

暗黒物質としての 原始ブラックホールと 重力波観測

横山修一郎(名大KMI)

第17回DECIGOワークショップ@名古屋 2018年11月1日

Intro - dark matter -

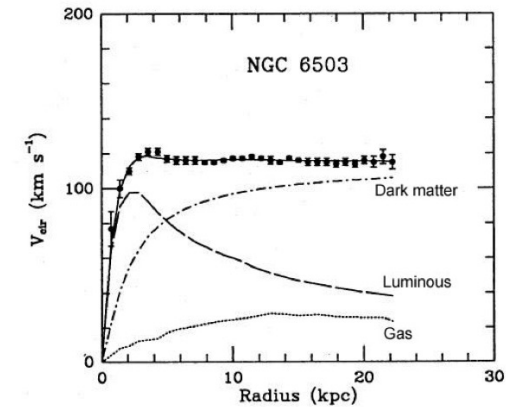
- 暗黒物質(dark matter)の存在

- ✓ 様々な「宇宙観測」から示唆
(回転曲線、大規模構造、CMB)
- ✓ 重力相互作用(基本的に)

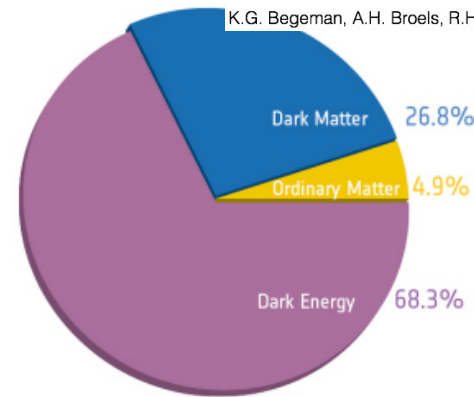


既知の素粒子(標準模型)と“弱い”相互作用
しかし未知の素粒子か？

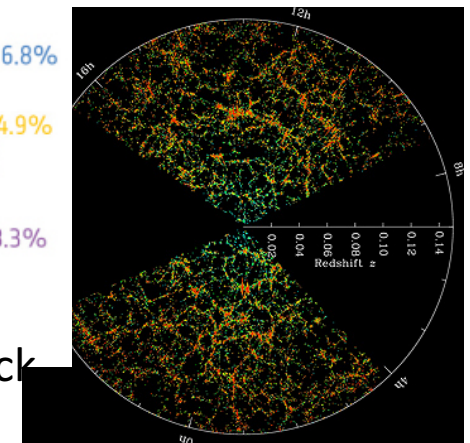
超対称性粒子(LSP)、
QCD axion, sterile neutrino,
Axion Like Particles (超弦理論) ...



K.G. Begeman, A.H. Broels, R.H. Sanders. 1991. Mon.Not.RAS 249, 523.

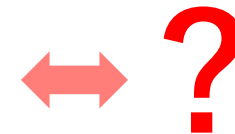
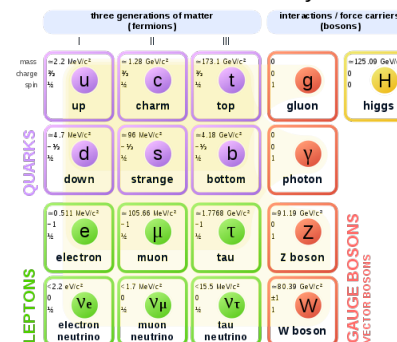


©Planck



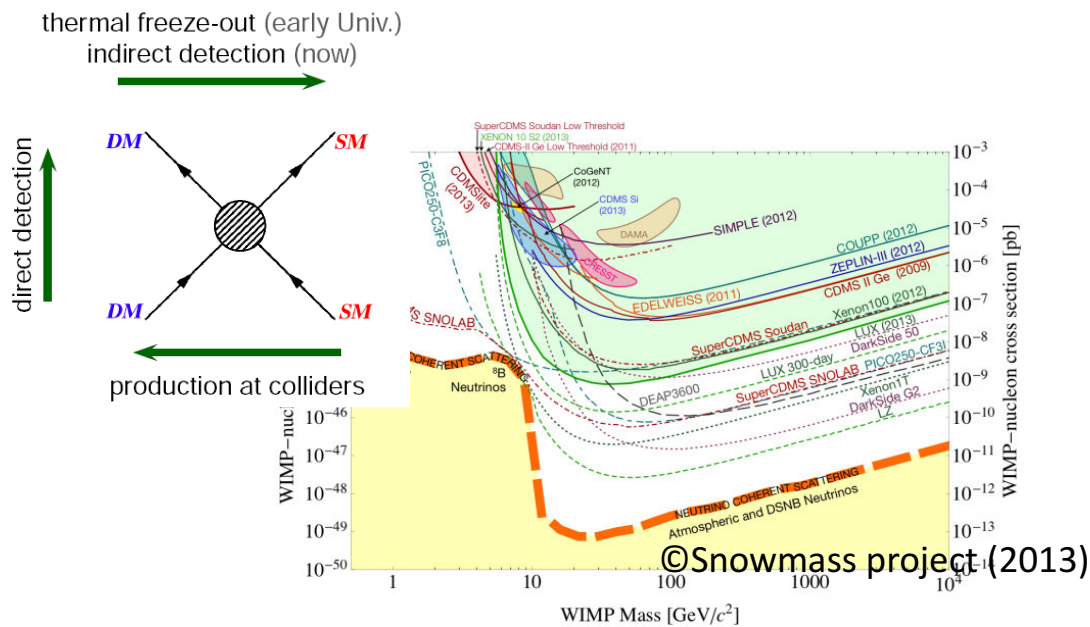
from SDSS

Standard Model of Elementary Particles



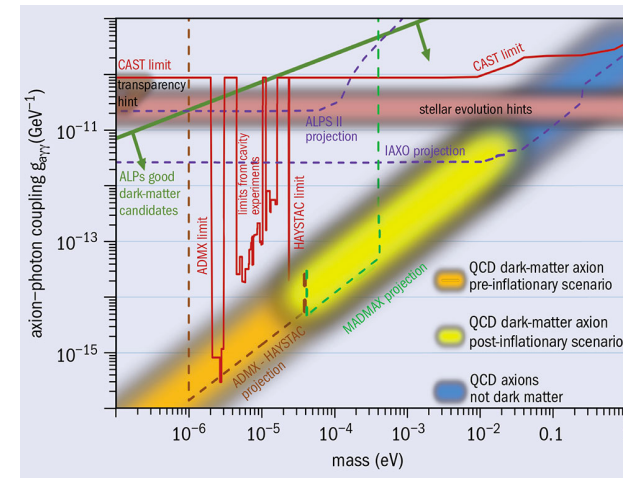
Intro - unknown particles as DM -

- 素粒子実験からの示唆

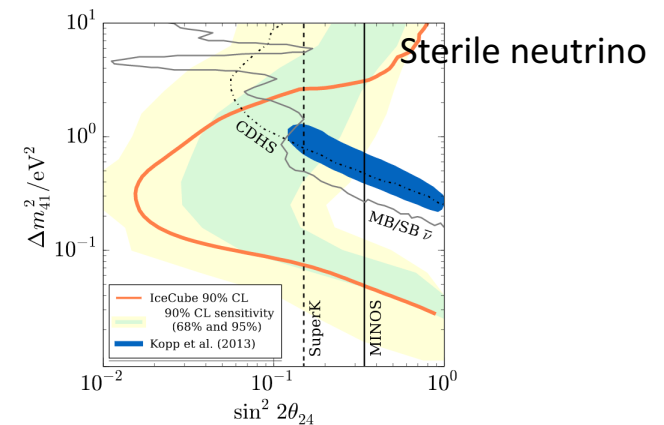


→ 未だに確たる証拠はなし

axion - photon coupling



©Majorovits (MADMAX)



©IceCube collabo.

Intro - BHs as DM -

- 他の候補は？

✓ 重力相互作用 → ブラックホールは??

