

10-30Hz 帯の影響：中間質量ブラックホール関連

中野 寛之

京大基研

Intermediate-mass black hole (IMBH)

$200 - 400 M_{\odot}$ の天体は、(金属量ゼロの Population III の星を除くと) intermediate-mass black hole (IMBH) に分類される。

M. Coleman Miller, E. J. M. Colbert によるレビュー論文
[<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0308402>] では、
 $10^2 - 10^4 M_{\odot}$ のレンジを IMBH と呼んでいる。

電磁波による観測から (1)

近年 (初めて) 観測された IMBH (HLX-1) は, $\sim 20000 M_{\odot}$

[<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2012/2012/11/full/>]

何らかのバイアスがあって, 今議論となっている質量の

IMBH は見つかりにくい可能性は無いか?

K. Yagi [<http://arxiv.org/abs/1302.2388>] より抜粋.

The distances and possible IMBH masses at the centers of galactic globular clusters.

NGC No.	distance (kpc)	(total) BH mass (M_{\odot})
5139 (ω Cen.)	4.8	$(3.0-4.75) \times 10^4$ $\leq 1.2 \times 10^4$ $(1.3-2.3) \times 10^4$
6388	10.0	5.7×10^3
6715 (M54)	26.8	9.4×10^3
6752	4.0 [?]	2.0×10^3
7078 (M15)	10.3	3.2×10^3

電磁波による観測から (2)

K. Yagi [<http://arxiv.org/abs/1202.3512>] より抜粋.

うれしい値が出ている.

The distances and velocity dispersions of galactic globular clusters. Possible masses of IMBHs, if they exist, are obtained from $M - \sigma$ relation.

NGC No.	distance (kpc)	vel. disp. σ (km/s)	BH mass (M_{\odot})
104	4.5	10.0	794.7
362	8.5	6.2	116.3
1851	12.1	11.3	1299
1904	12.9	3.9	18.04
5272	10.4	4.8	41.57
5286	11.0	8.6	433.4
5694	34.7	6.1	108.9
5824	32.0	11.1	1209
5904	7.5	6.5	140.6
5946	10.6	4.0	19.97
6093	10.0	14.5	3539
6266	6.9	15.4	4508
6284	15.3	6.8	168.6
6293	8.8	8.2	357.9
6325	8.0	6.4	132.4
6342	8.6	5.2	57.35
6441	11.7	19.5	11645
6522	7.8	7.3	224.3
6558	7.4	3.5	11.68
6681	9.0	10.0	794.7
7099	8.0	5.8	88.96

- aLIGO 観測を用いた IMBH と恒星質量のコンパクト天体の連星からの重力波に対して, D. A. Brown *et al.* [<http://arxiv.org/abs/gr-qc/0612060>] では, $\lesssim 10 - 30$ イベント/yr という見積もり.
- この論文では, 星団中で $350M_{\odot}$ くらいのもので IMBH が生成されるという R. M. O'Leary *et al.* の理論的研究 [<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0508224>] を引用.
- 後続の研究 (<http://arxiv.org/abs/0705.0285>) では, 似たようなイベントレート.
- これらの結果は, LIGO・VIRGO グループのイベントレート論文 [<http://arxiv.org/abs/arXiv:1003.2480>] でも引用.
- 上記論文では, 「While IMRIs into IMBHs more massive than $400M_{\odot}$ will be outside the Advanced LIGO-Virgo frequency band, the ringdowns following such coalescences may be detectable.」という, 少し弱気な言及をしている.

IMBH の存在の解明は...

(一般的によくイントロとして利用されるものは) 宇宙物理学では, その合体の歴史を通して, 銀河の進化や宇宙の構造形成の理解に深く利用されるであろう.

電磁波観測と異なり, IMBH の連星が存在するだけで必ず重力波が放出されるので, イベントの上限値を与えるだけでも今までに無い情報を今議論となっている質量レンジに対して得ることができる.

連星合体重力波

相対論からの理論予測からのずれを解析する方法は、修正重力理論ごとに様々な議論がされているが、例として、C. Kant Mishra *et al.* [<http://arxiv.org/abs/arXiv:1005.0304>] では、インスパイラルの波形（ポストニュートン展開の係数をパラメータ）（+Einstein telescope (ET)）を用いて、相対論からのずれを議論している。

（それぞれの修正重力理論にも依るが）相対論からのずれを意味のあるものにするためには... **理論屋の欲として**

- インスパイラルフェーズが長い（質量比が大きい系では重力波の位相を稼ぐことが可能）状況.
- 周りに降着円盤等が無いような、クリーンな環境.
- NS は状態方程式の情報も必要となるため、BH-BH 連星である方がシンプル.

