

西宮市生涯学習大学ラジオ講座 「宇宙はここまで理解できた」

スクーリング講座 2016/9/25

真貝 寿明

Hisaaki Shinkai



相対性理論

<http://www.oit.ac.jp/is/~shinkai/nishinomiya>

本講座の流れ

宇宙の大規模構造

宇宙の理解 ケプラーからニュートンへ

宇宙の理解 アインシュタインの登場

超新星爆発

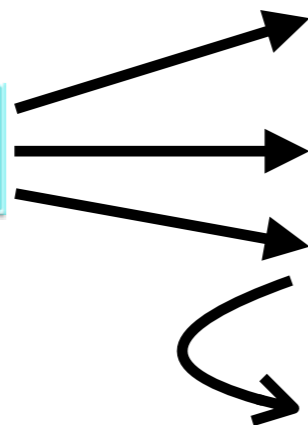
ブラックホールと重力波

膨張宇宙の発見とインフレーション宇宙

ダークマターとダークエネルギー

第2の地球はあるのか

相対性理論



近代物理学の進展

テキスト p46

1600

1700

1800

1900

1905

天文学

ガリレイ
ケプラー

電磁気学

ファラデー
マクスウェル

熱学

光学

流体力学

力学

解析力学

ニュートン

ラグランジュ
ハミルトン

物理学完成!?

現代物理学の発展



一般相対性理論

宇宙物理

特殊相対性理論

物理化学

経済物理

ブラウン運動

物性物理

生物物理

光電効果

統計力学

複雑系

量子力学

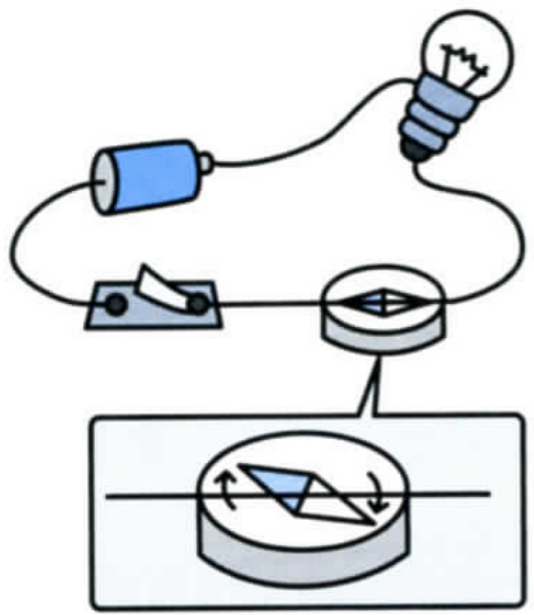
原子核理論

場の理論

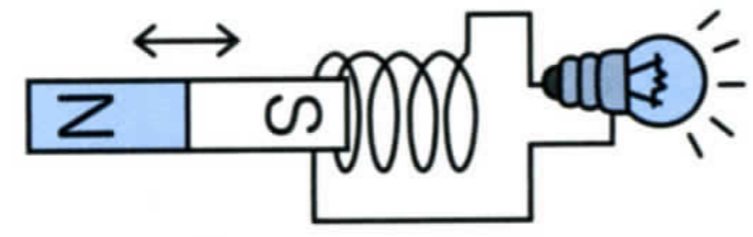
素粒子論



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。

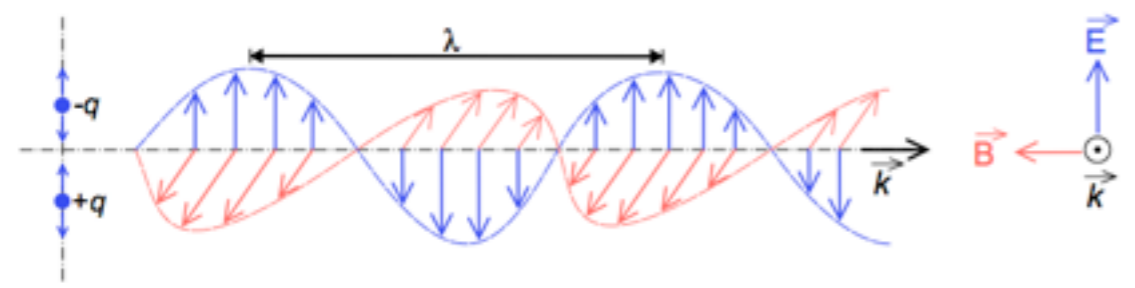
電磁誘導現象の発見 (1831年)

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)

電磁気学の基本方程式

次の4本の方程式から成り立つ。 \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。

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho, \quad (2.20)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (2.21)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}, \quad (2.22)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0, \quad (2.23)$$

具体的には, 各ベクトルは

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix}, \quad \nabla = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

などと書け, \cdot と \times はベクトルの内積と外積を表す。したがって,

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z}, \quad \nabla \times \mathbf{E} = \begin{pmatrix} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

などとなる。

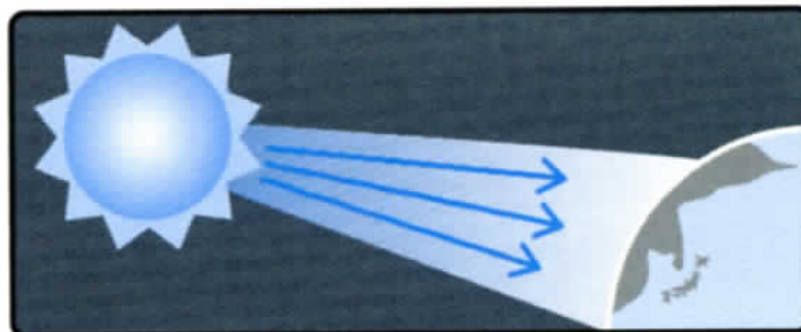
電磁気学で生じた疑問

テキスト p98

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?

エーテルの存在?

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?

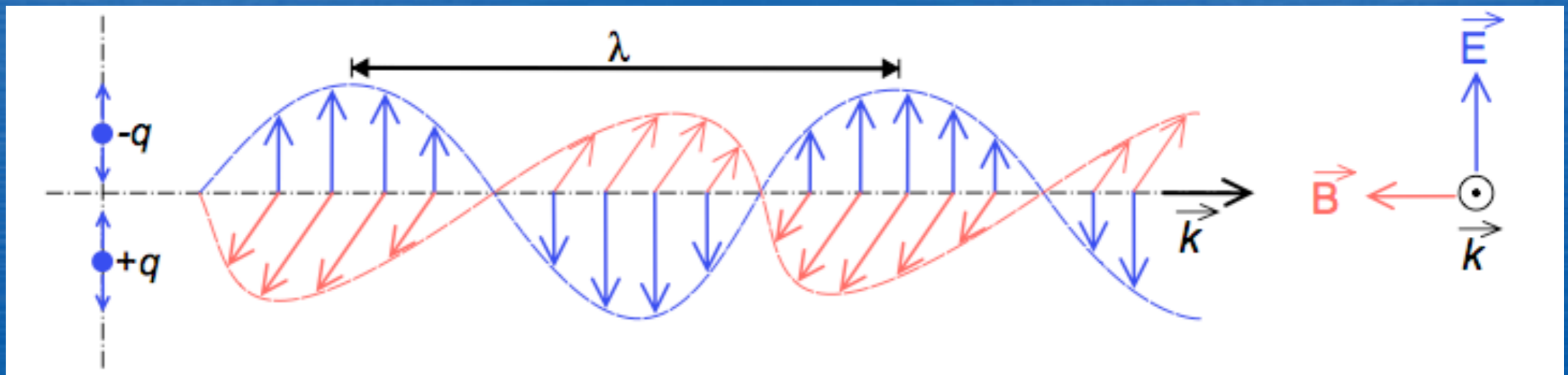
特殊相対性理論 【概略】

- 電磁気学の方程式に、光速 c が登場した。
どの座標系で見たかを議論していないのに……

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

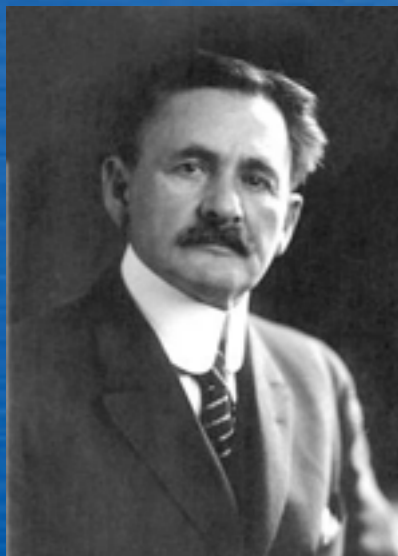
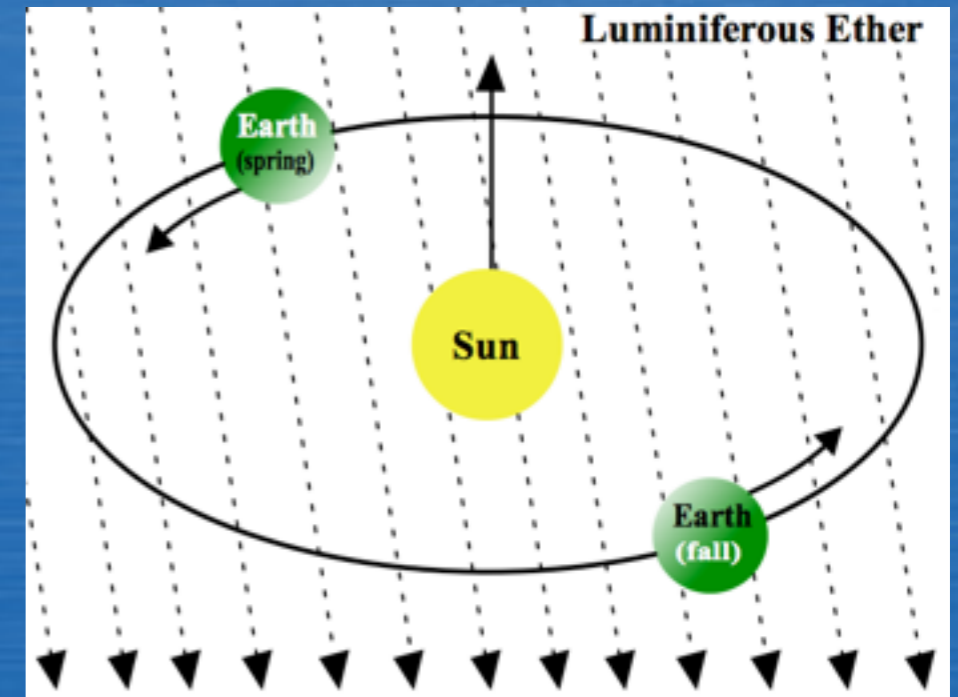
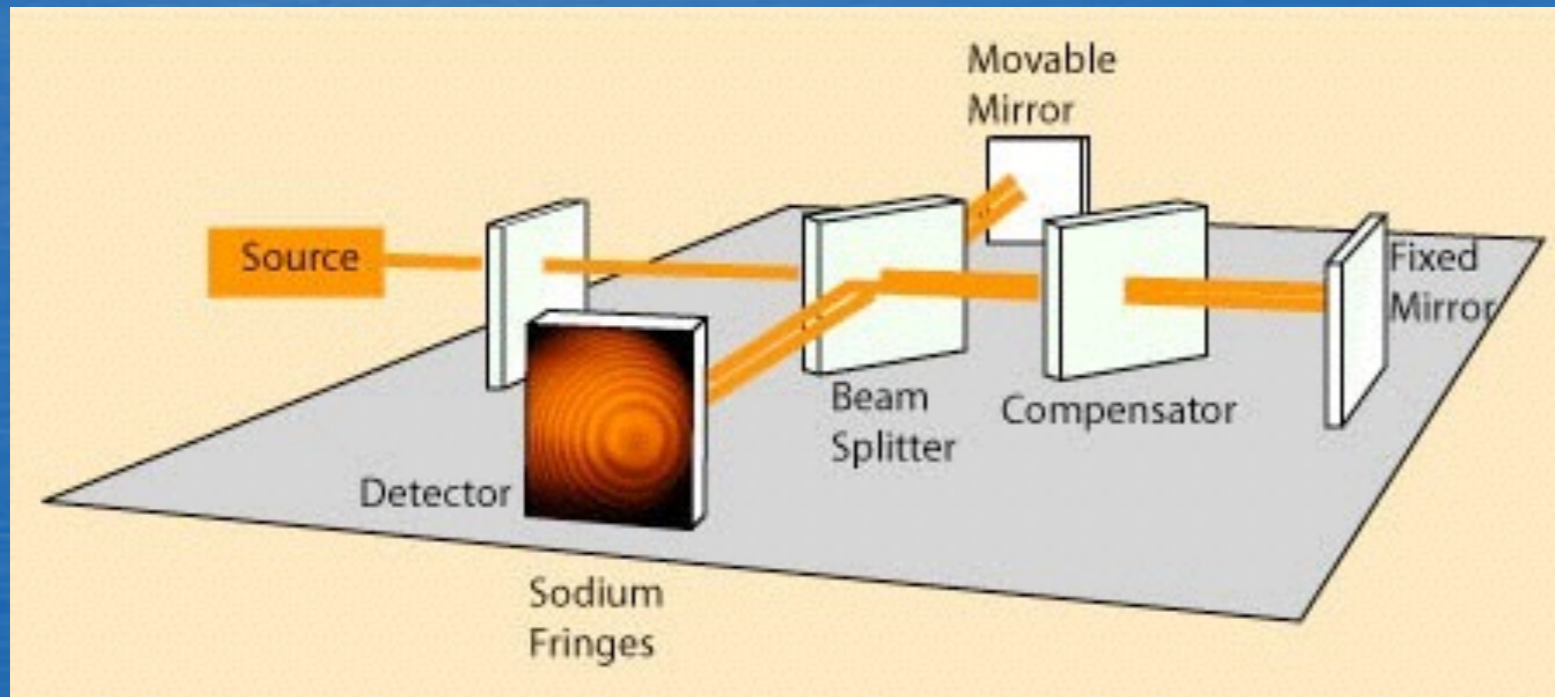
- 特別な慣性系の存在？ 光を伝える媒質の存在？

= 「エーテル」



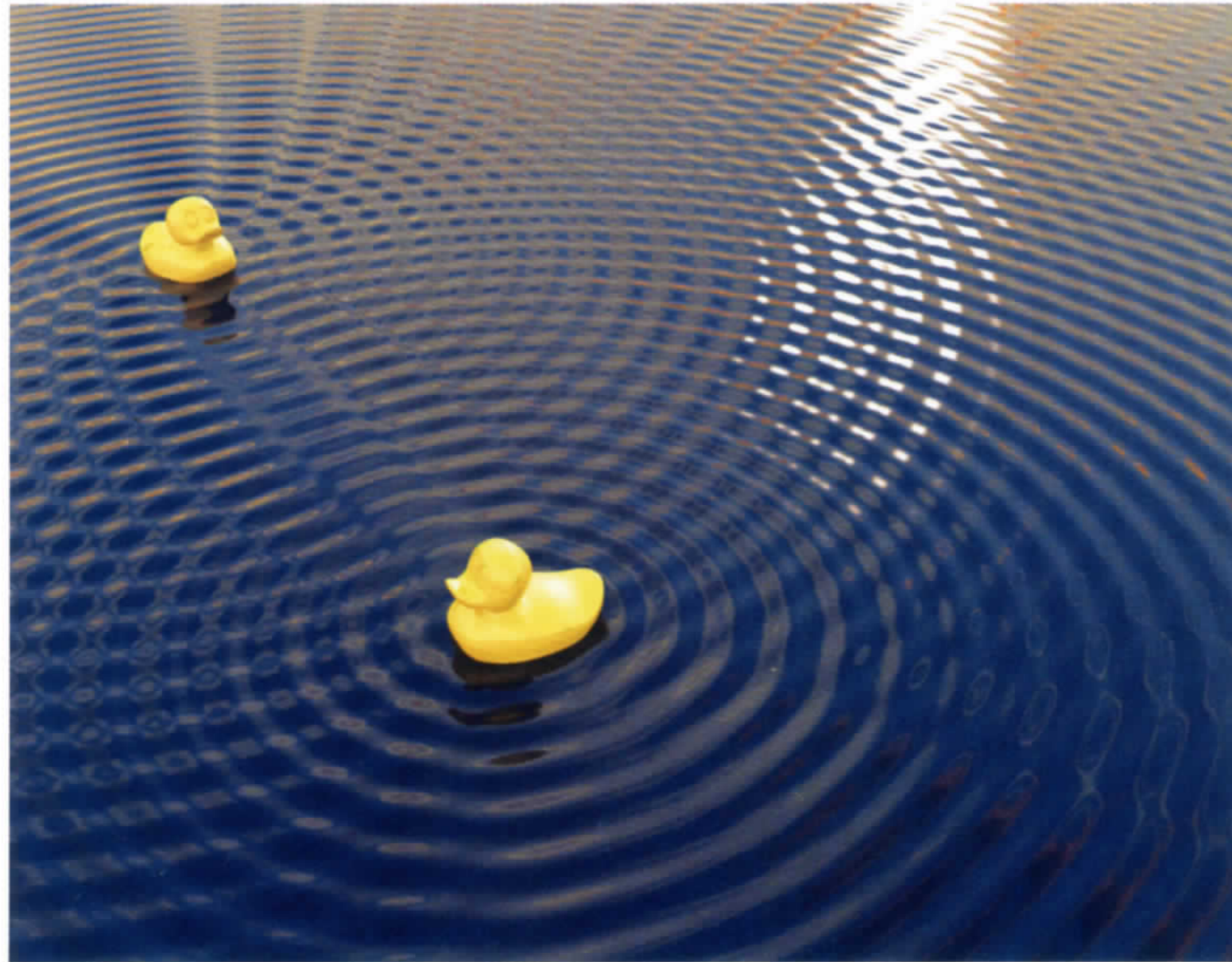
マイケルソン・モーリーの実験

Michelson-Morley experiment 1887



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。

波の干渉



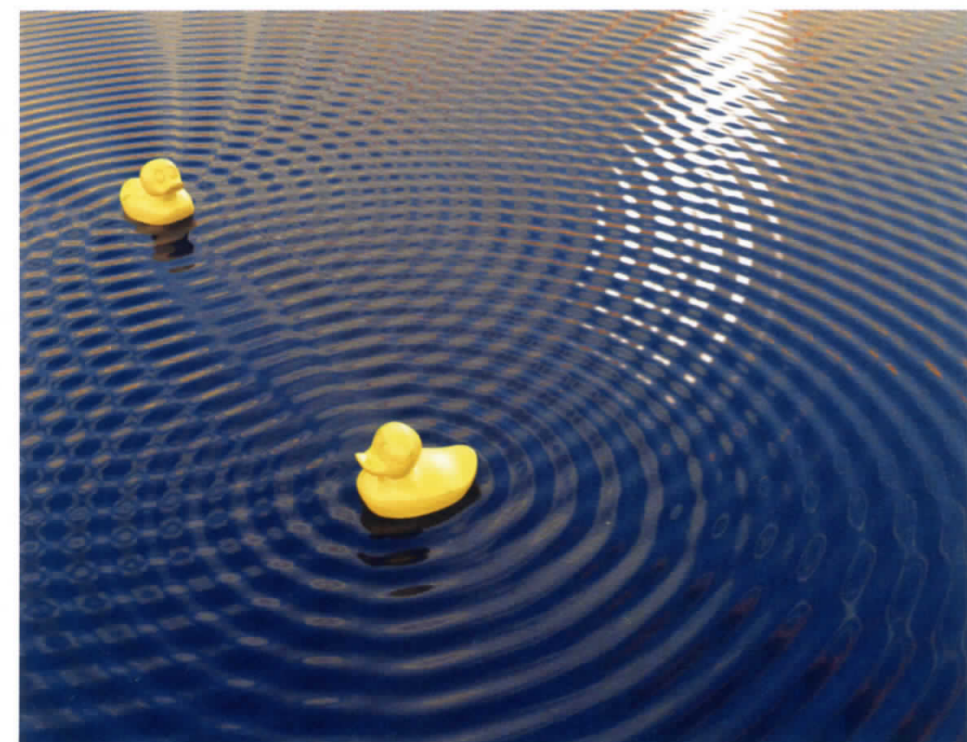
Puddle Interference The concept of interference shows up in everyday life in bodies of water, from puddles to oceans.

