

最先端物理学が描く宇宙

Frontiers of Physics & Cosmology

第8回 2024/11/11

第3章 現代物理学1：相対性理論（3）

真貝 寿明
Hisaaki Shinkai



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

11月12日(火)未明 おうし座北流星群が極大

https://www.astroarts.co.jp/article/hl/a/13732_ph241112

2024年11月12日、おうし座北流星群の活動が極大となる。同時期に活動するおうし座南流星群と合わせて、11月中旬ごろに小規模な出現が見られる。

11月上旬から中旬にかけて、おうし座南・おうし座北流星群の活動が見られる。はっきりとした極大のない流星群だが、南群は11月5日ごろ、北群は11月12日ごろが極大とみられている。両群とも母天体は周期3.3年のエンケ彗星である。

2つの群を合計しても1時間あたり最大で5～10個ほどの小規模な流星群だが、火球の割合が高いため、明るいのを目にできるかもしれない。防寒の準備をして空を見上げてみよう。

天文年鑑による予想では**1時間5個**



今年は満月と重なって、条件が悪い, しし座流星群.

しし座流星群は、母天体であるテンペル・タットル彗星の公転軌道と地球の軌道が近づいている辺りを毎年この時期に地球が通過する際に、彗星が残した塵が地球の大気と衝突し、上空100km前後で発光して見える現象である。1999年や2001年の大出現が有名だが例年の出現数は少ない。次に大規模な出現が見られるのは2030年代と予想されている。

天文年鑑による予想では**1時間15個**



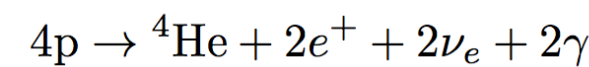
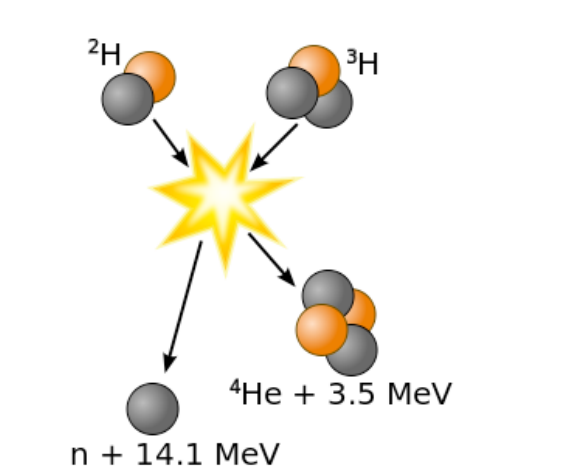
前回のミニッツペーパーから

“〇〇発電”というものは身近な物であるため、知ることからしてはよいはず。

3. 現代物理1:相対性理論 》 3.2 特殊相対性理論

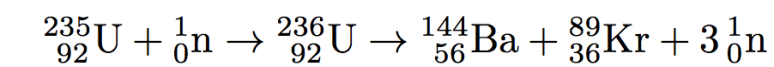
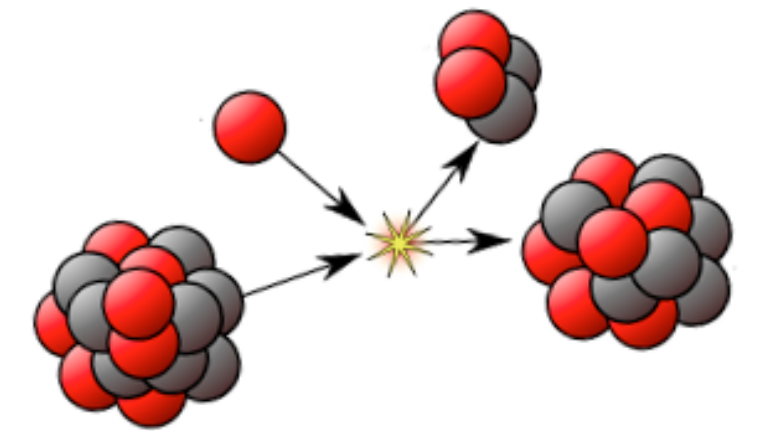
教科書 p74

核融合 と 核分裂



核融合
(nuclear fusion)

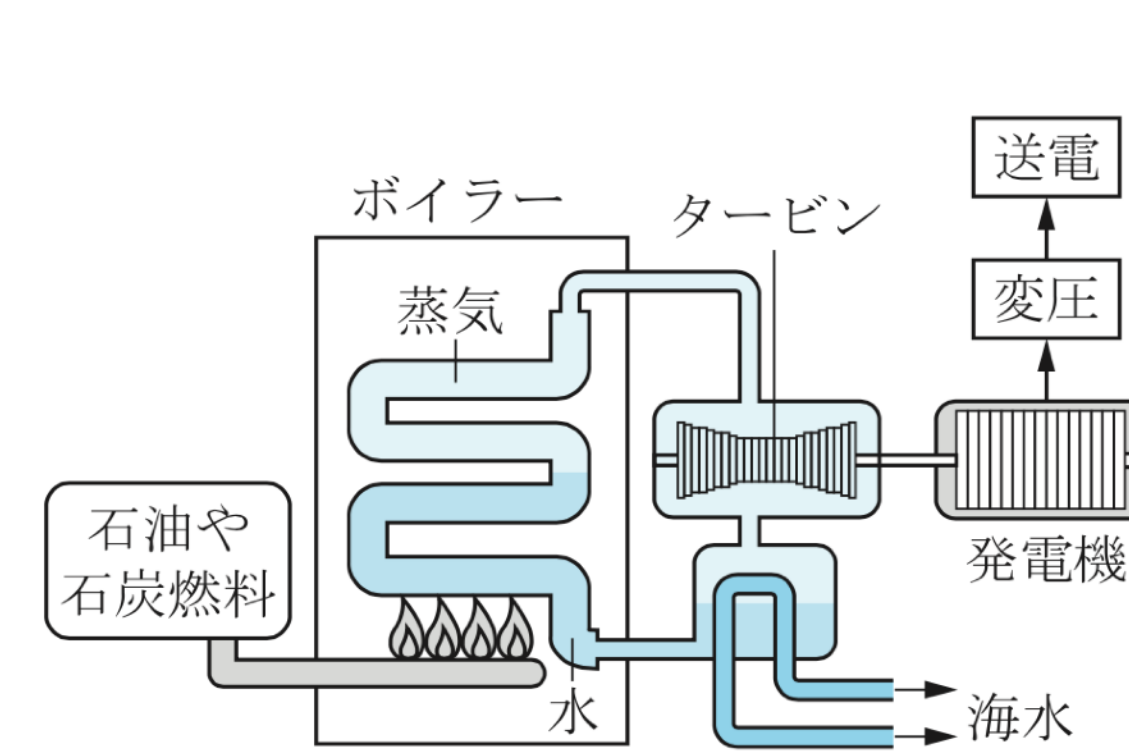
合体した方が安定
(エネルギー放出)



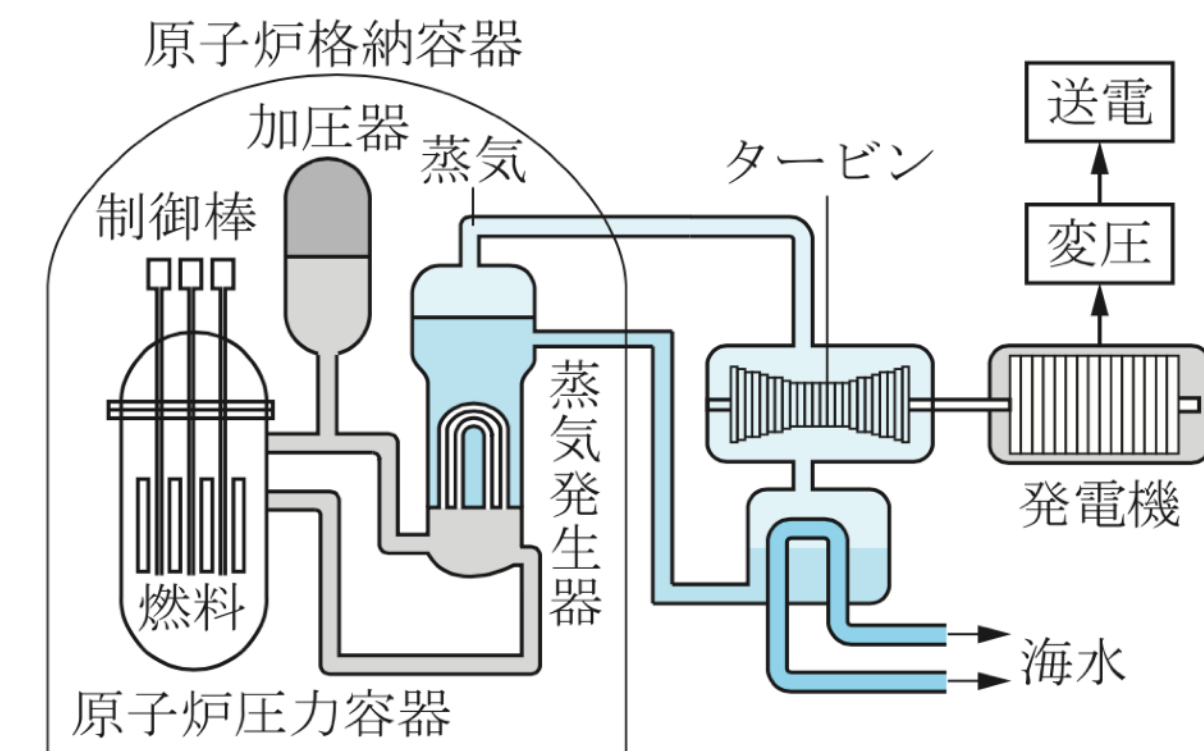
核分裂
(nuclear fission)

分裂した方が安定
(エネルギー放出)

水力発電, 火力発電, 原子力発電, 風力発電. . .
タービンを回す, という意味で同じ.



(a) 火力発電



(b) 原子力発電

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

太陽の光電を太陽光とまでいいのにな、
とよく思うのですが、現実的に可能
ですか??

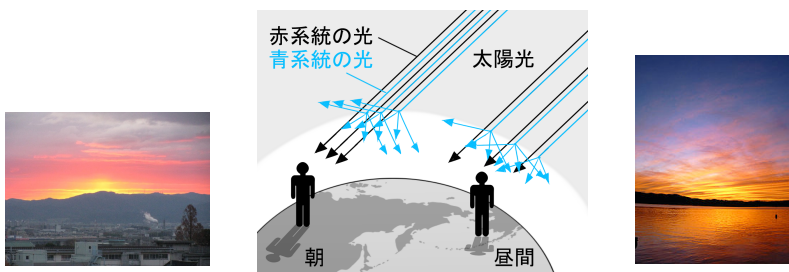
前回のミニッツペーパーから

グリーンフラッシュは 赤系統の光が少ない... という話が
あったので、二重で流れた 北海道とが正
空気が きれいなのか？ と思いました。

前回のミニッツペーパーから

「グリーンフラッシュ」という現象もレイリー散乱によるものなのではうか。

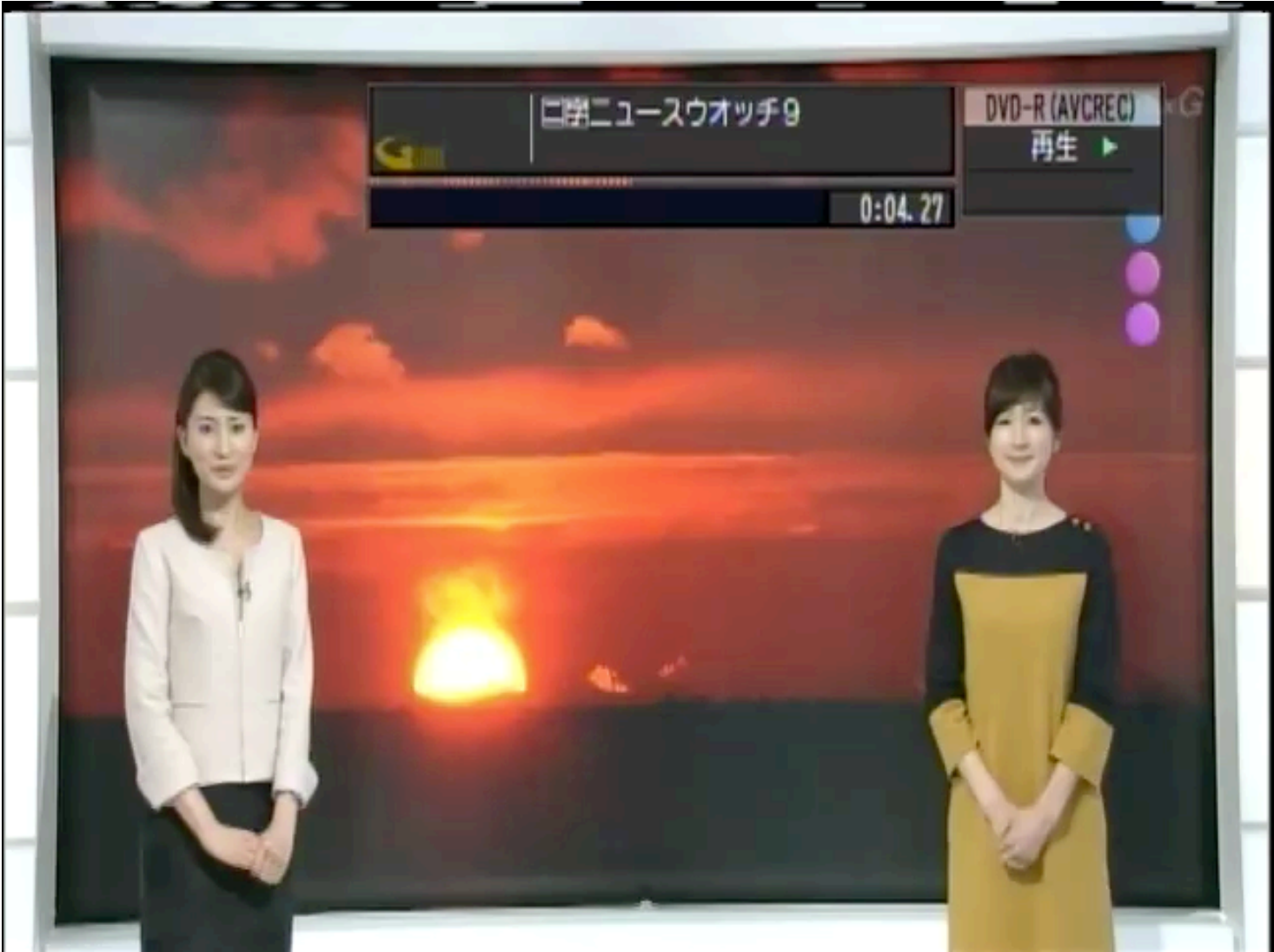
朝焼け・夕焼け なぜ赤い？



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



2012-0112 NHK ニュースウォッチ9

6

ブラックホールを形をはじめて見ました。



FL 10/14/13

ワームホールを正確に描いた映画は今までなかった

Interstellar (2014)



ブラックホールも同じだ

Executive Producer: Kip Thorne

<https://www.youtube.com/watch?v=qZ29J8n8eq>

前回のミニッツペーパーから

様々な宇宙食がありますか、宇宙食に絶対ではない食べ物、料理はありますか。それは何かも教えて下さい！



十勝川西長いもとろろ



十勝川西長いも肉巻焼き



十勝川西長いもトマト煮込み



十勝川西長いも十勝オムレツ



十勝川西長いもグラタン



万田酵素（宇宙用）



スペースうなぎ（うなぎ蒲焼）



種子島産バナナとインギー地鶏
のカレー



平成27年度リスクコミュニケーション
「JAXAの方と一緒に宇宙食を作る技（ハサップ）を学ぼう！
～宇宙グミづくりに挑戦！！」 事前質問回答集

質問1

Q. 宇宙で食べたいけど持って行けない物ってなんですか。

→A. 生きている菌が多い食品は持っていきません。

日本人が大好きな納豆や普段食べている漬物などは、残念ながら持っていきません。

質問2

Q. JAXAに宇宙食を作る所があるのか、食品会社に委託しているのか知りたいです。

→A. JAXAは、宇宙食を製造する設備を持っていません。

このため、宇宙日本食として認証した食品を各企業に製造してもらっています。

質問3

Q. 宇宙食の中に、一般の方が考えたものもあるのですか。

→A. 現在JAXAが認証している、ISS向けの宇宙日本食の中には、一般の方が考えたものはありません。

質問4

Q. 宇宙食にできないメニューなどはあるのですか。

→A. 生きている菌が多い食品は宇宙食にはできません。

また、臭いの強い食品も宇宙食には向いていません。

汁の多い食品や碎けやすい食品は、そのままでは宇宙食にできません。

質問5

Q. 宇宙食にはパンなどがありますが、他にも変わったものがありますか。

→A. 宇宙日本食のラーメンは、①麺をお湯で戻しても形が崩れない。②スープはとろみがあって麺に絡まるようにできています。

<https://humans-in-space.jaxa.jp/life/food-in-space/japanese-food/>

<https://kouseikyoku.mhlw.go.jp/chugokushikoku/shokuhin/documents/jizenshitumon.pdf>

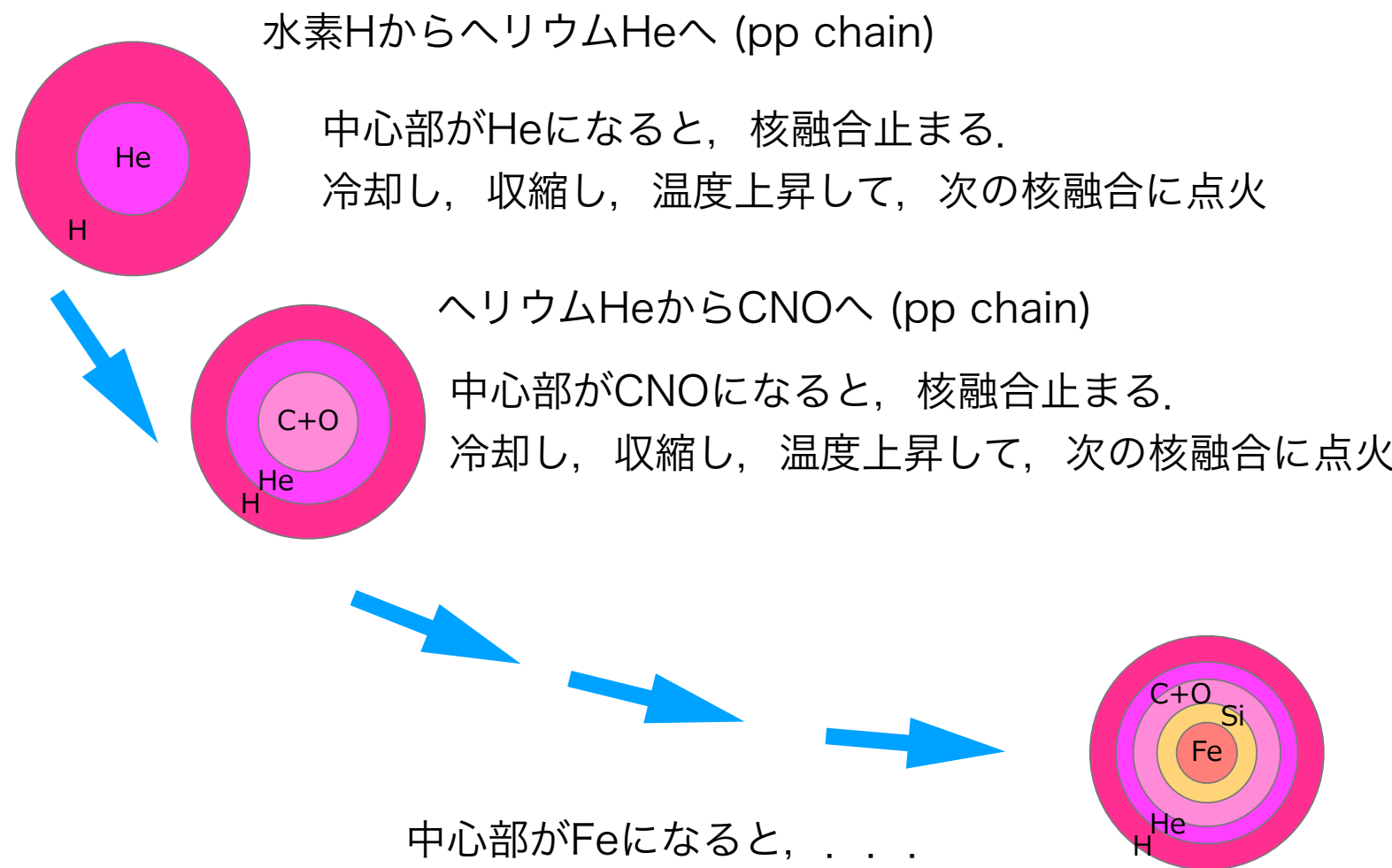
前回のミニッツペーパーから

超新星

超新星爆発のしくみについて知れて良かったです。

星が燃える話：星の一生

鉄まで核融合が進むと燃え終わる

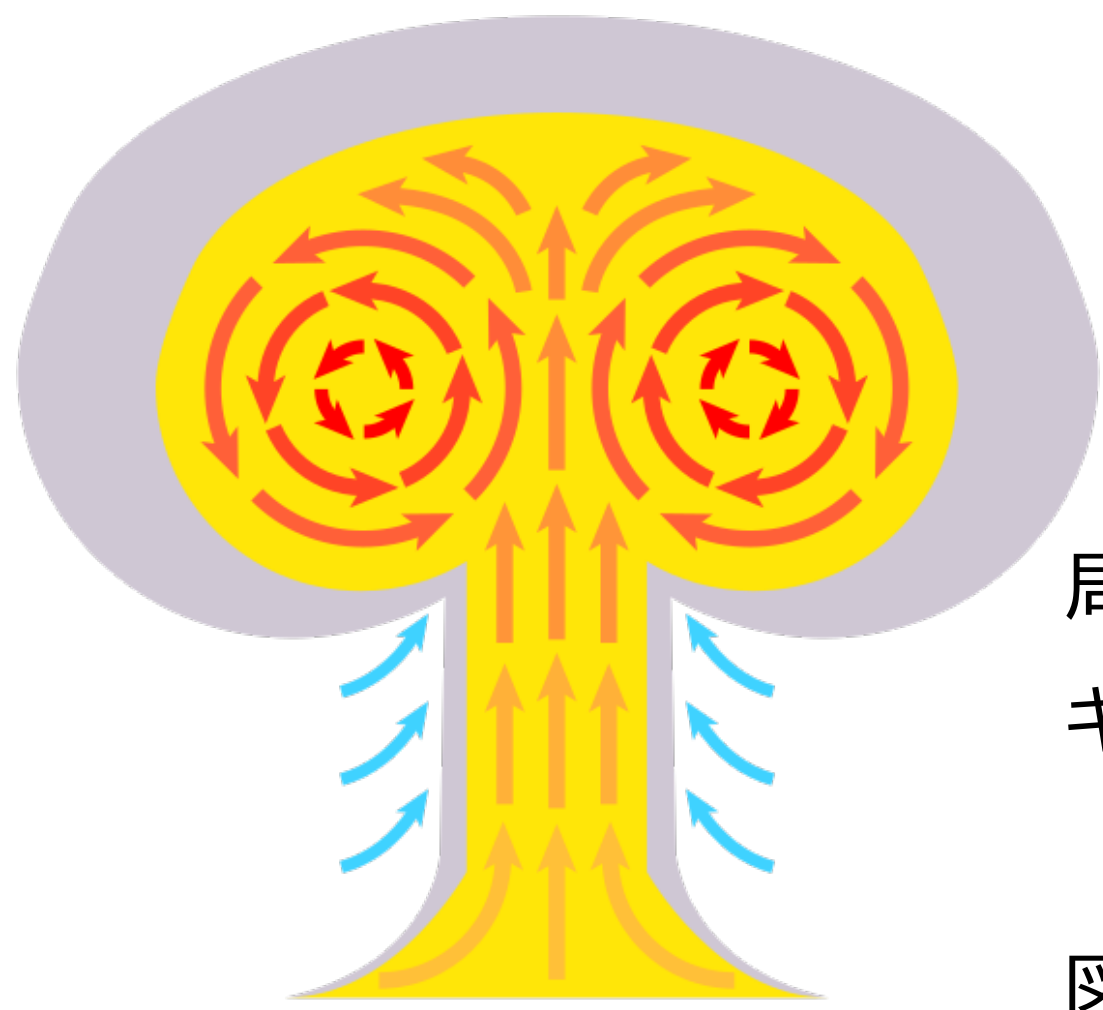


太陽が膨張して、いつか地球を飲みこむという話を聞いて、私が生きている間は関係ないことだけれど少し怖くなりました。

核融合で太陽が燃え尽きると地球も終わりになる話が衝撃だった。

超新星爆発のしくみを長々と書いてきた。太陽が地球を飲みこむと書いてきたけど、大きくて、下は、人類はどうかどうかかわりか、怖くはないと思った。

70秒の間に雲の上側は内巻きになっていきのかわ



局所的で強い上昇気流が、外気を巻き込み、キノコ状の構造を形成する。

図はwiki: mushroom cloudより

前回のミニッツペーパーから

面白そうな映画がたくさん紹介されて、見てみたくなりました。

インターステラーを一度見ようとしたのですが、途中で辞めてしまったので
もう一度見てみようと思いました。



住居を決める上で、
星が見えるか気にしますか？

都市近郊では満足のいくほど星は見えないので、朝日が昇るのが拝める
東向きの見晴らしのよいところに住んでいます。

この世に宇宙の科学者・専門家は何人いるのか？

天文・宇宙物理関係は、日本で200-300人、世界で2000-3000人くらいかな。
物理(相対性理論)は、日本で30-50人、世界で300人くらいかな。

狭い世界なので、何かハマすると、すぐに伝わります。たとえば..

Australia news

Astrophysicist gets magnets stuck up nose while inventing coronavirus device

Australian Dr Daniel Reardon ended up in hospital after inserting magnets in his nostrils while building a necklace that warns you when you touch your face

- [Sign up for Guardian Australia's daily coronavirus email](#)
- [Follow Australia coronavirus live news and updates](#)
- [Follow live global coronavirus updates](#)

Naaman Zhou

🐦 @naamanzhou

Mon 30 Mar 2020 05.48 BST



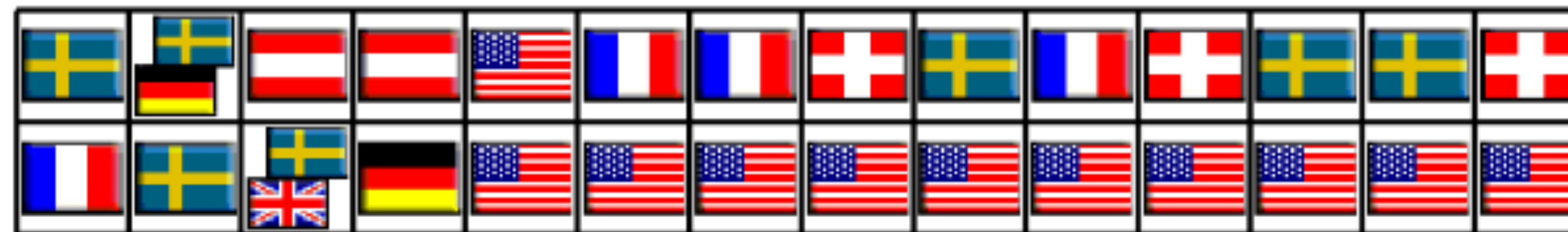
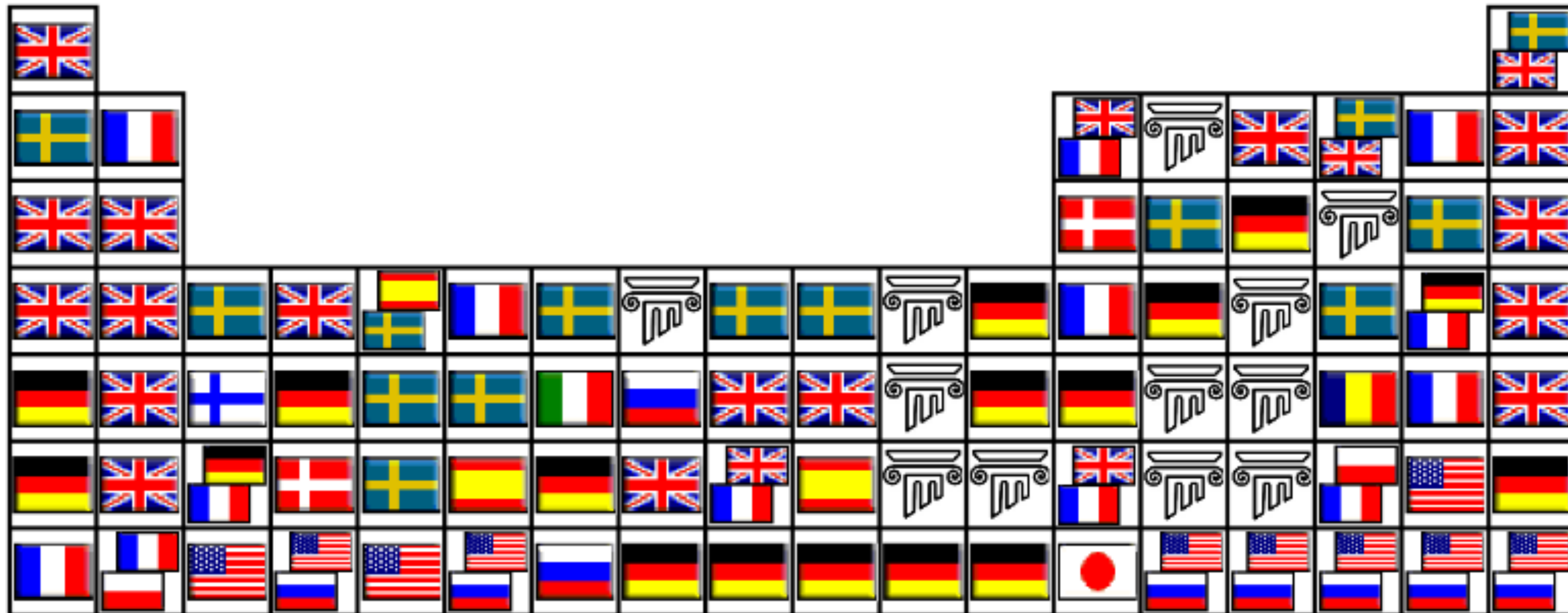
51,503



教科書 後ろ見開き

10

周期表 (periodic table)



http://www.meta-synthesis.com/webbook/35_pt/pt_database.php?Button=Data+Mapping

周期表 (periodic table)

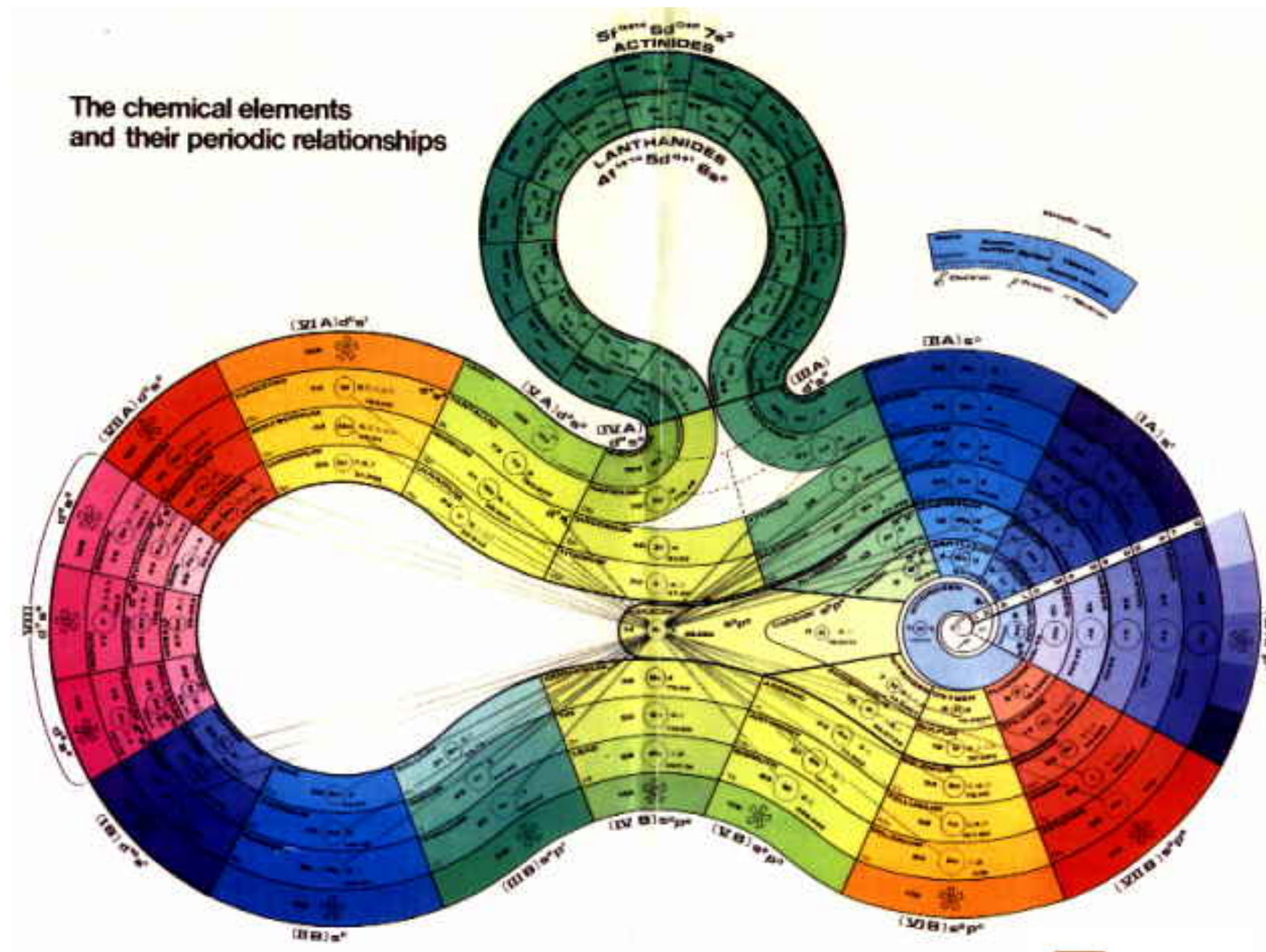
H1 Hydrogen Li3 Be4 Na11 Mg12 K19 Ca20 Rb37 Sr38 Cs55 Ba56 Fr87 Ra88 Sc21 Ti22 V23 Cr24 Mn25 Fe26 Co27 Ni28 Cu29 Zn30 Ga31 Ge32 As33 Se34 Br35 Kr36 Yttrium Zirconium Niobium Molybdenum Technetium Ruthenium Rhodium Palladium Silver Cadmium Indium Tin Antimony Tellurium Iodine Xenon Hydrogen Helium Neon Argon Krypton Xenon Radon Atomic Weight 1.00794 Density 0.0899 g/l Melting Point -259.14 °C Boiling Point -252.87 °C By weight, 75% of the visible universe is hydrogen, a colorless gas. In space, vast quantities interact with starlight to create spectacular sights such as the Eagle Nebula (seen by the Hubble Space Telescope).

周期表 (periodic table)

¹ H																	² He
氢																	氦
³ Li	⁴ Be											⁵ B	⁶ C	⁷ N	⁸ O	⁹ F	¹⁰ Ne
锂	铍											硼	碳	氮	氧	氟	氖
¹¹ Na	¹² Mg											¹³ Al	¹⁴ Si	¹⁵ P	¹⁶ S	¹⁷ Cl	¹⁸ Ar
钠	镁											铝	硅	磷	硫	氯	氩
¹⁹ K	²⁰ Ca	²¹ Sc	²² Ti	²³ V	²⁴ Cr	²⁵ Mn	²⁶ Fe	²⁷ Co	²⁸ Ni	²⁹ Cu	³⁰ Zn	³¹ Ga	³² Ge	³³ As	³⁴ Se	³⁵ Br	³⁶ Kr
钾	钙	钪	钛	钒	铬	锰	铁	钴	镍	铜	锌	镓	锗	砷	硒	溴	氪
³⁷ Rb	³⁸ Sr	³⁹ Y	⁴⁰ Zr	⁴¹ Nb	⁴² Mo	⁴³ Tc	⁴⁴ Ru	⁴⁵ Rh	⁴⁶ Pd	⁴⁷ Ag	⁴⁸ Cd	⁴⁹ In	⁵⁰ Sn	⁵¹ Sb	⁵² Te	⁵³ I	⁵⁴ Xe
铷	锶	钇	锆	铌	钼	锝	钌	铑	钯	银	镉	铟	锡	锑	碲	碘	氙
⁵⁵ Cs	⁵⁶ Ba	lanthanoid	⁷² Hf	⁷³ Ta	⁷⁴ W	⁷⁵ Re	⁷⁶ Os	⁷⁷ Ir	⁷⁸ Pt	⁷⁹ Au	⁸⁰ Hg	⁸¹ Tl	⁸² Pb	⁸³ Bi	⁸⁴ Po	⁸⁵ At	⁸⁶ Rn
铯	钡		铪	钽	钨	铼	锇	铱	铂	金	汞	铊	铅	铋	钋	砹	氡
⁸⁷ Fr	⁸⁸ Ra	actinoid	¹⁰⁴ Rf	¹⁰⁵ Db	¹⁰⁶ Sg	¹⁰⁷ Bh	¹⁰⁸ Hs	¹⁰⁹ Mt	¹¹⁰ Uun	¹¹¹ Uuu	¹¹² Uub			¹¹⁴ Uuq			¹¹⁶ Uuh
钫	镭		钇	铈	镧	铈	镧	铈	镧	铈	镧			—			—

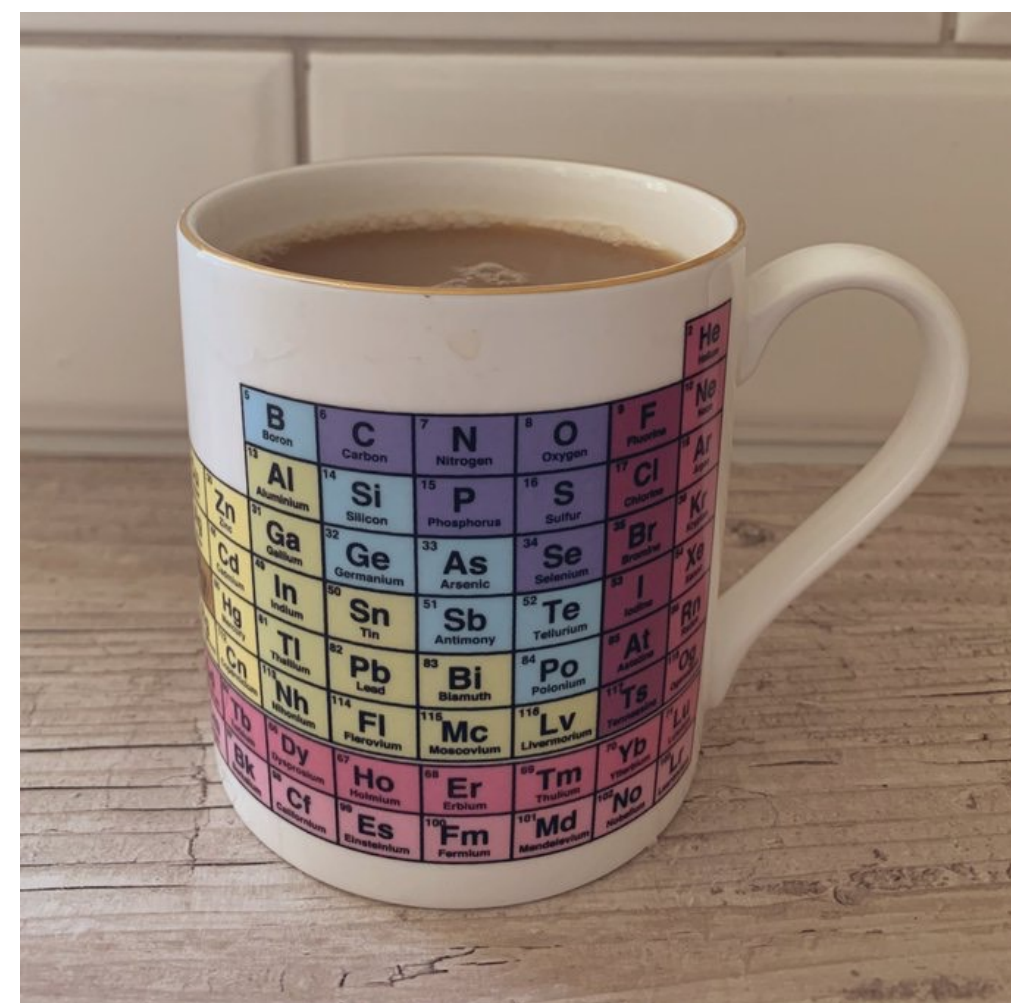
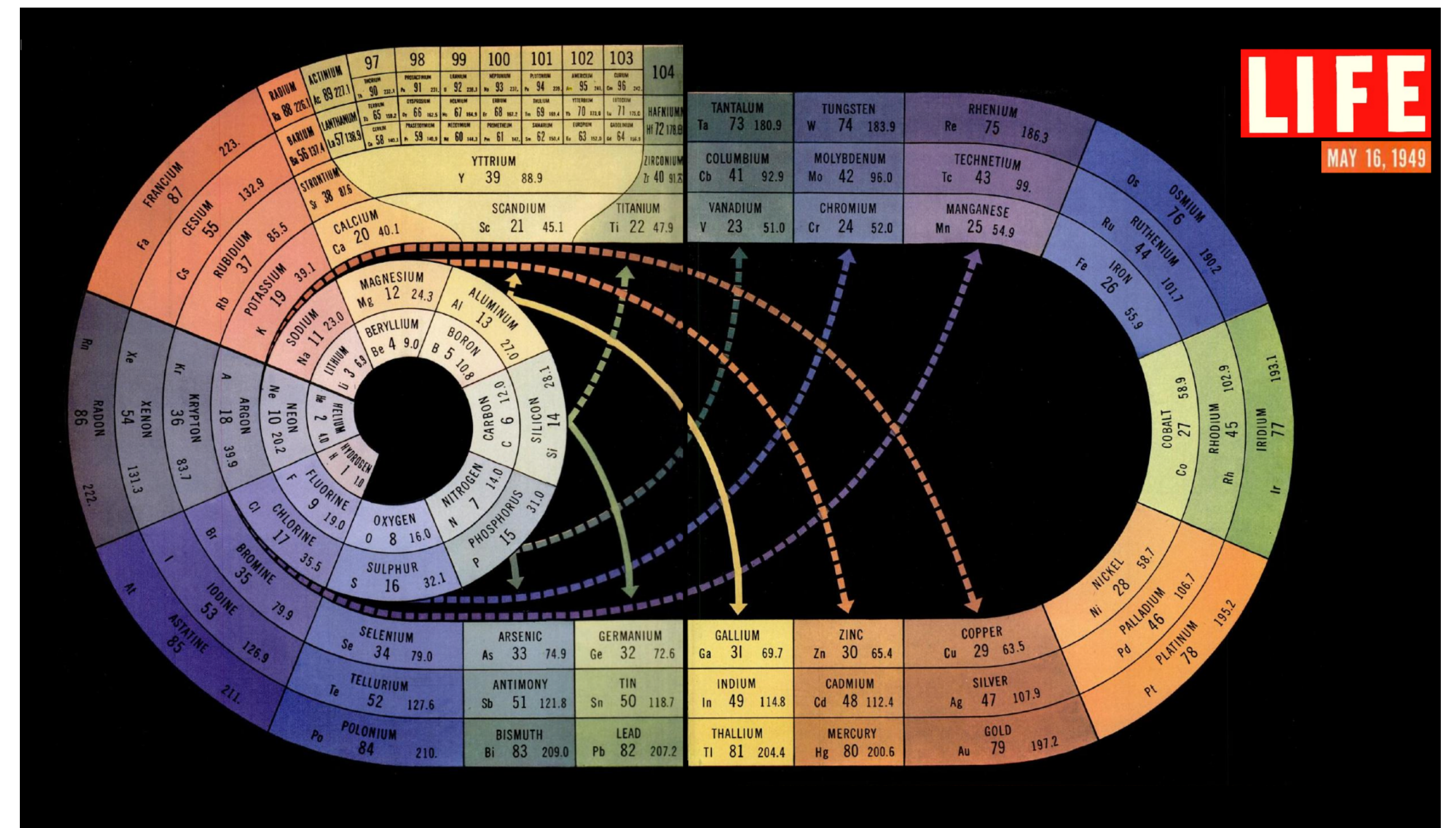
lanthanoid	⁵⁷ La	⁵⁸ Ce	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	⁶¹ Pm	⁶² Sm	⁶³ Eu	⁶⁴ Gd	⁶⁵ Tb	⁶⁶ Dy	⁶⁷ Ho	⁶⁸ Er	⁶⁹ Tm	⁷⁰ Yb	⁷¹ Lu
	镧	铈	镨	钕	钷	钐	铕	钆	铽	镱	铥	镱	铥	镱	镱
actinoid	⁸⁹ Ac	⁹⁰ Th	⁹¹ Pa	⁹² U	⁹³ Np	⁹⁴ Pu	⁹⁵ Am	⁹⁶ Cm	⁹⁷ Bk	⁹⁸ Cf	⁹⁹ Es	¹⁰⁰ Fm	¹⁰¹ Md	¹⁰² No	¹⁰³ Lr
	锕	钍	镤	铀	镎	钚	镅	锔	锫	锿	镄	钔	镅	镎	镎

周期表 (periodic table)



<http://users.erols.com/iri/show49.html>

<http://img.gawkerassets.com/img/18pdj3j02ehfwpng/original.png>

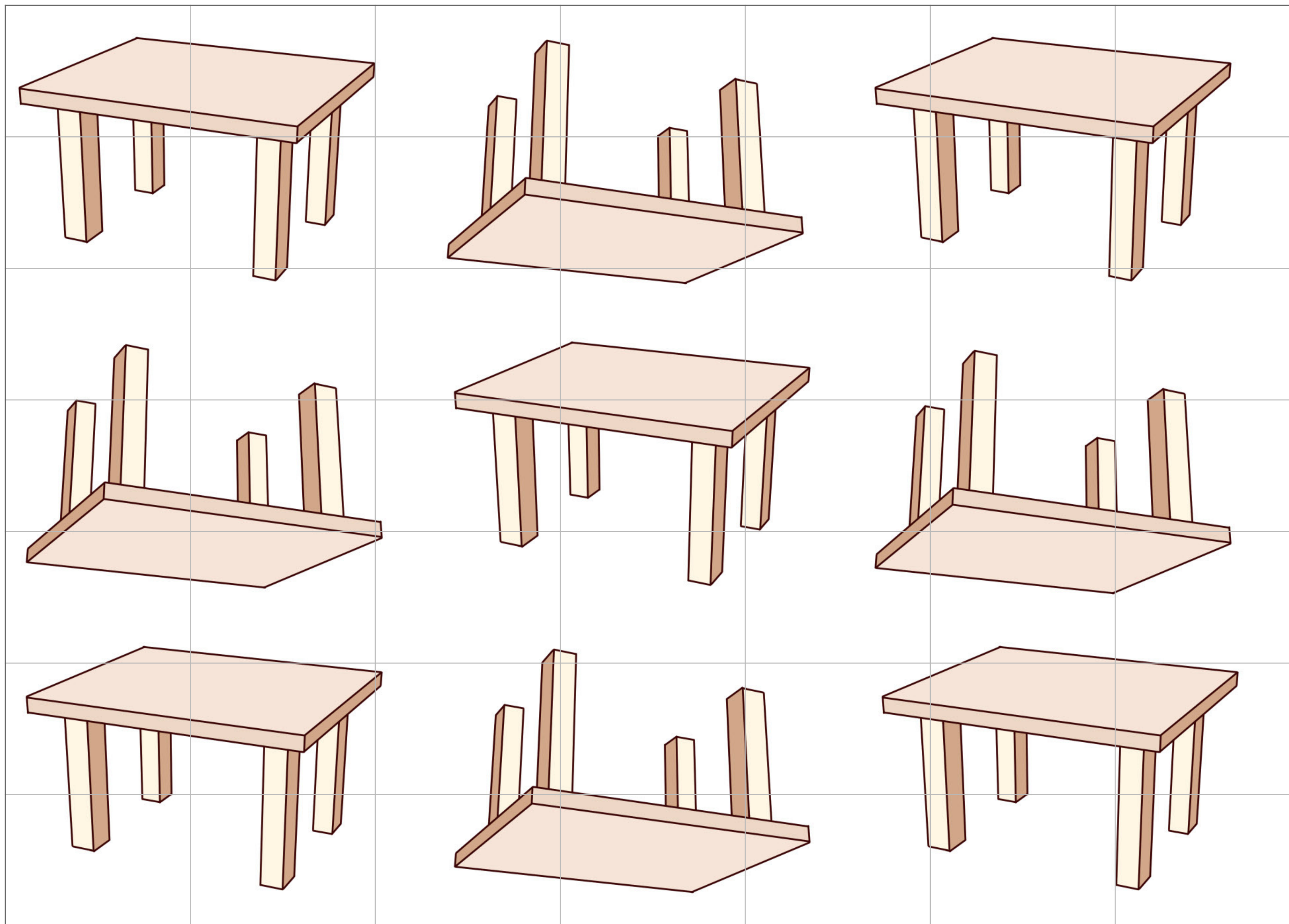


京都大学
オリジナルグッズ

周期表 (periodic table)

A stylized, wavy periodic table of elements. The elements are arranged in rows and columns, with some elements highlighted in larger, bold letters. The colors of the elements are: H (light blue), He (white), Li (blue), Be (light blue), B (light blue), C (dark blue), N (orange), O (red), F (orange), Ne (white), Na (dark blue), Mg (blue), Al (blue), Si (blue), P (purple), S (purple), Cl (orange), Ar (white), K (dark blue), Ca (blue), Sc (blue), Ti (blue), V (blue), Cr (blue), Mn (blue), Fe (blue), Co (blue), Ni (blue), Cu (blue), Zn (blue), Ga (blue), Ge (blue), As (purple), Se (purple), Br (purple), Kr (white), Rb (dark blue), Sr (blue), Y (blue), Zr (blue), Nb (blue), Mo (blue), Tc (blue), Ru (blue), Rh (blue), Pd (blue), Ag (blue), Cd (blue), In (blue), Sn (blue), Sb (blue), Te (blue), I (purple), Xe (white), Cs (dark blue), Ba (blue), La (blue), Ce (blue), Pr (blue), Nd (blue), Pm (blue), Sm (blue), Eu (blue), Gd (blue), Tb (blue), Dy (blue), Ho (blue), Er (blue), Tm (blue), Yb (blue), Lu (blue), Hf (blue), Ta (blue), W (blue), Re (blue), Os (blue), Ir (blue), Pt (blue), Au (blue), Hg (blue), Tl (blue), Pb (blue), Bi (blue), Po (blue), At (blue), Fr (dark blue), Ra (blue), Ac (blue), Th (blue), Pa (blue), U (blue), Np (blue), Pu (blue), Am (blue), Cm (blue), Bk (blue), Cf (blue), Es (blue), Fm (blue), Md (blue), No (blue), Lr (blue).

