

# 科学的背景

## Background

### 重力波とは

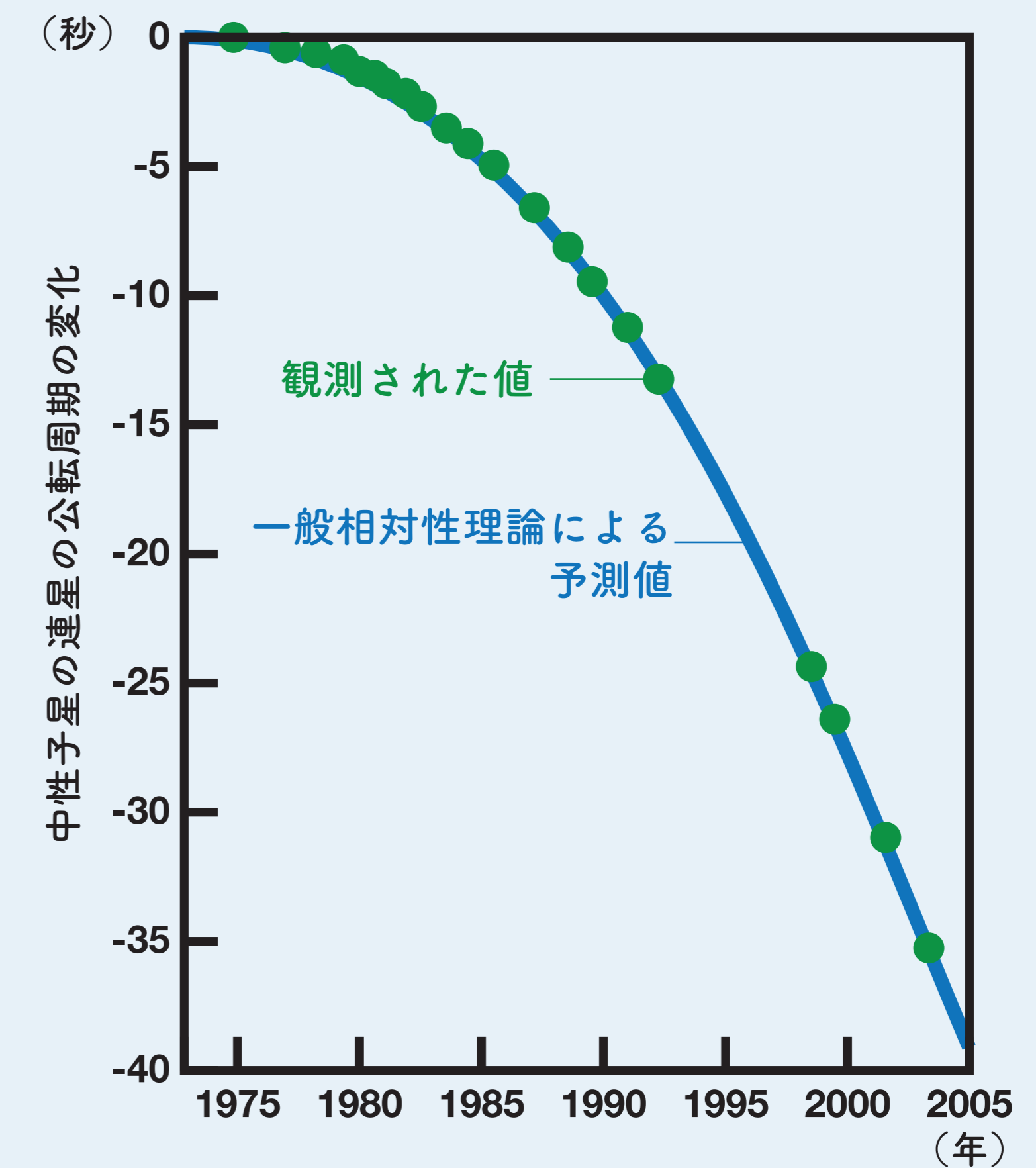
さざ波のように伝わる時空のゆがみ  
アインシュタインが1916年に予測

アインシュタインの一般相対性理論によれば、質量をもった物体が存在すると、それだけで時空にゆがみができます。さらにその物体が軸対称ではない運動をすると、この時空のゆがみが、水面のさざ波のように時空間に光速で広がっていきます。これが「重力波」です。重力波が到来すると、二つの物体の間の距離が変化したように見えます。特に、直交する二方向に対しては、片方の物体間の長さが縮むと片方の物体間の長さが伸び、縮んだほうが伸び始めると、伸びたほうが縮み始めるという「差動」の長さ変化が発生します。重力波は、物体の通過によってその振幅が弱まることはありませんが、ある1点から発生し、全方向に広がる場合は、エネルギー保存則の要請から、その重力波の振幅は走った距離に反比例して小さくなります。

