重力波を使った重力理論の検証



(C. Henze/NASA Ames Research Center)



はじめまして

東大宇宙線研 重力波観測研究施設



KAGRAデータ解析サブシステム(DAS) 連星合体重力波のパラメータ推定担当

新学術領域「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」 (平成24-28年度) [代表: 中村卓史] AO4班「重力波データ解析」

新学術領域「重力波物理学・天文学: 創世記」 (平成29-33年度) [代表: 田中貴浩] <u>B01班「中性子星連星合体」</u>[代表: 田越秀行]



- ・コンパクト連星合体から放出される重力波
- ・重力波データ解析:パラメータ推定
- ・重力波を使った重力理論の検証
 - LIGO-Virgoの研究
 - 我々の研究:重力子振動の検証
- ・将来展望:KAGRAの期待される寄与



- ・アインシュタイン方程式を平坦な計量まわりで線形展開.
- ・時空のゆらぎが波動方程式に従う.
- ・光速度で伝搬する横波
- ・振動の方向が45度ずれた2つの 偏極成分を持つ.

重力波の生成

- ・波源の四重極モーメントが時間変化
- →重力波の生成
- 例: コンパクト連星合体(CBC)

重力波の検出

- ・レーザー干渉計型重力波望遠鏡
- ・理論波形: ポスト・ニュートニアン近似, 数値相対論, ブラックホール摂動
- ・データ解析: マッチド・フィルタリング, MCMC

$$\eta^{\mu\nu} \partial_{\mu} \partial_{\nu} h_{ij}^{\text{TT}} = \left(-\frac{\partial^2}{c^2 \partial t^2} + \Delta \right) h_{ij}^{\text{TT}} = 0$$



レーザー干渉計型重力波望遠鏡

In the LIGO facility, a laser beam is split to travel down two perpendicular 4-kilometre tunnels. The beams then reflect back and forth before being recombined at the detector.

4-km-long arm



Normally, the two light beams travel paths of identical lengths, so that they cancel each other out when they recombine at the detector.



When a gravitational wave passes LIGO, the tunnels deform slightly and the distance travelled by each beam changes so that they no longer cancel out. This produces a measurable signal at the detector.



http://www.nature.com/news/physics-wave-of-the-future-1.15561

重力波望遠鏡ネットワーク

LIGO is partnering with similar observatories around the world so that any signal can be independently verified, and its source triangulated.



http://www.nature.com/news/physics-wave-of-the-future-1.15561



日本産の重力波望遠鏡 「かぐら」

現在建設中 2018年から本格的 に観測をはじめる。



「かぐら」の特徴 地下:地面振動を減らす。 低温:熱雑音を減らす。

ICRR, NAOJ, KEK, etc.

重力波観測計画と予想感度



KAGRAはLIGO-3rd Observation run (O3)参加を目指す.

重力波望遠鏡の感度



Black Holes of Known Mass

重力波望遠鏡で観測された重力波イベントのブラックホール達



連星中性子星合体から放出された重力波: GW170817





コンパクト連星合体から放出される重力波波形





インスパイラル期:ポスト・ニュートニアン波形

$$\begin{split} \tilde{h}_{\rm GR}(f) &= \mathcal{A}(f)e^{i\Phi(f)} \qquad (\forall/c)^{2n}: \text{n-PN頃} \\ \hline \textcircled{\mbox{$\stackrel{\circ}{\rm GR}$}(f) &= 2\pi ft_{\rm c} - \Phi_{\rm c} + \sum_{k=0}^{7} \left[\psi_{k} + \psi_{k}^{\log}\log(u)\right] u^{k-5}, \\ \Phi(f) &:= 2\pi ft_{c} - \Phi_{c} - \frac{\pi}{4} + \frac{3}{128}u^{-5} \left\{1 + \left(\frac{3715}{756} + \frac{55}{9}\eta\right)\eta^{-2/5}u^{2} - 16\pi\eta^{-3/5}u^{3} \right. \\ &+ \left(\frac{15\ 293\ 365}{508\ 032} + \frac{27\ 145}{504}\eta + \frac{3085}{72}\eta^{2}\right)\eta^{-4/5}u^{4} + \left(\frac{38\ 645}{756} - \frac{65}{9}\eta\right)\left[1 + \ln\left(\frac{y}{y_{\rm ISCO}}\right)\right]\pi\eta^{-1}u^{5} \\ &+ \left[\frac{11\ 583\ 231\ 236\ 531}{4\ 694\ 215\ 680} - \frac{640}{3}\pi^{2} - \frac{6848}{21}\gamma_{\rm E} - \frac{6848}{63}\ln(64\eta^{-3/5}u^{3}) \right. \\ &+ \left(-\frac{15\ 737\ 765\ 635}{3\ 048\ 192} + \frac{2255}{12}\pi^{2}\right)\eta + \frac{76\ 055}{1728}\eta^{2} - \frac{127\ 825}{1296}\eta^{3}\right]\eta^{-6/5}u^{6} \\ &+ \left(\frac{77\ 096\ 675}{254\ 016} + \frac{378\ 515}{1512}\eta - \frac{74\ 045}{756}\eta^{2}\right)\pi\eta^{-7/5}u^{7} \right\}, \end{split}$$

