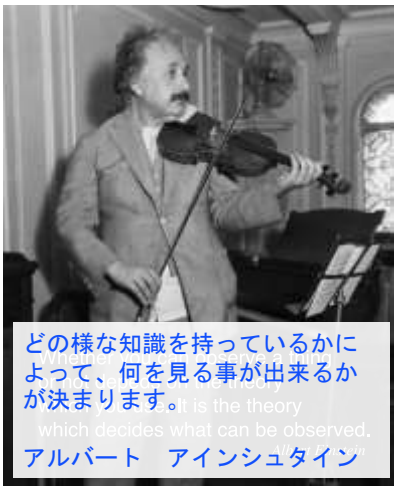
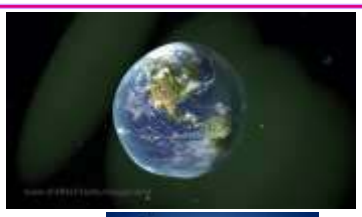
宇宙のかなたからの重力波の調べ

カリフォルニア工科大学　LIGO研究所　山本博章





電気と重力

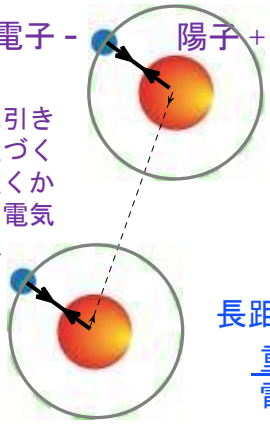
とても弱い重力が、宇宙では一番大事

電気の力～電荷の積 / 距離の二乗

重力～重さの積 / 距離の二乗

電子 -　陽子 +

＋と－は引き合って近づくので、遠くからみると電気的に中性



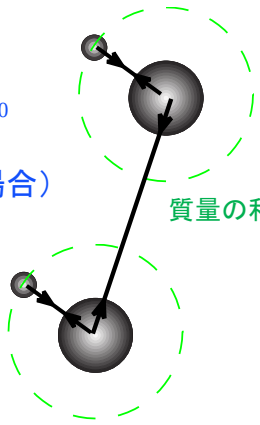
短距離では

$\frac{重力}{電気} = 10^{-40}$

（水素原子の場合）

長距離では

$\frac{重力}{電気}$ =無限大

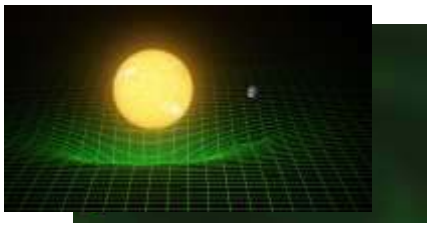


電波と重力波

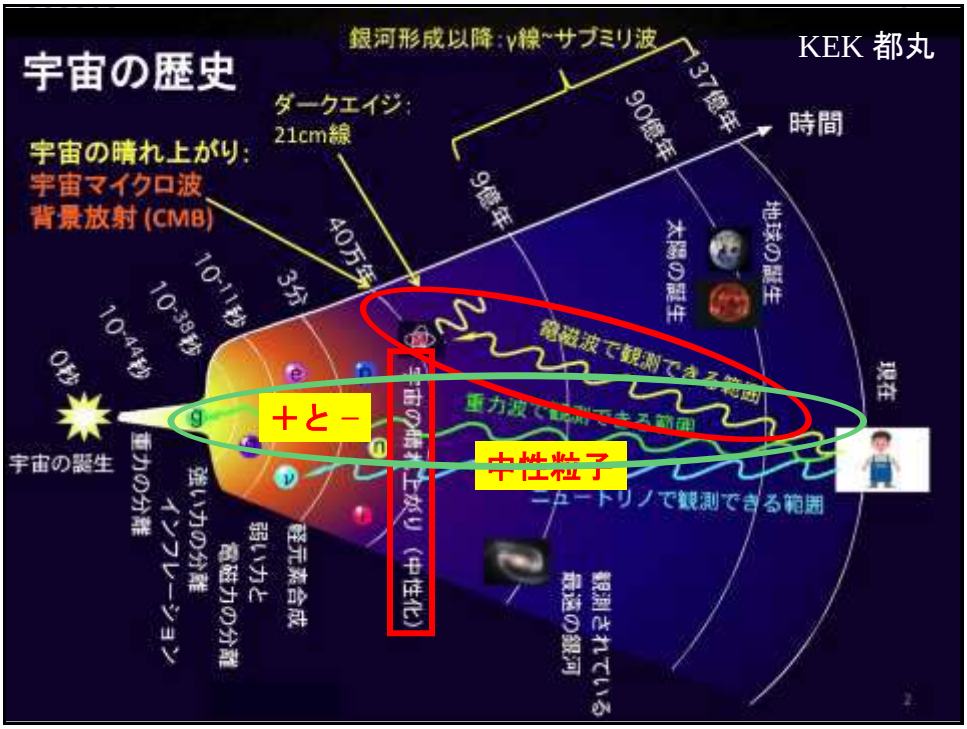
電気の力と電波：
光の波のキャッチボール

- 携帯電話
- 夜空の星と宇宙の構造
- 宇宙の誕生

重力と重力波：
物質の重さによる空間の
歪みとその歪みの伝搬

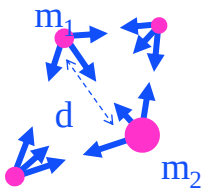


- 光では見えない宇宙の構造
- 光では知る事の出来ない大昔



ニュートンの万有引力の法則
1686年

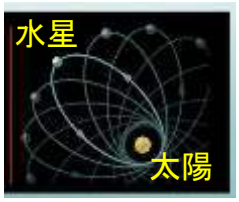
$$F = G\frac{m_1 \quad m_2}{d^2}$$



😀 地上天体の問題を殆ど説明出来た、非常に成功した理論

