

特集：量子色力学—中間子論を源として

## 時空格子上の量子色力学

宇 川 彰

### はじめに

湯川秀樹が核力の起源として新たな粒子中間子の存在を提案して、素粒子の強い相互作用の理論に時代を劃したのは1934年のことである。その後40年にわたる実験・理論両面にわたる研究を経て、1973年には漸近自由性が発見され、クォークとグルオンを基本自由度とする量子色力学 (Quantum Chromodynamics, 略してQCD) が強い相互作用の基礎理論として一気に注目を浴びた。格子量子色力学 (格子QCD) は、その直後に米国の Kenneth Wilson により定式化され1974年に論文発表されている。

格子QCDは連続な時間空間を離散な格子点で置き換え、この時空格子上にQCDを定式化した理論である。この奇異にも見える方法により、強い相互作用の本質について、概念的に深い理解が得られた。また、スーパーコンピュータを用いた数値シミュレーションの適用が可能となり、様々な物理量の具体的な計算を行ってQCDの検証と新たな予言の抽出を行うことが可能となった。

本稿では、格子QCDによってもたらされた素粒子物理としての進歩を概観し、併せて、計算物理の成長とスーパーコンピュータの発展に与えたインパクト、さらには研究体制と国際協力の状況にも触れる。

### クォークの閉じ込め

素粒子の間に働く力は粒子の交換により引き起こされるとする考えは、湯川の中間子論以来、素粒子物理学の中心的な概念の一つである。実際、電磁気力は光子の交換により生じるものであるし、原子核を結び付ける核力は、 $\pi$ 中間子をはじめとする一群の粒子の核子間の交換により説明できる。

一方で、核子や $\pi$ 中間子の構成要素とされるクォークを単独の状態では実験的に観測する試みは全て失敗している。このことからクォーク同士を結びつける力は極めて強いもので、単独のクォークの存在を許さない性質を持つのではないかと推測が行われてきたが、その生成機構は長年にわたり謎であった。格子QCDの重要な概念的な成功は、この“クォークの閉じ込め”の問題に明快な答えを与えたことである。

QCDによれば、クォークの間に作用する力は、クォークの持つ色電荷とグルオン場の

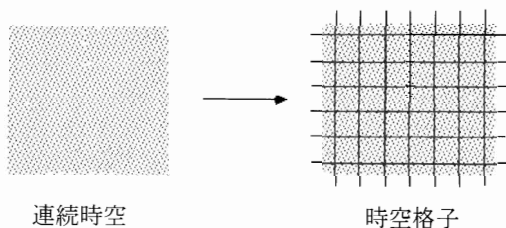


図1 連続時空を置き換えた時空格子

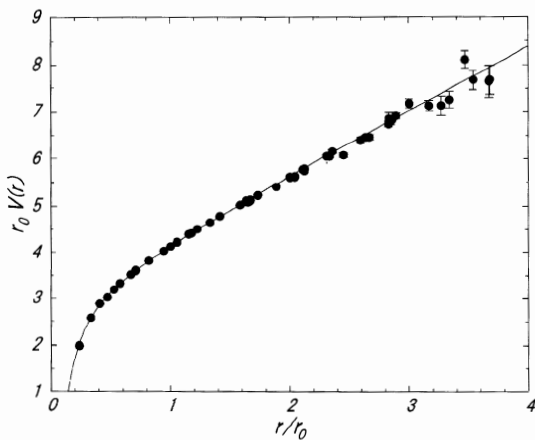


図2 格子QCDによるクォーク・反クォーク間のポテンシャルエネルギー<sup>1)</sup>

量子揺らぎが相互作用することにより生じる。QCDでは、漸近自由性により、クォーク間の距離が増大すると共にグルオン場の量子揺らぎも増大するので、クォークの色電荷間の相関が指数関数的に現象する。逆説的であるが、これによって距離に依存しない力が生成されるのである。

図2に、モンテカルロ法により計算されたクォークと反クォークの間のポテンシャルエネルギーを示す。距離の増大と共にポテンシャルエネルギーは距離に比例して増大すること、従ってどのように大きなエネルギーを注入しても、クォークと反クォークを完全に引き離すことが不可能なことが見て取れる。

