

# 一般相対論100年：重力波の直接検出

## 重力波 初検出



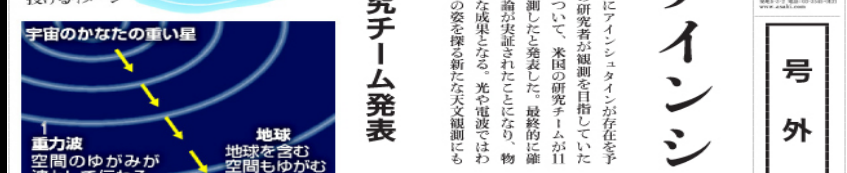
米チーム  
**宇宙誕生の謎迫る**  
相対性理論裏付け

宇宙の初め、重力波が宇宙誕生の謎を解き、宇宙の誕生から10億年経った頃、重力波が宇宙に広がった。重力波は、重力のゆがみが伝わる。池の水の波紋のようなもの。重力波は、重力のゆがみが伝わる。池の水の波紋のようなもの。重力波は、重力のゆがみが伝わる。池の水の波紋のようなもの。

重力波 重力で周りの空間をゆがめている物体が動くことで、ゆがみが波紋のように周囲に広がっていく現象。全ての物質を光速で貫通し、減衰しないといわれる。人が腕を回しても発生するが、距離が小さすぎて検出できない。非常に重い「中子星同士の合体やブラックホールの誕生、超新星爆発など大規模で劇的な現象によるものは観測可能とされる。重力波による空間のゆがみをとらえる装置は、太陽と地球の距離(約1.5億km)が光速度の1億分の1程度に近づかなければならぬ。極めて高感度の検出が必要とされる。

## 重力波を初観測

100年前にアインシュタインが存在を予言し、世界の研究者が観測を目指していた「重力波」について、米国の研究チームが11日初めて観測したと発表した。最終的に確認されれば理論が実証されたことになり、物理学の歴史的な成果となる。光や電波ではわからない宇宙の姿を探る新たな天文観測にも道が開ける。



**米研究チーム発表**  
重力波は、時間や空間がわずかに伸び縮みする。時空のゆがみが重力波のようになるといわれる現象。物体が加速して動くときに起こる。アインシュタインが1916年一般相対性理論から予言していた。その観測は「最後の宿願」とされ、物理学の長年の悲願だった。

重力波はあらゆる運動で生じるとされるが、極めて微弱で通常は観測できない。このため、星の合体などで生じた大きな重力波をとらえることになる。研究チームは米国のカリフォルニア州にある装置「LIGO」の性能を大幅に高め、昨年9月から今年1月上旬まで観測分析作業を進めていた。発表によると、昨年9月14日、地球から13億光年離れた二つのブラックホールが合体したときに出現したとみられる重力波を十分な精度で検出できたとはいった。物理学誌「サイエンス」に掲載された。

重力に詳しい大東博司・米カリフォルニア工科大学物理研究所長は「高い精度の分析結果で、重力波をきちんと観測されたことが、宇宙を探究する新しい窓が開けたことは素晴らしい。今後、検証が続き、さらに精度が上がっていくだろう」とコメントを寄せた。(小林哲二ワシントン、共同)

「我々は重力波を検出した。ワシントンで開かれた記者会見で、研究リーダーの一人が宣言する大場から大きな拍手がわいた。今後、別の現象の観測も出た可能性も含め、専門家の検証を受けることになる。研究チームがとったのは、長さ4kmの検出器に対し、水素の原子核の1万分の1程度のと極めて小さいゆがみだ。重力波の観測装置は「重力波望遠鏡」とも呼ばれる。重力波をとらえることで、二つの星が互いに回る連星の動きも超新星爆発宇宙の始まりなど様々な天体現象を新たな観点で探れるようになる。専門家の間では「観測予言はノベル賞」と言われている。

朝日新聞  
2月12日 金曜日  
朝日新聞 号外  
速報も詳細もデジタル版で

# 今回の講義内容

[http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation\\_2016j.html](http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2016j.html)

参考文献: 須藤靖『一般相対論入門』(日本評論社 2005年)  
須藤靖『もうひとつの一般相対論入門』(日本評論社 2010年)

- 一般相対論の考え方
- 一般相対論の観測的検証
  - エディントンと光の湾曲
  - マンドルと重力レンズ
  - 水星の近日点移動
- ついに重力波が直接検出された
- まとめ

# 一般相対論の考え方

# 重力と質量

## ■ 万有引力の法則

$$F = \frac{Gm_G m'_G}{r^2}$$

- あらゆる物体間に必ず引力として働く
- 互いの質量の積に比例

## ■ ニュートンの第二法則

$$m_I \frac{d^2 x}{dt^2} = F$$

- 物体の質量と加速度の積は、その物体が受ける力に等しい

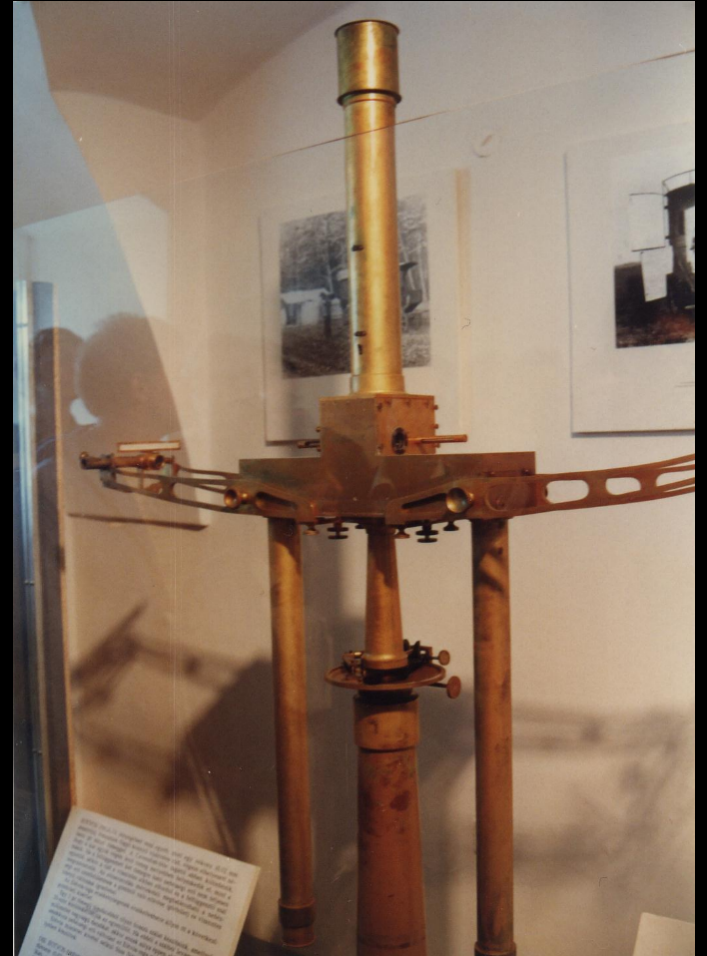
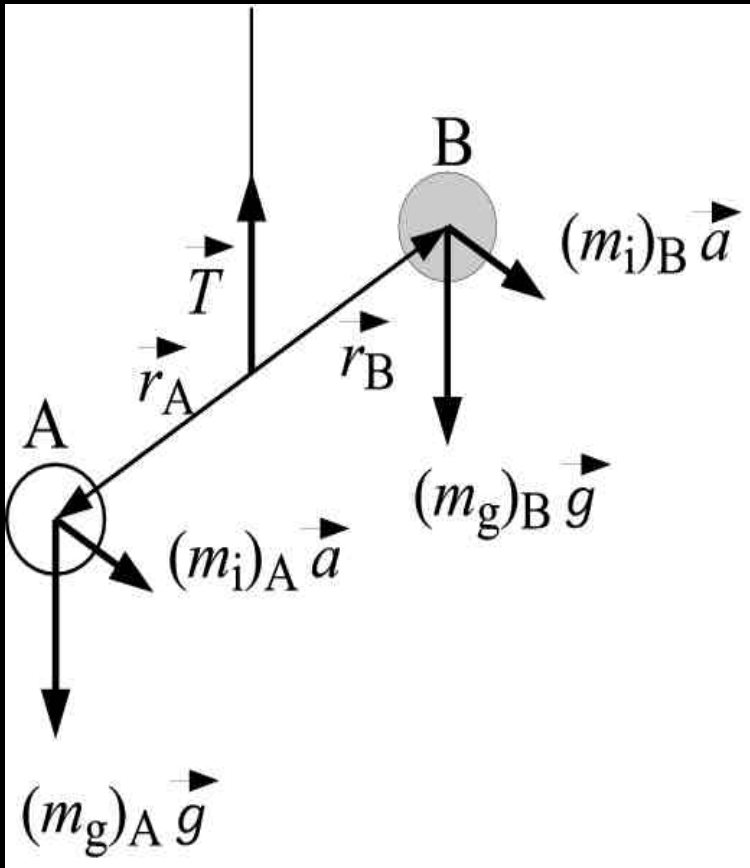
# 質量と電荷の違いは不公平？

- 万有引力に登場する質量(重力質量)と、ニュートンの第二法則に登場する質量(慣性質量)はなぜ同じなのか？
  - 例えば、2つの電荷の間に働くクーロン力は、万有引力と全く同じ形をしているが、そこに登場する電荷は、ニュートンの第二法則には登場しないではないか！

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r^2} \quad \Rightarrow \quad q \frac{d^2x}{dt^2} = F \quad ???$$

# エトバスの実験

- 重力質量と慣性質量は本当に等しいのか？



Loránd Eötvös (1890, 1906-1909)

# 等価原理

- 実験的には重力質量と慣性質量は同じ

$$\frac{|m_G - m_I|}{m_I} < 10^{-12}$$

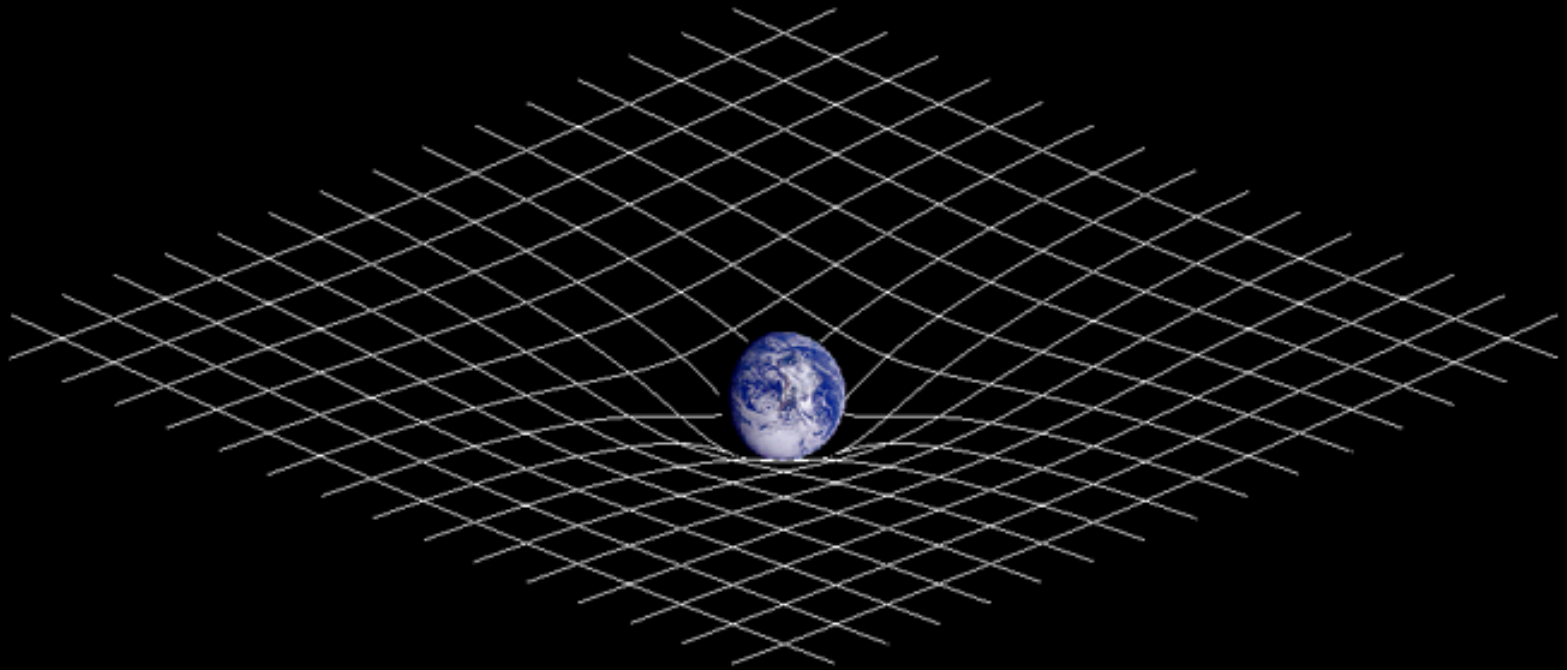
- 次の加速度系に移れば、(局所的には)必ずすべての物体の重力を消し去ることができる

$$x' = x - \frac{1}{2}gt^2 \Rightarrow m_I \frac{d^2 x'}{dt^2} = m_I \frac{d^2 x}{dt^2} - m_I g = m_G g - m_I g = 0$$

