ICRR Seminar

宇宙線研M2 田中健太

2019/07/22

はじめに

- 略語，用語
    - IMBH: Intermediate Mass Black Hole, 中間質量ブラックホール。10^2 ~ 10^4M⊙のスケール
    - BBH: Binary Black Hole, ブラックホール連星。この論文では主に IMBH同士の連星のことを指す。
    - PN: Post Newtonian 近似
    - NR: Numerical Relativity, 数値相対論
    - VMS: Very Massive Star, 大質量星
    - SFR: Star Formation Rate, 星形成率

Abstract

- IMBHの存在はまだ観測されていない(この論文が発表された2010年当時)が，その存在は天体物理学において非常に大きな関心がある。もしIMBHが観測されれば，SMBHの形成や進化，同様に銀河進化に関する理解が深まる。→1,2章

- 光による観測はまだ先の話になりそうだが，Advanced LIGO, Virgoや将来のETによる低周波領域のGW観測では，IMBHの検出の機会がある。total 200 ~ 20000M⊙ のIMBHの連星なら，上記の検出器で大きなS/N比が得られる。→3章

- 様々な状況でのIMBH連星合体のEvent Rateを計算し，IMBHのスピンに依存する値があることがわかった。→４章

- 地上GW検出器でのIMBHの検出はGRの検証だけでなく，これらの系の存在の確認になる。天体物理学者にとってはIMBHの環境や形成プロセスの探査につながる。

1. Introduction

- SMBHは，銀河中心の星の運動やいわゆるS0星(光源となる星)のケプラー軌道から，銀河の中心にあるとされている。Sgr A*の周りを動くS02星の動きからSgr A*の質量は ~4×10^6 M⊙ と見積もられる。

- 球状星団のような小さな恒星系には，中心のSMBHと周りの恒星の相互作用から，10^2 ~ 10^4 M⊙ のレンジを持つブラックホールがあるとされている。

- 銀河中心のSMBHの検出方法で，IMBHを見つけようとすると超精密な観測が要求される。例えば，速度分散σ = 20 km/s, 距離 ~ 5kpcで10^4 M⊙ のIMBHの場合，そのIMBHが影響がある範囲は~5”となる。その範囲の中には星が少ない。

- 現状，測定は，位置天文学的な基準を持つために，必要な明るい基準星が利用できるかのような多くの要因に依存します

- このことから，IMBH，ないし星団の中の大きな暗い物体を見つけるには，VLTI,VSIや将来のGRAVITYに頼らざるを得ない。１０倍の精度の改善が望まれる。

1. Introduction

- 重力波天文学もIMBH検出に貢献できる。

- マッチドフィルターによるIMBH連星の合体の波形は重力波検出に重要である。波形は，主に2つの方法で作られる。

  - effective one-body

  - PN + NR ← この論文ではこっちの結果を使う

2.1. Birth -IMBH-

- IMBHの形成過程の1つは，質量分離により若い星団内でもっとも重い星が中心に沈んでいくという過程である。

- そこで，領域内の星の密度が大きくなり，星同士がぶつかり始める。そのうちの1つの質量がずっと大きくなり，周りの星に比べて重い(VMSくらいの)runaway starを形成する。そのrunaway starが崩壊し，　IMBHとなる。

- ただ，VMSへの進化の最後の方はまだよくわかっていない(Super massive starに進化しない条件とか，IMBHに崩壊しない質量の上限とか）この過程には，たくさんの要素と仮定(星の金属量，星風やある質量以上のrunaway star の衝突など)が含まれている。

2.1. Birth -BBH-

- IMBHが出来た後，それらがbinaryになるには，2つの異なる方法で説明される。
  - **The double-cluster channel**
    - 星団群のうちの1つの星団の中で，2つの星団が生まれる。それらは重力で束縛され，最終的に衝突する。この時，IMBHは力学的摩擦の影響で衝突後の合体星団の中心に落ちていく。
    - それらが連星を形成し，その長半径は恒星系由来の星がはじき出されることで，縮み続ける。それらの過程の中で，星はエネルギーと角運動量の小さな揺らぎを取り除き，いわゆる硬い連星になっていく。
    - 連星の進化の終わりの段階になると，重力波が効率的にその過程を引き継ぎ，軌道が円になっていく。LISAの帯域に入る頃は，これらの系は少し偏心度が残っていると考えられている。
    - LISAは数GpcまでのIMBH連星なら観測できるとされ，この場合，event rateは年に4,5回とされる

2.1. Birth -BBH-

- **The single-cluster channel**

    - Gurkanらは，恒星系からrunaway starの形成のシナリオの初期条件に，ごく少量の原始的な連星を与えた。連星の割合が10%の場合，たくさんの星団の中で2つのVMSが形成することがわかった。

    - Fregeauらは、そのようなBBHによるGWの放出の可能性を調査し、クラスター質量とそれらの密度の分布に応じて、LISAとAdvanced LIGOがそれらの数十を検出できると推定した。Gairらは,Fregeauの率を再計算し、ETの場合，同程度の大きさのBBHの合体が数件から数千件のイベントであると見積もった。