😐 万有引力はどうして起こるのか
😐 重力が、なぜ瞬間的に伝わるのか

☹ 観測結果を厳密には説明出来ない（水星の近日点移動の観測値が 一世紀あたり43/3600°早かった）

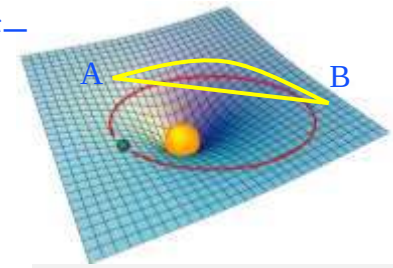


一般相対性理論と重力波
1915年

時空の座標

$$G \quad = \frac{8 \quad G}{c^4} T$$

エネルギー



- ❖ 重力は力では無く、時空の性質
- ❖ 質量、即ちエネルギーが局在すると、空間が歪む
- ❖ 物質は、歪んだ時空の最短距離をとる様に運動する
- ❖ 光速で伝搬する力と重力波の存在
- ❖ ブラックホール（次のページ）

😀 観測との一致（水星の近日点移動、太陽による光の曲がり具合）

ニュートンの万有引力の問題点への回答

😐 万有引力はどうして起こるのか
😐 重力が、なぜ瞬間的に伝わるのか

☹ 観測とのずれ（水星の近日点移動の観測値が 一世紀あたり43/3600°早かった）

ブラックホールとは

光速度で放り上げても逃げられない距離より小さい半径の星

重力は距離の二乗に反比例するので、小さい星だと重力がとても強い

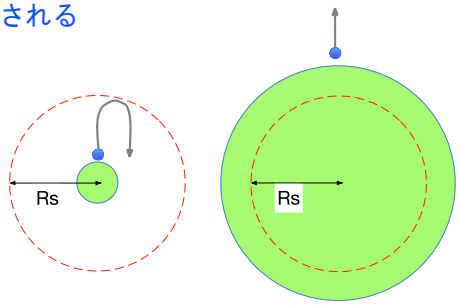
$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

シュヴァルツシルト半径
事象の地平線

G:重力定数 $6.7\times10^{-11}\ \mathrm{m^3\ kg^{-1}\ s^{-2}}$
C:光速度 $3\times10^{8}\ \mathrm{m\ s^{-1}}$
M:星の重さ kg

