

2012年度 第42回 天文天体物理若手 夏の学校

原始ブラックホールの合体から生じる 重力波の見積もり

名古屋大学大学院理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻
宇宙論研究室(C研)

小林 明美

共同研究者

横山修一郎、杉山直、田代寛之

2012年8月1日(水)～8月4日(土) @福井県東尋坊温泉三国観光ホテル

概要

一般相対性理論によると重力があると時空が歪み、質量を持ったものが加速度運動するとその時空の歪みが波となって伝わる。その波を重力波と呼ぶ。重力波を用いると、光では見えないブラックホールや、宇宙誕生直後を見ることができる。しかし、重力波の振幅は大変小さく未だ直接観測はされていない。重力波生成機構の一つとして、原始ブラックホール (Primordial Black Holes: PBHs) の合体がある。

PBH は、初期宇宙の過密度領域が重力不安定性により崩壊してできるブラックホールのことで、ダークマターの候補の一つとして考えられている。PBH は普通のブラックホールに比べて小さい質量のものも存在するが、たくさん存在していると考えられる。

PBH は、宇宙の歴史の中で合体を繰り返し、成長していくと考えられる。PBH が形成されると、そのまわりにダークマターが集まり、ハローが形成され成長していく。PBH が連星系を作るとき、それらを取り囲んでいる2つのハローも合体し、その新しいハローの中で2つのPBH も合体していく。

今研究では、銀河形成の準解析的形成モデルを用いて、PBH 連星合体過程で放出される重力波を計算する。今回は特に、PBH 連星合体により生じる強い重力波である重力波バーストに焦点を当てて計算を行った。ここで評価した重力波を、現在、もしくは将来の重力波観測装置によって観測可能かどうか議論する。

Introduction & motivation

現在の宇宙の構成要素は、我々が見ることのできる普通の物質が4%、見ることのできない謎の物質であるダークマターが22%、宇宙を加速膨張させている謎のエネルギーであるダークエネルギーが74%となっている。その内、ダークマターの候補の一つとして考えられているのが、原始ブラックホール (Primordial Black Holes: PBHs) と呼ばれる、宇宙初期の過密度領域が重力不安定性により崩壊することでできるブラックホールである。以下、原始ブラックホールを PBH と呼ぶ。

そもそも、現在の宇宙の大規模構造形成のためには、初期の一様等方宇宙における密度ゆらぎが必要である。この密度ゆらぎ、特に過密度領域、が重力不安定性によって成長して、今日の大規模構造となる。つまり、PBH も初期宇宙の過密度領域が崩壊してブラックホールになることによって作られるものなので、このことを踏まえるなら、PBH を作ることは原理的には可能である。

今回は、放射優勢期に PBH が形成されたと考える。放射優勢期に生成された PBH の質量は大体そのときのホライズンサイズに含まれる質量である。PBH の大きな特徴は、PBH の質量が太陽質量よりも小さくなれるということである。これは、宇宙の初期のホライズンサイズ というのは小さいので、十分宇宙初期に遡れば、そのときのホライズンサイズに含まれる質量が太陽質量よりも小さくなるからである。したがって、もし太陽質量以下のブラックホールが発見されれば、それは初期宇宙で作られた PBH だと分かる。

現在、PBH の存在量には各質量に対し上限しか与えられておらず [1]、小さな質量の PBH に対しては、多くの量の PBH が存在している可能性が残されている。

