中心部ほど速く落ちることが確認された(図1)。このことは、ブラックホール形成の目安である見かけの地平面が形成される時間とそのときの位置(バリオン質量座標)にも影響し、ニュートリノを計算しない方では11.992秒後、 $13.2M_{\odot}$ だったのにたいし、計算する方では8.882秒後、 $4.17M_{\odot}$ であった。つまり、ニュートリノの効果によりブラックホール形成は早まり、最初の大きさは小さくなることが分かった。ただし、ここでの時間は十分遠方にいる観測者にあわせてある。

つぎに、ニュートリノを計算するモデルについて、様々な物理量の空間分布の時間発展の様子について考察する(図2)。まず、ニュートリノのルミノシティであるが、途中までは電子捕獲反応により大量のニュートリノが生成されるので上昇していくが、途中からコアの内部で減少していくことが確認された。これは、中心部において非常に高温高密度となるため、ニュートリノの平均自由行程が小さくなり、ニュートリノが等方化されてくるからと考えられる。つぎに、1バリオンあたりのエントロピーの量についてであるが、これはニュートリノの輸送に伴ってエントロピーが運び去られていき、コアが冷却されていくことが分かった。そして、コアの中心部でニュートリノの平均自由行程が小さくなると、冷却も収まることも確認できた。さらに、electron fraction(Y_e)の値であるが、崩壊の途中からコア内部で上昇することが分かった。これは、通常の超新星爆発の計算などでは見られない傾向である。このようなことがおこるのは、電子捕獲反応と陽電子捕獲反応の反応率の差に原因がある。ニュートリノのエネルギーが陽子と中性子の質量差よりの小さいときには、電子捕獲反応の方が圧倒的に起こりやすいが、ニュートリノのエネルギーが陽子と中性子の質量差よりも大きく、さらに今回のモデルのようにエントロピーの値が大きくて縮退がそれほど強く効いていない場合には、両方の反応の反応率は同程度となる。そして、崩壊の途中の段階で電子捕獲反応が先に平衡に達し、続いて陽電子捕獲反応が効いてくるので、electron fraction が上昇すると考えられる。特に、今回のモデルではエントロピーの値が大きいという点が、通常の超新星爆発と異なる点である。

また、崩壊速度の空間分布は図3のようになった。さらに、崩壊から8.880秒後と8.882秒後の崩壊速度と音速の分布を描いたのが図4である。これらの図において、最初は中心部の重力崩壊はホモロガスに起こり8.880秒後の時点で内部コアと外部コアを形成することが分かる。しかし、もっと崩壊が進んで8.882秒後になると、内部コアの中でも崩壊が加速され、さらに内部コアと外部コアに分かれてくるという構造が確認された。

これまでの計算では、見かけの地平面ができた後、ニュートリノ球がそれに飲み込まれるまでの計算は行っていない。そこで、見かけの地平面ができた後の、このモデルの振舞について議論する。一般に見かけの地平面があると必ずその外側に事象の地平面があることが証明されている。そのため、この時点で内部コアの中はブラックホールに飲み込ま

れているか、短時間のうちに吸い込まれてしまうと考えられる。最終的には、ブラックホールのまわりを低温低密度な外部コアが取り巻いているような状態になると想像できる。本来なら、このときに発生するニュートリノもきちんと計算にいれるべきであるが、この状況下で発生するニュートリノは、エネルギーの大変小さいものになると考えられるので、発生するニュートリノの総エネルギーや、特に観測にかかることが期待されるような高エネルギーのニュートリノを見積もる上では、あまり問題にならないと考えられる。

最後に、今回の崩壊により放出されるニュートリノの総量であるが、そのスペクトルを示したのが図5である。この図によると、平均的に10 MeV程度のニュートリノが放出され、全体としてのエネルギー放出は 4.3×10^{54} ergになることが分かった。さらに、今回のような $375M_{\odot}$ のPop III大質量星がred shift $z = 17$ において一斉に形成され、それがバリオン数で宇宙全体の0.1%をしめたと仮定すると(Iocco et al. 2004)、地球上に到達するニュートリノの量は図6のようになることが分かった。ただしこの計算ではニュートリノ混合は考慮していない。そしてこの結果は、ニュートリノ観測の現状から考えると、測定できるニュートリノのエネルギー領域よりも低く、またfluxも小さいと言わざるを得ない。このようにPop III大質量星から放出されるニュートリノは、通常の超新星から比較すると十分大きいのが、遠くにあるために大きくred shiftされてしまい、またfluxも小さくなってしまおうと考えられる。

