

最先端物理学が描く宇宙

Frontiers of Physics & Cosmology

第6回 2025/10/27

第3章 現代物理学1：相対性理論（1）

真貝 寿明
Hisaaki Shinkai



<https://www.oit.ac.jp/labs/is/system/shinkai/mukogawa/>

レポート課題締め切り10月31日23:59

宇宙人はいるか？ 各自の考えを述べよ

「地球外生命体・地球外知的生命体の存在について」

提出日・様式など



- A4 用紙 3-4 枚程度. 手書き・PC 印刷どちらも可. 表紙は不要. (手書きの場合は写真撮影したものを提出)
- 必要であれば, 図や表を添付してよい. (上記のページ枚数に含める).
- 〆切は, **10月31日 (木) 23:59**
Google Classroom の課題として提出.
- 提出ファイルの名前は, 「U 学科 XXXXXXXX ○○○○」の形式とすること. (U は Universe の頭文字でレポート区別するためのもの, 学科は大日/短生など 2 文字で, XXXXXXXX は学籍番号, ○○○○は氏名) とすること.
- ファイル内の初めにも, タイトル・学部学科学年・学籍番号・氏名を記載すること.
- 参考とした文献 (web ページ含む) などがあれば, **必ず**記すこと. 剽窃行為が認められる場合は評価を下げます. (参考文献から引用するのは構いませんが, 引用範囲は必ずそう明記すること.)



星空と宇宙

レモン彗星が1350年ぶりの回帰 11月にかけて西空に輝く

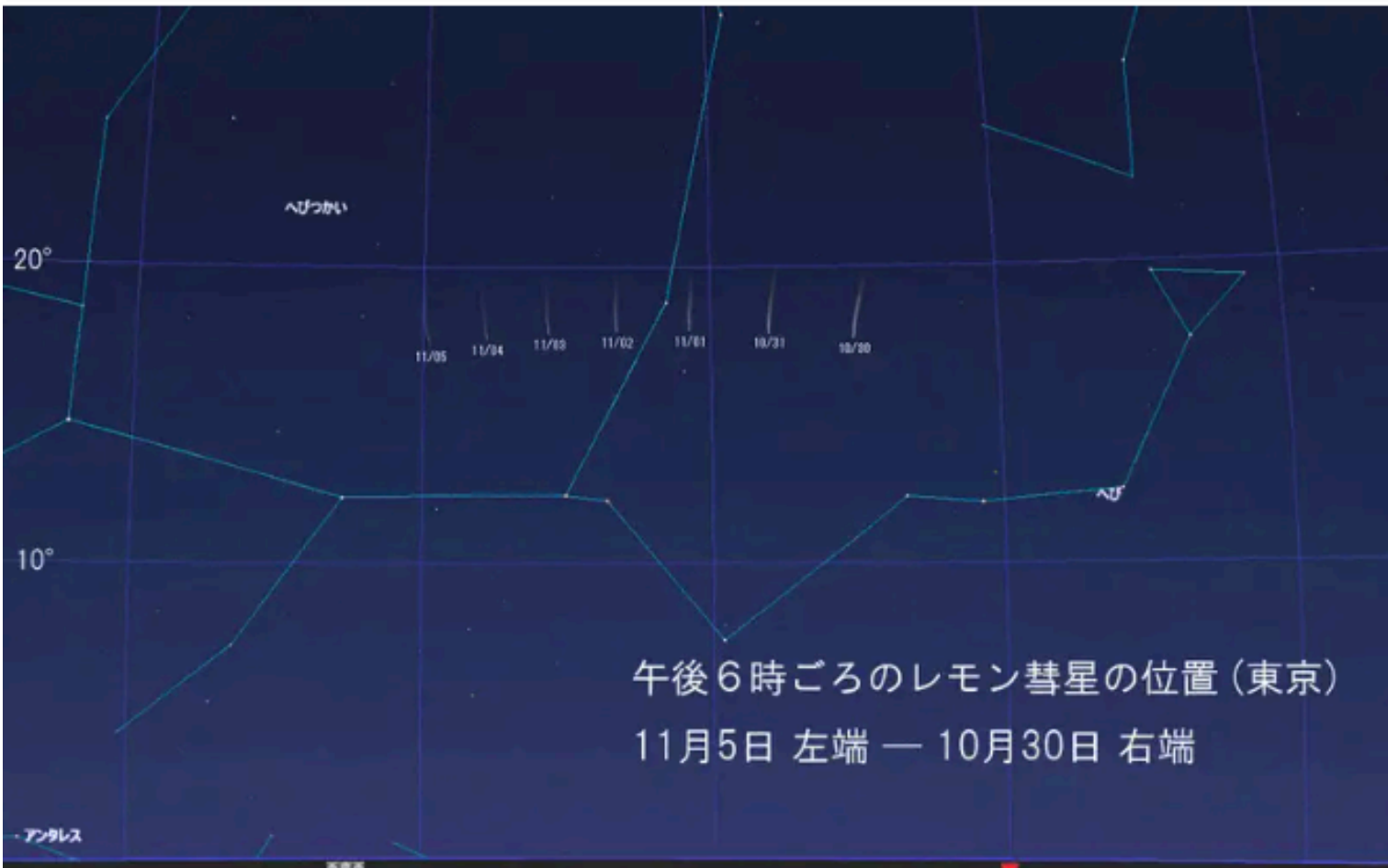
手塚耕一郎 環境・科学 | 速報 | 科学・テクノロジー | 宇宙

毎日新聞 | 2025/10/18 17:00(最終更新 10/18 17:11) | 1413文字

また新たな彗星(すいせい)がやってきました。その名は「レモン彗星」。黄色いレモンが夜空に浮かぶ姿を想像しそうな名前ですが、実は関係がありません。2025年1月、米国のレモン山天文台が発見しました。新月の10月21日には地球に約9000万キロ(地球―太陽間の6割ほど)まで最接近します。今まさに、見ごろです。



月明かりの中でも尾を伸ばして輝く「レモン彗星」。太いちり(ダスト)の尾の中に、細く伸びるイオンの尾が見える＝山梨県鳴沢村で2025年10月17日午前3時51分、手塚耕一郎撮影(10秒露光、赤道儀使用)





大西 浩次

2日 · 🌐



#今日の星景写真 2025年10月25日
「里山のレモン彗星（かんむり座から）」
撮影:2025/10/24
#鬼無里 長野市

夕暮れの空に #レモン彗星 が輝いています。

#白馬三山（#白馬鎗ヶ岳、#杓子岳、#白馬岳）
の上、
#かんむり座 の左下に10度以上の尾を伸ばして
います。

C/2025 A6 (Lemmon)
#長野県は宇宙県 表示を縮小

👍❤️ 108

5 💬

👍 いいね！ 💬 コメントする ➦ シェア



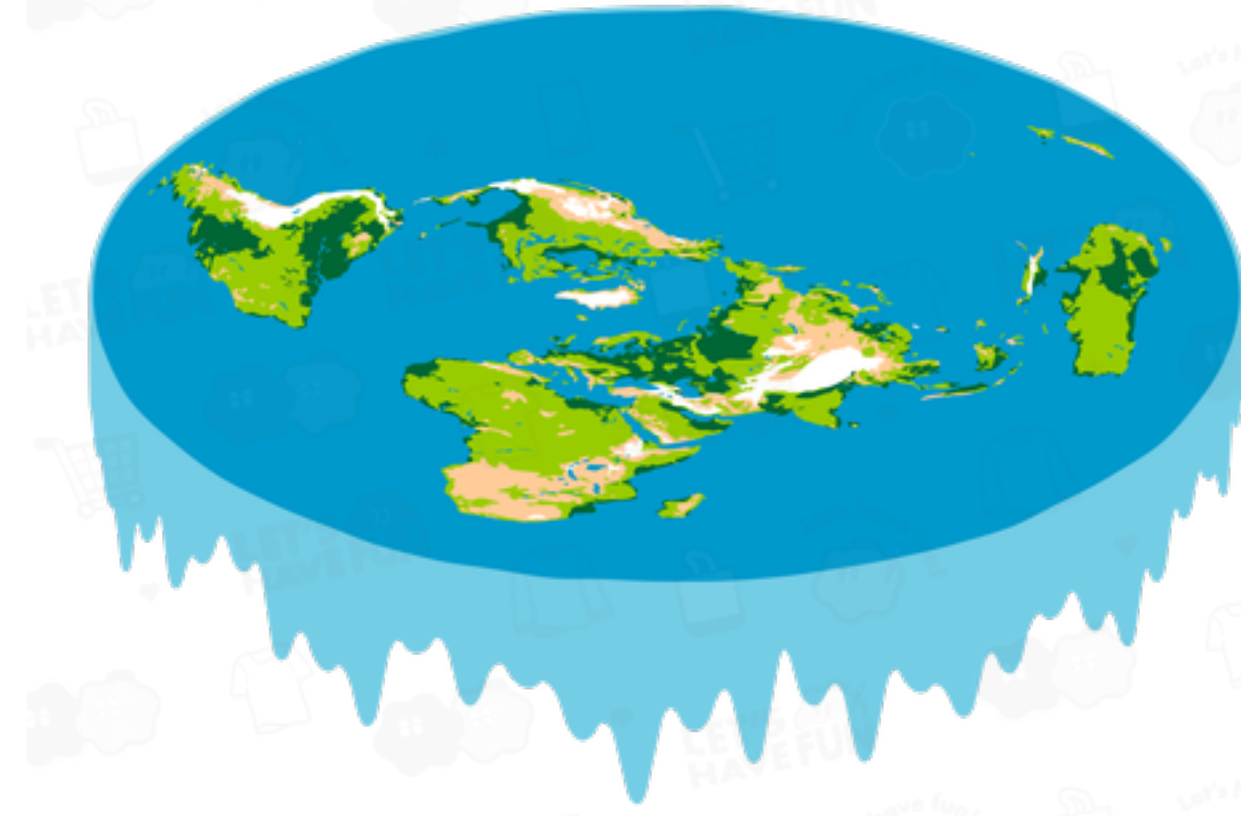
COMET LEMMON (C/2025 A6 (Lemmon))

f=70mm, F=2.8, ISO=4000, 13sec Exp

2025/10/24_18h11m47s @KINASA/NAGANO/NAGANO/JAPAN ©Kouji Ohnishi

前回のミニッツペーパーから

地球平面説を信じている人は何を根拠に？
何のメリットが？



宇宙に空気が無いとあんなにいたって、
どうやって会話するんでしょう。
宇宙人たちは信号で会話してるのでしょうか。

インターステラ - という宇宙系の映画観たことありますか？

受験生のとき現代文も勉強していた

物理学と神という評論？を読んでとてもおもしろかったことを思い出しました。

さにはたどりつくなぜ？は証明がない。理由をつければ神がそうしたと言わざるを得ないといった内容だったと思います。

時間の流れに物理学的にどう考えられているのか？

地球温暖化を完全に防げることは不可能なのか疑になった。

前回のミニツツペーパーから

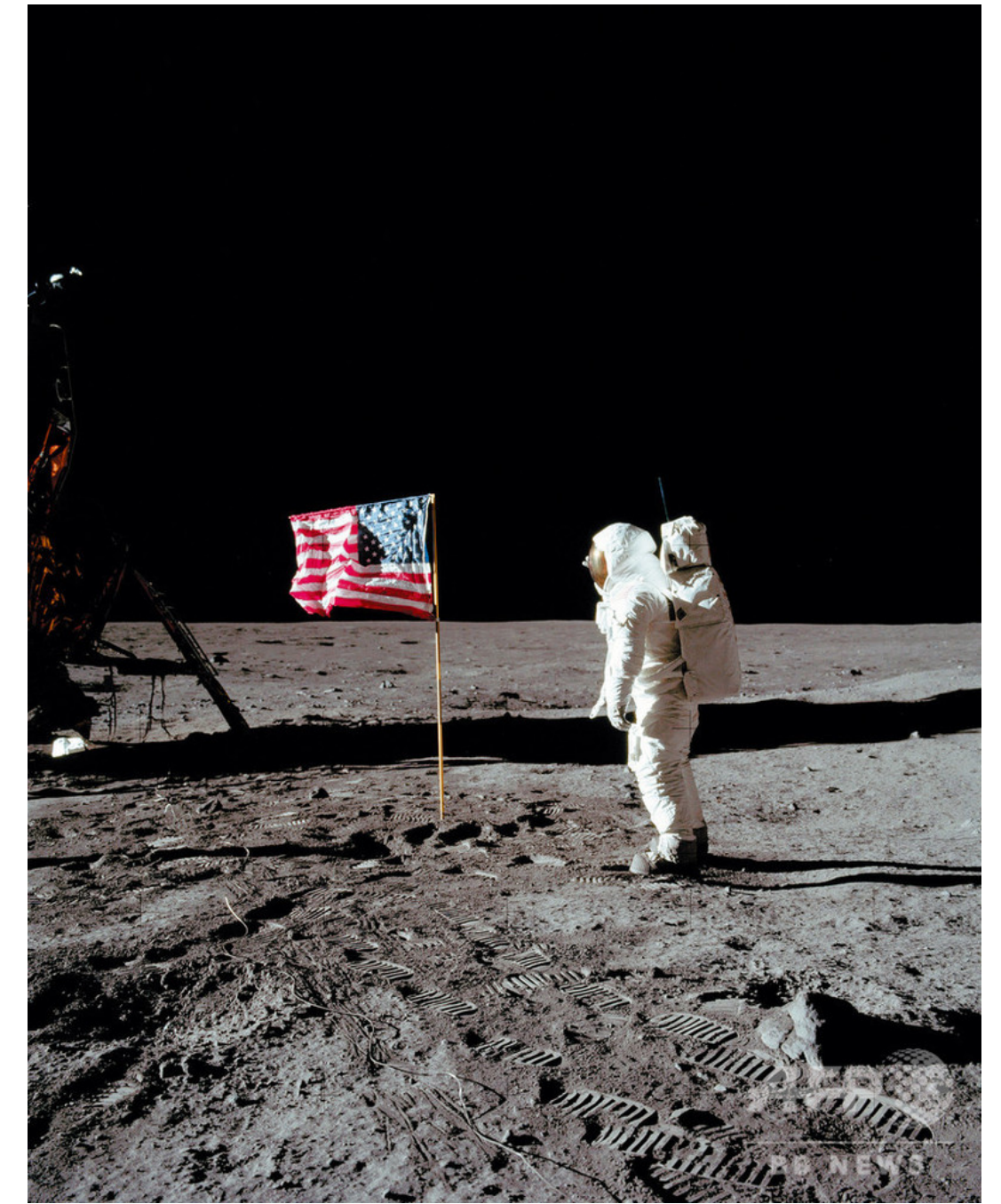
アポロ号が月面着陸して以来、最も月に人間が行かずに居たのはなぜですか

1960年代は米ソの宇宙開発競争 → 政治的・競争的な動機の消滅
多額の費用, 技術的な難しさ

アルテミス計画など再び計画あり → 月の資源活用, 火星探査への基地...

宇宙食について知りたい

長期保存が可能であること。
できるだけ軽量であること。
強い臭気を伴わないこと。
飛散しない。
栄養価が優れていること。
温度変化や衝撃に耐えること。
特別な調理器具を必要としないこと。



<https://ja.wikipedia.org/wiki/宇宙食>

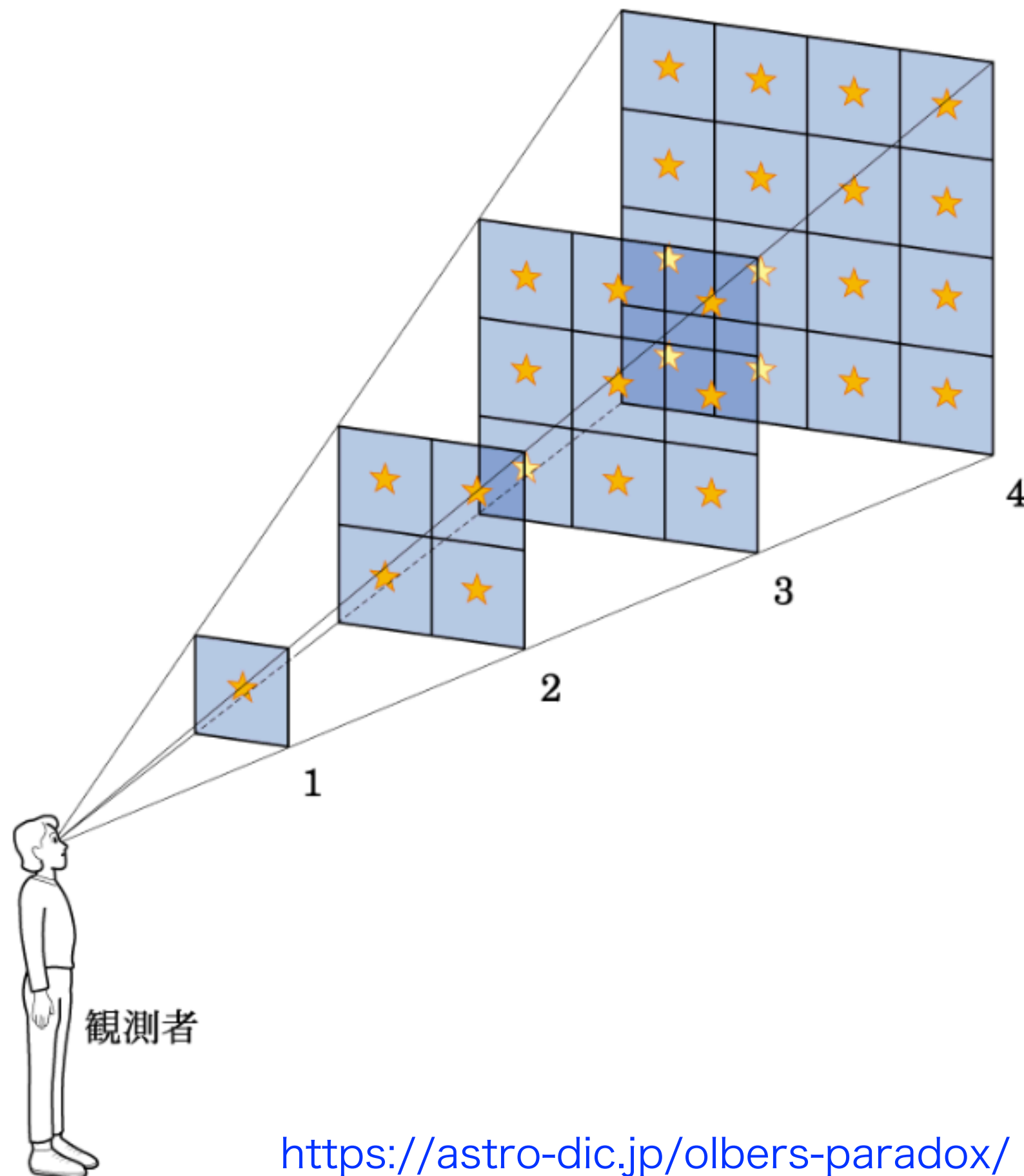


前回のミニツツペーパーから

星が光っているのになぜ宇宙は暗いのでしょうか？

オルバースのパラドックス

膨張していない宇宙で星間吸収がないとすれば、遠方の星から空の単位面積あたりに届く光の強度は星までの距離の2乗に反比例して弱くなる。一方、もし星の密度が一様であれば、天球上の単位面積内で、各距離(実際にはその距離を中心とする微小な距離範囲)にある星の数は距離の2乗に比例して増大する。両者を掛けたものがその距離にある星々から届く光の天球上での表面輝度になるが、光の強度が弱くなる効果と星の数が増える効果が打ち消し合って表面輝度は距離に依らない一定の値をとることになる。従って近い星も遠い星も表面輝度に同じ寄与をするため、遠い星まで考えれば夜空はどの方向を見てもどんどん明るくなる。オルバースは、どの視線上でも星が重なり合って、空は星の表面と同じ明るさで輝くと推測して夜空が暗いことに疑問を投げかけた。



<https://astro-dic.jp/olbers-paradox/>

球の体積 $\frac{4\pi R^3}{3}$

球の表面積 $4\pi R^2$

前回のミニッツペーパーから

ニュートンを中学、高校で習ったけれど、今改めて学んでいる方が少し変わっている(自分の中で)と感じた。

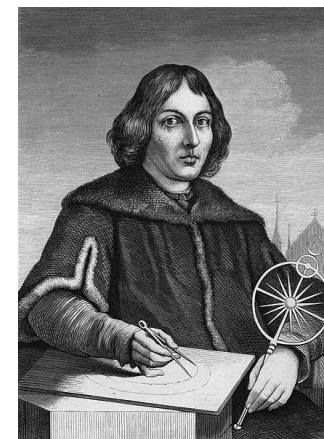
月が地球に落下しないのと同じように説明に納得した。

2. 近代物理学の夜明け: 宇宙はどう理解されてきたのか

近代物理学をつくりあげた登場人物たち

コペルニクス

Nicolaus Copernicus
(1473-1543)



地動説

ブラーエ

Tycho Brahe
(1546-1601)



天体観測

ケプラー

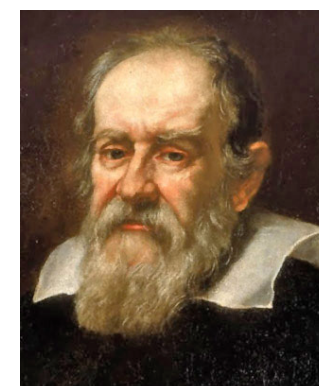
Johannes Kepler
(1571-1630)



惑星運動の法則

ガリレイ

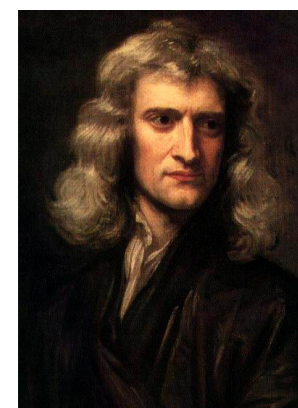
Galileo Galilei
(1564-1642)



慣性・自由落下運動
地動説の物理的根拠

ニュートン

Isaac Newton
(1642-1727)



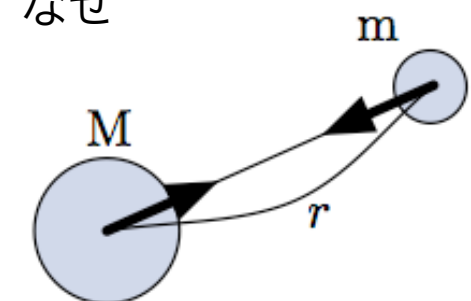
運動の法則
万有引力

7

【物理】

なぜ月は地球に落下してこないのか

万有引力を考えると、すべての物体は近づいてゆくように思える。地球と月も万有引力で引っ張り合っているのにも関わらず、なぜ月が地球に落下してこないのだろうか。



33

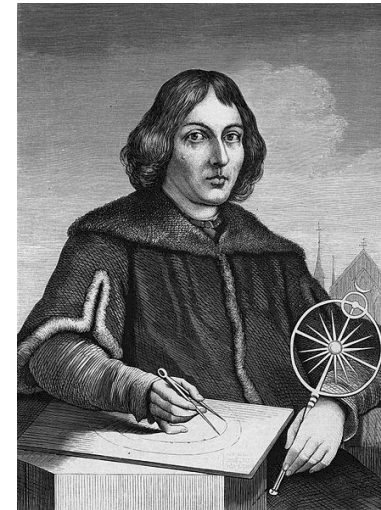
前回のミニッツペーパーから

昔の人は どうやって研究資金を手に入れたか

2. 近代物理学の夜明け: 宇宙はどう理解されてきたのか

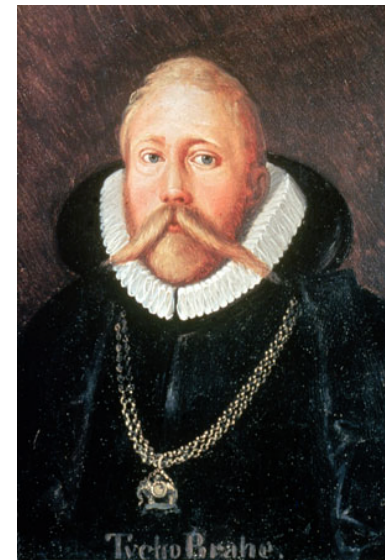
近代物理学をつくりあげた登場人物たち

コペルニクス
Nicolaus Copernicus
(1473-1543)



地動説

ブラーエ
Tycho Brahe
(1546-1601)



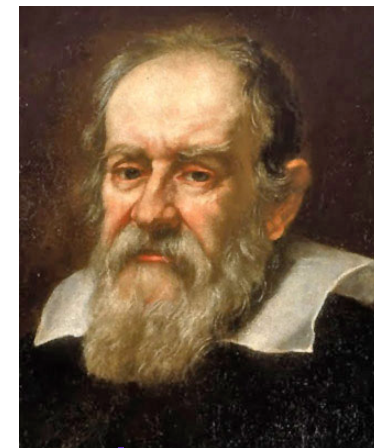
天体観測

ケプラー
Johannes Kepler
(1571-1630)



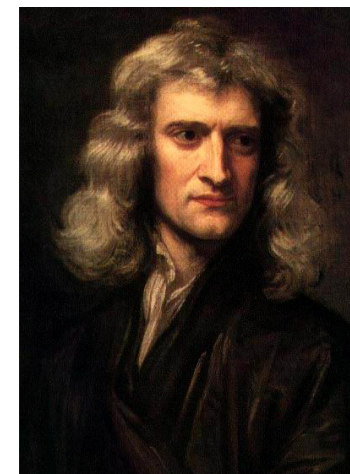
惑星運動の法則

ガリレイ
Galileo Galilei
(1564-1642)



慣性・自由落下運動
地動説の物理的根拠

ニュートン
Isaac Newton
(1642-1727)



運動の法則
万有引力

ティコ・ブラーエ

デンマーク王フレデリク2世と皇帝ルドルフ2世
星占い

ヨハネス・ケプラー

ルドルフ2世の宮廷付数学者
星占い
貴族からの支援

ガリレオ・ガリレイ

大学教授
私的なパトロン: フィレンツェのメディチ家子息の家庭教師
発明品

ニュートン

大学からの給料, 大学からの研究費
君主からの資金
王立協会
個人的な投資

前回のミニッツペーパーから

ノイズキャンセリングのデモの話もしてるから。

耳栓 + イヤーマフ をしても聞こえる音を消す方法はあるか

【身近な技術】

ノイズキャンセリング ヘッドホン

ノイズキャンセリングヘッドホンとは？

周囲の騒音を低減し、クリアなサウンドを再生する
ノイズキャンセリングヘッドホン

ANC NOISE
CANCELING

電車内や航空機※などでのリスニング時に、走行音やエンジンノイズなどさまざまな騒音を低減。

勉強や仕事のときなどは、気が散る原因となる周囲の雑音を低減し、静かな環境で聴けるので目的に集中できます。また、音量を上げ過ぎずに音楽を聴きとれるので、周囲への音漏れの心配がありません

■ノイズキャンセリングヘッドホンの活躍シーン



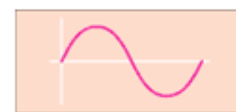
※航空機内の音楽サービスシステムにより、ご使用になれない場合があります

※航空機内で電子機器の使用が禁止されている場合や、機内の音楽サービスを個人のヘッドホンで利用することが禁止されている場合は、本機を使用しないでください

■ノイズキャンセリング機能の原理

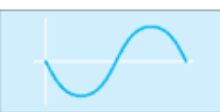


MDR-NC6
内蔵マイク



1. 騒音（元の波）
ヘッドホンに内蔵されたマイクで周囲からの騒音を拾い、ノイズキャンセリング回路がその音を分析。

+



2. 逆位相の波
その騒音を打ち消す効果のある、逆位相の音を発生。

→



3. 合成されて消えた波
元の波を反転させた逆位相の波を重ね、元の波を消去。これにより周囲の騒音を低減します。

*ノイズキャンセリング機能は、人が耳障りに感じやすい40〜1,500Hzの音を低減させます。周囲からの騒音がまったく聞こえなくなるわけではありません

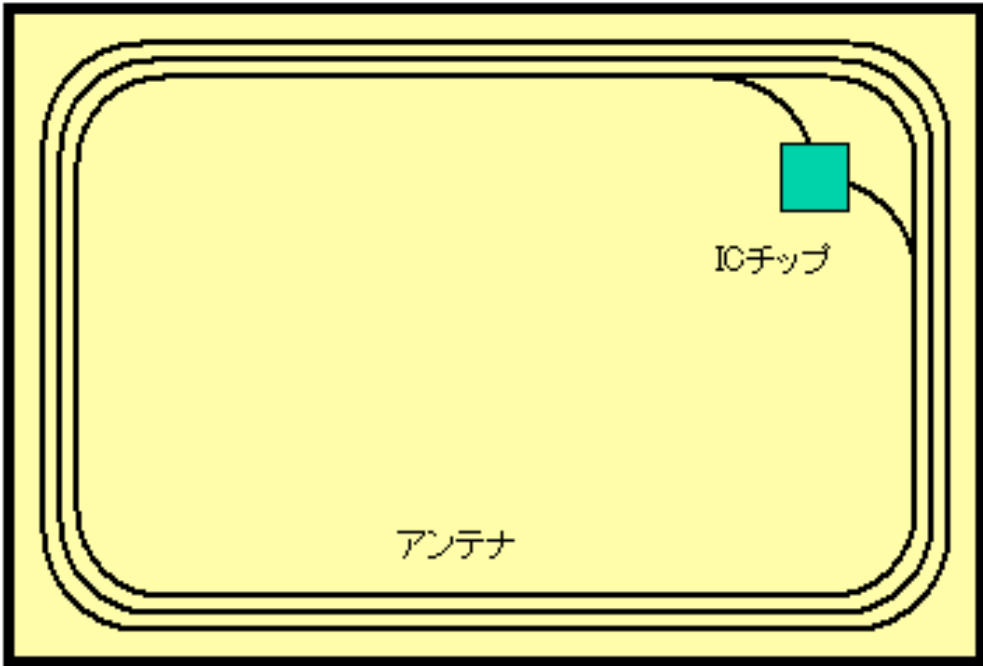


http://www.sony.jp/headphone/select/popup_noise

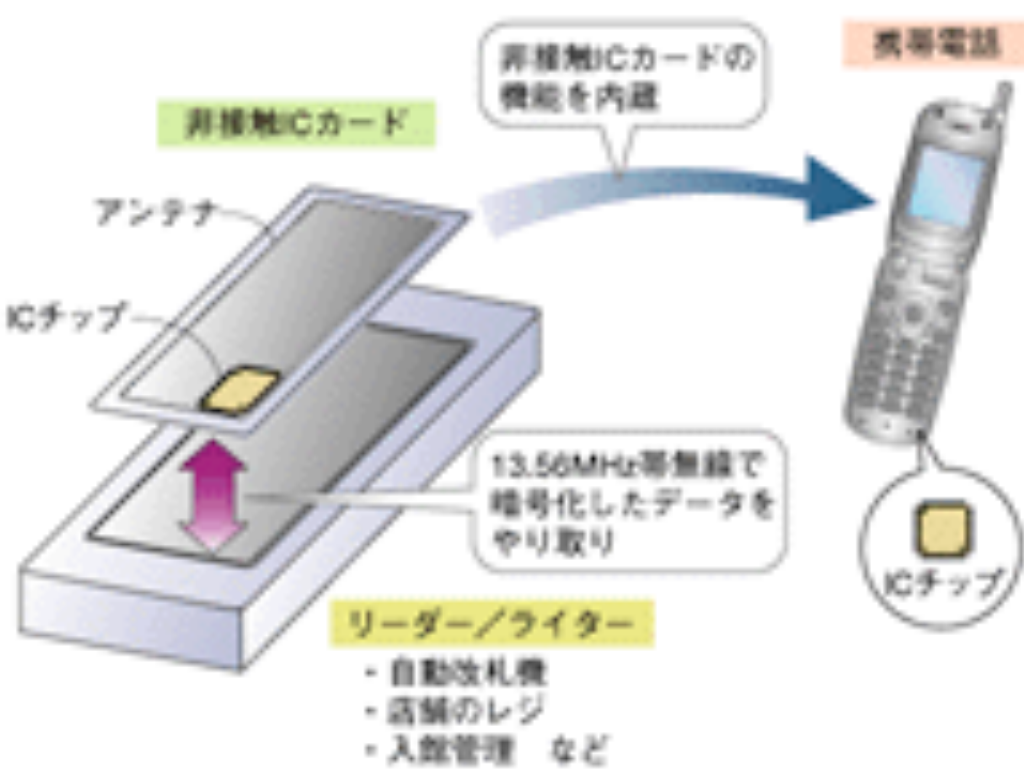
今回の授業で、ICカードにはコイルが入っており、電磁誘導が起きていると知ったが、モバイルICOCAの場合どうなっているか知りたい。

非接触型ICカード のしくみ

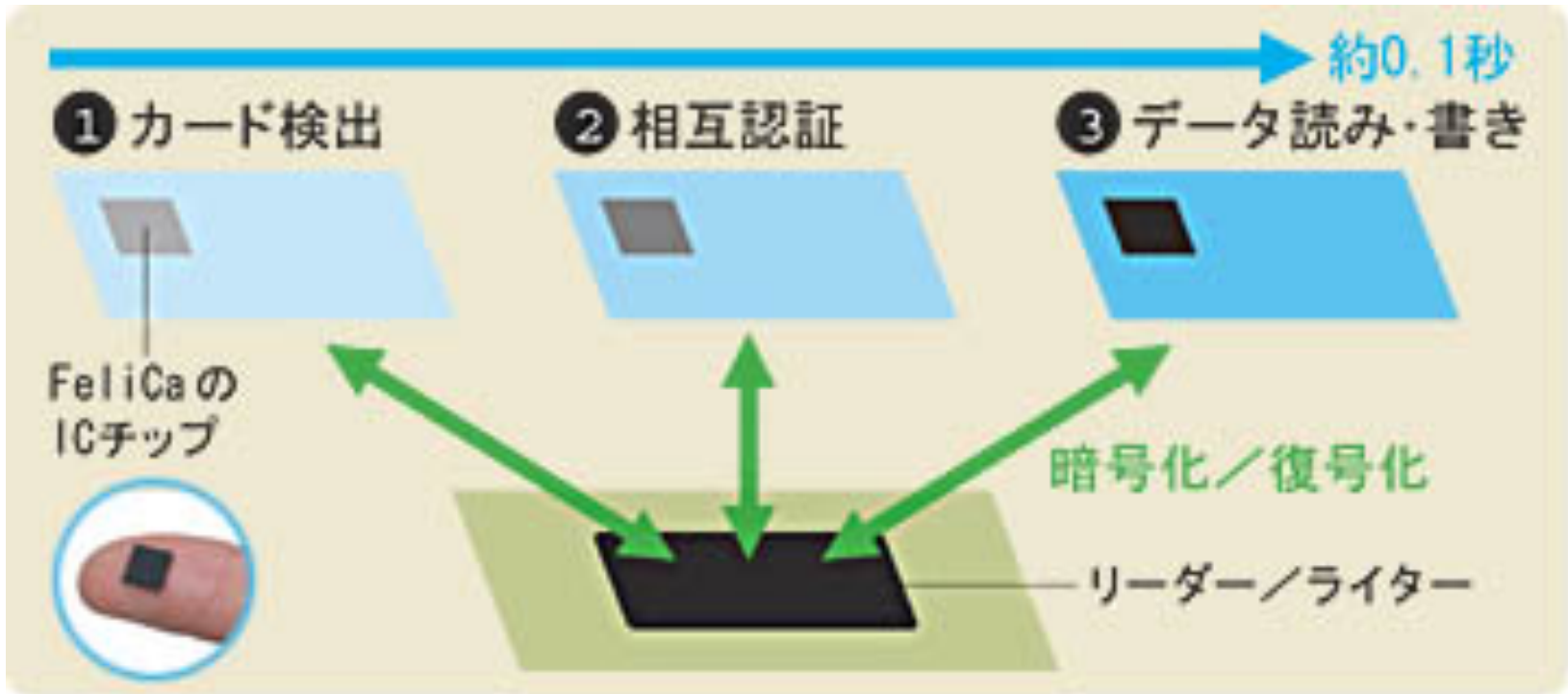
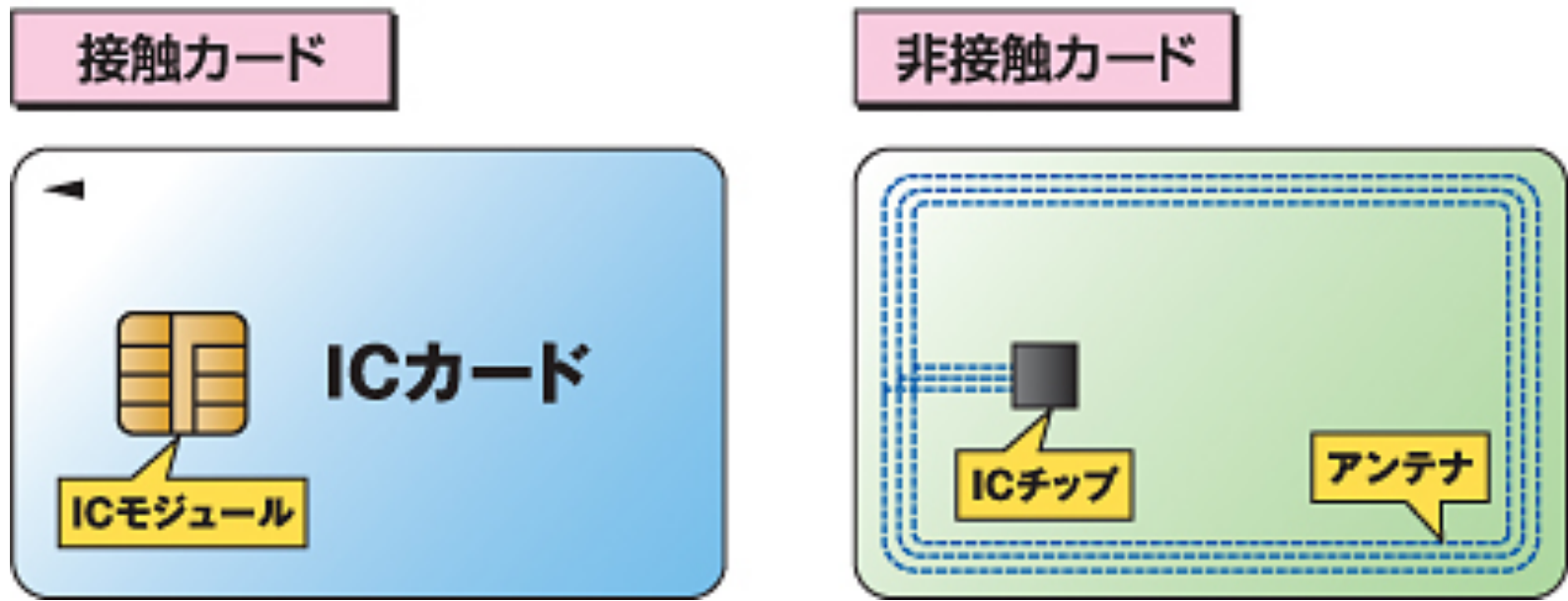
IC=Integrated Circuit 集積回路



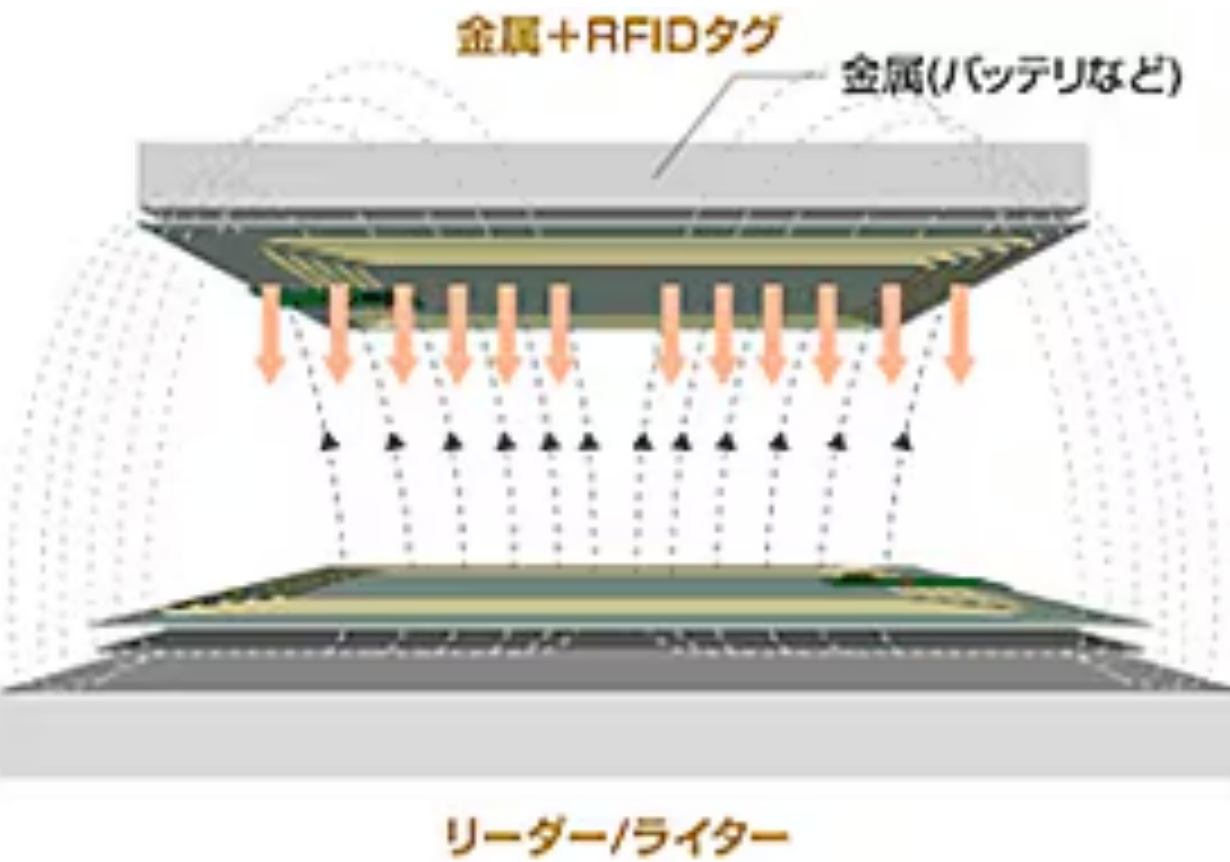
Felica
利用周波数： 13.56MHz
データ転送レート： 212Kbps
非接触型ICカード（近接型）



■接触型ICカードと非接触型ICカードの仕組み



TDK製品の「フレキシールド(Flexield)New IRL」を搭載することで、FeliCaチップの通信感度を大きく向上させることができる。



前回のミニッツペーパーから

リサ博士の消えた粒子が違う次元にいったから
見えなくなったという考え方ももつのが面白いなと思った

リサ・ランドールの唱える5次元が"とても"おもしろいなと思った。
次元を超えて別の次元にいけたらもっとおもしろいけれど、
動画中でそれは無理だと言った少しがっかり。

リサ・ランドールさんの5次元がある可能性の話が興味深かった。
今、私たちのいる次元は5次元の空間の中にあり、5次元の空間の中には
また別の次元がある。このことが本当なら、別の3次元の空間の中は
どうなっているのか、矢張りだと思った。

5次元の話と講義の中で聞いて、5次元に住む存在がいるとしたら、
彼らは私たちの次元をどのように認識しているのか気になります。

リサ・ランドール博士は若いからこそすごいことが引き出されていると思いました。
中世から考え方がつたあっていることに感心しています。
正しい証明には多額の資金が必要だと言っていました。

今現在、何次元まで提唱されているのか。

【話題】

膜宇宙論の提唱者の一人、リサ・ランドール

ワープする宇宙
LISA RANDALL
リサ・ランドール
NHK-BS特集
「未来への提言」に出演
21世紀のキーパーソンが語る宇宙の謎とは？
すぐそこにもうひとつの
次元が存在する！
2007年未来科学展のCEEN実験により、
彼女の理論が証明される??

