

高密度天体における原子核物質の非一様構造

Non-uniform Nuclear Matter in Compact Stars

丸山 敏毅 極限重原子核研究グループ

Toshiki Maruyama Research Group for Physics of Heavy Nuclei



- ・中性子星に代表される高密度の天体で実現している原子核物質の構造と性質を調べました。
- ・パスタ構造と呼ばれる一次相転移に伴う構造を持った混合相の構造を、荷電粒子の密度分布とクーロン力とを無撞着な形で計算することができました。
- ・低密度での液相気相相転移、高密度でのK中間子凝縮、更に高密度でのバリオン-クォーク相転移について、パスタ構造が系の状態方程式や物質の組成に少なからぬ影響を与えることがわかりました。
- ・バリオン-クォークの混合相に関して得られた状態方程式を用いて計算した中性子星の最大質量は太陽質量の約1.45倍であり、観測事実にほぼ一致しました。
- ・ We have investigated the structure and properties of nuclear matter in compact stars.
- ・ We have calculated the density distribution of structured mixed phase, i.e. the “pasta” structure, in a way fully consistent with the Coulomb interaction.
- ・ We have seen that the pasta structure greatly affects the equation of state and particle fraction of matter.
- ・ The maximum neutron-star mass was obtained to be 1.45 times the mass of the sun, which is reasonably in accord with observed values.

概要

中性子星は恒星の超新星爆発で形成される非常に密度の高い天体である。この中性子星を代表とする密度の高い星を形作っている物質の構造と性質を、原子核物質の一次相転移における混合相の問題として調べた。中性子星の表面近傍に存在する中性子と陽子、電子でできた物質、それより内側に存在するK中間子が混じった物質、さらに星の中心部に存在するクォークからできた物質という異なる物質を考慮し、それらが相転移を起こす際に形成されるパスタ構造と呼ばれる非一様な混合相に対して、クーロン遮蔽効果を厳密にかつ統一的に取り扱った。また、多成分系の熱力学としてもこれまで頻りに用いられた近似的方法ではなく厳密な取り扱いを行った。その結果原子核物質が相転移を起こすときに現れる、パスタ構造を持つ混合相の性質を定量的に予測することが可能となり、それが系の状態方程式や物質の組成、ひいては中性子星の質量に少なからぬ影響を与えることがわかった。

この記事の内容は、巽敏隆氏（京都大学）、谷川

知憲氏（元原子力機構）、D.N. Voskresensky氏（ドイツ重イオン研究所）、H.-J. Schulze氏（イタリア国立核物理研究機構）、千葉敏氏（原子力機構）、遠藤友樹氏（元京都大学）、丸山智幸氏（日本大学）らとの共同研究によるものである。

研究の背景

・原子核と原子核物質

我々の身の回りの物質は原子からできており、その原子は原子核と、その周りをまわる電子からできている。我々の日常には原子核が直接関与することは殆どないが、高密度の天体では、その原子核や原子核を作っている原子核物質の性質が顔を現す。

通常の原子核は種類に依らず密度や組成がほぼ一定である。すなわち、ほぼ同数の陽子と中性子からなり（陽子含有率 $Y_p \cong 0.5$ ）、密度 ρ_B は標準原子核密度 $\rho_0 \cong 0.16 \text{ fm}^{-3}$ に近い（ $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ ）。これは陽子や中性子といった核子を結びつけている核力の性質によるのと、陽子と中性子がフェル

ミ粒子であり、また質量が殆ど等しいため、ほぼ同数で化学ポテンシャルが釣り合うためである。また密度に関しては、標準原子核密度 ρ_0 でエネルギーが最も低く（安定に）なるからである。逆に言うと、我々が核力や核力が結びつける核子多体系としての原子核に対して持っている情報はごく限られた条件で得られた物で、そこから外れた時にどうなっているか、ということはよく分かっていない。実際、これまで安定な原子核で良く知られていた殻構造に由来する魔法数が中性子過剰な原子核では変化することが最近分かってきた。条件をいろいろ変えて、その中で物質がどのように振る舞うかを理解することは、その物質を支配する基本法則や物質の性質を調べる上で重要である。