マイケルソン・モーリーの実験を理解しよう

波の干渉：山+山=強い山 強めあう

山と山の重ねあわせ

© 数研出版

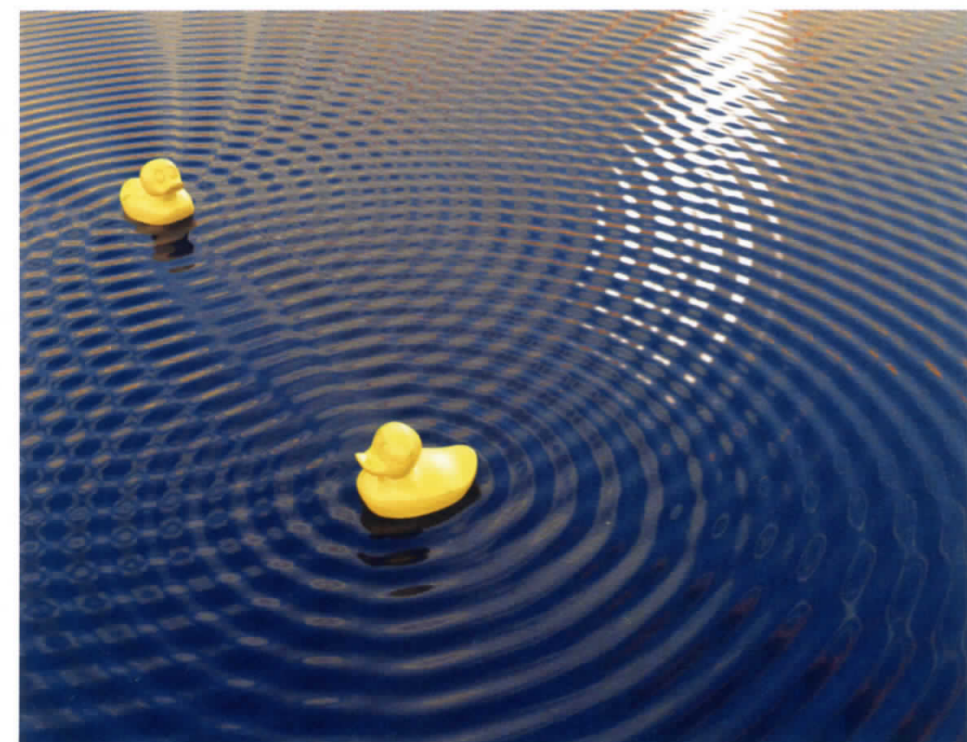


マイケルソン・モーリーの実験を理解しよう

波の干渉：山+谷=0 弱めあう

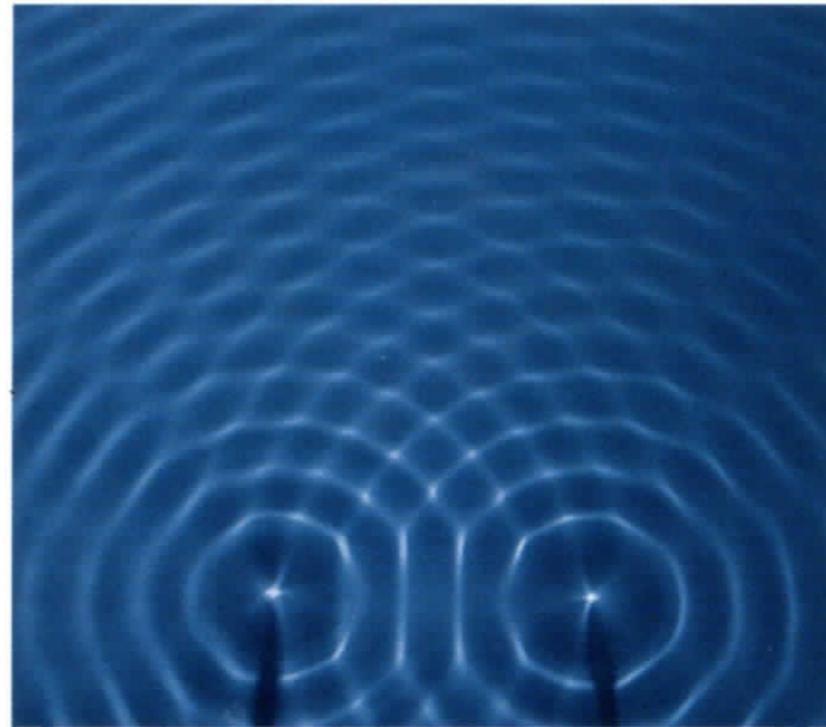
山と谷の重ねあわせ

© 数研出版

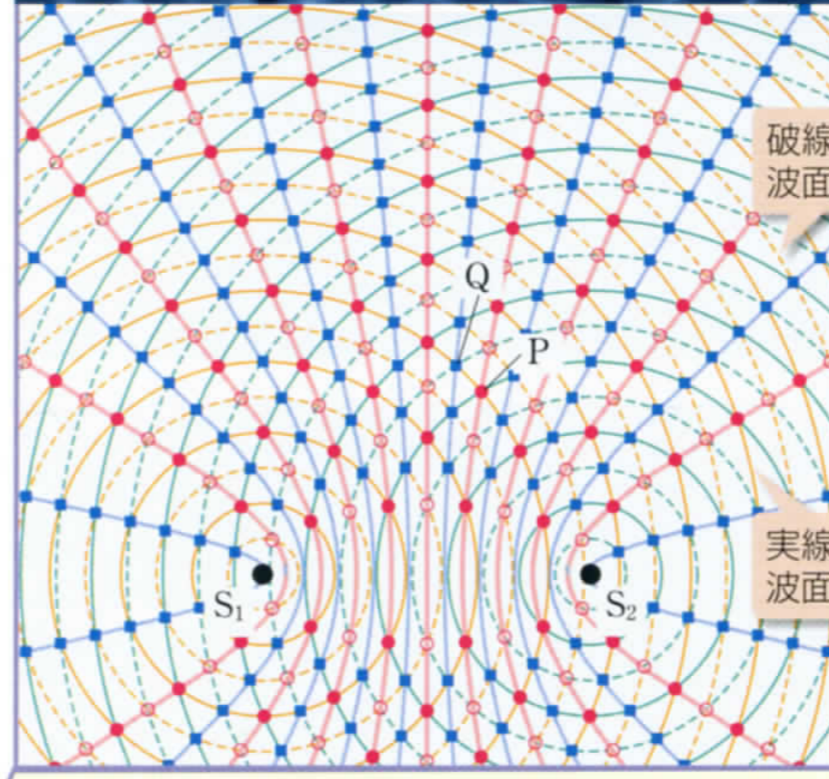
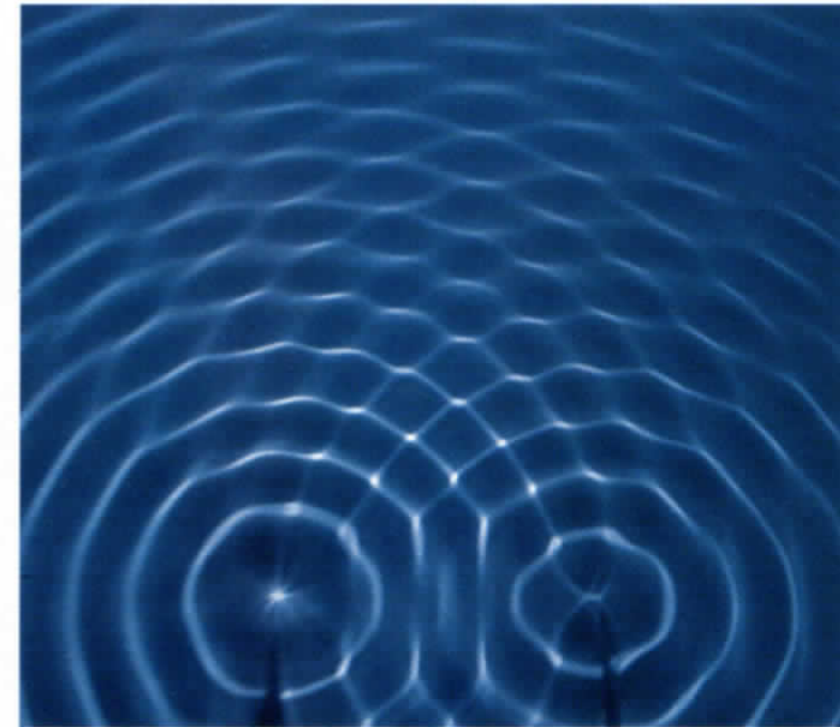


波の干渉 = 強めあったり弱めあったりする現象

● 同位相で振動する2つの波源の場合

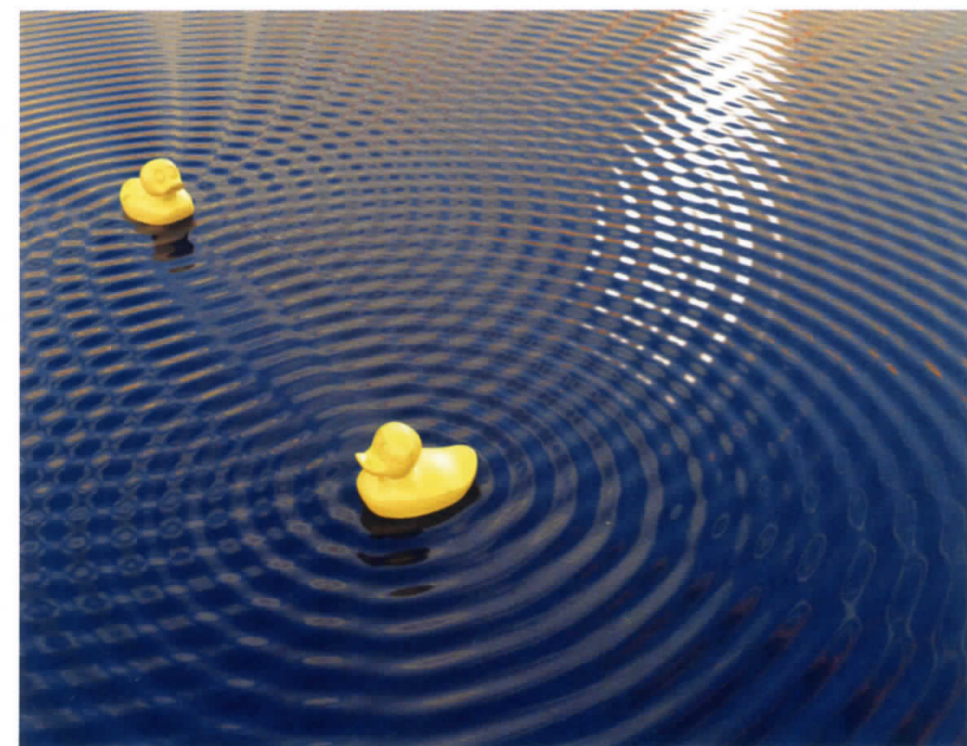
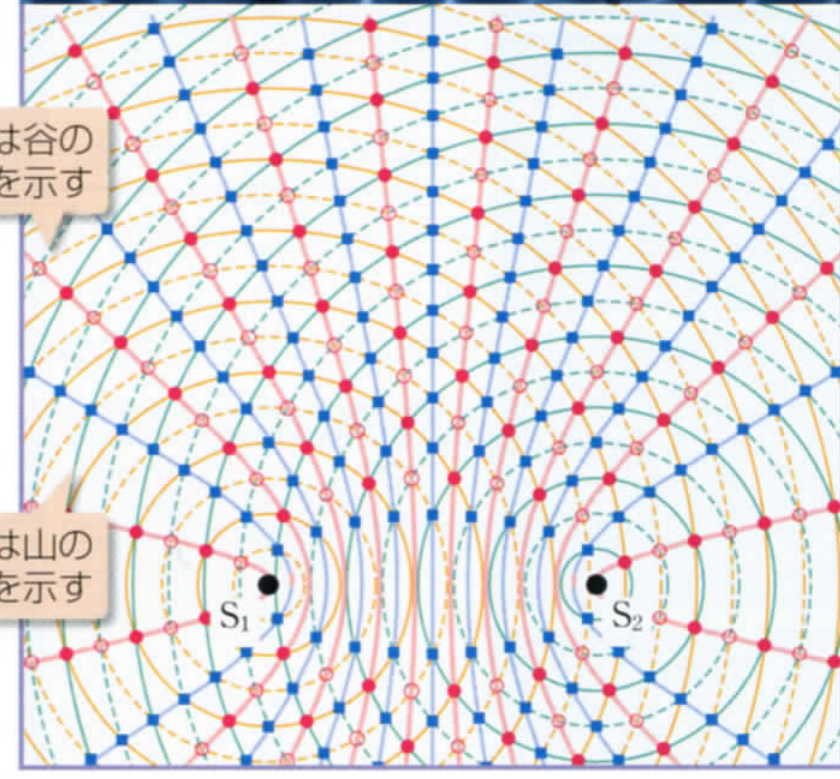


● 逆位相で振動する2つの波源の場合



破線は谷の波面を示す

実線は山の波面を示す



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>

重力波とブラックホール

2016年2月, LIGOが重力波を初めて検出した, と発表した

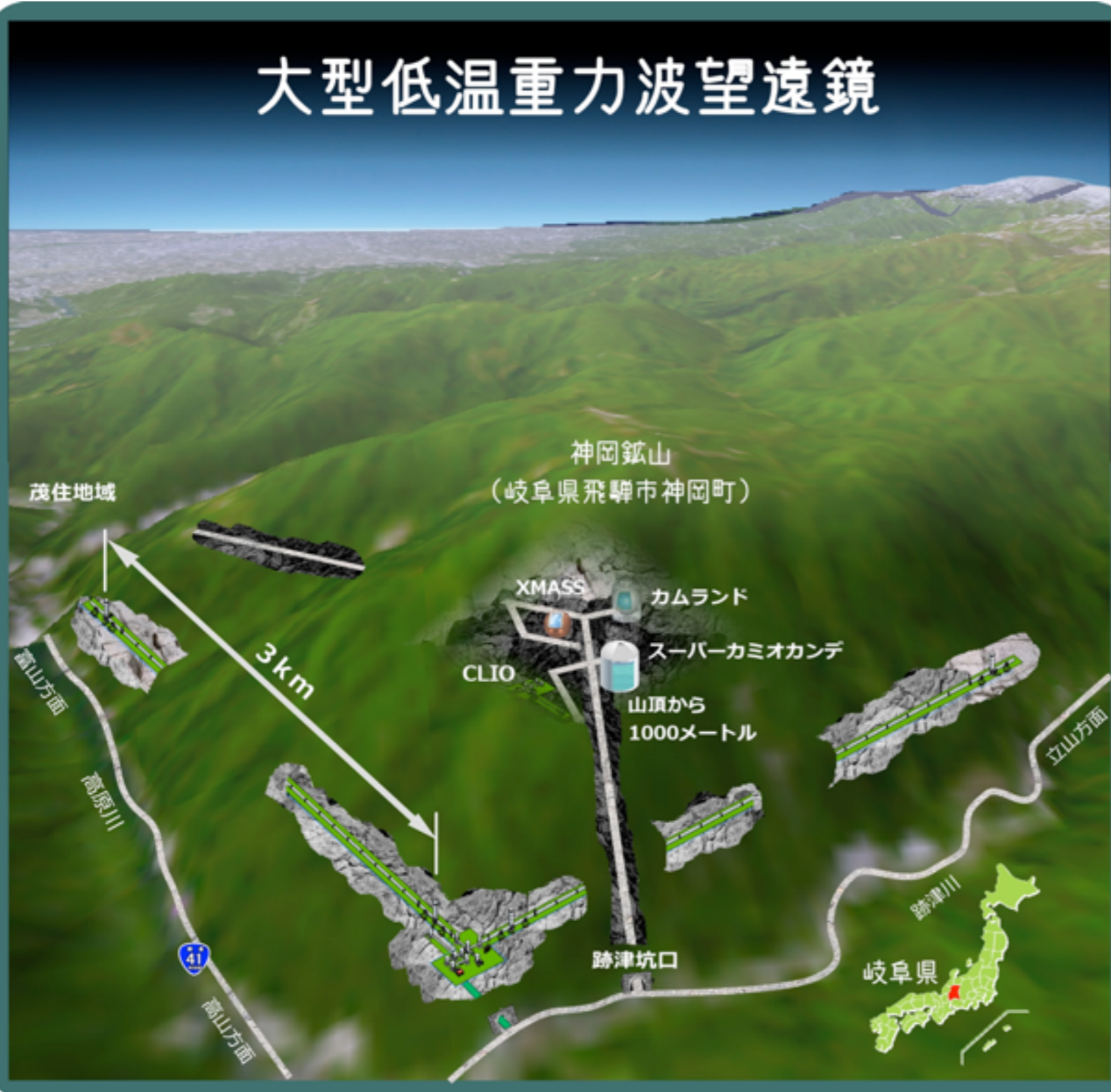


四国新聞だけ
ちがった... 残念 (笑)

KAGRA (大型低温重力波望遠鏡)