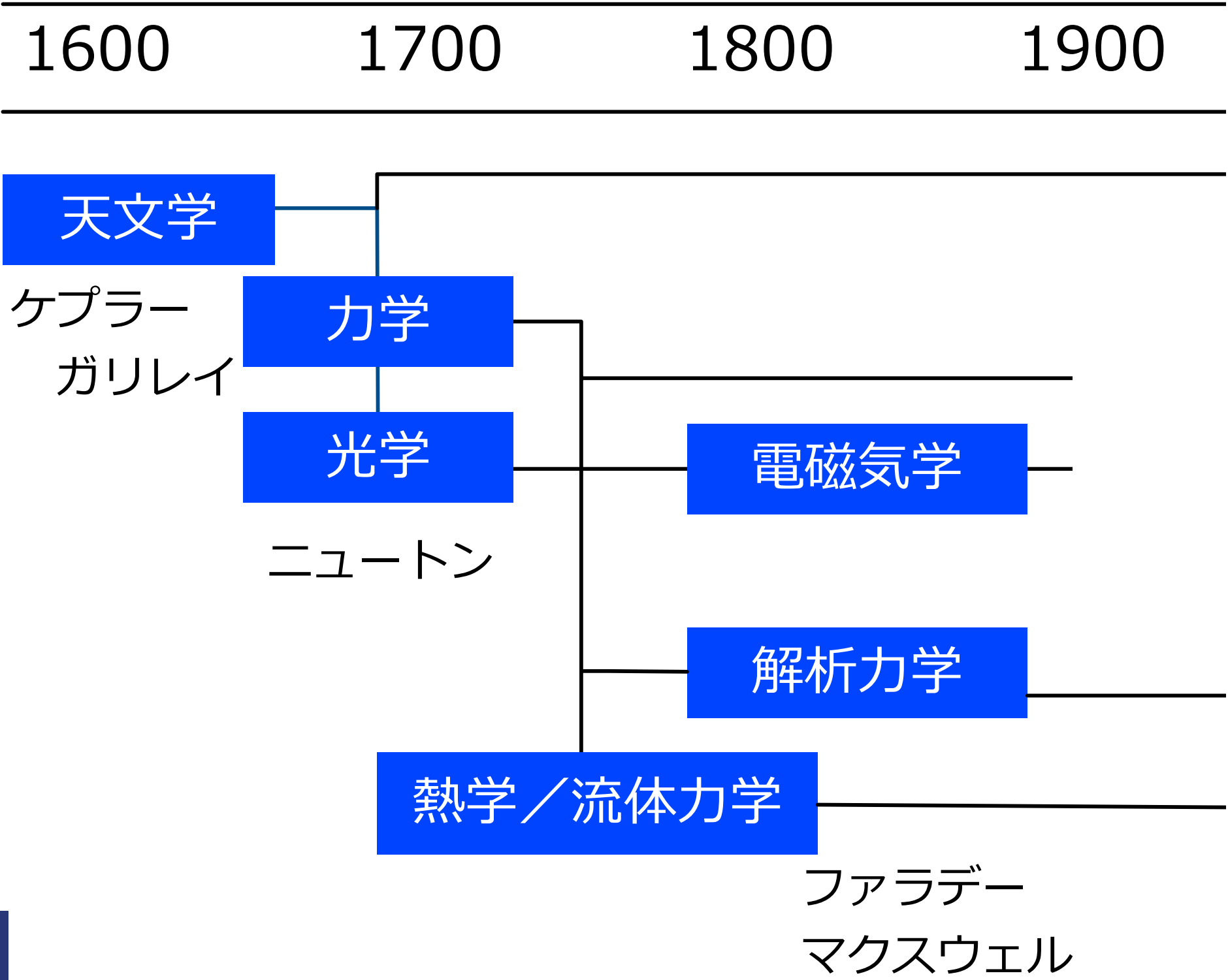
2007年 NHKニュース (7分)

42

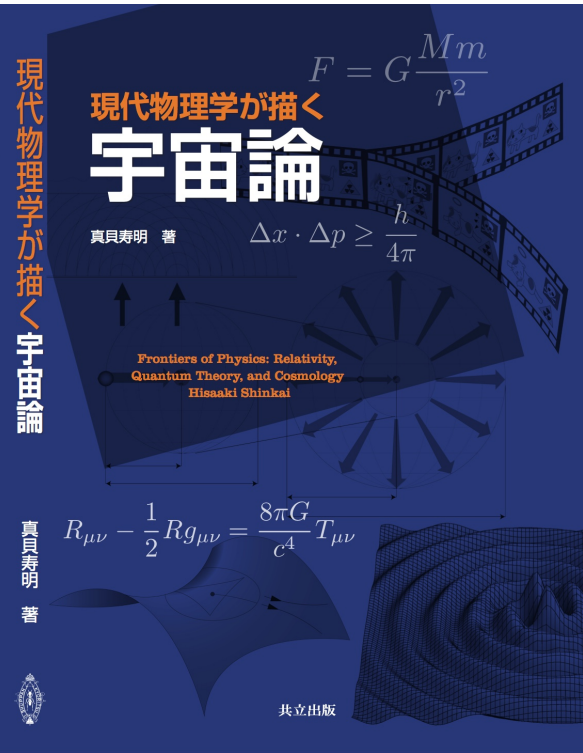
膜宇宙論が私にとって宇宙をどう考えているか
想像するものと似ていて、とても興味深かった。

1905年 物理学 奇跡の年

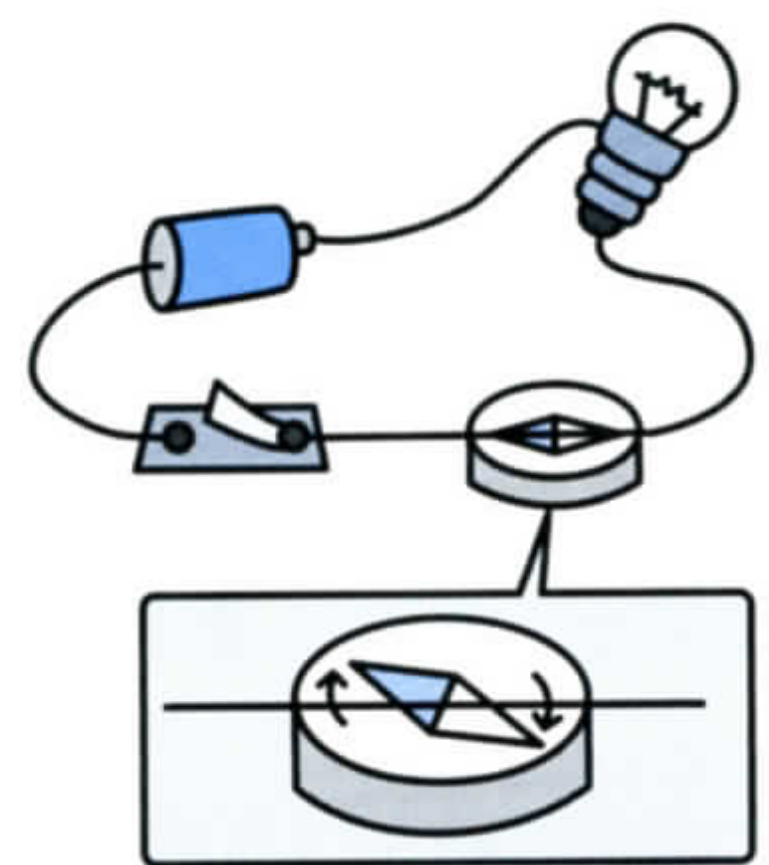
近代物理学の進展



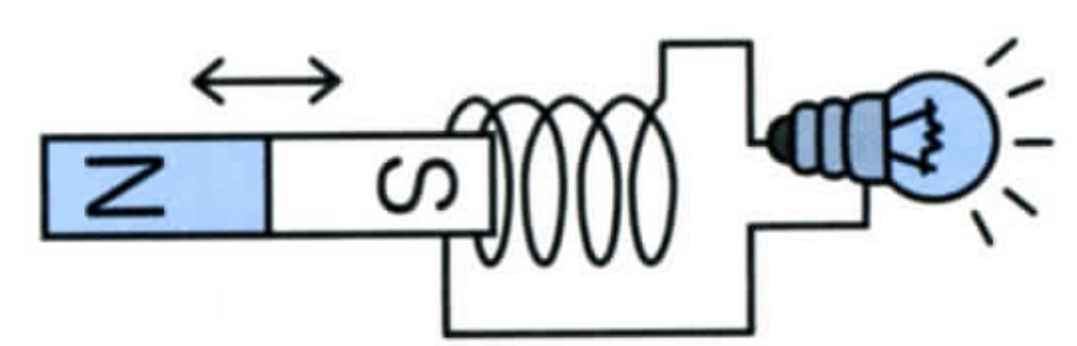
19世紀末は「物理学は完成した」と考えられていた。



電磁気学の進展



電流が流れると方位磁針の針が振れる。



ファラデー

コイルに磁石を出し入れすると電流が流れるぞ。

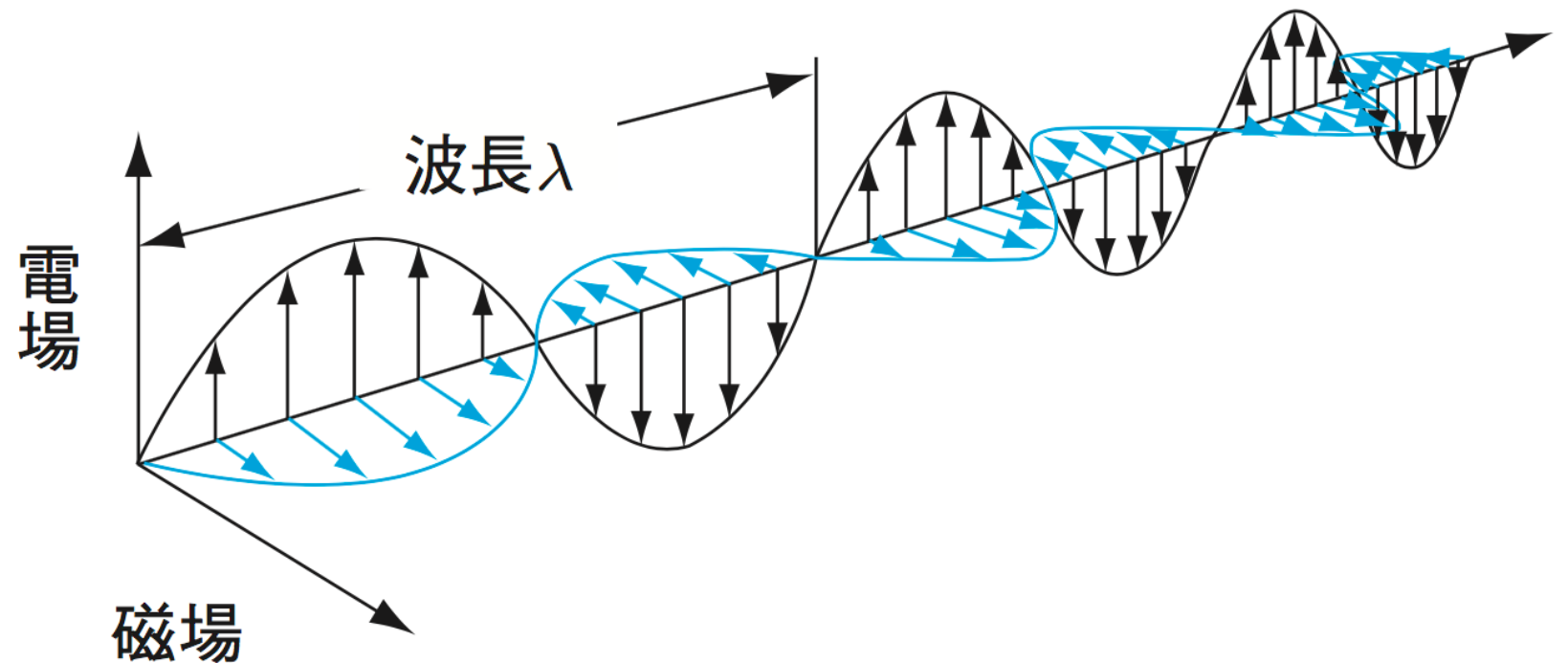
電磁誘導現象の発見 (1831年)

電気力と磁石の力は関係しあうから「電磁気学」としてまとめよう。



マクスウェル

電磁気現象を説明する「マクスウェルの方程式」を完成させ (1864年)、電場と磁場が互いに作用して電磁波として伝わることを示す。



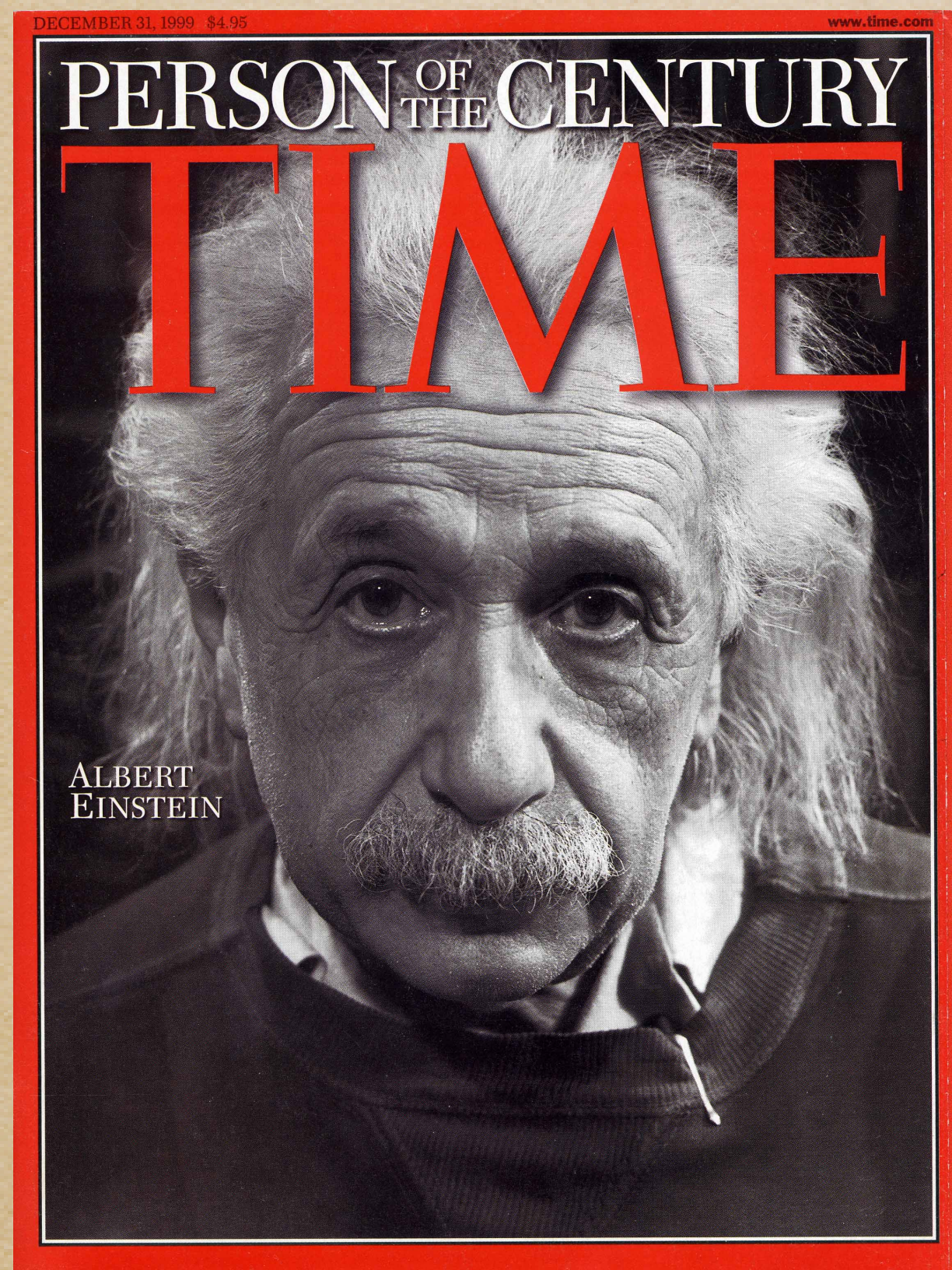
ヘルツ

電磁波は確かに光の速さで伝わっていた。

電磁波 (電波) の受発信に成功し、光の電磁波説を実証する (1888年)

アルベルト・アインシュタイン

1879 (明治12)/3/14 ~ 1955 (昭和30)/4/18

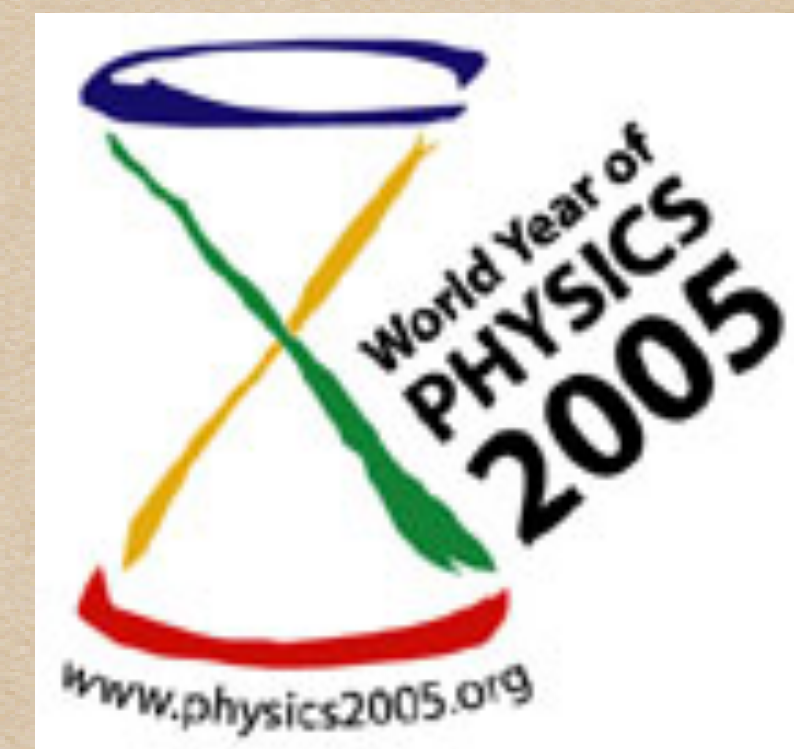


Time 1999/12/31号



26歳のアインシュタイン
(1905年)

国際物理年2005



科学の重要性と、自然や
宇宙に対する真理探究の
重要性を訴える1年間

電磁気学の完成 (Maxwell, 1864)

◆ Advanced マクスウェル方程式

マクスウェルがまとめた電磁気学の方程式は次の 4 本の式から成り立つ。
 $\boldsymbol{E}$ は電場ベクトル, $\boldsymbol{B}$ は磁場ベクトル, ρ は電荷密度, $\boldsymbol{j}$ は電流ベクトル,
 c は光速とする. また, ∇ は微分演算子とする.

$$\nabla \cdot \boldsymbol{E} = 4\pi\rho, \quad (2.6)$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0, \quad (2.7)$$

$$\nabla \times \boldsymbol{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} \boldsymbol{j}, \quad (2.8)$$

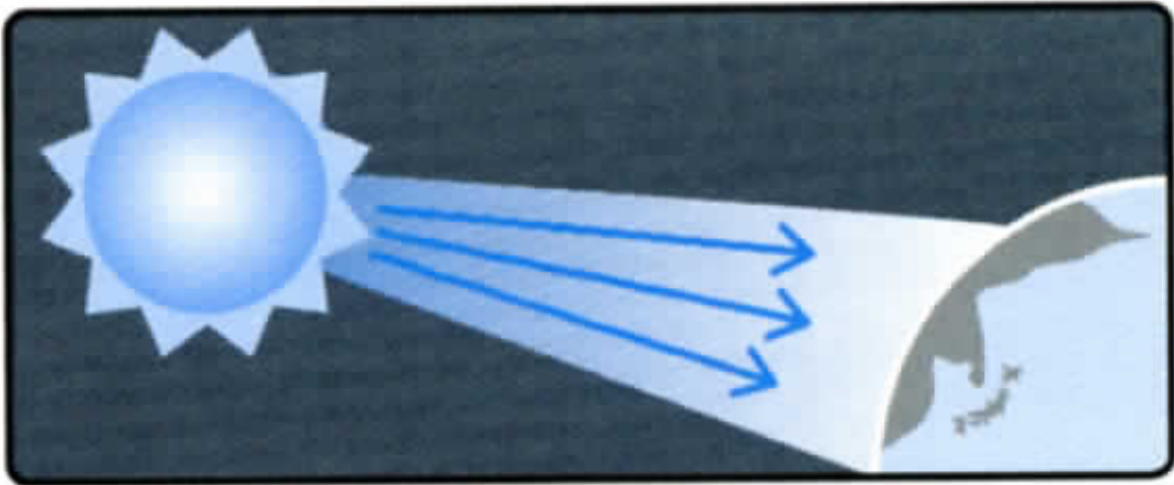
$$\nabla \times \boldsymbol{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} = 0. \quad (2.9)$$

3.2.1 電磁気学で生じた疑問

疑問1 電磁波を伝えるもの(媒質)は何か?



音波は空気中の分子の振動が伝える。



電磁波(光)は真空中を満たす未知の媒質エーテルが伝える?

電磁波を伝える媒質として
「**エーテル**」(ether; 天空をみたす物質)
が存在するはずだ。

疑問2 電磁波が伝わる速度が「光速」であるとは、誰から見た時の光速なのか?



時速140km

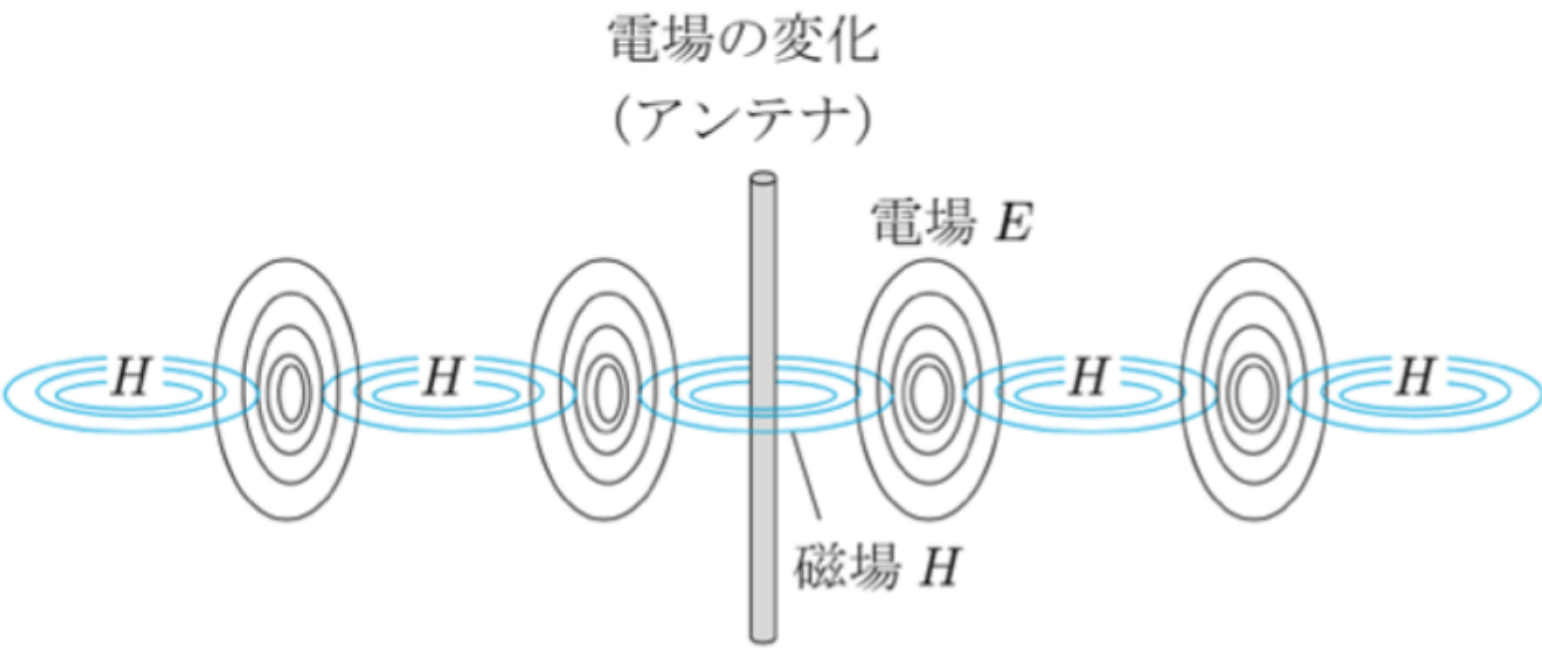


時速120km

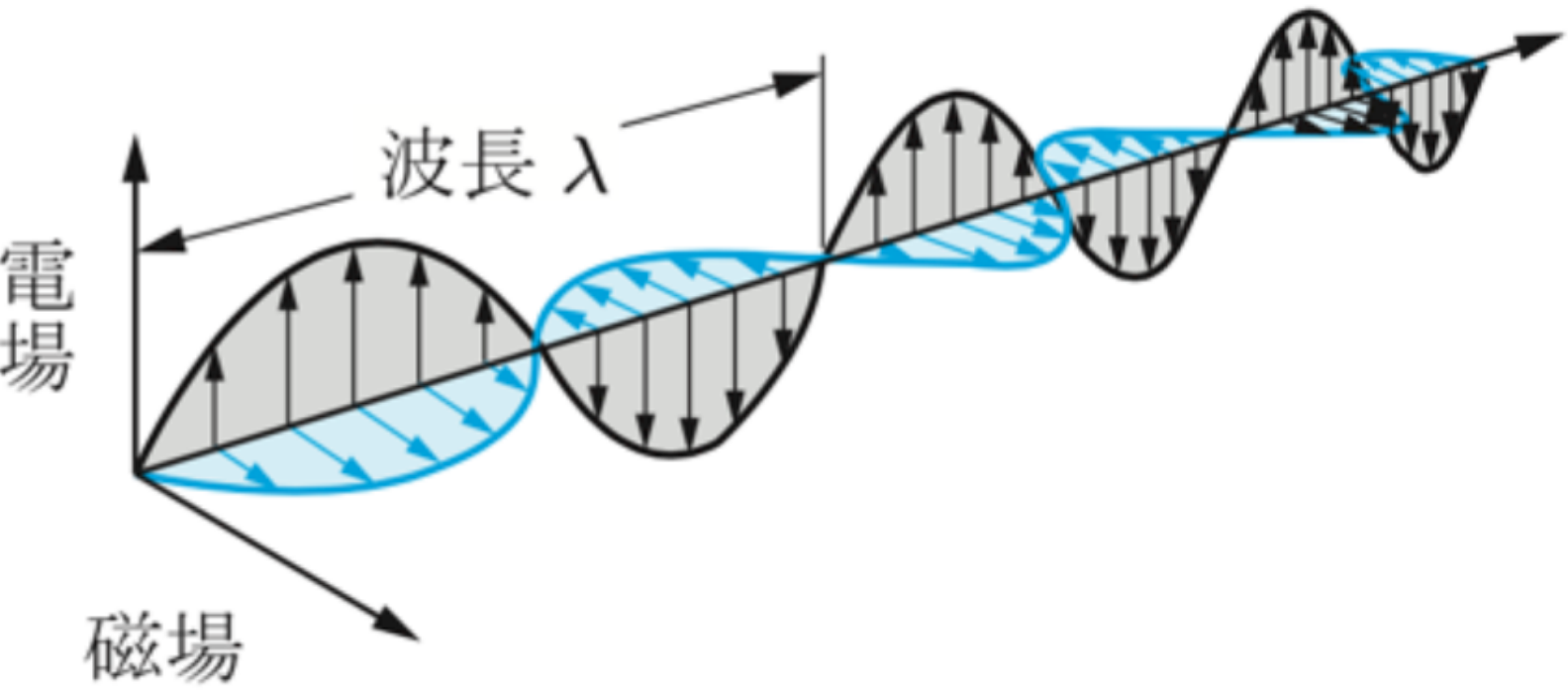
車中の人からはパトカーの速度は時速20kmに見える。
(速度は相対的なもの)

電磁波が存在して， 光速で伝播する

$$\left(\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \Delta\right)\mathbf{E} = 0, \quad \left(\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \Delta\right)\mathbf{B} = 0, \quad \text{where } \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$



(a) 電磁波の発生



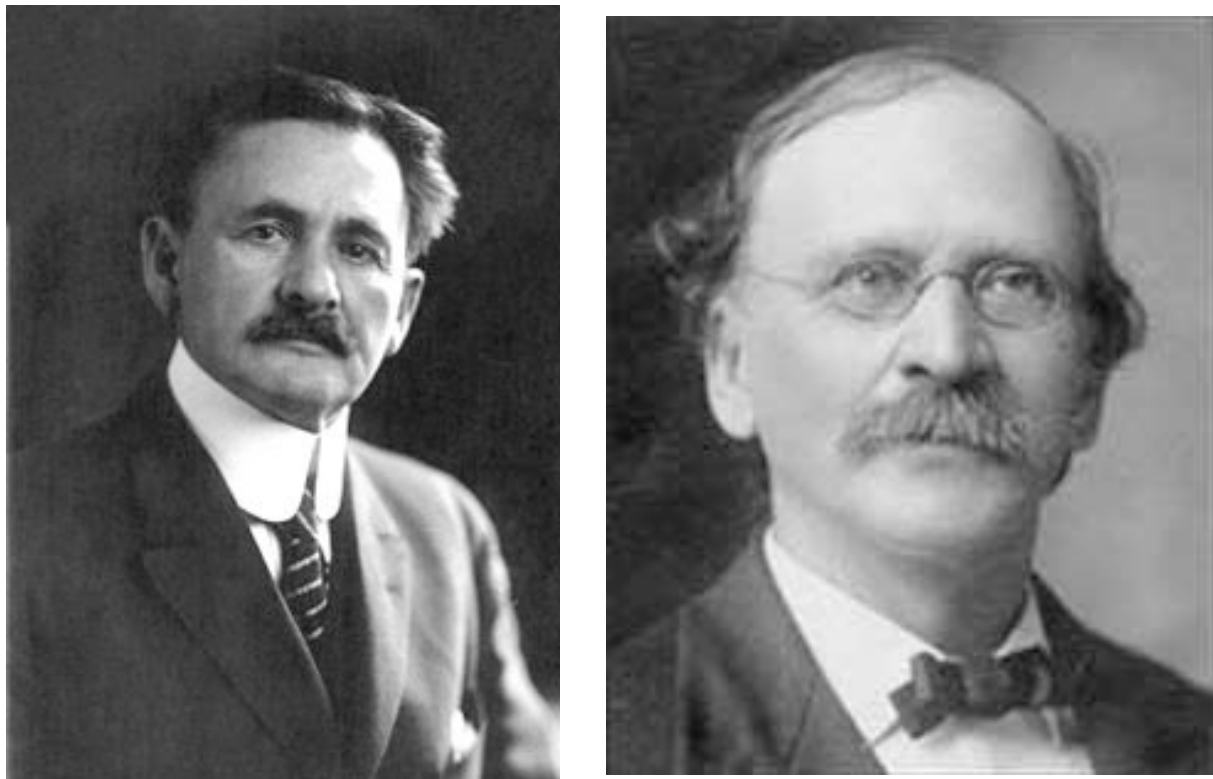
(b) 電磁波の伝播

でも，光速で伝わるって，誰からみた速さ？
真空中でも光は伝わるのは何故？

宇宙は「エーテル」で満たされていると考えよう
「エーテル」を見つけよう

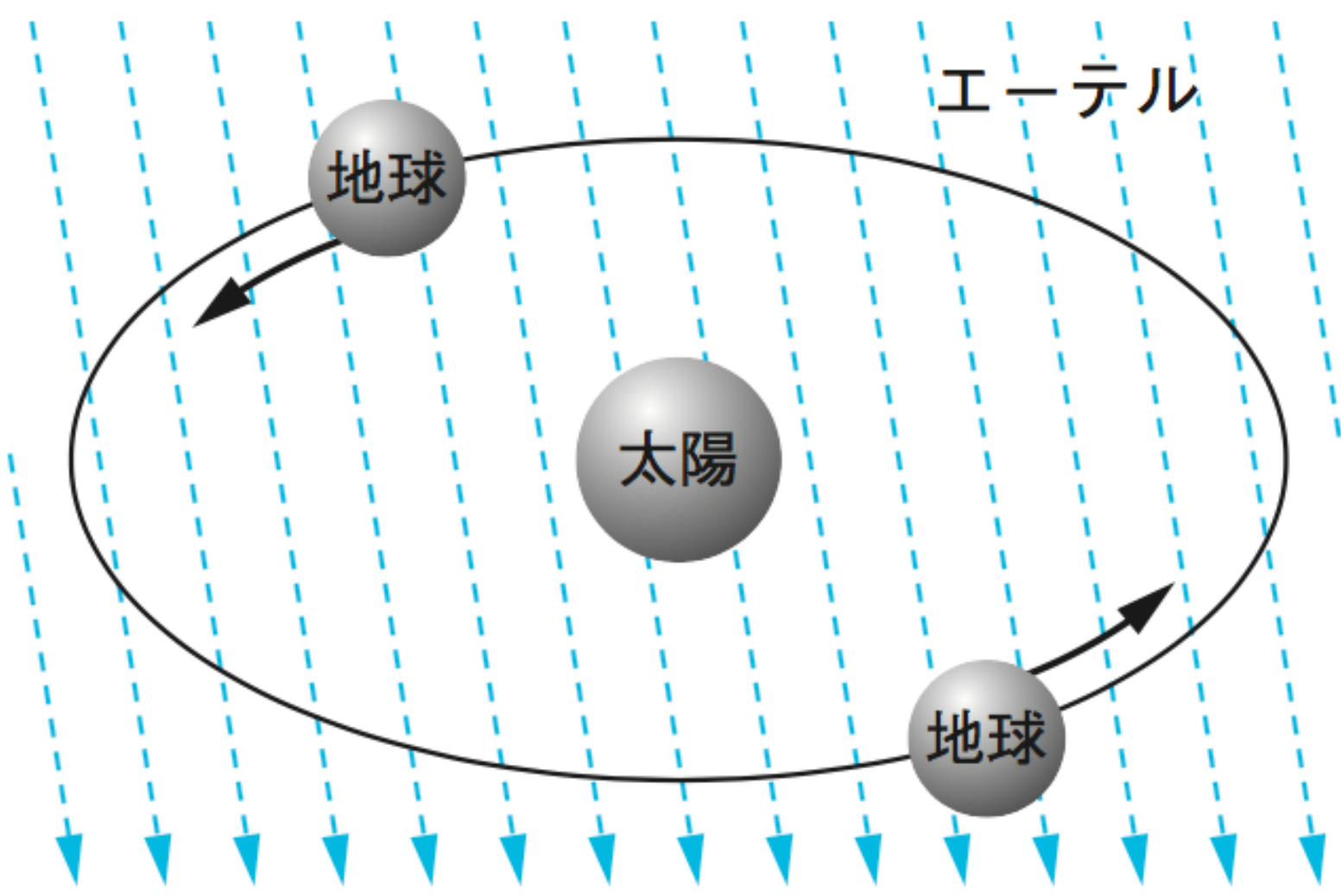
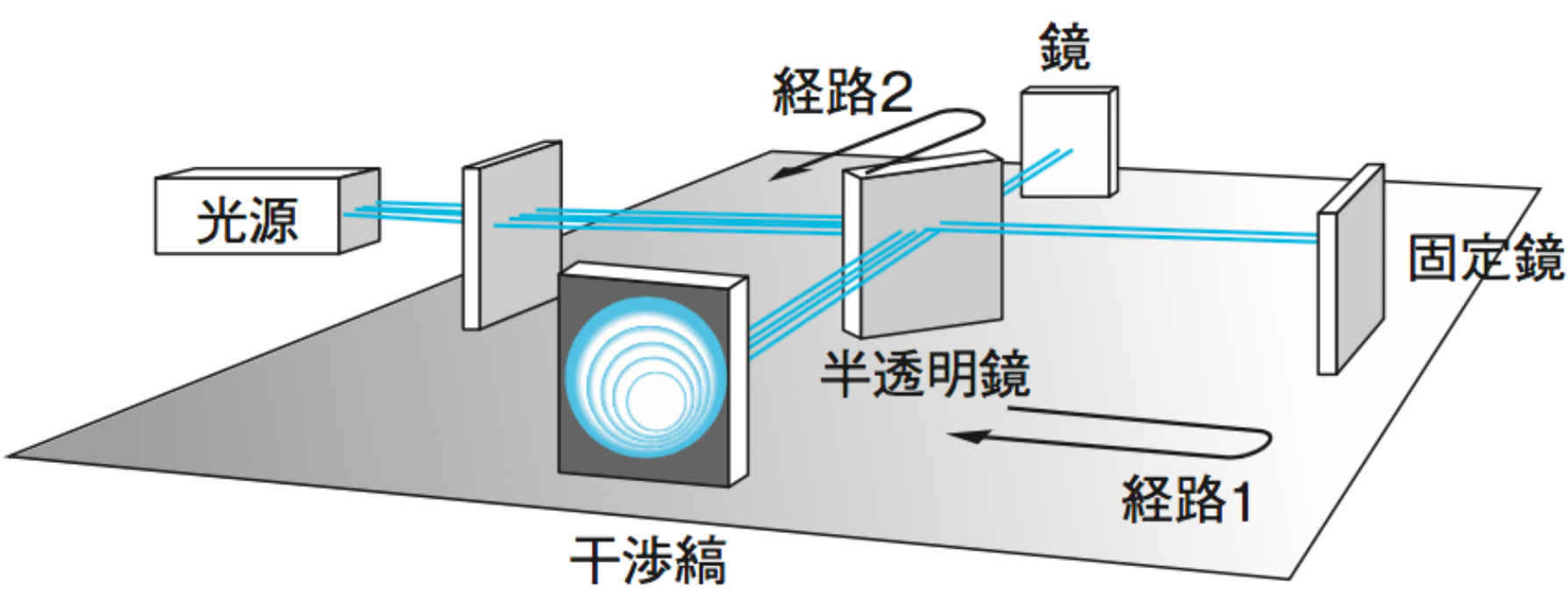
マイケルソン・モーリーの実験