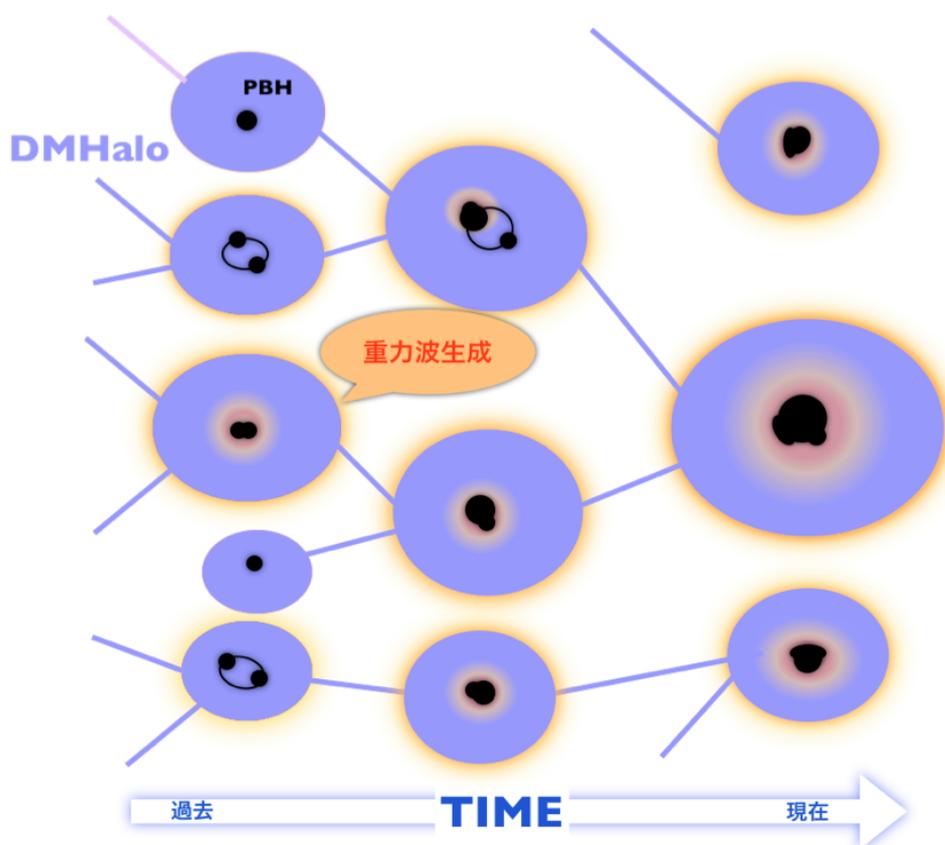
次に重力波について簡単に説明する。一般相対論により、質量を持ったものが加速度運動をすると時空が歪む。その歪みが波となって伝わったものが重力波であり、重力波は時空のさざ波である。重力波は、一般相対論によって存在が予想されており、間接的にその存在が確認されているものの、直接観測には未だ至っていない。その大きな理由は、重力波の振幅が大变小さいからである。

そのため、直接観測できるような大きな重力波を生じさせるものはないかということを考えて、上で述べたように PBH はたくさん存在している可能性があるので、PBH 同士が合体する時の重力波を考える、というのが今研究のモチベーションである。

今研究では、PBH が合体するときを生じる強い重力波である、重力波バーストを焦点を当てている。

Method & Calculation

まず、PBHがダークマターの内、ある割合 f を占めていると考えて計算を行っていく。今回考えるPBH合体のシナリオは以下の通りである。まず、PBHが生成すると、そのPBHの周りにダークマターが降着していき、ダークマターハローを形成していく。そして、そのハローの中でPBH同士が連星を作り、dynamical frictionによって連星は角運動量を失い、最終的に合体する。この過程で重力波が放出される。そしてその後、ハロー自体も merger history で成長していき、大きなハローになっていく。そしてその新しいハローの中でPBH連星の衝突が起こる、ということを現在まで繰り返す。このシナリオを示した図が以下に示してある。



今回は、PBHのダークマターに対する割合は、与えられている制限を超えない最大値である $f = 10^{-7}$ 、PBH連星の角運動量を失わせるプロセスは dynamical friction のみよるとして計算を行った。また、実質的に重力波に寄与するのは、低い赤方偏移のときに合体するブラックホールであることが分かっている。[2] そのため、今回は現在から過去に遡るという形で $z = 4$ までの計算を行った。

— BH 連星合体により生じる重力波バースト —

(1)amplitude

$$h_{\text{burst}} = \frac{3^{3/4}\epsilon^{1/2}GM_{\text{tot}}}{2^{1/2}\pi c^2 D(z)} = 7.8 \times 10^{-16} \left(\frac{\epsilon}{0.1}\right)^{1/2} \left(\frac{M_{\text{tot}}}{10^8 M_{\odot}}\right) \left[\frac{D(z)}{1\text{Gpc}}\right]^{-1} \quad (0.0.1)$$

(2)event rate

$$\nu_{\text{burst}}(h_{\text{burst}}, f_c) = \int n_{\text{burst}}(h_{\text{burst}}, f_c, z) \frac{dV}{dt_0} dz \quad (0.0.2)$$

この n_{burst} は、ある z で合体する PBH 連星の個数密度を表している。この n_{burst} を求めるために、以下に示す merger tree を用いたハローの合体の解析を行う。

merger tree を用いたハローの合体の解析は、Press-Schechter 理論を拡張した Extended-Press-Schechter 理論から導出することができる。

