

磁場や定常的な流れを伴った系の数値的解析

藤澤幸太郎 (東京大学総合文化研究科「駒場」)

概要 共同研究者: 吉田慎一郎(東大総文), 藤井亮治(東大総文), 高橋勇太(理研), 吉田至順(東北大), 江里口良治(東大総文)
コンパクトオブジェクトを考える時に、重力と磁場は欠かすことができない大切な要素である。もっと複雑に考えれば他にも様々な要素が考えられるが、まずは磁場と重力のみのシンプルな状況を丁寧に解析することは大切である。そこで、磁場と重力に焦点をあて、磁場や定常的な流れを伴った系の定常状態を計算した。

1.背景

中性子星は 10^6cm の半径に太陽と同じくらいの質量があり、非常にコンパクトで重力が強い。磁場も非常に強力である。この強重力と強磁場が、様々な興味深い高エネルギー現象を引き起こしていると考えられている。そこで、重力と磁場に焦点を当てその定常解を議論する。

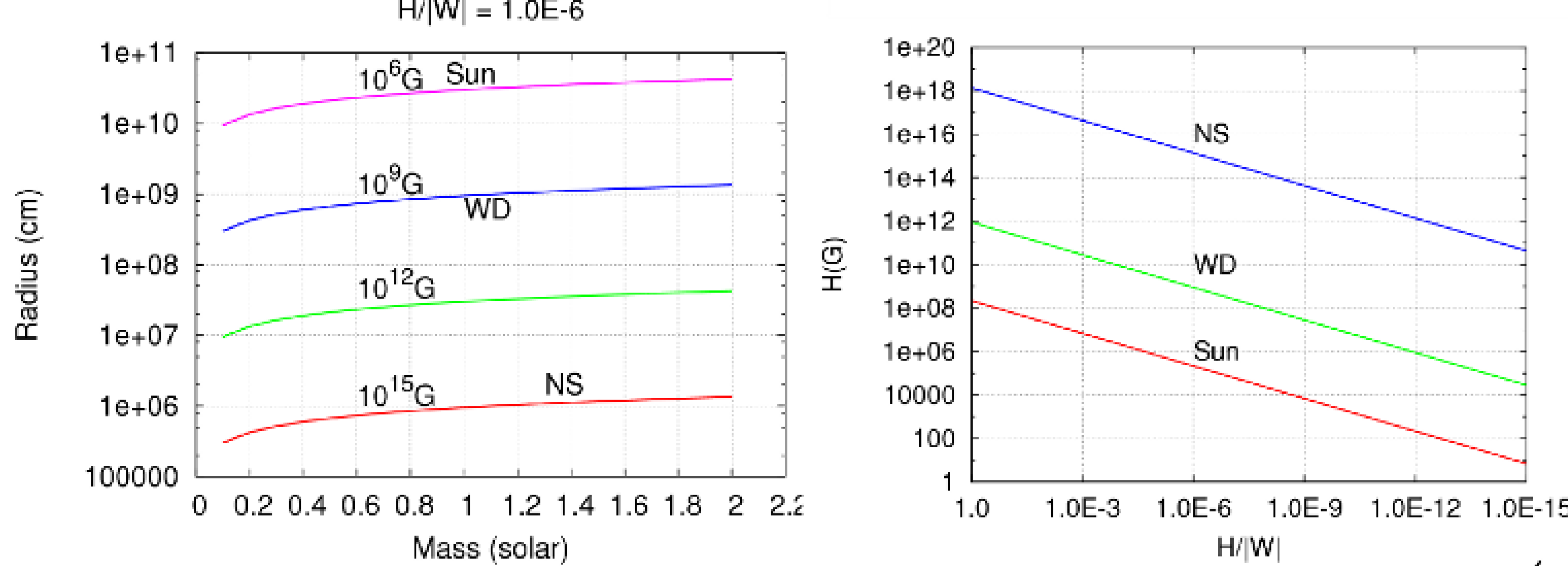
2.解析的な見積り Chandrasekhar & Fermi (1953)

