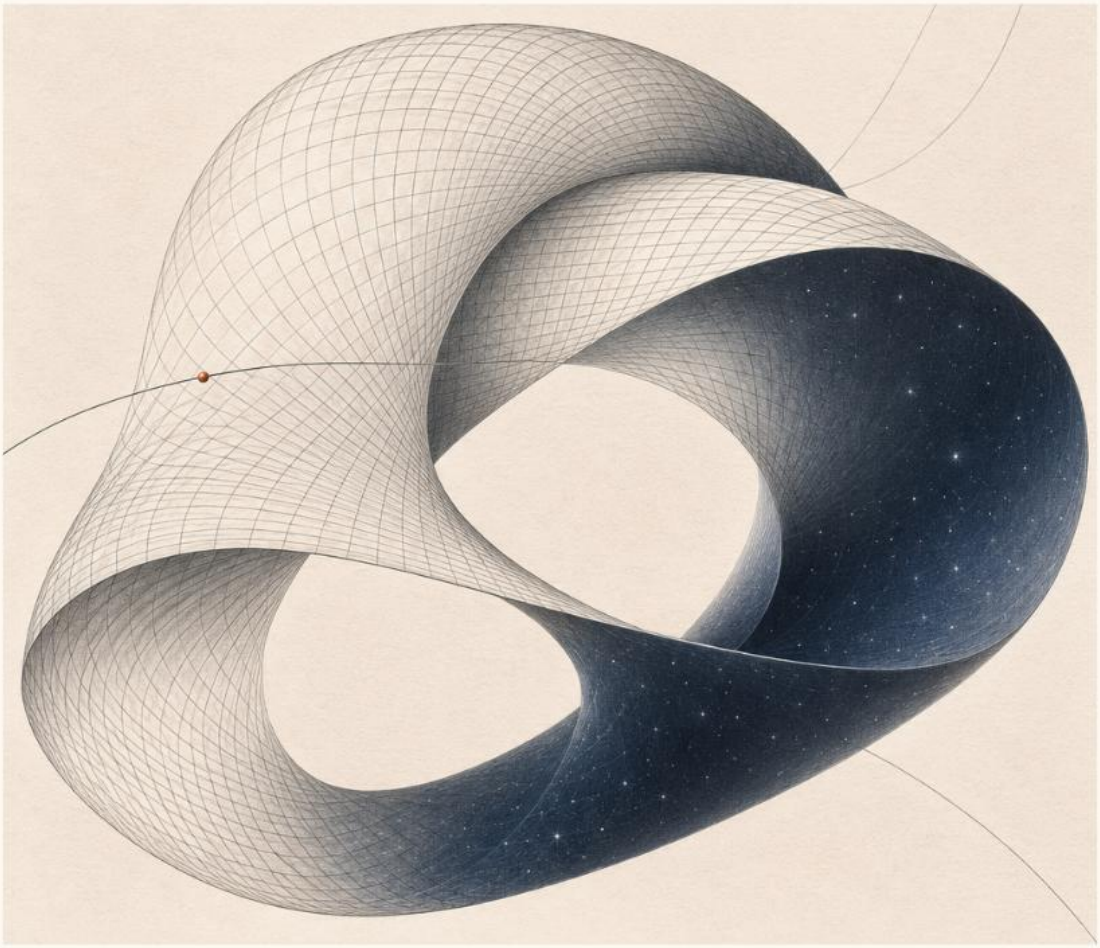
世界の収まる場所はない



Eudgene Brenev
Mira Veyran

2026

Eudgene Brenev

Mira Veyran

世界の収まる場所はない

宇宙の起源と構造科学知識の最前線で

2026

目次

図版 5

序文 7

I 観測量宇宙

1 世界の収まる場所はない 9

2 過去を見るには 16

3 何が膨張するのか 23

4 高温の歴史 30

5 最初の星が生まれる前の宇宙 41

II 見えないコンポーネント

6 見えない質量 52

7 なぜ物質が残ったのか 59

8 加速して膨張する宇宙 66

9 真空にはどれほどの重さがあるのか 76

10 測定結果が食い違うところ 84

III いつものスタート前

11 構造はどこから生じたか 96

12 宇宙の構造の起源は、量子的だったのか 105

13 高温の始まりより前 114

14 時間に向きがある理由 121

IV. 基礎構造

15 「どこ」は何からできているのか 131

16 余剰次元 141

17 空間は閉じることができるか 149

18 別の宇宙 156

19 重力が量子的になるとき 163

Vのオープンな未来

20 一つの宇宙にありうる、複数の未来 171
21 自然に問いを立てるには 179
22 AI とともに進める宇宙論 187
エピローグ 198
計算と、その適用範囲 200
研究計画 216
計算課題と、その再現 228
用語集 233
参考文献 240

図版

挿絵は説明に添えられ、モデル、類比、実験の構成を思い描く助けになる。計算によるグラフと模式図は、本文で別に「図」として示す。

図版（挿絵）

1. 幾何学は内側から測れる 10
2. 観測できる領域は観測者によって異なる 12
3. 最終散乱が光の通り道を開く 19
4. 距離が増しても、束縛された系は大きさを保つ 26
5. 初期のプラズマが軽い原子核を残すとき 32
6. ニュートリノの標的から電子の信号へ 38
7. 周波数が過去の異なる層を明らかにする 46
8. 月の裏側からの電波観測 50
9. 光が、見えない質量分布を明らかにする 53
10. 二つの相の間を動く境界 63
11. 宇宙論的な場と実験室の時計 71
12. 装置全体の内部にある真空 80
13. 膨張の尺度に至る二つの経路 86
14. 小さな非一様性から宇宙の大規模構造へ 97
15. 同じ統計的な痕跡と、異なる説明 107
16. バウンス仮説と摂動の行方 116
17. エントロピーと、取り除かれた制約 123
18. 物質の凝集と、外へ流れるエネルギー 124
19. 量子的な結びつきから幾何学的な記述へ 135
20. 量子シミュレーターと幾何学的な解釈 139
21. 分解能に隠れた方向 142
22. 短い距離での力の測定 147
23. 同じ光源の二つの姿 151
24. 場の状態が異なる領域 158
25. 無限を数える順序 159
26. 量子状態を保つ 169
27. 共通の歴史と、異なる続き 173
28. 測定の新たな角度 182
29. 速い計算と、精密な基準 190
30. 取り置いたデータによる検証 196

計算図・図

1. 宇宙論 27
2. 宇宙史観測窓 44
3. スカラー電位の再構成 70
4. レッドシフトドリフト 73
5. 三つの観測チャネルの一般パラメータ 93
6. 二次元平面トーラスの位相 150
7. 二つの質量の空間枝 164
8. 過去の歴史を持つ二つの未来 176
9. 二つのモデルの識別性マップ 193

序文

どのような科学的な答えにも、その答えが適用できる範囲があります。存在するものすべてを問うとき、私たちはそのことを忘れがちです。星の年齢を測っても、時間そのものの年齢を測ったことにはなりません。高温だった初期宇宙を記述しても、その起源という問いは残ります。私たちに届く信号の限界を定めたところで、その限界が世界の構造について何を示すのかを調べる仕事は、始まったばかりです。

本書は、宇宙論を、その観測的な基礎から、まだ広く受け入れられた答えのない問題までたどります。扱うのは、空間、時間、物質、宇宙の初期史、そして宇宙にありうる未来です。議論を進めるにつれて、確かさの度合いも変わります。精密な測定から、あるモデルのもとでの推論へと移り、やがて競合する理論的記述や、新たな検証の提案に向き合うことになります。

タイトルは、長い間私たちの周りのことを理解するのに役立ちました習慣に関するものです。すべてのオブジェクトは、他のオブジェクトに囲まれたどこかにあります。一度にすべてのスペースに適用されるこの習慣は、さらに別の場所の需要を生み出します。物理学は異なる質問をすることができます:どのような関係が距離と方向を可能にし、どのように測定され、それらを記述するために外部座標が必要ですか? 言い回しへの注意は調査の一部になる。

光、粒子、物理量の変化など、実際に私たちの機器に届くものから始めます。次に、拡大と早期のホット履歴がどのように再構築されるかを検証します。これらの基礎は、暗黒物質や余剰次元、宇宙の先史時代の観察に関する議論を維持するために必要である。理論上の想像力は、すでにテストされた物理学のコミットメントが理解された場合に特に有用である。

後の章は繰り返し一つの要件に戻ります。提案する一般機構は、異なる観察に対して一貫した結果をもたらす必要がある。新しい粒子の性質は物質の起源と結びついている。追加の方向の幾何学は、それらのスペクトルと可能な相互作用に接続する。ダークエネルギーのダイナミクスは、膨張、構造の成長、およびいくつかのモデルでは実験室の測定と接続する。これらの接続は、それと矛盾する可能性のある結果に仮説を公開します。

個々の章は、最初の星の前の時代、真空の重力、および構造の量子起源のテスト可能性に対処します。これらの主題は、未知の初期スペクトル、すでに存在する場のダイナミクス、および幾何学自体が物理的対象になる条件など、異なるレベルの説明を結びつける。最後に,計算と人工知能が,重要なステップを個別にチェックする能力を維持しつつ,そのような説明を比較する上でどのように役立つかを検討する。

各章は物理テストに関するセクションを含んでいる。測定可能な量、既存または可能な機器、主な干渉源、および推論の限界について説明します。次のタスクは、データを再分析することです。より正確な実験室実験が必要な場合がある。別のケースでは、まず仮説がまだ提供していない予測を計算する必要があります。技術に関する質問は、説明がどのように区別されるかについての質問と並んで意味があります。

主な物語は、すでに宇宙論のすべての数学を知らずに新しい概念に取り組むことを喜んでいる読者を取り上げています。関係を理解するには、いくつかの公式が直接必要です。より詳細な慣例や再現可能な例は、特定の研究プログラム、用語集、情報源とともに付録に現れます。この本では、一連のアイデアに従って、特定の結論が依存する計算に戻るという二つの読解が可能になっている。

計算例は定義された状態を持つ。モデルがどのように機能するかを示し、数学的結果をテストし、または身近な推論の曖昧さを示す。それらのパラメータは、自動的に宇宙の測定された特性として扱われるべきではありません。提案された共同試験は既存の科学研究の方向性を開発し、特定の新しいアイデアに優先順位を付けることは文献と専用の比較を必要とする。観測データの分析がまだ行われていない場合、これは明示的に述べられている。

宇宙論は発展し続けている。引数の値は、テーブル内の最新の番号だけでは決定されません。重要なのは、その数がどのように得られたか、それが仮定に依存するか、そしてその必要な結果が同じ物理的方法または別の方法によってテストできるかどうかも含まれます。

科学の最前線では、深く聞こえる質問とすでに調査できる質問の違いは特に明らかです。前者から後者に移動するには、しばしば言語自体を再構築する必要がある。オープンな問題を次のステップが方程式や観察,あるいは実験的な設計によって説明できるほど明確化するのです。

I 観測量宇宙

第1章

世界の収まる場所はない

箱をテーブルの上に置きましょう。中には石があり、周囲には空気があり、街は部屋の壁の外にあります。各オブジェクトはスペースの一部を占め、それぞれに環境があります。私たちはこの手配に慣れているので、それを全世界に転送します。宇宙が存在する場合、それはまたどこかにある必要があります。拡大すると、その隣にスペースが解放されるはずです。開始があった場合、いくつかの他のカウントダウンが先行していたはずです。

したがって、この本にタイトルを与える質問が発生します。日常生活の中で彼はほとんど私たちを失望させていないので、彼に抵抗することは困難です。しかし、「宇宙」という言葉は議論の規模を変えます。私たちは、場所、サイズ、距離が意味のある条件について質問し始めます。ボックスに適したルールは、スペース自体に十分ではない場合があります。

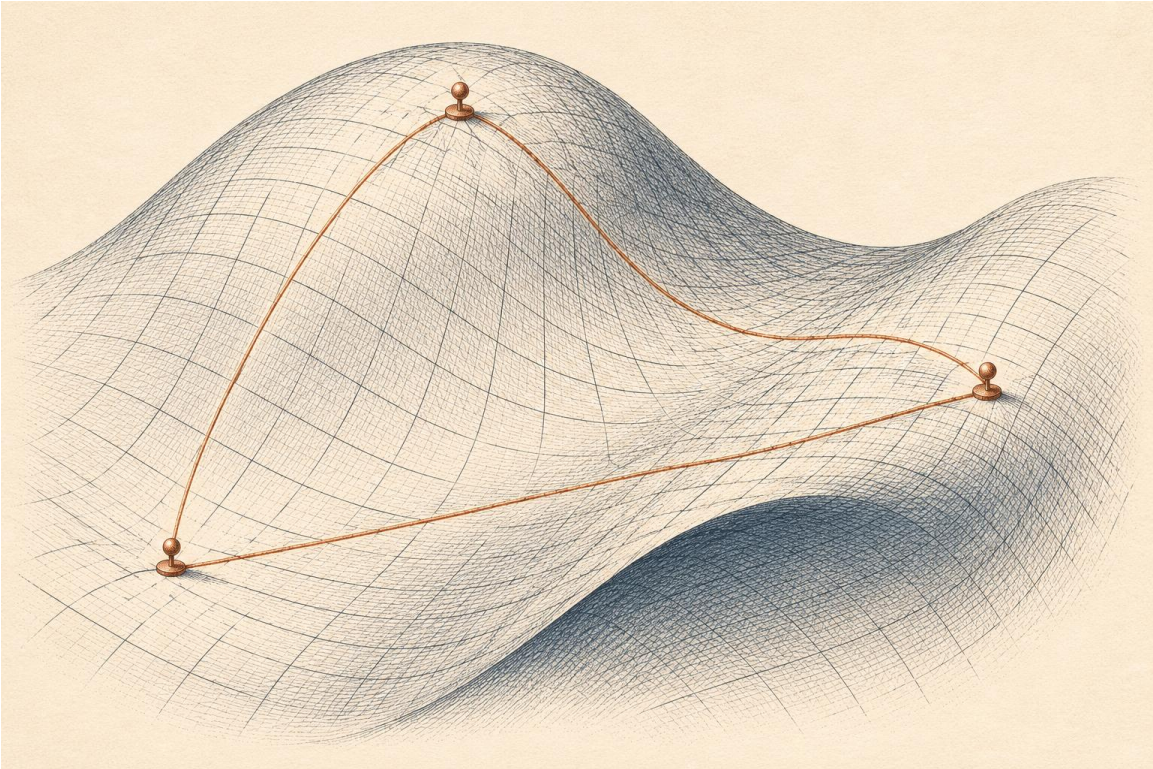
これはまだ答えではありません。間違った呼び方をすると、外界の問題を単に禁止することはできません。もう一つできることは、すでに質問に対してどんな仮定をしてきたか、どの仮定が必要で、どのような観測量の結果につながるのかを理解することです。空の見慣れた絵から、これまでは数学的モデルという形でしか存在しなかったアイデアへと移動できる道です。

外側の箱を必要としない空間

距離、角度、移動時間を測定できるが、外から自分の世界を見ることができない研究者を想像してみましょう。彼は最短経路から三角形を構築し、それらの角度を比較し、隣接する軌道の発散を監視する。これらの測定は、説明に外部シーンがなくても、幾何学について彼に伝えます。

ある平面上で、最短経路からなる三角形の角度の和は、二つの直角に等しい。球体では、北極から赤道へ進み、直角に曲がり、赤道の四分の一に行き、再び曲がって、別の子午線に沿ってポールに戻ります。三つの直角の三角形になります。旅行者は表面を離れること

なく曲率を発見しました。三次元空間における球面のイメージは私たちの想像力を助けるが、測定結果は表面自体の言語で書かれている。



図版 1. 幾何学は内側から測れる。距離や方向は、空間そのものの内部で測定できる。ここで曲面は二次元の類比として用いられており、研究者は経路とそれらの位置関係から曲率を知る。外からの視点は絵を描くために必要なもので、物理的な記述に不可欠な要素ではない。この図版は、正確な計量を定めるものではない。

なじみのある、風船が膨らむという類推が役立つのは、ここまでである。表面に特別な中心を置かなくても、点どうしの距離が増えうることは示せる。しかし、ゴム、内部の空気、風船の周囲の部屋は、机上の模型の構成に属する。追加の物理的な根拠なしに、それらを宇宙論へ持ち込んではいけない。三次元空間の記述に、外側の部屋は必須ではない。

一般相対性理論において、時空の幾何学は物理記述に含まれる。ギャップの測定方法と、どのイベントが信号を交換できるかを決定します。物質と幾何学は方程式によって関連づけられる。コーディネートはイベントを示すのに役立ちますが、それ自体は物理的な棒や時計ではありません。観察された距離と時間を維持しながら変更することができます。

このことから、より包括的な構造は不可能であるとは言えない。余剰次元を持つ理論は、そのような構造を提供する。しかし、これは独自の方程式とテストを必要とする追加の仮

説です。私たちはまだ、物理的な世界を別の物理的な世界に置く論理的な要件を持っていません。外箱の無限の鎖は、次元からではなく、私たちの元の習慣から来ています。

宇宙という言葉の三つの意味

会話では、「ユニバース」という言葉はしばしば一度にいくつかの目的を果たします。肉体的現実を全て指すこともある。時々 - 特定の宇宙モデルの時空。時には - 信号が私たちに到着することができた領域。これらの意味は重なり合うが、境界の問題に対する異なる答えを与える。

観測領域は信号伝搬の歴史によって制限される。光は有限の局所速度を持つが、宇宙幾何学は変化する。そのため、イベントの一部についてのみ情報が届きました。そのようなアクセスの境界は、物理的な壁、物質の終わり、または空間の休憩と一致する必要はありません。遠く離れた人には、異なる観察可能な領域があります。その中心にある私たちの位置は、オブザーバーの周りにマップがどのように構築されているかを表しています。

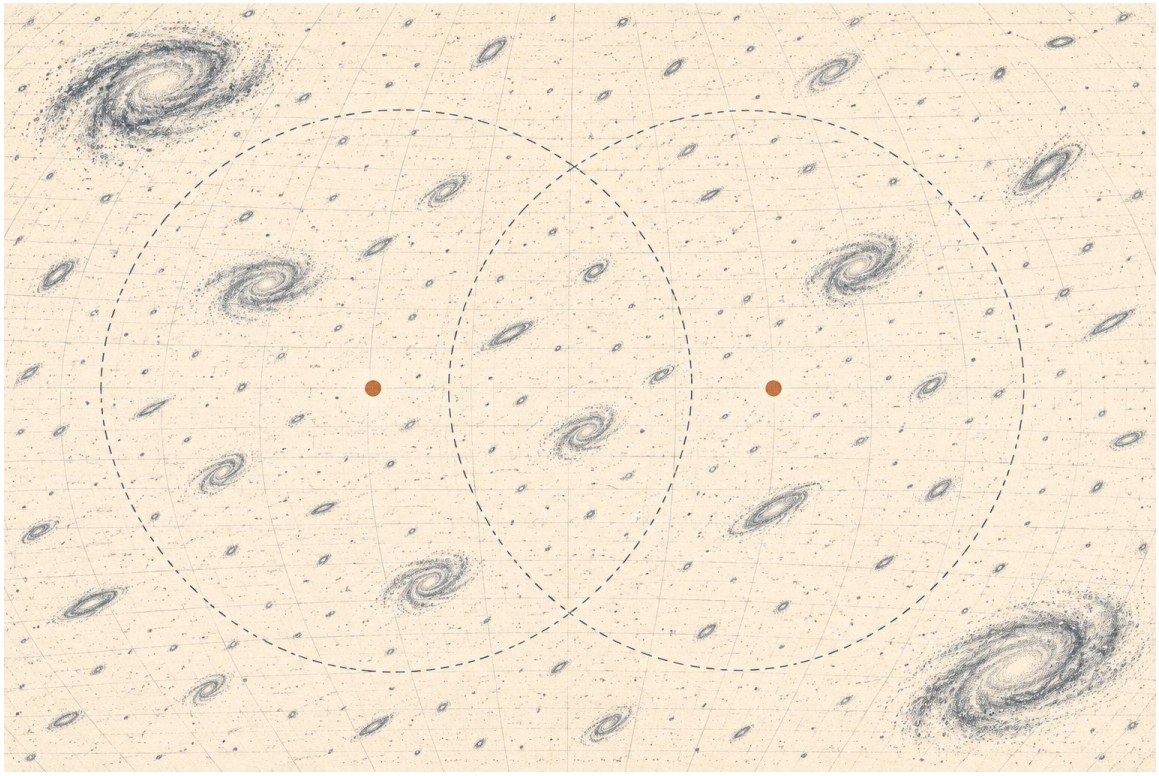
標準宇宙幾何学は、粒子地平線と将来の事象地平線とハッブル球面を区別する。ひとつは、アクセス可能な過去に関するものです。第二は、選択した瞬間に放出される信号が観測者に到達できる領域を制限し、その後の拡張履歴全体に依存し、すべてのモデルに存在するわけではない。三番目は、現在の膨張速度によって決定される。ラジエは概して異なる。ハッブル球体自体は、視界の絶対限度ではありません。[1]

違いの大きさをつかむため、非相対論的物質、放射、正の宇宙定数を含む、説明用の平坦なモデルを考えよう。ここで物質には通常の物質と暗黒物質を含める。後者は第 6 章で詳しく扱う。標準的な宇宙論の値に近いパラメーターを選ぶと、年齢は約 138億年、現在の粒子地平線の半径は約 461億光年となる。これは明示したモデルについて本書で計算した値であり、式とパラメーターは付録に示す。光が伝わる間にも距離が変化したため、半径は年齢と光速の積には等しくならない。

461億という値には、比較の方法がすでに含まれている。距離は、現在という同じ宇宙時刻の断面に換算してある。望遠鏡そのものには、その断面は見えない。遠くを見るほど、情報源のより古い状態を観測する。観測可能な過去の境界と、現在の距離の地図は、計算によって結びつくのであって、一枚の写真の上で一致しているのではない。

観察限界を超えてモデルを拡張することにより、その規則がそこでも適用されると仮定する。このような外挿はよく動機付けられるが、測定とは意味が異なる。「宇宙の向こう

に似ている」というフレーズは、モデルの単純な継続を表しています。「次に何が見えるか」というフレーズは、私たちが持っていない信号を必要とします。



図版 2. 観測できる領域は観測者によって異なる。異なる観測者の周囲に、二つの模式的な観測領域を示した。両者は一部で重なり、描かれた空間はその外側にも続いている。輪郭は信号にアクセスできる範囲の限界を示し、壁や物質の終わりを示すものではない。これは視覚的な類比であり、地平線の大きさや現在の距離は、別途、宇宙論的な計算によって求める。

壁がなくても有限でありうる

空間の有限性は、エッジの存在と同一ではない。ある方向へ十分に長く移動している旅行者が出発点に戻る幾何学を定義することができます。別のスペースではそのようなリターンは不可能です。小さな近所では、これらの世界は同じ幾何学的性質を持つが、遠くの領域をつなぐ方法が異なる。

この接続方法はトポロジーによって研究される。幾何学は、特に距離と曲率に責任があり、トポロジー - 接続性のより一般的な特性について。したがって、観測された空間曲率がゼロに近づくことは、すべての空間の無限のサイズを確立するわけではない。体積が有限である平坦なコンパクトなモデルがあります。そのような構成の可能性は数学的事実で

あり、このクラスに私たちの宇宙に属することは観察によって決定されなければならない。[2]

しかし、もし本当の物理的な境界線を仮定したら? その後、その近くの物質と信号の挙動を記述する必要があります。光は境界に達しますか? フィールドの状態はどのように決定しますか? 振動やエネルギー分布は変えられますか? 「エッジ」という言葉は、そのような条件が現れた後にのみ物理的な仮説になります。空白で壁を描くことは、自動的に定義されません。

また、境界が因果アクセシビリティの外にある領域を考えることもできる。その非常にリモートの存在は、ここで測定可能な効果を保証するものではありません。検証には追加の接続が必要です - 例えば、全体の履歴または観測フィールドの状態に対する予測された影響。アクセス可能な領域全体の二つのモデルがすべての結果の同じ確率を与える場合、外側領域の名前はそれらの間で実験的に選択することはできない。これは定式化された比較の限界であり、より有意義なモデルを探すことを禁じるものではない。

今のところ、一つの考えを保持することは有用です。「エッジはどこにあるか」という質問は、私たちが議論しているオブジェクトと、エッジであると考えるものを決定した後にのみ答えがあります。答えが測定可能な地平線である場合もあります。時々 - 選択したトポロジのプロパティ。空間の非常に身近な記述が適用可能性の限界に近づくので、時には質問は新しい物理学を必要とする。

想像上の世界から物理モデルへ

宇宙論は大胆な構成を可能にしますが、「許す」という単語の意味はここでは制限されています。数学的に一貫した幾何学を書き留めても、それを作成できるプロセスがあるかどうかはわかりません。方程式の解を得て、小さな乱れがそれを破壊することを見つけることができます。実験によってすでに除外されている観測効果を予測する安定したモデルを見つけることができる。その後の各ステップでは、追加の要件が導入されます。

したがって、本にはさまざまな強さの声明が含まれます。機器によって記録されたスペクトルは、校正後のデータを指します。宇宙モデルから得られる年齢は、その仮定に依存する。可能な追加次元は仮説のままである。導出の曖昧さを示す数値的な例は、選択されたパラメータが実空間を記述しなくても厳密である。

これらの場合を議論自体で区別します。ときどき「このモデルでは」という単語は、それらに従う数字よりも重要です。信号がないとパラメータを狭めることがありますが、説明のクラス全体を排除しません。最初の必要なステップは、より強力な望遠鏡を構築するのではなく、方程式を扱うことです。

この規律は実用的な意味を持つ。質問が広すぎた場合、任意の観察は仮説と互換性があると容易に宣言できる。例えば、地平線を越えて、世界のほぼすべての構造を想像することができます。デバイスが利用可能なデータに影響を与えず、テストされている理論に関係しない限り、オブザーバーは予測と比較することはできない。前進するには、誤った結果になる可能性がある特定の結果を見つける必要があります。

検証の可能性にもいくつかのレベルがあります。設置精度が低下する場合があります。望ましいエポックは、他の材料の不透明さによって隠される可能性がある。いくつかの異なるメカニズムが同じ信号を生成することができる。最後に、二つの記述は、アクセス可能な領域全体に対して物理的に等価である。これらの問題に対する解決策はさまざまである。望遠鏡ミラーの倍率化は、すべての場合に役立つものではありません。

検証するには

まず、単純な宇宙論的な絵が残す仮定から始めましょう:十分に大きなスケールでは、空間は単一の均質で等方的な幾何学によって記述されます。銀河と空隙は、実際の宇宙を不均一にするため、大規模な近似とその精度について話しています。この近似自体は、異なる距離と膨張率の一貫性によってチェックできる。

物理的には二種類の測定が必要です。銀河の分布における統計的構造の角サイズは、横スケールを提供する。同じ構造の赤方偏移分布は、半径拡大に関する情報を運ぶ。恒星個体群の年齢差から追加の推定時間を得ることができるが、ここでは進化モデルを考慮する必要がある。どのチャネルも仮定から解放されていないため、それらを明示し、独立キャリブレーション手法を比較することは有用である。

Friedmann-Lematre-Robertson-Walker 幾何学では、異なる時代のデータから今日の曲率パラメータの同じ値を復元するように距離と拡大率が関係している。空間スライスの物理的曲率は膨張中に変化し、一般的な正規化に還元されるパラメータを比較する。Clarkson、Bassett、Luのテストはこれに基づいています。誤り制御後の違反は、幾何学的仮定の

受け入れられたセットに疑問を投げかけます。状態そのものの達成は、完全な均質性を証明しない。[3]

実際の分析には、銀河選択モデル、正確な分光キャリブレーション、固有速度の影響の制御、共分散の一貫した取り扱い、および距離が再構築される方法に望ましい結果がすでに組み込まれていないかどうかをチェックする必要がある。固定ジオメトリのすべての距離を最初に計算して、同じジオメトリの独立した証明であるという同意を宣言することはできません。

次の研究成果は、均質性から制御された偏差を含む既知のジオメトリを持つ人工カタログを事前に分析し、同じ方法を観察に適用する、という非常に具体的なものです。これにより、手順が実際に認識できる偏差が確立される。得られた合意はモデルの利用可能な違反を制限する。不一致は、チェーン全体のどの部分を再検査する必要があるかを示す。

空間の性質は内側から探究することができます。遠い出来事に関する情報が測定器の読み物になる様子を見てみましょう。

第2章

過去を見るには

望遠鏡は、単一の現在における宇宙の画像を取得しません。検出された光子はそれぞれ伝搬履歴を完成させる。近くの星系からの信号もあれば、私たちの周りの宇宙の領域がまったく違うように見えたときに出所を離れたものもある。スカイマップは、距離だけでなく時代によっても分離したイベントを接続します。

この状況は宇宙論を可能にする。私たちは初期の宇宙に戻ることはできませんが、その生き残った痕跡を探索することができます。同時に、それは注意を必要とします:遠方の銀河の明るさ、その年齢と距離は展示の下で署名として写真から読まれていません。測定器と出力の間には、測定と物理的な仮定のシーケンスがあります。

光が伝える情報

最も単純なケースでは、検出器はエネルギーフローまたは入ってくる光子の数を登録します。読み取りをソースの特性に変換するには、機器の感度、露光時間、騒音、地上観測に対する大気影響、および視線に沿った放射線を知る必要があります。宇宙望遠鏡は大気を除去しますが、有限解像度、熱効果、キャリブレーション、および部分周波数範囲という独自の制限を保持します。

画像は、放射線がどこから来るのかという疑問に答えます。スペクトルは、それが波長にまたがって分布する方法を示しています。原子と分子は、スペクトルに特徴的な線を残します。認識可能な線のシーケンスが一貫した方法でシフトされた場合、観測された波長とソースシステム内の値の比率を決定できる。この比率は通常、赤方偏移 z で表される。

$$1 + z = \frac{\lambda_{\mathrm{obs}}}{\lambda_{\mathrm{em}}}$$

例えば、z=2では、観測波長は元の波長よりも三倍長い。そのような測定は、ソースが2 cの速度で移動しているという意味ではありません。高いレッドシフトでは、ベロシティへの変換はベロシティ自身と幾何学モデルの決定を必要とする。近辺の物体は、それ自身の顕著な運動を持ち、強い重力場も周波数に影響する。宇宙論的な問題では、これらの貢献は平均膨張と分離される。[4]

ライン認識も検証可能な操作です。スペクトルの一つの印象的な特徴は、複数の識別を可能にする。既知の原子遷移によって接続されるいくつかの線は、より安定した解を提供

する。広い色帯から再構成された光度赤方偏移は大きな調査に有用であるが、通常はスペクトルモデルに依存する。したがって、分光の明確化は、特に珍しい物体の距離と年齢に関する結論を変える可能性がある。

理論的には、原子遷移そのものが依存する量も変化する可能性がある。異なる線の同時比較は、基礎物理学のテストになる。これは解釈を複雑にするが、新たな観察可能な結果を与える: 定数の変更はすべての遷移を等しくバイアスする必要がない。将来的には、この可能性を宇宙分野や実験原子時計と結びつけていきます。

同じ光源までの、複数の距離

銀河がどのくらい離れているかを聞きましょう光の放出の瞬間における距離、現在のコ移動点間の距離、またはcを乗算した光の伝搬時間を意味することができます。幾何学の変化において、これらは異なる量である。定義を混合すると、計算自体が正しい場合でも、一見パラドックスになる。

天文学の測定は、さらに二つの有用な定義を追加します。光源の光度が既知の場合、受信したフラックスから光度距離を入力することができる。横向きの物理次元が分かっていれば、角径に沿った距離は角次元を使って入力できる。これらの定義は、明るさと角度の通常の公式が便利であり、宇宙幾何学の影響が対応する距離に入るように設計されている。[4]

遠方の情報源は、いくつかの理由で薄暗い。放射は広い領域に分布し、各光子のエネルギーは赤色のシフトによって減少し、到着間の間隔が延びる。したがって、再構成光度はこれらの効果がどのように考慮されるかに依存する。さらに、光の一部はほこりに吸収されるか、重力レンズによって再分布されます。

標準サイズのオブジェクトは、レッドシフトが増加するにつれて空で小さくする必要はありません。通常の拡大モデルにおける角径に沿った距離は最大である。これは、ジオメトリの以前の状態でソースを観察しているという事実の結果です。したがって、角サイズ自体はまだ曖昧な距離を与えていません。必要なのは、データを解釈するためのレッドシフトと一貫した方法である。

遠い銀河への「今日の距離」も再構成である。私たちは彼女の現状を直接観察しない。利用可能な信号と一致するモデルにおいて、選択した宇宙時間に基づいて計算される。こ

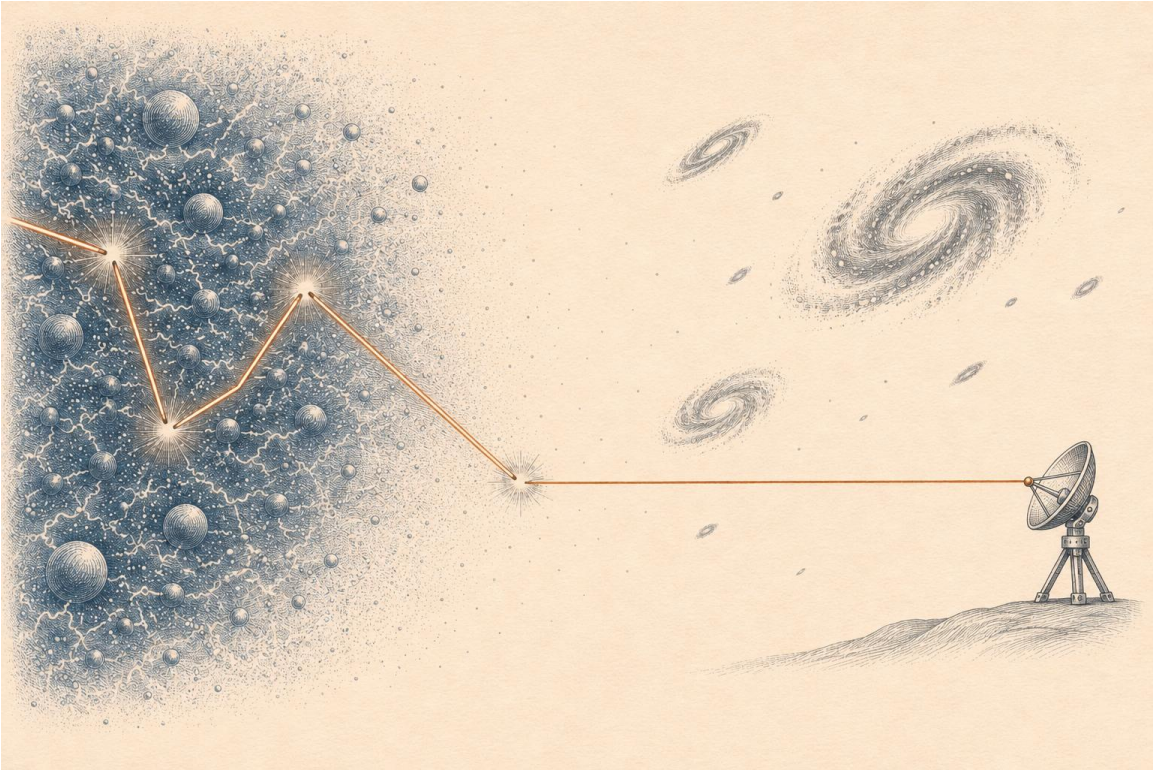
の再構成はモデル内では非常に正確であるが、検出された光子の到着の実際の時刻と区別しなければならない。

宇宙背景放射という、見通せる範囲の表面

初期の物質は光の自由な伝播に不透明であり、光子は荷電粒子と繰り返し相互作用した。電子が冷却されると、原子核と結合し始め、放射線の大部分は遠距離を移動することができた。今日、我々はこの放射をマイクロ波範囲で観察する。平均温度は2,725ケルビンに近い。[5]

宇宙マイクロ波背景放射の地図は、温度と偏光の小さな違いを示す。それらは、物質、重力的な摂動、光子の伝播の履歴から生じる。標準宇宙論モデルでは、この模様の主要な部分を残した最終散乱の時代は、熱い宇宙の進化が始まってから約 38 万年後に当たる。最終散乱自体にも時間的な幅があり、その後の過程も信号をさらに変える。[6]

したがって、これは世界が存在する最初の瞬間の写真ではありません。以前の出来事は、その後の絵にどのように影響したかによってのみ再構築することができます。不透明な時代の前の条件は、そこからの光が私たちに直接届いていないにもかかわらず、間接的にアクセスすることができます。これは宇宙論的推論の重要な例である:観測されたトレースとそれから再構成されるイベントは異なる時間に属する。



図版 3. 最終散乱が光の通り道を開く。不透明なプラズマでは、光子は相互作用するたびに何度も進行方向を変えた。中性原子が形成された後、放射のかなりの部分が自由に伝わるようになった。この図版は、それらの段階を模式的につないでいる。移行には有限の時間がかかり、観測される宇宙マイクロ波背景放射は、世界が存在し始めた最初の瞬間を直接写したものではない。

測定誤差とは何か

ほとんどの宇宙モデルは、空の各銀河の正確な位置ではなく統計を予測する。このようなモデルでは、ランダムな初期外乱は宇宙の異なる認識を引き起こす。観測された実装と可能性分布を比較し、選択したパラメータの下での典型的かを問う。

理想的な望遠鏡でさえ、利用可能な大規模なモードの数が有限である。すでに観察されているモードの測定精度を向上させることは、同じ規模の新しい独立した例を作り出さない。宇宙論における限定的なサンプリングは、宇宙分散と呼ばれる。測定器騒音と区別されるべきである:いくつかの精度の制限は、利用可能な情報の量によって決定される。[7]

これは宇宙論を検証不能にしません。異なる統計、偏光、物質分布、およびその他の物理メディアは、追加の制約を与えることができる。しかし、同じ空を再利用するには相関性を考慮に入れる必要がある。同じ地図の二つの分析は、異なるプログラムによって実行されたため、独立した観察にはなりません。

ランダムエラーと系統的エラーを区別することも有用である。同じ分散を持つ独立測定の場合、平均のランダム誤差は測定数の平方根として減少する。例えば、各誤差が二つの任意の単位である場合、百の測定平均は0,2単位のランダムエラーを持つ。一ユニット全体のスケールシフトは、一ユニットのシフトのままです。したがって、千個の追加オブジェクトは間違ったグレースケールを補正しない。異なるキャリブレーションを持つ異なる機器または方法が問題を検出する可能性がある。

したがって、異常クレームは生データから出力へのパス全体の記述を必要とする。オブジェクトはどのように選択されましたか? どんな信号がカタログに入れなかったのでしょうか? どんなパラメータが記録されましたか? それに気づく前に、何種類の機能を探していましたか? これらの問題は科学の最前線において特に重要であり、異例の結果は新しい物理学の兆候と容易に誤解される可能性がある。

簡単な選択例を見てみましょう。異なる光度の源を等距離で発生させる。私たちはほとんどすべてを検出しますが、遠く離れたものは最も明るいものを主に検出します。検出しきい値を考慮せずに二つのカタログの平均輝度を比較すると、人口の人工的な進化を得ることができます。この場合、記録された各フローは完全に正しく測定することができます。検出されたオブジェクトから既存のオブジェクトすべてに関する結論に移動するとエラーが発生します。

この効果を評価するために、研究者は実データまたは人工データに既知のパラメータを持つ信号を追加し、どの探索手順が回復するかをテストする。これが選択関数の決定方法です。また、確認する必要があります:人工オブジェクトは実際のものの本質的な特性を非常によく再現しなければならない。珍しい珍しい種類のオブジェクトに関する仮説に対して、標準ソースモデルは十分でない場合もある。

逆問題もある。特定のオブジェクトがカタログにない場合、これはそれらの物理的不在、小さい数、低輝度、またはアルゴリズムが所望の信号を認識することができないことを意味する可能性がある。仮説の限界に関する声明は、その予測を検出する確率を推定する必要がある。図面の空の領域は、そのような評価のみで科学的制限に変わります。

検証するには

チェーン全体をチェックする一つの方法は、距離の二つの定義を同じエポックと比較することです。距離時空のヌル測地線に沿って光が伝搬し、光子数が保存されると、光度と角径の距離は相互性によって関係する。受け入れられた表記法では、次のようになります。

$$D_L(z) = (1+z)^2 D_A(z)$$

この関係は、特定のダークエネルギーモデルを選択しない。光伝達のためのより一般的な条件をテストします。実用的な比較には、既知の性質を持つ物体や統計的スケールが必要である:例えば、輝度の標準化された超新星と、角距離の銀河分布における音響スケールである。音響観測は、主に音線の大きさと距離の比率を与えます。その長さと超新星の絶対光度は、独立して校正するか、一般的な未知のパラメータとして含む必要がある。それらのキャリブレーションは、同じ入力データからの依存関係を含む、一緒に考慮する必要があります。[4] [8]

簡単な例はここでチェックされているものを示しています。いくつかの光子を損失させ、フラックスのわずかなexp(− τ)がオブザーバーに到達し、 τ はパスの透過性を特徴付ける。損失が考慮されていない場合、ソースはさらに遠くに表示されます:光度距離はexp(τ /2)倍に過大評価されます。これは、流れの逆比例性から距離の二乗に従う。しかし、すべてのソースの同じ減衰は、絶対光度の誤差と混同される可能性がある。したがって、一般的なキャリブレーションパラメータを維持しつつ、赤方偏移と波長への影響の依存性を確認する必要があります。二つの距離の間の非常に不一致は、まだ光の損失の理由を示していません。

可能な不一致は、単一の原因を示すものではない。ダストは流束を減少させ、ソース自身の進化により推定光度が変化し、レンズは明るさを再分配する。それ自体では、通常の重力レンズは、その前提を維持しつつ、一貫した光ビームの相反性に違反しない;物体の選択と平均化方法のためにエラーが発生する可能性がある。新しい光子相互作用も結果に影響を与える可能性がある。異なる範囲での観察、独立した校正、およびレッドシフトへの影響の予測依存性は、原因を分離するのに役立つ。説明を主張するモデルは、偏差のパターン全体を再現しなければならない。

別のテストでは、観測されたイベントの時間コースを使用します。宇宙的赤方偏移では、イベントの連続する段階間の間隔は1+zの係数によって増加する。近距離超新星と遠距離超新星のスペクトルの変化を比較し、そのスペクトル特性に基づいて物理段階を決定する

ことができる。このチェックはすでに実施されており、期待されるストレッチと一致しています。時間ストレッチを予測しない特定のレッドシフトの説明を除外します。[9]

この試験を強化するためには、同じ事象の繰り返しスペクトル、超新星群間の差の制御、およびそれらの段階を比較するための所定の手順が必要である。期待されるストレッチとの合意は、テストされる信号転送特性をサポートする。宇宙論の他のすべての規定を別々に確立するわけではない。期待されるストレッチやその他の不一致の欠如は、まず特定の予測と測定チェーン全体と比較されるべきである。

したがって、遠くのソースだけでなく、それに関する情報が私たちに届いたルールについても光を尋ねることができます。次のステップは、スペース自体の距離がどのように変化したかを復元する、これらのルールに基づいています。

第3章

何が膨張するのか

遠く離れた銀河間の距離が大きくなるなら、私は爆発の空飛ぶ破片を想像したい。そして、それらが散在する中心があり、それらが移動するスペースがない必要があります。この画像は、すでに存在する環境における物質の爆発に有用である。宇宙の膨張は、宇宙物質の一般的な移動に関与する点間の距離の幾何学的比率が異なる。

理想的なオブザーバーのネットワークを想像してみましょう。各オブザーバーは、平均して、周囲の宇宙環境に対して休息しています。彼らは宇宙時計に従って同じ年齢を持つことができ、信号を交換し、距離を比較する。均質な近似において、そのような観測者のペア間の距離の比率は一般法則に従って変化する。この一般的な依存性はスケール係数 a によって決定される。

膨張を測る時計

通常、今日の a の値は一に等しくなります。これは、世界全体の絶対サイズを測定するのではなく、正規化の選択です。あるエポックaが半分に等しい場合、同質モデルにおける対応する宇宙論的距離は今日のものと半分である。スケール係数の相対変化率はHと表される。

そのような動きが専用のセンターを持つ必要がない理由を見てみましょう。等しい間隔で同じ行の小さな領域にある三つのコムービングオブジェクトを取りましょう。選択した時点で、一番目と二番目の間の距離の微分はHに一つの間隔を掛け、一番目と三番目のHの間に二つを掛けます。相対的な中間オブジェクトの説明に行くと、左側に最も近いオブジェクトと右側に最も近いオブジェクトが反対方向に等しく速く移動します。

すべての参加者は、距離と距離に応じて同じ法律を参照してください。この単純な例では、大域的な宇宙学的なスライスと局所的に適用される比較方法に一様の動きを用いる。彼は、自分の地図の中央にある観察者の位置がなぜ彼を物理システム全体の中心にしないのかを説明します。遠くの物体の場合、完全な計算は観察された光の異なる発光時間も考慮に入れます。

この法則は、自身の速度と重力が重要である特定の銀河群で違反する可能性がある。このような局所的違反は大規模拡大をキャンセルしない:その近似が記載されているスケールのモデルと観察を比較する必要がある。

$$H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$$

上の点は、宇宙時刻による微分を表す。量 H の次元は時間の逆数である。天文学ではよく、メガパーセク当たりの毎秒キロメートルで表す。この表記は、対応する近似の下で、遠ざかる速度が距離とともにどう変わるかを示している。一メガパーセクは約 326万光年である。

H の現代的値をハッブル定数と呼ぶことによって、すべての時代に同じだと仮定することはできない。数字H_0は今日を指します。H自体は宇宙進化の間に変化する。さらに、膨張が加速しても減少する可能性があります。加速とは a の正の二次微分のことであり、H はその変化の相対速度を記述する。この二つの問題は数学的に異なる。

単純な例では、距離はますます速くなりますが、すでに達成されているスケールはさらに大きくなります。この場合、速度とスケールの比率が低下する可能性があります。したがって、「膨張の加速」という表現は、自動的に「ハッブル定数の増加」という言葉に置き換えることはできません。ダイナミクスを復元するには、時間内のH関数全体またはレッドシフトを知る必要があります。

数学的な例を考えてみましょう:スケール係数は三つの半分の力に時間に比例します。その最初の微分は時間の平方根として成長するので、膨張が加速する。しかし、その微分のスケール係数への比率は三つを時間の二倍に分割し、減少する。この例は、宇宙の確立された歴史を説明していません。加速度と H の変化の区別は、特定の宇宙論が選択される前に、量の定義からすでに従うことを示す。

加速には、また微妙な点がある。相対論的宇宙論では、ダイナミクスは物質の密度だけでなく圧力によっても影響される。したがって、正の成分密度は必ずしも減速を意味しない。十分な負圧は加速モードを維持することができます。この圧力は、世界の外壁を押す物質として想像する必要がない:それは幾何学の内部力学の方程式に入る。

コンポーネントがどうやってこの特性を取得するかは、独立した物理的な問題である。宇宙定数は方程式のレベルで一つの答えを与える。移動スカラーフィールドは、別のストーリーを与えることができます。重力の法則を変更するには、第三の説明が必要です。特

定の範囲での膨張の偶然は、まだこれらのメカニズムを同一にしない:それらの相違は不均質または実験室相互作用の成長において現れる可能性がある。

全体の膨張に参加するソースの場合、観察された波長と放出された波長の比率は、パスの端にあるスケール係数の比率に等しい。今日の正規化により、これは放出の瞬間に=1/(1+z)を与える。この関係は、分光測定と宇宙史を結びつける。追加の運動と重力シフトは別々の補正を必要とする。[4]

物質の組成が歴史を定める

一般的な相対性理論では、膨張の速度は宇宙と空間的曲率の内容に関係している。放射線、非相対論的物質と宇宙定数が存在するモデルの場合、現在の共有の観点から方程式を書くことは便利です。

$$\frac{H^2(a)}{H_0^2} = \Omega_r a^{-4} + \Omega_m a^{-3} + \Omega_k a^{-2} + \Omega_\Lambda$$

ここで Ω_r は放射線、Ω_m は物質、Ω_Λ は宇宙定数を指す。パラメータ Ω_k は空間曲率の寄与を記述するもので、特別な物質の一部ではない。A=1の場合、これらの四つの量の合計は一に等しくなります。粒子の相対論的運動から遅い運動への遷移やセクター間のエネルギー交換は、より詳細な説明を必要とする。

ゆっくり動く物質の密度は、逆体積とほぼ同じである。膨張領域内の粒子数は維持されるが、体積は立方体aのように増加する。自由放射線では、各量子のエネルギーはさらに減少するため、密度はより速く低下する。このモデルでは、宇宙定数の密度が保存される。依存性が異なるため、コンポーネントは全体的なダイナミクスを順次決定できる。

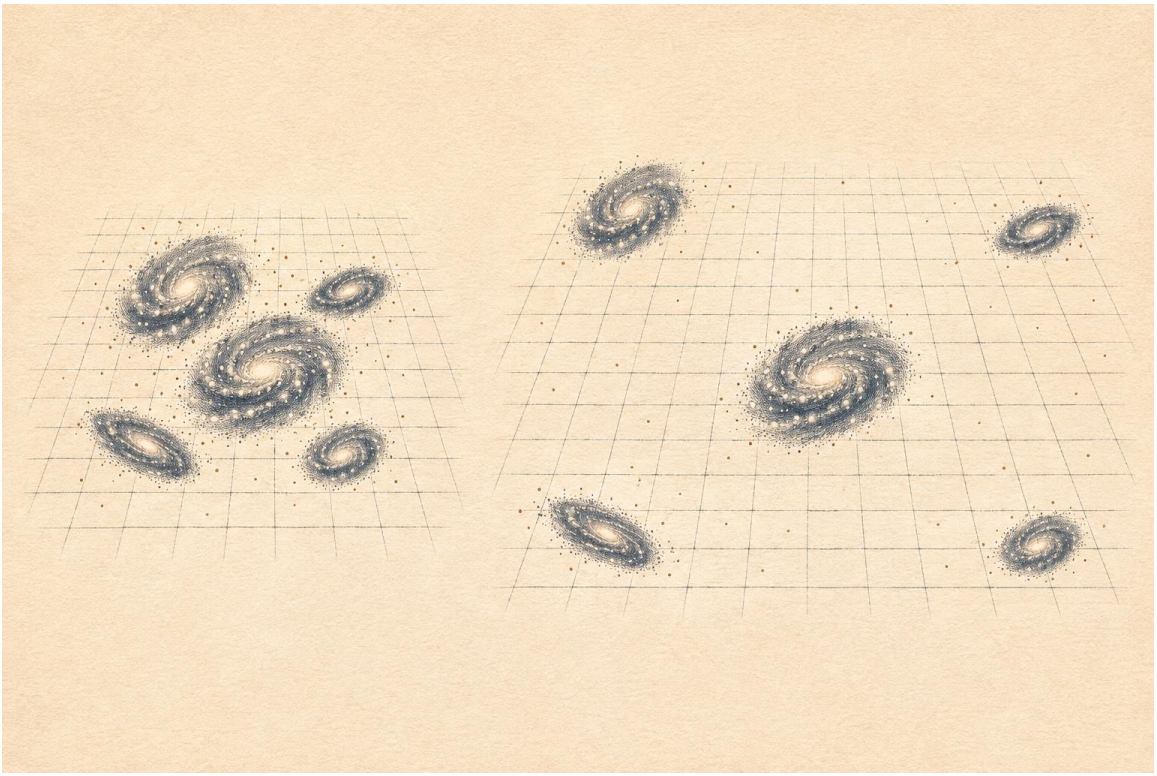
初期の時代では、放射線は特に重要である。後には、物事が大きな役割を果たします。正の宇宙定数では、その相対値は他の成分が希薄になるにつれて増加する。このシーケンスにより、非常に異なる温度のエポックを一つの動的記述で接続できる。標準モデルの観測的成功は、この歴史の多くの痕跡の和解にあり、そのパラメータはデータの共同分析によって決定される。[6]

年齢を知るには、H_0 だけを測っても足りない。H_0 の逆数は特徴的な時間尺度を与えるが、年齢は H の全履歴に依存する。本書の説明用モデルでは、H_0 の逆数は約 145億年であるのに対し、計算した年齢は約 138億年である。この違いは、膨張速度の変化が積み重なった結果を表す。

あらゆるものが一様に引き伸ばされるわけではない理由

均質な宇宙論モデルは、大規模力学の近似である。原子、惑星系および重力結合銀河は、それらを保持する力を考慮する必要がある。観測者の共通のコムービングネットワークに従う必要はない。そのサイズを記述するために、適切な背景で局所動的問題を解決する。

これは二つの粒子の例を使って理解できる。それらが事実上自由であり、一般宇宙運動に参加する場合、それらの間の距離は膨張と関連付けられる。安定した境界状態に入る場合、それらの距離は相互作用と系の状態によって決定される。宇宙論的影響は、完全な問題の一部として推定され、従来の結合システムでは極めて小さい。各項目のサイズを a で乗算する権利はありません。



図版 4. 距離が増しても、束縛された系は大きさを保つ。二つの模式的な状態は、共動する領域どうしの距離が増す様子を示す。描いた束縛系の大きさは保ち、それぞれの系の内部の力学が果たす役割を強調した。宇宙膨張は、あらゆる物体が同じように引き伸ばされることを意味しない。この図版が示すのは原理であり、尺度の正確な比や個々の銀河の実際の歴史ではない。

遠方の物体の後退速度も慎重に決定する必要がある。均質なモデルでは、遠方移動点間の適切な距離の微分は c を超えることができる。これは、オブザーバーの近くで飛んでいる物体の局所的な速度ではありません。特殊相対性理論の限界は、局所的な測定と信号伝

送に関係している。宇宙論的地平線の分析は、そのような誘導体の超光度値がなぜ自動的にソースを観察する禁止にしないかを示しています。[1]

ここで距離に戻ろう。本書の説明用モデルでは、z=1 の共動する情報源からの光は、約79.5億年かけて伝わった。対応する点どうしの現在の距離は約 110.9億光年、光を放った時点では約 55.5億光年である。この三つの値は、同じモデルと同じ情報源に関するものだ。違いは、何を測る量として定義するかに由来する。

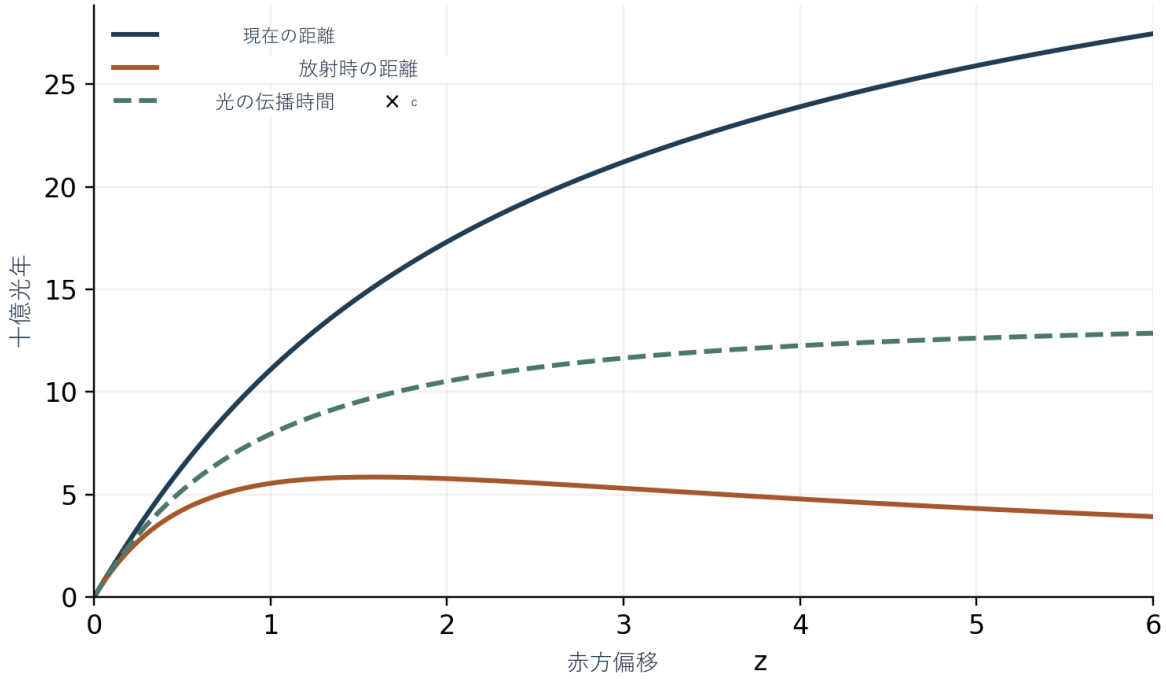


図1。放射、物質および宇宙定数を持つ図示的空間平坦モデルにおける異なる距離測度。パラメータと計算方法は、数学的付録に与えられます。曲線はモデル計算であり、新しい観測データを表すものではない。

放射エネルギーの変化は、次の自然な疑問を提起します:赤色光子のエネルギーはどこに行くのですか? 一般に相対性理論では、エネルギーと運動量の局所保存は正確な数学的形式を持つ。しかし、全保存エネルギーの使い慣れた概念を任意の動的時空に転送するには、時間内の適切な対称性などの追加の条件が必要である。拡大する宇宙全体にとって、そのようなグローバルエネルギーアカウントは通常の形式では存在し得ない。

均質な成分について、局所保存方程式はその密度の変化を膨張と圧力に関連付ける。これは、物質と放射線の希少化の指示された法則と一致する。失われたエネルギーが別の宇宙貯水池に蓄積しなければならないという追加の声明は、そこから従わない。同じ理由で、

宇宙の正確なゼロ総エネルギーに関する一般的なフレーズは、モデルとエネルギー自体を定義する必要があります。

検証するには

ほとんどの膨張測定は、異なる時代の物体を比較します。異なる光源からの光から歴史を再構成します。より直接的な仕事は、何年も後に同じ宇宙源の赤方偏移を再測定することである。過去の時間をかけて、幾何学は変化しました。つまり、世界の道の終わりにあるスケール係数の比率もわずかに変化するべきです。

コムービングソースの均質モデルでは、レッドシフトドリフトは今日のH_0とエミッションエポックにおけるHの値で表される。このような測定の物理的アイデアは、遠くのクエーサーのスペクトルのために開発されました:銀河間ガス中の多くの吸収線は、観察期間間で比較できる詳細なパターンを作成します。[10]

$$\frac{dz}{dt_0} = (1+z)H_0 - H(z)$$

時間t_0は観察者の時計によって測定される。私たちは次のスペクトルを待っている間、受信の瞬間と私たちに到達する光子の放出の瞬間の両方が変化します。したがって、ドリフトの兆候はソースのみの加速に起因するものではない。分光器と比較すると、z の小さな変化は c/(1+z) を掛けて等価な速度シフトに変換される。8章では、二つのダークエネルギー履歴に対するそのような信号を計算します。

効果は非常に小さいです。成功は、波長スケールの長期安定性、十分な光子、および観察者の動作の制御に依存する。正確な周波数基準、スペクトルの繰り返し処理、ガス自体の変化の検証が必要になります。個々の系の固有加速度は宇宙論的寄与を隠蔽することができるため、物体のアンサンブルとレッドシフトに対する信号の一貫した依存性が不可欠である。

この方法による膨張の測定は、ESO の超大型望遠鏡向けに開発されている分光器 ANDES の科学的課題の一つである。プロジェクトの公式ページでは、十年間で 0,02 m/s という校正の長期安定性は、達成済みの性能ではなく目標として示されている。この観測には、原子標準に結びつけた周波数コムと、ほかの校正光源が必要になる。それらによって、装置自体の変化を追跡できる。[11] [12]

最初の一連の観測からも、課題の大きさがすでに分かる。2026 年の研究で ESPRESSO のグループは、約二年間の間隔におけるクエーサー J052915.80−435152.0 の分光観測の三つの時期を比較した。得られたドリフトは一年当たり −3,5 ± 3,6 m/s で、ゼロと整合する。誤差は、予想される宇宙論的効果よりもはるかに大きい。これは測定手順の検証であり、この方法で膨張を検出した結果ではない。[13]

さらに、比較モデルのシフトを計算し、ノイズ、キャリブレーション、天体物理学の歪みを伴う人工スペクトルに転送することから始まる。次に、どのソースと観察間隔で差を再構成できるかを決定する必要があります。キャンペーン期間の推定は、オブジェクトの明るさと収集される光子数に依存する。トレーニング計算で選択された二十年の間隔は、それ自体が二十年以内に検出を約束しない。[14]

結果は、その感度があらかじめ決定されている場合に有用である。発見された一貫性のある関係により、拡張再構成を別の方法で検証できる。利用可能な範囲に期待される効果がないと、特定のモデルや測定制御の問題が発生します。すでにここで、宇宙論の未来は、特定の物理的作業のように見えます。二つの注意深く比較された観察は、時間によって分離され、宇宙スケール自体の変化を研究することができます。

第4章

高温の歴史

拡大を後方にトレースすると、平均して物質は濃くなり、放射線は熱くなります。しかし、単に方程式を反対方向に動かすだけでは、過去を復元するには十分ではありません。保存された痕跡が必要です。初期ホット宇宙の場合、そのような痕跡は物質の組成、宇宙マイクロ波背景放射のスペクトルおよびその不均一性の構造に見られる。

この絵の強さは、検証可能な物理学を通じて異なる時代の関係にある。核反応、原子遷移および光の伝搬は様々な観察可能な影響を残した。比較することができます。私たちが過去を深く掘り下げるにつれて、外挿は増加するので、うまくテストされたホットな履歴と、その可能性に関する仮説を早期に分離することが有用です。

放射は温度を記憶する

均衡中の熱放射は一定のスペクトルを持つ。その形状は、温度と統計物理学の基本法則に関連しています。そのような放射線が大きな新エネルギーの放出なしに宇宙を伝搬すると、波長は一貫した方法で増加する。スペクトルは熱形式を維持し、温度はスケール係数に逆比例して低下する。

したがって、初期の高温の段階から予測されるのは、弱い背景の光が存在することだけではない。そのスペクトルの形、現在の温度、より早い時代の温度が結びつく。現在の宇宙背景放射の温度はスペクトルから測定されており、フィクセンの分析では、整合的な推定値は 2,72548 ± 0,00057 ケルビンとなった。これは温度の具体的な測定であり、それだけで宇宙の年齢を測ったものではない。[5]

この放射能が以前より熱かったかどうか確認できますか? これは、過去に温度計を送信する必要はありません。遠くのガス雲では、分子は周囲の放射線と相互作用する。そのエネルギーレベルの占有確率は、より遠いクエーサーの光の吸収線に影響を与えます。衝突と局所放射線が考慮されると、そのようなレベルは宇宙温度計として機能することができます。

この原理は、遠距離吸収系における一酸化炭素分子の励起の観察に用いられた。その結果は、レッドシフトによる標準温度上昇と一致します。この方法は、独自の天体物理学的

な不確実性を有するが、今日の全天マイクロ波測定とは異なる物理によって温度履歴をテストする。[15]

最初の軽い原子核はどう生まれたか

初期のプラズマでは、反応は十分速く、状態の顕著な変化の間に粒子が繰り返し相互作用することができた。拡大するにつれて、密度と温度は低下した。ある反応が以前の平衡を維持する時間がなくなった瞬間がありました。その痕跡は、物質の組成または粒子の分布の形で保存された。

ここでは二つの物理的な時間を比較します。一つは、粒子に必要な反応の間の平均時間であり、もう一つは1/Hの順序で媒体が著しく膨張する時間である。第一は第二よりもずっと短いが、衝突は組成を変化温度に適応させる時間を持つ。それらがあまりにも希少になると、以前のバランスは中断されます。いわゆる反応の凍結は、粒子が動くのをやめたり、すべての反応を同時にオフにしたりすることを意味するものではない。各プロセスは独自の速度を持ち、独自のマークを残します。[16]

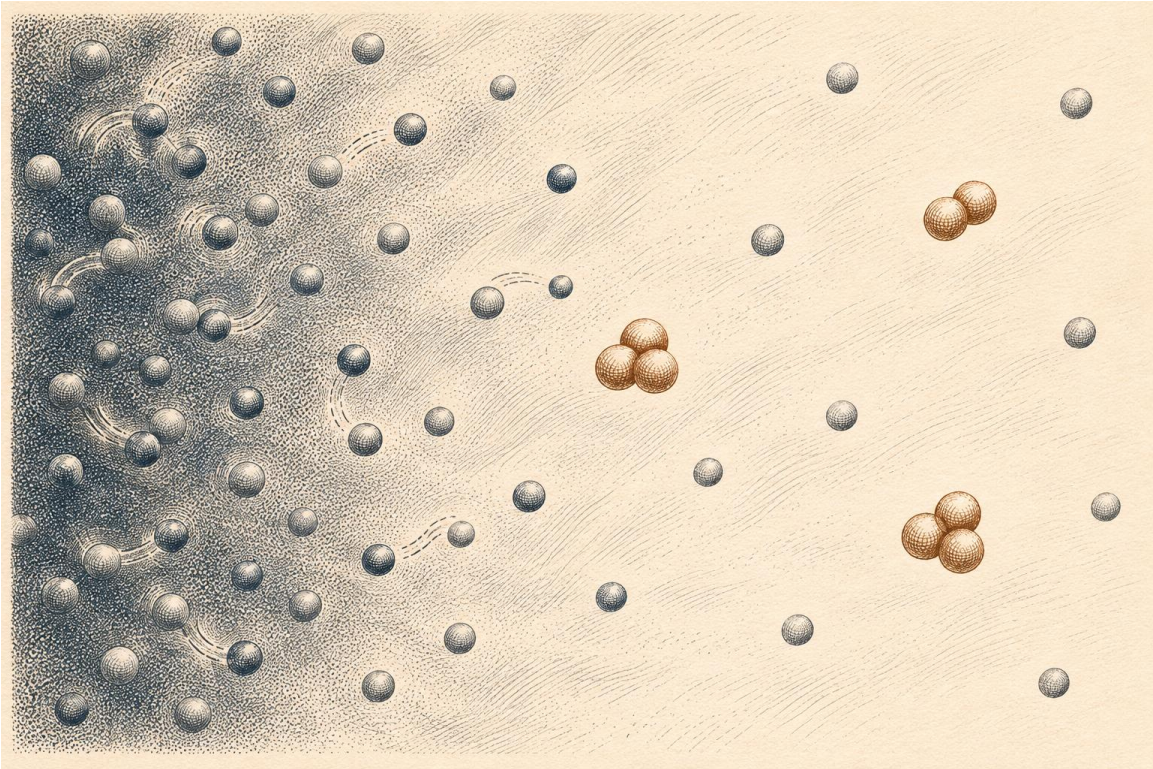
熱い宇宙の歴史の最初の数秒には、中性子と陽子の比が特に重要だった。弱い相互作用が一方の粒子を他方へ変換していたが、その後、膨張に追いつかなくなった。自由な中性子の崩壊は続いた。重水素が安定して蓄積し、軽い原子核が主に合成されたのは、それより後の、最初の数分の段階である。現在の計算では、反応ネットワーク、測定された断面積、中性子の寿命を使って、この過程を追う。[16]

粒子の平均エネルギーが結合エネルギーよりも小さくなると、なぜ核はすぐに現れなかったのですか? 熱分布は高エネルギー尾を持つ。さらに、バリオンよりも多くの光子があります。従って、十分なエネルギーを持つ少数の光子でさえ、新たに形成された重水素を破壊する可能性がある。さらなる冷却の後のみ、効果的に継続できる合成鎖があった。

この時点まで残った中性子のほぼすべては、ヘリウム4 の原子核に入った。簡単な見積りから、初期宇宙にヘリウムが多くできる理由が分かる。中性子一個に対して陽子が約七個あるなら、元の十六個の核子のうち、中性子二個と陽子二個が一つのヘリウム原子核を作る。ヘリウムは、それらの総質量の約四分の一を占める。より正確な結果は、実際の反応速度と、中性子の崩壊にかかる時間に依存する。

その際、宇宙がすべての物質を重い元素に変えたわけではない。膨張によって密度は急速に下がり、軽い原子核の性質も、その先の合成経路を制限した。多くの重い元素の生成

は、その後の恒星の進化や、ほかの天体物理的な過程に関わる。宇宙論で特に価値があるのは、初期の条件に敏感な、軽い原子核の残存量である。



図版 5. 初期のプラズマが軽い原子核を残すとき。膨張とともに、密度、温度、そして反応にかかる時間と環境が進化する時間との比が変化した。重水素のボトルネックを越えると、軽い原子核を効率よく作れるようになった。ここで示すのは、粒子から小さな束縛された集団への定性的な移行だけである。組成、反応率、元素の生成量は、核反応ネットワークを使って計算する。

同じ中身を測る二つの方法

重水素含有量は、初期の宇宙における通常の物質の密度に依存する。対応する核反応が頻繁に起こるほど、その残留分数が異なる。しかし、一次重水素はもっと後で測定しなければならない。ガスは星を通り抜けたり、他の物質と混合したり、複雑な吸収系になったりした。

したがって、観察者は処理されたガス雲を比較的ほとんど探さず、同じ吸収剤のいくつかの線を調べます。同位体シフトにより、水素と重水素を区別することができます。弱い重水素線が別の成分から異なる速度で水素を模倣しないかどうかを確認する必要があります。ここでの正確な分光と統一クラウドモデルは、宇宙論的推論の品質を決定する。2018

でCook、Pettini、Steidelによって得られた一パーセントの見積もりは、小さくて注意深く研究されたサンプルがいかに強力に制限されるかを示す例である。[17]

通常の物質の密度を定める別の物理的な経路が、宇宙背景放射である。最終散乱の前には、光子と荷電した物質は結びついた媒質を作り、その中を振動が伝わっていた。バリオンの量は、その動態に影響した。したがって、温度と偏光のスペクトルの特徴的な構造には、それよりずっと早い核反応にも関わった、同じ物理量についての情報が含まれる。元素合成そのものを厳密に検証するには、予測したヘリウムの割合が、背景放射の分析で先に使われていないかも考慮する必要がある。独立した検証では、この割合を自由に変化させ、共通の不確かさを保持する。[6]

二つの時代を比較するには、密度から今日のパラメータへの調整された遷移が必要である。それらの間に大きなエネルギーの追加、構成の変化、または受け入れられた進化の法則に異常な違反があった場合、これは合意を台無しにする可能性があります。この試験は、核物理学と宇宙幾何学を結び付け、直接観測することがほとんど不可能な新しい成分の探索を可能にする。

通常の物質とほとんど相互作用しない追加の光粒子を想像してみてください。初期の宇宙にそのような粒子が多く存在し相対論的に移動した場合、それらのエネルギーは膨張速度を決定するのに役立つ。核反応は温度ごとに進行する時間が異なる。他の条件は、例えば、有効中性子-陽子相互変換が停止し、その後のヘリウム収率を変更すると、より速い膨張が変化する可能性がある。

したがって、粒子は検出器にぶつかることなくトレースを残すことができます。しかし、トレースのサイズは初期の占有確率に依存します。粒子種の単なる存在は、それがどれだけのエネルギーを運んでいるかを教えてくれません。宇宙論的制約のために、誕生機構、対応するセクターの温度、および可能な崩壊を特定する必要があります。これは、相互作用に関する実験室の制約と密度に関する宇宙論的制約が同じテストの異なる部分である理由を説明します。

CMBと比較すると、時間的区別が増す。この成分は、核合成と崩壊の間に、最後の散乱や別の移動モードへの遷移の前に存在しうる。このバージョンが説明になるためには、同じ粒子履歴を持つ両方の時代を計算する必要があります。独立した密度を選択する自由は、予測関係を破壊する。

確かめられた歴史はどこまでか

この写真には本当の難しさが残っています。リチウムの既知の問題は、古い重い元素の乏しい星の観測から推定される標準予測とリチウムの存在量の相違である。解釈は、スペクトル解析における恒星組成の変化、物質移動、不確実性を考慮に入れる必要がある。新しい物理学の可能性が議論されているが、不一致の単なる事実は自動的に選択しない。[16]

重水素予測の精度は核データにも依存する。一つの応答の改善は、他の不確実性の消失を保証するものではない。天文学的な測定がより正確になるにつれて、以前の微妙なエラーが別の反応の速度で結果を決定し始めることがあります。したがって、初期の宇宙検証プログラムは、実験者が粒子ビームと目標組成を制御する従来の実験室核物理学を含む。

初期の時代が考慮されているほど、理論の適用性の限界がより重要である。加速器は高エネルギーで相互作用特性を確認することができる。しかし、この結果の宇宙論的利用は、特定の密度、媒体の組成および膨張履歴を仮定する。特定のプロセスが研究室で再現される。宇宙全体の状況は、モデルと保存された観察トレースを通じて復元される。

古典的な解決策をずっと遡って続けると、非常に高密度で曲率の高い体制にたどり着くことができます。これは、使用する方程式の適用性をチェックする必要がある制限を示しています。そのような限界の存在そのものは、時間の絶対的な誕生の観察ではありません。初期の段階、量子遷移または他の記述は独立した研究の対象のままである。

それゆえ「ビッグバン」という用語は、明確化で使うのに便利です。ホット履歴は、いくつかの観察試験によって支持される初期のプラズマの膨張と冷却を意味する。絶対的な始まりの仮定は、より強いステートメントです。光元素に関するデータは、これらの仮説が核合成の時に必要な条件を再現する場合、ホットステージがどのように発生したかについての異なる仮説の下でその価値を保持する。

最初の一秒の痕跡

高温の過去には、もう一つの証人、宇宙ニュートリノ背景があるはずだ。ニュートリノは太陽、超新星、地上の装置でも生まれるが、ここで扱うのは、初期の高温の媒質に存在した粒子である。宇宙論での意味を定めるのは、その起源と、その後の分布の進化である。どんなニュートリノでも検出すれば、この背景を検出したことになるわけではない。通常

の電波光子を記録しても、それだけで宇宙マイクロ波背景放射を測ったことにならないのと同じである。

初期のプラズマでは、弱い相互作用はニュートリノと他の粒子間のエネルギー交換を支持していた。冷え込むにつれ、この取引所は拡大に追随できなくなった。特徴的なエポックは、メガ電子ボルトの順に温度で、標準ホット履歴の最初の秒を指します。これは一つの反応を瞬時にシャットダウンするものではなく、宇宙の絶対年齢の測定でもない。背景には、粒子数、運動量、運動量を変更した可能性があるリリース条件とその後の影響に関する情報が格納されている。

温度の最も単純な推定はエントロピー保存から来る。理想的な瞬時分離の後、電子と陽電子の消滅は、すでに分離したニュートリノに対して光子を主に加熱する。フォトニック電子媒体では、エントロピーに関わる有効自由度が11/2から2に変化する。温度は、宇宙冷却に加えて、この数の逆立方根としてスケールします。よく知られた関係があります

$$T_{\nu,0} = \left(\frac{4}{11}\right)^{1/3} T_{\gamma,0} \simeq 1.945\ \mathrm{K}.$$

