

クォーク，核力，スーパーコンピュータ

初田 哲男

Hatsuda Tetsuo

1 素粒子の探求

約1兆分の1cmの大きさを持つ原子核は、約10兆分の1cmの大きさを持つ陽子と中性子（総称して核子）の集合体であり、物質質量のほぼ99%を担っています。さらに、核子はクォークと呼ばれる素粒子からできていることが20世紀後半には確立しました。小林誠博士・益川英敏博士（2008年ノーベル物理学賞）は、6種類のクォーク（アップ、ダウン、チャーム、ストレンジ、トップ、ボトム）があることを1973年に予言し、1995年までにそのすべてが発見されました。また、2012年には、クォークなどの素粒子に質量を与えるヒッグス粒子が、ヨーロッパ共同原子核研究機構CERN（European Organization for Nuclear Research）の大型ハドロン衝突型加速器LHC（Large Hadron Collider）で発見されたことは記憶に新しいところでは。

クォークの存在自体が確立しても、それらがどのように結合して核子や原子核を形成するのかという問いに直ちに答えられるわけではありません。“素粒子の相互作用には、それを媒介する粒子が伴う”というのが、湯川秀樹博士（1949年ノーベル物理学賞）が1935年に導入した現代物理学の基本的考え方です。例えば、

電荷を持つ電子は光子を媒介に相互作用し、それを記述するのが朝永振一郎博士（1965年ノーベル物理学賞）らが完成した量子電気力学です。同様に、クォークは“色”という特殊な電荷を持ち、グルーオンという媒介粒子により強く相互作用します。この理論は、量子色力学と呼ばれ、その原型は1966年に南部陽一郎博士（2008年ノーベル物理学賞、ただし受賞対象は自発的対称性の破れの理論）により提唱されました。

2 核力の探求

さて、話を量子色力学以前に戻しましょう。1935年に発表された湯川博士の論文「On the Interaction of Elementary Particles I」では、原子核のような小さな領域に陽子や中性子を繋ぎとめておく力（核力）の起源が考察され、核力を担う未知の粒子（湯川中間子）が理論的に導入されました。この湯川中間子は1947年に宇宙線の中で発見されます。湯川理論に基づいた核力の詳細な研究は、1950～1960年代に国内外で大きく進展しましたが、当初予想されていなかった新たな性質も明らかになってきました。なかでも、核子同士が至近距離に近づくと、湯川理論では説明できない大きな反発力（斥力）

が働くことを実験データは示唆しているように見えました。この事実最初に気が付いたのは、R. ジャストロウ博士 (R. Jastrow) で、彼が1950年に導入した“核力における斥力芯”は、原子核が核子間の引力で崩壊せず、液滴のように一定の密度を保つ性質 (密度の飽和性) と密接に関係した原子核物理学における重要な概念となっています。一方で、これはあくまで現象論であり、その本質的理解には核子の内部構造にまで立ち入った研究が不可欠でした。

さて、1970年代後半に量子色力学が確立し、核子がクォークとグルーオンできていることが明らかになると、核力の性質も図1の模式図にあるようなクォークとグルーオンの交換として記述されるべきであると認識されるようになりました。図1は、クォーク3つからなる陽子(p)と中性子(n)が、矢印付きの直線や曲線で描かれたクォークと、バネのような曲線で描かれたグルーオンにより互いに相互作用している様子を表しています。現実の核力を記述するためには、無数のクォークやグルーオンの交換を正確に取り扱わないといけないことが分かっています。しかし、このような複雑なプロセスを量子色力学に基づいて定量的に計算できるでしょうか？ 南部博士は、1997年に発行された著書「クォーク」の中で、その困難さを以下のように評しています。“現在でも核力の詳細を基本方程式から導くことはできない。核子自体がもう素粒子とは見なされないから、いわば複雑な高分子の性質をシュレーディンガー方程式から出発して決定せよというようなもので、むしろこれは無理な話である。”

