

2013年7月7日から12日までの6日の間、ワルシャワ大学で行われた Amaldi10GR20 会議に参加させて頂きました。会議に参加したモチベーションと学んだ内容をまとめます。

参加のモチベーションと参加概要

今回の会議は可能な限り広い範囲の講演に参加するつもりで会議に臨んだ。私の研究テーマである重力波のデータ解析によって分かる様々な天体现象を理解するため、あるいは重力波によって何が分かるのかを知るため、参加分野を絞らない事にした。

この会議は主にオーラル発表のプレナリーレクチャーとパラレルセッション、ポスターセッションに分けて発表が行われた。以下で参加したセッションの概要と感想を述べる。

プレナリーレクチャー、パラレルセッション

Tadashi Takayanagi

“Entanglement Entropy and the Gravity/Condensed Matter Correspondence”

宇宙論についての知識を深める為、このセッションについてまとめることにした。

このレクチャーでは大きく二つの事に言及していた。それは **Entanglement Entropy(EE)** とホログラフィック双対性である。

EE の概要は次のようなものだった。事象の地平線の内側と外側で、エンタングル状態であるような粒子を考える。地平線の内側の粒子だけ観測しない(数学的にはトレースアウト)としたとき、フォンノイマンエントロピーを地平線の外側の **EE** と定義する。

次にホログラフィック双対性への言及の概要を述べる。ホログラフィック双対性とは、「**d+2** 次元の量子重力理論と **d+1** 次元の非重力理論の等価性」を示唆する性質である。例として AdS/CFT 対応を挙げている。AdS/CFT 対応は「**d+2** 次元の AdS における重力(紐理論)と **d+1** 次元の実数空間における共形場理論(CFT)の等価性」を示唆している。

更に言及して Bekenstein-Hawking の BH エントロピーと、AdS/CFT に基づいた **EE** の対応について述べていた。前者後者共に境界面に依存した量である等、様々な類似点が見られる。この研究により BH 内部の情報が、境界線を観測する事で得られる情報から見て取れる事が説明出来るようになる。

Mark Hannam

“When can gravitational-wave observations distinguish between black holes and neutron stars?”

連星からの重力波を解析することで連星の情報がどこまで分かるのか、という事に興味があったため、このセッションに参加した。

このセッションは連星の重力波を、それぞれの質量、スピンの3つのパラメーターを評価することで、それがどんな連星なのかを判別しようという内容だった。中性子星連星(BNS)、BH連星(BBH)、中性子星BH連星(NSBH)の3つに分類しようという話である。解析の設定は公転の回転軸と同じ向きに自転をしている連星からのGWを、aLIGOによりS/Nが10-20で検出したという状況である。

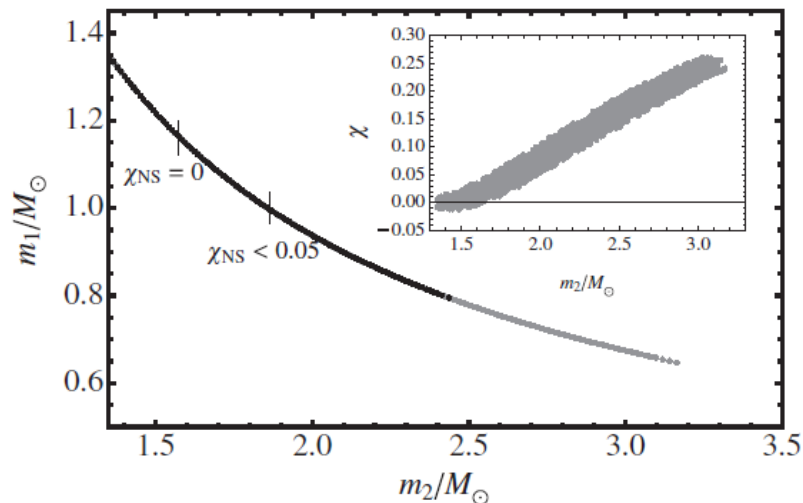


Figure 1. 90% confidence region around a $1.35\text{--}1.35 M_{\odot}$ BNS system at S/N 10 (gray) and S/N 20 (black) in the zero-detuned high-power configuration of aLIGO. The vertical bars indicate where the S/N 10 confidence region would be truncated if we restrict to non-spinning NSs, and if we restrict to NS spins less than 0.05. The inset shows the total effective spin $\chi = (m_1\chi_1 + m_2\chi_2)/(m_1 + m_2)$ of the waveforms, with respect to the mass of the larger body.

