

## ■クォーク多体系の分子動力学

極限ハドロン科学研究グループ ■丸山敏毅■

### Molecular Dynamics Simulation for Quark Many-body Systems

Toshiki MARUYAMA  
Research Group for Hadron Science

We propose a microscopic simulation for quark many-body systems based on molecular dynamics. Using the confinement potential, the one-gluon exchange potential and the meson exchange potentials, we can construct color-singlet nucleons, nuclei and also an infinite nuclear/quark matter. Statistical features and the dynamical change between confinement and deconfinement phases are studied with this molecular dynamics simulation.

#### 1. はじめに

クォークは物質を構成する最も基本的な粒子の1つである。中性子や陽子のようなバリオンは、3つのクォークがグルーオンという媒介粒子によって結合したものであり、 $\pi$ 粒子や $K$ 粒子のようなメソンは、1対のクォークと反クォークが結びついて出来ている。クォークの特殊性は、通常、単独の粒子として観測されない（閉じ込め）という点にある。これは、クォーク間には、遠く引き離すには事実上無限のエネルギーが要するような、非常に強い引力が働いているためと考えられている。また、無理に引き離そうとしても、相互作用を遮蔽するように新たなクォーク反クォーク( $q\bar{q}$ )の対生成が起きてしまって、単独なクォークは存在出来ない。このようなクォークに特有な現象は、クォークをSU(3)群の基本表現として扱うQCD(量子色力学)によって記述される。それによると、クォークには赤緑青の3つの色電荷があり、異なる色の3つのクォークが組になったバリオンや、同色のクォーク反クォークで組になったメソン、すなわち“白色”の状態としてのみ存在できる。最近クォークに関連した

研究が理論的にも実験的にも盛んに行われている。特に、高温または高密度状態においてクォークの閉じ込めが解けたクォーク・グルーオンプラズマ(QGP)[1]の存在が理論的に予言されてからは、超高エネルギーでの重イオン衝突実験が進められている。また天体物理の分野でも、中性子星内部にバリオンが“溶けた”クォーク物質が存在し、さらにそれが球状や棒状などの特殊な構造を持つのではないかという議論[2]がされたり、天体全体がクォーク物質からなる“クォーク星”の発見[3]が伝えられるなど、様々な形で注目されている。

理論的枠組みとしては先に述べたQCDを時空の格子で数値的に計算する格子QCDによる研究が急速に進展しており、ハドロンの質量や高温での相転移などが計算できるようになっている。しかし、高密度物質やハドロンの多体系のダイナミクスを計算できるまでには至っていない。

現在広い分野で分子動力学シミュレーションが盛んに行われているが、原子核物理の分野でも核反応や核構造の計算に核子を構成粒子とした分子動力学計算が行われている。電子系のシミュレーションと異なり、

基本となる核子間相互作用がまだ十分に分かっていないという難しさはあるものの、分子動力学による原子核の研究は、研究対象である原子核の構造や反応機構を仮定せずにその研究が出来るという特徴によって、様々な成功を収めている。この分子動力学を、クォークを構成粒子とした枠組みに発展させることが出来ると、原子核の構造やダイナミクスをさらに広範囲に研究することが可能となる。クォーク3つが、どのようにして陽子や中性子をつくるのか？それらが寄り集まってどのように原子核ができていくのか？原子核中では、クォークは動き回っていないのか？原子核衝突でクォークが現れる様子、中性子星内部での物質の構造、など、原子核構造から高エネルギー重イオン衝突、さらには中性子星まで、クォークの立場から統一的に研究しようというのが我々の目指すところである。

## 2. カラー分子動力学

クォーク系に分子動力学を適用しようとするとき、いくつかの点に注意しておくべきである。

まずクォークの質量である。実はクォークの“質量”と言うとき2種類あり、一つはクォークそのものの質量で数 MeV と軽い current mass、もう一つはクォークとその周りのグルーオンを入れた constituent mass とよばれ、 $u$ クォークや $d$ クォークでは核子質量の約3分の1である。これはクォークの質量の問題というよりも、クォークを裸の粒子として扱うか、グルーオンを伴ったものとして扱うかの問題と言って良い。我々の分子動力学ではグルーオンを顕わには扱わないので、後者の constituent 描像を用いる。