数値的な例では、上記の測定からT γ , $_0$ = 2,72548ケルビンが使用されます。計算係数は約0,71377です。これは理想化された推定であり、現代のニュートリノ温度の直接的な測定ではない。非相対論的となった巨大粒子に対して、T ν , $_0$ は保留運動量分布のスケールを表す。追加の再計算がなければ、運動の平均エネルギーによって決定される気体の通常の運動温度として理解できない。

デカップリングの正確な計算には、衝突、フレーバーとプラズマ特性間の振動を考慮した運動方程式が必要である。光子とニュートリノは完全に瞬時に分離しないため、単純な温度法則は補正されている。Froustey、PitruおよびVolpe 2020の計算では、相対論的ニュートリノ自由度N_{eff} = 3,0440の実効数が得られた。三との違いは、エネルギー密度の補正であり、粒子数の発見ではない。[18]

パラメータ N_{eff} は一般に、光子に対する相対論的セクターのエネルギーの単一測度として便利である。異なる粒子と温度セットは同じ値を与えることができます。したがって、この量だけを測定すると、ニュートリノの相互作用は決定されません。さらに学ぶためには、平均密度だけでなく、摂動の挙動も利用する必要があります。物質が領域間でエネルギーを伝達し、周囲の重力場を変化させた方法です。

相対論的ニュートリノは結合した光子バリオンプラズマとは異なる動きをする。それらの外乱は、このプラズマの音響振動に影響を与える重力ポテンシャルを変化させます。振動の特徴的な位相シフトが起こる。これは、ジオメトリによって絵画全体の角サイズを変更することとは異なります。BashinskyとSeljakは、対応する物理メカニズムを導出し、その診断価値を特定の断熱初期条件下で示した。[19]

2015 年、フォリン、ノックス、ミレア、パンは、宇宙背景放射の温度スペクトルに、予測された位相の痕跡を検出したと報告した。これは宇宙ニュートリノの振る舞いに関する、間接的な証拠の例である。検出器が測るのは光子であり、ニュートリノについての結論は、その重力的な作用を通じて得られる。この結果は、ニュートリノ質量の測定とも、実験室で背景の粒子を直接捕獲することとも区別する必要がある。[20]

次の研究では、二つの具体的な履歴を比較できる。一つ目では、ニュートリノは通常の弱い相互作用から脱結合した後、自由に伝播する。二つ目では、ニュートリノ間の追加の弾性相互作用が、平均エネルギー密度を近い値に保ちながら、衝突をより長く持続させる。このような可能性は、以前から研究されている。たとえば、シール＝ラシーヌとシグルドソンは、ニュートリノの自己相互作用の有効な強さ G_{eff} と、それが宇宙論的摂動にどう現れるかを検討した。[21]

相対論的ニュートリノのための重メディエータとの接触相互作用の体制において、特性衝突率はc,,k_Bが一に等しい単位における温度依存性$\Gamma_\nu \propto G_{\mathrm{eff}}^2 T \nu^5$を持つ。係数と角応答は、採用された顕微鏡モデルに依存する。それを計算するには、分離時間を任意に移動させるだけでは十分ではありません:衝突項を設定し、近似の適用性モードを確認し、分布の角乱れの階層を追跡する必要があります。[21]

この定式化は、データによって強い自己相互作用が必要であると仮定しない。CamarenaとCyr-Racineによって2025で発表された研究において、選択されたCMBデータと銀河分布の共同検討は、そのような宇宙論の単純なバージョンを著しく制約した。その結果は、研究されたモデルとデータセットを指す。これは、新しいバージョンが別のスペクトルにうまくフィットするのではなく、複数のオブザーバブルによって一度にテストされるべき理由を示しています。[22]

相対論的セクターの同様の平均エネルギーを持つ物語を事前に選択することは特に有用である。相と偏光の違いは、新しいエネルギーを追加するだけでなく、動きの性質をテストします。同時に、標準宇宙パラメータとヘリウム分数の変化が許されるべきである。そ

れ以外の場合、剛性固定補助値は、差分を人工的に視認性を高めることができる。最後のタスクは、このような共同比較の後も区別可能な衝突パラメータを見つけることである。

背景を直接検査するには、異なる機器が必要です。研究されている方法の一つは、ヘリウム3と電子の形成を伴うトリチウムによるニュートリノの捕獲です。

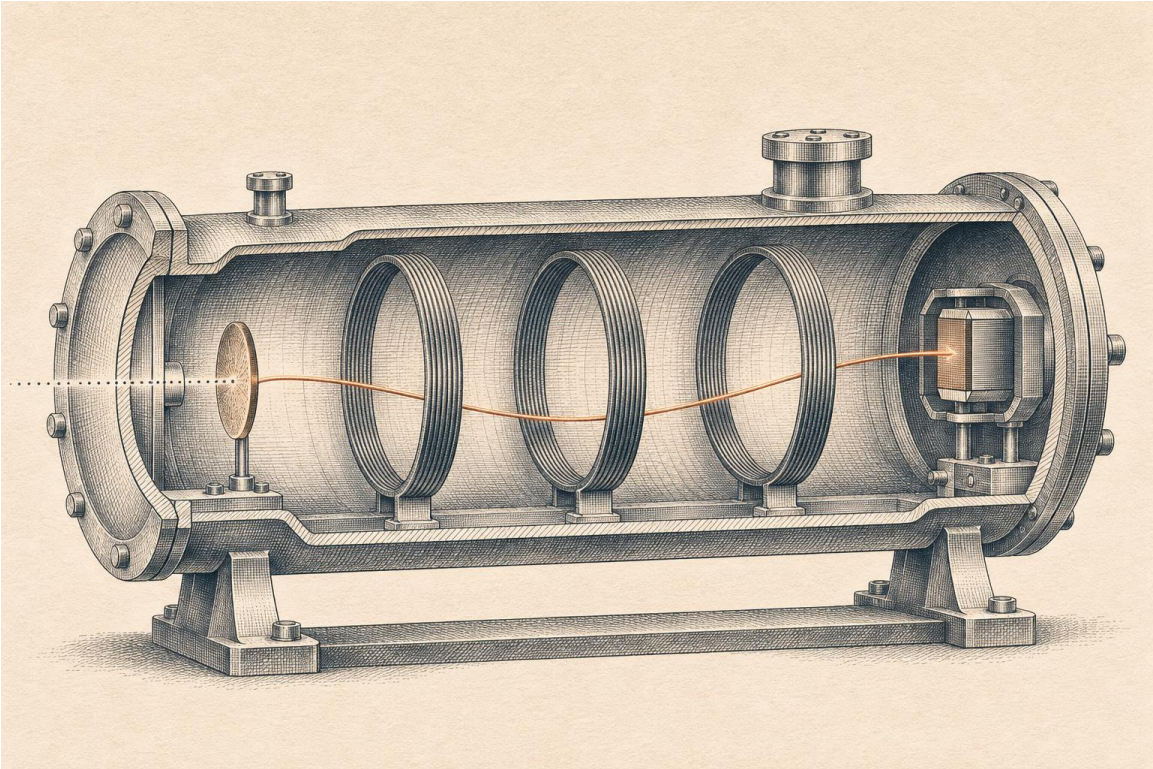
$$\nu_e + {}^3\mathrm{H} \longrightarrow {}^3\mathrm{He} + e^-.$$

Captureは、通常のベータスペクトルの終わりよりも高いエネルギーを持つ電子を生成することができる。ほぼ同一の非相対論的質量に対して、信号とベータ端の間の特性距離は約2m ν c^{2}である。異なる質量の場合、混合重量でいくつかの貢献を計算する必要がある。事象の頻度はニュートリノの局所密度、ヘリシティと性質にも依存する;これらの依存性はロング、ルナーディーニおよびサバンシラーによって詳細に分析される。[23]

PTOLEMYの研究プログラムは、そのようなキャプチャのセットアップの開発を検討しています。公表された見積もりは、質量、エネルギー解像度、背景をターゲットにする能力に関連する。物理的に分解された反応と信頼性の高い宇宙論的測定の間には、実際の反応のテストがあります:トリチウムが材料にどのように結合するか、電子線をどう広げるか、電子がどのようにエネルギーを失うか、そしてそのスケールの安定性が決定されるか。プロジェクト推定は、遺物ニュートリノの検出の報告を構成しない。[24]

使用されるPTOLEMYホワイトペーパーは、プロトタイプ磁気システムと電磁フィルタの構築を示しています。即時工学的目標は、所望の特性を持つ電子の選択と測定を検証することである。このフェーズは、研究計画で個別に考慮され、完全なインストールの実現可能性の設計評価に置き換えられてはいけません。[25]

成功したキャプチャでも、最初の秒の無条件の写真は提供されません。現代の重力によるニュートリノの蓄積は、地球近傍の密度を変えることができ、質量の性質はこの密度を捕獲率に変換することができる。したがって、実験室と宇宙のチャネルは一緒に有用です:最初のテスト粒子を直接、二番目は初期のエネルギーと伝搬を制限します。彼らの不一致は、両方の測定を接続するチェーン全体を計算した後にのみ興味深いものになるでしょう。



図版 6. ニュートリノの標的から電子の信号へ。検討されている直接探索の方法では、ニュートリノがトリチウムに捕獲され、生じた電子のエネルギーを測る。この模式的な配置は、標的、電子の輸送、検出器を結びつける。特定の計画の設計を再現したものではない。背景ニュートリノの信号を取り出せるかは、エネルギー分解能、背景、標的の性質、校正の安定性によって定まる。

検証するには

最初のパスは研究室を通過します。重水素によって捕獲されたプロトンの反応では、ヘリウム3が形成され、ガンマ量子が放出される。所望のエネルギーでの反応確率を測定することにより、原始重水素の計算における不確実性を低減することが可能である。LUNA実験では、宇宙背景が著しく減衰した地下実験室でプロトンビームとガスターゲット、ガンマ線記録を用いた。これは、地球上の測定が宇宙史の最初の分に関する結論をどのように洗練させるかの具体的な例です。[26]

さらに、重要な反応ネットワーク全体の協調的な改善、ターゲット特性の制御、検出器効率とエネルギースケールなどがあります。更新されたネットワークは、所望の宇宙密度に各反応を適合させることなく、重水素とヘリウムの独立した観察と比較されなければならない。誤差相関を公開することは特に有用であり、いくつかのよく測定された量が共通の体系的不確実性を保持する可能性がある。

第二の方法は、宇宙マイクロ波背景放射の熱的形態からのスペクトルの偏差を調べる。初期環境における追加のエネルギー放出は、平衡を回復するプロセスが完全に消去できるほど効果的でなくなった場合、スペクトルトレースを残すことができる。歪みの形状と大きさに基づいて、エネルギー放出の時間とメカニズムを制限することができます。しかし、一つのスペクトル成分は、通常の天体物理過程を含むいくつかのソースを持つことができる。

物理的には、正確な内部参照源、広い周波数カバレッジとデバイス自身の放射線の制御を備えた絶対分光器が必要です。マルチ周波数観測により、銀河塵やその他の前景を分離することができます。PIXIEインストゥルメンタルコンセプトは、そのようなタスクにおいて分光法と偏光法がどのように組み合わせられるかを示しています。[27]

特定の研究は、プロセスの選択から始まります:例えば、与えられた寿命とエネルギー分数を持つ粒子の崩壊。次に、プラズマ、一次元素および放射線スペクトルの組成の変化を計算する。モデルは、同じパラメータでこれらのテストに合格しなければならない。別のチャンネルで禁止されている効果を持つ信号は、一貫した説明を提供しません。

肯定的な結果は、スペクトル形状、周波数キャリブレーションと代替ソースを確認する必要があります。歪みがないことは、実験が敏感である時代とチャネルでのみエネルギー放出を制限する。非常に初期のプロセスが熱化された可能性があります。弱すぎると、デバイスのしきい値を超えて残ります。これらの境界の計算は、「始まりを見る」という約束を明確なタスクに変えるものです。

プログラムのニュートリノ部分は、標準計算と一つの公開衝突モデルを再現することから始まる。次に、共通のパラメータのグリッド上で、CMBの温度、偏光およびクロススペクトルを計算し、核合成との接続を維持する。固定された非ゼロ相互作用を持つ仮説が、許可されるパラメータを変更した後にデータに適合しない位相と偏光パターンを必要とする場合、このバージョンは拒否される。ヌル結果は相互作用の範囲を制限し、隠れたニュートリノ相互作用を禁止しない。

直接捕捉するためには、最初の結果は既知のエネルギーの電子に対する反応の測定された分布と背景およびスケール安定性でなければならない。特定の質量と局所密度の予測線とベータスペクトルと関連している。これは、次のデバイスに対する検証可能な要件が得られる方法です。十分な解像度がないと、別の線が存在しないと宇宙ニュートリノの背景

を反省しません。両方の研究部門は、検出前に有意義な結果を生成することができる:フリーストリーミングの許容される歴史と直接登録の実現可能性に合理的な境界。

ホットな歴史は、核反応、放射線と弱い相互作用粒子の動きをリンクします。ニュートラル原子の形成の後、別の可能な情報源が現れる - 最初の星の誕生の前に宇宙水素それ自体。彼の電波信号は、世界の将来の構造が初期の異質性から形を取り始めた時代までこの物語を継続することができます。

第5章

最初の星が生まれる前の宇宙

ニュートラル原子の形成の後、宇宙はスターライトなしで長い間生き残った。不均質性は既に存在し、気体は重力場に移り、密度の高い領域はさらに圧縮されるように徐々に準備されていた。よく研究されている宇宙マイクロ波背景放射と観測された銀河の間にはエポックがあり、その重要な部分は理論に従って再構成されている。これは、星が熱し始め、周囲の物質をリサイクルする前に構造の成長を見ようとすることができます。

「暗黒時代」という名称は、多くの発光物体が存在しないことを表している。放射線や物理的なプロセスがないという意味ではありません。光子を除去し、空間を埋め続けた。中性水素は、狭いスペクトル線でその流れを変える可能性があります。最初の星の出現の前にこの信号を研究するという原理は、特にロエブとザルダリアガによって定量的に発展した。したがって、新しい研究ステップは、モデルとその実現可能性のいくつかのテストで追求されるべきであり、水素自体が未知の宇宙プローブであると宣言するものではない。[28]

この章は、ホットな歴史とダークマターの性質の問題を結ぶ。初期のガスから、なぜ何らかの規模で不均質性がほとんどないのかを判断することは可能ですか? 最初から弱いのか、それとも粒子の動きを滑らかにしていたのか? 原因を見極めるためには、原子信号とその宇宙的変化と測定そのものの限界を一貫して理解する必要があります。

電波の送信器としての原子

水素の基底状態は、電子と陽子のスピンの相互配向に関連付けられたエネルギーに近い二つのサブレベルを持つ。それらの間の遷移は、原子の残りのフレーム内の約21センチメートルの波長に対応する。宇宙論的な問題では、膨大な数の原子の集合的効果が重要である:背景放射との相互作用は、一定の周波数で無線輝度に弱い変化をもたらす。

三つの温度はここで異なる役割を果たします。運動温度は気体粒子の動きを特徴付ける。CMBの温度は周囲の光子場を記述する。スピン温度は、水素の二つのサブレベルの占有確率の割合によって与えられる。これは、原子がこの線の光子を吸収して放出する方法を示し、原子の動きの温度と一致する必要はありません。温度比は、衝突と放射線との相互作用の競争によって変化する。

単純な均質な領域では、背景が宇宙マイクロ波背景放射である場合、スピン温度T_s、背景温度T_γおよびτ_{21}線の光学的厚さの観点から明るさ温度の観察された差を記述することができる。後者は、検討中の経路に沿った放射線と気体との相互作用の確率を特徴付ける。この表記は、層を通る放射線の移動に続き、明るさ温度の宇宙的減少を考慮に入れます。

$$\delta T_b = \frac{T_s - T_\gamma}{1+z}\left(1 - e^{-\tau_{21}}\right).$$

負の差は背景に対する吸収を意味し、正の差は追加の明るさを意味します。T_sとT_γが等しければ、気体は存在し不均一性を持つが、平均的な線のコントラストは消える。したがって、強い平均信号がないと、水素の量はまだ測定されません。正確な計算は、光学的な厚さ、速度および温度の不均質性も考慮に入れており、そのような転送の線形解析はルイスとチャリノールによって行われた。[29]

リリット光子との熱接続が弱まった後、ガスは放射線よりも速く冷却することができます。衝突がスピン温度を気体温度に十分に結合する限り、吸収が発生します。さらに希薄化することで、衝突はより効果的ではなく、スピン温度と背景温度の差が減少する。通常の原子物理学では、星が現れる前から、時間差のある電波信号を作り出します。[28]

最初のソースが点灯すると、写真はより複雑になります:それらの放射線はレベルの占有確率を変え、ガスを加熱し、徐々にイオン化します。この段階は宇宙の夜明けと呼ばれています。興味深いことですが、すでにソースのプロパティに関する追加質問に答えています。我々のタスクでは、その貢献が小さいと考えることができる間隔を事前に指定し、モデルを変更する際にこの仮定をチェックする必要がある。

周波数が時代の目印になる

原子は既知の周波数で光子と相互作用したが、波長の宇宙論的ストレッチの後オブザーバーに到着した。気体自身の速度を無視すると、関係は単純になります。

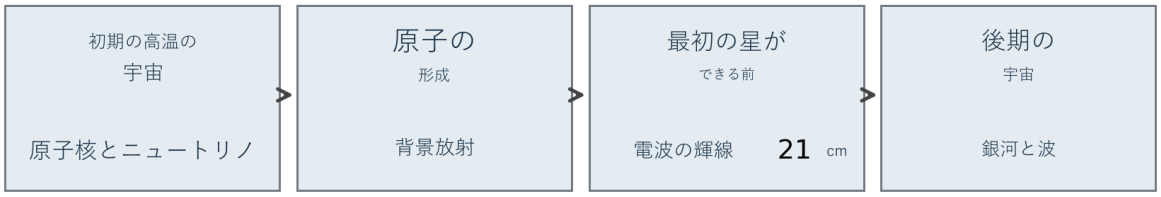
$$\nu_{\rm obs} = \frac{\nu_{21}}{1+z}, \qquad \nu_{21} \simeq 1420.4\ \text{MHz}.$$

赤方偏移 z = 30 では約 45,82 メガヘルツ、z = 50 では 27,85、z = 100 では 14,06 となる。これらの値は、示した式を使って本書のために実際に計算した。必要となる周波数帯を示すものであり、そこからアンテナの感度、観測時間、検出確率は導けない。この変換には、前景のフラックスも、装置のノイズも含まれていない。

異なる周波数を観察することで、過去のさまざまな層にアクセスすることができます。空の角の位置は二つの座標を与え、周波数は赤いシフトに関する情報を追加します。距離への遷移には宇宙モデルが必要であり、自然の速度は補正を導入し、有限チャネル幅は隣接する層を混合する。結果として生じる体積は過去の光円錐を指します:より遠い領域が以前の状態で観察されます。

この機能は便利で危険です。これにより、いくつかの時代の構造の統計を比較することができますが、観察されたボリューム全体を補正なしで一つのスナップショットとして考慮することを禁じます。外乱の平均温度と成長速度が広帯域内で顕著に変化する場合、処理は進化を考慮に入れなければならない。さもなければ、一時的な変化の一部が誤って空間構造に落ちる。

水素信号は他の宇宙の痕跡の中でも、より明確になりつつあります。ニュートリノの背景は、プラズマとの効果的な交換がずっと早く停止したことと関連しており、リリクト光子は最後の散乱時代の写真を持ち、水素線はその後の層を星に加える。これらのオブザーバブルは同じタイプの三枚の写真ではありません。各チャネルは独自のプロセスを覚えており、その時代との接続は独自の転送物理によって決定される。



情報を運ぶものの模式図。段階の幅は期間を表さない。
初期の時代を探れるかは、伝播のモデルと信号の保存に依存する。

図2。宇宙史のさまざまな段階に関する情報の担体。図は、達成した正確な持続時間や感度ではなく、シーケンスと物理的な役割を示しています。ニュートリノの背景には間接的な証拠があり、暗黒時代の直接捕獲と断層撮影は依然として課題である。重力波は、ソースと輸送に応じて異なる時代に関する情報を運ぶことができます。

平均の明るさから、空間の構造へ

実験の最初のバージョンでは、空に平均化されたスペクトルが測定されます。ガスの平均熱履歴と組成について話します。第二に、方向と周波数の違いを復元する。それらは不均質性の統計を研究することを可能にする。暗黒時代の展望の現代の計算は、これら二つのモードを別々に考慮している:正確な地図を取得するには、平均スペクトルプロファイルを検索するよりも異なる寸法と設定能力が必要である。[30]

平均値とばらつきは、異なる問いに答える。二つの気体が同じ平均温度をもちながら、高密度の領域と希薄な領域の分布はまったく異なる場合もある。したがって、平均的な吸収を検出しただけでは、小さな摂動のスペクトルはまだ得られない。測定には、一定の空

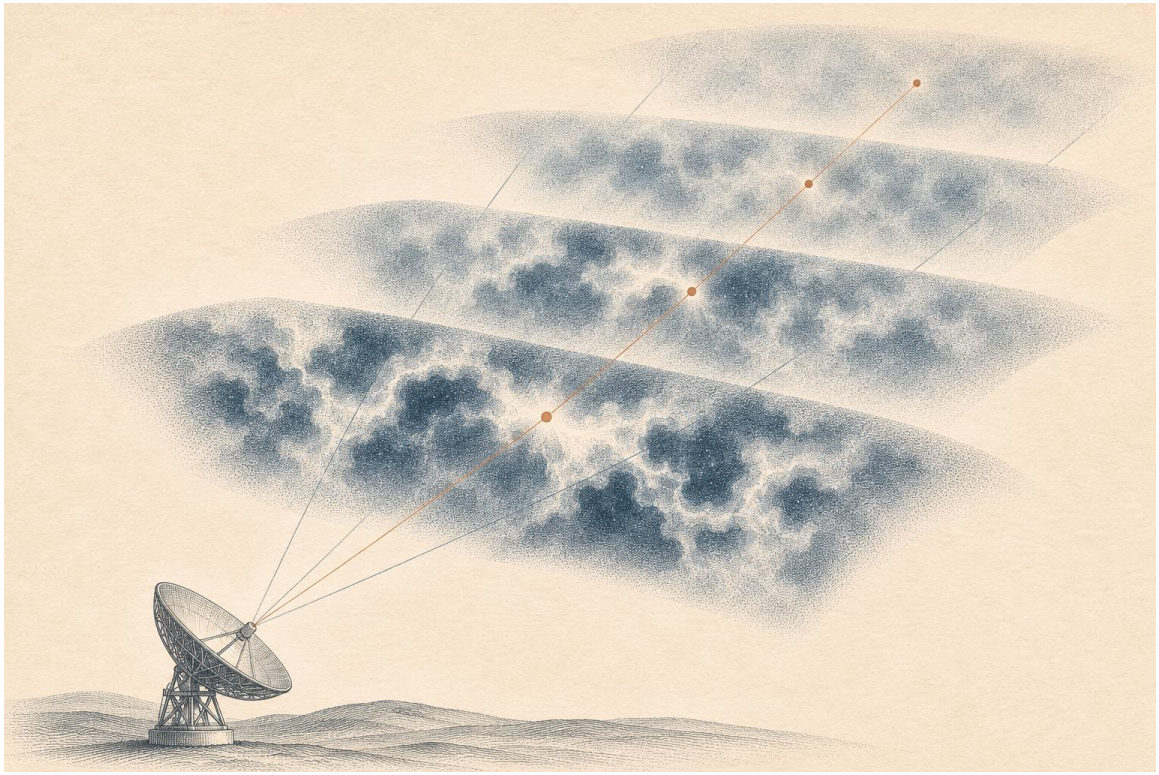
間的な間隔をもつ点どうしで、電波の明るさがどれほど相関して変わるかを定める必要がある。

そのような数字の便利な統計は、パワースペクトルP_{21}です。空間スケールで明るさ変化の平均の大きさを分布する。大きなコムービング波数kは小さいスケールに対応する。さらに、視線に対する方向への依存が生じます:気体の移動は観察された周波数を変化させ、それによって不均一性の見かけの半径方向の位置を変える。従って、同じ物理的構造はビームに沿って、あるいはビームを横切って異なるように見える。

q は波動ベクトルと視線線の間の角度のコサインを示し、ζ は一次曲率摂動を表す。一つの断熱初期モードを持つ限られた線形記述において、明るさはζに比例する。同じフーリエ正規化を使う場合、次のようになります。

$$P_{21}(k,q,z) = |\mathcal{R}_{21}(k,q,z)|^2 \, P_\zeta(k).$$

R_{21}値は、ガスの密度、運動および熱応答の増加を結合し、その単位は選択された輝度温度単位によって指定される。式は線形応答の通常の性質を表す。いくつかの独立した初期成分では、一つの積の代わりに相互相関を持つ和が必要であり、有意な非線形性で、追加の項が生じる。単純な記録でさえ、主な難しさを示しています: 一つの測定された積は、初期パターンとその後のダイナミクスを別々に決定しません。



図版 7. 周波数が過去の異なる層を明らかにする。波長 21 センチメートル線のトモグラフィーでは、空の方向と周波数を、電波の明るさの分布に結びつける。模式的な各層は、私たちの過去の光円錐上の異なる時代に対応する。それらを補正せずに一枚の瞬間像へまとめることはできない。距離への換算にはモデルが必要であり、気体の速度や周波数チャネルの有限の幅も再構成に影響する。

ガスは、それ自身の履歴を保つ

初期の水素は、恒星の前に複雑な放射線源を記述する必要がないため魅力的です。しかし、それは暗黒物質の静止スクリーンと見なすことはできません。ガスは、圧力、残留イオン化および熱慣性を有する。異なる密度は衝突に影響を与え、したがってスピン温度と粒子の動きの関係に影響する。したがって、同じ重力の不均一性でさえも常に同じ明るさを与えるとは限らない。

再結合後の通常の物質と冷たい暗黒物質の相対速度は特に重要である。それは小さな障害の成長を変え、その統計をより大きな地域に関連付けます。Ali-Haimud、MeerburgおよびYuanは、この効果が21センチメートル信号に異なるスケールで反映されていることを示した。このような共通の貢献を基本的な計算に含めた後、エキゾチックなパワー抑制を求めるべきです。[31]

私たちの設定では、これは物理的状態全体を比較する必要があることを意味します。密度マッチだけでは十分ではありません:速度、ガス温度、およびそれらの相互相関をチェックする必要があります。二つのバージョンが密度のみで一致した場合、不完全な初期条件からさらに発散する可能性がある。それは計算の実際の結果ですが、研究者がテストしようとしているメカニズムの違いではありません。

双スペクトル - あなたはまた、トリプル相関に回すことができます。波ベクトルの三角形を形成する三つのモード間の結合を説明し、従来のパワースペクトルに情報を追加する。しかし、非線形成長と気体の性質に対する明るさの依存性は、ガウス一次場であっても三重相関を生成する。Muñoz、Ali-Haimud、Kamionkowskiの研究は、一次非ガウス性を探す際にこの二次的貢献を考慮する必要性を示している。[32]

したがって、「双スペクトルを追加し、縮退を解く」という約束は別の計算を必要とする。どのコンポーネントがパワーと異なるモデルを接続しているか、そしてこの差はガスパラメータを推定した後に残るかどうかを示す必要がある。二つのバージョンで利用可能な同じ全状態統計を指定し、同じ方程式に従うと、統計の新しい名前自体が欠落した情報を作成しません。

同じ不足を生む、二つの起源

限定的なプロジェクトを定義しましょう。バージョンAでは、暗黒物質は冷たく、原始スペクトルは小さなスケールでスムーズに抑制される。最初の計算では、肯定的な現象論的形式を指定することができます。

$$P_\zeta^A(k) = P_{\zeta,0}(k)\exp[-(k/k_c)^p], \qquad k_c > 0, \quad p > 0.$$

ここでk_cはカットの位置を決め、pはそのシャープさであり、$P_{\zeta,0}$は選択された滑らかな参照スペクトルである。これは、障害の起源の新しい理論ではなく、便利な研究パラメータ化である。初期のメカニズムがスライスした理由はまだ説明されていない。まず、観察チャネル自体がそのような初期条件と小さな構造の損失の別の理由を区別できるかどうかを決定する。

バージョンBでは、一次スペクトルは滑らかに残されるが、与えられた運動量分布を持つ特定の熱暗黒物質が選択される。粒子の急速な移動は、小さな不均一性を滑らかにします。この物理機構は長い間、温かい暗黒物質のモデルで研究されてきた。ここでは、コン

ポーネントの質量、分布および寄与は、レッドシフトごとに独立して適合されるのではなく、選択したモデルによって関連している必要があります。[33]

まず、両方のバージョンのパラメータが選択され、測定された電力は同じ参照エポックと予め指定されたスケールの範囲で近接するようにします。次に、残りのエポック、視界に対して振動の方向、および十分な理論的精度で三重相関を比較する。テストされている仮定は、ダイナミクスの継続的な違いが、許容されるパラメータ変更によって吸収できない追加のトレースを残すことである。

この仮定は誤りかもしれない。利用可能なエポックによって、暖かい成分の残留運動がもはや重要ではなく、その作用が転送関数のほぼ一定の変化に還元された場合、特別に選択された一次スペクトルは同じ結果を再現することができる。複数のレッドシフトは分離を保証しない:等しい成長は、ある時期から次の段階への偶然を運ぶ。上記の指数形式は、正確なフィットには厳しすぎる可能性がある。そしてそれはテストされるこの形式であり、原始抑圧のアイデア全体ではない。

この結果は科学に役に立つ。これは、電波マップが初期スペクトルと搬送の組み合わせを計測していると判断し、分離に必要な追加の仮定を示す。一次スペクトルを別のチャネルに限定したり、残差ダイナミクスがまだ顕著である場合にエポックを観察する必要があるかもしれない。粒子を自分でテストする必要があるかもしれません。選択は変性の構造から従うべきであり、いかなる犠牲を払っても肯定的な答えを得たいという欲求からではありません。

退化の最初のテストは、特に透明にすることができます。一つの線形初期モードでは、同じコムービングkと角パラメータqの値が二つのエポックにおけるパワーの比率は一次力を減少させる。両方の応答が零でない場合、前の式から直接続きます。

$$\frac{P_{21}(k,q,z_1)}{P_{21}(k,q,z_2)} = \left|\frac{\mathcal{R}_{21}(k,q,z_1)}{\mathcal{R}_{21}(k,q,z_2)}\right|^2 .$$

したがって、初期電源を変更するだけでは、この比率の任意の変化を偽ることはありません。しかし、バージョンAとBで応答比が同じ場合、このテストはそれらを分離しません。これは限定線形記述の代数的帰結であり、暗黒物質識別の普遍法則ではない。実際の観察では、同じ領域の繰り返し画像ではなく、異なる層からの統計を比較する。共分散、異なる解像度、全体的な幾何学的モデルを考慮する必要がある。

このような制御は、特徴の識別を探索する人工知能にも有用である。第一に、関係が分析的に同一であるペアを与えられた後、既知の転送差と対する。アルゴリズムがシミュレーションの計測不可能な詳細に基づいて最初のグループを自信を持って区別すると、データ準備の特徴が見つかります。解析例に戻ると、結果を新しい物理として解釈する前にこのエラーを検出することができます。

結果が肯定的であれば、次のステップは安定性をチェックすることです。差は、標準宇宙パラメーター、気体温度および許容残留恒星の寄与の変化に耐えなければならない。完全に固定された共変量でのみ注目される予測は、実際の分析では消える可能性がある。したがって、プロジェクトの結果はパラメータ空間における識別可能性の領域であり、理論曲線の一つの壮大なペアではない。

電波の静けさと、機器の動作

必要な低周波はタスクエンジニアリングを困難にします。地球の電離圏は電波の伝搬を変化させ、人間の送信機が強力な干渉を生み出す。月の裏側は、地球の放射線汚染を緩和することができる場所と見なされています。LuSEE-Nightの公式な説明は、ラジオ環境を探索し、そのような観察窓をマスターするための前駆実験として定義されている。この状態は、暗黒時代のすでに完成した断層撮影と等価ではありません。[34]

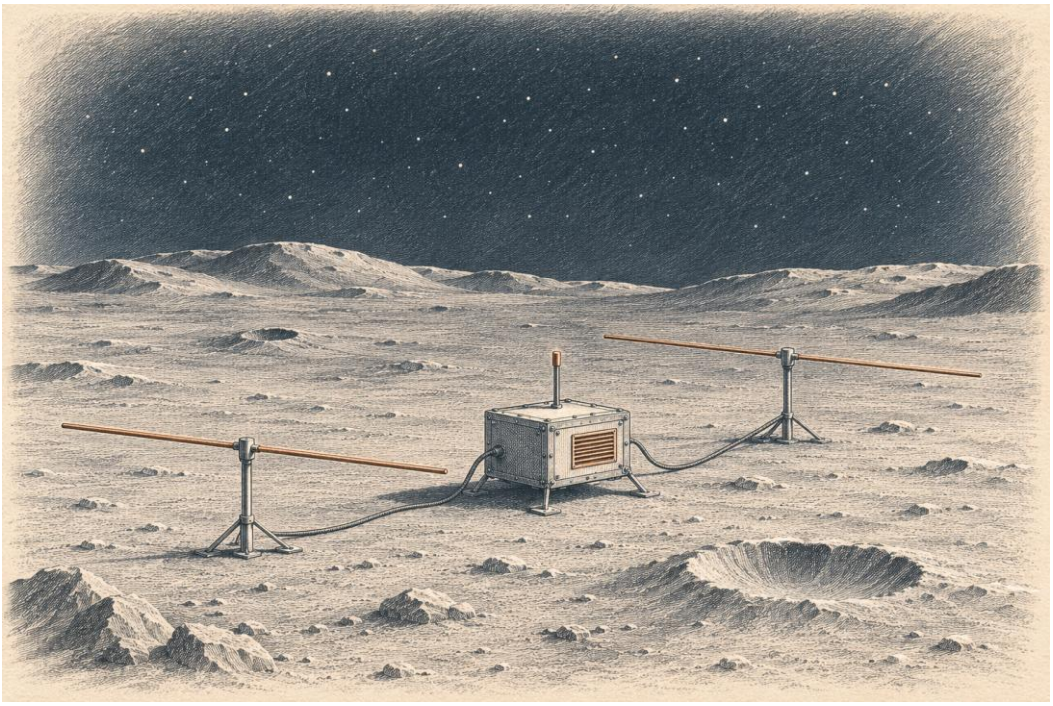
LuSEE-Nightの設計には、低周波受信機と相互指向アンテナが含まれています。本のために、物理的なステップ自体が重要です:所望の環境におけるインストールの受信、校正および操作を確認します。配信スケジュールは達成された感度の証明ではないため、宇宙論に関する結論は特定の機器の測定性能に基づいている必要があります。[35]

月のサイトは、銀河放射、電子機器の固有のノイズ、またはアンテナモデルの不正確さを排除しません。その方向応答の周波数への依存性は特に危険である。異なる周波数で空の明るい領域を異なる周波数で混合すると、スペクトル的に滑らかな前景が興味のある信号に似た構造を生成することができる。受信機の利得だけでなく、空の重さも測定する必要があります。

干渉計の場合、この問題は空間モードの混合にも現れます。スムーズな前景とインスタレーションの周波数応答との接続は、横方向および縦方向の波数座標におけるくさび状の領域を汚染することができる。この効果の統計的解析は、再イオン化時代の21センチメー

トルラインの研究で開発されました。暗黒時代には、将来の配列の周波数、幾何学およびノイズを再置き換える必要がある。別の実験の既製の感度が自動的に転送されない。[36]

これは、プロジェクトの特定の要件を意味します:モデルの識別性を計算するのは、クリーニングと選択後に実際に残るモードだけです。主な相違が遠くの領域にある場合、それは観察上の利点と見なすことはできません。機械学習アルゴリズムは、採用されたモデルから潜在値を予測することができるが、そのような再構成は削除モードの独立した尺度を追加しない。



図版 8. 月の裏側からの電波観測。月の裏側は、地球からの電波干渉を弱めて低周波の測定を行う場所として検討されている。描いたのは模式的なアンテナ装置であり、完成した望遠鏡の設計ではない。月による遮蔽があっても、銀河の前景放射、装置自身の雑音、アンテナの周波数依存性はなくならない。将来の感度は、測定と計算で求める必要がある。

検証するには

最初の結果は、大きな天文台の建設前に得ることができます。与えられたAとBのペアに対して、いくつかの層における密度、速度、温度および無線輝度の再現可能な計算(例えばz = 30、50および100)を生成する必要がある。これらの値は、普遍的な星なし境界ではなく、参照グリッドとして機能する。選択されたモデルがそこで重要な恒星の貢献を予測する場合、より低い層はソースで除外または補完される。

その後、測定モデルを構築します。ミッドスペクトルには、周波数応答、アンテナパターン、校正標準が含まれます。空間相関には、アレイ幾何学、アンテナ間の距離、周波数チャネル、観察時間が必要である。パラメータは、特定のプロジェクトから取得するか、将来の設計のオプションとして明示的に指定します。この後にのみ、理論信号間の差は観察的意味を持つ。

人工データには、二つのモデルと天の前景と楽器の誤りが紹介されている。解析アルゴリズムの再構成は盲目的に行われ、両方のバージョンで許容される迷惑パラメータを変更する。シミュレーションの一つの部分は、モデルが誤って選択されるしきい値を設定し、もう一つは、正しいバージョンが選択を通過する頻度をテストします。独立したコード実装は、共通のメッシュ上でキー伝達関数を再現しなければならない。

特定のテストは、誤った基本的な計算に関係します。残存イオン化、ガス圧、相対成分速度、前景の周波数形状を合理的な不確実性の中で交互に変化させなければならない。小さな標準補正がウォームマターの効果をシミュレートした場合、実験は未だに原因の組み合わせによって制限されている。このようなテストは、どの原子、宇宙論または工学的不確実性を減らすことがより有益であることを示すでしょう。

選択したバージョンAは、一般的なフィッティングの後、その解決されたパラメータが所定の基準の下で複数の層の利用可能な統計を再現しない場合に拒否される。同じ規則がBにも当てはまります。感度の不足による差がないことは、両方のバージョンを拒絶しない。検出された低消費電力欠陥は、粒子を自動的に確立しない:他の初期スペクトル、動的機構、および可能な転送エラーが残る。

この研究の最終結果は、与えられた二つのバージョンが異なるパラメータと観測モード、前景が干渉する場所、理論が制約する場所、器械ノイズがない場合でも退化が持続する場所のマップである。追加帯域幅、より大きなアレイベースとより良いキャリブレーションの利点を比較します。このような結果は、製造される前でさえ望遠鏡の設計を変え、次のグループにより狭く検証可能なタスクを与える可能性がある。

暗黒時代は、初期の乱れから物質構造への移行を追跡する機会を提供します。彼らの科学的価値は、この構造のどの原因が物理的測定によって分離できるかによって決定される。さて、目に見えない重力成分に関する質問はより正確に提示することができます:観測によって暗黒物質のどの特性が要求され、どのような独立したトレースがその性質を検証することができますか?

II 見えないコンポーネント

第6章

見えない質量

望遠鏡を通して、銀河は明るい物体のクラスターのように見えます。写真を深く撮ると、より薄い星と雲が現れます。自然の期待が生まれます:それはすべての光を収集し、目に見えないガスの塊を追加し、我々は私たちの前にどのくらいの物質があるかを見つけるのに十分です。しかし、銀河の動きは別の物語を伝えます。観測された速度を説明するために必要な質量は、発見される通常の物質の質量よりも著しく大きいことが多い。

この矛盾は、観測と重力の法則の間の特定の関係に関連している。画像のスペクトル,位置,歪みを測定し,質量分布を再構成する。したがって、最初から、問題は二つの解決策を持っています:重力の追加源とその記述の変化。一つは、現象の総数に基づいてそれらの間で選択する必要があります。一つの回転曲線の説明は、まだ光、ホットガス、および構造の形成の歴史のテストに耐える必要があります。

ダークマターは、その存在が主にその重力効果によって判断される成分である。名前は、粒子、質量、または作成のメカニズムを識別しません。これは、すでに観察によって制限されているが、確立された微小物理学によって満たされていない物理的記述の場所を示している。そのような物質の重力結合拡大構造はハローと呼ばれる。標準図では、可視銀河はこの構造の一部だけを占めている。

運動から求める質量と、光から求める質量

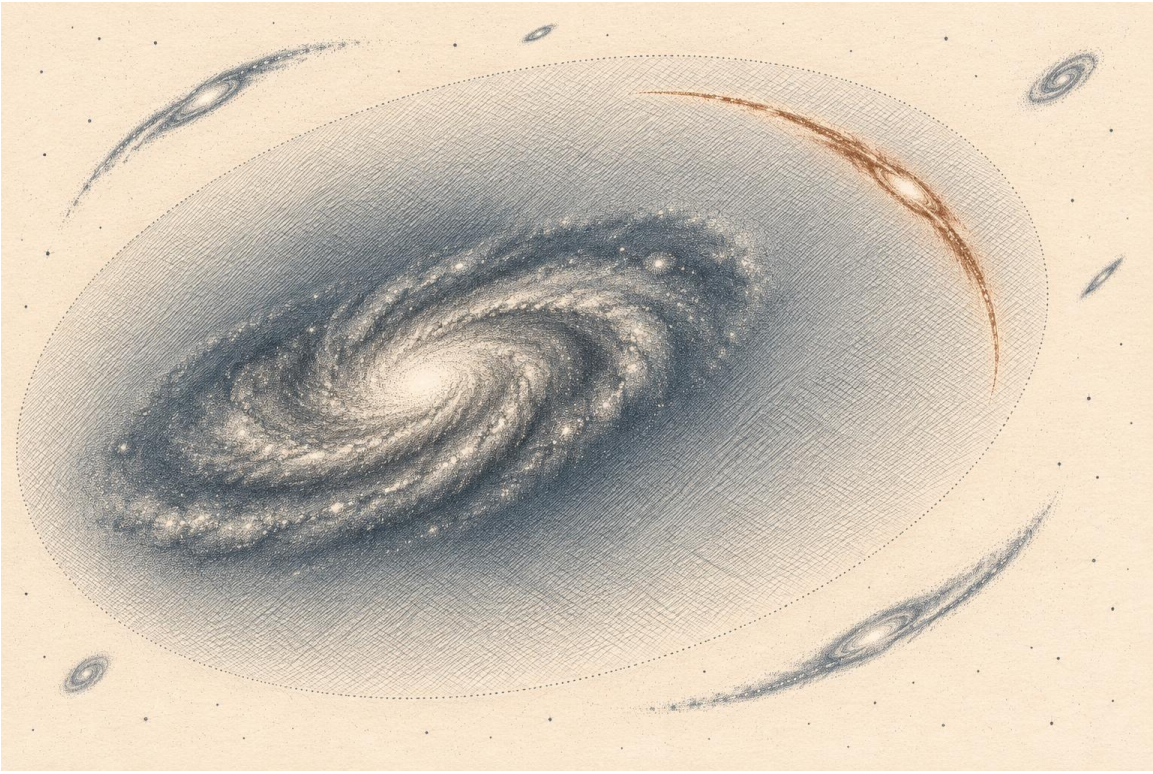
物質の球対称分布の周りのほぼ円形軌道にある恒星を想像してみましょう。ニュートン近似において、その速度は軌道内の質量と単純な関係によって関係している。

$$v^2(r) = \frac{GM(<r)}{r}.$$

ここで r は中心までの距離、G は重力定数である。ほぼすべての質量が軌道内に残っている場合、距離とともに速度は低下するはずです。速度がほぼ一定である場合、必要な囲まれた質量は増加し続ける。実際の円盤銀河は球面ではないため、正確な再構成には異なる幾何学、気体の動きの補正、恒星の円盤の寄与が必要である。単純な公式は、遠い軌道が物質の目に見えない分布に敏感である理由を説明するだけである。

星の速度さえ、そのままの数値として計算に入ってくるわけではない。スペクトルが示すのは、視線方向の運動成分である。回転速度を求めるには、円盤の傾きを知る必要がある。ほぼ正面から見える銀河では、円盤面内の速度が大きくても、スペクトルのシフトは小さくなりうる。傾きの誤差によって、再構成した質量は大きく変わる。したがって、十分な検証には、運動の空間的な地図と、幾何についての独立した制約を用いる。こうして、ハローの性質と、天体に対する観測位置に由来する誤差を区別できる。

遠方の像のゆがみは、別の経路を与える。光線は曲がった時空を通り、手前の質量は重力レンズとして働く。その質量自身がほとんど光らなくても、分布を推定できる。こうした地図を X 線放射と比べると、衝突する銀河団では特に分かりやすい。弾丸銀河団では、見える通常の物質の大半を含む高温ガスが、重力レンズから再構成した質量の極大がある領域と、空間的に離れている。これは、追加の重力を及ぼす成分の強い証拠である。ただし、像そのものから、その成分がどんな粒子でできているかは分からない。[37]



図版 9. 光が、見えない質量分布を明らかにする。重力レンズは遠方の光源の像を変え、その手前にある質量分布の再構成を可能にする。図版では、計算の対象を見えるようにするため、ハローを模式的な陰影で表した。このような発光が直接観測されるわけではない。この方法は質量を光の幾何学に結びつけるが、それだけで暗黒物質の粒子を特定するものではない。

初期の宇宙論もある。中性原子の形成の前に、通常の物質は放射線とともに音の振動に参加した。光と弱く相互作用する成分は、重力の不均一性に異なる影響を及ぼした。したがって、CMBスペクトルにおけるピークの高さの比率は、通常の物質と冷たい暗黒物質の密度を区別するのに役立つ。基本的なフラットΛCDMモデルでは、プランク解析はこれらの密度の約五の割合を与える。ここでは、モデルの他のパラメータを考慮して、目に見えない成分の重みが早期振動に与える影響によって決定される。[6]

それは、タスクに安定性を与える証拠の多様性です。暗黒物質を改良された重力法則に置き換える試みは、運動やレンズ、初期の音響振動を予測する必要がある。新しい粒子を持つモデルは、同じ義務を負う。双方が同じオブザーバブルを計算し、正直にエラーを考慮すれば、比較は意味のあるものになる。

標準成分の名前の「コールド」という言葉は、構造形成の段階におけるその動きを特徴付けます。これは、ランダムな速度が十分に小さく、関心のあるスケールで不均一性を消去しないことを意味する。この名前は、暗い雲の表面の温度とは何の関係もありません。異なる粒子は大きな構造で同じように振る舞うが、差はより小さなスケールまたは実験室での相互作用にのみ現れる。

まれな衝突を捉えるには

実験的なアプローチは、暗黒物質の粒子が通常の物質と衝突するのを待つことである。検知器は、保護に囲まれた宇宙線から隠れており、放射性背景を慎重に測定します。新しい粒子の銀河流が施設を通過すると、時には核や電子にエネルギーを移すことができる。すでに知られているプロセスと区別できるシグナルの性質が必要です。

LZ の二相キセノン検出器では、相互作用によって光の閃光が生じ、電子が放出される。電場は電子を液体と気体の境界へ運び、そこで追加の光信号が生じる。二つの信号を組み合わせると、事象のエネルギーと位置を復元し、相互作用の種類を区別しやすくなる。弱く相互作用する大質量粒子、すなわち WIMP の、スピンに依存しない散乱について選んだ標準的な条件では、2025 年に発表された、露出量 4,2 トン年の解析で、背景を超える過剰は見つからなかった。粒子の質量が 40 GeV/c^2 のとき、断面積の上限は、信頼水準 90 パーセントで $2{,}2\times10^{-48}$ cm^2 であった。これは、指定した相互作用と、銀河内の粒子流のモデルを前提とする、条件付きの上限である。[38]

断面は、粒子の流れをターゲット内の衝突の期待周波数に関連付ける。ゼロの結果は、検出可能な過剰なイベントを生成するべき質量、断面および密度の組み合わせを遮断する。主に電子と相互作用する異なる質量の粒子、または別のタイプの通信のために、信号の計算が変化する。また、所望の粒子がわずかな暗黒物質である場合にも変化します。したがって、そのようなグラフの境界は、すべての候補を消耗させるのではなく、特定の相互作用モードをテストする。

アクシオン探索には異なる論理がある。磁場では、推定公理を電磁励起に変換することができ、共振器は特定の周波数帯域で応答を増幅する。このような設定は、粒子と光子との結合とその局所密度の両方に敏感である。不透明な壁を通過する実験は、銀河ハローに存在しなくても、新しい粒子の製造とその後の光への変換をテストします。したがって、実験室内の光粒子自体の発見は、その宇宙的分数を決定するものではない。[39] [40]

背景が低ければ低いほど、以前無視できたプロセスがより顕著になる。別のLZ分析は、太陽ニュートリノのコヒーレント散乱の証拠を発見した。4,5標準偏差の意義は、暗黒物質信号がないという受け入れられた仮説の下で、ニュートリノに正確に適用される。それは新しい物質の発見の重要性ではありません。ニュートリノ事象といくつかの推定信号とのスペクトル的類似性は複雑さを増すが、他の核標的、エネルギー範囲、追加の事象特性のための余地を残している。[41]

理論はまた、新しい粒子の数を説明する必要があります。初期の暑い環境では、彼らは生まれ、反応で破壊される可能性があります。反応が冷却されると、反応速度は以前の平衡を維持するのに不十分になり、残余が残った。均衡が全く確立されなかったり、一般の初期状態として場が生じる仕組みも可能である。これらのオプションは、現代の密度を異なるパラメータに関連付ける。したがって、新しい粒子の正確な質量でさえも、相互作用や初期歴史の知識なしに宇宙におけるそのシェアを計算することはできません。

暗黒物質内部の衝突によって何が変わるか

通常の核による散乱と二つの暗黒物質粒子の衝突は異なる相互作用である。検出器との弱い接続は、粒子間の顕著な通信を排除しない。これにより、ダークハローを、質量分布によって研究できる独自の内部進化を持つシステムと考えることができる。

自己相互作用する暗黒物質では、衝突は粒子間でエネルギーを伝達する。熱が外側から中央に流れ込むと、中心領域は拡大し、密度が低下します。後の段階では、流れが逆にな

ることがあります。エネルギーを失うと自己重力中心が収縮し、同時に粒子の特性速度が増加し、熱流出が増加する可能性がある。この順序により、相互作用の法則によって、疎中心と非常に密な中心の両方が作成できる: 異なるハローは進化の異なる段階にある。この関係は、レンズで検出された小さな銀河や高密度物体に対してすでに研究されている。[42]

相互作用の速度依存性は重要である。小さな銀河と大きなクラスターは異なる特性速度を持ち、一つの定数は良い記述ではないかもしれない。本書の図示計算では、相対速度が30から1000 km/sに変化すると、単位質量あたりの輸送断面積が約8,9から0,0073 cm^2/gに減少する法則が選択されている。これらのパラメータは効果を示すために選択され、許可された観察として宣言されない。さらに、ある角重量を持つ輸送部は、実速度分布における熱伝達と正しく関連している必要がある。

そのような考えには検証可能なリスクがある。いくつかのパラメータは、考慮中の人口全体に適している必要があります。2026で更新されたSPARCカタログ銀河の解析は、この状態を達成することがいかに難しいかを示している: 考慮された家族では、著者らはすべての銀河を満足に記述する単一の断面モデルを見つからなかった。再構成されたパラメータは、ハロー進化の年齢と段階とともに縮退する。したがって、良い個々の説明はまだ一般的な微物理学を確立していない。[43]

同じ研究は、望ましいパラメータの一般的なL字型領域を同定する:ほとんど一定の小さな断面と速度への強い依存の両方が許容される。これは前の結論と矛盾しない。第4.2節では、著者らは別々に警告している:最良の共同妥協はまだ各銀河の満足な説明を提供しておらず、パラメータの狭い範囲は過大評価できない。次のチェックは、年齢、バリオンの歴史と進化段階の不確かさを維持しながら、一般的な最小値の位置だけでなく、オブジェクト間の残差の分布も比較すべきである。[43]

主な天体物理学の競争相手は近くにあります。星形成の破裂、ガスの放出と中心重力ポテンシャルの変化は、通常の冷たい暗黒物質の分布を再構成することができる。このような効果は、バリオンフィードバックを持つ数値モデルで再現される。通常の物質の記述の自由度に匹敵する二つのモデルを比較する必要があります。そうでなければ、その利点は単に調整を許可していたものに与えられます。[44]

恒星系ほどの大きさの波

粒子の量子特性は、そのde Broglie波長のスケールで顕著になる。十分な光の場のために、このスケールは天文学的であることができる。そして、軌道に沿って移動する独立点オブジェクトについてではなく、位相と干渉が変化する分散場について話すことがより便利である。非相対論的運動の場合、特性長は次の形式を持つ。

$$\lambda = \frac{h}{mv}.$$

この記法では、h はプランクの定数、m は質量、v は特性速度である。レストエネルギー2×10^{-20} eVと速度20 km/sでは、自身の次元計算は約30パースを与える。減少したプランク定数を使用すると、対応するスケールは2π倍小さくなります。両方の量が文献に現れる可能性があるため、数字を比較する前に長さの定義をチェックする必要があります。

波動特性は、小さな構造の形成を抑制することができる。光は銀河間水素を通過し、多くの吸収線を残します。異なるスケールでスペクトルに沿って透過率がどのように変化するかを計測し、気体と暗黒物質のモデルからの人工スペクトルと比較する。気体の熱的動きも細部を滑らかにするため、その履歴はフィールド特性とともに決定されなければならない。95パーセントベイズ信頼度を持つ公開下質量境界2×10^{-20} eV/c^2は、フィールドがすべての暗黒物質を構成する特定のモデルを指す。部品の混合物には別の計算が必要です。[45]

同じ場は、星の周囲に変化する重力環境を作る。ここで低温と呼ぶのは、内部の速度分散が小さい系である。すべての星にほぼ同じ加速度が働けば、系全体の運動は変わるが、速度分散にはほとんど影響しない可能性がある。内部の加熱で重要なのは、星どうしの加速度の違いである。系自身の重力、場の中心部分の構造、周囲の天体の潮汐作用によって、系が広がるか、現在まで残るかが定まる。現代の計算は、これらすべてを考慮する必要性を示している。[46]

検証するには

自己相互作用モデルでは、事前に二つのサンプルを定義することができる。第一に、気体と星の速度が異なる点において測定される小さな銀河を含む。中性水素と光スペクトロスコピーの電波観測はモーションマップを提供し、撮像と星形成の歴史は通常の物質の寄与を制約する。第二に、強い重力レンズがあり、その画像には小さな暗い濃度からの障害

を探します。彼らの貢献を隔離するために、主なレンズ、背景源、および視界に沿った材料を同時にモデル化する。

第一サンプルから一般散乱則の許容パラメータを取得し、第二の検出可能な障害の数とプロファイルを予測する。検出の確率は、画像モデルに人工的な凝縮を追加し、検索手順全体を繰り返すことによって測定される。個々のハローの年齢と軌道は不明であるが、これらの量の分布は一般的な物理的基礎を持つ必要がある。テストされているバージョンは、有効なパラメータセットが選択とエラーを考慮して、二番目のサンプルを再現しない場合に拒否される。通常の物質の影響と競合する寒冷物質も同様に試験される。

波動場の共通パラメーターは、質量と、宇宙全体に占める割合である。まず、気体の温度と電離の不確かさを含めて、クエーサーのスペクトルから許容範囲を求める。次に、同じパラメーターを使い、変化する場の中で進化した後の、古い恒星系の大きさと内部の速度分散を計算する。分光観測の反復は、連星の運動を分けるのに役立つ。さらに、年齢、以前のコンパクトさ、潮汐の影響を受ける軌道の推定が必要になる。それぞれの天体における局所的な場の密度は、同じ混合モデルから従うべきであり、結果を合わせるための新しい自由な手段にしてはいけない。

あるチャネルで要求されるパラメータがテストされた不確実性の下で他のチャネルと矛盾している場合、決定的な結果が発生する。古い寒冷システムの保存は、それを破壊することが確実であった場を排除することができる。構造の早期抑圧の欠如は、後期力学があまりにも大きな波及効果をアトリビュートする分野である。違いが感度より下にある場合、結果はまだテストされていない領域のマップになります。次の計算ステップは、パラメータの選択に参加しなかったデータの予測を伴う構造形成と後期ダイナミクスの一般的なモデルである。

第7章

なぜ物質が残ったのか

地球と星を構成する原子は陽子、中性子、電子を含んでいる。これらの粒子は反粒子を持つ。暑い環境では、十分なエネルギー相互作用はペアを生成することができ、反粒子を持つ粒子の会合はそれらのエネルギーを他の形に変換することができる。この問題は、星の形成の前に生じる:なぜ初期の熱い時代の後にそんなに多くの普通の物質が残っていましたか?

粒子の出現を説明し、それらの過剰を説明することは異なるタスクである。両者の違いを大きく変えることなく、膨大な量の物質と反物質を得ることができます。その後の消滅はペアの大部分を破壊し、最初の小さな利点を維持します。物理的プロセスに関連付けられる必要があるのは、この前提です。

この問題は、反物質がどこにも存在しないことを要求するものではない。反粒子は現在も生成されている。説明すべきなのは、観測される宇宙論的なバリオンの過剰である。ここでバリオンとは、陽子や中性子などの粒子をいう。初期のプラズマでは、それに対応するバリオン数がクォークに分配されていた。宇宙の歴史の説明は、軽い原子核の生成について成功している予測を損なわずに、そのバリオン数を現在の通常の物質量に結びつけなければならない。

小さな過剰がもたらす、大きな帰結

異なるエポックを比較するために、アンチバリオン上のバリオンの過剰は、拡張中にまれである別の量に対して表現される。超過光子と光子の数値密度の比率を取ることができます。別の選択はエントロピー密度であり、その結果の比率をバリオン歩留まりと呼ぶ。コムービングボリュームのエントロピーが保存されている場合は、特に便利です。

$$Y_B = \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{s}.$$

バリオンとアンチバリオンの数値密度を含み、sはエントロピー密度を表す。標準後期熱履歴を持つプランク参照宇宙論は、バリオン収率を約$8{,}7 \times 10^{-11}$とし、光子数に対する超過の比率は約$6{,}1 \times 10^{-10}$である。これは、メカニズムが再生しなければならない桁の順序を指定します。二つの比の間の遷移は熱履歴に依存し、一定数の光子が初期粒子変換によっては移動できない。[6]

バリオン過剰は電荷と区別されるべきです。陽子と電子は反対の電荷を持つが、電子は反陽子ではない。従って、通常の中性原子は、電気的にニュートラルを維持しつつ正のバリオン数を含むことができる。この二つのアカウントを混乱させることで、なぜ余剰物質が宇宙全体を巨大な荷電体にしないのかという誤った謎が生まれます。すべての物理的な相互作用は、問題の電荷が維持されていることを確認するためにチェックする必要があります。

小さな利点を作成することは仕事の一部に過ぎず、さらなる冷却を耐えなければなりません。粒子と反粒子の数は様々であり、いくつかの反応は非対称性を作り出すことも消すことも可能である。したがって、計算は残りの電荷を追跡します。過剰を効果的に生成する急速な反応は、システムを平衡状態に戻し、結果を破壊するのと同じように効果的である。

通常のシナリオでは、対称プラズマから始めると、サハロフの条件は三つの要件に結合する。バリオン番号を変更すると、最初の残高を完全にシフトすることができます。粒子と反粒子の間の対称性の破れは、過剰の一つの兆候を好むことを可能にする。熱平衡からの逸脱は、この選好が持続することを可能にします:標準的な仮定の下で、平衡の逆過程は電荷の方向的蓄積を補う。条件は、メカニズムの必要な特性を指定する。残りの物質の量は、特定の反応率によって決定される。[47]

C対称性は粒子を反粒子に置き換え、Pは鏡像のように空間的向きを変える。多くのメカニズムにおいて、CPの組み合わせは不可欠である。反粒子と反射座標を持つ対応するプロセスからプロセスを区別する能力は、異なる確率への道を開く。しかし、ある相互作用で測定されたCP違反は、他の初期のシステムにおける必要なすべての違いを自動的に決定するものではない。

宇宙論的膨張は平衡から離れる自然な可能性を作り出します。粒子は相互作用の時間に特徴があり、変化する宇宙には温度と密度の変化の時間がある。反応が環境の変化と一致しない場合、いくつかの平衡関係は停止する。研究者にとって、これは測定可能な速度または計算された速度の比較です。要求されたチャージがいつ発生するかを正確に指定し、それを維持するためにどの遅延反応をオフにする必要があります。

異なる時代を結ぶニュートリノ

一つの研究ラインは、既知の粒子に重いニュートラルレプトンを加えることです。通常のニュートリノと弱く混合することができます。この混合は、低エネルギーで観測される過程を早期プラズマダイナミクスに結びつける。最小版は二つの新しい状態、その質量と三種類の普通のレプトンとの相互作用の単一行列を考える。

相互作用行列は、各新しい状態と通常のレプトニック種に関する係数の表である。同じ表は、光のニュートリノの質量、インストール中の新しい粒子の誕生と崩壊、および初期のプラズマの反応を計算することに関与する。これにより、研究所は宇宙学的な説明をテストすることができます。しかし、一つの実験は通常、係数のいくつかの組み合わせのみを測定するため、異なるチャネルの結果を組み合わせる必要がある。

振動レプトジェネシスにおいて、非対称性は中性状態とCP-違反相互作用の量子進化によって生じる。血漿中での生産中、それらの相対相とレプトニック電荷の分布は変化する。相互作用は非対称性を通常のレプトンに転送し、電弱過程はバリオン過剰とリンクする。Akhmedov、RubakovとSmirnovによって提案されたメカニズムはこのように機能します。彼にとって、それは不可欠なホットメディアにおける混合状態の進化です。[48]

量子コヒーレンスは、計算では、各タイプの粒子の数だけを知るだけでは不十分であることを意味する。状態の相対的な段階も重要です。プラズマとの衝突はこの情報を破壊することができ、自由進化は干渉パターンを変えることができる。したがって、独立した誕生と崩壊の通常のスキームは重要な効果を逃す可能性があります。行列動力学方程式は、状態間の粒子の数と相関の両方を考慮に入れ、単純化が最終電荷をどの程度変化させるかを確認することができます。

バリオンとレプトンの過剰な結合は、スファラロン過程によって保証される。バリオンとレプトンの数を変え、違いを保ちます。したがって、通常のレプトンで生じる非対称性は最終的なバリオン電荷に影響する。これらのプロセスが宇宙進化と比較して十分に速い間、転送を行う必要があります。冷やすと効果がなくなる。彼らのスイッチオフの瞬間は、フィールドの特性と拡張履歴に依存します。スカラーセクタや宇宙学的な背景の変化には、新しい計算が必要です。[49]

実験室の写真は非常に視覚的です。新しいニュートラル粒子は、中間子またはWボソンの崩壊の間に生まれ、ある程度の距離を飛行し、目に見える生成物に崩壊する。その崩壊の頂点は、衝突現場に対してずれることが判明した。幾何学とエネルギーに基づいて、質

量と寿命を再構成し、崩壊生成物の組成に基づいて、様々なレプトニック種との接続を再構築する。このタイプのATLAS探索はすでに特定の質量と混合領域を制約しており、境界は採用シナリオに応じて輪郭の形をしている。[50]

粒子が発見された後でも、いくつかの複雑な相互作用パラメータは、利用可能な崩壊によって不十分に決定される。結果として生じる非対称性は、新しい状態の初期占有確率とエントロピーの後期解放にも依存する。我々のテストでは、十分に高い加熱温度を固定し、その後膨張は放射線によって制御される;新しい状態の初期非対称性と初期占有確率はゼロに等しく、エントロピーによる遅延希釈はない。これらの条件は、選択したバージョンのメカニズムの条件である: 失敗した結果の後に変更すると、別のバージョンをテストすることを意味する。

ニュートリノを排出しない二重ベータ崩壊の独立探索が有用である。その観測はレプトン数違反で試験されるが、信号をパラメータに変換するには、可能な交換機構と核計算を考慮する必要がある。重いニュートリノを持つモデルでは、貢献は互いに強化または抑制することができる。共同研究は、そのようなデータ、初期の核合成制限、および加速器探索が、所望のバリオン収率が可能な領域を狭める方法を示している。[51]

動く境界における物質

別の方法は、非対称性と電弱相転移とを接続する。一階転移の間、新しい気泡が古い段階に現れることがある。彼らの境界線はプラズマの中を移動し、粒子の特性と相互作用の条件を変える。空間的に不均質で非平衡な環境が生じると、CP違反の物理的源は電荷を再分配することができる。

よく知られた標準模型では、観測されたヒッグス粒子の質量に対し、電弱相互作用に関わる状態の変化は滑らかな移行となり、ここで必要となる泡の形成にはならない。したがって、この機構には追加の物理が仮定される。格子計算は、標準的な場合のスファレロン過程の条件と速度を定めるのに役立つが、新しい場を加える場合に、その結果を検証なしで適用してはいけない。[49]

特定の仮説として、一つの実際のスカラー場と、その場、ヒッグス場、およびトップクォークの間の個別のCP違反相互作用を追加することができる。スカラー自体は十分ではありません:粒子と反粒子の違いの源は明示的に述べなければなりません。一つの可能性から、

相の構造、気泡の発生確率、遷移の発達、およびプラズマ加熱を得ることが必要である。その後、移動中の壁の電荷移動を計算することができます。

壁の速度は特に興味深いです。ゆっくりで速い動きは、輸送と反応に異なる時間を与えます。同時に、この速度はプラズマの動きと可能な重力放射に影響を与えます。物質の形成に一つの速度を選択し、美しい波スペクトルのために別の速度を選択すると、互換性のない計算のセットになります。モデルは、速度と厚さに関する一般的な不確実性を持つ単一の物理的な壁を使用する必要がある。



図版 10. 二つの相の間を動く境界。ここで検討するモデルの拡張では、新しい相の泡の境界がプラズマ中を通過し、相互作用の条件を変える。同じ壁が、電荷の輸送と環境の運動の両方に関わる。これは仮説を示す図である。泡を伴う相転移には追加の物理が必要であり、速度、壁の厚さ、非対称性の大きさを共通の枠組みで計算しなければならない。

この拡大は実験室効果も予測する。追加のスカラー状態はヒッグの性質を変更したり、崩壊に現れたりすることができます。CP違反の原因は、電気双極子モーメントに影響を与えることができる。Ellisらによって研究された単一モデルでは、十分なバリオン収率を持つ領域があるが、その予測には利用できない重力波がある。したがって、波の欠如は、エレクトロウィーク非対称形成の全機構を排除しない。[52]

スピンに沿った恒久的な電気双極子モーメントは、電場上の粒子エネルギーの特定の依存性に現れる。分子分光法では、フィールドや他の設定パラメータの制御された反転の下で対応する周波数シフトを求める。しかし、分子反応はいくつかのCP違反相互作用に依存する可能性がある。一つのコントリビューションの仮定の下で派生した制限は、それらの任意の組み合わせに自動的に転送することはできません。複数の測定値を比較することは、これらの貢献を分離し、非対称性の共通源をテストするのに役立つ。[53]

重力波から何を知ることができるか

位相遷移中の境界と励起プラズマの動きは、確率的重力波背景を生成することができる。そのスペクトルは、プロセスのソース、持続時間およびエネルギーの特性サイズに関する情報を運びます。恒星からの光とは異なり、そのような信号は原子の出現よりもずっと前に物質の状態を明らかにすることができる。しかし、一つの履歴から十分に明確な物理モデルでのみ再構成することが可能である。

簡単な計算は問題を示しています。音源のキャリブレーションによると、約100 GeVの温度での遷移と約1000 GeVの温度での遷移は今日同じピーク周波数を持つことができます - 膨張時間に対するプロセスの持続時間が異なる場合、約1,50ミリヘルツ。ここでは、特定のスカラーポテンシャルに対する解決策を見つけるのではなく、特別に選択されたパラメータが使用される。この計算は、周波数がいくつかの量に依存することを示しており、振幅と検出性は決定されていない。[54]

そのような背景の説得力のある検出でさえ、どのセクターがそれを作ったかを知る必要がある。潜伏物質の遷移は同様のスペクトルを生み出し、バリオン生成には一切関与しない。接続を確立するためには、一貫した実験室のシグネチャを見つけ、全体的なダイナミクスから正しい電荷を導出しなければならない。将来のデバイスの感度範囲におけるピークの位置は、ソースの質問や検出の可能性のいずれかにはまだ答えていない。

通常の物質と暗黒物質の密度が同程度であることも、共通のモデルを考える動機になる。非対称暗黒物質の理論では、相互作用が二つの部門の電荷を結びつけ、その後の履歴によって異なる残存密度になる可能性がある。ただし、質量密度の比は、質量、粒子数の非対称性、その後の反応にも依存する。二つの宇宙論的な値が近いだけでは、共通の起源の証明にはならない。[55]

検証するには

ニュートリノプログラムは、共通の相互作用行列と上記の初期条件を持つ二つの新しい状態をテストする。加速器のデータは、質量、寿命、結合を通常のレプトンに制限する。ニュートリノ測定と二重ベータ崩壊、その他の制約。共同実現可能な領域全体について、達成可能なバリオン過剰が計算される。正しい記号で観測された値が、計算エラーを考慮して、パラメータの任意のセットの下で達成できない場合は、バージョンが拒否される。選択された一つの点の失敗は、これに対して十分ではありません。

次の計算では、量子運動論の公表済みの基準解を再現し、近似の影響を評価し、まだ測定されていない相を列挙する。特定の検出器モデルと関連付ける必要があります。寿命は、敏感な体積内でどのくらいの粒子が崩壊するかを決定します。幾何学としきい値 - どの崩壊生成物が登録されるか。人工的な出来事は、背景の崩壊とともに、セットアップが実際にテストする宇宙論的に実行可能な領域の量を示す。したがって、発見された粒子の欠如は、特定の物理的意味を受ける。

バブルシナリオでは、シーケンスは共通の可能性から始まります。トランジションが実際に完了し、作成された電荷が消去されないことを確認する必要があります。さらに、いくつかのパラメータは、気泡壁、電荷移動、新しい粒子の特性、双極子モーメントおよび波スペクトルを決定する。テストは、共通のパラメータ値と異なる観察が異なる値を好む場所で保存しなければならない。実験室での探索には、新しいスカラー誕生と崩壊チャネル、ヒッグス相互作用の変化、独立した制御による分子計測が含まれる。

ここでの失敗は、遷移が起こらない、非対称性が小さすぎる、その後の反応で破壊される、または必要な領域がすでに研究室によって除外されているなど、さまざまな物理的理由を持つ可能性がある。波がないことは、一貫した計算が検出可能な信号を予測する場合にのみ重要である。そのレベルが実際のノイズや背景よりも低い場合、そのような実験はまだこの点を検証していません。結果が成功した場合は、スペクトルの形状を別のソースと比較する必要があります。

これらのプログラムの完全な新しい動力学的または熱的計算はまだ行われていない。その結果は、所望のバリオン過剰とすべての独立した測定を可能にするパラメータの一般的な領域であるべきである。その後、物質の古代の歴史の説明は、それが放棄されなければならない実験条件に関連付けられます。

第8章

加速して膨張する宇宙

拡大履歴は、異なるエポックで発光した物体から再構成できる:その赤方偏移と距離を測定し、それらと互換性のあるダイナミクスを見つける。別の方法は、何年もの間一つのソースのレッドシフトの変化を監視することです。非常に安定した周波数スケールが必要です。加速度の発見につながった最初のパスから始め、その物理的原因を検証するためにどのような独立した測定を使用できるかを尋ねましょう。

二十世紀の終わりに、遠く離れたIa型超新星の測定は宇宙拡大が加速しているという証拠を提供しました。光曲線特性を考慮した後、超新星は減速物質のみを含むモデルで予想よりも薄かった。したがって、明るさと距離と赤方偏移の関係は、異なる宇宙史を指していた。オリジナルの論文では、ほこり、ソースの進化、選択効果、キャリブレーションなどの代替的な説明がすでに検討されている。[56]

現代の課題は、加速そのものの検出よりも深い。私たちは、その背後にある物理的な説明を確立する必要があります。「ダークエネルギー」という用語は、宇宙力学に対する対応する貢献を記述するための可能な方法を集めている。未知のタイプの物質がすでに研究室で捕まって研究されているという意味ではありません。

物理的な仮説としての不変性

一般的な相対性理論では、膨張はエネルギー密度と圧力の両方に影響される。したがって、エネルギー量だけを知るだけでは不十分です。パラメータw — 圧力pとエネルギー密度 ε の比率を導入することは便利です。

$$w = \frac{p}{\varepsilon}.$$

ゆっくり動く物質の場合、そのエネルギー密度に比べて圧力は小さい。放射線の場合、それは肯定的で不可欠です。十分な負圧を有する部品は、加速膨張をサポートすることができる。ここでの圧力は、エネルギーと運動量テンソル成分を表しています。外側の壁に向かって押す気体の機械的画像は、宇宙全体には適用されません。

宇宙定数 Λ は特に悲観的な記述を与える。そのエネルギー密度は拡大の間に希薄化されず、パラメータ w は −1 に等しい。通常物質と暗黒物質の密度が減少すると、一定の寄

与の相対値が増加する。これにより、各銀河に別々のプッシュを割り当てることなく、一連のエポックを得ることができる。

そのような成分の密度が一定であれば、膨張コ移動体積内のエネルギーは増加する。これは局所保存方程式と矛盾しない:圧力の作用を考慮に入れ、この場合負である。宇宙全体の一つの変化しない総エネルギーのアイデアは、時空対称性の追加条件を必要とし、孤立したシステムの力学から自動的に転送されない。したがって、宇宙定数は物質の日常的な画像から推定することができず、その量は容器が増加するのと同じである。

この単純さには値段がある。定数の測定値は、まだその起源を説明していません。量子場と基本理論の可能な定数項は、状態の重力的に有意なエネルギーに寄与する。全体の結果が観測された小さなスケールを持つ理由は、独立した理論的問題である。適切な数を宇宙方程式に置き換えることは、力学を確実に記述するが、なぜ自然がそれを選んだのかという疑問は解決しない。

この説明の単純な結果を確認することができます。一定の w を持つ独立保存成分の場合、膨張中の密度は予測可能な方法で変化する。w=－1 は一定のままで、この値から逸脱すると変化します。実際の距離は、蓄積された拡張履歴に依存します。したがって、変数 w は一つの超新星から直接読み取ることができない: 他のパラメータとともに積分観測から再構成しなければならない。

境界w=－1も注意深く解釈する必要がある。その下の値はファントムと呼ばれます。いくつかの単純な場モデルでは、それは受け入れられない運動学と関連付けられているが、観測から回収されるパラメータはより複雑な系の効果的な特徴付けとなる。最初のステップは、総密度から差し引かれたもの、選択したモデルによって排除された相互作用を確立することです。

変化の兆しには、どれほど説得力があるか

データ分析では、現在の値と時間の経過変化を別々に指定する二パラメータ形式が頻繁に使用されます。

$$w(a) = w_0 + w_a(1 - a).$$

スケール係数 a は今日、一 に等しくなると仮定される。この形式は結果を比較するのに便利であるが、独立した場理論を表していない。このような曲線に対する統計的選好でさ