周期表 (periodic table)



$$E = mc^2$$

- **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

酸素がない宇宙で太陽が燃えているのはなぜ？

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っていたのだ。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。太陽が水素でみ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ル (Chandrasekhar, S. 1910–95) とベーテ (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。

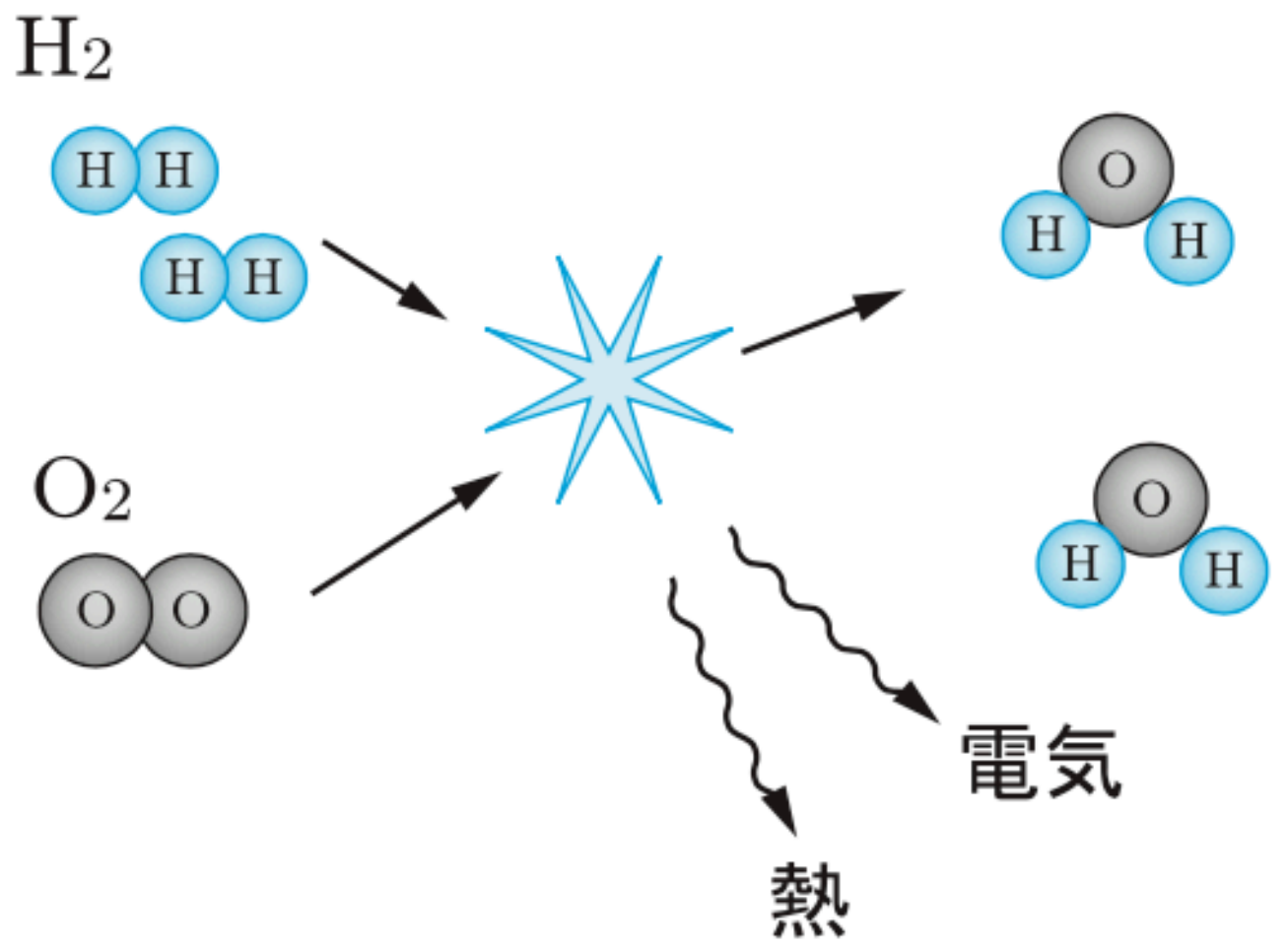
このコラムのタイトルにした疑問はよく科学館に寄せられる質問だそう。核融合反応は物理的な結合エネルギーの組み替えで発生している反応であり、化学的燃焼とは違うので酸素は不要なのである。

星は核融合反応で光を放っている

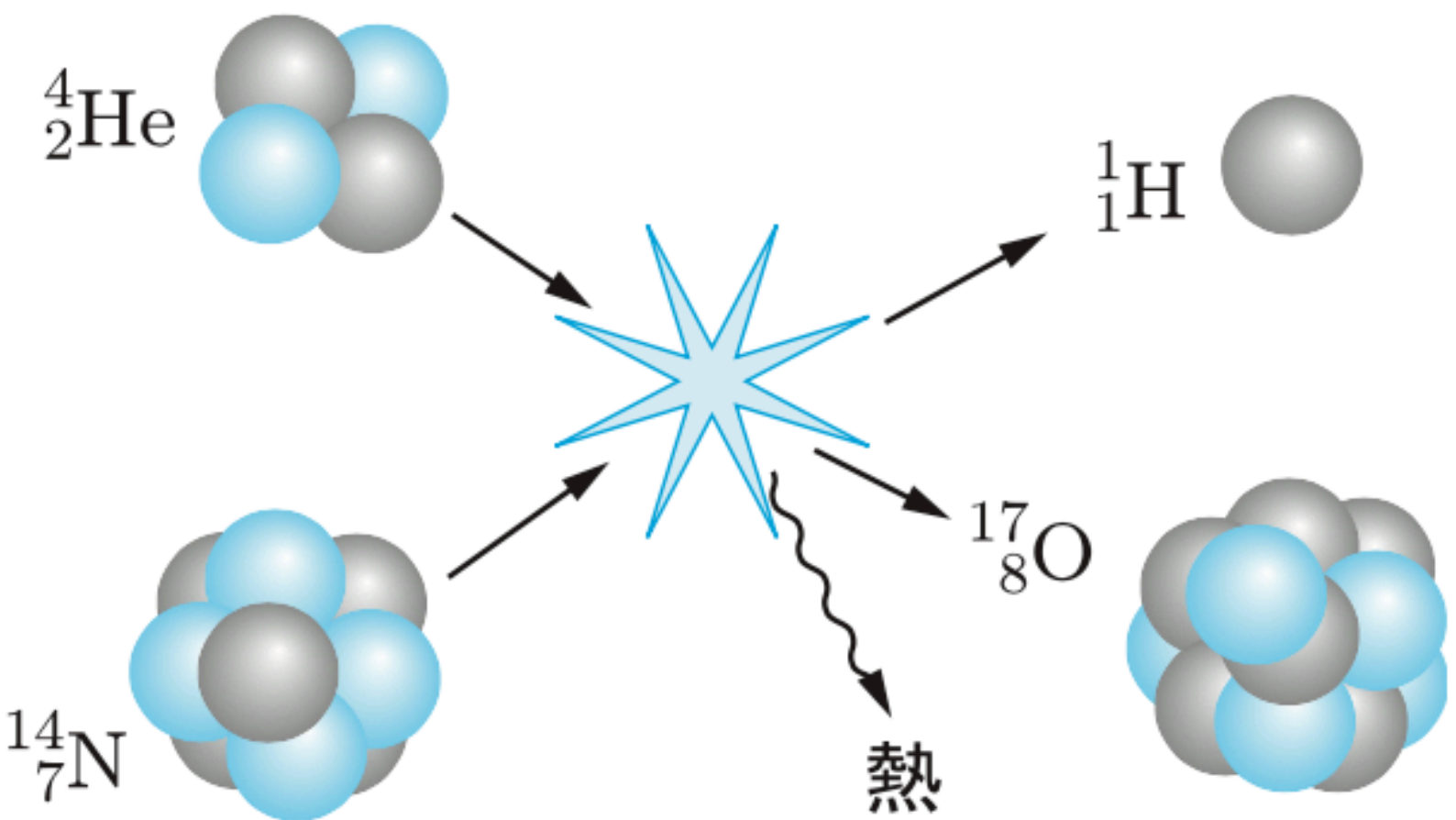
3.2.7 原子核反応

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**



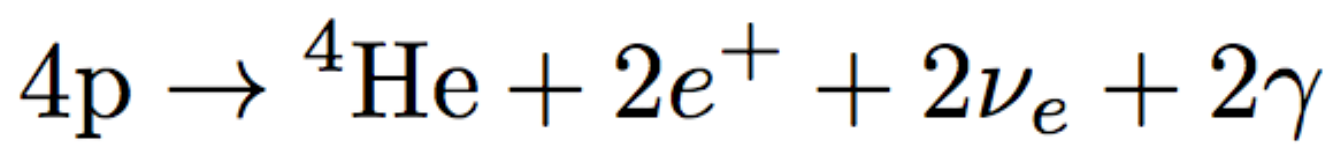
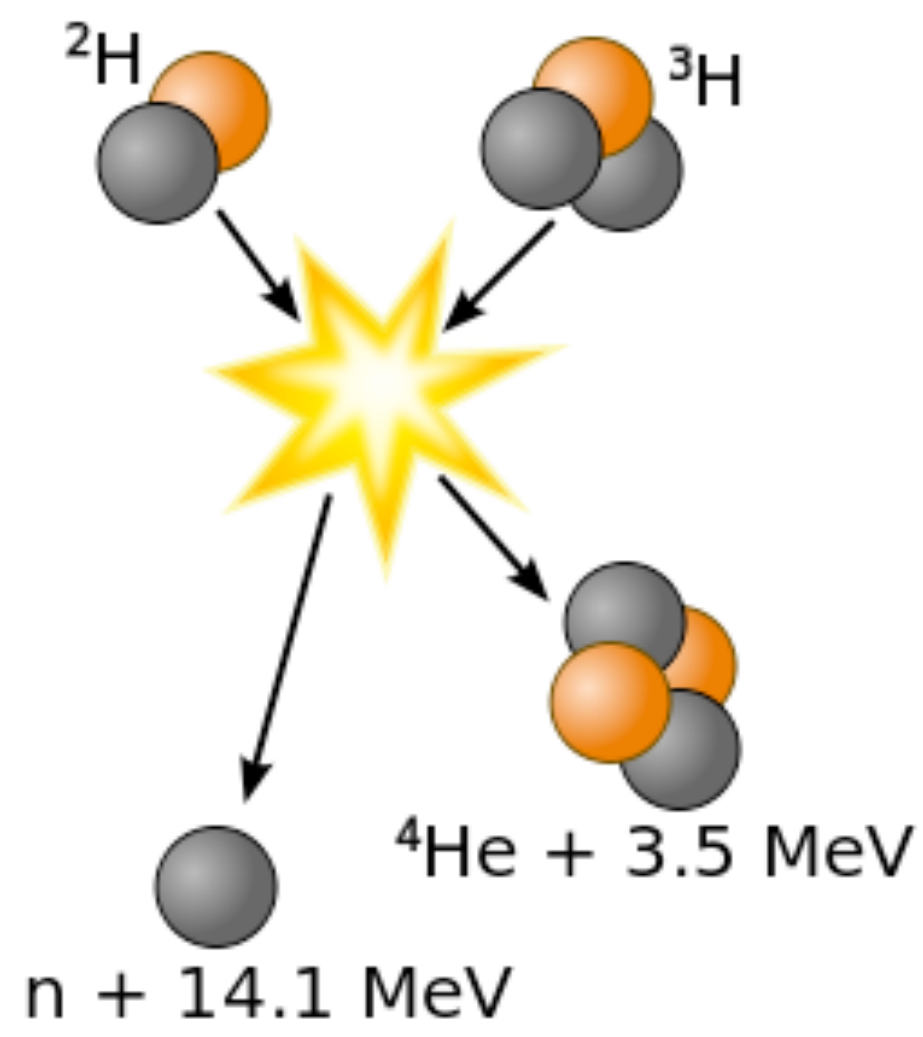
(a) 化学反応



(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.

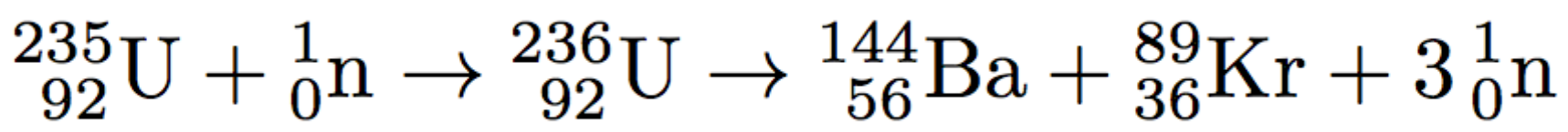
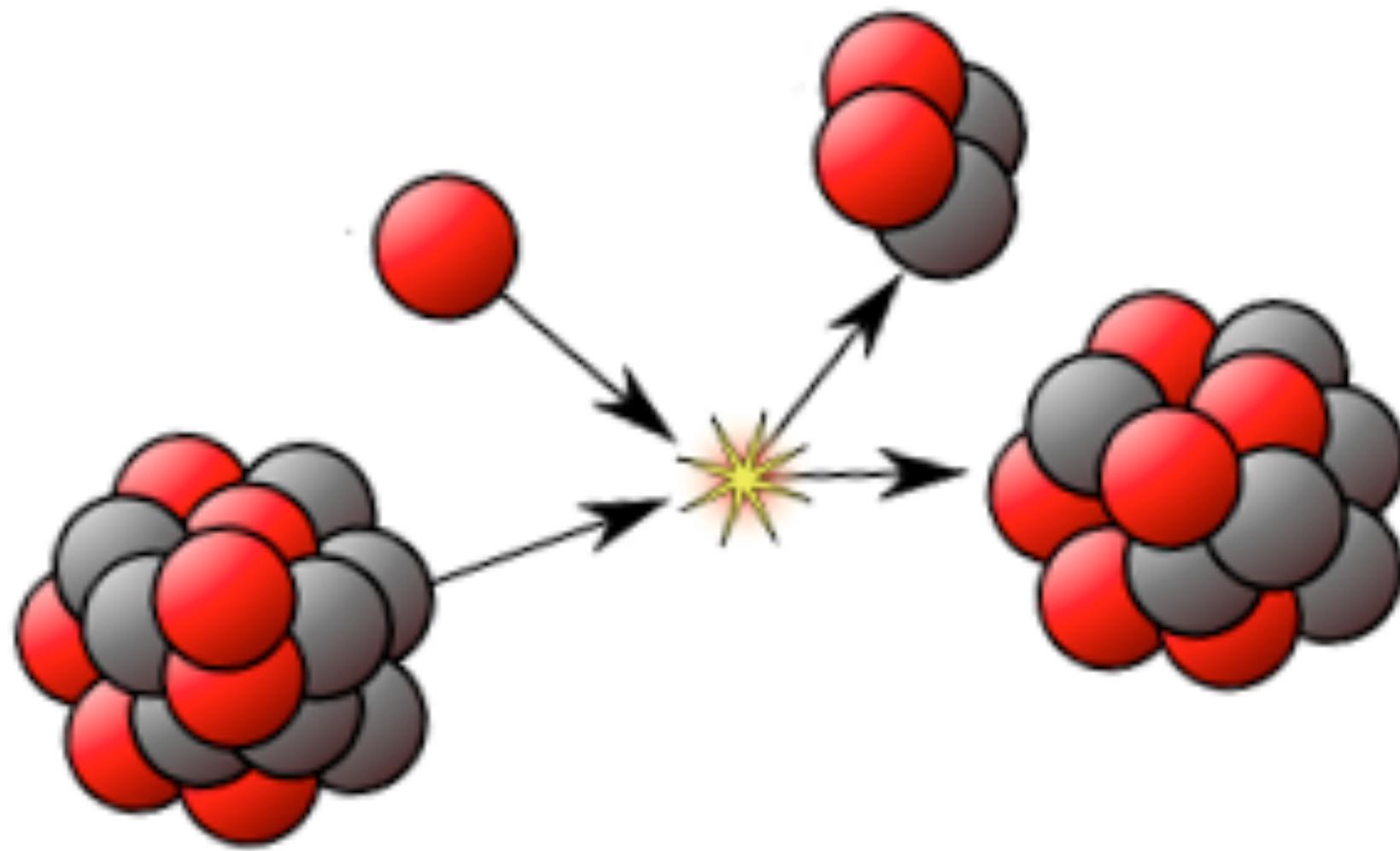
核融合 と 核分裂



核融合

(nuclear fusion)

合体した方が安定
(エネルギー放出)

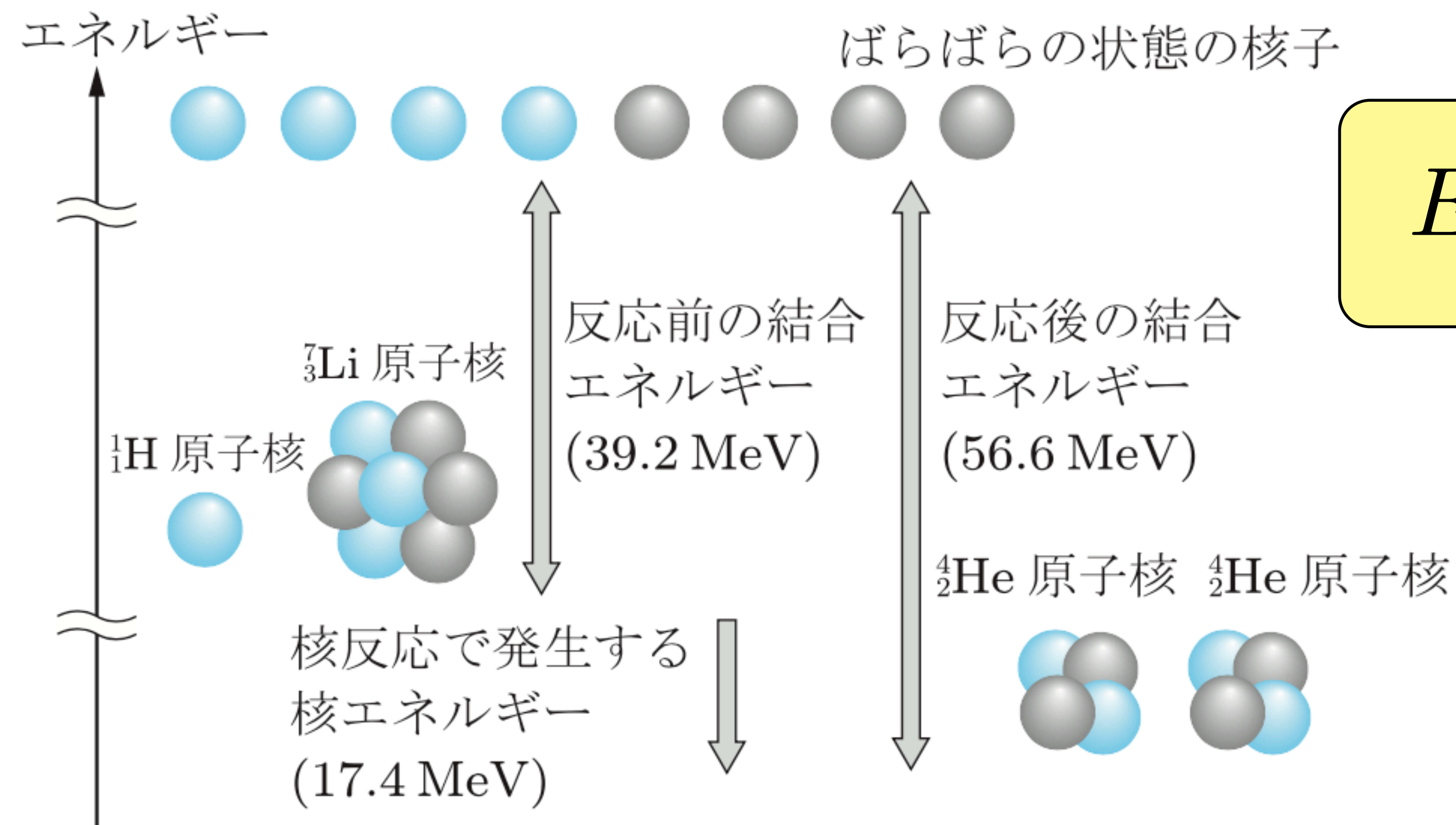


核分裂

(nuclear fission)

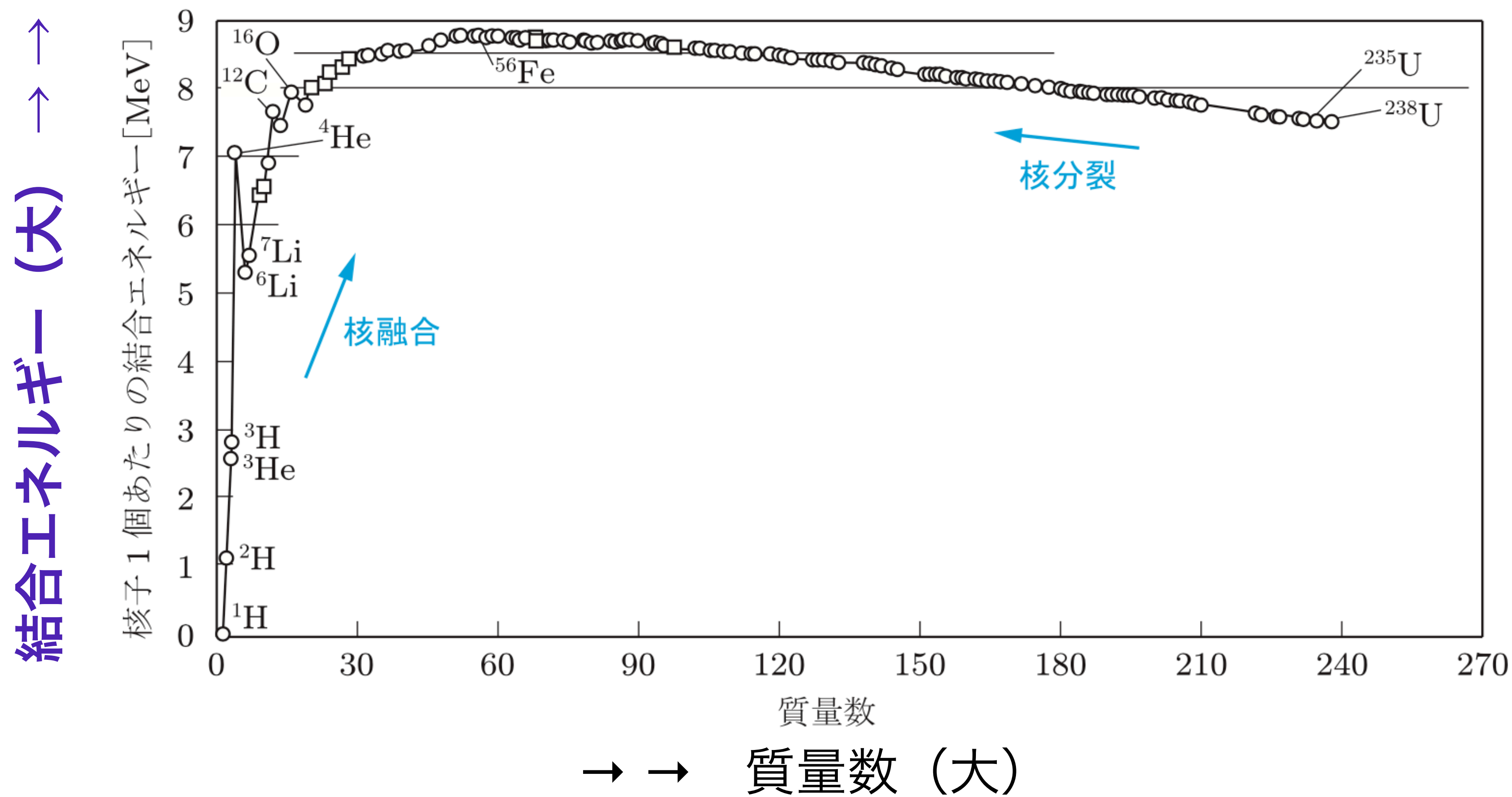
分裂した方が安定
(エネルギー放出)

結合エネルギー

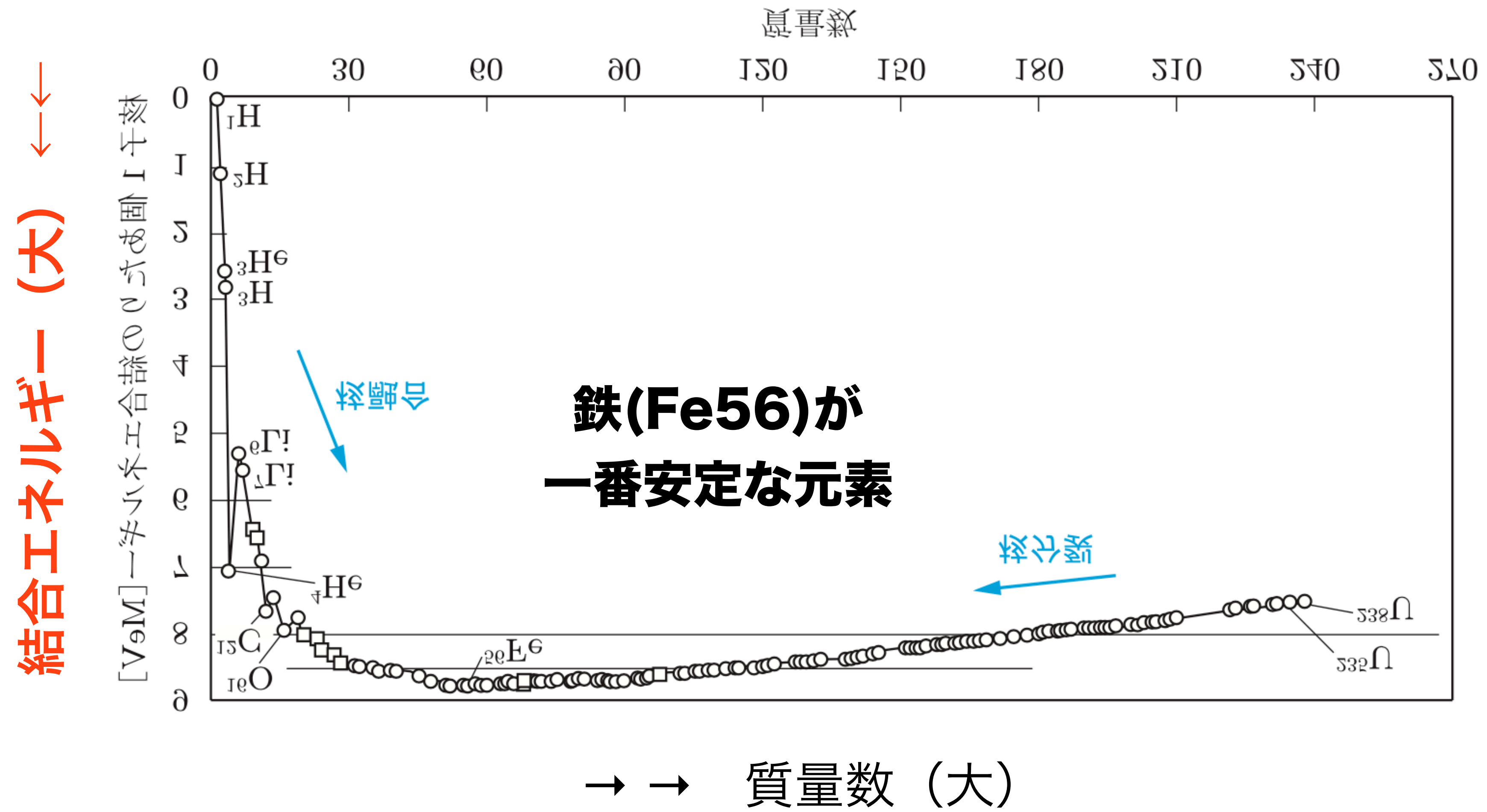


ばらばらでいるより，結合している方が，
エネルギーが低い

核融合も核分裂もどちらもおきる理由は何か？



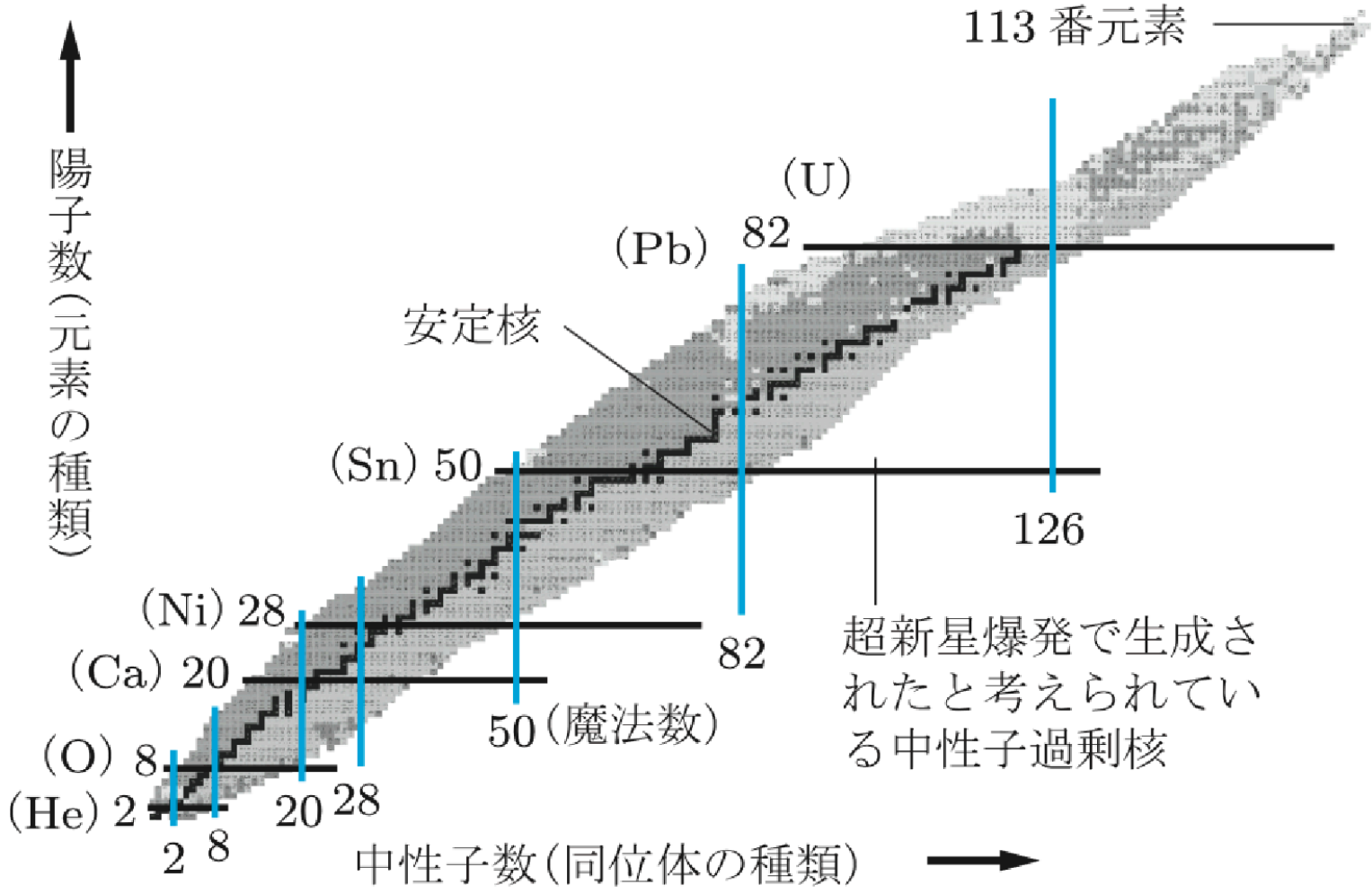
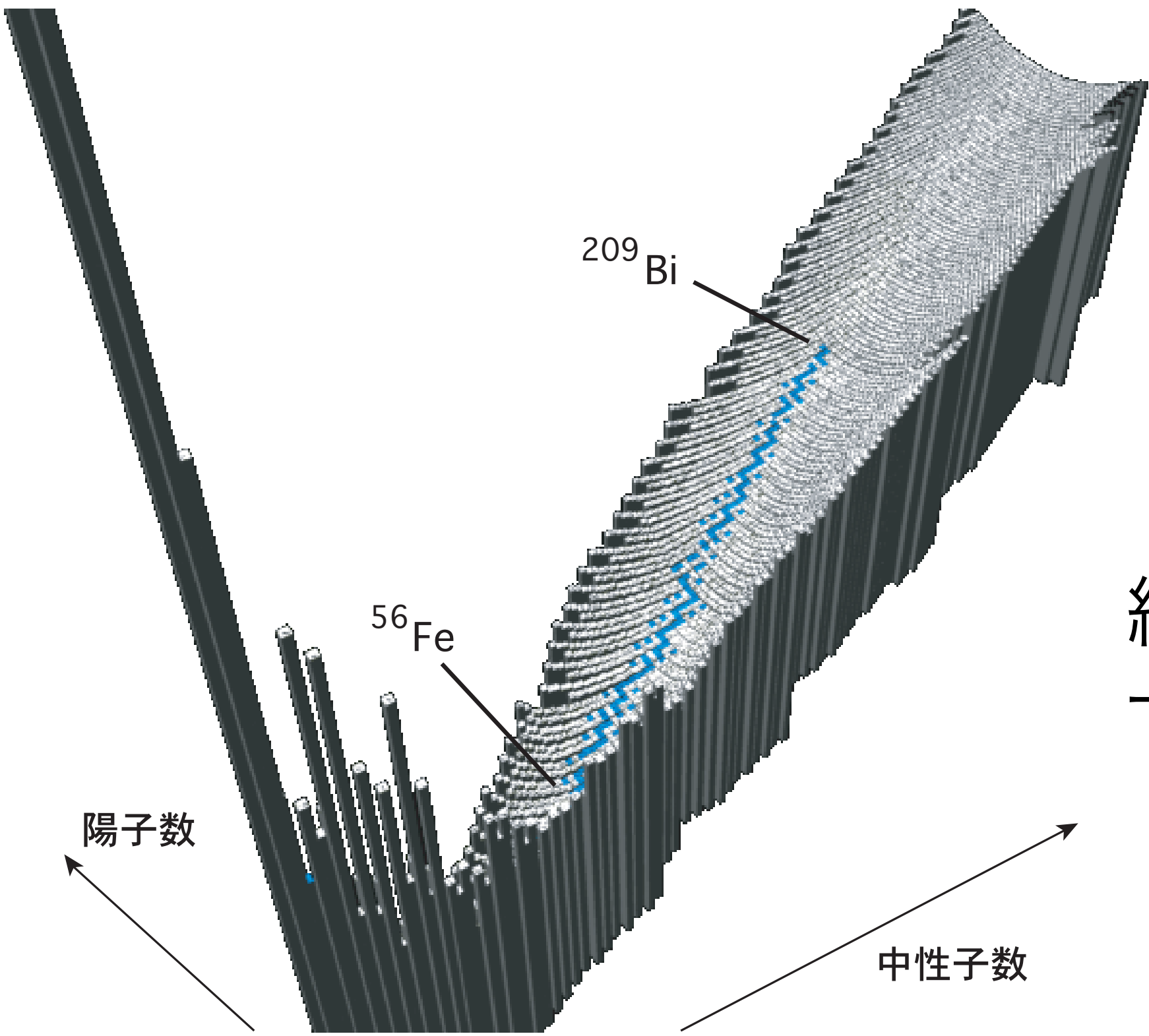
核融合も核分裂もどちらもおきる理由は何か？



