Prospects of Detecting the Nonlinear Gravitational Wave Memory

ICRR輪講　2019/7/1

大柿　航

●概要

・“nonlinear memory effect”の観測可能性についての最近(2019/2)の論文。

・重力波の振動成分は大分身近になったし、非振動成分であるmemory effectに目を向けていこうじゃないか。

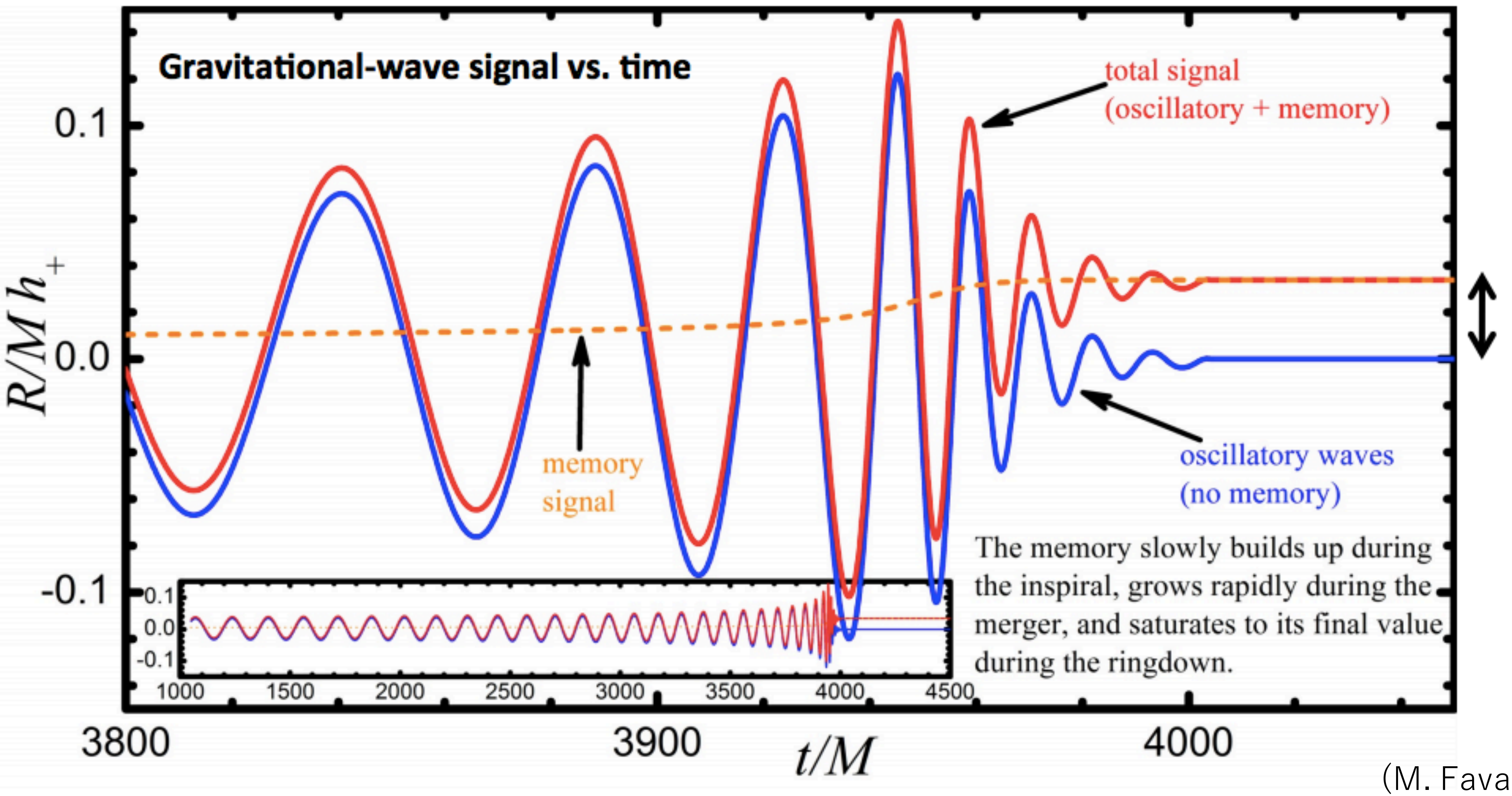
・GW150914-likeな波形とそれに付随するmemory effectを数値計算し、現在から次世代に渡る各検出器でのSNRを示している。