自由落下するエレベーター内は無重力  
静電気力の場合には絶対に不可能

# 座標系で消去しきれぬ重力は力か？

- 重力は、通常の意味の「力」ではない
- アインシュタイン： 重力は空間の歪みだ



非常に優れた、しかし実は騙されているとも言える図による説明



# アインシュタイン方程式:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

## ■ 「標語的」には **時空 = 物質**

- 左辺は時空の幾何学で決まる量だけからなる
- 右辺はその時空に存在する物質の性質を表す

## ■ これはそもそも**驚異的な発見**

- 物体の存在がどのように時空を歪めるかを数学(微分方程式)を用いて記述できる
- 多くの文系学問のように、仮説や解釈を述べているにとどまらない

# アインシュタイン方程式の解説

- 一般相対論および宇宙論の基礎方程式
- 物理学におけるもっとも美しい方程式(だと思う)
- 両辺にアインシュタインの思想と叡智が満ちている

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$R_{\mu\nu}$  : リッチテンソル (時空の曲がり具合を決める)

$R$  : スカラー曲率 (時空の曲がり具合を決める)

$g_{\mu\nu}$  : 計量テンソル (時空の性質を決める)

$T_{\mu\nu}$  : エネルギー運動量テンソル (物質の性質を決める)

$\Lambda$  : アインシュタインの宇宙定数 (実効的に万有斥力を及ぼす)

$G$  : ニュートンの万有引力定数、 $c$  : 光速

$\mu$ と $\nu$ は0,1,2,3のどれかの値をとる添え字(2つの下添え字を持つ量はテンソルとよばれ、4行4列の行列であらわすことができる)

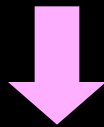
# 一般相対論の根底にある指導原理

## ■ 一般相対性原理

- どんな座標系でも物理法則は同じ方程式（物理法則の共変性）
- そもそも座標系とは、便宜上導入した2次的なものに過ぎず本来は不要

## ■ 等価原理

- 重力と加速度は局所的には区別できない



## ■ 物理学の幾何学化

- 曲がった空間の中で物質の自由な運動＝重力

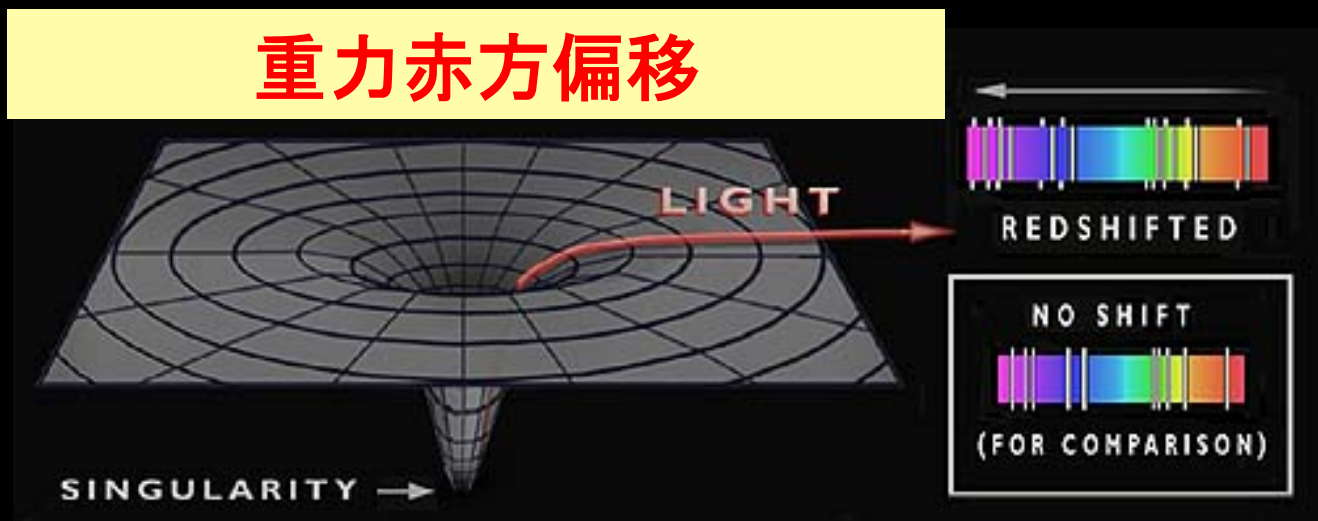
# 一般相対論の心：法則の法則

- ミクロの世界を記述する量子力学とならんで、現代物理学におけるもっとも重要な枠組み
  - 単にある現象を説明するモデルといった程度のレベルではなく
    - 自然法則とは何か
    - それを記述する表現方法とは何か
    - 時間とは何か、空間とは何か
    - 重力とは何か
    - 対称性・保存則とは何か
- など自然界に対する認識を改めさせてくれる

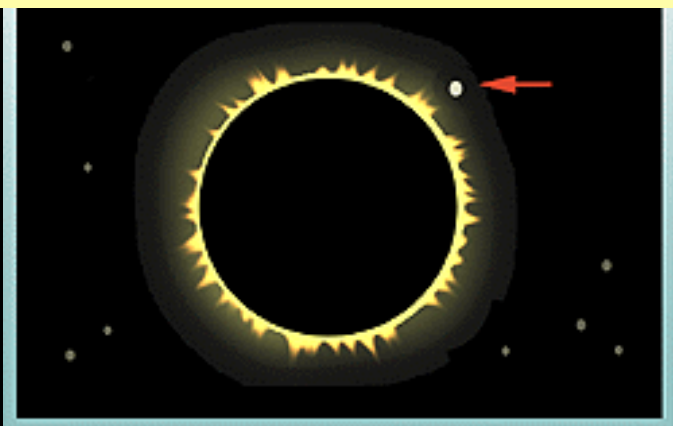
# 一般相対論の観測的検証



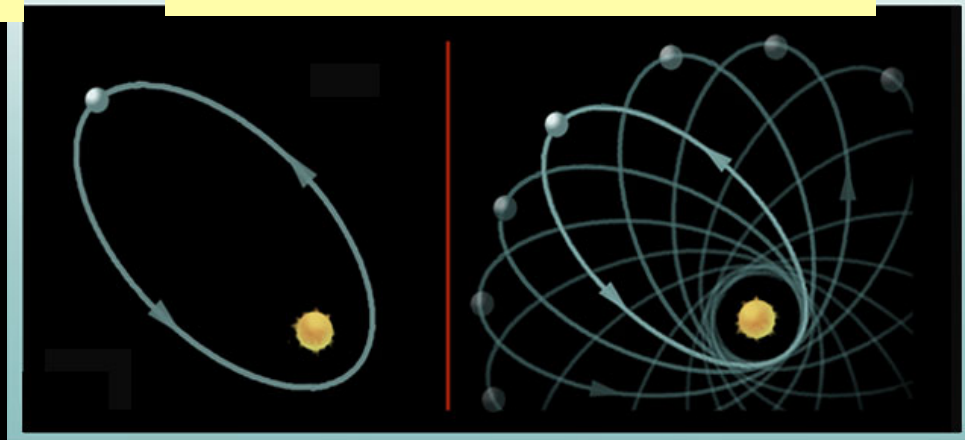
## 重力赤方偏移



## 太陽の周りの光線の湾曲



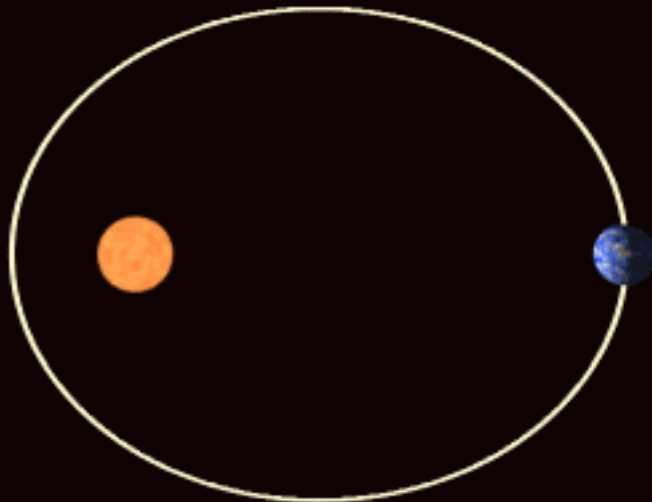
## 水星の近日点移動



# 水星の近日点移動

# ニュートン力学と水星の近日点移動

- ニュートン力学(ニュートンの運動方程式+ニュートンの重力の逆二乗則)の予言力
- 太陽の周りの水星の楕円軌道公転運動
  - 他の惑星がなければこの楕円は変化しない
  - ただし、他の惑星の重力のために、この楕円の軸が100年間に531秒角だけずれる(水星の近日点移動)
  - 観測値は574秒角、すなわち100年に43秒角だけの差



- 水星は $100\text{年} \div 88\text{日} \doteq 400$ 回以上公転
- つまり、一公転あたりわずか0.1秒角のズレしかない
- ニュートン力学および天文観測の驚異的な精度と信頼性

# 一般相対論と水星の近日点移動

- 何と一般相対論は、この水星の近日点移動が、ニュートン力学の予言に比べて43秒角だけずれることを示した
  - 観測の誤差0.5秒角の精度で一致
  - アインシュタインの時代には観測値は $45 \pm 5$ 秒角
  - このずれを説明する「ため」の理論などではない
  - 意外性・統一性・定量性が物理学の理論の「正しさ」を示す
- 単なる解釈や価値観、偶然とは明らかに異なる
  - ただしその元となったニュートン力学も同等にすごい
  - 「ニュートン力学は間違い」といった表現はあまりに皮相的
  - 世界は法則にしたがっていることが実感できる(物理教)



# エディントンと光の湾曲

# 一般相対論：アインシュタイン方程式 時空の曲がり＝物質による重力場

THE EINSTEIN FIELD EQUATION

$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

地球

月

太陽

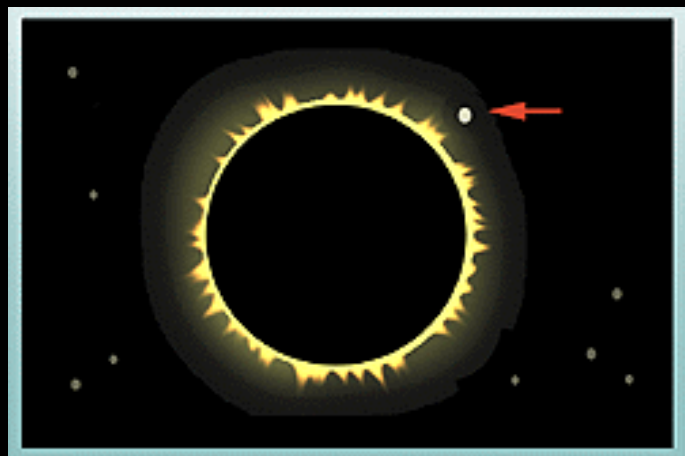


見かけ上の位置



実際の位置

1.75"

