

神岡の地下から挑む 重力波のさざなみの観測

東京大学宇宙線研究所 特任研究員 横澤孝章

[https://gwdoc.icrr.u-tokyo.ac.jp/cgi-bin/DocDB/
ShowDocument?docid=8512](https://gwdoc.icrr.u-tokyo.ac.jp/cgi-bin/DocDB/ShowDocument?docid=8512)

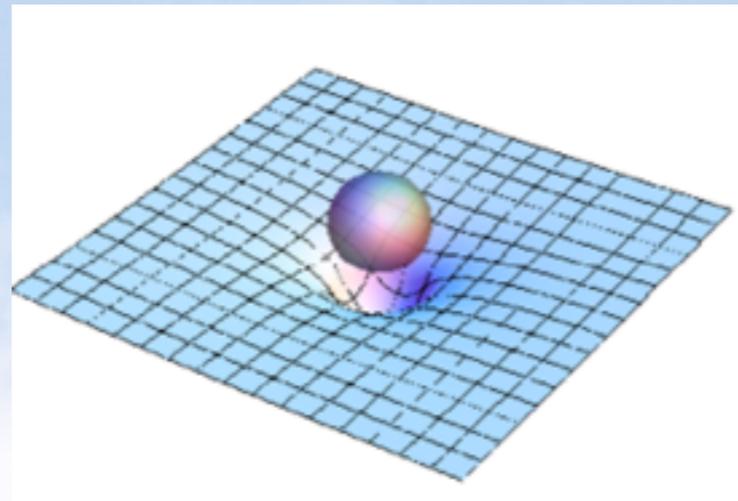
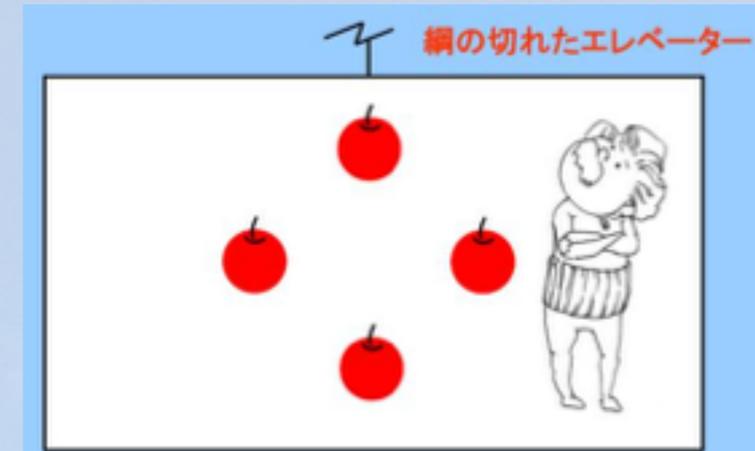
本日のお話

- 重力とは？重力波とは？？
- 重力波って主にどんなところからやってくるの？
- 実際に観測された重力波とはどういうものなの？
- 重力波って、どのように観測するの？
- KAGRA検出器って、どんな検出器？



重力とは？

- 質量の持つ物体が、他の質量を持った物体に引き寄せられる現象の呼称。
- アインシュタインは、この現象を”時空”の歪みとして説明した
- >一般相対性理論
 - 時間と空間(3次元)を同時に扱う概念
 - よくトランポリンに例えられる



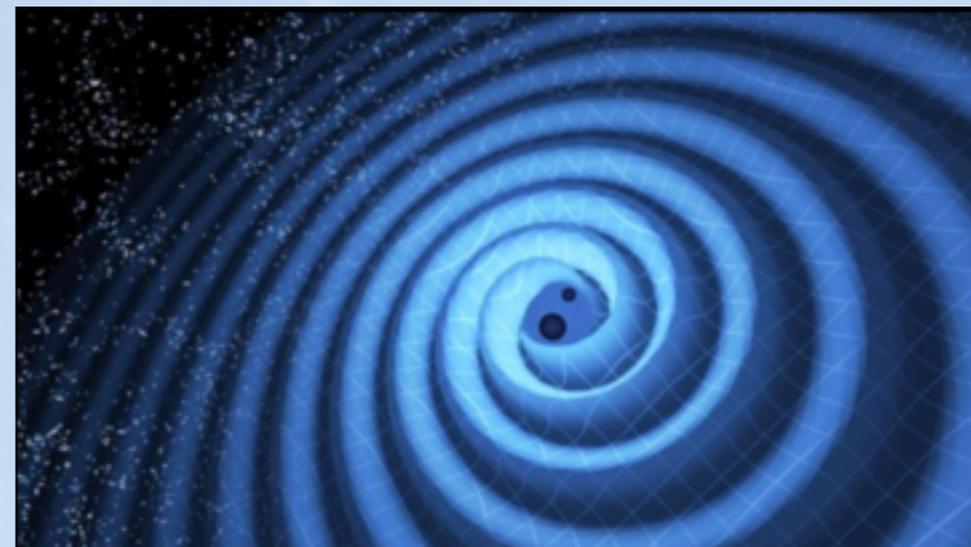
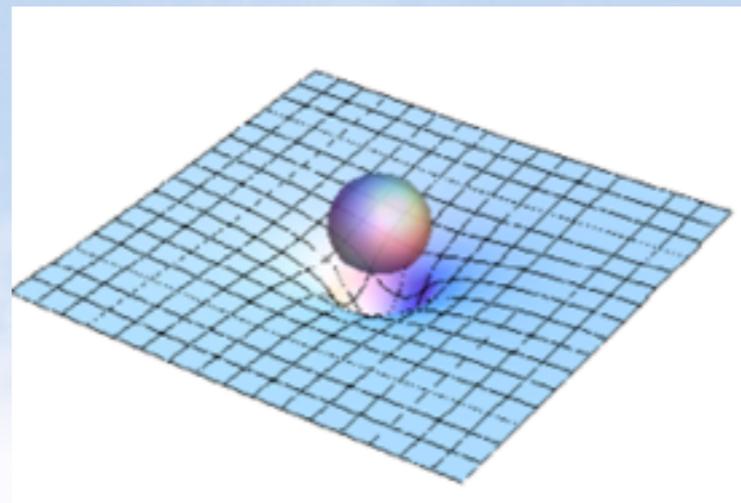
重力波とは??

- もし、一言で表すならば

時空の歪みの時間変化が波動として光速で伝搬する現象
(Wikipedia)

- すごく噛み砕いたイメージとしては

トランポリンの上で跳ねる。そして、その歪みが伝搬する



普段でしたら。。。。

アインシュタイン方程式：

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

平坦な時空からの摂動：

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

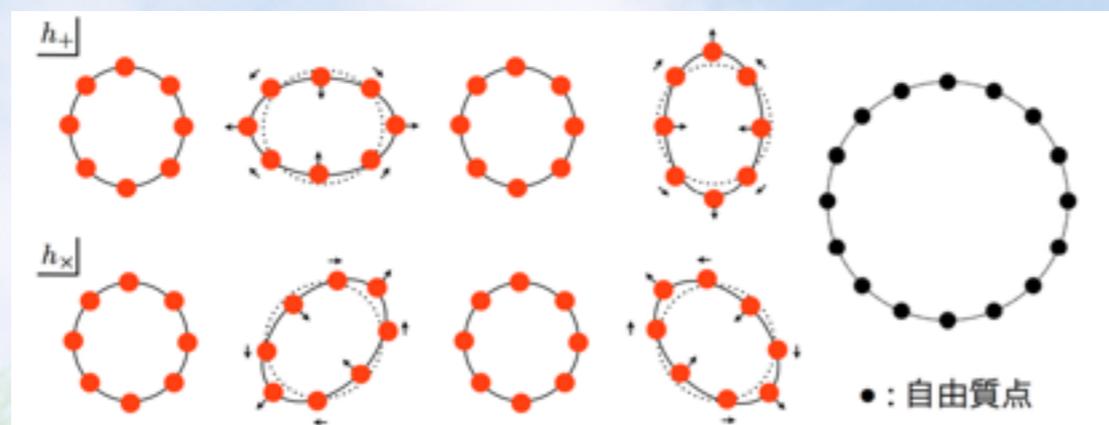
$$h_{\mu\nu} \ll 1$$

弱い重力場のもとで摂動近似すると波動方程式が出てくる：

$$(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}) h_{\mu\nu} = 0$$

重力波には、2つの偏極があり....

$$h_+ = h \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad h_\times = h \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$



的な説明をしています。

もう少し書き下してみます

- アインシュタイン方程式：

左辺は時空がどれくらい歪んでいるかで、右辺は物質やエネルギー量。

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

$$(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2})h_{\mu\nu} = 0$$

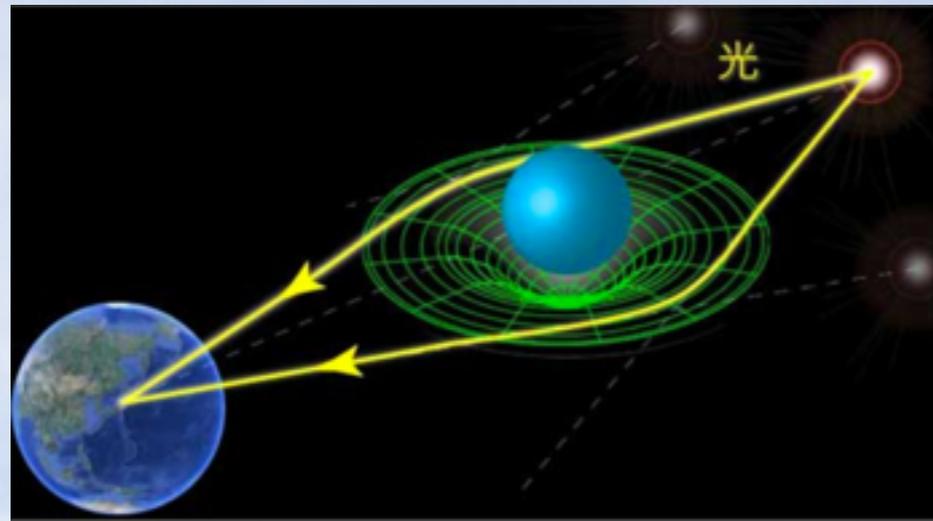


- つまりこの式で、物質やエネルギーによる時空の歪みの関係式を得ることができている。宇宙項は小さいので重力波業界では無視する。
- gは計量テンソルという名前で、平坦な時空からどれくらいずれてしまっているかを示している(小さい)。
- 波動方程式、雑な表現になってしまいましたが、Xm先の振幅とT秒後の振幅の大きさが同じ。
->光速度で移動する波

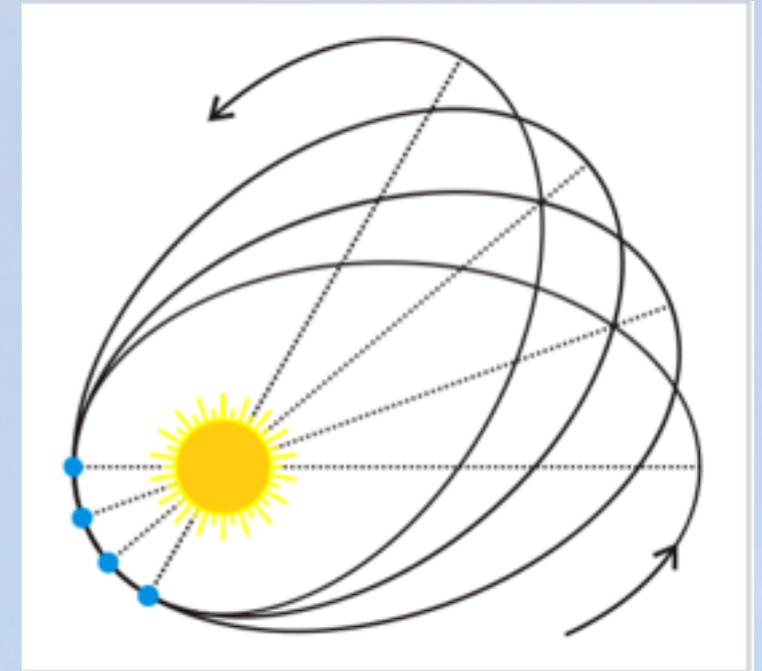
本当に時空って歪むの？

- Yes!

重力レンズの効果：



水星の近日点移動：



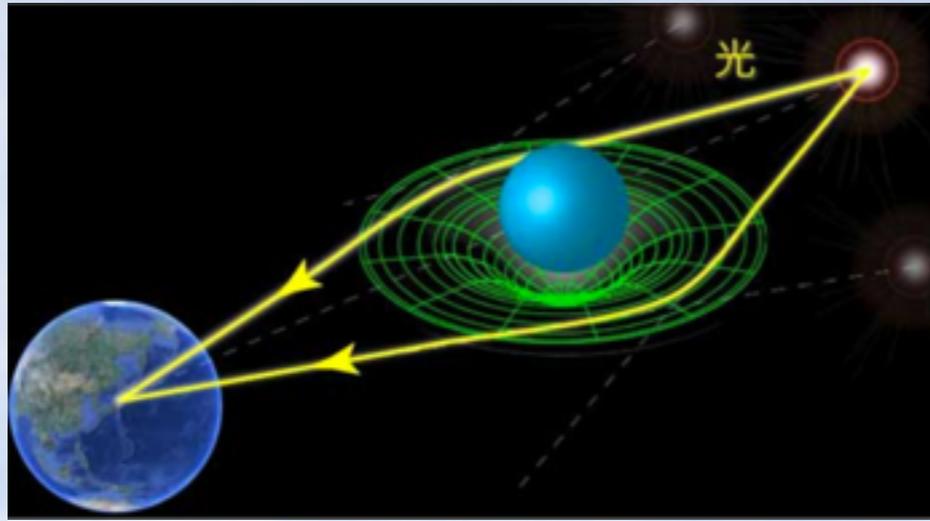
GPSにおける一般相対論による補正：



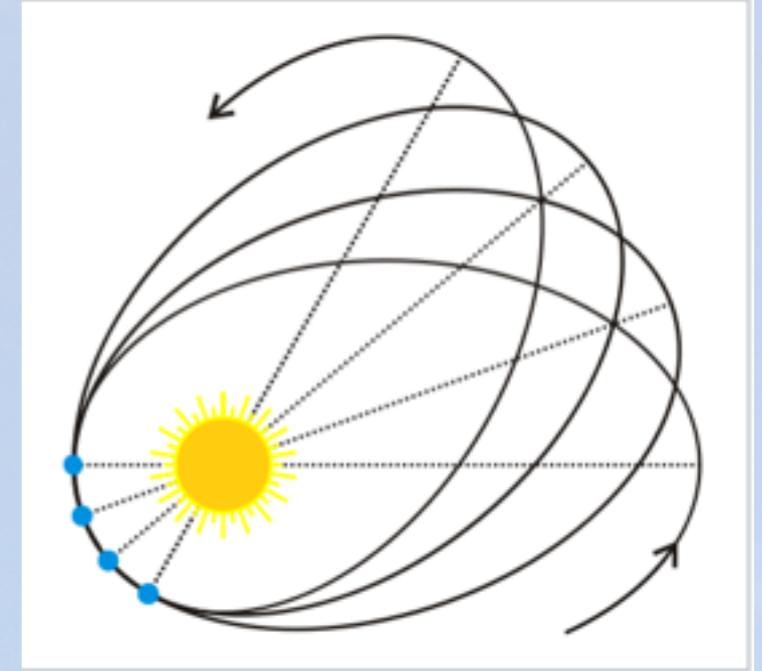
本当に時空って歪むの？

- Yes!

重力レンズの効果：



水星の近日点移動：



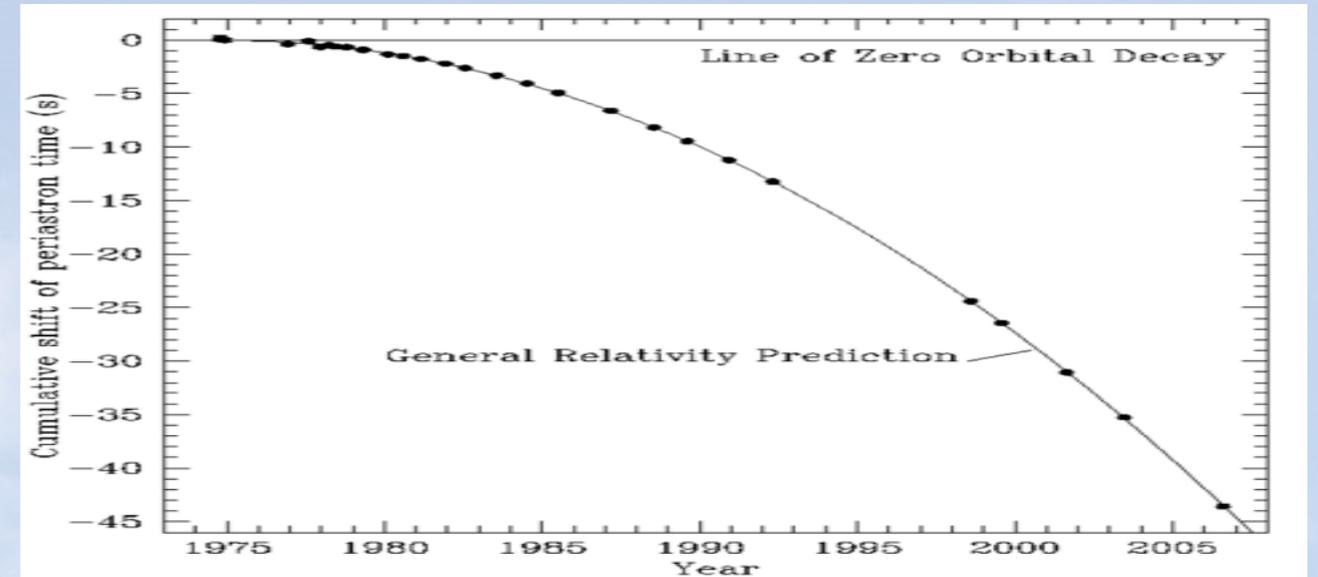
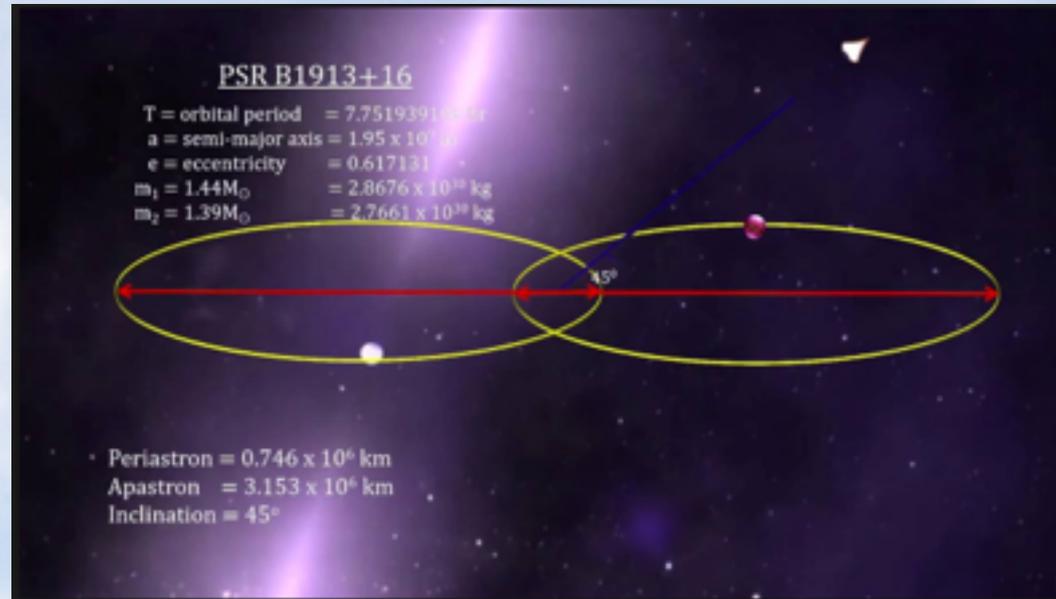
GPSにおける一般相対論による補正：



