

最先端物理学が描く宇宙

Frontiers of Physics & Cosmology

第6回 2024/10/28

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/is/shinkai/mukogawa>

『天文文化学の視点 星を軸に文化を語る』



天文現象は古代より人々の生活や文化活動に密接に関わり、文学や美術に広く取り入れられるとともに、現代科学の発端ともなった。古典籍・美術品・工芸品・遺跡・数式等の中には天文に関わる多様な表現がみられ、それらはさまざまな角度から考察することができる。

銅鏡の文様に見られる古代中国の宇宙観とは？
浦島太郎のタイムトラベルの理論物理学的な可能性とは？
一条兼良はどのような星空を見ていたのか？
沖繩に伝わる神歌に歌われた星に、人々は何を託していたのか？
絵画・文学作品、信仰・思想、民俗、実際の天体現象など、様々な視点から、文化史と科学論を統合して自然観を考察する。
細分化され過ぎた現在の学問を新たに捉え直し、総体としての知を確立する挑戦！



天文文化学の視点

松浦清・真貝寿明 編

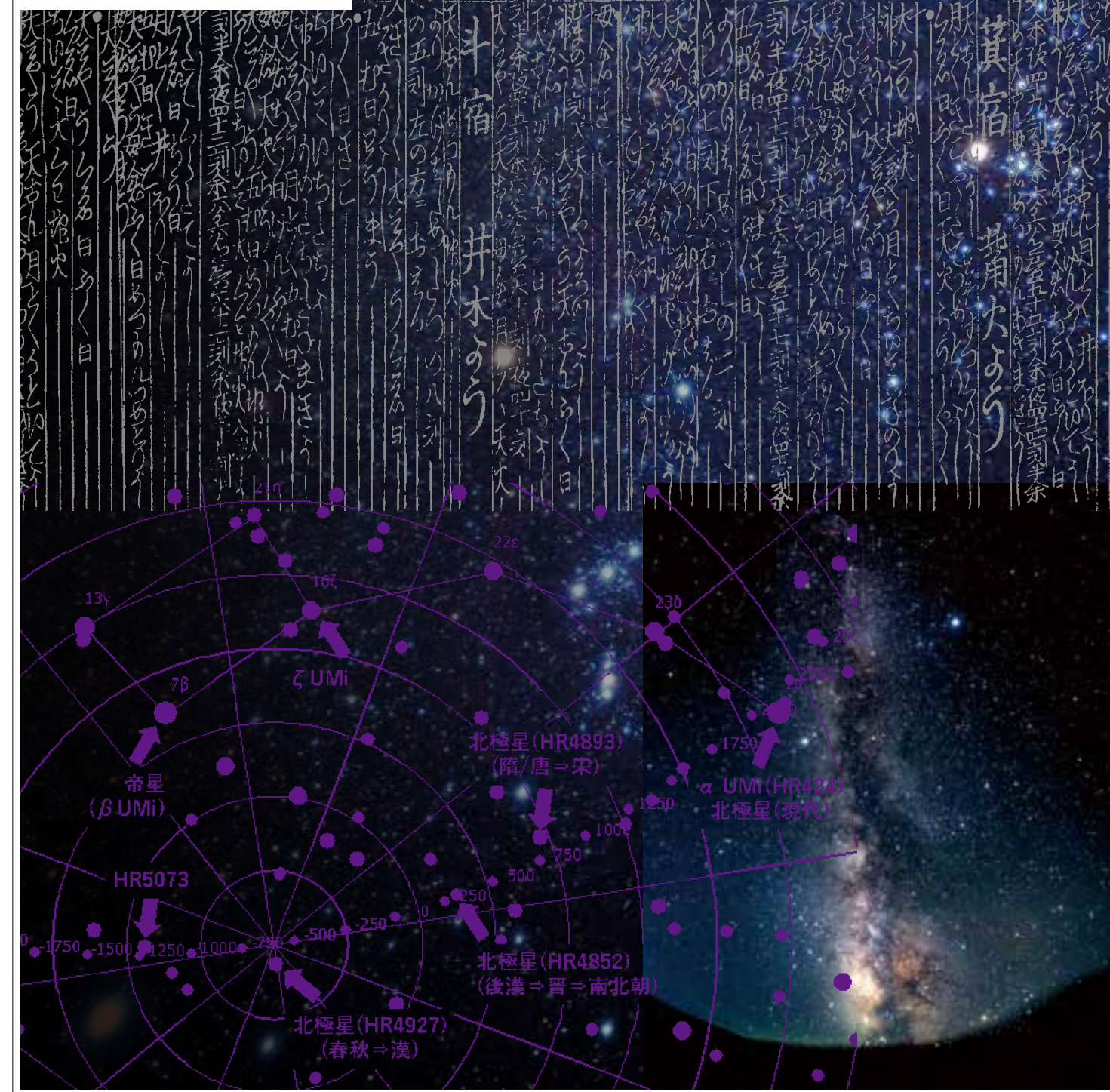
アジア
遊学

勉誠社



ISBN978-4-585-32542-0
C1344 ¥3500E

定価[本体3,500円+税]



勉誠社, 2024年10月30日発売, 3500円+税

『天文文化学の視点 星を軸に文化を語る』

序●「天文文化学」という複合領域を楽しむために……松浦清 999

I……**絵画・文学作品にみる天文文化**

原在明《山上月食図》（個人蔵）の画題について……松浦清 999

一条兼良がみた星空——『花鳥余情』における「彗星」「天狗星」注をめぐって……横山恵理 999

「軌道」の語史——江戸時代末以降を中心に……米田達郎 999

COLUMN ● 星の美を詠む……横山恵理

COLUMN ● 明治初頭の啓蒙書ブーム「窮理熱」と『滑稽窮理臆の西国』……真貝寿明 999

II……**信仰・思想にみる天文文化**

銅鏡の文様に見られる古代中国の宇宙観——記紀神話への受容とからめて……西村昌能 999

天の河の機能としての二重性——境界と通路、死と復活・生成、敵対と恋愛の舞台……勝俣隆 999

南方熊楠のミクロコスモスとマクロコスモス——南方曼荼羅の世界観……井村誠 999

COLUMN ● 天文学者は星を知らない……真貝寿明 999

III……**民俗にみる天文文化**

奄美与論島における十五夜の盗みの現代的变化をめぐる一考察……澤田幸輝 999

COLUMN ● 二日月の傾きと農業予測——鹿児島県与論島のマクマを事例に……澤田幸輝 999

天文文化学から与那覇勢頭豊見親の11りを考える……北尾浩一 999

IV……**中世以前の天体現象と天文文化**

天命思想の受容による飛鳥時代の変革——北極星による古代の正方位測量法……竹迫忍 999

惑星集合と中国古代王朝の開始年についての考察……作花一志 999

COLUMN ● 星の数、銀河の数……真貝寿明

丹後に伝わる浦島伝説とそのタイムトラベルの検討……真貝寿明 999

V……**近世以降の天体現象と天文文化**

1861年デバット彗星の位置測量精度

——土御門家と間家の測量比較を中心に……北井礼三郎・玉澤春史・岩橋清美 999

日本に伝わった古世界地図と星図の系譜……真貝寿明 999

あとがき●天文文化学を進める上で見えてきたもの——理系出身者の視点から……真貝寿明 999

勉誠社, 2024年10月30日発売, 3500円＋税

前回のミニッツペーパーから

昨日、すい星は見られませんでした、金星は輝いて見えた☆

アトラス彗星が見たこと2日間トライしましたが、金星は見えたけど、アトラス彗星は見れませんでした(泣)

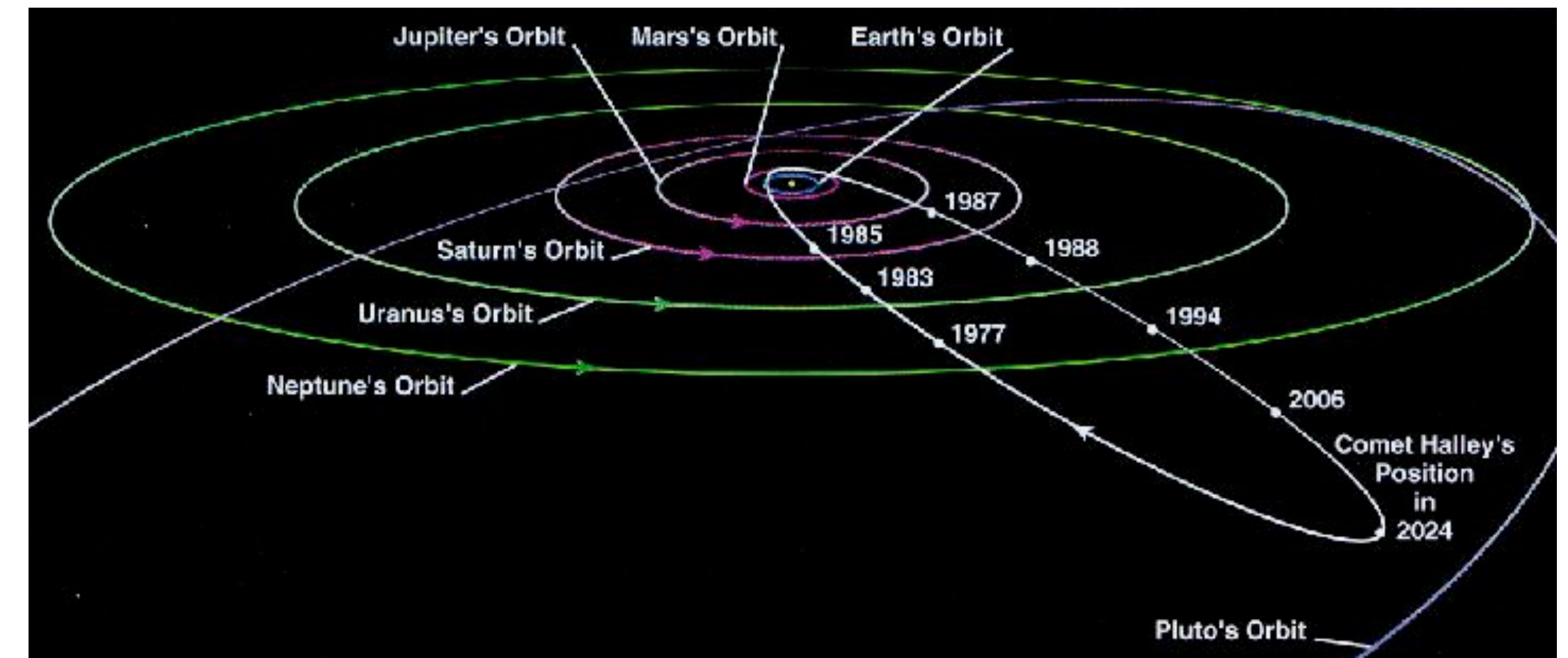
スマホで月や星をきれいに撮るにはどうしたらいいですか？

オリオン座流星群など、(時間)何回も流れ星が"流れる"のはなぜですか？

流星群、ほとんどいるところか田舎で星がきれいに見えるので見ようと思ってます。

結局私も紫金山アトラス彗星を見ることはできませんでした。

焦点は無限大(被写体長押し) + 三脚 + 自動シャッター



前回のミニッツペーパーから

ニュートンこそ中学、高校で習ったけれど、今改めて学んで
考え方が少し変わっている(自分の中では)と感じた。

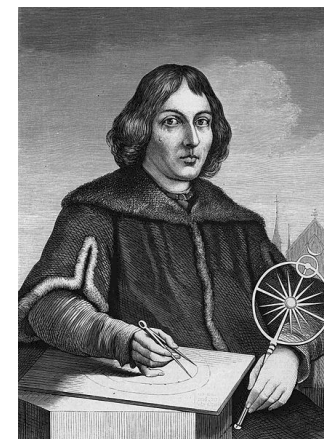
月が地球に落下しないのはどう説明に納得した。

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

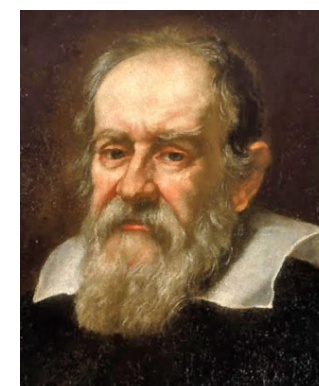
Johannes Kepler
(1571-1630)



惑星運動の法則

ガリレイ

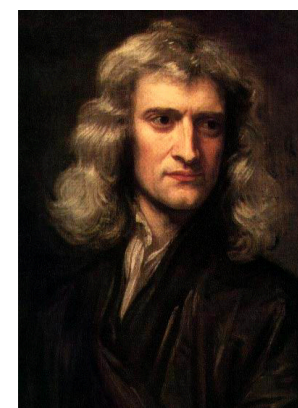
Galileo Galilei
(1564-1642)



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)



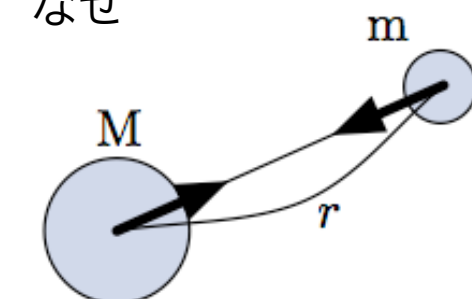
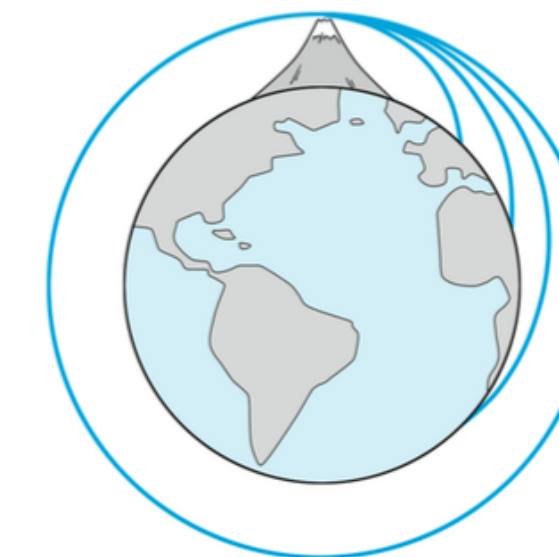
運動の法則
万有引力

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

君の名は。の彗星の話は当時私は理解できなかったけど、今日やっと理屈を理解できました。

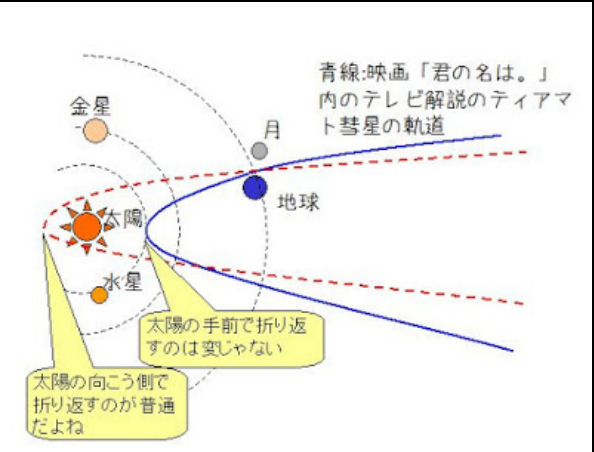
君の名は。は見たことがなかったんで、この授業で学んだことを頭に入れたって見えたと思います。

「君の名は。」に出てくる彗星は何ですか？

2016年のコメント

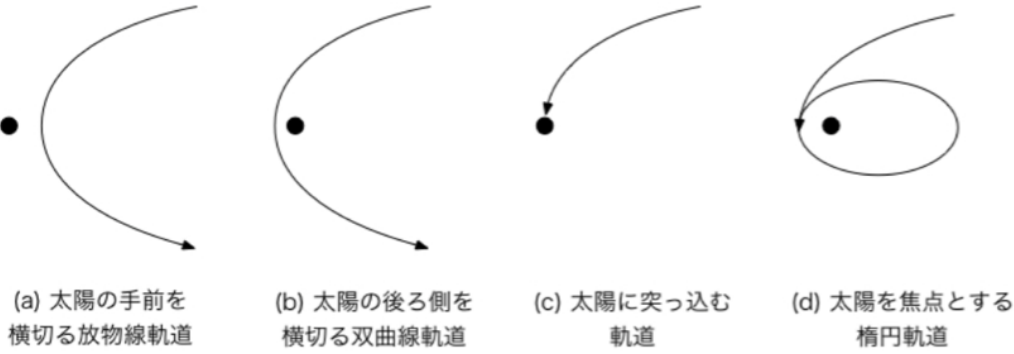
映画『君の名は。』に出てくる彗星の軌道が
おかしいと言われているようですが、本当におかしいのですか？





https://ara50yourname.blogspot.jp/2016/10/blog-post_88.html

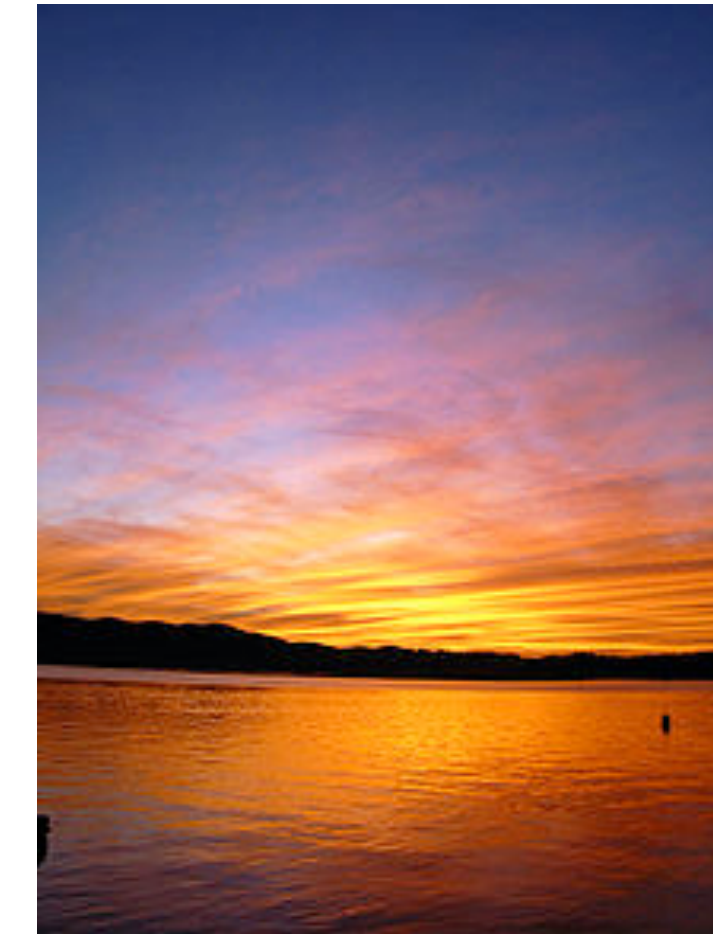
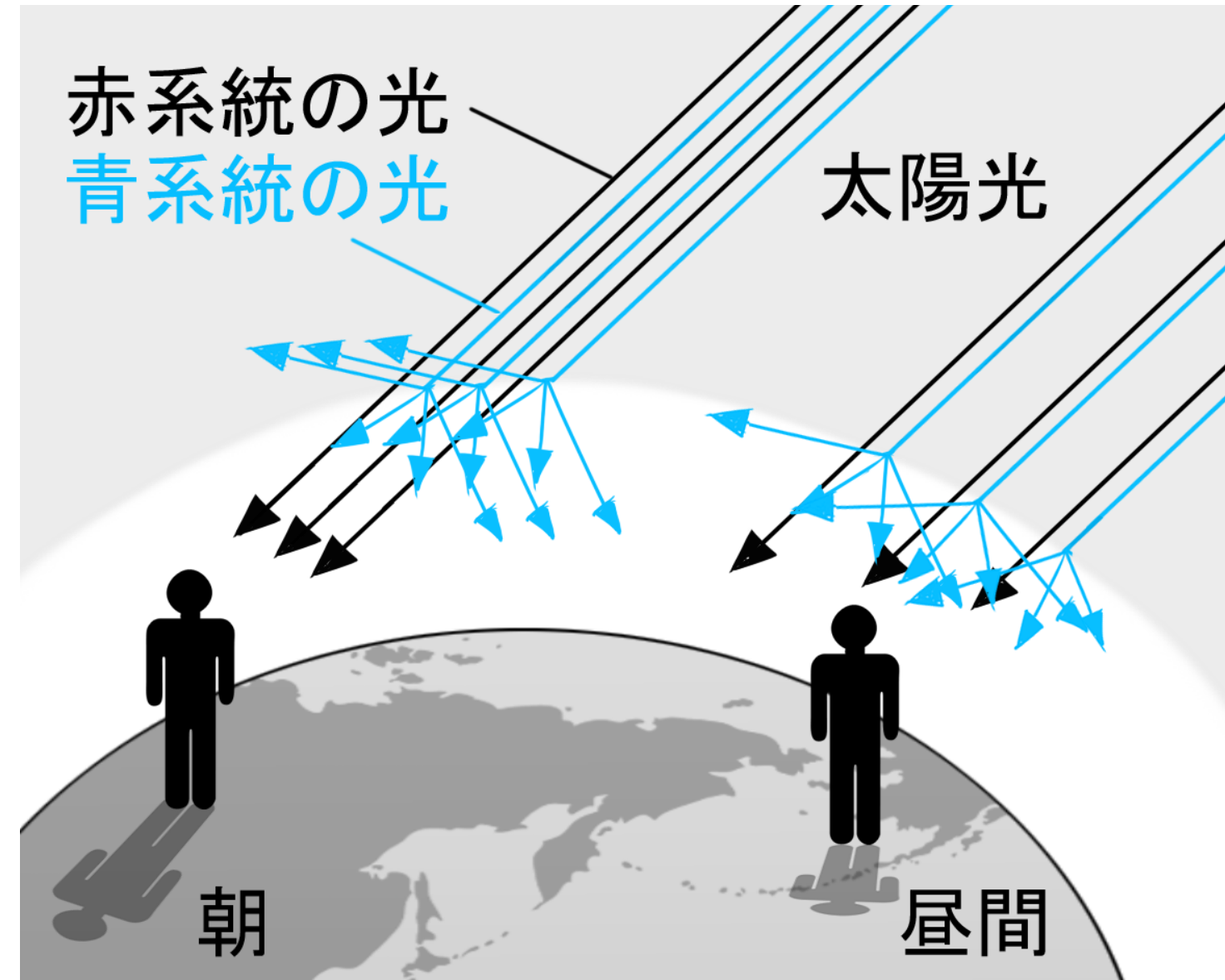
問題文
万有引力がはたらく2つの天体が描く軌道は、楕円（円を含む）、放物線、双曲線の3種類のいずれかになる。いま、太陽に彗星が接近してきたとする。図に示す4つのうち、力学的にありえない軌道はどれか。



夕陽や月など、目によって見える色がちがうのは何故ですか。

今回の授業とはあまり関係ありませんが、
火星の日の出（夕陽？）は青いと聞いたことがあります。なぜ地球では見かけが違うのでしょうか。

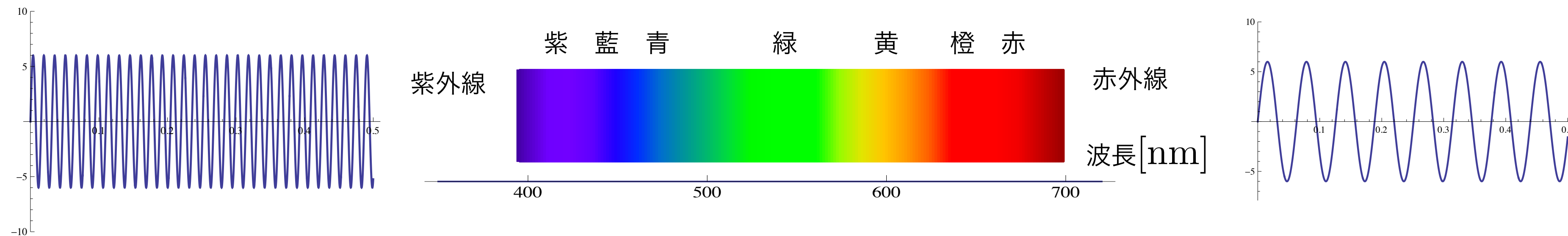
朝焼け・夕焼け なぜ赤い？



レイリー散乱 (Rayleigh scattering)

光の波長よりも小さな物体（窒素分子，酸素分子）で散乱を受ける。

散乱する量は，波長の4乗に反比例するので，**青い光は赤い光の5倍強く散乱する**



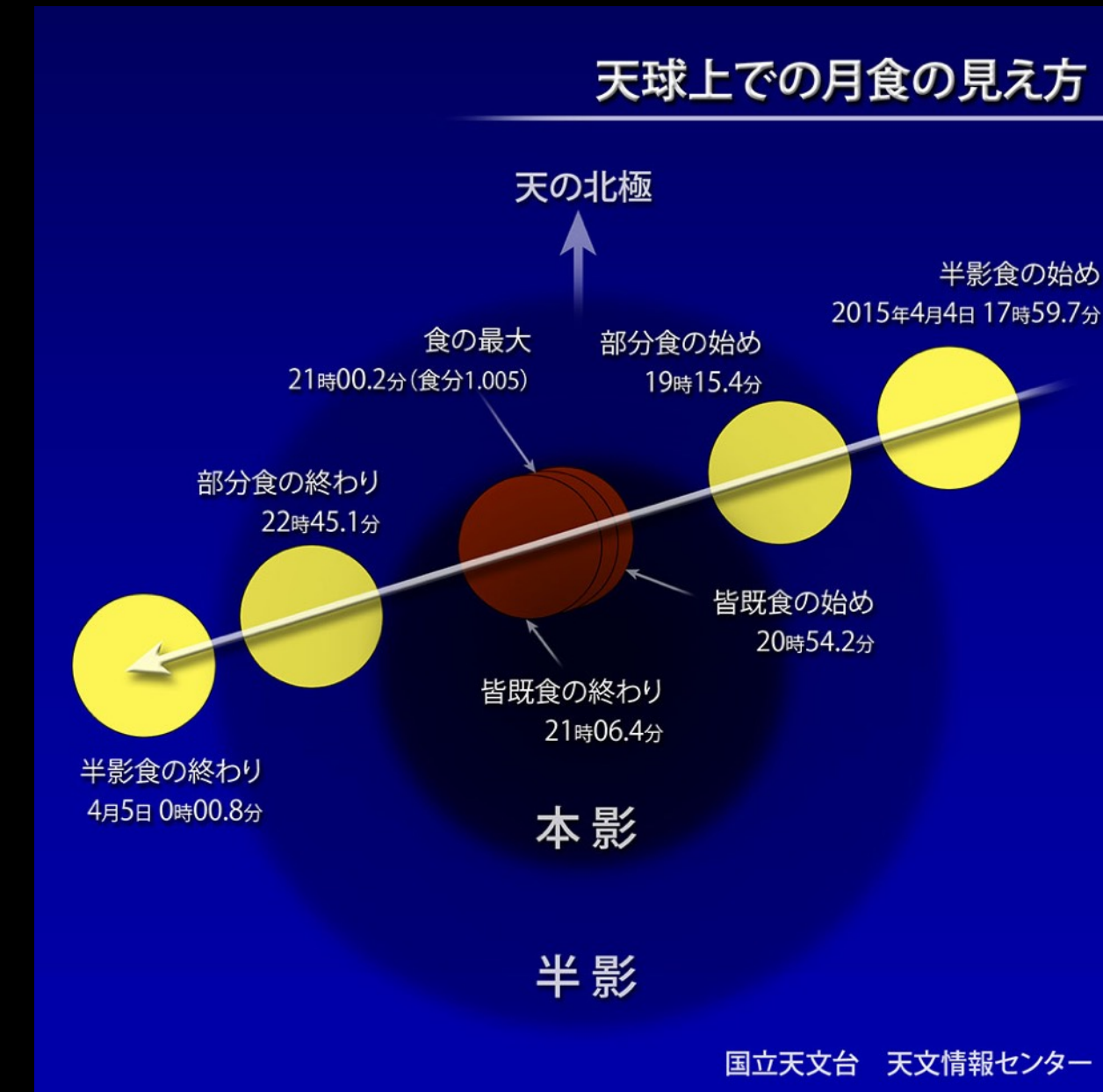
昼間は，青い光の散乱を見上げるので，青い空

朝夕は，青い光の成分が散乱されて届かないので，白－青＝赤い空

2015年4月4日 の皆既月食

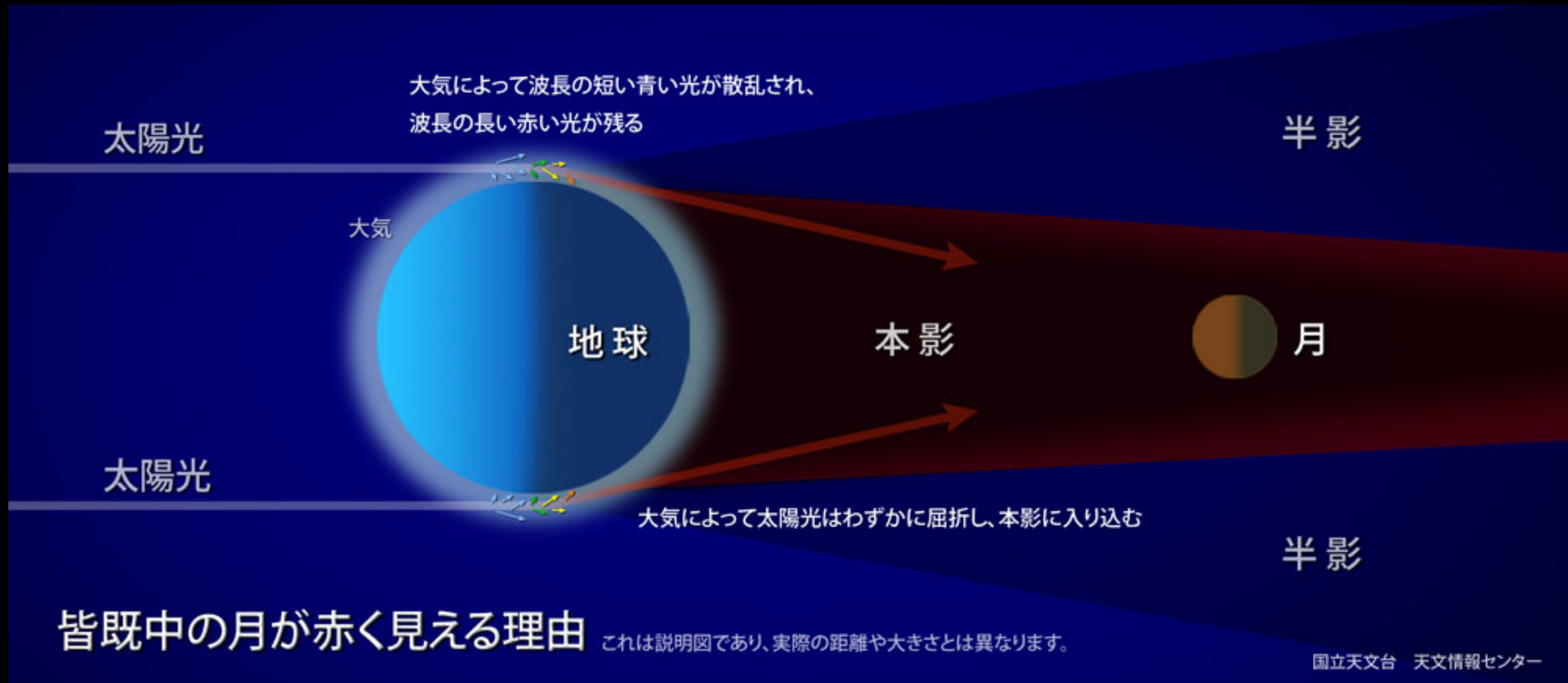


19時15分	部分食の始め
20時54分	皆既食の始め
21時00分	食の最大
21時06分	皆既食の終り
22時45分	部分食の終り



★皆既月食になると、
月が赤く見えるのはなぜ？

★皆既月食になると、月が赤く見えるのはなぜ？



前回のミニッツペーパーから

「ノイズキャンセリングイヤホンが物理学的に可能か」として
私たちの暮らしに良いことがあるのか、あるいは
むしろ身近な存在に感じられるのか。

イヤホンの「ノイズキャンセリング」の仕組みが分かっておもしろかったです。
「サウンド」の音で、実験が始まるから10年以上経っているのにまだ分かっていないことに驚きました。

4次元は、3次元に時間軸が増えたものだ”と分かったのですが
5次元と4次元の違いがよく分かりませんでした。

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

電車の中でもクリアなサウンドで聴けます

航空機※での移動時に快適にリスニング

勉強・仕事などに集中して取り組めます

※航空機内の音楽サービスシステムにより、ご使用にでき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。

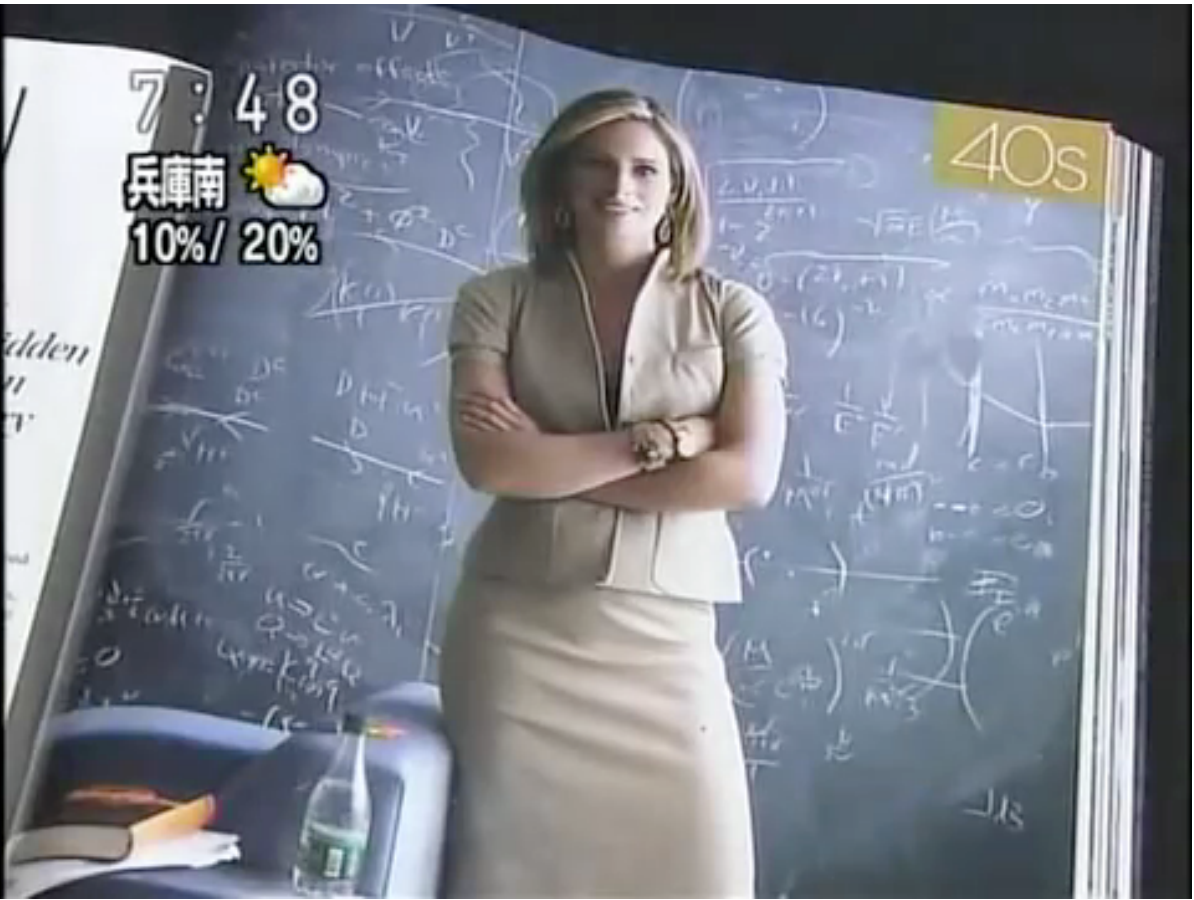
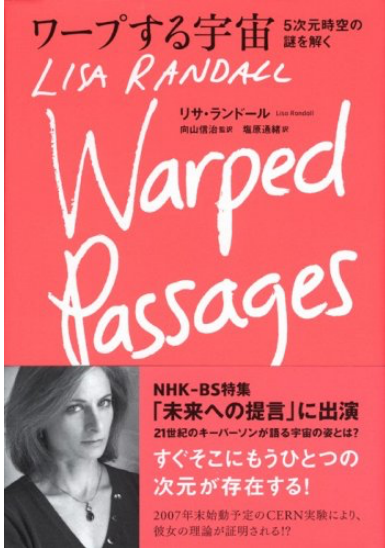
2.逆位相の波
その騒音を打ち消す効果のある、逆位相の音が発生。

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_cancel.html





2007年 NHKニュース (7分)

"Be inspired.
Keep an open mind.
Be brave and have fun!"

