

原始ブラックホールとインフレーション宇宙

2015年9月に、史上初めてブラックホール合体による重力波が米国ルイジアナ州リビングストーンとワシントン州ハンフォードにあるレーザー干渉計重力波検出器(LIGO)によって検出されました。その後もブラックホール合体による重力波イベントが見つかり、今年になって3例目のイベントが検出されたことが発表されました。これら3個のイベントは、質量が太陽の10倍から30倍程度のブラックホールの連星系が合体したことによると解釈されています。また、この歴史的な発見は、人類が重力波という新たな観測手段で宇宙を探ることができるようになったということを意味しています。

通常、ブラックホールは大きな質量を持った星がその一生の最後に自分自身の重力で崩壊して生まれると考えられています。しかし、LIGOによって観測されたブラックホールは星の重力崩壊で予想されるよりは質量が大きく、星の進化でこのようなブラックホール連星系がどのように形成されたかは議論になっています。そこで、重力波イベントを起こしたブラックホールの形成に関して、もう一つのアイデアが関心を持たれています。それは、原始ブラックホールと呼ばれる宇宙初期に形成されたブラックホールが連星系を作り合体したのではないかとということです。

原始ブラックホール

原始ブラックホールは、宇宙が誕生して1秒にも

満たないごく初期に大きな密度揺らぎが存在した場合に、それが重力崩壊を起こして形成されるものです。宇宙の初期にブラックホールが存在した可能性は1966年にZeldovichとNovikovによって指摘され、1971年にHawkingが大きな密度揺らぎを持った領域が重力崩壊してブラックホールができるという、原始ブラックホールに対する現在の描像を提示しました。その後、約50年にわたって原始ブラックホールは様々な形で議論され、物理学、天文学の研究者に興味を持たれてきました。

原始ブラックホールの質量は生成された時期で決まります。いま、宇宙初期に大きな密度揺らぎが存在していたとします。この時、揺らぎには様々な空間的サイズのものが存在します。揺らぎを密度の高いところと低いところがある波だとイメージして、揺らぎのサイズを揺らぎの波長と呼ぶことにします。この描像では揺らぎの大きさは波の高さに相当します。そして、ある波長の揺らぎに着目しましょう。揺らぎの進化は揺らぎの波長が宇宙の地平線の大きさ（地平線長）と比べて大きい小さいかによって異なります。ここで地平線とは光速で到達できる限界を表し、大雑把に（地平線長）=（光速）×（宇宙の時間）で与えられ、宇宙の時間とともに大きくなります。どんな情報も光速より速く伝わらないので地平線より大きなスケールでは因果関係が存在しません。最初、揺らぎは地平線より大きな波長を持っています。地平線長より揺らぎの波長が大きいと何も起きません。揺らぎの波長は宇

宇宙膨張によって引き延ばされますが、地平線長はそれより速く大きくなっていくので、十分時間が経つと揺らぎの波長は地平線長と等しくなり、揺らぎは地平線の中に入ります。この時、密度揺らぎの大きさが大きく、地平線内の重力がその時期宇宙を支配している輻射の圧力に打ち勝つとその領域は潰れ、ブラックホールが作られます。したがって、生成されるブラックホールの質量は地平線に囲まれた中にある輻射の全エネルギーにほぼ等しくなります。例えば、宇宙の温度が 10^{15} 度（時刻で約 10^{-11} 秒）の時に作られる原始ブラックホールの質量は 10^5 太陽質量 $=10^{28}$ グラム程度で、温度が 10^{12} 度（時刻で約 10^{-4} 秒）の時に作られる原始ブラックホールの質量は10太陽質量 $=10^{34}$ グラム程度となります。このように、原始ブラックホールは形成される時期によって様々な質量を持ちます。

ブラックホールはその強い重力のために光さえもその中から外に出ることはできません。そのためブラックホールは一旦形成されると安定に存在し続けると考えられていました。しかし、1974年にホーキングが、ブラックホール時空に量子論を適用することによって、ブラックホールが粒子を放出して蒸発することを示しました。これをホーキング輻射と呼びます。ホーキング輻射の効果は小さなブラックホールほど顕著で、質量が 10^{15} グラム程度以下のブラックホールはホーキング輻射によって現在までに蒸発してしまいます。したがって、現在の宇宙に存在している原始ブラックホールの質量は 10^{15} グラム以上のものになり

