

# 重力波で宇宙をさぐる

山元 一広

富山大学 理学部 物理学科

富山大学大学院理工学教育部 修士課程(理学領域)

現代物理学特論

2017年7月5日

# 目次

0. はじめに
1. 重力波
2. 天文学と重力波
3. 重力波の間接証拠
4. 重力波の直接検出
5. 重力波検出器の将来
6. まとめ

# 0.はじめに

## 自己紹介

山元 一広 (やまもと かずひろ)

富山大学理学部物理学科 (2017/3-)

東京大学宇宙線研究所 (-2017/2)

重力波検出器 (KAGRA) の開発

# 0.はじめに

## 自己紹介



山元 一広 (やまもと かずひろ)  
富山大学理学部物理学科 (2017/3-)

東京大学宇宙線研究所 (-2017/2)

所長: 梶田隆章 (2015年ノーベル物理学賞)

# 0.はじめに

**重力波**: 3つの分野 重力波や源の理論的研究、  
微弱な信号を抽出するデータ解析、  
検出器開発

最初のトピックつまり**重力波とはなにか、それからわかること**を話します。データ解析、検出器については話しません。

後期学部生対象の講義: 重力波天文学  
大橋正健、宮川治(東京大学宇宙線研究所)

物理教室セミナー

7/27に山元が検出器の話(自分の研究履歴に絡めて。

これも現代物理学特論！)

過去の物理教室セミナーしばしば重力波の話あり。これからも？

# 0.はじめに

このスライドは以下にuploadします。

<https://gwdoc.icrr.u-tokyo.ac.jp/cgi-bin/DocDB/ShowDocument?docid=6913>

# 1.重力波

## 特殊相対論 (1905)

特殊相対性原理:いかなる慣性系でも物理法則は同一

光速不変の原理:いかなる慣性系でも光速は一定

慣性系間の座標変換:ガリレオ変換でなくローレンツ変換

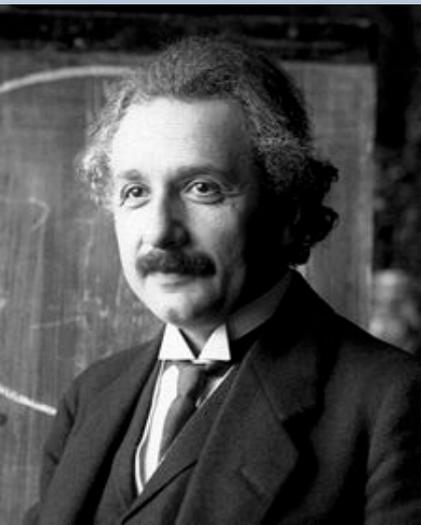
ユークリッド空間でなくミンコフスキー空間:固有時は慣性系によらない

時空の2点間の距離

$$ds^2 = (cdt)^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

時間

空間



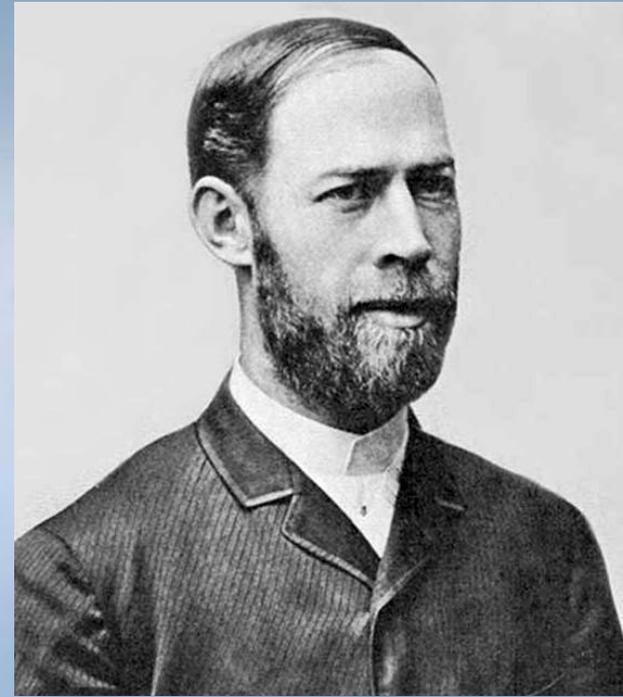
# 1.重力波

## 電磁波

マックスウェル方程式(1864):電磁場の基礎方程式  
電磁場が波動方程式を満たすことを示した(電磁波)。  
速度は物理定数で決まり、慣性系によらない。  
ヘルツの実験で検証された(1888)



マックスウェル  
(ウィキペディア 英語版)



ヘルツ  
(ウィキペディア 英語版)

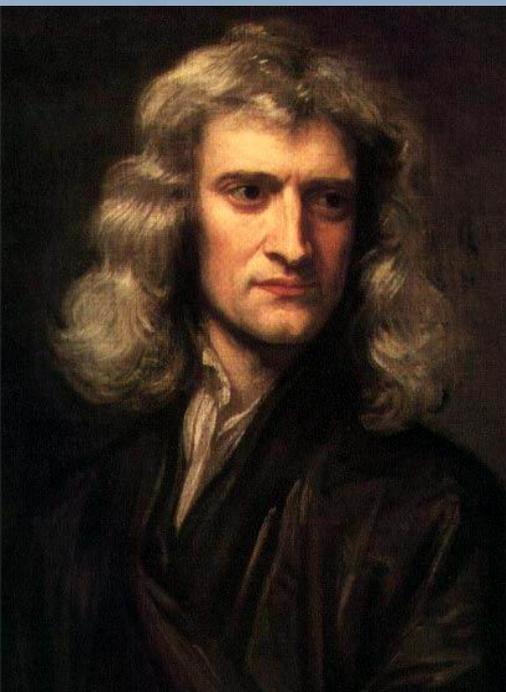
# 1.重力波

重力とは何か？

全てのものはお互いに引きつけあう

例えば地球と地球の上にあるもの  
手を放すと物は落ちる

ニュートンの法則



アイザック ニュートン (ウィキペディア 英語版)

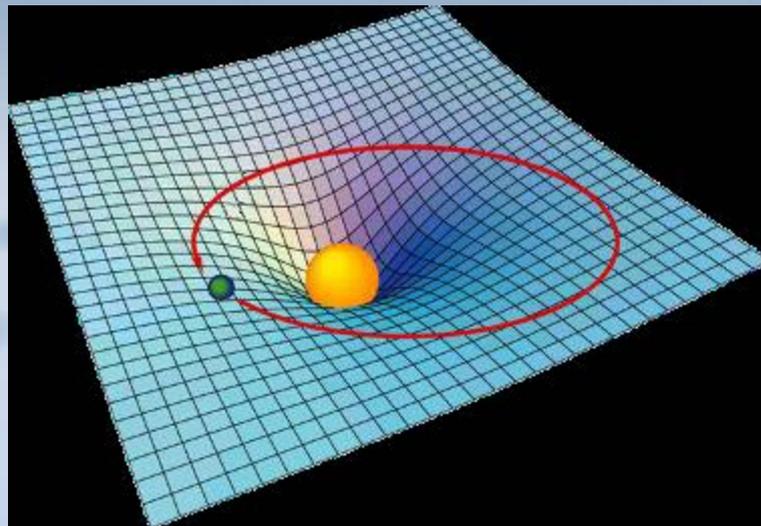
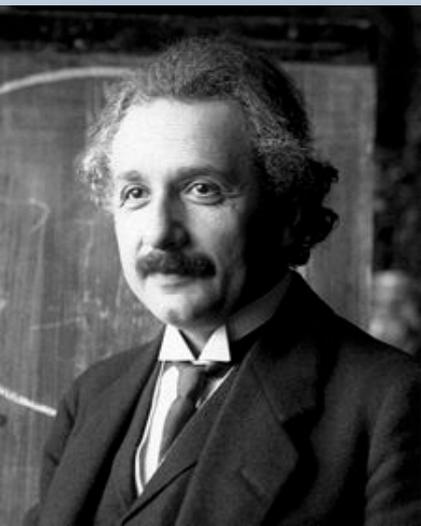
# 1.重力波

重力とは何か？

1915年 アルバート アインシュタイン：一般相対性理論

“**重力は時空**（時間と空間）の**曲がり**である。  
物体によって時空は曲がり、その中を進む  
物体の軌道が曲がる。”

安東正樹 重力波望遠鏡KAGRAで見る新しい宇宙の姿  
(東大物理学教室談話会 2013年5月31日)



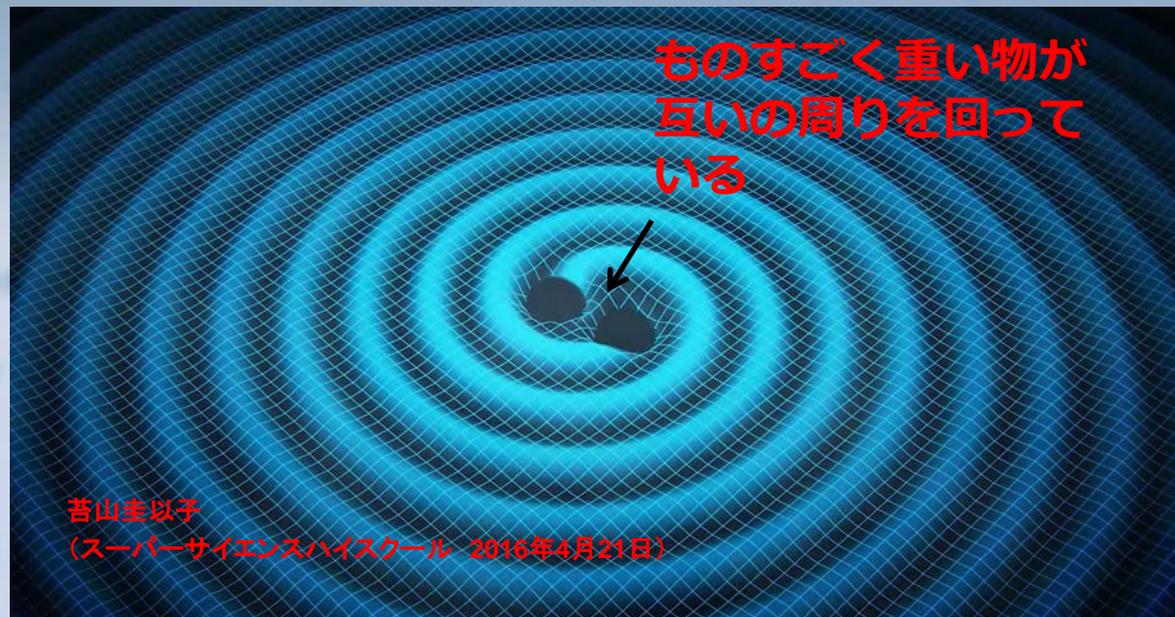
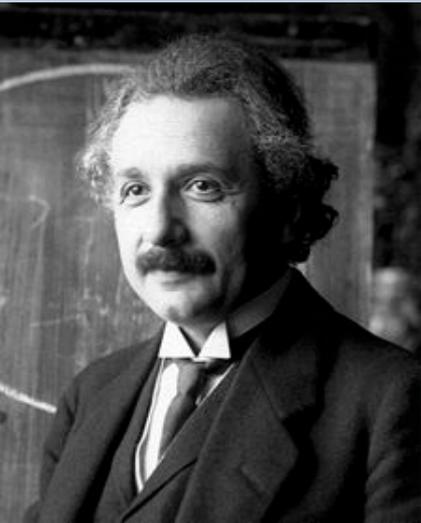
アルバート アインシュタイン (ウィキペディア 英語版)

# 1.重力波

重力波とは何か？

1916年 アルバート アインシュタイン：重力波

“重力(時空の曲がり)の源となる物体が  
激しい運動などをすると時空のさざなみ(重力波)  
が光と同じ速さで伝わっていく。”



アルバート アインシュタイン (ウィキペディア 英語版)

# 1.重力波

重力とは何か？

1915年 アルバート アインシュタイン：一般相対性理論

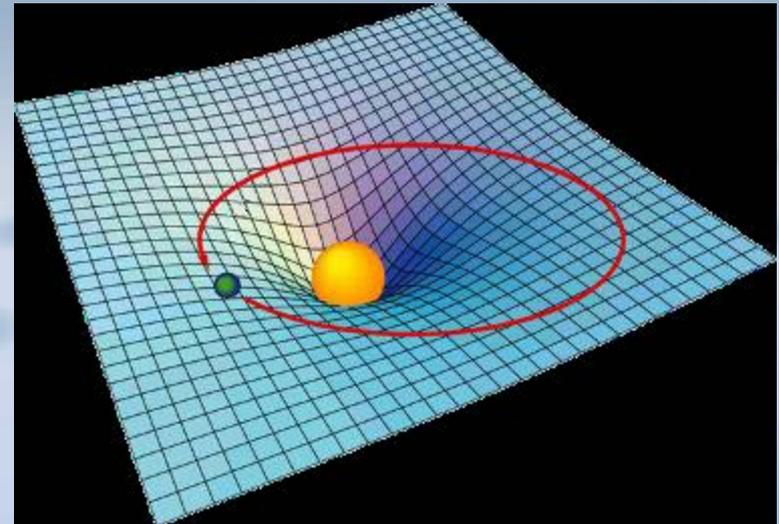
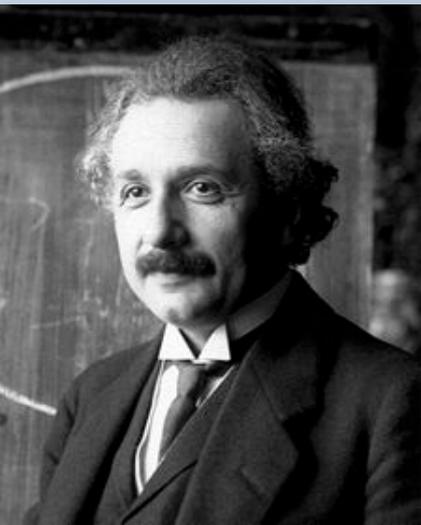
一般相対性原理：任意の系で物理法則は同一

