

Quark 星からの重力波

Hajime Sotani and Tomohiro Harada

Department of Physics, Waseda University, Okubo 3-4-1, Shinjuku, Tokyo 169-8555, Japan

最近、クォーク星の候補と思われる星が見つかった．この星の放射半径は、中性子星のそれに比べ、非常に小さいものである．今回、我々は観測された放射半径のクォーク星から放出される重力波の準固有振動数を計算した．状態方程式としては、簡単のため bag model EOS を用いた．特に、ここでは、 f -、 w -、および w_{II} -モードを考え、その bag constant や、星の放射半径に関する依存性を解析した．その結果、最低次の w_{II} -モードは、bag constant や星の半径に強く依存していることが分かった．また、 f -モードは、 w_{II} -モードとは別の依存性を示した．これより、重力波の準固有振動のうち、 f - および、最低次の w_{II} -モードをの振動数を直接観測することにより、クォーク物質の状態方程式やクォーク星の形状等に、強し示唆を与えることができると考えられる．

1980年代より、クォーク星についての多くの研究がなされた．真の基底状態は、核状態ではなく、クォーク状態であるという Witten の仮説を信じると、クォーク物質からなる天体が存在するかもしれない、と思われる．このクォーク物質の研究においては、簡単のため bag model EOS がしばしば用いられる．Lattimer 等は、この状態方程式を用いて、星の形状を計算した [1]．このようなクォーク星に対して、最近、その候補と考えられるコンパクトな星 (RXJ185635-3754) が、観測された [2]．この星は、*Chandra* で X 線観測によると、その放射半径が、今まで中性子星に対して用いた状態方程式で構成される星の放射半径より、ずっと小さい ($3.8\text{km} \lesssim R_\infty \lesssim 8.2\text{km}$) ことからクォーク星の候補として考えられている．

コンパクトな天体が振動すると、重力波が放出されるが、この重力波は天体の振動エネルギーを持ち去るので、天体の振動は減衰する．もしこのコンパクト天体からの重力波の直接観測ができた場合、波源の天体の情報が得られると思われる．これに関して、Yip 等は半径が $\sim 10\text{km}$ のクォーク星の非球対称振動について調べた [3]．しかしながら、今回、クォーク星の候補と考えられた RXJ185635-3754 の半径は、Yip 等の調べた星よりずっと小さいものである．そこで、ここでは、放射半径が $3.8\text{km} \lesssim R_\infty \lesssim 8.2\text{km}$ のクォーク星の非球対称振動を計算し、星の準固有振動数 (QNMs) とクォーク物質の状態方程式の関係を調べる．

QNMs は、次の2つに分類できる．1つは、星の流体と主に関係する「流体モード」で、もう1つは、主に計量の振動に関連した時空の振動を結びつけた「時空モード」である．流体モードのうち、最もよく研究がなされているのは、 f -、 p -、 g -モードである．これらのモードは、減衰率が振動数に比べて非常に小さい．一方、時空モードには、 w -や、 w_{II} -モードが含まれる．ここでは、簡単のために、 w -、 w_{II} -、 f -モードのみに着目する．最近、小嶋等によってクォーク星の f -モードが計算され、このモードの振動数と減衰率を用いることによる、中性子星との区別の可能性も研究されている [4]．

今回、星は静的球対称と仮定する．この仮定から、T.O.V. 方程式を解くことにより、重力波波源の星を構成できる．この場合、星の状態方程式が必要となるわけだが、今回は簡単のため、bag model EOS を採用する．この状態方程式は、bag constant と呼ばれる、1パラメータを用いて、 $P = (\rho - 4B)/3$ と表される．ここでは、bag constant として、 $B = 28.9, 56.0, 94.92$

MeV fm⁻³ の3つの値を用い、放射半径が $R_\infty = 3.8, 6.0, 8.2$ km となる、計9つの星のモデルを採用する．

これら9つの星のモデルからの重力波の準固有振動数を計算した結果、 w -モードは、振動数、減衰率とも bag constant に対して、依存性が弱いことが分かった．そのため、 w -モードを用いて bag constant の値を決めるのは難しいと思われる．一方、最低次の w_{II} -モードは bag constant や星の放射半径に強い依存性を示す．その結果、重力波のうち、最低次の w_{II} -モードを直接観測することにより、星の放射半径が、bag constant についての情報を得ることができる．さらに、このモードの減衰率を決めるのは難しいが、減衰率が観測により決めることが可能であるのならば、星の放射半径や bag constant の値に対して、さらに強い制限を与えられる．

また、 f -モードの振動数は、bag constant に強い依存性を示すが、星の放射半径にはあまり影響されない．この結果は、小嶋等の結果と一致する [4]．そのため、何らかの観測により、星の放射半径がある程度の範囲で決めれば、 f -モードの観測により、bag constant の値を決めることができる．さらに、観測された放射半径の値を用いて、波源の星の質量にも制限を与えられる．ここで、 f -モードの振動数が、bag constant にのみ強く依存する理由は、次のように考えられる．そもそも、 f -モードの振動数は、星の“平均密度”に強く依存するが、星を形成する状態方程式にはさほど依存しないことが知られている．これに対し、今回考えているクォーク星は、考えている放射半径においては、bag constant が同じならば、星の平均密度はほぼ一定であることから、 f -モードの振動数は bag constant のみに依存している、と考えられる．さらに、各 bag constant に対して、 f -モードの減衰率は星の放射半径に依存していることがわかる．これも、小嶋等の結果と一致する [4]．その結果、 f -モードの減衰率のデータが得られれば、X 線観測とは独立に、星の放射半径を決めることが可能であると思われる．

さらに、 f -モードの振動数の bag constant に対する依存性は、最低次の w_{II} -モードの振動数のそれとは異なる．そのため、重力波観測により f -と、最低次の w_{II} -モードの振動数を同時に捕らえられるならば、bag constant と星の放射半径を決めることも可能である．以上より、近い将来、クォーク物質からなる天体からの重力波を観測することにより、クォーク物質の状態方程式についての情報を得ることは可能であると考えられる．

[1] J. M. Lattimer et al., *Astrophys. J.* **550**, 426 (2001).

[2] J. J. Drake et al., *Astrophys. J.* **572**, 996 (2002).

[3] C. W. Yip et al., *Astrophys. J.* **513**, 849 (1999).

[4] Y. Kojima et al., *Prog. Theor. Phys.* **108**, 801 (2002).