・原子核物質の状態方程式と天体の質量

中性子星は半径が約 10km、質量が太陽の約 1.4 倍であり、全体の密度が原子核の密度と同等か、それよりも大きい非常に高密度な状態にあって、コンパクト星と呼ばれるものの代表である [1]。中性子星の表面付近は標準原子核密度 ρ_0 程度、中心付近は ρ_0 の数倍から約 10 倍の密度と考えられている。“中性子”星と言うのは中性子の含有率が非常に多いからであるが、陽子と、それと同量の電子も含まれている。また、内部に行くと密度が高くなると π 中間子や K 中間子が凝縮したり、ストレンジネスを含んだバリオン（ハイペロン）が混じったりすることが予想される。更に高密度の領域ではバリオンからクォーク物質への相転移が起こっているという説もある。このように中性子星における原子核物質は通常の原子核におけるものとは密度・組成の点で非常に異なり、またバラエティに富んでいる。このため中性子星の構造や性質を理解することは、強い相互作用やハドロン多体系についての理解を目指す原子核物理としても重要である。

しかし中性子星を実際に手にとって調べることはできない。そこで、その性質を知るための代表的な手掛かりとして、半径と質量が挙げられる。コンパクトな星の構造は一般相対論の方程式で記述されるが、その半径と重さを決めるのは原子核物質の状態方程式である。状態方程式は物質の密

度の関数としての圧力（またはエネルギー）であり、原子核物質の場合は核力やクォーク間力を用いて計算することになる。物質の状態方程式が硬いと重い天体でも安定に存在できるが、軟らかいと重い天体はつぶれてブラックホールになってしまい、軽い中性子星しか存在できない。つまり、状態方程式が決まるとそれに応じて存在できる中性子星の最大質量が決まり、もしその値が観測されている中性子星の最大質量を説明できなければ、状態方程式の計算に用いた核力や、あるいは様々な密度で実現していると考えた構造が正しくないことになる。

・混合相の状態方程式

観測されている中性子星の多くは、太陽質量の約 1.4 倍の質量を持っていて、最大でも 1.6 倍程度であるが、この観測事実を説明するちょうど良い硬さの状態方程式を導き出すのは、実はなかなか難しい。それは上で述べたように、原子核物質には密度によって様々な相が存在し、状態方程式が一つの単純な曲線では描けないからである。さらに問題を複雑にしているのが次に述べる混合相の存在である。

原子核物質には密度や温度によって複数の相が存在し、その相転移のうちいくつかは一次相転移と思われている。一次相転移では、異なる 2 相の共存した混合相が現れ、そのときの物質の状態方程式を求めるのにマクスウェル構成法がよく用いられる。水と水蒸気のような系では、表面張力を無視すれば単純な 2 相分離が成り立ち、ギブス条件（2 相での温度・圧力・化学ポテンシャルの一致）をみたくマクスウェル構成法により、正しい状態方程式を得ることが出来る。

ところが中性子や陽子などのバリオンと、電子などレプトンからなる中性子星物質は多成分系であり、マクスウェル構成法が適用できない。また強い表面張力が働いたり成分が荷電粒子で遠距離力が働いたりするような場合は、圧力が一様でさえない。原子核物質における混合相は、この最も複雑な場合に相当し、混合相の幾何学的構造、そこに働く表面張力やクーロン斥力を考慮しないと正しい状態方程式は得られないのである。

・混合相におけるパスタ構造

1980年代初めに提唱された原子核物質における、構造を持った混合相は、その奇妙な形状から「パスタ」構造と呼ばれる [2-6]。図1に模式的に示したように、青い相から赤い相への相転移を考えると、まず一様な青い相の中に球形の赤い相が混じる。赤の割合が増えると、球と球がくっついて棒状になり、やがて棒と棒がくっついて板状になる。更に赤の割合が増えると、これまでと逆転した構造（管状、泡状）を辿って一様な赤い相になるというものである。棒状や板状、穴状の構造をスパゲッティやラザニア、マカロニといったパスタにたとえたのである。

