

2008年4月22日

独立行政法人 理化学研究所
岡山光量子科学研究所

素粒子の世界の真空エネルギーをコンピュータで計算

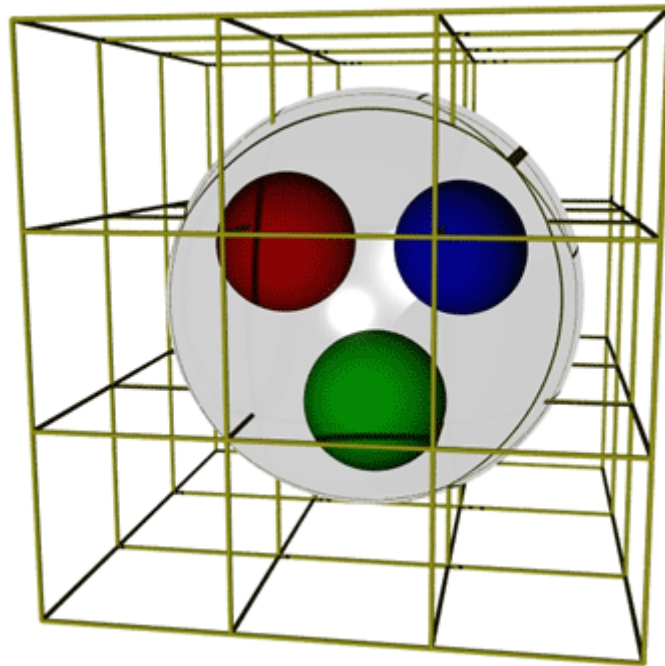
- 超対称性の自発的破れの可能性を数値シミュレーション -

物質の究極の姿とそれを支配する法則は？研究者が長年答えを追い求めている謎です。究極の物質である素粒子を理解することは、この謎の解明をもたらすと注目されています。

素粒子を理解するための最もホットな「超対称性」という考え方は、光子、ヒッグス粒子などのボーズ粒子と、電子やニュートリノ、クォークなどのフェルミ粒子を入れ替えても理論が変わらない、というものです。

ところが、自然界には重さの等しいボーズ粒子とフェルミ粒子のペアは存在しません。このため、自然界では、「対称性の自発的破れ」が生じ、超対称性がそのままでは成立しないと考えられています。しかし、従来、この超対称性の自発的破れの大きさを理論的に計算することは一般に不可能でした。

理研仁科加速器研究センター川合理論物理学研究室と岡山光量子科学研究所らの研究グループは、超対称性の自発的破れの指標である真空エネルギーを数値計算する手法を開発しました。さらに、この手法を使い、1次元空間の超対称性を4つ持った超対称ゲージ理論では超対称性の自発的破れが起きていない兆候を得ました。この成果は、コンピュータを使った数値シミュレーションで超対称ゲージ理論の研究が可能であることを実証したもので、素粒子の世界の新しい研究手法を提供したものと注目されます。



(図)格子ゲージ理論の概念図

赤・青・緑は、陽子・中性子や中間子などの
ハドロンを構成する素粒子（クォーク）

2008年4月22日
独立行政法人 理化学研究所
岡山光量子科学研究所

素粒子の世界の真空エネルギーをコンピュータで計算

- 超対称性の自発的破れの可能性を数値シミュレーション -

◇ポイント◇

- ・超対称ゲージ理論の真空エネルギーの数値計算を世界ではじめて実行
- ・ある超対称ゲージ理論では超対称性の自発的破れがおきていない兆候つかむ
- ・超対称性の自発的破れを数値的に検証する可能性を実証

独立行政法人理化学研究所（野依良治理事長）と岡山光量子科学研究所（二宮正夫所長）は、超対称ゲージ理論における真空エネルギーを数値シミュレーションで測定する方法を開発しました。この方法を使って1次元空間のある超対称ゲージ理論では、超対称性の自発的破れが起きていないことを示し、超対称性の自発的破れを数値計算で調べるといふ、これまで不可能と考えられていた研究手法の可能性を新たに切り開きました。これは、理研仁科加速器研究センター川合理論物理学研究室の金森逸作基礎科学特別研究員、鈴木博専任研究員、岡山光量子科学研究所の杉野文彦専門研究員（理研客員研究員兼務）らの研究成果です。