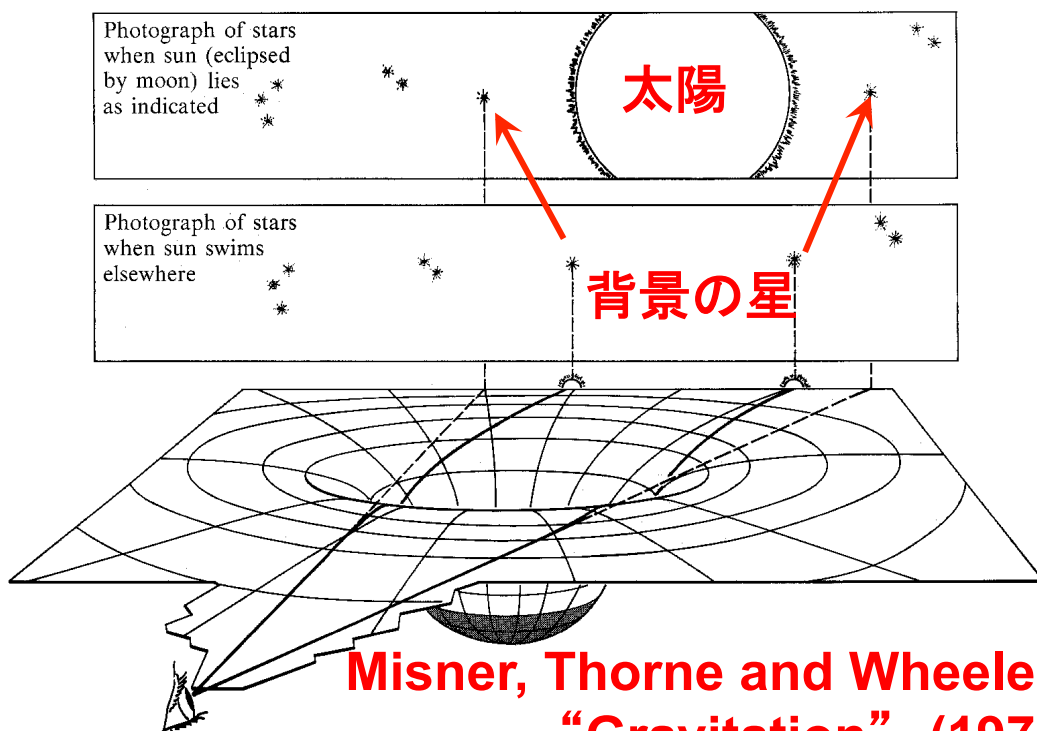


Photograph of stars when sun (eclipsed by moon) lies as indicated

太陽

Photograph of stars when sun swims elsewhere

背景の星



Misner, Thorne and Wheeler:  
"Gravitation" (1972)

# アーサー・エディントン

- 1913年、30歳にしてイギリスで最高の権威であるケンブリッジ大学ブルーム天文学・実験哲学教授に就任
  - 理論天文学に関して多くの業績
  - チャンドラセカールの先生だが、彼をいじめたことでも有名
  - 当時敵国でもあり知られていなかったドイツの学者が発表した一般相対論に注目しその宣伝につとめた
  - 1917年に光線の湾曲の検証の重要性を強調
  - ダイソンが1919年5月29日の日食が最適であると提案
- 敬虔なクエーカー教徒として、兵役を拒否
  - ダイソンを始めケンブリッジ大学の科学者達は、エディントンが戦争で死ぬのは科学にとって偉大な損失だと訴える
  - もし戦争が1919年5月29日までに終結していた場合、日食観測隊を率いることを条件に兵役延期が認められた

# 日食観測による光線の湾曲の検証?

- 1919年11月の王立天文協会会合での発表
  - エディントン隊@西アフリカのプリンシペ島:  $1.61 \pm 0.41$ 秒
  - クロメリン隊@ブラジルのソブラル:  $1.98 \pm 0.16$ 秒
  - 相対論の予言1.74秒 (ニュートン理論はその半分の0.87秒を予言)
  - そもそもこの観測データの取扱とその誤差には多くの批判がある、、、

**It is not that the public want to know  
- they want not to know but to believe  
(P.Coles; arXiv:astro-ph/0102462)**



# いづれにせよアインシュタインは一躍有名に

## LIGHTS ALL ASKEW IN THE HEAVENS

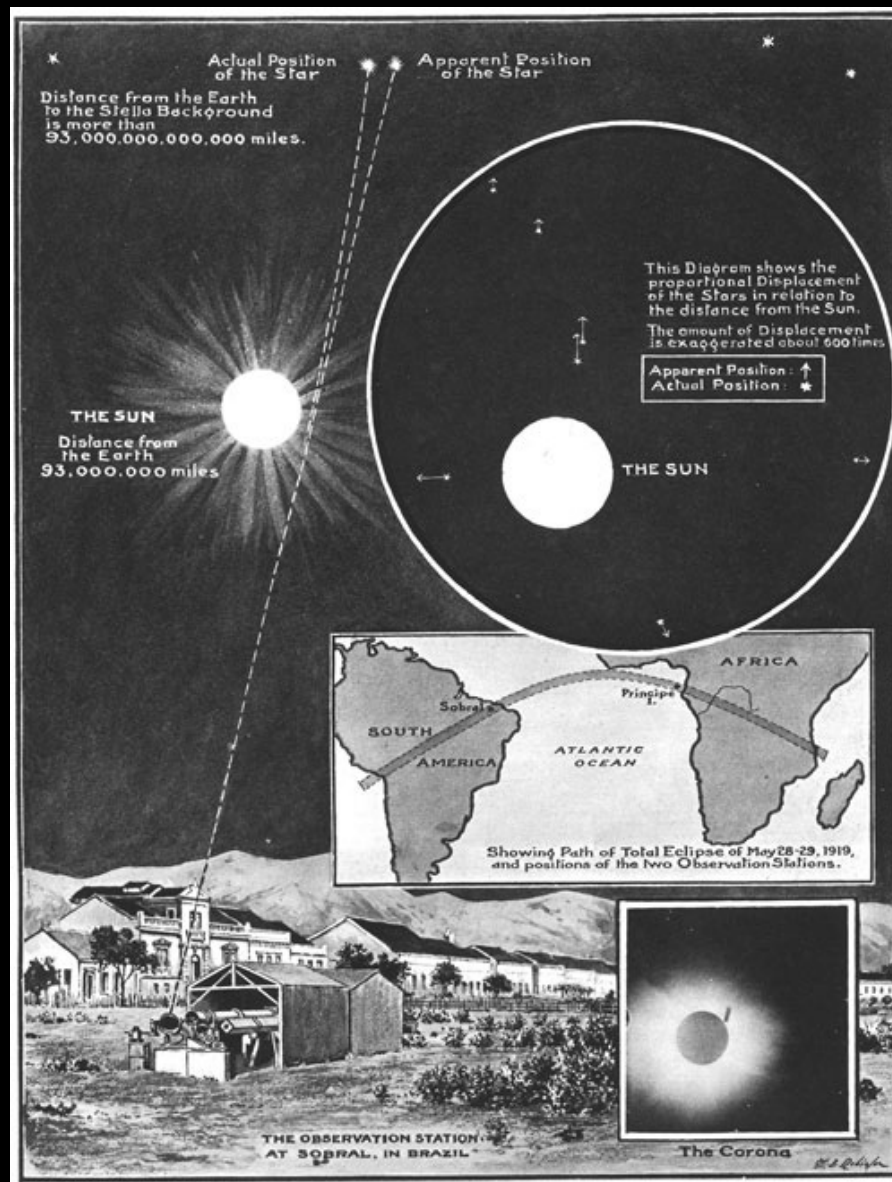
Men of Science More or Less  
Agog Over Results of Eclipse  
Observations.

### EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

Stars Not Where They Seemed  
or Were Calculated to be,  
but Nobody Need Worry.

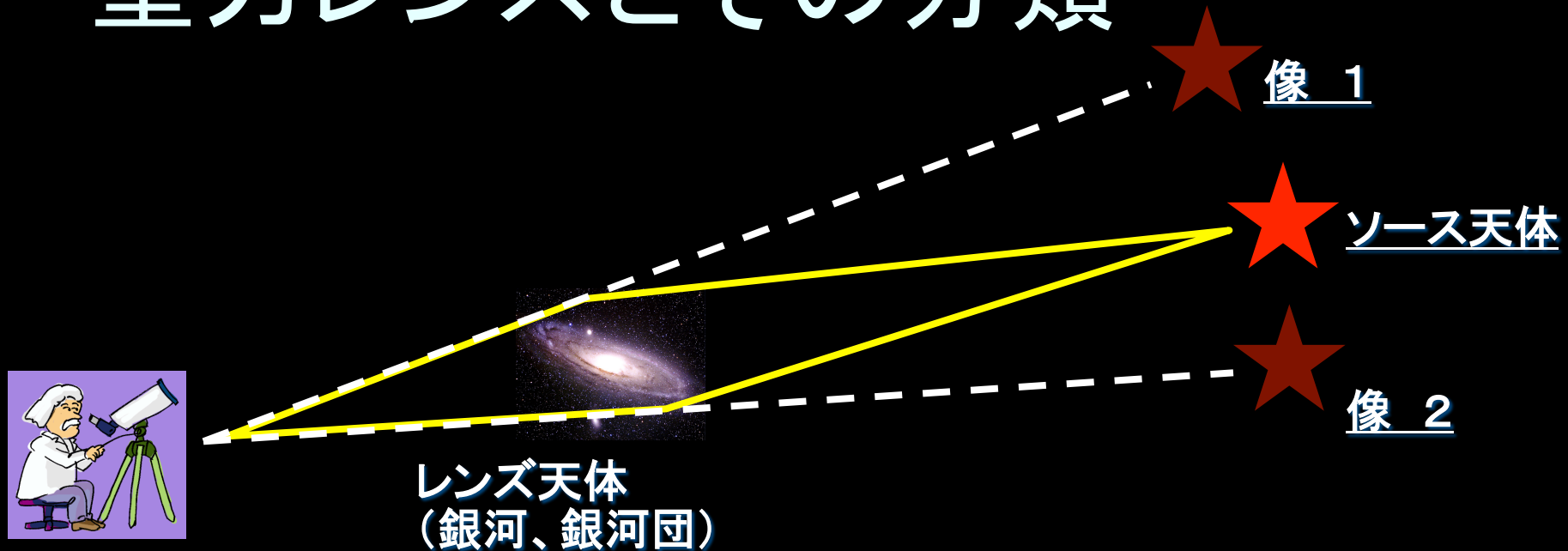
A BOOK FOR 12 WISE MEN

No More in All the World Could  
Comprehend It, Said Einstein When  
His Daring Publishers Accepted It.