$$u=(\pi \mathcal{M}_{c}f)^{1/3}$$
 で展開できる.
チャープ質量 $\mathcal{M}:=(m_{1}m_{2})^{3/5}/(m_{1}+m_{2})^{1/5}$

マッチド・フィルタリング - 波形の相関解析

15



n: 雑音 h_{true}: 真の信号 重力波望遠鏡の出力

data: s=n+h_{true}

理論予想テンプレート: h

データとテンプレートの雑音重みつき 内積

$$\rho = (s, \hat{h}) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} df \frac{\tilde{s}(f)\hat{h}^*(f)}{S_n(f)}$$

Sn(f): 雑音の片側パワースペクトル密度 h∝s であれば, ρは最大になる.

重力波のベイズ的パラメータ推定

- ・多変量パラメータ,確率分布の関数形を仮定しない
- ・パラメータ推定
- ・モデル選択



H: 仮説, {d}: データセット, θ : パラメータ $\vec{\theta} = \{\mathcal{M}, \eta, \iota, D_{\mathrm{L}}, t_{\mathrm{c}}, \phi_{\mathrm{c}}, \alpha, \delta, \psi\}$

事後分布とエヴィデンスとMarkov chain Monte Carlo method, Nested sampling, MultiNest/BAMBI (LSC Algorithm Library (LAL), LALInference)で計算.



パラメータ推定結果







どちらのモデルがデータをより良く描写しているか? ベイズ因子 仮説のエビデンスの比 $B_{\rm MG,GR} = \frac{Z_{\rm MG}}{Z_{\rm GR}}$

ベイズ因子の値が大きいほど, そのモデルがより強く好まれる.

$2\log B_{XY}$	Evidence for model X				
< 0	Negative (supports model Y)				
0 to 2	Not worth more than a bare mention				
2 to 5	Positive				
5 to 10	Strong				
>10	Very Strong				



- ・GRはこれまですべての検証をパスしてきた. しかし, GRは「The 重力理論」なのか?
- ・GRは完璧ではない.
 - ・ブラックホール特異点 ← 非物理的!
 - ・力の統一, 重力の量子化
 - ・宇宙の加速膨張 → ダークエネルギー or 重力の修正?

- 「The 重力理論」へのヒント
 - ・理論:構築して安定性チェック.
 - ・観測:GRの破れを探す. GRで説明できない現象を探す.







[c.f., Psaltis, LRR, 2008]

重力波を使った重力理論の検証

- ・LIGO-Virgoによる研究
 - ・GRからのずれ
 - ・重力子の質量
 - ・重力波の伝搬速度
- ・我々の研究
 - ・双重力モデルにおける重力子振動
 - ・将来, KAGRAの寄与が期待される研究
 - ・重力波の偏極モード

Parametrized post-Einsteinian フレームワーク

$$\tilde{h} = \tilde{h}_{\rm GR} \exp[i\beta u^b]$$

[Yunes & Pretorius, PRD 2009]

GRのポスト・ニュートニアン波形

GIMR

 $\tilde{h}_{\rm GR}(f) = A_{\rm GR} e^{i\tilde{\Psi}_{\rm GR}^{(f)}(f)}$

位相:

$$\Psi_{\rm GR} = 2\pi f t_{\rm c} - \Phi_{\rm c} + \sum_{\substack{k \equiv 0 \\ \varphi_j \equiv \varphi_j}} \left[\psi_k + \psi_k^{\log} \log(u) \right] u^{k-5},$$

$$u = (\pi M_c f)^{1/3}$$
 で展開できる.

$$\hat{\varphi}_j \equiv \varphi_j^{GR} (1 + \delta \hat{\varphi}_j)$$

多くのモデルはppEフレームワークに包含される

 $\tilde{h}(f) = \mathcal{A}(f)e^{i\Phi(f)}\left(1 + \alpha_{\rm ppE}u^{a_{\rm ppE}}\right)\exp[i\beta_{\rm ppE}u^{b_{\rm ppE}}]$

