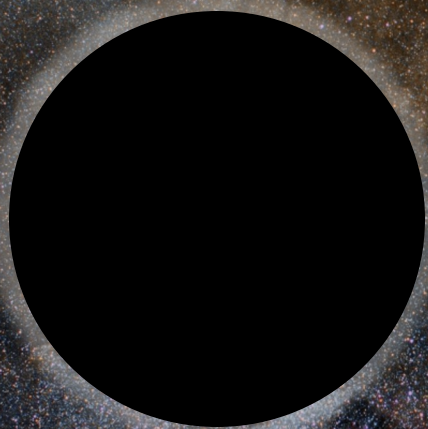


暗黒エネルギー/修正重力 と重力波



本橋 隼人
(工学院大学)

2022.3.18 日本物理学会 第77回年次大会
シンポジウム「重力波宇宙論の展望」



科研費
KAKENHI

重力：物理学の最後のフロンティア

万有引力定数 $G = 6.67430(15) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ CODATA (2018)

わずか4桁の精度でしか分かっていない。↙

- 非常に弱い力
- 負の質量がないため遮蔽が不可能

SI (2019)での定義値

$c = 299792458 \text{ m/s}$

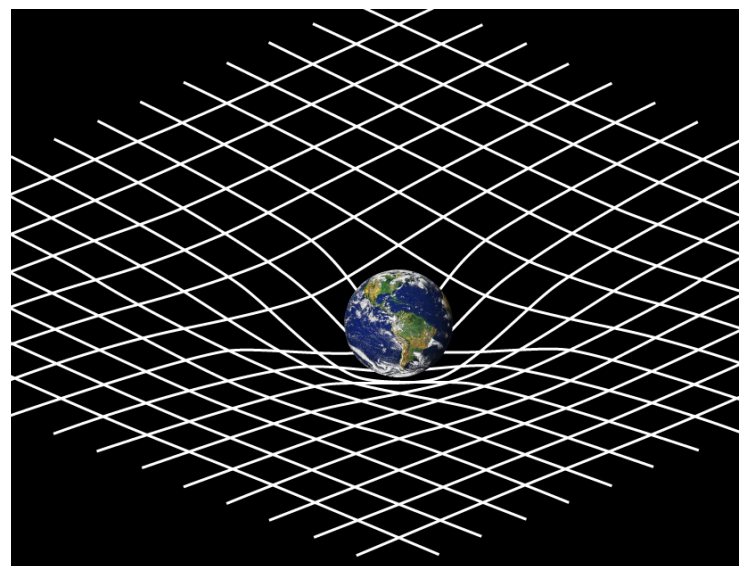
$\hbar = 1.0545718176462 \times 10^{-34} \text{ J s}$