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

大型低温重力波望遠鏡



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



Hisaaki Shinkai



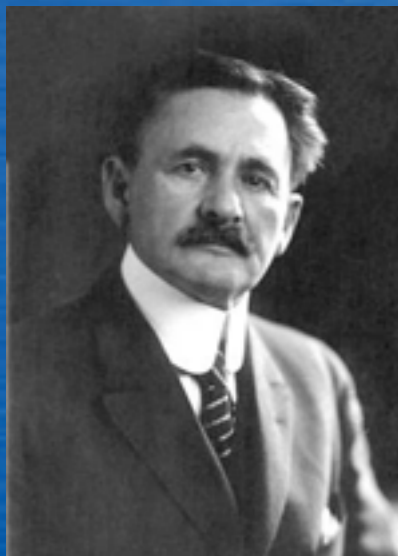
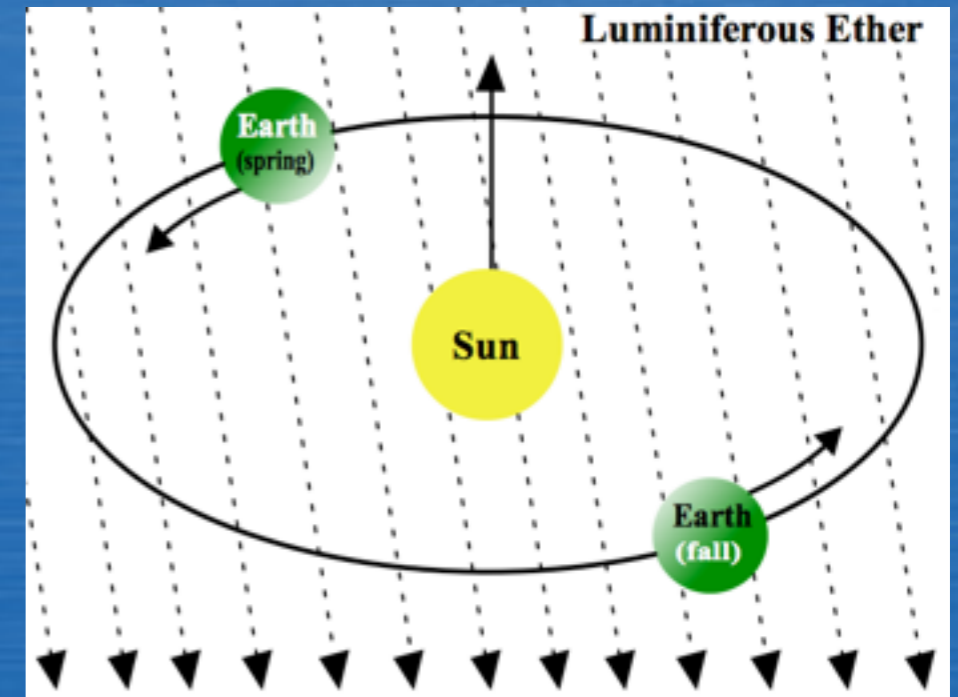
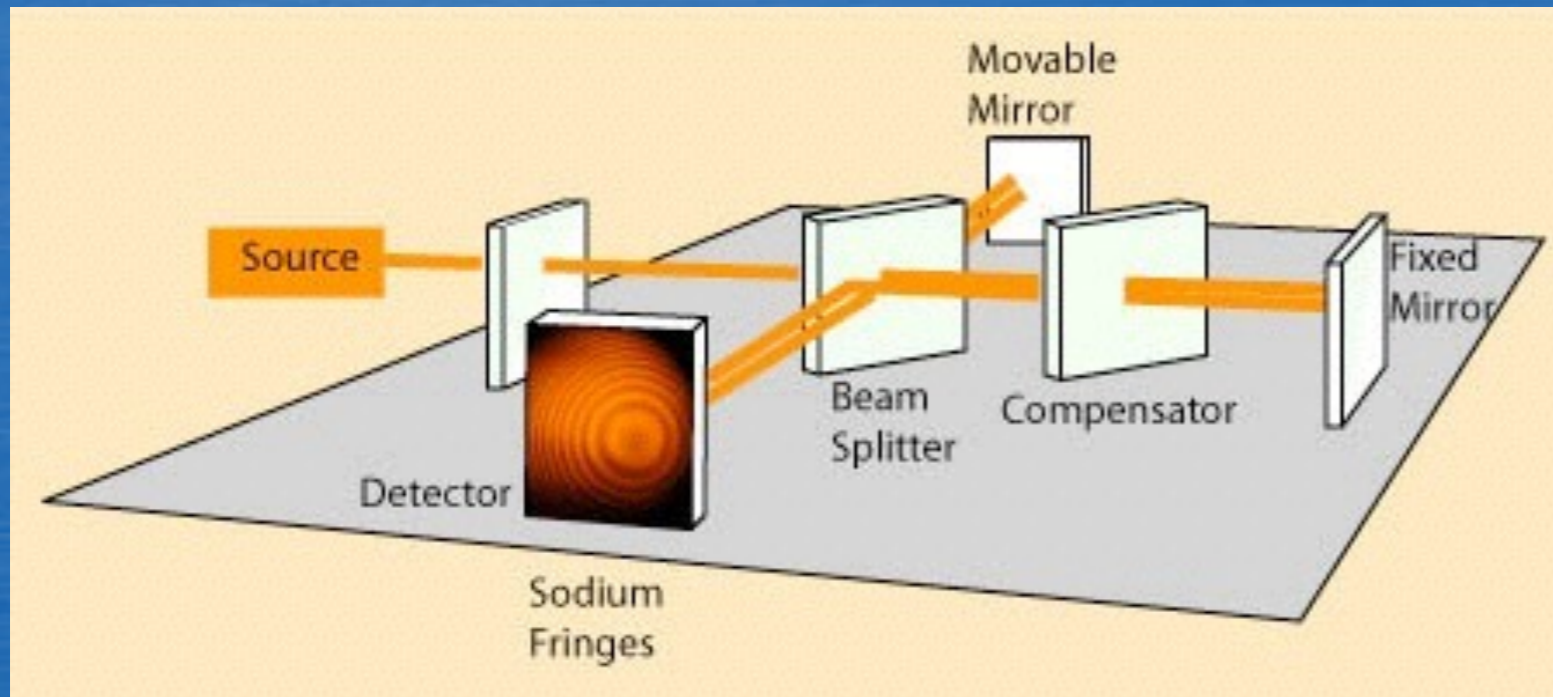
Seiji Kawamura

Kieran Craig

Martynov Denis

マイケルソン・モーリーの実験

Michelson-Morley experiment 1887



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。

→エーテルの検出に「失敗」

(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。

2つの原理の導入

p100

★**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。

★**光速度一定の原理**：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？



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)

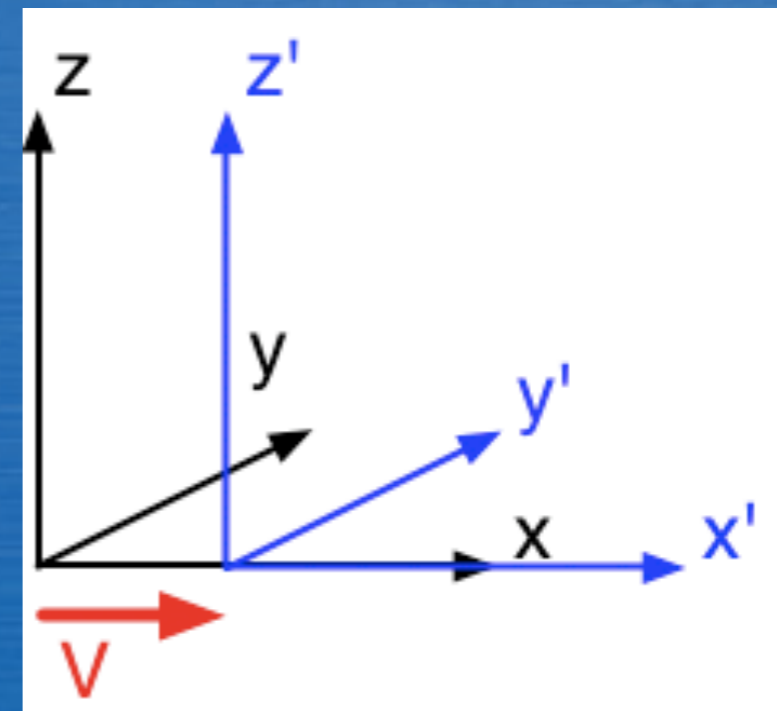
✗ 特別な座標系の存在？
不要である

特殊相対性理論 【時間の相対性】

- 動いている座標と静止している座標との変換則（ローレンツ変換）

$$\begin{pmatrix} t' \\ x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & -\gamma v/c^2 & 0 & 0 \\ -\gamma v & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$



- 時間の進み方だけを考えると,

$$dt' = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} dt$$

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.

光速 + 光速 = 光速

テキスト p101

ローレンツ変換では、速度の足し算は $v_1 + v_2$ ではなく、

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

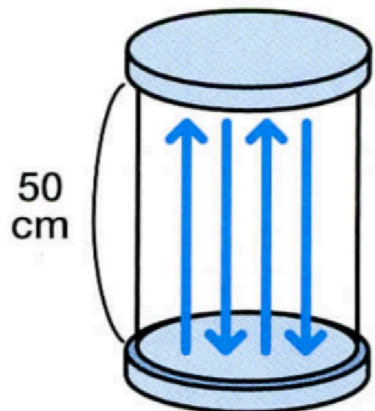
v_1	v_2	$v_1 + v_2$
光速の 0.1%	光速の 0.1%	光速の 0.19999998%
光速の 10%	光速の 10%	光速の 19.802%
光速の 90%	光速の 90%	光速の 99.448%
光速	光速	光速

光時計を使った思考実験

テキスト p102

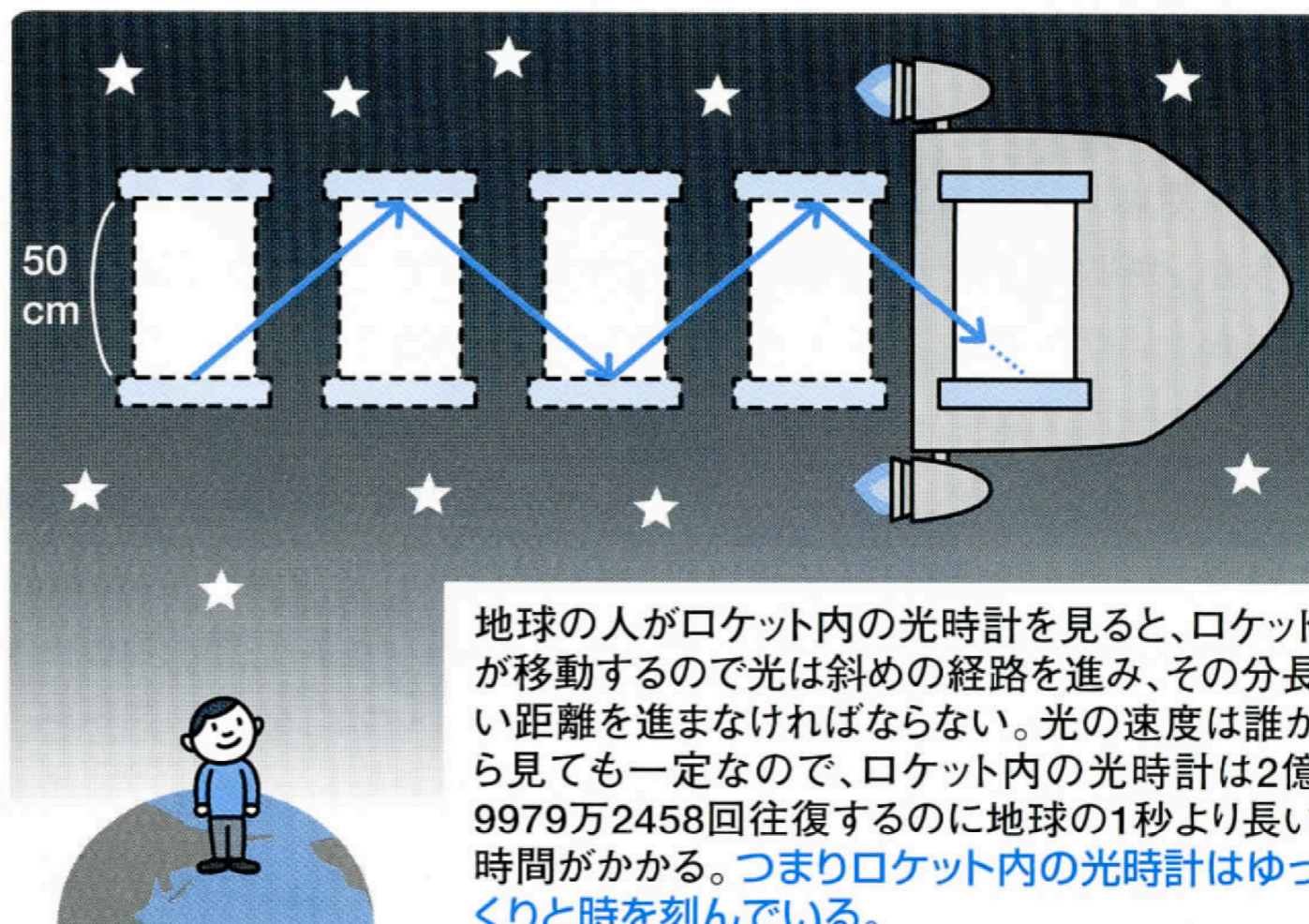
時間の進み方は、観測する人によって異なる。

時間の進み方は**相対的**になる。



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**

光時計の不思議

NHK 100分de名著「相対性理論」第2回 (2012年)

2:30'

特殊相対性理論 【ウラシマ効果】

- 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。

$$dt' = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} dt$$

- 「水の江の浦の島子を詠める一首」（万葉集 巻九 1740-41）
……家ゆ出でて 三歳の中に 垣もなく 家滅せめやと……

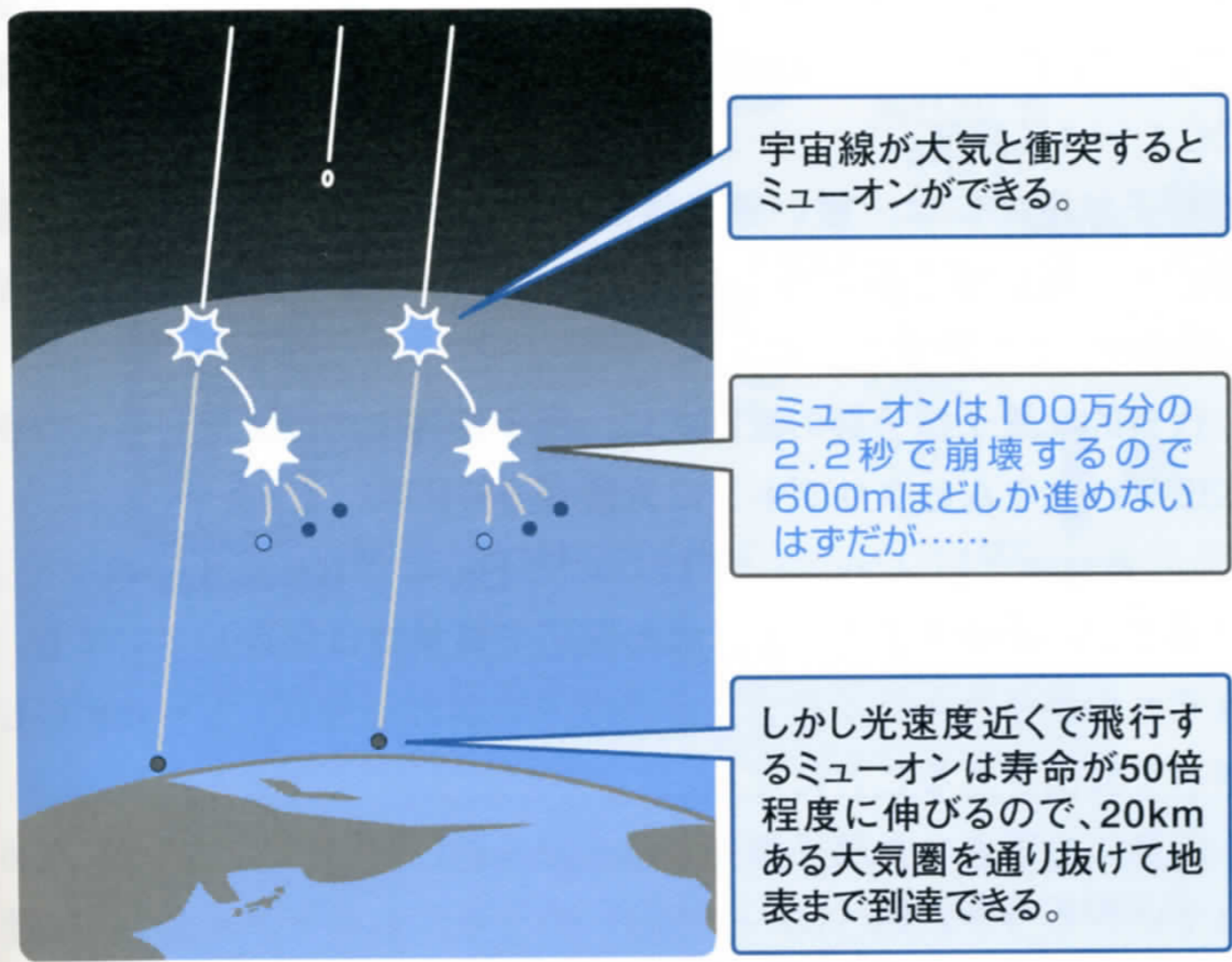
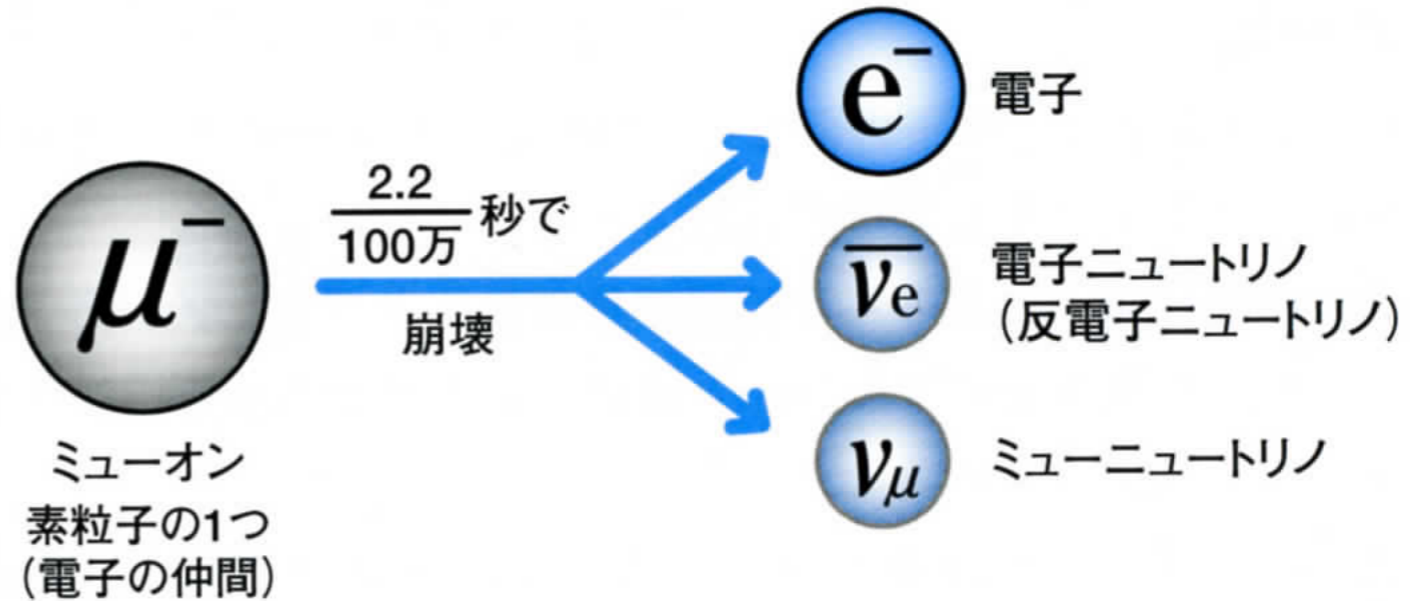
3年間竜宮城にいる間に、300年も経っていた。

