

10. 物質の極限的状态

京大・基研 佐藤 文 隆

宇宙では超高密度とか超高温とかいう物質の極限的状态が実現されている。そして宇宙現象はマクロな現象だからそういう極限的状态での統計力学や物性が問題となる。§ 2以下に、そうした問題のうち私の個人的関心事のいくつかを紹介するが、この選択は必ずしも宇宙物理屋にとって共通のものではないことはお断わりしておく。物性論が関係した宇宙の問題として標準的なのは dust から惑星にいたる固体的天体の問題か白色矮星、中性子星といった高密度星の問題であるが、以下に記した問題点はそうした standard な関連問題からはみ出したものである。

§ 1 には少し一般的な解説をつけたが、全体としてまとまりがつかなくなった点はおゆるし頂きたい。

§1. 宇宙での物質と輻射

図 1 は密度 ρ と温度 T の diagram の上に宇宙の種々な状態を示したものである。これから分るように、地上の物質の状態から極端にずれた場合が宇宙物理ではよく出てくる。しかし、現在の物理の理論は相当に広い領域をカバーしており、実験できないような状態をも案外気軽に扱っている。あるいは、理論では理想的条件を仮定しているがそういうことが宇宙の方でよりよく満たされている場合も多い。例えば、星間ガスの熱い領域と冷い領域の間では水素や He の recombination がおこっているが、それが主量子数 n が非常に大きいレベル間の遷移が電波の線スペクトルで観測されている。例えば n が 10^4 から 10^3 、あるいは 166 のが 165 へといった遷移である。また電波天文学では最もポピュラーな H の 21 cm の line をはじめ多くの fine structure line や hyper fine structure line なども星間のような稀薄な状態のみで輻射となって観測されるものである。

第 1 図に戻って、この温度というのは物質のそれである。星の内部のような dense などところを別にすれば宇宙の多くの領域では物質と輻射とは熱平衡を達成していない。エネルギーは星から星間空間へ、星間空間から銀河間空間へとたれ流しているが、その反作用を