4 まとめと今後の展望

今回、我々が行なったのは、現在示唆されているIMFより妥当な質量であると考えられるPop III大質量星のモデルにたいし、一般相対論とニュートリノ輸送を考慮にいれた重力崩壊のダイナミクスの計算である。その結果、ニュートリノの効果が重力崩壊の描像に大きな影響を与えること、崩壊の内部では Y_e の上昇のように、通常の超新星とは定性的に異なる現象も見られることが分かった。さらに、この重力崩壊により放出されるニュートリノは地上での測定が難しいことも分かった。

ただし、今回の見積もりではIMFなどにおいて、現実的と思われるものを考慮していない。また、計算したモデルも1つしかない。そこで、同様の計算を様々な質量のモデルにたいして行ない、質量の違いによって重力崩壊の描像にどのような変化が現れるかを調べる必要がある。さらにそれぞれのモデルから放出されるニュートリノを、現在様々な見積もりがなされているいくつかのIMFに基づいて足し上げ、地球上に到達するニュートリノの量を計算することも今後の課題である。

謝辞

今回の研究では、数値計算において国立天文台のVPP5000システムを使用させて頂きました。ここに、お礼を申し上げます。

参考文献

- [1] Bond, J.R., Arnett, W.D., & Carr, B.J. 1984, ApJ, 280, 825
- [2] Fryer, C.L., Woosley, S.E., & Heger, A. 2001, ApJ, 550, 372
- [3] Iocco, F., Mangano, G., Miele, G., Raffelt, G.G., & Serpico, P.D. arXiv:astro-ph/0411545
- [4] Linke, F., Font, J.A., Janka, H.-Th, Müller, E., & Papadopoulos, P. 2001, A&A, 376, 568
- [5] Misner, C.W., & Sharp, D.H. 1964, Phys. Rev., 136, 571
- [6] Shen, H., Toki, H., Oyamatsu, K., & Sumiyoshi, K. 1997, Prog.Theor.Phys, 100, 1013
- [7] Shen, H., Toki, H., Oyamatsu, K., & Sumiyoshi, K. 1997, Nucl.Phys, A637, 435
- [8] Umeda, H., & Nomoto, K. 2002, ApJ, 565, 385
- [9] Woosley, S.E., Heger, A., & Weaver, T.A. 2002, Rev.Mod.Phys, 74, 1015
- [10] Yamada, S. 1997, ApJ, 475, 720
- [11] Yamada, S., Janka, H.-Th, & Suzuki, H. 1999, A&A, 344, 533

表 1: 初期質量と鉄コアのエントロピーの関係 (質量の単位は太陽質量 M_{\odot} 、エントロピー単位はボルツマン定数 k_B)

初期質量	ヘリウムコア質量	酸素コア質量	酸素コアエントロピー	鉄コアエントロピー
300	159	143	14.54	15.98
375	201	181	16.06	17.50
470	254	228	17.73	19.17
585	319	287	19.53	20.96
730	400	360	21.54	22.97
915	504	454	23.81	25.25
1145	633	570	26.33	27.77
1430	794	714	29.10	30.54
1800	1001	901	32.29	33.74
2250	1254	1129	35.74	37.19