核図表

核図表 教科書 p213

教科書 p75



結合エネルギーの大きなモノが
下になるように描いた核図表

1
I A

2
II A

3
III B

4
IV B

5
V B

6
VI B

7
VII B

8
VIII B

9
VIII B

10
VIII B

11
I B

12
II B

13
III A

14
IV A

15
V A

16
VI A

17
VII A

18
VIII A

1
H
水素
hydrogen
1.008

2
He
ヘリウム
helium
4.003

3
Li
リチウム
lithium
6.941

4
Be
ベリリウム
beryllium
9.012

11
Na
ナトリウム
sodium
22.99

12
Mg
マグネシウム
magnesium
24.31

19
K
カリウム
potassium
39.10

20
Ca
カルシウム
calcium
40.08

21
Sc
スカンジウム
scandium
44.96

22
Ti
チタン
titanium
47.87

23
V
バナジウム
vanadium
50.94

24
Cr
クロム
chromium
52.00

25
Mn
マンガン
manganese
54.94

26
Fe
鉄
iron
55.85

27
Co
コバルト
cobalt
58.93

28
Ni
ニッケル
nickel
58.69

29
Cu
銅
copper
63.55

30
Zn
亜鉛
zinc
65.41

37
Rb
ルビジウム
rubidium
85.47

38
Sr
ストロンチウム
strontium
87.62

39
Y
イットリウム
yttrium
88.91

40
Zr
ジルコニウム
zirconium
91.22

41
Nb
ニオブ
niobium
92.91

42
Mo
モリブデン
molybdenum
95.94

43
Tc
テクネチウム
technetium
98.91

44
Ru
ルテニウム
ruthenium
101.07

45
Rh
ロジウム
rhodium
102.91

46
Pd
パラジウム
palladium
106.42

47
Ag
銀
silver
107.87

48
Cd
カドミウム
cadmium
112.41

55
Cs
セシウム
cesium
132.9

56
Ba
バリウム
barium
137.3

57
La
ランタニウム
lanthanum
138.91

58
Ce
セリウム
cerium
140.12

59
Pr
プラセオジム
praseodymium
140.91

60
Nd
ネオジム
neodymium
144.24

61
Pm
プロメチウム
promethium
144.91

62
Sm
セミウム
samarium
150.36

63
Eu
ユークリウム
europium
151.96

64
Gd
ガドリウム
gadolinium
157.25

65
Tb
テルビウム
terbium
158.93

66
Dy
ジスプロシウム
dysprosium
162.50

67
Ho
ホウミウム
holmium
164.93

68
Er
エルビウム
erbium
167.26

69
Tm
テュリウム
thulium
168.93

70
Yb
ytterbium
173.05

71
Lu
ルテチウム
lutetium
174.97

87
Fr
フランシウム
francium
223

88
Ra
ラジウム
radium
226

89
Ac
アクチニウム
actinium
227

90
Th
トリウム
thorium
232.04

91
Pa
プロタクトニウム
protactinium
231.04

92
U
ウラン
uranium
238.03

93
Np
ネプツニウム
neptunium
237.05

94
Pu
プルトニウム
plutonium
244.06

95
Am
アメリシウム
americium
243.06

96
Cm
キュリウム
curium
247.07

97
Bk
ベルグシュテッド
berkelium
247.07

98
Cf
カリフォルニウム
californium
251.08

99
Es
エジソン
einsteinium
252.08

100
Fm
フェルミウム
fermium
257.10

101
Md
メンデルレーヴィウム
mendelevium
258.10

102
No
ノボロジウム
nobelium
259.10

103
Lr
ローレンス
lawrencium
262.11

104
Rf
リフ
rutherfordium
261.10

105
Db
ドブニウム
dubnium
262.11

106
Sg
シグ
seaborgium
266.12

107
Bh
ブハ
bohrium
264.10

108
Hs
ハース
hassium
277.13

109
Mt
ミッターマッハー
meitnerium
268.10

110
Ds
ドブニウム
darmstadtium
271.10

111
Rg
ローレンス
rogersium
272.11

112
Uu
ウンビウム
unbinilium
285.12

113
Nh
ニホニウム
nihonium
286.10

114
Fl
フルロウィウム
flerovium
289.10

115
Mc
モック
moscovium
288.10

116
Lv
リフ
livermorium
293.10

117
Ts
テシ
tennessine
294.10

118
Uuo
ウンビウム
ununoctium
294

原子番号 →

元素記号 →

元素名 (日本語) →

元素名 (英語) →

← 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

← 原子量

29

+2,1

Cu

銅

copper

63.55

↑ 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

→ 非金属元素

↓ 金属元素

1
I A

2
II A

3
III B

4
IV B

5
V B

6
VI B

7
VII B

8
VIII B

9
VIII B

10
VIII B

11
I B

12
II B

13
III A

14
IV A

15
V A

16
VI A

17
VII A

18
VIII A

1
H
水素
hydrogen
1.008

2
He
ヘリウム
helium
4.003

3
Li
リチウム
lithium
6.941

4
Be
ベリリウム
beryllium
9.012

11
Na
ナトリウム
sodium
22.99

12
Mg
マグネシウム
magnesium
24.31

19
K
カリウム
potassium
39.10

20
Ca
カルシウム
calcium
40.08

21
Sc
スカンジウム
scandium
44.96

22
Ti
チタン
titanium
47.87

23
V
バナジウム
vanadium
50.94

24
Cr
クロム
chromium
52.00

25
Mn
マンガン
manganese
54.94

26
Fe
鉄
iron
55.85

27
Co
コバルト
cobalt
58.93

28
Ni
ニッケル
nickel
58.69

29
Cu
銅
copper
63.55

30
Zn
亜鉛
zinc
65.41

37
Rb
ルビジウム
rubidium
85.47

38
Sr
ストロンチウム
strontium
87.62

39
Y
イットリウム
yttrium
88.91

40
Zr
ジルコニウム
zirconium
91.22

41
Nb
ニオブ
niobium
92.91

42
Mo
モリブデン
molybdenum
95.94

43
Tc
テクネチウム
technetium
98.91

44
Ru
ルテニウム
ruthenium
101.07

45
Rh
ロジウム
rhodium
102.91

46
Pd
パラジウム
palladium
106.42

47
Ag
銀
silver
107.87

48
Cd
カドミウム
cadmium
112.41

55
Cs
セシウム
cesium
132.9

56
Ba
バリウム
barium
137.3

57
La
ランタニウム
lanthanum
138.91

58
Ce
セリウム
cerium
140.12

59
Pr
プラセオジム
praseodymium
140.91

60
Nd
ネオジム
neodymium
144.24

61
Pm
プロメチウム
promethium
144.91

62
Sm
セミウム
samarium
150.36

63
Eu
ユークリウム
europium
151.96

64
Gd
ガドリウム
gadolinium
157.25

65
Tb
テルビウム
terbium
158.93

66
Dy
ジスプロシウム
dysprosium
162.50

67
Ho
ホウミウム
holmium
164.93

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？

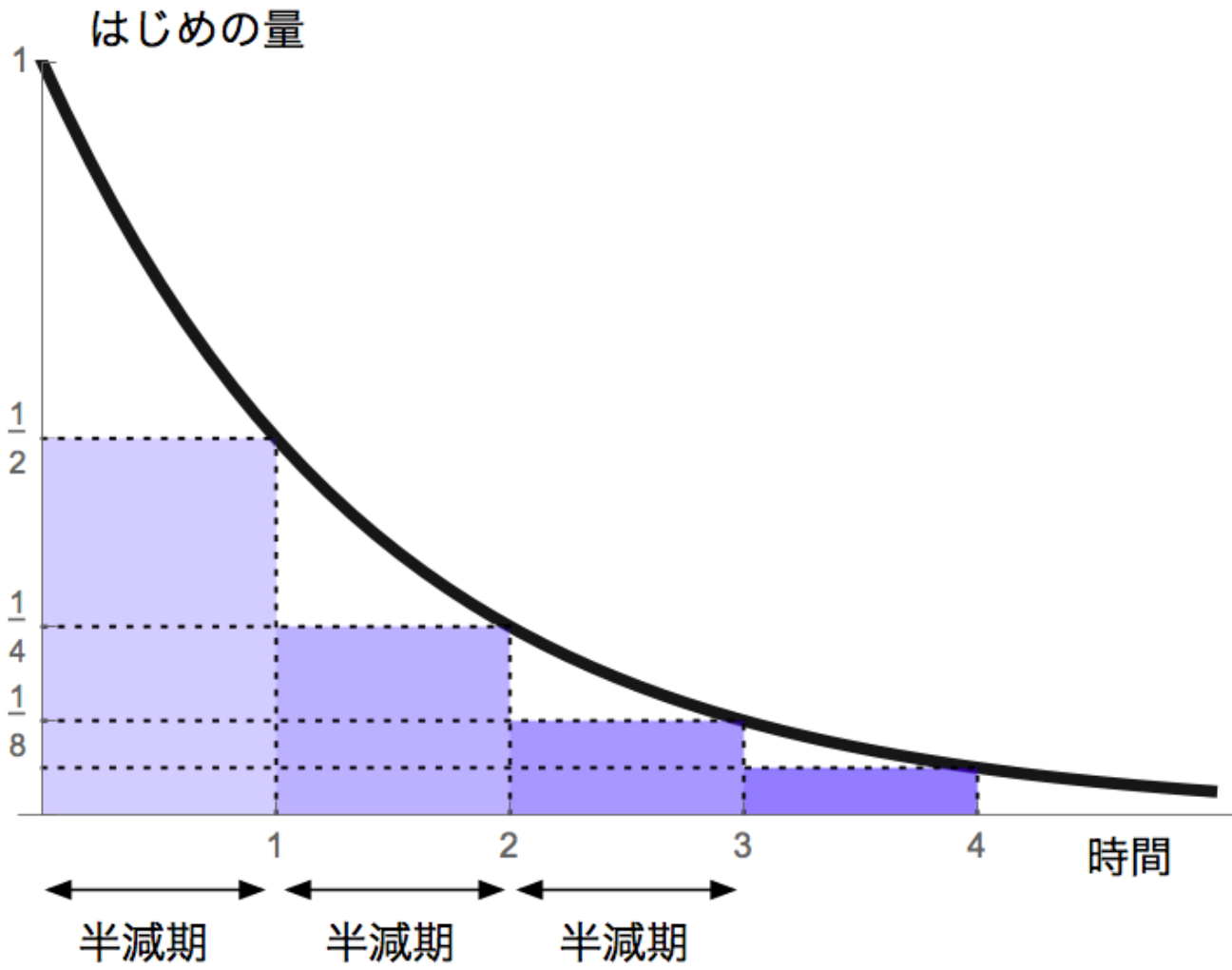
超新星爆発で作られた！

連星中性子星の合体で作られた！

原子番号が同じでも，中性子数が違う原子が存在する．それらを**同位体**という．同位体には，安定なものと不安定で他のものに崩壊してゆくものがある．

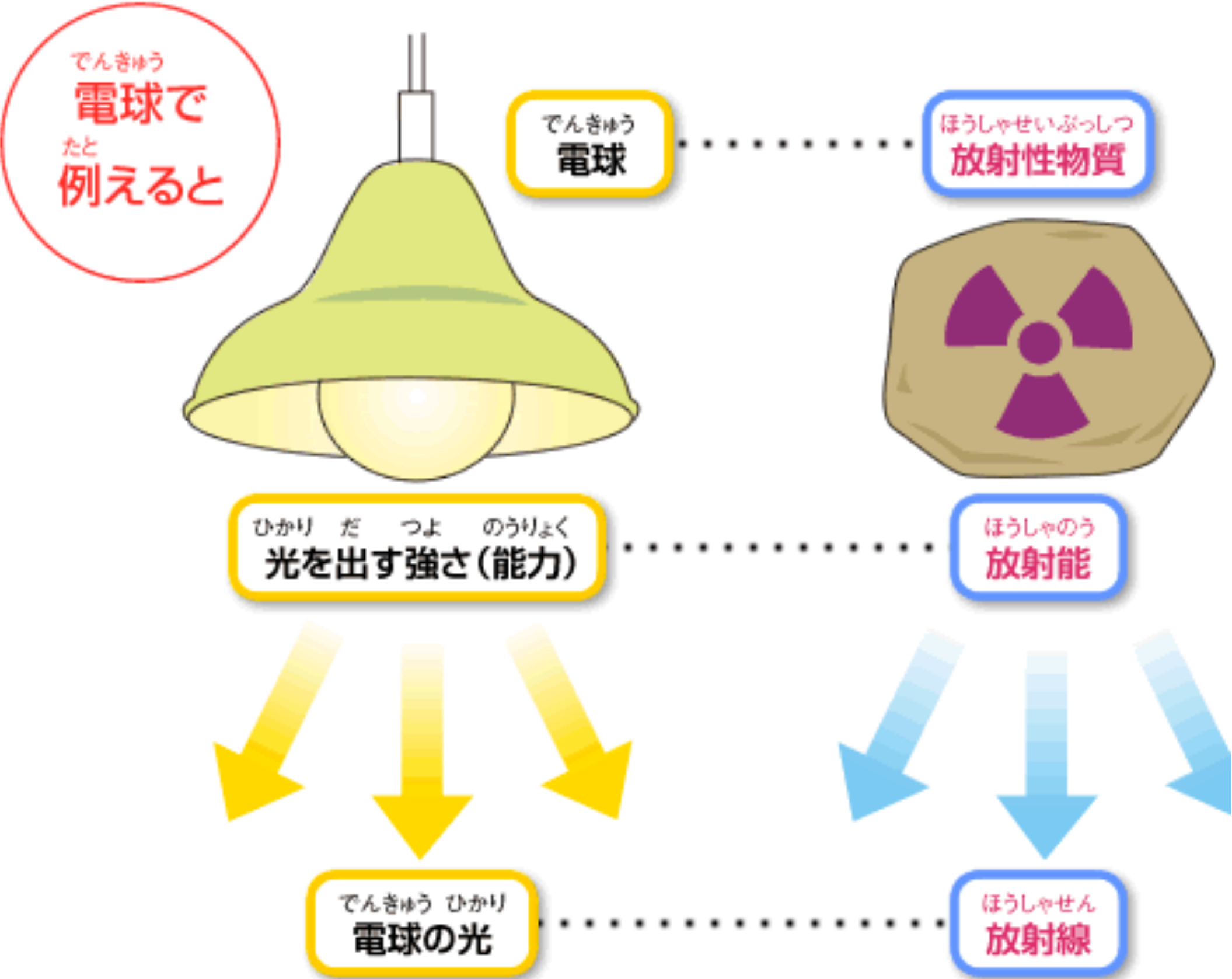
名称		記号	陽子の数	中性子の数	質量 (u)	存在比	半減期
水素	水素1(軽水素)	${}^1_1\text{H}$	1	0	1.0078	0.999885	12.32年でヘリウム3に
	水素2(重水素)	${}^2_1\text{H}$, D		1	2.0141	0.000115	
	水素3(三重水素)	${}^3_1\text{H}$, T		2	3.0160	微量	
炭素	炭素12	${}^{12}_6\text{C}$	6	6	12	0.9893	5730年で窒素14に
	炭素13	${}^{13}_6\text{C}$		7	13.0034	0.0107	
	炭素14	${}^{14}_6\text{C}$		8	14.0032	微量	
ウラン	ウラン234	${}^{234}_{92}\text{U}$	92	142	234.0409	0.000054	25万5千年でトリウム230へ
	ウラン235	${}^{235}_{92}\text{U}$		143	235.0439	0.007204	7億380万年でトリウム231へ
	ウラン238	${}^{238}_{92}\text{U}$		146	238.0508	0.992742	44億6800万年でトリウム234へ

	名称	記号	模式図※1	陽子の数	中性子の数	質量 (u)※2	存在比 (%)
水素	水素	${}^1_1\text{H}$		1	0	1.0078	99.9885
	重水素	${}^2_1\text{H}$ D			1	2.0141	0.0115
炭素	炭素 12	${}^{12}_6\text{C}$		6	6	12	98.93
	炭素 13	${}^{13}_6\text{C}$			7	13.0034	1.07
ウラン	ウラン 234	${}^{234}_{92}\text{U}$		92	142	234.0409	0.0054
	ウラン 235	${}^{235}_{92}\text{U}$			143	235.0439	0.7204
	ウラン 238	${}^{238}_{92}\text{U}$			146	238.0508	99.2742





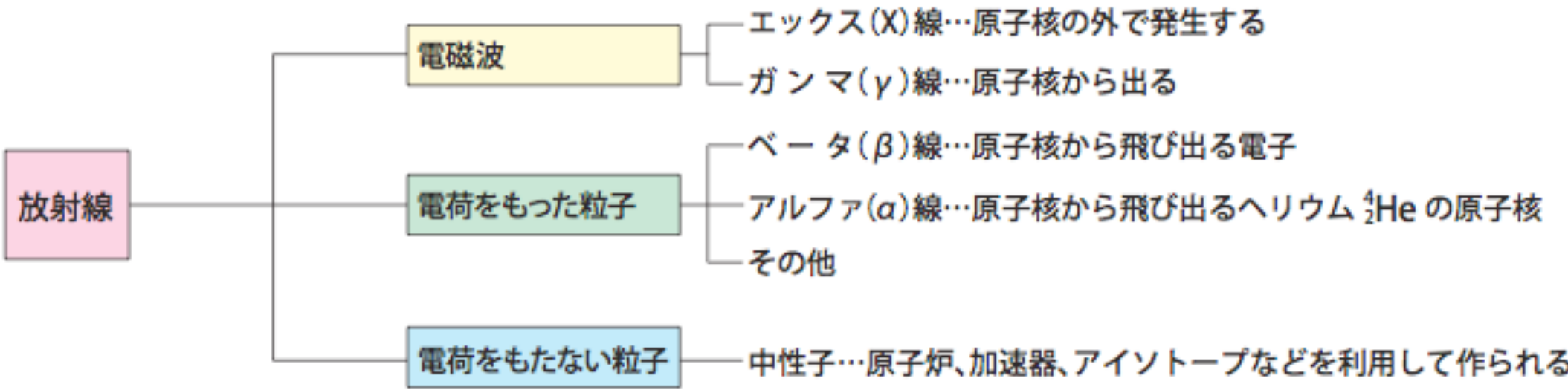
原子核と放射線



放射線の種類

アルファ (α) 壊変 (崩壊)	アルファ線 (He原子核)	(例) $^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^{222}_{86}\text{Rn} + \alpha$
ベータ (β) 壊変 (崩壊)	ベータ線 (電子)	(例) $^{24}_{11}\text{Na} \rightarrow ^{24}_{12}\text{Mg} + \beta$
ガンマ (γ) 線の放出	アルファ線 ガンマ線 (電磁波)	

● 陽子 ● 中性子





原子核と放射線

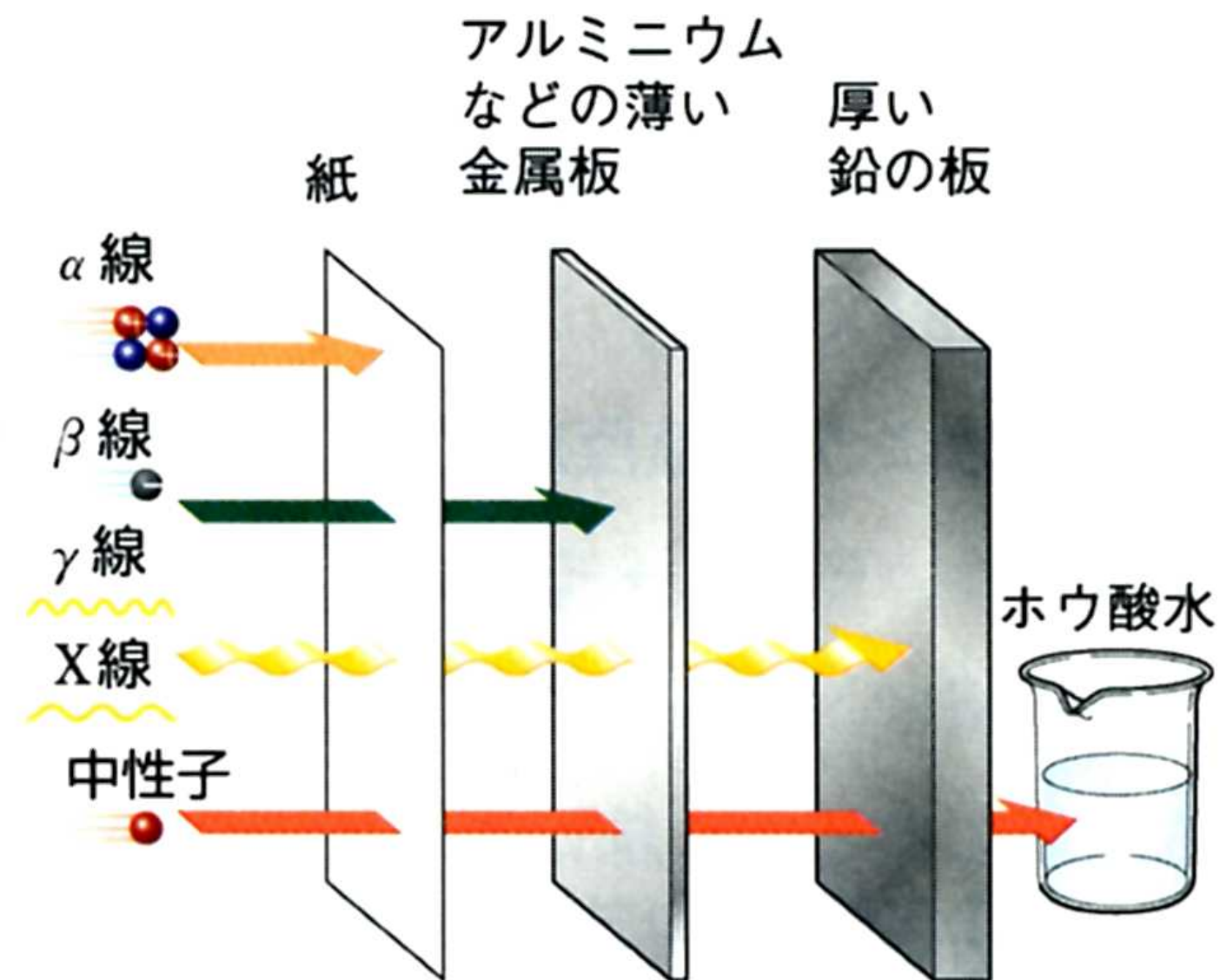


図7 放射線の透過力

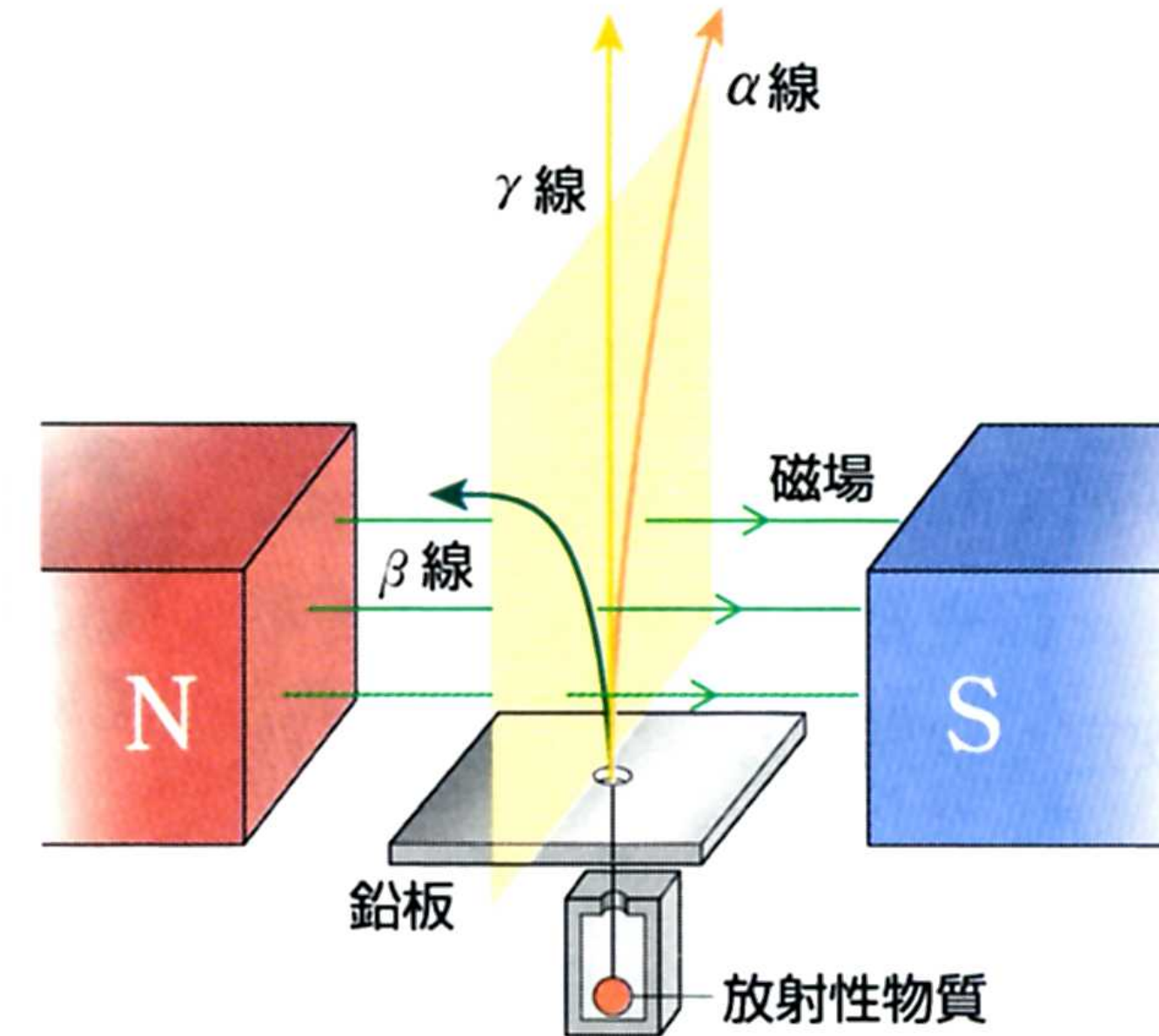
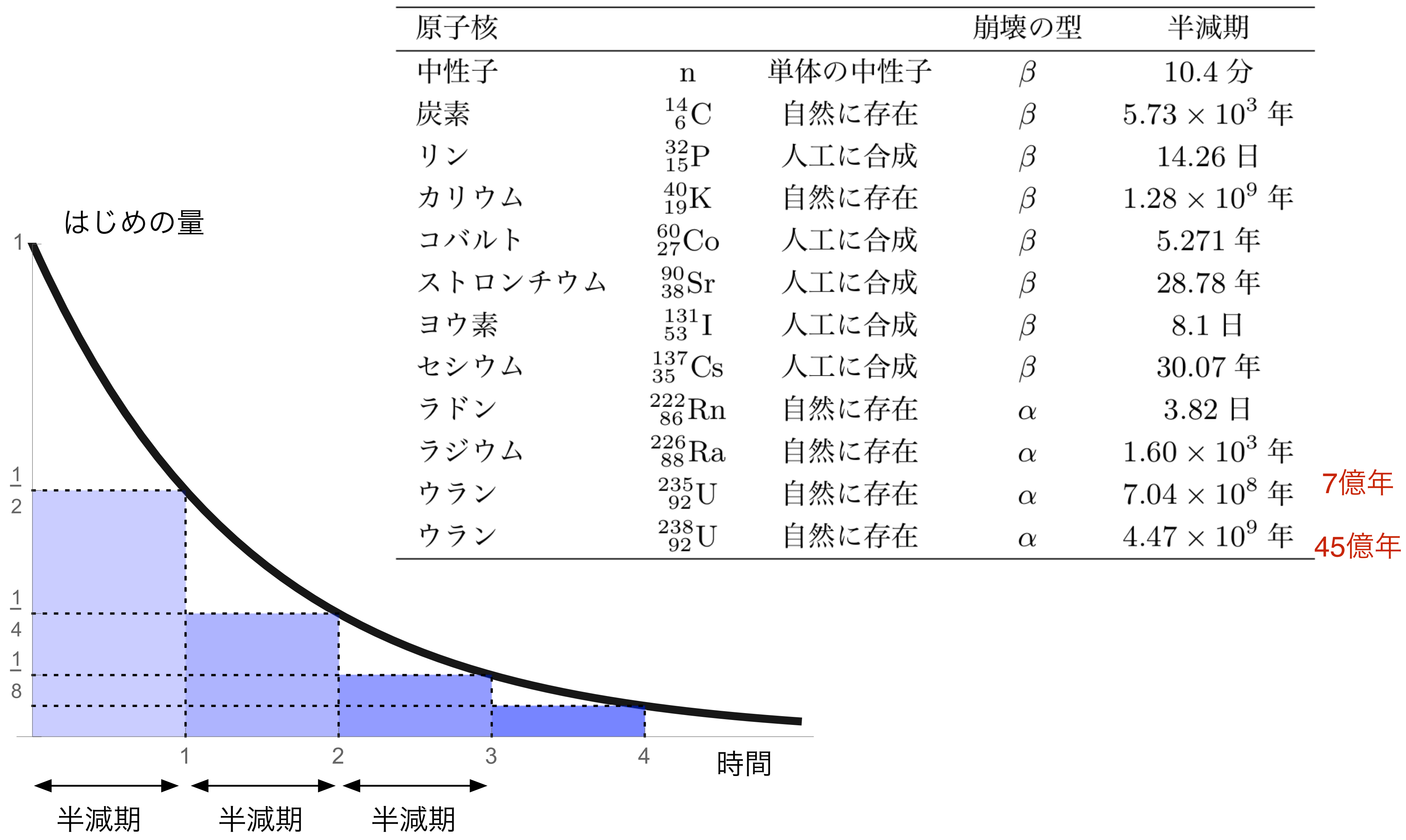


図8 磁場中での放射線

実教出版「物理II」

1898年頃、ラザフォードは、ウランやトリウムなどの天然の放射性物質から出ている放射線には性質の異なる少なくとも2種類のものがあることを明らかにし、透過力の弱い方を「 α 線」、透過力のより強い方を「 β 線」と命名した。この他に β 線よりもさらに透過力が大きい放射線も存在することが分り、それを「 γ 線」と名付けた。

半減期 (half-decay time)



放射性炭素年代測定法

Topic

放射性炭素年代測定法

炭素 ^{12}C には、安定な同位体 ^{13}C と不安定な同位体 ^{14}C が存在する。両者は空気中に一定の割合で含まれていて、生物、例えば樹木が呼吸していれば樹木中にもその割合で取り込まれる。樹木が切られ木材となると、木材は新たに内部に炭素を取り入れなくなる。

^{14}C は 5730 年の半減期で放射線を放出しながら ^{14}N に壊変するので、後年、木材からどれだけの量の放射線が放出されているかを計測することにより、内部に含まれる $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ の存在比がわかり、樹木が切り倒された年代が測定できることになる。この方法により、生物遺骸があれば、数万年前までの年代測定が可能になるという。

日本で 2000 年にスクープされた旧石器発掘に関する捏造事件は、出土した石器に対して有効な年代測定法がないために第三者の検証ができなかったことが、事件を大きくさせた。

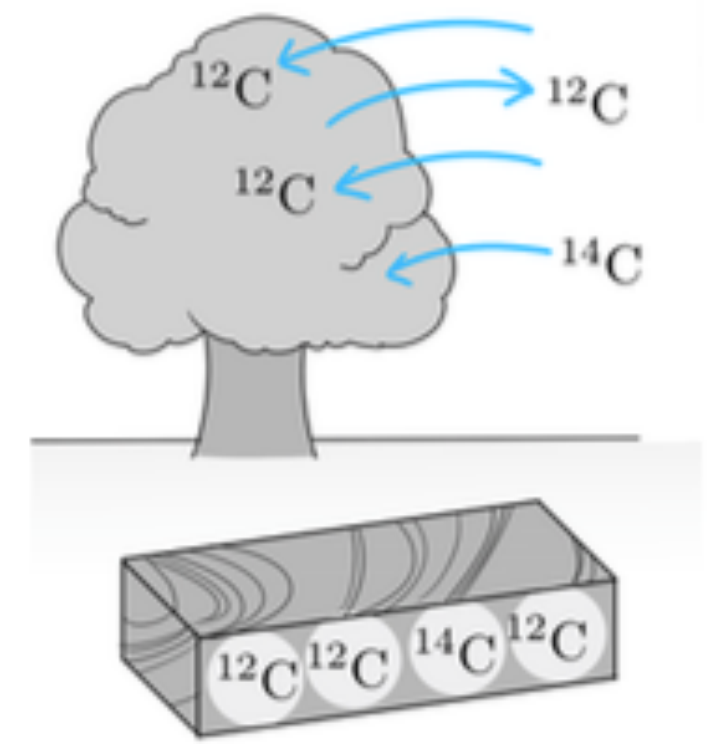
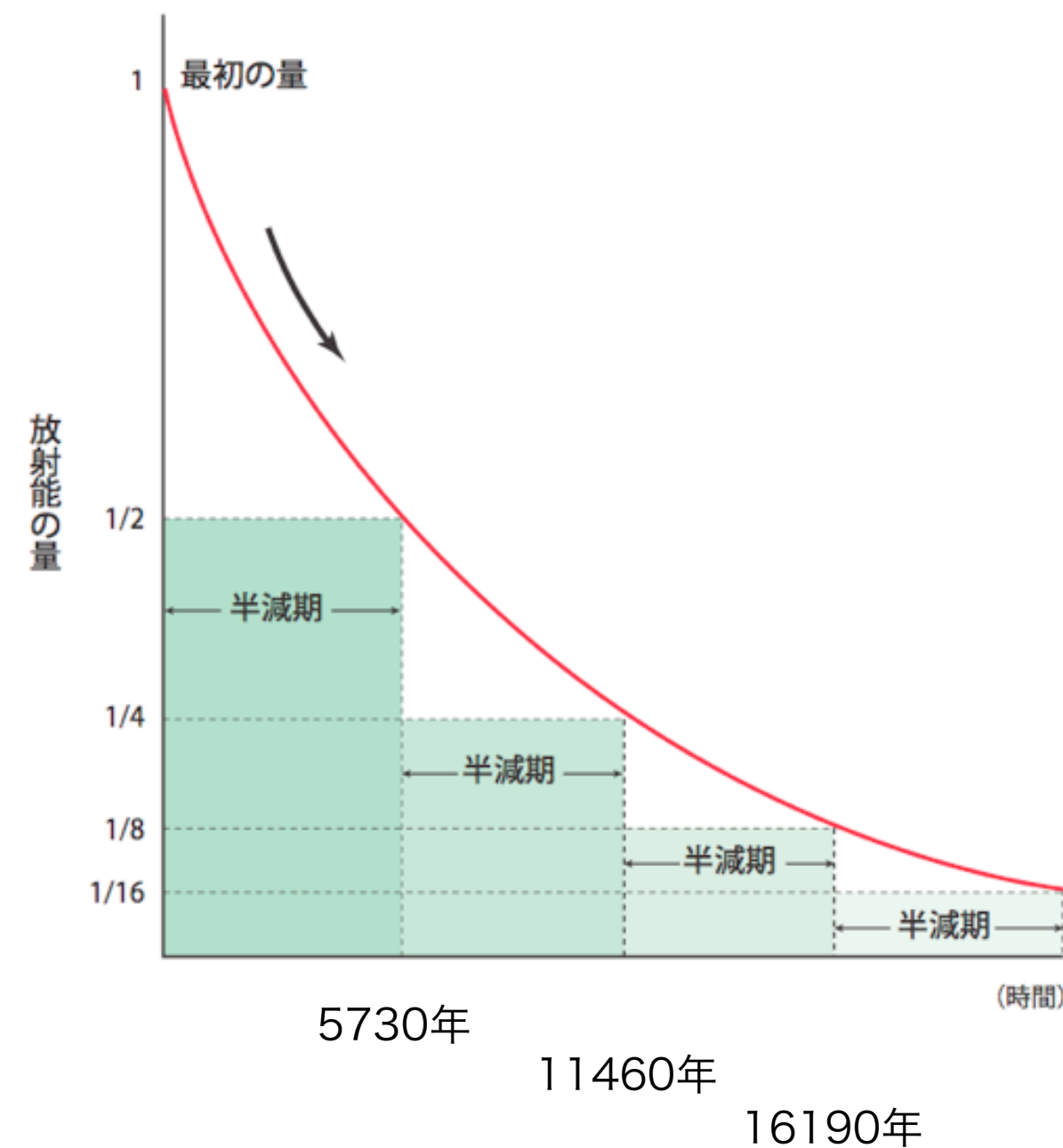


図 6: 放射性炭素年代測定法。呼吸していた樹木が材木になると、 ^{14}C が閉じ込められ、放射性壊変で徐々に減ってゆく。 ^{14}C の含有量で材木の年代がわかる。

^{12}C ^{13}C 安定同位体

^{14}C 不安定同位体 (半減期5730年)

放射性廃棄物問題

原子力発電では使用済みの燃料棒が発生するが、
ウランやプルトニウムを大量に含む。これらは、
長い年月をかけて放射線を出し続ける。

原子炉では、貯蔵プールで3年から5年
かけて冷却する。その後、再処理工場にて
固め、**長期保存**することになる。

青森県六ヶ所村に核燃料再処理・貯蔵施設



原子炉内の貯蔵プールに格納された使用済み核燃料

前回のミニッツペーパーから

【7-2】(本日の講義関連)

原子力発電は、放射線漏れの危険を伴うが、それ以外にも「放射性廃棄物問題」がある。これは何が問題なのか。

放射能の低減に長い時間がかかる。

放射性廃棄物 からも生物に 有害な物質が 発生するから

廃棄物を安全に保管することや、処分するところを確保するのが難しいため、

放射線物質を処理・保管するのが難しいという問題。

放射性廃棄物の処分の方法、貯蔵方法について

放射レベルが高く人体に 有害なうえに、土層処分が 必要と 掘るのが 簡単ではない点。

放射線による健康リスクや 処分しづらい問題がある。

人体に有害なので、長い時間かけて安全な場所へ保管し、放射能レベルを下げ、 廃棄場所を なくしていくといっている。

廃棄物が無害な状態になる 数万年後まで、どのようにして安全に 保管するか、解決策が 未だに無いこと。

原子力発電所が廃棄した物に放射線が含まれており、生物に影響を 与える

発電によって生じる放射性廃棄物が、長い時間放射線 を出し続けるため、人間や環境に長時間危険をもたらす。

放射線物質の廃棄物をそのまま海へ捨ててしまうと、魚などの海の生物に影響が 出るなどして、漁業に影響が出るのが問題

長期の隔離が必要、処分場の確保

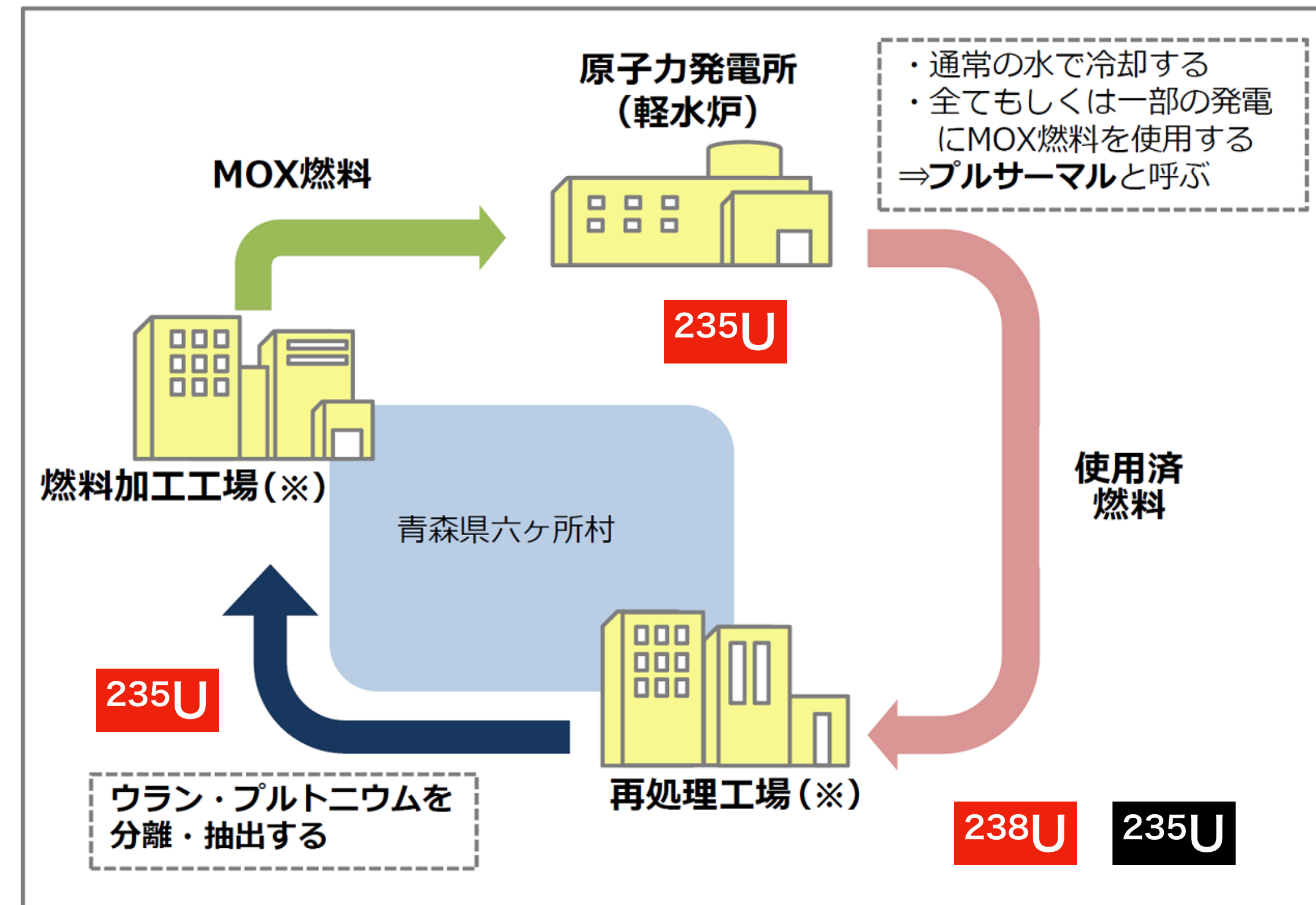
廃棄物が安全に処理、保管される方法がまだ完全に 確立されていないという問題。

発電後の残存物が、今後10万年にわたって放射線を出すため、 それを管理しなければならない。

もんじゅ

福井県敦賀市にある高速増殖炉。

日本のめざす「核燃料サイクル」を実現するため、研究用として建設され、92年に運用開始したが、冷却用ナトリウム漏れ事故等のトラブルにより、ほとんどの期間は運転停止状態で、2016年12月に廃炉が正式決定。 >> 実証炉から実用炉へ

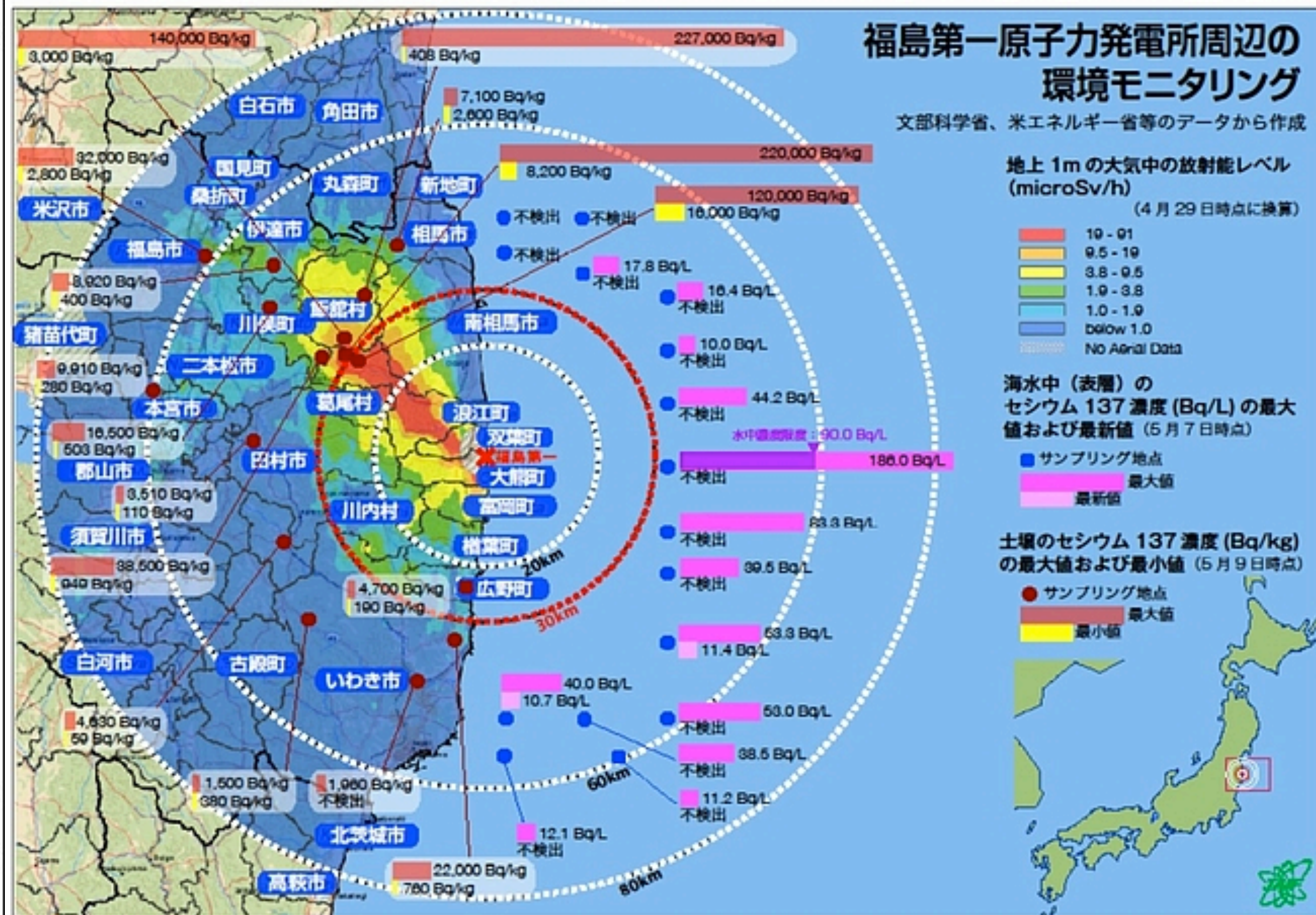
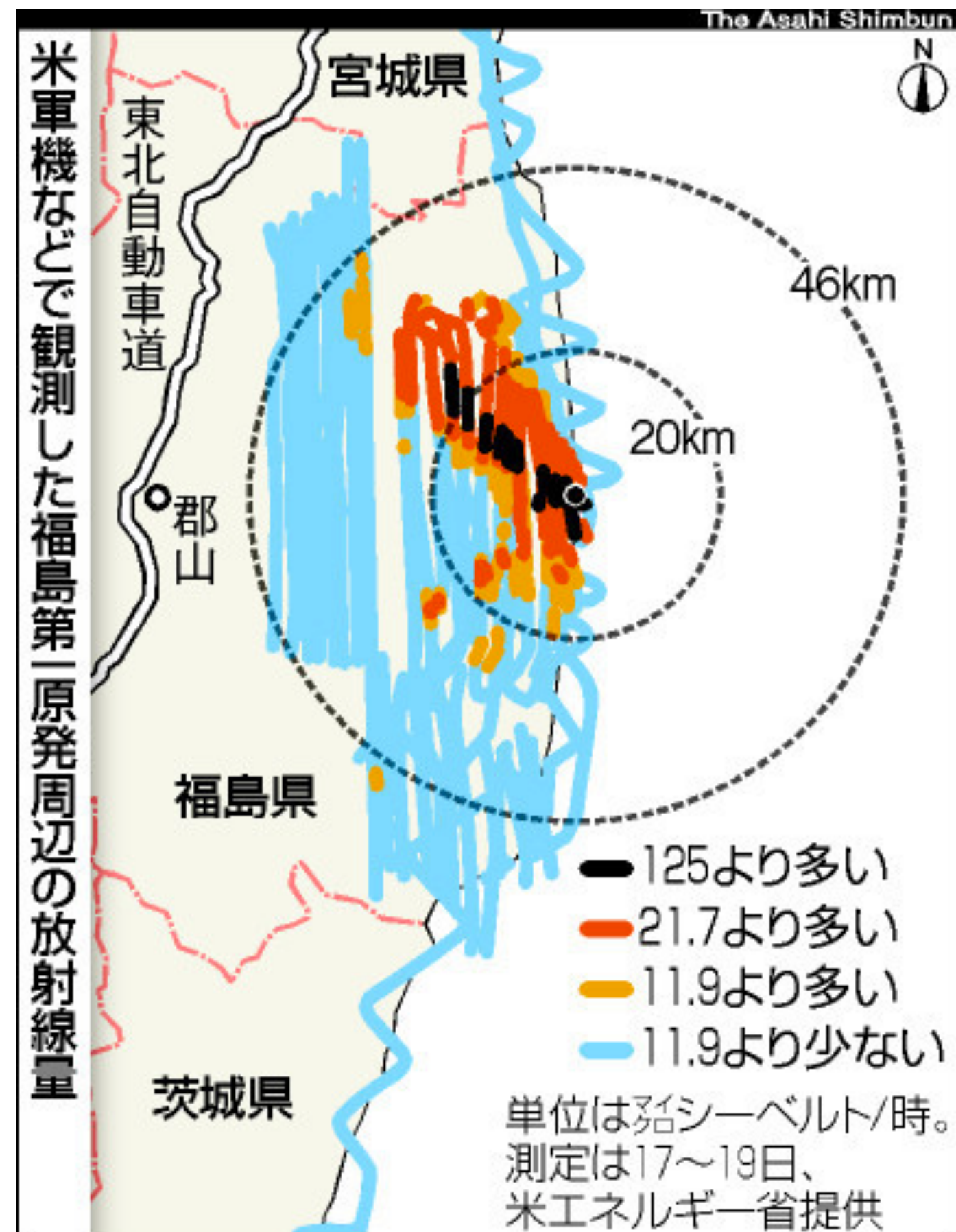


直接処分だと廃棄物保存は10万年，軽水炉サイクルができれば8000年

<http://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/kakucycle.html>

<http://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/monju.html>

東日本大震災 2011/3/11 福島第一原子力発電所溶融



震災 1 週間後の上空での放射線量(単位は μSv)
[朝日新聞 2011 年 3 月 24 日].