$e = 1.602176634 \times 10^{-19} \text{ C}$

逆二乗則/一般相対論は $10\mu\text{m} \sim 1\text{au}$ まで検証。

短距離、動的・強重力系は未開拓。

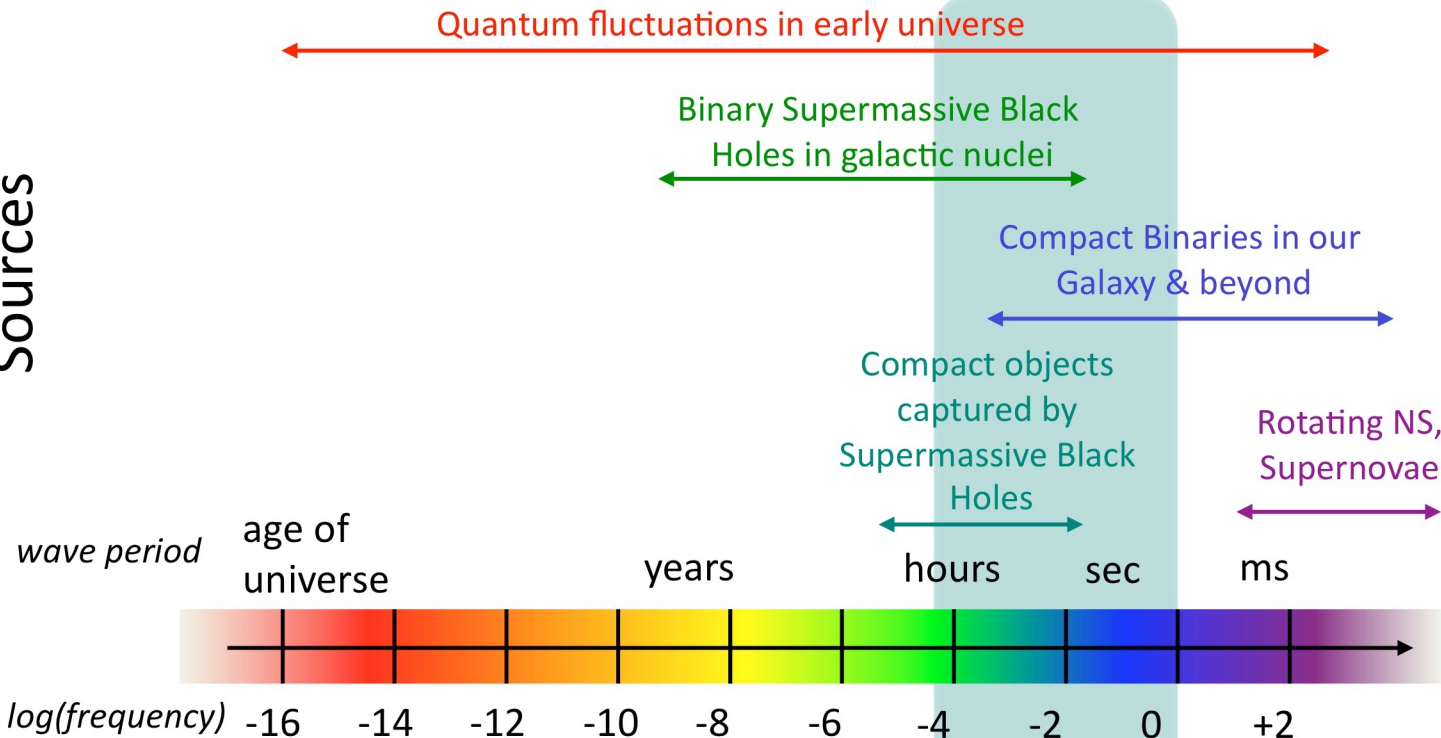
長距離にも謎が残されている。



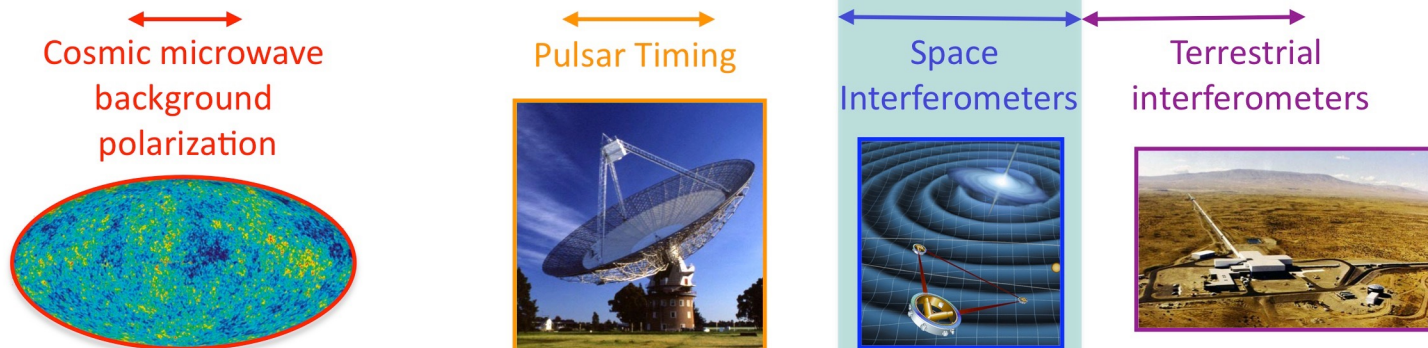
Credit: NASA

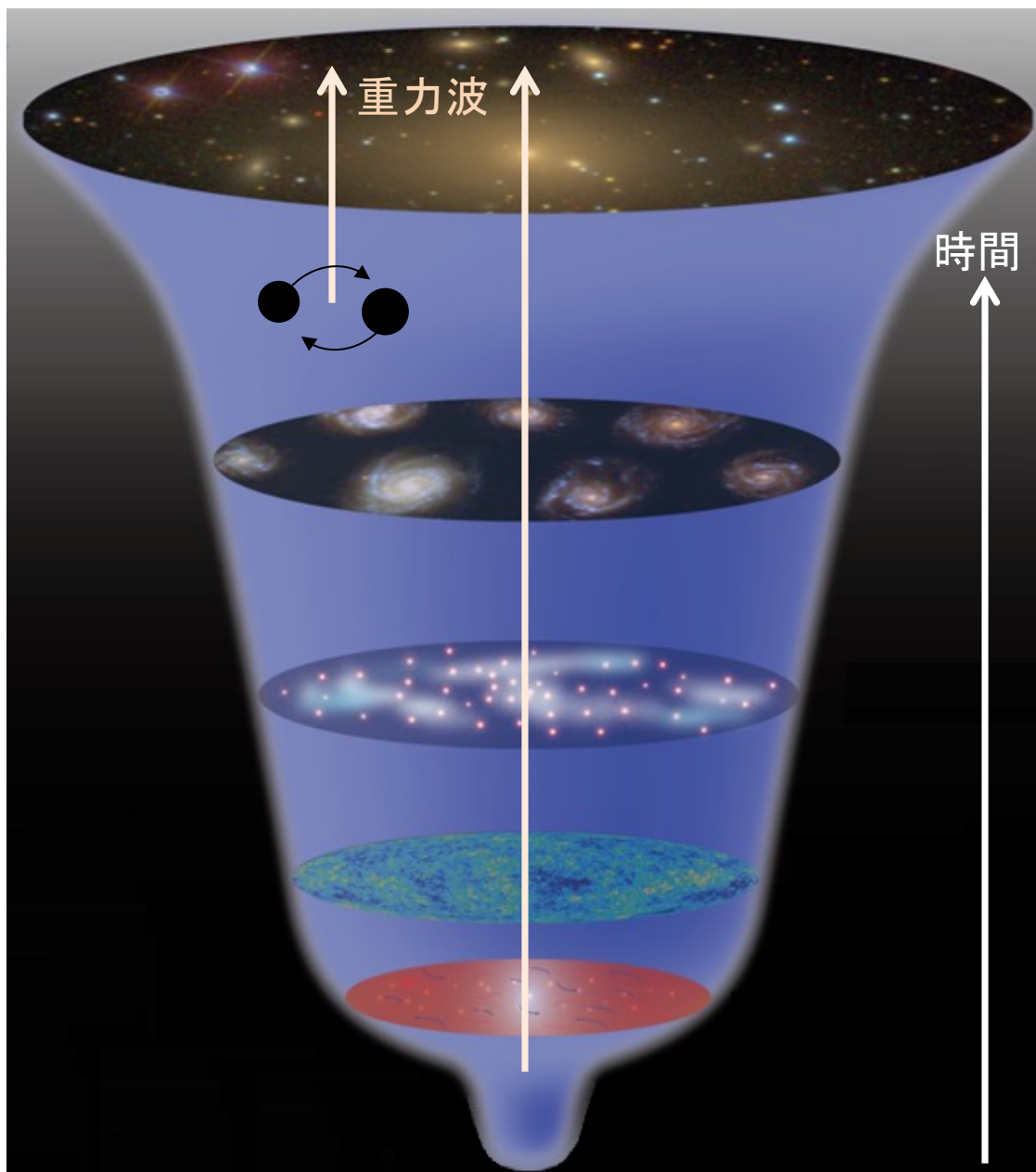
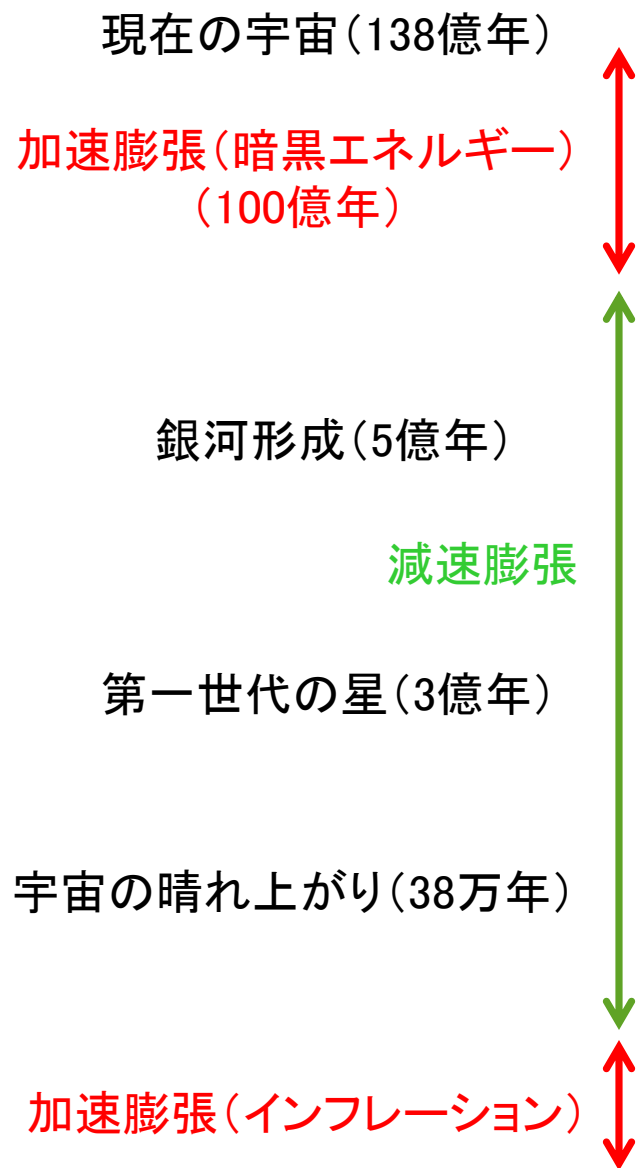
The Gravitational Wave Spectrum