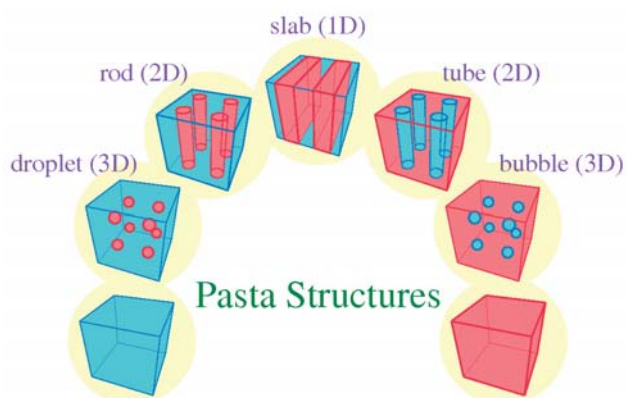


図1 原子核物質に現れるパスタ構造の概念図。左2番目から、球状 (droplet)、棒状 (rod)、板状 (slab)、管状 (tube)、泡状 (bubble) 構造。

Fig.1 Schematic picture of pasta structures.

パスタ構造は、いくつかの研究グループにより研究されているが、各相の内部で一様な密度分布を仮定したり関数形を仮定したりして単純化したものが主だった。特に電子は全空間で一様が仮定されてきた。これから紹介する原子核物質のパスタ構造に関する我々の研究では、すべての荷電粒子の密度分布を相互作用と無撞着に計算するのが特徴である。これによってパスタ構造をもった物質の状態方程式をより定量的に計算できるようになった。また、低密度原子核物質での液相気相相転移、高密度でのK中間子凝縮、更に高密度でのバリオン-クォーク相転移といった様々な密度領域での混合相を系統的・階層的に研究することにより、パスタ構造の出現を表面張力とクーロン斥力の釣合という力学的側面と、負の圧力の不安定性という熱力学的側面の両方から理解を深めることができた。これらが我々の研究における新しい点で、中性子星の全密度領域において統一的な取り扱いが

可能となり、状態方程式を定量的に計算することが出来るようになった。

研究の内容

・数値計算の枠組み

原子核物質における一次相転移とそれに伴う混合相の具体的な計算例として、低密度での液相気相相転移を紹介する。ここでは原子核物質のモデルとして相対論的平均場理論を用いる [7, 8]。このモデルは、原子核の密度分布、結合エネルギー、陽子含有率を良く再現し、一様な原子核物質に関してよく知られた状態方程式を再現する。

無限系の構造を記述するために、構造の規則性を仮定しウィグナー-ザイツ-セル近似を用いる。すなわち全空間を同等なセルに分割し、そのセルに幾何学的対称性（3次元：球対称、2次元：円筒対称、1次元：平面。図2を参照。）を仮定する。その上でセル内での核子密度、電子密度、相対論的平均場によるポテンシャル・クーロンポテンシャル・セルサイズ・セルの次元を、エネルギー（有限温度では自由エネルギー）が最低になるように解く。セルの荷電を中性にするのでセル同士の相互作用はなく、1つのセルについて計算すればよい。

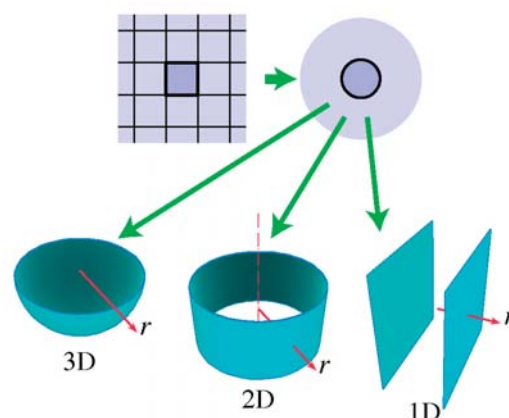


図2 ウィグナー-ザイツ-セル近似。左から3次元、2次元、1次元の例。自由度は r 方向のみ。

Fig.2 Wigner-Seitz cell with 3, 2 and 1 dimension. Only r direction is the degree of freedom.