**等価原理**：慣性質量と重力質量は同じ

→重力による加速度は質量によらない。

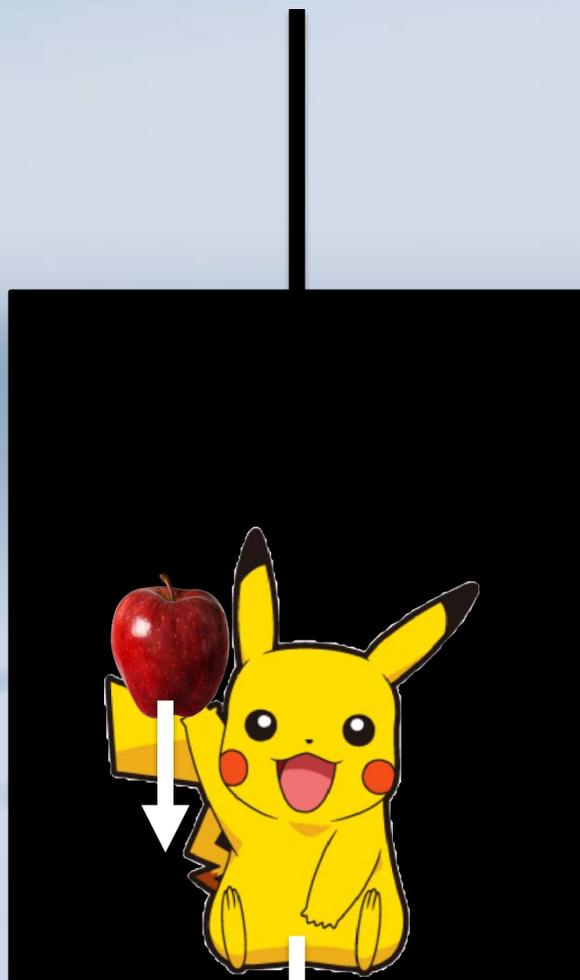
座標の取り方によって重力を消せる？

安東正樹 重力波望遠鏡KAGRAで見る新しい宇宙の姿  
(東大物理学教室談話会 2013年5月31日)

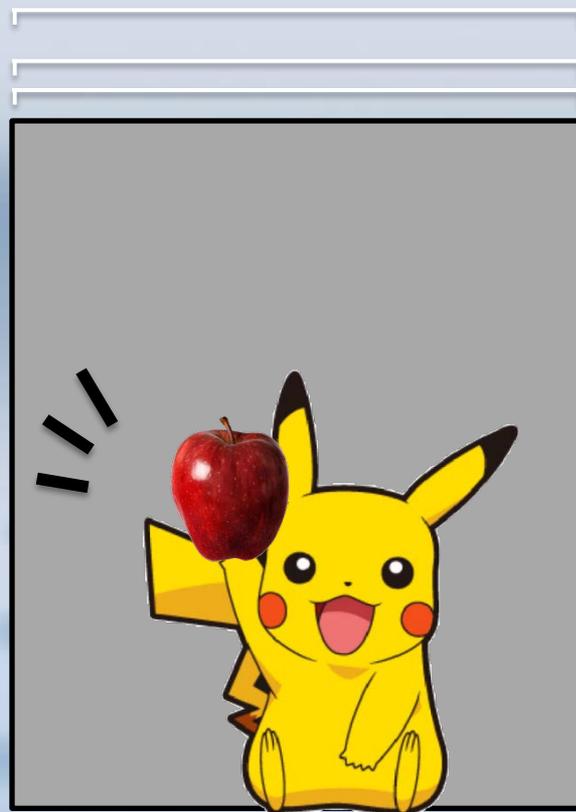
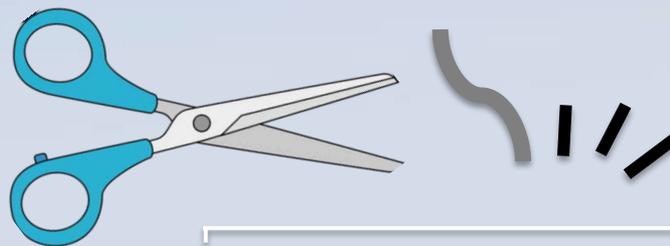


# 1.重力波

重力とは何か？



重力



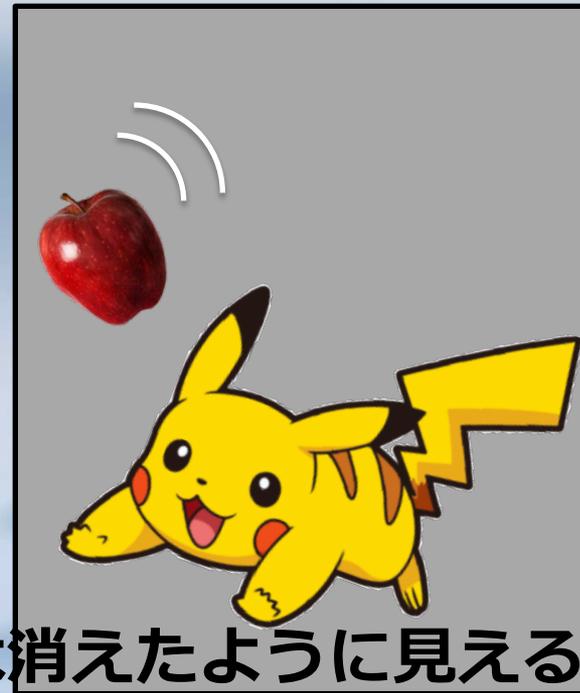
苔山圭以子

(スーパーサイエンスハイスクール 2016年4月21日)

# 1.重力波

重力とは何か？

苔山圭以子  
(スーパーサイエンスハイスクール 2016年4月21日)



重力は消えたように見える。  
重力は、見かけの力なのか？

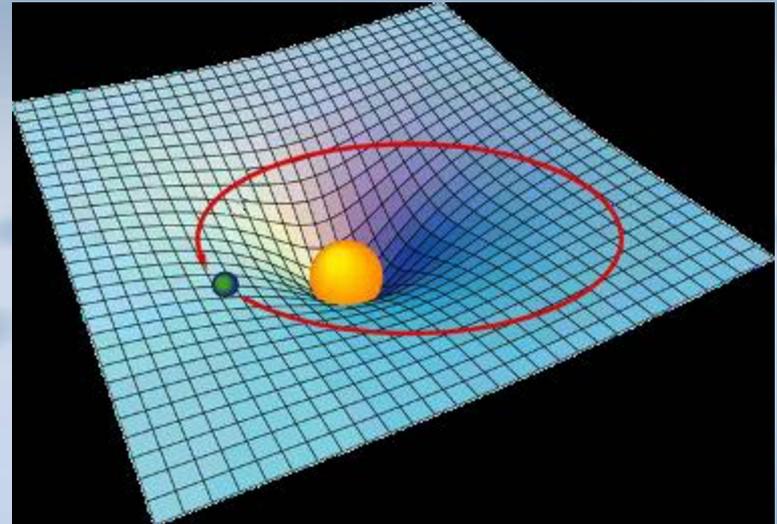
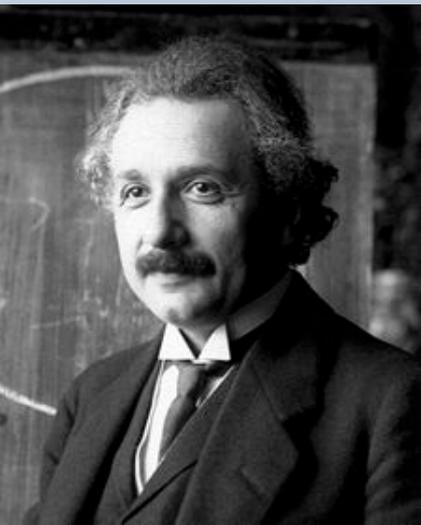
# 1.重力波

重力とは何か？

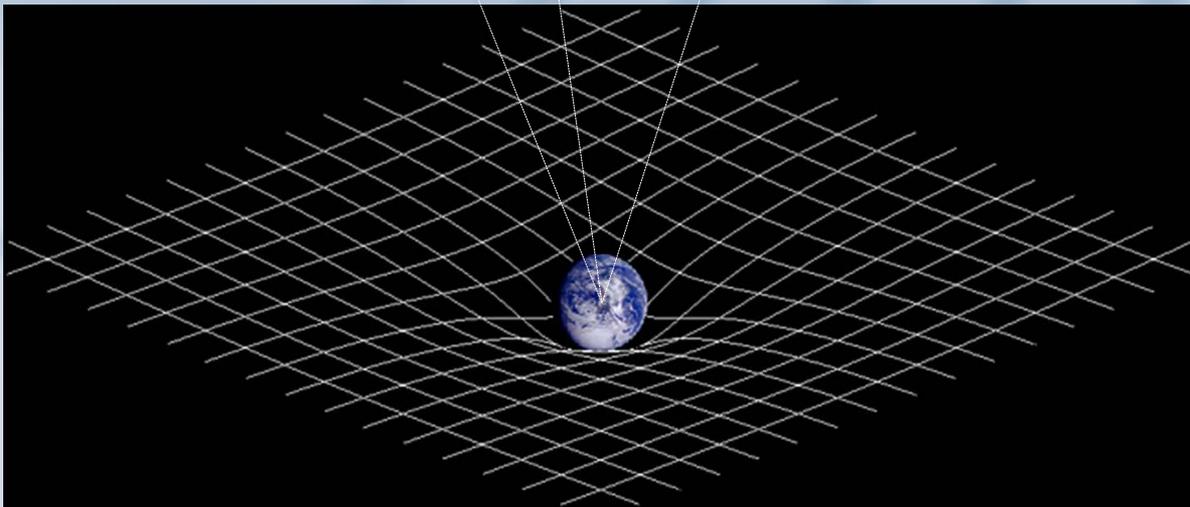
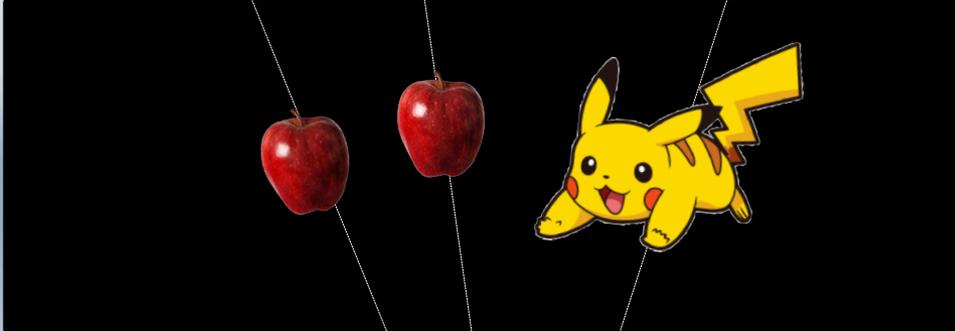
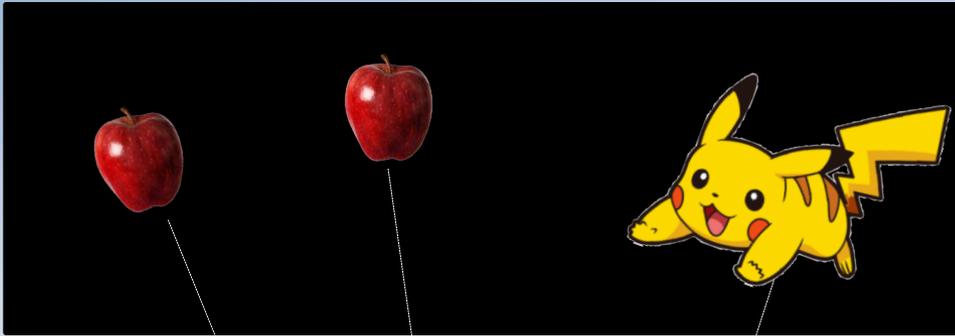
1915年 アルバート アインシュタイン：一般相対性理論

重力が**非一様**だと消せない：**潮汐力**

安東正樹 重力波望遠鏡KAGRAで見る新しい宇宙の姿  
(東大物理学教室談話会 2013年5月31日)

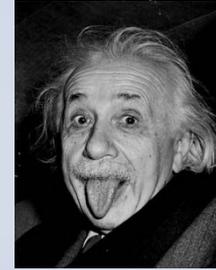


アルバート アインシュタイン (ウィキペディア 英語版)