Michelson-Morley experiment 1887



電磁波を伝える媒質としての
「**エーテル**」を探す実験

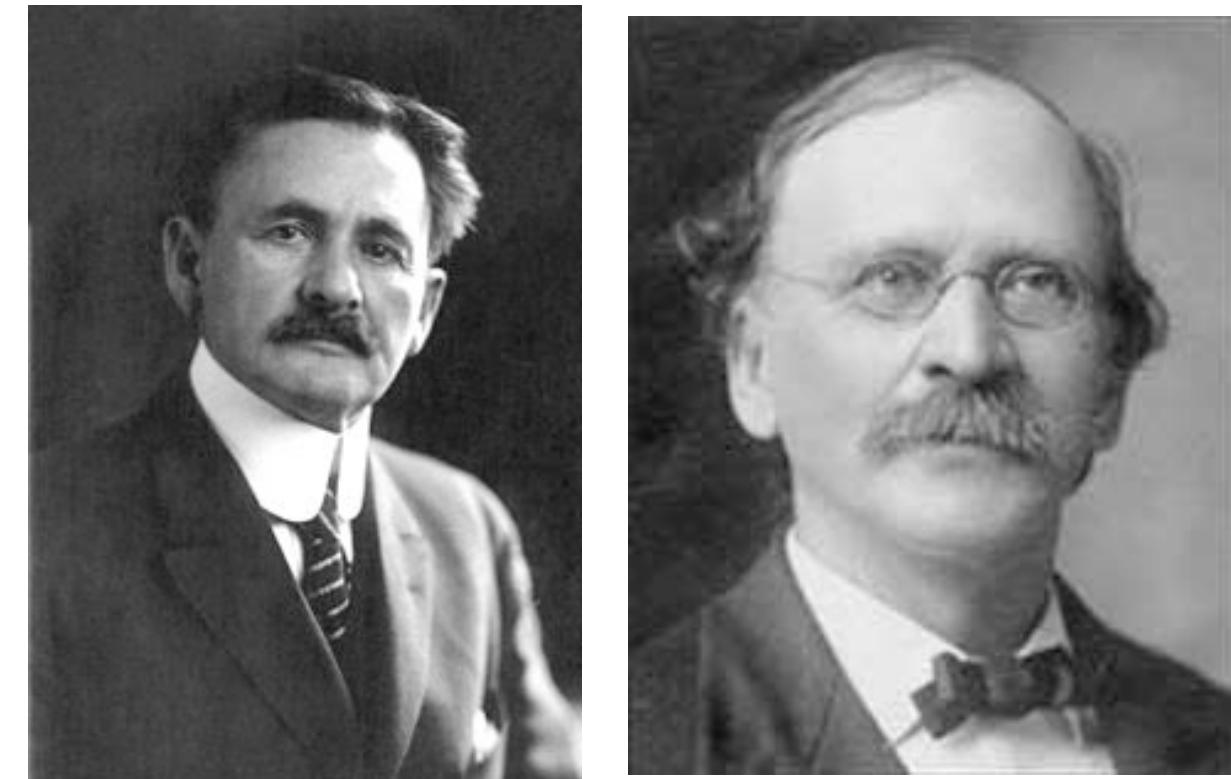
微小距離を測定する**干渉計**



エーテルがあれば、季節で距離が変わるはず。
微妙な差でも、干渉計なら測れるはず。

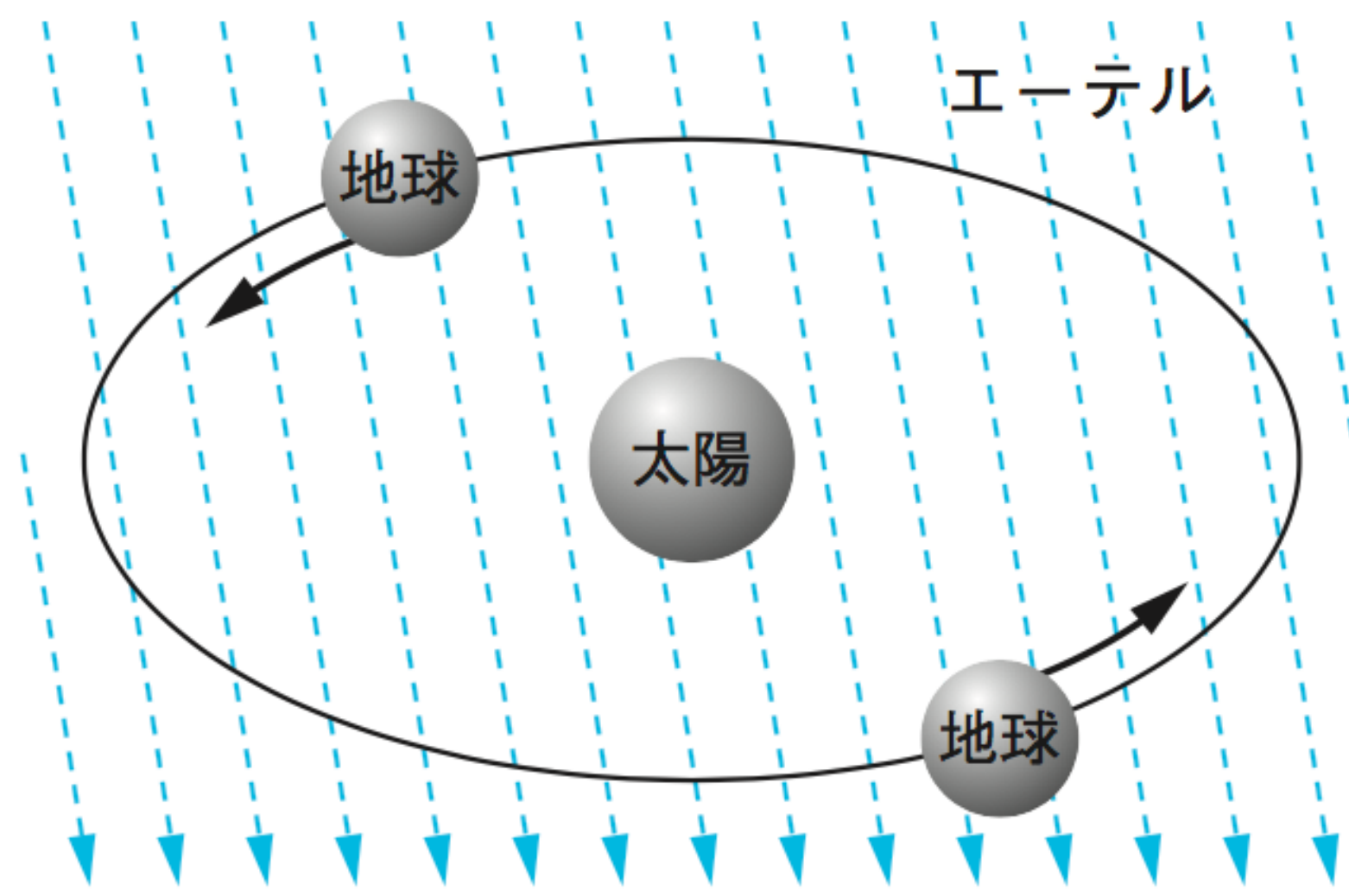
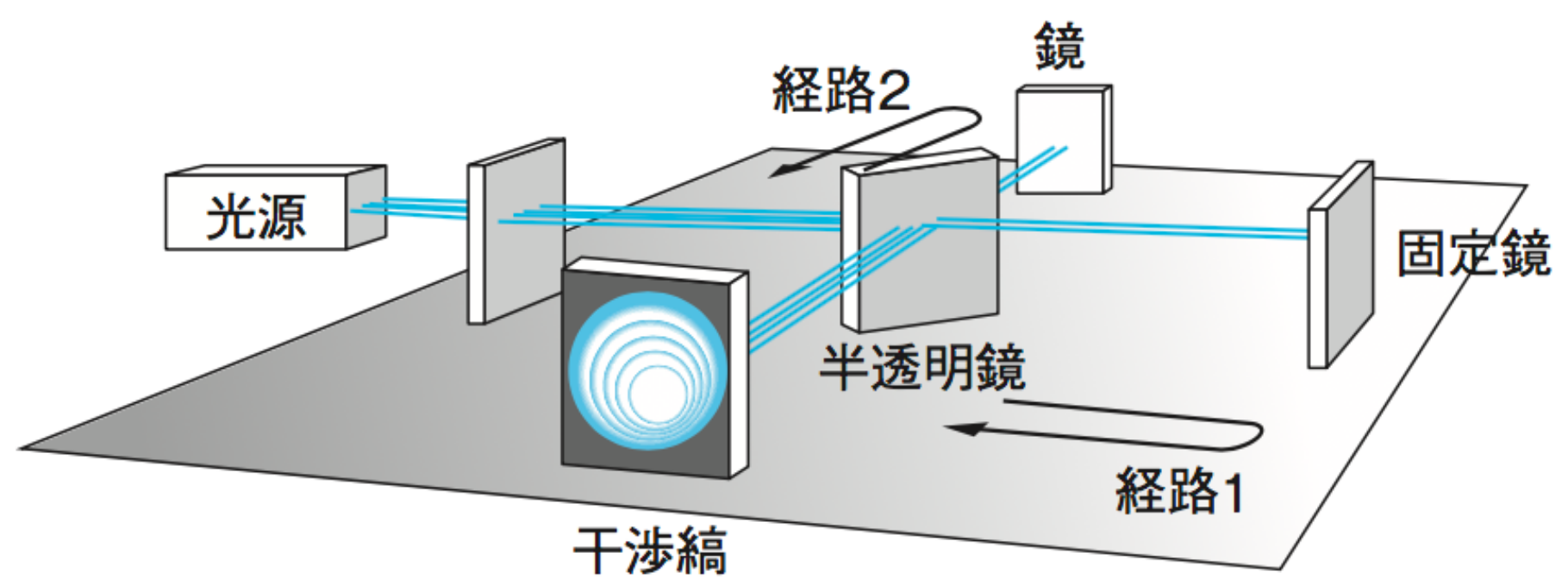
マイケルソン・モーリーの実験

Michelson-Morley experiment 1887



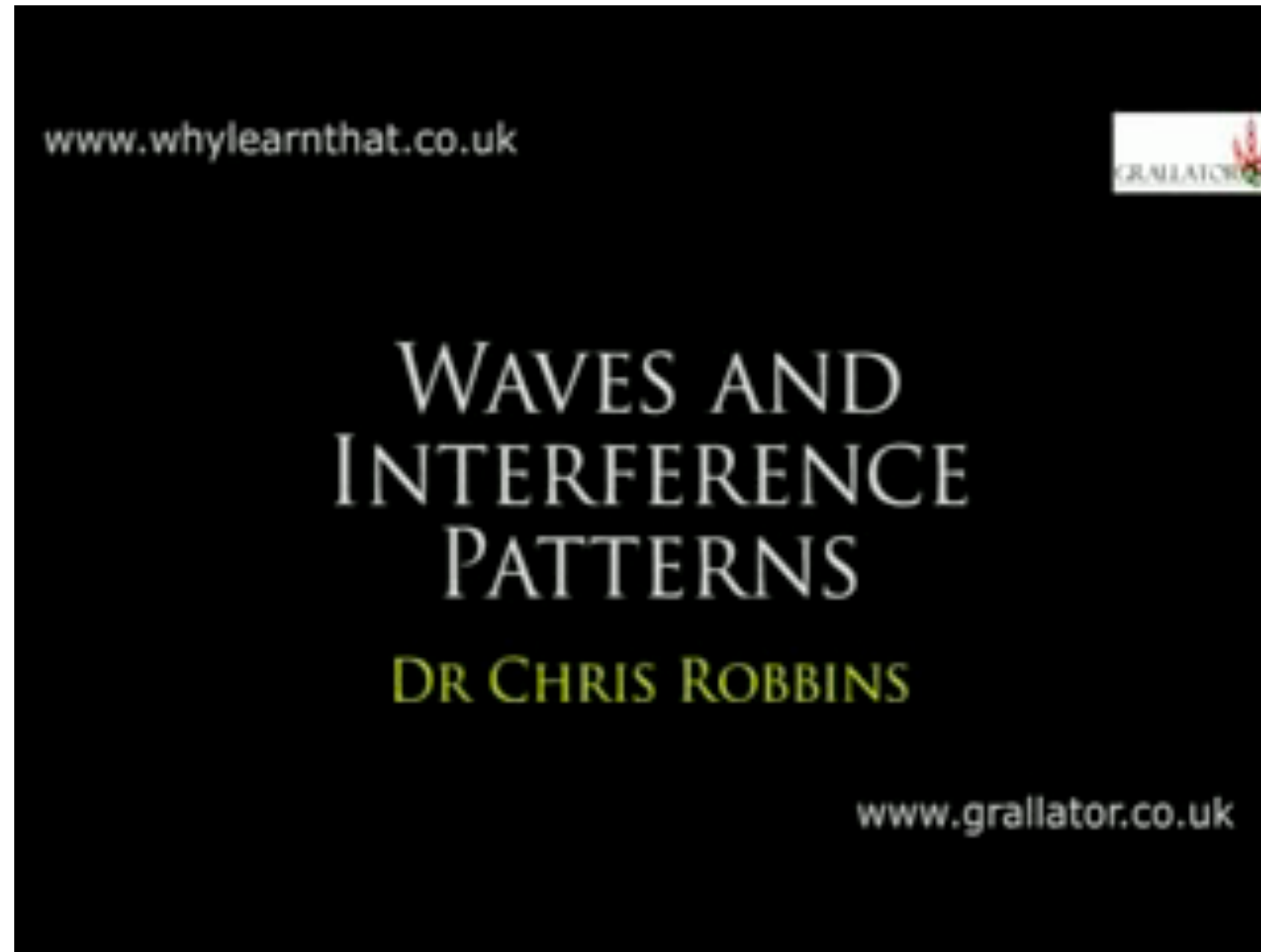
→エーテルの検出に「失敗」

微小距離を測定する干渉計

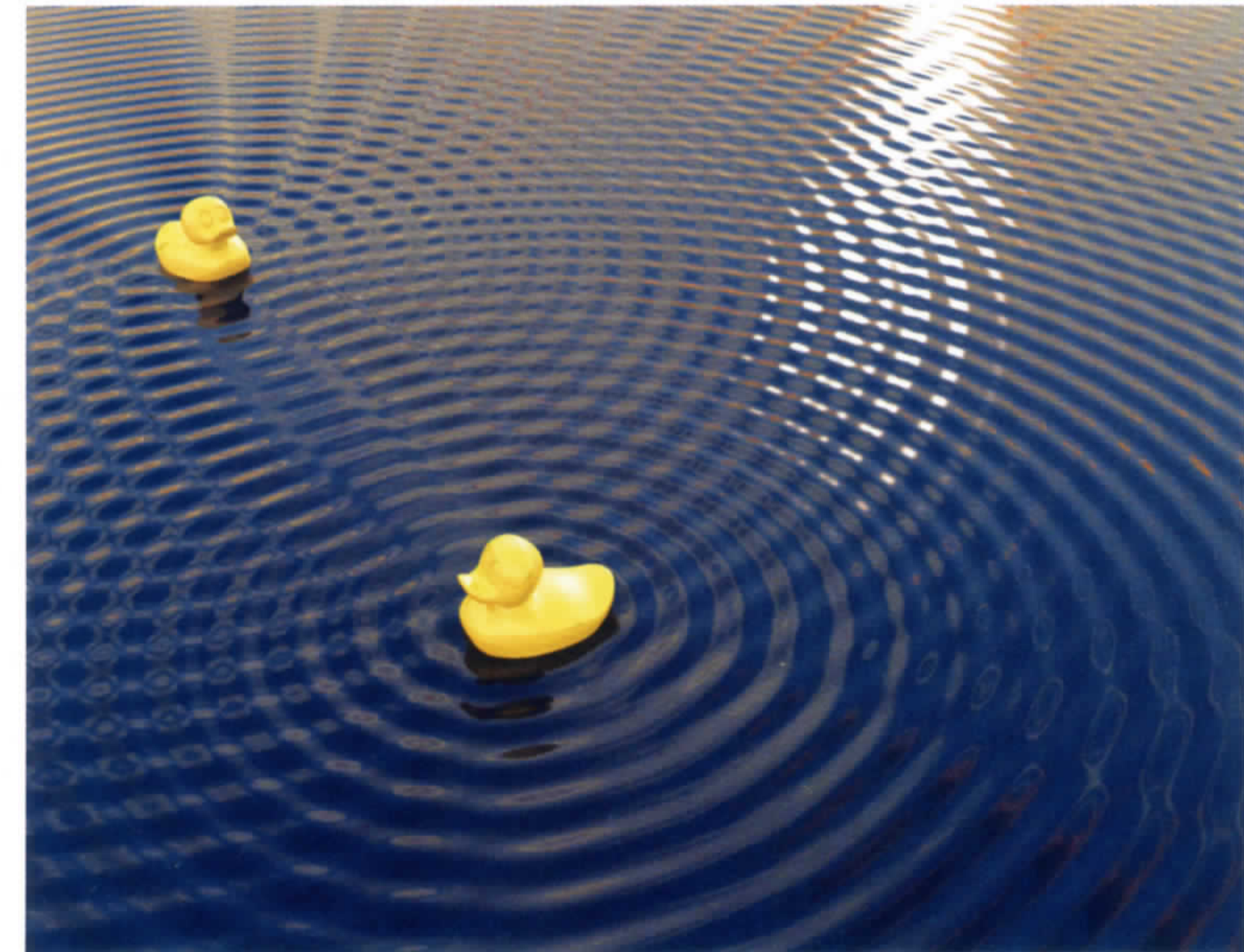


エーテルがあれば、季節で距離が変わるはず。
微妙な差でも、干渉計なら測れるはず。

干渉 (interference)



<https://www.youtube.com/watch?v=dNx70orCPnA>



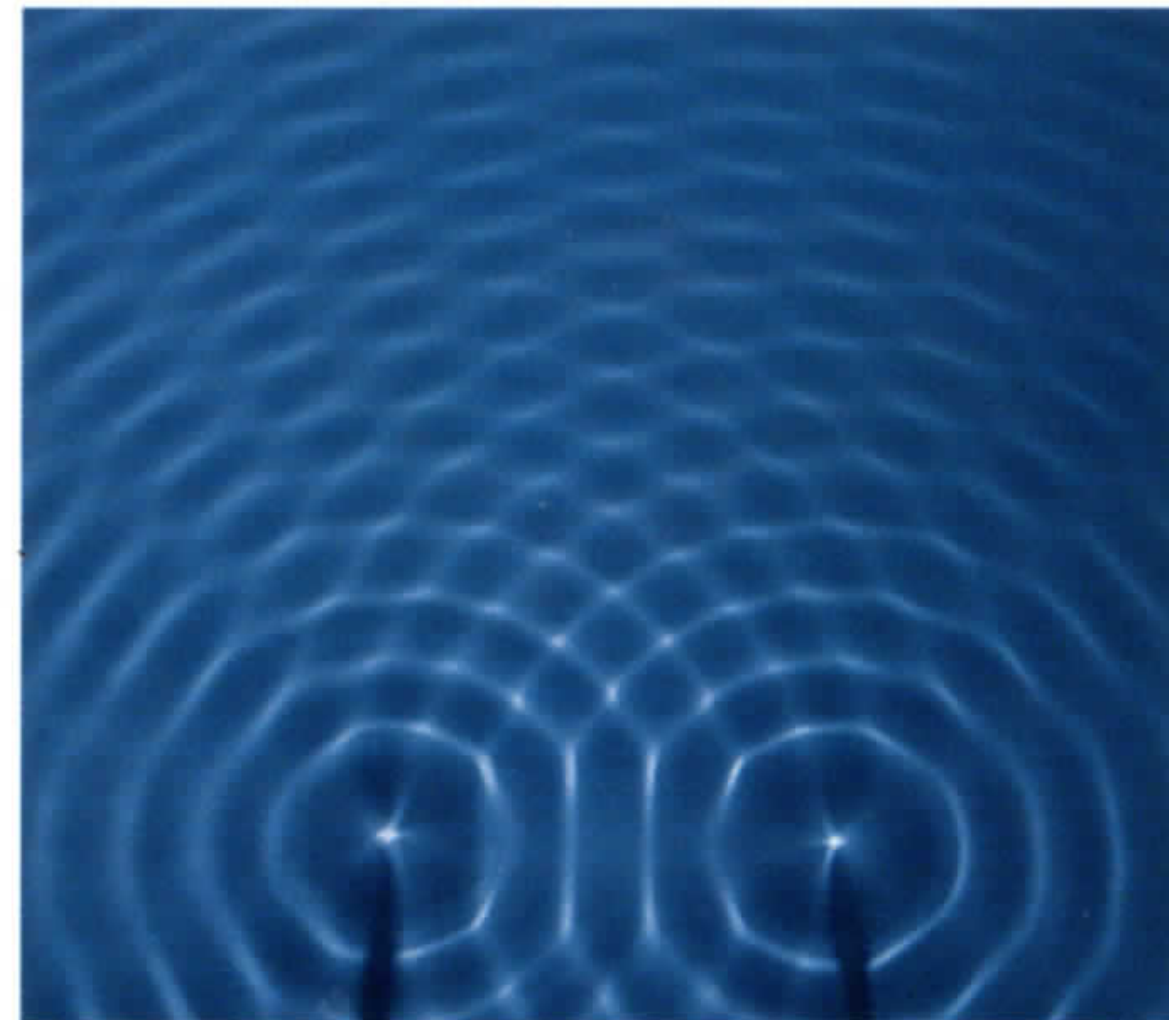
Puddle Interference The concept of interference shows up in everyday life in bodies of water, from puddles to oceans.

法則 波の特徴：干渉

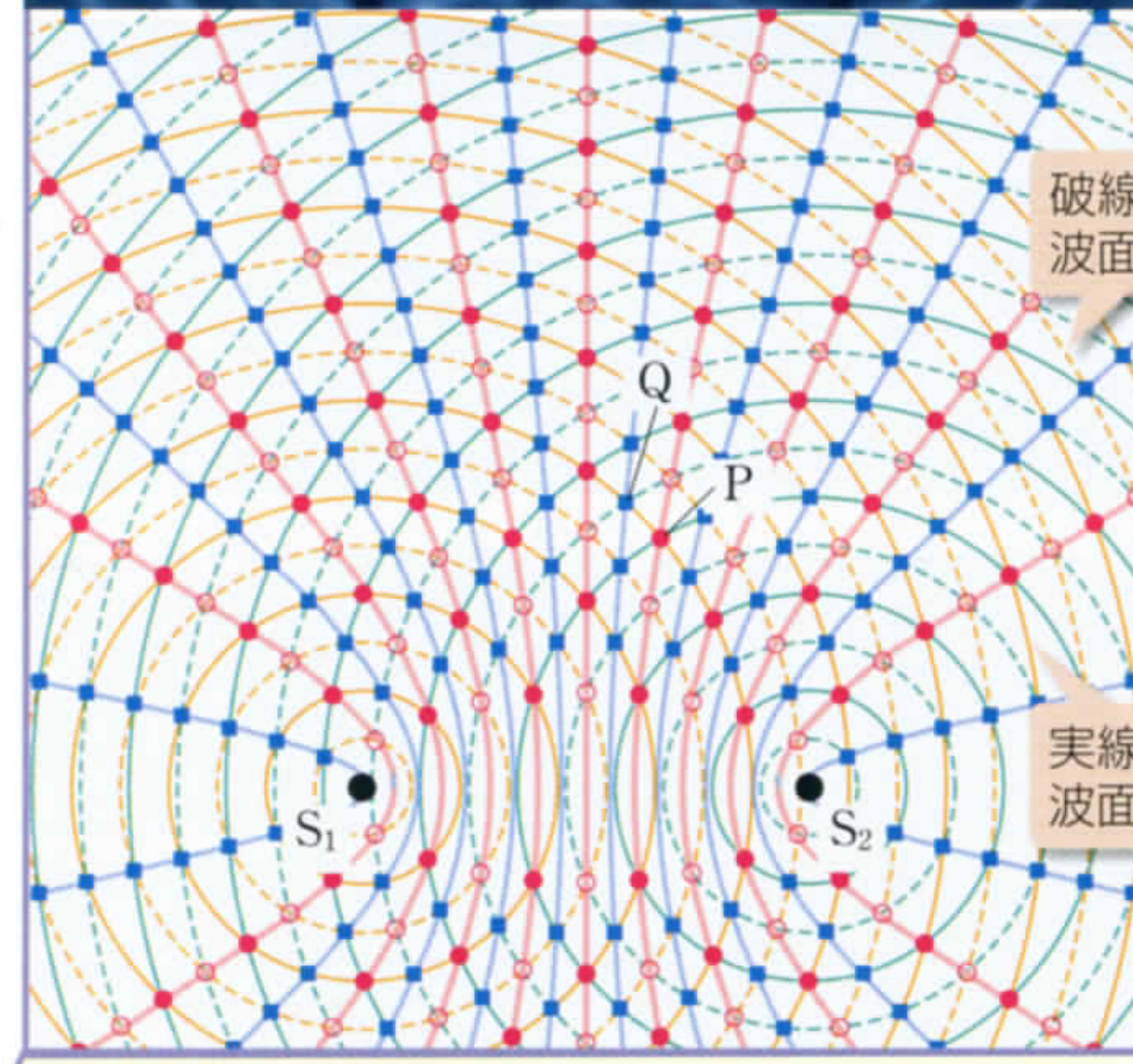
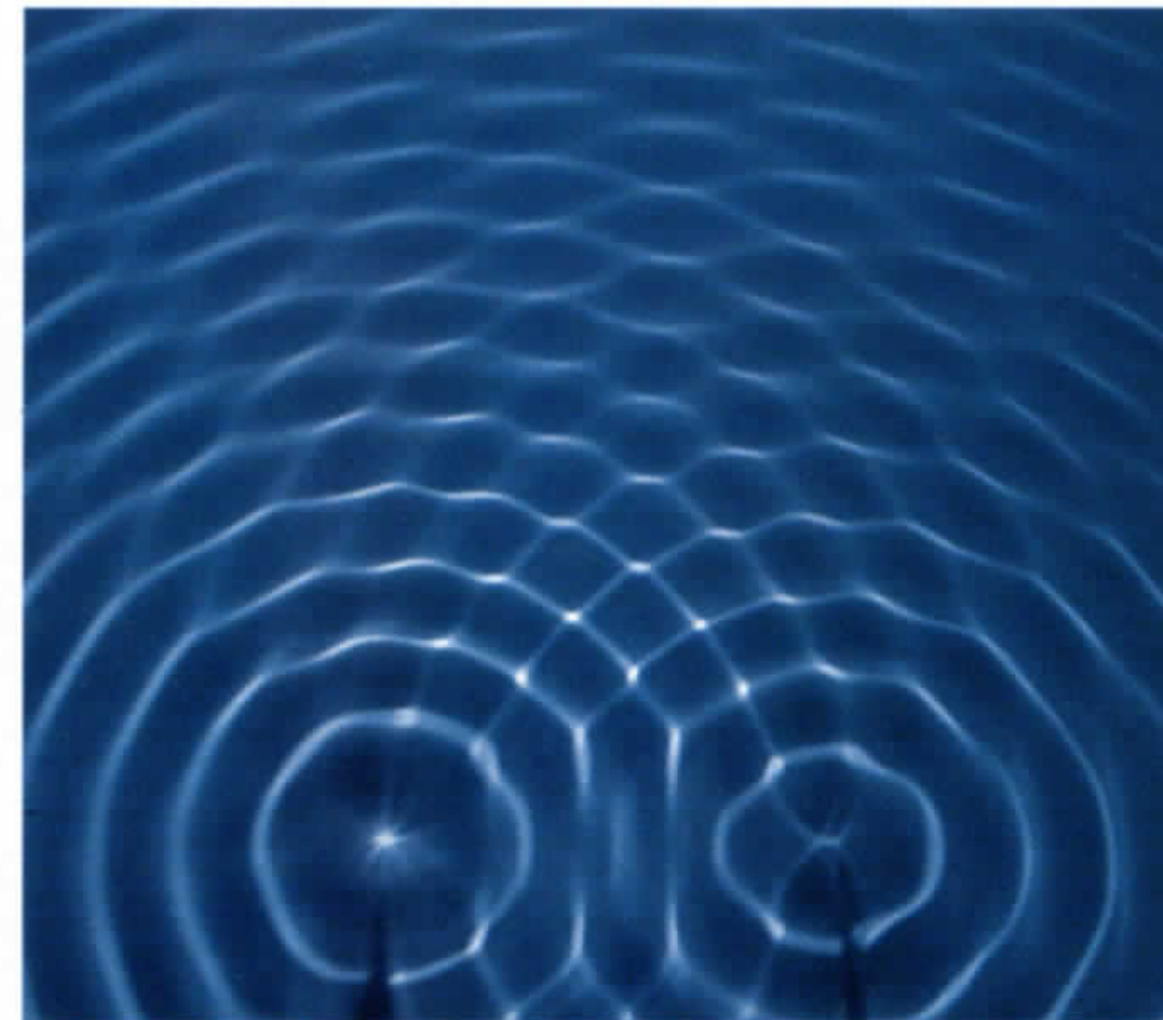
合成された波が、互いに強めあったり弱めあったりする現象を、干渉という。

波の干渉 = 強めあったり弱めあったりする現象

●同位相で振動する2つの波源の場合

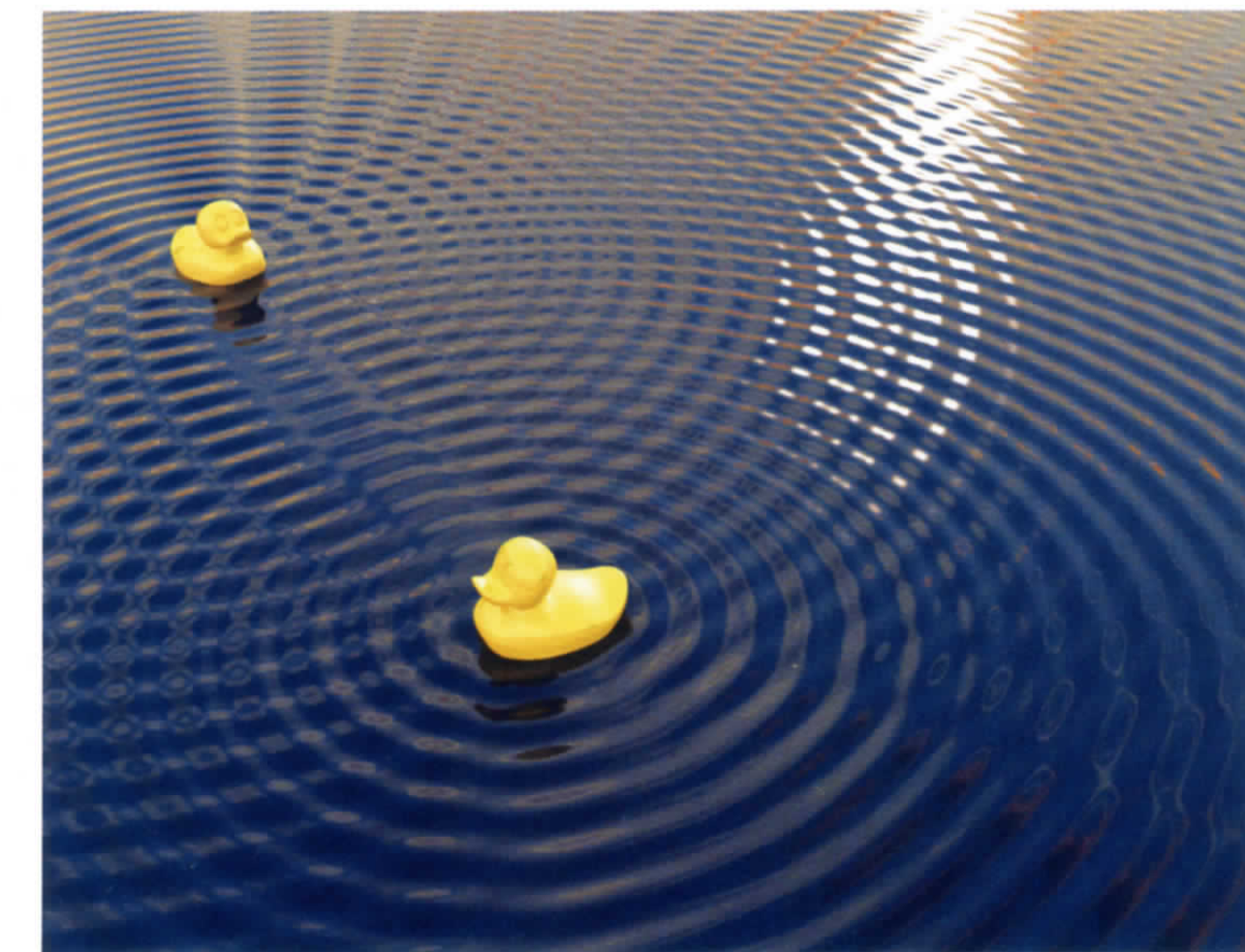
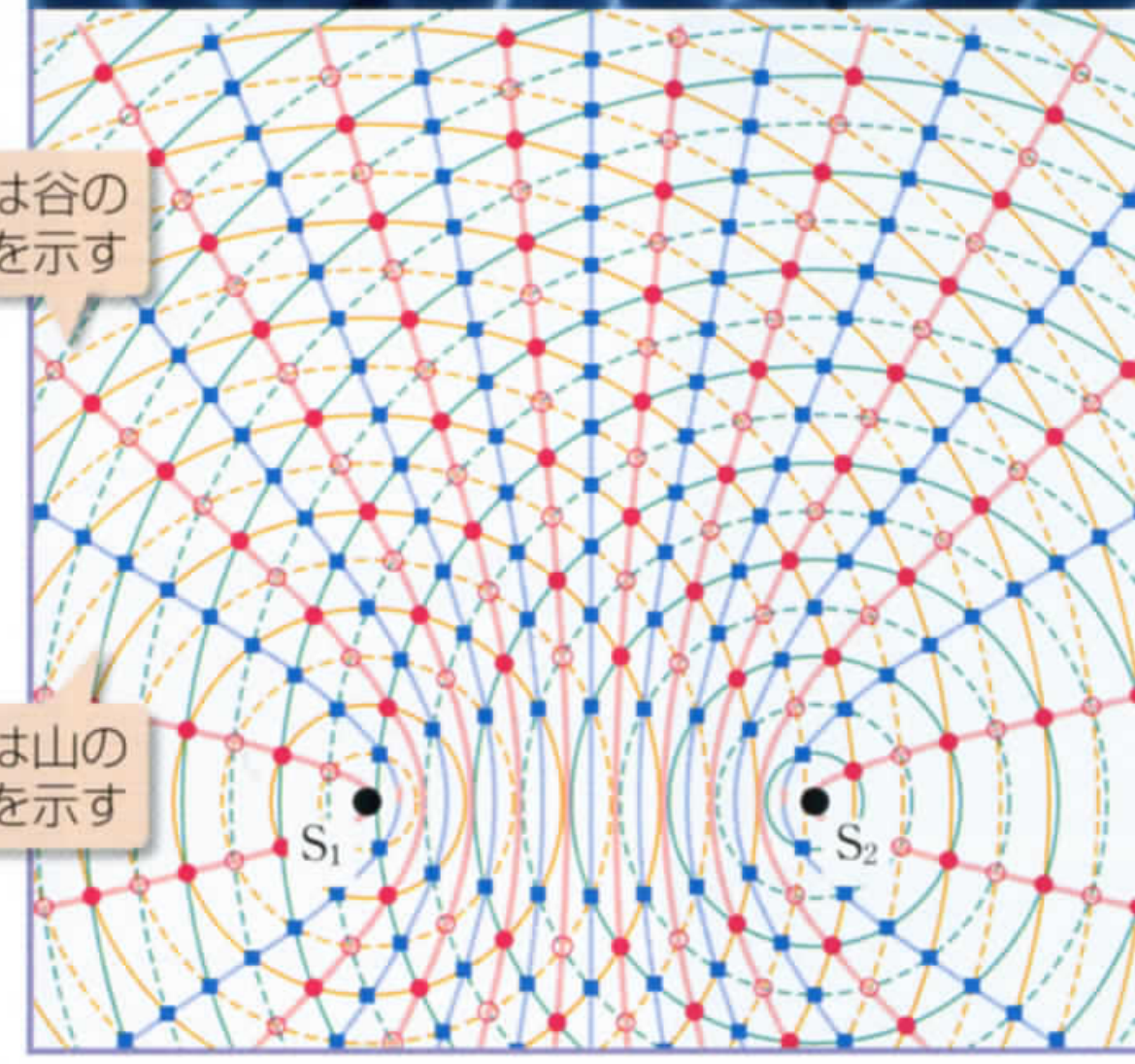


●逆位相で振動する2つの波源の場合



破線は谷の波面を示す

実線は山の波面を示す



Puddle Interference The concept of interference shows up in everyday life in bodies of water, from puddles to oceans.

