最先端物理学が描く宇宙
Frontiers of Physics & Cosmology

第8回　2025/11/10

第3章　現代物理学1：相対性理論（3）

真貝　寿明
Hisaaki Shinkai

真貝の武庫川講義ページtop

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

【天文観望】

11月12日(水)深夜 おうし座北流星群が極大

2025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。今年は火球の割合が例年以上に高めとの予想もある。

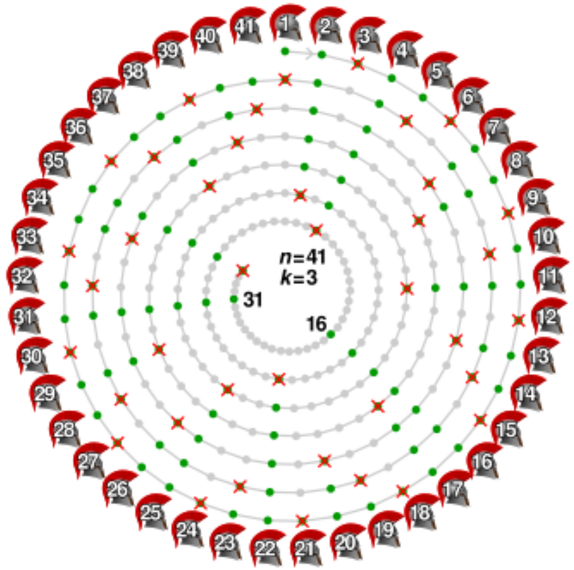
11月上旬から中旬にかけて、おうし座南・おうし座北流星群の活動が見られる。はっきりとした極大のない流星群だが、南群は11月5日ごろ、北群は11月12日ごろが極大とみられている。両群とも母天体は周期3.3年のエンケ彗星である。

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、火球の割合が高いことで知られ、明るいものを目にできるかもしれない。さらに今年は、その火球の割合が例年以上に高い可能性も指摘されている。月明かりの影響が大きいタイミングのため条件は良くないが、少し気にかけて空を見上げてみよう。流れ星の速度は遅め。

天文年鑑による予想では1時間5個

https://www.astroarts.co.jp/article/hl/a/14185_ph251112

継子立てとヨセフスの問題



継子立て問題の歴史

　関孝和編『算脱之法』

Josephus problemの歴史

　Euler『新しく発見された特異な数列』

両者を結ぶものはあるか

202511 継子立てヨセフス問題 print

202511 継子立てヨセフス問題 slide

真貝寿明(大阪工業大学 情報科学部)
hisaaki.shinkai@oit.ac.jp
https://www.oit.ac.jp/labs/is/system/shinkai/

189

第一　まゝ子だての事

子三十人有内、十五人は先腹、残る十五人は当腹の子也。右のごとく立ならべて十にあたるをのけて、又二十にあたるをのけ、二十九人までのけて、残る一人にあとをゆづり可レ申と云時、まゝ母かくのごとく立たる也。さて、かぞへ候へば、先腹の子十四人までのき申候時、今一たびかぞへれば先腹の子みなのき申候ゆへに、一人残たるまゝ子のいふやうは、あまり片一双にのき申候間、いまよりはわれよりかぞへられ候へといへば、ぜひにをよばずして、一人残りたる先腹の子よりかぞへ候へば、当腹の子皆のき、先腹の子一人のこりてあとをとるとなり。

岩波文庫

継子立ての問題設定

先妻の子15人と，後妻の子15人を残して主人が亡くなった．誰か一人に財産を継がせることになったが，後妻は実子を選びたい．そこで，30人をある順に円形に並べ，10人ごとに取り除くことにした．初めて見ると，先妻の子（継子）だけが次々と取り除かれていく．15人目の継子が「これは意図的であまりにひどい．今から自分から数え直して欲しい」と嘆願する．後妻は同意し，その子から数え始めると15人の実子がすべて取り除かれ，15人目の継子が最後に残った．どのような順に並べたか（どこから数えたか）．

最後に残された継子が，こんどは自分から逆回りに数え直して欲しい，と嘆願した．後妻は同意し，その子から数え始めると，継子が最後に残った．

継子を黒丸●，実子を白丸○

●●○●●●○○○○○●●○○●●●●○●○○○●○○●●○

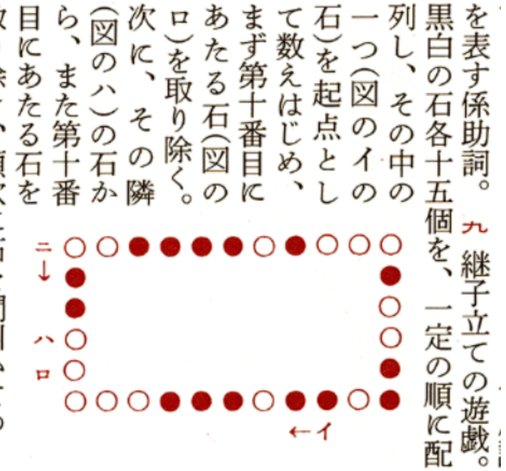
{2,1,3,5,2,2,4,1,1,3,1,2,2,1}

継子立ての歴史　徒然草137段

兼行法師 1330年頃

るべからず。一日に一人、二人のみならんや。鳥部野・舟岡、さらぬ野山にも、送る数多かる日はあれど、送らぬ日はなし。されば、棺をひさくもの、作りてうち置くほどなし。若きにもよらず、強きにもよらず、思ひかけぬは死期なり。今日まで遁れ来にけるは、ありがたき不思議なり。しばしも世をのどかには思ひなんや。ままこだてといふものを双六の石にて作りて、立て並べたるほどは、取られん事いづれの石とも知らねども、数へあてて一つを取りぬれば、その外は遁れぬと見れど、又々数ふれば、彼是間抜き行くほどに、いづれも遁れざるに似たり。兵の軍に出づるは、死に近きことを知りて、家をも忘れ、身をも忘る。世をそむける草の庵には、閑かに水石をもてあそびて、これを余所に聞くと思へるは、いとはかなし。閑かなる山の奥、無常の敵競ひ来らざらんや。その死に臨める事、軍の陳に進めるにおなじ。

今日まで死からまぬかれてきたということは、珍しい不思議なことなのである。しばらくでも、この世をのんびりしたものと思えようか。継子立てというものを、双六の石で作って、置き並べてあるうちは、取られるであろうのは、どの石であるともわからないが、数えあてて一つの石を取ってしまえば、その他の石はまぬかれたように見えるが、さらにまた数えると、あれこれと間引いてゆくうちに、どの石も遁れられないのと、人間の運命は似ている。武士の戦



を表す係助詞。九 継子立ての遊戯。黒白の石各十五個を、一定の順に配列し、その中の一つ(図のイの石)を起点として数えはじめ、まず第十番目にあたる石(図のロ)を取り除く。次に、その隣(図のハ)の石から、また第十番目にあたる石を取り除き、順次に石を間引いてゆくと、白は(図のニ)の石だけが残る。さて今度は、残った白(図のニ)の石を起点に順々に、十ずつ反対の方向に数えて間引いてゆくと、ついに白(図のニ)の石一つだけが残る仕組みである。一〇 十番目、十番目と数えあてて。一一 そのほかの石は助かった。一二 間をおいて抜き取る。一三 どの石も。一四 俗世間を隠遁した。

小学館『新編日本古典文学全集44　方丈記／徒然草／正法眼蔵随聞記／歎異抄』（校注／訳　神田秀夫・永積安明・安良岡康作）1995年

ヨセフス問題

15人のキリスト教徒と15人のトルコ人が同じ船で航海していた. 激しい嵐に遭遇したため, 水先案内人は船に乗っていた人々の半分を海に投げ込み, 残りの人々を救う必要があると言った. これは力ずくでしかできない. そこで, 全員を順番に配置し, 9ずつ数えて9人目を海に投げ込むことで合意した.
30人のうち15人だけが残るようにする. キリスト教徒を一人も失うことなくトルコ人を全員投げ込むにはどのように並べるべきか.

Claude-Gasper Bachet (1581-1638) による『Problemes plaisants et d'electables qui se font par les nombres. 2nd ed.』(1624)

$15+15$ 人の 9 脱であり，取り除かれる順は，

$$E_i^{(30,9)} = \{23, 20, 28, 24, 14, 4, 7, 12, 1, 19, 16, 10, 26, 27, 25, 5, 18, 2, 8, 29, 30, 13, 15, 11, 22, 6, 3, 21, 17, 9\}$$

となるから，トルコ人を●，キリスト教徒を○とすれば，
○○○○●●●●●○○●○○○●○●●○○●●●○●●○○● となり，並べ順は $\{4, 5, 2, 1, 3, 1, 1, 2, 2, 3, 1, 2, 2, 1\}$ となる[9].

母音a,e,i,o,u をそれぞれ1,2,3,4,5 と対応させて,
“From numbers' aid and art, never will fame depart” （数の助けと技術によって名誉は去らない）.
4 5 2 1 3 1 1 2 2 3 1 2 2 1

継子立て問題 と ヨセフスの問題 につながりはあるか？

15＋15の9脱 {4,5,2,1,3,1,1,2,2,3,1,2,2,1}

		n	m
1150 頃	エズラ (Rabbi Abraham ben Ezra, 1546 年出版)	学生 15+ 怠け者 15	9
1363	サファディ (Salah al-Din al-Safadi)	M15+C15	9
15c	カランドリ (Filippo Calandri)	C15+J15	
1465 頃	フィレンツェ (Benedetto da Firenze)	C15+J15	9
1484 頃	シュケ (Nicolas Chuquet)	C15+J15	9
1485 頃	カランドリ	修道士 15+15	9
1500 頃	パチョーリ (Luca Pacioli)	C2+J30	9
1500 頃	パチョーリ	C2+J18	7
1500 頃	パチョーリ	C2+J30	7
1500 頃	パチョーリ	C15+J15	9
1539	カルダーノ (Gerolamo Cardano)	黒＋白	
1556	タルターリャ (Niccolo Fontana Tartaglia)	C+T, 黒＋白	
1559	ブテオ (Johannes Buteo)	C15+J15	10
1612	バシェ (Claude-Gasper Bachet)	C15+T15	
1624	エッテン (Hendrik van Etten)	C15+T15	9
1678	ヴィンゲイト (Edmund Wingate)	C15+T15	
1725	オザナム (Jacques Ozanam)	C15+T15	9

選択したスライドのレイアウトを変更します。

Euler 1776

15＋15の10脱 {2,1,3,5,2,2,4,1,1,3,1,2,2,1}

10＋10の10脱 {1,1,3,2,1,3,2,2,3,2}

＜平安時代＞

[1106 -1159 藤原通憲 (村井中漸によれば，継子立の考案または伝授者)]

[1127 『懐中歴』(『二中歴』の博棊歴が基づく)]

1151-1156 頃『簾中抄』(「まゝこたての略頌」の項で数字列 2 つを列挙)

＜鎌倉–南北朝 時代＞

1210-1221 頃『二中歴』(博棊歴の「後子立」の項で数字列 2 つを列挙)

1310-1331 頃『徒然草』(死を免れぬ身をまゝ子立の石にたとえる)

1278-1346 頃『異制庭訓往来』(「継子立」に言及)

?–1372『新撰遊覚往来』(「三十二十之継子立」に言及)

＜室町–戦国–安土桃山 時代＞

1500 頃『十二段草子』(「ありやなしやのまゝこたて」に言及)

1500 頃 天理図書館蔵『鼠の草子絵巻』(「ありやなしやのまゝこたて」を含む

＜江戸時代＞

1604『徒然草寿命院抄』(数字列 1 つを列挙し，10 番目を除くことに言及)

1624『徒然草野槌』(数字列 1 つを列挙し，10 番目を除くことに言及)

1627-1631 頃『塵劫記』刊年未詳の 5 巻本 (継子立の具象的な絵と文章説明を

[1644-1652?『姫百合のさうし』(「まま子だて」に言及)]

1693『男重宝記』(「三十二十之継子立」に言及)

関孝和編 1683

中国には同種の問題設定は見つかっていない（Needham, 1959;『中国の科学と文明4』p71）

引用文献に Smith & Mikami (1914), Smith(1925)

継子立てとヨセフスの問題　　まとめ

継子立て問題の歴史　　12cから

　関孝和編『算脱之法』（1683）

Josephus problemの歴史　10cから

　Euler『新しく発見された特異な数列』（1776）

両者を結ぶものはあるか　　見つかっていない

（中国経由でなくてもよい？）

最後に残る人 (survivor) を $J_m(n)$ とする

$J_m(n) = p$ とする.

$$J_m(n+1) = \begin{cases} p+m, & \text{if } p+m \le n+1 \\ p+m-(n+1), & \text{if } p+m > n+1 \end{cases}$$

202511 継子立てヨセフス問題 print

202511 継子立てヨセフス問題 slide

概 要

『塵劫記』を通じて有名になった「継子立て」は，円形にならべた人を 10 人ごとに外し，最後に残る人を勝ちとする算数遊戯である．2 つのグループ（先妻の子と，後妻の子）を特別な順にならべると，1 つのグループだけが先にすべて取り除かれていくが，取り除かれていくグループの最後の一人の提案で，勝敗が逆転するというストーリー性を持っている．このような逆転劇がどのような設定で生じるか，という一般化された問題は，関孝和編『算脱之法』(1683 年) にて論じられ，再帰的方法で導かれている．

一方，継子立てとよく比較される西洋の Josephus（ヨセフス）の問題は，同じ設定でありながら，最後に残される人はどこの位置か，というシンプルな問いかけであり，逆転するような展開はない．オイラーによって，この問題が数学問題に格上げされたのは 1776 年のことで，その特異な数列として，算脱之法と，まったく同じ再帰的方法が述べられていたことを発見したので報告する．和算の方が 80 年以上早く，問題を扱って解決していたことになる． 2 つの問題の間には，管見の限り，歴史的交流の跡は見つからない．

前回のミニッツペーパーから

ちょうど3連休の間に「インターステラー」を視聴しました。クーパーがマン博士にヘルメットを壊されていましたが、あんなに息が続くものなのでしょうか。映画だからでしょうか。またガンダムAGEという作品で生身で宇宙に飛び出すシーンがあるのですが、可能なのでしょうか。

宇宙で宇宙服が破けたら，一瞬で中の空気が抜け，人間も風船のように爆発すると思われます．

インターステラーをみてみたいです。

インターステラーという映画は聞いたことがあってもどんな映画か知りませんでした。今日予告を見ましたが、おもしろそうで見てみようかなと思いました。

映画「インターステラー」ではブラックホールの中は五次元であり過去に戻ることができると解釈されていましたが、現実では、物質は粒子がバラバラ化すると考えられていると聞きました。

タイムスリップは、現実的な話ではなくて、どちらかというと夢物語で人間が欲望みたいなものだと思っていたけど、死生みたいな物理とか宇宙関連の勉強している人が話すような理論や計算で成り立つものかもしれないことが驚きでした。生きてるうちに開発してほしいです。

話題があること

バックトゥザフューチャー見たことがなかったので今度見ようと思いました。

前回のミニッツペーパーから

今回の講義もおもしろかったです.

☆色々な作品、メディアでも活躍している教授は凄くて、授業を受けられているのも凄い事なんだなと感じました。

すごいことなんだな.

この前母とオリオン座流星群を見ていたらUFOみたいなのが母と同時に見えました。とても速かったので飛行機ではないです。なんだったのでしょうか？

こんな形でした。

UFOですね(Unidentified Flying Object)

住める惑星が発見した場合、所有権は見つけた国のものになるのか？

住める

さて, どうなるのか.