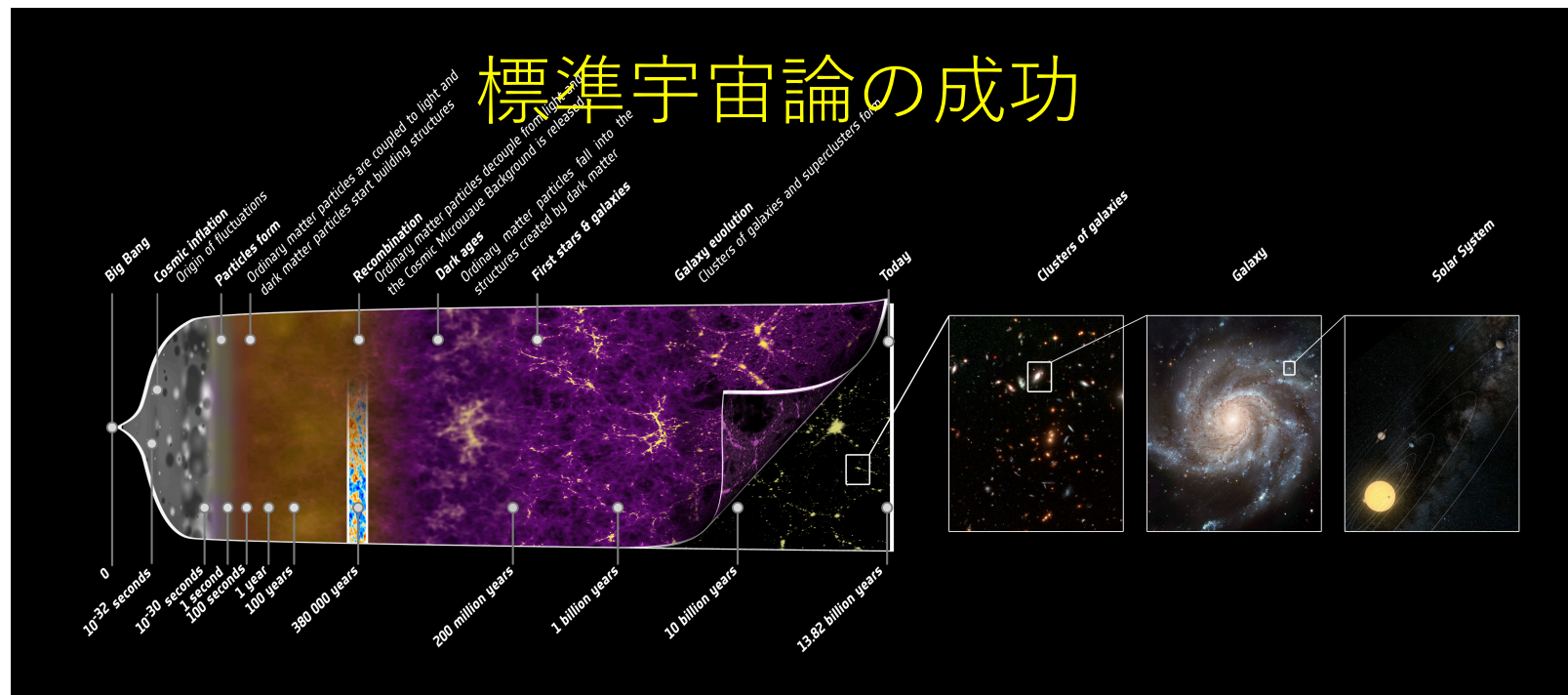
しかし、

Intro - BHs as DM -

- 他の候補は？

✓ 重力相互作用 → ブラックホールは？？

しかし、

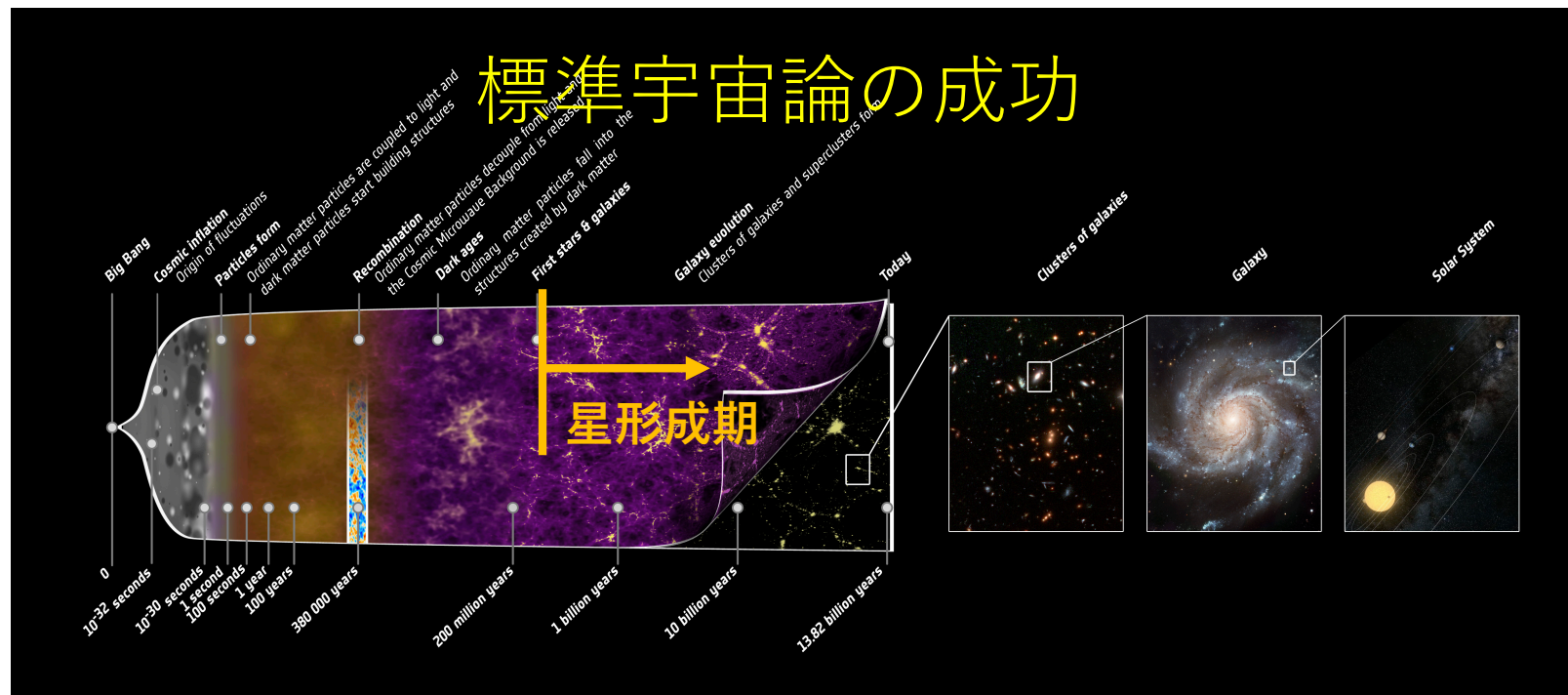


Intro - BHs as DM -

- 他の候補は？

✓ 重力相互作用 → ブラックホールは？？

しかし、

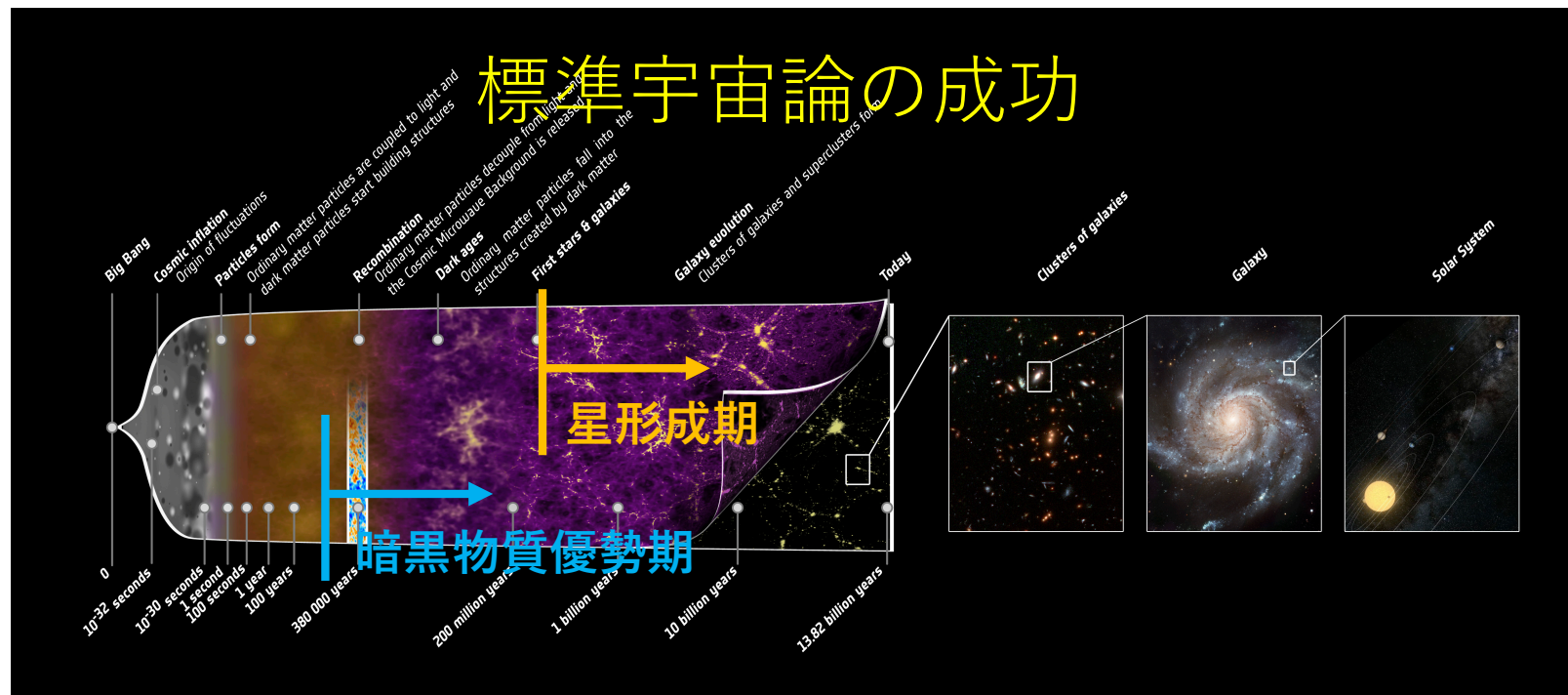


Intro - BHs as DM -

- 他の候補は？

✓ 重力相互作用 → ブラックホールは？？

しかし、

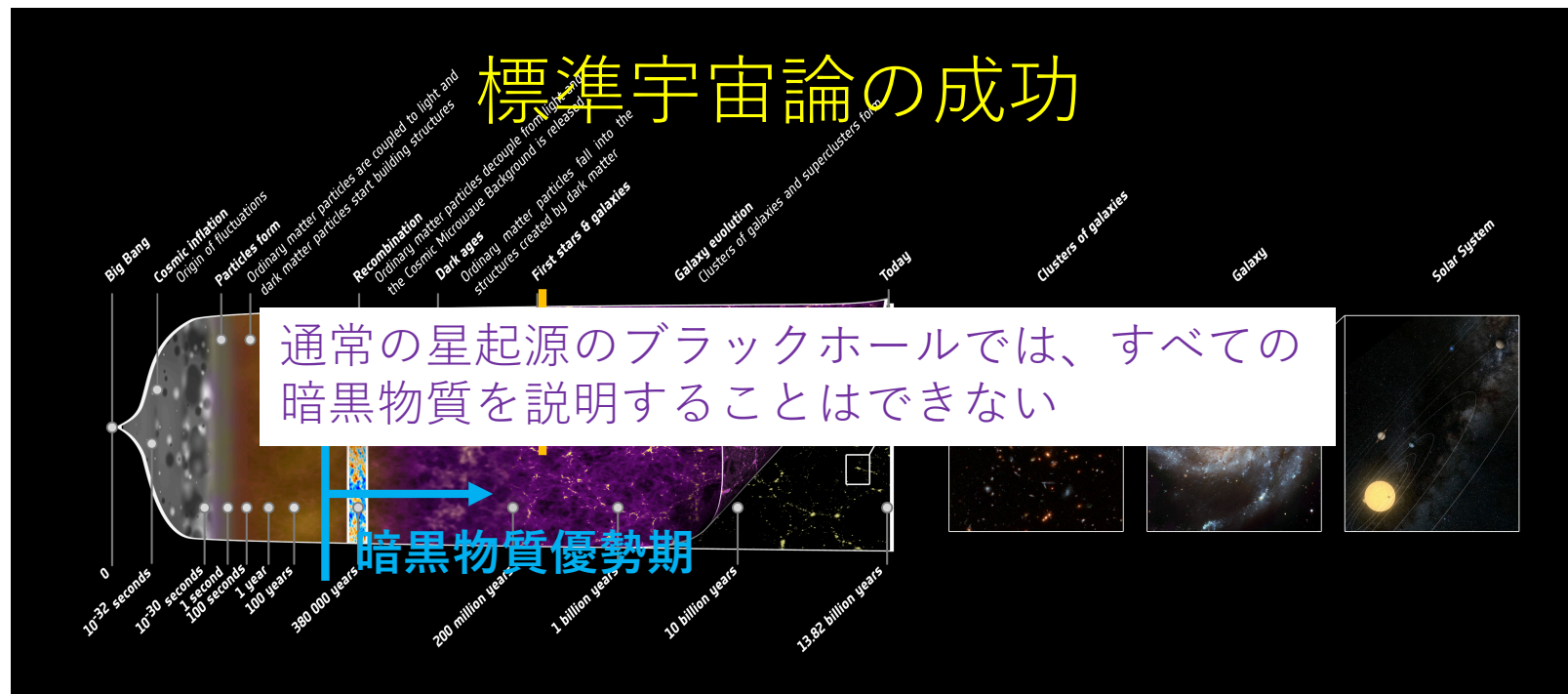


Intro - BHs as DM -

- 他の候補は？

✓ 重力相互作用 → ブラックホールは？？

しかし、

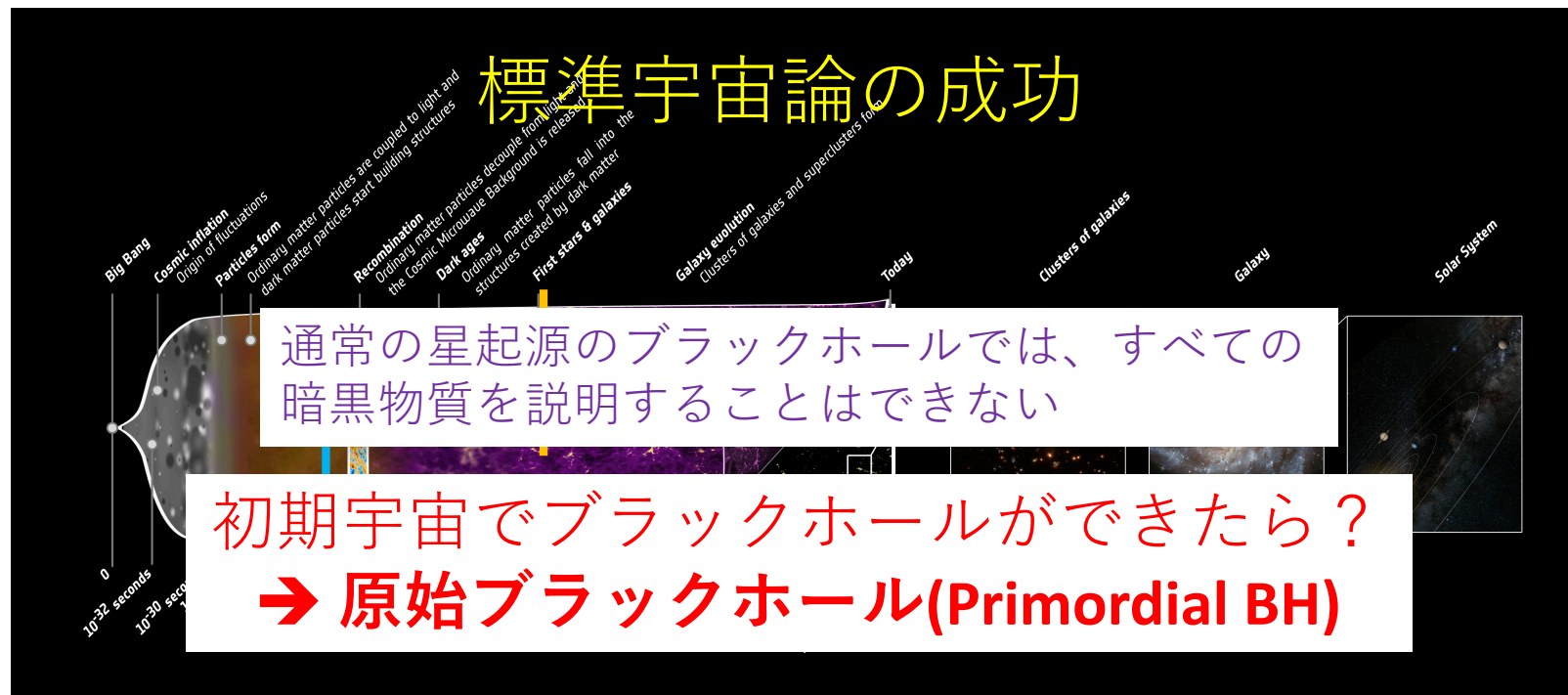


Intro - BHs as DM -

- 他の候補は？

✓ 重力相互作用 → ブラックホールは？？

しかし、



Primordial BHs (PBHs)

Zeldovich and Novikov (1967)

Hawking (1971)

Carr and Hawking (1974), ...

- 初期宇宙に形成されたブラックホール

- 幾つかの形成シナリオあり (domain walls, cosmic string, vacuum bubbles ...)

see, e.g., Garriga, Vilenkin, Zhang; 1512.01819

**輻射優勢期に高密度領域が宇宙膨張から切り離され重力崩壊
→ BHへ というシナリオに着目**

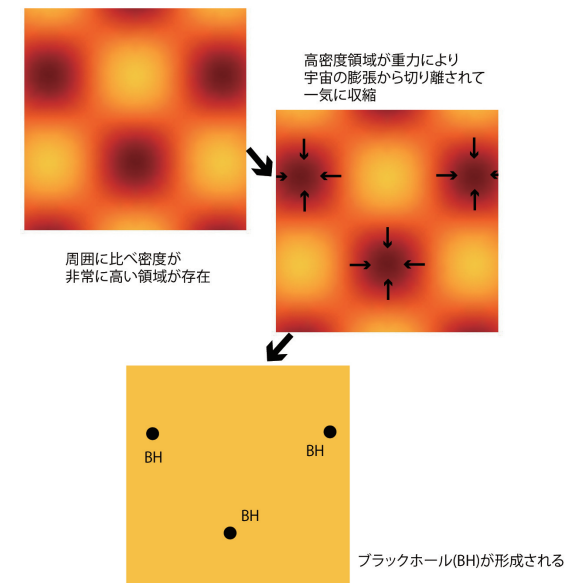
→ 形成されるブラックホールの質量は、
形成時の宇宙のホライズン内の質量程度

(Jeans scale = $c_s / H < \text{Horizon scale } c/H \sim ct$)

$$M = \gamma M_{\text{PH}} = \frac{4\pi}{3} \gamma \rho H^{-3} \approx 2.03 \times 10^5 \gamma \left(\frac{t}{1 \text{ s}} \right) M_{\odot}.$$