赤色で示した曲線(双曲線) — は強めあう点を連ねて得られる曲線で、●(山と山)や○(谷と谷)の状態が移動していく経路を表している。
青色で示した曲線(双曲線) — は、打ち消しあう点(■(山と谷))を連ねて得られる曲線であり、節線という。

ノイズキャンセリングヘッドホンとは？

周囲の騒音を低減し、クリアなサウンドを再生する
ノイズキャンセリングヘッドホン



電車内や航空機※などでのリスニング時に、走行音やエンジンノイズなどさまざまな騒音を低減。
勉強や仕事のときなどは、気が散る原因となる周囲の雑音を低減し、静かな環境で聴けるので目的に集中できます。また、音量を上げ過ぎずに音楽を聴きとれるので、周囲への音漏れの心配がありません

■ノイズキャンセリングヘッドホンの活躍シーン



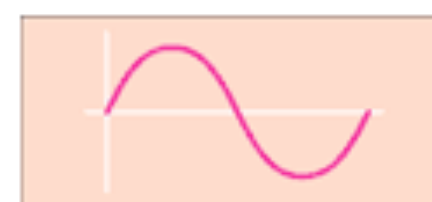
※航空機内の音楽サービスシステムにより、ご使用になれない場合があります
※航空機内で電子機器の使用が禁止されている場合や、機内の音楽サービスを個人のヘッドホンで利用することが禁止されている場合は、本機を使用しないでください



■ノイズキャンセリング機能の原理

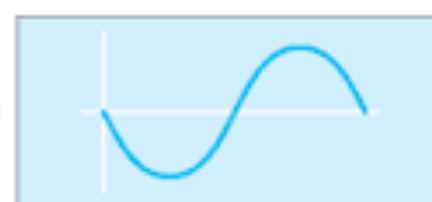


MDR-NC6
内蔵マイク



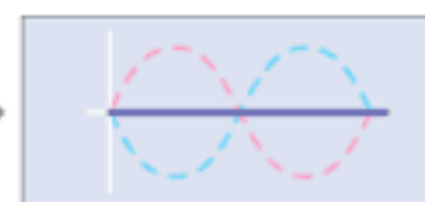
1.騒音（元の波）
ヘッドホンに内蔵されたマイクで周囲からの騒音を拾い、ノイズキャンセリング回路がその音を分析。

+



2.逆位相の波
その騒音を打ち消す効果のある、逆位相の音を発生。

→

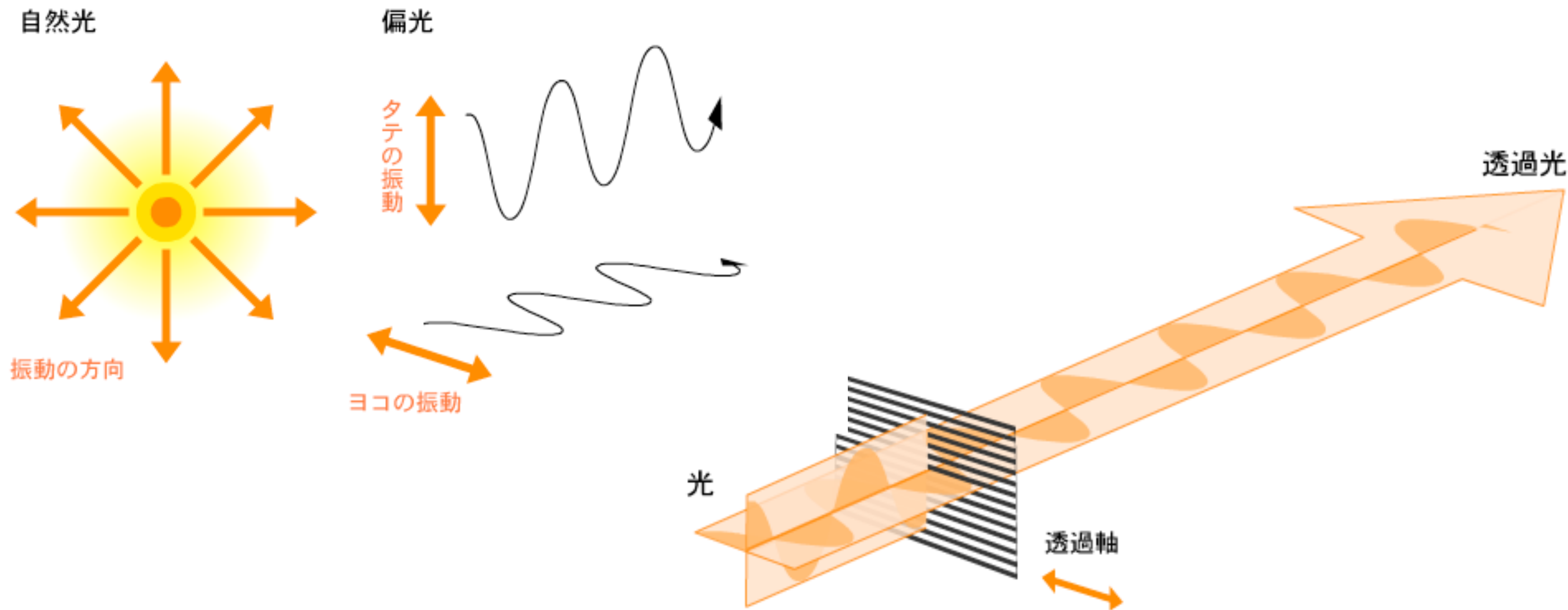


3.合成されて消えた波
元の波を反転させた逆位相の波を重ね、元の波を消去。これにより周囲の騒音を低減します。

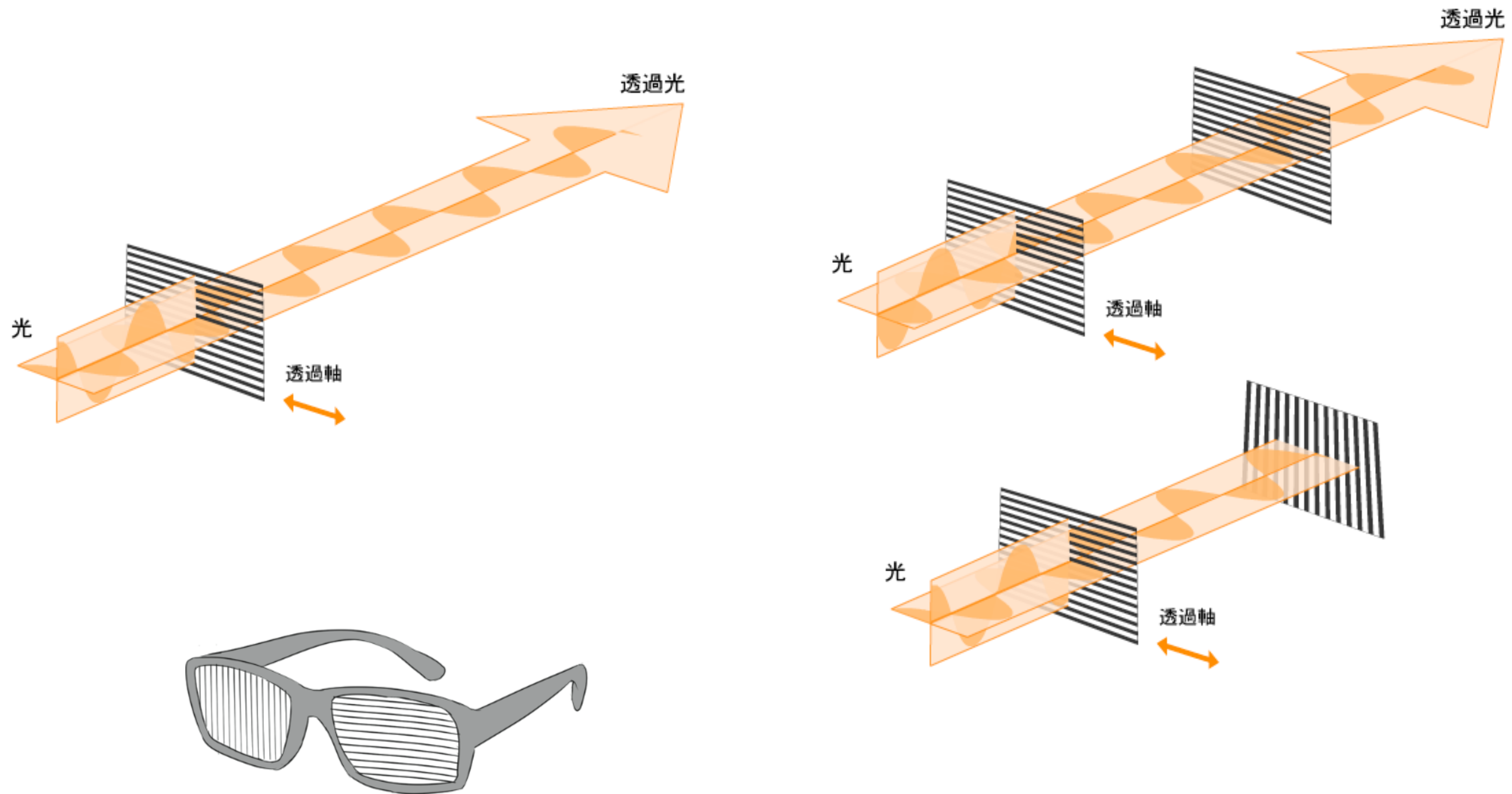
波のことは 高校生のころに少し聞いたことがあ。たのびが、
あまりよく理解できていませんでした。一・二・三 産院の貝真
物理学は 難しいけど、聞いているととても楽しいです。

*ノイズキャンセリング機能は、人が耳障りに感じやすい40～1,500Hzの音を低減させます。周囲からの騒音がまったく聞こえなくなるわけではありません

光は横波である



光は横波である



マイケルソン型干渉計のしくみ

Michelson Interferometer

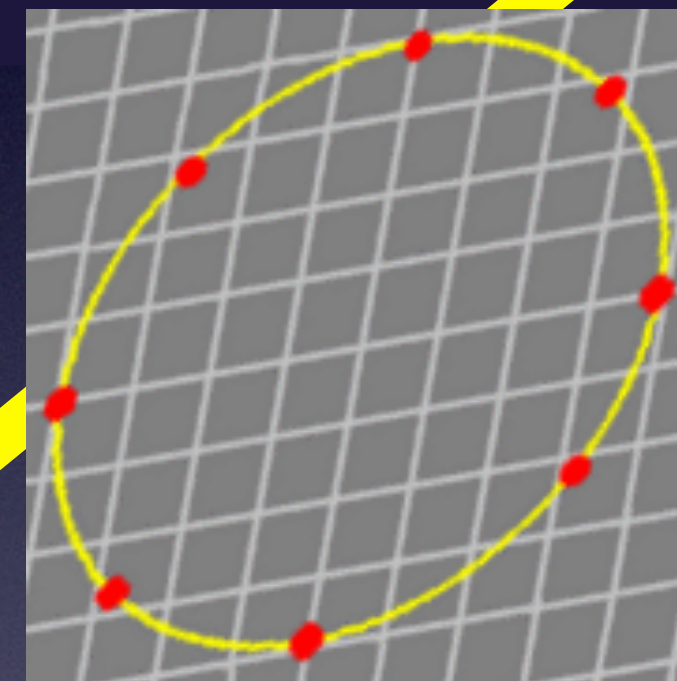
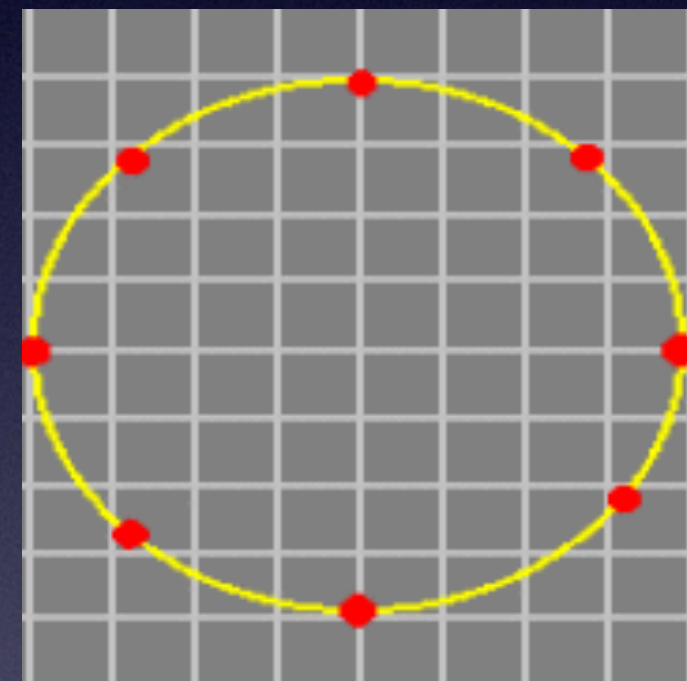
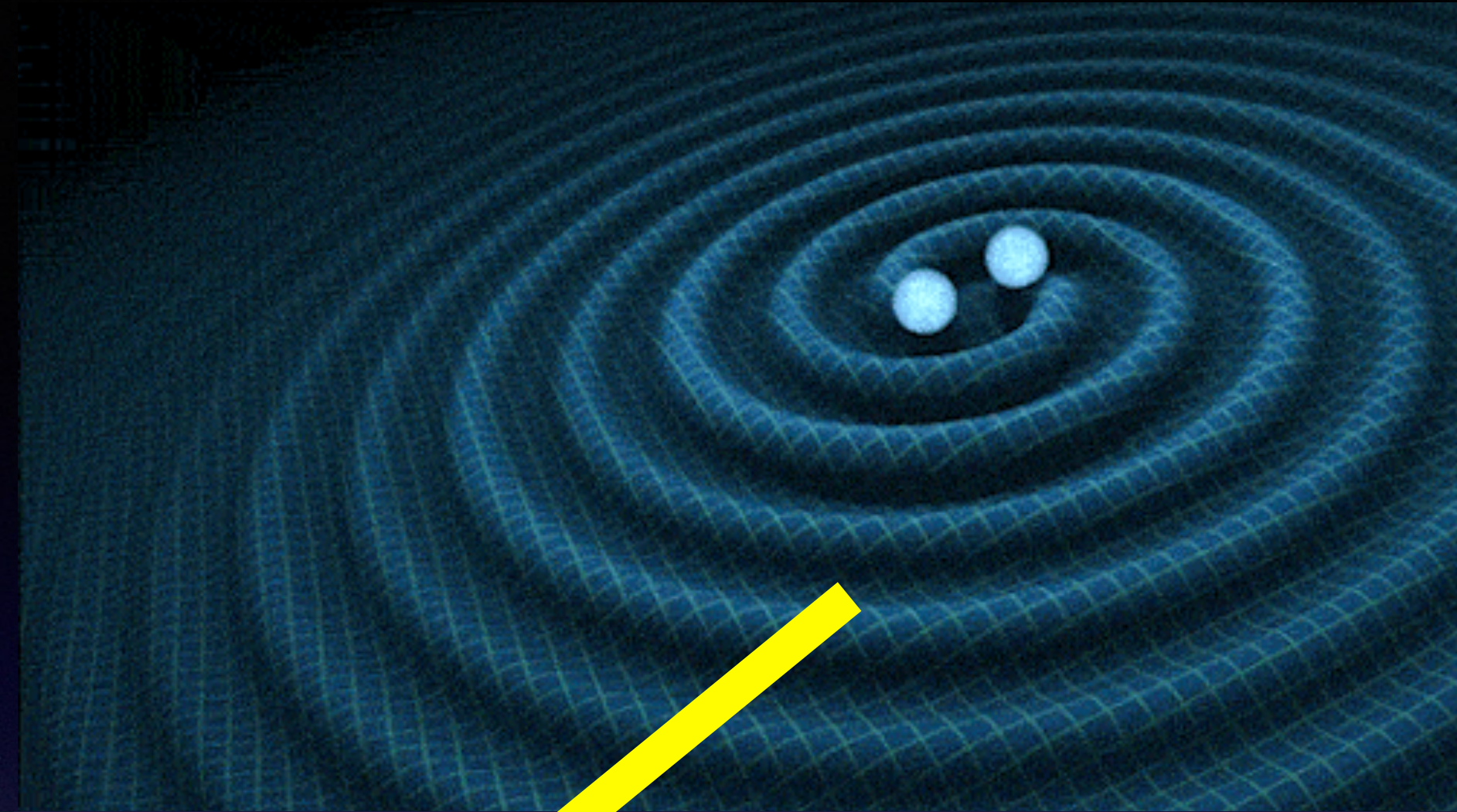
MIT Department of Physics
Technical Services Group

start on click, last half, 1'45"

<http://techtv.mit.edu/videos/9823-michelson-interferometer>

重力波の発生と伝播

連星ブラックホールや
連星中性子星



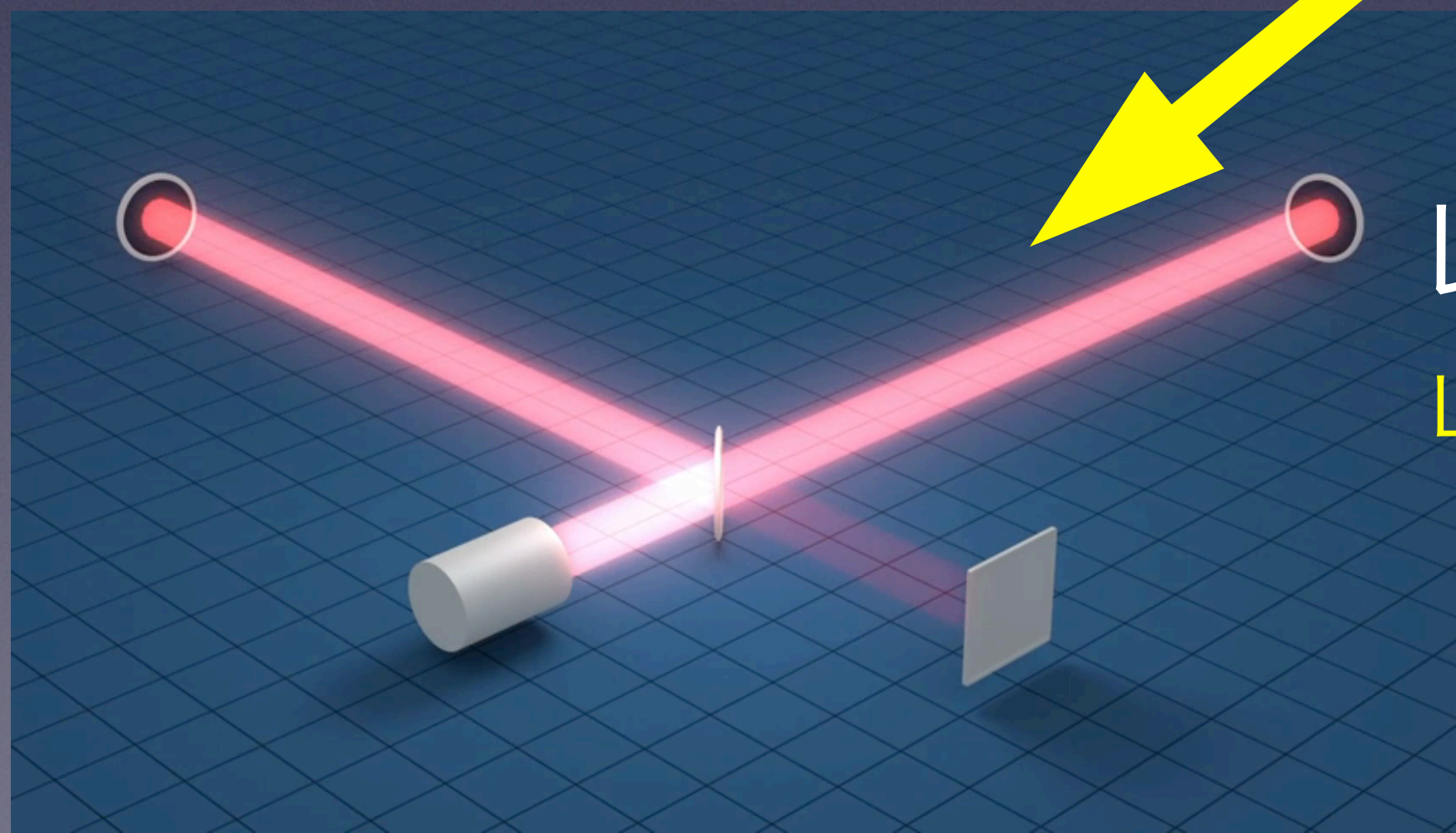
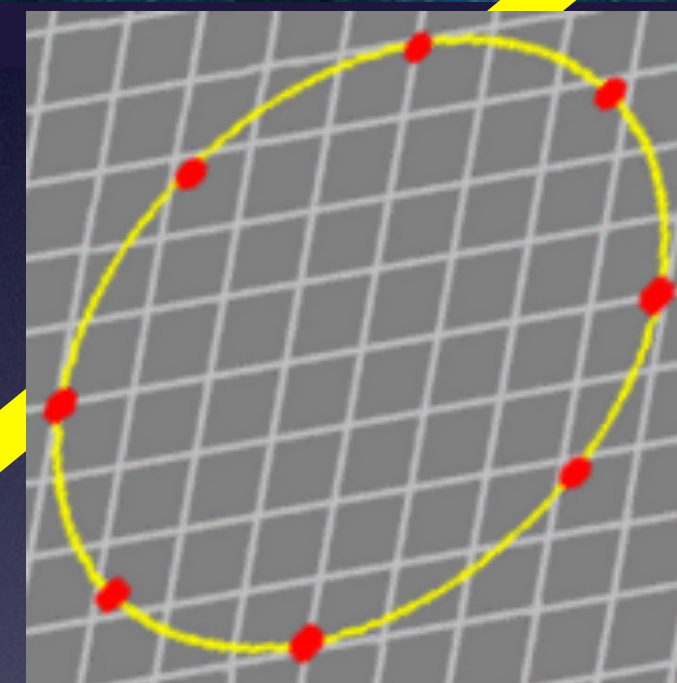
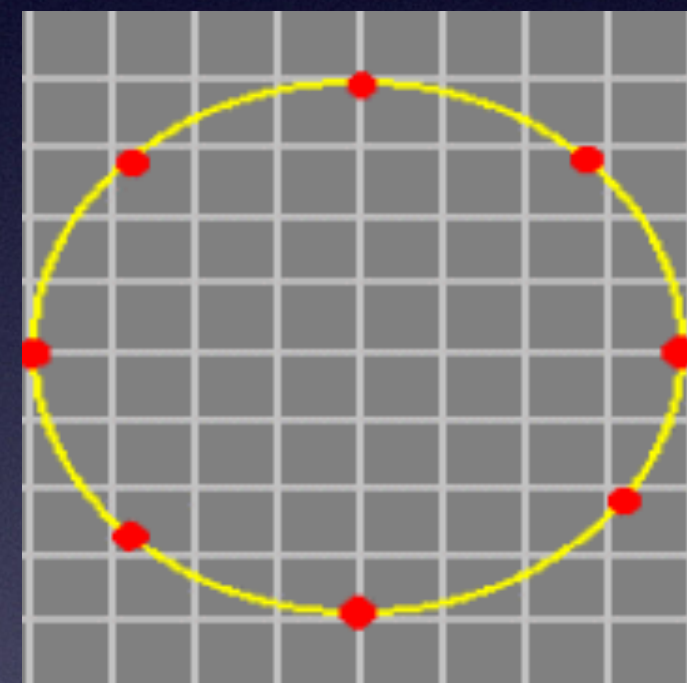
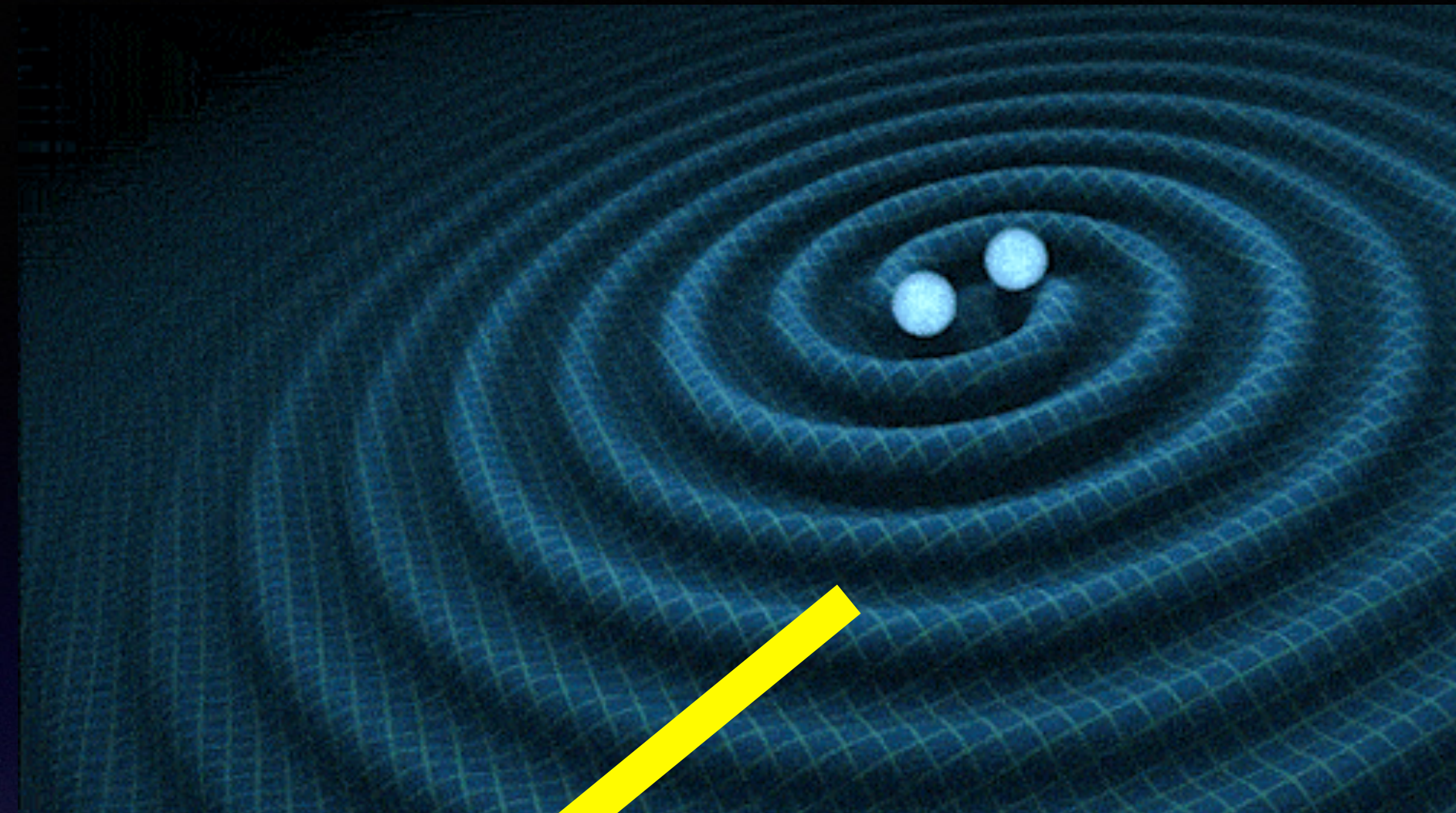
レーザー干渉計

LIGO=Laser Interferometer

Gravitational-Wave Observatory

重力波の発生と伝播

連星ブラックホールや
連星中性子星

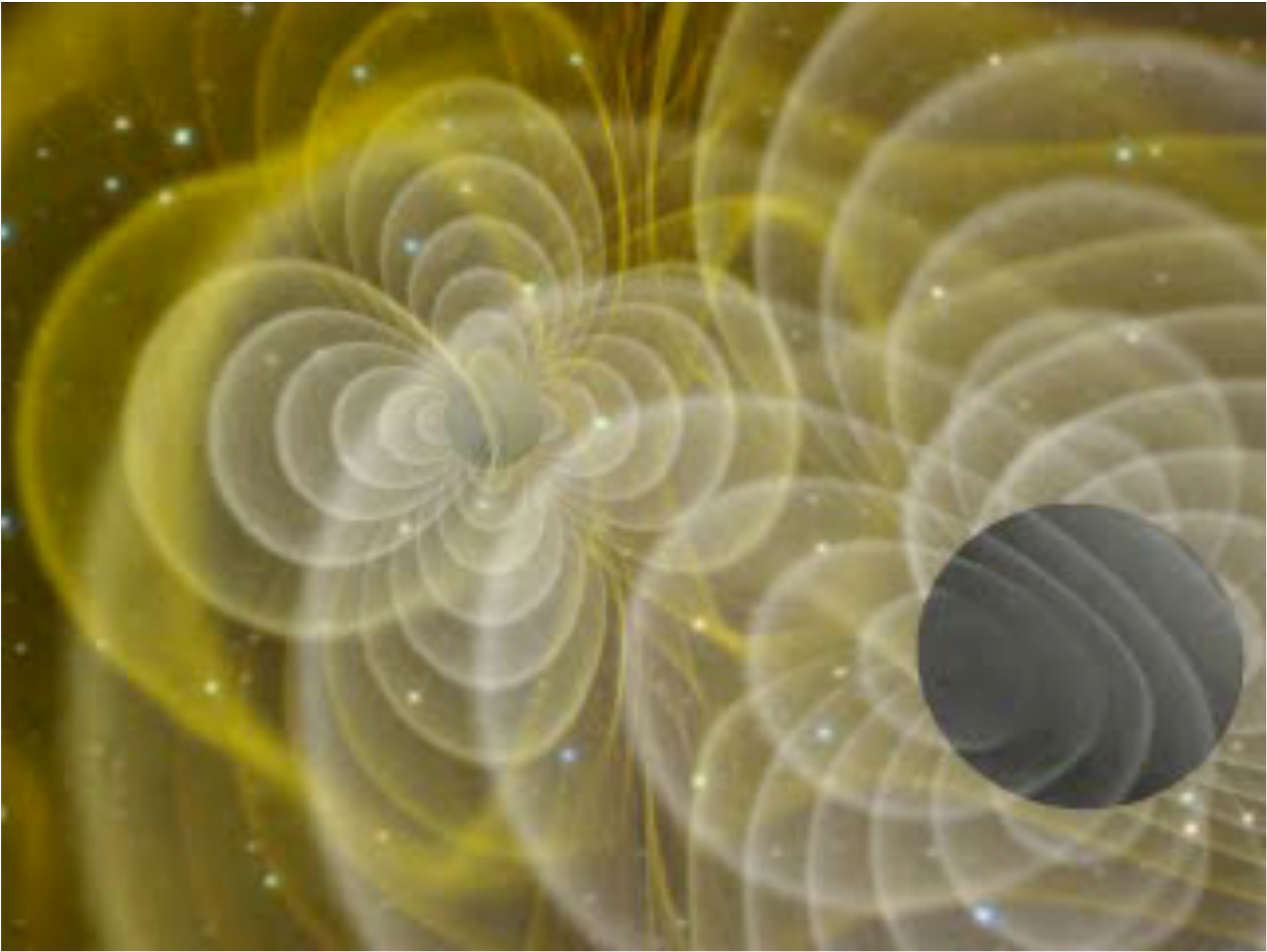


レーザー干渉計

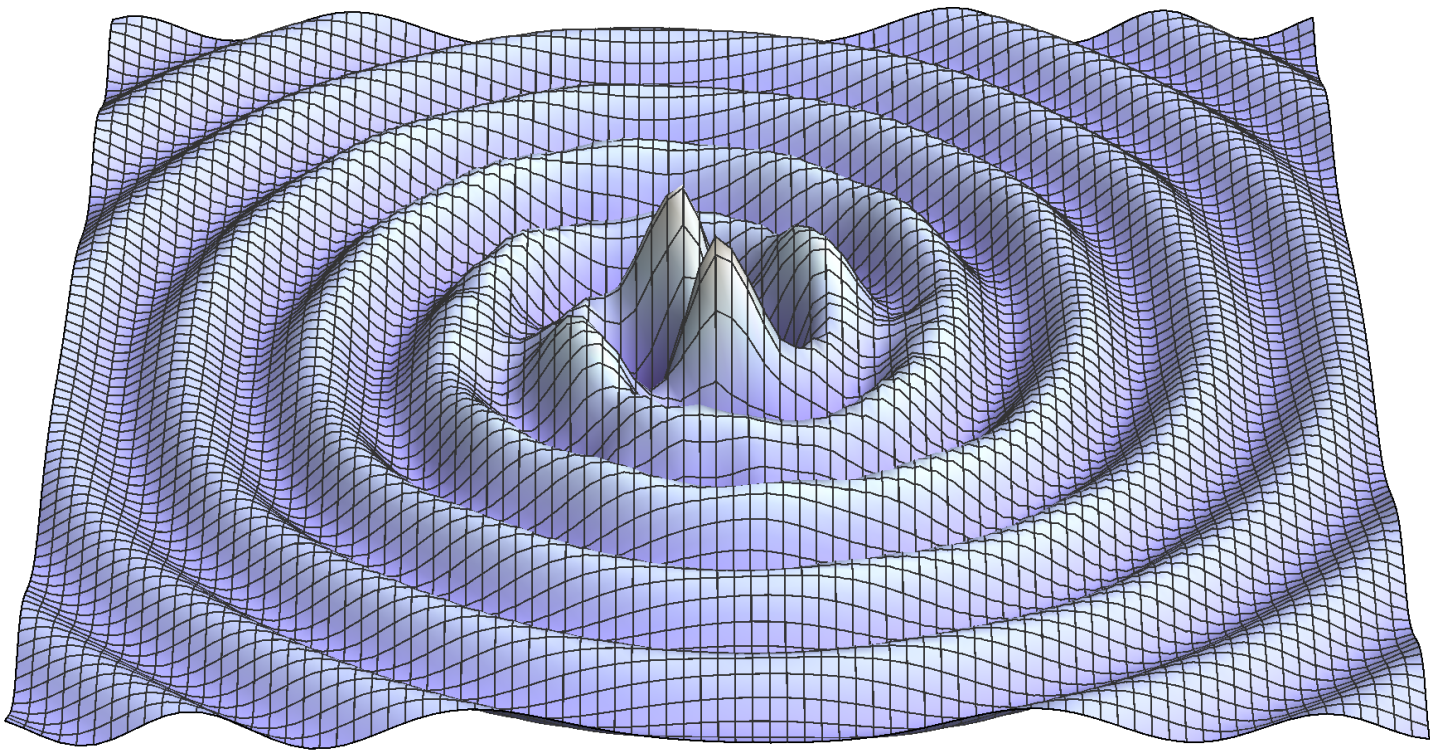
LIGO=Laser Interferometer

Gravitational-Wave Observatory

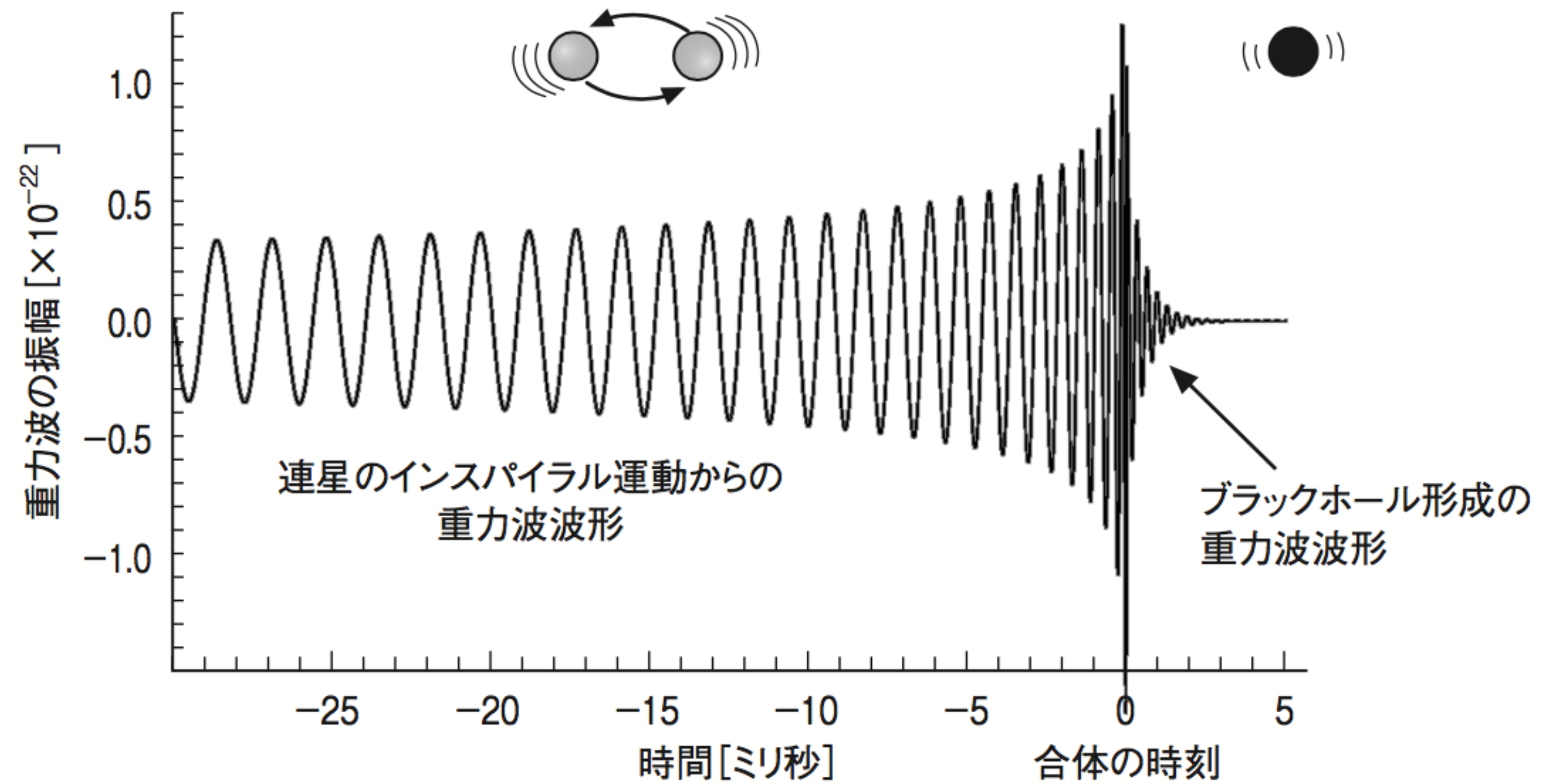
連星合体からの重力波の波形(理論予測)



(NCSA-AEIグループ, 1998年)



Inspiral **Merger** **Ringdown**



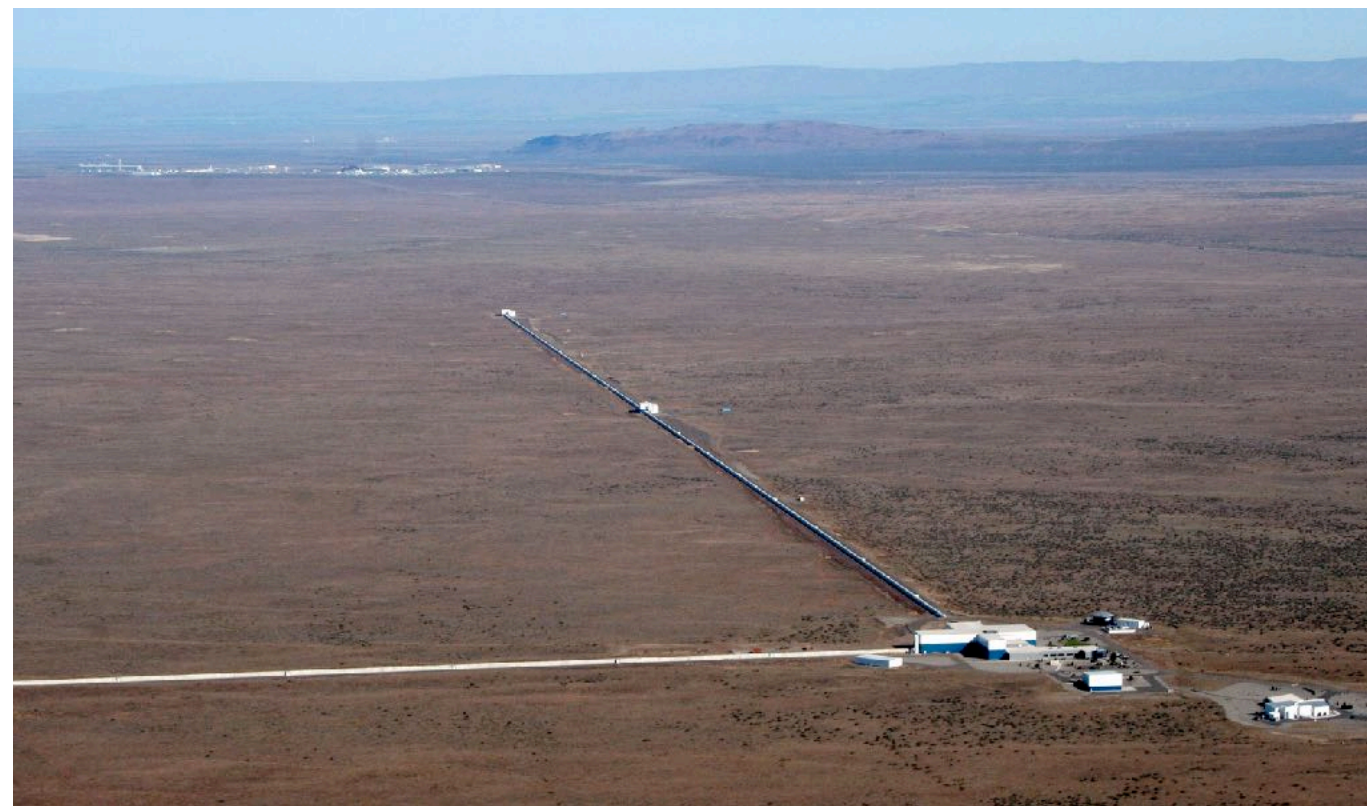
連星のインスパイラル運動からの
重力波波形

ブラックホール形成の
重力波波形



2023年5月から 日米欧で重力波共同観測中

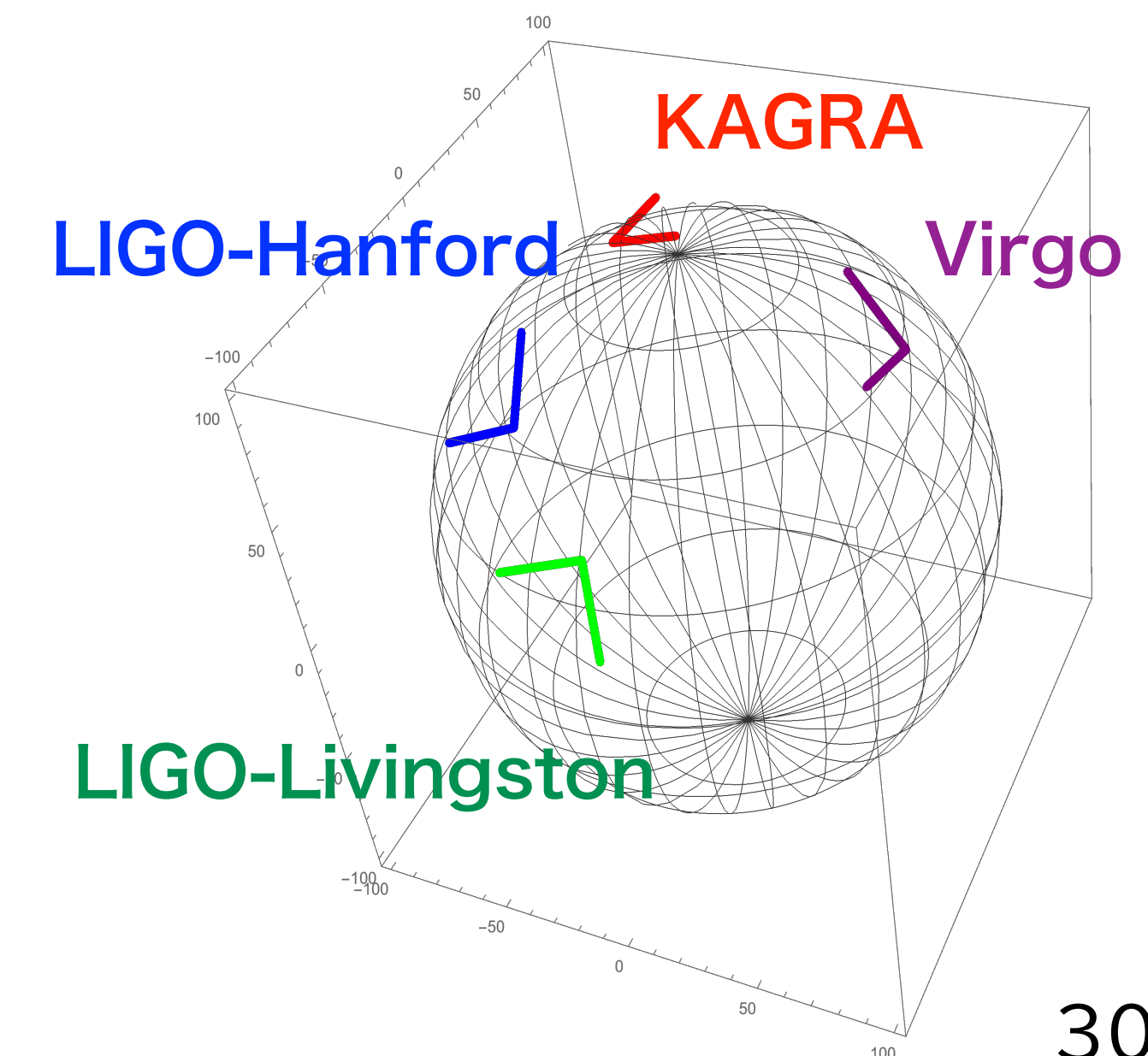
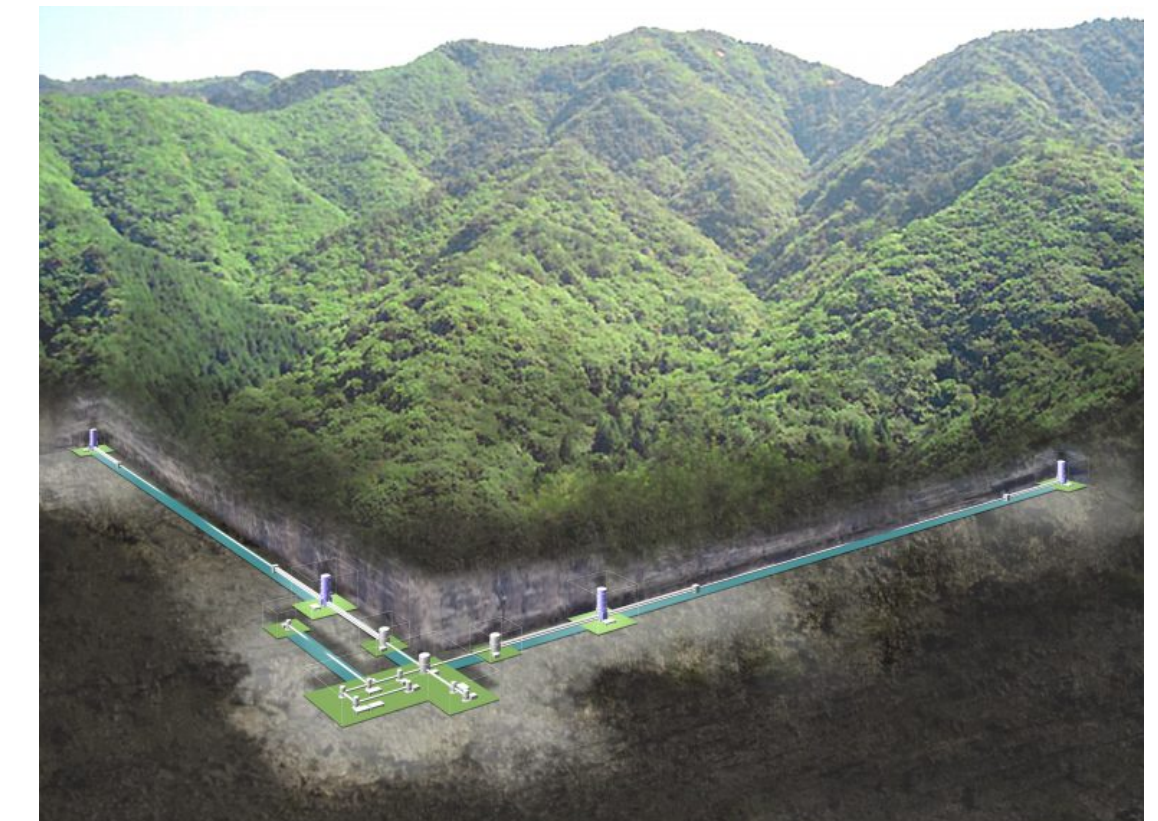
アメリカ・LIGO