えも、どのダイナミクスがそれを作成でき、その適用性はどこで終了するかという疑問を残している。

DESIは、多くの銀河やクエーサーのスペクトルを測定し、物質の大規模な分布を再構成する。この分布の音響スケールは、宇宙論的支配者として機能する。DR2分析では、距離測定自体がフラットΛCDMの良い説明を可能にします。DESIとCMBの組み合わせは3,1の標準偏差であり、異なる超新星セットの追加では2,8から4,2までであった。数値は、指定された二パラメータの代替および特定のデータセットを指します。[8]

さらなる観察は、一貫して最初のヒントを強化する必要はない。2026のDESI分析では、ライマン-α森林からの追加情報を用いて、考慮された組み合わせの重要性が変化した。これにより、利用可能なオブザーバブルに対する結果の依存性が示される。同じ調査からの分析を組み合わせる場合、それらの共有データを考慮に入れなければならない: 適切な共分散なしで相関情報を再利用すると、人工的に信頼度が向上する。[57]

ダーク・エナジー・サーベイ自体からの異なる観測の組み合わせは、可変的なダークエネルギーもテストします。2026では、CMBと超新星が含まれていたため、超新星のキャリブレーションが変更された。しかし、超新星を含まない別の分析は、ダイナミクスに対する適度な選好を保った。したがって、単一の光度誤差によってすべての結果を説明することは、確立された進化を宣言するのと同じくらい時期尚早である。[58]

標準偏差の指定された数は、特定の統計的比較の結果を特徴付ける;それは物理画像の真理の確率ではない。代替パラメータ化、バイアス、事前分布に対するロバスト性チェックが必要である。予測は新しいデータに特に有用である: ある観察の組み合わせから選択されたモデルは、事前に別のデータを予測する必要がある。その後、曲線の柔軟性が加わると、間違いになる可能性が高くなります。

描かれた曲線の背後にある場

スカラー場は、時空の各点において一つの値によって与えられる。時間変化は運動エネルギー密度Kと関連し、ポテンシャルVは場値自体に依存するエネルギー密度の一部を規定する。通常の標準記述における均質体について、次のものを得る。

$$\varepsilon_\varphi = K + V, \qquad p_\varphi = K - V.$$

磁場がゆっくり変化し、ポテンシャル寄与が支配的になると、圧力はマイナスエネルギー密度に近くなります。コントリビューションの比率が変わることがあります。膨張は場の速度に影響を与え、そのエネルギーは膨張に影響する。

これらの式における圧力とエネルギー密度の合計は、Kの二倍である。正準場の場合、Kは非負であるため、正の総エネルギー密度では、wは−1を下回らない。この境界を越える曲線は、異なる物理や再構成パラメータの異なる解釈を必要とする。

この関係を見るには、本の図解的な計算を検討してください。正のベル形の偏差1+wを、赤いシフト0,5の近くに最大0,25と、変数ln aに幅0,2で設定します。今日では、物質の分数を0,3とし、場の分数は0,7である;空間は平坦であり、現在の時代からz=3までの後期間隔での放射線は無視される。パラメータは手動で選択され、適合観察の結果ではありません。

ベル形のプロファイルは、−1境界の上に残っています。これは正準場のダイナミクスを示し、DESIデータの組み合わせによって好まれる二パラメータ記述とは異なります。この特定のプロファイルと観測との互換性は、まだテストされていない。

与えられた機能により、フィールド密度、その変化率、および軌道上のポテンシャルを復元することができます。その後、発見したポテンシャルは運動の方程式に置き換えられ、独立して解かれる。二つの履歴の偶然は、再構成の物理的一貫性を検証する。この手法自体は、よく知られた科学的先駆者である。[59]

この例では、独立した計算は、高い数値精度で元の履歴を再現する。ポテンシャルは最小値を持ち、場は約赤方偏移0,199で通過する。今日では、蓄積された運動エネルギーを消費して、すでに反対側で上昇しています。連続した下向きスライドの画像は正しくないが、解そのものは正準的である。これは、便利な画像が方程式によってテストされる必要がある理由の簡単な例です。

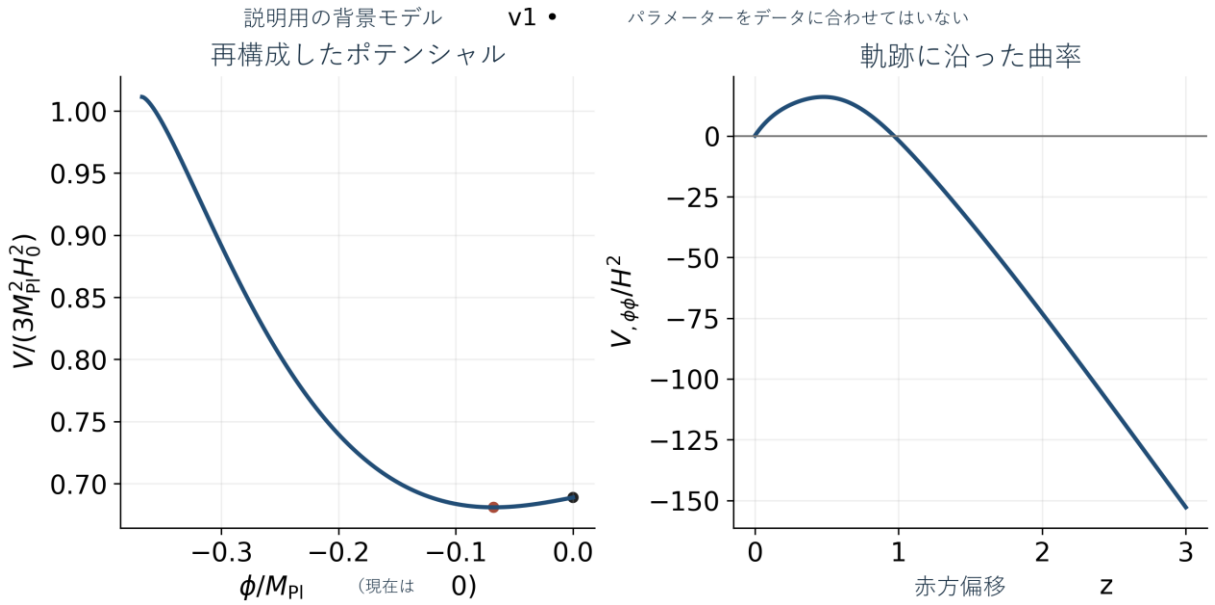


図3。訓練スカラープロファイルの再構成とそのダイナミクスの独立検証。最小ポテンシャルは軌道のすでに通過した部分にある。グラフは選択した例を示しています。観察データとの合意はここでテストされていませんでした。

均質な初期条件の小さな変化は、後に研究された近傍に小さな変化をもたらす。空間的不均質性は別の検証を必要とする。軌道の一部では、ポテンシャルの曲率は負である:ここでは、空間の曲率ではなく、場エネルギーグラフの形を意味する。それは外乱の成長や崩壊に影響しますが、サインだけでは結論には不十分です。空間勾配と重力への接続を考慮に入れなければならず、均質な解の精度はこれを保証しない。

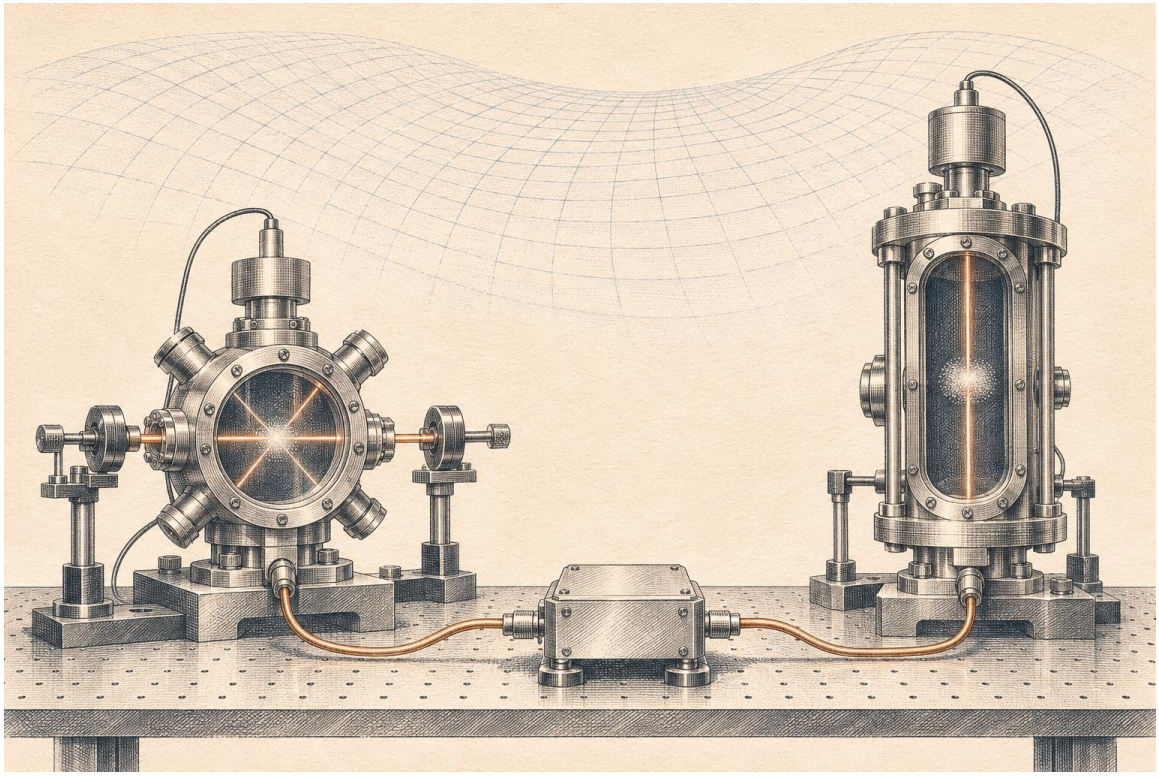
未来への継続にも限界があります。同じベル形の関数を無限に外挿すると、場は有限値に近づき、ポテンシャルの二次微分は無限に大きくなる。この点を通してポテンシャルを連続的な二次微分で拡張することは不可能である。無限の時間にのみ達成されるため、計算は有限の宇宙大災害を確立しない。選択したプロファイルが物理的ベースの拡張を必要とする場所を示します。

原子時計から、余剰次元へ

磁場が電磁気学と関連付けられている場合、その運動は微細構造定数などの相互作用の無次元特性を変えることができる。そして、宇宙学的なアイデアは検証の実験室チャネルを受け取る。異なる原子遷移は、異なる方法でマイクロ物理パラメータに敏感である。時計を比較すると、その周波数の相対的変化を見つけることができる。

しかし、測定は通常、結合強度と磁場速度の積を制限する。ほぼ一定の周波数比は、運動の少ない、結合の弱い、またはその両方の組み合わせを意味します。追加の前提条件なしにそれらを分離することは不可能です。再構成された宇宙軌道は、量に関連するが、それ自体は観測上の制約に耐えなければならない。このような前提に対する結論の依存性は、微細構造定数の変化に関する研究で詳細に研究されている。[60]

同じ接続は、異なる組成の体の加速の違いを引き起こす可能性がある。したがって、同値原理のテストが時計に追加される: 予測は、フィールドが構成原子とその結合エネルギーとどのように相互作用するかに依存する。別の難しさは、量子補正に対する非常に軽い場の安定性である。宇宙グラフに便利な法則は、依然として他のマイクロ物理と互換性を持たなければならない。[61] [62]



図版 11. 宇宙論的な場と実験室の時計。異なる原子遷移を比較することで、宇宙論的な仮説を実験室での測定に結びつけられる。場が電磁セクターと相互作用するなら、周波数比の変化によって、結合の強さと場の変化速度との組み合わせに制約を与えられる。機器の各部分は模式的に示した。この図版は時計の設計を定めず、そのような結合がすでに発見されたとも主張しない。

ダークディメンション方向では、幾何学との接続が現れる: 追加次元の半径はスカラー場とともに変化し、ダークマターの質量状態に影響を与える。十一月2026に発表された論文は、そのようなダイナミクスを検証している。使い慣れた成分で説明するために、著者

らは、別々に保存される仮説物質の総密度から減算し、残りの部分が効果的な暗黒エネルギーに帰着する。さらに, 減算物質の正常化は早期に設定された。残りの部分は −1 以下の w に対応するが、場自体の運動エネルギーは通常のままである:効果の一部は相互作用する成分を受容した分離から生じる。[63]

ここでの幾何学機構は、暗黒物質の膨張と性質を結びつける。これは検証可能な仮説であるが、追加の次元の存在はまだ確立されていない。構造の成長を予測するためには、相互作用するセクターの方程式が必要である。

二十年間の変化を測る

与えられたフィールド履歴は、別の観察可能な結果をもたらします。3章では、一つの吸収体の赤方偏移の再測定について論じた。これでドリフトを計算し、ダークエネルギーが一定であるモデルと比較することができます。同じガウスプロファイル、H_0=70 km/s/Mpc、物質の現在の割合0,3と二十年の観察間の間隔を取りましょう。実際の実験の期間はまだ正当化されていません。

レッドシフト z=0,5では、宇宙定数は+5,48 cm/sと等価なスペクトルシフトを与え、選択された場は+4,00 cm/sである。最大の違いは、z≈0,78で約1,82 cm/sです。z=3では、どちらのモデルも負のシフトを与え、差は約0,37 cm/sに減少する。記号は、ベロシティ単位に換算されたレッドシフトの変化を指します。公式とその他の値は付録で与えられます。

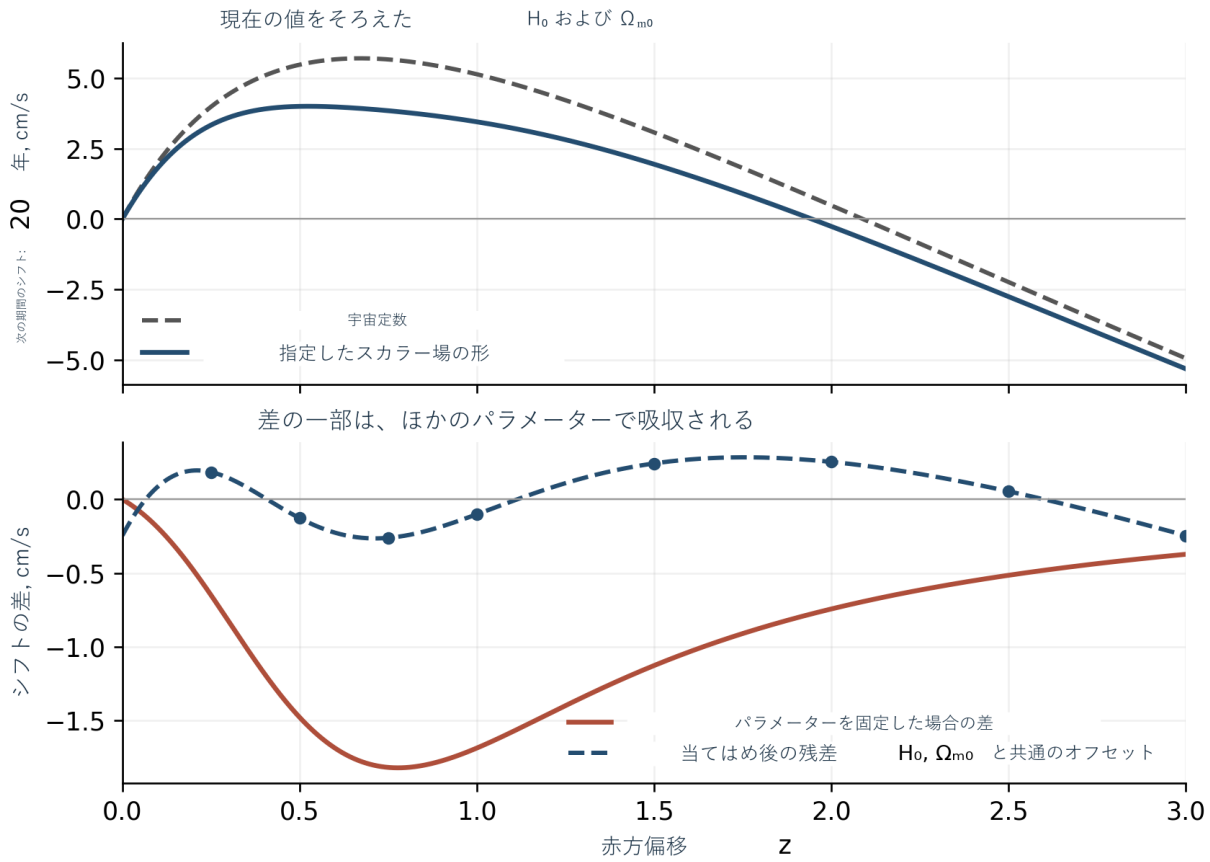


図 4. 指定したスカラー場の形と宇宙定数について計算した、二十年間の赤方偏移ドリフト。上段では H_0 =70 km/s/Mpc と Ω_{m0}=0,3 を共通にしている。下段は、元の差と、宇宙定数のモデルで H_0、Ω_{m0}、共通の校正シフトを当てはめた後の残差を示す。点は、当てはめに使う八つの仮定した赤方偏移である。二つのモデルの計算であり、観測データや、特定の装置の精度の予測を示したものではない。

ただし、パラメーターを固定した比較では、この経路だけで両者を区別する力を過大評価する。宇宙定数のモデルで H_0 と物質の割合を変えてよいとしよう。八つの仮定した赤方偏移で、その曲線をスカラー場の曲線に近づけると、残差をすべて 0,3 cm/s 未満にできる。そのためには H_0 が約 57,1 km/s/Mpc である必要がある。この値が実際の宇宙と整合すると主張しているのではない。当てはめには、独立した観測を一切含めていない。この例は、二つの機構を区別できるかを評価する前に、どのパラメーターをほかの測定で制約すべきかを示している。

利用可能なスペクトル線も考慮する必要があります。私たちの固定モデルの最大の違いは、比較的小さなレッドシフトで発生します。ライマン-α森林の地上光観測は、紫外線線がすでにアクセス可能な範囲にシフトしたより遠くの吸収体のために設計されています。したがって、提案されたグリッドは単一の分光器の能力を記述するものではない。光学的および無線的観察の感度を別々に計算し、一般的なキャリブレーションと個々のキャリブ

レーションを考慮した後、それらの組み合わせがもたらすものを確認する必要があります。[14] [13]

次のステップは計算自体によって決定される: 条件付き誤差を実際の観測モデルに置き換え、宇宙パラメータに独立した制約を加える。ここでは、利用可能な過去のさまざまな拡張履歴を比較します。20章では、より厳格な難易度が現れる - その過去は与えられた近似と正確に一致する異なる将来の継続; このドリフトの例自体はそれを取り除くものではない。

検証するには

特定のフィールドモデルから始めましょう:そのアクション、接続、適用範囲を定義し、拡張と空間的障害を計算します。超新星と音響スケールの限界距離。物質の濃度への銀河の落下は、それ自身の速度を増加させ、その分布を赤方偏移空間に歪ませる;この効果は、弱いレンズとともに構造の成長をテストする。初期振幅は初期の観測に限られ、モデルの継続はそれらと一致している。そして、各々の新しい正規化なしに、同じ初期摂動と物質パラメータがすべての遅延チャネルで使用される。

これらの幾何学的測定に関する最初の制約を考慮し、許容範囲のパラメータを取得し、所定のサンプルの成長を予測する。レッドシフトエラー、銀河の適切な向き、通常の物質とニュートリノ質量の影響を考慮に入れましょう。距離に適合する領域がテストされた不確実性の下で成長を再現しない場合、モデルは拒否される。重力の自由な変化を加えることは、新しい仮説を意味する。

必要な精度は、宇宙定数と選択した分野の人工カタログによって決定される。特徴選択、ノイズ、一般的な体系的バイアスを再現し、実際のデータ処理を適用する。予め選択された許容偽発見率が与えられた場合、どのフィールドパラメータを定数と区別できるかを計算する。結果は、まだ区別できないバージョンを含む感度マップである。

原子時計は、磁場が電磁パラメータと関連しているときに独立したチャネルを追加します。異なる感度を持ついくつかの遷移を比較し、外部場を制御し、その結果を自由落下の普遍性に関する実験と比較する。ゼロ周波数変化は、場速度と場結合の組み合わせを制限する。到達した限界を超えると予測するバージョンは除外され、通常の物質にほとんど無関係な領域は宇宙論的な試験のみでアクセス可能である。

追加の次元のために、全体の半径、スペクトルおよび結合は同時に宇宙論、短距離での実験室力、および天体物理学的エネルギー移動を決定する必要がある。最初のステップは、摂動とともに一つの完全な実装を独立して再現することです。測定と理論的誤差を考慮した一般的な許容領域の欠如は、この特定の実装を除外する。

次の研究結果は、計算されたダイナミクスと観測を組み合わせて、どのパラメータが距離、成長、利用可能な実験室の測定によって同時にテストされるかを示す必要がある。完成した再建はそのような研究の源泉であり、その観測可能性はまだ確立されていない。

第9章

真空にはどれほどの重さがあるのか

空気、光、熱放射と残留粒子が順次除去される実験室を想像してみましょう。デバイスが寒くなると圧力は下がるが、問題は「何が残っているか」ではなく、「何もない」という答えだ。物理的な説明は、フィールド、それらの相互作用および許容される状態に残されている。真空はシステムの状態の名前であり、法律やシステム自体の欠如ではありません。したがって、その重力の問題は、絶対的なゼロから世界の起源についての憶測の前に生じる。

この章のタイトルは、毎日の計量を意図的に連想させます。しかし、宇宙学者はスケールに空しさを置きません。彼は、場の状態が幾何学の方程式にどのような貢献をし、この貢献の大きさは物理学の成功の残りの部分を維持しながら説明できるかどうかを問う。拡張の遅い加速は、問題を観察します。しかし、膨張の理想的な再構築でさえも、測定された効果のどの部分が真空に関連付けられており、どの部分が新しい場または重力の法則の変化によるものであるかはまだわからない。

ここには二つの異なる困難が隠されている。まず第一に、なぜ粒子物理学の多くのスケールと比較して、方程式によって一定の寄与が許されるのでしょうか? 第二に、計算が洗練されるとき、その小さはなぜ残るべきですか? 番号は一度選択できます。その説明は新しい修正案に耐えなければならない。これは、数値の選択が成功したことと、この問題の最先端の重要な部分である安定したメカニズムの間にあります。

ゼロの基準が物理的な意味をもつ理由

通常の力学では、ポテンシャルエネルギーに定数を加えることができます。力は位置の変化に依存するため、粒子の軌道は同じままになります。また、床の違いを変えずにゼロの高さマークを変更することもできます。この自由は間違った答えをしばしば示唆します: それは真空エネルギーがゼロであることを宣言するのに十分であり、問題は消えます。重力理論では、エネルギー密度に定数を加えるには、その作用を詳しく調べる必要がある。

また、どのような真空を意味するのかを明らかにする必要があります。変化する幾何学において、場状態の選択は追加の条件を必要とし、そのエネルギー運動量テンソルは定数項のみからなる必要はない。したがって、以下ではまずアクションの一定の部分を強調し

ます。これにより、量子場のすべてのエネルギーを宇宙定数として宣言することなく、明確な問題を引き起こすことができる。動的励起、熱的寄与、幾何依存偏光はそれ自身の計算を必要とする。

メトリックシグネチャ−+++と光の速度が一に等しい単位を取りましょう。物質の作用における定数項は、四次元体積要素に乗じたエネルギー密度を除いたものとして記述される。ボリューム要素はメトリックによって異なります。その結果、空間的に均質な添加物でさえも、幾何学に従って作用の変動に参加する。このことから、エネルギー運動量テンソルと状態の方程式を直接得られる:

$$T^{\mathrm{vac}}_{\mu\nu} = -\rho_{\mathrm{vac}} g_{\mu\nu}, \qquad p_{\mathrm{vac}} = -\rho_{\mathrm{vac}}.$$

ここでの負圧は、空の空間が異常な分子で目に見えないガスで満たされていることを意味するものではない。これは、体積の変化に対するエネルギー応答の特徴です。均一な密度が一定である場合、選択された膨張コモーティング体積のエネルギーは、体積自体に比例して増加する。局所保存法では、この行動は圧力の仕事と一致している。条件を指定せずに、静止した実験室ボックスから拡大する宇宙全体へのエネルギー保存の法則を転送することは不可能です。

最も単純な場合を考えよう。ほかの源はなく、重力は一般相対論で記述し、一定の寄与はすべて、一つの物理的な密度 ρ Λ にまとめてあるとする。換算プランク質量を M_{Pl} と書き、M_{Pl}^2=1/(8πG) とする。アインシュタイン方程式のトレースを取ると、次を得る。

$$M_{\mathrm{Pl}}^2 G_{\mu\nu} = -\rho_\Lambda g_{\mu\nu} \quad \Longrightarrow \quad R = \frac{4\rho_\Lambda}{M_{\mathrm{Pl}}^2}.$$

これは小さな結論であり、重力の新しい公式ではありません。高さゼロの機械的なアナロジーが崩れる場所を示しています:一定の密度は曲率を決定します。物質と不均質性の存在下では、数 R だけでは時空を記述するのに十分ではなくなったが、定数源は方程式から消えない。右から左へ移動し、宇宙定数と呼びます。この動作は、物理コンテンツではなく記録を変更します。

観測との一致を改善するために、この定数を任意の時間関数に置き換えたいとします。その後、追加条件が生じる。方程式の幾何学的な部分はビアンキの同一性を満足するため、全体の源は共変的に保存されなければならない。通常の物質が別々に保たれていれば、単に「定数」変数を置き換えれば一貫性は損なわれる。フィールド、エネルギー交換、また

は理論上の明示的な変更が必要になります。グラフ上のフレキシブル曲線自体はそのような変化を引き起こさない。

測定する量には、具体的に何が足し合わされるか

量子計算は、観察結果から中間量を分離する必要がある。積分では、導入されたエネルギー制限に対する無限大または強い依存が現れる可能性がある。これは、結果として生じる膨大な数を宇宙論に結びつける許可ではありません。アクションパラメータとフィールドコントリビューションは、一貫した再正規化手順で決定される。観察は、それぞれの用語を個別にではなく、最終的な合計を指します。

スキーマ表記法は、μが再正規化スケールを示す便利なものです。

$$\rho_{\Lambda,\mathrm{phys}} = \rho_{\Lambda,\mathrm{ren}}(\mu) + \rho_{\mathrm{fields}}(\mu), \qquad \frac{d\rho_{\Lambda,\mathrm{phys}}}{d\ln\mu} = 0.$$

最後の等式は合意された完全定住者を指し、シリーズが切り捨てられると、より高い順序依存性が残る。μ を変更すると、結果が条件間で分配される方法を変更します。これは、時間の経過とともに真空密度の物理的変化ではありません。実行パラメータは、ダークエネルギーの自動予測進化では識別できない:そのような進化には、別々の動的正当化が必要である。

ある特定の量子貢献を見てみましょう正二乗質量 m^2 を持つ実スカラー場について、平坦な背景と修正された最小減算スキームにおいて、有効ポテンシャルの一ループ項は次のとおりである。この標準的な公式は、量子計算から従う; その一般化された表現は、例えばスティーブン・マーティンの研究において与えられる。[64]

$$\Delta V_1 = \frac{m^4}{64\pi^2}\left[\ln\!\left(\frac{m^2}{\mu^2}\right) - \frac{3}{2}\right].$$

ここで重要なのは尺度 m^4 と、補正を作用のパラメーターと整合させる必要性である。ほかの場や計算方式では係数が異なる可能性があり、フェルミオンの寄与には固有の構造がある。曲がった空間では、幾何に関する追加の項も現れる。したがって、この一行は宇宙の真空エネルギー全体の数値予測ではない。重い部門を加えると、小さな最終値が保たれる条件が変わりうる理由を示している。

多くの場合、問題は一つの巨大なミスマッチ数によって示される。それはどの規模と評価方法が選ばれるかによって異なります。議論にとってより重要なことは、理論が一つの

レベルで合意されると、次の物理的に許容される貢献は、非常に正確な報酬の再配置を強制してはならないということです。最大カットオフで粗い推定を破棄しても、既知の質量しきい値に対する感度の問題は依然として意味がある。

架空の算術例で、この論理を見ることができる。それぞれ百万程度の二つの寄与の差を、一程度にしたいとしよう。値を選ぶこと自体は難しくない。しかし、独立した精密化によって片方の寄与が千だけ変われば、結果はもはや小さくない。小ささの説明には、もう片方も変わる理由、あるいは新しい寄与がそもそも測定される総和に入らない理由が必要だ。数字を再調整するだけでは、その説明にはならない。

これにより、モデルの比較に有用なルールが導かれる。良い結果を得るための自由なパラメータの数だけでなく、パラメータ間の接続が必要かどうかも尋ねる必要があります。補正が対称性や制約から従う場合、改良は指定された領域でこの関係を保存しなければならない。二つの数値が独立している場合、それらが高精度と一致するという要件は、追加条件のままです。小さなパラメータの存在は、その小型さのためのメカニズムの存在を意味するものではない。

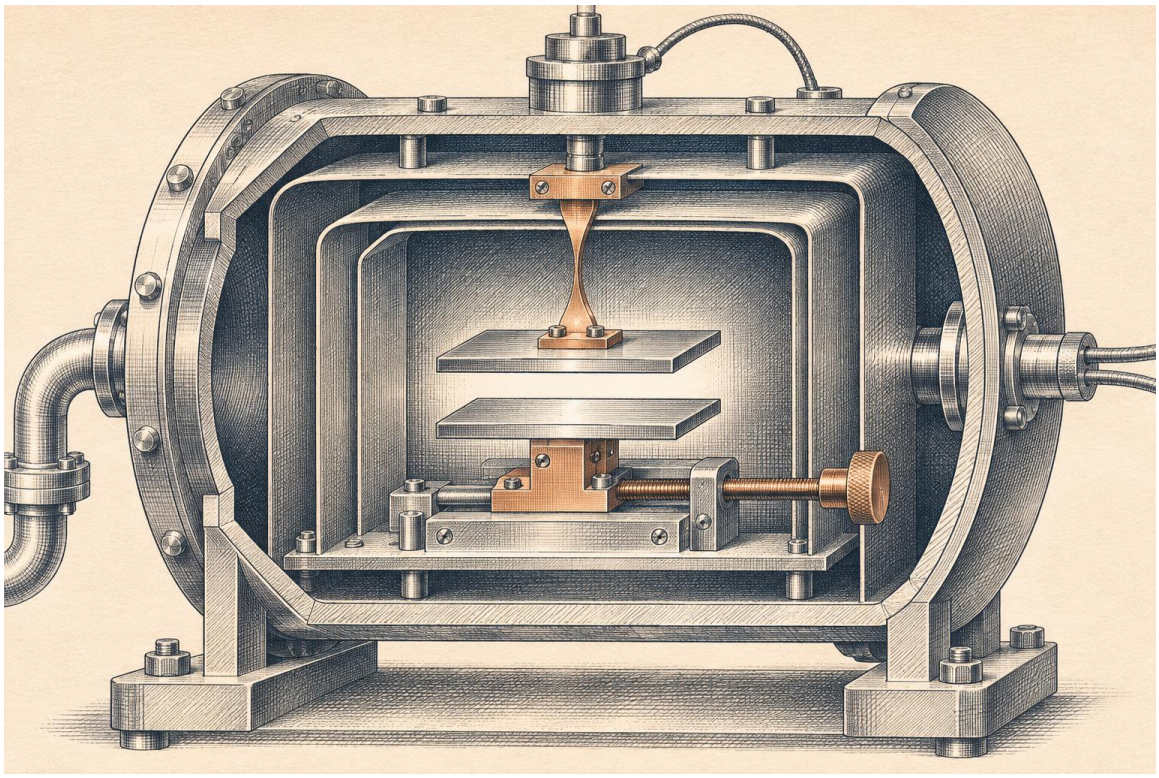
時間に関する別の質問もあります:なぜ永久成分の密度と希釈物質の密度は、いくつかの時代に匹敵するのでしょうか? 安定した小さな定数の説明でさえ、自動的に答える必要はありません。逆に、加速度への遷移と宇宙の組成の変化を結びつけるモデルは、依然として真空補正に対する自身の感度を説明する必要がある。関心の分離は、すべてがすぐに解決されることを要求することなく、不必要な成功を慎重に代行することなく、理論の貢献を評価することを可能にする。

実験室の真空から分かること

真空は測定可能な症状を持っていますが、各実験には観察可能な量があります。材料表面間の力は、その特性と距離に依存します。カシミール効果の分析において、ロバート・ジャフは、ゼロ点エネルギーの絶対和に頼らずに電荷と電流の相互作用を通じて記述の可能性を示した。したがって、測定された力はそれ自身で均質な宇宙真空の重力効果を決定しない。[65]

実験者のタスクとして差分を定式化することは有用である。インスタレーションがプレートを動かす際の力の変化を測定する場合、その結果は、この動きに関してインスタレーション全体のエネルギーの誘導体と比較されなければなりません。重力質量の変化を測定

することを意図している場合は、プレート、ストレス、締め付け、熱条件と作業の源を考慮に入れる必要があります。システムの不都合な部分を単語で減じることは不可能です。さもなければ、私たちは異なる物理的な物体を比較し、「空の重さ」と呼んでいます。



図版 12. 装置全体の内部にある真空。表面どうしの距離を変え、物理的な装置全体の応答を測る。その重力質量を考えるには、支持具、応力、熱、なされた仕事も重要になる。板とチャンバーは模式的に示した。表面間で測られた力だけでは、一様な宇宙論的真空が重力に与える寄与は決まらない。

実験室でのテストは役に立たない。彼らは、有界系の総エネルギーが重力にどのように寄与するかに関する特定の予測をテストできる。しかし、そのような結果から宇宙定数への道は明示的な理論を通過しなければならない。境界条件の局所的な変化と時空全体の作用への均質な付加は異なる作用である。両者を区別することで、研究プログラムは一つの決定的な実験の誤った約束から保護される。

機構は、精密化しても成り立たなければならない

定数の代わりに、ゆっくりと変化するスカラー場を導入したと仮定しましょう。その可能性は、適切な拡張を得るために調整することができます。しかし、ポテンシャルに定数を加算することができ、場相互作用は補正を生成する。これは、ダークエネルギーのダイ

ナミクスを説明し、その絶対レベルの安定性を説明することが二つの関連する問題であることを意味する。第一の解は、自動的に第二の解と考えるべきではない。

近似対称性は許容される補正を制約することができる。例えば、フィールドのシフトがアクションをほとんど変更せずに残す場合、いくつかの潜在的な形状は任意の形状よりもよく保護される。しかし、「対称性」という言葉は計算を完了しません。対称性破壊相互作用、パラメータのサイズ、および物質と重力によって導入された補正を指定する必要があります。計算アシスタントは、見落とした許可された演算子を検索するのに役立つ。メカニズムは、その効果がチェックされた後にのみ安定であると宣言できる。

ネマニャ・カロパーとアントニオ・パディッラによって、特定の研究パスが提案された。元のグローバル隔離設計では、追加の変数は、物質ループの一定の真空寄与を重力方程式でキャンセルする制約を導入する。私たちは、重力ループの問題を完全に解決することなく、物質の保護されたセクターについて話しています。最初の設計には、有限な四次元ボリュームを含むグローバルな条件があります。これは理論の構造の強い変化であり、古い定数の新しい指定ではない。[66]

その後のローカルバージョンでは、KaloperとPadillaと共著者は、追加のフィールドと四種類のフィールド強みを使用した。ある量の安定は局所方程式の結果となる。このバージョンでは有限四次元体積に対する要求は取り除かれ、残差定数寄与は積分定数を含む。著者らは、考慮された物質の真空補正の下で安定性を得るが、最終残留物の値を測定する必要がある。ここでは、安定性の予測と特定の観測可能な量の予測を区別しなければならない。[67]

これらの例は、メカニズムを正しく考慮する準備ができていない読者にとっても有用です。通常の励起の重力を維持しながら、均一なエネルギーシフトが観測された幾何学を破壊しないように、方程式で正確に何を変える必要があるのか? 右側からすべてのエネルギーを取り除くと、惑星の動きの説明は消えます。あらかじめ選択された定数を一つだけ補うと、次の補正の問題は残ります。成功した設計は、これらの極端の間を移動する必要があります。

検証するには

新しい望遠鏡が利用可能になる前に完了できるオープンな計算タスクから始めることが提案されている。完全に指定されたアクション、セクタ、再正規化手順、および境界条件

またはグローバル条件のセットが選択される。次に、元の場合と、問題ラグランジアンに一定の貢献を追加したケースの二つの一貫したケースを計算する。パラメータマッチングルールは、あらかじめ固定されています。そうでなければ、宇宙用語の手動再調整は任意のメカニズムの下で所望の応答を再現する。

上記の一般相対性理論の単純な真空例では、他のパラメータを固定すると、曲率の変化は$4\Delta\rho/M_{Pl}^2$と等しい。代替設計の場合、制限を含む対応する応答を独立して導出する必要があります。一定の貢献がキャンセルされた場合、次のステップは許容される相互作用を追加し、少なくとも最初の非自明な量子補正を実行することである。テストでは、選択したキャラクターが一つのアクションラインから消えるだけでなく、測定可能な値の減少を示す必要があります。

このシフトは、実験室の真空を即座に変える指示ではなく、理論の診断として機能します。物質の状態、エネルギー分布、温度、そしておそらくは、効果的な自由度数の変化です。宇宙論的検証のために、遷移はエネルギー交換の法則を保存、単一の歴史に含めるべきである。フリードマン方程式の定数を切り替えて、エネルギー差がどこにあるかを無視することはできません。

次のステップは、背景と障害を関連付けることです。モデルはH(z)だけでなく、不均質性の成長、光の伝搬、そしてそれらが変化する重力障害の特性も予測しなければならない。解の存在、許容できない高速不安定性の欠如、および近似の適用範囲がチェックされる。一つの拡大曲線の偶然は、追加の自由度の運動エネルギーの不正確な符号を補わない。

この後にのみ、観察予測を構築することは理にかなっています。予測距離と構造成長を、共通のパラメータと系統的誤差で比較する。このメカニズムが初期の拡張を大きく変えると、原始的核合成を含むホット履歴からの制約が追加される。それが一定の寄与のみに作用し、通常の力学を離れるならば、選択された宇宙定数を持つ一般相対性理論と区別できるデータを直接示す必要がある。

アクセス可能な領域では、二つの構造が観察的に等価であることが判明するかもしれない。これは意味のあるネガティブであり、既存の測定値が内部メカニズムの証拠として販売されることを禁止する。その後、プログラムは数学的一貫性のチェックと実際にモデルを区別する新しい効果を見つけることに分割されます。そのような効果は、すでに与えられた設計から来るべきです。便利なデバイス用の任意の信号を追加しても、元のアイデアをテストしません。

特定のフォーマットは、ここでAIを扱うのに適しています。研究者はアクションと制御されたアプローチを定義し、システムは自動的に方程式を導出し、寸法をチェックし、独立した計算方法を比較し、障害マップを構築します。人はオブザーバブルの選択、還元条件、近似の許容性をチェックします。有用な結果は、メカニズムが障害に耐えられるケースと、それが壊れるケースの再現可能なセットである。このチェックなしで何百もの類似したポテンシャルを生成することは、答えをそれほど近づけることはありません。

実際には、そのようなセットは小さく始めることができます。一つの自由質量場、一つの選択された正則化と一つの宇宙論的解の族は十分である。その後、一つの相互作用が追加され、二つ目の質量しきい値が追加されます。各段階では、中間式と独立出力の比較が保存される。一貫した拡張により、実装エラーが物理機構障害と混同されるのを防ぐ。見つかった不一致は、別のグループによって再現できる最小限の例を伴わなければならない。

最も困難なケースは、時空の歴史を通じてメカニズムが条件に依存するケースです。それらにとって、短い間隔で局所的な解決策を提示するだけでは十分ではありません。元の制約を満たした継続を認めているかどうか、そしてこの継続に対する出力の感度を確認する必要があります。異なる許容継続が今日同じ可観測変数を生成する場合、そのような曖昧さは結果に入力しなければならない。それは真空の問題と有限可観測領域からの推論の限界の問題を結びつける。

反論の基準は事前に書き留めておくべきです。主張されるメカニズムとしては、これは非キャンセル可能な量子寄与、所望の領域における避けられない急速な不安定性、または一つのパラメータセットの下で関連する観測値の不適合である可能性がある。そのような結果は、特定の構造とその主張領域を反省する。将来の真空理論は不可能であることを証明しない。この章は研究順序を提案し、新しい隔離モデルとデータへの適合性はここでは計算されない。

ボイドの重さの問題は、宇宙論と量子理論の構造を特に緊密に結びつける。宇宙がなぜ今日加速しているのかを説明するだけでは十分ではありません。理解する必要があるのは、その大規模な幾何学がなぜ顕微鏡的世界について学んだことと一致し続けているかです。これにより、小さな一定の貢献は、テーブル内の最後の適合数ではなく、エネルギーと時空間の接続の欠落ルールを探すことができる場所になります。

第10章

測定結果が食い違うところ

測定間の矛盾は、合意よりも注目を集めています。これは理解できます:それは私たちの方程式にまだない物理学を示すかもしれない矛盾です。しかし、観察は直接的に議論するものではない。記録された光と宇宙パラメータの間には、キャリブレーション、補正、モデル接続の連鎖があります。発散の意味を理解するためには、どの経路が分岐しているかを知る必要があります。

一つの領域を測定する二つの調査員のグループを想像してみましょう。一つは定規と直接比較して長さを決定し、もう一つは三角形の角度からそれを計算する。矛盾は、誤った定規、角度誤差、または平面仮定の失敗を示すことがある。宇宙論では、表面の役割は構造の膨張と成長の歴史によって果たされる。いくつかのルートの存在は、これらの仮定をテストすることを可能にします。

本書で論じた研究の現状によれば、全ての宇宙的ストレスを一つの普遍的な故障に還元することは不可能である。ハッブル定数、不規則性振幅および初期の銀河は観測値と大きな不確実性が異なる。それらを一つの新しい理論にリンクすることは価値があるが、各リンクはまず定量的予測になる必要がある。

現在の膨張を求める二つの道

パラメータ H_0 は現在の相対膨張率を記述する。近くの銀河の場合、その距離は一般的な流れに対する自身の動きを考慮して、赤いシフトと比較される。距離は重なり合う方法の連鎖を使って構成される。近くの幾何学的に測定された天体は絶対的なスケールを定義し、既知のタイプの恒星は他の銀河に移動させ、より明るい光源はさらに測定を継続する。

Cepheidsの場合、脈動期間は明度に関連する。キャリブレーションが完了すると、この関係により、恒星がどれだけの光を放出しているか、観測された明るさから距離を決定することができます。他の恒星の手法は異なる物理特性を用いる。しかし、一般的なサポート、銀河、明るさの標準はエラーをリンクします。一つの共通のキャリブレーションを持つ十の評価は、そのキャリブレーションの十独立したテストを提供していない。

局所的な距離を結ぶ共同のネットワークから、H_0=73,50±0,81 km/s/Mpc が得られた。0,81 は、採用したガウス近似で、共通の共分散行列から求めた標準誤差である。著者らは、

個々の指標を除いた場合の頑健性を調べ、共通の校正も考慮した。ただし、論文名の「コンセンサス」は、参加した共同研究の結果を表すもので、すべての研究グループの最終的な合意を意味しない。[68]

別のルートは宇宙マイクロ波背景放射から始まります。初期不規則性の角パターンが測定され、物理モデルは音階とそれに対応するエポックとの距離に関連する。基本的なフラットΛCDMでは、プランク分析は68パーセント信頼度レベルで今日の値H_0=67,4±0,5 km/s/Mpcを与えます。これは、今日の宇宙の初期膨張の直接的な測定ではありません。意味は、その歴史を通してモデルを実行した後に得られる。[6]

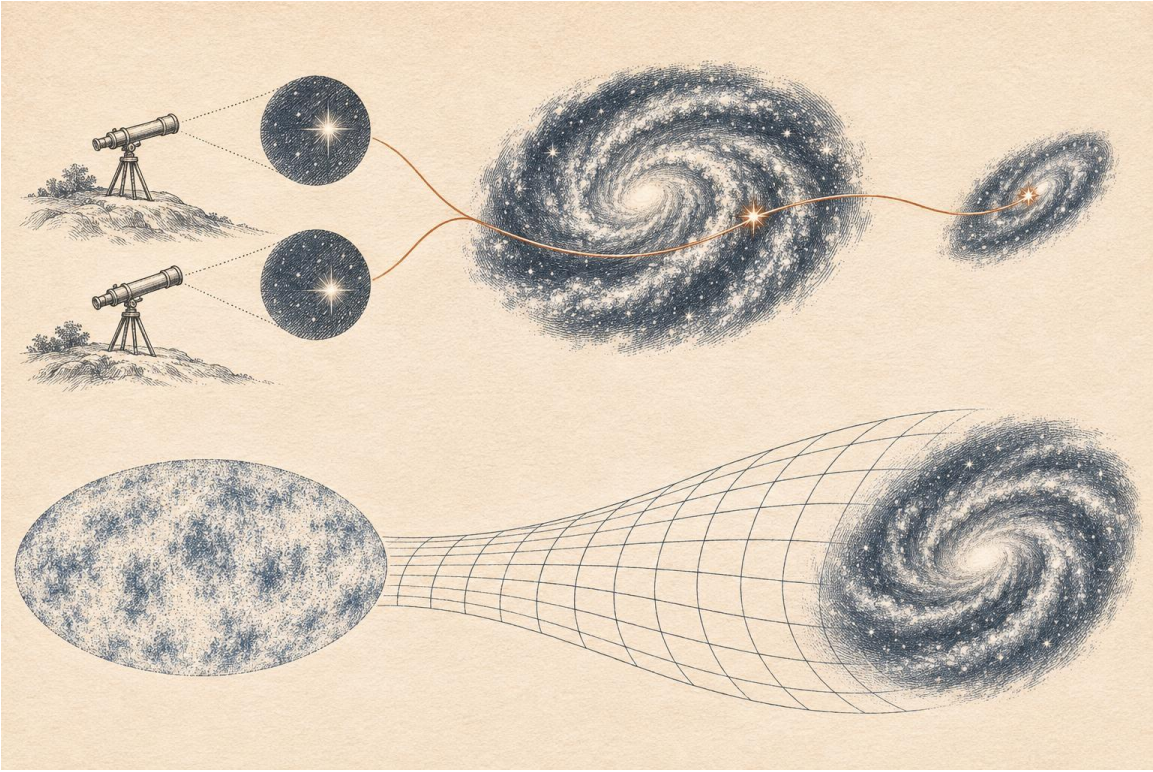
赤色巨枝法の先端は、コアにヘリウムが燃焼する前の古い星の光度分布の鋭い縁を使用する。絶対光度を校正した後、境界の位置は距離を与えます。JAGBは、他の選択された恒星群の性質を利用する。恒星の進化の異なる段階は、年齢、化学組成および環境に異なる感受性を有する。したがって、手法の合意は物理的制御として正確に有用であるが、一般的な幾何学サポートはその誤差の相関を保っている可能性がある。

二つの数字間の位置は、他のいくつかのルートによって占有されます。CCHPは、赤色巨枝(TRGB)の先端を使用し、選択された漸近的巨枝(JAGB)の星を用いて、局所ネットワークよりも低い中心推定値とより広い不確実性を報告する。TRGBに基づく最も正確な還元推定は70,39 km/s/Mpcである。著者らは、統計学からの±1,22、系統論からの±1,33と、光度校正や銀河の適切な運動を含む超新星残差の不確かさに対する±0,70の追加貢献という誤りを共有している。統計的部分は辺分布の中心的な68パーセント間隔に対応し、他の二つの貢献は別々に与えられる。これは、局所的なスケール構造をより詳細に考慮するのに十分な理由である。[69]

強いレンズは、単一のソースの複数の画像を生成する。ソースが明るさを変更すると、異なる光路に沿って同じパターンの変更が遅延して到着します。それはレンズの幾何学と重力ポテンシャルに依存し、我々は宇宙スケールを決定することができます。TDCOSMO 2026分析では、著者らは非対称不確実性推定+2,4と−2,3でH_0=71,1 km/s/Mpcを報告する。この結果は、DES-Dovekie超新星サンプルからの物質密度に外部制約のあるフラットΛCDMで得られた。レンズの質量分布は、特に恒星運動学によってさらに制限されている。結果として得られる精度は、主ルート間では明確に選択されない。[70]

レンズ質量とソース位置の異なる分布は、観察された画像幾何学を保存することができるが、異なる時間遅延を予測することができる。したがって、正確に測定された画像位置

でさえ、距離を曖昧に決定しない。レンズ内の星の動きと、視線に沿った物質の情報によって、この自由度は低下します。これらの追加モデルの不確実性は、結果として生じる宇宙論的スケール誤差に寄与する。



図版 13. 膨張の尺度に至る二つの経路。局所的な距離尺度は、幾何学的な基準、恒星の性質、さらに遠方の光源を結びつける。もう一つの経路は、宇宙論モデルを介して、宇宙マイクロ波背景放射の模様を現在の膨張に結びつける。これは推論方法の模式的な比較であり、距離の地図ではない。観測手法が異なっていても、共通の校正によって誤差が相関する場合がある。

小さな補正が宇宙論になるとき

初期宇宙の新しい物理モデルは、宇宙論的な標準定規を校正する音響尺度を変えることがある。その場合、同じ観測された角度の模様が、後期の距離と H_0 の異なる組み合わせに対応する。ただし、その変更は、宇宙マイクロ波背景放射のスペクトルのほかの部分、軽い原子核の生成、その後の構造の成長を保たなければならない。定規の長さだけを自由に変え、ほかの帰結をすべてそのままにすることは、通常できない。

後の説明は鎖の別の部分を変える:一次スケールの形成後の拡大、暗いセクター相互作用、または光の伝搬。それらは音響測定、超新星と成長の組み合わせによってテストされます。

したがって、一つの数字H_0をうまくフィットさせることは、単なる最初のフィルターです。モデルは、パラメータの選択に参加しなかったデータに耐えなければならない。

分類学は同等の規模である。超新星解析に関する議論では、サブサンプル間の約0,04桁の相対的シフトが議論されている。グレースケールの定義を通して、これは距離の約1,86パーセントに対応する。現代の精度では、この効果は重要です。しかし、シフトの事実はどのディレクトリが修正を必要とし、どのように正確に変更するかを決定しません。[71]

DESチームの反応は、違いが分散と選択関数のパターンに関連していることを示しました。同じ超新星は、様々な妥当な補正の後、同じ公開距離を持つ必要はない。違いの源をテストするには、光度曲線、明るさ標準、各ビューにどのオブジェクトが含まれていたかのモデリングに戻る必要があります。最終的なカタログから便利なステップを差し引いても、この作業は置き換えられません。[72]

ランダムエラーと一般エラーの違いは、単純な例で明らかにわかります。新しい超新星を追加し、それぞれに明るさのランダムな変化を加えましょう。平均するとスコアが向上します。しかし、それらがすべて一つのわずかに間違った標準に対して測定されている場合、全体的なシフトは任意の数のオブジェクトに対して残ります。別の望遠鏡でも、校正が同じ基準に結びついている場合、完全に独立した検証は作成されません。したがって、サンプルだけでなく、測定を絶対的なスケールに関連付ける物理的に独立した方法の数を増やすことは有用です。

精神的な実験のために、結果に従ってではなく、登録の物理的状況に応じてデータを分割しましょう:機器、波長範囲、ホスト銀河の種類、選択条件。宇宙的変化は、主にレッドシフトとジオメトリによって組織される。キャリブレーション効果は、装置またはソース人口に追従することができます。これらの依存性は時々重なり合うが、説明を分離できる追加の観察を示唆するのはそれらの比較である。

宇宙はどれほど不均一か

次の問題は、その物質がいかに強く異種構造に集められるかである。比較のために、S_8を使用してください:この量は重力レンズで測定するのに便利であり、物質の平均割合とその線形不均一性の振幅と接続します。

$$S_8 = \sigma_8 \sqrt{\frac{\Omega_m}{0.3}}.$$

同一球面によって滑らかに計算された密度場を想像してみましょう。値σ_8は、現在のエポックに拡張された線形モデルにおいて、そのような領域の密度の根平均二乗相対拡散を特徴付ける。球の半径は 8 h^{-1} メガパーセク、h - H_0 を 100 km/s/Mpc の単位とする。弱いレンズは、しばしばσ_8と物質画分Ω_mの組み合わせを個別に制約するため、S_8が使用されます。この数の偶然は、すべてのスケールとすべての時代の構造の偶然をまだ保証しません。

弱いレンズは統計的に測定される。個々の銀河は、事前に知られていない独自の形をしています。したがって、方向と距離によって分布する複数の画像の相関を解析する。光学的および大気的なぼかしを復元し、形状測定を校正し、レンズの前にも近隣の銀河が同じように向き合う可能性があることを考慮する必要があります。

完全な六年間のDES分析は、ΛCDMでS_8=0,789±0,012に68パーセントの信頼度レベルを与えます。CMBデータの考慮された組み合わせとの違いは、S_8への投影における2,6標準偏差であるが、フルパラメータ空間における1,8である。一変量比較は、一つの量の差をテストします。結合は、パラメータの全セットとそのエラーの相関を考慮に入れます。これらは異なる統計的質問であるため、標準偏差で表される答えは同じである必要はありません。[73]

完成したKiDS-Legacyは、非対称エラー+0,016と−0,021でS_8=0,815を受け取った。このエントリは、一次元の後部分布の最大値とその68パーセンテージ最高密度の位置を示しています。結果は、使用した比較でPlanckと一致します。著者らは、以前の分析に対する推定の変化を、主にレッドシフト推定、キャリブレーション、領域、画像処理の改善に帰している。したがって、変化しない単一の「危機S_8」のアイデアは、現在の測定状態を適切に記述していません。[74]

複雑な観測を一つの数に凝縮することは、最初の比較に有用である。しかし、同じS_8を持つ二つのモデルは、大規模で小さなスケールやエポック間の異なる成長において、異質

性の異なる相対強度を生成する可能性がある。中央値のみに一致すると、この情報が失われます。完全なテストは、画像と銀河の位置の相関、角度と赤いシフトへの依存に戻ります。そこでは、統計的圧縮後に消えた新しい物理学の兆候を保存できる。

小さなスケールでは、天体物理学は器械的な問題に加えられる。気体は冷却し、星を形成し、銀河から放出され、質量分布を変える。ニュートリノは成長のスケール依存性にも影響する。ロバストテストでは、まず説明が十分に制御されている領域を使用し、次により複雑なモードを含む場合に堅牢性をチェックする。いくつかのデータを破棄すると、精度は低下しますが、物理学が実際に不一致を引き起こしているものを理解するのに役立ちます。

初期の銀河と、その明るさに必要な条件

ジェームズ・ウェッブ望遠鏡は赤外線の遠距離源を観測する。それらの中には、初期の銀河形成の特定のモデルによって予想されるよりも明るく、あるいはより巨大であることが判明したものもある。この時点で、物体は明るく、多くの星を持ち、暗いハローは巨大であり、宇宙学ではそのようなハロの十分な数を許さない。隣接するステートメントの間には、異なる測定と物理モデルがあります。

若い恒星は単位質量あたりの光度が大きい。スペクトルは、年齢、星形成履歴、化学組成、塵、および可能な能動核によって影響される。複数のワイドフィルタを用いて推定されるレッドシフトは、スペクトル線による検証を必要とする。分光の後に得られる距離は役に立つが、自動的にすべての質量不確かさを取り除くわけではない。

KrishnanとAbazajianの論文2026は、恒星質量と散乱における系統的誤差が銀河形成の効率に関する結論をどのように変えるかを検証した。分布のまれな大規模な終わりでは、より多くの中程度の物体が、希少な真の巨人がそれから落ちるよりも頻繁にトップカテゴリに落ちる可能性がある。そのような非対称性は理論との比較に含めなければならない。[75]

2026のもう一つの分析は、選択したCEERSとFRESCOオブジェクトの宇宙学とバリオン-星変換効率を共同で変化させた。ダークエネルギーパラメータと空間曲率の解放は、研究した分光試料の高効率化要件を排除しなかった。この結果は、銀河形成の天体物理学をより詳細に研究する必要性を示しているが、考慮される宇宙論のデータと拡張に特有である。[76]

ビューのサイズも物理問題の一部です。小さな場はランダムに銀河密度の高い領域を横切り、希少物体の過剰な出現を与える。一方、非常に深い観察により、広い視野ではアクセスできない弱いシステムを見ることができる。深さは人口の構成を特定し、面積はその空間的分散を制限する。画像に既知の特性を持つ人工ソースは、各クラスの検出確率を測定するのに役立つ。

新しい初期の物理学は、テストの対象のままです。その重要な特徴は、ハローの数、そのクラスタリング、その他の観測可能な量の一貫した変化であり、これは恒星形成と選択の許容される変化によって再現できない。印象的な画像だけでは、この結論に達するには十分ではありません。そして、構造形成の標準的なモデルの修正でさえ、早期にホットな段階の証拠を自動的に取り消すことはありません:これらは異なるレベルの宇宙的記述です。

重力の法則そのものを検証するには

これまでのところ、私たちは宇宙パラメータを決定する方法を比較しました。選択された理論は、拡大、物質の動き、重力波の伝搬を同じように記述しているのだろうか? これを確認するためには、同じ法則の異なる側面に対応する観察が必要である。距離は主に幾何学を制限する。銀河の速度とレンズングは、重力場摂動に関する情報を追加します。合併信号により、ソースから私たちへの波の転送を確認することもできます。

二つの理論について、H(z) の類似した履歴を選択し、それらの摂動を比較することができる。背景関数の偶然は、構造の成長のための方程式の偶然を必要としない。重力変化に関しては、宇宙距離における重力波振幅の減衰も変化する。この効果は光速と同等の伝搬速度でも可能です。この場合、一般相対性理論の仮定の下での振幅から得られる通常の距離を再考する必要がある。[77]

観測検証に便利な値は、一つの赤方偏移における重力波と電磁光度距離の比率です。

$$\Xi(z) = \frac{d_L^{\mathrm{GW}}(z)}{d_L^{\mathrm{EM}}(z)}.$$

一般的な相対性理論では、光子と波の標準伝搬、正しいソースモデルおよびレンズの同じ考慮で、この比率は一に等しい。どちらの推定も長さの次元を持つが、異なる物理手法によって得られる。放射電力と観測された明るさは、電磁経路を決定する。重力信号の周波数と形状を変更することは、バイナリシステムの特性を制限する。検出器の向きと応答

とともに、振幅スケールを再構成することができる。指定 d_L 自体は、これらの手順を理論から独立させるものではない。

GW170817とガンマ線バーストの合同登録により、2017では、発光時間の仮定を考慮し、光速と研究体制における重力信号の違いを厳格に制限することが可能となった。しかし、速度と振幅の進化は方程式の異なる特性です。最初のテストの成功は二番目を置き換えるものではありません。そして、低赤方偏移での試験は、宇宙距離で蓄積された効果を自動的に測定しません。[78]

このメカニズムを理解するには、テンソル偏光速度 c と正の有効プランクスケール M_* (t) という二つの限定的な例を考えよう。通常の物質は、時間や距離が決定されるメートル法と最小に関連している。c=1 の単位における一様バックグラウンドでは、各自由モードは次の式に従う。

$$\ddot{h} + (3 + \alpha_M) H \dot{h} + \frac{k^2}{a^2} h = 0, \qquad \alpha_M = \frac{d \ln M_*^2}{d \ln a}.$$

ここでの点とは、宇宙時間に関する微分を意味し、kはコムービング波数である。背景変化の規模に対して波長が小さい場合、そのエンベロープは約1/(aM_*)として変化する。均質輸送モデルでは、これは距離に追加の乗数を与える。M_*の変化は、H_0推定値と混同される可能性がある:より小さい記録された振幅は、異なる距離または異なる転送を示すことができる。そのような変性は、特にLagos et alの作品で研究されました。[79]

与えられた $\alpha_M(a)$ の短い例は、数学的付録で示される。記載された仮定の下でパススルー効果を計算します。本格的な理論を得るためには、アクションを選択し、その背景を乱れと一致させ、安定性をチェックし、ソースとオブザーバーの周りの条件を計算する必要があります。任意に割り当てられたH(z)、成長および機能 Ξ(z)は同じ物理モデルにまったく属さないかもしれない。

発生源から検出器まで

均質な計算には大きな制限がある。実二元系は密集した環境にあり、検出器は銀河の内部にある。一部の理論では遮蔽を用いる: 追加の場は空間内で作用するが、その影響は密集した領域で抑制される。DalangとLombriserの研究は、彼らが調べたモデルのクラスでは、パスの両端で一貫したシールドが通常の距離を復元できることを示している。したがって、

宇宙移動の効果を残すことは不可能であり、同時に計算なしですべての局所物理標準を宣言する。[80]

ホーンデシ理論の幾何学において、追加のスカラー放射とモード変換が指定された無視されると、観測される振幅効果は、放射と受信の場所で有効なプランクスケールの局所値と関連付けられる。これは、宇宙論的な背景とソースの環境の間の遷移を通してフィールドをトレースするプログラムのための特定の要件につながります。c とそれ自体の速度の偶然は、この問題を解決しません。[81]

通常の重力でも、単一の合併に沿った距離は不確かです。軌道傾斜角は視振幅を変化させ、距離と混合する。レンズは信号を増強または弱める。より頻繁にサンプルに鮮やかでよく指向されたイベントが含まれます。波の生成理論が変化する場合、波形も再計算されなければならない。電磁ルートには、その校正、可能な吸収および標準ソースモデルが残っています。補正のセットは、任意の平均宇宙ではなく、同じ選択されたカタログを記述する必要があります。

以下の思考実験が有用である。二つのモデルが選択した間隔で同じ距離を超新星に与えます。一番目が三=1を予測し、二番目が特定の偏差を予測する場合、波イベントはそれらを区別することができる。しかし、方向、測光キャリブレーション、伝搬パラメータを自由に変更できるため、差は減少する。したがって、まず第二予測のどの部分が必須であり、再構成が許可されたときに消えるかを確立する必要がある。レッドシフトドリフトの計算では、すでにこのロジックに遭遇しています。

三つのチャネルに共通するパラメーター

提案されたタスクは、二つの明示的に書かれたアクションと、物質を扱うための一般的なルールから始まる。各アクションに対して、実行可能なバックグラウンドソリューション、線形障害、および波動輸送が計算される。そして、H(z)に近い解のペアが選択される。この近接性は、測定範囲とその共分散によって決定されるが、これは目で描かれた曲線の偶然ではない。次のステップは、成長、レンズ、標準サイレンを追加した後、全体的なパラメータ範囲が維持されているかどうかを確認することです。

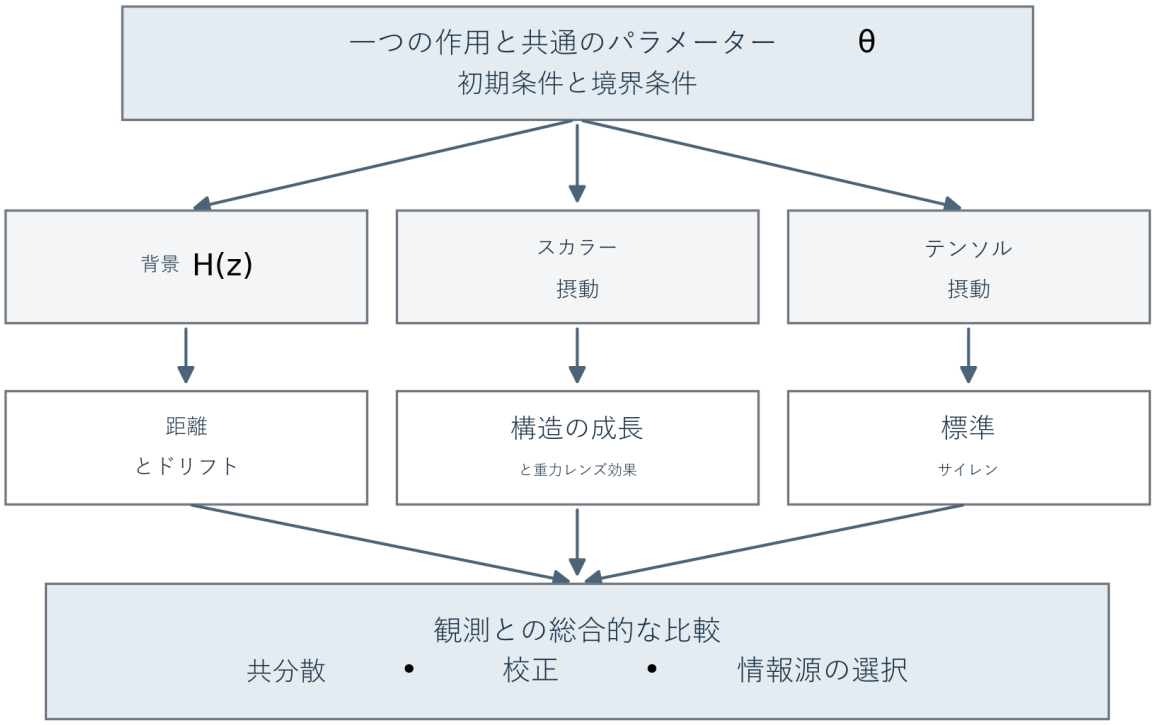


図5。一つの物理モデルによって接続される三つの観察ルート。一般的なパラメータと初期条件は背景と外乱を設定します。各チャネルは独自の測定モデルを通過します。このスキームは、任意に与えられた三つの関数を座標アクションから得ることができると仮定しない。

強い結果は、同じ理論が三つのテストすべてに合格する領域になりますが、選択した競合相手はそうではありません。同様に意味のあるネガティブな結果:パラメータのシールドや自由は、問題のチャネルをほぼ同一にすることができる。次に、縮退マップは、異なるレッドシフト範囲が必要かどうか、より正確にはソースの既知の方向、フィールドの実験室テスト、または新しい物理チャネルを示す。サイレンが暗黒エネルギーの問題を解決することを事前に約束することは不可能です。

三 が一からずれることも、発見された理論の名称ではない。選んだ総合的な記述と観測が一致しないことを示す。原因は、波の伝播、情報源のモデル、光子を使う経路、共通の校正かもしれない。重力法則の変化を選ぶには、赤方偏移に対する効果の特有の依存性を再現し、独立した観測量で確かめる必要がある。二つの整合する当てはめは、一つの共通の予測の代わりにはならない。

検証するには

局所スケールから始めましょう:同じ幾何学的サポートを持つCepheidとTRGBを使って、共通の銀河までの距離を測定します。独立したグループは、事前に固定された選択で画像を処理する。フレームに付加された人工星により、混合源からの変位を測定できます。銀河内の恒星の密度、色および領域の位置に依存する推定値の違いを確認します。解像度が改善すると予測可能な変化は、特定の測定誤差を示します。サポート自体の一般的なエラーは、物理的に独立した別の方法でチェックする必要があります。

この方法は、マージからの標準サイレン重力波によって提供される。信号の形と振幅は、与えられた重力理論における距離を推定し、電磁追跡はホスト銀河を見つけ、その赤方偏移を測定するのに役立つ。この組み合わせの実現可能性はGW170817で実証されました。軌道傾斜、干渉計の振幅キャリブレーション、検出された事象の選択、および近くの銀河の自然速度を制御する必要がある。[82]

特定のホストを持たないイベントでは、カタログの完全性を考慮して、確率的銀河セットが使用される。次の計算では、比較される拡張履歴の人工マージサンプルを作成し、特定のネットワークのノイズと選択モデルを通して実行し、実データと同じ方法を用いて距離を再構成する。実験を繰り返すと、どの程度の頻度で差が認識でき、どのくらいの頻度で干渉が誤った矛盾を引き起こすかが示される。これにより、必要なイベント数とキャリブレーション精度が決定される。

幾何学はまたクラークソン、バセットおよびルーテストによって点検されます。異なるレッドシフトにおける独立に再構成された距離と膨張率から、空間曲率パラメータの電流値を計算する。均質な等方モデルでは、各計算は暗黒エネルギーの形式に関係なく同じパラメータを与えるべきである。空間スライスの物理的曲率は拡大とともに変化する; このテストは、今日の正規化である一に減少した値を比較する。テスト可能な関係自体を使って、ある観察可能な関係を他の関係から導出することはできません。微分、共通のキャリブレーション、相関エラーは制御を必要とする。これらのチェックの後も不整合が残る場合、受け入れられた幾何学モデルの基底は修正が必要になる。[3]

初期の銀河では、次の物理ステップは異なる:分光、波長範囲と視野の拡大、恒星質量の独立制約、空間クラスタリングの測定。モデルは、理想的な質量だけでなく、完全な選択後に記録された画像やスペクトルを予測する必要がある。その結果、科学的結果はマップの形をとります:どの一般的な物理パラメータは、除外され、未だに区別できない異なるル

ートによってサポートされています。精度の欠如がどこで終わり、世界の新しい絵の必要性が始まるかを示すことができるのはそのような地図です。

重力を一緒にテストするために、まず選択された各理論から人工マージカタログを作成し、同じ検出器のスクリーニングネットワークを介して実行します。レンズと成長は同じパラメータを使って計算される。カタログの一部は予測をチェックするために保存される。一般的なキャリブレーションと大規模モードは、独立した複製ではなく依存関係としてカウントされる。チャネル間の必要な関係が許容可能なパラメータの下で再現されない場合、モデルのこのバージョンは拒否される。このような共同分析は研究課題として提示され、観測データに基づく三の新しい制限は宣言されない。

III いつものスタート前

第11章

構造はどこから生じたか

銀河地図には、当たり前のように簡単に理解できるものがあります。物質は拡張されたスレッド、ノード、クラスタに集まります。重力は、小さな初期不均一性がどのように顕著な構造に変わるかを理解するのに役立つ。密度の高い領域は、追加の物質を引き付ける、差が強まる。しかし、この説明は始まりがある:サイトはすでにその隣人と少し異なるはずです。厳密に均質な古典系と対称性を保つ方程式を指定する場合、アトラクションに関する言葉だけでは元の絵の外観には不十分です。

最初の不均質性の問題は、宇宙論と量子物理学を結びつける。これにより、直接画像が受信されない時代に近づくことができます。これを行うには、フィールドの初期段階、外乱の出現、ホットプラズマ中のその発達、原子の形成およびその後の構造の成長といった長い因果鎖を追跡する必要があります。観測された空はこの鎖の端にあります。開始までの道のりは、すべてのリンクをチェックする必要があります。

小さな違いがもたらす、大きな帰結

初期の乱れを異なるサイズの波に解析することが便利である。これは空間パターンの数学的表現であり、音を周波数に分解するのと似ている。ここでの波は、均一な背景からの空間の密度または曲率におけるわずかな偏差を意味することができる。その長さはスケールを決定し、振幅は偏差の大きさを決定し、位相は尾根とトラフの位置を決定する。与えられた長さと方向を持つそのような波成分はモードと呼ばれます。これは、一般分野の記述の要素として機能し、個別の主題としては機能しない。

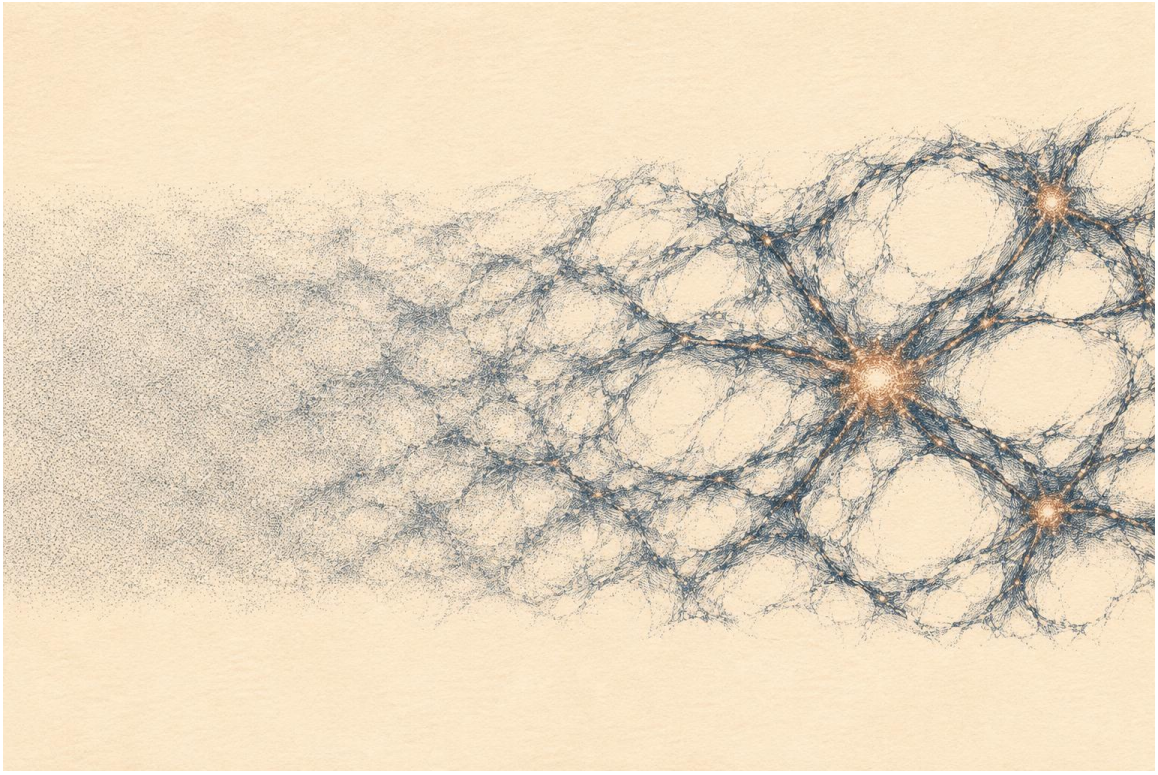
パワースペクトルは、異なるスケールの強い外乱が統計的にどれほどあるかを示している。将来の全ての銀河の座標を報告するわけではない。一つのスペクトルは、多くの可能な空間パターンに対応する。これは分布の予測と単一の結果の予測の間に重要な違いである。宇宙論は、特定の寒い場所がどの方向になるかを事前に指定することなく、空の統計を正しく記述することができる。

単純な近似では、無次元一次力はパワー法則として記述される:

$$\mathcal{P}_\zeta(k) = A_s \left(\frac{k}{k_*}\right)^{n_s - 1}.$$

文字kは、波数を表します:大きいほど、空間規模が小さくなります。指数 ζ は曲率摂動が記述されていることを示す。A_sは選択された基準スケールk_*における振幅を、n_sはスロープを指定する。n_s が一に等しければ、等対数区間は等しくなる:重要なことは同じ差ではなく、間隔の境界の間の同じ比率である。この分布はスケール不変と呼ばれる。