どんなに速くても、強い重力で引き戻される

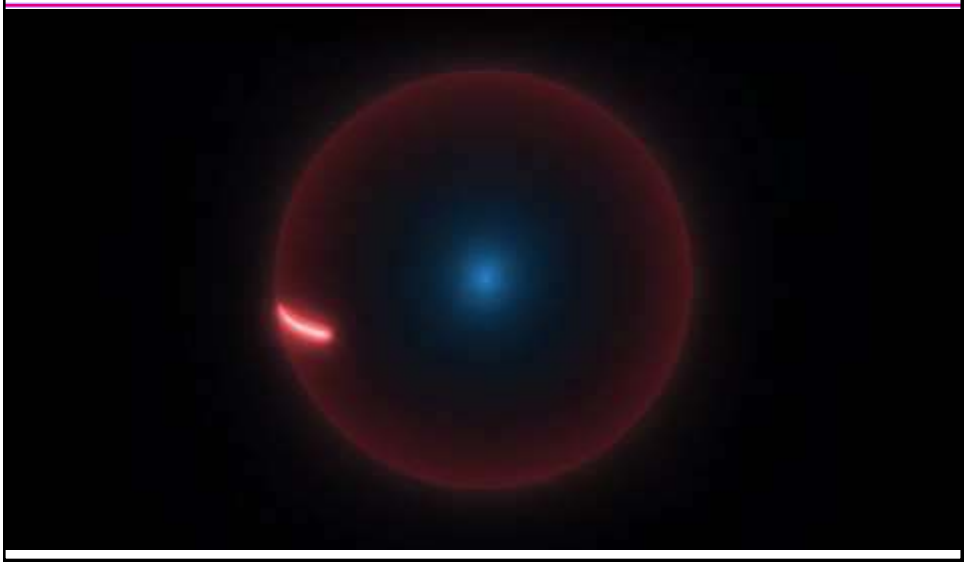
十分速ければ飛び出せる

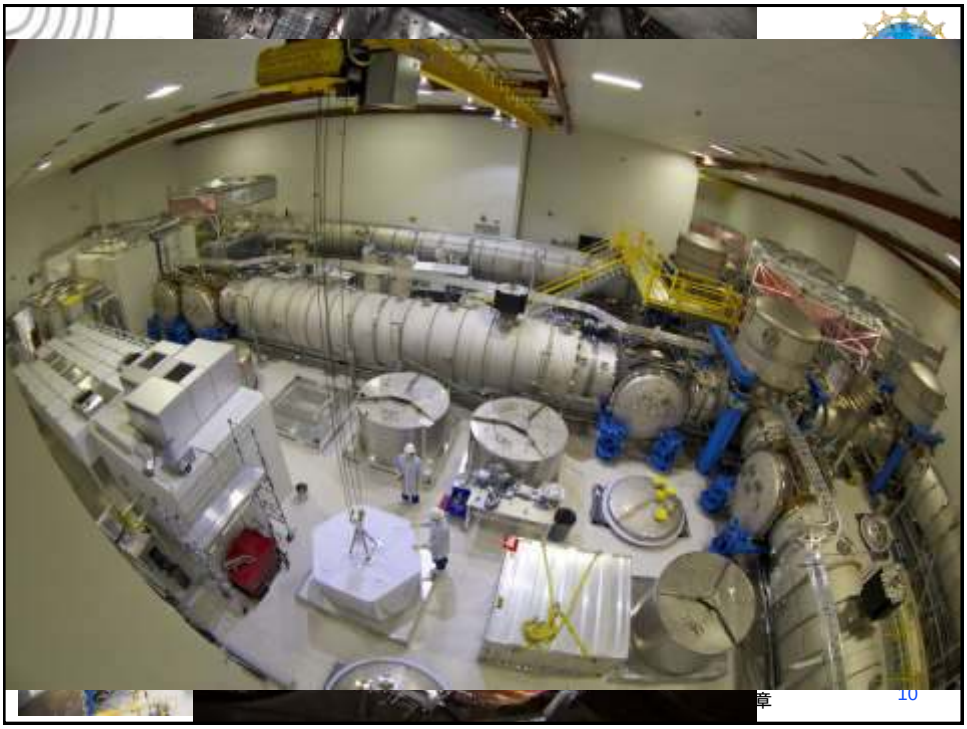


太陽質量のBH
$M_\odot = 2\mathrm{x}10^{30}\mathrm{kg}$
R_S =3km
太陽の半径
=700000km

中性子星
重さ～1.4 $M_\odot$
R=10km
R_S=4.2km

重力波直接観測の難しさ





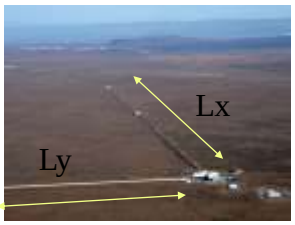
GW150915 : PRL 116,061102(2016)