次に相互作用であるが、閉じ込めを引き起こしているのは距離に比例した閉じ込めポテンシャルである。これはクォーク間にできるひも状のカラー場のモデルなどで説明されているが、格子 QCD の結果にも合致する。一方、短距離領域では漸近的自由性のため、クーロン型や湯川型などで表される少数グルーオンによる交換力が効いている。閉じ込めポテンシャルはクォーク系に特徴的なもので、クォークが閉じ込められているハドロン物質と、閉じ込めが解けたクォーク物質との間の相転移のダイナミクスを支配する最も重要な相互作用である。格子 QCD の結果に因れば、これは温度に依存し、高温でクォーク間相互作用は弱くなるこ

とが知られている。しかし我々のシミュレーションでは、現象論的に、距離  $r$  に比例した一定の強さの閉じ込めポテンシャルと、クーロン型相互作用とを用いることにする。

カラーの取り扱い、たとえばクォーク毎に固定したカラー電荷を割り振り、それによる相互作用をもとにハミルトン方程式を解くのが最も簡単なやり方である。しかしクォークのカラー相互作用は、それを媒介するグルーオン自体がカラーを持っているため、クォークは時々刻々とそのカラーを変えていくのである。我々はこのカラーの時間発展を、クォークのカラーコヒーレント状態の時間発展として数値的に解く方法を開発し、分子動力学に乗せることが出来た[4]。

その他、クォーク系は本来非常に量子的かつ相対論的な系である。しかし多体系のダイナミクスを簡単に計算するというメリットのため、甘んじて我々の枠組みは古典系の扱いとする。すなわち、反対称化 (Fermi 運動) やゼロ点振動を無視し、また運動エネルギー項のみを相対論的に扱う。また、冒頭に触れたクォーク反クォーク  $q\bar{q}$  の対生成過程も扱わない。

## 3. “原子核”

クォーク系の分子動力学計算の例として、まず3クォークからなる核子を図1(a)に示す。我々のシミュレーションには、まだスピン依存力やフレーバー ( $u, d$  などの種類) による質量差などが入っていないので、陽子と中性子の区別は無い。従って、これは計算結果というよりも、我々の分子動力学では核子をこのようなものと定義するといった方が適切であろう。シミュレーションとしては古典系を扱う枠組みなので、ゼロ点振動や Fermi 運動は入らない。従って核子内クォークに初期の運動を与えて、動かしてみただけである。唯一この計算の「結果」と言えることは、このような“白色”の3体系のなかでは、各クォークの色は一定のまま変化しなかった。同色クォーク反クォークのメソンの場合も同様である。我々のカラーコヒーレント状態の時間発展では、色が時間変化を始めるのは「3体で白色」の状態を乱すよそ者からの相互作用を受けた場合である。

この“核子”を多数集めて出来たのが図1(b)である。核子同士の短距離の斥力と中距離の引力をある程度再

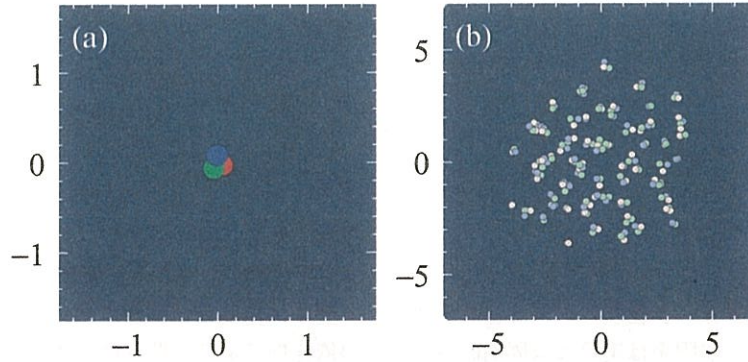


図1 (a) 3つの異なる色のクォークからなる核子。長さスケールの単位は fm ( $10^{-15}$ cm)。  
(b) 3クォークからなる核子を66個集めた“原子核”。

現するように、クォーク間の相互作用に、メソン交換力を現象論的に用いている。これによって、核子同士がある程度の距離を保って且つ結合した原子核が出来上がる。「白色」の核子間では、カラーによる相互作用はお互い遮蔽されて非常に弱い。

