

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 17 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22740128

研究課題名（和文）SCO X-1 からの重力波の重力波-X 線望遠鏡を用いたマルチメッセンジャー観測

研究課題名（英文）Multi-messenger observations of Sco X-1 using gravitational waves and RXTE satellite.

研究代表者

端山 和大 (HAYAMA KAZUHIRO)

国立天文台・重力波プロジェクト推進室

研究者番号：70570646

研究成果の概要(和文)：系外天体のうち最も強い X 線を放射する低質量 X 線連星である Sco X-1 とターゲットとしてマルチメッセンジャー観測を行い、重力波を新しい方法で探査した。重力波の放出には X 線等の電磁波、宇宙線が伴うことに着目して、アメリカの重力波望遠鏡 LIGO と NASA の高時間解像度を持つ X 線望遠鏡 RXTE を用いて Sco X-1 を観測した。両方の時系列データを用いたコインシデンス解析を行った。その結果重力波は検出されなかったが、重力波データと RXTE データからコインシデンスイベントが 5 つ検出された。研究期間内にはできなかったが、そのイベントを用いて、SCO X-1 からの重力波-X 線同時放射モデルの制限を行っていく予定である。

研究成果の概要（英文）：We carried out multimessenger observation of Sco X-1, which is a low mass X-ray binary radiating strongest X-ray among external Galaxy objects, and searched for gravitational waves from Sco X-1 for the first time. In general, it is likely that a gravitational wave is accompanied with electromagnetic waves and cosmic rays. Focusing on this coincidence, we made observations of Sco X-1 using LIGO, the American gravitational wave telescopes, and RXTE, the X-ray satellite. We analyzed both time-series data and performed coincidence analyses. As a result, although we could not find evidence of the gravitational wave, we found five coincident events. Analyzing the five events, we will continue study to constrain models that explain the simultaneous radiation of a gravitational wave and a X-ray.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：重力波、X 線天文学、RXTE、LIGO

1. 研究開始当初の背景

SCO X-1 は太陽系外で最も強い X 線を放射する低質量 X 線連星(LMXB)であり重力波の初検出に有望な天体であるが、未だに多くのことが分からない:連星中の中性子星の回転周期はなにか?X 線データに存在する低、高周波数準周

期振動(QPO) はどのようなメカニズムで起きているのか? (1) LMXB 中の中性子星の回転周期は、降着円盤から受けるトルクによって増加すると期待されるが、観測結果はそれよりも有意に低い。回転周期の増加を制限しているメカニズムはなにか? (2)

最近の研究ではこれらは重力波の放射と関連することを報告している。R. Wagoner は X 線のフラックスと回転周期、重力波の関係性を示し(3)、J. Jernigan は QPO の励起中に重力波が放出されるメカニズムを提案し(4)、L. Bildsten は降着円盤から受けるトルクによって増加した角運動量が重力波で放出されるメカニズムを提案している(5)。N. Andersson は角運動量が放出される仕組みについて r-mode による重力波の放出のメカニズムを提案している(6)。Sco X-1 からの重力波の探査は LIGO を用いて連続周期的重力波をターゲットとしたテンプレートサーチ(7)、複数の望遠鏡のデータの cross-correlation によるサーチ(8)が行われたが検出には至らなかった。

- (1) van der Klis, M. et al., ApJL 469L, L1 (1996).
- (2) Chakrabarty, D. et al., Nature 424, 42 (2003).
- (3) R. Wagoner, ApJ, 278, 345 (1986).
- (4) J. Jernigan, AIPC, 586, 805 (2001).
- (5) L. Bildsten, ApJ, 501, 89B (1998).
- (6) N. Andersson, ApJ, 502, 708A (1998).
- (7) B. Abbott et al., Phys. Rev. D, 76, 082001 (2007).
- (8) B. Abbott et al., Phys. Rev. D, 76, 082003 (2007).