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, 何かヘマすると, すぐに伝わります. たとえば. .

The Guardian

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

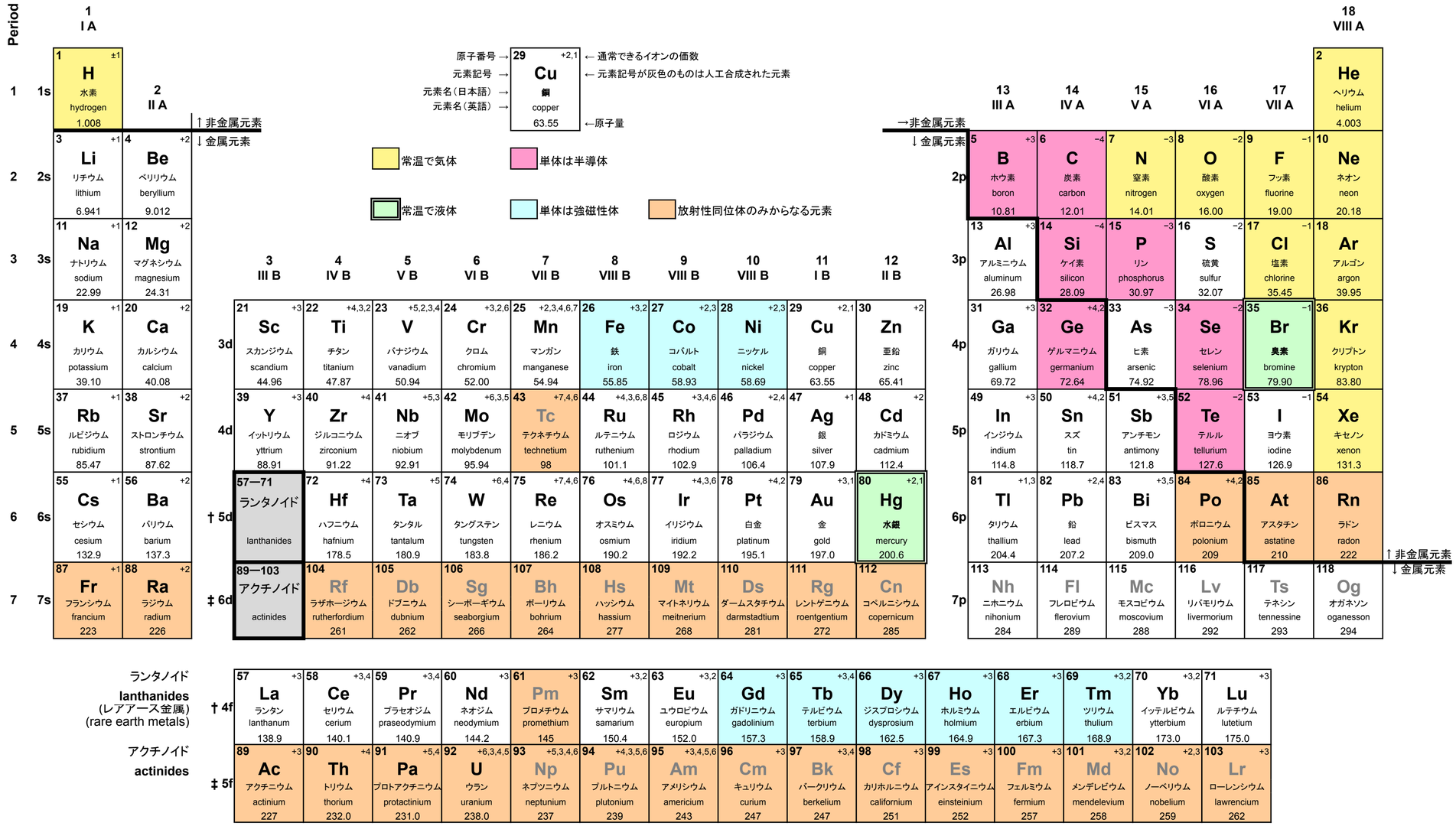
Mon 30 Mar 2020 05.48 BST

51,503

https://www.theguardian.com/australia-news/2020/mar/30/astrophysicist-gets-magnets-stuck-up-nose-while-inventing-coronavirus-device?

周期表（periodic table）

教科書　後ろ見開き

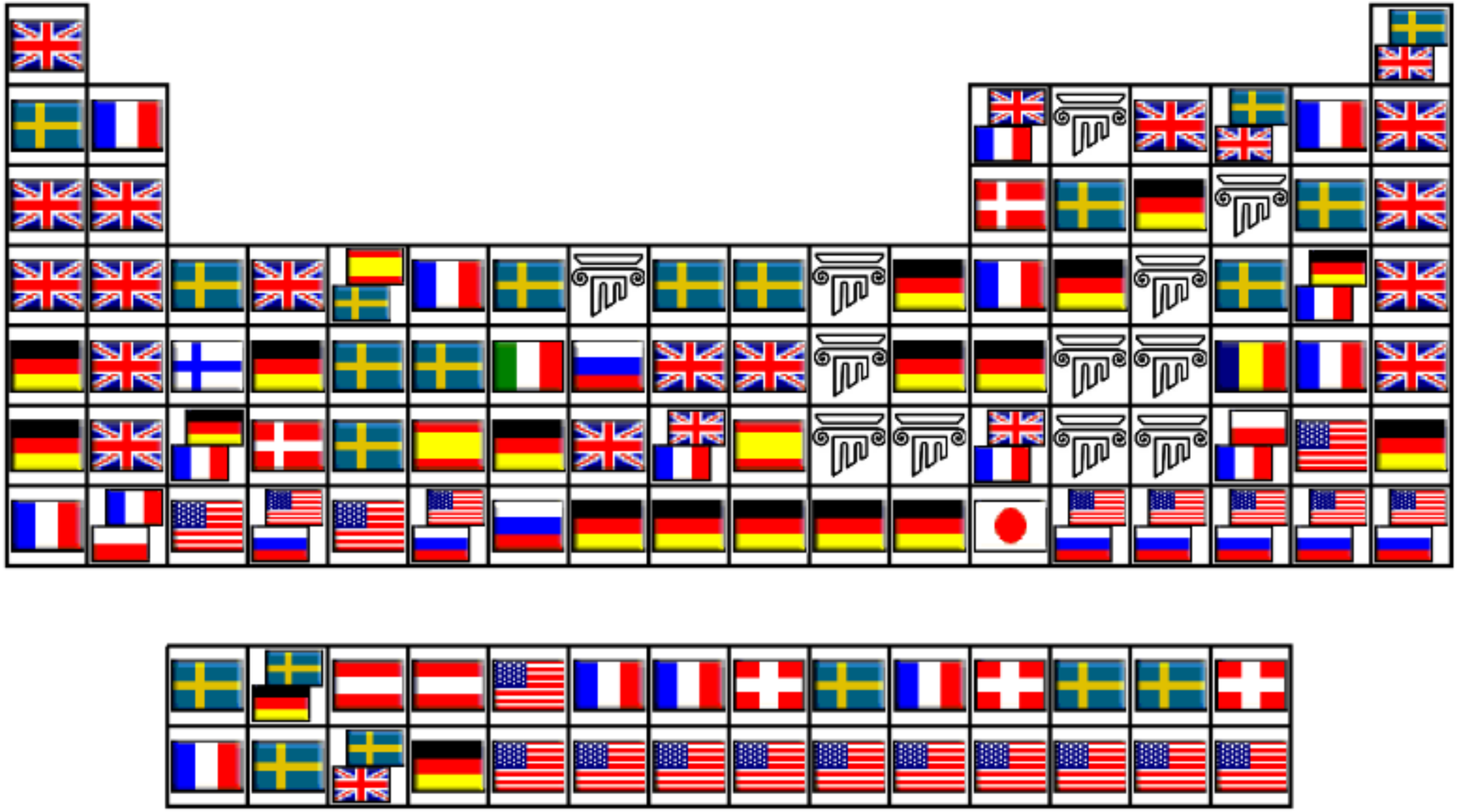


周期表を久しぶりに見てなつかしくなりました。
生粋の文系だったので、必死に化学反応式を覚えましたが
もうすっかり全部忘れました☆

改めて
地球にもある物質が宇宙にみられるのはなぜか、
おもしろいと思った。

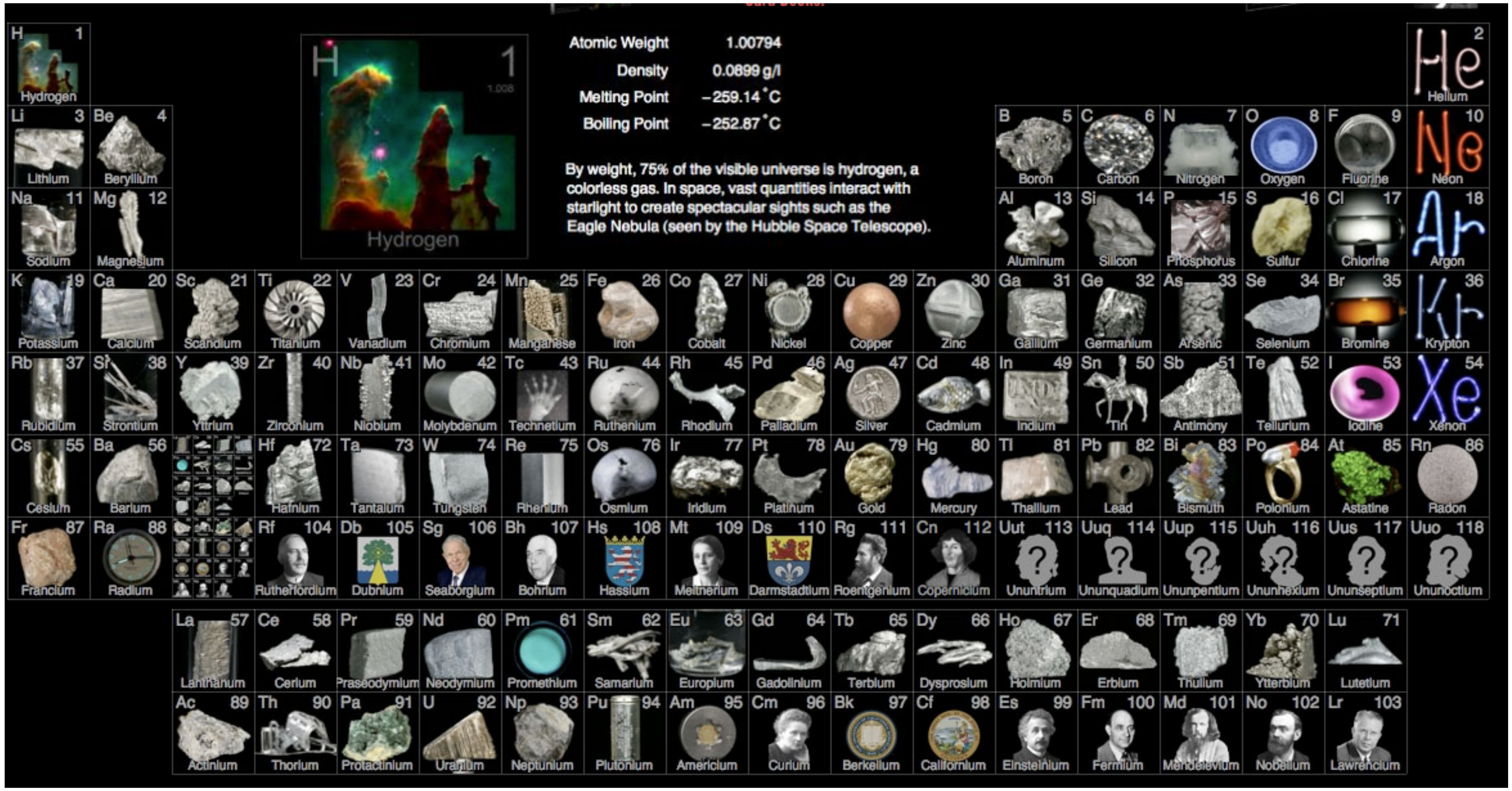
それがサイエンスというものです

周期表（periodic table）



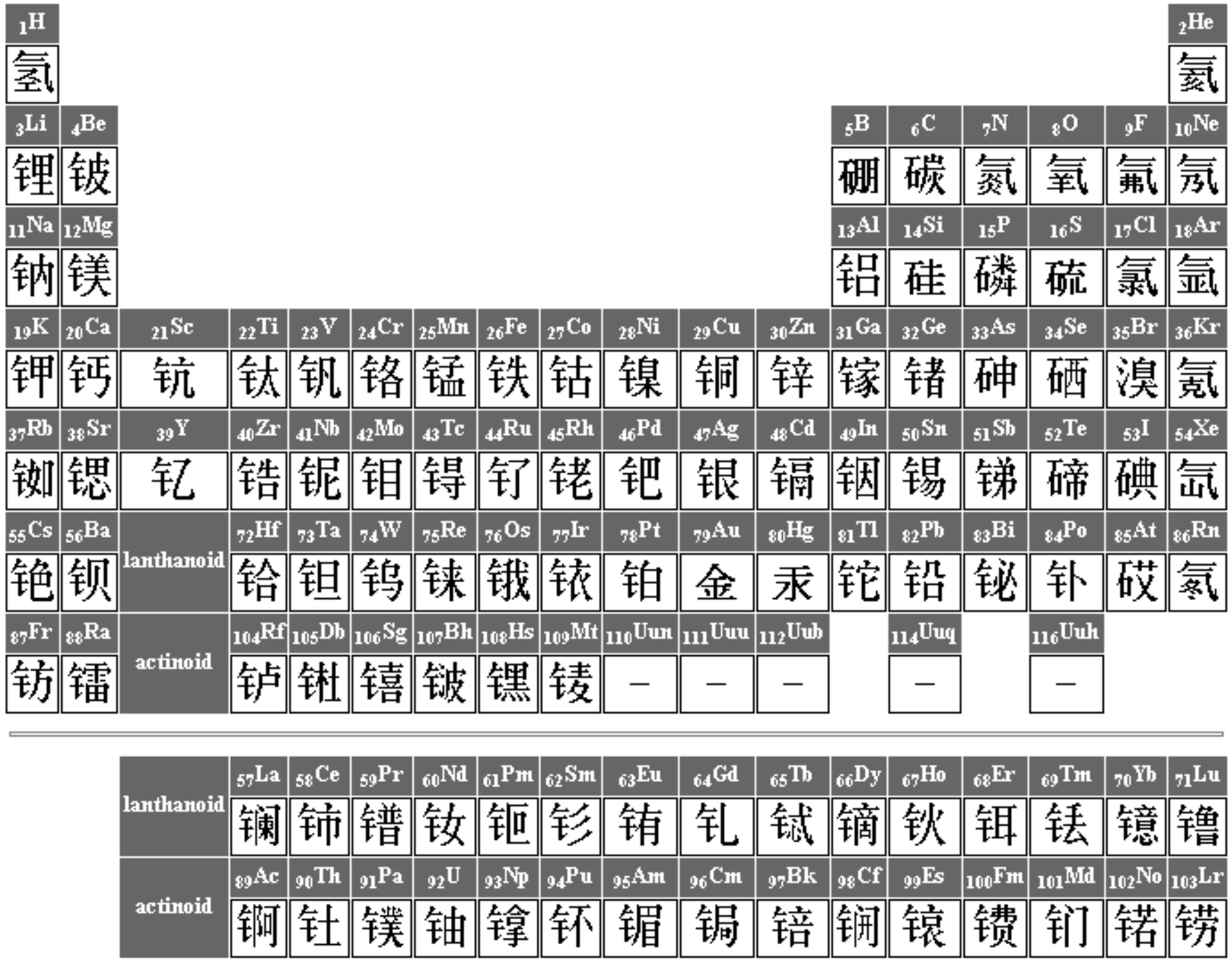
http://www.meta-synthesis.com/webbook/35_pt/pt_database.php?Button=Data+Mapping

