

標準模型を超える物理学

2012年、CERNの大型ハドロン衝突型加速器（LHC）でヒッグス粒子の発見が確認されたとき、標準模型（SM）は理論上完成していました。予測されたすべての粒子が発見され、その方程式は驚異的な精度で実験的検証を通過していました。

しかし、物理学の雰囲気は終結ではなく、不完全さの感覚でした。ニュートンの法則がアインシュタイン以前に、または古典物理学が量子力学以前にそうであったように、標準模型は私たちがテストできるスケールではあまりにも成功していましたが、より深い問いに答えることができませんでした。それはほぼ完璧な地図でしたが、風景のごく一部にすぎませんでした。

重力：欠けている力

最も明白な欠落は重力です。

- SMは、知られている4つの基本的な力のうち3つを記述します：電磁気、弱い相互作用、強い相互作用。
- アインシュタインの**一般相対性理論（GR）**によって記述される重力は、完全に欠けています。

これは単なる見落としではありません。一般相対性理論は重力を時空の曲がりとして扱い、滑らかな幾何学的フィールドとします。一方、SMは力を粒子によって媒介される量子場として扱います。重力を同じ方法で量子化しようとする、正規化できない無限大に直面します。

標準模型とGRは、まるで2つの異なるオペレーティングシステムのようなものです。それぞれの領域で優れていますが、根本的に互換性がありません。それらを統合することは、現代の物理学における最大の課題かもしれません。

ニュートリノの質量

SMは、ニュートリノに質量がないと予測しています。しかし、1998年の日本のスーパーカミオカンデ検出器を皮切りに、世界中で行われた実験により、ニュートリノが異なるフレーバー（電子、ミューオン、タウ）間で振動することが示されました。振動には質量が必要です。

これは、標準模型を超える物理学の初めての確認された証拠でした。この発見は、梶田とマクドナルドに2015年のノーベル賞をもたらしました。

ニュートリノは非常に軽く、電子の少なくとも100万分の1の軽さです。それらの質量はSMでは説明できませんが、**シーソー機構**、無菌ニュートリノ、または初期宇宙との関連など、新たな物理学を示唆する可能性があります。一部のシナリオでは、重いシーソーニュートリノが**レプ**

トジェネシスを可能にし、初期宇宙でレプトンの非対称性が生成され、それが後に観測される物質-反物質非対称性に変換されます。

暗黒物質

SMが記述する可視物質は、宇宙の5%未満を構成しています。残りは目に見えません。

- **暗黒物質**（宇宙の約27%）は、重力を通じてのみ現れます：銀河は可視物質が許すよりも速く回転し、銀河団は予想以上に光を曲げ、宇宙マイクロ波背景放射には追加の目に見えない質量が必要です。
- SMのどの粒子もこれを説明できません。ニュートリノは軽すぎて速すぎます。通常の物質はあまりにも希少です。

理論は新たな粒子を提案しています：WIMP（弱く相互作用する大質量粒子）、アクシオン、無菌ニュートリノ、またはもっと奇妙なもの。しかし、地下検出器、衝突実験、天体物理学的調査による数十年にわたる探索にもかかわらず、暗黒物質は依然として捉えられていません。

暗黒エネルギー

さらに神秘的なのは、宇宙の加速膨張を駆動する**暗黒エネルギー**です。

- 1998年に超新星観測を通じて発見された暗黒エネルギーは、宇宙の約68%を構成します。
- 原理的には、量子場の「真空エネルギー」として説明できるかもしれませんが。しかし、単純なQFT計算は、真空エネルギーの密度が120桁も大きすぎるという、物理学史上最悪の予測を行います。

この**宇宙定数問題**は、量子場理論と重力の間の最も鋭い対立かもしれません。標準模型は暗黒エネルギーについて何も語っていません。これは宇宙の理解における大きな空白です。

階層問題

もう一つの深い謎は、ヒッグス粒子そのものにあります。

ヒッグスの質量は125 GeVと測定されています。しかし、量子補正はそれをプランクスケール（ 10^{19} GeV）に押し上げるはずで、奇跡的な打ち消しがなければなりません。なぜ重力の自然なエネルギー規模に比べてこれほど軽いのでしょうか？

これが**階層問題**です：ヒッグスは異常なまでに微調整されているように見えます。物理学者は、**超対称性（SUSY）**のような新たな物理学を疑っており、これはヒッグスの質量を安定化させるパートナー粒子を導入することで危険な補正を打ち消す可能性があります。（**自然性**に関する議論には、動的解決法から可能な「真空の風景」における**人類学的推論**までが含まれます。）