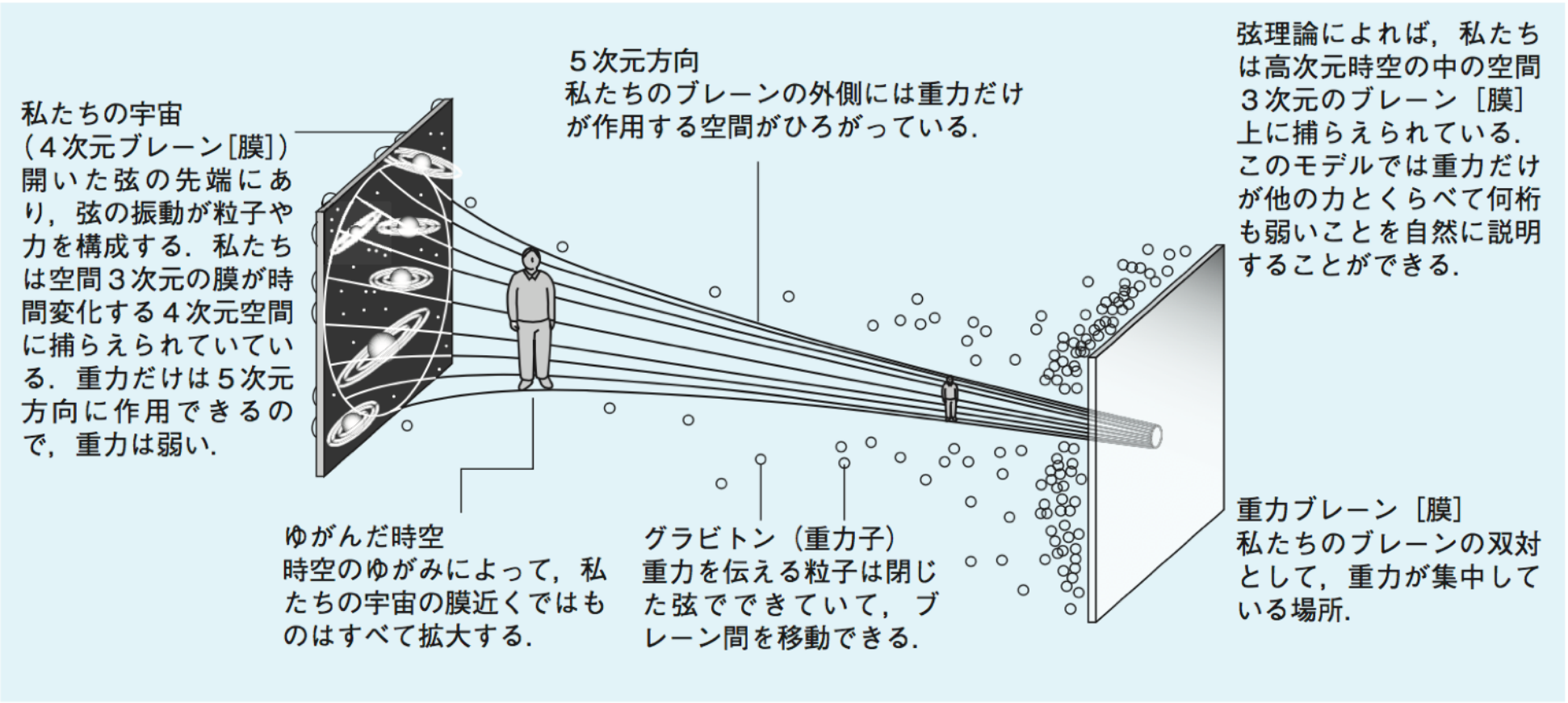


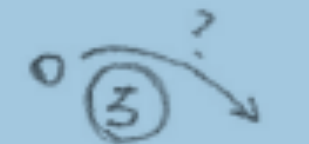
図 5.31 ランドールとサンドラムが提案したブレーンワールド・モデルの1つ。（膜宇宙モデル，1999）

膜宇宙モデル (brane-world cosmology)

教科書 p178

前回のミニッツペーパーから

月は速く移動しているから地球からは見えておらず、といっていました。逆にはすぎると、地球の周りを回り続けられず飛んでいってしまうんじゃないですか？



その通りです。楕円ではなく、双曲線や放物線軌道になります。1度きりしか邂逅しない彗星もあります。

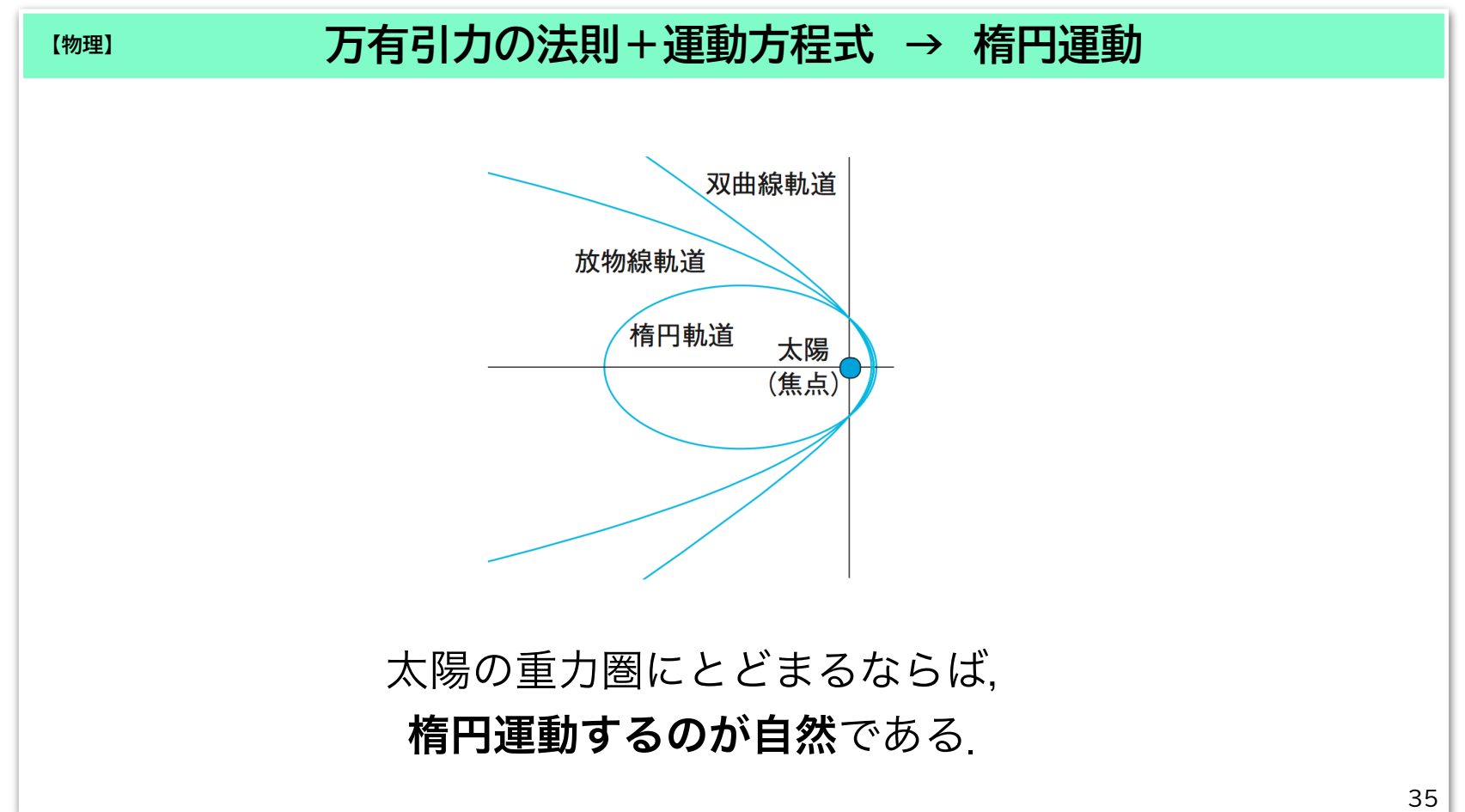
あと何年あれば宇宙について解明することができると思っていますか？

探求する問題が次々と出てきて、終わらないんじゃないかな...

先生は、パラレルワールドはありますか？

パラレルワールドの話は量子論で取り上げますが、宇宙広いと言えど、私たちのコピーのような世界がある確率は小さいでしょうねえ。

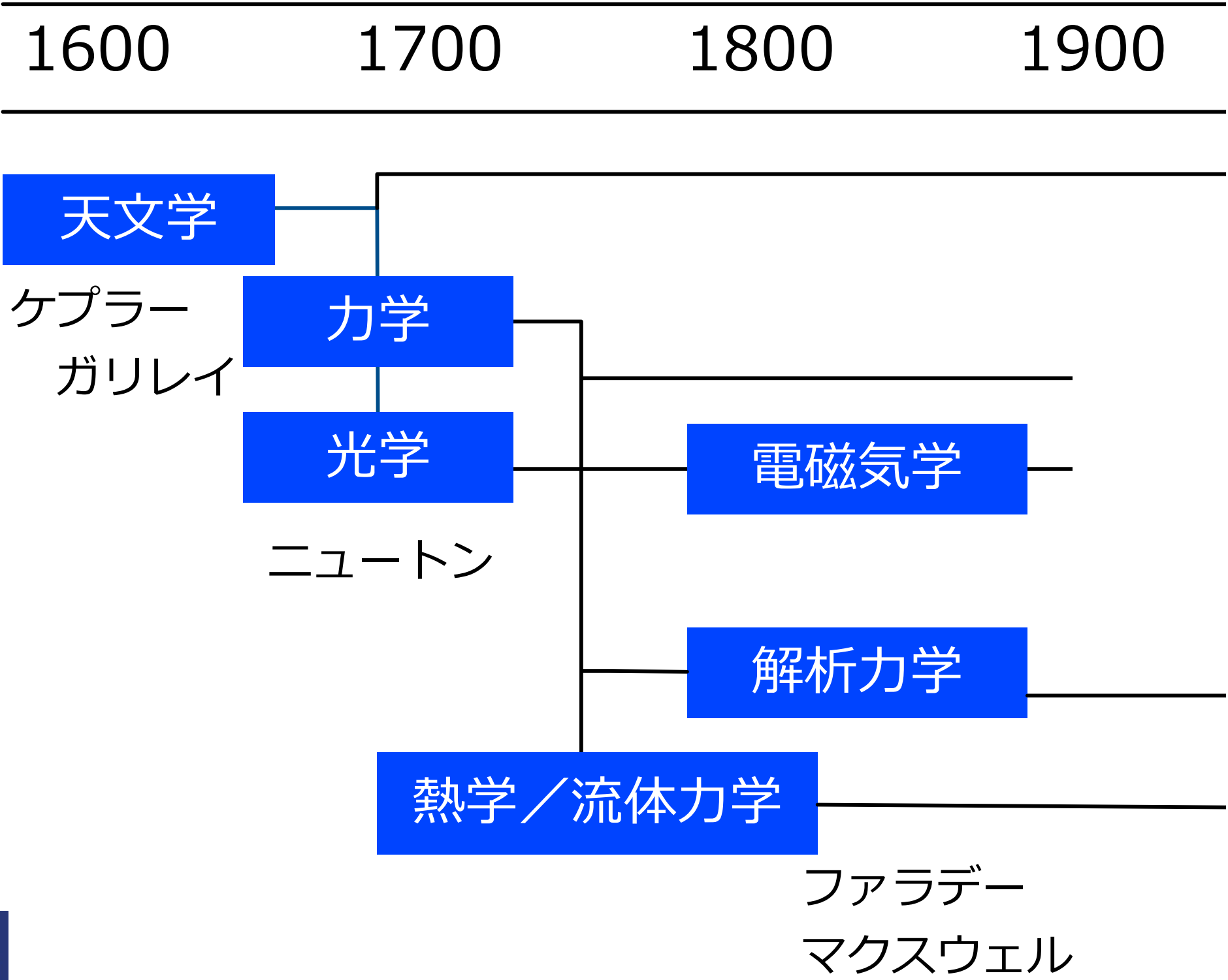
相対性理論という言葉はよく聞きますが、どんなものなのかまだあまりわかっていないので、次回以降の講義が楽しみです。



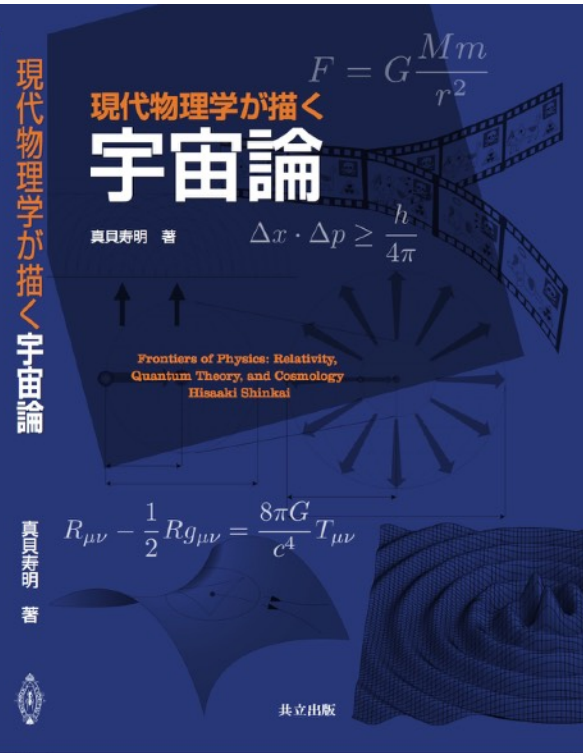
次回はタイムマシンの話ですごく楽しみです。

1905年 物理学 奇跡の年

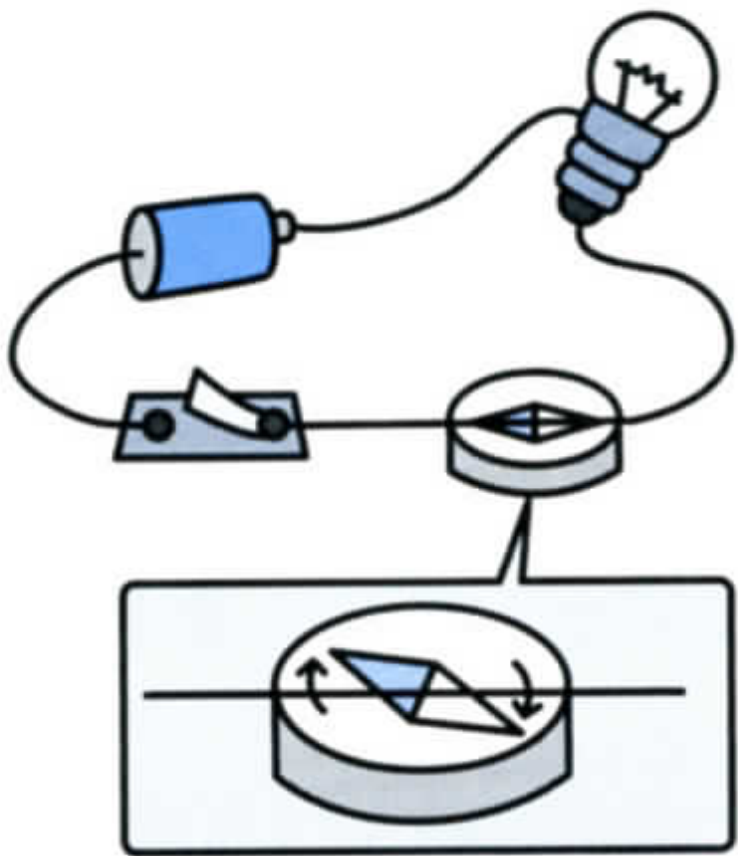
近代物理学の進展



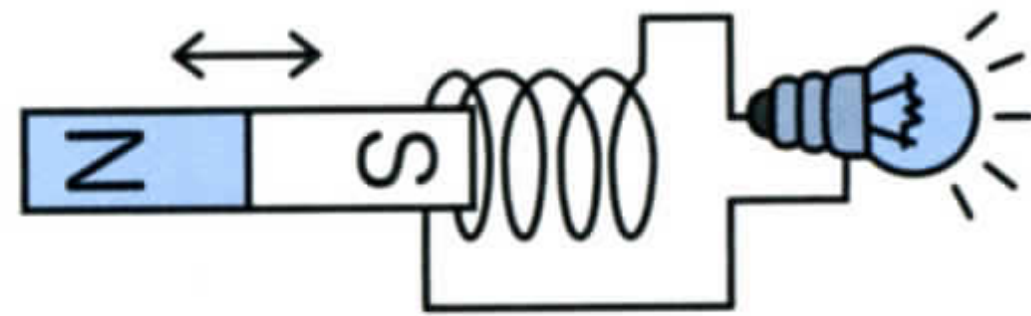
19世紀末は「物理学は完成した」と考えられていた。



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。

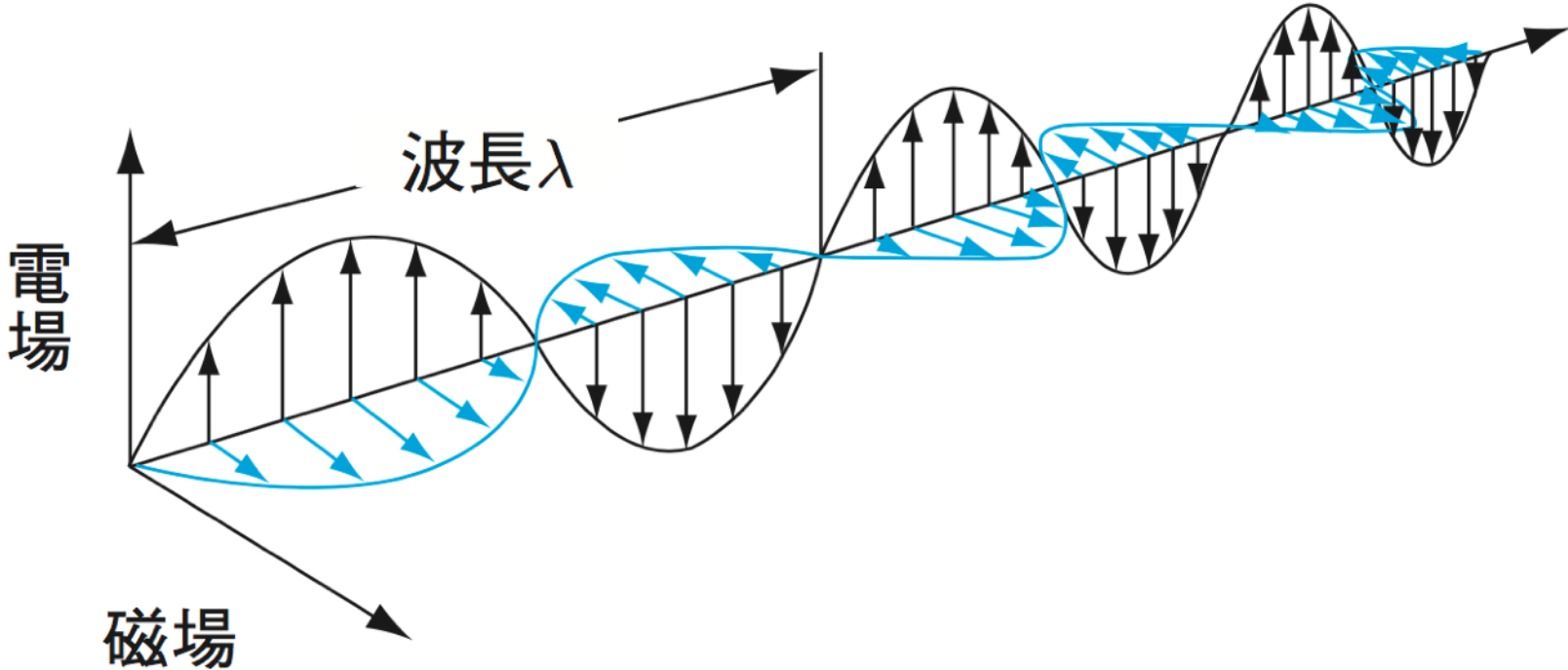
電磁誘導現象の発見 (1831年)

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。

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。



マクスウェル



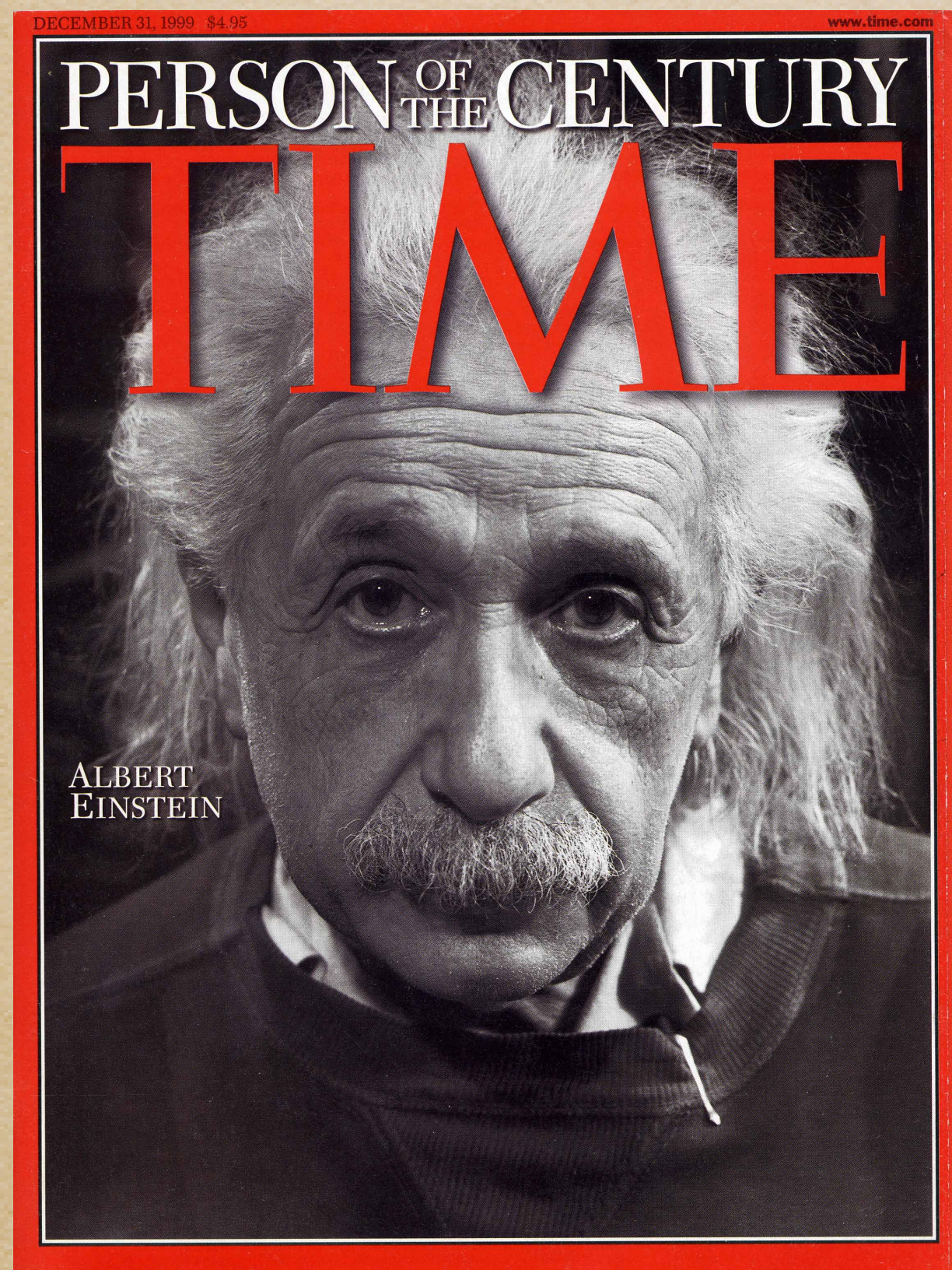
ヘルツ

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

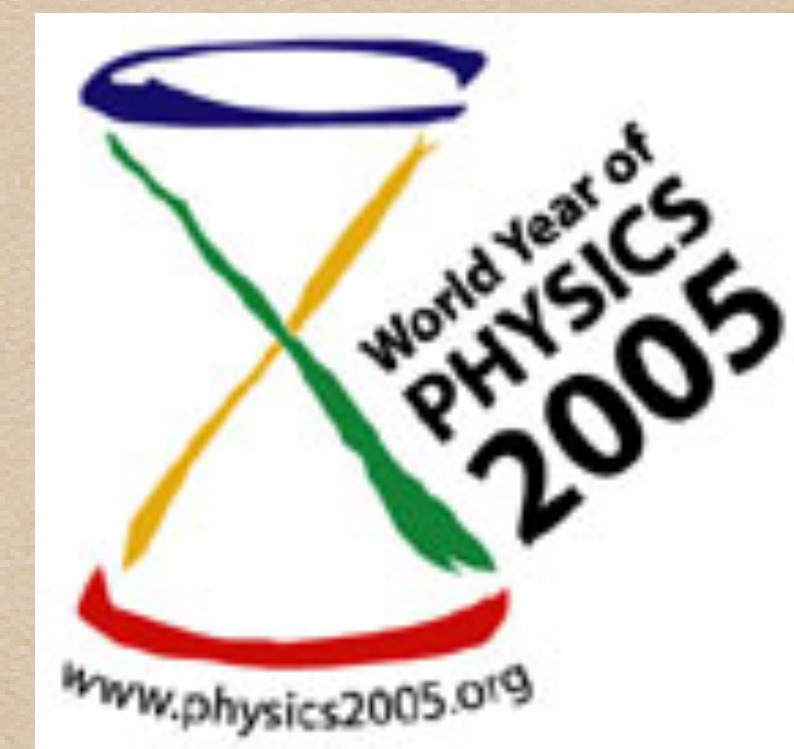


Time 1999/12/31号



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。
 $\mathbf{E}$ は電場ベクトル, $\mathbf{B}$ は磁場ベクトル, ρ は電荷密度, $\mathbf{j}$ 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.

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

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

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

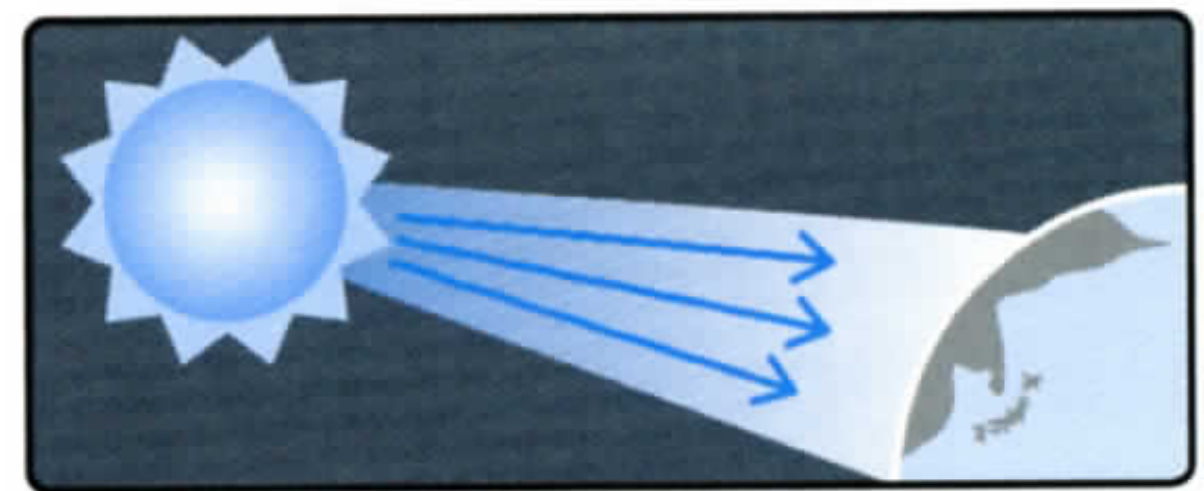
$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0. \quad (2.9)$$

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

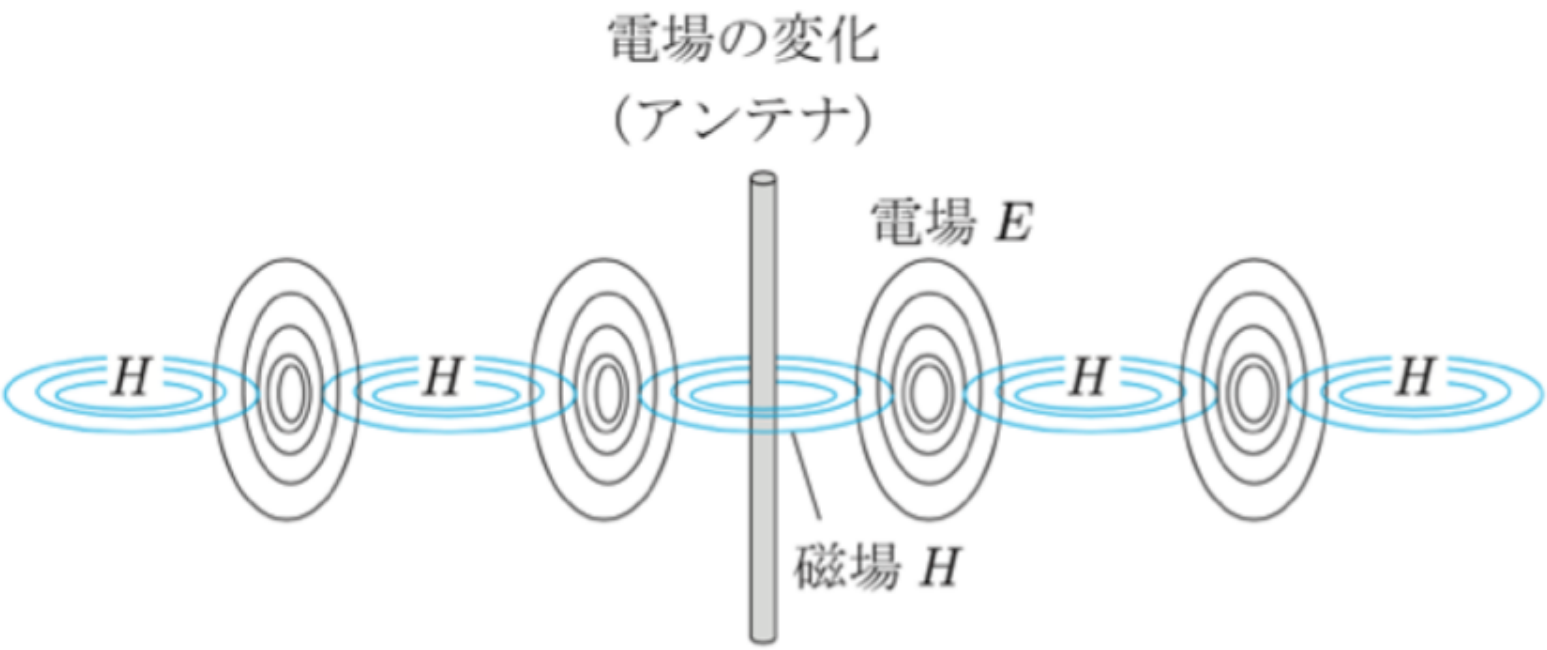


時速120km

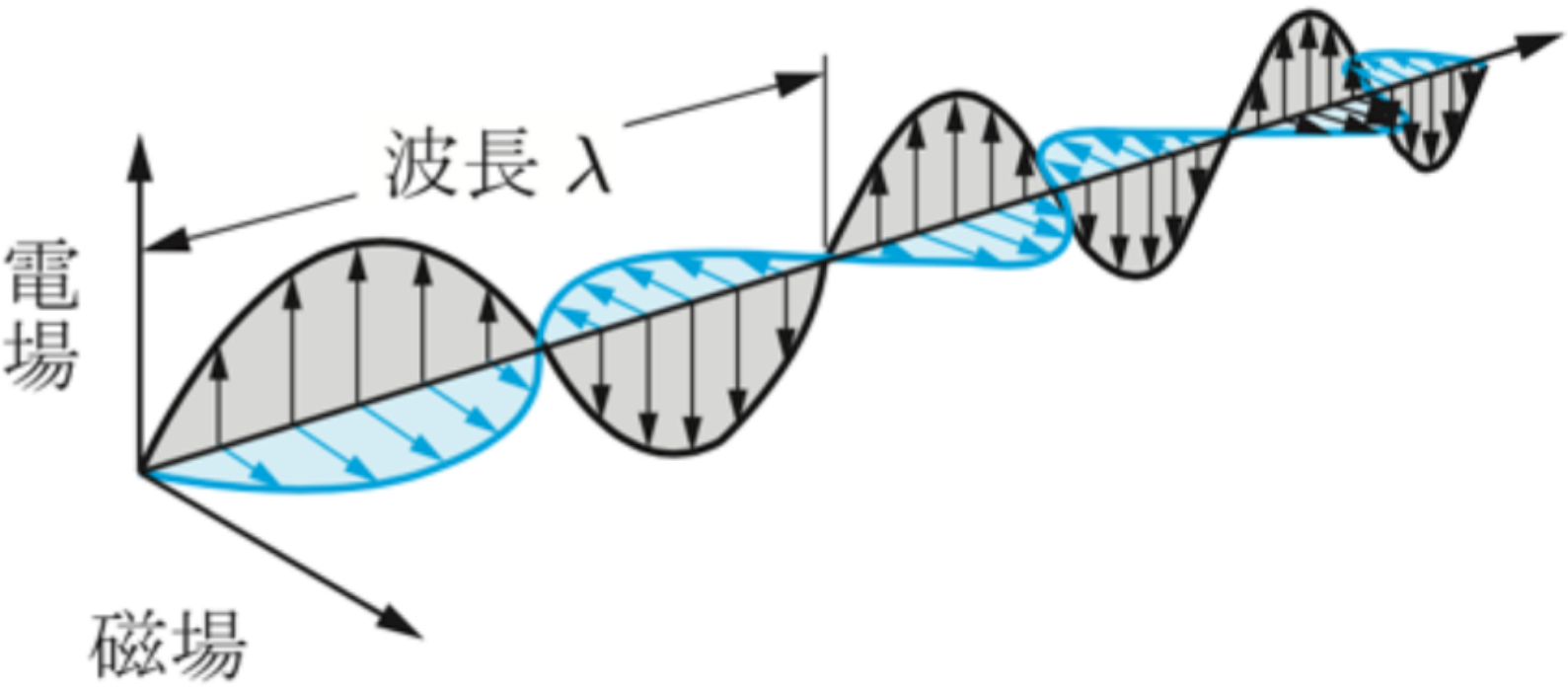
車中の人からはパトカーの速度は時速20kmに見える。
(速度は相対的なもの)

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

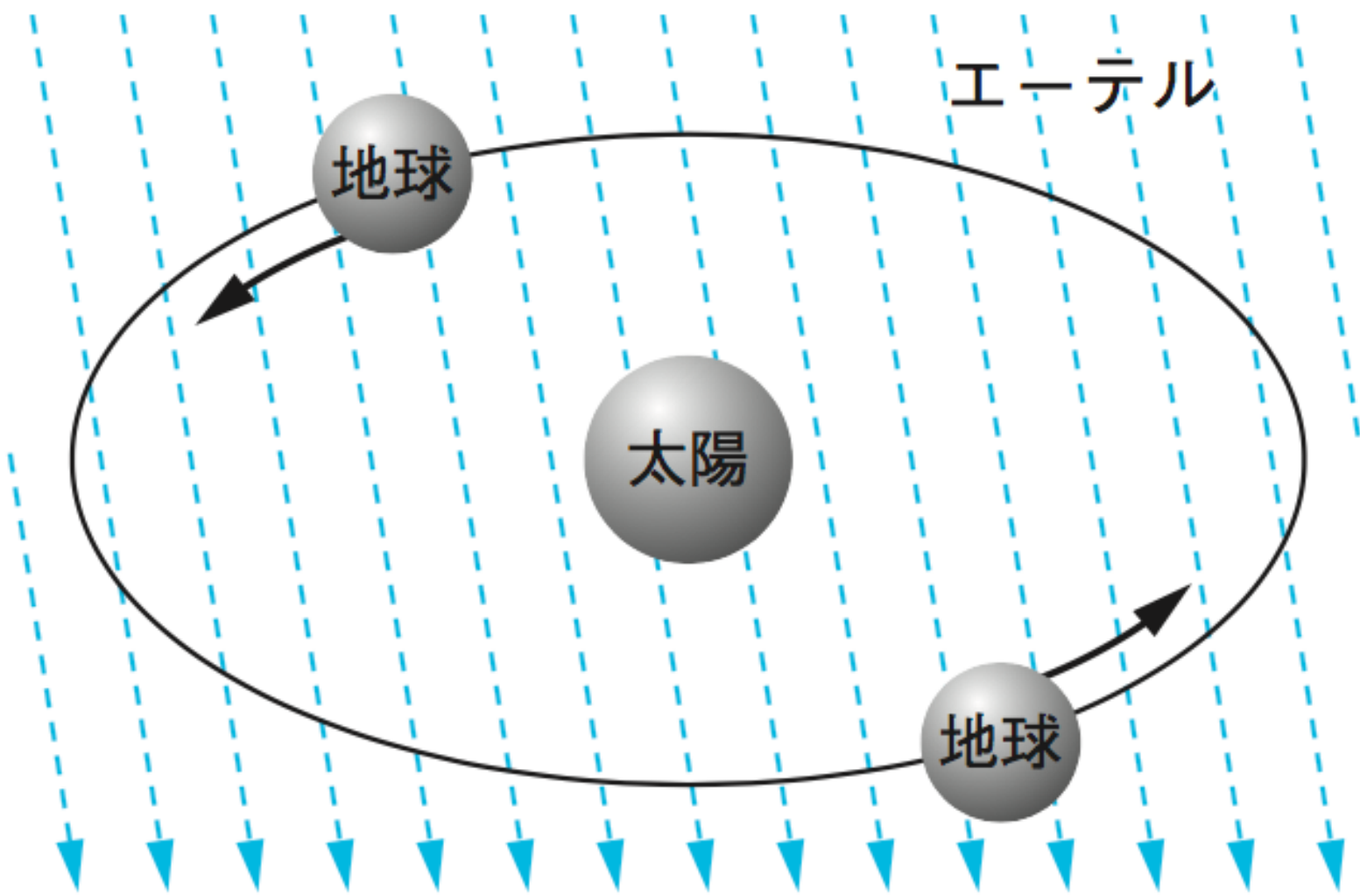
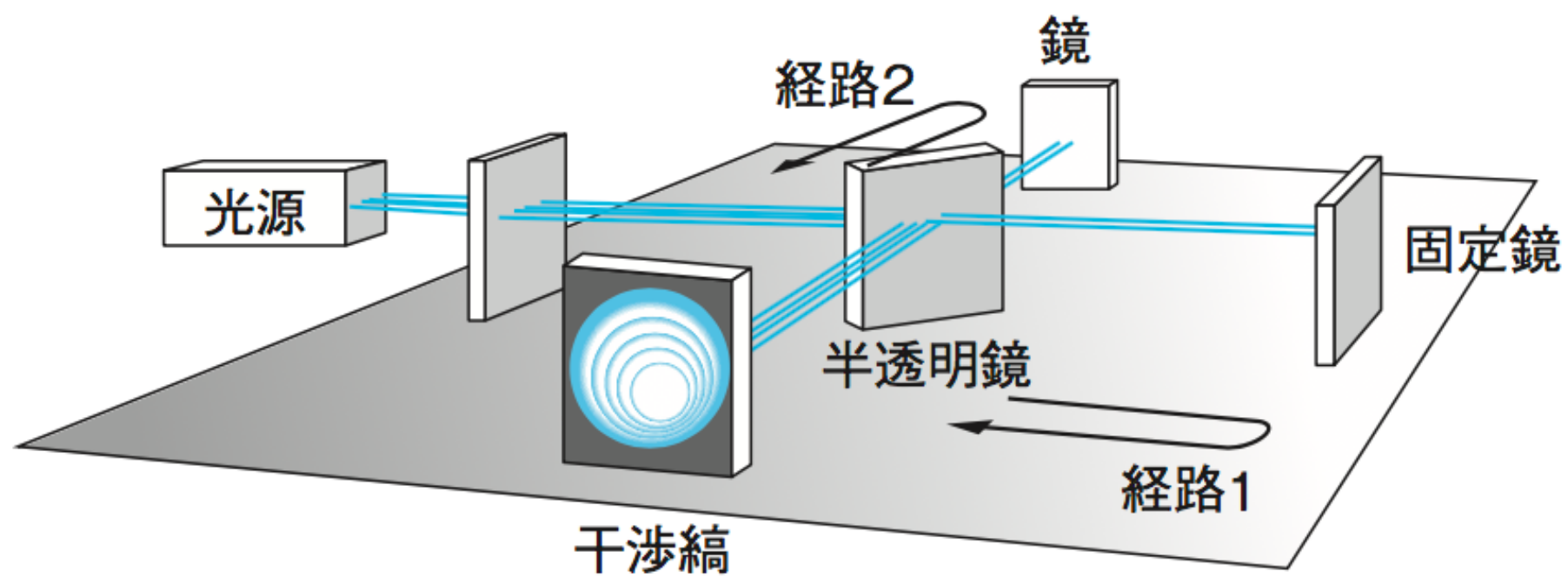
マイケルソン・モーリーの実験