周期表 (periodic table)

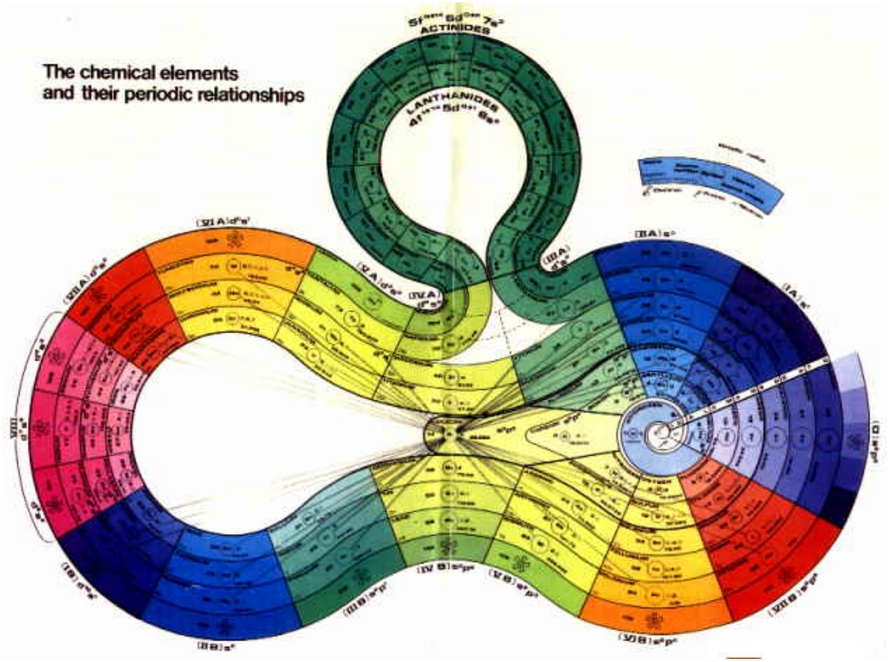


http://periodictable.com

周期表 (periodic table)

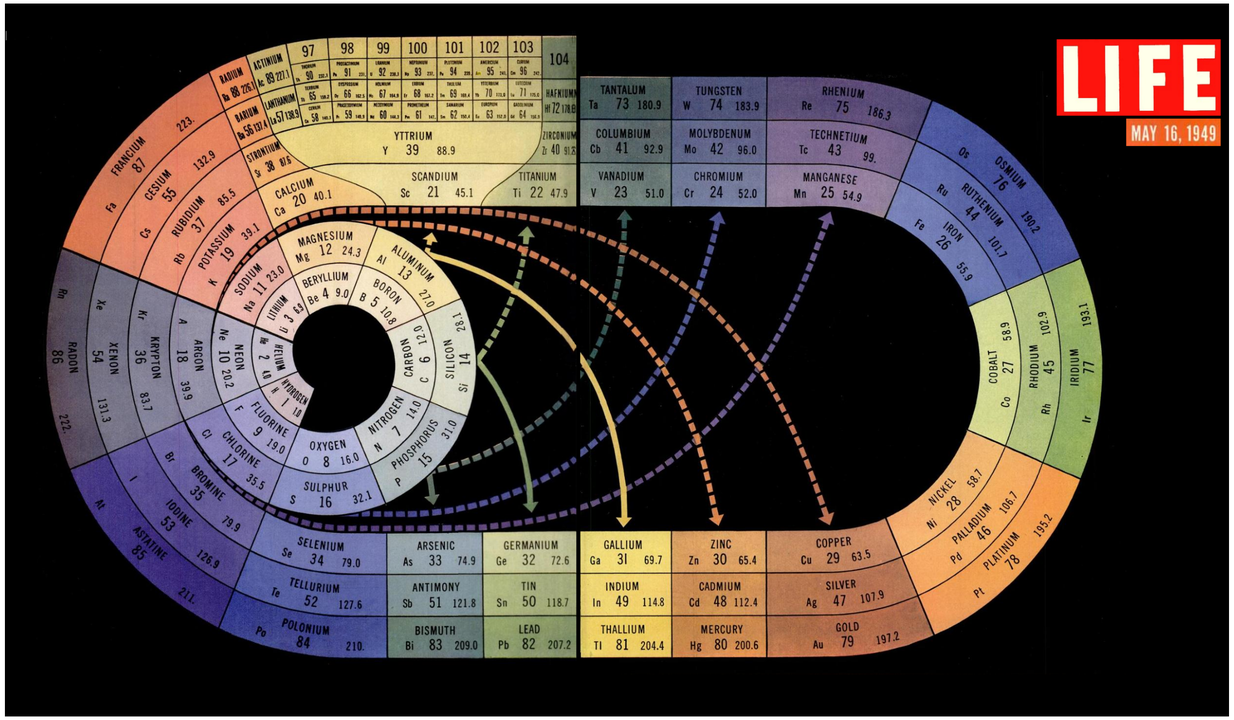


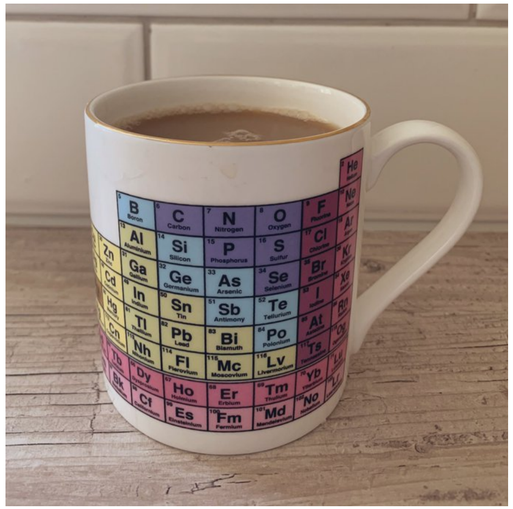
周期表 (periodic table)



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

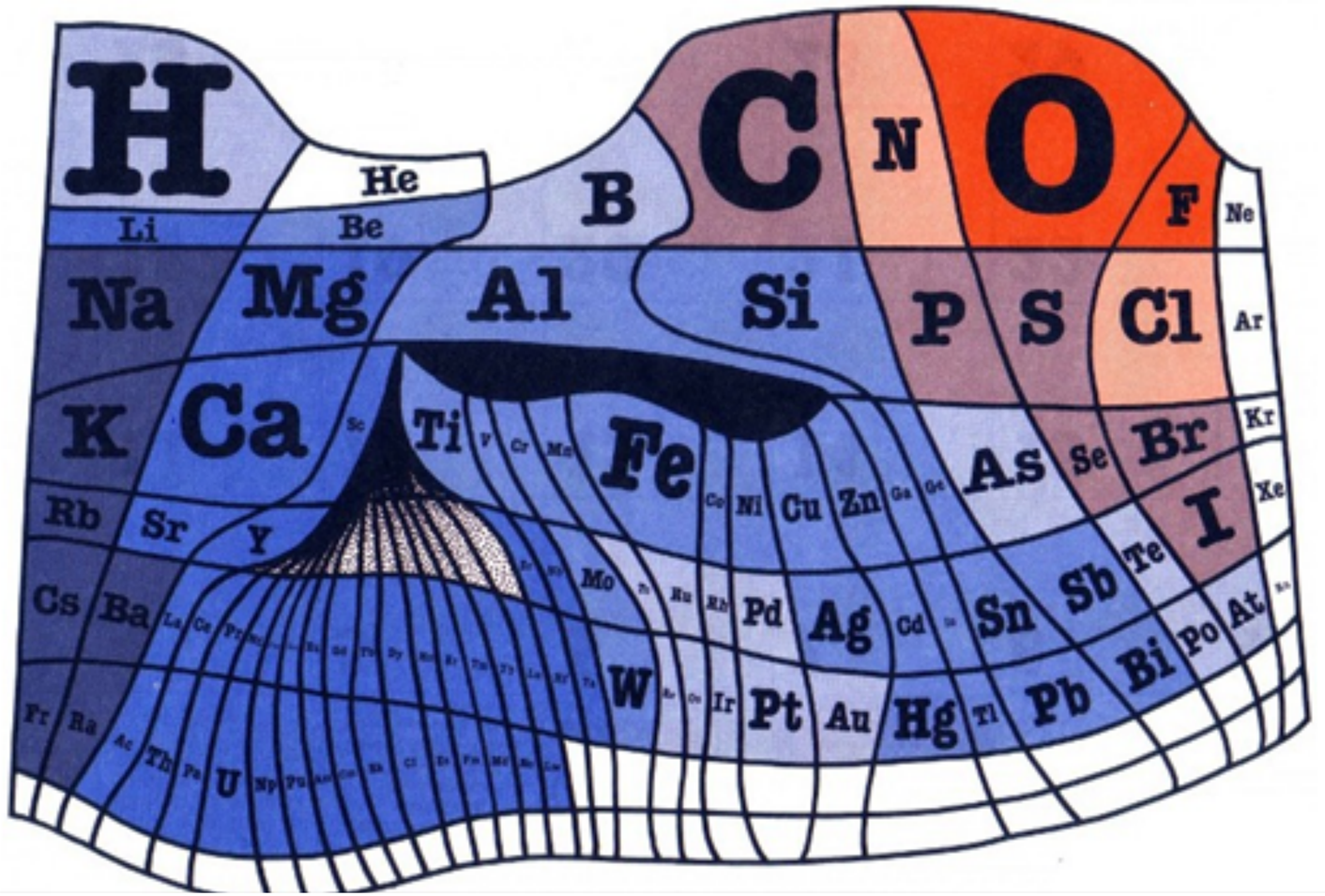
http://img.gawkerassets.com/img/18pdj3j02ehfwpng/original.png





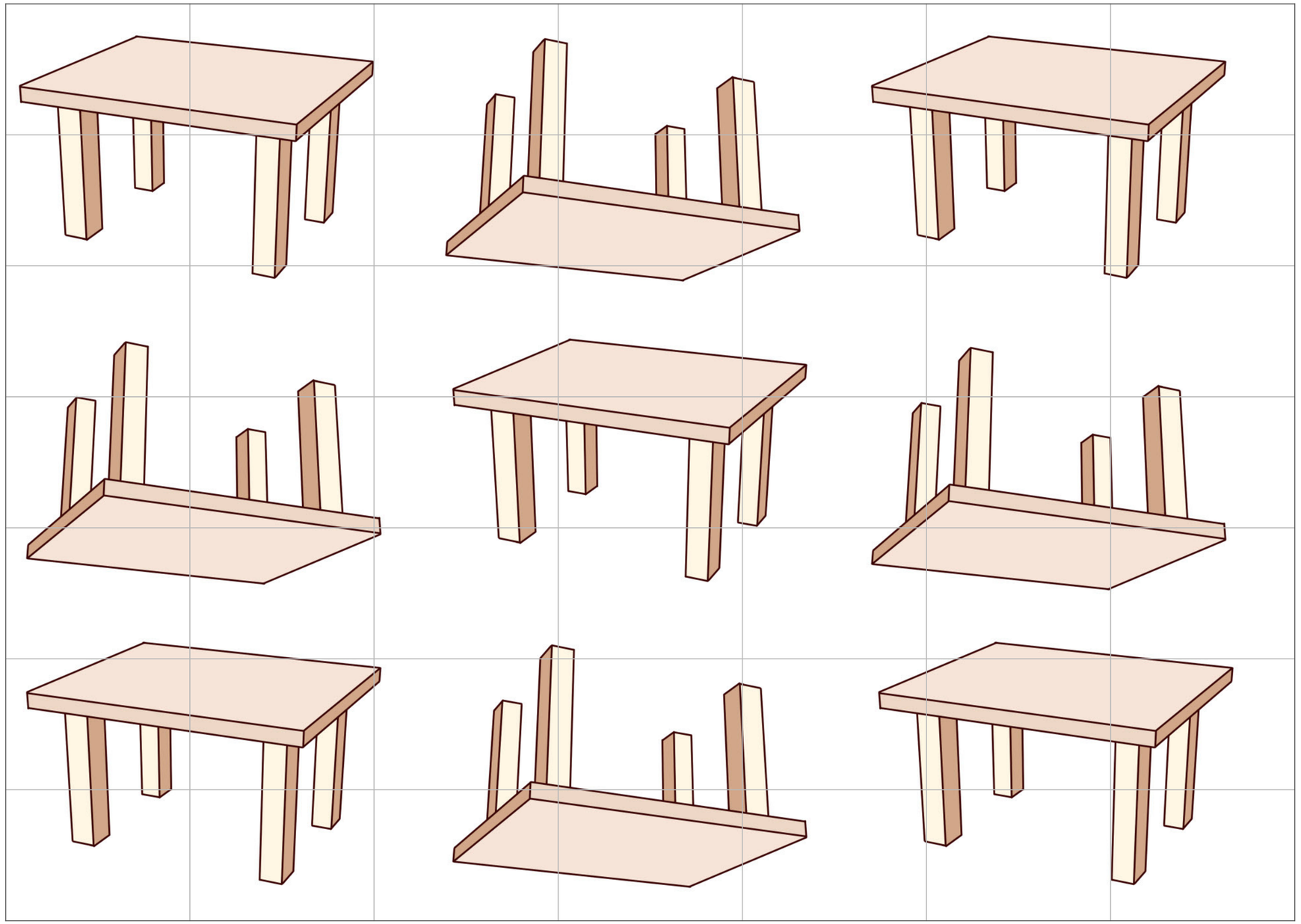
京都大学
オリジナルグッズ

周期表 (periodic table)



http://chemreflux.blogspot.jp

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ール (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．