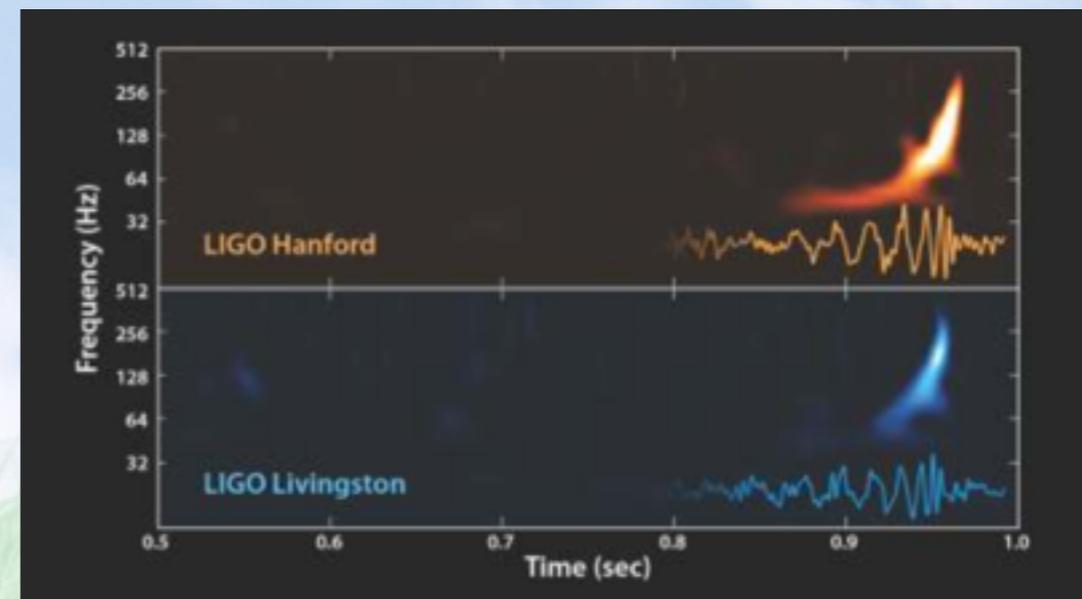
ポケモンGOを楽しめるのも、一般相対論のおかげ！ 8

本当に重力波って存在するの？

- Yes! 連星パルサーの周期変化が、重力波放出の影響を含めると見事に一致することにより、間接的には重力波の存在というのは確認されていた。(1974)



- さらに、2015年、アメリカの重力波検出器LIGOによって直接観測に成功した。
->こちらは後ほど改めて詳細に説明いたします。



重力波はどうやったら出てくる？

- 重力波は、非軸対象な物質の動きから出てきます。(またおおざっぱな式ですが...)

$$h \sim \frac{GM\Delta v^2}{c^4 r} = \left(\frac{GM}{c^2 r}\right) \left(\frac{\Delta v}{c}\right)^2$$

M : 重力波源の質量 Δv : 重力波源の動く早さ
r : 重力波源と地球の距離

- つまり、

できるだけ重い物質が、

できるだけ速く、

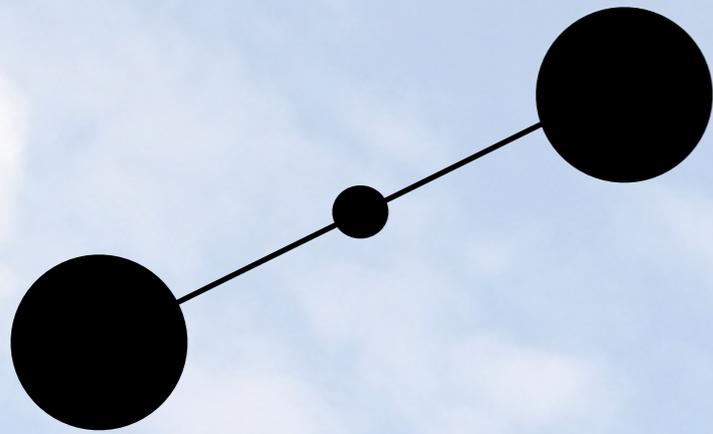
できるだけ地球から近い距離にある、

重力波源が観測候補となります。

重い物質が早く動くには、コンパクトな物体がベター！

地球で大きな重力波源を作ってみる

- 重たい物質をすごく速くまわすには、回転させるのが効率が良い、というわけで、重いダンベルをまわしてみる。

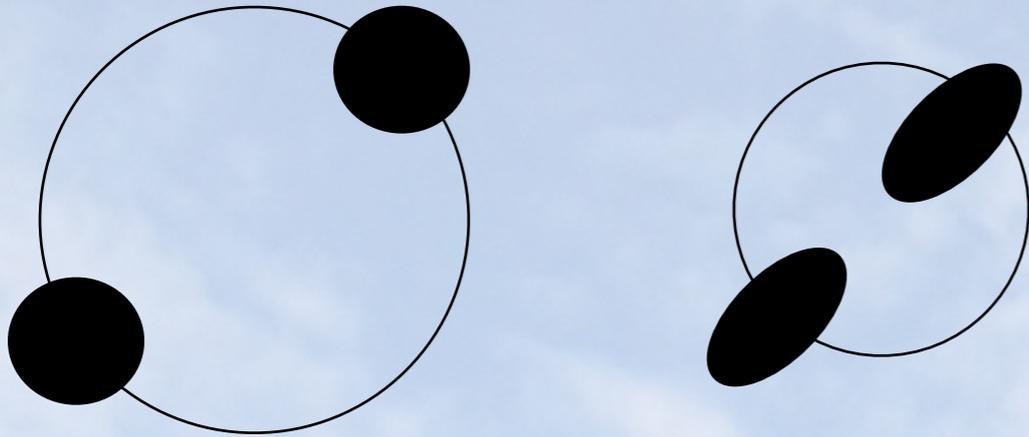


- 2mの棒に、100kgのおもりをつけて、1mのところを中心に100Hz(1秒間に100回転)でまわしてみる。
- すると、重力波の振幅は、10の-43乗程度。
- 現在の最高感度で10の-23乗位なので、あと20桁以上大きな重力波でないと現在の技術では観測することができない。

というわけで、現在の技術で観測可能な重力波源というのは宇宙現象ということになる。->**重力波天文学**
光やニュートリノでは得ることが難しい物質の動きというものが理解できるようになる

主な重力波源

- コンパクト連星合体



最初はお互いの重力で引っ張り合いながら、重力波を放出。そうすると、どんどんエネルギーを失っていき距離が短くなり、速く回転するようになっていく。波形の予測が可能。

->インスパイラル期

近づいてくると互いの重力のせいで、星が変形する。->潮汐効果

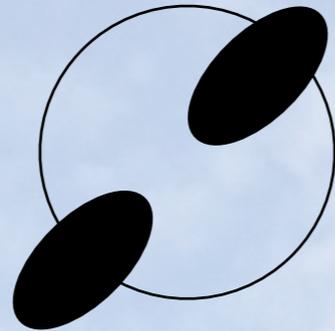
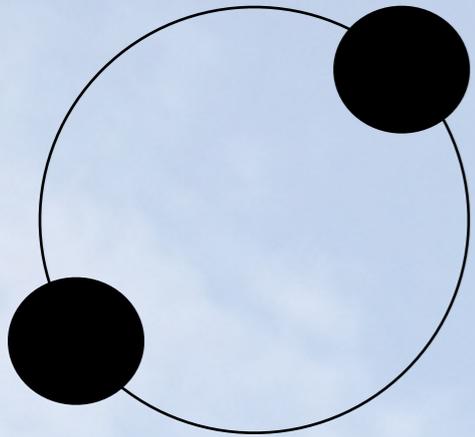


ついに2つの星は合体し、大きな重力波が放出される。その際に合体によっては大量の光が放出されたりが予想されている。->連星合体期

合体後は、ボヨボヨと揺れているとか、ブラックホールになってしまうのか?! など様々な議論が行われている。->リングダウン期

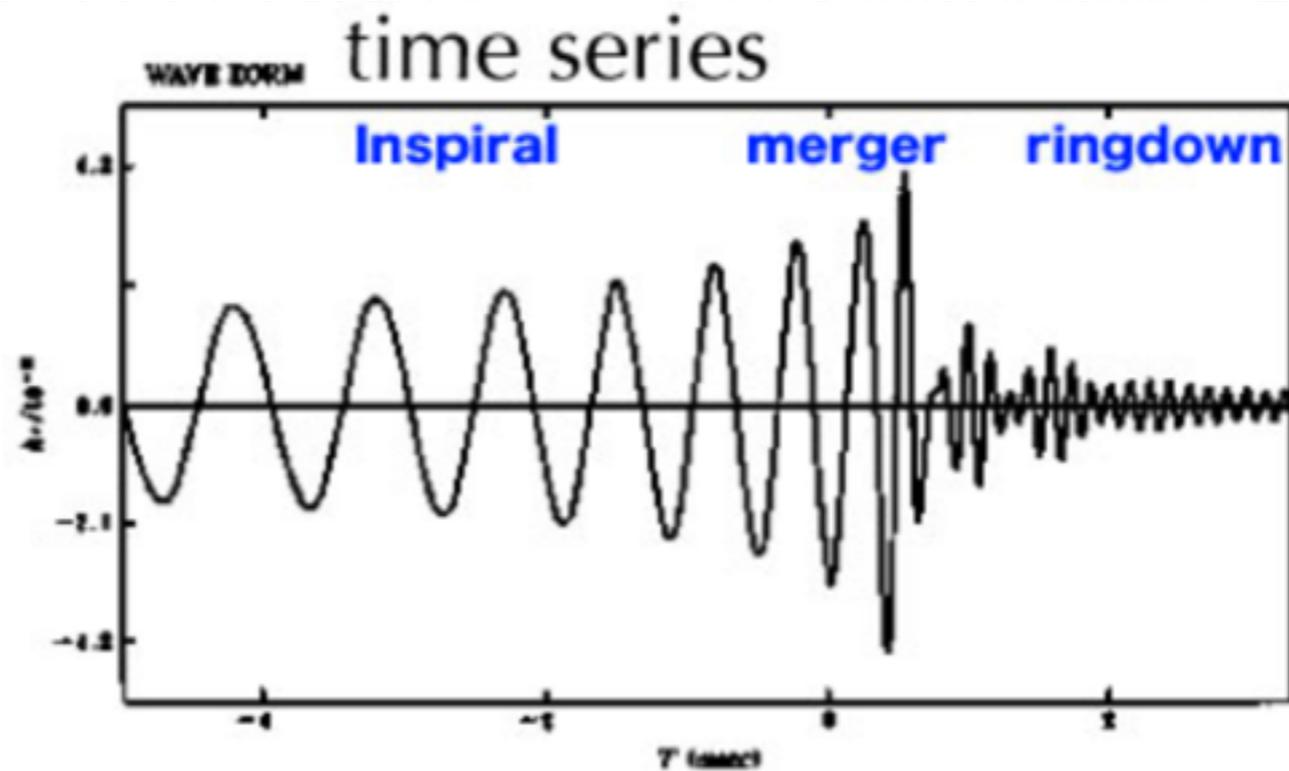
主な重力波源

- コンパクト連星合体



最初はお互いの重力で引っ張り合いながら、重力波を放出。そうすると、どんどんエネルギーを生んでいきお互いの距離が短くなり、
なっていく。波形
->インスパイラル期
近づいてくると互いの星が変形する->潮汐

ついに2つの星は合体し、大きな重力波が放出される。その際に合体によって
は太陽の半が放出されたりが予期され



期
と揺れているとか、
ってしまうのか?!
われている。->リ

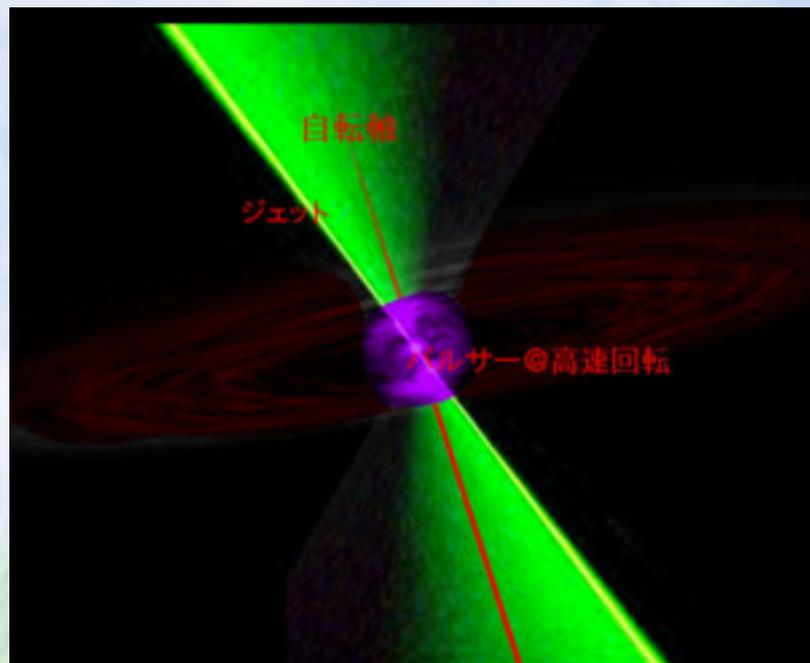
主な重力波源

- 超新星爆発



- 重たい星がその最期に引き起こす大爆発。
- 大まかな爆発メカニズムは、確立されているが、詳細なメカニズムはマルチメッセンジャー観測が鍵となる
- 爆発後、中心に重たくてコンパクトな天体(ブラックホール or 中性子星)を残す。
- 重力波源の重力波源。

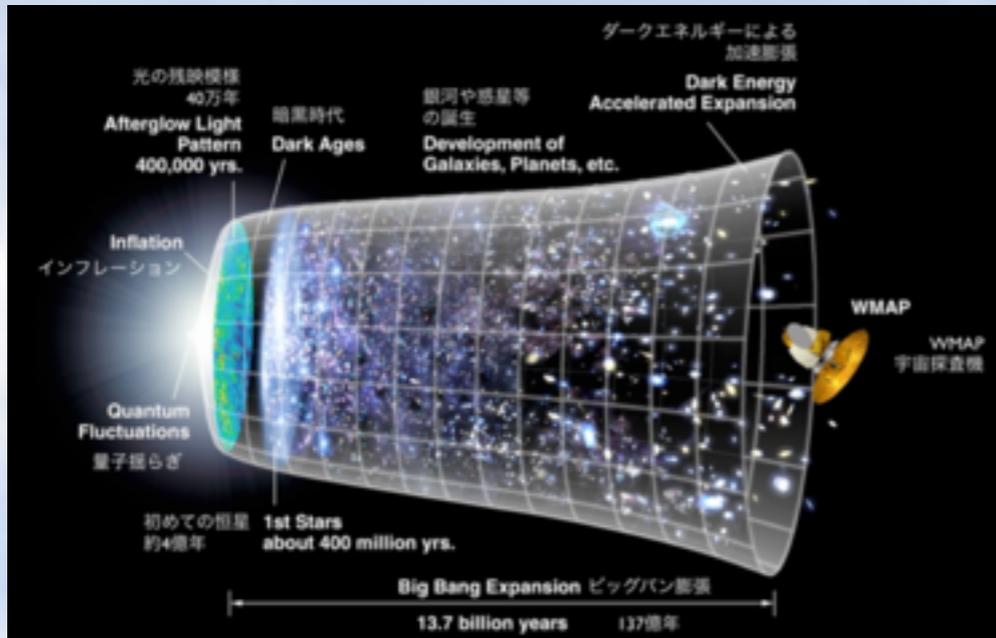
- 高速回転パルサー



- 中心に高速で回る中性子星があり、ジェットと呼ばれる光を放出している。
 - 地球に到達する光がパルスのように見え、その周期はほとんどの時計よりも正確。
- 中性子星にわずかに山があると重力波源となる
 - 振幅は小さいが、反永続的に放出されているので長時間観測で見えるようになってくる。

主な重力波源

- 背景重力波



- インフレーション起源の原始重力波含む、様々な方向からランダムに到来する重力波
- 複数の重力波検出器にて相関をとって(同じような波形の波が到来しているのかをチェックするイメージ)観測を目指す。

- その他、unexpected unknown



- 光学観測やニュートリノ感想と同様に、重力波観測でも、我々が予期していなかった重力波源からの重力波や、予期せぬ特徴を持った重力波が見つかるかもしれない。全てが予想通りだったらつまらない。