$$t \approx 0.738 \left(\frac{g_*}{10.75} \right)^{-1/2} \left(\frac{T}{1 \text{ MeV}} \right)^{-2} \text{ s},$$

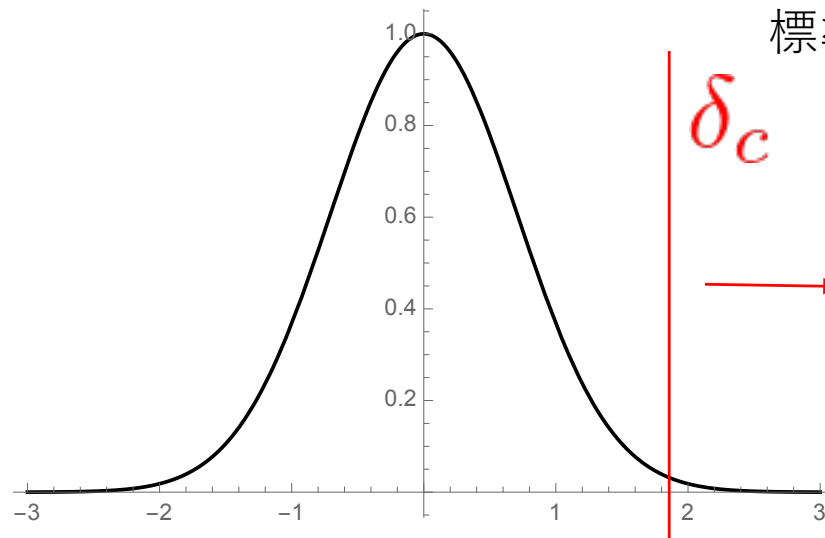
$$30 M_{\odot} \leftrightarrow 70 \text{ MeV}$$



Abundance of PBHs

- 形成確率は？どのくらい形成されるか？

高密度領域が存在する確率は、初期密度揺らぎの確率分布で決まる



標準的にはガウス分布

$$P(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right),$$

→ あるしきい値を超えた高密度領域がBHに。

形成確率は

$$\beta(M) = \int_{\delta_c} P(\delta) d\delta \sim \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_M} e^{-\frac{\delta_c^2}{2\sigma_M^2}}$$

しきい値 / 分散(典型的な揺らぎの振幅)に指数関数的に依存

しきい値 ~ 0.5 (←数値相対論)

ref. Shibata, Sasaki (1999), Musco et al. (2005), Nakama et al. (2014), ...

有意な形成を考えるには、ある程度大きい振幅が必要 cf. CMB obs. $\rightarrow \sim 10^{-9}$

PBHs vs inflation

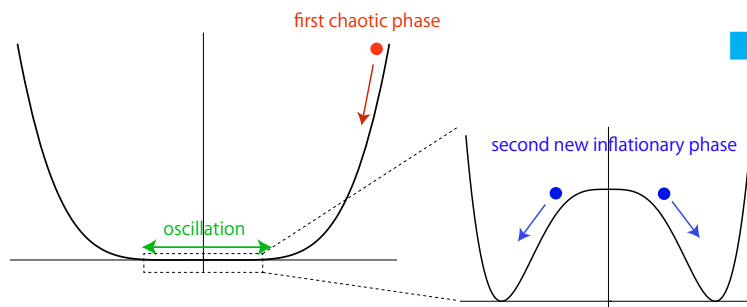
- もともとの高密度領域は？

← 初期密度揺らぎとしてインフレーション中に生成(標準的には)

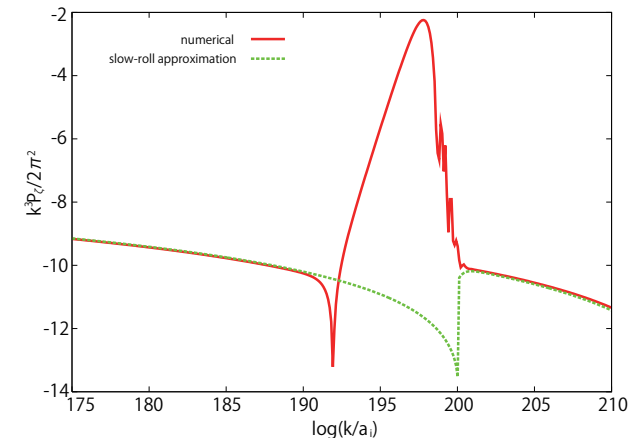
例； Saito, Yokoyama, Nagata; 0804.3470

インフレーションポテンシャル

$$V(\varphi) = \frac{\lambda}{4}\varphi^4 \left(\ln \left| \frac{\varphi}{v} \right| - \frac{1}{4} \right) + \frac{\lambda}{16}v^4.$$