オブザーバーへの道のりでは、いくつかの障害がプラズマ中で振動し、他の障害は重力の影響で成長し、その他の障害は部分的に平滑化されます。したがって、宇宙マイクロ波背景放射の温度スペクトルにおけるピークは、インフレーションポテンシャルにおける直接ピークとして読み取ることができない。測定されたパターンは、初期条件と環境履歴の両方を含む。同様に、銀河の分布は、ハローに集められた物質と、光る物体がどこで形成されたかに依存する。開始の回復は、常にこの転送のモデルに基づいています。



図版 14. 小さな非一様性から宇宙の大規模構造へ。小さな初期の差は、環境の進化と重力による成長を経て、宇宙の網目状の大規模構造になる。淡い粒状の模様からフィラメントや結節へ至る模式的な移行が、この過程を表す。この図版は数値シミュレーションの結果ではなく、与えられたパワースペクトルから生じる唯一の結果を示すものでもない。

インフレーションは、量子と宇宙をどう結ぶか

インフレは、初期の宇宙の加速膨張に与えられた名前です。ここで重要なのは、拡大率の大きな数値だけでなく、スケール係数の変化の性質です。インフレーションでは、ハッブル距離の移動が減少します:物理的長さc/Hは、伸張座標グリッド上の距離と比較するためにスケール係数aで分割されます。したがって、波長はもともと小さくてもc/Hよりも大きくなります。この遷移は乱れの進化に重要であり、ハッブル球自体をすべての因果地平線と同一視することはできない。

十分なインフレーション段階により、観測された領域は以前に因果相互作用が起こった可能性のあるより小さな領域にリンクすることができる。また、空間曲率の相対サリエンスを減少させる。アラン・グースの古典的作品の動機となったのは、均質性と平面に近いという問題であった。しかし、元のモデルを完了するための特定のメカニズムは問題であった。プログラムの名前がすべての実装を等しく成功するわけではない。[83]

後期加速の記述と同様に、インフレーションダイナミクスはしばしばスカラー場とそのポテンシャルエネルギーと関連付けられる。これは一般的な数学的ツールであり、初期と後期の加速度が同じ場によって引き起こされていることを立証しない。ポテンシャル部が優勢となり、磁場が十分にゆっくり変化すると、エネルギー密度は通常の膨張気体の密度よりもはるかに小さくなる。その後、エネルギーは粒子と放射線に変換されなければならず、そこから熱い段階が発展します。再加熱と呼ばれるこの遷移は、インフレーションモデルをその後の宇宙史と結びつける。

このような背景に対して、量子場の乱れは巨大な物理波長まで延びる可能性がある。媒体の相対組成に独立した摂動がない単純な断熱体制では、長波長曲率摂動はホットエポックのための統計的情報を保持する。古典的計算により、この機構がほぼスケール不変な密度摂動を生成することができることが示されている。この場合、振幅は場のダイナミクスに依存し、一般的なアイデアは定量的予測に持ち込まれる必要がある。[84]

「銀河は量子揺らぎから成長した」というフレーズは、いくつかの物理的遷移を圧縮する。選択された量子状態、進化の方程式、古典統計学の適用性の説明が必要である。波長自体のストレッチは、粒子が光よりも速く空間を移動することを意味するものではありません。そして、宇宙規模の増加は、初期状態の起源の問題を取り除くものではない。インフレーションは観察された領域の性質を説明することができ、なぜこの特定の段階が始まったのかという疑問を解くことができる。

一つの現在の規模は、拡大の歴史を通してインフレの特定の瞬間に関連付けられています。再加熱の期間やその中の物質の特性を変えることで、私たちはこの対応を変えます。したがって、潜在的な形状とデータを比較するには、中間のエポックを考慮する必要がある。潜在的な図形自体は、観測された各不均一性に対して、まだ準備された起源日を提供していない。

空の観測は、具体的に何を検証するか

Planck 2018分析では、温度、偏光およびレンズデータにより、採用モデルの68パーセントレベルで$n_s = 0{,}9649 \pm 0{,}0042$が得られた。スペクトルはスケール不変に近いが、わずかな傾斜がある。この結果はインフレのシナリオを制限するのに役立つ。その意味は、背景の宇宙論とパラメータの選択されたセットに依存します。その数は、基本的なフィールドの形を直接測定するものではありません。[85]

温度と偏光は、異なるタイプの情報を提供する。偏光は、特定の角不均一性を持つ放射線が散乱されているときに起こり、したがってそれ自身の方法でプラズマの初期状態を反映する。一般的な理論は、同時に温度相関、偏光相関およびそれらの間の接続を記述する必要がある。ACT DR6のスペクトルは、公表された統計的記述を備えた別の温度および偏光測定セットを提供する。それらを扱うには、前景の放射線と楽器の不確かさを考慮する必要がある。[86]

その他の問題は、原始重力波に関するものである。彼らは偏光 - Bモードの特別なコンポーネントを残すことができます。このパターンは、重力レンズと銀河からの偏光によっても作成されます。2018年シーズン以前に公表されたBICEP/Keck解析では、これらの寄与の結合モデルは、95パーセントのレベルと逆メガパーセク参照波数0,05で$r < 0{,}036$の制限を得た。ここでrは、重力波に関連する一次テンソル力と、曲率摂動のスカラー力との比である。これは特定の作業の結果であり、現在の感度記録ではありません。[87]

モデルが信頼できる上限以上のテンソル信号を必要とする場合、それは観察的な矛盾に直面します。しかし、異なるインフレーションモデルはrの異なる値を可能にする。リミットの改善は、プログラム全体の拒否に自動変換することなく、可能性のスペースを一貫して狭めます。検出された場合、一種類の観察パターンが異なる方法で発生する可能性があるため、スペクトル形状と代替ソースもチェックする必要があります。

統計学は力よりも深く探究することができる。双スペクトルは、波モードの三重項間の相関を記述する。統計的均質性により、それらの波動ベクトルは三角形に近づく;我々は、空の地図上の三角形ではなく、波のスケールと方向の関係について話している。双スペクトルの形状への依存性は、初期場の相互作用に敏感である。このような相関は、平均相関と二点相関によって完全に指定されたガウス統計からの偏差を探すことを可能にする。一次非ガウス性のプランク解析では、研究パターンのうち有意な信号は見つからなかった。結果は、テストされた相関の形式によって正確に制限される。[88]

一つの出来事と、複数の痕跡

インフレーション中の乱れの伝播のための条件の短い変化を想像してみましょう。例えば、効果的な音速はわずかに低下し、以前の値に戻ります。私たちは、空気中の音ではなく、特定のフィールドモードの伝搬速度について話しています。いくつかの効果的な説明のために、そのようなエピソードはパワースペクトルとバイスペクトラムの関連した特徴を生成する。この関係は科学文献ですでに確立されており、メカニズムの有意義なテストを提供する。[89]

イベントには一般的なパラメータがあります:時間、持続時間、強度の位置。それらは、場とその相互作用の方程式が導出される単一の数学的表現であるアクションによって接続される。一度選択されると、一つのエピソードがいくつかの観察可能な結果を決定する。したがって、パワー特性と相関パターンを独立にシフトさせることはできない。この場合、温度と偏光の移動関数は異なります。一般的な物理スケールでは、二つのグラフの可視ピークが同じ位置にある必要はない。[90]

これは、応答時間が異なる複数のセンサを使用して一つの短い露光を再構成すると考えることができる。真の合意は、センサの特性を考慮した後、一つのソース履歴が得られることを意味する。各デバイスが自身のイベント時間を必要とする場合、説明は主なコンテンツを失う。宇宙論では、センサーの役割は様々な統計と観測フィールドによって行われ、その応答は宇宙の進化を通して計算されなければならない。

競合する説明は、初期量子状態を変える:いくつかのモードでは、選択された真空場参照に対して追加の励起が許される。この状態は、特に細長い構成に対して、特徴を作成して三点相関を強化することもできる。したがって、それ自身によるパワー振動は早期のメカ

ニズムを確立しない。励起状態に対する選好でさえ、前のリバウンドによって証明されない: この状態を実際に準備する個別の物理モデルが必要である。[91]

共役検証は説明の自由を制限するという利点がある。新しい測定は、すでに選択されているモデルの必要な結果をテストする必要があります。次の偏差に対応するためにパラメータが毎回拡張されると、マッチの数が増え、識別力は消えます。どの観察の組み合わせがメカニズムにとって困難になるかが事前に明らかな意味のある結果が始まります。

波が伝わる途中で得る情報

一次テンソルスペクトルは摂動生成の機構に依存するが、今日観測されている重力波背景もその後の膨張の跡をとっている。あるコムービングスケールの波は、ハッブル半径と比較して異なるレジームを通過します。その長さがこの半径よりもかなり小さい領域に戻った後、振動し、その振幅は膨張とともに変化する。したがって、スペクトルはソースと再突入エポックの両方に関する情報を格納することができる。

線形テンソルモードに対する一般相対性理論では、等角時間における方程式をc = 1で書くことができる。

$$h_k'' + 2\mathcal{H} h_k' + k^2 h_k = 16\pi G a^2 \Pi_k^{\mathrm{TT}}.$$

ここで h_k は一つの偏極の振幅であり、プライムは共形時による導関数を表す。花文字の H は a'/a に等しく、Π_k^{TT} は、採用した規格化における異方性応力の、対応する横波でトレースのない部分である。波の生成が終わっても、媒質は膨張と応力を通じて伝播に影響する。ボイルとスタインハートは、こうした効果が初期背景の伝達関数にどう入るかを調べた。[92]

有用な極端な例は、この関係の意味を示しています。波は、w > −1/3で、エネルギー密度wに対する圧力の一定の比率でエポックに再突入しましょう。サブハッブル自由伝搬波の場合、振幅は1/aとして減少する。初期次元を持たないテンソル力が指数 n_t を持つパワー k に比例する場合、エポックの境界から遠く離れて、よく知られたパワーロー依存を得る:

$$\Omega_{\mathrm{GW}}(f) \propto f^{\,n_t + 2(3w-1)/(3w+1)}.$$

ここで Ω_{GW} は、現在の臨界エネルギー密度に対する、対数周波数区間あたりの割合である。追加のべき指数は、再突入の条件 k = aH から導かれる。w が一定なら、突入時の

スケール因子は $k^{-2/(1+3w)}$ に比例する。k^2、初期のパワー、この因子の二乗に比例するエネルギースペクトルへ代入すると、示したべきが得られる。この導出は、振動の平均化、追加の発生源と顕著な異方性応力がないこと、対象区間で有効な自由度の数が変わらないことを仮定する。

放射値 $w= 1/3$ では加算度は零であり、$w= 0$ の場合は -2 に等しい。したがって、滑らかな一次スペクトルでさえ、異なるエポックに異なる周波数が含まれていた場合、リンクを得ることができる。しかし、ソースの形状のために、限られた帯域で同じ勾配が発生する可能性がある。単一の観察されたリンクは、加熱温度または新しい粒子の存在のいずれかを確立しない。

実際の基本転送関数は既に特異点を含んでいる。相対論的自由度数は変化し、ニュートリノの自由な伝播はテンソル摂動に影響を与える。渡辺と小松はこれを標準物理学の枠組みの中で計算した。異常な時代を探索する前に、この背景を再現し、その計算の精度を評価する必要がある。そうでなければ、標準遷移は非標準履歴の証拠として誤って宣言される。[93]

宇宙マイクロ波背景放射と重力波スペクトルの組合せを初期期間の制限方法として検討し,黒柳,蓮華,高橋らによる追加エントロピー生成について検討した。この考えは文献にすでに存在する。私たちの追加は、ソースの許可された変更、標準転送、および将来の測定の実際の応答の後、二つの事前選択された履歴が区別できるという限定的な比較を行うことです。[94]

最初のバージョンでは、選択した再加熱に標準放射線履歴が続きます。二番目は、核合成に対応するのに十分な早さで終わる固定wを持つ有限エポックを追加します。終了温度、持続時間、および可能なエントロピー生成は、成分の一つのモデルとその消失によってリンクされる。エネルギー収支を確認せずに、便利な休憩を個別に割り当てたり、標準密度を別々に維持することはできません。

両方の履歴に対して、選択した大規模摂動データと一致する一つの制約付き一次テンソルスペクトルのクラスが最初に計算される。次に、輸送方程式を解き、現代のスペクトルを得る。いくつかのパラメータは、バージョンがほぼ同じ周波数帯域で一致するように選択することができます。テスト可能な問題は、義務的発散が他の利用可能なバンドまたは関連する宇宙論的制約にとどまるかどうかである。

特に、観測周波数とソース温度を混同しないことが重要です。リンクの位置を遷移温度に変換するには、温度とスケール係数の関係と、遷移と今日の間のエントロピーの変化を知る必要があります。追加の崩壊は、この関係を変えることができます。したがって、温度推論は、周波数が非常に正確に測定されても、常に全モデルに対して相対的である。第一ステップとして、観察された振幅、傾斜および特徴の位置を推定し、関節輸送から物理パラメータを得ることが安全である。

実用的な中間積は、時間および状態方程式の解いたメッシュに対する転送関数のライブラリである。遷移から遠く離れた分析レベルでテストされ、遷移領域自体で数値的に洗練される。そのとき初めて、高速な近似コンピュータを訓練できる。そのようなコンピュータのエラーは、二つの履歴の違いと比較される: グリッド全体に対する小さな平均誤差が、区別するリンクを正確に体系的に平滑化すると役に立たない。

ソースの自由は、比較の前に宣言する必要があります。フォームと転送履歴の両方が任意に変更できる場合、一つの可観測関数は両方を復元しません。対照的に、ソースの固定された物理クラスは、いくつかのスペクトル関係を予測することができる。このような研究のネガティブな結果は、スペクトルが膨張履歴を測定し始める前に、ソースに関する事前知識がどの程度必要かを示す。

検証するには

一つは音速のわずかな変化、もう一つは一般的なインフレ背景に対して与えられた興奮状態である。それぞれに対して、アクション、初期条件および許容可能なパラメータの範囲は固定される。第一モデルでは、三つの障害因子との相互作用は、電力を決定する同じ作用から派生し、第二モデルでは、最初の三点相関も指定される。次に、運動係数の正性、近似の適用性、および励起エネルギーが受け入れられた背景を破壊しないという事実をチェックする。

最初の計算は、異なる三角形のサイズと形状の一次力と双スペクトルを与える必要があります。以下は、温度と偏光オブザーバブルにそれらを転送します。公開プランクデータとACT温度、および統計的モデルが準備されている範囲の偏光スペクトルはパイロットテストに適している。銀河調査は情報を追加できるが、非線形成長、銀河と物質の接続、調査した体積の幾何学を別々に計算する必要がある。

物理装置は、既製の原始相関を直接測定しない。ポラリメータはいくつかの周波数帯で放射線を受け、ほこりとシンクロトロンの前景を分離するのに役立ちます。ビーム形状、偏光角度、キャリブレーション、ノイズを制御する必要があります。これらの特性を持つ人工地図は、コンピュータ上で生成され、既知の信号で注入され、処理チェーン全体を通過する。これにより、汚染物質がそのシグネチャを隠す場合を含む特定のモデルの検出確率が確立される。

パラメータはデータの一部に基づいて推定され、残りの情報に対して条件付き予測が構築される。例えば、温度で見つかった特徴は、特定の偏光パターンを予測する必要がある。どちらの量も初期乱れと関連しているため、それらの共同共分散は、変動と誤差の統計的関係を考慮して考慮される。同時に、背景宇宙論と干渉パラメータは異なる。特徴の周波数探索範囲は予め設定され、検出しきい値は人工データに基づいて校正される。これは、多くの試みの中で壮大なランダムな変動を選択することから保護します。

パワー説明パラメータがデータと矛盾する測定可能な双スペクトルを必要とする場合、メカニズムの特定の非ヌルバージョンはテストに失敗する。期待される追加信号が弱すぎると、その不在は与えられた精度でバージョンを識別できなくなる。次の結果は、予め選択された許容誤検出率を持つエピソードの強度、持続時間および時間に依存する検出確率マップである。他のパラメータの干渉と許容される変更を考慮した後、選択したペア用にはまだ構築されていません。そのようなマップは、どの余剰次元が実際にモデルを分離するかを示す。

テンソル分岐は、まず絶対振幅を計算し、次に適切な範囲と測定器を選択する必要がある。理論的ブレークの存在は、宇宙干渉計による通常のインフレ背景の検出を約束しない。測定モデルは、計器ノイズと天体物理背景を含み、偏光、前景およびレンズの貢献と比較した場合。特定の非標準エポックは、他のテストによって許されるパラメータのすべてがデータと矛盾する測定可能なスペクトル比を予測する場合に除外される。即時の結果は、そのような比率がソースと干渉を調整した後、その識別能力を保持する領域の計算である。それが存在しない場合、変性の理由を示し、完全な初期履歴を復元してはならない。

第12章

宇宙の構造の起源は、量子的だったのか

銀河は小さな不規則性から成長した。インフレーションモデルでは、その起源はしばしば場の量子揺らぎによって記述される。言葉はとても親しみやすいので、次の質問は見逃すのが簡単です:どの観察がこの起源の量子性質を確立するでしょうか? 成功した量子計算と古典的説明の実験的排除は異なる結果である。予測の検証可能な違いは、それらの間に現れるはずです。

研究室の設備では戻れないプロセスの後期の痕跡が見られます。同じ宇宙の誕生を繰り返し、その状態の準備の瞬間を選択し、コマンドで相互作用を切り替えることは不可能です。しかし、関連する統計的特徴を比較し、既知のダイナミクスを通じてそれらを転送し、競合するモデルがそれらを再現できるかどうかを確認することができます。質問が科学的になるのは、まさにこの定式化です。

章の目的は、いくつかのレベルの主張を分離することです。量子論は、乱れの形成のための自然なメカニズムを提供する。ある古典的統計モデルは彼の結果の一部を再現することができる。相互作用はこの偶然を破壊する可能性がある。しかし、空の違いを検出することは、信号伝送、観測誤差、代替説明の自由を計算した後にのみ行うことができる。リンクがないと、測定プログラムが美しい物語に変わります。

一つの模様を作る、複数の方法

測定した二つの値は、x_1とx_2の偏差に対応する。共分散行列Cを収集することにより、それらの分散と相関を推定することができる。正定値であれば、これらの二番目のモーメントを再現する通常の正のガウス分布が存在する。二次元の場合、次のように記述される。

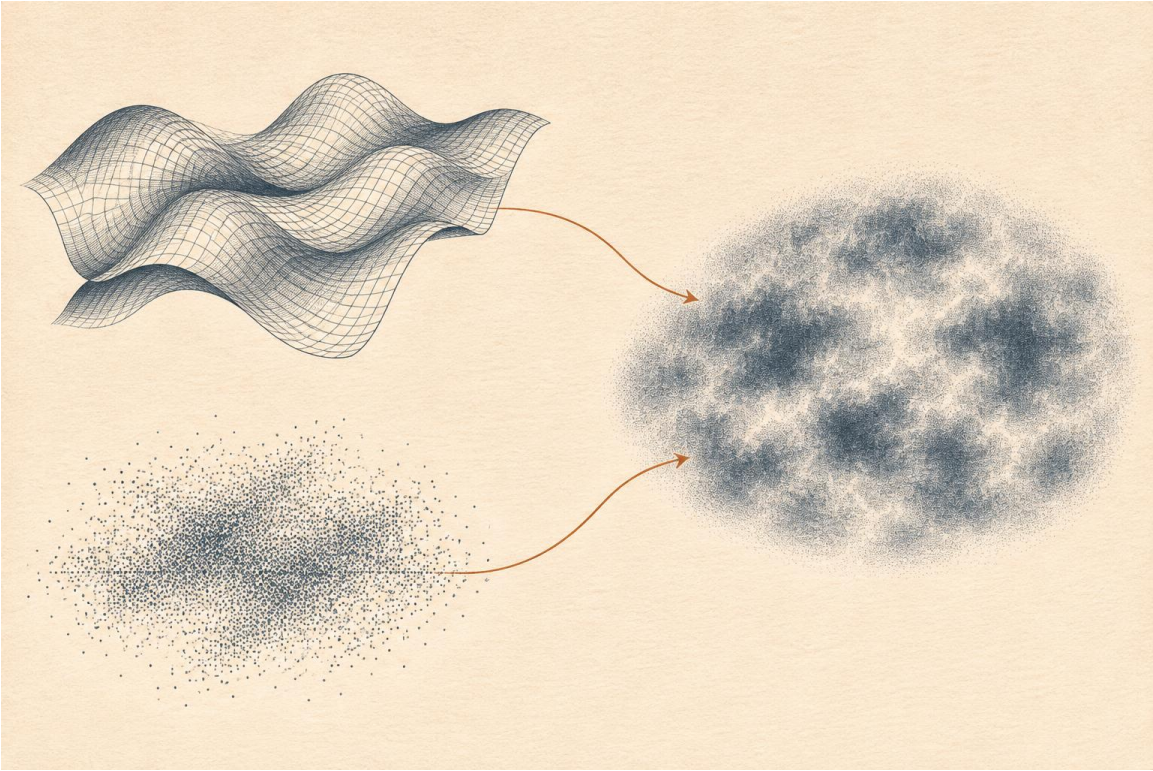
$$P(\mathbf{x}) = \frac{\exp[-\mathbf{x}^{\mathsf{T}} C^{-1} \mathbf{x}/2]}{2\pi\sqrt{\det C}}.$$

この公式は宇宙論全体を記述していない。ガウス第二のモーメントのみの測定された集合は、量子解釈を選択することを強制しない。同じ行列を持つ古典的確率変数を構築することは可能である。特異行列に対して、分布はより小さな部分空間上で指定され、情報の不完全性に関する本質的な結論は同じままである。

宇宙論において、そのような量の集合の役割は、外乱の空間的モードの振幅によって演じられる。パワースペクトルは二点相関を記述する。その成功は、拡張モデルのテストと構造の整形に非常に重要である。しかし、「分布はどこから来たのか?」という質問には「共分散とは何か」という質問よりも多くの情報が含まれている。単一の統計的スライスは、異なる状態準備機構と互換性がある。

量子的な記述は、観測量の代数も異なる。座標と運動量は、互いに可換ではない作用素で表される。対称化した積は、通常の統計モーメントと比較できるが、作用素の順序の入替えを、数の順序の入替えに無条件で置き換えることはできない。計算で使う量が、その違いの現れない組に限られるなら、データとよく一致しても、観測できない代数の部分を検証したことにはならない。

あなたの古典的な相手に事前に名前を付けることが重要です。これはガウス初期条件を持つ自由場、与えられた分布と相互作用する場、または特別に選択された非局所相関を持つより自由なモデルである。第一を除くと、第三を自動的に除外することはない。選択肢の自由度が高ければ高いほど、仮定はより強く、あるいはより独立した観察が必要となる。



図版 15. 同じ統計的な痕跡と、異なる説明。状態の準備方法が異なっていても、測定できる二点相関が一致することがある。したがって、パワースペクトルをうまく説明できても、競合する古典的な説明をすべて排除したことにはならない。この図版は、逆問題の解が一意に定まらないことの類比である。区別の手がかりは追加の観測量に求め、信号の伝播と各代替案の自由度を考慮して検証しなければならない。

量子状態は、どのようにランダムな場に似たものになるか

拡大の間、モードの振幅と標準共役変数の関係は変化する。適切な説明では、強い圧縮が生じる:不確実性は位相空間の方向間で非常に不均一に分布する。ある量の大きな不確実性と別の小さな不確実性は、量子法則が適用されるのをやめたことを意味するわけではない。つまり、利用可能な観察は状態の特定の部分を優先的に見ることができる。

ポールスキーとスターロビンスキーは、強い減衰モードを無視することで、検討中の体制における宇宙的摂動の古典的な確率的記述を得ることができるかを調査した。マルテンとヴェナンは後に、様々な古典的置換によって、どの相関と量子特性が失われるかを検討した。特に、ある二点関数を再現しても量子状態全体を再現しない。これらの結果は近似条件の保存を必要とし、他の観測対象の探索に関する一般的な禁止を提供しない。[95] [96]

位相平面上の点の長い狭い雲を想像してみましょう。測定器が長い方向だけに敏感である場合、雲の厚さの二つの異なるモデルが同じに見えるかもしれません。これは測定を制

限するための有用な幾何学的アナロジーである。しかし、雲の形自体は、各点がすべての量子可観測値の決定値であることを示しているわけではない。ここでは、統計的画像が物理的意味を知覚不能に置き換えることができる。

もう一つの移行は、環境に関わる。選んだ長波長モードを記述するには、残りの自由度について部分トレースを取り、明示的な考察から除くことができる。得られた縮約密度行列には、もとの全体系のすべての相関は含まれない。観測可能な干渉項が抑制されると、観測対象の部分は統計的な混合として振る舞い始める。この操作に、意識をもつ観測者は必要ない。

エリオット・ネルソンは、重力の非線形性と問題のモードと他のモードとの接続から生じる、インフレーション中のそのようなデコヒーレンスに対する特定のメカニズムを示した。研究の重要性は、明示的な相互作用と計算された還元ダイナミクスにある。この結果は、すべての宇宙モデルが同じ速度でデコヒーレンスする、またはすべての測定問題が解決されるという声明に翻訳されるべきではありません。[97]

目に見える干渉の抑制は運動の法則の違いを消さない。初期記述が正の古典分布を仮定しても、その後の非線形進化はモーメントが異なる。このアイデアを、独立した計算に十分小さいシステムでテストしましょう。そのような例は宇宙の観測を置き換えるものではないが、それは最初の偶然と永遠の等価性を混乱させないのに役立つ。

非線形ダイナミクスの検算

ハミルトニアン $H=p^2/(2m)+\lambda q^4/4$で、一つの座標qと運動量pを取りましょう。補助高調波発振器に対してコヒーレントである初期量子状態を選択する。ウィグナー関数は正であり、ガウス函数である。古典アンサンブルの初期条件と同じ正分布を設定します。その後、最初の時点では、対称化された瞬間が一致します。ハミルトニアン自体は、動作が始まれば、両方の計算において同じである。

モヤルの形式主義は相空間における量子力学を記述する。与えられたポテンシャルに対して、古典的リウヴィル方程式は運動量に関する第三微分を持つ項を補う。これは量子力学の有名な結果です。[98]

$$\partial_t W = -\frac{p}{m}\partial_q W + V'(q)\partial_p W - \frac{\hbar^2}{24}V^{(3)}(q)\partial_p^3 W, \qquad V = \frac{\lambda q^4}{4}.$$

では、方程式をp^3で乗算し、位相空間上の積分を見てみましょう。初期ガウス状態の場合、境界項は消える。部品による三つの統合は、量子補正の肯定的な兆候を与える。同じ初期分布で、次のようになります。

$$\left.\frac{d\langle p^3\rangle_Q}{dt}\right|_0 - \left.\frac{d\langle p^3\rangle_C}{dt}\right|_0 = \frac{\hbar^2}{4}\langle V^{(3)}\rangle_0 = \frac{3}{2}\hbar^2\lambda\langle q\rangle_0.$$

その本は独立した数値検証を受けた。従来の単位 $\hbar$=m=1 では、 λ=0,2, 平均 q_0=0,7 と p_0=0,2 は両方とも 1/2 である。古典微分はガウス・エルミート二次性によって計算され、量子微分は行列整流子 $(i/\hbar)\langle[H,p^3]\rangle$. −0,451332と−0,241332によってそれぞれ得られる。彼らの差+0,21は派生表現と一致する。

数値検証中、振動基底のサイズは24から48および96状態に増加した。公式の最大絶対差は1,67 × 10−16であり、二次ポテンシャルを持つ制御は2,22 × 10−16である。ソースコード、パラメータおよび結果は計算キットで与えられる。これは、次の進化全体ではなく、一つの瞬間の最初の微分のテストです。

初期対称モーメントの偶然は、この古典的比較に対する非線形力学の偶然を保証するものではない。それは宇宙信号の大きさを確立したり、異なる初期条件や法則を持つすべての考えられる古典モデルを除外したりしません。将来の研究にとって有用な方向性は、一次外乱モデルにおいて同様の制御された差を見つけ出し、それを観測可能な値に追跡することである。

相互作用はどこに痕跡を残すか

自由ガウス場に対して、多くの統計的性質は二点関数によって決定される。相互作用はモードをリンクし、高次相関は情報的になる。双スペクトルは、波ベクトルが閉じた三角形を形成する三つのモードを指す。この三角形の側面と角度への依存は、メカニズムを区別するのに役立つ。しかし、「非ガウス」という言葉はそれ自体が「証明された量子」を意味するわけではない:非線形古典力学もまた非ガウス分布を生成する。

二つの完全に定義された進化を比較する必要がある。予測バイスペクトラム間の差をΔBで示します。これは私たちの診断量の指定であり、新しい自然の法則ではありません。

$$\Delta B_\zeta(k_1,k_2,k_3;\tau_0) = B_\zeta^{Q}(k_1,k_2,k_3;\tau_0) - B_\zeta^{C}(k_1,k_2,k_3;\tau_0).$$

両方の部分で、動作、パラメーター、初期比較時間 τ_0および初期統計値を設定するための規則が記録される。それ以外の場合、異なるシステム準備が比較されるため、単に違いを得ることができる。古典的記述が各結果に対して最初の双スペクトルを再選択することが許されている場合、これは異なる研究課題である。これは、このような自由を物理的に許容可能なものにする追加の仮定を評価する必要がある。

Daniel GreenとRafael Portoは、局所性や古典的代替について一定の仮定の下で、積み重ねられたパルス構成の特徴を含む相関の分析フレームワークを通じて量子起源のシグネチャを探すことを提案した。この定式化は、哲学的な質問と計算される関数の形式を接続するため重要である。議論の条件は声明自体に含まれており、観察に移る際に破棄することはできません。[99]

ギリェルモ・バリェステロス、ヘスス・ガンビン・エヘア、アレハンドロ・ペレス・ロドリゲスの「インフレーションゆらぎの古典的進化と量子的進化」、2026 年十一月 4 日の版 v2 では、有限の初期時刻で比較が行われる。著者らは、ツリーレベルのスカラー・バイスペクトルと、一ループのテンソル・スペクトルの違いを調べている。重要な注意点は、この設定では、古典的な進化から折り畳み型の極が必ず生じるわけではないことである。結果は、相互作用と、初期条件を対応させる時点に依存する。この研究は、効果を確実に観測できるという予測ではない。[100]

これは、最先端がどのように進化しているかの良い例です。最初の問題の定式化が変わると、量子性の兆候に関する強力なアイデアがより正確になる。したがって、本の設計は一つの波形を普遍的に固定するべきではありません。明示的な前提との比較を行い、どの違いが記述において許容できる変化を生き残るかを見出す必要がある。万能記号がない場合でも、以下の検索を絞り込みます。

ベルに言及するだけでは十分でない理由

ベルの不等式に関する実験室試験は、異なる測定設定における結果の相関を比較する。宇宙論のために、特定の困難が生じる:初期の条件は実験室におけるアナライザの方向と同じ方法で切り替えることができない。単一の遅延空画像は、選択したテストに必要なすべ

ての代替測定値を自動的に含まない。不等式を書く前に、その入力変数と仮定の物理的意味を決定する必要があります。

マルダセナは、宇宙相関がベルの不等式に関連する定式化を可能にする特別なインフレーションモデルを構築した。これは、与えられた設計における原理的可能性の証明である。既製の測定手順として、任意のCMBマップに転送することはできません。[101]

さらに、現代の光子の量子特性のテストは、これらの光子の状態と選択した実験に関する質問に答えます。主な障害と接続するには、準備、相互作用、相関関係の転送、および必要な可観測物の可用性を追跡する必要があります。長い鎖の最後の量子段階は、最初のリンクの量子性質を自動的に確立しない。この移行は別々に証明する必要がある。

提案プログラムでは、限られたモデルのクラスで特定の識別可能な予測を最初に探索することがより有用である。すべての古典的説明の普遍的な排除は、より強い目標である。最初の論文が特定の初期条件で特定の古典力学のみを正直に否定するならば、それは依然として重要であるかもしれない。結果のサイズは、タイトルのボリュームではなく、出力の完全性によって決定される。

検算用の例から、研究計画へ

提案された作業の第一段階は再現可能な自由限度である。選択したインフレーション作用に対して、量子対称化相関と一貫性のあるガウスアンサンブルの古典的進化を計算する。理論が一致すると予測した場合、プログラムはそれを示す必要があります。このような制御がなければ、相互作用対差は互換性のない正規化やフーリエ変換規約、初期状態誤差と容易に混同できる。

第二段階では、明示的に記録された弱い相互作用が一つ含まれている。同じ順序の量子および古典的貢献を、必要に応じて同じカットオフおよび再正規化規則で計算する。パラメータは、廃棄された補正が検討中の差よりも小さい領域で選択される。この領域外の大きな発散は強い信号ではなく、両方の計算に対する制御の損失を示す可能性がある。

第三段階は、最初の比較の時間依存性です。初期状態の物理的正当化とともに変化するべきである。システムの選択した準備を反映し、有効な準備の家族のために安定している結果を確立する必要があります。この前提が変更されると、違いは消えます。このようにして、将来の実験が何を測定する可能性があるかが明確になる。

次に、主信号をオブザーバブルにマッピングする。宇宙論的な障害は、ホットプラズマ、構造形成、および光伝搬によって生じる。これらの過程は相関の形式を混合し、独自の非ガウス性を生成することができる。したがって、プライマリフィールドΔBデータと直接の比較は通常十分ではありません。転送関数と最近のコントリビューションを同じコンベンションセットで計算する必要があります。

AIには、成功のための明確な基準がある。整数の独立した実装を比較し、三角形構成に対する無責任な検討、テスト制限ケース、干渉パラメータに敏感でないオブザーバブルの組み合わせを特定することができる。彼に「最も量子的な絵」を選ぶことを託すことはできません。最適化は、物理的な証拠ではなくシミュレータやデータセットの特徴を見つける。

有用な最初の結果は、いくつかの制約付きモデル、ベンチマークソリューション、および識別不能領域のリストを備えたオープンパッケージである。そのようなパッケージは、新しい基本的な理論であると主張しません。その価値は、想定される宇宙的特徴のどの部分が独立計算に耐えられるかをチェックする能力である。この章の振動例は制御形式を示している。本格的なインフレーションパッケージはまだ作成されていない。

検証するには

物理テストは、オブザーバブルと代替案のファミリーの選択から始めなければならない。例えば、研究者は一次双スペクトルの形状、許される初期状態、および限られた相互作用を指定できる。オブザーバブルへの移動の後、宇宙マイクロ波背景放射の温度と偏光または物質分布の予測が行われます。チャネルの選択は、計算された波形に依存し、将来の望遠鏡の通常のリストには依存しない。

利用可能な空域、解像度、ノイズ、マスク、天体物理干渉、キャリブレーション誤差など、特定の測定性能がモデル化される。これらの条件は、三角形構成の興味深い部分を消したり、後期効果で縮退させる可能性がある。このような計算が行われるまで、理論的な差異がゼロでなくても検出性は主張できない。非ゼロ信号と測定可能な信号は二つの異なる基準である。

提案した分析は、真のモデルが知られている人工データでテストしなければならない。古典的信号、選択したモデルの量子信号、および意図された干渉がデータに別々に追加される。手順が通常の非線形寄与を量子であると体系的に宣言する場合は、実際の空を扱う

前に修正する必要があります。トレーニングパラメータとテストパラメータは分離されているため、アルゴリズムは外部機能に基づいてシミュレータを認識しない。

複数の調査を一緒に使用する場合、共通のスペースモードと一般的なエラー源を考慮する必要がある。空の一領域の二つの研究は、宇宙の二つの独立したコピーを提供していません。異なる可観測値における結果の偶然は、モデルが予測するそれらの間の関係の種類を事前に計算する場合に有用である。各チャネルで独立した振幅を選択する機能は、このチェックを弱めます。

障害条件は重要度を評価する前に記録されるべきである。理論プログラムは、差が数値誤差であることが判明した場合、互換性のない初期条件に依存する場合、または制御不可能な次の順序未満の場合、独自の制御に失敗する。予測された相関の集合が、与えられた仮定の下でのデータと矛盾している場合、観察仮説は拒否される。信号がないことは相互作用や初期状態を制限するかもしれないが、初期世界全体の古典的性質を証明するものではない。

そして、反対の結果は正確な定式化を必要とする。検出された形式が選択された古典モデルと矛盾する場合、結論はそのモデルとテストされた代替案に適用される。一次量子性について記述するためには、どの古典的説明が除外されているか、そしてどのような物理的根拠で示さなければならない。そのような慎重さは発見の見通しを弱めるものではない。何が発見されているのかを理解することができます。

宇宙パターンの量子起源の問題は、本の意図に特によく合います。これは、統計の理解可能な偶然から実際に実行された小さな計算につながり、相互作用する分野と将来の測定のためのプロジェクトにつながります。各ステップでは、ネガティブなものを含む特定の結果を得ることができます。この連鎖から、理論家やオブザーバー、コンピュータシステムのコラボレーションによって継続できる研究方向が生じる。

第13章

高温の始まりより前

宇宙が熱い密集した段階を通過したことを確立したので、私たちは以前の質問をすることができます。どのようなプロセスによってこの条件が発生したのですか? インフレが先行していたのでしょうか? 拡大は縮小に先行しているだろうか? 通常の時間自体は、私たちが回復している歴史とともに生まれましたか? これらの質問は、異なるレベルの説明に関連しています。そのうちの一つに対する答えは、自動的に他のものに引き継がれません。

ホットステージの始まりと存在の絶対的な始まりを混乱させることは特に簡単です。第一は、特定の物理的体制に関連付けられています。第二には、現在の記述がまだ構築されていないものを含む、可能なすべての体制に関する声明が必要である。背景を探るには、まず一般的な単語「開始」を正確な質問に置き換えることが有用である:どの量、幾何学、または因果関係は選択されたモデルで続かなくなるのか?

モデルの限界と、世界の始まり

膨張を追跡すると、通常の物質は濃くなり温度が上昇します。ある古典的解において、この経路は特異点をもたらす。ここでの数学的説明は無限小球のイメージよりも微妙なものです。測地線(幾何学)は、与えられた幾何学における自由に動く粒子や光の軌跡であり、粒子の有限固有時間や光線に沿った有限アフィンパラメータを超えて拡張できない。アフィンパラメータは自由運動の方程式と一致し、光が持たない光自身の時間ではない。不完全性は、モデルがパスを継続する場所に答えるのをやめることを意味する。

これはまだ世界が作られた物理的な出来事の説明ではありません。中断された軌道は、時空の選択した領域の不完全性、他のダイナミクスの重要性、または幾何学自体の古典的な概念の境界を示すことができる。オプションを区別するには、継続を構築して一貫性を確認する必要がある。境界の最終宣言はそのような作業に取って代わるものではなく、「そこに別の世界があった」という単語による意的な除去も物理学を定義していない。

ボルデ＝グース＝ビレンキンの定理は、インフレーションを過去へ無限に延長する、特定の試みに制約を与える。適切な測地線に沿って平均した膨張率が正であるという条件を満たすと、対応する記述は過去に向かって不完全になる。現在膨張しているだけでは、この条件は満たされない。重要なのは、考えている経路に沿った履歴である。この議論は運

動学的なもので、通常のエネルギーの正値条件を必要としない。結果が関わるのは、軌道とモデルの前提である。過去の境界での機構を選ぶものではなく、絶対的な無から生じたことを証明するものでもない。[102]

したがって、以前の圧縮を持つモデルは、提案された継続を通して定理の条件に従うためにチェックされなければならない。「循環的」という名称だけでは、問題を解決するには十分ではありません。同様に、記述における量子語の存在は、古典的境界が実際に除去されたことを保証するものではない。特定の変数、その変動の法則、そして観察可能な宇宙論が再び新しい記述から得られる領域がある必要があります。

歴史の局所的な継続と、結果として生じる状態の連鎖全体の説明を区別することは有用である。第一は、特定の場所で障害を取り除く;第二はまた、前のフェーズの条件を正当化しなければならない。継続の科学的価値は、これらの条件と観察された結果との接続によって与えられる。新しい時代が乱れの初期統計を変化させた場合、空との比較の対象が現れます。名前だけを受け取った場合、その説明はまだ進展していません。

バウンスは、摂動に対しても成り立つ必要がある

リバウンドモデルでは、収縮はスケール係数がゼロでない最小値に達すると拡大する。空間は無限のままである。膨張速度Hは当初負であり、零を通過して正となる。この単純なシーケンスは、すでにダイナミクスに制限を課している。一般相対性理論の空間的に平坦な均質モデルにおいて、光の速度を一とすると、次の関係が適用される。

$$\dot{H} = -\frac{\rho + p}{2M_{\mathrm{Pl}}^2}.$$

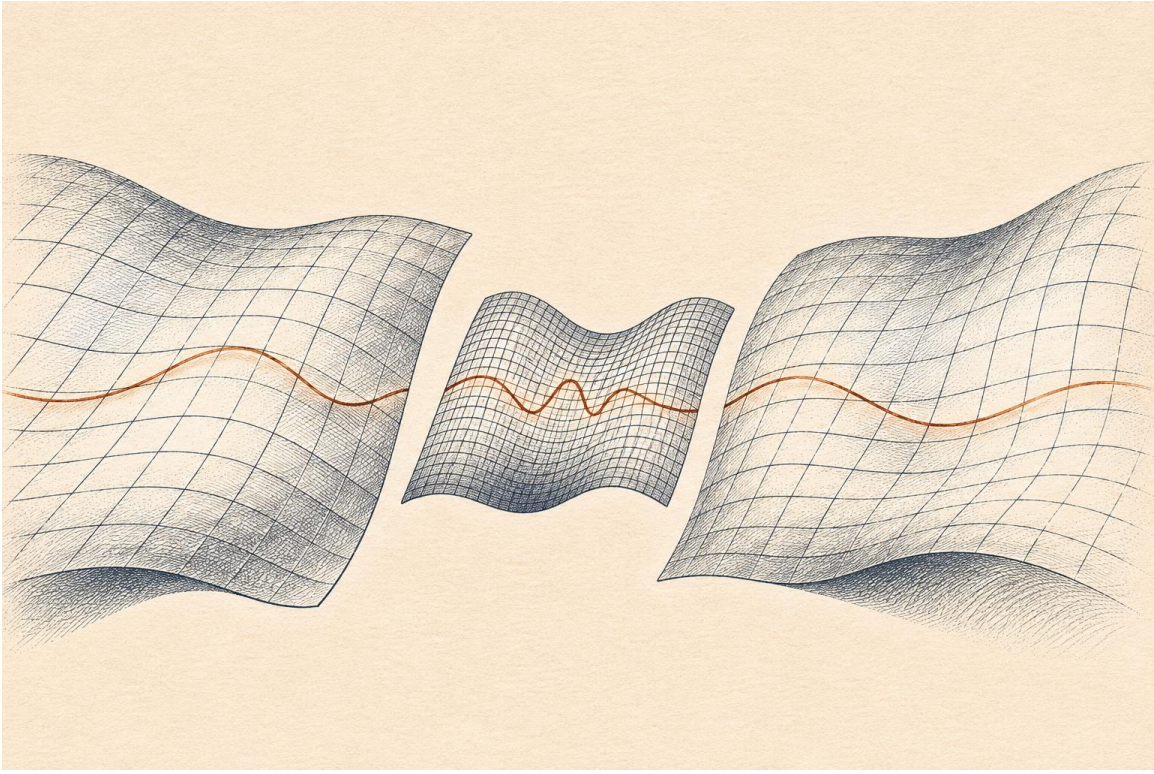
ここで ρ は総エネルギー密度、p は圧力、M_{Pl} は還元プランク質量です。密度と圧力の合計が非負であれば、Hはゼロを通して増加することができない。したがって、そのような定式化のリバウンドは少なくとも一つの必須前提条件を変更する必要がある。異なる幾何学、異なる物質の組成、あるいは変化した重力力学が可能となる。各オプションには、独自の価格と適用条件があります。

アスティーカル、パブロフスキーおよびシンのループ量子宇宙論において、特異点は質量のないスカラー場を持つ空間的に平坦な等方性モデルに対して量子リバウンドに置き換えられた。フィールドは内部時間として使用されました:その変化値は、外部クロックを導入せずに状態数に使用されます。進化は解析的および数値的に研究された。これは、自由

度のセットを大幅に削減した量子モデルの具体的な結果であり、結論を実際の不均質宇宙に移すには別々の作業が必要である。[103]

次のステップは特に重要です:理想的な均一性からの小さな偏差がリバウンドを通過する必要があります。かなり大規模なファクタープロットは不安定さを隠すことができます。一部の障害は急速に増加する可能性があるが、他の障害は使用される近似に従うのをやめる可能性がある。運動エネルギーの徴候、空間的不均一性の分布、および外乱自体が背景に与える影響を確認することが必要である。それらが背景に匹敵すると、線形計算はもはや遷移の滑らかさを確認しません。

ある量子論から便利な背景曲線を取り出して、計算が容易だからといって、別の量子理論からの摂動を追加することはできません。互換性のある記述に従う必要があります。ホットステージに移行する場合、粒子が形成されて、それらに転送されるエネルギーが予測スケールを変えることができる方法も一貫性が必要である。ここで、先行世界のアイデアは、難しいが具体的な物理的問題のセットに変わる。



図版 16. バウンス仮説と摂動の行方。バウンスのシナリオでは、スケール因子がゼロでない最小値を取るところで、収縮が膨張に転じる。描いたのは模式的な空間の一部であり、宇宙全体の外から見た大きさではない。細い不均一な線は、摂動が整合した力学のもとで移行を通り抜けなければならない、という主要な条件を示唆する。私たちの宇宙の歴史に、そのような段階があったことは確立されていない。

結合制約の有意義な例があります。ダストのような圧縮後のリバウンドの単一フィールドクラスでは、スカラー摂動の増加によるスカラーパワーに対するテンソルの割合を低減しようとする試みに非ガウス性の増加が伴った。ある観察上の難しさの修正は、別のことを作り出しました。結果は、初期真空、選択した物質とダイナミクスに依存します。それはすべてのバウンスを禁止しません。しかし、なぜパワー、テンソル、三点相関が一緒にチェックされる必要があるかを示しています。[104]

バウンスも無限ループの一部であるとは限らない。圧縮から拡張への一つの移行は、次の歴史のターンについて何も言っていません。繰り返しのためには、追加の条件が必要であり、連続するフェーズによるエネルギーとエントロピーの転送は別の計算を必要とする。最小値を通してスケールファクターを継続する能力は、いくつかの問題のうち一つの問題を解決します。

境界状態と、時間への問い

通常の前時代の検索では不十分なアプローチがあります。量子宇宙論において、幾何学自体は量子記述の一部となる。その後、通常の時間は、概ね古典的な歴史が受け入れられる領域にのみ現れる。より基本的な状態に関する問題は依然として意味があるが、追加の正当化なしに外部クロック上のイベントのシーケンスに変換することはもはや不可能である。

ハートルホーキングの提案は、適当なコンパクトな幾何学への加算を通じて宇宙の波動関数を定義する。波動関数は、可能な幾何学と場状態の量子振幅を決定する。元の定式化では、単純化されたモデルを用いて研究される量子状態を選択する方法である。計算に関わるジオメトリは、実際のプロセスのシーケンシャルなフレームである必要はない。したがって、そのような構成における通常の過去の境界の欠如は、非存在から存在への登録された遷移と等価ではない。[105]

動的理論、許容構成、振幅を計算する方法、観察確率への遷移規則が選択されると、観測予測が生じる。次に、古典的時空の約条件がどの条件下で現れるかを知る必要がある。その後、たとえば、異なる障害を持つ物語の重みを比較することができます。境界提案は、これらの重みと、それらを通じて利用可能な統計を制限する程度に検証可能になる。

ここで言語の有用な規律が生まれます。「創発時間」という表現は、他のすべてのイベントの前に発生するイベントではなく、あるレジームにおける便利な変数の出現を示すこ

とができる。より基本的な量間の数学的関係は、時間的原因と効果の関係である必要はない。「以前の」という単語の意味を保存するためには、まず比較される状態をリンクするモデルに一般的な順序があるかどうかを確認する必要がある。

成功した境界提案でさえ、単一の古典的なストーリーを生成する必要はない。確率分布を指定することができます。次に、この分布とその観測結果に関するテストを行う。空を見た後に最も魅力的な結果を選択すると、テストが弱まります。理論は、所定のルールが与えられたデータを正確に取得することがいかに自然であるかも説明する必要があります。

現在には、どれほどの過去が残るか

ホットステージの前に発生した混乱は、その後の進化を経て、適切な条件下でのみアクセス可能なスケールの範囲に現れます。十分に長いインフレは、観察可能な領域を超えて関心の跡を伸ばすことができます。転送中にいくつかの機能は滑らかになり、他の機能は後のプロセスと混合される。したがって、トレースの欠如はストーリー自体の特性であり、検出器の欠陥ではない。

温度とE偏光スペクトルへのスカラー線形寄与のために、レンズ補正の前に、主な力との関係は次のとおりです。

$$C_\ell^{XY} = 4\pi \int d\ln k\, \mathcal{P}_\zeta(k)\, \Delta_\ell^X(k) \Delta_\ell^Y(k), \qquad X, Y \in \{T, E\}.$$

ここで T は温度を意味し、E は偏光成分であり、ℓ は角スケールを数える:より大きな ℓ はより小さな詳細に対応する。左側のスペクトルは、これらのパターンの力とそれらの相互関係を表しています。Δ関数は、観測された画像に初期外乱を転送する。積分は、多くの元のスケールの貢献を一つの測定可能な数に集める。したがって、最終的な測定セットは生のスペクトルを制限しますが、そのすべての詳細を明らかにしていません。二つの補償スペクトルの物理的許容性は、別の証明を必要とする - 補償の数学的可能性だけでは不十分である。

最大の角度では、宇宙の分散が追加されます。私たちは、利用可能な単一の空のモッドの数に制限があります。ノイズの完全な除去は、同じ宇宙の追加の認識を作り出しません。偏光は情報を追加しますが、利得はパラメータとその温度との相関によって異なります。したがって、測定量の増加は、前史全体の知識の均等な改善を意味するものではない。[7]

異なる統計間の接続は回復に役立ちますが、それら自身を競合他社と比較する必要があります。構造の起源に関する章では、我々はすでにインフレーション中の音速の変化によって引き起こされるパワーとバイスペクトラムの相関した特徴に直面しました。彼らはリバウンドを必要としません。このような組み合わせは、まず特定の種類の初期力学を示し、縮小する先史時代の結論には追加の区別が必要である。[89]

ここでの知識の限界は正確に定式化することができます。二つのモデルが利用可能なすべてのオブザーバブルの同じ分布を生成する場合、同じデータを処理することはそれらの間で選択されません。出力は、異なる予測をする新しい可観測性や、モデルのクラスに対する独立に正当化された制約である。隠された時代のより詳細な説明はそれ自体では情報を追加しません。

検証するには

実用的なプログラムでは、完全に指定されたリバウンドモデルと特定の非リバウンド競合モデルを選択する必要があります。重力の法則、場、乱れの初期状態とホットステージへの移行を修正する必要があります。リバウンドがインフレに先立つ場合、全体の計算には両方の段階のダイナミクスとその後のインフレの持続時間が含まれます。これらのモデルは比較されており、曖昧な家族は「すべての始まり」と「すべてのサイクル」ではありません。

まず、背景のダイナミクスと障害は遷移を通じて統合される。スカラー力、テンソル力、双スペクトルは一致する作用から計算される。ステップと精度を変更する場合、既知の制限モードで数値解をチェックし、背景に対する外乱の影響を別々に評価する。計算がリバウンド領域で正確に制御を失うと、二つの便利な解の任意の組み合わせに置き換えることはできない。次の結果は遷移ダイナミクスを証明する必要がある。

観測段階は、CMBの温度と偏光のマルチ周波数マップを使用します。スカラトレースは、利用可能なテンソルコンポーネントの制約とともにチェックされる。銀河分布を結合する際に、後期重力双スペクトルと物体選択特性を計算する。初期の特徴の主な競合相手は、銀河放射、キャリブレーション誤差、ランダム変動、代替早期ダイナミクスである。彼らのパラメータは履歴のパラメータと一緒に評価され、最も便利な値で固定されていません。

実際の空を分析する前に、モデルとベーススムースシナリオの両方に対して人工データを作成する。検索全体は同じマスク、ノイズ、パラメータ範囲で繰り返し、誤ったリバウ

ンド嗜好の頻度とトレースを検出する確率を測定する。電源マッチングパラメータが必然的に検出可能な三点信号を必要とする場合、この信号の欠如は対応する実装を妨げる。一つの便利な点だけでなく、残りの有効な範囲全体を確認する必要があります。差が全体の不確実性よりも弱い場合、両方の履歴は達成された精度で保存される。

将来のインストールは、所望の角範囲、周波数純度、偏光精度、または利用可能な空間モードの数という、特定の差分に合わせて設計する必要があります。トレースが因果境界を超えているか、利用可能な分布で完全に失われている場合、機器ノイズを減らすことは問題を解決しない。次の計算は、リバウンドパラメータとその後のインフレーションの長さに応じて、残りのパラメータと干渉の再評価による識別可能性マップである。トレースが保存されているがまだ弱い場所、選択した観察チャネルに識別情報が含まれていない場所を示す。

第14章

時間に向きがある理由

寒い部屋では、加熱した金属棒が冷めます。容器の半分から放出されるガスは、利用可能なボリューム全体を満たします。検知器に吸収された光は、読み取り可能な記録を残します。これらのプロセスにより、過去の過去と未来を物理的なトレースで区別することが可能になる。一方、多くの機械モデルの方程式は、運動の反転シーケンスも許容する。なぜ逆過程はマクロの世界では珍しいのでしょうか?

質問を投げかけるために、時間を反転させるとき、すべての基本的な相互作用を厳密に対称として考える必要はない。力学が可逆的であり、その振る舞いが明確な方向を持つシステムでは、すでに困難が生じる。宇宙論はそれに別の問題を加えます:なぜ世界の初期の状態は、その後の不可逆的な変化の大きなマージンを可能にしたのですか? 答えは、私たちが議論している情報の種類によって異なります。

同じ巨視的な特徴をもつ、異なる状態

温度、体積および圧力によってガスを記述することは、不特定多数の分子の位置と速度を残します。そのようなマクロ状態の一つは、集合的に測定可能な特性によって定義される状態であり、多くの異なるマイクロ状態と互換性がある。統計的記述において、エントロピーはこの集合のサイズと関連している。最も単純なボルツマン記法では

$$S_{\mathrm{B}} = k_{\mathrm{B}} \ln \Omega.$$

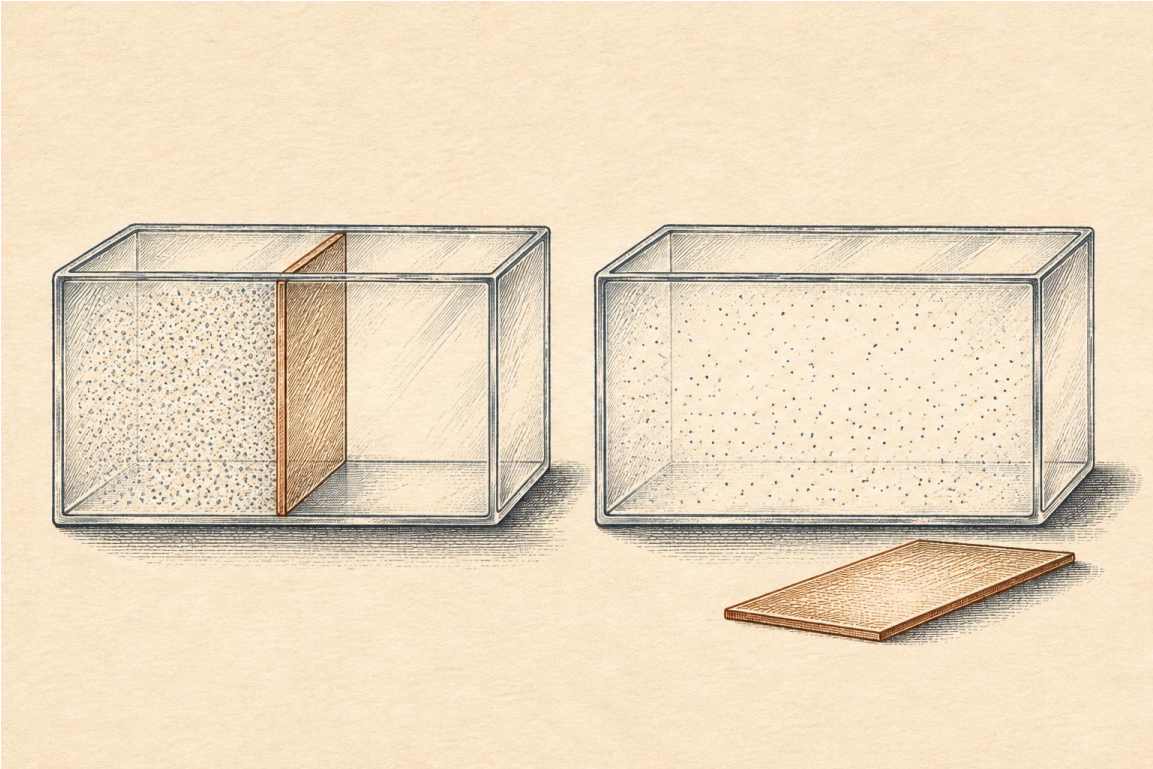
量Ωは、選択したマクロ状態と互換性のあるミクロ状態の数または状態空間における対応する適切に正規化された体積を示す。ボルツマン定数は対数を物理単位に変換する。どの特性が固定されているかは重要です:エネルギー、体積、粒子数およびその他の制限は、正確に比較されるものを決定する。「雑然と」という言葉は家庭的なヒントとして機能しますが、この定義を置き換えるものではありません。

理想的な気体は、最初に絶縁容器の半分の分配によって含有されるようにする。その除去の後、各分子が利用可能な体積は二倍になります。N 粒子の場合、空間変種の数は N 倍に二倍になり、平衡エントロピーの対応する変化は二の対数の N ボルツマン定数と等しい。効果は、制限の特定の除去に関連付けられています。ガスは、この計算が意味をなすためにより混としたように見える必要はありません。

この場合、可逆的な顕微鏡の動きは、容器の元の半分に関する情報を破壊する必要はありません。それらは、従来の圧力測定では識別できない座標とモーメントの複雑な相関に格納できる。すべての必要な動作と接続が信じられないほどの精度で反転した場合、逆プロセスは考慮中のモデルでは許容される。典型的なマクロ製剤はそのような調整を提供しない。したがって、実用的な可逆性は基礎となる方程式の可逆性と互換性がある。

しかし、統計的な議論には初期条件があり、ガスは当初コンテナの半分に閉じ込められていた。特別な準備なしに通常の均衡状態を選択すると、常にエントロピーが著しく増加するストーリーは得られません。典型的値の周りの平衡変動が期待できる。したがって、より確率の高いマクロ状態に向かって移動する傾向を説明し、特別な初期マクロ状態の起源を説明することは二つの関連するが別々の問題である。

選択したマクロ量によって区別されないこのミクロ状態の組み合わせは、記述の粗大化と呼ばれます。相互作用と観察時間に応じて分割が選択される。多くの速いプロセスが安定した集合的記述を可能にするため、温度は有用である。条件が変更された場合は、その適用性が残っているかどうかを確認する必要があります。容器内の気体から宇宙全体への熱力学的単語の転送には、特に注意を払う必要があります。



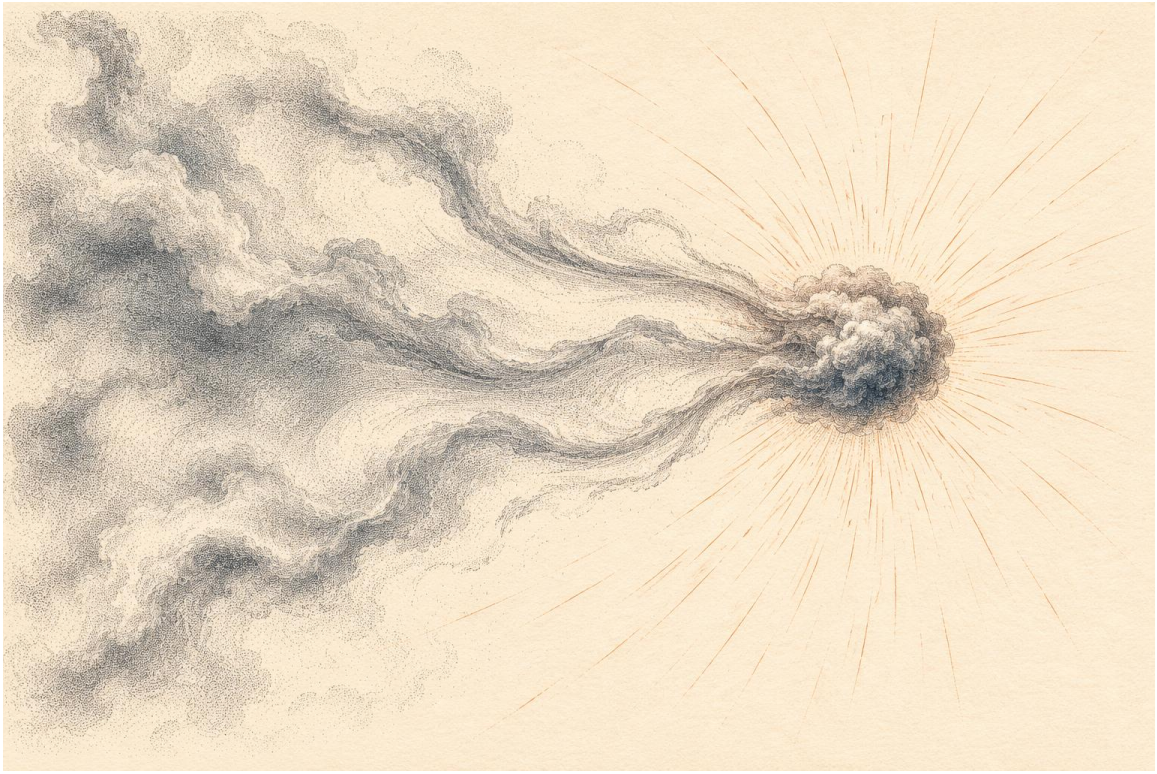
図版 17. エントロピーと、取り除かれた制約。仕切りは、気体が取りうる空間的な状態を制限する。取り除くと可能な状態の数は増えるが、可逆な微視的力学が、準備についての情報を必ず失わせるわけではない。分子は模式的な点で表した。この図が扱うのは容器内の気体である。同じイメージを宇宙へ移すには、系と制約を別途定義する必要がある。

高温の始まりが、特別な状態かもしれない理由

初期のプラズマは多くの局所過程において熱平衡に近かった。これは、それがすでに可能な限り高いエントロピーを持っていた印象を作り出すことができます。しかし、ある粒子群の局所平衡は、重力系全体の平衡と等価ではない。重要なのは、単一の温度計で小さな領域を記述する際に考慮されない物質の空間分布、幾何学および自由度である。

重力は特異性を持ち、十分に大きなほぼ均質な系が凝縮に向かって進化し、エネルギーを放出する。雲が収縮すると、物質自体のエントロピーは減少し、訓練された放射線は全体のエントロピーの増加を保証する。したがって、幾何学的により組み立てられたオブジェクトは、システムとその環境とともに低エントロピーの結果であるとは限らない。重力が物質の統計に与える影響と、重力場の本質的な自由度を区別することが基本的に重要である。[106]

彼らが宇宙の低い初期エントロピーについて語るとき、それらはより広い許容状態とその後のプロセスに対する初期の状態の特殊性を意味する。熱い、ほぼ均質な物質は、まだ構造を形成し、エネルギーを放出し、大きな温度差を維持することができる。「すべてのエントロピー」の数は、システムの定義と比較の尺度を必要とします。単一の重力エントロピーを宇宙論的時空にすぐに割り当てる普遍公式は一般に受け入れられていない。



図版 18. 物質の凝集と、外へ流れるエネルギー。重力による収縮の際、物質は周囲へエネルギーを渡しながら、よりコンパクトな構造へ集まることがある。そのため、物体の見かけの秩序だけでは、系全体のエントロピーは決まらない。この図版が示すのは、その定性的な意味に限られる。任意の宇宙論的時空に適用できる、重力エントロピーの普遍的な尺度を仮定しているわけではない。

拡大それ自体も熱力学的矢印の定義ではありません。熱交換せずに可逆膨張の間、その密度と温度は減少するが、選択したコムービングボリュームのエントロピーを維持することができる。圧縮モデルでは、不可逆的なプロセスは物理的履歴と同じ方向に継続することができる。Hの記号を変更すると、自動的に熱が戻らない。リバウンドまたはサイクルと矢印を和解させるには、状態と遷移の特定の理論次第です。

インフレーション平滑化は、特定の領域の性質を説明するのに有用であるが、それ自体はその初期状態の確率を確立しない。可逆力学において、複数の変数の図形における軌道の収束は、他の自由度の違いの保存を伴うことができる。キャロルとタムは宇宙史の尺度

を通じてこの問題を探究した。それらの推論は、結論が状態空間と測定方法に依存することを強調しており、そのような分析からの特定の巨大または小さな確率を、宇宙の誕生の一般に受け入れられた確率と見なすことはできない。[107]

初期条件の有意義な理論は、どの状態が許されるか、どのように比較するか、そして観察された歴史が選択した重みを受け取る理由を知らせる必要がある。低エントロピーが単に境界条件に書き込まれるなら、これはモデルの公正で有用な部分である。しかし、その後の成長の説明は、それゆえに境界条件それ自体の説明にはならない。後者が追加の身体的動機と明確な結果を受けた場合、プロモーションが可能となる。

デコヒーレンスと、記録の向き

量子記述は、別の違いを追加します。完全閉状態のエントロピーと選択された部分系のエントロピーは、異なる対象を指す。密度行列 ρ は、測定結果の確率が導出される量子状態の数学的表現である。システム全体とその選択した部分の両方を記述することができます。フォン・ノイマンエントロピーは、次のように書かれています。

$$S_{\mathrm{vN}}(\rho) = -k_{\mathrm{B}}\,\mathrm{Tr}(\rho \ln \rho).$$

シンボルTrは、括弧内の行列式の対角要素の和を意味します。閉量子系の通常の進化は可逆的であり、ユニタリと呼ばれる。密度行列の固有値を保持し、したがってこの式における総エントロピーを保持する。サブシステムの状態は、記述から環境変数を除外することによって得られる。そのエントロピーは周囲と絡み合うと増加するが、全体のエントロピーは同じままである。任意の系と任意の初期状態に対して、そのような成長は単調である必要はない。

純粋な量子状態は単一波動関数によって記述でき、選択された系の混合状態を単一の波動関数に還元することはできない。さらに、純度は低エネルギーを意味しません:純粋な状態は非常に興奮することができます。外乱の力を測定することは、密度行列全体を再構築するものではありません。したがって、余分な小規模電力を自動的に過剰な初期エントロピーの測定とは呼べない。そのような結論に達するためには、理論は測定された相関関係をエントロピーの特定の定義に関連付ける必要がある。

デコヒーレンスは、環境と接続した場合の代替手段間の観察された干渉を抑制します。異なる状態は、観測されていない自由度において異なる痕跡を残す。アクセス可能なサブシステムの場合、これは古典的確率論的記述を良い近似にすることができる。Zurek氏の仕

事では、デバイスと環境との相互作用により、どの記録状態が安定であるかが決定される。ここでレコードは、特別なオブザーバーの存在ではなく、測定装置の状態などの物理的相関を意味します。[108]

初期の摂動に対して、デコヒーレンスは量子統計が古典的歴史への入力として使用できる理由を説明するのに役立つ。計算は与えられた状態と環境との特定の相互作用から始まる。選択した記述の下でどの相関がアクセスできなくなるかを示し、古典的絵への遷移の一部を説明する。初期状態の特殊性は、この計算のために別個の条件のままである。

Nayeriの2026研究は、半古典的枝の拡大と収縮を検証した。採用されたインフレスキームでは、関連する環境状態の違いが枝間の干渉をいかに抑制するかを計算する。著者は、この過程を量子境界条件によって指定された重みと分離する。結果として生じる矢印は、分岐内の粗い記述を参照し、特別な初期状態に基づいている。これは、任意の状態からの低初期エントロピーの推論ではなく、与えられた条件に対する定量的結果である。[109]

宇宙論の提案の検証は、これらのレベルを結びつける必要がある:初期条件の規則は統計を設定し、その後のダイナミクスはそれを観察されたトレースに転送する。二つの境界ルールの区別は、この転送が信号の違いを保存する場合にのみ利用可能になる。これが、時間の矢印の議論が、エントロピーに関する一般的な単語から測定可能な特定の放射線に私たちを導かなければならない理由です。

熱史と、アクセスできる範囲

水平線は独自の熱力学的構造を発達させる。ギボンズとホーキングは、正の宇宙定数を持つ不適切な宇宙幾何学は、地平線を温度およびエントロピーにマッピングすることができ、検出器が熱応答を有することを示した。これは、特定の条件下での半古典的結果です。システムを定義することなく、地平線、物質、絡み合いのエントロピーを明らかに独立した三つの貢献として追加する権利は与えられません。[110]

ホット履歴に関する章で議論されているCMBの周波数スペクトルは、初期のプラズマにおける不可逆的なプロセスへのアクセスを提供する。FIRAS測定は、そのほぼ平衡形の基準試験を提供する。初期状態のどの違いがこのスペクトルに識別可能なトレースを残すことができるのか? ここで観測される量は、放射エネルギーの周波数分布です。[111]

小規模の音響障害のエネルギーはプラズマ中に放散し、熱に変換することができます。完全な熱平衡を復元するプロセスがもはや十分に効果的でなくなった場合、そのようなエ

ネルギー放出はスペクトル歪みを残します。それらは、特に、異なる周波数形状を持つμおよびy成分によって記述される。初期の段階では、同様のエネルギーの放出は全体の温度だけを変えることができ、ほとんど区別できる残りは残らない。したがって、スペクトルは熱履歴の特定のウィンドウを探索する。[112]

このような測定は、選択した初期状態が外乱から放射線にエネルギーを転送するプロセスをテストする。矢印の起源の仮説との関係は、その境界規則が必要な振幅と乱れの形を予測した場合に現れる。これがなければ、私たちは熱履歴を調査していますが、まだ初期条件の説明をテストしていません。したがって、次のステップは計算可能なスペクトルトレースを持つ限られた例を構築することである。

熱の痕跡の地図

平均スペクトル歪みは、特定の履歴ウィンドウにどれだけの熱が保持されたかを知らせます。しかし、同じ平均値が空を横切ってこのトレースの同じ分布を必要としません。μ歪みがわずかに大きい方向は、CMBの大規模温度不均質性に関連するかどうかを問うことができる。この接続は、スペクトルの単純な平均化によって消える長波と短波の比率に関する情報を追加します。

その理由は、音響減衰によるμ歪みが、小さな外乱のエネルギー、すなわち振幅における二次値に関係しているからです。温度異方性も長い波を追跡します。長い波が短い波の力を変調すると、これらの二つの観測場は相関する可能性がある。PayerとZaldarriagaは、μ-Tと一次双スペクトルの関係を非常に細長い極限で示した: 一つの波が長く、他の二つは短い。これは、本書で紹介した新しい効果ではなく、確立された理論的提案です。[113]

μ_{lm} による歪み写像の球面調和と a_{lm}^{T} による温度写像を示し、相互角スペクトルの通常の定義を得る。

$$C_\ell^{\mu T} = \frac{1}{2\ell+1}\sum_{m=-\ell}^{\ell}\left\langle \mu_{\ell m}\, a_{\ell m}^{T*}\right\rangle .$$

角指数lは空のパターンのサイズを決定し、アスタリスクは複素共役を意味し、ブラケットは統計的アンサンブルの平均を示す。実際の推定器は、マスク、ノイズ、および角モードの混合をさらに考慮しなければならない。非零平均 μ はそれ自体では $C_l^{\mu T}$ を決定付けない: 二つの初期状態は同じ総エネルギーを放散し、その空間パターンを長い波に異なる関係付けることができる。

したがって、以前のプロジェクトは、特定の状態のペアで拡張することができます。最初の一つは、ほとんどガウス摂動が指定され、二つ目は長波と短波の間の通信の事前選択された弱いパターンを持つ。点対点力と平均歪みは、指定された精度に一致する。期待されるμ-T相関は、全一次双スペクトルと転送から導出される。結合は有限個の固定パラメータを持ち、摂動理論の制御性を維持する必要がある。データの表示後に相関をランダムに描画しても、初期ルールはチェックされません。

単純な人工的な例は、計算チェーンをテストするのに有用である。独立したガウス長体と短体を見てみましょう。ある場合、ショートフィールドは変化せず、第二では、その振幅を長いフィールドに弱い依存する値で掛け、再び平均パワーを正規化します。これら二つの構造は同じ短波の分散を保持することができるが、その局所エネルギーと長い波との異なる相関関係を得ることができる。これは、平均スペクトル歪みの等式が空間接続の問題を閉じない理由を説明する。

この構成は、初期状態の物理モデルの置き換えではなく、プログラムへの制御された入力として機能する。まず、コードは理想的な場合に指定された接続を復元し、変調を無効にすると生成しない必要があります。次に、熱伝達、角分解能制限、実世界のノイズを導入する。科学的な推論では、人工入力は選択されたダイナミクスと初期規則から得られる双スペクトルに置き換えられ、パワーと平均μの対応は同じ精度で再度チェックされる。

この提案は計算可能な問題を特定するが、まだ時間の矢印の物理的な起源を選択していない。このような接続を得るためには、対応する仮説からの初期条件規則が実際に選択されたパターンを生成する必要がある。この結論は得られないが、統計的状態の識別性について検討している。肯定的な結果はどの性質が放射線にアクセスできるかを示し、宇宙の総エントロピーを測定しず、境界条件の一意性を証明しない。

主な実験的危険性は、再構成されたμマップへの常温異方性の漏洩である。そして、その温度との相関は、はるかに強い温度場からの刺激的な貢献を含む。RemazeiとHlubaは、このような漏洩を明示的に抑制して成分分離を調査し、予測における前景の重要な役割を示した。必要なのは、一つの平均スペクトルの正確な測定ではなく、マルチ周波数マップです。[114]

また、μ と偏光 E-成分の相関も計算できる。その診断能力はRemazei、RavenniおよびHlubaによって研究された。しかし、第二プロットの存在は自動的にテストを独立にしない: μ写像の温度漏洩は通常のTEスペクトルによってEと相関し、周波数校正と前景の一部

が一般的である。インクリメンタルチャネルの利点は、共同共分散と処理全体の現実的なシミュレーションによって評価されなければならない。[115]

非均一なエネルギー放出は、独自の歪みの空間パターンを生成することができる。したがって、選択した一次テンプレートに対して、競合する後期貢献と既知の搬送効果を別々に計算する必要がある。「相関はゼロでなければならない」という単純な要件は粗すぎる。必要なベース信号を切り替えた後、追加部品の特定の振幅と角度依存性をチェックします。

検証するには

限られた設計では、与えられた二つの初期状態を同じダイナミクスと比較することができる: 基本的な状態は、滑らかなスペクトルを与え、所定の小規模帯域で追加の励起を持つ状態である。これらは時間の矢の二つの既製の理論ではありません。これは、初期条件の特定の結果のテストです。振幅、中心スケール、帯域幅は、選択した状態規則または所定の範囲から従わなければならない。大規模異方性モデルの適合を同時にチェックする。

まず、これらの乱れのエネルギーがいつどの速度で放散されるかを計算し、次に熱過程を考慮して最終周波数スペクトルを計算する。基本的な予測には、すでに歪みの標準源が含まれています:追加の貢献がチェックされ、理想的な黒体からの逸脱がない。エネルギー放出の異なる履歴は、同様の最終スペクトルを与えることができる。したがって、観察を設計する前に、選択した状態と競合するエネルギー源を実際に区別する形状の詳細を計算する必要がある。

絶対分光計と温度標準を備えた測定回路は、ホットヒストリーに関する章で説明されています。現在の問題では、初期状態の違いは各周波数チャネルの信号の違いに変換される。放射温度、キャリブレーション、天体物理成分は両方のモデルに修正される。残りの差は、チャネルの結合誤差行列と比較され、それらの総誤りを考慮に入れます。これにより、必要な精度が決定される:同様の一次状態は、熱伝達とノイズ調整後にデバイスでほぼ同一になる可能性がある。

最も危険なのは、基準誤差、温度のドリフト、周波数応答の不正確さおよび残留天体物理放射である。実験では、スペクトルの既知の小さな差に対する応答を確認し、ノイズとともにモデル信号を人工データに導入する必要がある。粒子崩壊やガス加熱など、エネルギー放出の代替源と比較されます。この評価後の残留差が校正によって吸収されないように、周波数と精度のセットが選択される。

選択した初期状態が必然的にデバイスに利用可能な歪みを生成する場合、そのような貢献の信頼できる欠如はパラメータを制限する。検出は、周波数形式と競合する過程をテストする必要がある。それは初期の宇宙の完全な量子純度を決定するものではない。最も近い計算は、干渉と熱消去を考慮して、その振幅、中央スケールおよび幅に応じて追加の励起を検出する確率のマップである。検索の前に誤検出しきい値を設定する。このような地図では、チャネル感度を選択し、スペクトル測定に別の独立した観測可能なトレースが必要な場所を示すことができます。

プロジェクトを空間的に拡張するには、同じ平均歪みを持つ二つの状態の区別可能性マップという、二つ目の別々の結果が必要である。μ–Tを計算した後、マルチ周波数人工マップが作成され、温度漏洩、キャリブレーションの不確かさおよび前景が追加され、データで使用される同じアルゴリズムを使用して相関が復元される。周波数セットとマスクを変更すると、望ましい効果は生まれません。状態の固定された非ゼロバージョンに必要な観測可能な相関関係が、テストした感度で存在しない場合、そのバージョンはテストに失敗する。両方のバージョンが区別できない場合、結果は与えられた観測チャネルの限界と追加の測定のための要件を設定します。

IV. 基礎構造

第15章

「どこ」は何からできているのか

部屋は空間の最も信頼できる例のようです。ドアを指差し、窓までの距離を測定し、テーブルと壁の間を歩くことができます。そのような経験では、オブジェクトは位置を変更しますが、「どこに」自体は既製のコンテナのままです。空いているスペースを想像しても、私たちは通常この部屋を保ちます。しかし、物理的な理論は、すでに建てられた部屋から始める必要はありません。それはより難しい質問を引き起こすかもしれません:どの関係が最初に近接性、距離および方向を決定することを可能にするか?