重力波天文学の歴史

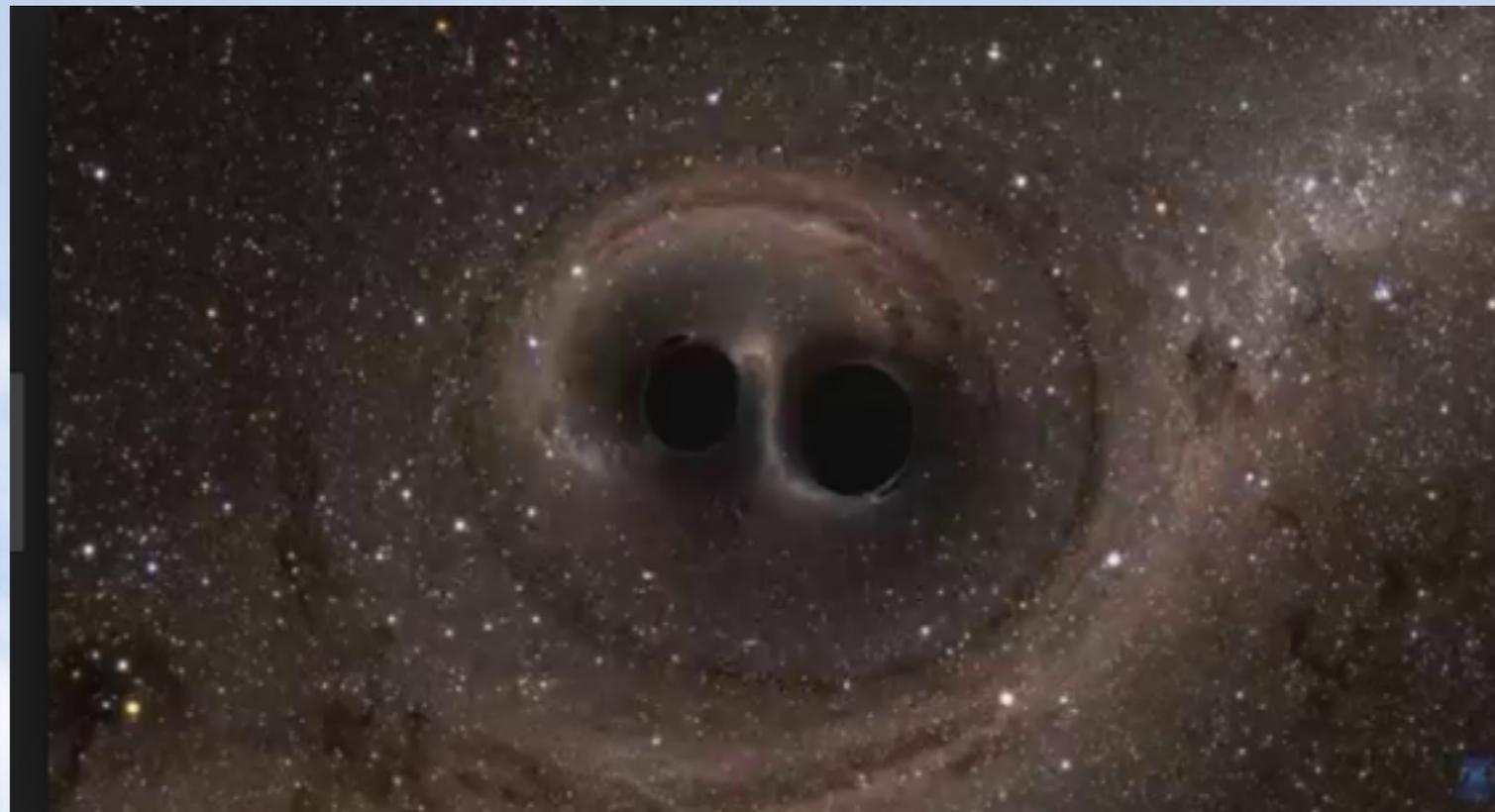
- はじめての直接観測の前にも様々な歴史がありますが、あまり詳しくないので省略いたします。

- GW150914の観測

GW150914

- 日本時間の2016年2月12日未明、衝撃的な発表がアメリカの重力波検出器LIGOよりされた。ブラックホール連星からの重力波の直接観測に成功したとのこと！

<https://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.116.061102>



PRL **116**, 061102 (2016)

Selected for a **Viewpoint** in *Physics*
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
12 FEBRUARY 2016



Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

GW150914

- 日本時間の2016年2月12日未明、衝撃的な発表がアメリカの重力波検出器LIGOよりされた。ブラックホール連星からの重力波の直接観測に成功したとのこと！
- 深夜にも関わらず、大阪市立大学にはたくさんの記者、そしてもちろん翌日の朝刊の一面は重力波一色！



GW150914

- 日本時間の2016年2月12日未明、衝撃的な発表がアメリカの重力波検出器LIGOよりされた。ブラックホール連星からの重力波の直接観測に成功したとのこと！
- 名前は観測された日からGW150914と命名された。
- 13億光年はるか彼方からの重力波を観測。
- なんと、太陽質量の36倍の星と29倍の星が合体したとのこと。
- 合体後のブラックホールの大きさは62太陽質量、3太陽質量が重力波へ変化。

大きくまとめると、以下の3つの功績が挙げられる

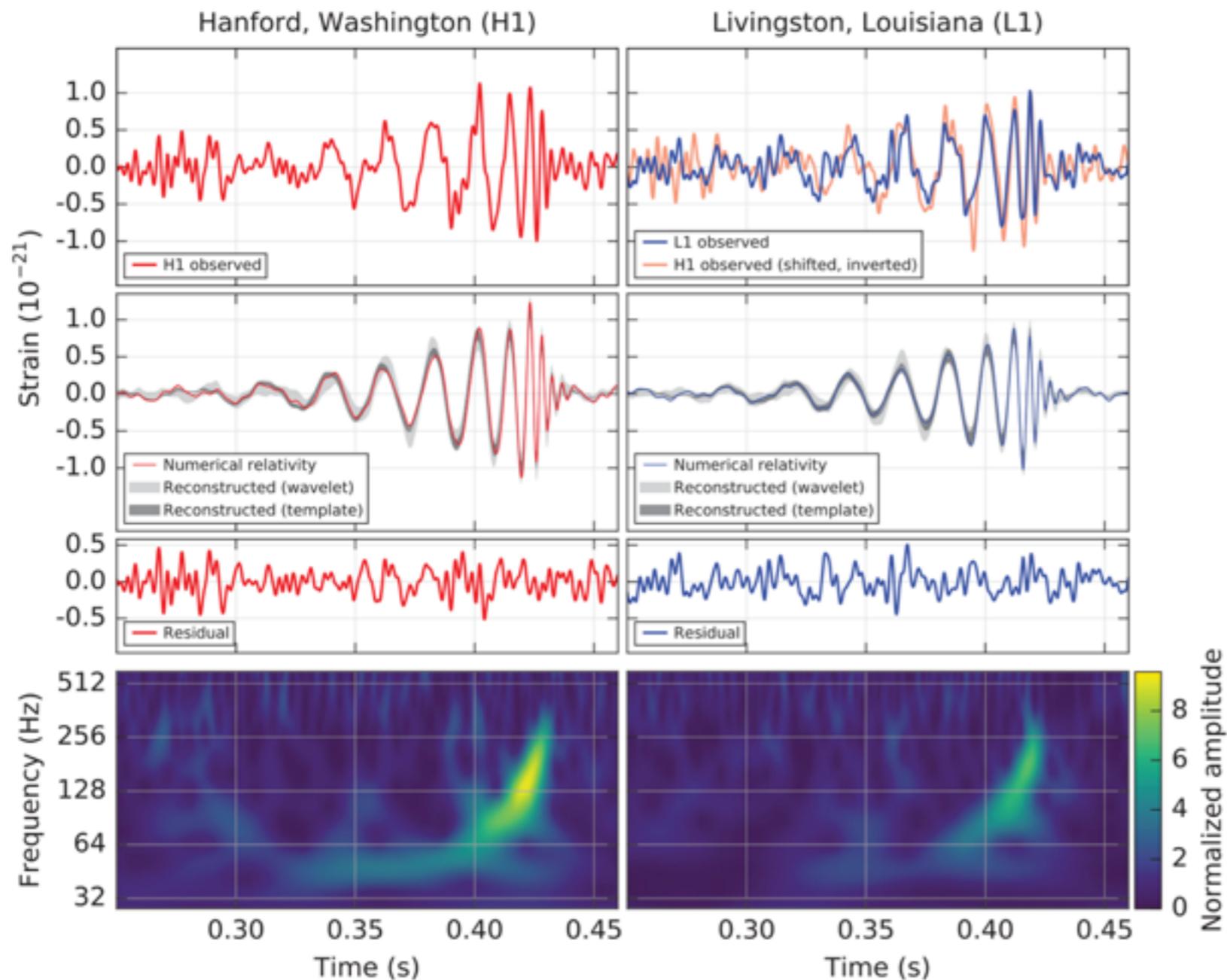
- 世界ではじめて重力波の直接観測に成功した
- 世界ではじめてブラックホールからの信号をとらえることに成功した
- 世界にはブラックホールの連星があることを証明した

そして、干渉計という技術で本当に重力波をとらえることができることが分かった。これは、KAGRAも観測が始まれば重力波をとらえることができるという大きな励みとなった。

GW150914

- 日本時間の2016年2月12日未明、衝撃的な発表がアメリカの重力波検出器LIGOよりされた。ブラックホール連星からの重力波の直接観測に成功したとのこと！

- 論文の図1



実際に観測された重力波の振幅
- 二台の検出器で同じ信号が観測されている！

- 理論的に予測された波形と一致している！時間とともに振幅と周波数が増えていってる！

- 観測信号から、理論予測の信号を引くとノイズしか残らない

- この業界ではよく、横軸時間・縦軸周波数・色でパワーの図を見せる。

GW150914

- 日本時間の2016年2月12日未明、衝撃的な発表がアメリカの重力波検出器LIGOよりされた。ブラックホール連星からの重力波の直接観測に成功したとのこと！

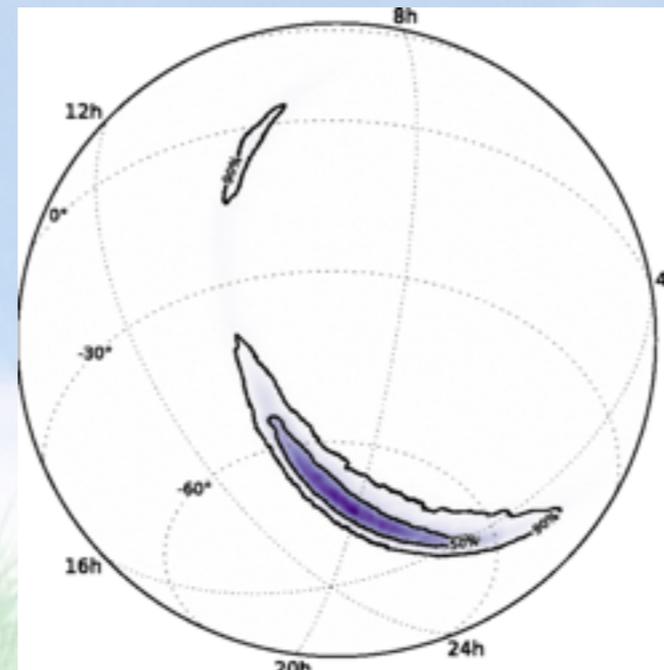
GW150914: FACTSHEET

BACKGROUND IMAGES: TIME-FREQUENCY TRACE (TOP) AND TIME-SERIES (BOTTOM) IN THE TWO LIGO DETECTORS; SIMULATION OF BLACK HOLE HORIZONS (MIDDLE-TOP), BEST FIT WAVEFORM (MIDDLE-BOTTOM)

first direct detection of gravitational waves (GW) and first direct observation of a black hole binary

observed by	LIGO L1, H1	duration from 30 Hz	~ 200 ms
source type	black hole (BH) binary	# cycles from 30 Hz	~10
date	14 Sept 2015	peak GW strain	1×10^{-21}
time	09:50:45 UTC	peak displacement of interferometers arms	± 0.002 fm
likely distance	0.75 to 1.9 Gly 230 to 570 Mpc	frequency/wavelength at peak GW strain	150 Hz, 2000 km
redshift	0.054 to 0.136	peak speed of BHs	~ 0.6 c
signal-to-noise ratio	24	peak GW luminosity	3.6×10^{56} erg s ⁻¹
false alarm prob.	< 1 in 5 million	radiated GW energy	2.5-3.5 M _⊙
false alarm rate	< 1 in 200,000 yr	remnant ringdown freq.	~ 250 Hz
Source Masses	M _⊙	remnant damping time	~ 4 ms
total mass	60 to 70	remnant size, area	180 km, 3.5×10^{15} km ²
primary BH	32 to 41	consistent with general relativity?	passes all tests performed
secondary BH	25 to 33	graviton mass bound	< 1.2×10^{-22} eV
remnant BH	58 to 67	coalescence rate of binary black holes	2 to 400 Gpc ⁻³ yr ⁻¹
mass ratio	0.6 to 1	online trigger latency	~ 3 min
primary BH spin	< 0.7	# offline analysis pipelines	5
secondary BH spin	< 0.9	CPU hours consumed	~ 50 million (=20,000 PCs run for 100 days)
remnant BH spin	0.57 to 0.72	papers on Feb 11, 2016	13
signal arrival time delay	arrived in L1 7 ms before H1	# researchers	~1000, 80 institutions in 15 countries
likely sky position	Southern Hemisphere		
likely orientation resolved to	face-on/off ~600 sq. deg.		

Detector noise introduces errors in measurement. Parameter ranges correspond to 90% credible bounds.
Acronyms: L1=LIGO Livingston, H1=LIGO Hanford; Gly=giga lightyear= 9.46×10^{12} km; Mpc=mega parsec=3.2 million lightyear, Gpc= 10^3 Mpc, fm=femtometer= 10^{-15} m, M_⊙=1 solar mass= 2×10^{30} kg



GW150914

arXiv	LIGO #	title	
1602.03837	P150914	Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger	PRL [1]
1602.03838	P1500237	GW150914: The Advanced LIGO Detectors in the Era of First Discoveries	[2]
1602.03839	P1500269	GW150914: First results from the search for binary black hole coalescence with Advanced LIGO	[3]
1602.03840	P1500218	Properties of the binary black hole merger GW150914	[4]
1602.03841	P1500213	Tests of general relativity with GW150914	[5]
1602.03842	P1500217	The Rate of Binary Black Hole Mergers Inferred from Advanced LIGO Observations Surrounding GW150914	[6]
1602.03843	P1500229	Observing gravitational-wave transient GW150914 with minimal assumptions	[7]
1602.03844	P1500238	Characterization of transient noise in Advanced LIGO relevant to gravitational wave signal GW150914	[8]
1602.03845	P1500248	Calibration of the Advanced LIGO detectors for the discovery of the binary black-hole merger GW150914	[9]
1602.03846	P1500262	Astrophysical Implications of the Binary Black-Hole Merger GW150914	ApJL [10]
1602.03847	P1500222	GW150914: Implications for the stochastic gravitational wave background from binary black holes	[11]
1602.03868		Swift follow-up of the Gravitational Wave source GW150914	[12]
1602.05411	P1500271	High-energy Neutrino follow-up search of Gravitational Wave Event GW150914 with ANTARES and IceCube	[13]
1602.03920		Fermi GBM Observations of LIGO Gravitational Wave event GW150914	[14]

発表と同時にたくさん
さんの論文が連載

GW150914

arXiv	LIGO #	title		
1602.03837	P150914	Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger	PRL [1]	発見論文
1602.03838	P1500237	GW150914: The Advanced LIGO Detectors in the Era of First Discoveries	[2]	aLIGOの特徴
1602.03839	P1500269	GW150914: First results from the search for binary black hole coalescence with Advanced LIGO	[3]	探索論文1
1602.03840	P1500218	Properties of the binary black hole merger GW150914	[4]	パラメータ推定論文
1602.03841	P1500213	Tests of general relativity with GW150914	[5]	一般相対論の検証
1602.03842	P1500217	The Rate of Binary Black Hole Mergers Inferred from Advanced LIGO Observations Surrounding GW150914	[6]	BBHレートの推定
1602.03843	P1500229	Observing gravitational-wave transient GW150914 with minimal assumptions	[7]	探索論文2
1602.03844	P1500238	Characterization of transient noise in Advanced LIGO relevant to gravitational wave signal GW150914	[8]	aLIGOのノイズ特徴
1602.03845	P1500248	Calibration of the Advanced LIGO detectors for the discovery of the binary black-hole merger GW150914	[9]	キャリブレーション
1602.03846	P1500262	Astrophysical Implications of the Binary Black-Hole Merger GW150914	ApJL [10]	天文学へのインパクト
1602.03847	P1500222	GW150914: Implications for the stochastic gravitational wave background from binary black holes	[11]	BBHからの背景重力波
1602.03868		Swift follow-up of the Gravitational Wave source GW150914	[12]	BBHからの光探査1
1602.05411	P1500271	High-energy Neutrino follow-up search of Gravitational Wave Event GW150914 with ANTARES and IceCube	[13]	BBHからのニュートリノ探査
1602.03920		Fermi GBM Observations of LIGO Gravitational Wave event GW150914	[14]	BBHからの光探査2

そもそもブラックホールって??

- 地球からものを打ち上げる際、エネルギー保存則より、速度が位置エネルギーに変化する。

- 階段を上るのは大変だけど、降りるのは簡単/リンゴは落ちてくると速くなる
- 式で書くとこのようになる

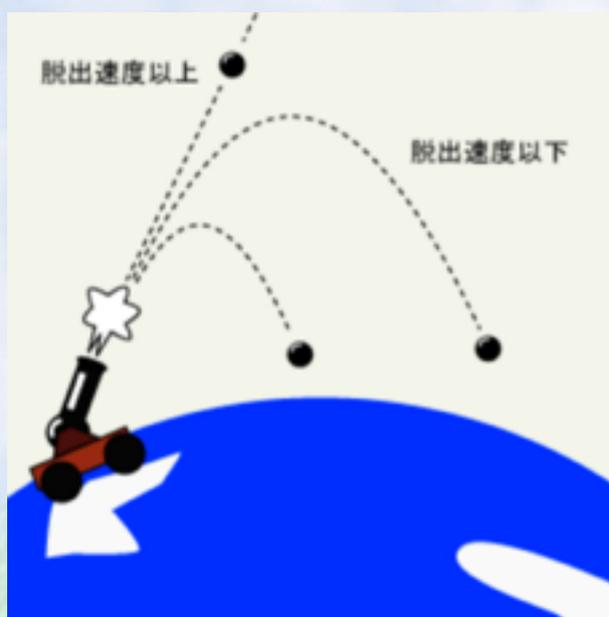
$$\frac{1}{2}mv^2 = G\frac{mM}{r}$$

- 速度vに光速cを入れるとあるrの値が計算できる。

- つまり、この半径以内で光が発生しても脱出することができない
- シュワルツシルト半径と呼ばれる

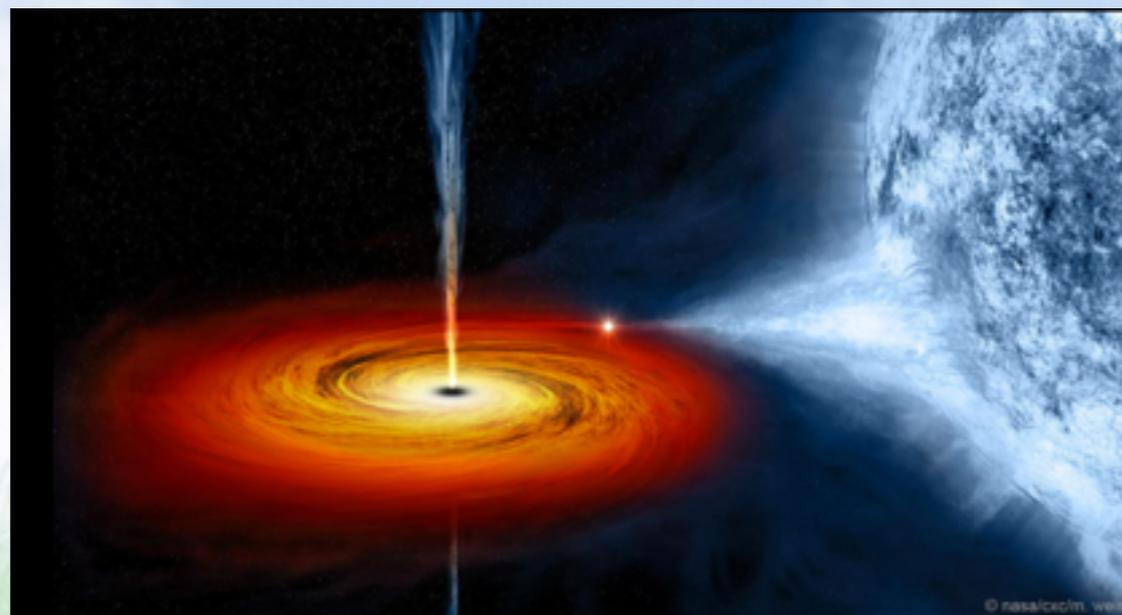
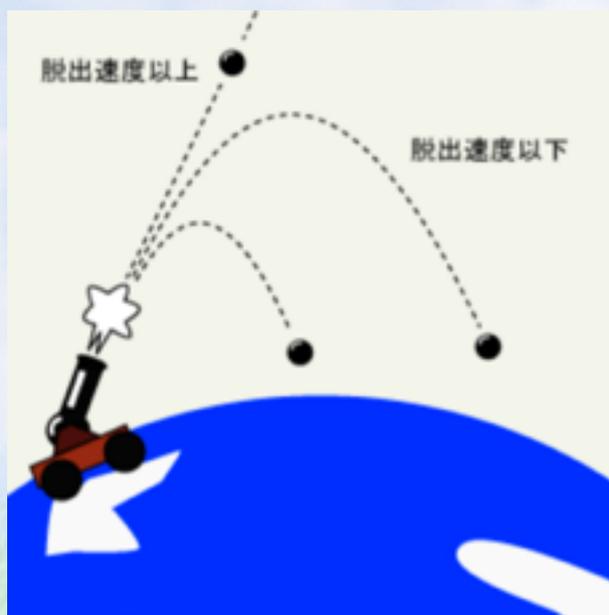
$$r_c = \frac{2GM}{c^2}$$

- 光さえも出て来れないほど重い天体->ブラックホール!



