

物理学 I (青木)課題

実験番号 27 番 法学部政治学科 2 年 I 組

学籍番号 31761502 氏名 星野寛人

題材記事「マルチバースと多世界」野村泰紀

2017 年 9 月号 30 頁から 38 頁

●記事概要

この記事では「マルチバース(多宇宙)」という、宇宙の考え方を紹介している。このマルチバースという考え方の中での描像には多数の宇宙が存在しており、そのそれぞれの宇宙で固有のルールがあるとしている。このマルチバースの考え方は、ある宇宙がビッグバンを発端に指数関数的に膨張することを示す理論「インフレーション」が関係している。このインフレーション理論では急膨張の間にそれぞれ性質の異なる宇宙が誕生していき、「泡宇宙」と呼ばれる宇宙(イメージとして、沸騰するお湯の中で次々と新たな気泡が存在するということが生まれていく。このマルチバースの考え方だと、私たちが存在している宇宙はそうした気泡の中の一つにすぎなくて、この宇宙の外側には無限に多くの泡(宇宙)が存在することになる。

しかし、このマルチバース理論には大きな問題がある。インフレーション理論の提唱者の一人、マサチューセッツ工科大学の Alan Guth 氏によると、「永久にインフレーションを繰り返す宇宙では起こりうる現象は全て起こり、それらは無限に起こる」という。これによると、あらゆる現象は無限に繰り返してしまうということになり、それらに対する予言能力の欠如という科学分野においてあってはならない事態が起こっている。また、このマルチバースの問題はもう一つの宇宙についての理論である量子力学「多世界解釈」と矛盾が生じる部分がある。この記事ではこれら問題を回避するためのマルチバースに対する解釈問題について述べている。

●この記事を選んだ動機

この記事で非常に興味深かったのは、マルチバース理論という宇宙科学的な分野の問題に対して物理学の根幹となっている量子力学の理論である多世界解釈理論が衝突し、解決の糸口として問題の解消に至っているという点である。ミクロな量子力学の世界では分子や原子の一つ一つの細かな動きや力を記述し、考察する。その量子力学でいう分子や原子を宇宙に見立てて考え、本来マクロであるはずの問題をミクロに落とし込んで考えているところに興味を抱いた。また、この問題を解消して上で使っている例で、実験の方法論の部分に触れ、科学哲学の分野にも踏み込んで考えているので、とても広い分野での話になっていたのもとても興味深かったのもこの記事を選んだ。

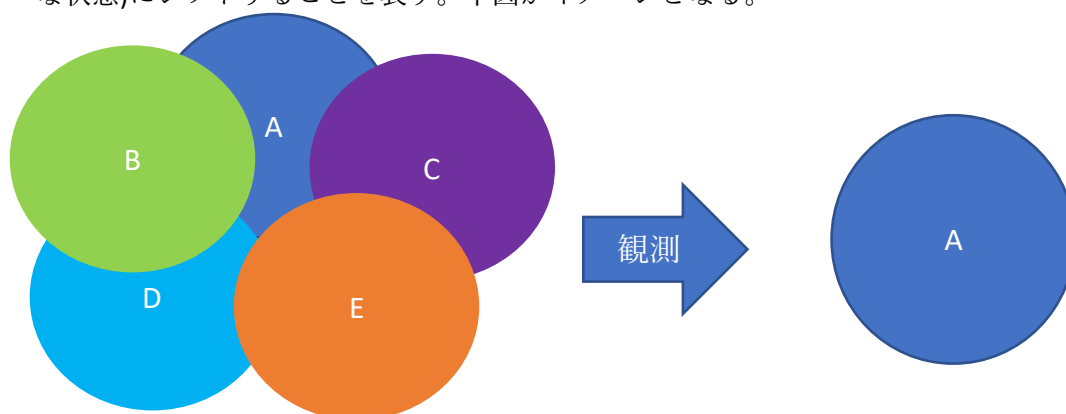
●この記事の結論

この記事で軸となっているのが、マルチバース理論と多世界解釈の理論が矛盾してしまうという点である。この問題は最終的に、この二つの理論は科学実験における「観測者」の存在を考えた場合、同じ世界に双方の理論が同居することは不可能であり、泡宇宙におけるそれぞれの現象の無限発生問題もそれぞれが有限と考えることによって完結している。では、どういう風にこの結論に著者は至ったのか。以下の記述で説明していきたいと思う。