Virial定理. $2T + 3(\gamma - 1)U + W + H = 0,$

$$E = \frac{3\gamma - 5}{3(\gamma - 1)}T + \frac{3\gamma - 4}{3(\gamma - 1)}(W + H) < 0,$$

T: 運動エネルギー
U: 内部エネルギー
W: 重力エネルギー
H: 磁場エネルギー
E: 星の全エネルギー

磁場の見積り(T=0の時) $\frac{H}{|W|} \sim 1.05 \times 10^{-60} \frac{\bar{H}^2 R^4}{M_\odot^2}$



Virial定理から計算した太陽(Sun)、白色矮星(WD)、中性子星(NS)の磁場の上限の見積り。左図は、 $H/|W|=1.0E-6$ の時に、質量と半径から決まる磁場の限界値を表している。右図は、 $H/|W|$ が変化した時にそれぞれの磁場の限界値を示している。

3.定式化 Tomimura & Eriguchi (2005), Fujisawa et al. (in preparation)

定常軸対称バロトロップ $p = p(\rho)$ を仮定。

運動方程式 $\frac{1}{\rho} \nabla p = -\nabla \phi_g - \frac{1}{2} \nabla |v|^2 + v \times \omega + \frac{1}{\rho} \left(\frac{j}{c} \times H \right).$

Poisson方程式 $\Delta \phi_g = 4\pi G \rho.$

Grad-Shafranov方程式 $\Delta(A_\varphi \sin \varphi) = -4\pi \frac{j_\varphi}{c} \sin \varphi,$
(右辺の電流密度の形を与えて解くとAから磁場構造が決まる)

運動方程式の第一積分と電流密度

$$\int \frac{dp}{\rho} = -\phi_g - \frac{1}{2}|v|^2 + \int \mu(\Psi) d\Psi + \Omega(\Psi) R v_\varphi + C,$$

この可積分条件より電流密度の形が求まる。

$$\frac{j}{c} = (\kappa'(\Psi) + Q''(\Psi) R v_\varphi) H + Q'(\Psi) \omega + \rho R (\mu(\Psi) + R \Omega'(\Psi) v_\varphi) e_\varphi.$$

Ψ は磁力線関数でAから求まる。 κ, Q, μ, Ω は磁力線に沿って保存する量で、 Ψ の任意関数である。この任意関数の形を変化させることで、様々な解が得られる。

無限遠での境界条件 $\phi_g \rightarrow O\left(\frac{1}{r}\right), A_\varphi \rightarrow O\left(\frac{1}{r}\right)$ をGreen関数で組み込む。

