

# 宇宙をひもとく物理学

真貝寿明（しんかいひさあき）



- 10月25日 なぜ円ではなく楕円か — ケプラーの惑星運動の法則
- 11月22日 光のドップラー効果 — 宇宙膨張の法則
- 12月27日 星は何を燃やしているのか — 特殊相対性理論**
- 1月24日 時空のゆがみとブラックホール — 一般相対性理論
- 2月28日 光は波なのか粒子なのか — 量子論
- 3月28日 解明されている部分は5%? — 宇宙論

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

<http://www.oit.ac.jp/is/%7Eshinkai/mainichi/>

# 近代物理学の進展

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

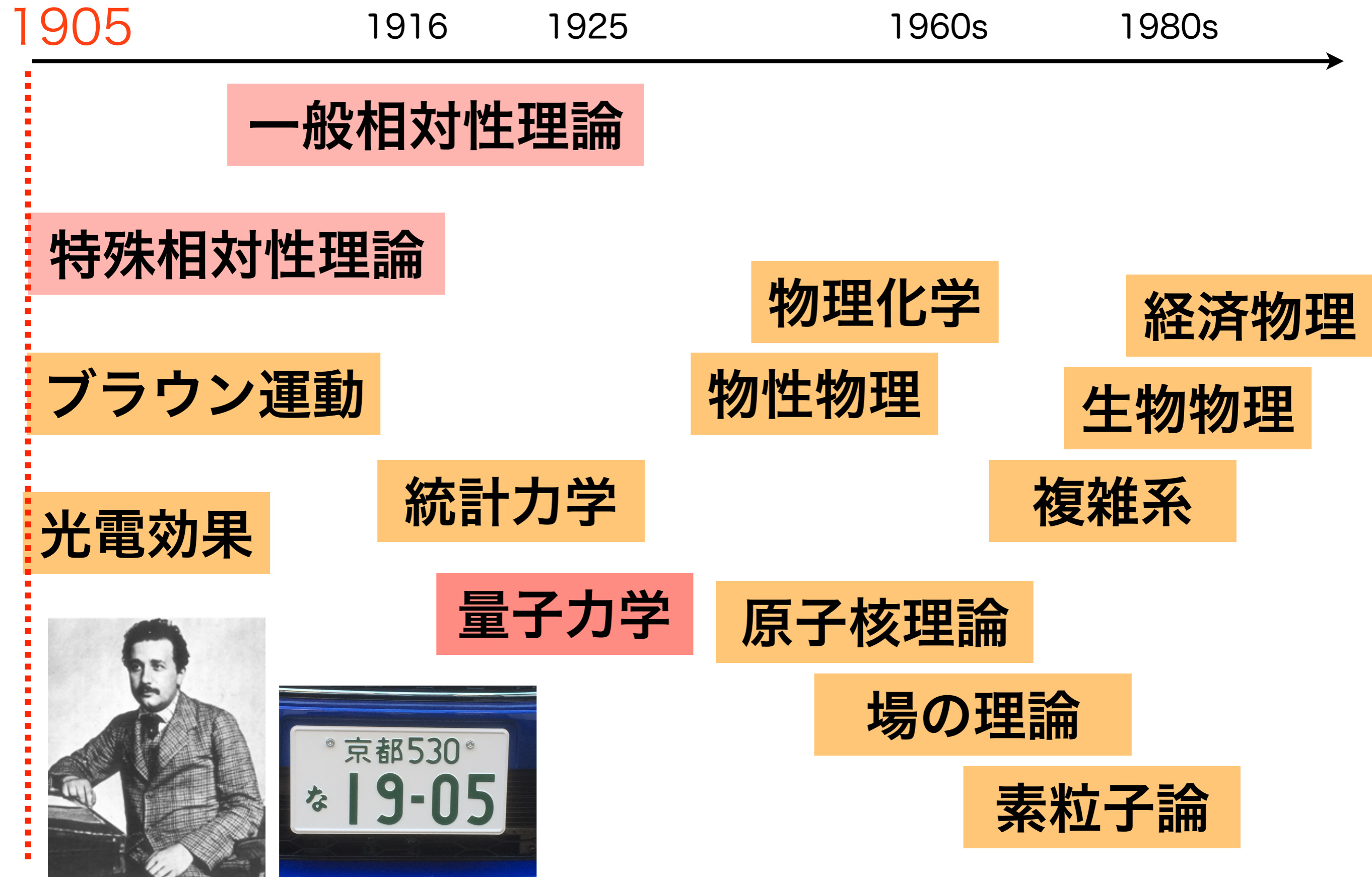
解析力学

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



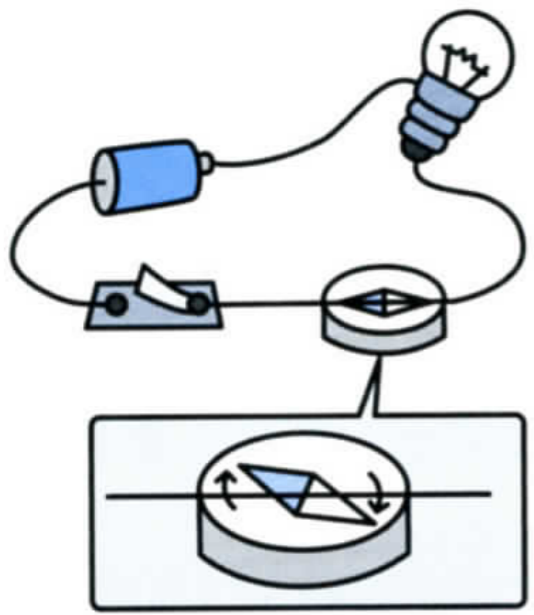
# 光の速さで動く人が鏡をみると 自分の顔が映るのを見るのだろうか？



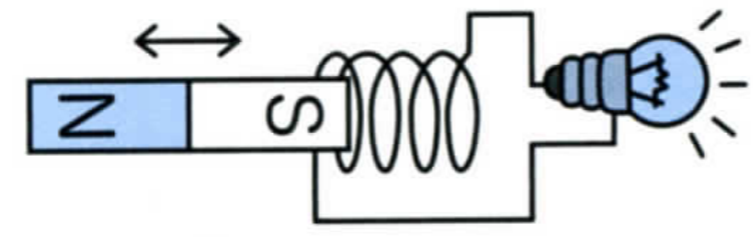
NHK 100分で名著のwebページより.

[http://www.nhk.or.jp/meicho/famousbook/17\\_einstein/index.html#box01](http://www.nhk.or.jp/meicho/famousbook/17_einstein/index.html#box01)

# 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。

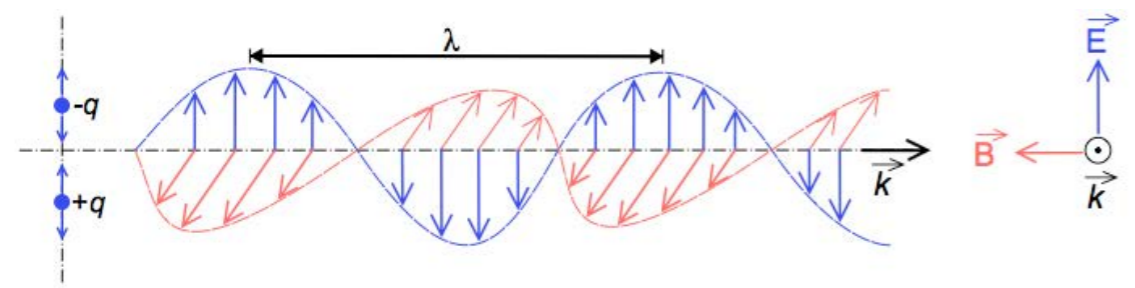
電磁誘導現象の発見 (1831年)

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)

## 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,  $\rho$ は電荷密度,  $\mathbf{j}$ は電流ベクトル,  $c$ は光速とする。また,  $\nabla$ は微分演算子とする。

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho, \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (3.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}, \quad (3.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0. \quad (3.4)$$

具体的には, 各ベクトルは

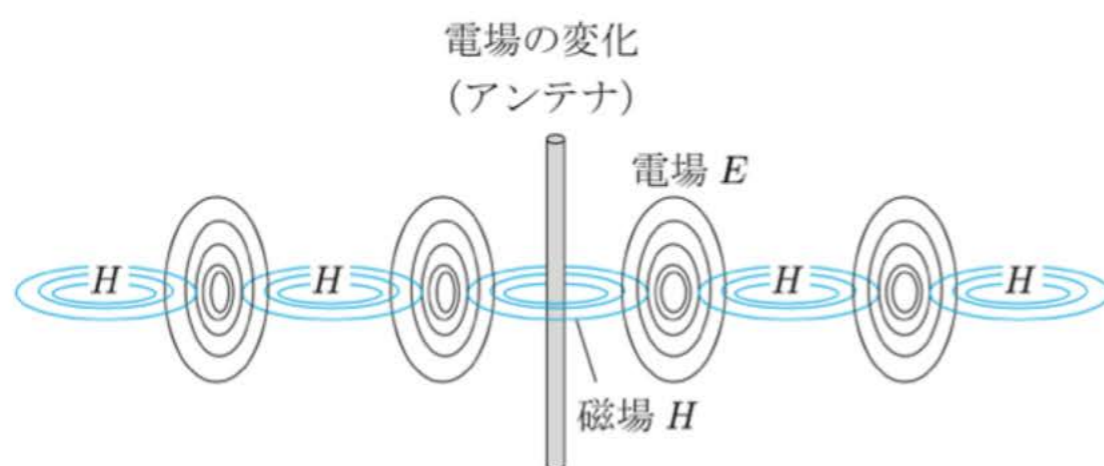
$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix}, \quad \nabla = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

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, 以下のようになる

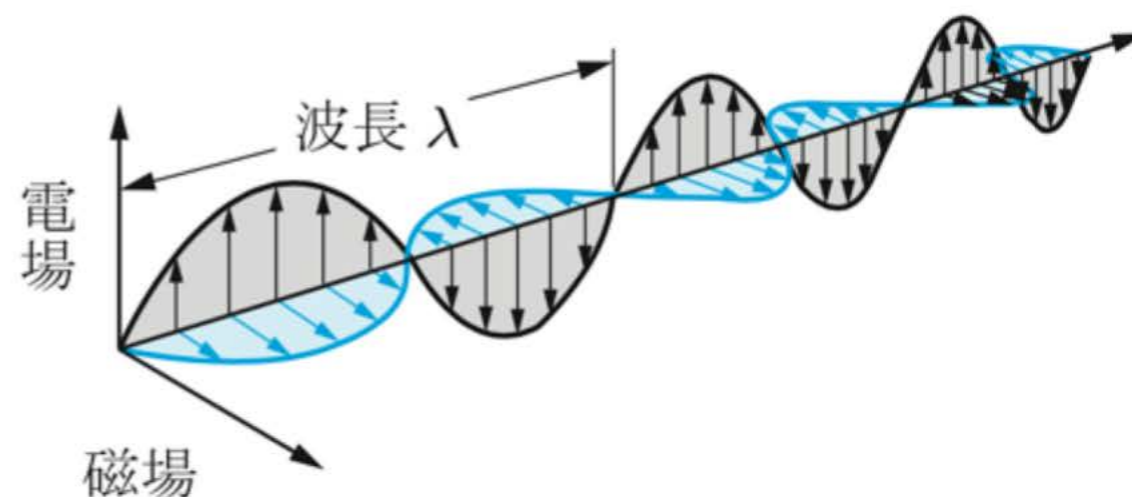
$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z}, \quad \nabla \times \mathbf{E} = \begin{pmatrix} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

# 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？

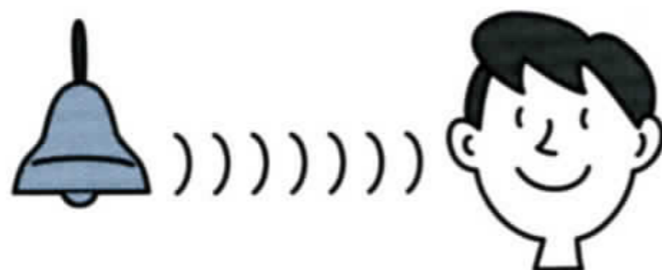
真空中でも光は伝わるのは何故？

宇宙は「エーテル」で満たされていると考えよう

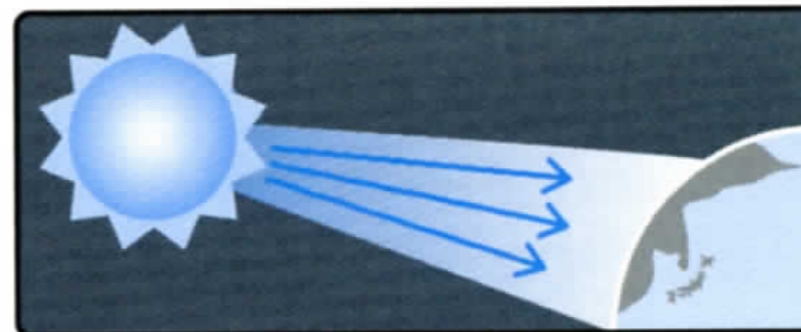
「エーテル」を見つけよう

# 電磁気学で生じた2つの疑問

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?

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)

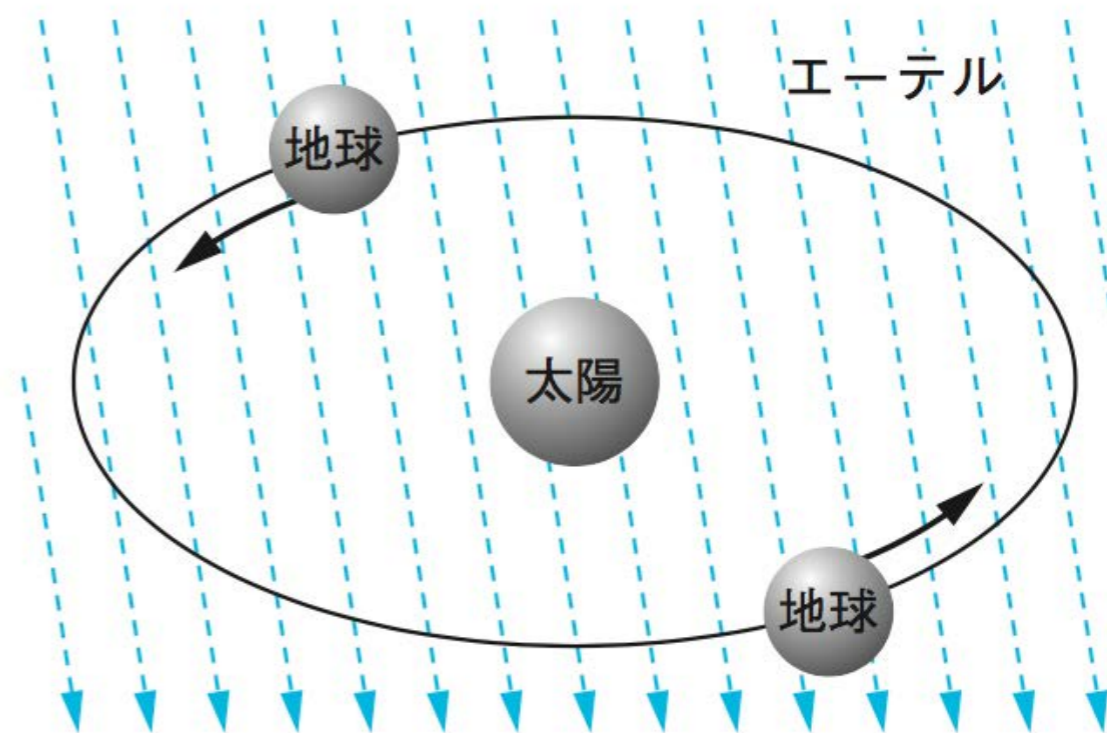
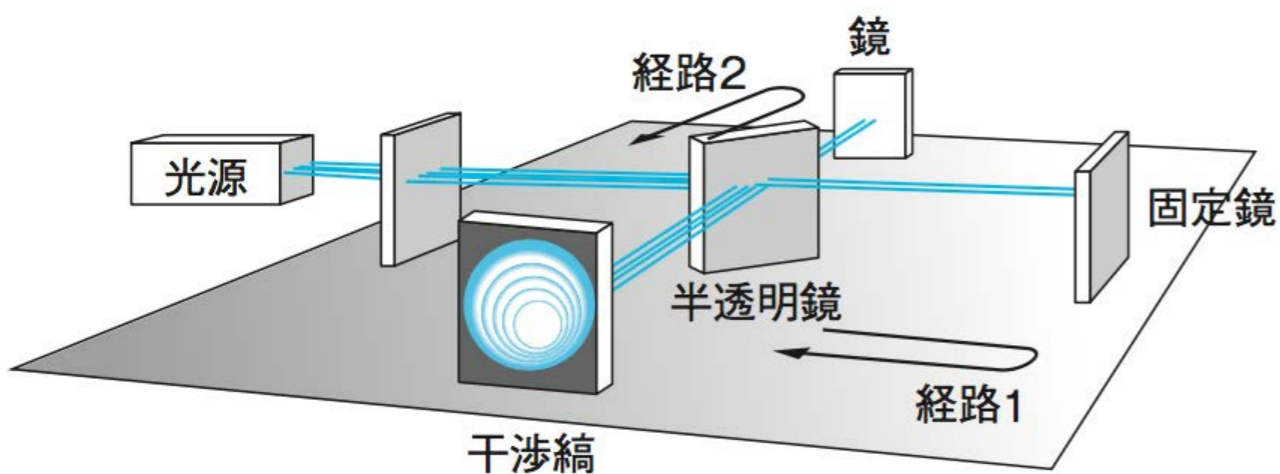


# マイケルソン・モーリーの実験

Michelson-Morley experiment 1887

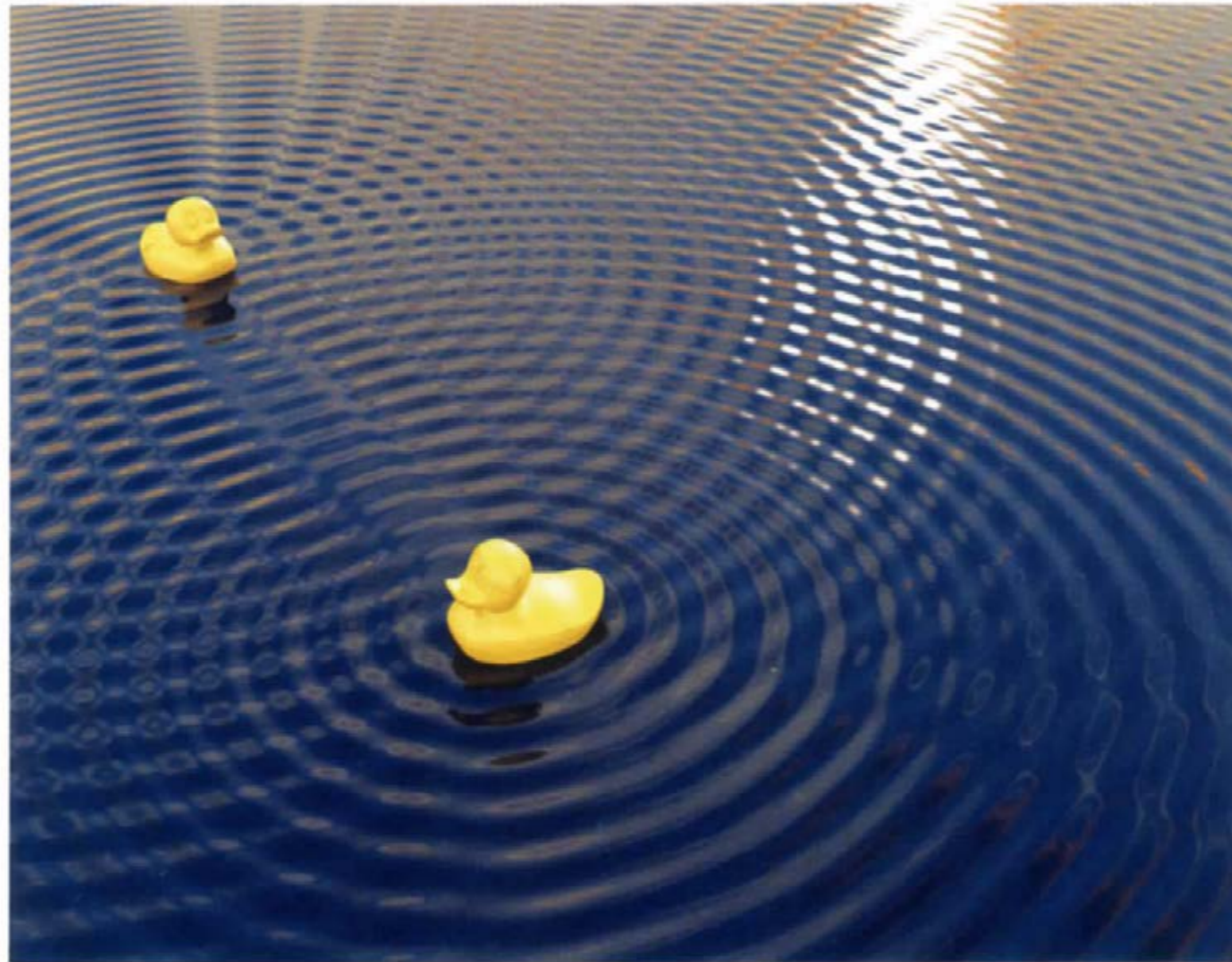


## 微小距離を測定する**干渉計**



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。

## 波の干渉



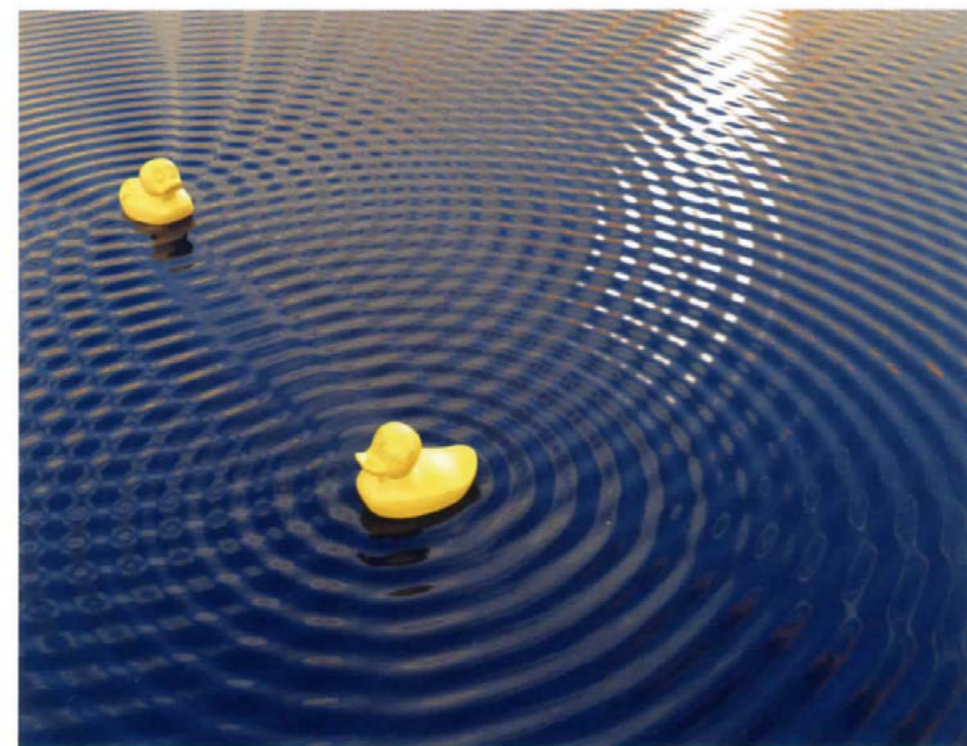
**Puddle Interference** The concept of interference shows up in everyday life in bodies of water, from puddles to oceans.