●この記事の結論までの工程

(1)「観測」という観点から見るマルチバース理論

マルチバースに相対する多世界理論は量子物理学の奇妙な側面である、どんな過程の帰結も常に確率的になるということを説明してくれる。自分たちにとって身近であるミクロの世界に例えると、ボールを投げる現象がとても顕著である。A地点のボールを投げた場所とその際の速度などの初期条件に基づいてB地点のボールの着地点を予言できる。この時、この予言には確率的な性質がある。しかし、このA地点からB地点への遷移の確率的性質(B地点に完全にはないし絶対には至らないということ)は観測前までであり、一度観測されてしまえば、何回同じ実験をやっても最初の観測結果と同じになってしまうということが起こる。この現象は「コペンハーゲン解釈」と呼ばれ、観測の前では系の状態が重ね合わせ状態(様々な実験結果になる場合が含まれている状態)から状態A(観測結果におけるベターな状態)にシフトすることを表す。下図がイメージとなる。

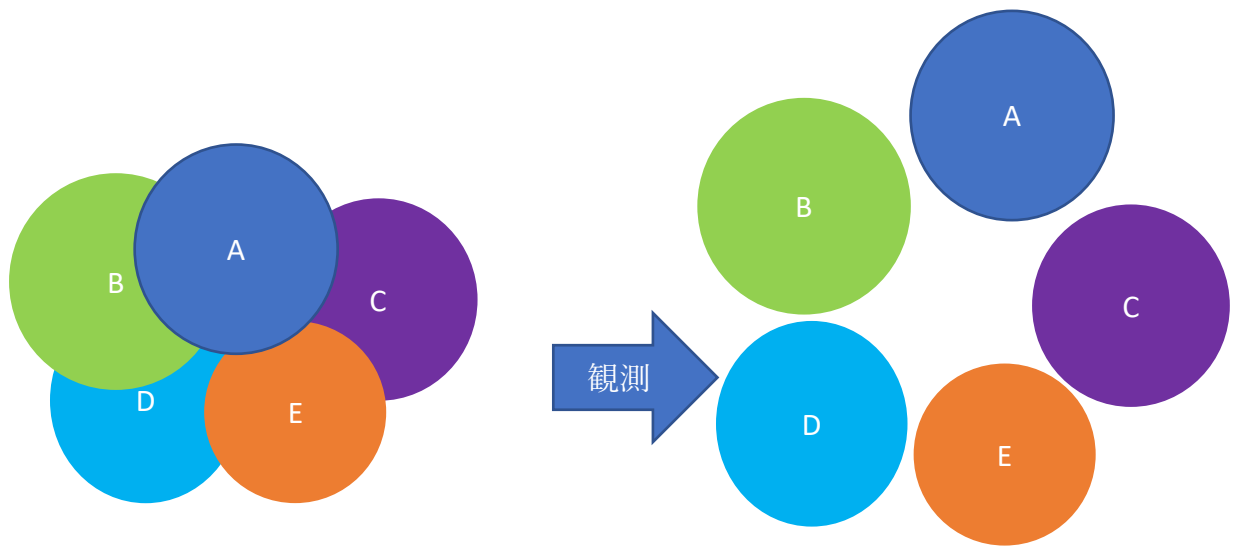


観測前:A~Eの様々な実験結果になりうる

観測後:状態Aに落ち着く

図1 コペンハーゲン解釈のイメージ

このコペンハーゲン解釈のような実験前後での観測結果と予想の乖離はなぜ起きてしまうのか。それは観測時のスケールの問題で、A~Eの状態の分岐はミクロな世界での相互作用であり、こうした現象は結果に変化を及ぼす「観測」とは通常見なされないが、常に生じているという問題である。つまり、量子力学の状態について意識的に知ろうとしている人と、そうしない人との間で実験における意味合いが違っているようなことが起きてしまっているのである。そこで、この問題の解消するために出てきた理論が量子力学の多世界解釈(Hugh Everett, 1957)である。この理論の考えでは、量子系の問題はそれを取り巻く宇宙全体の状態を反映しているため観測という事象を完全に記述するためには観測者自身をそこに含める必要があると理論がある。そのため、先ほどの例で言うと、ボールの着地点を調べる人を含め、その時点の宇宙に存在するあらゆるものを観測の記述の中に含めないと完全ではないということである。この多世界解釈では、先ほどのコペンハーゲン解釈とは違い、観測後は依然として系の重ね合わせ状態にある。観測を行う際に世界 α では観測者は系の状態がAに変化したことを観測し、この特定の α という世界ではAという結果を得る。しかし、観測時に別の宇宙 β が分岐して生じて、宇宙 β では、Bという結果を得る。具体的には、観測者ごとに別々の宇宙が生じてそれぞれが並行世界に生きているということをこの多世界解釈では表している。また、次頁の図2のようなイメージになる。

