

■量子分子動力学による ハドロン物質の研究



極限ハドロン科学研究グループ

■千葉 敏 ■

1. はじめに

地球や我々の体を構成する元素は、太陽系が作られるよりはるか以前に星の中において核融合反応で作られ、超新星爆発に伴う合成を経て宇宙空間に放出され、気の遠くなるほど長い間宇宙をさまよって来たものである。その意味で超新星爆発は我々の生みの親と言えるが、一方、超新星爆発の多くは中心部に特異な天体、中性子星やブラックホールを形成する。このうち中性子星は中性子、陽子、電子や中間子等からなる小さな星で、ハドロン物質の極限的な存在形態の一つである。

一般に陽子や中性子、パイ中間子など、強い相互作用をする粒子（ハドロン）からなる物質をハドロン物質、あるいは核物質と呼ぶ。原子核は陽子と中性子からなる典型的なハドロン物質で、どの原子核もだいたい同じ密度（飽和核密度、 $\rho_0 = 2.8 \times 10^{14} [\text{g/cm}^3]$ ）を持ち、同じ様な形をしている（核物質の飽和性）。また、質量数はせいぜい300、中性子と陽子の比は1から1.6程度で、この範囲から大きくはずれるものは不安定になるため天然には存在しない。

このような微視的な原子核の世界に対し、超新星の中心部や中性子星は巨視的なハドロン物質の系である。中性子星の半径は約10kmで、主として中性子からできており、中心密度は飽和核密度の数倍あるが、表面付近はそれよりずっと低い密度になっている。低密度の核物質の性質は、超新星爆発の強度を左右するニュートリノの輸送率を見積もったり、パルサーのグリッチやバースト現象を理解する上で重要な役割を果

たすことが知られている。一方、中性子星の深淵部にある密度の高い部分では、中間子の凝縮相が出現したり、高密度に圧縮された核子同士が融合してクオーカとグルーオンのプラズマ状態へ相転移していることが期待される。

巨視的なハドロン物質、たとえば中性子星は、見方を変えると質量数が 10^{37} という超重核であり、また内部はほとんどが中性子という中性子過剰の状態にある原子核である。このため、巨大ハドロン物質は、実験室では実現できない極限状態にあるハドロン多体系として、天体物理のみならず核物理分野においても多岐にわたって興味が持たれている。巨視的なハドロン多体系の場合は、飽和核密度以外の部分が占める割合が大きく、その部分の理解が本質的に重要である。しかしながら、このような飽和核密度以外における核物質の性質には未知な事項が多く、さらなる理解が必要である。

我々はこのような極限状態にあるハドロン多体系の研究を行い、独自の手法と成果からの原子核現象の新しい理解をめざす。

2. 量子分子動力学によるハドロン物質の研究

当グループでは、中間エネルギー重イオン衝突の分野で1980年代後半から発展してきた量子分子動力学（Quantum Molecular Dynamics、QMDと略）の手法を用いてハドロン物質を研究する。重イオン核反応では、現象を理解するために重要な二つの要素として、平均場と衝突項が挙げられる。従来のこの分野で