ほんとうに落ちているエレベーター  
では重力が消えているのだろうか？

？



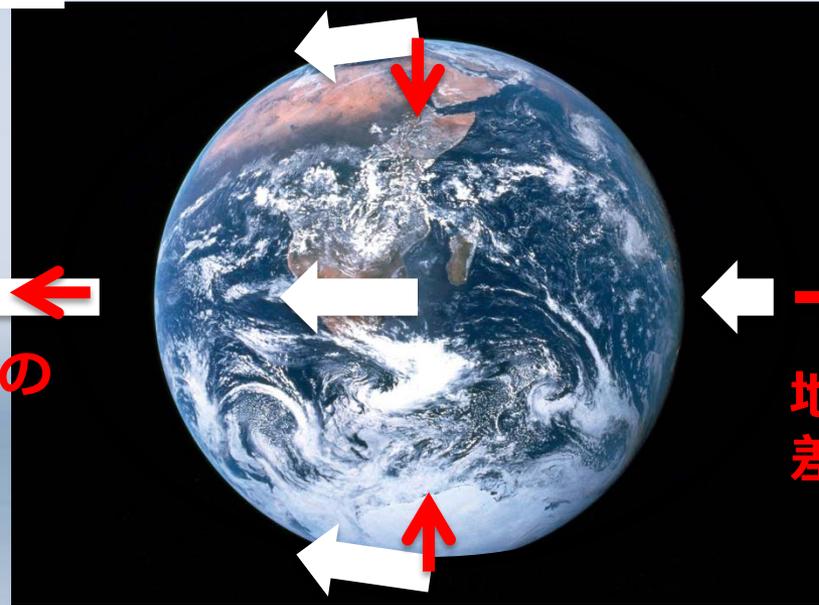
地上に落ちるにしたがって、  
ピカチュウやリンゴ同士の  
位置が近づいてきた。

地球の重力の影響が  
一定ではないので、重力は  
完全にキャンセルできない。

同じことが、月の重力でも起きて、  
潮の満ち引き(潮汐)を引き起こす。



月からの  
重力



地球中心との  
差分

場所によって、強さや向きが  
ばらばらの重力は消せない  
潮汐力

# 1.重力波

重力とは何か？

1915年 アルバート アインシュタイン：一般相対性理論

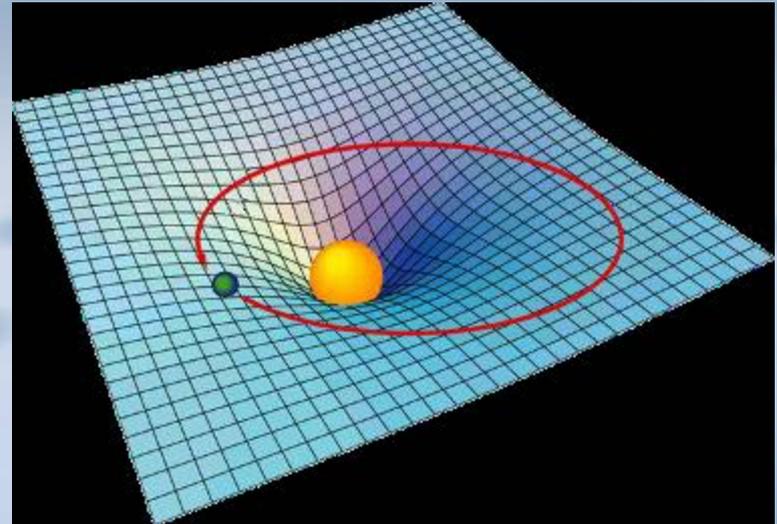
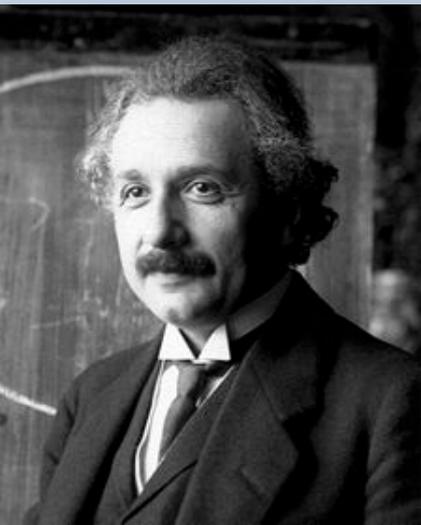
重力が**非一様**だと消せない：**潮汐力**

潮汐力による運動：等価原理により質量によらない

->幾何学的に表す。つまり潮汐力による効果を

**時空の歪み**によるものとする。

安東正樹 重力波望遠鏡KAGRAで見る新しい宇宙の姿  
(東大物理学教室談話会 2013年5月31日)



アルバート アインシュタイン (ウィキペディア 英語版)

# 1.重力波

重力とは何か？

ミンコフスキー空間の拡張：リーマン幾何学

ミンコフスキー：平坦な時空

$$ds^2 = (cdt)^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

リーマン：曲がった時空

計量テンソル

$$ds^2 = \sum_{\mu, \nu} g_{\mu\nu} dx_{\mu} dx_{\nu}$$


# 1.重力波

重力とは何か？

アインシュタイン方程式: 重力場の基礎方程式

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

アインシュタインテンソル  
計量テンソルの関数で  
時空の歪みを表す

エネルギー運動量テンソル  
物質やエネルギーの分布を  
表す

# 1.重力波

重力波とは何か？

弱い重力の場合

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

ミンコフスキー時空

ミンコフスキー時空からのずれ

アインシュタイン方程式は以下のようなになる。

ミンコフスキー時空  
からのずれの伝播

$$-\bar{h}_{\mu\nu},{}^{\alpha}{}_{\alpha} = \frac{16\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}.$$

重力波の源

$h$ は波動方程式を満たす：重力波

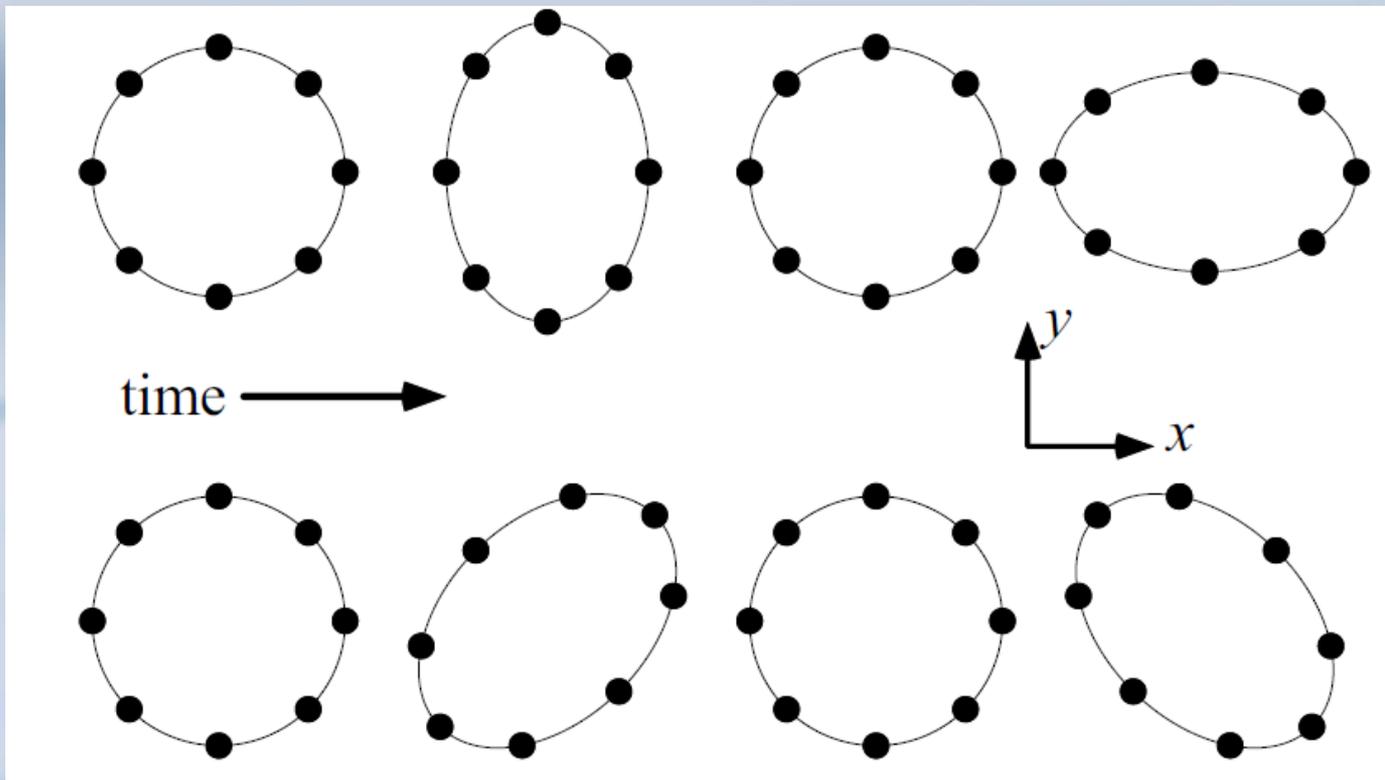
# 1.重力波

重力波とは何か？

波動方程式からわかる重力波の性質

速さは光と同じ、横波、偏光あり

自由質点への影響：距離の変化は $h$ と距離自体の積



# 1.重力波

**重力波**とは何か？

四重極公式(電磁波と異なり二重極はない)

$$h_{ij} = -\frac{2G}{c^4} \frac{1}{r} \ddot{D}_{ij},$$

球対称、もしくは時間に依存しない軸対称な系からは重力波は出ない。

hの大きさ: 楽観的に考えて $10^{-17}$ 、典型的な値は $10^{-21}$

# 1.重力波

## 重力波を検出する意義

- (1) **物理的**な意義：一般相対性理論の検証  
“**アインシュタインからの最後の宿題**”
- (2) **天文学的**な意義：重力波天文学の創生  
重力波から**星や宇宙に関する情報**を得る  
発生後吸収や散乱されずに地球にやってくる

# 1.重力波

**重力波**を検出する意義

(1) **物理的**な意義：一般相対性理論の検証

1915年：一般相対論が発表される

**ニュートンの法則と異なる様々な予言**

(水星の)近日点移動、光の屈折、重力赤方変異、  
シャピロ時間遅れ、ジャイロスコープへの測地線効果...

1960年以降：**劇的な技術革新**により一般相対論の予言が  
極めて高い精度で**正しいこと**が検証される。

**最後に残ったのが重力波の直接検出**

“アインシュタインからの最後の宿題”

# 1.重力波

**重力波**を検出する意義

(1) **物理**的な意義：一般相対性理論の検証

“アインシュタインからの最後の宿題”

重力波の性質からなにがわかるのか

**Alternative theory**との区別

一般相対論は今までの検証実験をすべてパスした

**唯一**の重力理論**ではない**。

このような理論も重力波を预言するが、**性質が**

**一般相対論と異なる**。

速さ、偏光、輻射公式....

# 1.重力波

## 重力波を検出する意義

### (1) 物理的な意義：一般相対性理論の検証

一般相対論だと2つだけ偏光があるが、一般には6つ

C.M. Will,  
“Theory and experiment in gravitational physics”(1993)  
Cambridge University Press.

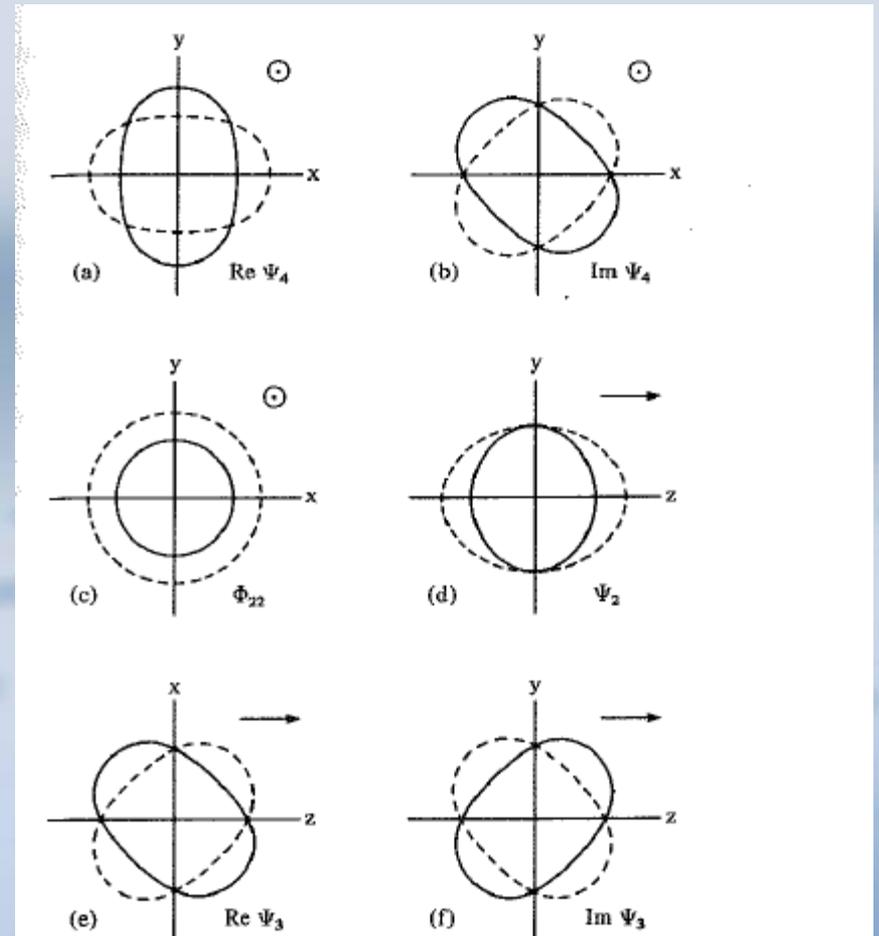


Figure 10.1. The six polarization modes of a weak, plane gravitational

# 1.重力波

## 重力波を検出する意義

### (2) 天文学的な意義: 重力波天文学の創生

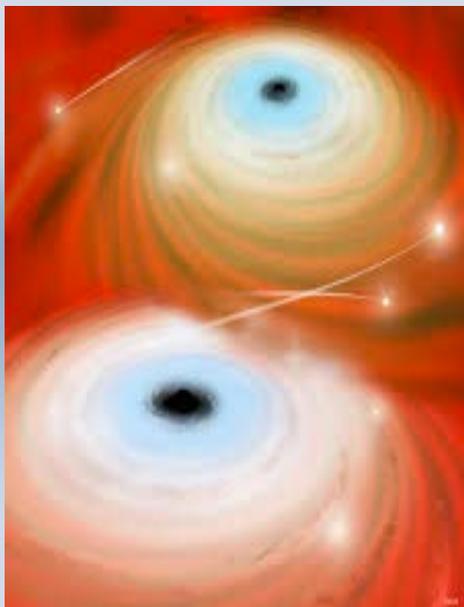
重力波から星や宇宙に関する情報を得る  
発生後吸収や散乱されずに地球にやってくる

他の手段では見えないものが見える  
宇宙始まりのビッグバン、ブラックホール、  
超新星爆発、中性子星、...