### 中性子星の連星系の公転周期の減少の観測結果 (1974年)

互いの周りを公転しあう「連星中性子星」  
重力波が回転のエネルギーを持ち去っていた

一般相対性理論で理論的に予言された重力波は、実在するのでしょうか？その疑問に答えたのが、ハルス博士とテイラー博士です。発端は、両博士が、直径が20km程度しかないのに太陽と同じくらいの重さを持つ「中性子星」という特別な星が、しかも二つ近接し、互いの周りを公転しあう「連星中性子星」という特異な星系をこの銀河系の中に発見したことに始まります。もし、重力波が実在するならば、この連星中性子星からも重力波が発生し、その重力波が回転のエネルギーを持ち去り、その結果、公転周期が短くなるはずだと考えたのです。観測の結果、その公転周期の減少具合は、相対性理論の予測とぴったり一致し、これが、重力波が実在することの証明とみなされました。この功績により、両博士は1993年のノーベル物理学賞を受賞しました。

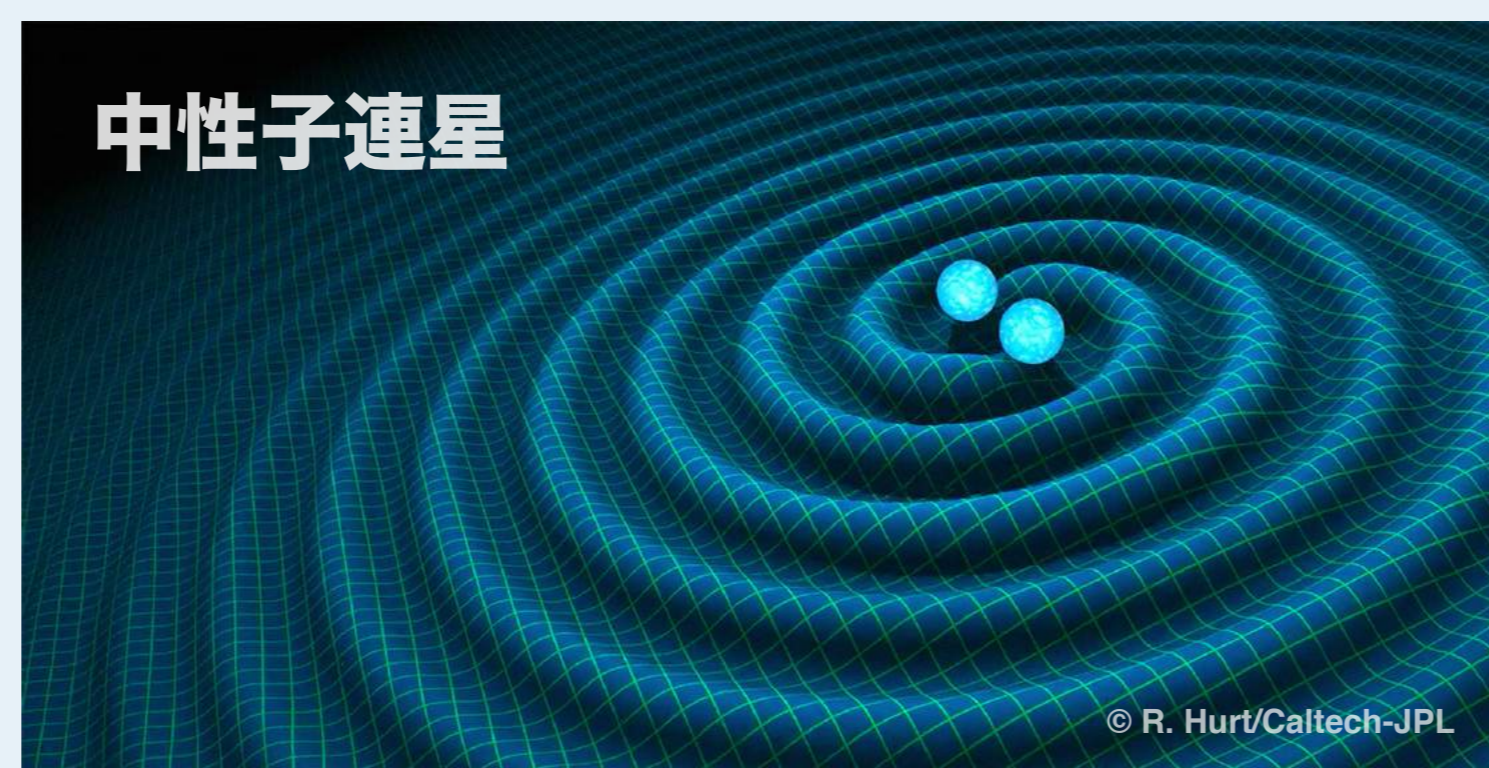


### 観測できそうな重力波が生じる事象

星ほどの重い物体が動いたり、  
合体したり、爆発で吹き飛ばような現象

重力波は、質量を持った物が軸対称でない運動をすれば必ず発生します。ですので、皆さんが腕を回しても重力波は出ているはずですが、その重力波の振幅はあまりに小さくて人類の技術では検出できません。人類が「検出できそう」な振幅の重力波を発生させるには、星ほどに重い物体の運動、あるいは、星ほどの重い質量が合体したり、吹き飛ばような現象が必要となります。具体的には、星が一生を終えて最後を迎えた時に起こる超新星爆発や、中性子星やブラックホールの連星運動とその合体、そして宇宙の誕生のようなすさまじいエネルギーの放出を伴う天体現象などが考えられます。