## ハドロン質量とクォーク質量

格子QCDのモンテカルロシミュレーションによれば、ハドロン質量等を計算することができる。このような計算は、QCDの基本的検証を与えるので1980年台始めから多数の計算が行われて来たが、十分な精度で計算を行うことは容易でなかった。1998年に筑波大学のグループが自己開発の超並列計算機CP-PACSを用い、真空のクォーク・反クォーク対生成・対消滅を無視した“クエン

チ近似” ( $N_f = 0$  計算) で誤差数%の計算に成功し、実験で測定されている質量スペクトルと定性的に合致すること、但し定量的には5-10%の系統的なずれがあることを見出している。その後、特に軽いクォークであるup, down, strangeの対生成・対消滅効果を取り入れた計算 ( $N_f = 2 + 1$  計算) が進み、比較的計算の容易な中間子スペクトルについては実験と数%精度で一致する結果が得られつつある。

ハドロン質量の計算から定められる重要な物理量にクォークの質量がある。クォークはハドロン内部に閉じ込められているから直接質量を測定することができない。ハドロン質量とクォーク質量の関数関係を格子QCDにより計算し、ハドロン質量から逆算するのが唯一の方法である。図3に最近の計算結果を示す。複数の格子間隔  $a$  で計算を行い、連続時空の極限  $a = 0$  への外挿を行って物理的予言が抽出される。

従来クエンチ近似で得られて来た値 ( $N_f = 0$ ) に比べて、近似を含まない計算 ( $N_f = 2 + 1$ ) では、現象論的に用いられてきた値の約2/3という軽い値が得られている。

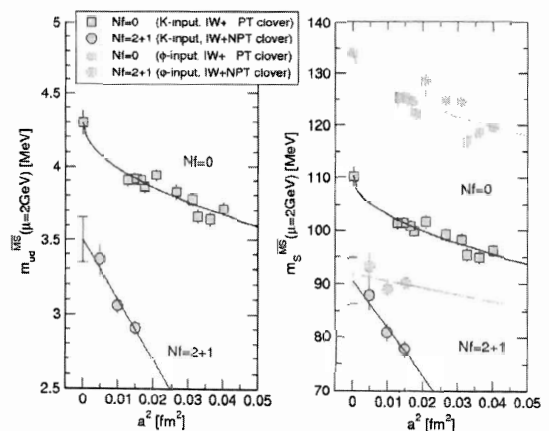


図3 クォーク質量の決定<sup>2)</sup>

## クォーク・グルオン・プラズマ

通常はハドロンの内部に閉じ込められているクォークも、十分な高温ではハドロンの内部から解放されることが予想されている。格子 QCD のシミュレーションによれば、ハドロンの相からクォーク・グルオン・プラズマ相への転移を特徴付ける相転移の次数や転移温度、さらには圧力やエネルギー密度と温度の関係を決める状態方程式等を求めることができる。

温度と共に密度も重要な変数であり、高密度状態では、色電荷の超伝導状態の可能性を始めとして様々な興味深い物理が予測されている。有限密度ではクォーク行列式が負になるとの符号問題が発生してモンテカルロ法が破綻するため有限密度の計算は、現在までのところ比較的密度が小さい場合に限定されている。格子 QCD の今後の大きな課題である。

## ハドロンの相互作用

ハドロンの間に働く力は、QCD ではハドロンの間に複数のクォークや反クォークが交換されることにより生ずる力と理解される。このようなクォーク・反クォーク対の中で最も軽い粒子がパイ中間子であるので、核力がパイ中間子交換により理解されることが自然に導かれる。

格子 QCD により直接計算できる物理量はハドロンの間に働く力そのものではなく、それによって決まるハドロンの散乱の位相差と呼ばれる量である。図 4 に  $\pi\pi$  散乱のアイソスピンが 2 のチャンネルでの格子 QCD 計算結果と実験値の比較を示す。この方法の拡張により核子間の散乱を理解することは、ハドロンの物理の今後の大きな目標である。