Sources



Detectors



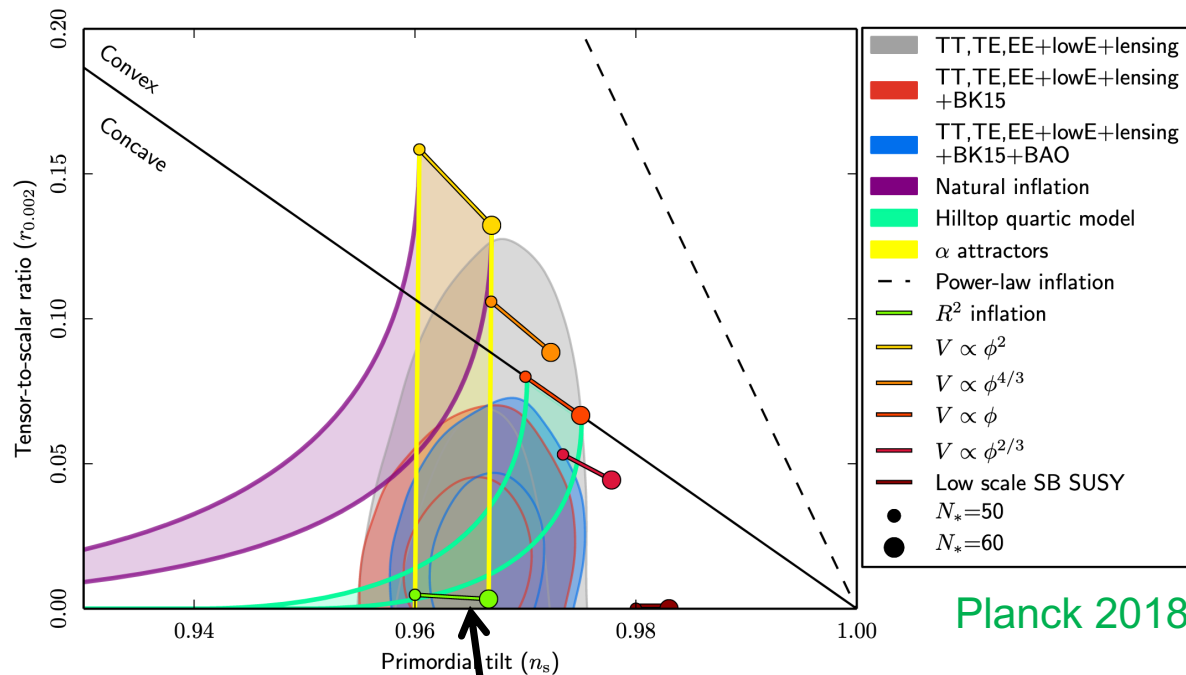


宇宙の加速膨張

一般相対論 + 普通の物質 = 減速膨張
⇒ 加速膨張を説明するには修正が必要。

宇宙初期の加速膨張

現状、“修正重力”インフレーションが最有力。



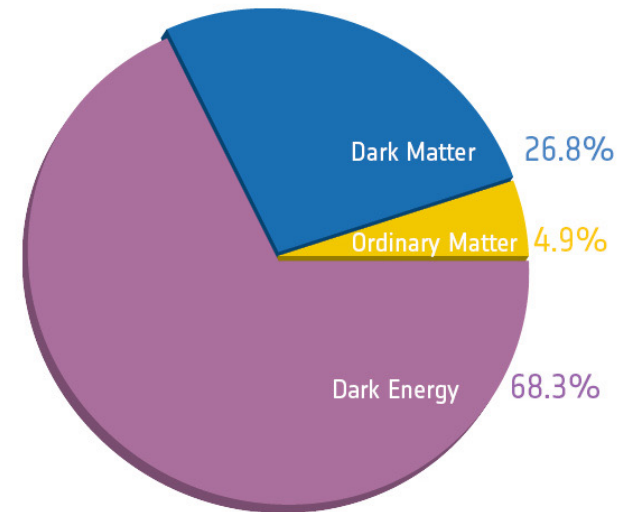
$R + R^2$ inflation

宇宙の加速膨張

一般相対論 + 普通の物質 = 減速膨張
⇒ 加速膨張を説明するには修正が必要。

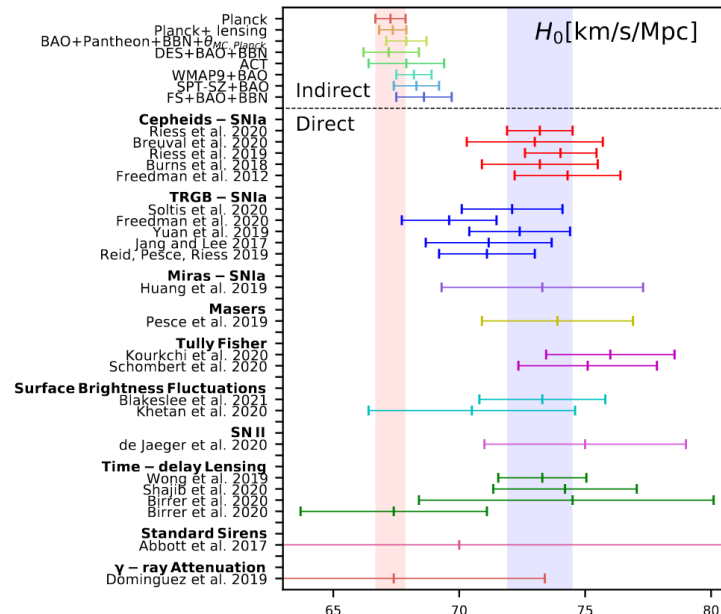
現在の加速膨張

(非常に小さい)宇宙定数で説明できるが、
暗黒エネルギー/修正重力の可能性もある。

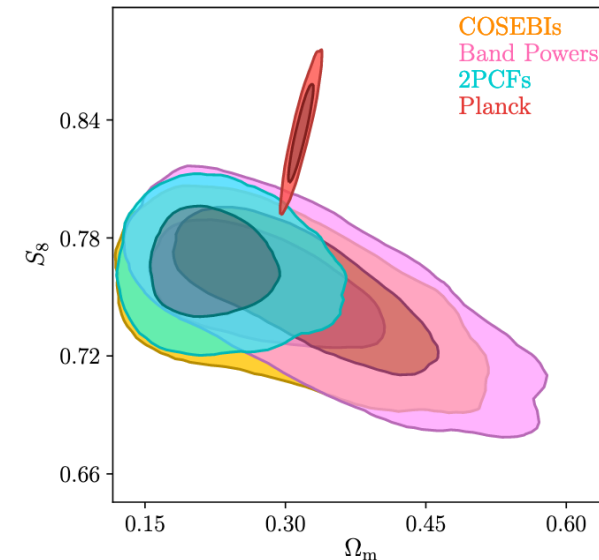


Planck 2013

最近では、
 H_0 , σ_8 tension
の解決という
動機もある。



Di Valentino, 2011.00246



Asgari+ 2007.15633

約1.3億光年離れた連星中性子星合体で生じた

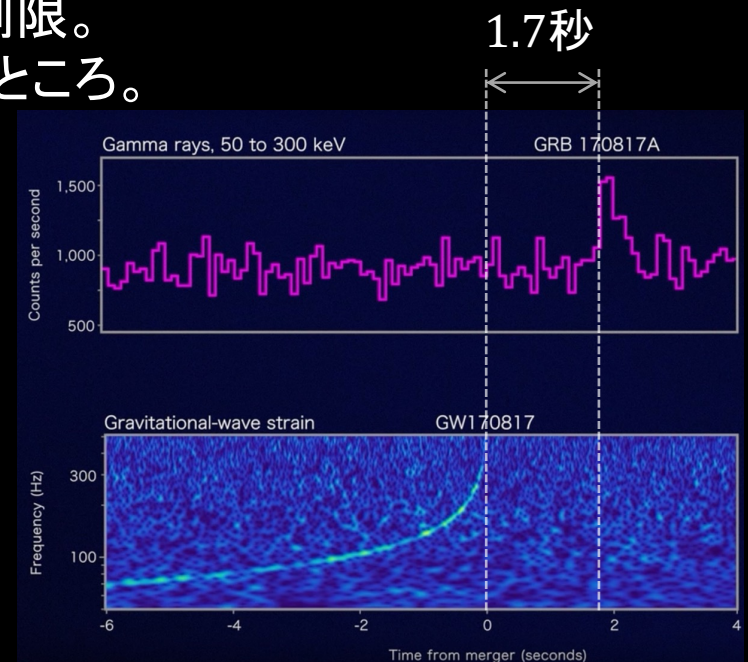
- 重力波 GW170817
 - 短ガンマ線バースト GRB 170817A
- の到来時刻の差がわずか1.7秒と判明。

⇒ 15桁の精度で c_{GW} と c が一致！
(マルチメッセンジャー観測の威力)

100Hz 付近の物理を記述する重力理論への制限。
暗黒エネルギーのモデルに適用されるか微妙なところ。

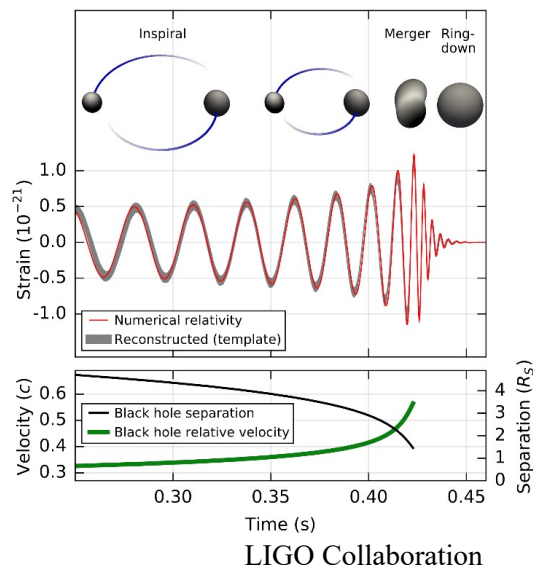
de Rham, Melville 1806.09417

初期宇宙やBH近傍の重力理論
には影響なし。

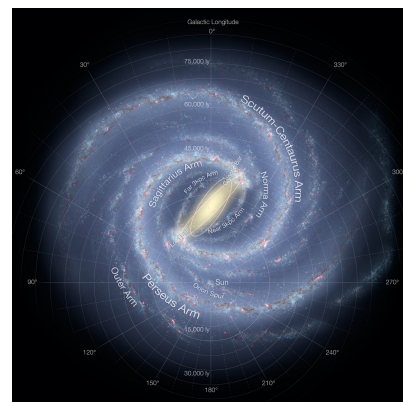


動的・強重力系における重力理論は未開の領域。
その検証が本格的に始まりつつある。

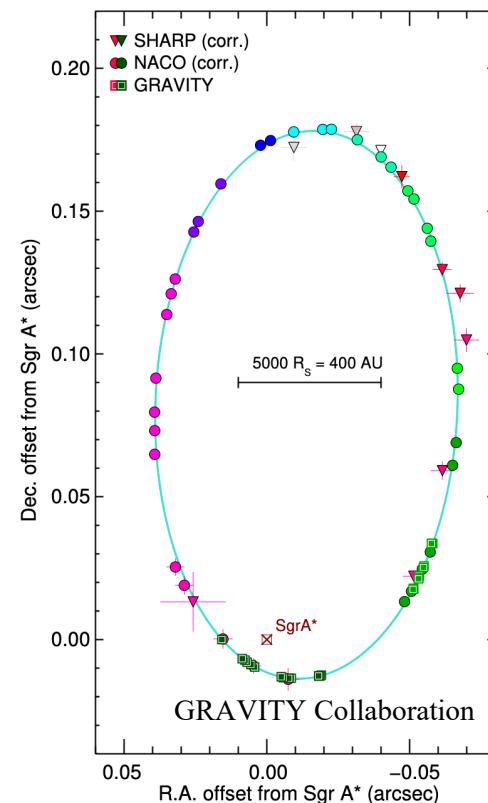
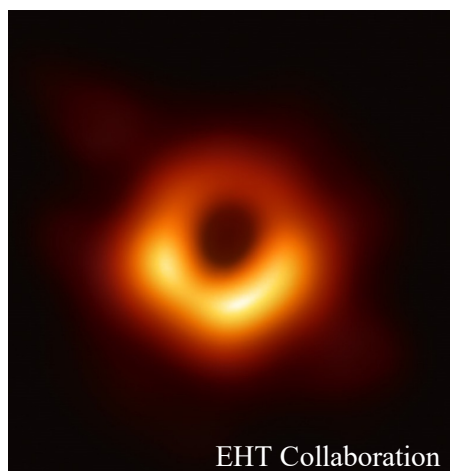
重力波



