

原始ブラックホールは暗黒物質を説明できるか？

須山 輝明

東京工業大学理学院

M.Sasaki, TS, T.Tanaka, S.Yokoyama, CQG 35, 063001(2018) [arXiv:1801.05235]

IOP Publishing

Classical and Quantum Gravity

Class. Quantum Grav. 35 (2018) 063001 (76pp)

<https://doi.org/10.1088/1361-6382/aaa7b4>

Topical Review

Primordial black holes—perspectives in gravitational wave astronomy

Misao Sasaki¹, Teruaki Suyama², Takahiro Tanaka^{1,3}
and Shuichiro Yokoyama^{4,5}

¹ Center for Gravitational Physics, Yukawa Institute for Theoretical Physics,
Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan

² Research Center for the Early Universe (RESCEU), Graduate School of Science,
The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan

³ Department of Physics, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan

⁴ Department of Physics, Rikkyo University, Tokyo 171-8501, Japan

⁵ Kavli IPMU (WPI), UTIAS, The University of Tokyo, Kashiwa, Chiba 277-8583, Japan

E-mail: misao@yukawa.kyoto-u.ac.jp

Received 5 November 2016, revised 11 January 2018

Accepted for publication 15 January 2018

Published 8 February 2018



CrossMark

Abstract

This article reviews current understanding of primordial black holes (PBHs), with particular focus on those massive examples ($\gtrsim 10^{15}$ g) which remain at the present epoch, not having evaporated through Hawking radiation. With the detection of gravitational waves by LIGO, we have gained a completely novel observational tool to search for PBHs, complementary to those using electromagnetic waves. Taking the perspective that gravitational-wave astronomy will make significant progress in the coming decades, the purpose of this article is to give a comprehensive review covering a wide range of topics on PBHs. After discussing PBH formation, as well as several inflation models leading to PBH production, we summarize various existing and future observational constraints. We then present topics on formation of PBH binaries, gravitational waves from PBH binaries, and various observational tests of PBHs using gravitational waves.

Keywords: black holes, gravitational waves, primordial perturbations

(Some figures may appear in colour only in the online journal)

LIGOで検出された重力波は原始ブラックホールから？

須山輝明 (東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター suyama@resceu.s.u-tokyo.ac.jp)
田中貴浩 (京都大学大学院理学研究科 t.tanaka@tap.scphys.kyoto-u.ac.jp)
横山修一郎 (立教大学理学部物理学科 shuichiro@nikkyo.ac.jp)

2015年9月14日、アメリカのレーザー干渉計重力波天文台(LIGO)の2台の検出器によって人類初の重力波の直接検出がなされた。これはニュースでも大々的に報道されたので、多くの読者がご存じだろう。重力波の直接検出自体大ニュースだが、研究者をさらに驚かせたのは、その重力波の源が、およそ30倍の太陽質量を持つ2つのブラックホール(以降BHと省略)合体によるものだという点である。恒星質量域のBHの存在自体は、これまでも間接的には知られていた。コンパクト天体とそこにガスを供給する星からなる連星系(X線連星と呼ばれる)からの電磁波信号を説明するためには、そのコンパクト天体がBHであることが最も自然だったのである。

しかしながら、20例ほどあるX線連星で見つかったBHの推定質量はどれも数倍~15倍太陽質量程度に収まっており、30倍太陽質量ほどもある重いBHが見つかったのは、驚きであった。しかも、そのような重いBH同士が連星という形で宇宙にたくさん存在し、それらが合体することが明らかになったことも大きな発見であった。つまり、宇宙には想像以上にBHが溢れていることが分かったのである。新しい観測の窓が開くと必ず(良い意味で)予想を裏切る発見があるというのが天文学の歴史であるが、重力波も例に漏れずそうだったわけである。このLIGOの発表以降、見つかった連星BHの起源解明が宇宙物理学の重要なテーマとして躍り出てきた。

この記事では、「LIGOで見つかった重力波は、原始ブラックホール連星の合体から生じた」可能性を指摘した著者達の最近の研究を紹介する。原始ブラックホール(英語名はPrimordial Black Holeであり、以

宇宙誕生直後にできたBHのことであり、存在可能性の理論予言は60年代にまで遡る。電磁波を用いた探索ではこれまでPBHの存在の証拠は見つかっていなかったが、今回の重力波検出によって初めてPBHが見つかったかもしれないのだ。PBHシナリオでは、ビッグバン後6万年未満のまだ熱い放射優勢の時代に、PBH間の強い重力によって連星が自然に作られる。一旦形成した連星BHは、公転運動によって重力波を放射し、長い時間をかけて徐々にその軌道半径を縮めていき、宇宙年齢の時間スケールで合体をする。その合体に伴って強烈に放射された重力波をLIGOはとらえたというのが、PBHシナリオでのLIGOの観測結果の説明である。

PBHが形成時には宇宙空間にランダムに分布していたという仮定の下で、PBH合体頻度を理論的に評価したところ、PBHが暗黒物質の約0.1%に相当する量であれば、予測合体頻度がLIGOの結果と一致することを明らかにした。これは天の川銀河内に約3,000万個のPBHがあることに相当する。これは莫大な数のPBHに思えるが、BHは光を出さないで、既存のPBH存在量に対する制限とは矛盾しない。

PBHはインフレーション理論と密接な関係性があり、PBHシナリオが確定すると、未だ大きな不確定要素があるインフレーションモデルを、宇宙マイクロ波背景放射等の従来の制限とは全く別の切り口から制限することになり、初期宇宙に対する我々の理解が大幅に進展する。現段階では、PBHシナリオは一つの可能性に過ぎないが、今後多数のBH連星合体イベントが見つかり、データが蓄積されてくると、PBHシナリオの検証が可能になってくる。

—Keywords—

重力波:
巨大な天体等の運動により発生する時空の歪みが光速で伝搬する現象。アインシュタインの一般相対性理論で予言されていた。今までも中性子星連星の運動から重力波が放出されていることが間接的に確かめられていたが、2015年アメリカのLIGOという検出器によって初めて直接検出された。

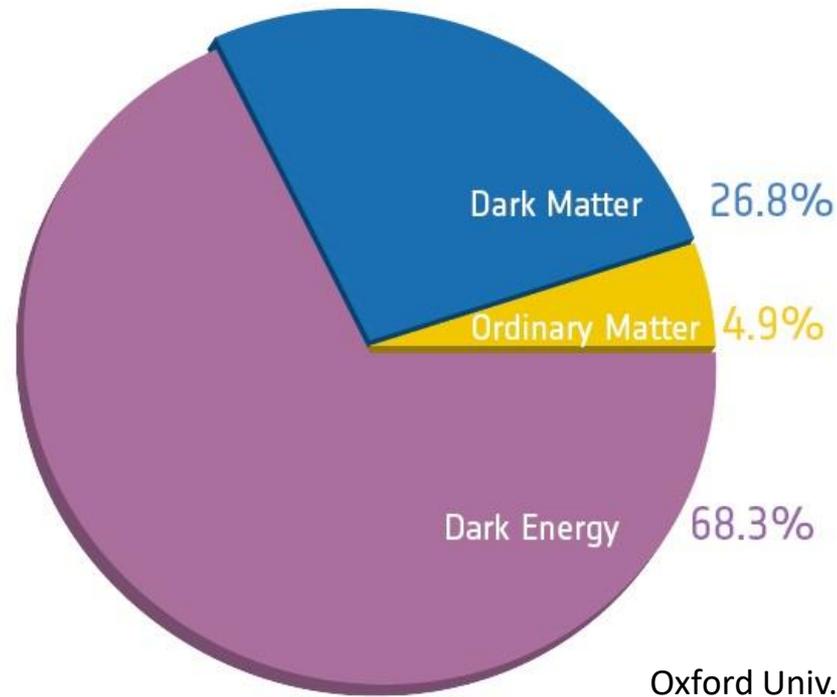
ブラックホール連星:
2つのブラックホールがお互いの重力によって周回する連星系。連星を構成するブラックホールは、重力波放出によりその軌道半径を縮めていき、最終的には合体によって一つのブラックホールになる。この合体に伴って放射された重力波をLIGOが検出した。この観測によって、宇宙にはブラックホール連星が存在することが明らかになった。

原始ブラックホール:
宇宙誕生直後、宇宙が非常に高温、高密度であった時期に生成されるブラックホールのこと。星の重力崩壊とは異なり、物質密度の空間的な揺らぎに起因する周囲に比べて特に高密度な領域が直接重力崩壊し生成される。理論的には、このようなブラックホールがあっても構わず、これまで様々な方法による探索が行われてきたが、まだ決定的な存在証拠は見つかっていない。暗黒物質の候補としても注目されている。

原始ブラックホールは暗黒物質を説明できるか？

YES

ただし原始ブラックホール(PBH)の質量域は限られる



暗黒物質の正体は何か？

宇宙論だけでなく他分野を
巻き込んだ重要な問題

暗黒物質の候補

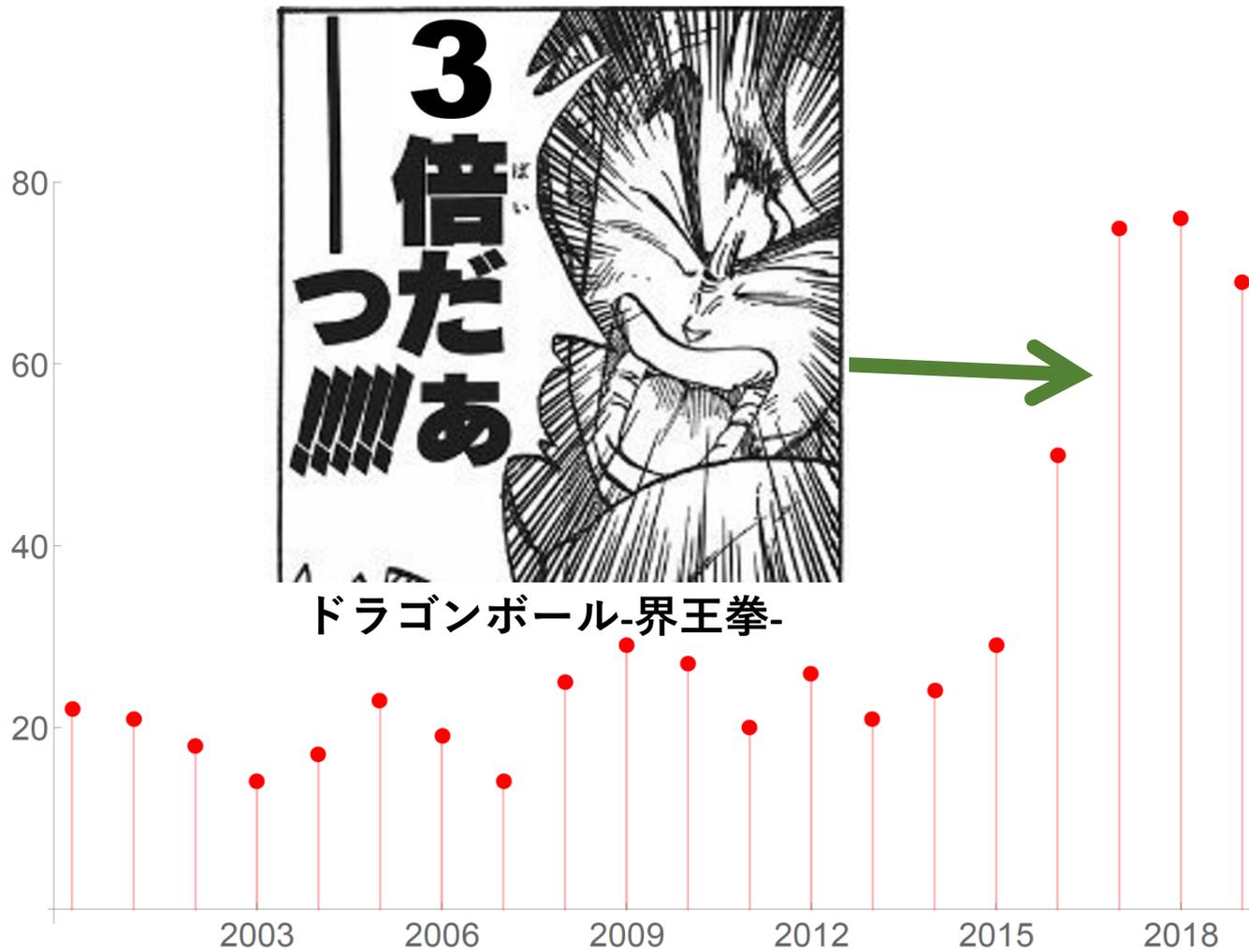
光らない・相互作用が弱い・非相対論的運動



**PBH研究が最近大きく進展
しているから**

タイトルにPrimordial black holeが含まれる論文数の推移 (HEP INSPIREに基づく)