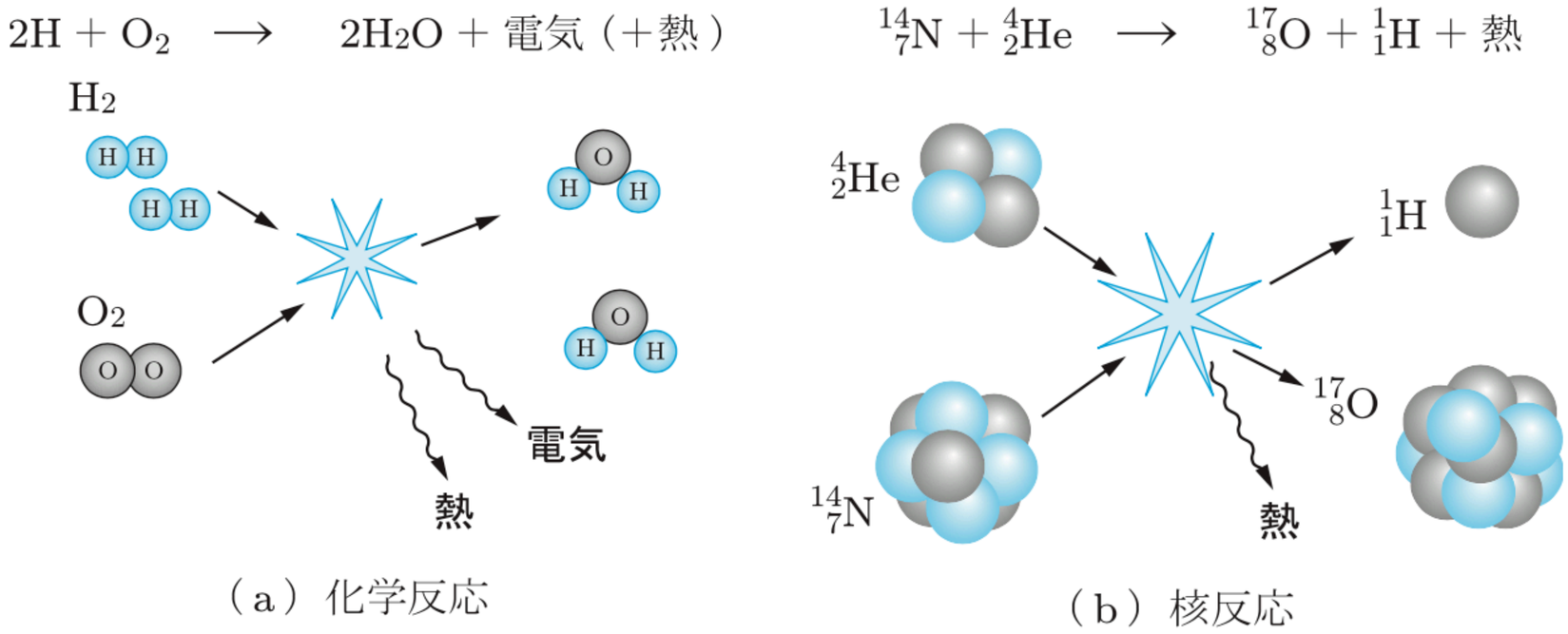
星は核融合反応で光を放っている

核融合が太陽で起きているという事が非常に身近に感じました

3.2.7 原子核反応

分子どうしの組み替えは，化学反応

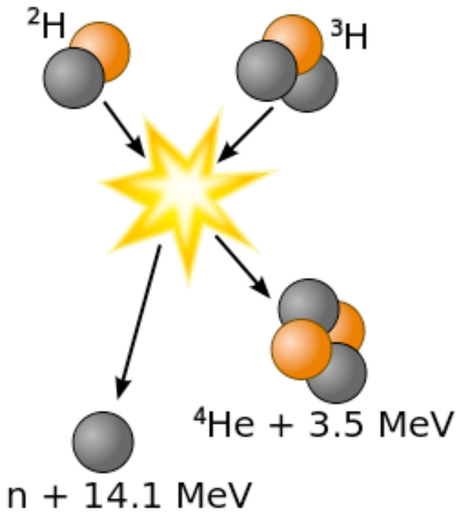
原子核の組み替えは，核反応

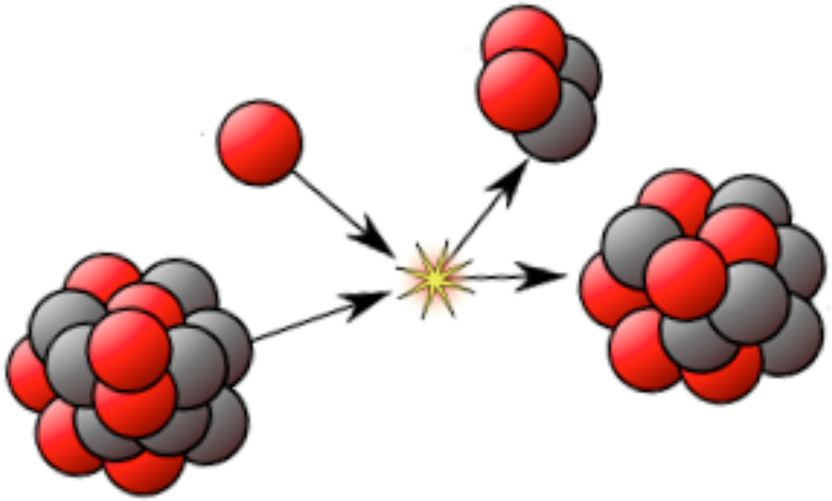


（a）化学反応　　（b）核反応

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





$$4\mathrm{p} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + 2e^{+} + 2\nu_e + 2\gamma$$

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{236}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{144}_{56}\mathrm{Ba} + {}^{89}_{36}\mathrm{Kr} + 3\,{}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

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)

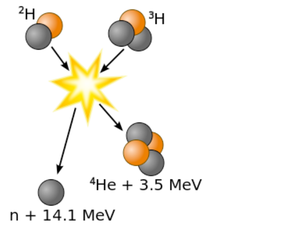
分裂した方が安定
（エネルギー放出）

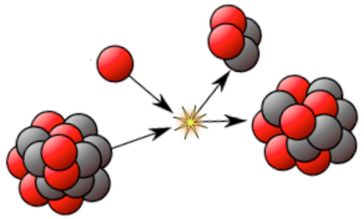
前回のミニッツペーパーから

"○○発電"というものは身近な物であるため、知ることができてよかったです。

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





$4\mathrm{p} \rightarrow {}^4\mathrm{He} + 2e^+ + 2\nu_e + 2\gamma$

核融合
(nuclear fusion)
合体した方が安定
（エネルギー放出）

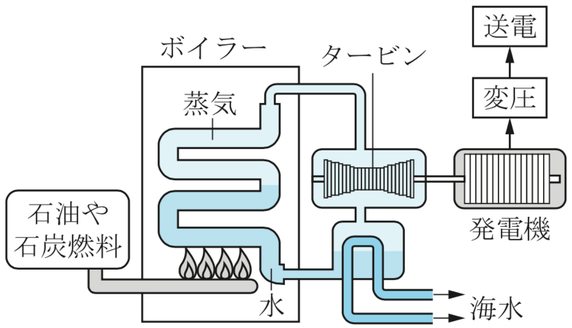
$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^1_0\mathrm{n} \rightarrow {}^{236}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{144}_{56}\mathrm{Ba} + {}^{89}_{36}\mathrm{Kr} + 3\,{}^1_0\mathrm{n}$

