

4.5.2 素粒子

(1) 現在行われている課題

素粒子物理学が目指すもの

我々が生きている自然界には幅広い階層性が存在する。これまで人類はその英知を駆使して階層ごとの自然現象を記述する物理法則を探求してきた。現在我々がいまだ完全には理解できていない階層として、自然界の最小構成要素である素粒子の階層と、広大なスケールを扱う宇宙の階層がある。これら両極端の階層は人類の発展と理解が進むとともに新たな階層が現れてくるという自然科学のフロンティアでもある。素粒子物理学の目的は、より深い階層を探ることによって素粒子の世界を記述するより根源的かつ統一的な基本理論を探求するとともに、得られた基本理論を用いて宇宙の始まりから現在に至るまでの進化の過程を解明・理解することにある。このような研究活動を通じて得られた科学的知見は直ちに現在の我々の日常生活の質の向上につながるものではないかもしないが、発見された物理法則や世界認識の視点、科学的成果等は普遍性を持って人類共通の知的財産となり、文化遺産として遠い将来まで引き継がれて行くものである[1]。

自然界は強い力、電磁気力、弱い力、重力の4つの力によって支配されており、重力を除く他の相互作用は「標準理論」と呼ばれる体系によって記述できることが知られている。しかしながら、重力の量子効果や標準理論に含まれるパラメータの起源等は標準理論の枠内では解決できない問題であるため、これらを説明する新しい自然階層の存在が期待され世界的に活発な理論的・実験的研究が進められてきている（図4.5.2-1 参照）。素粒子加速器実験には大きく分けて二つの相補的アプローチがある。一つはエネルギー フロンティア型の実験であり、加速粒子の衝突エネルギーを上げることによって新しい粒子・物理現象の発見を目指す[2]。現在欧州原子核研究機構（CERN）において稼働中の LHC（Large Hadron Collider）が典型例である。エネルギー フロンティア型の場合、通常の標準理論を超える新しい理論を想定して実験が計画・推進される。もう一つのアプローチはルミノシティ フロンティア型の実験である。粒子の衝突イベント数增加による統計精度の向上によって標準理論からのズレを検出し、新しい物理の手がかりを得ようというものである。代表的なものとして高エネルギー 加速器研究機構（KEK）におけるスーパーKEKB 計画や KEK と日本原子力研究開発機構（JAEA）が共同で建設した J-PARC におけるミューオン実験が挙げられる。これらのアプローチでは、高精度の実験結果に対応して、標準理論を定量的に高い精度でコントロールする必要がある。このような加速器実験の現状も踏まえつつ、本稿では以下の5つの計算素粒子物理の課題について、その短・長期的目標とそれを達成するために必要な計算スペックを検討する。

- i) 格子量子色力学（格子 QCD）
- ii) テクニカラー理論の非摂動ダイナミクス
- iii) 量子電磁気学（QED）の高次補正計算（多倍精度演算）
- iv) ファインマン振幅の自動計算（4倍精度演算）
- v) 超弦理論シミュレーションで探る時空の量子ダイナミクス

力の統一へ向けて

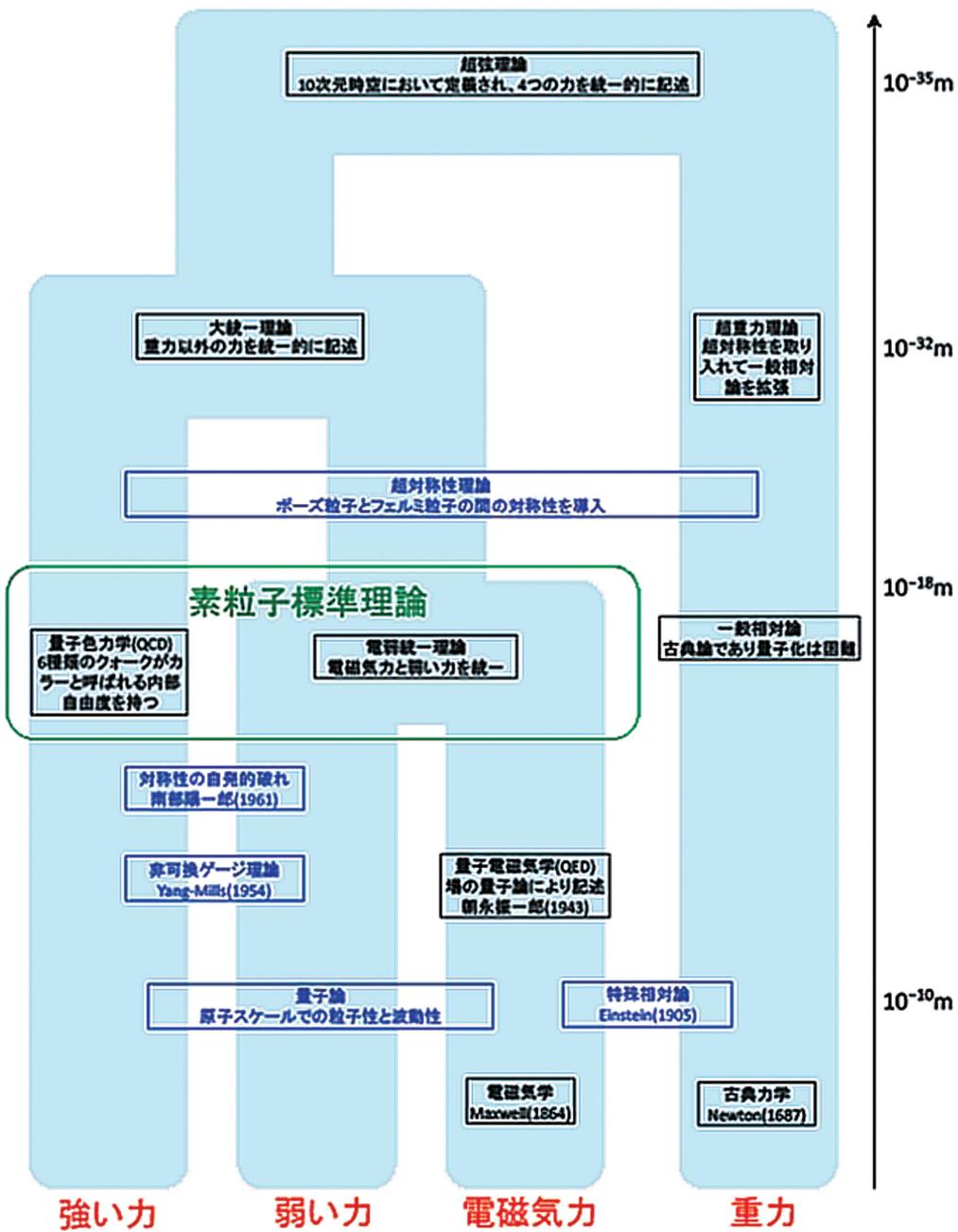


図 4.5.2-1 自然界に存在する力の構造

「京」での研究課題

HPCI 戦略分野 5 の素粒子物理分野の課題として「格子 QCD による物理点でのバリオン間相互作用の決定」が設定されている。格子 QCD は、1974 年 Wilson によって提唱され、1981 年頃から高性能計算機の登場とともに実際の数値計算が始まった。それ以来、格子 QCD は常に世界最高レベルのスーパーコンピュータを用いた大規模計算によって計算素粒子物理学を牽引してきた。ここでは格子 QCD 研究の歴史を概観し、「京」での研究課題にどのようにつながっているのかを簡単に説明する。

標準理論において強い相互作用は QCD により記述され、原子核や陽子・中性子の性質をその構成要素であるクォークとグルーオン（相互作用を媒介する粒子）の力学から説明する。しかしながら、強い力は陽子・中性子の大きさ程度の距離 (10^{-15}m) 以上では相互作用が大きいために摂動論（一種の近似）による解析的取り扱いが難しく、何らかの非摂動的な（つまり、近似によらない）計算手法が必要になる¹。格子 QCD はその要請に応えるものであり、空間 3 次元と時間 1 次元を離散化することによって QCD を格子上で定義し、モンテカルロ法による数値計算を用いて非摂動的な理論的予言を可能とする。