$$u = (\pi \mathcal{M}_c f)^{1/3}$$

Theory	$lpha_{ m ppE}$	$a_{\rm ppE}$	$eta_{ ext{ppE}}$	$b_{ m ppE}$
Jordan–Fierz– Brans–Dicke	$-\tfrac{5}{96}\tfrac{S^2}{\omega_{\rm BD}}\eta^{2/5}$	-2	$-rac{5}{3584}rac{S^2}{\omega_{ m BD}}\eta^{2/5}$	-7
Dissipative Einstein-Dilaton- Gauss–Bonnet Gravity	0	•	$-rac{5}{7168}\zeta_3\eta^{-18/5}\delta_m^2$	-7
Massive Graviton	0		$-\frac{\pi^2 D \mathcal{M}_c}{\lambda_g^2 (1+z)}$	-3
Lorentz Violation	0		$-\frac{\pi^{2-\gamma_{\rm LV}}}{(1-\gamma_{\rm LV})}\frac{D_{\gamma_{\rm LV}}}{\lambda_{\rm LV}^{2-\gamma_{\rm LV}}}\frac{\mathcal{M}_c^{1-\gamma_{\rm LV}}}{(1+z)^{1-\gamma_{\rm LV}}}$	$-3\gamma_{\rm LV}-3$
G(t) Theory	$-\frac{5}{512}\dot{G}\mathcal{M}_c$	-8	$-rac{25}{65536}\dot{G}_c\mathcal{M}_c$	-13
Extra Dimensions	•	•	$-\frac{75}{2554344}\frac{dM}{dt}\eta^{-4}(3-26\eta+24\eta^2)$	-13
Non-Dynamical Chern–Simons Gravity	$lpha_{ m PV}$	3	$\beta_{ m PV}$	6
Dynamical Chern– Simons Gravity	0	•	$eta_{ m dCS}$	—1

[Yunes & Siemens, LRR 2013; See Yunes, Yagi, Pretorius, 2016]



重力子の質量への制限

・有質量重力子モデル

$$E^2 = p^2 v_g^2 + m_g^2 c^4$$

 $v_g^2/c^2 \simeq 1 - \frac{h^2 c^2}{\lambda_g^2 E^2}$ $\lambda_g = \frac{h}{m_g c}$

・重力波位相への影響

$$\Delta \Phi = -\frac{\pi^2 DM}{\lambda_g^2 (1+z)}$$



連星中性子星合体: GW170817/GRB170817





重力波の伝搬速度

GWとEMの到着時間の差

D/v_Gw-D/v_{EM}=Δt=1.7秒

GWとEMの伝搬速度の差

 $V_{GW}-V_{EM}=:\Delta V$

- ・GWとEMは同時に放出されたが、GWが1.7秒速かった→上限
- ・GWが10秒先に放出されたが, EMに1.7秒差まで追い上げられた→下限

$$-3 \times 10^{-15} \le \frac{\Delta v}{v_{\rm EM}} \le 7 \times 10^{-16}$$

修正重力理論の制限へのインパクト

$$-3 \cdot 10^{-15} \le c_g/c - 1 \le 6 \cdot 10^{-16}$$

$c_g = c$			$c_g \neq c$		
	General Relativity		quartic/quintic Galileons [13, 14]		
Horndeski	quintessence/k-essence [42]		Fab Four $[15, 16]$		
	Brans-Dicke/ $f(R)$ [43, 44]		de Sitter Horndeski [45]		
	Kinetic Gravity Braiding [46]		$G_{\mu\nu}\phi^{\mu}\phi^{\nu}$ [47], Gauss-Bonnet		
	Derivative Conformal (20) [18]		quartic/quintic GLPV [19]		
[pu	Disformal Tuning (22)		DHOST [20, 48] with $A_1 \neq 0$		
beyo	DHOST with $A_1 = 0$				
	Viable after GW170817		Non-viable after GW170817		

Ezquiaga-Zumalacarregui 1710.05901

双重力モデルにおける重力子振動の制限

TN, H. Tagoshi, T. Tanaka, T. Nakamura, J. Veitch, W. Del Pozzo, A. Vecchio

重力波イベントの実データを使って, 重力理論の具体的なモデルを制限する.

Massive gravity: history

Simple question: Can graviton have mass? May lead to acceleration without dark energy



[向山さんのスライド]

de Rham-Gabadadze-Tolley有質量重力モデル

dRGTは有質量重力の安定なラグランジアンをみつけた.



[Hassan & Rosen 2012 JHEP1202,126]

dRGT有質量重力モデルに基づき, gを動的に昇進.