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

竜宮城は光速の99.995%で動いていた。

未来へ行くタイムマシンは実現可能！

素粒子の寿命は確かに延びている！



国際宇宙ステーションの乗務員の寿命も延びる！



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

旅客機の乗務員の寿命も延びる！



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

不思議の国のトムキンス

テキスト p102

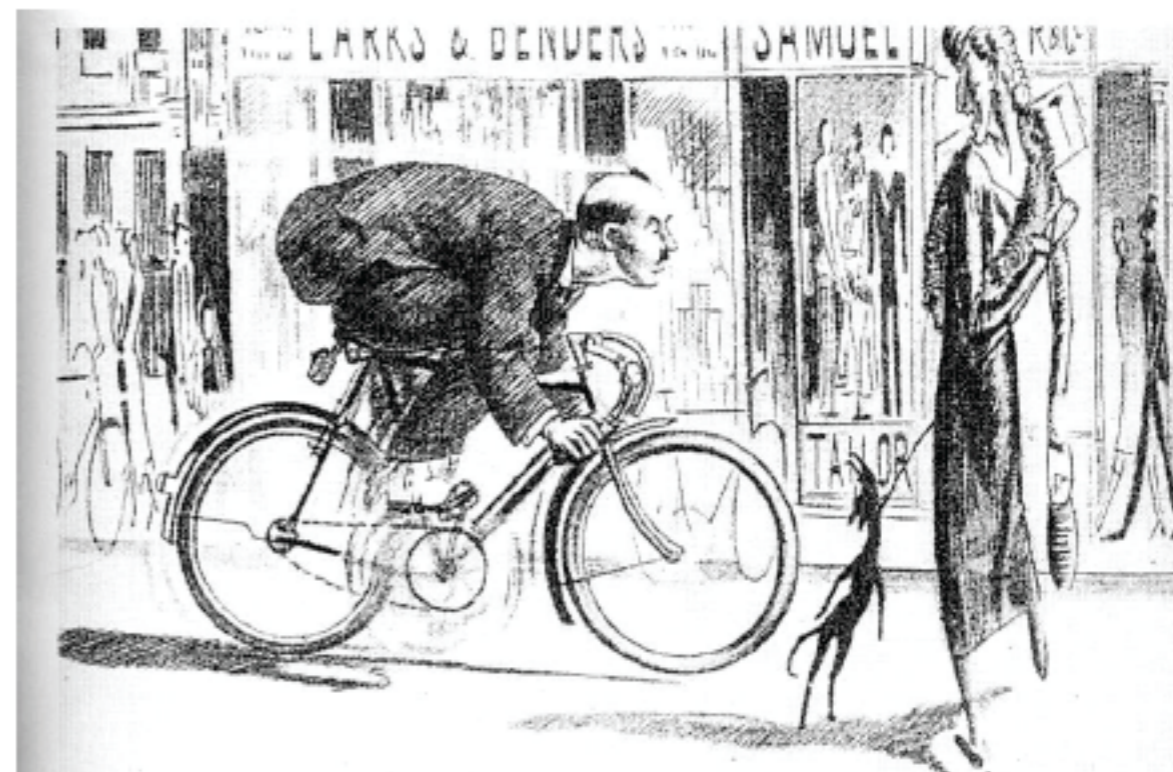
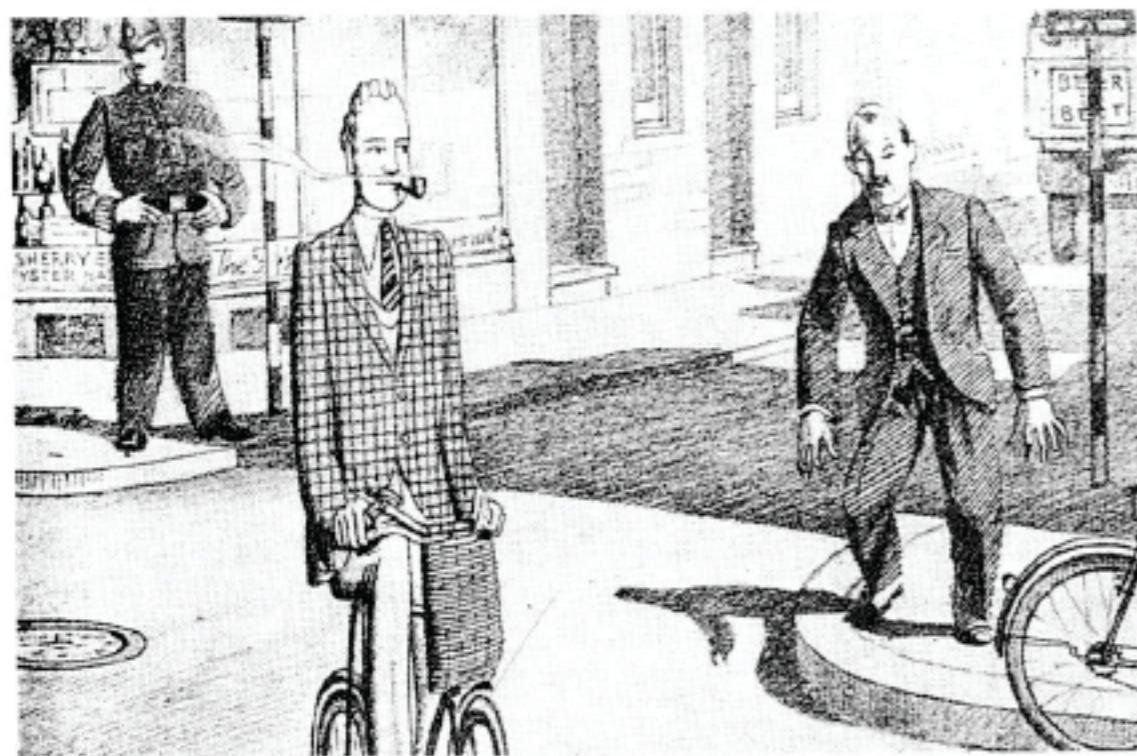


図 A.3 ガモフ著『不思議の国のトムキンス』[5]の挿絵。最高速度が時速 30 km/s の世界では、自転車で移動する人からみると世界が歪んで見え、止まっている人から自転車の人を見ると平たく見える。

光円錐と因果律

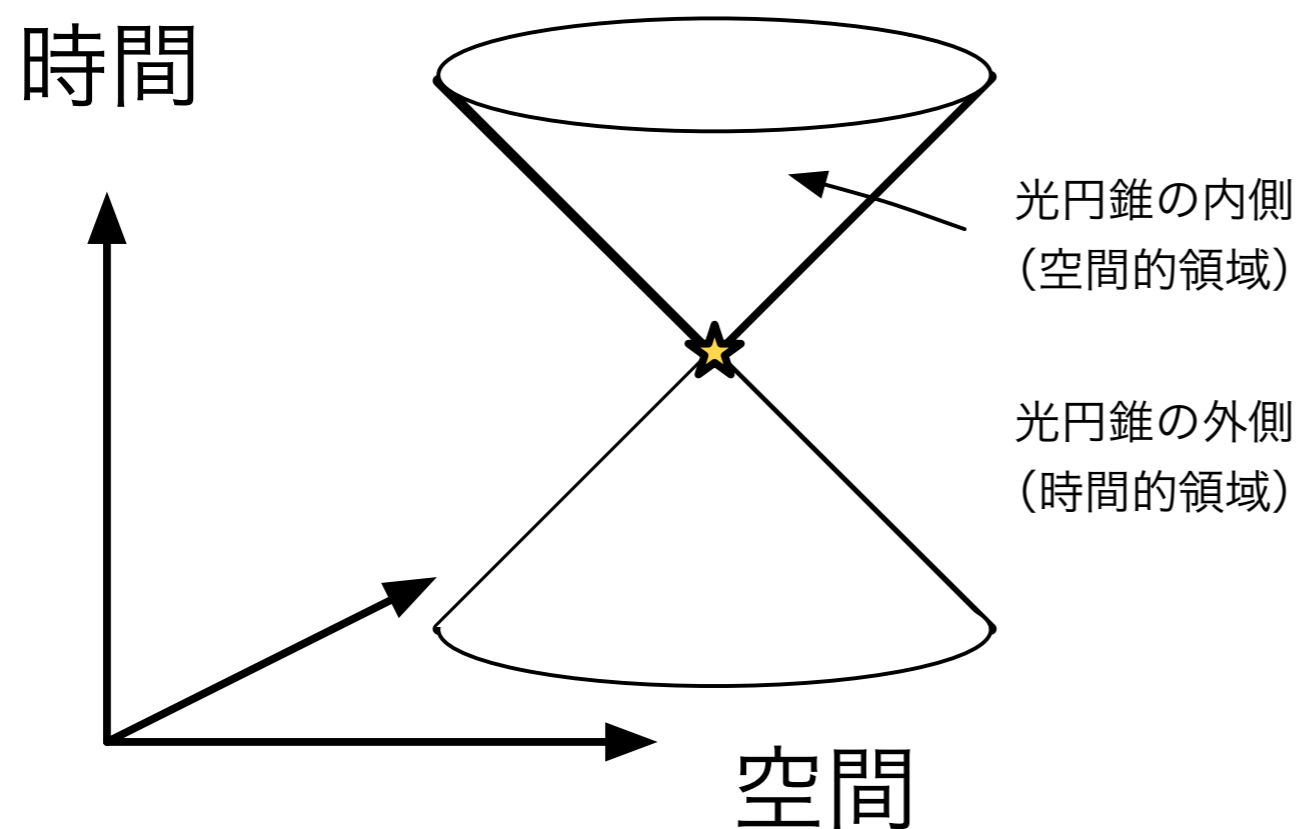


図 3.8 (左) 4次元時空は図にすることが難しいので、空間を2次元、時間を1次元にして図を描く。時間軸が縦である。光の伝わる経路はある点から円錐状に広がる。この円錐内であれば、情報が伝達可能な領域（因果関係があり得る空間的領域）、円錐より外側は情報伝達があり得ない領域（時間的領域）である。図を過去に向かって見れば、ある1点に過去からの情報がどこまで影響しているかも同様にわかる。(右) 世界物理年(2005年)のロゴは、ミンコフスキー時空の光円錐の図だった。

静止質量エネルギー

$$E = mc^2$$

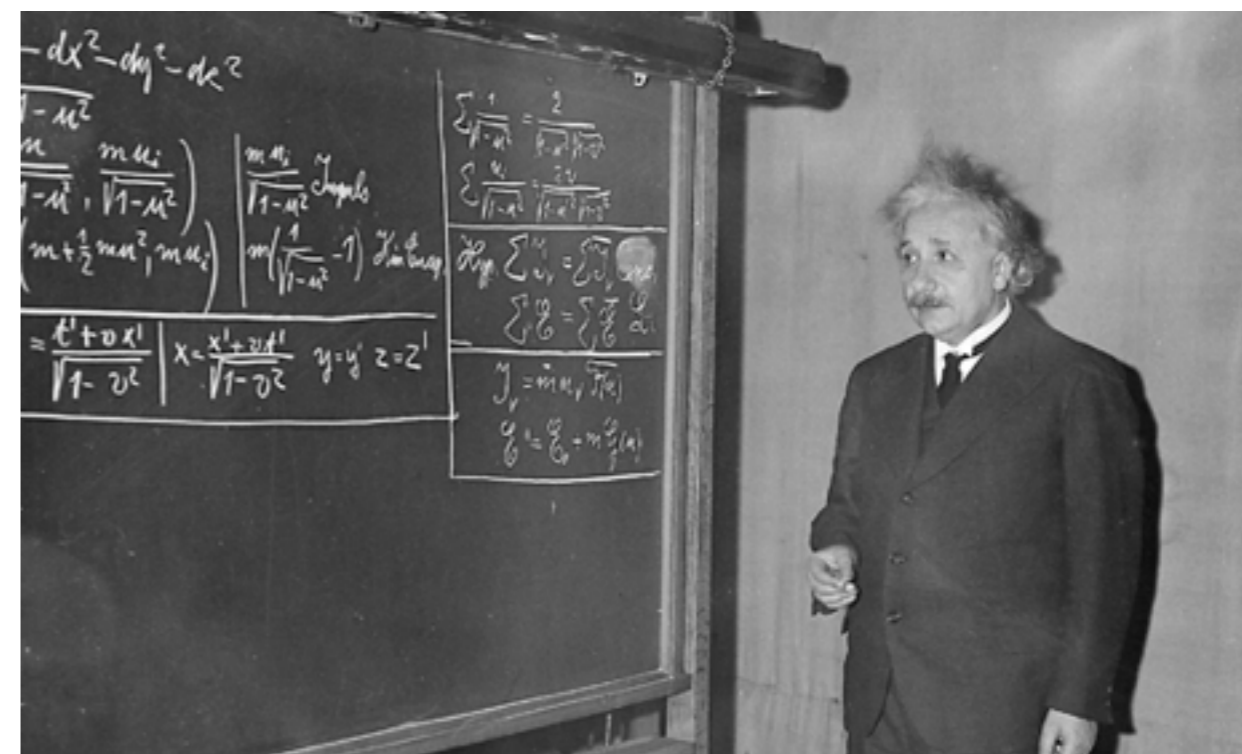
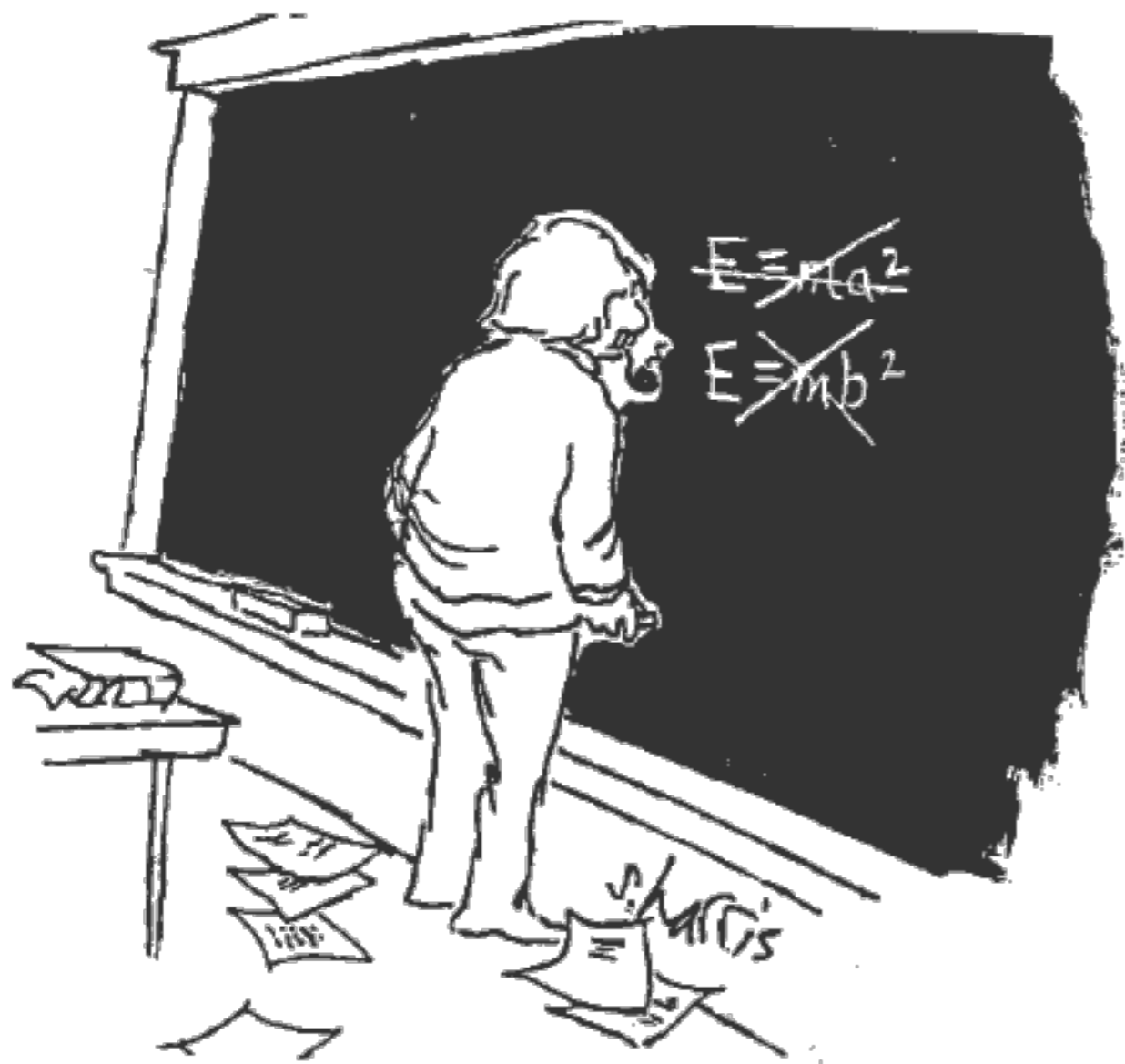
エネルギー

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！

A 特殊相対性理論 >> A.5 もっとも有名な物理の公式



特殊相対性理論 【静止質量エネルギー】

運動方程式 (ニュートン力学)

$$\frac{dp^i}{dt} = F^i$$

$$(ma = F)$$

相対論的運動方程式

$$\frac{dp^i}{d\tau} = f^i$$

相対論的エネルギー保存則

$$E \equiv mc^2 \frac{dt}{d\tau} = m \frac{c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

$$= mc^2 + \frac{1}{2}mv^2 + \frac{3}{8}m\frac{v^4}{c^2} + \dots$$

質量とエネルギーは、等価である。
質量が欠ければ、莫大なエネルギーが生じる。

最も有名な物理の公式

テキスト p106



……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いる。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。……