格子 QCD の数値計算が始まった当初は、クォークの真空偏極効果を無視することによって計算コストを抑えた、いわゆるクエンチ近似を用いた小規模計算に限定されていた。その後計算機性能は着実に向上し、1990 年代中頃には 600GFLOPS 程度のピーク性能を持つ計算機を用いることによってクエンチ近似計算でのハドロン質量は 10% の精度で実験値を再現したが、同時に、数% の精度で実験値と一致させるにはクエンチ近似では不十分でありクォークの真空偏極の寄与が必要であることも明らかとなった。これにより、研究の焦点はクォークの真空偏極効果を取り入れた近似のない計算へと移行し、現在数百 TFLOPS から 1PFLOPS 相当のピーク性能を持つ計算機を用いたハドロン質量再現の試みは誤差を数% 以下に抑えた非常に高精度なものとなっている。また、標準模型においてクォークの力学を記述する部分（クォークセクター）のパラメータを決定するために必要な各種ハドロン行列要素の計算に関しても、近似を排すことによって高精度化が推し進められている。

2000 年代に入り、10TFLOPS を超えるピーク性能を持つ計算機が利用できるようになると格子 QCD 研究に二つの新たな流れが加わった。一つは、格子カイラル対称性を保持した計算である。カイラル対称性は QCD の持つ特徴的な性質の一つである。しかしながら、格子カイラル対称性を保持した計算はそれを保持しない計算に比べて計算コストが 10 倍以上必要なため、扱える物理的体積が小さくなってしまったり、格子間隔が粗くなってしまう。そのため格子カイラル対称性を保持した計算はその対称性が本質的な役割を果たす物理量の計算に主眼をおいて推し進められている。もう一つの流れは、QCD のダイナミクスを表すハドロン間相互作用の研究である。具体的には、不安定粒子の崩壊、ハドロン同士の散乱・束縛状態、核力を含むバリオン間力、クォークを自由度とした原子核の直接構成などの課題が挙げられる。これまででは主に孤立したハドロンの静的な性質が調べられてきたが、ハドロン間相互作用の計算では複数のハドロンを扱うため、より大きな物理体積を必要とする。これまででは計算コストを抑え

¹よく知られている電磁気力では相互作用が十分小さいため、摂動論的に精度の高い計算が可能となる。

るために現実世界よりも重いクォーク質量を用いた計算が中心であったが、現在では積年の目標であった現実的なクォーク質量での計算（物理点計算）が可能となってきた。

このような状況の下、「京」での研究課題「格子 QCD による物理点でのバリオン間相互作用の決定」が目指すものは、微細化とマルチスケール化を鍵とする格子 QCD 計算の新しい展開である。微細化とは、電磁相互作用やアップ・ダウンクォークの質量差を取り入れたシミュレーションの実現を意味する。物理点計算が可能となったことにより、格子 QCD 計算は誤差 10% レベルの段階から誤差 1% レベルの精密計算の時代を迎えつつある。それにともなって、たかだか 1% 程度と考えられている電磁相互作用やアップ・ダウンクォークの質量差の効果を正しく評価する必要性が認識され始めている。他方、マルチスケール化とは格子 QCD を用いてバリオン 2 体間の有効相互作用を調べたり、更には核子の束縛状態である原子核の直接構成を行うことを意味する。前者が従来の原子核研究の延長・発展であるのに対して、後者はクォーク・グルーオンを自由度とした第一原理的アプローチである。

(2) 長期的目標

(i) 格子量子色力学（格子 QCD）

格子 QCD 研究の目的は、(1) 標準理論の精密化によって、より小さなスケールの階層を支配する新しい物理法則への足掛かりを探ること、(2) 宇宙の進化過程を解明するために必要な多体系物理の定量的解明・理解を進めることである。より具体的な研究項目として

- 素粒子標準模型におけるクォークセクターのパラメータの精密決定
- クォークから原子核にわたる複数階層をつなぐダイナミクスの QCD による統一的理解
- 有限温度・有限密度の物理の解明

が挙げられる。これらの研究目標を達成するために、今後格子 QCD が取り組むべき課題は大きく分けて、(a) 格子カイラル対称性を保持した計算の進化、(b) 複数の階層を取り入れることのできる大きな物理的体積や小さな格子間隔での計算の進化、(c) 有限温度・有限密度計算の進化に分類される。以下それぞれの課題について科学的意義を述べる。

(a) 格子カイラル対称性を保持した計算の進化

標準理論はすべてカイラル対称性を持つフェルミオンから構築されており、QCD も例外ではない。特に標準理論におけるクォークセクターのパラメータの精密決定に関しては、格子カイラル対称性を保持した計算は理論的に大きな利点を持っている。しかしながら、格子カイラル対称性を保持した計算はそうでないものに比べて計算コストが 10 倍以上必要なため、大規模な計算はいまだ困難である。今後、格子カイラル対称性を保持した計算を効率的に実行するためのアルゴリズム的進展が望まれる。

格子カイラル対称性を保持した計算の重要性は QCD のみにとどまらない。QCD とともに標準理論を構成する電弱統一理論はカイラルなゲージ対称性に基づいており、そのダイナミクスにおいて本質的な役割を果たす。しかしながら、この対称性は QCD の持つカイラル対称性よりも複雑な構造を持っており、現在のところ実際の数値計算は非常に困難である。また、標準理論よりも一段深い階層の物理を記述する理論の候補である超対称性理論においてもカイラ

ル対称性は重要である。格子上における超対称性の定式化が困難であるために数値的研究は進んではいないが、もし現在稼働中の加速器 LHCにおいて超対称性粒子が発見されれば、超対称性を持つゲージ理論の非摂動的な側面の研究が必要になってくる。

(b) 複数の階層を取り入れることのできる大きな物理的体積や小さな格子間隔での計算の進化

自然科学の発展は実験による新たな階層の発見と、既存の物理法則を統合的に説明する新しい物理法則の構築を積み重ねてきた。強い相互作用においても歴史的には原子核の階層 \Rightarrow 核子（陽子・中性子）の階層 \Rightarrow 素粒子であるクォークの階層という深化のプロセスをたどってきた。現在、強い相互作用を記述する理論は QCD であると信じられているが、そうであれば格子 QCD 計算は原子核階層での従来の物理法則を矛盾なく説明するとともに、それを超える理論的予言が可能なはずである。そのためには、クォークの階層と原子核階層を同時に取り扱わなければならず、大きな物理的体積での計算が必要となる（図 4.5.2-2 右参照）。宇宙における鉄より重い元素の合成過程は素粒子の階層と原子核の階層にまたがる物理現象であり、格子 QCD を用いた第一原理計算が果たす役割は大きい。

標準理論が記述する階層よりも更に一段深い階層の新しい物理を探るために、エネルギー フロンティア型とルミノシティフロンティア型の 2 種類の実験的アプローチがあることは先に述べたとおりである。KEK によって推進されているスーパーKEKB 計画は後者のタイプの実験であり、その目的は B ファクトリー実験の更なる精緻化によって、標準理論による理論的予言（理論値）と実験値とのズレを見出すことである。この実験はボトムクォークを含むハドロン行列要素の精確な理論的評価を要求するが、そのためには 1 fm オーダーの QCD の特徴的スケールとその 1/10 程度の長さであるボトムクォークの波長を同時に取り扱う必要がある。いまのところ計算機性能の制約から格子間隔はボトムクォークの波長よりも粗いものとなっておりボトムクォークの直接的な取り扱いは困難な状況にあるが、重いクォークの有効理論などを使うことでその困難を解決し、ボトムクォークを含むハドロン行列要素の精密計算を目指して行く（図 4.5.2-2 左参照）。