素粒子の標準模型を越える枠組みでは、超対称性という考え方が重要となっています。超対称性とは、ボーズ粒子（光子、ヒッグス粒子など）とフェルミ粒子（電子、ニュートリノ、クォークなど）を入れ替えても理論が変わらない、というものです。実際の自然界では、ボーズ粒子とフェルミ粒子では重さがまったく違うので、超対称性は、そのままの形で実現していません。このように理論の持っている対称性がそのままの形であらわれない現象を「対称性の自発的破れ^{*1}」と呼んでいます。つまり、超対称性は自発的に破れている、と考えられているのです。そこで、超対称性を持つ理論を考えた時に、超対称性が自発的に破れているかどうかを調べるのが重要になり、そのためには、理論の方程式を解く必要があります。従来の素粒子理論の方程式に対しては、格子ゲージ理論^{*2}と呼ばれるコンピュータを利用した手法が大きな成功を収めてきました。しかし、一般に格子ゲージ理論は超対称性を壊してしまうため、超対称ゲージ理論の方程式をコンピュータで数値的に解くことは、これまでほとんど不可能とされていました。

研究グループは、最近提唱された、超対称性と相性がよい格子ゲージ理論の定式化に基づき、超対称性の自発的破れをはかる指標である真空エネルギー^{*3}を数値計算する方法を開発しました。さらに、理研のスーパーコンピュータ「理研スーパーコンバインドクラスター（RSCC）システム」を60,000CPU時間使い、1次元空間のある超対称ゲージ理論では超対称性の自発的破れが起きていないという兆候を得ました。この理論では、超対称性の自発的破れが起きるのではないかと予想がありましたが、研究グループの結果は、この予想に疑問を呈するものとなりました。

本研究成果は、米国の科学雑誌『*Physical Review D*』5月号（オンライン版では5月6日付け：日本時間5月7日）に掲載されます。

1. 背景

現在確立している素粒子の理論を素粒子の標準模型と言います。この標準模型は、これまでに知られている素粒子の性質を見事に説明しますが、理論的には不満足な点がいくつもあり、究極的なものではないと考えられています。そこで、今後行われる高いエネルギーでの加速器実験では、この標準模型を越えた新しい理論の証拠が見つかるだろうと期待されています。その最も有力な候補が「超対称ゲージ理論」です。素粒子には、電気力、磁力などの力に対応したボーズ粒子（光子、ヒッグス粒子など）と、物質に対応したフェルミ粒子（電子、ニュートリノやクォークなど）の2種類とがあります。超対称性とは、これらボーズ粒子とフェルミ粒子を入れ替えても理論が変わらないとするものです。この理論は数学的に大変美しく、また量子力学的な振る舞い（原子の大きさ以下のマイクロなスケールでの振る舞い）が理論的に望ましくなることから有望視され、極めて精力的に研究されています。

超対称理論では、本来、同じ重さのボーズ粒子とフェルミ粒子が常にペアとなつてあらわれます。ところが、こうした同じ重さの粒子のペアは、自然界にまったく見つかっていません。例えば、電磁気力をつかさどる光子（これはボーズ粒子です）は、重さを持ちませんが、それとペアを組んでいるはずの重さのないフェルミ粒子は存在しません。自然界では、超対称性がそのままでは成立していないのです。こうした、理論が持つ対称性がそのままではあらわれない物理現象を一般に、「対称性の自発的破れ」と呼びます。つまり、自然界の法則に超対称性は存在するが、それは自発的に破れているので現象としてあらわには見えないのだ、と考えられているのです。

そこで、いくつかある超対称理論のうちどれが正しく自然界を記述しているのかを知るには、それぞれの理論で超対称性の自発的破れは起こるのかどうか、また、起こるとすればどのくらいの大きさの破れになるのかを調べることが極めて重要です。これらを知るには、理論の方程式を解く必要がありますが、これは多くの場合数学的に解を求めることが不可能です。