初期密度揺らぎのパワースペクトル



大スケール

小スケール

あるスケールで非常に大きな振幅の揺らぎを生成するモデルもある

→ PBH探査はインフレーションモデル構築にとっても重要

PBHs as DM

- 様々な質量を持ったBHが形成される可能性あり

軽いPBH → **Hawking radiation**により、宇宙時間内に蒸発
→ 現在の宇宙でDMとして残っていない

$$M_{crit} \sim 10^{15} g \sim 10^{-18} M_{\odot}$$

BHの寿命; $\tau \propto M^3$

形成時期; $\sim 10^8$ GeV

→ $M \gtrsim 10^{15} g$ に着目し、その**観測的制限**を考える

軽いPBHに関しても蒸発により生じた粒子の

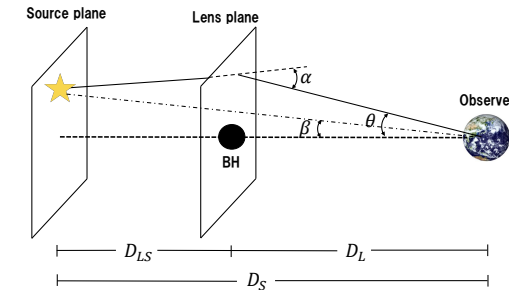
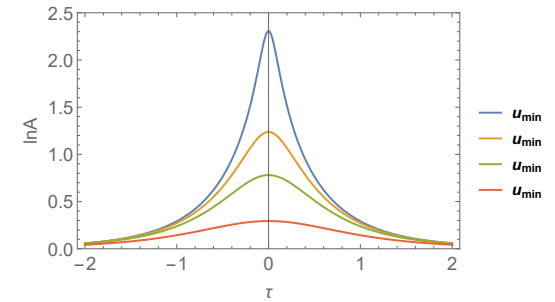
- ビッグバン元素合成への影響
- 宇宙マイクロ背景放射の温度揺らぎパワースペクトルへの影響
- extragalactic background photonへの影響

see, e.g., Carr et al.; 0912.5297

からの観測的制限あり

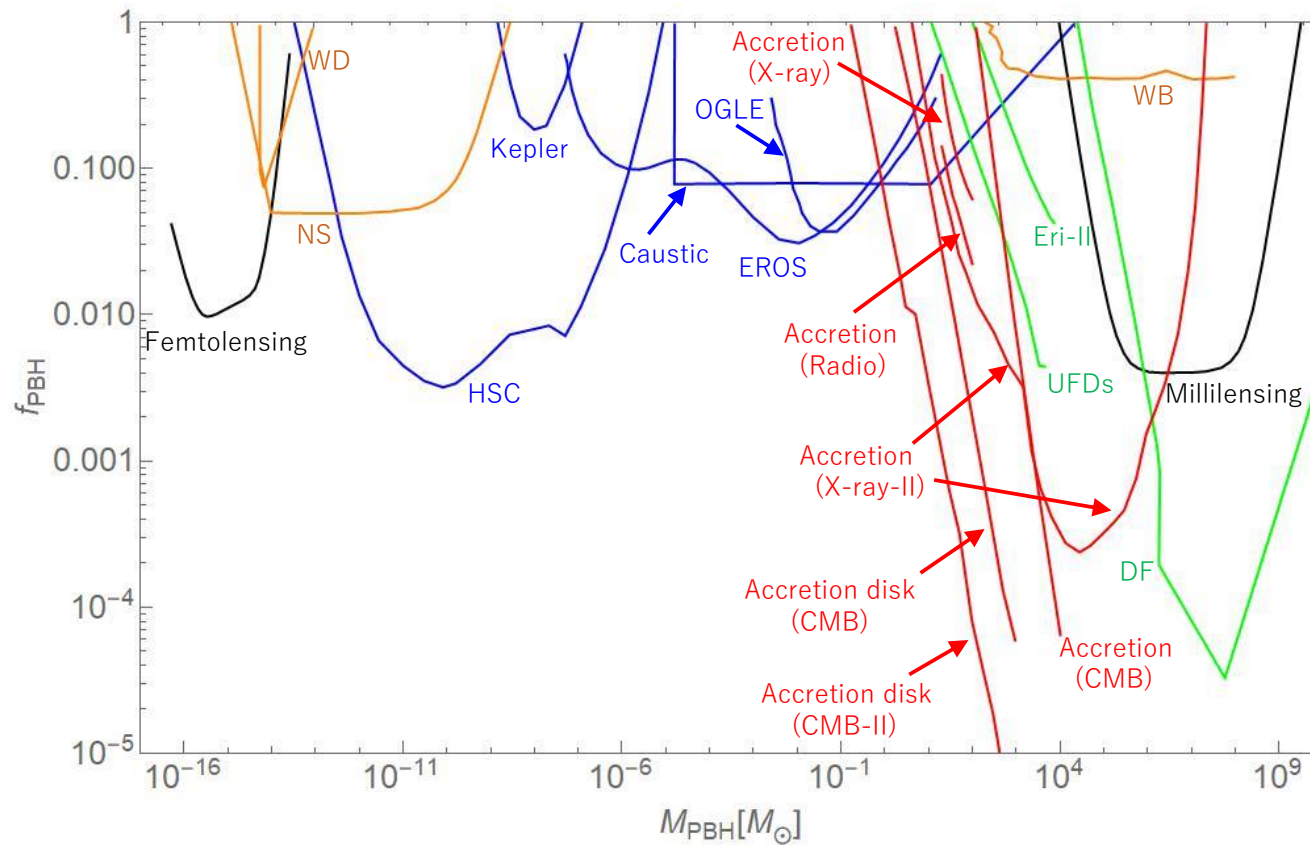
Constraints on PBH-DM

- 基本的に重力相互作用を通じて
- 重力レンズ効果
 - ✓ microlensing <-> e.g., MACHO project
 - ✓ femtolensing (wave effect; interference of two images) <-> GRB obs.
 - ✓ millilensing (two images with milliarcsecond sep.) <-> astrometry by, e.g., VLBI ..
- Disruption of astrophysical objects
 - ✓ White Dwarfs; 星の内部でheating
 - ✓ Neutron Stars; PBHがNSにcapture
 - ✓ Wide binaries, globular clusters, galactic center, ultra-faint dwarf galaxies, ...
- Photons from gas accretion onto PBHs
 - ✓ CMB, X-ray, radio observations



Summary of constraints

暗黒物質の全質量に対するPBHの割合



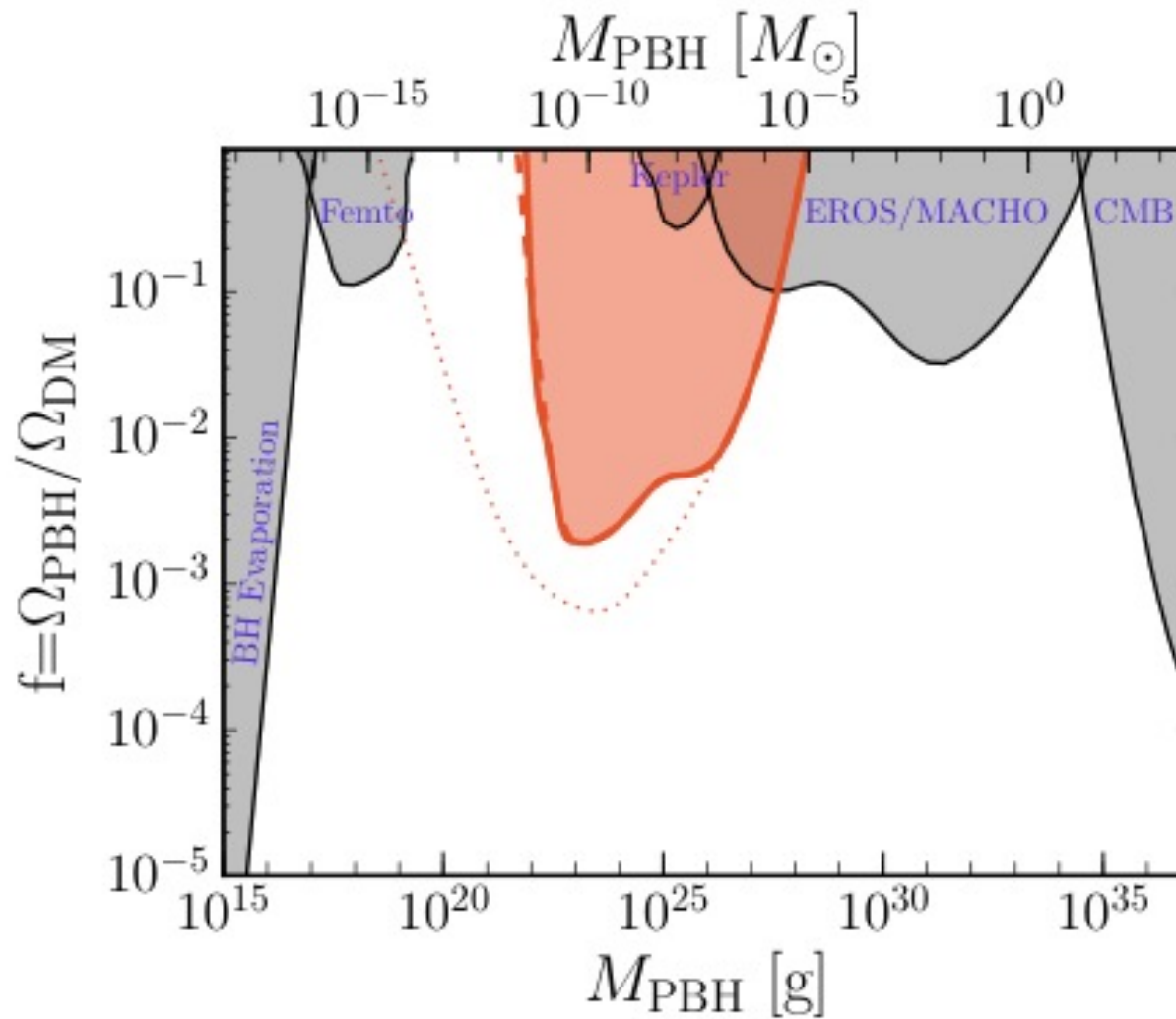
PBHの質量

(注；重力レンズからの制限は不定性大きい
+HSC constraint はupdateされている)