核分裂
(nuclear fission)
分裂した方が安定
（エネルギー放出）

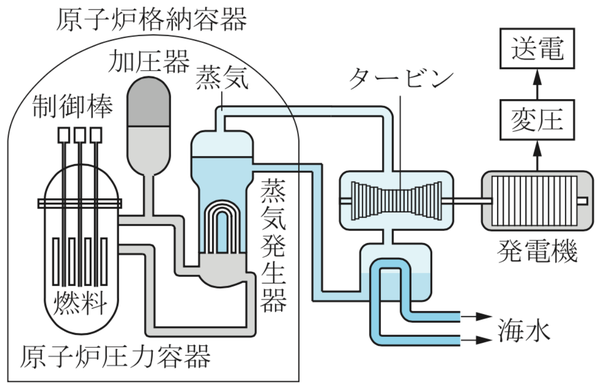
45

- **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**

水力発電，火力発電，原子力発電．．．
タービンを回す，という意味で同じ．

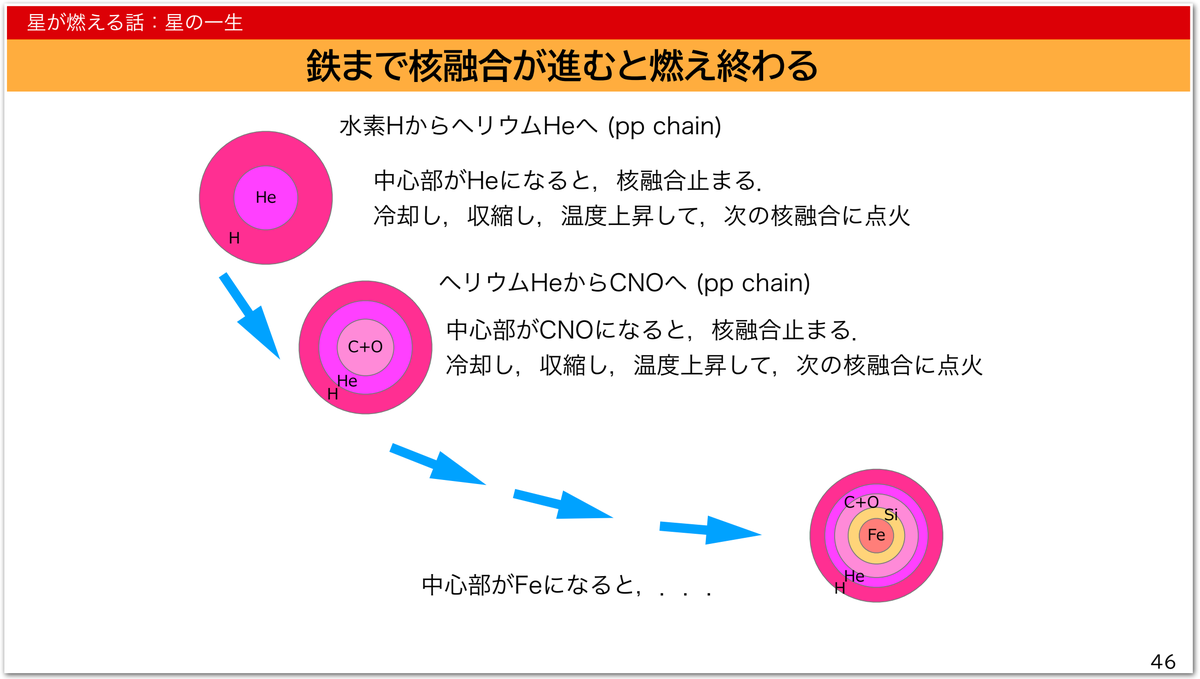


（a）火力発電



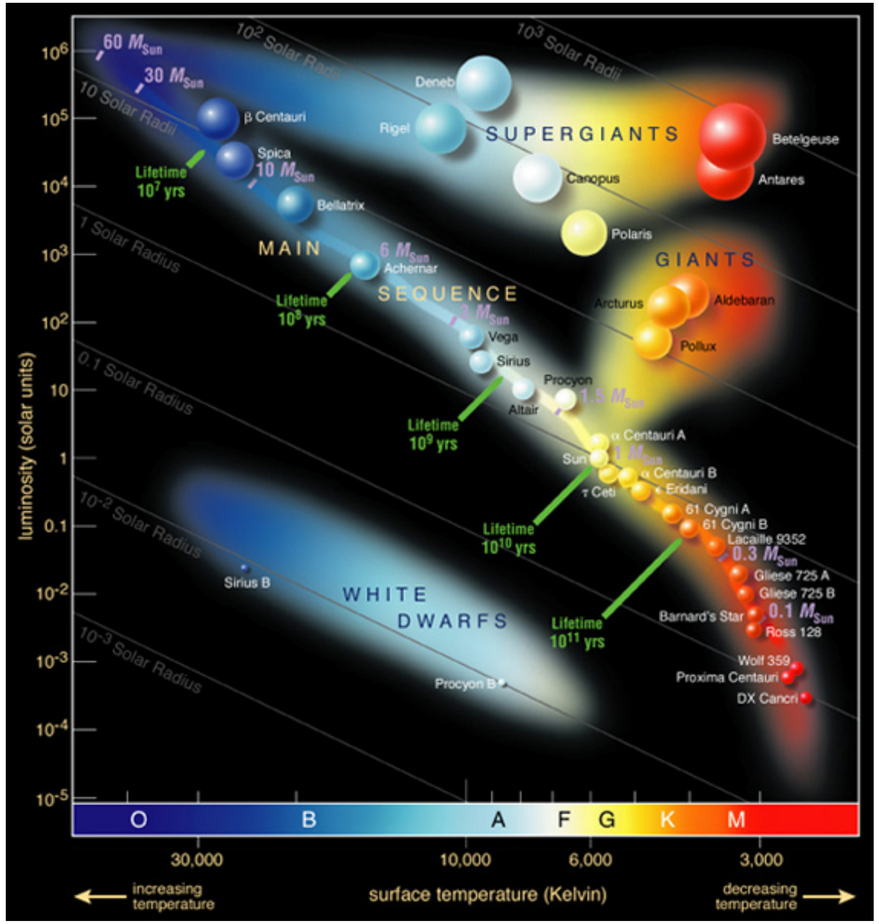
（b）原子力発電

前回のミニッツペーパーから



原子核融合がFeまで進むと燃えなくなると講義で聞きましたが，太陽の原子核融合はどこまで進んでいるのですか？

太陽はHがHeになる核融合反応中．



もし太陽がなくなってしまったら世界はどうなるのか。

世界はおしまい

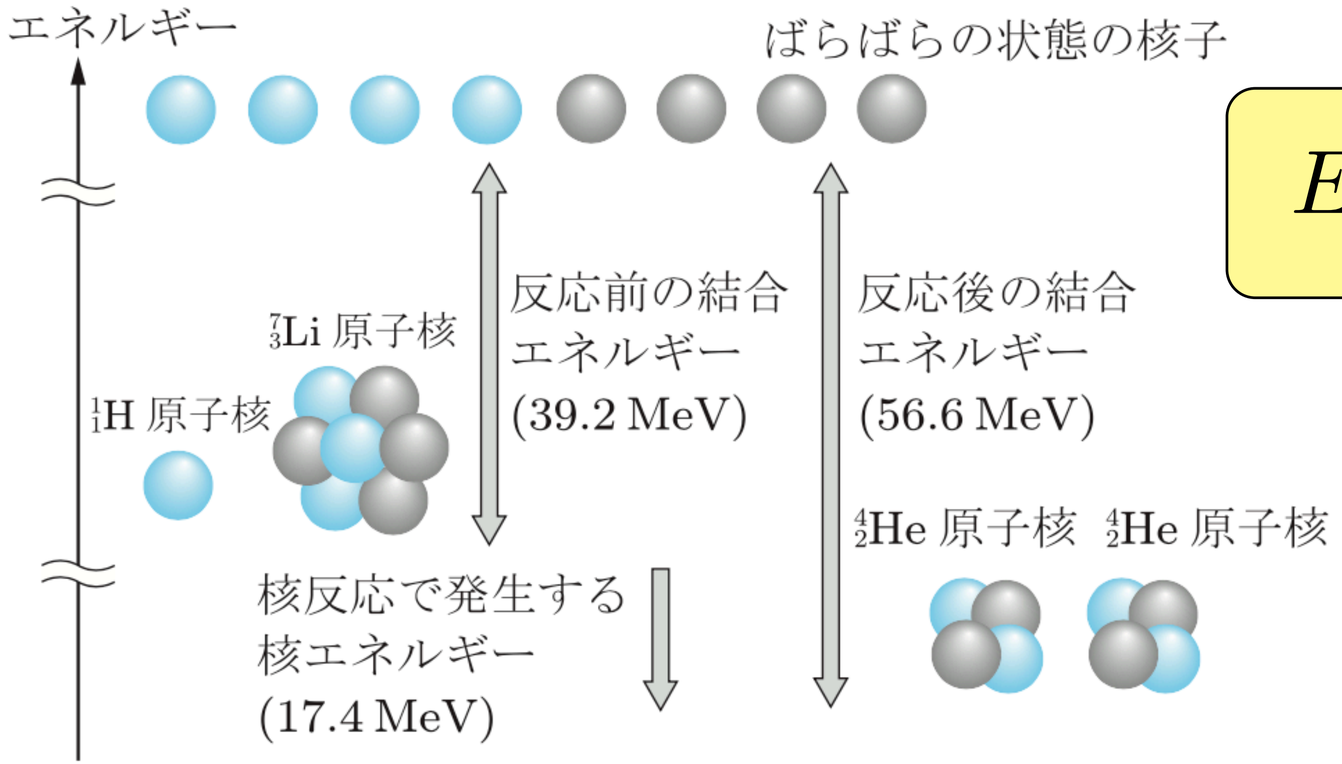
太陽の消滅パターンを学べて興味深かった。

※今の時点で如何角後ぐらいに起こる可能性がある「地球が太陽にのみこまれる」それの対作は考えられていますか？

対策

まだ先のことですので，考えていません．

結合エネルギー

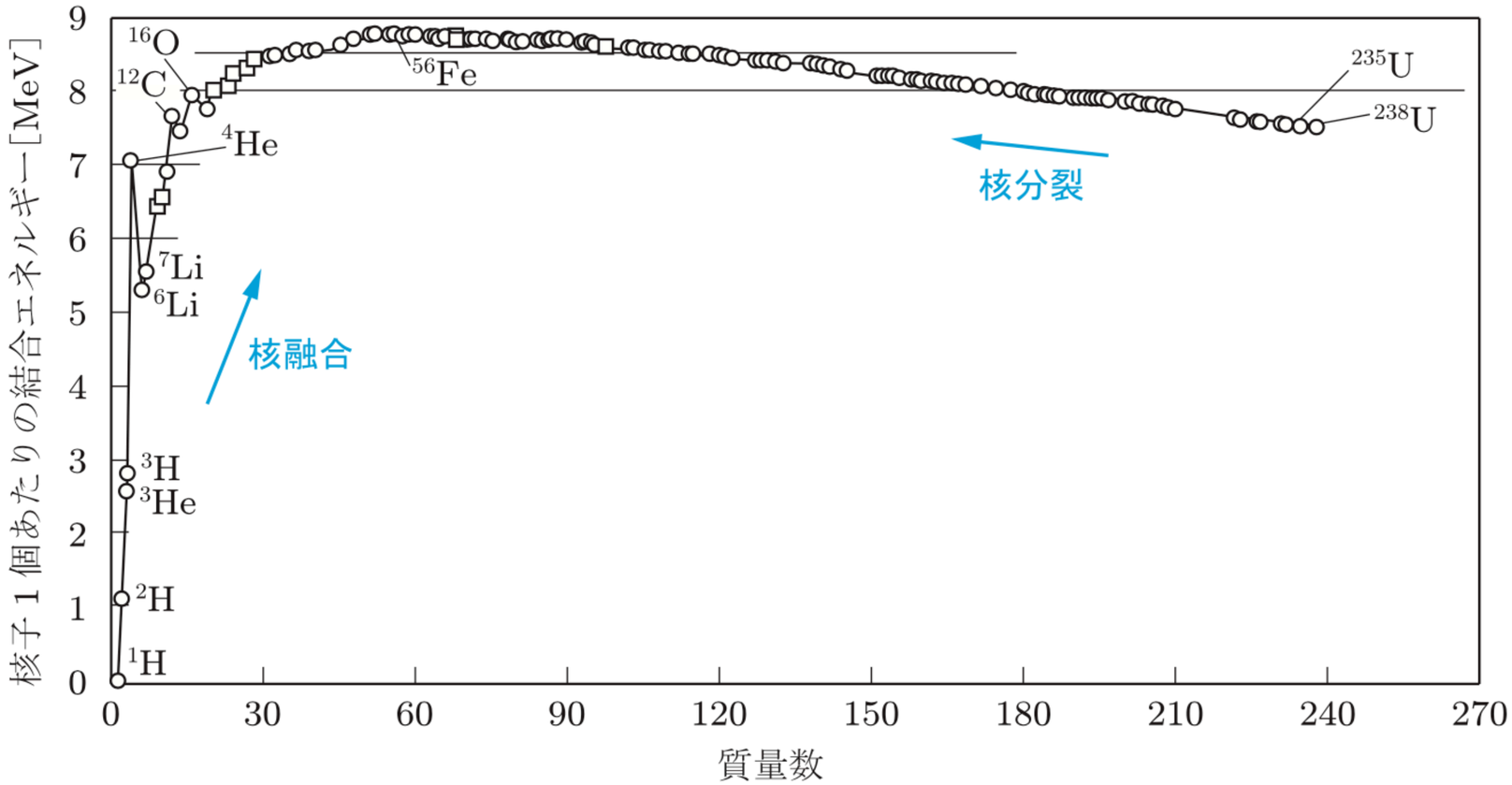


$$E = mc^2$$

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

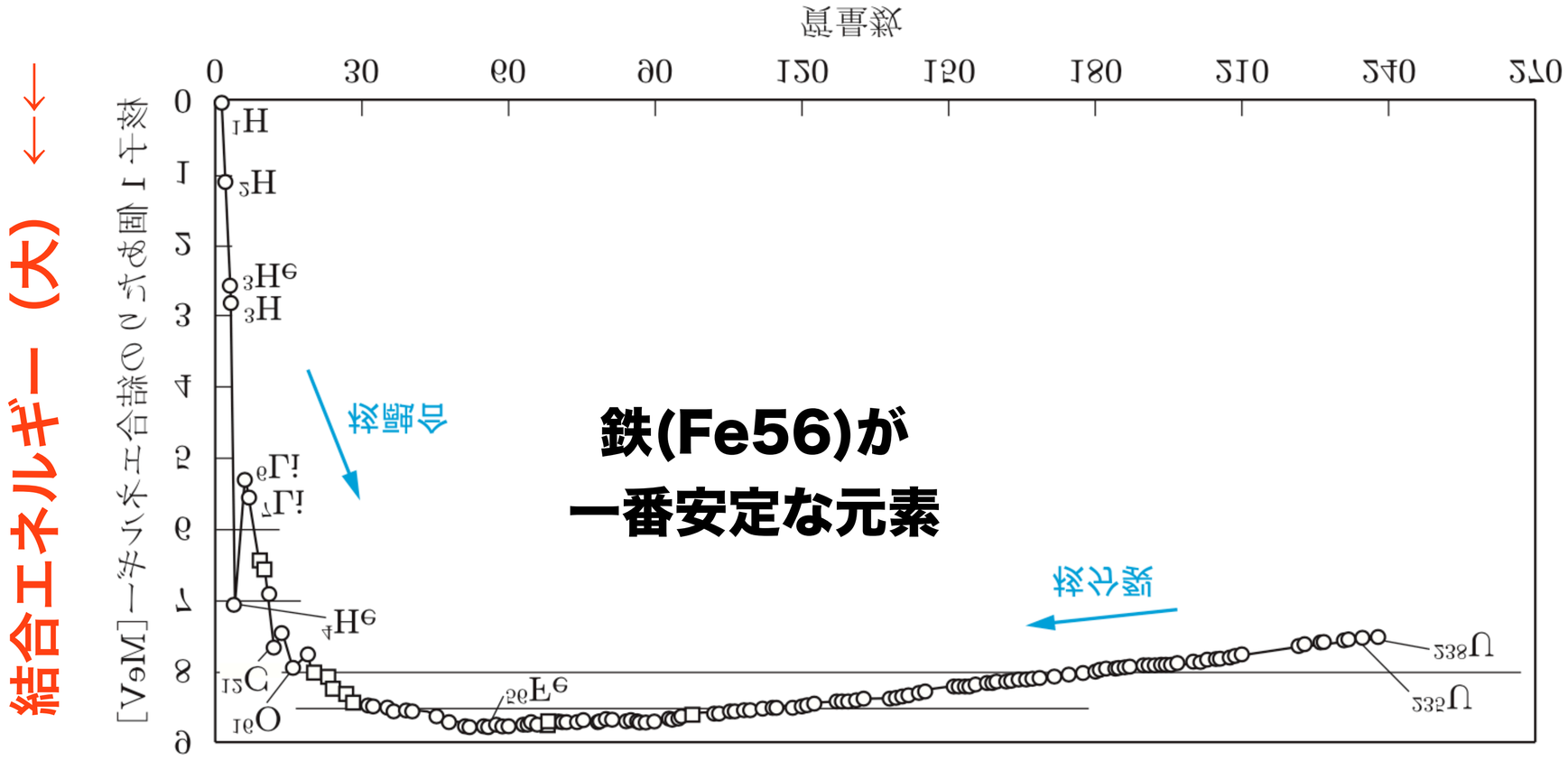
核融合も核分裂もどちらもおきる理由は何か？

結合エネルギー（大）　→ →



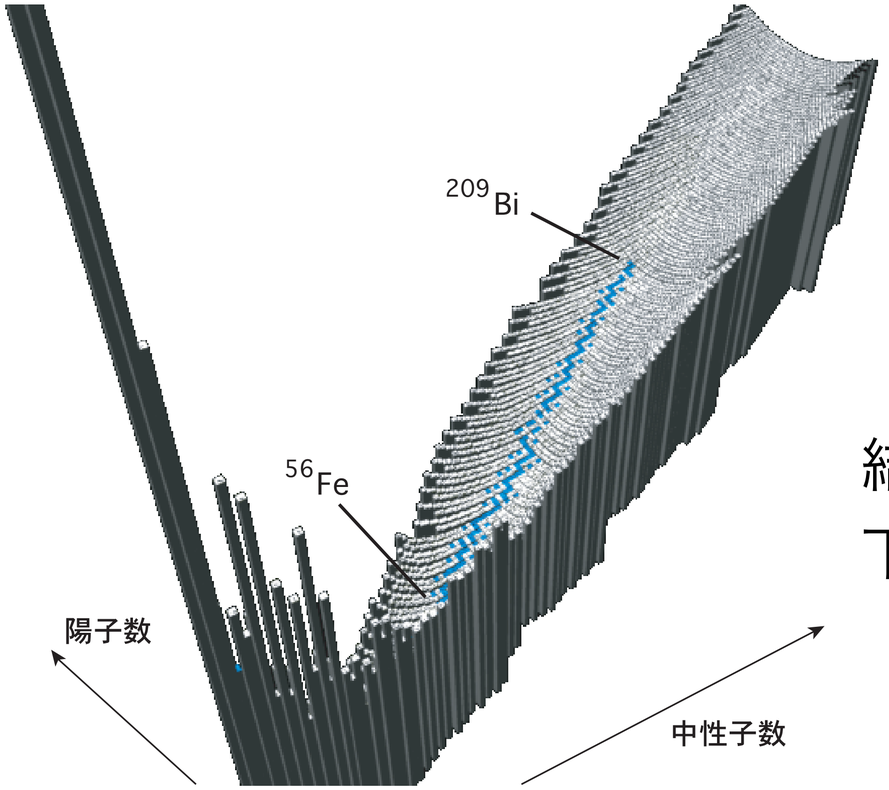
→ →　質量数（大）

核融合も核分裂もどちらもおきる理由は何か？

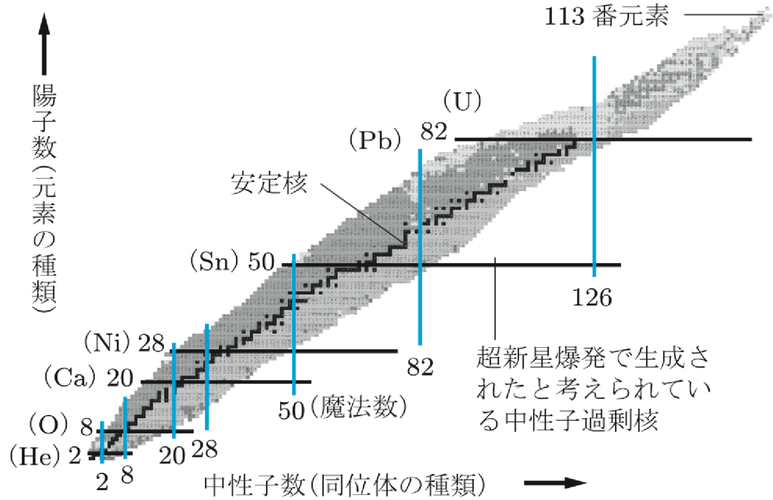


核図表

教科書 p75



核図表　教科書 p213



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

星の輪廻

星（恒星）の一生を決めるのは，どれだけの質量があるか，そしてどのように燃えていくかの2つの要素だ．巨大な星は，核燃料の消費もはやく，数万年くらいの寿命しかないが，小さな星は現在の宇宙年齢の数倍も燃焼し続ける可能性がある．

褐色矮星*はよく「星のなりそこない」と呼ばれる．水素の核融合反応に点火するほどの質量を持てなかった星の残骸だからだ．これらの星は，まわりの空間に熱を放出して，ゆっくりと死んでゆき，やがて消えてゆく．巨大なガス惑星と同じなので，「できすぎた惑星」と考えてもよいかもしれない．[*訳注：矮星（dwarf）は，小さな星という意味．]

赤色矮星は小さいけれども水素の核融合を起こすことのできる星だ．低い温度で燃えるために，宇宙が今の何倍の年齢になったとしても薄暗く輝き続けることができる．宇宙にある多くの星は -- 全体のおよそ75パーセントの星は -- 赤色矮星である．

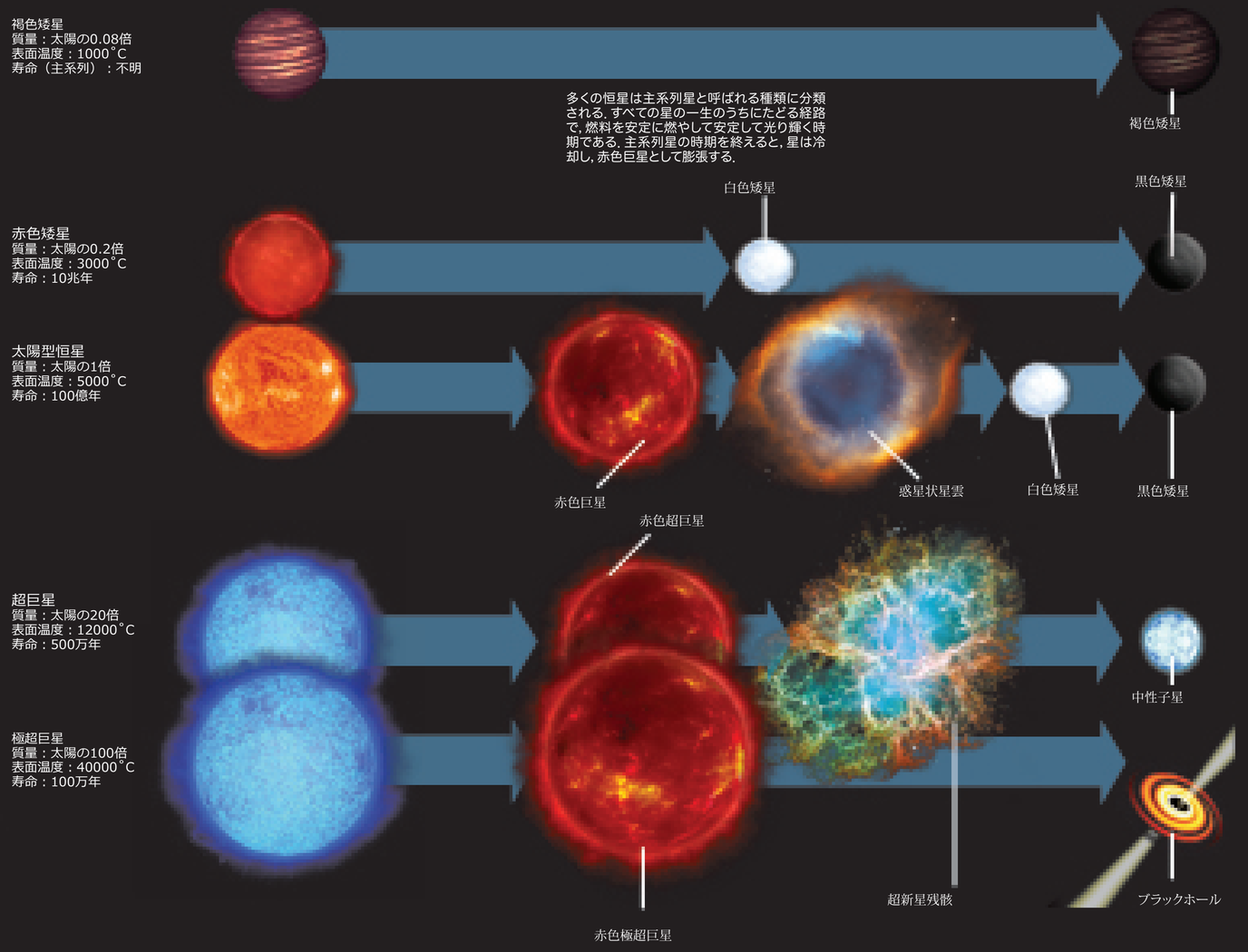
太陽型恒星（あるいは黄色矮星）は，水素とヘリウムの両方の核融合反応に点火できる十分な質量を持つ星だ．これらの星がヘリウムを失ったあとは赤色巨星になり，周囲のガス層を照らして惑星ガス雲とし，そしてやがて白色矮星となる．100億年以上の時間をかけて（もし宇宙がそれだけ長く続くならば，だが），これらの星はゆっくりと冷却して，黒色矮星になってゆく．

