

## ブラックホールと重力波

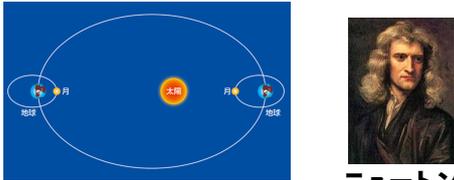
真貝寿明 (しんかいひさあき, 大阪工業大学)

2017年のノーベル物理学賞は、重力波の検出に成功した3人のアメリカ人学者が受賞しました。重力波は、「時空のゆがみ」が伝わる現象で、アインシュタインが100年前に予言していたものです。重力波によって、ブラックホールどうしの合体現象が宇宙にたくさんあることがわかってきました。

### 重力の正体は？ 重力波とは？

重力の正体をニュートンは万有引力で、アインシュタインは「時空のゆがみ」で説明した。

**重力の正体は？**



**ニュートン**

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

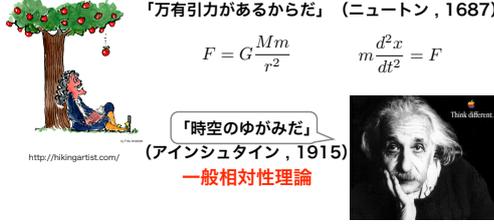
**万有引力**  
**＝すべてのものは引力で引き合う**

**重力の正体は？**

「万有引力があるからだ」 (ニュートン, 1687)

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \quad m \frac{d^2x}{dt^2} = F$$

「時空のゆがみだ」 (アインシュタイン, 1915)  
**一般相対性理論**



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

$$\frac{d^2\xi^\mu}{dt^2} = R^\mu{}_{\nu\rho\sigma} \frac{d\xi^\nu}{dt} \frac{d\xi^\rho}{dt} \xi^\sigma$$

**GRAVITATIONAL WAVES EXPLAINED**

WHAT IS A GRAVITATIONAL WAVE?

IT'S A RIPPLE IN THE FABRIC OF SPACE AND TIME.

IMAGINE THAT SPACE IS A GIANT SHEET OF RUBBER...

THINGS THAT HAVE MASS CAUSE THAT RUBBER SHEET TO BEND, LIKE A BOWLING BALL ON A TRAMPOLINE.

THE MORE MASS, THE MORE THAT SPACE GETS BENT AND DISTORTED BY GRAVITY.

FOR EXAMPLE, THE REASON THE EARTH GOES AROUND THE SUN IS THAT THE SUN IS VERY MASSIVE, CAUSING A BIG DISTORTION OF THE SPACE AROUND IT.

IF YOU JUST TRY TO MOVE IN A STRAIGHT LINE AROUND SUCH A BIG DISTORTION, YOU WILL FIND YOURSELF ACTUALLY MOVING IN A CIRCLE.

THAT'S HOW ORBITS WORK. THERE'S NO ACTUAL FORCE PULLING THE PLANETS AROUND, JUST A BENDING OF THE SPACE.

重力波って何？

時間と空間のじゅうたんを伝わるさざ波だよ。

大きなゴムのシートを考えてみて、トランポリンにボールをのせるときと同じで、重いものをのせると沈むよね、重ければ重いほど、重力によってシートは曲がる。

地球が太陽を回るのは、太陽の重力が大きくてシートを沈み込ませていて、地球が太陽の近くにつかまっているからだ。地球はまっすぐ進もうとしても太陽のまわりをまわってしまう、惑星を引っ張っている力ではなく、時空が曲がっているんだ。

GRAVITATIONAL WAVES ARE PRODUCED ANYTIME MASS ACCELERATES, CHANGING THE DISTRIBUTION OF SPACE.

EVERYTHING WITH MASS AND/OR ENERGY CAN MAKE GRAVITATIONAL WAVES.

IF YOU AND I STARTED TO DANCE AROUND EACH OTHER, WE WOULD ALSO CAUSE RIPPLES IN THE FABRIC OF SPACE AND TIME.

BUT THESE WOULD BE EXTREMELY SMALL, PRACTICALLY UNDETECTABLE.