論文数



ドラゴンボール-界王拳-

年

世紀の大偉業

「重力波」初検出

重力波を初観測

重力波 初観測

重力波を初観測

初期宇宙解明に道
アインシュタイン予言

北、開城を

新毎日

朝日新聞

同一賃金法制



発行所 四国新聞社
 〒760-8572 高松市中野町15番1号
 ©四国新聞社 2016年
 ●意見・お問い合わせは
 読者相談室087-833-5552
 (平日10時～17時/土日祝休)
 電話 087-833局
 報道部 1119 総務部 1114
 運動部 1818 販売部 1124
 生活文化部 1121 広告部 1145
 事業室・文化教室 811-2300
 ●印刷のお申し込み先
 ☎0120-084459



県内の人気うどん店100店のかけうどんの平均価格は235・7円で、2014年4月の消費税増税時に比べて3・2円値上がりしていることが四国新聞社の調べで分かった。値上げした店は15店。大半は増税時に値上げを見送った店で、結果的に増税負担に耐えられなかったようだ。50円的大幅改定をした店があり、平均値上げ額は増税時を上回った。天ぷらなどのサイドメニューの価格を改定した店もあった。しかし、値段が徐々に上がっているとはいえ、安くて気軽に食べられる「讃岐うどん」の存在感は揺るぎない。(19面に「特報」)

県内うどん店100店調査

かけうどん235.7円

増税以降3.2円値上がり

UPIの推移

	今回調査	前回調査 (2014年4月)	差額
全体	235.7円	232.5円	3.2円
セルフ製麺所	202.0円	199.4円	2.6円
一般店	314.5円	309.8円	4.7円

の14年4月以来。UPIは235・7円で、前回調査時の232・5円から3・

実際に値上げしており、値上げの理由として「増税から1カ月頑張ったが限界だった」など回答。残る2店は増税時に値上げし、その後再度、値上げしていた。逆に値下げをした店はなかった。

UPIを店のタイプ別にみると、セルフ・製麺所は2・6円アップの202・0円、一般店は4・7円アップの314・5円だった。

調査ではこの1年でのサイドメニューの価格変動も聞いた。サイドメニューを値上げした店は25店。内訳は、天ぷら20店、おでん8店、ご飯類12店だった。こちらも値下げをした店はなかった。

うどんの価格は据え置く一方、サイドメニューの値上げに踏み切った店もあった。この間、小麦価格は大きく上がっていないが、食用油やエビなどの輸入食材

重力波、世界初観測

米大学など国際チーム 宇宙の起源に迫る

【ワシントン共同】浅見英一「アインシュタインが100年前に存在を予言した「重力波」について、米大学を中心とした国際実験チーム「LIGO(ライゴ)」が11日(日本時間12日未明)、ワシントンで記者会見を開き、「二つのブラックホールが合体したときに放たれた重力波の観測に成功した」と発表した。重力波の直接観測は世界初で、宇宙の成り立ちに迫るノーベル賞級の成果。(3面に関連記事)

かけうどん3.2円値上がり > 重力波初検出

恐るべし香川県



ブラックホール連星合体の発見!!!
(質量 $\approx 30M_{\odot}$)

LIGOのBH連星の起源は謎

PBHは一つの候補

これがPBH研究の再燃の1つのきっかけとなった

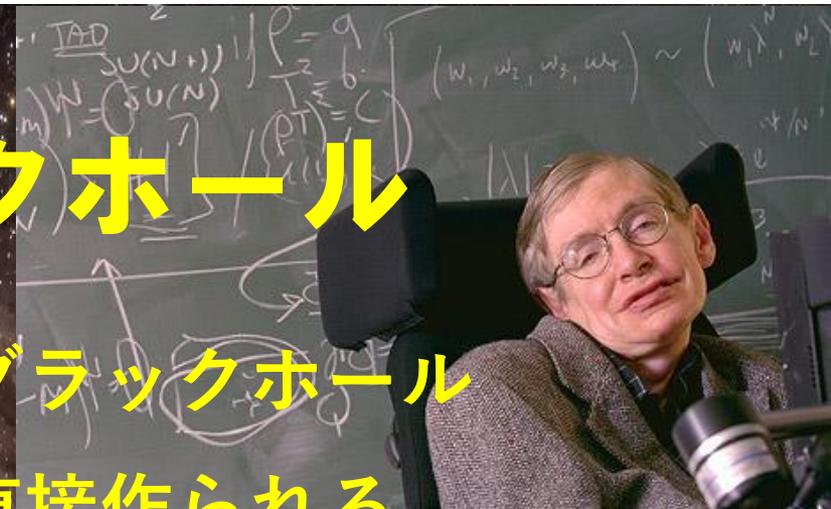
他の実験で暗黒物質検出の兆候なし

PBHならば新しい素粒子の導入は必要なし

他の質量域のPBHにまで燃焼波面が広がっている

原始ブラックホール

宇宙初期に形成するブラックホール
原始密度揺らぎから直接作られる
理論的にはあっても全く不思議ではない



Mon. Not. R. astr. Soc. (1971) **152**, 75–78.

GRAVITATIONALLY COLLAPSED OBJECTS OF VERY LOW MASS

Stephen Hawking

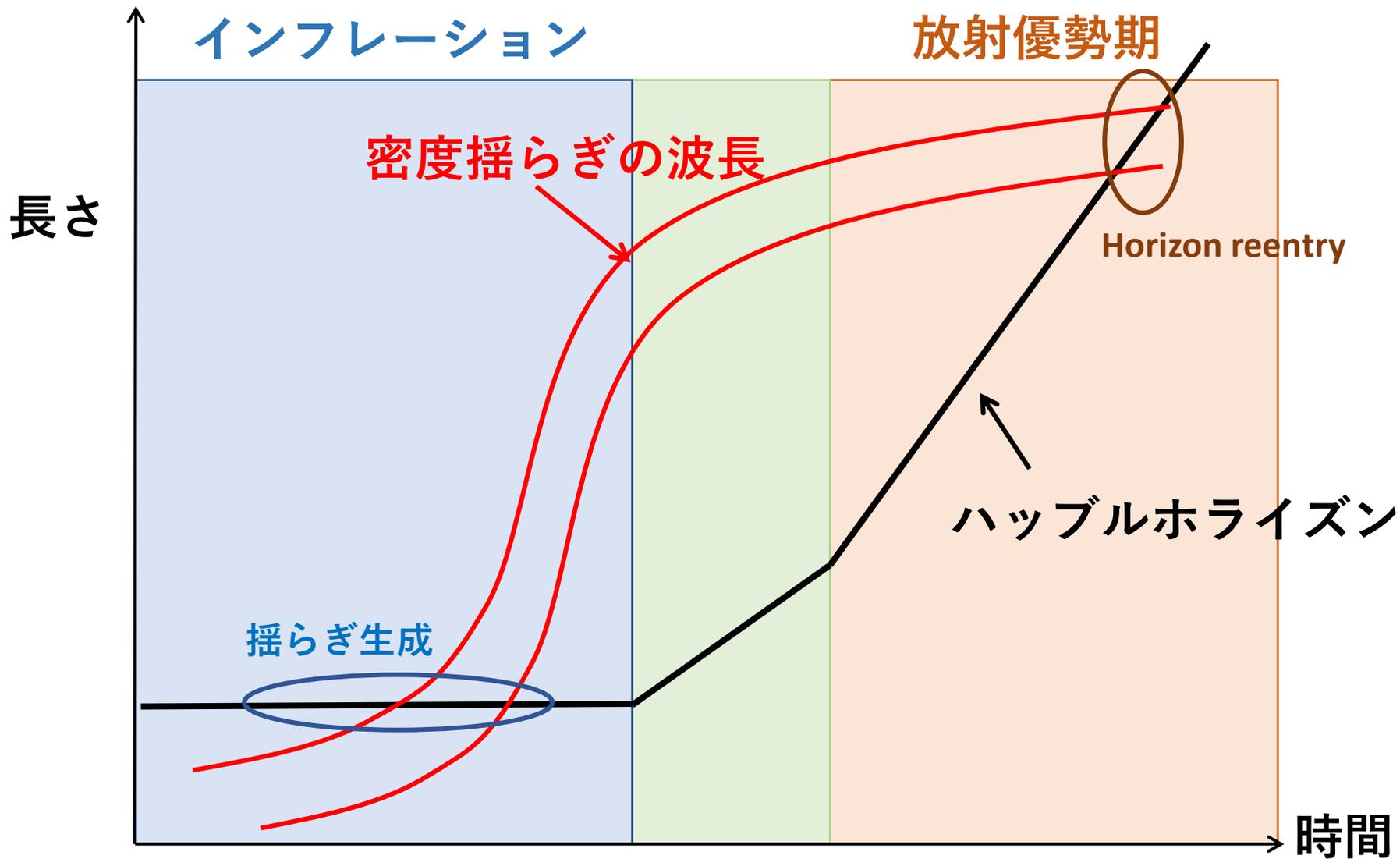
(Communicated by M. J. Rees)

(Received 1970 November 9)

SUMMARY

It is suggested that there may be a large number of gravitationally collapsed objects of mass 10^{-5} g upwards which were formed as a result of fluctuations in the early Universe. They could carry an electric charge of up to ± 30 electron

PBH形成

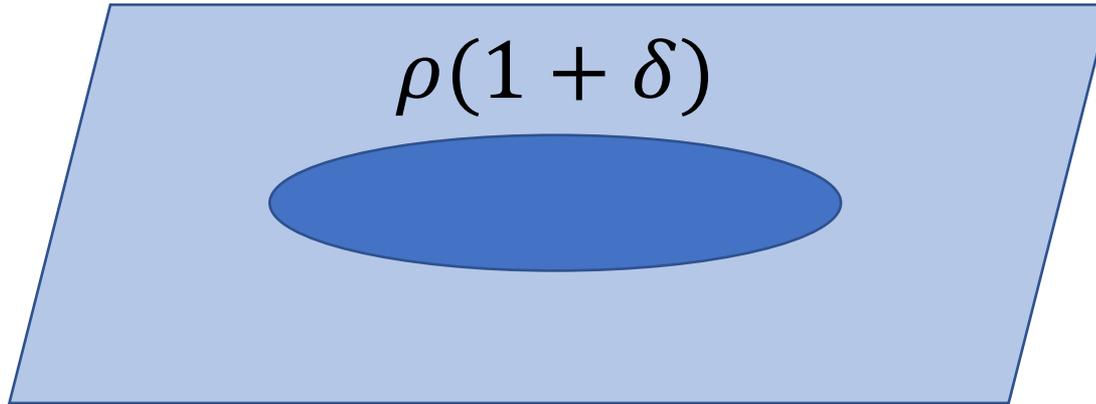


あらゆる波長 ($1\text{m} \lesssim \lambda \lesssim \text{Gpc}$)の揺らぎが作られる

PBH形成

e.g. Harada+ 2013

Horizon reentry直後



形成条件

自己重力 > 压力勾配


$$\delta > \delta_{th} \quad (\delta_{th} \simeq 0.8)$$

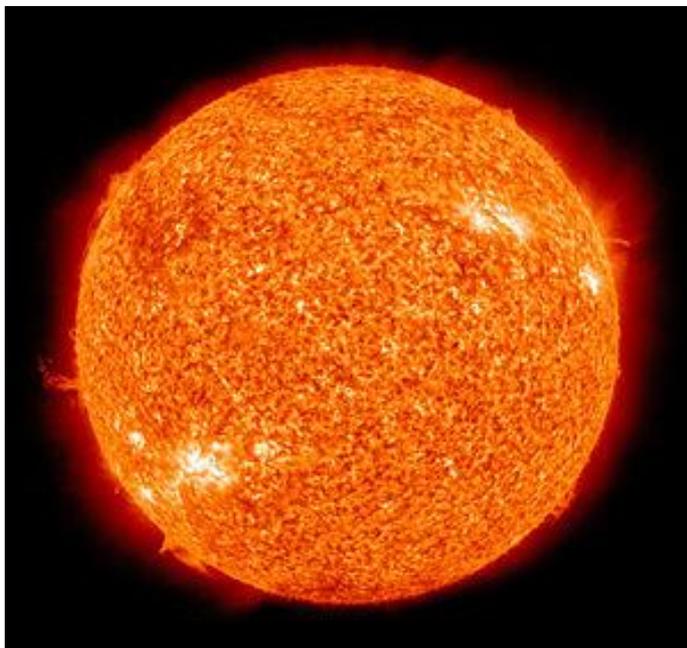
PBHの質量

$$M_{\text{PBH}} \sim \frac{1}{GH} \sim 10M_{\odot} \left(\frac{t}{0.1\text{ms}} \right) \sim 10M_{\odot} \left(\frac{k}{1\text{pc}^{-1}} \right)^{-2}$$