2. 研究の目的

本研究では Sco X-1 のように降着円盤からの降着を受けているような天体からの重力波として連続周期波を仮定するのは無理があると考え、本研究では波形を分からない、継続時間が様々なバースト的な重力波を探査する。以下、単にバースト重力波と呼ぶ。

バースト重力波を放出するメカニズムのほとんどが、重力波の放出に X 線やガンマ線を伴うことから、重力波検出器だけでなく、X 線望遠鏡などの同時観測を行う、multi-messenger 観測が検出の信頼性を上げ、また検出の際には多角的なサイエンスを行うのに有効である。Sco X-1 のような LMXBs(Low-mass X-ray binaries)では、降着円盤からの降着流により星の中の圧力が高まり、あるしきい値を越えるとコアのフェーズが変化し、それに伴うバースト重力波が繰り返し放出されると考えられる(9)。また r-mode が生じていればそれに誘発されてバースト重力波が放出されるとい報告もある(10)。これらの現象は X 線と重力波のデータにコヒーレントに埋め込まれると期待される。本研究では X 線の情報を得るために、ミリ秒より高い時間分解能を持つ X 線望遠鏡 Rossi X-ray Timing Explorer(RXTE)の PCA(Proportional Counter Array)データを用い、重力波検出器のデータとして、2005-2006 年に行われた LIGO の観測 S5 のものを用いて、コインシデンス解析を行う。

(9) E. Coccia et al., Phys. Rev. D, 70, 084010 (2004).

(10) A. Drago et al., Astron. Astrophys, 445, 1053D (2006).

3. 研究の方法

研究は3段階に分けて行う。

第一段階では解析パイプラインを開発する。まず RXTE と LIGO のデータのフォーマットをそろえて、同じデータ解析環境で解析できるようにする。RXTE データと LIGO データの観測時間がオーバーラップする時間を抽出し、その間のデータを以下の方法で解析していく。RXTE のデータに関しては MIT の RXTE チームと密接に連絡を取りながら正しいデータの取り扱いを行う。RXTE データには dead time が多く含まれており、それらの gap を解析に影響がないようにランダム雑音で埋めて、その時間のイベントはイベントリストからは排除する。RXTE、LIGO のデータからイベントリストを作成するのにまずは現在までに重力波グループで精査された解析手法を用いて行う。RXTE データは時間周波数空間上でエネルギーが閾値よりも高い領域を検出する Excess power method を用い、LIGO データはコヒーレントネットワーク解析を用いる。しかし複数の重力波望遠鏡を用いて特定の天体をトラッキングする手法は論文にはなっているがソフトウェアとしては開発されていないのでその部分を実装する。両データから作成されたイベントリストを、重力波と X 線の放射モデルを用いて決定した時間窓でコインシデンス解析を行う。

第二段階ではコインシデンス解析の後に得たイベントリストを評価して、重力波信号の検出またはアッパーリミットを出す Post processing を行う。偽イベントのバックグラウンドを知るためにコインシデンス解析の性能を評価する。人工的に作った重力波信号モデルを両データにソフトウェアインジェクションして検出効率をだし、さらに RXTE データと LIGO データを意図的にタイムシフトさせてバックグラウンドを評価する。こうして得た情報を用いてイベントリストから真のイベント候補を選別してゆく。

第三段階では、検出したイベントリストを元に、サイエンスを行う。イベント候補はノイズバックグラウンドから定めたしきい値を超えるものがあれば、重力波の有力な候補となる。存在しない場合は、重力波、X 線の同時放射モデルについての制限を行う。

4. 研究成果

2010 年は、我々は RXTE の X 線時系列データと、LIGO の重力波データを解析するパイプラインを構築し、解析パイプラインをデータに適用した。その際、2010 年 4-5 月、8-11 月にドイツのマックスプランク研究所(アインシュタイン研究所、