あまりに古典的な枠組みで相互作用も吟味せず作られた原子核は、まだ「お遊び」の段階に過ぎないのだが、あえてこの原子核を衝突させてみたのが図2である。衝突する前の原子核が潰れた形をしているのは、ローレンツ収縮をさせているためである。原子核が左右から入射し(左上図)、衝突を起こし(左下図)、相互作用しながら左右に飛び去って行く(右上図→右下図)様子が、時間を追ってプロットしてある。淡い色のクォーク

は3つ組をつくって白色になっている者、濃い色のは近隣のクォークと3つ組をつくらない“はぐれ者”である。相互作用の結果、はぐれ者のクォークがエネルギー密度の高い中心付近で増えていることがわかる。

ここで一つ注意しなくてはならない点は、 $q\bar{q}$ の対生成過程が抜けている点である。3つ組を作れずにはぐれ者になってしまったクォークは、はぐれ者同士で遠距離相互作用しているわけであるが、そのようなクォークの間には本来 $q\bar{q}$ の対が出来てポテンシャルを遮蔽するように働くはずである。ここで生成されたクォークや反クォークは、はぐれ者のクォークと組をなし、白色のハドロンを作るので、はぐれ者のクォークは図に表れているほど長い時間は存在しないはずである。

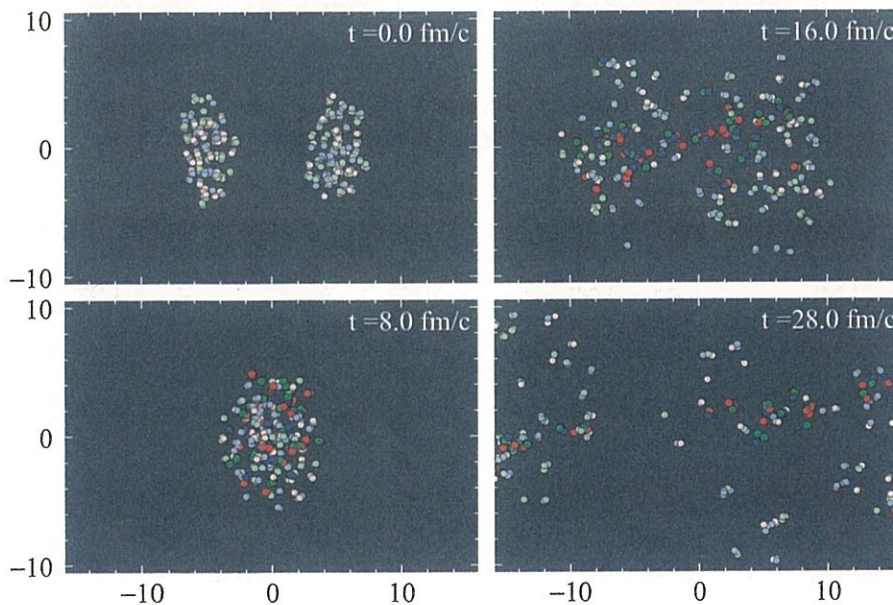


図2 質量数  $A=66$  の原子核同士の正面衝突。衝突のスピードは光速の約85%。シミュレーションの時刻  $t$  の単位は fm/c (約  $3.3 \times 10^{-23}$  sec)。薄い色のクォークは閉じ込め状態(3つ組みで白色)になっているもの。濃い色で表されているのは閉じ込め状態にないクォーク。



#### 4. 無限系のシミュレーション

次に無限系（核物質、クォーク物質）のシミュレーションについて紹介する。無限系は実際には周期的境界条件を課した箱の中の有限系で近似する。ランダムな分布の系を摩擦冷却法により冷却し、系の性質を調べる。図3は密度を変えた場合の“基底状態”の物質のスナップショットである。濃い色で示してあるのが閉じ込め状態から解放されたクォークで、薄い色が3つ組みで閉じ込められているクォークである。低密度では閉じ込められているクォークの割合は高く、密度