●memory effectとは？

「重力波の通過後、永続的に有限な変位が残る現象」

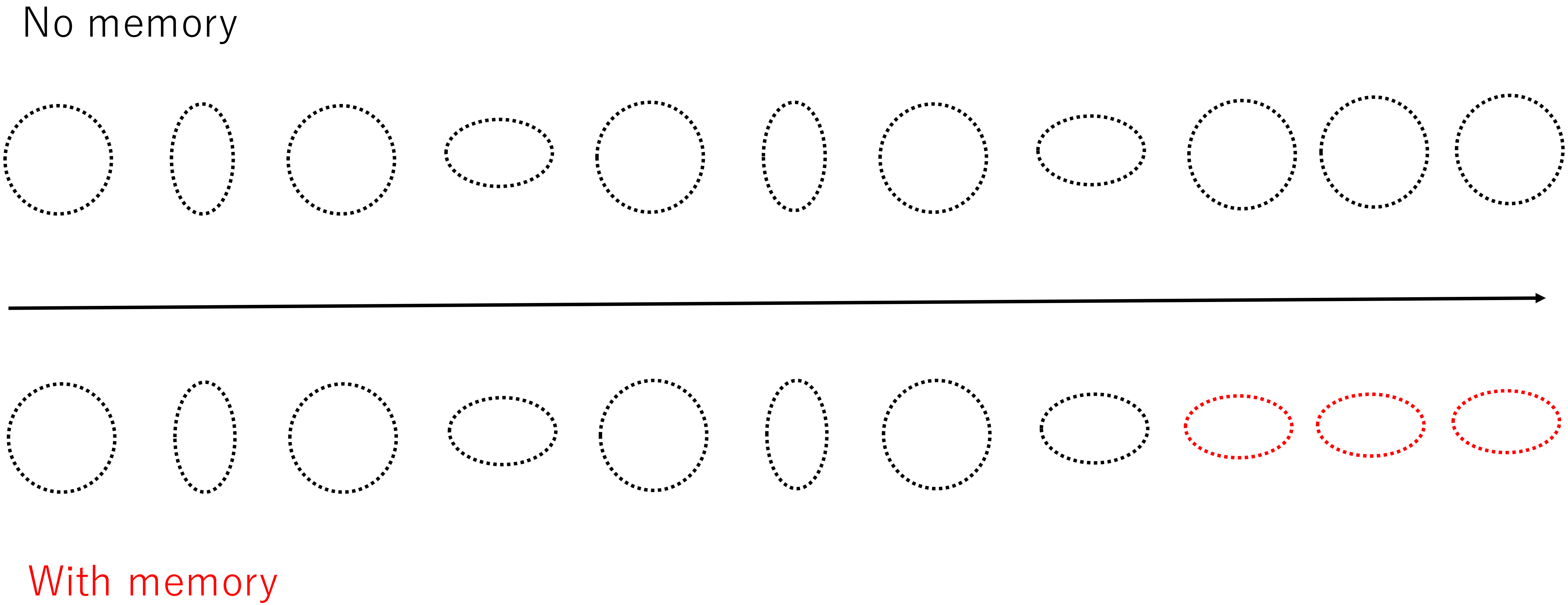
「重力波の通過前後で、strainが異なる現象」

$$\boxed{\Delta h^{\mathrm{mem}}_{+,\times} = \lim_{t\to+\infty} h_{+,\times}(t) - \lim_{t\to-\infty} h_{+,\times}(t) \neq 0}$$

