

ブラックホールを観る ブラックホールを聴く

身近な物理現象と最先端の物理研究

2024年7月27日 枚方公園青少年センター
大阪工業大学 真貝寿明（しんかいひさあき）

1 「重力の正体は、万有引力である」とニュートンは気がついた

- 万有引力 = 全てのものは引力で引き合う

$$\begin{aligned}\text{万有引力の大きさ} &= G \frac{Mm}{r^2} = G \times M \times m \div r \div r \\ &= \text{定数} \times \text{地球の質量 (kg)} \times \text{物体の質量 (kg)} \div \text{地球の半径 (m)} \div \text{地球の半径 (m)}\end{aligned}$$

となるので、地球以外の星での体重が計算できるよ。

星	質量	地球の何倍か	半径	地球の何倍か	重力は何倍か
地球	6.0×10^{24} kg	1	6370 km	1	1
月	7.3×10^{22} kg	0.012	1730 km	0.27	
火星	6.4×10^{23} kg	0.11	3390 km	0.53	
木星	1.9×10^{27} kg	317	69900 km	11	
土星	5.7×10^{26} kg	95	58200 km	9.1	
太陽	2.0×10^{30} kg	333	700000 km	110	

- 脱出速度（星から脱出するのに必要な速度）

$$\begin{aligned}\text{脱出速度の大きさ} &= \sqrt{2gR} = \sqrt{2 \times g \times R} \\ &= \sqrt{2 \times \text{重力加速度 (重力の大きさ)} \times \text{地球の半径}}\end{aligned}$$

となるので、地球以外の星でも脱出速度が計算できるよ。

星	重力加速度	地球の何倍か	半径	地球の何倍か	脱出速度	地球の何倍か
地球	9.8 m/s^2	1	6370 km	1	11.1 km/s	1
月	1.6 m/s^2	0.16	1730 km	0.27	2.4 km/s	
火星	3.7 m/s^2	0.38	3390 km	0.53	5.0 km/s	
木星	25.8 m/s^2	2.62	69900 km	11	60 km/s	
土星	11.1 m/s^2	1.13	58200 km	9.1	36 km/s	
太陽	271 m/s^2	27.6	700000 km	110	615 km/s	

2 脱出速度が光の速さを超えたら・・・

- すべてのもののうち、いちばん速く動くのは、光で、秒速 30 万 km です。（正確には、光速は $c = 299792458 \text{ m/s}$ ）
- 大きな質量で、小さな半径の天体からは、光でさえも脱出できなくなる。＝ ブラックホール
- $c = \sqrt{2gR}$, $g = \frac{GM}{R^2}$ より, $c^2 = \frac{2GM}{R}$ だから, ブラックホールの半径 $R = 2GM/c^2$ がわかる. G は万有引力定数で, $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m/s}^2/\text{kg}$
地球がブラックホールになるとしたら, 地球の全質量をどれだけの半径に閉じ込めたらいいかな.

星	質量	ブラックホールになる半径
地球	$6.0 \times 10^{24} \text{ kg}$	
太陽	$2.0 \times 10^{30} \text{ kg}$	2.9 km
天の川銀河中心	太陽の 400 万倍	
M87 銀河中心	太陽の 65 億倍	

3 アインシュタインの相対性理論

アインシュタインは2つの相対性理論をつくりました。

	特殊相対性理論 (1905 年)	一般相対性理論 (1915 年)
物理法則	光速に近いときの運動法則	大きな重力をもつ物理法則
結論	時間の進み方は相対的である. 光速に近いほど時間はゆっくり進む	空間も伸び縮みする. 大きな質量があると空間がゆがむ. ゆがんだ空間を動くことが重力による運動となる.
式	$E = mc^2$	$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$
予言したもの	核エネルギーの存在	ブラックホール, 宇宙の膨張, 重力波

- ブラックホール, 宇宙の膨張, 重力波のどの予言も, アインシュタイン自身はじめは信じてませんでした.
- **宇宙の膨張**が発見されたのは, 1929 年にハッブルとルメートルによる観測です.
- **ブラックホール**が存在することがわかってきたのは, 1960 年代です. ブラックホールが本当に存在することが観測でわかってきたのは, 1990 年代の観測です (天の川銀河中心にブラックホールがあることを示した天文学者のゲンツェルとゲズが, 2020 年にノーベル物理学賞を受賞). 電波望遠鏡を使ってブラックホールの撮影に成功したことが発表されたのは 2019 年です.
- **重力波**が存在することがわかってきたのは, 1970 年代です. そして, 重力波が直接検出されたのは, 2015 年でした (アメリカの LIGO (らいご) グループが 2017 年にノーベル物理学賞を受賞).