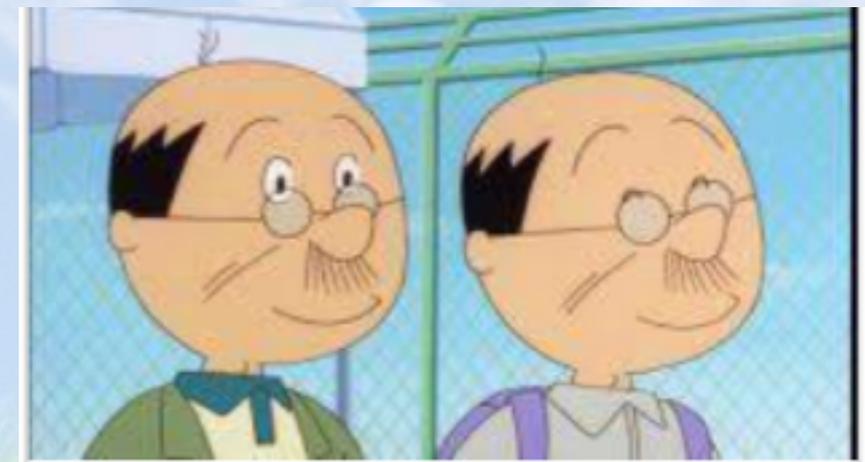
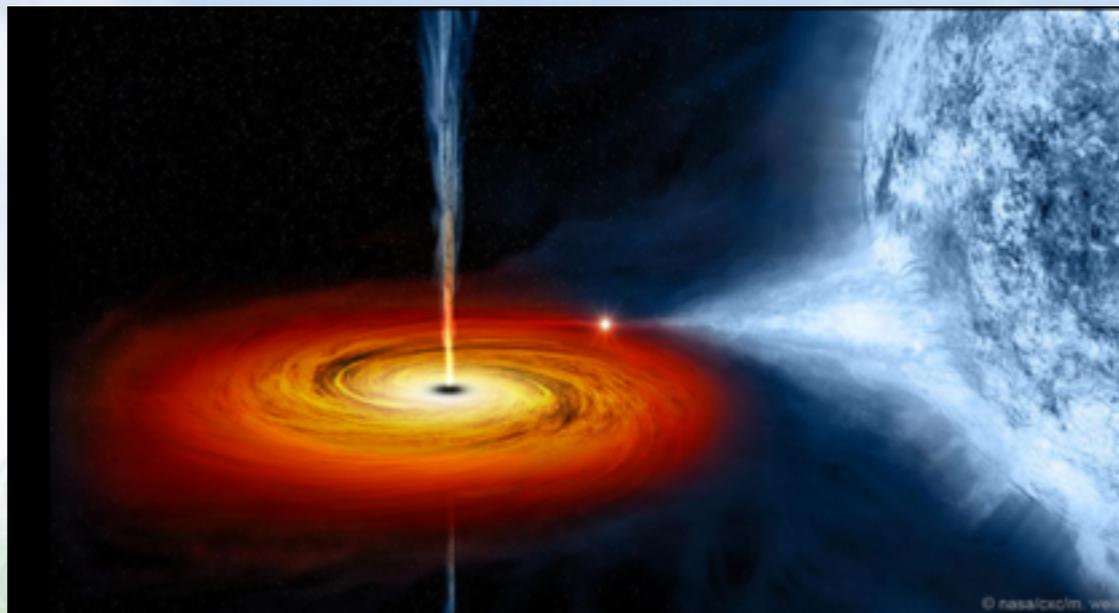
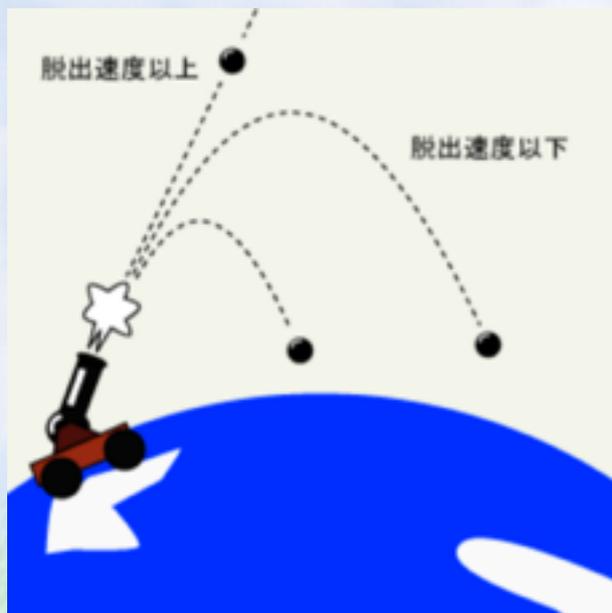
そもそもブラックホールって??

- 光さえも出て来れないほど重い天体->ブラックホール!
- すごく重たい物体のため、周りのものを吸い込んでいってしまう
 - 周りには物質があって(降着円盤)ぶつかり合って光を放出している
 - なのでブラックホールからは光が出ないけど、その周辺で生成される光や、その周辺の星の動きからブラックホールがそこにあることは推測することができる。
- 我々の銀河の中にも、たくさんのブラックホールがあることが確認されている、更に各銀河の中心にはとてつもなく思いブラックホールがあることも確認されている。
- ブラックホールからは3つの情報(質量・回転・電荷)の情報しか抜き取れない



そもそもブラックホールって??

- 光さえも出て来れないほど重い天体->ブラックホール!
- すごく重たい物体のため、周りのものを吸い込んでいってしまう
 - 周りには物質があって(降着円盤)ぶつかり合って光を放出している
 - なのでブラックホールからは光が出ないけど、その周辺で生成される光や、その周辺の星の動きからブラックホールがそこにあることは推測することができる。
- 我々の銀河の中にも、たくさんのブラックホールがあることが確認されている、更に各銀河の中心にはとてつもなく思いブラックホールがあることも確認されている。
- ブラックホールからは3つの情報(質量・回転・電荷)の情報しか抜き取れない
 - 毛が3本だけ生えているという表現をする



重力波天文学の歴史

- はじめての直接観測の前にも様々な歴史がありますが、あまり詳しくないので省略いたします。

- GW150914の観測
- LVT151012の観測
- GW151226の観測



LIGO O1での観測

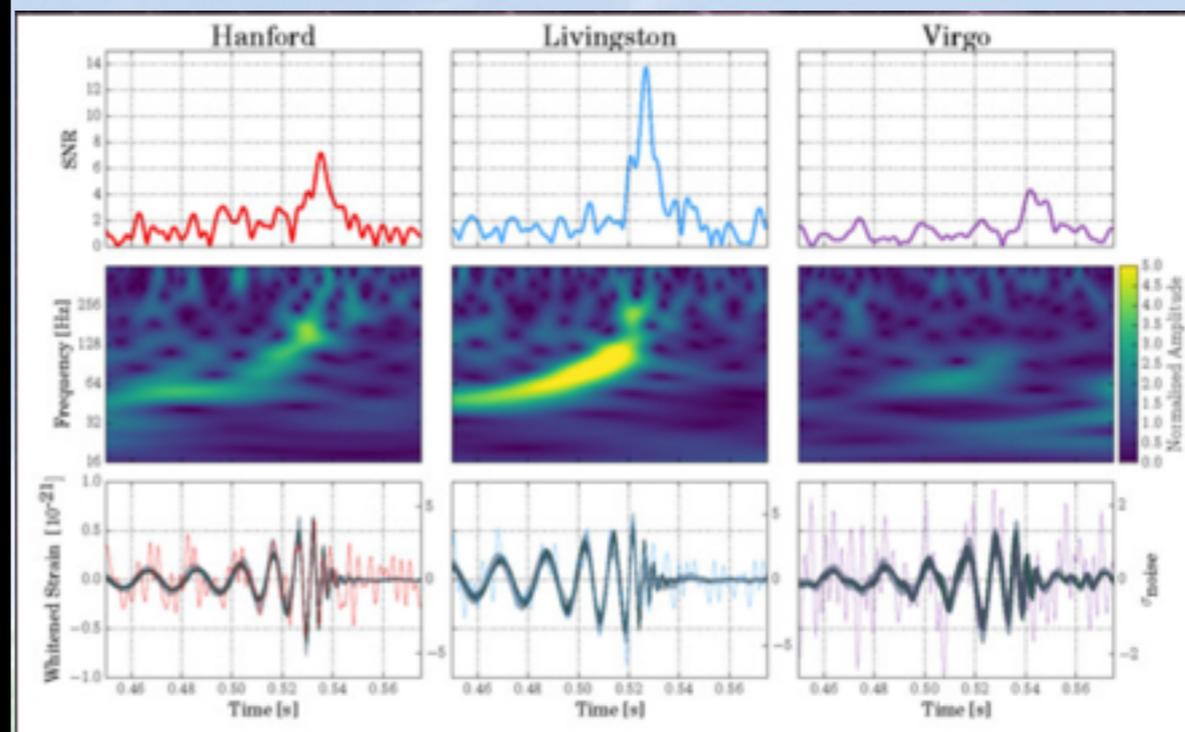
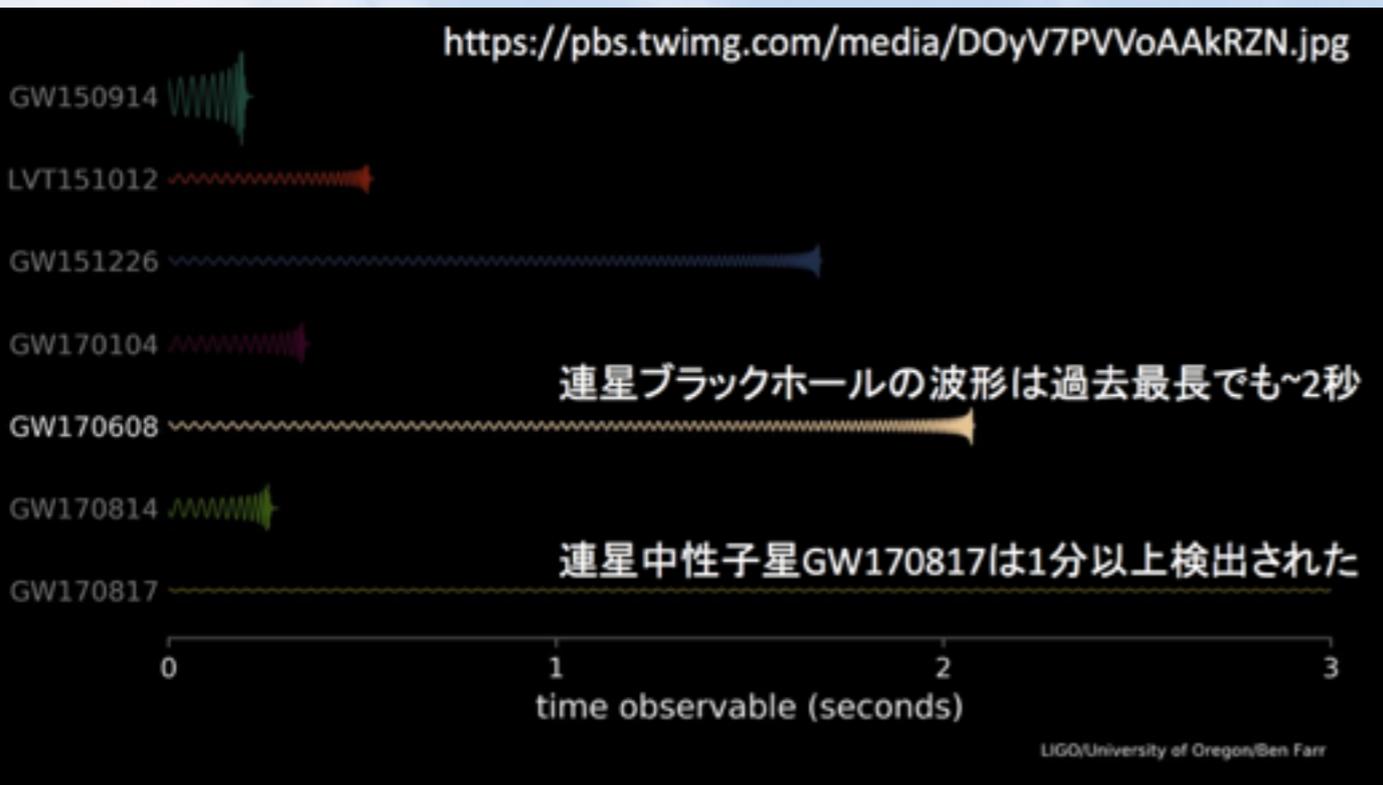
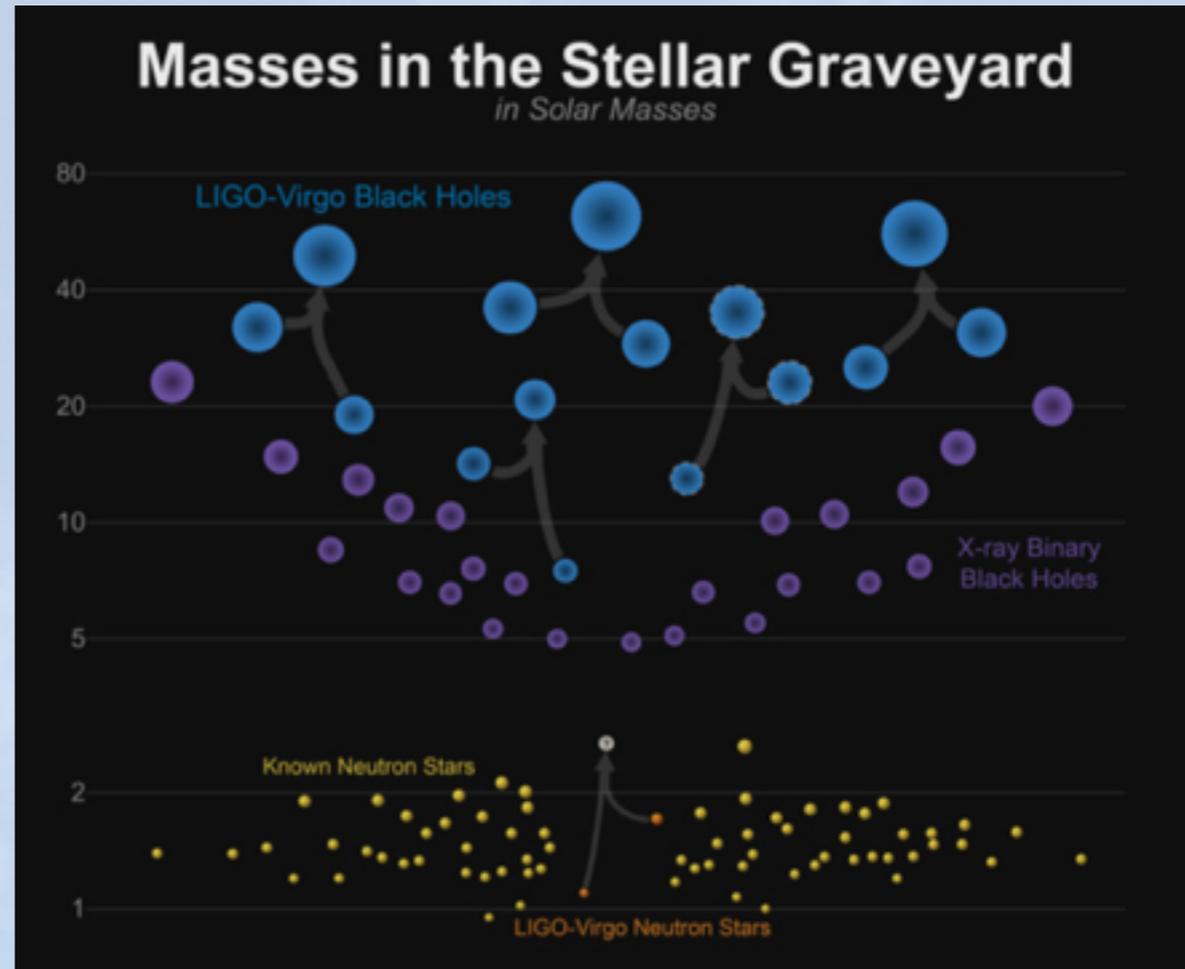
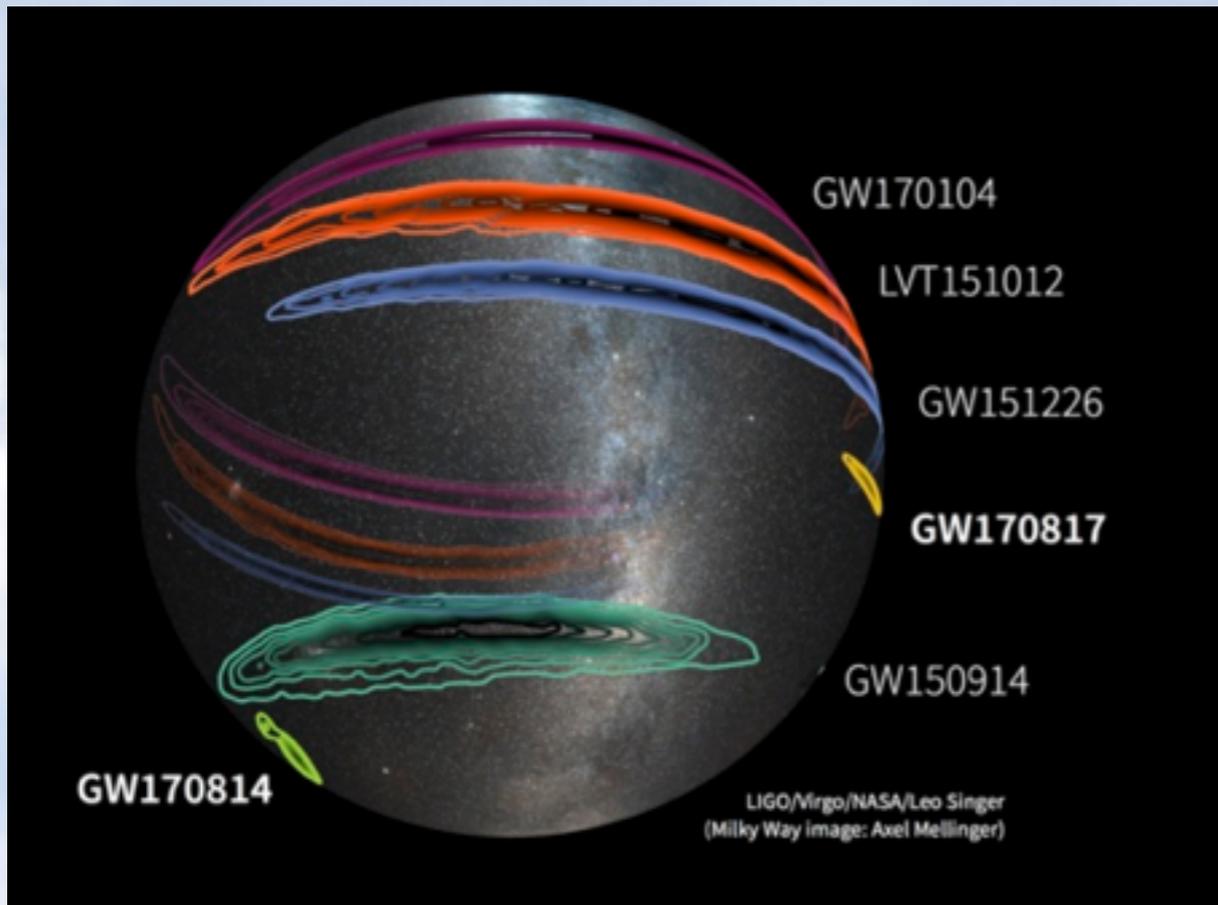
- GW170104の観測
- GW170608の観測
- GW170814の観測