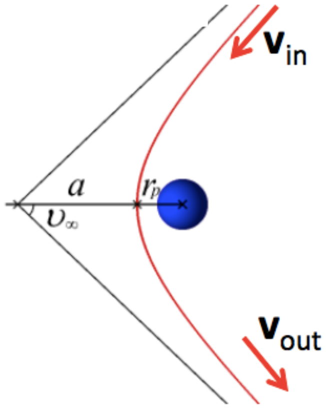


(M. Favata)

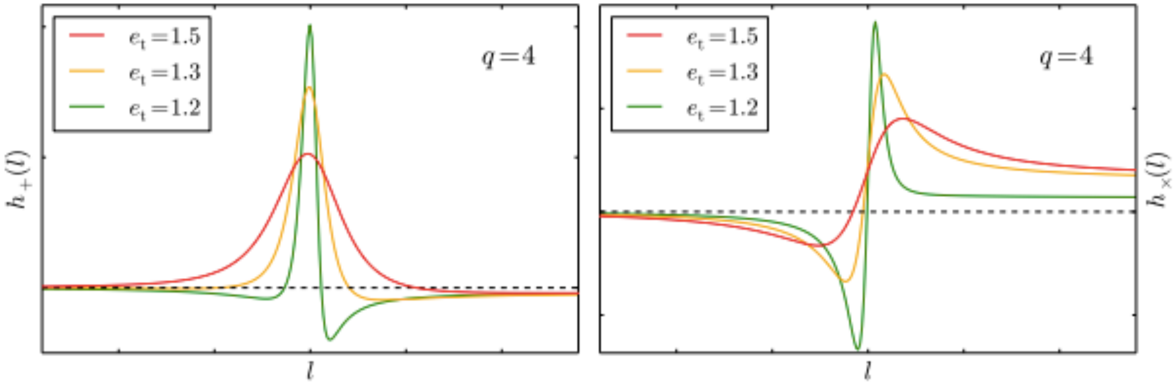
0を平均に振動する普通の重力波に、成長するDC offsetが加わるようなかんじ。


No memory
With memory

- 歴史的には、unboundなsystemにおいてまず**linear**なmemory effectが発見されていた。(Braginsky & Thorne ’87)
- 例えばhyperbolicな2体散乱。
- 始状態と終状態の速度の変化がmemoryになる。



$$\Delta h^{\rm TT}_{jk} = \frac{2}{R}\Delta(\ddot{\mathcal{I}}^{\rm TT}_{jk})$$



(L. De Vittori et al. ‘14)

$$\ddot{\mathcal{I}}^{\rm TT}_{jk} = 2\mu\left[\dot{x}_j\dot{x}_k - \frac{M}{r^3}x_j x_k\right]^{\rm TT}$$

$$\Delta h^{\rm TT}_{jk} = \frac{4\mu}{R}\Delta[\dot{x}_j\dot{x}_k]^{\rm TT}.$$

$$\boxed{\Delta h^{\rm TT}_{ij} = \Delta\sum_{A=1}^{N}\frac{4M_A}{R\sqrt{1-v_A^2}}\left[\frac{v_A^j v_A^k}{1-\boldsymbol{N}\cdot\boldsymbol{v}_A}\right]^{\rm TT}}$$

linear memory effectの一般的な表式

・**nonlinear** memory effectは、**”重力波自身が生む重力波”**（波じゃないけど）。

・最初はChristodoulou(数学の人)が1991年に導出。

・重力波のエネルギー運動量自身を源とするEinstein eq.を解くことで導かれる。(Wiseman & Will ‘91)

