

Title	格子量子色力学によるクォーク閉じ込めの研究
Author(s)	管沼, 秀夫
Citation	大阪大学大型計算機センターニュース. 1999, 111, p. 20-20
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/66316
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

格子量子色力学によるクォーク閉じ込めの研究

阪大・核物理研究センター・素粒子核物理 菅沼 秀夫
suganuma@rcnp.osaka-u.ac.jp

今日、「陽子・中性子などの核子は3個のクォークから構成されている」といった記述は、専門書以外でも目にするほど常識となっており、クォークの「実在性」を疑う物理学者は殆ど皆無である。にもかかわらず、実際のクォークは、ハドロン内部に閉じ込められており決して単独では姿を現わさない。これは、「クォークの閉じ込め」(より一般的には「カラーの閉じ込め」)と呼ばれ、それが起こる物理的な理由やメカニズムの理論的説明は、強い相互作用の本質に深く根ざしており、現代素粒子・核物理学の最も難しい重要課題の1つと認識されている。

強い相互作用の基礎理論は、量子色力学(QCD)と呼ばれ、クォークやグルーオンといった「カラー電荷」を持った自由度で記述されている。クォークやグルーオンの間に働く相互作用は、電磁相互作用等と比べて桁違いに強く、その結果、「真空の構造」さえも変化する程に大きな「量子論的效果」が生じ、それがさらにはクォーク等の存在様式を根底から変えてしまっている。強い相互作用を解析する上での難しさはそのような「QCDの強結合性」に起因している。実際、理論の結合定数が小さければ、量子電磁気学(QED)の常套手段である結合定数の巾展開による「摂動論」が有効に適用できるが、(低エネルギー領域の)QCDの様に強結合の理論では、結合定数の巾展開は意味を為さない。加えて、特殊ユニタリ行列で表現されるグルーオン場の非可換性もQCDの理論的解析を非常に困難なものにしている。そこで、QCDの生成汎関数や物理量を、超大型計算機を用いて数値的に計算する試みが提唱され、特に最近かなりの成果を挙げてきている。

具体的な計算としては、「無限重積分」である「汎関数積分」を実行すれば良いのだが、そのままでは計算できないので、それを数値的に実行する為に、格子QCDの方法を用いる。格子QCDの考え方は、有限個の表現点を用いた数値積分の評価や微分方程式を差分化して解くのと似ている。これらの計算では、メッシュが十分に細かければ、十分な精度の近似解が得られる。格子QCDの場合は、「4次元時空連続体」に小間隔の「格子状の座標系」を導入し、場(field)の連続的な自由度を格子上の離散的な自由度で代表させた表現形式をとる。そして、(十分に大きな)有限サイズの格子を考えれば、QCDの汎関数積分は「有限重積分」に還元され、一応数値計算可能になる。とはいえ、例えば、 $24 \times 24 \times 24 \times 24$ の格子を用いても、「1,000,000重積分」以上の大規模数値計算になる。従って、指数関数型の作用因子をウェイトとする乱数を用いた「モンテカルロ法」により、効率良く超多重積分の評価を行なっている。尚、QCDの局所的相互作用を反映して、格子QCDでは、少し離れた格子点上の演算は独立に実行できるので、そのアルゴリズムは極めてベクトル化しやすく、ベクトル計算機を有効に活用して計算が実行できる。

阪大RCNPの理論グループでは、この格子QCDモンテカルロ・シミュレーションの方法を用いて、「クォークの閉じ込め」が起こる物理的なメカニズムの解明を行なっている。ポイントは、最大可換(MA)ゲージをとると、混沌としたQCDの理論構造が既知の電磁気学と類似の構造の簡単な可換理論に還元されることである。図1は、格子QCD計算で得られたMAゲージでのグルーオンの対角成分・非対角成分に対する伝搬関数及び有効質量の解析である。グルーオンの非対角成分が1GeV程度の有効質量を有し、その為、0.3fm以下の短距離領域を除いてグルーオンの非対角部分は物理的に不活性になることがわかる。従って、MAゲージでは、ごく短距離領域を除いて、QCDの非可換性は消失し電磁気学と類似の系になる。また、MAゲージのQCDにおいては、理論のトポロジーを反映して、ソリトンの自由度である「カラー磁気単極子」が現れる。図2は、格子QCD計算で得られたQCDの真空状態におけるカラー磁気単極子の世界線の3次元投影図である。定量的分析とあわせて、MAゲージでは、QCDの真空状態がカラー磁気単極子が詰まった凝縮体、即ち、「磁氣的超伝導状態」であることがわかった。あとは超伝導現象とのアナロジーで理解できる。即ち、磁氣的超伝導状態であるQCDの真空では、「デュアル・マイスナー効果」によって「カラー電束」が1次元的に絞り込まれる。その結果、カラー電荷を有するクォークは「線型ポテンシャル」で束縛され、クォークの閉じ込めがもたらされるわけである。超大型計算機をツールとして、マイクロな世界に超伝導現象が見えるのである。

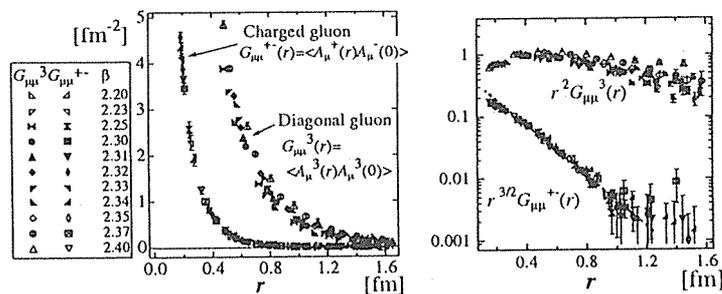


図1

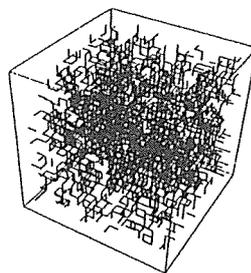


図2