これまでの物理学を否定せず、拡張した理論！

特殊相対性理論

光の速さに近い場合の力学

「時間の進み方は観測者によって異なる」

ニュートン力学

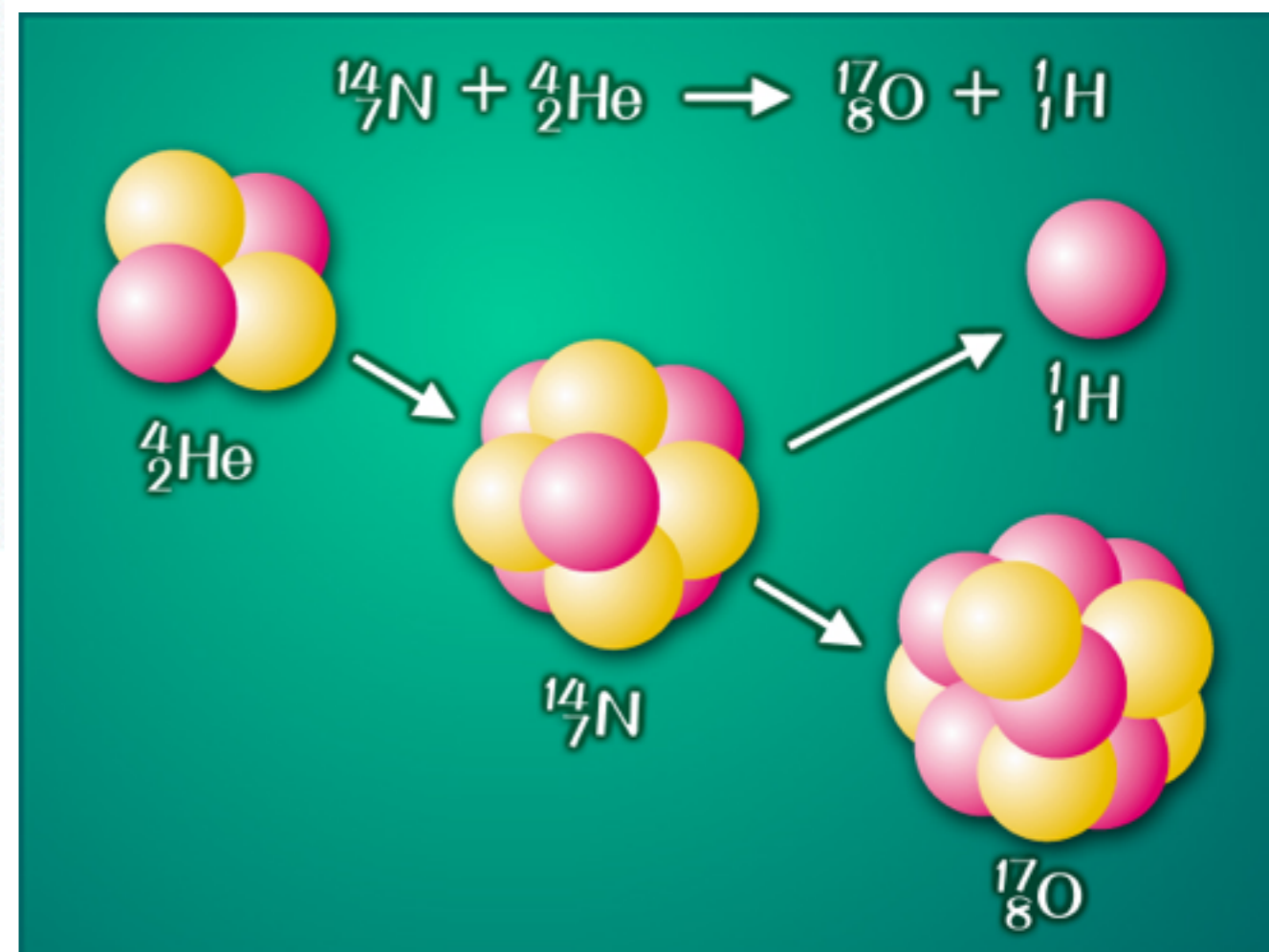
$$F = ma$$

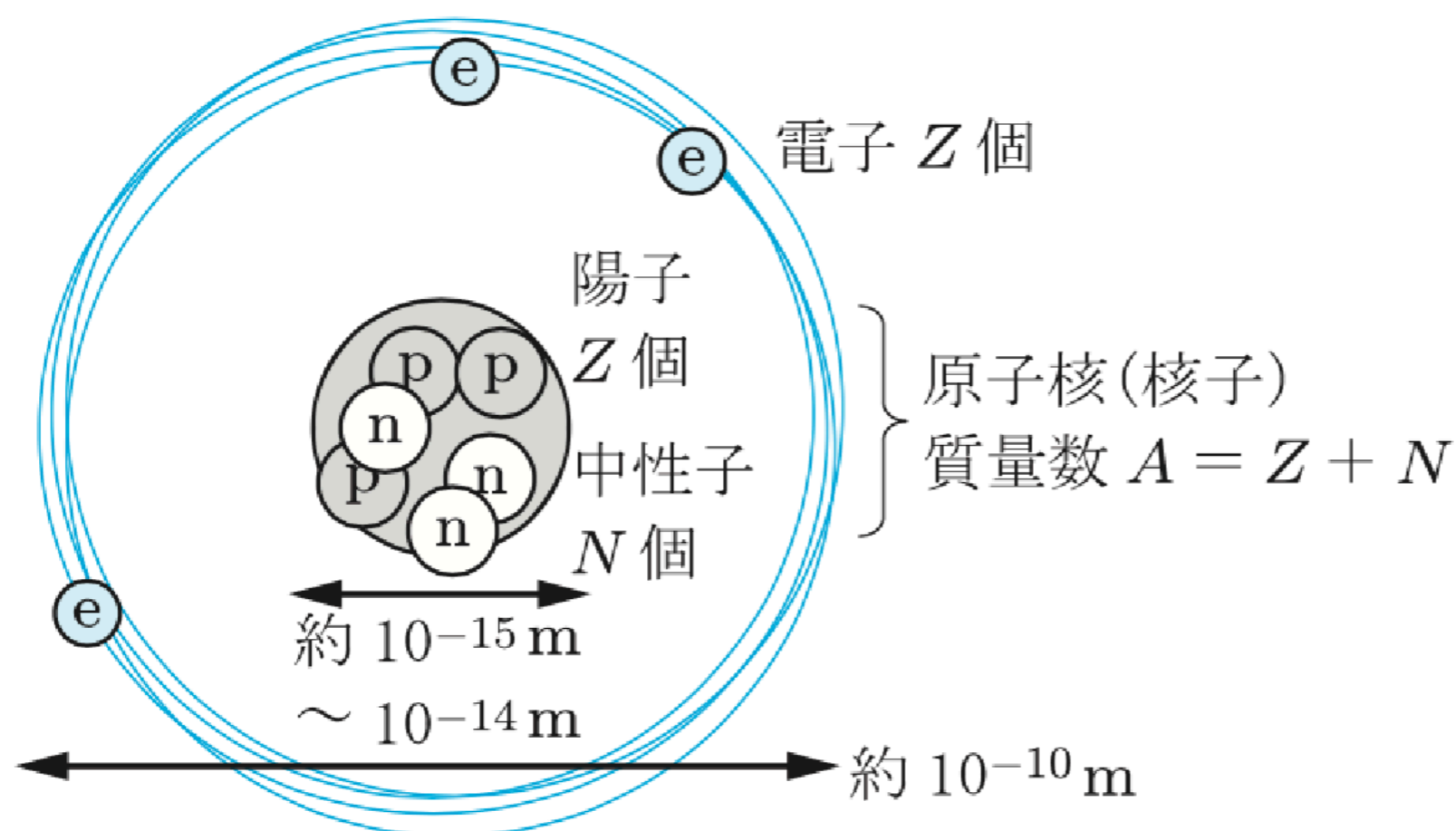
原子核反応と化学反応の違い

分子どうしの組み替えは、**化学反応**

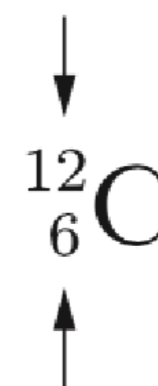


原子核の組み替えは、**核反応**





質量数 A
(核子の数)



原子番号 Z
(陽子の数)

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

周期表 (periodic table)

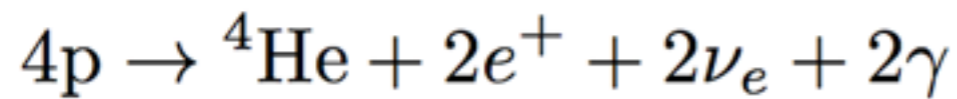
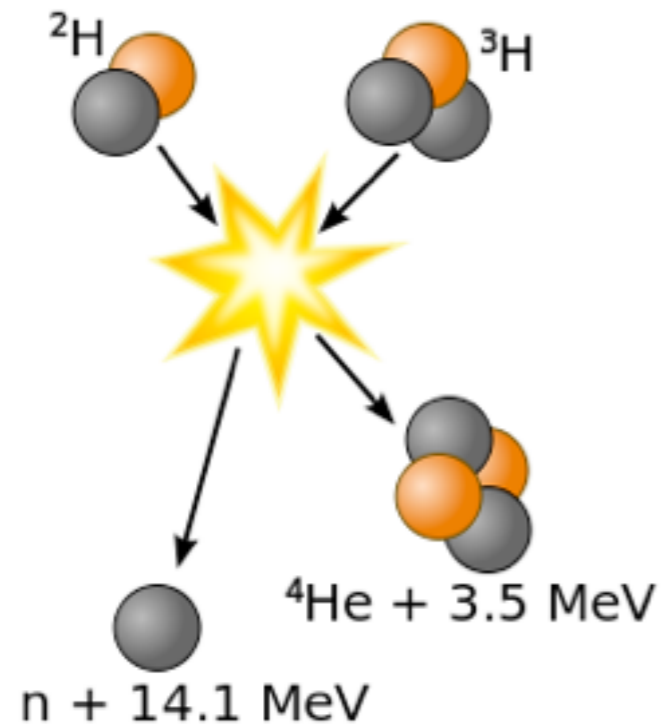
Period	1 IA	2 IIA											13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	18 VIII A
1	1 1s H 水素 hydrogen 1.008																	2 He ヘリウム helium 4.003
2	3 2s Li リチウム lithium 6.941	4 2s Be ベリリウム beryllium 9.012											5 2p B ホウ素 boron 10.81	6 2p C 炭素 carbon 12.01	7 2p N 窒素 nitrogen 14.01	8 2p O 酸素 oxygen 16.00	9 2p F フッ素 fluorine 19.00	10 2p Ne ネオン neon 20.18
3	11 3s Na ナトリウム sodium 22.99	12 3s Mg マグネシウム magnesium 24.31	3 3d III B	4 3d IV B	5 3d V B	6 3d VI B	7 3d VII B	8 3d VIII B	9 3d VIII B	10 3d VIII B	11 3d IB	12 3d II B	13 3p Al アルミニウム aluminum 26.98	14 3p Si ケイ素 silicon 28.09	15 3p P リン phosphorus 30.97	16 3p S 硫黄 sulfur 32.07	17 3p Cl 塩素 chlorine 35.45	18 3p Ar アルゴン argon 39.95
4	19 4s K カリウム potassium 39.10	20 4s Ca カルシウム calcium 40.08	21 3d Sc スカンジウム scandium 44.96	22 3d Ti チタン titanium 47.87	23 3d V バナジウム vanadium 50.94	24 3d Cr クロム chromium 52.00	25 3d Mn マンガン manganese 54.94	26 3d Fe 鉄 iron 55.85	27 3d Co コバルト cobalt 58.93	28 3d Ni ニッケル nickel 58.69	29 3d Cu 銅 copper 63.55	30 3d Zn 亜鉛 zinc 65.41	31 4p Ga ガリウム gallium 69.72	32 4p Ge ゲルマニウム germanium 72.64	33 4p As ヒ素 arsenic 74.92	34 4p Se セレン selenium 78.96	35 4p Br 臭素 bromine 79.90	36 4p Kr クリプトン krypton 83.80
5	37 5s Rb ルビジウム rubidium 85.47	38 5s Sr ストロンチウム strontium 87.62	39 4d Y イットリウム yttrium 88.91	40 4d Zr ジルコニウム zirconium 91.22	41 4d Nb ニオブ niobium 92.91	42 4d Mo モリブデン molybdenum 95.94	43 4d Tc テクネチウム technetium 98	44 4d Ru ルルテニウム ruthenium 101.1	45 4d Rh ロジウム rhodium 102.9	46 4d Pd パラジウム palladium 106.4	47 4d Ag 銀 silver 107.9	48 4d Cd カドミウム cadmium 112.4	49 5p In インジウム indium 114.8	50 5p Sn スズ tin 118.7	51 5p Sb アンチモン antimony 121.8	52 5p Te テルル tellurium 127.6	53 5p I ヨウ素 iodine 126.9	54 5p Xe キセノン xenon 131.3
6	55 6s Cs セシウム cesium 132.9	56 6s Ba バリウム barium 137.3	57-71 † 5d ランタノイド lanthanides	72 † 5d Hf ハフニウム hafnium 178.5	73 † 5d Ta タンタル tantalum 180.9	74 † 5d W タングステン tungsten 183.8	75 † 5d Re レニウム rhenium 186.2	76 † 5d Os オスミウム osmium 190.2	77 † 5d Ir イリジウム iridium 192.2	78 † 5d Pt 白金 platinum 195.1	79 † 5d Au 金 gold 197.0	80 † 5d Hg 水銀 mercury 200.6	81 6p Tl タリウム thallium 204.4	82 6p Pb 鉛 lead 207.2	83 6p Bi ビスマス bismuth 209.0	84 6p Po ポロニウム polonium 209	85 6p At アスタチン astatine 210	86 6p Rn ラドン radon 222
7	87 7s Fr フランシウム francium 223	88 7s Ra ラジウム radium 226	89-103 ‡ 6d アクチノイド actinides	104 ‡ 6d Rf ラザホージウム rutherfordium 261	105 ‡ 6d Db ドブニウム dubnium 262	106 ‡ 6d Sg シーボーギウム seaborgium 266	107 ‡ 6d Bh ボーリウム bohrium 264	108 ‡ 6d Hs ハッシウム hassium 277	109 ‡ 6d Mt マイトネリウム meitnerium 268	110 ‡ 6d Ds ダームスタチウム darmstadtium 281	111 ‡ 6d Rg レントゲニウム roentgenium 272	112 ‡ 6d Cn コペルニシウム copernicium 285	113 7p Nh ニホニウム nihonium 284	114 7p Fl フレロビウム flerovium 289	115 7p Mc モスコビウム moscovium 288	116 7p Lv リバモリウム livermorium 292	117 7p Ts テネシン tennessine 293	118 7p Og オガネソン oganesson 294
			† 4f ランタノイド lanthanides (レアース金属) (rare earth metals)	57 † 4f La ランタン lanthanum 138.9	58 † 4f Ce セリウム cerium 140.1	59 † 4f Pr プラセオジウム praseodymium 140.9	60 † 4f Nd ネオジウム neodymium 144.2	61 † 4f Pm プロメチウム promethium 145	62 † 4f Sm サマリウム samarium 150.4	63 † 4f Eu ユロピウム europium 152.0	64 † 4f Gd ガドリニウム gadolinium 157.3	65 † 4f Tb テルビウム terbium 158.9	66 † 4f Dy ジスプロシウム dysprosium 162.5	67 † 4f Ho ホルミウム holmium 164.9	68 † 4f Er エルビウム erbium 167.3	69 † 4f Tm ツリウム thulium 168.9	70 † 4f Yb イッテルビウム ytterbium 173.0	71 † 4f Lu ルテチウム lutetium 175.0
			‡ 5f アクチノイド actinides	89 ‡ 5f Ac アクチニウム actinium 227	90 ‡ 5f Th トリウム thorium 232.0	91 ‡ 5f Pa プロトアクチニウム protactinium 231.0	92 ‡ 5f U ウラン uranium 238.0	93 ‡ 5f Np ネプツニウム neptunium 237	94 ‡ 5f Pu プルトニウム plutonium 239	95 ‡ 5f Am アメリシウム americium 243	96 ‡ 5f Cm キュリウム curium 247	97 ‡ 5f Bk バーケリウム berkelium 247	98 ‡ 5f Cf カリホルニウム californium 251	99 ‡ 5f Es アインスタイニウム einsteinium 252	100 ‡ 5f Fm フェルミウム fermium 257	101 ‡ 5f Md メンデレビウム mendelevium 258	102 ‡ 5f No ノーベリウム nobelium 259	103 ‡ 5f Lr ローレンシウム lawrencium 262

原子番号 → 29
 元素記号 → **Cu**
 元素名(日本語) → 銅
 元素名(英語) → copper
 原子量 → 63.55

← 通常できるイオンの価数
 ← 元素記号が灰色のものは人工合成された元素

↑ 非金属元素
 ↓ 金属元素

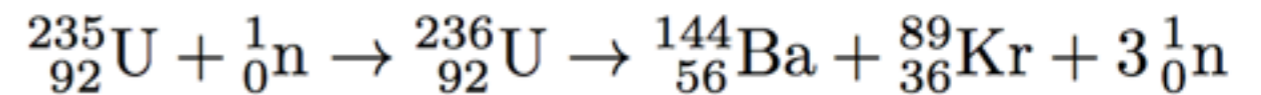
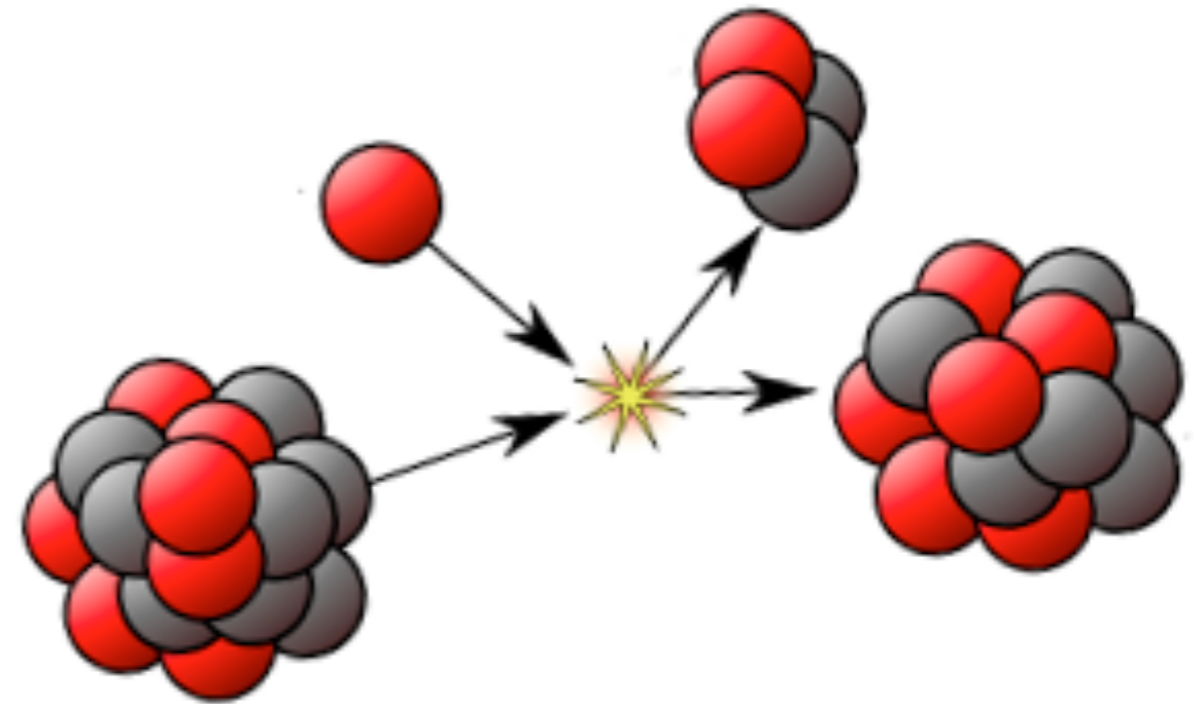
■ 常温で気体
 ■ 単体は半導体
 ■ 常温で液体
 ■ 単体は強磁性体
 ■ 放射性同位体のみからなる元素



核融合

(nuclear fusion)

合体した方が安定
(エネルギー放出)



核分裂

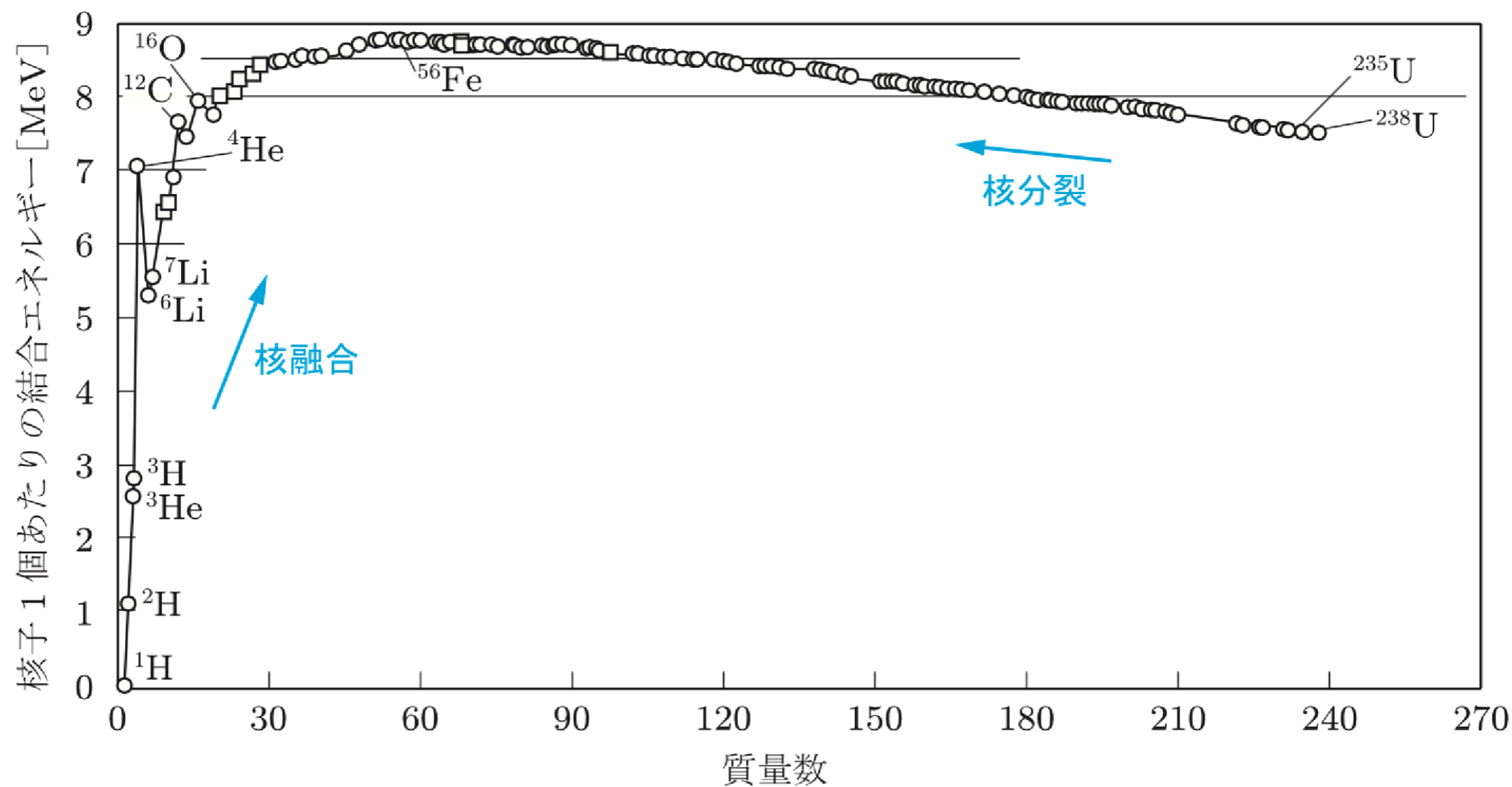
(nuclear fission)

分裂した方が安定
(エネルギー放出)

結合エネルギー

核融合も核分裂もおきる理由は何か？

↑ ↑
結合エネルギー (大)