3 スーパーコンピュータと核力

ところが、2006年に新たな突破口が開かれました。石井理修氏 (当時、東京大学)、青木慎也氏 (当時、筑波大学) と筆者 (当時、東京大学) は、量子色力学に基づいて核力を計算する新しい理論的方法を考案しました。この理論

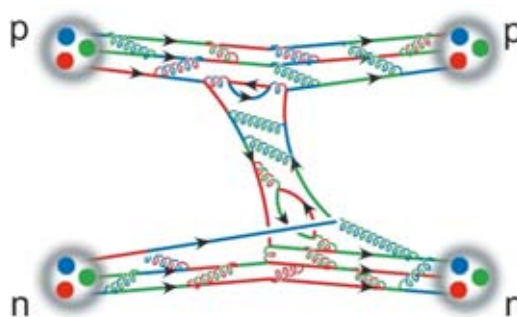


図1 量子色力学から見た陽子 (p) と中性子 (n) の相互作用
矢印付きの直線や曲線はクォークを、バネのような曲線はグルーオンを表わしている。核力の記述には、無数のクォークとグルーオンの交換を正確に考慮する必要がある

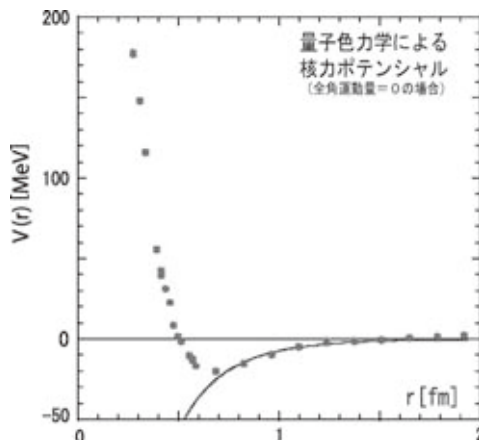


図2 量子色力学の数値シミュレーションで得られた核力ポテンシャル
横軸は $1 \text{ fm} = 10^{-13} \text{ cm}$ を単位として表した核子間の距離 r 、縦軸は $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ を単位として表したポテンシャルの強さ $V(r)$ である。シミュレーションのデータ点のほかに、湯川理論の予言が実線で示されている

はそれ自身でたいそう面白い内容を持っているのですが、実際に計算を実行しようとすると、スーパーコンピュータを用いても膨大な計算時間が必要になります。幸いなことに、2006年に高エネルギー加速器研究機構に Blue Gene/L という当時国内最速のスーパーコンピュータが導入され、フル稼働を始める前のテスト期間の

数か月間、この計算機を優先的に利用させてもらうことができました。そして、およそ4か月(3,000時間)の計算時間を使って核力の計算を世界で初めて実行することができました。

この計算結果の一例を図2に示してあります。横軸は核子間の距離 r を $1 \text{ fm} = 10^{-13} \text{ cm}$ を単位として、縦軸はポテンシャルエネルギー V を $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ を単位で記してあります。湯川博士が予言した遠距離での引力はもとより、ジャストロウ博士が予言した近距離での斥力が、特別な仮定をすることなく自然に得られています。原子核は、この引力と斥力の微妙なバランスの結果として安定に存在しているわけです。現在は、2006年当時と比べて100倍以上の演算性能を持つスーパーコンピュータ“京”が、神戸ポートアイランドにある理化学研究

所・計算科学研究機構で稼働を始め、それを用いた核力の高精度計算や斥力芯の物理的起源の解明に向けた研究が多く、若手研究者の参加を得てスタートしています。このような研究が進めば、原子核構造はもとより、ハイパー原子核やエキゾチック原子核、宇宙に浮かぶ最大の原子核である中性子星の内部構造などの解明に大きく貢献できると期待しています。

80年以上も前に提唱された核力の湯川理論は、ジャストロウ博士の斥力芯、南部博士の量子色力学などの様々な進展を経て、世界最高性能のスーパーコンピュータを用いた研究にまで拡がりを見せています。今後も、物質構造の基本的理解を目指した旅は続きます。

((独)理化学研究所 仁科加速器研究センター)