# マンドルと重カレンズ

# 重力レンズとその分類



- 光の進路は重力場中では曲がる
  - 天体が多重像をつくる(強い重力レンズ)
  - 天体の形状が変形を受ける(弱い重力レンズ)
  - 天体の見かけの明るさが増光する(マイクロレンズ)

# アインシュタインによる 歴史的な重力レンズ論文

A. Einstein, Science (1936)  
vol. 84, pp. 506-507

## LENS-LIKE ACTION OF A STAR BY THE DEVIATION OF LIGHT IN THE GRAVITATIONAL FIELD

SOME time ago, R. W. Mandl paid me a visit and asked me to publish the results of a little calculation, which I had made at his request. This note complies with his wish.

$$q = \frac{l}{x} \cdot \frac{1 + \frac{x^2}{2l^2}}{\sqrt{1 + \frac{x^2}{4l^2}}},$$

$$l = \sqrt{\alpha_0 D R_0}.$$

### 質点重力レンズによる遠方天体の増光率

$x$ : 遠方天体と質点との天球上での距離( $R_s$ )

$l$ : アインシュタイン半径( $R_E = (4GMD)^{1/2}$ )

$\alpha_0$ : 質点による光線の曲がり角( $4GM/R_0$ )

$D$ : 質点と観測者の距離

$R_0$ : インパクトパラメータ



# マンドル氏をめぐるエピソード

- チェコ出身のアマチュア科学者
  - 重力レンズのアイデアを、コンプトンやミリカンを始めとする大科学者に説明するも、あまり真剣に取り合ってもらえない
- 1936年に、ワシントンの米国アカデミーの広報部のような部署を直接訪ねて助言をもらう
  - なぜか、プリンストンにいるアインシュタインに直接意見を聞くように勧められ旅費のサポートまで受ける
- 1936年4月17日、プリンストンのアインシュタインを訪問
  - アインシュタインは極めて丁寧に議論につき合う
  - Mandl氏は非常に感激。自ら論文にまとめるも結局出版できないまま。一方、アインシュタインに出版を勧め、アインシュタインが渋々書いたのが前出の論文

# マンドル氏のアイディア

- 天体の重力は、背後の別の天体からの光を曲げかつ収束させるレンズとして働く

- 完全に正しい

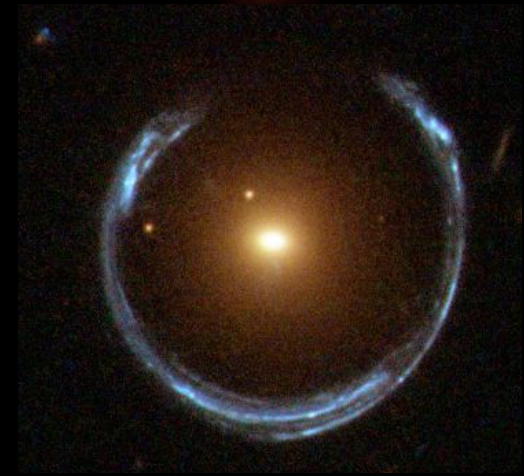
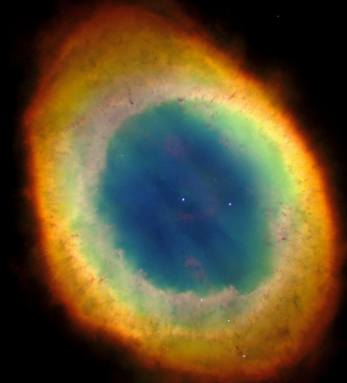
- リング状星雲こそ、重力レンズを受けた遠方天体の像の例であり、重力レンズ現象はすでに観測されている

- この解釈は全くの間違いだ、遠方銀河の重力レンズ像としてのいわゆるアインシュタインリングは今や数多く観測されている

- 遠方天体からの光が一時的に重力レンズ効果で増光した結果、地球上の生物の大量絶滅(例えば恐竜絶滅)を引き起こし、その後のダーウィン進化をもたらした

- 極めて独創的だが、残念ながらトンデモ。。。
- ただし、一時的な天体の増光は系外惑星発見の基本原理としてとても重要

こと座のリング星雲  
(中心の白色矮星からの紫外線に照らされてで光るガス雲)



SDSS J1148+1930  
z=2.379 (背景銀河)  
z=0.446 (レンズ銀河)

# アインシュタインの本音

Therefore, there is no great chance of observing this phenomenon, even if dazzling by the light of the much nearer star *B* is disregarded.

A.Einstein, Science (1936) vol.84, pp.506-507


## ■ Scienceの編集者にあてた手紙

- Let me also thank you for your cooperation with the little publication, which Mr.Mandl squeezed out of me. It is of little value, but it makes the poor guy happy.

# 初めて発見された重力レンズ二重像

QSO 0957+561 A, B@ $z=1.41$  (87億年前)

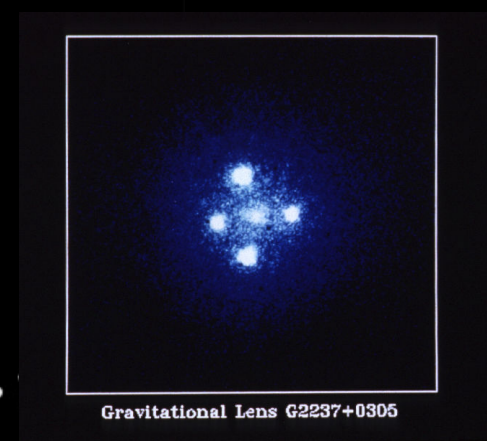
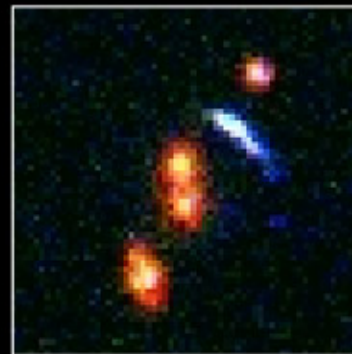
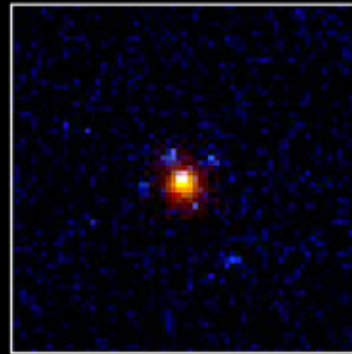
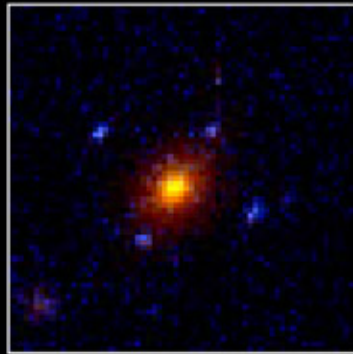
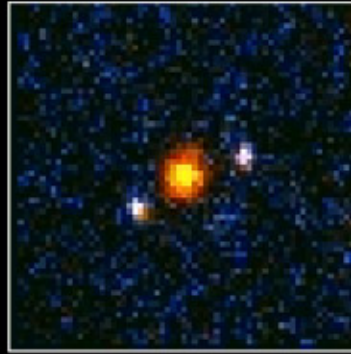
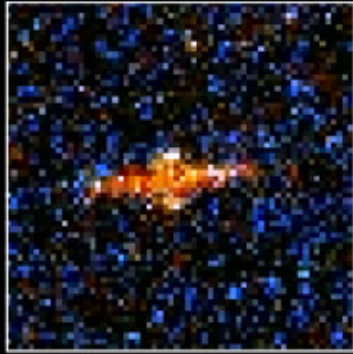
A  
B



レンズ銀河@ $z=0.353$  (37億年前)

Walsh, Carswell and Weymann (1979)

# 強い重力レンズの観測例 (HST)



Gallery of Gravitational Lenses

PRC99-18 • STScI OPO • K. Ratnatunga (Carnegie Mellon University) and NASA

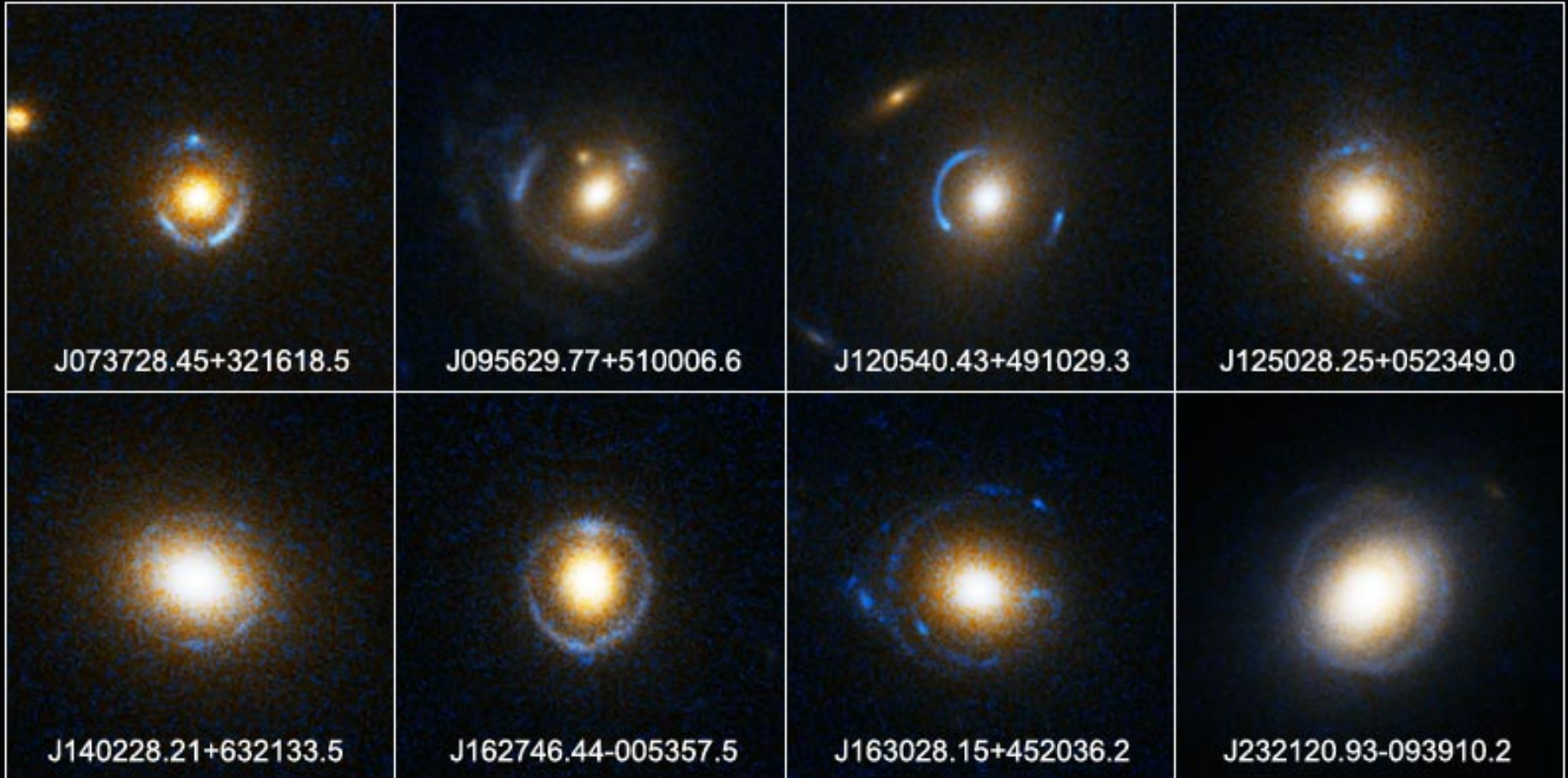
HST •

Gravitational Lens G2237+0305

# アインシュタインリング (HST)

Einstein Ring Gravitational Lenses

Hubble Space Telescope ■ ACS



# 重カレンズで「見る」ダークマター



98億光年先にある  
クエーサー(中心に  
ブラックホール)