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

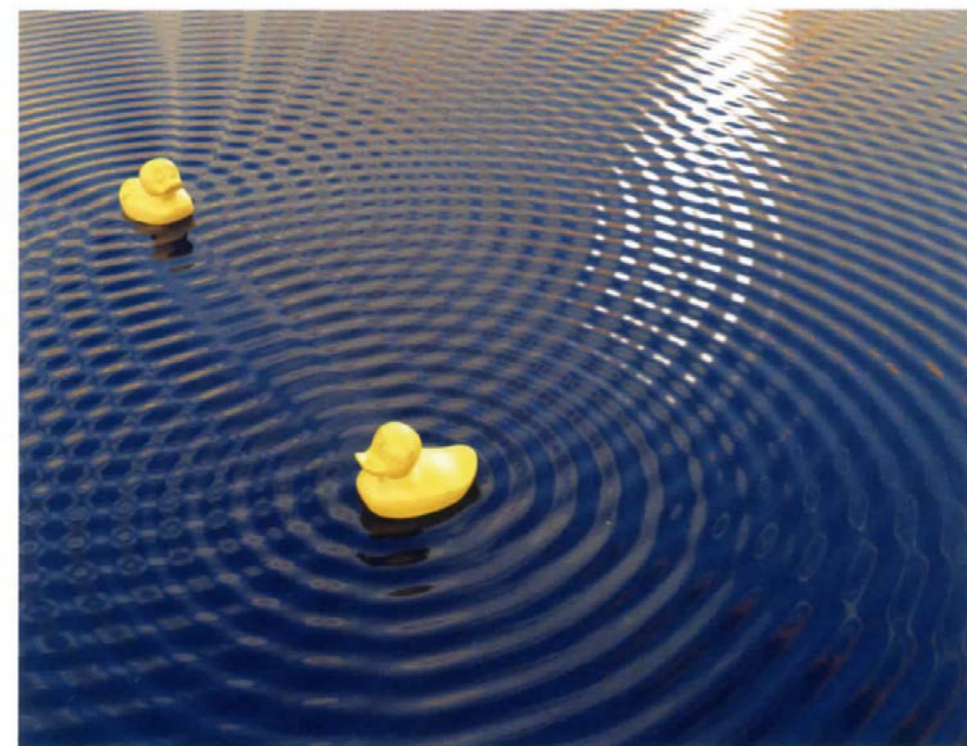


マイケルソン・モーリーの実験を理解しよう

波の干渉：山+谷=0 弱めあう

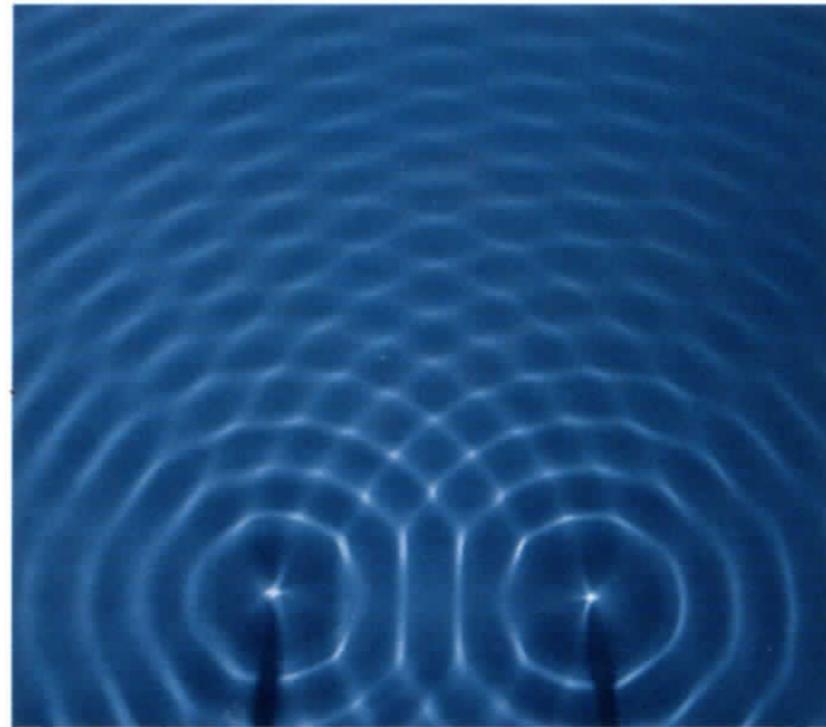
山と谷の重ねあわせ

© 数研出版

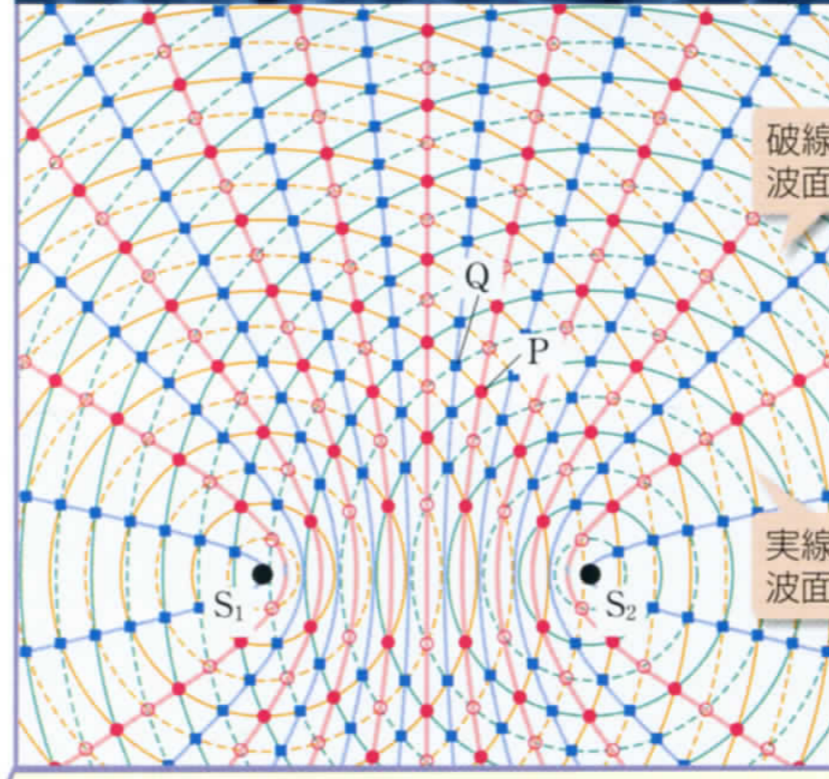
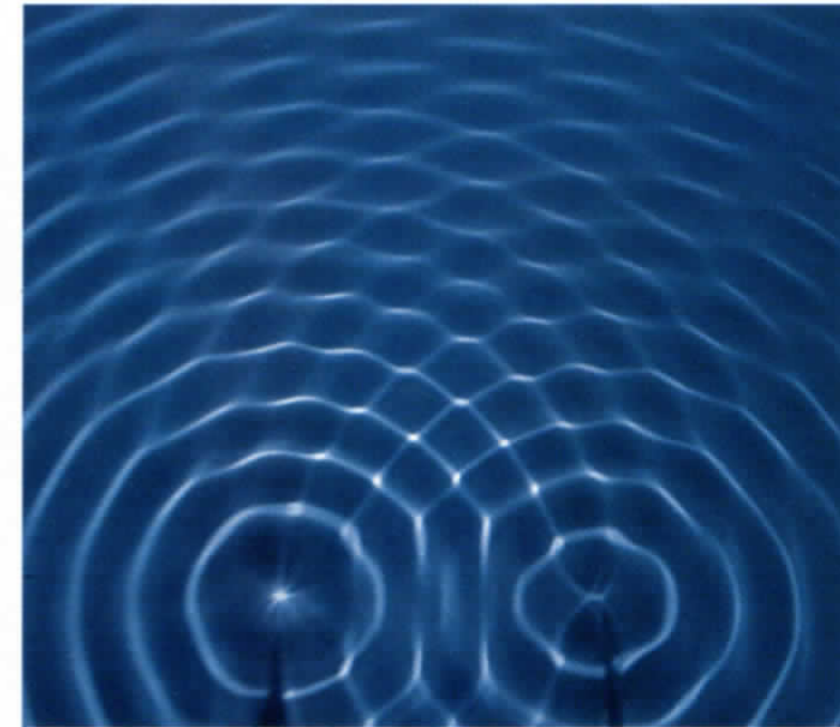


# 波の干渉 = 強めあったり弱めあったりする現象

● 同位相で振動する2つの波源の場合

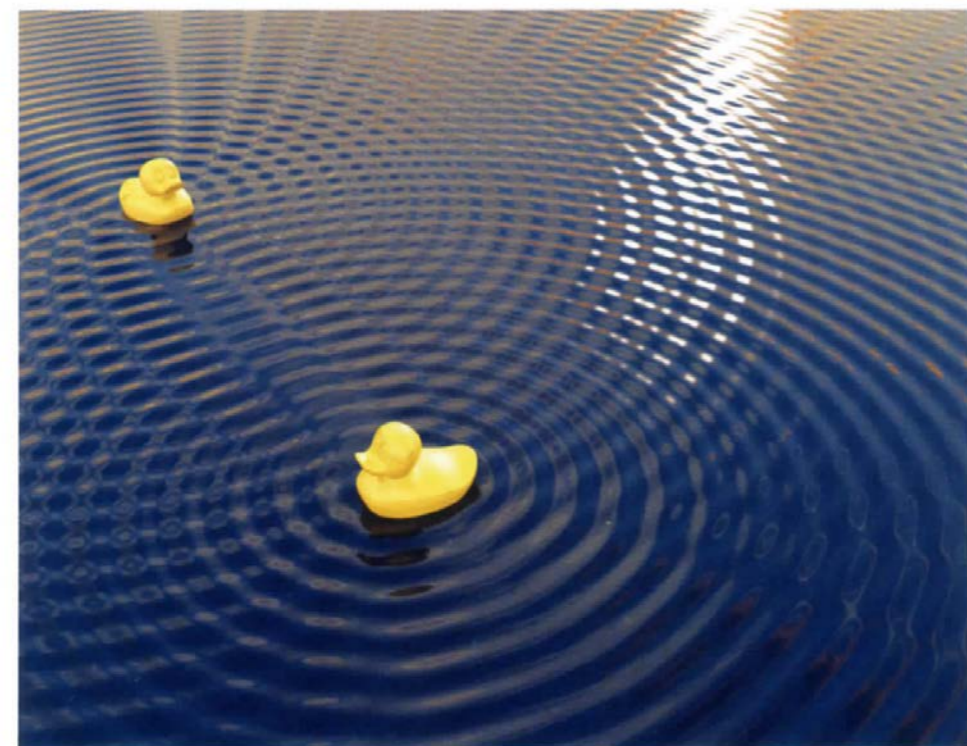
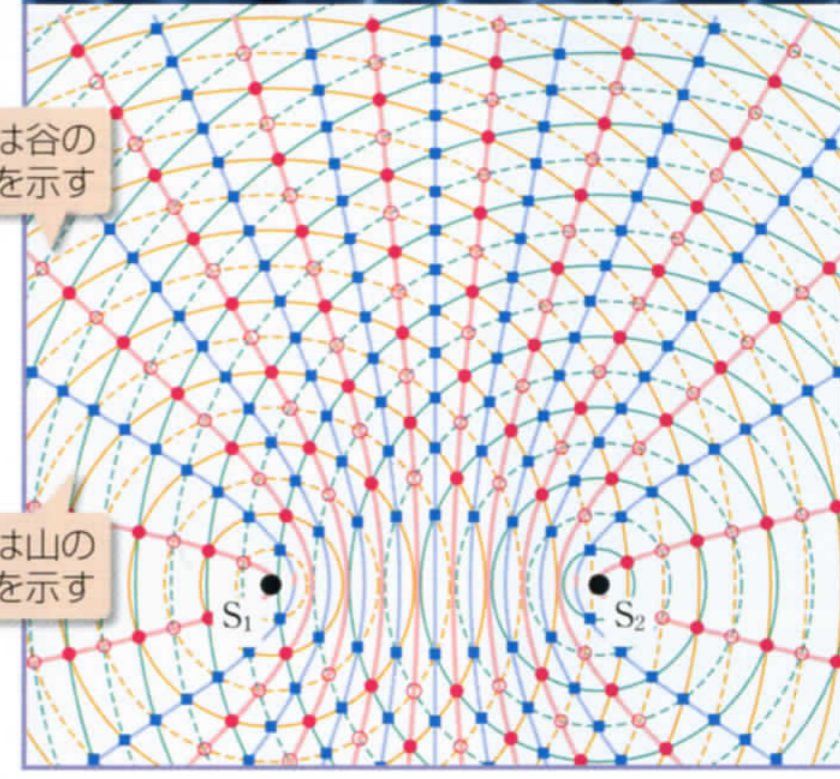


● 逆位相で振動する2つの波源の場合



破線は谷の波面を示す

実線は山の波面を示す



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。勉強や仕事するときなどは、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

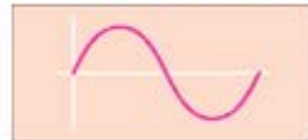


※航空機内の音楽サービスシステムにより、ご使用になれない場合があります  
※航空機内で電子機器の使用が禁止されている場合や、機内の音楽サービスを個人のヘッドホンで利用することが禁止されている場合は、本機を使用しないでください

■ノイズキャンセリング機能の原理

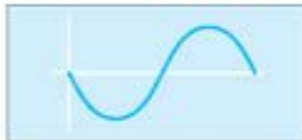


MDR-NC6  
内蔵マイク



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

# マイケルソン型干渉計のしくみ

## Michelson Interferometer

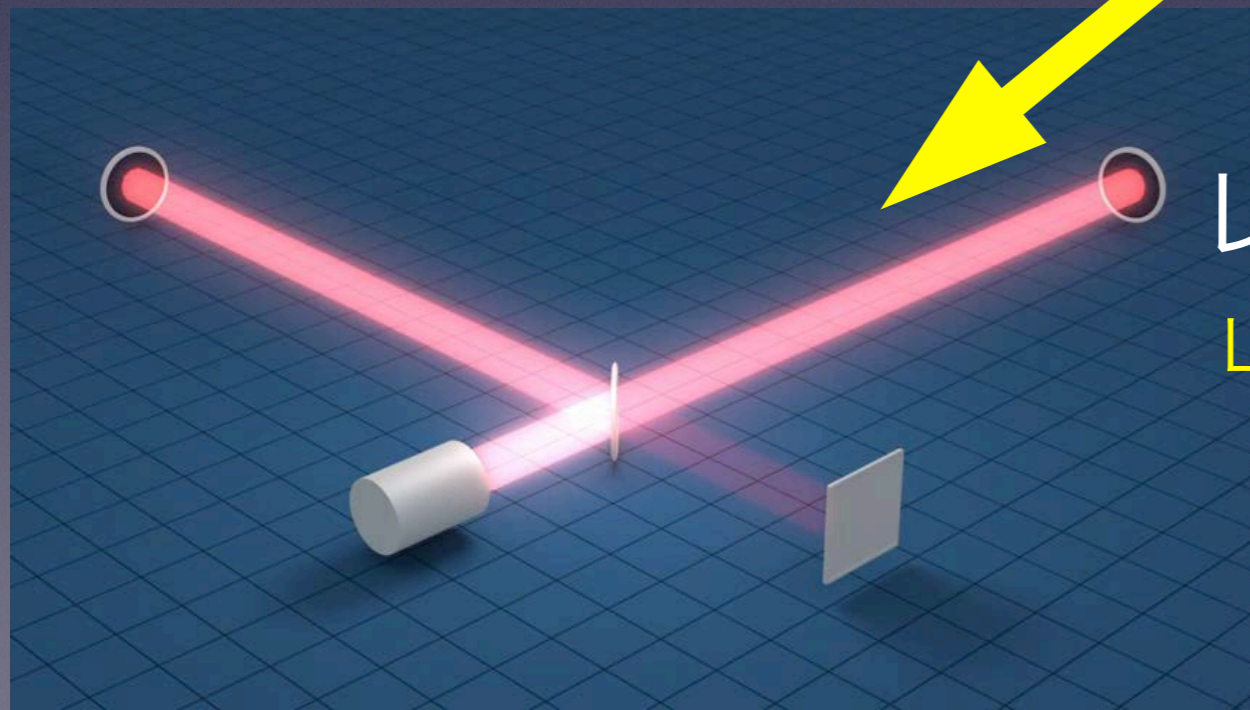
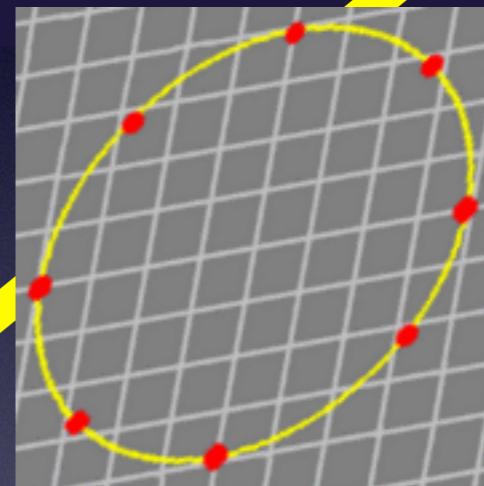
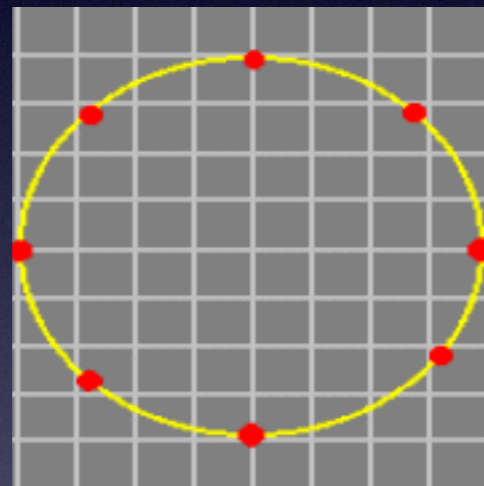
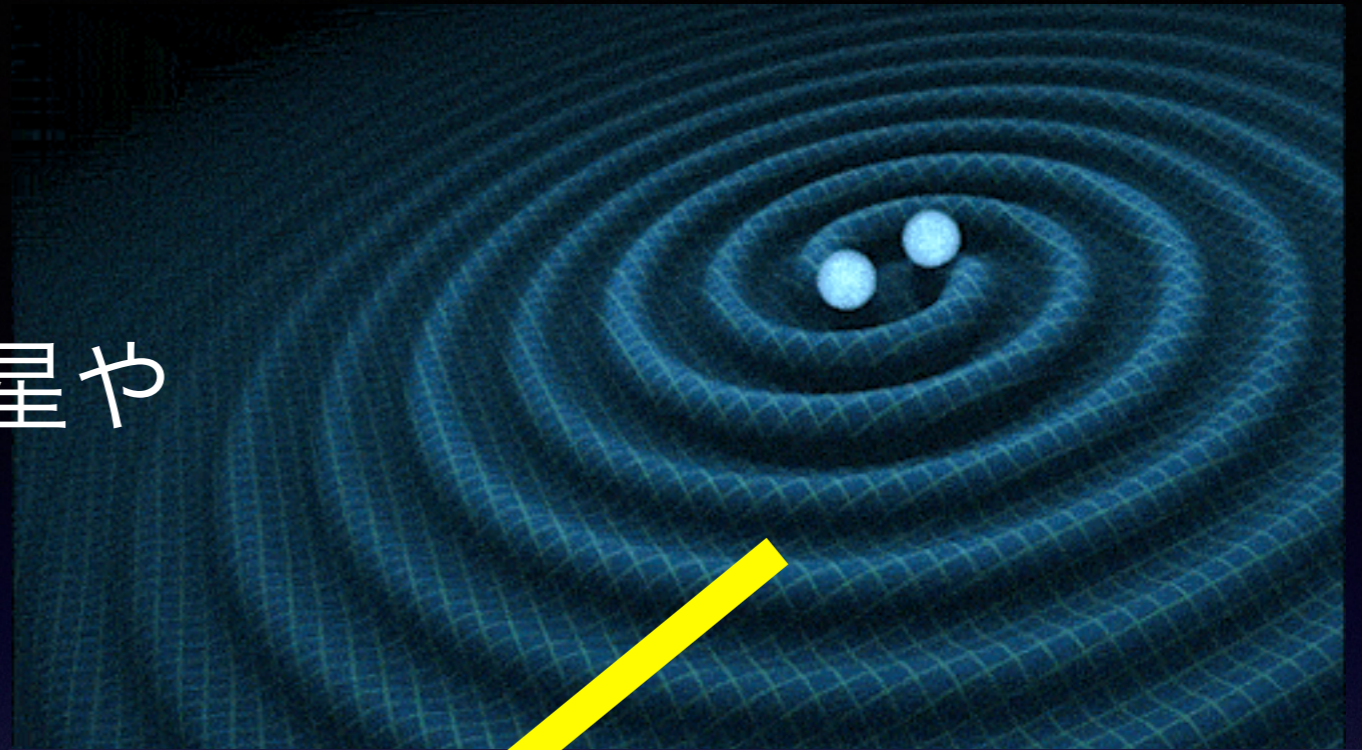
MIT Department of Physics  
Technical Services Group

start on click, last half, 1'45"

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

# 重力波の発生と伝播

ブラックホール連星や  
中性子星連星



レーザー干渉計

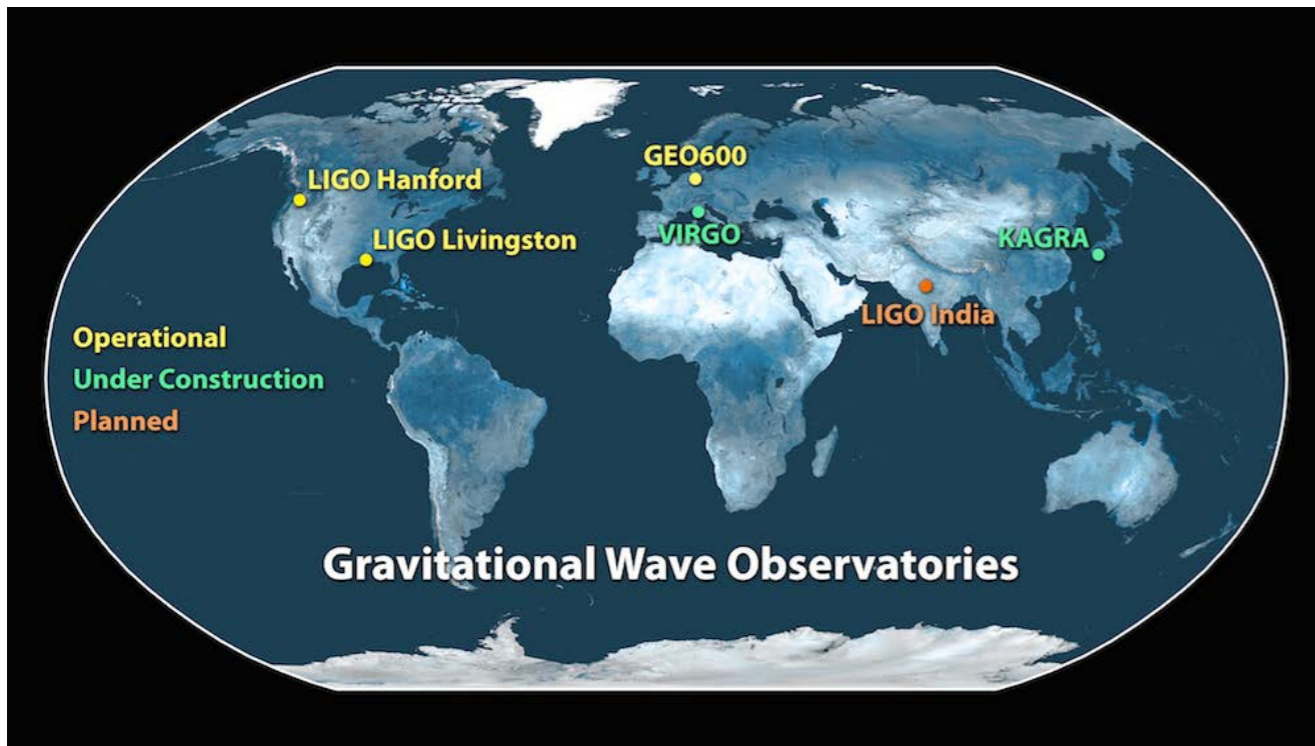
LIGO=Laser Interferometer

Gravitational-Wave Observatory

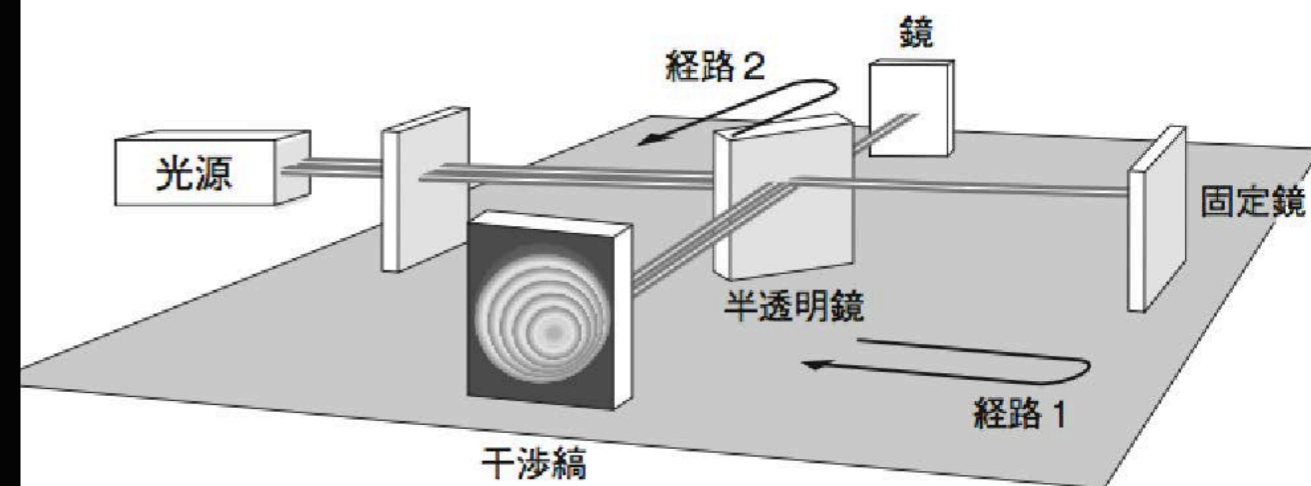


# LIGO (ライゴ: レーザー干渉計重力波天文台)

Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (1992年予算承認)



<https://mediaassets.caltech.edu/gwave>



# KAGRA (かぐら：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



神岡鉱山  
(岐阜県飛騨市神岡町)



