

国民生活における重力波研究の意義

重力波はこの数年で、自身の探索というフェーズから、宇宙や物理現象の観測や、その標準理論の検証手段に移り、多くの分野が融合する学術として変貌を遂げた。欧米を始め諸外国はこれに敏感に反応し、各国コミュニティでの立ち位置や、予算機関からの支持を急速に強めてきた中で、同じ道をめざしてきた我が国は、今これから追随しようとしている。

重力波を用いた研究は多種多様で多くの可能性を秘めている一方で、個々の研究は専門性が高すぎて、一般の人はもちろん研究者でさえも、結局何がわかるのか解らない状態になり、各々の自己満足的なものに見えてしまいがちである。そのため、まずは、重力波研究によって得られるものを整理し、国民生活にどのような意義があるのかを、下記に二つ示すことにした。

(1) 力のしくみを精密に検証し、基礎物理学を深め、生活の礎とする

基礎物理学は、将来のイノベーションのきっかけとなるばかりでなく、現在使われている確立した技術を保証するものであり、物理定数の普遍性などは、経済活動のよりどころとなるべきものであるため、基礎物理学の新たな法則の発見や、今わかっている理論の修正などがもし見つければ、社会基盤を揺るがすことにもなりかねない。

(1-1) 力の大統一

自然界には4つの力が存在するとされるが、宇宙初期にはもともと一つであり、温度が下がる過程で相転移を繰り返しながら別々にわかれ、現在の4つになったと考えられている。4つの力を統一的に説明する理論がもし考えられるのならば、それは自然科学の夢であるとともに、これまで知られていなかった新たな力の性質などが見つかる可能性もある。

(1-2) 極限下での重力

重力は最も統一が難しいとされる力で、物理学の最後のフロンティアである。エディントンから始まった天体観測はより高精度となり、近日点移動や、シャピロ遅延などから、アインシュタインが提唱した一般相対論が重力を記述できると十分に検証され、GPS補正（1日あたり38マイクロ秒、約1 km）に安心して使えるようになった。一方で、これまでの検証は主に、弱い重力下での現象観測に基づいており、ブラックホールや中性子星からなるコンパクト連星の合体前後に生じるような極限下での検証は、重力波を用いて初めて本格的に行うことが可能となった。

(1-3) ブラックホールと重力理論の検証

ブラックホールは質量、電荷、角運動量の3つのみで記述される無毛定理によって、最も単純な天体とされる一方、ブラックホールどうしの衝突現象は重力波を通してのみ観測可能で、らせん運動、合体、振動のそれぞれのフェーズから発生する特徴的な重力波形を、一般相対論によって計算されるものと精密に比較することによって、ブラックホールの性質の理解のみならず、これまで十分に行えなかった極限下での重力理論の検証も可能になる。

(1-4) 中性子星とマルチメッセンジャー天文学

中性子連星、または、ブラックホールと中性子星との合体は、物質の極限下の相互作用を伴うため、ガンマ線から赤外線に至る幅広い波長と、数秒から数年という時間にわたる電磁波観測によって、マルチメッセンジャー天文学と呼ばれる、多数分野を融合する学術として認識されるようになった。これは、基礎物理学を深めるのみならず、天体観測の新たな手段として、後述するような宇宙の成り立ちを理解することにも必要不可欠である。

(1-5) 中性子星と原子核、素粒子物理学

半径10 km程度とされる中性子星の中心部は、角砂糖の大きさに10億トンともいえる高密度で、通常核物質に加え、ハイペロンやクォークなどの多彩な構成粒子が出現しており、それらの相互作用を記述する状態方程式を解明するための、地球上では達成するのが困難な環境下の実験室と考えられている。そのため、重力波を通して観測される中性子の潮汐変形や合体後の超高压状態などは、地上実験では得られない情報を含んでおり、原子核・素粒子物理学の更なる発展に大きく貢献する。

(1-6) 重力波の偏光による相対論の検証

連星合体などから発生する重力波自体も理論検証に用いることができ、今は、一般相対論に基づき $+$ と \times の二つの偏光を重ね合わせて計算した波形を測定データと比較しているが、より普遍的な重力理論では最大で六つの偏光成分が考えられるため、これらの可能性を実験的に除外することは、一般相対論の根本的な検証に必要である一方で、もし新たな偏光成分の兆候が見えた場合は、修正重力理論を発展させる大きな動機となる。

(1-7) 究極のマルチメッセンジャーとしての超新星爆発観測

超新星爆発は人類の歴史のなかで度々肉眼で観測されており、その存在は古くから知られ研究されてきた。恒星の進化の最終段階に起きるこの現象は、中性子星・ブラックホールといった高密度天体の形成、重元素の生成と放出、宇宙線やガンマ線バーストなどのエネルギー源として宇宙や我々の成り立ちに不可欠な存在である。そのメカニズムには自然界の4つの力が全て関わっており、宇宙に存在する総合実験室としての役割は非常に高く、もし今後天の川銀河内で発生し、電磁波、ニュートリノ、重力波の全てで観測することができれば、物理、天文学といった幅広い分野に革命的な知見をもたらすのは間違いない。