ます。

宇宙の密度揺らぎとインフレーション宇宙

さて、原始ブラックホールを生成するような大きな揺らぎはどうやって作られるのでしょうか。宇宙にある銀河や銀河団などの宇宙の大規模構造は宇宙初期に存在した小さな密度揺らぎが重力の不安定性によって成長し形成されたと考えられています。実際、宇宙の初期に密度揺らぎが存在することは、アメリカのNASAが打ち上げたCOBE衛星による宇宙マイクロ波背景放射（CMB）の観測から1992年に発見されました。CMBは宇宙が高温で熱平衡にあった時に大量に存在した光が宇宙膨張によってその波長が引き伸ばされ、現在数mmの波長をもつマイクロ波として観測されている放射で、宇宙のあらゆる方向から等方的にやってくる放射です。CMBを精密に観測するとわずかながら非等方性があることがCOBEによって発見されました。これは光が放出された時期、つまり、誕生して約38万年の宇宙にわずかに密度揺らぎがあることが原因であると解釈されます。CMBの非等方性はその後WMAP衛星とプランク衛星によってさらに詳細に調べられ、宇宙初期に 10^{-5} 程度の密度揺らぎが存在したことが明らかになりました。

そもそもCMBの観測で明らかになった密度揺らぎはどのように作られたかが問題ですが、ほとんどすべての宇宙論研究者は、インフレーションと呼ばれる

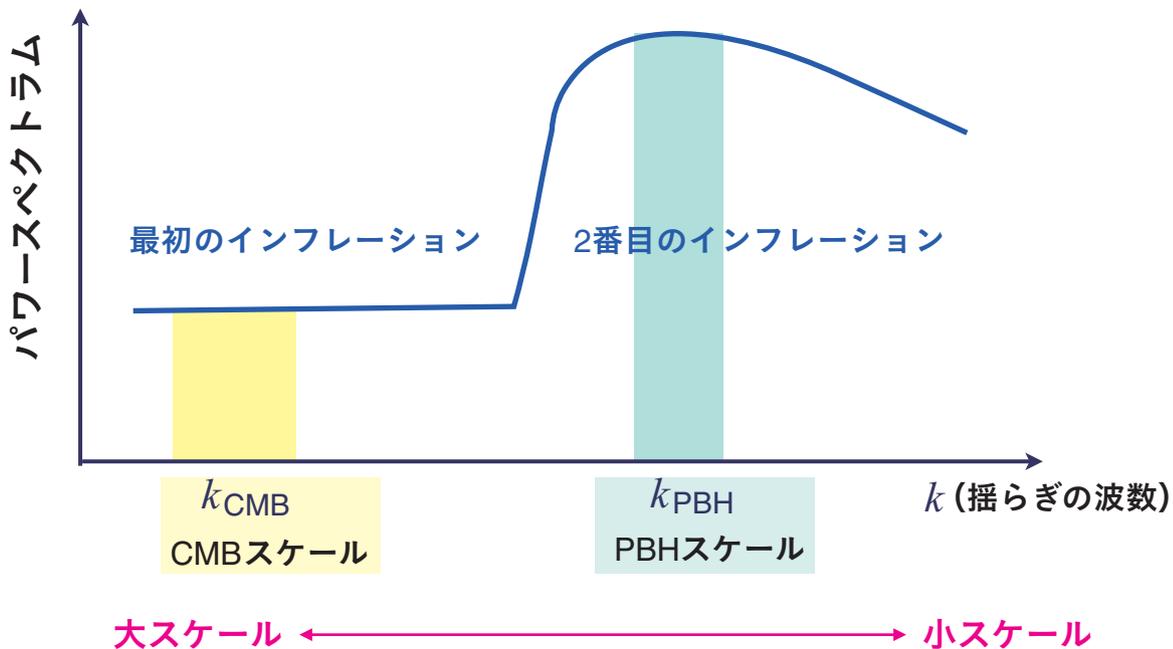


図1 ダブルインフレーション模型が作る揺らぎのパワースペクトルを模式的に示した図。パワースペクトルとは波数 k の揺らぎの大きさの2乗を k の関数として書いたもので、波数とは波長の逆数に比例する量、つまり $k \sim 1/(\text{波長})$ 。最初のインフレーションで大スケールの揺らぎ（波数の小さな揺らぎ）が作られ、2番目のインフレーションで小スケールの揺らぎ（波数の大きな揺らぎ）が作られる。図中のPBHは、原始ブラックホール（primordial black hole）を意味する。