# 1.重力波

## 重力波による天文学

ブラックホール連星合体



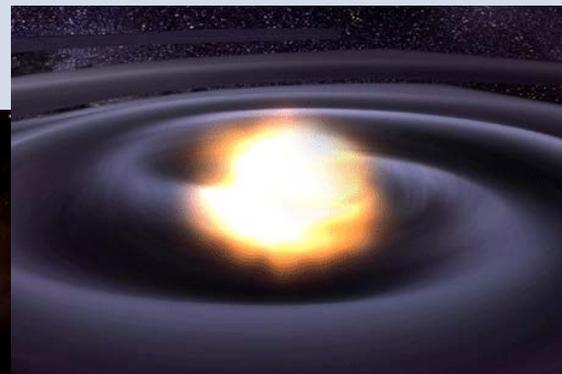
超新星爆発



ガンマ線バースト



中性子星連星合体

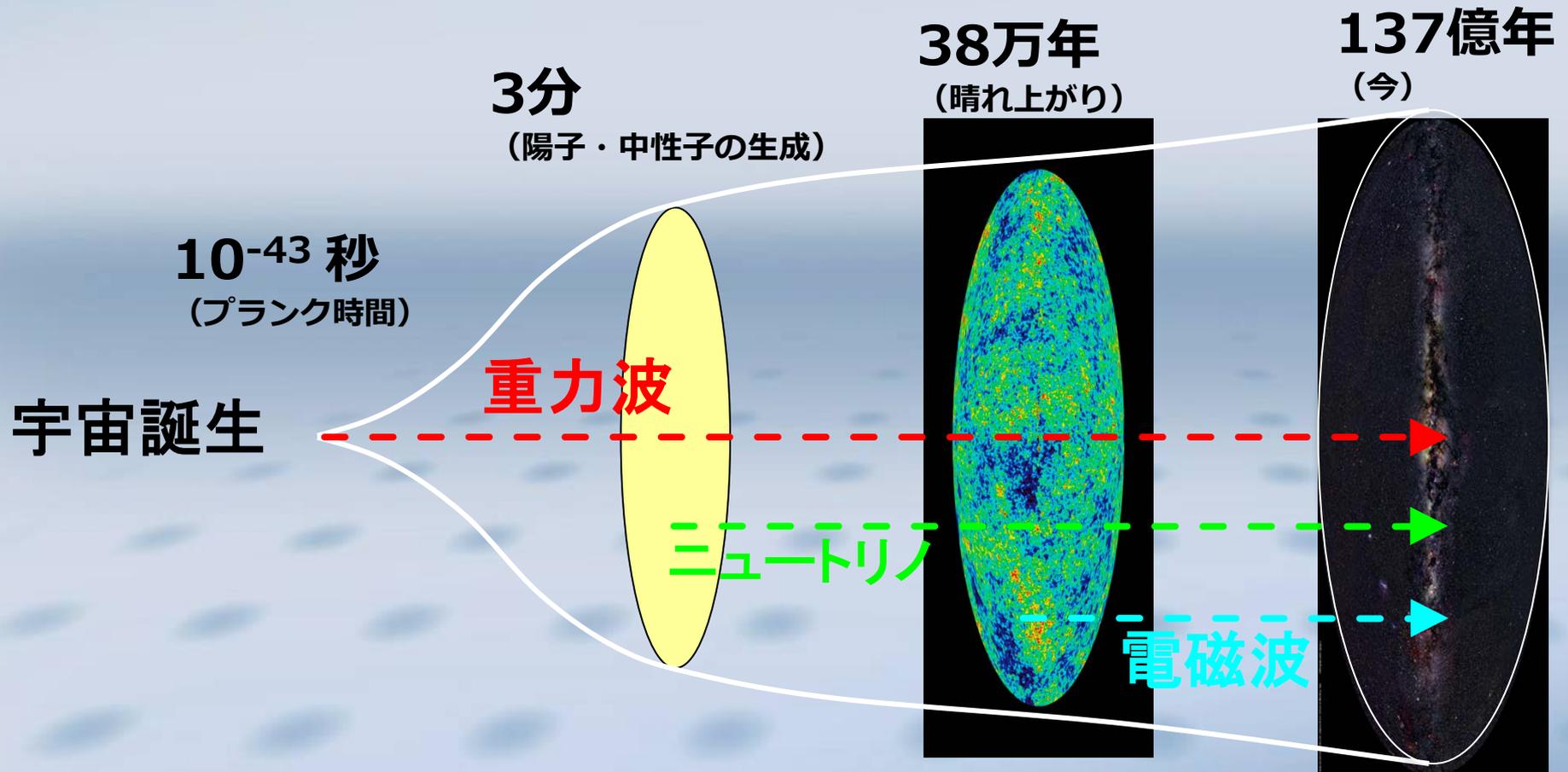


まったく未知の天体



# 1.重力波

宇宙のはじまりの情報を運んでいる



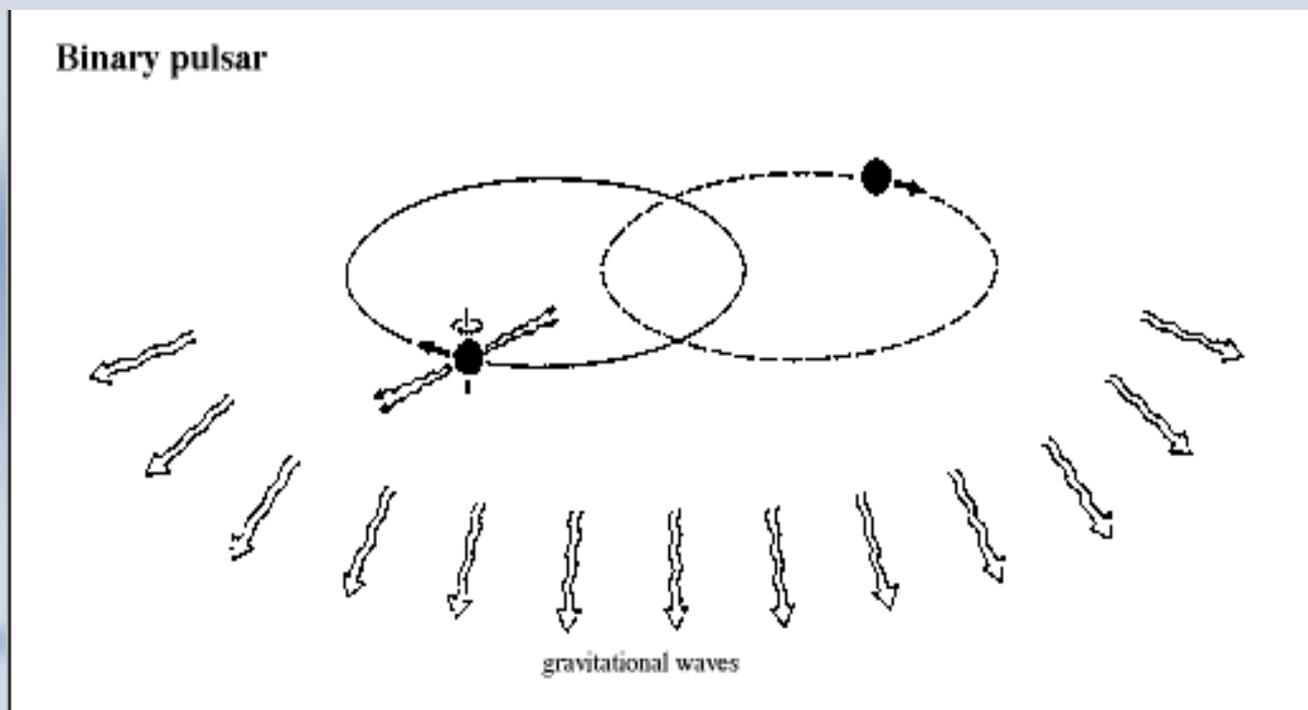
図：川村教授

## 2.天文学と重力波

まず天文学の基礎知識を紹介し、重力波源を紹介します。

## 2.天文学と重力波

連星：質量が似た2つの星がそれらの重心の回りを回っている。



## 2.天文学と重力波

**銀河系**：直径10万光年、厚さ1000光年程度の星の集団



## 2.天文学と重力波

**球状星団**：銀河系の回りを回る星の集団



## 2.天文学と重力波

### 星の進化

星は生まれて、最後には死んでいく

星間ガスの中の密度揺らぎが重力で成長。当初は重力エネルギーをもとに輝くが温度が1000万度を越えると核反応によって光りだす（収縮が止まる）。

最初は水素の核反応であるが、それが尽きるとヘリウムと段階を追って重い元素の反応に移行する。

## 2.天文学と重力波

### 星の最後：一般論

最初は水素の核反応であるが、それが尽きるとヘリウムと段階を追って重い元素の反応に移行する。

最後がどうなるかは**星の質量に依存**する。星の質量は太陽質量を単位とすることが多い。

軽い星の場合は外層が外に逃げて、中心核がのこるが、重い星の場合は核反応の暴走、もしくは重力崩壊による衝撃波による超新星爆発を起こす。

## 2.天文学と重力波

### 星の最後：白色矮星

星の質量が太陽程度から8倍程度まで

星の周辺のガスが重力を逆らって逃れ、中心部の核のみ残る。  
中心部は**電子の縮退圧**で支えられている。

太陽程度の質量、地球程度の大きさ

## 2.天文学と重力波

### 星の最後：中性子星

星の質量が太陽の10倍程度まで

電子が原子核に捉えられることによって電子の縮退圧が消失。このため重力崩壊が起こる。

**中性子の縮退圧**が働きはじめると崩壊が止まる。

直径10km程度、密度は水の100兆倍

## 2.天文学と重力波

### パルサー

規則正しい電波パルスを発する天体（周期：ミリ秒から秒まで）

**電波を発する自転する中性子星**。電波をビーム上に発しておりそれが地球の方向を向いたときにパルスが観測される。

# 2.天文学と重力波

PPPL#93X0345A

Pulsar

Rotation Axis

Radio Waves

Magnetic Field

Radio Waves

RADIO SIGNAL

Period

TIME

(秒まで)

ておりそ

パルサー

規則正しい

電波を発する  
それが地球の

R.A. Hulse,  
ノーベル賞講演  
(1993年)

## 2.天文学と重力波

### 星の最後：ブラックホール

太陽の10倍程度以上の質量をもつ星

重力崩壊によってできた時空の穴。光も脱出できない。

自転しているKerrブラックホールについて考える。  
質量、スピン（自転による角運動量）のみがパラメータ。  
スピンの絶対値は最大値が存在する。

## 2.天文学と重力波

### 宇宙の歴史

宇宙は等方かつ一様と仮定して一般相対論を適用する。

宇宙は137億年前に始まった。**インフレーション**（指数関数的な急激な膨張）ののち真空が相転移を起こす。そのとき開放されたエネルギーにより宇宙は高温になった。そのあと膨張にともない、温度が低下し、水素、ヘリウム、リチウム（**軽元素**）が**生成**された。星が誕生し、そこでより重い元素が核反応で生成された。

## 2.天文学と重力波

### 重力波源

- (1) **バースト** (現れてからすぐに消える)
- (2) **連続波** (常に続いている)
- (3) **背景重力波** (四方からat randomにくる)

## 2.天文学と重力波

(1)バースト (現れてからすぐに消える)