ハノーファー)に滞在して、共同研究者と研究を推進した。また結果を LIGO-Virgo コラボレーションミーティングで報告し、議論を深めるとともに、研究を広く知らせる努力を行った。2011 年はパイプラインの詳細をつめて行き、残っていたバグなどを取り除いた。2011 年 8-10 月にドイツのマックスプランク研究所(アインシュタイン研究所、ハノーファー)に滞在して、共同研究者と研究を推進した。そして研究成果を LIGO-Virgo コラボレーションミーティングで報告した。2012 年は 6-8 月にドイツのマックスプランク研究所(アインシュタイン研究所、ハノーファー)に滞在して、共同研究者と研究を推進した。さらに 6 月に 1 週間ほどイギリスのカーディフ大学の共同研究者である Chris Messenger を訪問し、RXTE グループメンバーの Duncan Galloway を交えて議論した結果、X 線のデータのキャリブレーション精度に問題がある事がわかりその部分の修正に多くの時間を割いた。また、研究成果を 7 月にスウェーデンのストックホルム大学で行われた第 13 回 Marcel Grossmann meeting や、LIGO-Virgo コラボレーションミーティングで報告した。その後改良した解析パイプラインを用いて再び X 線トランジェントと重力波トランジェントとのコインシデンスイベントを 5 つ発見した。その結果を 2012 年 9 月にローマで行われた LIGO-Virgo コラボレーションミーティングで報告し、その際、ミーティング参加者と結果の解釈について議論を行った。

結果として重力波と見なせるイベントは検出できなかった。

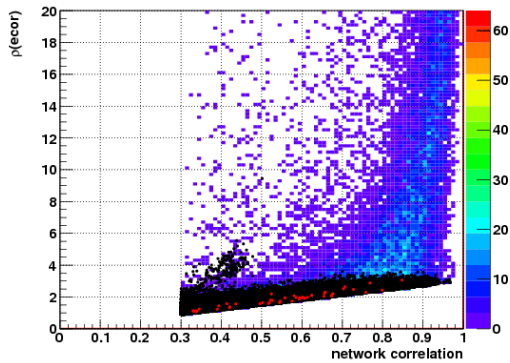


図 1. 重力波イベント候補

図1は、LIGO の観測と RXTE が SCO X-1 を観測している時期がオーバーラップしているデータから検出された重力波イベント候補である。横軸が2台の LIGO 間の相関係数に対応し縦軸が信号雑音比に対応する量である。カラーマップ重力波のインジェクションテスト信号で、アッパーリミットをつけるときに用いるものである。黒点が実データからのイベント候補、赤点が RXTE データ

から検出された X 線イベント候補と相関があるイベントである。このプロットより、バックグラウンドとなる黒点から逸脱するコインシデンスイベントが存在しなかったことがわかる。

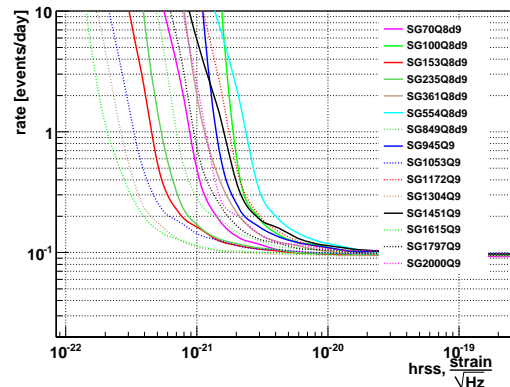


図 2. 重力波のアッパーリミット

図 2 は重力波についてのアッパーリミットを示している。凡例にある SG70Q9 等の意味は、データに挿入したシミュレーション重力波信号の波形が SineGaussian 波形で、その周波数が 70Hz、Q 値が 9 などを表している。図 2 によると、SG849Q8.9 型の重力波のイベントレートのアッパーリミットはエネルギー $2E-21 [1/Hz^{-1/2}]$ については毎日 1 イベントを表している。重力波は検出できなかったが、重力波と X 線の同時放射イベントに関するアッパーリミットはつけられる結果を得た。今重力波と X 線を同期に放射するモデルとしては、Sco X-1 の伴星からの降着ガスが積み重なることによって主星の外殻が崩壊し解放される重力エネルギーによって重力波の f-mode が励起されると同時に X 線が放射されるというモデルが考えられる。