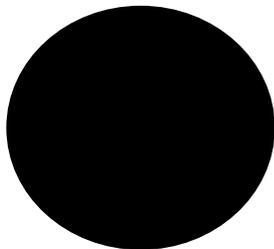
PBH質量は恒星質量よりも(ずっと)小さくなり得る

興味ある質量域に対応する揺らぎの波長は、
宇宙論的スケールよりもずっと短い

星

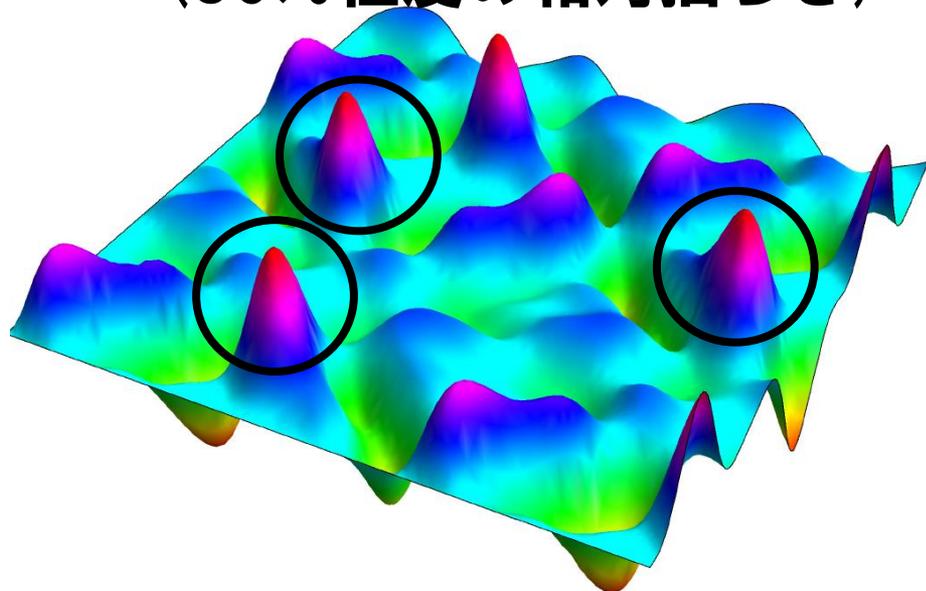


~100億年

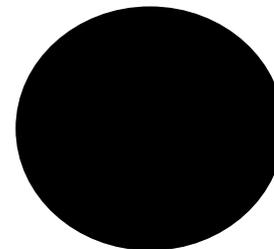


ブラックホール

原始密度揺らぎ
(80%程度の相対揺らぎ)



~0.1ミリ秒



原始ブラックホール

PBH形成の非自明な点

$\delta = O(1)$ が実現されていたか？

インフレーションモデルに依存する
(たくさん論文が出続けている)

PBHスケールで $\delta \sim 1$ となる必要あり

PBHを予言するインフレーションモデル(一例)

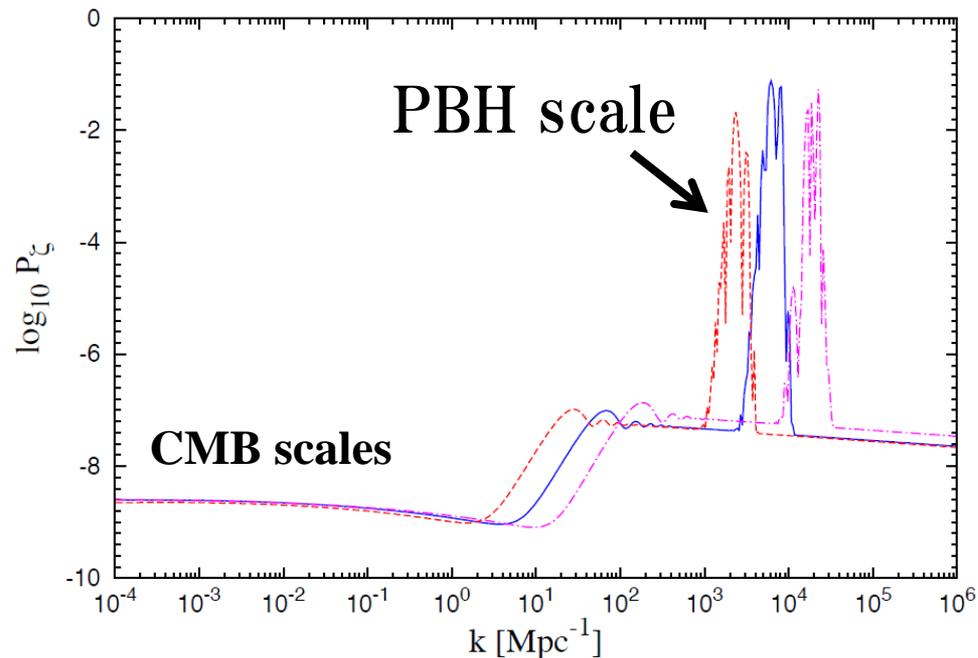
$$V = V_{\text{H}} + V_{\text{N}} + V_{\text{HN}},$$

Kawasaki+ 2012

$$V_{\text{H}}(\phi, \psi) = \left(1 + \frac{\phi^4}{8} + \frac{\psi^2}{2}\right) \left(-\mu^2 + \frac{\psi^4}{16M^2}\right)^2 + \frac{\phi^2\psi^6}{16M^4},$$

$$V_{\text{N}}(\varphi) = v^4 \left(1 - \frac{\kappa}{2}\varphi^2\right) - \frac{g}{2}v^2\varphi^4 + \frac{g^2}{16}\varphi^8,$$

$$V_{\text{HN}}(\phi, \psi, \varphi) = \left(-\mu^2 + \frac{\psi^4}{16M^2}\right)^2 \frac{\varphi^2}{2} - \left(-\mu^2 + \frac{\psi^4}{16M^2}\right) v^2\phi\varphi,$$



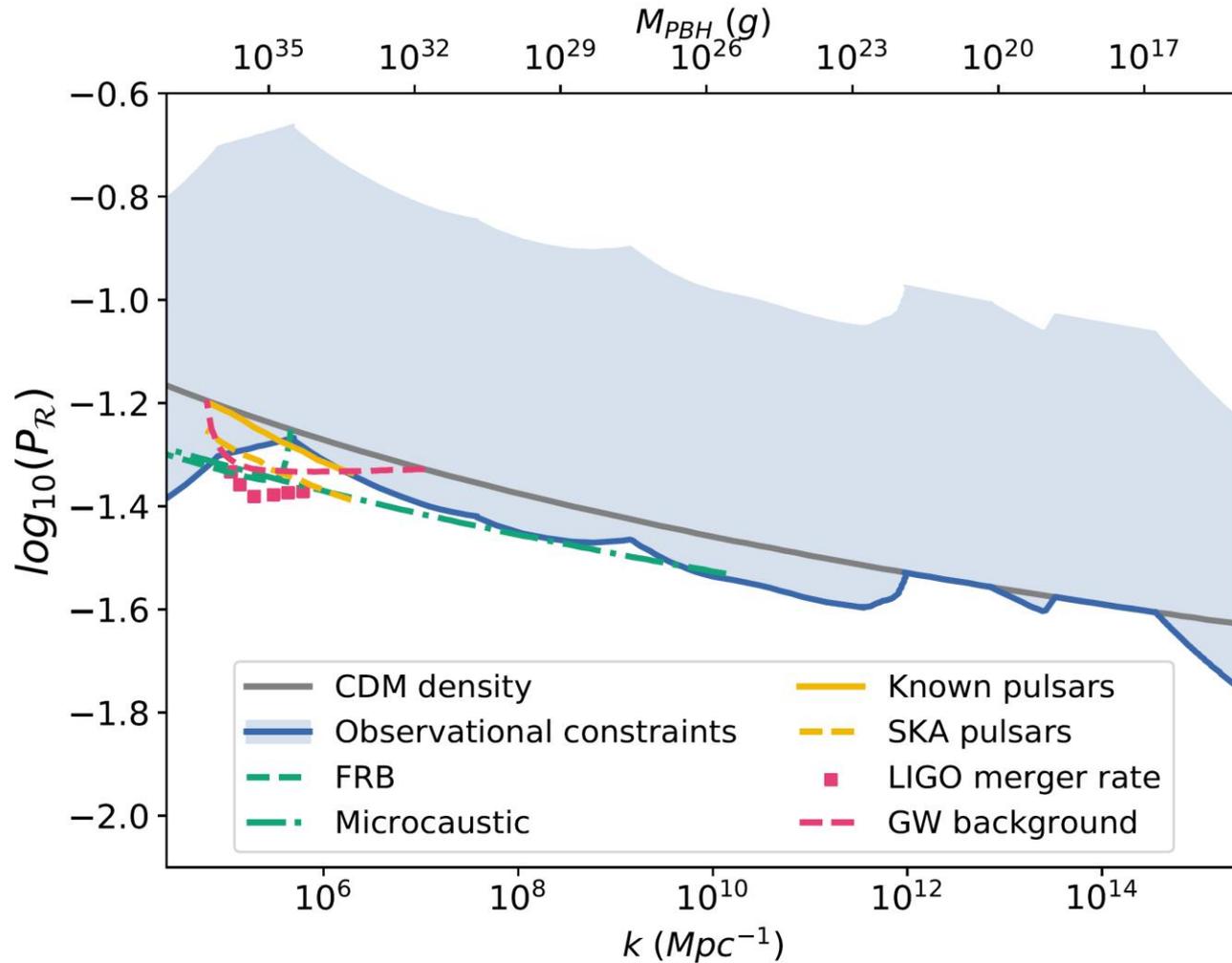
PBHの存在量

$$\beta(M_{BH}) \equiv \frac{\rho_{PBH}}{\rho_{tot}} = \int_{\delta_{th}}^{\infty} P(\delta) d\delta \quad @PBH形成時$$

$$f_{PBH} \equiv \frac{\Omega_{PBH}}{\Omega_{DM}} \simeq 6 \times 10^7 \left(\frac{M_{BH}}{1M_{\odot}} \right)^{-\frac{1}{2}} \beta$$

PBH形成は非常にレア(高 σ ピークからのみ)

f_{PBH} への観測制限 \Rightarrow $P(\delta)$ への制限



PBHの制限から、インフレーションモデルを制限することができる

PBHがなぜ重要か？

- PBHは暗黒物質の候補
- インフレーションの制限に結び付く (CMB など大スケール観測とは独立・相補的)