望遠鏡の大きさ：基線長 3km

望遠鏡を神岡鉱山内に建設

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

# 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

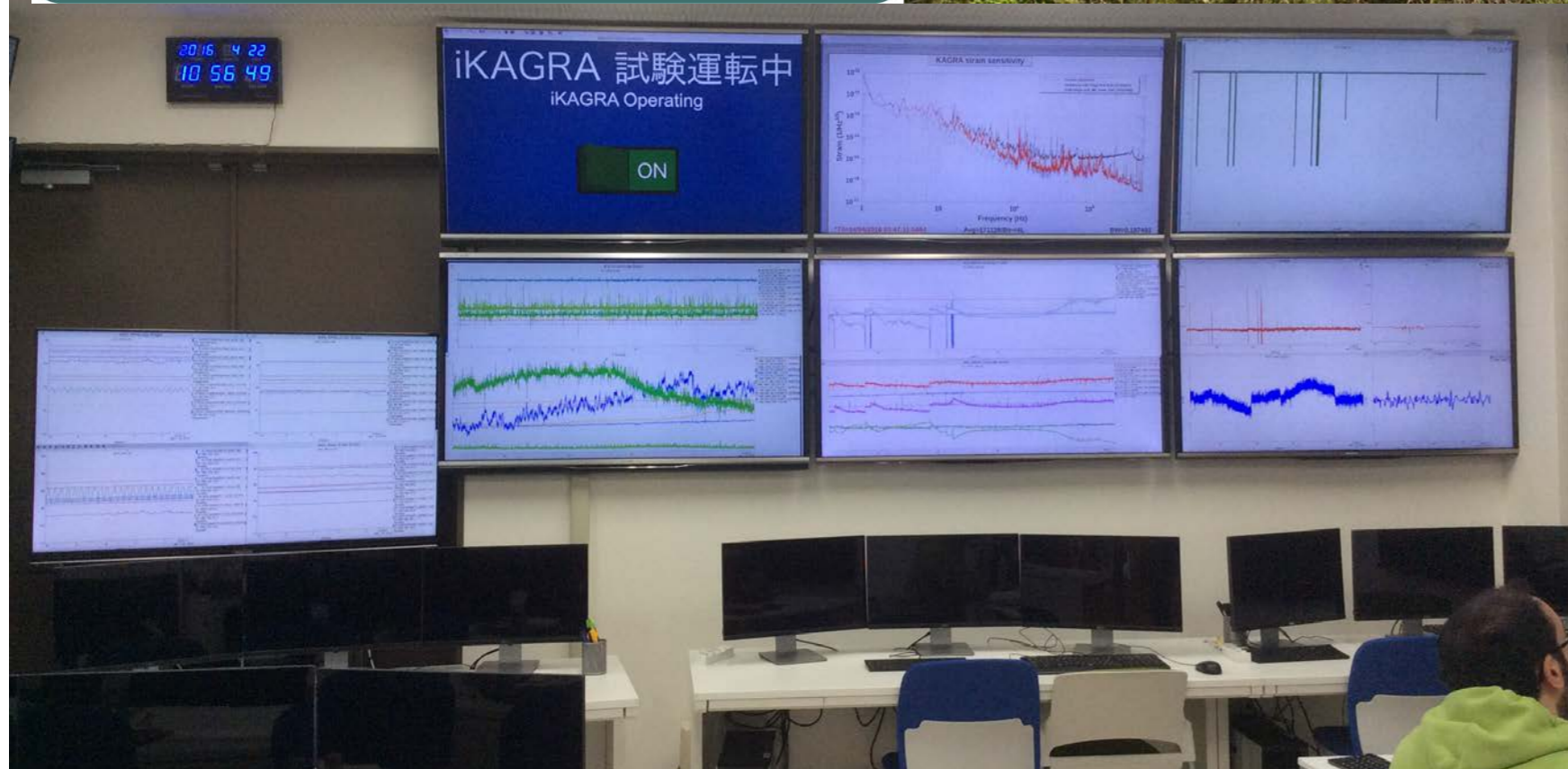
鏡をマイナス250度 (20K) まで冷却

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

# KAGRA (かぐら : 大型低温重力波望遠鏡)

2016年4月





Hisaaki Shinkai

Seiji Kawamura

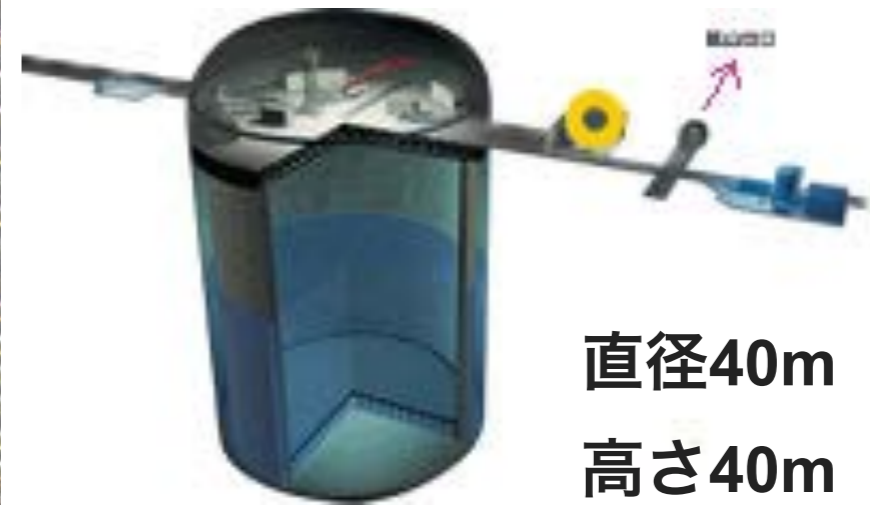
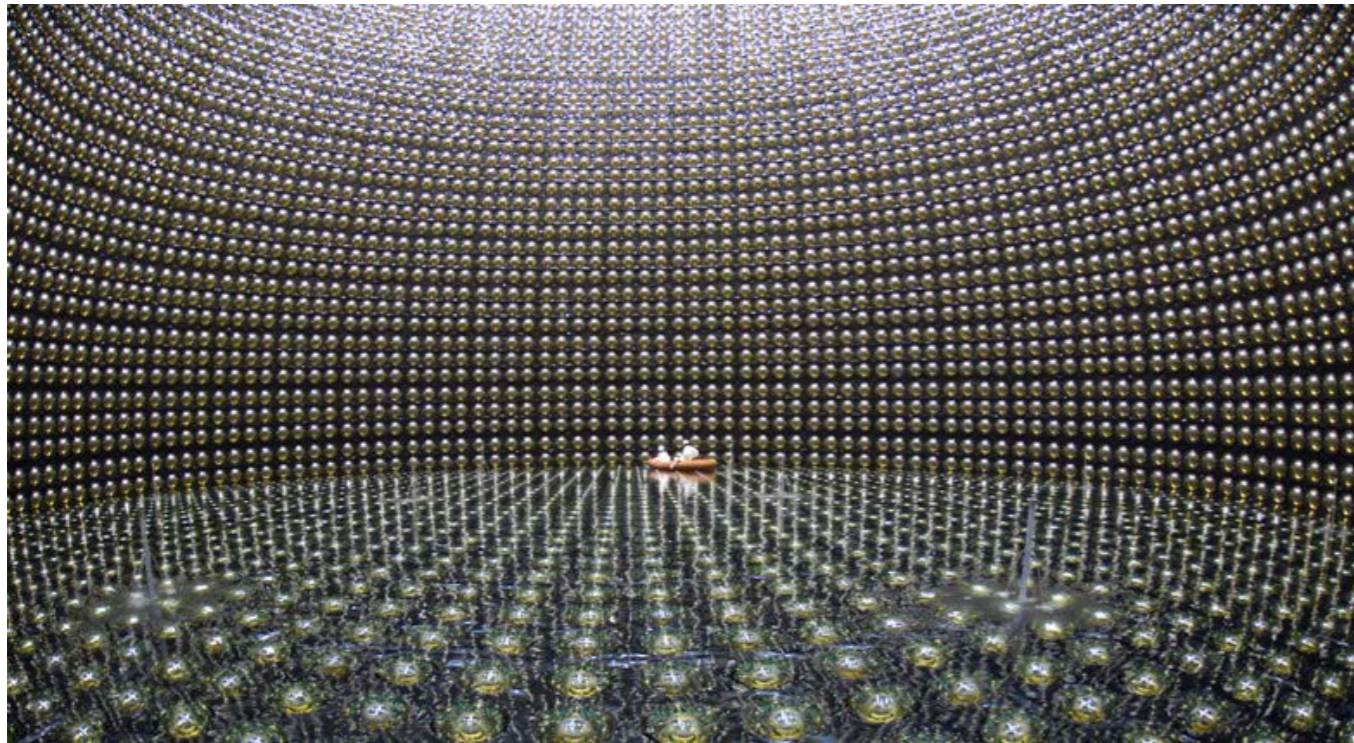
Kieran Craig

Martynov Denis

# スーパー・カミオカンデ (ニュートリノ観測装置)

Super-Kamiokande

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/>



直径40m

高さ40m

岐阜県・神岡の鉱山跡の空洞に巨大な水槽をつくり、  
宇宙から飛来するニュートリノを観測する。



ノーベル物理学賞を受賞

小柴昌俊 (2002年)



梶田隆章 (2015年)



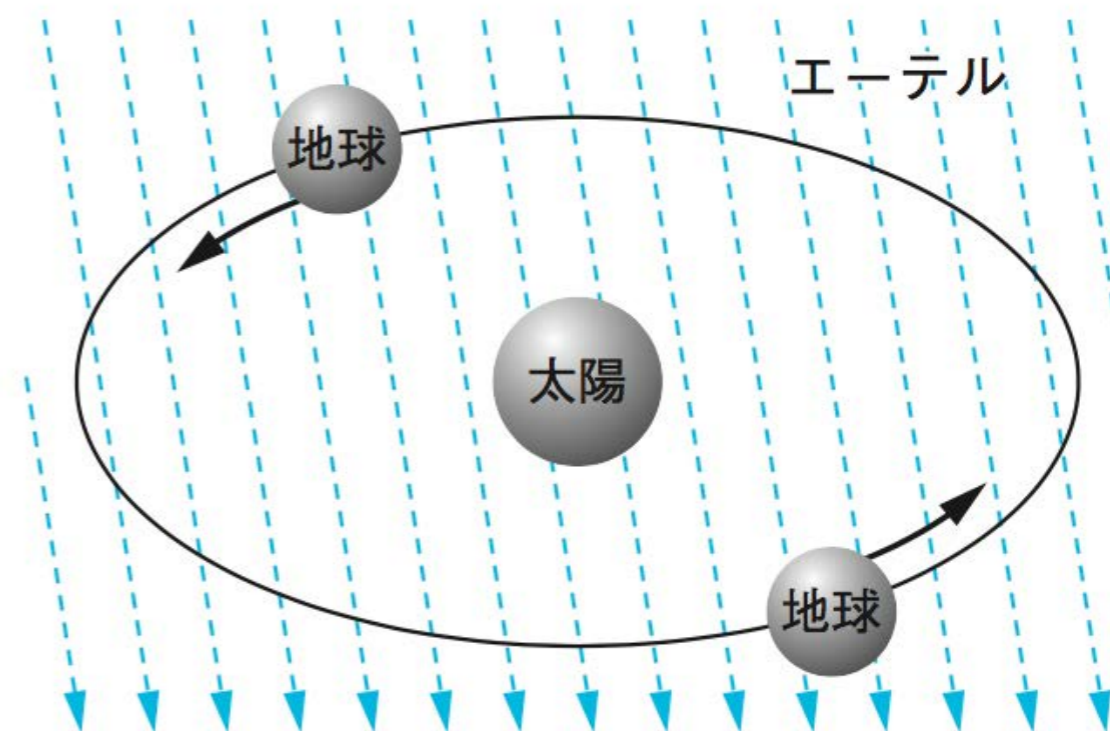
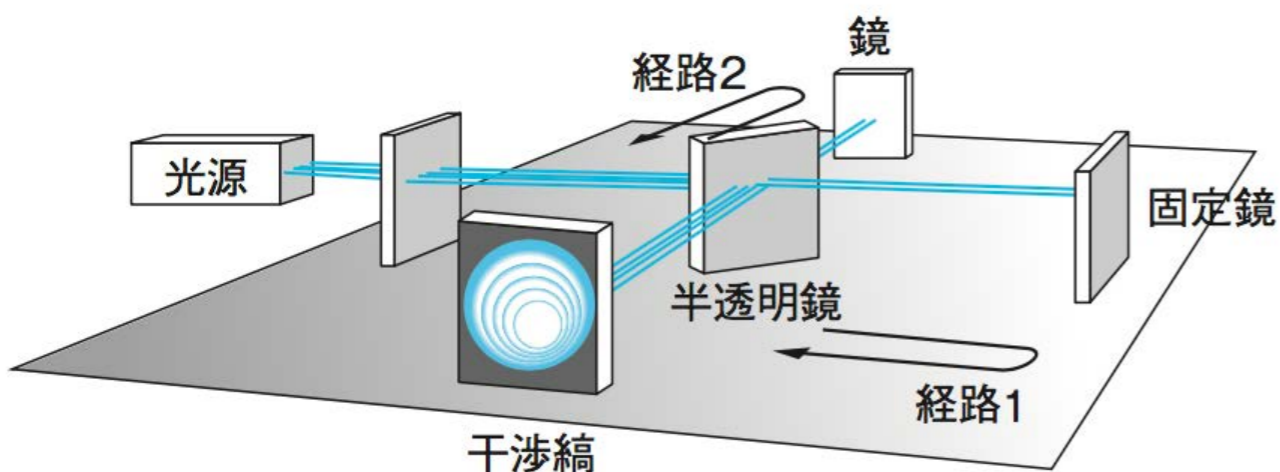
# マイケルソン・モーリーの実験

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。



## アインシュタイン 大胆な2つの原理の導入

- ★**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

# 光速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

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

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.

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

ローレンツ変換  
(Lorentz transformation)

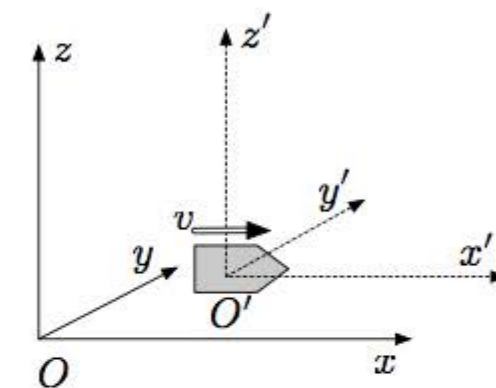
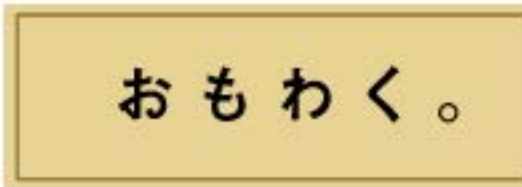
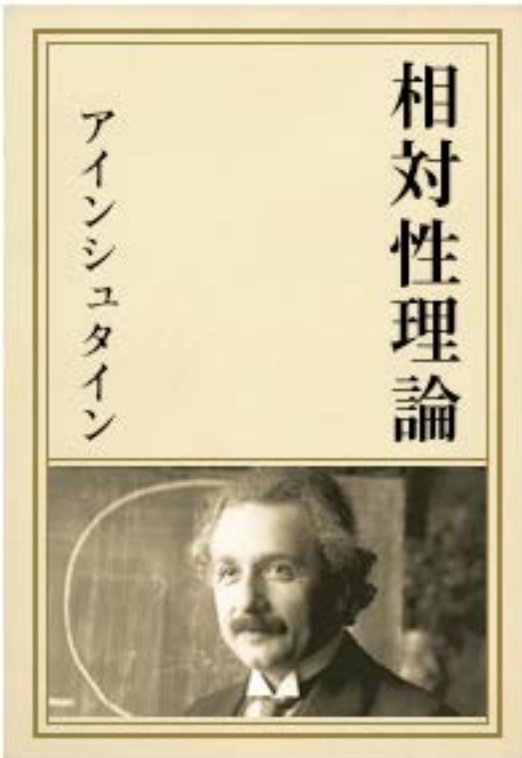
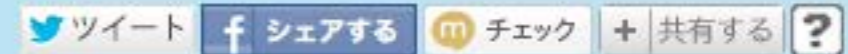


図 3.6: 静止している  $xyz$  座標系と，速度  $v$  で  $x$  方向に動いている  $x'y'z'$  座標系.

名著17



第1回 11月7日放送  
光の謎を解き明かせ！

第2回 11月14日放送  
時間と空間は縮む



アインシュタイン『相対性理論』

20世紀初頭に発表されたアインシュタインの相対性理論。物理学の革命と言われ、時間と空間の概念を一新するとともに、原子力開発にも結びついた、この偉大な論文を知らない人はいないでしょう。

しかし相対性理論とはどのようなものなのか、正確に答えられる人はほとんどいません。難解な十元連立方程式など、理解するには高度の数学知識が必要となるからです。

しかし実は、比較的簡単にその理論を説明することもできます。アインシュタインが得意とした「思考実験」という方法を用いることです。思考実験とは、「光に近い速度で宇宙船が飛行しているとしたら、その内部で何が起きるか」といった、実現不可能な想像上の実験のことです。

そこで11月の「100分 de 名著」では、スペシャル企画として、アニメーションやコンピューターグラフィックスを駆使して様々な思考実験を行いながら、相対性理論を読みときます。番組を見れば、数学や科学の知識がなくても、そのエッセンスが手に取るように分かります。

ロマンあふれる「相対性理論」の不思議な世界を、どうぞお楽しみ下さい。

▲ ページ先頭へ

第1回 光の謎を解き明かせ！

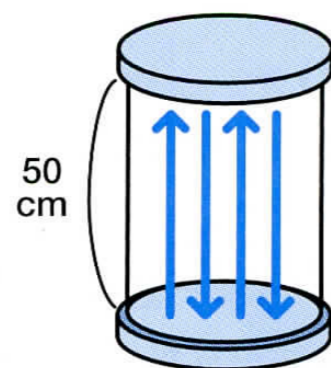
# 同時とは何か？

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』

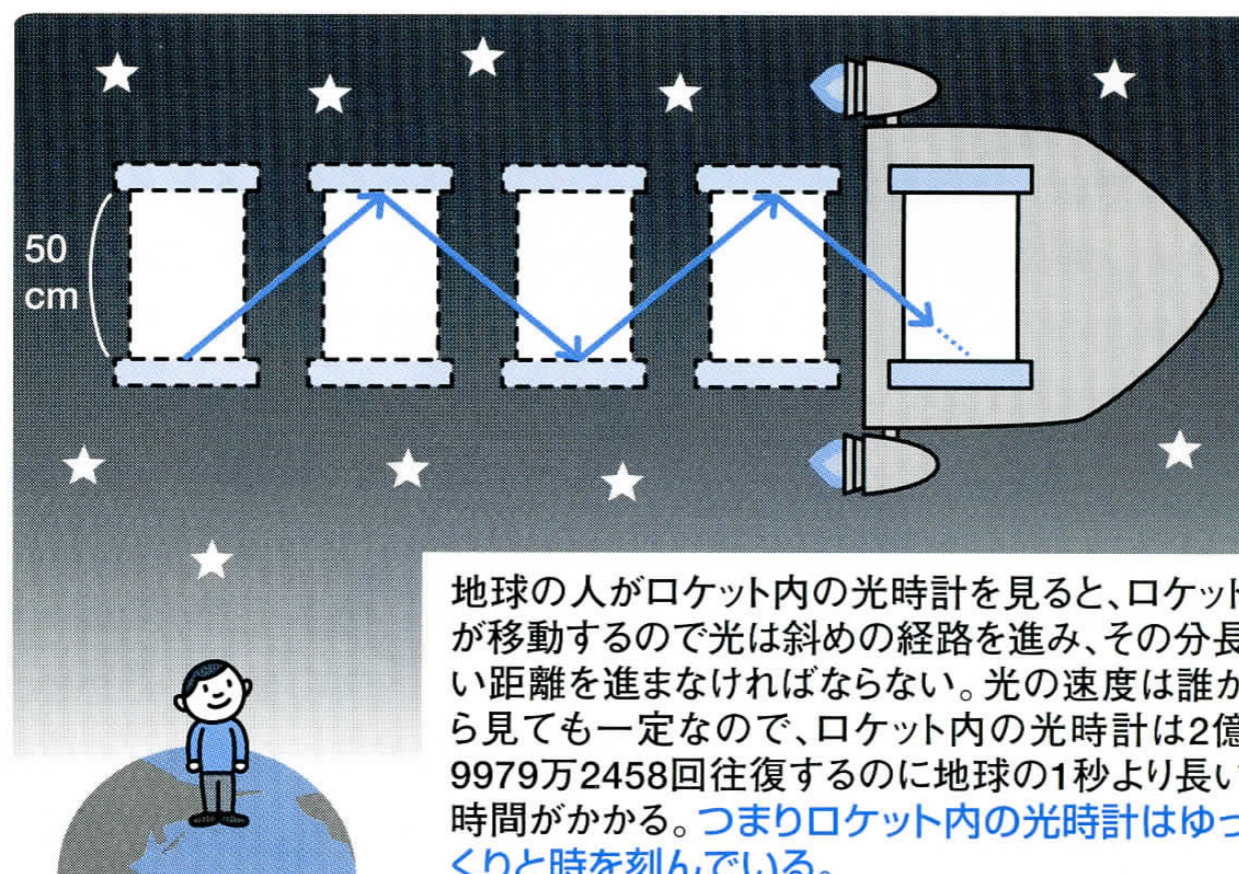
# 高速ロケットの中では時間の進み方が遅い

## 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

# 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'

# 未来へいくタイムマシンは可能

コラム

## コラム 1 (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  $\Delta T$  と同じではなく、次式になる。

$$\Delta T' = \sqrt{1 - (v/c)^2} \Delta T \quad (3.9)$$

この式にいくつか数字を入れると、時間の進み方は、 $v$  が光の速さ  $c$  に近づくほど極端に遅くなっていくことがわかる。(右の表と図、および裏表紙見返しのグラフを参照のこと)。

地球を周回している国際宇宙ステーション (ISS) は、秒速 7.8 km ほどの速度だが、この速度は光速の 10 万分の 2.6 でしかないため、たとえ 1 年間 ISS に乗っていたとしても、残念ながら地球上との時間差は、わずかに 0.01 秒程度でしかない。しかし、光速の 80% で飛ぶロケットならば、ロケット内の 1 年は地球上の 1 年 8 ヶ月になる。もし光速に近い速さで飛ぶロケットがあれば、ロケットに乗った人はなかなか歳をとらないことになる。

浦島太郎は、竜宮城で 3 年間過ごし、自分の村に戻ってきたら、誰も知り合いがいなかった。これを例えば 300 年経っていた、と考えるならば、竜宮城が光の速さの 99.99499% で動くロケットだった、と考えればツジツマが合う。

だから、この意味で、未来へ行くタイムトラベルは可能！と言える。光速に近いロケットが実現すれば、そのロケットで旅行して帰ってくるだけでタイムマシンになるのだ。

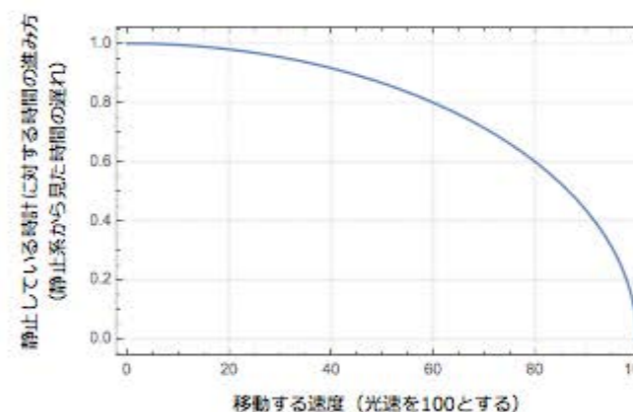
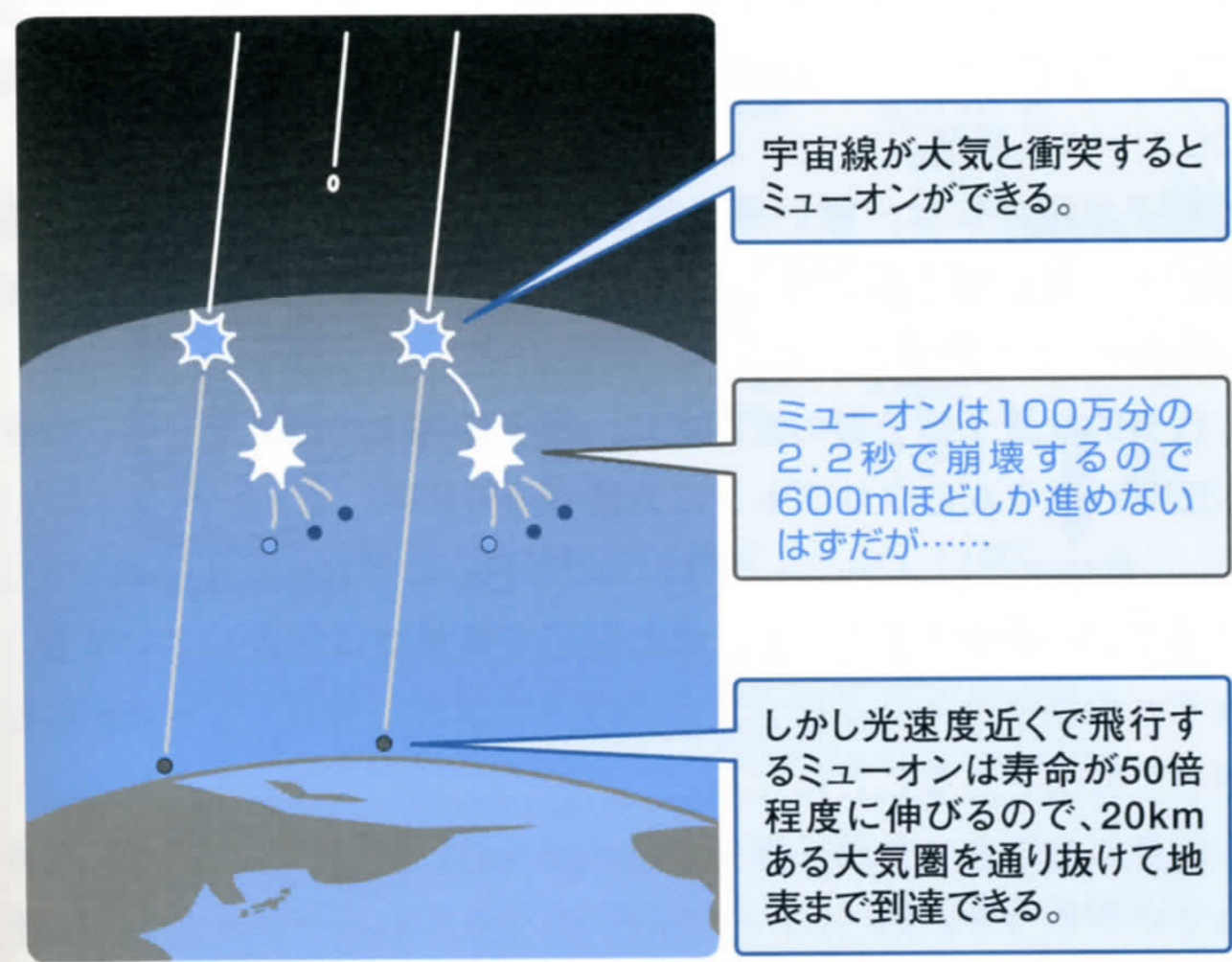
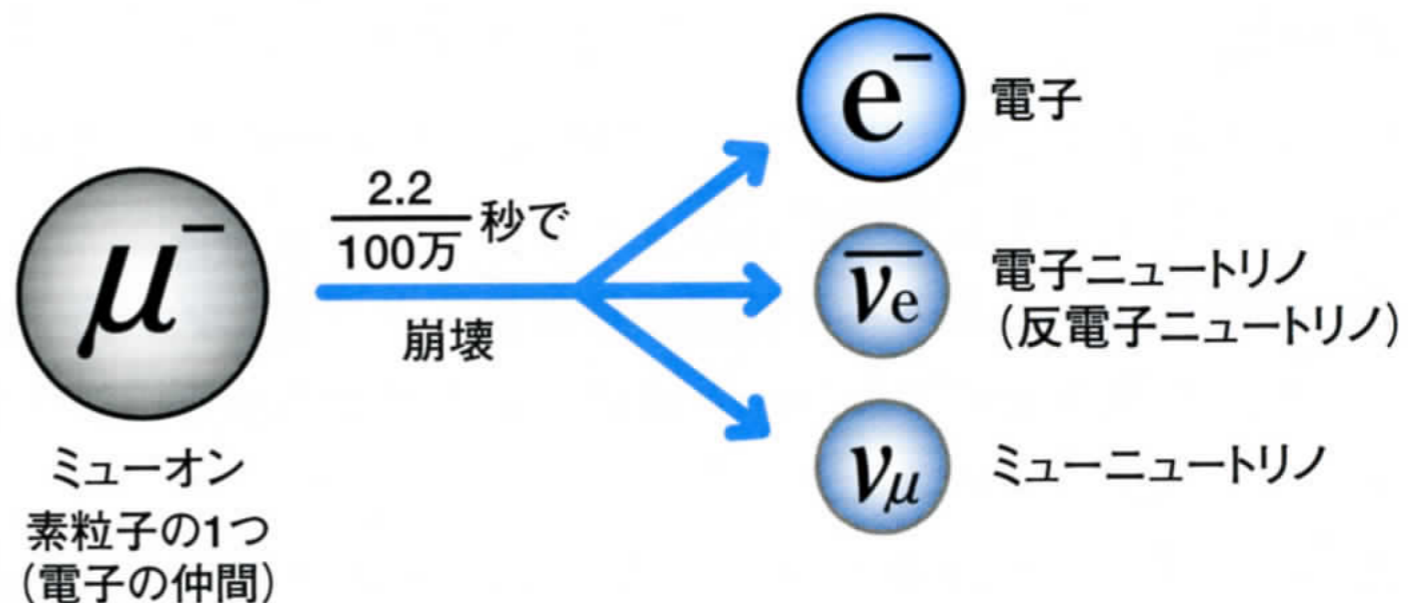