宇宙誕生後約 10^{-36} 秒に起こった宇宙の加速度膨張によって密度揺らぎが作られたと信じています。インフレーションはインフラトンと呼ばれるスカラー場のポテンシャルエネルギーが宇宙を支配することによって起き、その時インフラトン場は量子揺らぎを持っており、それが急激な膨張で引き伸ばされることによって宇宙論的スケールの長さを持った揺らぎになります。インフレーションが作る揺らぎにはほぼスケール不変であるという性質があります。スケール不変な揺らぎとは、揺らぎを構成する様々な波長の揺らぎの大きさが波長によらず一定であるような揺らぎのことです。このインフレーションの作る揺らぎの性質は、他のインフレーションの予言とともに宇宙マイクロ波背景放射の観測によって確かめられており、我々がインフレーション宇宙を信じる大きな根拠となっています。

ダブルインフレーションによる 原始ブラックホールの生成

インフレーション宇宙ではほぼスケール不変な揺らぎが生成され、CMBで観測される大スケール（100 Mpc 程度以上）の波長の揺らぎは 10^{-5} 程度だと分かっています。一方、原始ブラックホールを作るには揺らぎが地平線内に入った時に 10^{-1} 程度の大きな揺らぎが必要です。しかし、スケール不変性が正しいと地平線内に入った時の揺らぎは常に 10^{-5} 程度で、原始ブラックホールを生成するような大きな揺らぎを作るのは困難です。したがってスケール不変性を破る必要があります。

ここではそのための1つのアイデアとしてダブルインフレーション模型を紹介します。スケール不変性はインフレーションが一つのスカラー場によって起こっている場合には簡単には破れません。しかし、インフ

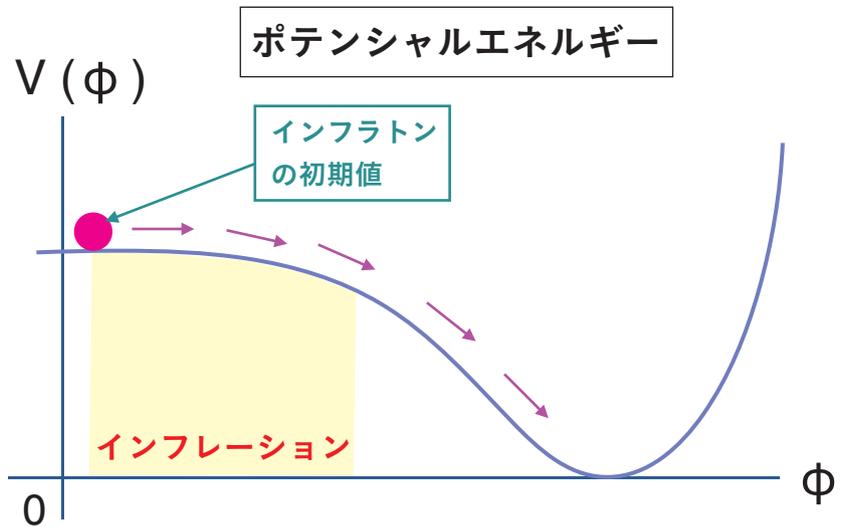


図2 ニューインフレーションモデルにおけるインフレーションを起こすスカラー場 (=インフラトン) のポテンシャル。インフラトン場が原点近くの値を初期値に持ち、ポテンシャルの最小値に向かってゆっくり転がる間にインフレーションが起きる。