PBH研究は見つからなくても意義がある

PBHの観測的制限

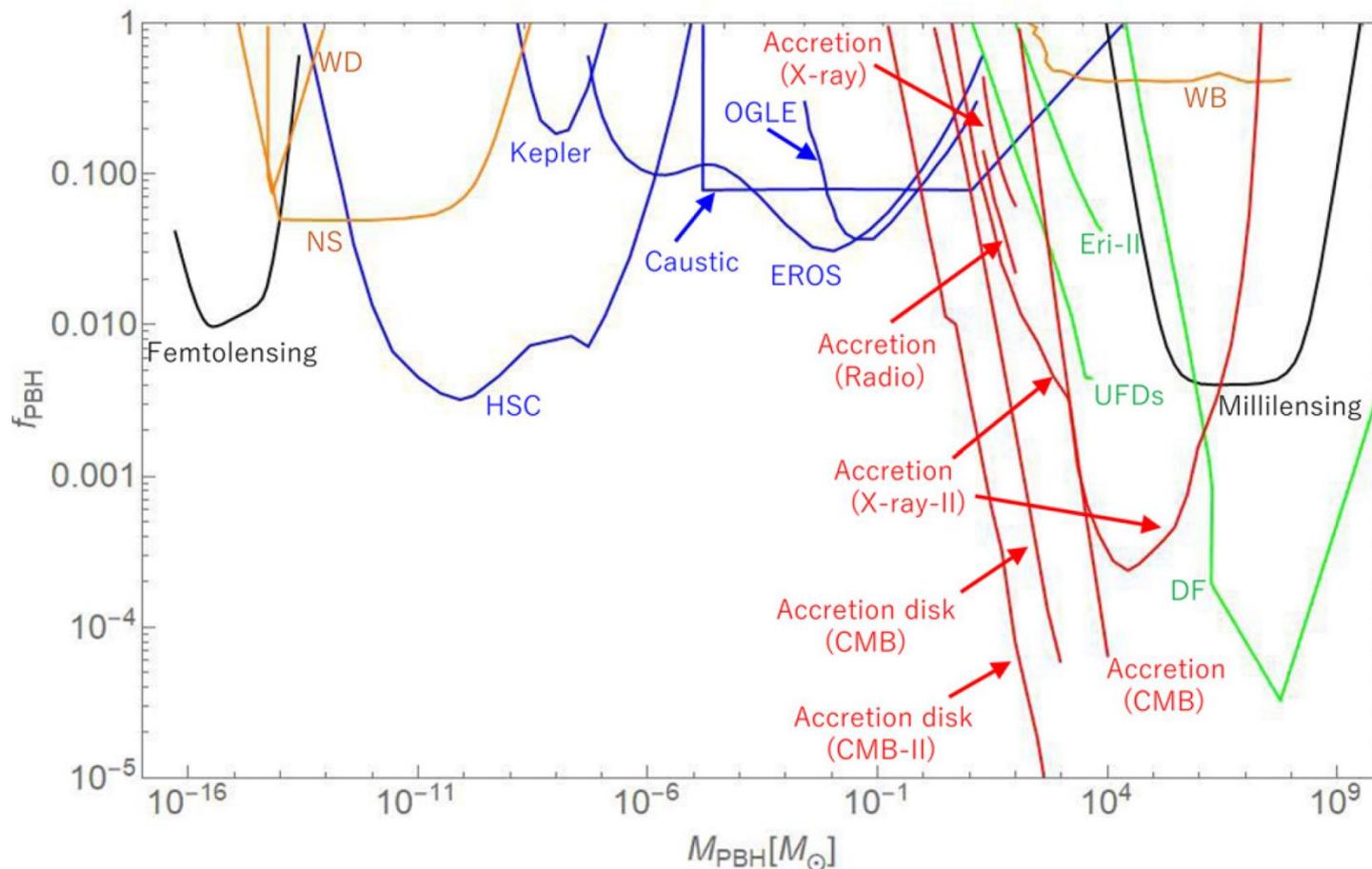
PBHの質量によって様々な現象が起こる

非常に大雑把な分類

- 恒星より軽いPBH
重カレンズ、個々の天体をぶっ壊す
- 恒星より重いPBH
降着、天体系の破壊

f_{PBH} の観測的制限(一年半前)

1801.05235

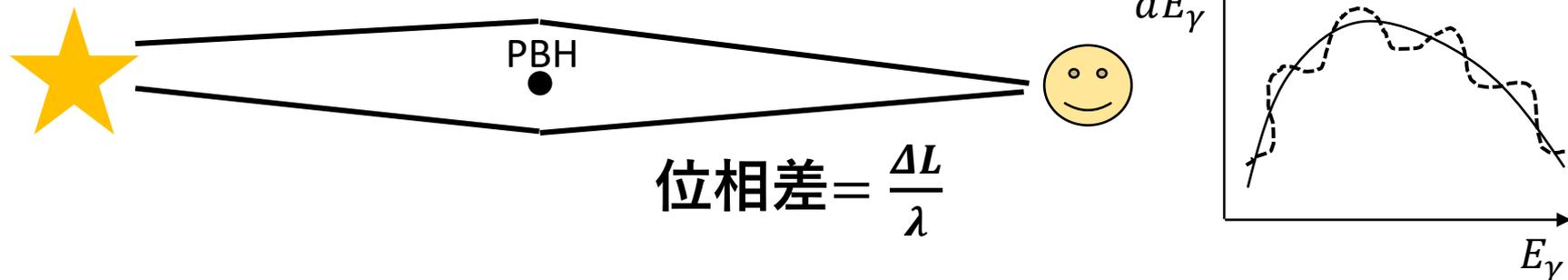


PBHは暗黒物質全てを説明できない

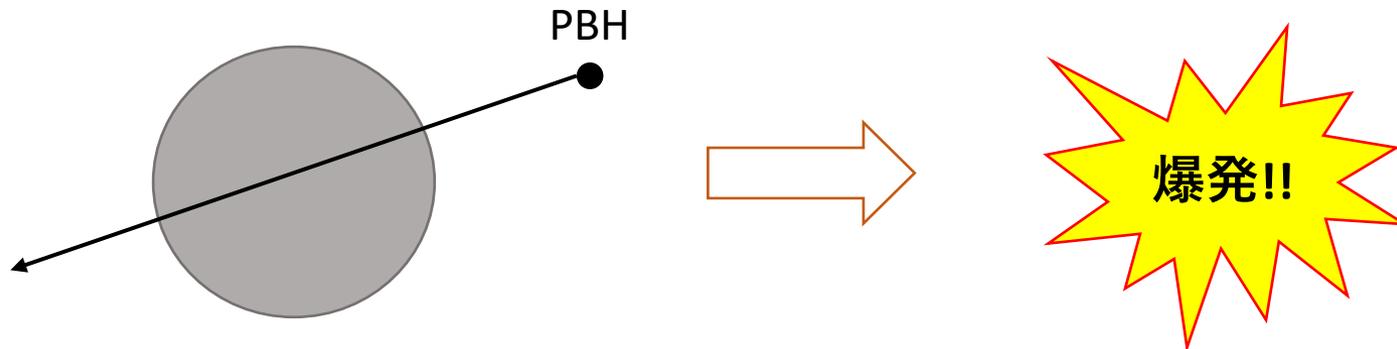
※全てのPBHは同質量と仮定 ²⁴

制限の再考

- Femtolensingによる制限 1807.11495



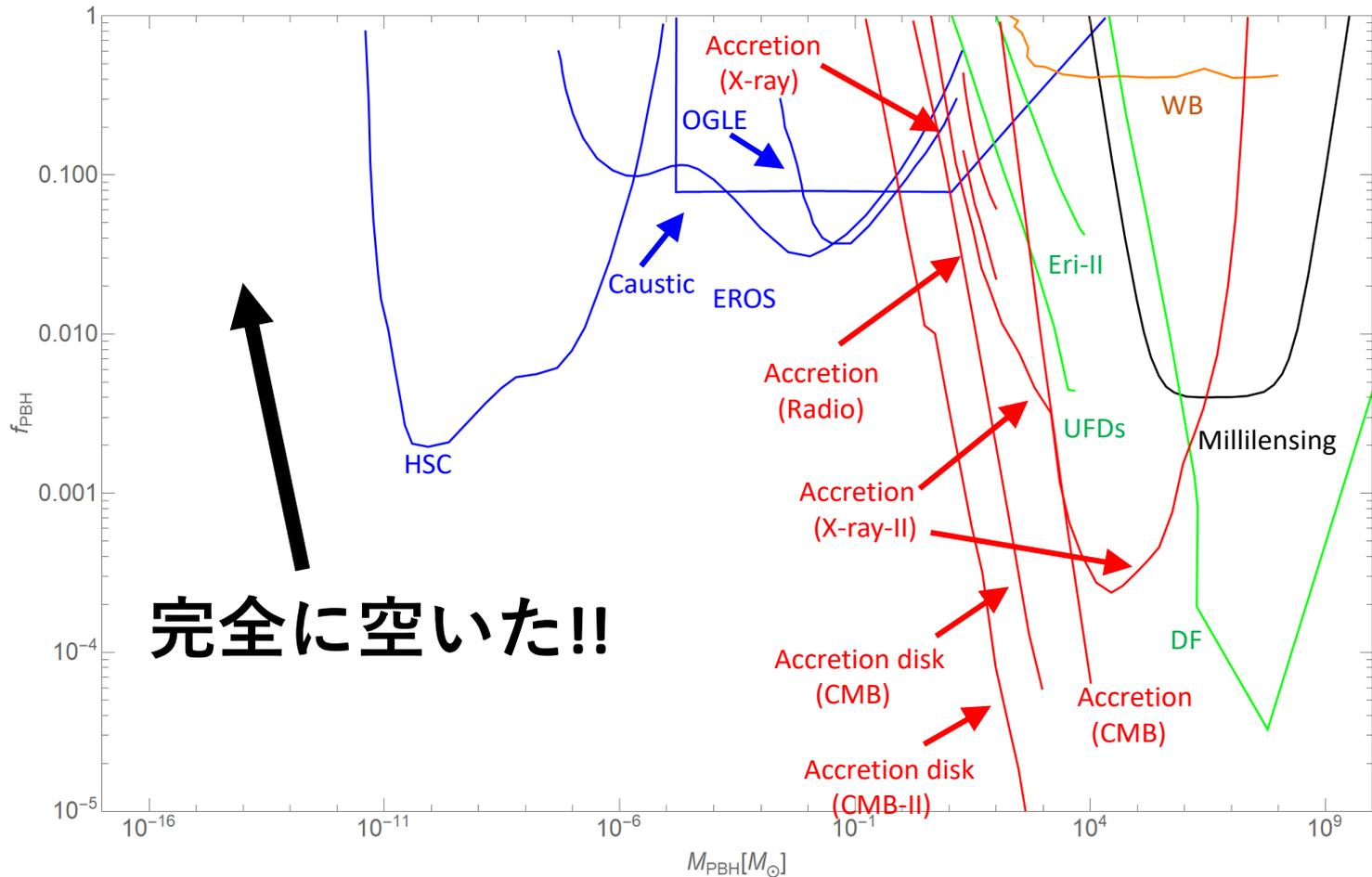
- 白色矮星による制限 1906.01847



- HSCによる制限 1701.02151, 1905.06066

重力レンズの波動効果($\lambda \gtrsim 2GM_{BH}$)及び有限サイズ($\theta_S \gtrsim \theta_E$)の効果

f_{PBH} の観測的制限(現在)



$M \lesssim 10^{22}$ gのPBHは暗黒物質全てを担い得る

重力波によるPBHの制限

PBH探査にとって、重力波は非常に強力な観測手法

PBHは放射優勢期に連星を作る

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 487:L139–L142, 1997 October 1
© 1997. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.