2011 年 7 月 21 日時点 [NHK ニュース]

被災地の女川原発 再稼働（すぐにトラブルで臨界前に停止）

時刻
時刻

女川原発と周辺の避難道路

東日本大震災では…

主な津波浸水想定エリア

全国の原発の状況

いっから
わかる。

再稼働している原発
全国は状況は？

西日本で6原発12基。女川は福島第一と同じ型の炉

時刻
時刻

女川原発と周辺の避難道路

東日本大震災では…

主な津波浸水想定エリア

全国の原発の状況

いっから
わかる。

再稼働している原発
全国は状況は？

西日本で6原発12基。女川は福島第一と同じ型の炉

時刻
時刻

女川原発と周辺の避難道路

東日本大震災では…

主な津波浸水想定エリア

全国の原発の状況

いっから
わかる。

再稼働している原発
全国は状況は？

西日本で6原発12基。女川は福島第一と同じ型の炉

1 14版△ 2024年(令和6年)10月30日(水)

被災の女川2号機再稼働

半島に立地 避難計画に懸念

東北電力は29日、2011年の東日本大震災で被災した女川原発(宮城県女川町、石巻市)2号機(出力82・5万kw)を再稼働させた。震災の被災地の原発、東京電力福島第一原発事故を起こした同じ沸騰水型炉(BWR)として、いずれも初の再稼働となる。

▼2面II被災地も原発回帰

東北電力は29日、2011年の東日本大震災で被災した女川原発(宮城県女川町、石巻市)2号機(出力82・5万kw)を再稼働させた。震災の被災地の原発、東京電力福島第一原発事故を起こした同じ沸騰水型炉(BWR)として、いずれも初の再稼働となる。

東北電力は29日午後7時、核分裂を抑える制御棒を引き抜き、2号機を起動させた。核分裂反応が継続する「臨界」を確認し、11月7日にも発電を始め、12月ごろに営業運転を再開する計画だ。東北電力は13年、2号機の再稼働に向けた審査を原子力規制委員会に申請。規制委は20年に「適合」と判断し、村井嘉浩知事が再稼働への「同意」を表明した。東北電力は5700億円を投じ、海抜29mの防潮堤の整備などを行った。

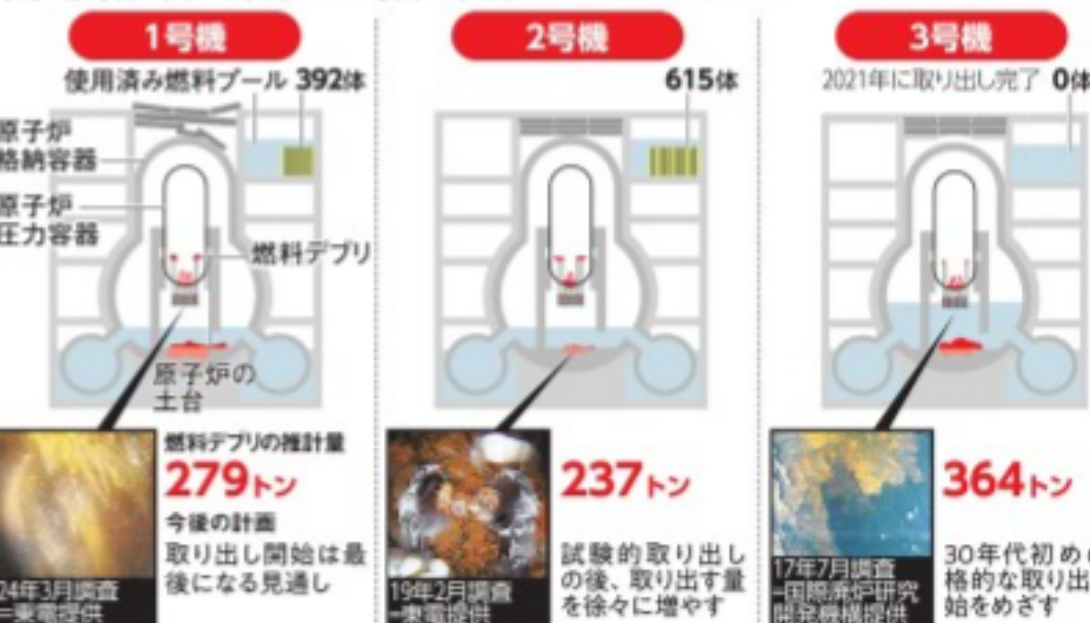
再稼働した女川原発2号機(手前左の建物)は29日、宮城県女川町、本社へから、小林正明撮影

再稼働した女川原発2号機(手前左の建物)は29日、宮城県女川町、本社へから、小林正明撮影

福島第一原発 溶け落ちた核燃料問題

33 社会・総合 14 版

東京電力福島第一原発1～3号機の状況 東京電力の資料などから



加えて、次の「一手」
となる取り出し方法はま
だ定まっていなかった。

機能性表示食品で含有量不足

消費者庁は7日、機能性表示食品の買
上げ調査（2023年度）の結果を公表した。
4商品のうち2商品の機能性表示と成分の量
が、消費者庁に届け出た資料に記載されて
いた含有量より少なかったという。消費者
庁の指摘を受けた2業者はこれらの商品の
販売を中止した。2業者の名前や商品名は
公表していない。

小林製菓（大阪市）の機能性表示食品に
る健康被害問題が明らかになり、消費者
庁は買い上げ調査を強化する方針。
今月1日時点の機能性表示食品の届け出
は6685件（撤回分を除く）。

衆院選期間 危険物約30件

警察庁の藤本康浩長官は7日の定例の記
事会で、今回の衆院選期間中に施設会場

2024年(令和6年)11月8日(金)

2024年(令和6年)11月8日(金)

第3種郵便物認可

廃炉へ ひとつまみの一歩

最難関 デブリ遠隔取り出し

3基の原子炉がメルトダウン（炉心溶融）を起
した原発事故から約13年8カ月。東京電力福島第
一原発の廃炉作業で最難関と言われる溶け落ちた
核燃料（燃料デブリ）の取り出しは、2号機でよ
うやく一歩目を踏み出した。しかし、廃炉への道
のりは果てしなく遠い。（福地康太郎）▼1面参照

「放射性物質を外に出
さないように安全を確保
しながら、遠隔操作で作
業ができる。そのひとつ
の証明になる」。東電福
島第一廃炉推進カンパニ
ーの小野明代表は、今回
の試験的な取り出し作業
の意義をこう強調する。

東電は今回、原子炉格
納容器の外側に、取り出
し装置を収納する「隔離
箱」を設置。放射性物質
が周囲に漏れるのを防ぎ
ながら、装置を遠隔で操
作し、格納容器の底にあ
る3号機以下の燃料デブリ
を取り出した。

こうした対策は、今後
の燃料デブリ取り出しで
も重要になる。

1979年に事故を起
こした米スリーマイル島
（TMI）原発2号機
は、圧力容器に水をため
た状態で燃料デブリの取
り出しができた。水は放
射線を遮り、放射性物質
の飛散も抑えられる。

一方、福島第一原発1
～3号機は損傷が激し

残る880トン 先行き不透明

政府と東電は、今回の
試験的な取り出しを「最
初の一歩」と位置づけ、
今後に弾みをつけたい考
えだ。だが、この先もそ
う簡単ではない。

福島第一原発1～3号
機にある燃料デブリは、
推計880トンとされる。
東電は、①2号機で試験
的な取り出しをした後、
2020年代後半に別の
手法で段階的に取り出し
量を増やす②30年代初
めに3号機でさらに大規
模な取り出しを開始③そ
の後、1号機に展開する
—という青写真を描
く。

ただ、今回採取した燃
料デブリの量は、全体の
数百分の一程度だ。成分
や構造が「燃料デブリ全
体の特徴を反映するとは
限らない」（更田豊志・
前原子力規制委員長）。

燃料デブリと違って
も、金属製の設備やコン
クリートと混ざったもの
もあれば、核燃料物質の
割合の違いなど多様なも
のがあると考えられてい
る。

ただ、今回の試験的な
取り出し作業では東電の
「下請け任せ」の姿勢も
浮き彫りになった。

取り出し作業を始める
はずだった8月22日朝、
装置の接続順のミスが
発覚。東電社員は事前に
現場を訪れていたが、パ
イプの並び順はチェック
項目に含めておらず、確
認していなかったとい
う。

9月の作業着手後も、
装置のカメラ映像が確認

「下請け任せ」露呈

できるなかった。東電
は、高線量の環境でカメ
ラの電源を切った間に電
気がたまったことが原因
と推定。事前にカメラメ
ーカからこうしたリス
クの情報はなかったとし
て、対応に問題はなかつ
たと説明する。

政府関係者は一連のト
ラブルを振り返り、こう
嘆く。「結局、東電はい
つも下請け任せ。東電が
もっと関わりを強めない
といけない」

最初の経験の重要性は非
常に大きい。まずは第一
歩を踏み出すことができ
た」と話す。

2011年3月11日第3期

2011年3月11日第3期

成分分析し廃炉工程検討

福島第一

デブリ 初の取り出し

東京電力は7日、福島第一原発2号機の溶け落
ちた核燃料（燃料デブリ）の試験的な取り出しを
完了したと発表した。燃料デブリを取り出したの
は、2011年の原発事故後初めて。成分や構造
を分析し、今後の取り出しや保管方法の検討に生
かすという。▼7面「廃炉費膨張」、14面「社説」、
33面「果てしない道のり」

福島第一原発は、東日
本大震災による津波で電
源を失い、原子炉を冷や
せなくなった。1～3号
機は、核燃料やまわりを
覆う金属が溶け落ちた。
これが冷えて固まった燃
料デブリが推計約880
トンある。非常に強い放射
線を出し、人が近づけ
ず、詳しい成分や硬さは
わかっていない。

東電によると、今回採
取した燃料デブリの大き
さは5センチ以下、重さは3
キログラム以下とみられる。この
日は、原子炉格納容器の
外側に設けた「隔離箱」
から燃料デブリが入った
容器を出し、パケツ型の
容器に収めた。その後、
重さや放射線量を測るた
めに原子炉建屋内の専用
設備に移したという。

取り出しは、廃炉の最
難関の作業とされる。政
府や東電は2051年ま
での廃炉完了を掲げる

が、課題は山積みだ。当
初、試験的な取り出しは
21年に始める方針だっ
た。しかし、ロボットア
ームの開発が難航するな
どして、3回延期。過去
の調査で実績のある「釣
りさお式装置」を使うこ
とになった。8月22日、



福島第一原発 溶け落ちた核燃料問題

7 オピニオン 13 版

享月 日 歳年 隔月

2024年(令和6年)11月4日(月)

第3種郵便物認可

記者解説 Commentary

福島第一 霧中の廃炉



今年9月にあった「1F地域塾」には地元の住民や専門家、東京電力の社員、原子力規制庁の職員らが参加。福島第一原発の廃炉の将来像をテーマに対話した＝福島県広野町

政府と東電は51年までの廃炉完了を掲げている。11年12月の工程表で示したものだ。

この構想の最初のステップが今年9月に始まった。東電は2号機の原子炉格納容器の側面にある貫通口から取り出し装置を挿入した。カメラの不具合で作業は1カ月以上中断したが10月28日に再開。燃料デブリを装置でつまみ、今月2日に設置ごと格納容器の外側の設備に入れた。線量が基準を下回り容器に取めれば初の取り出し成功となるが、これから続く道のりは深い霧に覆われている。

東電の構想では、まずは2号機で試験的に3％以下を取り出し、2020年代後半に別の手法で段階的に取り出す量を増やす。それから、30年代初めに3号機で大規模な取り出しを始め、その後、1号機に展開する。

「燃料デブリが原子炉内のどこにとどくらない分布するかが正確にはわからない。しかも、高濃縮の中で遠隔で作業しなければいけない。それが取り出しの難しさだ」

原子力規制委員会の前委員長、更田豊志氏は、燃料デブリの取り出しについて、こう解説する。東京電力福島第一原発の1～3号機には推計880トンの燃料デブリがある。3基とも圧力容器の底を突き破り、外側の格納容器にまで広がっている。放っておけば、将来、建屋の老朽化などで放射性物質が漏れ出す恐れがある。政府と東電は、全て取り出して安全な状態で管理しようとしている。

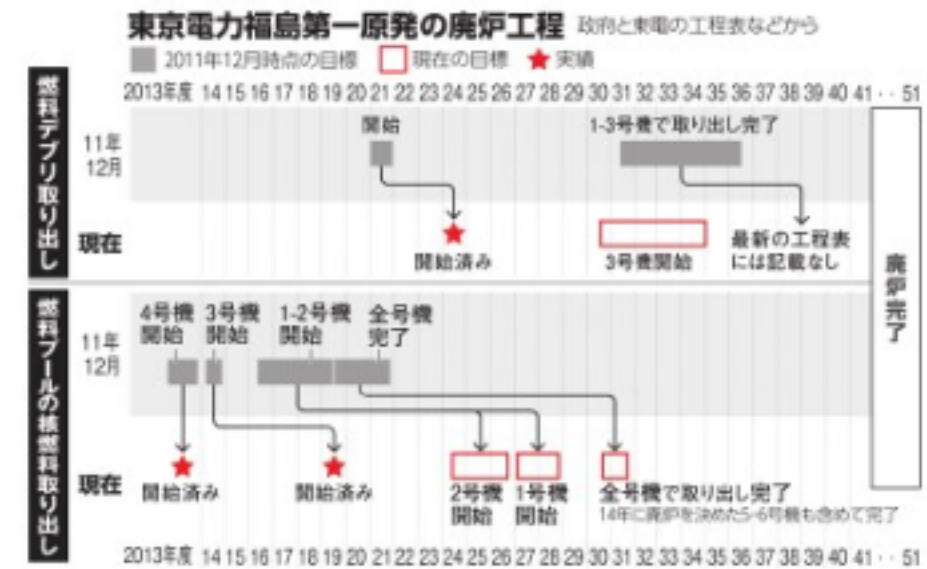
処理水問題の反省も踏まえ、地元と丁寧な対話を重ねて現実的な工程を探るべきだ

「溶け落ちた核燃料(燃料デブリ)を取り出すには100年超かかるとの試算もある」

福島第一原発の廃炉は、政府と東京電力が掲げる2051年までの完了は非現実的だ

デブリ回収難航 根拠なき「2051年完了」

東京電力福島第一原発1～3号機の状況 東京電力の資料などから



当時の想定では21年までに燃料デブリの取り出しに着手し、10～15年程度で1～3号機すべての取り出しを終える計画だった。しかし、開始は3年遅れた。主な原因は、関連事業を含めて78億円の国費を投じて開発したロボットアームの精度不足だ。ロボットアームはいまも試験中で、今回の取り出しには簡易的な「釣りさお式装置」を使った。

原子炉建屋のプールにある核燃料の取り出しも大幅に遅れている

科学みらい部 福地慶太郎

そもそも、なぜ51年までの廃炉完了を目標にしたのか。政府関係者は技術的な根拠はまったくなかったと明かす。「事故直後は廃炉が進まないと原発周辺の新築区域の住民は帰還できない

る。当初の計画では、1～4号機に計3108体ある核燃料を21年までに取り出すとしていた。だが、ガレキの撤去など作業環境の整備に時間がかかり、21年までに取り出せたのは3、4号機だけ。1、2号機はいまも始まっていない。最新の工程表では、当初から10年遅れの31年までにすべての取り出し完了をめざしている。

重要作業の遅れが続いても、政府と東電は51年までの廃炉完了という旗はあきらめていない。東電福島第一原発推進カンパニーの小野明代表は「51年までの完了を目標に仕事を積み上げていくことが大事だ」と強調する。

一方、福島第一原発は圧力容器の損傷が激しく、水をはることができない。外側の格納容器まで広範囲に燃料デブリが広がると、TMI原発よりも取り出しの難易度が格段に高いとみられている。

「溶け落ちた核燃料(燃料デブリ)を取り出すには100年超かかるとの試算もある」

福島第一原発の廃炉は、政府と東京電力が掲げる2051年までの完了は非現実的だ

地元と対話で探る将来像

政府と東京電力は福島第一原発の廃炉完了の姿を明確にしていないう求める意見もある。一部は、施設が残っても完了とみなすのか。ゴールはあいまいだ。

福島県は燃料デブリを含む放射性廃棄物をすべて県外で最終処分するよう、繰り返し求めている。だが、処分地探しなどの議論は進んでいない。

原発事故を後世に継承できるような、一部を「遺構」として残すよう求める意見もある。廃炉の費用は東電が出すが、電気代の一部として国民の負担になる。政府は廃炉に必要な技術開発への支援などとして、毎年1000億円以上を企業などに補助している。

最新の見積もりでは廃炉費用は8兆円とされるが、燃料デブリの最終処分にかかる費用などは含んでいない。さらに膨らむのは確実で、廃炉の将来像は国民全体に関わる問題だ。

日本原子力学会の分科会が示すように、将来像や時間のかけ方で発生する廃棄物の量は変わる。技術的な検討だけでは解決できず、社会的な合意形成が重要となる。

昨年8月に始まった処理水の海洋放出では、政府は専門家会議で技術やコスト面からの議論を重視した。

放出の方向性を固めた後に、地元や漁業者らへ説明して理解を得ようとした。だが、結論ありきの姿勢に幅広い納得は得られず、強い反発を招くことになった。

福島では地元の住民や専門家、東電社員らが対話し、廃炉の将来像を探る「1F地域塾」が22年から続く。廃炉作業について助言する「原子力損害賠償・廃炉等支援機構」も今年6月、原発事故の避難指示が出るなどした13市町村で住民の声を直接聞く場を設けた。

政府と東電はこうした取り組みを参考に、丁寧な対話を重ね現実的な工程を探るべきだ。

早稲田大学の松岡俊二教授(環境経済・政策学)は22年、福島第一原発の燃料デブリの全量取り出しにかかる期間を試算し、論文を発表した。

TMI原発では約132トンの取り出しに4年3カ月かかった。連休2日で作業が年間2600日とすると、1日の取り出し量は120トンのTMI原発より作業が難しい福島第一原発の取り出し量は、1日20トンの50％と仮定し、その場合、全量取り出しにかかる期間はそれぞれ170年、68年という結果だった。

松岡さんは「3％以下の取り出しに難航している現状を踏まれば、170年でも相当楽観的な数字だ」という。

廃炉作業で出る放射性廃棄物は、事故を起こしていない原発600基分になるとの見方もある。

技術コンサルタントの河村秀紀さんらは、福島第一原発の図面などの公開情報をもとに試算した。敷地の放射線量が下がり、自由に出入りできる状態にする場合の放射性廃棄物は約780万トンになるという。

日本原子力学会の分科会はこの試算を参考に、汚染された地盤などを残して廃棄管理とする「部分撤去」のシナリオについて検討した。廃棄物量を試算すると約440万トンとなる。放射性物質が自然に減るのを待つために数十年間の期間を挟めば、さらに約110万トンまで減らせるといふ。

「溶け落ちた核燃料(燃料デブリ)を取り出すには100年超かかるとの試算もある」

福島第一原発の廃炉は、政府と東京電力が掲げる2051年までの完了は非現実的だ

福島第一原発の廃炉は、政府と東京電力が掲げる2051年までの完了は非現実的だ

福島第一原発の廃炉は、政府と東京電力が掲げる2051年までの完了は非現実的だ

福島第一原発の廃炉は、政府と東京電力が掲げる2051年までの完了は非現実的だ

福島第一原発の廃炉は、政府と東京電力が掲げる2051年までの完了は非現実的だ

福島第一原発の廃炉は、政府と東京電力が掲げる2051年までの完了は非現実的だ

福島第一原発の廃炉は、政府と東京電力が掲げる2051年までの完了は非現実的だ

福島第一原発の廃炉は、政府と東京電力が掲げる2051年までの完了は非現実的だ

福島第一原発の廃炉は、政府と東京電力が掲げる2051年までの完了は非現実的だ

福島第一原発の廃炉は、政府と東京電力が掲げる2051年までの完了は非現実的だ

福島第一原発の廃炉は、政府と東京電力が掲げる2051年までの完了は非現実的だ

福島第一原発の廃炉は、政府と東京電力が掲げる2051年までの完了は非現実的だ

福島第一原発の廃炉は、政府と東京電力が掲げる2051年までの完了は非現実的だ

福島第一原発の廃炉は、政府と東京電力が掲げる2051年までの完了は非現実的だ

福島第一原発の廃炉は、政府と東京電力が掲げる2051年までの完了は非現実的だ

福島第一原発の廃炉は、政府と東京電力が掲げる2051年までの完了は非現実的だ

福島第一原発の廃炉は、政府と東京電力が掲げる2051年までの完了は非現実的だ

福島第一原発の廃炉は、政府と東京電力が掲げる2051年までの完了は非現実的だ

福島第一原発の廃炉は、政府と東京電力が掲げる2051年までの完了は非現実的だ

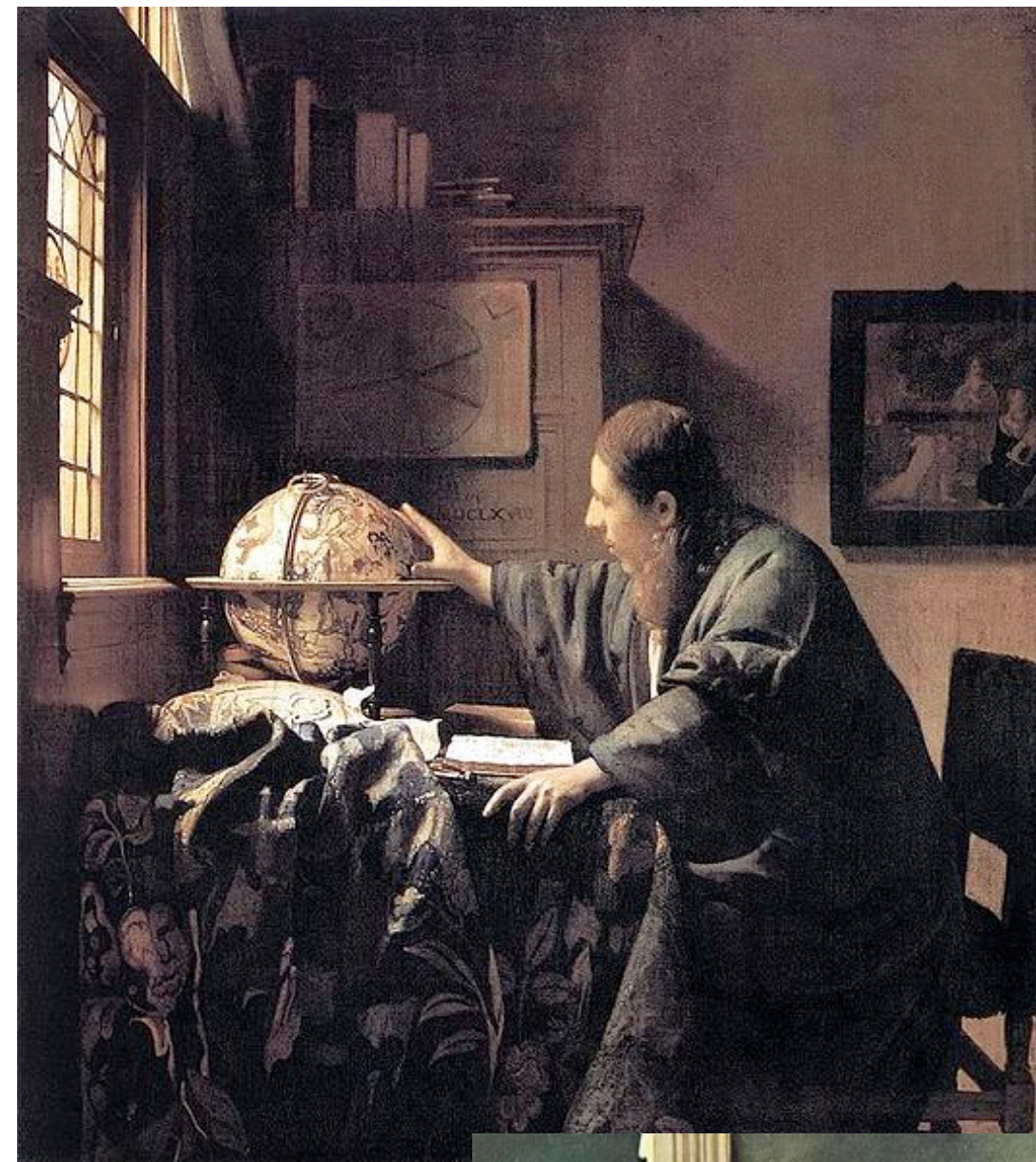
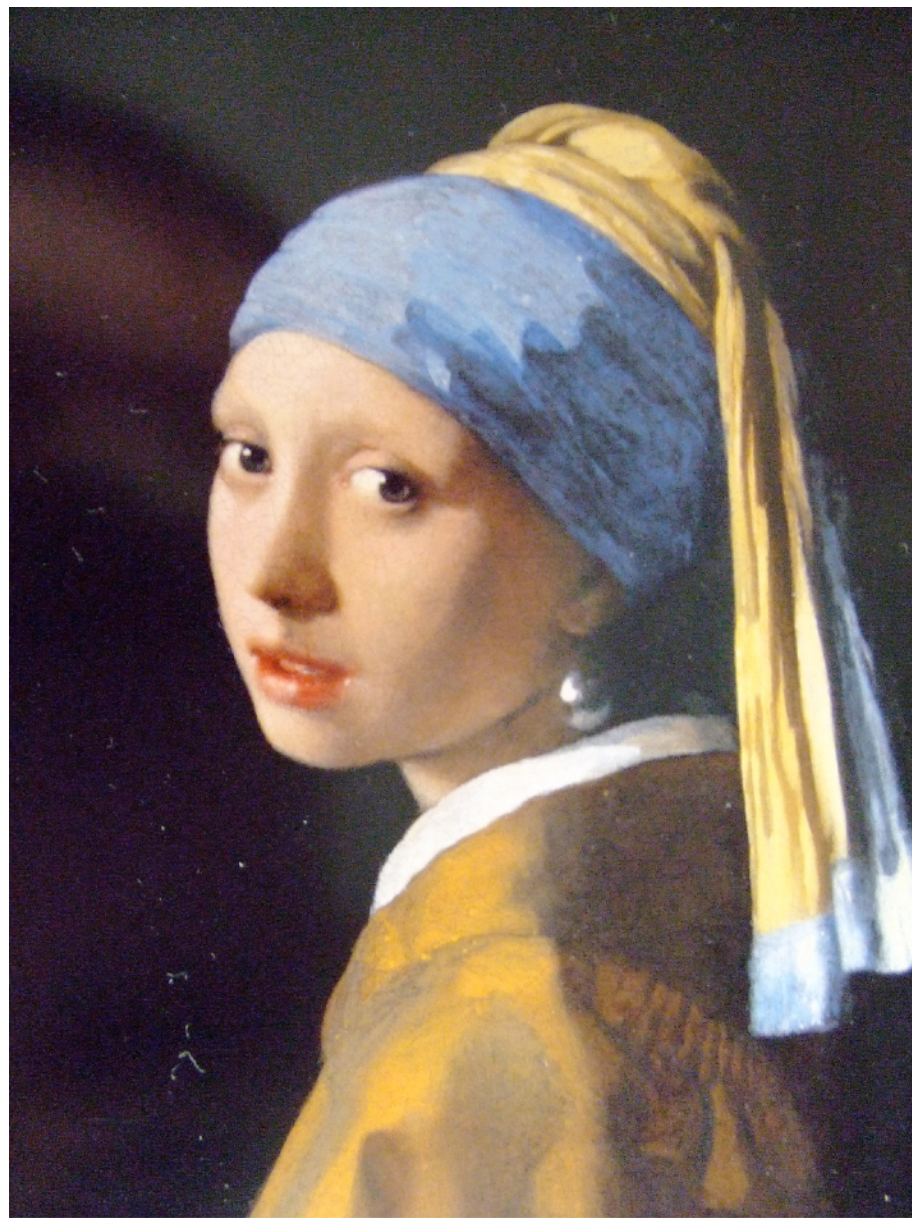
オッペンハイマー OPPENHEIMER



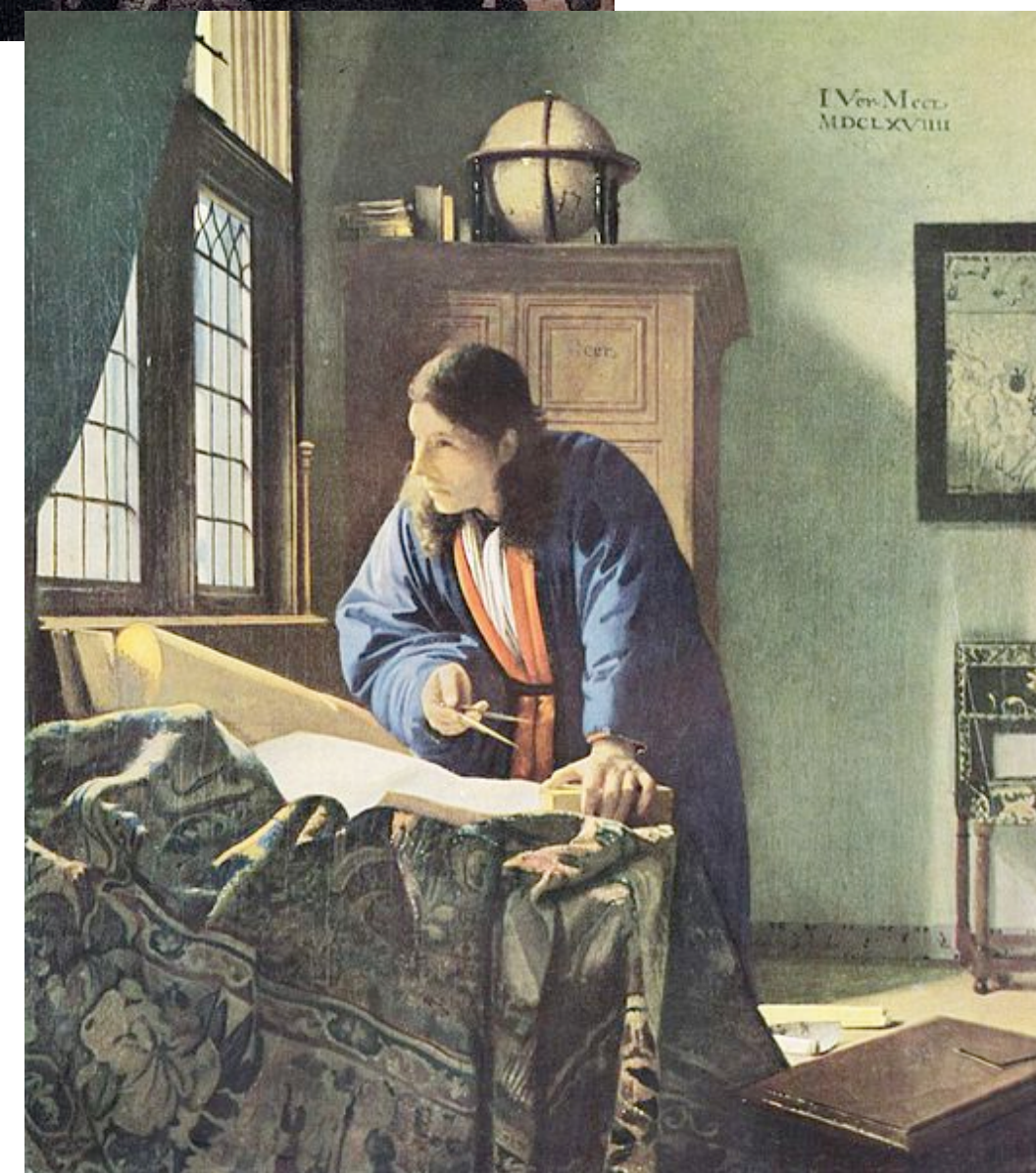
オッペンハイマー 予告編 (2024) 1:30'

<https://www.youtube.com/watch?v=Uoctuzt2IfU>

ヨハネス・フェルメール Johannes Vermeer (1632–75)



真珠の耳飾りの女 (1665頃)
真珠の首飾りの女 (1664頃)
牛乳を注ぐ女 (1658頃)
天文学者 (1668)
地理学者 (1669)



ヨハネス・フェルメール Johannes Vermeer (1632–75)

デルフトの眺望(1660頃)
小路 (1657頃)

Delft,
The Netherlands



2018年9月撮影

フェルメールの贋作事件(1947)

2.6.1 年代測定と贋作鑑定

放射性原子核の崩壊現象を利用すると年代測定が可能になる(例題 2.3, コラム 2). 次の例題は, 寡作だったオランダの画家 Vermeer (フェルメール) の贋作問題として実際にあった話をもとにしている.

贋作鑑定

【Level 1】

放射性元素の崩壊

⇒ 例題 2.3

炭素を使う年代測定法

⇒ コラム 2

👤 Johannes Vermeer
フェルメール (1632–75)
オランダの画家. 現存する作品は 30 数点と少ない.

鉛 Pb には同位体が多数あり, 安定なものは ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb .

例題 2.31 1947 年, Vermeer の絵画として持ち込まれた絵が贋作かどうか鑑定することになった. 顔料に含まれている鉛 (^{210}Pb) の含有量で年代を判定することになった.

- ほとんどの絵に使われる顔料は, 半減期 22 年の放射性物質である ^{210}Pb を含む. ^{210}Pb は, ラジウム (^{226}Ra) が半減期 1600 年で崩壊してできる.
- ^{210}Pb に崩壊する ^{226}Ra の総量は, 単位時間ごとに, 崩壊・減少する ^{210}Pb の総量と等しい. すなわち, ^{210}Pb と ^{226}Ra は時間が経つと平衡状態になる.
- 顔料の製造過程では, ラジウムはほとんど除去されるが, 完全には除去されない. 顔料となった ^{210}Pb は崩壊を始めるが, やがて除去されずに残った微量のラジウムと平衡状態に達する.

以上の過程を微分方程式のモデルにすると,

$y(t)$ = 時刻 t における通常の鉛 1g ごとの ^{210}Pb の量

$r(t)$ = 通常の鉛の中における毎分 1g ごとの ^{226}Ra の崩壊数

とし, λ を ^{210}Pb の崩壊定数として, 次の式になる.

$$\frac{dy}{dt} = -\lambda y + r(t)$$

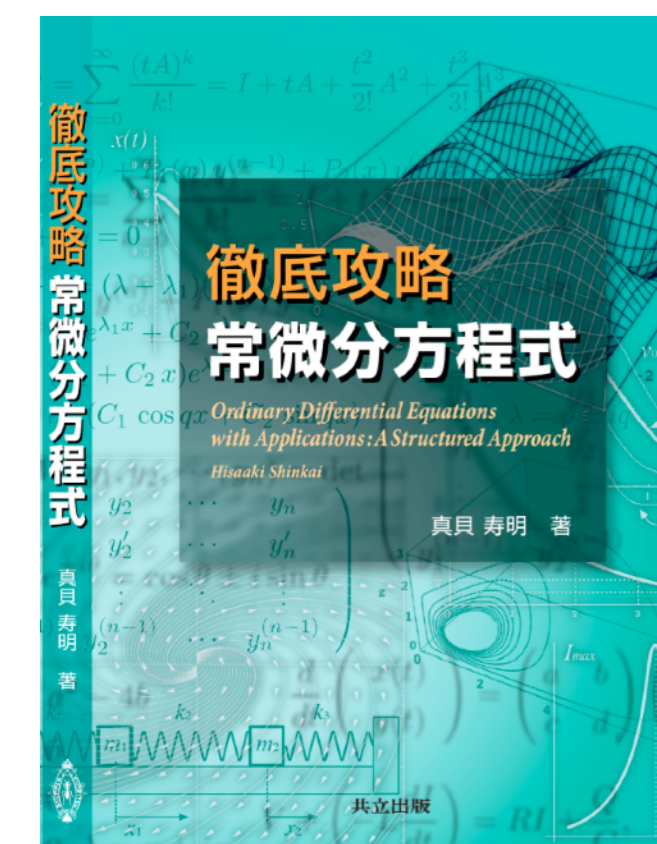
(1) この微分方程式を, $y = \dots$ の積分形にせよ.

コラム 5 (フェルメールの贋作事件)

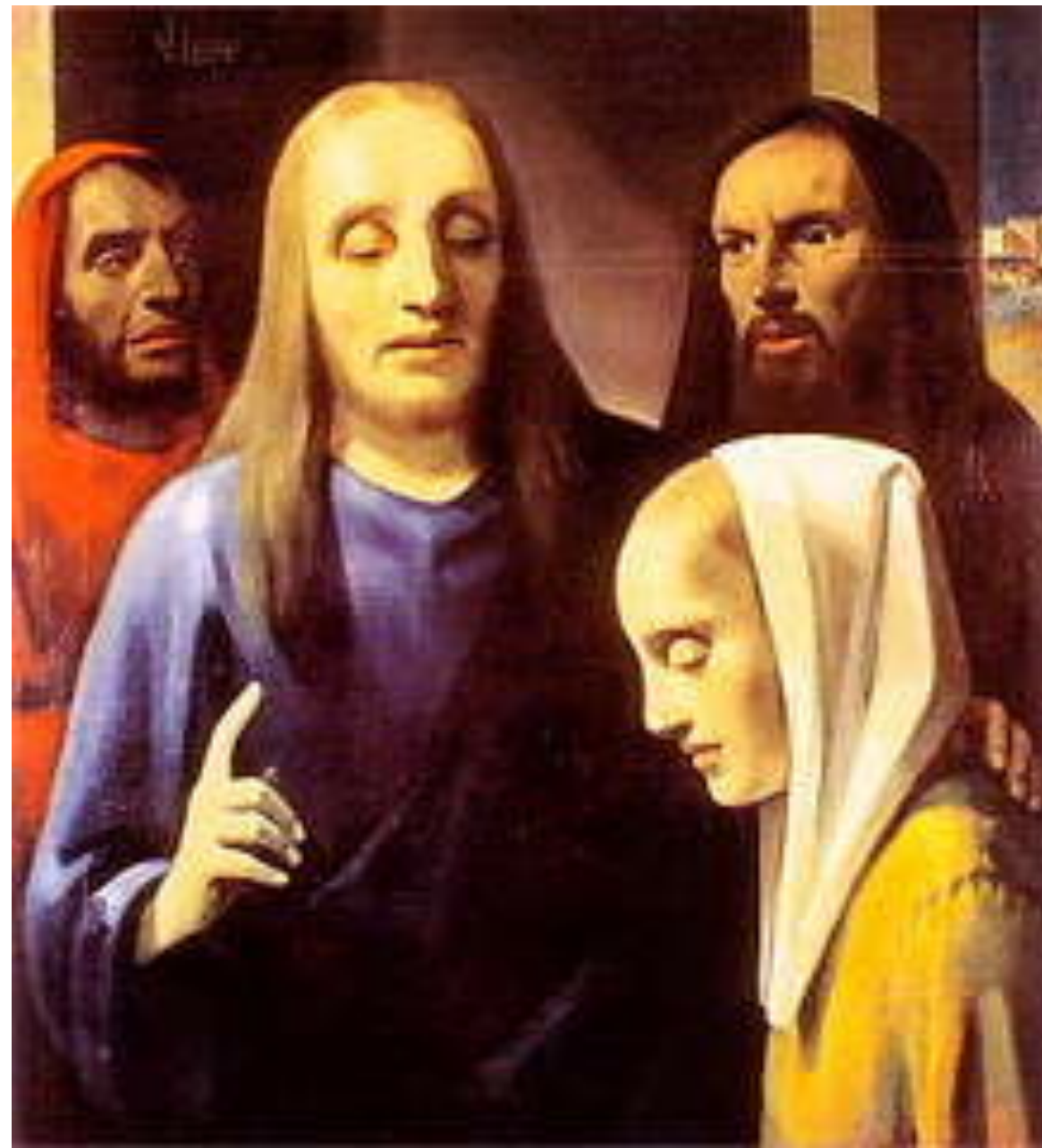
19 世紀, 絵画研究家 Thoré Bürger (トレ・ビュルガー) が Vermeer (フェルメール) の作品として認定した絵画は 70 点以上にのぼる. しかし, これらの作品の多くは, その後の研究によって別人の作であることが明らかになり, 次々と作品リストから取り除かれていった. 20 世紀に入ると, このような動きと逆行するように Vermeer の贋作が現れてくる. 中でも最大のスキャンダルといわれるのが Han van Meegeren (ハン・ファン・メーヘレン) による一連の贋作事件である.

この事件は 1945 年ナチス・ドイツの国家元帥 Hermann W. Göring (ヘルマン・ゲーリング) の妻の居城から Vermeer の贋作『キリストと悔恨の女』が押収されたことに端を発する. 売却経路の追及によって, Meegeren が逮捕された. オランダの至宝を敵国に売り渡した売国奴としてである. ところが, Meegeren はこの作品は自らが描いた贋作であると告白した. そしてさらに多数の Vermeer の贋作を世に送り出しており, その中には『エマオのキリスト』も含まれていると述べた. 『エマオのキリスト』は 1938 年にロッテルダムのボイマンス美術館が購入したものであり, 購入額の 54 万ギルダーはオランダ絵画としては過去最高額であった. 当初 Meegeren の告白が受け入れられなかったため, 彼は法廷で衆人環視の中, 贋作を作ってみせたという. 『エマオのキリスト』は, 現在でもボイマンス美術館の一画に展示されている.

参考 『謎解きフェルメール』(小林頼子・朽木ゆり子著, 新潮社, 2003 年)



フェルメールの贋作事件(1947)



1945年ナチス・ドイツの空軍総司令官ヘルマン・ゲーリングの妻の居城から、フェルメールの作とされた「キリストと悔恨の女」が押収された。

オランダの至宝を敵国に売り渡した売国奴として、売却経路の追求からファン・メーヘレンが逮捕された。

ところが、メーヘレンは、これは「自分が描いた贋作だ」と主張。そして多くの贋作を世に送り出したことを告白した。その中には「エマオのキリスト」も含まれていた。

「エマオのキリスト」は、1938年にロッテルダムの子イマンス美術館が、当時の過去最高額として購入した作品だった。



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。

前回のミニッツペーパーから

【7-3】(次回以降の講義関連)

次の学説で、過半数の宇宙物理学者が信じているものはどれか(複数).

- | | | |
|----|-------------------------------|----------------------|
| 17 | (1) なんでも吐き出すホワイトホールが存在する. | 理論上存在するが, 現実には未観測 |
| 11 | (2) ワームホールを使うと過去へのタイムマシンができる. | 理論はあるが, 仮定が多すぎる |
| 21 | (3) パラレルワールドが存在する. | 理論はあるが, 確率が低すぎる |
| 28 | (4) 宇宙は何度もビッグバンを繰り返す. | 理論はあるが, 証拠はない |
| 10 | (5) 宇宙は11次元時空として誕生した. | 素粒子論研究者は信じている |
| 25 | (6) ブラックホールは蒸発して消える. | ホーキング理論, おそらく正しい |
| 12 | (7) 情報は瞬間移動できる. | 量子論の特徴の1つで, 実験検証された. |

みなさんの願望?
(40名回答)

もし、パラレルワールドが存在したら、そこに手紙を送ったりすることは可能でしょうか? (Orange という漫画の内容です.)

