

8) S. G. Brush, H. L. Sahlin and E. Teller, J. Chem. Phys. 45 (1966), 2102.

中 性 子 星 の モ デ ル

京大理 池 内 了

いわゆる中性子星の存在する(安定・不安定に関わらず, 中性子が系の主な物質となつている)領域は, 密度にして $10^{12} \sim 10^{16} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ に渡つてゐるが, この密度領域では, 系の物質の状態は様々であり, 従つて中性子星の構造, モデル, 安定性も密度毎に違つてゐる。

便宜的に, この密度領域を4つに分割し, 各領域での物質の状態, 中性子星のモデル, 及びその系での物理の問題点をまとめると次のようになる。

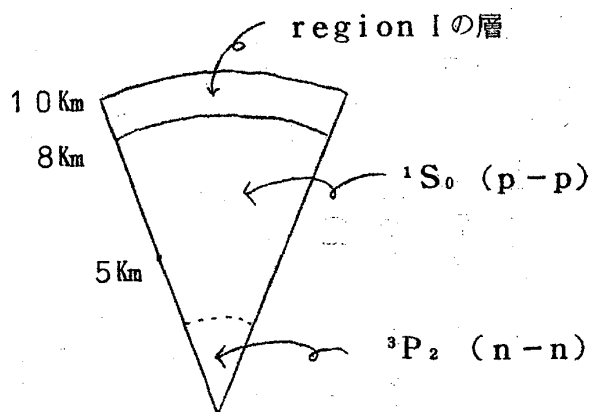
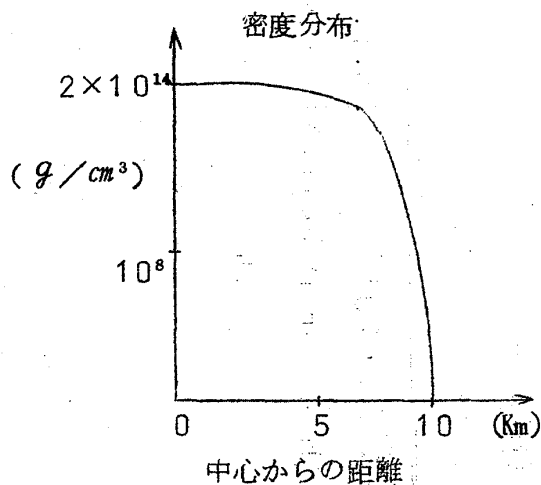
密度領域	物質	Model	特徴・問題点
$\rho \leq (5 \sim 7) \times 10^{13}$ (g cm^{-3}) (Low Density) region (I)	n, e^- n -rich nuclei (不安定) $r \lesssim 4/3$	$R \simeq (500 \sim 10^3) \text{ km}$ $M \sim 1 M_\odot$ (大きなenvelop)	n -rich 核のとりあつかい ($B, E, > 0$) ○ Crystallization ○ q.of state ($n \rightarrow \text{nucleus}$) ○ neutron star の envelope の状態 Cooling
$5 \times 10^{13} \leq \rho \leq 6 \cdot 10^{14}$ (Nuclear Density) region (II)	$n \gg p, e^-$ (安定) $r \sim 5/3$	$R \simeq (10 \sim 50) \text{ km}$ $M = (0.1 \sim 0.5) M_\odot$ (envelope は約 10 km)	○ 核力 $\rightarrow$ eq.of state $\rightarrow$ model ○ Super state ($S_0, 3P_2, \dots$) ○ minimum mass. ($\sim 0.1 M_\odot$) (ほぼ, 理論は確立している) Cooling
$6 \cdot 10^{14} \leq \rho \leq 5 \cdot 10^{15}$ (High Density) region (III)	$n.p.e^-, \mu \gg \Sigma, \Lambda$ (安定) $r \gtrsim 4/3$	$R \simeq (5 \sim 7) \text{ km}$ $M = (0.5 \sim 1 \sim 3) M_\odot$	○ hyperon threshold ○ eq.of state (核力?) ○ maximum mass ($1 \sim 3 M_\odot$)
$\rho \geq 25 \cdot 10^{15}$ (Hyperon Density) region (IV)	$n.p.e^-, \Sigma, \Lambda, \dots$ (不定定)? 一般相対論による		○ hyperon star ○ Schwarzschild singularity

従つて、物性物理的な興味から見ると、region I 及び II における物質の状態とそれに関連した星の cooling の問題に焦点があてられ、pulsar と関連した問題では、中性子星が安定に存在するという意味で、region II, III の諸性質を調べておくことが必要である。