中性子連星



超新星爆発



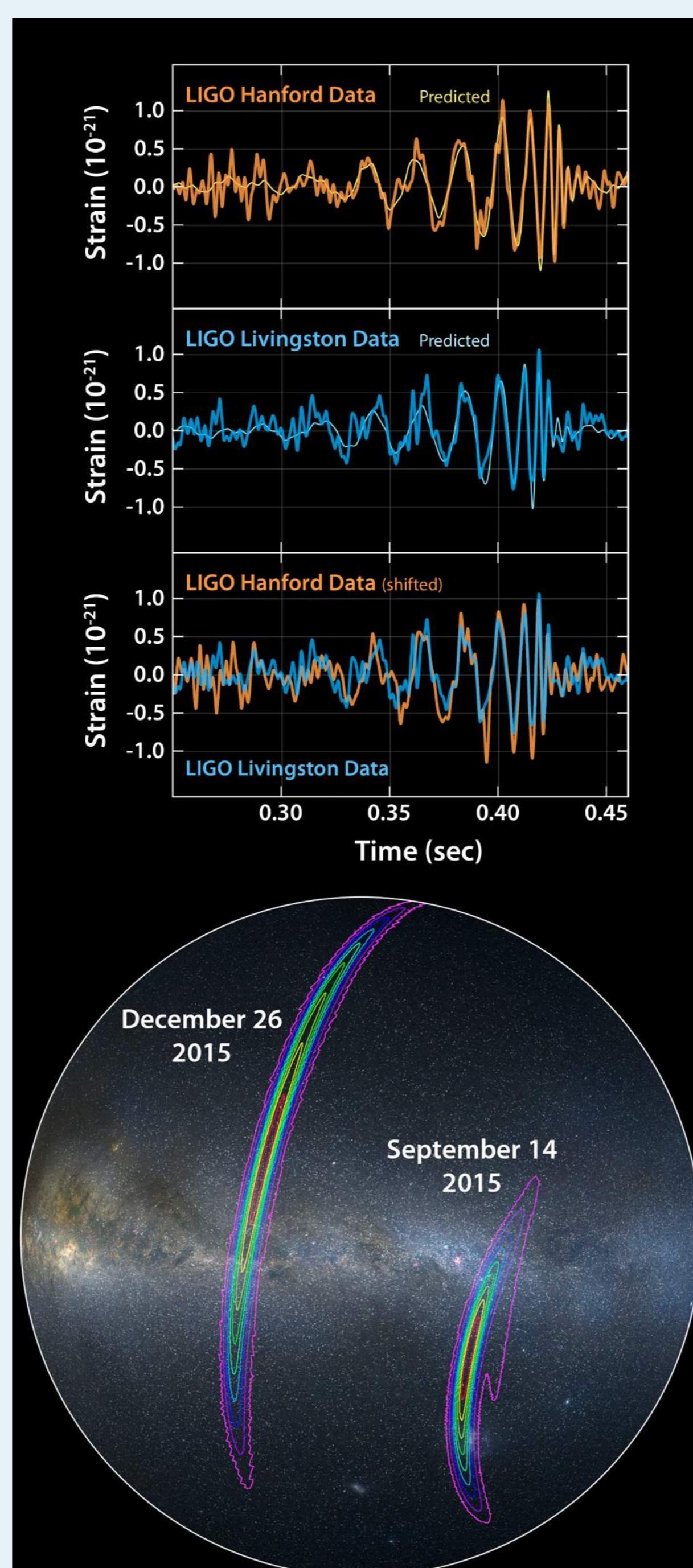
ブラックホール連星



### LIGOでの初検出

連星ブラックホールの合体からの重力波を初検出  
波源の位置を特定する精度を高めるために  
KAGRAやVirgoとのネットワーク観測に期待

アメリカのLIGOグループが、2015年9月14日の観測において、人類史上初となる重力波の検出に成功したと、2016年2月11日に発表しました。3000km離れた場所にある2台の重力波望遠鏡が、7ミリ秒の時間差でほぼ同じ波形の信号を検出し、その波形は、質量が29太陽質量と36太陽質量のブラックホール連星の合体から発生する重力波の予想波形とほぼ一致しました。さらに、その信号は、同時計測しているどの環境雑音とも相関がなく、かつ、雑音でそのような特徴的な波形が偶然に発生する確率は20万年観測して1回という低さであったため、この信号は、重力波によるものに間違いないと判定されました。ついに、人類は、重力波という新しい観測の「窓」を手に入れたのです。ただ、LIGOの2台の重力波望遠鏡では、波源の位置の推定誤差が大きいため、今後VirgoやKAGRAが同程度の感度を持ち、ネットワーク観測を行うことにより、より正確で多くの情報を得ることが期待されています。



### 時空のゆがみの大きさ

地球と太陽の距離が「水素原子1個」変わる