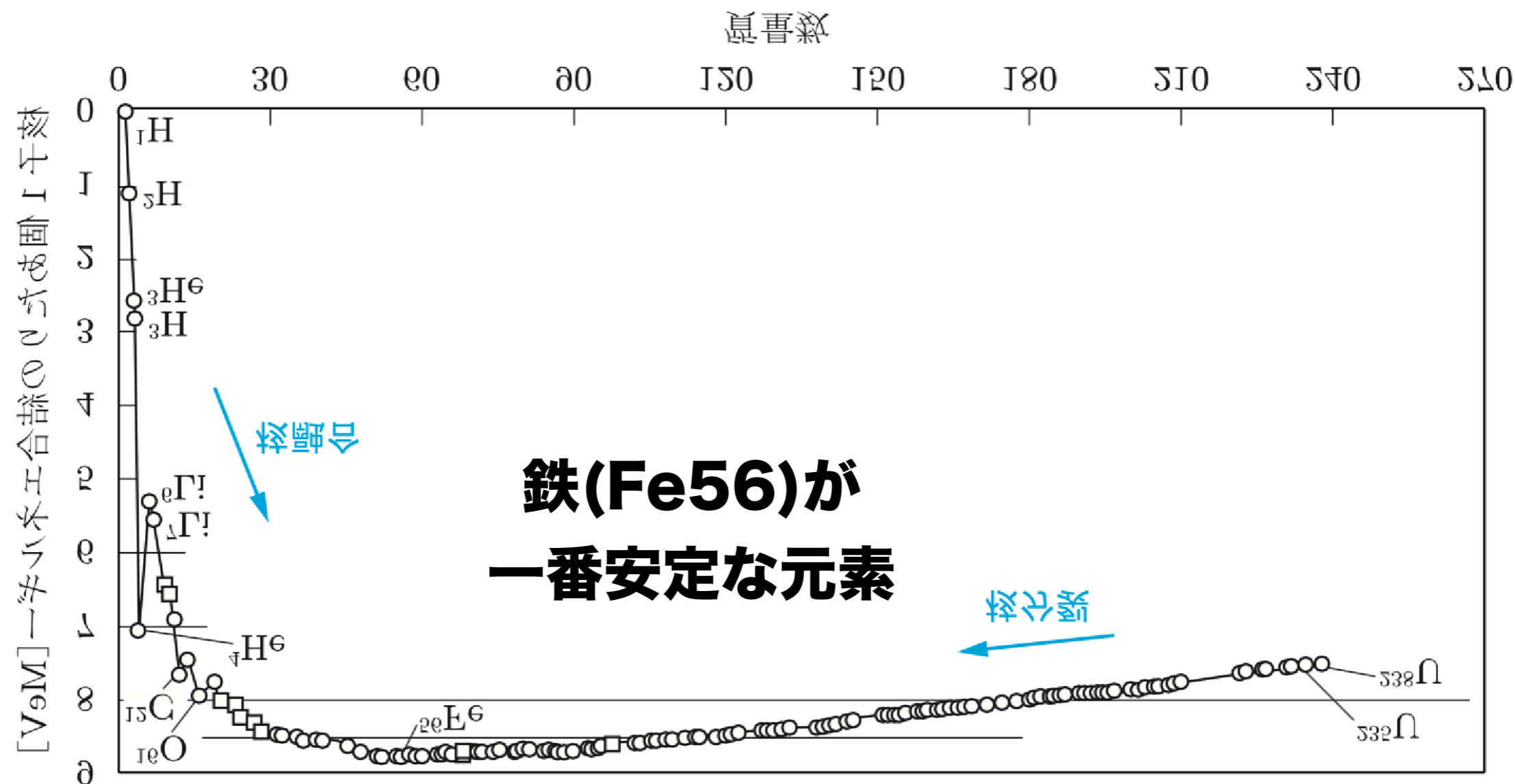


→ → 質量数 (大)

結合エネルギー

核融合も核分裂もおきる理由は何か？

結合エネルギー (大)



→ → 質量数 (大)

The Convection Zone

Energy continues to move toward the surface through convection currents of heated and cooled gas in the convection zone.

The Corona

The ionized elements within the corona glow in the x-ray and extreme ultraviolet wavelengths. NASA instruments can image the Sun's corona at these higher energies since the photosphere is quite dim in these wavelengths.

The Radiative Zone

Energy moves slowly outward—taking more than 170,000 years to radiate through the layer of the Sun known as the radiative zone.

Sun's Core

Energy is generated by thermonuclear reactions creating extreme temperatures deep within the Sun's core.

Coronal Streamers

The outward-flowing plasma of the corona is shaped by magnetic field lines into tapered forms called coronal streamers, which extend millions of miles into space.

The Chromosphere

The relatively thin layer of the Sun called the chromosphere is sculpted by magnetic field lines that restrain the electrically charged solar plasma. Occasionally larger plasma features—called prominences—form and extend far into the very tenuous and hot corona, sometimes ejecting material away from the Sun.

$$E = mc^2$$

- **発端：**

相対性理論の考えにより，運動法則をどの座標から見ても同じ形になるように書き換えると登場した。

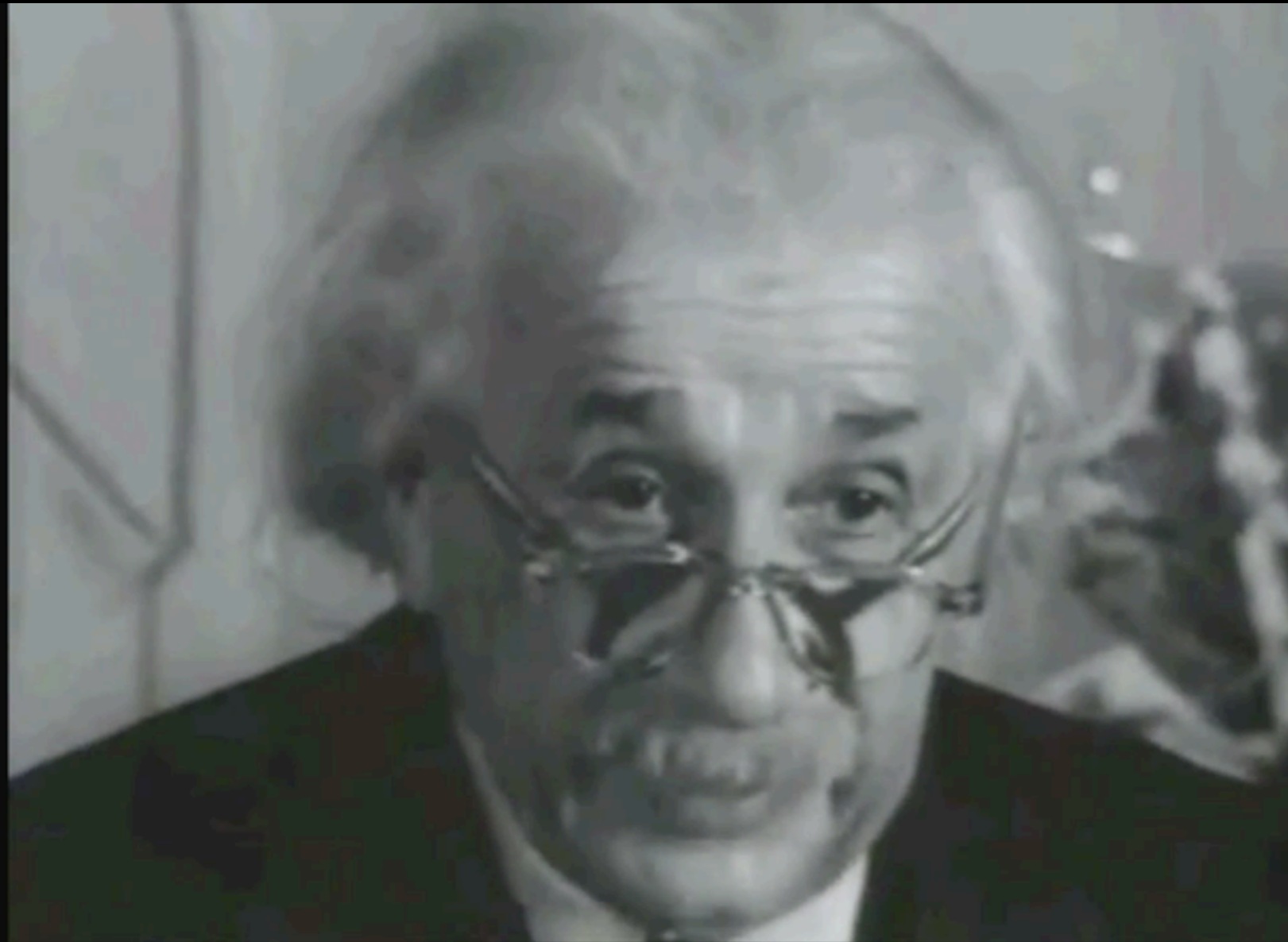
- **意味するもの：**

質量とエネルギーは同じ。原子核反応により，世の中から質量がわずかでもなくなれば，莫大なエネルギーが得られる。

- **応用：**

核融合反応：星の輝く原理，水素爆弾

核分裂反応：原子爆弾，原子力発電



Einstein 自身による $E = mc^2$ の説明

It followed from the special theory of relativity that mass and energy are both but different manifestations of the same thing — a somewhat unfamiliar conception for the average mind.

Furthermore, the equation $E = mc^2$, in which energy is put equal to mass, multiplied by the square of the velocity of light, showed that very small amounts of mass may be converted into a very large amount of energy and vice versa.

The mass and energy were in fact equivalent, according to the formula mentioned before.

This was demonstrated by Cockcroft and Walton in 1932, experimentally.

特殊相対性理論は正しいか？

- **光速度一定**
疑う余地なし
- **時間の遅れ**
宇宙線による素粒子の寿命
原子時計を用いた飛行機実験
GPS衛星からの電波
- **$E=mc^2$**
原子核実験, 原子力発電に応用
- **素粒子理論**は特殊相対性理論をベースにして構築されており, この前提が崩れればたいへんなことになる。

一般相対性理論

強い重力場での時空の力学

「空間が歪むのが重力の正体である」

特殊相対性理論

光の速さに近い場合の力学

「時間の進み方は観測者によって異なる」

ニュートン力学

$$F = ma$$

いよいよ

一般相対性理論 General Relativity

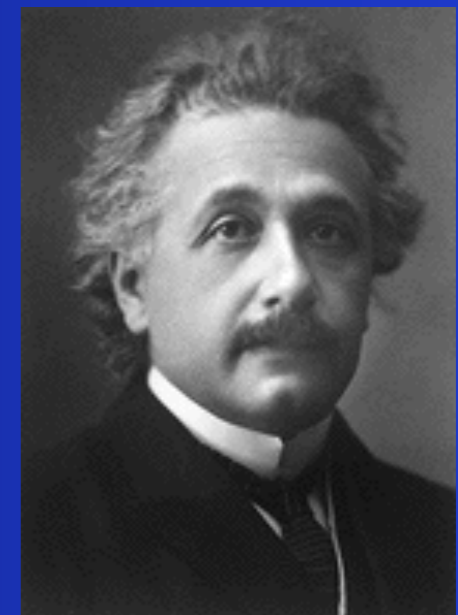
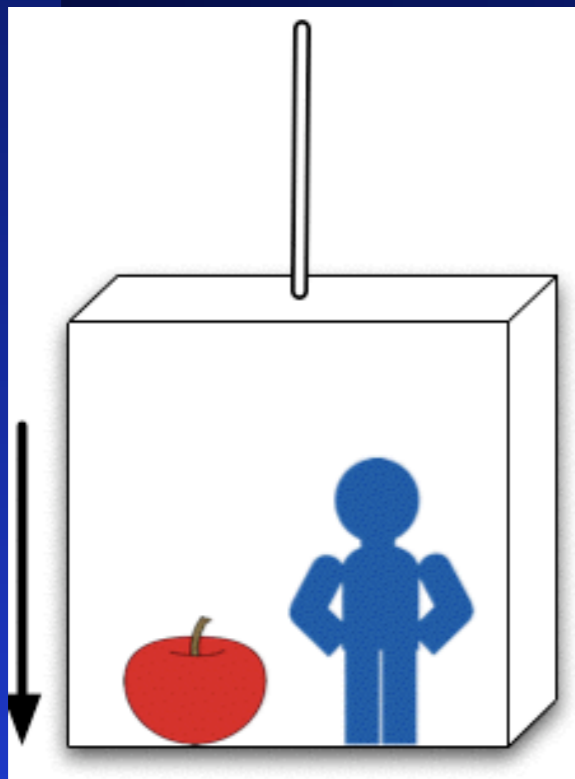
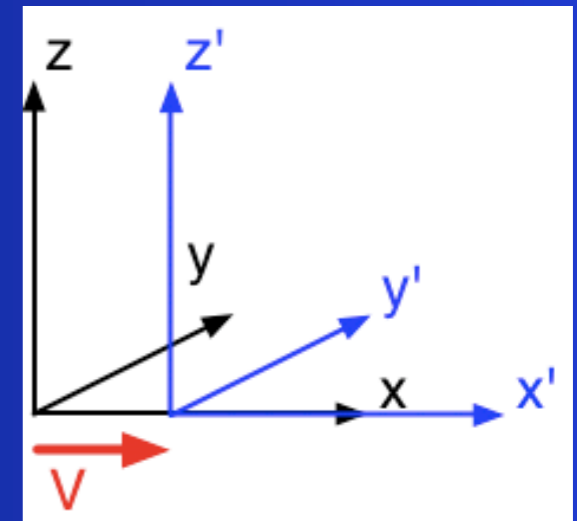
一般相対性理論は、重力の理論。
重い天体は、時空を曲げる。

一般相対性理論【等価原理】

★ 特殊相対性理論は、加速運動する座標系を取り扱うことはできなかった。

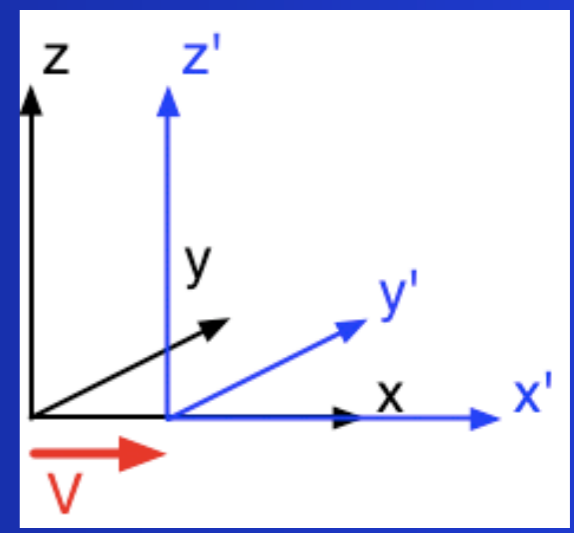
★ 加速度とは何か？

エレベータの思考実験



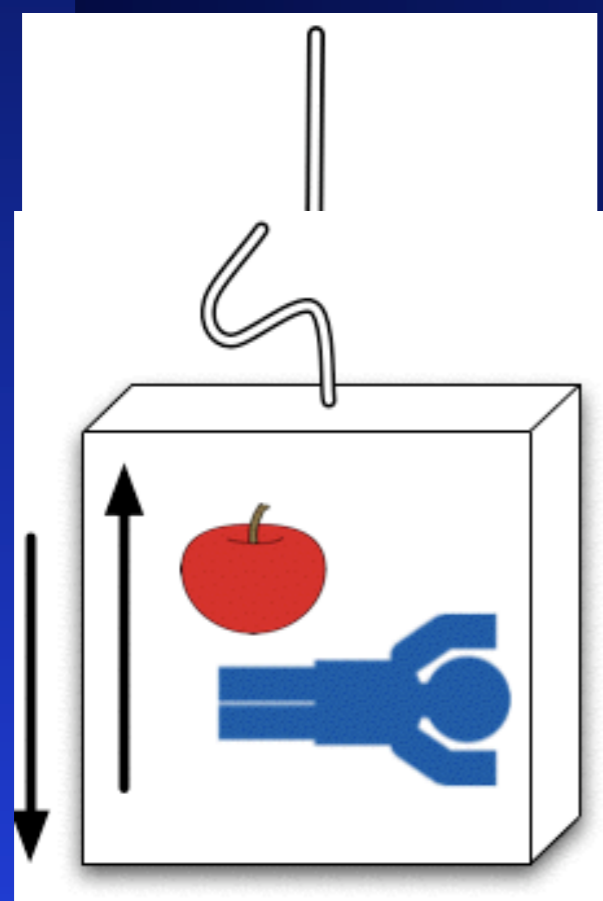
一般相対性理論【等価原理】

★ 特殊相対性理論は、加速運動する座標系を取り扱うことはできなかった。



★ 加速度とは何か？

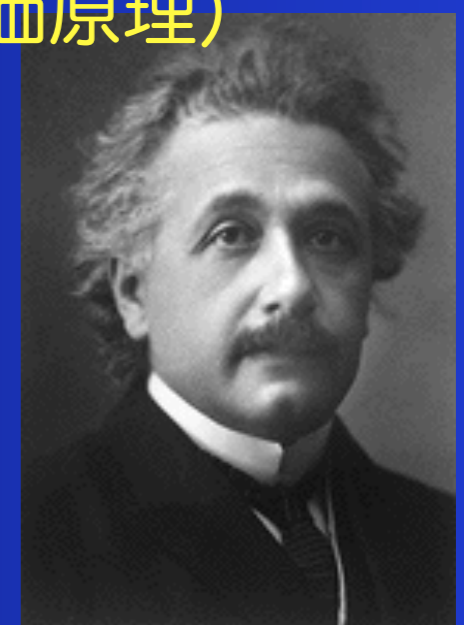
エレベータの思考実験



「重力加速度は、自由落下しているエレベータでは相殺されてしまう」

= 加速度は局所的に消去可能 (等価原理)

「生涯で最もすばらしいアイデア」



無重力状態をつくることは可能か？



無重力体験 ～アメリカ～



ボーイング727による宇宙体験・無重力体験飛行がアメリカ・ラスベガス、ケネディースペースセンターなどで楽しめます。

天井や壁を歩いてみたり、スーパーマンのように宙を飛んだり、水球になった水を飲んだり(?)... などなど。楽しみ方は、自由！無重力状態でどんな事を試してみますか？

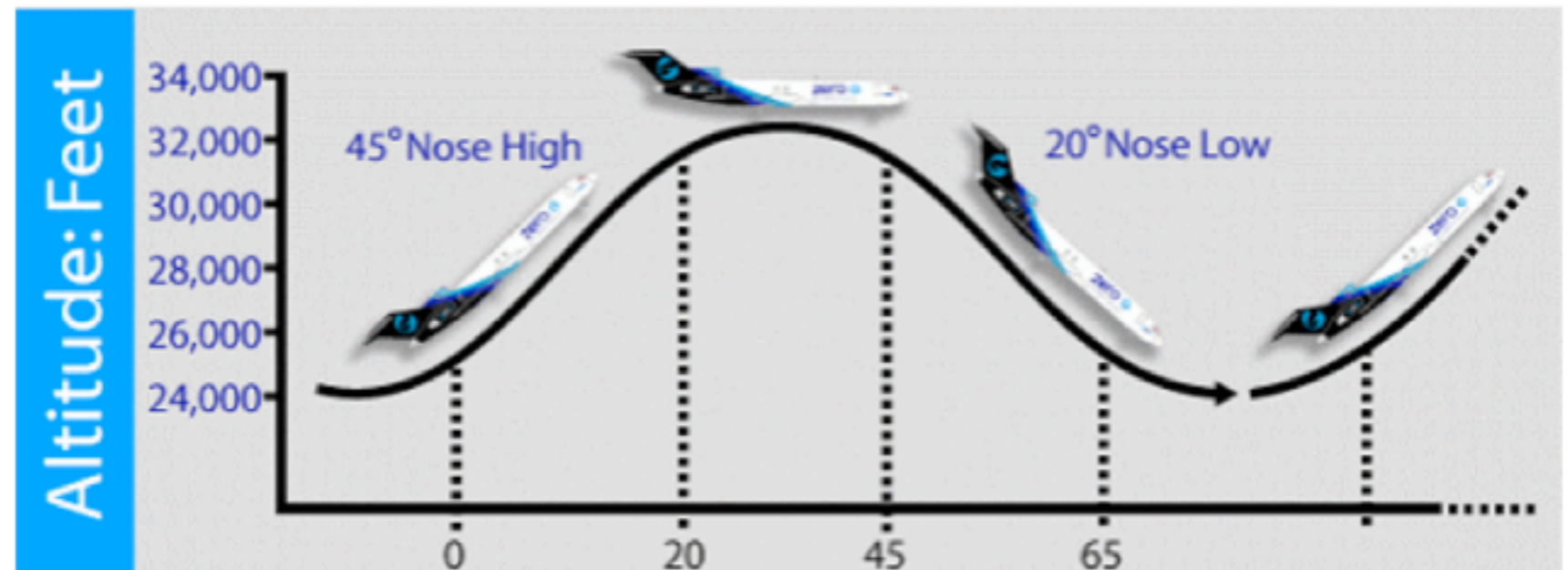
このプログラムでは、無重力体験のみでなく火星や月の重力も体験できます。

無重力体験・概要

高度24,000ft (約7,315m) から45度の角度で34,000ft (約10,360m) まで地上の1.8倍 (1.8G) の重力を感じながら、一気に上昇し、その後下降します (パラボラテック飛行)。この時に無重力を25-30秒程度お楽しみいただけます。