今は重力波のEM自身を源とする

relaxed Einstein eq. $\Box\bar{h}^{\mu\nu} = -16\pi(T^{\mu\nu} + \boxed{t^{\mu\nu}})$

$$T^{gw}_{jk} = \frac{1}{r^2}\frac{d^2E}{dt'd\Omega'}\xi_j\xi_k$$

$$\bar{h}^{jk} = 4\int \frac{T^{jk}_{\mathrm{gw}}(t' - |\mathbf{x}-\mathbf{x}'|, \mathbf{x}')}{|\mathbf{x}-\mathbf{x}'|}$$

$$\boxed{h^{\mathrm{TT}}_{jk} = \frac{4}{r}\int_{-\infty}^{t} dt' \int \frac{d^2E}{dt'd\Omega'}\left(\frac{\xi_j\xi_k}{1-\cos\theta'}\right)^{\mathrm{TT}} d\Omega'.}$$

nonlinear memory の一般的な表式

私の鈍感さゆえ長い間
見落としていたんだ ><

(Thorne '91)

・linear memory とnonlinear memoryは無関係じゃない。

・nonlinear memoryは、重力波を媒介するgraviton多体系のlinear memoryだと理解することができる！

$$\Delta h_{ij}^{\mathrm{TT}} = \Delta \sum_{A=1}^{N} \frac{4M_A}{R\sqrt{1-v_A^2}} \left[\frac{v_A^j v_A^k}{1-\boldsymbol{N}\cdot\boldsymbol{v}_A} \right]^{\mathrm{TT}}$$

$$\frac{M_A c^2}{\sqrt{1-v_A^2}} \to E_A$$

$$v_A^j \to c n_A^j$$

$$h_{jk}^{\mathrm{TT}} = \frac{4}{r} \int_{-\infty}^{t} dt' \int \frac{d^2 E}{dt' d\Omega'} \left(\frac{\xi_j \xi_k}{1-\cos\theta'} \right)^{\mathrm{TT}} d\Omega'.$$