連星合体

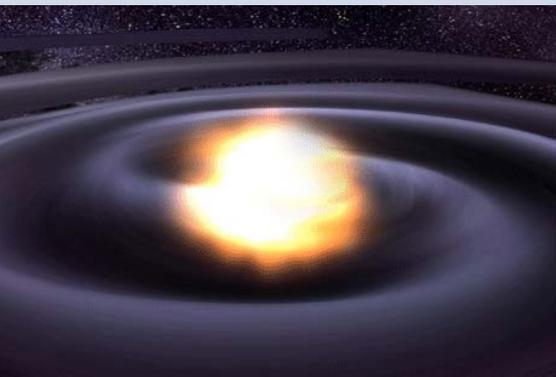
波形を厳密に予測することが可能。探査が（他とくらべれば）容易。

重力波の振幅は源までの距離に反比例するので計算した波形と比較して距離を出せる

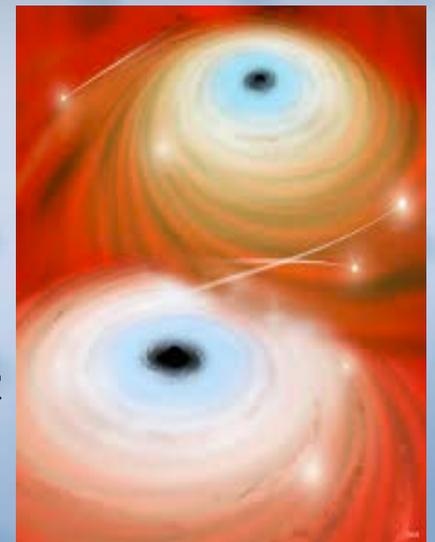
->天文学において距離の測定はもっとも重要なものの一つ。

従来の方法とは独立なもの

中性子星連星合体



ブラックホール連星合体



## 2.天文学と重力波

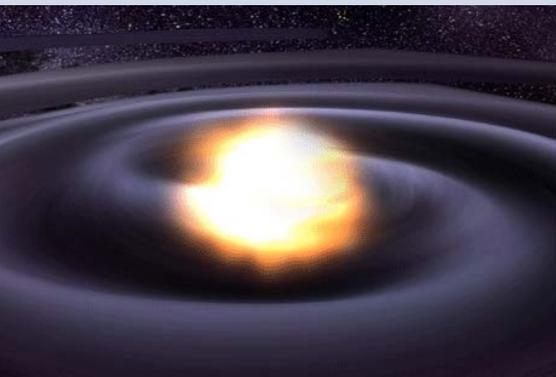
(1)バースト（現れてからすぐに消える）

中性子星**連星合体**

合体時の重力波から、中性子星の**状態方程式**（柔らかいか硬いか）がわかる。

重元素合成：従来超新星爆発で生成されたと考えられてきたが、実際に観測されている量はこれより多い。**連星中性子星合体が寄与**している？見合うだけ頻繁におきているかが問題。

中性子星連星合体



## 2.天文学と重力波

(1)バースト（現れてからすぐに消える）

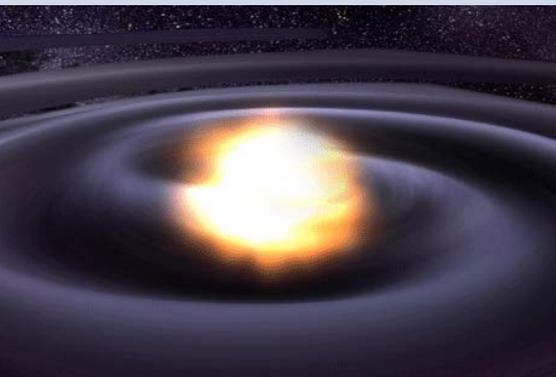
### ガンマ線バースト

たかだか数十秒の間に強いガンマ線を放出する謎の天体。全天に分布し、遠方に存在。

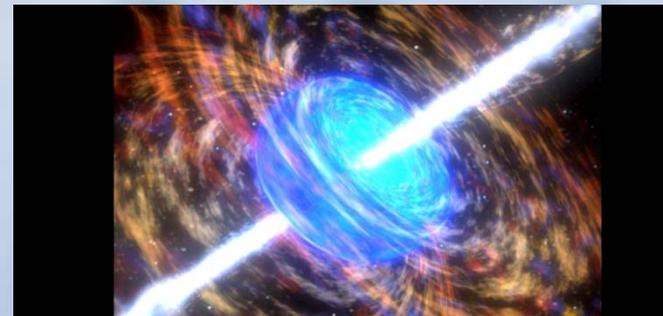
2秒以上続く長ガンマ線バーストとそれ以下の短ガンマ線バースト

->短ガンマ線バーストは中性子星連星合体？もし重力波が同時に捉えることができればその可能性が高い。

中性子星連星合体



ガンマ線バースト



## 2.天文学と重力波

(1)バースト（現れてからすぐに消える）

### 超新星爆発

じつは**爆発のメカニズムはわかっていない**。中心からの衝撃波が星の表面に到達するまでに減衰してしまう。

非対称性が大きいと大きい重力波を出す。

超新星爆発のメカニズムの解明



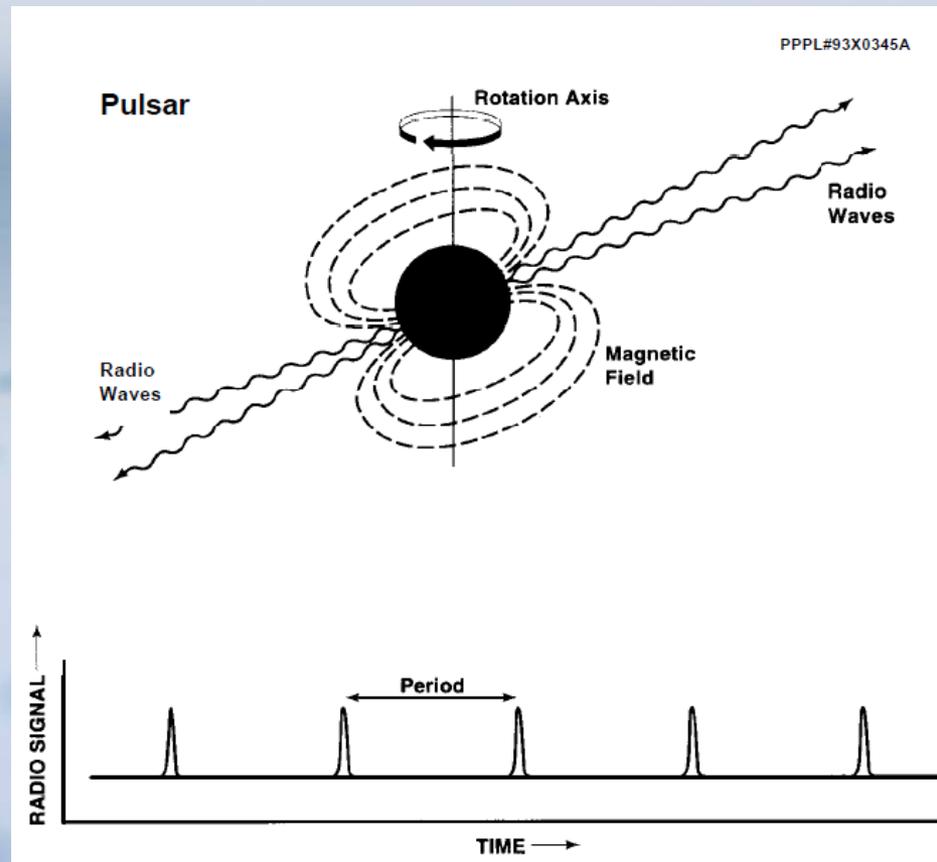
超新星爆発

## 2.天文学と重力波

(2)連続波（常に続いている）：**パルサー**

球対称もしくは定常的な軸対称な系からは出ない。

->**非対称性に関する情報**を得ることができる。



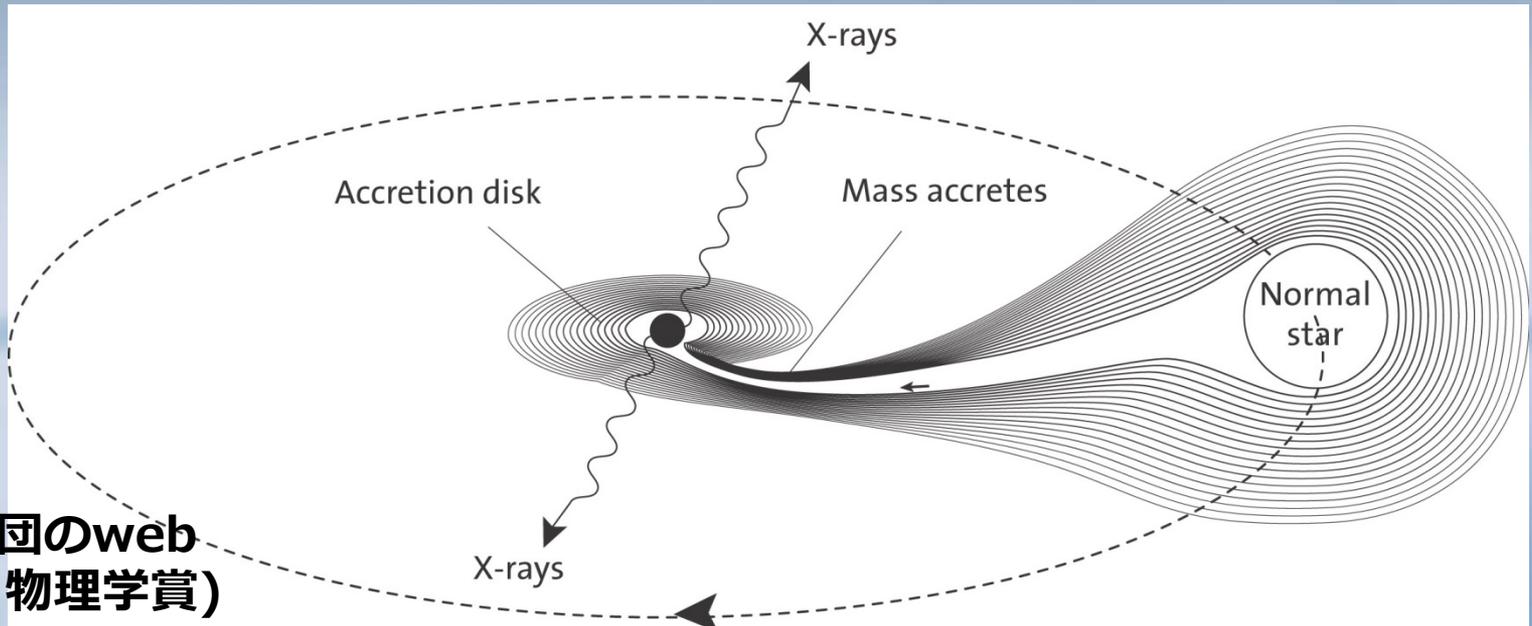
R.A. Hulse, ノーベル賞講演 (1993年)

## 2.天文学と重力波

(2)連続波（常に続いている）：**パルサー**

連星の場合は質量降着

もう片方の星からガスが流れ込む。小質量の星からの場合、ガスが持ち込む角運動量が重力波で放出されて釣り合いを保っている？



ノーベル財団のweb  
(2002年、物理学賞)

## 2.天文学と重力波

(3)背景重力波 (四方からat randomにくる)

### 宇宙論的起源

宇宙初期からの重力波

インフレーション、統一されていた相互作用の分岐による真空の相転移….

### 天文学的起源

多数の連星 (白色矮星、中性子星、ブラックホール) からの重力波

# 3.重力波の間接証拠

重力波の存在の間接、もしくは直接の証明

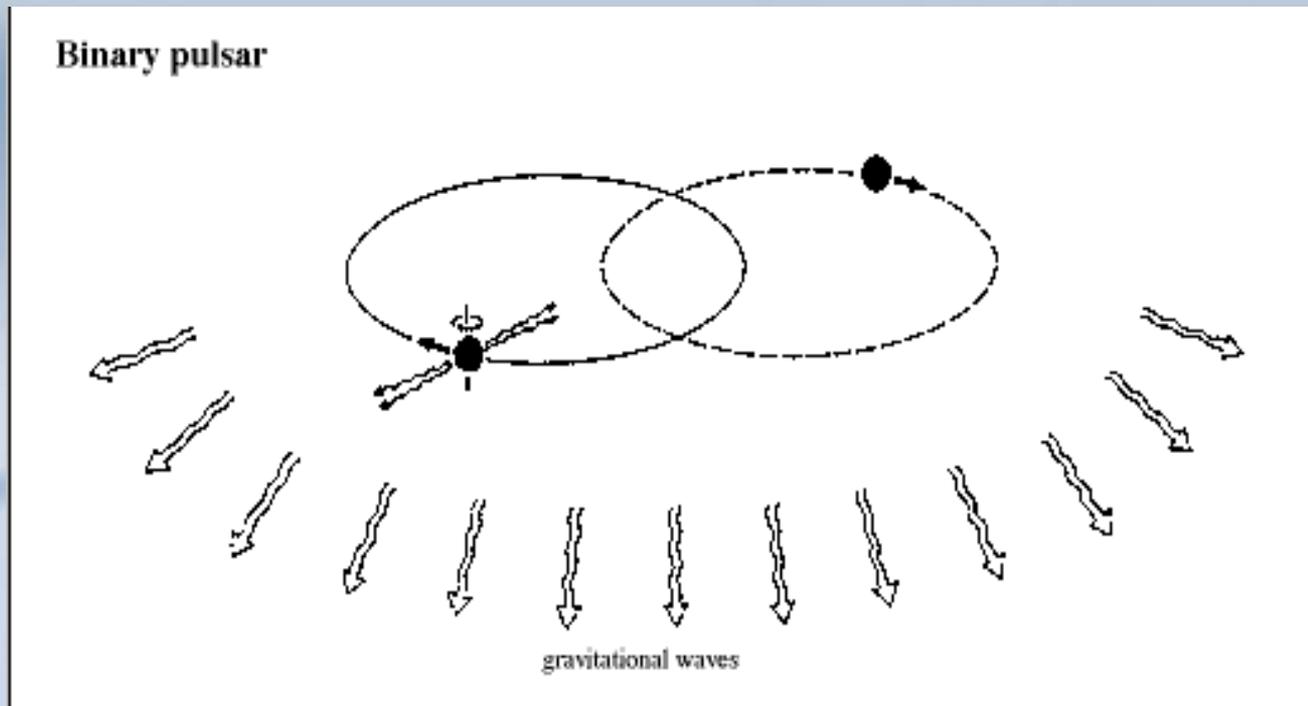
- (1) **間接**的証拠: 連星中性子星パルサーの公転周期の変化  
(重力波が存在しないと説明しがたい観測結果)
- (2) **直接**的証拠: ブラックホール連星の衝突からの重力波  
(地球に到達した重力波を捉えた)