(2) 宇宙の成り立ちを理解し、ひとびとの明日への希望を後押しする

なぜ宇宙を研究するのかと聞かれて、ただ面白いからと答えるだけでは理解は得られない。だが、我々はどこからきてどこに向かうのかという究極の問いは、科学に興味がある者だけではなく、ひとびとの共通のものであると考える。宇宙論によれば、ビッグバンから全てが始まり銀河が形成され、やがて、この地球という多彩で美しい、あたかも創造物のような生態系が自発的に生まれ、私たちと宇宙とという一見全くスケールの違うものが、実は、時間と呼ばれる連続な一本の軸でつながっているということを証明しようとしている。

(2-1) 人間原理としての宇宙論

量子的な宇宙創成シナリオによると、基本物理定数などパラメータの異なる宇宙が無数に存在する中で、適切な条件を満たす限られた宇宙だけに知的生命体が生まれるという考え方がある。これを信じれば、我々が今いるのは、決して必然ではなく、様々な偶然が重なって無数の候補の中から選ばれた奇跡であると感じ、明日を生きるための心のよりどころになるのではないか。

(2-2) 暗黒エネルギーと修正重力理論

宇宙の標準モデルはほぼ確立してきたが、現代宇宙論における最も大きな謎の一つとして、加速膨張の物理的起原の解明があり、この原因を一般に暗黒エネルギーと呼んでいるが、アインシュタインが一般相対論の基礎方程式に宇宙項を導入したことにさかのぼる。別の可能性として、宇宙論的な距離と時間が離れた遠方の物理には、一般相対論を修正した拡張重力理論を適用する必要があるのではとも言われているため、(1-3、1-6)で挙げた重力理論の検証は、宇宙論の発展にも影響する可能性がある。

(2-3) 原始重力波

最古の電磁波とも言われるマイクロ波背景放射の観測によって、宇宙の晴れ上がりの様子が明らかになってきたが、その更に前にはインフレーションと呼ばれる指数関数的な膨張が起きたと考えられる。その際、時空的あるいは量子的なゆらぎに起因する原始重力波が発生した可能性が高く、もしこの観測に成功すれば宇宙のごく初期まで迫ることができ、宇宙論の強力な検証や発展につながるるとともに、(1-1)重力を含めた力の大統一を構築していく上で重要なヒントになると期待されるため、(1-7)超新星爆発の観測と並んで、重力波研究における究極の目的であることは他言を要しない。

(2-4) ハッブル定数の独立な測定

現在の宇宙の膨張速度を表すハッブル定数の値について、近傍の宇宙観測から距離のはしごを継ぎ足して得られた値と、最古の宇宙からの電磁背景放射にモデルを組み合わせて導出した値に食い違いがあるが、もし両者の方法に問題がないとすれば、まだ気づいていない宇宙の特徴を示唆している可能性がある。(1-4)中性子連星を用いたマルチメッセンジャー天文学によって、重力波と電磁波の独立な観測の直接比較から第三のハッブル定数の導出方法が得られたが、今後その精度が向上していく中で、宇宙論発展の新たな突破口になると期待される。

(2-5) 銀河形成

銀河の形成とその進化は、滑らかな宇宙の始まりから不均質性が生み出される過程の解明として、宇宙論の未解決で最重要なピースのひとつである。多くの銀河の中心に超大質量ブラックホールが存在することは既に電磁波観測で知られているが、銀河とブラックホールの形成の因果関係について、鶏と卵のような議論が繰り返されているなか、重力波による観測はその決着に不可欠である。

(2-6) 重元素合成

地球がなぜこのように多様で美しいかを知るうえで、様々な元素が宇宙でどのようにして合成されたかを理解する必要がある。中性子連星の合体で速い中性子捕獲反応により重元素が合成された可能性が、以前から提唱されてきたが、(1-4) マルチメッセンジャー天文学で得られる重力波と電磁波のキロノバ同時観測によって、これが明らかになってきており、今後その理解が更に進むことが期待される。

(2-7) 宇宙ジェット

宇宙ジェットはブラックホール、コンパクト天体、原始星などの中心の天体から双方向に吹き出してくるプラズマの総称であるが、宇宙の様々な階層で発見されており、重力によって生じる普遍的な現象だと考えおり、光すらも出てこられないとされるブラックホールが最も明るい天体として観測されている所以である。その物理的機構の解明は、宇宙物理学における最重要問題の一つとなっているなかで、(1-4) 中性子連星を用いたマルチメッセンジャー天文学によるショートガンマ線バーストの解明が重要な手がかりを与えるであろう。