

量子ゆらぎ

20世紀後半に発展した素粒子物理学の標準モデルは、2012年のヒッグス粒子の発見をもって揺るぎないものとなった。21世紀には、宇宙論の標準モデルが大きく進展した。素粒子物理学の発展を主導したスティーブン・ワインバーグは、2008年の著書「宇宙論」の中でこう記している。「この宇宙論における新展開は、まるで素粒子物理学のそれを見るようである。素粒子と場の理論の標準モデルは80年代までには完成されていた。その後も重要な理論的、および実験的な仕事は続いたものの、現在では、実験と新しい理論的アイデアとのあいだにはほとんど関連性が見られない。このため、素粒子物理学はその生気のほとんどを失ってしまった。一方、宇宙論は、素粒子物理学の研究者が60年代や70年代に経験したような興奮を提供しているのだ。」

「 Λ CDMモデル」と呼ばれる宇宙論の標準モデルは、素粒子物理学のそれがかつてそう見えたように、一見突拍子もないものを内包している。 Λ は現在の宇宙膨張を加速させる正体不明の暗黒エネルギーの理論的な候補のうち、最も単純（かつ最も理解不能）なアインシュタインの宇宙定数を表わす記号で、CDMは宇宙の全物質密度の8割を占める、やはり正体不明の冷たい暗黒物質の略称である。暗黒エネルギーと暗黒物質の存在や、そのわけのわからなさ是一般の宇宙ファンにも広く知れ渡っており、人気のあるワードである。

一方、 Λ CDMの名前には含まれないが、宇宙論の標準モデルの柱として欠かすことのできないものこそが、最も突拍子もないことであることは、一般には知

られていない。それは、「我々の起源は、宇宙初期に生成された量子力学的なゆらぎ（以下、量子ゆらぎ）」であるという仮説である。驚くべきことに、この仮説は、これまでに得られたありとあらゆる宇宙の観測データと矛盾しない。それどころか、この仮説を支持する証拠は、新しい観測データが得られるたびに強固となってさえいるのだ。宇宙のあらゆる構造、すなわち銀河、星、惑星、ひいては生命に至るまで、その究極的な起源は宇宙初期の量子ゆらぎだった可能性が高いのである。

真空からエネルギーを借りる

専門家のお叱りを受けるのを覚悟の上でざっくりと云えば、量子力学では、すぐに返すことを約束するならば真空からエネルギーを借りることができる。量子ゆらぎを、真空から借りることのできたエネルギーであるとしよう。エネルギーを借りることのできる期間は、借りるエネルギーの大きさに反比例する。銀行を例にすると、突然1億円を現金で1日貸してくれ、と言っても貸してはくれないが、1億円を現金で1秒貸してくれ、と言うのなら、窓口で1億円をもらってそのまま返すしかないから、貸してくれるかもしれない。（それか、頭がおかしいと思われて警察を呼ばれるかである。）宇宙初期にはごく短い時間しかないので、借りることのできたエネルギーも大きく、空間のいたるところでランダムにエネルギー密度のゆらぎが発生していた。

宇宙の構造形成は、アインシュタインの重力場の方程式と、宇宙を構成するエネルギー成分それぞれの運動方程式に従って進む。宇宙初期のある時刻に初期条件を与えれば、あとは決定論的に進化する。そして、豊富な観測データに裏付けられた最先端の宇宙論によれば、その初期条件、すなわち初期時刻におけるエネルギー密度の分布は、量子力学によってランダムに与えられたのである！量子力学の確率論的な点を批判してアインシュタインが言ったとされる「神はサイコロを振らない」どころか、宇宙のどこにどんな銀河ができるかは、振られたサイコロの目に応じて決められたと言うのだ。

ミクロとマクロな世界を結ぶミッシング・リンク

しかし、量子ゆらぎは微小な世界でのみ顕著となるはずで、それが銀河のような巨大な構造の種となったとはどういうことだろう。微小な世界と天文学的な長さの世界とをつなぐミッシング・リンクは何であろうか？宇宙論の標準モデルの柱の一つを担う有力な仮説は「宇宙のインフレーション」である。宇宙空間は開闢直後に指数関数的に膨張し、そのため量子ゆらぎの微小な波長は指数関数的に引き伸ばされ、天文学的な長さになったとされる。典型的なインフレーション理論のモデルでは、 10^{-36} 秒間という刹那に、空間は少なくとも 10^{26} 倍に広がった。これは、原子核ほどの大きさが太陽系ほどの大きさになるというとてつもない広がり、すぐにはそんなことを信じる気にはなれない。しかし、インフレーション理論が予言する宇宙の構造の詳細は、これまでに得られた全ての観測データをうまく説明する。後に述べるように、筆者は宇宙マイクロ波背景放射の測定データを用いてインフレーション理論の検証をしてきたが、理論予言を高精度で確認するたび、自分の研究者としての凡人ぶりを再認識させられた。こんな突拍子もないことが本当かもしれないなんて！佐藤、グース、スタロピンスキーなど、インフレーション理論を考えついた人たちはすごすぎ