# 3.重力波の間接証拠

## 間接的な証拠

**中性子星連星**: 重力波を放出して一回転に要する時間(周期)が  
変わる

主星がパルサー、伴星はそうではない



# 3.重力波の間接証拠

パルサー:パルスを規則正しく発する正確な時計

連星の公転運動によるドップラー効果によって地球に到達するパルスの間隔が変わる

->公転軌道を見積もることができる

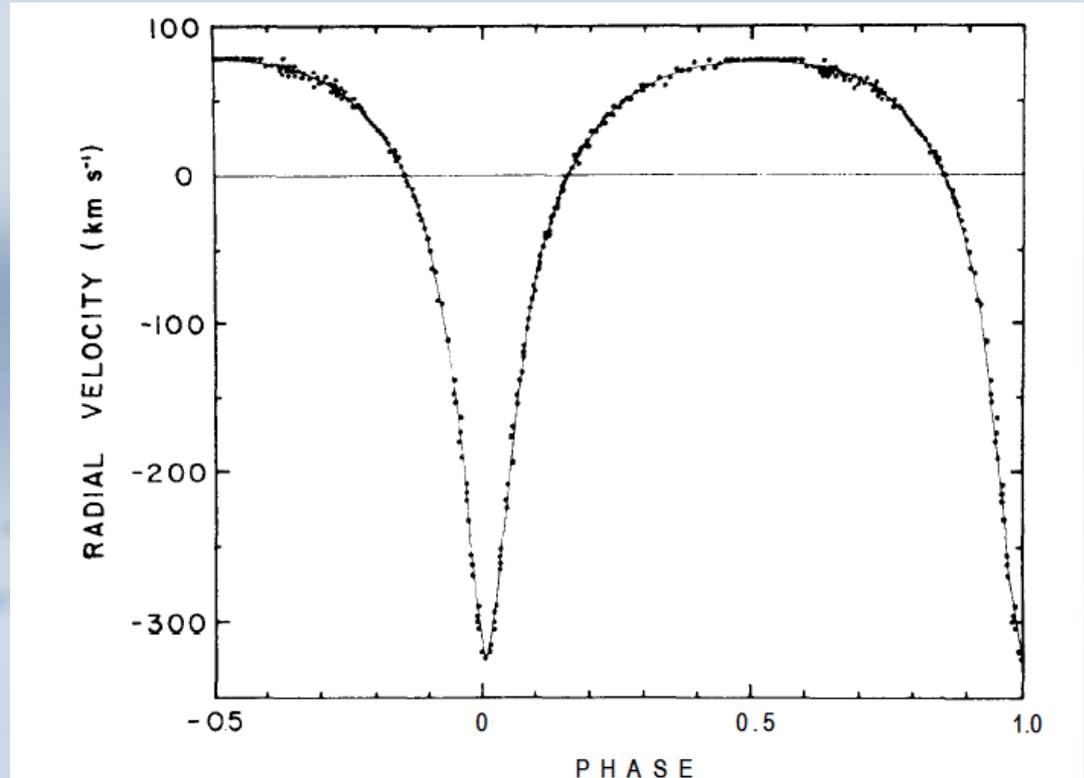


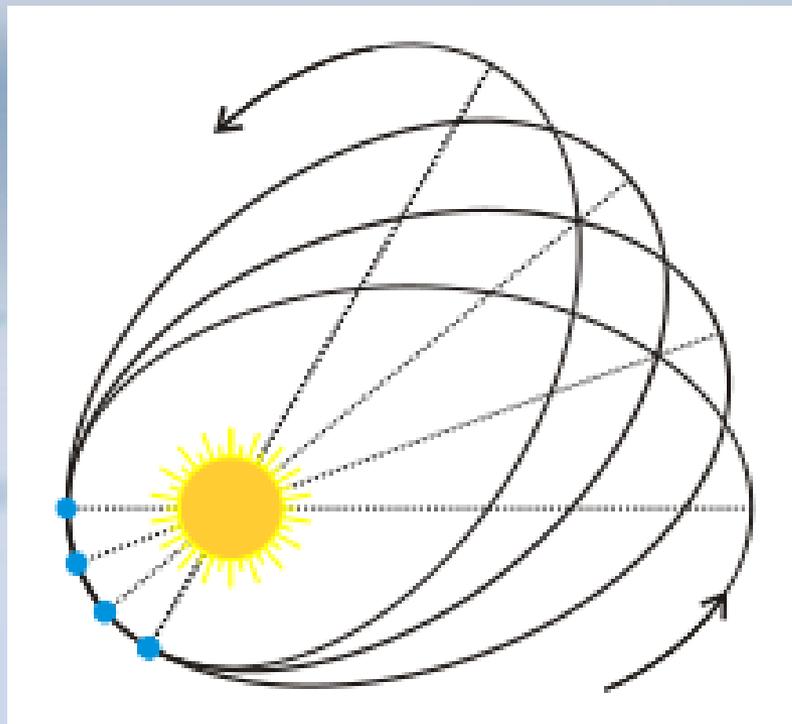
Fig. 12: The complete velocity curve for PSR 1913 + 16 from the discovery paper, fitted with a Keplerian orbital solution. The orbital phase is the fraction of a binary orbital period of  $7^{\text{h}}45^{\text{m}}$  (from R.A. Hulse and J.H. Taylor, *Astrophys. J.*, 195: L51 -L53, 1975).

# 3.重力波の間接証拠

パルサー:パルスを規則正しく発する正確な時計

**近星点移動**(一般相対論的効果)が観測できた:4度/年。

->連星の総質量を推定できる(2.8太陽質量)。

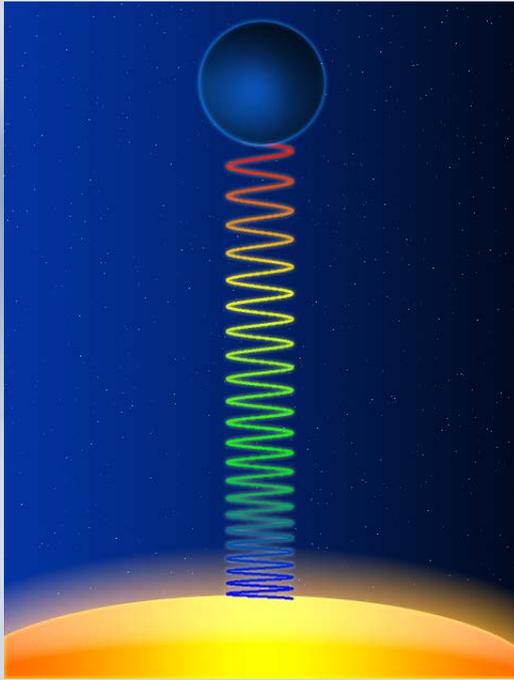


# 3.重力波の間接証拠

パルサー:パルスを規則正しく発する正確な時計

重力場および横ドップラー効果における時間の遅れ

->伴星の質量がわかる (1.4 太陽質量)



重力赤方偏移 (ウィキペディア 英語版)

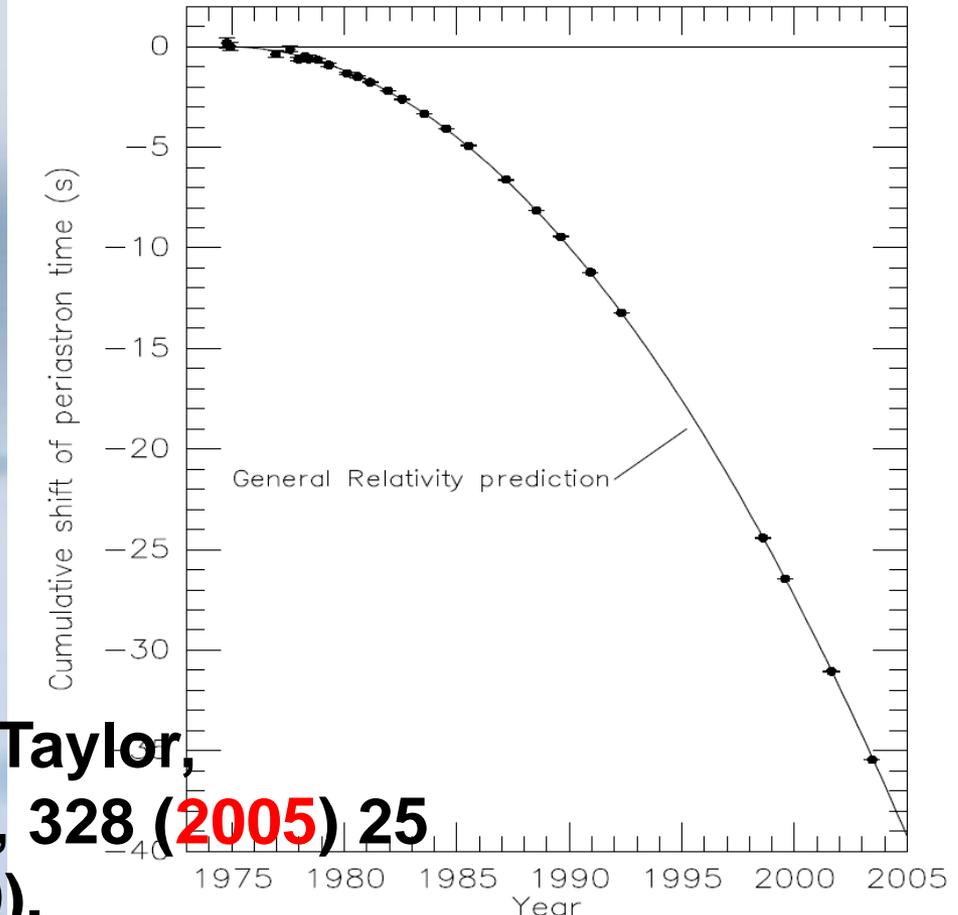
近星点移動と連立させて2つの中性子星の質量をそれぞれ求めることができる。(パルサー:1.4 太陽質量、伴星:1.4太陽質量)

# 3.重力波の間接証拠

重力波輻射による公転周期の変化:2つの中性子星の質量が各々わかったので一般相対論から計算できる。

周期の変化の観測と計算値の比較

観測された周期変化が  
一般相対論の予言と一致



J.M. Weisberg and J.H. Taylor,  
ASP Conference Series, 328 (2005) 25  
(arXiv:astro-ph/0407149).

# 4.重力波の直接検出

重力波の存在の間接、もしくは直接の証明

- (1) **間接**的証拠: 連星中性子星パルサーの公転周期の変化  
(重力波が存在しないと説明しがたい観測結果)
- (2) **直接**的証拠: ブラックホール連星の衝突からの重力波  
(地球に到達した重力波を捉えた)

# 4.重力波の直接検出

©2016 LIGO Scientific Collaboration

吉山 圭以子, 重力波検出器の開発と重力波天文学  
(大阪大学電気工学特別講義, 2016年6月28日)

LIGOがブラックホールの合体から  
きた重力波をとらえた!