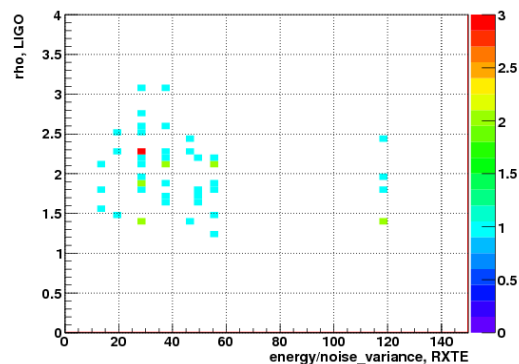


図 3. 重力波-X 線コインシデンスイベント

図3は、重力波-X線のコインシデンスイベントである。横軸はX線イベント候補の信号雑音比、縦軸が重力波イベント候補のエネルギーを表している。図より、X線イベントで2倍以上強い信号雑音比を持つイベントを5つ検出した。今後は解析パイプラインで得られたこの結果を定量的に評価して、SCO X-1での重力波-X線同時放射モデルの制限を行っていく。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 29 件)

- ① K Hayama, A. Nishizawa, “Model-independent test of gravity with a network of ground-based gravitational-wave detectors,” Phys. Rev. D, 査読有, vol 87, 062003 (2013)
DOI: 10.1103/PhysRevD.87.062003
- ② K Hayama in Aasi, J. et al., “Einstein@Home all-sky search for periodic gravitational waves in LIGO S5 data”, Physical Review D, 査読有, vol. 87, Issue 4, id. 042001 (2013)
DOI: 10.1103/PhysRevD.87.042001
- ③ K Hayama in Aasi, J. et al., “Search for gravitational waves from binary black hole inspiral, merger, and ringdown in LIGO-Virgo data from 2009–2010”, Physical Review D, 査読有, vol. 87, Issue 2, id. 022002 (2013)
DOI: 10.1103/PhysRevD.87.022002
- ④ K Hayama in Evans, P. A. et al., “Swift Follow-up Observations of Candidate Gravitational-wave Transient Events,” The Astrophysical Journal Supplement, 査読有, Volume 203, Issue 2, article id. 28, 14 pp. (2012).
DOI: 10.1088/0067-0049/203/2/28
- ⑤ K Hayama in Aasi, J., et al., “The characterization of Virgo data and its impact on gravitational-wave searches,” Classical and Quantum Gravity, 査読有, Volume 29, Issue 15, pp. 155002 (2012)
DOI: 10.1088/0264-9381/29/15/155002
- ⑥ K Hayama in J. Abadie, et al., “Implications for the Origin of GRB 051103 from LIGO Observations,” The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 755, Issue 1, article id. 2 (2012)
DOI: 10.1088/0004-637X/755/1/2
- ⑦ K Hayama in J. Abadie, et al., “All-sky search for gravitational-wave bursts in the second joint LIGO-Virgo run,” Physical Review D, 査読有, vol. 85, Issue 12, id. 122007 (2012)
DOI: 10.1103/PhysRevD.85.122007
- ⑧ K Hayama in J. Abadie, et al., “Upper limits on a stochastic gravitational-wave background using LIGO and Virgo interferometers at 600–1000 Hz,” Physical Review D, 査読有, vol. 85, Issue 12, id. 122001 (2012)
DOI: 10.1103/PhysRevD.85.122001
- ⑨ K Hayama in J. Abadie, et al., “Search for gravitational waves from intermediate mass binary black holes,” Physical Review D, 査読有, vol. 85, Issue 10, id. 102004 (2012)
DOI: 10.1103/PhysRevD.85.102004
- ⑩ K Hayama in J. Abadie, et al., “First low-latency LIGO+Virgo search for binary inspirals and their electromagnetic counterparts,” Astronomy & Astrophysics, 査読有, Volume 541, id.A155 (2012)
DOI: 10.1051/0004-6361/201218860
- ⑪ K Hayama in J. Abadie, et al., “Search for gravitational waves from low mass compact binary coalescence in LIGO’s sixth science run and Virgo’s science runs 2 and 3,” Physical Review D, 査読有, vol. 85, Issue 8, id. 082002 (2012)
DOI: 10.1103/PhysRevD.85.082002
- ⑫ K Hayama in J. Abadie, et al., “Implementation and testing of the first prompt search for gravitational wave transients with electromagnetic counterparts,” Astronomy & Astrophysics, 査読有, Volume 539, id.A124 (2012)
DOI: 10.1051/0004-6361/201118219
- ⑬ K Hayama in J. Abadie, et al., “All-sky search for periodic gravitational waves in the full S5 LIGO data,” Physical Review D, 査読有, vol. 85, Issue 2, id. 022001 (2012)
DOI: 10.1103/PhysRevD.85.022001