図 3.8

表 3.1

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

# 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

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

$$F = ma$$

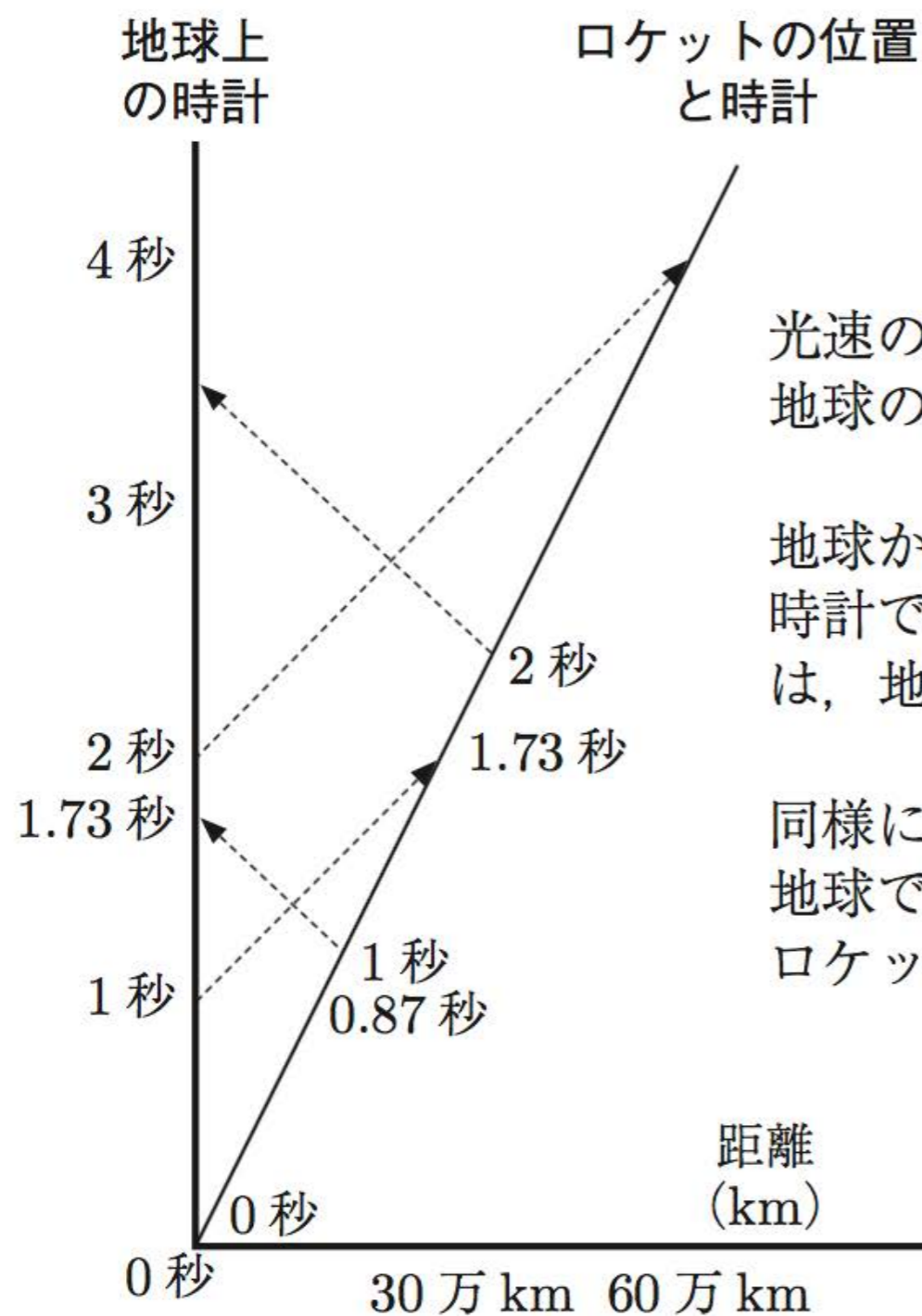
## (1) 「相手の時計が遅れている」パラドックス

「相手の時計が遅れている」パラドックス

- 1a) 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。
- 1b) そのため、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。
- 1c) つまり、お互いどちらも「相手の時計が遅れている」と主張する。

どちらも正しい

## (1) 「相手の時計が遅れている」パラドックス



光速の50%で動くロケットでは  
地球の1秒は0.87秒に、地球の2秒は1.73秒になる。

地球から1秒ごとに送信された信号は、ロケット内の時計では1.73秒間隔で受信する。だからロケット側は、地球の1秒は遅くなっていると考えよう。

同様に、ロケットから1秒ごとに送信された信号も、地球では1.73秒間隔で受信する。だから地球側も、ロケットの1秒は遅くなっていることになる。

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。

## (2) 双子のパラドックス

### 双子のパラドックス

- 2a) 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。
- 2b) 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。
- 2c) 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。

**兄の方が若い**

## (2) 双子のパラドックス

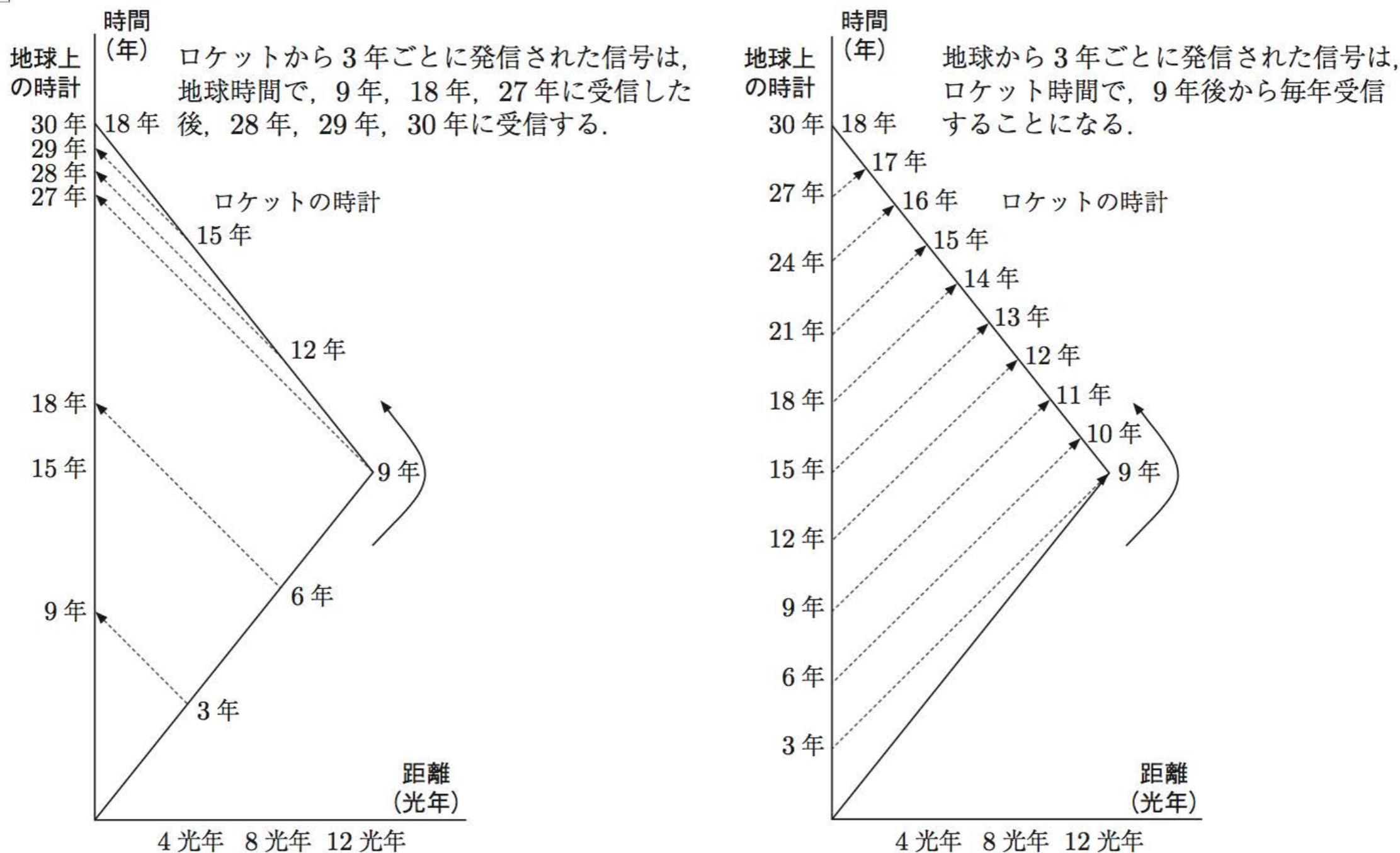


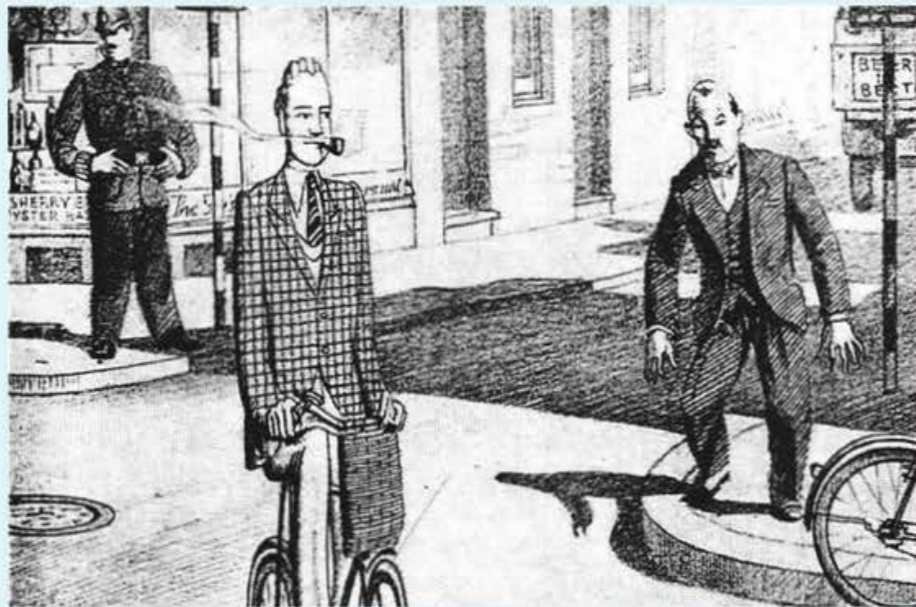
図 3.17 双子のパラドックスの理解. 互いに3年ごとに信号を発して、互いに相手の時計は遅いと感じつつも、再び出会うときにはロケットに乗っていた方が時間経過が短い。

# 不思議の国のトムキンス

## 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

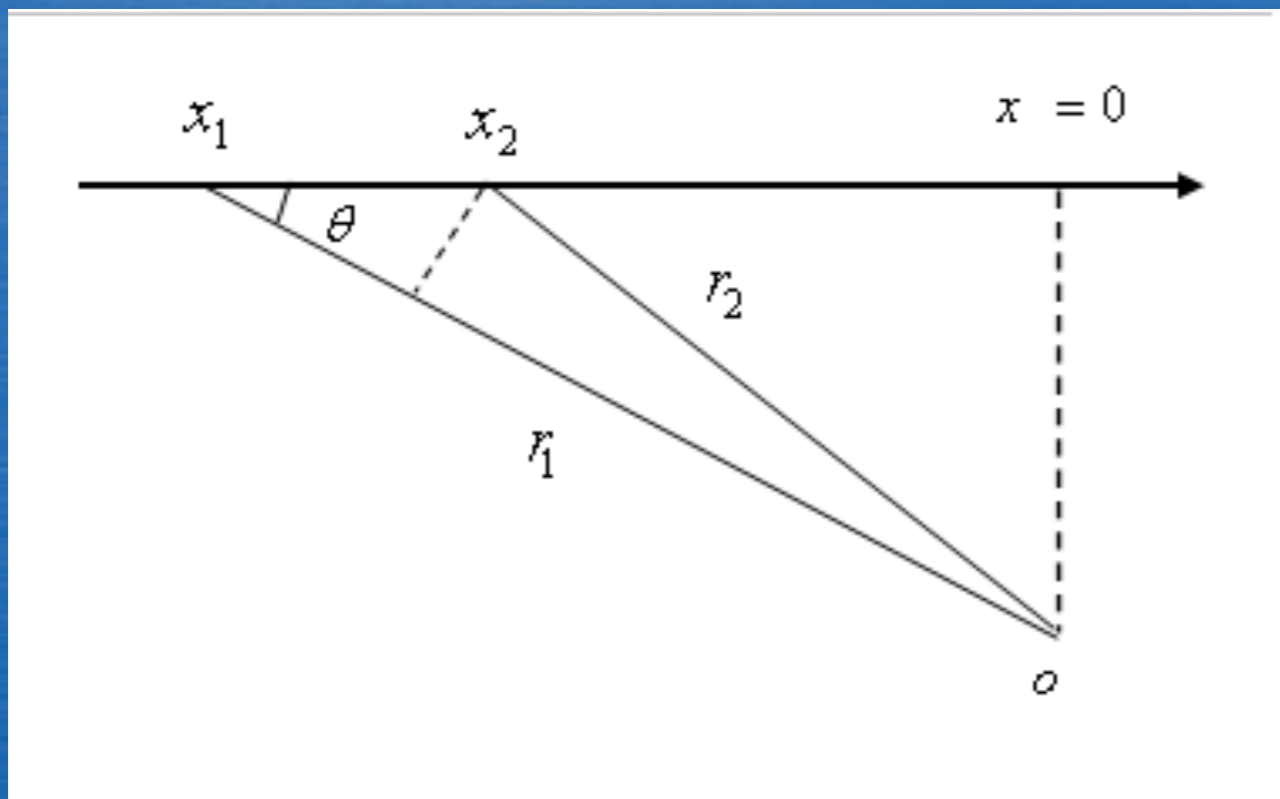


$$f_N = \frac{c + v_{source}}{c - v_{obs}} f_{source}$$

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

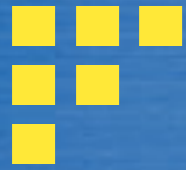
# 「不思議の国のトムキンス」 効果の由来

## 準光速ロケットからの眺め (2) 光の横ドップラー効果

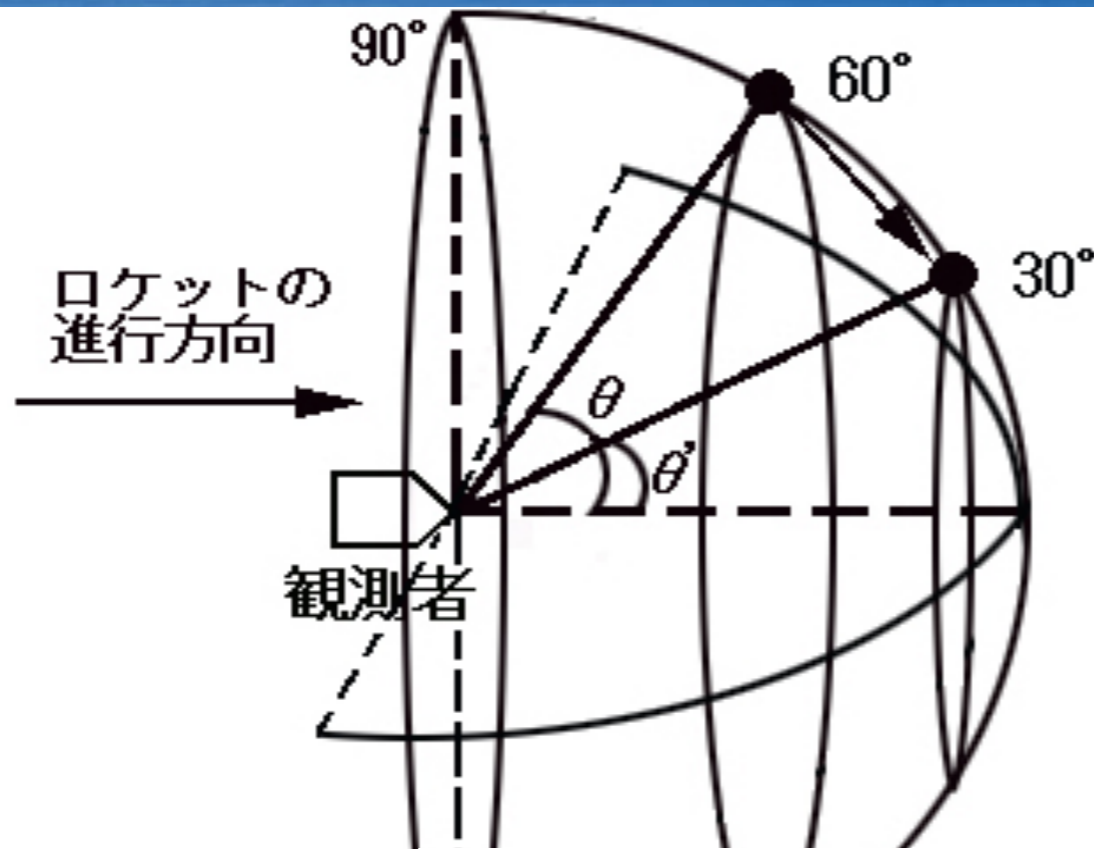


$$f_{SR} = \frac{(1 - \beta^2)^{1/2}}{1 - \beta \cos \theta} f_{source}, \quad \beta = \frac{v_{obs}}{c}$$

# 「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)

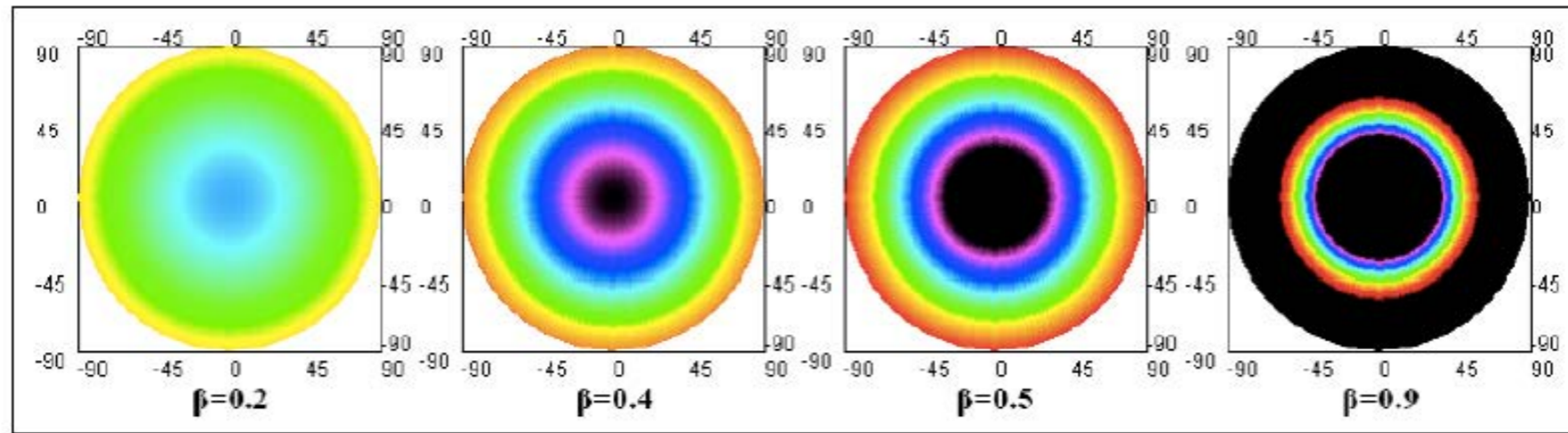


図 13: ドップラー効果のみを考えた前方の景色

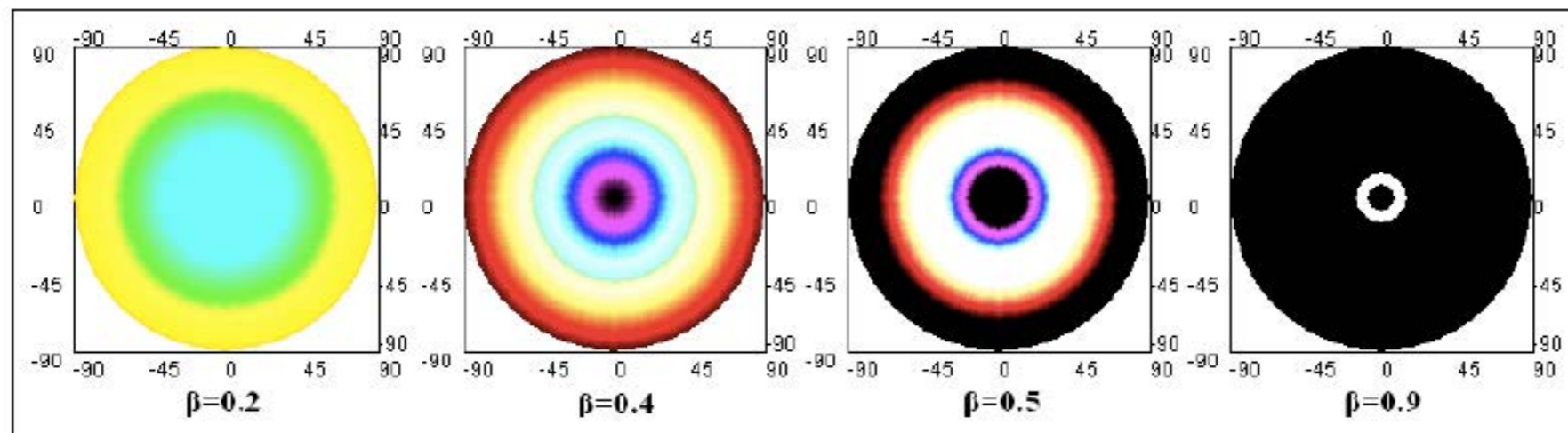
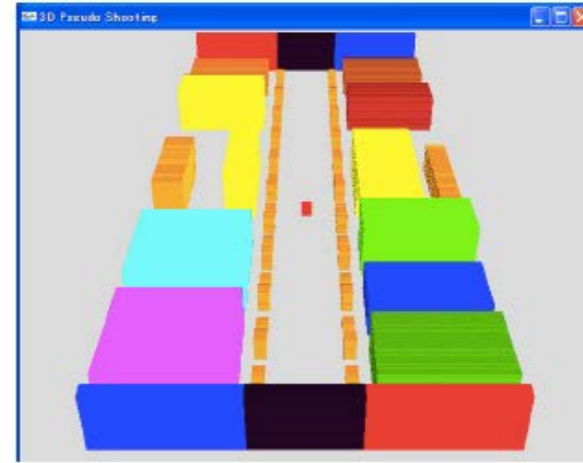


