

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 22 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25800126

研究課題名(和文) GPGPUを用いた効率的な重力波パルサーの探索

研究課題名(英文) Search for gravitational wave pulsars using efficient algorithm with GPGPU

研究代表者

伊藤 洋介 (Itoh, Yousuke)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：60443983

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：パルサーからの重力波検出にともなう計算コストの問題を解決するために、GPGPUの可能性を探った。結果として、現在利用しているコードでは、費用対効果の面では疑問符をつけざるを得ないことがわかった。KAGRAの共同研究者の結果によると本課題とは異なるSuboptimalな方法ではCPU比100倍のスピードアップが得られており、対象とアルゴリズムによっては高速化の可能性が残されているので、そのような対象を今後増やしていくことが課題となる。

研究成果の概要(英文)：We investigate possibility of reducing the computational cost in search for gravitational waves from pulsars using GPGPU. It was found that the current algorithm we use do not get any benefit from GPGPU if (financial, not computational) cost is taken into account. A KAGRA collaborator found it possible to make some suboptimal algorithm different from ours 100 times faster if using GPGPU with respect to the existing CPU code. The next step around we consider now is to widen the applicability of the suboptimal GPGPU code.

研究分野：重力波データ解析

キーワード：宇宙物理 アルゴリズム ハイパフォーマンスコンピューティング 理論天文学

1. 研究開始当初の背景

アインシュタインは100年前に一般相対性理論を確立し、重力波の存在を予言した。宇宙を重力波によって観測することによって、いままでまったくわかっていなかった強重力場の物理が明らかになると期待されている。事実、日本は岐阜県神岡にKAGRAを建設中であり、今後10年以内にKAGRA検出器をはじめとする世界各地の重力波検出器によって、重力波天文学が創生されるとの期待が高まっている。

高速自転する中性子星であるパルサーは、重力波を放射する天体と考えられている。図1は重力波検出器の設計感度曲線と様々な既知パルサーからの重力波の振幅の理論的な上限値を示している。

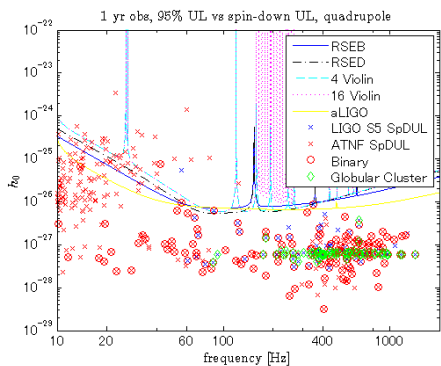


図1：LIGO、KAGRA の設計感度曲線と Australia Telescope National Facility(オーストラリア国立望遠鏡機構、ATNF)のパルサーカタログにリストされているパルサーからの重力波の振幅の上限値の比較。一つ一つの点(x 印や口 印)がパルサーの重力波振幅を示している。この図は、設計感度を持つ重力波検出器からのデータを1年間積分することによって、多くのパルサーについて、理論上限値より深く重力波を探索できることを示している。ATNF カタログを元に伊藤が作成。LIGOおよびKAGRAの感度曲線は、LIGO:<https://dcc.ligo.org/LIGO-T0900288-v3/public>
bKAGRA :<http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/researcher/parameters>より取得した。

さて、このような高速回転するコンパクト天体からの重力波を検出するには、既存の計算アルゴリズムでは、計算コストが多すぎるという問題があった。たとえば私がGholami, Cutler, Krishnanらの方法に基づいて計算したところによると、銀河系全域でパルサー探索をおこなうためには、10の28乗 FLOPS という途方もない計算機が必要で

あることがわかっていた(伊藤洋介 2012年理論天文学宇宙物理学懇談会シンポジウム発表、図2参照)。なお京計算機はたかだか10の16乗 FLOP 程度の計算能力しかない。すなわち、いくら良い検出器を作っても、計算機能力の問題でパルサーからの重力波を検出できないとされている。実際問題としては、銀河系全体を観測するのではなく、一部領域のみを観測するなどの方法をとることになるが、計算機パワーの獲得およびアルゴリズム改良と同時に、アクセラレータの導入が不可避な状況であった。