わかりません

一般相対性理論

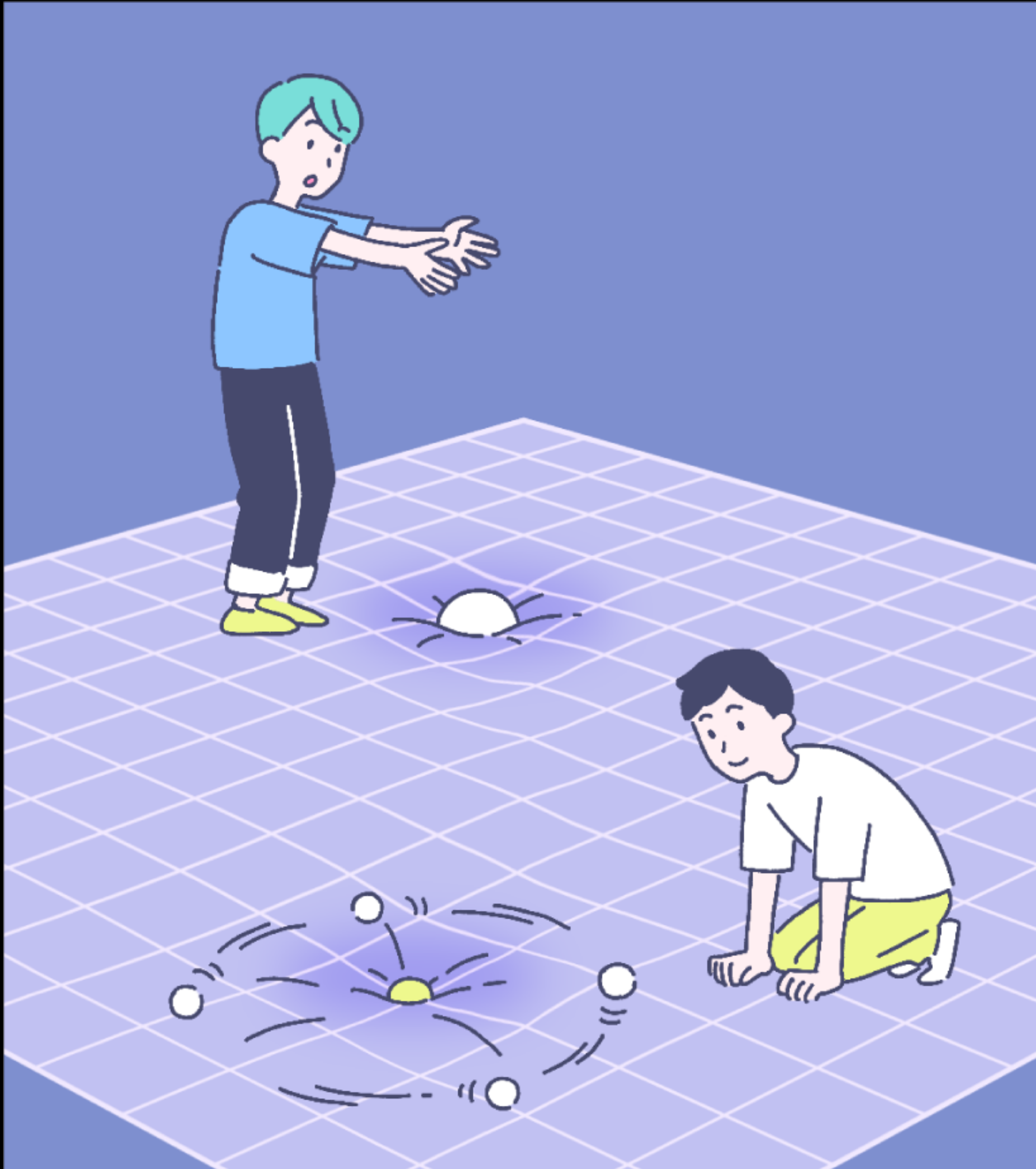
強い重力場での時空の力学
「空間が歪むのが重力の正体である」

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

$$F = ma$$



空間のゆがみが重力の原因だ

光や物体は、まっすぐ進んでいるつもりでも、曲がって進む

万有引力の法則



ニュートン (1642-1727)

万有引力の法則

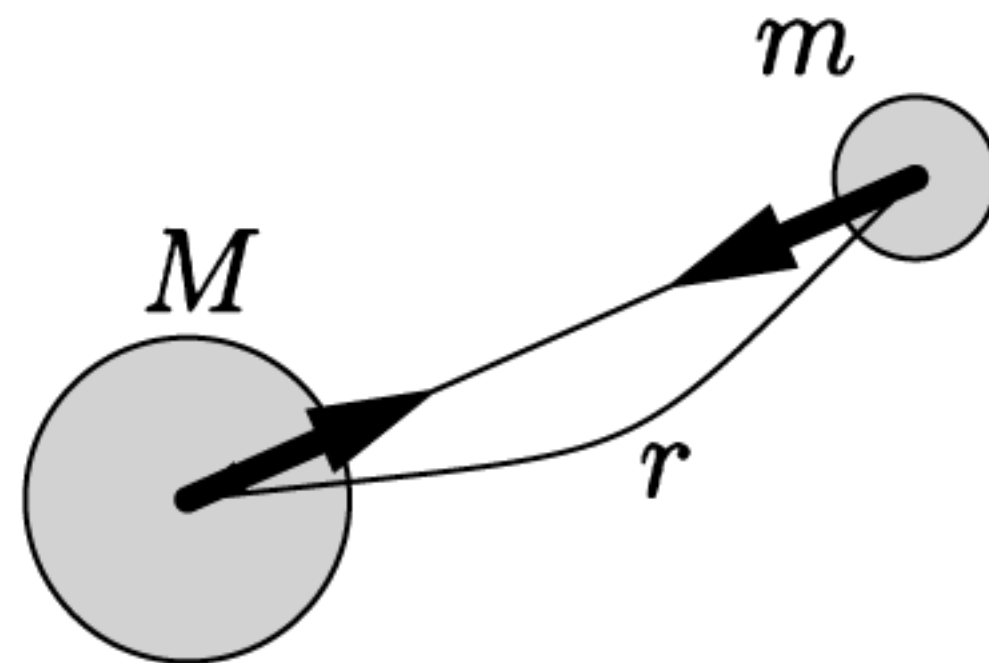
すべてのものは 引力で引き合う

万有引力の法則

質量 m と M の質点が r だけ離れて置かれているとき 両質点にはたらく力 F は 大きさが

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

でつねに引力である G は定数であり 万有引力定数と呼ぶ

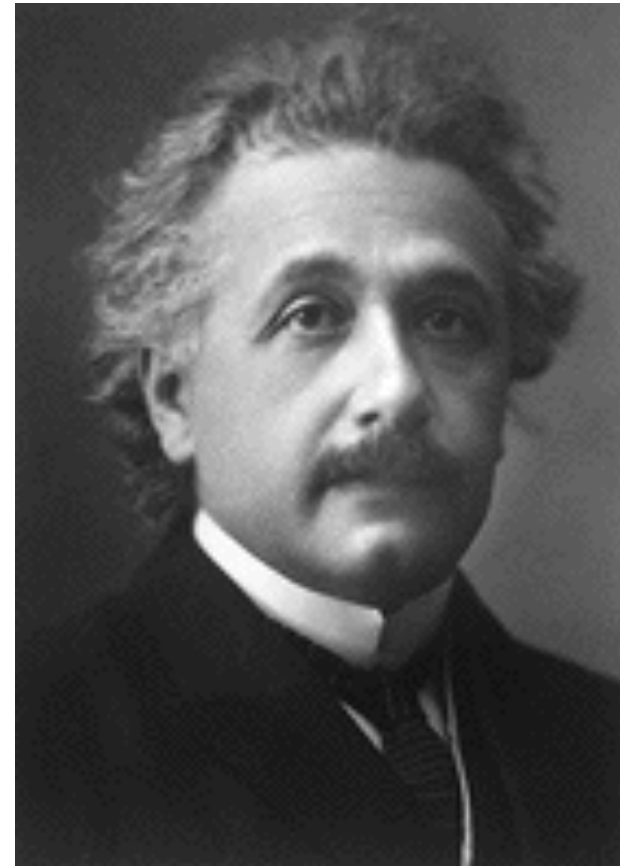


この法則は重力の伝わる速さが無限大であることを想定している. 光速が最大とする相対性理論と矛盾する.



一般相対性理論の出発点

★ 特殊相対性理論は、加速運動する座標系を取り扱えなかった。



加速運動含めた相対性理論をつくらなくては...

次の2つを出発点としよう

一般相対性原理・光速一定の原理

(A) 一般相対性原理：物理法則は、どのような局所慣性系[†]でも同じ形で書かれていなければならない（一般座標変換に対して不変である）。

物理法則はどの座標系でも同じとなるべきだ

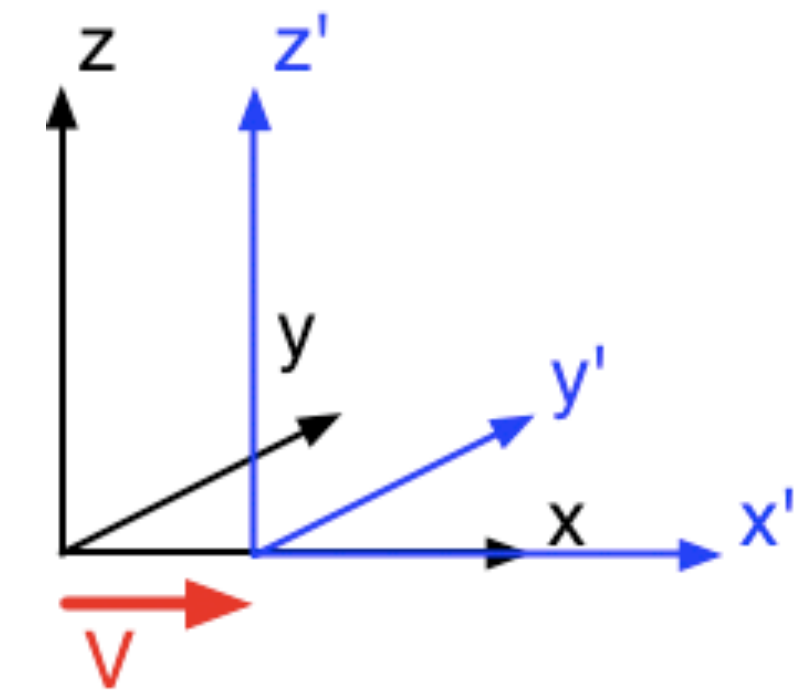
(B) 光速一定の原理：真空中の光の速度は、すべての局所慣性系で等しい。

光速は常に一定である

[†] 慣性の法則が成立する(すなわちふつうの物理法則が成立する)座標系を慣性系という。
「局所」という語は、観測者のいる小さな領域で、の意味。

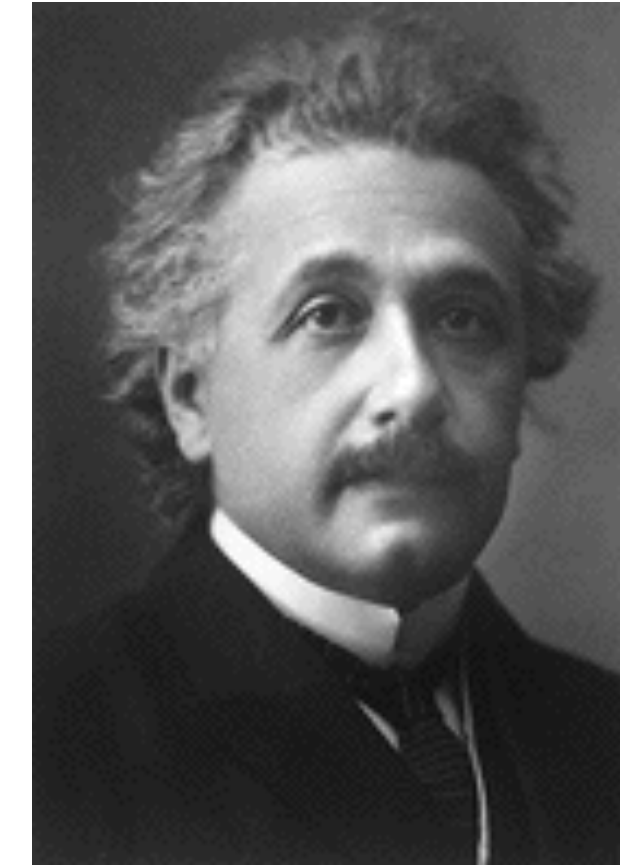
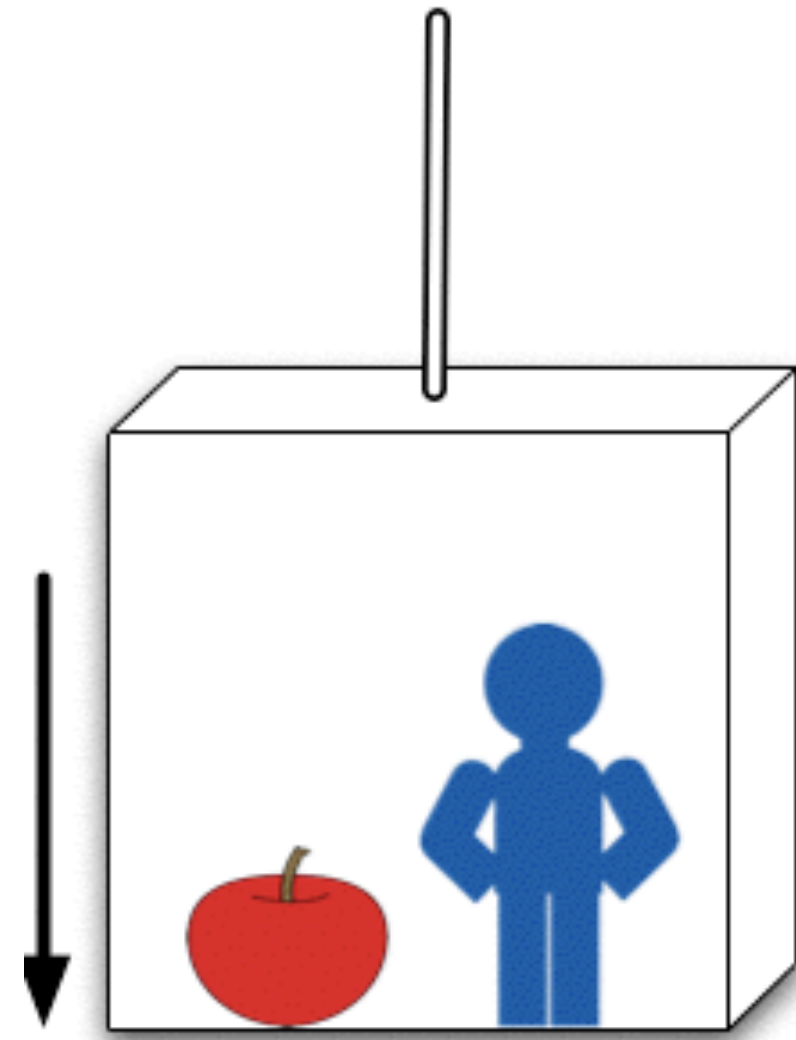
加速度をどう扱おうか？ 慣性力(遠心力)を考えるのは煩わしい...

加速度運動している系では慣性力を考えて運動方程式を立てなければならない...



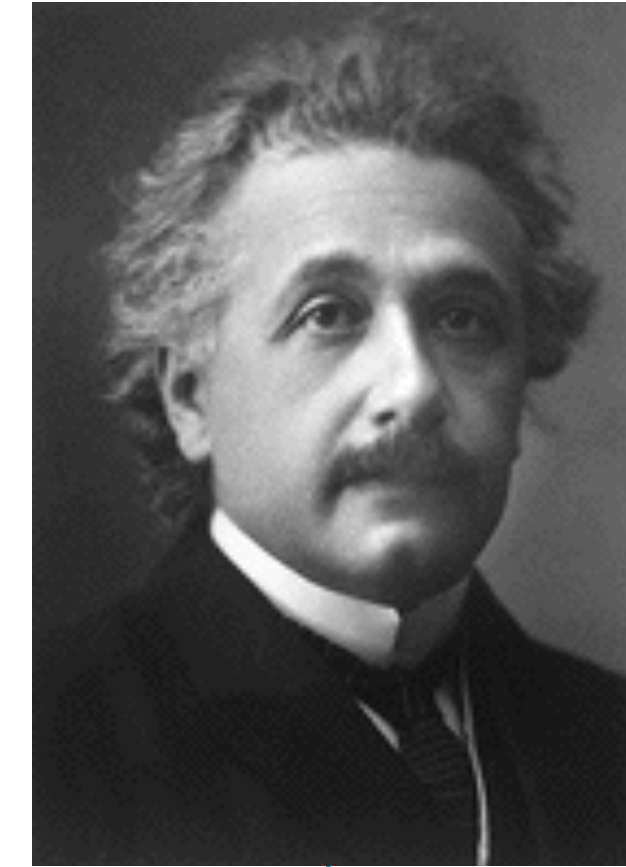
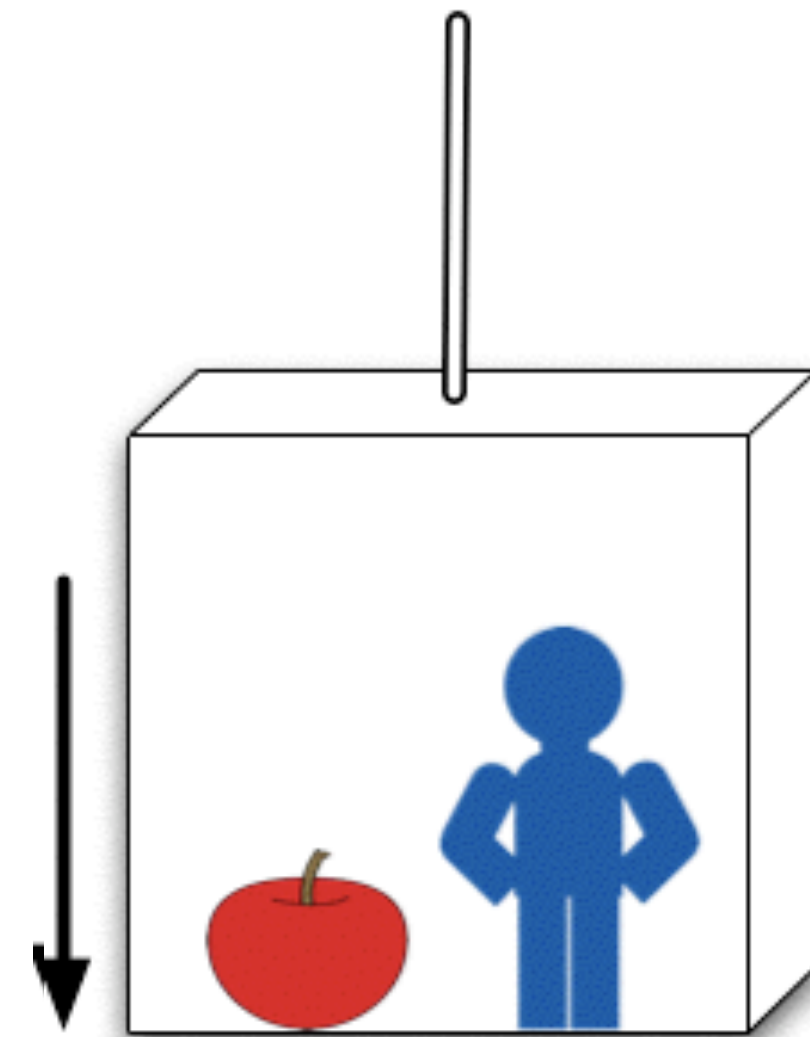
エレベータの思考実験

加速度の正体を考えているうちに、重力加速度の取り扱いをどうするかで悩んでいた。
エレベータのひもが切れたらどうなるだろうか？



エレベータの思考実験

加速度の正体を考えているうちに、重力加速度の取り扱いをどうするかで悩んでいた。
エレベータのひもが切れたらどうなるだろうか？



「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)

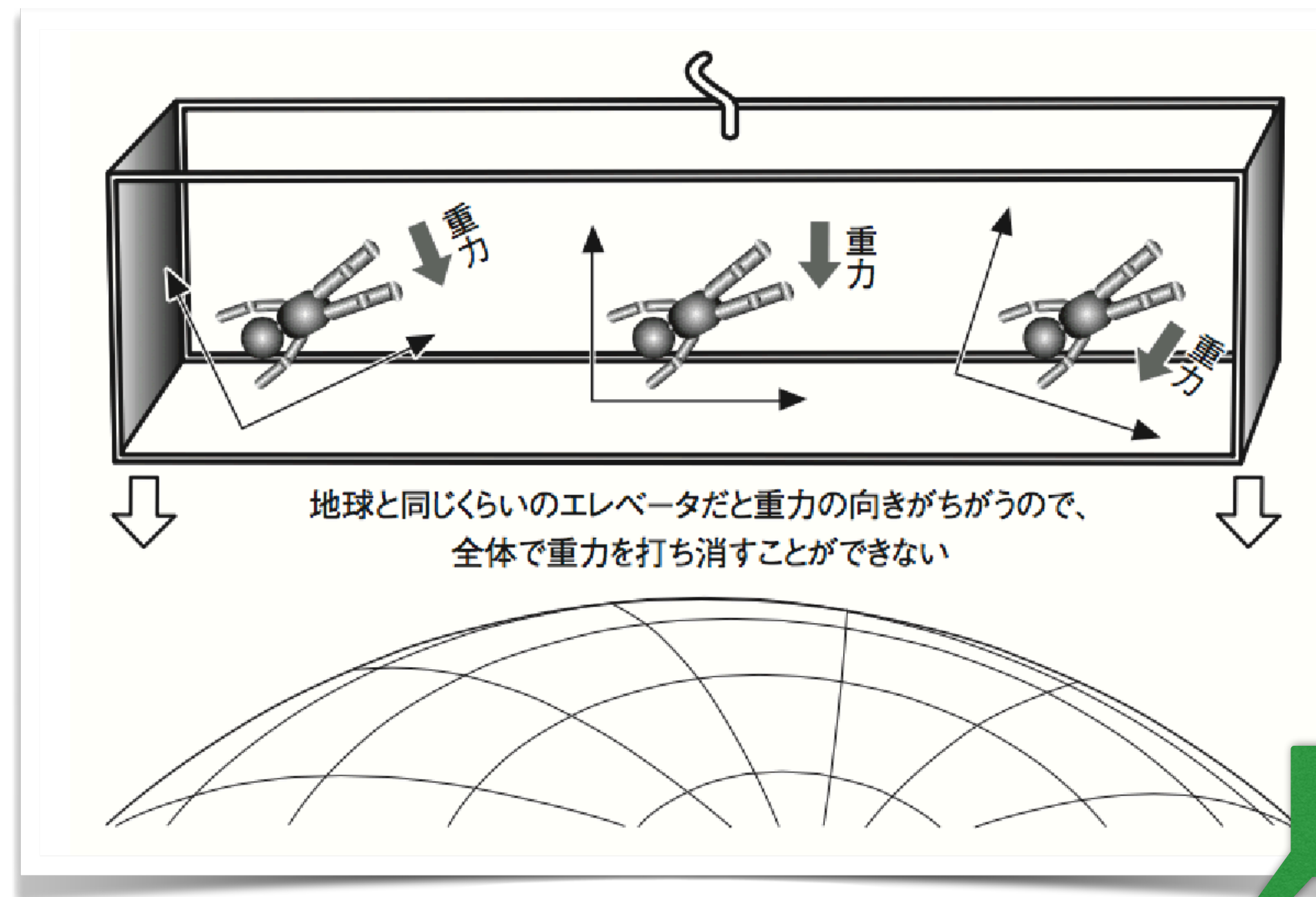
エレベータ内では重力を消すことができるけど、....
エレベータを大きなサイズにすると消すことができない..

人生で最も幸福なひらめき

重力の原因は, 空間のもつ性質だ

「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)



人生で最も幸福なひらめき

= 重力は, **大域的には**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」

曲がった空間とは？

曲がった時空の幾何学＝リーマン幾何学

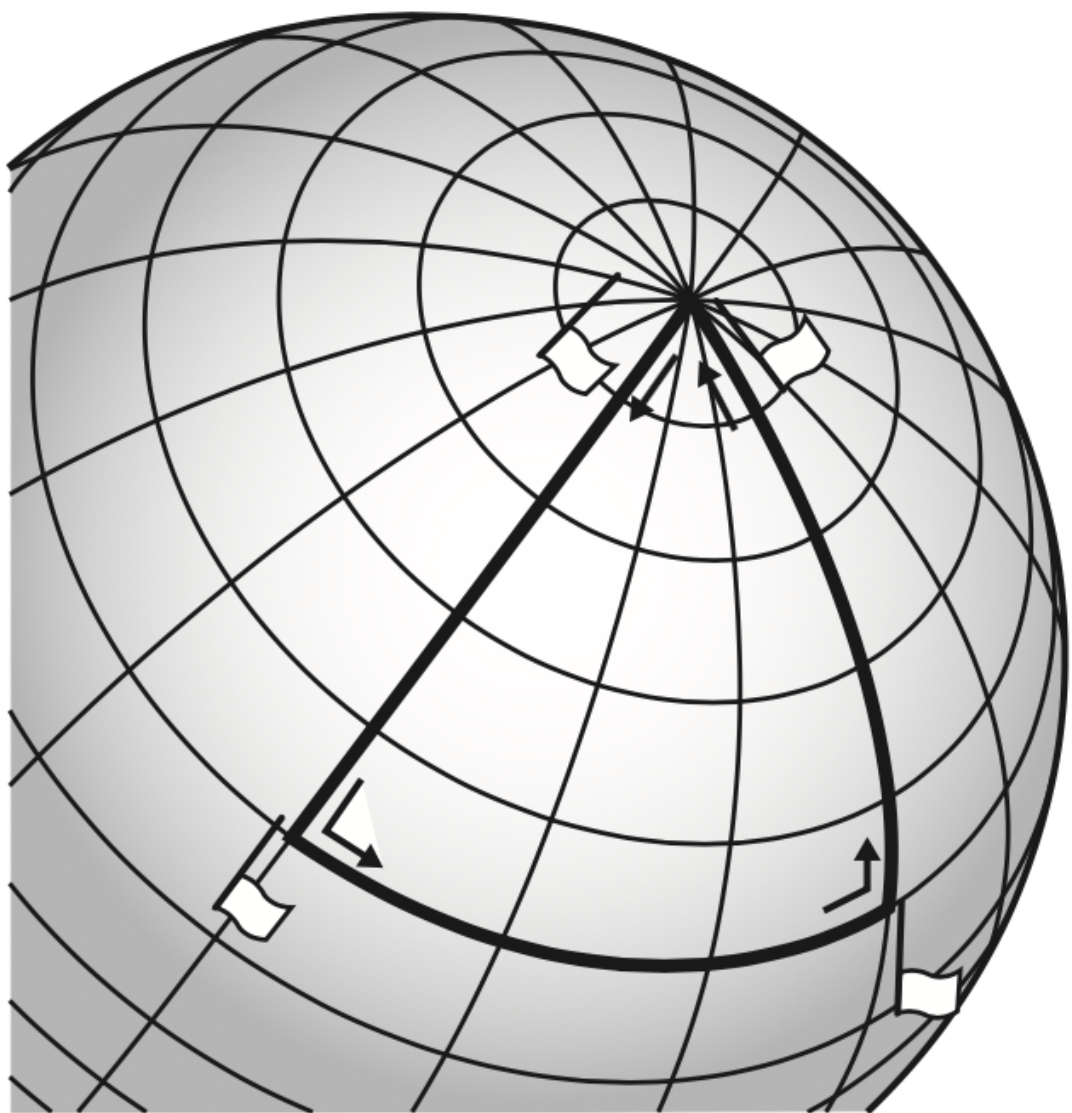


曲がった空間の数学？

4次元距離を一般化した「計量(metric)」

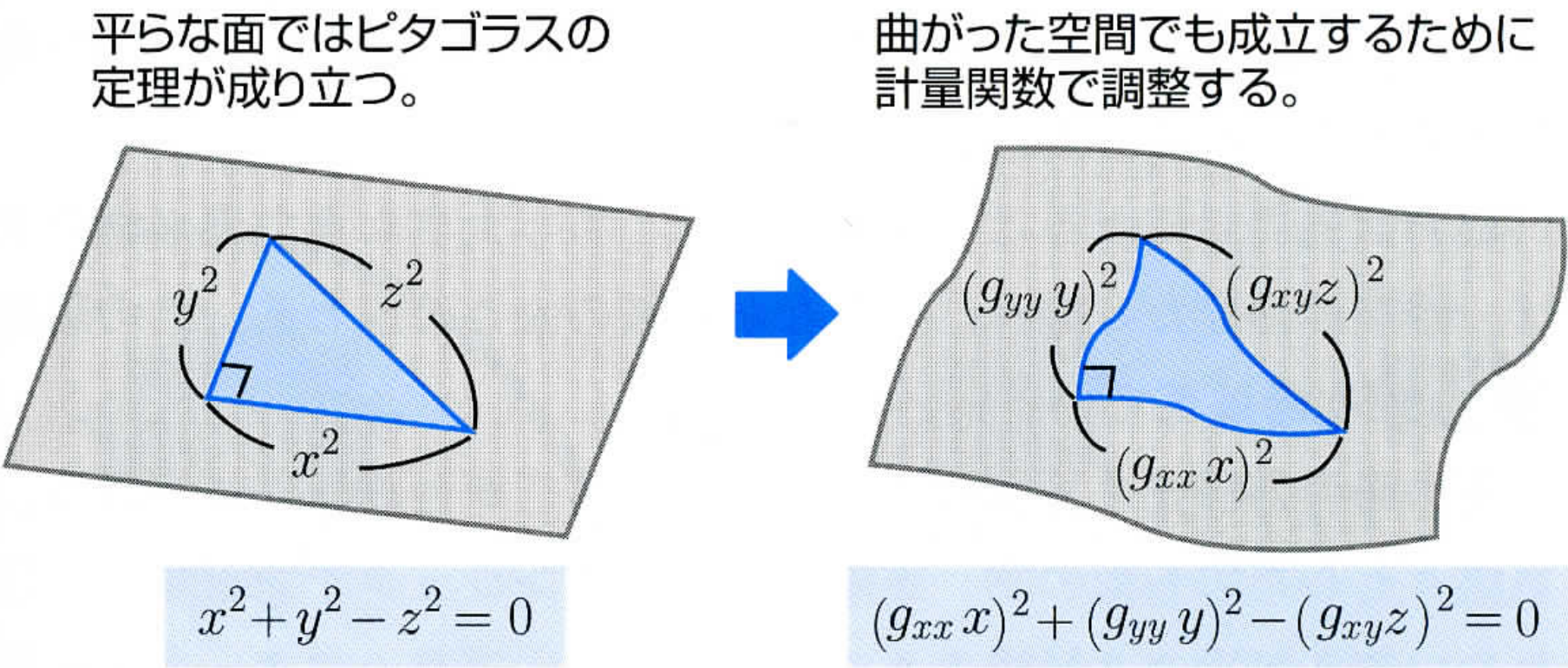
$$ds^2 = \sum_{\mu=0}^3 \sum_{\nu=0}^3 g_{\mu\nu}(x) dx^\mu dx^\nu = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

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



正の曲率（地球表面）

時空の曲がりを表す計量 $g_{\mu\nu}$



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。

平らな時空(flat spacetime)では、

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



リーマン幾何学があるよ
物理学者は深入りしない
ほうがいいよ。

Marcel Grossmann

重力場の方程式(アインシュタイン方程式)



重力の正体は、空間の性質だ

空間のゆがみが
重力の正体だ

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

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

重力場の方程式 (アインシュタイン方程式, 1915 年)

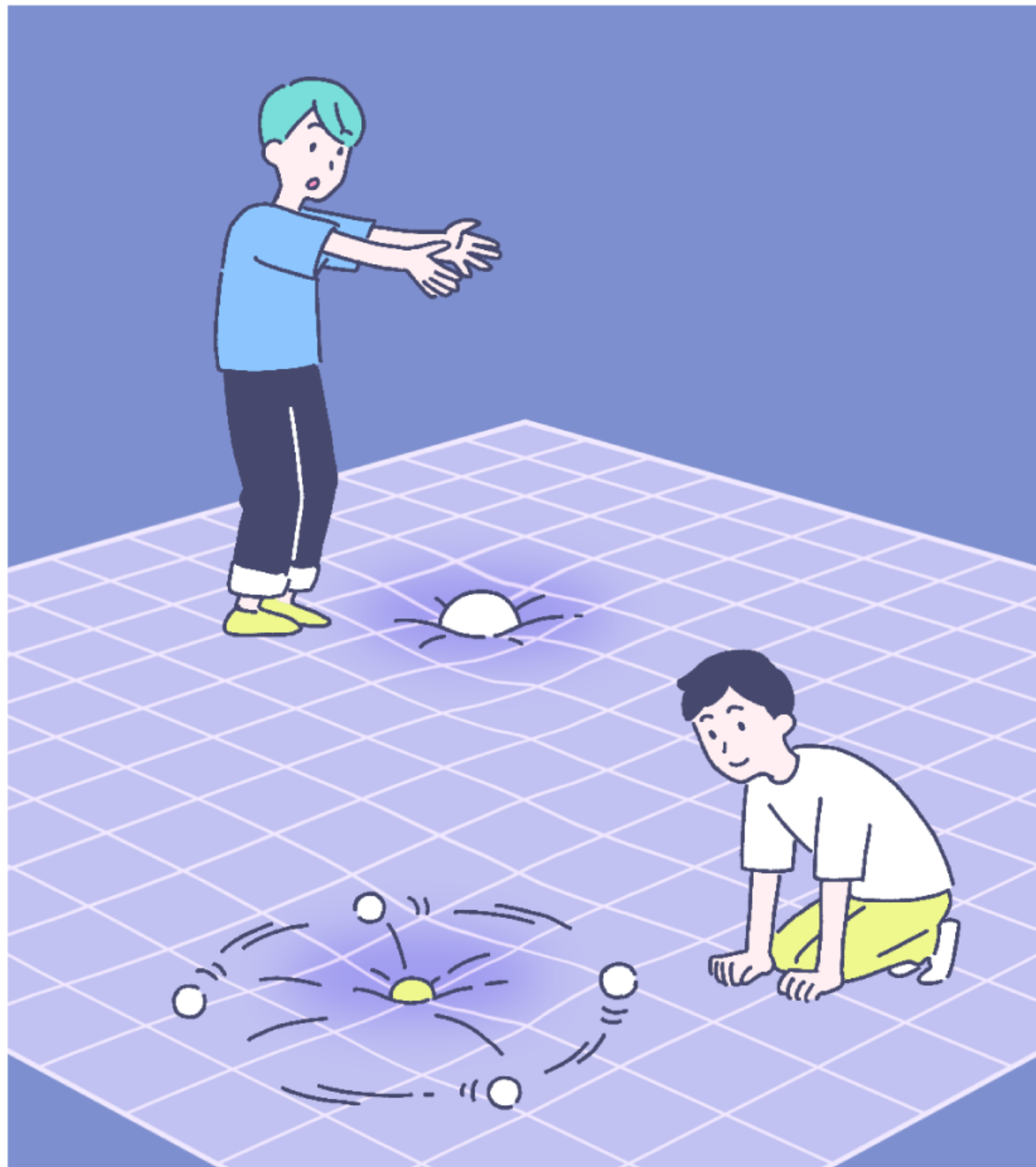
重力の正体は、時空の歪みである。その関係は、次の式で表される。

$$\underbrace{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R}_{\text{時空の歪み}} = \frac{8\pi G}{c^4} \underbrace{T_{\mu\nu}}_{\text{質量の分布}} \tag{3.21}$$

左辺はリーマン幾何学にもとづいて時空がどのように曲がっているのかを表している。右辺は物体がどのように分布しているのかを表す量である。

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

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



◆ Advanced 万有引力の法則

質量 m と M の質点が r だけ離れて置かれているとき、両質点にはたらく力 F は、大きさが

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \quad (2.2)$$

でつねに引力である。 G は定数であり、万有引力定数と呼ぶ。



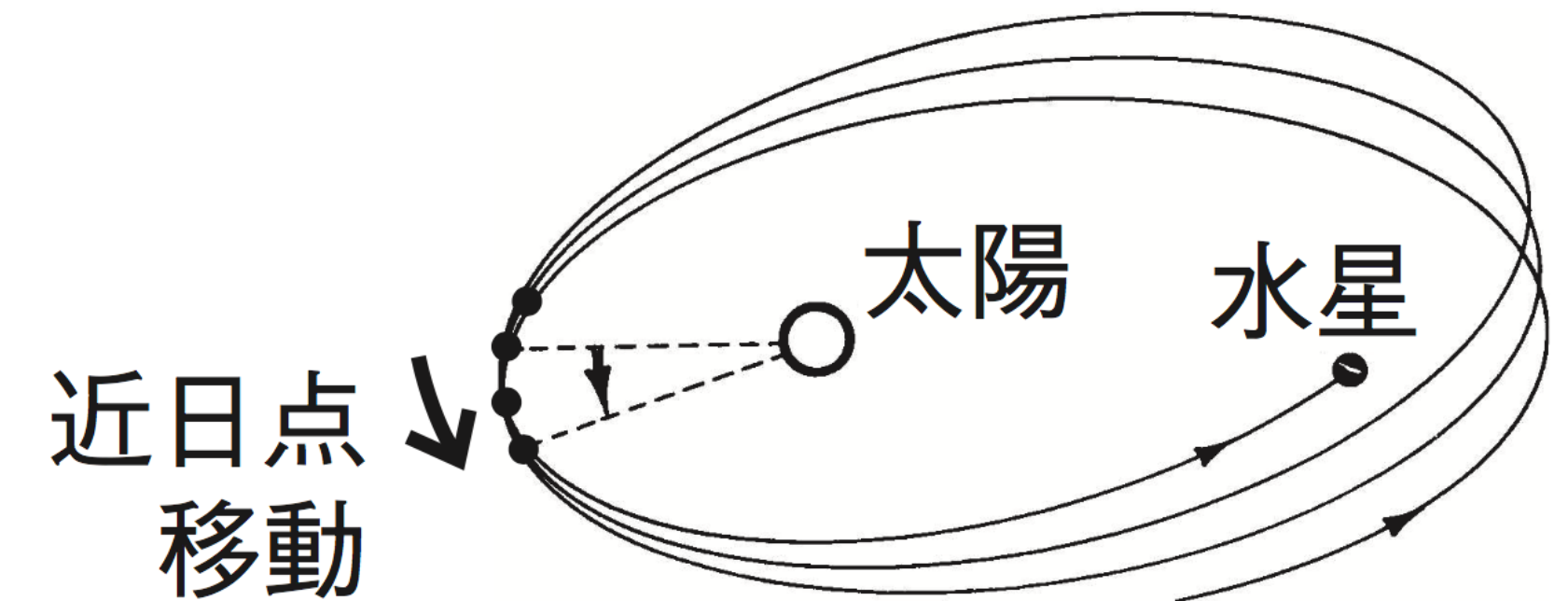
空間のゆがみが重力の原因だ
光や物体は まっすぐ進んで
いるつもりでも 曲がって進む
重力は光速で伝わる

水星の近日点移動

水星の近日点移動の問題(ルベリエ, 1854)

100年で574秒角ずれる. 2250世紀で完全な「ばら模様」.
→→金星の影響で277秒角, 木星で153秒角, 地球で90秒角,
その他の惑星で10秒角分の説明が可能.

残りの43秒角は???



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秒角の歳差運動」が出てきた.

心臓の鼓動を感じた

最終的に一般相対性理論は, 一つの論理的構造物としてここに完成した. (1915年11月25日)



アインシュタインも一般相対性理論の結論に右往左往する

- 重力によってゆがんだ空間では, 光の経路も曲がる(重力レンズ)
- 重力によってゆがんだ空間では, 時間の進み方は遅くなる(重力赤方偏移)
- 強い重力のもとでは星はつぶれ続ける(ブラックホール)
- 宇宙全体は動的でなければならない(膨張宇宙)
- 重力波が宇宙空間を伝わる(重力波)

X

ブラックホール特異点は簡単すぎる
仮定をしたからだ

X

宇宙は膨張するはずない

X

重力波は座標系の変換で消せる

X

一般相対性理論は日常生活に影響することはない



Sの科学 Yの科学

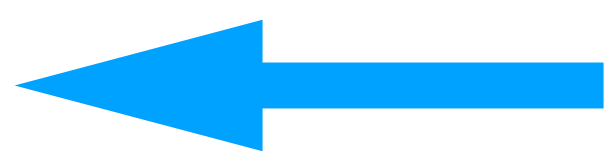
Sの科学

physics_S 物理
mathematics_S 数学
statistic_S 統計学
genetic_S 遺伝学

Yの科学

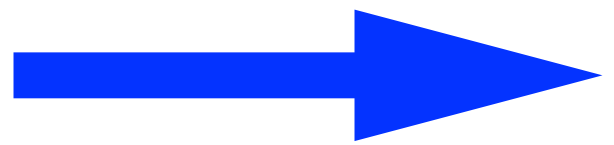
astronomy_Y 天文学
economy_Y 経済学
biology_Y 生物学
archaeology_Y 考古学
anthropology_Y 人類学
sociology_Y 社会学

体系化の学問
対象物の性質を理論で説明



発見の学問
対象物を分類し記載

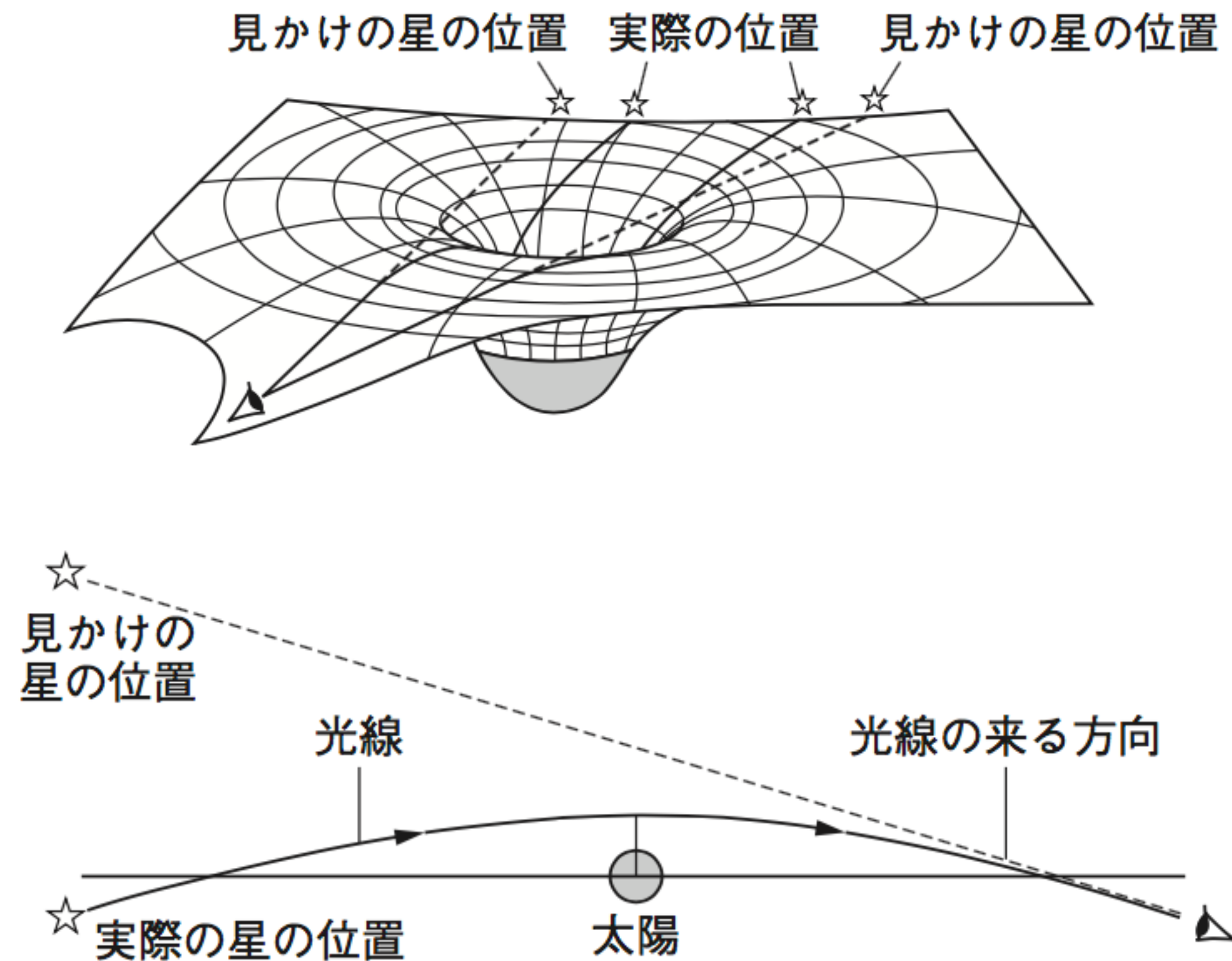
相対性理論



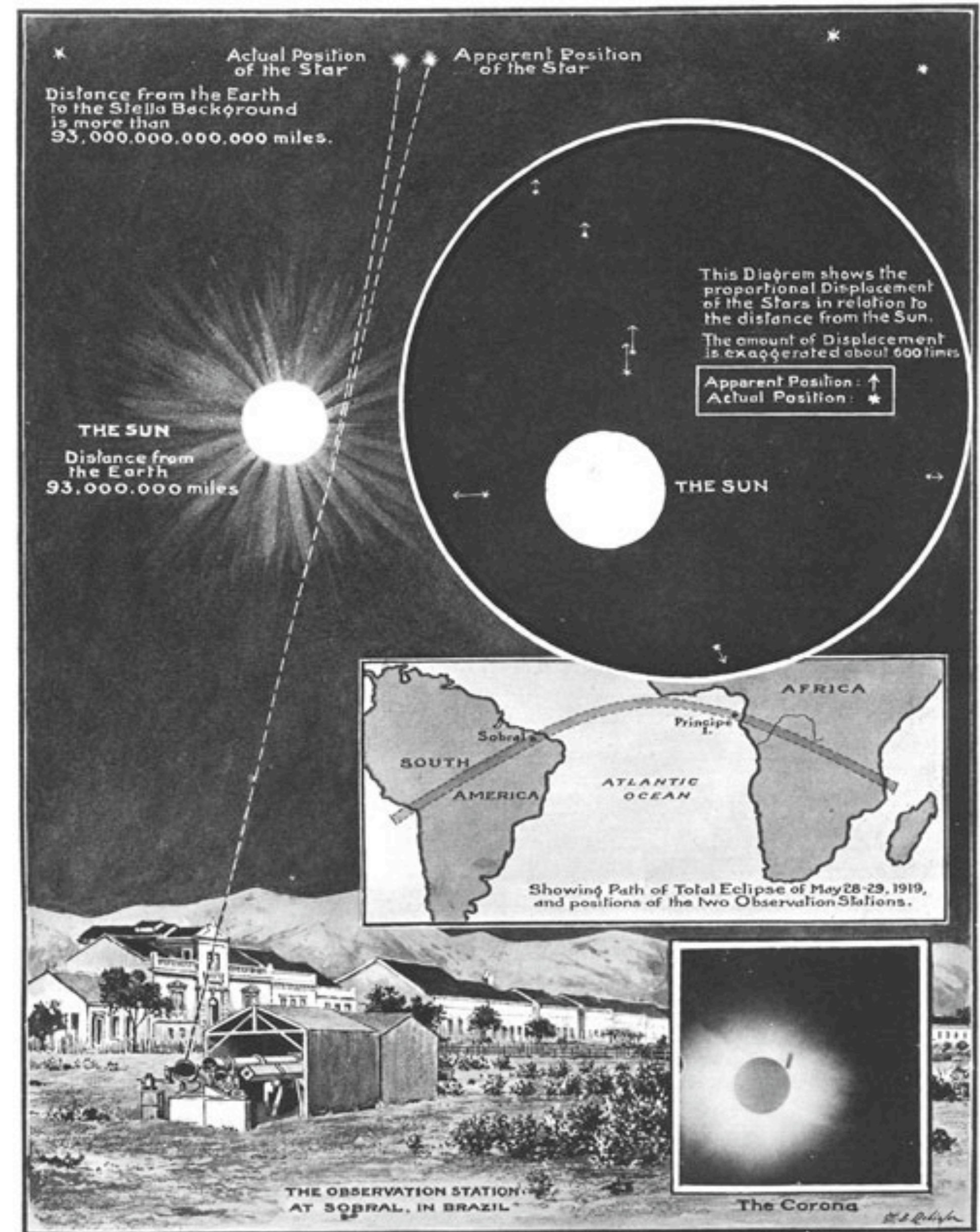
ブラックホール
膨張宇宙
重力波

重力レンズ効果 ▶▶▶ 1919年の皆既日食で確認

- 重力によってゆがんだ空間では, 光の経路も曲がる



1919年5月の皆既日食で
太陽のすぐ近くにみえる星の位置が
普段の位置とずれていた



重力レンズ効果 ▶▶▶ 1919年の皆既日食で確認

- 重力によってゆがんだ空間では, 光の経路も曲がる

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

Coverage in the (more excitable) New York Times.