物質-反物質非対称性

SMにはある程度のCP対称性の破れが含まれますが、現在の宇宙が物質で満たされ、物質と反物質が同等に存在しない理由を説明するには十分ではありません。上記で述べたように、**レプトジェネシス**（しばしばニュートリノの質量のシーソー機構に結びつく）のようなメカニズムは、SMを超える物理学がバランスを傾ける説得力のある道を提供します。

美しくも不完全な絵

標準模型は時折「物理学で最も成功した理論」と呼ばれます。その予測は実験と10〜12桁の精度で一致します。粒子加速器や実験室で私たちが見るほとんどすべてを説明します。

しかし、それは不完全です：

- 重力を無視します。
- ニュートリノの質量を説明できません。
- 暗黒物質や暗黒エネルギーを説明できません。
- 階層問題や物質-反物質非対称性のような深い謎を解決していません。

物理学者は今、歴史の中でおなじみの瞬間に直面しています。ニュートンの力学が相対性理論に道を譲り、古典物理学が量子力学に道を譲ったように、標準模型は最終的に何かより深いものに道を譲らなければなりません。

聖杯：統一理論

最終的な目標は**大統一理論（GUT）**または**万物の理論（ToE）**です：すべての4つの力を統一し、すべての粒子を説明し、最小スケール（量子重力）から最大スケール（宇宙論）まで一貫して機能する枠組みです。

これが現代物理学の聖杯です。そのため、研究者は加速器をより高いエネルギーに押し上げ、巨大なニュートリノ検出器を構築し、望遠鏡で宇宙をマッピングし、大胆な新しい数学的アプローチを発明しています。

次の章では、主な候補を探索します：

- **超対称性（SUSY）** – 物質粒子と力粒子の間の対称性。
- **弦理論とM理論** – 粒子が振動する弦であり、グラビトンが自然に現れる。
- **余剰次元** – カルツァークラインの初期のアイデアから現代のランドール-サンドラムモデルまで。
- **その他のアプローチ** – ループ量子重力や漸近的安全性など。

これらのアイデアはそれぞれ、ドグマとしてではなく、科学の最良の形として生まれました：亀裂に気づき、新しい理論を構築し、現実に対してそれらをテストすることです。

超対称性：次の大きな対称性？

物理学には、対称性を通じて統一する長い歴史があります。マクスウェルの方程式は電気と磁気を統一しました。特殊相対性理論は空間と時間を統一しました。電弱理論は4つの基本力のうち2つを統一しました。すべての前進は、自然に隠された対称性を明らかにすることから生まれました。

超対称性 – または物理学者が愛情を込めて呼ぶSUSY – は、次の大きな対称性が、見た目上異なる2つの粒子カテゴリ、**物質と力**を結びつけるという大胆な提案です。

フェルミオンとボソン：物質対力

標準模型では、粒子は大きく2つのファミリーに分かれます：

- **フェルミオン（スピン1/2）**：クォークやレプトンを含み、物質の構成要素です。それらの半整数スピンは、パウリの排他原理に従うことを意味します：同一のフェルミオンは同じ状態を占有できません。これが、原子が構造化された殻を持ち、物質が安定している理由を説明します。
- **ボソン（整数スピン）**：光子、グルーオン、WおよびZボソン、ヒッグス粒子を含みます。ボソンは力を媒介します。フェルミオンとは異なり、同じ状態に集積することができ、これがレーザー（光子）やボース-アインシュタイン凝縮の存在を説明します。

要するに：フェルミオンは物質を形成し、ボソンは力を運びます。

超対称性の仮説

超対称性は、フェルミオンとボソンを結びつける対称性を提案します。知られているすべてのフェルミオンにはボソンのパートナーが存在し、すべてのボソンにはフェルミオンのパートナーが存在します。

- クォーク → **スクォーク**
- レプトン → **スレプトン**
- グルーオン → **グルイーノ**
- ゲージ/ヒッグスセクター → **ニュートラリーノ**（ビーノ、ウィーノ、ヒッグシーノの混合；中性）と**チャージーノ**（ウィーノ、ヒッグシーノの混合；帯電）

（「フォティーノ」や「ジーノ」はゲージの固有状態に対する古い愛称です；実験は実際には上記の**質量固有状態**を探します。）

なぜこのような粒子世界の急進的な倍増を提案するのか？ SUSYは、標準模型が残した最も深い問題のいくつかのエレガントな解決策を約束するからです。

階層問題の解決

SUSYの最大の魅力の1つは、**階層問題**を解決する能力です：なぜヒッグス粒子はプランクスケールに比べてこれほど軽いのか。

標準模型では、仮想粒子の量子補正はヒッグスの質量を膨大な値に押し上げるはずですが、超対称性は、これらの発散を打ち消すスパーティクルを導入します。結果：ヒッグスの質量は自然に安定化され、微調整は必要ありません（少なくとも「自然な」SUSYスペクトルでは）。