BH近傍の 星の運動



シャドウ



重力理論検証のための枠組みが必要。

スカラー・テンソル理論: 最もシンプルな枠組み。
最近10年ほどの間に、大きな進展があった。

本橋, 物理学会誌 71 (2016) 734

「オストログラドスキーの定理: 整合的な修正重力理論への道のり」

従来、様々な理論が別個に調べられてきた。

$f(R)$ gravity
 $R + R^2$ inflation
 K -essence/-inflation
Brans-Dicke
GR (2自由度)



共形変換 $\tilde{g}_{\mu\nu} = A g_{\mu\nu}$
してEinstein frameに移れば
スカラー・テンソル理論

Maeda (1988), (1989)



Keiko Sena (1969)

従来、様々な理論が別個に調べられてきた。これらはより広い、オストログラドスキー・ゴーストを持たない理論の一部だった。

Horndeski (1974), Deffayet+ 1103.3260, Kobayashi+ 1105.5723

$f(R)$ gravity

$R + R^2$ inflation

K -essence/-inflation

Brans-Dicke

GR (2自由度)

Horndeski

$G_5(\phi, X)$

$G_4(X)$

この外側にある高階理論はゴーストを持つと考えられていた。

Ostrogradsky (1850), Woodard 1506.02210

高階EOM=オストログラドスキー・ゴーストあり...?

縮退理論

ゴーストを取り除くのは「縮退条件」であることが判明。

HM, Noui, Suyama, Yamaguchi, Langlois, 1603.09355

HM, Suyama, Yamaguchi, 1711.08125, 1804.07990

$F(\phi, X)R$

$A_3(\phi, X)$

DHOST

$\nabla\nabla\phi$

$f(R)$ gravity

$R + R^2$ inflation

K -essence/-inflation

Brans-Dicke

GR (2自由度)

Horndeski

$G_5(\phi, X)$

$G_4(X)$

Langlois+ 1510.06930

Crisostomi+ 1602.03119

Ben Achour+ 1602.08398

HM, Suyama, 1411.3721, 2001.02483, Aoki, HM, 2001.06756

非縮退理論 = オストログラドスキー・ゴーストあり

縮退理論の広がり

縮退条件から様々な理論が生まれた。



- スカラー・テンソル理論

Langlois+ 1510.06930, 1512.06820, 1802.03394, Crisostomi+ 1602.03119
Ben Achour+ 1602.08398, 1608.08135, Takahashi+ 1708.02951
De Felice+ 1803.06241, Gao+ 1806.02811, HM+ 2002.07967

- ベクトル・テンソル理論

Allys+ 1609.05870, Kimura+ 1608.07066
Errasti Diez+ 1905.06967, Cadavid+ 2009.03241

- ボゾン・フェルミオン系

Kimura+ 1704.02717, 1805.10963

- Chern-Simons重力の拡張

Crisostomi+ 1710.04531

- Fierz-Pauli理論の拡張

Naruko+ 1812.10886

- 縮退Hořava理論

Barausse+ 2101.00641

縮退理論

「縮退条件」によりゴーストを取り除いた理論

$F(\phi, X)R$

$A_3(\phi, X)$

DHOST

$\nabla\nabla\phi$

$f(R)$ gravity

$R + R^2$ inflation

K -essence/-inflation

Brans-Dicke

GR (2自由度)

Horndeski

$G_5(\phi, X)$

$G_4(X)$

非縮退理論 = オストログラドスキー・ゴーストあり

縮退理論

Disfomal変換

$$\tilde{g}_{\mu\nu} = Ag_{\mu\nu} + B\nabla_\mu\phi\nabla_\nu\phi$$

Bekenstein, gr-qc/9211017

Horndeski理論とdisfomal変換で
関係付いているサブクラス

$F(\phi, X)R$

$A_3(\phi, X)$

“Disformal
Horndeski”

$f(R)$ gravity

$R + R^2$ inflation

K -essence/-inflation

Brans-Dicke

GR (2自由度)

Horndeski

$G_5(\phi, X)$

$G_4(X)$

DHOST

$\nabla\nabla\phi$

宇宙論的解が不安定

de Rham, Matas, 1604.08638

非縮退理論 = オストログラドスキー・ゴーストあり

縮退理論

重力波の伝搬速度＝光速となるサブクラス

Langlois, Saito, Yamauchi, Noui, 1711.07403

$c_{\text{GW}} = c$

$F(\phi, X)R$

$A_3(\phi, X)$

“Disformal
Horndeski”

DHOST

$\nabla\nabla\phi$

$f(R)$ gravity

$R + R^2$ inflation

K -essence/-inflation

Brans-Dicke

GR (2自由度)

Horndeski

$G_5(\phi, X)$

$G_4(X)$

非縮退理論 = オストログラドスキー・ゴーストあり

縮退理論

より一般的な可逆変換を発見。
理論の枠組みを拡張。

Takahashi, HM, Minamitsuji
2111.11634, in prep.

$$c_{\text{GW}} = c$$

$$R^{\mu\nu}\nabla_\mu X\nabla_\nu X$$

“Generalized
Disformal
Horndeski”

$$\nabla\nabla\nabla\phi$$

$$F(\phi, X)R$$

$$A_3(\phi, X)$$

“Disformal
Horndeski”

DHOST

$$\nabla\nabla\phi$$

$f(R)$ gravity

$R + R^2$ inflation

K -essence/-inflation

Brans-Dicke

GR (2自由度)

Horndeski

$$G_5(\phi, X)$$

$$G_4(X)$$

非縮退理論 = オストログラドスキー・ゴーストあり

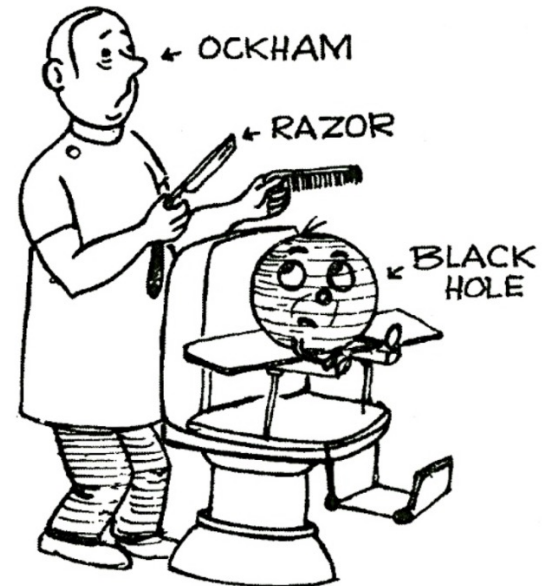
唯一性定理

一般相対論における
回転ブラックホール解

⇒

カー解のみ

ブラックホールを特徴づける
「毛」は、質量と角運動量の他に
はない。



Vishveshwara (1980)

唯一性定理

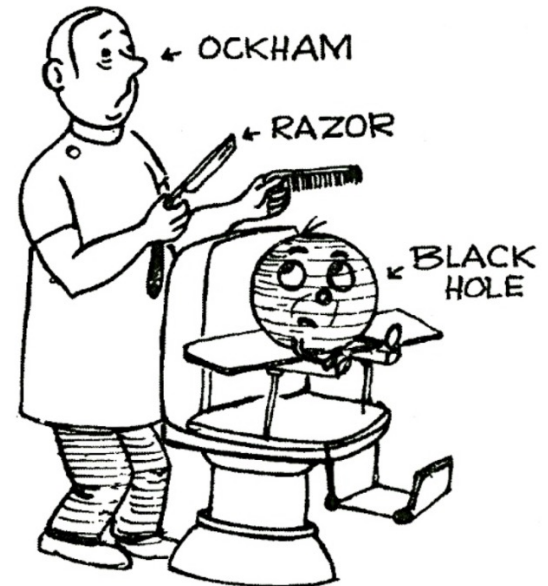
一般相対論における
回転ブラックホール解

$\Rightarrow$

カー解のみ

では、その逆は？

カー解 $\Rightarrow$ 許されるのは一般相対論のみ...？



Vishveshwara (1980)