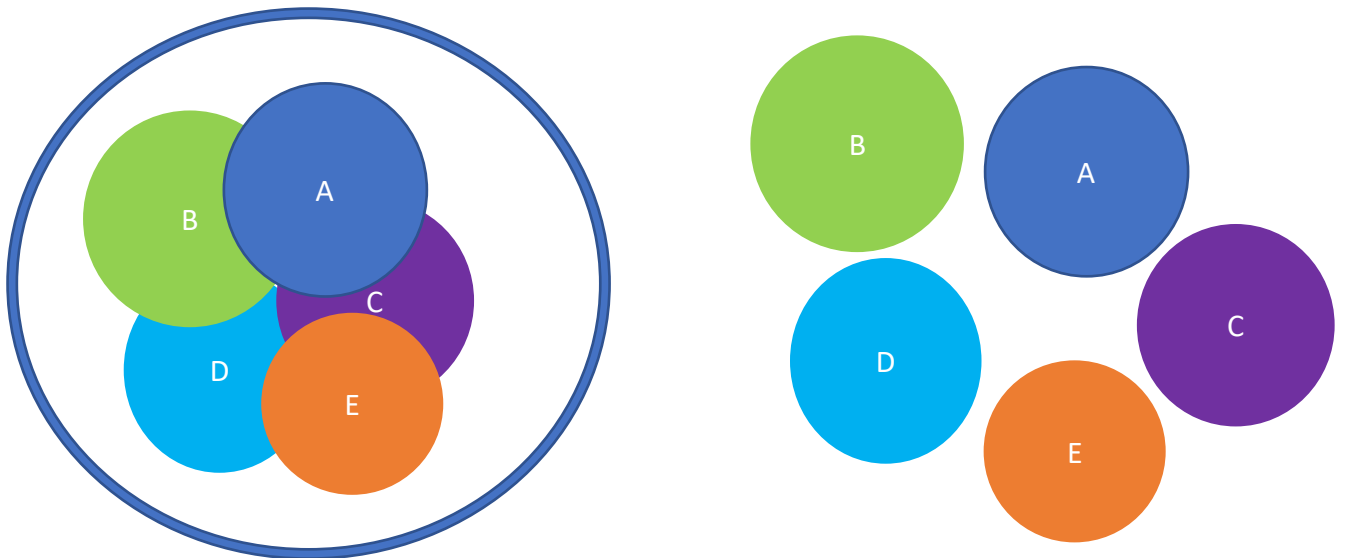


観測前:A~E になりうる(まだ一つの宇宙) 観測後:観測者ごとに結果(宇宙)が落ち着く

図2 多世界解釈のイメージ

この多世界解釈では、世界全体の状態が多数のあらゆる並行世界へと分岐を続けていき、それらの世界が重ね合わせとして存在する。人間の観測者はそれぞれの世界の一部であり、それから逃れることはできないとしている。そして、その世界のそれぞれの全てが量子力学の法則に従うのである。

しかし、この量子力学の多世界解釈とマルチバース理論はここまで見ると、少し違うように見える。というのも、多世界解釈が並行して存在する多数の世界というより、マルチバースは連続した1つの実空間にそれぞれ存在しているように見える。イメージとして図3を見て欲しい。



マルチバース:一つの実空間の中に複数の世界が存在

多世界理論:複数の世界が存在

図3 マルチバース、多世界解釈のそれぞれのイメージ

この二つの考え方が同居するのは矛盾が生じてしまい、単一の空間が存在するのか、それとも複数空間が確立の枝分かれとして完全に別世界としてそれぞれが存在しているのか、両者は相容れない理論となっている。しかし、2011年、今回の記事の著者である野村泰紀氏は永久インフレーションを続けるマルチバースとエヴェレット流の量子力学の多世界解釈がある意味において同じ概念であるということを提唱した。野村氏はこの味方には、「マルチバースの無限に続くインフレーションによって生じる無限に大きな空間というのは一種の幻である」と