- ⑭ [K Hayama](#) in J. Abadie, et al.,
 “Directional Limits on Persistent Gravitational Waves Using LIGO S5 Science Data,”
 Physical Review Letters, 査読有, vol. 107, Issue 27, id. 271102 (2012)
 DOI: 10.1103/PhysRevLett.107.271102
- ⑮ [K Hayama](#) in J. Abadie, et al.,
 “Beating the Spin-down Limit on Gravitational Wave Emission from the Vela Pulsar,”
 The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 737, Issue 2, article id. 93 (2011)
 DOI: 10.1088/0004-637X/737/2/93
- ⑯ [K Hayama](#) in J. Abadie, et al.,
 “Search for gravitational waves from binary black hole inspiral, merger, and ringdown,”
 Physical Review D, 査読有, vol. 83, Issue 12, id. 122005
 DOI: 10.1103/PhysRevD.87.022002
- ⑰ [K Hayama](#) in J. Abadie, et al.,
 “A gravitational wave observatory operating beyond the quantum shot-noise limits,”
 Nature Physics, 査読有, Volume 7, Issue 12, pp. 962–965 (2011).
 DOI: 10.1038/nphys2083
- ⑱ [K Hayama](#) in J. Abadie, et al.,
 “Search for Gravitational Wave Bursts from Six Magnetars,”
 The Astrophysical Journal Letters, 査読有, Volume 734, Issue 2, article id. L35 (2011)
 DOI: 10.1088/2041-8205/734/2/L35
- ⑲ [K Hayama](#) in S. Kawamura et al. (DECIGO collaboration),
 “The Japanese space gravitational wave antenna: DECIGO,” Classical and Quantum Gravity, 査読有, Volume 28, Issue 9, pp. 094011 (2011)
 DOI: 10.1088/0264-9381/28/9/094011
- ⑳ [K Hayama](#) in J. Abadie, et al.,
 “Search for gravitational waves associated with the August 2006 timing glitch of the Vela pulsar,”
 Phys. Rev. D, 査読有, vol. 83 (2011) 042001
 DOI: 10.1103/PhysRevD.83.042001
- ㉑ [K Hayama](#) in J. Abadie, et al.,
 “Calibration of the LIGO gravitational wave detectors in the fifth science run,”
 Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A, 査読有, 624 (2010) p.223-240
 DOI: 10.1016/j.nima.2010.07.089
- ㉒ [K Hayama](#) in J. Abadie, et al.,
 “FIRST SEARCH FOR GRAVITATIONAL WAVES FROM THE YOUNGEST KNOWN NEUTRON STAR,”
 ApJ, 査読有, 722 (2010) 1504
 DOI: 10.1088/0004-637X/722/2/1504
- ㉓ [K Hayama](#) in J. Abadie, et al.,
 “Search for gravitational waves from compact binary coalescence in LIGO and Virgo data from S5 and VSR1,”
 Phys. Rev. D, 査読有, vol. 82 (2010) 102001
 DOI: 10.1103/PhysRevD.82.102001
- ㉔ [K Hayama](#) in Abadie, J. et al,
 “TOPICAL REVIEW: Predictions for the rates of compact binary coalescences observable by ground-based gravitational-wave detectors,”
 Classical and Quantum Gravity, 査読有, Volume 27, Issue 17, pp. 173001 (2010)
 DOI: 10.1088/0264-9381/27/17/173001
- ㉕ [K Hayama](#) in Abadie, J. et al,
 “Search for Gravitational-wave Inspiral Signals Associated with Short Gamma-ray Bursts During LIGO’s Fifth and Virgo’s First Science Run,”
 The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 715, Issue 2, pp. 1453–1461 (2010)
 DOI: 10.1088/0004-637X/715/2/1453
- ㉖ [K Hayama](#) in B. Abbott et al,
 “Search For Gravitational-wave Bursts Associated with Gamma-ray Bursts using Data from LIGO Science Run 5 and Virgo Science Run 1,”
 The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 715, Issue 2, pp. 1438–1452 (2010).
 DOI: 10.1088/0004-637X/715/2/1438
- ㉗ [K Hayama](#) in B. Abbott et al,
 “All-sky search for gravitational-wave bursts in the first joint LIGO–GEO–Virgo run,”
 Physical Review D, 査読有, vol. 81, Issue 10, id. 102001 (2010).
 DOI: 10.1103/PhysRevD.81.102001
- ㉘ [K Hayama](#) in B. Abbott et al,
 “Searches for Gravitational Waves from Known Pulsars with Science Run 5 LIGO Data,”
 The Astrophysical Journal, 査読有, Volume 713, Issue 1, pp. 671–685 (2010).