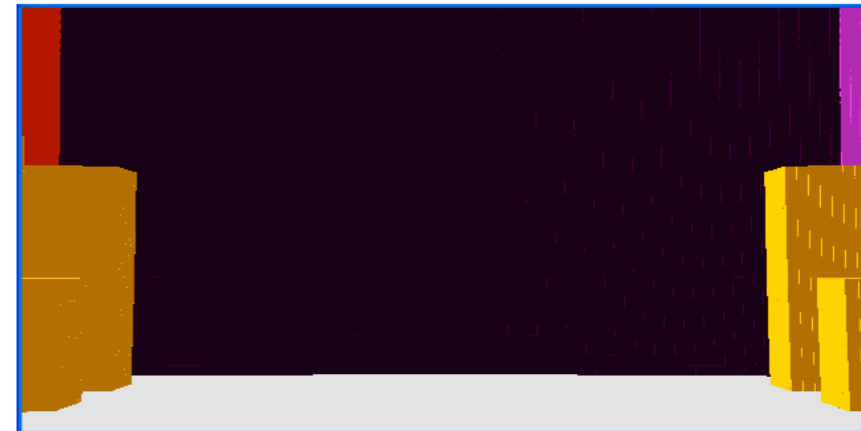
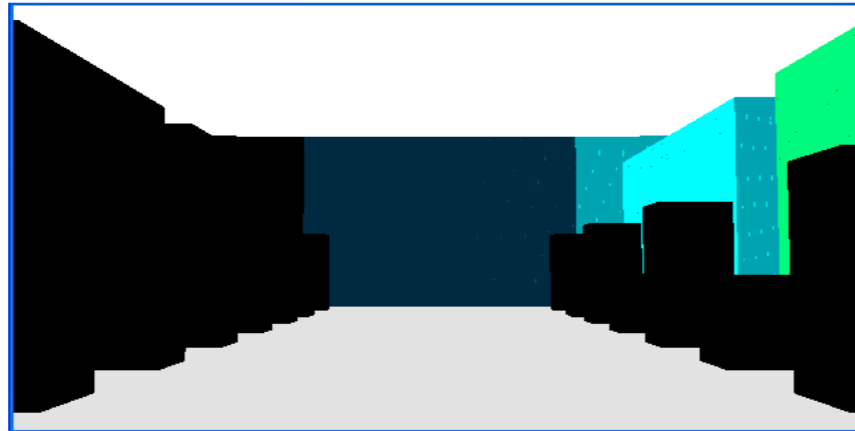
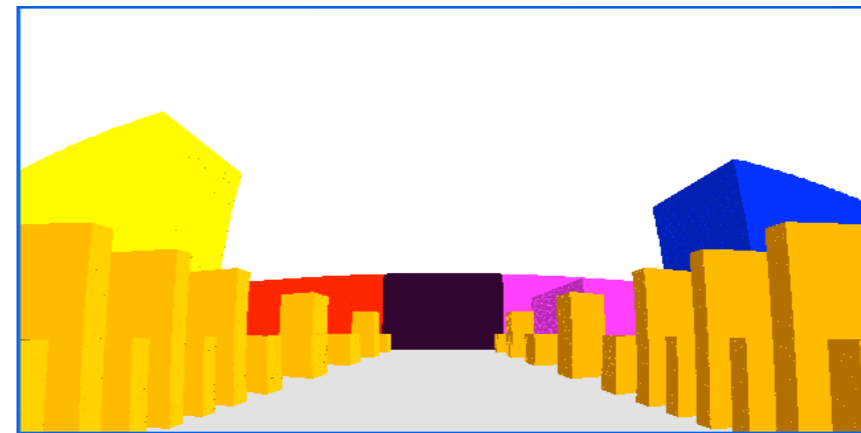
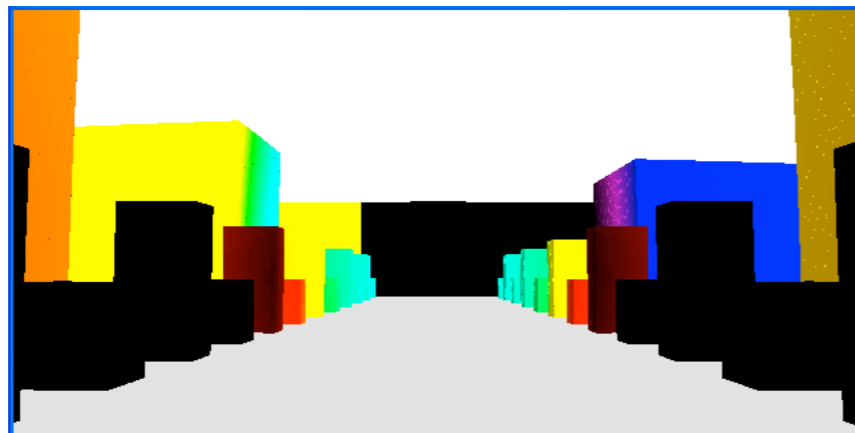
図 14: 図 13 に光行差及び明るさ変化を取り入れた前方の景色

# 準光速ロケットから見える世界(2)

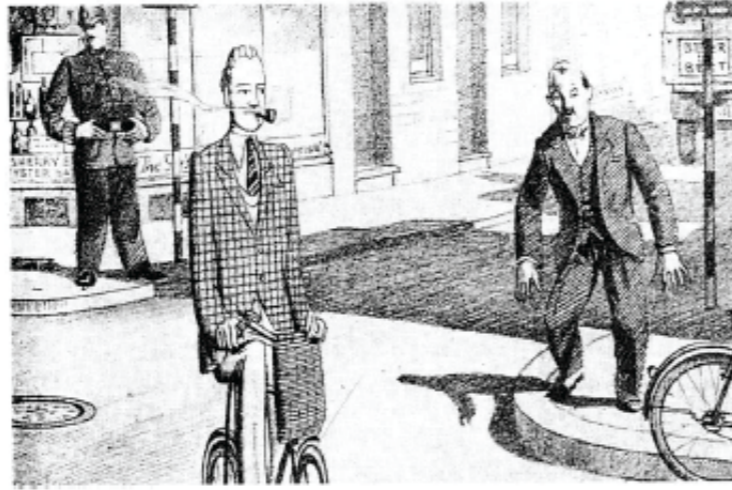
$v=0$



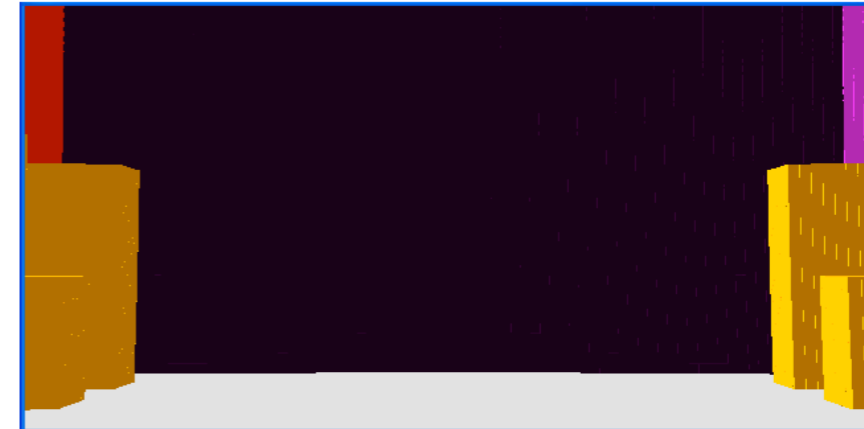
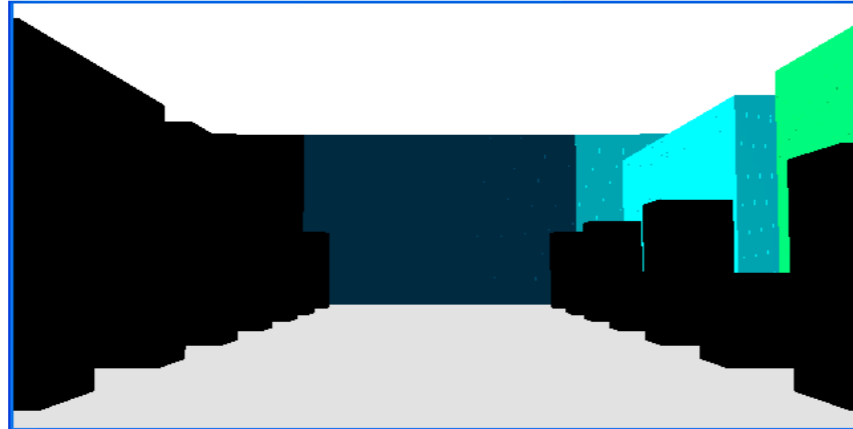
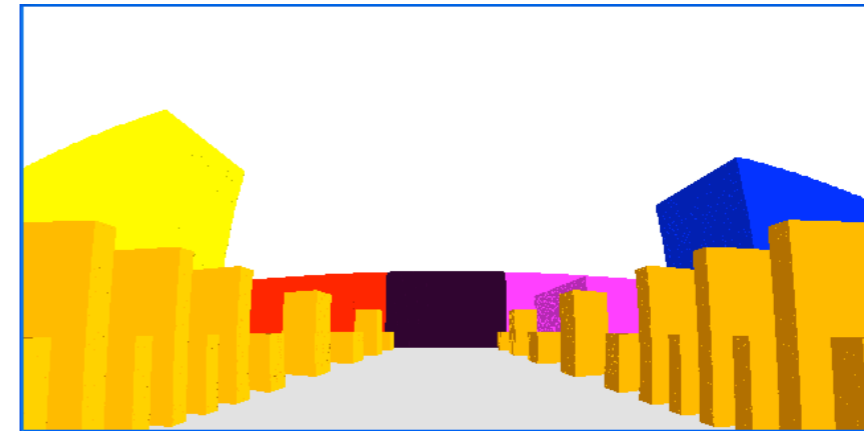
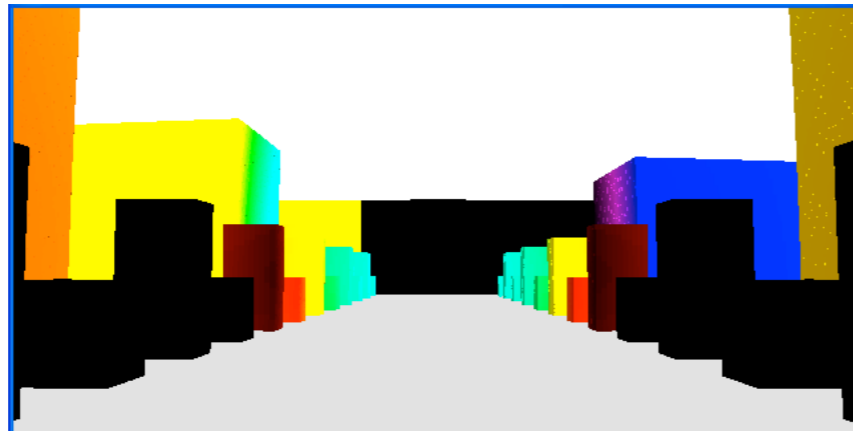
$v=0.8c$



# 準光速ロケットから見える世界(3)



$v=0.8c$



$$E = mc^2$$

## 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)

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

$$E = mc^2$$

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

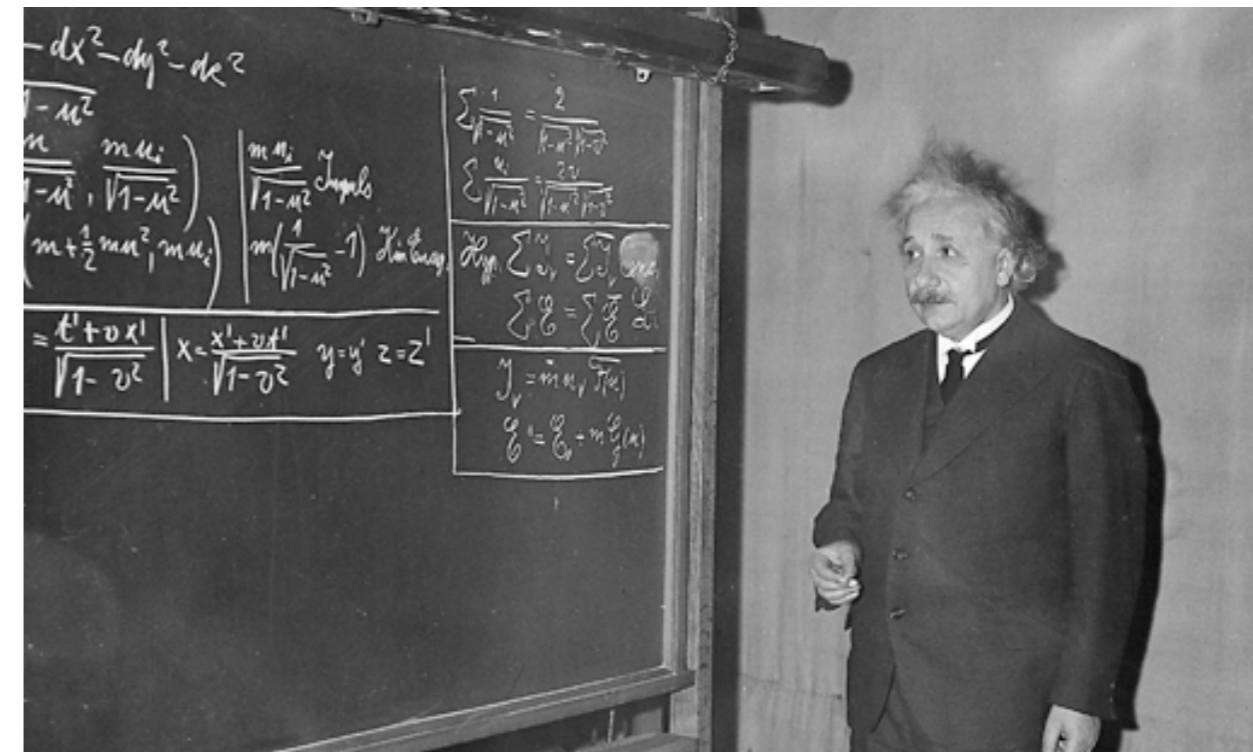
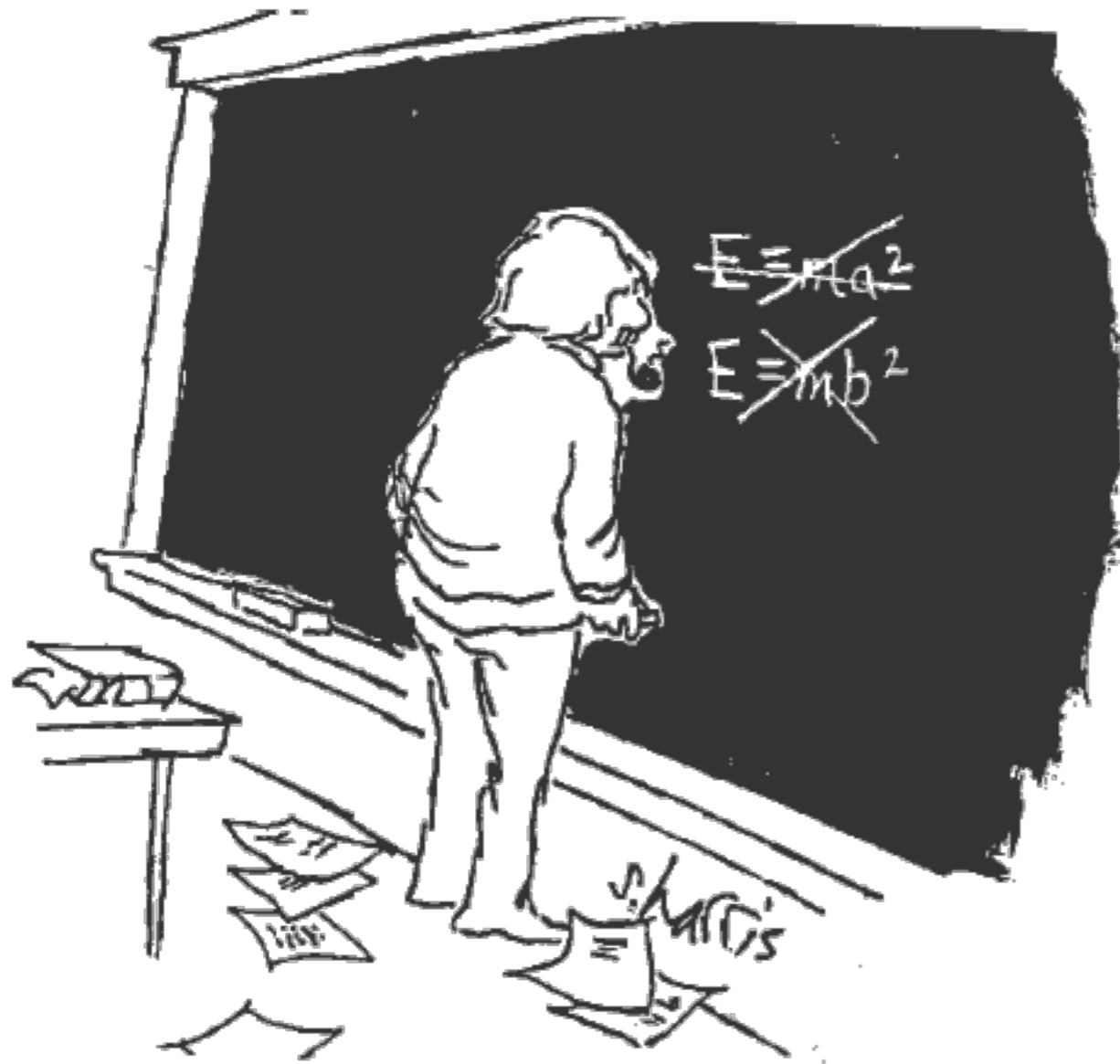
質量x光速x光速

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！



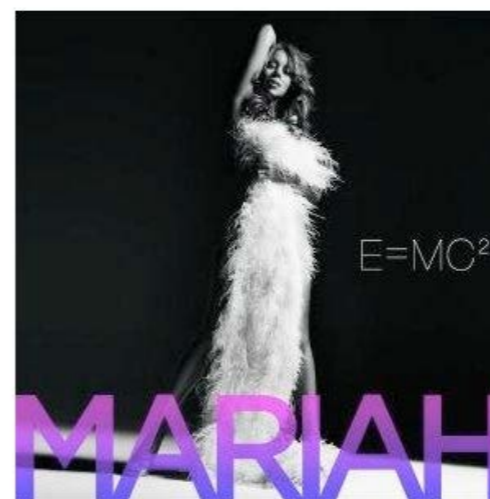
$$E = mc^2$$



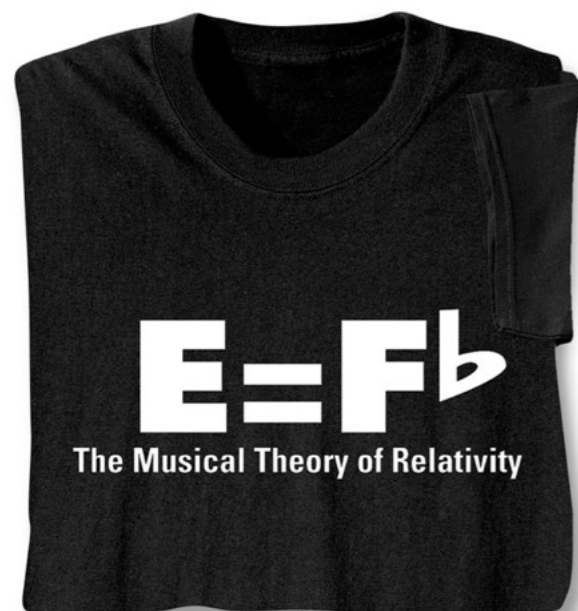
$$E = mc^2$$



"You think you're pretty smart, don't you?"



$$E = mc^2$$



# 最も有名な物理の公式



……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

$$E = mc^2$$

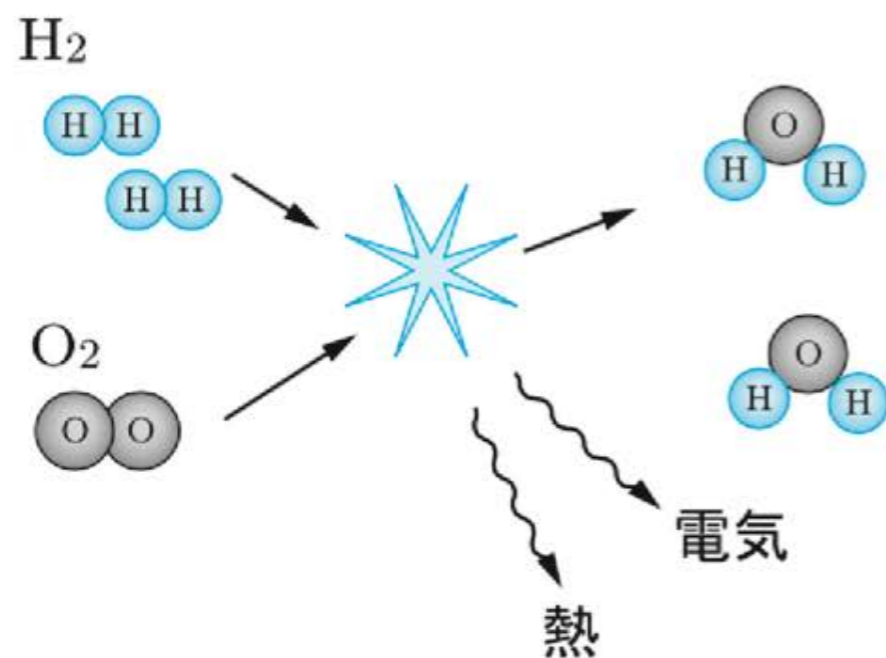
である。この式が私の本の潜在的な読者をおびえさせ、半分に減らさないことを願っている。……



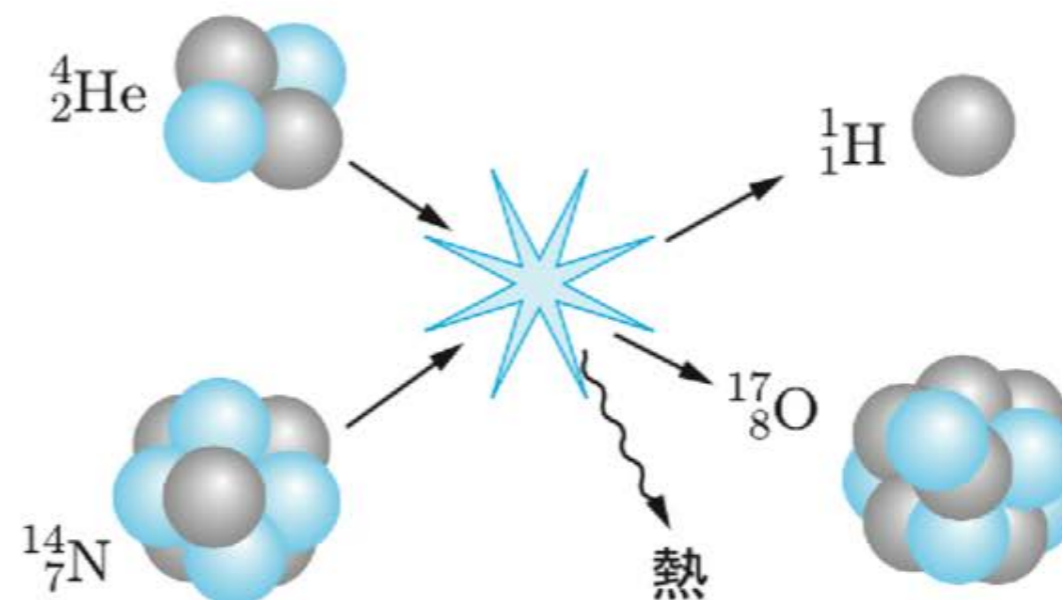
# 化学反応 と 原子核反応

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**

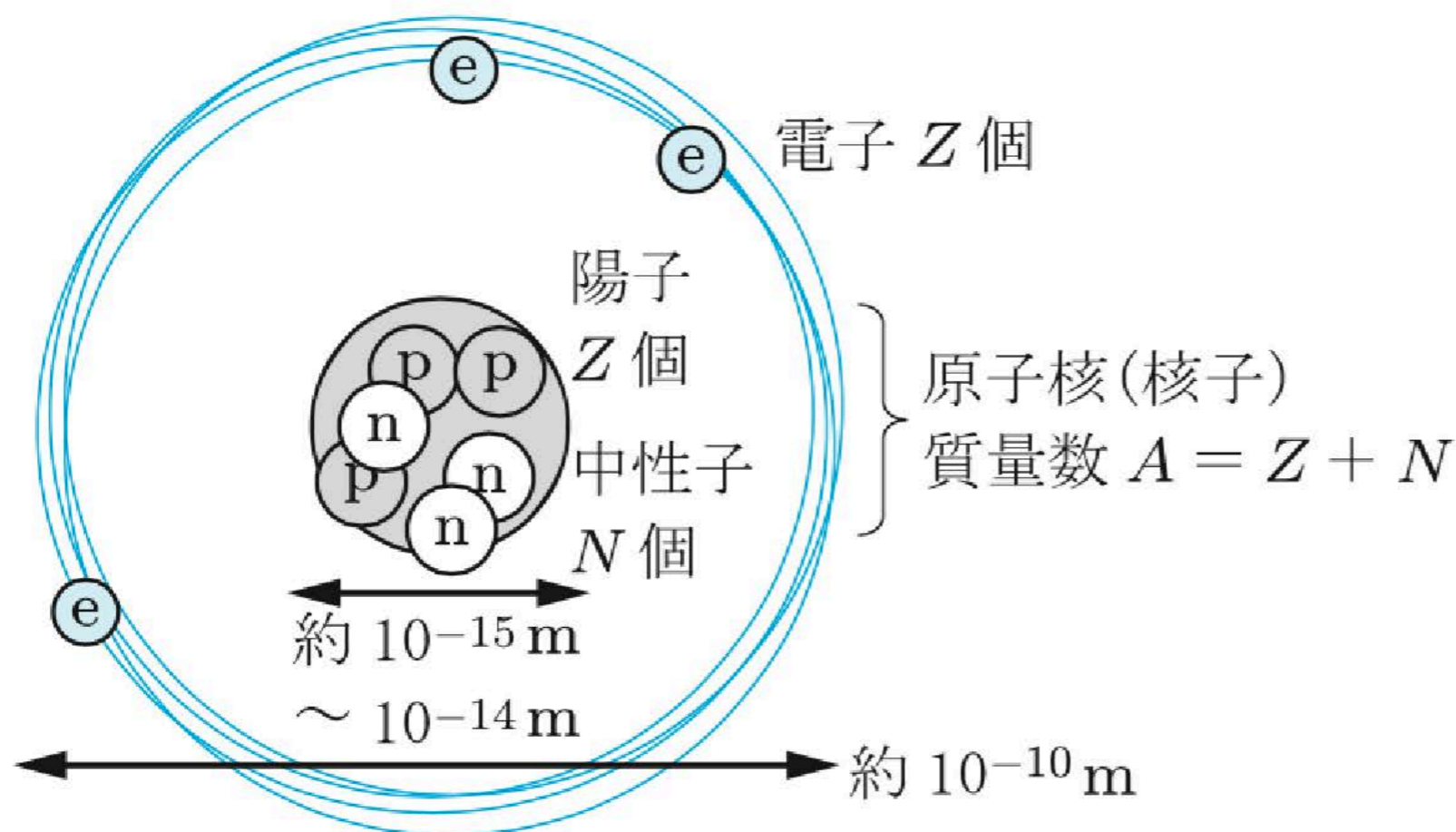


(a) 化学反応

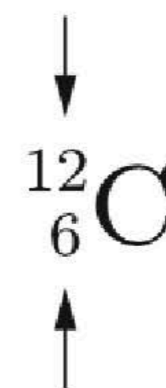


(b) 核反応

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.