る。

しかし、真空から借りたエネルギーは、すぐに返さねばならないのではなかったか？ここで不思議なことが起こる。インフレーションによって量子ゆらぎの波長が引き伸ばされてマクロスコーピクなゆらぎとなると、見かけ上量子ゆらぎではなく、古典的なゆらぎとして振る舞うのである。無理に銀行の比喻を用いると、「インフレーションのため、銀行にお金を返さなくてもよくなった」という、わけのわからないことになる。少しマシな比喻は、窓口に行って1億円を現金で借りた瞬間、空間が指数関数的に膨張して、借りた人と窓口との距離が引き離され、その後交信不能になった、というところであろうか。

インフレーションの研究者は長い間、量子ゆらぎが古典的なゆらぎとなる仕組みに頭を悩ませてきた。波長が引き伸ばされるだけでは、ゆらぎは真の意味では古典化しない。見かけ上古典的なゆらぎと区別できなくなるだけである。物理学者の前でインフレーションの講演をするとこのあたりをいつも質問されるので、古典化するメカニズムはわかっていないから研究の余地があると言ってきたが、2015年6月にペンシルベニア州立大学で開催された一般相対性理論100周年の研究会で、量子重力理論のアベイ・アシュテカーが「いや、ゆらぎの古典化なんてなかったのだよ。この世はまだ、完全に量子力学的なのさ」と言ってきたので、またまたご冗談を、と返したら、本気だったので驚かされた。確かに、見かけ上は古典的なゆらぎと区別できないのだから、頭ごなしに古典化したものと決めつけなくても良いのかもしれない。また自分の凡人さを再認識し、視野が広がったことを喜んだ。

宇宙を加速膨張させるには、未知のエネルギー成分が必要である。物質や放射のような既知の成分は、宇宙を必ず減速膨張させるからである。ΛCDMのΛは現在の宇宙の加速膨張を担う未知の暗黒エネルギー成分であるが、そのようなものが宇宙初期にも必要だったことになる。このエネルギー成分は、専門的には「インフラトン場」と呼ばれる。ヒッグス場と似た性質を

持つため、ヒッグス粒子の発見は、インフレーションの研究者を勇気付けた。しかし、素粒子物理学の標準モデルのヒッグス場は、ポテンシャルの勾配がきつすぎるという技術的な問題からそのままではインフラトン場とはならず、ヒッグス場と性質は似ていても、より勾配の小さい平坦なポテンシャルを持つ別の場を仮定するか、標準モデルに「ヒッグス場と重力場の曲率との非最小結合」と言う新しい要素を導入せねばならない。

大事なことなので繰り返しておくと、インフレーション理論によれば、宇宙は開闢直後の刹那に原子核ほどの大きさが太陽系ほどの大きさになる急膨張を起こした。それに伴って、微小な空間に生じる量子ゆらぎの波長は大きく引き伸ばされ、現在宇宙に見られる全ての構造の種となったのである。私たちの体を構成する元素は星の内部の核融合で生成されたことを指して「私たちは星屑である」と言うが、宇宙論研究者に言わせれば、私たちの起源は量子ゆらぎである。

こういうことを一般講演で話すと、まず間違いなく信じてもらえない。当然の反応だと思う。むしろ、そんなことを言われてすぐに信じる宇宙物理の大学院生の方が異常かもしれない。宇宙の研究はおとぎ話のように思われがちである。一般の方は面白がって聞いてくれるが、頭のどこかでは「これは興味深い話ではあるが、大部分は天文学者の空想だ」と思っているようである。これは、研究者が一般講演をする際に、どこまでが観測データに基づいた確かな結果で、どこからが不定性の大きい推論であるかをはっきり言わないのにも原因があるかもしれない。いずれにせよ、「私たちの起源は量子ゆらぎ」なんて突拍子もないことを信じてもらうには、圧倒的な観測的証拠が必要である。