のべていて、結論として「インフレーションで生じた多数の泡宇宙は単一の実空間に存在するのではなく、枝分かれしていく確率の木の異なる枝に対応している」としている。では、どのような理論でこの問題が解消されていくのか。この記事ではブラックホールの例を使って荒らしている。

(2)ブラックホールのパラドックス

このブラックホールの例では量子力学の多世界解釈でマルチバース理論をどのように説明できるかを表している。例として、ケース A,B の二つを考える。両者ともにブラックホールに1冊の本を落とし、それをブラックホールの外から観察する状況が前提となっている。この時の本自体はブラックホールの外から決して脱出できないが、「ホーキング現象(ブラックホール自体のかすかな放射を発することにより、外部観察者はこの放射を詳細に調べることによって本に含まれていた情報を再び構築できる)」という物理学の理論により、本の情報に失われることがない事も考慮する。ケース A では本のみをブラックホールに落とし、観察者はブラックホールの外からその本情報を元に観察を行う事ができる。一方、ケース B では本と一緒にブラックホールを観察者が落下してくる場合を考えている。だから、内部観察者にとっては本の情報もブラックホール内に永久に留まり続ける。しかし、ケース A を考えた時に本情報はブラックホールの外にあるように見える。図4がイメージとなっている。

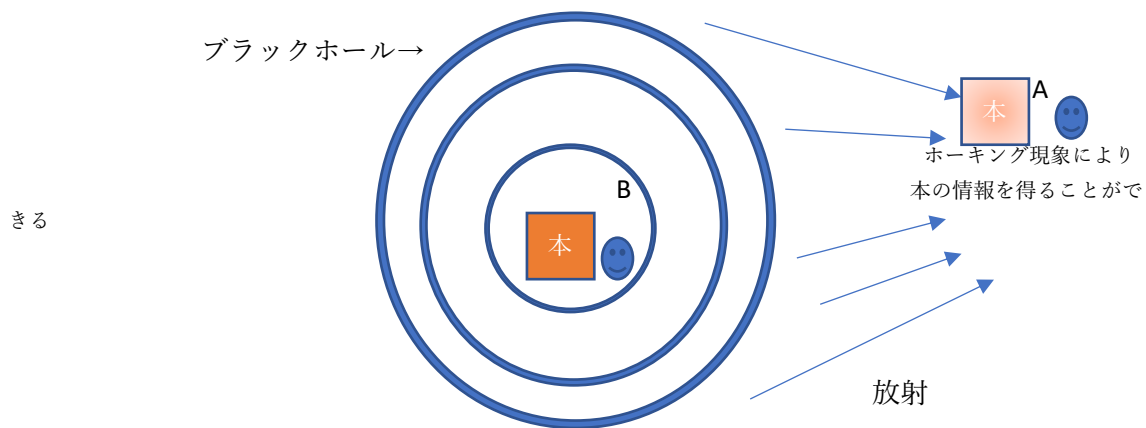


図4 ブラックホールのパラドックス

一見これは単なる情報の複製が行われただけのように思えるが、量子力学のいわゆる「量子複製不可能定理(ノークローニング定理)」によれば、情報の完全に正確なコピーはできないとされているため、ケース A、B の両方で見えている二つの本が全く同じものであり、両方とも正しいという事はある事にならない。

では、なぜこのような事態が起きてしまうのか。オランダのユトレヒト大学の物理学者とホーフとサスキンドらは「この2つの描像はどちらも正しいが同時に成立するのは不可能である。」とした。それぞれの場合における外部と内部のアクセスについて考えなければいけない。ケース A のように外部の観察者側の場合、情報はブラックホールの外側にあり、この時ブラックホールの内部にアクセスすることは不可能であるため、ブラックホールの内部を記述する必要はないことになる。また、情報の複製を避けるには、ブラックホール内部の時空は存在しないことを考えなければいけない。同様にケース B のように内部の観察者である場合を考えると、この時の観察者にとってブラックホールの内部が全てであり、そこに本ないしその情報が存在する。この内部の観察者にとって外部へのアクセス