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

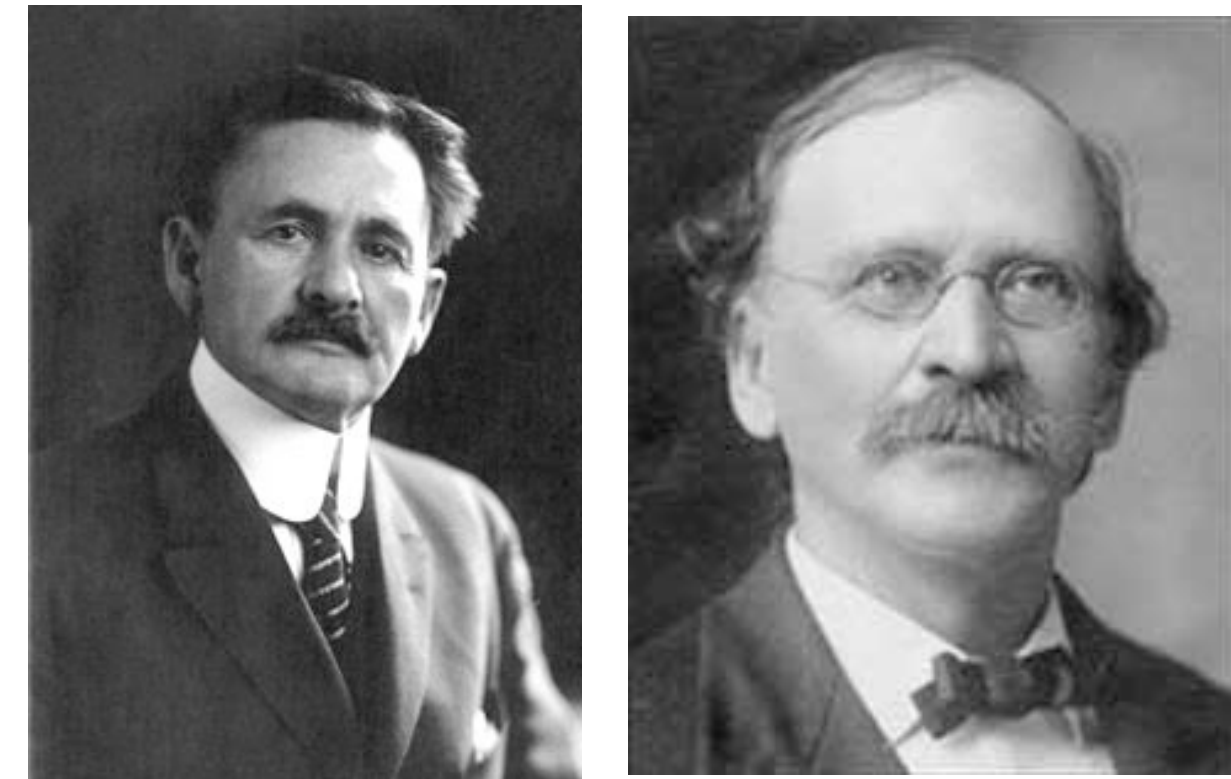
微小距離を測定する**干渉計**



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。

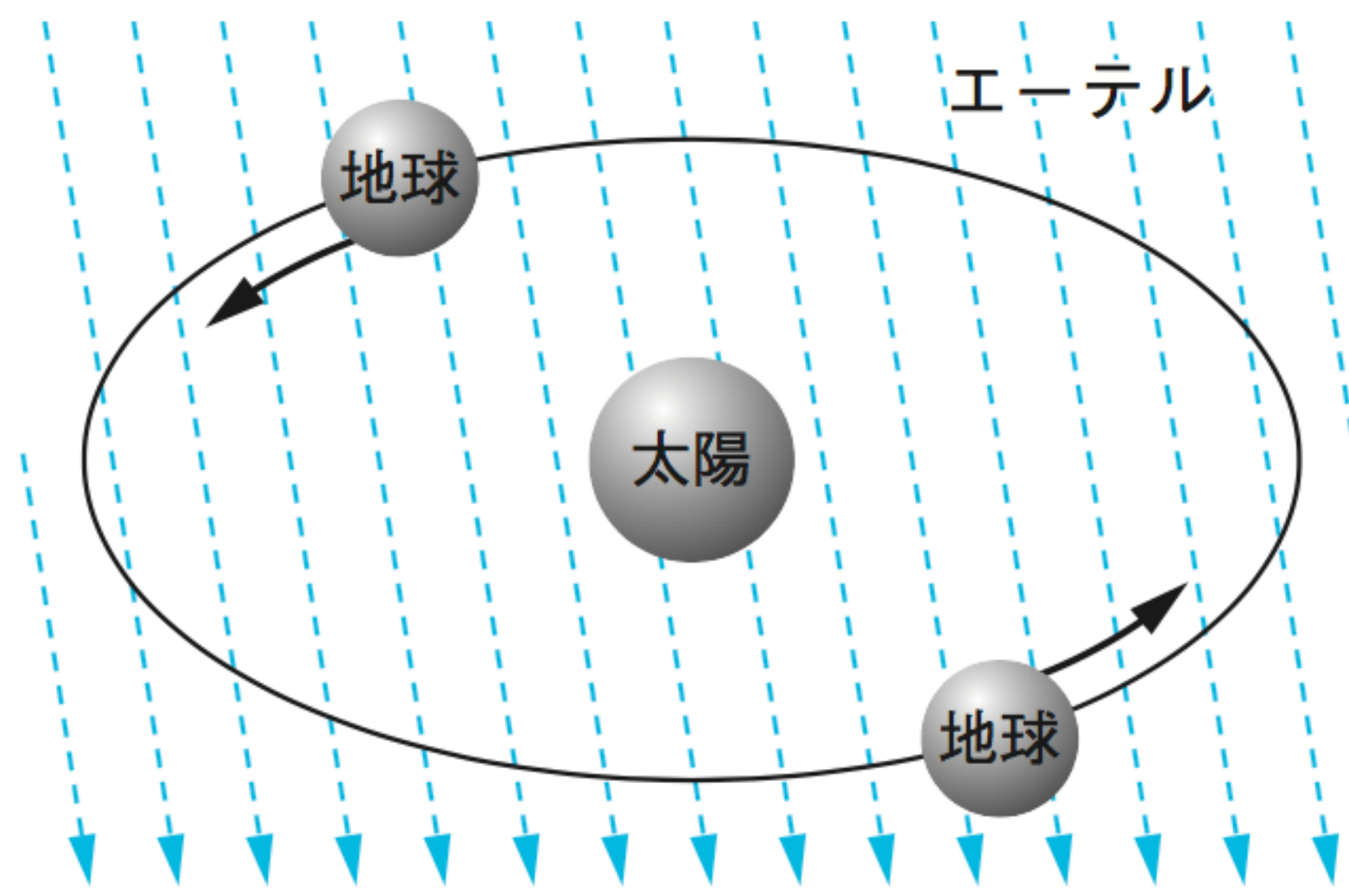
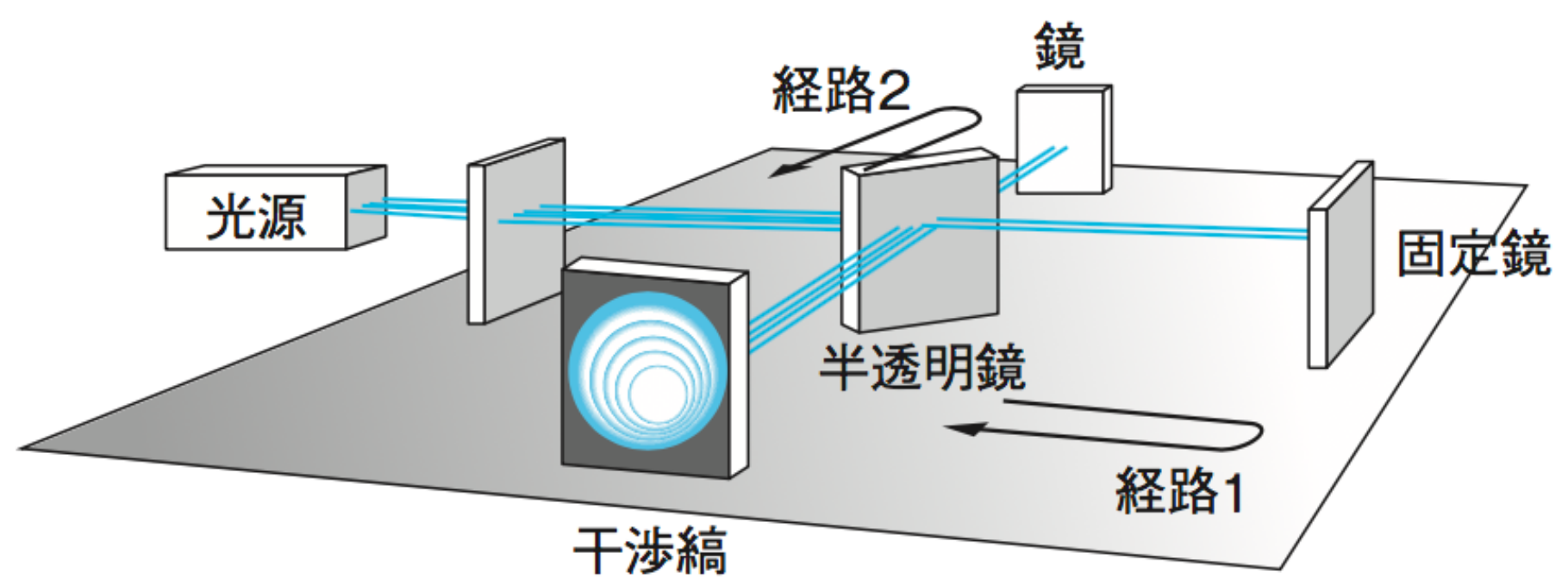
マイケルソン・モーリーの実験

Michelson-Morley experiment 1887



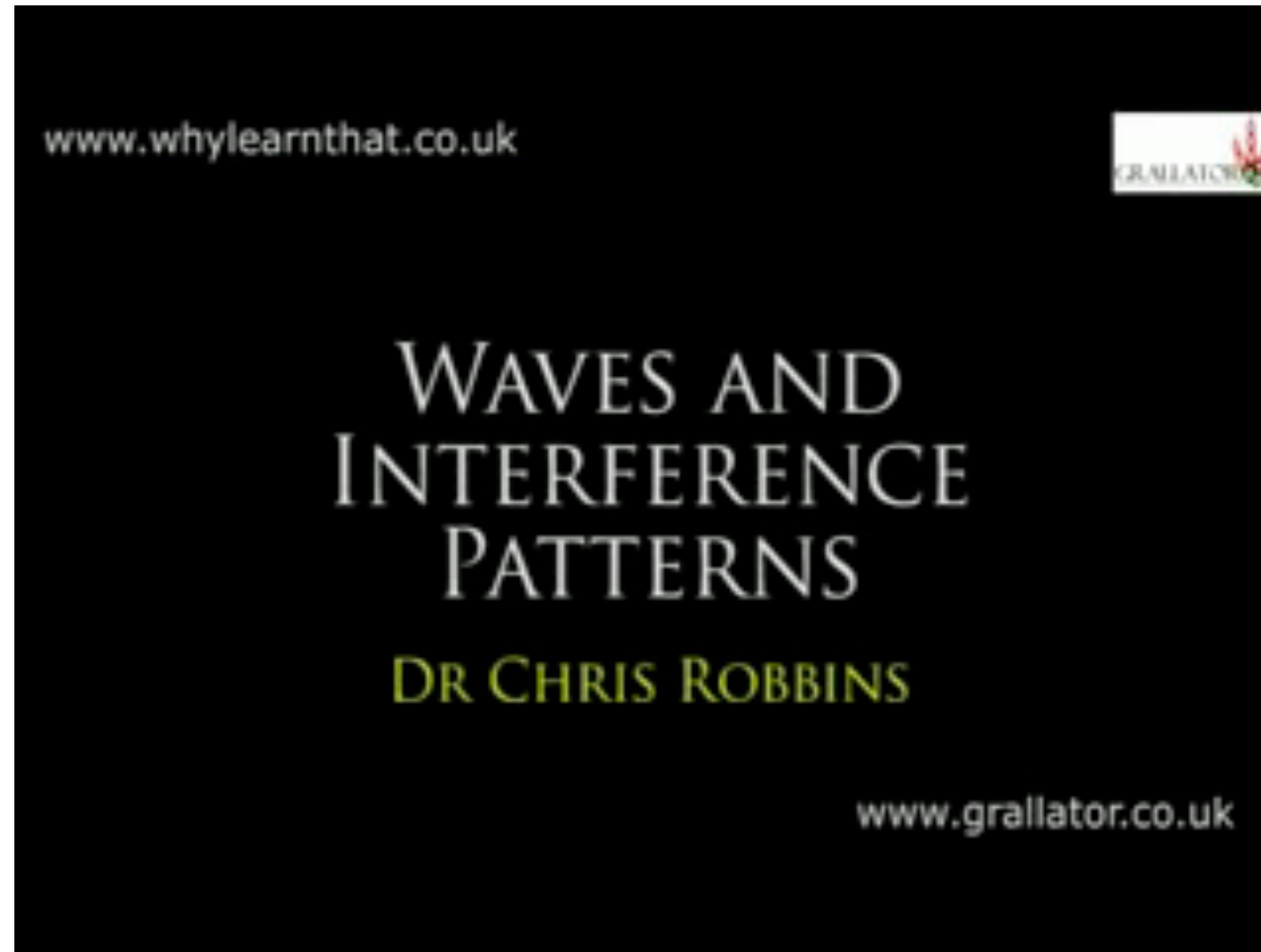
→エーテルの検出に「失敗」

微小距離を測定する干渉計

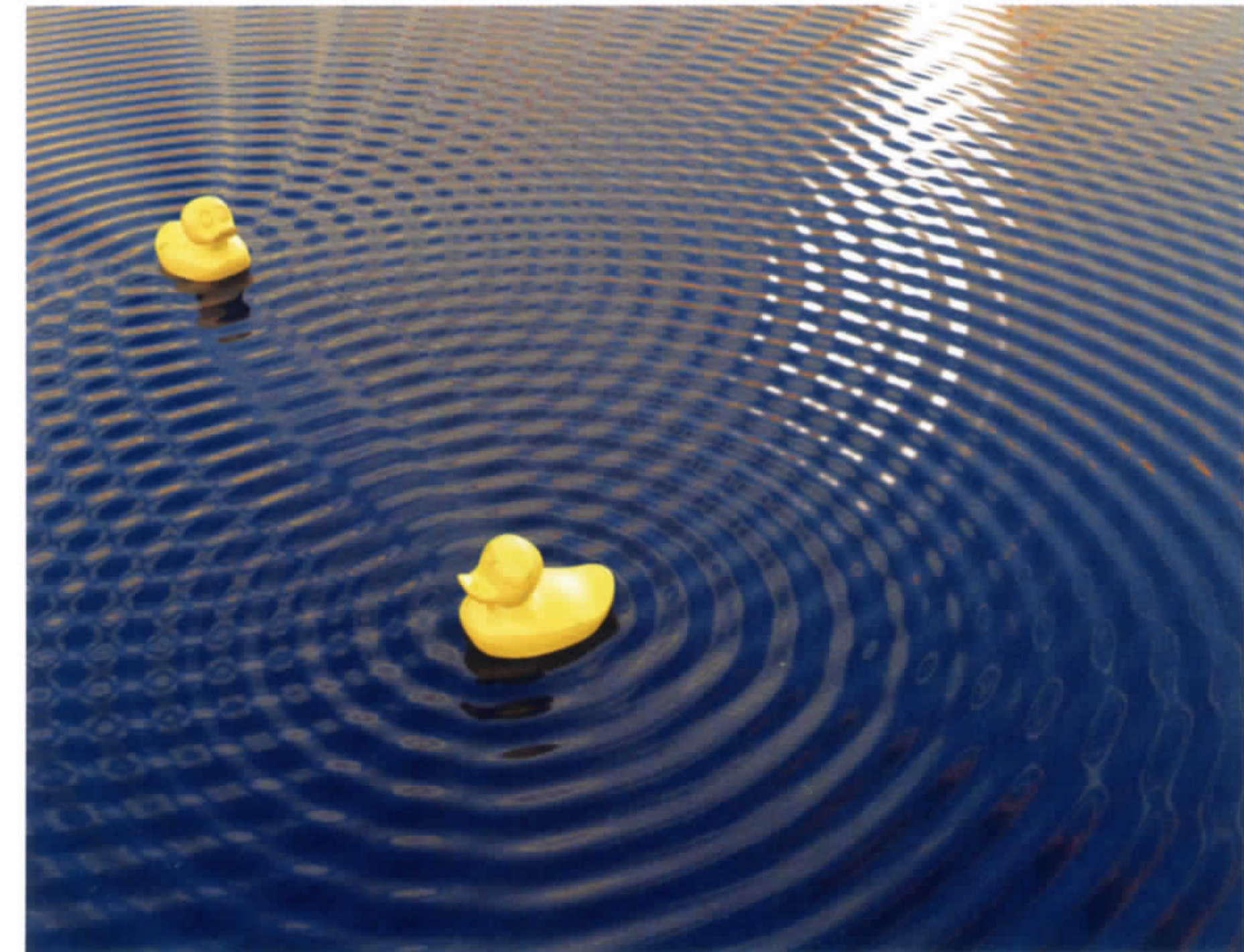


エーテルがあれば、季節で距離が変わるはず。
微妙な差でも、干渉計なら測れるはず。

干渉 (interference)



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



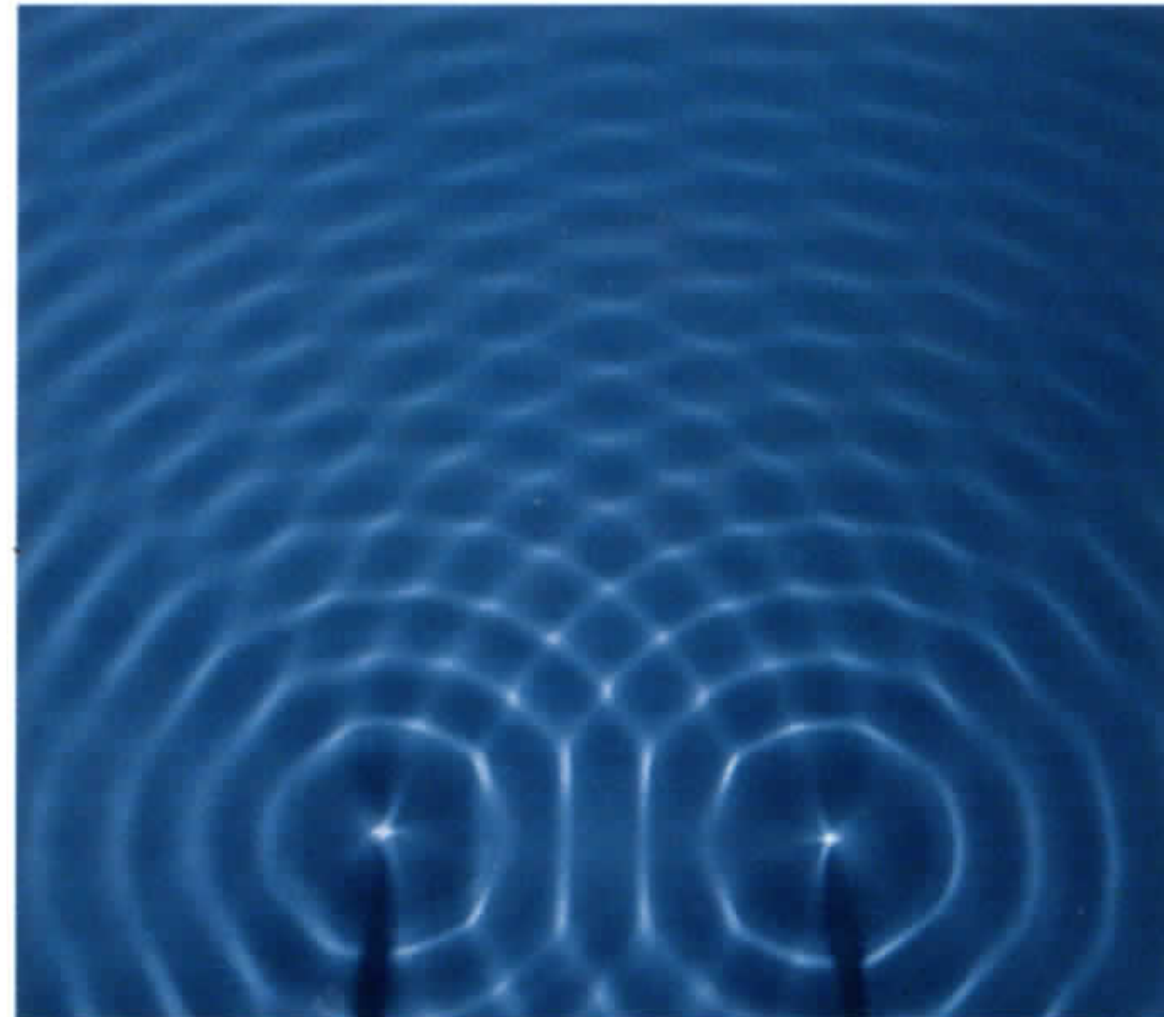
Puddle Interference The concept of interference shows up in everyday life in bodies of water, from puddles to oceans.

法則 波の特徴：干渉

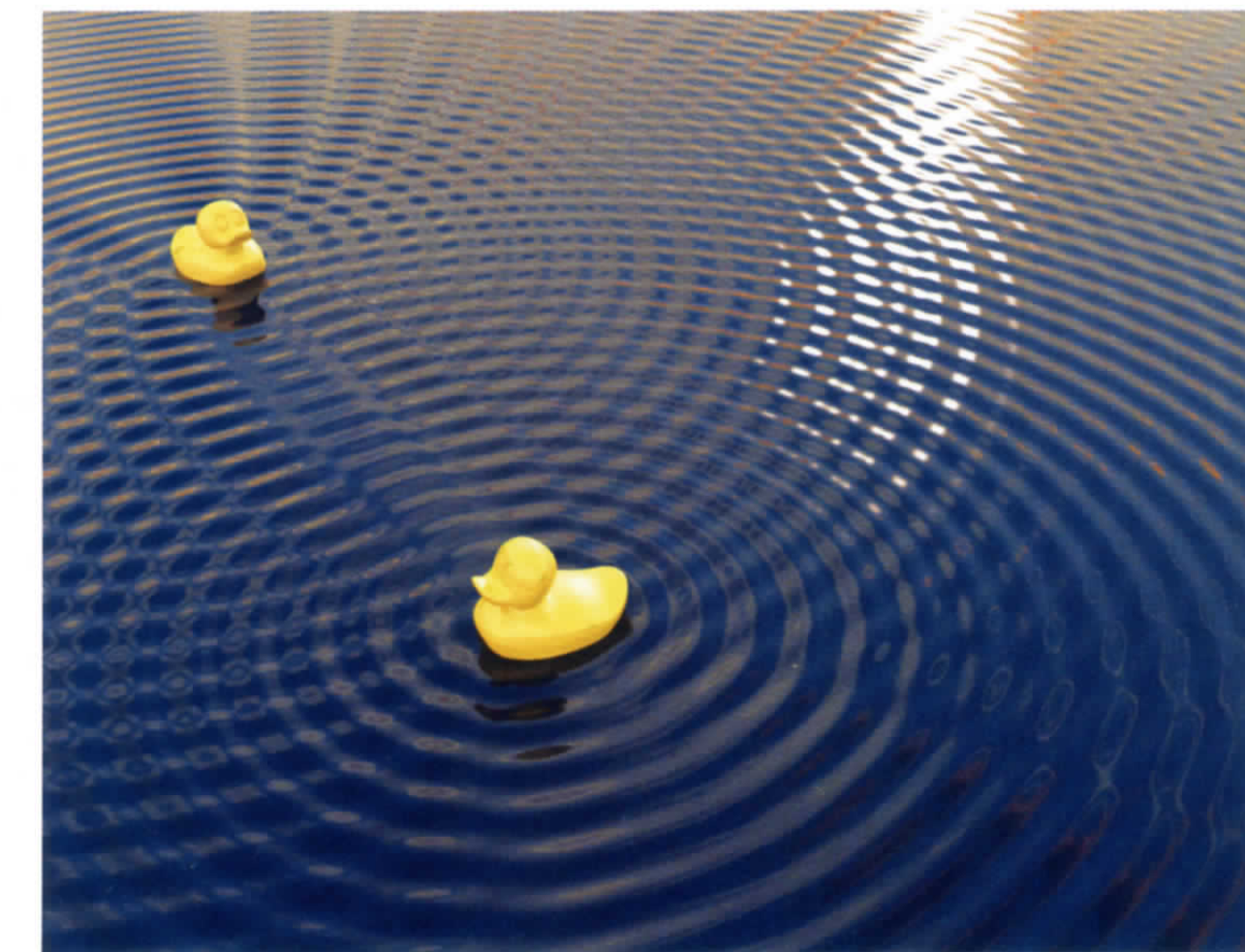
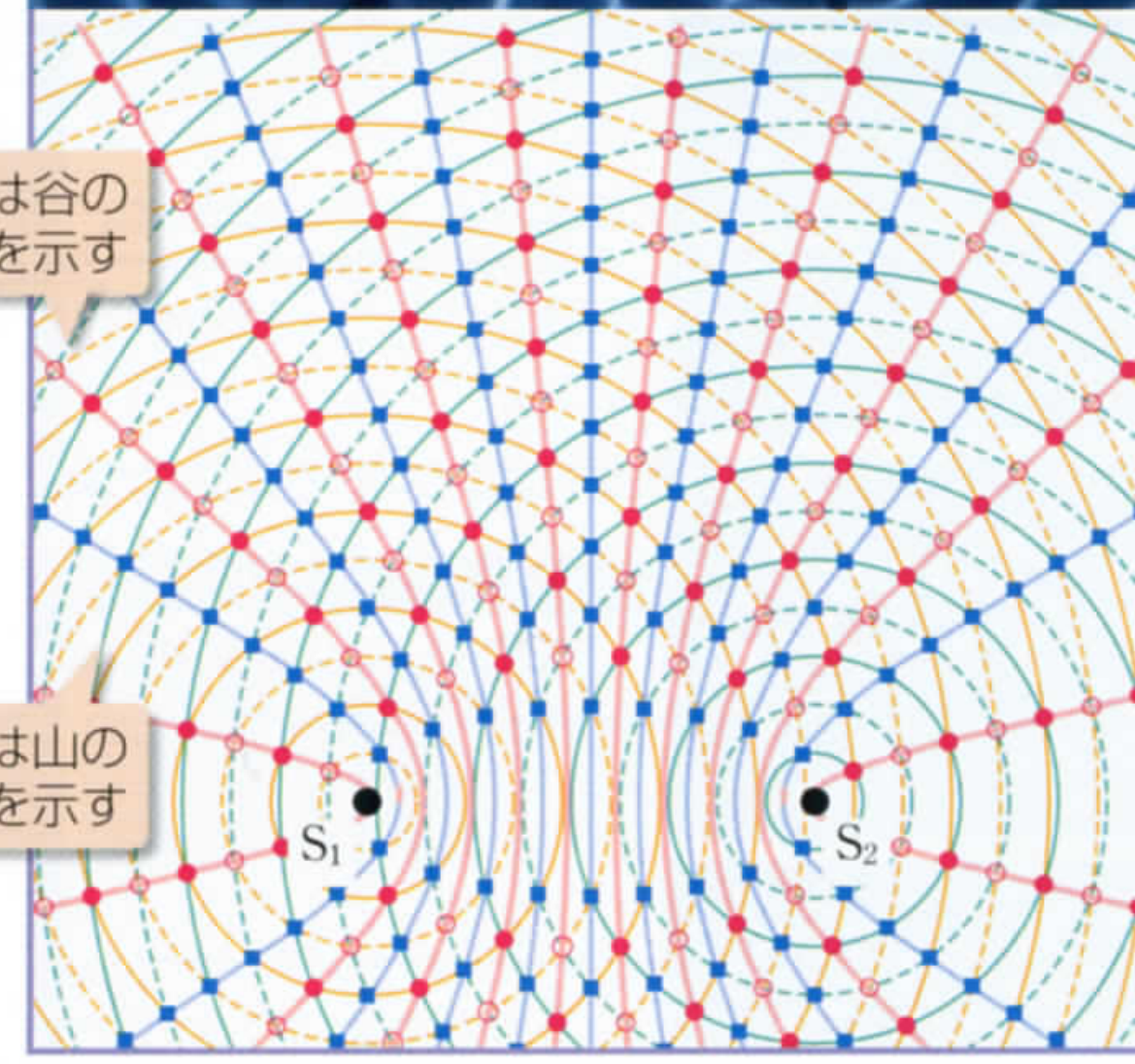
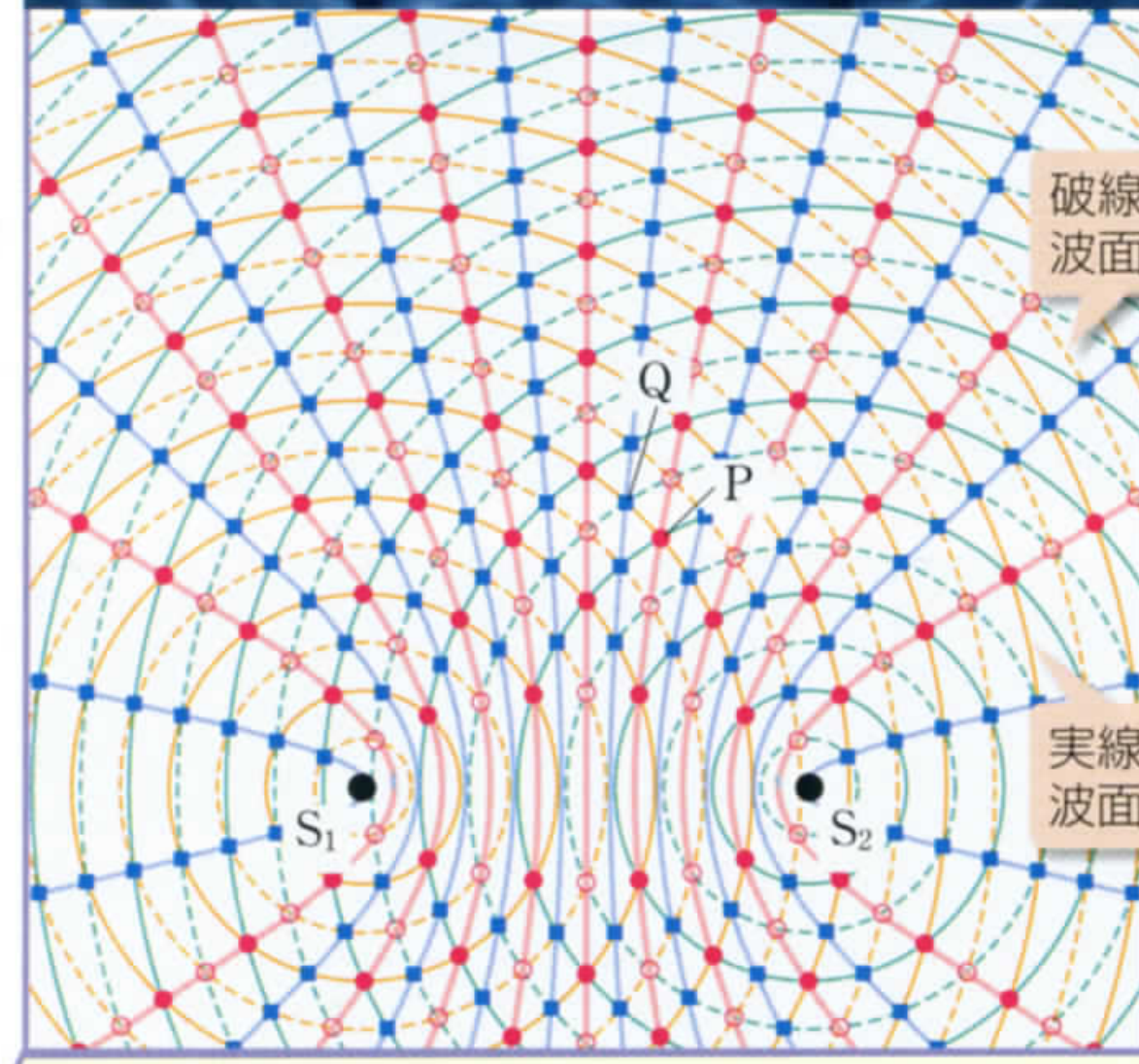
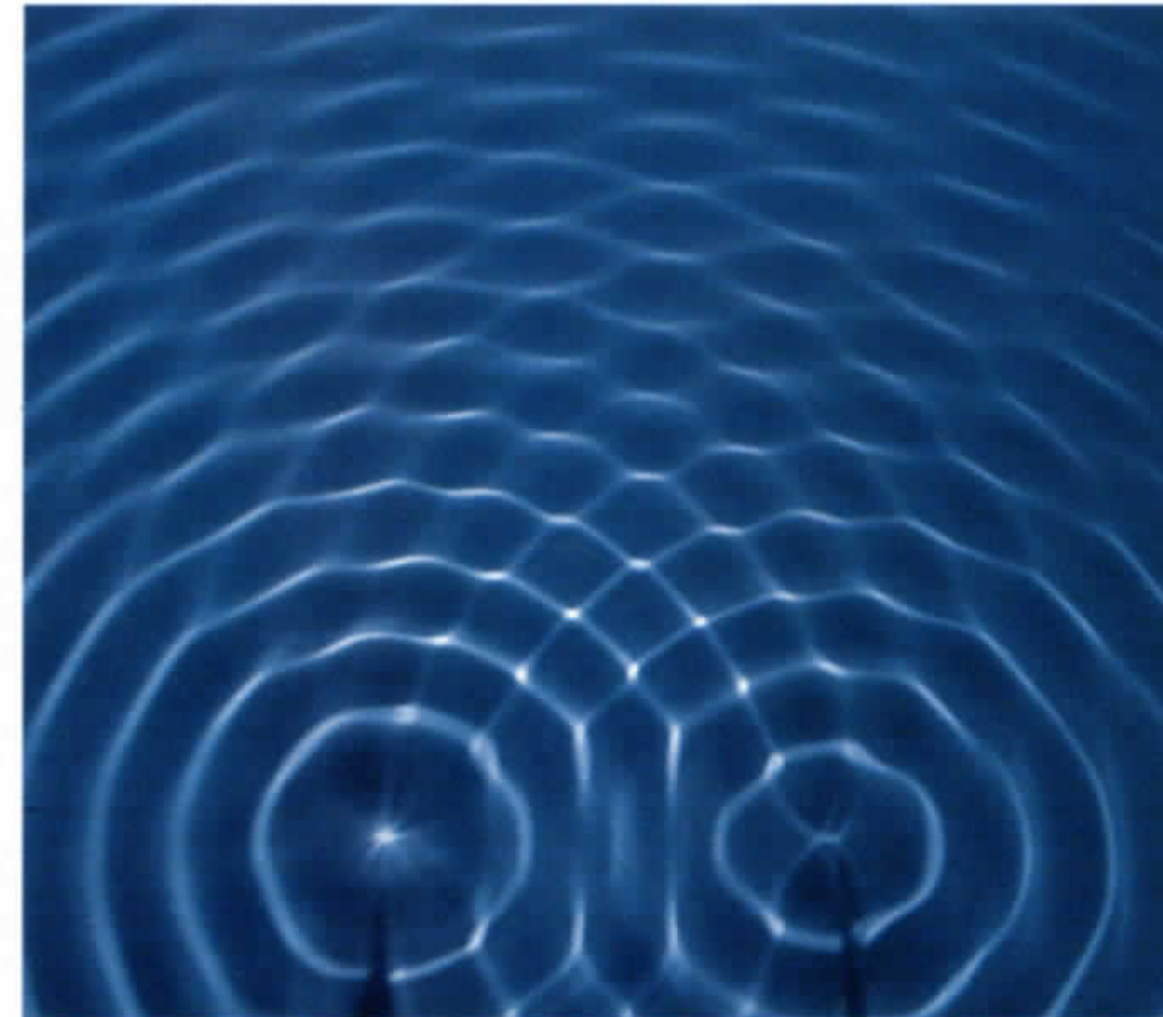
合成された波が、互いに強めあったり弱めあったりする現象を、干渉という。

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



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



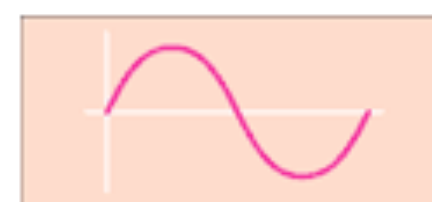
※航空機内の音楽サービスシステムにより、ご使用になれない場合があります
※航空機内で電子機器の使用が禁止されている場合や、機内の音楽サービスを個人のヘッドホンで利用することが禁止されている場合は、本機を使用しないでください