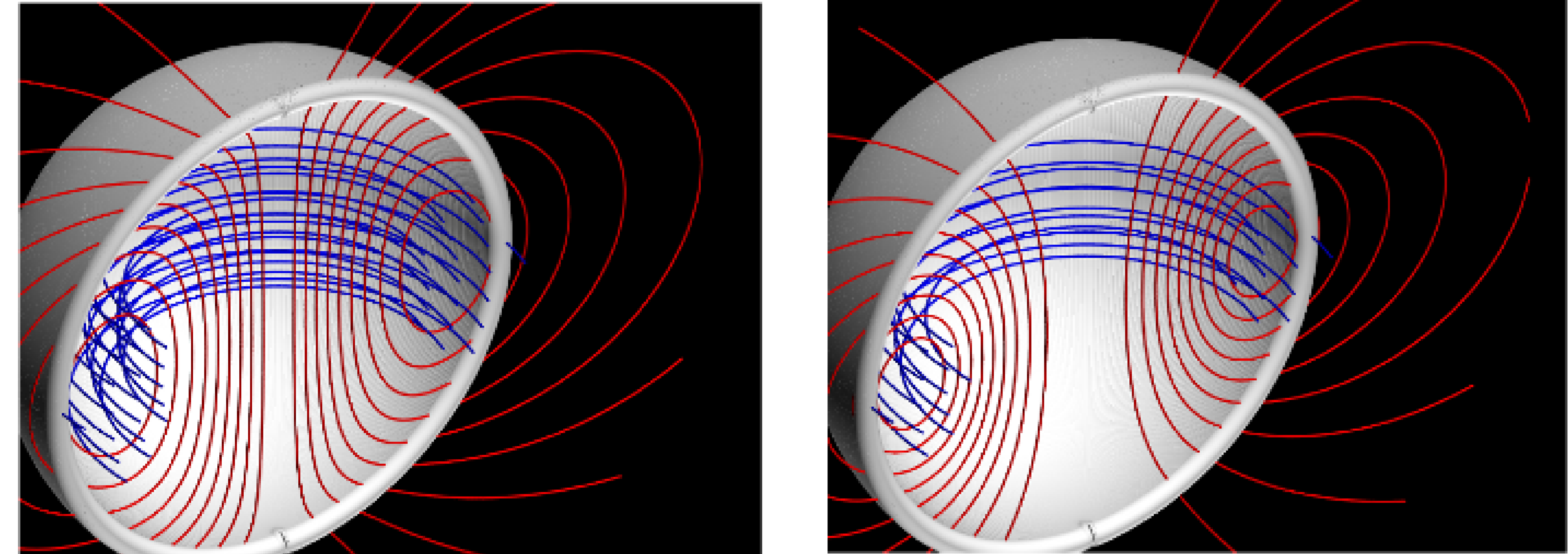
$$\phi_g = -G \int \frac{\rho(r')}{|r - r'|} d^3 r', \quad A_\varphi(r) \sin \varphi = \frac{1}{c} \int \frac{j(r')}{|r - r'|} \sin \varphi' d^3 r'.$$