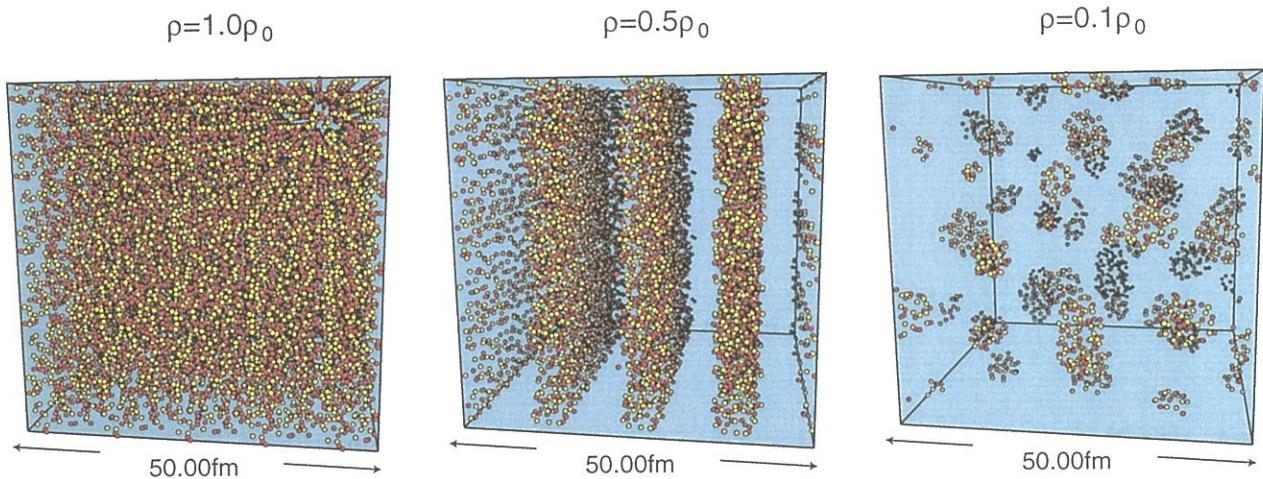


図1 量子分子動力学で計算した低密度核物質の構造
赤丸が陽子、黄色が中性子。 ρ_0 は飽和核密度 ($=2.8 \times 10^{14} \text{g/cm}^3$)。

用いられてきた理論は、多くの場合これら二つの要素のうち一つだけを含むが、我々はQMDが両方の効果を含み、かつフラグメンテーション、すなわち核子分布の非等方性や非一様性まで記述できる理論として注目している。

QMDでは、通常の分子動力学と同様、初期に仮定した核子分布から出発して、2粒子間相互作用に基づいて核子分布の時間変化を古典力学のハミルトン方程式より決定していく。モデルハミルトニアンは運動エネルギー項とクーロン力及び核力の二体相互作用による。ただし、通常の分子動力学では粒子は点であるのに対し、QMDでは粒子をガウス波束と仮定する。また、核子はフェルミ粒子であるので、パウリ排他原理の効果を考慮する必要がある。さらに2つの粒子がある距離より近づいた場合は、カスケードモデルと同様の二体衝突が起こるとして、終状態をパウリ原理を満たすように決定する。この衝突項の存在も通常の分子動力学との違いであり、これにより初期状態に存在しない新しい粒子が生成する。これらの新顔粒子も相互作用に寄与するし、新たな二体衝突も起こす。

我々のグループでは、QMDの手法を無限核物質に適用して、その構造の非一様性や関連する相転移、フラグメンテーションについての理解を深めることを第一の目的としている。このために核子を立方体の中に

配置し、かつ周期的境界条件を課すことで無限核物質を模擬する。さらに、絶対零度における核物質の性質を探るため、運動方程式に摩擦項を導入して系を冷却し、最低エネルギー状態を求める¹⁾。

図1に、この方法で得られた陽子数と中性子数の等しい無限核物質の構造を、密度 ρ をパラメータとして示す。飽和核密度 ($\rho = \rho_0$) 近傍は核子が非常に密につまつた状態で、その分布は一様であることが分かる。一方、密度が $0.5\rho_0$ 程度より低くなると核子分布に劇的な変化が起こり、板や球といった構造が現れて来る。このような構造の変化は、中性子星の表面構造と関連して従来の研究でも定性的には予想、あるいは仮定されていたが、この分子動力学を用いた研究では、ランダムな初期配位から出発して実際にこれらの構造が安定状態として出現することが示された。また、構造が完全には規則的でなかったり、小さな粒子が混在している等の新しい結果を得ることもできた。さらに、ある一定の密度領域で、異なる幾何学的配置がほとんど等しいエネルギーを与えることも分かってきた。また、同様な方法で膨張する核物質をシミュレートすることで、一様構造から非一様構造への動的変化の様相についても興味深い結果が得られつつある。