は不可能であり、ホーキング放射による外部の諸現象とも完全に切り離されているのである。ケース A の観測者であると同時にケース B の観測者であることはできないのである。つまり、図 4 のような状況は本来切り離されている状態であるはずの 2 つの世界が、双方のアクセス性を無視したことにより、つなぎあわさってしまっている状態であり、これにより本来量子力学の世界では起こりえない情報複製も起こってしまっているのである。また、このブラックホールの問題を取り扱ったことによって、マルチバース理論の整合性について語る上で、以下のような事柄が重要になってくる。

(3)宇宙の地平

上記の例で扱ったブラックホールの境界はいわゆる「宇宙の地平」と重要な点において同じなのである。「宇宙の地平」とは、私たちがそこから信号を受けとることができる時空領域の最も遠い境界のことを指す。図 5 のようなイメージとなる。

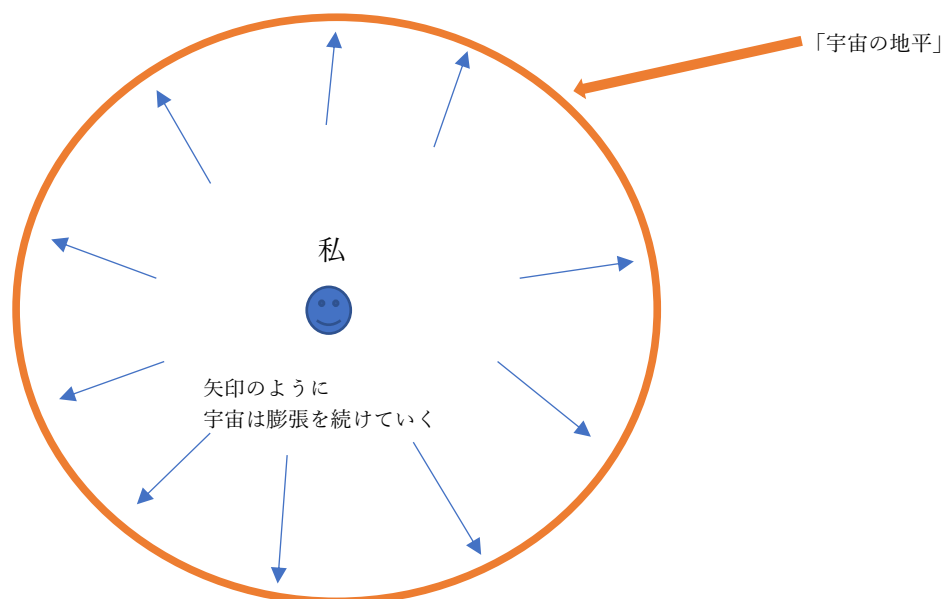


図 5 宇宙の地平

図 5 に示されている「私」に宇宙の地平より外のメッセージが届くことは不可能である。この状況は(2)のケース B の観測者の状況のようにブラックホールを内部から観察している状態と酷似している。よって、地平の内側にいる観測者は地平の外側の世界ないし時空を存在しないものとして捉えることが量子力学から要請される。つまり、ブラックホール内部の観測者にとって内部が存在しないように、宇宙地平の内側にいる観測者にとって外側は存在しないものとなる。この時、宇宙の地平の内側にいる観測者にとっての宇宙の量子状態の記述は、情報のダブルカウント(外側の時空が存在すると考えた時の場合のもの)を避けるために、宇宙の地平の内側の領域のみを含むものとしている。この「宇宙の地平」という概念からわかるように、宇宙についての記述において、「無限の空間」というものは存在しないものとなる。

ここで問題となるのが、永久に膨張する無限の空間内に存在するとされているマルチバースはどこに存在するのかという問題である。本記事において、著者の野村氏は「永久にインフレーションする宇宙の量子状態は異なる多数の宇宙を表す世界ないし分岐の重ね合わせになっており、それぞれの世界はその宇宙の地平内の領域だけを含んでいる」とした。これは一体どういうことか。

まず初めに、これらの宇宙は「宇宙の地平」の存在によりそれぞれ有限であるため、あらゆる全てを包含する無限の大空間という見方から生じる予言能力の問題は避けられる。この時、マ