4.計算結果

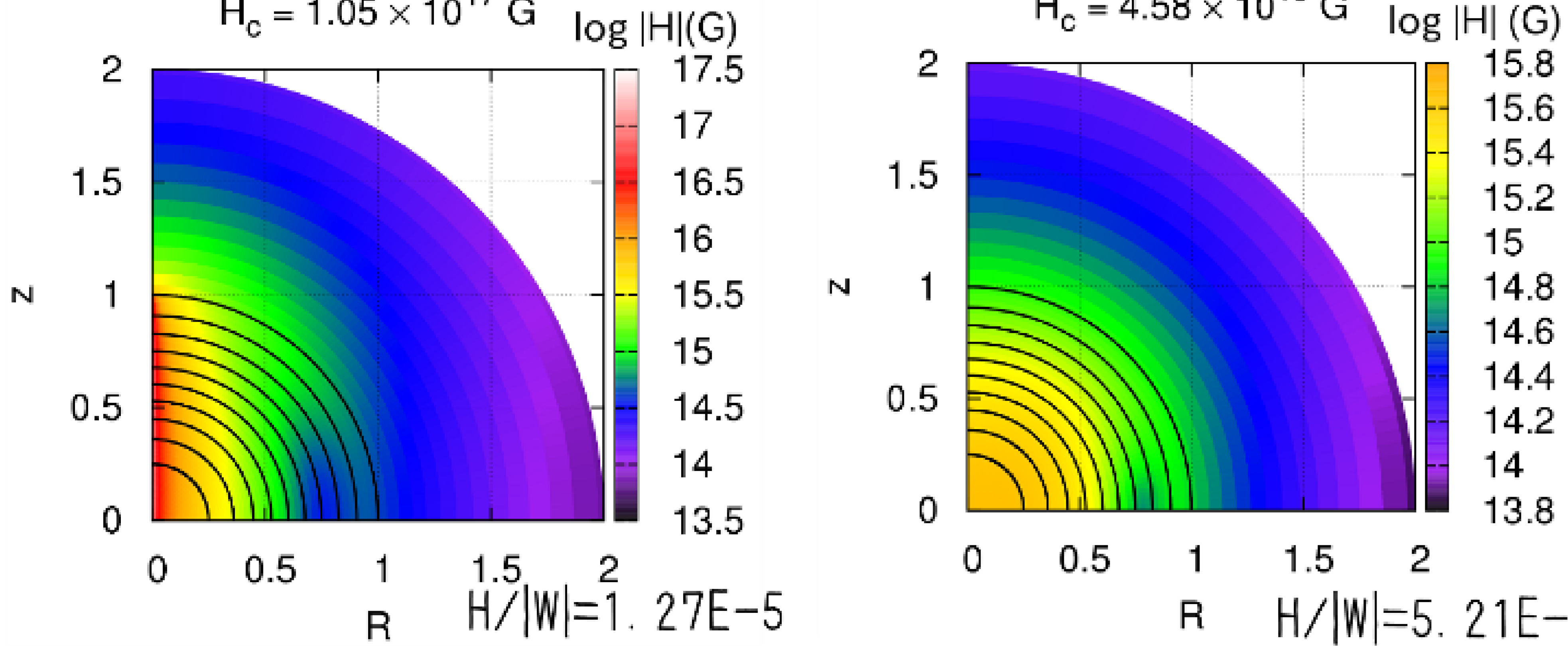
中性子星の場合

質量 $1.4 M_{\text{sun}}$, 中心密度 10^{15}g/cm^3 , 星の表面で磁場の強さが $8.0 \times 10^{14} \text{G}$ の中性子星の構造を計算した。