SUSYと大統一

SUSYのもう一つの動機は、力の統一にあります。

- 強い力、弱い力、電磁気の結合定数をより高いエネルギーで計算すると、標準模型ではそれらがほぼ、しかし完全には、1点で交差しません。
- SUSYでは、スパーティクルの貢献により、結合定数が約 10^{16} GeVで美しく収束します。

これは、非常に高いエネルギーでは、3つの力が1つの**大統一理論（GUT）**に融合する可能性を示唆しています。

暗黒物質の候補としてのSUSY

超対称性はまた、**暗黒物質**の自然な候補を提供します。

SUSYが正しい場合、1つのスパーティクルは安定で電氣的に中性でなければなりません。主要な候補は、ビーノ、ウィーノ、ヒッグシーノの混合である**最も軽いニュートラリーノ**です。

ニュートラリーノは弱くしか相互作用せず、WIMP（弱く相互作用する大質量粒子）のプロファイルに適合します。それらが発見されれば、宇宙の欠けている27%の物質を説明できるかもしれません。

SUSYの実験的探索

何十年もの間、物理学者は超対称粒子が既に探査されたエネルギー規模のすぐ上に現れることを期待していました。

- **LEP（CERN、1990年代）**：約100 GeVまでSUSY粒子は見つかりませんでした。
- **テバトロン（フェルミラボ、1990年代-2000年代）**：スパーティクルは見つかりませんでした。
- **LHC（CERN、2010年代-2020年代）**：最大**13.6 TeV**（設計：**14 TeV**）での陽子-陽子衝突。大量の探索にもかかわらず、数TeVのスケールまでスクォーク、グルイーノ、ニュートラリーノの証拠は見つかりませんでした。

LHCでのSUSY発見の欠如は失望を招きました。「最小超対称標準模型」（MSSM）のような最も単純なSUSYのバージョンは現在強く制限されています。「自然な」スペクトルはより重い値に押しやられ、SUSYがTeVスケール近くに存在する場合、より多くの微調整を意味します。

それでも、SUSYは排除されていません。より複雑なモデルは、LHCの範囲を超えるか、簡単に検出できないほど弱い相互作用を持つ、より重いまたはより微妙なスパーティクルを予測します。

SUSYの数学的美

現象論的動機を超えて、SUSYは深い数学的優雅さを持っています。

- それは、相対性理論と量子力学に適合する、時空対称性の唯一の可能な拡張です。
- 超対称理論はしばしば計算が容易です：無限を抑え、QFTに隠された構造を明らかにします。
- 弦理論では、SUSYは一貫性に不可欠です：それがなければ、理論にはタキオンやその他の病理が含まれます。

自然がアクセス可能なエネルギーでのSUSYを実現しなくても、その数学はすでに物理学を豊かにしています。

超対称性の現状

今日、SUSYは奇妙な位置を占めています。

- それは標準模型を超える物理学のための最も説得力のある枠組みの1つであり続けます。
- 階層問題を解決し、統一を支持し、暗黒物質の候補を提供します。
- しかし、実験的証拠はまだ見つかりません。

もしLHCやその後継者が何も発見しなければ、SUSYは我々の手の届かないエネルギー規模でしか実現しないかもしれません – あるいは、自然が全く異なる道を選んだのかもしれません。

方法論、ドグマではない

超対称性は、科学的方法が実際に行動していることを示しています。

物理学者は問題を特定しました：階層問題、統一、暗黒物質。彼らはそれらすべてを解決する大胆な新しい対称性を提案しました。彼らはそれをテストする実験を設計しました。これまでのところ、結果は否定的です – しかし、それはアイデアが無駄だったという意味ではありません。SUSYは我々のツールを磨き、我々が何を求めているかを明確にし、研究の世代を導きました。

エーテルやエピサイクルがそうであったように、SUSYは最終的な言葉として生き残るかどうかにかかわらず、より深い真実への踏み石であるかもしれません。

弦理論とM理論

標準模型を超える物理学は、しばしばパッチによって動機付けられています：階層問題の解決、暗黒物質の説明、ゲージ結合の統一。弦理論は異なります。それは特定の謎から始まりません。代わりに、数学から始まり、空間、時間、物質の私たちの全体概念を再構築します。

起源：失敗から生まれた理論

驚くべきことに、弦理論は万物の理論としてではなく、強い核力を理解しようとする失敗した試みとして始まりました。

1960年代後半、QCDが完全に発展する前、物理学者はハドロンの動物園を説明しようとしていました。彼らは散乱データにパターンを見つけ、共鳴が振動する弦によってモデル化できることを示唆しました。