唯一性定理

一般相対論における
回転ブラックホール解

$\Rightarrow$

カー解のみ

では、その逆は？

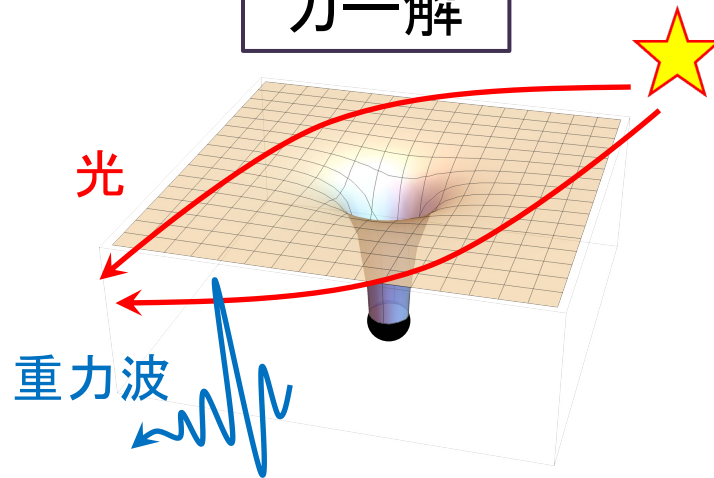
カー解 $\Rightarrow$ 許されるのは一般相対論のみ...ではない。

修正重力理論では様々なブラックホール解が可能。

- ステルス解
($g_{\mu\nu}$: カー解、 ϕ : 非自明な配位)
- Disformalカー解
($g_{\mu\nu}$: カー解+ズレ、 ϕ : 非自明な配位)
- カー解とは全く異なる解

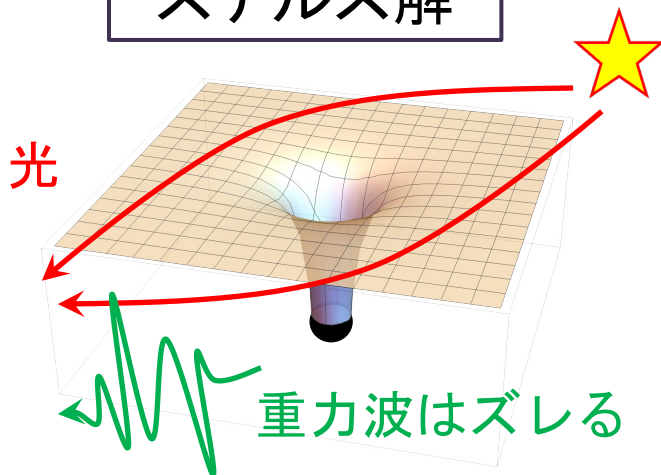
一般相対論

カー解

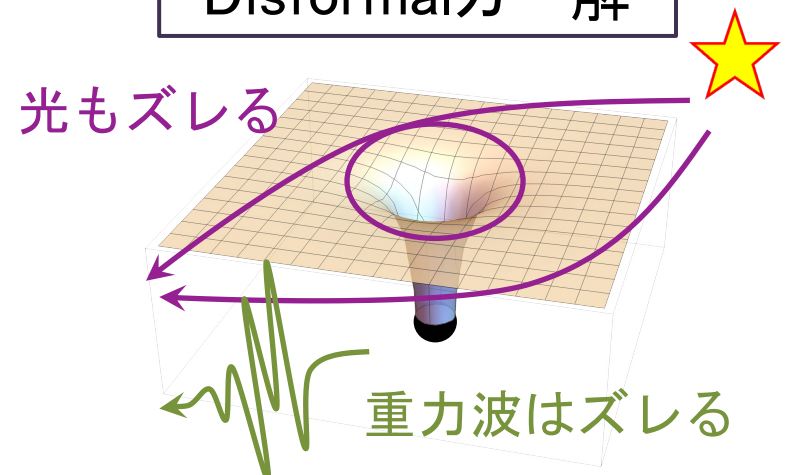


修正重力理論

ステルス解



Disformalカー解



ステルス解：背景解 $g_{\mu\nu}$: GR解、 ϕ : 非自明な配位

個々の理論で様々なステルス解があることはわかっていた。
(ステルス・シュバルツシルト解、ステルス・カー解、…)

Babichev+ 1312.3204, Kobayashi+ 1403.4364, Minamitsuji, HM, 1809.06611
Ben Achour+ 1811.05369, HM+ 1901.04658, Charmousis+ 1903.05519

共変解析のまま、ステルス解を厳密解に持つ理論を特定。

HM, Minamitsuji, 1804.01731, Takahashi, HM, 2004.03883

面白い性質：

- GRから“遠い”理論でもステルス解を持つことが可能。
- かなり非自明なスカラー場の配位が許される。

$g_{\mu\nu}$: 静的or定常、 $\phi = qt + \psi(r)$

(GRからわずかにズレた理論/スカラー場というわけではない)

ステルス解：摂動論

$g_{\mu\nu}$: GR解、 ϕ : 非自明な配位

静的球対称時空の摂動論におけるマスター変数を特定。

(GRにおける Regge, Wheeler (1957), Zerilli (1970) の拡張)

Kobayashi, HM, Suyama, 1202.4893, 1402.6740

Takahashi, HM, Minamitsuji, 1904.03554, Takahashi, HM, 2106.07128

- 回転しないBHが安定に存在するために理論が満たすべき安定性条件が明らかになった。

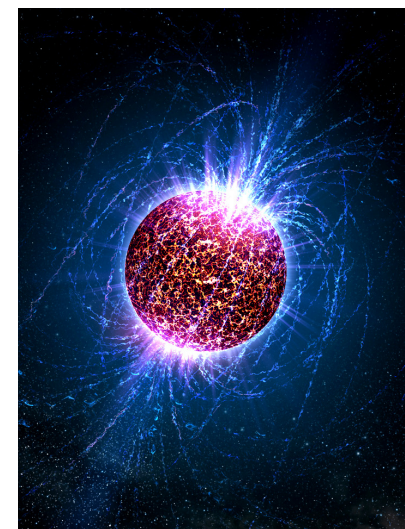
完全流体を加えてBHから星に拡張した解析も可能。
中性子星への応用の可能性。

Kase, Tsujikawa, 2110.12728

静的な配位 $\phi = \phi(r)$ は広いクラスで
強結合/不安定。

Minamitsuji, HM, 1809.06611

Minamitsuji, Takahashi, Tsujikawa, 2201.09687



Credit: NASA

ステルス解：摂動論

$g_{\mu\nu}$: GR解、 ϕ : 非自明な配位

$\phi = qt + \psi(r)$ でも強結合/勾配不安定性が発覚。

de Rham, Zhang 1907.00699

調べてみると、2階微分理論ではかなり一般的に起こる。

($\omega^2 = c_s^2 k^2 \Rightarrow E_s \sim c_s^{7/4} M$ だが、漸近的に $c_s^2 \leq 0$ と判明。 M : 理論のcutoff、 E_s : 強結合スケール)

これは、2階微分理論に限定したことで本来EFTとして出てくる

$\left(\frac{\omega}{M}\right)^2 = \left(\frac{k}{M}\right)^4 + \left(\frac{k}{M}\right)^6 + \dots$ の高次項が看過されていたため。

実際に $\alpha(\Box\phi)^2/M^2$ という項を追加して解析すると、

$E_s \sim |\alpha|^{7/2} M$ となり強結合が解消できた。

(オストログラドスキー・ゴーストは $\sim M$ 以上で現れる。

低エネルギーではghost-freeの縮退理論)

縮退条件の弱いdetuning = Scordatura

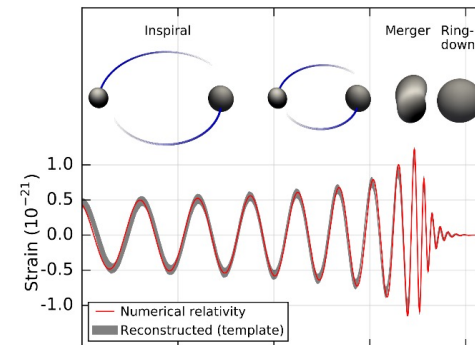
HM, Mukohyama, 1912.00378



Wikipedia

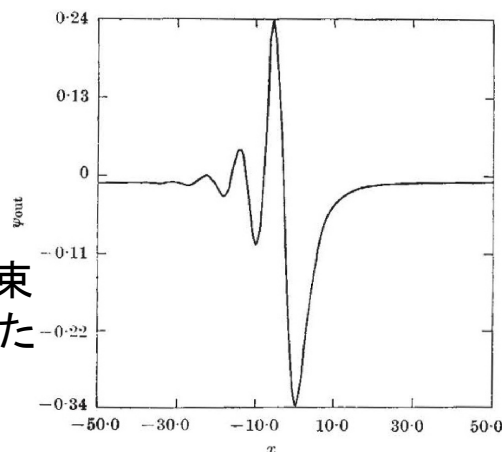
準固有振動

リングダウン重力波を記述する固有減衰振動。
(ブラックホールによる波の散乱問題)

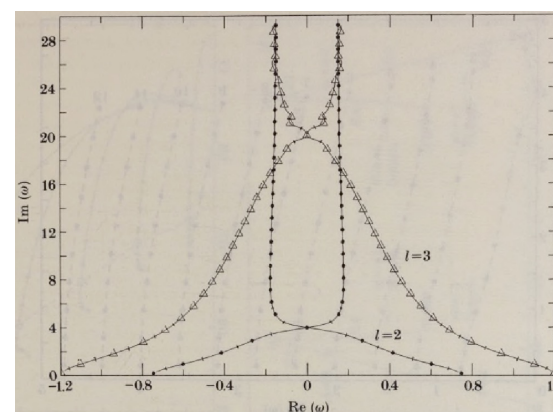


LIGO Collaboration

ガウシアン波束
の散乱で生じた
減衰振動



Vishveshwara (1970)