■ノイズキャンセリング機能の原理

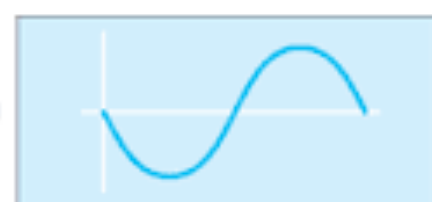


MDR-NC6
内蔵マイク



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。

→

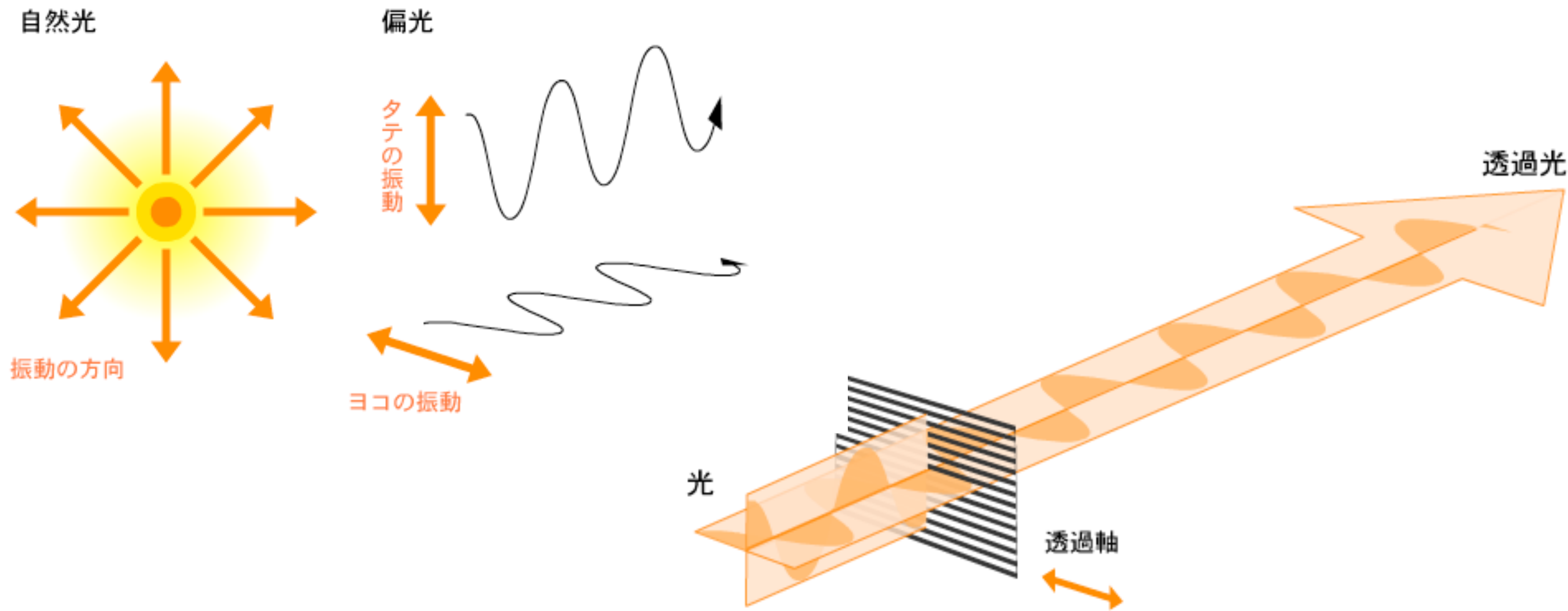


3.合成されて消えた波
元の波を反転させた逆位相の波を重ね、元の波を消去。これにより周囲の騒音を低減します。

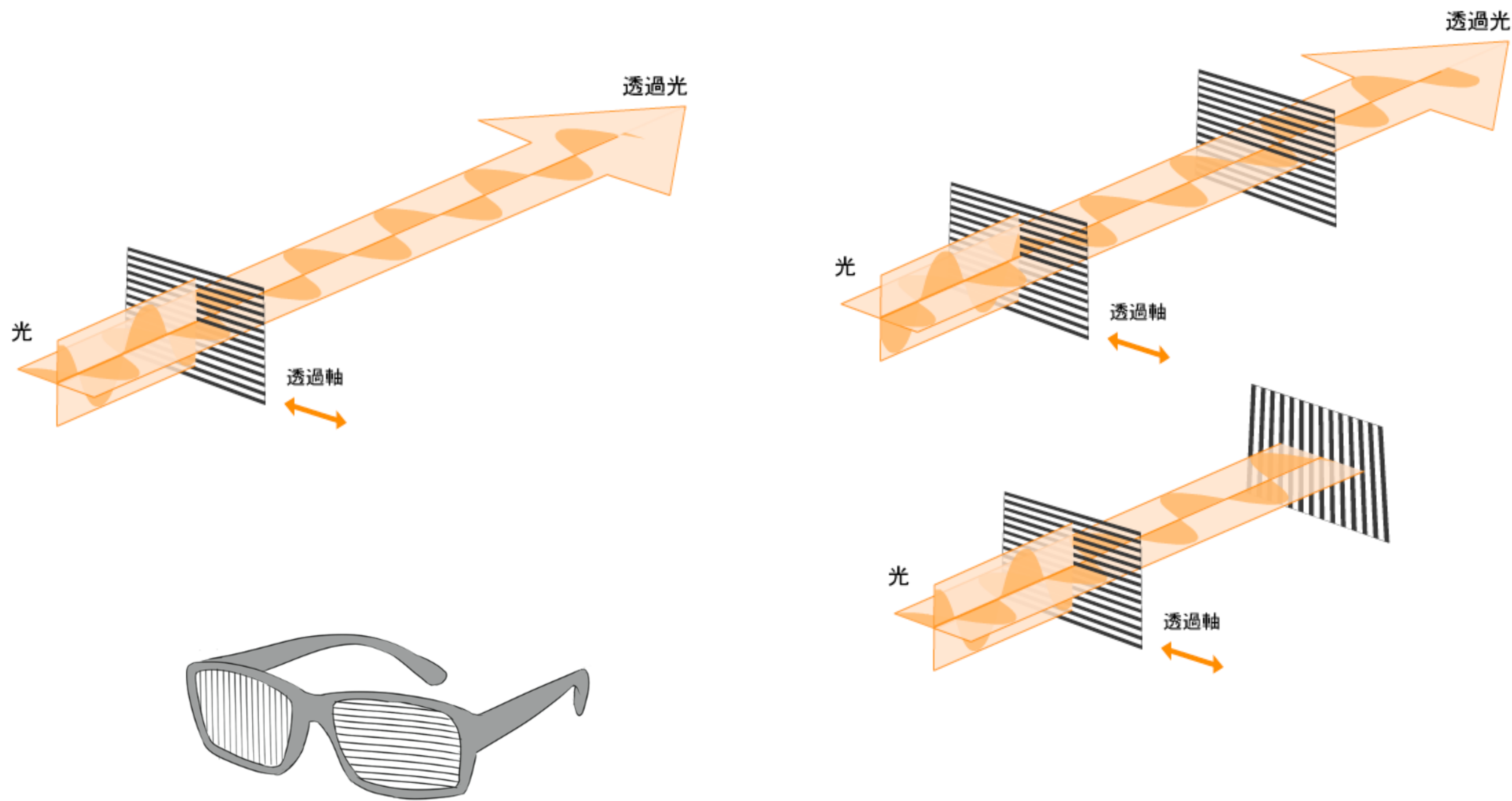
波のことは 高校生のころに少し聞いたことがある。たのびが、
あまりよく理解できていませんでした。一・二・三 産院の貝真
物理学は 難しいけど、聞いているととても楽しいです。

*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

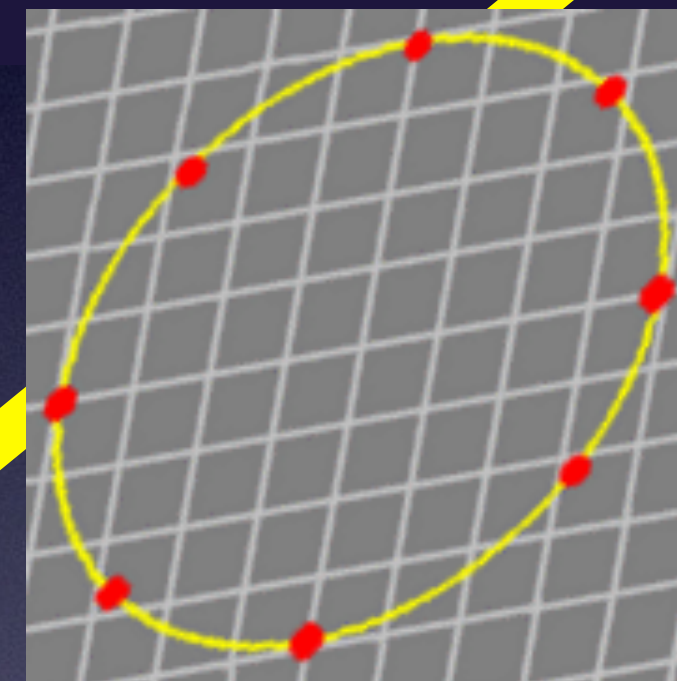
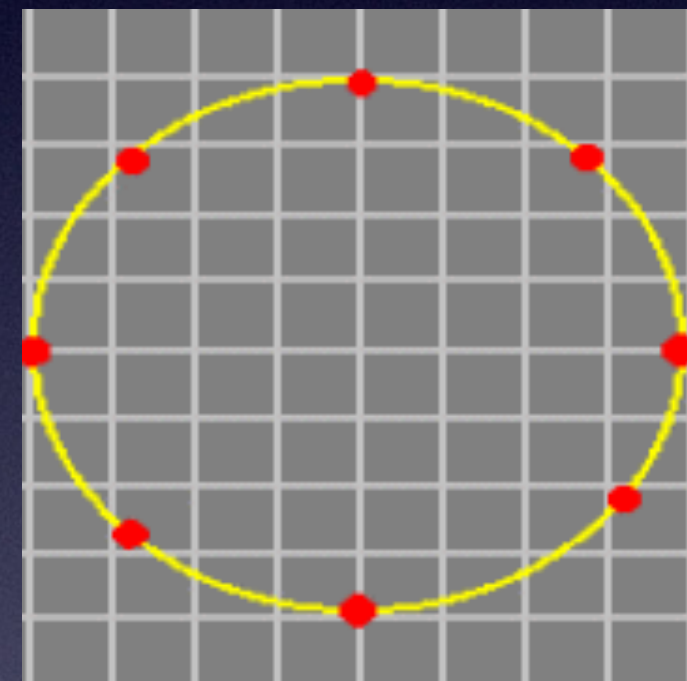
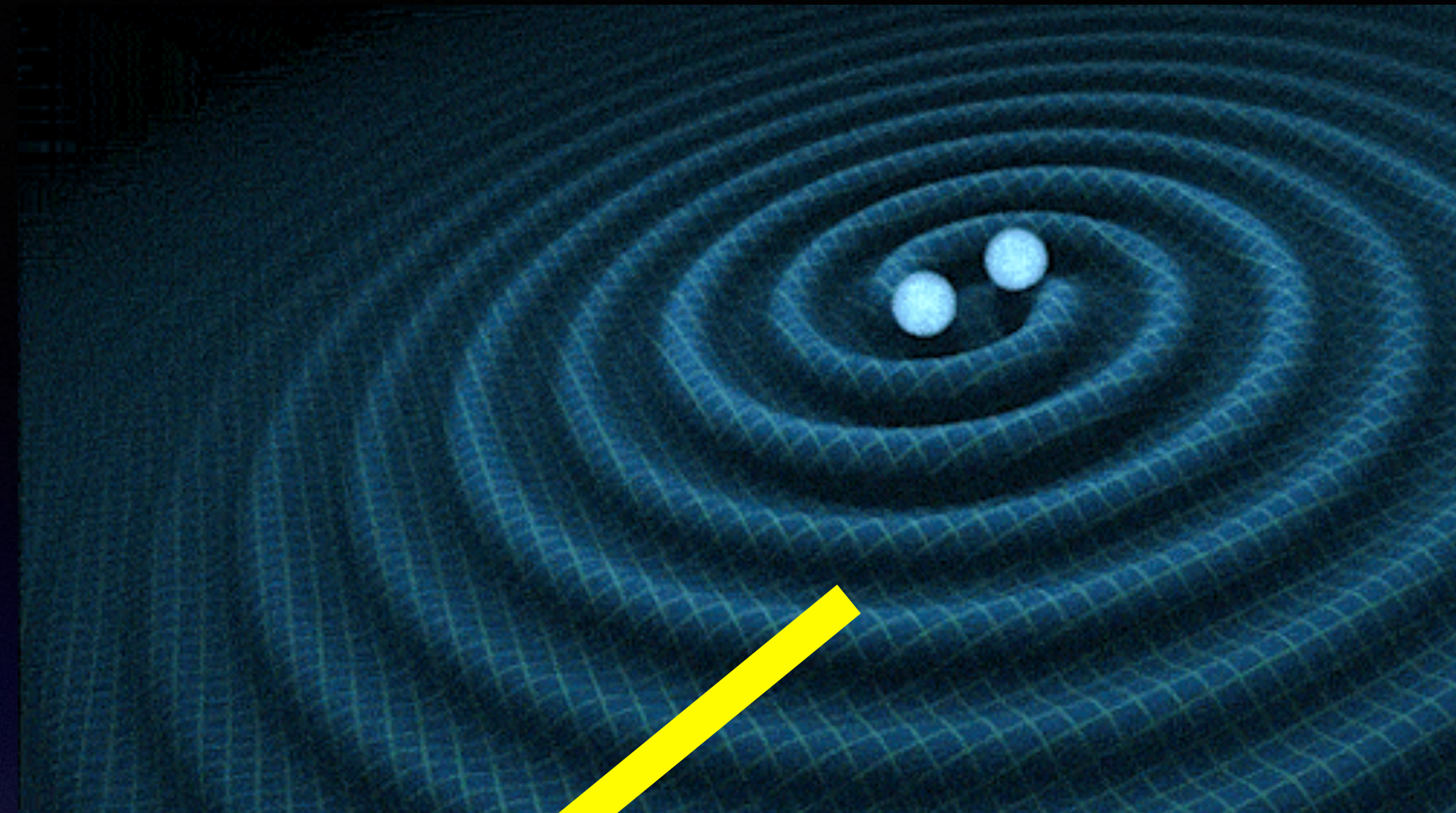
MIT Department of Physics
Technical Services Group

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



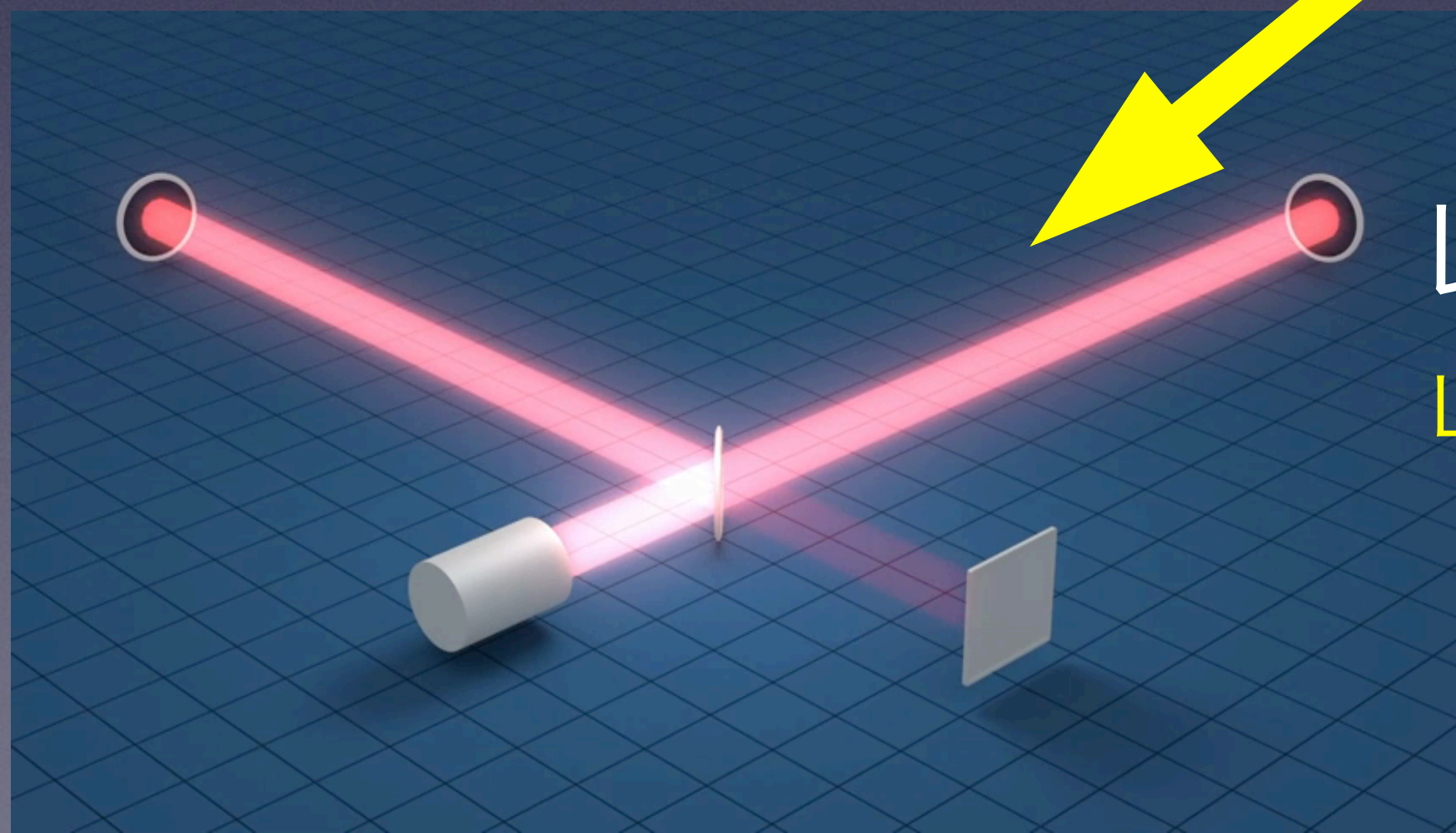
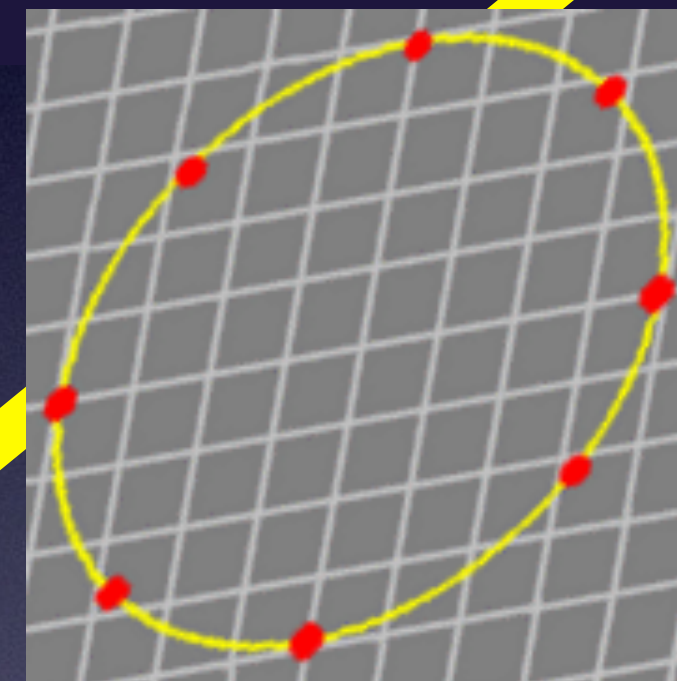
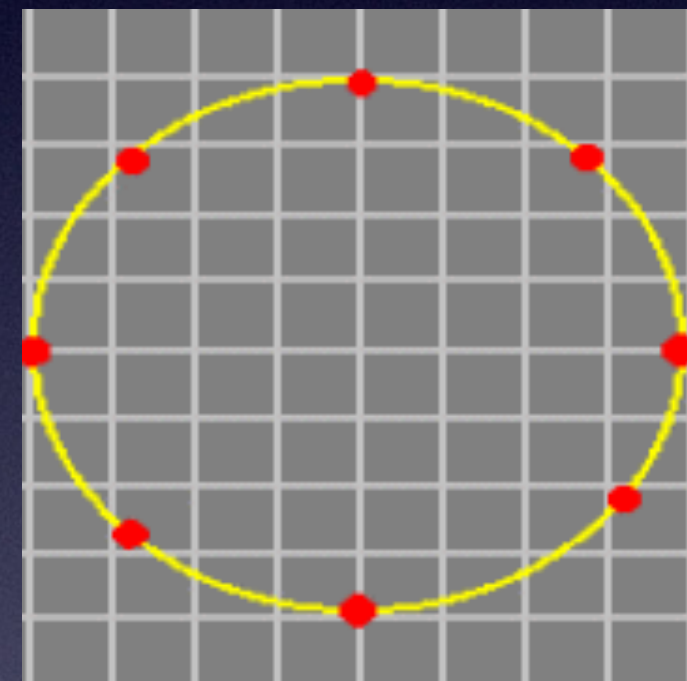
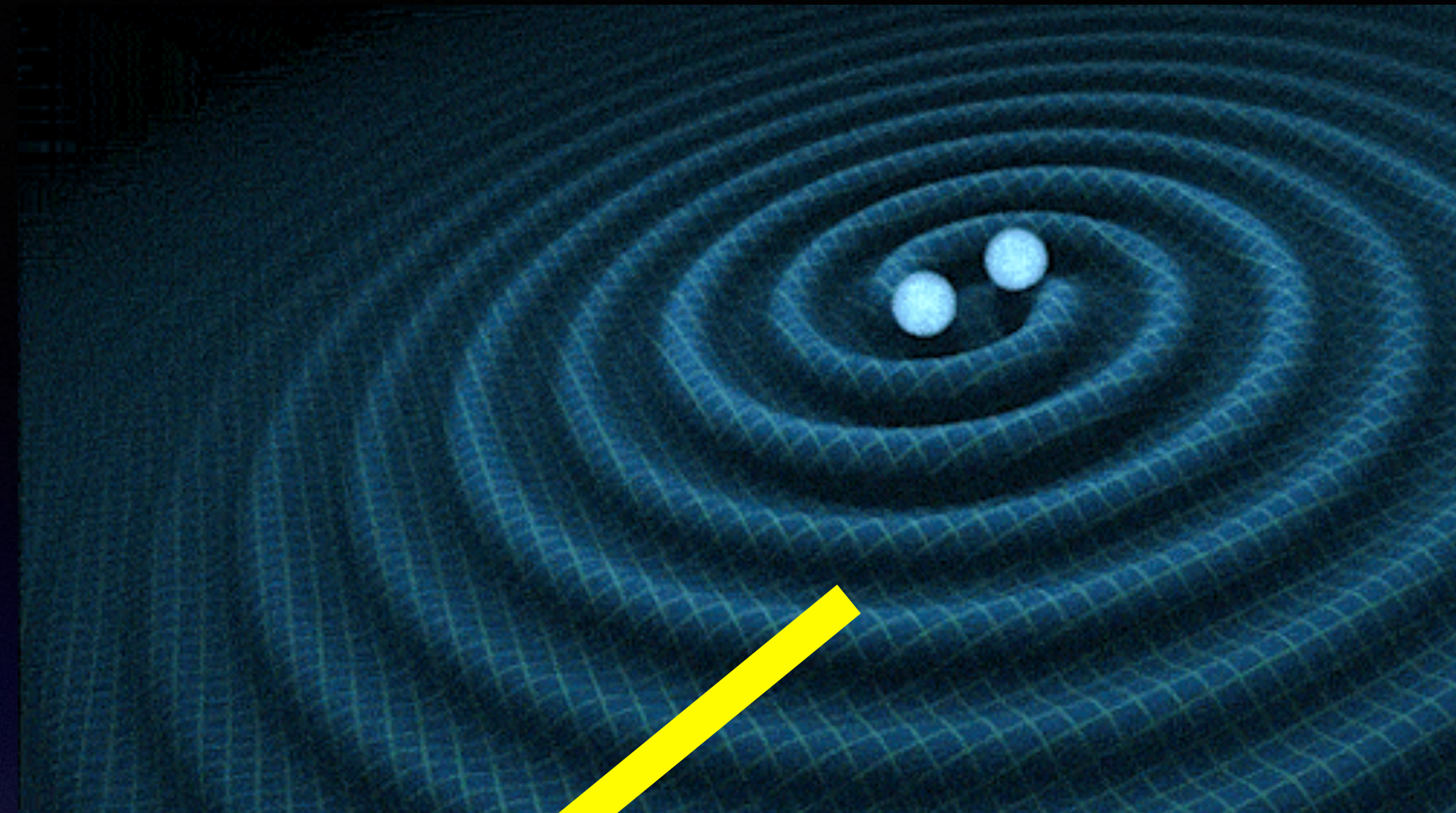
レーザー干渉計

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

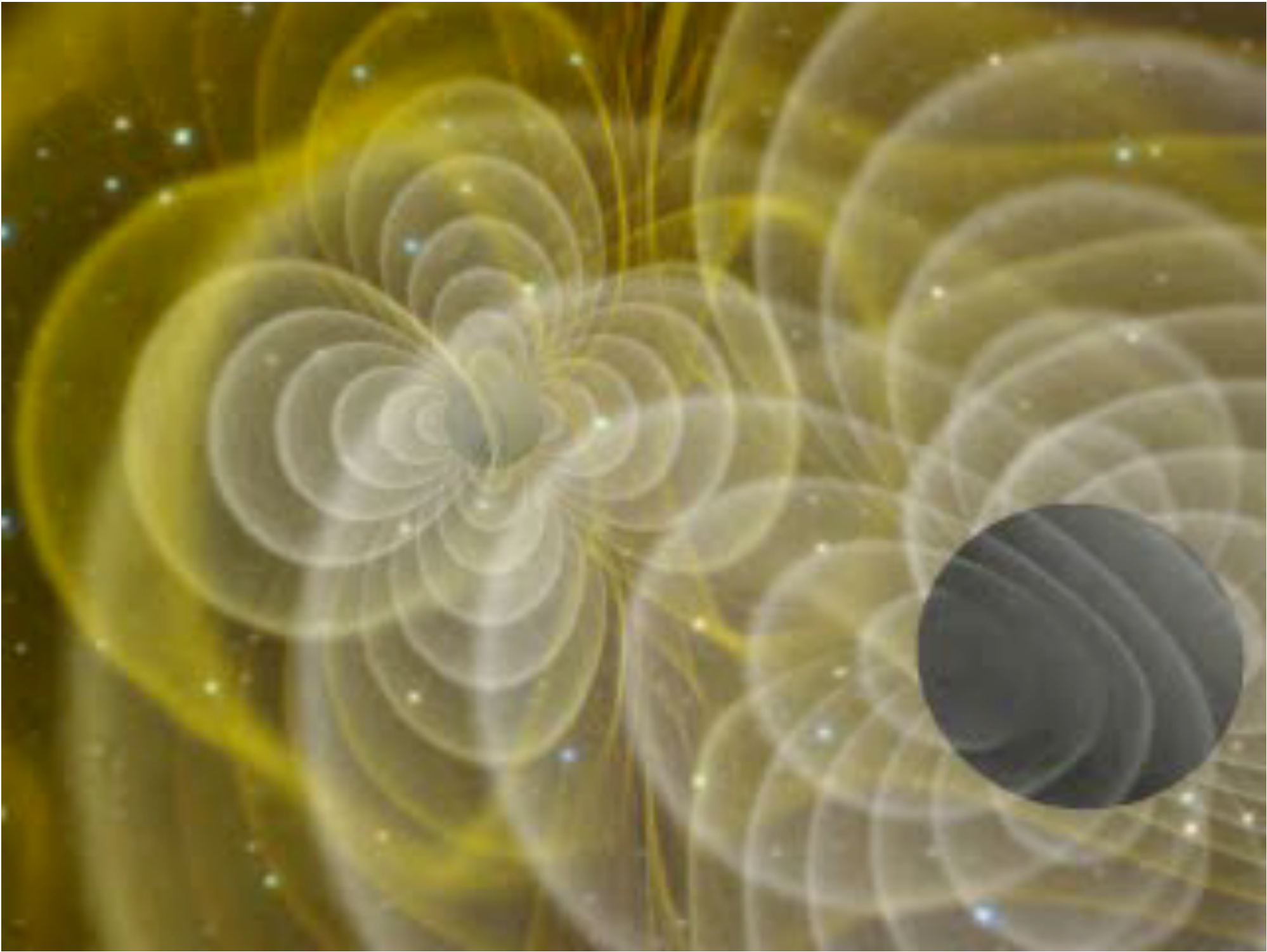


レーザー干渉計

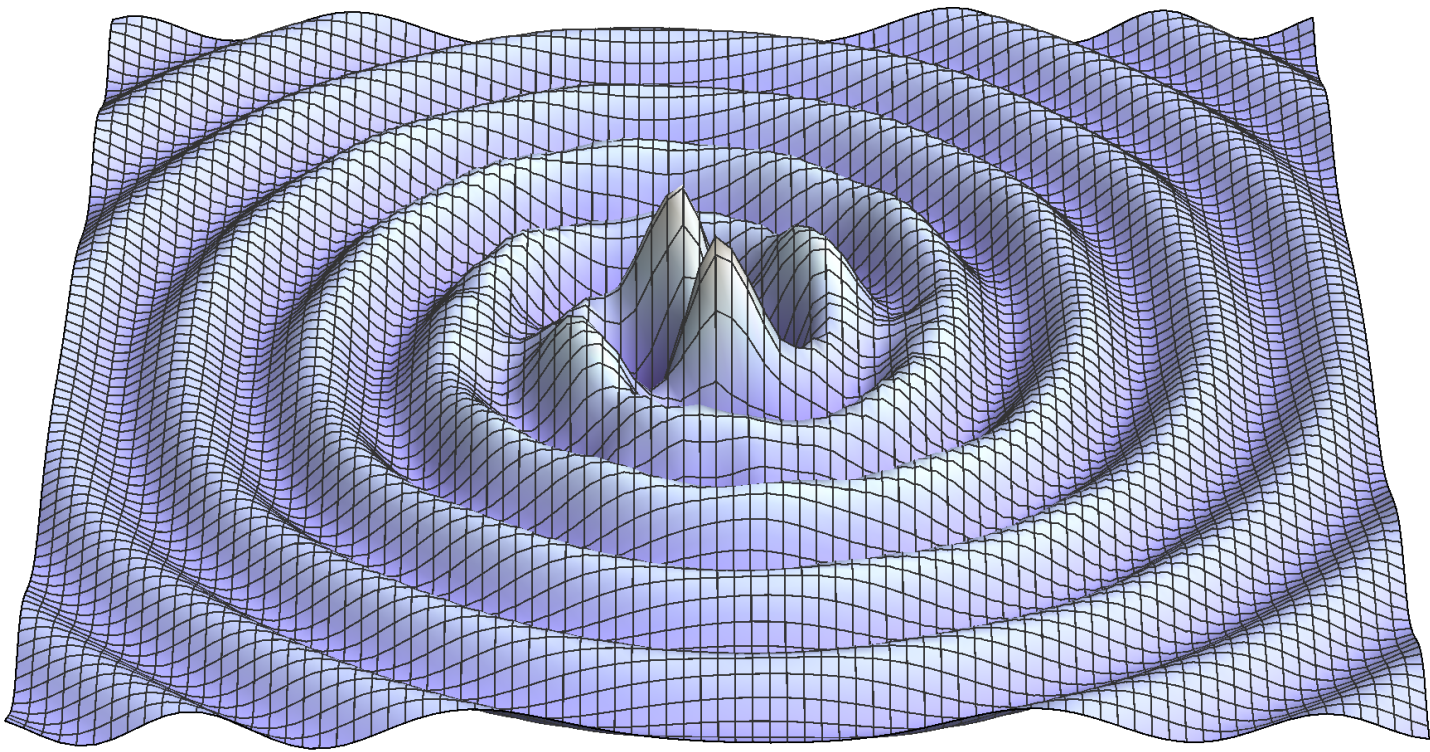
LIGO=Laser Interferometer

Gravitational-Wave Observatory

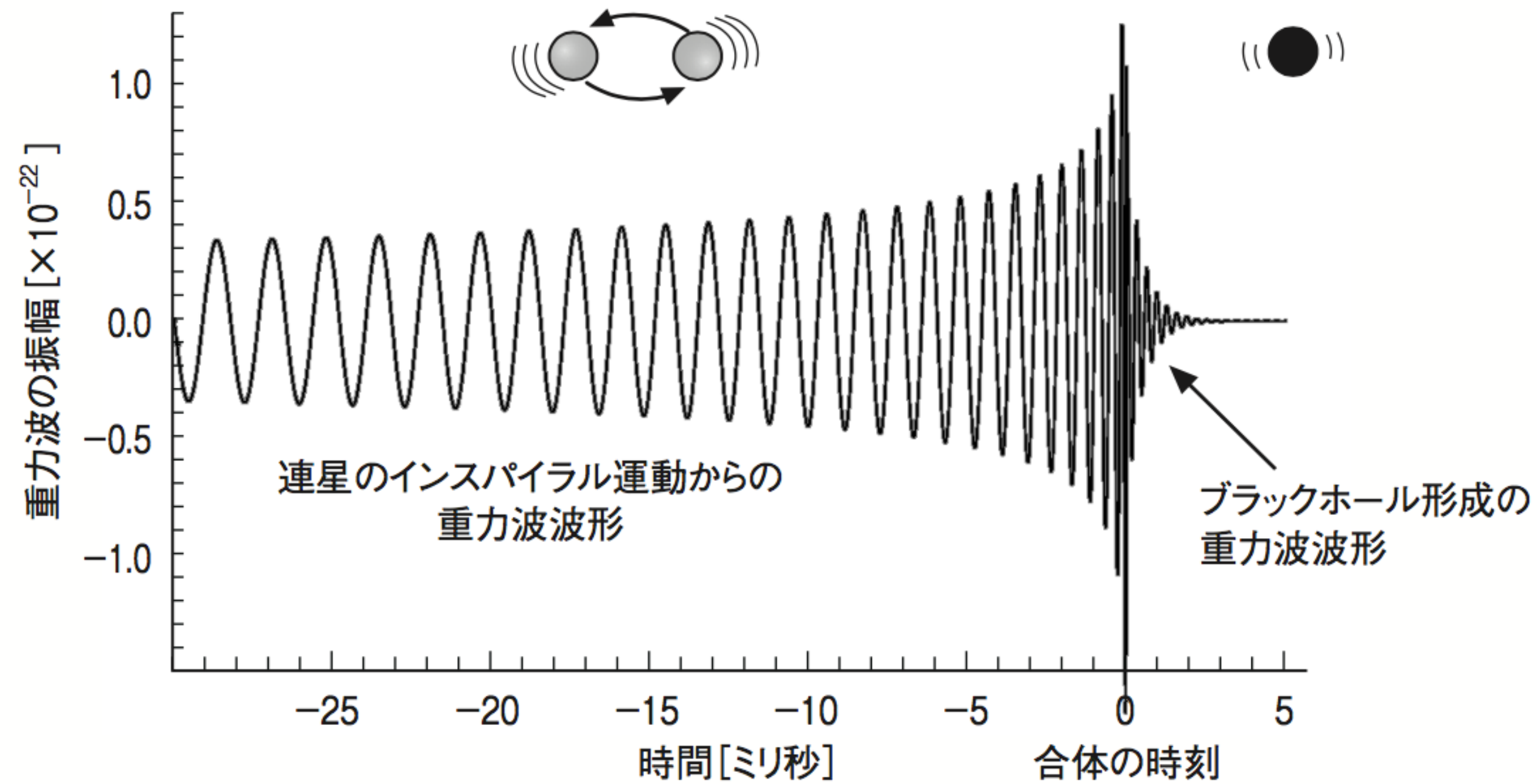
連星合体からの重力波の波形(理論予測)



(NCSA-AEIグループ, 1998年)