前章では、なぜイベントが時間内に特定の方向で歴史に発展するのかを尋ねました。幾何学はすでに説明に含まれています。距離と近接性をイベントにアトリビュートできる理由は何か? 測定された距離は元のデータのままです。説明すべきことは、それらが書かれた言語そのものの安定性です。

場所の指定から幾何へ

三つの空間次元は、選択した瞬間におけるイベントの局所位置が三つの独立した座標を必要とすることを意味する。座標を変更することができます:カルテシアングリッドを球状に置き換え、別の参照点を選択します。これは独立した方向の数を増加させません。相対性理論において、時間座標は空間座標に追加されるが、時間は因果構造において特別な役割を果たす。四次元の時空は、説明なくして、もう一つの通常の運動方向を持つ部屋として描かれることはできない。

状態空間の次元は全く異なる意味を持つ。通常の空間における二つの粒子の位置を示すためには、六つの数が必要である。モーメントを知る必要がある場合、パラメータの数は二倍になります。人間に利用可能な十二の方向は、このことから生まれません。私たちは部屋の新しい側面を発見するのではなく、システムの説明を拡張しました。ヒルベルト空間は、量子状態が記述される数学的空間である。その次元はそのような記述の可能性を特徴付け、それ自体が空間方向の数について何も語らない。

座標は幾何学を定義するのに十分ではありません地図の二つの部分における同じ数の差は、異なる物理的距離に対応することができる。座標差を定規と時計の読み取りに変換する規則、つまりメートル法が必要です。一般的な相対性理論では、エネルギー分布は幾何学に影響を与え、幾何学は物質と光の動きに影響する。ここですでにスペースは動かない装飾で停止します。しかし、幾何学量は理論の元の言語にまだ含まれている。

新たな幾何学は、より強力な可能性を意味する。ある理論の初期変数は、慣れ親しんだ空間における点を記述することはできず、滑らかな幾何学はある状態とスケールに対してのみ現れる。温度のアナロジーは有用です。分子が熱力学的に記述されるためには、分子の集合に自身の温度は必要ない。類推は言語を変える論理的可能性を示しているが、どの空間が作られるかは定まらない。顕微鏡変数と幾何学への遷移はまだ示されていない。

ここで「発生」という言葉は、必ずしも時間内の出来事を意味するものではない。もし大規模言語が深い言語から派生しているなら、それは記述間の関係であるかもしれない。私たちは、元の要素がすでに待っていて、スペースがまだ集まっていなかった初期の時代を想像する義務はありません。連続するエポックについて話すためには、まずどの変数がシーケンスを計測しているかを決定する必要があります。したがって、時間の起源に関する問題は、三次元の絵を多次元の絵に置き換えるよりも難しい。

境界上で体積を記述する

このような言語の変化の具体的な例は、ホログラフィック双対性によって提供される。フアン・マルダセナの提案では、ある種の量子場理論は反ド・シッター空間における重力を含む理論と関連付けられている。双対性の意味は、物理的状態と観測量を二つの記述間で翻訳する能力である。一つはバルク幾何学と重力を使用し、もう一つは低次元境界上の動的重力のない理論として構造化される。[116]

ここでの「境界」は、与えられた構造の数学的部分です。宇宙船が休むことができるのはガラスではなく、システム全体を別の部屋に入れる必要はありません。「ホログラフィー」という単語は記述の関係を示しているが、通常の光学ホログラムは類似点に過ぎない。その中で、光は物体のイメージを復元し、双対性において、あるモデルにおける完全な物理ダイナミクスの対応について論じる。

この着想の力を捉えるため、難しい量子相互作用を扱う問題を考えよう。一方の記述ではほとんど手に負えなくても、もう一方では、ある特定の領域が比較的単純な幾何に対応

する。二つの記述の間を変換することで、それまで計算できなかった量を求められる。双対性の辞書は、一方の状態と測定が、他方のどの状態と測定に対応するかを示す。したがって確かめるのは予測の整合性であり、どちらの記述が「本物」かという問いだけでは、新しい実験は定まらない。

反ド・ジッター時空の幾何は重要である。特有の漸近的な性質をもち、負の宇宙定数と結びつく。観測された私たちの宇宙の履歴には、膨張と後期の加速が含まれる。それを、もとの AdS の構成と言い換えるだけではいけない。2025 年の研究エッセイで、高柳匡は、現実的な宇宙論的時空へのホログラフィーの拡張と、時間の創発の理解を、明確に未解決の課題として挙げている。これは研究の方向であり、私たちの宇宙のモデルを完成させたという宣言ではない。[117]

宇宙論への移動は、初期変数、状態とダイナミクスを決定し、拡大と観測された摂動を再構成する必要がある。幾何学画像の類似性はこれに対して十分ではない。次のステップは特に重要である: ある設計からいくつかの関連する予測を得ることで、そのパラメータを各観測に対して独立して再構成できないようにする。

量子的な結びつきに現れる幾何

二つの言語間の最も正確な橋の一つは、量子もつれと幾何学的領域を接続する。絡み合った結合状態は、その部分の状態の積の統計的混合としても想像できない。完全状態が純粋であれば、選択された部分のエントロピーは、残りの部分との絡み合いを特徴付ける。混合完全状態の場合、同じエントロピーは他の不確実性の源を含む。龍と高柳は、重力的記述の中で、表面積を通して領域のエントロピーを計算することを提案した。適切な静的な定式化では、主要な結果は次の形式です。[118]

$$S(A) = \frac{\mathrm{Area}(\gamma_A)}{4G_N}$$

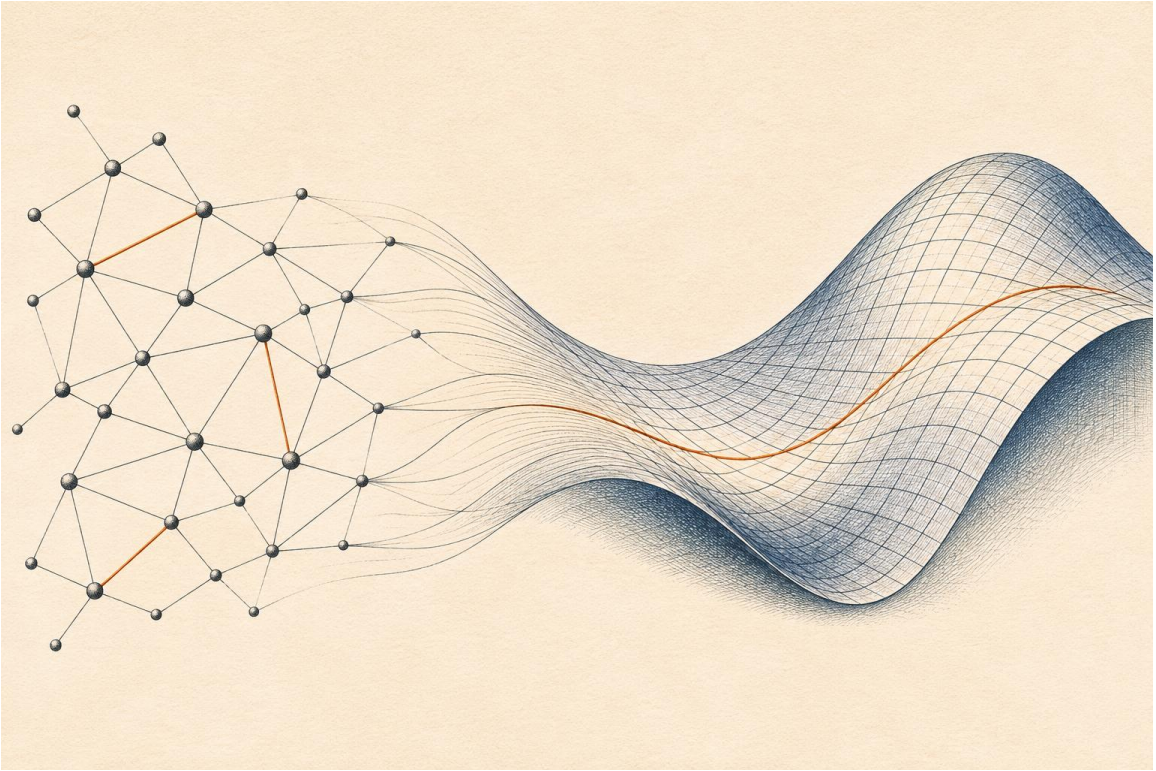
ここで光速、プランク定数とボルツマン定数は一に等しくなる。Aは境界系の面積です。表面γ_Aは体積内にあり、エッジAで終わり、必要な境界条件と位相条件を満たす表面間の最小面積を有する。G_Nは体積の重力的記述を指す。したがって、ナンバレータは領域A自体の領域ではない。我々は、対応の一方側にサブシステムを選択し、他方に幾何学オブジェクトを探す。量子補正と非定常定式化は、この公式の一般化を必要とする。

量子状態の特徴は幾何学的対象になる:量間の接続は顕著である。Mark Van Raamsdonck氏の研究は、対応するシステムの部分間の絡み合いの変化が、体積幾何学の接続性の変化とどのように関連しているかを探求している。考慮中の構造では、特定の量子接続の弱化は幾何領域の分離を伴う。これは、状態構造から空間関係を復元する能力に関する議論である。[119]

しかし、「より絡み合いの少ない距離」という声明は、普遍的なルールではあまりにも粗すぎるでしょう。量子状態には多くの異なる相関関係があり、エントロピーは全ての幾何学を決定付けるわけではない。どのサブシステムが識別されているか、どの演算子に対応しているか、どの州のどのクラスにスムーズなボリューム記述があるのかを知る必要があります。接続された量子ビットの任意のネットワークは、まだ小さな空間宇宙にはならない。

一連の測定に基づいて地図の再構築を想像すると便利です。都市間の複数の距離は、異なる場所を可能にする可能性がある。ホログラフィック問題では、初期データの役割は特定の量子特性によって果たされるが、互換性の問題はまだ残されている。結果として得られる幾何学は複数の可観測性を一度に説明しなければならない。相関関係ごとに独自の地図を描く必要がある場合、統一された物理的再構成はありません。

空間再構成プログラムは、ある量子状態が安定距離を許す理由を説明する必要があるが、一方では滑らかな幾何学パターンを持たない場合もある。テストは、同じジオメトリを再構築するための異なる方法の合意です。これは、量子状態を「情報の空間」と宣言するよりも、はるかに具体的なタスクである。



図版 19. 量子的な結びつきから幾何学的な記述へ。特定のホログラフィーの構成では、状態の量子的な性質が幾何学的な量と結びついている。結びつきのネットワークから滑らかな面への移行は、記述の変化を表す芸術的な類比である。任意の量子ビットのネットワークが、自動的に空間になるわけではない。定められた力学、対応関係の辞書、そして同じ幾何学を再構成する複数の方法の一致が必要になる。

蒸発と、部分系のエントロピー

ブラックホールは、幾何学と量子情報を特に緊密に結びつける。ホーキングの半古典的計算は、ブラックホールの背景に対する量子場の放出を予測する。流れがエネルギーを流す場合、幾何学パラメータは変化しなければならない。同時に、個々の観察された流れの熱性は、まだ完全な状態のすべての相関を決定するものではない。このような相関関係は、蒸発を量子的および幾何学的記述の一貫性のテストにする問題である。[120]

純粋に量子的な事実から始めましょう閉系が純粋状態にあり、二つの部分に分けられる場合、それらのフォン・ノイマンエントロピーは等しくなる。ある部分が減少すると、他の部分との任意のより絡み合いを保存できない: その能力は状態空間の次元によって制限される。Don Page氏の典型的な純粋な状態に関する研究は、この評価の定量的基盤を提供する。これはサブシステムに関する議論であり、それ自体が本当のブラックホールのダイナミクスを決定するものではない。[121]

また、二種類のエントロピーを区別する必要がある。熱力学的エントロピーは、粗い記述と一致する様々な微小状態を記述する。選択した量子サブシステムの正確なエントロピーは、残りの部分との相関に依存する。したがって、第二の削減は、選択されたマクロプロセスに対して、負の発熱や通常の法則の違反を必要としない。「ページ曲線」を描く前に、どのシステムが識別され、どのエントロピーが計算されているかを示す必要があります。

ホログラフィックアプローチは、曲面の重力的寄与と対応する辺上の量子場のエントロピーという一般化されたエントロピーを用いる。エンゲルハルトとウォールは、この和に対して定常な量子極曲面を探すことを提案した。まず、必要なホモロジー条件を持つ許容極端が発見され、次に、最も低い一般化エントロピーを持つ適切な極端が選択される。これは、任意に描画された表面上の最小化ではありません。[122]

アルムヘイリ、エンゲルハート、マロルフ、マックスフィールドの具体的なモデルを選ぼう。ディラトンを伴う二次元のジャッキーヴ＝タイテルボイム重力を、1+1 次元の共形場と結合する。初期の両側ブラックホールには、境界の量子系 L と R があり、重力をもたない補助的な熱浴 B は、最初は基底状態にある。R と B の結合を有効にする。補集合 L∪B に対する R のエントロピーを調べる。この区別は重要である。定義からして、熱浴だけのエントロピーと等しいわけではない。[123]

この研究で採用されたディラトン正規化に対して、候補Xは一般化エントロピーを持つ:

$$S_{\mathrm{gen}}(X) = \frac{\phi_0 + \phi(X)}{4G_2} + S_{\mathrm{CFT}}(\Sigma_{RX}), \qquad \delta_X S_{\mathrm{gen}} = 0.$$

ここで使用されるユニットは $\hbar$=c=kB=1です。領域 ΣRX は、X と対応する境界点の間を通過する。定数 ϕ_0 は位相的寄与を指定する。この二次元の記述における「領域」はディラトンによって表される; 二次元の表面の通常の領域として読み取ることはできない。発表された計算では、量子極端曲面の枝間の遷移は増加し、後に最初の過渡過程の後の選択エントロピーが減少する。これは必要な放射線相関の導出ではなく、情報問題に対する完全な解決策ではない。[123]

ペニントンの独立した研究は、蒸発するブラックホールの説明と情報回復における量子極端表面変化の重要な役割も示した。結果の類似性は、この幾何学的機器の研究を支持する。しかし、幾何学手順と顕微鏡的情報復元機構は異なるレベルの記述のままであり、それらの間の合意は与えられたモデルに対してチェックされなければならない。[124]

サブシステムの定義は、我々のイラストの重要な制限を意味する。計算の途中でRをBに置き換えることはできず、同じ曲線を名前で保持します。この交換により、密度行列の減少と表面の問題が変化します。また、示されるエントロピーが必ずしもゼロになる傾向があることを要求することも不可能である: 左系と最初の相関関係および残余セクタの存在を考慮に入れなければならない。これは、方程式の数値解の前にも、定式化によってチェックされる。

研究を継続するために,非常に具体的な計算タスクを提案する。選択したJTモデルでは、初期状態の温度、フィールドの中心電荷、ディラトンパラメーターおよび浴室との通信をオンにするプロトコルが固定されている。次に、幾何学と場に対する解を再現し、各瞬間にすべての許容定常点Sgenを独立して探索する。プログラムは、優勢と非優勢の両方の枝を維持する必要があります。さもなければ、あるアプローチから始まった検索は遷移そのものを見逃す可能性がある。

次の制御は、クリッピングに対する感度と適用範囲です。磁場エントロピーと重力パラメータへの短波長寄与は、一つの手順で調整しなければならない。計算解像度を変更すると、指示された誤差よりも遷移が移動しないことが検証される。接続がオンになっている速度は変化し、物理遷移は短い状態準備効果から切り離される。各グラフに対して、半古典的記述がまだ信頼できる前提条件のリストが保存される。

より強力な検証には、同じモデルまたは制御されたアナログの独立した顕微鏡的特徴付けが必要である。その場合、選択したサブシステムのエントロピーは密度行列から直接計算され、幾何学的予測と比較される。一つの描画された曲線の偶然は十分ではない:同じ初期条件、相互作用およびサブシステムを選択するための規則が必要である。実験シミュレーションは、この説明の特定の関係をテストします。それはそれ自体が天体物理学のブラックホールにデバイスを回すことはありません。

宇宙論にとって、この計画の価値は方法にある。幾何学的な境界、量子部分系、利用できる情報は、出来上がった部屋のイメージから想像するより、厳密に結びつけられる可能性がある。ただし、宇宙論的な地平線に結果を適用するには、状態、境界、観測者を定義し直す必要がある。外部の熱浴が自動的に現れるわけではない。本書は、次に行う研究の問題設定を示している。ページ曲線を独立に計算したり、その測定実験を行ったりしたわけではない。

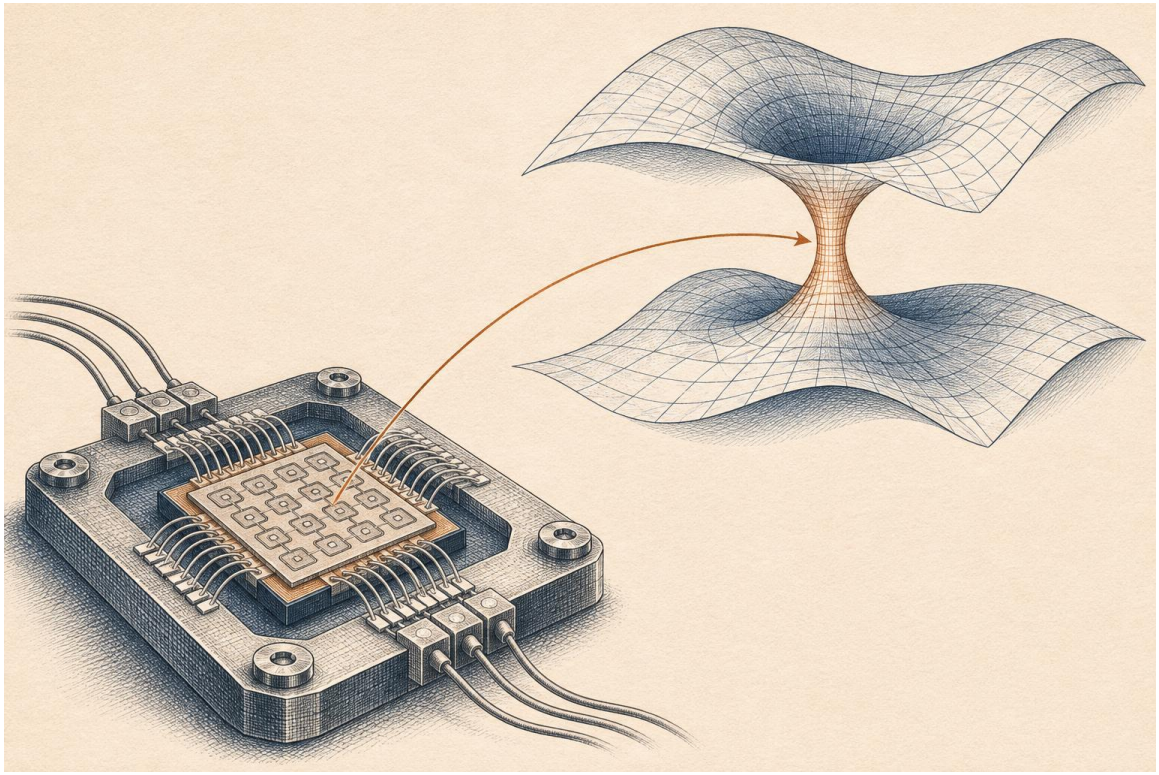
実験の記述に現れるワームホール

2022では、Jafferisらの研究は「量子プロセッサ上のトラバーサブルワームホールのダイナミクス」と題されました。実験は特別に選択された量子モデルを実装し、重力解釈が提案されたプロトコル内の情報の転送を調査しました。量子自由度はプロセッサで制御されました。実験室の遠隔地の間に空間トンネルは作成されなかった。[125]

電子機器上の流体の流れを計算することは、水をトランジスタに流すことを強制しません。量子シミュレーションは古典的に計算するのが難しいダイナミクスを再現できるが、幾何学的解釈に移行するには双対性の語彙が必要である。この辞書は、実験室の結果が重力的記述で何を意味するかを定義するものです。

七月2025では、NatureはKobrin、ShusterとYaoの重要な仕事とその実験の著者たちの反応を発表しました。重力力学のどの特徴が実際に小さな特別に選択されたモデルに保存されているか、そしてテストされる演算子が変化したときの安定性について論じた。選択された特徴の偶然は、物理機構全体の複製を保証するものではない。[126] [127]

シミュレータは状態と相互作用を制御し、モデルに適合しない条件に変更を加える。これにより、意味のあるテストが作成される: 二つの記述間の接続は新しい測定のために保持されるだろうか? 選択したプロセスを正常にチューニングすることが、その実験の出発点となる。



図版 20. 量子シミュレーターと幾何学的な解釈。量子プロセッサーを使うと、状態を準備し、相互作用を制御し、相関を測定できる。幾何学的な描像は、特定のモデルの力学の解釈に関わる。装置とその模式的な数学表現は分けて描いた。この実験は、実験室内に空間のトンネルを作るものではない。モデルの調整に使っていない新しい測定を行うことで、検証を強められる。

検証するには

創発幾何学の場合、対応の両側が明示的に指定される問題から始める必要があります。量子進化を決定するエネルギー作用素であるハミルトニアンと、状態を準備するための方法と、オブザーバブルを変換する規則が必要です。測定結果間の接続は、システムの異なる部分または異なる瞬間に相関関数によって記述される。モデルを選択する際にどのモデルが使われ、どれがテストされるかを事前に記録します。このように、幾何辞書は未だ使われていないデータを予測することができる。

物理セットアップは、再現可能な操作と読み取り相関を持つ量子シミュレータである。小さなシステムは、まず直接数値解に対してチェックされる。自由度、相互作用、局所摂動は変化し、予測される応答時間と相関性をテストする。エントロピーが測定から再構成された場合、この再構成の誤差も比較に含まれます。サイズ依存は重要であり、滑らかな幾何学体制が現れる前に、いくつかの量子ビットのパターンが変化する可能性がある。したがって、システムが増加するにつれて検証効果がどのように変化するかを計算する必要

があります。バリデーションセットには、選択された瞬間の新しい測定値だけでなく、新たな進化時間が含まれます。

受け入れられた幾何学的解釈のないテストモデルは、チューニングで使用される機能を再現し、検証データで競合しなければならない。これにより、新機能の特質を知ることができます。準備、読み込み、制御エラーは両方のモデルに同じ方法で含まれています。デバイスの独立したキャリブレーションは、研究中のダイナミクスの損失と症状に対する感度の損失を分離するのに役立ちます。

肯定的な結果は、検証されたモードで特定のマッチをサポートします。ネガティブなものは、選択した実装、再構築、安定性の仮定にエラーを示します。どちらの場合も、結論は検討された量子モデルを指す。私たちの宇宙の構造について声明を述べるためには、別々の物理的な橋が必要です。

まず必要な計算は、検証用の相関関数を、不確かさ、系の大きさへの依存性、あらかじめ選んだ非ホログラフィックな競合モデルとともに予測することである。宇宙論へ進む次の独立した段階では、同じ構成から、測定可能な宇宙の効果を導く必要がある。たとえば、パラメーター間の関係を固定した、特定の初期相関の形である。この橋ができるまでは、調べているのはモデルの仕組みである。結果を正確に述べるなら、それだけでも本格的な物理学として十分である。

第16章

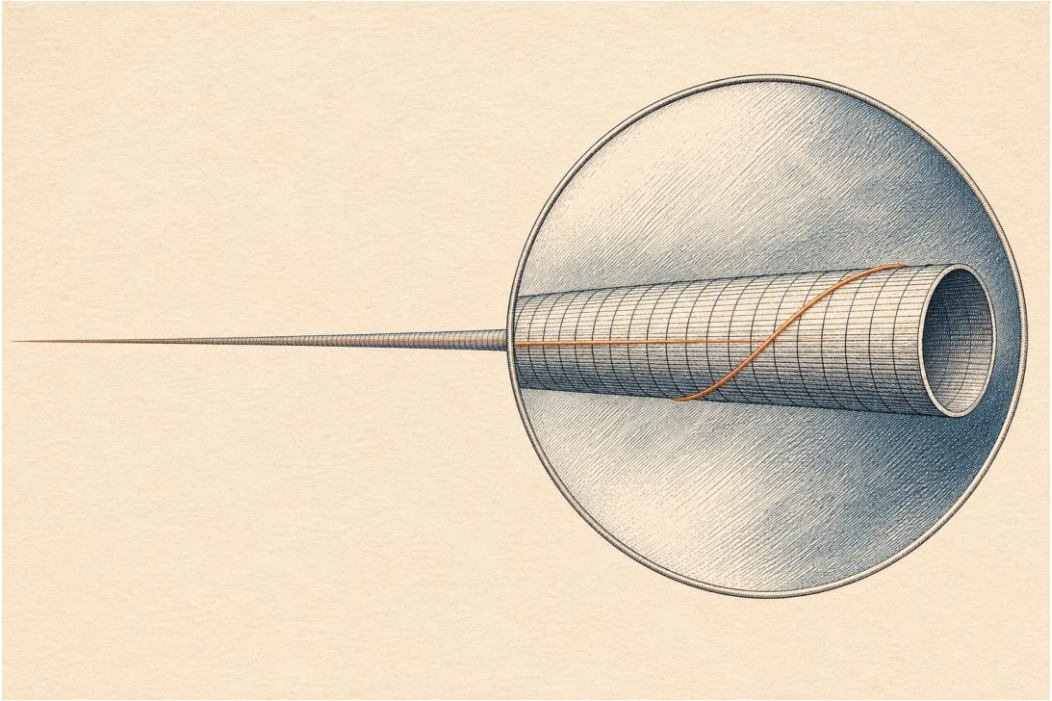
余剰次元

既存の方向の隣に置くのが習慣なので、追加の寸法を正確に想像するのは困難です。私は頭をひっくり返して、世界の別の面を見たい。しかし、物理的な仮説はそれほど壮観ではないかもしれない。新しい方向は、力の微妙な変化、粒子質量の特定のシーケンス、または恒星核内のエネルギー損失として検出することができる。幾何学は、直接描画できなくても、ダイナミクスの痕跡を残します。

新たな幾何学に関する章の後、それは設定を変えることが重要です:今我々は量子状態の空間の次元についてではなく、追加の物理的方向について話します。私たちは一つの単純な例を選択し、ジオメトリから実験室、加速器および星核までの結果を追跡します。

もう一つの方向は、どこへ行ったのか

非常に薄いシリンダの表面を想像してみてくださいその周囲を見分けることができる生物のために、二つの方向があります:シリンダーに沿ってそしてそれの周りに。半径よりもはるかに粗い測定値を持つ観察者には、表面はほとんど線として現れる。二つ目の方向はここでは消えていません。それに対する動きへの感受性は消えました。これは、有能な空間方向の数が実験の解像度にどのように依存するかの精神的な例である。



図版 21. 分解能に隠れた方向。細い円筒を、隠れた方向の類比として用いる。分解能が粗いと円筒に沿う運動が見え、より細かく調べると、周囲を回る運動も見える。この図は、得られる記述が測定の尺度に依存することを説明する。余剰次元の確立された構造を描いたものではなく、余剰次元の存在に外部空間が必要だとしているわけでもない。

コンパクトな次元も、似た数学的原理に従う。その方向へ進むと、出発点へ戻る可能性がある。ただし、円筒の図像が必要なわけではない。コンパクトな空間は、固有の距離と同一視の規則で定まり、曲がりを外から眺める領域は必要としない。大きなエネルギーが必要になるのは、隠れた扉が閉まっているからではない。小さな方向に沿った励起には、特定のエネルギーの費用がかかるからである。

Arkani-Hamed、Dimopoulos、Dvaliのシナリオでは、通常ADDと略されるが、従来の物質場はブレーン上に局在し、重力の自由度も追加の方向に拡張する。ここでのブレーンは、モデルによって与えられる低次元の物理構造を示している。この場分布は、観測された重力と他の相互作用のスケールの大きな違いを説明するために提案されている。[128]

この前提は、明らかな質問にも答えます:なぜ余剰次元に行きませんか? 私たちを構成する粒子が局在化されている場合、従来の身体はモデルのフルスペースに任意の移動の自由を持っていません。しかし、「局所化」という言葉はメカニズムに対応する必要があります。フィールドがどのように含まれているか、どのような興奮が許されているか、そして

近似のどのエネルギーで動作を停止するかを説明する必要があります。名前のブレーン自体は、この仕事をしません。

湾曲した追加方向を含む他の設計が可能です。それらは一つの予測に混ざり合うことはできない。スペクトル、粒子結合、力の変動は幾何学と境界条件に依存する。フラットでコンパクトな方向を選択することで、私たちはデータに特定のコミットメントをします。別の幾何学への遷移は許容されるが、それとともに観察された結果を再計算する必要がある。

共通の半径と、その帰結

周期 $2\pi R$ を持つ二つの空間方向と同じ半径 R を持ちましょう。正方形の二次元トーラスを形成する。三つの通常の空間方向と時間とともに、これらは時空の六次元である。ここでのトーラスは幾何学の隠れた部分のみを指し、観測された三次元空間全体の閉さに関する問題は次の章では別の話題となる。

コンパクトな方向に沿って進む波は、一周した後に自身と整合しなければならない。そのため、許される運動量は離散的な集合になる。隠れた方向の運動エネルギーは、観測者が通常の座標だけで記述しても保存され、その観測者にとっては粒子の静止エネルギーに含まれる。こうして、四次元の質量が異なる状態である、カルツァ・クラインのモードが現れる。もとは質量のない六次元の場と、選んだトーラスについて、ħ=c=1 の単位系では、

$$m_{k_1,k_2}^2 = \frac{k_1^2 + k_2^2}{R^2}, \qquad k_1, k_2 \in \mathbb{Z}.$$

ゼロモードは、隠れた方向における運動量の欠如に対応する。最初の励起は整数格子によって結び付けられた質量を持つ。レベルは同じ質量を持つことができます:反対方向の動きと異なる軸に沿った動きは多重性を与えます。半径を小さくすることで、同時にスペクトル全体を増加させます。同じモデルを維持しながら、実験室力の便利な半径と天体物理学のための異なるファーストモード質量を独立に選択することは不可能です。

重力の尺度の関係は、理論を通常の座標へ帰着させる同じ操作から生じる。隠れた二つの方向について積分すると、その総体積に等しい因子が現れる。四次元の換算プランク質量を M^{-}_{Pl} と書き、六次元の重力作用の係数を質量 M^{-}_{6} によって定めよう。この章では、さらに $M_D=\sqrt{(2\pi)}M^{-}_{6}$ と定義する。すると、

$$\bar{M}_{\rm Pl}^2 = (2\pi R)^2 \bar{M}_6^4 = R^2 M_D^4.$$

このM_Dの定義は、他の人の制限を読むときに覚えておく必要がある:異なる論文は、2π と減少したプランク質量に関する異なる慣例を使用している。物理学は変わらないが、テラ電子ボルトの数は変わる。まず結合の半径、状態質量と大きさを比較し、その結果を選択した正規化に変換することがより信頼性が高い。これらのパラメータは、測定されたプロセス速度に含まれています。

Rよりも大きい距離では、通常の長距離重力が優勢である。大量モードは急速に崩壊する貢献を追加します。最も簡単なレベルは湯川補正のように見えるかもしれません:質量に逆比例する範囲を持つニュートンポテンシャルへの指数関数的に減衰する付加。その強さは、レベルの多重性と物質との相互作用に関連する。Rスケールに近づくと、以下のレベルが重要となります。完全なプロファイルは、スピンとスカラーの自由度にも依存するため、自由に選択された指数関数は通常それでは不十分です。

そのような測定の実際の例があります。Liらの実験では、静止したねじり検出器が回転アトラクターと相互作用し、それらの間の距離は52マイクロメートルから3ミリメートルまで変化する。データはニュートン重力によってよく記述されている。95パーセントの信頼度を持つ著者によって与えられたマイクロメートル極限38,6は、重力相対力との湯川相互作用の範囲を指す。任意のコンパクトな半径の普遍的な限界ではありません。[129]

仮定した十テラ電子ボルトの場合の検証

本書の規格化に M_D=10 TeV と $M^{-}_{Pl}=2{,}435\times10^{18}$ GeV を代入しよう。R≈4,805 マイクロメートルとなる。最も軽い非零モードの静止エネルギーは ħc/R に等しく、およそ 0,041 eV になる。尺度の差は巨大だが、矛盾はない。十テラ電子ボルトは、選んだ記法における重力相互作用の係数を特徴づける。一方、電子ボルトの百分の一程度の値は、大きなコンパクト化半径で決まるスペクトルの間隔である。

この点は計算の例として有用である。自然に許されたとすぐに呼ぶのは間違いです。加速器では、検出不可能なKK状態の生成は、可視ジェットとともに損失の横運動量として現

れる。同様のATLAS検索では、期待されるバックグラウンドプロセスから大きな逸脱はないことがわかった。結果のM_Dリミットへの翻訳は、余分な寸法の数と効果的な計算の適用範囲によって異なります。[130]

異なる検索は、ADDの異なるバリエーションをテストします。例えば、2026で発表されたCMSモノフォトン分析では、三次元から六次元が追加された。その結果は、スペクトル密度と予測プロセスの速度が変化する二次元隠れトーラスの新しい限界として直接記述できない。[131]

星は、さらに高感度な検証手段になりうる。一つ一つの KK モードの相互作用は弱いが、高温の核では多くのモードを励起でき、エネルギー流出への寄与が足し合わされる。それらが核から出ていけば、冷却が変わる。ハーディ、ソコロフ、スタッブスは、KK グラビトンの生成経路を追加して、これらの過程を計算し直した。ほぼ同じ大きさの二つのトーラス状の次元について、超新星 SN 1987A に基づく保守的な評価は、最初の KK 質量尺度が、およそ 0,6 eV を下回らないことを要求する。限界は、高温の物質の性質と、エネルギーが逃げる条件に依存する。[132]

同じ規約では、これは R がおよそ 0,329 マイクロメートル以下、本書の M_D がおよそ 38,2 TeV 以上であることを意味する。この二つの値は、もとの天体物理学的な評価を換算して得たもので、観測を新たに分析した結果ではない。したがって、仮定した 10 TeV という点は、この検証の前提が成り立つ範囲では条件を満たさない。将来、数マイクロメートルの距離でしか力を測れない装置ができても、この最小モデルについて、新しい自由な探索範囲が自動的に得られるわけではない。

他の制限は、KK状態の捕獲と崩壊生成物による中性子星の加熱を用いる。ここでのより強い制限は、寿命と減衰チャネルに関する追加の仮定を必要とする。HannestadとRaffeltの分析には、著者の修正バージョンが不可欠である。減衰を変えると、冷却制限を維持しながらこのチャネルを弱めることができます。両方のプロセスは一つのモデルで再計算する必要があります。[133]

半径が一定である必要はない理由

これまでは、R は問題の条件に記された定数のように見えていた。本格的な多次元理論では、コンパクトな幾何学の大きさと形は、モジュライという動的な場に対応する場合がある。その場合には、なぜ半径が選ばれた値の付近に保たれるのかを説明しなければなら

ない。対応する場が十分に軽く、通常の物質と結合していれば、追加の力を生む可能性がある。幾何学の安定化は、技術的な注記ではなく、観測と比較するモデルの一部になる。

したがって、モジュライ、その質量と結合、励起履歴および宇宙論的影響の可能性をKKスペクトルに追加しなければならない。ADDおよびダーク次元安定化作業は具体的な設計を提案するが、スカラー力、モジュライ占有確率、補正制御の問題は検証の一部である。「余分なスカラーが抑制される」というフレーズは、計算の結果であり、その置き換えではありません。[134]

ここでは、8章との関連があります。ダークディメンションの方向では、彼らは光の塔と一つの比較的大きな追加次元で小さな暗いエネルギーを接続しようとしています。この関係は、追加の理論的仮説に基づいている。進化する半径は、宇宙力学と暗いセクター質量の変化を結びつける可能性がある。しかし、一つの半径と二つの等しい半径は、利用可能な状態の密度が異なる異なるモデルである。n=2の数値制約はn=1に転送できない。[135] [63]

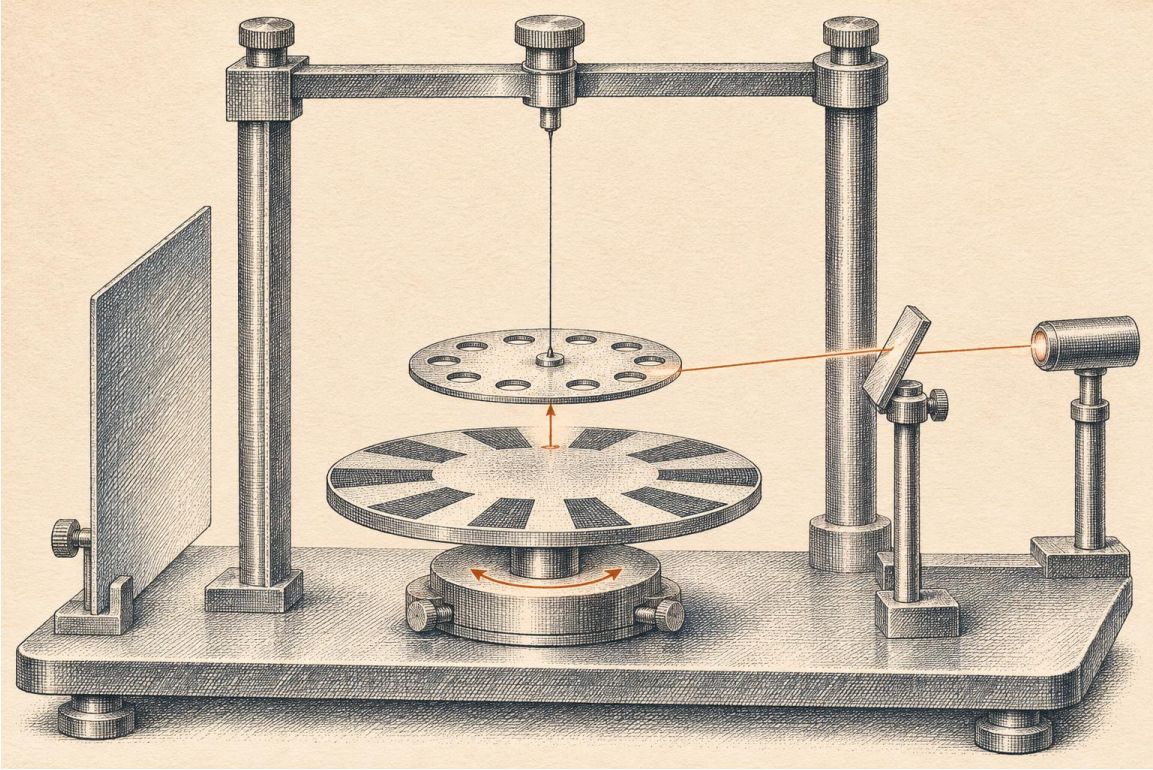
このアプローチの強みは、結果のコヒーレンスです。一つの半径は、実験室の力と恒星の冷却に関わるスペクトルを定義します。実験ごとにスペクトルが独立して変化すると、この試験可能な接続は正確に破壊される。

検証するには

試験対象は完全に定義されるべきである: 二つの等しいコンパクトな半径、物質の局在化、KK状態のスペクトル、それらの接続と安定化セクタ。まず、選択した天体物理および加速器の制約と互換性のあるパラメータ範囲を計算する。各制限について、適用条件は別々に記述される。したがって、実験室が本当にさらに探索できる領域は明確になり、物理モデルを変更せずに自由として表現できなくなる。

実験では、ねじりまたはマイクロメカニカル検出器と既知の形状のアトラクターを使用します。相互作用の計算は、厚さ、穴、隙間および傾斜を考慮して、体の実際の密度に従って統合される。アトラクターが回転すると、そのパターンは力の変化の周波数を設定し、対応する応答の振幅と位相を比較することができる。その後、検出器の機械的応答が考慮される。これにより、スペクトル予測は、複数の距離や構成で相関できる特定の機器信号に変換される。

主な競合相手は、電気表面の不均一性、残留電荷、磁気モーメント、および量子電磁揺らぎ力である。ギャップの独立した測定、材料やコーティングの変化、スクリーンの制御と異なるアトラクターパターンで繰り返しが必要です。信号周波数自体は重力を証明しない:同期干渉はまた、インストールの動きに従っている。ニュートンモデル、一つの新しい大規模フィールドと与えられたKKタワーは、同じハードウェア記述によって比較される。



図版 22. 短い距離での力の測定。ねじりを使う測定の模式図。つり下げられた感応素子が、近くの引力源と相互作用する。物理的な予測は、すき間、物体の形状、表面の性質に依存する。この図は、短距離で働く寄与を実験室で探す原理を示す。装置の設計図ではなく、細部が達成済みの感度や余剰次元の証拠を示すものでもない。

一つの特性長を持つ正の信号は、余分な次元の存在をまだ証明しない: 同様の力は通常の新しい場によって作成することができる。より強力なテストは、同じ質量と結合に関する独立した制約とともに、複数のコントリビューションの一貫した形式になります。それでさえ、他のスペクトル説明の比較が必要になります。ゼロの結果は、実験が十分な感度を持つ半径と接続の領域のみを除外する。空間がどんなスケールでも三次元であることを立証するものではない。

次の計算では、いくつかのKKレベルと一つの指数補正が、体の平均値と表面を考慮に入れた後に区別できるかどうかを決定する必要があります。最小ギャップは特に重要である:

Rよりもかなり大きい距離では、短距離貢献が強く抑制される。すべてのまだ解決された信号がノイズの下である場合、これはこのインストールの機能の結果です。次のステップは、感度を変更するか、別の明示的に定義されたモデルを選択することです。

第17章

空間は閉じることができるか

スペースがエッジを持たないためには、無限に続ける必要はありません。この声明は言うのは簡単で、あなたの心にとどまるのが難しい。私たちは、外側から歩き回ることで物体の有限性をチェックすることに慣れています。しかし、空間全体の幾何学は、経路の継続のための内部距離と規則によって指定することができる。外部バイパスは、単にタスクの一部ではありません。

前の章は隠れた追加方向を閉じました。さて、問題は通常の三次元空間に関連している: その部分がどのように全体に接続されているか? 小さな三角形の幾何学と光の伝搬の局所的な規則を知っているかもしれないが、十分な長い経路が空間全体を移動し、元の領域に戻ることができるかどうかはまだわからない。これは、局所幾何学と宇宙トポロジーの違いです。

壁がなくても有限でありうる

球の表面は、エッジのない有限領域の見慣れた例を提供する。表面だけに生息する生き物にとって、移動は崖で終わりません。外から球面を見るのが便利ですが、内部の幾何学はそのようなビューなしで決定することができます。宇宙論において、アナロジーは、我々の宇宙がより大きな球の中の二次元の殻であるという文字通りの記述よりも、有限の可能性を指す。

通常の絵にさらに抵抗する例があります。正反対の面を持つ平らな四角を想像してみましょう写真の右端に達した後、パスは左から続きます。上部が下部に接続されています。描画自体は境界を持っていますが、説明されている空間には境界がありません。縁に沿った線は、地図の便宜のために作ったカットです。モデル内には壁もなく、縫い目もなく、特別な物理的なイベントもありません。

三次元バージョンは、対で識別される反対側の面を持つ立方体領域から得られる。三次元トーラスです十分に小さな近傍では、通常のユークリッド幾何学を持つ。任意の直線が正確に閉じる必要がないにもかかわらず、移動が開始点に戻る方向があります。紙に見える立方体は宇宙容器ではなく、反対側は同じ場所を表しています。

これにより、曲率とトポロジーが分離される。カーバチュアは局所幾何学の関係を記述する。トポロジーは、領域のグローバル接続と可能なパスクラスを定義します。ゼロ空間曲率は無限ユークリッド空間とコンパクトトーラスの両方と互換性がある。したがって、「観測された幾何学は平坦に近い」という結果は、それ自体が「宇宙は無限である」という意味ではない。ある性質を別の質問への答えに変換するべきではない。

拡張もコンパクトさに矛盾しません。基本領域の座標サイズが L である場合、単純な均質モデルにおける物理サイズは aL として変化する。総体積は増加するが、壁は外側の空隙に移動しない。すべての小さな測定定規は、対応する非コンパクトモデルと同じ局所幾何学の対象となる。違いは、フィールドのかなり長いパスとグローバルな特性に現れます。

閉じた空間パスは過去の旅ではありません。光は移動するのに時間がかかります、そしてこの時間の間に宇宙が変わります。さらに、コンパクトさの事実は、光が利用可能な歴史内の空間を移動する時間があることを保証するものではありません。観測段階のサイズ、拡大、年齢は、グローバル接続が私たちにとってアクセス可能なトレースを残すことができるかどうかを決定します。

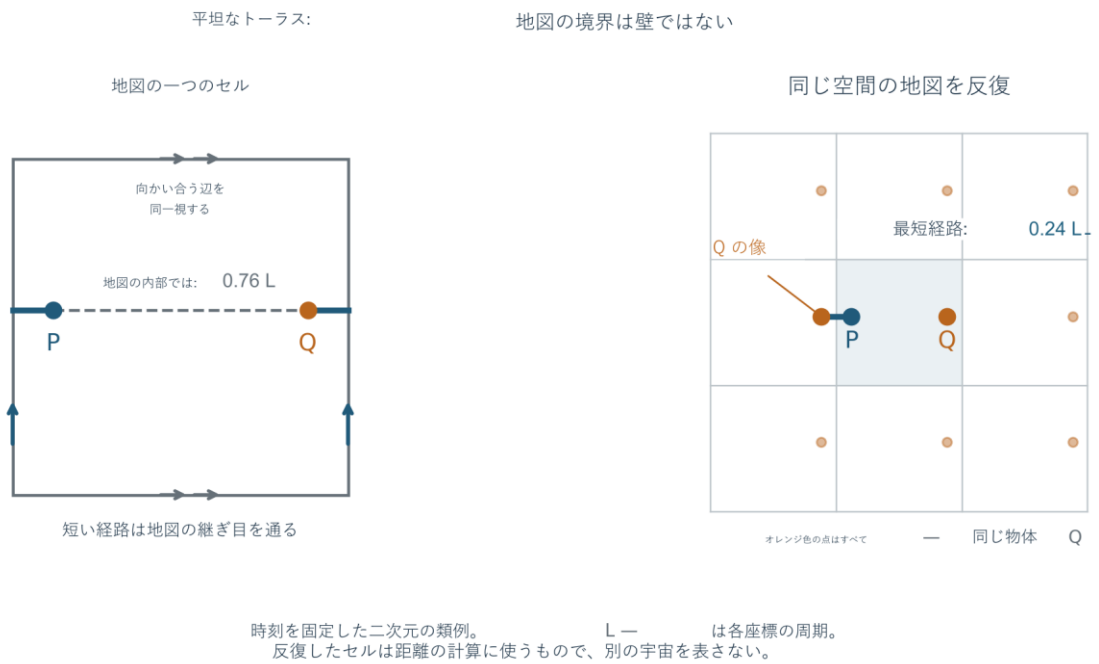


図6。コンパクト空間の類似体としての二次元平面トーラス:平方写像の反対側が同定される。繰り返しマップは、新しい物理的なオブジェクトではなく、一つのオブジェクトの画像を表示します。選択した点に対して、最短経路は 0,24L であり、座標縫い目と交差する。図は、外部空間に埋め込まれた表面を描いていません。

複数の方向に見える、同じ一つの光源

ある物体からの光が、異なる位相経路に沿って我々に届くと、物体は複数の方向に現れる。これは多くの画像に似ていますが、鏡は必要ありません。数学的記述では、基本領域を乗算し、そのコピーを通して直接光線を描くことが便利である。コピーは計算として機能します:それらは追加の物理的銀河や独立した宇宙ではありません。

そのような捜索には難点がある。異なる経路は通常、異なる排出時間を意味します。一つの銀河は、異なる角度から、異なる明るさで、発達の異なる段階に現れる可能性がある。したがって、同じ空の写真を探すことは、アイデアの弱いバージョンです。ソース、カタログ選択、光路幾何学の進化をモデル化する必要がある。明らかな二重の存在は、コンパクト空間を直ちに放棄することを許さない。



図版 23. 同じ光源の二つの姿。コンパクトな空間では、異なる光の経路によって、同じ光源の像が複数見える場合がある。経路にかかる時間が異なれば、その光源の異なる進化段階を、異なる方向から見ることになる。二つの銀河の姿は模式的なものである。探索の難しさを説明しており、発見された位相幾何学的な像の対でも、宇宙が閉じていることの証明でもない。

より厳格な可能性は、放射線を放出することによって得られる。理想化された絵には、最後の散乱の球面が見えます。識別空間において、この曲面がその位相的交点と交差する

と、交点が円を形成する。同じ初期の領域は、私たちの空の二つの円に沿って観察されます。Cornish、Spergel、Starkmanは、このような一貫したパターンを使って宇宙トポロジーを探すことを提案した。[136]

単純な平坦な場合、中心間の距離が$2\chi_{rec}$より小さい場合、同じコムービング半径χ_{rec}の二つの球体は交差する。この条件は、空間の大きさを円を観察する可能性に関連付ける。しかし、共通の初期の領域からの光は異なる方法で到着する。視線への物質の速度の投影、重力ポテンシャルの最近の変化、および最後の散乱層の有限厚さはパターンを変える。したがって、テストは各温度ピクセルが等しくなることを要求するのではなく、予測された統計的合意を探す。

プランクの2015データの解析は、考慮されたトロイダルおよび層状モデルにおいて望ましいコンパクトなトポロジー信号を明らかにしなかった。立方体トーラスの場合、共沈円の偏極探索は、基本領域に記述されている球の半径の下限を生じさせた: 0,97よりも大きい99パーセントの信頼度で最後の散乱までの距離。これは、特定の幾何学と方法の制限です。それは、宇宙全体のサイズが測定されたことや、その無限大が確立されていることを意味するものではありません。[2]

繰り返しから、許される波へ

繰り返し現れる像だけが痕跡ではない。大域的な幾何学は、物理的な場に許される振動の集合を変える。両端を固定した弦には特定の定常波が許される。同様に、周期的な空間も整合性の条件を課す。この類比はスペクトルについてのものであり、素材についてのものではない。宇宙空間が弾性のある弦であったり、機械的な壁をもっていたりする必要はない。

側Lを持つ立方体トーラスの場合、許容される波ベクトルは周期性から従う形式を持つ。これは、16章でKKスペクトルを与えたバイパス後の波のマッチングと同じ原理です。

$$\mathbf{k}_{\mathbf{n}} = \frac{2\pi}{L}\,\mathbf{n}, \qquad \mathbf{n} \in \mathbb{Z}^3.$$

無限平坦空間において、方向と波長は連続集合を形成する。これが格子の出番です。私たちの空に対するその方向は、観測されたパターンの統計的関係に影響を与えます。大きなLでは、許容される波ベクトル間の距離は減少し、アクセス可能な範囲では、トーラスは

徐々に通常の連続的な記述に近づく。したがって、非常に大きなコンパクトな宇宙は、無限の宇宙と実質的に区別できない。

宇宙マイクロ波背景放射では、ある角度スケールのゆらぎの平均パワーだけでなく、それを超える情報を探す必要がある。天空の地図は、球面上の標準的なパターンである球面調和関数に展開される。添字 ℓ は角度スケールを定め、m は同じ ℓ に属するパターンを区別する。それぞれの係数は、そのパターンが地図にどれだけ寄与するかを表す。トポロジーは、もとの統計的に等方なモデルでは相関のない係数どうしに相関を生みうる。m について平均したパワーだけを残すと、これらの関係と、それに含まれる幾何学的情報の一部が失われる。[137]

COMPACTコラボレーションの研究は、温度円が一致しないという具体的な例を示しており、相互相関を用いたトポロジーの探索の余地を残している。これにより、一連のテストは拡張されるが、大きな異常な点を有限空間の証拠にしない。選択した多様体全体の相関パターンを計算し、観測された空との適合性をチェックする必要がある。[138]

より一般的な空間では、同定には回転やその他の変換が含まれる。追加のパラメータが発生し、時にはオブザーバーの位置が重要になる。したがって、相関の計算パターンは特定の多様体に属する。立方体トーラスは透明な構造のため便利ですが、その限界はすべてのトポロジをカバーしていません。

地図を検証する手段としての偏光

偏光は、放射線の電気振動の方向の順序を記述する。反射光では、電子によって散乱されると、入ってくる放射線が一定の角の不均質性を持つときに生じる。その描画は、鏡面反射のための異なる変換規則を持つE成分とB成分に分割される。温度と偏光は一般的な初期外乱によって関係しているが、その進化により異なる。したがって、偏光は温度整合幾何学を検証することができる。[139]

ここで提案する定式化は、温度の地図から始まる。それを用いて、トーラスの許される大きさと向きを推定する。ただし、それぞれの幾何学について、実際に測定された温度の模様そのものも考慮しなければならない。T と E の相関により、その模様は偏光の一部をすでに予測しているからである。新たな検証の対象は、この温度の地図を条件とした E の条件付き分布である。温度解析から幾何学だけを取り出し、観測された温度とは無関係な、まったく新しい天空をその幾何学で生成するだけでは不十分である。

ガウス的記述を持つ各固定幾何学に対して、条件付き予測は、期待される偏光パターンと残りの共分散(散乱の大きさと成分間の接続)によって与えられる。予測は、最もパフォーマンスのよいジオメトリだけでなく、サイズと向きの可能な分布全体にわたってプールされる。結果として生じる分布の混合はもはやガウス的ではない。偏光は、この合同計算に情報を追加します。完全に独立した天国と見なすには、テストの力を誤判断することになります。

COMPACT の 2025 年の研究では、対象とするユークリッド的トポロジーについて、テンソル摂動の相関行列も構成された。その識別可能性の評価には、純粋なテンソル信号の解析が含まれる。現実の天空を扱うには、スカラー摂動、雑音、前景放射を加える必要がある。見いだされた偏光の相関は、選ばれた多様体に関するものであり、立方トーラスでも保たれるとは限らない。[140]

残りは宇宙分散である: 初期確率場の実装を一つ観察し、最大の角スケールでは利用可能なモードはほとんどない。偏光はデータセットを拡張するが、無限個の独立世界を提供しない。インストゥルメンタルノイズを除去した後でも、統計的モデル推論の精度は限られている。[7]

検証するには

最初のテストの対象は、サイズLの立方体三次元トーラス、向き、および一次障害の与えられたモデルである。温度と偏光マップが使用されます。線形ガウス摂動に対しては、温度と温度の関係、偏光と偏光、温度と偏光という共分散が構築される。非常に大きなLの限界では、計算は元の非コンパクトな平面モデルを再現すべきである。この制限は、物理構造とプログラムの両方をテストします。

合成マップには、計器分解能、実マスク、ノイズ、前景周波数成分が重ねられている。スカイバンド自体を外すと高調波が結合するため、すべての競合他社は同じ観察および処理手順を通過する必要があります。周波数と時間分割は、測定器の効果を特定するのに役立ちます。一般的な温度と偏光クリーンアップ誤差は共同共分散に含まれる: 一貫した干渉は、そうでなければ、成功した幾何学予測であるように見える。

温度から幾何パラメータの分布を推定し、E偏光の条件付き予測をチェックする。同じ条件付き予測は、非コンパクトモデル、許容可能な一次異方性、キャリブレーション誤差、物理的偏光回転の各競合に対して構築される。TとEの相関関係の存在は、トポロジーなし

で予測される;トーラスの利点はその特定の構造と残留散乱の正しい予測であるべきである。さらに、選択したサイズが利用可能であれば、一致する円も考慮に入れます。温度によって制限されない競合他社のパラメータは、予め定義された事前分布または独立した外部制約に従って統合される。

多くのサイズと向きを探索すると、ランダムに成功したオプションを見つける。したがって、偏光試験ステップを含む制御シミュレーション全体の探索を繰り返すことで、重要度を評価する。ヌル結果は、はるかに大きなコンパクトな空間の可能性を維持しつつ、検出可能な効果でLと配向の領域を制限する。トーラスは、同じデータ上の代替物と比較して、幾何学の選択で使用されない偏光をうまく予測することで好まれる。

今後の作業は、この共同分析の感度マップです。トーラスと競合他社の予測がどこ異なるのか、宇宙分散や幾何学の不確かさによって違いが失われているのかを示す必要がある。この計算は、エッジのない有限空間の許容性をその構造に関する検証可能な問題に変換する。

第18章

別の宇宙

「別の宇宙」という表現は、私たちが一つの宇宙であると考えるものを説明する前にも印象的です。この単語が物理的な現実全体を指す場合、定義上は外側に二番目のコピーはありません。もし私たちが共通の宇宙史を持つ領域について話しているなら、類似の領域はより大きなパターンの一部かもしれない。存在に関する論争は、言葉の規模がはっきりしない変化から始まることがある。

この章では正確さが必要です。我々は、複数の宇宙領域を生じさせるメカニズム、その確率を計算することの難しさ、および相互作用の可能な痕跡を検討する。アイデアの価値は、観察に対するコミットメントに依存します。観測不可能な世界の数自体の増加は、何も説明しません。

同じ名称で呼ばれる、異なる課題

最も適度な可能性は、光がやってきた領域を超えて私たちの空間の継続です。この場合、同じ低エネルギー物理学を使って、同じ時空にある他の銀河や物質領域について話すことができる。Horizonはデータへのアクセスを制限し、必ずしも世界の構造を破壊するものではない。これはモデルの継続であり、余剰次元やその他の量子法則を必要としない。

前章の位相的反復は異なっている。複数の画像が同じ物理ソースに対応することがあります。基本領域の計算コピーはトレース光線を助けるが、既存のオブジェクトを乗算しない。それらを並列宇宙と呼んで、地図を描く方法をモデルにない新しい物理コンテンツに変えるのです。

永遠インフレーションの宇宙論的多元宇宙論は、初期の加速膨張が異なる方法で、あるいは異なる時間に終わる領域を示唆している。それらはポケット宇宙と呼ばれ、真空崩壊のシナリオでは泡が現れます。これらは、与えられた場と遷移のダイナミクスを持つ宇宙論的構造の一部である。すべてのポケットエリアが別々の壁を持つバブルの構造を持つ必要があるわけではありません。

もう一つの問題は量子論に関するものである。エベレットの相対状態の定式化は、個別の収縮を前提とせずに普遍的量子進化を用いる。現代の博覧会は、異なる結果の一貫した記録で州の統一された枝について議論する。デコヒーレンスは、環境との相互作用が代替

手段に関する情報をその中に分散し、一つのサブシステムを観察する際に利用可能な干渉を抑制することを意味する。このことは記録の安定性を説明するが、この力学自体は量子力学の解釈をまだ選択していない。枝は量子状態の構造を通じて定義され、泡は場の宇宙力学を通して定義される。これらの構成間の関係は、別の理論を必要とする。[141] [142]

識別も検証を決定する。二つの解釈が確率を計算するために同じ規則を使用している場合、それらの確率を用いた実験はそれらを分離しない。例えば、物理的な収縮を導入してルール自体を変更すると、すでに別のテスト可能な動的な状態が設定されている。干渉の観察は宇宙の泡の衝突を証明せず、位相的反復は量子解釈を選択しない。したがって、私たちはさらに、宇宙領域の誕生のメカニズムについて具体的に説明します。

空間はどのようにインフレーションを維持するか

第11章では、インフレは可能な初期段階と見なされ、ホットな歴史のステージが続きます。私たちのサイトのためにそれは完了する必要があります。しかし、局所終了は必ずしもモデル空間全体を通してプロセスの終了を意味するわけではない。一部の地域は通常の進化に移行し、他の地域ではインフレーション体制が持続し、新しい物理的ボリュームを作成します。

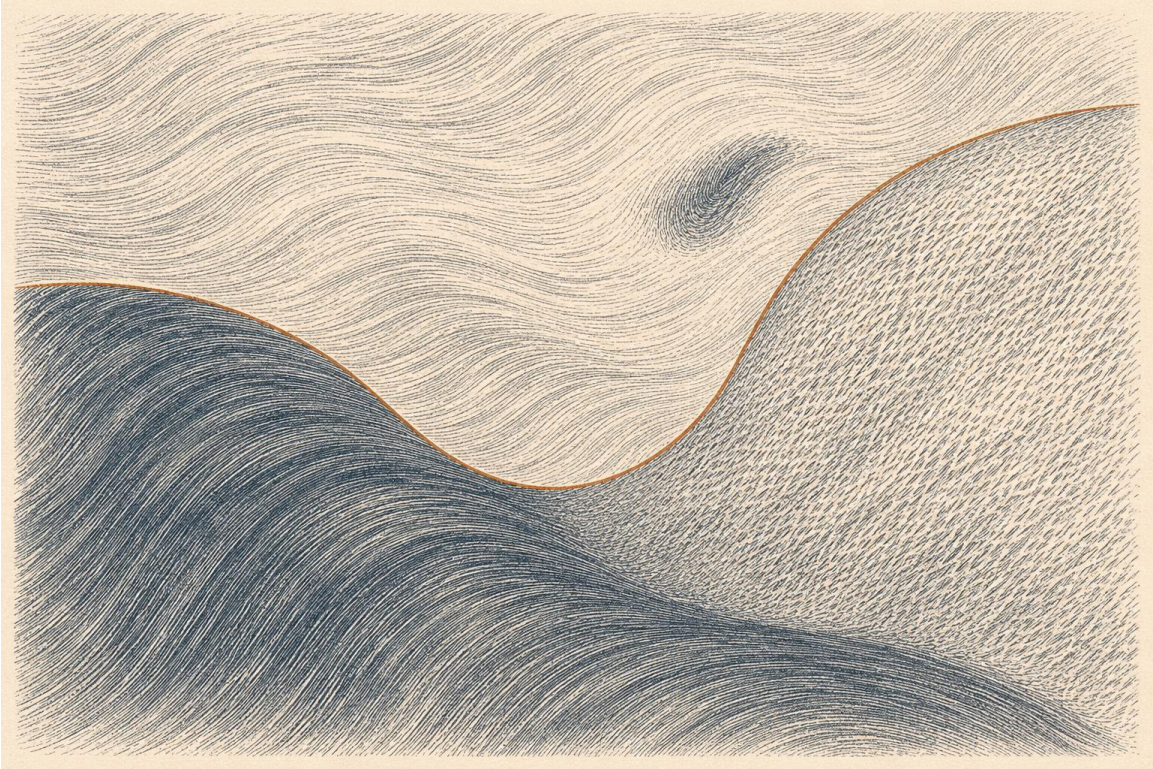
確率的自己再生シナリオでは、インフレーション場の古典的動きは量子変動と競合する。特性的な膨張時間の間に、いくつかの領域ではフィールドはインフレの終わりに向かって移動しますが、他の領域ではその変化はこの出口を遅延させます。拡大を続ける地域の再生が十分に効果的であれば、多くの個々の軌道はすでにインフレ体制を離れていますが、総容積は増加する可能性があります。Linde氏は、作業1986でそのようなメカニズムを探求した。[143]

量子揺らぎの存在自体は、永遠のインフレーションを保証するものではない。必要なものは、ポテンシャルの適切な形式、記述の適用性モード、動的スケールの関係である。私たちにとってアクセス可能な障害を形成する可能性のある可能性のその部分の観察は、その遠い領域を決定する必要はありません。自己複製が想定されるフィールドの継続は、追加の物理的なステートメントです。

もう一つのメカニズムは、準安定または偽の真空を使う: 長期間持続できる状態だが、減衰チャネルを持つ。遷移は、新しい状態の領域の核形成を通じて起こり、残りの背景は拡大し続ける。気泡への体積損失と比較して膨張が十分に速い場合、移行はグローバルに

完了しない可能性がある。ここでは、気泡の誕生と偽真空の体積の増加が競う; 確率的シナリオ - フィールドドリフトと変動。[144]

ここで「バブル」という言葉は、通常の気体や外気を必要としません。フィールドの異なる状態領域と遷移境界を記述する。理論が複数の空白を許すなら、異なる領域は異なる効果的な性質を持つかもしれない。しかし、数学的に許容可能な多数の真空は、それらがすべて人口であることを証明していない:ダイナミクスは、どのような遷移が可能か、どの速度で、どの初期状態から説明しなければならない。



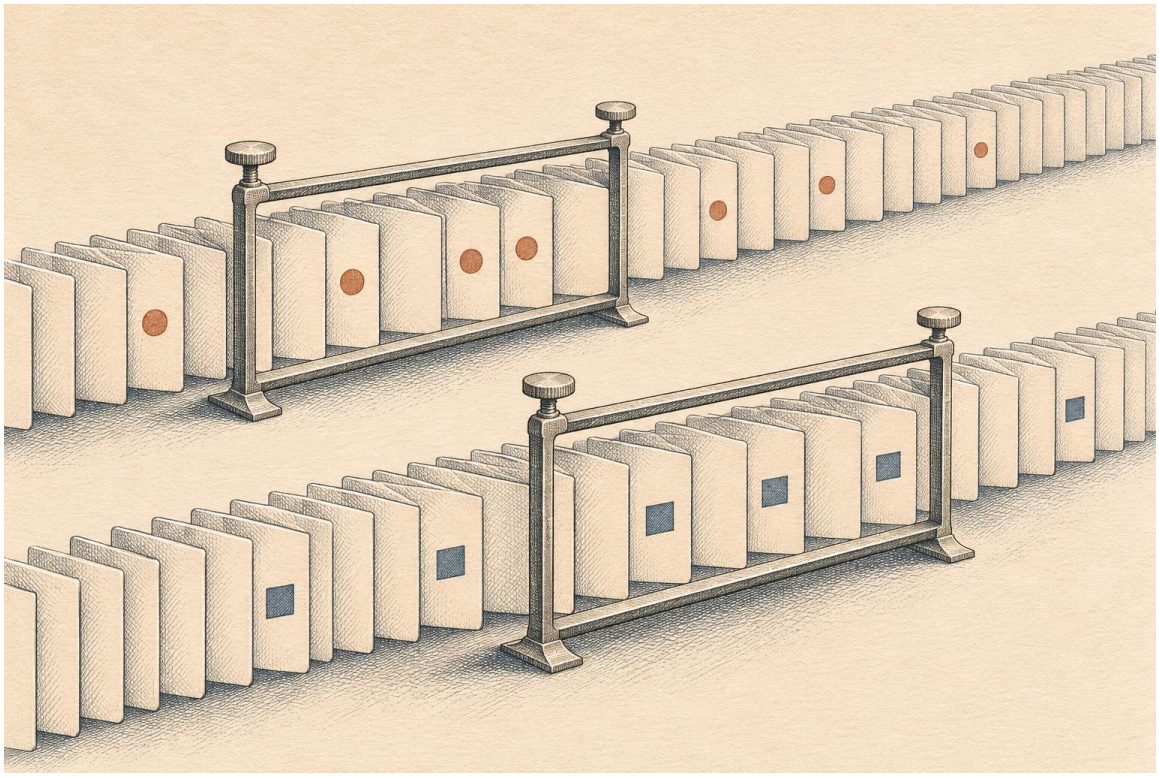
図版 24. 場の状態が異なる領域。泡のシナリオで考えるのは、場の状態が異なる領域と、相転移の境界である。図版では、それらを外部の空気で隔てず、質感の違いで表した。これは仮説的な力学のイメージである。許される状態が複数あるだけでは、そのうち何が、どの確率で生じたのかは定まらない。

最後に、未来の永遠は過去の問題を解決しません。ボルデ・グス・ヴィレンキンの定理は、ある測地線の過去の不完全性を平均拡大に関する仮定の下で確立している。それは絶対的なゼロからすべての出現を証明するものではありません。したがって、自己永続的なインフレーションモデルは、内部の新しい領域の生産が停止しない場合でも、過去の境界の別の記述を必要とする可能性がある。[102]

無限を数えるには

この理論が二種類の領域の無限数を生成すると仮定する。最初のタイプの確率はどのくらいですか? まず、サンプルを構成するものを決定する必要があります:エリア自体、等しく物理的なボリューム、または特定の種類のイベント。そして、それらを比較するための規則が必要です。最終サンプルでは周波数を数え、無限アンサンブルにおいて、二つの無限遠の比率はまだ確率を決定していない。

簡単な数学的例が問題を示しています。赤と青のカードの無限の数のコレクションがあるとします。サンプルを拡大すると、各色の最初のn枚のカードを取るたびに、赤いカードの割合は半分に等しくなります。最初の2n赤と最初のn青色を取る場合、それは三分の二に等しくなります。どちらの場合も、特定のカードはいつか含まれます。無限の総体が消耗する順序は異なります。



図版 25. 無限を数える順序。遠くへ続く二組のカードは、無限集合だけでは数え方が決まらないことを示唆する。有限の標本を拡張する規則が異なれば、いずれはすべてのカードを含めるとしても、異なる割合が得られうる。この図が伝えるのは類比の意味であり、宇宙論的な領域の確率を数値で与えたり、測度の問題を解決したりするものではない。

測定の宇宙論的問題は、この例よりも複雑です。時空を時間面で切り捨てたり、選択した軌跡をたどったり、他の重み付けを導入することができます。成長するアンサンブルにおいて、規則の選択は周波数を変える。例えば、登録の遅延が大きいイベントは、その開始がすでに考慮されているにもかかわらず、カットオフの後ろに残ります。Gut氏とVanchurin氏は、特定のグローバルカットオフでこの依存関係を調査した。私たちの観察の典型性を計算する前に、物理的なカウントルールを選択する必要があります。[145]

この測定は、動的および確率的要件と一貫性があり、特定の結果を生み出し、テストに耐える必要があります。すでに知られている結果を典型的にするルールを選択すると、説明が完成しません。測定の新しい選択は予測構造を変え、独立した正当化を必要とする。

観察選択効果もあります。データは特定の物理的条件下で取得され、記録されたイベントの分布はすべてのモデルイベントの分布と異なる可能性がある。この選択は、銀河を数える際に望遠鏡の感度が考慮されるのと同じように、考慮する必要があります。しかし、選択条件は元の分布を置き換えない。我々の結果がどれほど期待されているかを評価するためには、領域を作成する方法、それらを計量する規則、および検討中のサンプルにインクルードするための明示的な条件が必要である。

「すべてがどこかで実現される」という声明は、この仕事をバイパスします。無限アンサンブルでさえ、状態の限られたクラスしか含むことができない:偶数の無限列は奇数を含まない。そして、許容可能な状態間の私たちの状態の存在は、その確率をまだ示していない。モデルが結果の分布を制約し、データと矛盾するリスクがある場合に説明力が発生する。

別の泡は痕跡を残せるか

ほとんどの地域のアクセシビリティは、個々のトラックのアクセシビリティを排除しません。いくつかのバブルシナリオでは、衝突は後に観測された領域が出現した領域に影響を与える可能性がある。次に、計算は、衝突のダイナミクスと一次外乱、およびこれらを宇宙マイクロ波背景放射の温度と偏光に関連付けるべきである。特定の物理的プロセスの連鎖がチェックされる。

期待されるパターンは、ポテンシャル、衝突幾何学およびその後の進化に依存する。適切な条件下では、特徴的な角領域と結合した温度および偏光応答構造を有する。しかし、

丸みを帯びた点そのものは、特徴的な機能ではない。ランダムな原始場、後期重力効果、地図汚染は、別の宇宙的泡なしで視覚的に珍しい領域を作り出すことができる。

有意義なテストの歴史的な例は、Feeneyらによる七年間のWMAPデータの分析である。著者らは、空全体の探索を考慮しながら、候補を選択し、モデルを比較する手順を構築した。得られた結果は、元の宇宙論にバブル衝突を追加する必要はありませんでした。これは、特定のパターンとパラメータの制限の一例であり、永遠のインフレーションを観察するものではありません。[146]