DOI: 10.1088/0004-637X/713/1/671

- ⑲ K Hayama in M. Ando et al. (DECIGO collaboration),
“DECIGO and DECIGO pathfinder,”
Classical and Quantum Gravity, 査読有,
Volume 27, Issue 8, pp. 084010 (2010)
DOI: 10.1088/0264-9381/27/8/084010

[学会発表] (計 8 件)

- ① Kazuhiro Hayama, A. Nishizawa,
“Test of scalar-tensor gravity theory from
observations of gravitational wave bursts with
advanced detector network,”
13th Marcel Grossmann meeting , Stockholm,
Sweden, July. 1-7, 2012
- ② Kazuhiro Hayama, Chris Messenger
“Proposed Multi-messenger observation of
Sco X-1 with the RXTE and LIGO-Virgo
detector network,”
13th Marcel Grossmann meeting , Stockholm,
Sweden, July. 1-7, 2012
- ③ Kazuhiro Hayama, T Oyama, K Niinuma, T
Aoki, S Kida, T Daishido,
“Proposed multi-messenger observations of
radio transients using gravitational wave
telescopes and the Nasu radio telescope,”
13th Marcel Grossmann meeting , Stockholm,
Sweden, July. 1-7, 2012
- ④ Kazuhiro Hayama, Atsushi Nishizawa, Peter
Shawhan, Mark Avara
“Test of scalar-tensor gravity theory from
observations of gravitational wave bursts with
advanced detector network,”
GWPAW(The Gravitational-wave Physics and
Astronomy Workshop), Hannover Germany,
June 4-7 2012
- ⑤ Kazuhiro Hayama, Kotaro Niinuma, Tomoaki
Oyama
“Proposal for multi-messenger observations
of radio transients by Nasu and LIGO-Virgo,”
IAU Symposium 285, “New Horizons in Time
Domain Astronomy,” Univ. Oxford, United
Kingdom, September 19-23, 2011
- ⑥ Kazuhiro Hayama
“Test of scalar-tensor gravity theory from
observations of gravitational wave bursts with
advanced detector network,”
GWPAW(The Gravitational-wave Physics and
Astronomy Workshop), Milwaukee,
Wisconsin , United State, January 26-29,
2011

- ⑦ Kazuhiro Hayama, A. Nishizawa, A. Taruya
“Testing scalar-tensor theory from
observations of gravitational wave bursts with
a network of interferometric detectors,”
14th Gravitational Wave Data Analysis
Workshop , ROME, Italy, January. 25-29,
2010

- ⑧ Kazuhiro Hayama, Chris Messenger
“Proposed Multi-messenger observation plan
for Sco X-1 with RXTE and gravitational wave
detectors,”
14th Gravitational Wave Data Analysis
Workshop , ROME, Italy, January.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

端山 和大 (HAYAMA KAZUHIRO)
国立天文台・重力波プロジェクト推進室・研究
員
研究者番号 : 70570646

(2) 研究分担者

該当者なし

(3) 研究連携者

該当者なし