観測的証拠

観測的証拠は、宇宙マイクロ波背景放射（CMB）の測定から得られた。量子ゆらぎのため真空中に生じるエネルギー密度のゆらぎの分布は、ある確率分布に従

う。この確率分布は、ゆらぎ発生の物理に応じて変わる。一つ重要な要素は、宇宙の構造の種となったのはどの場の量子ゆらぎか？という点である。最も単純な描像では、指数関数的な膨張の源であるインフラトン場の量子ゆらぎが宇宙の構造の種となる。ある技術的な理由からインフラトン場は平坦なポテンシャルを持つが、それはインフラトン場の相互作用は弱いという事を意味する。相互作用をしない場の真空の量子ゆらぎの分布はガウス分布（正規分布）となるから、CMBの温度異方性の分布もガウス分布となることが予想される。

私は、アメリカ航空宇宙局（NASA）のウィルキンソンマイクロ波異方性探査機（WMAP）チームの一員として、2001年の打ち上げから2012年の最終データリリースまで、CMBのデータを用いたインフレーション理論の検証に没頭した。まず、温度異方性の分布（図1）は、確かにガウス分布であった。年の瀬も迫った2012年12月21日に発表した最終結果では、ガウス分布からのズレの上限値は95%の信頼度でわずか0.2%までしか許されないことを示した。同じ手法を用いて、欧州宇宙機関（ESA）のプランク探査機のチームは上限値を0.04%まで押し下げた。宇宙の観測データで、（検出器のノイズを除けば）これほど高精度なガウス分布を私はまだ見たことがない。これは、CMBの温度異方性の起源がインフレーション中に発生した量子ゆらぎであることと無矛盾であるだけでなく、量子ゆらぎはインフラトン場を起源とし、他の場の寄与は無視しうる「単一場のインフレーションモデル」を支持する成果である。

量子ゆらぎはインフレーション中常に生成され続け、波長は引き伸ばされ続ける。インフレーション初期に生成された量子ゆらぎの波長は、後期に生成されたゆらぎよりも引き伸ばされる期間が長く、長波長となる。これをCMBのデータで見ると、大きな見込み角度をもつ温度異方性はインフレーションの初期に生成されたことになる。量子ゆらぎの振幅は、真空からエネルギーを借りる時間に反比例する。単位時間に宇

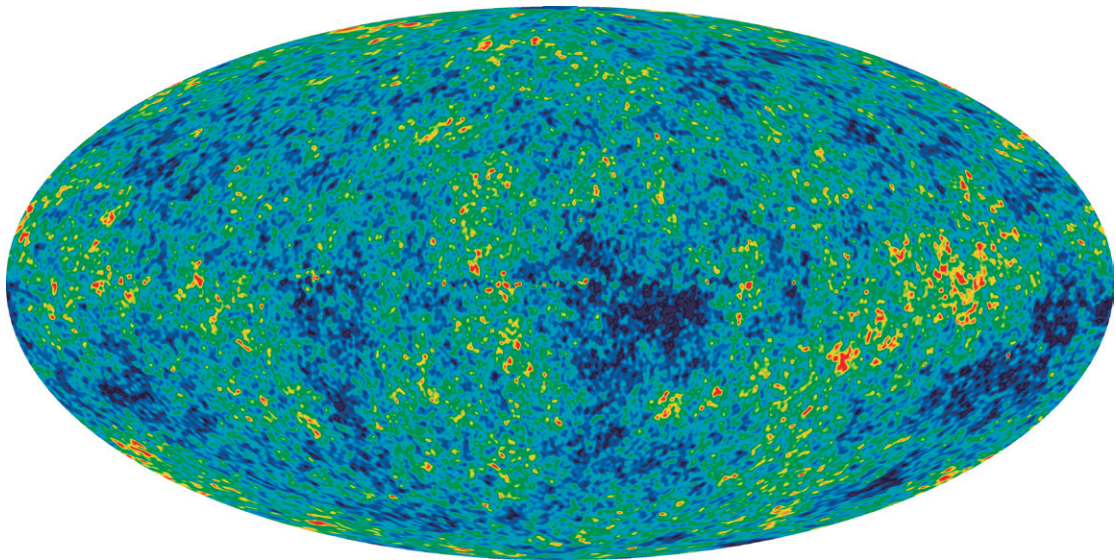


図1 WMAPの9年間の観測データから得られた宇宙マイクロ波背景放射の温度異方性の全天分布を、モルワイデ図法で示す。温度異方性の分布は、ガウス分布と高精度で無矛盾であった。(クレジット：WMAPサイエンスチーム。)

宇宙空間が何倍になったかをあらわす便利な指標に「宇宙膨張率」があり、次元は $[(時間)^{-1}]$ である。これを用いると、量子ゆらぎの振幅は宇宙膨張率に比例することが導かれる。