2.2. Growing up, Shrinking down

- double-cluster channel の場合，星団は2つの初期星団の合体から生まれ、十分な求心性軌道を生み出すのに十分な三軸性を発達させる可能性がある。これらの”箱型”軌道はそのいかなる軸に対して対称性を持たない典型的な軌道であり，星は系の中心に勝手に近づく。

- そのために，星は，潜在的なパチンコであるせいで，エネルギーと角運動量が取り除かれ，連星の長半径が縮んでいく。

- 合体によって引き起こされた回転により，棒のような不安定な構造になる。その間は，角運動量が保存せず，また星の数に関係なく，求心性軌道の星によって，BBHの損失円錐がいっぱいになる。

- 一方で，ブラウン運動が損失円錐に衝撃を与える役目を持つ。

- 求心性軌道の数が減っていくにも関わらず，BBHは失速しない(?)

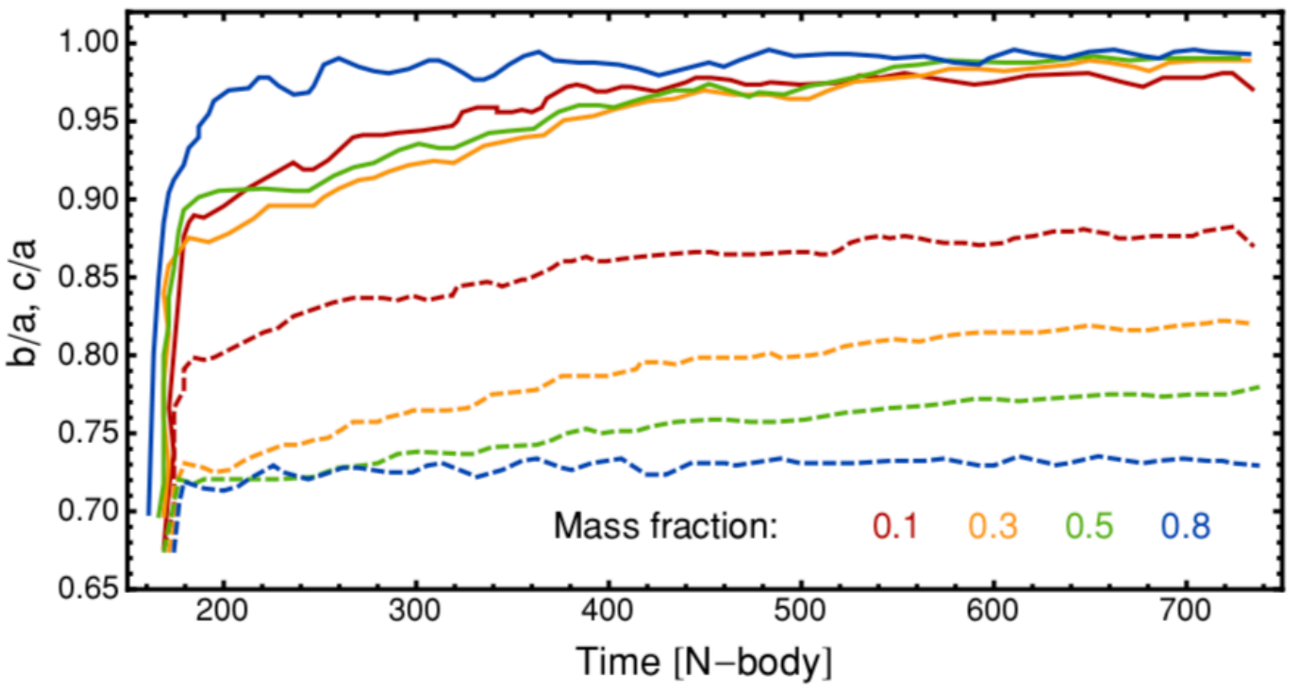


Fig.1 Triaxiality of the resulting merged cluster for different mass fractions (upper panel) and the mass fraction 0.5 (lower panel)