Sasaki, Suyama, Tanaka, SY; 1801.12224

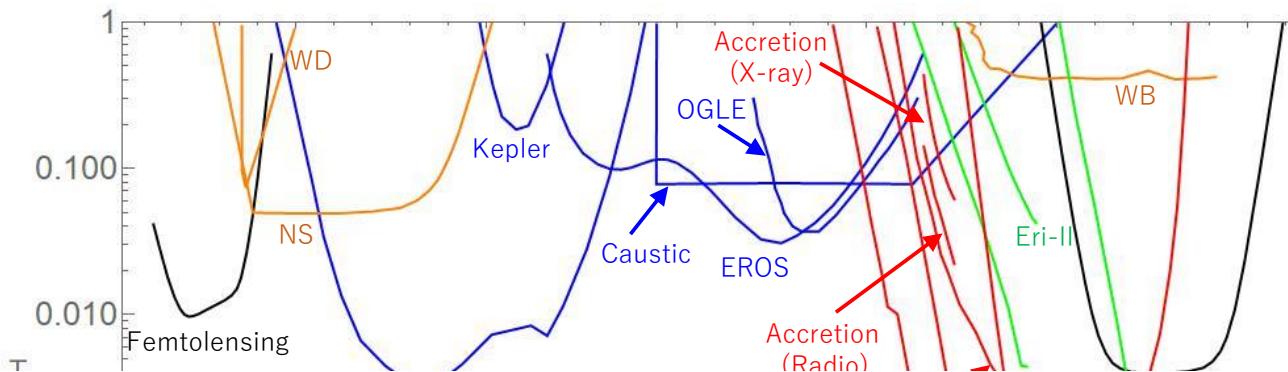
Summary of constraints

暗黒物質の全質量に対するPBHの割合

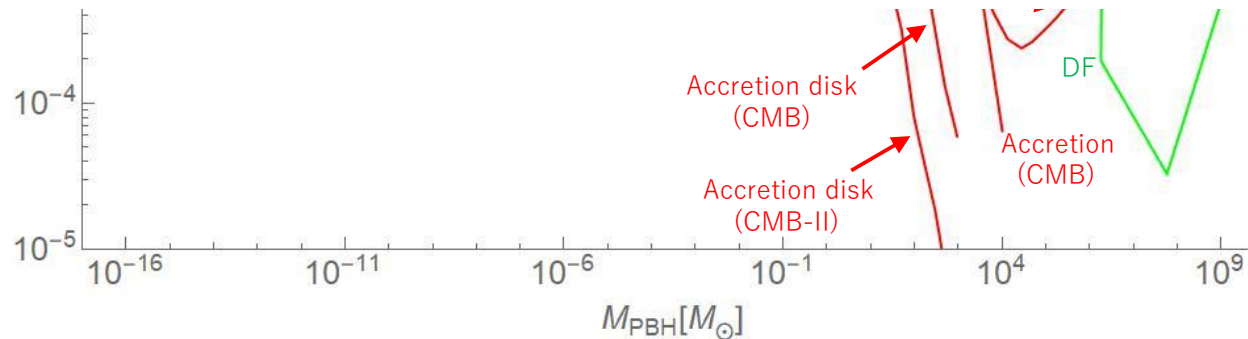


Summary of constraints

暗黒物質の全質量に対するPBHの割合



重力波観測のインパクトは??



PBHの質量

(注；重力レンズからの制限は不定性が大きい
+HSC constraint はupdateされている)

Sasaki, Suyama, Tanaka, SY; 1801.12224

PBHs vs GW experiments

- PBH abundanceに対する観測的制限

重力波観測の寄与として、主に2パターンが考えられる

① PBH連星のmergerからの重力波

② PBH形成に必要な初期密度揺らぎが作る背景重力波

(過去のDECIGOワークショップで横山さんが既に紹介。。)

① mergers of PBH binary

- 理論的には

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

If MACHOs are black holes of mass $\sim 0.5 M_{\odot}$, they must have been formed in the early universe when the temperature was ~ 1 GeV. We estimate that in this case in our Galaxy's halo out to ~ 50 kpc there exist $\sim 5 \times 10^8$ black hole binaries the coalescence times of which are comparable to the age of the universe, so that the coalescence rate will be $\sim 5 \times 10^{-2}$ events yr^{-1} per galaxy. This suggests that we can expect a few events per year within 15 Mpc. The gravitational waves from such coalescing black hole MACHOs can be detected by the first generation of interferometers in the LIGO/VIRGO/TAMA/GEO network. Therefore, the existence of black hole MACHOs can be tested within the next 5 yr by gravitational waves.

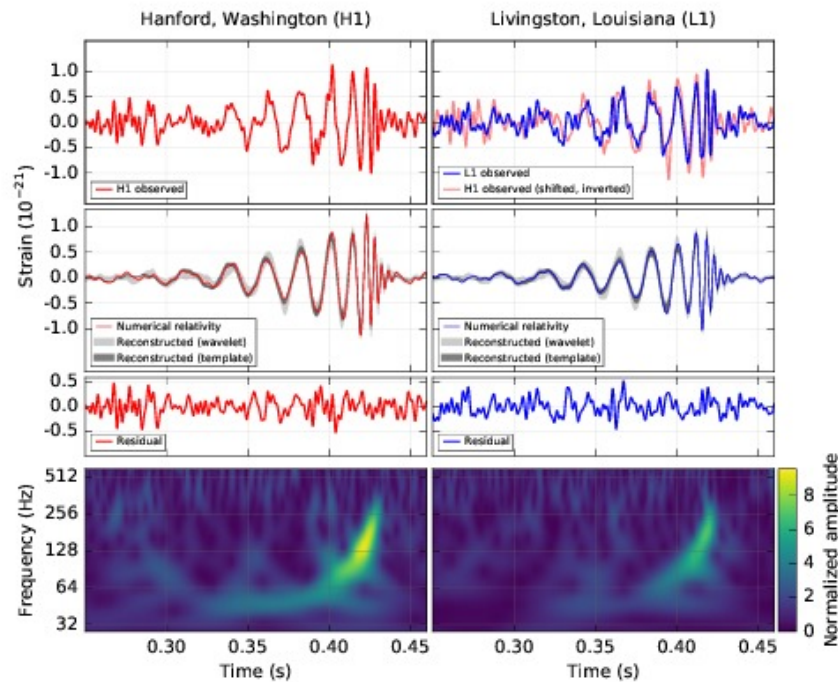
Subject headings: black hole physics — dark matter — gravitation — gravitational lensing — Galaxy: halo

星起源では説明できない軽いBH

First event of GW

- そしてLIGO/VIRGO first event

星起源としてはいくらか重いBH



Estimated source parameters

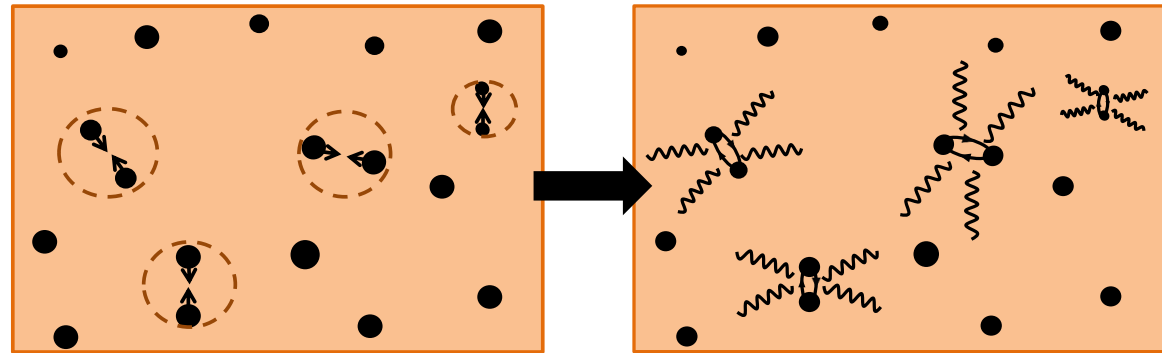
Quantity	Value	Upper/Lower error estimate	Unit
Primary black hole mass	36	+5 -4	M sun
Secondary black hole mass	29	+4 -4	M sun
Final black hole mass	62	+4 -4	M sun
Final black hole spin	0.67	+0.05 -0.07	
Luminosity distance	410	+160 -180	Mpc
Source redshift, z	0.09	+0.03 -0.04	
Energy radiated	3	+0.5 -0.5	M sun

Mass distribution	$R/(\text{Gpc}^{-3}\text{yr}^{-1})$		
	PyCBC	GstLAL	Combined
Event based			
GW150914	$3.2^{+8.3}_{-2.7}$	$3.6^{+9.1}_{-3.0}$	$3.4^{+8.6}_{-2.8}$
LVT151012	$9.2^{+30.3}_{-8.5}$	$9.2^{+31.4}_{-8.5}$	$9.4^{+30.4}_{-8.7}$
GW151226	35^{+92}_{-29}	37^{+94}_{-31}	37^{+92}_{-31}
All	53^{+100}_{-40}	56^{+105}_{-42}	55^{+99}_{-41}

event rate

Abbott et al. (LIGO Scientific Collab. And Virgo Collab.), PRL 116, 061102(2016)
and arXiv:1606.04856

Brief review of PBH binary formation



PBHの(comoving) number densityを固定 (平均間隔も固定)

← PBHの質量とそのDM fraction (M, f)を固定すれば決まる

- 空間にばらまく → 宇宙膨張に従う
- 近接したBHが宇宙膨張から切り離されて、bound systemを形成
- 周囲のBHsから潮汐力を受け、binary motionに。
- 重力波放出により軌道半径を縮めていく

合体時刻; $t = Qa^4(1 - e^2)^{7/2}$, $Q = \frac{3}{170}(GM_{\text{BH}})^{-3}$.

a ; 軌道長半径, e ; 離心率 (形成時)

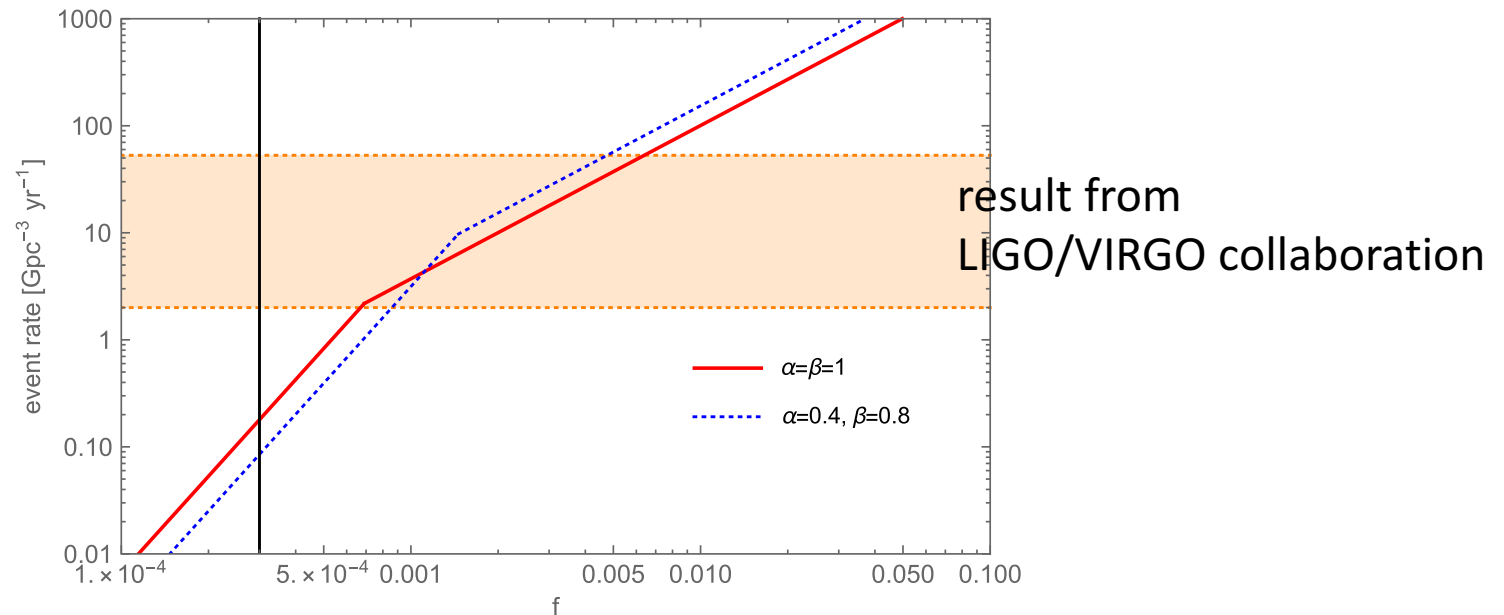
Peters, Mathews (1963)

