OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

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	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

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しまい，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，ハドロンの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解明は，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「量子論的効果」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，特殊ユニタリー行列で表現される 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，メッシュが充分に細かければ，充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，（充分に大きな）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易く，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，ソリトン的自由度である「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，「磁気的超伝導状態」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，磁気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。超大型計算機をトゥールとして，ミクロな世界に超伝導現象が見えるのである。

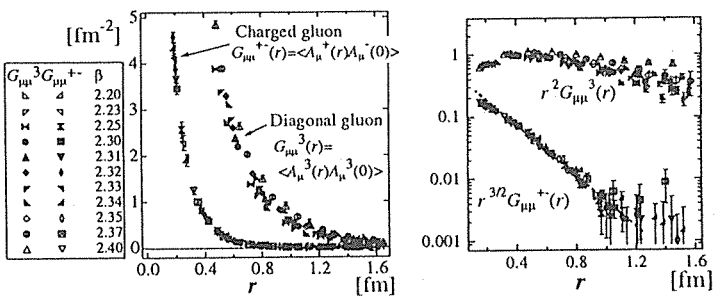

図1

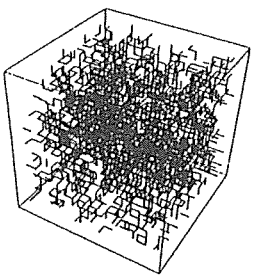

図2