# 4.重力波の直接検出

ブラックホールとは？

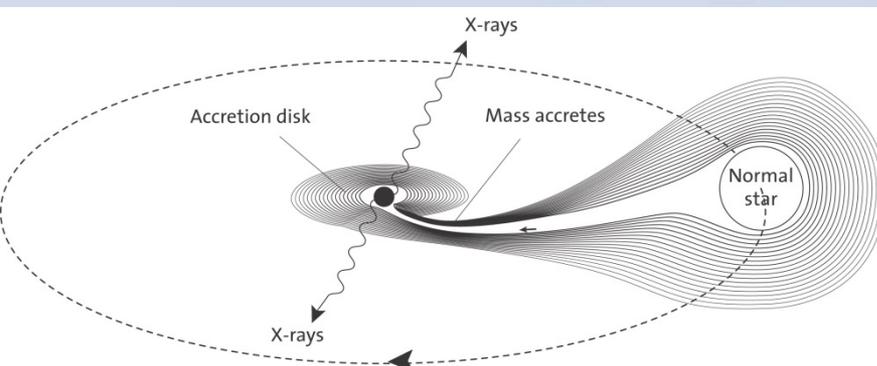
一般相対性理論から導出：**光さえ抜け出せない時空の穴**

どうやって**観測することができるのか**

(1)物が吸い込まれるとき出るX線を見る

(2)連星の片方がブラックホールだったらもう片方の星の運動からブラックホールかどうか判断できる。

->**まわりに物質がなかったら、見ることはできない**



ノーベル財団のweb  
(2002年、物理学賞)

# 4.重力波の直接検出

ブラックホールとは？

2種類のブラックホール

**低質量**：太陽質量の10倍程度

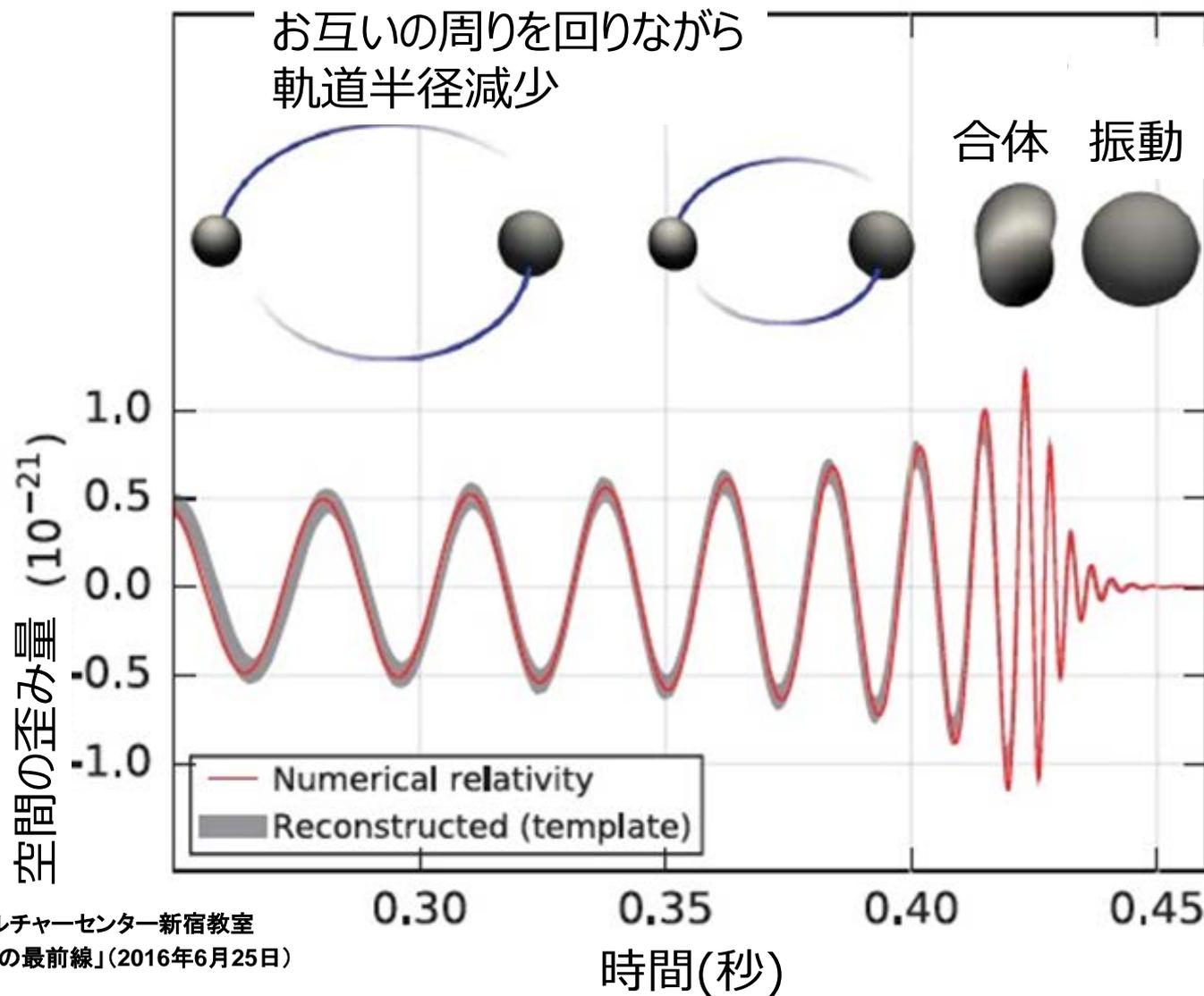
比較的重い星が最後に爆発してできる

**高質量**：太陽質量の100万倍以上

銀河中心に存在している

# 4.重力波の直接検出

ブラックホールの合体からきた重力波をとらえた！



# 4.重力波の直接検出

現在までに**3回**重力波を検出

**GW150914 : 2015/9/12-2016/1/19の観測中(O1)**

**GW151226 : 2015/9/12-2016/1/19の観測中(O1)**

**GW170104 : 2016/11-2017半ばの観測中(O2)**

## 論文

**Physical Review Letters 116(2016)061102.(16ページ)**

**Physical Review Letters 116(2016)241103.(14ページ)**

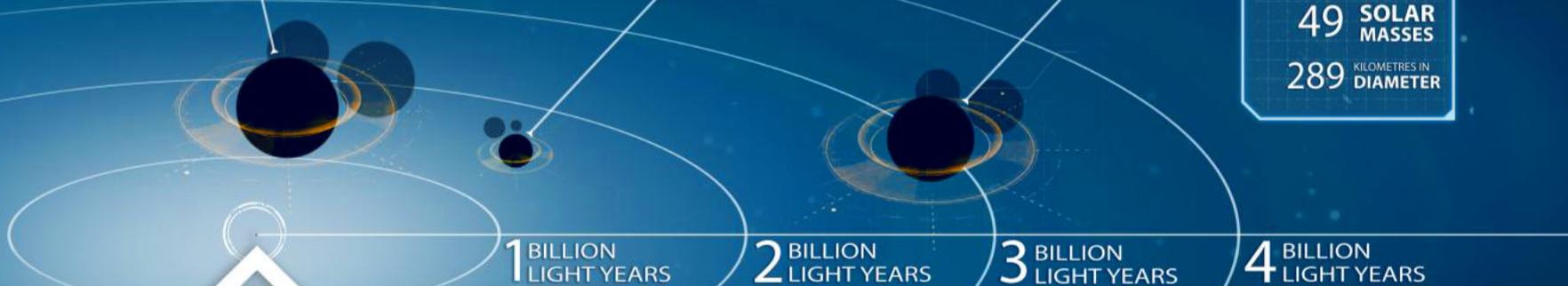
**Physical Review Letters 118(2017)221101.(17ページ)**

# LIGO'S **GRAVITATIONAL-WAVE** DETECTIONS

**[GW150914]**  
 DISCOVERED:  
**14.09.2015**  
 1.3 BILLION LIGHT-YEARS AWAY  
 62 SOLAR MASSES  
 366 KILOMETRES IN DIAMETER

**[GW151226]**  
 DISCOVERED:  
**26.12.2015**  
 1.4 BILLION LIGHT-YEARS AWAY  
 21 SOLAR MASSES  
 124 KILOMETRES IN DIAMETER

**[GW170104]**  
 DISCOVERED:  
**04.01.2017**  
 3 BILLION LIGHT-YEARS AWAY  
 49 SOLAR MASSES  
 289 KILOMETRES IN DIAMETER



**YOU ARE  
HERE**

## DID YOU KNOW ?

THE SOLAR MASS is  
 A STANDARD UNIT OF MASS  
 IN ASTRONOMY  
 IT IS EQUAL TO  
 THE MASS OF THE SUN  
 EQUAL TO APPROXIMATELY  
 $1.99 \times 10^{30}$  KG

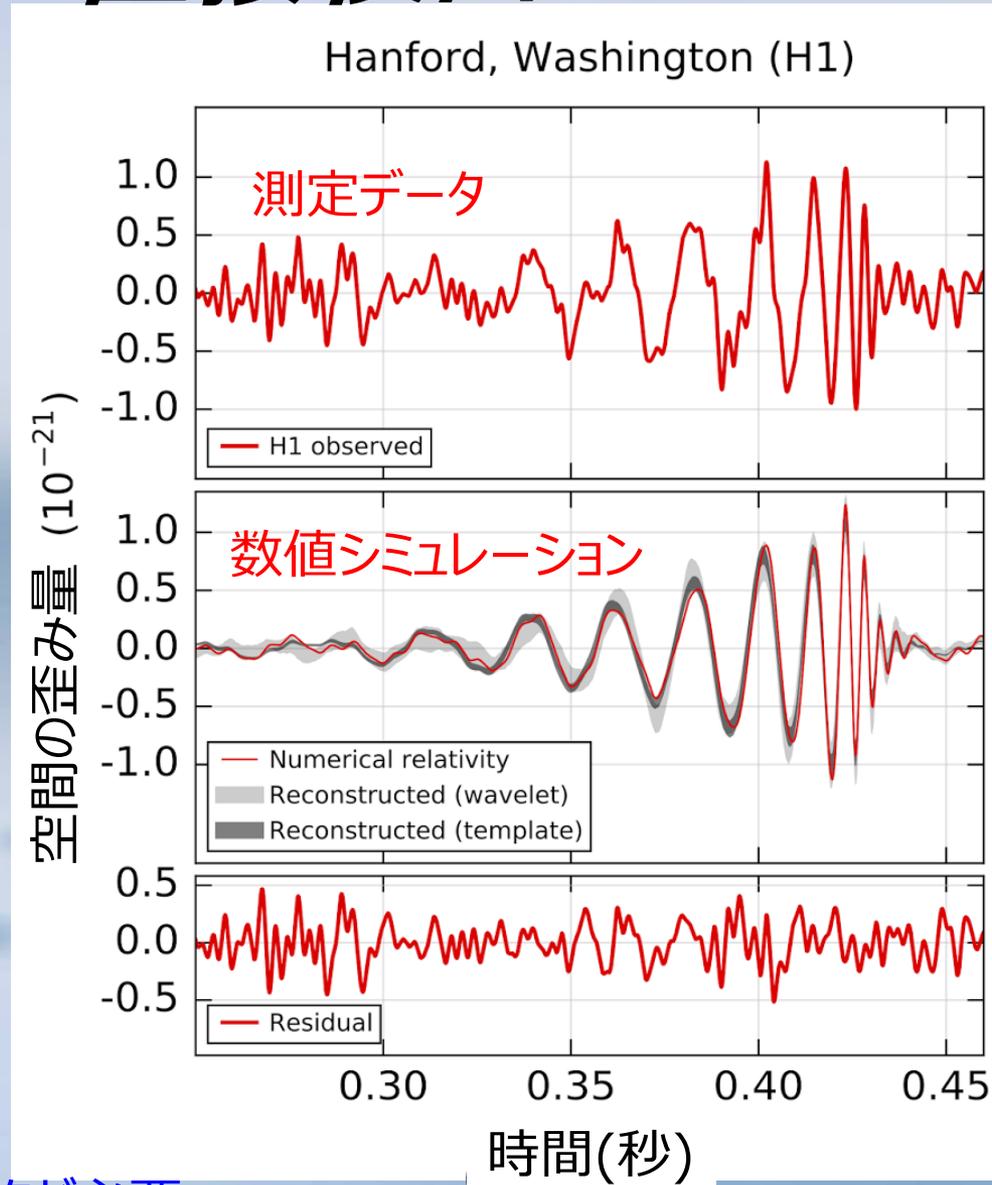
# 4. 重力波の直接検出

## 重力波形からわかったこと

- 見てわかる教科書のような波形
- 一般相対論は  
ブラックホールの  
ような**強い重力**でも  
**正しい**(3events いずれも)。



道村 唯太、朝日カルチャーセンター新宿教室  
「ブラックホール研究の最前線」(2016年6月25日)



重力波の波形の計算にはスーパーコンピュータが必要

# 4.重力波の直接検出

重力波形からわかったこと

**重力波の速さは光と同じか？**

->Gravitonの質量は0か？

GW150914のみ： $< 1.2 \cdot 10^{-22} \text{ eV}$

GW150914、GW151226、GW170104全て：

$< 7.7 \cdot 10^{-23} \text{ eV}$

電子の質量： $511 \text{ keV}$

Photonの質量： $< 1.0 \cdot 10^{-18} \text{ eV}$

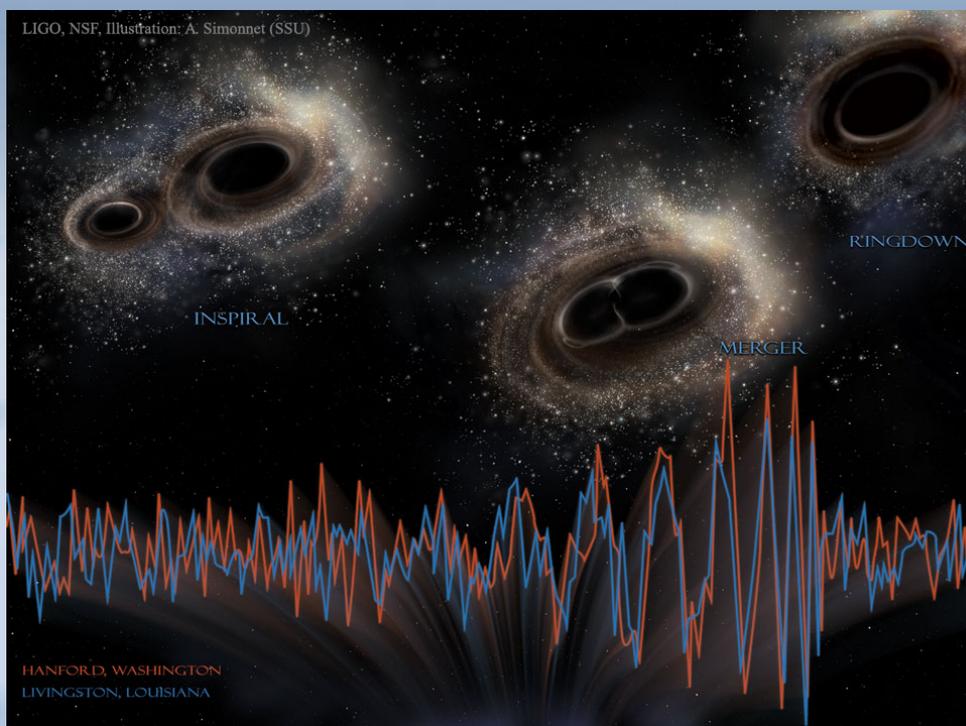
Physics Letters B 667 (2008) 1.