62億光年先にある銀河団のダーク  
マターによる重力が、クエーサーから  
の光を曲げる

5つの異なる  
クエーサー像  
が見える



重力レンズ天体  
SDSS J1004+4112 :  
一般相対論的蜃気楼





# ハッブル宇宙望遠鏡で観測した 重カレンズ SDSS J1004+4112

稲田直久、大栗真宗  
が2003年に発見

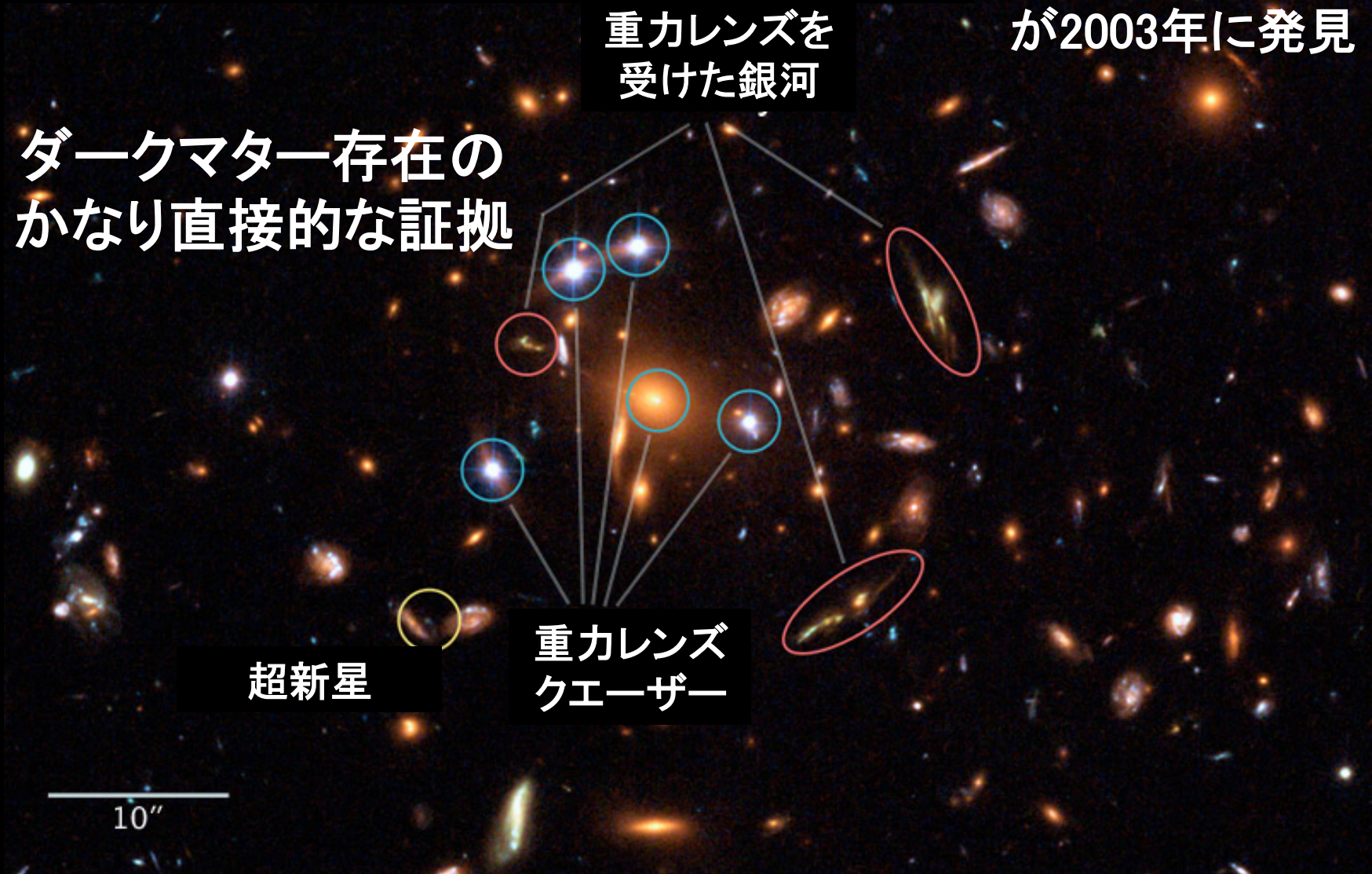
ダークマター存在の  
かなり直接的な証拠

重カレンズを  
受けた銀河

重カレンズ  
クエーザー

超新星

10''



# 宇宙の蜃気楼

いくら直接見えていようとそれが真実とは限らない

私もかつて月が4つに見えたことがある、、、

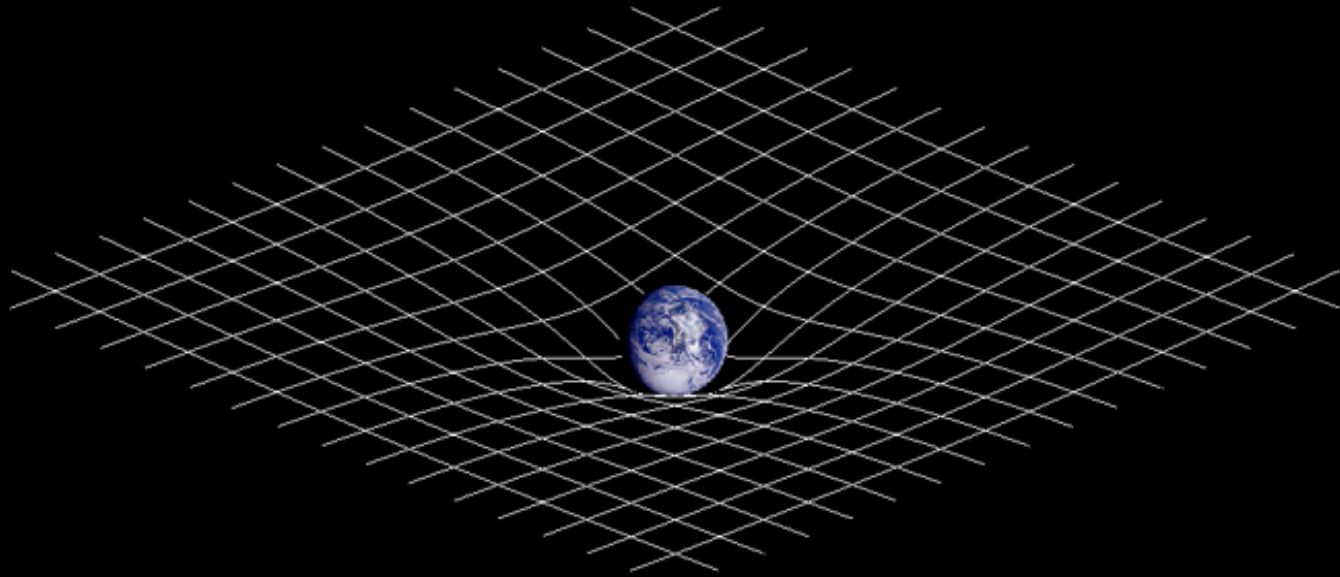
~~重力波はいつ検出されるか~~

ついに重力波が直接検出された



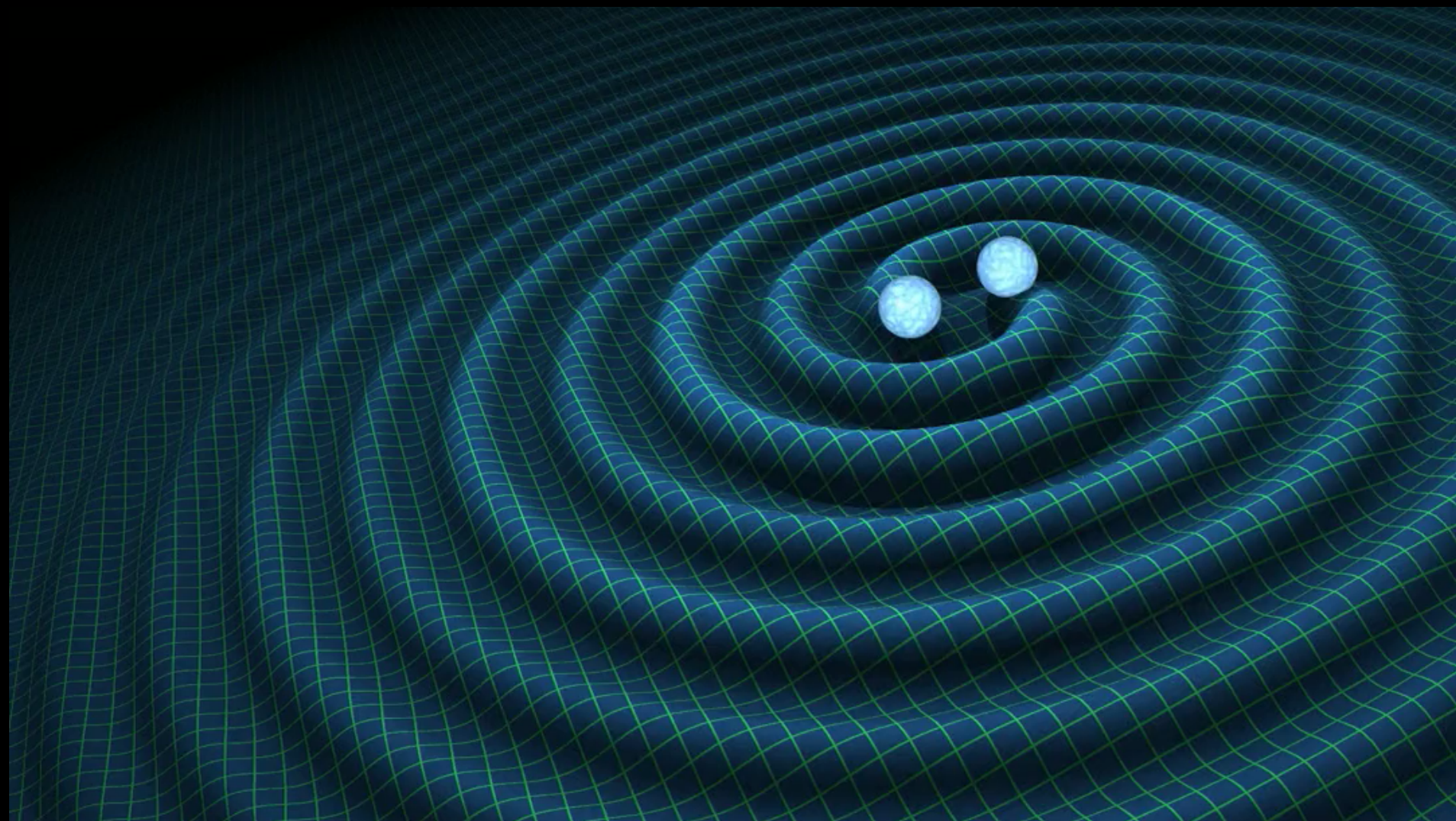
# 重力波：時空の歪みは波として伝わる

- 物体が静止している時には、それによって生まれる空間の歪みもまた変化しない



- しかし、物体が運動していると、歪みのパターンが時間変化する → 波が発生する

# 連星中性子星合体時の重力波

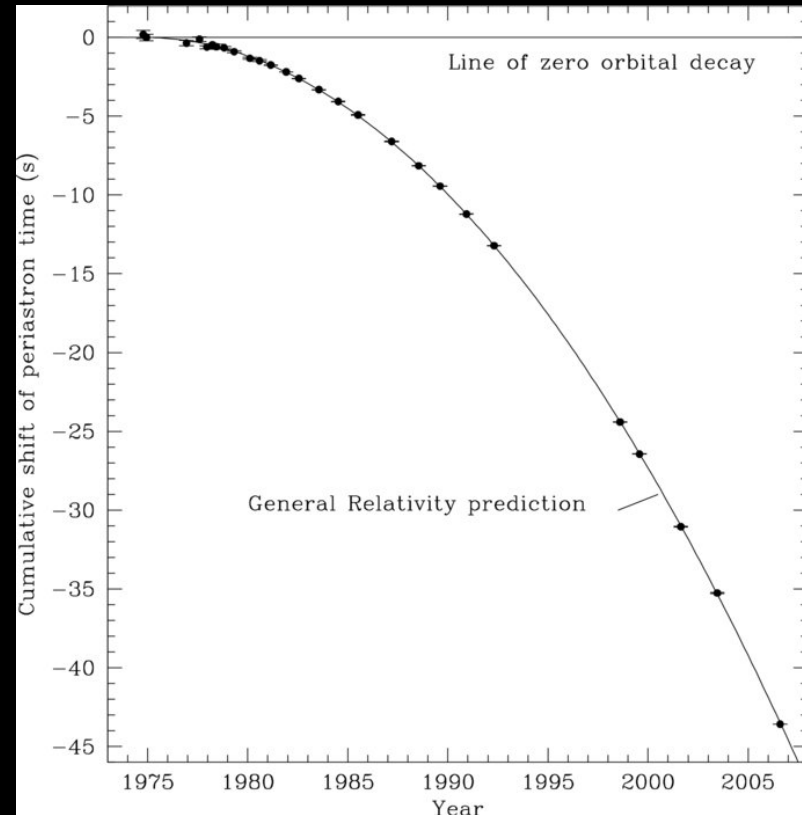


# 重力波のまとめ

- **一般相対論が予言する時空のさざ波**
  - 弾性波：物体を叩くと振動する
  - 音波：空気中の圧力と密度の変化の伝播
  - 電磁波：電荷の加速度運動
  - **重力波：質量の加速度運動**
    - 空間の歪みが光速で伝わる
    - 波の大きさが極めて小さく、検出は困難
    - **太陽と地球の間の距離が、原子一個の大きさだけ変化  
する程度！**
    - 精密計測、実験物理学の最先端技術が必須