Nakamura et al. (1997),
Ioka et al. (1998),
Sasaki et al. (2016)

PBH binary merger rate vs PBH fraction

- BH massを $30 M_{\odot}$ に固定

Sasaki, Suyama, Tanaka, SY; 1603.08338

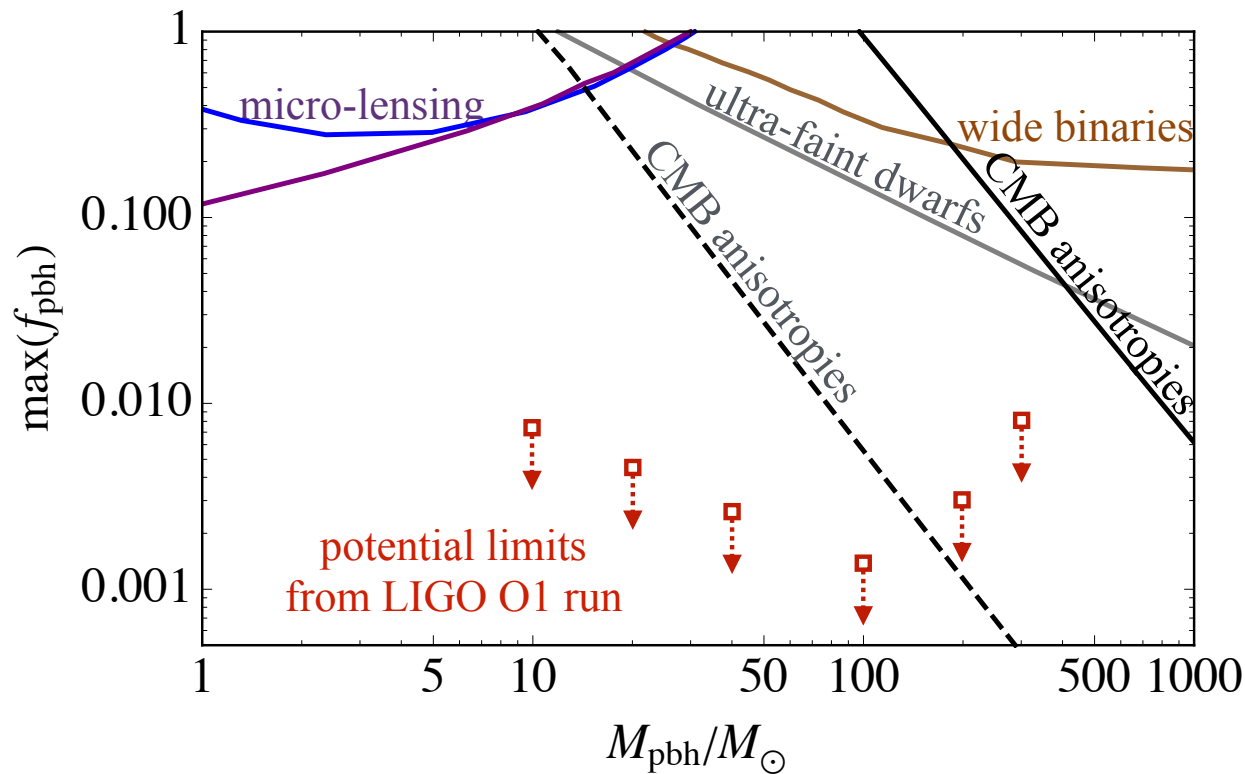


暗黒物質の全質量に対するPBHの割合

fractionにして、だいたい0.1%から1%でconsistent

PBH binary merger rate vs PBH fraction

- Estimated event rateの上限から

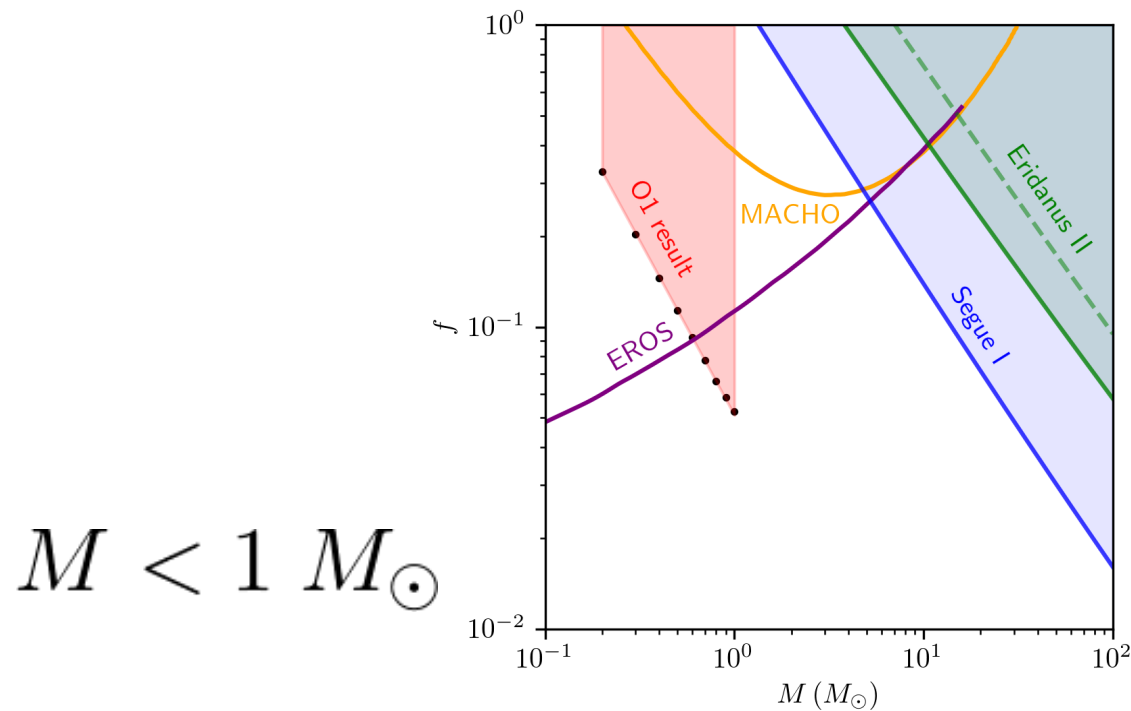


Ali-Haimoud, Kovetz, Kamionkowski; 1709.06576

$$M > 10 M_{\odot}$$

PBH binary merger rate vs PBH fraction

- Estimated event rateの上限から



In future ...

- PBH binary merger に関して将来観測への期待

観測された連星BH($O(10 M_{\text{sun}})$)は、
PBHなのか星起源BHなのか？

→ 統計的な議論

- ✓ event rateの質量関数 -- $\mathcal{R} \propto (m_1 + m_2)^\alpha$, $0.97 \lesssim \alpha \lesssim 1.05$
Kocsis, Suyama, Tanaka, SY; 1709.09007
- ✓ 合体前のBHのスピンド分布 -- PBHのスピンはほぼゼロ
Chiba, SY; 1704.06573
- ✓ 合体前の軌道離心率分布 -- PBH binaryの離心率は1に近い
$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{x}{y}\right)^6}.$$
- ✓ merger history -- 星形成期以前の高赤方偏移宇宙($z > 30$)からの
Nakamura et al.; 1607.00897 BH mergerからの重力波を捉えられれば..
- ✓ PBH連星合体からの背景重力波 --
Ioka et al.; astro-ph/9809395

In future ...

- ✓ event rateの質量関数 → 100 ~ 1000 events 程度で $\Delta\alpha \sim O(0.1)??$

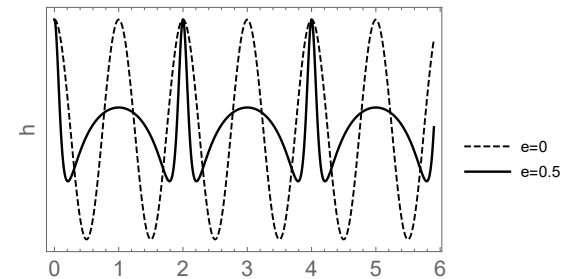
Kocsis, Suyama, Tanaka, SY; 1709.09007

- ✓ 合体前のBHのスピン分布

- ✓ 合体前の軌道離心率分布

→ 低周波観測で議論可能? → DECIGO??

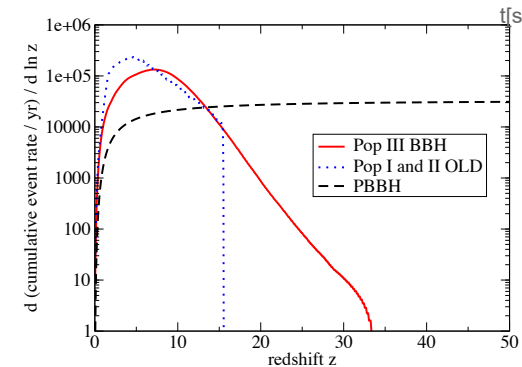
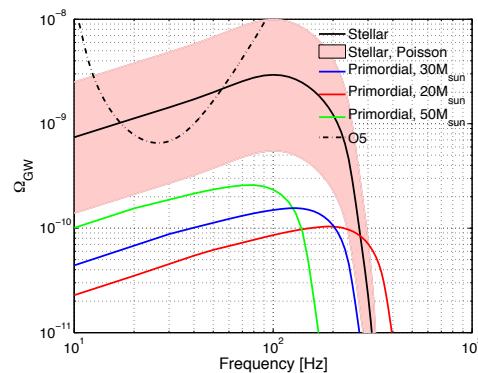
Nishizawa et al.; 1606.09295



- ✓ merger history → B(pre?)-DECIGOでどうか?

Nakamura et al.; 1607.00897

- ✓ PBH連星合体からの背景重力波



Mandic, Bird, Cholis, 1608.06699

② PBH vs GWB

PRL **102**, 161101 (2009)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
24 APRIL 2009

Gravitational-Wave Background as a Probe of the Primordial Black-Hole Abundance

Ryo Saito^{1,2} and Jun'ichi Yokoyama^{2,3}

¹*Department of Physics, Graduate School of Science, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan*

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

³*Institute for the Physics and Mathematics of the Universe, The University of Tokyo, Chiba 277-8568, Japan*

(Received 25 December 2008; published 23 April 2009)

The formation of a significant number of black holes (PBHs) is realized if and only if primordial density fluctuations have a large amplitude, which means that tensor perturbations generated from these scalar perturbations as a second-order effect are also large and comparable to the observational data. We show that pulsar timing data essentially rule out PBHs with $10^2\text{--}10^4 M_\odot$, which were previously considered as a candidate of intermediate-mass black holes, and that PBHs with a mass range of 10^{20} to 10^{26} g, which serves as a candidate of dark matter, may be probed by future space-based laser interferometers and atomic interferometers.