そこで、コンピュータを使い、理論の方程式を数値的に解くことが考えられます。従来の素粒子理論の方程式を解く上では、「格子ゲージ理論」という手法が大きな成功を収めてきました。これは、時間と空間を格子目に切って近似し、コンピュータの上に理論をのせるものです。ところが、一般に格子ゲージ理論は超対称性をある本質的な理由で壊すため、超対称ゲージ理論をコンピュータで調べることはこれまで（特別な例外を除き）不可能とされてきました。それにもかかわらず、ここ数年で超対称ゲージ理論を格子ゲージ理論で定式化する研究が急速に進展し、超対称ゲージ理論の数値シミュレーションに対する機運が高まっていました。

2. 研究手法

ここ数年来の研究から、少なくとも理論の持つ超対称性が十分大きい場合には、超対称ゲージ理論をどのように格子で定式化すればよいかの道筋が見えてきました。基本的な考え方は、格子上ですべての超対称性を保つことはあきらめ、格子の構造と矛盾しない少数の超対称性だけを保つよう定式化したことです。この少数の超対称性をいかに切り出すかがポイントです。この方法で、少なくとも空間の次元が少ない（私たちが住んでいる空間は、縦、横、高さを持つ3次元空間ですが、2

次元空間や1次元空間の理論を考えることも超対称理論を理解する上で大変意味があります) 場合には、うまくいくことがわかってきました。これは、量子力学的な揺らぎを考えつつ格子目の間隔を0にして連続的な空間を再現する極限(連続極限)では、犠牲にした超対称性が回復し、すべての超対称性を持つ理論が再現できることが言えるためです。

研究グループは、超対称性の自発的破れを観測するための物理量として、真空のエネルギーに注目しました。真空エネルギーが数値的に計算できると、超対称性の自発的破れの大きさがわかるためです。ここで、エネルギーを計算するとはいつでも、エネルギーの基準点をどのように選ぶかが問題になります。特に超対称性の自発的破れを見るためには、真空エネルギーが0か否かが重要であるため、エネルギーの基準点を“正しく”選ぶ必要があります。しかし、通常の力学では、エネルギーとは、その増減だけが重要であり、基準点の選び方はまったくの自由です。この、エネルギーの基準点の選び方に対する一定の理解に到達するまでが、研究グループの最も苦勞した点です。最終的な理解は、もし格子上で保たれる超対称性があれば、その超対称性と矛盾しないような自然な基準点の選び方がある、というものでした。これが開発した方法の決定的なポイントです。

まず、この方法を数学的に既に結果がわかっている、比較的やさしい系に応用して、その有効性を調べました。使用したのは超対称量子力学という系で、この理論に含まれる(超ポテンシャルと呼ばれる)ある関数の形によっては、超対称性が自発的に破れることがわかっています。数値計算による測定の結果、確かに真空エネルギーは正、つまり超対称性が自発的に破れていました(図1)。このように、この方法で真空エネルギー、そして超対称性の自発的破れを調べることができることを確認しました。

次に、本格的な応用として、これまで超対称性の破れがわかっていない系に適用しました。問題としたのは、1次元空間の超対称性を4つ持った超対称ゲージ理論です。この理論については、類似の系の理論計算から、超対称性が自発的に破れているのではないかという予想がありました。研究グループは、この予想の正否を、数値シミュレーションを使った計算で確かめることが面白いと考え、杉野文彦専門研究員が以前から独自に提唱していた格子定式化を使用しました。理研のスーパーコンピュータ「理研スーパーコンバインドクラスター(RSCC)システム」を60,000CPU時間程度(1CPU時間とは1個のCPUで計算すると1時間かかる計算量:ここでは最大100個程度のCPUを同時に使った)使って計算したところ、真空エネルギーは誤差の範囲で0となりました(図2)。結果を見る限り、この理論では超対称性の自発的破れはおきていないように思われます。

3. 研究成果

研究グループは、超対称性の一部を厳密に保つような超対称ゲージ理論の格子定式化に基づいて、真空エネルギーを数値的に計算する方法を開発・提案しました。さらに、この手法を使って、1次元空間の超対称性を4つ持った超対称ゲージ理論における超対称性の自発的破れの可能性を数値シミュレーションで検証しました。今回、従来の予想と反し、真空エネルギーが0、つまり超対称性が自発的に破れていない、という結果を得ました。まだ誤差が大きいいため、この点に関する研究グル