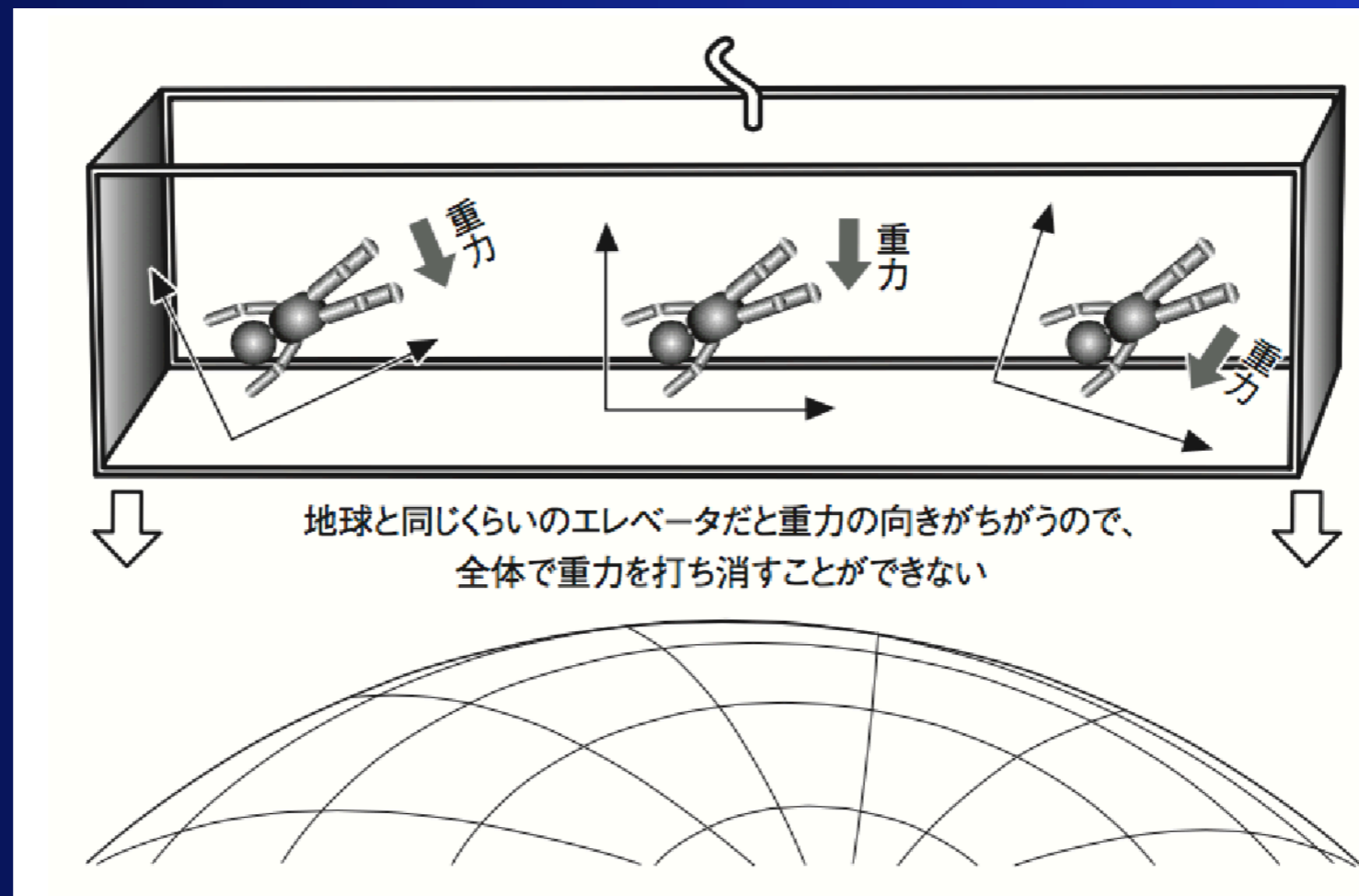
30秒という時間は短いようですが、通常スカイダイビングでのフリーホールの時間 (バンジージャンプの5回分より長い) 時間とほぼ同じです。無重力の間は、スーパーマンになったように空を飛ぶなど思い思いにお楽しみ下さい。

また、このプログラムでは、10回の無重力が予定されていますが、それ以外に3回の月 (地球の1/6) や2回の火星 (地球の1/3) の重力も同じフライトでお楽しみいただく予定です。



一般相対性理論【重力の正体】

「重力加速度は、自由落下しているエレベータでは相殺する」
 = 加速度は局所的に消去可能（等価原理）



= 重力は、大局的には消去できない。

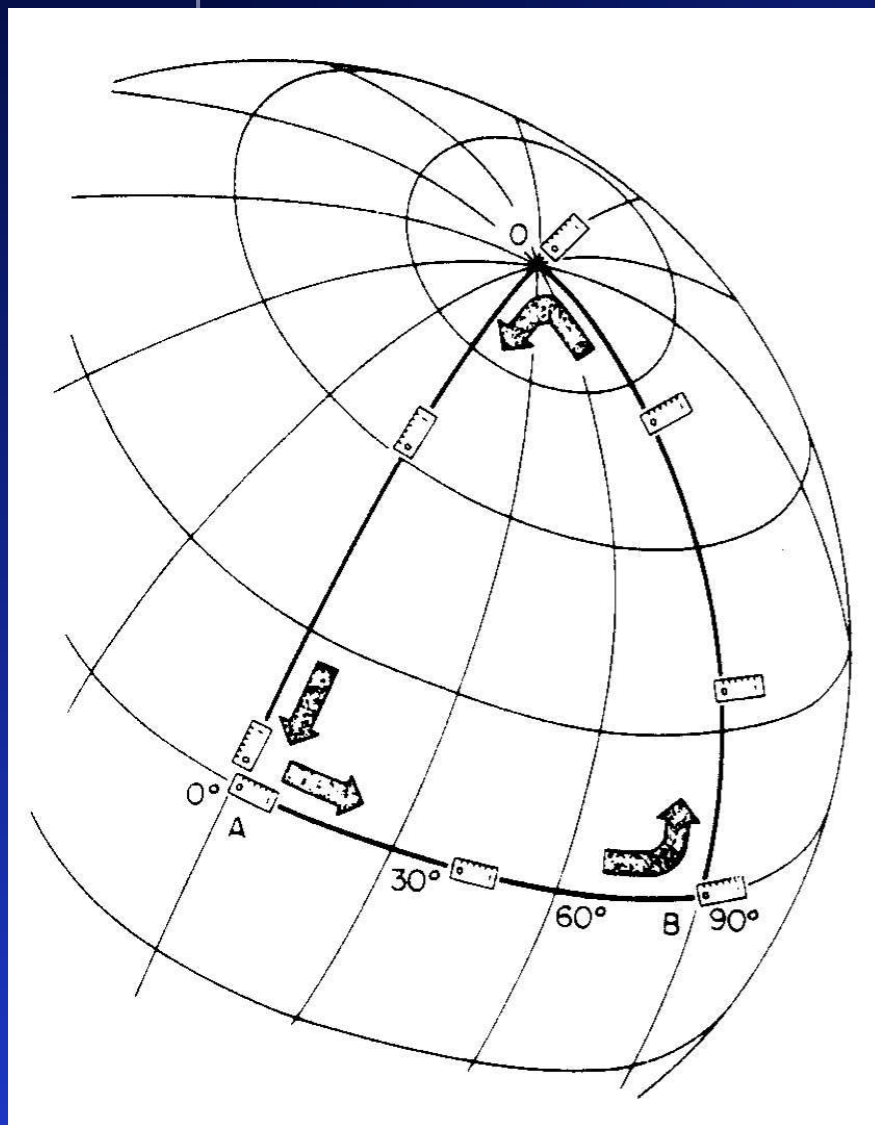
= 重力の正体は、時空のもつ曲がり具合である。

曲がった時空の幾何学 = 「一般相対性理論」

一般相対性理論【計量 metric】

曲がった時空の幾何学 = リーマン幾何学

4次元距離を一般化した「計量(metric)」.



$$ds^2 = \sum_{\mu=0}^3 \sum_{\nu=0}^3 g_{\mu\nu}(x) dx^\mu dx^\nu = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} g_{tt} & g_{tx} & g_{ty} & g_{tz} \\ & g_{xx} & g_{xy} & g_{xz} \\ & & g_{yy} & g_{yz} \\ sym. & & & g_{zz} \end{pmatrix}$$

平らな時空(flat spacetime)では,

$$\begin{aligned} ds^2 &= -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 \\ &= -c^2 dt^2 + dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) \end{aligned}$$

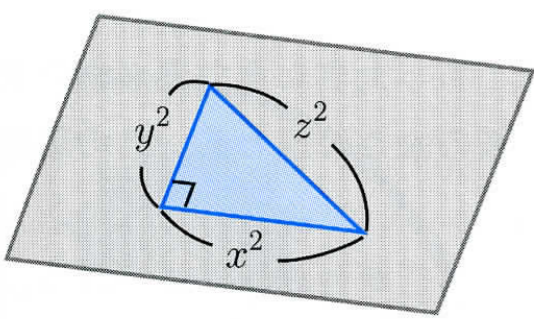
一般相対性理論【計量 metric】

曲がった時空の幾何学 = リーマン幾何学

4次元距離を一般化した「計量(metric)」.

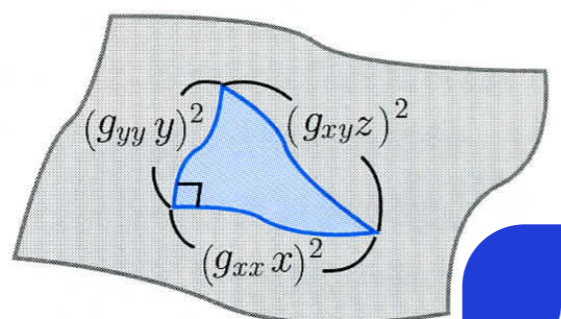
時空の曲がりを表す計量 $g_{\mu\nu}$

平らな面ではピタゴラスの定理が成り立つ。



$$x^2 + y^2 - z^2 = 0$$

曲がった空間でも成立するために計量関数で調整する。



$$(g_{xx}x)^2 + (g_{yy}y)^2 - (g_{xyz})^2 = 0$$

このように、曲がり具合は関数 $g_{\mu\nu}$ に押し付けて表すことができる。アインシュタイン方程式は、3次元空間+時間の4次元の曲がり $g_{\mu\nu}$ を解く方程式である。

$$ds^2 = \sum_{\mu=0}^3 \sum_{\nu=0}^3 g_{\mu\nu}(x) dx^\mu dx^\nu = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

$$\begin{pmatrix} g_{tt} & g_{tx} & g_{ty} & g_{tz} \\ & g_{xx} & g_{xy} & g_{xz} \\ & & g_{yy} & g_{yz} \\ & & & g_{zz} \end{pmatrix}$$

物理学者は、リーマン幾何学に深入りしないほうがいいよ。

(time)では、

$$\begin{aligned} ds^2 &= -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 \\ &= -c^2 dt^2 + dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) \end{aligned}$$



Marcel Grossmann

一般相対性理論【Einstein方程式】

重力場の方程式 (1915)

空間の曲がりかモノの運動を決める \Leftrightarrow モノがあると空間が曲がる

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

アインシュタイン曲率テンソル

<空間の歪み>

エネルギー運動量テンソル

<モノの分布>

$$\begin{aligned} \Gamma_{\mu\nu}^{\alpha} &\equiv \frac{1}{2}g^{\alpha\beta}(\partial_{\nu}g_{\beta\mu} + \partial_{\mu}g_{\beta\nu} - \partial_{\beta}g_{\mu\nu}) \\ R^{\mu}_{\nu\alpha\beta} &\equiv \partial_{\alpha}\Gamma_{\nu\beta}^{\mu} - \partial_{\beta}\Gamma_{\nu\alpha}^{\mu} + \Gamma_{\sigma\alpha}^{\mu}\Gamma_{\nu\beta}^{\sigma} - \Gamma_{\sigma\beta}^{\mu}\Gamma_{\nu\alpha}^{\sigma} \\ R_{ab} &\equiv R^{\mu}_{a\mu b} \equiv \partial_{\mu}\Gamma_{ab}^{\mu} - \partial_b\Gamma_{a\mu}^{\mu} + \Gamma_{\nu\mu}^{\mu}\Gamma_{ab}^{\nu} - \Gamma_{\nu b}^{\mu}\Gamma_{a\mu}^{\nu} \\ R &= g^{ab}R_{ab} \end{aligned}$$

$$T_{\mu\nu} = (\rho + p)u_{\mu}u_{\nu} + pg_{\mu\nu}$$

一般相対性理論【Einstein方程式】

重力場の方程式 (1916)

空間の曲がりかたがモノの運動を決める \Leftrightarrow モノがあると空間が曲がる

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

- μ, ν と添字は 4次元の座標の成分 (t, x, y, z) を表していて、この式全体は具体的には 10本の微分方程式である。
- 「物質が存在すれば時空が曲がる。時空が曲がると物質も（光も）それに添って動く」その作用を1つにまとめた美しい式である。
- 一般相対論は、強い重力場の物理現象を記述する。対象となるのは、コンパクトで重い天体や宇宙全体である。

一般相対性理論の予言【水星の軌道】

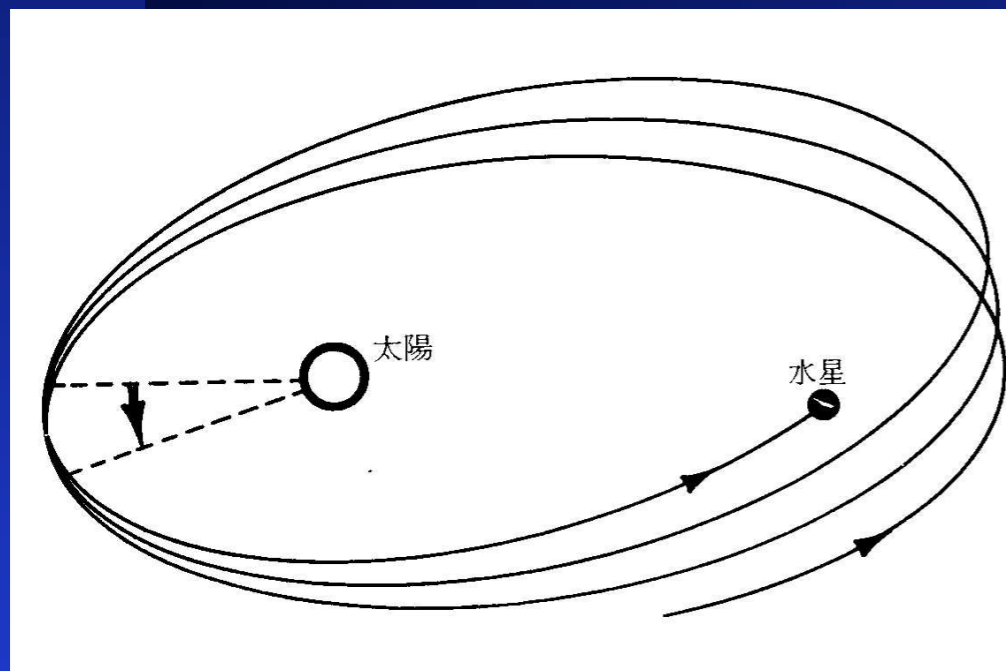
近日点移動

水星の近日点移動の問題（ルベリエ，1854）

100年で574秒ずれる。2250世紀で完全な「ばら模様」。

→→金星の影響で277秒，木星で153秒，地球で90秒，
その他の惑星で10秒分の説明が可能。

残りの43秒は？？？



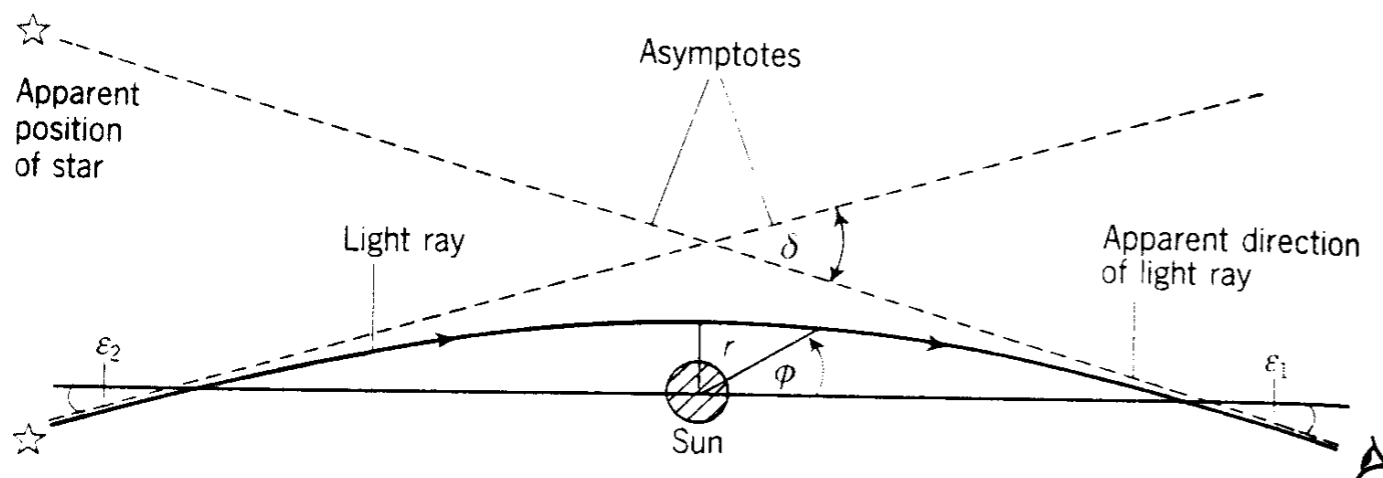
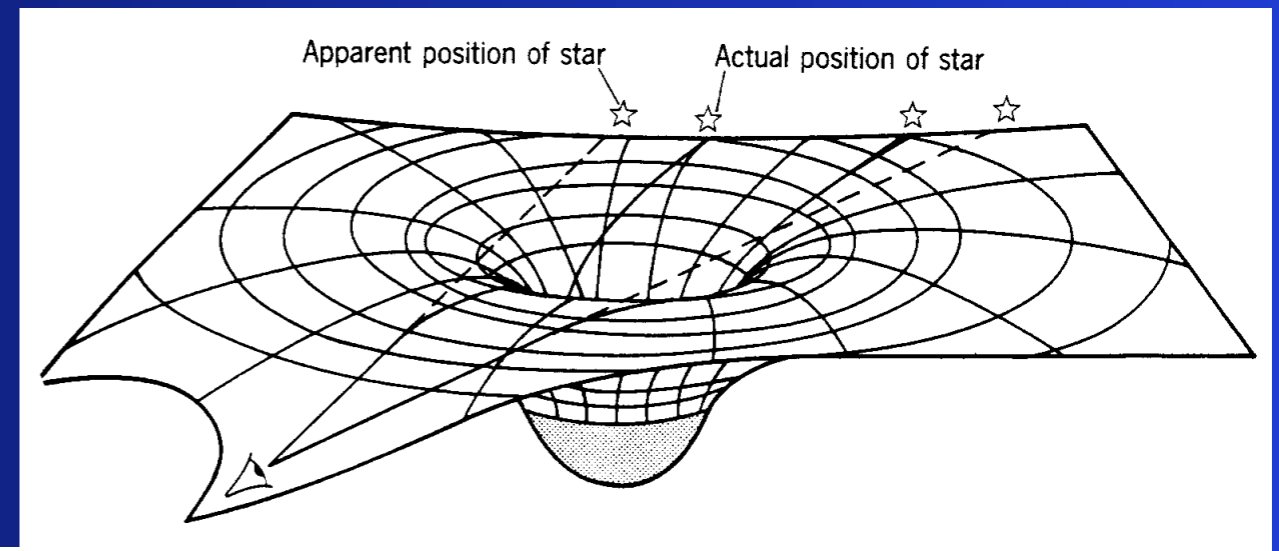
1915年，アインシュタインが，できたばかりの一般相対性理論を適用すると，「43秒の歳差運動」が出てきた。

「2-3日間，興奮のため，我を忘れてしまった」

一般相対性理論は正しい

一般相対性理論の予言【光の曲がり】

光は時空を直進するが、重い天体の周りでは、時空の歪みにより、曲がって進むことになる。



1919年、エディントンが、皆既日食を利用して、光の曲がりを確認（0.875秒角）

一般相対性理論は正しい

Taken from the 22 November 1919 edition of the Illustrated London News.