- 左図は，合体後の星団の三軸性，上がBBHと星団全体の重力エネルギーとの質量比が異なる場合，下が質量比が0.5で，三軸性の発展パラメータ τ と描いたもの。

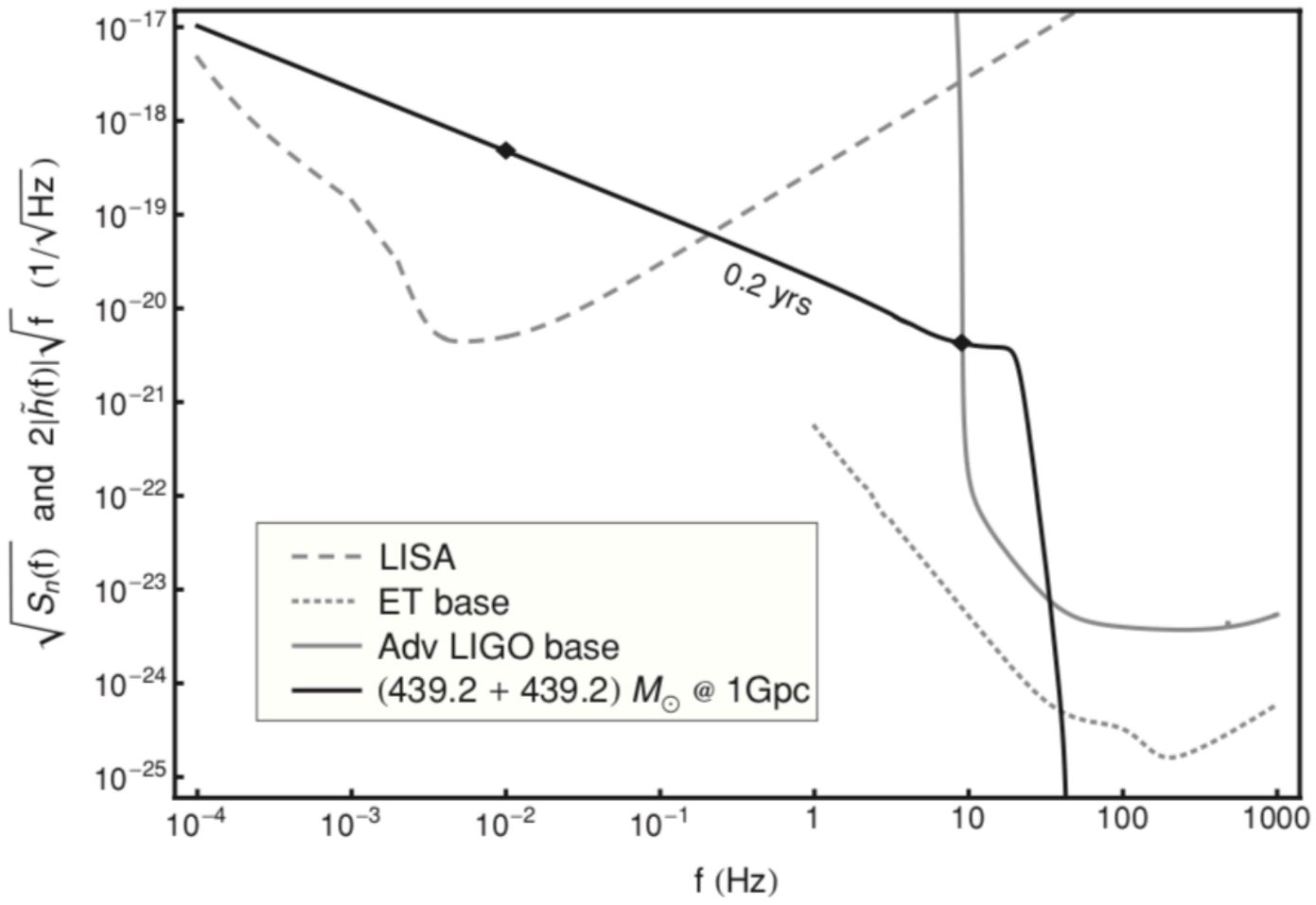
- 縦軸のa, b, cは回転楕円体の半径(a > b > c), 実線がb/a，破線がc/a

- 合体星団の中心までの距離が短くなるほど，質量比が小さくなる。

- 下図から，合体後時間が発展していくにつれて，星団は横長の回転楕円体になっていく。

- 合体後の星団は，端の方では平坦になり，中心部では，BBHにより球状になっていく。

2.3. Death



Amplitude of the GW emitted by a system of two equal-mass IMBHs of total mass 878.4 M⊙ at 100 Mpc as seen by different GW observatories