衝突の2015連結数値モデルによるその後の研究は、温度と偏光伝達関数に結びついている。そのような関数は、その進化と投影を考慮して、観測された空のパターンに外乱の初期空間プロファイルを変換する。測定利得も宇宙分散によって制限され、基本的なパラメータの導出は採用された宇宙論に依存する。その論文の数値予測は、別の設定に適用される前に新しい計算を必要とする。[147]

結果は二つに分かれている。データに基づいて、事前に定義された観察パターンのパラメータを制約することができます。これを宇宙論的メカニズムに関する結論に変換するには、どのくらいの頻度で、どのパラメータがそのようなトレースを生成するかを知る必要があります。説得力のある出会いでさえ、最初にアクセス可能な因果履歴でイベントを認証します。アンサンブルの無限の継続は、大域力学に関する別の推論のままである。

検証するには

具体的な研究計画は、泡の遷移について一つのモデルを選ぶことから始まる。ポテンシャル、初期状態、衝突のパラメーター、その後のインフレーションの履歴を指定する。それらから摂動と、観測可能な温度および偏光のプロファイルを計算する。数値計算の空間分解能と時間分解能を上げ、必要な精度でテンプレートの形が変わらなくなるまで確かめる。そのうえで、許される範囲でパラメーターを変えても、両チャネルのどの関係が保たれるかを調べる。そのような関係だけが、新たな測定に対する予測となりうる。

主なデータは、宇宙マイクロ波背景放射のマルチチャネルマップである。予測される信号の振幅、角サイズおよび空間プロファイルを予測偏光応答とともに測定する。比較は、通常の宇宙論的実現、他の起源の可能な主な特徴、後期構造および前景モデルと比較される。宇宙パラメータとキャリブレーションの不確かさはコヒーレントに変化する: 固定された便利な背景は、新しい効果の嗜好を人工的に拡張することができる。候補の場合、周波

数マップは一つの角感度をもたらす:解像度の違いはスポット形状の変化をシミュレートすべきではない。マスクと洗浄方法は重要度が評価されるまで固定されます。

シミュレーションに既知の強度の人工信号を追加し、アルゴリズム全体の検出完全性および誤警報率を測定する。この評価には、テンプレートの位置、サイズ、および家族の検索が含まれます。偏光は、17章のようにすでに知られている温度マップを用いて条件付きでチェックされる。これは、同じ情報を再カウントすることなく、二つのチャネルの共通物理を使用する。装置が改良されても、宇宙分散は保たれる。

必要な検出可能な信号がないことは、対応するパラメータ範囲を除外する。しかし、目に見える衝突がまれであるか、またはそのトレースが利用可能なスケールを超えていれば、候補者の欠如はグローバルモデルを弱く制約する。マスクの変化、観察周波数と処理方法全体で肯定的な結果を維持し、偏光を含む完全なプロファイル全体で代替手段を比較する必要があります。

最も近い計算は、特定の衝突のパラメータの関数としての検出確率である。これにより、予測されたイベント周波数と振幅分布が結合される。この第二ステップが不特定の測定値に依存する場合、観測パターンに対する条件付き感度と選択した測定値の結果は別々に報告されるべきである。そして、空から実際に得られる制約は、グローバルアンサンブルの不確実性の中で失われない。

第19章

重力が量子的になるとき

重力は石、原子、量子系に作用する。しかし、このことから、彼らはすべてその性質を等しく研究することを可能にします。原子の落下は、量子物質に対する重力の影響をテストする。質量そのものが異なる位置の重ね合わせにあるときに、より厳しい質問が発生する:それはどのような重力効果を作り出し、その隣の他の量子系に何が起こるか? ここでは、よく知られた力の公式は、ソースのいくつかの可能な位置を同時に記述する必要性を満たします。

弱い場における、量子についての問い

この出会いのために、ブラックホールの中心から始める必要はありません。相互作用の量子特性は、システムが十分に分離され、観測された量が量子相関に敏感であれば、弱い場でも現れる。重力の弱さが主な実験上の障害となります:その効果は蓄積されなければならず、より強い電気力と磁気力が破壊または変化することができる状態を維持します。

重力の量子論が完全に未知のという主張は厳しすぎる。一般相対性理論は、十分に低いエネルギーで量子効果の理論として使用できる。この記述は、未知の物理学から既知の自由度によって決定される影響を非常に小さいスケールで分離する。John Donohue氏は、空間の顕微鏡的構造に関する決定的な答えを得ることなく、主要な長距離量子補正を抽出する方法を示した。これは、任意のエネルギーの完全な理論ではなく、計算の制御領域です。[148]

これは、絡み合いの生成をテストし、力に対する補正を見つけるか、量子進化の変化をテストするという異なる実験的目標につながる。これらの問題は理論の異なる性質に敏感である。発見された重力絡み合いでさえ、同じアクセス可能な低エネルギー限界を持つ量子重力の変種を分離しない。

16章では、私たちは力の法則の変化を探しました。主要なニュートン相互作用そのものが二つの質量に対して量子的に作用できるだろうか? 絡み合いは、両方の源の位置が量子的に記述されるときに、相互引き合いの通常のエネルギーから生じる可能性がある。これを行うためには、まずポテンシャルに対する小さな量子補正を測定する必要はない。既知の相互作用が関節状態に与える影響は重要である。

二つの質量と、四つの経路

二つの小さな質量、それぞれが明確に区別可能な二つの位置LとRの重ね合わせを想像してみましょう。ペアの場合、LL、LR、RL、RRの四つの組み合わせが生じる。距離、そしてそれゆえアトラクションのエネルギーは、それらの間で異なる場合があります。待ち時間の間に、この組み合わせは異なる量子相を生成する。相対フェーズは、代替手段がその後の干渉読み出しで互いにどのように強化またはキャンセルするかを決定する。

Sugato Bose らの提案では、空間枝は動きを準備し結果を読むのに役立つスピン状態に関連付けられている。空間枝の収束の後、スピン相関が測定される。適切な操作シーケンスが与えられた場合、彼らは質量の相互作用中に発生した絡み合いに関する情報を運ぶ。この研究は実験的な提案を記述しており、そのような重力の絡み合いがすでに観測されていると結論付けることはできない。[149]

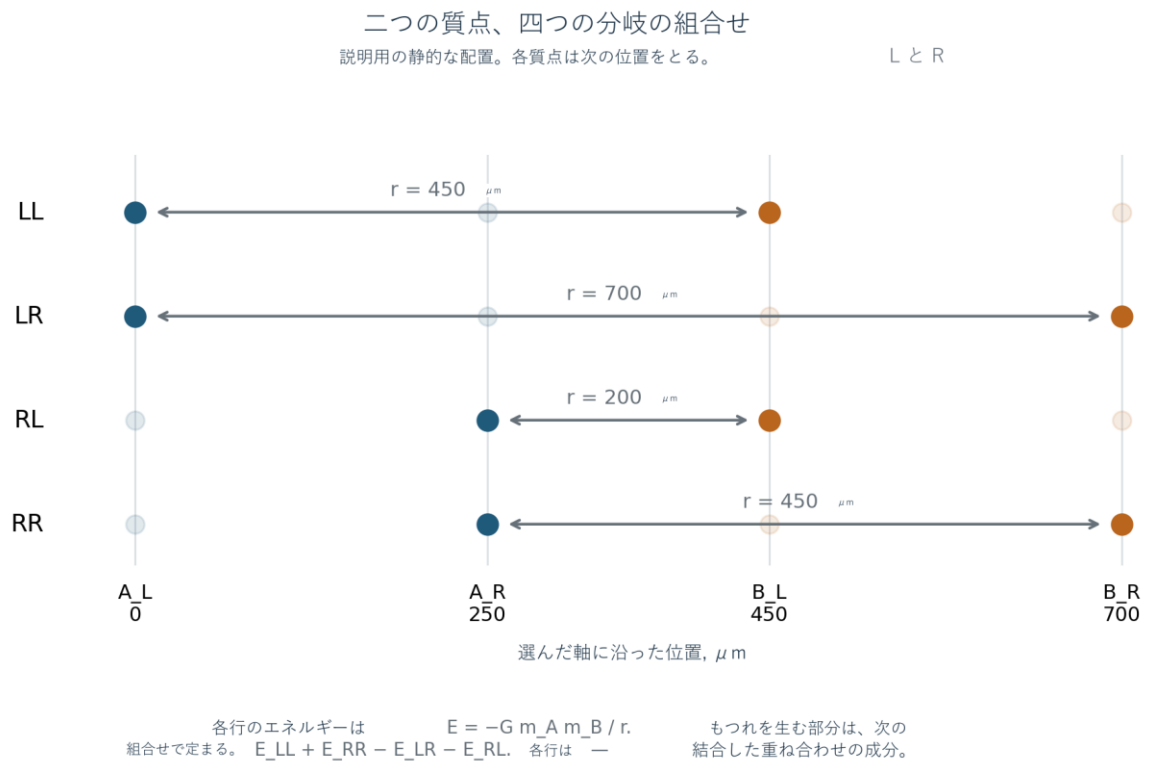


図7。計算例の条件付き静的幾何学における二つの質量の空間枝の四つの組み合わせ。位置はマイクロメートルで示されています;距離は450、700、200および450 μmです。これらは結合量子状態の成分であり、同時に局所化された粒子を持つ四つの実験ではない。図では、枝とノイズを合わせた準備は表示されません。

すべての位相差が絡み合うわけではない。各枝の位相が第一質量上の別々の作用と第二質量上の別の作用の和として表すことができる場合、最初の独立状態は独立のままである。絡み合う部分は、一方の質量が他方の位置に与える影響を記述する。これは、独立した局所的貢献が減少する四つのエネルギーの組み合わせによって区別される。一定の距離で

$$H_{\mathrm{int}} = \hbar g Z_A Z_B, \qquad g = \frac{E_{LL} + E_{RR} - E_{LR} - E_{RL}}{4\hbar}, \qquad E_{ij} = -\frac{G m_A m_B}{r_{ij}}.$$

H_{int}は相互作用エネルギー作用素であり、Zは二つの枝にプラスとマイナスを割り当てる。地元の用語はすでに記録から削除されています:彼らは個々のフェーズを変更しますが、それ自体は大衆を絡めません。gパラメータは逆秒で測定され、絡み合い効果が蓄積される速度を指定する。このアプローチは、狭いパケットと既知の距離を仮定する。実際の軌道の場合、このエネルギーの組み合わせは、枝の分離と収束を含む時間の経過とともに統合されなければならない。

説明用の計算例を考えよう。二つの質量はともに 10^{-14} キログラム、距離は LL と RR では 450 マイクロメートル、LR では 700、RL では 200 マイクロメートルとする。g の絶対値は約 0,0314 s^{-1} となる。ノイズのない理想モデルでは、もつれの最初の極大には約 25 秒で達する。これらの値は課題の尺度を示すが、そのような重ね合わせを、その時間だけ保持する能力をすでに実現したことを意味しない。

電位の静的記録は、物理信号が即座に送信されることを意味するものではない。これは、いくつかのフィールド変数がすでに記述から除外されている、ゆっくりと変化する構成に対する低エネルギー近似である。質問が仲介と因果関係の役割に関する場合、この近似の条件を再構成しなければならない。まず、場のダイナミクスを二つの質量の直接相互作用に置き換えることはできない。実験の解釈には、効果的な計算の精度とそれに由来する理論の両方が重要である。

測定値が通常の意味で整合しているだけでは不十分である。共通の振動も相関を生む。もつれの証人とは、状態の直積の許されるどの混合についても、ある範囲内にとどまる測定量の組合せである。その範囲を超えれば、もつれが証明される。量子位相を捉えるには、異なる方向のスピン測定が必要になる。位置 LL, LR, RL, RR の出現頻度だけでは、この課題は解けない。理想的な位相相互作用では、状態がもつれていく間も、これらの頻度が変わらない場合がある。

量子もつれは何を裏づけるか

なぜこの結果は仲介者を示しているのですか? 各質量の局所作用と古典的結果の移動は、状態の積の混合状態をそのような混合状態に変換する。通常の相関関係が生じるかもしれないが、絡み合っていない。重力のメディエーションが完全にこのチャネルに還元されると、最初はもつれていない質量を絡み合わせることができません。したがって、検出された絡み合いは、前提条件が満たされた場合に正確にこのクラスの仲介者を除外する。

結論を出すためには、準備によって導入された絡み合い、インストールの一般的な量子要素、または残留電磁相互作用を排除する必要があります。また、サブシステムの識別と局所性の意味を正当化する必要がある。このような引数のローカル操作は、選択したサブシステムの一つに影響する。これは光伝達よりも速いという一般的な禁止よりも、より具体的な数学的要件である; 超光通信のみの禁止は、メディエーター定理には十分ではない。

この違いは、詳しい論争の対象となった。アンドレア・ディ・ビアージョは、重力場の量子的本性についての結論が、理論的記述の選択から独立ではないことを示している。媒介者についての一部の論証が必要とする情報的な局所性は、時空の局所性とは異なりうるからである。したがって、検出された効果は、「古典的重力」という大まかな呼び名だけでなく、具体的な代替理論の定量的予測と比較しなければならない。[150]

Tianfeng Feng、Vlatko Vedral、Chiara Marlettoは、地元の仲介の明示的な仮定の下で証人の推論を擁護します。彼らは、状態収縮の代替案が適切な意味で非局所的相互作用を使用する場合、議論を反省しない理由を示している。不一致は、より自信のある定式化を選択することで解決することはできません。比較されるモデルの仮定と、予測を区別する測定を確立する必要がある。[151]

独立したサブシステムの選択にも微妙な点があります。ゲージ理論において、物体の物理的記述は周囲の場と関連し、重力においては、特に重力ドレッシングと呼ばれる。Nicolas Boule と Guilherme Franzman は、これらの接続が完全状態の独立な因子への分解をいかに複雑にするかについて論じている。彼らの推定は、検討中の実験体制に無視できる修正を提供する。これは、サブシステムの近似を定量的にテストし、問題の名称だけで実験を拒否しないことが重要であることを意味する。[152]

実用的な目標は、相、コヒーレンスの損失、絡み合いに基づく力学のクラスを比較することである。単一の実験は、他のいくつかの記述が同じ利用可能な結果を生み出しても、特定の古典的相互作用モデルを排除することができる。

位相と、コヒーレンスの喪失

絡み合う効果は、干渉が依存する相対位相の安定性であるコヒーレンスの損失によって対抗される。密度行列 ρ は、統計的不確実性と代替手段間の接続を含む結合量子状態を記述する。最初の計算では、メモリなしの独立した局所ノイズを受け入れます。つまり、環境との以前の相互作用が状態変化の現在の速度に有意な影響を与えません。

$$\dot{\rho} = -ig[Z_A Z_B, \rho] + \sum_{i=A,B} \gamma_i (Z_i \rho Z_i - \rho), \qquad \gamma_i = \gamma_{\mathrm{env},i} + \eta|g|, \quad \eta \geq 0.$$

右の最初の項は相互作用相を蓄積し、和は位相緩和を記述する。選択された正規化では、一つの自由系のコヒーレンスは2γの速度で減衰する。γ_{env}の一部は通常の環境に帰せられる; 付加$\eta|g|$は相互作用力に関連するノイズに関する検証可能な仮定であり、無次元係数ηを持つ。これは、感度研究のためのモデルのファミリーです。相関するノイズやメモリ環境は異なる方程式を必要とする。

二つの枝の等しい重ね合わせの初期積に対して、このモデルは時間の初期近似における絡み合いの出現のための単純な条件を与える:

$$g^2 > \gamma_A \gamma_B.$$

しきい値は与えられた方程式、初期状態および進化の初期段階を指し、量子重力と古典重力の間の普遍的な境界ではない。これは、絡み合ったフェーズの蓄積とコヒーレンスの破壊との競争を示しています。したがって、遅延の増加は適切なノイズ範囲の結果を改善するのみである。

一つの固定 g に対して、媒体のノイズの不確かさにより、合計位相緩和を通常および付加的な寄与に拡張することができる。通常の位相緩和レートの非負性は、η に対して保守的な上限を与えるが、一意的に決定するものではない。距離を変更すると、各構成が独自の環境補正を許可された場合、この不確実性は排除されません。ηを分離するためには、全ての級数に同時に適用される独立キャリブレーションまたは一般的な干渉物理モデルが必要である。

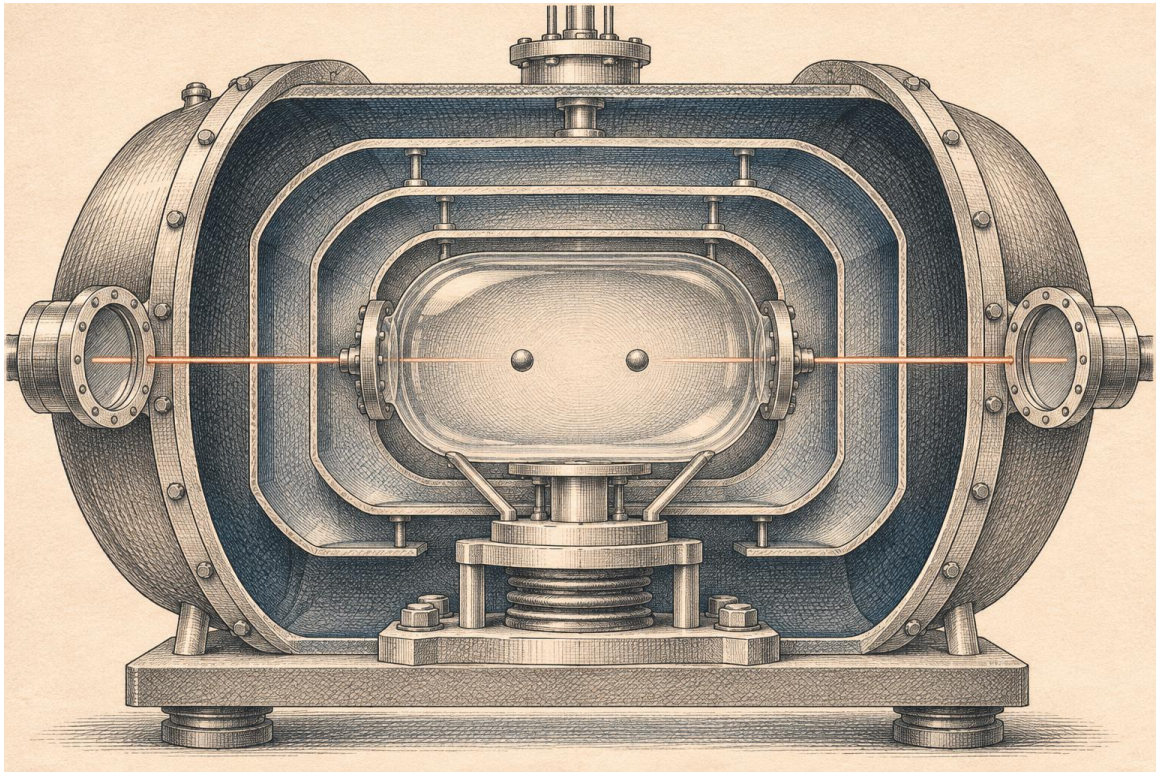
内容のある古典的な代替モデルも存在する。一方の系の位置を連続的に測定し、その結果をフィードバックによって他方へ伝えるというものである。カフリ、テイラー、ミルバーンは、機械共振器について、このようなチャネルのモデルを構築した。そこで検討された構成では、相互作用は雑音を伴い、もつれを生まない。ただし、我々の方程式で η の名前を変えるだけでは、このモデルは得られない。特定の干渉計の空間的な分岐へ移るには、別途の導出が必要である。[153]

残留電磁相互作用は別の方法で危険です。実際の絡み合いを生成することができ、追加のノイズパラメータを必要としないが、別のコヒーレントダイナミクス用語を必要とする。したがって、絡み合いを検出し、検出した絡み合いの重力起源を確立することは二つの連続する実験課題である。

検証するには

実験では、いくつかの幾何学と二つの質量の相互作用時間を比較した。枝を結合した後、個々のコヒーレンスとスピンの相関が予め選択された方向に沿って測定される。局所的な位相も校正される: 絡み合いは生成せず、読み出し軸に対する相関を回転させる。証人は、蓄積された相の質量、距離および持続時間への依存性を試験しながら、準備と測定誤差で評価される。これは関節状態のテストであり、干渉の可視度における単一の変化ではない。

必要なのは、同様のインパルスと環境条件を持つ制御シーケンスであるが、重力相の絡み合う組み合わせによって抑制される。実軌道に基づいて、信号と干渉に対する制御の保存感度の両方を計算する。別途、表面電界中の粒子電荷、不均一性、磁気勾配、振動、残留ガスおよび熱放射を測定します。使用すると、画面は動き、力、ノイズとともにモデルに入ります。距離を変更するだけでは、相互作用の起源を確立するには不十分です。



図版 26。量子状態を保つ。概念的な装置の図は、二つの小さな質量を隔離し、環境を制御する課題を示している。重力によるもつれの検証では、残留気体、熱、振動、電磁相互作用が重要になる。この図は、すでに達成された検出を描いたものではない。実際の実験には、状態の準備、分岐の再結合、相関の測定をそれぞれ行い、妨害要因のモデルを定量的に検証する必要がある。

キャリブレーションされた媒体とのコヒーレントなニュートンポテンシャル、共通の付加ηと同じポテンシャル、インストールのために派生した測定およびフィードバックチャネル、および残留電磁相互作用を比較する。各モデルは相、可視度、スピン相関を同時に記述しなければならない。干渉パラメータは級数間の一般的な物理的依存によって関係し、各実験に対して分離された自由調整によりηが不確定になる。

絡み合った状態の境界を超えて統計的に有意な出発は、受け入れられた読書モデルの下で絡み合うことを確認する。その重力起源を確立すると、そのような効果を作り出せない比較モデルを除外することが可能になる。非古典的メディエータに関するより強い推論は、さらに局所的なメディエーション条件を必要とする。ゼロの結果は、不十分な段階、コヒーレンスの破壊、目撃者の弱い感度を意味する可能性がある。

次の計算は、実際の軌道に対して選択された代替ダイナミクスを導出し、既知のパラメータと独立に推定されるノイズを持つ人工データに関する全体の分析をテストすることである。パラメータ η に対して、必要な繰り返し数と通常のノイズの誤ったアトリビューシ

ョンの頻度を確立する必要があります。その後、追加の位相緩和の制限は特定の物理的意味を持ち、仲介者に関する論争は同等の実験的結果をもたらす。

Vのオープンな未来

第20章

一つの宇宙にありうる、複数の未来

遠方の物体の光から過去を再構成することで、徐々に拡大の歴史を得る。発見した曲線を前に進めたいという自然な願望があります。宇宙は無限に拡大するのだろうか? 加速は続きますか? いつの日か信号を交換できる場所は? 数学的にグラフを続行するのは簡単です。物理的には、これはどの法律がまだ完成していない歴史の一部を決定するかを知る必要があります。

将来の予測は、モデルの継続に関する観察と仮定を組み合わせたものである。時々、この仮定はよく確立され、安定した結果をもたらします。いくつかの有効な継続は、アクセス可能な過去を同じように記述することがある。特定の過去の記述に一致するが、異なる将来の因果構造を持つ二つの普通の古典モデルを構築する。この例では、一つの拡張履歴から抽出できない情報を正確に示します。

宇宙の行方を定める前提

空間曲率だけでは、宇宙の運命は定まらない。幾何学と未来の関係は、エネルギーの組成とその圧力に依存する。暗黒エネルギーが適切な性質をもつ場合、空間的に閉じたモデルでも際限なく膨張しうる一方、閉じていないモデルでも収縮へ転じうる。クラウスとターナーは、宇宙定数が観測宇宙論に復帰した後、この依存性を強調した。幾何学は世界の構造の重要な一部を教えるが、その後の運動を知るには力学の法則が必要である。[154]

正の宇宙定数が持続し、最終的に優勢であれば、拡大は指数関数的に近づく。加速成分の密度が十分に早く低下し始めると、加速は終了する可能性がある。他のモデルでは、圧縮への戻りが可能です。一般的な相対性理論に対応するモデルでは、圧力と密度の比がマイナス比より小さい場合、密度とスケール係数は有限時間に発散する。これは与えられた連続の結果であり、観測可能な宇宙の確立された終わりではない。[155]

状態方程式の観測的推定は、利用可能なエポックを指す。選択したモデル内のBAO、CMBおよび超新星テスト距離と拡張履歴の組み合わせ。暗いエネルギーの進化の説得力のある検出でさえ、その将来の特性をすべて決定するものではない。重要なのは、データが実際にダイナミクスを制約する範囲です。[8]

便利なパラメータ化にもスコープがある。例えば、いくつかの係数の観点から状態の方程式を記述することは、最近の拡張履歴を比較するのに役立つ。しかし、そのような公式を任意に大きな将来のスケールに継続することは新しい仮定となる。観測された間隔をうまく記述する関数は、それが近似的に記述するために使用された物理場とは全く異なる振る舞いをする。[156]

状態方程式のベル形の偏差は、遅い観察間隔で許容可能な軌道を与えたが、その無限の継続により、フィールドに対する二番目の微分であるポテンシャルの無限の曲率をフィールドの有限値で与えた。この例は、特定の外挿の適合性をテストした。いずれのモデルも、範囲全体にわたって滑らかなポテンシャルを持たなければならず、その地平線の違いは漸近論から導出されなければならない。そして、予測の不確かさはモデルの一つにおける数学的欠陥によって説明できない。

地平線が未来に依存すること

粒子地平線は、宇宙の受け入れられた歴史の間に信号が私たちに到着したことができる領域を制限します。イベントの地平線は、どの信号が到着するかという別の質問に答えます。無限の適切な未来を持つ空間的に平坦なモデルに対して、対応するコムービング距離は積分によって決定される:

$$\chi_{\mathrm{e}}(t) = c \int_t^\infty \frac{dt'}{a(t')}.$$

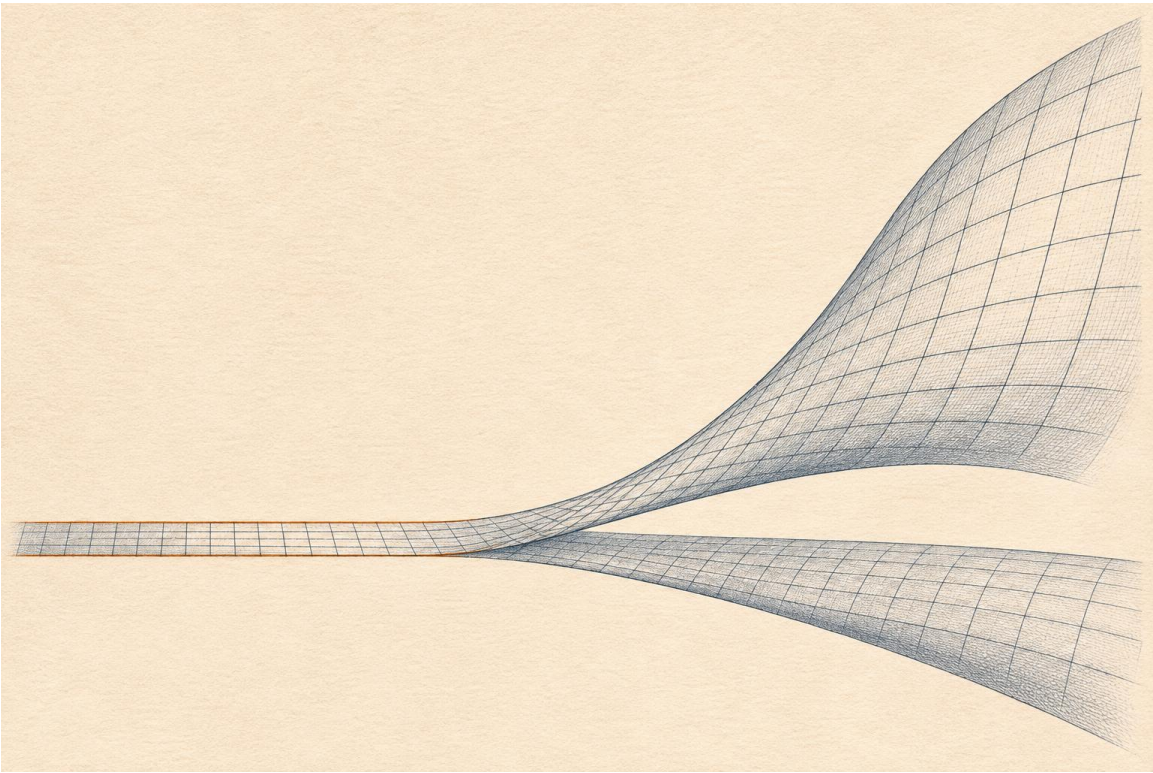
光の速度はcと表示され、aはスケール係数です。積分が有限であれば、与えられた瞬間に送信される光が移動できるコムービング距離の制限がある。発散する場合、そのような極限は考慮中の非有界平面幾何学には存在しない。イベントの因果的可用性について話しているところです。未来の地平線がなくても、無限空間は有限時間で完全に観測可能になるとは限らない。

指数的拡大によって、分母はとても早く成長するので積分は収束する。ダストモデルのパワーロー展開特性により、発散します。したがって、特定の時代の観測された加速度は、永遠の地平線の存在をまだ証明していない:スケール係数の全将来関数が必要である。現在の膨張速度によって決定されるハッブル球面は、この情報を含まない。

地平線の存在は、以前に議論された熱力学にも関係している。ド・シッター空間において、半古典理論は温度とエントロピーを宇宙論的地平線に割り当てる。しかし、この説明

を宇宙の未来に転送することは、対応する未来幾何学を前提とします。進化の法則を変えることは、熱力学的計算が関係する因果境界を変えることもできる。[110]

これにより、予測の強さに関する特に正確なテストが作成されます。現在に等しく拡大する二つの世界を構築することは可能ですが、そのうちの一つだけが将来の地平線を持っていますか? 答えは、かなり広い種類の滑らかなスカラーモデルにおいて肯定的である。これは、負の運動エネルギーも、有限時間における空間の破壊も必要としない。



図版 27. 共通の歴史と、異なる続き。同じように描いた歴史の区間から、二通りの続きが生じる。これは、共通の過去と整合する異なる力学法則を比較する比喩であり、分岐は宇宙が物理的に分裂することを意味しない。検討したモデルで将来の地平線が存在するかどうかは、その後の進化全体によって決まる。観測された加速の一期間や、この図の見た目だけで決まるものではない。

共通の過去をもつ二つのポテンシャル

一般相対性理論、空間的に平坦な均質背景、通常の塵状物質、および最小結合の正準スカラー場を考える。標準正の運動学項はカノニカルと呼ばれる。粉塵との曲率やエネルギー交換など、分野に直接関係した追加用語は導入しておりません。今日のスケールファクターは一に等しくなります。正の定数Λ、SおよびMはエネルギー密度の次元を持ちます; 塵密度はスケール係数の立方体によって分割されるMとして減少します。単純さのために、

私たちは放射線を省略します:これは実証モデルであり、ホット履歴の完全な説明ではありません。

変数 N - スケール係数の自然な対数 - とスムーズなスイッチング関数を導入しましょう。次に、スカラー成分自体の密度の二つの可能な履歴を定義します。

$$N = \ln a, \qquad g(N) = \begin{cases} 0, & N \le 0, \\ e^{-1/N^2}, & N > 0, \end{cases} \qquad F(N) = \int_0^N g(u)\,du,$$
$$\rho_A(a) = \Lambda + Sa^{-3},$$
$$\rho_B(a) = (\Lambda + Sa^{-3})e^{-3F(\ln a)}.$$

現在まで N は非正で、函数 F は零に等しく、二つの密度は正確に一致する。今日の彼らの誘導体もすべて一致している。その後、モデルBの乗算器は滑らかに密度を減少させ始めます。スイッチは、どの誘導体にも鋭いエッジを持たないという点で珍しいです。これはクラス C^∞ の無限微分可能な関数である。

これまでのところ、密度と膨張の依存性は二つしかありません。物理的な反例になるためには、フィールドのダイナミクスを提示する必要があります。エネルギー保存の法則は、密度wに対する圧力の割合を決定する。各履歴に対して、フィールドの動きとその可能性を復元することができます。

$$w_A = -\frac{\Lambda}{\Lambda + Sa^{-3}}, \qquad w_B = w_A + g(N),$$
$$\frac{d\phi_i}{dN} = M_{\rm Pl}\sqrt{3\Omega_{\phi,i}(1+w_i)},$$
$$V_i = \frac{1-w_i}{2}\rho_i, \qquad i \in \{A, B\}.$$

ここでは、Ω は総密度における対応する場のエネルギーの分数を示し、M_{Pl}は還元されたプランク質量であり、場公式中の光の速度を一とします。膨張率は、共通の粉塵成分を持つフリードマン方程式から得られる。この宇宙力学からのポテンシャルの回復は、よく知られた科学的基礎を持つ。その物理的意味は、重力、物質および運動学項に関する受け入れられた仮定によって制限される。[157]

N のすべての有限値に対して、密度は正であり、両方のモデルの w はマイナス一と一の間に厳密に存在する。これは、運動エネルギーとポテンシャルが正であることを意味します。N = 0の場合、我々は $\phi = 0$を両方のモデルに設定し、示された正の動きの枝を取る。フィールドの速度と拡大率も一致します。N に関する場の微分は消滅しないため、N は ϕ の項で表され、自律ポテンシャル $V(\phi)$ を得ることができる。移動フィールド自体が新し

い値に達する:それは、外部クロックによってスイッチされません。横断する領域では、両方のポテンシャルが一致します。まだ完成していない領域では、それらは異なります。

ここで正の S は重要である。それのおかげで、フィールドは今日すでに移動しています。私たちは、フィールドが突然正確な休息から滑らかなポテンシャルに移動することはありません。各モデルでは、独自の動作法則と初期データによってユニークな解が決定される。異なる未来の結果は、同じ方程式が任意の結果を選択するためではなく、異なるポテンシャルが先にあるためである。

従って、均質なバックグラウンド履歴が一致します。同一の初期摂動に対しては、その線形進化も一致し、小さな振幅の最初の順序が保存される: ポテンシャルと共通の背景に沿った微分は同じである。有限不均質性は、背景場の前に潜在的な差の領域に入ることができる。したがって、ここでは正確な非線形同値性は確立されず、非摂動過程を含む完全量子同値性は確立されていない。正の速度と正準伝播速度は、完全な安定性解析を置き換えない。

未来はどこで分かれるか

モデルAでは、場密度は正の Λ になる傾向がある。ほこりが薄くなり、Hは一定の正の値に近づき、膨張は漸近的に指数関数的になる。未来の光路の積分は有限である。このモデルはイベントの地平線を持っていますが、適切な時間は無限に続きます。

モデル B では、関数 g は統一し、F と N の差は有限定数となる。これは、g のユニティからの偏差が N の逆二乗として減少し、遠い将来において有限積分を持つという事実に従ったものである。したがって、密度の付加因子は、逆立方体 a を定数係数で漸近的に振る舞う。密度 A を乗算すると、Λ になる。これは、密度B自体とそれとともに総密度が粉塵モデルのように減少することを意味する。スケール係数は三分の二のパワーに時間とともに増加し、将来の光路の積分が発散する。

モデル B の体は無限に成長する: N に対する微分は正の定数になる傾向がある。したがって、再建はフィールドの最終的な将来のポイントに留まらず、それを通じて、ポテンシャルを別々に継続する必要があります。Aの場合、ポテンシャルの正の最小値に近い滑らかな解析継続がある。両方のモデルにおいて、未来は自身の時間に無限大である。地平線間の差は漸近的であり、描画された曲線の最終部分の出現によっては成立しない。

例えば、今日の臨界密度の単位でΛ = 0,699、S = 0,001およびM = 0,300を取ることができます。次に、両方のモデルが加速し、その密度に対する場圧力の比率はマイナス一に近い。これらの数字は、デモンストレーション目的で選択され、データに適合して取得されません。塵のように減少する場密度項は、その乱れをほこり状にしない: 標準場は、独自の伝播規則を保持する。

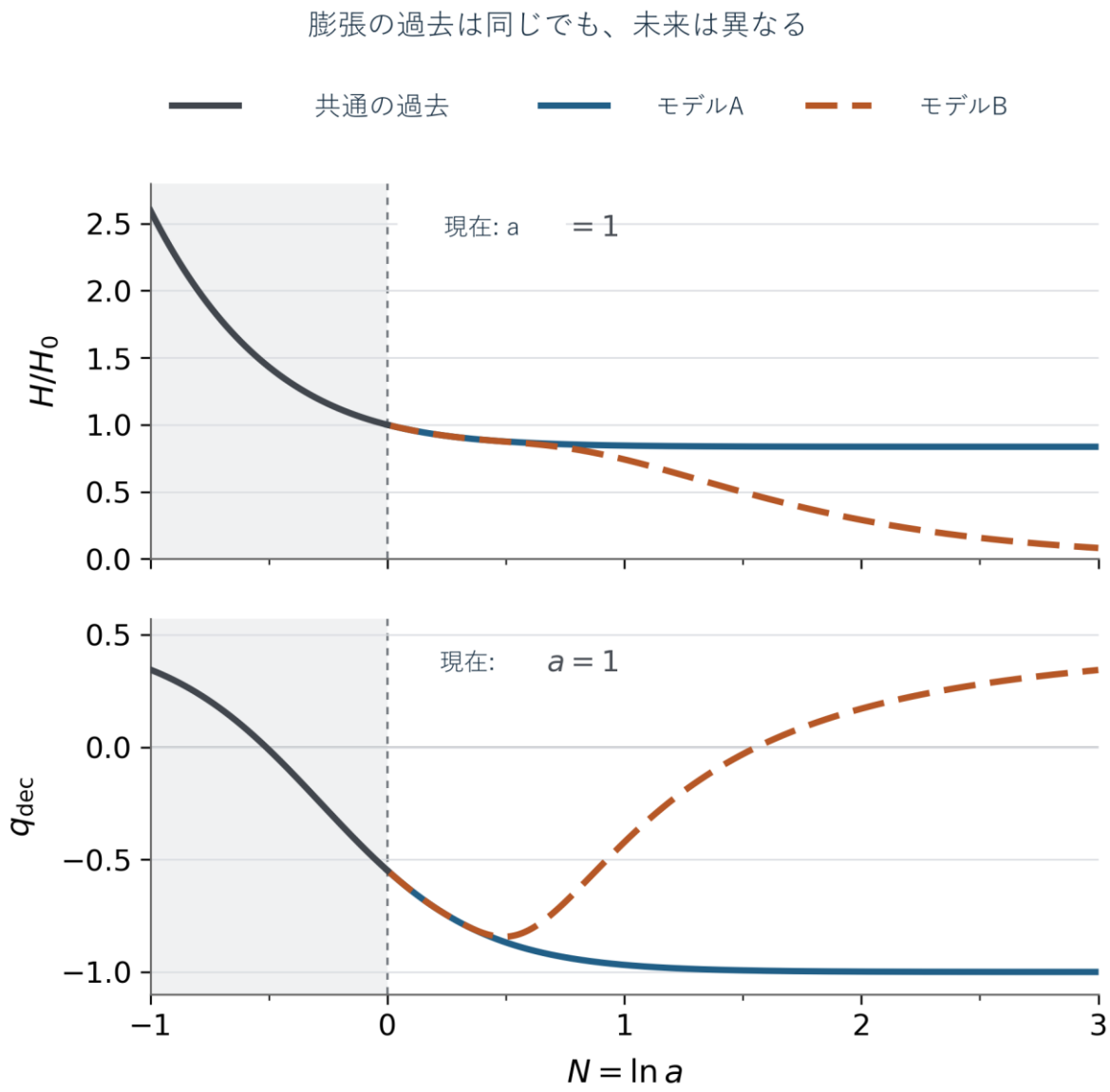


図8。過去のストーリーと今後の続編が二つ。膨張速度H/H_0と減速パラメータは、N = ln aの関数として示される。モデルAは指数拡大に近づき、モデルBは減速に戻る。パラメータはデモンストレーション目的であり、観察に適応しない。

正確な接着は重要な数学的条件を持つ。ポテンシャルBは滑らかであるが、接合部において実解析的ではない。解析関数の場合、連結領域の開区間上のマッチは連続を一致させる。クラス C^∞ の二つの函数は同じ値を持ち、全ての微分はある点において成り立つが、函数自体は右とは異なり、テイラー級数は滑らかな函数を復元する必要がない。両方のポテンシャルがグローバルに分析されることを事前に要求した場合、この例は追加の要件によって除外されます。

従って、この構成は特定のステートメントを検証し、一般的な過去の背景履歴と共帰線形ダイナミクスは、滑らかモデルの指定されたクラスにおいて単一の未来を定義しない。それはダークエネルギーの新しい理論ではなく、自然によって実現される連続性を確立しません。より狭い分析クラスであっても、実データの最終的な精度は別個の問題であり、観測はすべての微分の正確な値を報告しない。

検証するには

再構成されたポテンシャルから、場とフリードマン方程式は共通の初期データに再統合され、与えられた密度を持つ解を比較する必要があり、将来の漸近性をチェックするべきである。過去の正確な一致は関数の定義から、地平線の存在は積分の収束から従う。受け入れられた背景と線形記述における一般的な過去の観察は、これら二つのポテンシャルの間で選択できない。

物理研究では、利用可能な歴史の期間ですでに異なるモデルの家族が取られます。パラメータの一つのセットは、構造の距離、膨張速度および成長を記述するべきである。これは、分光赤方偏移とBAO、標準化された超新星発光、および重力レンズに対して試験される。キャリブレーション、対象選択、材料分布、およびその他の標準スケールの不確かさが一緒に評価される。次に、残りのモデル範囲でどの将来の特性が安定であるかを計算する。

追加のルートは、長い時間間隔の後、同じ遠方のソースのスペクトルを再測定することである。宇宙レッドシフトの遅いドリフトは、観察者の時間とともに膨張ダイナミクスをテストします。ローブは特にクエーサーのスペクトルに吸収を使うことを提案した。これは、利用可能な拡張履歴の異なるモデルを区別する方法である。我々の正確なペアAとBについて、今日の点において一般的な歴史から計算された瞬間的なドリフトは同じである。将来の再観察は、測定可能な不一致が発生した後にのみそれらを分離することができる。[10]

必要なのは、長期間安定した分光器、再現可能な波長スケール、および複数のソースの比較である。スペクトルプロファイルの変化、観察者の動き、局所加速度および器械ドリフトをモニタリングする。アイデアは作成されているANDES分光器の科学プログラムに含まれています。すでに達成された測定値や結果の保証時間枠はありません。データと独立したベンチマークの人工的なシフトは、実際にどれだけのドリフトが回復されているかを示すべきです。[11]

モデルが要求する振る舞いを一貫した観察で除外すると、将来の予測は基礎を失います. 合意は法の継続に関する予測条件を維持します。正確なペアAとBの場合、アクセス可能な不一致を待つか、独立物理学によってより狭い種類のポテンシャルを正当化する必要がある。異なるファミリーに対する次の計算は、与えられた偽信号しきい値における干渉とその検出確率を調整した後の残差を示すべきである。ドリフト測定プログラムでは、観測時間、ソース数、キャリブレーション安定性の機能です。この計算は、将来の推測から達成可能な検証を分離する。

第21章

自然に問いを立てるには

本の始めに、世界のための場所の問題はほぼ地理的に見えた。遠くに移動して、その外側の境界線がどこにあるかを確認すれば十分です。この画像の後ろには、空間の構造を決定したり、初期の歴史を復元したり、空間の構成を理解したり、利用可能な情報の限界を確立するなど、さまざまなタスクが隠されていることが徐々に明らかになった。それぞれの問題は、答えを得るための独自の方法を必要とします。

これで研究プログラムを組み立てることができます。その結果は、実際の機器と代替説明を考慮した後に残る予測された観察との違いであるべきである。必要なデータの一部がすでに存在する。他のタスクでは、新しいインストールが必要になります。問題に関して言えば、最初の制限は理論そのもののままであり、計算可能な結果はまだ得られていない。

着想が研究課題になるとき

「ダークエネルギーが変化している」というフレーズは、多くの可能性を示しています。テストを実行するには、フィールド、そのダイナミクス、物質との接続、初期条件を指定する必要があります。膨張履歴、乱れ、および可能な実験室効果を計算することができる。ステートメントを絞り込むと、結論はスコープに制限されますが、確実性を提供します。

どのモデルをテストしているか、どのパラメータが共通性を保つべきか、計測器が正確に何を測定しているのか、モデルが説明できない結果の四つを書き留めておくと便利です。将来的には、エラーの説明と適用範囲がこれに追加される。このような文書により、他の研究者は分析を繰り返すことができ、データへの露出後に元のコミットメントが残されているかどうかを確認することができる。

計算の失敗条件も重要です。モデルは不安定になり、効果的な理論の限界外に落ちるか、自由関数が多すぎるため予測力を失う可能性がある。これらは有意義な結果です。空の比較の前に発生し、作業を続けるために必要な追加の物理学を示します。

また、成功した説明と新しい予測を区別する必要があります。多数のパラメータを持つ関数が測定された曲線に適合している場合、この曲線への単なる近接は説明をテストしない。より強力なテストは、見つかったパラメータが選択で使用されていない別の効果を決

定する場合に発生します。そのため、異なる観察のための共通のパラメータの要件が本を通して実行されます。

複数の測定に現れる、同じ一つの機構

宇宙の時代によって変化するスカラー場を見てみましょう。電磁場に関連付けられている場合、その動きは原子遷移に影響を与える可能性がある。距離履歴、時計の比較、天体物理分光は、同じモデルの異なる側面を探索する可能性がある。しかし、時計は通常、すべての可能な理論で同じ普遍定数ではなく、結合強さと場の変化率の組み合わせを制限する。[158] [60]

ここで、特定の研究課題が生じる。宇宙的背景、不規則性成長、局所的な周波数測定、自由落下試験を調和させるポテンシャルパラメータと相互作用パラメータの領域はありますか? これを解決するには、対応する接続を導出し、局所場と宇宙体との可能な差を考慮し、付加力の複合依存性を計算する必要がある。それ以外の場合、データを組み合わせると、より厳格な制限の外観が生じるだけです。[61]

同様の論理は早期の障害にも当てはまる。環境特性の短い変化は、パワースペクトルとより複雑な相関の特徴を残すことができる。一つのアクションまたは一つの選択した状態から両方の形式を計算する必要があります。任意に各統計にぎっしりとカーブを追加しても、全体のメカニズムはテストされません。独立して反論できる機能の間には必須の関係がある必要があります。[89] [90]

ダークマターの場合、共通のパラメータは完全に異なるオブジェクトを接続できる。自己散乱の速度依存性は、レンズ内の銀河と暗い塊のアンサンブルに作用する。超光場の質量とその宇宙分数によって、構造の早期抑圧と恒星系の後期内部力学が調整されなければならない。天体物理学の歴史はさまざまであるため、すべての物体が同じプロファイルを持つことを要求するのではなく、全体的なマイクロ物理とこれらの歴史の分布を試験する。

物質の起源に関するプログラムでは、新しいニュートラル粒子の一組と相互作用が同時に実験室の制限を通過し、与えられた初期歴史において所望の不対称性を生成する必要がある。観測された非対称性が許容されるパラメータの全実行可能なセットに含まれていない場合、選択したシナリオは失敗する。一つの便利な点間の不一致は、そのような結論を与えない。[51]

二つのモデルを区別するとはどういうことか

デバイスがプロセス速度を測定するとします。結果の一部は、未知の背景によるものであり、一部は、私たちが決定したい大きさの新しい相互作用によるものです。条件モデルは次のように記述できる。

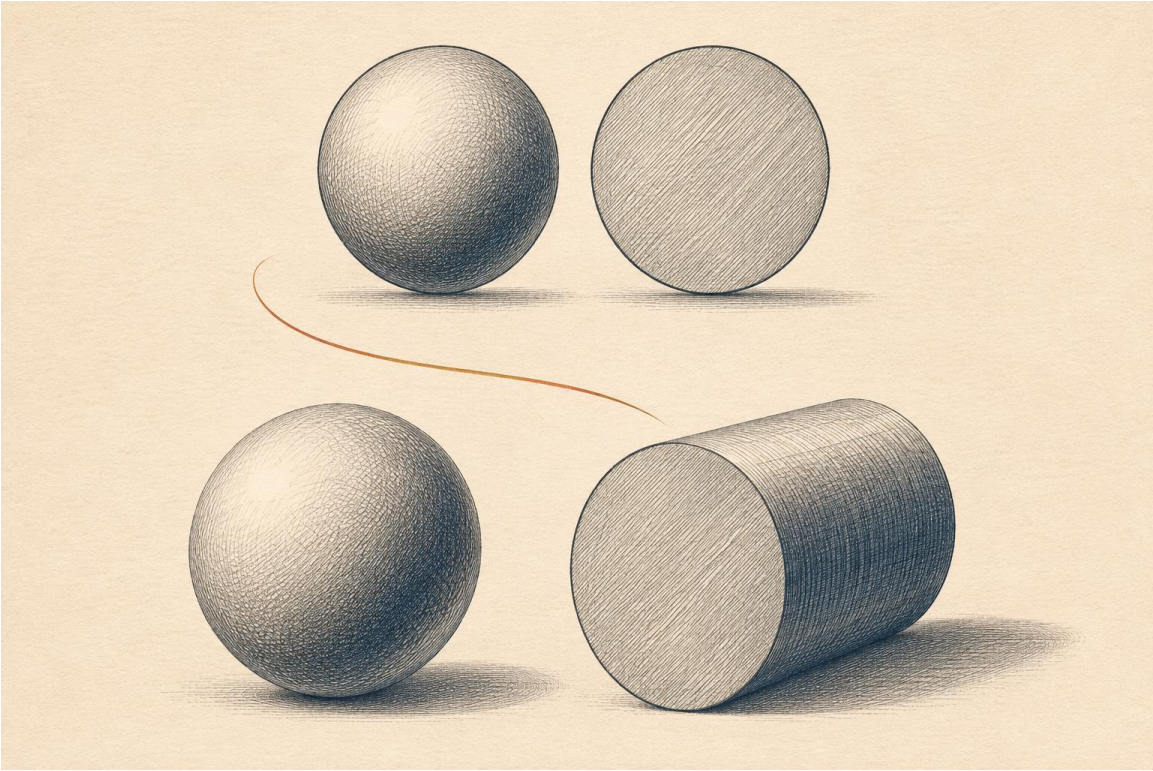
$$R_i = b_i + \eta s_i$$

Rは測定速度を表し、bは背景、sは選択した設定に対する計算応答であり、η は効果の未知の強さである。各測定値に未知の背景が許されている場合、η の異なる値は許容パラメータ範囲内で b を変化させることによって補償される。装置は非常に正確にRを測定することができますが、この精度だけでは信号の原因を分離することはありません。個々の貢献の非負性の状態は、実際の大きさの不確かさを維持しつつ、効果に対する保守的な上限を得ることができる。

ここで、物理的な対照を加えよう。二つの設定が s を変え、両者の間で背景が、独立に確かめられた精度の範囲内で保たれると仮定する。結果の差を取れば共通の背景が相殺され、η の寄与が取り出される。本当の難しさは、背景が共通であるという仮定にある。設定の切替えによって温度、静電的な結合、読出しの効率、その他の重要な要因が変わっていないかを検証しなければならない。

この例は、弱い信号と識別不可能なパラメータの違いを示しています。最初のケースでは、追加の精度が役立ちます。第二に,実験のセットアップを変更したり,背景を独立して測定したり,設定間の合理的な接続を導入する必要がある。無料の未知の貢献は、単に取得時間を増加させることで排除することはできない。

宇宙データの場合、同じことが起こります。ただし、速度、スペクトル、距離、相関関数を数える代わりに考慮します。異なる物理パラメータは、互いに影響を補うことができる。これらのパラメータによって異なる場合、追加の観察が有用である。ほとんど同じ組み合わせの二つの非常に正確な測定は、主な質問に答えを残さない。



図版 28. 測定の新たな角度。異なる二つの形でも、一方向から見れば似た投影像を与えることがある。別の角度から見ると、元の像を鮮明にするだけでは解消できなかった違いが明らかになる。この幾何学的な類比は、パラメータの縮退を説明する。新しい実験が役立つかどうかは、物理的な原因のどの組み合わせを検証できるかによる。

8章のレッドシフトドリフト計算は、数値的な例を示す。同じH_0と物質分数に対して、スカラー場は予測シフトを著しく変化させる。しかし、これらのパラメータに対して異なる値を持つことができるなら、宇宙定数を持つモデルは同じ曲線に近づく。これは、図示プロットに従ってH_0の新しい値を選択する理由ではありません。これは、分析全体に含まれる独立したデータを示すものです。それらが追加されると、補償調整は宇宙の距離と構成の測定との不一致に対して支払う必要があります。

次に、どの測定を行うべきか

退化が見つかると、次の質問は新しい観察に関するものです。取り除く不確実性のどの部分を理解する必要があります。二つの測定が同じパラメータの組み合わせに敏感である場合、精度の向上はモデル比較にほとんど影響しない可能性がある。もう一つの測定は、非常に粗いもので、競合他社が以前のデータを再現するおかげで、正確な自由度を制限することができる。

計算による補足から、どの独立な測定が、差を打ち消すパラメーター調整を妨げうるかを詳しく調べられる。選んだ八つの赤方偏移について、共分散をすべて明示したうえで、宇宙定数モデルを H_0, Ω_{m0} および共通の速度シフト B に関してプロファイルする。二十年間の間隔で、独立な誤差を 1 cm/s、相関したモードを 0,5 cm/s とすると、プロファイルした不一致 Q は 0,316615 となる。仮定上の外部制約 $H_0 = 70 \pm 1$ km/s/Mpc を加えると 1,565071 に上がる。一方、$B = 0 \pm 0{,}1$ cm/s という制約だけでは 0,331525 にとどまる。両者を同時に加えると 3,420077 となる。これは、この設定で制約が互いを補う例であり、現実の観測装置の順位を示すものではない。

Qは、許容パラメータを調整し、条件付き外部制約を考慮した後、二つの予測の残差不類似度をノイズなしで測定する。統計的基準を別々に定義し、データを生成し、誤った決定率と力をチェックすることなくシグマに変換することはできません。次の実際の実験を選択するには、コスト、達成可能な精度、体系的エラーの依存性、およびH_0の外部推定がテストされている宇宙モデル自体に依存する可能性も必要です。

この計算では、外部制約は入力値を中心に独立ガウス測定として指定される。ランダムノイズはまだ再生されていません。したがって、Qゲインは制約の幾何学と重みを話しますが、実データに誤り率を確立しません。結果を観察プロジェクトに転送する前に、両方のモデルから人工カタログのアンサンブルを作成し、事前に選択された決定ルールで手順をテストする必要がある。

プロジェクトの有用性は、予測されるモデル確率の変化によっても決定できる。このベイズテストは数学的付録に記載されているが、パラメータ分布、競合確率、完全なデータモデルを必要とする。それは平均曲線のプロファイル化された発散と一致しない。これら二つのタスクを分離することで、各ステップを明確に制御しながら、研究の複雑さを徐々に増やすことができます。

仮説的な例から得られる地図は次の仕事への方向性を与える。新しいレッドシフト範囲、より長い間隔、独立した絶対的なスケール、より良いキャリブレーションなどです。その答えを事前に選ぶことはできない。利用可能なソースと、実験的な設計でエラーがどのように変化するかによって異なります。次の章では、この計算のどの部分がAIに転送できるのか、その結果をチェックする方法について説明します。

三つの研究課題

最初の問題は、初期の宇宙での簡単な出来事に関するものです。例えば、乱れの伝播速度と特定の励起初期状態の短い変化である。最初のステップは、通常のスペクトルが利用可能な精度の範囲内にある領域を確立することです。その後、双スペクトルと偏光予測の違いを計算し、さらなる宇宙進化と観測モデルを通してそれらを転送する。その結果、追加の統計が実際にメカニズムを区別するパラメータの範囲になるはずです。

そのようなプロジェクトでは、事前に制御フォームと、ソートされる周波数、位相およびその他のパラメータを考慮に入れる方法を修正する必要があります。広範な検索後に見つかった機能は、適切な統計的キャリブレーションを必要とする。このモデルのペアをうまく区別しても、すべての考えられる理論の中で説明のユニークさを証明するものではない。それは二つの宣言されたメカニズムについてより狭く、しかし再現可能な結果を与える。

二つ目の問題は、暗黒物質の微小物理学と二つの物体群を結びつけるものである。自散乱断面の速度依存性を選択し、ハロー履歴の分布を構築し、運動学的特性とレンズ特性を同時に計算する。いくつかのオブジェクトはパラメータの決定に使われ、一部は独立した検証に使用される。ここで最も重要な結果は、平均的な成功曲線だけでなく、散乱を含む新しい観察の分布を予測する能力である。

ストーリーの分布がゆるすぎることが判明した場合は、追加の観察で制限されているものを見つける必要があります。星、ガス、環境に関するデータは、この不確実性を減らすことができます。パラメータの数の増加は、新しい観察された接続がどれだけ保持されているかの評価とともにのみ許容される。さもなければ、統一されたマイクロ物理学の仮説は、各物体の独立な適合性に対する形式的な上部構造のままである。

第三の問題は、第8章からのスカラー場の計算を継続する。復元されたポテンシャルは、通常の物質との摂動と接続の完全なモデルに含まれるべきである。距離、構造成長、周波数関係、および自由落下普遍性の期待される違反を共同で計算しなければならない。接続された暗黒セクタの場合、背景方程式と外乱のレベルにおいてすでにエネルギー交換を考慮する必要がある。関係のないフィールド式を自動的に使用することはできません。

同じ問題には、レッドシフトドリフトの次の計算が含まれます。アプリの八つの概念的な測定値を、実際のアブソーバとスペクトル遷移のリストに置き換えて、それぞれの精度を決定し、エポック間のキャリブレーションエラーを関連付ける必要があります。二つの

固定曲線の最大差は約z=0,78であり、従来のライマン-α森林の地盤ベース光分光は、かなり高い赤方偏移で動作している。したがって、一つのデバイスでより多くの時間を注文することはできません。光学測定と無線測定の組み合わせ、独立した制約H_0の利点、および縮退を実際に削減する精度を向上させるためのこれらの方向を比較する必要があります。[14] [13]

この作業の別の部分は、物理的安定性と潜在的な許容可能な継続をチェックすることです。我々のガウス図は、局所的に成功した歴史がフィールド全体の定期的な継続を保証しない理由を示している。良い結果は、適用範囲が宣言された一貫性のあるモデルドメインか、その義務を果たすことができないことが証明されています。完全なプログラムと数学的慣例は、付録に集められます。

三つのタスクはすべて、まず最初に、すでに利用可能なデータタイプの計算と分析を必要とする。より遠いプログラムは、新しい測定モードに関連付けられています。重力の絡み合いのためには、十分に大きな重力相と非重力相互作用やコヒーレンスの損失を制御することが必要である。レッドシフトドリフトの場合、時間分離観測間で同等の周波数スケールを維持する。トポロジーを検索するには、実際のマスクとノイズを持つ信号の総共分散を計算します。いずれの場合も、技術的な目標は期待される信号の形状によって決定される。

検証するには

研究手順自体を確認する必要があります。まず、真のモデルが知られている人工データのセットが作成される。ノイズ、選択、観察マスク、および現実的な体系的効果が含まれます。分析は、実際のデータに適用することを意図しているのと同じ方法で実行されます。このような実験は、メソッドが存在しない場合に効果を宣言する頻度と、実際に存在する信号を見逃す頻度を示している。

誤って指定されたバックグラウンドモデルでテストすることは特に有用である。制御されたキャリブレーションエラーを追加したり、天体物理履歴の分布を変更したり、計画外のノイズ相関を導入することができます。手順が自信を持ってこれらの効果を新しい物理学と呼ぶ場合、その感度は十分に意味がありません。制御観察を拡張するか、正直に推論の範囲を制限する必要がある。

次に、パラメータの選択に関与しなかった検証のために観察の一部が保存される。分割ルールは、所望の効果を見る前に選択される。結合宇宙論的データに対して、カタログ行の単純なランダム分割は十分ではないかもしれない: 一般キャリブレーションと大規模モードは依存を保存する。データの実際の統計構造を考慮する必要があります。

信号が検出されなかったという結果には、感度の地図を添えなければならない。どの振幅とパラメーター領域なら検出できたか、どこでは背景と事実上区別できなかったかを示すものである。肯定的な結果は、独立した処理、根拠のある系統誤差モデルの変更、さらに必然的に伴う追加の帰結の検証に耐えなければならない。都合のよい統計的有意性の値を一つ挙げても、この作業の代わりにはならない。

最後に、結果を再現可能にする必要があります:モデルバージョン、正規化、入力データ、選択条件とコードを保存します。計算パッケージは、レッドシフトドリフト、均一な波移動および振動制御のためのプログラムを含んでいる。追加のプログラムは、背景再構成、成長、位相ダイナミクス、および尺度の換算をテストする。残りの例では、数学的付録は公式、入力および出力境界を指定する。このキットでは、リストされたチェックを繰り返すことができ、まだ分析されていない観察と区別することができます。

知識の端を越えた小さなステップがこれです。まず、質問の定式化は変化する: 新しい変数が現れる、観察間の異なる関係、または以前に探索されていないモデルのクラス。このステップは、データ抵抗に遭遇できる形式が与えられる。本の最も価値のある継続は、これらの計算の一つが事前に予期していなかった答えを提供するところから始まります。

第22章

AI とともに進める宇宙論

研究書は、一組以上のアイデアを次世代に引き継ぐことができます。定義された入力、スコープ、制御された回答、明確な障害条件に関する問題を残すことができる。その後、人工知能で作業する科学者は、テスト可能な基盤から始めます。彼は仮定を変え、どの結論が消えるかを確認し、次にどの計算や測定を行う必要があるかを決定できる。そのような基盤により、各新しい試みを以前のすべての作業の繰り返しに変えることなく結果を蓄積することができます。

この章では、最初の限定的な一歩を踏み出します。レッドシフトドリフトでは、与えられた二つの宇宙モデルの識別可能性マップが作成された。初期の乱れや暗黒物質については、次の問題が定式化されているが、まだ観察の分析には持ち込まれていない。人工知能は本の範囲内でこれらのタスクで訓練されていないため、ニューラルネットワークの精度の評価と新しい物理学の発見に関する主張はない。次に,各改良点をオープンベンチマーク計算と比較する研究設計を提案する。

人工知能の異なる三つの役割

最初の役割は研究助手です。システムは、必要な定義を検索し、方程式の変換を提案し、プログラムを書き、可能な退化をリストし、反例を選択する。この作業の有用な結果は、アウトプット、コード、テーブル、または基礎となる仮定を示す文書という形で、対話とは別に存在すべきです。テキストが説得力があるように見えるが、それから計算を再構築できない場合、それはまだ科学的結果になっていません。そのようなテキストの準備速度は、物理モデルの正確性について何も言っていません。

ここでは簡単なチェック手順が必要です。まず、質問と許容可能な近似が固定される。次に、寸法、符号、制限ケース、および一般的なパラメータの保存を独立してチェックする。プログラムは、別の方法によって得られる答えと比較される。AIはこれらすべてのアクションを提案できるが、テストでは同じシステムに対して、自身の回答に同意するかどうかを再度問うべきではない。より信頼性の高い計算可能なコミットメント: 新しい相互作用がオフになっている場合、既知の制限は与えられた数値精度で復元しなければならない。

二番目の役割はエミュレータです。完全な数値ソルバは物理パラメータを受け取り、観測された量を計算する。エミュレータはこの表示を素早く近似することを学ぶ。その入力は初期スペクトルの成分密度とパラメータであり、出力はパワースペクトルの集合である。同じタイプの計算を何度も繰り返す必要がある場合、加速は特に有用です。しかし、新しい理論、新しいパラメータ範囲、または異なる器械モデルが問題をトレーニングセットを超えて移動させる可能性がある。

第三の役割は、シミュレーション、シミュレーションベースの推論、またはSBIの逆問題を解決することである。シミュレータは与えられたパラメータから可能な観測値を作成し、トレーニングされたモデルはパラメータと推論に必要なデータとの接続を近似する。所望の値を直接計算することが困難な場合、後方分布、確率関数または確率比を推定することができる。このクラスのメソッドは、特定のデータジェネレータと仮定のセットに関連付けられています。開発者による概要では、どの逆問題がこの可能性を開くかを説明している。[159]

これらの役割を混乱させることで、誤った期待が生じる。正確なエミュレータは、元のソルバーの物理をまだチェックしていない。人工宇宙のパラメータを注意深く復元しても、実際の宇宙が同じ方法で構成されていることが示されていない。私たちの問題セットでは、これらのレベルは分離されています。それぞれに、必要な入力、制御されたエラーおよび作業の完了と見なすことができる結果が示されます。これにより、研究タスク自体の意味を変えることなく、異なるAIシステムの使用が可能になる。

計算を速めながら、物理を保つ

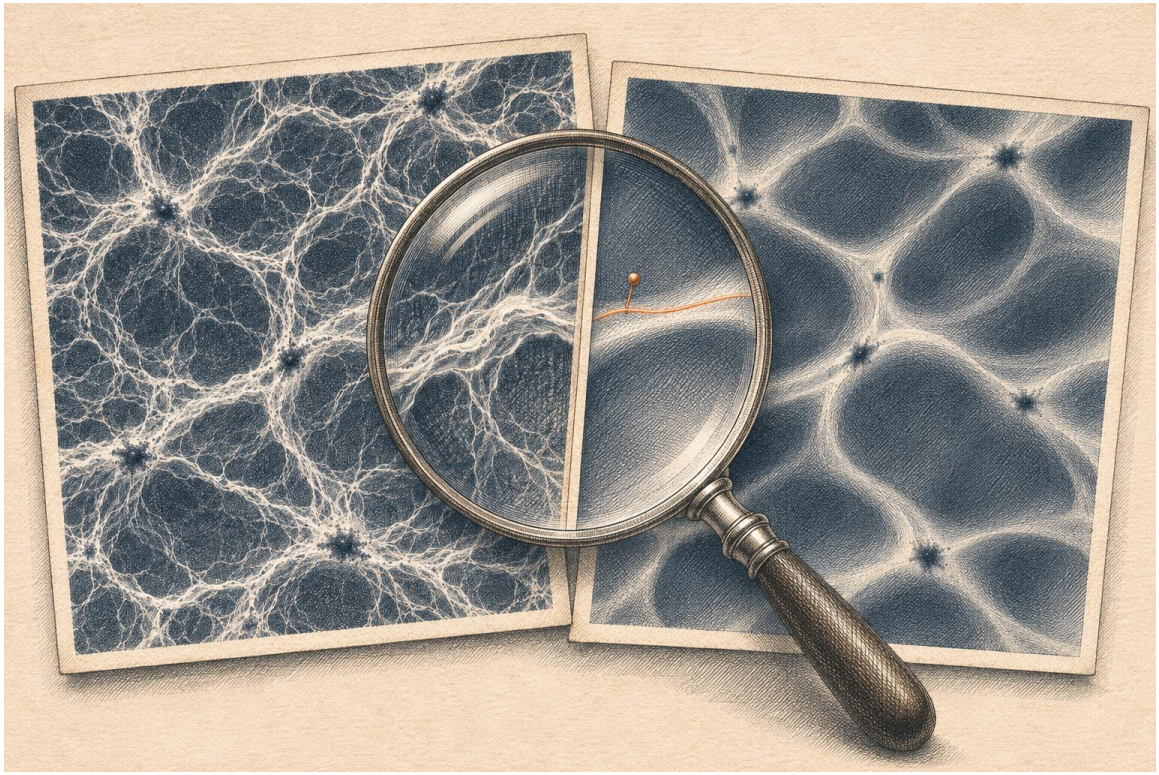
エミュレーションの実用的な例はCosmoPowerによって与えられます。完全宇宙論的エミュレーションと推論プロセスに関する論文は、特定のモデルとパラメータ範囲のための近似ソルバの準備、パッケージング、テストについて論じている。私たちの本にとって有用な原則は、高速予測器とともに、その近似値とそのテストされた場所に関する情報を共有することです。既製のエミュレータを使用すると、任意の新しいスカラーフィールドがトレーニングにすでに含まれていることを意味しない。そのような拡張では、新しい参照計算と個別の検証が必要になる。[160]

私たちが提案する制御は、トレーニングが見なかった点の選択したサンプルから始まります。その上で、予測された観察の誤差を測定し、このエラーが物理的パラメータに関する結論をどの程度シフトするかを確認する必要があります。許容領域の境界付近にある希

少な大きな誤差は、体積全体の小さな平均誤差よりも重要である。したがって、エラーの分布と特定の障害事例を公開する必要があります。エミュレーション精度が不十分な場合は、元のソルバーによって議論された点を再計算し、差分を検証ログに保存する必要があります。

もう一つの有用な例は、宇宙パラメータの変化と天体物理処方の変化をシミュレーションするCAMELSプロジェクトである。オリジナルの研究は、流体力学的実現と銀河形成と進化の過程の異なる記述を比較する。これは、アウトプットが宇宙論と天体物理学に同時に依存することを研究する実用的な可能性を示しています。ここで提案されているプログラムでは、そのようなセットは実験を整理するためのモデルとして機能する。CAMELSでアルゴリズムをトレーニングしておらず、このプロジェクトからダークマターに関する新しい制限を取得していません。[161]

今後の作業では、いくつかの実装はトレーニングの範囲外のままでいなければならない。サンプルをランダムな初期数だけでなく、物理的要件によっても分離することが重要である。前のシミュレータの新しい実装でうまく機能するアルゴリズムは、スターやアクティブなコアからフィードバックを変更した後にエラーを起こす可能性がある。この転送は別々にチェックする必要があります。しかし、いくつかの子音シミュレータは可能なすべてのエラーをカバーせず、自然に存在しない同じ近似を使用する可能性がある。



図版 29. 速い計算と、精密な基準。構造を描いた二つの模式的な像を、基準となる計算とその高速な近似として並べた。強調した部分は、まれにうまくいかない場合も含めて、局所的な誤差を調べる必要を示唆する。この図版は、本書で行った AI の学習結果を示すものではない。エミュレーターと元の計算プログラムを比較する、将来の手順を説明している。

正しい校正だけでは十分でない理由

ベイズ推論は、選択したモデル、データ、事前情報を接続する。物理パラメータが θ で示され、観察が x で示されている場合、その通常の表記は次のとおりです。

$$p(\theta \mid x, M) = \frac{p(x \mid \theta, M)\, p(\theta \mid M)}{p(x \mid M)}$$

ここではMシンボルが重要です。これには、物理的な記述、観察生成器、およびエラー慣例が含まれます。右辺の完璧な計算でさえ、Mに関して条件が残っている。新しい宇宙論的仮説のためには、手法の計算精度とモデル自体の有効性を別々に研究する必要がある。さもなければ、狭いパラメータ間隔は、過度に制限された人工世界の族内で信頼を示すことができる。このような効果の疑いは、トレーニングサンプルを増やすだけでなく、セットアップと独立した観察を拡大することで検証される。

シミュレーションに基づくキャリブレーションであるSBCは、宣言された関節分布から生成されたパラメータとデータのアルゴリズムを制御することを提案する。後方サンプル

間でデータを生成するパラメータの位置が、期待されるランク分布と一致するかどうかをチェックする。この方法は計算誤差を見つけるのに有用である。しかし、与えられたシミュレータに対するキャリブレーションの成功は、そのシミュレータの物理的真理を確立しず、すべての小さなパラメータ範囲で良好な動作を保証するものではない。この結論の境界は、テストの結果に付随するべきです。[162]

一次非ガウス性の導出に関するAlokda、Porciani、Eggemeierの研究は、平均カバレッジテストだけでは不十分な特定の例を検証している。著者らはニューラルネットワーク手法と明示的な確率推論を比較し,固定パラメータに対する分布の挙動を検討する。研究では、パワースペクトルとバイスペクトラムを組み合わせることで、明示的な確率推論よりも広いニューラルネットワーク分布を生成することができるが、通常の平均テストでは問題を明らかにしなかった。これは特定の手法の比較の結果であり、SBIの全体的な失敗の証拠ではなく、異なるシミュレータ間の転送のテストも構成しない。[163]

私たちの目的のために、これは将来のプロトコルに対する特定の要件を意味します。異なる領域におけるパラメータの回復、事前分布の境界に対する感度、および統計を組み合わせる際の挙動を別々にチェックする必要がある。予測テストは、トレーニング中に使用されなかった機能でも実行されるべきである。最後に、異なるエラーモデルまたは別の物理ジェネレータでテストする必要がある。このようなテストは宣言された不適合に対する抵抗を検査し、その成功さえも選択されたすべての生成器間で未知の一般的なエラーの可能性を残します。

二つの世界の識別可能性の地図

複雑なシステムを訓練する前に、より単純な問題を解決することは有用である:パラメータチューニングによって吸収できない選択された観察に差があるか? ダークエネルギーに関する章では、宇宙定数から状態方程式のわずかな偏差を持つスカラー場の例が構築されている。追加ノイズのないドリフト予測は、ΛCDMモデルのファミリーと比較される。八つのポイントは、z = 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2; 2,5および3に位置しています。これは架空の格子であり、実際の分光目標のリストではない。

競合モデルでは、H_0、物質Ω_{m0}の分数、および総付加シフトBは自由に変化する。パラメータBは、速度変位の未知の定数成分を表す。各点の独立誤差に加えて、レッドシフトに応じて一つの相関モードが導入される。その形状と振幅は事前に発表されています。した

がって、結果を再現し、異なる共変量でどのくらい変化するかを確認することができます。相関性の仮定は問題の一部であり、計算の隠れた設定ではない。

$$C_{ij} = \sigma^2 \delta_{ij} + \tau^2 u_i u_j, \qquad u_i = \frac{z_i - \bar{z}}{\max_j |z_j - \bar{z}|}, \qquad \tau = 0.5 \text{ cm/s}$$

独立誤差 σ は蓄積された速度シフトを指し、八つの点すべてに対して同じである。相関モードは、ゼロ平均とガウス分布を持つランダム振幅を記述する。その効果はすでにCに含まれています。自由Bはすべての点に対して等しく作用し、中心となる非一様モードuと異なる。共分散は既知のものであり、宇宙パラメータを選択する際に変化しない。実際の機器は、スペクトルの特性と測定の安定性の管理から派生しなければならない、より複雑な説明を必要とします。

yをスカラーモデルの付加的なノイズのないシフトのベクトルとし、fΛ を宇宙定数を持つモデルの予測とする。精度の組み合わせごとに、最小二乗不一致が計算される。さらに、中央の70 km/s/Mpcと幅sHで条件付き独立外部ガウス制約H_0を指定できます。

$$Q_* = \min_{H_0, \Omega_{m0}, B} \left[\left(\mathbf{y} - \mathbf{f}_\Lambda - B\mathbf{1}\right)^{\mathsf{T}} C^{-1} \left(\mathbf{y} - \mathbf{f}_\Lambda - B\mathbf{1}\right) + \frac{(H_0 - 70)^2}{s_H^2} \right]$$