 $\mathcal{L} = \frac{M_{\rm G}^2}{2} \sqrt{-g} R(g) + \frac{\kappa M_{\rm G}^2}{2} \sqrt{-\tilde{g}} \tilde{R}(\tilde{g}) - m^2 M_{\rm G}^2 \sqrt{-g} V(\sqrt{g^{-1}\tilde{g}}) + \sqrt{-g} \mathcal{L}_{\rm m}$ physical sector hidden sector coupling term matter

双重力モデルのおける重力子振動

双重力モデル "普通の"質量ゼロの重力子に加えて, "隠れた"有質量の重力子がある. ("隠れた"重力子は"普通"の重力子と相互作用し, 重力を通してその影響を調べられる.) 重力子振動 ニュートリノ振動のように, 2種類の重力子が伝播中に状態間を振動. GR 重力子振動による補正

$$h(f) = \mathcal{A}(f)e^{i\Phi(f)} \left[B_1 e^{i\delta\Phi_1(f)} + B_2 e^{i\delta\Phi_2(f)} \right]$$



δh_{Bimetric}

シンプルなパラメータ化(ppE)ではカバーするのが難しいクラスの波形.

特徴的物理量:重力子質量 μ(うなりの振動数を決定する)

重力定数の補正 κξ_c² (混合角 θ_gを決定する)

De Felice, Nakamura, Tanaka (DFNT), PTEP 2014. TN et al., PRD 91, 062007 (2015).

重力子振動の特徴的ふるまいとパラメータ

$$h(f) = \mathcal{A}(f)e^{i\Phi(f)} \left[B_1 e^{i\delta\Phi_1(f)} + B_2 e^{i\delta\Phi_2(f)} \right]$$

特徴的ふるまい

立相補正:
$$\delta\Phi_i(f;\mu,\kappa\xi_c^2,D_{\rm L})$$

$$\delta\Phi_{1,2} = -\frac{\mu D_L \sqrt{\tilde{c} - 1}}{2\sqrt{2x}} \left(1 + x \mp \sqrt{1 + x^2 + 2x} \frac{1 - \kappa\xi_c^2}{1 + \kappa\xi_c^2} \right)$$

振幅補正: $B_i(f; \theta_g(\mu, \kappa \xi_c^2), \rho_{gal})$

混合の度合い $B_1 = \cos \theta_g (\cos \theta_g + \sqrt{\kappa}\xi_c \sin \theta_g)$ $B_2 = \sin \theta_g (\sin \theta_g - \sqrt{\kappa}\xi_c \cos \theta_g)$

特徴的パラメータ

- ・重力子の有効質量: μ
- ・重力定数の修正: κξ_c²



予想: 重力子振動の検出可能性

重力子振動が地上レーザー干渉計で検出可能であることを示した. 重力子質量に強い上限を与えられる可能性を示した.









SNRが大きいイベントほど, 振幅補正への制限が強い. 波形が長くてSNRが大きいイベントほど, 位相補正への制限が 強い.

KAGRAの期待される寄与

- ・位置推定の向上
- ・全天カバー率の向上
- ・偏極モードの分離

LIGO-3rd Observation run (O3)参加に向けて 「KAGRAがサイエンスの成果を挙げられる感度はどれくらいか?」 取り組み中.

位置推定の向上

BNS (1.4,1.4), 200Mpc, 軌道傾斜角 i=30°



全天カバー率の向上

連星中性子星, Face on @160Mpc



90% confidence regions

位置推定が難しい天球位置がある(×).

ほとんどの天球位置がカバーできる.

Fairhurst's slide (2012)

重力波の偏極モード

偏極モード(+,x)の検証には4台以上の望遠鏡が必要.

KAGRAが必須となる科学的成果.

重力理論への新しい質の検証.



まとめ

- ・コンパクト連星合体から放出される重力波
- ・重力波データ解析:パラメータ推定
- ・重力波を使った重力理論の検証
 - LIGO-Virgoの研究
 - 我々の研究:重力子振動の検証
- ・将来展望:KAGRAの期待される寄与
- ・重力波を使った重力理論の検証は、はじまったばかり.
- ・SNRの大きいイベントが待たれる.
- ・イベント数が増えると,統計的議論が進む.
- ・KAGRAの寄与が期待される.

補足スライド

重力波の偏極モード

5つの未知パラメータ:

- h₊(t), h_×(t)
- 波源の天球位置を表す角度(θ, φ)
- 偏極角 ψ

観測で得られる量 $h(t)=F+(\theta,\phi;\psi)h+(t)+F\times(\theta,\phi;\psi)h\times(t)$

- 1台望遠鏡の場合, h(t)のみ.
- 2台望遠鏡の場合, h1(t), h2(t), T12
- 3台望遠鏡の場合, h1(t), h2(t), h3(t), T12, T23

しかし, 2台のLIGO望遠鏡はほとんど平行に作られたので, ほぼ同じ偏極の 情報しか得られない. よって, 4台目のKAGRAが重要.

偏極の分離は距離-軌道傾斜角の縮退を改善する: $h_{+} \propto (1 + (\cos i)^2) / (2 d_L), \qquad h_{\times} \propto (\cos i) / d_L$