人類が観測できそうな重力波を発生する天体現象は、宇宙ではまれにしか発生しません。宇宙の誕生は、今のところ1回きりです。連星中性子星の合体現象は、銀河系内で発見されている数個の連星中性子星の統計的考察から、1銀河あたり10万年に1回程度しか起こらないと推察されています。中質量の連星ブラックホールの合体にいたっては、そもそも中質量のブラックホールの連星自体が見つかっていなかったため、大雑把な予想さえも難しい状態でした。

重力波の振幅は、2つの物体間の距離(L)と重力波による長さの変化量(dL)の比「dL/L」で表されます。重力波は、物体の通過によってその振幅が弱まることはありませんが、ある1点から発生し、全方向に広がる場合は、エネルギー保存則の要請から、その重力波の振幅は走った距離に反比例して小さくなります。

例えば、連星中性子星の合体からの重力波をとらえることをめざし、目標検出回数を1年に数回としたければ、単純に我々の銀河系を中心に100万個の銀河を含む宇宙空間の範囲で、その最遠距離から来る「弱まった重力波」の振幅をとらえることのできる重力波望遠鏡を作ればよいことになります。その最遠距離は約7億光年となります。

しかし、そこから届く重力波の振幅は微かなものです。地球と太陽の距離の1億5000万kmを観察しても、たった水素原子1個分程度の変化(dL/L ~ 7x10^-22)しかありません。多くの研究者だけではなく、当のアインシュタインでさえも、「重力波の検出は困難」と自分の論文の中で述べた理由がここにあります。