# 重力波の間接的検出

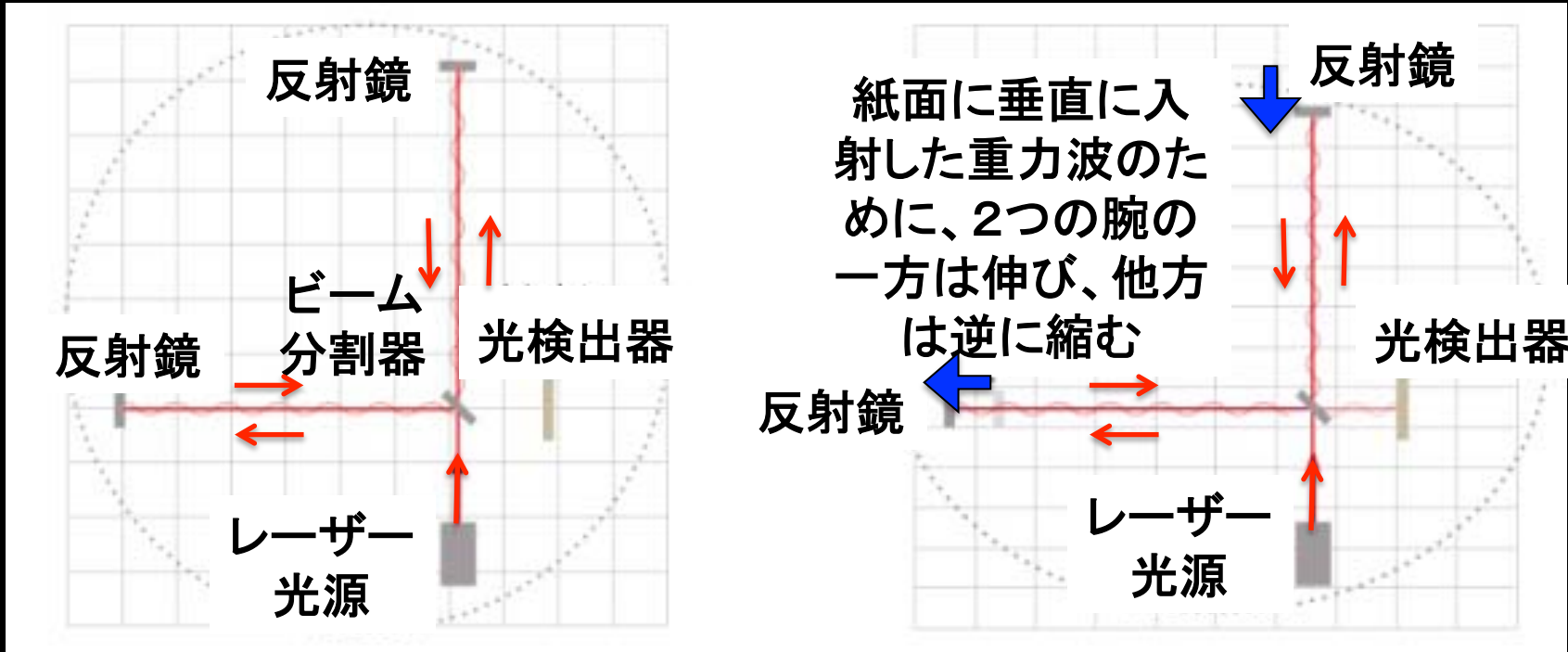
- 連星系をなす中性子星(半径わずか10kmの太陽質量天体:星自体が巨大な原子核)の公転周期Pが重力波放射によるエネルギー損失によって減少
  - 一般相対論の予言: $\Delta P/\Delta t = -2.402531 \pm 0.0014 \times 10^{-12} \text{s/s}$
  - (理論値)/(1975年から2005年の観測結果) $= 0.997 \pm 0.002$
  - 1993年ノーベル物理学賞(ハルスとテイラー)



Weisberg, Nice & Taylor:  
ApJ 722(2010)1030



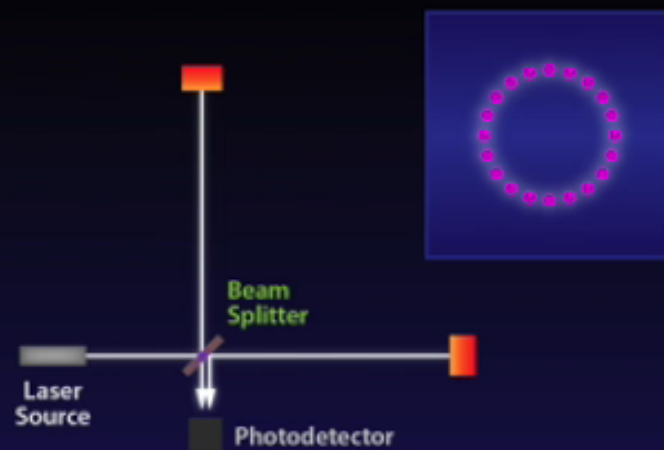
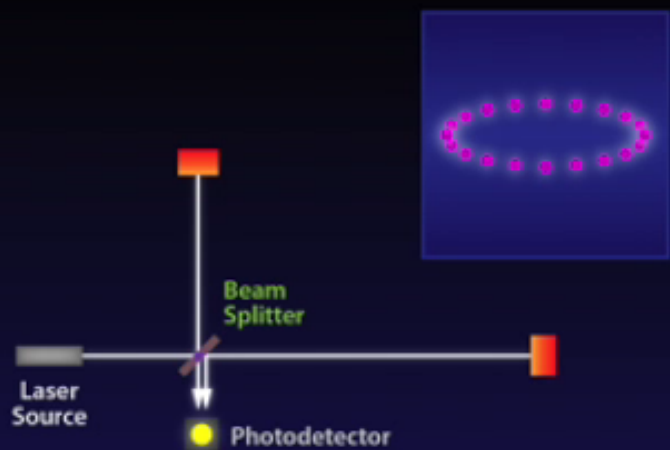
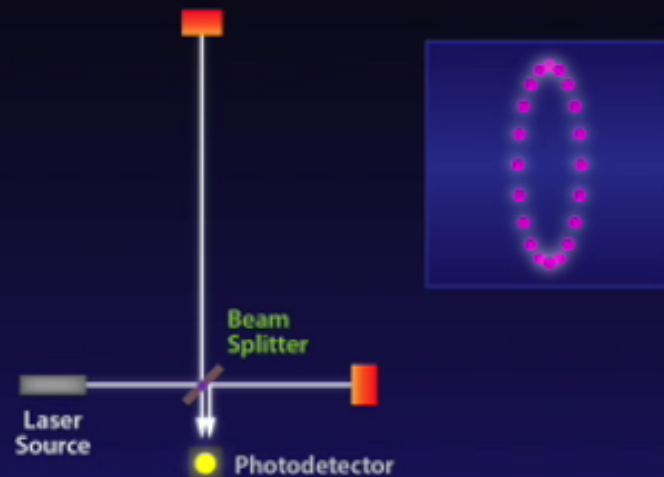
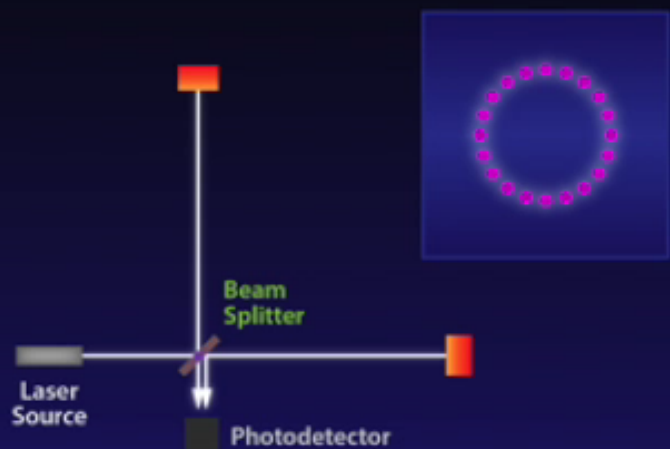
# レーザー干渉計による 空間の歪み(=重力波)検出原理



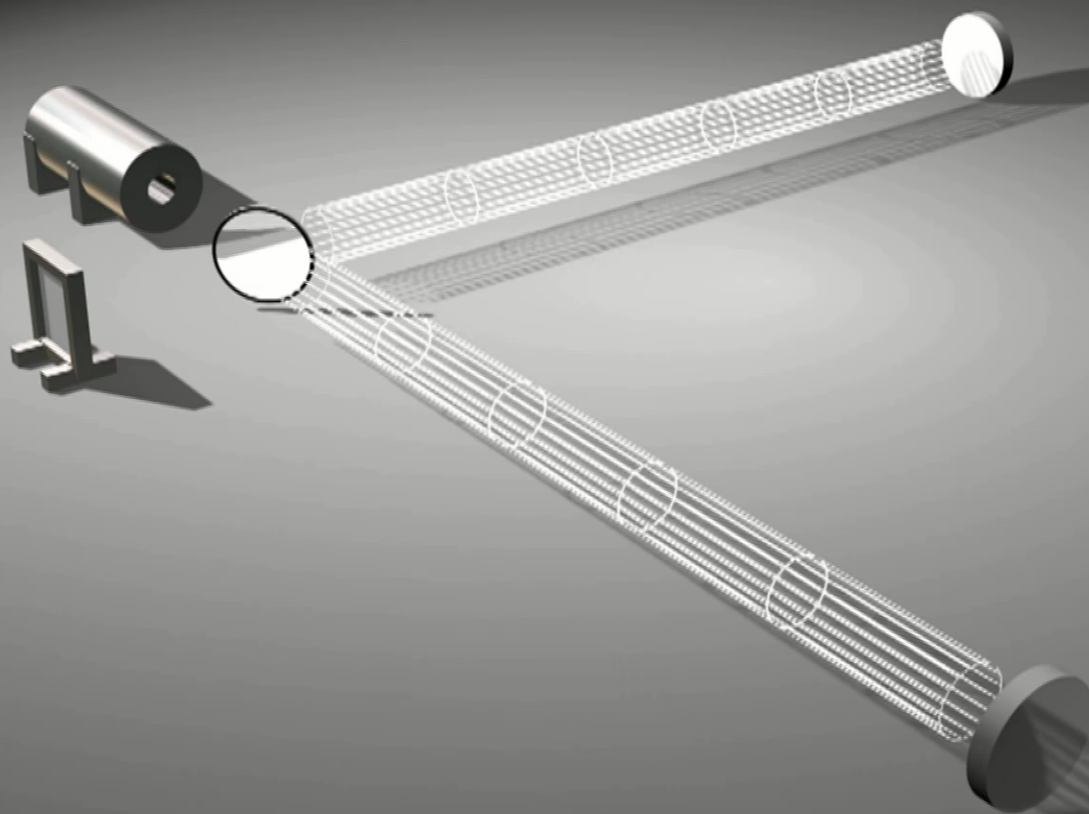
反射して戻って来た2つの  
光が互いに打ち消して、光  
検出器には届かないように  
調整しておく