有意なPBH形成 ← ある程度振幅の大きい初期密度揺らぎ

その初期密度揺らぎをsourceとして、重力波生成

GWB from second-order scalar perturbations

Scalar (↔ 密度揺らぎ)

Perturbed metric; $ds^2 = a(\eta)^2[-e^{2\Phi}d\eta^2 + e^{-2\Psi}(\delta_{ij} + h_{ij})dx^i dx^j]$,

↑ tensor (重力波)

重力波の時間発展

$$\mathcal{H} = a'/a = d \ln a / d\eta$$

conformal Hubble

$$h_j^{i''} + 2\mathcal{H}h_j^{i'} - \partial^2 h_j^i = 2\mathcal{P}_{rs}^{is} S_s^r,$$

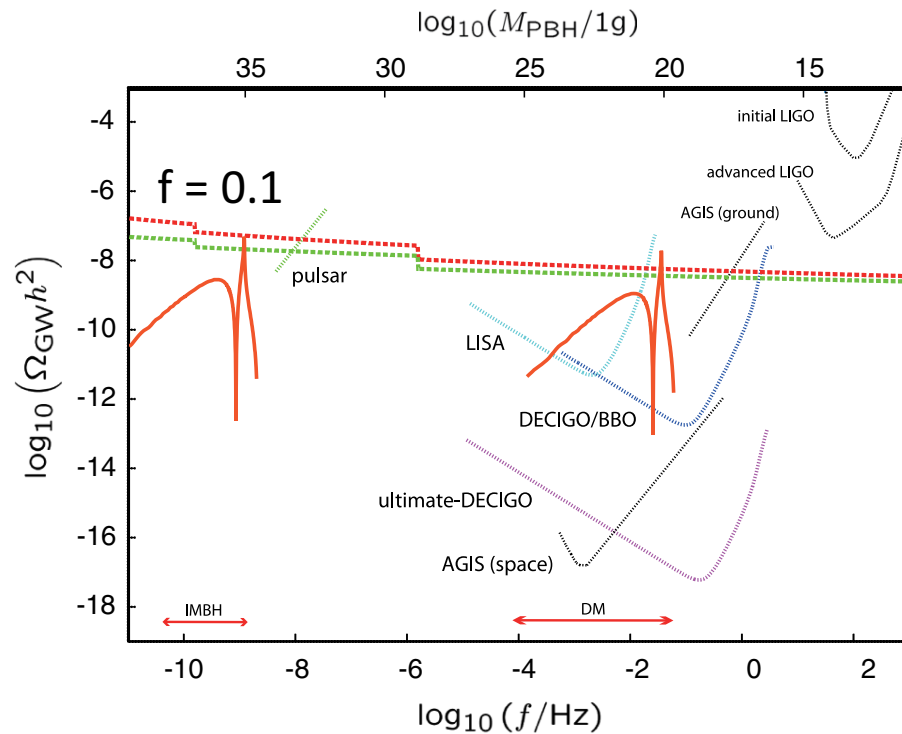
$$S_s^r = -2\Psi\partial_r\partial_s\Psi + \frac{4}{3(1+w)}\partial^r(\Psi + \mathcal{H}^{-1}\Psi')\partial_s(\Psi + \mathcal{H}^{-1}\Psi').$$

スカラー揺らぎの二次がsourceに！ $w = p/\rho$; equation of state

特に輻射優勢宇宙では、生成される重力波の振動数はPBH形成時のホライズンスケールと対応。ホライズンスケールはPBH massと対応。

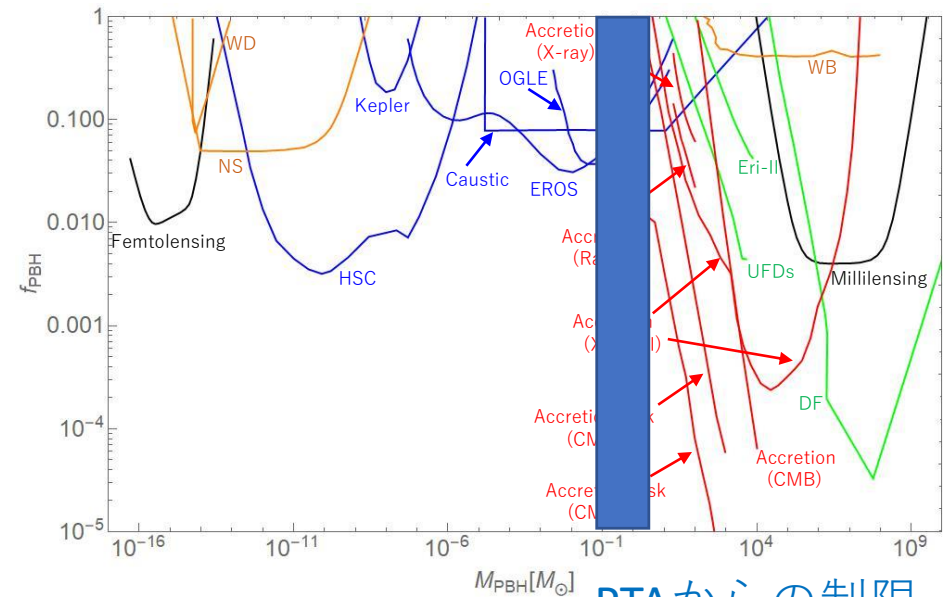
$$f_{\text{GW}} = 4 \times 10^{-10} \text{ Hz} \left(\frac{M_{\text{PBH}}}{10^{36} \text{ g}} \right)^{-1/2} \left(\frac{g_{*p}}{10.75} \right)^{-1/12}.$$

PBH mass vs frequency of GWs



Saito and Yokoyama (2009)

$$\Omega_{\text{GW}} \propto |h|^2 \propto \sigma^4$$

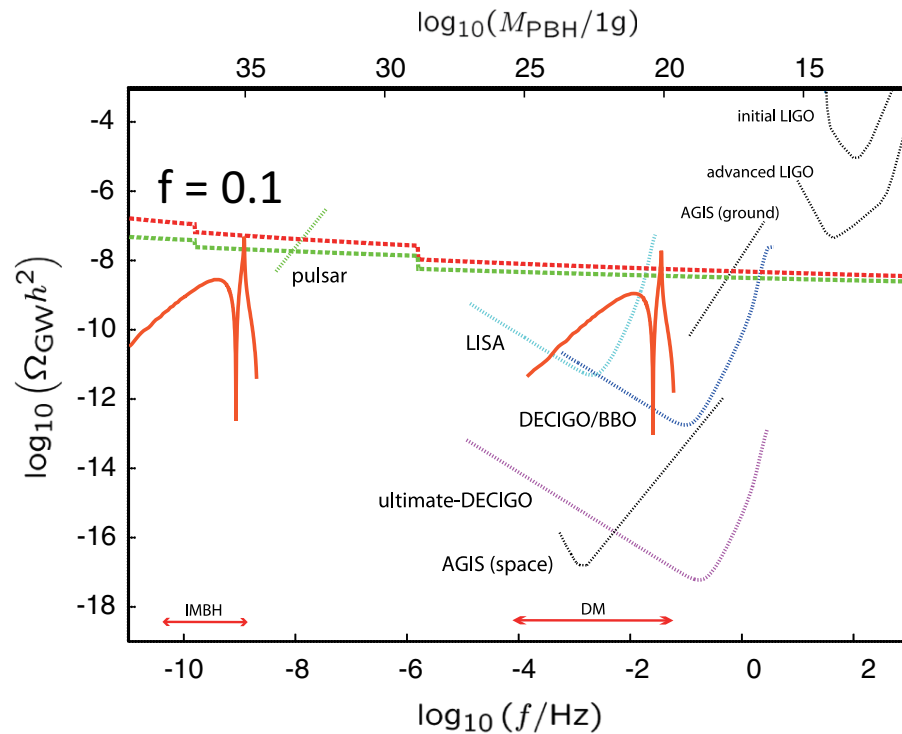


$$f \propto e^{-\delta_c^2/\sigma^2}$$

See, also Inomata et al. ;1611.06130

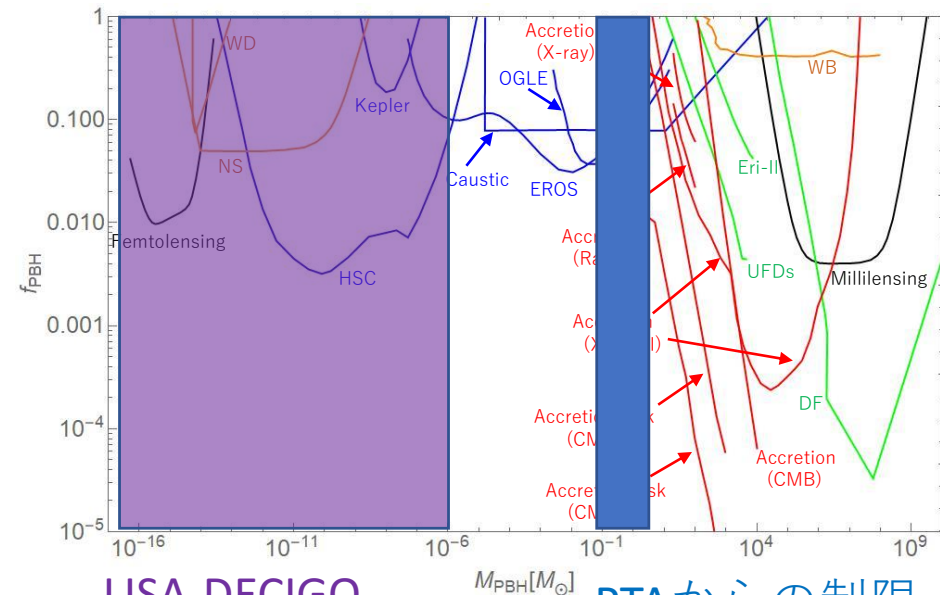
LIGO event をPBHで説明する際に強力な制限

PBH mass vs frequency of GWs



Saito and Yokoyama (2009)

$$\Omega_{\text{GW}} \propto |h|^2 \propto \sigma^4$$



LISA-DECIGO
でかかる！

PTAからの制限

$$f \propto e^{-\delta_c^2/\sigma^2}$$

More ..

- 観測された背景重力波
 - インフレーション中の量子揺らぎ起源なのか？
 - 二次のスカラー揺らぎ起源なのか？
- ➔ 背景重力波の統計的性質？
 - ガウス分布なのか、非ガウス性があるのか？

Recently,..