超巨星や極超巨星は，星の仲間たちからみても病的に肥満している星である．太陽の10倍から数百倍の大きさの質量のものは，燃料の消費も大きく，数十万年程度の寿命である．

宇宙におけるすべての重元素の合成主の星たちは，その星のコアでひとたび鉄が合成されると，超新星として爆発する．

痩せている星は中性子星やパルサーとなって生き延びるが，肥満している星は，自分の巨大な体重で押しつぶされてブラックホールに変貌する．

図にした星の大きさは正しいものではない．例えば，太陽の20倍の質量をもつ超巨星は，太陽の75倍の大きさになる．．



宇宙のつくり方（ギリランド著，真貝・鳥居訳，丸善出版，2016年12月刊）

前回のミニッツペーパーから

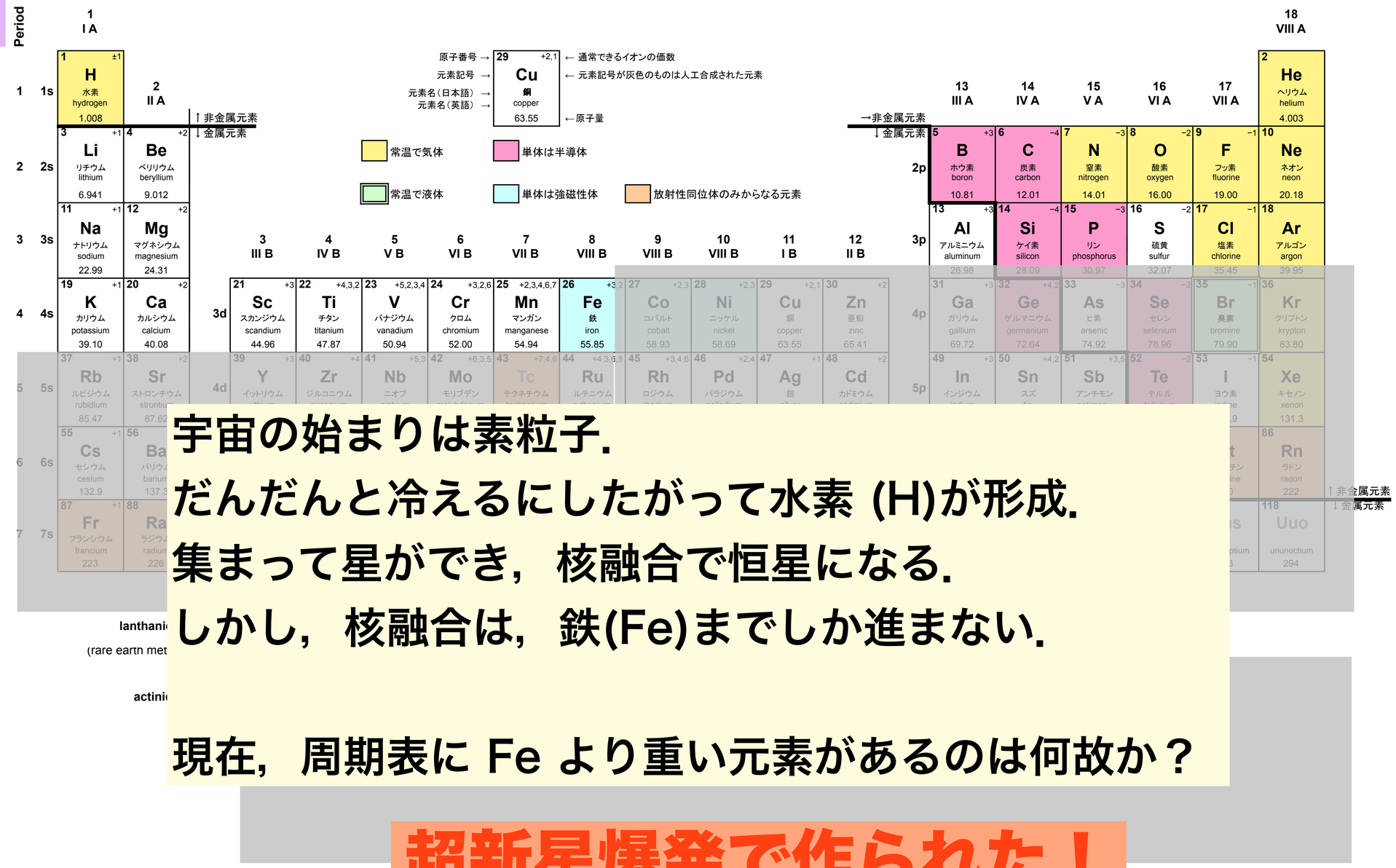
星は輪廻転生できても人はできないのですか？？？
死んだ人が火葬で燃やされたら、その分子が新たな生命体になりますか
などについてです。

そのとおり.
星は輪廻転生しますが, 火葬された人の分子はそのまま新たな生命体にはなりません.

次回の、ブラックホールについての授業が楽しみです!!

ブラックホールって結局何？形は見えない、超高密度な物質…？
穴？物体？星？

ブラックホール　＝　強い重力のはたらく空間領域（光でも脱出できない強い重力）
外から見ると天体のように振る舞う



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？

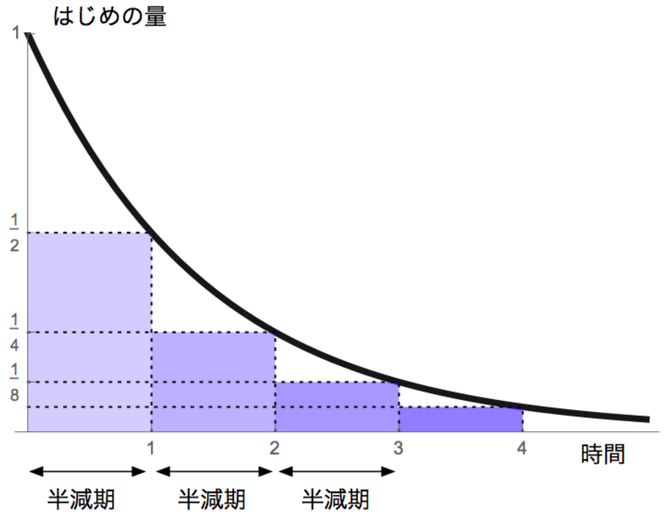
超新星爆発で作られた！

連星中性子星の合体で作られた！

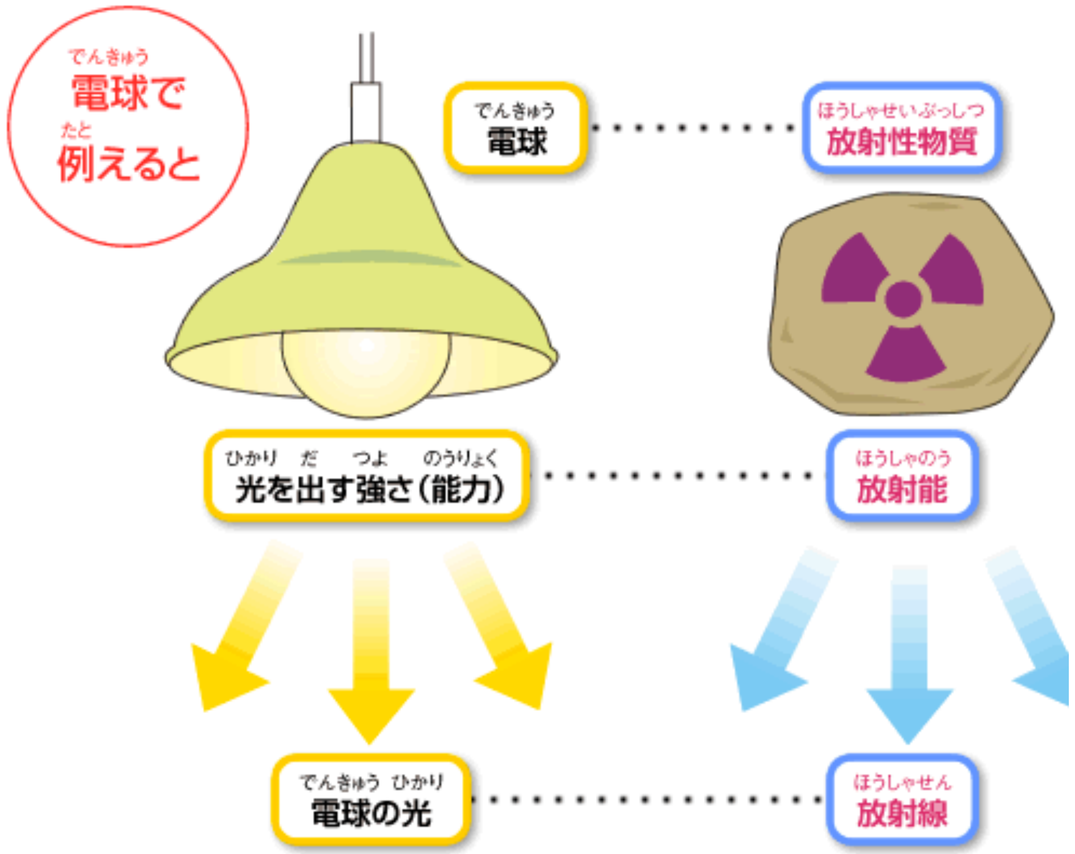
原子番号が同じでも，中性子数が違う原子が存在する．それらを**同位体**という．同位体には，安定なものと不安定で他のものに崩壊してゆくものがある．

	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)	$^{1}_{1}\mathrm{H}$	1	0	1.0078	0.999885	
	水素2(重水素)	$^{2}_{1}\mathrm{H}$, D		1	2.0141	0.000115	
	水素3(三重水素)	$^{3}_{1}\mathrm{H}$, T		2	3.0160	微量	12.32年でヘリウム3に
炭素	炭素12	$^{12}_{6}\mathrm{C}$	6	6	12	0.9893	
	炭素13	$^{13}_{6}\mathrm{C}$		7	13.0034	0.0107	
	炭素14	$^{14}_{6}\mathrm{C}$		8	14.0032	微量	5730年で窒素14に
ウラン	ウラン234	$^{234}_{92}\mathrm{U}$	92	142	234.0409	0.000054	25万5千年でトリウム230へ
	ウラン235	$^{235}_{92}\mathrm{U}$		143	235.0439	0.007204	7億380万年でトリウム231へ
	ウラン238	$^{238}_{92}\mathrm{U}$		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	$^{1}_{1}\mathrm{H}$		1	0	1.0078	99.9885
	重水素	$^{2}_{1}\mathrm{H}$ D			1	2.0141	0.0115
炭素	炭素 12	$^{12}_{6}\mathrm{C}$		6	6	12	98.93
	炭素 13	$^{13}_{6}\mathrm{C}$			7	13.0034	1.07
ウラン	ウラン 234	$^{234}_{92}\mathrm{U}$		92	142	234.0409	0.0054
	ウラン 235	$^{235}_{92}\mathrm{U}$			143	235.0439	0.7204
	ウラン 238	$^{238}_{92}\mathrm{U}$			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（$^4_2$He原子核）	（例）$^{226}_{88}Ra \xrightarrow{\alpha} {}^{222}_{86}Rn$
ベータ（β）壊変（崩壊）	ベータ線（電子） e	（例）$^{24}_{11}Na \xrightarrow{\beta} {}^{24}_{12}Mg$
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

- 放射線
  - 電磁波
    - エックス（X）線…原子核の外で発生する
    - ガンマ（γ）線…原子核から出る
  - 電荷をもった粒子
    - ベータ（β）線…原子核から飛び出る電子
    - アルファ（α）線…原子核から飛び出るヘリウム $^4_2$He の原子核
    - その他
  - 電荷をもたない粒子
    - 中性子…原子炉、加速器、アイソトープなどを利用して作られる