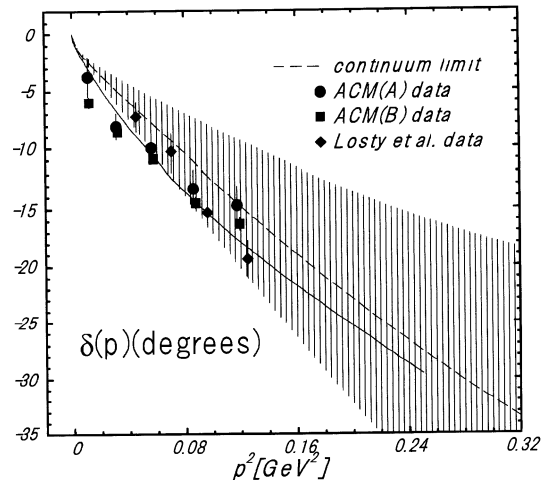


図 4  $\pi\pi$  散乱位相差の実験データと格子 QCD による計算結果の比較<sup>3)</sup>

## 格子 QCD とスーパーコンピュータ

格子 QCD シミュレーションは、膨大な計算を必要とするが、近接相互作用を特徴とする場の理論により記述される系であるので並列計算に好適な問題である。

格子 QCD が重要となった 1980 年代は、ベクトル型スーパーコンピュータが急速に成長した時期一方でマイクロプロセッサの進歩と重なって並列計算機が発達した時期でもある。格子 QCD はこのような計算機の進歩に助けられて進展したが、同時に格子 QCD を目標とした並列計算機の開発・製作を通じて計算機の進歩にも多大の貢献をした。

このような系列の並列計算機として、我が国では筑波大学における QCDPAX (1989)、CP-PACS (1996)、PACS-CS (2006) があり、特に CP-PACS は 1996 年 11 月の「世界のスーパーコンピュータトップ 500」リストの第一位を獲得した。また米国ではコロンビア大学で一連の計算機が開発され、特に最近の QCDOC (2005) は現時点で世界最高速の BlueGene/L へと成長している。

## 計算素粒子物理学と国際協力

格子 QCD 計算は多大のスーパーコンピュータ資源を必要とし、そのような拠点は世界的に見ても限られている。一方で格子 QCD 計算の基本となるグルオン配位は、一度生成されれば、その上で様々な物理量を計算可能である。そこで、世界各拠点で生成されたグルオン配位を世界的なデータグリッドを形成して国際的共有し、格子 QCD の研究を加速しようとの活動が、International Lattice Data Grid (ILDG)<sup>4,5)</sup>の名称の下に2002年夏から進められている。4年間の準備を経て、ILDGはこの夏に正式にオープンする予定であり、今後ILDGを通じての国際協力の進展が期待されている。

### 今後に向けて

格子 QCD により、素粒子の強い相互作用の理論は、概念的にも物理量の計算の面でも大きな進歩を遂げた。現在 up, down, strange の三種類の軽いクォークの対生成・

対消滅効果を取り入れた計算が可能になり、今後数年間にハドロンの性質、クォークグルオンプラズマ、標準模型全体に取って重要な CP 非保存過程に対する強い相互作用補正等の重要テーマに、多くの成果が期待される。その先にはハドロン同士の相互作用の問題、さらには原子核の QCD に基づく理解などの問題が控えている。湯川の間接子論以来 70 有余年を経て、強い相互作用の理論は漸く基礎から応用へと進化しようとしているのである。

### ■ 参 考 文 献 ■

- 1) CP-PACS Collaboration, Phys. Rev. D 65 (2002) 054505.
- 2) CP-PACS and JLQCD Collaborations PoS LAT 2005 (2005) 057.
- 3) CP-PACS Collaboration, Phys. Rev. D 70 (2004) 074513.
- 4) <http://www.lqcd.org/ildg/>
- 5) <http://www.ccs.tsukuba.ac.jp/people/ILFTNet/kyoten 06.pdf>

宇 川 彰 (うかわ・あきら)

筑波大学大学院数理物質科学研究科 教授,  
計算科学研究センター長