1968年にヴェネツィアーノが導入した「デュアル共鳴モデル」は、強い相互作用をハドロンが小さな弦の励起であるかのように記述しました。それはエレガントでしたが、QCDが強い力の真の理論として浮上するとすぐに放棄されました。

それでも、弦理論は死を拒否しました。その方程式には、核物理学をはるかに超えるものに指し示すような、注目すべき特徴が隠されていました。

驚くべき発見：グラビトン

理論家が弦の振動を量子化すると、スペクトルには必然的に**質量のないスピン2の粒子**が含まれることがわかりました。

これは衝撃的でした。量子場理論は、質量のないスピン2の粒子がユニークであることを示していました：それは重力の量子、**グラビトン**でなければなりません。

ジョン・シュワルツが後に指摘したように：「しかし、驚くべき事実が明らかになりました：弦理論の数学は必然的に質量のないスピン2の粒子 – グラビトンを含んでいました。」

ハドロンの理論として始まったものが、偶然にも量子重力の構成要素を生み出していました。

中心的なアイデア：点ではなく弦

弦理論の核心では、点粒子が小さな1次元の物体：弦に置き換えられます。

- 弦は**開いた**（2つの終点を持つ）または**閉じた**（ループ）ことができます。
- 弦の異なる振動モードは異なる粒子に対応します。
 - 特定の振動は光子として現れるかもしれません。
 - 別のものはグルーオンとして。
 - 別のものはクォークとして。
 - そして1つのモードは、必然的にグラビトンとして。

この単純な変化 – 点から弦へ – は量子重力を悩ませる多くの無限を解決します。弦の有限のサイズは、ゼロ距離で爆発する相互作用をばかします。

超対称性と超弦

初期の弦理論のバージョンには問題がありました：タキオン（不安定性）を含み、非現実的な特徴を要求していました。ブレークスルーは**超対称性**の導入によって起こり、1970年代と1980

年代に**超弦理論**につながりました。

超弦はタキオンを排除し、フェルミオンを取り入れ、新たな数学的一貫性をもたらしました。

しかし、問題がありました：弦理論はより高い次元でしか機能しません。具体的には、**10の時空次元**です。

- 私たちが見る4つ（3つの空間、1つの時間）。
- 他の6つは、現在の実験では見えない小さなスケールに圧縮または巻き付けられています。

このアイデアは、急進的に思えるかもしれませんが、完全に新しいものではありませんでした。1920年代に、**カルツァー-クライン理論**は、余剰次元が重力と電磁気を統一できると示唆していました。弦理論はこのアイデアを復活させ、大きく拡張しました。

5つの弦理論

1980年代半ば、物理学者は弦理論が単一ではなく、**5つの異なるバージョン**で存在することを発見しました：

1. **タイプI** – 開いた弦と閉じた弦、向き付けられた弦と向き付けられていない弦を含む。
2. **タイプIIA** – 閉じた、向き付けられた弦、非キラル。
3. **タイプIIB** – 閉じた、向き付けられた弦、キラル。
4. **ヘテロティック $SO(32)$** – ハイブリッド構造を持つ閉じた弦。
5. **ヘテロティック $E_8 \times E_8$** – 高い対称性を持つバージョンで、後に現実的な粒子物理学との接続に重要。

それぞれは数学的に一貫しているように見えたが、なぜ自然は1つを選ぶのでしょうか？

超弦の第一次革命

1984年、マイケル・グリーンとジョン・シュワルツは、弦理論が量子異常を自動的に打ち消すことができることを示しました – 量子場理論が慎重に設計しなければならない何か。この発見は、**超弦の第一次革命**を引き起こし、千人の物理学者がすべての力を統一する理論の候補として弦理論に目を向けました。

これは、量子重力が一貫しているだけでなく、必然的である最初の真剣な枠組みでした。

超弦の第二次革命：M理論

1990年代半ばに、第二次革命が起こりました。エドワード・ウィッテンと他の人々は、5つの異なる弦理論が競争相手ではなく、単一のより深い理論の異なる限界であることを発見しました：**M理論**。

M理論は**11次元**に存在すると考えられており、弦だけでなく、**ブレーン**（膜の略）と呼ばれるより高次元のオブジェクトも含みます。

- 1次元ブレーン＝弦。
- 2次元ブレーン＝膜。
- 9つの空間次元までの高次元ブレーン。

これらのブレーンは豊かな新しい可能性を生み出しました：宇宙全体が、より高次元の空間に浮かぶ3ブレーンとして存在し、重力が体積に漏れ出し、他の力は閉じ込められたままになる可能性があります。このイメージは、**ランドール-サンドラム**のような現代の余剰次元モデルにインスピレーションを与えました。