Leaver (1985)

準固有振動数
(複素数)の分布

GRでのBHの散乱問題は詳しく調べられており、厳密に解ける。

HM, Noda, 2103.10802

リングダウン重力波観測データの準固有振動による検証や、
基音・倍音の(非)重要性が様々な観点から議論されている。

Giesler+ 1903.08284, Sago+ 2108.13017, Abbott+ 2112.06861, Cotesta+ 2201.00822
Barausse+ 1404.7149, Cardoso+ 2109.00005, Cheung+ 2111.05415

ステルス解：準固有振動

マスター方程式をシュレーディンガー型や連立1階微分方程式に変形して解くのが定石。

ステルス解では、GRの場合と異なる座標変換が必要となる。

$$\left(-\frac{\partial^2}{\partial \tilde{t}^2} + \frac{\partial^2}{\partial \tilde{r}_*^2} - V_{\text{eff}}(r) \right) \Psi = 0$$

座標変換後の $\tilde{t}$ は一般に物理的時間とは異なるので、注意が必要。

観測と直接関わる
波の時間発展を調べたい。

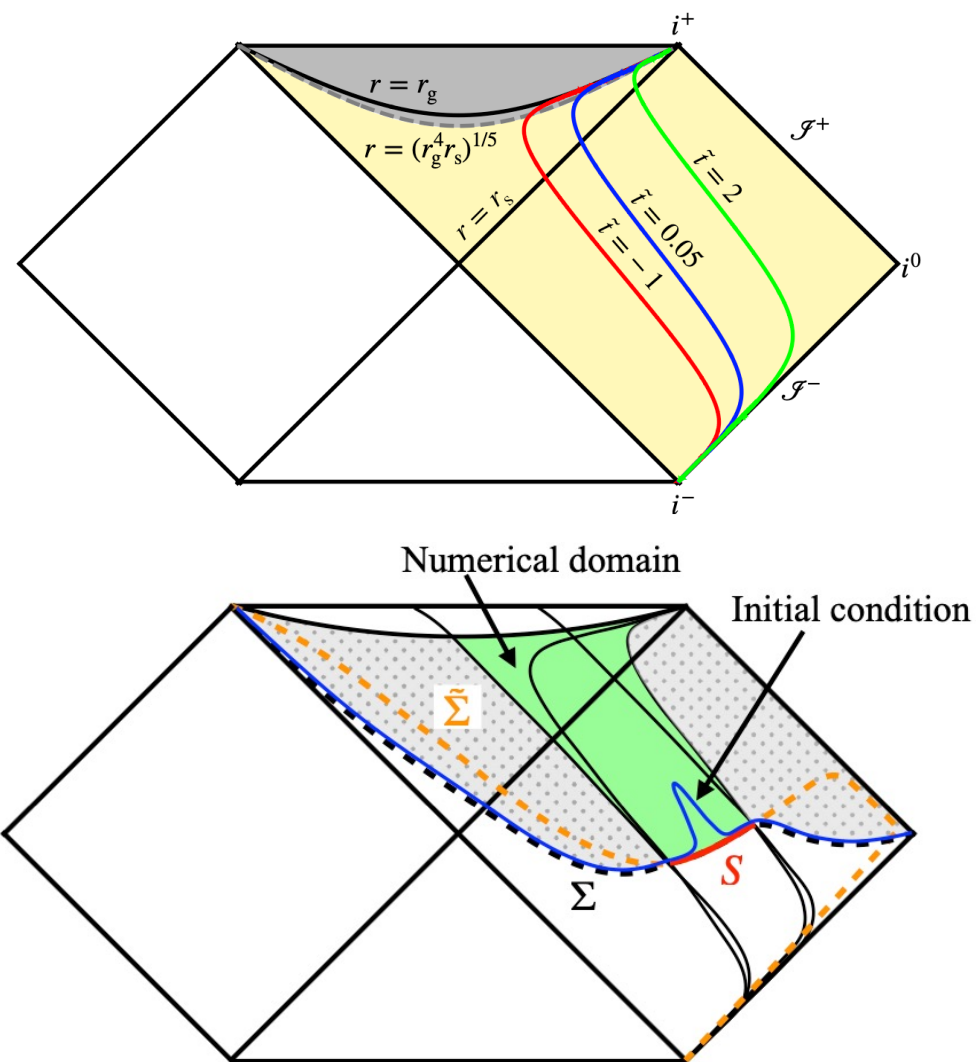


Dali, The Persistence of Memory (1931)

ステルス解：準固有振動

s波($\ell = 0$)を詳しく解析すると、
 $\tilde{t} = \text{一定}$ 面がtimelikeである
ことが判明。
 $\Rightarrow$ 初期面として不適切。

初期値問題を解くために、
適切なspacelike初期面を
用意。

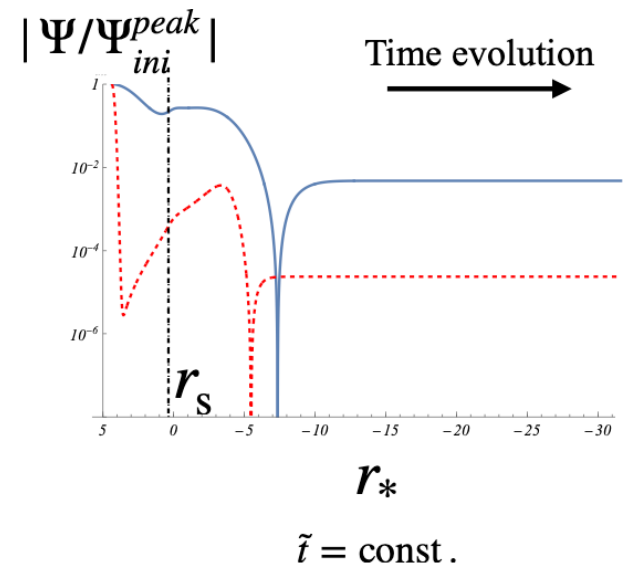
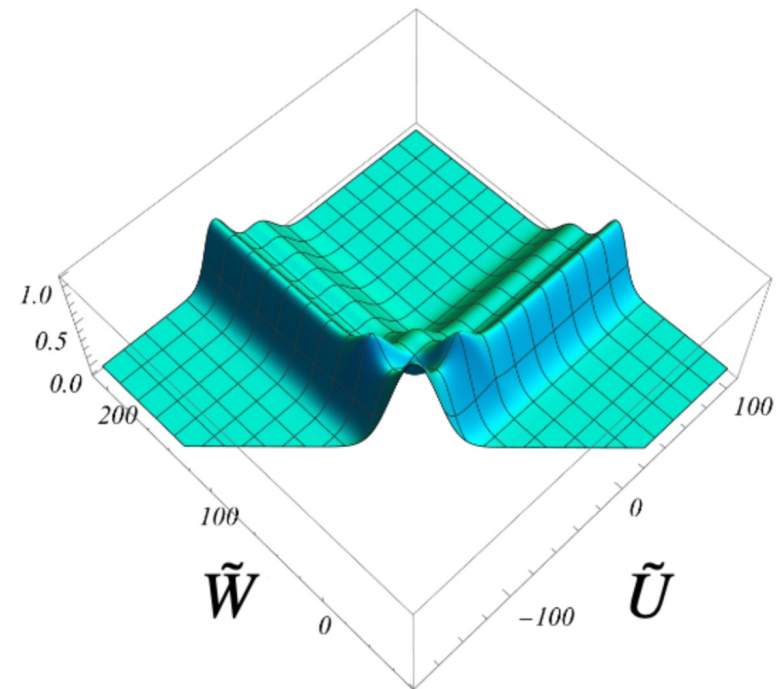