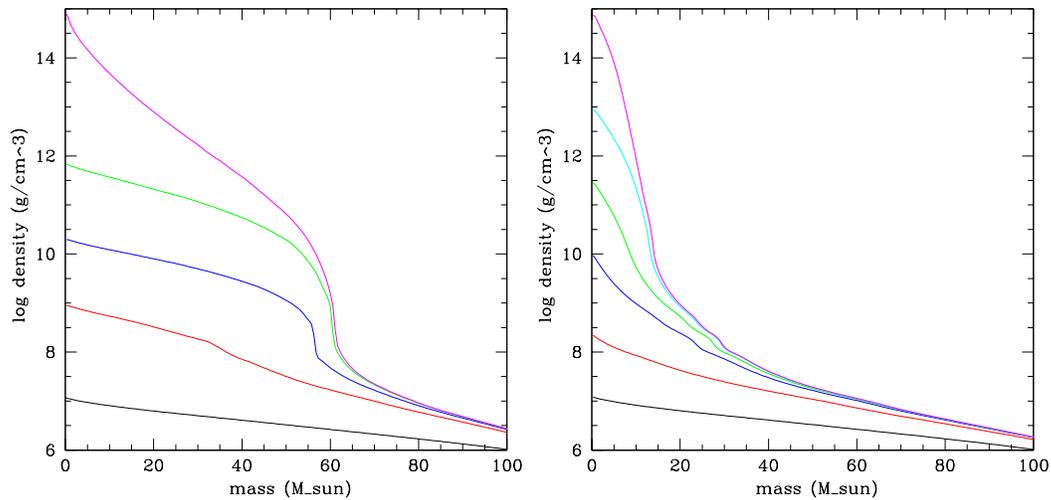


図 1: ニュートリノを計算しない場合 (左) とする場合 (右) の密度分布の時間発展の比較 (黒はともに初期条件。左図では、赤が 11.792 秒後、青が 11.950 秒後、緑が 11.987 秒後、ピンクが 11.992 秒後。右図では、赤が 8.583 秒後、青が 8.824 秒後、緑が 8.865 秒後、水色が 8.880 秒後、ピンクが 8.882 秒後。)

