

量子多体系の気体液体相転移

----- 広い立場から見た原子核 -----

國府俊一郎（高知大教育）

原子核は Fermion である核子が高い密度で凝集した液滴である。にも拘わらず Fermi 統計による反発力の為、その励起準位を見ればあたかも気体であるかのような振る舞いを示す。また理論を展開する上では液体よりは気体の方がはるかに容易であるから、この2つは都合良く合致し、我々は気体としての理論的扱いを違和感なく当然の事としてきた。しかし目の前にある核を出発点にするのではなく、逆に「陽子と中性子のガス」を出発点にして考えてみると、そもそも「なぜ陽子と中性子は凝集して核として存在しているのか？」という点こそが不思議な謎である。実験的には重い核同志の衝突によって fragmentation が起き、気体液体転移の兆候が見えるか？という点が今日の1つの興味の焦点になっている。しかし先の出発点を逆にした立場からは見れば「核とはすでに液体になってしまった結果」なのであり、「なぜ気体液体転移が起きたのか？」という点こそが説明を要する事実である。この様な立場から核を眺めると、どのような問題がそこに浮かんでくるか？を述べてみたい。通常は我々は核は絶対零度にあるとして扱うが、より広い環境に原子核を置くという意味で仮想的に有限温度の環境の中に核を置き、その中で安定性を論じることにする。

はじめに1種類の Fermion の気体があるとしよう。そこに引力が働いた時に、液体に転移するであろうか？古典気体の気体液体転移は統計力学の古くからの難問である。現実の世界では身近に気体液体転移は起きているにもかかわらず、これを簡明に説明するのは今でも難しい。しかし量子統計が働く場合は、ある意味では古典統計の場合よりもむしろ簡単になる。Fermion の気体では Fermi 統計により粒子が接近すると強い反発力が働く。したがって簡単な2体力の引力しか働かない場合 (BCS 模型はそれに当る) は、Fermion の気体をいかに低温高密度にしても気体液体転移は起きない。この事は大分配関数が Yang-Lee の zero を持たない事により証明できる (Koh, 1997)。

この結果は核の中で働いている引力は多体的な引力である可能性を示唆している。それでは多体的な引力が働きあう Fermion の気体の模型で、その大分配関数を求めてそれが Yang-Lee の zero を持つ事を証明できるか？となるとこれ

はたいへん難しい問題である。我々理論家は「2体力である事により初めて可能になった簡単化」を今まで享受してきた訳であるから、多体力になった場合の困難さは容易に想像出来るであろう。

以上の方向を言わば正攻法とすれば、出発点を少し変えて核子はすでに2つ集まって Boson として振る舞うという立場から始める事もできる。これは別に現実離れした立場ではない。周知のように核には強い alpha 相関があり、これは多体的な引力の存在を強く指し示している (Koh,1993)。さらに昔から「核とは Boson である alpha particle が凝集したもの」とみなす立場もある。また valence shell に話を限れば、相互作用する Boson 模型は多くの実験を説明する。Boson の気体に簡単な2体の引力が働く模型でその大分配関数を求めることは可能である。系の温度を下げ密度を上げていくと Yang-Lee の zero を持つ事を証明でき、必ず気体は液体に転移すると結論出来る (Koh, 2001)。この時の温度と密度は Bose 凝縮が起きる条件よりも、ずっと高温低密度である。Boson の気体で気体液体転移が起きるには Bose 凝縮は必要条件ではなく、Bose 統計こそが必要条件である。

現実の核は以上2つの立場の中間にあって、Fermi 統計を基本としながら Bose 統計の要素も混じりあう多体系であると言えそうである。しかしながら引力を少しでも現実的な形にすると、とたんに大分配関数を求めることが難しくなり、現実に核が液体として存在している事実の統計力学的根拠を示すことは簡単な課題ではない。

以上の議論は QGP-Hadron 相図における Hadron 相の中で、さらに Hadron plasma と核領域を分かち境界線を引く際に現実の問題になる。ただし以上はすべて熱平衡状態のはなしであって、実験で問題になる極端な非平衡状態とは直接には繋がらない。ただし非平衡状態を論じる基礎としては、その背後にはどんな平衡状態が控えているのかを知る事は大切である。

S.Koh Nuclear Physics. A. **560**, (1993) 797-810

S.Koh Physics Letters. A **229** (1997) 59-62

S.Koh Physicl.Review. **B64** (2001), 134529, **B65** (2002), 019901 (E)