高速回転重力崩壊からの重力波とニュートリノ **柴垣翔太1 黒田仰生2 固武慶1 滝脇知也3** 1福岡大学 2ダルムシュタット工科大学 3国立天文台





高速自転する70太陽質量星の重力崩壊を3次元一般相対論的ニュートリノ輻射流体シミュレーションを行って調べた。 バウンス後、low-T/WA 安定という流体不安定によって原始中性子星が変形し、原始中性子星のまわりに渦状腕が現れるのを確認した。変形した原始中性子星と渦状腕 から準周期的な重力波が放出され、そのピーク振動数が時間とともに増加するのを発見した。ニュートリノ光度にも準周期的な振動が見られた。こ の振動のピーク振動数は渦状腕の本数と重力波のピーク振動数によって説明でき、重力波の振動とニュートリノ光度の振動に強い相関があること がわかった。

背景

大質量星の重力崩壊は主要な重力波・ニュートリノ源のひとつであり、 将来マルチメッセンジャー観測が期待される。大質量星の重力崩壊の

2 手法

3次元一般相対論的ニュートリノ輻射流体シミュレーションコード (Kuroda et al. 2016)を用いて、大質量星の重力崩壊の進化を計

うち、高速回転を伴う星の重力崩壊は、原始中性子星の強い差動回 転がlow-T/WA安定と呼ばれる非軸対称流体不安定を起こし、原 始中性子星の変形と渦状腕の形成を引き起こす。この回転重力崩壊 固有のダイナミクスは、放出される重力波やニュートリノに影響を及ぼ す。一方で、low-T/WA安定は原始中性子星がどれくらい小さいか に影響を受けるため、ニュートリノ輻射輸送と一般相対論的な輻射流 体計算の両方取り入れた数値計算が重力波やニュートリノの定量的な 予測のために重要になるが、そのような計算は行われてこなかった。

算した。

- 一般相対論:BSSNフォーマリズム
- ニュートリノ輻射輸送:M1法を用いたエネルギー依存ニュートリノ輻 射輸送
- Nested grid法(最小グリッド幅=458m)
- Lattimer&Swesty状態方程式(K = 220 MeV)
- 70太陽質量初代星モデル(Takahashi et al. 2014) ullet
- 初期中心回転角速度:2.0 rad/s

計算結果

3.1 重力波(arXiv:1909.09730)

図1が赤道方向(左)・極方向(右)からみた重力波波形(h) とそのスペクトル進化(スペクトログラム)である。準周期振 動の振動数が増加しているのがわかる。t_{pb}~70msの重力 波が強くなっているとき、原始中性子星まわりには1本の渦 状腕が現れ(図2左)、 $t_{\rm ob}$ ~100ms以降の重力波が強く なっている頃には、原始中性子星まわりには2本の渦状腕 が現れた(図2右)。この重力波は次世代重力波検出器で あれば、Mpcスケールまで検出が期待できる(図3)。





図0. エントロピーの3次元プロット

図1.赤道方向・極方向からみた重力波波形とそのスペクトル進化



3.2 ニュートリノ

ニュートリノ光度にも、low-T/WA安定が起こり、渦状腕が形成さ れたときに振動が見られた(図4)。ニュートリノ光度のスペクトログ ラムを調べると(図5)、1本の渦状腕のときは重力波の半分の振 動数(下の白線)で、2本の渦状腕のときは重力波の振動数で、 ニュートリノ光度が振動していることがわかった(上の白線)。ハイ



パーカミオカンデでの検出数を計算したのが図6になる。



ペクトル進化と重力波振動数との相関

図3. 重力波のスペクトル振幅と検出器ノイズ

まとめ

・高速回転重力崩壊では、重力波・ニュートリノの両者に現れる準周期振動の振動数が、時間とともに増加することを発見した。 ・ニュートリノと重力波の同時観測によって、重力崩壊の内部でどのような渦状腕が形成されているかの情報を得ることができる。