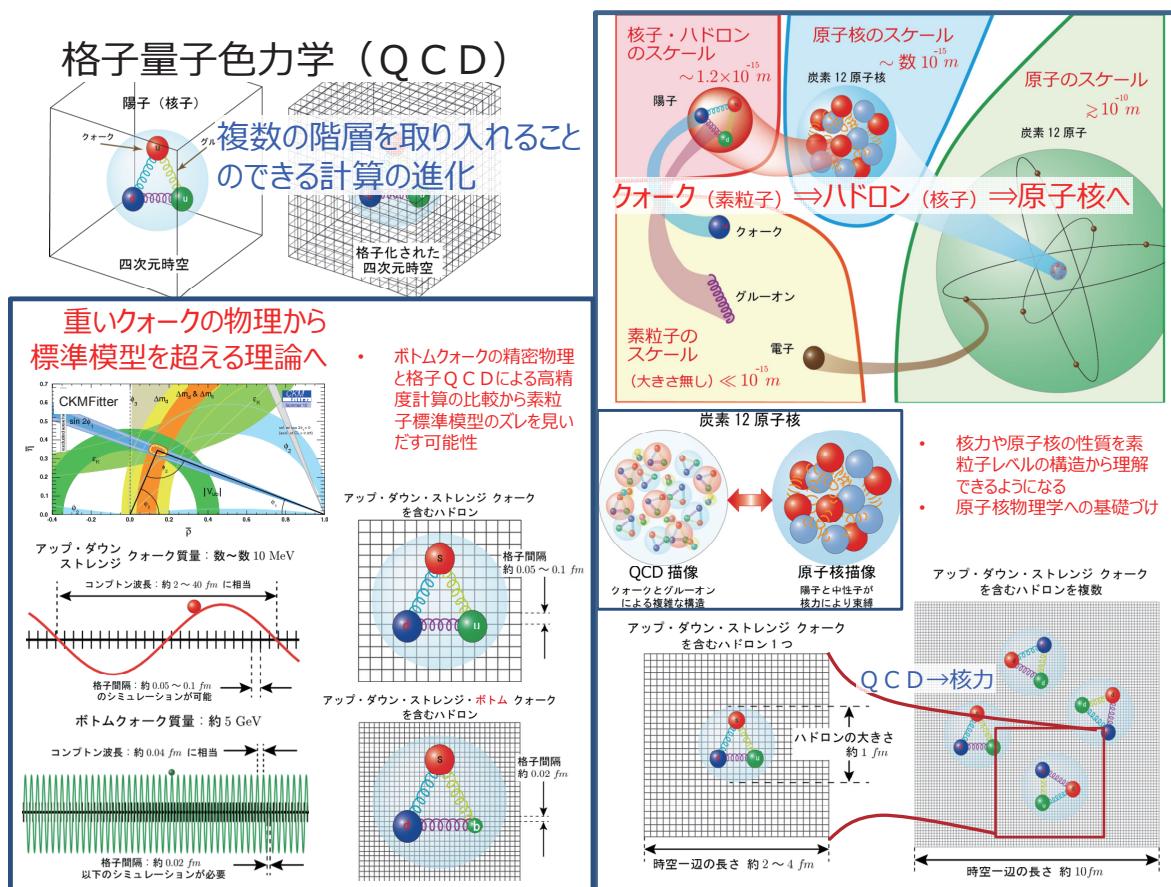


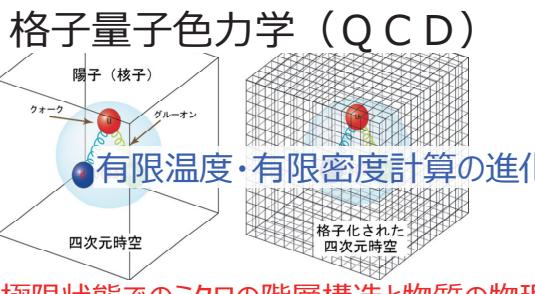
図 4.5.2-2 長期的目標 複数の階層を取り入れることのできる計算の進化 (CKM Fitter 図[3])

(c) 有限温度・有限密度計算の進化

現在の宇宙の姿はビッグバンによる宇宙開闢後のミクロなスケールにおける物理現象の帰結であると考えられている。例えば QCD は宇宙初期のような高温ではクォーク・グルーオン・プラズマ相を、現在のような“冷えた”状態ではハドロン相を予言する。また、低温高密度における QCD の相構造解析は、超新星の爆発メカニズムの解明や、中性子星などの高密度天体の内部状態を知るうえで必須である。QCD は温度と密度の関数として多様な相構造を持つことが期待されているが、その全貌を実験的に解明することは不可能であり、格子 QCD による第一原理計算への期待は大きい（図 4.5.2-3 参照）。

しかしながら、有限密度計算におけるモンテカルロ法の符号問題のために、歴史的にはゼロ密度における有限温度相転移の研究が重点的に進められてきた。現在相転移温度や状態方程式（熱力学量間の関係式）の計算は精密測定と呼べる段階に入ってきており、今後は流体力学的性質を表す輸送係数などの物理量を計算し、相構造のより詳細な解析と理解を目指す。

他方、有限密度計算において現在広く用いられている方法の一つは、クォークの化学ポテンシャル μ について $\mu=0$ のまわりで級数展開を行い物理量を評価する試みである。残念ながらこの方法は収束半径による制約から低密度領域でしか有効ではない。真に興味深い相構造は高密度側で予想されているため、その領域を開拓できる計算手法が確立されれば新たな物理学の地平が開けるはずである。



極限状態でのミクロの階層構造と物質の物理

- 宇宙誕生直後や中性子星、超新星爆発などの高エネルギー・高密度状況下での物質の性質を知ることができる。
- 有限温度・有限密度における相構造解析
- クォーク→ハドロン→原子核つながる階層構造の諸性質解明

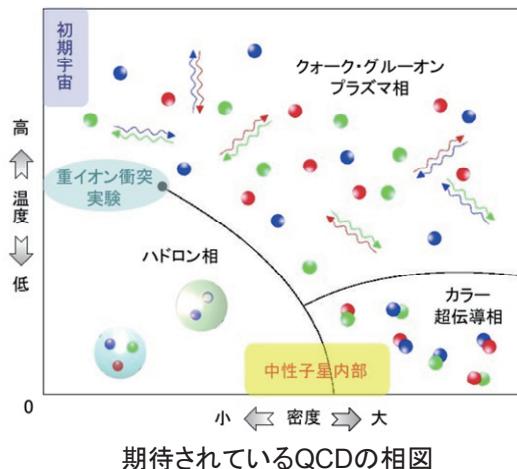


図 4.5.2-3 長期的目標 有限温度・有限密度計算の進化

(ii) テクニカラー理論の非摂動ダイナミクス

標準模型において、すべての素粒子の質量の起源はヒッグス場の凝縮によって説明される。2012年7月、CERNのLHCにおいてヒッグス粒子“らしきもの”が発見されたとの報道がなされたことは記憶に新しい。今後より詳細な解析を経て最終的な論文が発表される予定である。では、素粒子物理学は標準理論の実験的検証によって終焉を迎えるのであろうか？実は、標準理論には理論的に不自然な点あるいは不満足な点が存在することが早くから指摘されており、そのためこれが究極の理論だとは考えられていない。例えば、ヒッグス場のような基本的な場の凝縮のエネルギー・スケールは量子論的に不安定であることが挙げられる。ただし、これまでの実験結果により標準理論が $1\text{TeV}=1000\text{GeV}$ より下のエネルギー・スケールの物理現象を非常によく記述していることが確認されているため、 1TeV を超えるような高いエネルギー・スケールに新しい物理理論が存在し、標準理論の枠内では説明できない素粒子物理学上の疑問に対する答えを与えてくれることが期待されている。