Mark Hannam et al. / *The Astrophysical Journal Letters*, 766:L14 (5pp), 2013

はじめにスピンを考えない場合の中性子星連星について述べている。Figure1は中性子星の典型的な質量である $1.35M_{\odot}$ (太陽質量)のNSからなる連星について示した図である。縦軸、横軸がそれぞれの質量となっている。 $1.35M_{\odot}$ から始まり、S/Nが20、10である領域をそれぞれ黒線、灰線で表している。しかしこれらの条件においても観測で見つかっていない質量領域のBHを考えると、BNSと断定できなくなる。

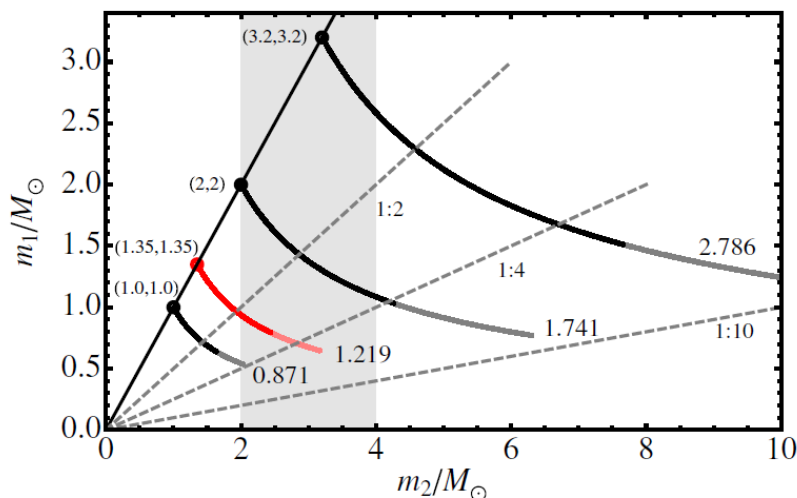


Figure 2. 90% confidence regions for a number of different non-spinning compact-binary configurations; see the text for interpretation. The number at the end of each confidence region is the chirp mass of the binary. The gray shaded region indicates the current observational mass gap.

(A color version of this figure is available in the online journal.)

Mark Hannam et al. / The Astrophysical Journal Letters, 766:L14 (5pp), 2013

Figure2 も同様にしてスピンがない場合の BNS に言及した図である。灰色の領域は観測で見つかっていない中間質量 BH の質量領域である。NS の質量はおよそ $1\sim 3M_{\odot}$ と考えられている。上図では観測で見つかっている最低質量～最大質量の $1\sim 2M_{\odot}$ と、理論的に予想されている最大質量 $3.2M_{\odot}$ の場合も表されている。

一方で $3M_{\odot}$ 以上 BH も存在すると考えられている。その為連星の一つが NS であると言っても、もう片方が BH か NS かの判断が、aLIGO でも難しいとのことだった。だがチャープマス $\mathcal{M} = (m_1 m_2)^{3/5} / (m_1 + m_2)^{1/5}$ が $2M_{\odot}$ 以上である時は、BNS だと断言できるらしい。

下図の Figure3 では BHBH 連星である時の領域が示されている。この図から見て取れるように、Merger – ringdown の効果を考慮すれば各々の質量が $5.7M_{\odot}$ 以上であるとき BBH だと言えるとのことだった。

以上の事から連星による重力波信号を、特に BNS であるか NSBH であるかを断定する為には多くの問題がつかまとう事が分かった。今回のアプローチではスピンが減少していく効果を考慮していなかったが、それを取り込むともっと複雑になるらしい。そして BNS、NSBH の判定は更に困難となるとの事だった。