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	1A	1	2	13	14	15	16	17	18											
1s	1A	2	IIA	III A	IV A	V A	VI A	VII A	VIII A											
1	H	2	He	5	6	7	8	9	10											
1s	H	2	He	5	6	7	8	9	10											
2	Li	3	Be	13	14	15	16	17	18											
2s	Li	3	Be	13	14	15	16	17	18											
2	Li	3	Be	5	6	7	8	9	10											
2s	Li	3	Be	5	6	7	8	9	10											
3	Na	11	Mg	12	13	14	15	16	17	18										
3s	Na	11	Mg	12	13	14	15	16	17	18										
3	Na	11	Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
3s	Na	11	Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
4	K	19	Ca	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
4s	K	19	Ca	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
4	K	19	Ca	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
4s	K	19	Ca	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
5	Rb	37	Sr	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
5s	Rb	37	Sr	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
5	Rb	37	Sr	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
5s	Rb	37	Sr	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
6	Cs	55	Ba	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
6s	Cs	55	Ba	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
6	Cs	55	Ba	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
6s	Cs	55	Ba	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
7	Fr	87	Ra	88	89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
7s	Fr	87	Ra	88	89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
7	Fr	87	Ra	88	89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
7s	Fr	87	Ra	88	89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118

原子番号 → 29 ← 通常できるイオンの価数  
 元素記号 → Cu ← 元素記号が灰色のものは人工合成された元素  
 元素名(日本語) → 銅  
 元素名(英語) → copper  
 ← 原子量  
 63.55

↑ 非金属元素  
 ↓ 金属元素

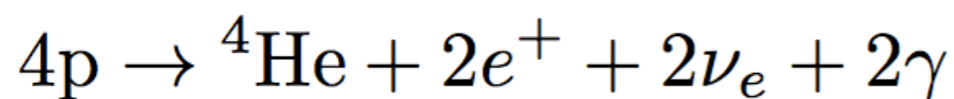
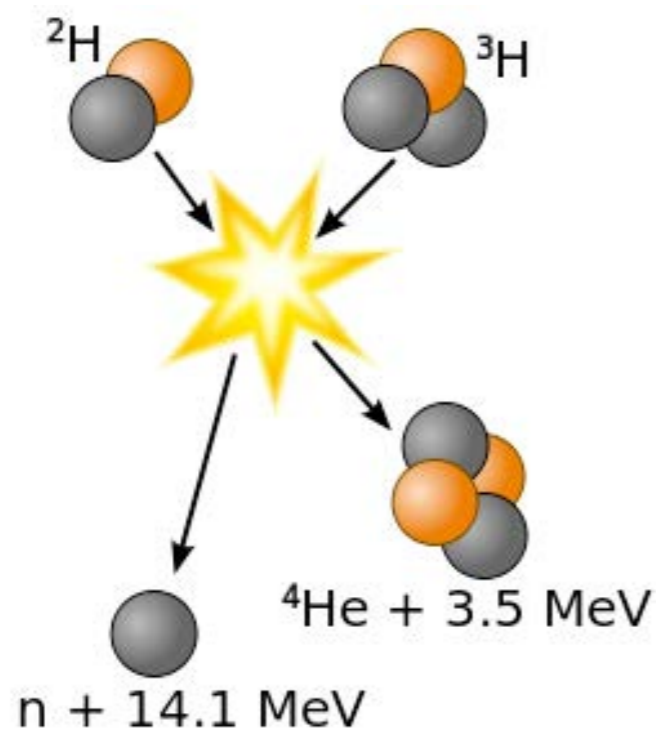
常温で気体 (Yellow)  
 単体は半導体 (Pink)  
 常温で液体 (Green)  
 単体は強磁性体 (Cyan)  
 放射性同位体のみからなる元素 (Orange)

ランタノイド  
 lanthanides  
 (レアアース金属)  
 アクチノイド  
 actinides

57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
ランタン	セリウム	プラセオジウム	ネオジウム	プロメチウム	サマリウム	ユロピウム	ガドリニウム	テルビウム	ジスプロシウム	ホルミウム	エルビウム	ツリウム	イットルビウム	ルテチウム
lanthanum	cerium	praseodymium	neodymium	promethium	samarium	europium	gadolinium	terbium	dysprosium	holmium	erbium	thulium	ytterbium	lutetium
138.9	140.1	140.9	144.2	145	150.4	152.0	157.3	158.9	162.5	164.9	167.3	168.9	173.0	175.0
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
アクチニウム	トリウム	プロトアクチニウム	ウラン	ネプツニウム	プルトニウム	アメリシウム	キュリウム	バークリウム	カリホルニウム	アインスタイニウム	フェルミウム	メンデレヴィウム	ノーベリウム	ローレンシウム
actinium	thorium	protactinium	uranium	neptunium	plutonium	americium	curium	berkelium	californium	einsteinium	fermium	mendelevium	nobelium	lawrencium
227	232.0	231.0	238.0	237	239	243	247	247	251	252	257	258	259	262

↑ 非金属元素  
 ↓ 金属元素

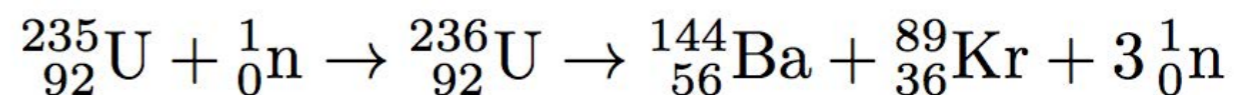
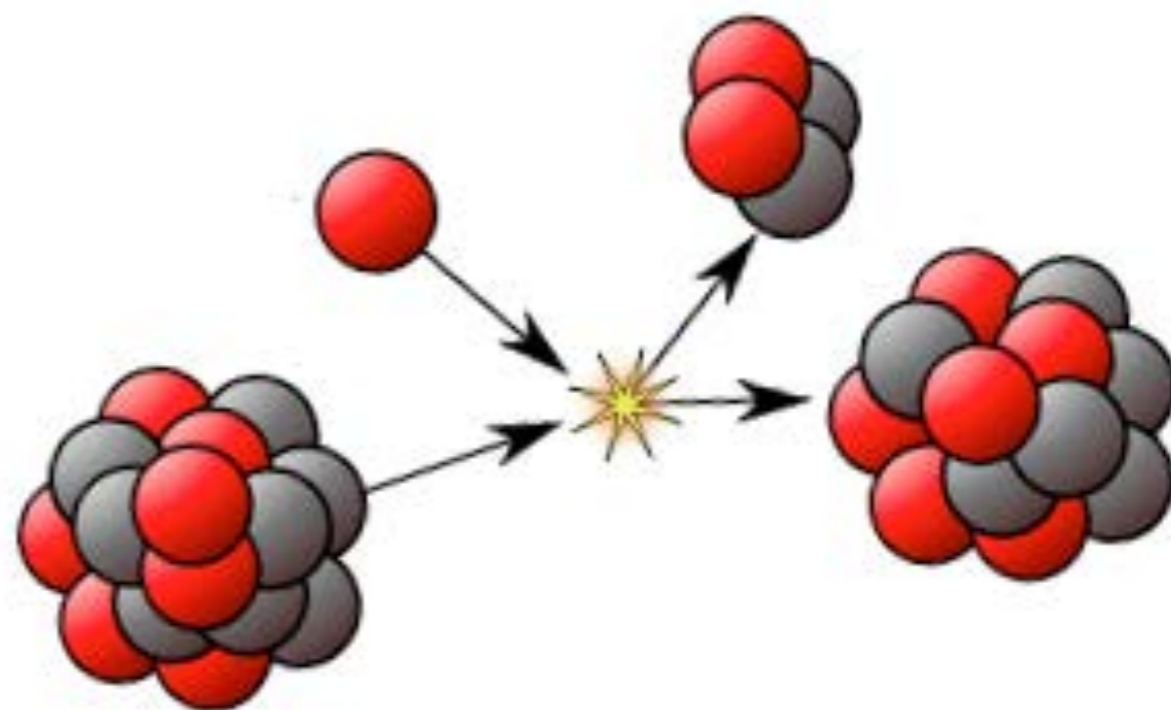
## 核融合 と 核分裂



## 核融合

(nuclear fusion)

合体した方が安定  
(エネルギー放出)



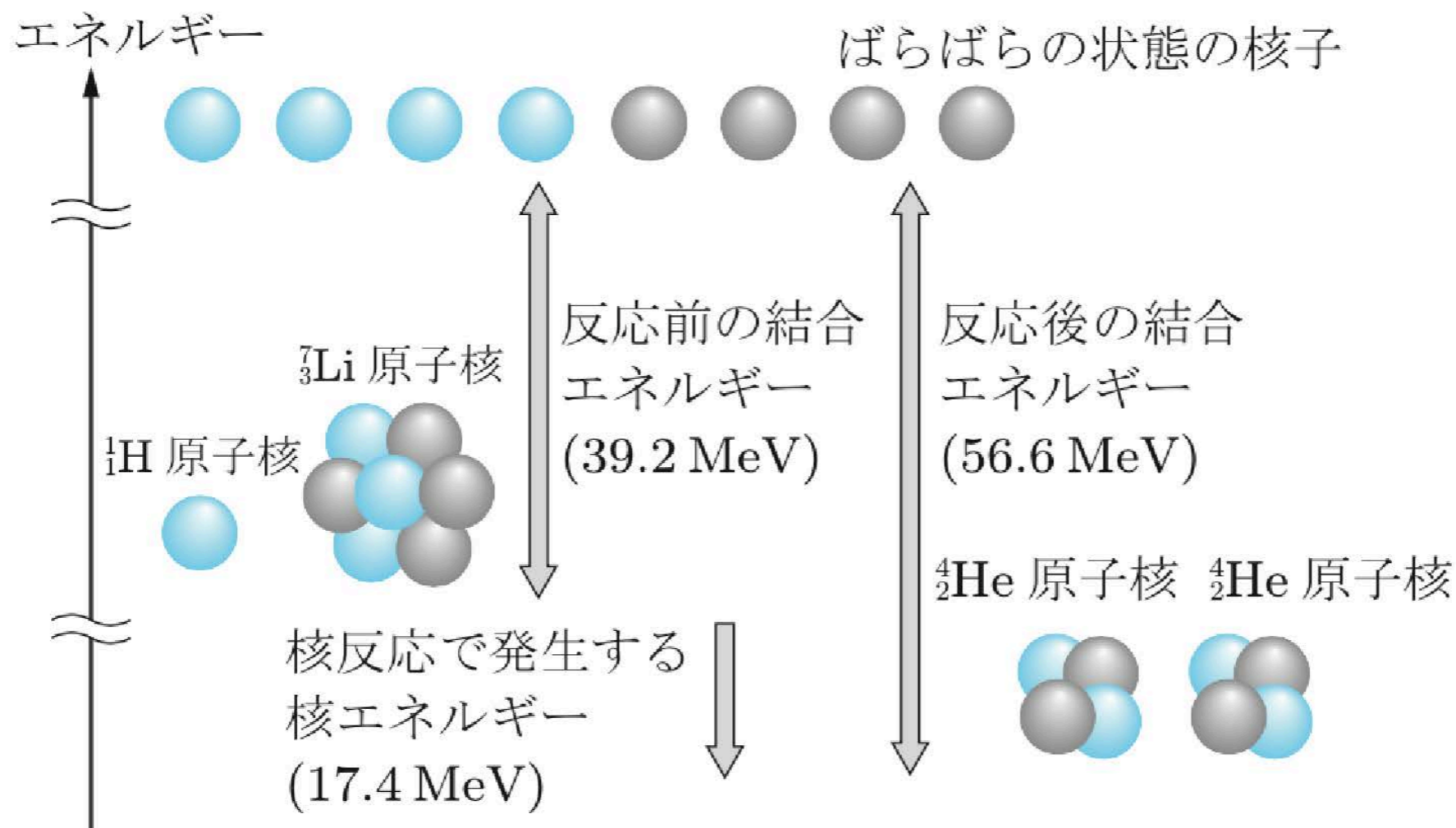
## 核分裂

(nuclear fission)

分裂した方が安定  
(エネルギー放出)

# 結合エネルギー

$$E = mc^2$$



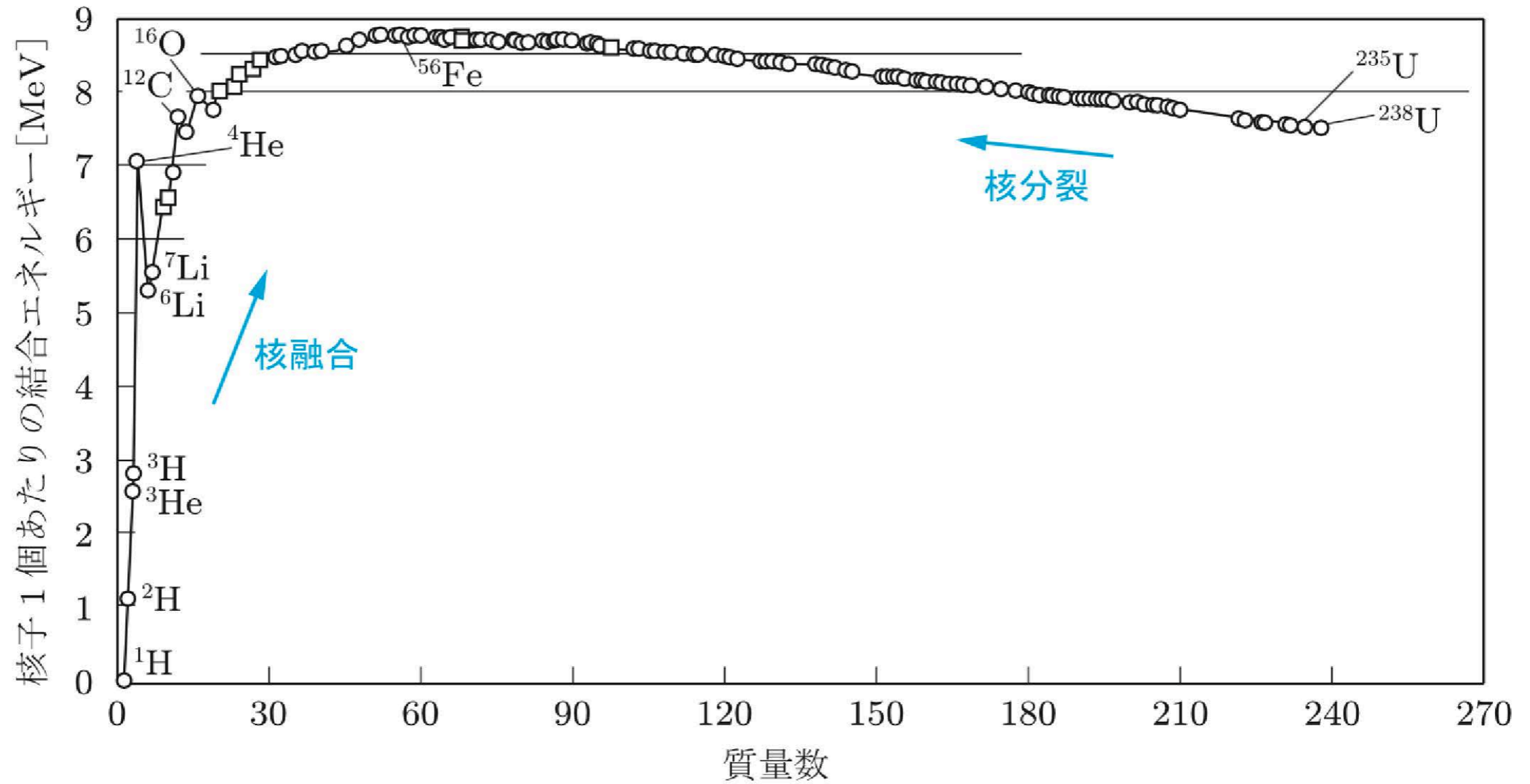
ばらばらでいるより、結合している方が、  
エネルギーが低い



# 結合エネルギー

核融合も核分裂もどちらもおきる理由は何か？

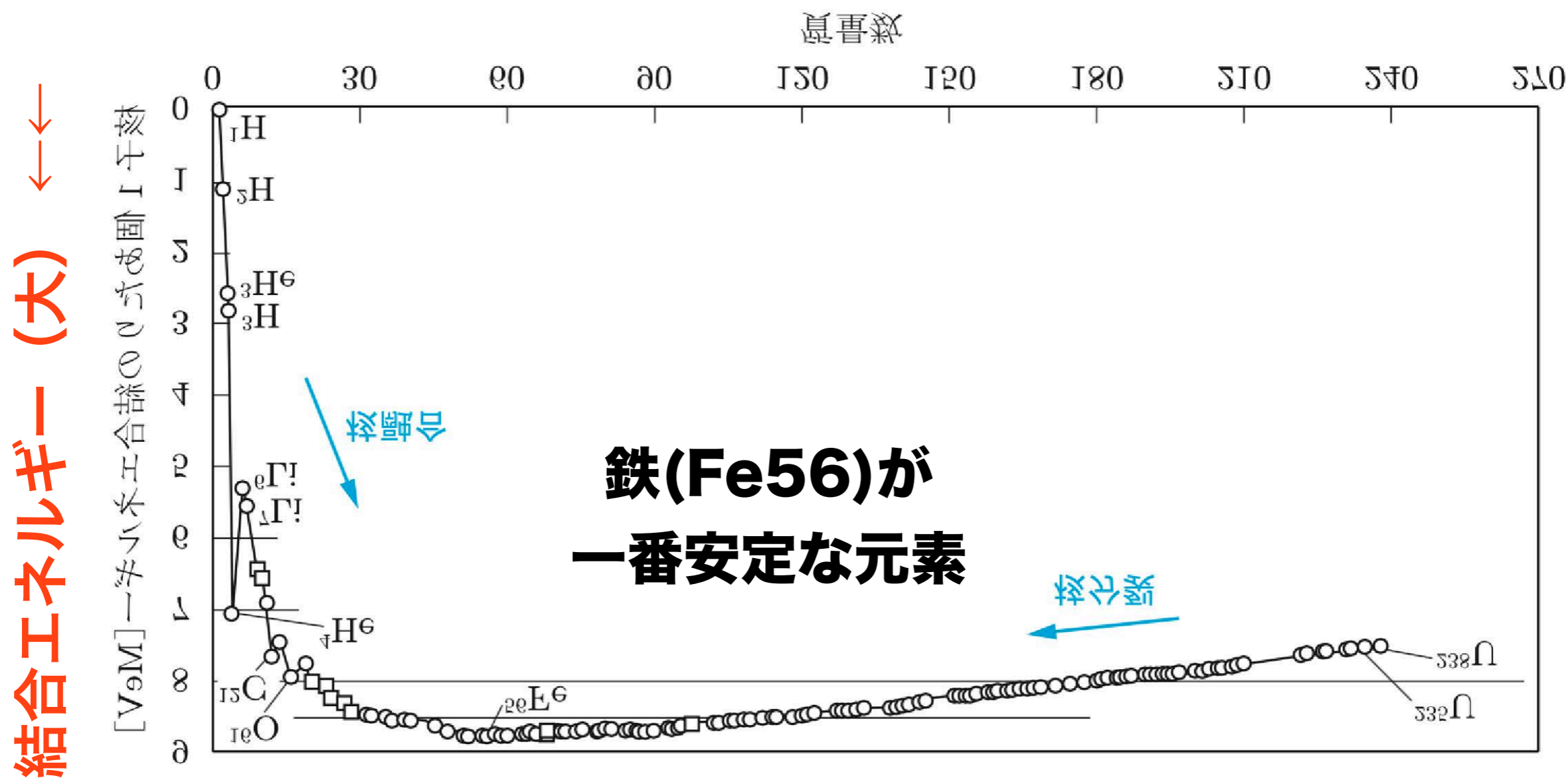
↑  
↑  
結合エネルギー (大)



→ → 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？



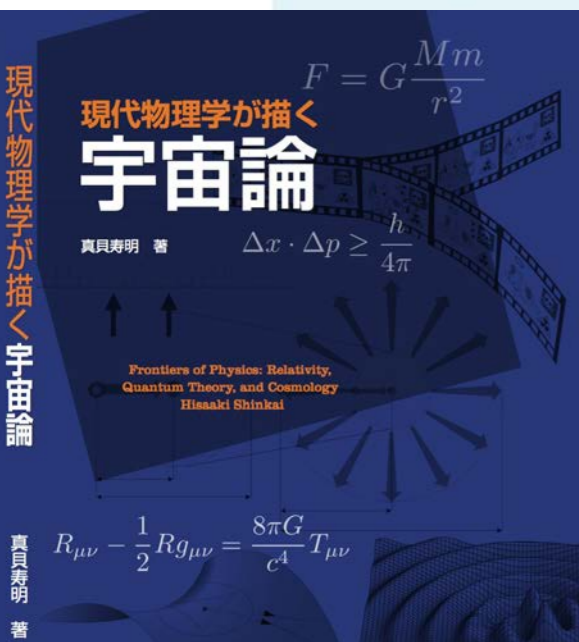
→ → 質量数 (大)

## コラム 18 酸素がない宇宙で太陽が燃えているのは何故？

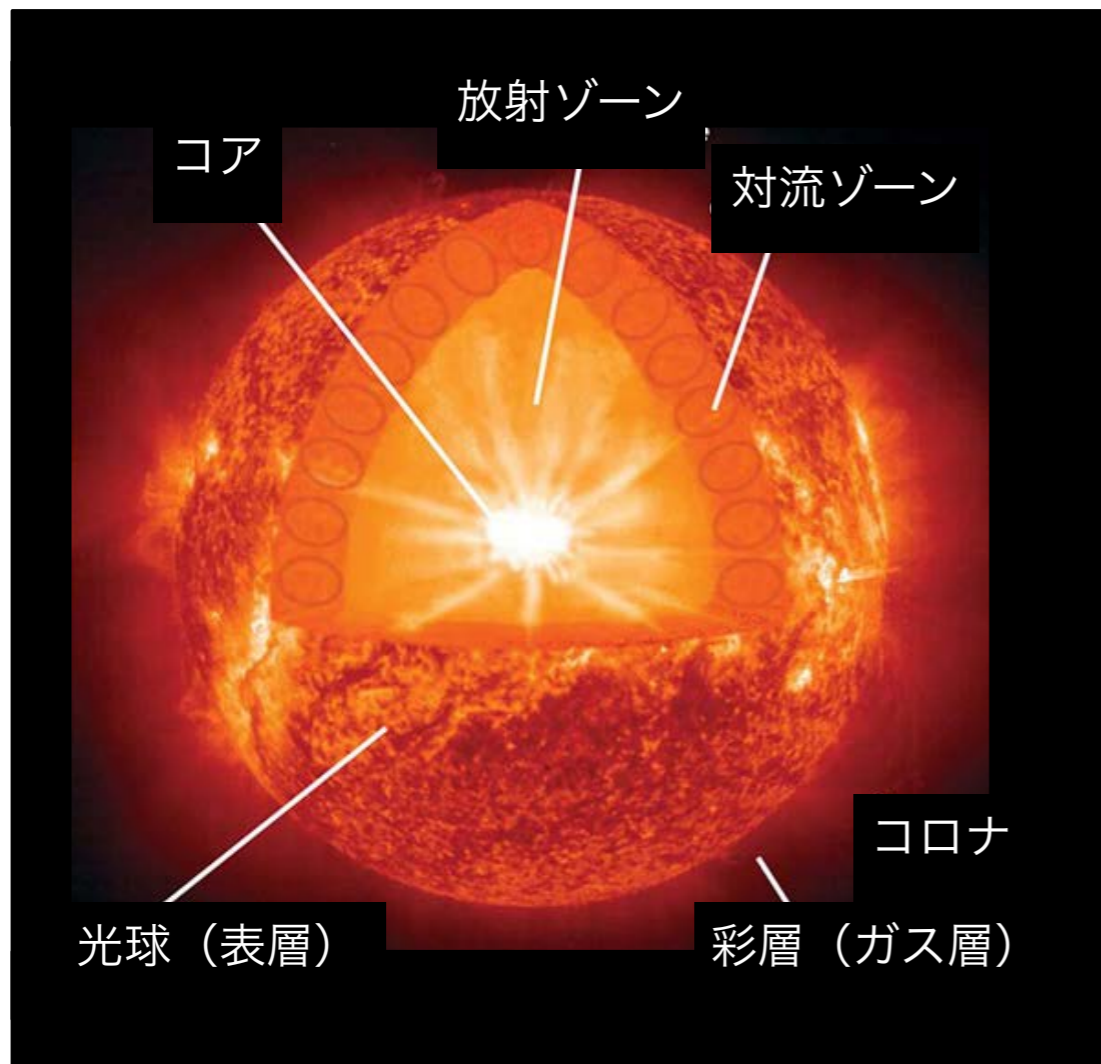
太陽系の起源は約 50 億年前と考えられている。物理学がそろい始めた 19 世紀末、太陽のエネルギー源は何か、という大問題が解けずにいた。（当時、太陽の年齢は 3 億年以上ということしかわかっていなかったが）単純に化学反応で説明するには寿命が長すぎたのだ。ケルビンとヘルムホルツ (von Helmholtz, H. L. F. 1821–94) は「太陽は大きな重力で収縮しているため、周囲に熱を放出する」という説を考えたが、それでも太陽年齢は 2000 万年以上にはならなかった。

決定的な理論となったのは、アインシュタインが 1905 年に提出した相対性理論による、 $E = mc^2$  という式である。この式から、1920 年、天文学者エディントン (Eddington, A. S. 1882–1944) は、太陽内部での水素からヘリウムへの核融合の可能性を指摘している。太陽が水素で満たされていることが 1925 年にわかり、1930 年代に物理学者チャンドラセカール (Chandrasekhar, S. 1910–95) とベータ (Bethe, H. 1906–2005) によって核融合の理論が進むと、太陽のエネルギー源が核融合反応であることがようやく明らかになる。

このコラムのタイトルにした疑問はよく科学館に寄せられる質問だそうだ。核融合反応は物理的な結合エネルギーの組み替えで発生している反応であり、化学的燃焼とは違うので酸素は不要なのである。