※異なる検出器の感度曲線を比較するために，|h(f)|には2sqrt(f)がかかっている。

※ この質量は見やすさのため

- 439.2 M⊙ + 439.2 M⊙ のBBH @1Gpc からの重力波の振幅と様々な検出器の感度

- 破線がLISA，点線がET，実線がLIGO(10Hzから)の感度

- IMBHのBBHでは，LISAはほとんどがインスパイラル，ETではインスパイラルの終わりから，合体，リングダウンをとらえる事ができる。

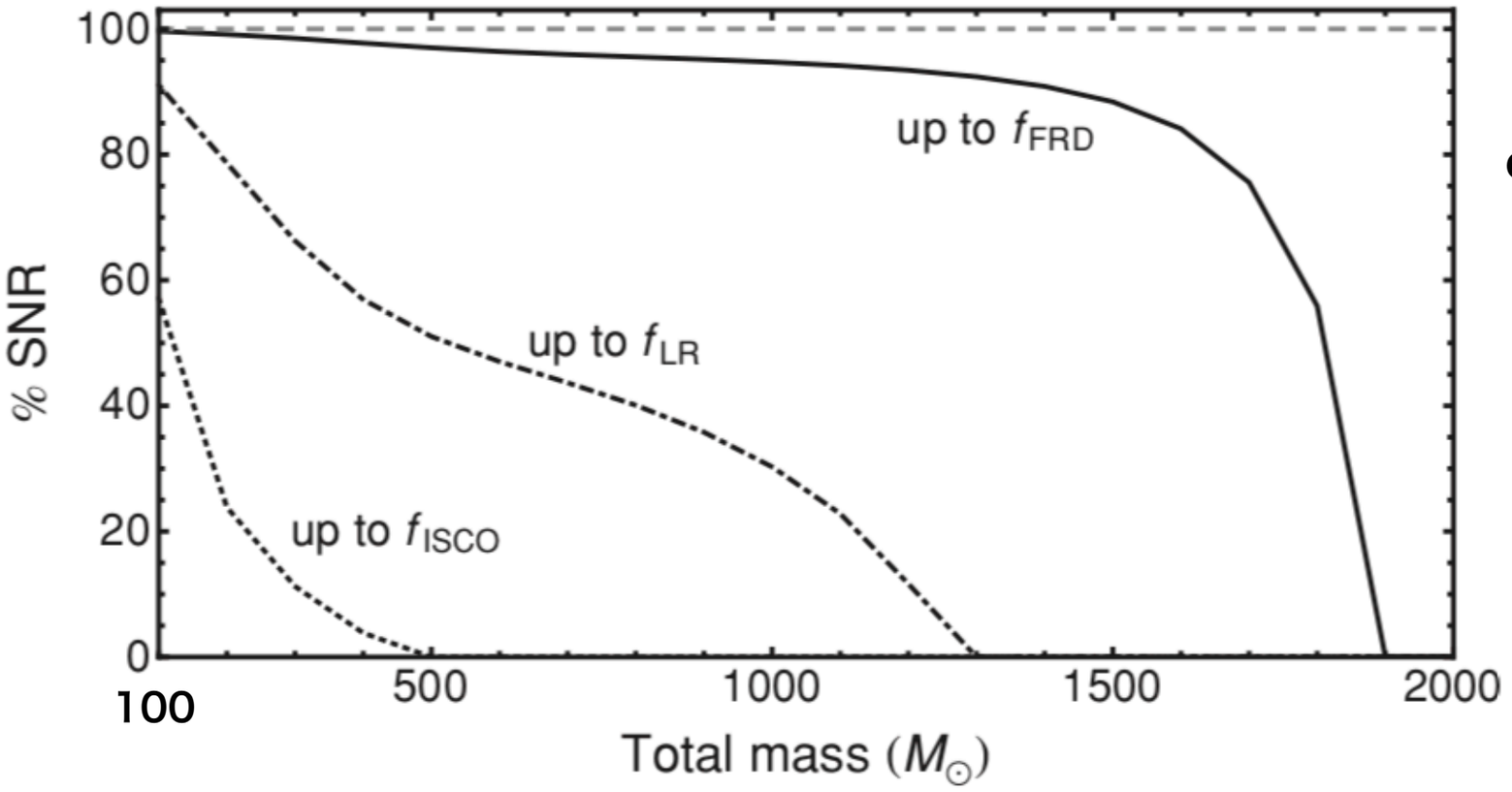


Figure 3. Percentage of the total S/N produced by IMBH inspiralling signals cut at the three reference frequencies: fISCO,fLR, and fFRD.

f_{isco}: innermost stable circular orbit of a test particle orbiting a Schwarzschild BH

f_{LR}: the light ring freq. corresponding to the smallest unstable orbit of a photon orbiting a Kerr BH

f_{FRD}: the fundamental ringdown freq. of the decay of the quasi-normal modes

- BBHの合体までの時間発展で，3つの周波数(f_{isco}, f_{LR}, f_{FRD})を考える。

- 図３は，total massが100 ~ 2000M⊙での，それぞれの周波数までのS/N比への貢献度。S/N比はAdv. LIGOの(10Hzからの)感度曲線と，100Mpcからの信号から計算されている。