相対論の検証 (2)

IMBH を含んだ系に対しての議論：

- 今議論となっている質量レンジ質量の IMBH は、電磁波で観測されていない。このことは逆に、周りに降着円盤等が無く、クリーンな環境にあることを捉えることが可能か？
- **しかし**，K. Hayasaki *et al.* [<http://arxiv.org/abs/1201.2858>] では、地上検出器に関しては、(ET できえ) 連星系の周りの降着円盤の降着率がかかなり高くても、その影響は小さい (降着円盤の影響は観測できない) という結果。
- BH-BH 連星で質量比を稼ごうと考えると、小さい方の質量を $10M_{\odot}$ とすると、大きい方は IMBH となる。
- **しかし**，「KAGRA に対して」という制限をつけると $200 - 400M_{\odot}$ はインスパイラルフェーズが短いためにベストであるとは言えない。

参考：モンタナの八木くんが、DECIGO や DPF での議論を展開。

リングダウン重力波

この波形の検出は、ブラックホールの直接観測として、とにかくうれしい。

IMBHからのリングダウン重力波の検出で、BHの質量・スピンの精度良く決まるような状況であれば、no hair theoremの検証ができるのでは？

no hair theoremを議論するためには、リングダウンの1つのモードだけでなく他のモードも検出して、相対論（カーブラックホール）に無矛盾かを調べる必要がある。

相対論の検証 (4)

リングダウンの中心周波数と Q 値 :

$$f_c \simeq 32\text{kHz} [1 - 0.63(1 - a)^{0.3}] \left(\frac{M}{M_\odot} \right)^{-1}, \quad Q \simeq 2.0(1 - a)^{-0.45}.$$

(基本モード, $l = 2, m = 2$ モード)

M はブラックホールの質量, $|a| \leq 1$ は (無次元) スピンパラメータ.

数値相対論等で良く出てくるスピンパラメータ「0.7」に対して, $500M_\odot$ ($200M_\odot$) とすると, 基本モードは $\sim 36\text{Hz}$ (90Hz), 次のモード ($l = 3, m = 3$ モードとして, 1.5 倍くらい) は $\sim 54\text{Hz}$ (135Hz) となる.

次のモードは基本モードより励起されにくいために良く見えるようにしたいという目論見.

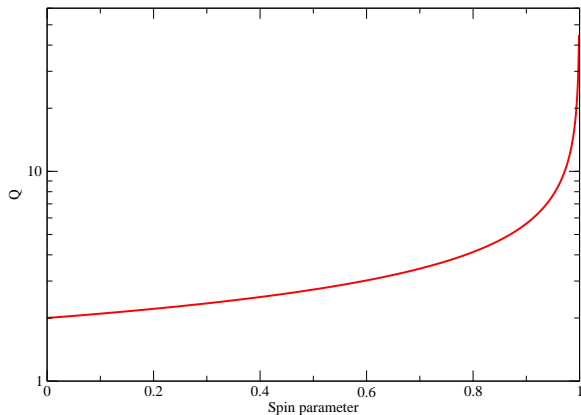
* 例として, Z. Zhang et al. [<http://arxiv.org/abs/1305.4306>] では, (励起の仕方にも依存するが) 次のモードの振幅は, 基本モードの 10% 程度となっている.

- $200 - 400 M_{\odot}$ の IMBH は，現在観測されていない.
- 宇宙物理学的には，ブラックホール形成史.
- 相対論の検証としては，IMBH のリングダウンは理想的.

付録：リングダウンのQ値

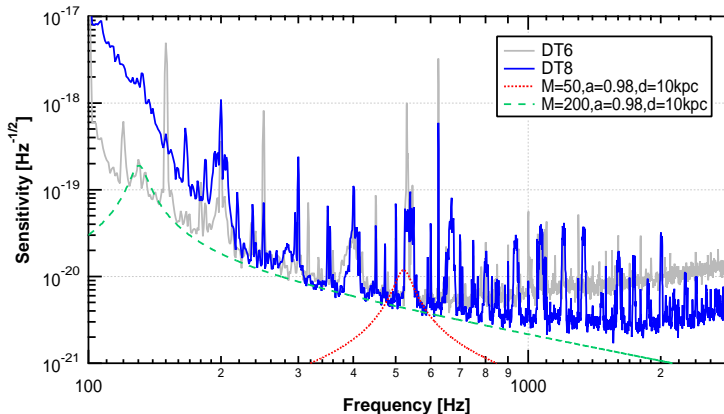
$$h(f_c, Q, t_0, \phi_0; t) = e^{-\frac{\pi f_c (t-t_0)}{Q}} \cos(2\pi f_c (t-t_0) - \phi_0) \quad t \geq t_0,$$

$$Q = 3.44 \ (a = 0.7), \quad Q = 11.6 \ (a = 0.98), \quad Q = 32.8 \ (a = 0.998)$$



観測的には、どれくらいのスピンパラメータが多いかは？

付録：リングダウンの信号とノイズ



昔、常定くんにより作成されたプロット。Tsunesada *et al.*
[<http://arxiv.org/abs/gr-qc/0410037>] より抜粋。