・パスタ構造出現のメカニズム

まずパスタ構造が現れる要因を説明するために、ゼロ温度の対称原子核物質（陽子と中性子が同数含まれる：陽子含有率 $Y_p=0.5$ ）の場合を説明する。このような巨視的な対称原子核物質は自

自然界には存在しないが、典型的なパスタ構造がきれいに現れる。図3にセル内での密度分布の数値計算の結果を示す。横軸原点がセルの中心、斜線がセル境界、赤、緑、青が陽子、中性子、電子の密度を表している。セルの次元は与えられた平均バリオン密度 ρ_B に対してエネルギーが最低になるものを選んであり、上の枠から3、2、1、2、3次元となっている。いちばん上の枠を見ると、3次元（球形）セルの原点付近にバリオンが集中しており球状構造になっている。同様に次の枠から下に棒状、板状となり、4番目は円筒セルの周縁にバリオンが集中した管状、最後は泡状の構造となっている。ここでバリオン（核子）が存在する領域が液相であり、電子だけが存在する領域が“気相”に相当するが、温度ゼロの特殊な場合であるため、気相のバリオンが欠如している。ちなみに有限温度の計算を行うと、バリオン密度の高い液相と、低い気相とにきれいに分かれる [9]。また、電子の非一様性は他の研究者による計算では無視されがちだが、我々の無撞着な手法により計算してみると、ある程度電子密度の局在が起こることが分かった。同様に、液相内の陽子の分布もクーロン斥力によって相境界付近で多くなっている。このような荷電粒子の局在を正しく取り入れているのが、我々の計算の特徴である。

図4に対称原子核物質の状態方程式を示す。点線は一様物質を仮定した場合で、実線がパスタ構造の場合である。電子を含んだ荷電中性な原子核物質のエネルギーや全圧力は、電子の寄与により、密度に関して単調増加になっている。ここではパスタ構造の出現機構を分かりやすくするため、電子の寄与を除いたバリオンのエネルギー E_B や分圧 P_B を示してある。低密度（標準原子核密度 $\rho_0 \cong 0.16 \text{ fm}^{-3}$ より低い密度）の領域ではバリオン圧力が負で、最も単純な議論では、負の圧力は不安定であるので相分離を起こしてグレーの線のようになるはずである。しかし相分離の結果現れる非一様構造の表面張力やクーロン斥力があると、圧力が負であっても一様物質が好まれる領域が存在する。点線で圧力の傾きが負の領域は、スピノーダル領域と呼ばれ、一様物質が不安定となることが知られている。我々の計算結果では物質が非一様となる領域は、圧力が負の領域の全部ではなく、スピノーダル領域とそれより少し高密度側の領域である。そして物質の構造は、低密度側から球状—棒状—板状—管状—泡