3. 量子分子動力学による核反応の研究

ところで、QMDの手法は通常の核反応に対しても新しい視点からの研究を可能にする。一例として、図1, 2の計算に用いたものと同じ有効相互作用を用いて、 ^{238}U に400MeVの中性子が入射した場合に起こる核分裂反応の時間発展を計算したものを図2に示す。 $t=0\text{ fm}/c$ は反応が起こる前の状態で、 $t=200\text{ fm}/c$ では前平衡粒子は全て放出されており、残留核に約170MeVの励起エネルギーが付与された状態となっている。その後、長い時間をかけて熱平衡状態が達成され、次いで鉄亜鉛型の中間状態を経て最終的に2つのほぼ等しい原子核に分裂する様子が生きしく記述されている。この過程では、1) 安定な原子核基底状態が、2) 外部から入射する粒子によって励起され、3) 励起エネルギーが熱エネルギーに転化し、4) 平

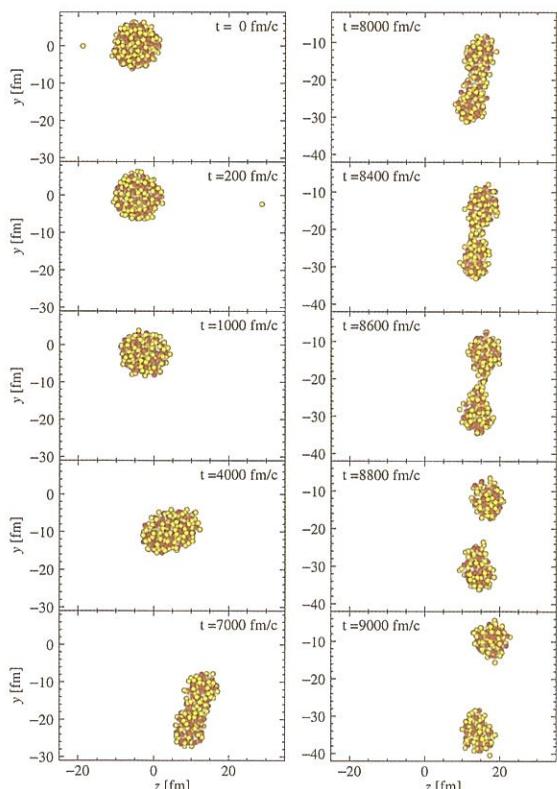


図2 量子分子動力学による、400MeV中性子と ^{238}U との反応の時間発展
赤丸が陽子、黄色が中性子。 $1\text{ fm}/c$ は $3 \times 10^{-24}\text{秒}$ に相当。時間ステップが等間隔でないことに注意。

均場が変化（変形度の関数としてのポテンシャルバリアの低下）して、5) クーロン反発力によるサドル点の通過、という時系列によって核分裂まで至る。このうち、1), 4), 5) は主として平均場効果、2), 3) は主として衝突項の効果であり、核反応を記述するモデルとしてこの二つの効果を併せ持つQMDの有効性を示すものと言える。核反応により誘起される核分裂を多体論的に扱える理論は他に存在せず、このような分野においても独自の成果をめざしている。

4. おわりに

複雑なハドロン多体系の性質解明のために、一見両極端とも言える極微の原子核からのアプローチと巨大な天体からのアプローチを併用することは非常に有効である。量子分子動力学は本質的には古典的な理論であるという制約はあるものの、ハドロン多体系の両極限条件におけるシミュレーションを同じ枠組みでできる極めてユニークな手法であり、かつ複雑な形状や動的変化、様々な温度にも対応できるなどの利点を有している。当グループでは今後、この方法を用いて中性子星の冷却過程や超新星爆発のメカニズム、パルサー・グリッチ等についても、独自の像を描きたいと希望している。

参考文献

- 1) T. Maruyama, K. Niita, K. Oyamatsu, T. Maruyama, S. Chiba, A. Iwamoto, Phys. Rev. C57, (1998) 655.