注目すべき例：カルツァ-クラインとランドール-サンドラム

- **カルツァ-クライン (1920年代)**：重力と電磁気を統一するために5番目の余剰次元を提案しました。このアイデアは何十年も棚上げされていましたが、弦理論はそれをより壮大な形で復活させました。圧縮された余剰次元は、弦モデルの中心的な特徴のままです。
- **ランドール-サンドラム (1999)**：「歪んだ」余剰次元を提案し、私たちの宇宙がより高次元に埋め込まれた3ブレーンであるとししました。重力は体積に広がり、他の力よりも弱い理由を説明します。このようなモデルは、粒子加速器での可能な信号や、非常に短い距離でのニュートンの法則からの逸脱を予測します。

実験的手がかりと課題

弦理論は大胆な主張をしますが、それをテストすることは非常に困難です。

- **余剰次元**：欠損エネルギー信号や**カルツァ-クライン励起**を通じて現れる可能性があります – 設定によっては**グラビトン**や**標準模型の場**にも。加速器の制約は通常、**マルチTeV**の範囲に達します。
- **グラビトン**：質量のないスピン2粒子が予測されますが、単一のグラビトンを検出することは現在の技術では不可能です。重力波の逸脱などの間接的な効果が可能です。
- **超対称性**：弦理論は、あるスケールでSUSYを必要としますが、LHCはまだスパーティクルを見つけていません。
- **宇宙論**：初期宇宙、インフレーション、宇宙マイクロ波背景放射は、弦物理学の痕跡を含む可能性があります。現在の結果は決定的ではありません。

課題にもかかわらず、弦理論は数学に肥沃な土壌を提供し、幾何学、トポロジー、AdS/CFT（高次元での重力を重力のない量子場理論に結びつける）のような双対性に進展を促しました。

美と論争

支持者は、弦理論が統一理論への最も有望な道であると主張します：量子重力を含み、すべての力を統一し、グラビトンが存在しなければならない理由を説明します。

批判者は、実験的確認がなければ、弦理論は経験科学から切り離されるリスクがあると主張します。可能な解の膨大な「風景」（最大 10^{500} ）は、ユニークな予測を抽出することを困難にし

ます。

両者は1つの点で同意します：弦理論は物理学の考え方を換え、統一のための新しい言語を提供しました。

万物の理論へ

超対称性が標準模型を超える次のステップであるならば、弦理論はその次のステップです：長年求められてきた**万物の理論**の候補です。

その最も大胆な主張は、標準模型と重力を含むだけでなく、これらが高次元で振動する弦の必然的な結果であるということです。グラビトンは追加の部品ではなく、組み込まれています。

自然がこの道を選んだかどうかは、まだ発見されていません。

フロンティアを探る：標準模型を超える実験

理論は物理学の生命線ですが、実験はその心臓の鼓動です。超対称性、弦理論、余剰次元は美しい数学的構造ですが、証拠によって生きるか死にます。それらが単なる推測以上であるためには、データに痕跡を残さなければなりません。

物理学者は、これらの痕跡を探す巧妙な方法を考案しました – 加速器、宇宙、そして時空そのものの構造の中で。

加速器：スパーティクルとグラビトンの狩猟

CERNの大型ハドロン衝突型加速器（LHC）は、世界で最も強力な粒子加速器であり、最大**13.6 TeV**（設計：**14 TeV**）のエネルギーで陽子を衝突させます。これは、標準模型を超える物理学を探る人類の主要なツールでした。

LHCでの超対称性

- **スパーティクルの探索**：ATLASおよびCMS実験は、スクォーク、グルイーノ、ニュートラリーノ/チャージーノを探してデータを精査しました。これらはしばしば「欠損エネルギー」のシグネチャとして現れ、SUSY粒子が検出を逃れるためです。
- **結果**：数TeVのスケールまで、確認されたSUSY粒子は見つかっていません。これは最も単純なSUSYのバージョンの多くを排除し、「自然な」SUSYをより重く、より微調整された領域に押しやりました。

グラビトンと余剰次元

- **カルツァークラインのモード**：余剰次元が存在する場合、**グラビトン**や**SM**の場でさえ、質量を持つKK励起として現れる可能性があり、ディレプトン、ディフォトン、ディジェットチャンネルでの共鳴として検出可能です。
- **ランドール-サンドラムの信号**：歪んだ余剰次元は、スピン2の特徴的な角度パターンを持つグラビトン共鳴を生み出す可能性があります。

- **結果：** LHCの探索はこれまで証拠を見つけていませんが、**マルチTeV**の範囲に限界を押し上げ、余剰次元のサイズ、歪み、幾何学を制限しています。

マイクロブラックホール

一部の理論は、TeVスケールで重力が強くなると、LHCの衝突で小さなブラックホールが形成され、粒子バーストで蒸発する可能性があるとして示唆しています。そのようなイベントは観測されていません。