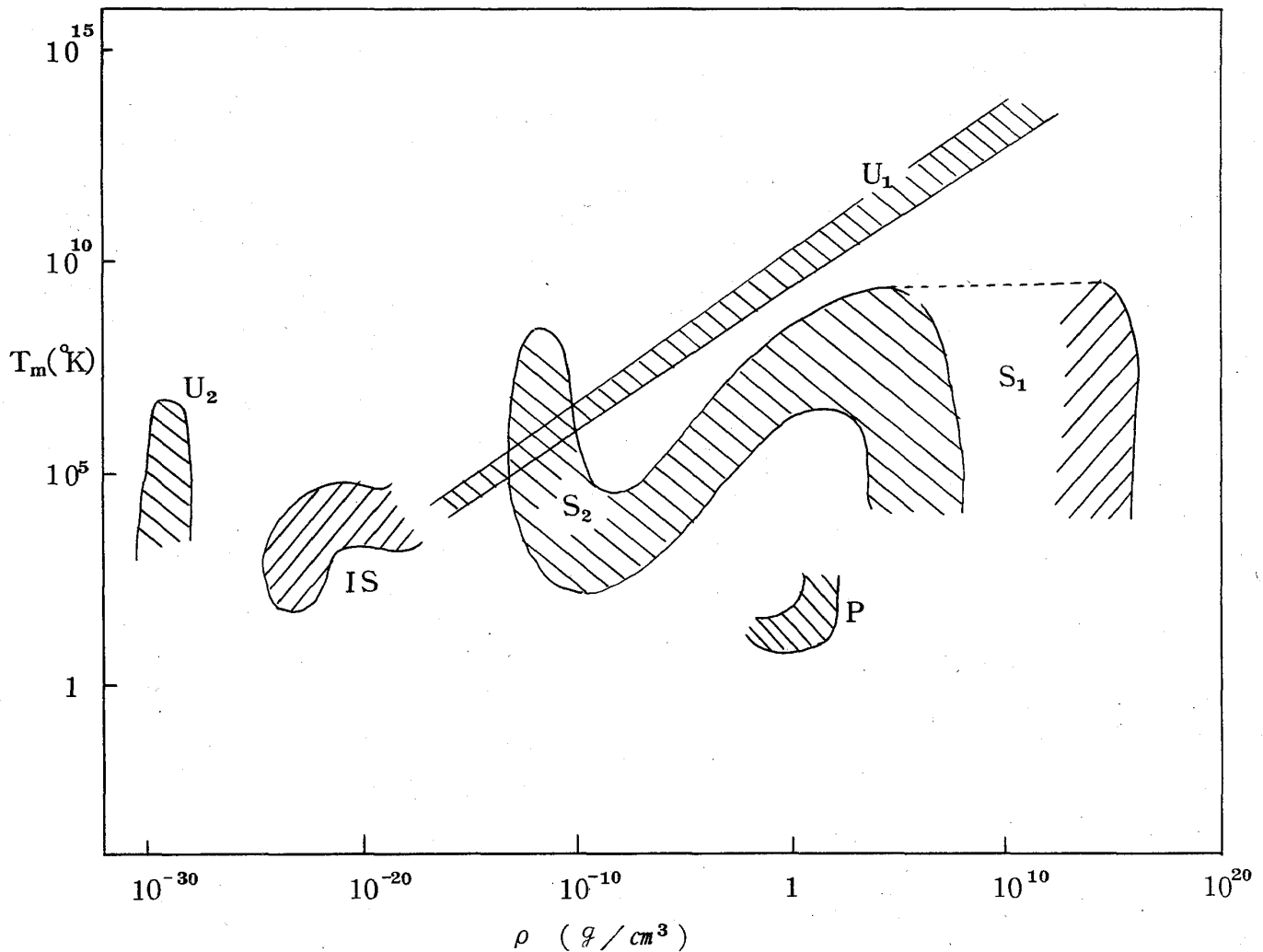


図1 宇宙の物質密度 ρ_m と温度 T_m 。星の中心部 S_1 ，星の大気部 S_2 ，星間ガス IS ，惑星 P ，膨脹宇宙初期 U_1 ，銀河系間空間 U_2 。

受けてはいない。このことをもっと原理的問題として考えれば，膨脹宇宙と時間のarrowの関係はいかにという問題にまでエスカレートするのであるが，¹⁾ 常識的にはそこまで考えずに，膨脹宇宙論というのは今から約 10^{10} 年前にはじまったばかりでそれ以来十分時間が経っていないから「熱の死」に達していないと考えれば十分であろう。

熱平衡に達していないことを反映して星間空間や銀河間空間には各種の天体からの輻射が入り乱れて飛びかっている。その上，太陽のような標準的星は可視光で主づエネルギーを放出するが10年程前から次々に発見されてきた新天体は電波，赤外線，X線などでエネルギーを主に出している場合が多い。（第一表，第二表参照）さらに，放出の過程自体が熱的過程でない場合が多い。

第一表 星間空間の平均的场所における輻射のエネルギー flux

	erg/cm ² sec
光子 電波 (m波)	10^{-10}
マイクロ波	$10^{-3.5}$
赤外線	10^{-5}
可視光	10^{-3}
X線	10^{-7}
ニュートリノ	10^{-5}
宇宙線 (粒子線)	10^{-3}
重力波*	10^4

* Weber の重力検出器にかかった flux で必ずしも定常的にあるものでない。比較のため地球上での太陽光の flux をあげると 10^6 である。

第二表 天体からの輻射の相対的強度。可視光を1とした時のオーダーを示す

	電波	赤外	可視	X線
太陽	10^{-15}		1	10^{-9}
カニ星雲	10^{-2}		1	10
パルサー	10^{-2}		1	10^2
銀河 (平均)	10^{-7}	10^{-2}	1	10^{-4}
Q S O	10^{-3}	10	1	10^{-1}

§ 2. 黒体輻射の Bose Condensation

物質と熱平衡にある黒体輻射は通常 Planck 分布であると考えられている。Planck 分布は一般の Bose 分布が含む化学 Potential がゼロの場合になっている。この制限は光子の生成、消滅が十分短時間でおこるという条件からきている。通常の比較的密度の高い状態では物質と輻射のエネルギー交換は光の吸収、放出の過程を通じて行われる。すなわち、光子のエネルギーの調整と光子の数の調整が同時に行われているのである。しかし、輻射と物質との相互作用はいつでもこの調整を同時に行うとはかぎらない。電離気体では Compton 散乱でエネルギーのやりとりは行なわれるがこの過程では光子の数は保存される。(double Compton 散乱を無視して。) 吸収—放出過程 (これを天体の方では free free transition という) と Compton 過程の早さを比較すると前者は $n_e n_i$ 、後者は n_e に比例する。(n_e は電子密度, n_i はイオン密度) このため密度を小さくしていくと Compton 過程の方が十分早くなる。Compton 過程はまた温度が大きくなればより早くなるから高温 (ただし $kT < m_e c^2$) で稀薄な場合はエネルギーの平衡は達成されるが光子の数の化学平衡は達成されないという黒体輻射が出現する。