磁力線



磁場の強さ



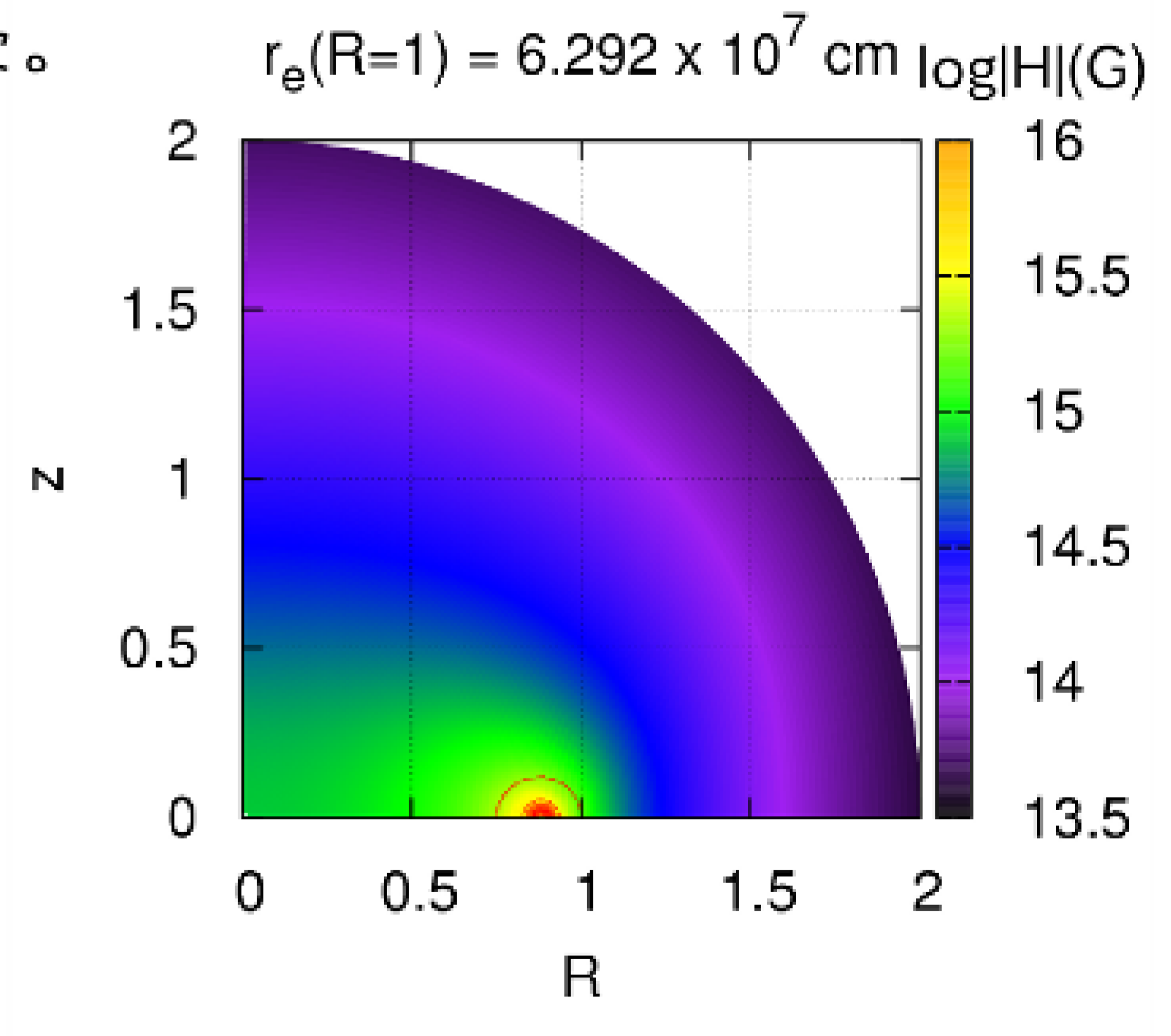
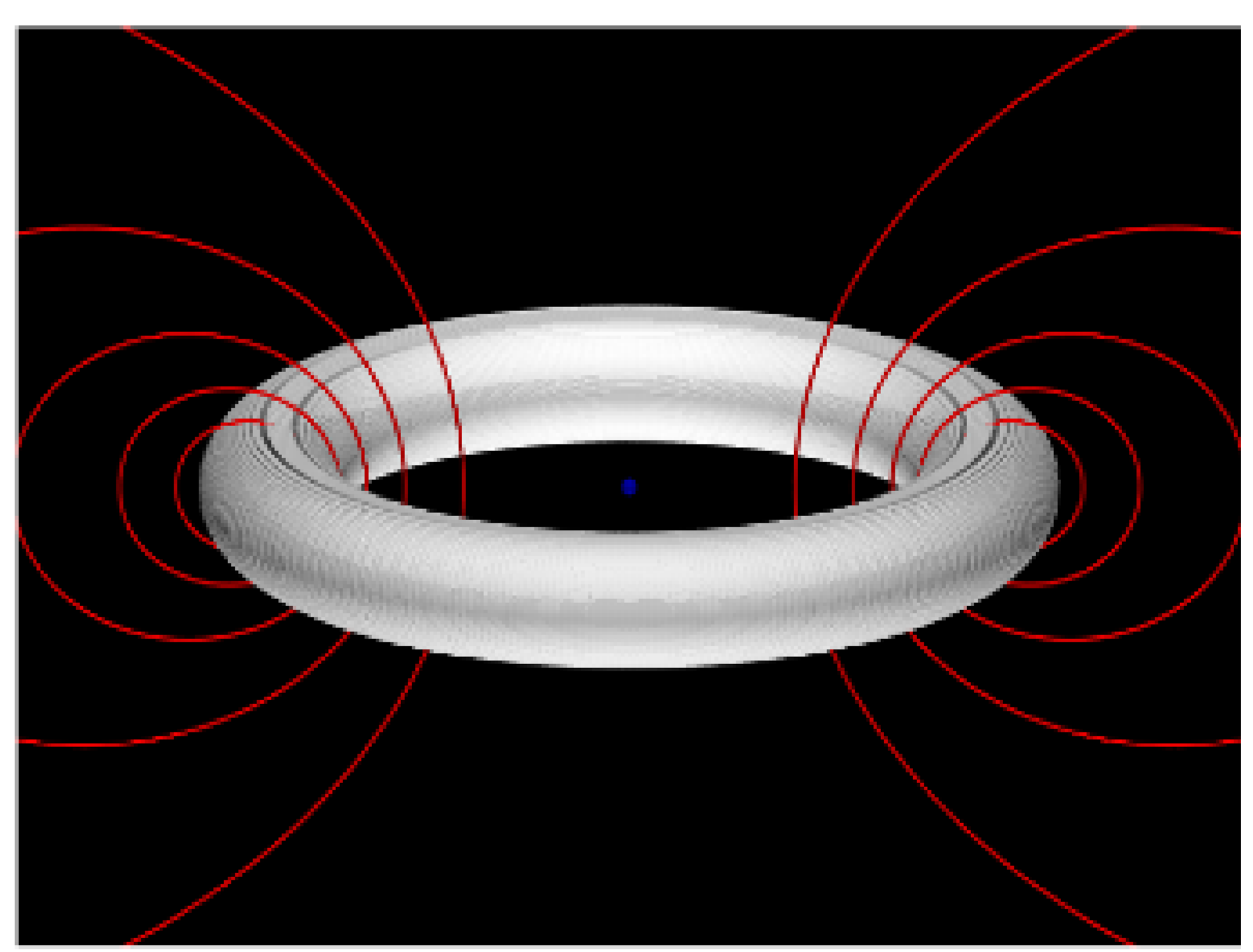
表面での磁場の平均的な強さが同程度でも、異なる磁場構造を伴った解が得られた。左の解では、中心軸付近に偏った、非常に強い磁場が存在している。右の解は比較的一様に近い。等高線は密度分布で、一つの線で最大値の1/10違う。R=1が表面。