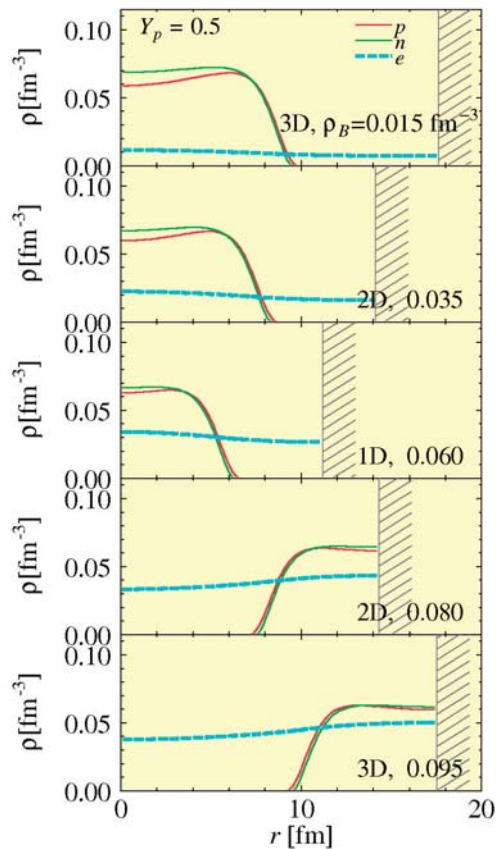


図3 温度ゼロの対称原子核物質の、セル内での密度分布。与えた平均密度 ρ_B は上から $0.015 \text{ fm}^{-3}, \dots, 0.095 \text{ fm}^{-3}$ 。
Fig.3 Density distribution in a cell for symmetric nuclear matter at zero temperature. From the top, given average density ρ_B is $0.015 \text{ fm}^{-3}, \dots, 0.095 \text{ fm}^{-3}$.

状そして一様物質へと変化している。状態方程式に関しては、点線の一様物質より非一様物質の方がエネルギーが下がり圧力が上昇する。このように、負の圧力を避けてエネルギー（有限温度では自由エネルギー）を減少させるのが物質の非一様化の本質である。しかし表面張力やクーロン斥力のために、圧力が負であっても一様物質の方がエネルギー的に安定となる領域も存在する。バリオンの負の分圧と表面張力やクーロン斥力の兼ね合いで、低密度原子核物質が一様であるかパスタ構造を取るかが決まるのである。

・中性子星表面物質

次に実際の中性子星物質に対応するゼロ温度でのベータ平衡物質を紹介する。中性子星表面物質は、密度が ρ_0 程度かそれ以下で、陽子含有率が極めて低い。そのため電子の寄与は極めて小さく、エネルギーも圧力もバリオンの寄与がほとんどを占める。図5に示すように、一様な場合と非一様な場合のエネルギー差はあまり大きくない。し

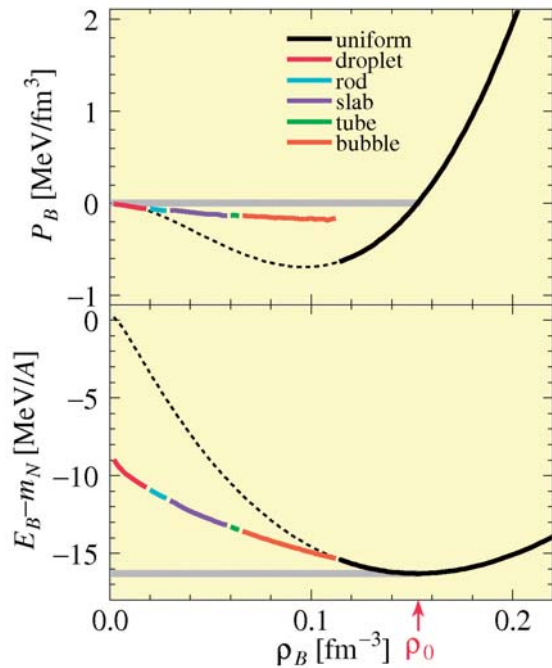


図4 対称原子核物質の圧力とエネルギーに対するバリオンの寄与。点線は一樣物質を仮定した場合。 ρ_0 は原子核の標準密度である。
Fig.4 Baryonic pressure and energy of symmetric nuclear matter. Dotted lines indicate the case of uniform matter.

かし陽子含有率 Y_p の密度依存性を調べたところ、一樣物質と非一樣物質とは大きく異なることが分かった。ちなみに低密度の極限が $Y_p \cong 0.5$ の原子に対応する。また、棒状や板状等のいわゆるパスタは見られず、単純な球状しか現れない。但しこの結果は計算に用いる相互作用に依存し、まだはっきりした結論は出せない。