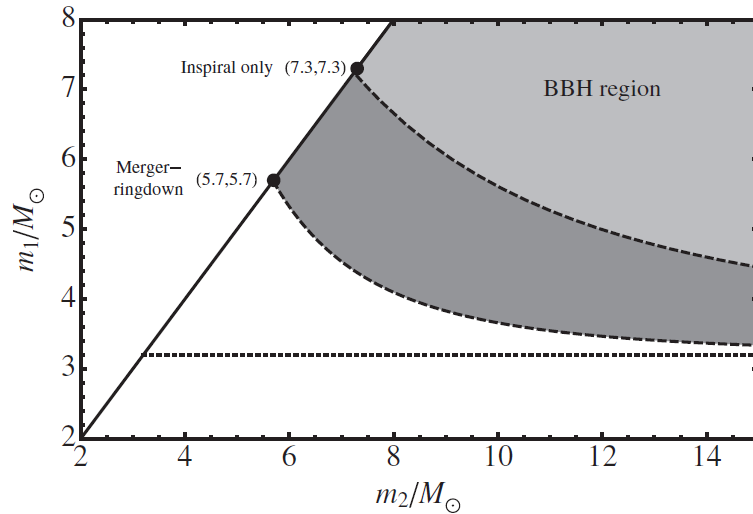


Figure 3. Shaded region indicates binaries would be unambiguously identified as BBH systems, assuming a maximum NS mass of $3.2 M_{\odot}$ (dotted line). The light gray region represents the most conservative estimate of this region, using an inspiral-only waveform model, while the additional darker region uses a full merger-ringdown model.

Mark Hannam et al. / The Astrophysical Journal Letters, 766:L14 (5pp), 2013

Nicola Pinamonti

“Tunneling processes through black hole horizons and Hawking radiation”

このセッションへの参加目的はBHに対する理解を深める事であった。

セッションではシュバルツシルド BH からトンネル過程によって出てくる粒子の描像について述べていた。スピーカーの研究内容はその描像の妥当性についてだったが、そこへの理解が及ばなかった為、研究については結果だけ述べる。

まず tunneling probability を2つのエネルギー状態の波動関数の内積の二乗で定義する。

$$\Gamma_E = \left| \langle \psi_{E_x} | \psi_{E_y} \rangle \right|^2$$

これはあるエネルギーEを持っていて、座標 $x = (t, r_1, \theta, \varphi)$, $y = (t, r_2, \theta, \varphi)$ の周りで局在化している波動関数 ψ_{E_x} , ψ_{E_y} で表される一つの粒子の遷移確率である。今回の状況で二点の座標は event horizon (以下 horizon と略す) の内と外の点をで選ぶ。また $y \rightarrow x$ に遷移する確率を WKB 近似を用いて計算すると

$$\Gamma_E = \lim_{y \rightarrow x} \left| \langle \psi_{E_x} | \psi_{E_y} \rangle \right|^2 \sim \lim_{y \rightarrow x} \left| e^{i \int_{r_1}^{r_2} p_r^{(E)} dr} \right|^2$$

特に指数の肩で虚部を見ると、ボルツマン定数を 1、Hawking temperature を T_H として用いれば

$$\Gamma_E \sim e^{-\beta_H E} = e^{-E/T_H}$$

と書ける。これがシュバルツシルド時空における粒子の tunneling probability である。

ここまでが導入であり、話者の研究内容は上の結果に対する

- ・幾何への依存性
- ・WKB 近似の妥当性
- ・波動関数の状態に対する依存性

を説明するものだった。そしてこれらに対する返答は

- ・幾何への依存性 → 局所的に全ての時空で有効
- ・WKB 近似の妥当性 → 未解決
- ・波動関数の状態に対する依存性 → 依存性無し

ということだった。

ポスターセッション

Sofiane Aoudia

“Parameter estimation improvements using a new hybrid waveform”

Post-Newtonian(PN)近似の妥当性と改良をテーマにしたポスターだった。私の研究テーマに関連が深いものだった為、これについて学んだ。

主な内容は連星の衝突時に発生する重力波の近似が 3.5PN では荒い為、衝突時の波形を Numerical Relativity による波形で作り直したものと重ね合わせ、改良したというものだった。具体的には

$$|\psi^{\text{hyb}}(t)| = |\psi^{\text{pn}}(t)|[1 - T(t)] + |\psi^{\text{NR}}(t)|T(t)$$