Probing non-Gaussian Stochastic Gravitational Wave Backgrounds with LISA

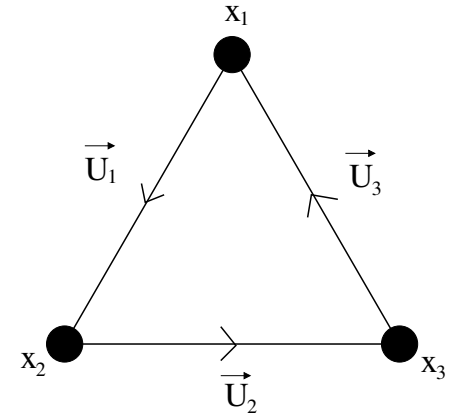
Nicola Bartolo ^{*a,b,c*} , Valerie Domcke ^{*d*} , Daniel G. Figueroa ^{*e,1*} ,
Juan Garcia-Bellido ^{*f,g*} , Marco Peloso ^{*a,h*} , Mauro Pieroni ^{*g*} ,
Angelo Ricciardone ^{*i,1*} , Mairi Sakellariadou ^{*j*} , Lorenzo Sorbo ^{*k*} ,
Gianmassimo Tasinato ^{*l*}

arXiv:1806.02819v2

+ Bartolo et al.;1810.12218, 1810.12224

Non-Gaussian SGWB

- 非ガウス性 → 高次相関にあらわれる



$$\begin{aligned} \langle \tilde{\Sigma}_{O_1}(f_1) \tilde{\Sigma}_{O_2}(f_2) \tilde{\Sigma}_{O_3}(f_3) \rangle &= L^3 \int \left(\prod_{i=1}^3 dt_i e^{-2\pi i f_i t_i} d^3 k_i \sum \frac{c_{O_i j_i}}{2} \mathcal{Q}_{a_i b_i}^{j_i}(\vec{k}_i) e_{a_i b_i, \lambda_i}(\hat{k}_i) \right) \\ &\quad \times \langle h_{\lambda_1}(t_1 - L, \vec{k}_1) h_{\lambda_2}(t_2 - L, \vec{k}_2) h_{\lambda_3}(t_3 - L, \vec{k}_3) \rangle, \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\tilde{\Sigma}_O(f) = \tilde{s}_O(f) - \tilde{n}_O(f) ; \text{ signal - noise}$$

$$\begin{aligned} \tilde{s}_{12}(f) &\equiv \int dt e^{-2\pi i f t} s_{12}(t) \\ &= L \int d^3 k e^{-2\pi i \vec{k} \cdot \vec{x}_1} \sum_{\lambda} \mathcal{G}_{\lambda}(\hat{k}, \hat{l}_{12}) \int dt e^{-2\pi i f t} h_{\lambda}(t - L, \vec{k}) \mathcal{T}(kL, \hat{k} \cdot \hat{l}_{12}) + \tilde{n}_{12}(f), \end{aligned}$$

周波数空間でのシグナルの3点相関

How about with DECIGO?

The Primordial Black Hole Dark Matter - LISA Serendipity

N. Bartolo,^{1,2,3} V. De Luca,⁴ G. Franciolini,⁴ M. Peloso,^{1,2} and A. Riotto⁴

¹*Dipartimento di Fisica e Astronomia “G. Galilei”,
Università degli Studi di Padova, via Marzolo 8, I-35131 Padova, Italy*

²*INFN, Sezione di Padova, via Marzolo 8, I-35131 Padova, Italy*

³*INAF - Osservatorio Astronomico di Padova, Vicolo dell'Osservatorio 5, I-35122 Padova, Italy*

⁴*Département de Physique Théorique and Centre for Astroparticle Physics (CAP),
Université de Genève, 24 quai E. Ansermet, CH-1211 Geneva, Switzerland*

(Dated: Tuesday 30th October, 2018)

The last few years have witnessed a renewed interest in the possibility that primordial black holes (PBHs) constitute the dark matter of the universe. Current observational constraints leave only a few PBH mass ranges for this possibility. One of them is around $10^{-12} M_{\odot}$. If these PBHs are due to enhanced scalar perturbations produced during inflation, their formation is inevitably accompanied by the generation of fully non-Gaussian gravitational waves (GWs) with frequency peaked in the mHz range, precisely at the maximum sensitivity of the LISA mission. We show that, if these primordial black holes are the dark matter, LISA will be able to detect not only the GW power spectrum, but also the non-Gaussian three-point GW correlator, thus allowing this scenario to be thoroughly tested.

1810.12218

DECIGOでも可能か？

Summary & discussion

- 原始ブラックホール(PBH)

- ✓ 暗黒物質の候補
- ✓ インフレーションモデルのプローブ

- 重力波観測とPBH

- ✓ LIGO/VIRGO collaboration, PTA → O(1-10) M-sun PBHの存在量に対して制限
- ✓ DECIGO → 暗黒物質の候補として許されている質量範囲に対して強力

- さらなるPBHの検証とDECIGO

- ✓ O(1-10) M_{sun} BH binaries のスピンや離心率分布？
- ✓ 背景重力波の非ガウス性を検証できるか？

PBHs vs inflation

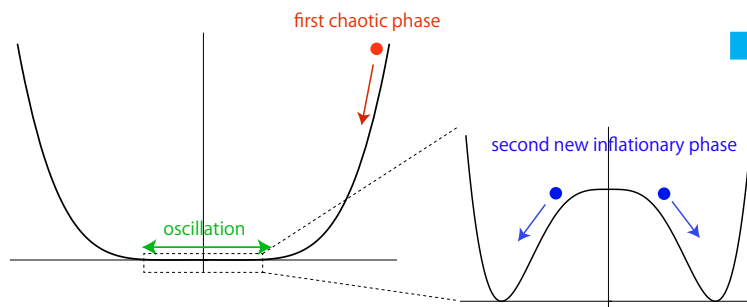
- もともとの高密度領域は？

← 初期密度揺らぎとしてインフレーション中に生成(標準的には)

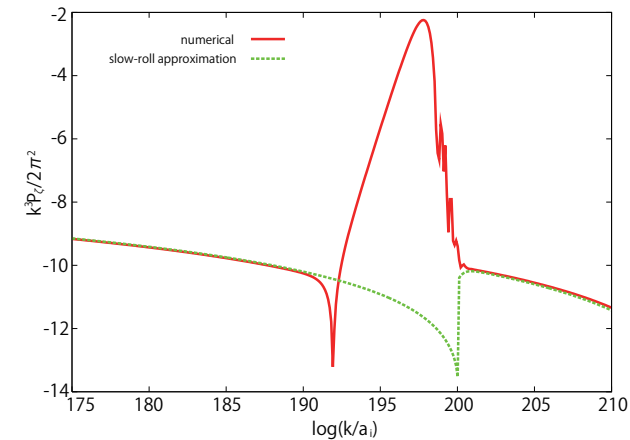
例； Saito, Yokoyama, Nagata; 0804.3470

インフレーションポテンシャル

$$V(\varphi) = \frac{\lambda}{4}\varphi^4 \left(\ln \left| \frac{\varphi}{v} \right| - \frac{1}{4} \right) + \frac{\lambda}{16}v^4.$$



初期密度揺らぎのパワースペクトル



大スケール

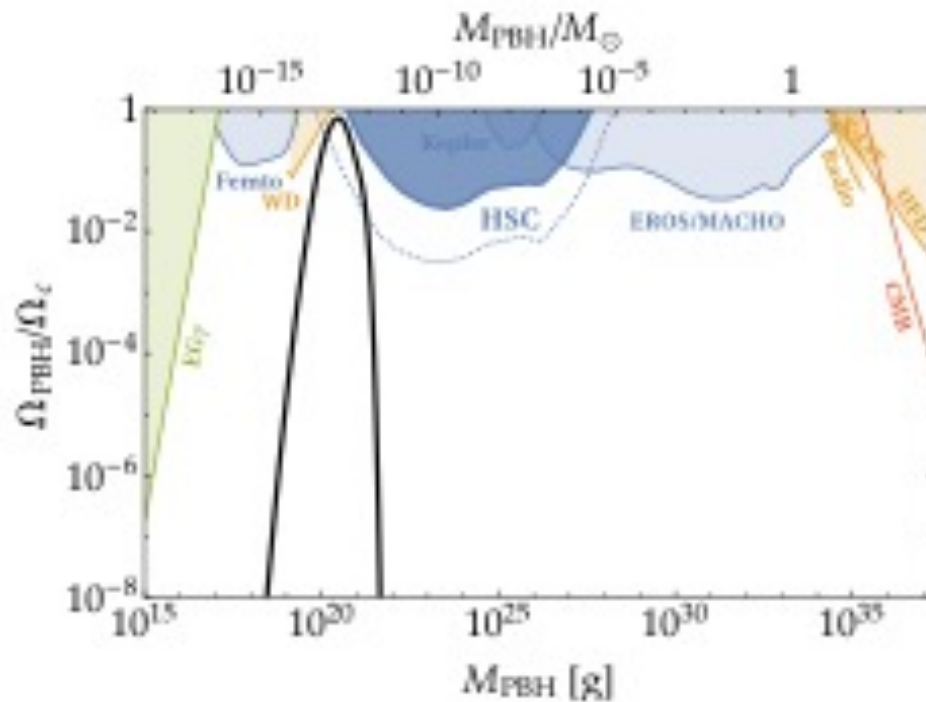
小スケール

あるスケールで非常に大きな振幅の揺らぎを生成するモデルもある

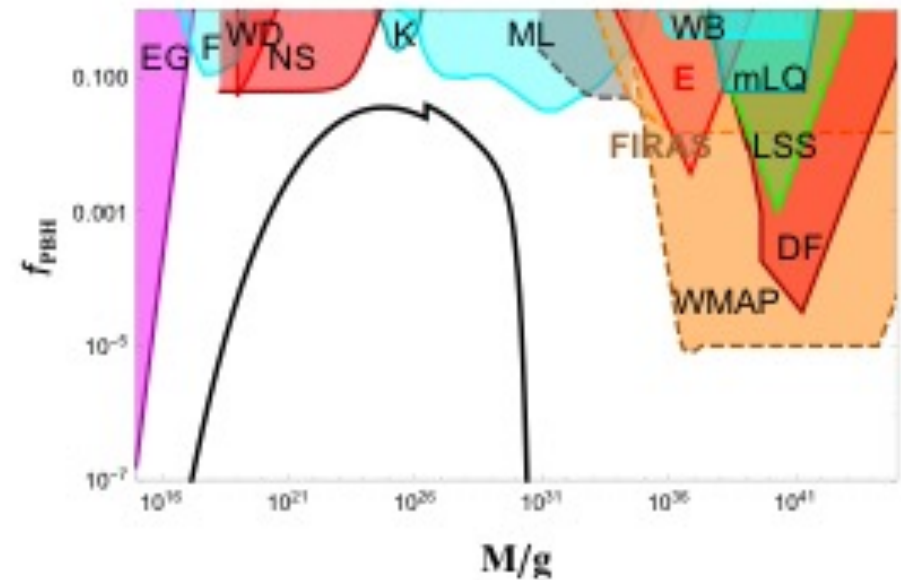
→ PBH探査はインフレーションモデル構築にとっても重要

PBHs vs inflation

- Broad spectrum



Inomata et al. (2017)



Di and Gong (2017)