・高密度原子核物質のパスタ構造

中性子星の内部に入り、標準原子核密度の数倍の領域ではストレンジネスをもったK中間子 (K^-) が混じり、これは原子核物質と強く引き合うため一次相転移を起こすと思われている。先ほどのゼロ温度のベータ平衡物質にK中間子の自由度を入れ、密度を上げていくと、K中間子を含んだ相と含まない通常原子核物質の相がパスタを構成することが分かった [10, 11]。図4の低密度対称原子核物質の時と同じように球状からはじまり泡状に至る構造が存在する。また中性子はほぼ一様に分布しているのに対し、K中間子と陽子が強く引き合い塊りを作る。その結果、局所荷電は近似的にゼロに近くなる。このために、混合相の状態方程式がマクスウェル構成法によるものに近づくことが明らかになった。これはクーロン相互作用を

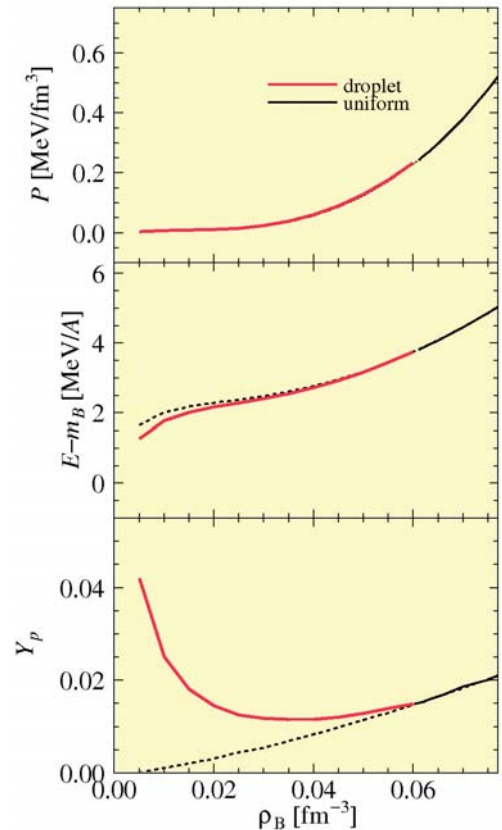


図5 (上) ベータ平衡物質の圧力と(中) エネルギー。(ともに電子の寄与も含む)。点線は一樣物質の場合。(下) 陽子含有率。

Fig.5 Pressure (top), energy (middle) and proton fraction (bottom) of beta-equilibrium matter. Dotted lines indicate the case of uniform matter.

弱めるように荷電粒子が分布する荷電遮蔽効果の一つの現れであり、我々の低密度物質から高密度物質にわたる混合相の一連の研究で明らかになった点である。

・更に高密度でのバリオン-クォーク相転移

ある質量の中性子星では密度が高く、半径10kmのうち内側に2~3km入った領域でバリオンからクォークへの相転移が起き、それより内側はクォーク物質になっていると予想されている [12]。我々は、中性子星内部でバリオンからクォークへの相転移が起こるとき、パスタ構造をもった混合相が存在 [13, 14] している可能性が高いことを示した。この研究ではバリオンとクォークの2相を統一的に扱うことはできないが、クーロン斥力と荷電粒子の分布を無撞着に計算することができた。また、パスタ構造をしっかりと考慮した状態方程式は、ギブス条件のみを考慮した軟らかい状態方程式を与える以前の計算 [12] とは有意に異なる結果を得た。

また、その状態方程式を用いて中性子星の最大質量を計算したところ、太陽質量の1.45倍となり、完璧ではないが先に挙げた観測事実の許容範囲に収まる結果を得ることができた。ちなみに、クォークへの相転移を考えずバリオンのみで構成した中性子星質量は、大量のハイペロンが析出するため最大で太陽の1.3倍と観測事実と大きく矛盾することが分かった。またバリオン相とクォーク相の釣合にギブス条件のみを考慮した場合も1.4倍とまだ小さすぎ、クォーク相及び非一様なバリオン・クォーク混合相の存在と厳密な熱力学的取り扱いが必要であることが分かった。