高精度実験：小スケールでの重力のテスト

余剰次元が存在する場合、ニュートンの重力法則は短い距離で破れる可能性があります。

- **ねじり天秤実験（「Eöt-Wash」）：** 逆二乗法則を**サブミリメートル**スケールまでテストします – 現在は**数十ミクロン（ $\sim 50\ \mu\text{m}$ ）**です。
- **結果：** 逸脱は見つかっていません。これらの実験は、特性長が $\sim 10^{-4}\ \text{m}$ を超える（モデルに依存）広範な余剰次元シナリオを**排除**します。

これらの卓上実験は驚くほど敏感で、加速器がアクセスできないスケールを探ります。

重力波：量子重力への新たな窓

2015年にLIGOによる重力波の発見は、新たなフロンティアを開きました。

- **余分な偏光/修正された伝播：** 一部の量子重力モデルや余剰次元モデルは、GRからの逸脱（追加の偏光、分散、または修正されたリングダウン）を予測します。
- **リングダウン分光法：** ブラックホールの融合後の「鳴り響き」は、GRからの微妙的な逸脱を明らかにする可能性があります。
- **原始重力波：** ビッグバンの波紋は、弦物理学の痕跡を運ぶ可能性があり、LISAやアインシュタイン望遠鏡のような将来の観測所で検出可能です。

これまでの観測は、**現在の不確実性の範囲内でGRと一致していますが**、より高い精度は驚きを明らかにする可能性があります。

宇宙論：実験室としての宇宙

宇宙そのものが究極の粒子加速器です。

- **宇宙マイクロ波背景放射（CMB）：** 小さな揺らぎは初期宇宙をマッピングします。一部の弦モデルは、非ガウス的特徴や振動的特徴のような特定のシグネチャを予測します。
- **インフレーション：** 宇宙の急速な膨張は、弦理論に関連する場合によって駆動された可能性があります。CMBでの原始Bモードの検出は強力な手がかりとなるでしょう。
- **暗黒物質の探索：** SUSYのニュートラリーノは暗黒物質の主要な候補です。XENONnT、LUX-ZEPLIN、PandaXのような実験は、核反跳を通じてWIMPを探します。
- **アクシオン：** 弦理論はまた、共振キャビティや天体物理学的観測を通じて検出可能なアクシオンのような粒子を予測します。

これまでのところ、空は静かです。暗黒物質は検出されておらず、宇宙論データは明確な弦の痕跡なしで Λ CDMモデルに適合します。

現在の状況：制約、確認ではない

数十年にわたる探索は、SUSY、余剰次元、または弦のシグナルを確認していません。しかし、証拠の欠如は不在の証拠ではありません：

- SUSYは、LHCの範囲を超えるスケールや、目立たないスペクトルに存在する可能性があります；これまでのゼロ結果は、SUSYがTeVスケール近くにある場合、より微調整された（「自然でない」）バージョンを**支持**します。
- 余剰次元は、現在のプローブでは隠れているかもしれない、より小さく、より歪んだものである可能性があります。
- 弦理論は、宇宙論を通じてのみアクセス可能な、非常に初期の宇宙にのみ検出可能な痕跡を残すかもしれません。

いくつかの**高精度異常**（例えば、ミュオンの**(g-2)**測定や**フレーバー物理学**のいくつかの緊張）は、**興味深い但未解決**のままです；それらは継続的な精査を動機付けますが、SMをまだ覆していません。

実験が行ったことは、**パラメータ空間を狭める**ことです。それらはSUSYが存在しない場所、余剰次元がどれだけ小さくならないか、暗黒物質がどれだけ強くまたは弱く相互作用するかを教えてくださいました。

前進の道

将来の実験は、より深く探ることを約束します：

- **高輝度LHC (HL-LHC)**：約10倍のデータを収集し、より高い質量やまれなプロセスまでSUSYを探ります。
- **未来円形加速器 (FCC-hh)**：100 TeVの加速器の提案で、GUT物理学が現れる可能性のあるエネルギー規模を探ります。
- **LISA (2030年代)**：初期宇宙からの原始信号に敏感な、宇宙ベースの重力波観測所。
- **次世代暗黒物質検出器**：弱い信号に対する感度で、ついにWIMPやアクシオンを捕まえるかもしれません。

旅としての科学

標準模型を超える物理学の実験的物語は、失敗の物語ではなく、プロセスの物語です。

- ゼロ結果は単純なモデルを排除し、私たちの理論を鋭くします。
- 各制約は、より洗練された予測的な枠組みへと私たちを導きます。
- TeVスケールでのSUSYや余剰次元の不在は、アイデアを殺すものではなく、新しい領域に押しやります。