LIGO O2での観測

+Virgoでの観測

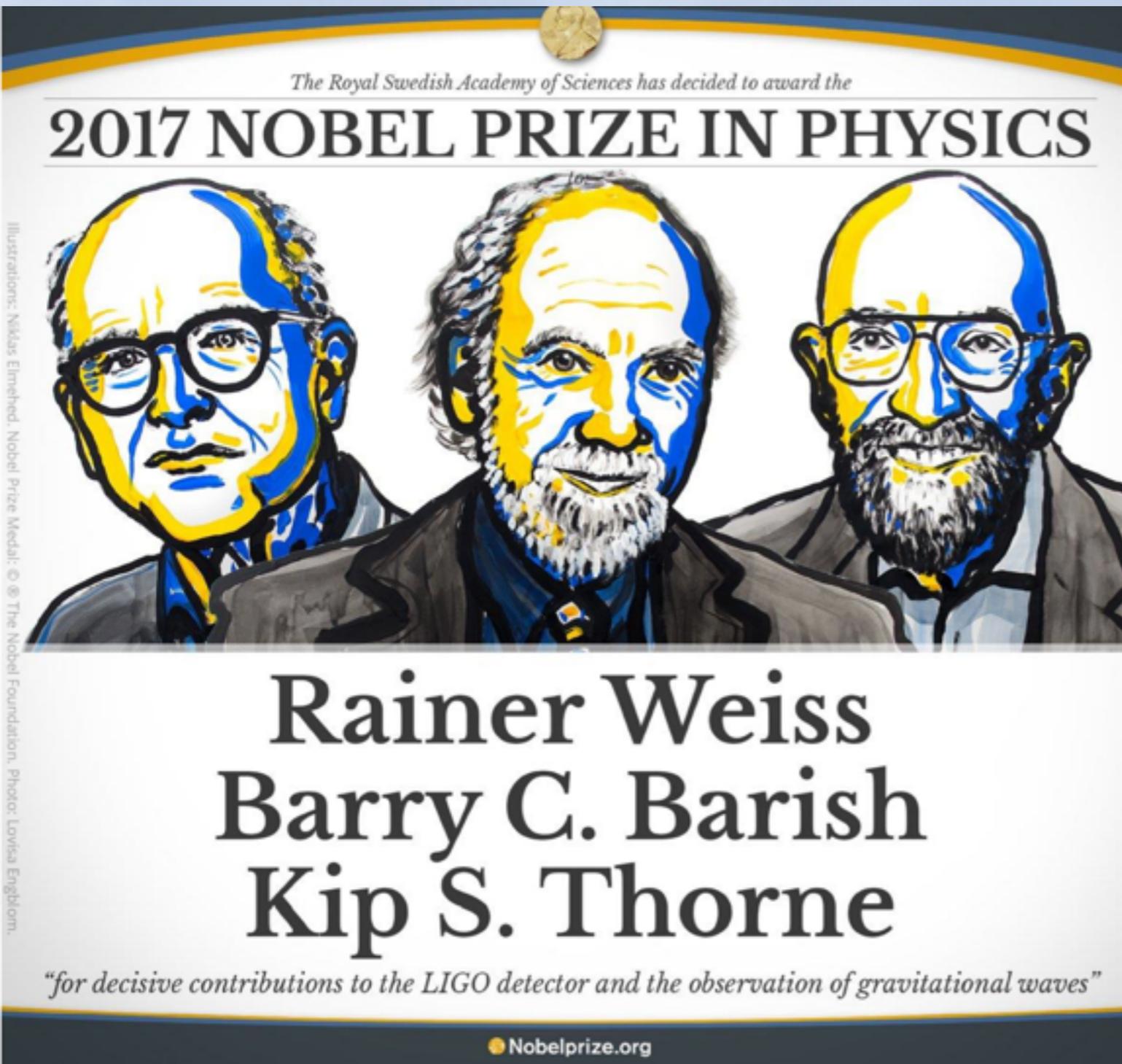
その他の連星ブラックホールの観測



重力波天文学の歴史

- はじめての直接観測の前にも様々な歴史がありますが、あまり詳しくないので省略いたします。
- GW150914の観測
- LVT151012の観測
- GW151226の観測
- GW170104の観測
- GW170608の観測
- GW170814の観測
- ノーベル物理学賞

ノーベル物理学賞(2017)



「レーザー干渉計LIGOを用いた重力波観測への多大なる貢献」

- Rainer Weiss

レーザー干渉計によって重力波を検出する方法を提案、様々な観測技術の先駆的存在

- Barry C. Barish

LIGOの元責任者で、国際的なプロジェクトへと発展させることに大きく貢献

- Kip S. Thorne

天体現象から放出される重力波のモデル化や、干渉計で観測された重力波のデータ解析手法の開発に大きく貢献

本当におめでとうございます！

重力波天文学の歴史

- はじめての直接観測の前にも様々な歴史がありますが、あまり詳しくないので省略いたします。
- GW150914の観測
- LVT151012の観測
- GW151226の観測
- GW170104の観測
- GW170608の観測
- GW170814の観測
- ノーベル物理学賞
- **GW170817の観測**

GW170817

- ノーベル物理学賞の興奮さめやまぬ中、2017年10月16日、GW170817と命名された中性子連星合体からの重力波が観測されたと報告された。

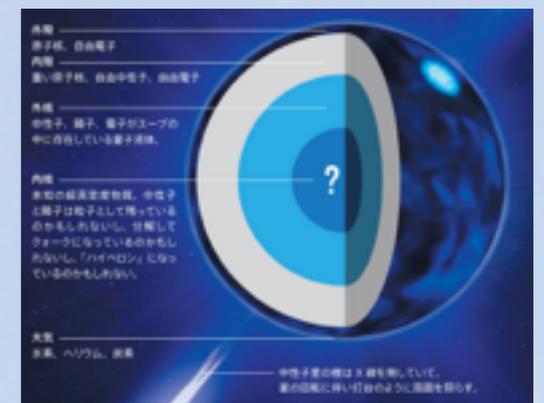
太陽くらいの質量が、半径10kmの球に収まっている。ほとんど中性子。非常に丸い。

- ブラックホール連星合体と異なり、

星の内部の情報を知ることができる

様々な光が直接放射される

などにより、くらべものにならないほどの情報を我々に与えてくれた!



PRL 119, 161101 (2017)

Selected for a **Viewpoint in Physics**
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
20 OCTOBER 2017



GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral

B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 26 September 2017; revised manuscript received 2 October 2017; published 16 October 2017)

GW170817

- ノーベル物理学賞の興奮さめやまぬ中、2017年10月16日、GW170817と命名された中性子連星合体からの重力波が観測されたと報告された。

1. GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral: <https://arxiv.org/abs/1710.05832>
2. Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger: <https://arxiv.org/abs/1710.05833>
3. Gravitational Waves and Gamma-rays from a Binary Neutron Star Merger: GW170817 and GRB 170817A: <https://arxiv.org/abs/1710.05834>
4. A gravitational-wave standard siren measurement of the Hubble constant: <https://arxiv.org/abs/1710.05835>
5. Estimating the Contribution of Dynamical Ejecta in the Kilonova Associated with GW170817: <https://arxiv.org/abs/1710.05836>
6. GW170817: Implications for the Stochastic Gravitational-Wave Background from Compact Binary Coalescences: <https://arxiv.org/abs/1710.05837>
7. On the Progenitor of Binary Neutron Star Merger GW170817: <https://arxiv.org/abs/1710.05838>
8. Search for High-energy Neutrinos from Binary Neutron Star Merger GW170817 with ANTARES, IceCube, and the Pierre Auger Observatory: <https://arxiv.org/abs/1710.05839>
9. Fermi-LAT observations of the LIGO/Virgo event GW170817: <https://arxiv.org/abs/1710.05450>
10. An Ordinary Short Gamma-Ray Burst with Extraordinary Implications: Fermi-GBM Detection of GRB 170817A: <https://arxiv.org/abs/1710.05446>

11. The Electromagnetic Counterpart of the Binary Neutron Star Merger LIGO/Virgo GW170817. I. Dark Energy Camera Discovery of the Optical Counterpart: <https://arxiv.org/abs/1710.05459>
12. The Electromagnetic Counterpart of the Binary Neutron Star Merger LIGO/VIRGO GW170817. II. UV, Optical, and Near-IR Light Curves and Comparison to Kilonova Models: <https://arxiv.org/abs/1710.05840>
13. The Electromagnetic Counterpart of the Binary Neutron Star Merger LIGO/VIRGO GW170817. III. Optical and UV Spectra of a Blue Kilonova From Fast Polar Ejecta: <https://arxiv.org/abs/1710.05456>
14. The Electromagnetic Counterpart of the Binary Neutron Star Merger LIGO/VIRGO GW170817. IV. Detection of Near-infrared Signatures of r-process Nucleosynthesis with Gemini-South: <https://arxiv.org/abs/1710.05454>
15. The Electromagnetic Counterpart of the Binary Neutron Star Merger LIGO/VIRGO GW170817. V. Rising X-ray Emission from an Off-Axis Jet: <https://arxiv.org/abs/1710.05431>
16. The Electromagnetic Counterpart of the Binary Neutron Star Merger LIGO/VIRGO GW170817. VI. Radio Constraints on a Relativistic Jet and Predictions for Late-Time Emission from the Kilonova Ejecta: <https://arxiv.org/abs/1710.05452>
17. The Electromagnetic Counterpart of the Binary Neutron Star Merger LIGO/VIRGO GW170817. VII. Properties of the Host Galaxy and Constraints on the Merger Timescale: <https://arxiv.org/abs/1710.05458>
18. The Electromagnetic Counterpart of the Binary Neutron Star Merger LIGO/VIRGO GW170817. VIII. A Comparison to Cosmological Short-duration Gamma-ray Bursts: <https://arxiv.org/abs/1710.05438>

19. Swope Supernova Survey 2017a (SSS17a), the Optical Counterpart to a Gravitational Wave Source: <https://arxiv.org/abs/1710.05452>
20. Light Curves of the Neutron Star Merger GW170817/SSS17a: Implications for R-Process Nucleosynthesis: <https://arxiv.org/abs/1710.05443>
21. Early Spectra of the Gravitational Wave Source GW170817: Evolution of a Neutron Star Merger: <https://arxiv.org/abs/1710.05432>
22. The Unprecedented Properties of the First Electromagnetic Counterpart to a Gravitational Wave Source: <https://arxiv.org/abs/1710.05440>
23. Origin of the heavy elements in binary neutron-star mergers from a gravitational wave event: <https://arxiv.org/abs/1710.05463>
24. The Old Host-Galaxy Environment of SSS17a, the First Electromagnetic Counterpart to a Gravitational Wave Source: <https://arxiv.org/abs/1710.05439>
25. Electromagnetic Evidence that SSS17a is the Result of a Binary Neutron Star Merger: <https://arxiv.org/abs/1710.05434>
26. A Neutron Star Binary Merger Model for GW170817/GRB170817a/SSS17a: <https://arxiv.org/abs/1710.05453>
27. Illuminating Gravitational Waves: A Concordant Picture of Photons from a Neutron Star Merger: <https://arxiv.org/abs/1710.05436>
28. A Radio Counterpart to a Neutron Star Merger: <https://arxiv.org/abs/1710.05435>
29. Swift and NuSTAR observations of GW170817: detection of a blue kilonova: <https://arxiv.org/abs/1710.05437>
30. The X-ray counterpart to the gravitational wave event GW 170817: <https://arxiv.org/abs/1710.05433>

31. A kilonova as the electromagnetic counterpart to a gravitational-wave source: <https://arxiv.org/abs/1710.05841>
32. Optical Follow-up of Gravitational-wave Events with Las Cumbres Observatory: <https://arxiv.org/abs/1710.05842>
33. Optical emission from a kilonova following a gravitational-wave-detected neutron-star merger: <https://arxiv.org/abs/1710.05843>
34. Observations of the first electromagnetic counterpart to a gravitational wave source by the TOROS collaboration: <https://arxiv.org/abs/1710.05844>
35. The Emergence of a Lanthanide-Rich Kilonova Following the Merger of Two Neutron Stars: <https://arxiv.org/abs/1710.05455>
36. How Many Kilonovae Can Be Found in Past, Present, and Future Survey Datasets?: <https://arxiv.org/abs/1710.05845>
37. Optical Observations of LIGO Source GW 170817 by the Antarctic Survey Telescopes at Dome A, Antarctica: <https://arxiv.org/abs/1710.05462>
38. Follow up of GW170817 and its electromagnetic counterpart by Australian-led observing programs: <https://arxiv.org/abs/1710.05846>
39. ALMA and GMRT constraints on the off-axis gamma-ray burst 170817A from the binary neutron star merger GW170817: <https://arxiv.org/abs/1710.05847>
40. J-GEM observations of an electromagnetic counterpart to the neutron star merger GW170817: <https://arxiv.org/abs/1710.05848>
41. The unpolarized macronova associated with the gravitational wave event GW170817: <https://arxiv.org/abs/1710.05849>

42. Kilonova from post-merger ejecta as an optical and near-infrared counterpart of GW170817: <https://arxiv.org/abs/1710.05850>
43. MASTER optical detection of the first LIGO/Virgo neutron stars merging GW170817: <https://arxiv.org/abs/1710.05461>
44. A peculiar low-luminosity short gamma-ray burst from a double neutron star merger progenitor: <https://arxiv.org/abs/1710.05851>
45. AGILE Observations of the Gravitational Wave Source GW 170817: Constraining Gamma-Ray Emission from a NS-NS Coalescence: <https://arxiv.org/abs/1710.05460>
46. The Diversity of Kilonova Emission in Short Gamma-Ray Bursts: <https://arxiv.org/abs/1710.05442>
47. The environment of the binary neutron star merger GW170817: <https://arxiv.org/abs/1710.05444>
48. The first direct double neutron star merger detection: implications for cosmic nucleosynthesis: <https://arxiv.org/abs/1710.05445>
49. A Deep Chandra X-ray Study of Neutron Star Coalescence GW170817: <https://arxiv.org/abs/1710.05852>
50. Afterglows and Macronovae Associated with Nearby Low-Luminosity Short-Duration Gamma-Ray Bursts: Application to GW170817/GRB170817A: <https://arxiv.org/abs/1710.05910>
51. GRB170817A associated with GW170817: multifrequency observations and modeling of prompt gamma-ray emission: <https://arxiv.org/abs/1710.05448>
52. INTEGRAL Detection of the First Prompt Gamma-Ray Signal Coincident with the Gravitational Wave Event GW170817: <https://arxiv.org/abs/1710.05447>

53. The Rapid Reddening and Featureless Optical Spectra of the optical counterpart of GW170817, AT 2017gfo, During the First Four Days: <https://arxiv.org/abs/1710.05853>
54. The discovery of the electromagnetic counterpart of GW170817: kilonova AT 2017gfo/DT17ck: <https://arxiv.org/abs/1710.05854>
55. A comparison between SALT/SAAD observations and kilonova models for AT 2017gfo: the first electromagnetic counterpart of a gravitational wave transient - GW170817: <https://arxiv.org/abs/1710.05855>
56. The Distance to NGC 4993: The Host Galaxy of the Gravitational-wave Event GW170817: <https://arxiv.org/abs/1710.05856>
57. GRB 170817A as a jet counterpart to gravitational wave trigger GW 170817: <https://arxiv.org/abs/1710.05857>
58. Spectroscopic identification of r-process nucleosynthesis in a double neutron star merger: <https://arxiv.org/abs/1710.05858>
59. Jet-driven and jet-less fireballs from compact binary mergers: <https://arxiv.org/abs/1710.05859>
60. Multimessenger tests of the weak equivalence principle from GW170817 and its electromagnetic counterparts: <https://arxiv.org/abs/1710.05860>
61. Distance and properties of NGC 4993 as the host galaxy of a gravitational wave source, GW170817: <https://arxiv.org/abs/1710.05861>
62. TeV gamma-ray observations of the binary neutron star merger GW170817 with H.E.S.S.: <https://arxiv.org/abs/1710.05862>

63. Lanthanides or dust in kilonovae: lessons learned from GW170817: <https://arxiv.org/abs/1710.05863>
64. An empirical limit on the kilonova rate from the DLT40 one day cadence Supernova Survey: <https://arxiv.org/abs/1710.05864>
65. Subaru Hyper Suprime-Cam Survey for An Optical Counterpart of GW170817: <https://arxiv.org/abs/1710.05865>