4 レンズと焦点

レンズに平行な光が入ると、焦点に集まる。凸レンズと凹レンズで比較しよう。

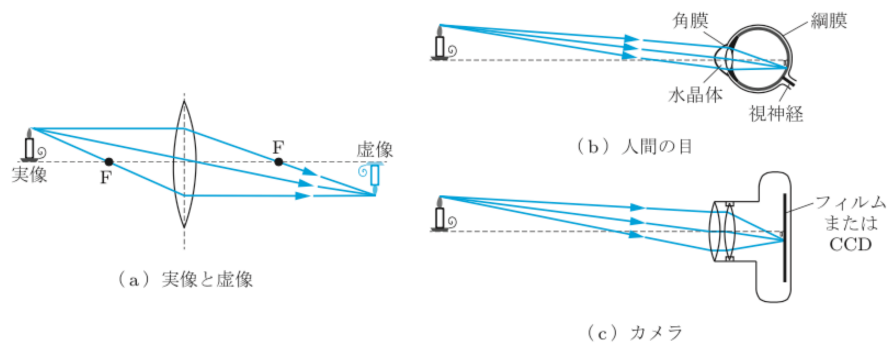


図 1: 凸レンズと焦点

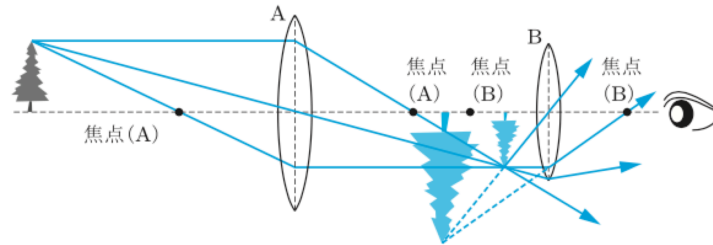


図 2: 凸レンズ 2 枚で望遠鏡になる

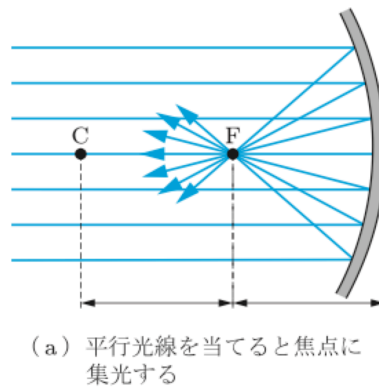


図 3: 凹レンズと焦点

- 電波望遠鏡は凹レンズと同じ。望遠鏡が大きいほど、弱い電波を観測できる。
- ブラックホールの撮影をしたイベント・ホライズン・テレスコープ (Event Horizon Telescope; EHT) のグループは、世界中の電波望遠鏡を使って、同じ時間に遠くのブラックホールを観測した。

5 ブラックホールの写真撮影に成功



図 4: (左) イベント・ホライズン・テレスコープのグループによる電波望遠鏡. (右) 初めて公開された M87 銀河中心のブラックホール.

6 波

音も光も水面も波.

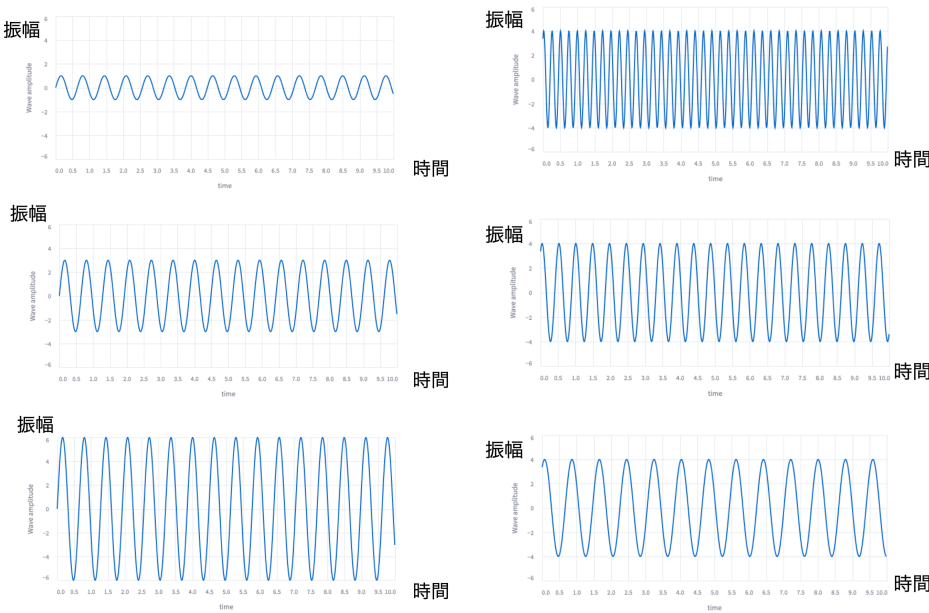


図 5: 振幅（波のゆれる大きさ）のちがい 振動数（1 秒間の波の数）のちがい

	音	光
速さ	秒速 340m	秒速 30 万 km
振幅	音の大きさ	光の強さ
振動数	音の高低（ドレミ） 大きい振動数ほど高い音	光の色 大きい振動数ほど青い色
可聴・可視領域	20-20000Hz の音を聞き取れる	可視光線（赤燈黄緑青藍紫）