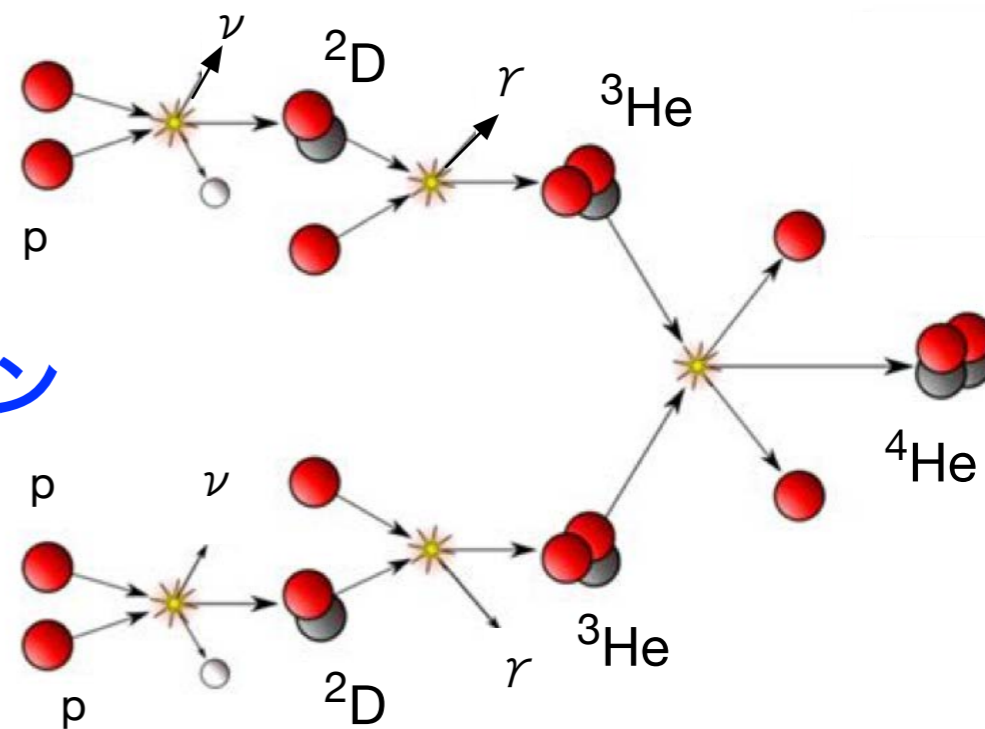


# 3.2.8 星の一生

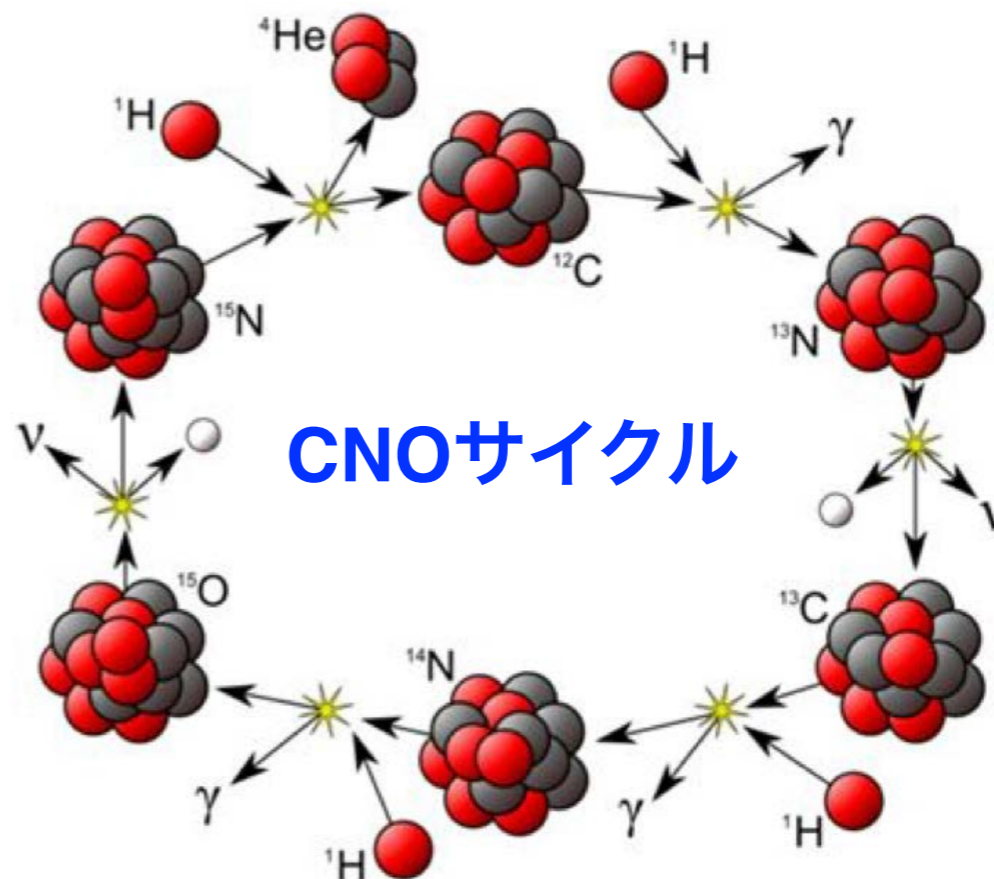


- 陽子(proton)
- 中性子(neutron)
- 陽電子(positron)
- $\gamma$  ガンマ線
- $\nu$  ニュートリノ

## ppチェーン



## CNOサイクル



## 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.

# 周期表 (periodic table)

Period	1	1A																	18	VIII A			
	1	1s	1															2					
			<b>H</b> 水素 hydrogen 1.008															<b>He</b> ヘリウム helium 4.003					
			↑ 非金属元素																	↓ 非金属元素			
			↓ 金属元素																	↓ 金属元素			
2	2s	3	4											5	6	7	8	9	10				
		<b>Li</b> リチウム lithium 6.941	<b>Be</b> ベリリウム beryllium 9.012											<b>B</b> ホウ素 boron 10.81	<b>C</b> 炭素 carbon 12.01	<b>N</b> 窒素 nitrogen 14.01	<b>O</b> 酸素 oxygen 16.00	<b>F</b> フッ素 fluorine 19.00	<b>Ne</b> ネオン neon 20.18				
3	3s	11	12											13	14	15	16	17	18				
		<b>Na</b> ナトリウム sodium 22.99	<b>Mg</b> マグネシウム magnesium 24.31											<b>Al</b> アルミニウム aluminum 26.98	<b>Si</b> ケイ素 silicon 28.09	<b>P</b> リン phosphorus 30.97	<b>S</b> 硫黄 sulfur 32.07	<b>Cl</b> 塩素 chlorine 35.45	<b>Ar</b> アルゴン argon 39.95				
4	4s	19	20											21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
		<b>K</b> カリウム potassium 39.10	<b>Ca</b> カルシウム calcium 40.08											<b>Sc</b> スカンジウム scandium 44.96	<b>Ti</b> チタン titanium 47.87	<b>V</b> バナジウム vanadium 50.94	<b>Cr</b> クロム chromium 52.00	<b>Mn</b> マンガン manganese 54.94	<b>Fe</b> 鉄 iron 55.85	<b>Co</b> コバルト cobalt 58.93	<b>Ni</b> ニッケル nickel 58.69	<b>Cu</b> 銅 copper 63.55	<b>Zn</b> 亜鉛 zinc 65.41
5	5s	37	38											39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
		<b>Rb</b> ルビジウム rubidium 85.47	<b>Sr</b> ストロンチウム strontium 87.62											<b>Y</b> イットリウム yttrium 88.91	<b>Zr</b> ジルコニウム zirconium 91.22	<b>Nb</b> ニオブ niobium 92.91	<b>Mo</b> モリブデン molybdenum 95.94	<b>Tc</b> テクネチウム technetium 98	<b>Ru</b> ルテニウム ruthenium 101.1	<b>Rh</b> ロジウム rhodium 102.9	<b>Pd</b> パラジウム palladium 106.4	<b>Ag</b> 銀 silver 107.9	<b>Cd</b> カドミウム cadmium 112.4
6	6s	55	56											57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
		<b>Cs</b> セシウム cesium 132.9	<b>Ba</b> バリウム barium 137.3											ランタノイド lanthanides	<b>Hf</b> ハフニウム hafnium 178.5	<b>Ta</b> タンタル tantalum 180.9	<b>W</b> タングステン tungsten 183.8	<b>Re</b> レニウム rhenium 186.2	<b>Os</b> オスミウム osmium 190.2	<b>Ir</b> イリジウム iridium 192.2	<b>Pt</b> 白金 platinum 195.1	<b>Au</b> 金 gold 197.0	<b>Hg</b> 水銀 mercury 200.6
7	7s	87	88											89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112
		<b>Fr</b> フランシウム francium 223	<b>Ra</b> ラジウム radium 226											アクチノイド actinides	<b>Rf</b> ラザホージウム rutherfordium 261	<b>Db</b> ドブニウム dubnium 262	<b>Sg</b> シーボーギウム seaborgium 266	<b>Bh</b> ボーリウム bohrium 264	<b>Hs</b> ハッシウム hassium 277	<b>Mt</b> マイトネリウム meitnerium 268	<b>Ds</b> ダームスタチウム darmstadtium 281	<b>Rg</b> レントゲニウム roentgenium 272	<b>Cn</b> コペルニシウム copernicium 285

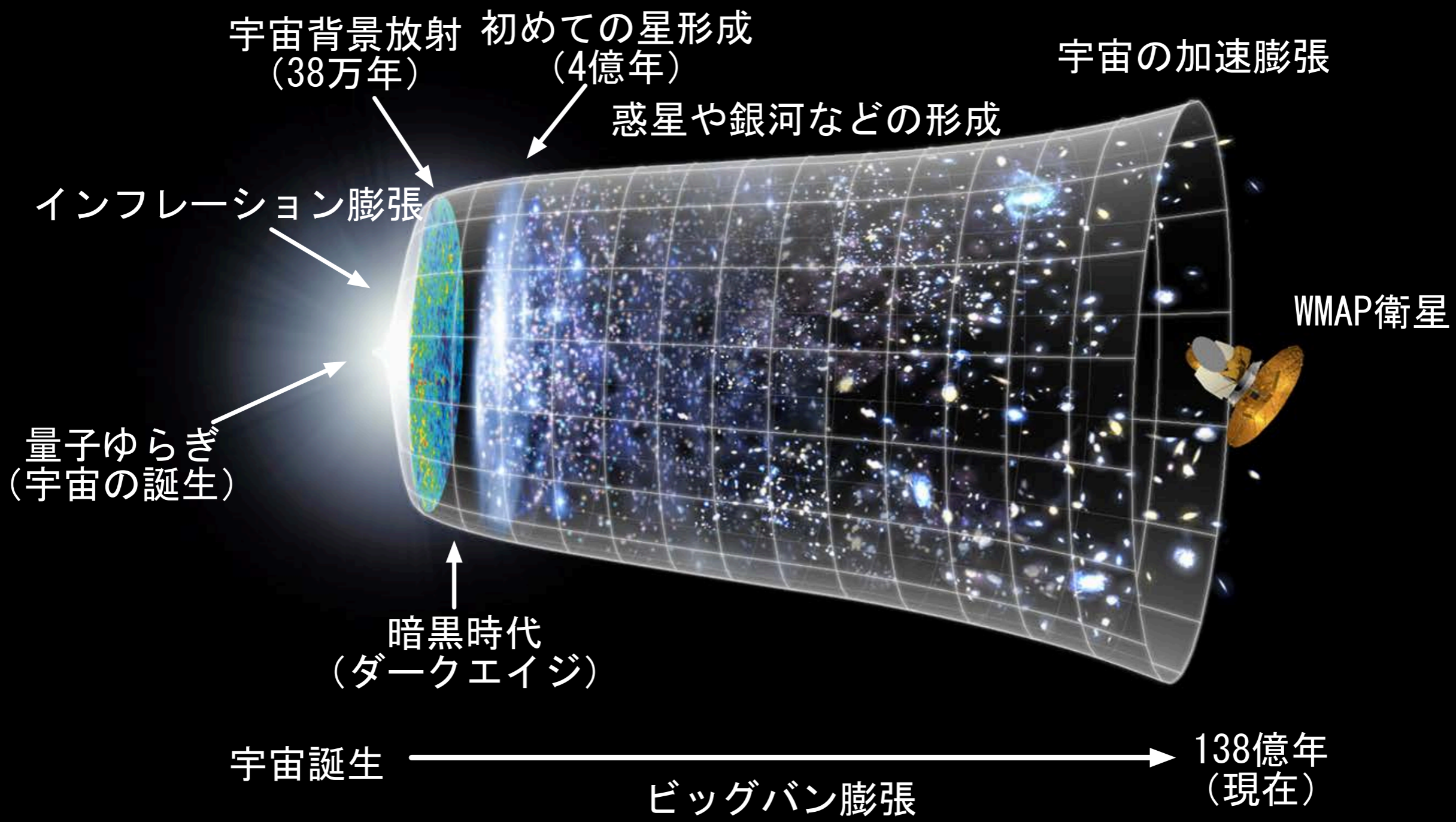
原子番号 → 29 +2,1 ← 通常できるイオンの価数  
 元素記号 → **Cu** ← 元素記号が灰色のものは人工合成された元素  
 元素名(日本語) → **銅**  
 元素名(英語) → copper  
 ← 原子量

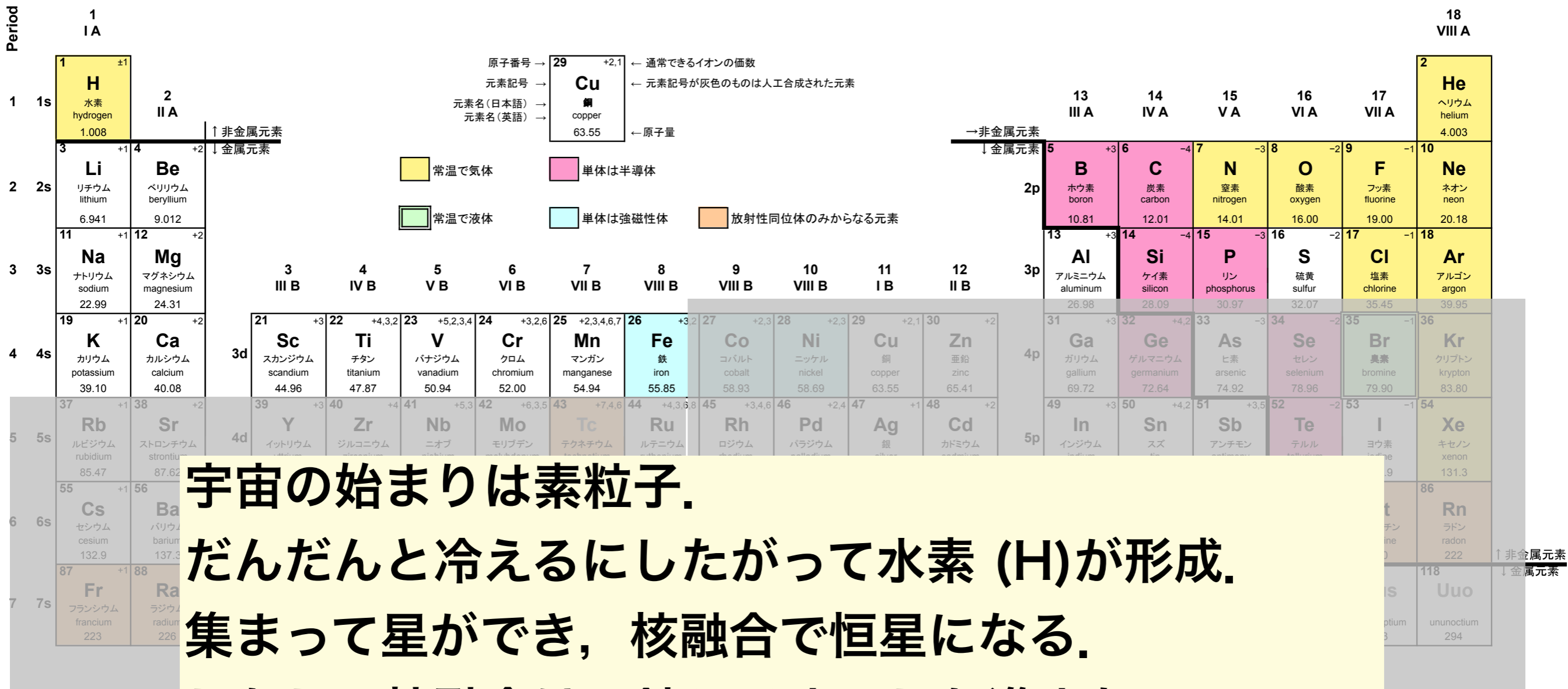
■ 常温で気体      ■ 単体は半導体  
 ■ 常温で液体      ■ 単体は強磁性体      ■ 放射性同位体のみからなる元素

ランタノイド  
lanthanides  
(レアアース金属)  
(rare earth metals)

アクチノイド  
actinides

† 4f	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
	<b>La</b> ランタン lanthanum 138.9	<b>Ce</b> セリウム cerium 140.1	<b>Pr</b> プラセオジウム praseodymium 140.9	<b>Nd</b> ネオジウム neodymium 144.2	<b>Pm</b> プロメチウム promethium 145	<b>Sm</b> サマリウム samarium 150.4	<b>Eu</b> ユロビウム europium 152.0	<b>Gd</b> ガドリニウム gadolinium 157.3	<b>Tb</b> テルビウム terbium 158.9	<b>Dy</b> ジスプロシウム dysprosium 162.5	<b>Ho</b> ホルミウム holmium 164.9	<b>Er</b> エルビウム erbium 167.3	<b>Tm</b> ツリウム thulium 168.9	<b>Yb</b> イットルビウム ytterbium 173.0	<b>Lu</b> ルテチウム lutetium 175.0
‡ 5f	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
	<b>Ac</b> アクチニウム actinium 227	<b>Th</b> トリウム thorium 232.0	<b>Pa</b> プロトアクチニウム protactinium 231.0	<b>U</b> ウラン uranium 238.0	<b>Np</b> ネプツニウム neptunium 237	<b>Pu</b> プルトニウム plutonium 239	<b>Am</b> アメリシウム americium 243	<b>Cm</b> キュリウム curium 247	<b>Bk</b> バークリウム berkelium 247	<b>Cf</b> カリホルニウム californium 251	<b>Es</b> アインスタイニウム einsteinium 252	<b>Fm</b> フェルミウム fermium 257	<b>Md</b> メンデレビウム mendelevium 258	<b>No</b> ノーベリウム nobelium 259	<b>Lr</b> ローレンシウム lawrencium 262



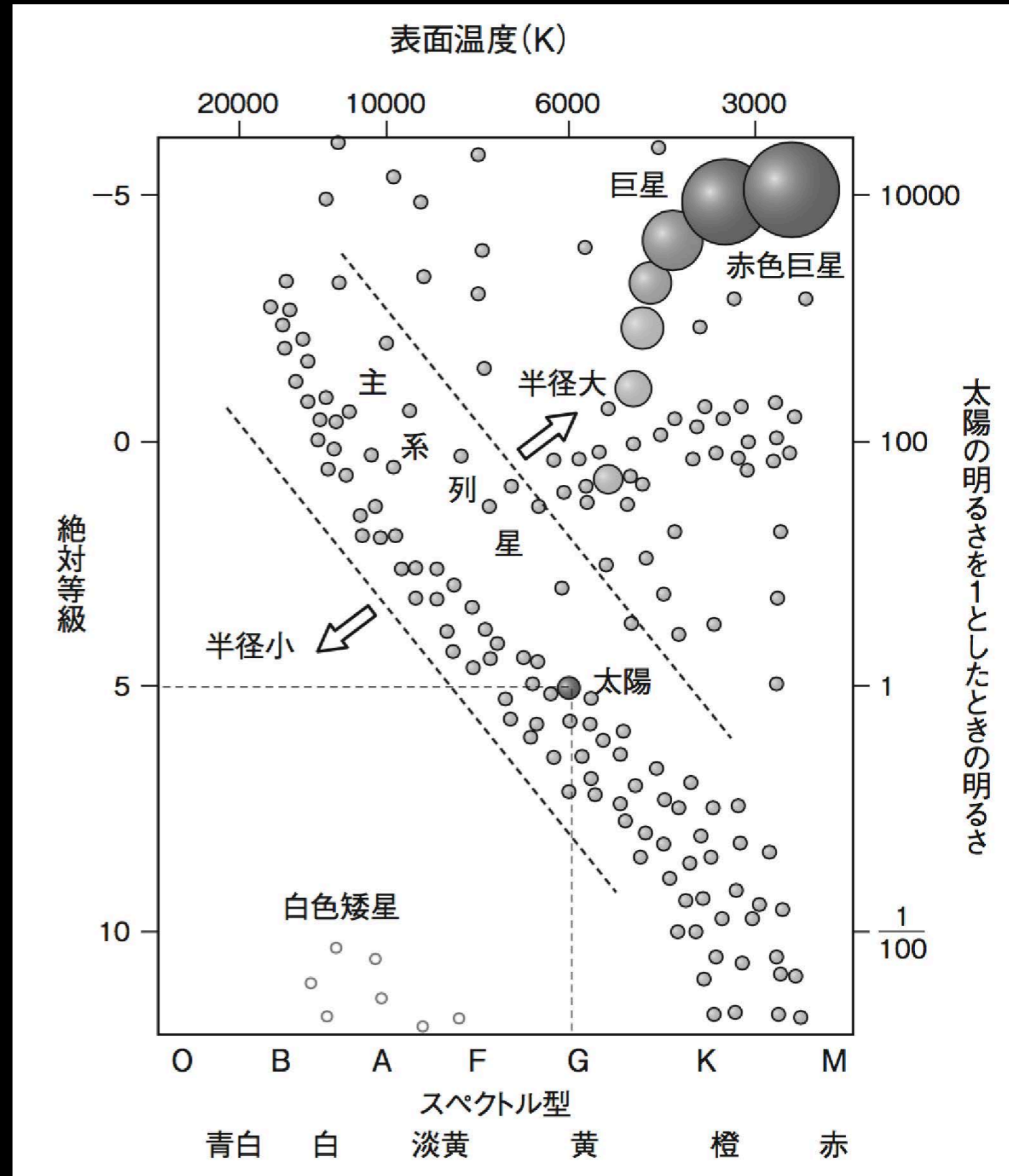
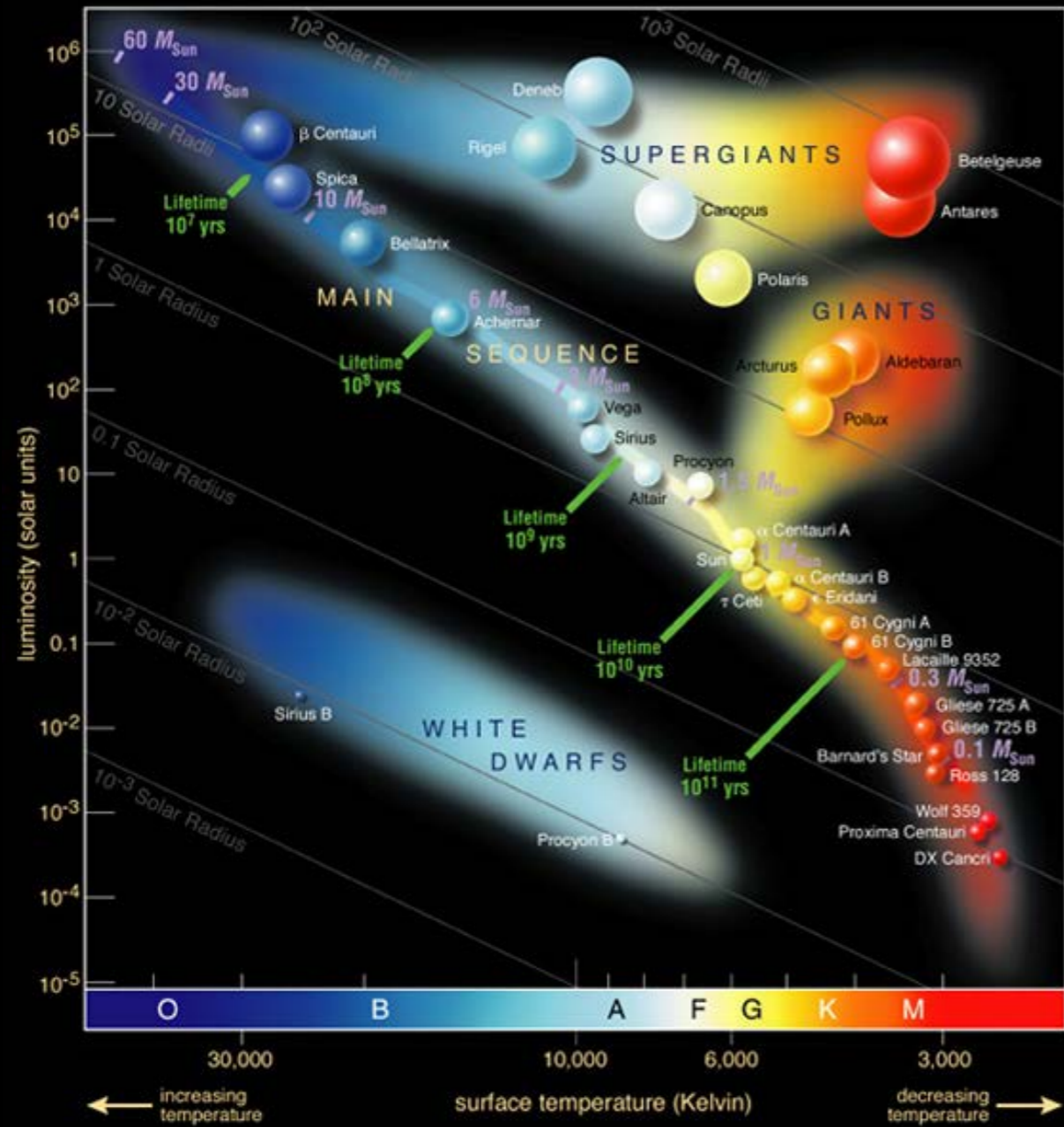