ラザフォードの金箔実験がプランプディングモデルを打ち砕いたように、LIGOが重力波の疑いを払拭したように、次の大きな発見は突然やってくるかもしれません – そしてすべてを変えるかもしれません。

万物の理論へ

何世紀にもわたり、物理学は統一を通じて進んできました。ニュートンは天と地を1つの重力法則で統一しました。マクスウェルは電気と磁気を統一しました。アインシュタインは空間と時間を統一しました。電弱理論は、2つの非常に異なる力が1つの側面であることを示しました。

次のステップは、これまでで最も大胆です：**4つの基本相互作用** – 強い、弱い、電磁気、重力 – を単一の、一貫した枠組みに統一すること。これは物理学の聖杯です：**万物の理論 (ToE)**。

なぜToEが重要か

完全な統一は、単なる哲学的優雅さではありません；実際的かつ概念的に深い問題に取り組みます：

- **量子重力**：一般相対性理論はプランクスケール (10^{19} GeV) で崩壊します。量子重力理論だけがブラックホールやビッグバンの特異点を説明できます。
- **自然性と微調整**：階層問題と宇宙定数問題は、より深い説明を求めています。
- **標準模型のパラメータ**：なぜ粒子はそれらの質量と電荷を持つのか？なぜクォークとレプトンの3世代なのか？ ToEはこれらの謎を説明できるかもしれません。
- **宇宙論**：暗黒物質、暗黒エネルギー、インフレーションはすべて、統一スケールでの物理学に関連している可能性があります。

ToEは力を統一するだけでなく、スケールを統一します – 量子理論の最も小さな弦から最大の宇宙構造まで。

超対称性と大統一

自然に実現する場合、超対称性 (SUSY) はToEへの踏み石を提供します。

- **階層問題解決**：スパーティクルはヒッグスの質量に対する発散補正を打ち消します。
- **ゲージ結合の統一**：SUSYにより、3つの力の強さは 10^{16} GeVで美しく収束し、**大統一理論 (GUT)** を示唆します。
- **暗黒物質の候補**：ニュートラリーノは宇宙の暗黒物質に自然な説明を提供します。

SUSYにインスパイアされたGUT (SU(5)、SO(10)、またはE₆など) は、超高エネルギーではクォークとレプトンがより大きなマルチプレットに統一され、力が単一のゲージグループに融合することを想像します。

しかし、SUSYはまだ実験に現れていません。それが我々の手の届かないスケールにのみ存在する場合、その統一力は魅力的だが隠されたままかもしれません。

弦理論：量子重力とグラビトン

弦理論はさらに進みます。標準模型をパッチする代わりに、その基礎を書き換えます：

- **弦、点ではない**：すべての粒子は小さな弦の振動です。
- **グラビトンは自然に現れる**：質量のないスピン2の励起は必然であり、量子重力が組み込まれていることを意味します。
- **統一**：異なる振動モードは、すべての既知の粒子 – クォーク、レプトン、ゲージボソン、ヒッグス – を単一の枠組みで生み出します。
- **余剰次元**：弦理論は10の時空次元を要求します；M理論は11を要求し、隠された次元は圧縮または歪んでいます。

このビジョンでは、統一は偶然ではありません – それは幾何学です。力は、余剰次元のトポロジーによって形作られた、異なる方法で弦が振動するため異なります。

M理論とブレーンの世界

5つの弦理論が双対性によってつながっているという発見は、M理論、より壮大な枠組みにつながりました：

- 弦、膜、そして高次元のブレーンを含む。
- 私たちの宇宙が、より高次元の空間に埋め込まれた3ブレーンである可能性を示唆します。
- 重力が他の力よりも弱い理由（余剰次元に広がるため）や、「マルチバース」内に複数の宇宙が存在する方法を自然に説明します。

M理論はまだ不完全ですが、これまで試みられたToEへの最も野心的なステップを表します。

量子重力への他の道

弦理論とM理論は唯一の道ではありません。物理学者は、それぞれ異なる強みを持つ複数の枠組みを探っています：

- **ループ量子重力 (LQG)**：時空を直接量子化しようとし、プランクスケールで空間が離散的であると予測します。
- **漸近的安全性**：重力は、非自明な固定点のために高エネルギーでも良好に振る舞う可能性があることを示唆します。
- **因果動的三角形分割 (CDT)**：単純な幾何学的構成要素から時空を構築します。
- **ツイスター理論とアンプリチュードヘドラ**：時空と散乱振幅を再考する新しい数学的枠組み。