ステルス解：準固有振動

ガウシアン波束を初期条件として
s波($\ell = 0$)の初期値問題を解いた。

波は成長せず、
振動は起きないことが判明。

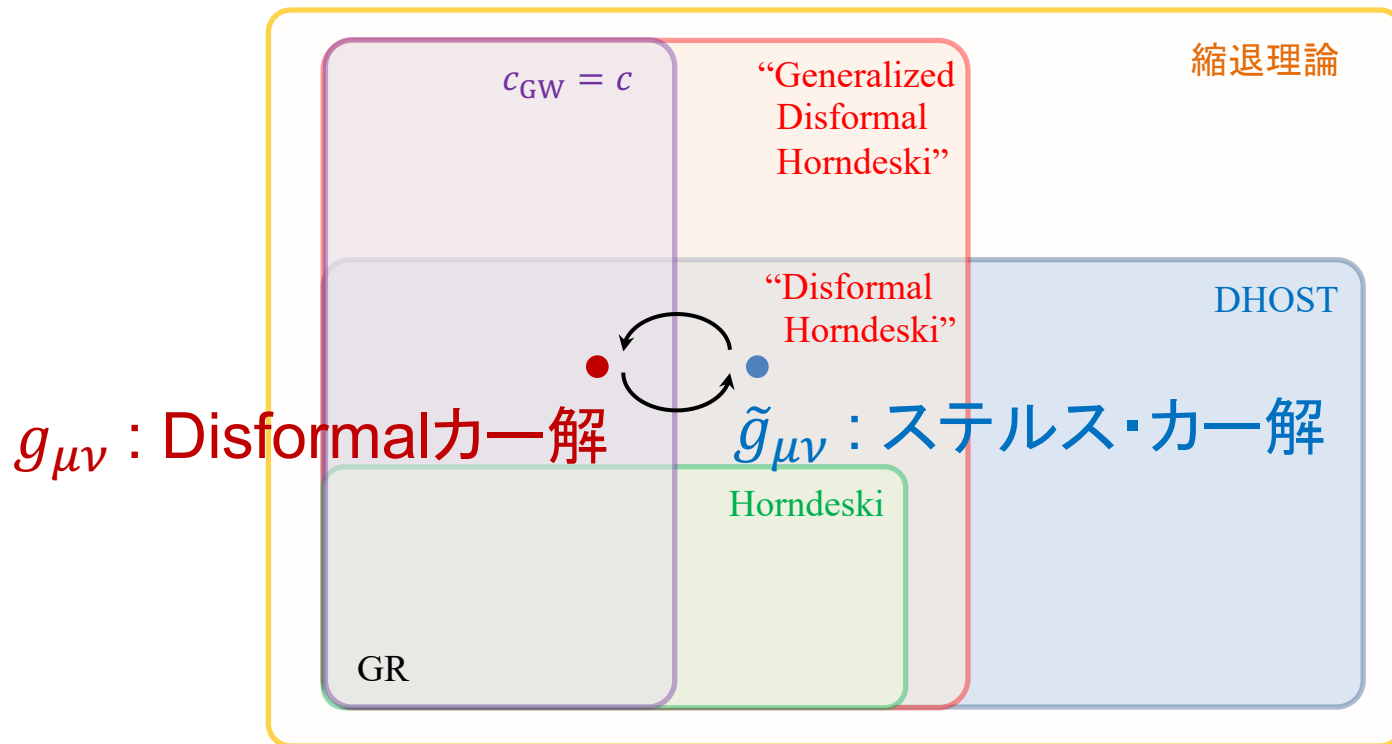
- 初期値問題の適切な解法を確立。
- ステルス解はs波に対して安定。
- 多重極で準固有振動に特徴が現れるかに期待。



Disformalカー解

Ben Achour, Liu, HM, Mukohyama, Noui, 2006.07245
Anson, Babichev, Charmousis, Hassaine, 2006.06461

Disformal変換によりカー解からのズレを持つ厳密解を生成。



$$ds^2 = d\tilde{s}_{\text{Kerr}}^2 + \alpha \left[dt + \frac{\sqrt{2Mr(r^2 + a^2)}}{\Delta} dr \right]^2$$

特徴:カー解との相違は高速回転で顕著になる。

ブラックホール・シャドウ

Long+, 2009.07508

Disformal
parameter

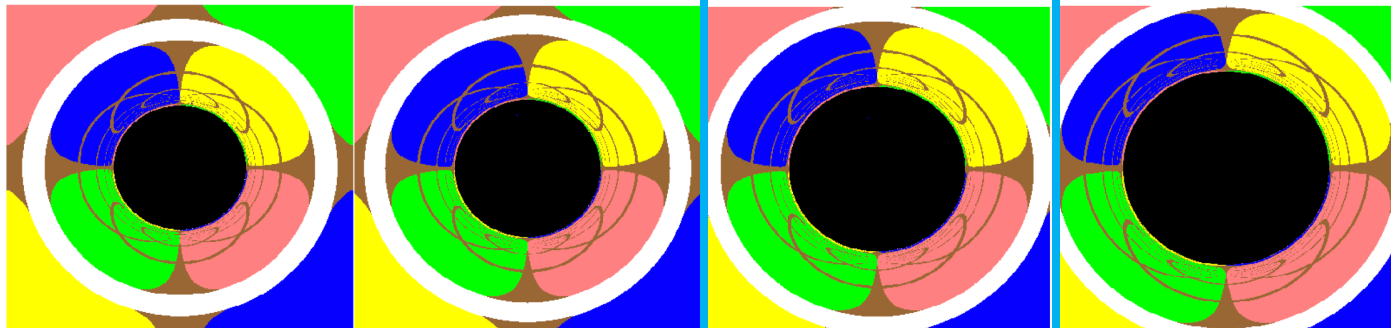
$\alpha = -0.5$

-0.3

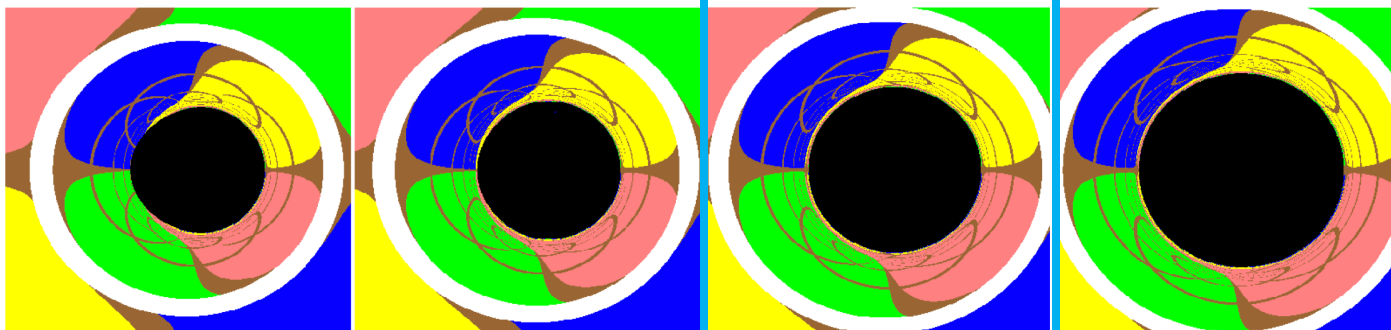
0 (GR)

0.2

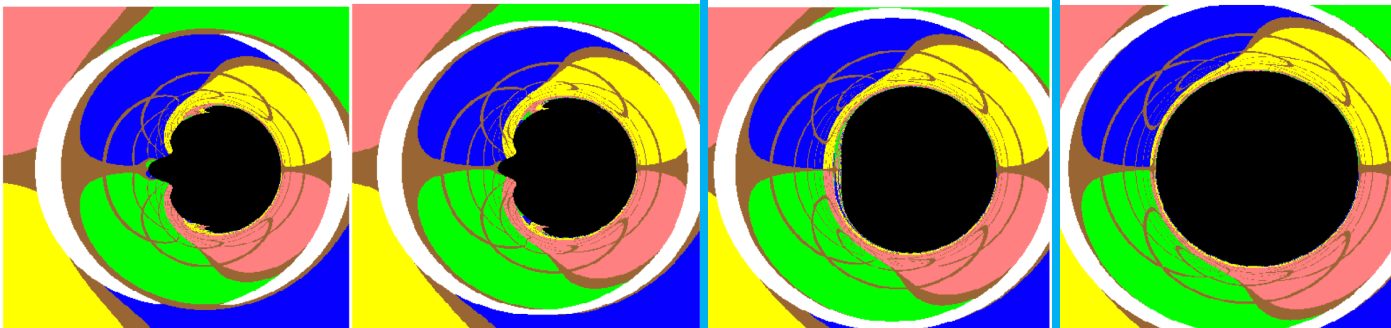
$a/M = 0$
(回転なし)



$a/M = 0.5$
(回転)