これまで、標準理論を超える新しい物理理論として数多くのものが提案されている。テクニカラー理論もその一つであり、ヒッグス場の凝縮を“複合粒子”的凝縮に置き換えることによってエネルギー・スケールの不安定性の問題解決を目指していることが大きな特徴である（図4.5.2-4）。この理論はQCDに似た理論的構造を持っているため解析的な取り扱いが難しく、非摂動ダイナミクスを数値的に解く必要がある。ただし、QCDとは異なる困難として、理論を構成するゲージ群の種類・表現とフレーバー数（QCDはSU(3)群の基本表現で6フレーバー）が確定しておらず、両者の組み合わせを系統的に試すことによって有力候補を絞り込む必要がある。そのため、提案から30年以上経った現在に至るまで定量的な予言はほとんどなされてこなかった。しかしながら、近年の計算機能力の飛躍的向上と新規計算手法・アルゴリズムの開発により、テクニカラー理論の非摂動ダイナミクスをゲージ群の種類・表現とフレーバー数を変えながら系統的に調べることが可能になり、今後の発展が期待されている。

(iii) 量子電磁気学（QED）の高次補正計算（多倍精度演算）

量子電磁気学（QED : Quantum Electrodynamics）は、量子論と特殊相対論を統合した「場の理論」で記述される。1940年代、朝永振一郎、J. Schwinger、R. Feynman らによる繰り込み手法に基づく定式化によって完成した（1965年ノーベル物理学賞共同受賞）。QEDにおける場の理論の成功がその後の標準理論の礎となっており、素粒子物理学の発展における歴史的役割はきわめて大きい。

QEDは現在実験的に最も高い精度で検証されている理論であり、素粒子物理学的に重要な研究対象として電子とミュー粒子の異常磁気能率がある。磁気能率は通常 g で表され、QEDによる補正がなければその値は厳密に 2 と予想されている。そのため g の 2 からのズレを表す $g-2$ という量は異常磁気能率と呼ばれている。便宜的に $g=2 \times (1+a)$ と表すと、現時点では電子の異常磁気能率に関する最も高精度の実験結果は 2008 年ハーバード大グループによるもので、 $a=0.00115965218073(28)$ で与えられている。その相対誤差は 0.24ppb であり、 10^{-9} レベルという驚くべき精度である（図 4.5.2-4 参照）。他方、理論的に a を計算する場合には、電磁相互作用の強さを表すパラメータ α （微細構造定数）による摂動展開を行う：

$$a(\text{理論}) = \alpha A_2 + \alpha^2 A_4 + \alpha^3 A_6 + \alpha^4 A_8 + \alpha^5 A_{10} + (\alpha \text{の高次項}) + (\text{QED 以外の寄与})$$

ここで、展開係数 $A_{2n}(n \geq 4)$ の評価のために数値計算が必要となる。電子の場合とミュー粒子の場合の重要な違いは QED 以外の寄与の大きさであり、そこから両者の研究目的が異なってくる。電子の場合は QED 以外の寄与が小さいため、実験値と理論式を等しいとして微細構造定数 α を現時点で 0.25ppb の精度で決めることが可能である。電磁相互作用は物理のあらゆる分野に関わっており、微細構造定数 α は原子物理や物性物理における異なる物理現象からも決定することができる。特に、近年の原子物理実験の発展によって、電子異常磁気能率に比肩する精度の α の値が得られるようになってきた。これらの α を相互比較することで、QED の検証、それを含む標準理論の検証、更に広く物理理論の体系をも検証することを目的とする。他方、ミュー粒子の場合はその質量が電子の約 200 倍重いため、より高いエネルギーの現象に敏感である。そのため、ミュー粒子の異常磁気能率では $0.1\text{ppm}(10^{-6})$ 程度の精度で未知の重い粒子の影響が見えるのではないかと期待されている。そのためには、実験および理論の双方がこの ppm 以下の精度を達成し、両者の差異を確定させることが必要である。現在 J-PARC でミュー粒子異常磁気能率実験の準備が精力的に進められており、理論側は QED の寄与を精確に決定することが求められている。

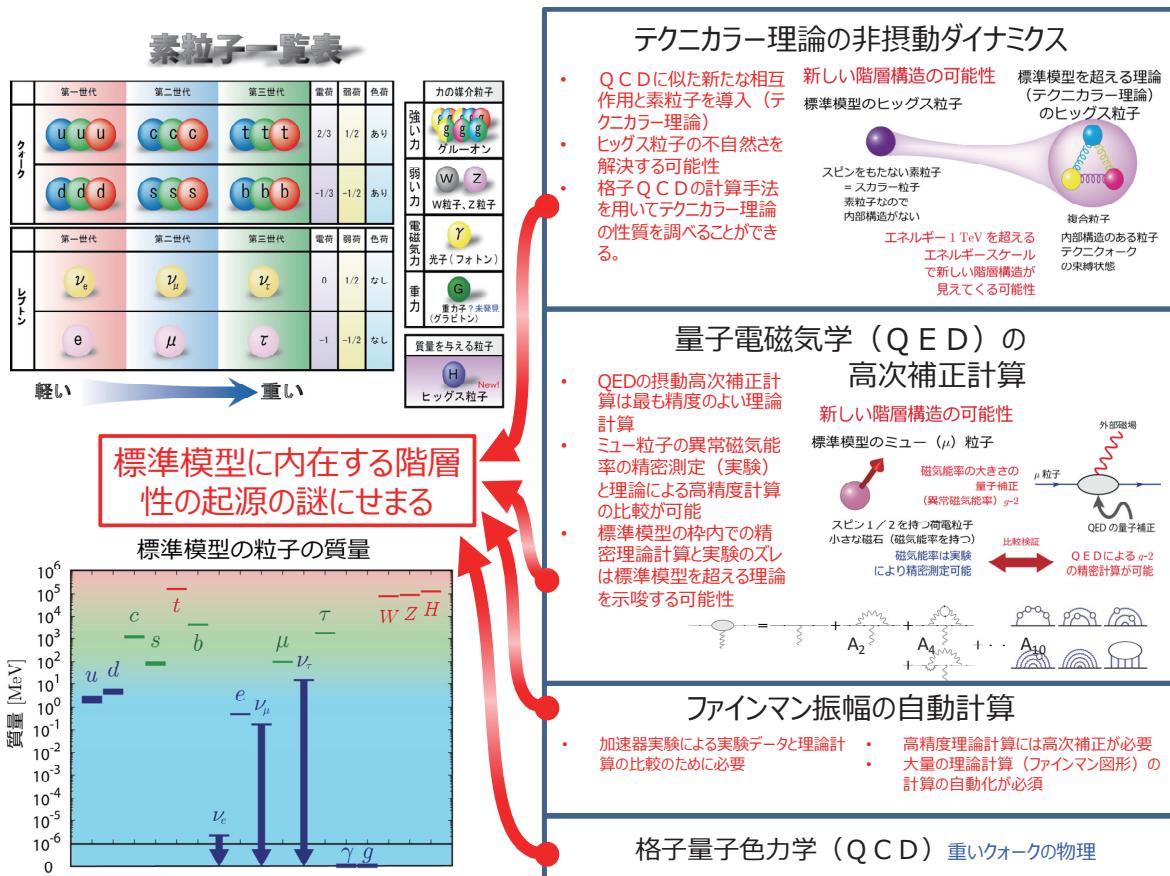


図 4.5.2-4 長期的目標 テクニカラー理論の非摂動ダイナミクス、量子電磁気学（QED）の高次補正計算、ファインマン振幅の自動計算

(iv) ファインマン振幅の自動計算（4倍精度演算）

大型加速器などによる素粒子反応実験に対しては、理論から素粒子の反応確率や運動量分布などを計算し、実験データと比較することが必要である。またシグナルと類似の現象（バックグラウンド）がどのくらい混入するかも予測が必要であり、これらの計算なしには、実験から有意な結論を導くことは困難である。反応確率や分布の計算は相対論的量子場理論を摂動論的に計算する手法が定式化されている。摂動展開を数値的に評価する場合は展開係数をファインマン図で表し、それぞれの図形の表現する多次元積分を計算する方法が一般的である。前出のQEDの高次補正計算もこの一例であるが、ここではQEDに限定せず、標準理論全体およびそれを超えるような新しい理論も対象とする。多種多様な素粒子反応の散乱断面積をこのような手法で数値計算するシステムをファインマン振幅自動計算と呼び、わが国をはじめ、ロシア、フランス、米国などで開発されてきており、90年代にはCERNのLEP-II実験、現在はLHC実験などのデータ解析に貢献している（図4.5.2-4参照）。