GRAVITATIONAL WAVES FROM COALESCING BLACK HOLE MACHO BINARIES

TAKASHI NAKAMURA

Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Kyoto 606, Japan

MISAO SASAKI AND TAKAHIRO TANAKA

Department of Earth and Space Science, Osaka University, Toyonaka 560, Japan

AND

KIP S. THORNE

Theoretical Astrophysics, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125

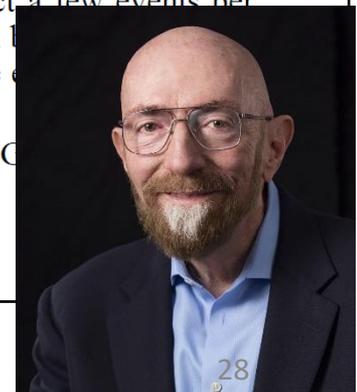
Received 1997 April 11; accepted 1997 July 23; published 1997 September 2



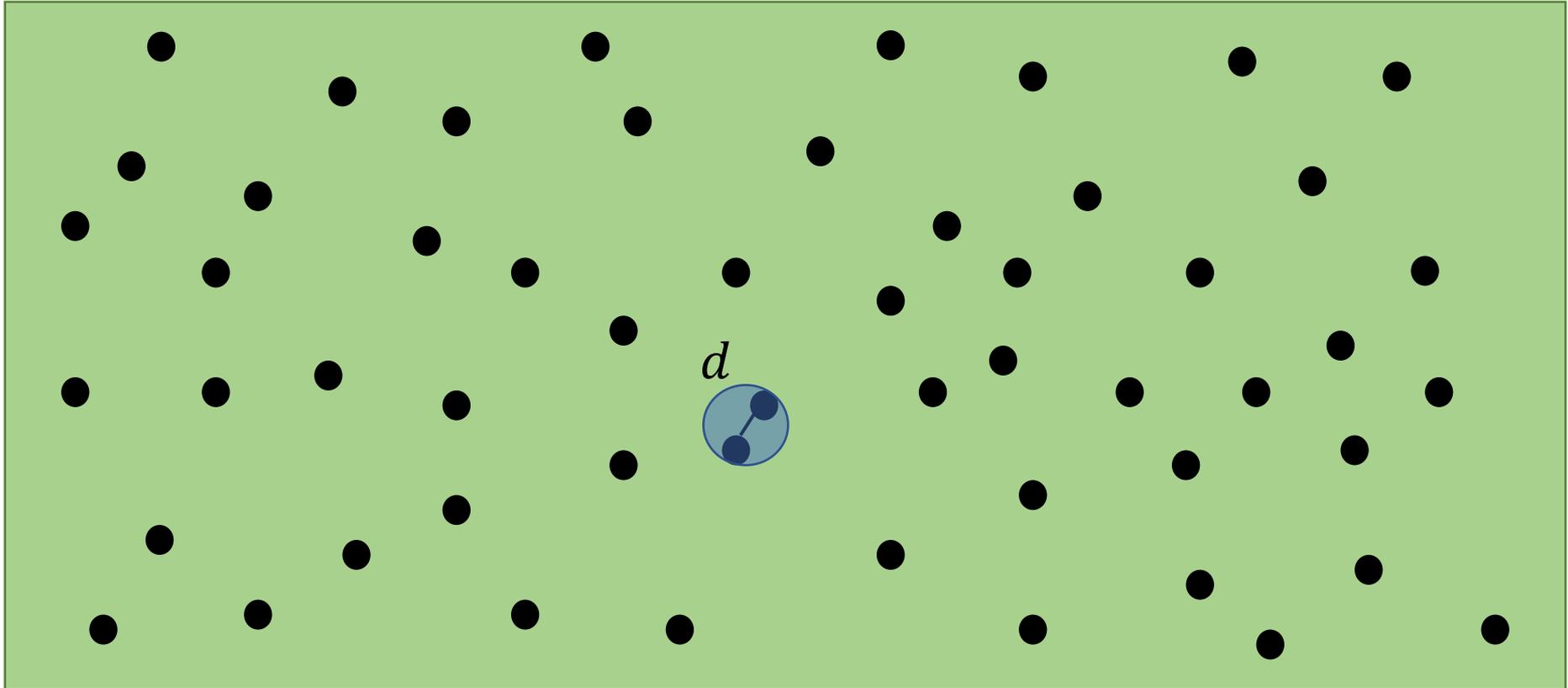
ABSTRACT

HOs are black holes of mass $\sim 0.5 M_{\odot}$ they must have been formed in the early uni
e was ~ 1 GeV. We estimate that in this case in our Galaxy's halo out to ~ 50 kpc there exist $\sim 5 \times$
hole binaries the coalescence times of which are comparable to the age of the universe, so that the
e rate will be $\sim 5 \times 10^{-2}$ events yr^{-1} per galaxy. This suggests that we can expect a few events per
15 Mpc. The gravitational waves from such coalescing black hole MACHOs can be
tion of interferometers in the LIGO/VIRGO/TAMA/GEO network. Therefore, the
HOs can be tested within the next 5 yr by gravitational waves.

Findings: black hole physics — dark matter — gravitation — gravitational lensing — C



放射優勢期でのPBH連星形成

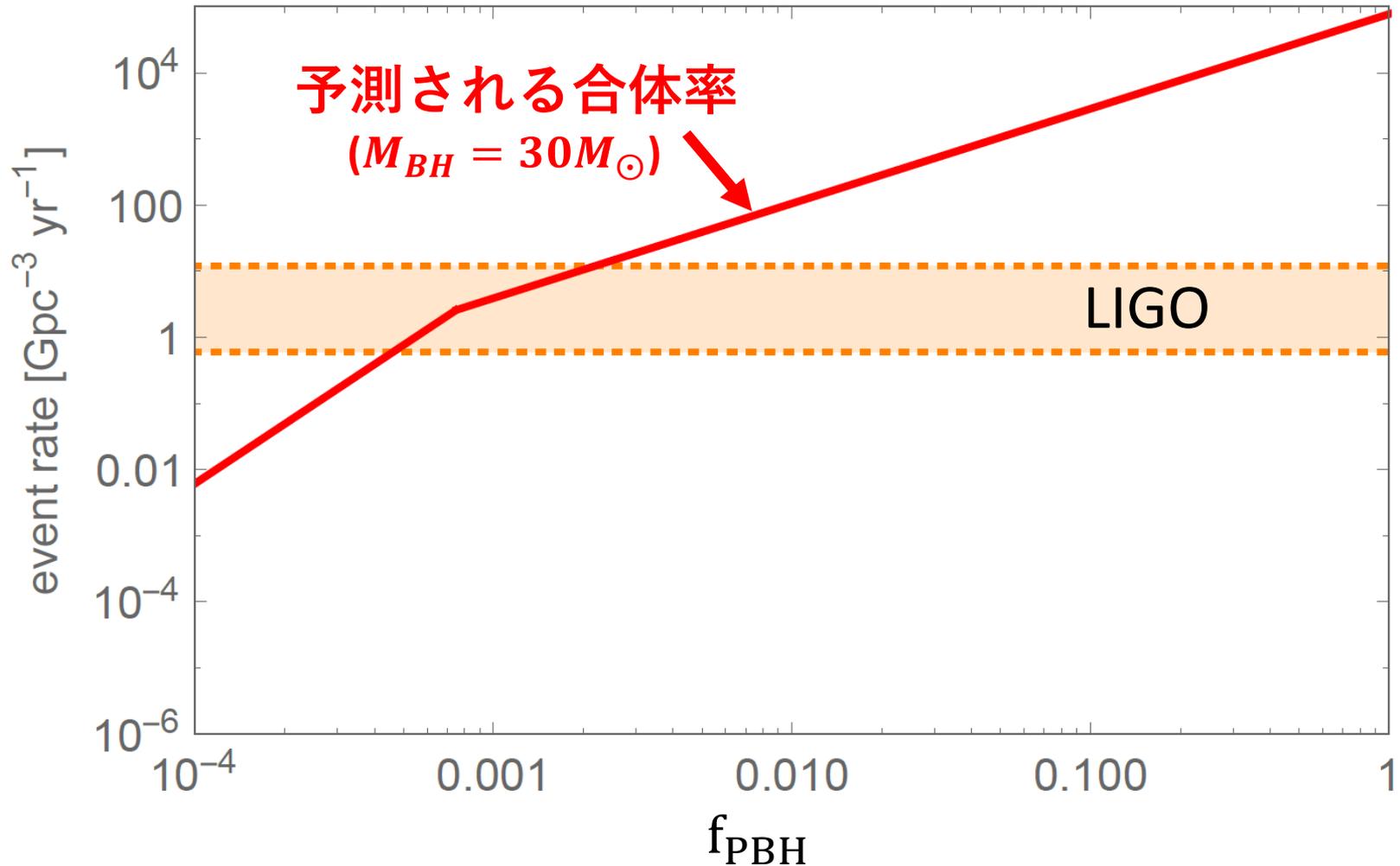


BH 質量 : $2 M_{BH}$

放射質量 : $\rho_{rad} d^3 \propto 1/a$

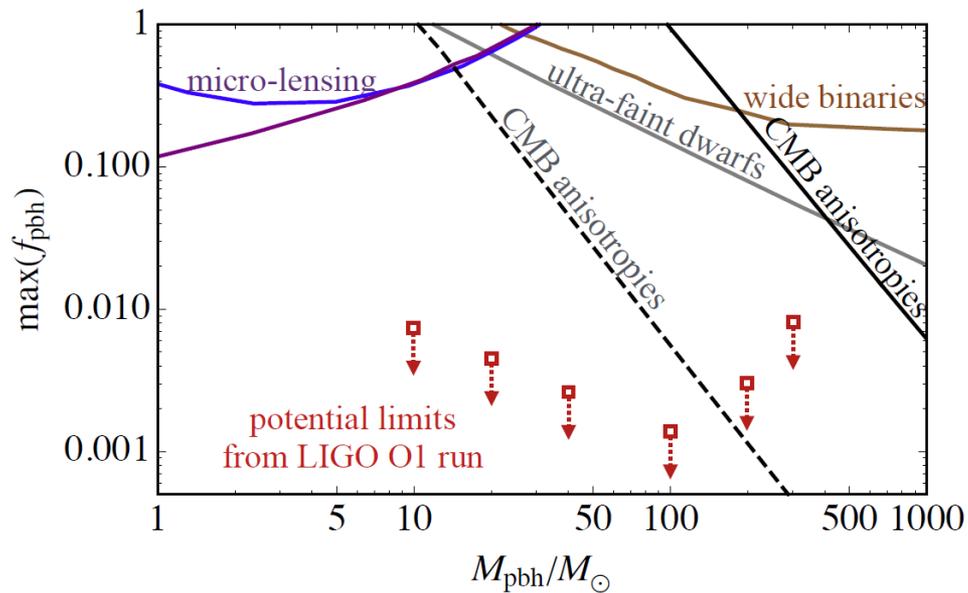
PBH連星合体率

Sasaki+ 2016

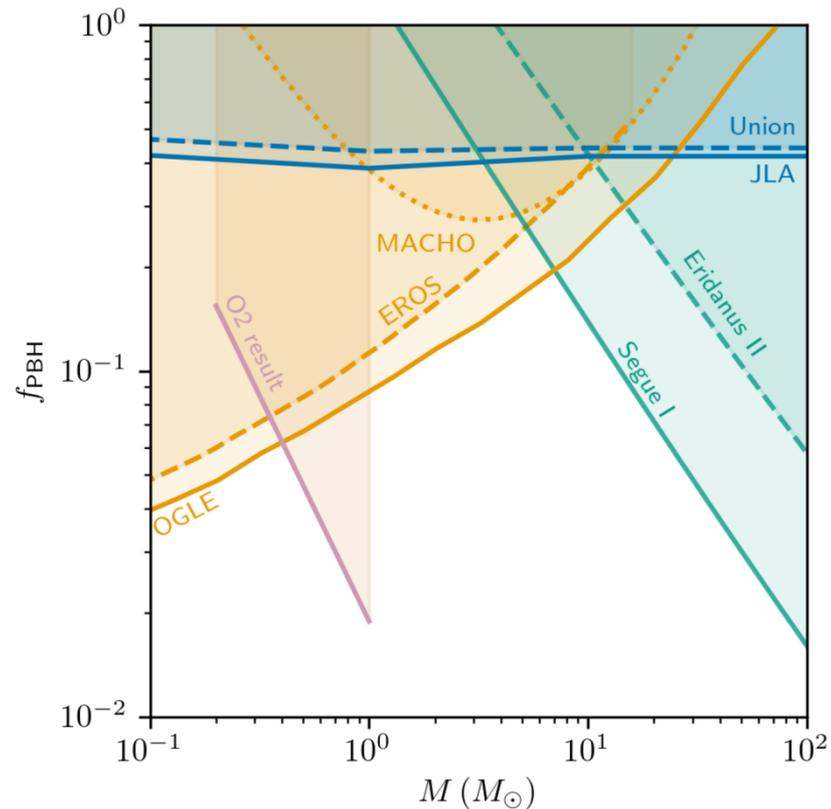


$f_{\text{PBH}} \sim 10^{-3}$ であれば、LIGOの観測結果を説明できる
 $M_{\text{BH}} \sim 30M_{\odot}$ のPBHは暗黒物質の主成分となり得ない