# 4.重力波の直接検出

## 重力波形からわかったこと

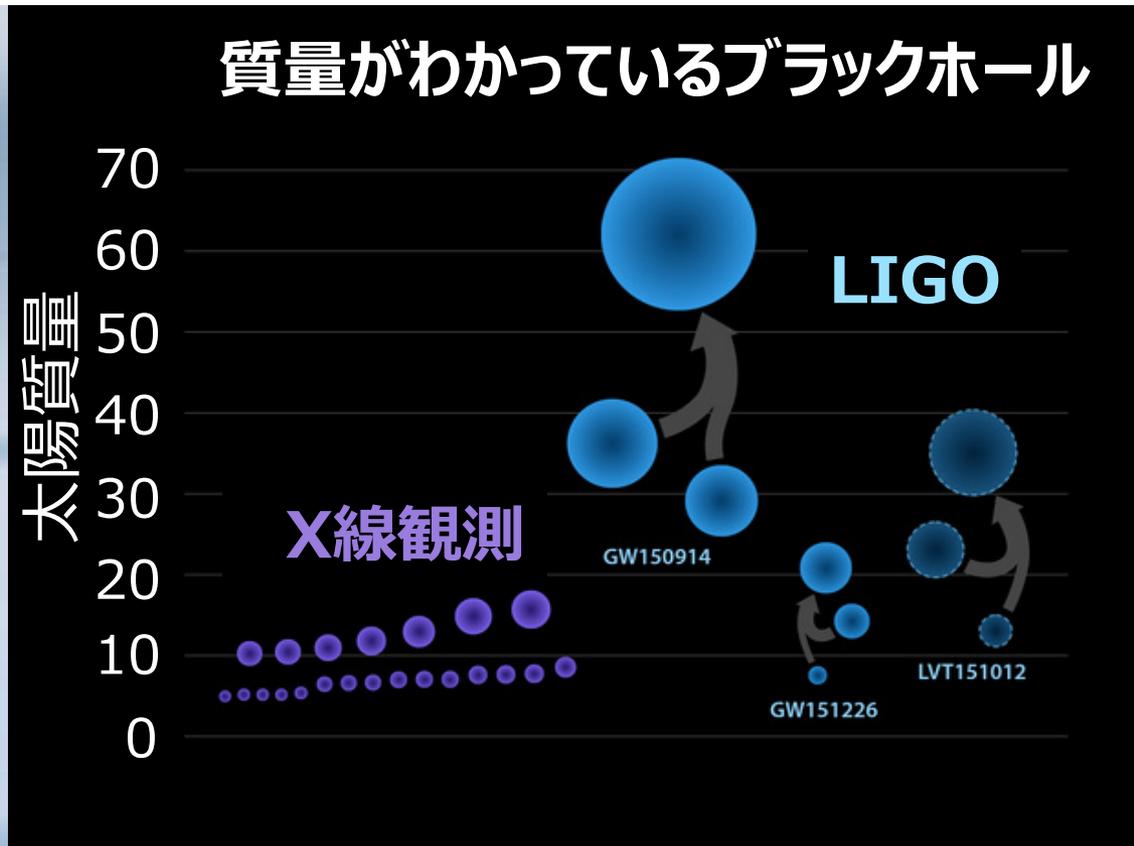
- ブラックホール連星が存在する：**重力波でなければ見えない**ため今まで確認がなかった。

道村 唯太、朝日カルチャーセンター新宿教室  
「ブラックホール研究の最前線」(2016年6月25日)



# 4. 重力波の直接検出

- これまでX線の観測で見つかったブラックホールはせいぜい10太陽質量程度だった
- 新たな謎: **30太陽質量程度のブラックホールはどのようにしてできたのか?**



# 4.重力波の直接検出

考えられるシナリオ

## (1) 宇宙初期にできた連星

種族III(初代)もしくは種族II(2代)

重元素がすくないので外層が光を吸収して吹き飛ばされることがなく**大きくなりやすい**。種族IIIに関しては衣川智弥の2014年(初検出前!)の論文が有名。

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 442(2014)2963.

# 4.重力波の直接検出

考えられるシナリオ

## (2) 宇宙初期につくられたブラックホール

銀河系などの構造(星の数密度の非一様性)は宇宙初期の揺らぎに由来をもつ。**この揺らぎがブラックホールをつくるかも?**これらが連星系となった。

(3)銀河中心や球状星団のブラックホールが連星を形成する**合体を繰り返す**ことで重いブラックホールへと成長

## 4. 重力波の直接検出

スピン(自転)の連星の軌道面に対する向き

**連星系**がブラックホール連星になった:**そろっていることが多い**。公転と自転の向きは同じ。

ブラックホールがお互いを**捕捉して連星系**:**そろっていなくてもおかしくない**。

ブラックホール連星の起源に関しての**のてがかり**

## 4. 重力波の直接検出

スピン(自転)の連星の軌道面に対する向き

GW150914 : ほとんど情報を得られず

GW151226 : 片方のブラックホールが最大の0.2倍程度。  
公転と自転の向きが同じ。

GW170104 : どちらのブラックホールの自転も公転と逆向きのよう

ブラックホールがお互いを捕捉して連星系のほうが有利？

**より多くの観測が必要！**

# 5.重力波検出器の将来

ブラックホール連星の合体だけ考えても....

**より多く**の連星合体を観測することでブラックホール連星の起源を特定できるかもしれない。たとえば質量やスピンの向きの統計。

->**より遠く**までみることで観測数(観測体積)をふやす。遠くまでみるということは**より過去**をみることなのでいつから連星合体が生じているかを調べることができる。宇宙初期にもブラックホール連星合体があれば初期宇宙ブラックホールの可能性が高い

# 5.重力波検出器の将来

ブラックホール連星の合体だけ考えても....

->より小さい振幅の重力波を検出しなければならない

より波形を正確に測定することでより厳しい一般相対論の検証となる(一般相対論の破綻を発見?)

より感度のよい検出器が必要。

# 5.重力波検出器の将来

より**遠く**までみる:より**感度**のよい検出器



第1世代:検出できず

第2世代:初検出!  
目標感度目指して開発を進めている

第3世代:本格的な重力波  
天文学が花開く

# 5.重力波検出器の将来

より精度よく**方向**をきめる

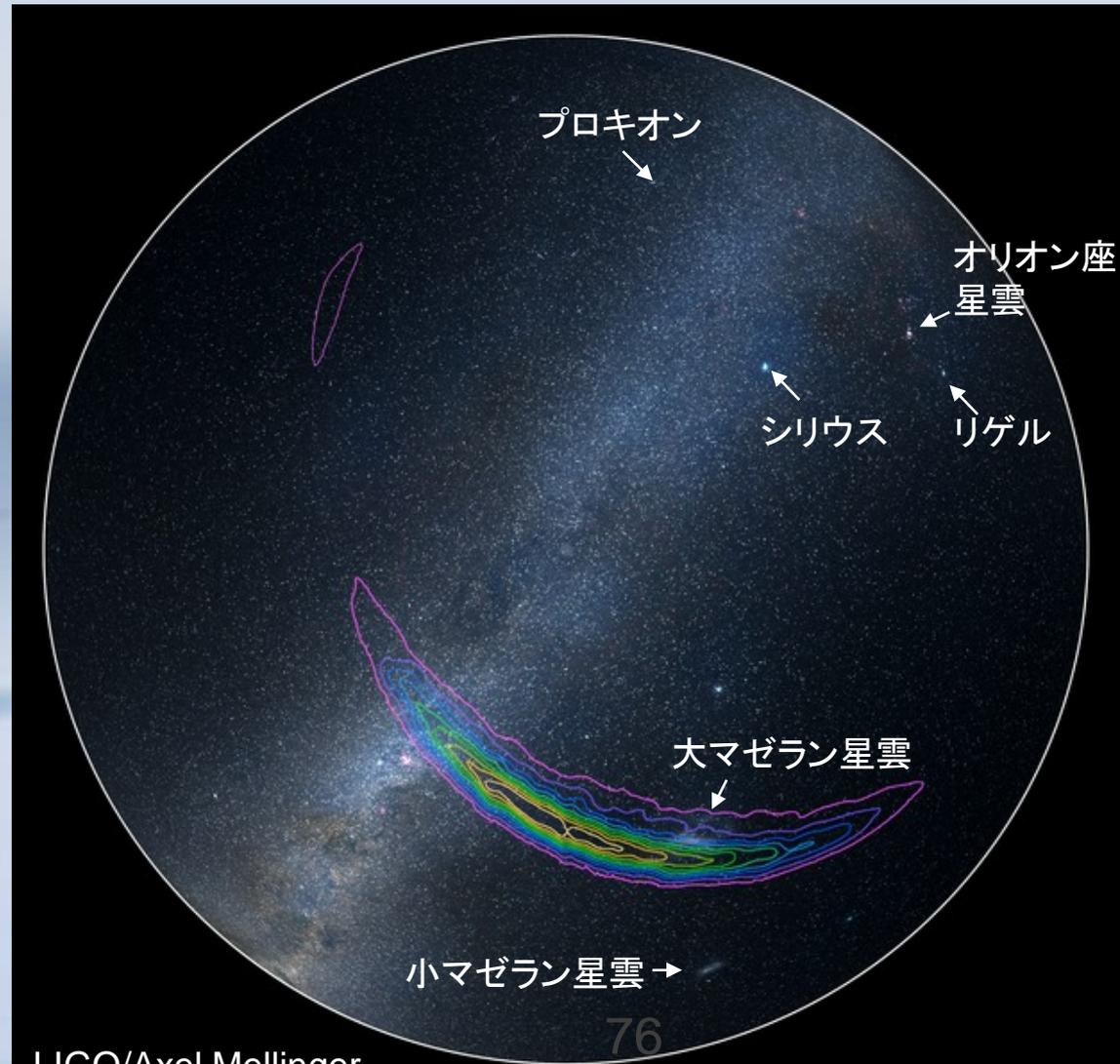
たとえば銀河付近に集中しているのか、もしくは関係なく一様に分布しているのか

1台の検出器だけでは重力波が来た方向をきめるのは不可能。

LIGOは2台持っている。

# 5.重力波検出器の将来

- LIGOの2台の検出器では**到来方向があまり特定できない**
- 約600平方度  
満月の3000倍  
の広さ  
冬の大三角形  
の2倍の広さ
- より多くの  
**検出器が必要**



# 5.重力波検出器の将来

苔山 圭以子、重力波検出器の開発と重力波天文学  
(大阪大学電気工学特別講義 2016年6月28日)



重力波検出器ネットワーク(第2世代)



# 5.重力波検出器の将来

## KAGRA



プロジェクト代表:  
梶田隆章

岐阜県の  
神岡鉦山内に  
建設

3kmの腕



安東正樹 重力波望遠鏡KAGRAで見る新しい宇宙の姿  
(東大物理学教室談話会 2013年5月31日)

Gifu Pre.  
Hida-city  
Kanioka  
Ikenoyama mt.

1000m  
Underground  
Altitude 358m

Landsat photo data  
NASA altitude data  
Cashmir 3D

# 5.重力波検出器の将来

KAGRAの重要な特徴

(1)岐阜県の神岡鉱山内に建設

**地面振動が小さい**(都市近郊の1/100)

->鉱山の入口の地面振動はそこまで小さくない。地下であることが重要

小さい雑音、安定な運転

(2)熱雑音低減のために**鏡を冷却**。

kmスケールでは初。

いずれも**将来の性能向上に不可欠**。

# KAGRAの特徴

地下サイト

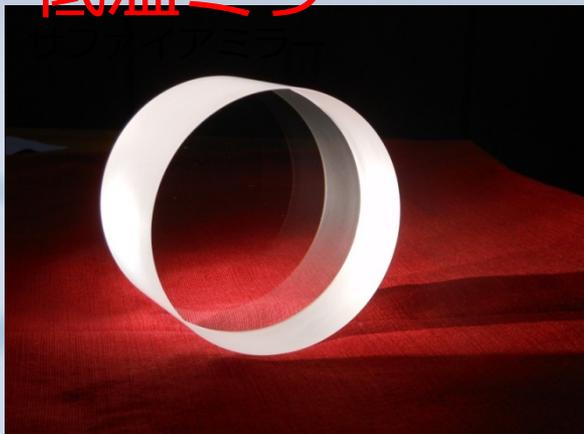
Y arm



X arm



低温ミラー



鏡の冷却装置 (クライオスタット)



# 6. まとめ

重力波: アインシュタインが予言した(1916)時空のさざなみ

**直接検出**は困難を極めた(アインシュタインからの最後の宿題)が  
**2015年**にアメリカのLIGOが検出した。

**物理的**な意義: 一般相対性理論の検証

**天文学的**な意義: 重力波天文学の創生

実際の観測例

(1)**間接的**証拠: 連星中性子星パルサーの公転周期の変化

(2)**直接的**証拠: ブラックホール連星の衝突からの重力波

さらなる**性能向上**と**LIGO以外の検出器が必要**。

日本では岐阜県飛騨市神岡町で**KAGRA**を建設中。

# 興味を持った人は....

安東正樹、重力波とはなにか、講談社ブルーバックス、2016年

川村静児、重力波とは何か、幻冬舎新書、2016年

クリフォード・M・フィル(松田卓也、二間瀬敏史訳)、

アインシュタインは正しかったのか?、TBSブリタニカ、1989年

おわり