1919年5月の皆既日食で
太陽のすぐ近くにみえる星の位置が
普段の位置とずれていた

**LIGHTS ALL ASKEW
IN THE HEAVENS**

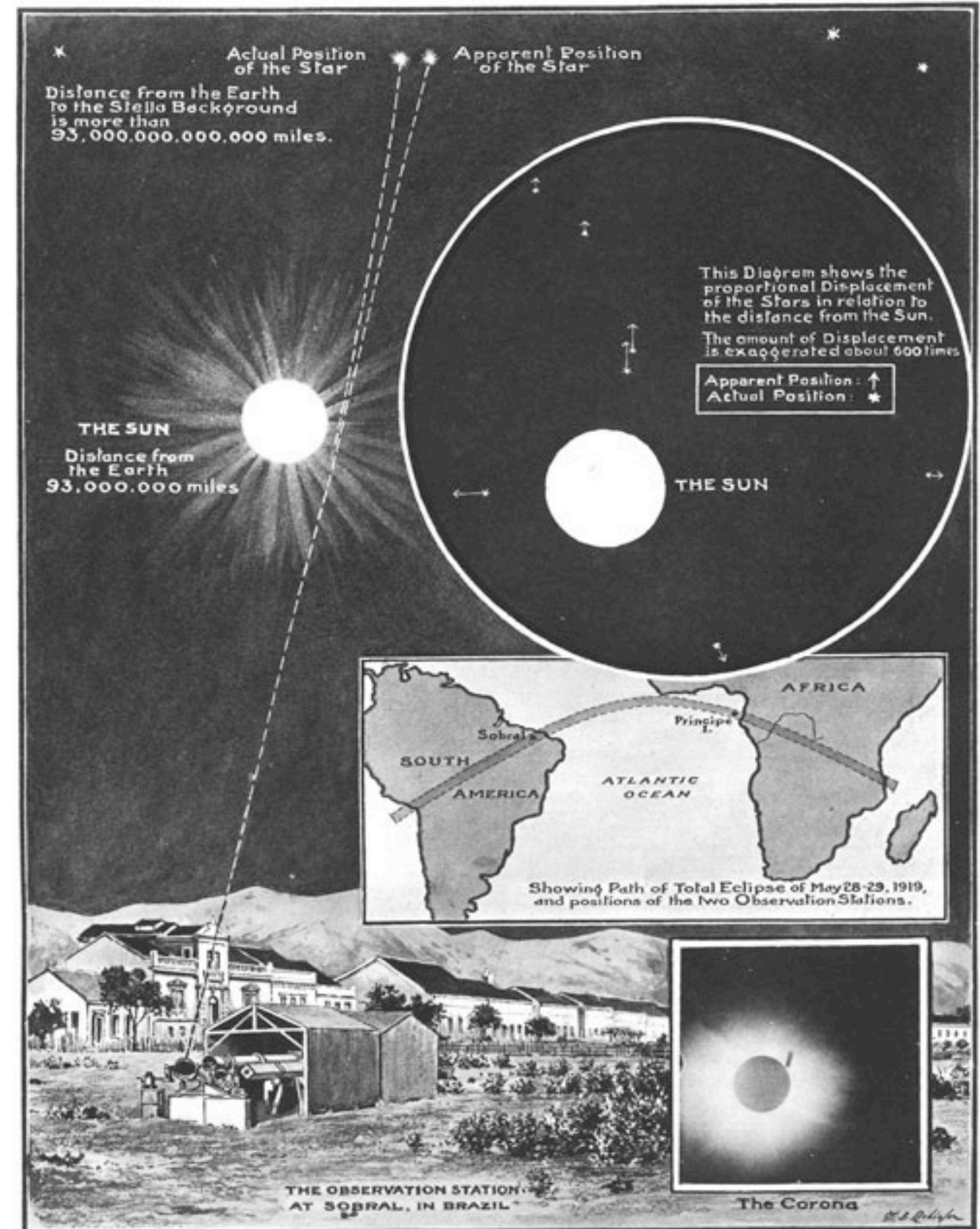
**Men of Science More or Less
Agog Over Results of Eclipse
Observations.**

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.



「一般相対性理論を理解しているのは世界に3人と言われているが？」



Arthur Stanley Eddington
(1882–1944)

He was an early advocate of Einstein's General Relativity, and an interesting anecdote well illustrates his humour and personal intellectual investment: Ludwig Silberstein, a physicist who thought of himself as an expert on relativity, approached Eddington at the Royal Society's (6 November) 1919 meeting where he had defended Einstein's Relativity with his Brazil-Principe Solar Eclipse calculations with some degree of scepticism and ruefully charged Arthur as one who claimed to be one of three men who actually understood the theory (Silberstein, of course, was including himself and Einstein as the other two). When Eddington refrained from replying, he insisted Arthur not be "so shy", whereupon Eddington replied,

"Oh, no! I was wondering who the third one might be!"

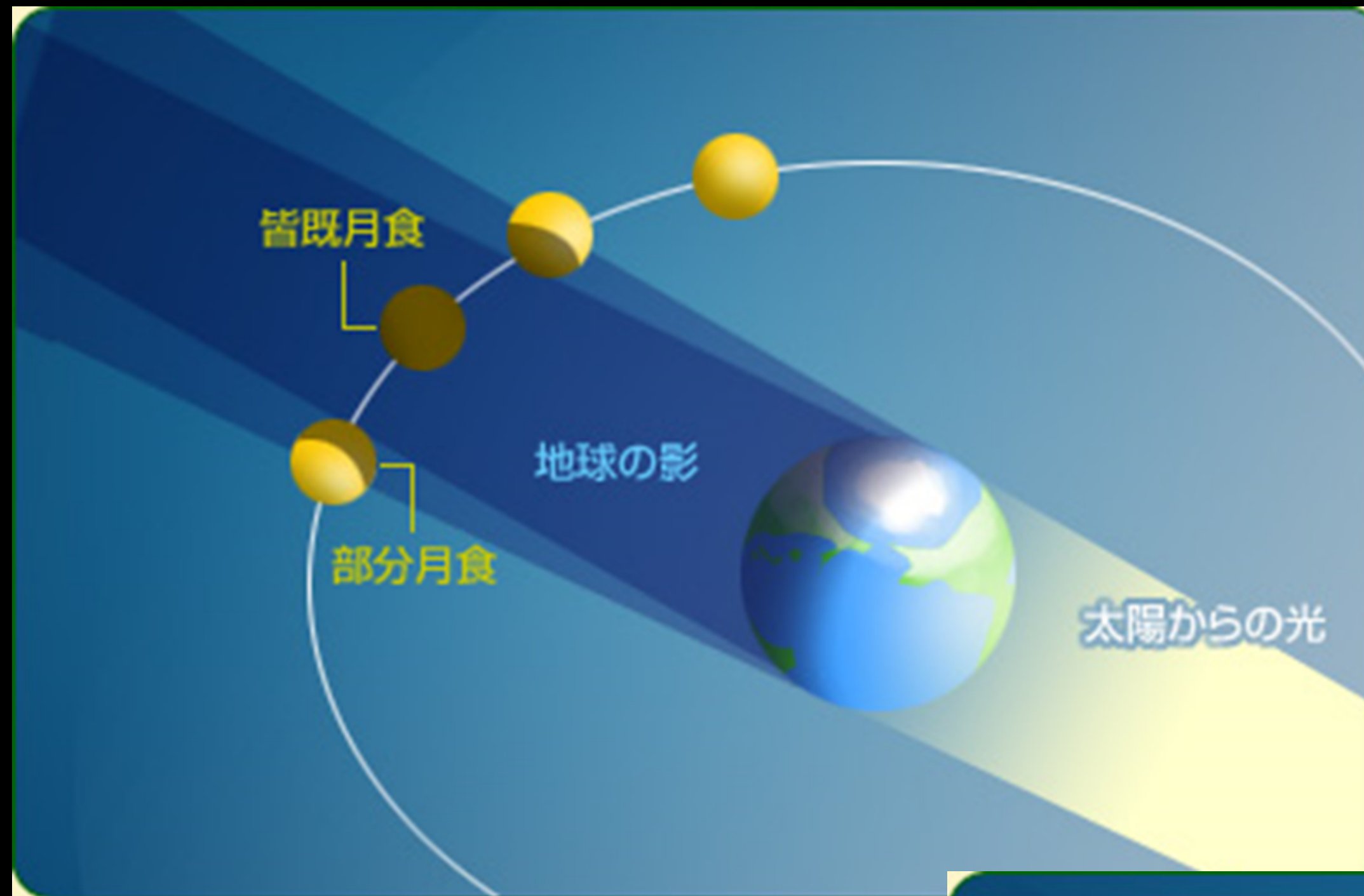
Silberstein 「一般相対性理論を理解しているのは世界に3人と言われているが？」

Eddington 「...」

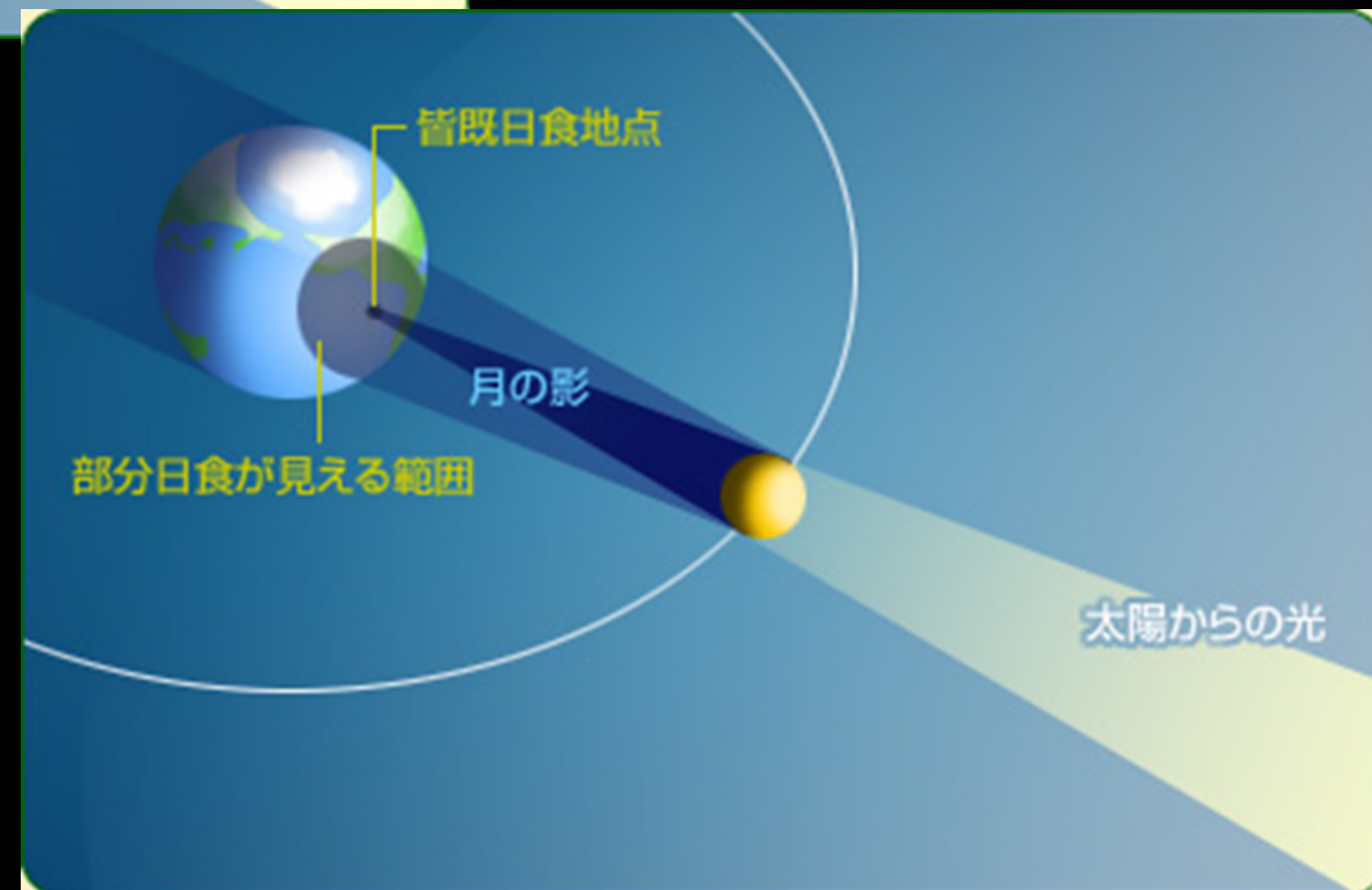
Silberstein 「そう謙遜なさないで」

Eddington 「いや, 誰が3人目かを考えていたんです」

月食のしくみ

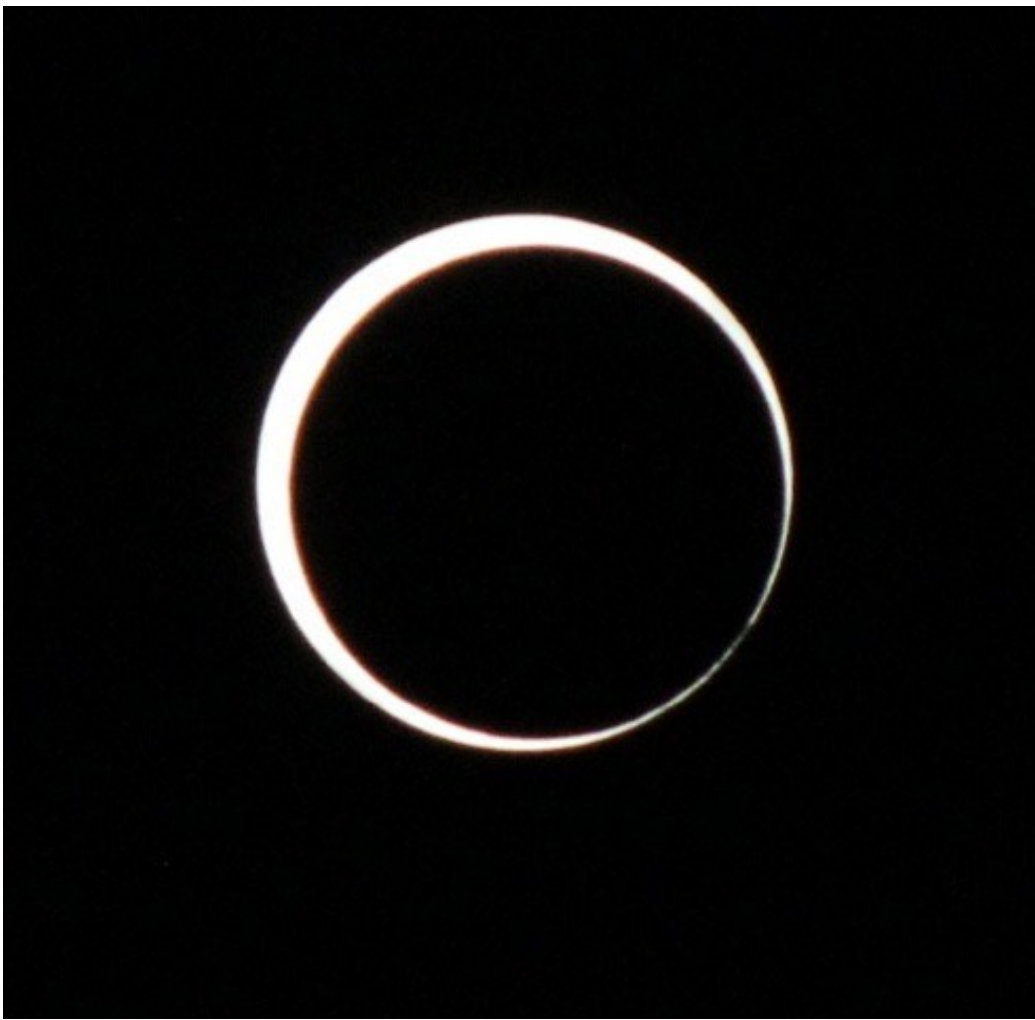


日食のしくみ





京都府木津市 槌谷則夫氏撮影



京都府向日市 真貝撮影



2017年8月21日 皆既日食(アメリカ)



縣 秀彦氏撮影



縣 秀彦

8月22日 · 🌐



第2接触時にベリ・ビーズが肉眼でもよく分かる綺麗な日食でした。



縣 秀彦

8月22日 · 🌐



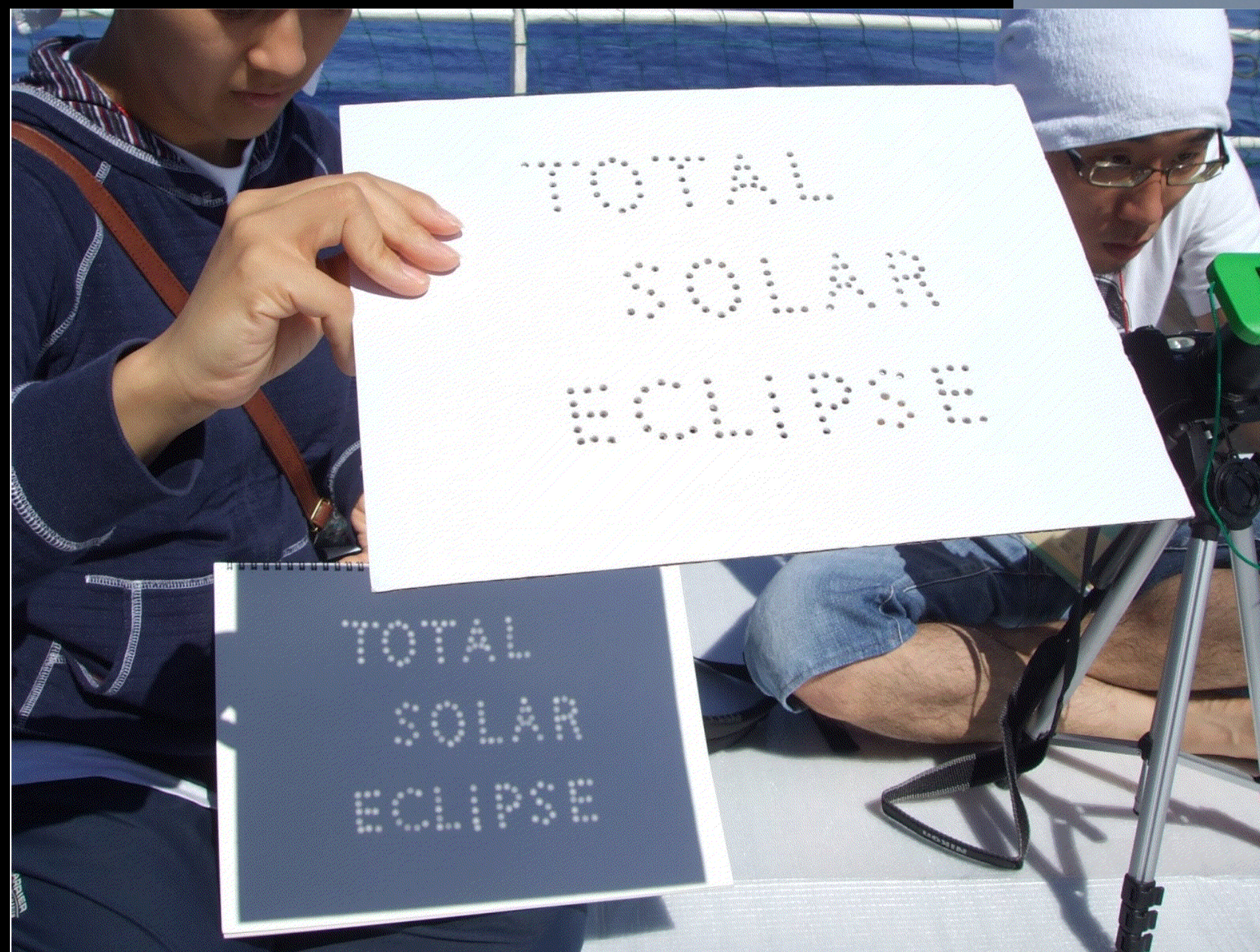
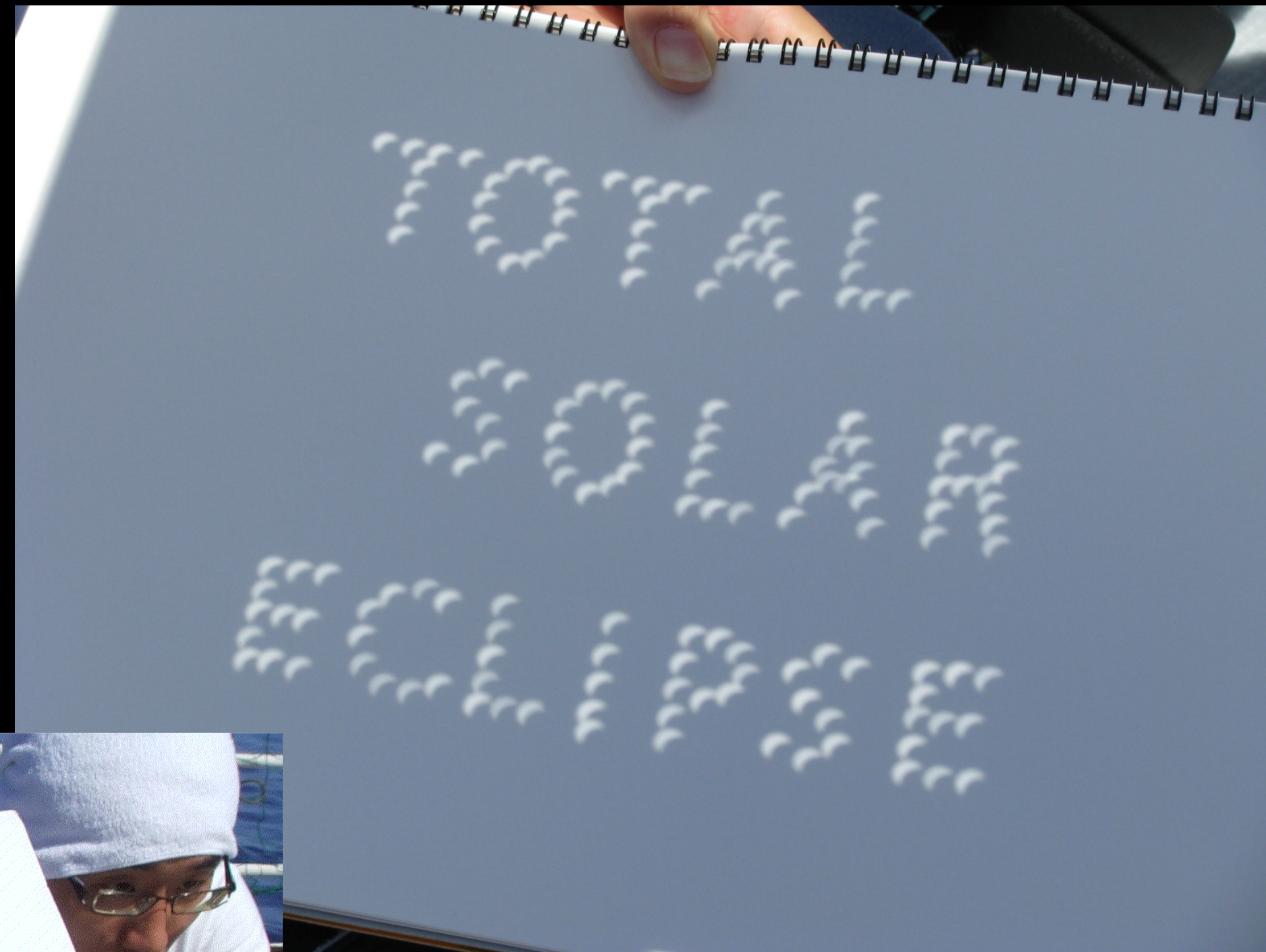
What a beautiful diamond ring !
ダイヤモンドリングも綺麗でした。

2009年7月22日 皆既日食

ふじ丸 皆既日食ツアー



2009年7月22日9時30分 真貝寿明撮影



2009年7月22日10時52分 真貝寿明撮影

2009年7月22日 福江慧氏撮影



2009年7月22日11時25分 大鐘卓哉氏撮影



2009年7月22日11時27分 米田晃氏撮影



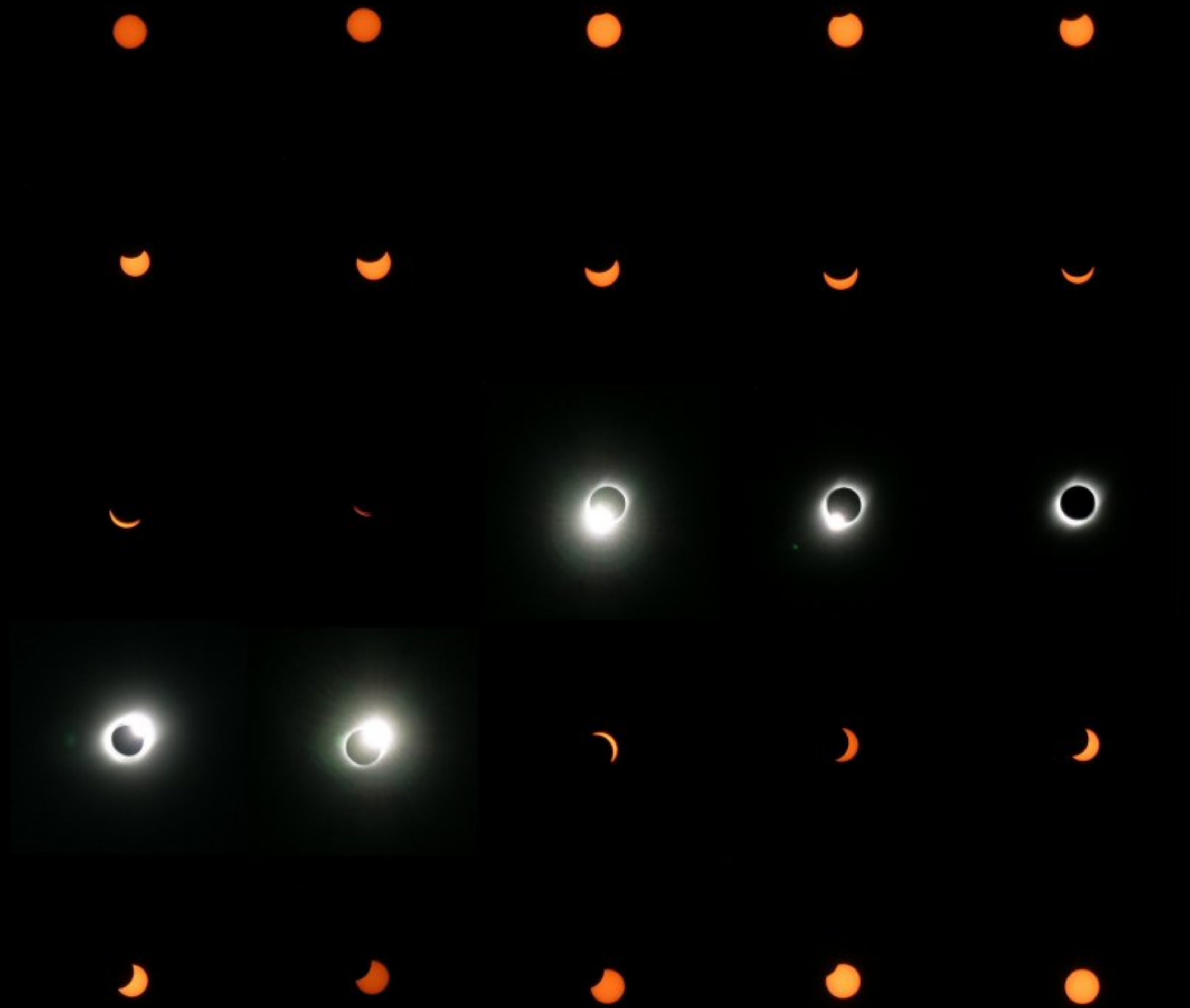
2009年7月22日11時28分 米田晃氏撮影



2009年7月22日11時?分 大西浩次氏撮影



2009年7月22日11時33分 米田晃氏撮影



2009年7月22日 福江慧氏撮影



2009年7月22日11時29分 真貝寿明撮影



2009/ 7/22 11:28am

2009年7月22日11時28分 大鐘卓哉氏撮影



22 11:30AM

2009年7月22日 福江純氏撮影



2009年7月22日11時30分 米田晃氏撮影



2009年7月22日 福江彗氏撮影

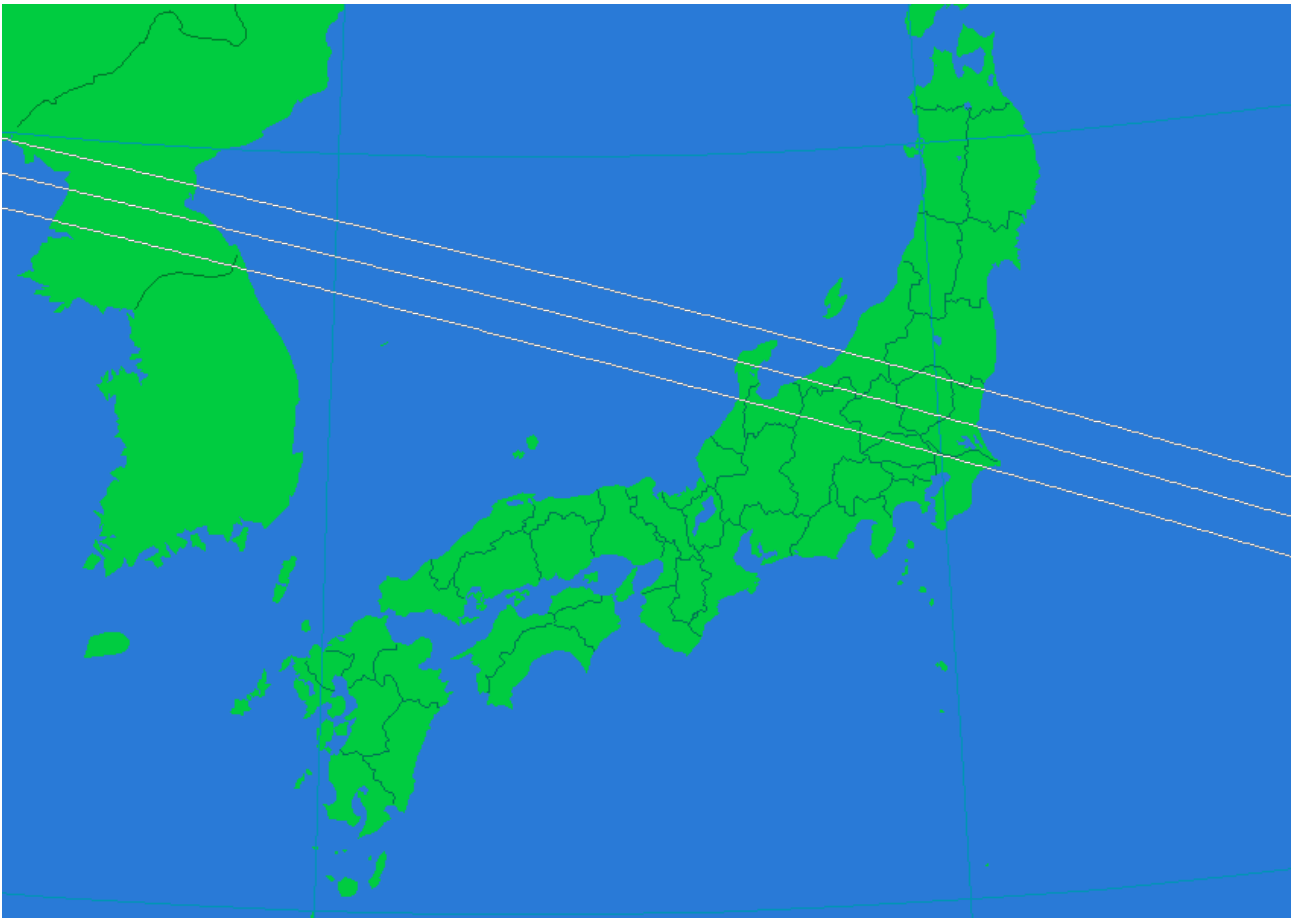




2009年7月22日 福江慧氏撮影

年 月 日	種 類	見 え る 場 所
2009年7月22日	皆既日食	奄美大島・屋久島・種子島・トカラ列島・硫黄島
2012年5月21日	金環日食	南九州・南四国・南近畿・東海地方・関東地方
2030年6月1日	金環日食	北海道
2035年9月2日	皆既日食	能登・富山・長野・前橋・宇都宮・水戸
2041年10月25日	金環日食	北近畿・中部地方・伊豆諸島
2042年4月20日	皆既日食	鳥島（伊豆小笠原諸島）
2063年8月24日	皆既日食	青森県北部・北海道南部
2070年4月11日	皆既日食	須美寿島（伊豆小笠原諸島）
2074年1月27日	金環日食	鹿児島県南部・屋久島・種子島
2085年6月22日	金環日食	沖縄島・大東島
2089年10月4日	皆既日食	宮古島・尖閣諸島
2095年11月27日	金環日食	中国地方・四国地方・南近畿・小笠原諸島

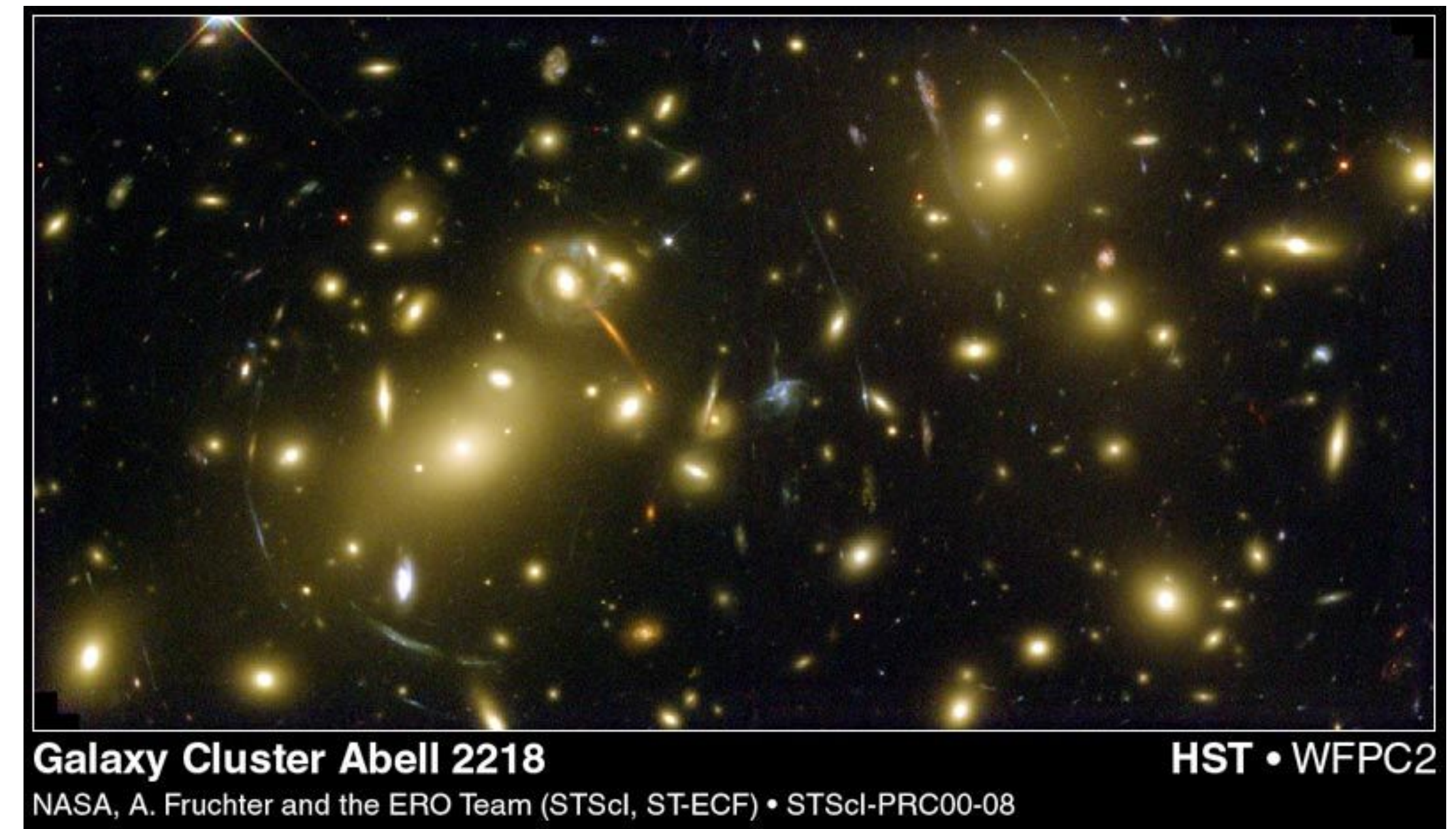
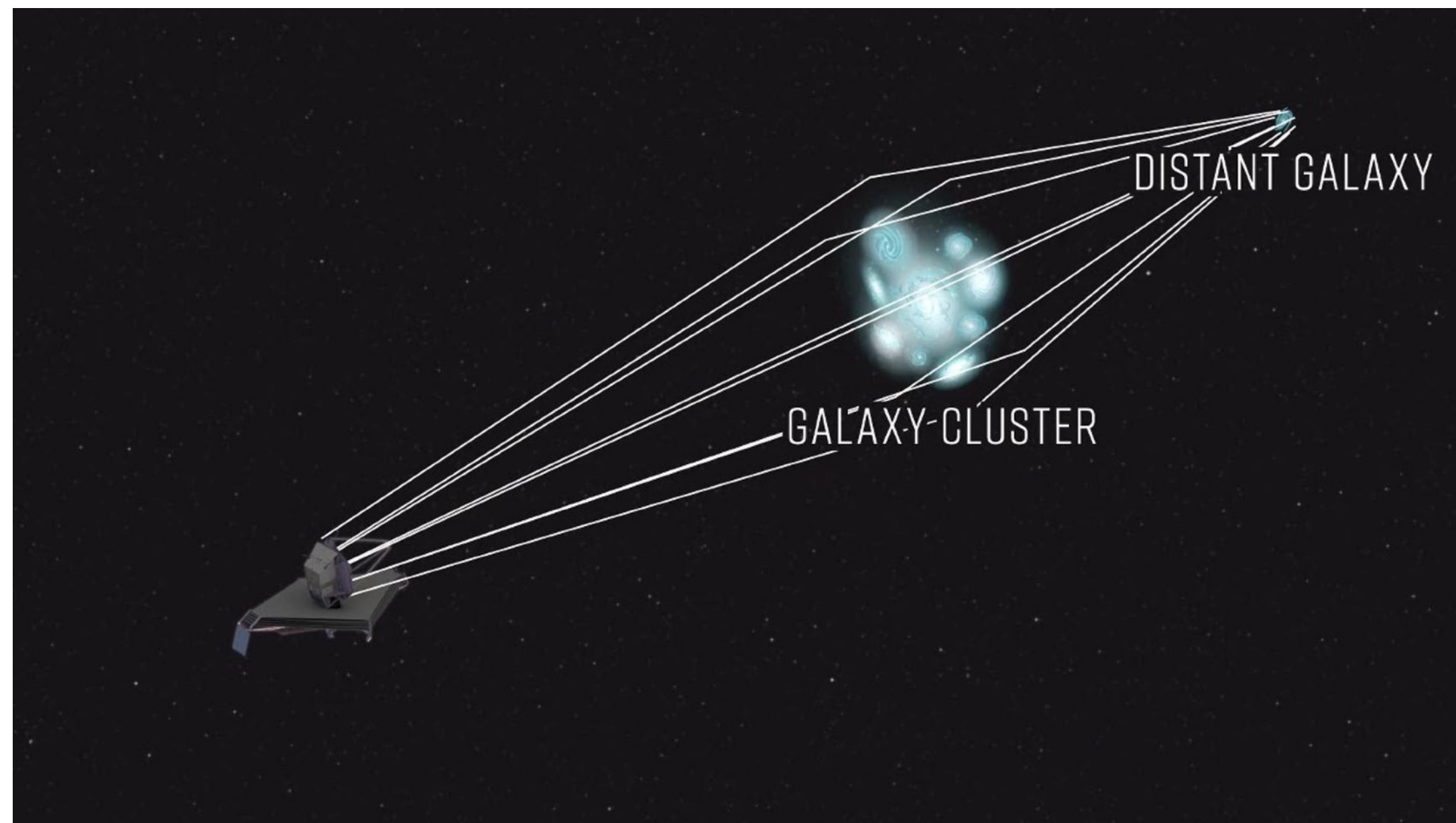
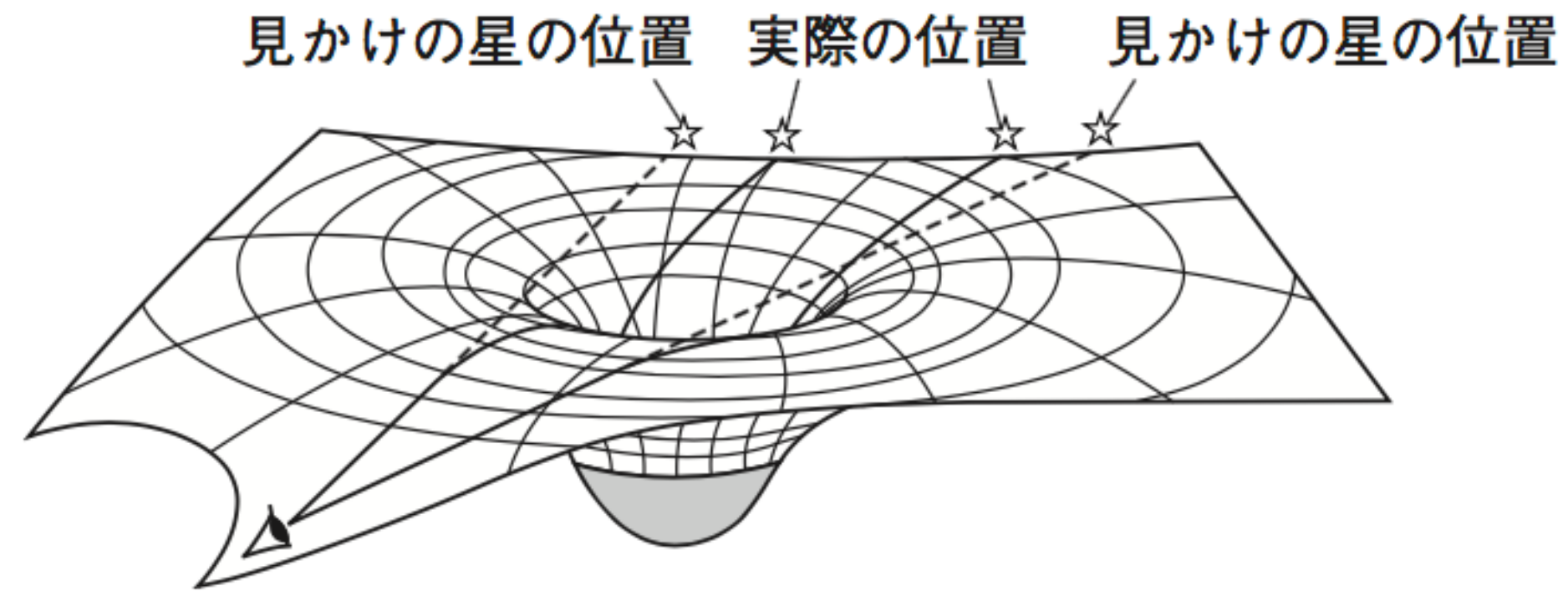
2035年9月2日
関東一北陸皆既日食
最大2分54秒