- 合体とリングダウンの部分が，total massが数百M⊙以上で，S/N比が増えるのに貢献している。

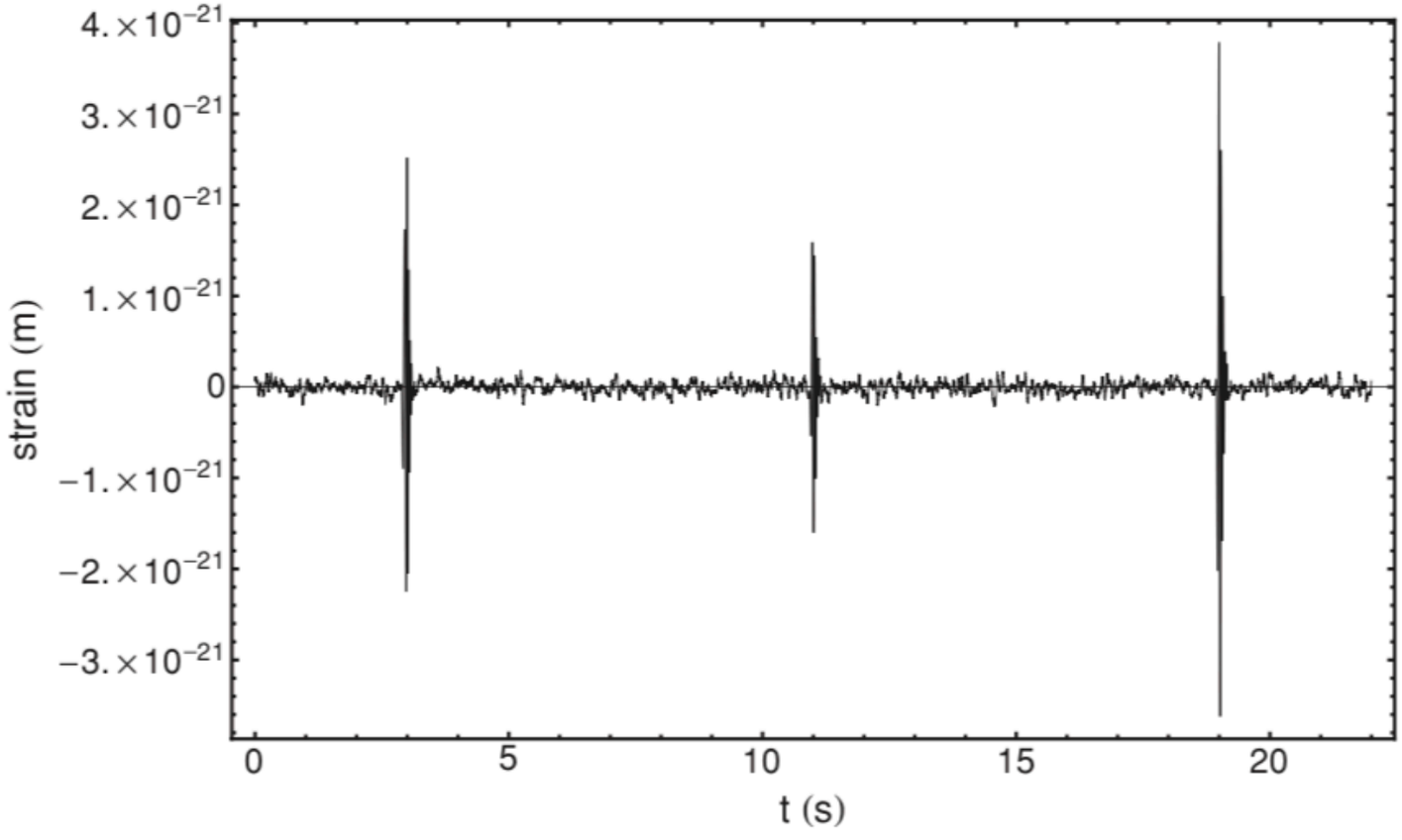


Figure 4. IMBH systems as they will be seen in the time-domain output strain of the detector by the Advanced LIGO interferometer at the Livingston site.

- 3つの信号は等質量，スピンなし，400M⊙ < M_tot < 700M⊙ で，検出器から1Gpcから任意の方向と偏光角を持つIMBHの信号

- LISAで見え始める0.01HzからLIGOで見え始める10Hzまでかかる時間を式(1)から見積ると，大体80日かかる。

$$\frac{df}{dt} = \frac{96}{5}\pi^{8/3}\mathcal{M}^{5/3}f^{11/3}. \qquad (1)$$

- 今までの図から，LISAは，特定のBBHに地上検出器を感度を合わせるための”アラーム”として使える。

- LISAでのインスパイラル期間からの正確なパラメータ推定と，LIGOとETでのBBHの合体とリングダウンの大きなS/N比からの情報を組み合わせて，系のより完全なcharacterizationができる。