まとめ

このノートでは通常の条件とはかけ離れた原子核物質の代表として、中性子星の性質、特に一次相転移による混合相で現れる「 pasta構造」についての我々の研究成果を説明した。我々はまず、pasta構造をもった物質の状態方程式を定量的に求めることを可能にした。そして観測されている中性子星の最大質量をほぼ再現することができた。低密度物質の場合と同様に、高密度物質でもpasta構造の存在が構成粒子の成分に影響を与えることを明らかにした[13, 14]。高密度物質では、ある密度からストレンジネスを持ったハイペロンがバリオンに混じることが分かっているが、このハイペロンが混じり得る程度に高密度のバリオンとクォークとの混合相を考えると、バリオン相が正の荷電を持つために、ハイペロンの混合が抑制されるのである。これは従来多くの取り扱いで仮定されていた局所的荷電中性の条件が適切でなく、多成分系に対する化学平衡の条件とクーロン力を正確に取り扱った我々の研究で分かったことである。このハイペロン抑制は中性子星の冷

却過程に影響を与える可能性が大きい。

中性子星の理解には核力、クォーク間力など原子核物理の情報を用いた状態方程式が必要であり、また電荷を持つ多成分系としての熱力学的取り扱いにも細心の注意が必要である。我々は現時点で最良の（またはそれに限りなく近い）方法でこれらを取り扱い、混合相の状態方程式やそれが観測データとの比較に与える影響について研究し理解を深めた。

pasta構造の出現は一般的でまた階層的な現象である。そしてpasta構造はただ単に奇妙なだけではなく、天体のマクロな性質に影響を及ぼす可能性もあり、今後、観測事実との関係もより深く理解されるだろう。

参考文献

- [1] S. L. Shapiro and S. A. Teukolsky, *Black Holes, White Dwarfs, and Neutron Stars*, John Wiley & Sons Inc. (1983).
- [2] G. D. Ravenhall, J. C. Pethick and R. J. Wilson, *Phys. Rev. Lett.* **50**, 2066 (1983).
- [3] M. Hashimoto, H. Seki and M. Yamada, *Prog. Theor. Phys.* **71**, 320 (1984).
- [4] K. Oyamatsu, *Nucl. Phys. A* **561**, 431 (1993).
- [5] C. P. Lorenz, D. G. Ravenhall and C. J. Pethick, *Phys. Rev. Lett.* **70**, 379 (1993).
- [6] T. Maruyama, *et al.*, *Phys. Rev. C* **57**, 655 (1998).
- [7] U. E. Gros and M. R. Drizler, *Density Functional Theory*, Plenum (1995).
- [8] T. Maruyama, *et al.*, *Phys. Rev. C* **72**, 015802 (2005).
- [9] T. Maruyama, in preparation.
- [10] T. Maruyama, *et al.*, *Phys. Rev. C* **73**, 035802 (2006).
- [11] M. B. Christiansen, N. K. Glendenning and J. Schaffner-Bielich, *Phys. Rev. C* **62**, 025804 (2000).
- [12] K. N. Glendenning and S. Pei, *Phys. Rev. C* **52**, 2250 (1995).
- [13] T. Maruyama, *et al.* *Phys. Rev. D* **76**, 123015 (2007).
- [14] T. Maruyama, *et al.*, *Phys. Lett. B.* **659**, 192 (2008).
- [15] T. Maruyama, *et al.*, *Recent Res. Devel. in Physics* **7**, 1 (2006).

用語の説明

1. バリオン

陽子や中性子をはじめとするクォーク3個からなる粒子。特に陽子と中性子を核子という。

2. ハドロン

強い相互作用をする粒子の総称。クォーク3個から構成されるバリオンと、クォーク・反クォークから成るメソン(中間子)とに分けられる。

3. ニュートリノ

質量が殆どゼロで電気的中性な素粒子。電子などのレプトンとバリオンとの反応(弱い相互作用)で現れる。

4. ベータ平衡

レプトンとバリオンの弱い相互作用に関する化学平衡。たとえば $n \leftrightarrow p + e^- (+ \bar{\nu})$ 。

5. ハイペロン

ストレンジクォークを含んだバリオン。たとえば Λ や Σ など。