電気事業連合会　http://www.fepc.or.jp/library/pamphlet/zumenshu/

原子核と放射線

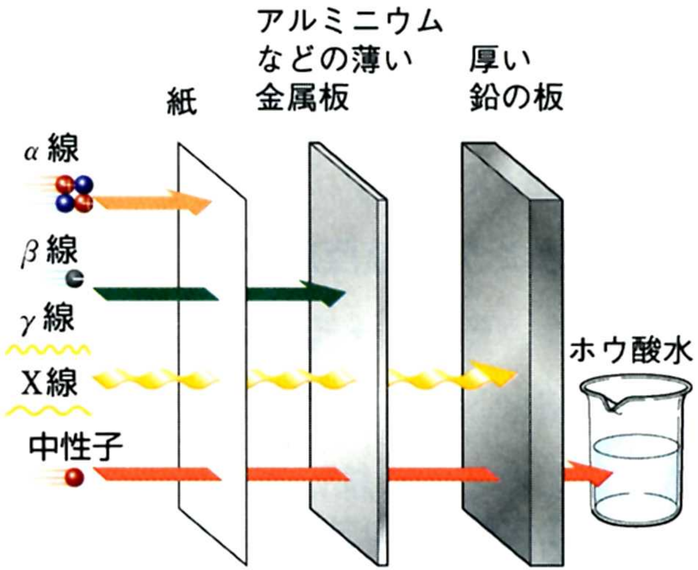


図７　放射線の透過力

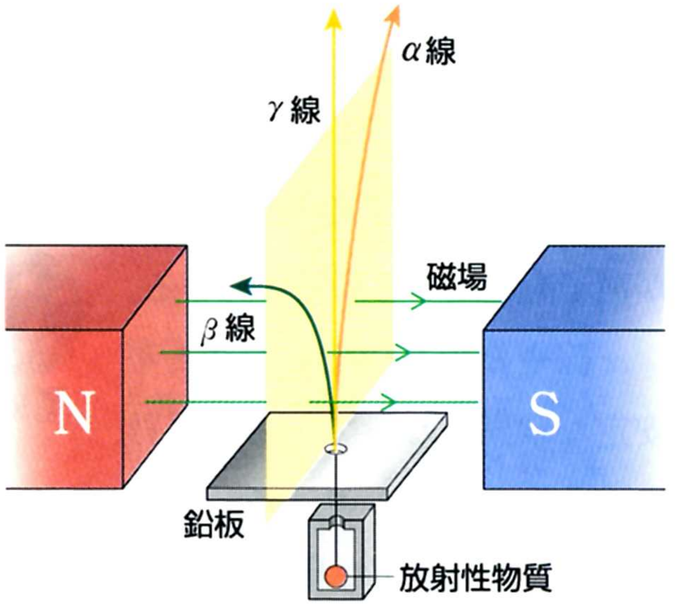
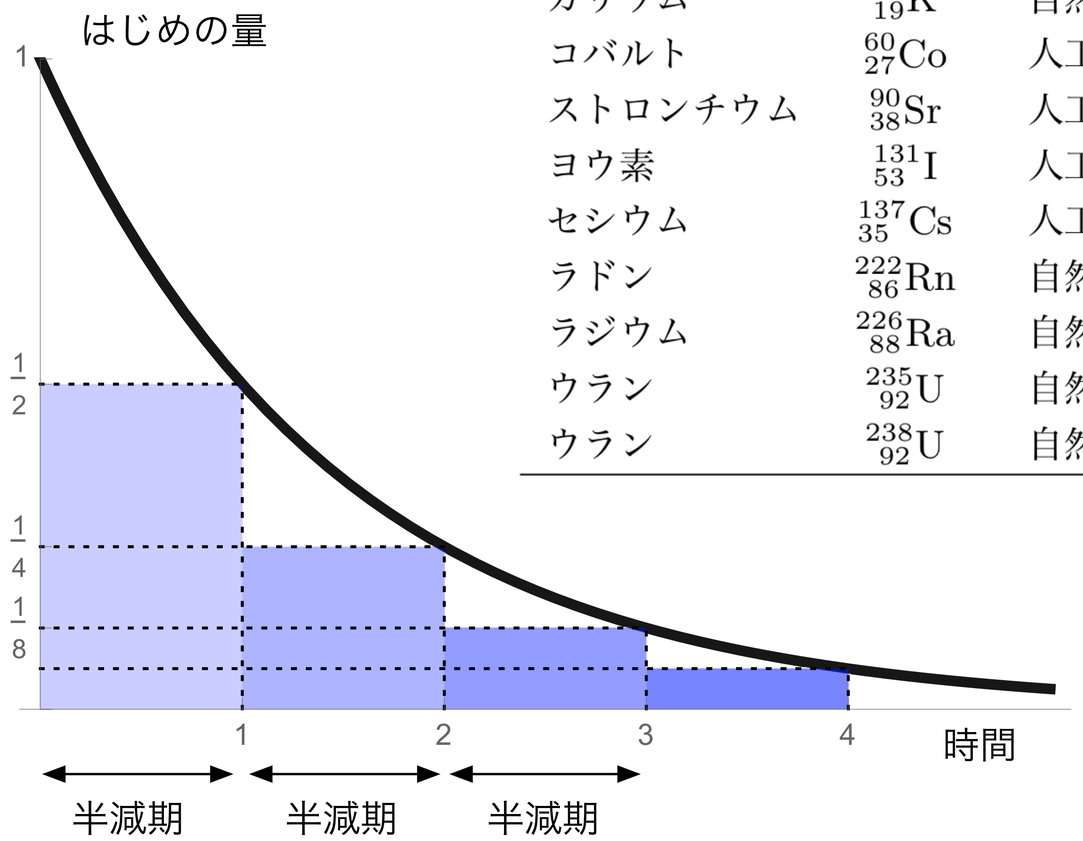


図８　磁場中での放射線

実教出版「物理II」

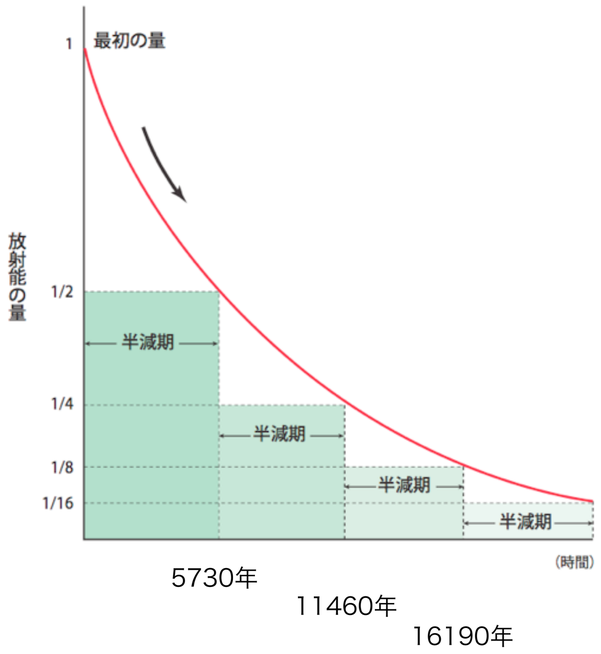
1898年頃、ラザフォードは、ウランやトリウムなどの天然の放射性物質から出ている放射線には性質の異なる少なくとも２種類のものがあることを明らかにし、透過力の弱い方を「α線」、透過力のより強い方を「β線」と命名した。この他にβ線よりもさらに透過力が大きい放射線も存在することが分り、それを「γ線」と名付けた。

半減期（half-decay time）



原子核			崩壊の型	半減期	
中性子	n	単体の中性子	β	10.4 分	
炭素	$^{14}_{6}\mathrm{C}$	自然に存在	β	5.73×10^3 年	
リン	$^{32}_{15}\mathrm{P}$	人工に合成	β	14.26 日	
カリウム	$^{40}_{19}\mathrm{K}$	自然に存在	β	1.28×10^9 年	
コバルト	$^{60}_{27}\mathrm{Co}$	人工に合成	β	5.271 年	
ストロンチウム	$^{90}_{38}\mathrm{Sr}$	人工に合成	β	28.78 年	
ヨウ素	$^{131}_{53}\mathrm{I}$	人工に合成	β	8.1 日	
セシウム	$^{137}_{35}\mathrm{Cs}$	人工に合成	β	30.07 年	
ラドン	$^{222}_{86}\mathrm{Rn}$	自然に存在	α	3.82 日	
ラジウム	$^{226}_{88}\mathrm{Ra}$	自然に存在	α	1.60×10^3 年	
ウラン	$^{235}_{92}\mathrm{U}$	自然に存在	α	7.04×10^8 年	7億年
ウラン	$^{238}_{92}\mathrm{U}$	自然に存在	α	4.47×10^9 年	45億年

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 $^{14}C/^{12}C$ 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．

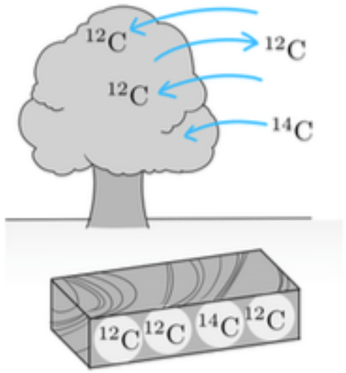


図 6: 放射性炭素年代測定法．呼吸していた樹木が材木になると，^{14}C が閉じ込められ，放射性壊変で徐々に減ってゆく．^{14}C の含有量で材木の年代がわかる．

^{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

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

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.

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。

放射線物質を処理・保管するのが難しいという問題。

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、漁業に影響が出ることが問題

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、土地が必要で捨てるのが簡単ではない点。

放射線による健康にリスクや処分しづらい問題がある。

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。

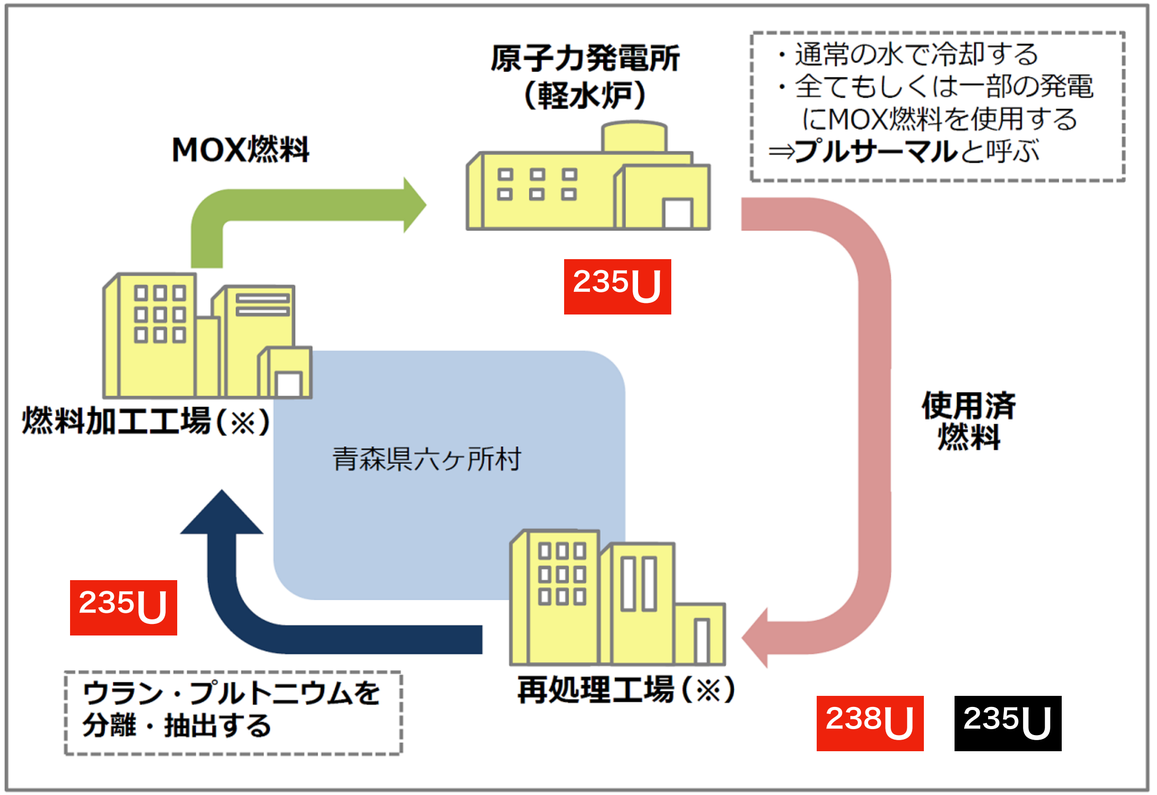
人体に有害なので、長い時間かけて安全な場所で保管し、放射能レベルを下げたり、廃棄場所をよく検討しないといけないから。

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.

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

経済産業省
資源エネルギー庁
Agency for Natural Resources and Energy

東日本大震災　2011/3/11　福島第一原子力発電所溶融

1　11版　第44941号　日本経済新聞　2011年(平成23年)3月12日(土曜日)　(日刊)

東北M8.8 最大地震

死者・不明、首都も被害

震度7 仙台で津波10メートル

原子力緊急事態を宣言

官房長官「予防的に措置」

配達遅れ おわびします

M8.8の地震の各地の震度

- 激震、想定超す規模　2
- 高波・火災…列島襲う　3
- 典型的なプレート型　4
- 円・株急落、経済に重荷　5

日経平均株価	1万254円43銭 (−179円95銭)
NYダウ	1万1984.61ドル (−228.48ドル)

1　14版　第44942号　日本経済新聞　2011年(平成23年)3月13日(日曜日)　(日刊)

東日本巨大地震

原発の炉心溶融

過熱阻止へ海水注入

福島第1、建屋が爆発

政府「格納容器 破損ない」

被害の把握難航

宮城・南三陸町 9500人連絡取れず

死者・不明 1300人超す

避難20キロ圏に拡大 原発第1

住民3人被曝 福島県発表

被害状況(13日午前0時現在)

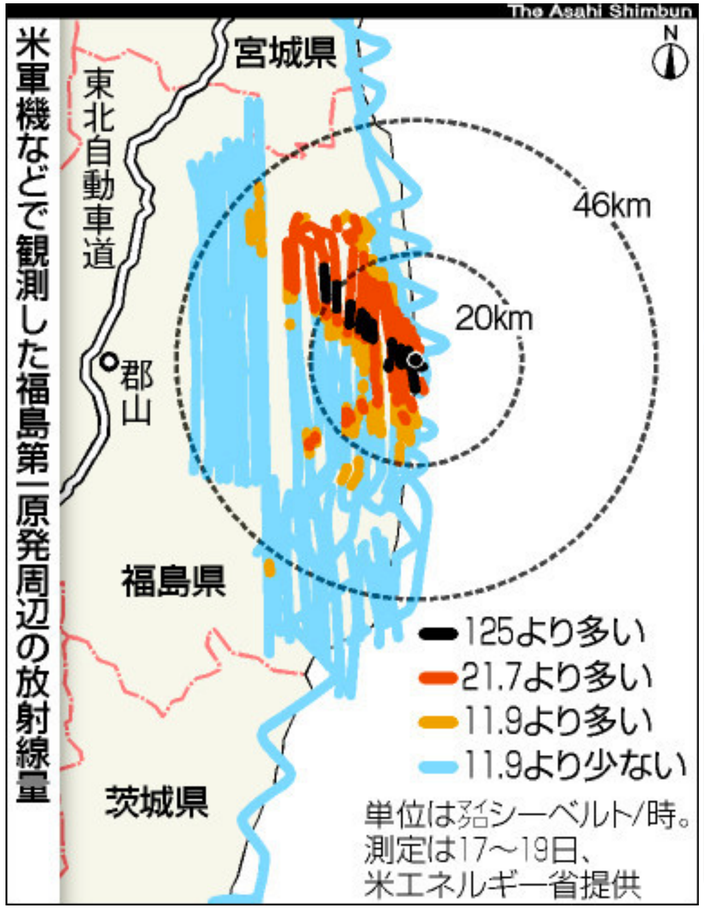
死者	686人
行方不明者	642人
負傷者	1426人
損壊家屋	
半壊・半焼以上	5259戸
一部損壊	7622戸