と構成して、PN、NR、それぞれの近似が良い領域を使っていた。

これによりすべてのパラメーターの SNR が向上している事が見て取れた。

Morgane Fortin

“Proto-neutron stars evolution and gravitational wave emission”

中性子星への理解を深める目的で、このポスターについて学んだ。

(1) 超新星爆発

まず中性子星の成り立ちについて書かれていた。8 M_{\odot} 以上ある重い星ではコアを形成する鉄が、重力を(主に)電子の縮退圧で支え超高密度となっている。やがて鉄は光と熱によって陽子と中性子に分解して、その陽子が電子と反応する。この過程により次々と電子がなくなり、次いでコアを支えていた縮退圧が一気になくなり、コアが急激に縮む。コアは最終的に大半が中性子であるような巨大な原子核にまで縮むが、この時押しつぶされたエネルギーが衝撃波となって外部へ伝わる。外部へ伝わっていく過程はまだ明らかで無いようなので省く。この衝撃波により星の外装が吹き飛ばされる現象が超新星爆発であり、その残りが Proto-neutron star(PNS)である。

(2) PNS から NS へ

PNS が NS とへと変化していく様子を段階的に見ていこう。

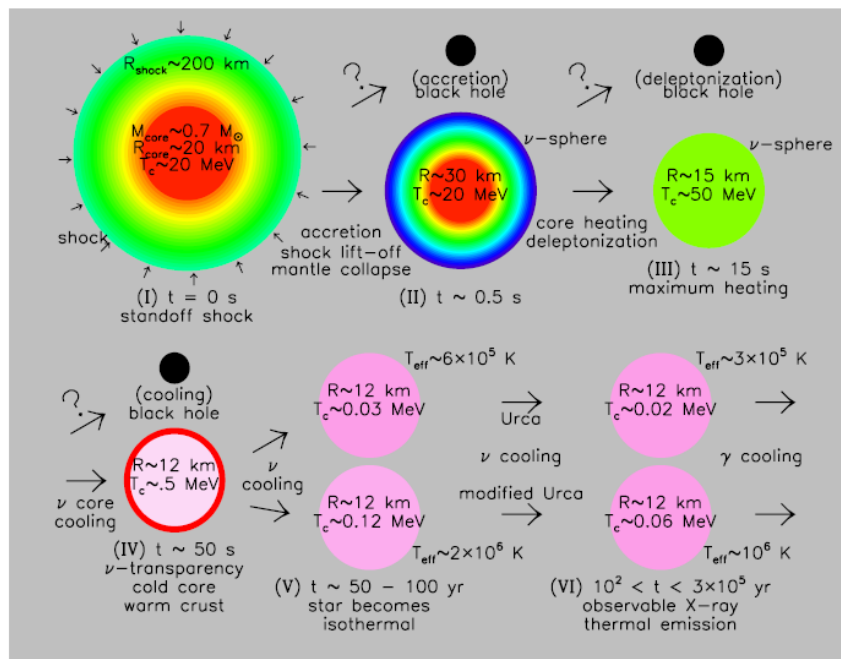


Fig. 10. The main stages of evolution of a neutron star, from Ref. [133]. Shading indicates approximate relative temperatures.

Stage I :t=0s

PNS が出来た時間を $t=0$ としよう。この状態では比較的低温であるニュートリノを捉えたままの中心核($T \sim 2 \times 10^{10} \text{K}$)と、比較的高温の外層からなっている。外層(およそ 200km)は鉄の核の残り、電子捕獲やニュートリノの放出による熱の放出でエネルギーを失っている。

Stage II :t~0.5s

マントルのニュートリノ放出による非レプトン化で縮退圧がなくなり、急激に縮む。

Stage III :t~15s

核に捉えられていた高エネルギーのニュートリノが PNS の内部を動きまわり、外層へ向かう過程で相互作用を起こして PNS を温める($T \sim 5 \times 10^{10} \text{K}$)。

Stage IV :t~50s

ニュートリノの平均自由行程が PNS の半径に達し(ほとんどのニュートリノが PNS 外へと抜け出し)、NS が出来上がる。

これ以降はニュートリノを放出しながらゆっくりと温度を下げていく。

(3)NS の準固有振動による重力波

最後に重力波についても少し触れられていたので述べておく。準固有振動は **f-mode**、**g-modes**、**p-mode**・・・等からなっている。それぞれ簡単に説明すると

f-mode (fundamental mode)	星の全体的な振動
g-modes (gravity-modes)	熱や構成物質の分布によるもの
p-modes (pressure-modes)	圧力勾配によるもの