ープの結論は完全ではありませんが、さらに誤差を減らして強固な結論を得るために、現在アルゴリズムを改良した数値計算に取り組んでいます。

4. 今後の期待

研究グループが行った、超対称ゲージ理論での超対称性の自発的破れに関する数値シミュレーションは、世界で初めて行ったまったく新しいタイプの研究です。最も大きな意義は、これまでほとんど不可能と考えられてきた、超対称ゲージ理論の数値計算に基づいた研究が、実際に可能であることを実証してみせた点にあります。この研究を契機に、今後、より大規模な数値シミュレーションが行われ、理論計算では従来得ることができなかった超対称ゲージ理論のさらなる理解へとつながることが期待されます。

(問い合わせ先)

独立行政法人理化学研究所

仁科加速器研究センター 川合理論物理学研究室

専任研究員 鈴木 博 (すずき ひろし)

Tel : 048-462-4395 / Fax : 048-462-4698

岡山光量子科学研究所

専門研究員 杉野 文彦 (すぎの ふみひこ)

Tel : 086-256-3005 / Fax : 086-256-3580

(報道担当)

独立行政法人理化学研究所 広報室 報道担当

Tel : 048-467-9272 / Fax : 048-462-4715

Mail : koho@riken.jp

<補足説明>

※1 対称性の自発的破れ

系を記述する理論の変数にある種の置き換えをおこなっても理論が変わらない時、その理論は対称性を持つという。例えば、宇宙には特定の方向がないので、物理法則は全ての変数の向きを同時に回転しても不変である（これを回転対称性という）。しかし、実際には、磁石や結晶などのように特定の方向が特別な性質を持つ状態が存在する。このように、理論の対称性が系の状態の対称性に反映しない現象を、対称性の自発的破れと呼ぶ。超伝導体のマイスナー効果や素粒子理論のヒッグス機構なども、その例である。対称性の自発的破れを観測するには、対称性を破る弱い外場を系に作用させ、それをスイッチオフした時に外場の痕跡が残るかどうかを調べればよい。例えば、鉄などの強磁性体に外からある向きに磁場を作用すると、その磁場に沿った向きに磁化（磁石の性質）が起こり、回転対称性が破れる。この外部

磁場をだんだん弱くして最終的に 0 にした時にも磁化が残っていれば、回転対称性が自発的に破れていることになる。今回の超対称性の場合には、ボーズ粒子とフェルミ粒子で温度に対する応答が違うために、系の絶対温度が 0 でなく正の場合には超対称性が破れる。そこで、温度をだんだん低くして 0 にした時に、破れの痕跡が残るかどうかなを見ると、超対称性の自発的破れを調べることができる。これがまさに真空エネルギーが 0 かどうかを測定することに対応しており、研究グループが数値計算で行っていることである。

※2 格子ゲージ理論

ゲージ理論とは、量子力学の波動関数の位相を時空の各点ごとに変えても理論が変わらないこと（ゲージ対称性）を要請する理論である。自然界の基本的な 4 つの力、重力、電磁気力、弱い力、強い力は全てこのゲージ理論で記述できることが分かっており、ゲージ理論の考え方は現代物理学の 1 つの基礎をなしている。ゲージ理論の方程式は、力の強さが弱い場合には近似的に解くことができる（この手法を摂動論と呼ぶ）が、力が強い場合には解くのが極めて難しい。これは、我々の住む時間と空間が連続的であり、無限個の数の点を含んでいることと関係している。このような、摂動論が無効な状況で有効なのが、格子ゲージ理論と呼ばれる手法である。これは、時間と空間を格子目に切り有限個の点の上で理論の方程式を近似する（図 3）のもので、このようにすることで、摂動論によらずにゲージ理論を定式化することができる。また、この格子目の上の方程式をコンピュータで数値的に解くことも可能になり、摂動論で調べるのが本質的に不可能な現象（クォークの閉じ込め、カイラル対称性の自発的破れなど：非摂動論的效果と呼ばれる）の研究に大きな成果をあげてきた。ここで問題にしている超対称性の自発的破れもこうした非摂動論的效果であり、格子ゲージ理論の手法を超対称ゲージ理論に応用しようとするのは極めて自然である。ところが、超対称性の性質は、時間・空間の構造と密接に関係しており、格子的な時間・空間の構造は、一般に超対称性と矛盾する。このことから格子ゲージ理論による超対称ゲージ理論の研究はほとんど不可能とされてきた。