(v) 超弦理論シミュレーションで探る時空の量子ダイナミクス

一般相対論では約 100 年前に Einstein によって構築され、重力は時空（時間と空間）の曲がり方で表される。例えば、物質が運動すれば時空の曲がり方が変化する。仮に何も物質が存在しなくとも、時空の曲がり方は波として伝播することが可能である（重力波）。しかしながら、

重力の量子効果が重要な役割を果たす宇宙初期やブラックホールの研究においては、一般相対論の有効性は限定的である。なぜなら、一般相対論は量子論的効果が考慮されていない古典力学的な理論であり、量子論との統合がきわめて困難だからである。現在、重力の量子論として最も有望な候補は超弦理論だと考えられている。超弦理論においては、宇宙の最小基本要素はプランク長 (10^{-35} m) 程度の有限の大きさを持った弦だと考える。一般相対論の単純な量子化における困難は最小基本要素を大きさを持たない点として扱うことに起因しているが、超弦理論では最小基本要素を広がりを持った弦だと考えることによりその困難を回避している。また、超弦理論のもう一つの魅力的な特徴として、弦の振動の仕方によりさまざまな粒子（標準理論に現れるすべての粒子を含む）を表現することができる点である。これは、超弦理論が重力、強い力、弱い力、電磁気力という4つの力の統一的に記述する理論である可能性を示唆している。では、本当に現実世界を記述している究極の理論なのだろうか？今後、超弦理論の構造をより深く理解し、現実世界を記述する理論としての可能性を検証することが長期的目標と言える。

超弦理論の大きな問題は、理論の礎である最小基本要素が実験によって直接検証することが不可能なほど小さいことである。ちなみに、LHC 実験において調べられているスケールは 10^{-19} m 程度である。そのため、理論が正しいことを実証するためには現実世界との整合性を示す証拠の断片を積み重ねていく必要があり、解析的な手法および超弦理論の非摂動的定式化である行列模型を用いた数値シミュレーションによって活発な研究が行われている。

(3) 次世代に解決すべき課題

(i) 格子量子色力学（格子 QCD）

(a) カイラル対称性と QCD に基づく有効バリオン間相互作用の決定とその応用

格子 QCD 計算を用いた有効バリオン間相互作用の決定により原子核・ハイパー核の統一的記述を目指す。実験データ量の不足から不定性が大きいハイペロン間力や3核子間力に対し、格子 QCD 計算によって得られたバリオン間の有効ポテンシャルの情報を提供することで、天体物理においても重要な役割を果たす不安定核やハイパー核の理解を発展させる。同時に有効バリオン間相互作用を応用して状態方程式を決定し、中性子星の構造や超新星爆発の理解を推し進める。また散乱理論と有効バリオン間相互作用を組み合わせることで多様なエキゾチックハドロンの構造解明を進める。現在これらの計算はウィルソン型作用を用いて行われているが、次世代では格子カイラル対称性を持つ5次元有効型作用を使用する。

有効バリオン間相互作用の決定のためには複数のバリオンを取り入れた格子 QCD 計算を行う必要があるため、格子の物理的空間体積は(10 fm^3)以上が望まれる。また、本計算では重いクォークを含まないため格子間隔が 0.1 fm 以下であれば有限格子間隔効果をコントロールできると考えられる。

(b) 重いクォークの物理

現在計画中のスーパーB ファクトリーでは、ボトムクォークを含むハドロンの崩壊の中からまれに起こる崩壊を精密に測定することにより、標準理論が予言する CP 対称性の破れからのズレを検知することで新しい物理の発見を目指している。そのためには、実験精度に匹敵する

精度でボトムクォークを含むハドロンの崩壊の理論計算が必要となる。しかしながら、ボトムクォークは非常に重くその波長が格子間隔よりも小さくなるために、これまでの計算機性能では直接取り扱うことは困難であった。

原理的には、計算機性能の向上とともに格子間隔を小さくすることによって有限格子間隔効果による誤差をコントロールすることが可能である。エクサスケールマシンでの目標としては、格子の物理的空間体積が $(4 \text{ fm})^3$ 、格子間隔が 0.02 fm 程度の計算が一つの目安になると考えられる。この格子間隔であってもボトムクォークを直接取り扱うことは難しいが、有効理論と組み合わせることにより 1%以下の精度の理論計算は可能であると考えられる。

(c) 極限状態でのミクロの階層構造と物質の物理

ビッグバン以降の宇宙の進化において、現在宇宙に存在する多種多様な元素・物質が素粒子から構成されていった過程を解き明かす。そのためには、フェムトスケールにおける二つのテーマを探求することが必要である。一つはクォーク \Rightarrow ハドロン \Rightarrow 原子核へとつながる階層構造の諸性質解明である。現在原子核を構成する基本自由度はクォークとグルーオンであり、その力学を記述する理論は QCD であると広く信じられている。最初の目標は格子 QCD を用いた第一原理計算によって原子核の安定構造の基本指標である魔法数を導出することである。その後、宇宙における元素合成にとって本質的な役割を果たす中性子過剰核の諸性質解明を目指す。もう一つのテーマは、温度・密度を関数とするクォーク物質の相構造解析である。これらを実験によって包括的に研究することは困難であるため、格子 QCD を用いた第一原理計算への期待は大きい。当面の課題は臨界終点の精密決定であるが、その後低温中高密度領域での相構造解析と状態方程式の決定が主要課題となる。

原子核の半径は $1.3 \times A^{1/3} \text{ fm}$ (A は質量数) 程度であることが実験的に知られているため、格子 QCD を用いた原子核の直接構成のためには格子の物理的空間体積は $(10 \text{ fm})^3$ 以上が必要だろう。また、格子間隔は 0.1 fm 以下であれば有限格子間隔効果をコントロールできると考えられるが、なるべく小さい方が望ましい。

(ii) テクニカラー理論の非摂動ダイナミクス

テクニカラー理論の非摂動ダイナミクスを探る際の鍵となる物理量として以下の 3 つが挙げられる。

- (a) 質量異常次元の計算：有限サイズの格子を利用したステップスケーリング型の計算手法を用いて大きな質量異常次元（およそ 1 が望ましい）を持つゲージ群とフレーバー数の組み合わせを調べる。
- (b) 複合粒子のスペクトラム：テクニ中間子質量とその崩壊定数、カイラル凝縮など。テクニカラー理論で期待される特徴的なスペクトラムを探索。
- (c) 多フレーバー QCD における有限温度相転移：強い一次相転移を示すフレーバー数とその質量領域を探る。

今後数年間は、小中規模の格子サイズを用いてゲージ群とフレーバー数の組み合わせを変えながら上記 3 つの物理量を調べ、ゲージ群とフレーバー数の有望な組み合わせを絞り込んで行

くことが中心課題となる。有力候補が見つかった後は大規模格子サイズを用いた精密計算へと移行し、LHC での発見可能性が議論されているテクニ中間子質量の予言を行う。

(iii) 量子電磁気学 (QED) の高次補正計算 (多倍精度演算)

電子の異常磁気能率に対して、ハーバード大のグループが更に 1 枠の精度向上を確定させる実験を計画している。これに対応して、摂動の 8 次の係数 A_8 と 10 次の係数 A_{10} の理論計算精度を更に高めることが強く求められている。実験値と理論計算の精度が現在よりも 1 枠向上すれば、電子の異常磁気能率を用いて未知の重い粒子の効果を探ることが可能になると期待されている。今後 5 年～7 年における目標は、実験精度の飛躍的向上に対応すべく、 A_8 および A_{10} の数値的評価におけるモンテカルロ積分の統計誤差を現在の半分以下に削減することである。そのため、モンテカルロ積分の計算プログラムを高度に最適化したうえで従来の精度を超える高統計計算の遂行を目指す。 A_8 と A_{10} の両者の計算においては 4 倍精度が要求されるため、4 倍精度ライブラリの開発を行うなどにより計算の高速化を図る必要がある。実験グループからの要望により、できれば 2～3 年程度で終わらせたいが、残念ながら計算資源獲得の目処は立っていない。