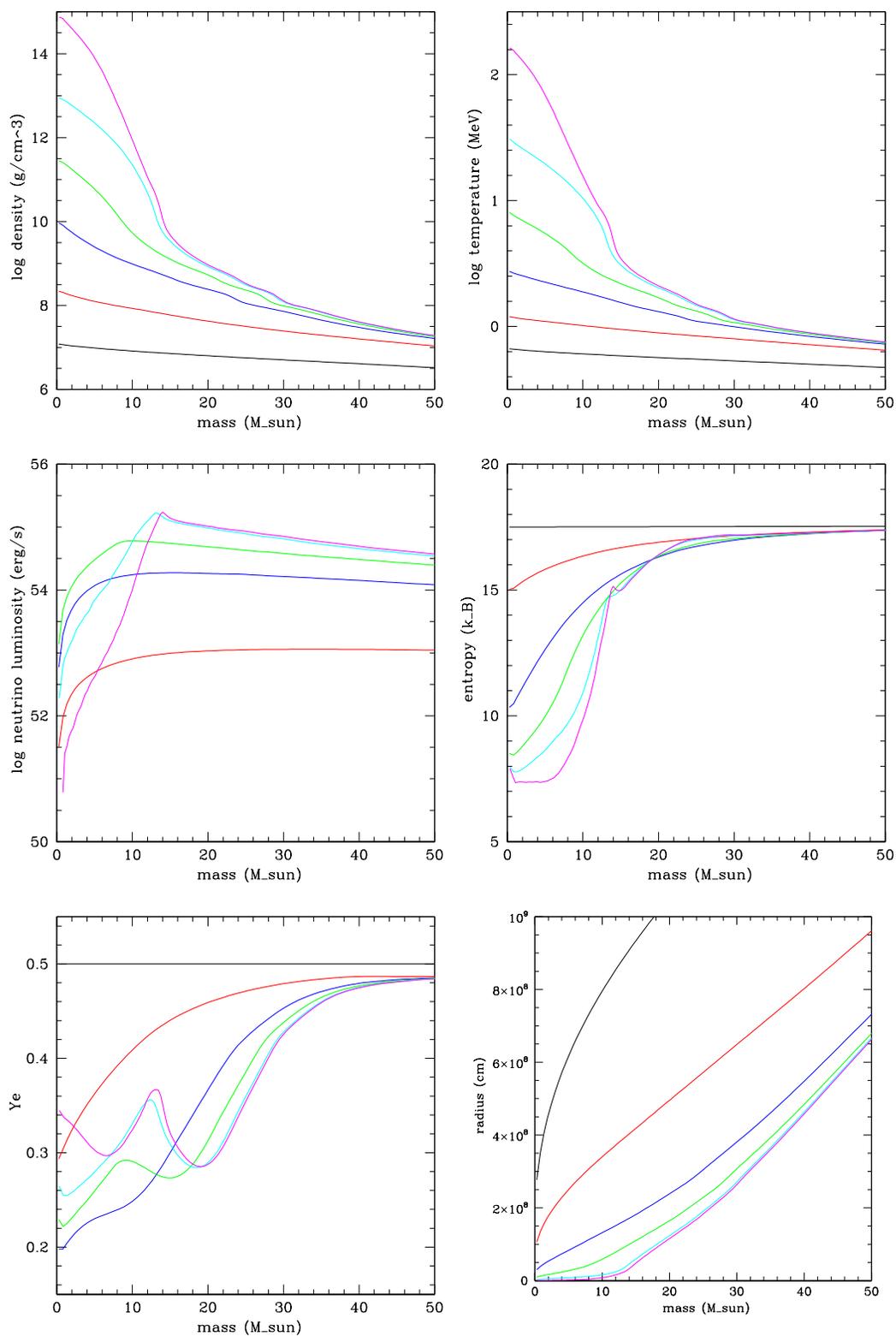


図 2: 様々な物理量の時間発展 (すべての図で、黒は初期条件、赤は 8.583 秒後、青は 8.824 秒後、緑は 8.865 秒後、水色は 8.880 秒後、ピンクは 8.882 秒後。)

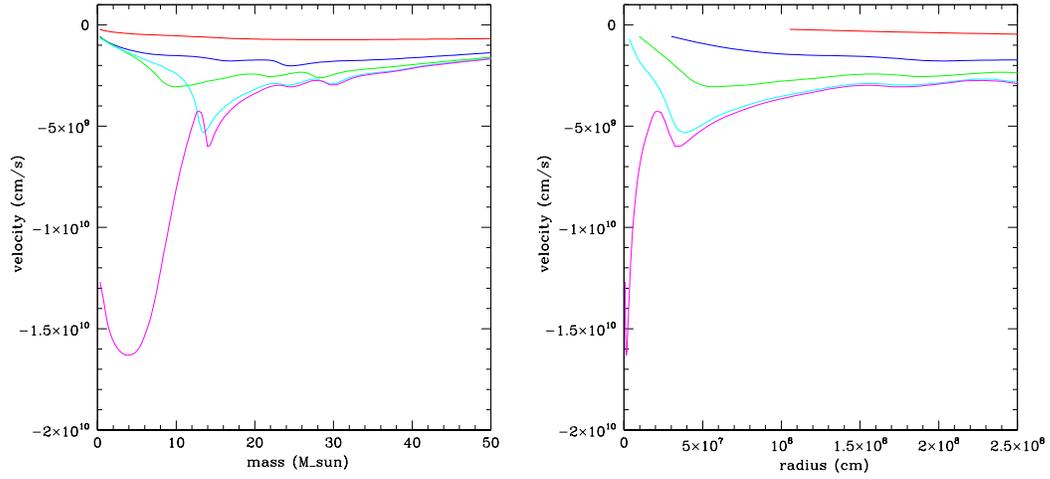


図 3: 崩壊速度の時間発展 (赤は 8.583 秒後、青は 8.824 秒後、緑は 8.865 秒後、水色は 8.880 秒後、ピンクは 8.882 秒後。)