さて、インフレーションはいずれ終わらねばならないので、宇宙膨張率は時間とともに減少する。すなわち、インフレーション初期に生成された量子ゆらぎの振幅は、後期に生成されたゆらぎよりも大きい。するとCMBの温度異方性の振幅は、大きな見込み角度のものほど大きく、小さな見込み角度のものほど小さくなるはずである。実際には、CMBにゆらぎを与えると音波が発生し、温度異方性の振幅は見込み角度とともに振動するので、「大きな見込み角度のものほど大きく、小さな見込み角度のものほど小さくなる」効果を取り出すには音波振動を取り除かねばならない。音波の物理はよく分かっているので、この作業は難しい。

1981年にムハノフとチビソフによって予言されたこの効果を発見することは、インフレーション研究者の悲願であった。ゆらぎの振幅は波長の $1-n_s$ 乗に比例すると書けば、ムハノフとチビソフの予言は「パ

ラメータ n_s は1より小さい」となり、これを測定すれば良い。私たちは2012年末、WMAPの9年間の観測データを、他のチームによる地上の望遠鏡で得られたCMBのデータ、およびスローン・デジタル・スカイ・サーベイで得られた銀河の分布のデータと組み合わせて、68%の信頼領域で $n_s = 0.958 \pm 0.008$ を得た。ついに、 $n_s < 1$ を統計的有意性5シグマで発見することに成功したのである。その3ヶ月後、プランク衛星のチームはWMAPとプランクのデータを組み合わせて、銀河の分布のデータなしに $n_s = 0.960 \pm 0.007$ を得た。これはCMBのデータのみから得た結果という点で、重要な確認である。これをもって、インフレーションと量子ゆらぎの仮説は強力な観測データの支持を得ることとなったのである。

WMAPで見えるはずだった原始重力波

それでも、カール・セーガンの言うように「途方もない主張には、途方もない証拠が必要」である。さらなる観測的証拠を求めて、CMBの研究者はインフレーション中に生成された「原始重力波」の発見を目指し

ている。LIGOによって直接測定される、ブラックホール連星の合体から放出される重力波の波長は数千キロメートルであるが、インフレーションによって波長が引き伸ばされた原始重力波の波長は、数十億光年にもなる。そのような極端に長波長の重力波は天体から作ることはできないので、インフレーションの決定的な証拠となるだろう。

重力波は空間を伸び縮みさせるのでCMBの波長も伸び縮みし、温度異方性が生じる。この効果は、WMAPで発見できるはずであった。

当てもっともらしいと思われていたインフレーションのモデルは、ポテンシャルがインフラトン場のべき乗で与えられ、中でもインフラトン場 ϕ の4乗(ϕ^4)モデルは、自然なモデルだと考えられていた。東北大学での恩師二間瀬敏史教授からはそう教わったし、ヒッグス場のポテンシャルも、場の値が大きくなるほどは ϕ^4 の形となるので、もっともらしかった。このモデルによれば、原始重力波の振幅はWMAPで測定可能なほど大きい。一方、二間瀬教授は早稲田大学の前田恵一教授とともに、 ϕ と重力場の曲率との間に素粒子物理学の標準理論には含まれない非最小結合を許せば、 ϕ^4 モデルはヒッグス場のポテンシャルでもインフレーションを起こせて、さらにもっともらしくなることを理論的に発見していた。そこで、二間瀬研究室の修士の学生だった私は、非最小結合があると、原始重力波の振幅の予言がどう変わるかを計算して見た。驚くべきことに、モデルが予言する n_s の値はほとんど変わらないのに、原始重力波の振幅は100分の1になったのである！そこで、WMAPで $n_s < 1$ が発見されても原始重力波が発見されないならば、非最小結合が必要になるという論文を書いた。1999年1月のことである。

そして2006年。私たちはWMAPの3年目のデータを用いて、 ϕ^4 モデルを棄却してしまったのである。震えた。まさかこんなことになるとは。2018年4月現在、まだ原始重力波は発見されていない。非最小結合を含む ϕ^4 モデルは現在「ヒッグス・インフレーション」

として知られ、CMBのデータに最も良く合致するモデルの一つであり続けている(図2)。

宇宙マイクロ波背景放射の偏光

ヒッグス・インフレーションが予言する小さな原始重力波の振幅は、WMAPやプランクの温度異方性のデータでは発見できなかった。そこで、次はCMBの偏光を用いた方法が注目されている。重力波がCMBの波長を伸び縮みさせて生じた温度異方性を電子が散乱すると偏光する。それを用いるのである。現在、世界中で研究者がしのぎを削って観測中である。私は、KEKとカプリIPMUの羽澄昌史教授を中心とするチームの一員として、宇宙航空研究開発機構(JAXA)とともに、次世代CMB観測衛星ライトバード(LiteBIRD)計画を推し進めている(Kavli IPMU News No. 36)。まだ正式に採択はされていないが、今年度中には採択か否かの判断が下されるとのことで、ドキドキしている。ぜひ飛ばせたい。そして、原始重力波を見てみたい。