腕の長さが変化したために、  
反射して戻って来た2つの  
光はもはや打ち消されず  
光検出器に届く

# レーザー干渉計重力波検出器の原理



# レーザー干渉計重力波検出器

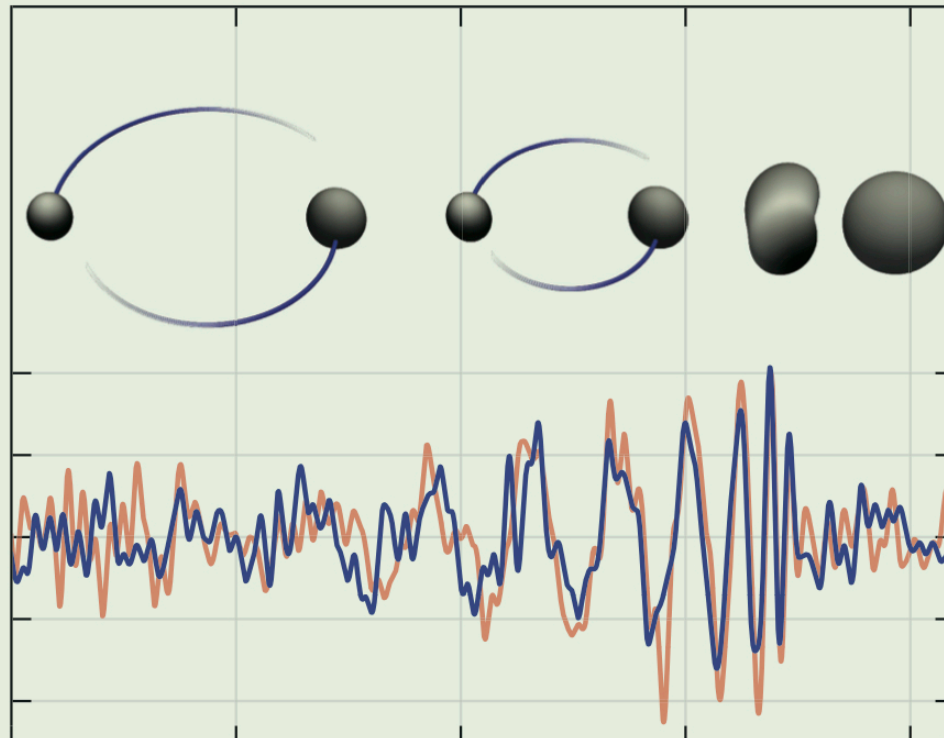


# PHYSICAL REVIEW LETTERS™

Member Subscription Copy  
Library or Other Institutional Use Prohibited Until 2017

Articles published week ending

12 FEBRUARY 2016





## Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

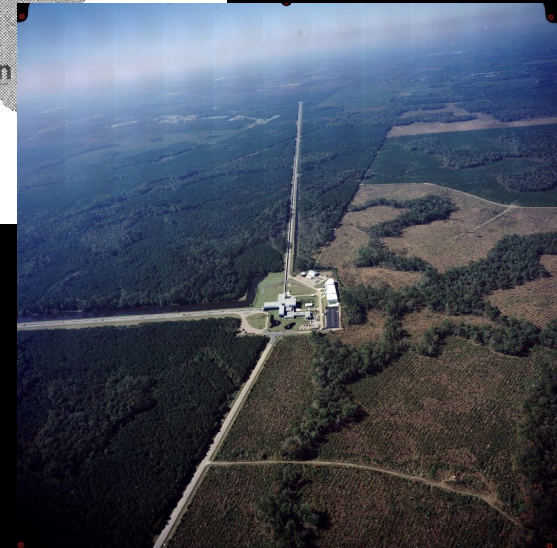
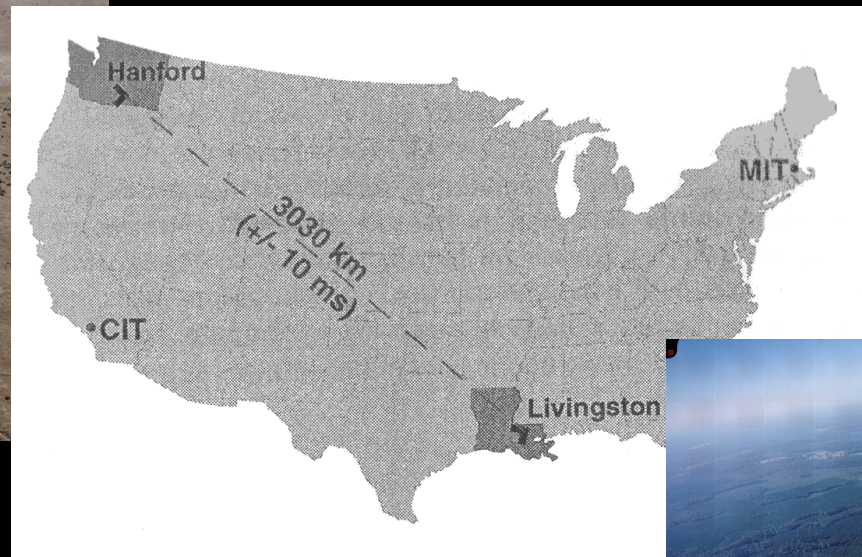
B. P. Abbott *et al.*\*

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

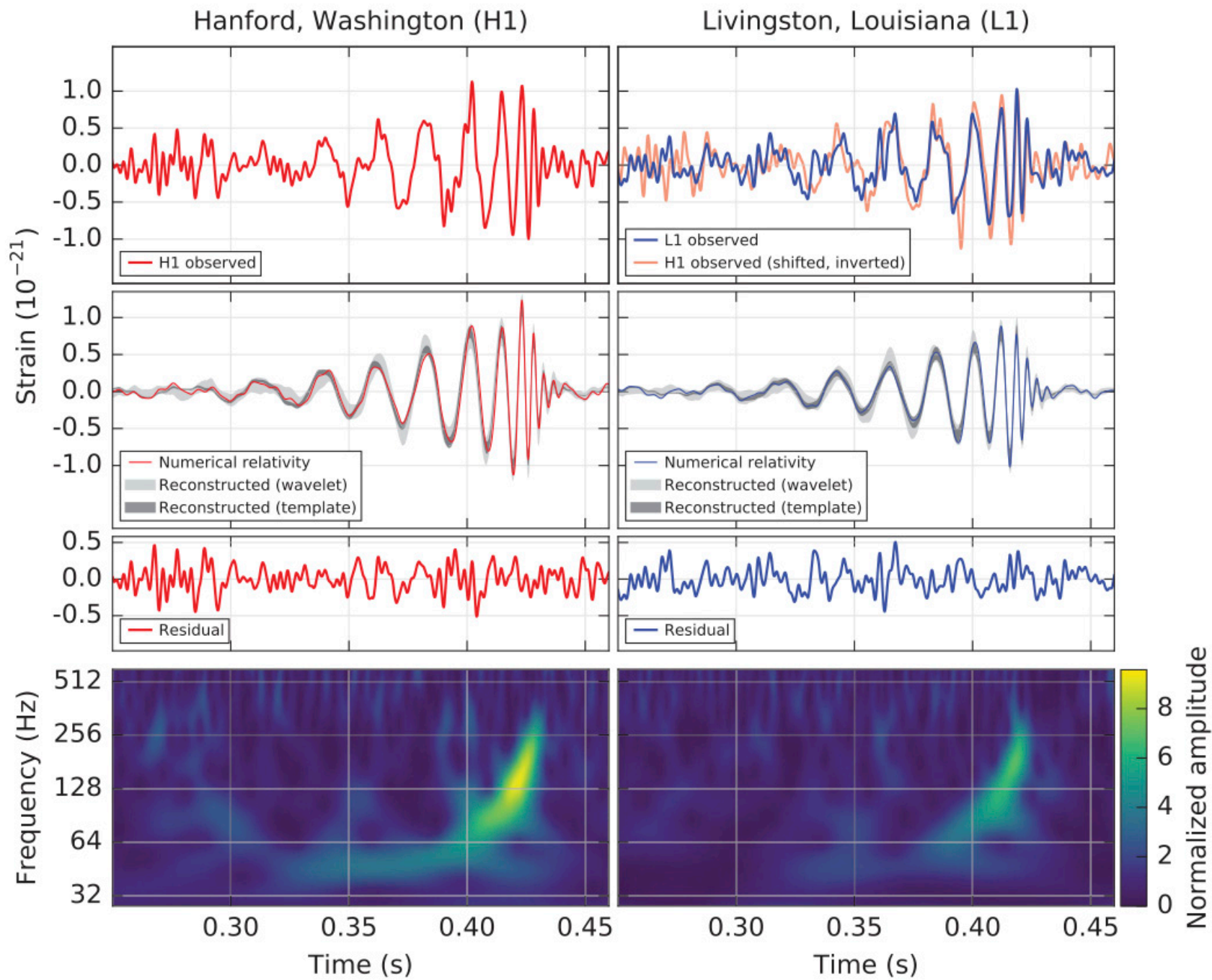
(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of  $1.0 \times 10^{-21}$ . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than  $5.1\sigma$ . The source lies at a luminosity distance of  $410_{-180}^{+160}$  Mpc corresponding to a redshift  $z = 0.09_{-0.04}^{+0.03}$ . In the source frame, the initial black hole masses are  $36_{-4}^{+5}M_{\odot}$  and  $29_{-4}^{+4}M_{\odot}$ , and the final black hole mass is  $62_{-4}^{+4}M_{\odot}$ , with  $3.0_{-0.5}^{+0.5}M_{\odot}c^2$  radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