外部の制約がなければ、最後の用語は失われます。この式はよく知られたプロファイリング法を使用し、エクササイズの新規性は特定の定式化と計算結果にある。Qは調整後にどのくらいの相違が残るかを示します。シグマ番号、検出確率、または期待される情報ゲインではありません。このような結論を得るためには、両方のモデルからのランダムデータ、所定の決定ルール、そのエラーの頻度のチェックなど、別の計算が必要である。ここでは決定論的な段階のみが行われる。

二十年間、 σ = 1 cm/s の場合に、Q = 0,316615 が得られた。パラメーターを調整した Λ モデルは、H_0 を約 55,66 km/s/Mpc、Ω_{m0} を約 0,3232、B を約 0,2403 cm/s に選ぶ。これらの数値は、現実の宇宙のパラメーターの推定値ではない。許されたパラメーターをどう変えると、代替モデルが選ばれた曲線に近づくかを示している。仮定上の制約 H_0 = 70 ± 1 km/s/Mpc を加えると、極小値は Q = 1,565071 に上がる。採用した汎関数では、それまでの補償に大きなペナルティがかかるようになるためである。

とくに有用なのは、制約を組み合わせた検証の結果である。B だけを 0 ± 0,1 cm/s に制約すると、Q = 0,331525 にとどまる。同じ制約を、H_0 に対する外部制約に加えると、Q = 3,420077 となる。つまり、校正の影響は、ほかの調整の自由度がすでにどこまで取り除かれているかに依存する。この問題では、二つの制約が互いを補う。この挙動は、個々の

精度の一覧だけからは導けない。総合的なモデルと共通の誤差体系について計算する必要がある。

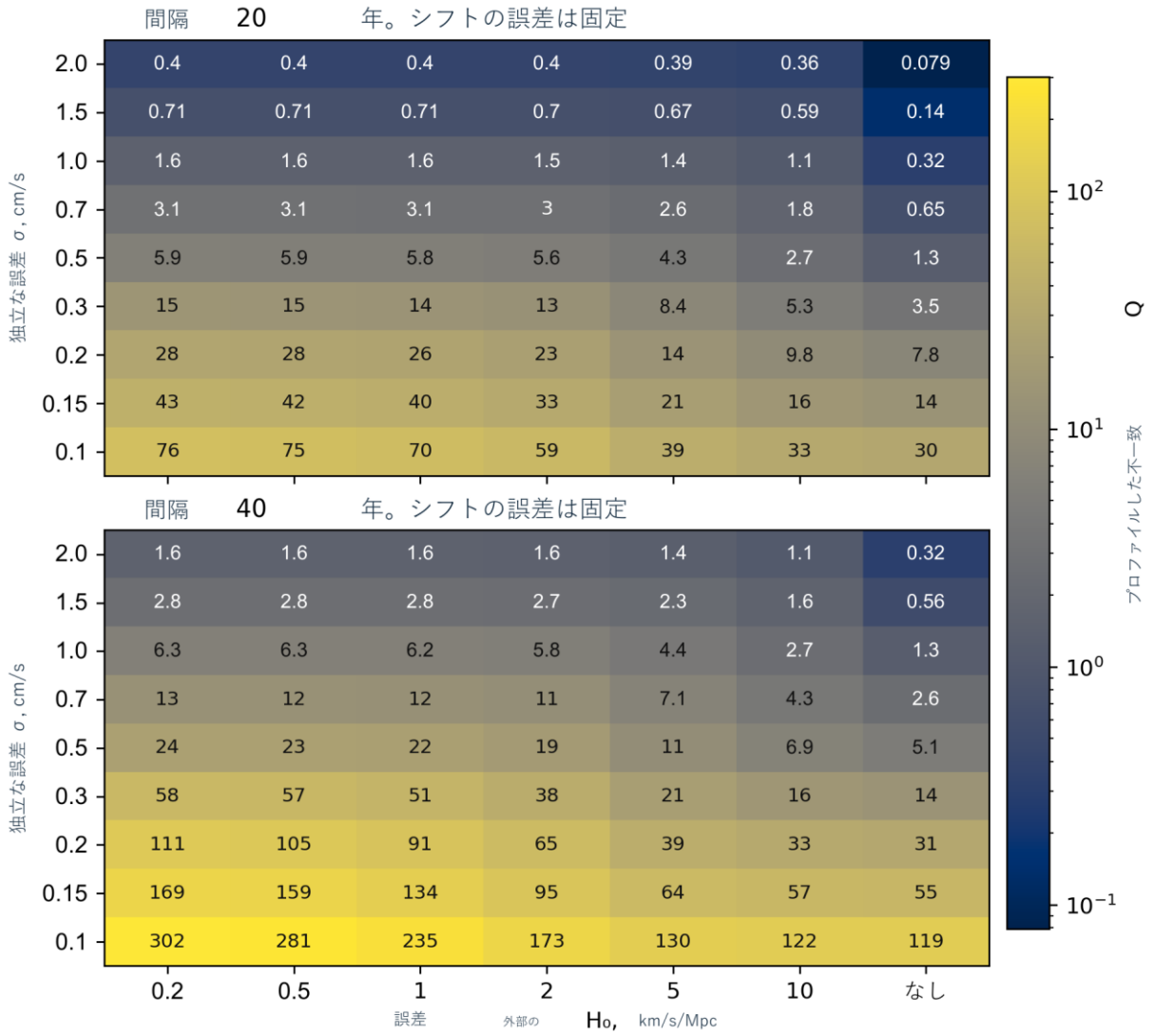


図9。プロファイルされた発散マップQ:二つの観察期間、九つの独立したσエラー、七つの外部制約オプションH$_0$。相関振幅 τ = 0,5 cm/s は固定される; "no" は外部制限 H$_0$ を含まないことを意味する。20から40年に移動すると、蓄積された速度シフトの誤差が保存される。これは条件付き地図であり、デバイスの予測ではなく、Qは統計的に有意ではない。完全な値と仮定は、計算付録で利用可能です。

合計126の組み合わせが計算され、条件付き制約$\Omega_{m0} = 0,3 \pm 0,01$も追加比較される。二十年から四十年に移動すると、速度シフトの共分散は人工的に保存される。したがって、外部の制約がなければQは正確に四倍に増加する:信号と最適Bは二倍になり、二次測度は四倍になる。これはプログラムの有用なチェックです。長期観察の実際の利点は、機器の老化、サンプリングの変化、エラー相関、繰り返し分光のコストによって異なる場合があります。

σ = 0,2 cm/sでは、外部制約のない二十年の計算によりQ = 7,795838が与えられ、指定された制限H_0 — 26,349304が与えられる。数値は、再生の制御と精度に対する生産の感度を示すために有用である。彼らは将来の望遠鏡の必要な精度を決定しません。これを行うには、スペクトル線、アクセス可能なオブジェクト、ソース自身の加速度、キャリブレーション手順、異なる結果を得る可能性を含める必要がある。H_0の実際の外部測定は、宇宙論に依存し、基礎となるデータと体系的なエラーを共有することもあります。

次の実験をどう選ぶか

矛盾マップは方向を見つけるのに役立ちますが、最適な実験を選択しません。与えられたスカラー予測を考慮し、未知のパラメータ、候補データ、観察コストに対して平均的ではない。次のステップは、例えば、機器の安定性の向上、レッドシフト範囲の拡大、パラメータの独立制約など、さまざまな実現可能な計画を特定することである。各計画について、エラー、リソース、許容可能な物理モデルも同様に記述しなければならない。それ以外の場合、比較は任意に選択された仮定の利点に還元される。

この選択を行うためのよく知られた方法の一つは、期待される情報獲得である。目的がモデル間の区別である場合、設計の有用性は、最終的な測定後の指標の確率分布の平均変化として定義することができる。ベイズ計画は、モデルの事前確率、パラメータ分布、データの予測分布を必要とする。このようなユーティリティの近似計算法は、特にFosterらによって検討されている。私たちのコードでは、この値は計算されません。計算されたマップQはそれを置き換えません。[164]

開かれた探究を続けるための三つの課題

最初のタスクには、ドリフトマップとその制御値の再現という、動作可能な狭い標準がすでに存在する。その次のレベルは、競合する各モデルに対するノイズ実装の同じ分析である。アクセラレータは、直接計算と比較してトレーニングされ、新しい共分散への転送がテストされる。物理層は現実的なスペクトルとアクセス可能なオブジェクトを必要とする。AIシステムは、事前に宣言された許容されるエラーで計算コストを削減したり、独立した計算によって確認できる特定の以前に欠落した変性を見つけた場合に有用であると考えられている。

第二の課題は、他の機能に関するものだ。完全に定義されたメカニズムのペアを選択し、許容可能な調整後にパワースペクトルが近い領域を見つける必要があります。バイスペク

トラルと観測された偏光結果は、同じパラメータから計算される。各統計が独自の特異点を持つようにすることはできません:それから単一の起源のテストは消えます。オープンセットでは、これはまだ仕様です。我々は、一次障害の正しい生成、観測可能な量への転送と一般的な共分散を必要とする;本はそのような本格的な分析を含まない。

三つ目の問題は、物体の集団と暗黒物質の一般的な微小物理学を結びつける。選択した自己散乱の法則では、重力レンズによって検出された銀河と塊のアンサンブルの特性を同時に予測する必要がある。比較は、形成履歴と天体物理フィードバックの分布を考慮に入れなければならない。個体群の一部は独立したテストのために残され、相互作用パラメータは共通に保たれている。このタスクは、仕様として記述される。実証済みの生成器、選択モデルおよび適切な観察が得られるまで、散乱断面積の制約にはならない。

数学的な意味を確かめる

もう一つの可能なAI支援は、個々のステートメントを証明システムによって検証できる形式に変換することである。HepLeanプロジェクトは、リーンにおける高エネルギー物理学の定義と導出を形式化する例を示している。FormalScienceの研究は、人間の参加による自動形式化を調査し、特に元のタスクの意味の保存に焦点を当てている。本の場合、合理的な最初のステップは制限される: 選択した代数的補題を形式的に検証するか、記載された仮定の従属性を検証する。宇宙モデルの完全な形式化はここでは完了していない。[165] [166]

成功した形式的テストでさえ、書かれた定義内で動作します。翻訳中に正のエネルギーの状態が消えたり、観測された量の意味が変わったりした場合、証明は論理的に正しく、物理的に不適当である可能性があります。したがって、正式な声明とともに、元の記録、表記の対応、および適用範囲を保管する必要があります。制限ケースと形式的証明の数値検証には異なる目的がある。ドリフト計算で数値チェックが行われました。それらを物理的な構造全体の機械証明と呼ぶことは間違いです。

検証するには

テストは標準を再現することから始まります。独立した研究者が公開コードを実行し、Qテーブルを取得し、それをベンチマーク番号と比較する。その後、別のオプティマイザでプロファイルを確認し、相関モードをオフにし、以前の独立したケースを復元します。四つの制御点において、最小値の差は3×10^{-13}より小さい。インターバルテストを二倍に

する場合、外部制約なしでQの正確な四倍の変化は、採用されたスケーリングモデルをテストする。これらの結果は、自然界のスカラー仮説の確認ではなく、計算を指す。

次の段階では、人工データを用いる試験をあらかじめ定める必要がある。モデルを識別する規則を定義し、比較する双方のモデルから観測データを生成して、誤った選択と差の見逃しの頻度を測定する。学習を行う手法については、直接的な解法に対する精度、パラメーターの異なる領域での挙動、物理的な規定を変えた場合の結果を別々に検証する。学習用、検証用、最終試験用のデータ集合の境界は固定しなければならない。手法の調整のために最後の集合を調べれば、それも学習の一部になってしまう。



図版 30. 取り置いたデータによる検証。模式的な宇宙論の地図を別々の組に分け、学習、中間の検証、最終の試験を表した。最後のデータセットは、手法の調整に使わないようにしておく。これは研究の規律を表すイメージであり、実際のカタログを分割する完成済みの手順ではない。用紙を分けて描いていても、共通の校正やデータ間の物理的な依存関係は、別途考慮する必要がある。

物理的レベルでは、検証可能な機器モデルと重要な不確実性の独立制御を備えた測定が必要である。ドリフトの場合、これは安定した分光スケールとソースの説明を意味します。他の特徴 - 転送およびフォアグラウンドを伴う統計の共同分析; 暗黒物質 - 人口と選択を説明する。次の研究者はどんなレベルからでも始められますが、名前を付けなければなりま

せん。科学的な貢献は、新しいテストが実施されたり、持続的な違いが発見されたり、以前の定式化が隠れていたことが証明されたりする。

エピローグ

世界は、別の世界の中でスペースを取る必要はありません。空間幾何学は内部次元によって決定でき、その起源に関する質問には物理モデルと観測可能な結果が必要である。私たちの研究は、この通常の設定の変化から始まりました。本書の終わりまでに、空間の形、粒子の特性、時間の方向、宇宙拡大の運命といった、遠く離れた問題を結ぶことを可能にしました。

いくつかの答えは、珍しい話題の最初の印象よりも信頼性が高いことが判明しました。ホットな履歴にはいくつかの独立したサポートがある。地平線とエッジの区別は、正確な定義によって与えられる。数学は、壁のない有限空間を可能にする。これらの結果は、宇宙論の他の質問がまだ開かれているからといって消えるわけではありません。

パターンの継続にどのくらい依存するかが明らかになった場所もあります。観察された過去に基づいて、一つの未来を任意に割り当てることはできない。ある理論体制において成功した幾何学設計は、まだ我々の宇宙への架け橋を必要としている。早期イベントの可能なトレースは、同様のデータを生成することができるメカニズムと比較する必要がある。そのような制限は、次の研究の特定の場所を示しています。

一般的なパラメータは特に有用でした。同じ磁場質量は、初期の宇宙や後期の恒星系で作用しなければならない。隠れた空間の半径は、いくつかの物理的スケールを定義する。新しい粒子の一つのモデルは、実験室の制約に耐え、有効な宇宙履歴を生成する必要がある。仮説がより独立したコミットメントをするほど、その成功や失敗はより意味のあるものとなる。

しかし、失敗は必ずしも研究の設計上の誤りを意味しません。共通のパラメータ範囲の欠如、与えられたデバイスと二つのメカニズムを区別できないこと、または便利なソリューションの不安定性は、特定の結果である。彼らはさらなる作業を誤った確信から解放し、どの条件が意味のある方法で変更される必要があるかを示す。モデルの新バージョンは、再びチェックされる新しいコミットメントを受け取ります。

このロジックは、最も大胆な質問にも持続します。利用可能な力学と効果が決定されると、他の宇宙領域、創発空間、または重力の量子構造が物理プログラムの一部になる可能性がある。この前に、彼らは考えを指示することができますが、結論の力は異なっていま

す。アイデアがより珍しいほど、それはあなたがそれを放棄するか、それを大きく変更しなければならない特定の観察に名前を付けることができることです。

私たちは、知識の進歩を拡張マップとして想像する傾向があります:別の物体、より遠くの銀河、初期の時代。進歩はその形をとることがあります。他にも、地図の変更を構成するのに使われた量があります。異なる測定を接続することが可能になるか、以前の質問が互換性のない定義を組み合わせたことを発見する。新しい結果は、大きくて身近な主張の意味を変える小さな数学的補正から始まるかもしれません。

計算の例は、この境界を具体化する。固定パラメータに対して著しく異なる二つのモデルは、それらを適合させた後に近づく。独立した測定と組み合わせると、キャリブレーションはほとんど役に立たない。量子系と古典系は初期分布に一致し、その発展において発散する。それぞれの結果は、どの仮定が前の結論と次の有意義なテストを探すための場所を伝えます。

本書で提案されているタスクのいくつかは、初期の二つのメカニズムの識別性を計算し、独立したサンプル上で暗黒物質の一般的なモデルをテストし、宇宙学的な分野と正確な実験室制限を接続する。他にも、測定器や理論に関する多くの作業が必要です。それらすべてにとって、進歩の一つの基準は残っています:世界のどの可能な配置が自然が測定できるものと互換性があるかをより明確にするかどうかです。

おそらく次の宇宙の画像は、今日無関係に見える概念を使用します。おそらく身近な空間と時間は、非常に正確な近似として残るでしょう。決定は、どの接続を導出し検証できるかによって異なります。研究に必要な場所は、主に定式化された仮説とまだ得られていない実験の結果の間にあります。

附属書A

計算と、その適用範囲

この付録は、仮定、公式、入力、出力境界といった主テキストの計算例をカバーする。数字は、観測カタログの新しい扱いではありません。イラストレーションモデルのパラメータは明示的に選択されています。特定の値との合意がすべてのデータとの合意を意味するわけではありません。プログラムを起動するための手順は、計算のための付属の指示に与えられます。

場公式は単位 $c=\hbar=1$ と還元プランク質量 M_{pl} を用いる。距離公式は、光cの速度を明示的に保持する。今日の目盛係数は $N=\ln a$ で、素数は特に明記しない限り N に対して微分を示す。異なる例における同一文字は、共有物理モデルを意味するものではない:各例は自身の仮定から始まる。

宇宙年齢と、異なる三つの距離

非コンパクト空間位相 R^3, 非相対論的物質, 有効放射成分と宇宙定数を持つ平坦モデルをとりましょう。ここで $H_0=67{,}4$ km/s/Mpc、$\Omega_m=0{,}315$、$\Omega_r=0{,}000092$ と $\Omega_\Lambda=0{,}684908$。拡張関数は次のようになります。

$$E(a) \equiv \frac{H(a)}{H_0} = \sqrt{\Omega_r a^{-4} + \Omega_m a^{-3} + \Omega_\Lambda}.$$

これは便利な解析モデルであり、プランク計算の正確な再現ではありません。特に、相対論的から非相対的行動への大規模ニュートリノの遷移はここではモデル化されていない。年齢と半径コ移動距離は、異なる積分から得られる:最初の合計宇宙観察者の適切な時間、第二 - コムービング座標内の光信号の経路。[4] [6]

$$t(a) = \frac{1}{H_0}\int_0^a \frac{d\tilde{a}}{\tilde{a}E(\tilde{a})}, \qquad D_C(z) = \frac{c}{H_0}\int_{1/(1+z)}^1 \frac{d\tilde{a}}{\tilde{a}^2 E(\tilde{a})}.$$

積分の下限を零にすることは、熱い宇宙のモデルを選んだ仕方で延長することを意味する。その記述が絶対的な始まりにまで適用できる証明ではない。z=1 では、光の伝播時間は 79.5億年、現在の共動距離は 110.92億光年となる。放射時の固有距離は 55.46億光年であり、この平坦なモデルでは角径距離に等しい。光度距離は 221.85億光年である。異なる値は、距離を定める異なる方法に対応する。

$$D_A = \frac{D_C}{1+z}, \qquad D_L = (1+z)D_C.$$

未来まで無期限に続くモデルについて、粒子地平線と将来の事象地平線の現在の半径は次のように記述される。イベント地平線は、対応する積分が収束した場合にのみ存在する。[1]

$$R_{\mathrm{p},0} = \frac{c}{H_0}\int_0^1 \frac{da}{a^2E(a)}, \qquad R_{\mathrm{e},0} = \frac{c}{H_0}\int_1^\infty \frac{da}{a^2E(a)}, \qquad R_{H,0} = \frac{c}{H_0}.$$

数値積分で得られる年齢は 137.91億年、半径は順に 461.33億光年、166.79億光年、145.07億光年である。それぞれの値は、それぞれ異なる問いに対応する。ハッブル半径は現在の膨張率に依存する。事象の地平線は、仮定した未来にも依存する。将来の膨張則を変えれば、観測可能な過去の履歴をすべて保ったまま、二つ目の積分を変えることができる。

スカラー場のポテンシャルを復元するには

再構成は、検討中の標準場に対して正の関数 q=1+w から始まる。u=ϕ/M_{pl}, S=ρ_{ϕ}/(3$M_{pl}^2H_0^2$), U=V/(3$M_{pl}^2H_0^2$) とする。ダストΩ_{m0}=0,3のフラットモデルでは、放射線なしで滑らかなプロファイルを設定しました。

$$q(N) = A\exp\left[-\frac{(N+b)^2}{2s^2}\right], \qquad A = 0.25, \quad s = 0.2, \quad b = \ln 1.5.$$

S(0)=0,7では、エネルギーとフリードマン方程式の保存法則により、密度、場軌道、ポテンシャルエネルギーを見つけることができます。フィールド速度の正の徴候が選択される。この再構成法は従来の応用を知られており、本書での使用は新しい方法ではないと主張されている。[157] [59]

$$S' = -3qS, \qquad E^2 = 0.3e^{-3N} + S, \qquad u' = \sqrt{\frac{3qS}{E^2}}, \qquad U = S\left(1 - \frac{q}{2}\right).$$

得られたパラメトリックな関係 U(u) は、その後、運動方程式を解き直して検証する。指定した w を恒等式に再び代入するだけでは、検証として弱すぎる。そのため、再構成したポテンシャルを使い、クライン・ゴルドン方程式を別途積分する。

$$u'' + \left(3 + \frac{E'}{E}\right)u' + \frac{3U_{,u}}{E^2} = 0.$$

数値的な検証では、12 001 点と 24 001 点の格子でポテンシャルを再構成し、その後、クライン・ゴルドン方程式とフリードマン方程式を別途積分した。0≤z≤3 の区間で、w の

最大絶対差は 2 × 10−11 を超えず、H の相対差も 4 × 10−12 を超えなかった。ポテンシャルの極小は z≈0,199002 で見つかった。現在の場は、運動エネルギーを使いながら、その小さな区間をすでに登っている。別の範囲でポテンシャルの曲率が負になること自体は、運動項が負であることや、勾配不安定性を意味しない。

均質な初期データの小さな変化をテストすることは有用であるが、すべての空間的障害の分析を置き換えるものではない。無限の未来への同じガウスプロファイルの文字通りの継続は、フィールドの有限リミット値とポテンシャルの発散曲率につながる。N→∞の時は、

$$\frac{V_{,\phi\phi}}{H^2} = -\frac{(N+b)^2}{4s^4} + \frac{3(N+b)}{2s^2} + \frac{1}{2s^2} + o(1).$$

リミットポイントは無限の時間にしか到達しません。これは明日の壊滅的な予測ではなく、選択した関数の正確な大域的継続における欠陥である:連続二次微分を持つポテンシャルは、この終末を通して引き出せない。本書では、そのような結果は、有限間隔で良いマッチの後ろに隠れるのではなく、適切な仮説を選択するために使用される。

磁場が電磁気学と線形に関係している場合は、Δ α / α = ζ (u − u_0)をセットします。その後、実験室時計は結合 ζ と現在の磁場速度の積を制限します。

$$\frac{\dot{\alpha}}{\alpha} = \zeta H_0 \sqrt{3\Omega_{\phi 0} q_0}.$$

H_0=70 km/s/Mpcと ζ =10^{-6}では、選択したプロファイルは年間約1,86·10^{-17}を提供します。これは具体的な例です。ドリフト制約 α から、追加の仮定なしに普遍的制約 w を得ることは不可能である: ζ の結合はより小さく、局所力学は宇宙論と異なる。同値実験への転送は、身体の構成と可能な遮蔽のモデルも必要である。[167] [60] [168]

自由度と安定性の条件

復元された拡張はまだ実行可能な理論を定義していない。必要なのはアクション、物理的な変数、そしてそれらが信頼できるエネルギー領域です。本の例では、最初の作用は一般相対性理論、標準スカラー場および別々に保存されたコールドマターである。シグネチャ−+++では、次のようになります。

$$S = \int d^4x\sqrt{-g}\left[\frac{M_{\rm Pl}^2}{2}R - \frac{1}{2}g^{\mu\nu}\partial_\mu\phi\partial_\nu\phi - V(\phi)\right] + S_m[g,\psi_m].$$

まず、物質とは別に、重力と場の自由度を考えます。計量の空間分解において、空間計量とスカラー場のうち六つの成分は七つの構成変数を与える。時間関数と三つのシフトコンポーネントは制約乗算器として機能する。四つのファーストクラスの制約と座標自由度は、十四段階変数のうち八つを取り除く。二つのテンソル偏光と一つのスカラー:三つの伝播自由度が残っている。材料セクターは独自の障害を追加します。

この計算は、より高い微分を持つ任意の作用に転送できない。付加項は時々新しいモードを導入し、時には縮退と追加の制限によって束縛される。したがって、研究は完全な作用のバリエーションから始まります。最初にゲージを選択し、誤って制約方程式を失うと、結果の「安定」な方程式セットは元の理論を全く記述しないかもしれません。自動推論の場合、ダイナミクス制約の保存は独立して検証されるべきである。

二次の作用によって何を検証するか

非動的変数を除去した後、二次作用は小さな摂動の方程式の主要部分を分離する。一つの対角スカラーモード ζ の場合、追加係数1/2のない正規化が便利です。

$$S_\zeta^{(2)} = \int dt\, d^3x\, a^3 Q_s\left[\dot\zeta^2 - \frac{c_s^2}{a^2}(\partial_i\zeta)^2 + \cdots\right].$$

ここでは、楕円体は質量および他のより低い微分項を含み、他の動的モードが存在する場合、それらとの接続を含む。検討中のレジーム内の伝播モードには、速度係数$Q_s>0$と正のc_s^2の正しい徴候が必要である。負Q_sはゴーストダイナミクスを意味し、負c_s^2は適用範囲内でかなり短い波の急速な増加を引き起こす。これらの条件は特定の危険性を試験するが、非線形安定性や量子完全性を証明しない。

ベッリーニとサヴィツキは、ホルンデスキーのクラスに属するスカラー・テンソルモデルの線形動力学について、有用なパラメーター化を示した。彼らの記法では $Q_s=2M^{*2}D/(2$

$-\alpha_B)^2$ であり、$D=\alpha_K+3\alpha_B^2/2$ である。テンソル部門にも、正の運動項と、許される伝播速度が必要になる。これらの式は、指定された作用のクラスと、選んだ変数系について成り立つ。とくに、$\phi\dot{}$ で割る変数は、場が停止すると使えなくなる場合がある。その係数が一つ発散するだけでは、物理的な破綻が証明されたことにはならない。[169]

複数のスカラーモードが存在する場合、運動行列 K は単一の Q_s の代わりに考慮され、勾配項は行列 G によって与えられる。制約の正しい除去の後、K は物理動的モードに対して正定値であるべきであり、二乗速度は一般化された固有値問題 $Gv = c^2Kv$ によって決定される。理想的な塵の場合、音速ゼロは許容可能であり、負と等価ではありません。その重力密度の増加は、その完全なダイナミクスに基づいて評価されなければならず、各成長モードを病理学として宣言してはならない。

負の有効二乗質量も成長時間解析を必要とする。宇宙スケールでの遅い進化はモデルの物理的な部分であり、使用される範囲の爆発的な成長は選択した背景を破壊する。したがって、記号をチェックするには、方程式の解法と特性時間の比較が伴う必要があります。短波長主成分の分析と長期進化の解析は、異なる疑問に答えます。

本書の正準的なプロファイルを検証する

$X=-g^{\mu\nu}\partial\mu\phi\partial\nu\phi/2$のラグランジアンP(X,$\phi$)では、密度は2XPX−Pに等しく、局所コムービング記述におけるスカラー摂動の速度は以下の関係によって決定される。そのような一般的なクラスはGarrigaとMukhanovによって研究されました。P=X−Vでは標準結果c_s^2=1を得る。[170]

$$c_s^2 = \frac{P_X}{P_X + 2XP_{XX}} = 1 \quad (P = X - V).$$

これは直接確かめられる。場の摂動の作用の主要部分は、$a^3[(\delta\phi\dot{})^2-(\nabla\delta\phi)^2/a^2]/2$ を含む。とくに、ポテンシャルの導関数は、この二つの項の相対符号を変えない。完全な問題には、重力の拘束条件と、物質の摂動との相互作用も残る。この導出は、伝播する正準的なモードを検証するものであり、宇宙論的な系全体を積分することに代わるものではない。

これまでの記号 N=ln a, q=1+w, $S=\rho_\phi/(3M_{Pl}^2H_0^2)$, $u=\phi/M_{Pl}$ を用いる。例では q=0,25 $\exp[-(N+\ln1{,}5)^2/(2\times0{,}2^2)]$, S(0)=0,7, Ω_{m0}=0,3 である。保存則から $S' = -3qS$ と u'

^{2}=3qS/E^2 が従い、E=H/H$_0$ である。区間 0≤z≤3 で、q の形は厳密に正となり、S の正値性も保たれる。したがって、再構成した背景の運動エネルギー $q\rho_\phi/2$ は符号を変えない。

ベッリーニとサヴィツキのパラメーター化では、この最小結合した正準場について $\alpha_B=\alpha_M=\alpha_T=0$、$\alpha_K=\dot{\phi}^2/(H^2M_{Pl}^2)=u'^2$ となる。そのため、彼らのスカラーの運動項の係数は、とくに簡単な形をとる。

$$Q_s = \frac{M_{\rm Pl}^2}{2}u'^2 = \frac{3M_{\rm Pl}^2 qS}{2E^2} > 0.$$

これは既知のパラメータ化への標準作用の置換であり、新しい安定性公式ではない。Q$_s$ はこのパラメータ化におけるスカラーセクタを指し、塵は分離した力学系にとどまり、場との接続は完全方程式で保存されなければならない。極小 q の極限は注意を要する: 場は悪い時計となり、その速度に正規化された変数は通常の小さな摂動 $\delta\phi$ をうまく記述できないかもしれない。したがって、数値コードは変数のコンディショニングを制御し、必要に応じて通常のキャリブレーションに進む必要があります。そのような座標の選択における最小 Q$_s$ は、物理場の強い結合のスケールをまだ決定しない。

断熱的な微分 $c_a^2=\dot{p}_\phi/\dot{\rho}_\phi$ を別途計算しよう。$p_\phi=(q-1)\rho_\phi$ と $\rho_\phi'=-3q\rho_\phi$ を代入し、通常の微分によって次を得る。

$$c_a^2 = q - 1 - \frac{q'}{3q} = q - 1 + \frac{N + \ln 1.5}{3(0.2)^2}.$$

これは、伝搬の物理的速度ではなく、背景の変化の比率です。本書の数値チェックでは、c_a^2 は約 −9,1736 から 2,4109 まで変化し、z≈0,36668 で零になる。一方、正準モードの c_s^2 は全区間でユニティに等しい。c_a^2の符号のみに基づいてこのモデルを除けば、スカラー場の場合、圧力と密度の障害間の接続は選択した参照フレームに依存し、非断熱部分を含んでいる。

テストでは、Nに沿って24 001ポイントを使用しました。数値微分 p_ϕ と ρ_ϕ の独立比は導出c_a^2 と一致し、最大絶対不一致率は 9×10^{-6} より小さい。最小qは約$1{,}50\times10^{-6}$であり、最小u'^2は$2{,}25\times10^{-7}$である。これらの数は、指定された間隔とパラメータにのみ適用されます。彼らは、大きな摂動の下でポテンシャルまたはその行動のすべての継続の安定性を証明しない。

異なる二つの未来への適用

同じ制御は、共通の過去を持つ二つの滑らかな未来を構築することに適用される。ρA=Λ+Sa^{-3}、ρB=ρA exp(−3F)、F′ =g≥0の表記を維持しましょう。ここで S は、前の例から得られる正規化密度関数ではなく、この構造の正次元定数である。任意の有限 N に対して正の Λ, S および M で、次のものを得る。

$$q_A = \frac{Sa^{-3}}{\Lambda + Sa^{-3}} > 0, \qquad q_B = q_A + g(N) > 0, \qquad H_i^2 = \frac{Ma^{-3} + \rho_i}{3M_{\rm Pl}^2} > 0.$$

密度は正であるため、復元された運動エネルギー $q_i \rho_i/2$ も正である。どちらのアクションも標準的であり、スカラー主部分はc_s^2=1である。その結果、選択した軌道には、標準速度と短波勾配項の符号に欠陥はない。設計式を用いた解析テストであり、今後のモデルから乱れの別個の数値積分は行われていない。

遠い未来におけるAについて、qAはゼロになる傾向がある。この場は、時計のように、変数の退化選択になるが、これはまだ物理的不安定性ではない。試験された符号は、すべての非線形効果を排除せず、Bポテンシャルの非解析的結合に対する量子補正の許容性を確立しない。したがって、異なる地平線のステートメントは、その顕微鏡的起源の完全な監査ではなく、特定の制限で制御された背景サンプルの状態を保持する。

信頼できる計算はどこまでか

効果的な理論は、すべての顕微鏡的詳細を知らずに制御された低エネルギー記述を可能にする。Donohue氏は、このアプローチを使って計算可能な低エネルギー量子補正を重力にする方法を示した。したがって、高エネルギーにおける未知の物理学の存在は検証可能な計算を禁止しない。しかし、拡張の順序と破棄された用語の大きさは決定されなければなりません。[148]

新しい宇宙論的作用のために、物理周波数、Hおよび波数k/aは、適用性ΛEFTのスケールと比較されるべきである。弱い運動学では、標準正規化の後、相互作用は時々より強くなります。条件H≪ΛEFTとk/a≪ΛEFTは有用ですが、演算子の係数とループ拡張をチェックせずに不十分です。ΛEFTをPlanckマスに等しく割り当てることはできません。

放射線安定性は一つのステップを必要とします。すべての許可された相互作用を追加する場合、ポテンシャル項と運動項に対する補正を計算し、保護対称性を決定し、または正直に設定を指定する必要があります。復元されたプロファイルについては、そのような計

算はここで行われませんでした。その微視的連続と物質との完全連結は特定されていないため、すべての量子補正の小さいことを数値的に証明することはまだ不可能である。背景再構成は隠れた方法でこの情報を含まない。

結果が潜在的な補間の任意の精度に依存しないことを事前に要求することが有用である。その微分は乱れや相互作用のダイナミクスに含まれており、ほとんど同じ背景曲線が微分において異なる誤差を与えることができる。マルチレゾリューションテストと独立微分回復は、この特定の不確実性を評価する必要がある。彼らの成功は計算実装を確認するが、選択したアクションの物理的検証を置き換えるものではない。

次の特定のタスクは、これらの接続を選択し、完全なシステムの二次作用を導出し、そのスペクトルをチェックし、使用される範囲上の障害を統合することである。次に、明示的に選択された有効理論において最初の量子補正を行い、残差誤差を推定する。検証済み標準主成分,実行中の背景制御,放射安定性に関する未解決問題という三つの結果が報告されている。この形式では、既製の基礎理論として一つの成功したグラフを提示することなく証明を構築することができます。

赤方偏移のドリフトと、パラメーターの自由度

同じガウスプロファイルq(N)を、宇宙定数と比較してみましょう。両方の最初のモデルでは、H_0=70 km/s/Mpc、Ω_{m0}=0,3および$\Omega_{\phi 0}$=0,7;間隔0≤z≤3の放射線は考慮されません。Δt_0=20ジュリアン年に観測されたコムービング吸収体に対して、時間線形近似は速度変化の分光学的等価性を与える。

$$\Delta v(z) = \frac{c\,\Delta z}{1+z} \simeq c H_0 \Delta t_0 \left[1 - \frac{E(z)}{1+z}\right].$$

これはFLRWとレッドシフトの定義の運動学的結果です。Δvの値はスペクトルの小さなシフトを表しており、遠方の銀河のニュートン速度の変化ではない。E(z)を計算するには宇宙モデルが必要である。自己加速、オブザーバーの動きとデバイスのスケールの変化は、これまでのところ平均信号から除外されている。[10] [14]

z=0,5では、宇宙定数を持つモデルは+5,476 cm/sを与え、スカラーモデルは+3,996 cm/sを与える。z=1の値は+5,136と+3,448 cm/s、z=3-－4,946と−5,319 cm/sです。選択した間隔における最大差分係数は、z=0,777 の周りの 1,823 cm/s である。非自明なゼロ交差

は、定数のz≈2,089とスカラーのz≈1,945で起こる。すべての数値は、観測値からの推定ではなく、指定されたパラメータを指します。

他の宇宙論的パラメーターを選択した後、どの部分が保存されているかを確認しましょう。条件付き測定値を z=0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2; 2,5; 3 に設定します。平均値はスカラー予測と同等であり、ランダムノイズは追加されない。それぞれは、特に二つのエポック間の差に対して独立エラー σ_i=1 cm/sが割り当てられる。このような精度とカバレッジは、特定のデバイスの特性から従わない。当初は、曲線の数学的識別性をインストールを構築する問題から分離する必要があります。

仮定上の平均値に、宇宙定数をもつ平坦なモデルを当てはめる。さらに、八つの測定に共通する校正の残留シフト B を、cm/s の単位で許すことにする。これは、ガウス型プロファイルの無次元量 b とは異なる。正規化した残差の二乗和を最小化する。

$$Q(H_0, \Omega_{m0}, B) = \sum_{i=1}^{8} \frac{[\Delta v_\phi(z_i) - \Delta v_\Lambda(z_i; H_0, \Omega_{m0}) - B]^2}{\sigma_i^2}.$$

H_0=70, Ω_{m0}=0,3, B=0 を固定すると、Q=11,007 となる。B=0 のまま H_0 と Ω_{m0} を自由に当てはめると、Q=0,333 となり、極小は H_0=57,106 km/s/Mpc と Ω_{m0}=0,31760 の付近にある。B も自由にすると、極小は Q=0,317 に下がり、H_0≈55,696 km/s/Mpc, Ω_{m0}≈0,32336, B≈0,246 cm/s となる。元の差の大半は、宇宙論パラメーターの自由度に吸収される。この特定の格子では、共通の追加シフトによる結果の変化は、それよりはるかに小さい。

ここでは、Qは測定された統計 χ^2、検出の確率、または標準偏差の数ではありません。条件付きデータは、ランダムノイズやパラメータの外部制約、実際のエラー共分散を含まない。発見された低いH_0は、宇宙論的観測の全体性に基づいて許容できるとは宣言できない: このような観察はこの比較ではまったく使用されなかった。それらを追加すると、結合確率関数が必要となり、補償調整のコストが変わる。

一つの一般Bは、すべての分光誤差もカバーしない。異なるインストールは、個々のオフセットと波長依存歪みを持つ可能性がある。各点が完全独立な未知シフトを許されると、平均の任意の差はこれらの自由パラメータに吸収される。次の計算には、物理的にキャリブレーションされた共分散、実スペクトル、およびソース選択を含める必要がある。二つの固定曲線間の最大距離のみを比較して実験を設計するだけでは不十分である。

数値結果は二つの光路を通じてさらに検証される。まず、受信時間の変化を統合して、同じ吸収体と観察者との間の移動光子経路の等式条件を新たに解く。この計算は、ほぼ等しい赤方偏移を減算しないように、小規模の因子増分で実行される。両方のモデルのz=0,5とz=3の場合、線形二十年式との差は4·10⁻⁸ cm/s未満である。これは、計算のチェックと最終時間ステップの小さであり、自然に選択したスカラーフィールドのチェックではありません。

プロファイルと、局所的に区別できない方向

$$C_{ij} = \sigma^2 \delta_{ij} + \tau^2 u_i u_j, \qquad u_i = \frac{z_i - \bar{z}}{\max_j |z_j - \bar{z}|}, \qquad \tau = 0.5 \ \mathrm{cm/s}$$

C は、$\sigma > 0$ に対して正定値である。z において不均一であるモード u のランダム振幅は、平均とガウス分散 τ^2 がゼロであり、その積分は記録された共分散を与える。自由共通シフト B は別のパラメータであり、そのベクトルは一に等しくなるが、成分 u の和は零に等しくなる。同じランダムなコントリビューションをCに独立して追加し、別の不確実性として再びカウントすることはできません。

$$Q_* = \min_{H_0, \Omega_{m0}, B} \left[\mathbf{r}^{\mathsf{T}} C^{-1} \mathbf{r} + \frac{(H_0 - 70)^2}{s_H^2} + \frac{(\Omega_{m0} - 0.3)^2}{s_m^2} + \frac{B^2}{s_B^2} \right], \qquad \mathbf{r} = \mathbf{y} - \mathbf{f}_\Lambda(H_0, \Omega_{m0}) - B\mathbf{1}$$

対応する外部制約を指定しない場合、その項は含めない。仮定上の外部制約三つは互いに独立とし、それぞれの中心をスカラーモデルの入力値に置く。s_H の単位は km/s/Mpc、s_B の単位は cm/s であり、s_m は無次元である。Ω_{m0} を固定するとドリフトは H_0 に線形に依存するため、対応するペナルティを含む重み付きの線形正規方程式から H_0 と B が求まる。その後、Ω_{m0} に関して極小値を一次元探索した。これは二次汎関数のプロファイルであって、モデルの周辺確率ではない。

$$\mathbf{d} = C^{-1/2}(\mathbf{y} - \mathbf{f}_0), \quad A = C^{-1/2} G, \quad P_\perp = I - A A^{+}, \quad Q_{\mathrm{lin}} = \mathbf{d}^{\mathsf{T}} P_\perp \mathbf{d}$$

G は調整パラメータに関する予測の局所微分を含み、A^{+} は擬逆ムーア・ペンローズ行列である。これは、共分散を単位形式に還元した後の既知の線形射影である。パラメータを変更することで、最初の順序で吸収される差分コンポーネントを削除します。ガウス外部制約は、残差ベクトルと応答行列に行を追加することで有効になる。局所結果は大域非線形プロファイルに置き換えることはできない。二十年の試験ケースでは、$\sigma = 1$ cm/sと外部制限のない$Q_{\mathrm{lin}} = 0{,}3177280257$が、非線形最小値は0,3166149159に等しい。

独立した課題として、測定を選ぶ

$$U(d) = \mathbb{E}_{\mathbf{y}|d}[D_{\mathrm{KL}}(p(M \mid \mathbf{y}, d) \,\|\, p(M))]$$

これはモデルの識別のための標準ベイズユーティリティであり、dは実験設計を表し、Mはモデルインデックスであり、期待はモデルとそのパラメータで平均化された可能なデータの予測分布から得られる。モデルの正規化された事前確率、パラメータ分布、ノイズモデル、および特定のプランセットが必要である。コストを考慮したユーティリティは別々に指定する必要があります。この値は実験設計文献で研究されており、添付コードでは計算されていない。Q写像は予備診断として役立ち、U(d)を置き換えない。[164]

成長の規格化によって結論が変わる理由

平滑な正準場に対する相対性理論と地平線に比べて十分に小さいスケール上の一つの非相対論的成分の一般的な理論では、密度コントラストの線形増加は方程式によって説明される:

$$D'' + \left(2 + \frac{E'}{E}\right) D' - \frac{3}{2}\Omega_m(N) D = 0.$$

我々の簡略化された比較では、a=0,01では両方のモデルがD=D′ =0,01である。大量のニュートリノ輸送の排出とスケール依存性は含まれていない。ガウススカラーモデルでは、宇宙定数 — 0,77898 のモデルでは D(1)=0,75127 を得る。比率は0,96443です。これは、示された近似における同じ早期正規化との成長の違いである。

z=0,5の場合、予測比fσ_8は一般的な初期正規化を維持すると0,92691に等しい。現在のσ_8を手動で比較すると、比率は0,96110になります。どちらの操作も数学的には有効であるが、異なる実験的な質問に答える。第一のテストでは、初期条件からの後期成長の関節予測をテストし、第二のテストでは、違いの一部は再正規化によって事前に除去される。ここでの初期の D の等式は主振幅全体の近似プロキシとして機能し、乱れの伝達の完全な計算ではない。

この方程式は、暗黒物質がスカラー場とエネルギーを交換するモデルに対して修正なしでは使用できない。そこでは、背景と乱れの方程式が変化する。この制限は、暗い次元のシナリオを議論する際に特に重要である: 拡張グラフの一般的な形状は、他の理論のダイナミクスがそれに移ることを許さない。[63]

共通の過去をもつ、滑らかな二つの未来

別の論理例を構築しましょう。宇宙は平坦で、ほこりと標準場があり、放射線は含まれていません。塵密度はM a^{-3}です。正の Λ、SおよびMはエネルギー密度の次元を有する。一般的な正規化 $\phi_A(0)=\phi_B(0)=0$を選択しましょう。すべてのデリバティブとともに、前のセクションで消滅する関数を導入しましょう。

$$g(N)=\begin{cases}0, & N\le 0,\\ e^{-1/N^2}, & N>0,\end{cases}\qquad F(N)=\int_0^N g(x)\,dx.$$

二つの場密度と二つの状態方程式は、次のとおりです。

$$\rho_A=\Lambda+Se^{-3N},\qquad \rho_B=\rho_A e^{-3F},\qquad w_A=-\frac{\Lambda}{\Lambda+Se^{-3N}},\qquad w_B=w_A+g.$$

保存法は両方のモデルに満足しています。各有限Nには1+w>0があるので、軌道とポテンシャルは通常の方法で復元することができます。S a^{-3}という用語は、接続の瞬間における非零場速度を保証するもので、したがって逆関数N(ϕ)が滑らかである。このようなスカラー密度の項は、その摂動をほこりに変えない。[157]

$$\frac{d\phi}{dN}=M_{\rm Pl}\sqrt{3\Omega_\phi(1+w)},\qquad V=\frac{1-w}{2}\rho,\qquad H^2=\frac{Me^{-3N}+\rho}{3M_{\rm Pl}^2}.$$

A のポテンシャルは、明示的に書ける。$\phi(0)=0$ を選び、$C=2\sqrt{[S/(3(M+S))]}$, $\phi_\infty=M_{\rm pl}$ C arsinh$\sqrt{[(M+S)/\Lambda]}$ と置く。すると、

$$V_A(\phi)=\Lambda+\frac{\Lambda S}{2(M+S)}\sinh^2\left(\frac{\phi_\infty-\phi}{M_{\rm Pl}C}\right).$$

ポテンシャルAは解析的であり、フィールドの制限値による継続を可能にする。第二の再構成によって得られるポテンシャル B は無限に微分可能であるが、結合点において真の解析的ではない。これは必須の前提条件です。共通の連結領域における二つの解析関数は、開の過去の間隔で正確に一致しておらず、この方法で分岐する。

正の N に対して、積分 F は明示的な表現と漸近的振舞いを持つ。

$$F=Ne^{-1/N^2}-\sqrt{\pi}\,\operatorname{erfc}(1/N)=N-\sqrt{\pi}+\frac{1}{N}+O(N^{-3}).$$

モデル A では、密度が正の定数に近づくため、その未来は漸近的にド・ジッター的になる。B では、場の密度は正の定数に a^{-3} を掛けたように振る舞い、漸近的に $a\propto t^{2/3}$ となる。

A では未来の共形時の積分が収束し、B では発散する。地平線の違いを決めるのは、この漸近的な挙動である。有限の範囲の数値グラフだけでは、この結論は出せない。

数値図は、今日の臨界密度の単位でΛ=0,699、S=0,001およびM=0,300を使用します。独立制御により、場方程式の分離積分は10−14より小さい相対誤差で密度Aを再現した。二つのポテンシャル格子上のBに対して、最大相対誤差は0≤N≤8の2 × 10−9を超えなかった。両方の結果は計算キットで与えられる。この例はコーシー問題の特異性に違反しない:接続後、異なるポテンシャルが作用し、すなわち異なる物理モデルである。

この偶然は、一般的な過去のセクションにおける共通の初期データとの均質な背景と線形乱れのために証明されている。有限不均質性は、背景場の前に異なるポテンシャルの領域に浸透することができる。完全非線形、非摂動量子または大域観測等価性は証明されていない。それにもかかわらず、この例は示された近似における再構成過去からの無限の未来に関する推論の正確な限界を示している。

依存関係のある地図による、独立した検証

固定宇宙論と位相論について、温度 T のガウスベクトルと零平均の E-偏光を一緒に考える。偏光は温度マップの独立した再認識と見なすことはできない。その条件平均と条件共分散の形式は次のとおりである。

$$\mu_{E|T} = C_{ET} C_{TT}^{-1} T, \qquad \Sigma_{E|T} = C_{EE} - C_{ET} C_{TT}^{-1} C_{TE}.$$

ここでの行列は、観察されたデータを記述する必要があります:スカイマスク、測定器ノイズ、適切な前景モデリング。温度データは、まずサイズ、向き、宇宙パラメータを含む θ パラメータを制約し、その後、残りの不確実性に対して偏光予測が平均される。

$$p(E|T) = \int p(E|T,\theta)\, p(\theta|T)\, d\theta.$$

一般的な物理情報を考慮に入れ、同じモデルの予測として使うことです。単一の最良の方向を置き換えることは、信頼度を高める可能性がある。本書は、選択されたトポロジーに対するそのような解析のためのプログラムを定式化するが、空間のサイズに関する新しい数値的制限は得られない。[138] [140] [137]

重力実験の位相とノイズ

二つの枝を持つ二つの系に対して、四つのニュートンエネルギーの差はそれらの状態を絡めることができる相互作用を決定する。ローカルフェーズの用語は、絡み合いを変更しないため省略されます。

$$E_{ij} = -\frac{G m_A m_B}{r_{ij}}, \qquad g = \frac{E_{LL} + E_{RR} - E_{LR} - E_{RL}}{4\hbar}, \qquad H_{\mathrm{int}} = \hbar g Z_A Z_B.$$

質量 10^{-14} kg、距離 $r_{LL}=r_{RR}=450\ \mu$m, $r_{LR}=700\ \mu$m, $r_{RL}=200\ \mu$m のとき、$|g|\approx 0{,}0314\ \mathrm{s}^{-1}$ となる。初期状態が、等しい振幅の重ね合わせどうしの積なら、ネガティビティと呼ぶ理想的なもつれの尺度は $|\sin(2gt)|/2$ である。最初の極大は約 25 秒後に現れる。これは、選んだ配置における位相変化の時間尺度の見積りであって、すでに作動する装置の設計ではない。[149]

材料で考慮されるノイズは、マルコフ方程式によって与えられる。彼の慣習は必須であり、一量子ビットのコヒーレンスは γ ではなく 2γ の速度で崩壊する。

$$\dot{\rho} = -ig[Z_A Z_B, \rho] + \sum_{j=A,B} \gamma_j (Z_j \rho Z_j - \rho), \qquad \gamma_j = \gamma_{\mathrm{env},j} + \eta |g|.$$

この動力学と、この初期状態では、初期段階でもつれが生じるために、$g^2 > \gamma_A \gamma_B$ が必要である。各実験に、それぞれ別の未知の背景を許すなら、全体の γ を通常の成分と仮説上の成分に分ける、異なる分解が同じ結果を与える可能性がある。各寄与の非負性により、η に保守的な上限を与えられる場合はあるが、それだけで値は定まらない。幾何を制御して変化させることと、独立した雑音の校正が必要である。媒介するものの性質についての結論も、明示的に採用した相互作用の構造と局所性に依存する。[150] [151] [152]

粒子と余剰次元の尺度

波状暗黒物質の場合、定数hのデ・ブロッリー長と $\hbar$ の還元長を区別する必要がある。次の式は許容される次元推定を定義します。正確な相関尺度は波の分布に依存します:

$$\lambda_{\mathrm{dB}} = \frac{h}{mv}, \qquad \ell_{\mathrm{coh}} = \frac{\hbar}{mv}, \qquad \tau_{\mathrm{coh}} = \frac{\hbar}{mv^2}.$$

$mc^2 = 2\cdot 10^{-20}$ eV、v=20 km/s の場合、最初の二つの推定値は 30,115 pc と 4,793 pc になる。係数 2π によって、場の尺度と恒星系の大きさの比較が変わる。ただし、一つの長さだけで恒星系の加熱は決まらない。空間的に一様な加速度は系全体を移動させるため、

内部の加熱には、力の不均一性とその時間相関が必要になる。また、この物質の宇宙論的な割合が、特定のハローの中心での割合に自動的に等しくなるとは限らない。[45]

二つの平面相補方向を持つ別の例では、基本的なスケールの正規化は次のように固定される:

$$M_{\rm Pl}^2 = (2\pi R)^2 \overline{M}_6^4 = R^2 M_D^4, \qquad M_D = \sqrt{2\pi}\,\overline{M}_6.$$

M_D=10 TeVでは、半径は4,805 μmであり、最初のモードのエネルギーは0,0411 eVである。対応する二次元の場合、文献で考慮される最初のモードについて約0,6 eVの恒星極限は、この慣例におけるR≤0,329 μmとM_D≥38,2 TeVを意味する。したがって、10 TeVの元の例は、冷却計算仮定が適用されると条件付きで除外される。この結論は、自動的に一つの追加次元や任意の幾何学に転送しない。[171] [132]

周波数が、そのまま温度計にはならない理由

選択された位相遷移音響重力波源キャリブレーションについて、特性気泡サイズとピーク周波数は以下のように関連している。ここでv_{wall}はcの単位の壁速度、c_s=1/√3は相対論的プラズマにおける音速、β/H_*は膨張率の単位における逆遷移持続時間、g_*は有効相対論的自由度数である。T_*は、遷移後の温度と関連する再加熱を示します。この推定は、遅延エントロピー入力を追加することなく、高速遷移$\beta/H_* \gg 1$と標準放射赤シフトを仮定する。z_pパラメータはスペクトルピークの形状を表し、宇宙的赤方偏移ではありません。[54]

$$H_* R_* \simeq (8\pi)^{1/3} \frac{\max(v_{\rm wall}, c_s)}{\beta/H_*}.$$

$$f_0 \simeq 2.6 \times 10^{-5}\,\mathrm{Hz}\,\frac{T_*}{100\,\mathrm{GeV}}\left(\frac{g_*}{100}\right)^{1/6}\frac{z_p/10}{H_* R_*}.$$

v_{wall}=0,6, g_*=106,75, および z_p=10 の場合、T_*=100 GeV と β/H_*=100 の遷移は、T_*=1 000 GeV と β/H_*=10 との遷移と同じピークを 1,496 mHz 近くで生成する。単一の周波数は、ソースダイナミクスに制約なく温度を決定することができない。この例では、信号振幅、音響波の寿命、検出確率は計算されません。次の物理ステップは、一つの共通モデルのパラメータを用いた遷移、バリオン非対称性、実験室の制約、および波スペクトルの共同計算を必要とする。

重力波の伝播を仮定した例

ここでは、重力試験章からの均一テンソルモード輸送のみを計算します。波長は背景変化の規模よりもずっと小さく、その速度はcであり、追加の質量はなく、他のフィールドへの変換はありません。我々は、一貫したソース正規化と、パスの末尾でM_*値を変更する局所スクリーニング遷移の欠如を仮定する。これらの条件の下で、エンベロープは$1/(aM_*)$に比例する。

$$\Xi(z) = \frac{M_*(0)}{M_*(z)} = \exp\left[\frac{1}{2}\int_0^z \frac{\alpha_M(\tilde{z})}{1+\tilde{z}}\, d\tilde{z}\right].$$

積分の符号は、数値ソルバーなしでチェックすることができます。$\alpha_M = d\ln M_*^2/d\ln a$ and $a=1/(1+z)$から、それは $d\ln M_*/dz = -\alpha_M/[2(1+z)]$に従います。ソースから今日のオブザーバーへの統合は、$M_*(0)/M_*(z)$の表現に肯定的な兆候をもたらします。$\alpha_M=0$では$\Xi=1$を取得し、$z=0$では比率も一に等しい。このチェックは、距離が逆振幅係数と混同されるのを防ぎます。

完成した理論だとは主張しない計算例として、$s>0$ の下で $\alpha_M = \alpha_{M0}\, a^s$ と置こう。すると、

$$\Xi(z) = \exp\left\{\frac{\alpha_{M0}}{2s}\left[1-(1+z)^{-s}\right]\right\}.$$

$\alpha_{M0}=0{,}1$、$s=1$ のとき、$z=0{,}5;\ 1;\ 2;\ 3$ に対して、それぞれ 1,016806; 1,025315; 1,033895; 1,038212 が得られる。もとの積分を適応的な数値求積で計算すると、解析式が絶対差 10^{-13} 未満で再現される。$z=1$ における距離の相対的な効果は、およそ 2,53 パーセントである。これは達成可能な感度の推定ではない。ここでは、光源の分布、向きによる誤差、装置については計算していない。

関数$\alpha_M(a)$はまだスカラー摂動、安定性および局所テストを定義していない。それらは完全な一貫した方程式セットを必要とする。さらに、本章で示されているシールドモデルでは、振幅比の値が変化したり、ユニティに戻ったりすることがあります。したがって、この結果は輸送公式と正規化の例の制御として使用され、許容される新しい重力の存在の証明ではない。計算キットでは、メソッドの入力、テーブル、および比較が与えられる。

付録B

研究計画

これらの研究計画は、本書の問いを、計算と測定の手順に変える。公表済みの機構と、第 21 章の共通の方法を使う。モデルをあらかじめ定め、異なる観測量を共通のパラメーターで結びつけ、どの結果が出れば検証中の版を棄却するかを明示するのである。現時点での到達点は、次に必要な段階とは分けて記す。

計画 1 宇宙と実験室における暗黒エネルギーの場

このプログラムは、3、8および10の章を開発します。我々は、ポテンシャル$V(\phi)$を持つ正準スカラー場と、微細構造定数の変化と場との線形関係である $\Delta\alpha/\alpha = \zeta\,\Delta\phi/M_{Pl}$ を考える。一つのポテンシャル、一つの軌道と一つのζ結合は、宇宙的および実験室的なデータを説明する必要がある。局所モデルは、スクリーニングせずに、他の定数の変化を補償することなく修正される。時計は結合と場速度の積を制限しているため、これらの量は追加の仮定なしには分離できない。[60]

異なる光時計の周波数比、遠方吸収体のスペクトル線、宇宙距離を物理的に比較する。同じ吸収体の繰り返しスペクトルは、赤方偏移の変化を検証します。このチャネルは拡大と$\zeta=0$の履歴に敏感です。自由落下実験では、まず材料のスカラー電荷を計算する。標準ドリフト、磁気および温度シフト、分光校正を監視します。競合相手は、計器誤差やその他の変化する定数を含む。同値原理の違反の限界は、同じ相互作用モデルを通じて制限ζに変換される。[61] [172]

ポテンシャルの範囲と非零の結合を明示した版は、すべてのチャネルの許容領域に共通部分がなければ棄却される。第 8 章のプロファイルについては、ポテンシャルを再構成し、一様な動力学を検証し、赤方偏移のドリフトを計算した。最後の例からは、H_0 と物質の割合との強い縮退が分かった。次の計算では、現実のスペクトル誤差と外部の宇宙論的制約を結びつけ、局所的な場と宇宙論的な軌道を対応させ、物体の電荷を導く必要がある。観測の総合的な当てはめと、場の小さな質量を保護する仕組みは、まだない。ガウス型プロファイルは明示した区間で適用できるが、それを正確に無限に延長した形には、第 8 章で述べた欠陥がある。[59] [62]

最初のプログラムの開発は、条件付き相関誤差と外部制約の下でのプロファイルドリフト発散の完全なマップである。独立したH_0とキャリブレーションの相補性を示します。実際に観察を選択するには、両方の宇宙論からランダムな実装に関する機器モデル、コスト、テストが必要である。

計画 2 膨張、成長、波の伝播

3、8、および10の各章は、同じダイナミックの異なる結果として距離と構造を調べます。テストされるバージョンは、一般相対性理論、別々に保存された物質、および標準場を用いる。一次振幅と勾配は共通の初期の時代に設定され、転送関数は一致する履歴から計算される。チャネルごとに電流振幅を新規に調整することは不可能です。滑らかな場近似は、主に対応するサブ水平領域において、その乱れの小さが検証された場合にのみ許容される。

分光調査はBAOと銀河分布の異方性を測定し、銀河画像は弱いレンズを与え、超新星は相対距離を提供する。一般的なモデルは、対象の選択とともに各観測信号を予測する。一定のΛと重力の特定の変化がそれと比較される。非線形進化、バリオンフィードバック、赤方偏移分布、銀河-物質結合、ニュートリノ質量が一緒に考慮される。オーバーラップレビューボリュームは共通の共分散を必要とする。[58] [73] [74]

距離を説明するパラメータの範囲が初期条件とノイズを一致させた後にデータと矛盾する成長を必要とする場合、バージョンは拒否される。次のステップは、一つの宇宙的コードに背景と摂動を実装し、新しい正規化なしで残りのサンプルをテストすることです。本書は、説明的な背景ダイナミクスを検証した;まだ完全な共同分析はない。別々に保存された物質と滑らかな場のための公式は、11プログラムの相互作用する暗黒セクタに転送できない。

二つ目のプログラムの追加チェックは、重力波距離です。選択された理論では、波の生成と可能なスクリーニングを含む成長とレンズイングとともに導出される。一般的なパラメータ領域は、すべてのチャネルをサポートする必要があります。各チャネルが独立して便利な自由関数を割り当てられる場合、比較は一つの理論のテストとみなされない。付録の条件付き転送例は、背景が宣言された場合にのみ解析関係をテストします。

計画 3 初期の一つの出来事と、複数の統計量

11-14章の質問では、一般的なインフレ背景に対して二つの特定の競争相手が選択される。第一は、音障害の速度のわずかな減少を含む;エピソードの時間、幅および振幅が固定動作に含まれる。第二は、あるスケール帯域におけるガウス励起状態を、初期三点相関がゼロである。立方体相互作用とその後の双スペクトルは、各記述から導出される。パワーを調整した後、バイスペクトラムの位相を独立して選択することはできません。これらのメカニズムは、これまでの研究で知られていた。[89] [91] [90]

CMBのマルチ周波数マップを用いて、温度とE偏光力と異なる構成の三点相関を測定する。インストゥルメンタル実装には、ビーム、偏光角、ノイズおよび銀河放射の制御が必要である。モデルと滑らかなベースシナリオの両方の人工マップは、同じマスクと処理を通過する。温度と偏光が一緒に分析され、特徴の位置と幅を反復して重要な校正に含まれます。銀河データは非線形輸送が計算された後にのみ加算される。

電力を説明するパラメータがデータによって拒否される測定可能な双スペクトルを必要とする場合、非ゼロ実現は除外される。次の計算は、選択したペアが事実上同じ二点統計を持っているかどうかを最初に決定し、残りのオブザーバブルのペイオフを決定する必要がある。仕様は現在準備されているが、その識別性は計算されていない。興奮した状態に対する嗜好は、まだ反発を証明していない:そのような結論のために、その起源の独立モデルが必要である。

第三のプログラムは、μ歪みとCMB温度との空間相関を加える。二つのモデルは、小さな乱れの崩壊中に同様の平均エネルギーを放出し、長モードと短モードの異なる結合を持つ可能性がある。まず、それらの総双スペクトルと搬送を導出し、その後、スペクトルクリアリング、温度漏洩、および総共分散をモデル化する。主なメカニズムは同じであり、各チャネルの個々の振幅は結果を見た後に独立して割り当てることはできない。

計画 4 条件つきの偏光予測を通じたトポロジー

1、15、および17の章の継続は、共通の側長L、向き、および指定された原始スペクトルを持つ立方体三次元トーラスをテストする。これらのパラメータは離散空間モードと全温度偏光共分散を決定する。温度データは、幾何学上の分布を生成する; E偏光の条件分布は、すでに測定された温度を考えると計算される。許容される幾何学の平均化は予測不確実性を維持する。単一の最適な向きは、その分布を置き換えることができない。[2] [140]

測定材料はCMB温度と偏光マップです。理論共分散は実ビーム、ピクセル化およびスカイマスクを介して行われ、ノイズと相関したクリアリングエラーを両方のカードに追加する。人工データでは、全体のLと方向探索が繰り返される。競合には、非コンパクトな平面モデル、一次異方性、偏光キャリブレーション、許容される物理的偏光回転がある。選択したジオメトリが実際にそれらを予測する場合、偶然の円が使用されます。単独で予測するテンソルは、観測された全空を記述するものではない。

必要な相関パターンがなく、テストに十分な力がある場合、特定のサイズと向きの範囲は除外される。次の成果物は、検証された大L制限と校正条件偏光テストとの計算共分散である。これまでのところ、プロトコルが準備されており、新しいサイズ境界は取得されていない。観察するには弱すぎるパターンの非検出は、空間が無限であることを証明せず、第18章で他の世界のシナリオを自動的にテストしない。宇宙の分散は、理想的な機器でも残っています。[7]

計画 5 二つの余剰次元と、共通の尺度

第 16 章では、周期 $2\pi R$ の、等しい二つの平坦なコンパクト方向をもつモデルを指定した。採用した規格化 $M_{\mathrm{Pl}}^{2} = R^{2} M_{D}^{4}$ のもとでは、半径、最初の KK エネルギー $\hbar c/R$、基本的な尺度が結びついている。幾何学の安定化と、状態の塔全体の相互作用も指定しなければならない。例として $M_D = 10$ TeV を用いると、$R \approx 4{,}805$ マイクロメートル、最初のエネルギーは約 0,041 eV となる。これは計算した一つの点であり、モデルとして成り立つかどうかは別途検証する。[128]

移動アトラクターを備えたねじれ検出器は、ニュートン依存からの力の偏差を測定します。信号は実際のボディサイズで計算されます。表面電荷、振動およびその他の非重力を制御します。天体物理チャネルは、KK状態の誕生とホットマターによるエネルギー損失をチェックする。ここでは、超新星プロファイル、パイオン相互作用、フリーエスケープ条件、および可能な崩壊が重要である。実験室効果の競合相手は、追加の寸法のない新しい力を含む。[129] [132]

最初のKKエネルギーが約0,6 eV以上であるという保守的な天体物理学上の要請は、この規格化では$R \lesssim 0{,}329$マイクロメートル、$M_D \gtrsim 38{,}2$ TeVに換算される。したがって、評価の前提が当てはまる範囲では、最初の10 TeVの点は条件付きで除外される。黙って別のモデルに置き換えてはならない。次の計算では、各条件を同時に満たす範囲を求め、その

力の予測を装置の幾何に応じて畳み込む必要がある。現時点で確認したのは尺度の換算だけである。冷却と安定化を含む完全な同時フィッティングは行っていない。崩壊からの制約には、各状態の占有数について独自のモデルが必要である。[133] [132] [134]

計画 6 重力による位相と、コヒーレンスの追加の喪失

第19章の研究計画では、二つの質量を空間的な重ね合わせに準備する。同じ幾何配置によって、もつれを生じさせるニュートン相互作用 g を定める。記憶をもたない局所的な方程式では、位相緩和率を $\gamma_i = \gamma_{env,i} + \eta\,|g|$、$\eta \geq 0$ とする。パラメータ η は、距離や待ち時間の異なる測定系列に共通である。通常の雑音は、検証する環境モデルで定める。競合する、測定とフィードバックによる古典的なチャネルは、選んだ干渉計について別途導出する必要がある。[149] [153]

絡み合うのを目撃するために必要な相対位相、干渉コントラストおよび相関を測定する。重力的寄与と同様のインパルスを抑制した制御シーケンスが実行される。独立して電荷、表面の電気的不規則性、磁気勾配、振動、ガスおよび熱放射を制限します。電磁チャネルは実際の絡み合いを生成することができるため、追加のノイズで置き換えることはできません。結果の解釈は、メディエータの局所性と特性に関する明確な仮定を必要とする。[150] [151]

位相と相関の分布がデータや制御と矛盾している場合、特定のダイナミクスは除外される。各系列の任意の独立ノイズでは、η は一意に復元されない。しかし、$\gamma_{env,i}$ の非負性により、エラーを考慮した全位相緩和から η 上の保守的な上限を得ることができる。次のステップは、全体のノイズ応答を導出し、人工データ上のモデルの識別性をテストすることである。このあいまいさの図解的ダイナミクスと分析が現在存在しており、η に新たな実験的な制限はない。

計画 7 銀河と重力レンズにおける物質の自己散乱

6章から続いて、すべての暗黒物質はそれ自体に弾力的に散乱すると仮定される。正規化s_0と特性速度ωを持つよく知られた二パラメータ角モデルを選択する。ある散乱法則は、あるハローの疎中心と異なる進化を通じて他のハローの密中心を記述するべきである。物体の質量、濃度、年齢およびバリオンの歴史は、一般的な人口分布に従っており、各銀河ごとに別々の部分が許可されていない。[43] [42]

中性水素と空間分解光分光の電波干渉法は、小さな銀河の速度場を提供する。高度にレンズ化された弧の画像は、質量、プロファイル、および摂動するハローの数を制約します。画像に人工的な障害を導入し、検出確率を測定する。競合相手は冷酷で衝突のない問題であり、バリオンフィードバックもある。どちらのモデルも、同じストーリーテリングの自由を与えなければならない。ディスクの傾き、非円形の動き、一次レンズ、背景源、および視界に沿った構造を監視します。[44]

二パラメータバージョンは、s_0とωの共通領域が両方のアンサンブルを記述していない場合や、検出可能な高密度ハローの分数を必要としない場合に失敗する。次の計算は、進化シミュレーションの熱伝達と収縮を校正し、遅延サンプルを予測することである。合計、輸送および伝熱セクションは互いに交換することはできません。本書は物理的なスケールのみのイラストを含んでいるが、キネマティクスとレンズに関する一般的な人口分析はまだない。

計画 8 クエーサーから恒星までの、波としての物質

6章の第二のプログラムは、重力と相互作用する自由超光場と、通常の冷たい暗黒物質が混在する可能性を規定している。一般的なパラメータは、場 f の質量 m と宇宙的割合である。初期スペクトル関数と転送関数は一貫した方法で計算される。各ハロー内の波動成分の局所密度は同じ混合モデルから派生しており、恒星物体を保存するために独立して選択することはできない。構造の早期平滑化と後期力学は同じ物理的原因を持つ必要がある。

高分解能分光器は、ライマン-α森林における遠方のクエーサーの透過率を測定する。繰り返される恒星分光と深部イメージングは、古い寒冷系の内部速度、サイズおよび年齢を明らかにする。競合相手は、温暖物質であり、初期チャネルにおける一次スペクトルの変化、後期チャネルにおける潮 tiと二重星である。気体の熱履歴、電離背景、金属、初期コンパクト性および軌道が監視される。恒星系全体の加速は、その内部加熱とはみなされない。[45] [46]

初期のデータを満たすパラメーターでも、許される履歴のもとで観測された低温の系を存続させられない場合、選んだ m と f の領域は排除される。次の段階では、スペクトルの流体力学的予測を、波動場の進化、恒星の自己重力、コヒーレントな潮汐力と結びつける。対象の選択も含め、検証のために残しておいた集団を調べる。今のところ計算したのは特

徴的な長さと周波数だけであり、質量についての新たな総合的制約は得ていない。弱い効果が観測上区別できないことは、その場の存在を裏づけるものではない。

計画 9 二つの重いニュートリノと、バリオンの過剰

第4章と第7章では、結合行列 F と質量 M_1,M_2 を持つ二つの HNL の最小モデルが固定される。加熱温度は非常に高い事前に選択され、その後放射線優位が効果を発揮する。初期 HNL と非対称電荷はゼロであり、エントロピーによる希釈はない。FとMのみは、光ニュートリノ質量、重状態の生成、崩壊およびY_Bのバリオン収率を決定する。第三のHNLまたは与えられた以前の非対称性は、異なる仮説が試験されていることを意味する。[48] [51]

加速器では、中間子とWの崩壊におけるHNLの誕生を探り、遠方の頂点、寿命およびレプトンチャネルを測定する。ニュートリノ振動や、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊と比較される。後者では、光と重い交換とその干渉が考慮される。主な不確実性は、粒子生成、検出器センシング領域幾何学、頂点再構成効率、核マトリックス要素に関連する。宇宙論部はさらに原始核合成と後期崩壊を試験する。[50] [173]

正しい符号を持つ観測されたY_B間隔が、実験室で許容されるパラメータの達成可能なセットに含まれていない場合、モデルは除外される。次の計算は、コヒーレンス、熱速度、電荷再分布、およびスファレロンを含む行列量子力学の制御点を再現し、固定測定可能な質量と混合でY_B範囲を構築することである。速度近似は推定誤差を持つ必要がある。既知のメカニズムの仕様がコンパイルされたが、新しいスキャンは行われなかった。HNLの検出だけでは物質の起源を再構築するには不十分です。

計画 10 一重項の転移と、CP 対称性の破れの共通の原因

7章の別のテストでは、標準モデルは一つの実スカラーSによって拡張され、固定再正規化可能なポテンシャルと、S、ヒッグス場、および係数c_t/Λを持つトップクォークを結合する次元五のCP違反作用素である。質量、混合、およびポテンシャル係数はすべての計算によって共有される。遷移は完了しなければならず、生成された電荷は生存しなければならない。気泡壁のプロファイル、厚さ、速度は、粒子輸送計算と可能な重力波源の計算の両方に入る。[52]

加速器は、スカラーの特性とトップクォークのCP感受性相関を試験する。磁場反転分子分光法は、電気双極子およびその他のCP違反相互作用を制限する。周波数オフセットは複

数の演算子に依存する可能性があるため、一つのEDM制限を再計算せずに任意の組み合わせに適用することはできません。重力波スペクトルは、干渉計ノイズと天体物理背景と比較される。競合相手は、十分なバリオン出力のない遷移、CP違反の別の源、および隠れたセクターからの波を含む。[53] [54]

このシナリオは、実験室で許容可能な完了した遷移が、非対称性のその後の消去なしに必要なY_Bを与えず、効果的な理論の領域を離れた場合に拒否される。次のステップは、すべての実験室信号の出力とポテンシャル、バブル誕生、壁および量子輸送の一貫したスキャンである。波の場合、同じ壁速度が使用されます。これまでのところ、イラストレーション周波数校正のみが行われており、Y_Bは計算されていません。周波数自体は温度を決定しません;弱い波がないことは、メカニズム全体を排除しません。

計画 11 一つの半径と、相互作用する暗黒セクター

6、8、15と16章の束は、一つの大きなコンパクトな方向を持つダークディメンションの特定の実装を選択します。半径 R(u)、磁場ポテンシャル、KKスペクトルと暗黒物質の接続は同じ幾何学から来る。公開された例では、暗黒物質のポテンシャルと質量はフィールドに指数関数的に依存する。可変質量はエネルギーの交換を引き起こすため、背景と外乱が一緒に出力される。これは、プログラム5の二次元トーラスとは異なるオブジェクトです。[135] [63]

彼らは宇宙距離と構造成長、実験室における短距離力、天体物理学的エネルギー損失および可能な崩壊を測定する。選択されたコンパクト化が通常の物質と対応する結合を予測する場合、時計と自由落下は接続される。KK状態の一組の半径、その場依存性、ポテンシャルおよび占有確率は全てのチャネルを通過しなければならない。超新星キャリブレーション、バリオンフィードバック、ニュートリノ、表面力、および熱い恒星物質の特性が監視されます。競争相手は無関係な分野であり、新たな勢力を分離する。

制約付き実装は、これらの不確実性を考慮に入れた後に一般的な実行可能な領域がない場合、除外される。次に必要な成果は、選択したアクション、関連するバックグラウンドと線形方程式、および実際の装置の力信号の独立した実装です。半径安定化と適用性は独自の検証を必要とする。公表されている宇宙論的な分析は存在するが、本プログラムでは再現されていない。異なる幾何学の安定化に関する既知の結果は、単純に完全なモデルに結びつけることができない; 場と物質の間の本質的な接続はすべての計算で保存されなければならない。[134]

計画 12 再調整を必要としない、真空の重力

課題は、物質の記述が変化するときに真空の小さな重力寄与が保存されているかどうかを確認することである。与えられた正規化された定数項を持つ一般相対性理論と、カロパーとパディラの真空寄与を分離するための元の大域モデルである。新しいアクション定義と条件なしでは、後のローカルバージョンと組み合わせることはできない。時空領域、境界条件、物質場および量子補正の順序が示される。まず、選択したソリューションで必要なグローバル平均化が可能かどうかを確認する。