3. BBH waveform model and expected S/N

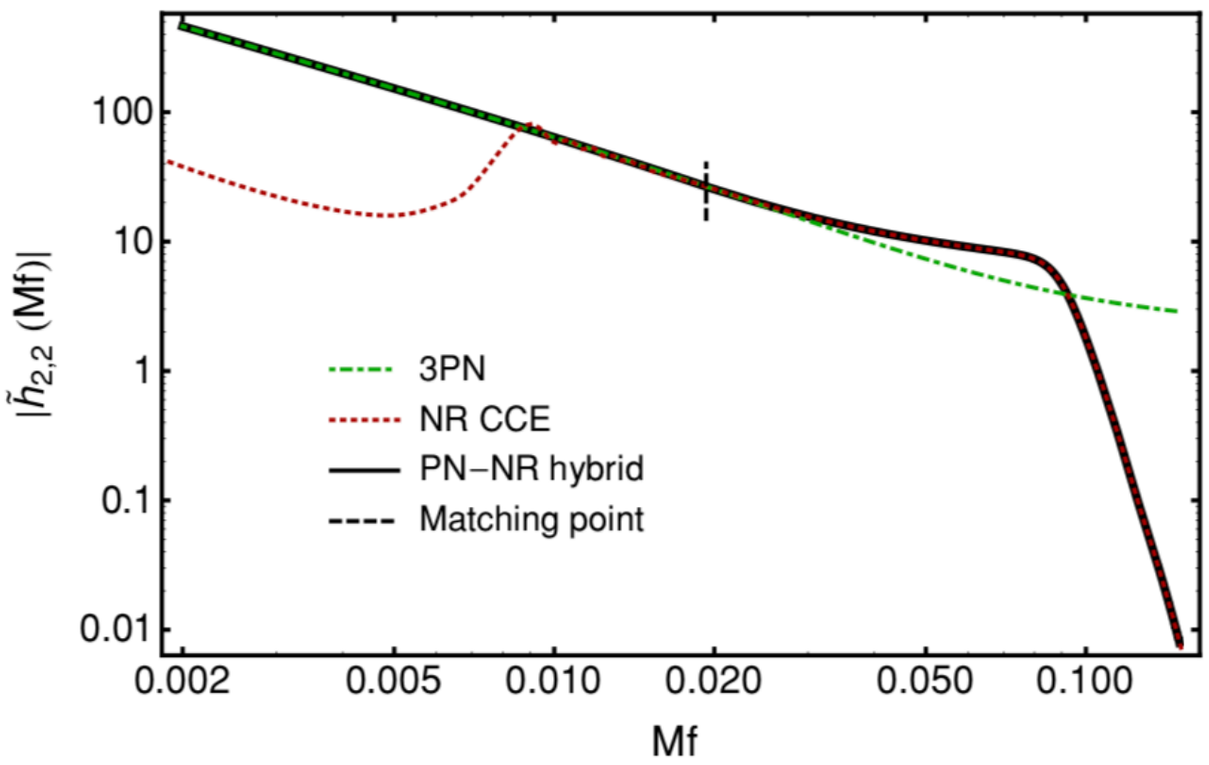


Figure 5. Waveform model employed in the S/N calculations of Section 3 for the equal-mass, non-spinning BBH scenario

- この論文では，図５のような，新しいPN-NRのハイブリッドを示す。

- 本質的に、このモデルは、同等の質量（0.15<η<0.25）を持つ回転非歳差運動BBHシステムのためのハイブリッドPN + NR波形への現象論的適合からなる

- 現象論的波形は3つの物理的パラメータから成る。

  - 連星の全質量M, 質量比η, スピンパラメータχ

- この計算は，連星のスピンが揃っているときのみ使える。

- 結果を示すために，3つの状況を考える。

1. 等質量，スピンなし

2. 等質量，スピンの大きさと方向が同じ，χ=0.75

3. 質量比が1:3, η=0.19, スピンなし

- GW信号 h(t)のS/N比は式(2)から求められる。

$$\rho^2 \equiv 4\int_0^\infty \frac{\tilde{h}(f)\,\tilde{h}^*(f)}{S_n(f)}\,df = \int_0^\infty \frac{|2\,\tilde{h}(f)\sqrt{f}|^2}{S_n(f)}\,d\ln f, \quad (2)$$