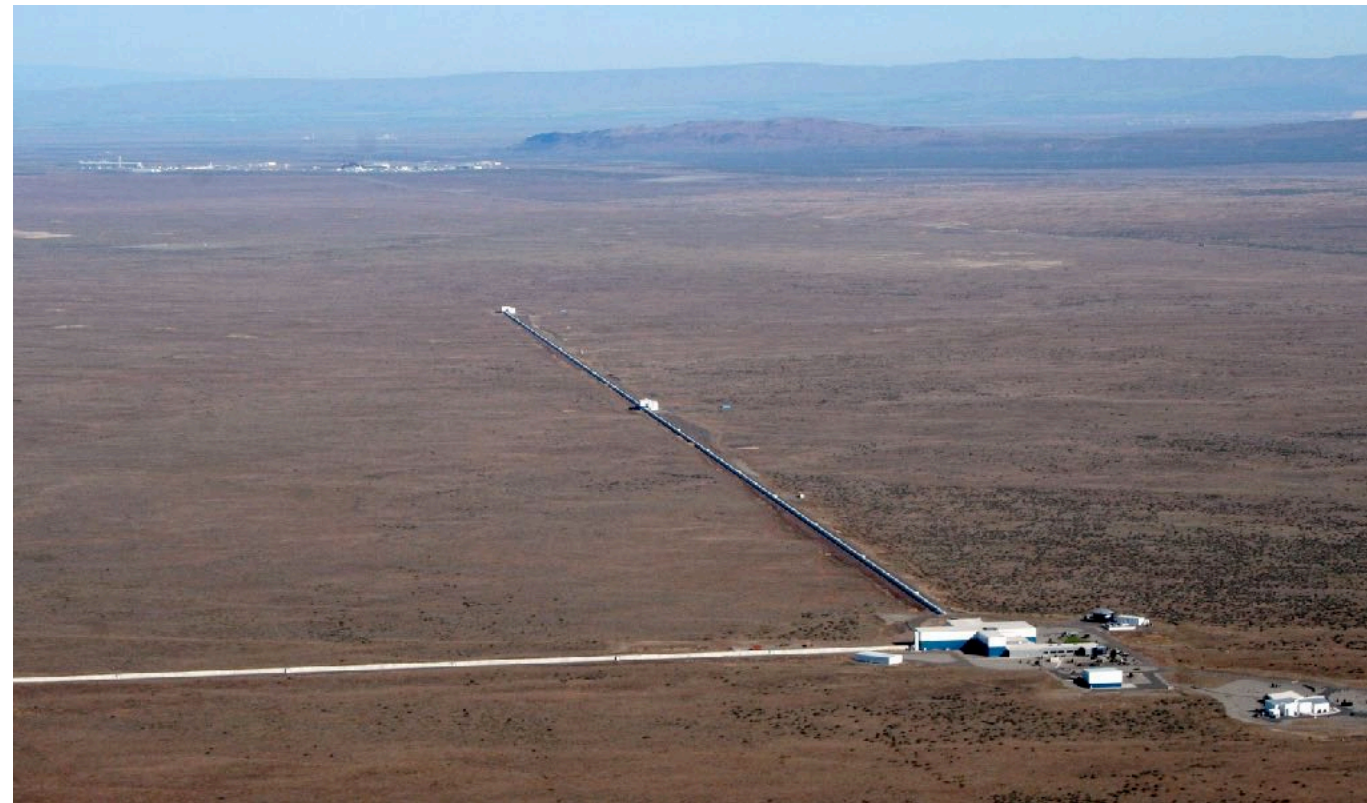


Inspiral **Merger** **Ringdown**



2023年5月から 日米欧で重力波共同観測中

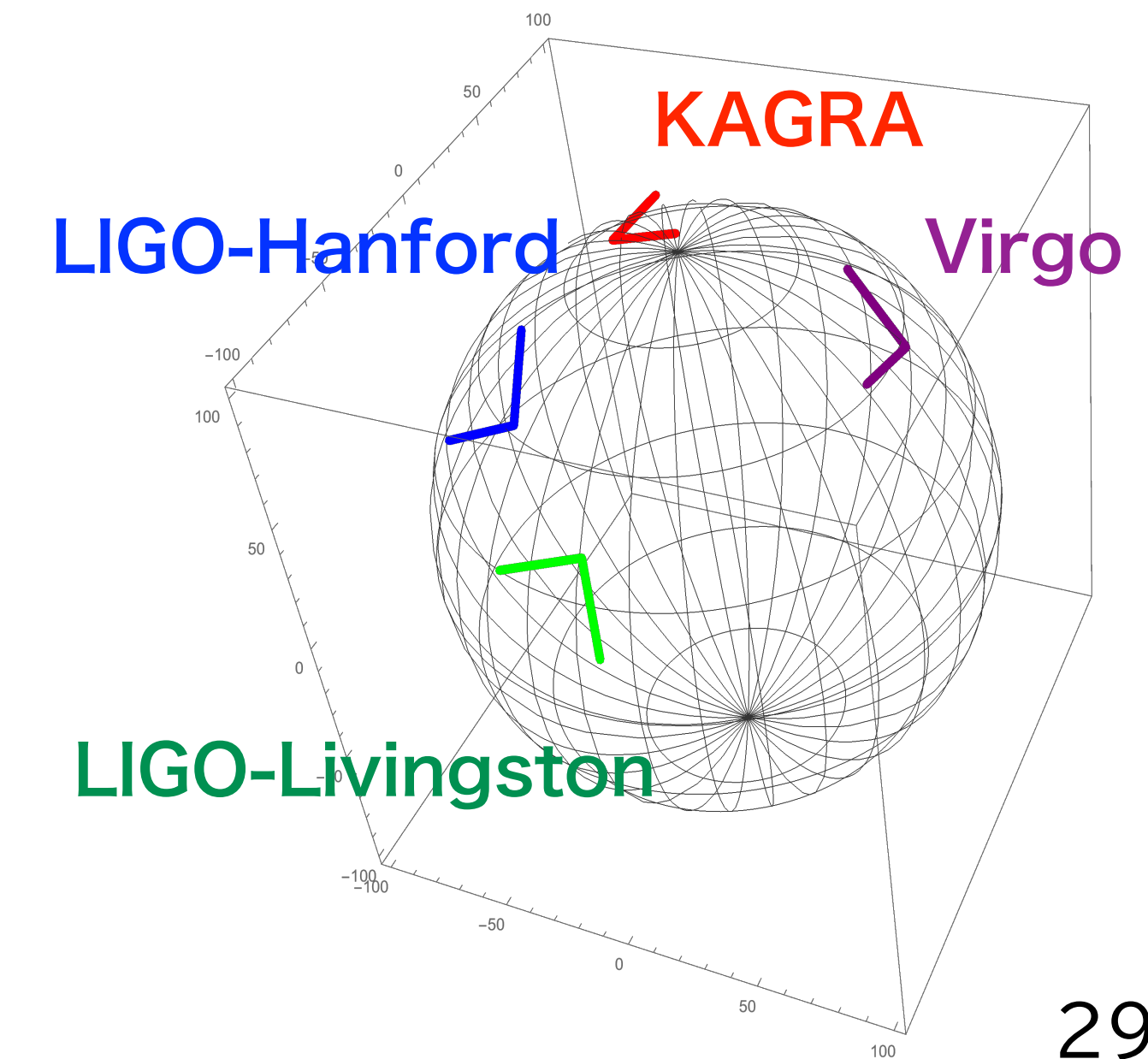
アメリカ・LIGO



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

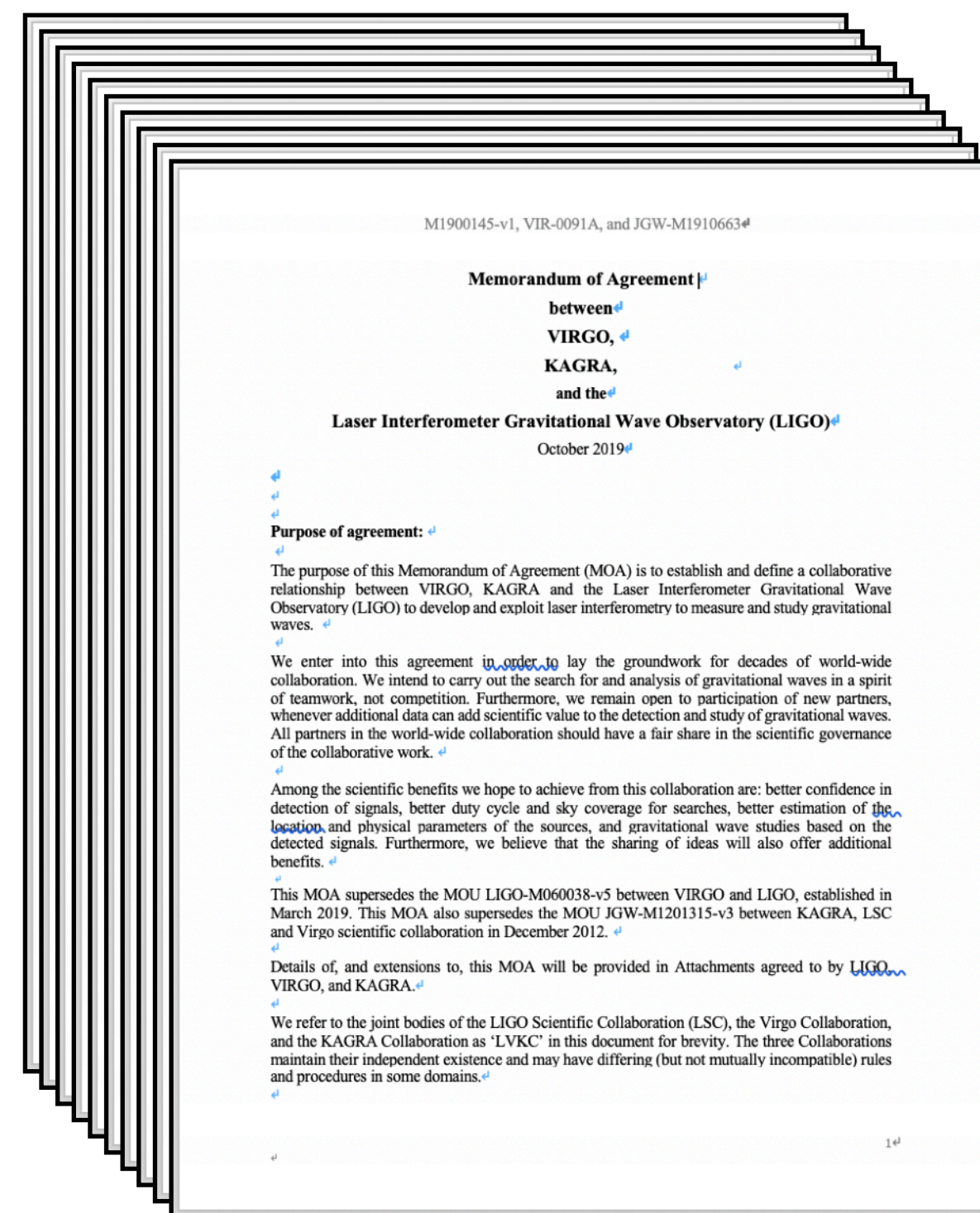
光学特性に優れ、低温に冷却すると熱伝導や機械的損失が少なくなる

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

KAGRA(かぐら:大型低温重力波望遠鏡)



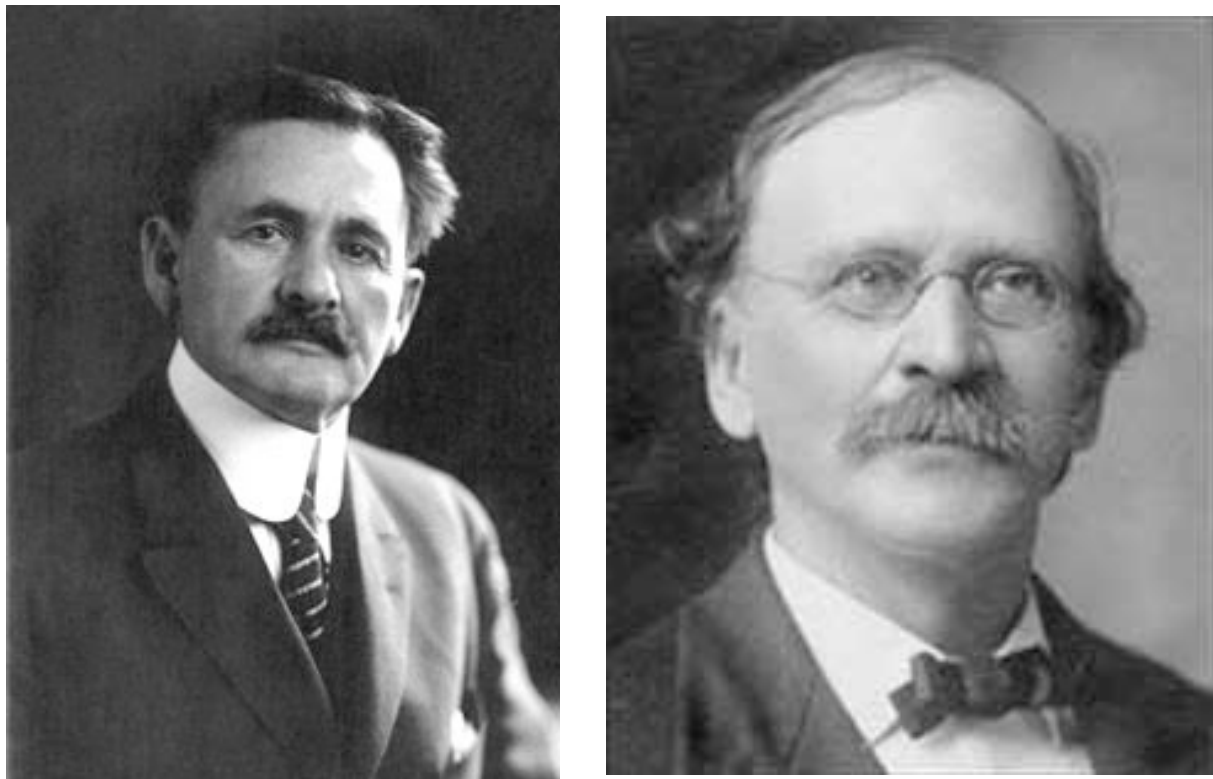
KAGRA(かぐら:大型低温重力波望遠鏡)



2019年10月, アメリカ・ヨーロッパとの研究協定に調印

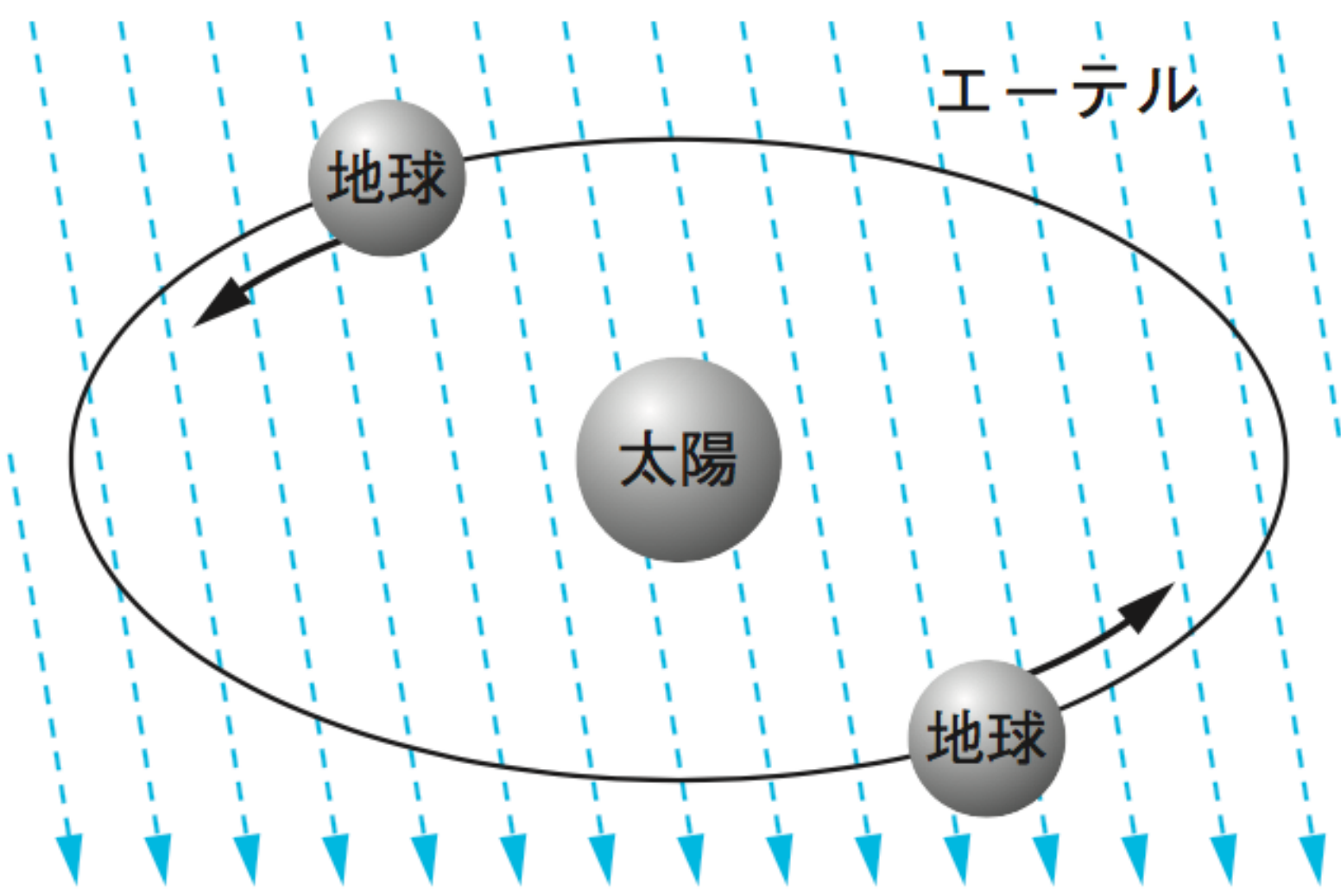
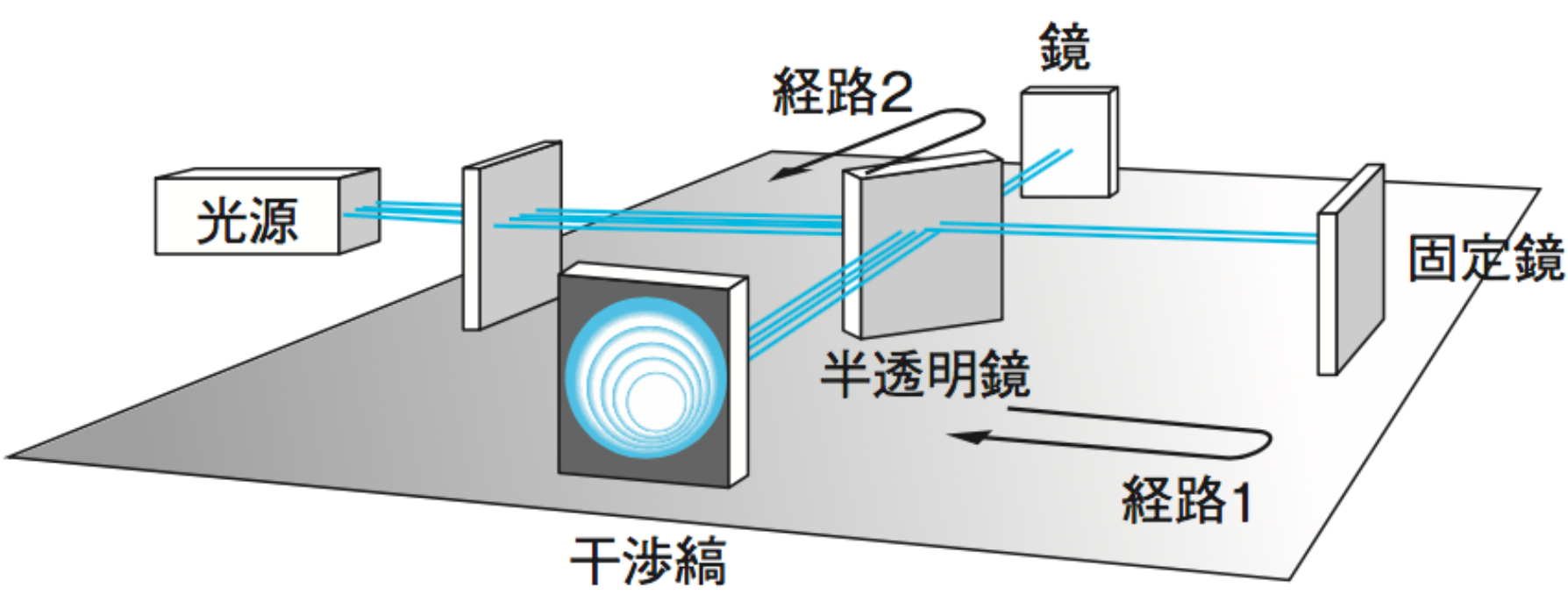
マイケルソン・モーリーの実験

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。

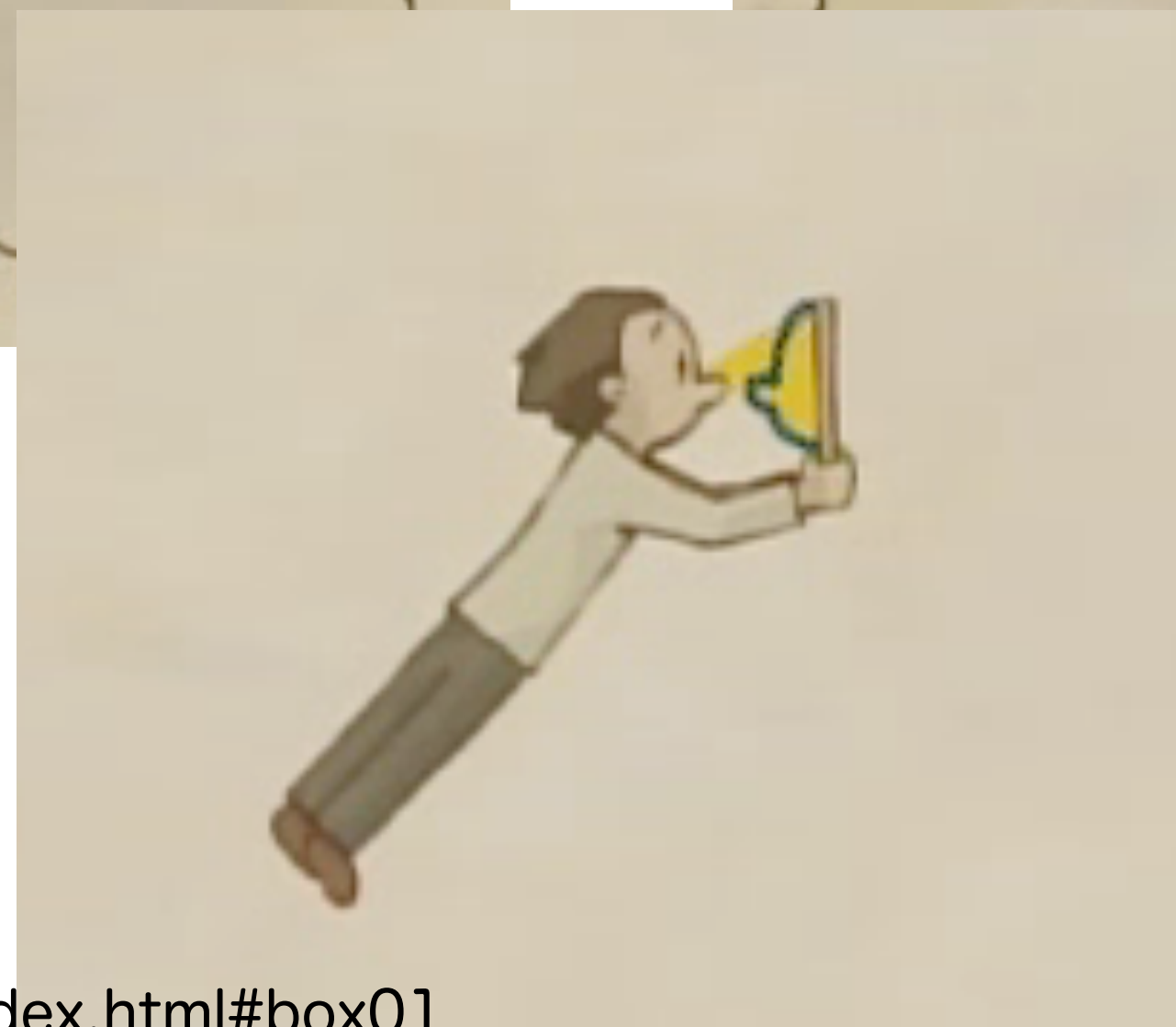
- 当時の考え：

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)

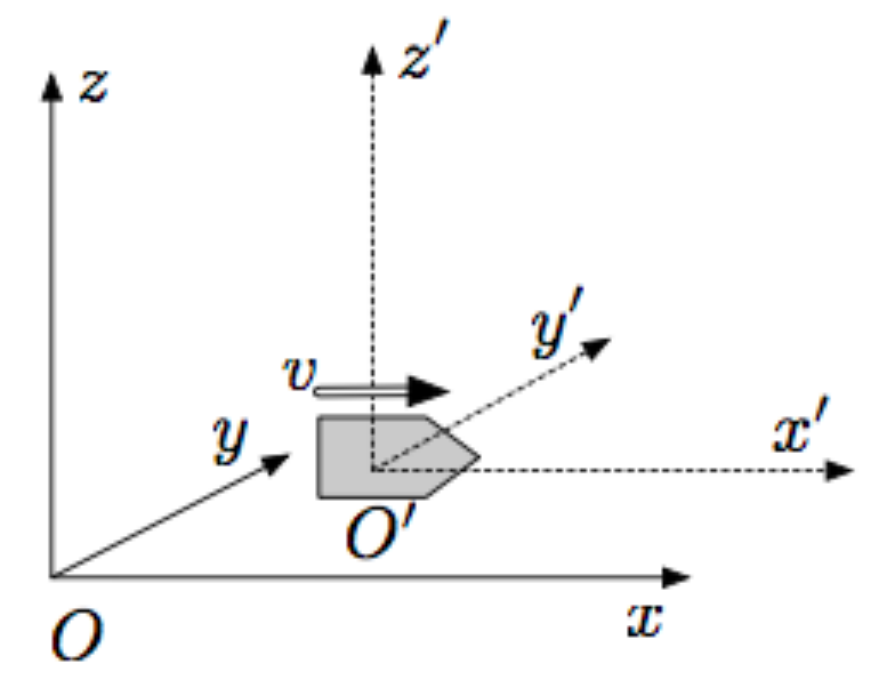


図 3.6: 静止している xyz 座標系と, 速度 v で x 方向に動いている $x'y'z'$ 座標系.

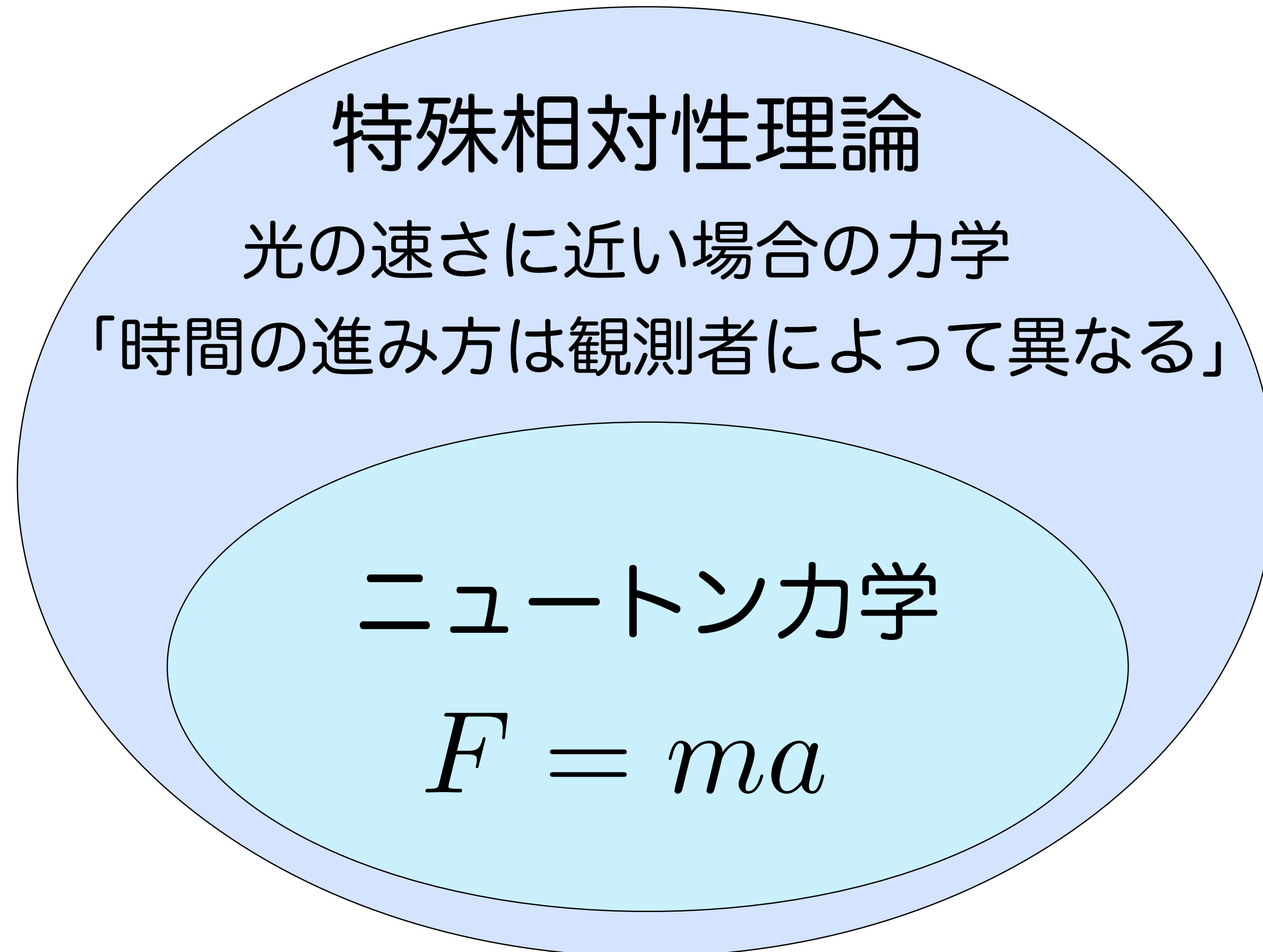
光速 + 光速 = 光速

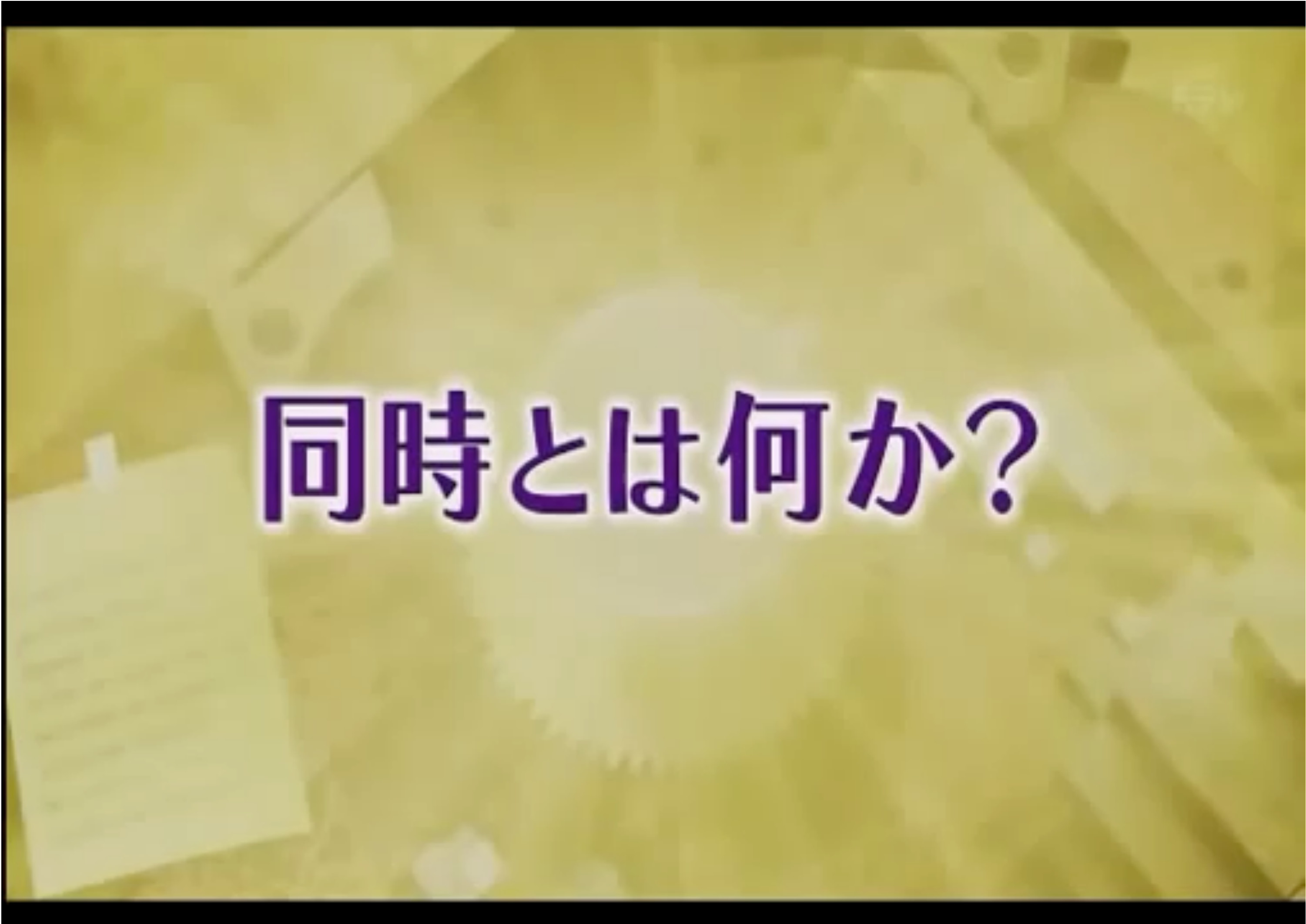
ローレンツ変換では，速度の足し算は $v_1 + v_2$ ではなく，

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

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！



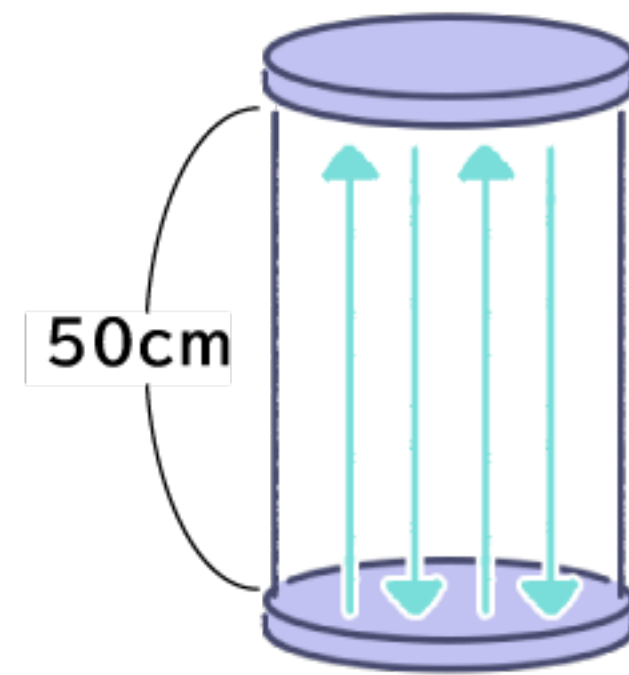


同時とは何か？

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

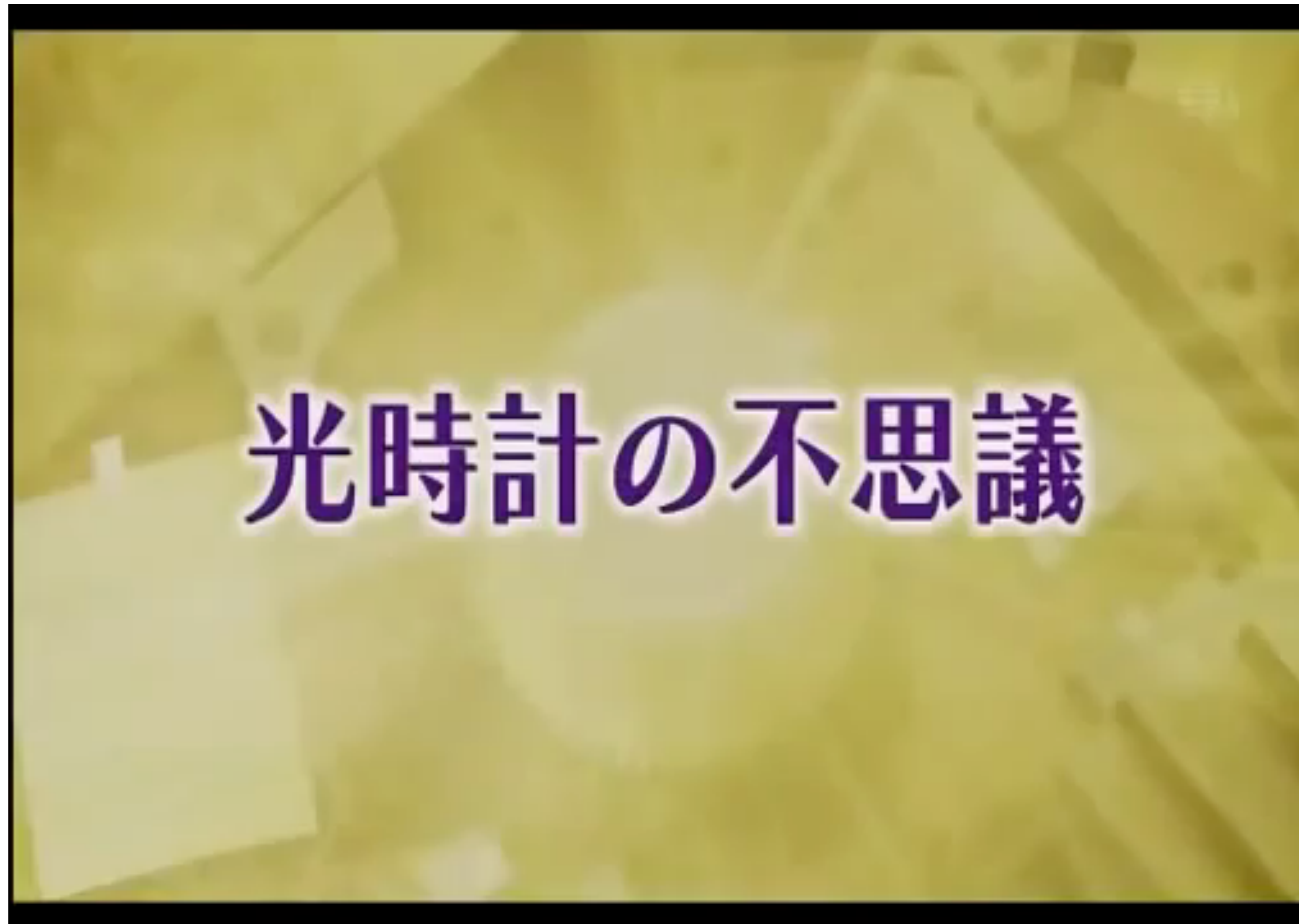
光が 2億9979万2458回往復すると
「1 秒」を刻む時計



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．

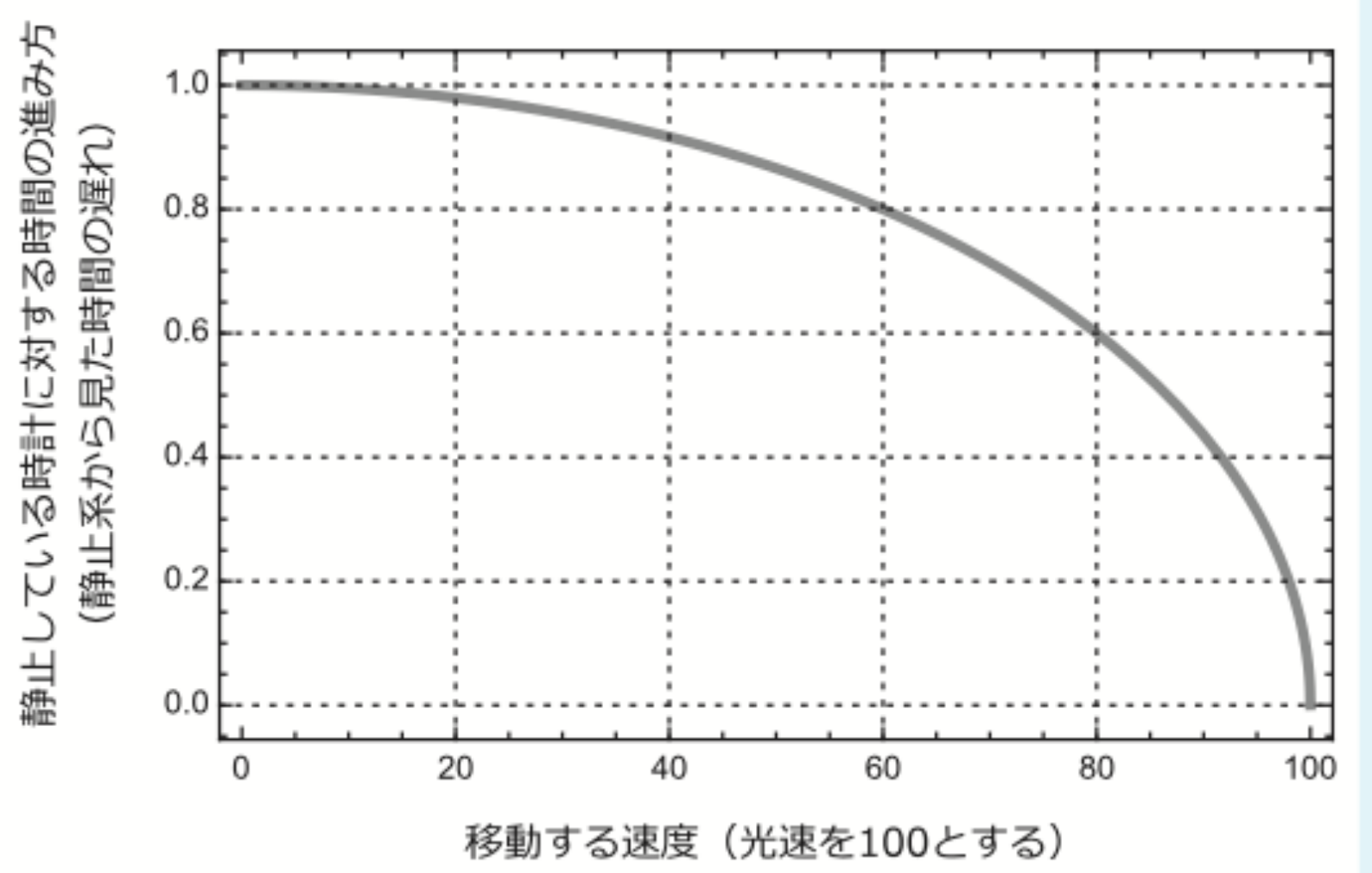
$$\Delta T' = \sqrt{1 - (v/c)^2} \Delta T \tag{3.4}$$