逆に制限も課すことができる



Ali-Haimoud+ 2017



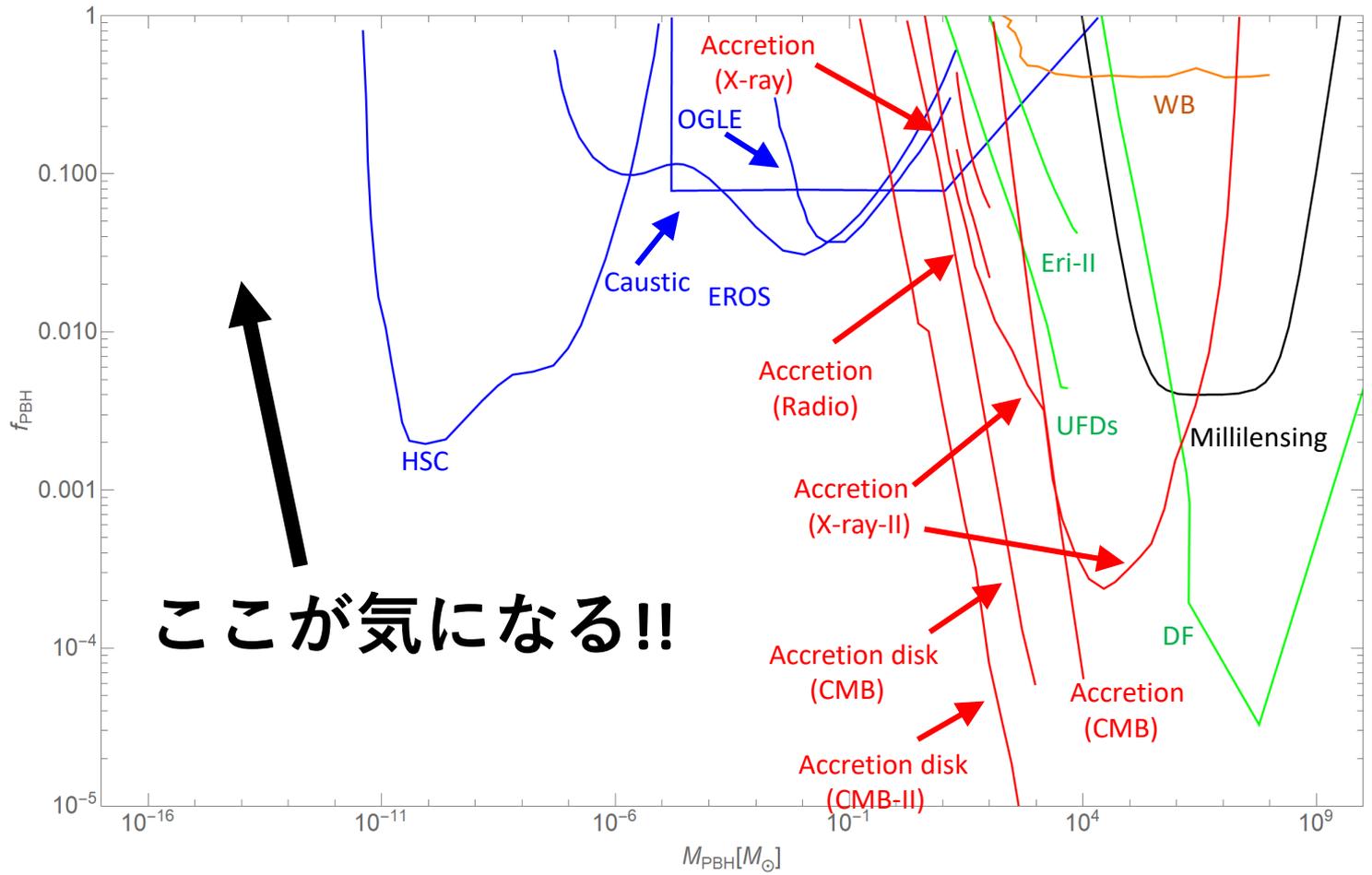
LIGO-Virgo
Collaboration 2019

重力波は、従来の制限よりも強力となり得る

恒星質量域のPBHの検証

- 連星合体率の時間進化 T.Nakamura+ 2016
- スピン分布 T.Chiba+ 2016, M.Mirbabayi+2018, V.De Luca+2019, M.He+ 2019
- 背景重力波 K.Ioka et al 1999, S.Wang et al. 2016, M.Raidal et al. 2017
- 合体率の質量分布 B.Kocsis+2017, L.Liu+ 2018, J.Garriga+ 2019

今後の観測で、明らかになるだろう

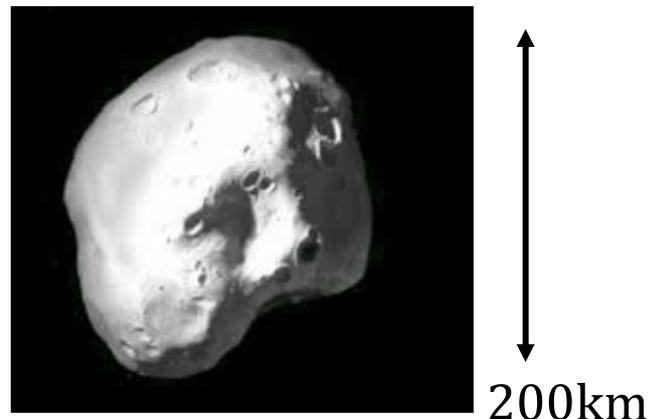


ここが気になる!!