ヨーロッパ・VIRGO



日本・KAGRA(岐阜・神岡)



KAGRA(かぐら:大型低温重力波望遠鏡)

Kamioka Gravitational wave detector, (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope)



望遠鏡の大きさ：基線長 3km

望遠鏡を神岡鉱山内に建設

地面振動が小さい岐阜県飛騨市にある神岡鉱山

鏡をマイナス250度 (20K) まで冷却

熱雑音を小さくするため

鏡の材質としてサファイア

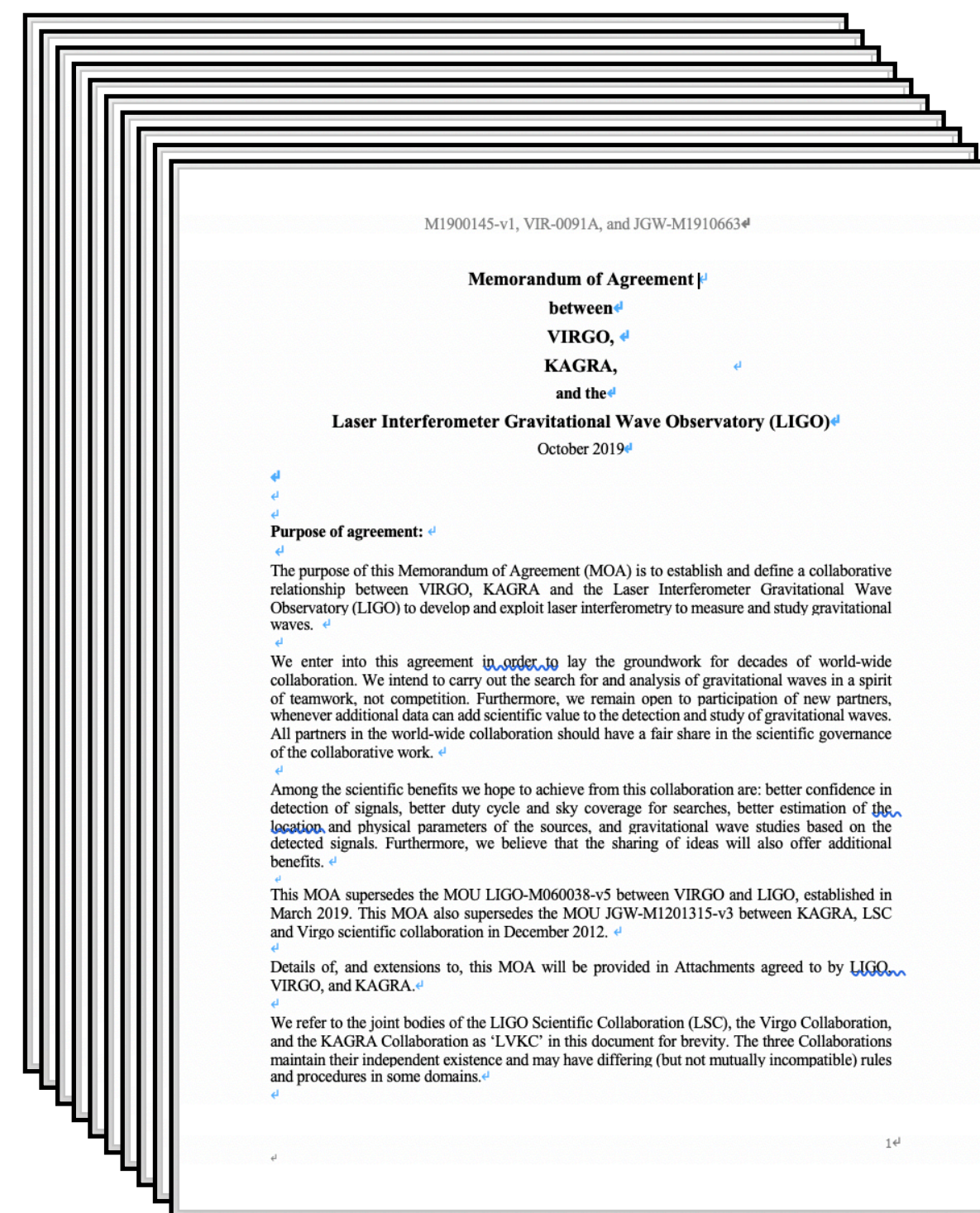
光学特性に優れ、低温に冷却すると熱伝導や機械的損失が少なくなる

<http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/plan/history>

KAGRA(かぐら:大型低温重力波望遠鏡)



KAGRA(かぐら:大型低温重力波望遠鏡)



2019年10月, アメリカ・ヨーロッパとの研究協定に調印

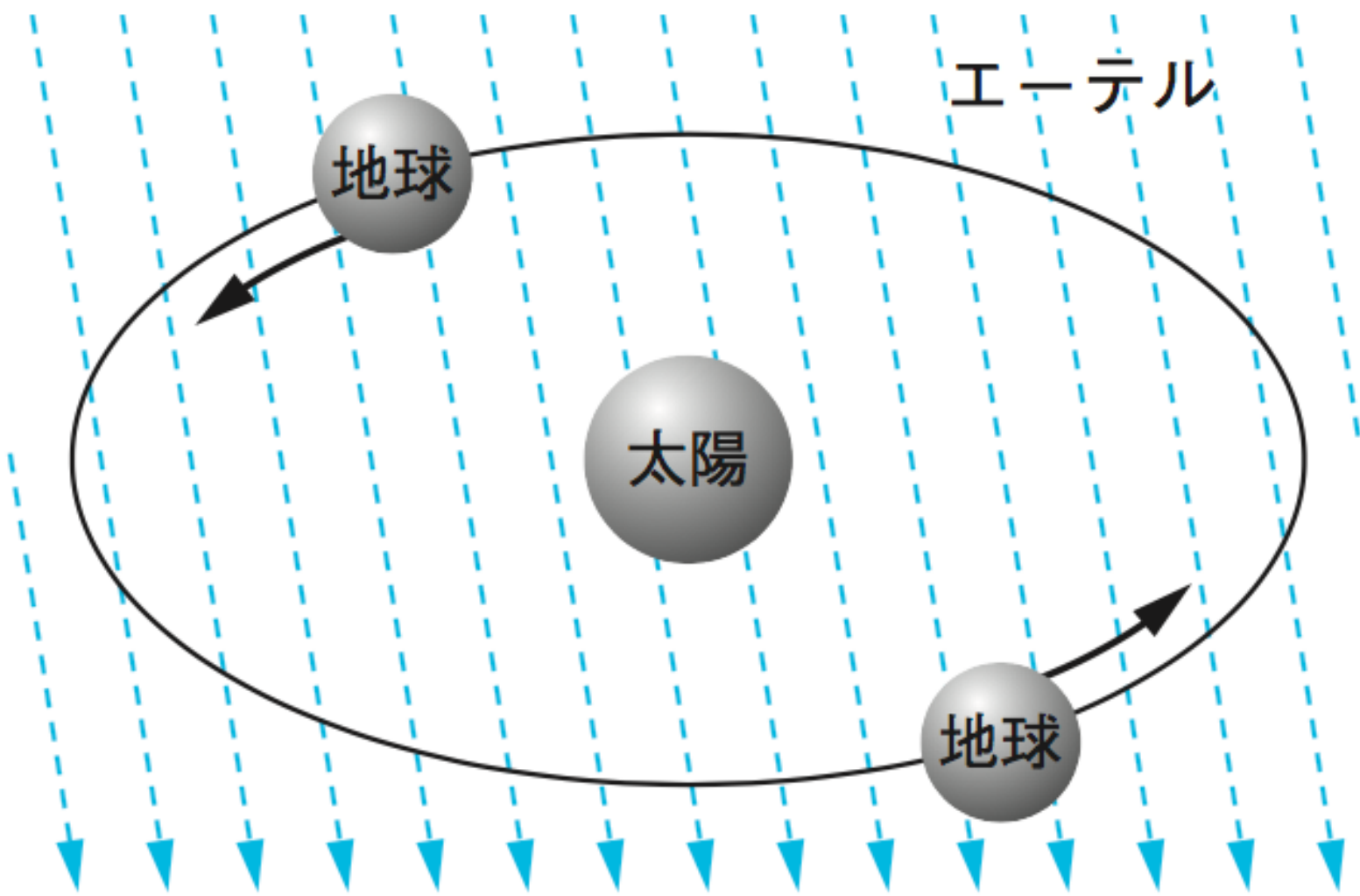
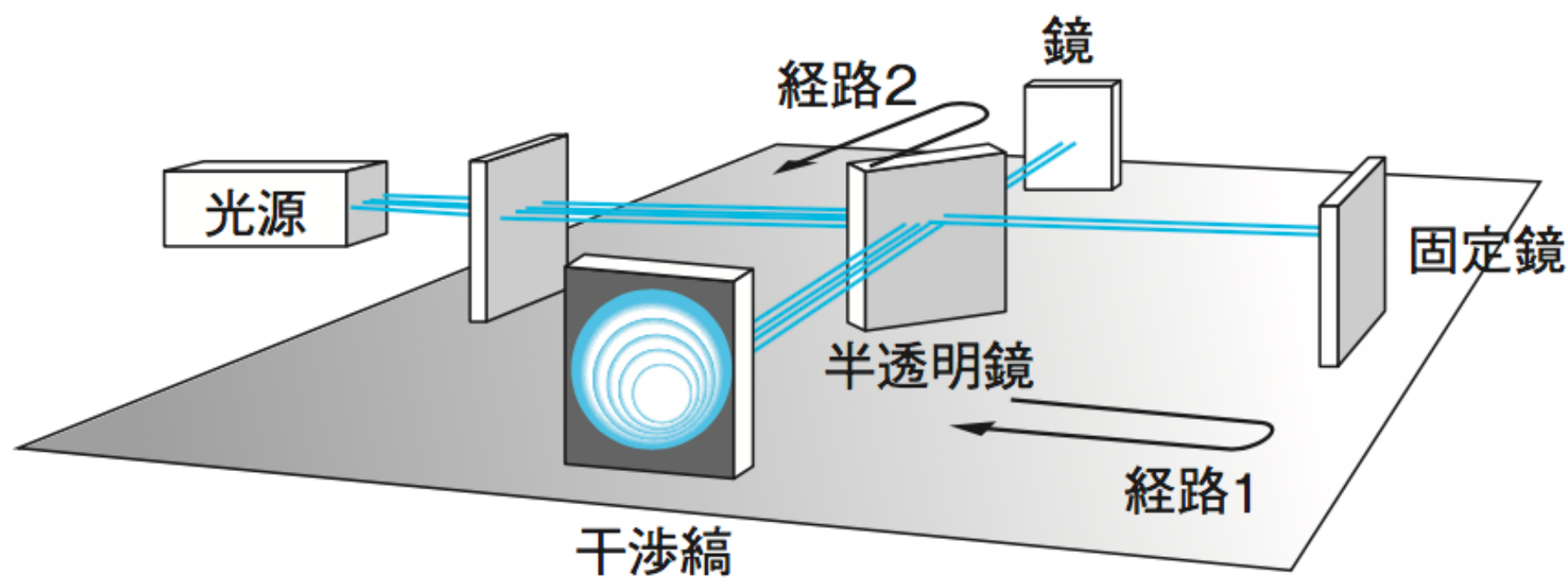
マイケルソン・モーリーの実験

Michelson-Morley experiment 1887



→エーテルの検出に「失敗」

微小距離を測定する干渉計



エーテルがあれば、季節で距離が変わるはず。
微妙な差でも、干渉計なら測れるはず。

(特殊) 相対性理論(1905年)

- 発端：

電磁気学の式に出てくる「光速 c 」は誰から測った速さなのか。光は真空でも伝わるのか。

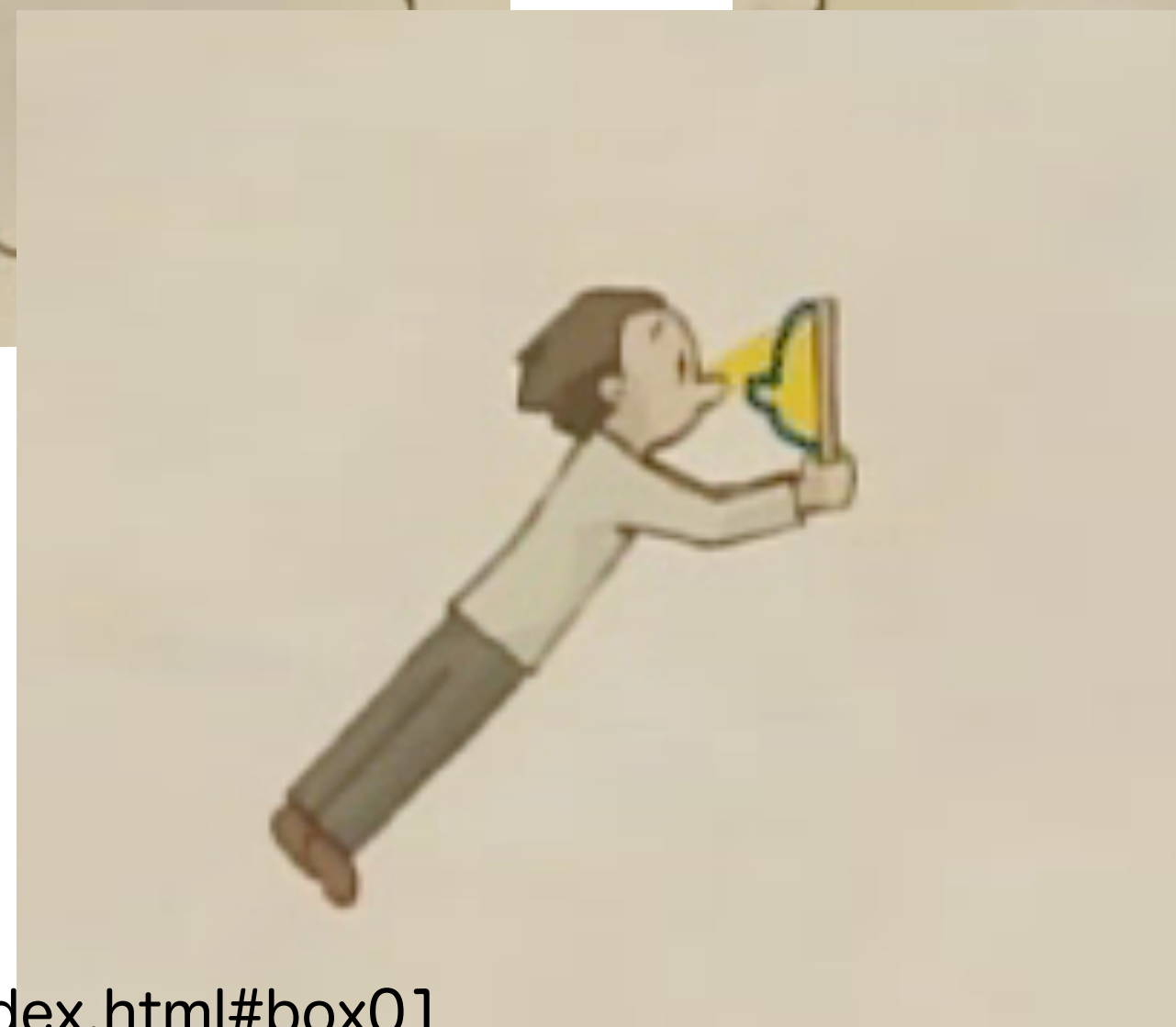
- 当時の考え：

光はエーテル中を伝わる。「光速 c 」は座標系によって変化するはずだ。ただし、エーテルは未発見。 . . .

- アインシュタインの考え：

光速度は誰から見ても一定、光は真空でも伝わり、物理法則は座標系によらず不変のものでなければならない。

光の速さで動く人が鏡をみると 自分の顔が映るのを見るのだろうか？



3.2.2 アインシュタイン 大胆な原理の導入

★**相対性原理**：物理法則は、どのように運動をする人からみても（どのような座標系から見ても）同じ形にならなくてははいけない。

★**光速一定の原理**：真空中の光の速度は、どのような座標系から見ても同じである。

疑問2

電磁波が伝わる速度が「光速」であるとは、誰から見た時の光速なのか？



時速140km



時速120km

車中の人からはパトカーの速度は時速20kmに見える。
(速度は相対的なもの)

✗ 特別な座標系の存在？
不要である

光速度一定を原理とすると, 時間座標も伸縮する

Advanced

ローレンツ変換

ローレンツは, 次のような座標変換をしてもマクスウェル方程式は不変であることを示した (1904 年). すなわち, ある慣性系 (t, x, y, z) から $+x$ 方向に速度 v で運動する慣性系 (t', x', y', z') への座標変換として

$$\begin{aligned} t' &= \frac{t - (v/c^2)x}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \\ x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z. \end{aligned} \tag{3.7}$$

この式は, 行列とベクトルの積として, 次のようにも書ける.

$$\begin{pmatrix} t' \\ x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} & \frac{-v/c^2}{\sqrt{1-(v/c)^2}} & 0 & 0 \\ \frac{-v}{\sqrt{1-(v/c)^2}} & \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix} \tag{3.8}$$

ローレンツ変換
(Lorentz transformation)

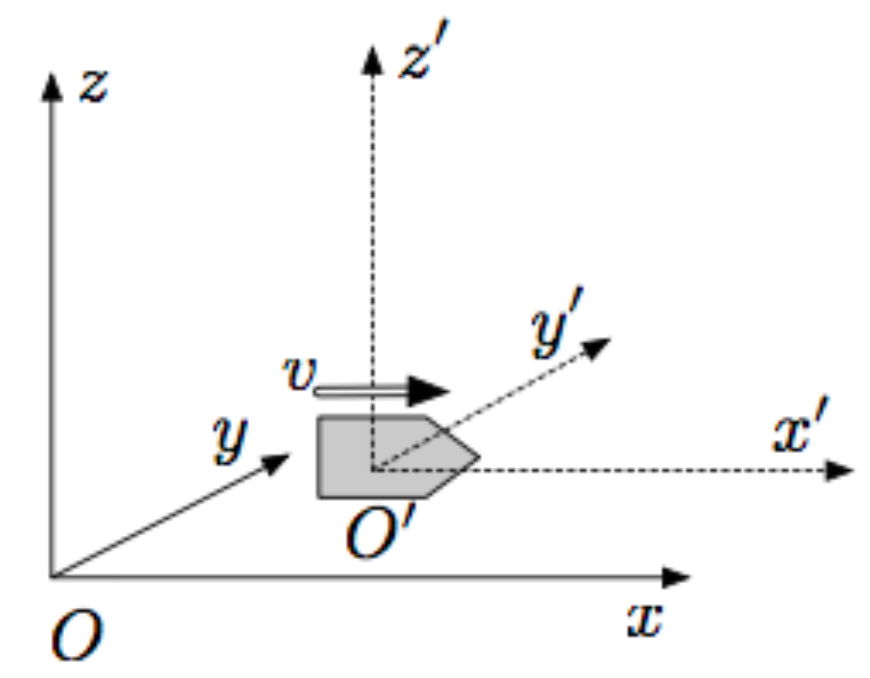


図 3.6: 静止している xyz 座標系と, 速度 v で x 方向に動いている $x'y'z'$ 座標系.

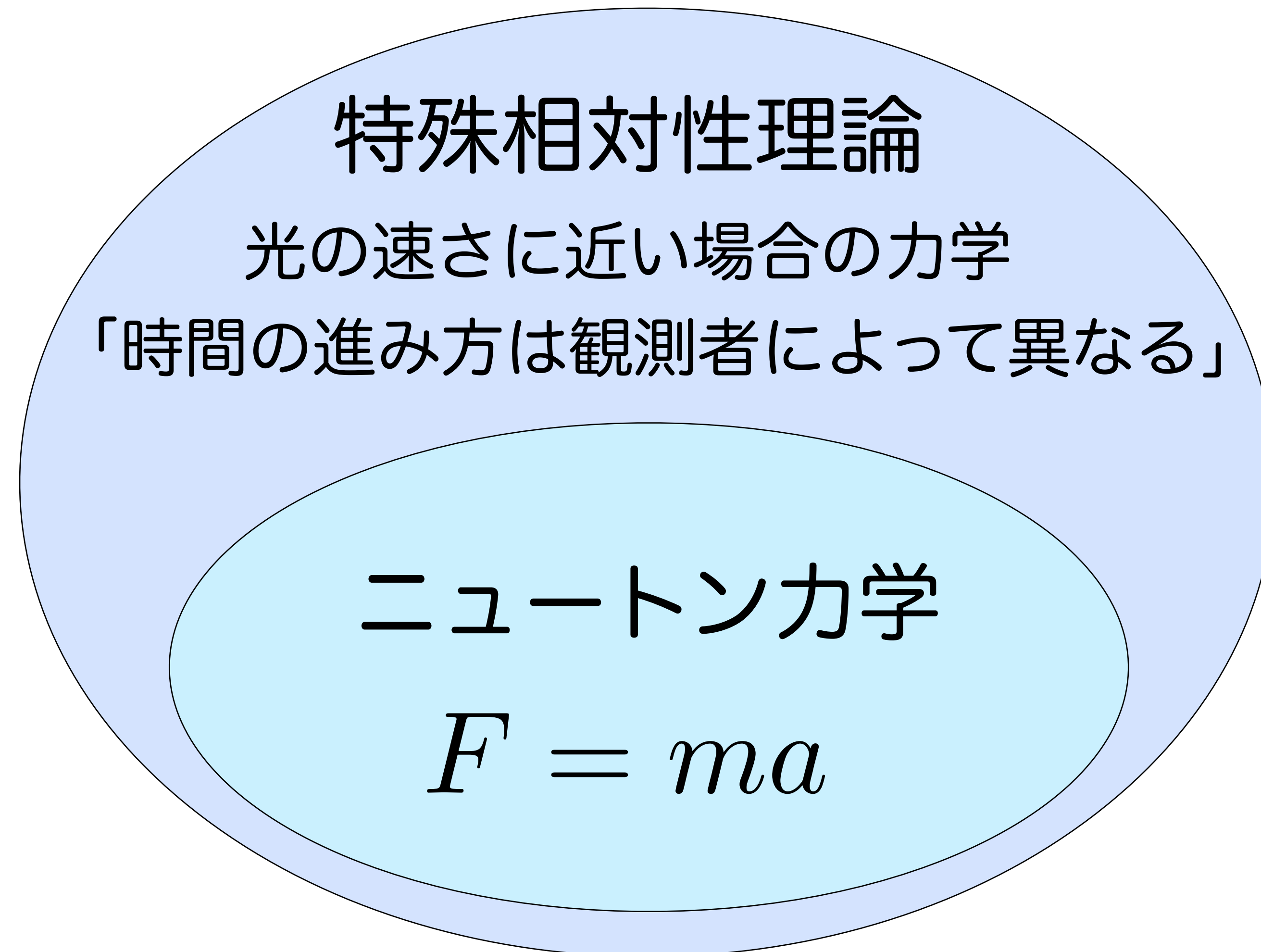
光速 + 光速 = 光速

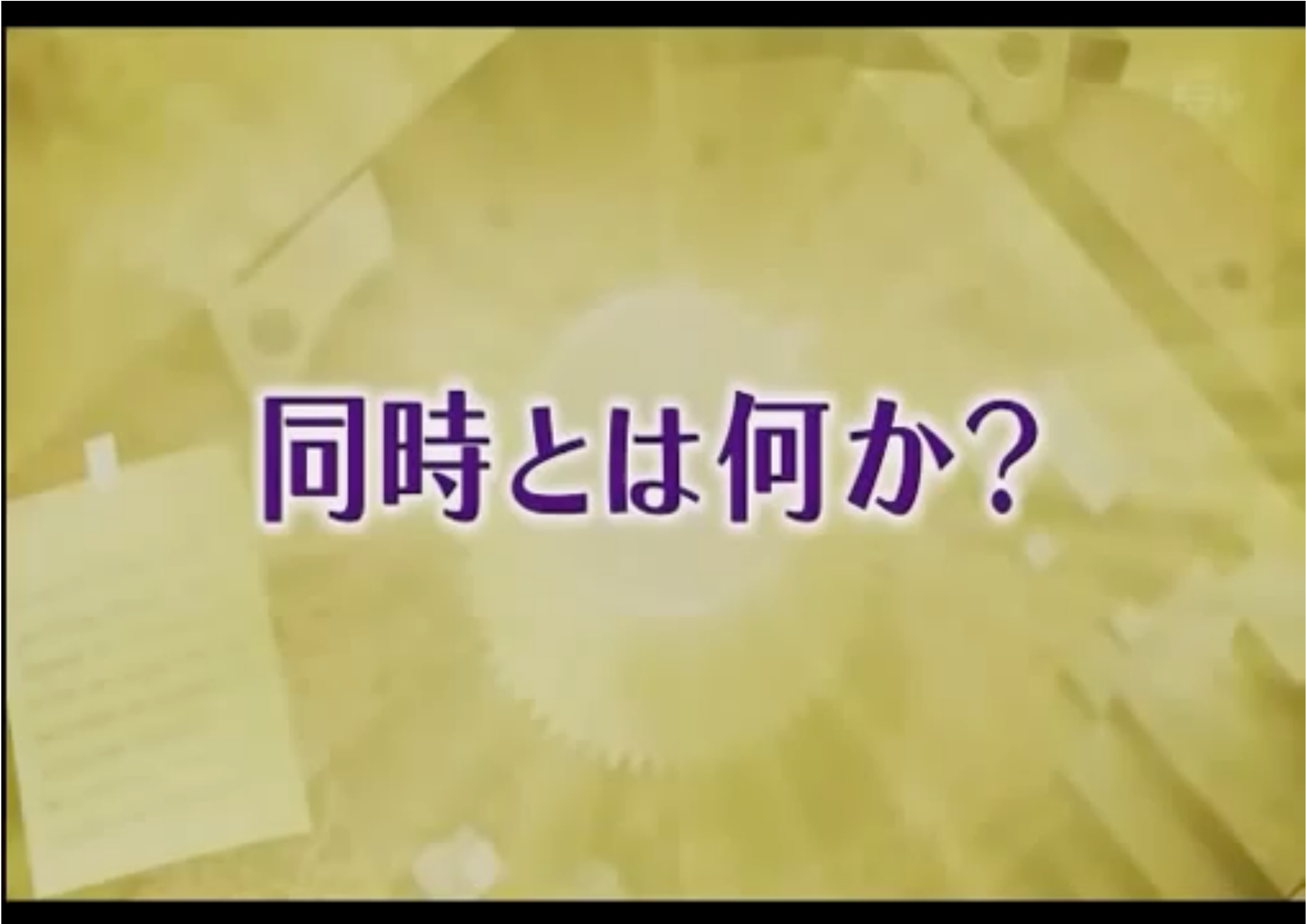
ローレンツ変換では，速度の足し算は $v_1 + v_2$ ではなく，

$$v_1 + v_2 \implies \frac{v_1 + v_2}{1 + (v_1 v_2 / c^2)}$$

v_1	v_2	$v_1 + v_2$
光速の 0.1%	光速の 0.1%	光速の 0.19999998%
光速の 10%	光速の 10%	光速の 19.802%
光速の 90%	光速の 90%	光速の 99.448%
光速	光速	光速

これまでの物理学を否定せず、拡張した理論！



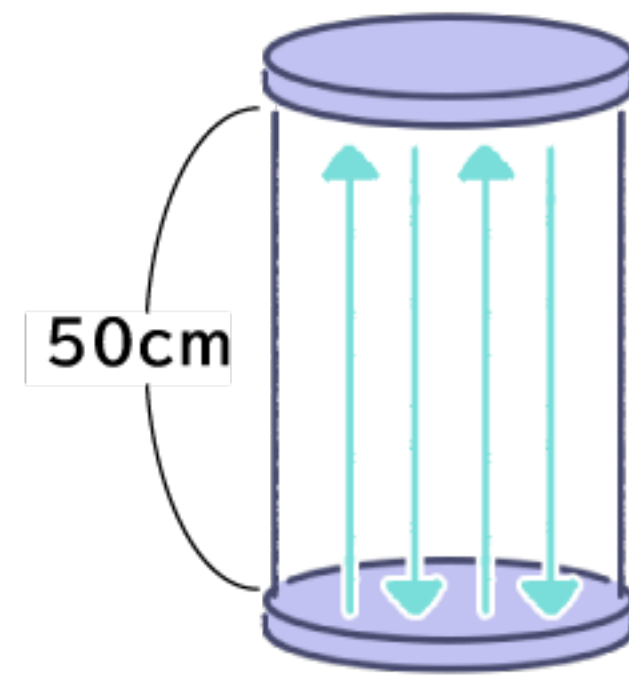


同時とは何か？

4:00

NHK 100分de名著「相対性理論」第2回（2012年）
佐藤勝彦『光速を不変とすると、時間是不変ではない』

光時計の思考実験



光時計

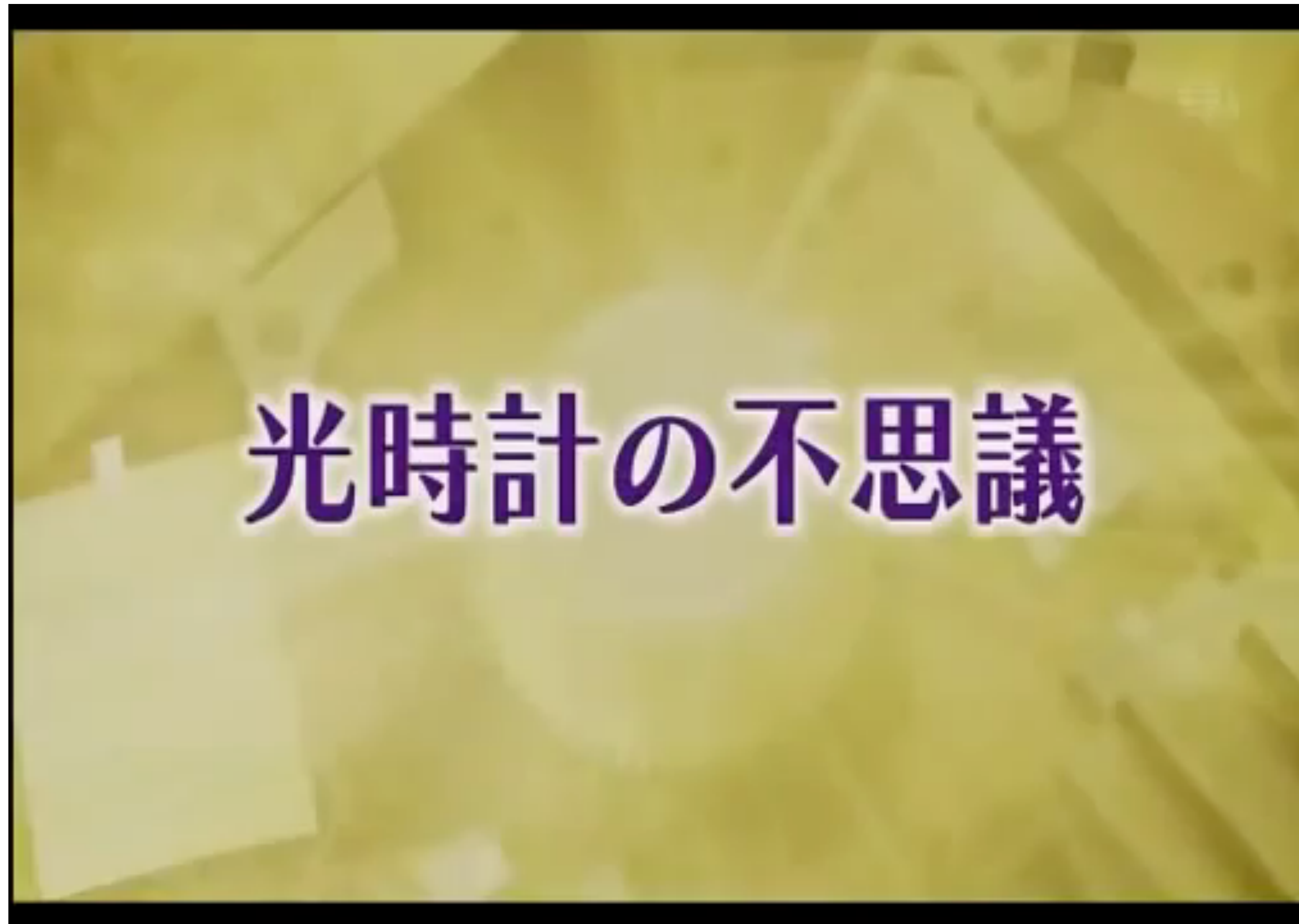
光が 2億9979万2458回往復すると
「1 秒」を刻む時計



地球の人がロケット内の光時計を見ると ロケットが移動するので光は斜めの経路を進み その分長い距離を進まなければならない 光の速度は誰から見ても一定なので ロケット内の光時計は 2 億 9979万 2458 回往復するのに地球の 1 秒より長い時間がかかる つまりロケット内の光時計はゆっくりと時を刻んでいる

動いている人の時間の進み方は 静止している人よりも遅い

時間の進み方は相対的になる



2:30'

NHK 100分de名著 「相対性理論」 第2回 (2012年)

未来へのタイムトラベルは可能!!

コラム 16 浦島効果：未来へ行くタイムトラベルは可能！

特殊相対性理論によれば，高速で動いている人ほど1秒の間隔は開いてくる．計算式で表すと，速度 v で移動している人の時間 $\Delta T'$ は，静止している人の時間 ΔT と同じではなく，次式になる．

$$\Delta T' = \sqrt{1 - (v/c)^2} \Delta T \tag{3.4}$$

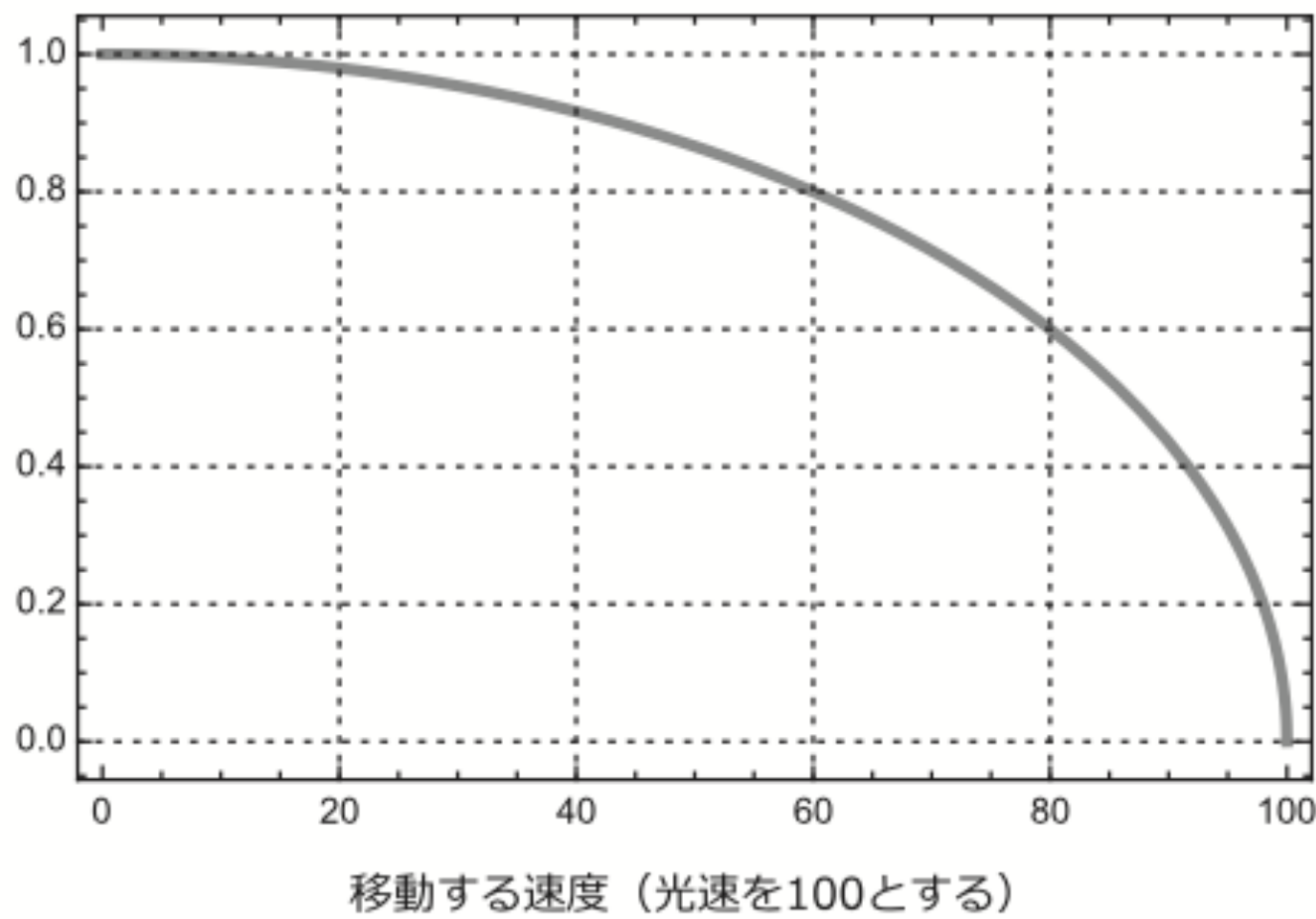
速度 v で移動している人の1秒

静止している人の1秒

表 3.2

v	$\sqrt{1 - (v/c)^2}$
$0.1\ c$	0.99499
$0.5\ c$	0.86603
$0.9\ c$	0.43589
$0.99c$	0.14107

静止している時計に対する時間の進み方
(静止系から見た時間の遅れ)



動いている人の時間の進み方は， 静止している人よりも遅い

コラム 16 浦島効果：未来へ行くタイムトラベルは可能！

特殊相対性理論によれば，高速で動いている人ほど1秒の間隔は開いてくる．計算式で表すと，速度 v で移動している人の時間 $\Delta T'$ は，静止している人の時間 ΔT と同じではなく，次式になる．

$$\Delta T' = \sqrt{1 - (v/c)^2} \Delta T \quad (3.4)$$

速度 v で移動している人の1秒

静止している人の1秒

$$300 \text{ year} = \int_0^{3 \text{ year}} \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} dt \quad \Rightarrow v = 0.9999499c$$