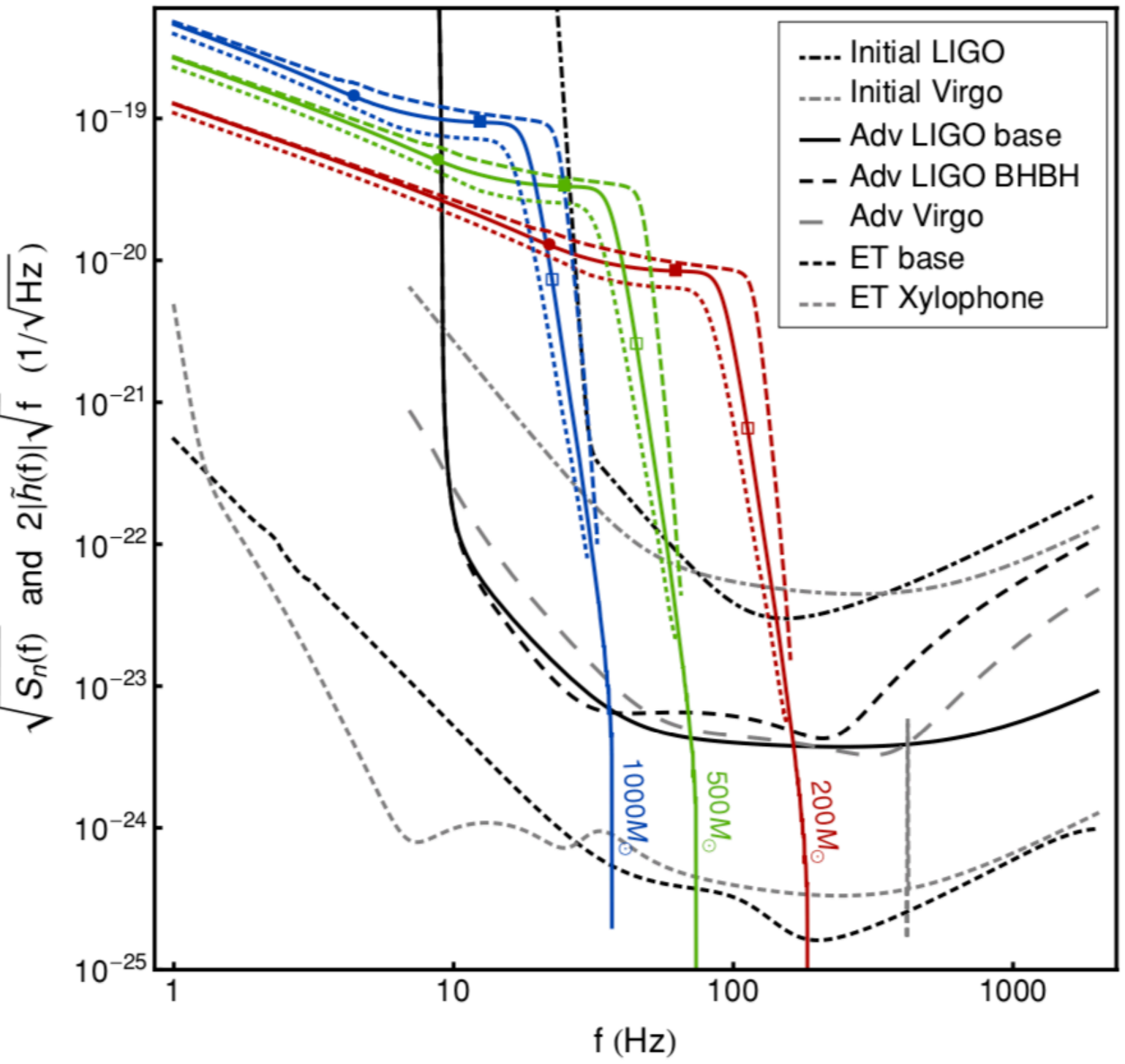


Figure 6. Hybrid waveform for three BBH configurations scaled to various IMBH masses.

※波源は100Mpc

実線：(1) 等質量，スピンなし
破線：(2) 等質量，スピンが同じ大きさ，方向
点線：(3) 質量比1:3, スピンなし
丸　：ISCO freq.
黒四角：light ring freq.
白四角：Lorentzian ringdown freq.
($1.2\times f_{RD}$)

- 図６は，現行，将来の地上重力波検出器で見えるIMBHの波形。
- 500M⊙以上は40Hzの地面振動の壁より前から落ち始める。
- 同じ質量比なら，スピンなしよりもスピンありの方が高い周波数で合体するため，大きなS/N比が得られる。
- 一方スピンの値が同じなら，質量比が小さくなると，S/N比が下がる。