- 可視光線，赤外線，紫外線

												
	宇宙線	ガンマ線	X線	光			電磁波					
				紫外線	可視光線	赤外線	マイクロ波	超短波	短波	中波	長波	超長波
波長[m]	10^{-13}	10^{-10}	10^{-9}	3.8×10^{-7}	7.7×10^{-7}	10^{-4}	1	10	10^2	10^3	10^4	
波長[nm]				380	770							
振動数[Hz]	3×10^{18}	3×10^{17}					3×10^{12}	3×10^8	3×10^7	3×10^6	3×10^5	3×10^4
利用例		医療／食品照射	医療／X線写真	殺菌	光学機器	赤外線写真	携帯電話 電子レンジ	テレビ FMラジオ	短波ラジオ	AMラジオ	電波時計 飛行機の通信	

図 6: 人間の目に見える光を可視光線．赤から紫まで．

- 光は波であることを偏光シートの実験で確かめよう

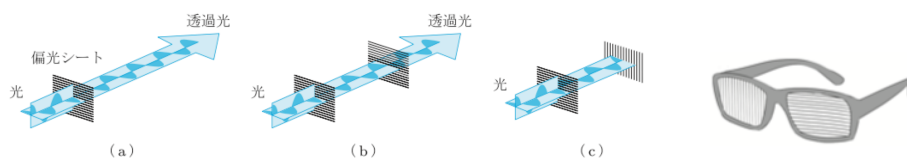


図 7: 偏光シートの実験．立体映像メガネのしくみ．

- ドップラー効果

波源が移動したり，観測者が移動したりすると，観測される音の振動数が変わる現象．

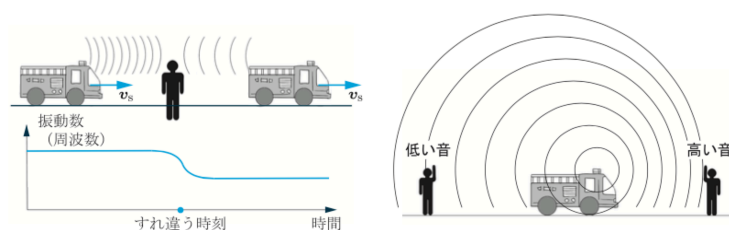


図 8: 音源が近づくときは高い音が聞こえているが，遠ざかるときは低い音になる．

光のドップラー効果では，光源が近づくときは元の色より_____，光源が遠ざかるときは元の色より_____見える．

7 重力波の直接観測に成功

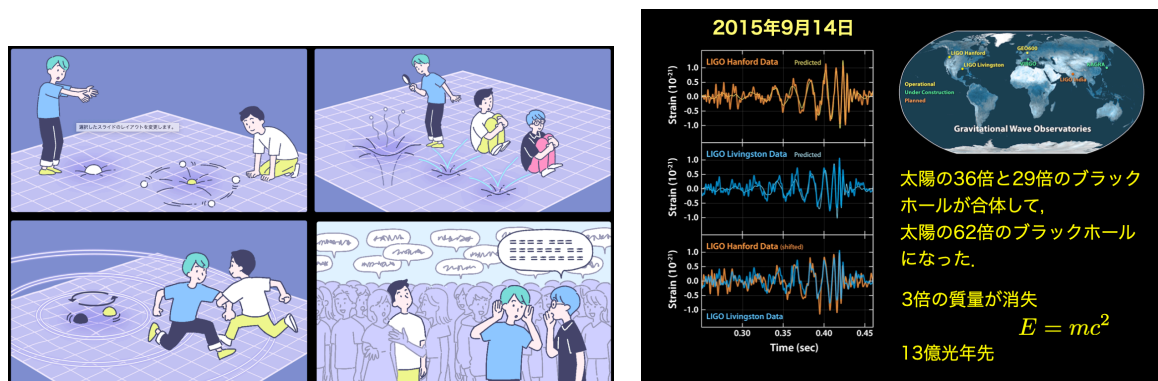


図 9: (左) 連星が合体すると大きな重力波を発生させる。(右) 初めて検出された重力波の波形。

8 いま、研究者が取り組んでいること

- アインシュタインの相対性理論はどこまで正しいのか？
- ブラックホールが他の星を飲み込む様子を観測したい。
- 連星合体以外の重力波を観測したい。
- 銀河中心にあるような超巨大ブラックホールはどのようにしてできたのか？

..... まだまだ、たくさん未解決の問題あり。

-
- 物理に関する図は、『日常の「なぜ」に答える物理学』（真貝寿明著、森北出版）から。
 - 真貝のウェブページ <https://www.oit.ac.jp/is/shinkai/index.html>
 - 本日配布したプリントと、使ったスライドは、次の QR コードから取得できます。

プリントpdf



スライドpdf