日付	種類	食の経路等
2012年11月14日	皆既	オーストラリア北部から南太平洋を通過し、チリの西方洋上で終わる。ニュージーランド北島で食分0.8前後。
2015年3月20日	皆既	グリーンランド、アイスランドの南沖から北極を通過。ユーラシア北西部・北アフリカで部分食を観測できる。
2016年3月9日	皆既	インドネシアを通過し北太平洋に至る。日本では全国で部分食が見られる。
2017年8月21日	皆既	北太平洋中部に始まり北米大陸を横断、中部大西洋で終わる。
2019年7月3日	皆既	南太平洋、南米のチリ、アルゼンチンで観測できる。
2020年12月14日	皆既	太平洋西部に始まり南米大陸南部を通過、アフリカ南西岸沖で終わる。
2021年12月4日	皆既	南極大陸の南米側で観測できる。
2023年4月20日	皆既	南インド洋からオーストラリア北西岸、インドネシアを経て中部太平洋。九州・四国・東海・関東の南岸でも僅かに欠ける。
2024年4月8日	皆既	中部太平洋に発し北米大陸東部を北上、ヨーロッパ沖に至る。
2026年8月12日	皆既	北極、グリーンランドからイベリア半島に達する。
2027年8月2日	皆既	北大西洋中部からアフリカ北岸、アラビア半島南岸を通過しインド洋に至る。
2028年7月22日	皆既	インド洋に発しオーストラリア、ニュージーランドを横断する。
2030年11月25日	皆既	南アフリカ、南インド洋、オーストラリアを通る。
2031年11月14日	皆既	北西太平洋に始まり赤道付近を経過してパナマ付近に達する。
2033年3月30日	皆既	ベーリング海峡から北極にかけて起こり、北米大陸、シベリア東端とグリーンランドで部分食が見える。
2034年3月20日	皆既	南米東沖からアフリカ中部、アラビア半島を通り中国奥地で終わる。
2035年9月2日	皆既	中国奥地から日本を横断、太平洋東部で終わる。日本では能登半島と茨城県を結ぶ一帯で中心食が見られる他、全国で部分食。1970年頃までの古い書籍では東京を中心食が通るように書いてあるが、東京は食分0.992で部分食。

重力レンズ効果 ▶▶▶ 銀河によるその背後の銀河からの光線湾曲

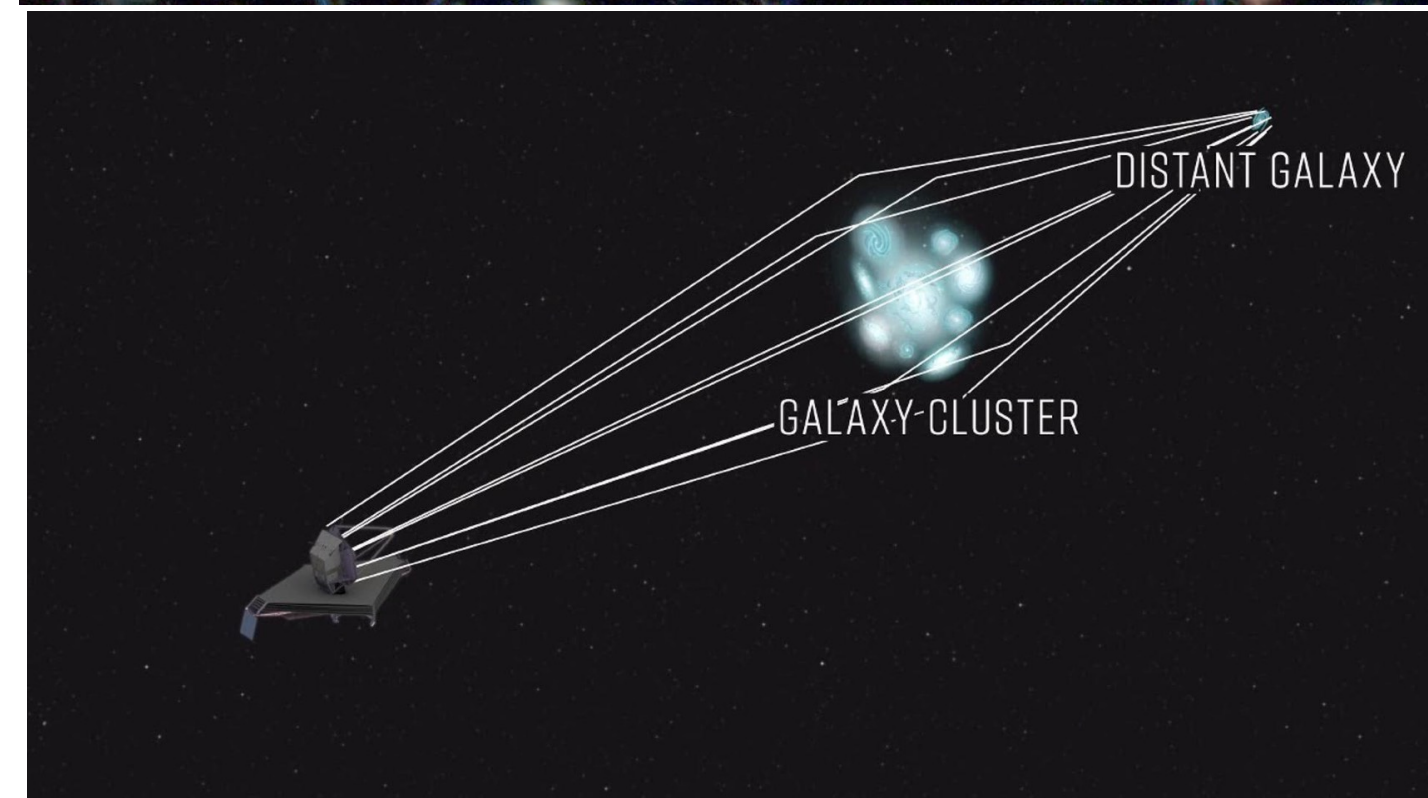
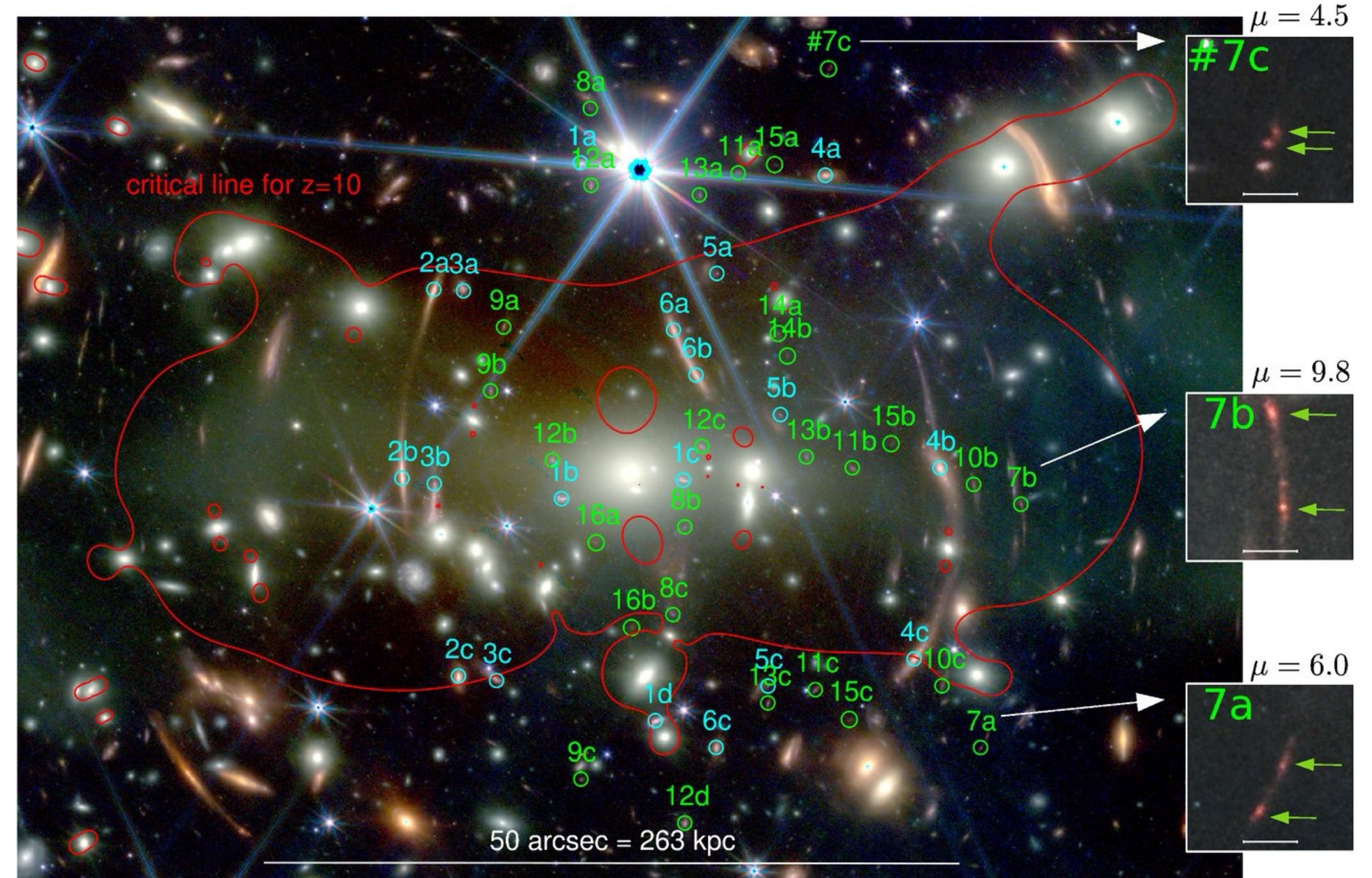
- 重力によってゆがんだ空間では, 光の経路も曲がる