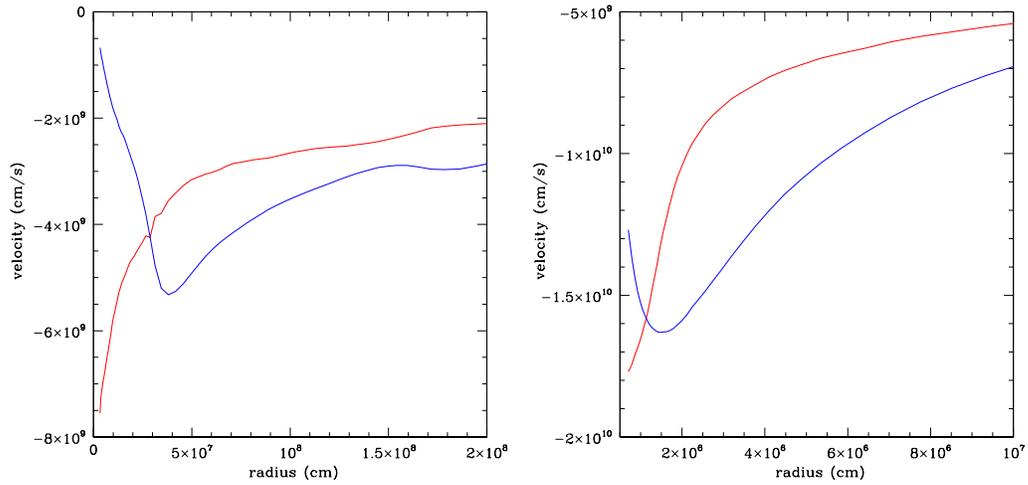


図 4: 8.880 秒後 (左) と 8.882 秒後 (右) の崩壊速度 (青) と音速 (赤) の比較

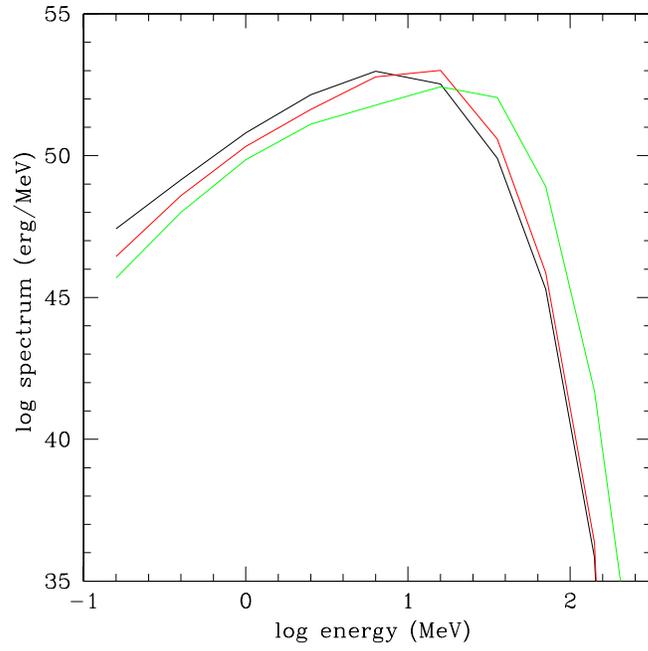


図 5: Pop III 大質量星のコア崩壊で放出されるニュートリノのスペクトル (黒は ν_e 、赤は $\bar{\nu}_e$ 、緑はその他のタイプのニュートリノ)

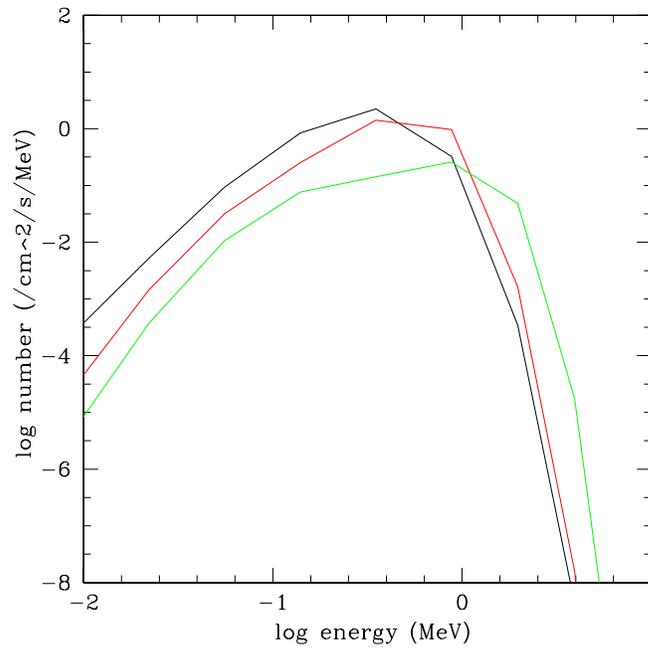


図 6: 地球上に到達する Pop III 大質量星のコア崩壊を起源とするニュートリノ (黒は ν_e 、赤は $\bar{\nu}_e$ 、緑はその他のタイプのニュートリノ)