Press-Schechter 理論は銀河のような bounded objects の数密度の計算に広く使われている理論である。簡潔にまとめるなら、密度ゆらぎの線形成長解を、球対称モデルを仮定することにより、非線形領域まで外挿し、天体形成を解析的に記述する理論のことである。Extended-Press-Schechter 理論では、クラウドインクラウド問題として知られる Press-Schechter 理論の問題点である、密度ゆらぎ δ があるスケールでは δ_c を超えないが、それより大きいスケールでは δ_c を超えることを説明できる。



図 1: Ref[4] より。merger tree の概念図

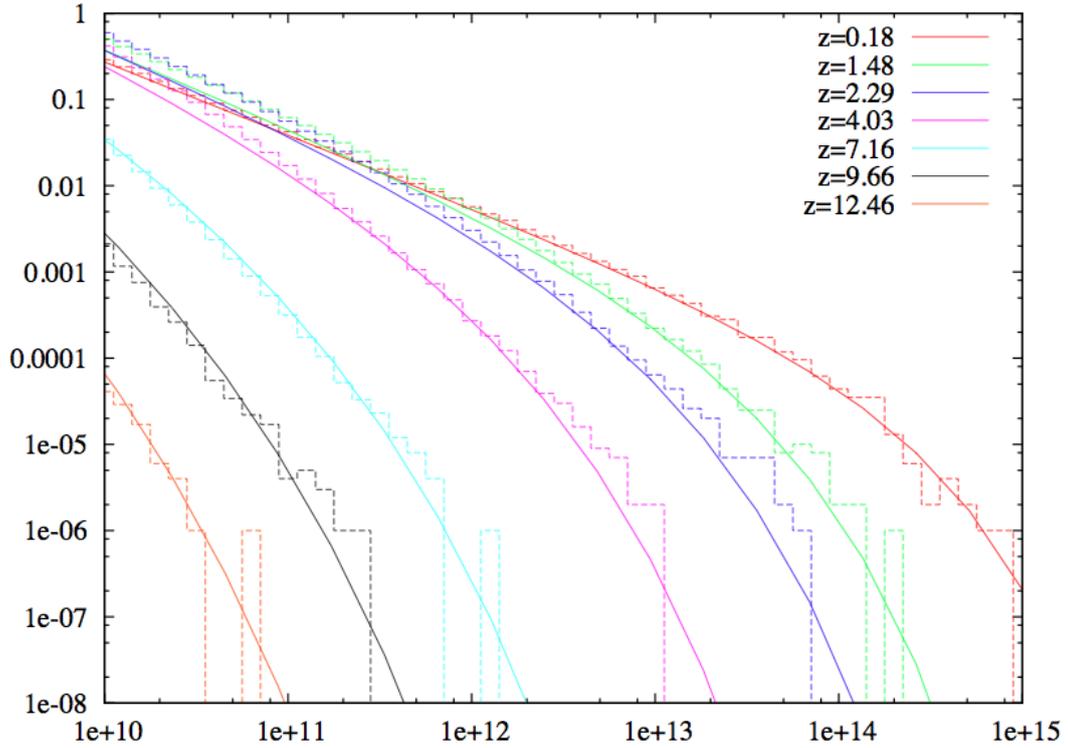
質量に対応する新たな変数として $S = \sigma^2(R)$ を定義し、スケール S での密度ゆらぎの軌跡 $\delta(S)$ を考える。これから、 S から $S + \Delta S$ の間に、障壁 δ_c を最初に上回る確率を計算することによって、ある点での任意の時刻での質量を求めることができる。k 空間 top-hat 型の window function でならずと、 $\delta(S)$ の軌跡はランダムウォークをする。

そうして、Extended-Press-Schechter 理論から、ある質量を持ったものがそれより少し前に質量がどれだけ変化するかを表した確率は以下ようになる。

$$P(\Delta S, \Delta\omega)\Delta S = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\Delta\omega}{(\Delta S)^{3/2}} \exp\left[-\frac{(\Delta\omega)^2}{2\Delta S}\right] d\Delta S \quad (0.0.3)$$

ここで、 $\Delta\omega$ は時間に相当する変数である。

今回は、ハローの合体は最大2つのハローの合体と考えて計算を行った。以下は、merger tree を用いた半解析的シミュレーションから得られた mass function と理論的に得られた mass function との比較である。実線が理論から予測されるもの、点線が今シミュレーションから得られたものである。今回はボックスサイズが 100Mpc での計算を行った。



この結果から、うまく再現できていると考えられるので、計算を進めていく。また、dynamical friction のタイムスケールは以下で与えられている。[5]

dynamical friction のタイムスケール

$$t_{\text{df}} = \frac{v_{\text{PBH}}^3}{4\pi G^2 M_{\text{PBH}} \rho_{\text{DM}} \ln \Lambda} \left[\text{erf}(X) - \frac{2X}{\sqrt{\pi}} e^{-X^2} \right]^{-1} \quad (0.0.4)$$