Coverage in the (more excitable) New York Times.

LIGHTS ALL ASKEW IN THE HEAVENS

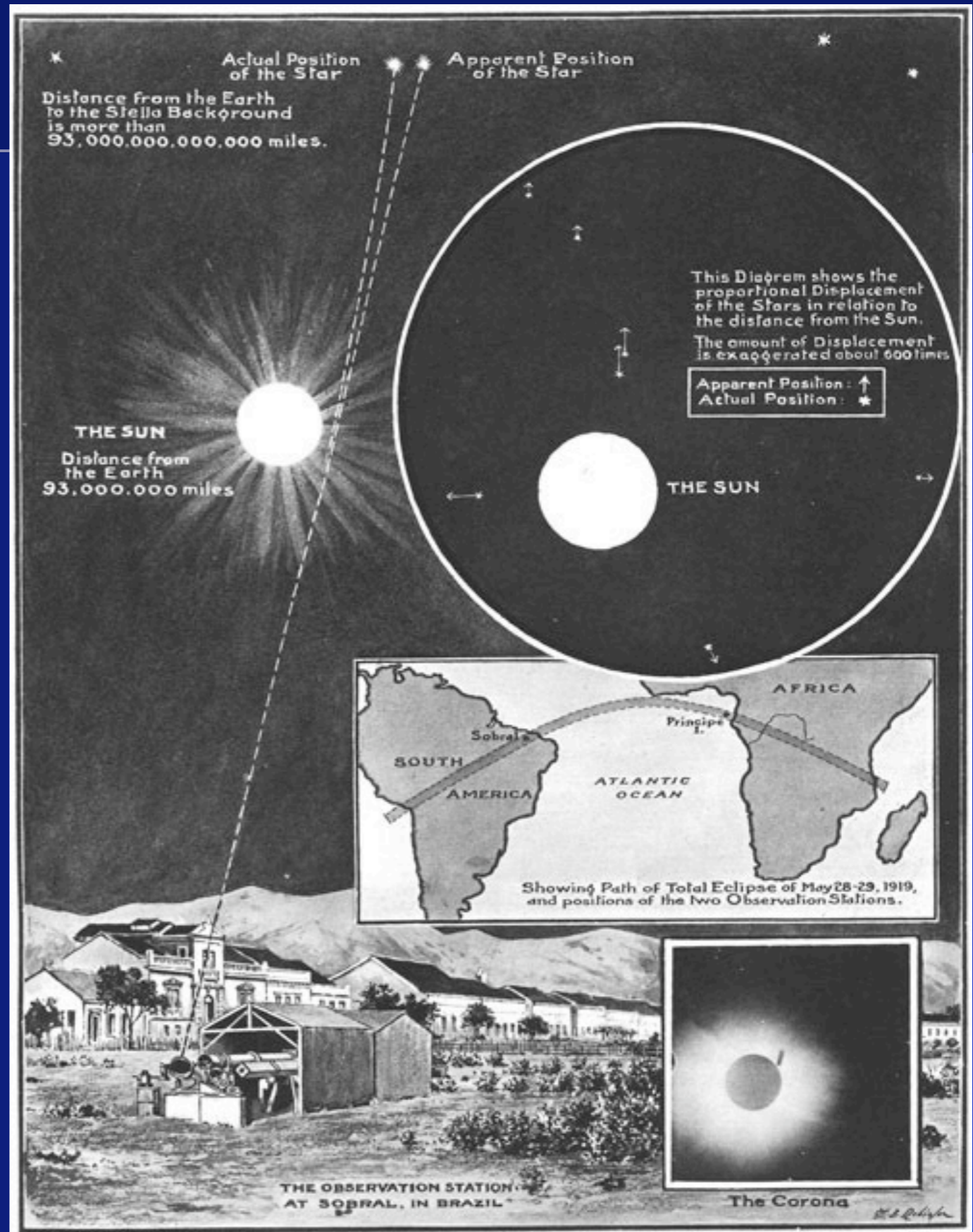
Men of Science More or Less
Agog Over Results of Eclipse
Observations.

EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

Stars Not Where They Seemed
or Were Calculated to be,
but Nobody Need Worry.

A BOOK FOR 12 WISE MEN

No More in All the World Could
Comprehend It, Said Einstein When
His Daring Publishers Accepted It.

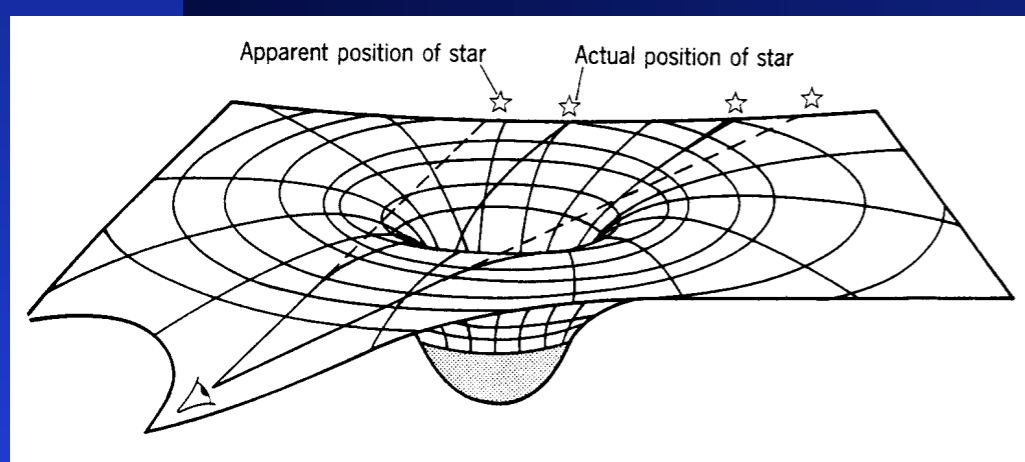


一般相対性理論の予言 【光の曲がり】

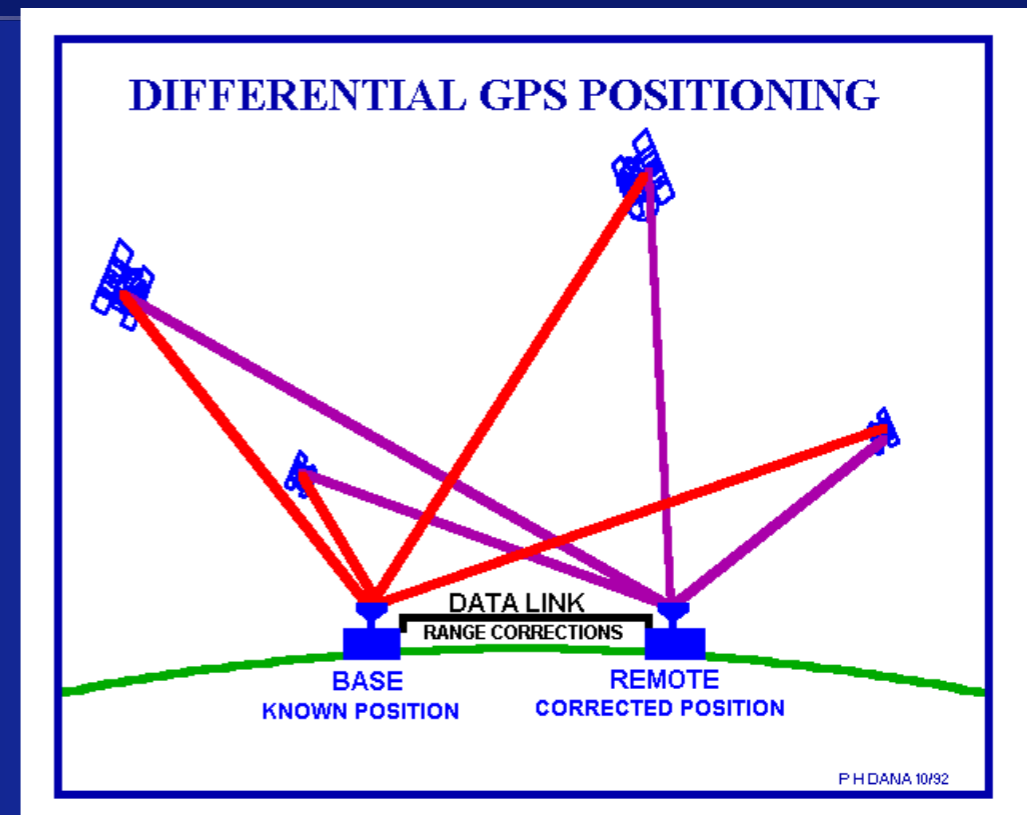
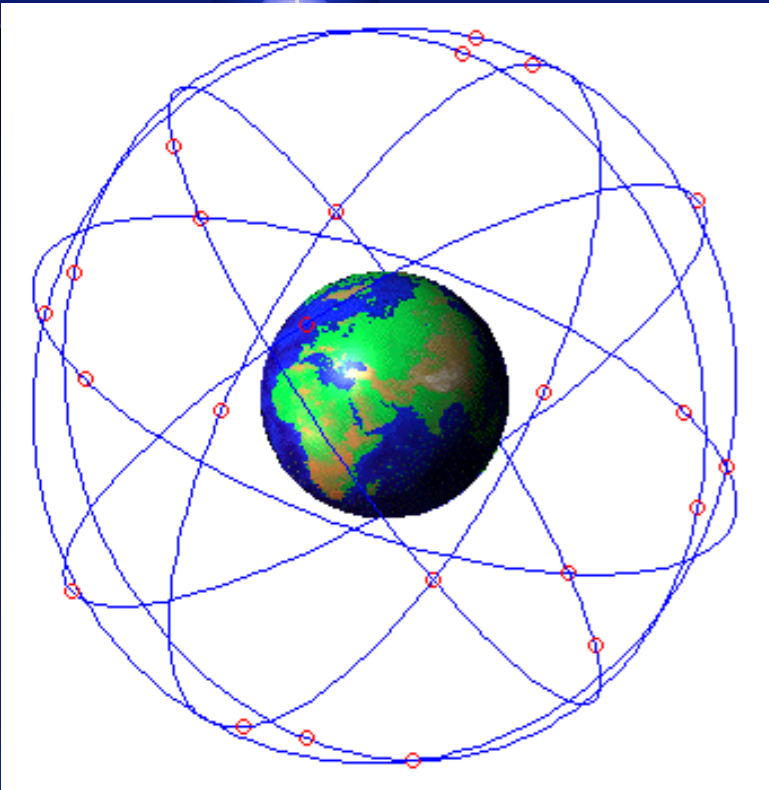
重力レンズ



Galaxy Cluster Abell 2218 HST • WFPC2
NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, ST-ECF) • STScI-PRC00-08



一般相対性理論の予言【GPS】

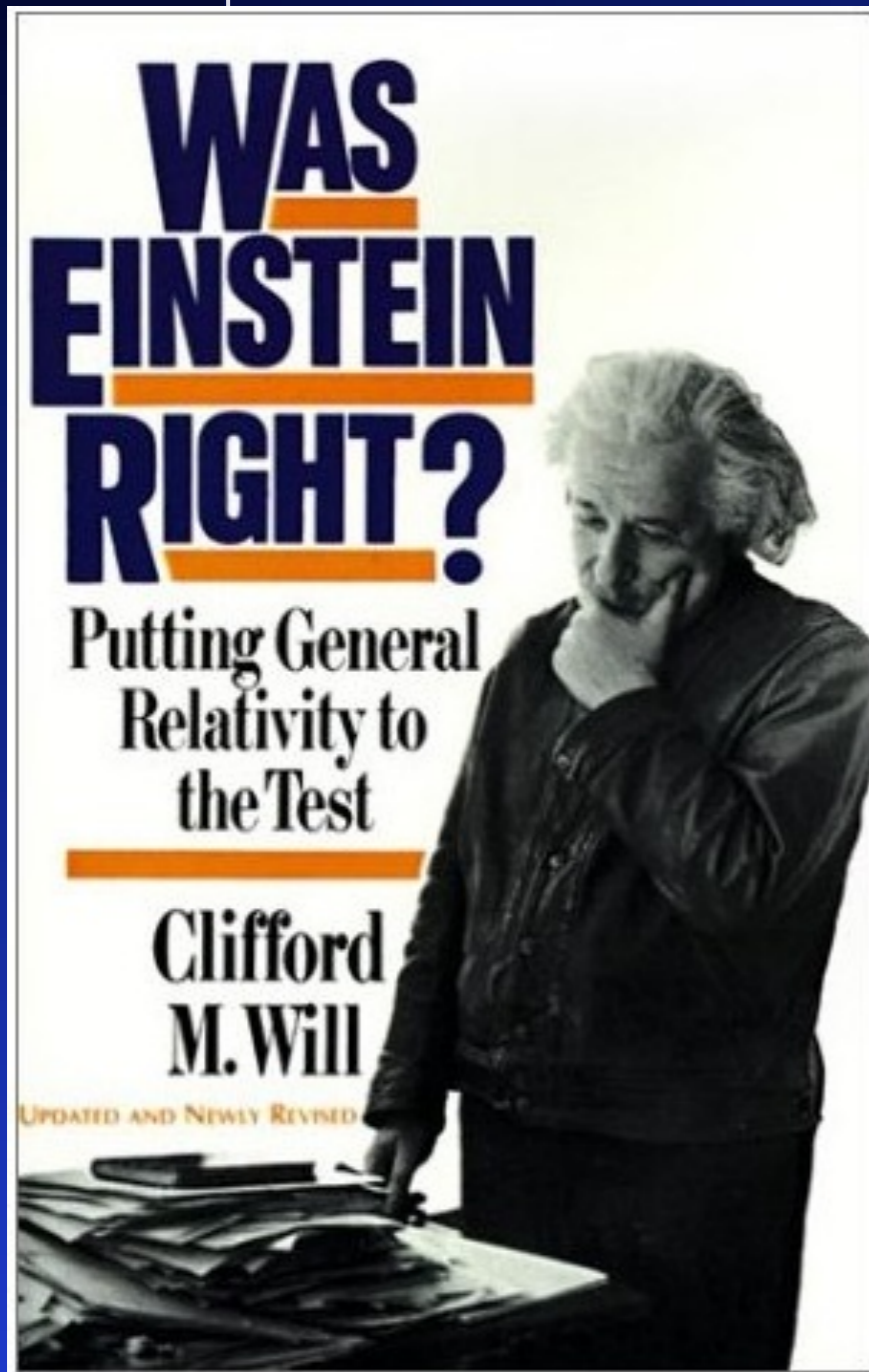


正確な位置と時刻の情報を含んだ電波で、
 3角測量→精度±15m
 高速飛行の**特殊相対論効果**と
 地球重力の**一般相対論効果**
 ⇒1日につき、 38×10^{-6} 秒ずつ衛星の
 時計を遅らせる必要あり



一般相対性理論は正しい

アインシュタインは正しかったか？



- ☑ 水星の近日点移動
- ☑ 重力レンズ効果の観測
- ☑ 連星中性子星の軌道の変化の観測
- ☑ GPS
- ☑ レーダーエコーの遅れのテスト
- ☑ 等価原理のテスト

一般相対性理論は、
99.9999%
正しい。

相対性理論の描く世界

特殊相対性理論

時間の遅れ, $E=mc^2$, GPS

一般相対性理論

空間の歪み, 重力レンズ

ブラックホール, ワームホール, 重力波

GPS

膨張宇宙, 高次元宇宙

一般相対性理論(1915年)

発端：

1905年の相対性理論では、加速度を扱えなかった。

加速度の正体は何だろうか？

加速度を生じさせる**重力**とは何だろうか？

ブレークスルー：

エレベータの自由落下で重力が消せる！

だけど、地球の大きさのエレベータでは消せない。

アインシュタインの結論：

重力の正体は時空の歪みである。

www4.nhk.or.jp/P3442/x/2016-09-29/10/24978/2071006/

フランケンシュタインの誘惑 科学史 闇の事件簿「握りつぶされたブラックホール」 - NHK

NHK 番組をみつける ウェブで視聴 知る学ふ 報道・スポーツ ...もっと 受信料の窓口 サイトマップ 地域: 東京 NHK 全体から検索

フランケンシュタインの誘惑

科学史 闇の事件簿

BSプレミアム 毎月最終木曜 午後9時 | 再放送 土曜 午後6時

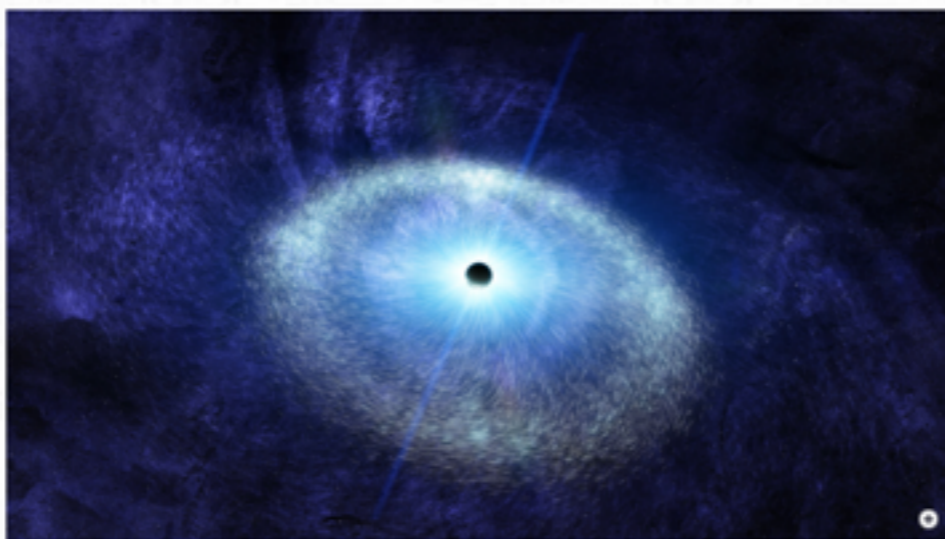
放送予定 | 再放送予定 | 過去3か月の放送 | 番組情報

シェアする ?

Twitter Facebook Google+

9月 木曜 **BSプレミアム** 午後9時00分～午後10時00分

29日 フランケンシュタインの誘惑 科学史 闇の事件簿「握りつぶされたブラックホール」



人類に功も罪ももたらす「科学」。その知られざる姿に迫る知的エンターテインメント。宇宙の始まりと構造を解明するために、いま最もホットな研究分野であるブラックホール。しかし、その存在が広く信じられるようになったのは、つい最近。1970年代に入るまで眉唾ものとされていた。なぜか？そこには、はるか以前、1930年代に起きた「ある事件」があった。今回は、天文学を40年遅らせたこの「事件」の闇に迫る...

字幕放送

真貝寿明

ブラックホール・膨張宇宙・重力波
一般相対性理論の100年と展開

2016年、アインシュタインが100年前に予言した「最後の宿題」=重力波を、アメリカの研究チームが世界で初めて観測に成功

歴史的快挙!

「重力波天文学」時代の幕開け

現代物理学の最先端を分かりやすく解説した一冊 **売れます!**

9月29日 (木) 午後9時
NHK BS

かもしれない女優たち

キャスト 現時点でお声がけしている女優さんたち。

40代のビッグ女優。もし売れていなかったら



10月10日（月）午後9時
フジテレビ系列