レーションを起こすスカラー場が複数あると話違ってきます。例えば、インフレーションが2段階で起こるとしましょう。インフレーションではインフレーションの終わりに近い時期に最も小さなスケールの揺らぎが生成され、それより早い時期に作られた揺らぎは大きなスケールの揺らぎになります。これは早い時期に作られた揺らぎの方がその後のインフレーションで引き伸ばされ、より大きな波長を持つ揺らぎになることを考えれば容易に理解できます。したがって、2段階にインフレーションが起こるシナリオでは、最初に起きるインフレーションがCMBで観測されるような大きなスケールの揺らぎを作り、あとで起こるインフレーションが小さなスケールで大きな揺らぎを生成し、それによって原始ブラックホールを作ることができます。このように2段階でインフレーションが起きるモデルをダブルインフレーションモデルと呼びます。ダブルインフレーションで生成される揺らぎのパワースペクトラム (波数 k を持った揺らぎの2乗) を模式的に書くと図1のようになります。

実際に原始ブラックホールを生成するようなダブル

インフレーションモデルを構築するためには、2番目に起こるインフレーションに工夫が必要になります。2番目のインフレーションとしては、エネルギースケールが小さくても大きな揺らぎを作ることのできるモデルが好ましく、具体的には、図2のようなポテンシャルを持つニューインフレーションモデルが適しています。ニューインフレーションモデルはその名前に反して最も古いインフレーションモデルの一つですが、難点としてインフラトン場の初期値をポテンシャルの極大近くの値にとる必要があるという初期値問題があります。しかし、ダブルインフレーションモデルでは、最初のインフレーションの効果によってこの初期値問題も解決することができます。^{*1}

図3にダブルインフレーションモデルが生成する原始ブラックホールの質量分布 (質量関数) を示しました。モデルのパラメータを適切に選ぶことによって、様々な質量を持った原始ブラックホールが生成できます。また、図2の青い実線で示したように、パラメータに

^{*1} 個人的には初期値問題の解決が20年前にダブルインフレーションを考えた動機でした。(K.-I. Izawa, M. Kawasaki, and T. Yanagida, *Physics Letters B* **411**, 249 (1997))

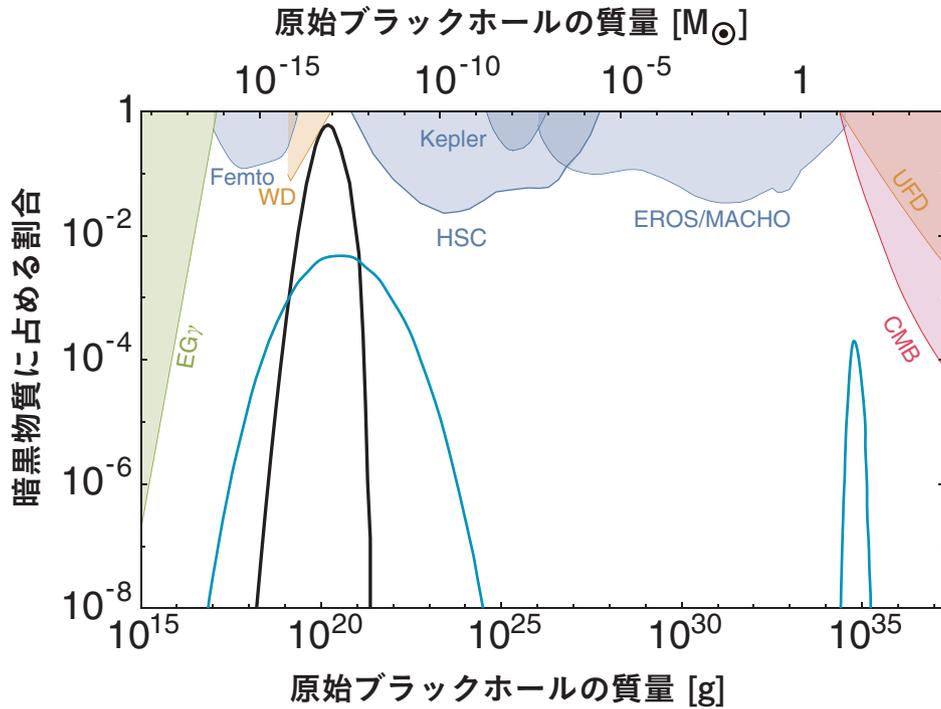


図3 黒の実線と青の実線は、それぞれ異なるモデルパラメータに対するダブルインフレーションモデルで生成される原始ブラックホールの質量分布（質量関数）を表す。影をつけた領域は原始ブラックホールの暗黒物質に占める割合に対する様々な観測的制限。M_☉ は太陽質量を表す。