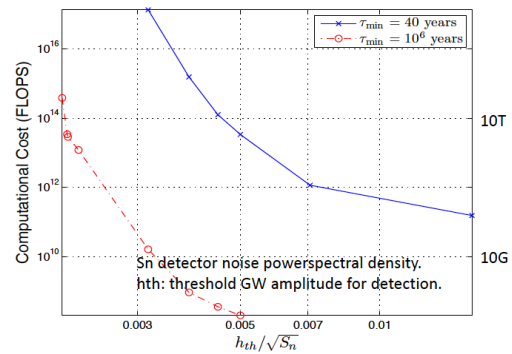


図2：伊藤が計算したKAGRA計算コストを評価したグラフ。この表は、ある振幅の重力波を放射する40歳もしくは、百万年歳パルサーを検出するためには、どの程度計算能力が必要となるかを求めたものである。1年間のデータを1年間かけて解析することを仮定しており、また、15パーセント程度の第1種過誤(false alarm probability)を仮定している。Snは検出器の片側パワースペクトル密度である。たとえば、100TFLOPSの計算機を所持していると、KAGRA検出器のデータ1年分を1年間解析して、300パーセクまでの距離にある百万歳のパルサーを探索できる。若いパルサーは重力波位相の時間変化が激しいため、計算コストが大きく、1パーセク程度の距離にあるパルサーしか探索できない。電磁波観測で知られている最近傍の中性子星は100パーセク程度の距離にあり、パルサーは160パーセク程度の距離ある。また、300パーセクまでに10個程度のパルサーが見つかっている。パルサーは一般に空の特定の方向にのみ電磁波信号を放射するため、電磁波でパルサーが見つからないからといって、重力波で信号が見つからないとは限らないことに注意。

私はKAGRAコラボレーションという研究グループの中でデータ解析サブシステムに所属し、データ解析班のサブチーフとしてKAGRAデータ解析のためのシステム構築を担っている。とくに私はパルサーからの重力波検出を担当しているため、計算機コストについて長年問題意識を持っていた。

2. 研究の目的

本研究課題は、上記の計算コストの問題を新しいアルゴリズムであるリサンプリング法の導入によって軽減することを最初の目的としている。その上で、C言語による実装当時にはなかった計算加速技術（ハードウェア）である、General Purpose Graphical Processing Unit (GPGPU)を使ってこの問題を解決できないかをテストすることを目的としている。

3. 研究の方法

パルサーからの重力波探索方法には、コヒーレント法とインコヒーレント法の2つがあり、それぞれまたいくつかの方法がある。本研究課題ではもっとも基本的なコヒーレント法であるF統計量を使った方法をもちいることとした。伊藤は2002年から4年間、ドイツおよびアメリカにポスト・ドクトラフェローとしてF統計量を用いた解析コードを開発、利用しており、アルゴリズムには精通していた。本研究課題では、このアルゴリズムをさらにリサンプリング法を用いて改良したコードを開発し、これの高速化を目指すこととした。

4. 研究成果

F統計量の計算コードはオリジナルにはC言語で実装されており、リサンプリング法を取り入れたコード開発は、matlabでおこなった。例として、仮想的に帆（ほ）座パルサーを探索した場合に得られる周波数対F統計量のグラフを図3に、全天探索したときの結果を図4に示す。

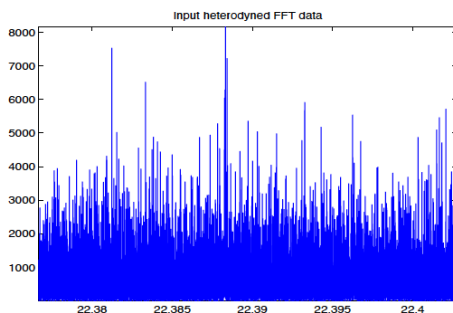


図3：仮想的な帆(ほ)座パルサーを探索した結果。横軸は周波数、縦軸はF統計量の値である。高速フーリエ変換を利用したリサンプリング法を用いて計算している。真ん中あたりにあるピークが帆座パルサーの信号をあらわす。

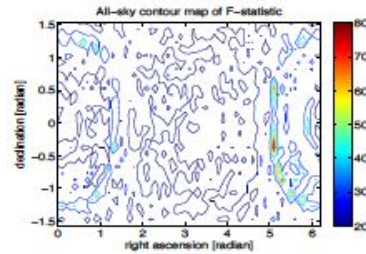


図4：仮想的な帆（ほ）座パルサーを全天探索したときのF統計量のコンタープロット。横軸は赤経、縦軸は赤緯である。赤色はF統計量が大きい値であることを示す。右端にある赤い部分が仮想的なパルサーの天球面上での位置である。

そこで本コードを元にして、GPGPUによる高速化の可能性を検討したところ、現状の実装ではたかだか2~3倍程度の高速化しか望めず、GPGPUの導入コストを考えると、残念ながら費用対効果の面では採用に否定的な結果が得られた。