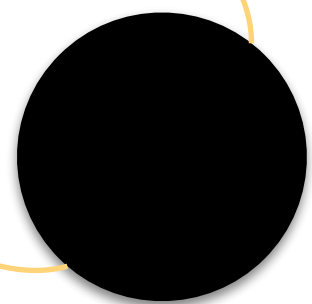
重力レンズ効果 ▶▶▶ 銀河によるその背後の銀河からの光線湾曲

- 重力によってゆがんだ空間では, 光の経路も曲がる

JWSTによる撮影, 2022年



<https://www.mpg.de/19028990/galaxies-behind-a-gravitational-magnifier>



ブラックホールの周りで
光は曲がる





大阪工業大学 元学長 井上正崇 名誉教授

2015年8月 工学実感フェアにて撮影，重力レンズプログラムで画像処理



大阪工業大学 前学長 西村泰志 教授

2015年8月 工学実感フェアにて撮影，重力レンズプログラムで画像処理

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。

~~~~~



## Gravity Ink. - Einstein's Gravity (Episode 1)



LISAccommunity <http://support.elisascience.org>

Hand: Pavel Gurov Voice: Heather Audley

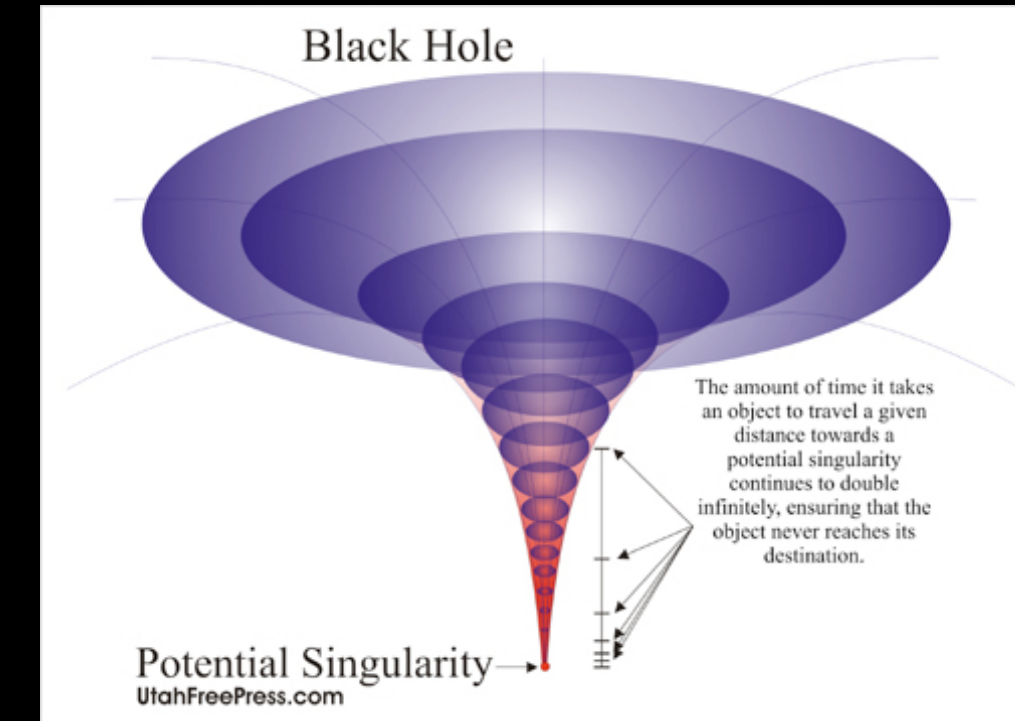
Concept: Oliver Gerberding, Simon Barke, Heather Audley, Benjamin Knispel

[Start on click, 3 min](#)

[http://www.youtube.com/watch?v=a\\_zMKF66tzo](http://www.youtube.com/watch?v=a_zMKF66tzo)



# ブラックホール Black-hole



まず、方程式を解いたのは、シュバルツシルドだった。

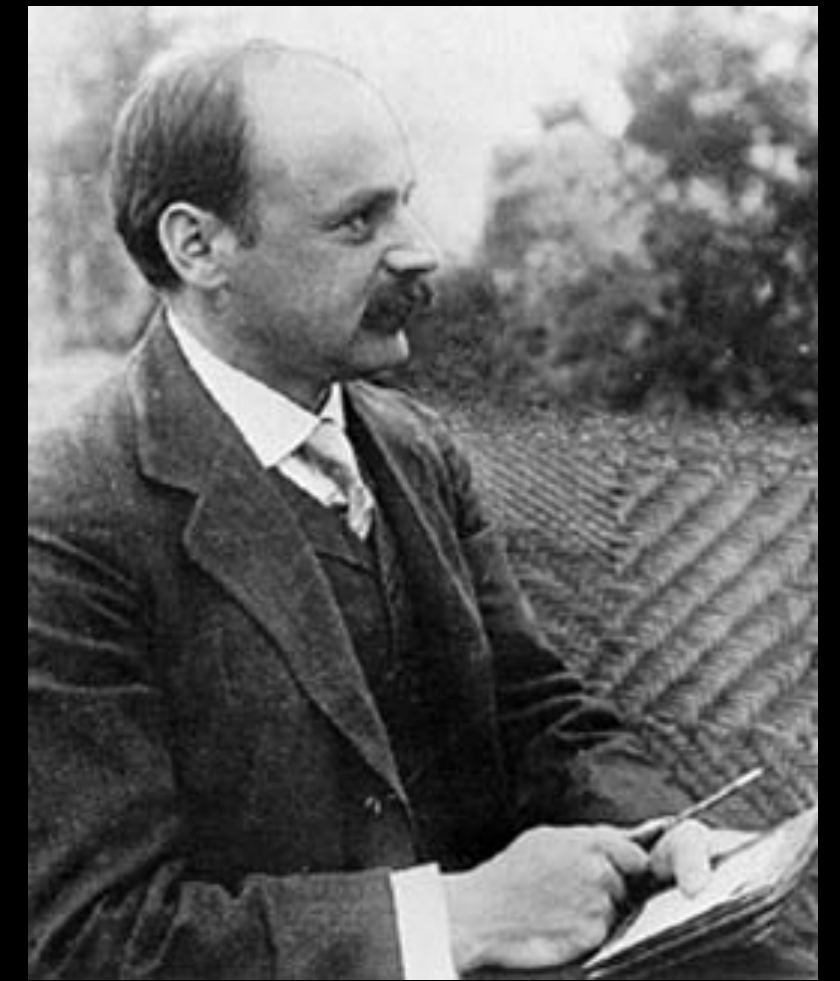
アインシュタインは信じなかったが、  
この答えは、ブラックホールを意味していた。



# アインシュタイン方程式の解 【シュヴァルツシルド解】

Schwarzschild (1916)  
球対称, 真空での方程式の厳密解

$$ds^2 = - \left( 1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right) c^2 dt^2 + \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$$



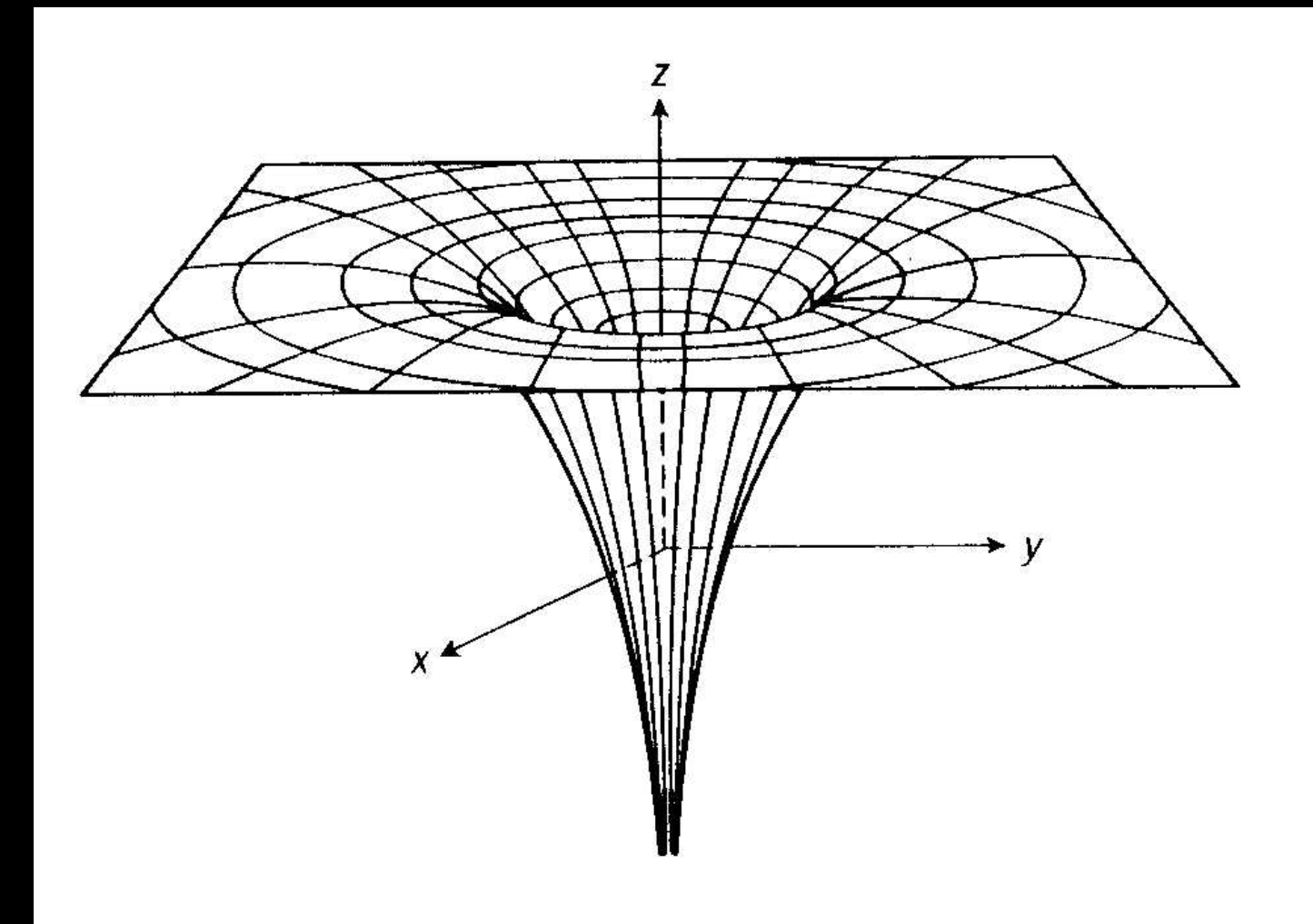
困ったことに, ……

$r=0$  で特異点

⇒ 今でも困ってる

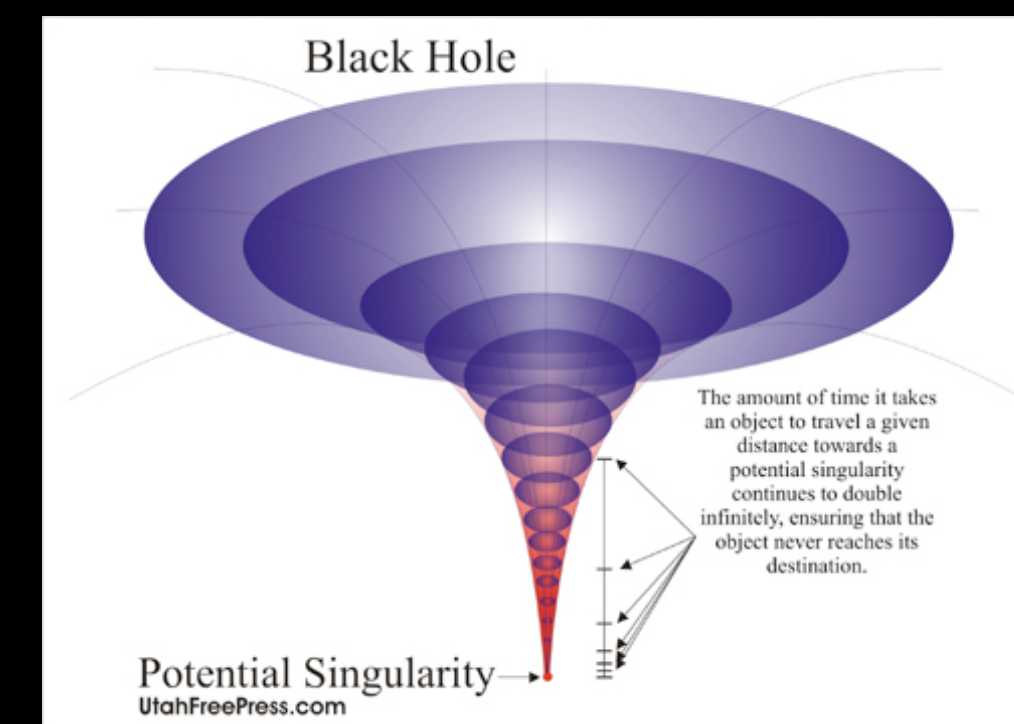
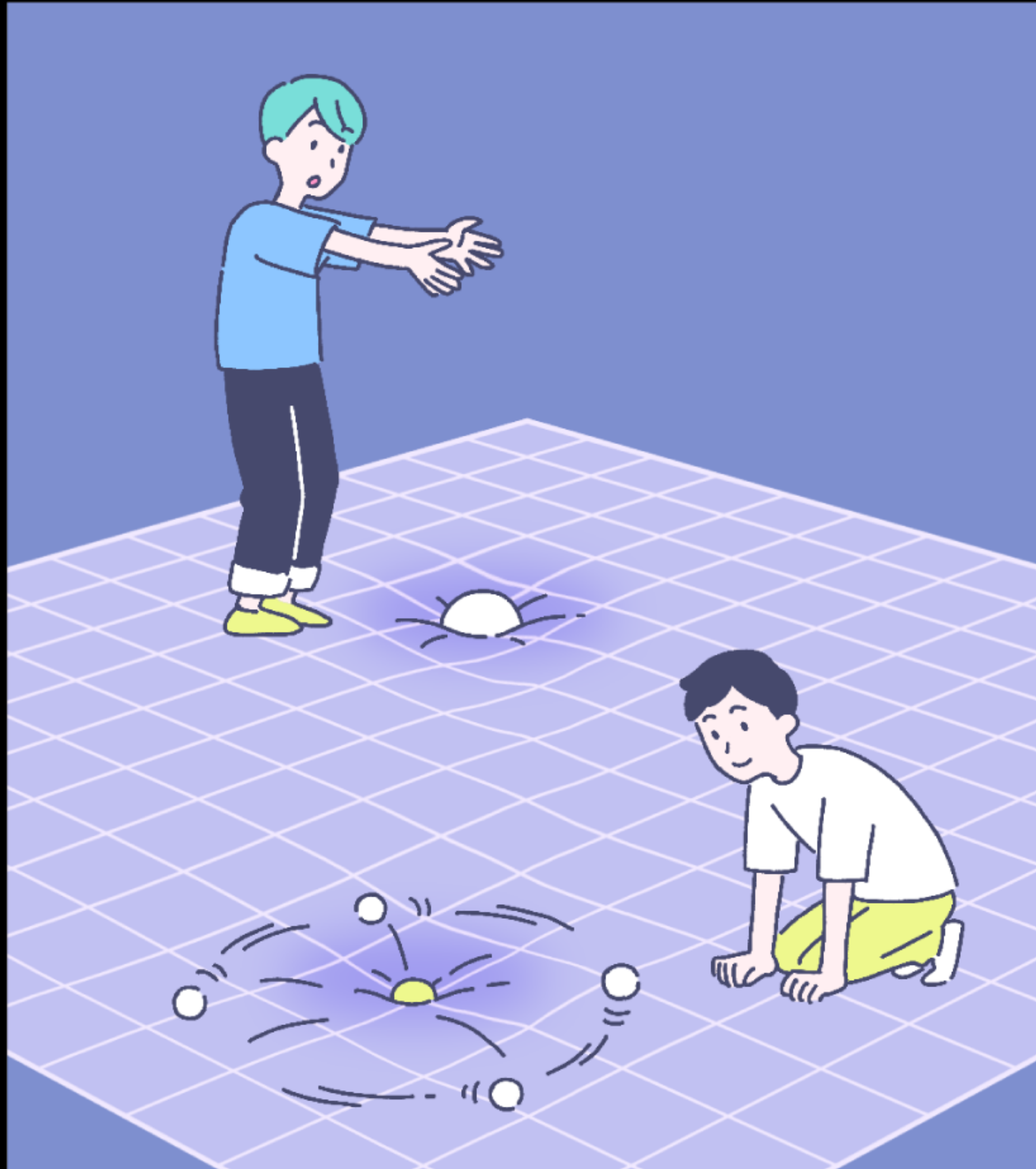
$r=2GM/c^2$  でも特異点

⇒ ブラックホールの境界





### 3.4 相対論の産物:(1) ブラックホールと時空特異点

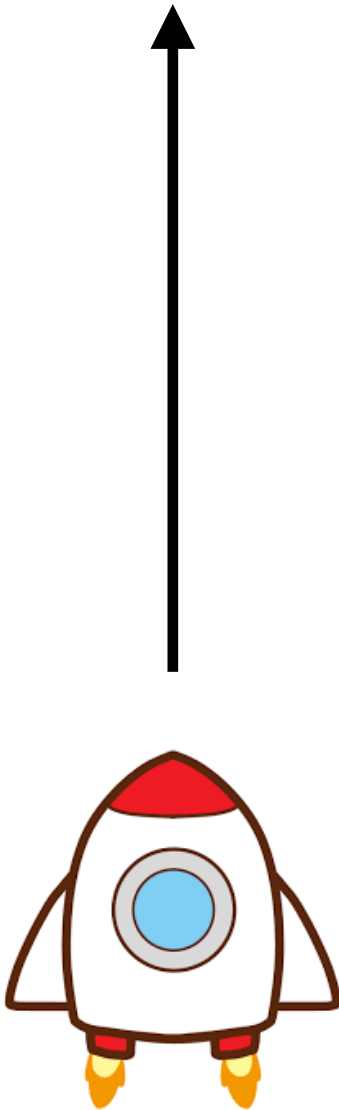
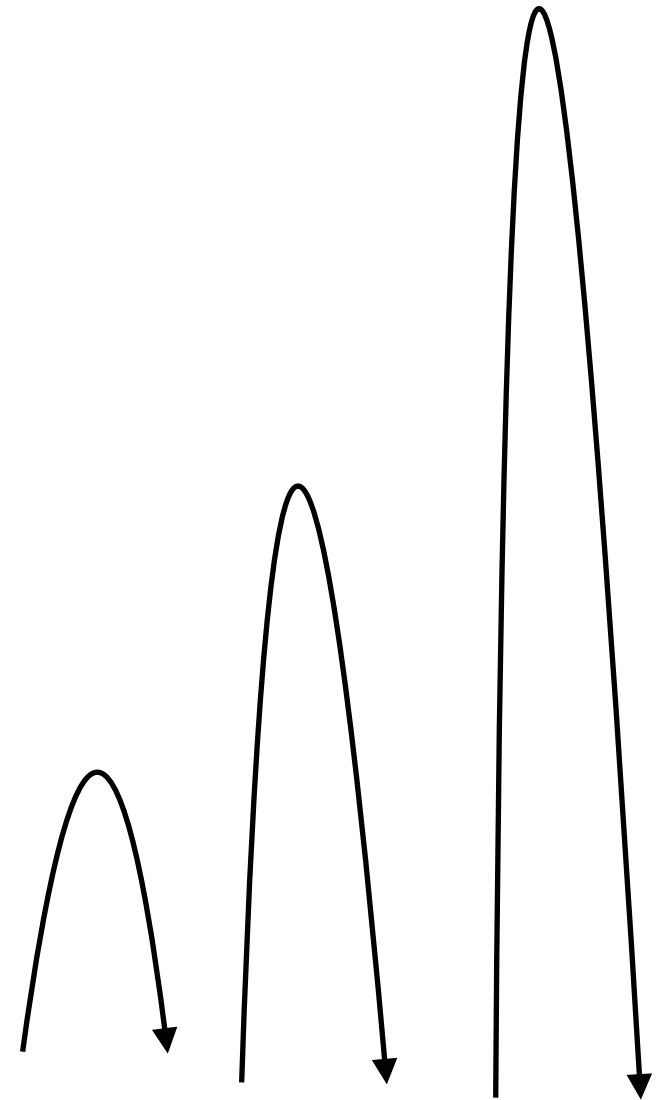




# 光も脱出できない天体とは・・・

とてつもなく 重くて小さな天体では

ボールを速く投げ上げると、  
高くまで飛ぶ



秒速  
30万 km

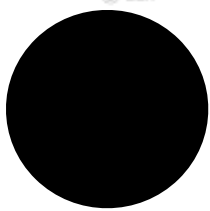
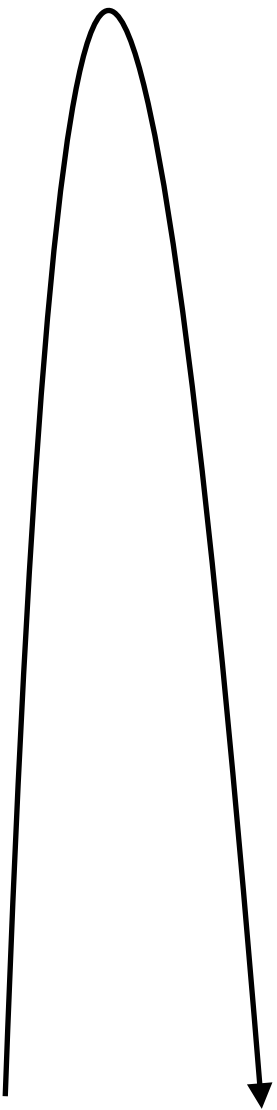


光は当然  
脱出できる



地球からの脱出速度  
秒速 12 km

光も  
脱出できない

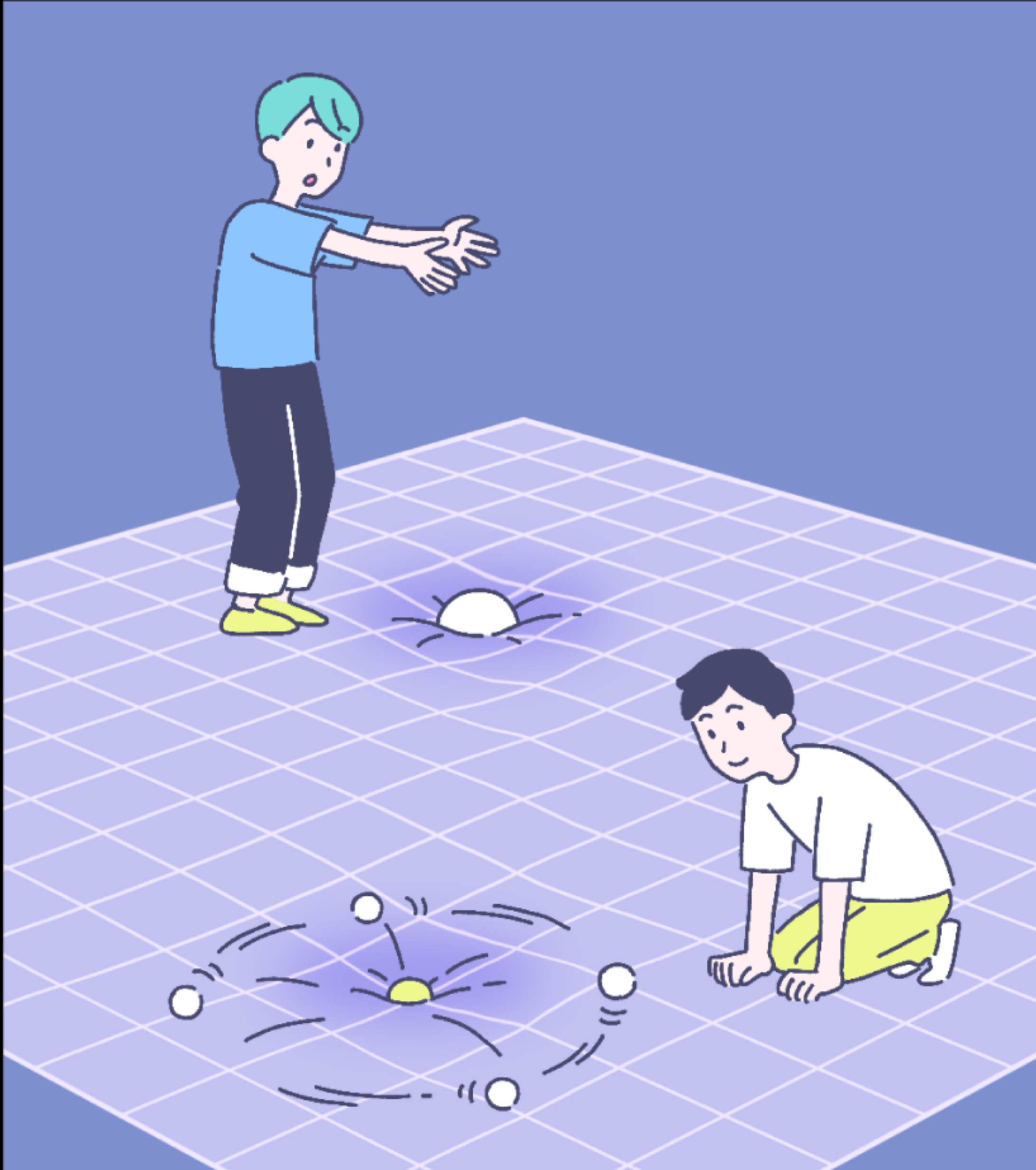


地球質量が半径9mmに  
なったら、

ブラックホール



# ブラックホール



## ブラックホール

= 重力が強すぎて 光さえも出られない天体

= 因果的に隔離される領域 境界=地平面(ホライズン)

重い物体のまわりでは  
時空がゆがむ

非常に重い物体の  
まわりでは時空が  
大きくゆがんで  
ブラックホールになる

光さえも脱出できない  
巨大な重力をもつ  
こんな天体を  
「ブラックホール」と命名  
しよう

ここから内側からは光さえも外向きに  
脱出できない  
= 事象の地平面 (event horizon)

大きさはシュワルツシルト半径  $r$

$$r = \frac{2GM}{c^2}$$

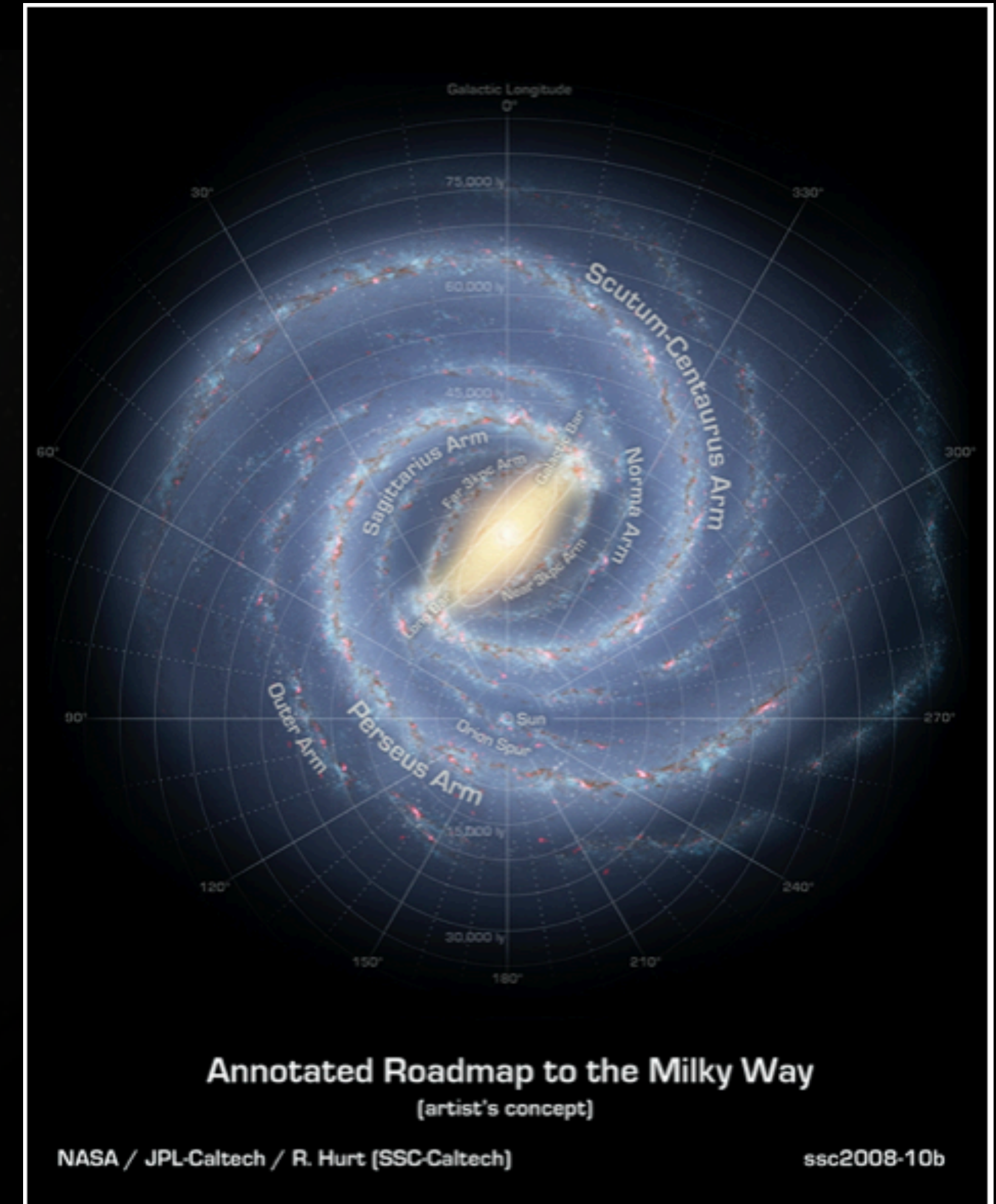
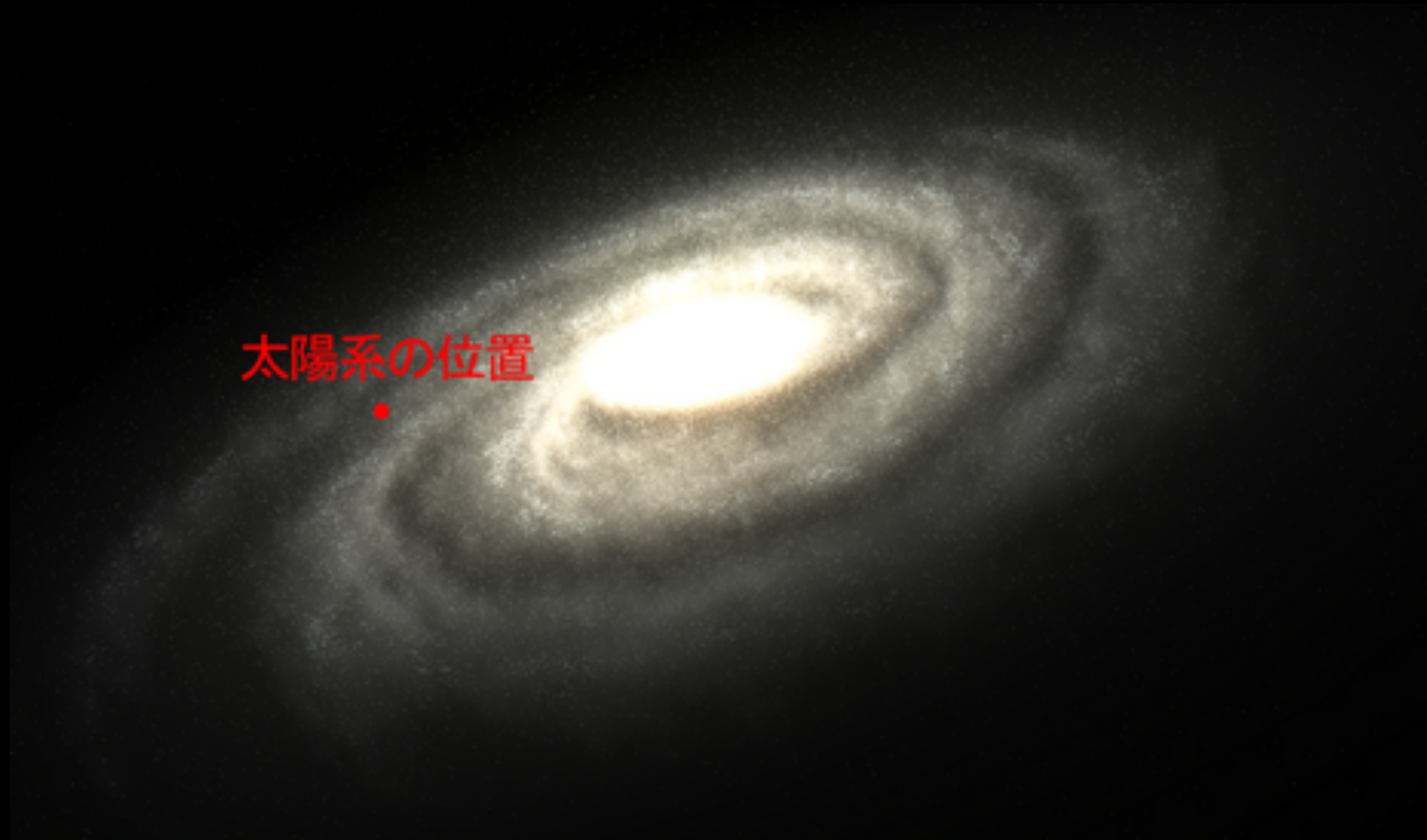
( $M$ : 物体の質量  $G$ : 重力定数  $c$ : 光速)

太陽なら半径3km 地球なら半径  
9mmにそれぞれの全質量を  
押しこめば ブラックホールになる

ホイーラー  
命名者については諸説あります



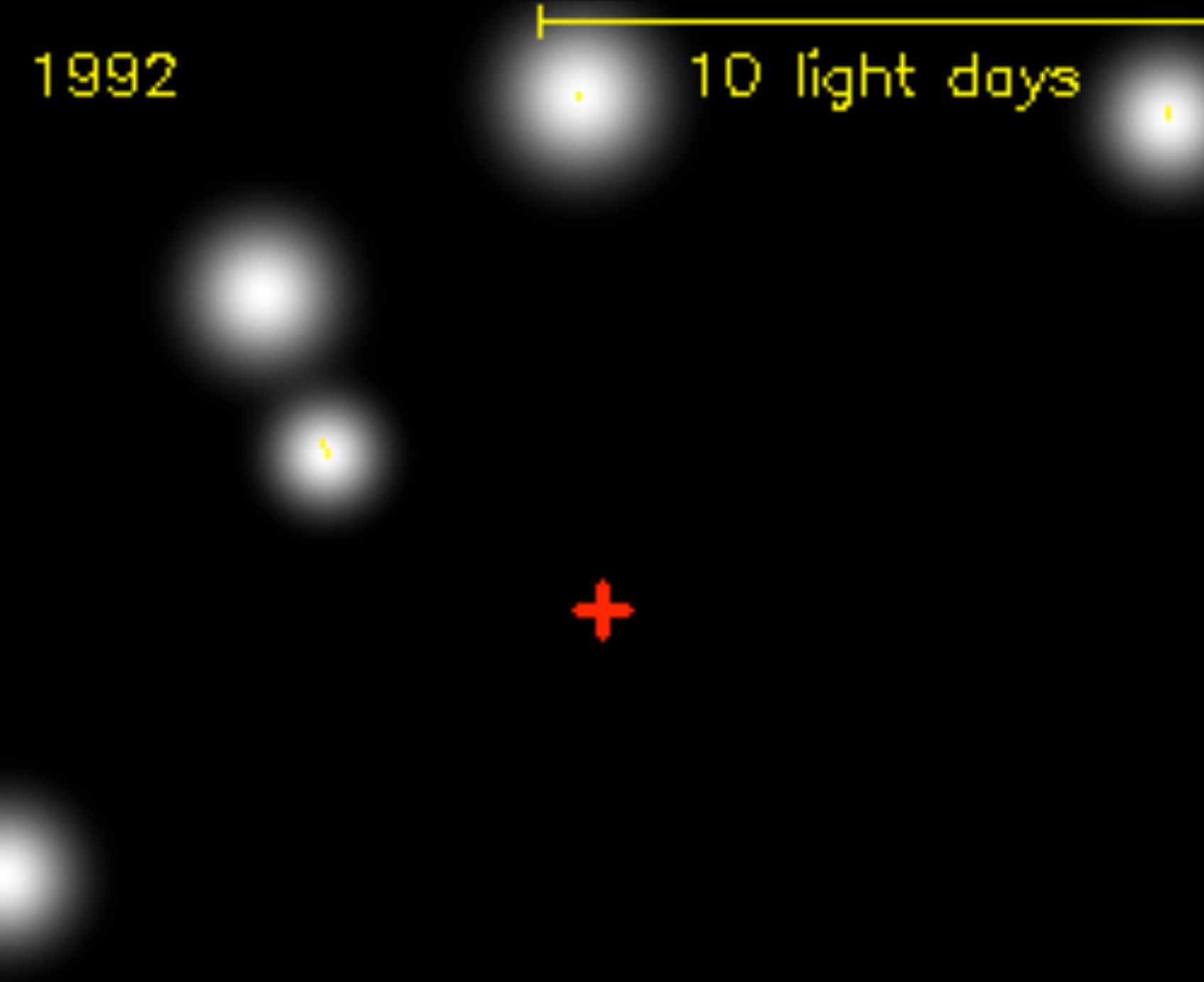
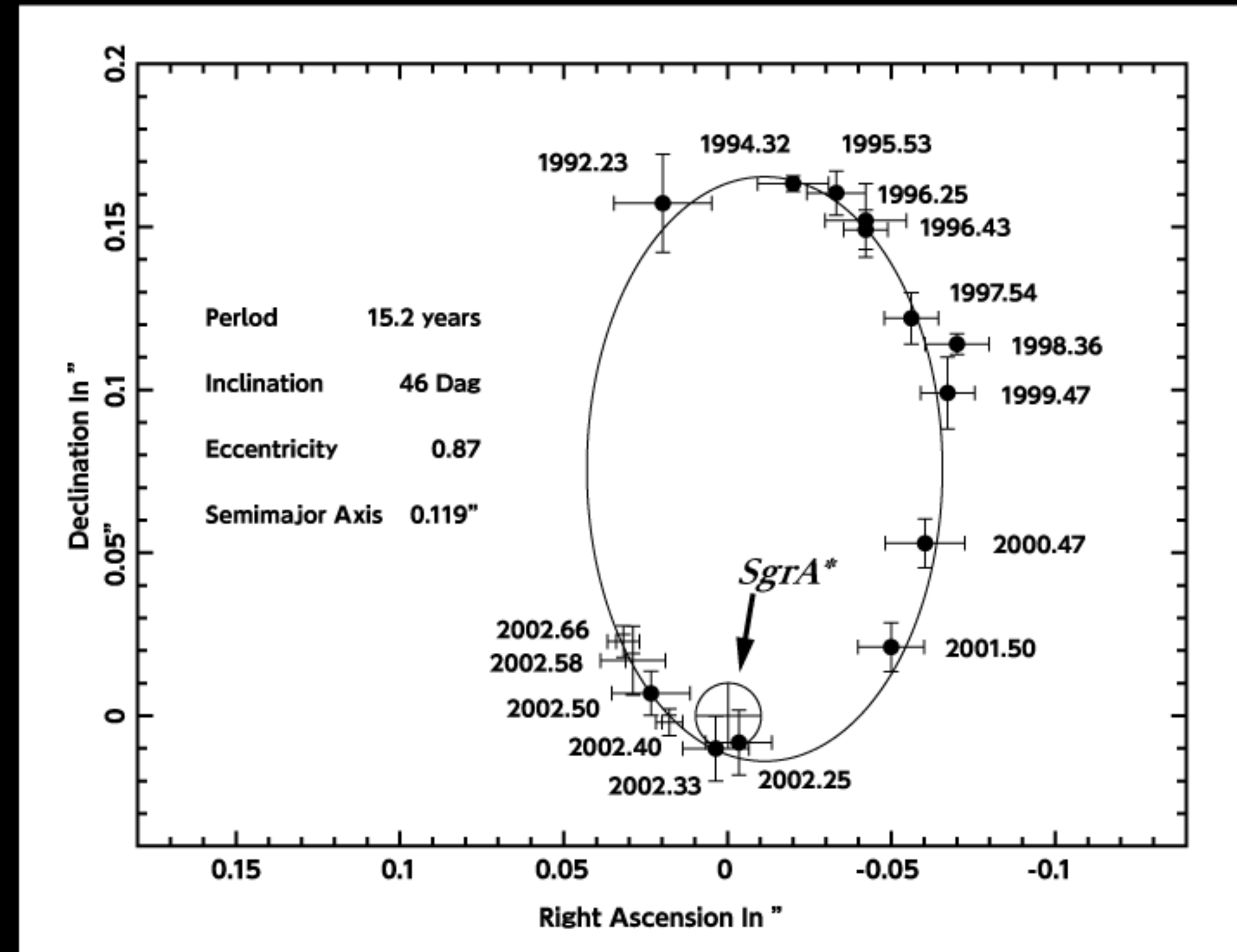
# 天の川銀河



出典 天文学辞典(日本天文学会) HP



# 天の川銀河の中心には巨大ブラックホールがある(太陽質量の400万倍)



## 2020年 ノーベル物理学賞受賞

ロジャー・ペンローズ

「ブラックホール形成が一般相対性理論におけるごく自然な帰結となることの発見に対して」

ラインハルト・ゲンツェル

アンドレア・ゲズ

「天の川銀河の中心に超大質量なコンパクト天体を発見したことに対して」



# 2019年4月10日 国立天文台グループ「ブラックホールの直接撮像に初めて成功」

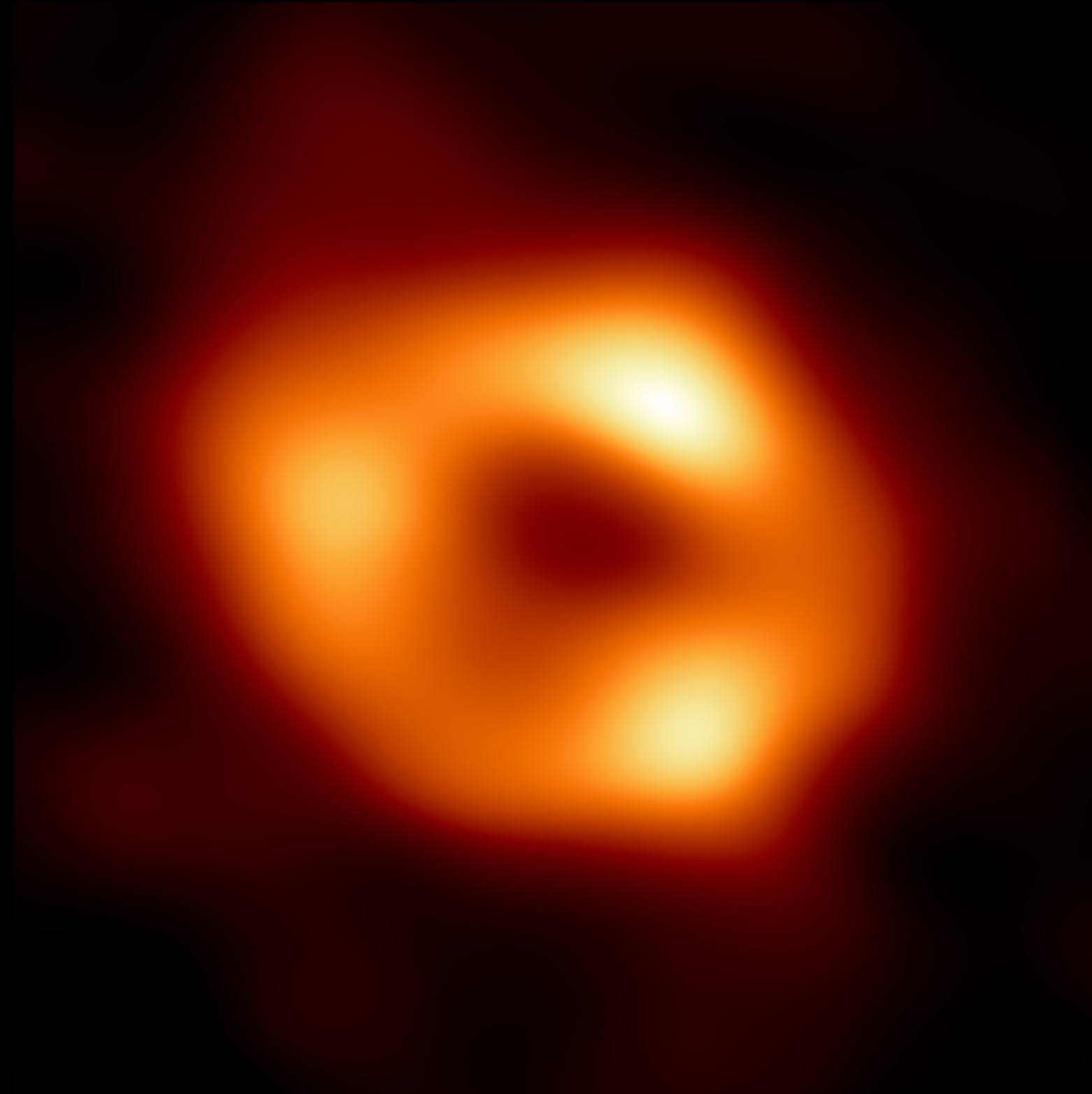


M87銀河（地球から5500万光年, 太陽質量の65億倍）

出典 Event Horizon Telescope HP



# 2022年5月22日 国立天文台グループ「天の川ブラックホールの撮像に成功」



天の川銀河中心（地球から3万光年, 太陽質量の400万倍）

出典 Event Horizon Telescope HP



# ブラックホール

=重力が強すぎて、光さえも出られない天体

=因果的に隔離される領域

境界＝地平面（ホライズン）

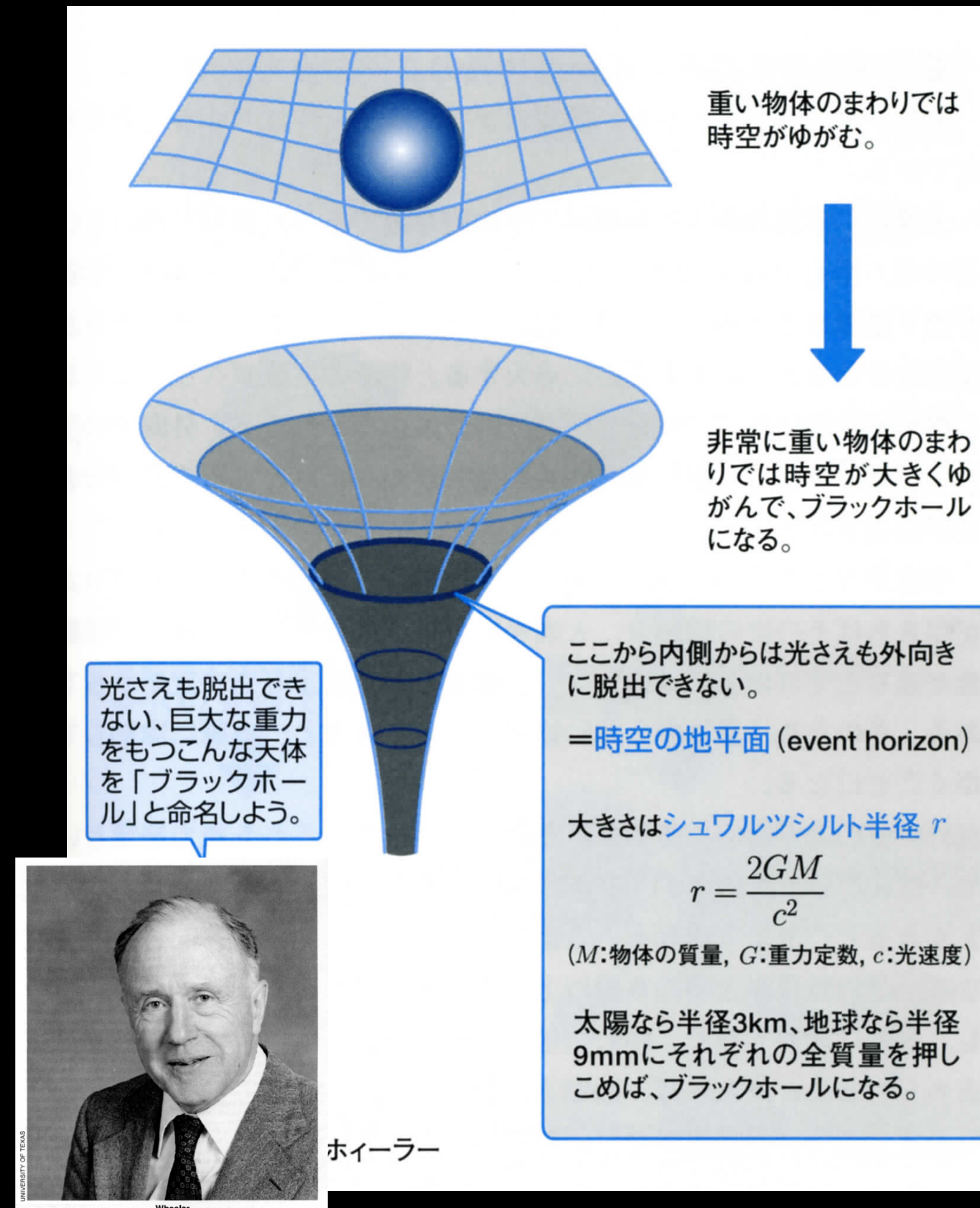
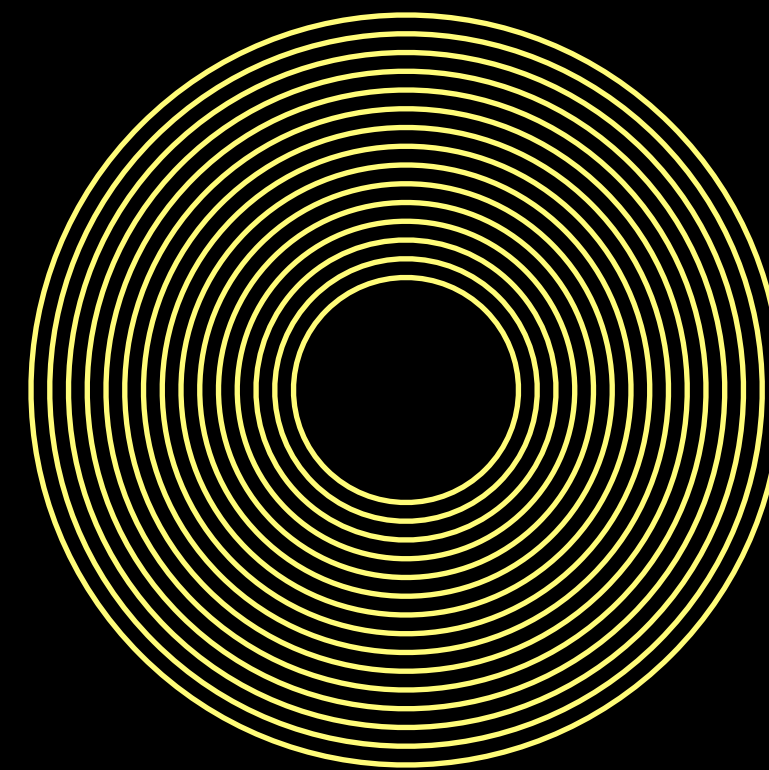


表 4.1: シュヴァルツシルト半径 (対応するブラックホールの大きさ). 質量  $M$  の物体がどの位の半径  $R_{\text{Sch}}$  に押し込まれたらブラックホールになるか, という目安. Sgr A\* は天の川銀河中心の超巨大ブラックホール.

| 天体     | $M$                                         | $R_{\text{Sch}}$              |
|--------|---------------------------------------------|-------------------------------|
| 地球     | $6.0 \times 10^{24} \text{ kg}$             | 8.9 mm                        |
| 太陽     | $M_{\odot} = 2.0 \times 10^{30} \text{ kg}$ | 2.95 km                       |
| Sgr A* | $4.2 \times 10^6 M_{\odot}$                 | $1.24 \times 10^7 \text{ km}$ |





中心にあるブラックホールへ落ちていく宇宙ロケットが、  
同じ間隔でパルス光信号を周囲に放つときの光信号の伝播  
(光が次第にブラックホール近くから出てくるのに時間がかかる)



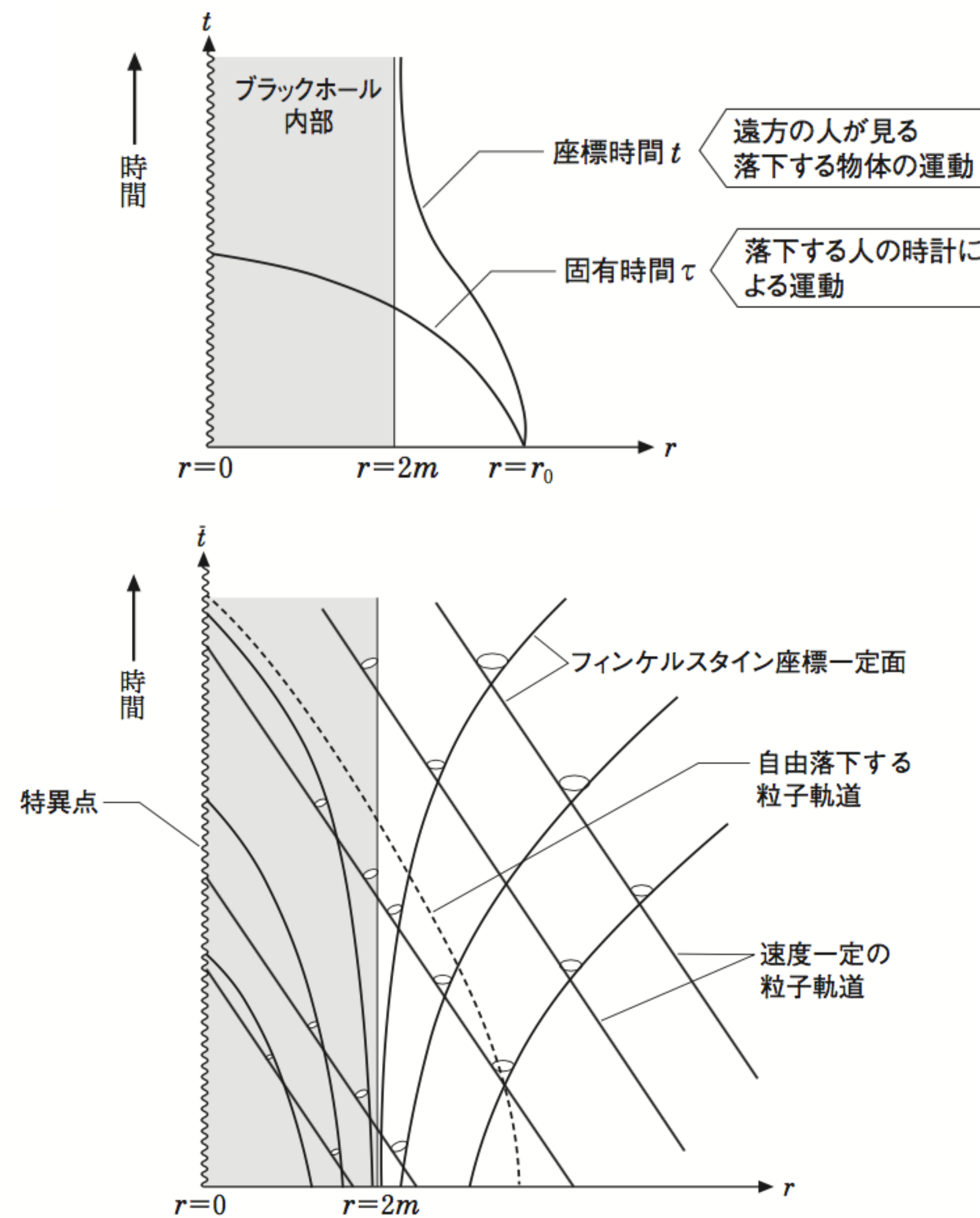


図27 シュヴァルツシルト解の振る舞い 〔上〕もともとの座標で見ると、星が重力崩壊して落ち込んでいく人は有限時間で落下するが、遠方から見て人にとっては無限の時間が経っても地平面までしか到達しないように見える。〔下〕縦軸と横軸がもとのシュヴァルツシルト座標で、フィンケルスタインの考案した座標は図中の実線。フィンケルスタインの考案した座標を使うと、地平面を通過して扱うことが可能になる。各時刻と位置から光を出した時の円錐も描いてある。





# GPS (Global Positioning System)

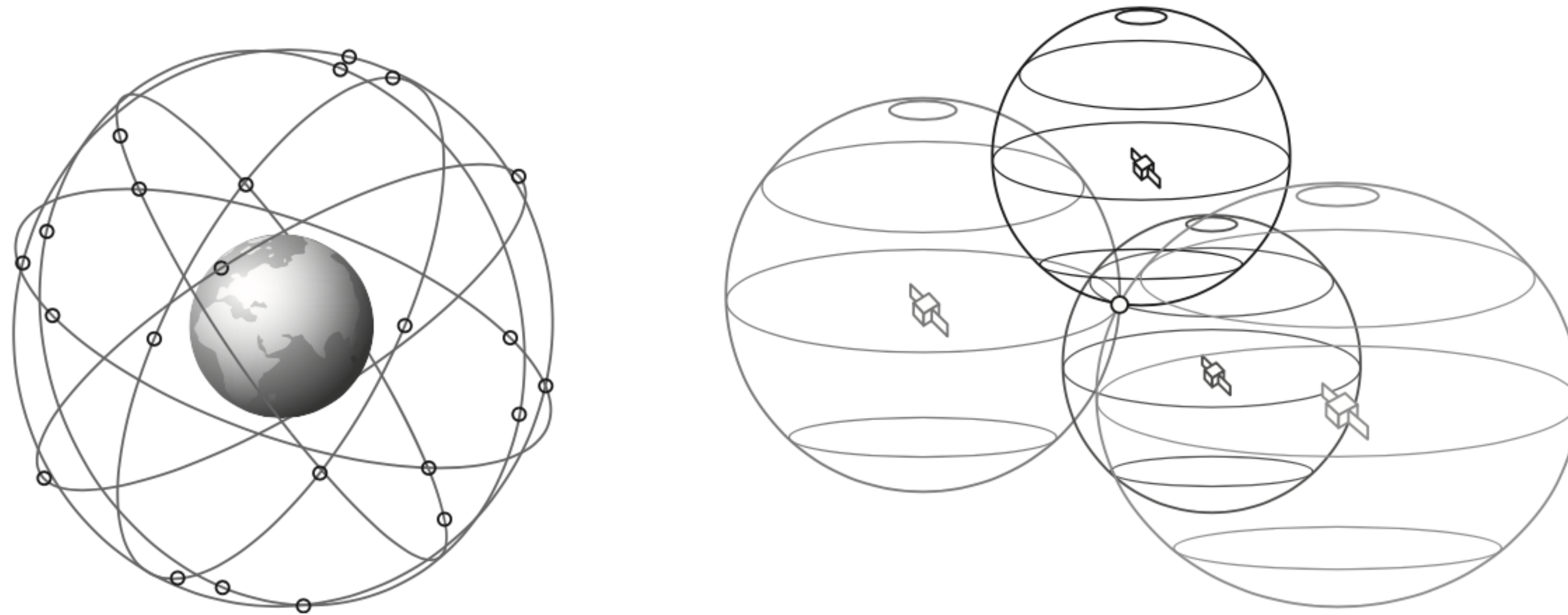


図 3.43 GPS システム. 2 台の GPS 衛星からの電波を使うと重なり合う部分は 1 つの円周上, 3 台からの電波では 3 点に絞られ, 4 台の衛星からの情報を使うと 1 点に絞られる.



正確な位置と時刻の情報を含んだ電波で,

3 角測量→精度 $\pm 15\text{m}$

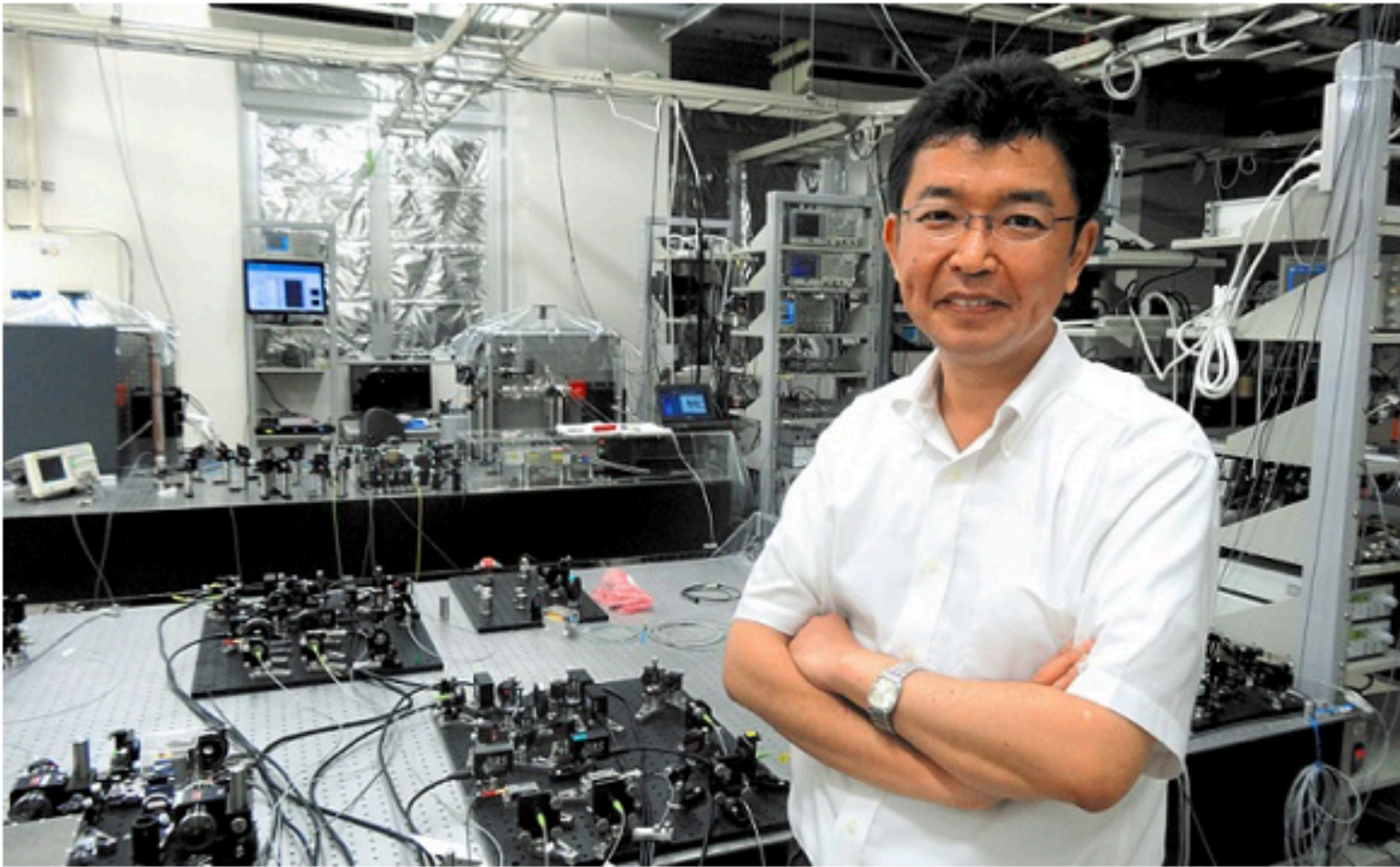
高速飛行の**特殊相対論効果**と

地球重力の**一般相対論効果**

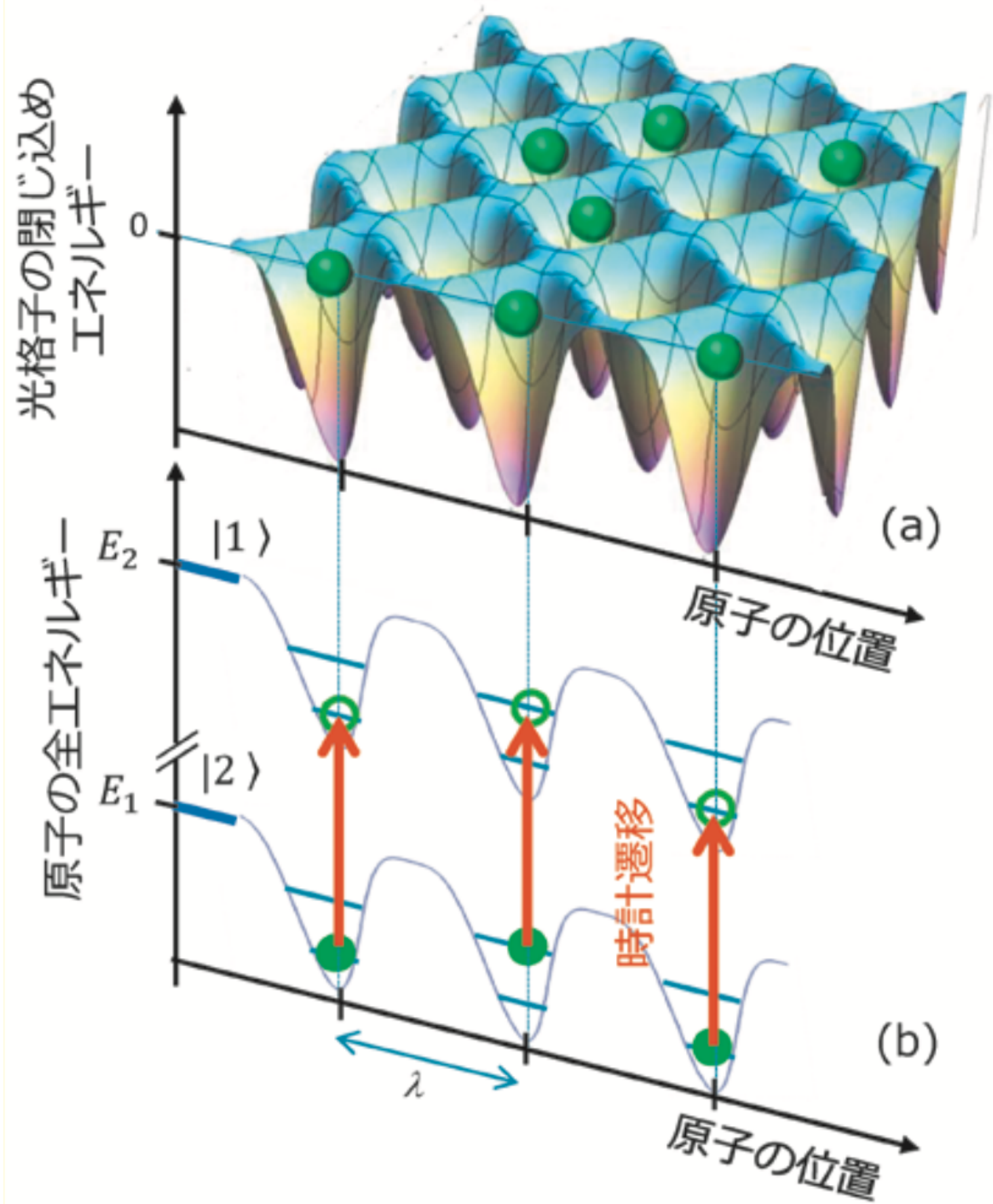
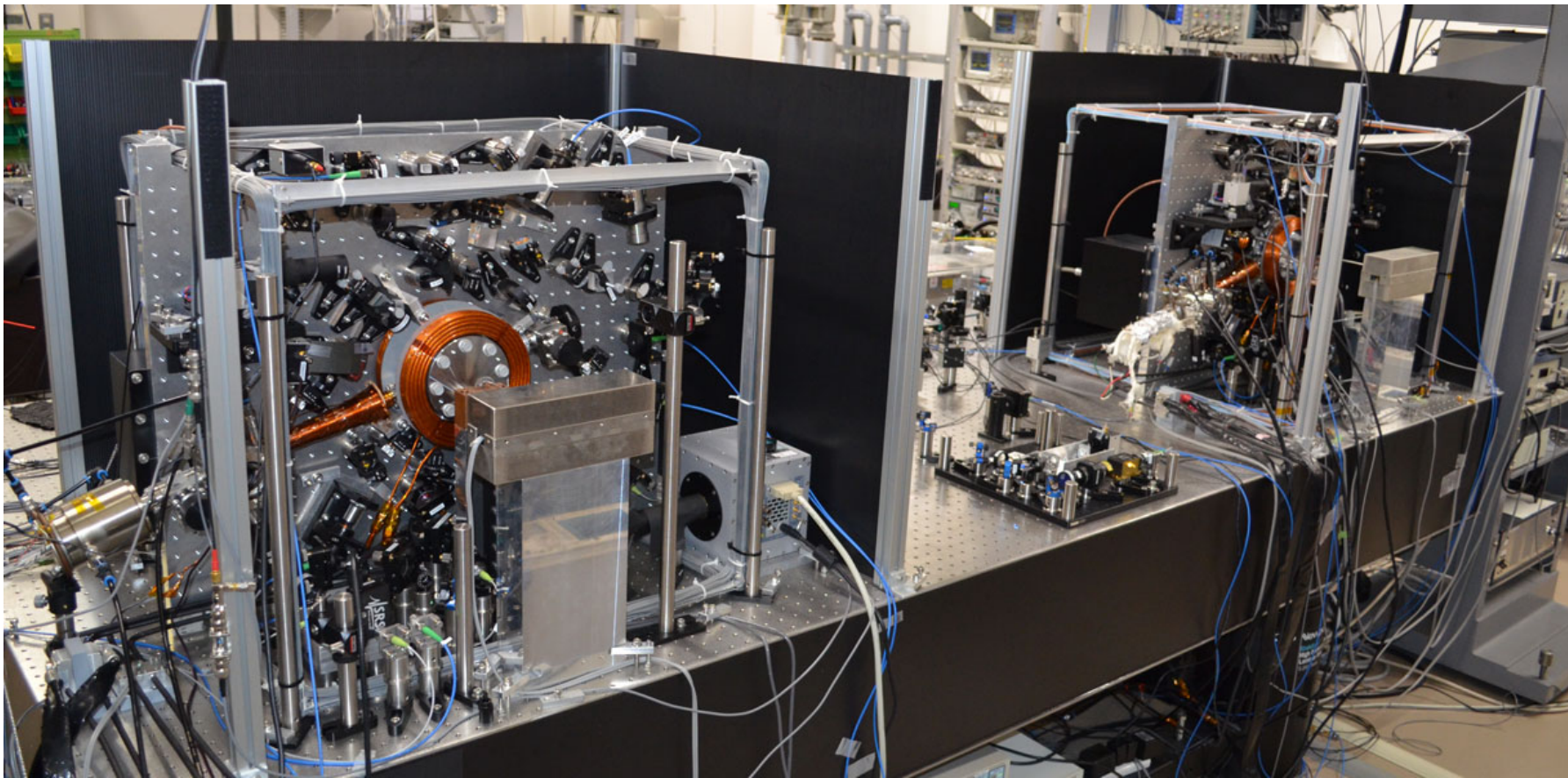
⇒ 1 日につき,  $38 \times 10^{-6}$  秒ずつ衛星の時計を遅らせる必要あり

一般相対性理論は正しい





光格子時計を開発した香取秀俊東京大学教授  
兼理化学研究所招聘主任研究員＝2013年7月  
31日、田中郁也撮影



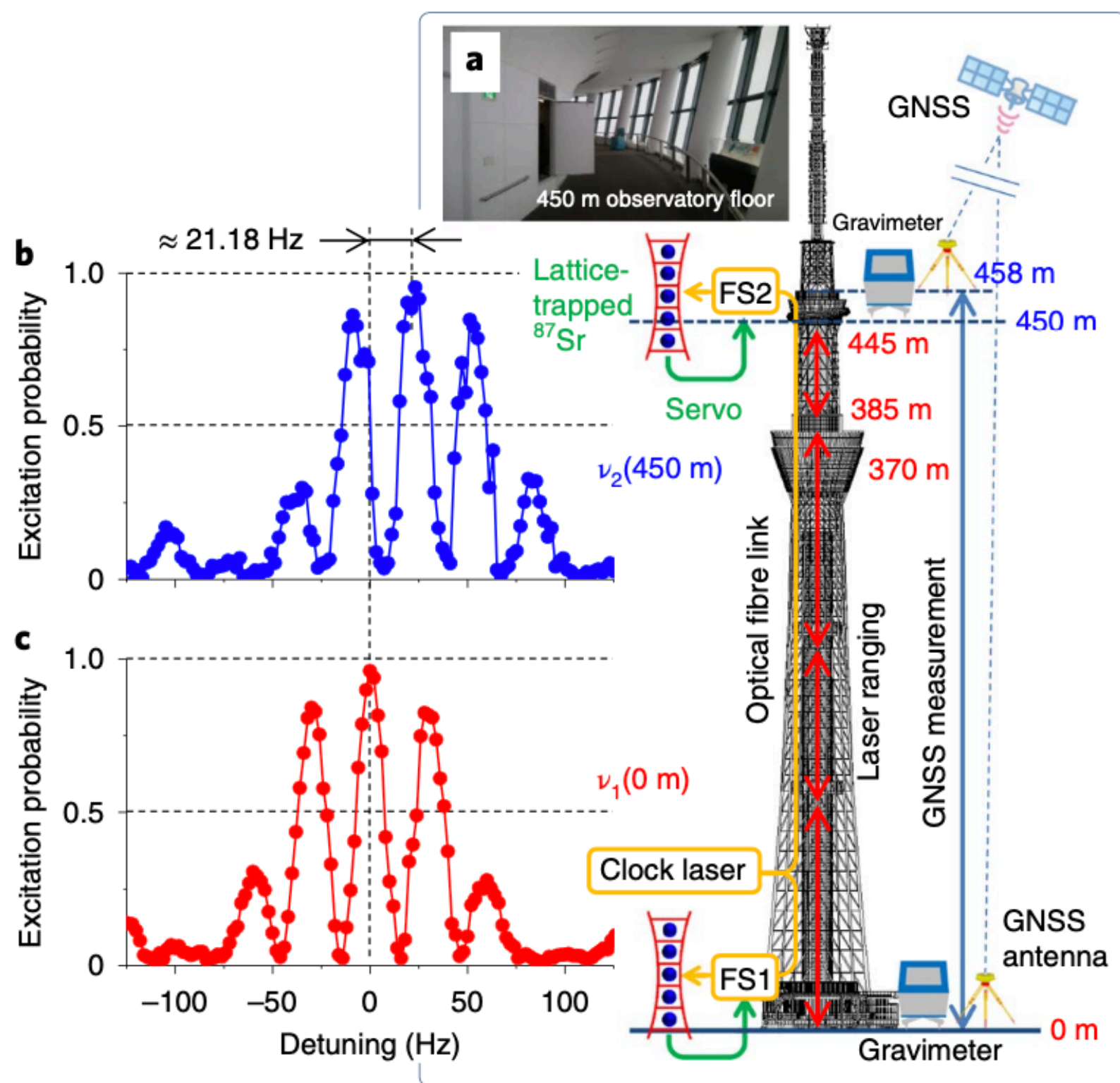
10<sup>-18</sup> の精度を実現  
(300億年ですれは1秒以内)



アインシュタインの相対性理論によれば、  
重力の強いところでは時間の進み方が遅くなる

地上と450mの展望台に光格子時計を設置して検証

図 6: 東京スカイツリーでの一般相対論検証実験の概要。地上階と展望台に設置した2台の可搬型光格子時計を光ファイバーでつなぎ、周波数比較を行った。一方、2台の時計の標高差を従来の測量手法（GNSS 測量およびレーザー測距）によって計測した。時計遷移を分光して得られたスペクトルでは、標高差 450 メートルに相当する約 21 ヘルツの周波数シフトが観測された。



1 週間の計測. 平均して, 差が

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = (49337.8 \pm 4.3) \times 10^{-18}$$

$$\frac{g\Delta h}{c^2} = (49337.1 \pm 1.4) \times 10^{-18}$$

相対性理論の正しさを

$$(1.4 \pm 9.1) \times 10^{-5}$$

の精度で検証したことになる



## Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks

Masao Takamoto<sup>1,2</sup>, Ichiro Ushijima<sup>3</sup>, Noriaki Ohmae<sup>1,2</sup>, Toshihiro Yahagi<sup>4</sup>, Kensuke Kokado<sup>4</sup>, Hisaaki Shinkai<sup>5</sup> and Hidetoshi Katori<sup>1,2,3</sup> ✉

Nature Photonics, 14 (2020) 411

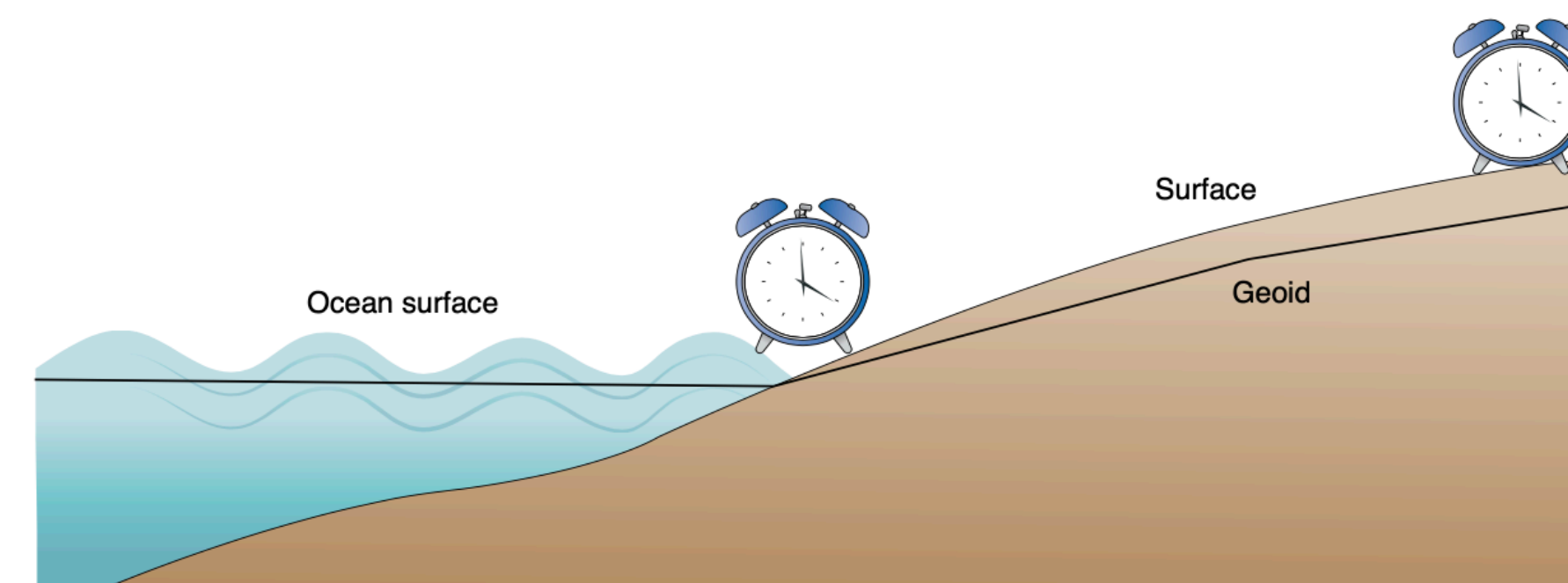




Physics Today 2020 July

冷蔵庫サイズの時計で，高度差450mを  $\pm$ 数cm で測定できる.

光格子時計の社会実装に向けた大きな一歩.  
今後，地殻変動や火山活動の監視など，相対論的測地技術の実用化が期待される.



**Fig. 1 | Illustration of how in the future relativistic geodesy might be done with clocks.** The geoid is an equipotential surface of the Earth's gravitational potential, indicated by the black line. While the mean ocean surface is closely aligned with the geoid, the surface of land can significantly differ. Placing one clock at sea level and one at an inland location allows to determine the geoid height via a frequency comparison between the clocks.

K.Bongs & Y.Singh, Nature Photonics 14 (2020) 408



# 一般相対性理論は正しいか？

- **時空のゆがみ**

水星の近日点移動が説明できた  
地球重力の検証では理論に反しない

- **光の曲がり**

重力レンズ効果，皆既日食でも，銀河レンズでも，  
GPS衛星からの電波の修正項



## 【8-1】(本日の講義から)

特殊相対性理論は、「\_\_\_\_\_」という理論.

一般相対性理論は、「\_\_\_\_\_」という理論.

どちらも1-2行で要約せよ.

## 【8-2】(本日の講義関連)

皆既日食の観測によって, (a)\_\_\_\_\_が確認されたことにより,

一般相対性理論の予言する(b)\_\_\_\_\_が確認された.

## 【8-3】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)