恐ろしい数の論文が数日のうちに発表された。今現在もどんどん上昇中！
マルチメッセンジャー天文学の開幕！

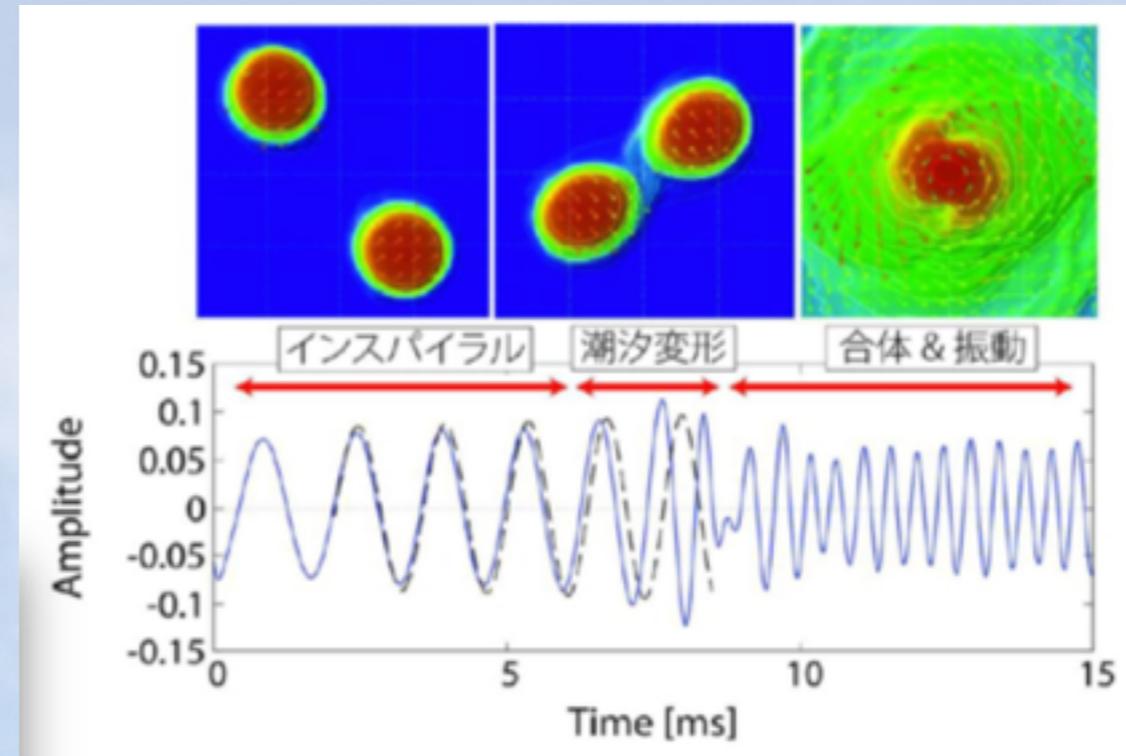
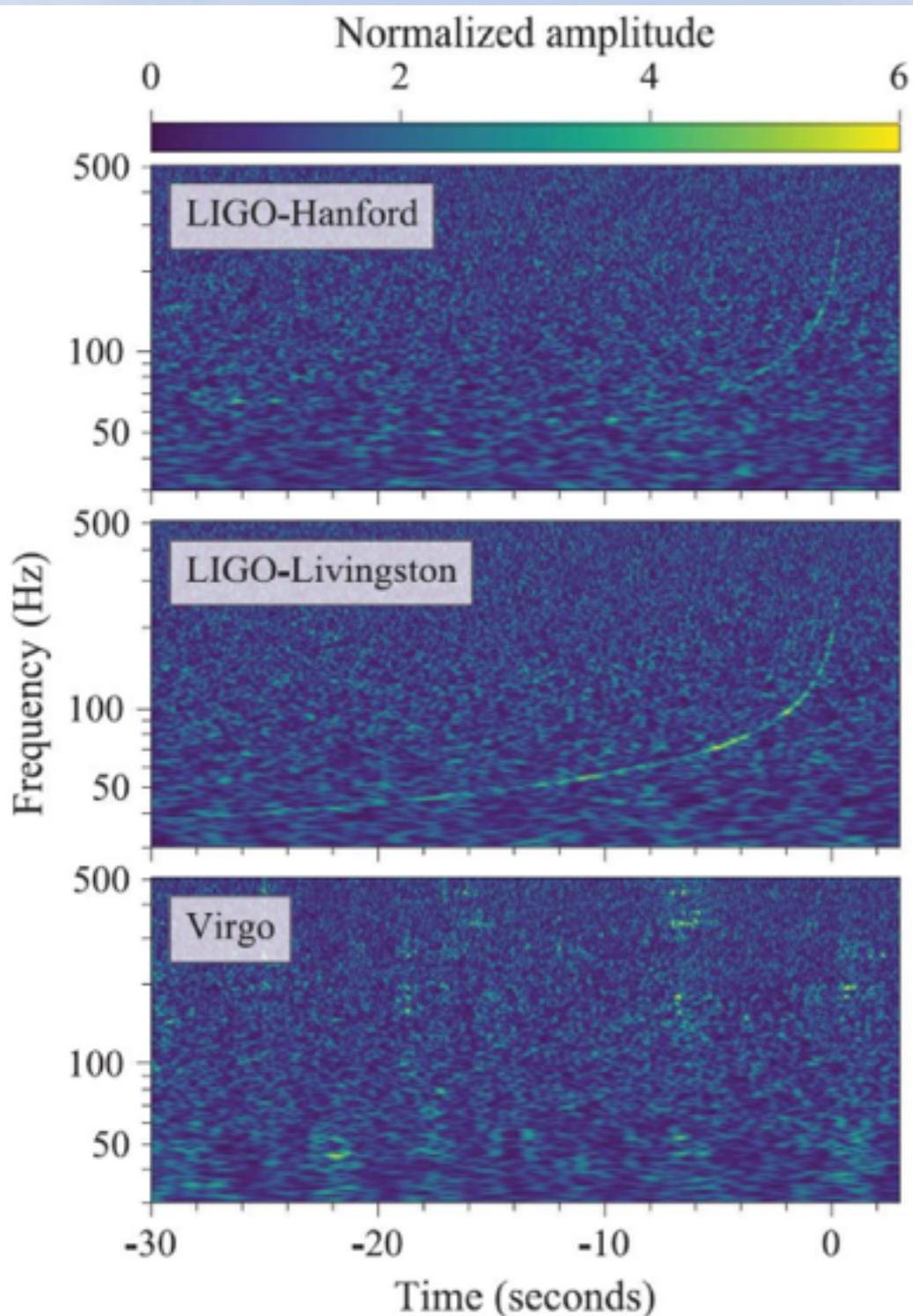
GW170817

- ノーベル物理学賞の興奮さめやまぬ中、2017年10月16日、GW170817と命名された中性子連星合体からの重力波が観測されたと報告された。
- たくさんある中のいくつかの重要な特徴
 - 重力波と同時にたくさんの波長の光が同時観測された。
 - 2つの連星の合計の質量が約2.8太陽質量、中性子星連星合体と見て間違いない。
 - 様々な光学観測により、母銀河(合体が起こった銀河)が同定された。
 - 距離が1.3億光年と最初のイベントよりももっと近い距離で起きた。
 - 合体時に出てきた光の大きさが予想よりも少し小さい、すこしずれたところからの観測か??
 - 星の内部の情報を少し見ることができた
 - 光と同時観測できたのでハッブル定数をこれまでにない方法で推定できた



GW170817

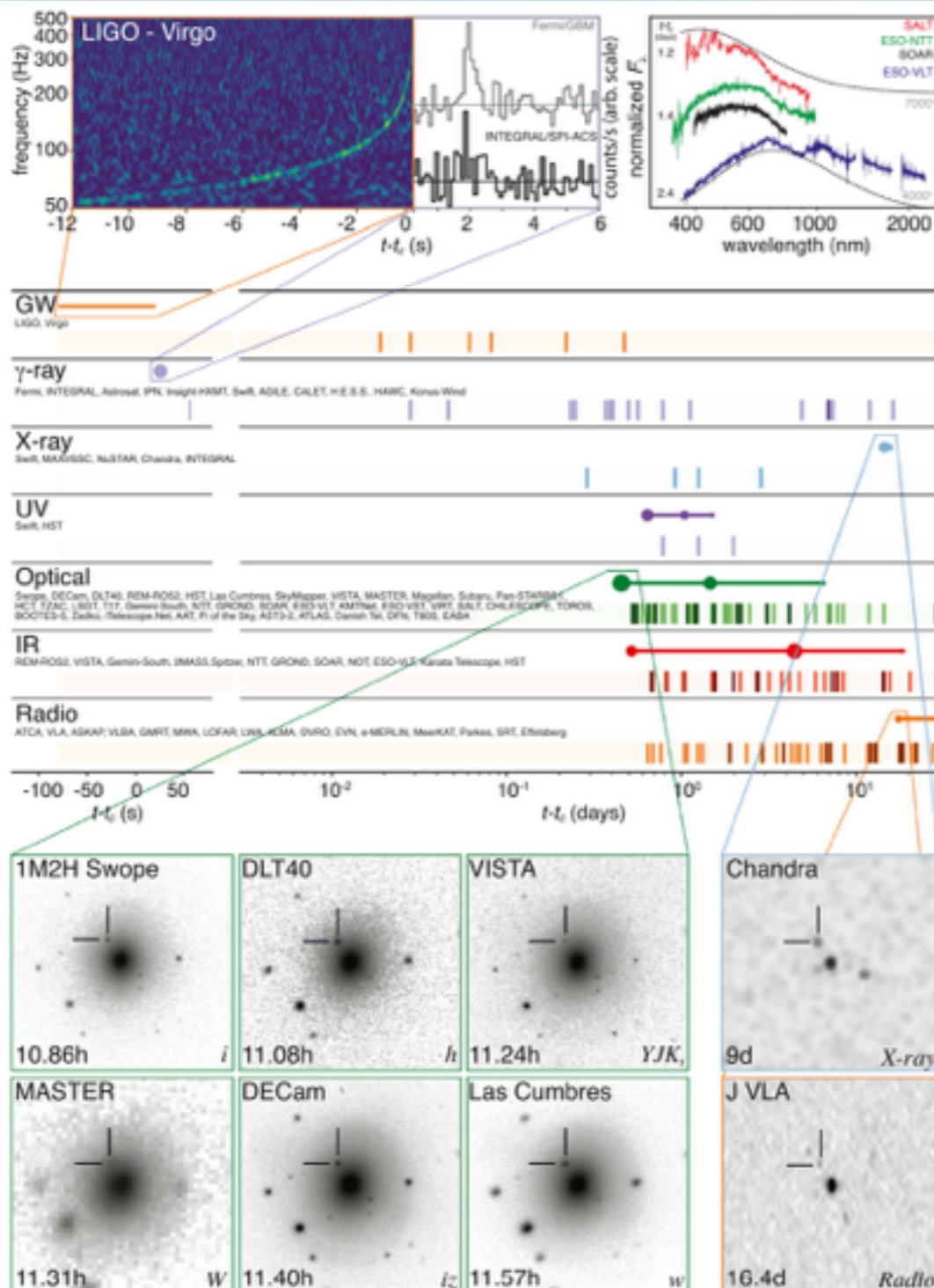
- ノーベル物理学賞の興奮さめやまぬ中、2017年10月16日、GW170817と命名された中性子連星合体からの重力波が観測されたと報告された。



- まさに教科書通りの波形。
- この大きさの重力波がKAGRA稼働時にも起こってほしい。。
- 星の潮汐変形の解析も行われたが、決定的な結論はまだ得られていない
- 合体後にどうなったのかは今回は観測できなかった。。

GW170817

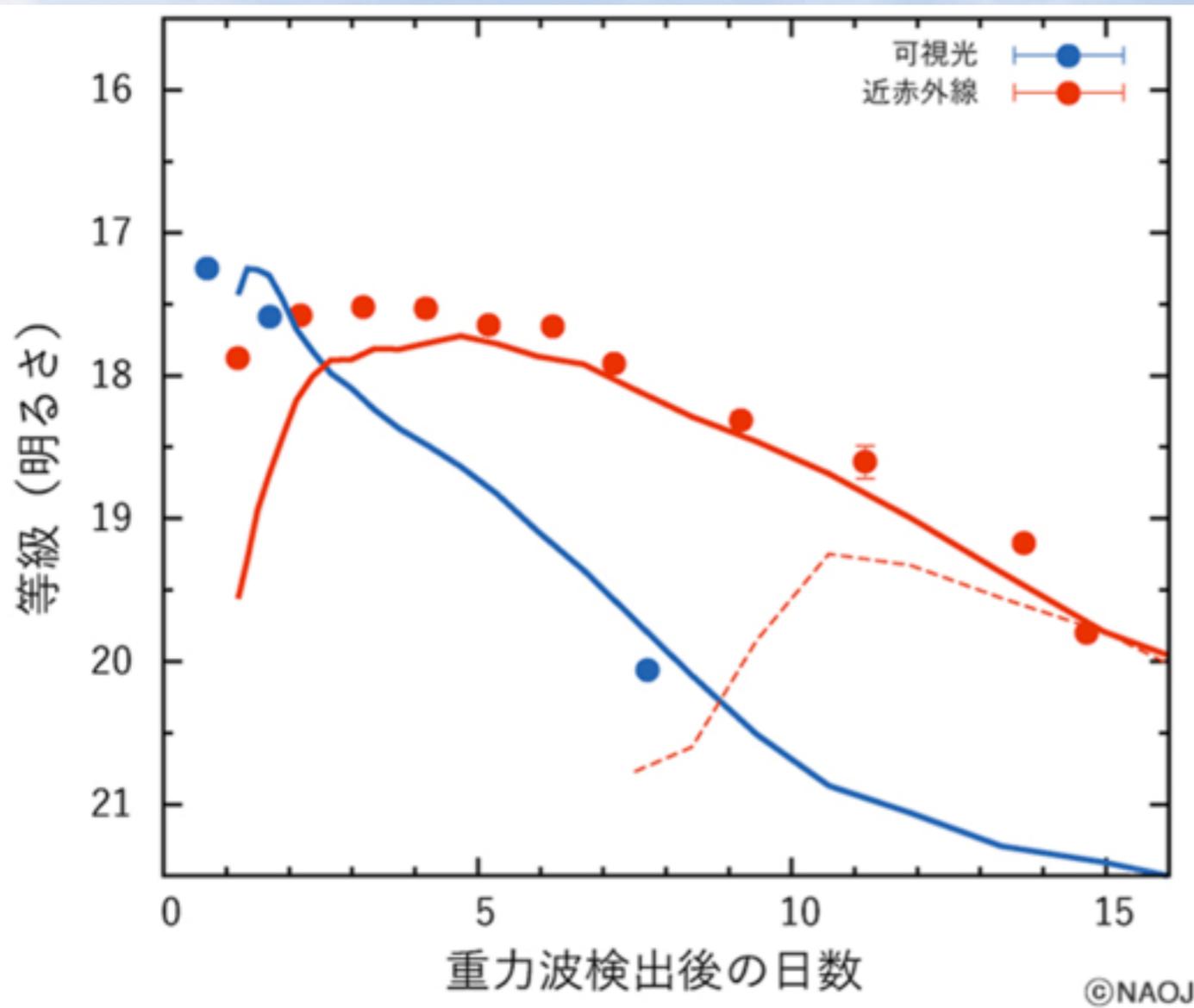
- ノーベル物理学賞の興奮さめやまぬ中、2017年10月16日、GW170817と命名された中性子連星合体からの重力波が観測されたと報告された。



- 重力波観測の1.7秒後に、ショートガンマ線らきイベントがFermi衛星によって観測された。
- 重力波観測から12時間後くらいに、だんだんと光が弱まっていく星を発見、様々な望遠鏡の観測から、この星が中性子連星合体により突然光り、だんだんと光が弱まっていくことによるものだと断定された。NGC4993
- そして、様々な波長の光の観測が数日にわたって行われ、光の強さの時間変化などを詳細に追うことができた。

GW170817

- ノーベル物理学賞の興奮さめやまぬ中、2017年10月16日、GW170817と命名された中性子連星合体からの重力波が観測されたと報告された。
- キロノバ(金などの重い元素の起源?!)



- 中性子星はたくさんの中性子でできている星なので、合体により中性子が大量に放出される。その影響で数日にわたり近赤外線の光が観測される(金などの重金属ができた際に放出される光)。これが理論曲線と一致しているため、たくさんのができたのでは?!とされている。

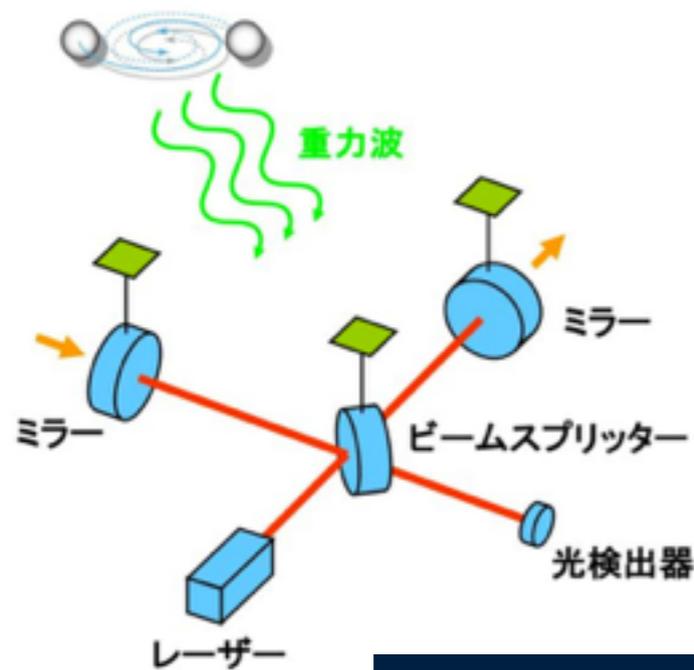
重力波をとらえる

- 最初のほうで説明した通り、重力波が到来すると時空が歪む→2点間の距離を正確にはかることにより観測できる。ただし、ものすごい正確に測定を行わなければならない。
- 重力波の大きさを示すのに通常振幅ストレインで表示することが多いです。
 - これはLメートルの物差しが何メートル縮むかというのを示す無次元量です。
- $h = \Delta L / L \sim 10^{-21}$ くらいが現在観測可能な重力波の大きさ。
 - これをイメージするには太陽と地球の距離が原子核1個分変化するくらいの長さしか変化しないことを示している。
 - この微小な変化しかしないことが、重力波が予言されてから発見されるまでに100年を要した理由。
 - アインシュタインも重力波を予言した際に、「こんな微小な変化観測するの無理じゃない？」的なことを言っていたらしいです。
- このような微小な変化をとらえるのにはどういう検出器を作ればいいのでしょうか？