マルチバースを理解する上で重要なのが、マルチバースは実空間に同時に存在するのではなく、「確率空間」においてのみ並存しているということである。マルチバースはそれぞれの世界の内部にいる人が行う観測によって得られる多数の結果として存在しているのである。つまり、マルチバースは観測者の行なった観測結果ベースで存在しているため、観測結果である以上無限という予言不可なものではなく、有限に存在するものである。言い換えると、観測結果が存在して初めて、その宇宙が「存在する」状態になっているということであり、それぞれの世界の内部にいる人が行う観測によって得られる多数の結果として存在するということである。図6にそのイメージが描かれている

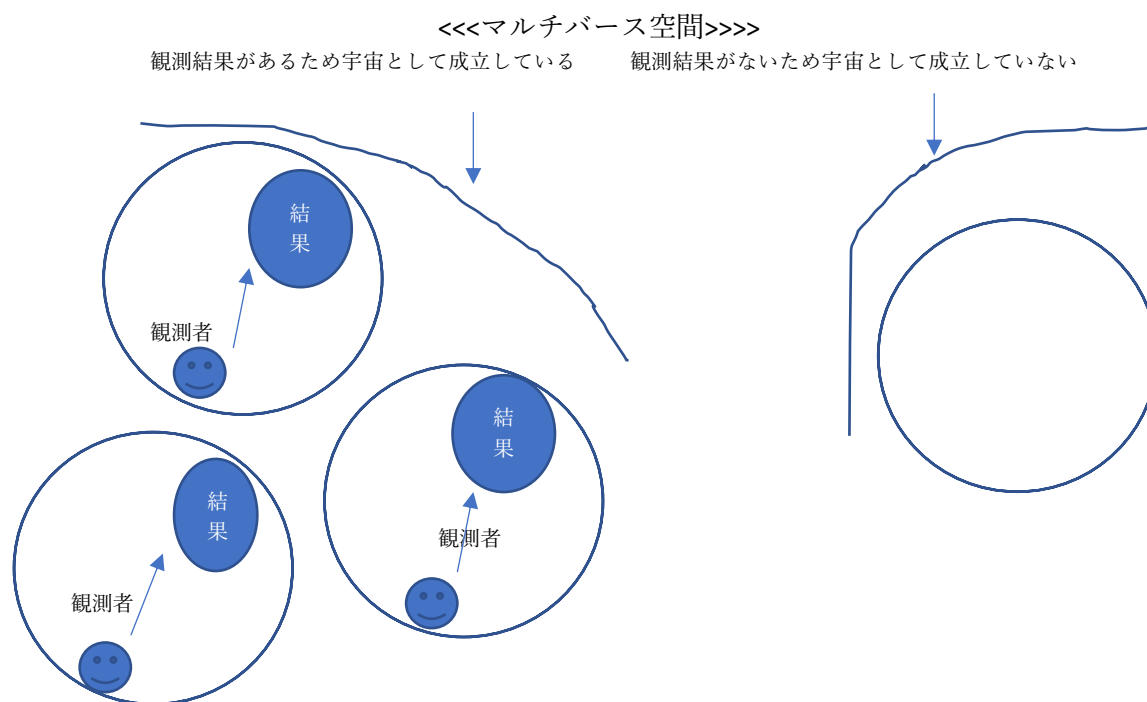


図6 「確率空間」におけるマルチバースのイメージ

それぞれの宇宙で結果が生じているため、その結果からそれぞれが特定の結果を持つことになる。この理論では複数の別々の世界が並行して存在するという多世界解釈の要素と実空間の中に複数の世界が存在しているというマルチバースの要素の両方を組み合わせている。この宇宙の構造が生まれるプロセスとして、旧来のマルチバースと同じようにある初期の状態からスタートして多数の泡宇宙の重ね合わせ状態へ分岐していく。この泡宇宙がさらに分岐していき、各宇宙で実行された実験の結果として生じる様々な結果の重ね合わせ状態になる。最終的にマルチバース全体を表す状態は膨大な数の枝を含むものになり、それぞれの枝が初期状態から生まれうるそれぞれが特定の確率を持った個別の世界に対応するのである。

これは素晴らしい理論だが、これを実証するにはどうすればいいのか。本記事では以下のような記述がされている

(4)観測による実証の可能性

ここで考えなければいけないのが「曲率の問題である。曲率をイメージするために、図7を見て欲しい。ここで考えるのが曲率の正負の問題である。まず曲率には正負があり、三次元空間の中でx軸とy軸のみを考える。それぞれx,yのベクトルで曲率の方向が同