5.まとめ

磁場を伴った星などの定常的な構造を計算した。その結果、比較的一様な磁場構造から、非常に偏った磁場構造まで様々な解が得られた。今まで一様磁場やダイポール磁場で仮定して計算していた現象も、こういった磁場構造を考えると何か分かるかもしれない。今後はこのような様々な磁場構造やエネルギーがこういった現象に帰結されるかについて考えていきたい。

ブラックホールとトーラスの場合

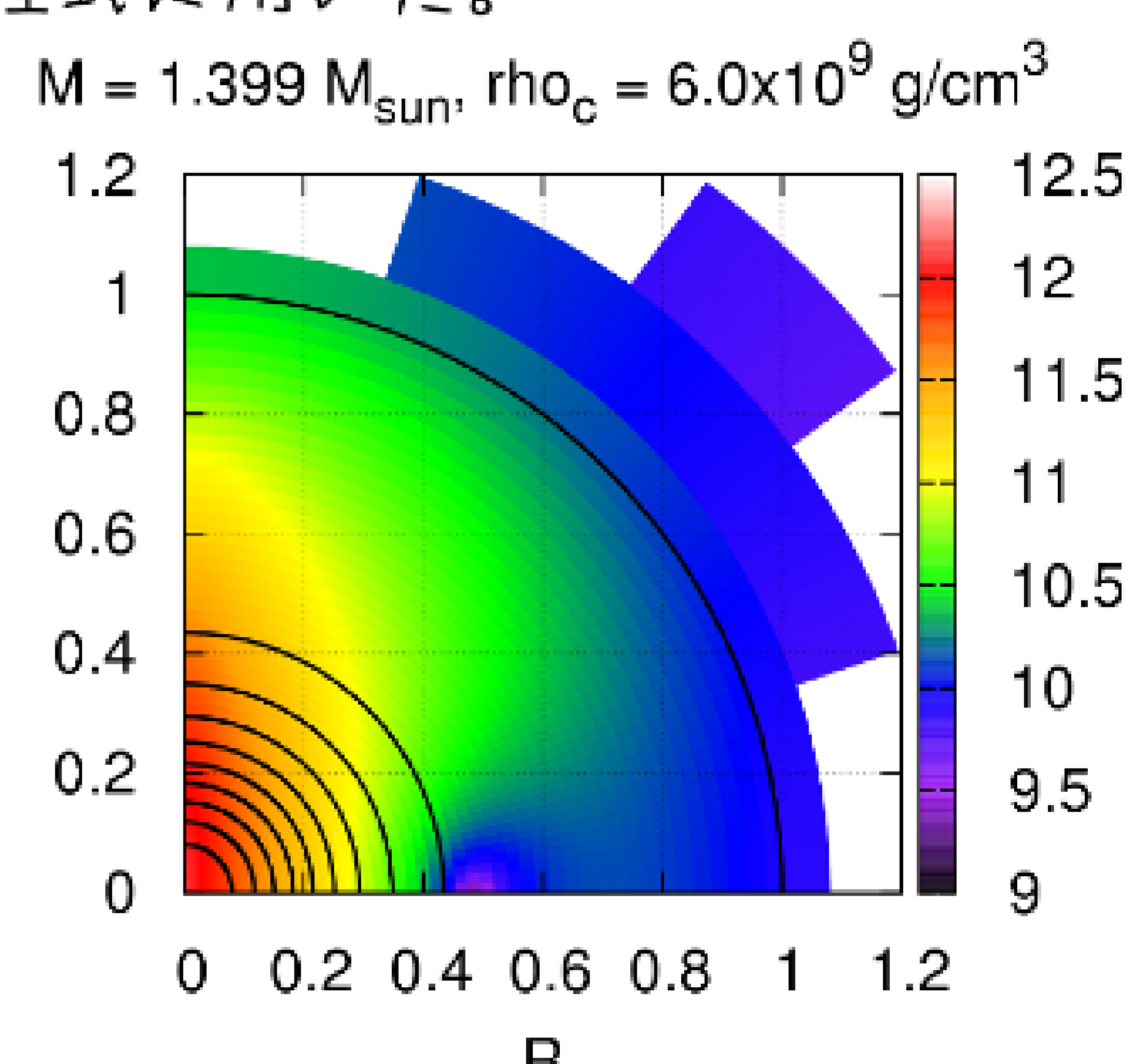
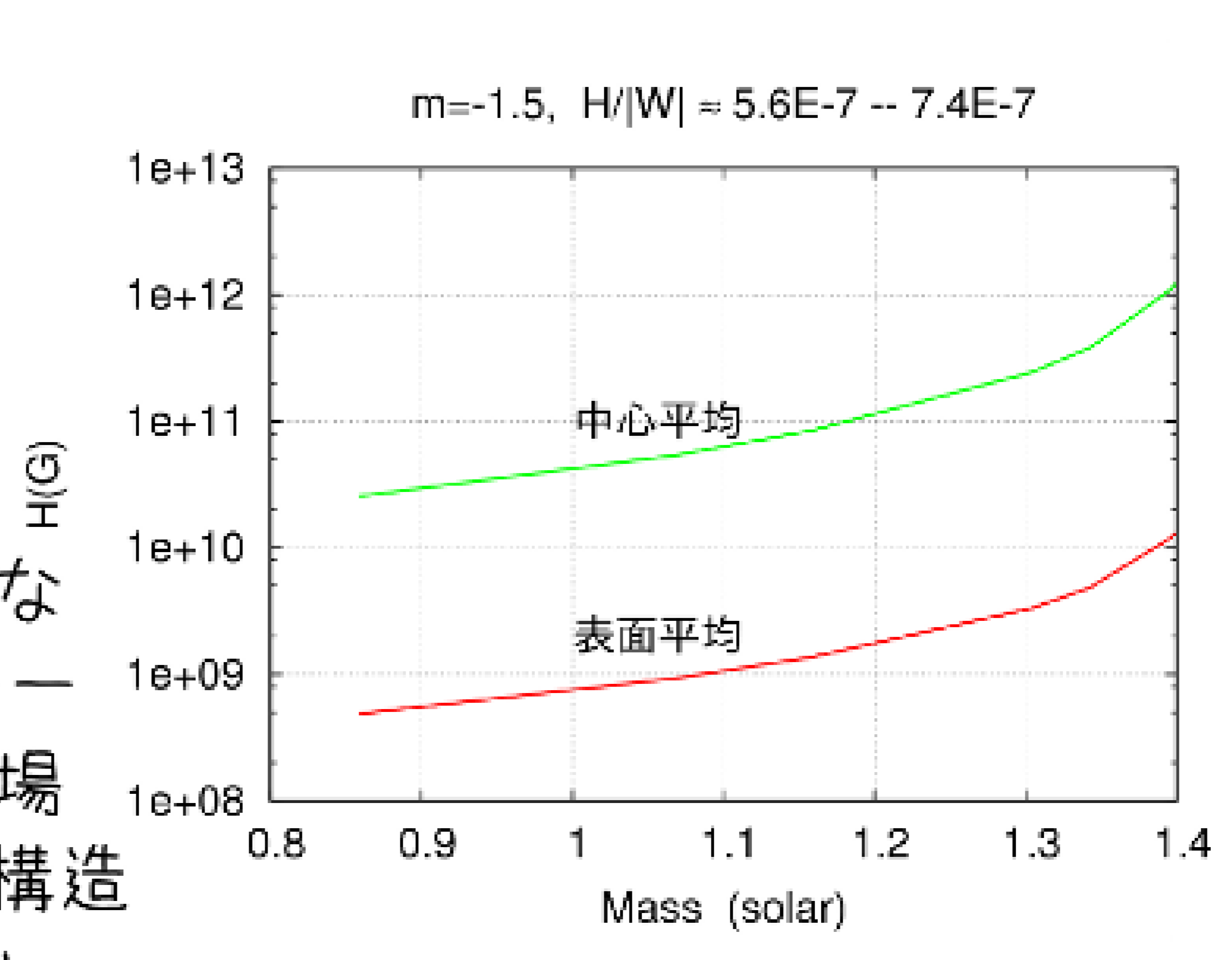
一般相対論的シミュレーション(Sekiguchi & Shibata 2007)により示されている、大質量星の重力崩壊後に形成されるBHと重たいトーラスの系。このような系で、トーラスが主に磁場によって支えられていると考えて計算した。