※3 真空エネルギー

原子・分子の大きさ以下のミクロな世界の物理法則である量子力学によると、粒子の量子力学的ゆらぎの効果（零点エネルギー）のため、真空といえどもエネルギーを持つ。しかも、量子力学と相対性理論によると、真空とは何もないからっぽの状態ではなく、粒子と反粒子が絶えず生成と消滅をくり返している複雑な状態である。通常、超対称性を持った理論では、ボーズ粒子とフェルミ粒子のペアの間で零点エネルギーが打ち消し合い、真空エネルギーは 0 になっている。しかし、もし超対称性が自発的に破れると、この真空エネルギーは 0 ではなく正の値になるので、その値が超対称性の自発的破れのひとつの指標を与える。

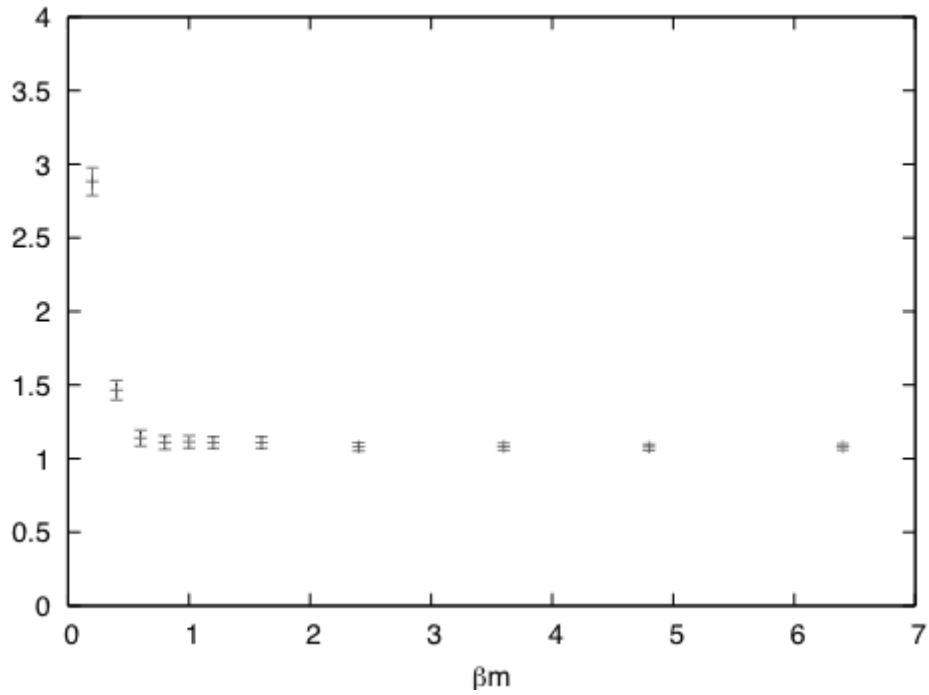


図1 超対称量子力学系の真空エネルギー
 (横軸：温度の逆数、縦軸：エネルギー)

図の右の方に行くに従って温度が低く、系のエネルギーがある一定値に近づく。この値が真空エネルギーを表す。これは超対称性が自発的に破れている例で、真空エネルギーが0ではなくなっている。