となっている。これらの情報は状態方程式、拡散係数、発展方程式によって決められる。例として 10kpc 離れたソースから重力波がマッチドフィルターを使って SNR が 8 で捉えられたとした時の図が下の図である。これを見ると次世代型検出器が中性子星の物理を明らかに出来るのではないかと期待が膨らむ。

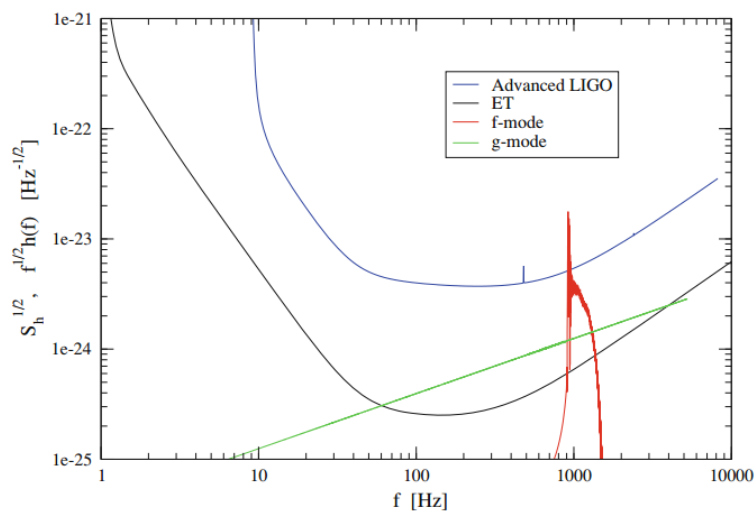


Fig. 3 This figure compares the strain amplitude of the signal emitted by a proto-neutron star oscillating in either the f-mode or the g-mode to the sensitivity of Advanced LIGO and ET. The signal is assumed to have an amplitude at the detector site which corresponds to an ET detection with a signal-to-noise ratio of 8 using matched filtering techniques. For a galactic source at distance of 10 kpc, this would require an energy equivalent to $\Delta E_f \sim 2 \times 10^{-12} M_{\odot} c^2$ and $\Delta E_g \sim 3 \times 10^{-11} M_{\odot} c^2$ to be radiated through the f- and g-mode, respectively. A key point of these results is that the oscillation spectrum evolves during the observation. It is important to establish to what extent future detections, e.g. with ET, may be able to extract the characteristics of these signals and allow us to probe the physics of newly born neutron stars

参考文献

- Tadashi Takayangi (Plenary Lecture) : “Entanglement Entropy and the Gravity/Condensed Matter Correspondence”
- Mark Hannam (Parallel session - B1) : “When can gravitational-wave observations distinguish between black holes and neutron stars?”
- Nicola Pinamonti (Parallel session - D4) : “Tunneling processes through black hole horizons and Hawking radiation”
- Sofiane Aoudia (Poster session – C2.1) : “Parameter estimation improvements using a new hybrid waveform”
- Morgane Fortin (Poster session B1.5) : “Proto-neutron stars evolution and gravitational wave emission”
- Shinsei Ryu, Tadashi Takayanagi : “Holographic Derivation of Entanglement Entropy from AdS/CFT”, Phys.Rev.Lett. 96 (2006)
- Mark Hannam, Duncan A. Brown, Stephen Fairhurst, Chris L. Fryer, Ian W. Harry : “When can gravitational-wave observations distinguish between black holes and neutron stars?”, The Astrophysical Journal Letters, 766:L14 (5pp), 2013
- Giovanni Collini, Valter Moretti, Nicola Pinamonti : “Tunnelling black-hole radiation with ϕ^3 self-interaction: one-loop computation for Rindler Killing horizons”, arXiv:1302.5253 [gr-qc]
- James M. Lattimer, Maddapa Prakash : “Neutron Star Observations: Prognosis for Equation of State Constraints”, Phys.Rept.442:109-165,2007