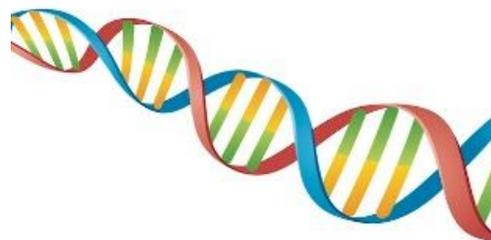
LIGO等の干渉計では見えない

$M \lesssim 10^{22} \text{g}$ のPBHを探るのは簡単ではない

小惑星(Juno)と同程度の質量



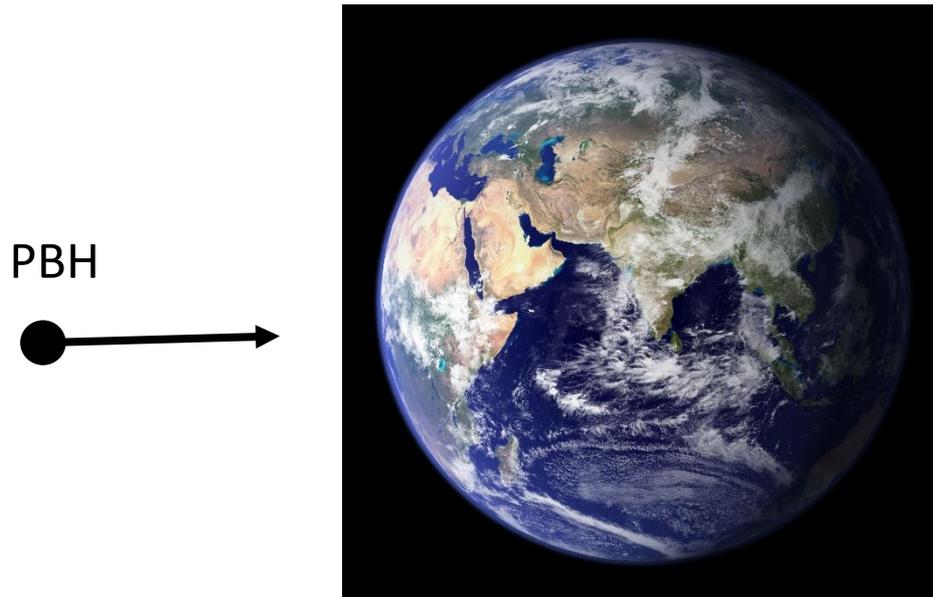
DNAとだいたい同じ大きさ



$(100 \text{AU})^3$ の体積内にPBH 1 個

PBH通過による地震

Khriplovich+ 2008



エネルギー $\sim 10^{24}$ J

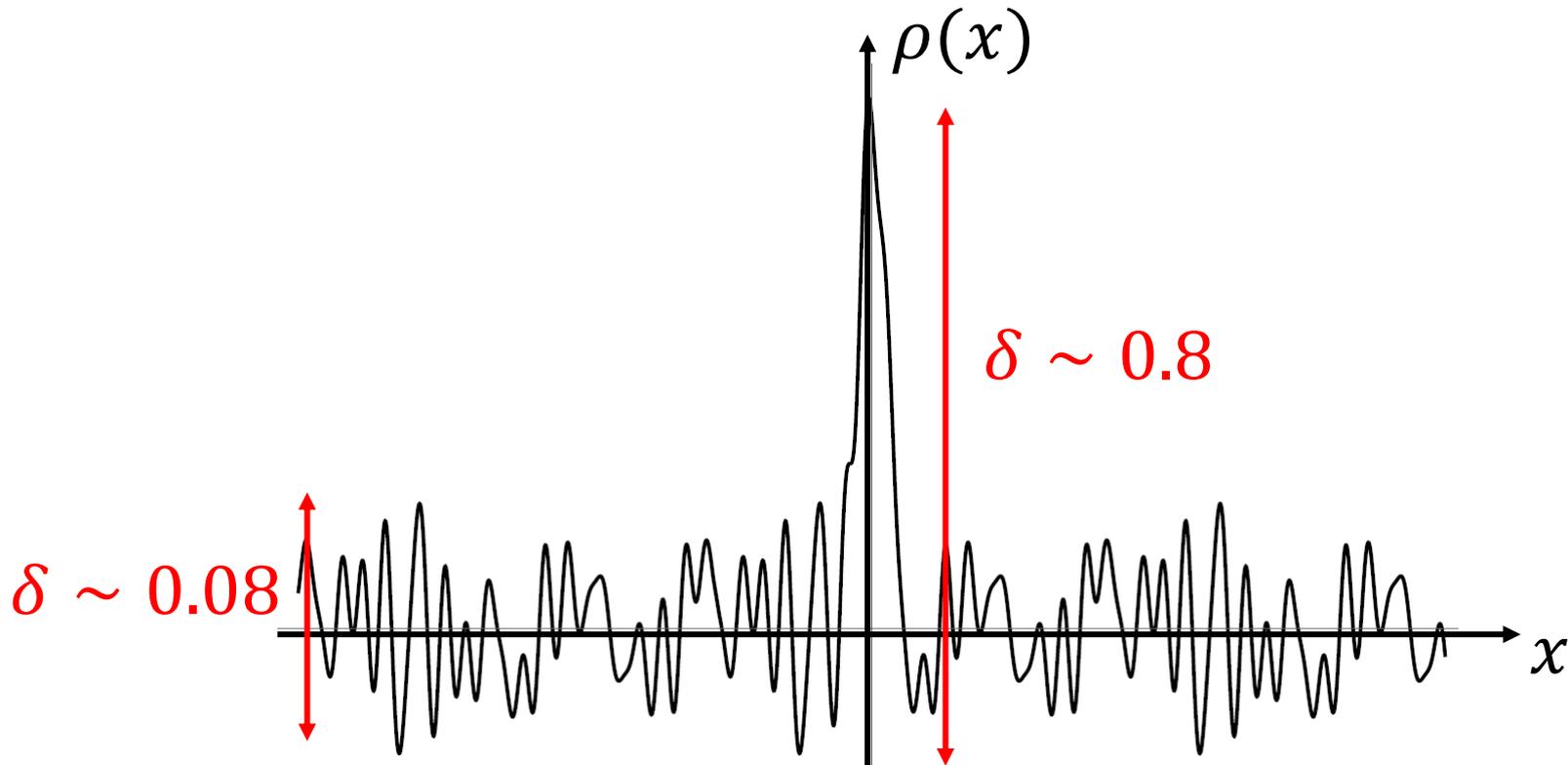
※大地震 $\sim 10^{18}$ J

遭遇率 $\sim 10^{-14}$ /yr

直接探査は見込みなし

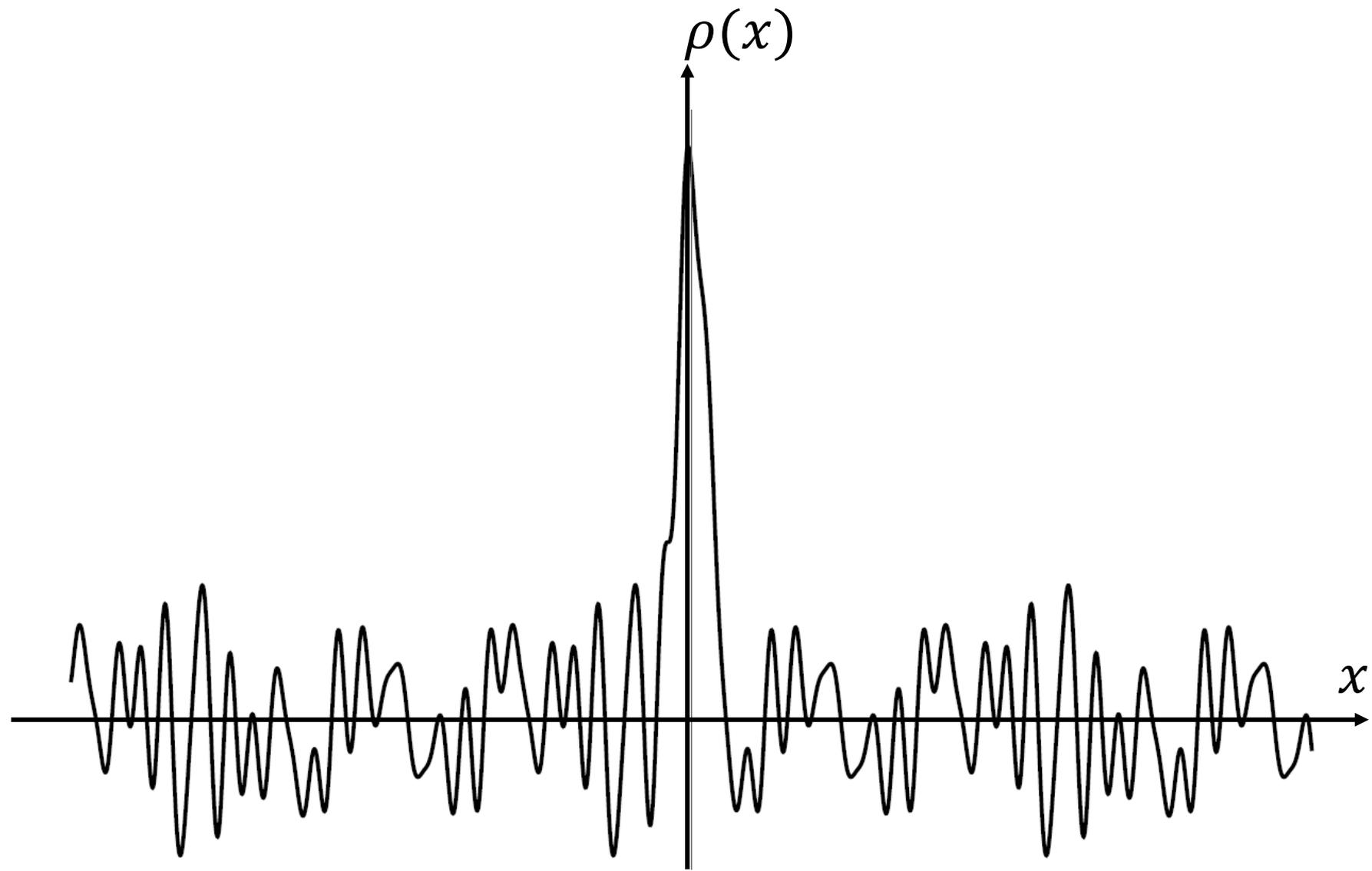
2 次的背景重力波

Saito, Yokoyama 2008

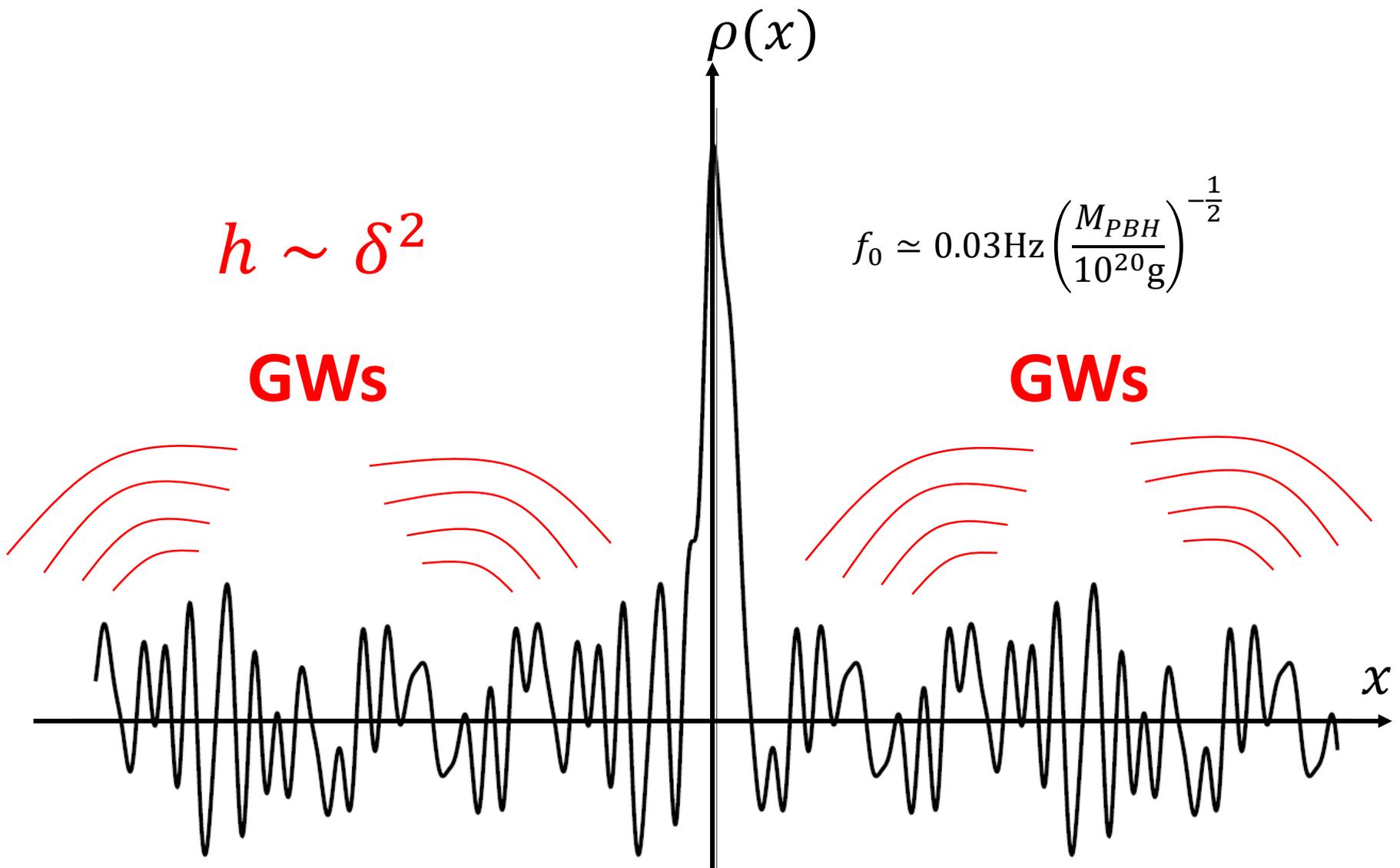


PBHs形成はレアな高 σ ピークのみから

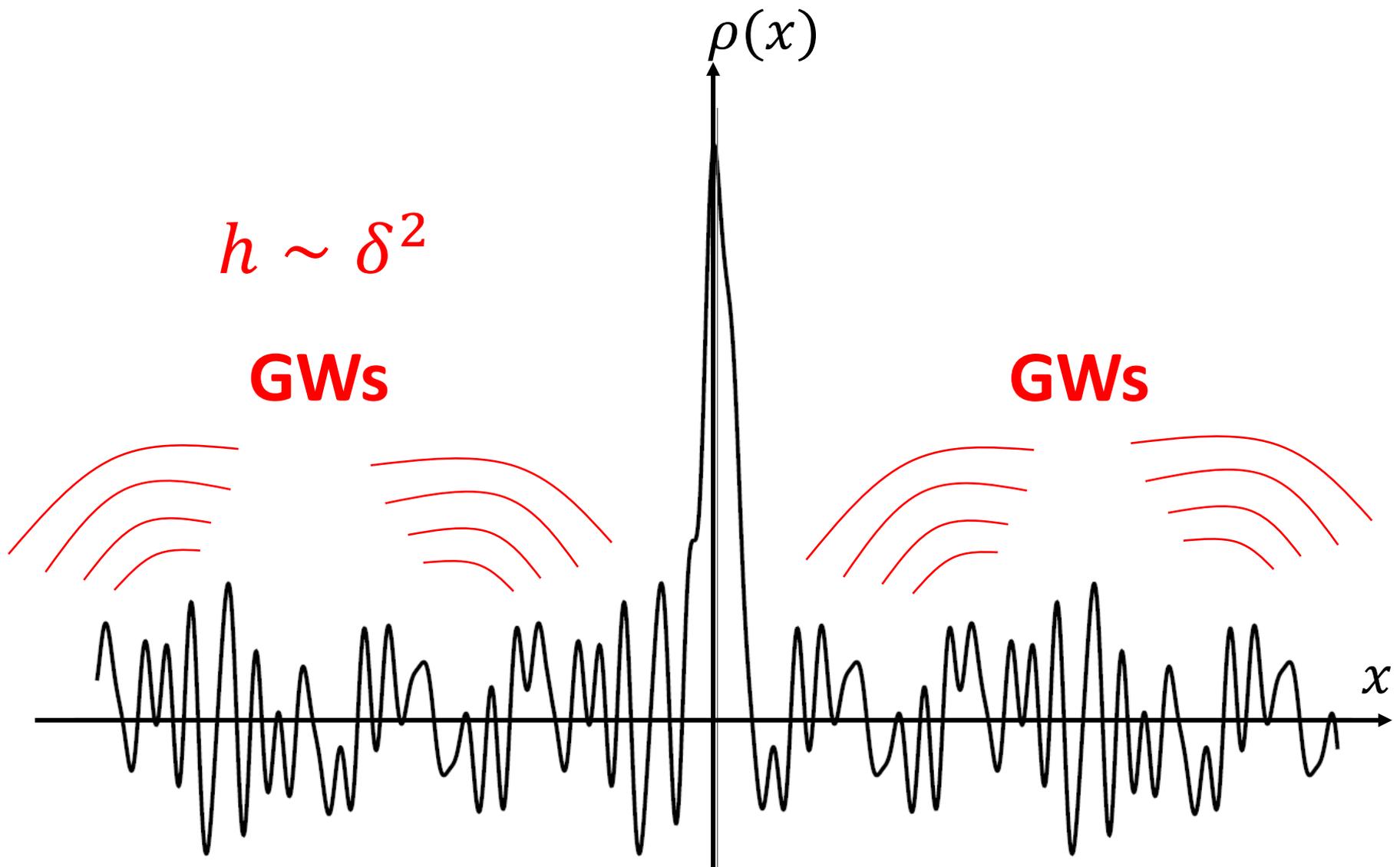
他の場所の原始密度揺らぎはPBHを作るほど大きくはないが、そこそこ大きい



