

阪市大理 神田展行

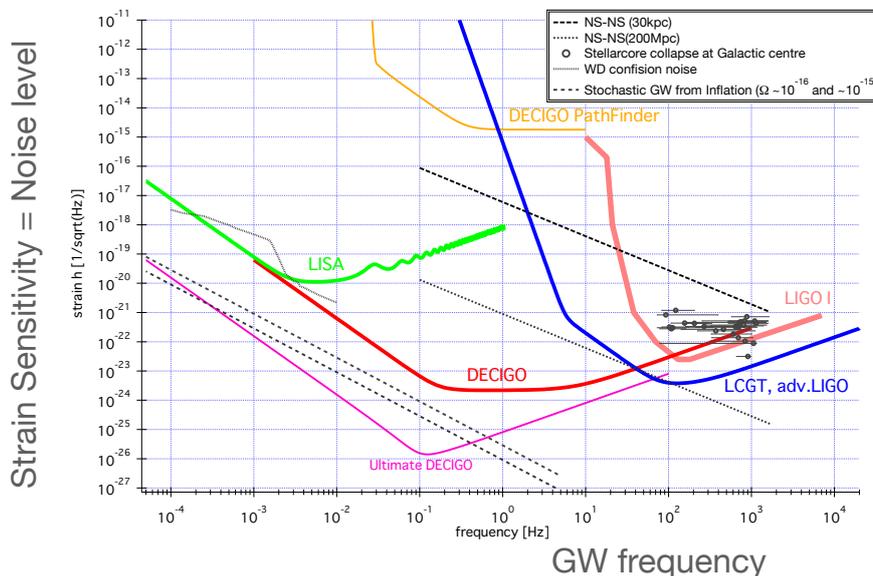
Current Status and Future of Gravitational Wave Detectors

Graduate School of Science, Osaka City University Nobuyuki Kanda

本講演では、重力波検出実験の原理、検出目標とする物理/天体のターゲット、近年の実験の現状、そして近い将来の計画について解説する。特に検出目標として、ブラックホールを考えた場合、どのような解析手法があり、どういう物理が明らかにできるかを議論したい。

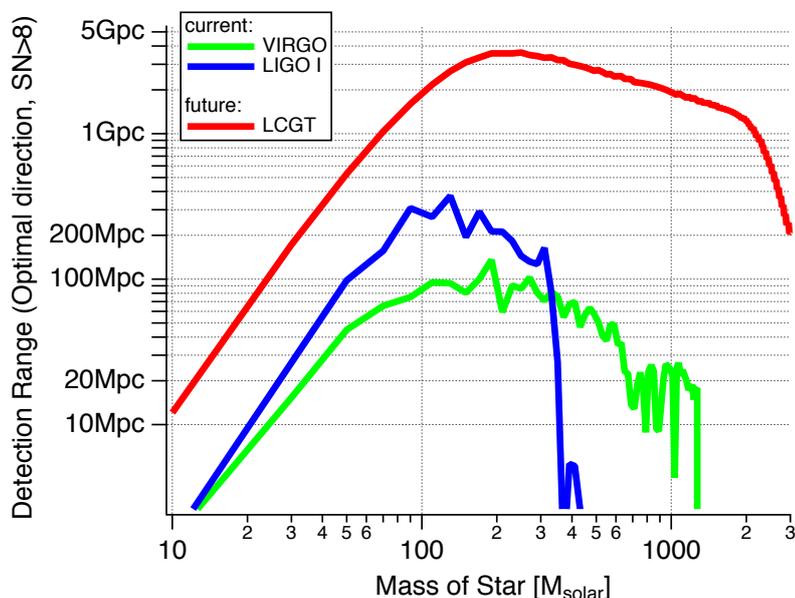
一般相対論を実験ないし観測的に直接検証することを考えたときに、重力波はいろいろな意味で優れた現象と考えられる。まず、強い重力場での現象であるということが挙げられる。現在までに実験的に直接確かめられた一般相対論の現象は、太陽系重力場程度の弱い重力場での現象である。しかし、現在検出が期待されている中性子星やブラックホール連星の合体や、ブラックホールの準固有振動、超新星爆発などは、いずれも(重力崩壊やそれに比肩する程度の)強い重力場での現象である。一般相対論を実験的に証明するには、強い重力場での現象による結果が不可欠である。次に、重力波自体は摂動的な解であって、伝搬や重ね合わせなどの波(線形波)としての性質が期待されている。重力波の基本原則が素直なことは、未知の現象のプロブとして扱いやすい。それから、重力相互作用は波動や粒子としての性質が確認されておらず、重力波は相互作用の基本を確認する上で不可避の行程である。さらに重力の結合定数が極端に小さいため透過性が高く、天体内部の情報や、宇宙初期からの重力波が期待できる。

このように物理、宇宙物理、天体物理としてたいへん有望視されている重力波であるが、非常に弱いために検出は困難であった。近年のレーザー干渉計の実験によって感度が改善し、現在のLIGO実験では、時空の歪み h の感度にして $factor \times 10^{-23} [1/\sqrt{\text{Hz}}]$ に達している。地上やスペースでの検出実験が計画され、その開発が進んでいる(下図)。さらに、パルサータイミングをもちいた低い周波数での重力波観測も始まっている。



重力波を検出するためには、雑音の中に埋もれた微小信号を取り出すための解析手法が必要である。波形が予想できていれば、それに最適なフィルターを用いて探ることが可能である。Kerrブラックホールの場合、摂動によって準固有振動からの重力波が予想されるが、これは短時間で減衰する正弦波(リングダウン重力波)である。このリングダウン重力波の中心周波数と減衰時間は、Kerrパラメーター a とブラックホール質量 M で決まる。すなわち、準固有振動からの重力波を捉えることによってブラックホールの質量と角運動量を決めることが可能である。典型的には、 $S/N \sim 10$ 程度の信号があれば、質量は10~20%の精度で測定できる。重力波によるblackhole spectroscopyが期待できる。

また、仮に質量の3%程度のエネルギーが重力波として放出されれば、下図に示すような検出レンジでブラックホール準固有振動を捉えることが期待できる(最適方向)。地上の検出器では、100-1000太陽質量程度の中間質量ブラックホールになるが、現行のLIGO検出器でも200Mpcを越え、将来計画のLCGTやadv.LIGOでは1Gpcを越える検出レンジで探索できる。



一方でいくつかの問題も考えられる。まず、準固有振動は摂動での予想なので、連星合体のように重力波の振幅について解析的な確信がない。また、減衰時間が10msec程度と短いために、検出器の非定常雑音を十分に抑制する装置や解析を導入しないと、探索が難しい。このような理由もあって、ブラックホールからの重力波検出を確立するには、光学やX線などの相補的な天体観測情報が望まれている。