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



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！

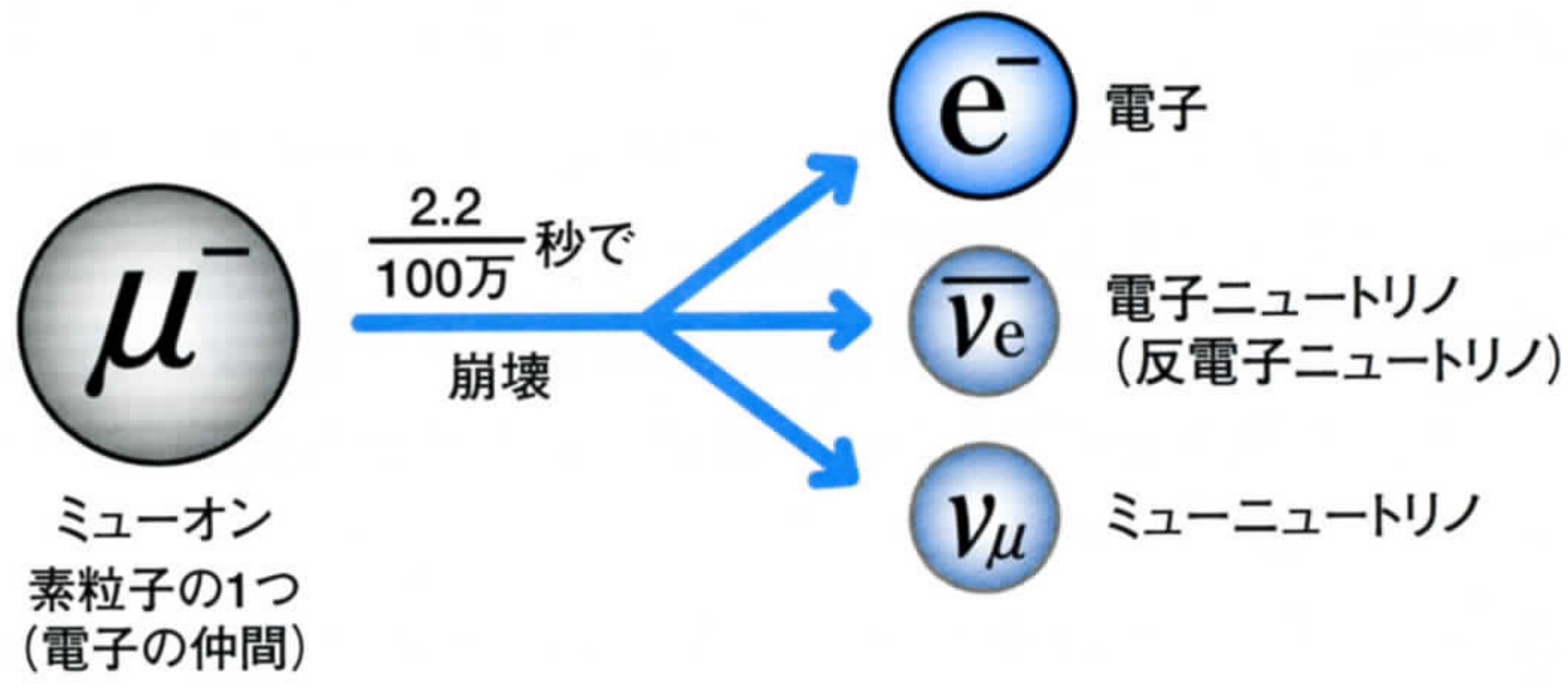
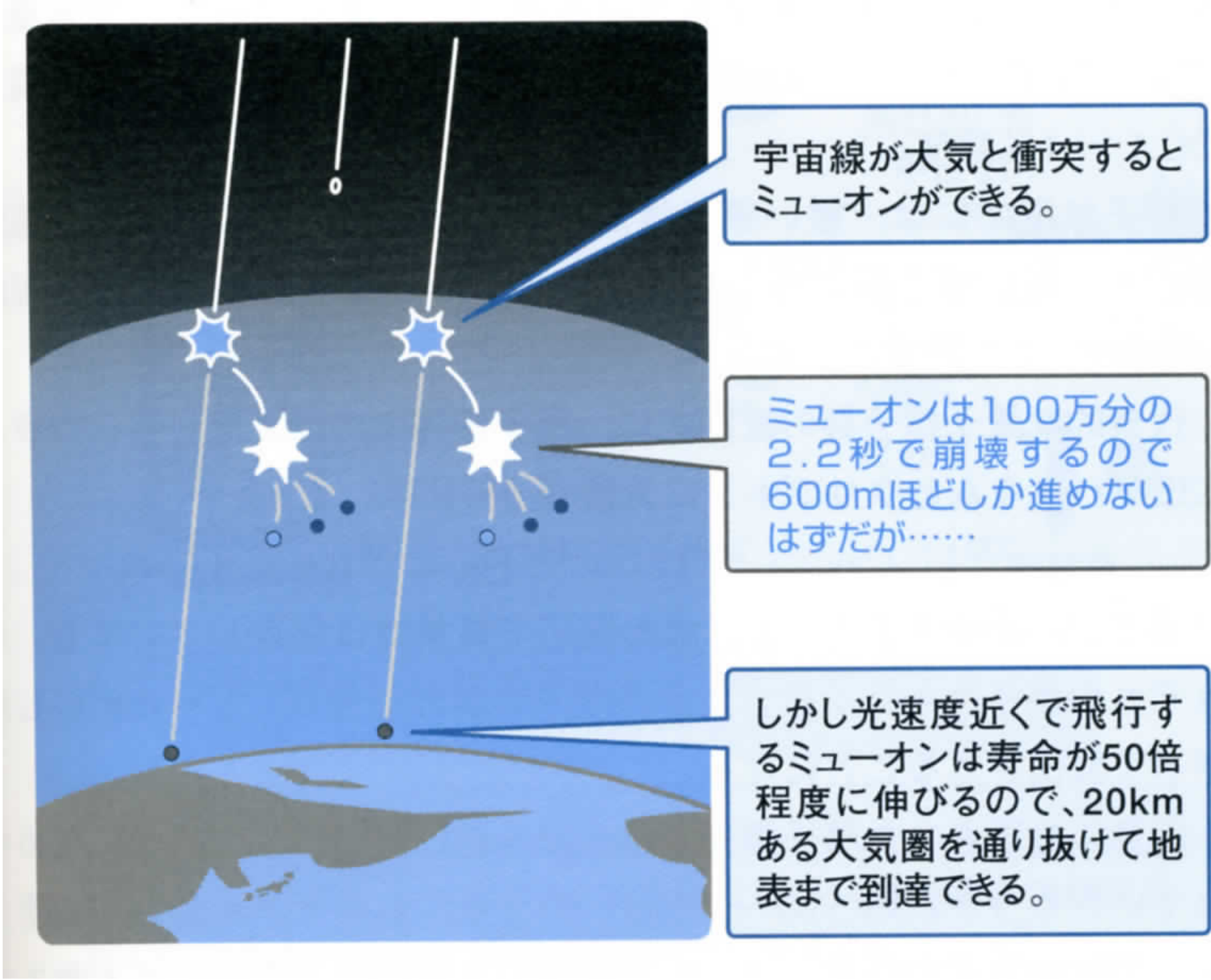
未来へ行くタイムマシンは可能

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？

今が一番好きなことを好きなようにできる時期だと思うので、未来には行きたくない。

1年後

2年後

5年後

結婚しているか、子供がいるか見てみたい。

15年後

20年後

6年後

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ります。

10年ほど前に変わりが
あまりないと思う。

6年後、国試に合格しているか気になります。

2044年の未来へ行ってみよう。

6年後 国試に受かっているか、大学卒業できているか、
どうやって言うて明治とかの過去へ行きたい。

30年後

50年後

8-10年後

30才ごろの自分はどんな感じか
見てみたい。

自分が生きている可能性のある中で、
いろいろな宇宙の不思議が解けるのか
興味がある。

10年後

自分がどのような生活をしているのか、
気になるから。

10年後、自分が上手く生活しているか気になります。

10年後の未来。次の誕生日で二十歳になるので、
丁度良い区切りだと思えるから。

前回のミニツツペーパーから

未来は 11月6日です。
過去へ 行きたい。

行けるとしたら何年後の未来へ行ってみたいですか？

100年後

自分が絶対に生きておらず、見ることはできない世界であり、100年の間の科学の発展はすごいと思うから。

150年後

私は自分がまだ生きているかもしれない時代の未来は見たくないので、おそらくもういないと思う150年後を見たいです。

長生きできたとしても知り得ない近い未来を見たいから。

150年以降。いそ自分が死んだ後を見たいから。

ドゥエモンがいた 22世紀

先生は何年後に行きたいですか。

500年後

1000年後

自分が生きていないような1000年後に行ってみたいです

人間がまだ存在しているか知りたい。

それまでのことは歴史として知ることが出来るので、とりあえず1000年

2-3000年後

2、3千年後の未来に行きたい。自身が確実に生きていない時代の地球を見たい。未来の技術や科学の進展を目の当たりにすることで、人類の発展を感じることができると思う。特に、医療や宇宙探索、環境問題に対する解決策など、今では考えられないような進歩を見たい。そもそも人類が生存しているのかも興味深い。ですが、2024年に帰ってくることは可能ですか？

2億年後

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

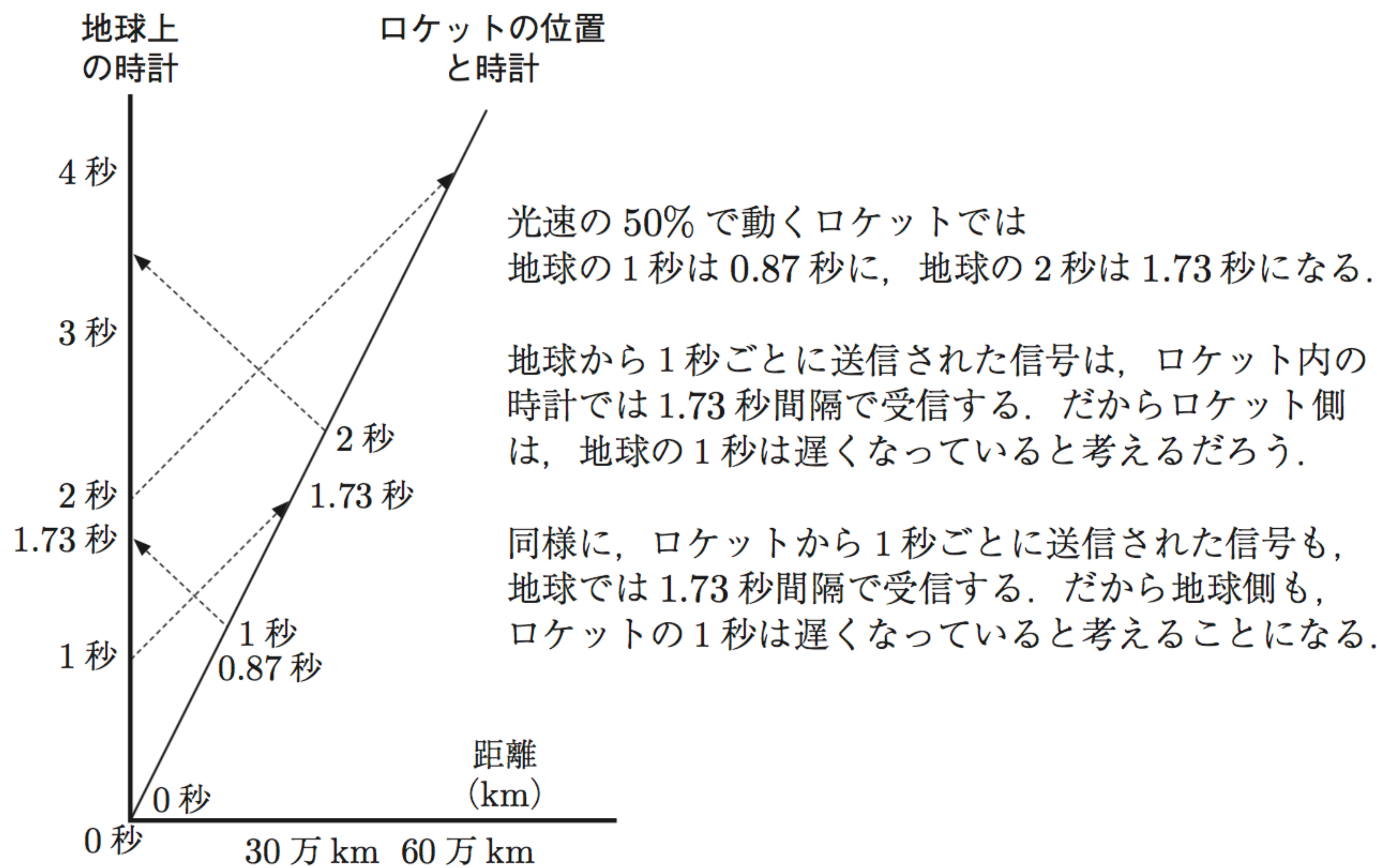


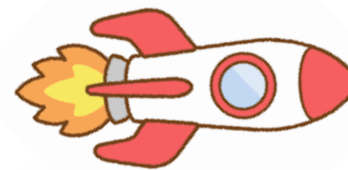
図 3.16 「相手の時計の方が遅れている」という主張はどちらも正しい。

双子のパラドックス

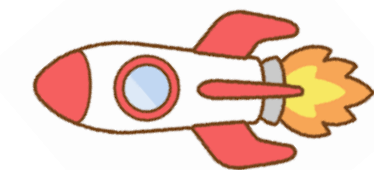
双子のパラドックス

- 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

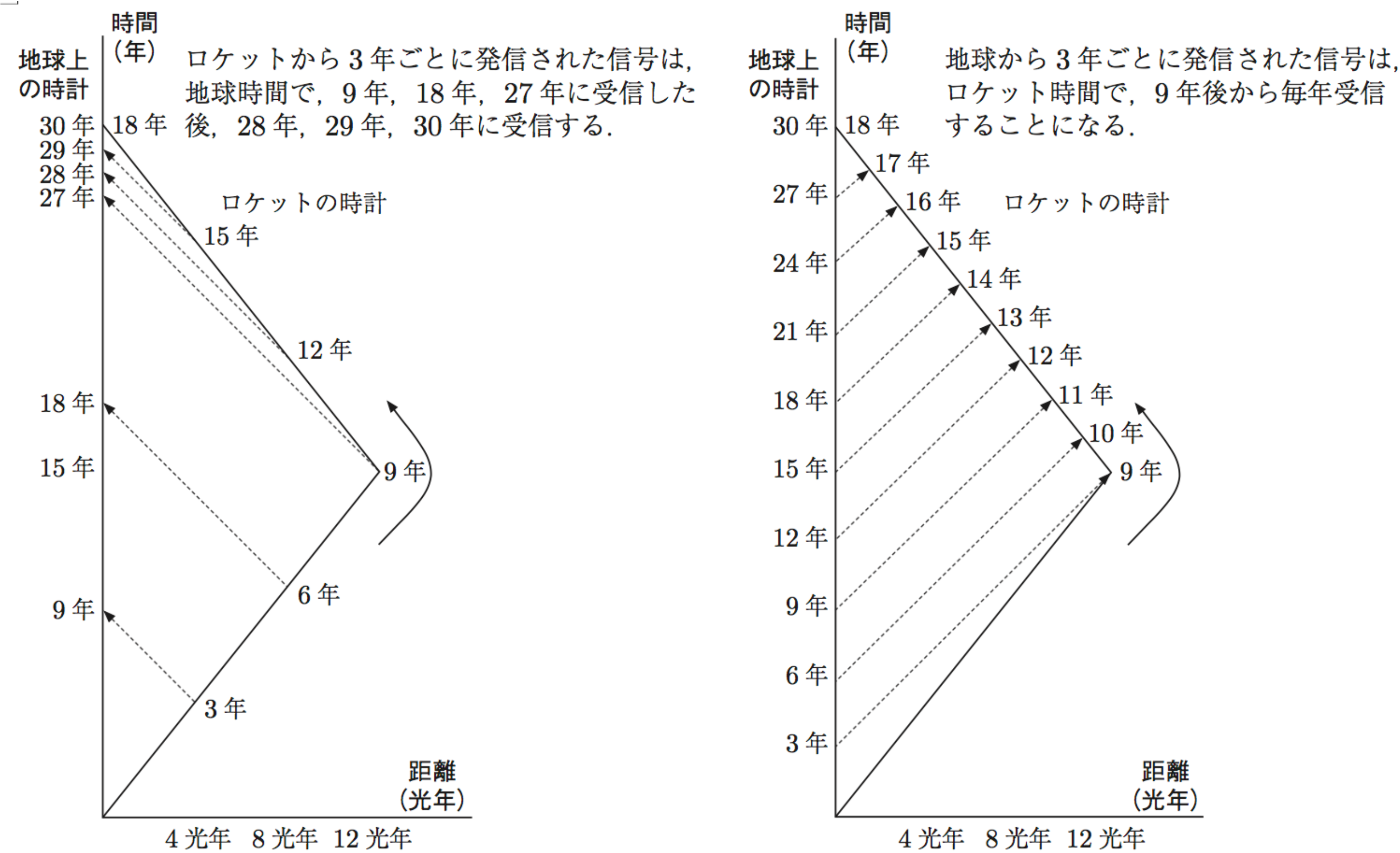


図 3.17 双子のパラドックスの理解. 互いに3年ごとに信号を発して、互いに相手の時計は遅いと感じつつも、再び出会うときにはロケットに乗っていた方が時間経過が短い。

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

ルは、矛盾なくOKです。未来に行つたとしても、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ります。

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。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で待たされ、戻ってきたときには、何年か経っていたという話。これをモデルに、浦島太郎が竜宮城で30年間過ごし、地上に戻ったとき、地上は300年経っていたと考えたと、竜宮城が光速の99.999999%で動いていると、光速に近いロケットに乗って帰るだけ、未来へのタイムトラベルが可能になる。

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周半回することになる。

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・ローレンツレクター」でタイムマシンを提唱。多世界解釈のタイムトラベルの可能性を示す。小説「コンタクト」を執筆するカル・セアンが「ドラえもん」のタイムマシンの研究を始めた、重力源の存在も示唆。

5 ワームホール
虫のトンネルやぬいぐるみの穴のように、時空の異なる場所を結びつけるトンネル。宇宙空間の異なる場所を結ぶトンネル。重力源の存在も示唆。

6 エヴェレット
1957年、ワシントン大学の物理学者。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、ジャイアンとネ夫がの子で、しずちゃんがお母さん。さらにのび太が世界で1人だけという話。

8 ドイツチェ
イギリスの物理学者。量子力学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。量子力学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。

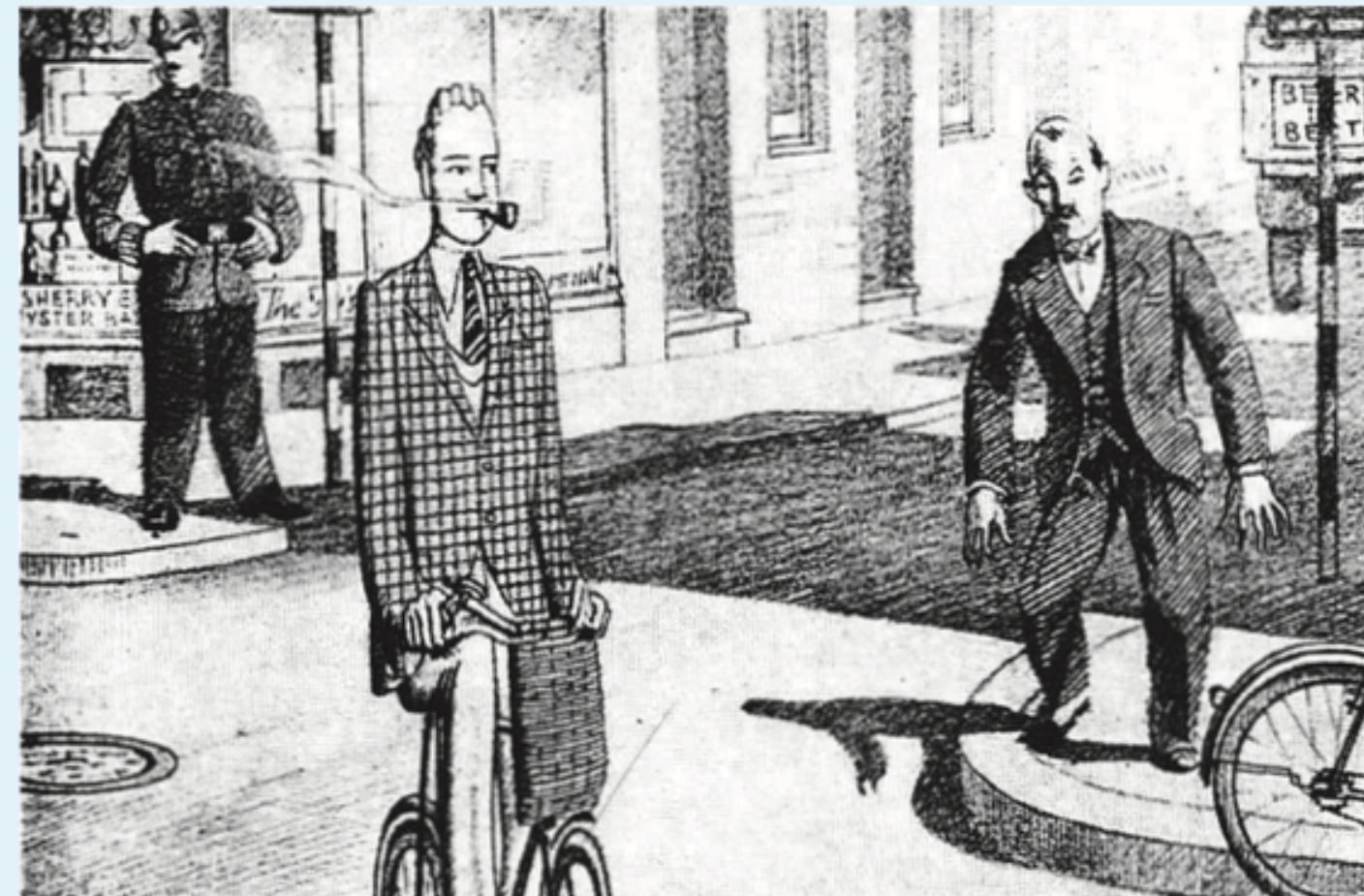
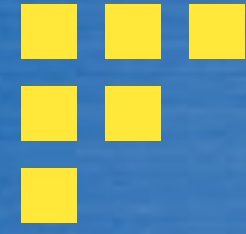


図 3.18 ガモフ著『不思議の国のトムキンス』(伏見康治 (訳), 創元科学選書, 1943) の挿絵. 最高速度が時速 30 km/s の世界では、自転車で移動する人から見ると世界が歪んで見え、止まっている人から自転車の人を見ると平たく見える。

「不思議の国のトムキンス」 効果の由来



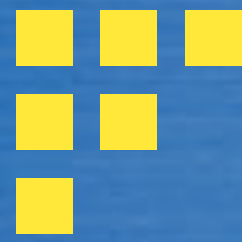
準光速ロケットからの眺め (1) 光のドップラー効果



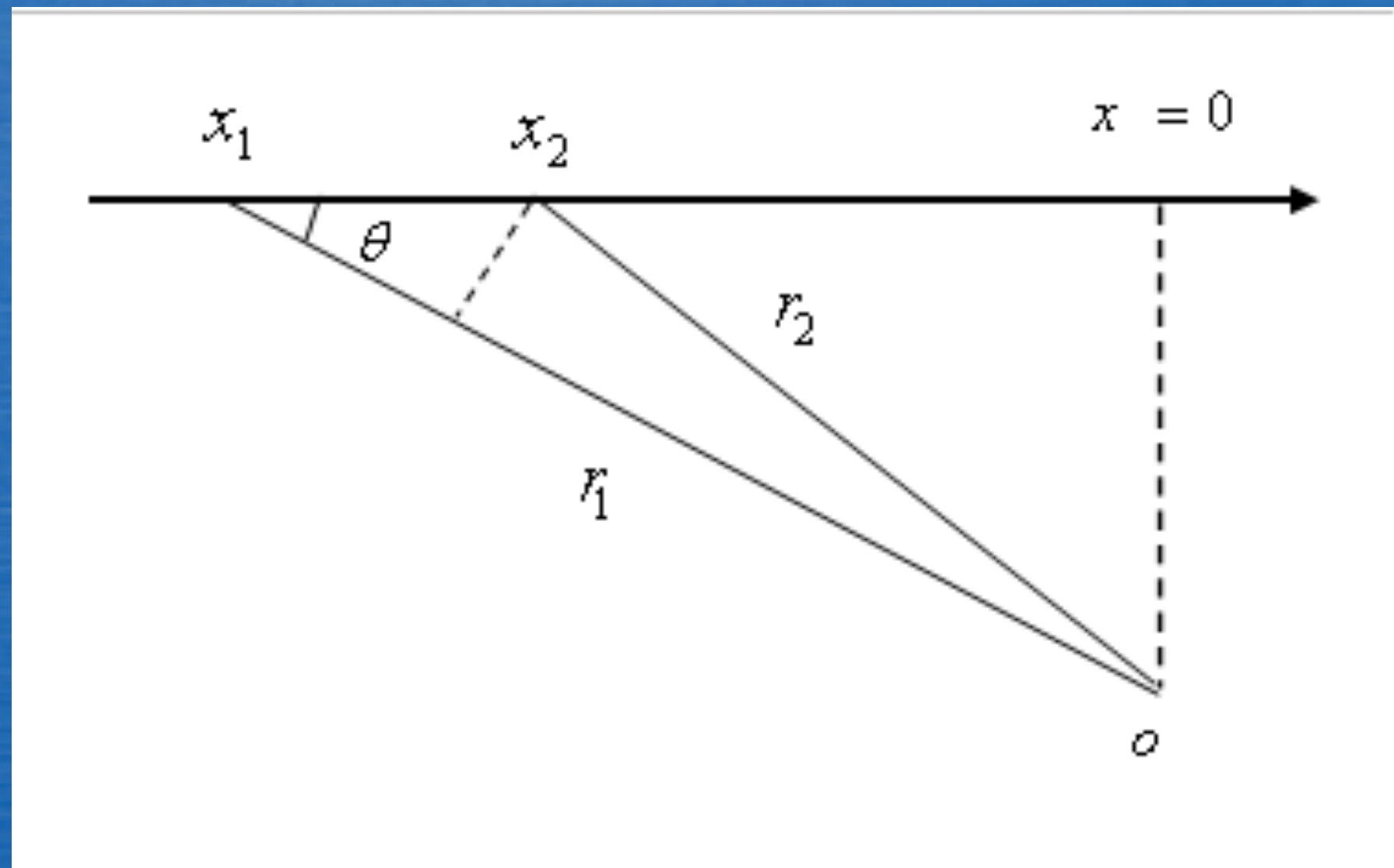
$$f_N = \frac{c + v_{source}}{c - v_{obs}} f_{source}$$

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

「不思議の国のトムキンス」 効果の由来

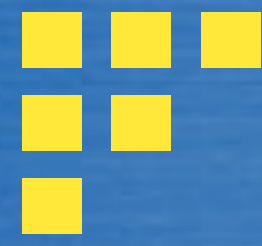


準光速ロケットからの眺め (2) 光の横ドップラー効果

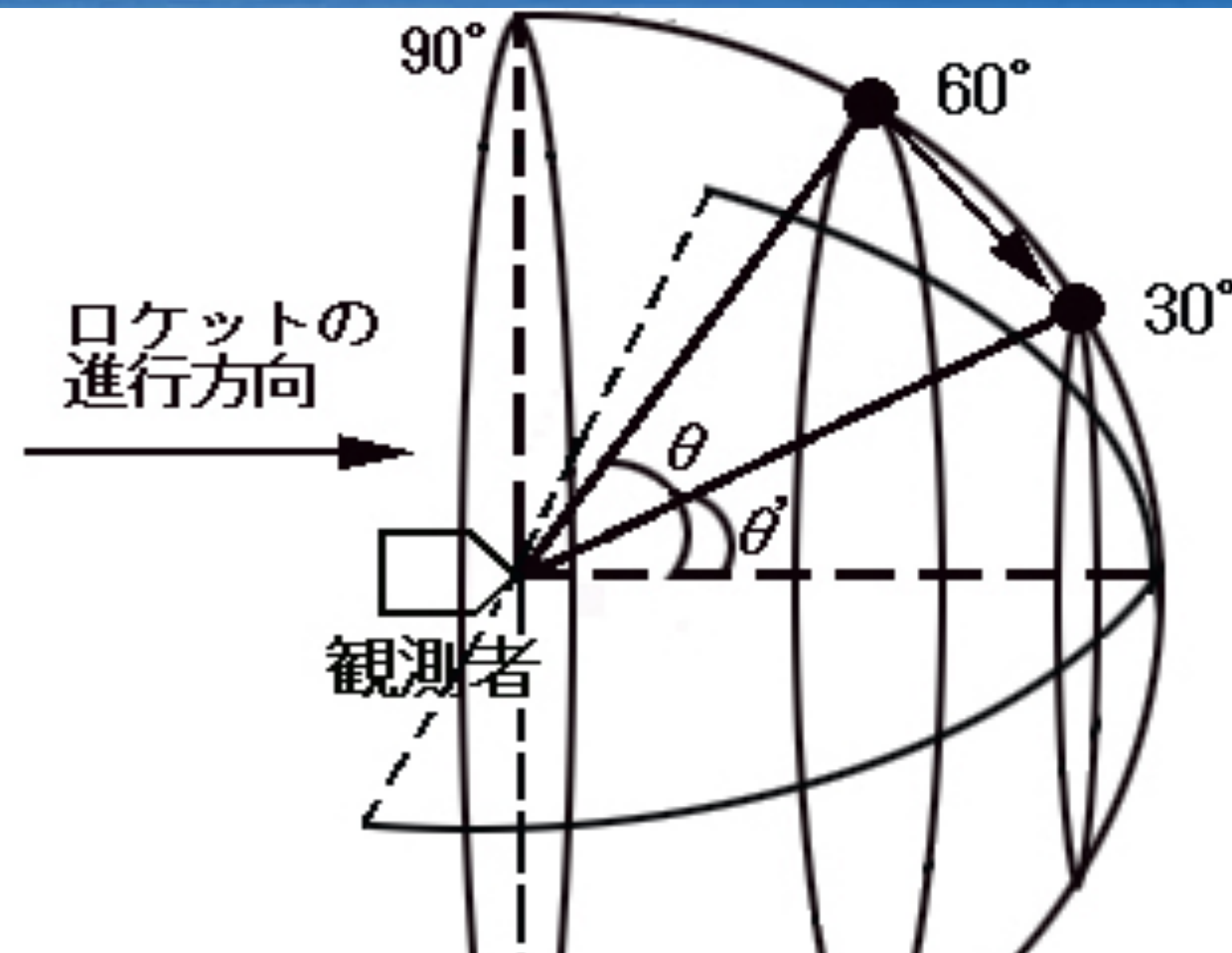


$$f_{SR} = \frac{(1 - \beta^2)^{1/2}}{1 - \beta \cos \theta} f_{source}, \quad \beta = \frac{v_{obs}}{c}$$

「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)

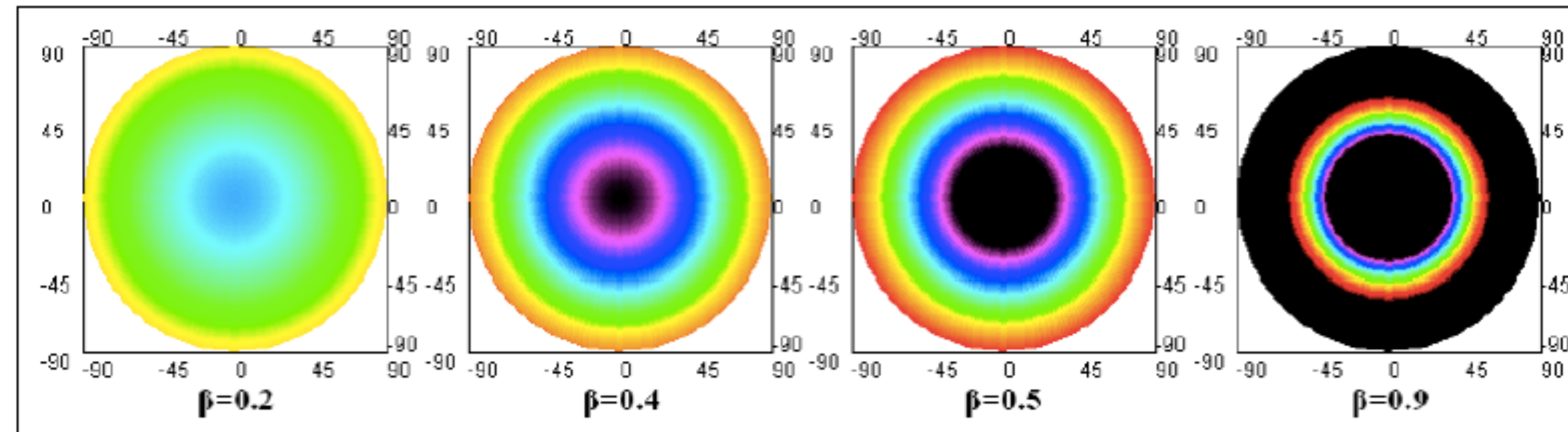


図 13: ドップラー効果のみを考えた前方の景色

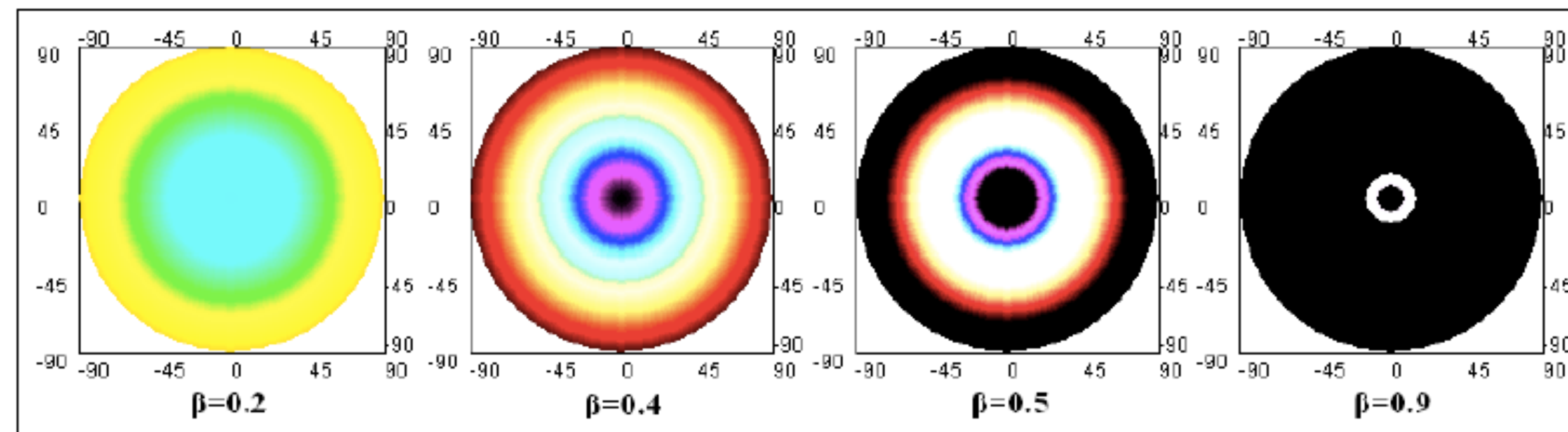
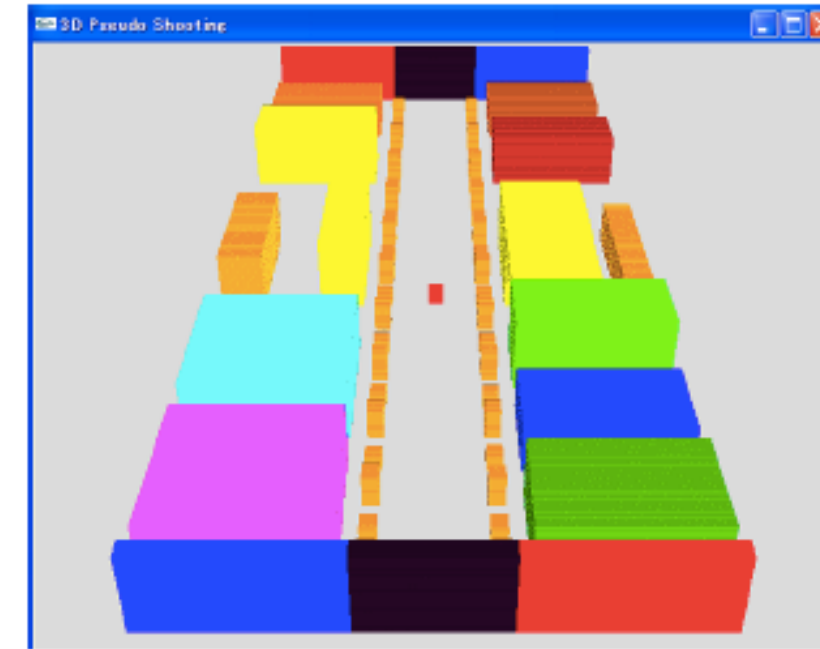