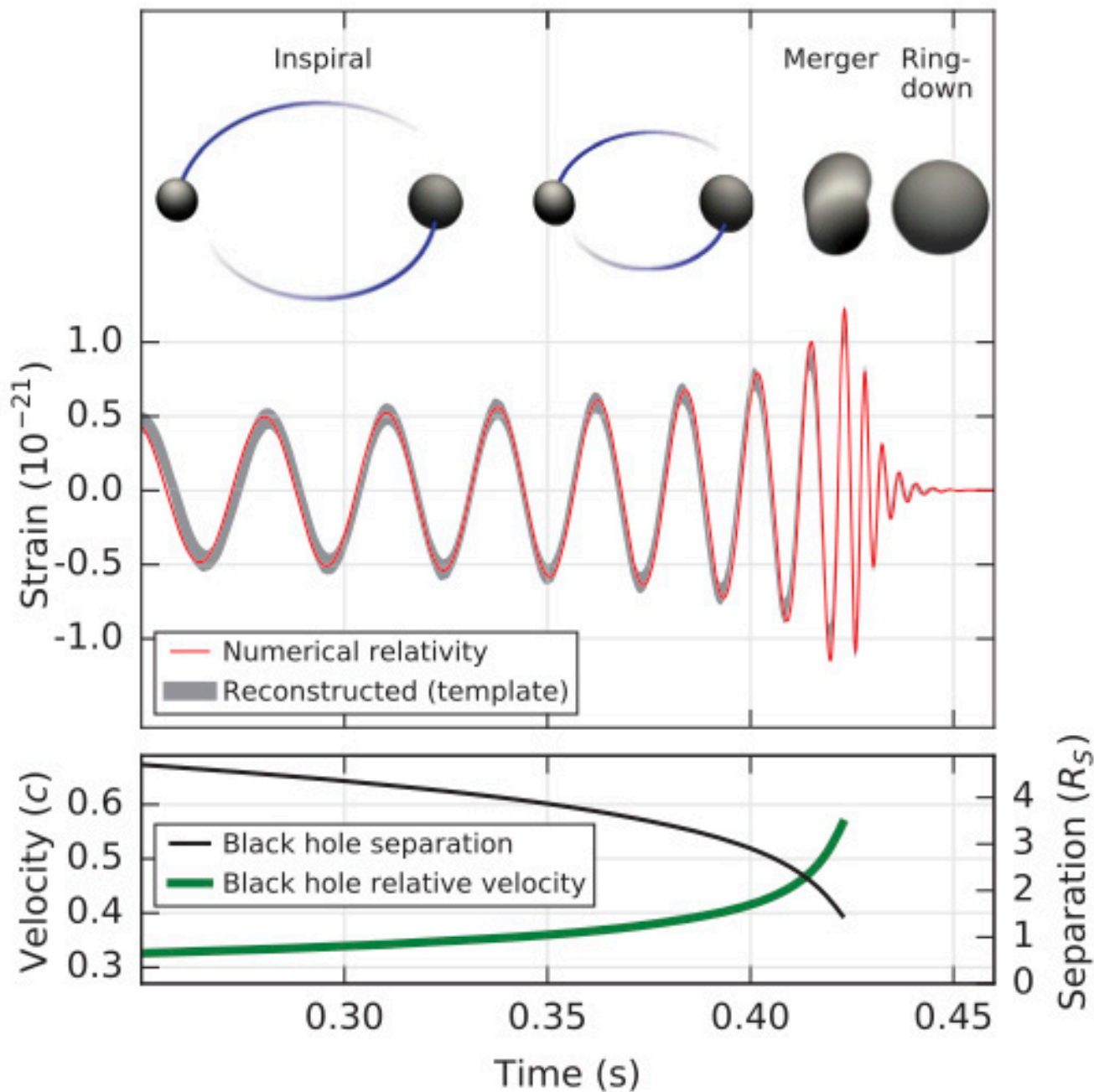
# 重力波の直接検出を目指して advanced LIGO(Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)



2015年9月14日 9時50分45秒 (協定世界時)

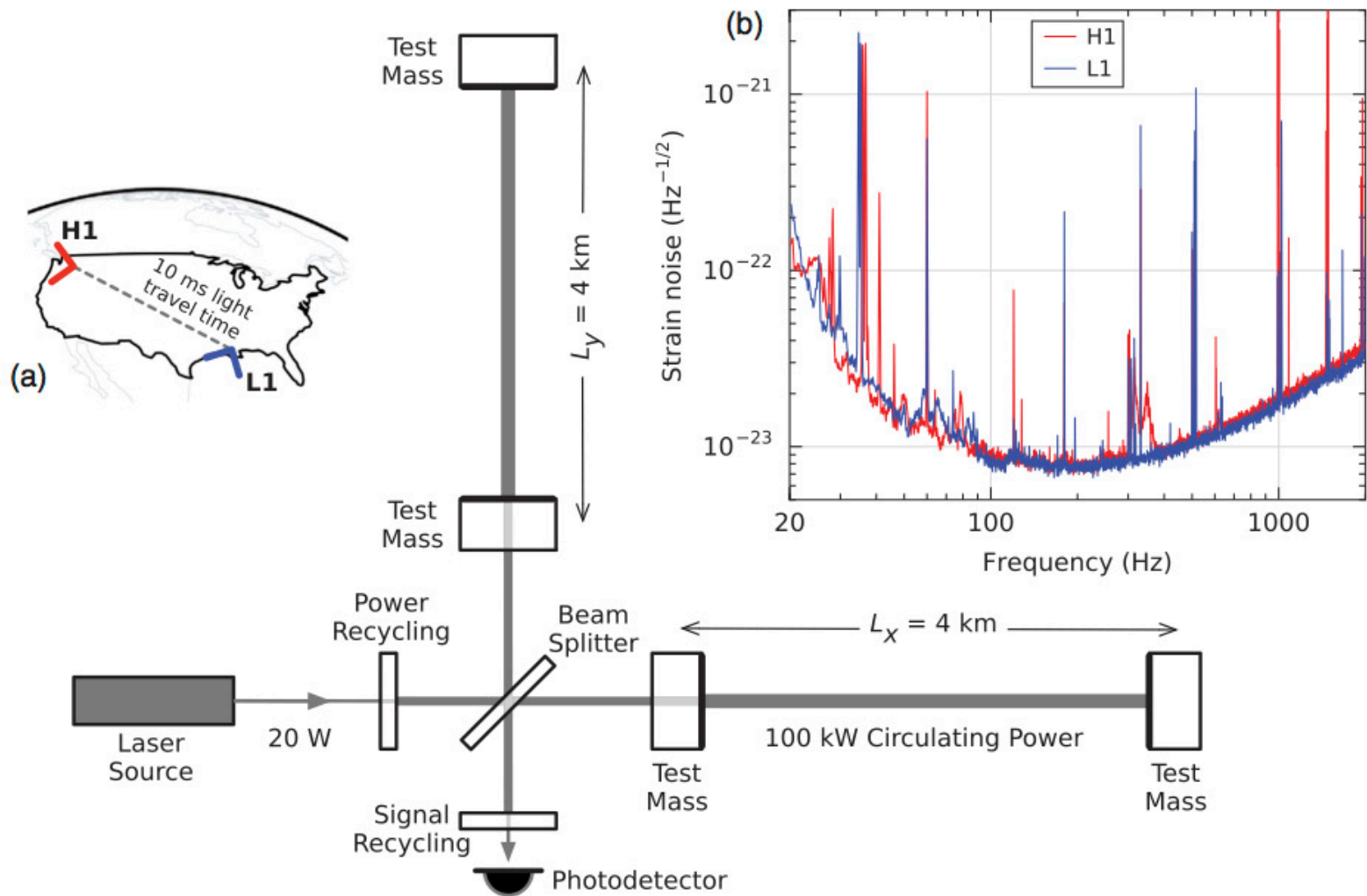


# ブラックホール連星系の合体

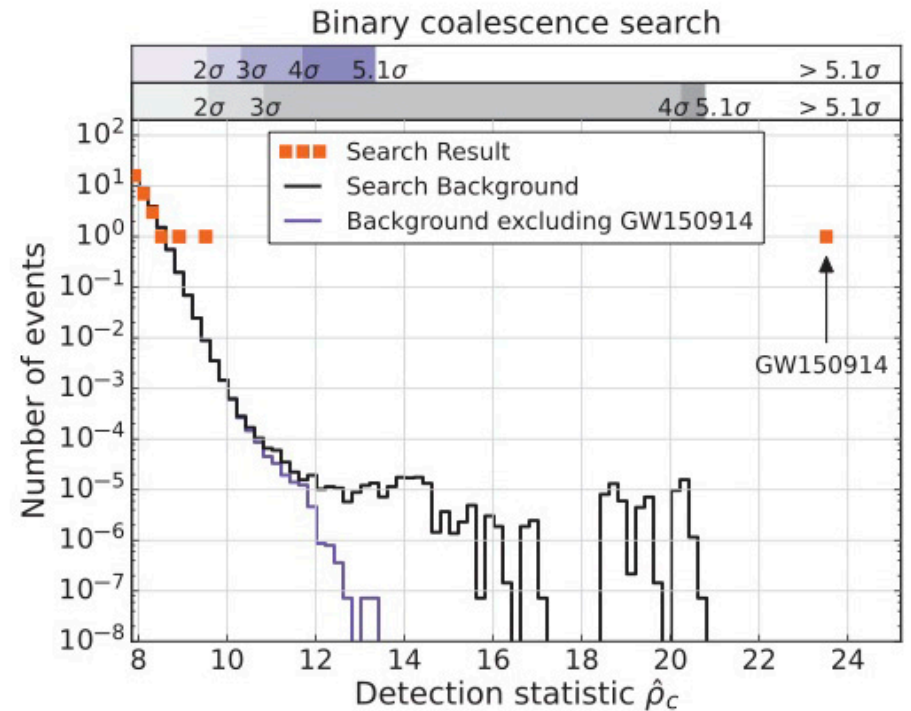
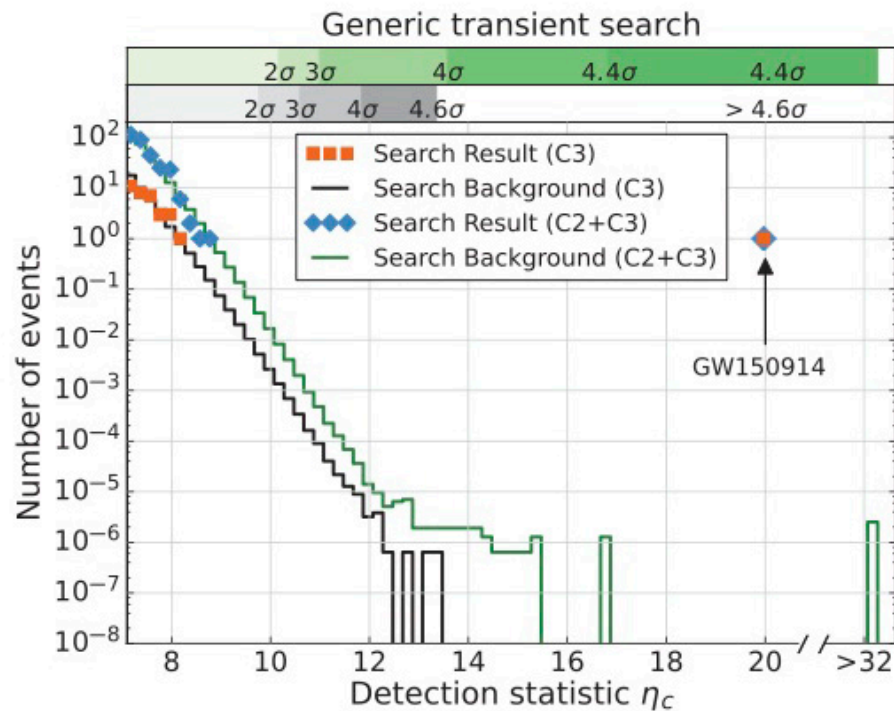




# LIGOの2つのレーザー干渉計



# 偶然起こる確率



# 得られた結果

TABLE I. Source parameters for GW150914. We report median values with 90% credible intervals that include statistical errors, and systematic errors from averaging the results of different waveform models. Masses are given in the source frame; to convert to the detector frame multiply by  $(1+z)$  [90]. The source redshift assumes standard cosmology [91].

Primary black hole mass	$36_{-4}^{+5} M_{\odot}$
Secondary black hole mass	$29_{-4}^{+4} M_{\odot}$
Final black hole mass	$62_{-4}^{+4} M_{\odot}$
Final black hole spin	$0.67_{-0.07}^{+0.05}$
Luminosity distance	$410_{-180}^{+160}$ Mpc
Source redshift $z$	$0.09_{-0.04}^{+0.03}$

まとめ

# 重力波天文学の幕開け

- 2015年9月14日、アメリカの重力波実験施設 LIGOが、重力波の直接検出に成功
  - アインシュタインが一般相対論を発表した2016年からちょうど100年目の大発見
  - 光(電磁波)以外で観測する新しい天文学が誕生
  - 光で見えない宇宙はどんな姿なのか？
- かつては不可能だった実験・観測も、科学・技術の飛躍的進展の結果、可能となる例は多い。のみならず、その後の新たな科学を開拓する手法として確立することもある。