ところで、2014年にアメリカの研究グループが、原始重力波起源のCMBの偏光を発見したと報告した。これは、銀河系内の星間塵による偏光を誤解したものであった。研究者の責任もあるが、このニュースを扱ったメディアは2つの誤りを犯した。一つは、多くの専門家の懸念の声があったにもかかわらずそれらを見逃し、騒動を広げたこと(もちろん、それに進んで加担した一部の研究者の責任も大きい)。もう一つは、この発見が「重力場の量子化の証拠である」としたことである。前者は言うまでもないので、後者を取り上げたい。

この主張の根拠は、重力波は重力場そのものであり、その量子ゆらぎとはすなわち重力場(すなわち時空の歪み)が量子化されたことを示す、というものである。これは原理的には正しいが、この主張をするには、発見された原始重力波が時空の量子ゆらぎの性質と無矛盾であることを確認する作業が不可欠である。それは、発見された偏光の分布がガウス分布かどうか

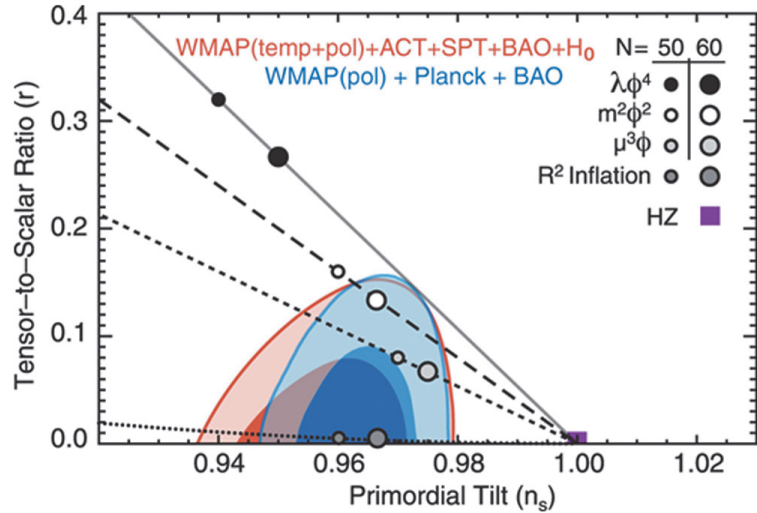


図2 縦軸は重力波の振幅、横軸は n_s を表わし、赤い等高線は2012年12月発表のWMAPの結果から得られた68%と95%の信頼領域を、青い等高線は2013年3月発表のプランクの結果から得られた信頼領域を示す。上の方の2つの黒丸は ϕ^4 モデルの予言の範囲を示し、一番下の濃い灰色の丸は非最小結合を含んだ ϕ^4 モデルの予言の範囲を示す。Komatsu et al., *PTEP*, 06B102 (2014) より抜粋。

の確認である。そしてその作業がされることは、今に至るまで一度もなかった。

原始重力波は時空の量子ゆらぎか？

この状況に業を煮やし、最近私は共同研究者たちと、論文や研究会で一大キャンペーンを張っている。インフレーション中には、インフラトン場以外にも多くの物質場があったと考えるのは自然である。ただし、CMBの温度異方性が高精度でガウス分布であることから、これらの場のエネルギー密度はインフラトン場よりもずっと小さくしなければならず、近似的に単一場によるインフレーションとみなせる。しかし一方でこれらの物質場は、ライトバードの偏光データで発見可能な重力波を生成するには十分なエネルギー密度を持ち、その確率分布はガウス分布から著しくずれるのである。原始重力波によるCMBの偏光は、時空の量子ゆらぎ起源の重力波の寄与と、物質場起源の寄与の重ね合わせであり、どちらの寄与が大きいかは測定して見るまでわからないのだ。

原始重力波の発見の際には、ガウス分布の確認は必須である。ガウス分布と無矛盾だったなら、そして原始重力波の振幅の波長依存性が予想通りなら、重力場の量子化の証拠が得られたと報告すれば良い。ガウス分布でなかったなら？それは、インフレーションの素粒子物理学が大きく飛躍する新たな時代の始まりとなるろう！