$$\ell_H \simeq t$$

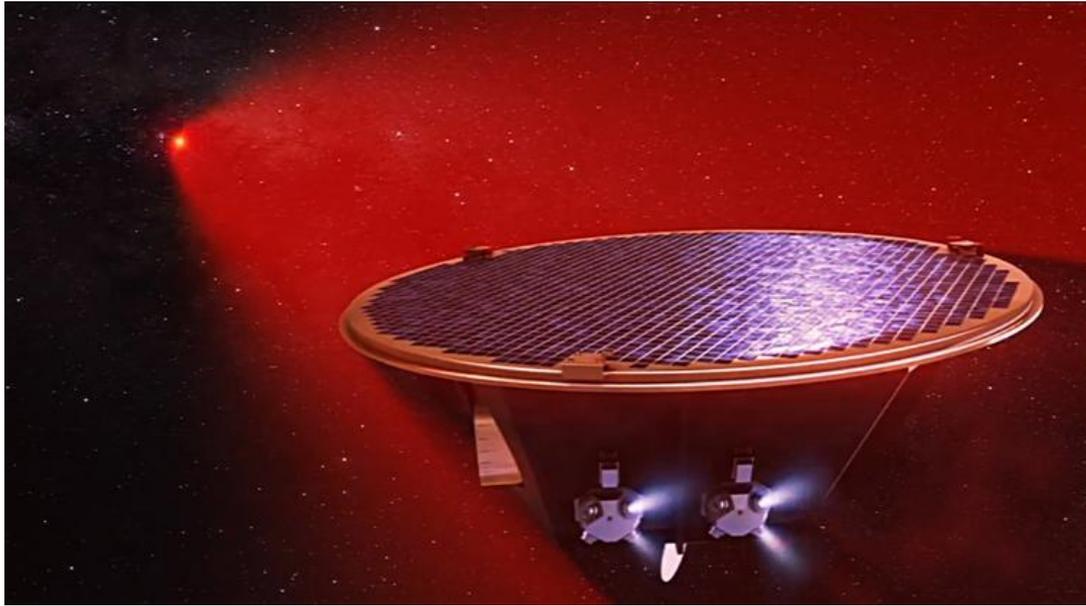


至る所で重力波が放射される



$$f_0 \simeq 0.03\text{Hz} \left(\frac{M_{PBH}}{10^{20}\text{g}} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

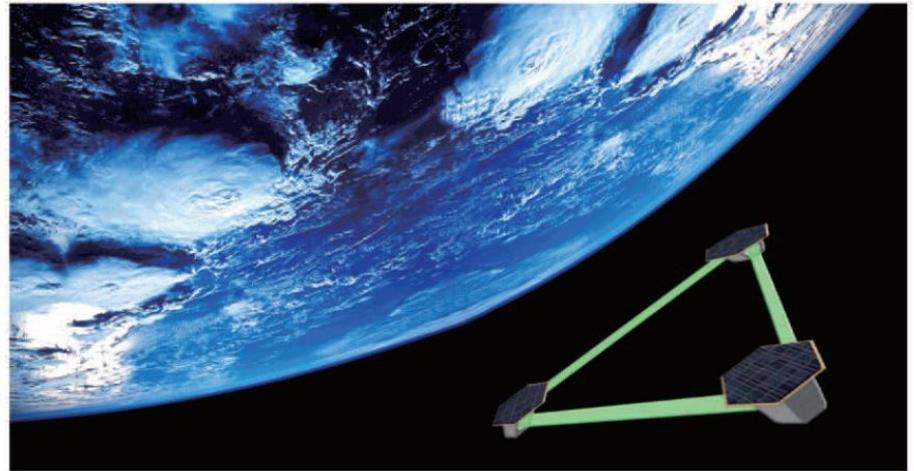
$$\Omega_{GW} \sim 10^{-8}$$



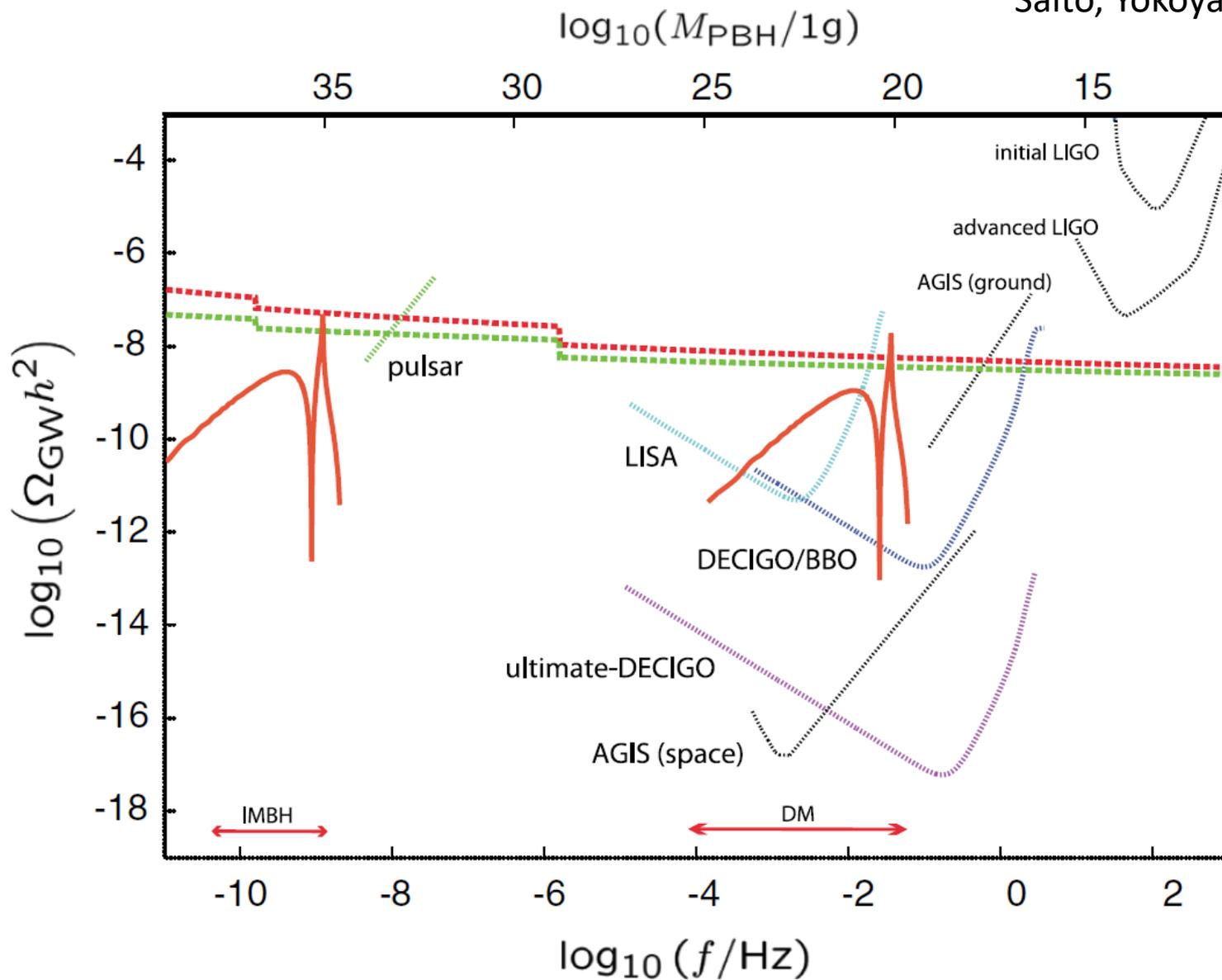
LISA

LISAのHPより

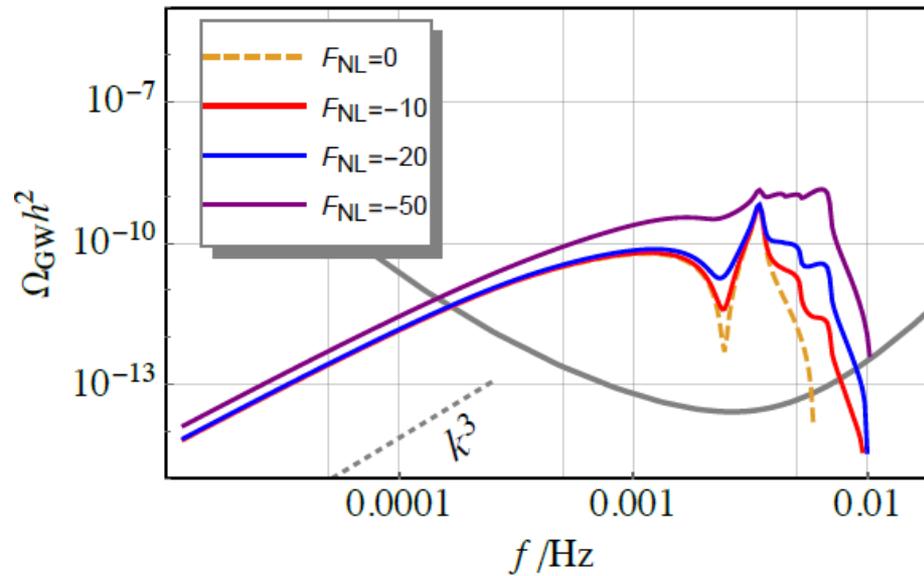
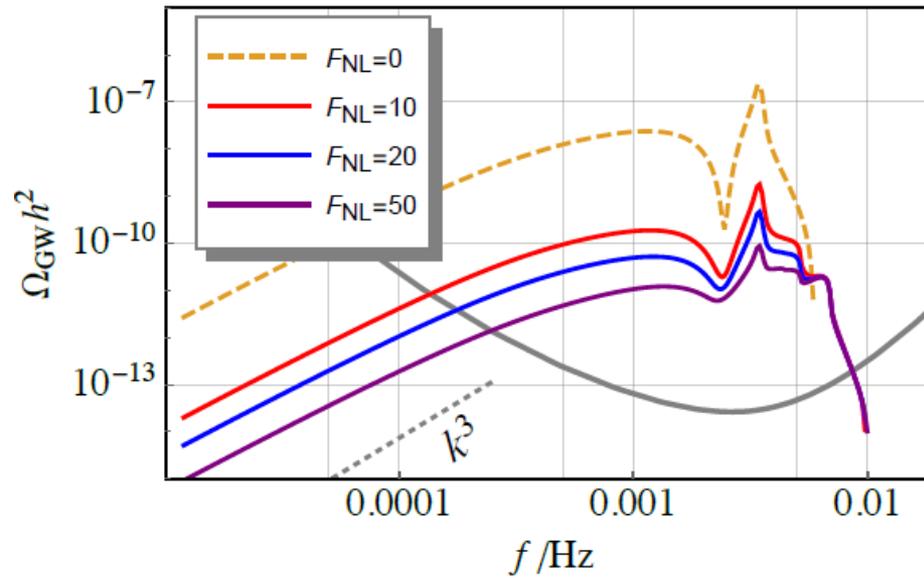
b-DECIGO



1607.00897
40



LISA/DECIGOで重力波が受かる!!



Cai+ 2018

原始密度揺らぎが非ガウスのでも十分受かる

まとめ

- PBHが暗黒物質である可能性が残されている
- LIGOが見つけたBHは、PBHかもしれない
- 今後の重力波観測で、PBHが暗黒物質を占めるかどうか決着がつかうだろう