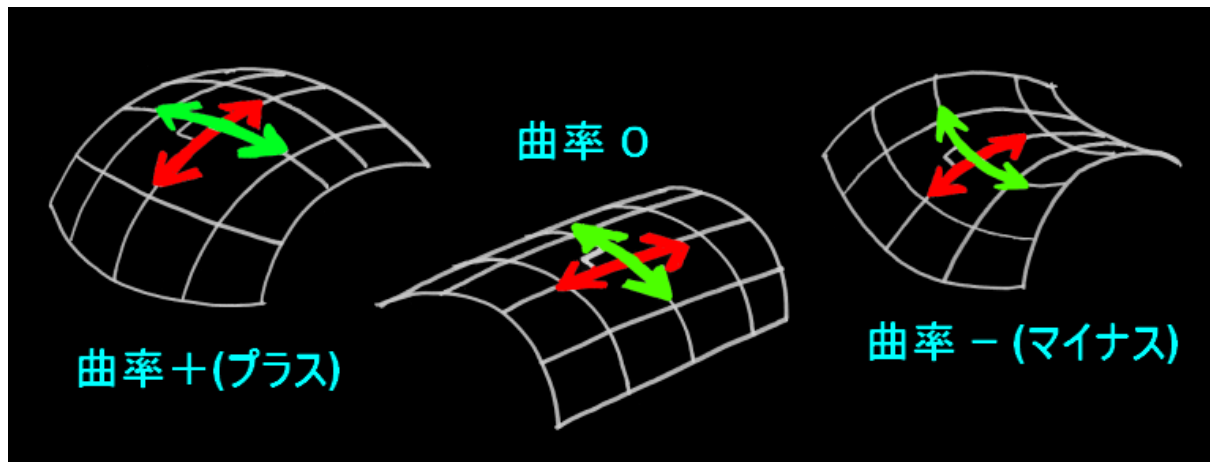


図7 曲率の正負のイメージ

じである場合は曲率は+になり、片方が真っ直ぐで片方だけに曲率が生じている場合は曲率は0になる。また、それぞれ x, y の曲率の方向が違う場合は曲率はマイナスになってしまう。具体例を挙げると、球の表面は曲率+であり、パイプの表面は曲率0であり、鞍の表面が曲率-ということになる。

この時、負の曲率というのは二方向からの見え方が違うという意味で使われる。そのため、永久インフレーションによって生じる泡宇宙は外部の観測者から見る大きさは有限だが、内部の観測者から見ると大きさは無限に大きい。この時、内部と外部で泡宇宙の大きさは違うものになり、この状態は「負の曲率を持っている」状態となる。もし自分たちが住んでいるのがマルチバース理論における泡宇宙であるならば、負の曲率が観測される可能性はあることになる。

しかし、ここで注意しなければならないのが、宇宙が誕生した初期の頃に起きた内部のインフレーション(いわゆるビッグバン)による影響である。もしこれが長く続いてしまうと、曲がった空間が極度に引きのばされて大きくなり、曲率が見えなくなるということである。つまり、内部と外部どちらで見ても同じ大きさで同じように曲がって見えてしまっているため曲率そのものが存在しているように見えない状態である①。このことから、インフレーションが長く続いた宇宙の方が観測されやすく、負の曲率が検出されることはないと考えられる。しかし、一方で量子的な重ね合わせになったマルチバースであれば、負の曲率が観測できる可能性はある。つまりこの負の曲率が少しでも観測できれば量子マルチバースの概念が支持されることになる。

●疑問点や考察

(1)(4)での①の下線部分の記述について(分からなかった所)

(4)の下線部分での記述では、「内部と外部のどちらで見ても同じ大きさで同じように曲がって見えてしまっているため曲率そのものが存在しているように見えない状態」という記述がなされていた。この記述の前に、「曲がった空間が極度に引き伸ばされて大きくなり、曲率が見えなくなる」ということが起こると記されていた。自分で調べたところ、曲率の状態というのは正負と0の場合のみに分けられており、「曲率がない場合」というのは0でもなく、値が記せない時のことを言うため、とても解りづらかった。おそらく、関数でいうと、限りなく0に近い状態であり、ある意味での「無限」の状態を表しているのだと推測できるが、空間図形などの図でわかりやすく説明しようとした時にメソッドが困難であったため、本レポートでは明確に記述することができなかった。