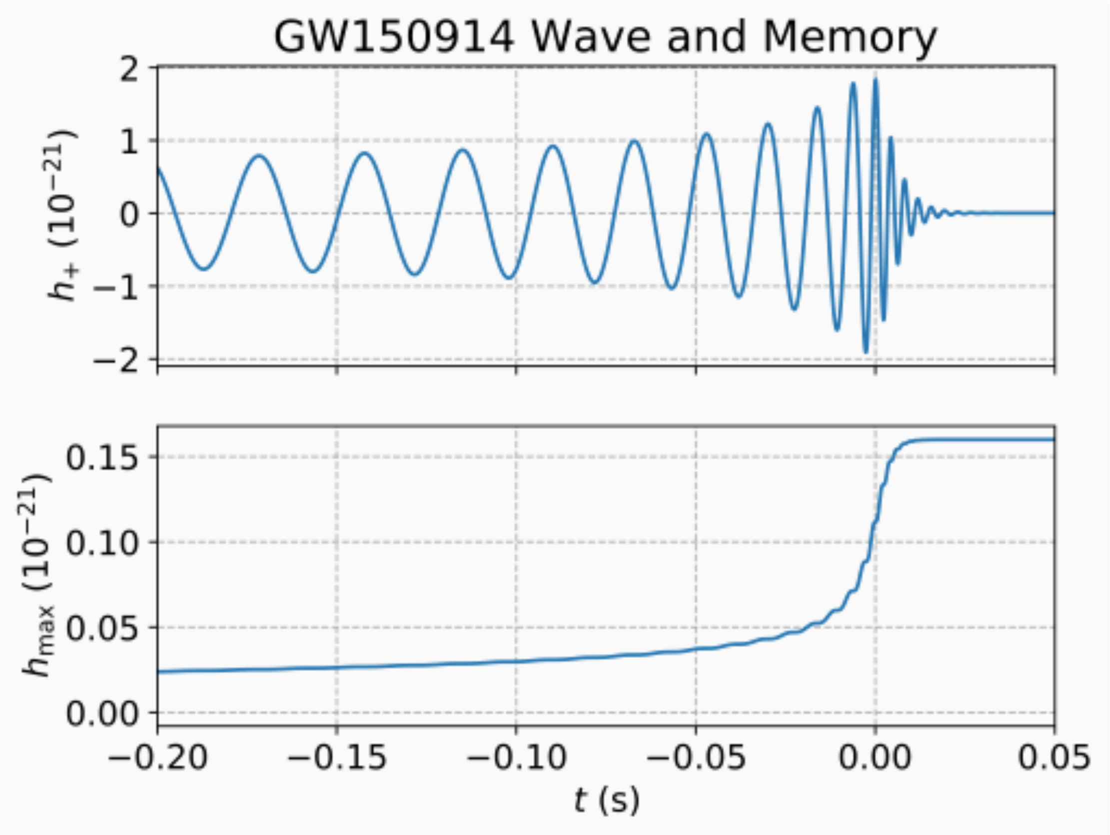
●この論文の仕事

・GW150914-likeな波形と、それに付随すると期待されるmemory effectを数値相対論の手法で計算した。

・memory effect が最大化されるようにbinaryから検出器への最善の方向とinclinationを仮定すると、結局memory effectは右のように書ける。

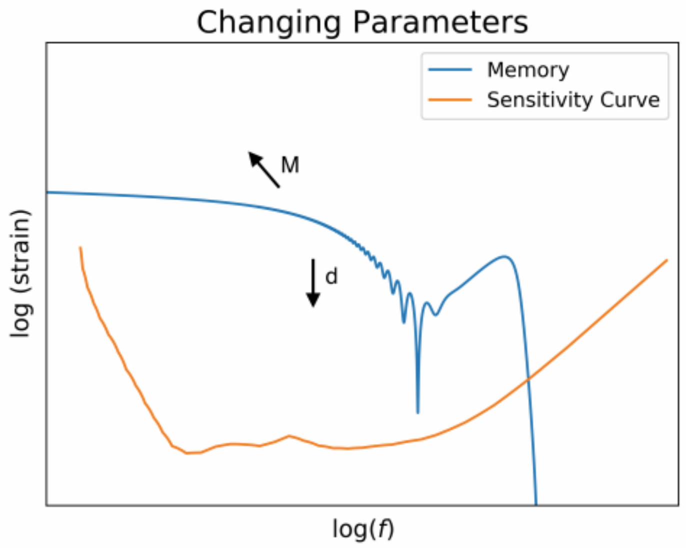
(waveform generated with SEOBNRv4 using PyCBC and LAL)

$$h_{\max}(t) = \frac{r}{4\pi}\int_{-\infty}^{t} dt' \dot{h}_{+}^{2}$$



- 各検出器でのSNRも計算した。
- memory effectに対しての感度ってどうやって決まるの？
- build upの部分があることを見た。そのタイムスケールが $\tau \approx 1/f_{\rm opt}$ ($f_{\rm opt}$ は検出器の最高感度周波数)であれば良い感度が得られることになる。
- 現代の検出器ではGW150914-likeなイベントに対するmemory effectの観測可能性は低いので、質量と距離をもっといろいろ変えてみた。

Detector	SNR	Detector	SNR
AdV	0.238	eLISA	0.025
aLIGO	0.450	LISA	0.214
KAGRA	0.243		
ET	9.726	DECIGO	96.53
CE	27.73	BBO	177.2



~シミュレーション結果 鑑賞~

●まとめ

・nonlinear memory effectは重力波自身が生み出す非振動成分で興味深い。天体現象の理解を深める手がかりになるかもしれない。

・現在の重力波検出器ではどれもmemory effectの検出可能性は無いに等しいが、将来の第3世代ground basedやspace basedやpulsar timing arrayなどは、それぞれ異なる周波数帯で検出が十分期待できる感度を持つ。

・BNSのmemoryにも感度のある検出器からは、中性子星の状態方程式の理解も進むかもしれない。

・memory effectがgravitonの描像で記述できることから、massive gravityの検証なんかにも使えるかもしれない。