Result & Discussion

結果は以下ようになった。

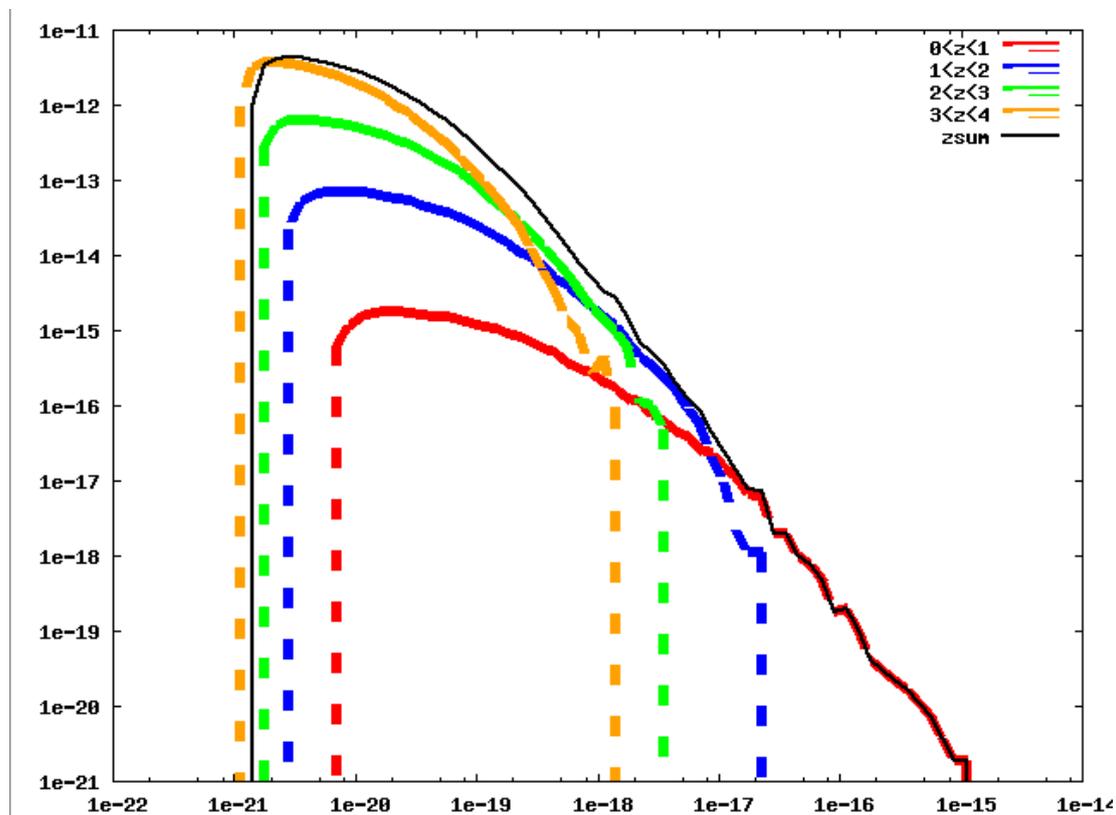


図 2: 縦軸は event rate [yr^{-1}]、横軸は amplitude

この結果から、PBH 連星合体により生じる重力波バーストを観測するのは、非常に困難だと分かった。

しかし今は、連星を合体させるために角運動量を失わせる物理的效果を dynamical friction しか考えていない。そのため、今後角運動量を失わせる他の物理効果（降着円盤との相互作用、三体問題）を考えていきたいと思う。また、PBH 連星から放出される背景重力波についても考えていきたいと思う。

参考文献

- [1] B. J. Carr, K. Kohri, Y. Sendouda and J. Yokoyama, Phys. Rev. D **81**, 104019 (2010) [arXiv:0912.5297 [astro-ph.CO]].
- [2] M. Enoki, K. T. Inoue, M. Nagashima and N. Sugiyama, eConf C **041213**, 2115 (2004) [astro-ph/0502529].
- [3] R. S. Somerville and T. S. Kolatt, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **305**, 1 (1999) [astro-ph/9711080].
- [4] C. G. Lacey and S. Cole, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **262**, 627 (1993).
- [5] K. Hayasaki, K. Takahashi, Y. Sendouda and S. Nagataki, arXiv:0909.1738 [astro-ph.CO].
- [6] H. I. Kim, C. H. Lee, Phys. Rev. **D54**, 6001-6007 (1996).