一方で同時期にKAGRA共同研究者である大阪市立大学の田中氏は、インコヒーレント法の一つであるラジオメーター法において、対CPU比で100倍の高速化を達成している。現在その成功原因および実データへの適用について共同研究を進めはじめている。また、ラジオメーター法はコヒーレント法と比べると本質的に感度が良くないため、これを改良したセミコヒーレント法であるCrossCorr法へのGPGPUの利用について、検討を始めた。このように、本研究課題は、その目的自体は否定的な結論に終わったものの、多少異なる方法（コヒーレント法でなくインコヒーレント法）については、今後の発展については、本研究課題の知見を生かして、可能性を追求している段階にある。

なお、本研究課題に関連して4本の論文を出版した。まずKAGRAデータ解析をテストする上で現状利用できるTOBAデータの解析への準備として、レーザー干渉計型重力波検出器に対するTOBA検出器の角度分解能に関する優位性を示した論文Improving parameter estimation accuracy with torsion-bar antennasを出版した。一般にレーザー干渉計型重力波検出器は1台では波源の方向を全く決定できない。しかしTOBAでは3つの出力を利用することによって重力波の偏極を決定することができ、このことが1台での方向決定を可能にしていることがわかったのである。また、New Probe of Dark-Matter Properties: Gravitational Waves from an

Intermediate-Mass Black Hole Embedded in a Dark-Matter Minispikes および、Gravitational waves as a probe of dark matter minispikes はおよそ重力波では検出不可能であると考えられていたダークマターの重力波の影響を定量的に示し、重力波によるダークマター検出の道を示した。最後に、New estimation method for mass of an isolated neutron star using gravitational waves は、年度が変わってから出版されたものの研究自体は 2014 年度におこなったもので、今まで連星でのみ可能であった中性子星の質量測定を、重力波を使えば単独中性子星であっても可能とするものである。実際我々はモンテカルロシミュレーションによって、第3世代検出器である Einstein 重力波望遠鏡であれば、50%のパーサーについては、20%の精度でその質量を決定できることがあることを示した。

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 4 件)

1. New estimation method for mass of an isolated neutron star using gravitational waves, Kenji Ono, Kazunari Eda, Yousuke Itoh, Physical Review D, Volume 91, Issue 8, id.084032 (2015) 査読有り

2. Gravitational waves as a probe of dark matter minispikes, Kazunari Eda, Yousuke Itoh, Sachiko Kuroyanagi, Joseph Silk, Physical Review D, Volume 91, Issue 4, id.044045 (2015) 査読有り

3. Improving parameter estimation accuracy with torsion-bar antennas, Kazunari Eda, Ayaka Shoda, Yousuke Itoh, Masaki Ando, Physical Review D, Volume 90, Issue 6, id.064039 (2014) 査読有り

4. New Probe of Dark-Matter Properties: Gravitational Waves from an Intermediate-Mass Black Hole Embedded in a Dark-Matter Minispikes, Kazunari Eda, Yousuke Itoh, Sachiko Kuroyanagi, Joseph Silk, Physical Review Letters, vol. 110, Issue 22, id. 221101 (2013) 査読有り

[学会発表](計 5 件)

1. Yousuke Itoh, "Status and plan for Continuous gravitational Wave (CW) search

for the (i)KAGRA", 3rd Annual Symposium of the Innovative Area on Multi-messenger Study of Gravitational Wave Sources, 広島大学, Hiroshima, 2015/02/19-21

2. Yousuke Itoh

"KAGALI Coding Style Guide: Its motivation and introduction"

A Satellite meeting of the The 7th Korea-Japan Workshop on KAGRA, 富山大学, Toyama, 2014/12/19-20

3. Yousuke Itoh (invited)

"Status of KAGRA and gravitational wave astronomy"

2nd International Workshop on Theoretical and Computational Physics, Buon Ma Thuot, Vietnam, 2014/07/28-31

4. 伊藤洋介 (招待講演)

『重力波で探る巨大ブラックホールの物理量』(2014年4月24日発表)

「活動銀河核ワークショップ ～2020年代への展望～」

日時：2014年4月23日(水)、24日(木)

会場：国立天文台(三鷹)

5. Yousuke Itoh

"Review & Proposal: LMXB search"

New Innovative area "Gravitational Wave Astronomy" workshop, Osaka City University, 2013/10/19

6. 研究組織

(1)研究代表者

伊藤 洋介 (ITOH, Yousuke)

東京大学・大学院理学系研究科・助教

研究者番号：60443983