これらのどれもまだ弦理論の統一範囲に匹敵しませんが、探索の豊かさを示しています。

実験の役割

ToEは最終的にテスト可能でなければなりません。プランクスケールは現在の実験をはるかに超えていますが、物理学者は間接的な証拠を探します：

- **加速器**：SUSY粒子、余剰次元、またはマイクロブラックホール。
- **高精度テスト**：短いスケールでのニュートンの法則からの逸脱。
- **重力波**：異国の偏光や高次元からのエコー。
- **宇宙論**：インフレーションの痕跡、暗黒物質の候補、または弦理論が予測するアクシオン。

これまで、ToEは手の届かないところにありますが、すべてのゼロ結果は可能性を刈り込みます。

美と挑戦

本当のToEは物理学を統一するだけでなく、**人間の知識**を統一します。量子力学と相対性理論、ミクロとマクロ、粒子と宇宙を結びつけます。

しかし、パラドックスに直面しています：統一が起こるスケールそのものは、実験的範囲を超えて永遠にあり得ます。100 TeVの加速器は、プランクスケールへの道のほんの一部しか探りません。私たちは宇宙論、数学的一貫性、または間接的なシグネチャに頼る必要があるかもしれません。

夢はその枠組みの深い優雅さのために生き続けます。ウィッテンが指摘したように、弦理論は単なる「方程式の集合」ではなく、「物理学のための新しい枠組み」です。

方法としての科学、ドグマではない

ToEの探求は、弦理論、SUSY、または単一のアイデアを「本当」と宣言することではありません。それは**科学的方法**についてです：

- 既存の理論の亀裂を特定する。
- 大胆な新しい枠組みを提案する。
- 必要に応じて、それらを現実に対してテストし、破棄または改良する。

物語は終わりには程遠いです。しかし、この開かれた姿勢 – どの理論も神聖としないこと – が物理学を生きた科学、ドグマではないものにします。

前方の地平線

次の物理学の世紀は以下を明らかにするかもしれません：

- 超対称性またはその代替の証拠。
- 弦の予測を確認または否定する宇宙論データ。
- 時空そのもののより深い再構築。

あるいは、本当のToEは誰もまだ想像していない何かかもしれません。

しかし、探求そのもの – 統一し、説明し、自然を全体として見る欲求 – は方程式そのものと同じくらい人類の一部です。

参考文献とさらなる読み物

超対称性と大統一

- Wess, J., & Bagger, J. (1992). **Supersymmetry and Supergravity**. Princeton University Press.
- Baer, H., & Tata, X. (2006). **Weak Scale Supersymmetry: From Superfields to Scattering Events**. Cambridge University Press.
- Georgi, H., & Glashow, S. L. (1974). “Unity of All Elementary-Particle Forces.” **Physical Review Letters**, 32(8), 438.

弦理論とM理論

- Green, M. B., Schwarz, J. H., & Witten, E. (1987). **Superstring Theory** (Vol. 1 & 2). Cambridge University Press.
- Polchinski, J. (1998). **String Theory** (Vol. 1 & 2). Cambridge University Press.
- Witten, E. (1995). “String Theory Dynamics in Various Dimensions.” **Nuclear Physics B**, 443(1), 85–126.
- Becker, K., Becker, M., & Schwarz, J. H. (2006). **String Theory and M-Theory: A Modern Introduction**. Cambridge University Press.

ループ量子重力と代替案

- Rovelli, C. (2004). **Quantum Gravity**. Cambridge University Press.
- Thiemann, T. (2007). **Modern Canonical Quantum General Relativity**. Cambridge University Press.
- Ambjørn, J., Jurkiewicz, J., & Loll, R. (2005). “Reconstructing the Universe.” **Physical Review D**, 72(6), 064014.

実験的フロンティア

- Aad, G., et al. (ATLAS Collaboration). (2012). “Observation of a New Particle in the Search for the Standard Model Higgs Boson.” **Physics Letters B**, 716(1), 1–29.
- Chatrchyan, S., et al. (CMS Collaboration). (2012). “Observation of a New Boson at a Mass of 125 GeV.” **Physics Letters B**, 716(1), 30–61.
- Abbott, B. P., et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). (2016). “Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger.” **Physical Review Letters**, 116(6), 061102.

アクセス可能な一般向け解説

- Greene, B. (1999). **The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory**. W. W. Norton.
- Randall, L. (2005). **Warped Passages: Unraveling the Mysteries of the Universe's Hidden Dimensions**. Harper Perennial.
- Rovelli, C. (2016). **Seven Brief Lessons on Physics**. Riverhead Books.
- Wilczek, F. (2008). **The Lightness of Being: Mass, Ether, and the Unification of Forces**. Basic Books.