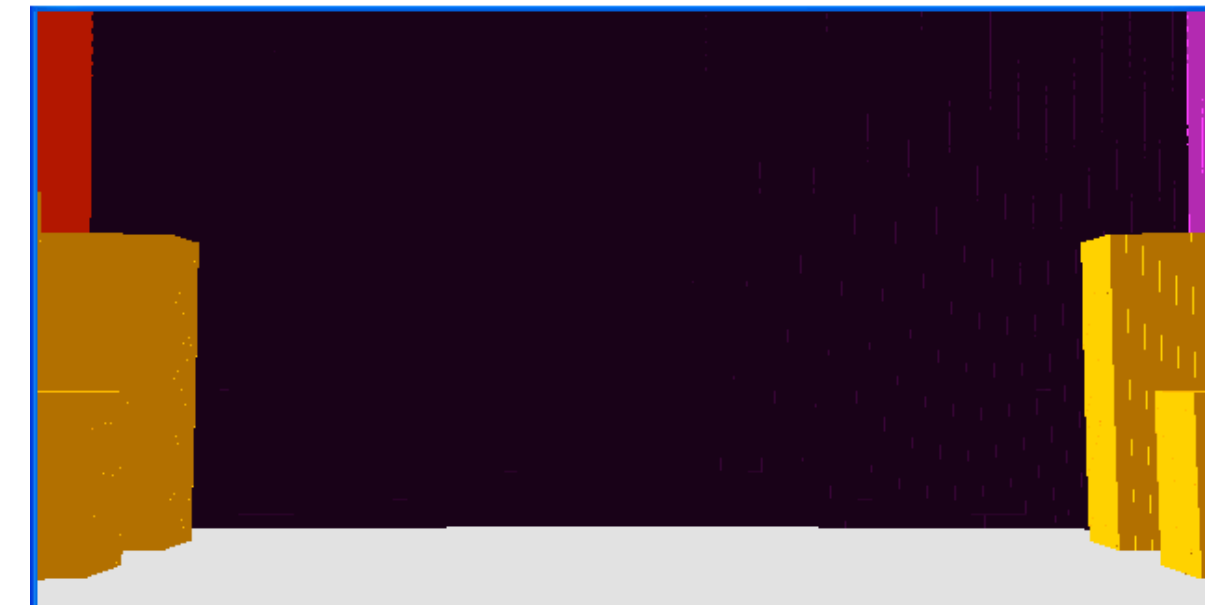
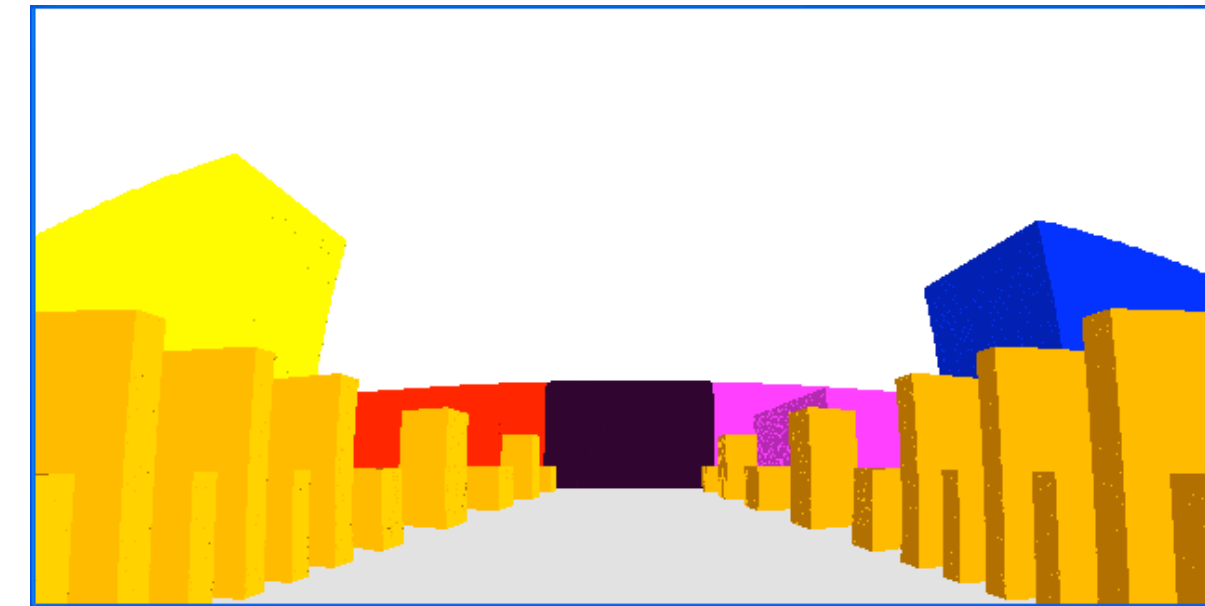
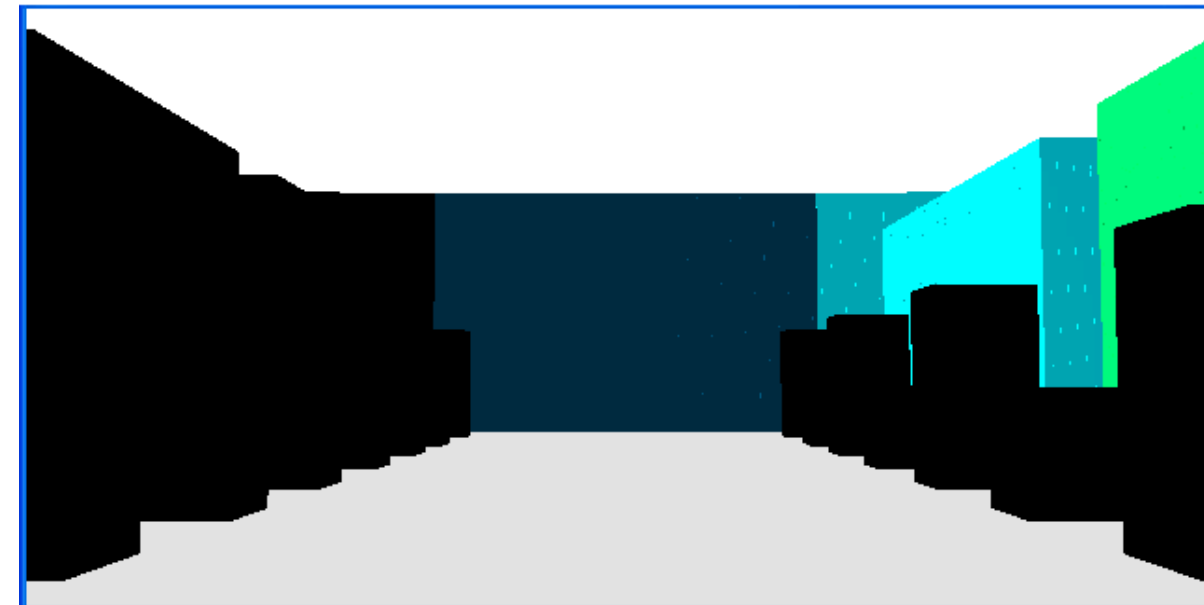
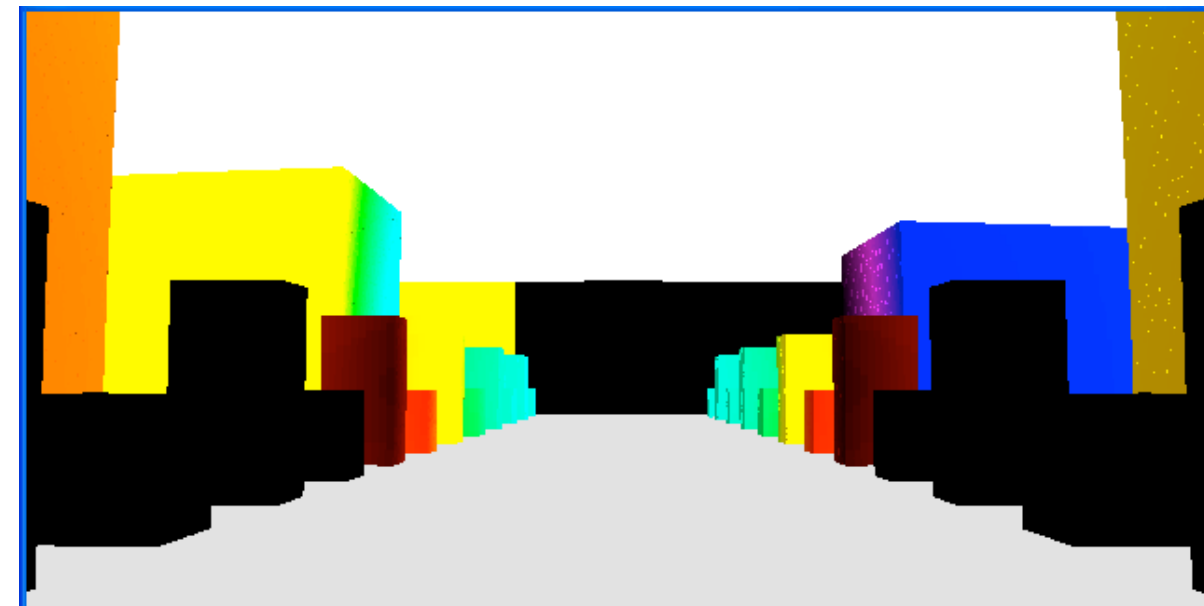
図 14: 図 13 に光行差及び明るさ変化を取り入れた前方の景色

準光速口ケットから見える世界(2)

$v=0$

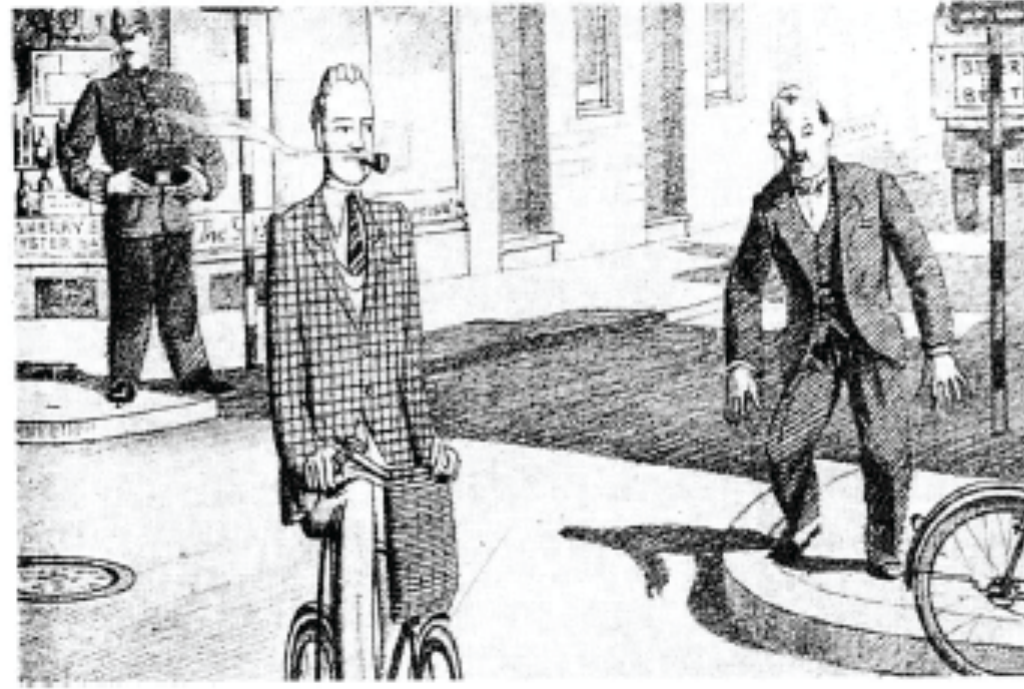


$v=0.8c$

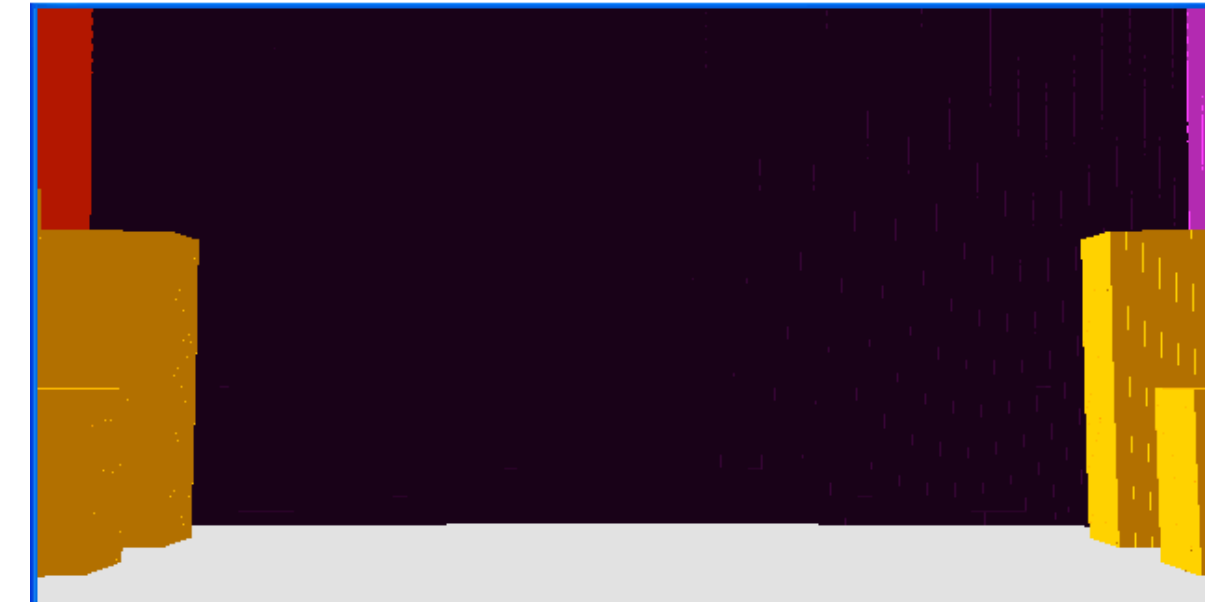
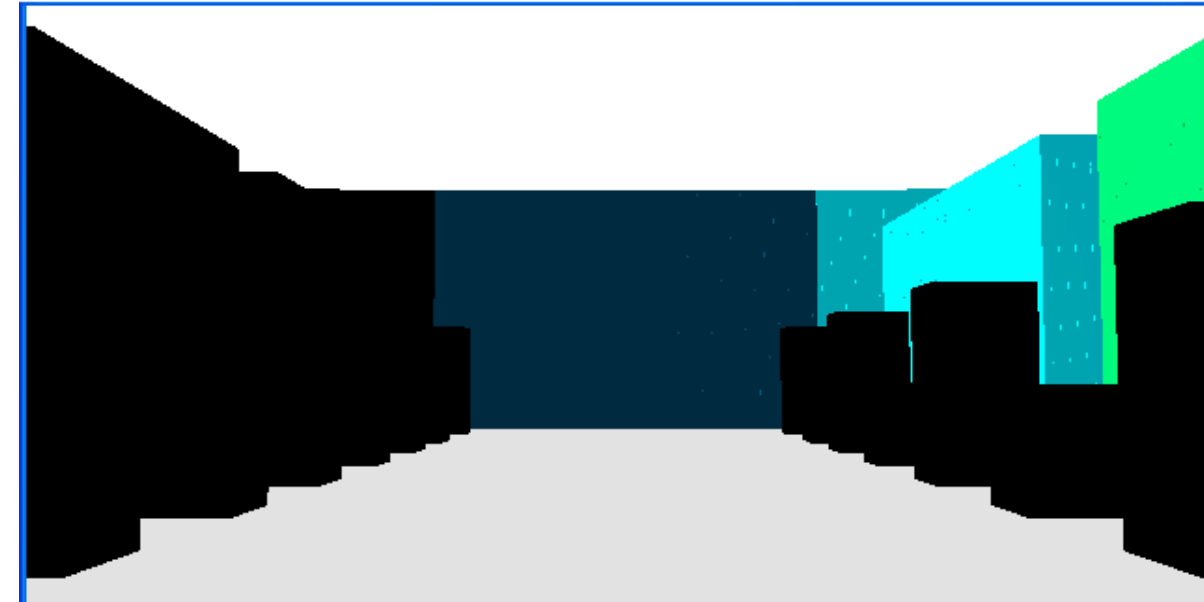
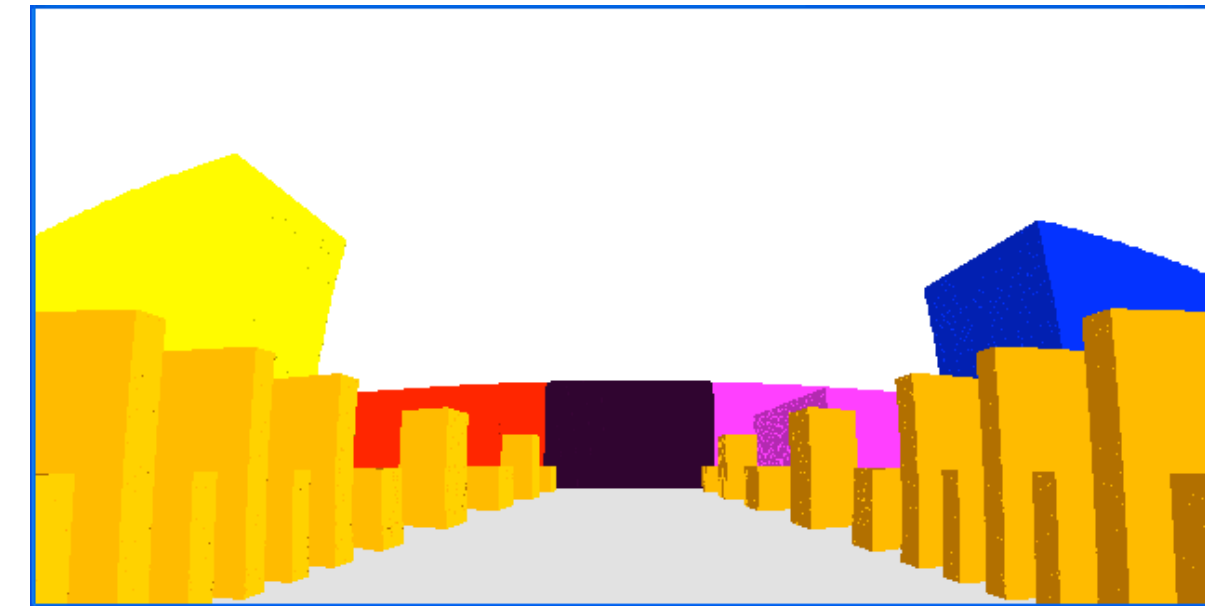
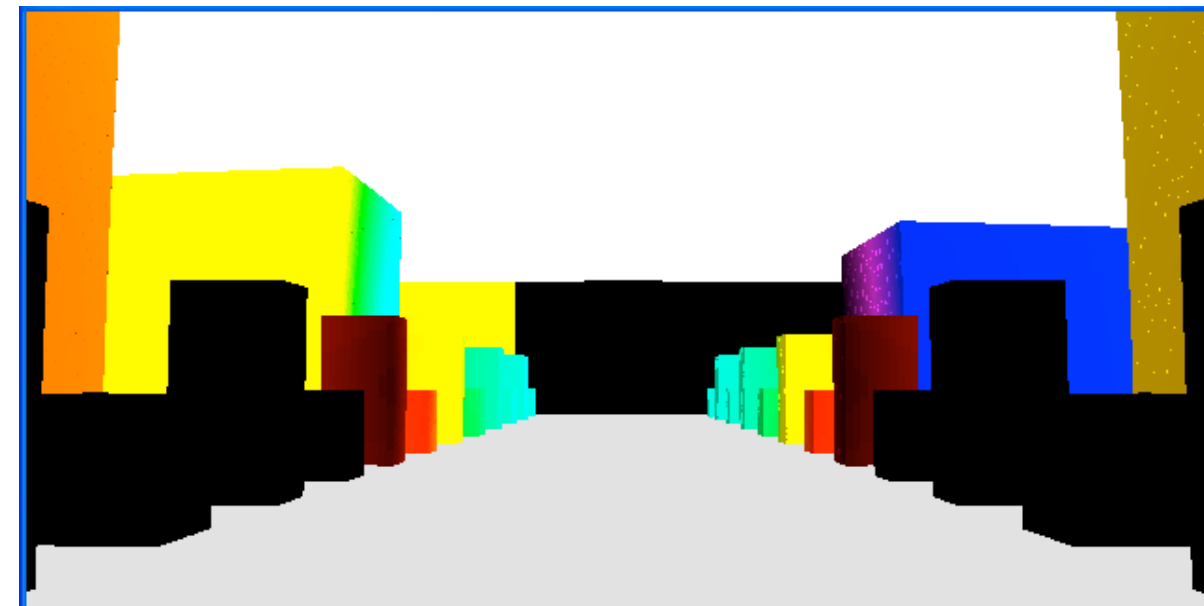


2012年度卒業論文（葭矢景淑君）から

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

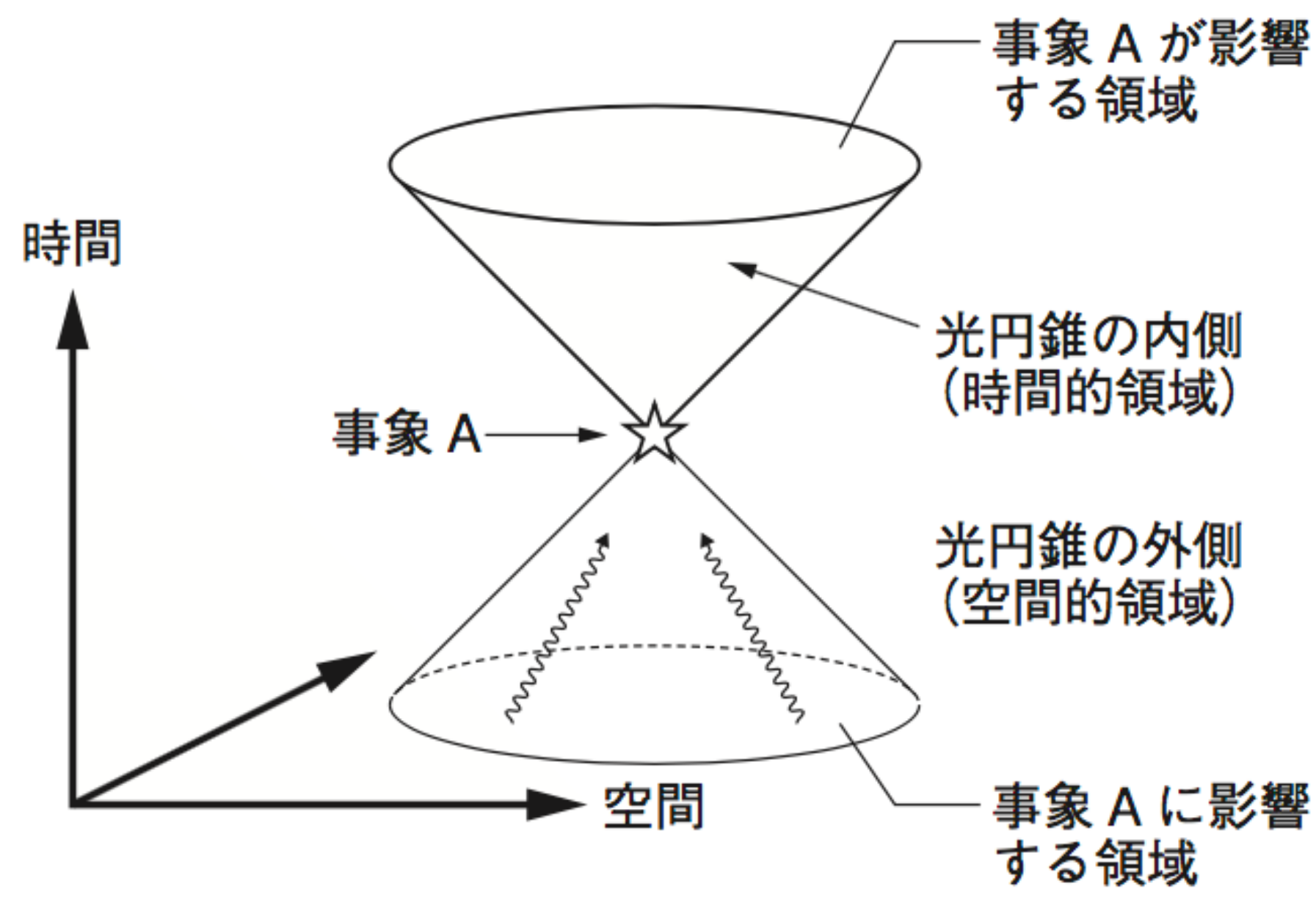


図 3.19 〔左〕 4 次元時空は図にすることが難しいので、空間を 2 次元、時間を 1 次元にして図を描く。時間軸が縦である。光の伝わる経路はある点から円錐状に広がる。この円錐内であれば、情報が伝達可能な領域（因果関係があり得る時間的領域）、円錐より外側は情報伝達があり得ない領域（空間的領域）である。図を過去に向かって見れば、ある 1 点に過去からの情報がどこまで影響しているかも同様にわかる。〔右〕 世界物理年（2005 年）のロゴは、ミンコフスキー時空の光円錐の図だった。

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、...

$$E = mc^2$$

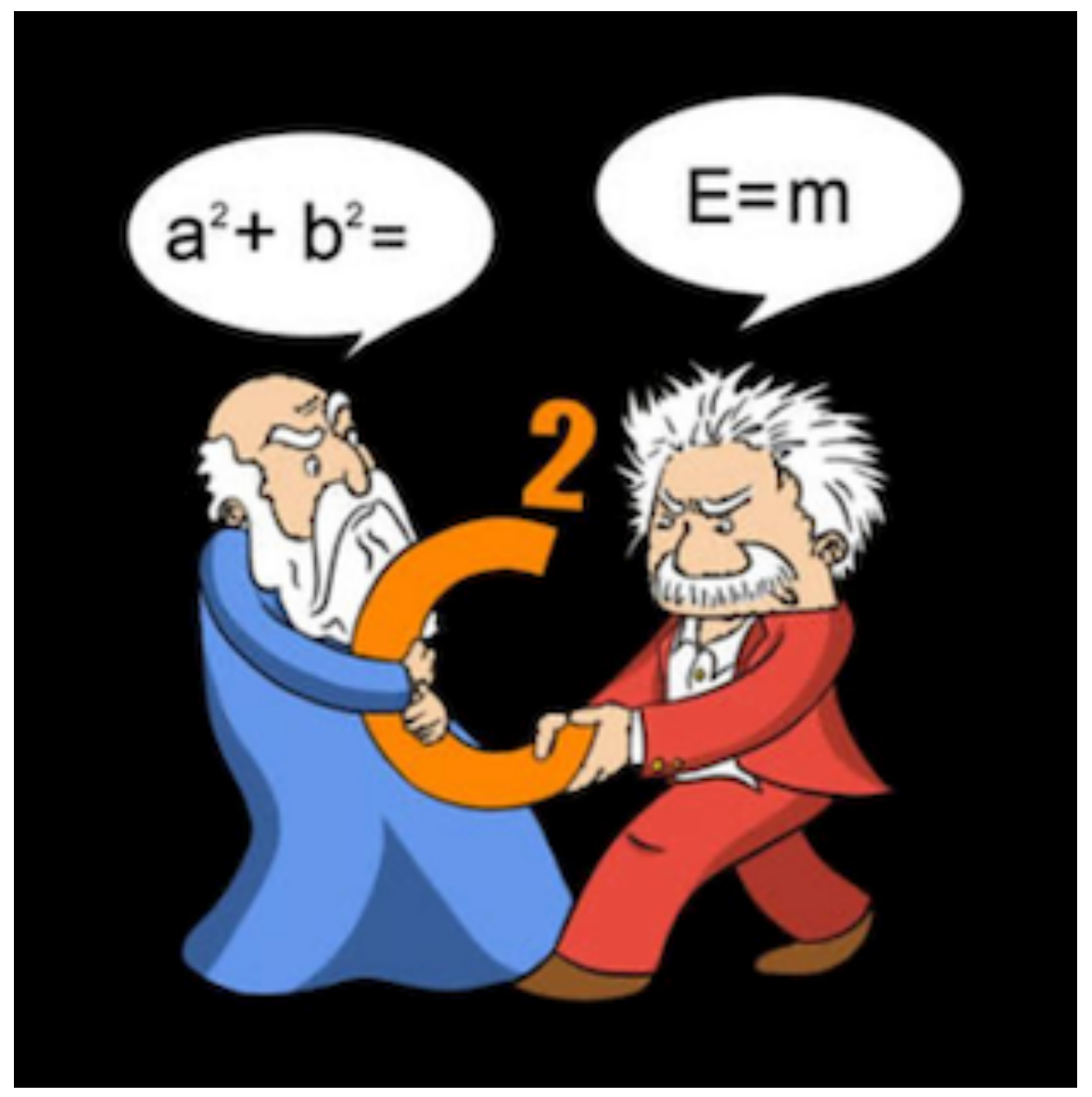
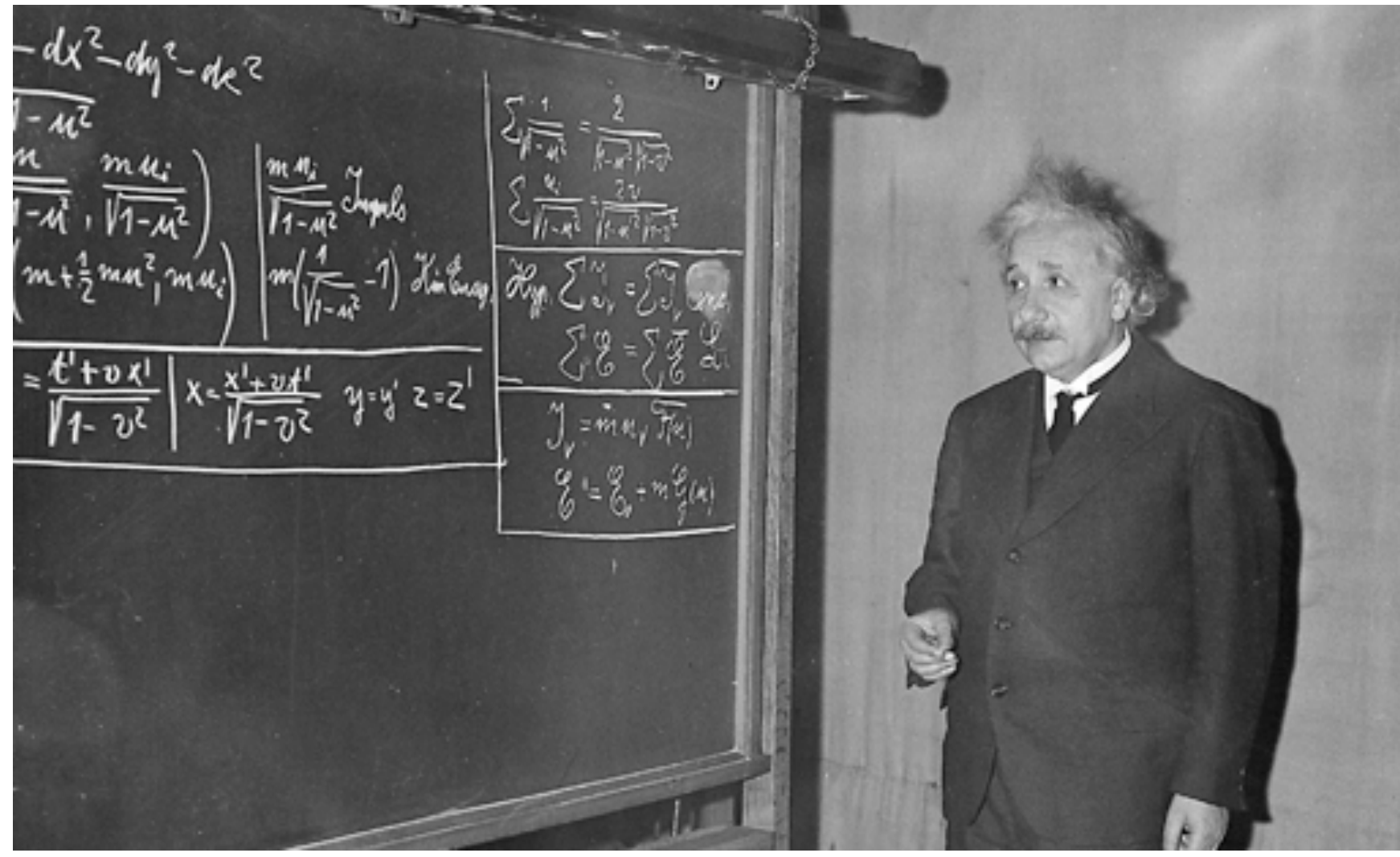
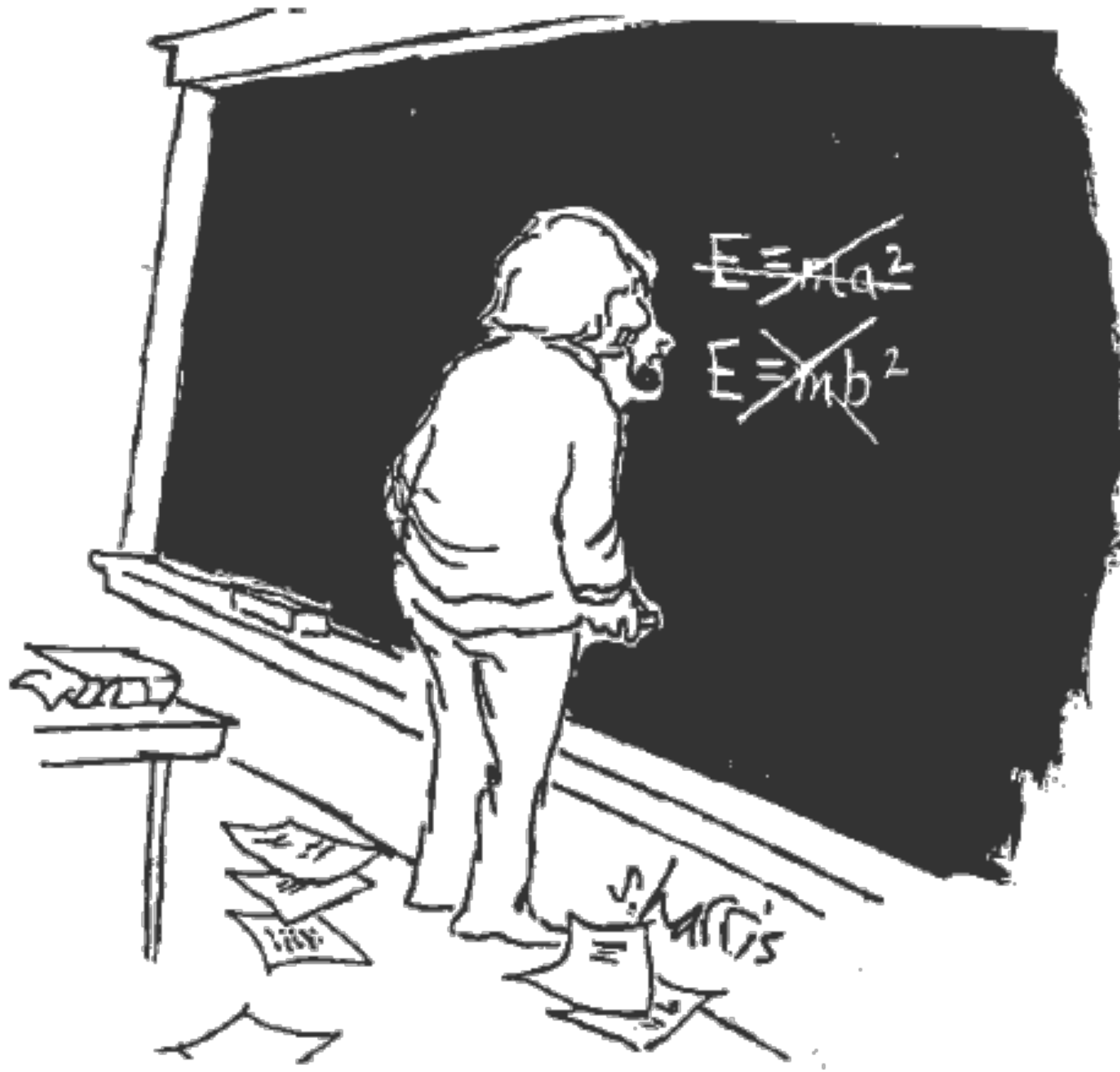
エネルギー

質量x光速x光速

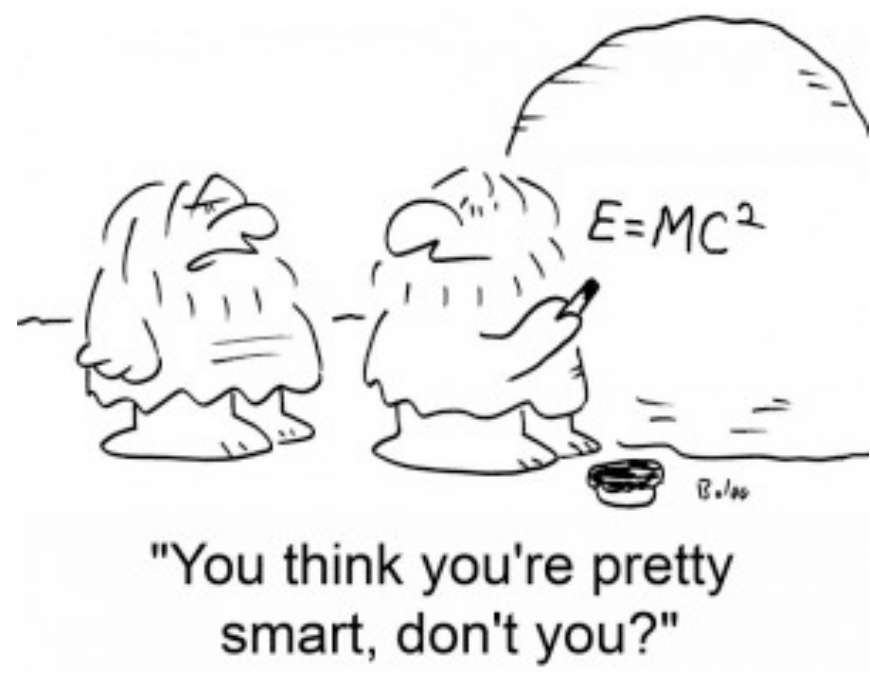
エネルギーは質量と等価である！

質量はエネルギーに変換できる！

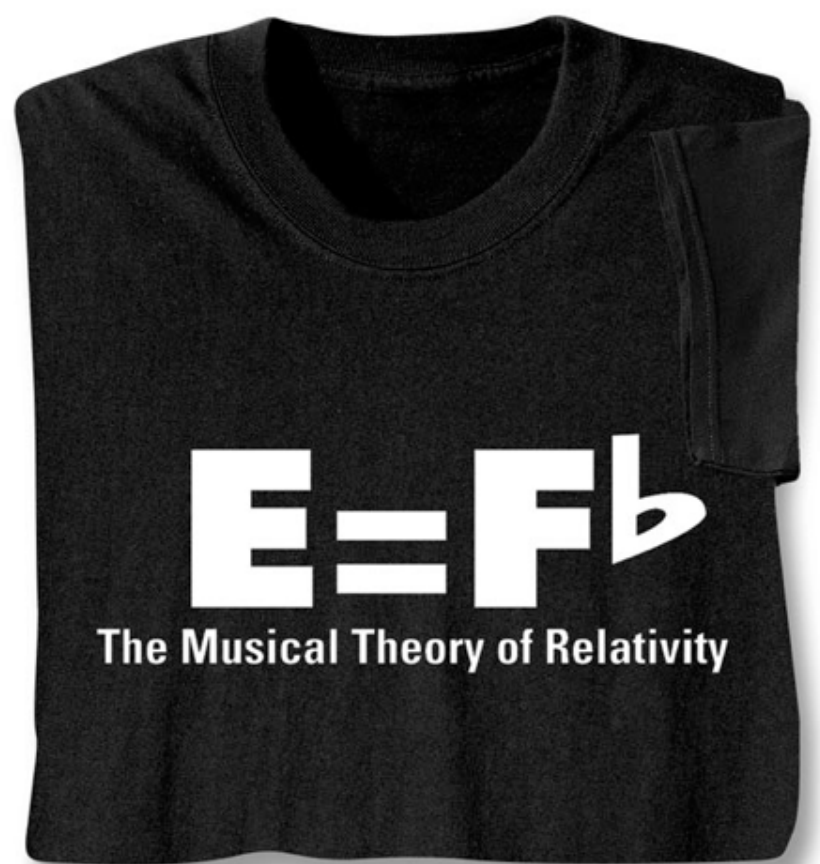
3.2.6 最も有名な物理の公式



3.2.6 最も有名な物理の公式



$E = mc^2$



【話題】 NHK 朝までラーニング 2023年8月26日放送

https://www.nhk.jp/p/ts/883N4WZPGQ/

NHK 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)