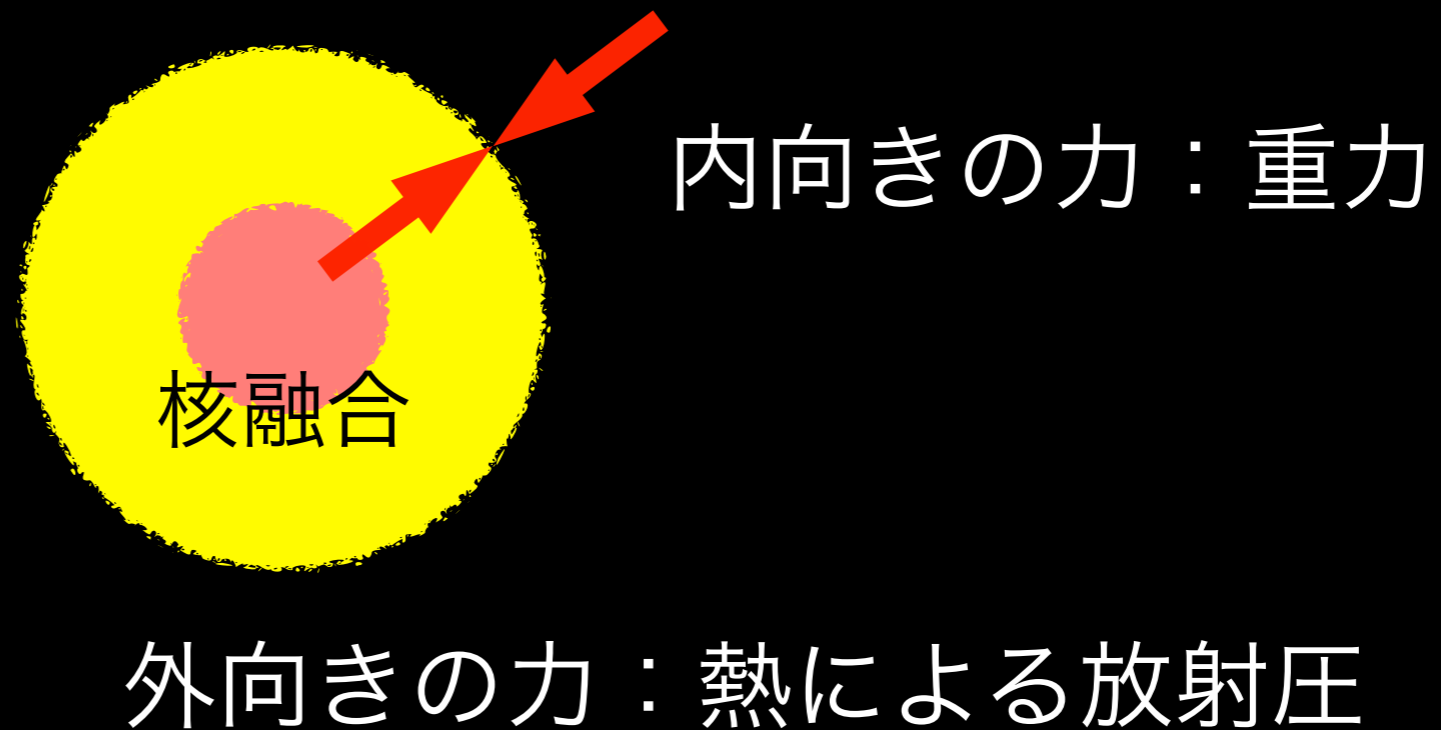
宇宙の始まりは素粒子。  
 だんだんと冷えるにしたがって水素 (H) が形成。  
 集まって星ができ、核融合で恒星になる。  
 しかし、核融合は、鉄 (Fe) までしか進まない。

現在、周期表に Fe より重い元素があるのは何故か？

**超新星爆発で作られた！**  
**連星中性子星の合体で作られた！**

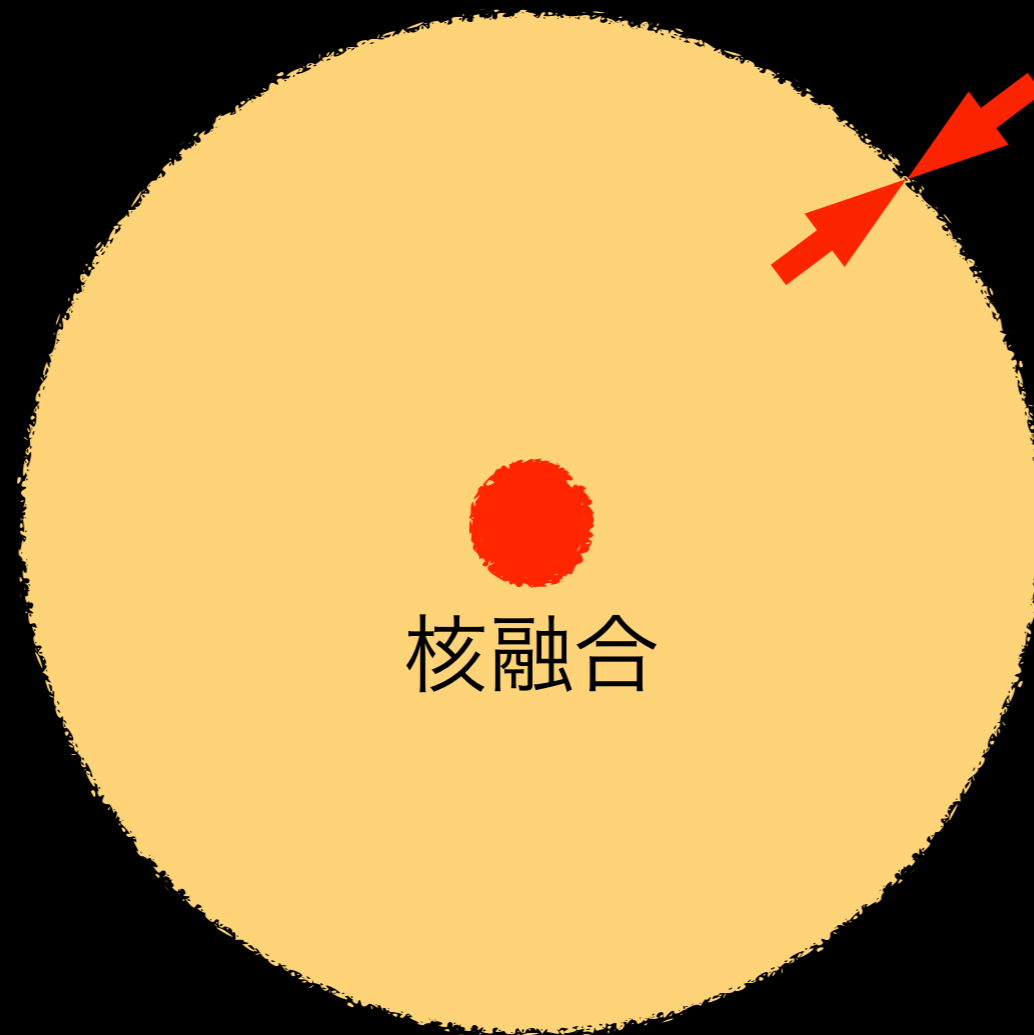






\*現在の太陽：水素がヘリウムに核融合

\*放射圧=重力 となるところで星の半径が決まる



内向きの力：重力

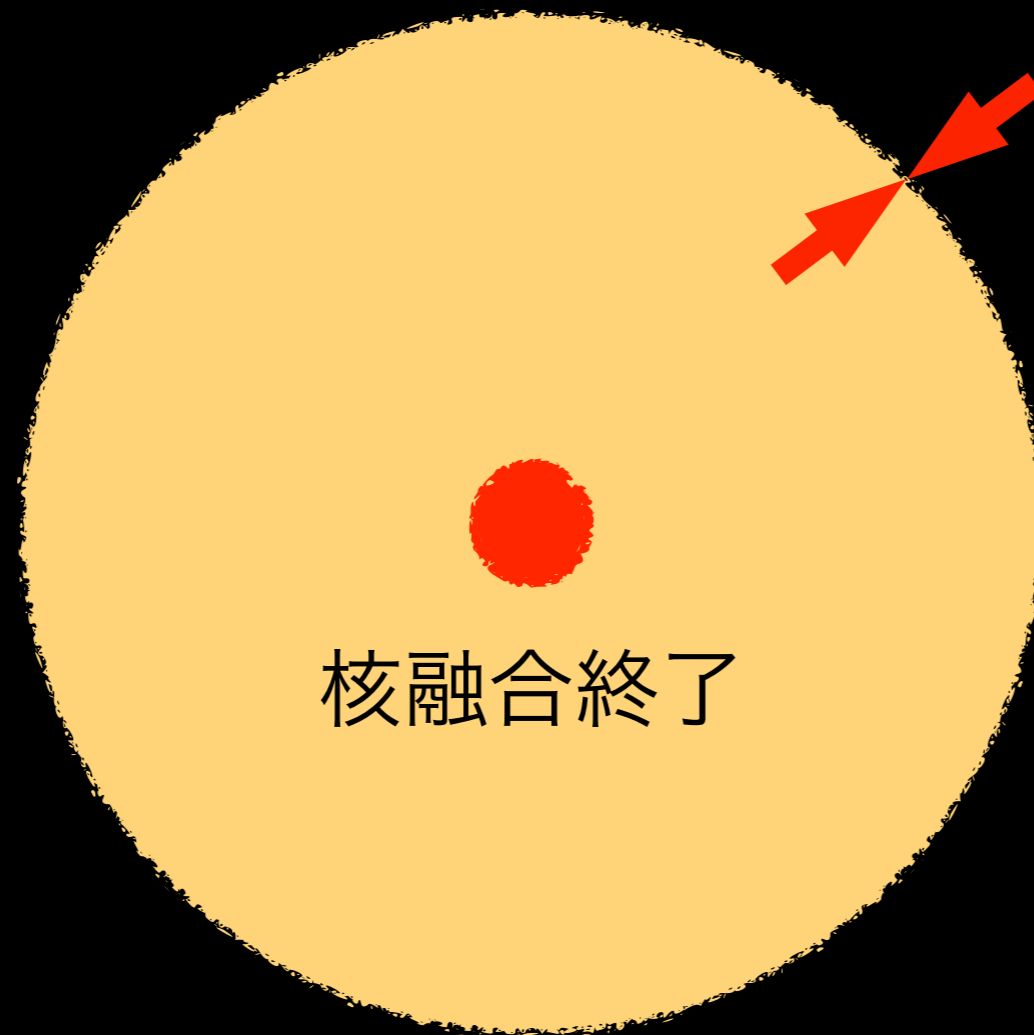
外向きの力：

熱による放射圧

核融合

\*核融合反応で質量をエネルギーに変換し続けると、  
軽くなるので重力が弱くなる。

\*放射圧=重力 となるところで星の半径が決まる



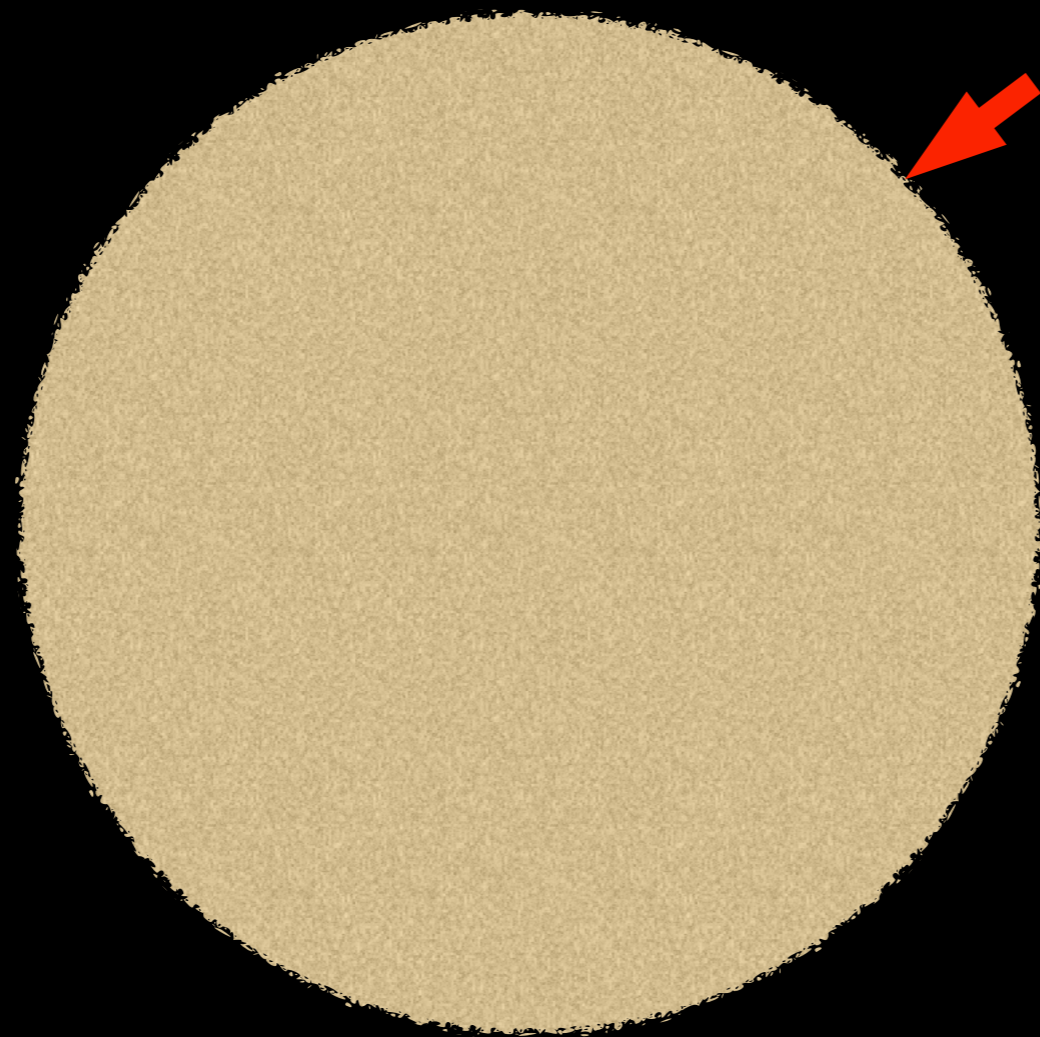
内向きの力：重力

外向きの力：

熱による放射圧

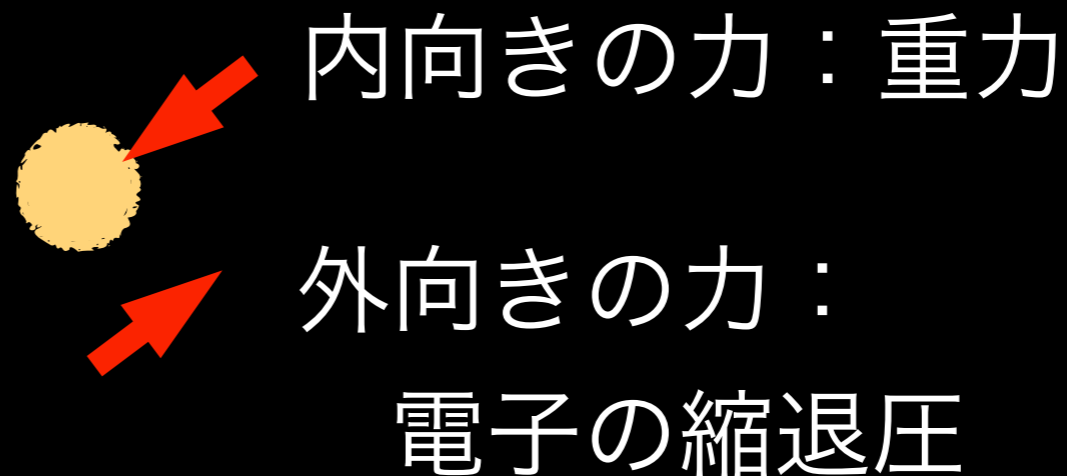
\*核融合反応は鉄まで進むと終了

\*放射圧がなくなるので星の収縮が始まる



内向きの力：重力

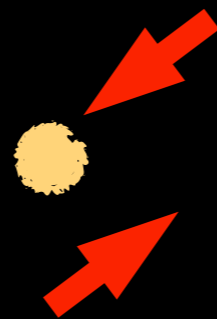
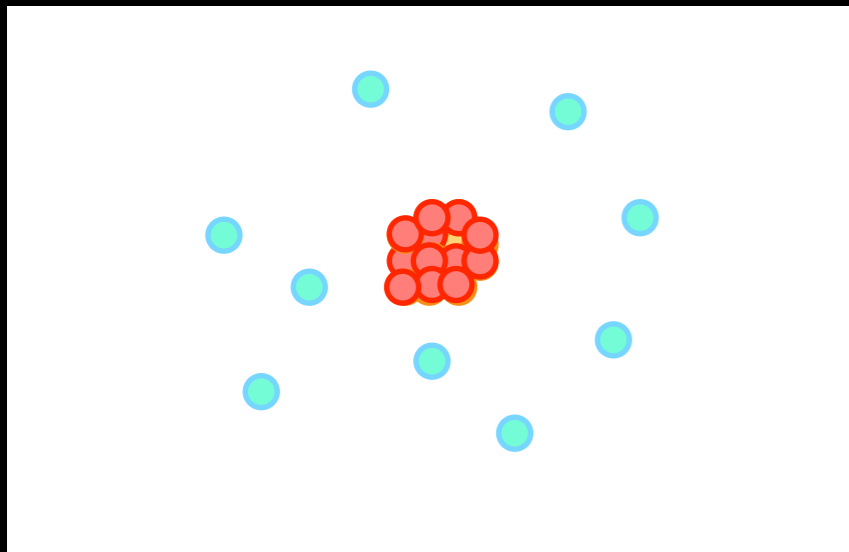
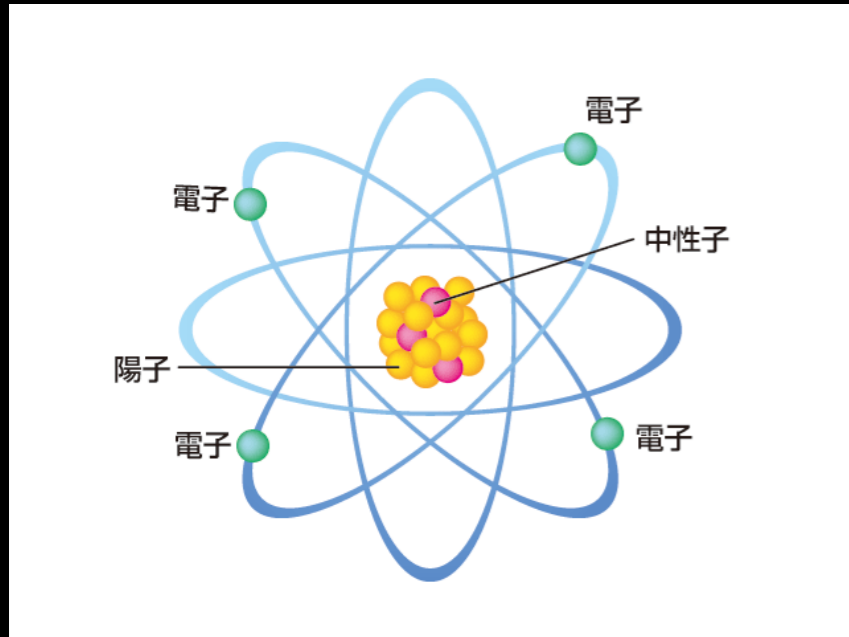
\*収縮が始まる



\*密につまった物質が星を支えるようになる

【運命その1】 電子の縮退圧で支える「白色矮星」になる

1933年チャンドラセカールの考え



内向きの力：重力

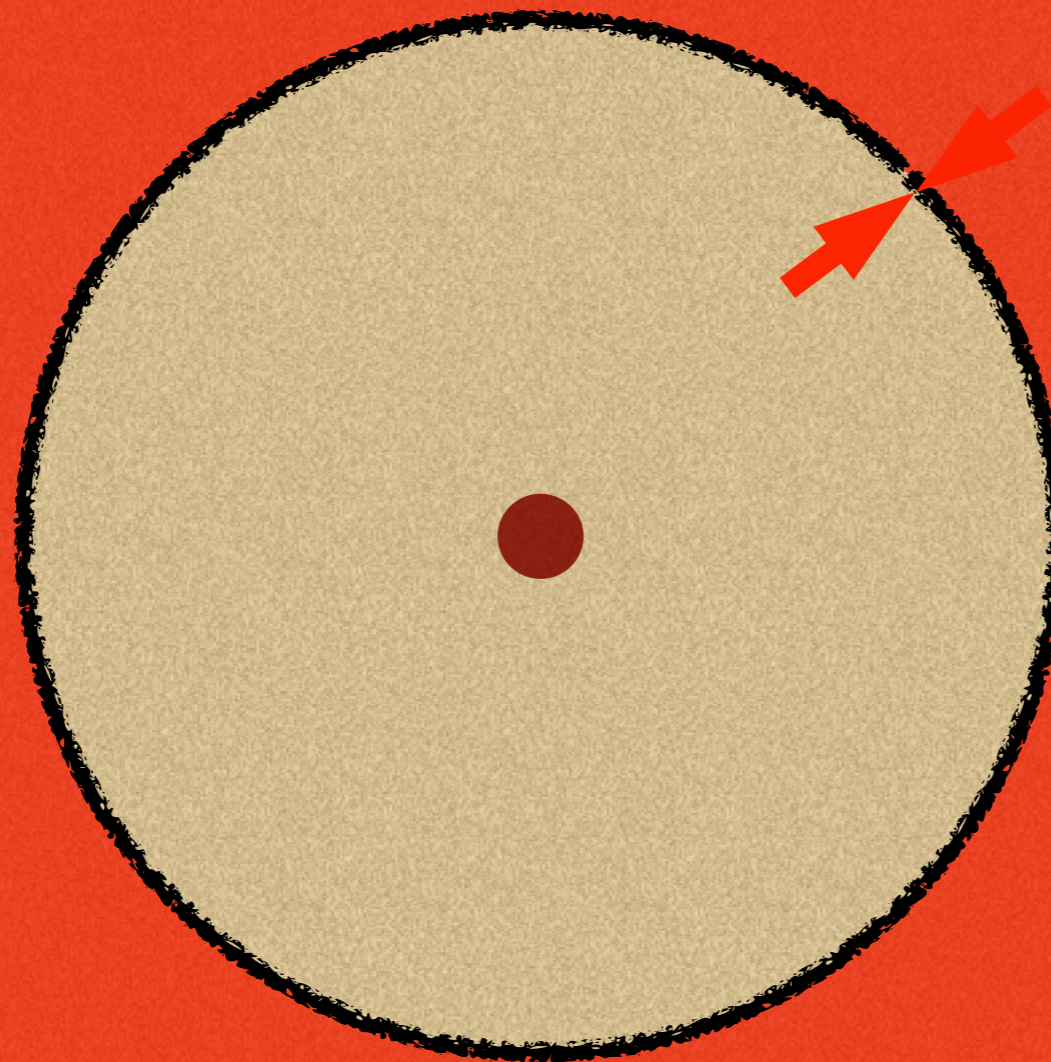
外向きの力：  
中性子の縮退圧

\*密につまった物質が星を支えるようになる

【運命その2】 中性子の縮退圧で支える「中性子星」になる

1938年ツヴィツキーの考え

# 超新星爆発のしくみ (6) さらに降り積もると...



内向きの力：重力

外向きの力：

中性子の縮退圧

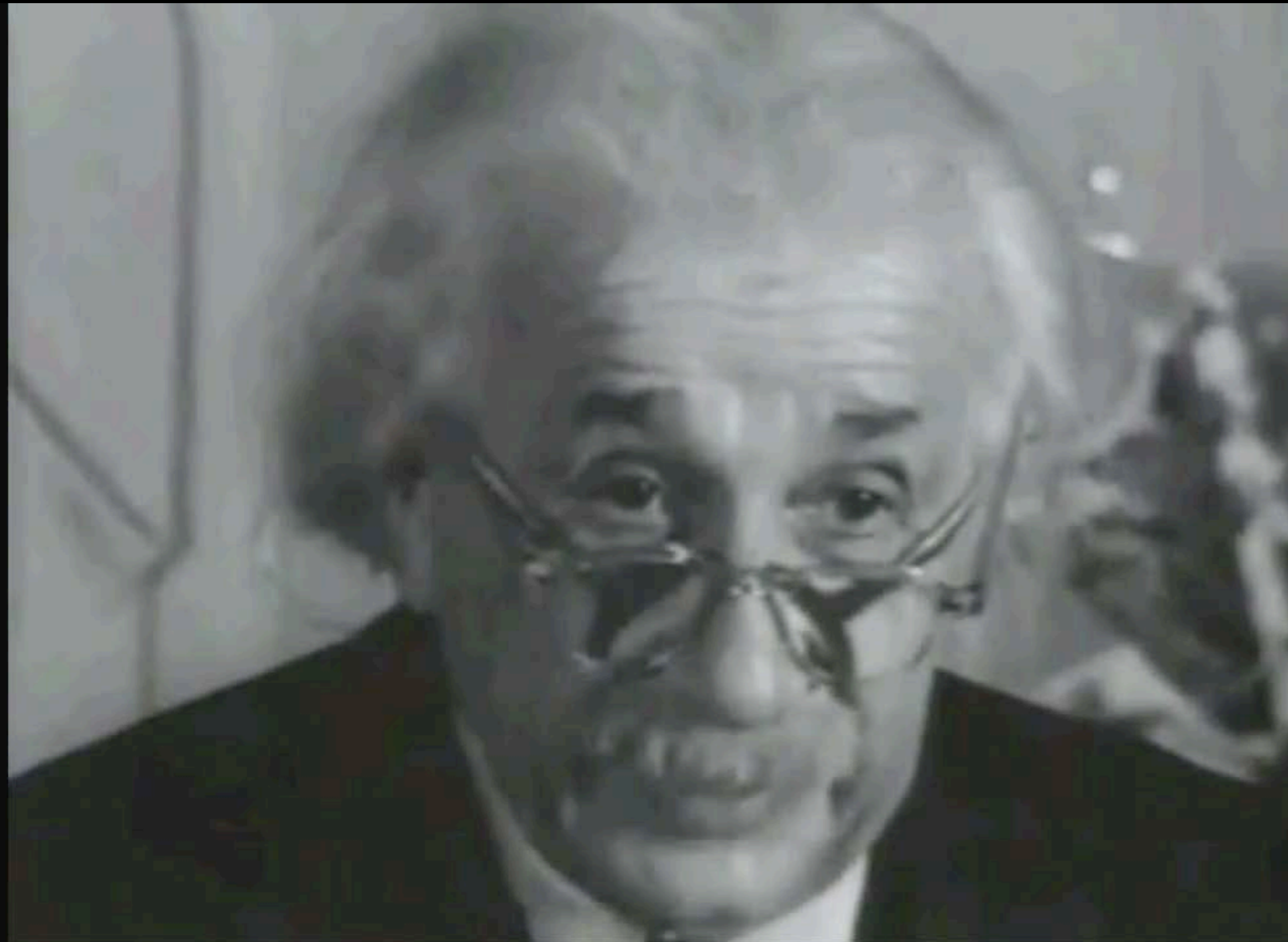
硬い殻ができる

\*収縮が始まる

中性子の塊ができる。

さらに外側からガスが落下すると...





## 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.

# 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

$$F = ma$$

# 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？



NHK 100分で名著のwebページより.

[http://www.nhk.or.jp/meicho/famousbook/17\\_einstein/index.html#box01](http://www.nhk.or.jp/meicho/famousbook/17_einstein/index.html#box01)

# 宇宙をひもとく物理学

真貝寿明（しんかいひさあき）



- 10月25日 なぜ円ではなく楕円か — ケプラーの惑星運動の法則
- 11月22日 光のドップラー効果 — 宇宙膨張の法則
- 12月27日 星は何を燃やしているのか — 特殊相対性理論**
- 1月24日 時空のゆがみとブラックホール — 一般相対性理論
- 2月28日 光は波なのか粒子なのか — 量子論
- 3月28日 解明されている部分は5%? — 宇宙論

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

<http://www.oit.ac.jp/is/%7Eshinkai/mainichi/>