先ず、region I は、中性子（非相対論的に縮退している）の海に、n-rich 核（ $A \sim 100$ ）が漂っているという状態として考えられる。密度と共に核を溶かすために（相転移）系は安定でない（ $r < 4/3$ ）。この時、これらの核が格子を組んで crystalization している可能性がある。この系の最低エネルギー状態を求めるには、中性子と核の間の相互作用を知ることが必要であるが、現在これについては、わかつていない。

又、region I の密度領域は、region II, III の安定な中性子星の外部層（envelope）の領域であり、observational な側面から調べておくことも必要である。例えば、特殊な核の x , r による測定、コアの回転に対し外層はどうなるか？— star-quake, 回転周期の伸び— crystal の有無で cooling rate はどう変るか？対流のようなものは存在しないか？質量が落ちてきて降り積もる（mass accretion）とどのような現象を起こすか？等々。現在、このような面での研究は、少いようである。

region II の中性子星は、比較的単純な構造をしており、概念的に次のように表わされる。



安定な中性子星の minimum mass は、約 $0.1 M_{\odot}$ で中心密度は、 $\sim 7 \times 10^{13} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ にあたる。このあたりではまだ、巨大な (100 km くらいの) 外層を持っている。中心密度が、核物質の密度に近づくと共に、上の図のように、ほぼ、密度一定のコアと、うすい外層の部分から或る単純な構造を示し、半径は、約 10 km 、質量は、高々 $0.5 M_{\odot}$ くらいである。

このような中性子星の構造、モデルをつくるには、核子間の相互作用 (核力) の知識とその多体問題的な取扱いを経て、系の物質の状態方程式を確立しておく必要がある。現在まで、ほぼ、region II の全領域、及び region III の一部 ($\sim 10^{15} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) までは、理論的に確立したモデルであると言える。

この領域では、中性子間の 3P_2 の super - state はほぼ実現されることがわかつているが、数% 存在する陽子が果たしてどういう役割を果たすか今のところ明らかでない。いずれにしても、核子間引力による super - state が、回転や cooling の問題 (比熱や ν - loss) にどう effect するか重要である。

region III は、核力の知識 (特に、hard core) 多体問題的な取り扱い (相対論的な縮退、斥力が大きくなるための計算上のむづかしさ) において、必ずしも万全とは言えないし、又ハイペロン (Λ , Σ , $\Xi \dots$) も混在してくる。中性子星の maximum mass (一般相対論の効果による) は、この領域にあり、上の理論的な取り扱いのむづかしさから、必ずしも正しい結論ではないが、 $1 \sim 3 M_{\odot}$ の範囲にある。この領域では、半径は、 $5 \sim 7 \text{ km}$ で、外層部は、わずかに数 m というモデルになる。

region IV は、今のところ皆目系の状態について何もわかっていない。中性子星の maximum mass より大きいコアの星は、進化の最終段階としてこの領域へ進んでゆくだらうと予想されている。

以上のような中性子星の静的なモデルの上に立つて、中性子星の観測 - 特に、pulsar との関連 - について考えてみよう。(以下余談)

中性子星が回転しているというイメージは、星は、殆んどすべてこれくらいの角運動量を持つており、むしろ自然である。回転による遠心力の大きさは、重力の $1/100$ 以下であり、上に考えてきた構造は変わることはない。

中性子星の表面は、薄い層ではあるが、温度差も大きく、外からの mass のふりつもらも考えられるので、何らかの active な状況にあると思われる。(これを X-star のモデルとして考えることもできる。)もし、そこに強い磁場が存在すれば、粒子の加速、強い輻射機構も充分考えられる。つまり、輻射の場所とその状態をつくり出している原因(磁場、回転、エネルギー・ソース)とを明らかにすることによつて pulsar の機構について、かなりはつきりしたイメージが持てると思われる。いずれにしても、中性子星のモデルと結びついた中性子星本体の問題と中性子の表面や廻りの状態(プラズマ、電磁流体)の両面を明らかにしなければならない。

(reference)

H. A. Bethe, G. Börner and K. Sato, *Astroph. and Astron.* 7('70)279.

S. Ikeuchi, S. Nagata, T. Mizutani and K. Nakazawa

(pre - print)

..... Neutron Star 形成と進化の問題

京大理 佐 藤 勝 彦

報告された内容は、報告をまとめる際、最初の Introduction - 中性子星について - に含められていますので、それを参照下さい。