(iv) ファインマン振幅の自動計算 (4 倍精度演算)

将来建設が検討されている国際リニアコライダー (ILC : International Linear Collider) のようなエネルギー・フロンティア型の実験では、素粒子の衝突エネルギーが高くなり、重要なデータを得るために終状態のチャネルが多粒子系となる場合が多い。また反応を検知する測定器の感度が向上することにより、より精密で高精度な実験データが得られる。この 2 点から、対応した理論的計算においても複雑な終状態で、高次補正を入れたファインマン振幅の計算が必要となる。すでにわが国でも、1 ループ図形を含むファインマン振幅自動計算が完成し、国際リニアコライダーのエネルギー領域では弱い相互作用の 1 ループ補正の寄与が 10% 程度あることを数値的に示している。2 ループ補正についても数値化した計算が必要であるが、現在のところ、世界的に 2 ループ図形の計算まで自動化するシステムはなく、そのようなシステムの開発が急務となっている。またファインマン振幅自動計算システムでは標準理論だけではなく超対称性を取り入れた新たな理論による計算も実行可能であり、未知のエネルギー領域での新粒子・新現象の解明には、このような自動計算システムが不可欠である。

(v) 超弦理論シミュレーションで探る時空の量子ダイナミクス

超弦理論が本当に現実の世界を記述しているのかという問い合わせるうえで、大きな課題の一つが時空の次元である。我々が生きている世界は空間 3 次元と時間 1 次元を合わせた 4 次元時空であるが、実は超弦理論は 10 次元時空で定義されており現実世界を自然に説明できない。この問題に対しては、初期宇宙においては 10 次元時空が実現していたが、その後量子論的な非摂動ダイナミクスにより現在の 4 次元時空が誕生したのではないかと考えられている。この説を行列模型に基づく数値シミュレーションによって検証し、その後日常的には観測できない残り 6 次元の方向の広がりや構造の詳細を明らかにする。

(4) 課題を解決するために必要なアプリケーション群

(i) 格子量子色力学（格子 QCD）

格子 QCD 計算の大まかな流れについて説明する。格子 QCD は場の量子論に基づいて構築されており、Feynman による経路積分量子化を格子離散化されたユークリッド時空上で直接計算するものである。力学的自由度はグルーオンに対応するリンク場とクォークに対応するフェルミオン場を含み、これらの場からなる物理量は、QCD のラグランジアンを指數に持つ重みつき積分で表現される。積分の自由度は非常に巨大であるため、これらの積分の評価はモンテカルロ法で行われる。より具体的には、何らかの方法で重みを再現するようにリンク変数のアンサンブルを生成し、物理量をこのアンサンブルの上で評価し、統計平均をとることで物理量の期待値が得られる。現在、アンサンブル生成に用いられている主流の方法は、クォークの真空偏極の効果を取り入れることができる Hybrid Monte Carlo (HMC) 法である。

以上の一連の計算の流れで最も計算コストのかかる部分はクォーク伝搬関数の計算であり、全体の 8 割以上を占めている。HMC 中では分子動力学の力の計算に現れ、物理量の計算ではハドロン伝搬関数構築のため必要となる。さまざまな物理の問題においてこのクォーク伝搬関数の計算が十分速やかに行われる必要がある。

クォーク伝搬関数の計算は、大規模連立方程式を解く問題に帰着する。係数行列はクォークの運動方程式を 4 次元格子離散化したものになる。格子離散化には任意性があるが、離散化の方法により大まかに以下の 3 種類のクォーク作用が使われている。

- ① スタッガード型
- ② ウィルソン型
- ③ オーバーラップ型、ドメインウォール型（以下ではまとめて 5 次元有効型と呼ぶ）

①はここでは説明しない。ターゲットとする研究対象では②ウィルソン型と③5 次元有効型を用いる。②ウィルソン型は Wilson による格子 QCD の提唱時から長年使用されてきている。この作用はカイラル対称性を持たないが、係数行列は 4 次元格子上の 1 階差分の形になり、計算効率がよく、大規模化に向いていると言える。一方③5 次元有効型は格子カイラル対称性を持ち理論的に望ましい作用である。しかし、対称性を保持するために②ウィルソン型に比べ計算コストはおよそ 10 倍になり、計算は比較的困難である。大規模連立方程式は Krylov 部分空間反復法を用いて計算する。

エクサスケールでの研究対象では以下の作用の組み合わせと計算規模と計算スペックが必要である。

(a) カイラル対称性と QCD に基づく有効バリオン間相互作用の決定とその応用

5 次元有効型作用を用い $128^4 \times 32$ 格子 ($8^4 \times 32/\text{node}$)、格子間隔約 0.1 fm 以下、物理体積約 $(12\text{fm})^4$ 以上が必要となる。

- 演算性能 : 10TFLOPS/node
- オンチップメモリ容量 : 200MB/node
- オンチップメモリバンド幅 : 6TB/s (更に上位にキャッシュがあれば 2TB/s)

- オフチップメモリ容量 : 1GB 以上
- オフチップメモリバンド幅 : 128GB/s
- ネットワークバンド幅 : 128GB/s (リンク 8 本 4 次元トーラス)
- ネットワークレイテンシ : 1μs (8 リンク同時) 反復法内でベクトルの内積計算のためのリダクション計算を高速化する必要性有り
- ストレージ容量 : 0.5~5PB
- 必要総演算量 : 実効 $10^6\sim10^7$ EFLOP
- ジョブ 1 当たりの演算量 : 実効 100EFLOP 以上

(b) 重い夸克の物理

ウィルソン型作用を用い 192^4 格子 ($16^4/\text{node}$)、格子間隔約 0.02fm、物理体積約 $(4\text{fm})^4$ 以上が必要となる。

- 演算性能 : 10TFLOPS/node
- オンチップメモリ容量 : 200MB/node
- オンチップメモリバンド幅 : 18TB/s (更に上位にキャッシュがあれば 6.3TB/s)
- オフチップメモリ容量 : 1GB 以上
- オフチップメモリバンド幅 : 128GB/s
- ネットワークバンド幅 : 128GB/s (リンク 8 本 4 次元トーラス)
- ネットワークレイテンシ : 1μs (8 リンク同時) 反復法内でベクトルの内積計算のためのリダクション計算を高速化する必要性有り
- ストレージ容量 : 10PB
- 必要総演算量 : 実効 $10^6\sim10^7$ EFLOP
- ジョブ 1 当たりの演算量 : 実効 50EFLOP 以上

(c) 極限状態でのミクロの階層構造と物質の物理

ウィルソン型作用を用い 256^4 格子 ($16^4/\text{node}$)、格子間隔約 0.05fm、物理体積約 $(12\text{fm})^4$ 以上が必要となる。

- 演算性能 : 10TFLOPS/node
- オンチップメモリ容量 : 200MB/node
- オンチップメモリバンド幅 : 18TB/s (更に上位にキャッシュがあれば 6.3TB/s)
- オフチップメモリ容量 : 1GB 以上
- オフチップメモリバンド幅 : 128GB/s
- ネットワークバンド幅 : 128GB/s (リンク 8 本 4 次元トーラス)
- ネットワークレイテンシ : 1μs (8 リンク同時) 反復法内でベクトルの内積計算のためのリダクション計算を高速化する必要性有り
- ストレージ容量 : 2PB
- 必要総演算量 : 実効 $10^6\sim10^7$ EFLOP
- ジョブ 1 当たりの演算量 : 50EFLOP 以上

(ii) テクニカラー理論の非摂動ダイナミクス

基本的に格子 QCD シミュレーションと同じ枠組みの計算であるが、ゲージ群とその表現の選び方とフレーバー数の自由度が付加される。特に、計算コストおよび必要メモリはフレーバー数に比例して増大する。現在典型的なフレーバー数は 10 程度である。