NOW GRAVITY IS VERY WEAK IN THE SCALE OF OTHER FORCES IN THE UNIVERSE.

A NEUTRON STAR AND A BLACK HOLE.

PAIR OF NEUTRON STARS. PAIR OF BLACK HOLES.

SO YOU NEED SOMETHING REALLY REALLY MASSIVE MOVING VERY FAST TO MAKE THE BIG RIPPLES THAT WE CAN DETECT.

重力波は大きな質量が空間を曲げるほど加速していると発生する。質量やエネルギーがあれば重力波は発生する。僕と君が互いに手を組んでダンスをしたら、時空のじゅうたんに振動させて重力波になる。ただ、人間が動いても小さな重力波しか発生しない。

重力は他の力にくらべて、とても弱い。

中性子星のペア、ブラックホールのペア、中性子星とブラックホールのペア。

だからとてもとても重くて、とてもとても速く動くものが、観測できるような大きな重力波を発生させるんだ。

図 1: 重力波は「時空のゆがみ」。(<http://phdcomics.com/>)

# ブラックホールと重力波

いまから3年前の2015年9月、アインシュタインが予言していた重力波が、はじめて観測された。ブラックホールが2つ連星をつくっていたものが最後に合体したとき、巨大な質量エネルギーが宇宙全体に広がるだろうという予想は以前からあったが、技術的な進歩もあって、ようやく発見された。

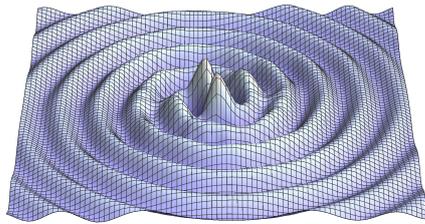


図 2: 2つの連星ブラックホールから周囲に出される重力波のイメージ。中央の2つの大きな山のところに星があり、2つの星が次第に近づいて合体するまでに、時空にゆがみを引き起こす。ゆがみは波として周囲に伝播する。

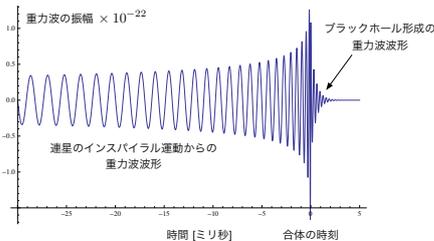
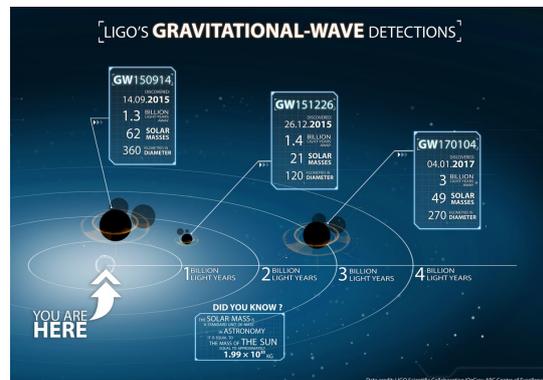


図 3: 2つの連星が合体するときに予想される重力波の波形。

重力波の発生と伝播

ブラックホール連星や  
中性子星連星

レーザー干渉計  
LIGO=Laser Interferometer  
Gravitational-Wave Observatory



Nobelprize.org

2017 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

Rainer Weiss  
Barry C. Barish  
Kip S. Thorne

"for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves"

LIGO検出器への決定的な貢献と重力波の観測に対して

ライナー・ワイス(85)  
バリー・バリッシュ(77)  
キップ・ソーン(77)

マルチ・メッセンジャー天文学の誕生

	宇宙線	ガンマ線	X線	可視光線	赤外線	電波	重力波
波長[m]	$10^{-13}$	$10^{-10}$	$10^{-9}$	$3.8 \times 10^{-7}$	$7.7 \times 10^{-4}$	1	$10^3$
波長[nm]				380	770		
振動数[Hz]	$3 \times 10^{18}$	$3 \times 10^{17}$				$3 \times 10^{12}$	$3 \times 10^8$

ガンマ線 X線 可視光 赤外線 電波 重力波

重力波天文学ははじめました