トーラスの形状(左)とその周囲の磁場の強さ(右)。トーラスは非一様回転し子午面流を伴っている。Newtonianでの計算なので、BHのポテンシャルは, Paczynski & Witta ポテンシャル(1980)を用いた。BHの質量は $5.0 M_{\text{sun}}$, トーラスの質量は $0.25 M_{\text{sun}}$, 最大密度は 10^{11}g/cm^3 と、重たく高密度である。エネルギー比は、 $T/|W|=5.6E-4, H/|W|=7.1E-1$ で磁場が圧倒的に強い。

白色矮星の場合

任意関数を固定して、質量が変化した時の磁場の強さを計算した。完全縮退したガスを状態方程式に用いた。



左図は質量が変化した時の中心、表面での磁場の平均的な強さ。右図は質量が $1.399 M_{\text{sun}}$ の時の磁場の強さと密度分布。一つの等高線で密度が最大値の1/10違う。中心部では非常に磁場が強い。

このポスターは以下のようなオープンソースソフトやフリーのフォントで作成されました。この場を借りて心から感謝します。
ポスター全体: Inkscape グラフ: gnuplot CG: povray 画像処理: simp OS: Ubuntu10.04 Lucid
フォント: 非横書きフォント, みかちゃんフォント, さなフォント, あずきフォント