以下では典型例として、SU(3)ゲージ群の基本表現で 10 フレーバーの場合を 5 次元有効型作用を用いて $96^4 \times 32$ 格子 ($6^4 \times 32/\text{node}$) でシミュレーションすることを考えた場合の計算スペックを示す。

- 演算性能 : 5TFLOPS/node
- オンチップメモリ容量 : 200MB/node
- オンチップメモリバンド幅 : 18TB/s (更に上位にキャッシュがあれば 6TB/s)
- オフチップメモリ容量 : 7GB 以上
- オフチップメモリバンド幅 : 128GB/s
- ネットワークバンド幅 : 128GB/s (リンク 8 本 4 次元トーラス)
- ネットワークレイテンシ : $1\mu\text{s}$ (8 リンク同時) 反復法内でベクトルの内積計算のためのリダクション計算を高速化する必要性有り
- ストレージ容量 : 500TB (配位のみ)
- 必要総演算量 : 実効 $10^6 \sim 10^7$ EFLOP
- ジョブ 1 当たりの演算量 : 実効 200EFLOP 以上

(iii) 量子電磁気学 (QED) の高次補正計算 (多倍精度演算)

電子の場合もミュー粒子の場合も、摂動展開の係数 $A_{2n}(n \geq 1)$ は運動量空間における多次元積分の和の形で表され、これを解析的に多次元パラメータ空間に変換した後、モンテカルロ法を用いて数値的に評価する。異常磁気能率に対する QED の高次摂動計算は、木下東一郎 (ヨネル大)を中心とした日本人研究グループ独自の数値的アプローチによってのみ計算されてきた。現在ターゲットとなっているものは摂動の 8 次の係数 A_8 と 10 次の係数 A_{10} である。素粒子の反応は、視覚的に理解しやすいように図形化された「ファインマン図」で表され、各々の多次元積分はこのファインマン図に対応している。重要な特徴として、 $A_{2n}(n \geq 1)$ は n 重のループを含むファインマン図で表される。例えば、10 次の場合 1 万個以上という膨大な数の 5 ループを含むファインマン図を数値的に評価する必要がある。数値計算における特徴として以下の点が挙げられる。

- (a) 被積分関数が長大であること。10 次ではすべてのファインマン図の寄与を合わせると 1 億行程度の長さになる。
- (b) 紫外 (運動量が大きい) および赤外 (運動量が小さい) 領域での発散の処理手続きにおいて大きな桁落ちが発生するため、4 倍精度の実数計算が必要である。
- (c) モンテカルロ積分において、多次元運動量空間 (8~13 次元) の各点における被積分関数の評価は独立であるため、通信をほとんど必要としない embarrassingly parallel 的な処理が可能である。

また、必要総演算量は $10^3 \sim 10^4$ EFLOP である。被積分関数の評価点の数で並列化可能であり、評価点の数はイタレーション当たり 10 億から 100 億点を用いる。これを SIMD とコア並列の両方に適宜振り分ければよく、どのような階層性を持つ並列計算機の構成にも対応できる。必要メモリ容量は並列化の実装の詳細によるが、コア当たり 1GB 程度を目安として見込んでおけばよい。また、計算に必要なストレージ容量は総計 1TB で十分である。その他の要望として以下が挙げられる。

- 倍精度および 4 倍精度演算に対するコンパイラの高度な自動 SIMD 化
- プログラムが巨大であるため、コンパイル速度も重要
- 高度に最適化された 4 倍精度ライブラリの提供
- プログラム言語のポータビリティ

(iv) ファインマン振幅の自動計算（4 倍精度演算）

基本的に QED の高次補正計算と同じ枠組みの計算であるが、大きな違いとしては、一つは対象が QED に限定されない点、もう一つは反応の終状態が多岐にわたる点が挙げられる。これにより QED の高次補正計算よりも格段に複雑な計算となっている。

この点を理解するために、電子・陽電子衝突で電弱統一理論に基づく事例を考える。終状態が WW の 2 体、WW γ の 3 体、WW $\gamma\gamma$ の 4 体では、摂動展開の最低次の項（ループ図形を含まない）におけるファインマン図の数は 3 個、18 個、138 個となる（W、 γ は各々ウィークボゾン、光子と呼ばれる素粒子を表す）。摂動展開の最初の補正となる 1 ループ図形では、WW の 2 体でもファインマン図は 129 個となり、4 体ともなれば数千個となる。なお、これに対応する QED 補正計算における A_2 では、1 個のファインマン図のみ必要である。

実験精度が高まれば、摂動展開の更に高次のファインマン振幅の計算が必要とされるが、ファインマン図の数は展開次数の増加と共に指数関数的に増大する。また、反応の全確率を計算するためには終状態の位相空間での積分が必要となるが、終状態 2 体では 2 次元積分、3 体では 5 次元積分、4 体では 8 次元積分となる。ループ図形に対しては、終状態の位相空間積分に加えて反応の中間状態に対する積分が必要となる。終状態が 2 体の最も簡単な場合でも、1 ループ図形では 3 次元積分、2 ループ図形では 6 次元積分が必要である。

以上のように、QED と比較して計算量は格段に増加するものの、計算の枠組みは同じであるため、計算機に対する要望も共通している。

- 倍精度および 4 倍精度演算に対するコンパイラの高度な自動 SIMD 化
- プログラムが巨大であるため、コンパイル速度も重要
- 高度に最適化された 4 倍精度ライブラリの提供

また、各々の多次元積分は単体ノードジョブによる embarrassingly parallel 的処理が可能である点も同じであり、必要総演算量は以下と予想される。

- 摂動展開の最低次の項（ループ図形を含まない）： 10^4 TFLOP 以内
- 1 ループ図形： $10^4 \sim 10^5$ PFLOP
- 2 ループ図形： $10^5 \sim 10^6$ EFLOP

(v) 超弦理論シミュレーションで探る時空の量子ダイナミクス

行列模型は超対称性を持ち、ボゾン的自由度とフェルミオン的自由度を同数含んでいる。フェルミオン的自由度を積分した後に、ボゾン的自由度に対してモンテカルロシミュレーションを行う。ただし、フェルミオン的自由度の積分によって位相因子が現れ、いわゆる符号問題が起こるため、数値シミュレーションは必ずしも容易ではない。

今後しばらくは、アルゴリズムの高度化などを含む数値シミュレーション手法の研究・実証が中心課題になると予想され、エクサスケールの計算機資源は必要としない。

課題	要求性能(PFLOPS)	要求メモリバンド幅(PB/s)	メモリ量/PB	ストレージ量/PB	計算時間/hour	ケース数	総演算量(EFLOP)	概要と計算手法	問題規模	備考
カイラル対称性とQCDに基づく有効パリオン間相互作用の決定とその応用	510	390	0.066	0.5	880	10	16000000	格子QCD (カイラル5次元型)、ハイブリッドモンテカルロ法、CG法	問題規模 格子点: 128^4x32、格子間隔: 0.1 [fm] 以下	ノード数を16^4 ノードを仮定し、ノードあたり性能を、オンチップメモリ容量 200MB、オンチップメモリバンド幅 6TB/s、ネットワークレイテンシ 1 μ sec程度、ネットワークバンド幅128GB/sを想定。
重いクォークの物理	510	370	0.021	1	880	10	16000000	格子QCD (ウィルソン型)、ハイブリッドモンテカルロ法、CG法 BiCGStab 法	192^4	ノード数を12^4 ノードを仮定し、ノードあたり性能を、オンチップメモリ容量 200MB、オンチップメモリバンド幅 18TB/s、ネットワークレイテンシ 1 μ sec程度、ネットワークバンド幅128GB/sを想定。
極限状態でのミクロの階層構造と物質の物理	510	1200	0.066	0.2	880	10	16000000	格子QCD (ウィルソン型)、ハイブリッドモンテカルロ法、CG法、 BiCGStab 法	256^4	ノード数を16^4 ノードを仮定し、ノードあたり性能を、オンチップメモリ容量 200MB、オンチップメモリバンド幅 18TB/s、ネットワークレイテンシ 1 μ sec程度、ネットワークバンド幅128GB/sを想定。
テクニカラー理論の非摂動ダイナミクス	510	1200	0.46	0.05	880	10	16000000	格子QCD (カイラル5次元型)、ハイブリッドモンテカルロ法、CG法	96^4x32	ノード数を16^4 ノードを仮定し、ノードあたり性能を、オンチップメモリ容量 200MB、オンチップメモリバンド幅 18TB/s、ネットワークレイテンシ 1 μ sec程度、ネットワークバンド幅128GB/sを想定。
量子電磁気学(QED)の高次補正計算(多倍精度演算)						1	1000	モンテカルロ法による多1万個以上の多次元(8~13次元)積分		1万個以上の単体ノードジョブのアレイジョブ、SIMDとコア並列が必要、プログラムが巨大なためコンパイル速度が重要、高度に最適化された4倍精度ライブラリが必要。ケース数は独立なノードジョブの個数である1万程ともいえる。2から3年かけて計算を終えるようにしたい。
ファインマン振幅の自動計算(4倍精度演算)						1	1000	モンテカルロ法による多2ループ図形 多次元積分		同上、QEDの高次補正計算と同程度の計算性能が必要