こういう状態は実際に熱い宇宙の初期や X 線星の大気などにおいて実現されている。²⁾

こうした場合は光子数は与えられた定数になり、それに対応して化学 Potential はゼロでなくなる。上記の実際の場合で問題になるのは物質の温度のわりには光子の数が少ない場合である。すなわち、分布を

$$n = \frac{1}{\exp \{ (E - \mu) / kT \} - 1}$$

とかけば $\mu < 0$ の場合である。この場合は縮退の効果がない場合で光子も Boltzmann 分布になるとしてよい場合である。それに反し光子の数のわりには物質の温度が小さい場合、すなわち $\mu > 0$ の場合には量子的効果があらわれる。³⁾ 通常こういう場合には $E = 0$ の状態との Bose condensation がおこる。こういうことが光子の場合もおこるかどうか問題である。

若干の考察によると Bose condensation していく過程が初期のエネルギー分布関数につよく依存し、ある場合には分布関数の変化が shock wave の形をとって変化していくことや、Bose condensation で E がゼロにいく途中で吸収過程（この速さは E^{-2} に比例）が効いてくるらしいとの結論が得られている。

§3. 巨大量子系

最近は中性子星の構造というのが普通の星の構造よりも多くの物理屋にポピュラーになったかの観があるが、星そのものを一つの量子力学的系として扱おうと思えば何んでも ground state から考え初める物理屋にとっては太陽の構造は分らないが中性子星の構造は分ると云わす理由がないわけではない。確かに 10^{57} 個程の粒子から成る系の ground state が中性子星で、その excited state が太陽とかの星である。

しかし、通常はこういう見方では貫徹さしてはいない。例えば中性子星の構造でもこれ全体を1つの量子力学的系と見るのではなく、局所的にマクロな物質としての状態方程式を作り上げて、これを流体力学的なつり合いの式に入れて星の平衡解は解かれる。この前提は系の大きさが de Broglie 波長に比して大きいということである。しかしこのような仮定は Boson から成る仮想的星の ground state を考えるさいには満足されない。この Boson 星では状態方程式の考えでいけば圧力はゼロであるから平衡解になく、重力的に collapse するはずである。しかし、量子力学的系と考えればゼロ点振動に対応する圧力

が発生して平衡解はあることになる。もちろん、中性子星も Fermion から成る巨大量子系の ground state して解ける。⁴⁾ 具体的には重力が Newtonian でよい時には原子の Thomas-Fermi model と同様な解き方をする。また重力を一般相対論的にやる時も Boson 場や Fermi 場は第2量子化するが重力場はメトリックに量子化しないで入れるというやり方で解く。このようにして中性子星の場合は状態方程式流のやり方と殆んど同一の結果が得られる。例えば平衡状態として可能な粒子数の上限は

$$\text{Fermion の場合} \quad N_{\text{crit}} \sim (m_*/m)^3$$

$$\text{Boson の場合} \quad N_{\text{crit}} \sim (m_*/m)^2$$

となる。ここで m_* は Planck mass $m_* = (\hbar c/G)^{1/2} \sim 10^{-5} \text{ g}$, m は構成要素の Fermi 又は Bose 粒子の質量。

このように温度ゼロの星を量子系として扱った研究は少なく、しかも要素は一成分としてやっている。しかし白色矮星の場合などは圧力は電子で重力は陽子に働き、両者の間は Coulomb 力でひっつけられているという少し複雑な構造になっている。こういう系を量子系としてちゃんと扱ったものはまだない。また ground state は分ったとしても excited state の考え方をどのようにしていくのか見当もつかない。

§4. 核子 — 反核子ガスの Phase transition

宇宙論では物質と反物質の対称性を回復しようとする試みが何回かくりかえされてきている。この場合、問題となるのは現在の世界が少なくとも local には物質である以上物質と反物質が等量あったとすればそれらを空間的に分離するメカニズムが有効に働くかどうかということである。Omnes という素粒子をやっている人はこの問題について、熱い宇宙の初期で(温度が約 300 MeV 近辺で)核子と反核子が一様に混合した状態は不安定で核子が主な領域と反核子が主な領域とに分離するという、一種の Phase transition がおけると主張している。⁵⁾ 彼は二議論を核子 — 反核子間の相互作用を考慮して Virial 係数の方法でこの不完全気体を扱うというやり方をとって行う。

Beth-Uhlenbeck 理論というのがあるが Virial 係数を散乱の phase shift で書くということが行われているが、最近これを相対論的にして phase shift の代りに(物理的には同じことだが) S-matrix を使うという形に定式化し直している。この formulation は素粒子間の相互作用を考慮した超高温のあまり高密度でない不完全気体の理論に今