重力波をとらえる

干渉型重力波検出器

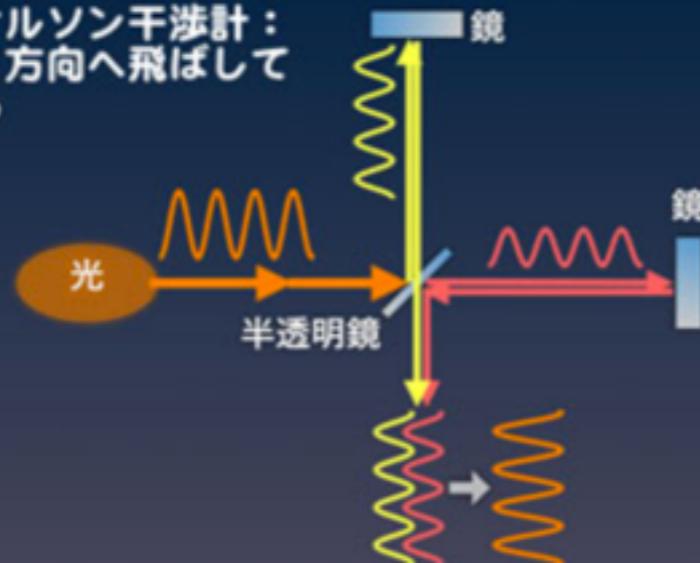
レーザー干渉計による重力波検出



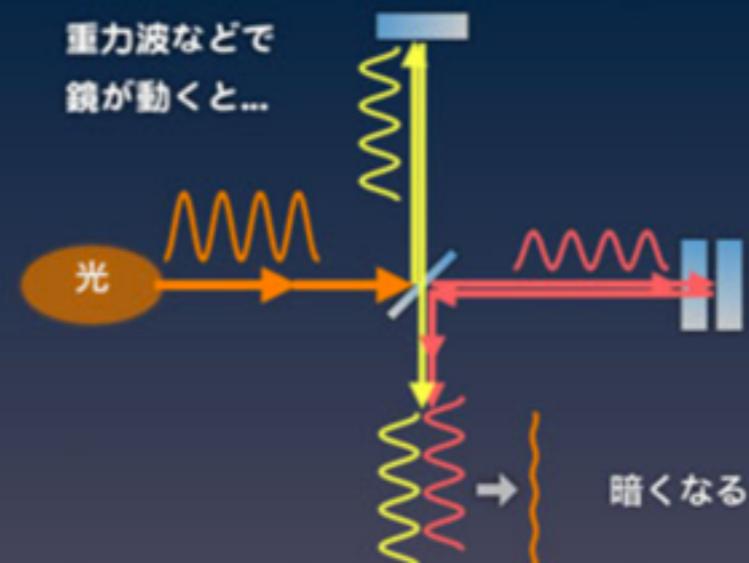
- 現在では干渉型重力波検出器が主流となっています。
 - レーザー光源を用意する
 - ビームスプリッターでレーザーの光を2つに分ける
 - 2つに分けた光をミラーで跳ね返す
 - かえってきた光を光検出器で観測する
- すると、2つの光の干渉の具合によって、2つの光の通ってきた距離の差を観測することができます。

時空のゆがみの測り方

マイケルソン干渉計：
光を2方向へ飛ばして
調べる

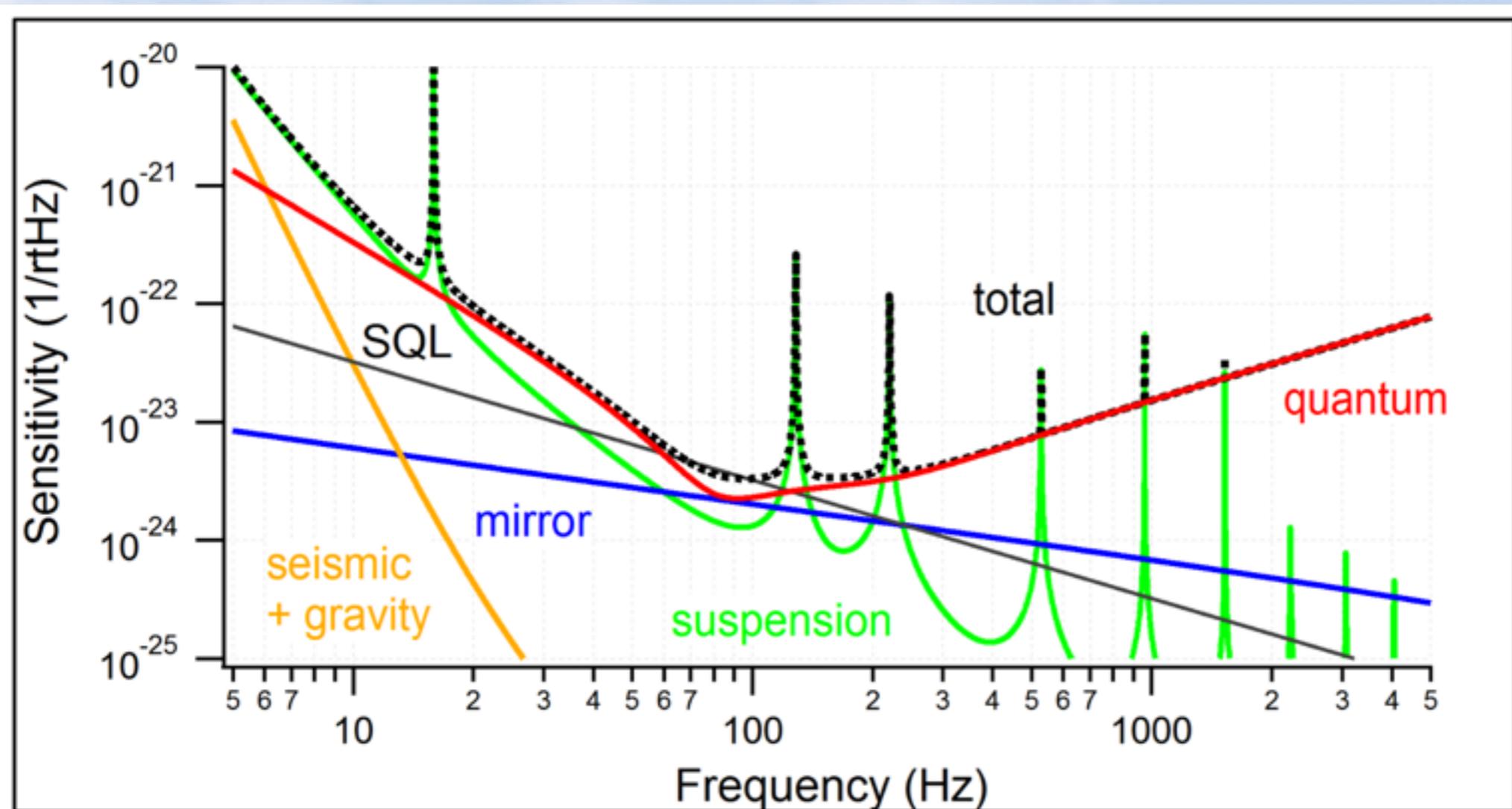


重力波などで
鏡が動くと...



干渉型重力波検出器

- ただし、鏡自身が動いてしまうと、重力波による時空の歪みと区別することができないので、できる限り鏡を動かさない状態で観測することが重要!
- こうして出てくるのが、よく見る検出器の感度曲線です。これは横軸周波数、縦軸その周波数に対するノイズの大きさを示しています。このプロットに重力波の信号を重ね書きして、観測可能かどうかを判断することができます。



世界の重力波検出器

The image features a world map with blue lines indicating the locations of various gravitational wave detectors. The detectors are labeled as follows:

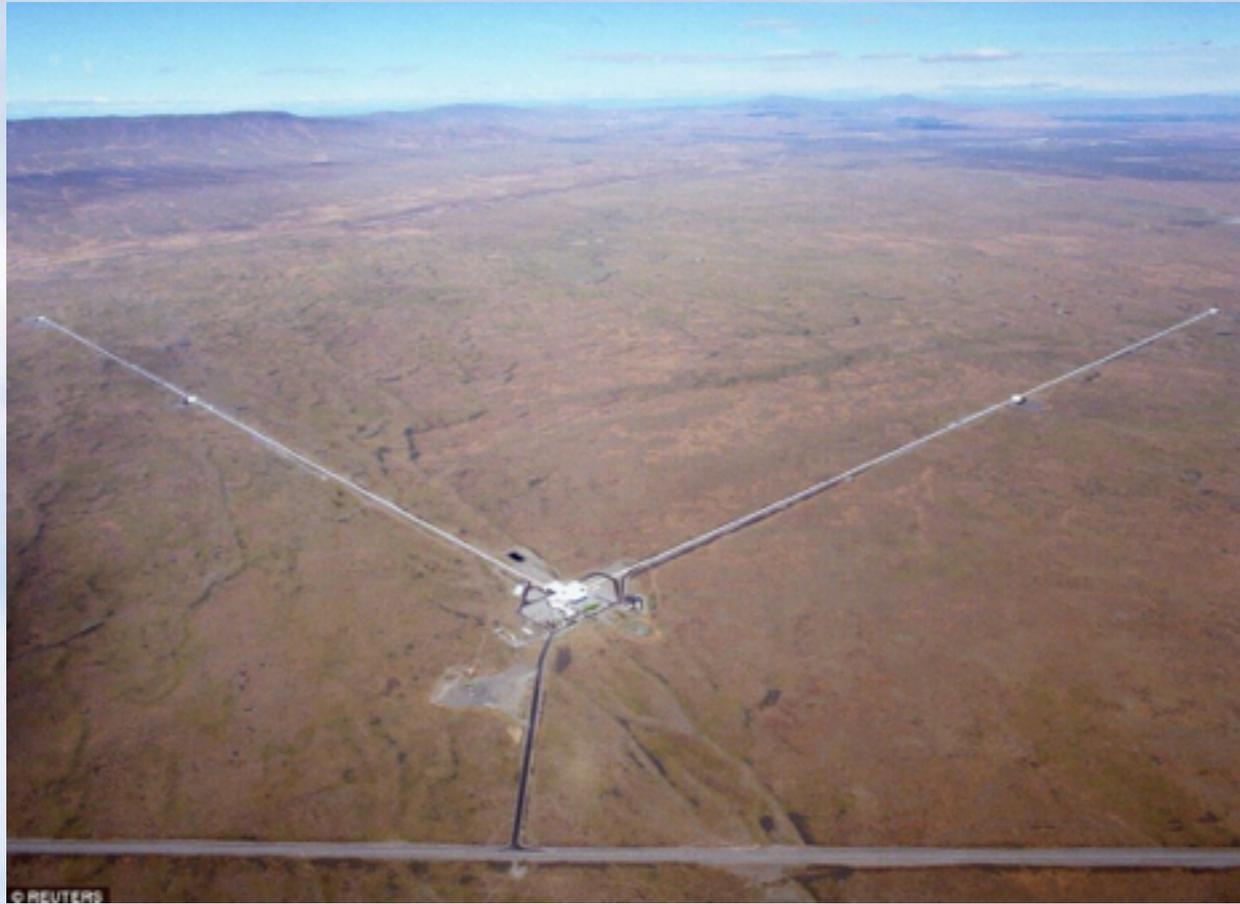
- aLIGO (USA)**: 4km x 2 (or 3)
- Adv. VIRGO (ITA-FRA)**: baseline 3km
- GEO-HF (GER-UK)**: baseline 600m
- KAGRA (JPN)**: baseline 3km
- LIGO-Australia**: in proposal
- LIGO-India**: in proposal

Accompanying the map are several photographs and a logo:

- Top left: Aerial view of the aLIGO facility in the USA.
- Bottom left: Aerial view of the Adv. VIRGO facility in Italy/France.
- Bottom center-left: Aerial view of the GEO-HF facility in Germany/UK.
- Bottom center-right: Aerial view of the KAGRA facility in Japan.
- Top right: Aerial view of the LIGO-Australia facility.
- Bottom right: The 'indigo' logo, which consists of the word 'indigo' in a sans-serif font next to a stylized purple and grey spiral graphic.

LIGO

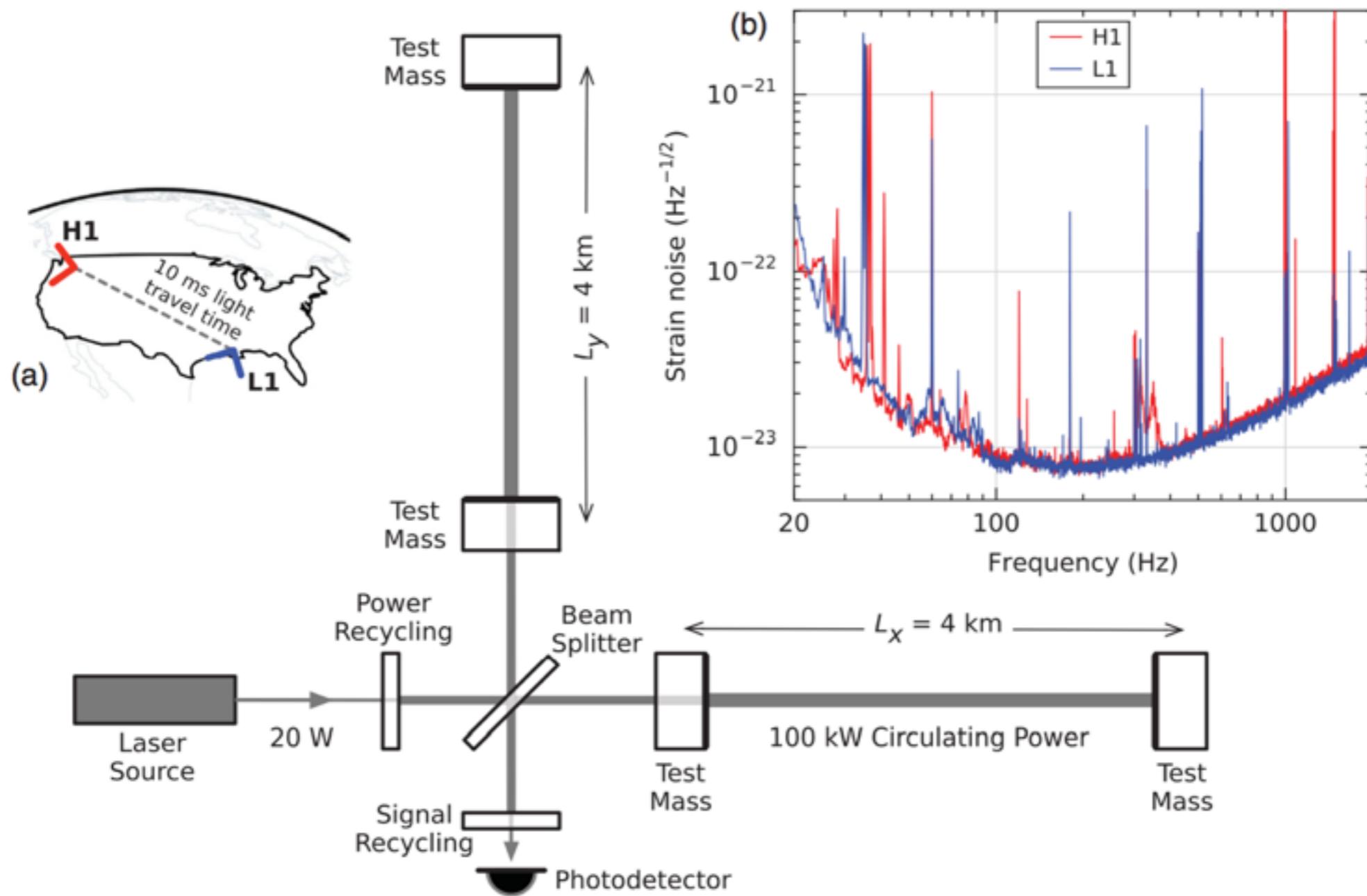
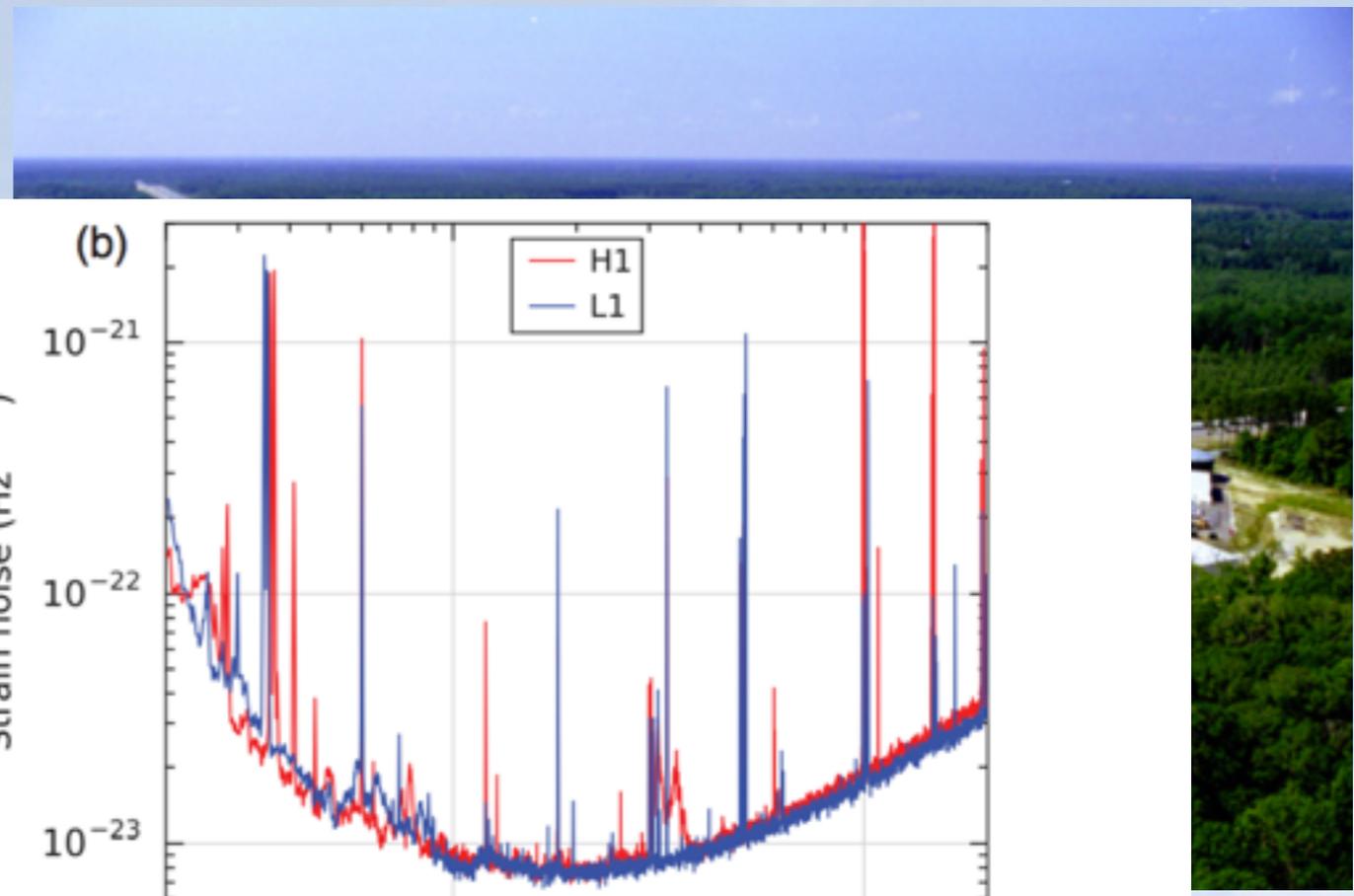
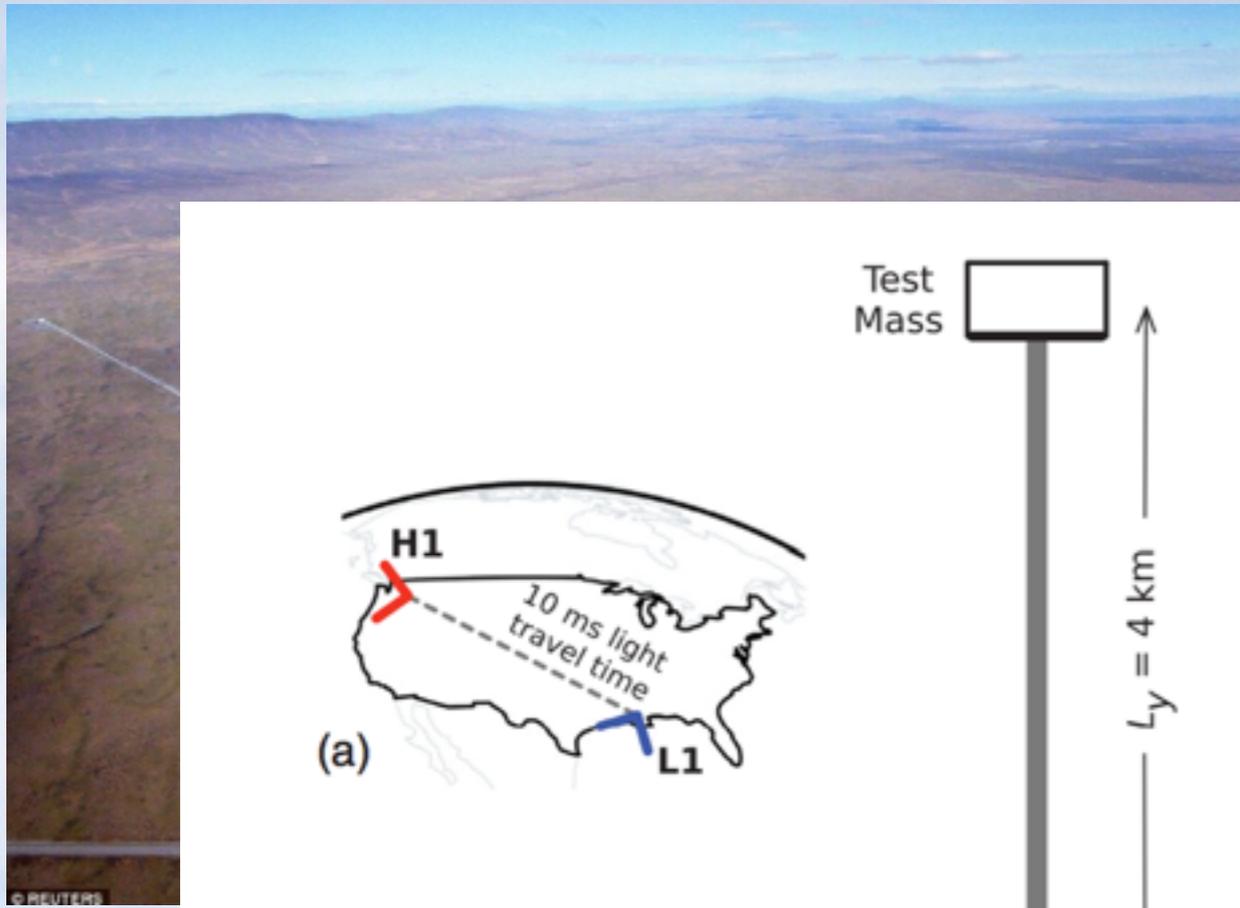
- アメリカに設置されている2台の検出器(Large Interferometer Gravitational-Wave Observatory)