竜宮城は，光速の99.995%の速さで動いていた！

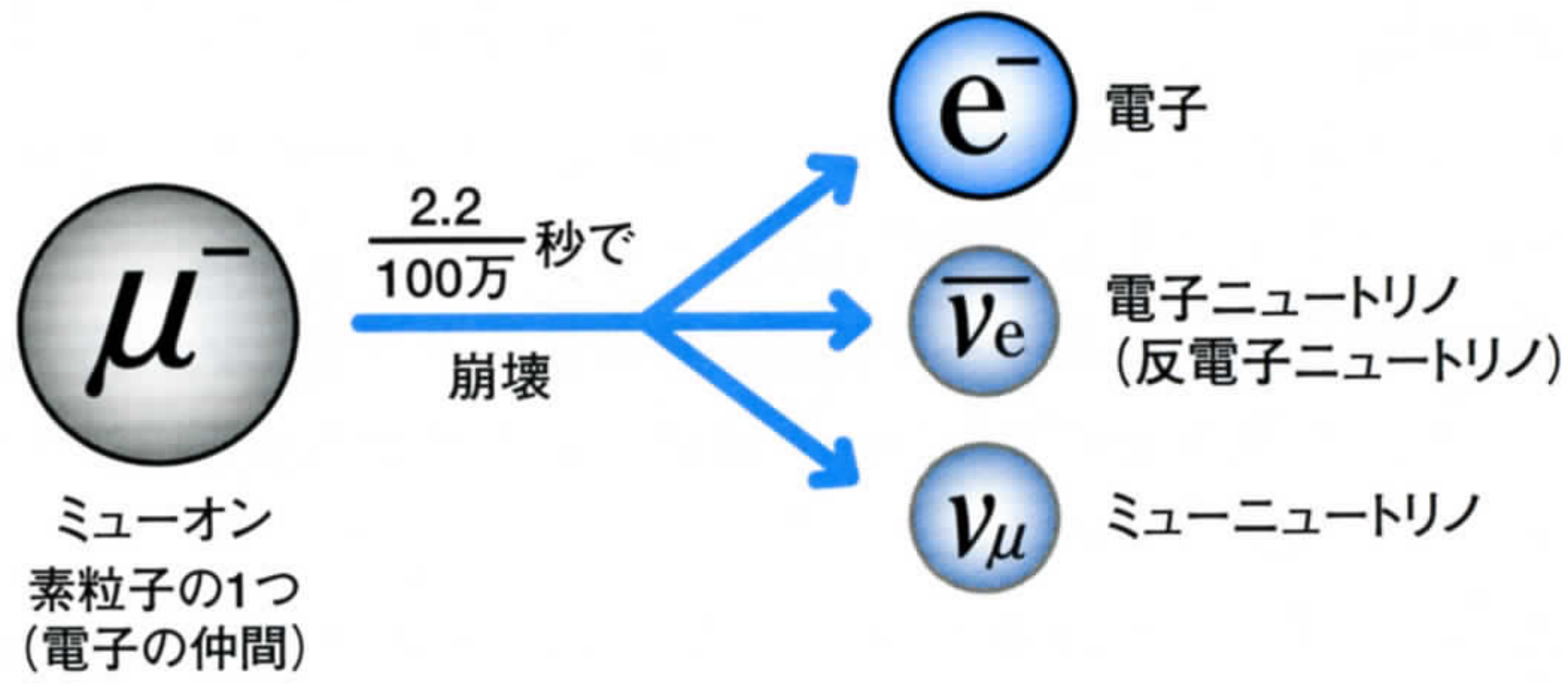
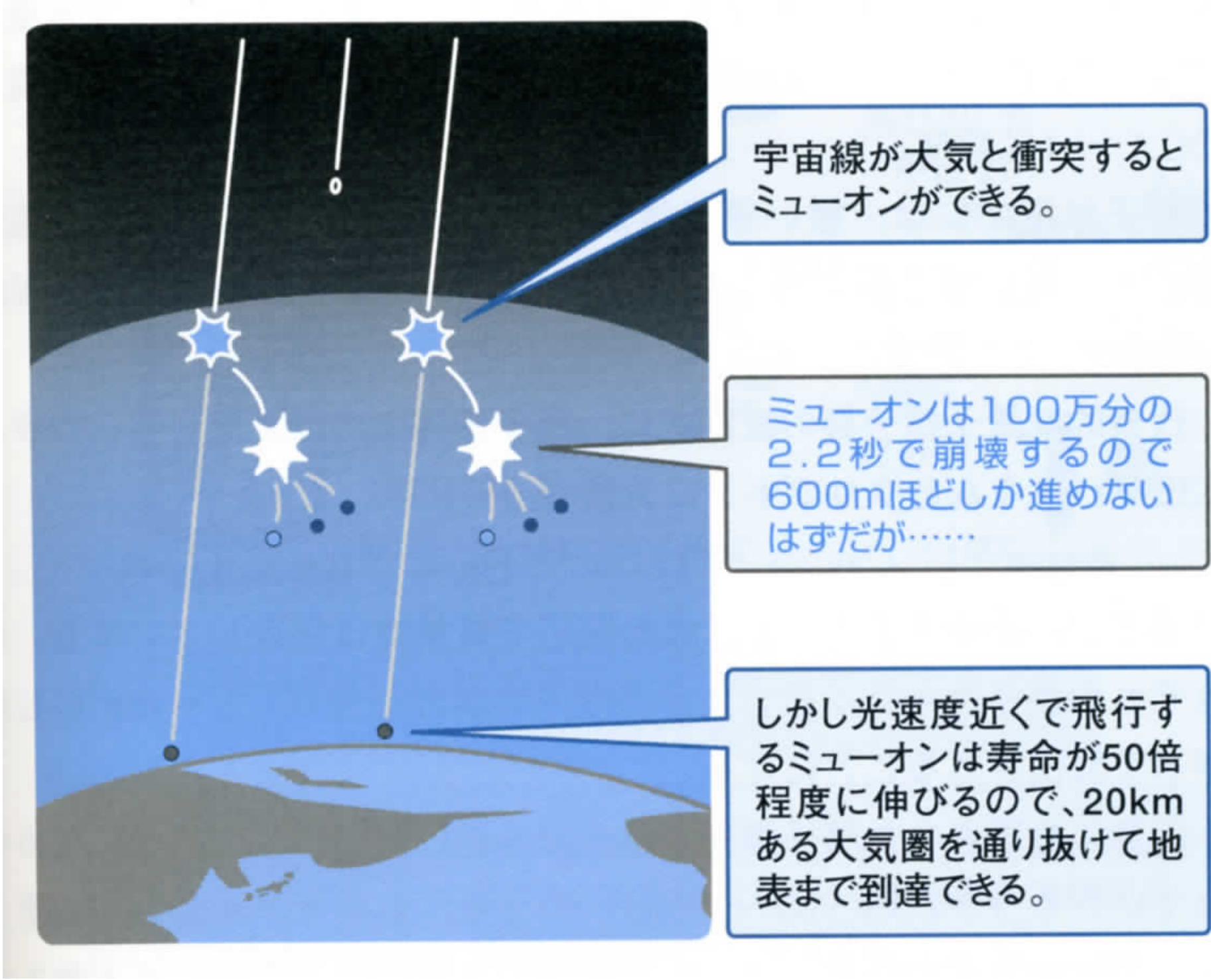
未来へ行くタイムマシンは可能

万葉集 巻九 水江の浦の島子を詠みし一首短歌を并（あは）せたり

春の日の霞める時に 墨吉の岸に出で居て 釣船の
とをらふ見れば 古のことと思ほゆる 水江の浦の島
子が 堅魚釣り鯛釣り誇り 七日まで家にも来ずて
海坂を過ぎて漕ぎ行くに わたつみの神の娘女に た
まさかにい漕ぎ向かひ 相あたらひ言成りしかば か
き結び常世に至り わたつみの神の宮の 内の重の妙
なる殿に 携はり二人入り居て 老いもせず死にもせ
ずして 永き世にありけるものを 世の中の愚か人の
我妹子に告りて語らく しましくは家に帰りて 父
母に事も語らひ 明日のごと我は来なむと言ひければ
妹が言へらく 常世辺にまた帰り来て 今のごと逢
はむとならば このくしげ開くなゆめと そこらくに
堅めしことを 墨吉に帰り来たりて 家見れど家も見
かねて 里見れど里も見かねて 怪しみとそこに思は
く 家ゆ出でて三歳の間に 垣もなく家失せめやと
この箱を開きて見てば もとのごと家はあらむと 玉
くしげ少し開くに 白雲の箱より出でて 常世辺にた
なびきぬれば…

<https://www.kyoto-np.co.jp/articles/-/32438>

素粒子の寿命は確かに延びている！



前回のミニッツペーパーから

行けるとしたら何年後の未来へ行ってみたいですか？

1年後

5年後

5から10年後

6年後

10年後

15年後

20年後

30年後

40年後

5年後、大学を卒業して安定しているか気になる。

結婚しているか、子供がいるか見てみたい。

6年後の24歳の自分をみたい。
仕事に就いて2年経ち、結婚や出産、どんな生活をしているのか気になる。

10年後、10年後の自分や周りの人の人生がどうなっているのか気になる。

10年後（どんな仕事しているのか気になる）

10年後、自分が早く生活しているか気になる。

15年後、ある程度お金を手に自分でどんな生活を送っているか
見てみたい。

20年後 親を再会したい！

40年後、どんな定年後を過ごしているのか見てみたい。

前回のミニツツパーから

行けるとしたら何年後の未来へ行ってみたいですか？

50年後

50年後

おばあちゃんになった姿を見たい

50年後、地球温暖化が進んでいるから2070年と511人が住める人が半分になるとい
ことを聞いたことがあったので、見てみたい。

50年後

AIを介してみたい。

50年後、半世紀でどれだけ技術が上がっているのか知りたいです。

世紀

100年後

100年後 (自分が生きている可能性が低い年だから)

100年後 (トランスヒューマンが22世紀から来ており、技術が発展しているから会えるかも(未知))

せなかにせな、私が生きている(保証のない)100年後とかに
行ってみたい。

宇宙に行くかあたりまえになっている世界

150年後

150年後

死後、世界はどうなっているのか知りたい。

200年後

200年後の未来

自分が死んだ後は知ることができないから

前回のミニッツペーパーから

行けるとしたら何年後の未来へ行ってみたいですか？

500年後

③ 500年後. (2500年代)
現在では500年前の人々からは想像できないほど、発展し、様々な技術が生まれている。現在でさえ、AI技術が発達しているのに、500年後はどのような生活か想像もできないから見てみたい。

40億年後

1000年後

1000年後
→ ほぼ確定で私が生きていない時代だから。

1000年後、どこかで変わっているの気がする

とりあえず1000年くらい後に行きたいです
地球に人がいるでしょうか

未来は怖くて知りたくなかったです、過去に行きたいです

今の自分の行動が何年後の未来に影響を
与えているのか、知りたい。

先生はいつの未来に行きたいですか？

皆既日食見たい。2035年
ハレー彗星見たい。2061年



ISSは秒速 7.8km
1年間乗務すると, . . .

0.01067秒 地表より時間が短くなる



旅客機は時速900km (秒速 250 m)

10000時間乗務すると, . . .

0.000012517秒地表より時間が短くなる

3.2.4 時間の遅れとパラドックス

(1) お互いに「相手の時計が遅れている」という パラドックス

1-a 速度は相対的なものだ。地球からロケットを見れば速度は v でも、ロケットから地球を見れば地球は速度 $-v$ で動いていることになる。

1-b だから、地球の人はロケットの時計が自分より遅く進むと観測し、ロケットの人は地球の時計が自分より遅く進むと観測する。

1-c だから、お互いどちらも「相手の時計が遅れている」と主張する。

さて、どこかに間違いはあるだろうか。

どちらも正しい

「相手の時計が遅れている」というパラドックス

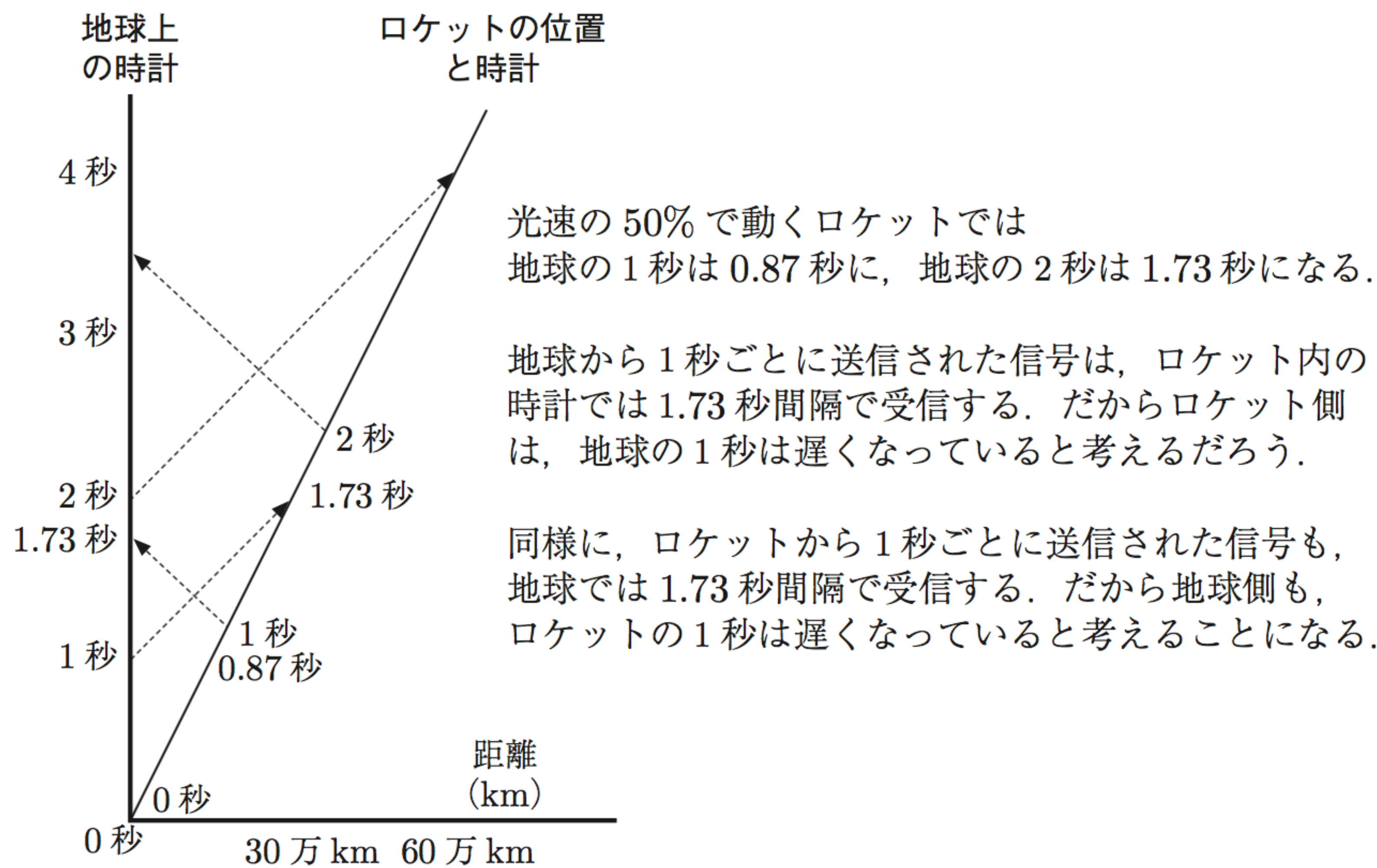


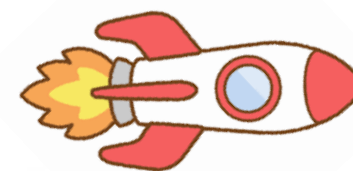
図 3.16 「相手の時計の方が遅れている」という主張はどちらも正しい。

双子のパラドックス

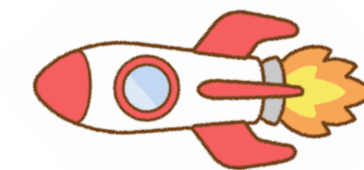
双子のパラドックス

- a 双子の兄と弟がいて、兄が光速の 80% のスピードで飛ぶロケットに乗って宇宙旅行に出た。目的地の星の近くまで一直線に飛び、すぐに引き返して戻ってきた。
- b ロケットで飛行中は、どちらも相手の時計の進み方が遅いと観測していた。
- c それでは、地球時間で 30 年経って戻ってきた兄と、地球に残っていた弟が再会するとき、どちらが若いのか。

弟



兄の方が若い



双子のパラドックス

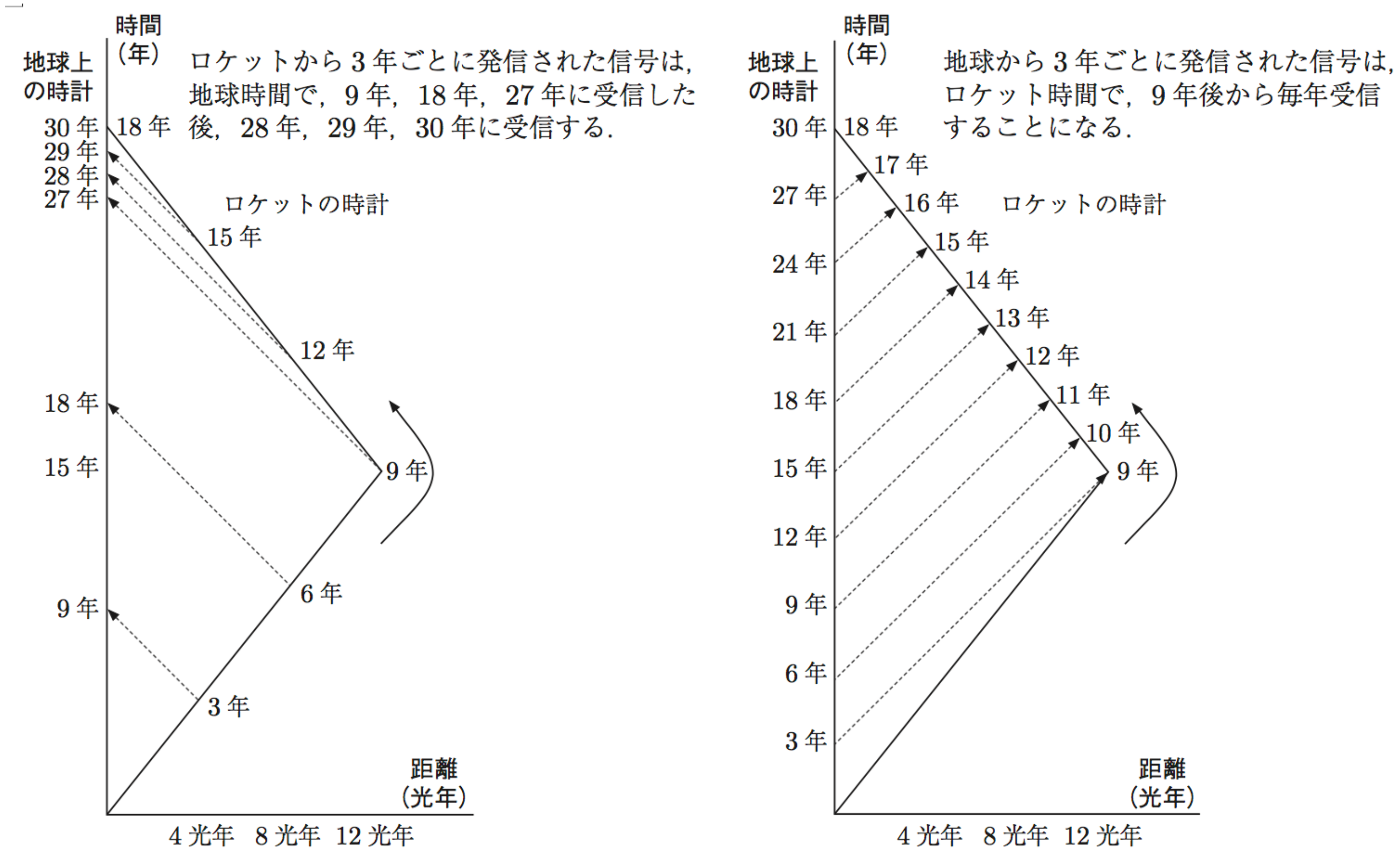


図 3.17 双子のパラドックスの理解. 互いに3年ごとに信号を発して、互いに相手の時計は遅いと感じつつも、再び出会うときにはロケットに乗っていた方が時間経過が短い。

ドラえもんの世界を、学問してみれば。

各界の第一人者が講師となって、タイムトラベル論、デザイン論、コミュニケーション論を誌上講義。『ドラえもん』を題材に、わかりやすく解説します。

タイムトラベル論 講師 眞貝寿明 Hisaki Shinkai 大阪工業大学情報科学部教授

●1966年東京都生まれ。早稲田大学理工学部物理学科、同大学大学院修士、ワシントン大学、ペンシルバニア州立大学、理化学研究所研究員を経て、2006年より大阪工業大学。専攻は「一般相対性理論・宇宙論」。

過去や未来へ行くことは、果たして可能なのか？

タイムマシンが可能かどうかを議論する学問は、物理学です。アインシュタインが作りあげた「相対性理論」は、ミクロの世界を扱う量子物理学の、両方に絡む問題です。

浦島太郎が竜宮城から帰ってきたら、知り合いは一人もおらず、自分だけ未来に着きました。このようないわゆる「ウラシマ効果」の説話は世界中にありますが、現代物理学の理論上、未来へのタイムトラベルは実際に可能です。

「光速に近いロケットを作って、そのロケットに10年間乗り、地球に戻ってきたら100年後になる」という話を聞いたことがあるでしょう。時間の進み方は状況によって異なる、というのが相対性理論の結論の1つです。ロケットの中の時間の進み方と、地球の時間の進み方が違っているので、地球に戻ってきたら、100年後の未来だったというウラシマ効果がおきるのです。実験でも証明されています。素粒子を光速に近いスピードまで加速すると、崩壊するまでの寿命が延びるのです。

過去に行く話はどうでしょうか。「ド

ラえもん」は、矛盾なくOKです。未来に行きたとしても、こうなっていたのか、と知るだけで、情報が過去に戻ってくるわけではないからです。一方、過去へ行くタイムトラベルでは、さまざまなパラドックスが考えられます。「ドラえもん」を題材に、どのようなパラドックスが生じるか、紹介しましょう。

過去へのタイムトラベルと、さまざまなパラドックス

まず、過去を変えてしまったら、現在の自分も消えてしまうかもしれません。「プロポーズ作戦」では、パパとママがきちんと結婚するように、のび太とドラえもんがタイムマシンで12年前のプロポーズの日に戻ります。この話に、いわゆる「親殺しのパラドックス」と呼ばれる矛盾が登場します。タイムマシンで過去に行つて親を殺してしまつと、自分が存在しなくなる問題を、ソフトに変えていますね。

「あやうし！ライオン仮面」では、ドラえもんがタイムマシンで来月号の漫画雑誌を買ってきて、それを元に締め切りには追われた漫画家が描く話ですが、ここには「作者不明のパラドックス」が提示されています。未来から持ち帰った自分の漫画を本人が描き写したのか、その作品は誰がはじめに描いたのか、という問題ですね。情報は無から生じない。何もないところから、意味のある情報が発生したとなると、因果律に反したことになる。

このようなパラドックスがあると、過去へのタイムトラベルは否定されるのでしょうか。いえいえ、物理学者は解決策も考えています。その1つが、

「のび太も天才になれる？」（てんと虫コミックス32巻）

ママに脱教され、家出しようと「宇宙救命ボート」でワープしたら、自分が住む町とそっくりなところに着る。学校では問題が簡単すぎて満点はかり。天才になったとはしゃぐが……。



パラレルワールド

パラレルワールドの存在を肯定すれば、いくつもある並行世界の中で、その中のひとつを選択しながら生きていることになる。

「あやうし！ライオン仮面」(てんと虫コミックス3巻)

フニャコフニャ夫の人気連載漫画「ライオン仮面」の来月号を読みたくなったドラえもんは、1カ月後の未来へ。締め切りには追われた先生は、ドラえもんから来月号をもらって……。



作者不明のパラドックス

フニャコフニャ夫のように、未来から持ち帰った自分の漫画を描き写した場合、その作品の本当の作者はいったい誰になるのか。

「プロポーズ作戦」(てんと虫コミックス1巻)

12回目の結婚記念日の夜、パパとママが、どちらがプロポーズしたかで、大ゲンカ。のび太とドラえもんが、真相を確かめるべく12年前にタイムマシンで戻ってみると……。



親殺しのパラドックス&事後選択モデル

過去に行つて親を殺すと自分が存在しなくなるパラドックスと、未来で矛盾となる出来事はあらかじめ除外されるという考え方。

「ドラえもん」は未来から過去へ来たわけですが、過去へのタイムトラベルが可能かどうかは現時点では未解決です。

空間も時間もジャンプする、ワームホールという存在。

キップ・ソーンというアメリカの物理学者が、1988年に「ワームホールを使ったタイムトラベルの方法を発表しました。ワームホールは、空間も時間もジャンプできる「どこでもドア」のようなものです。相対性理論は、時間と空間の物理学ですが、ワームホールのような時空のトンネル構造が方程式の解として存在します。ソーンは、ワームホール型タイムマシンを使えば、理論的には、過去へのタイムトラベルが可能である、という論文を発表し、我々に夢と希望を与えてくれました。

ところで、タイムマシンが実現可能だとすると、いろいろ矛盾が生じます。物事には順序があり、原因が先にあって結果が後にあるという因果律を基本とする物理学では、矛盾があつては許されません。未来へ行くタイムトラベ

「エヴェレット」による多世界解釈です。量子論の確率解釈をマクロな世界に拡張した考えで、我々の世界は、多くの同じような世界「パラレルワールド」から1つ1つを選択することで実現しているという考え方です。

「のび太も天才になれる？」は、ある惑星では、いまの世界ののび太が天才になっていた、という一種の「パラレルワールド」ものです。「あべこべ惑星」も、すべてがあべこべだけれど、一種の「パラレルワールド」といえるでしょう。

ドイツでは、親殺しのパラドックスを多世界解釈で解決することを提案しました。タイムマシンで過去に行つて親を殺した時点で、その世界は、自分が存在しない未来へ分岐する。自分自身は、パラレルワールドを移動しただけ、と考えれば、因果関係に矛盾は生じません。ただ、過去を変えて世界を変えたといつても、変わっていない世界が、常に存在することになります。

最近、パラドックスの解決策として「事後選択モデル」という考え方が提案されました。「未来でパラドックスになりそうな出来事は、あらかじめ除外される(ような作用がはたらく)」という考え方です。パラドックスが起こらない場合のみ、過去の改変が許されるということですね。先ほどの「プロポーズ作戦」では、のび太とドラえもんの活躍で、パパとママが元のサヤにおさまります。のび太が生まれるためには無矛盾ですから、この話はまさに事後選択モデルといえるでしょう。

「ドラえもん」には、タイムトラベル論の要素が、矛盾する問題点を含めてきちんと描かれています。



1 相対性理論
アインシュタインによって提唱された時間と空間に関する理論であり、2段階の理論になっている。1905年に、時間の進み方など異なる人の運動状態によって異なることを示した特殊相対性理論を発表。1916年に、重力の存在が時間のゆがみであることを示した一般相対性理論を発表。

2 ウラシマ効果
亀を助けた浦島太郎が竜宮城から帰ってきたとき、何年か経つていたという話を聞いた。何年か経つていたという話を聞いた。何年か経つていたという話を聞いた。

3 光速
光の速度のこと。1秒間で約30万km進む。地球の周囲が約4万kmなので、1秒間で地球を7周半回することができる。

4 キップ・ソーン
アメリカの物理学者。カリフォルニア工科大学教授。1988年に「ワームホール」に関する論文を発表。ワームホールは、空間も時間もジャンプできる「どこでもドア」のようなものである。

5 ワームホール
虫のトンネルやぬいぐるみのトンネルのように、時空の異なる場所を結ぶトンネル。時空の異なる場所を結ぶトンネル。時空の異なる場所を結ぶトンネル。

6 エヴェレット
ヒュー・エヴェレット3世。1957年、プリンストン大学の大学院生時に多世界解釈を提唱。

7 「あべこべ惑星」
左右が逆で、西から太陽が昇り、ジャイアンやネ夫が女の子で、しずちゃんや静香の。さらにのび太が世界で1人だけ男の子という、すべてがあべこべの世界。



8 ドイツチェ
イギリスの物理学者。量子計算理論のバイオニア。エヴェレットの多世界解釈の支持者。



9 ドイツチェ
イギリスの物理学者。量子計算理論のバイオニア。エヴェレットの多世界解釈の支持者。

コラム 17 不思議の国のトムキンス

光速に近い速さで移動すると、ニュートン力学とは違った現象が起きる。光がドップラー効果を受けて色を変えたり、角度によって光が到着する時間差が生じるので、見かけの形が変形する。

物理学者のガモフ (George Gamow, 1904–68) は、このような現象を一般向けにわかりやすく伝えるため、物語として『不思議の国のトムキンス (Mr. Tompkins in Wonderland)』を著した。もし、光の速度が時速 30 km/s だったとしたら、日常生活でも相対性理論の効果がいろいろ見えるだろうというストーリーである。

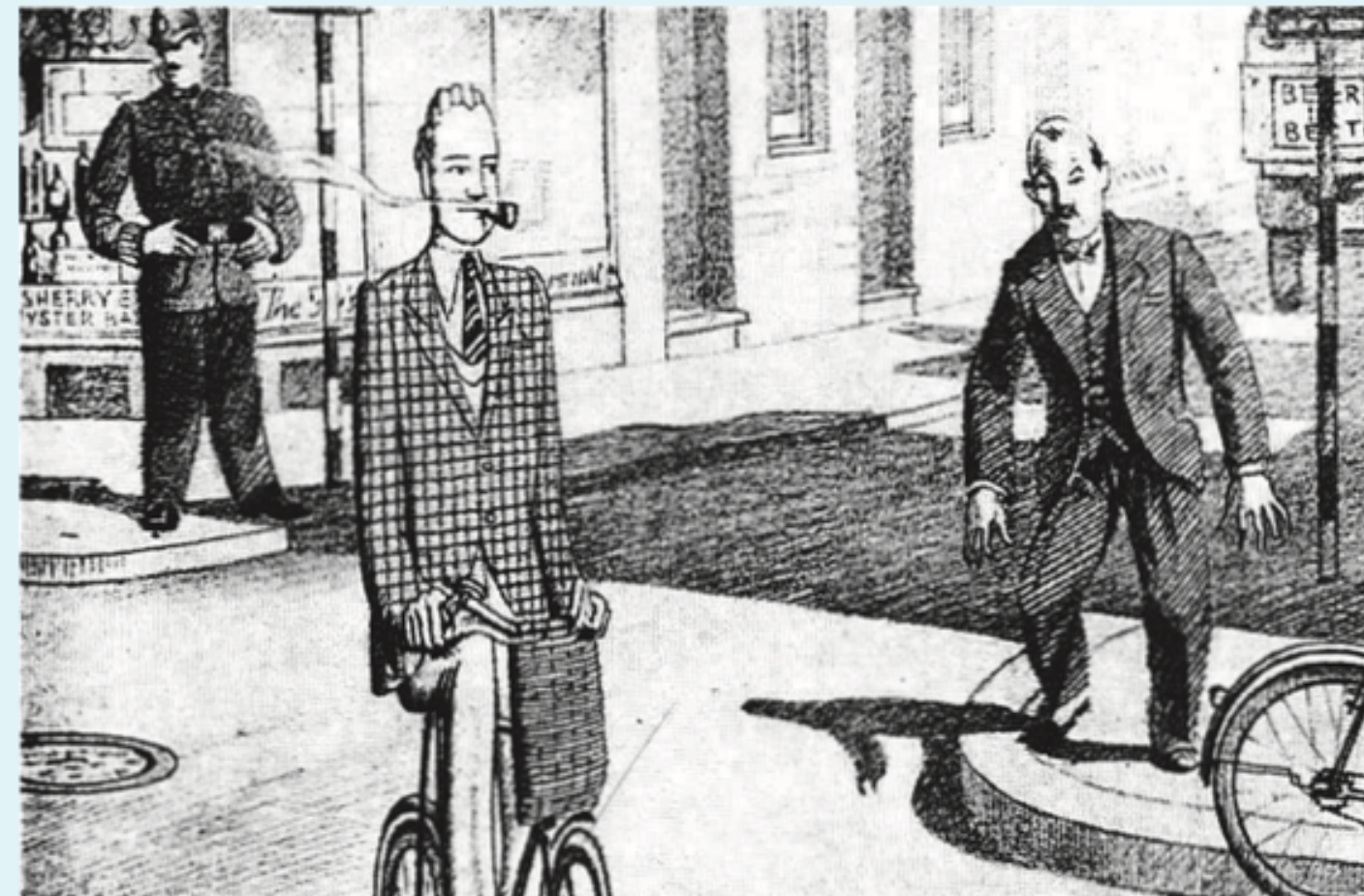
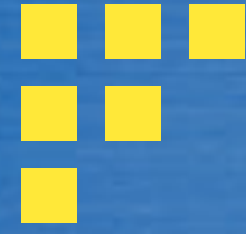


図 3.18 ガモフ著『不思議の国のトムキンス』(伏見康治 (訳), 創元科学選書, 1943) の挿絵. 最高速度が時速 30 km/s の世界では, 自転車で移動する人から見ると世界が歪んで見え, 止まっている人から自転車の人を見ると平たく見える.

「不思議の国のトムキンス」 効果の由来



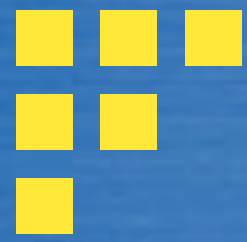
準光速ロケットからの眺め (1) 光のドップラー効果



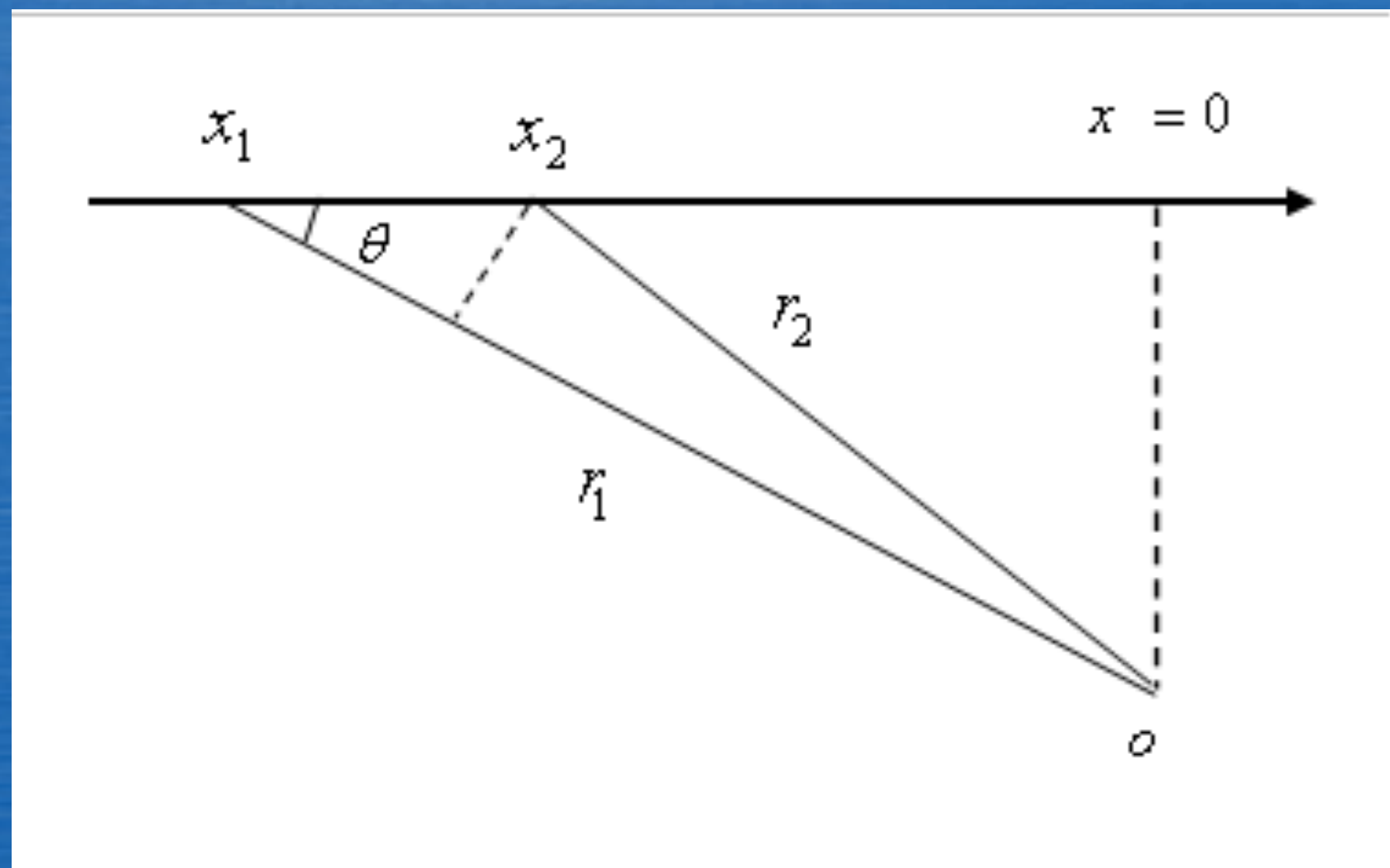
$$f_N = \frac{c + v_{source}}{c - v_{obs}} f_{source}$$

$$f_{SR} = \left(\frac{1 + \beta}{1 - \beta} \right)^{1/2} f_{source}, \quad \beta = \frac{v_{obs}}{c}$$

「不思議の国のトムキンス」 効果の由来

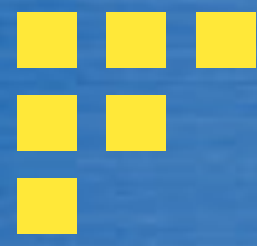


準光速ロケットからの眺め (2) 光の横ドップラー効果

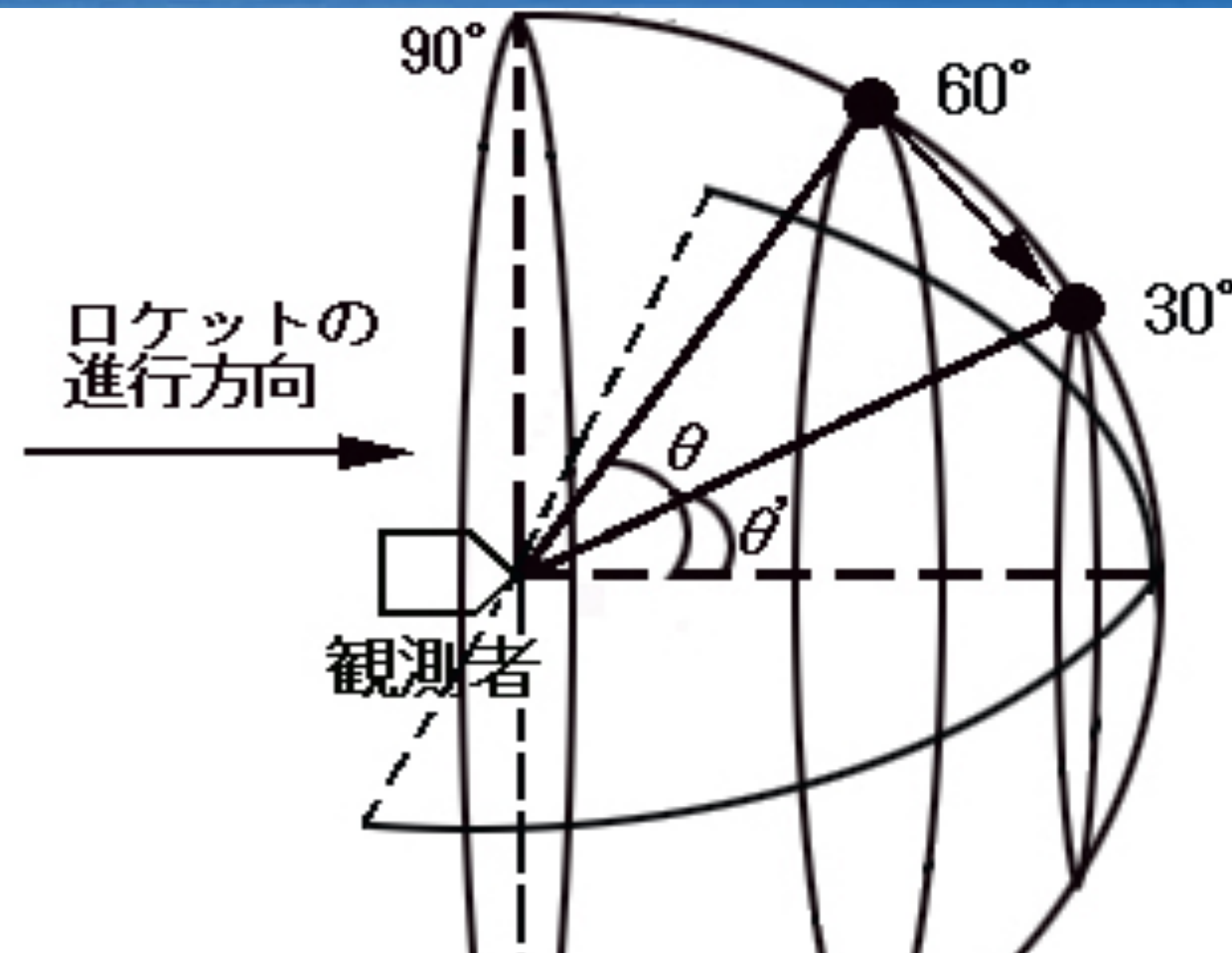


$$f_{SR} = \frac{(1 - \beta^2)^{1/2}}{1 - \beta \cos \theta} f_{source}, \quad \beta = \frac{v_{obs}}{c}$$

「不思議の国のトムキンス」 効果の由来



準光速ロケットからの眺め (3) 光行差現象



$$\tan \theta' = \frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{\cos \theta + \beta} \sin \theta, \quad \beta = \frac{v_{obs}}{c}$$

準光速ロケットから見える世界(1)