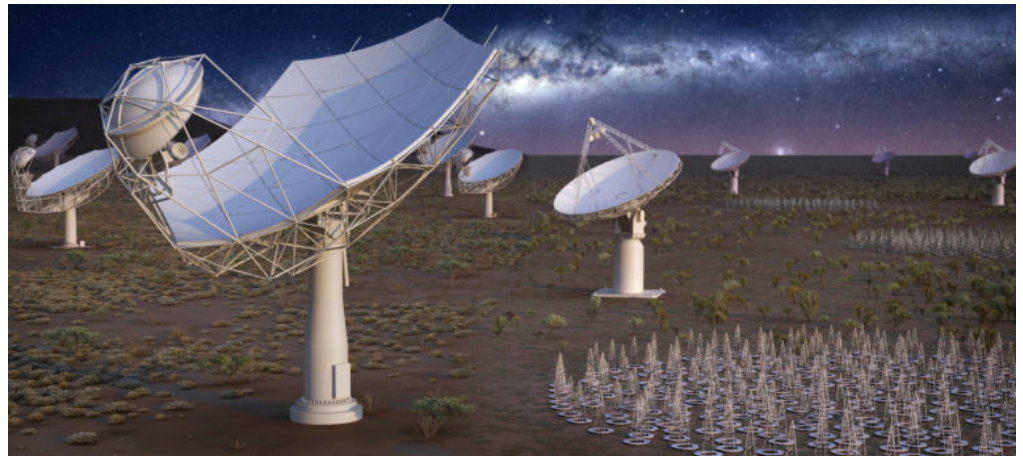
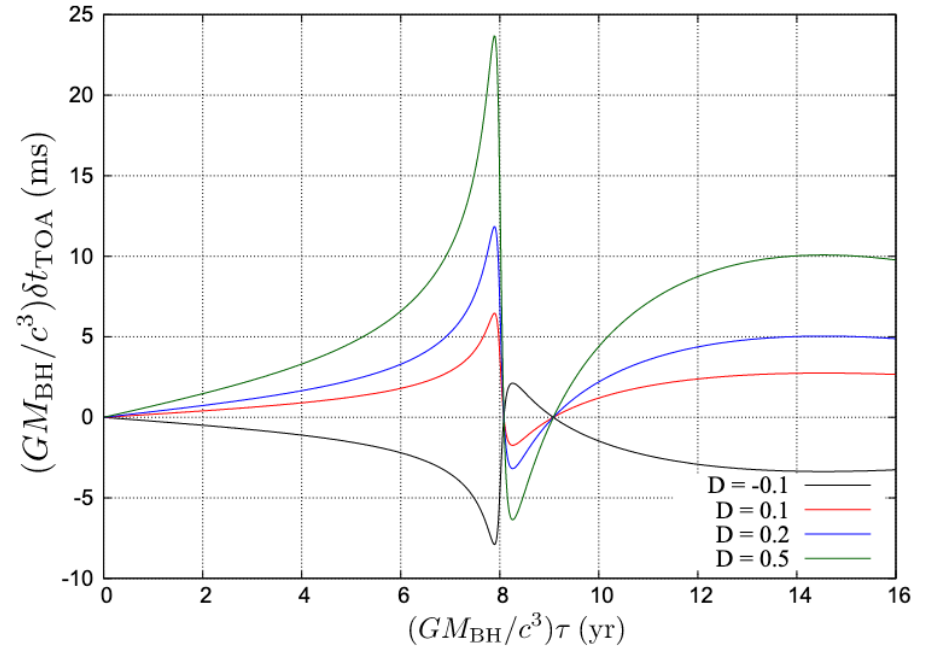
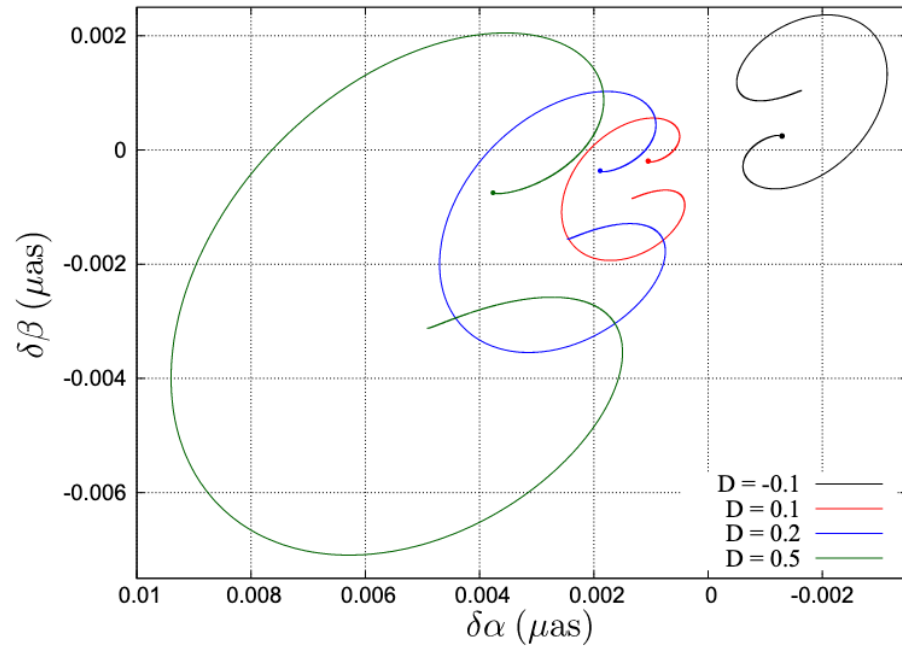


$a/M = 0.998$
(高速回転)



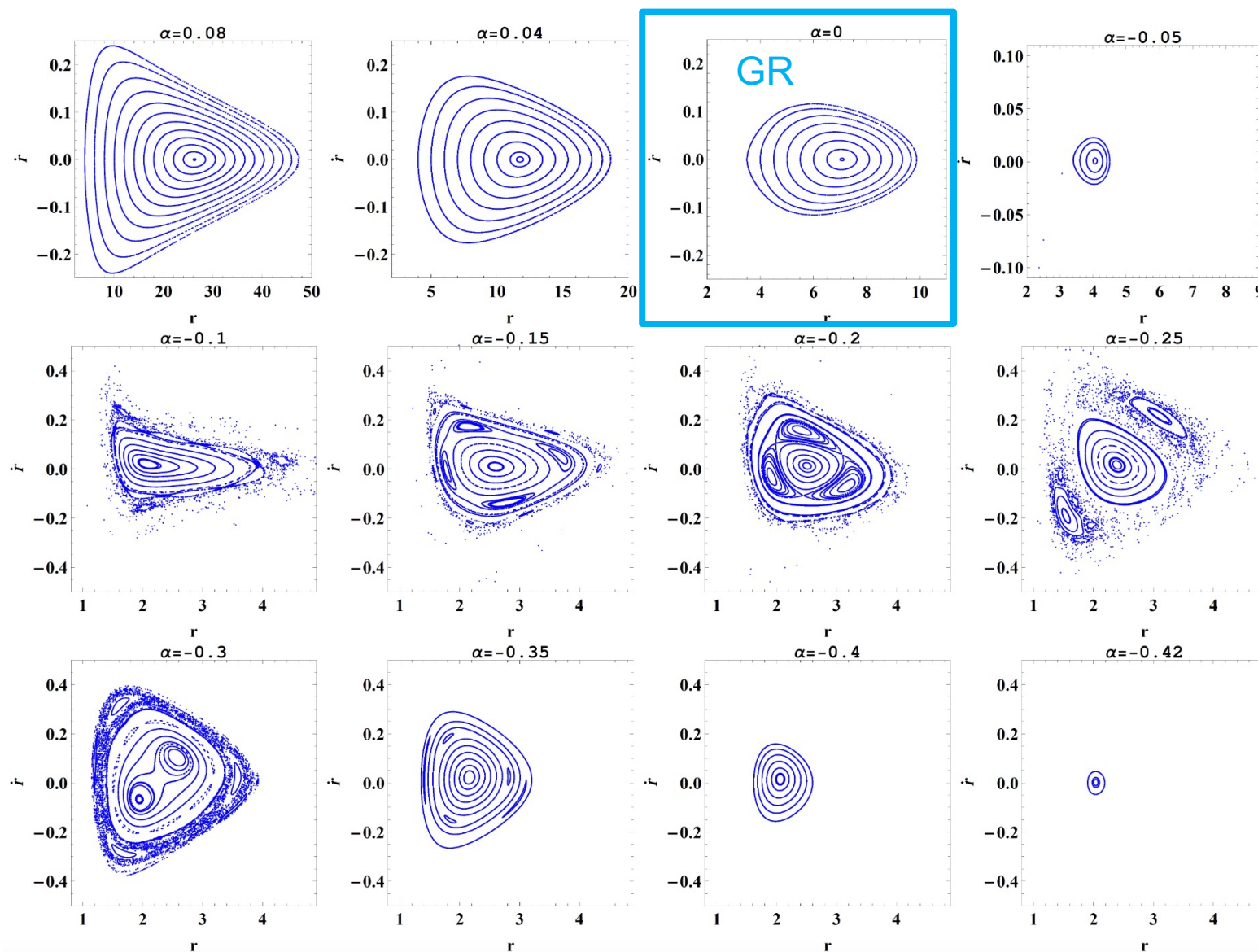
BHを周回するパルサー

Takamori+, 2108.13026



BHに落ちるテスト粒子のカオス

Zhou+, 2110.03291



修正重力理論

- 長/短距離、動的・強重力系の重力理論検証の枠組みとして、オストログラドスキー・ゴーストを持たない縮退理論の構築法を確立（縮退条件、一般化disformal変換）。

ブラックホール厳密解

- ステルス解 ($g_{\mu\nu}$: カー解 ϕ : 非自明な配位)
- Disformalカー解 ($g_{\mu\nu}$: カー解+ズレ ϕ : 非自明な配位)
- 星の運動、電磁波、重力波などを組み合わせて区別可能。

観測による検証可能性

- ステルス解: 背景レベルでは区別出来ないので、線形摂動論を整備し、s波の伝搬の初期値問題を定式化。多重極の準固有振動にGRからの違いが現れるはず。
- Disformalカー解: シヤドウ、星やパルサーの運動など様々な点でGRとの違いが現れる。いずれも高速回転BHで違いが顕著になる。