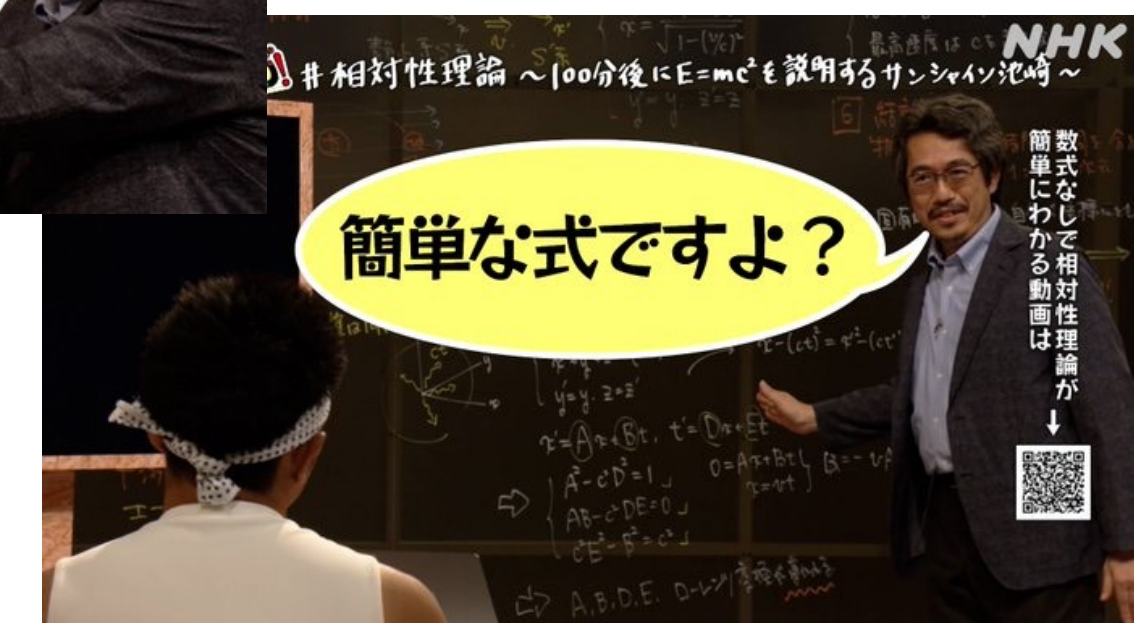
出演
小池美波(櫻坂46)



#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。



https://www2.nhk.or.jp/learning/video/?das_id=D0024010735_00000

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

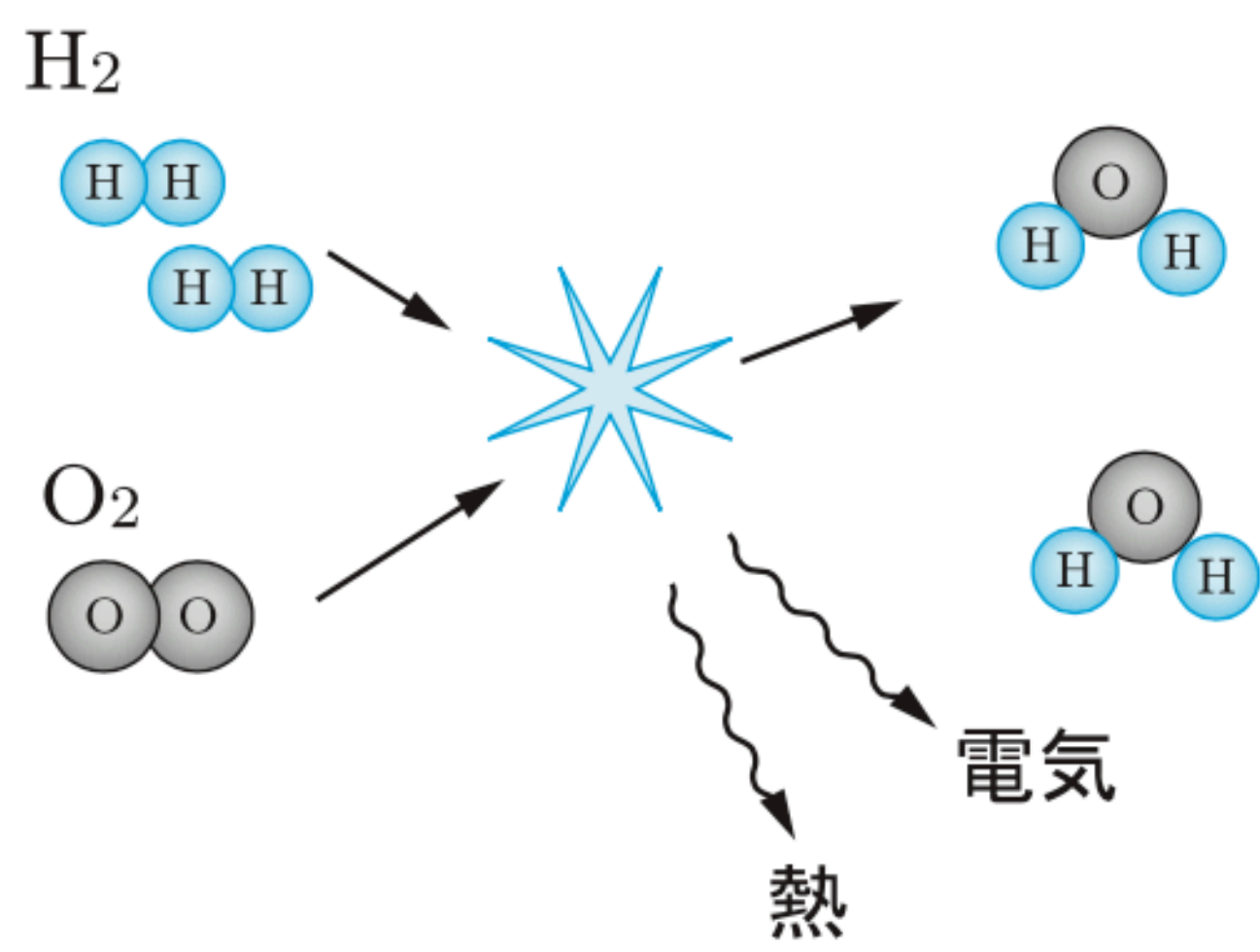
http://content.time.com/time/video/player/0,32068,660287833001_2029571,00.html

Start on Click, first 1'40" part

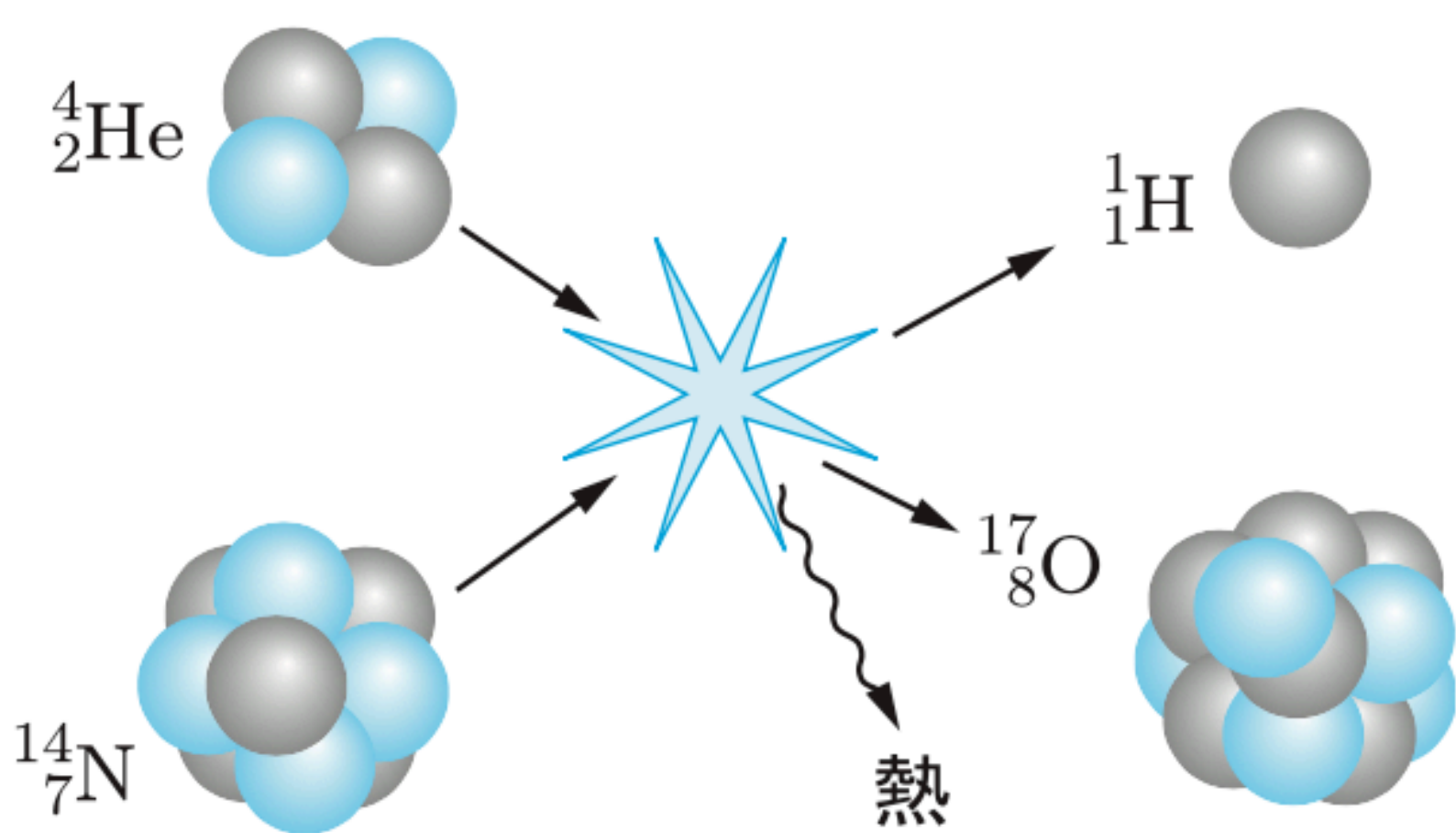
3.2.7 原子核反応

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**



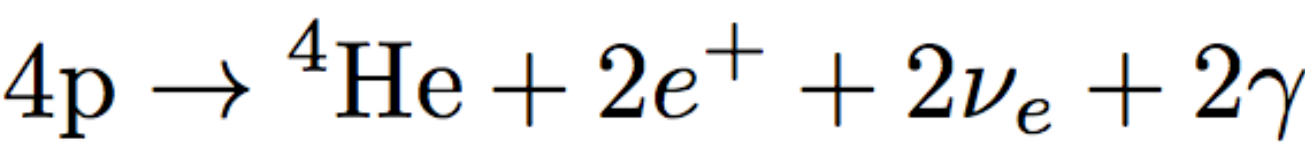
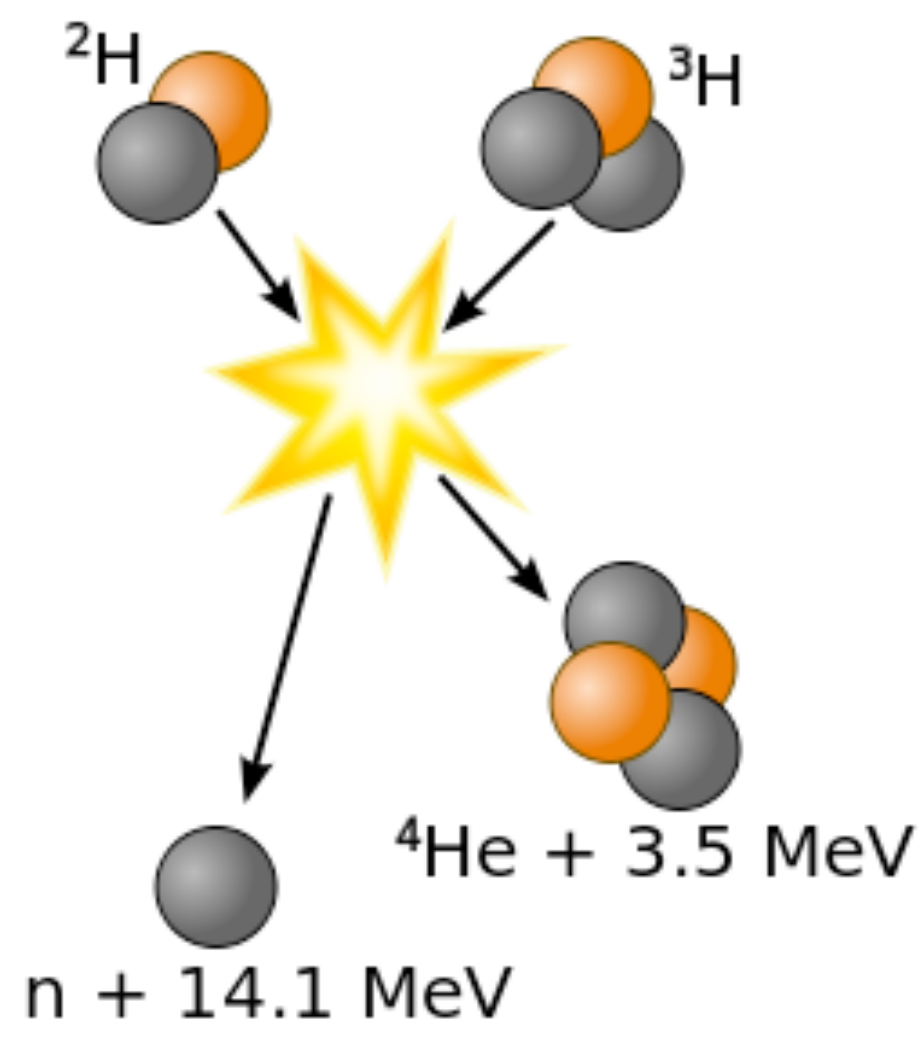
(a) 化学反応



(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.

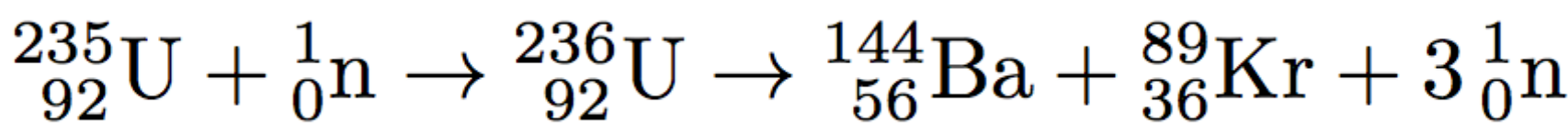
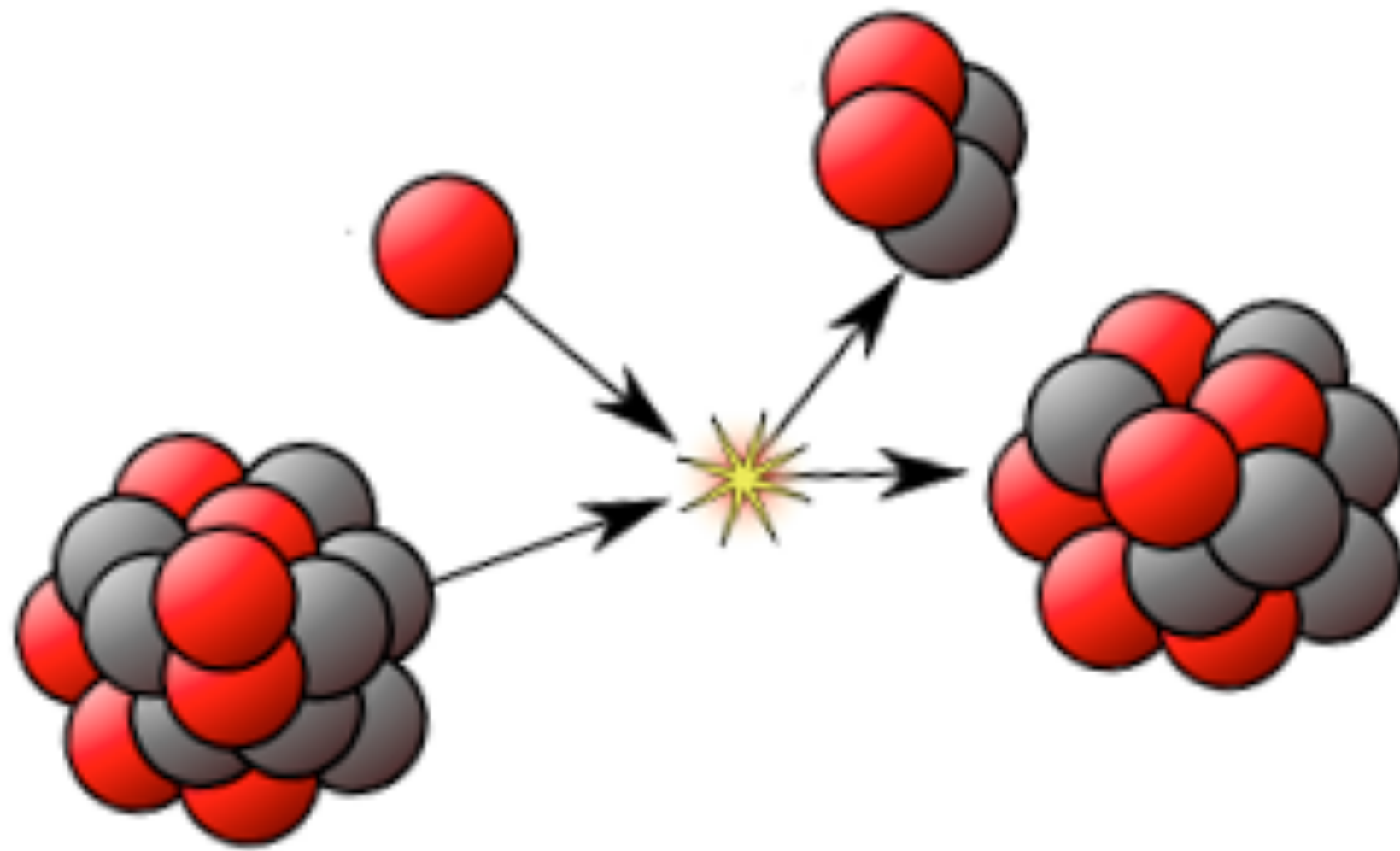
核融合 と 核分裂



核融合

(nuclear fusion)

合体した方が安定
(エネルギー放出)

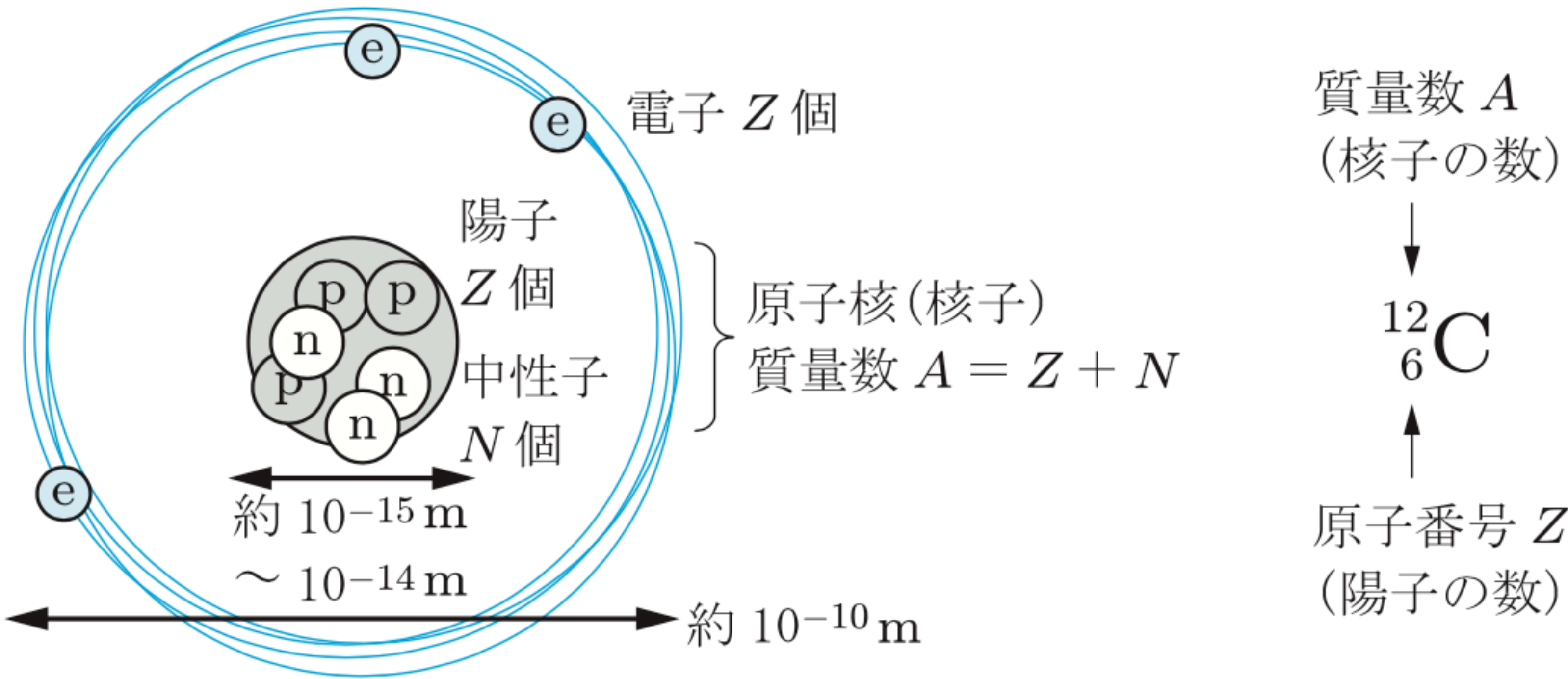


核分裂

(nuclear fission)

分裂した方が安定
(エネルギー放出)

陽子・中性子・電子

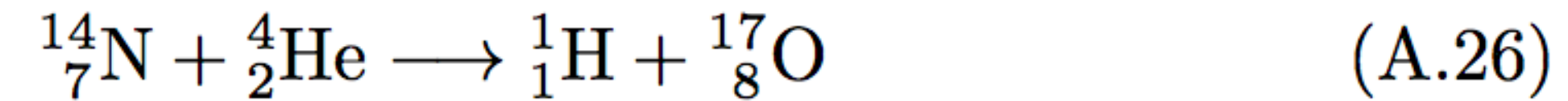
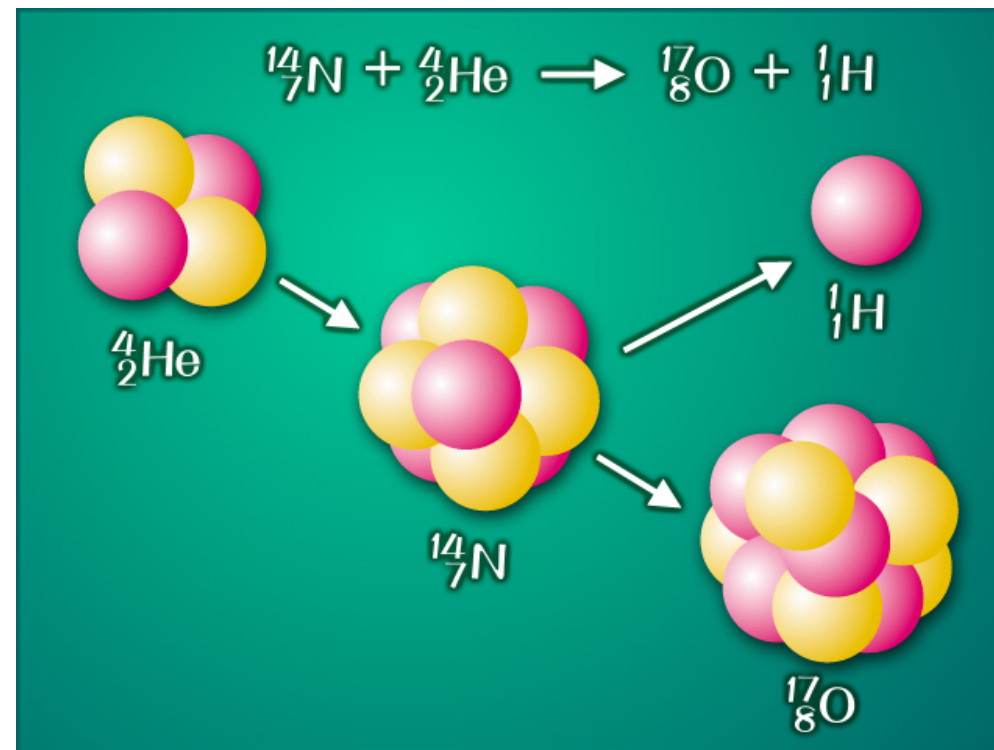


記号			電荷	質量	質量比
陽子	p	proton	+1	$1.67262158 \times 10^{-27} \text{ kg}$	1836.15
中性子	n	neutron	0	$1.67492735 \times 10^{-27} \text{ kg}$	1838.68
電子	e	electron	-1	$9.10938188 \times 10^{-31} \text{ kg}$	1

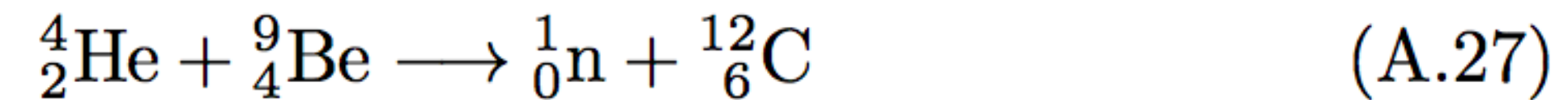
質量欠損

● 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、



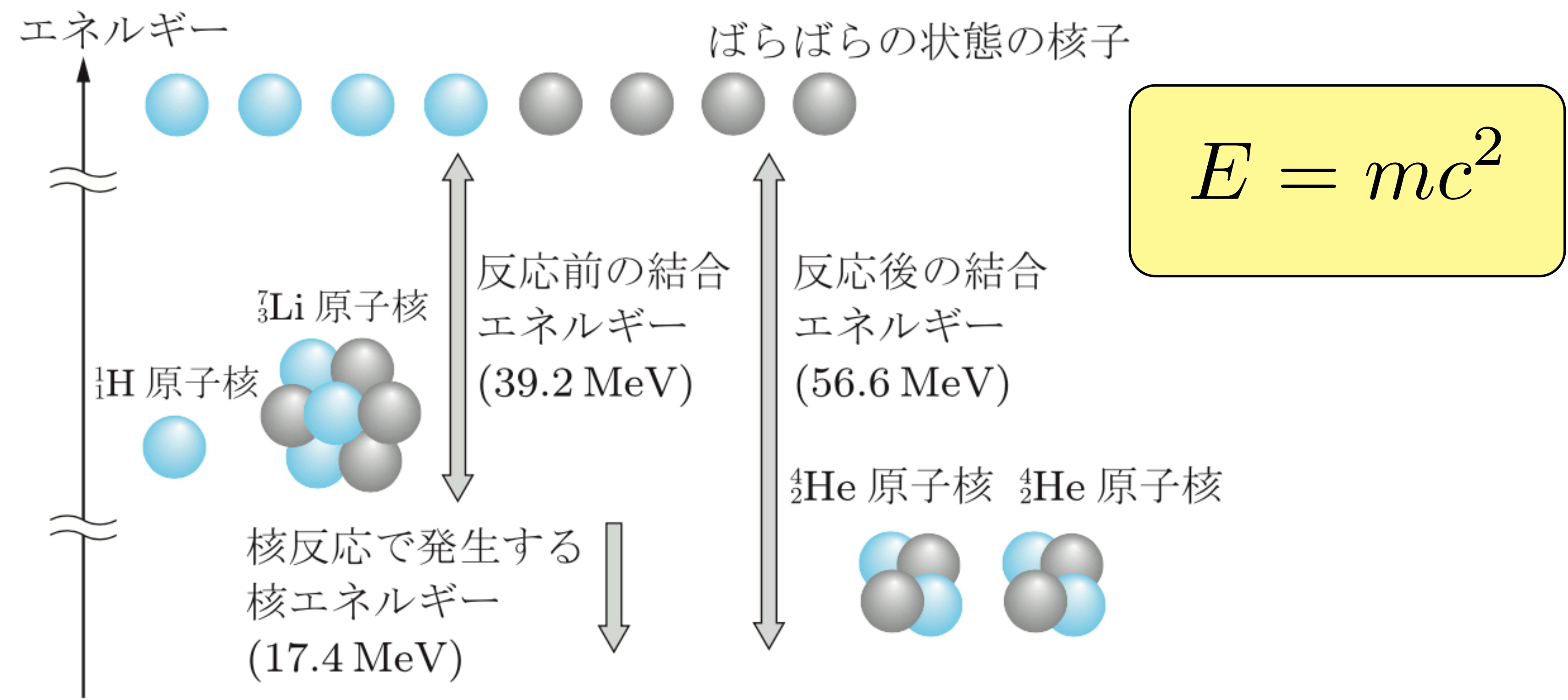
の反応を検出した。中性子をはじめて発見したのは、チャドウィックで



の核反応からである（1932年）。

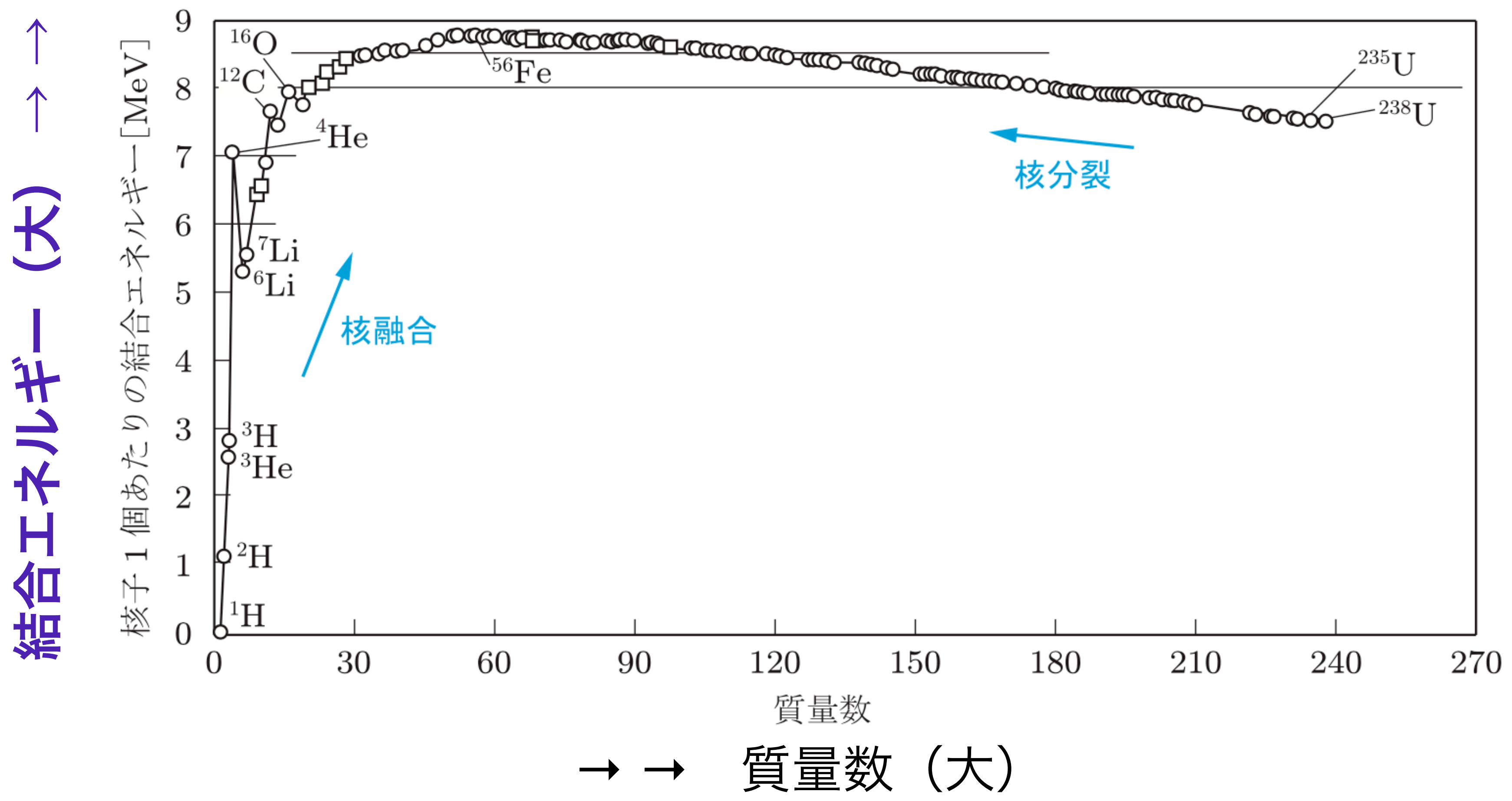
このような核反応が生じる原因は、原子核の結合エネルギーの差にある。原子核は、陽子と中性子が結合することによって、個々に存在するよりも質量エネルギー（ $E = mc^2$ ）の和が小さくてすむ。これを**質量欠損**と呼ぶ。

結合エネルギー

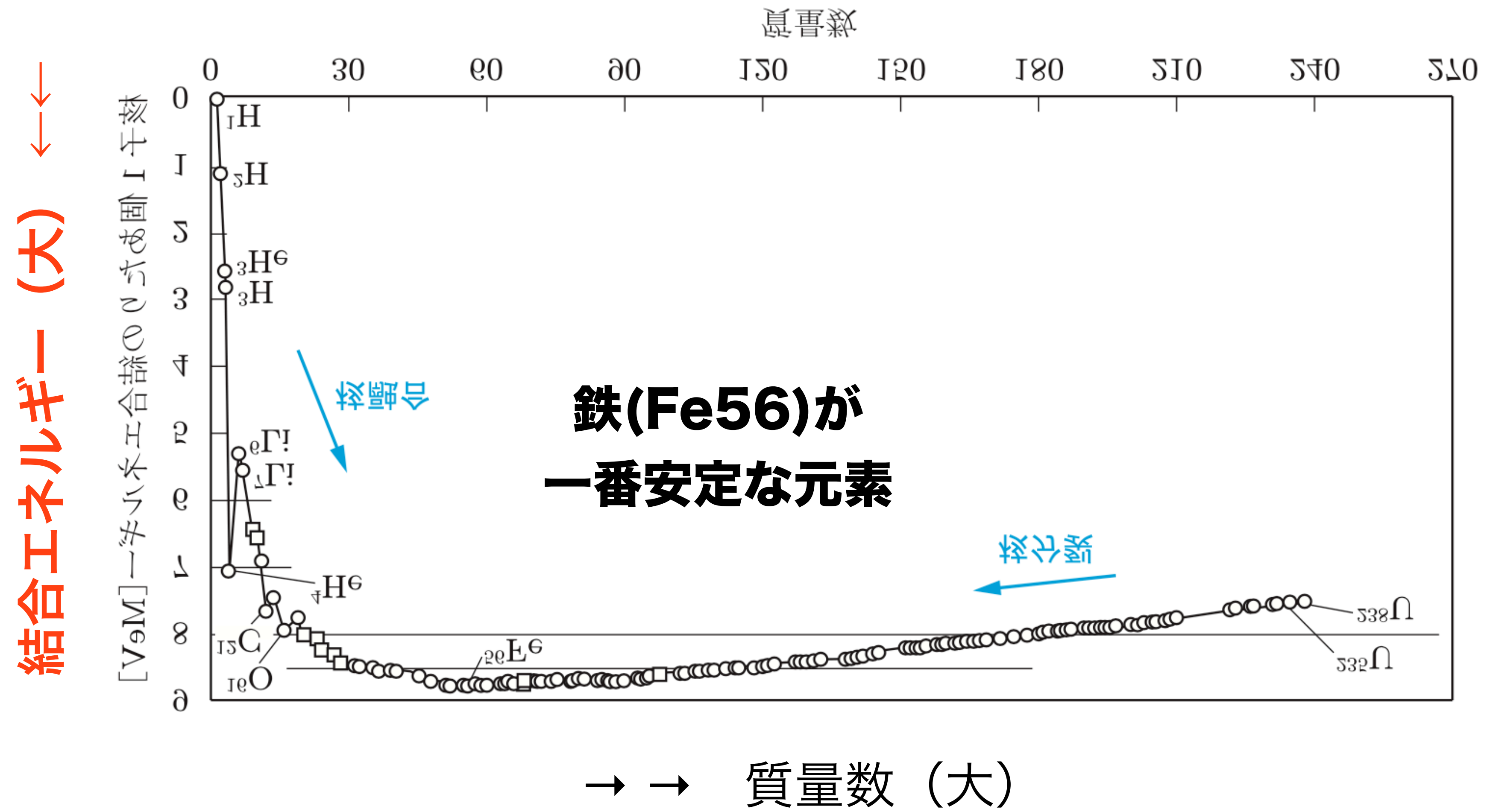


ばらばらでいるより，結合している方が，エネルギーが低い

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

77

【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)