が高くなると周りのクォークとの相互作用により「3クォークで白色」という状態が乱されるのである。

図4は密度及び励起エネルギーに対する閉じ込め率の依存性である。低密度、低励起ではクォークの閉じ込め率は高いが、励起エネルギーを上げていったり密度を高くすると閉じ込められているクォークの割合は減っていく。図5の励起エネルギーに対する有効温度の依存性には、低密度と高密度では明らかな違いが見られる。高密度の場合は励起エネルギーに対してほぼ直線的な温度変化が見られるが、低密度の場合、高励起の領域に比べて低励起領域での温度の上昇が緩やか

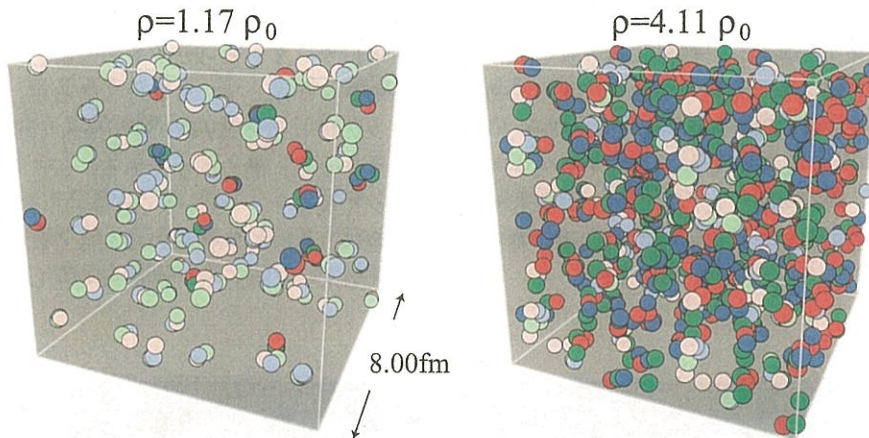


図3 周期的境界条件による無限系。薄い色は閉じ込め状態にある、濃い色は閉じ込め状態にないクォーク。バリオン密度  $\rho$  は標準原子核密度  $\rho_0$  で表してある。

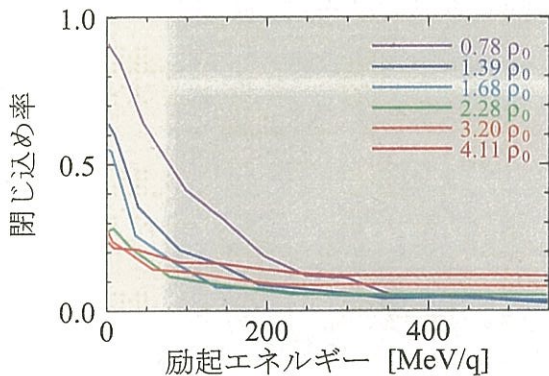


図4 閉じ込め率（閉じ込め状態にあるクォークの割合）の励起エネルギーに対する依存性。異なる線の種類は異なるバリオン密度を表している。密度の単位は原子核標準密度  $\rho_0$ 。