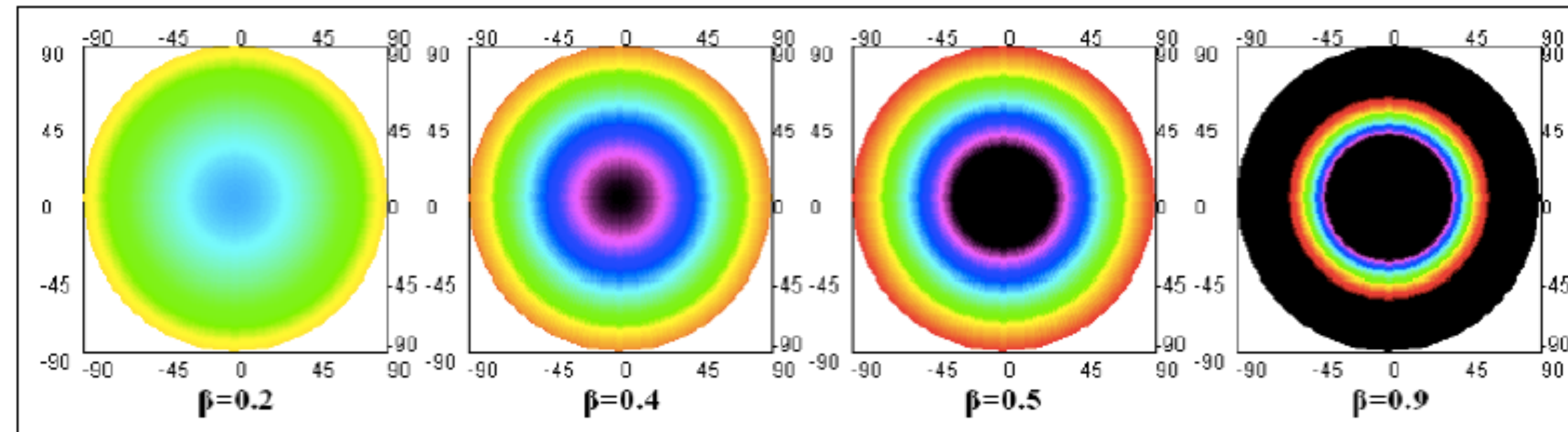


図 13: ドップラー効果のみを考えた前方の景色

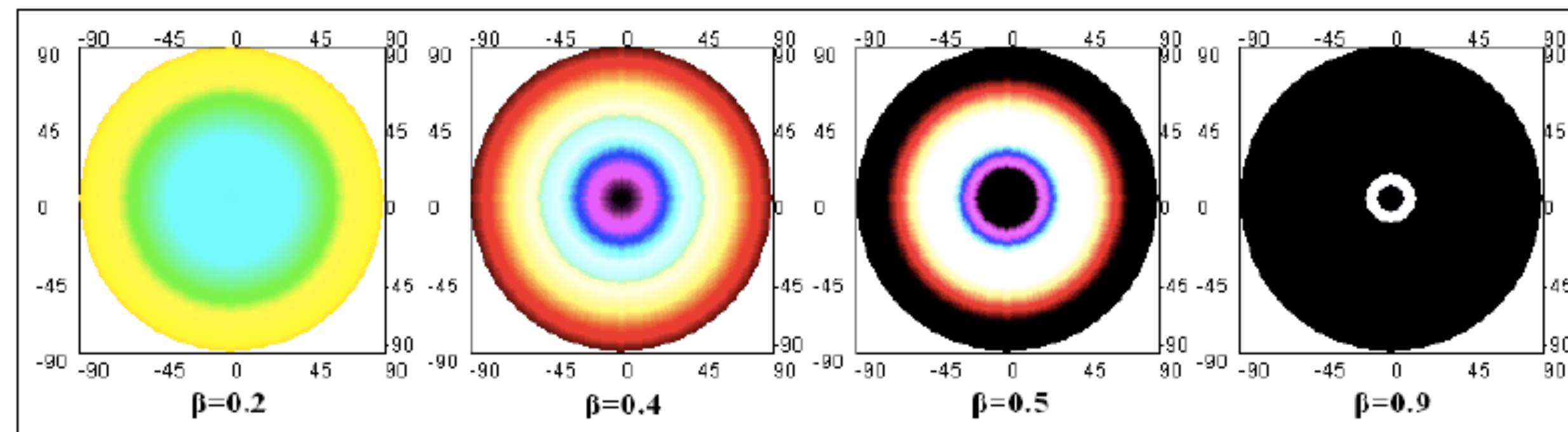
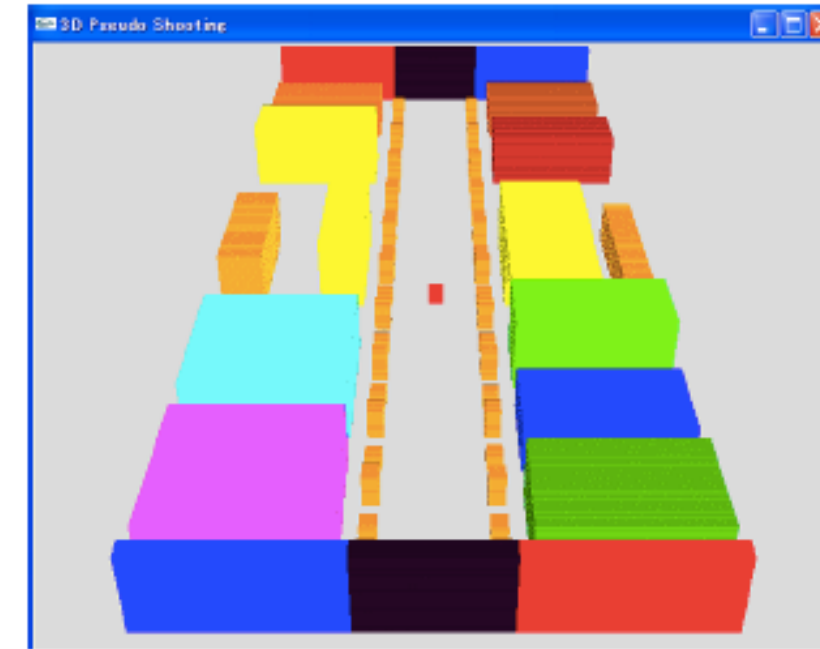


図 14: 図 13 に光行差及び明るさ変化を取り入れた前方の景色

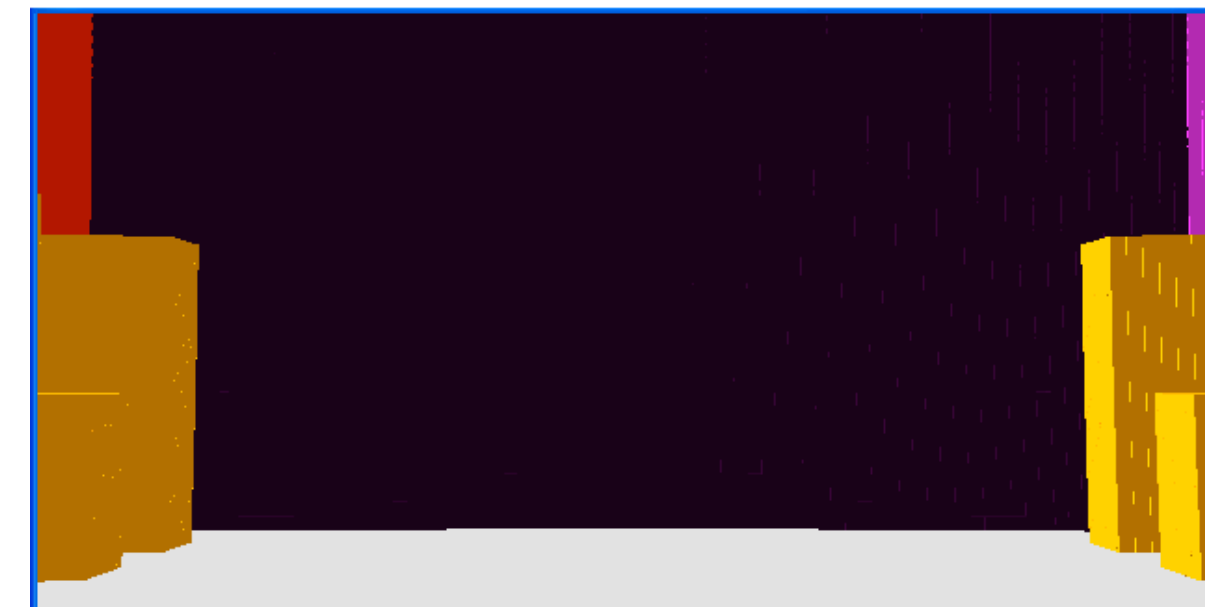
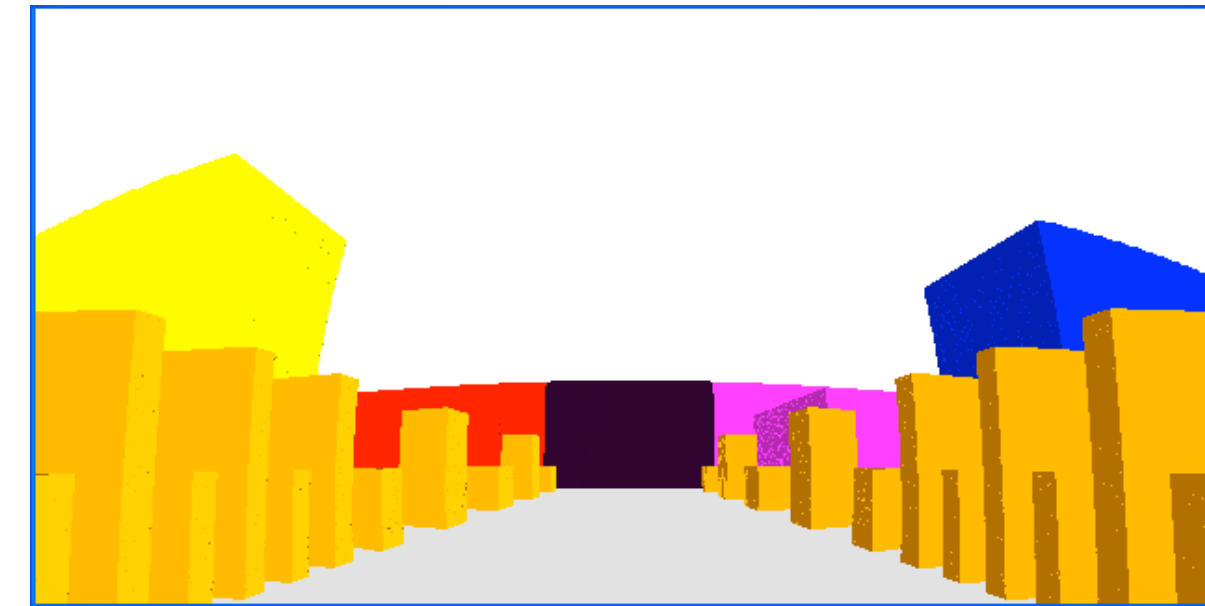
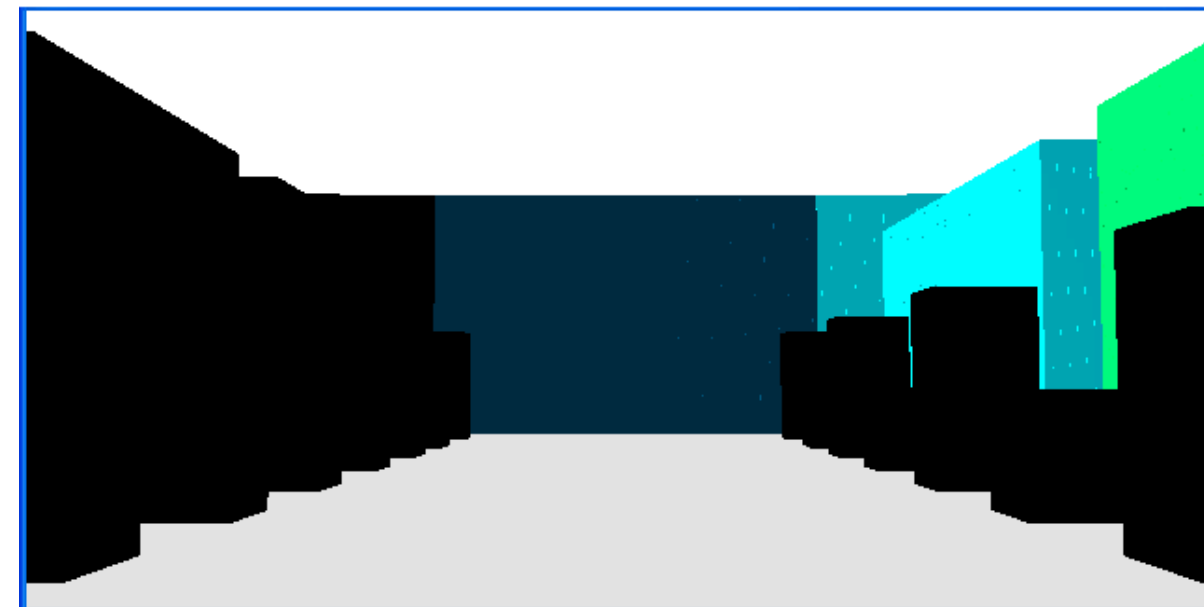
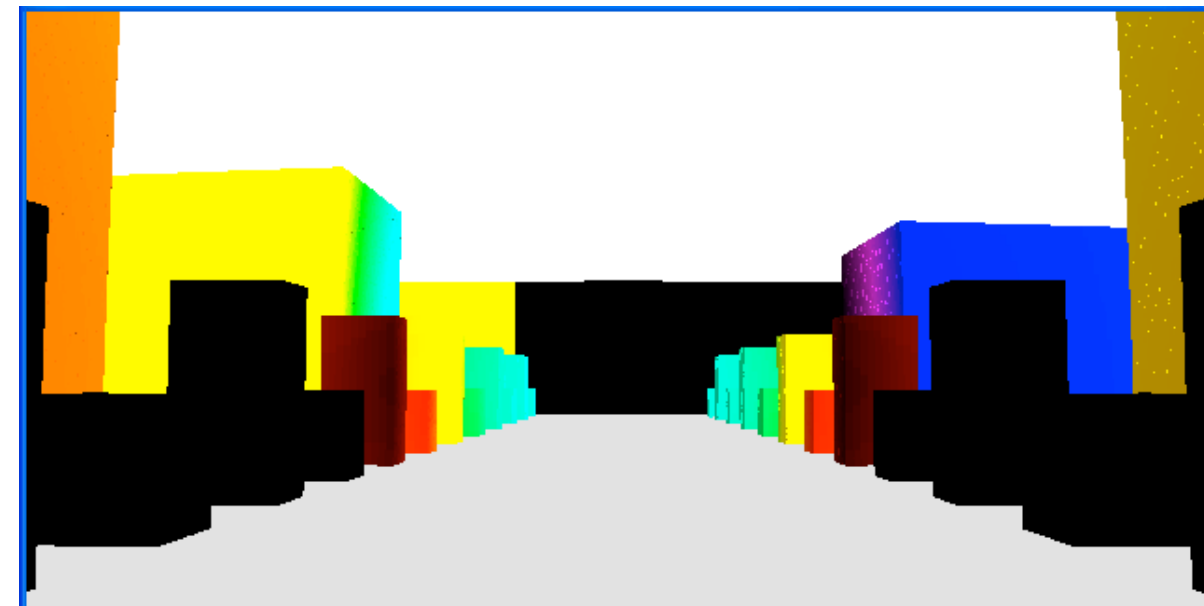
2012年度卒業論文（葭矢景淑君）から

準光速口ケツトから見える世界(2)

$v=0$

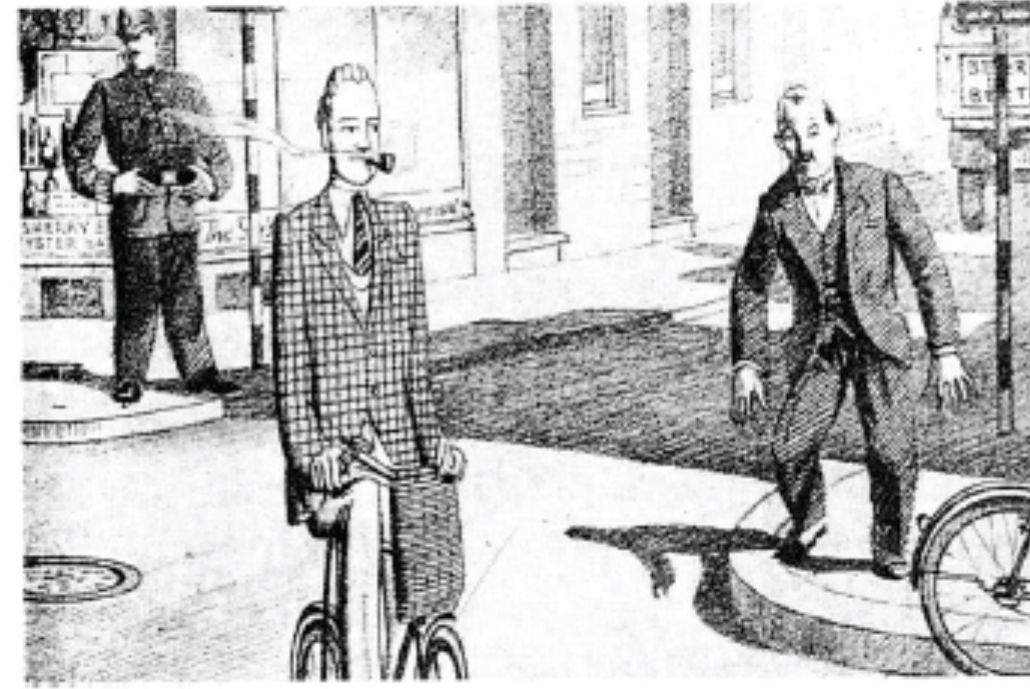


$v=0.8c$

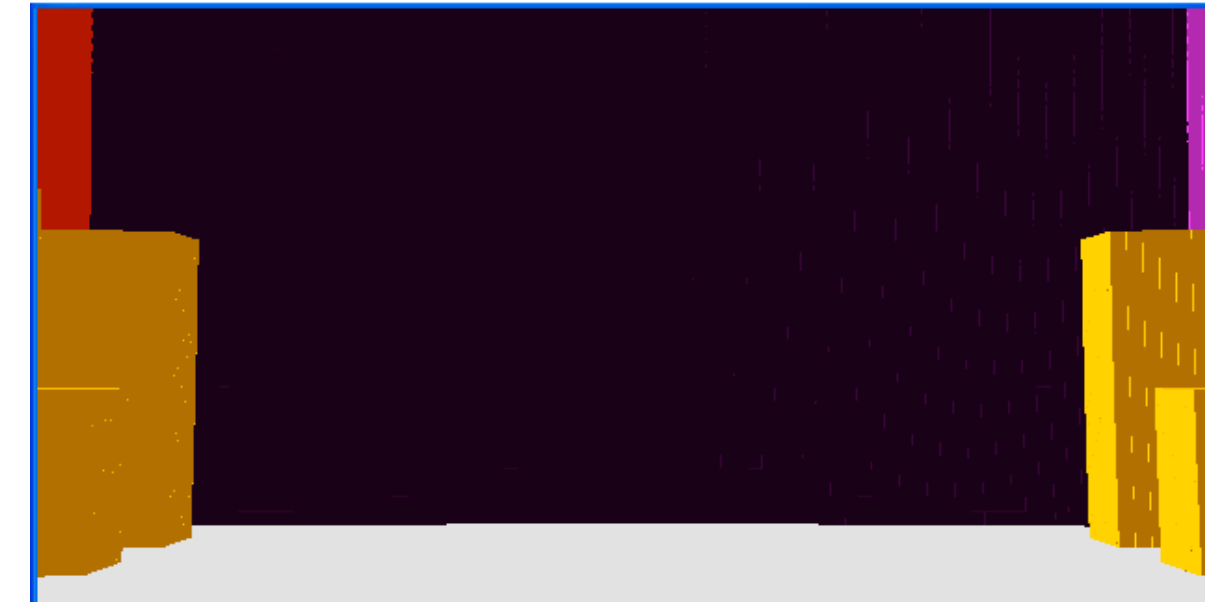
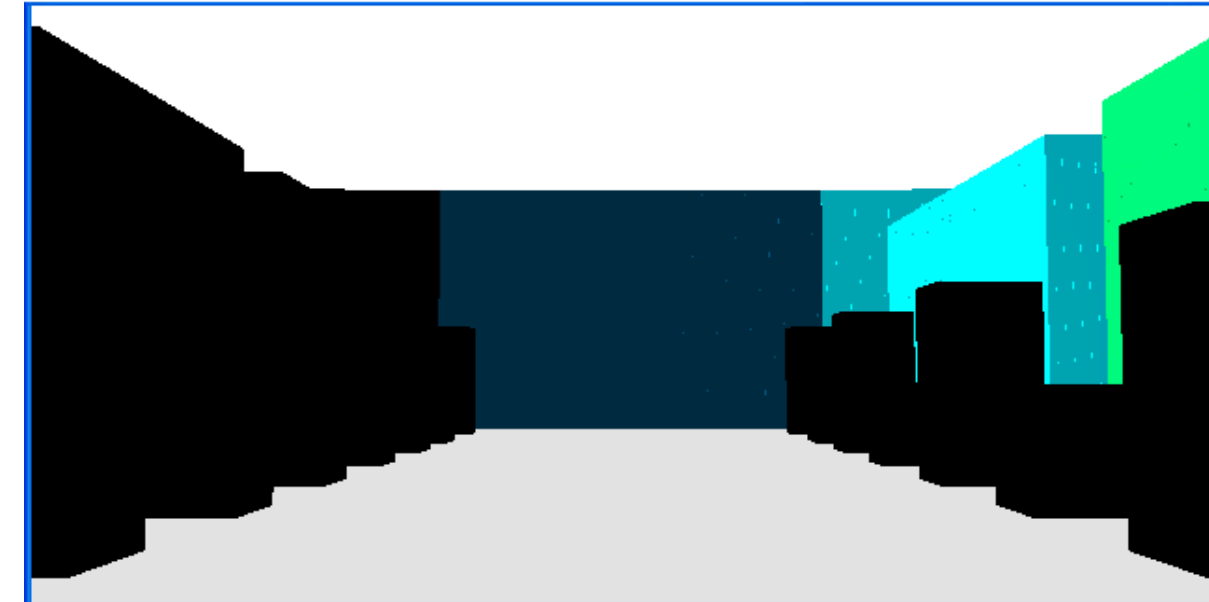
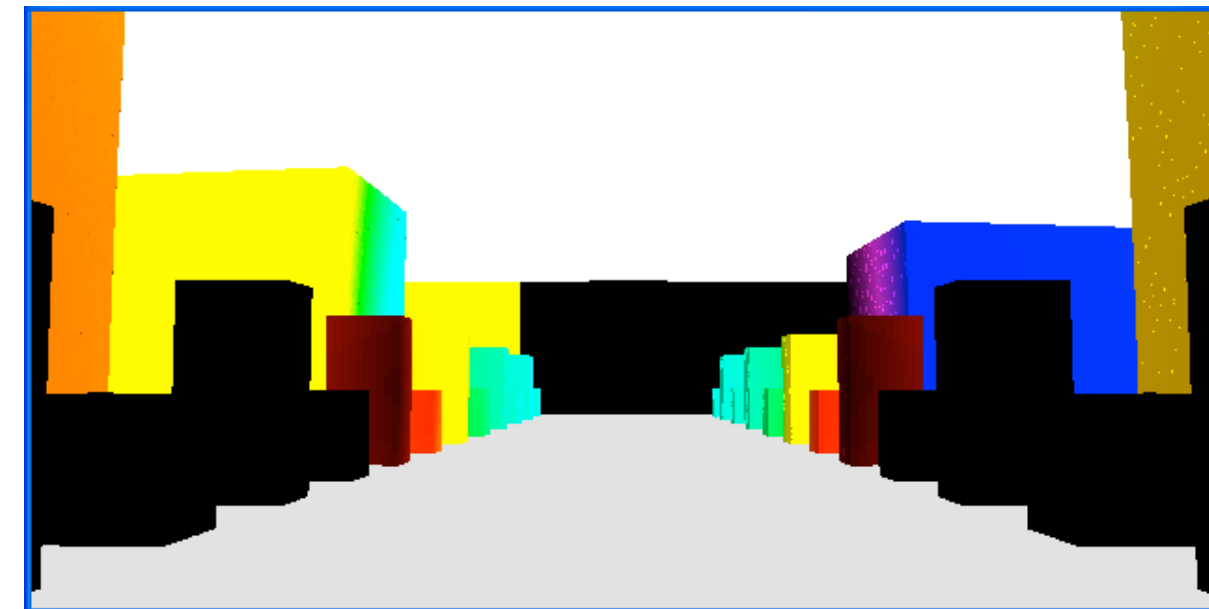


2012年度卒業論文（葭矢景淑君）から

準光速口ケットから見える世界(3)



$v=0.8c$



2012年度卒業論文（葭矢景淑君）から

3.2.5 光円錐と因果律

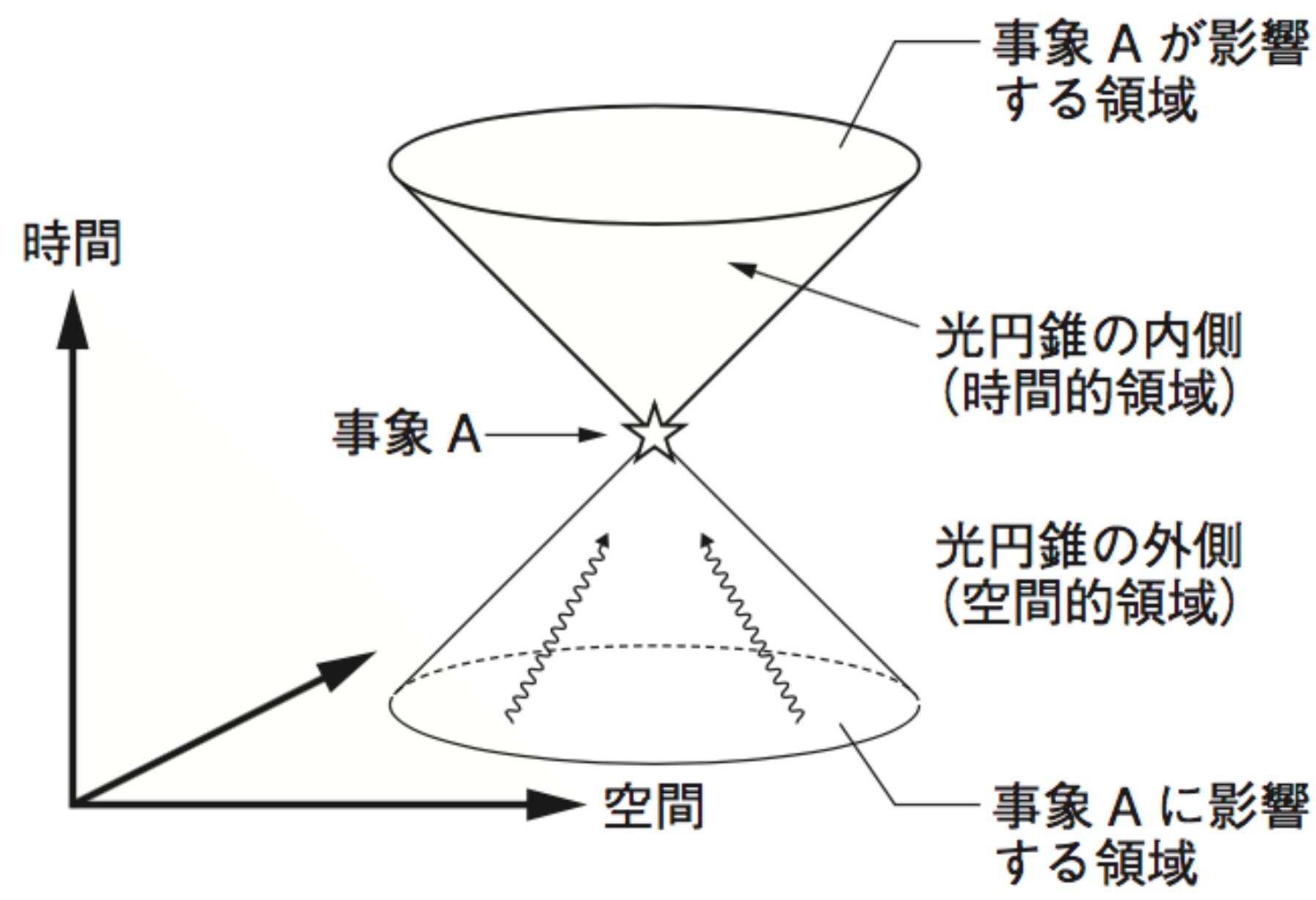


図 3.19 〔左〕 4 次元時空は図にすることが難しいので、空間を 2 次元、時間を 1 次元にして図を描く。時間軸が縦である。光の伝わる経路はある点から円錐状に広がる。この円錐内であれば、情報が伝達可能な領域（因果関係があり得る時間的領域）、円錐より外側は情報伝達があり得ない領域（空間的領域）である。図を過去に向かって見れば、ある 1 点に過去からの情報がどこまで影響しているかも同様にわかる。〔右〕 世界物理年（2005 年）のロゴは、ミンコフスキー時空の光円錐の図だった。

3.2.6 最も有名な物理の公式

4次元時空としてエネルギー保存則を考えると、...

特殊相対性理論を使ってエネルギーを計算すると、

$$E = m \frac{c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = mc^2 + \frac{1}{2}mv^2 + \frac{3}{8}m\frac{v^4}{c^2} + \dots \quad (3.10)$$

となることがわかった。第2項は運動エネルギーだが、第1項は物体が静止しているときにももつ質量エネルギーである。第3項以下は相対論的補正項といえる。

静止質量エネルギー（エネルギーと質量の等価性）

$$E = mc^2 \quad (3.11)$$

3.2.6 最も有名な物理の公式

4次元時空としてエネルギー保存則を考えると、...

$$E = mc^2$$

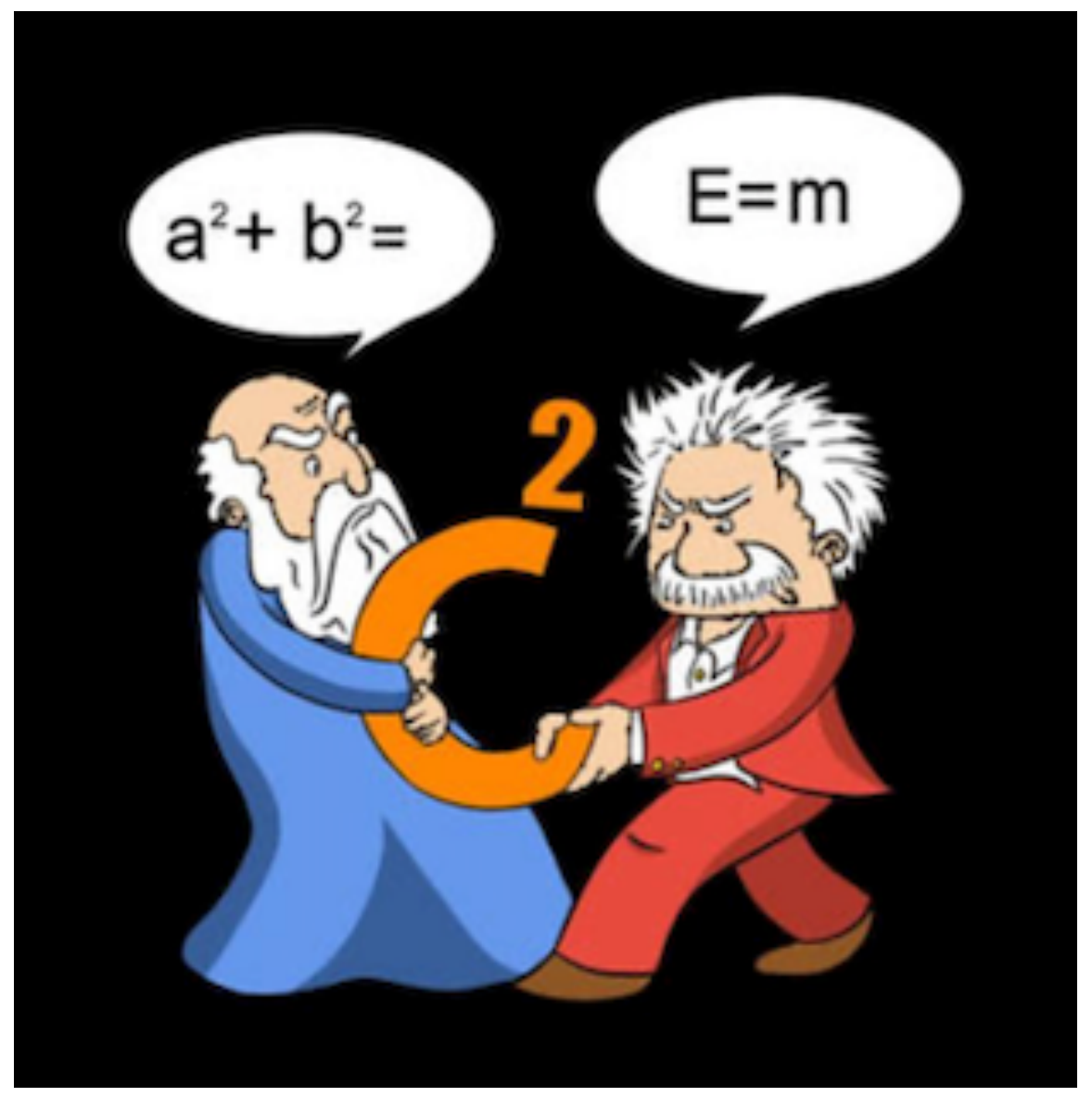
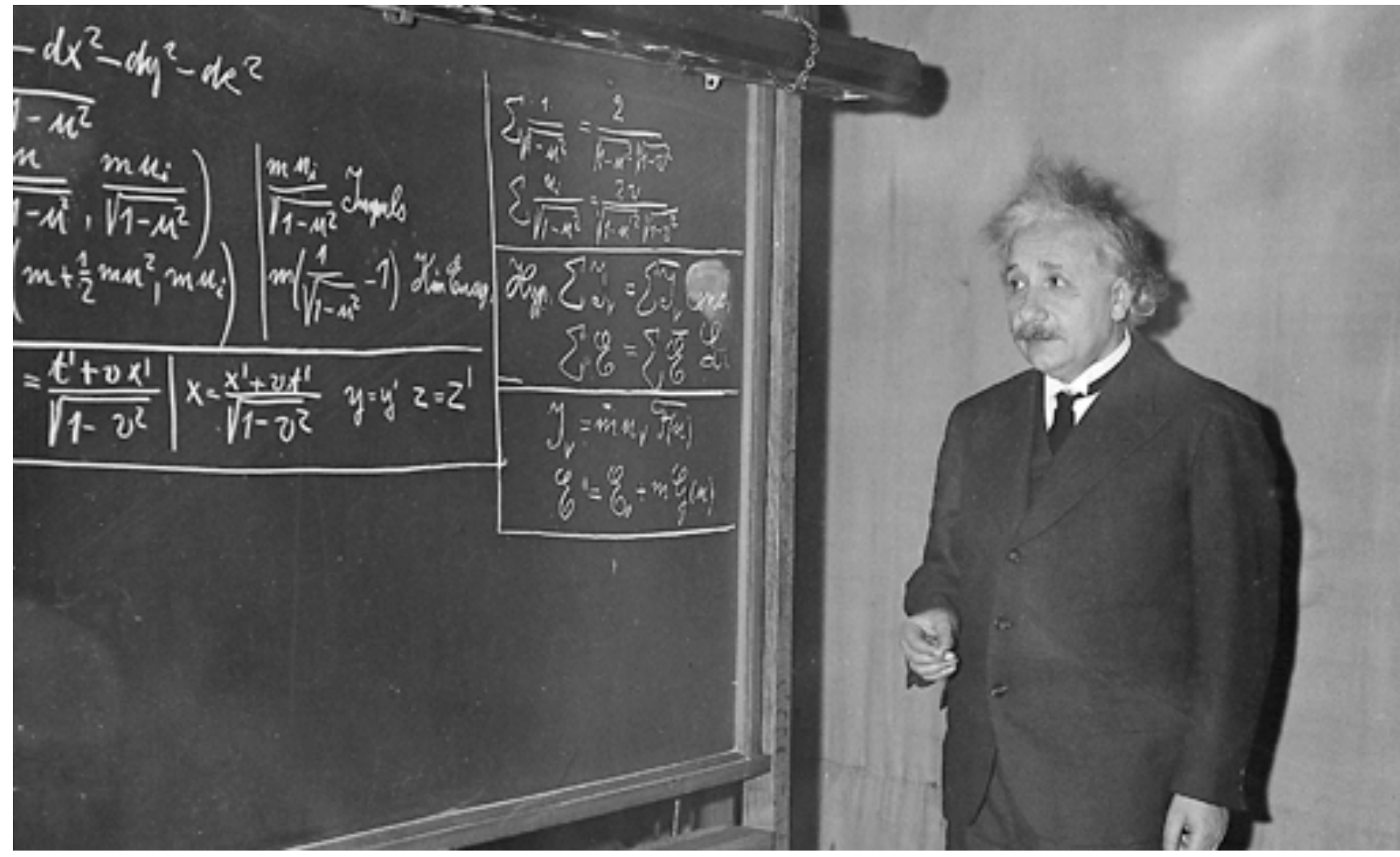
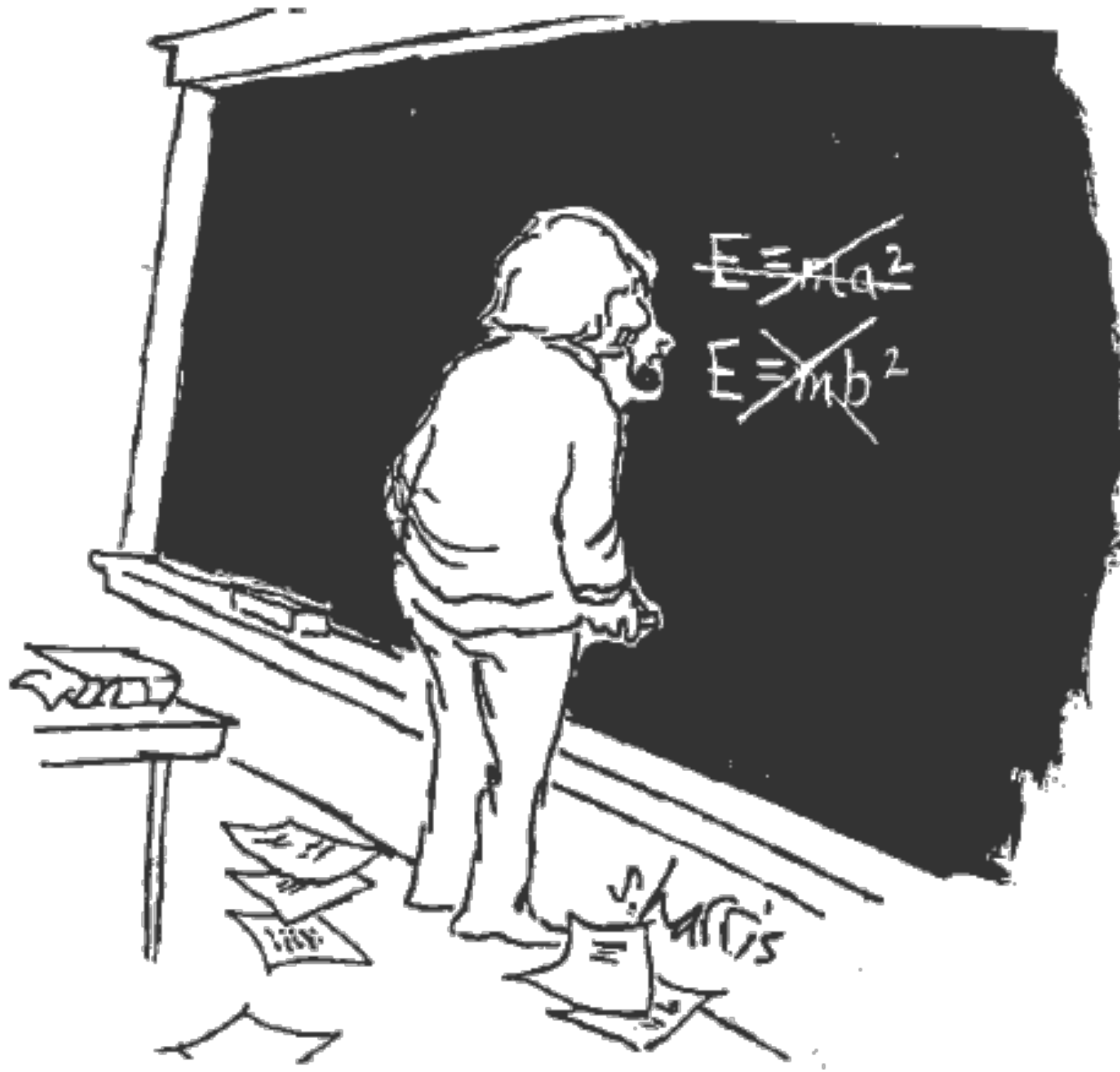
エネルギー

質量x光速x光速

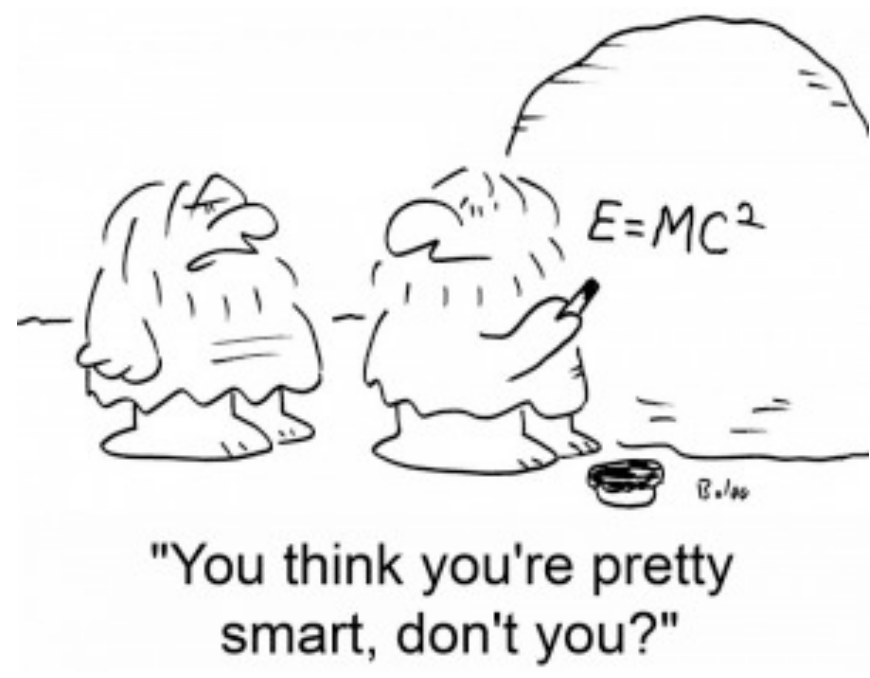
エネルギーは質量と等価である！

質量はエネルギーに変換できる！

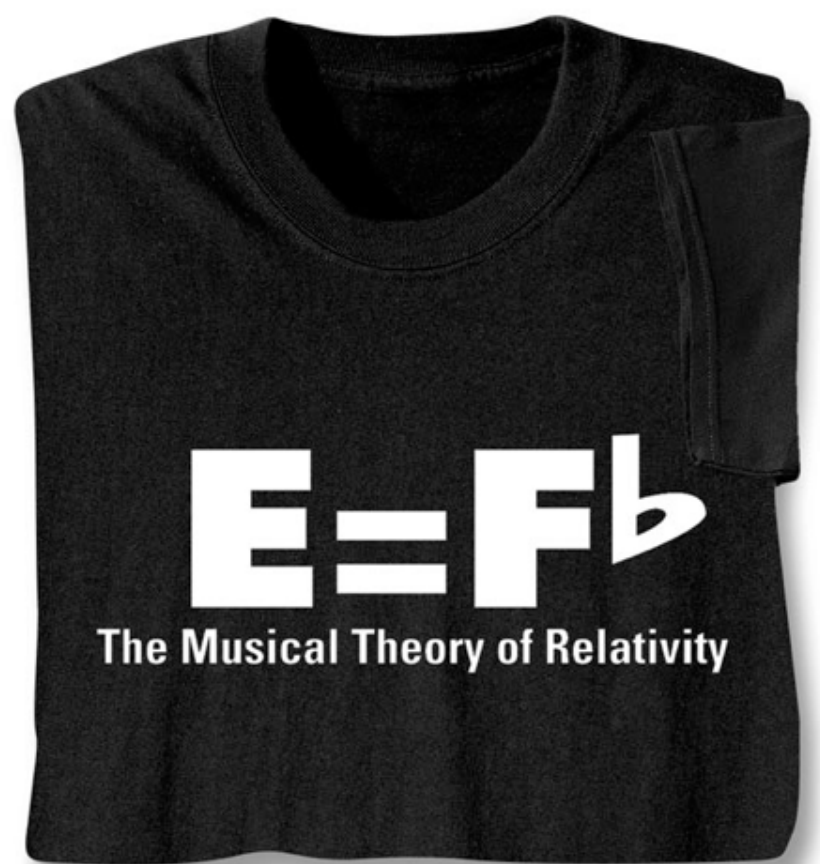
3.2.6 最も有名な物理の公式



3.2.6 最も有名な物理の公式



$$E = mc^2$$



朝までラーニング! - NHK

NHK

NHKについて

コロナ・感染症

ニュース

番組表

NHKプラス

受信料の窓口

朝までラーニング!