(2) 「確率世界」におけるマルチバース理論に対する疑問点について

著者が結論に行き着いた「確率世界」のマルチバース理論の考え方からすると、図6のようにそれぞれの世界で複数の世界が観察からなる「結果」というものを保持しており、その結果からそれぞれの世界における「確率」というものを保持している。また、(4)で述べられていた「負の曲率」というものを観測することで、確率世界におけるマルチバース理論というものが証明されるが、ここで僕はこの証明を行う上で「観測者」の存在を考えると矛盾が生じると考えた。というのも、(3)の記述での「宇宙の地平」というのを考える上で、あるメッセージがその外界に届くことを不可能であるとしていることは、内部と外部の観察者の並在を否定しているということになる。しかし、各世界の「結果」を観測するのに、外部の観察者の存在は必要となってくる。たとえ負の曲率が観測されたとしても、そのそれぞれの世界の内側に確率が存在するかどうかは内部の観察者と外部の観察者の連携が必要になるように思える。以下の図8がそのイメージとなる。

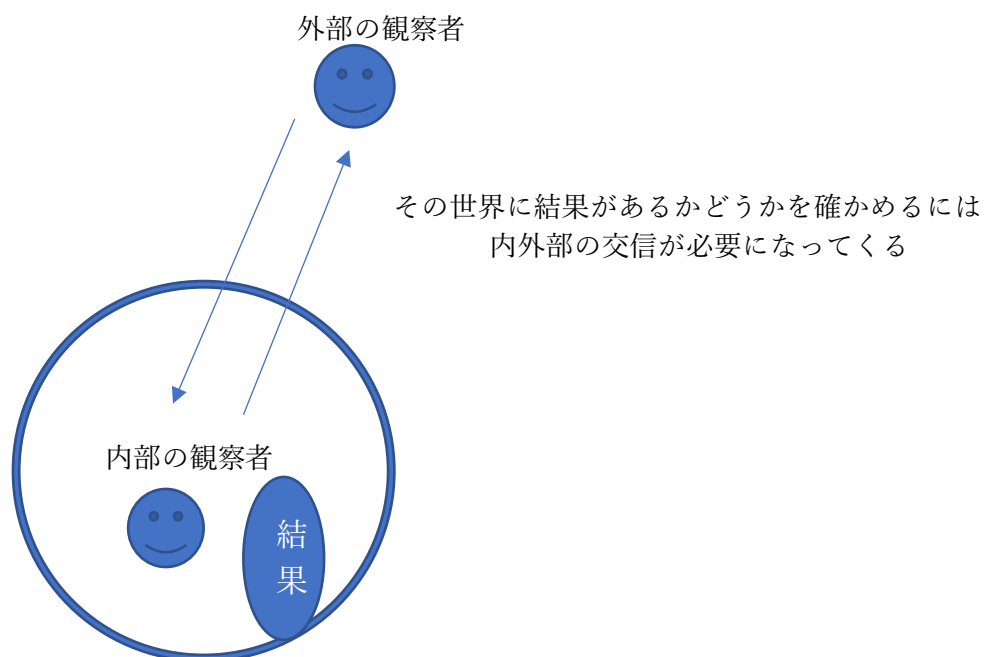


図8 内部と外部の交信による「結果」の確認のイメージ

また、当然のことながら、宇宙の地平のところで地平を超える情報の交換が不可能とされているため、図8のような状態になることは不可能である。しかし、一方でそれぞれすべての世界で「結果」からなる「確率」が確認されて、その実空間に存在する全ての空間に確率が存在するということを確認する用の中央の外部の観察者の役割が必要になると考えられるため、矛盾が生じると考えられる。

●その他の参考文献

形状補正方法及び形状補正プログラム並びに3次元形状処理装置,

<https://astamuse.com/ja/published/Jp/No/2007156603> 2018年6月27日 アクセス

平均曲率法線ベクトルを算出する

<<http://www-mm.hm.t.kanazawa-u.ac.jp/research/kodatuno/usersguide/current/2-6-8.html>> 2018 年 6 月 27 日 アクセス