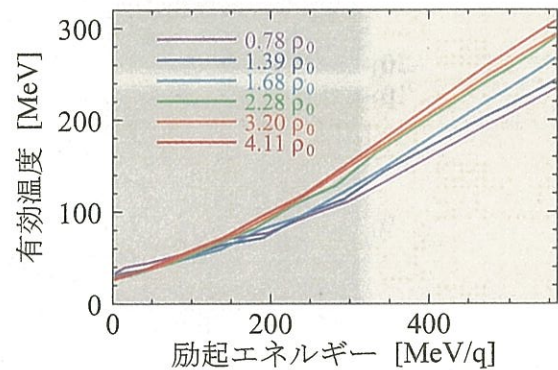


図5 系の有効温度の励起エネルギーに対する依存性。有効温度はクォークの運動量分布を Boltzmann 分布でフィットして得られる。



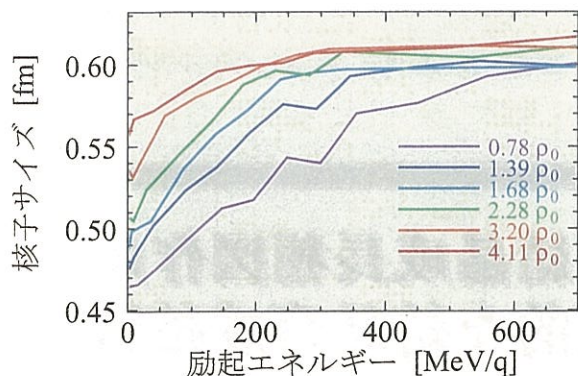


図6 核子サイズの励起エネルギー依存性。核子サイズは、閉じ込め状態にあるクォークのみから計算した核子の平均二乗半径。

になっている（比熱が大きい）。これはちょうど閉じ込め率の変化する領域であり、核子クラスターが溶けるのにエネルギーが使われたためである。これがはっきりした相転移を示しているのかは今の所明らかでない。また、この枠組みには $q\bar{q}$ の対生成過程が取り入れられていないので、系は高温でボルトツマンガスの振る舞いをするが、対生成の過程を取り入れることで系の統計性は別のもになると思われる。

低エネルギーから高エネルギーへ、または低密度から高密度への系の変化に対して、クォークが閉じ込め状態から非閉じ込め状態へ変化するの、一つには他のクォークとの相互作用によるクォークの色の変化が原因だが、もう一つはクォークの運動状態の変化が原因である。図6に示した核子のサイズの励起エネルギーと密度に対する依存性から分かることは、密度や温度が高くなるに従い核子のサイズが大きくなっていき、空間を自由に動き回るようになることである。高温での振る舞いはごく当たり前だが、密度が高くなったときに核子のサイズが大きくなるという計算結果は逆説的で面白い。

## 5. おわりに

我々は座標空間とカラー空間における分子動力学をつくり、クォーク系のシミュレーションを行った。計算の手法にはまだ改良しなくてはならない点が多く、議論も初期の定性的な段階ではあるが、これはクォークの閉じ込め、非閉じ込めの状態のダイナミカル（自動的）な記述が可能な初めての分子動力学である。高エネルギー原子核衝突や高密度核物質において、クォークが閉じ込め状態から非閉じ込め状態に変化する様子を、このモデルでは非常に直感的な映像や物理量によって表すことが出来る。より定量的な議論や、高密度物質の構造に関する新しい知見を得るためには、模型

をこの非常に古典的な取り扱いから、多少なりともフェルミオン系の性質を表せるものへと改良する必要がある。現在、粒子のフェルミ運動を現象論的に取り入れた、ある種の分子動力学[5]の手法を適用しようとしているところである。しかし、クォーク反クォーク $q\bar{q}$ の対生成の過程には、まだ手をつけていない。とりあえず、本来は同時に考えなくてはならない逆過程（対消滅過程）は無視して、現象論的に扱ってはどうかと考えている。これは特に高エネルギー原子核衝突のシミュレーションには不可欠のものである。しかし仮にこの過程を分子動力学に取り入れることができたとしても、非常に高エネルギーの衝突の場合は、クォークのプラズマではなく、グルーオンが殆どのプラズマが生成されると思われており、この場合は分子動力学の扱いは適切ではないかもしれない。あくまでも分子動力学の長所を生かしつつ、扱える範囲を吟味した研究を進めていくことも重要である。

## 謝辞

このノートは、東京大学理学部の初田哲男教授および当グループの千葉敏リーダーとの共同研究によるものである。

## 参考文献

- 1) J. Harris and B. Müller, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **46** (1996) 71; W. Greiner and D. Rischke, *Phys. Rep.* **264** (1996) 183; C. Y. Wong, *Introduction to High-Energy Heavy-Ion Physics*, World Scientific Publ. Singapore, 1994; Proc. Quark Matter '97, ed. T. Hatsuda et al., *Nucl. Phys.* **A638** (1998) 1.
- 2) G. Baym, *Nucl. Phys.* **A590** (1995) 233.
- 3) J. J. Drake, H. L. Marshall, S. Dreizler, P. E. Freeman, A. Fruscione, M. Juda, V. Kashyap, F. Nicastro, D. O. Pease, B. J. Wargelin, and K. Werner, *Astrophys. Journ.* **572** (2002) 996.
- 4) T. Maruyama and T. Hatsuda, *Phys. Rev. C* **61** (2000) 62201; T. Maruyama, T. Hatsuda and S. Chiba, *Nucl. Phys.* **A681** (2001) 72.
- 5) M. Papa, T. Maruyama and A. Bonasera, *Phys. Rev. C* **64** (2001) 024612.