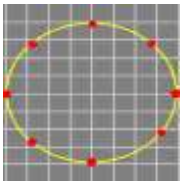
２０１５年９月１４日に観測された

始めての重力波信号

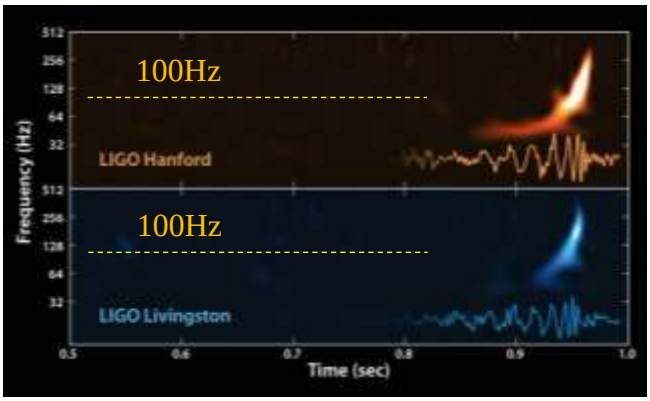
２個のブラックホールの合体で放出

アインシュタインの一般相対論から100年の長い道のり





腕の長さの差（Lx-Ly)の時間変化



11

最初にリビングストン干渉計で、そして1000分の7秒後にハンフォード干渉計で信号が観測された

信号に含まれる重要な情報

- 地球よりずっと小さな所に
- ぎゅっとつまった物がある

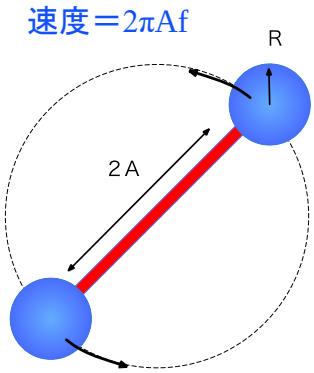
半径Aの棒が一秒に f 回回転する時、棒の端の速度が光速度より速くならない条件

$$2\ Af < c$$

$$A < \frac{c}{2\ f} = \frac{3x10^8}{2x3.14x100} = 500km$$

棒の半径は500km（北海道）より短くなければならない。棒の端の球の大きさは、その数分の一以下 (R~100km)