よってはブラックホールの分布に2つピークが現れる場合もあります。

原始ブラックホールの観測的制限

前に述べたように、現在宇宙にある原始ブラックホールは極めて幅広い範囲の質量を持つ可能性があり、様々な方法でその存在を観測する試みが行われてきました。残念ながら、現在に至るまで原始ブラックホールの観測的証拠はなく、そのことから原始ブラックホールの存在量に制限がつけられています。まず、質量が 10^{15} グラムから 10^{17} グラム程度の比較的軽い原始ブラックホールは蒸発する際に放出されるガンマ線の観測から強い制限がつけられています。 10^{17} グラムから 10^{19} グラムの質量のブラックホールはガンマ線バーストからの光の重力レンズ効果による干渉効果（femto lensing）の観測から制限され、 10^{20} グラ

ムから 10^{35} グラムの質量のブラックホールは星と観測者の間の視線をブラックホールが通過すると重力レンズによって星の光が増光する効果（microlensing^{*2}）の観測から制限がつけられています。また、その他、ブラックホールが矮小銀河などの系を力学的に暖めることによる効果や、ブラックホールの周りのガスのアクリーション（降着）によるCMBへの影響からくる制限などがあります。図3に現在の原始ブラックホールの存在量（暗黒物質の密度に対する割合）に対する制限を示しました。この図から非常に広い質量範囲にわたって観測から制限がつけられていることが分かります。

暗黒物質としての原始ブラックホール

インフレーション宇宙で作られた原始ブラックホールは宇宙の暗黒物質を説明できるのでしょうか？ 図

*2 本号の裏表紙を参照。

3で示したように、原始ブラックホールの存在量は観測から厳しく制限されていますが、質量が 10^{20} グラム付近のブラックホールの制限は比較的弱く、 10^{20} グラムにシャープなピークを持つような質量分布の原始ブラックホールを作ることができれば暗黒物質を説明できる可能性があります。実際に、そのようなブラックホールを作ることは可能です。前述したダブルインフレーションモデルで作られる原始ブラックホールの質量関数を図3の黒の実線で示しました。この質量関数を積分すると暗黒物質の全質量密度になり、宇宙の全暗黒物質を説明することができます。ただし、今後観測の制限はさらに厳しくなると予想され、近い将来暗黒物質としての原始ブラックホールは排除されるかもしれません。

LIGO重力波イベントと原始ブラックホール

最初に述べたように、LIGOで発見された重力波イベントは原始ブラックホールの合体によって引き起こされた可能性があります。宇宙初期に原始ブラックホールが作られた場合、そのようなブラックホールがどのくらい存在すればLIGOの観測を説明できるかに関して、不定性が大きいのですが、約30太陽質量を持つ原始ブラックホールが暗黒物質に対して質量比で 10^{-3} 程度あればLIGOイベントを説明できるという解析があります。図3にはダブルインフレーションモデルでそのような原始ブラックホールを説明できる質量関

数が青の実線で示されています。

ダブルインフレーションモデルに限らず、一般的に、インフレーションで作られた大きな揺らぎで原始ブラックホールを作るシナリオでは、揺らぎの2次の効果として重力波が生成されます。これはブラックホールが連星系を作って放出する重力波とは異なるもので、LIGOイベントを説明するような原始ブラックホールの場合、生成される重力波はnHz（ナノヘルツ）程度の周波数を持ちます。この振動数帯の背景重力波に対してはパルサータイミングの観測から厳しい制限があり、その制限を逃れてLIGOイベントを説明するには密度揺らぎが極めてシャープなピークを持つことが要求されます。（図3の質量関数はこれを満たしています。）

まとめ

最近のLIGOによるブラックホール連星合体からの重力波の観測によって、原始ブラックホールは注目を集めています。また、原始ブラックホールは宇宙の暗黒物質に重要な寄与をしている可能性もあります。ここでは原始ブラックホール生成に必要な大きな密度揺らぎを生成することができるダブルインフレーションモデルを取り上げ、原始ブラックホールが宇宙の全暗黒物質やLIGOイベントを説明できることを示しました。近い将来、microlensingを用いた観測等で原始ブラックホールが発見されることを期待しています。