最初の計算では、ほかの前提を保ったまま、物質のラグランジアンに定数のシフトを加え、重力方程式の変化を導く。次の計算では、真空の寄与の履歴を明示した、所定の相転移を導入する。定数部分を取り除く機構が、時間とともに変わる残りの部分まで取り除くとは限らない。そのため、膨張の応答を別途計算し、保存則を検証する。結果を見るたびに自由パラメーターを調整し直してはならない。

次の物理ステップは、特定のH(z)と摂動を得た後に生じる:ホット履歴、距離および構造成長と比較する。有用な結果は、遷移と修正の許容領域、またはメカニズムが指示されたタスクを実行するのをやめる正確な場所である。研究所は、宇宙全体の一定の真空項を自由に変更することはできません。プログラムの現状は一貫した比較であり、宇宙位相遷移の新しい計算と完全な放射安定性の証明はここでは行われていない。

計画 13 小規模な構造の不足を生む、二つの起源

我々は、冷たい暗黒物質と修正された原始スペクトルと、滑らかな原始スペクトルを持つ暖かい暗黒物質の一つの特定のバージョンを比較します。暖かい成分は、その質量、運動量分布および密度分数によって指定される。原始的な修正は、解析の前に固定されたパラメータの有限セットを持つ。どちらのモデルも、選択した参照エポックにおける21-cm不均一性の類似スペクトルに適合する。これは意味のあるテストを生み出します:追加のチャネルは、最初の測定ですでに類似しているように見える原因を区別する必要があります。

次の段階では、複数の時期についての計算、視線に対する方向依存性、許される非線形統計量を求める。物理的には、星の影響が強くなる前の時期の、多周波数の電波地図が必要になる。観測モデルには、アンテナの周波数依存の指向特性、前景、校正、失われるモード、水素の熱的な履歴を含める。多くの時期を観測しても、成功が保証されるわけでは

ない。基準時刻より後に、両モデルの伝達関数と成長が同じであれば、線形の観測を追加しても、新たな差が含まれない場合がある。

必要な成果は、許容可能な競合パラメータの繰り返し選択により、スケール、レッドシフト、エラーの空間における識別可能性マップである。逆問題が曖昧なままである領域も必要です。特定のプロジェクトに移行する前に、マップは配列領域、ベース、帯域幅と校正安定性の要件に変換されます。本書は、周波数とエポック間の対応を計算します。観測装置を含めた二つの宇宙論モデルの合同シミュレーションは、まだ開いている部分です。

計画 14 ニュートリノの媒質と、その音響的な痕跡

与えられた質量と結合定数との一つの顕微鏡的ニュートリノ相互作用が選択される。CMBスペクトルに対する任意の補正ではなく、衝突項を生成する。競合相手は、相対論的粒子の同様の総密度における標準自由伝播である。相互作用が成分間のエネルギーを伝達したり、粒子の数を変えたりした場合、この変化は背景方程式と初期分布に含まれる。

計算検証は、エネルギーの保存と強い相互作用する媒体と自由伝播の間の適切な遷移から始まる。結合温度と偏光スペクトルは、バリオン密度、一次スペクトルおよびキャリブレーションを変化させることによって計算される。物理基準は必須の一貫した位相と振幅構造であり、許可された再調整では除去できない。単一の N_{eff} 値は、これらすべてのプロパティを記述するものではありません。

宇宙解析の後、私たちは現在までニュートリノ分布を継続し、質量、混合および局所凝縮を考慮してトリチウムによる捕獲を計算することができます。エネルギー分解能、ベータ崩壊背景、ターゲット特性がイベントモデルに含まれている。結果は、他のパラメータを両方のチャネルにリンクするか、このリンクが明確に定義されていない理由を示す必要があります。本書は標準温度基準と試験ルートを提供しており、相互作用媒体と実験室感度の新しいボルツマン計算は宣言されていない。

計画 15 量子ダイナミクスと、競合する古典モデル

相空間における正のガウス分布が一致する量子系と古典系は、非線形相互作用中に異なる高次モーメントを発生させることができる。コードと初期マッピングの意味をチェックします。開宇宙学的な部分は、インフレの摂動と有限の初期時間、および古典的統計状態の明示的に選択されたクラスの相互作用から始まる。

まず、同一でなければならない最初の対称化相関が調整される。近似と再正規化の順序を含むその後の開発は、独立した手法を用いて計算される。各差分について、観察された統計値を示す:例えば、CMBへの転送後の双スペクトルの特定の構成や物質分布。数値的に小さな量子寄与は、従来の古典積分器の近似誤差と精度と比較される。

物理検証にはマスクモデル、ノイズ、非線形進化、および可能な古典的シミュレータが必要である。古典的な競争相手は、事前発表の自由のみが認められます。違いが考慮された後に消えた場合、選択した統計は問題を解決しません。すべての古典的説明の普遍的な否定は、別の証明を必要とします。振動制御は、宇宙の量子起源の測定ではありません。続編の目的は、同様の差が物理的伝達と現実的な観察精度に耐えられるかどうかを確立することである。

計画 16 重力波の伝播に現れる膨張の履歴

検証されたホットフェーズの開始前に有効な二つの早期インフレ後の履歴が記録される。一つは、選択された放射線履歴がすぐに始まり、もう一つは状態と完了機構の特定の方程式を持つ中間エポックがある。どちらの歴史も核合成と保存法則の制約を満たさなければならない。一次テンソルスペクトルは、予め限定された形の族を受け取り、任意のスペクトル関数に対して、逆問題は未知のままである。

波動方程式は収束チェックされた遷移によって統合され、今日のスペクトル密度が計算される。モデルのペアは、同じ周波数帯の近接信号に一致します。次のバンドとCMB偏光は、同じパラメータセットの予測をテストする。相転移や宇宙弦などの源は、波の生成機構を変化させるため、別々に考慮される。

物理プログラムには、検出器キャリブレーション、相関ノイズ、および残留天体物理背景が含まれます。その成果は、選択した履歴が必然的に異なる周波数とエラーの領域であり、最初のスペクトルの変化がそれらをマスクする領域です。このような比較は、一つのピークから加熱温度を決定するという約束と置き換えることはできない。この本は既に相転移周波数の変性を示しており、完全に新しいマルチバンド分析が依然として課題である。

計画 17 蒸発するブラックホールの情報

共形場と外部貯水池に関連付けられた、特定の二次元ジャクシヴ・テイテルボアム重力モデルを選択する。作用、状態、境界軌道、貯水池との接続と半古典近似モードが完全に

指定される。最初の研究では、一般化されたエントロピーの極端と許容枝間の遷移を再現する。ページ曲線に似たグラフは十分ではありません。同じ方程式から各枝の原点を示す必要があります。

次に、一つの物理的な要素(初期状態または通信モード)を変更し、出力が維持されているかどうかを確認します。独立計算は、部分系エントロピー、熱エントロピーおよび閉系全体のエントロピーを区別しなければならない。アルゴリズムが放射線サブシステムに割り当てる領域の近似と可能な変化の精度を考慮します。二つの枝の近似最小値の非滑らかさはそれ自体が物理的特異点を意味するわけではない。

ここで一番近いテストは数学と計算です。可能な実験室シミュレーションは、天体物理蒸発自体ではなく、選択したシステムのモデルへのマッピングをテストします。結果を四次元ブラックホールまたは宇宙地平線に転送するには、別の結論が必要である。この本は、理論ルートを説明しています。新しいページ曲線計算は実行されません。有用な拡張は、推論が堅牢で、その適用性に正確な境界がある再現可能な条件の集合である。

附属書C

計算課題と、その再現

この付録は、実行された計算、方法テスト、および将来の研究を区別する。タスクD1の場合、プログラム、入力データおよび制御値が与えられます。目的D2とD3は、初期宇宙の特徴と暗黒物質集団の研究のための仕様である。既製のジェネレータ、ニューラルネットワークトレーニング、または新しい物理制限は発表されていない。

実施した計算を再現するには

ソフトウェア環境の起動コマンドと要件は、計算に付随する手順で与えられます。プラットフォーム間の最後の小数点差は許容できるものであり、指定された公差内で宣言されたテスト結果を変更してはならない。

課題 D1：モデルと入力データの概要票

対象モデルは、保存される非相対論的物質と、正準スカラー場を含む、平坦で一様な宇宙論である。入力パラメーター $H_0 = 70$ km/s/Mpc と $\Omega_{m0} = 0{,}3$ は、著者が設定する。状態方程式は $1 + w = A \exp[-(\ln(1+z) - b)^2/(2s^2)]$ という形をもち、$A = 0{,}25$, $s = 0{,}2$, $b = \ln(1{,}5)$ である。場の密度は連続の式から求める。これは本書に含まれる計算例であり、観測に合わせて当てはめたものではない。

ベクトル z は [0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2; 2,5; 3] である。平均ドリフトの計算では、光源が宇宙の膨張に共動すると仮定し、この赤方偏移の範囲では放射を無視する。吸収系の固有加速度は含めていない。時間間隔 Δt にわたる速度シフトは、単位を整合的に換算して、$c\,\Delta t[H_0 - H(z)/(1+z)]$ と計算する。20 ユリウス年と 40 ユリウス年を検討した。この平均信号の定義は、現実のスペクトル線の測定モデルではない。

独立エラー σ は、値0,1; 0,15; 0,2; 0,3; 0,5; 0,7; 1; 1,5および2 cm/sを取る。総共分散は、$C_{ij} = \sigma^2 \delta_{ij} + \tau^2 u_i u_j$によって与えられます。ここで $\tau = 0{,}5$ cm/sと$u = [-0{,}76; -0{,}6; -0{,}44; -0{,}28; 0{,}04; 0{,}36; 0{,}68; 1]$。相関振幅は平均零。自由一般シフトBは平均予測を変え、このモードと一致しない。間隔が変化すると、共分散の両方の成分は人工的に保存される。

競合する家族は、宇宙定数を持つフラットモデルです。H_0、Ω_{m0}およびBはプロファイリングされる。外部条件制約H_0では、中心は常に70 km/s/Mpcに等しく、幅sHは値0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10 km/s/Mpcを取るか制限がない。九つのエラー、七つの変種H_0と二つの間隔がメインスキャンの126行を形成します。外部評価はドリフトから独立していると考えられており、現在のデータに対するそのような仮定の適用性は別々に検討されていない。

さらに 14 行で、$\sigma = 1$ cm/s とした各時間間隔について、仮定上の制約の七つの組合せを比較する。幅は sH = 1 km/s/Mpc、sΩ = 0,01、sB = 0,1 cm/s とし、それぞれの中心を 70; 0,3; 0 に置く。Ω_{m0} を固定すると、H_0 と B は線形に解ける。Ω_{m0} に関する極小値は、1201 点の格子で探索し、見つかった局所極小をさらに精密化する。H_0 の 20 から 140、Ω_{m0} の 0,01 から 0,99 という探索範囲は、数値計算上の境界である。最終的な極小値は、いずれもその境界には達しない。

検算の結果と、結論の限界

二十年間、$\sigma = 1$ cm/s とし、外部の制約を加えなければ、Q = 0,31661491586716844 となる。H_0 に幅 1 の制約を加えると 1,5650711955566339、B だけに幅 0,1 の制約を加えると 0,33152500553204495、両方を加えると 3,4200771730750636 となる。三つの制約をすべて加えると Q = 5,694309749083916 である。これらの値は、ノイズを加えていない曲線を当てはめ、仮定したペナルティーを加えた後に残る不一致を測っている。統計的有意性、検出確率、ベイズ的証拠、期待情報利得を表すものではない。

三パラメータ最適化は、最大絶対発散Qが9,77 × 10−15と等しい四つの制約の組み合わせをテストする。相関モードをオフにすると、0,31681625152981635が得られる。外部の制約がなければ、二十年から四十年の間に、九つのσすべてに対してQ40/Q20 = 4が与えられる。主なスキャンを通して、制約H0の増加は最小値を減らしません。Cの正定値と局所線形射影の二つの実現の一致を検証する。非線形プロファイルと局所射影は異なる意味を持つ。これらのチェックは、この計算例に固有のものです。

独立制御により、スカラー場密度はレッドシフト上の二次度によって再計算され、H0, Ωm0, Bが共同で選択される。テスト対象のモジュールからのシグナルとプロファイル関数はインポートされません。二十年の例の七つの制約の組み合わせについて、最大絶対差Qは1,42 × 10−14と確立された公差10−8であった。レポートは計算キットで提供されてい

る。実装合意は、共通の物理的仮定の下で計算を検証する;それは仮定自体の誤りを除外しない。

課題 D2：初期の特徴

目標は、それらが類似したパワースペクトルを認めた後に、二つの与えられた他のメカニズムの識別可能性領域を見つけることである。入力は、アクションまたは状態、初期条件、許容可能なパラメータ、観察への一般的な転送、およびエラーモデルである必要があります。一組のパラメータからパワースペクトルとバイスペクトラムを計算し、関節調整後にどのくらいの違いが残るかを推定する必要がある。初期制御 - 機能がオフになっているときのスムーズな制限と、正規化の独立した確認を復元します。次の結果は、一つの選択された美しい曲線だけでなく、縮退の再現可能な領域である。

初期の特徴を示す既存の図は、形状を初めに調べる助けにはなるが、具体的な機構から結合統計量を導く作業には代えられない。完全な生成器がまだ作られていないため、仕様にはそのまま実行できるコマンドはない。完成には、摂動の安定した解、採用する近似の次数、伝達、前景成分、結合共分散が必要である。それらが揃えば、独立したデータ集合でエミュレーションとSBIを検証できる。成功の基準は、明示した条件の下で再現できる差、較正された誤り率、そして識別できない領域を明記することである。

課題 D3：暗黒物質の集団

目標は、いくつかの個体群に与えられた自己散乱速度依存性をテストし、冷たい暗黒物質と天体物理フィードバックの選択したモデルとの比較である。マイクロ物理パラメータは一般的なままであり、形成履歴と観測パラメータは与えられた階層モデル内のオブジェクトによって異なる。入力は、シミュレーションのアンサンブル、選択モデル、銀河とレンズの測定特性、および誤差推定である。トレーニングとテストはオブジェクト、ストーリー、そして別のトライアルではシミュレータの物理処方によって分離されるべきです。

これまでのところ、この本はこの問題の定式化を提供する。密度プロファイルの単純な例は、人口生成器では不十分である。独立ベンチマークの実装、天体物理学的記述間の移動のテスト、一般的な微物理学を再調整することなく遅延した個体群の予測が必要である。可能な有意義な結果は、パラメータ空間の一部における除去不可能な不一致の発見や、残

りの退化の確立である。相互作用断面の数値的制限は、実際の観察と検証された導出手順を必要とする。この時点まで、機械可読タスクの結果フィールドは空白のままです。

課題を完了する三つの水準

最初のレベルは計算標準である: 固定入力、動作コマンド、制御結果と一定の公差。このレベルは D1 です。第二のレベルは、シミュレーションデータの出力をチェックする:両方のモデルのノイズ実装、事前発表された選択ルール、エラー率、キャリブレーションチェック、指定されたジェネレータミスマッチに対する堅牢性。このレベルはまだ三つのタスクすべてで完了していません。第三のレベルは、データ、ハードウェア特性、選択モデル、主な系統的効果の独立テストという物理的研究である。

レベル間の遷移には、新たに記録された結果が伴う。プログラムのスピードアップは、エラーとともに考慮される。モデルの拡張 - 適用範囲の変更を伴う。識別性の欠如は、明確に定義されたモデルと測定のクラスに確立された場合にも有用な答えである。このアレンジにより、科学者とAIシステムは単一の問題チケットで作業を続けることができ、各出力の起源を維持し、まだ持っていない事前計算の機能をアトリビュートしない。

追加の検算

加えて、年齢と距離の積分、場方程式への別の解によるスカラーポテンシャル再構成、断熱微分試験、簡略化された線形成長、物理スケール変換が繰り返される。計算スイートは入力、結果、エラーを含む。数は、付録Aの教示仮定に対応する;空間的障害の完全な解と観察の適合はない。

別のプログラムは、20章から二つの背景再構成をチェックする。Aの場合、明示的なポテンシャルが使われ、Bの場合、二つのグリッド上のパラメトリック再構成が使用される。一般的な過去の履歴は、スイッチング関数の定義から従う; 異なる地平線 - その解析漸近から。最終的なグリッドは選択した間隔で実装をチェックし、これらの引数を置き換えません。結果は計算キットに表示されます。

別のプログラムは、ニュートン重力による四つのエネルギーの、もつれを生む組合せを計算する。密度行列の部分転置によって理想的なネガティビティを検証し、局所的な位相緩和がある場合について、早期のしきい値のいくつかの例も調べる。振動子のプログラム

は、第 12 章の振動子による対照計算を再現する。これらのプログラムは、完全な実験装置を記述するものではなく、新たな実験的制約を与えるものでもない。

用語集

エントリは、ロシア版の順序に従ってください。ラテン語とギリシャ語の省略形は主な用語に従っています。定義は、本の中で概念が使用される感覚を指します。

バリオン非対称性。宇宙に残るバリオンに対するバリオンの過剰。特定の熱履歴に対して、光子密度やエントロピーに相対して表すのが便利です。説明は過剰の大きさとその保存を再現しなければならない。物質の電気的中立性が物質と反物質の等式を意味するわけではない。

Bispectrum 三点相関統計。統計的に均質な場に対して、三重子の波動ベクトルは三角形に閉じている。平均零度を持つガウス摂動に対して、双スペクトルはゼロに等しい。非ゼロ信号は、初期相互作用や後期非線形進化を反映する可能性がある。

パラメータの縮退。パラメータの異なる組み合わせが、選択した観察に対して同一または類似した予測を与える状況。一つの組み合わせをより正確に測定すると、各値を個別に決定できるとは限らない。パラメータと独立キャリブレーションに異なる依存を持つ追加の観察が役立ちます。

測地不完全性。ある測地線がその自然パラメータの有限値で与えられたモデル内で継続しない時空の特性。巨大な粒子の場合、このパラメータは自身の時間である。不完全性は記述の限界を示すが、それ自体は世界の継続または創造の物理学を決定するものではない。

ホログラフィー。低次元空間における同等の自由度を通じて重力系を記述するという考え方。実装研究は、特定の理論と幾何学に関連している。彼らは、目に見える世界が物理的なスクリーンへの投影であることを証明しておらず、宇宙の既製の説明を提供していません。

イベント地平線。信号がオブザーバに到達可能なイベントと、将来的には利用できないイベントを分離する因果境界。宇宙論では、その存在はさらなる拡大に依存する。今日の加速度だけを測定するだけでは、そのような境界を永遠に設定することはできない。

粒子地平線。宇宙の受け入れられた過去の歴史の間に、信号が観測者に届くことができた領域の境界線。この拡張の歴史によって定義される。粒子地平線は物質的な壁ではなく、特定の望遠ビューの深さに自動的に一致しない。

重力レンズ。重力幾何学の影響下で光ビームの方向と形状を変更する。これにより、背景物体の画像から目に見えない質量を含む質量分布を研究することができる。質量回復にはレンズモデルと幾何学が必要であり、複数の分布が同様の観察効果を生み出すことがある。

重力波。エネルギーを伝達し、自由試験体の相互距離を変えることができる重力幾何学の摂動を伝播する。天体物理学と初期の宇宙過程によって作られたと考えられている。信号の周波数はメカニズムとその後の膨張に依存するため、これは時代のユニークな温度計ではありません。

勾配不安定性。理論の適用範囲における勾配項の不適切な徴候に関連する小さな空間的障害の成長。物質のゆっくりとした重力成長と異なる。

デコヒーレンス. 環境との相関による量子代替物間の利用可能な干渉の抑制。サブシステムの場合、これは古典的確率的絵を良い近似にすることができる。プロセスは、完全な状態からの情報の根本的な消失を必要とせず、初期条件の専門性を説明しない。

レッドシフトドリフト。観測期間間の単一宇宙源の赤方偏移の遅い変化 FLRWのコモーティングソースについて、それは受信と光の放出の瞬間における膨張速度に関連する。その分離には、独自の加速度の制御とスペクトルキャリブレーションの長期安定性が必要である。

インフレ。初期の宇宙の膨張を加速する仮説段階であり、その間ハッブル宇宙の移動の長さは減少した。様々な実装は、主な障害を作成し、観察された領域の性質を説明することができる。成功した予測は、単一のフィールドポテンシャルや絶対的な存在の始まりを確立しない。

量子極限表面。一般化されたエントロピーが与えられた重力公式の中で定常である曲面。その使用には、サブシステムと近似モードを定義する必要がある。

コンパクト化。空間方向が閉または有限な特性サイズを持つという仮定は、従って大きな移動方向として認識されない。その幾何学は、利用可能な励起のスペクトルに影響を与えます。小さなサイズだけでは、モデルがすべての実験に同意する保証はありません。

宇宙の分散。利用可能な宇宙モードの有限数と観測フィールドの実現に関連する統計的不確実性。機器ノイズを除去しても除去されません。その影響は、測定されるパラメータ、検査されるボリューム、および相関する観測値の共有に依存する。

宇宙のリバウンド圧縮から拡大への遷移は、スケール係数がゼロでない最小値に達する。特定の幾何学、物質組成、重力力学の変化を必要とする。均質な解の滑らかさは、摂動の安定性、完全な測地線連続性、または残りのストーリーのリアリズムをまだ証明していない。

宇宙論宇宙全体を研究する物理学の分野:その構成、幾何学、拡張、歴史と構造の起源。宇宙論モデルは、一般法則によって異なる時代の測定を接続する。観測された領域は、すべての既存の空間と必ずしも一致しない。

レッドシフト。観測波長の上昇は、発光時の長さと比較して、zと表される。宇宙論的な拡大において、それは光の受信と放出の間のスケール係数の比率に関係している。震源と重力効果の動きは、観測された周波数も変化する可能性がある。

ページ曲線。選択したモデルにおける蒸発時間に対する放射線サブシステムのエントロピーの依存性後の段階で予測される減少は、システム全体の情報の再分布と関連付けられている。特定の計算では、サブシステムを明確に示す必要があります:外部バスと境界システムのエントロピーは定義上一致しません。

曲率。平面からの偏差を表現し、近傍の自由物体の相対運動に現れる幾何学の特性。スライスの空間曲率と時空の曲率は異なります。ゼロ空間曲率は、世界の無限性も世界的識別の欠如も確立しない。

スケール係数。関数a(t)は、一般宇宙展開における参加者間の距離の変化を記述する。その絶対正規化は条件付きであり、今日の値は一とみなす。スケールファクターの増加は、原子や惑星系、銀河などの関連する系の等膨張を意味しない。

メトリクス。座標の変化を通じて、閉じたイベント間の間隔を指定するオブジェクトです。時空では、適切な時間、空間距離、光方向を決定する。異なる座標レコードは同じ距離を記述できるため、公式を変更することは常に新しい物理幾何学を意味するとは限らない。

多元的。私たちのいる多くの宇宙地域や世界に関するさまざまな仮定の名前。シナリオはメカニズム、因果関係、テストステータスが異なります。宇宙論的多元宇宙論と量子力学の多世界的解釈は、同じ記述ではない。

ニュートリノ宇宙論の背景。初期のホットユニバースの古いニュートリノ人口。その間接宇宙論的トレースと個々の粒子の直接捕獲は、異なる測定タスクである。

一般的なエントロピー。半古典的重力において、領域の幾何学的寄与と選択した定式化における量子場の一貫して再正規化されたエントロピーの和。

逆問題。測定結果から原因、パラメータまたは初期条件の再構成。宇宙論では、信号伝達と観測選択の記述が必要である。いくつかのモデルは同じデータを生成する可能性がある。差別は、許容可能な説明に対して追加の観察可能または独立に正当化可能な制約を必要とする。

フィールドポテンシャル。理論における場エネルギーのポテンシャル部分を記述する関数。その形状は、運動、平衡および外乱特性に影響を与えます。観測はアクセス可能なダイナミックスの範囲のみを制限し、未移動値へのポテンシャルの継続には追加の物理前提条件が必要である。

時空。空間座標と時間座標を持つイベントの一般的な幾何学的記述。相対性理論では、その計量は物質とエネルギーに依存し、自由体と光の動きを決定する。時間は因果構造における空間方向と異なる。

プロファイリングパラメータ。一定のテスト値を持つ干渉パラメータに対する不一致の測定の最小化。パラメータの分布におけるベイズ平均化とは異なる。

放射線安定性。各ステップでパラメータの任意の調整を繰り返すことなく、宣言されたスキームにおける量子補正を考慮しながらモデルの宣言された特性を保存する。

寸法。考慮中の空間内の位置を局所的に指定するのに必要な独立座標の数。通常の時空のモデルは三つの空間座標と一つの時間座標を持つ。量子状態の空間の大きな次元は、運動の追加的な物理的方向を意味するものではない。

再加熱。インフレーションを支えた場のエネルギーが、高温期の粒子と放射へ移る過程。複数の非平衡段階を含む場合がある。その継続時間と動力学は、観測のスケールと、初期のモデルにおいてそのスケールが生じた時刻との対応に影響する。

粒子の自由な流れ。衝突が考慮中の規模で局所平衡を維持する時間を持たない体制。そのような成分の摂動は、密結合した流体の摂動とは異なる。

システムエラー。インストルメンテーション、キャリブレーション、データ選択、または処理モデルの不正確さによる結果のバイアスや歪み。観測の数を増やすことは必ずしもそれを排除するものではない。評価には独立したテスト、応答モデリング、ベンチマーク測定が必要である。共通のソースは異なるメソッドからエラーをリンクできる。

Scalarフィールド。時空の各点において、一つの数によって指定された量で、座標を変更するとスカラーとして変換される。そのダイナミクスは、動的項、ポテンシャルおよび相互作用によって決定される。スカラーフィールドはプロセスをモデル化することができます。名前自体はその存在を確立しません。

パワースペクトル。異なる空間スケールまたは角スケールにおける不均質性の振幅の統計的記述。これは点対点場相関に関連付けられており、物体の特定の位置を決定しない。異なる機構は類似した力を生成することができるが、高次相関において異なる。

スピン温度。水素の基底状態の二つの超微細レベルの占有確率の割合のパラメータ。気体の運動温度や宇宙マイクロ波背景放射の温度と一致する必要はありません。

スタンダードキャンドル。絶対光度が属性によって推定または標準化できるソース。この光度と結果のフラックスを比較すると距離が広がります。この方法は、吸収、物体の選択およびそれらの特性の可能な進化を考慮して、校正を必要とします。キャンドルは同じランプではありません。

標準サイレン。信号の形が与えられた伝搬理論の光度距離を推定できる重力波源。拡張の測定には、通常レッドシフトも必要です。精度は、システム指向、キャリブレーション、ホスト銀河選択、検出されたイベントの選択によって制限される。

統計的意義。得られた結果の異常さの特徴は、与えられた仮説がテストされていることと統計的モデルである。新しい理論が真である確率と等しくない。解釈はノイズ仮定、分析オプション、バイアス、および比較される説明のセットによって影響される。

ハッブル球体。宇宙の後退速度が光の速度と等しい均質な拡大モデルにおける特性半径c/Hを持つ表面。その位置は現在の膨張率によって決定される。これは普遍的な因果的地平線ではなく、信号を受け取る可能性はその後の進化にも依存する。

暗黒物質。標準宇宙論的解釈における存在は、運動、レンズ、構造成長に対する重力の影響から推測される。その微細な性質は確立されていない。一つの粒子の探索の負の結果は対応するモデルを制限し、暗黒物質への説明を自動的には制限しない。

ダークエネルギー。標準重力記述における拡張の遅延加速を説明する成分。それらは、宇宙定数または磁場の動的系として機能することができる。性質に関する結論は、採用された幾何学、宇宙の構成および重力の法則に依存する。

暗黒時代。中性原子の形成後の期間と最初の発光物体の有意な影響前。正確な境界は、ソースの形成の歴史に依存します。

トポロジー。空間のグローバル構造:その接続性、閉じたパスと点の識別。同じ局所曲率は異なる位相を許す。コンパクトな空間は、物理的な端のない有限な体積を持つことができる;それはそれが位置している外側の部屋を必要としない。

状態の方程式。圧力、密度と部品の他の特性の関係。本書では、パラメータw - エネルギー密度に対する圧力の比率を使用します。宇宙定数 w = −1 に対して、非相対論的ダスト — 0 に対して。相互作用する成分を異なる分割によって回収される有効値は、各フィールドのパラメータと異なる可能性がある。

偽装仮説の予測は、与えられた条件下でそれと矛盾する観察結果に直面する可能性があるテスト。確率的モデルは基準と不確実性を必要とする。信号がないことは、その検出を必要とするバージョンが達成された感度で拒否する。

周波数コム。多数のスペクトル線が、互いに正確な関係をもつ光源。原子周波数標準に結びつけると、分光器の校正に使える。コムがあるだけでは、すべての誤差は取り除けない。光の伝送、検出器の応答、観測の間に生じる装置の変化も考慮する必要がある。

エミュレータ。与えられた物理解法に対する高速な計算近似。解法に対する誤差と物理記述自体の誤りは別々に評価される。

エントロピー。状態の定量的特性であり、その定義は使用される記述に依存する:マクロ状態、量子密度行列、サブシステムまたは地平線。これらの量を自動的に識別することはできません。閉量子状態のエントロピーはユニタリ進化の間に保存され、選択された部分系のエントロピーは変化する。

効果場理論。許容される相互作用を通じてアクセス不可能な部分の影響を考慮に入れ、限られた範囲のエネルギーとスケールで物理的プロセスの記述。その予測には、適用範囲の検証が必要である。成功した効果的な理論は、いかなるエネルギーでも真であり続ける必要はありません。

BAO - バリオン音響振動。物質の空間分布における早期プラズマの音波の軌跡特性スケールは、ジオメトリと拡張を測定するための標準定規として使用されます。その物理的長さは初期の歴史から計算されるため、絶対校正には宇宙の組成とダイナミクスに関する仮定が必要である。

BBN — ビッグバン元素合成。熱い宇宙の歴史の最初の数分に起こる、軽い原子核の生成。計算は、重水素、ヘリウム、ほかの軽元素の量を、通常の物質の密度、核反応、膨張率に結びつける。観測による検証には、その後の恒星による物質の変化と、系統誤差を考慮する必要がある。

CMB - 宇宙マイクロ波背景放射。高温の初期の宇宙から保たれ、物質が十分に透明になった後に私たちに到達した放射線。そのスペクトル、温度不均質性および偏光は様々な情報を運ぶ。観察されたパターンは、主な障害とその後の進化の結果の両方を含んでいる。

CP対称。反粒子、C、空間反射Pによる粒子置換の結合対称性。その違反は、対応するプロセスの違いを意味します。これはバリオン非対称性の動的生成のための通常の条件の一部であるが、観測効果とその宇宙論的有効性の大きさは特定のメカニズムに依存する。

EDM - 電気ダイポールモーメント。正電荷と負電荷の分離特性スピンに沿った素粒子の定常モーメントは、空間反射と時間反転の違反に敏感である。粒子、原子、分子の実験は相互作用を制限するが、結果をパラメータに変換するには顕微鏡モデルが必要である。

HNLは重い中立レプトンです。光ニュートリノよりも重く、それらと混合することによって相互作用できる仮想中立フェルミオン。一部のモデルでは、そのような粒子はニュートリノ質量を説明し、バリオン非対称性の生成に関与する。粒子の発見は、まだ宇宙論的なメカニズムを確認していない。

H_0はハッブル定数です。宇宙膨張率Hの現在の値。近隣の物体の場合、適切な運動を考慮した後、後退速度の宇宙的部分と距離を関連付ける。通常、一メガパーセクあたり秒速一kmで表されるが、Hは時間とともに一定であるとは限らない。

KK - Kaluza - Kleinモード。フィールドが追加のコンパクトな方向に拡大されたときに生じる励起のセット。より少ない次元での効果的な説明では、モードは異なる質量を持つ粒子として現れる。それらのスペクトルと相互作用は幾何学、境界条件および理論に依存する。

SBI。シミュレーションに基づく推論 - パラメータ分布の復元やシミュレーションを用いたモデルの比較。ロバスト性は、トレーニングモデル、統計、推論手順、キャリブレーションチェックに依存する。

S_8 は、物質のクラスタリングの振幅を表す。構造の測定結果を比較する際に使う組合せは $S_8 = \sigma_8\sqrt{(\Omega_m/0{,}3)}$ である。Ω_m は現在の物質の割合であり、σ_8 は、半径 8/h メガパーセクの球内における、線形な密度ゆらぎの二乗平均平方根を特徴づける。h は、H_0 を、メガパーセク当たり毎秒 100 キロメートルを単位として表した値である。これはモデルのパラメーターである。

ΛCDM。宇宙定数Λ、冷たい暗黒物質、通常の物質と放射線を含む基本的な宇宙モデル。略称CDMは、冷たい暗黒物質の略です。解析は幾何学、初期外乱および自由パラメータの集合を規定し、モデルの拡張は結論を変える可能性がある。

μ–T相関。宇宙マイクロ波背景放射の温度不均一性とスペクトルμ歪みの空間写像の統計的結合与えられたモデルでは、長モードと短プライマリモードの結合に敏感である。

参考文献

ソースは最初の参照順にリストされる。テキスト内の数字は、対応するエントリにつながります。

[1] Tamara M. Davis; Charles H. Lineweaver. Expanding Confusion: common misconceptions of cosmological horizons and the superluminal expansion of the Universe. 2004. https://doi.org/10.1071/AS03040. https://arxiv.org/abs/astro-ph/0310808

[2] Planck Collaboration. Planck 2015 results. XVIII. Background geometry & topology. 2016. https://arxiv.org/abs/1502.01593

[3] Chris Clarkson; Bruce A. Bassett; Teresa Hui-Ching Lu. A general test of the Copernican Principle. Physical Review Letters 101, 011301 (2008). https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.011301. https://arxiv.org/abs/0712.3457

[4] David W. Hogg. Distance measures in cosmology. 2000. プレプリント。 https://arxiv.org/abs/astro-ph/9905116

[5] D. J. Fixsen. The Temperature of the Cosmic Microwave Background. 2009. https://doi.org/10.1088/0004-637X/707/2/916. https://arxiv.org/abs/0911.1955

[6] Planck Collaboration. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. Astronomy & Astrophysics 641, A6 (2020). https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910. https://arxiv.org/abs/1807.06209

[7] Douglas Scott; Dagoberto Contreras; Ali Narimani; Yin-Zhe Ma. The information content of cosmic microwave background anisotropies. JCAP 06 (2016) 046. https://doi.org/10.1088/1475-7516/2016/06/046. https://arxiv.org/abs/1603.03550

[8] DESI Collaboration. DESI DR2 Results II: Measurements of Baryon Acoustic Oscillations and Cosmological Constraints. Physical Review D 112, 083515 (2025). https://doi.org/10.1103/tr6y-kpc6. https://arxiv.org/abs/2503.14738

[9] S. Blondin et al. Time Dilation in Type Ia Supernova Spectra at High Redshift. 2008. https://doi.org/10.1086/589568. https://arxiv.org/abs/0804.3595

[10] Abraham Loeb. Direct Measurement of Cosmological Parameters from the Cosmic Deceleration of Extragalactic Objects. 1998. https://doi.org/10.1086/311375. https://arxiv.org/abs/astro-ph/9802122

[11] ヨーロッパ南部天文台。超大型望遠鏡用のANDE機器です。プロジェクトの公式説明。検証済み 9 十一月 2026.https://elt.eso.org/instrument/ANDES/

[12] アンデス・コンソーシアム、INAF。アンデス校正ユニット。プロジェクトの公式説明。検証済み 9 十一月 2026.https://andes.inaf.it/calibration-unit/

[13] A. Trost; C. M. J. Marques; S. Cristiani et al. The ESPRESSO Redshift Drift Experiment III — The Third Epoch of QSO J052915.80-435152.0. arXiv:2603.02318 (2026); Astronomy & Astrophysics に掲載受理。 https://arxiv.org/abs/2603.02318

[14] J. Liske; A. Grazian; E. Vanzella et al. Cosmic dynamics in the era of Extremely Large Telescopes. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 386, 1192–1218 (2008). https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.13090.x. https://arxiv.org/abs/0802.1532

[15] P. Noterdaeme; P. Petitjean; R. Srianand; C. Ledoux; S. Lopez. The evolution of the Cosmic Microwave Background Temperature: Measurements of TCMB at high redshift from carbon monoxide excitation. 2011. https://doi.org/10.1051/0004-6361/201016140. https://arxiv.org/abs/1012.3164

[16] B. D. フィールド; P。モラロ、S。サルカル。ビッグバン核合成。粒子物理学 2025.https://pdg.lbl.gov/2025/reviews/rpp2025-rev-bbang-nucleosynthesis.pdf

[17] Ryan Cooke; Max Pettini; Charles C. Steidel. One Percent Determination of the Primordial Deuterium Abundance. 2018. https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaab53. https://arxiv.org/abs/1710.11129

[18] Julien Froustey; Cyril Pitrou; Maria Cristina Volpe. Neutrino decoupling including flavour oscillations and primordial nucleosynthesis. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 12, 015 (2020). https://doi.org/10.1088/1475-7516/2020/12/015. https://arxiv.org/abs/2008.01074

[19] Sergei Bashinsky; Uros Seljak. Signatures of Relativistic Neutrinos in CMB Anisotropy and Matter Clustering. Physical Review D 69, 083002 (2004). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.69.083002. https://arxiv.org/abs/astro-ph/0310198

[20] Brent Follin; Lloyd Knox; Marius Millea; Zhen Pan. A First Detection of the Acoustic Oscillation Phase Shift Expected from the Cosmic Neutrino Background. Physical Review Letters 115, 091301 (2015). https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.091301. https://arxiv.org/abs/1503.07863

[21] Francis-Yan Cyr-Racine; Kris Sigurdson. Limits on Neutrino-Neutrino Scattering in the Early Universe. Physical Review D 90, 123533 (2014). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.90.123533. https://arxiv.org/abs/1306.1536

[22] David Camarena; Francis-Yan Cyr-Racine. Strong constraints on a simple self-interacting neutrino cosmology. Physical Review D 111, 023504 (2025). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.111.023504. https://arxiv.org/abs/2403.05496

[23] Andrew J. Long; Cecilia Lunardini; Eray Sabancilar. Detecting non-relativistic cosmic neutrinos by capture on tritium: phenomenology and physics potential. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 08, 038 (2014). https://doi.org/10.1088/1475-7516/2014/08/038. https://arxiv.org/abs/1405.7654

[24] PTOLEMY Collaboration; M. G. Betti et al. Neutrino physics with the PTOLEMY project: active neutrino properties and the light sterile case. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 07, 047 (2019). https://doi.org/10.1088/1475-7516/2019/07/047. https://arxiv.org/abs/1902.05508

[25] PTOLEMY Collaboration / Laboratori Nazionali del Gran Sasso、INFN。実験的な挑戦。PTOLEMYの公式ページです。認証済み 8 十一月 2026.https://ptolemy.lngs.infn.it/the-experimental-challenges/

[26] V. Mossa et al. LUNA Collaboration. The baryon density of the Universe from an improved rate of deuterium burning. 2020. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2878-4.

[27] A. Kogut et al. The Primordial Inflation Explorer (PIXIE): A Nulling Polarimeter for Cosmic Microwave Background Observations. 2011. https://doi.org/10.1088/1475-7516/2011/07/025. https://arxiv.org/abs/1105.2044

[28] Abraham Loeb; Matias Zaldarriaga. Measuring the Small-Scale Power Spectrum of Cosmic Density Fluctuations Through 21 cm Tomography Prior to the Epoch of Structure Formation. Physical Review Letters 92, 211301 (2004). https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.211301. https://arxiv.org/abs/astro-ph/0312134

[29] Antony Lewis; Anthony Challinor. The 21cm angular-power spectrum from the dark ages. Physical Review D 76, 083005 (2007). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.76.083005. https://arxiv.org/abs/astro-ph/0702600

[30] Rajesh Mondal; Rennan Barkana. Prospects for precision cosmology with the 21 cm signal from the dark ages. Nature Astronomy 7, 1025–1030 (2023). https://doi.org/10.1038/s41550-023-02057-y. https://arxiv.org/abs/2305.08593

[31] Yacine Ali-Haïmoud; P. Daniel Meerburg; Sihan Yuan. A new light on 21 cm intensity fluctuations from the dark ages. Physical Review D 89, 083506 (2014). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.89.083506. https://arxiv.org/abs/1312.4948

[32] Julian B. Muñoz; Yacine Ali-Haïmoud; Marc Kamionkowski. Primordial non-gaussianity from the bispectrum of 21-cm fluctuations in the dark ages. Physical Review D 92, 083508 (2015). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.92.083508. https://arxiv.org/abs/1506.04152

[33] Paul Bode; Jeremiah P. Ostriker; Neil Turok. Halo Formation in Warm Dark Matter Models. Astrophysical Journal 556, 93–107 (2001). https://doi.org/10.1086/321541. https://arxiv.org/abs/astro-ph/0010389

[34] カリフォルニア大学バークレー宇宙科学研究所。LuSEE - 夜。公式プロジェクトページ。認証済み 8 十一月 2026.https://www.ssl.berkeley.edu/projects/lusee-night/

[35] Stuart D. Bale et al. LuSEE 'Night': The Lunar Surface Electromagnetics Experiment. arXiv:2301.10345 (2023); URSI GASS 2023 で発表された報告。 https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.10345. https://arxiv.org/abs/2301.10345

[36] Adrian Liu; Aaron R. Parsons; Cathryn M. Trott. The Epoch of Reionization Window: I. Mathematical Formalism. Physical Review D 90, 023018 (2014). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.90.023018. https://arxiv.org/abs/1404.2596

[37] Douglas Clowe; Marusa Bradač; Anthony H. Gonzalez; Maxim Markevitch; Scott W. Randall; Christine Jones; Dennis Zaritsky. A direct empirical proof of the existence of dark matter. Astrophysical Journal Letters 648, L109–L113 (2006). https://doi.org/10.1086/508162. https://arxiv.org/abs/astro-ph/0608407

[38] J. Aalbers et al. (LZ Collaboration). Dark Matter Search Results from 4.2 Tonne-Years of Exposure of the LUX-ZEPLIN (LZ) Experiment. 2025. https://doi.org/10.1103/4dyc-z8zf. https://arxiv.org/abs/2410.17036

[39] G. Carosi et al. (ADMX Collaboration). Search for Axion Dark Matter from 1.1 to 1.3 GHz with ADMX. 2025. https://doi.org/10.1103/d7mg-6sqq. https://arxiv.org/abs/2504.07279

[40] Daniel C. Brotherton et al. (ALPS II). Any Light Particle Searches with ALPS II: first science results. 2026. https://doi.org/10.1103/61sw-k3bc. https://arxiv.org/abs/2512.14110

[41] D. S. Akerib et al. (LZ Collaboration). Searches for Light Dark Matter and Evidence of Coherent Elastic Neutrino-Nucleus Scattering of Solar Neutrinos with the LUX-ZEPLIN (LZ) Experiment. 2026. https://doi.org/10.1103/jvqf-njpj. https://arxiv.org/abs/2512.08065

[42] Ethan O. Nadler; Daneng Yang; Hai-Bo Yu. A Self-interacting Dark Matter Solution to the Extreme Diversity of Low-mass Halo Properties. 2023. https://doi.org/10.3847/2041-8213/ad0e09. https://arxiv.org/abs/2306.01830

[43] Zixiang Jia; Fangzhou Jiang; Shubo Li; Ran Li; Jing Wang; Ling Zhu. An Enhanced Isothermal Jeans Approach to Constraining Dark Matter Self-Interactions from Galactic Kinematics. 2026. 2026 年十一月 3 日の arXiv v2 版を使用。4.2 節と結論。 https://doi.org/10.1093/mnras/stag969. https://arxiv.org/abs/2601.17118

[44] Alexandres Lazar et al. A dark matter profile to model diverse feedback-induced core sizes of ΛCDM haloes. 2020. https://doi.org/10.1093/mnras/staa2101. https://arxiv.org/abs/2004.10817

[45] Keir K. Rogers; Hiranya V. Peiris. Strong bound on canonical ultra-light axion dark matter from the Lyman-alpha forest. 2021. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.126.071302. https://arxiv.org/abs/2007.12705

[46] Andrew Eberhardt; Mateja Gosenca; Lam Hui. Heating and scattering of stellar distributions by ultralight dark matter. 2026. https://doi.org/10.1103/zngx-f8pz. https://arxiv.org/abs/2510.17079

[47] A. D. Sakharov. Violation of CP invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe. JETP Letters 5, 24–27 (1967); Russian original Pisma ZhETF 5, 32–35 (1967); reprint UFN 161(5), 61–64 (1991). https://www.ufn.ru/ru/articles/1991/5/h/

[48] E. Kh. Akhmedov; V. A. Rubakov; A. Yu. Smirnov. Baryogenesis via neutrino oscillations. Physical Review Letters 81, 1359–1362 (1998). https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.81.1359. https://arxiv.org/abs/hep-ph/9803255

[49] M. D'Onofrio; K. Rummukainen; A. Tranberg. The Sphaleron Rate in the Minimal Standard Model. Physical Review Letters 113, 141602 (2014). https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.141602. https://arxiv.org/abs/1404.3565

[50] ATLAS Collaboration. Search for heavy neutral leptons in decays of W bosons using leptonic and semi-leptonic displaced vertices in sqrt(s)=13 TeV pp collisions with the ATLAS detector. Journal of High Energy Physics 07 (2025) 196. https://doi.org/10.1007/JHEP07(2025)196. https://arxiv.org/abs/2503.16213

[51] J. de Vries; M. Drewes; Y. Georis; J. Klarić; V. Plakkot. Confronting the low-scale seesaw and leptogenesis with neutrinoless double beta decay. Journal of High Energy Physics 05 (2025) 090. https://doi.org/10.1007/JHEP05(2025)090. https://arxiv.org/abs/2407.10560

[52] J. Ellis; M. Lewicki; M. Merchand; J. M. No; M. Zych. The scalar singlet extension of the Standard Model: gravitational waves versus baryogenesis. Journal of High Energy Physics 01 (2023) 093. https://doi.org/10.1007/JHEP01(2023)093. https://arxiv.org/abs/2210.16305

[53] T. S. Roussy et al. An improved bound on the electron's electric dipole moment. Science 381, 46–50 (2023). https://doi.org/10.1126/science.adg4084. https://arxiv.org/abs/2212.11841

[54] C. Caprini et al.; LISA Cosmology Working Group. Detecting gravitational waves from cosmological phase transitions with LISA: an update. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 03 (2020) 024. https://doi.org/10.1088/1475-7516/2020/03/024. https://arxiv.org/abs/1910.13125

[55] D. E. Kaplan; M. A. Luty; K. M. Zurek. Asymmetric dark matter. Physical Review D 79, 115016 (2009). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.79.115016. https://arxiv.org/abs/0901.4117

[56] Adam G. Riess et al. Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant. Astronomical Journal 116, 1009–1038 (1998). https://doi.org/10.1086/300499. https://arxiv.org/abs/astro-ph/9805201

[57] DESI Collaboration. DESI DR2 Results IV: Alcock-Paczynski Measurements from the Lyman Alpha Forest and Cosmological Constraints. 2026. プレプリント。 https://arxiv.org/abs/2607.27410

[58] DES Collaboration. Constraints on Dynamical Dark Energy from Multiple Probes in the Full Dark Energy Survey. 2026. プレプリント。 https://arxiv.org/abs/2605.27221

[59] Y. Park; M. Raveri; B. Jain. Reconstructing quintessence. Physical Review D 103, 103530. https://arxiv.org/abs/2101.04666

[60] P. P. Avelino. Avoiding unrealistic priors: the case of dark energy constraints from the time variation of the fine-structure constant. Physical Review D 93, 083501. https://arxiv.org/abs/1602.04501

[61] T. Damour; J. F. Donoghue. Equivalence Principle Violations and Couplings of a Light Dilaton. Physical Review D 82, 084033. https://arxiv.org/abs/1007.2792

[62] S. M. Carroll. Quintessence and the Rest of the World: Suppressing Long-Range Interactions. Physical Review Letters 81, 3067 (1998). https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.81.3067. https://arxiv.org/abs/astro-ph/9806099

[63] A. Bedroya; G. Obied; C. Vafa; D. H. Wu. Evolving dark sector and the dark dimension scenario. Physical Review D 114, 103506, published 4 November 2026; DOI 10.1103/1rsq-cv2m. https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/1rsq-cv2m

[64] Stephen P. Martin. Two-loop effective potential for a general renormalizable theory and softly broken supersymmetry. Physical Review D 65, 116003 (2002). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.65.116003. https://arxiv.org/abs/hep-ph/0111209v2

[65] R. L. Jaffe. The Casimir Effect and the Quantum Vacuum. Physical Review D 72, 021301 (2005). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.72.021301. https://arxiv.org/abs/hep-th/0503158

[66] Nemanja Kaloper; Antonio Padilla. Sequestering the Standard Model Vacuum Energy. Physical Review Letters 112, 091304 (2014). https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.091304. https://arxiv.org/abs/1309.6562v2

[67] Nemanja Kaloper; Antonio Padilla; David Stefanyszyn; George Zahariade. A Manifestly Local Theory of Vacuum Energy Sequestering. Physical Review Letters 116, 051302 (2016). https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.051302. https://arxiv.org/abs/1505.01492v2

[68] H_0DN Collaboration. The Local Distance Network: a community consensus report on the measurement of the Hubble constant at 1% precision. A&A 708, A166 (2026). https://doi.org/10.1051/0004-6361/202557993. https://arxiv.org/abs/2510.23823

[69] Wendy L. Freedman et al. Status Report on the Chicago-Carnegie Hubble Program (CCHP): Measurement of the Hubble Constant Using the Hubble and James Webb Space Telescopes. 2025. https://doi.org/10.3847/1538-4357/adce78. https://arxiv.org/abs/2408.06153

[70] TDCOSMO Collaboration. TDCOSMO 2026: A 3% measurement of the Hubble constant from strong lensing and stellar kinematics. 2026. プレプリント。 https://arxiv.org/abs/2610.14781

[71] George Efstathiou. Evolving Dark Energy or Supernovae Systematics? MNRAS 538(2), 875 (2025). https://arxiv.org/abs/2408.07175

[72] M. Vincenzi et al. (DES Collaboration). Comparing the DES-SN5YR and Pantheon+ SN cosmology analyses: Investigation based on Evolving Dark Energy or Supernovae systematics? MNRAS 541(3), 2585 (2025). https://arxiv.org/abs/2501.06664

[73] DES Collaboration. Dark Energy Survey Year 6 Results: Cosmological Constraints from Galaxy Clustering and Weak Lensing. 2026. https://doi.org/10.1103/nnlj-gyr2. https://arxiv.org/abs/2601.14559

[74] Angus H. Wright et al. KiDS-Legacy: Cosmological constraints from cosmic shear with the complete Kilo-Degree Survey. 2025. https://doi.org/10.1051/0004-6361/202554908. https://arxiv.org/abs/2503.19441

[75] Jay R. Krishnan; Kevork N. Abazajian. Statistics meet systematics: Resolution of the massive early JWST galaxy tension. Physical Review D 113, 083007 (2026). https://doi.org/10.1103/gjf5-3r89.

[76] Leonardo Comini; Sunny Vagnozzi; Abraham Loeb. Dark energy, spatial curvature, and star formation efficiency from JWST photometric and spectroscopic high-redshift galaxies. Journal of High Energy Astrophysics 53, 100626 (2026). https://doi.org/10.1016/j.jheap.2026.100626. https://arxiv.org/abs/2604.13866

[77] Enis Belgacem; Yves Dirian; Stefano Foffa; Michele Maggiore. Modified gravitational-wave propagation and standard sirens. Physical Review D 98, 023510 (2018). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.023510. https://arxiv.org/abs/1805.08731

[78] LIGO Scientific Collaboration; Virgo Collaboration; Fermi Gamma-Ray Burst Monitor; INTEGRAL. Gravitational Waves and Gamma-rays from a Binary Neutron Star Merger: GW170817 and GRB 170817A. The Astrophysical Journal Letters 848, L13 (2017). https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa920c. https://arxiv.org/abs/1710.05834

[79] Macarena Lagos; Maya Fishbach; Philippe Landry; Daniel E. Holz. Standard sirens with a running Planck mass. Physical Review D 99, 083504 (2019). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.99.083504.

[80] Charles Dalang; Lucas Lombriser. Limitations on Standard Sirens tests of gravity from screening. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 10, 013 (2019). https://doi.org/10.1088/1475-7516/2019/10/013. https://arxiv.org/abs/1906.12333

[81] Charles Dalang; Pierre Fleury; Lucas Lombriser. Horndeski gravity and standard sirens. Physical Review D 102, 044036 (2020). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.102.044036. https://arxiv.org/abs/1912.06117

[82] B. P. Abbott et al. A gravitational-wave standard siren measurement of the Hubble constant. 2017. https://arxiv.org/abs/1710.05835

[83] Alan H. Guth. Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems. 1981. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.23.347.

[84] James M. Bardeen; Paul J. Steinhardt; Michael S. Turner. Spontaneous creation of almost scale-free density perturbations in an inflationary universe. 1983. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.28.679.

[85] Planck Collaboration. Planck 2018 results. X. Constraints on inflation. 2020. https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833887. https://arxiv.org/abs/1807.06211

[86] Louis et al.、ACT Collaboration。Atacama宇宙望遠鏡:DR6パワースペクトル、ライクリフッドとLambdaCDMパラメータ。arXivエントリは、JCAPへの受け入れを示しています。https://arxiv.org/abs/2503.14452

[87] BICEP/Keck Collaboration. BICEP/Keck XIII: Improved Constraints on Primordial Gravitational Waves using Planck, WMAP, and BICEP/Keck Observations through the 2018 Observing Season. 2021. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.127.151301. https://arxiv.org/abs/2110.00483

[88] Planck Collaboration. Planck 2018 results. IX. Constraints on primordial non-Gaussianity. Astronomy & Astrophysics 641, A9 (2020). https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935891. https://arxiv.org/abs/1905.05697

[89] Ana Achucarro; Jinn-Ouk Gong; Gonzalo A. Palma; Subodh P. Patil. Correlating features in the primordial spectra. Physical Review D 87, 121301 (2013). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.87.121301. https://arxiv.org/abs/1211.5619

[90] Ana Achucarro; Vicente Atal; Pablo Ortiz; Jesus Torrado. Localized correlated features in the CMB power spectrum and primordial bispectrum from a transient reduction in the speed of sound. Physical Review D 89, 103006 (2014). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.89.103006. https://arxiv.org/abs/1311.2552

[91] R. Holman; Andrew J. Tolley. Enhanced Non-Gaussianity from Excited Initial States. JCAP 05 (2008) 001. https://doi.org/10.1088/1475-7516/2008/05/001. https://arxiv.org/abs/0710.1302

[92] Latham A. Boyle; Paul J. Steinhardt. Probing the early universe with inflationary gravitational waves. Physical Review D 77, 063504 (2008). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.77.063504. https://arxiv.org/abs/astro-ph/0512014

[93] Yuki Watanabe; Eiichiro Komatsu. Improved Calculation of the Primordial Gravitational Wave Spectrum in the Standard Model. Physical Review D 73, 123515 (2006). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.73.123515. https://arxiv.org/abs/astro-ph/0604176

[94] Sachiko Kuroyanagi; Christophe Ringeval; Tomo Takahashi. Early Universe Tomography with CMB and Gravitational Waves. Physical Review D 87, 083502 (2013). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.87.083502. https://arxiv.org/abs/1301.1778

[95] David Polarski; Alexei A. Starobinsky. Semiclassicality and Decoherence of Cosmological Perturbations. Classical and Quantum Gravity 13, 377–392 (1996); v2 版を使用。 https://doi.org/10.1088/0264-9381/13/3/006. https://arxiv.org/abs/gr-qc/9504030v2

[96] Jérôme Martin; Vincent Vennin. Quantum Discord of Cosmic Inflation: Can we Show that CMB Anisotropies are of Quantum-Mechanical Origin? Physical Review D 93, 023505 (2016). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.93.023505. https://arxiv.org/abs/1510.04038

[97] Elliot Nelson. Quantum Decoherence During Inflation from Gravitational Nonlinearities. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 03 (2016) 022. https://doi.org/10.1088/1475-7516/2016/03/022. https://arxiv.org/abs/1601.03734

[98] J. E. Moyal. Quantum mechanics as a statistical theory. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society 45(1), 99–124 (1949). https://doi.org/10.1017/S0305004100000487.

[99] Daniel Green; Rafael A. Porto. Signals of a Quantum Universe. Physical Review Letters 124, 251302 (2020). https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.251302. https://arxiv.org/abs/2001.09149

[100] Guillermo Ballesteros; Jesús Gambín Egea; Alejandro Pérez Rodríguez. Classical and quantum evolution of inflationary fluctuations. 2026. https://doi.org/10.1103/w7y3-gxbr. https://arxiv.org/abs/2604.18416v2

[101] Juan Maldacena. A model with cosmological Bell inequalities. Fortschritte der Physik (2016), first online 2015. https://doi.org/10.1002/prop.201500097. https://arxiv.org/abs/1508.01082

[102] Arvind Borde; Alan H. Guth; Alexander Vilenkin. Inflationary Spacetimes Are Incomplete in Past Directions. Physical Review Letters 90, 151301 (2003). https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.90.151301. https://arxiv.org/abs/gr-qc/0110012

[103] Abhay Ashtekar; Tomasz Pawlowski; Parampreet Singh. Quantum Nature of the Big Bang: Improved dynamics. Physical Review D 74, 084003 (2006). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.74.084003. https://arxiv.org/abs/gr-qc/0607039

[104] Jerome Quintin; Zeinab Sherkatghanad; Yi-Fu Cai; Robert H. Brandenberger. Evolution of cosmological perturbations and the production of non-Gaussianities through a nonsingular bounce: Indications for a no-go theorem in single field matter bounce cosmologies. Physical Review D 92, 063532 (2015). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.92.063532. https://arxiv.org/abs/1508.04141

[105] James B. Hartle; Stephen W. Hawking. Wave function of the Universe. Physical Review D 28, 2960 (1983). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.28.2960.

[106] David Wallace. Gravity, Entropy, and Cosmology: In Search of Clarity. 2010. https://doi.org/10.1093/bjps/axp048. https://arxiv.org/abs/0907.0659

[107] Sean M. Carroll; Heywood Tam. Unitary Evolution and Cosmological Fine-Tuning. 2010. プレプリント。 https://doi.org/10.48550/arXiv.1007.1417. https://arxiv.org/abs/1007.1417

[108] Wojciech H. Zurek. Pointer basis of quantum apparatus: Into what mixture does the wave packet collapse? 1981. https://doi.org/10.1103/PhysRevD.24.1516.

[109] Ali Nayeri. Inflationary branch decoherence and the cosmological arrow of time. Physical Review D 113, 126030 (2026). https://doi.org/10.1103/1k1w-c7vd. https://arxiv.org/abs/2602.21263

[110] G. W. Gibbons; S. W. Hawking. Cosmological event horizons, thermodynamics, and particle creation. Physical Review D 15, 2738 (1977). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.15.2738.

[111] D. J. Fixsen; E. S. Cheng; J. M. Gales; J. C. Mather; R. A. Shafer; E. L. Wright. The Cosmic Microwave Background Spectrum from the Full COBE/FIRAS Data Set. 1996. https://doi.org/10.1086/178173. https://arxiv.org/abs/astro-ph/9605054

[112] Jens Chluba; Adrienne L. Erickcek; Ido Ben-Dayan. Probing the inflaton: Small-scale power spectrum constraints from measurements of the Cosmic Microwave Background energy spectrum. 2012. https://doi.org/10.1088/0004-637X/758/2/76. https://arxiv.org/abs/1203.2681

[113] Enrico Pajer; Matias Zaldarriaga. A New Window on Primordial non-Gaussianity. Physical Review Letters 109, 021302 (2012). https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.109.021302. https://arxiv.org/abs/1201.5375

[114] Mathieu Remazeilles; Jens Chluba. Extracting foreground-obscured μ-distortion anisotropies to constrain primordial non-Gaussianity. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 478, 807–824 (2018). https://doi.org/10.1093/mnras/sty1034. https://arxiv.org/abs/1802.10101

[115] Mathieu Remazeilles; Andrea Ravenni; Jens Chluba. Leverage on small-scale primordial non-Gaussianity through cross-correlations between CMB E-mode and μ-distortion anisotropies. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 512, 455–470 (2022). https://doi.org/10.1093/mnras/stac519. https://arxiv.org/abs/2110.14664

[116] Maldacena, J. M. The Large N Limit of Superconformal Field Theories and Supergravity. Advances in Theoretical and Mathematical Physics 2, 231–252 (1998) (1999). https://doi.org/10.1023/A:1026654312961. https://arxiv.org/abs/hep-th/9711200

[117] Tadashi Takayanagi. Emergent Holographic Spacetime from Quantum Information. Physical Review Letters 134, 240001 (2025). https://arxiv.org/abs/2506.06595

[118] Shinsei Ryu; Tadashi Takayanagi. Holographic Derivation of Entanglement Entropy from the anti–de Sitter Space/Conformal Field Theory Correspondence. Physical Review Letters 96, 181602 (2006). https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.181602. https://arxiv.org/abs/hep-th/0603001

[119] Mark Van Raamsdonk. Building up spacetime with quantum entanglement. General Relativity and Gravitation 42, 2323–2329 (2010). https://doi.org/10.1007/s10714-010-1034-0. https://arxiv.org/abs/1005.3035

[120] S. W. Hawking. Particle creation by black holes. Communications in Mathematical Physics 43, 199–220 (1975). https://doi.org/10.1007/BF02345020.

[121] Don N. Page. Average Entropy of a Subsystem. Physical Review Letters 71, 1291–1294 (1993). https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.71.1291. https://arxiv.org/abs/gr-qc/9305007v2

[122] Netta Engelhardt; Aron C. Wall. Quantum Extremal Surfaces: Holographic Entanglement Entropy beyond the Classical Regime. Journal of High Energy Physics 01 (2015) 073. https://doi.org/10.1007/JHEP01(2015)073. https://arxiv.org/abs/1408.3203v3

[123] Ahmed Almheiri; Netta Engelhardt; Donald Marolf; Henry Maxfield. The entropy of bulk quantum fields and the entanglement wedge of an evaporating black hole. Journal of High Energy Physics 12 (2019) 063. https://doi.org/10.1007/JHEP12(2019)063. https://arxiv.org/abs/1905.08762v3

[124] Geoffrey Penington. Entanglement Wedge Reconstruction and the Information Paradox. 2020. https://arxiv.org/abs/1905.08255v3

[125] Jafferis, D. et al. Traversable wormhole dynamics on a quantum processor. Nature 612, 51–55 (2022). https://doi.org/10.1038/s41586-022-05424-3.

[126] Kobrin, B.; Schuster, T.; Yao, N. Y. Experiments implementing small commuting models lack gravitational features. Nature 643, E17–E19 (2025). https://doi.org/10.1038/s41586-025-08939-7.

[127] Jafferis, D. et al. Reply to: Experiments implementing small commuting models lack gravitational features. Nature 643, E20–E23 (2025). https://doi.org/10.1038/s41586-025-08995-z.

[128] Arkani-Hamed, N.; Dimopoulos, S.; Dvali, G. The Hierarchy Problem and New Dimensions at a Millimeter. Physics Letters B 429, 263–272 (1998). https://doi.org/10.1016/S0370-2693(98)00466-3. https://arxiv.org/abs/hep-ph/9803315

[129] Lee, J. G.; Adelberger, E. G.; Cook, T. S.; Fleischer, S. M.; Heckel, B. R. New Test of the Gravitational $1/r^2$ Law at Separations down to 52 μm. Physical Review Letters 124, 101101 (2020). https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.101101. https://arxiv.org/abs/2002.11761

[130] ATLAS Collaboration. Search for new phenomena in events with an energetic jet and missing transverse momentum in pp collisions at sqrt(s)=13 TeV with the ATLAS detector. Physical Review D 103, 112006 (2021). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.103.112006. https://arxiv.org/abs/2102.10874

[131] CMS Collaboration. Search for new physics in the final state with a single photon and large missing transverse momentum in proton-proton collisions at sqrt(s)=13 TeV. Physical Review D 113, 072020 (2026). https://doi.org/10.1103/f9r8-styj. https://arxiv.org/abs/2511.17310

[132] E. Hardy; A. Sokolov; H. Stubbs. Stellar cooling limits on KK gravitons and dark dimensions. JHEP 03 (2026) 029; プレプリント arXiv:2510.18975v2 (2025)。 https://arxiv.org/abs/2510.18975

[133] S. Hannestad; G. G. Raffelt. Supernova and neutron-star limits on large extra dimensions reexamined. Physical Review D 67, 125008; erratum 69, 029901; 著者版は 2025 年四月 2 日に訂正 (2003). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.67.125008. https://arxiv.org/abs/hep-ph/0304029

[134] A. P. Braun; M. Cicoli; R. Milioli; R. Valandro. Moduli stabilisation for ADD and the Dark Dimension scenario. JHEP 10 (2026) 112, 2026 年十月 9 日公表。 https://link.springer.com/article/10.1007/JHEP10(2026)112

[135] M. Montero; C. Vafa; I. Valenzuela. The dark dimension and the Swampland. JHEP 02 (2023) 022. https://arxiv.org/abs/2205.12293

[136] Neil J. Cornish; David N. Spergel; Glenn D. Starkman. Circles in the Sky: Finding Topology with the Microwave Background Radiation. Classical and Quantum Gravity 15, 2657–2670 (1998). https://doi.org/10.1088/0264-9381/15/9/013. https://arxiv.org/abs/astro-ph/9801212

[137] Johannes R. Eskilt et al.; COMPACT Collaboration. Cosmic topology. Part IIa. Eigenmodes, correlation matrices, and detectability of orientable Euclidean manifolds. JCAP 03 (2024) 036. https://doi.org/10.1088/1475-7516/2024/03/036. https://arxiv.org/abs/2306.17112

[138] Yashar Akrami et al.; COMPACT Collaboration. Promise of Future Searches for Cosmic Topology. Physical Review Letters 132, 171501 (2024). https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.171501. https://arxiv.org/abs/2210.11426

[139] Wayne Hu; Martin White. CMB Anisotropies: Total Angular Momentum Method. Physical Review D 56, 596–615 (1997). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.56.596. https://arxiv.org/abs/astro-ph/9702170

[140] Amirhossein Samandar et al. (COMPACT Collaboration). Cosmic topology. Part IIIb. Eigenmodes and correlation matrices of spin-2 perturbations in orientable Euclidean manifolds. JCAP 08 (2025) 015. https://doi.org/10.1088/1475-7516/2025/08/015. https://arxiv.org/abs/2503.08671

[141] Hugh Everett III. “Relative State” Formulation of Quantum Mechanics. Reviews of Modern Physics 29, 454–462 (1957). https://doi.org/10.1103/RevModPhys.29.454.

[142] Wojciech H. Zurek. Environment-induced superselection rules. Physical Review D 26, 1862 (1982). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.26.1862.

[143] Andrei D. Linde. Eternally existing self-reproducing chaotic inflationary universe. Physics Letters B 175, 395–400 (1986). https://doi.org/10.1016/0370-2693(86)90611-8.

[144] Alan H. Guth. Eternal inflation and its implications. Journal of Physics A 40, 6811–6826 (2007). https://doi.org/10.1088/1751-8113/40/25/S25. https://arxiv.org/abs/hep-th/0702178

[145] Alan H. Guth; Vitaly Vanchurin. Eternal Inflation, Global Time Cutoff Measures, and a Probability Paradox. 2011. プレプリント。 https://arxiv.org/abs/1108.0665

[146] Stephen M. Feeney; Matthew C. Johnson; Daniel J. Mortlock; Hiranya V. Peiris. First Observational Tests of Eternal Inflation: Analysis Methods and WMAP 7-Year Results. Physical Review D 84, 043507 (2011). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.84.043507. https://arxiv.org/abs/1012.3667

[147] Stephen M. Feeney; Franz Elsner; Matthew C. Johnson; Hiranya V. Peiris. Forecasting constraints from the cosmic microwave background on eternal inflation. Physical Review D 92, 083515 (2015). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.92.083515. https://arxiv.org/abs/1506.01716

[148] John F. Donoghue. General relativity as an effective field theory: The leading quantum corrections. Physical Review D 50, 3874–3888 (1994). https://doi.org/10.1103/PhysRevD.50.3874. https://arxiv.org/abs/gr-qc/9405057

[149] Bose, S. et al. A Spin Entanglement Witness for Quantum Gravity. Physical Review Letters 119, 240401 (2017). https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.240401. https://arxiv.org/abs/1707.06050

[150] A. Di Biagio. Gravity-induced entanglement is not a theory-independent witness of nonclassicality of the gravitational field. Physical Review D 114, 084050 (2026). https://doi.org/10.1103/r8ry-sp35. https://arxiv.org/abs/2511.02683

[151] Tianfeng Feng; Vlatko Vedral; Chiara Marletto. Collapse-based models for gravity do not violate the entanglement-based witness of non-classicality. Physical Review D 113, 104055 (2026). https://doi.org/10.1103/83rl-nygv. https://arxiv.org/abs/2503.19774

[152] Nicolas Boulle; Guilherme Franzmann. Subsystems independence in gravitationally induced entanglement proposals. Physical Review D 114, 025015 (2026). https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/tgjx-y7hl

[153] Kafri, D.; Taylor, J. M.; Milburn, G. J. A classical channel model for gravitational decoherence. New Journal of Physics 16, 065020 (2014). https://doi.org/10.1088/1367-2630/16/6/065020. https://arxiv.org/abs/1401.0946

[154] Lawrence M. Krauss; Michael S. Turner. Geometry and Destiny. General Relativity and Gravitation 31, 1453–1459 (1999). https://doi.org/10.1023/A:1026757718530. https://arxiv.org/abs/astro-ph/9904020

[155] Robert R. Caldwell; Marc Kamionkowski; Nevin N. Weinberg. Phantom Energy: Dark Energy with $w < -1$ Causes a Cosmic Doomsday. 2003. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.071301. https://arxiv.org/abs/astro-ph/0302506

[156] Eric V. Linder. Exploring the Expansion History of the Universe. Physical Review Letters 90, 091301 (2003). https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.90.091301. https://arxiv.org/abs/astro-ph/0208512

[157] A. A. Starobinsky. How to determine an effective potential for a variable cosmological term. JETP Letters 68, 757–763 (1998). https://doi.org/10.1134/1.567941.

[158] M. Martinelli et al.; Euclid Collaboration. Euclid: constraining dark energy coupled to electromagnetism using astrophysical and laboratory data. Astronomy & Astrophysics 654, A148 (2021). https://arxiv.org/abs/2105.09746

[159] Kyle Cranmer; Johann Brehmer; Gilles Louppe. The frontier of simulation-based inference. Proceedings of the National Academy of Sciences 117, 30055–30062 (2020). https://doi.org/10.1073/pnas.1912789117. https://arxiv.org/abs/1911.01429

[160] H. T. Jense; I. Harrison; E. Calabrese; A. Spurio Mancini; B. Bolliet; J. Dunkley; J. C. Hill. A complete framework for cosmological emulation and inference with CosmoPower. arXiv:2405.07903v1 (2024); 方法論の議論に使用。 https://arxiv.org/abs/2405.07903

[161] Francisco Villaescusa-Navarro; Daniel Anglés-Alcázar; Shy Genel et al. The CAMELS project: Cosmology and Astrophysics with MachinE Learning Simulations. The Astrophysical Journal 915, 71 (2021). https://doi.org/10.3847/1538-4357/abf7ba. https://arxiv.org/abs/2010.00619

[162] Sean Talts; Michael Betancourt; Daniel Simpson; Aki Vehtari; Andrew Gelman. Validating Bayesian Inference Algorithms with Simulation-Based Calibration. arXiv:1804.06788v2, 2020 年十月 21 日修正。 https://arxiv.org/abs/1804.06788

[163] Toka Alokda; Cristiano Porciani; Alexander Eggemeier. Coverage is not enough: Frequentist tests of simulation-based inference for primordial non-Gaussianity. Astronomy & Astrophysics 714, A66 (2026). https://doi.org/10.1051/0004-6361/202660668. https://arxiv.org/abs/2605.00980

[164] Adam Foster; Martin Jankowiak; Eli Bingham; Paul Horsfall; Yee Whye Teh; Tom Rainforth; Noah Goodman. Variational Bayesian Optimal Experimental Design. Advances in Neural Information Processing Systems 32 (2019); arXiv:1903.05480v3. https://arxiv.org/abs/1903.05480

[165] Joseph Tooby-Smith. HepLean: Digitalising high energy physics. arXiv:2405.08863v1 (2024); 著者版を使用。 https://arxiv.org/abs/2405.08863

[166] Jordan Meadows; Lan Zhang; Andre Freitas. FormalScience: Scalable Human-in-the-Loop Autoformalisation of Science with Agentic Code Generation in Lean. ACL 2026; arXiv:2604.23002v1. https://arxiv.org/abs/2604.23002

[167] M. Filzinger et al. Improved limits on the coupling of ultralight bosonic dark matter to photons from optical atomic clock comparisons. Physical Review Letters 130, 253001 (2023). https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.253001. https://arxiv.org/abs/2301.03433

[168] G. Dvali; M. Zaldarriaga. Changing alpha with time: implications for fifth-force-type experiments and quintessence. Physical Review Letters 88, 091303. https://arxiv.org/abs/hep-ph/0108217

[169] Emilio Bellini; Ignacy Sawicki. Maximal freedom at minimum cost: linear large-scale structure in general modifications of gravity. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 07 (2014) 050. https://doi.org/10.1088/1475-7516/2014/07/050. https://arxiv.org/abs/1404.3713v3

[170] Jaume Garriga; V. F. Mukhanov. Perturbations in k-inflation. Physics Letters B 458, 219–225 (1999). https://doi.org/10.1016/S0370-2693(99)00602-4. https://arxiv.org/abs/hep-th/9904176

[171] Particle Data Group; Y. Gershtein and A. Pomarol (section authors). Extra Dimensions, Review of Particle Physics 2025. 2025. https://pdg.lbl.gov/2025/reviews/rpp2025-rev-extra-dimensions.pdf

[172] MICROSCOPE Collaboration; P. Touboul et al. MICROSCOPE Mission: Final Results of the Test of the Equivalence Principle. Physical Review Letters 129, 121102. https://arxiv.org/abs/2209.15487

[173] KamLAND-Zen Collaboration; S. Abe et al. Search for Majorana Neutrinos with the Complete KamLAND-Zen Dataset. Physical Review Letters 135, 262501 (2025). https://doi.org/10.1103/jkf6-48j8. https://arxiv.org/abs/2406.11438

著者とプロジェクト

メール: info@brenev.com

著者のウェブサイト: brenev.com

Miraのウェブサイト: mira.technology

その他のプロジェクト: haraizen.tech

Telegram: https://t.me/Eudgenee