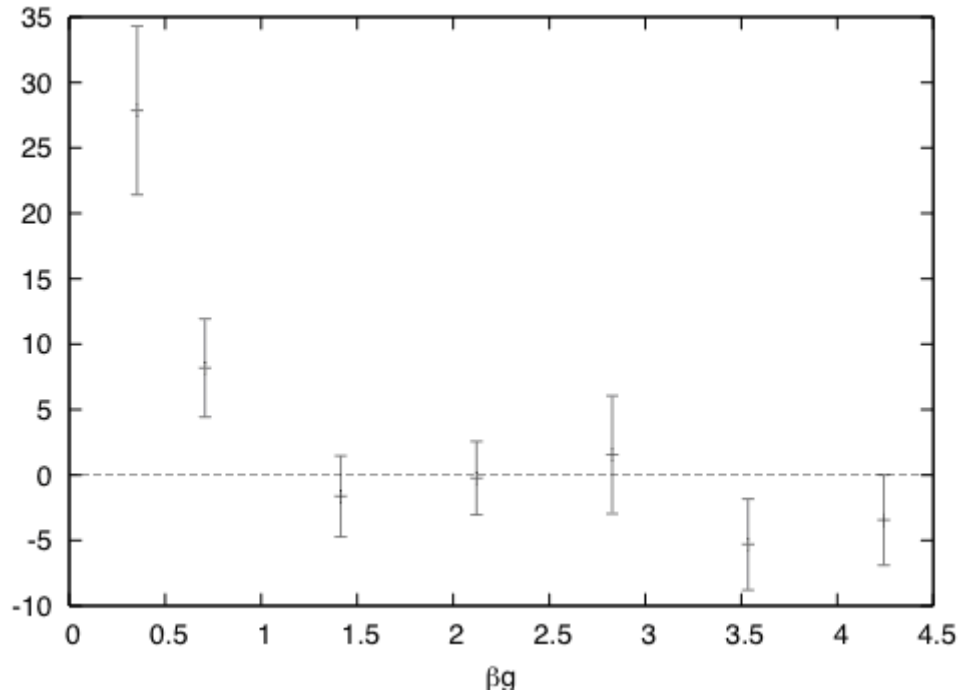


図2 1次元空間の超対称性を4つ持った超対称ゲージ理論での真空エネルギー
(横軸：温度の逆数、縦軸：エネルギー)

RSCCを60,000CPU時間使って得た。図の右の方に行くに従って温度が低く、系のエネルギーがある一定値に近づく。この値が真空エネルギーを表す。この系では真空エネルギーが0と無矛盾。

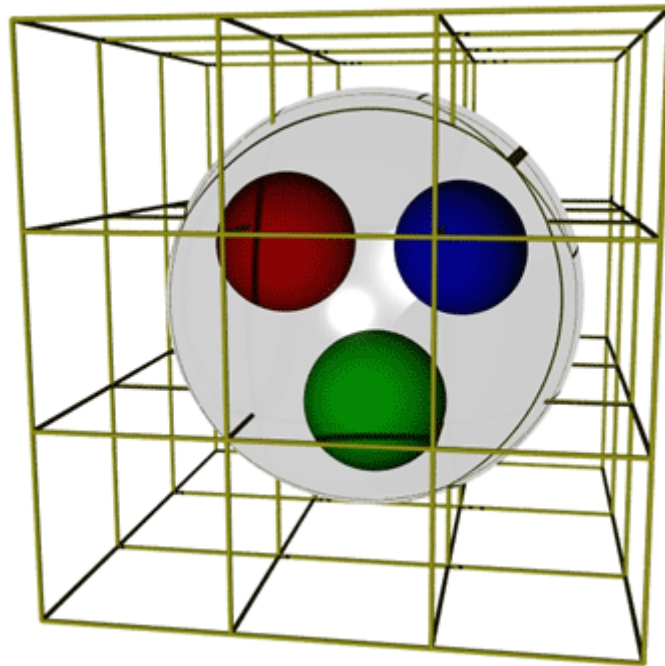


図3 格子ゲージ理論の概念図

赤・青・緑はクォークを示し、陽子・中性子や中間子などのハドロンと呼ばれる粒子を構成する素粒子。また、クォーク間の強い力を媒介する素粒子をグルーオンと呼ぶ。ハドロンは、いくつかのクォークが大変強い力で結合したもので、ハドロンからクォークを単独で取り出すことはできない。格子ゲージ理論では、空間を格子目に切って空間の点の数を有限とし、クォークやグルーオンは、この格子目の点上だけに置かれているものとして考える。