佐藤文隆

後適用すべきものとするが、例えば resonance particle を含む系の統計力学を我々も最近扱ってみた。⁶⁾ 核子-反核子系の統計力学も素粒子の散乱理論での結果と密接に結びついて議論できるわけである。

Omnes は系の free energy F_0 を完全気体のものとして

$$F = F_0(N, T) + F(\bar{N}, T) + a kT(N + \bar{N}) + b kT \frac{N\bar{N}}{V}$$

と書いた時 b が正である値より大きければ、核子と反核子が分離した方が F が小さくなることを示したのである。しかし、こういう場合どの程度の大きさ（空間のスケール及び非一様の程度）で分離するものが、それはどういう理論できめたらよいのか、ぜひ知りたいものである。

§5. 強磁場中の物性

地上では、強磁場の限度は当分は $10^5 \sim 10^6$ gauss ぐらいであるが、天体では白色矮星で 10^7 gauss, 中性子星では 10^{13} gauss 以上の磁場が期待できる。このような磁場になれば原子の構造も大きく変るし、また密度の高い縮退ガスの状態方程式も変る。⁷⁾ 例えば Larmor 半径が de Broglie 波長よりも短くなるような場合、すなわち

$$\frac{\beta^2}{1 - \beta^2} < 2\pi \frac{H}{H_q}$$

ただし $H_q = m^2 c^3 / e\hbar = 4.4 \times 10^{13}$ gauss, $\beta = v/c$, には回転運動は量子化が必要となる。また H が H_q になるということは

$$\frac{e\hbar}{mc} H_q = mc^2$$

から分るように電子の magnetic moment による静的エネルギーが mc^2 程度になることを意味している。従って spin 逆転によって電子対が創生されないかという議論もあるが、anomalous magnetic moment の形が強磁場中でも不変なら $H \sim H_q / \alpha$ ($\alpha = e^2 / \hbar c$) 以上では電子対創生がおこる。しかしこれも magnetic moment 不変の仮定がよくないようでおこらないではないかということになっているらしい。

強磁場中での原子スペクトルの大きなずれは比較的現実の問題で白色矮星は昔から通常のスペクトルパターンに合わないものが発見されている。さらに強磁場中での chemistry がどのように変って分子形成などにどのような effect を与えるかは興味あることである。

§6. 最大温度

素粒子の rest mass 程度に温度が上昇したり、高密度による Fermi エネルギーが大きくなると次々と重い素粒子が創生されてくる。すなわちエネルギー密度のある部分は必ず静止質量で占められている。ところで、色々の質量の素粒子（特に強い相互作用する hadron）の種類がどのように分布するかをきめる mass spectrum $\rho(m)$ は m とともに急に大きくなる傾向にある、Hagedorn という素粒子の人が Pion 発生の実験などを説明する一つのモデルとして、mass spectrum が

$$\rho(m) \sim c m^a e^{b m}$$

であるような理論を提出した。こういう系の統計力学を分析してみると $T_0 \sim b^{-1}$ 程度の温度以上には温度が上昇しないことが分る。特に $a < -5/2$ の場合にはあるエネルギー密度以上では比熱が負になる。⁸⁾

素粒子の実験の方からいうと $T_0 \sim 300 \text{ MeV}$ 程度である。こういう超高温は実際には熱い宇宙の初期や超新星爆発などに実現される。現実の mass spectrum が上記のようであるかどうかは素粒子の問題であるが、こうした仮定を統計力学的に処理して天体的なマクロな現象と比較できるようになる可能性が存在するという 1 例である。

references

- 1) B. Gal-Or, Science 176 (1972), 11 (No. 4030).
- 2) H. Sato, T. Mastuda and H. Takeda, Prog. Theor. Phys. Supple. No. 49, 11.
- 3) Ya. B. Zeldovich and E. V. Levich, Soviet Phys. JETP 28 (1969), 1287.
- 4) R. Ruffini and S. Bonazzola, Phys. Rev. 187 (1969), 1767.

佐藤文隆

- 5) R. Omnés, Phys. Reports 3c (1972), No.1.
- 6) A. Tomimastu and H. Sato, Prog. Theor. Phys. 47 (1972), 819
- 7) V. Canuto and H. Y. Chiu, Space Science Reviews Vol 12 (1971), 3.
- 8) R. Hagedron, Astron. Astrophys. 5 (1970), 184.
K. Huang and S. Weinberg, Phys. Rev. Letters 25 (1970), 895.
R. D. Corlitz, Hadronic matter at High Density, Princeton プレプ
リ。