※本見積もりは未だ精査中である。より精度の高い数値はWeb版(→「1.2. 本文書の構成」)を参照のこと。

(5) 他分野との連携

共同研究等、研究内容に関わる他分野との連携の可能性については現在検討中であるが、計算アルゴリズムやスーパーコンピュータ開発においては他分野との交流はこれまでにも行われている。

まず、格子 QCD 計算の鍵となるアルゴリズムとして、モンテカルロ法、分子動力学法、乱数生成、大規模連立線形方程式の反復解法、誤差解析などが挙げられる。これらのうち、格子 QCD 研究において開発され、他分野へと展開されていった基礎的アルゴリズムとして、Lüscher の乱数生成アルゴリズム、Sexton-Weingarten の多重時間刻み分子動力学法積分スキーム、Duane-Kennedy-Pendleton-Duncan のハイブリッドモンテカルロ法などがある。逆に、他分野から導入されたアルゴリズムとして、大規模連立線形方程式反復解法における ILU 前処理や流体計算で用いられてきた領域分割 Schwarz 前処理、分子動力学法における Omelyan-Mryglod-Folk 積分スキームなどがあり、現在においてもアルゴリズムの開発・交流が活発に行われている。他方、スーパーコンピュータ開発への寄与として、これまで格子 QCD 計算を主目的とした開発された計算機の一覧を表 4.5.2-1 にまとめた。これらほとんどは当時の世界最高レベルのピーク性能を持つ計算機であり、そのうちのいくつかは発展的に商用化されたり、他分野の計算にも供されて来た。

表 4.5.2-1 格子 QCD 計算を主目的とした開発された計算機の一覧

計算機名	登場/開発時期	ピーク性能
Columbia(USA)	1985–1989	0.25–16 GFLOPS
GF11(USA)	1983–1992	11 GFLOPS
QCDPAX(Tsukuba)	1989	14 GFLOPS
APE(Italy)	1986–1988	0.25–1 GFLOPS
ACPMAPS(USA)	1991–1993	5–50 GFLOPS
APE100(Italy)	1994	100 GFLOPS
CP-PACS(Tsukuba)	1996	614 GFLOPS
QCDSP(USA)	1995–1998	600 GFLOPS
APEMille(Italy)	2000	1 TFLOPS
APENEXT(Italy)	2006	12 TFLOPS
QCDOC(USA)	2005	10 TFLOPS
PACS-CS(Tsukuba)	2006	14 TFLOPS
QPACE(EU)	2009	200 TFLOPS

(6) 公的な意見交換会とそのサマリー

2011 年 1 月 12 日、素粒子論・原子核理論合同の研究者コミュニティ「素粒子論グループ」メーリングリスト(sg-l)にて計算科学ロードマップ白書作成経緯および平成 23 年度版白書初稿について報告し意見の募集を行った。いただいたコメントを白書に一部反映させた。

2012 年 9 月 13 日、日本物理学会にて、素粒子論グループの活動報告を行うインフォーマル・ミーティング「素粒子論懇談会」において、平成 23 年度版計算科学ロードマップ白書作成の経緯と報告、平成 24 年度版白書作成とアプリケーションの募集についての協力を要請した。後日、メーリングリストを通して再度案内を周知することとした。

2012年9月21日、素粒子論グループのメーリングリスト(sg-l)に上記案内を送付し協力を呼びかけた。

2012年12月19日、HPCI分野5、および計算素粒子関係の研究者に平成24年度白書の初稿についての意見の募集を行った。必要な修正を反映した。

2012年12月26日、素粒子論グループメーリングリスト(sg-l)にて国内の素粒子論研究者に平成24年度白書の初稿（前記修正済）についての意見の募集を行った。必要な修正を反映した。

2013年3月27日、日本物理学会年次大会（広島大学）における素粒子論領域・理論核物理領域・（物性）領域11,9,8,7,3,4,5,6,12合同シンポジウムにて宇宙分野の平成24年度版計算科学ロードマップについて説明し意見交換を行った。

(7) ロードマップ

素粒子分野のロードマップを図4.5.2-5に示す。

年代 課題	2012 ~	2014 ~	2016 ~	2018 ~	2020 ~	2022 ~
カイラル対称性とQCDに基づく有効バリオン相互作用の決定とその応用	・ウィルソン型作用を用いた物理点計算による有効バリオン間相互作用の決定 ・空間体積(10fm) ³ 、格子間隔0.1fm	・5次元有効作用を用いた物理点計算による有効バリオン間相互作用の決定 ・空間体積(12fm) ³ 、格子間隔0.1fm以下				
重いクォークの物理	・ボトムクォークを含むハドロン行列要素を5%以下の精度で計算 ・空間体積(2.6fm) ³ 、格子間隔0.10~0.05fm	・ボトムクォークを含むハドロン行列要素を1%以下の精度で計算 ・空間体積(4fm) ³ 、格子間隔0.02fm				
極限状態でのミクロの階層構造と物質の物理	・QCDによる軽原子核直接構成の物理点計算 ・有限温度・有限密度QCDにおける臨界終点の決定	・軽原子核直接構成による魔法数導出と中性子過剰核の諸性質解明 ・低温中高密度領域におけるQCDの相構造解析と状態方程式の決定				
テクニカラー理論の非摂動ダイナミクス	・様々なフレーバー数のQCDのβ関数、質量異常次元、スペクトロスコピーを中心規模サイズの格子(例 24 ³ ×48)で系統的に調べ、最も有力なフレーバー数の候補を絞る	・最も有力なフレーバー数を持つQCDの大規模計算(例 96 ⁴)を行い、定量的予言とLHCの結果を比較することによりテクニカラーモデルの検証を行う				
量子電磁気学(QED)の高次補正計算	・電子及びミュー粒子の異常磁気能率におけるQED高次補正計算 ・微細構造定数におけるQED補正の決定(0.03ppb)	・電子及びミュー粒子の異常磁気能率におけるQED高次補正計算 ・微細構造定数におけるQED補正の決定(6ppt)				
ファインマン振幅の自動計算	・1ループ図形の自動計算	・2ループ図形や多体終状態図形の自動計算				
超弦理論シミュレーションで探る時空の量子ダイナミクス	・超弦理論とその離散化手法を用いて重力の量子効果を研究	・超弦理論とその離散化手法を用いた時空構造の解明				

図 4.5.2-5 素粒子ロードマップ

参考文献

- [1] 報告「理学・工学分野における科学・夢ロードマップ」日本学術会議第三部拡大役員会・理学・工学系学協会連絡協議会 (2011)
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/kohyo-21-h132.html>
- [2] 「高エネルギー物理学将来計画検討小委員会答申」委員浅井祥仁他 (2012)、高エネルギー物理学研究者会議 <http://www.jahep.org/>
- [3] CKMfitter Group (J. Charles et al.), Eur. Phys. J. C41, 1-131 (2005) [hep-ph/0406184], updated results and plots available at: <http://ckmfitter.in2p3.fr>