#相対性理論 ~100分後にE=mc²を説明するサンシャイン池崎~

概要

放送予定

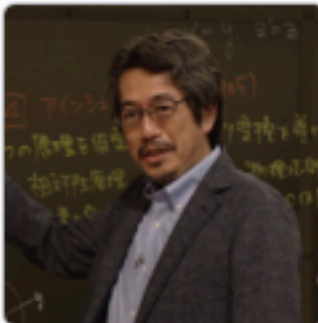
過去のエピソード

この番組について

サンシャイン池崎と一緒に教養ある大人になろう!テーマは、聞いたことあるけどよく知らない「相対性理論」。数式が飛び交う2時間30分。NHKラーニングのショート動画も。



出演
サンシャイン池崎
(お笑い芸人)



出演
真貝寿明
(大阪工業大学 教授)



出演
小池美波(櫻坂46)



#相対性理論 サンシャイン池崎がひたすら学ぶ 謎の深夜番組

初回放送日: 2023年8月27日

「相対性理論をサラッと説明できたらカッコいい!」芸人・サンシャイン池崎さんが100分の大学教授の講義に本気で挑む!難解な数式も登場!「一からちゃんと理解したい」そんな大人の知的欲求に応えます。「数式はムリ」という方にはウェブサイト・NHKラーニングのショート動画でわかりやすく解説!池崎さんの本気の推し、櫻坂46・小池美波さんが内緒で登場!なななな~なななな~ナレーションはジョイマン高木さん。



空前絶後の理論

簡単な式ですよ?

#相対性理論 ~100分後にE=mc²を説明するサンシャイン池崎~

数式になじむ相対性理論が簡単にわかる動画は↓



<https://www.web.nhk/tv/pl/series-tep-883N4WZPGQ/ep/2W8P531W5Y>
<https://www.nhk.jp/p/ts/883N4WZPGQ/>

69

Stephen Hawking (1942–2018)



……本の中に数式を1つ入れるたびに、売れ行きは半減すると教えてくれた人がある。そこで、数式はいっさい入れない決心をした。しかし、とうとう一つだけは入れることになってしまった。アインシュタインの有名な式 $E = mc^2$ である。この式が私の本の潜在的な読者をおびえさせ、半分に減らさないことを願っている。……



Someone told me that each equation I included in the book would halve the sales. I therefore resolved not to have any equations at all. In the end, however, I did put in one equation, Einstein's famous equation, $E = mc^2$. I hope that this will not scare off half of my potential readers.

Someone told me that each equation I included in the book would halve the sales. I therefore resolved not to have any equations at all. In the end, however, I *did* put in one equation, Einstein's

famous equation, $E = mc^2$. I hope that this will not scare off half of my potential readers.

1988

10 Questions to Stephen Hawking

**If you could talk to
Albert Einstein, what
would you say?**

Ju Huang, Stamford, Conn.

TIME

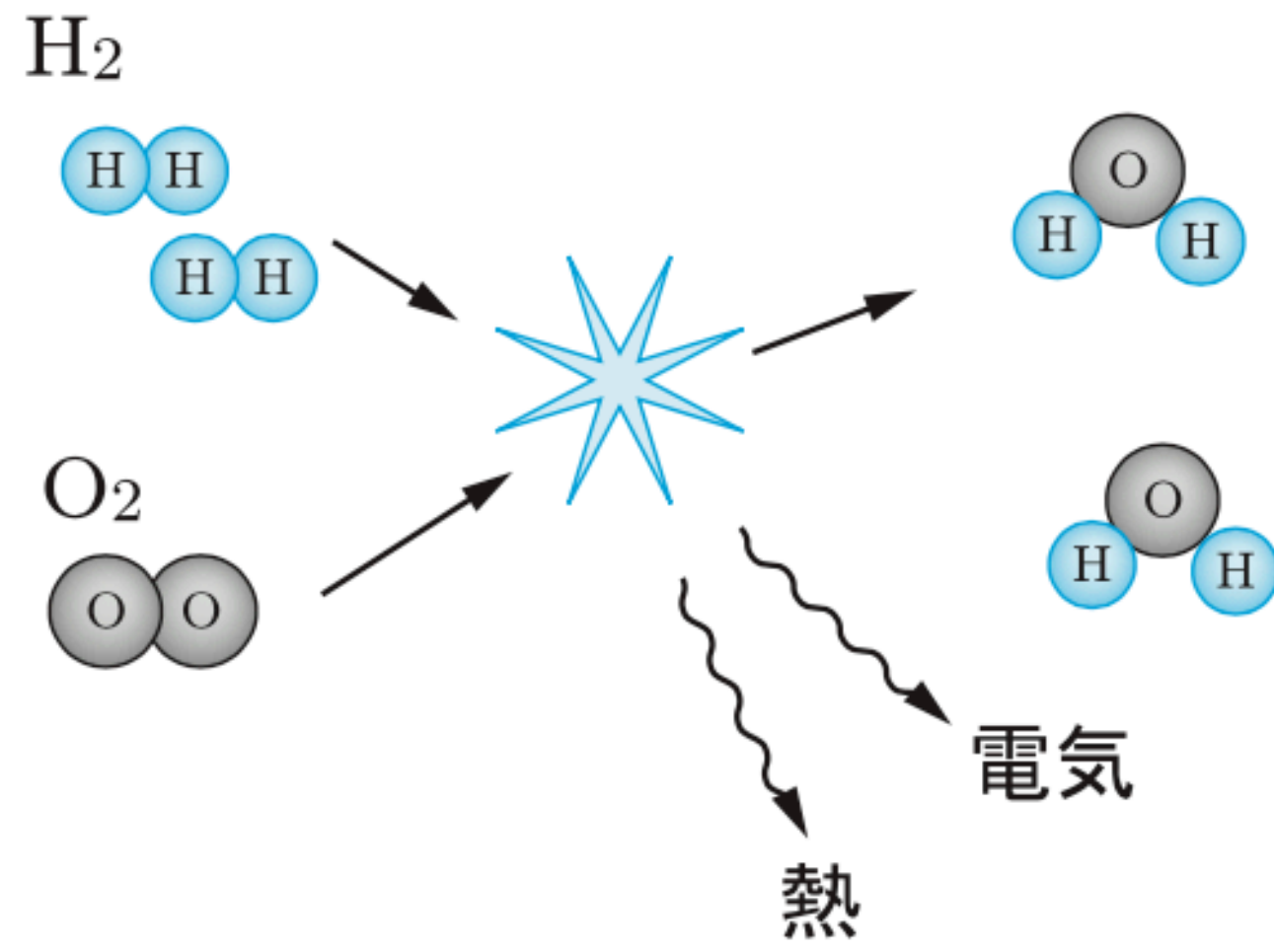
http://content.time.com/time/video/player/0,32068,660287833001_2029571,00.html

Start on Click, first 1'40" part

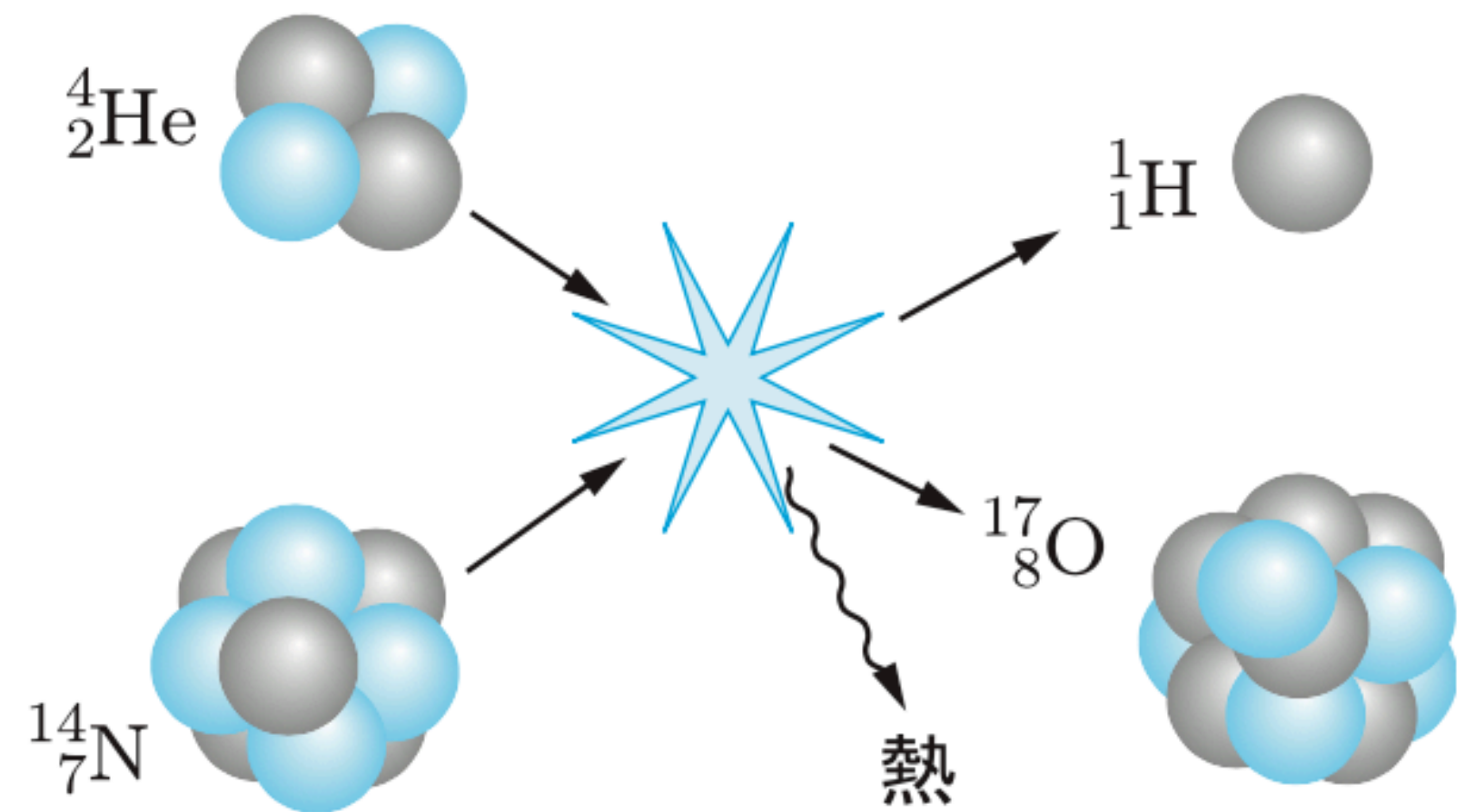
3.2.7 原子核反応

分子どうしの組み替えは、**化学反応**

原子核の組み替えは、**核反応**



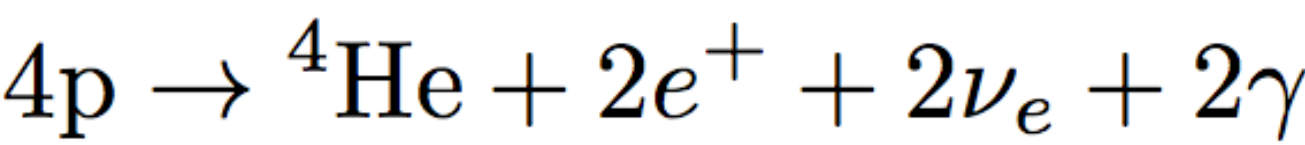
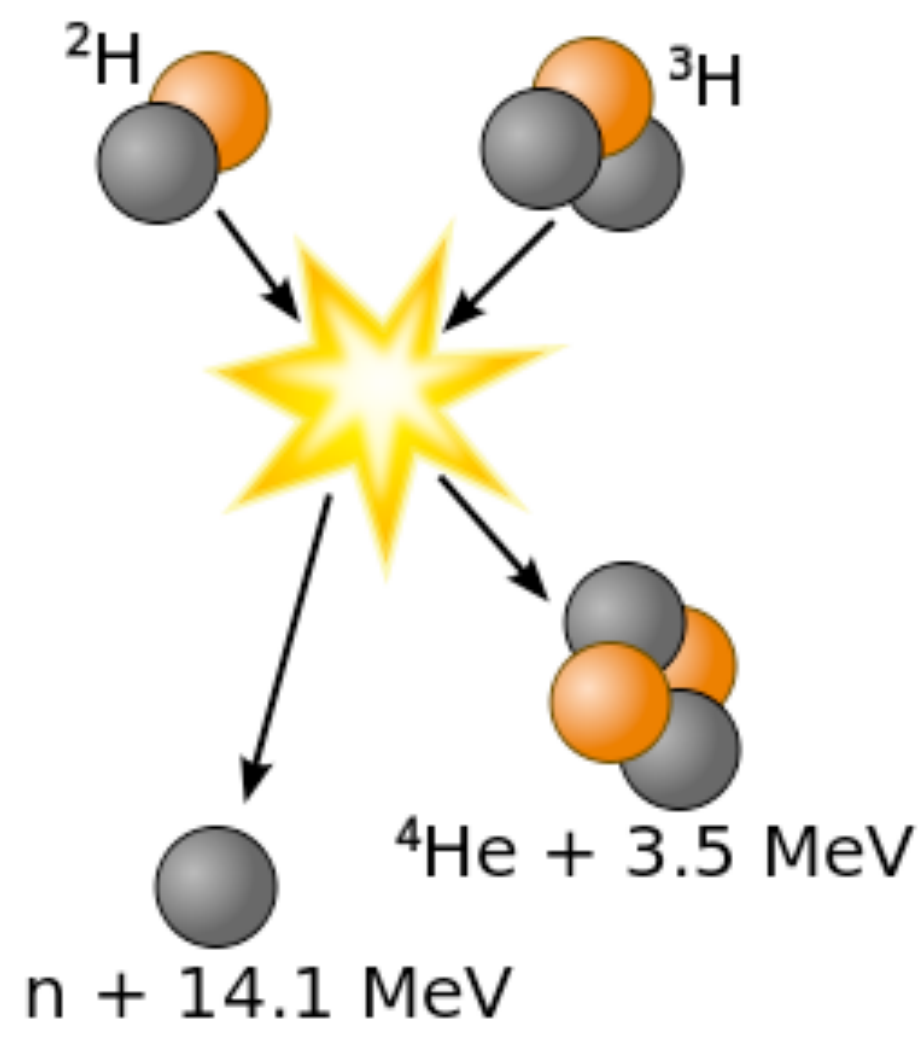
(a) 化学反応



(b) 核反応

図 3.14: 化学反応は実験室レベル. 核反応は, 原子爆弾や水素爆弾, 原子力発電や太陽の中心. エネルギーレベルがまったく異なる.

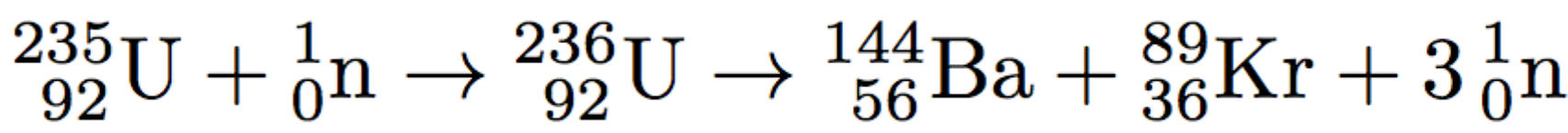
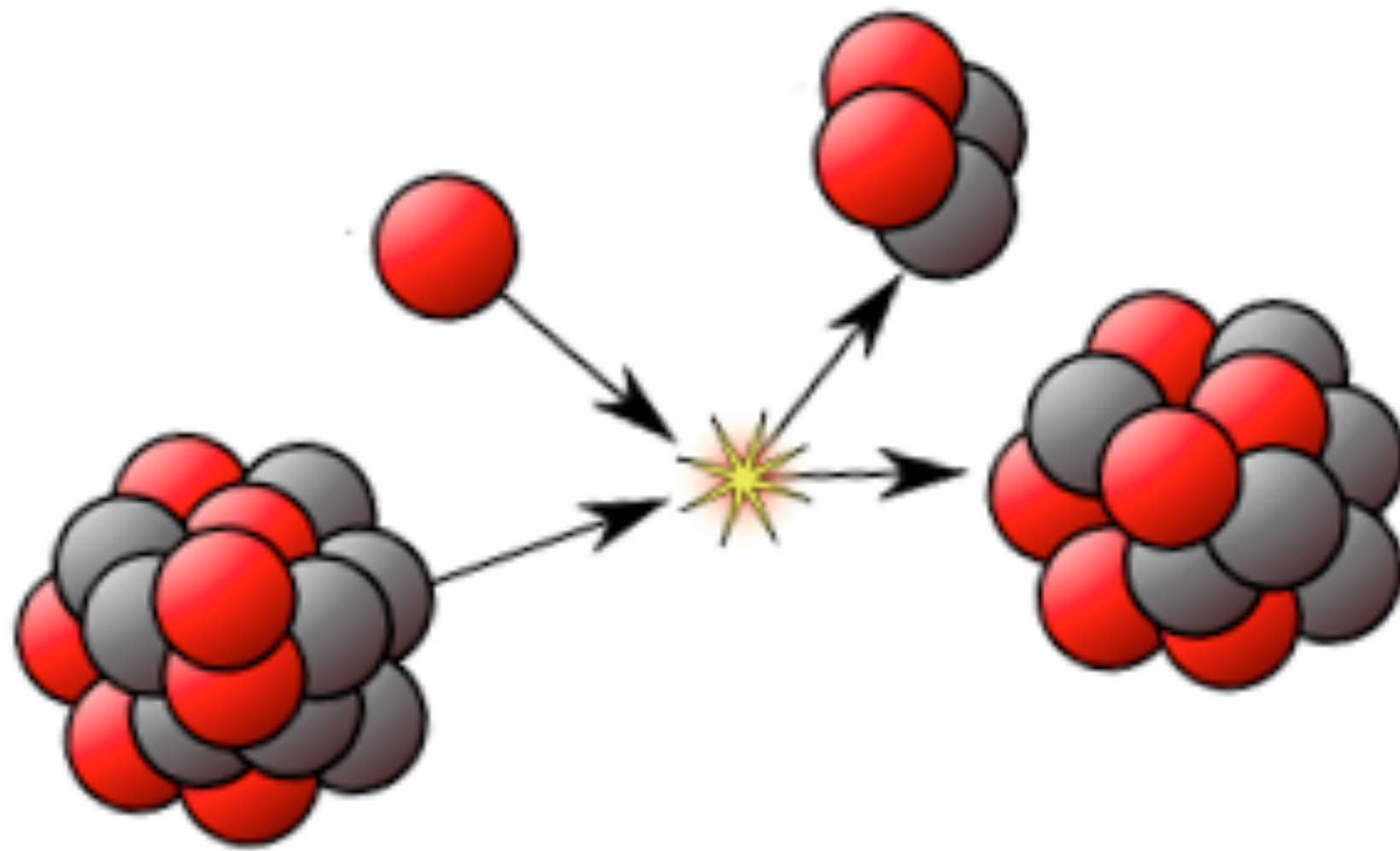
核融合 と 核分裂



核融合

(nuclear fusion)

合体した方が安定
(エネルギー放出)

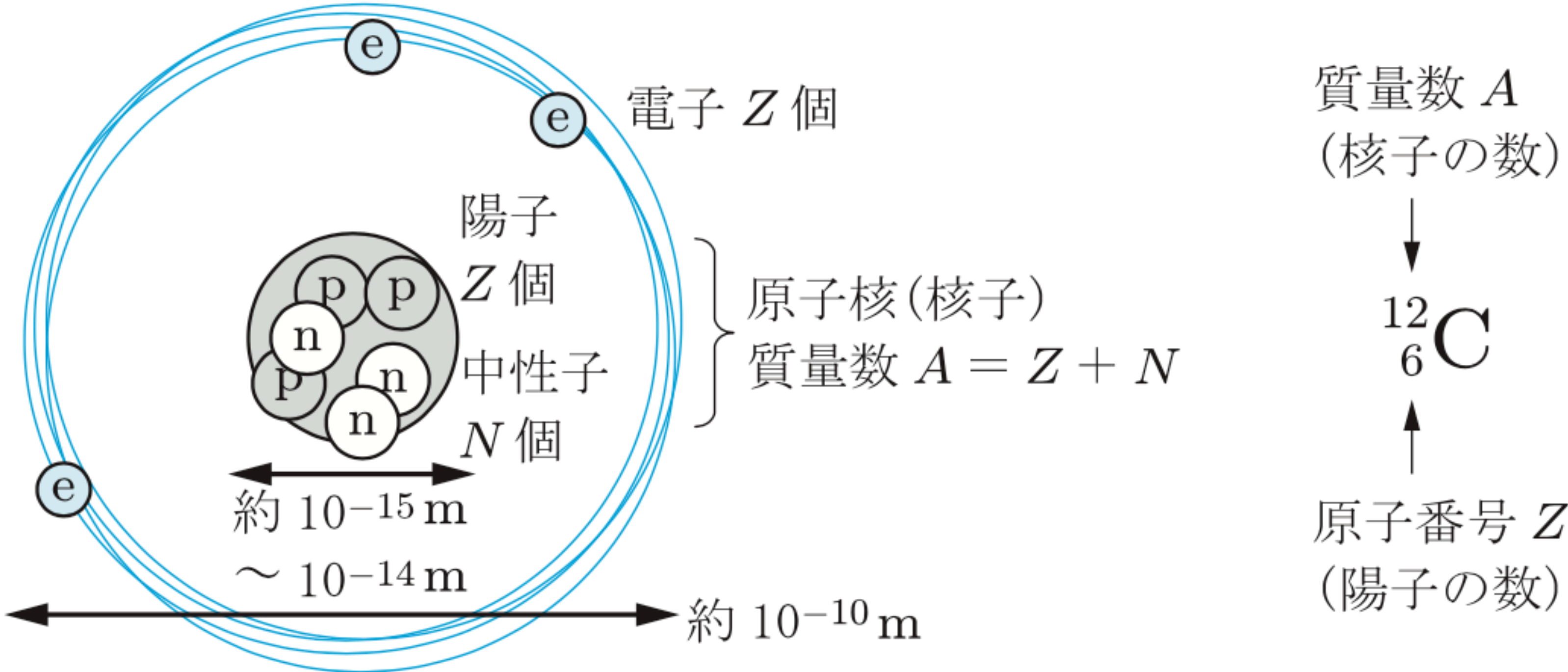


核分裂

(nuclear fission)

分裂した方が安定
(エネルギー放出)

陽子・中性子・電子

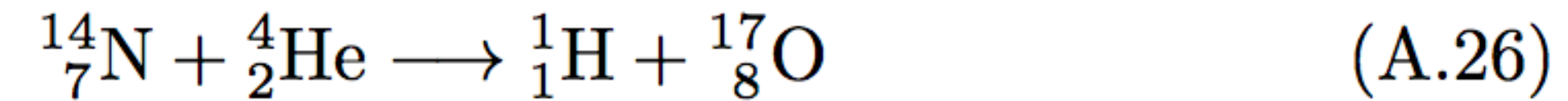
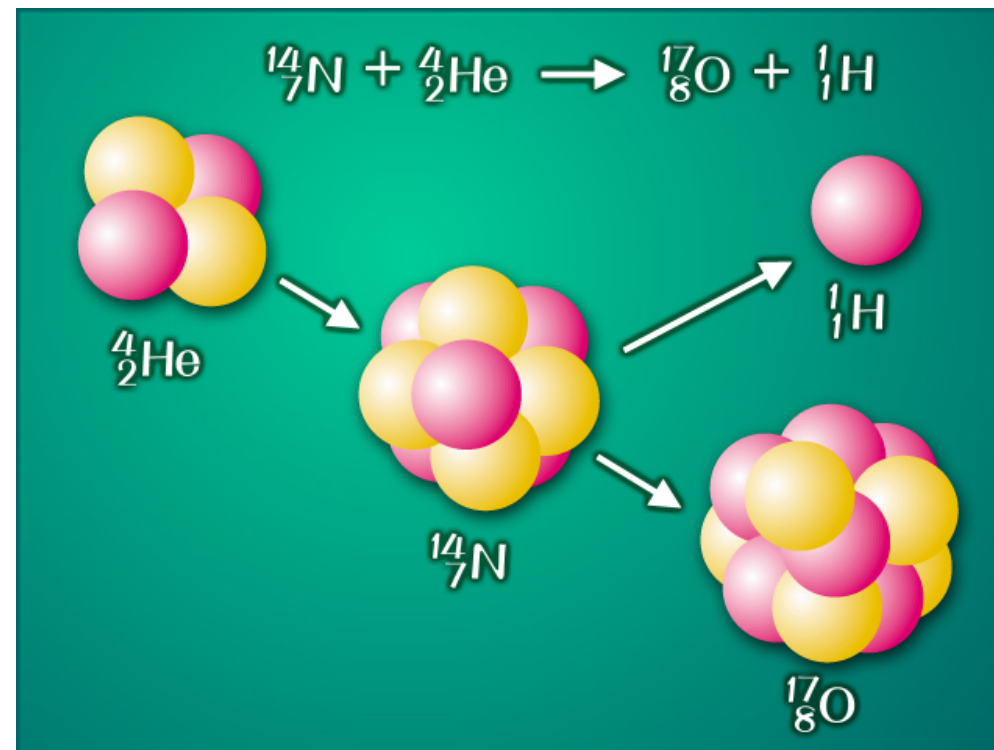


記号			電荷	質量	質量比
陽子	p	proton	+1	$1.67262158 \times 10^{-27} \text{ kg}$	1836.15
中性子	n	neutron	0	$1.67492735 \times 10^{-27} \text{ kg}$	1838.68
電子	e	electron	-1	$9.10938188 \times 10^{-31} \text{ kg}$	1

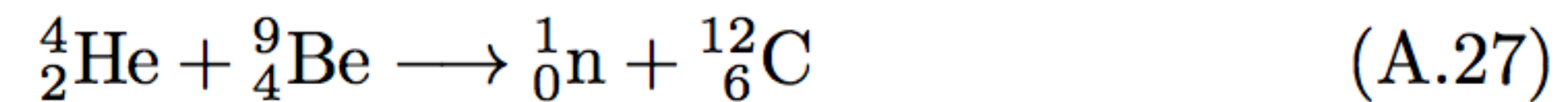
質量欠損

● 質量欠損

原子核を人工的に変換できることは、1919年、ラザフォードによって確かめられた。彼は、窒素の原子核に α 粒子（ヘリウム原子核）を衝突させて、



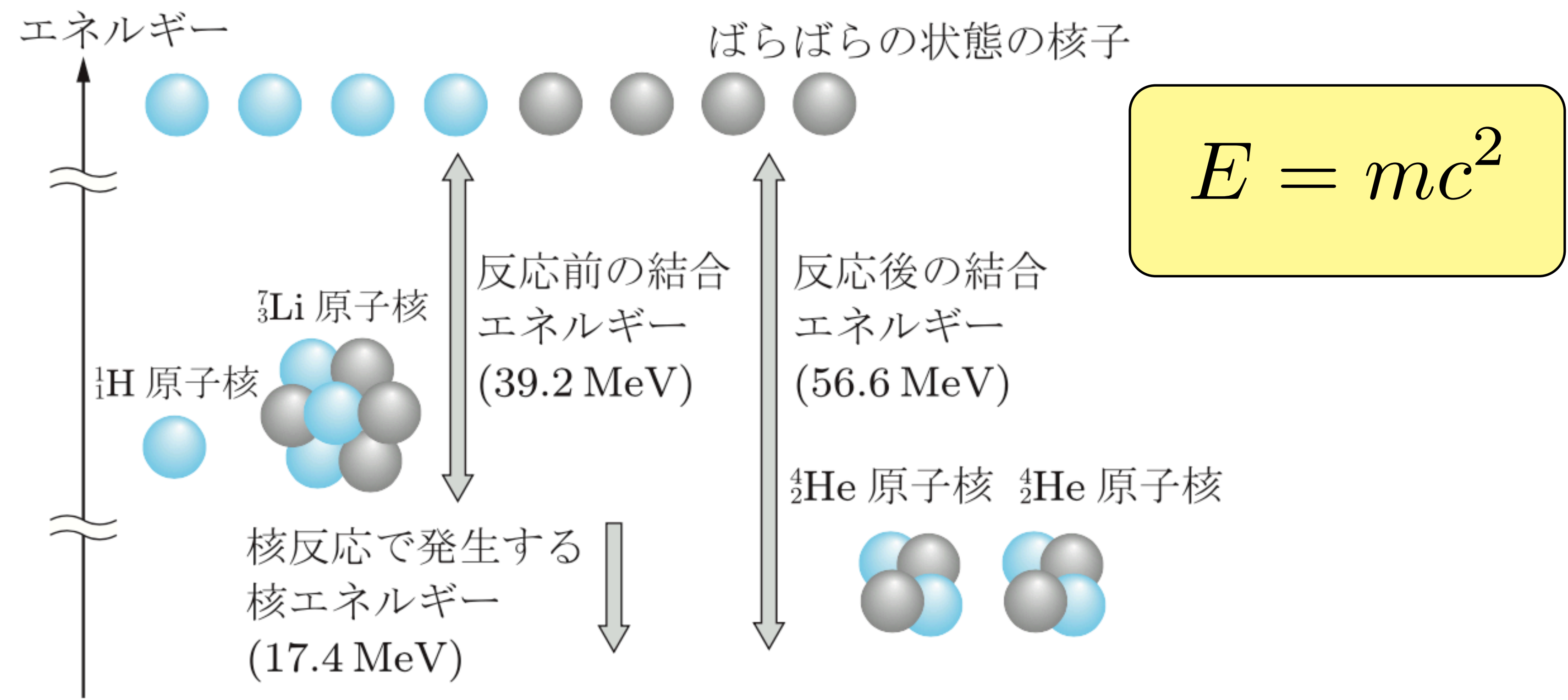
の反応を検出した。中性子をはじめて発見したのは、チャドウィックで



の核反応からである（1932年）。

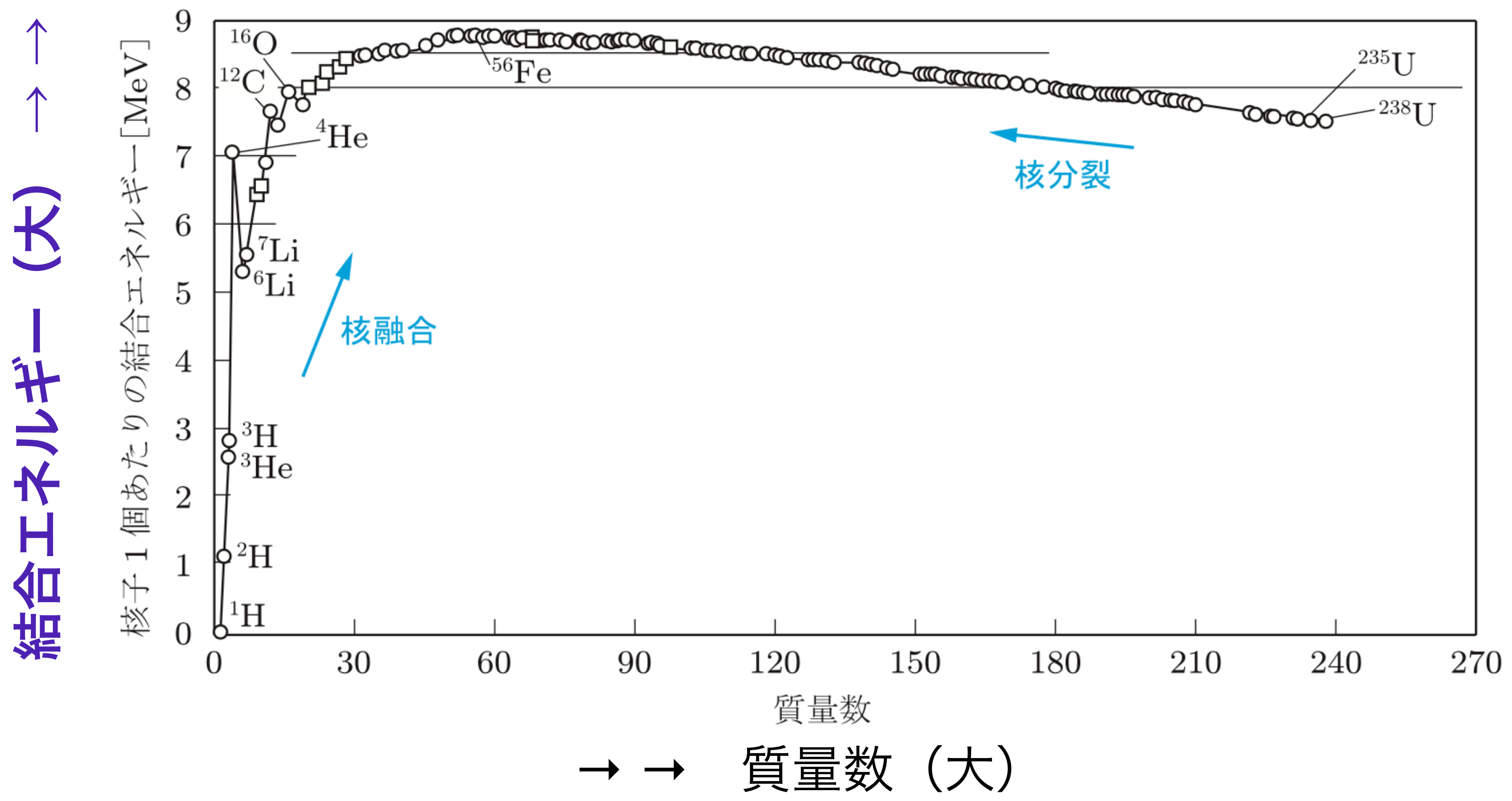
このような核反応が生じる原因は、原子核の結合エネルギーの差にある。原子核は、陽子と中性子が結合することによって、個々に存在するよりも質量エネルギー（ $E = mc^2$ ）の和が小さくてすむ。これを**質量欠損**と呼ぶ。

結合エネルギー

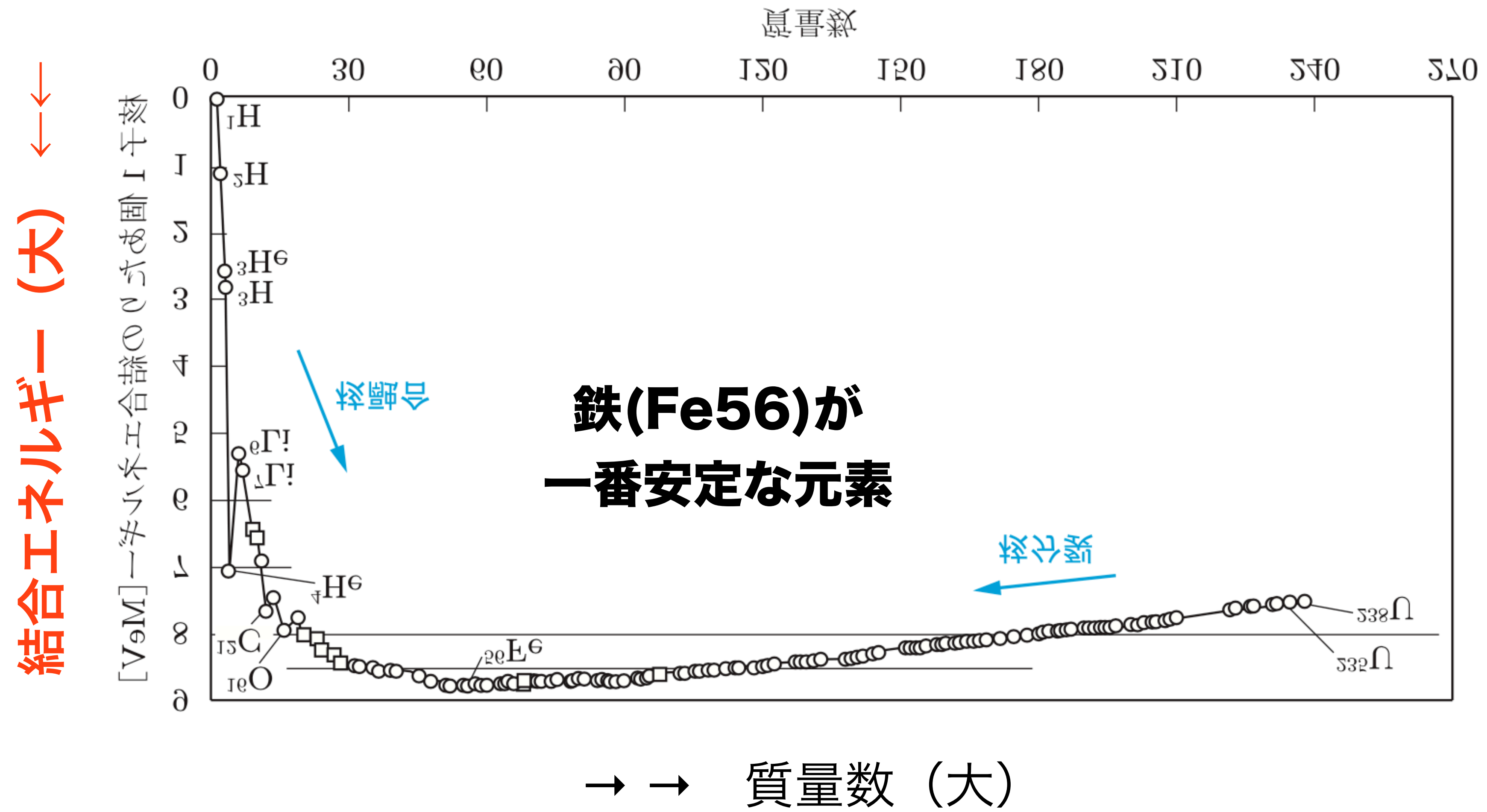


ばらばらでいるより，結合している方が，エネルギーが低い

核融合も核分裂もどちらもおきる理由は何か？



核融合も核分裂もどちらもおきる理由は何か？



教科書 後ろ見開き

79

【6-1】(本日の講義から)

光の速さで動く人が鏡を見ると, 自分の顔は映る? 映らない?

【6-2】(本日の講義から)

「双子のパラドックス」とは, 何がパラドックス(正しように思えるが間違っていること)だったのか.

【6-3】(次回のネタ)

おすすめのタイムマシン映画を教えて.

【6-4】 通信欄

(感想・講義で取り上げて欲しい疑問・要望・連絡事項など、何かあれば)