- ひとつは砂漠(Hanford)、もうひとつはジャングル(Livingston)に設置されている。

LIGO

- アメリカに設置されている2台の検出器(Large Interferometer Gravitational-Wave Observatory) (4km)



- ひび

ちなみに

- 昨年9月に研究のためにLIGO Hanfordに滞在しておりました。



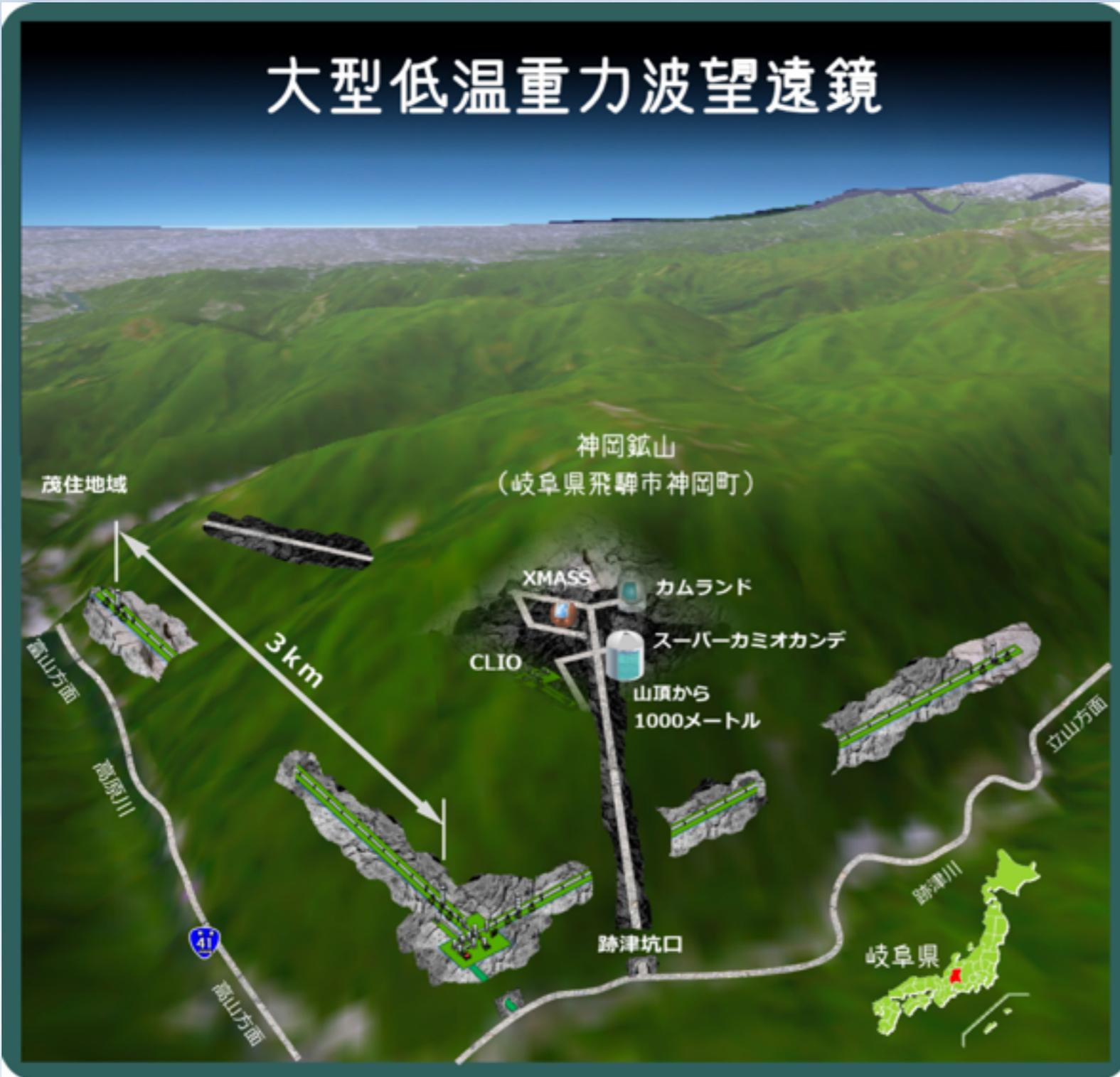
Virgo, GEO

- Virgo : イタリアのピサ郊外に設置されている検出器 (3km)
- GEO600 : ドイツハノーバーに設置されている検出器 (600m)



KAGRA

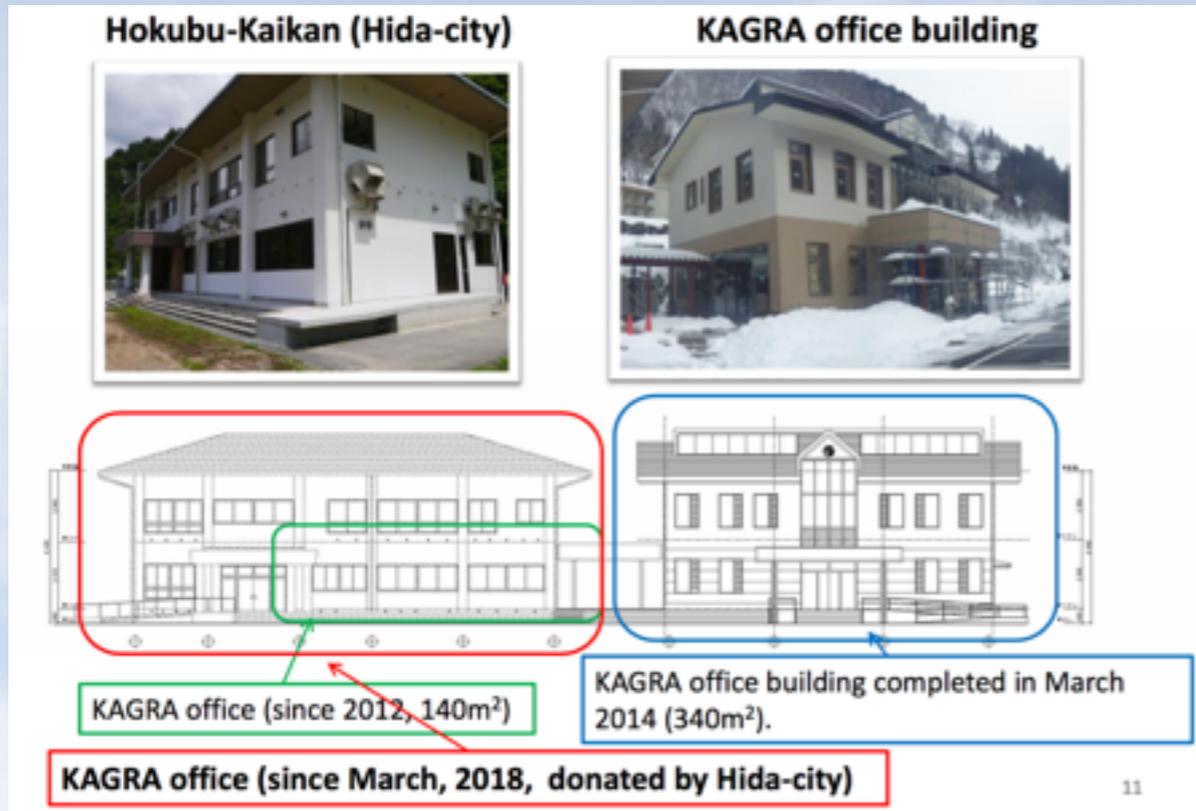
大型低温重力波望遠鏡



- 日本で建設が進行している大型低温重力波検出器
 - KAmioka + GRAvitational wave (愛称 KAGRA)
- 他の検出器と比べて、
 - 地下サイトという静寂な環境に建設している
 - 鏡を -250°C 程度まで冷やすという特徴を持っている。

KAGRA

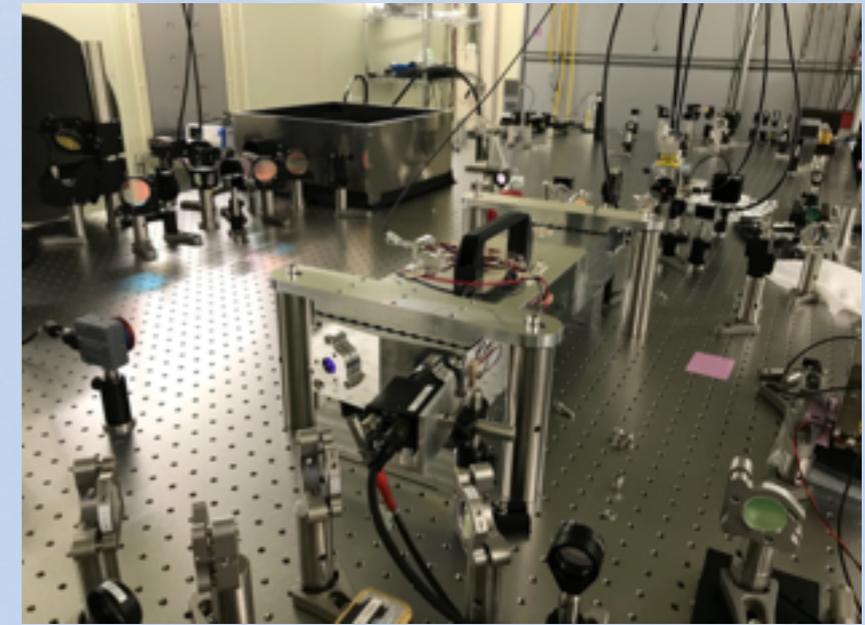
- 現在(2018年7月)、フル干涉計に向けて、インストール作業が急ピッチで進められている。



- 解析棟、コントロールルーム(後ほど見学いたします。)
 - 検出器をコントロールしたり、検出器の状態をモニターしたりするところ。
- KAGRA検出器までは、車で10-15分(41号線は、工事が多いw)

KAGRA

- 現在(2018年7月)、フル干涉計に向けて、インストール作業が急ピッチで進められている。

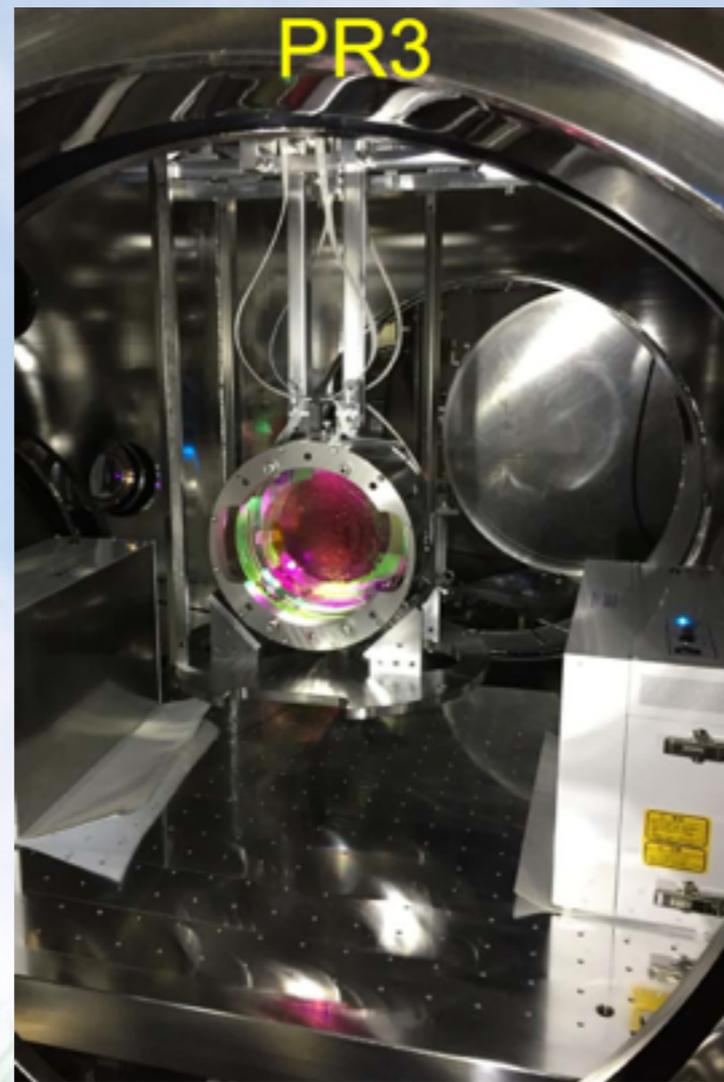
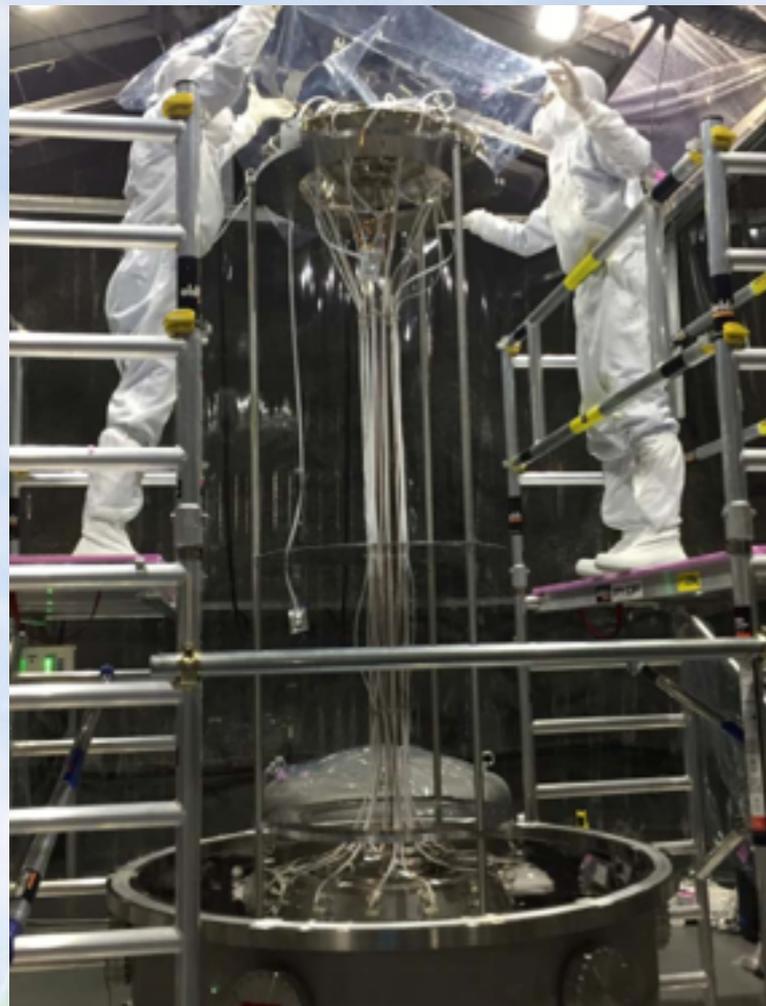


- トンネルから歩いて検出器のところまで行きます
 - トンネルの中は一年を通じて同じ気温、夏は涼しくて、冬は暖かく感じる
- 3kmの腕は、電動自転車または、電気カートで移動する



KAGRA

- 現在(2018年7月)、フル干渉計に向けて、インストール作業が急ピッチで進められている。
- 使用している鏡は、様々な振り子でつるされている
- 極低音鏡をつるしているのはKAGRAだけ
- すべて、真空の中につるしている



KAGRA

- 現在(2018年7月)、フル干涉計に向けて、インストール作業が急ピッチで進められている。

- 今回は、新跡津口よりサイトの中に入っていきます。
- 現在検出器中心部は、インストール中ですので、入り口の窓からの見学となります。
- その後、バイパスを通じて、Xアームの一部を見学します。