速度＝2πAf



地球の半径 6000km

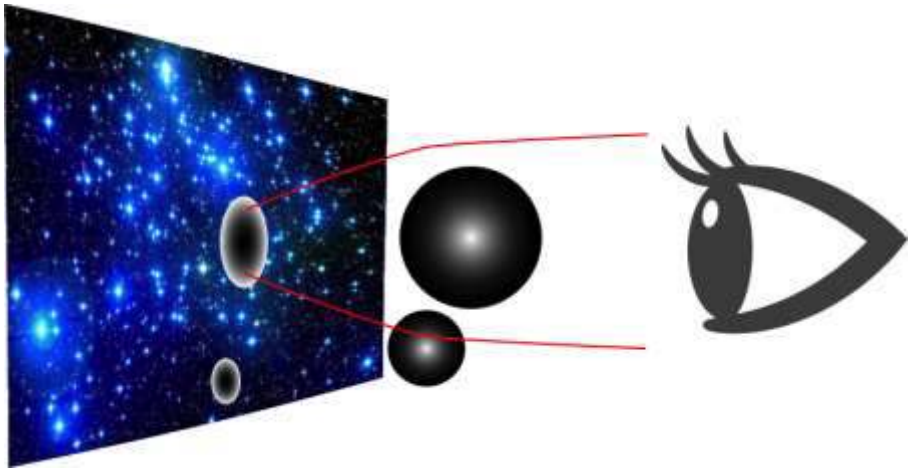
12

最初の重力波で聞こえた宇宙の大演奏

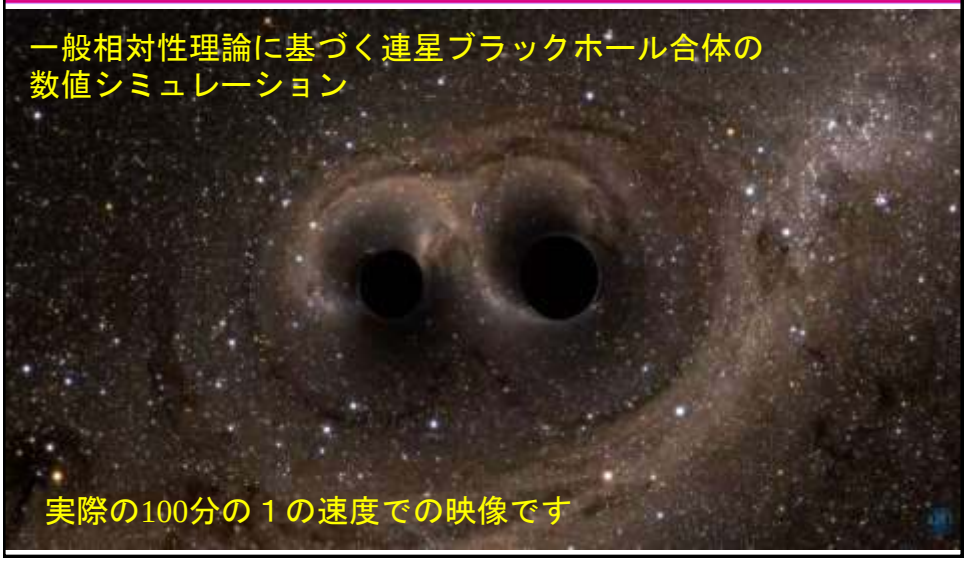
- 一般相対性理論の予言する重力波の波形と一致
  - » 波形から、距離と質量が決まった
- 13億光年の彼方で、太陽36個分の重さのBHと29個分のBHが合体して　62個分の重さのBHが生成された
- この時、太陽3個分のエネルギーが重力波として放出された
- これが全て電気エネルギーとして放射されたとすると
  - » 一番明るい時で、全天体の星から放射される電気エネルギーの50倍
  - » 光で13億年かる遠方での輝きが、1.3秒しかかからない直ぐそばの満月と同じ明るさ
  - » 全世界の使用電気の10^{27}年分（一年まかなうのに1000kg）

NHK　2017年12月10日　サイエンスZERO
「ノーベル物理学賞　重力波が切り開く新天文学」

宇宙に浮かぶブラックホール

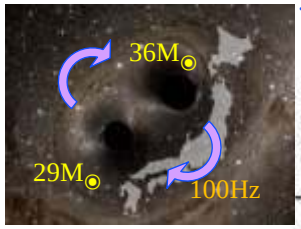


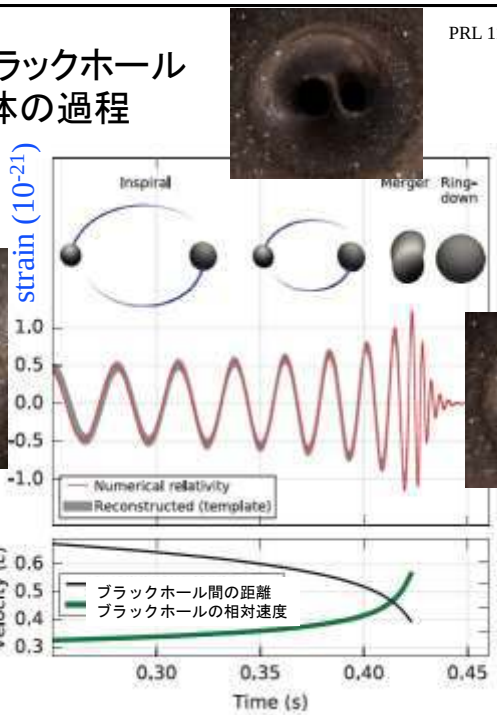
昔々、遠い宇宙の彼方での出来事です
- 13 億光年、あるいは
120000000000000000000000 km の彼方 -



連星ブラックホール合体の過程

PRL 116, 061102 (2016)





20万km/s

800km

LIGO-G1801933

16