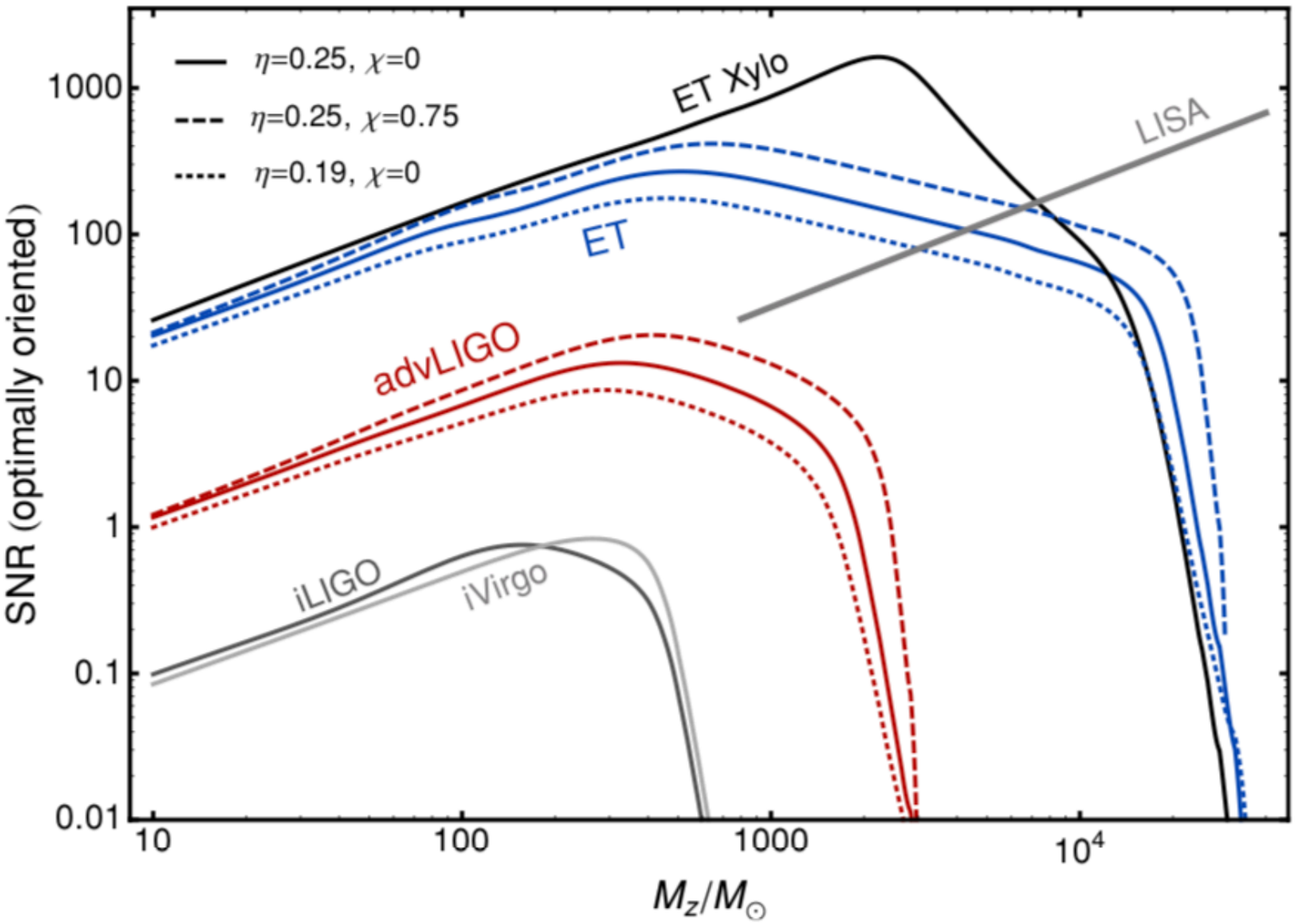


Figure 7. S/N as a function of the redshifted total mass of the BBH for the present and future generations of GW detectors and LISA.

実線：(1) 等質量，スピンなし
破線：(2) 等質量，スピンが同じ大きさ，方向
点線：(3) 質量比1:3, スピンなし

※波源は6.68Gpc (z=1)

- 図７は，地上検出器とLISAのS/N比をBBHの赤方偏移された全質量Mz=(1+z)Mtotの関数として描いたもの。

- Adv. LIGOやVirgoはz=1では，1~20のS/N比を得られ，数十のS/N値は閾値を大きく超えている。そのため，近傍の銀河にIMBHの連星があれば検出できる。信号のS / Nが中程度であるため、潜在的な検出ではIMBHの連星の存在を確認するのには十分かもだが、質量比やスピンなどのすべてのパラメータを十分な精度で決定するには不十分。

- ETは，z~1で10^2の範囲のS/N比を観測でき，total mass が10^4M⊙の連星に感度があると期待される。ETでIMBH連星によって潜在的に生成される比較的大きいS / Nから、それらの質量比とスピンを高い精度で抽出できることは、IMBH人口を特徴付けることにとって革新的になる

4. Event rate

$$R = \frac{dN_{\rm event}}{dt_0} = \int_0^{z_{\rm max}} \frac{d^2 M_{\rm SF}}{dV_c dt_e} g_{\rm cl}\, g\, \frac{dt_e}{dt_0}\, \frac{dV_c}{dz} \times \int_{M_{\rm cl,\,min}}^{M_{\rm cl,\,max}} \frac{dN_{\rm cl}^2}{dM_{\rm SF,\,cl} dM_{\rm cl}}\, dM_{\rm cl}\, dz. \quad (3)$$

- これを計算するには，検出器の観測可能体積が必要
- S/N = 8で観測できるhorizontal distance D_hも使われる。

$$R = \frac{f_{\rm GC}}{\ln(M_{\rm cl,\,max}/M_{\rm cl,\,min})}\, g\, g_{\rm cl} \int_{M_{\rm BBH,\,min}}^{M_{\rm BBH,\,max}} \frac{dM_{\rm BBH}}{M_{\rm BBH}^2} \times \int_0^{z_{\rm max}(M_{\rm BBH})} {\rm SFR}_i(z)\, F(z)\, \frac{1}{(1+z)}\, \frac{dV_c}{dz} dz, \quad (5)$$

Table 1
Event Rates Formed in the Single-cluster Channel for IMBH Binaries Potentially Observable by Advanced LIGO and the ET per year

Detector	Configuration	$R\left[\left(\frac{g}{0.1}\right)\left(\frac{g_{\rm cl}}{1/400}\right){\rm yr}^{-1}\right]$
Advanced LIGO	$\eta = 0.25,\ \chi = 0$	0.85
	$\eta = 0.25,\ \chi = 0.75$	2.36
	$\eta = 0.19,\ \chi = 0$	0.31
ET	$\eta = 0.25,\ \chi = 0$	21.5
	$\eta = 0.25,\ \chi = 0.75$	24.0
	$\eta = 0.19,\ \chi = 0$	16.8

Note. We take $g = 0.1$, $g_{\rm cl} = 1/400$ as standard scaling values.

BBHの生成はsingle-cluster channel

- Event Rateは，SFRに強く依存しない。質量比とスピンに強く依存する。

Summary

- IMBHを光学的に観測するには，VLTI, VSTやGRAVITYが必要

- z = 1でのIMBHのS/N比を見積もったところ，LIGOやVirgoで検出することはできる。ETはさらに大きなS/N比で取れる。LISAとETとの同時観測ができれば，特定のイベントを互いに補完しながら追う事ができる。

- LIGOとETがIMBHの連星を見ることができる距離を推定しました。 この量は、連星の質量比とスピンに強く依存します。 LIGOに関して，total 200~700M⊙の範囲で，等質量，スピンなしの場合、 z ～０．８まで見られ得る。

- スピンが全角運動量と有意に揃っていて（χ1,2～0.75）、到達した全質量が約400M⊙の場合、到達範囲はz～1.5に増加。