(注)警察庁まとめ。未確認情報を含む

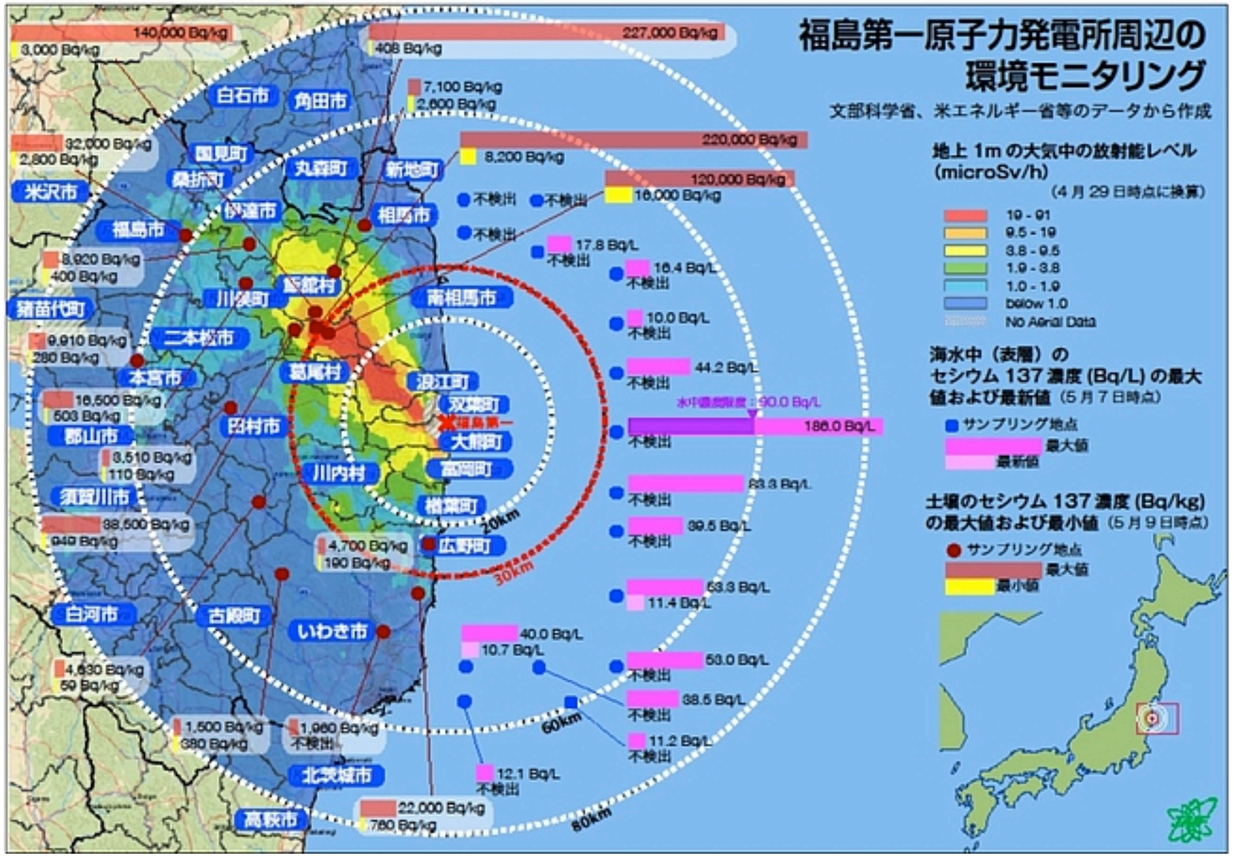
- 最悪の原発事故　3
- 新幹線で架線が切断　2
- 地盤沈み、津波を増幅　4
- 電力不安の長期化も　5

本日特別紙面

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]

政府, 原発推進へ　議論せず閣議決定

2022/12/23　朝日新聞

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）

朝日新聞　2024年(令和6年)10月30日(水)　13版S　総合2　2

時時刻刻　被災地も原発回帰

牡鹿半島に立地する東北電力女川原発（中央下）。右上は女川町の市街地＝25日、宮城県女川町、本社機から、嶋田達也撮影

半島に立つ女川　災害で孤立懸念

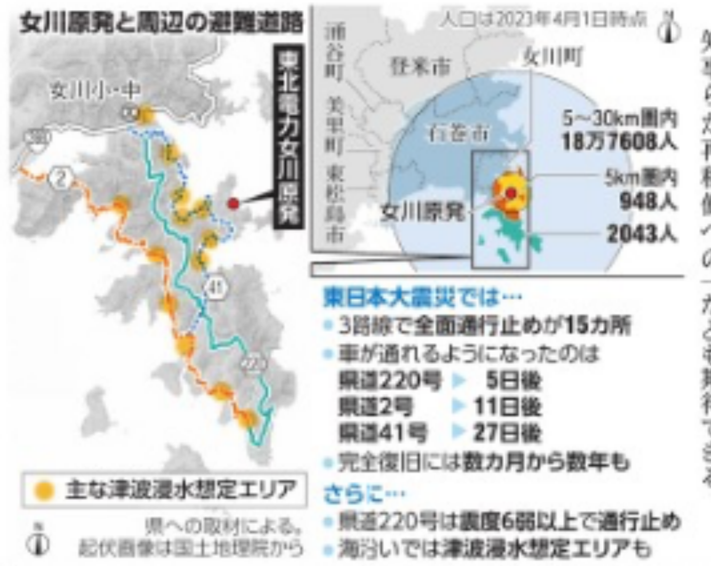
東日本大震災から13年7カ月余り。津波や地震で損傷した「被災原発」が29日、再稼働した。地震や避難計画への懸念が示される中、脱炭素を旗印に、政府は原発回帰の動きを加速している。▼1面参照

「東日本大震災級の規模の地震あるいは津波が来ても、（東京電力）福島（第一）原発のような事故は起こさないだろうと確信を持った」

東北電力女川原発2号機の再稼働を控えた9日、宮城県の村井嘉浩知事は定例会見で語った。現地を訪れ、竜巻対策でロープで固定された敷地内の車を見た点に触れ、「本当にすごいなと思った」と持ち上げた。

知事らが再稼働への「地元同意」を表明したのは4年前。村井知事は「苦渋の決断だった」と述べつつ、「立地自治体には収入増も期待される」と説明した。

女川町の場合、税収の8割を占める固定資産税の大半は原発関連で、過去40年余りで交付された電源三法交付金は約300億円に上る。再稼働した場合、最大5億円から2倍の10億円に引き上げられた「再稼働交付金」なども期待できる。



一方、女川原発が立地する牡鹿半島は、ひずみが集中するプレートの境界付近にあり、過去には貞観地震（869年）や明治三陸地震（1896年）といった津波を伴う巨大地震が発生。原発自体も震災などで、当時の想定を超える揺れを3回経験し、一時停止した。

関西電力大飯原発の運転差し止めを命じる判決を言い渡した元裁判官の樋口英明さんは「この地震大国では再稼働するべきではない。原発周辺に住む住民全員が、現在の避難計画で無事に避難するのは極めて困難だろう」と指摘する。

女川原発の30キロ圏内には約19万人が暮らす。大きな事故が起きた場合、5キロ圏内と、避難時に5キロ圏内を通る約3千人がすぐに避難する計画だ。

だが、半島から外に抜ける陸路は3本に限られ、山間部の1本は震度6弱以上で通行止め、海岸線の2本は14カ所で津波浸水の恐れがある。

元日に発生した能登半島地震では、北陸電力志賀原発の30キロ圏内で、道路や海路の寸断により14の地区の150人以上が、最長16日間孤立した。女川原発の周辺住民も懸念を募らせる。

牡鹿半島の先端の石巻市鮎川浜で区長を務める鈴木正利さん(70)もその一人。しかし、逃げられない場合はどうすればいいのかと、市の説明会で訴えても、担当者は「それでも逃げて下さい」の一点張りだという。住民の疑問は解消されないまま、原発は動き始めた。（岸めぐみ、田渕紫織）

脱炭素へ　柏崎刈羽再稼働を視野

東北電力は東日本大震災の前、女川原発1～3号機と東通原発（青森県）の計4基を動かしていた。2010年度の自社発電に占める割合は約3割で、約6割の火力に次ぐ主力電源だった。23年度は火力の割合が8割超になった。

東北電は女川原発の安全対策費に5700億円を投じた。2号機が動くことで、火力の燃料費が月70億円ほど抑えられるという。足元の燃料価格は落ち着いているが、再び急騰した場合、「節約効果」はさらに高まる。

国も電力の安定供給のためとして、東日本での再稼働に血道を上げてきた。東北電と東京電力は電気の周波数が同じで、電力を融通しやすい。

今夏の最大需要は、東北電が1400万キロワット、東電が5700万キロワットほどだった。出力82・5万キロワットの女川2号機が加わると、東日本の供給力に余裕が生まれる。今後は電力需要が伸びるとの予想がある一方で、脱炭素の流れが加速し、火力への風当たりは厳しい。

国が女川原発の先に見据えるのは、東京電力柏崎刈羽原発（新潟県）の再稼働だ。両原発とも、福島第一原発と同じ「BWR（沸騰水型炉）」。震災後に再稼働した西日本の12基は、すべて「PWR（加圧水型炉）」という異なるタイプだ。12月には同じBWRの中国電力島根原発も再稼働を予定しており、女川原発が「BWR陣営」の試金石となる。

電源構成に占める原発の割合は22年度に5・5%だった。エネルギー基本計画（エネ基）では、30年度には20～22%まで高めるとしており、実現に近づけるにはBWRの再稼働が欠かせない。

一方、原発は出力を変動させにくく、再生可能エネルギーの発電を一時的に止める「出力制御」が増えることへの懸念もある。春や秋は電気が余りやすく、再エネの電気がムダになりがちだ。（三浦惇平、中島嘉克）

視点　課題山積　推進でよいのか

女川原発2号機の再稼働で、政府の原発回帰はさらに進むことになる。

東日本大震災後の2012年9月、当時の民主党政権は「30年代に原発稼働ゼロ」を打ち出し、自公政権もエネルギー基本計画で「原発依存度の低減」を掲げた。

それが、22年のロシアのウクライナ侵攻で方針は一変した。岸田文雄前首相は22年8月に原発政策の転換を表明。大学教授や企業幹部らで構成する政府の有識者会議は原発活用の是非ではなく、原発推進を前提とした議論に多くを割き、半年後の23年2月には、「原発の最大限活用」を盛り込んだGX実現に向けた基本方針を閣議決定した。

これでは議論を尽くしたとは言えない。政府は電力の安定供給に貢献するというが、事故が起きれば取り返しのつかない被害が出る。福島の事故では、避難者が一時16万人超に達した。だが、衆院選でも論戦は低調だった。「選挙で原発政策が左右されるのは国益に沿わない」。そう語る経済系官庁の幹部もいた。

足元では、エネ基の改定作業が大詰めを迎えている。脱炭素に原発が不可欠だとし、新規投資を促すために必要な費用を電気料金に上乗せして国民から回収する案も俎上にあがっている。

だが、再生可能エネルギーが余っている地域に工場を立地する工夫や、節電の余地もある。核のごみの最終処分場の選定や核燃料サイクルの実現見通しも立っていない。このまま原発を推進してよいのか。山積する課題に向き合い、議論を深める必要がある。（福山亜希）

全国の原発の状況

いちからわかる！　再稼働している原発　全国の状況は？

西日本で6原発12基。女川は福島第一と同じ型の炉

Q　国内で動いている原発はどのくらいあるのか。

A　2011年3月の東京電力福島第一原発の事故後、国内54基の原発はすべて停止した。その後、21基が廃炉になった。これまでに再稼働したのは6原発12基で、すべて西日本だ。東北電力女川原発2号機の再稼働は東日本では初めてとなる。

Q　再稼働には原子力規制委員会による審査が必要だ。

A　事故の教訓を反映し、原発を運転するために最低限必要な条件や設備などのルール（新規制基準）を規制委がつくった。地震や津波、火山の噴火など自然災害の想定が引き上げられたほか、原子炉を冷やせなくなるような重大事故への対策が初めて義務化された。これらを満たさなければ再稼働が認められない。女川原発は防潮堤をかさ上げし、原子炉建屋の耐震補強などを行った。

Q　これまでの審査の進み方は？

A　原子炉のタイプによって差が出ている。原発は核分裂で起きる熱で水を沸騰させ、その蒸気で発電機につながった羽根車（タービン）を回して電気を作る。核燃料で沸騰させた水の蒸気で直接タービンを回すのが、沸騰水型炉（BWR）で、福島第一で使われていた。一方、加圧水型炉（PWR）は核燃料で温めた水を熱交換器に通して、別の水を沸かしてタービンを回す方式だ。関西電力や九州電力などが採用している。PWRの方が原子炉格納容器のサイズが大きく、安全対策が取りやすかったため、審査が先行した。

Q　再稼働した女川2号機は？

A　19年に新基準を満たすと判断され、BWRとして初めて再稼働した。出力は82・5万キロワットで、年間約162万世帯分の電力使用量をまかなう。東京電力柏崎刈羽6、7号機は17年にBWRで最初に新基準を満たすと認められたが、再稼働に必要な地元自治体の同意はまだ得られていない。中国電力島根原発2号機も12月上旬の再稼働をめざしている。（玉木祥子）

2024・10・30　関心のあるテーマをお寄せください。wakaru@asahi.com

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・5万キロワット）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＝被災地も原発回帰

東北電は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。▼31面＝住民の思いは

東北電は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。東北電は5700億円を投じ、海抜29メートルの防潮堤の整備や、原子炉建屋の耐震工事などを行った。

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

震災前、国内では54基の原発が稼働していたが、一時全て停止した。13年に新規制基準が施行され、15年の九州電力川内原発（鹿児島県）を皮切りに、関西、四国の各電力の計12基が再稼働した。東日本初となる今回の再稼働で「原発回帰」は一層進み、政府は東京電力柏崎刈羽原発（新潟県）など他の原発の再稼働に弾みをつけたい考えだ。

一方、震災で、女川原発（敷地の高さ約14メートル）には約13メートルの津波が押し

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）

時時刻刻　被災地も原発回帰

牡鹿半島に立地する東北電力女川原発（中央下）。右上は女川…

半島に立つ女川　災害で孤立懸念

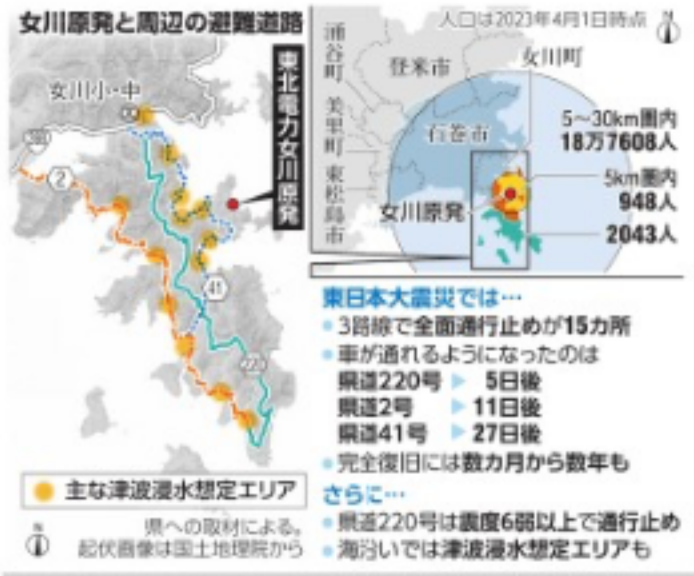
東日本大震災から13年7カ月余り。津波や地震で損傷した「被災原発」が29日、再稼働した。地震や避難計画への懸念が示される中、脱炭素を旗印に、政府は原発回帰の動きを加速している。▼1面参照

「東日本大震災級の規模の地震あるいは津波が来ても、（東京電力）福島（第一）原発のような事故は起こさないだろうと確信を持った」

東北電力女川原発2号機の再稼働を控えた9日、宮城県の村井嘉浩知事は定例会見で語った。現地を訪れ、竜巻対策でロープで固定された敷地内の車を見た点に触れ、「本当にすごいなと思った」と持ち上げた。

知事らが再稼働への「地元同意」を表明したのは4年前。村井知事は「苦渋の決断だった」と述べつつ、「立地自治体には収入増も期待される」と説明した。

女川町の場合、税収の8割を占める固定資産税の大半は原発関連で、過去40年余りで交付された電源三法交付金は約300億円に上る。再稼働した場合、最大5億円から2倍の10億円に引き上げられた「再稼働交付金」なども期待できる。



一方、女川原発が立地する牡鹿半島は、ひずみが集中するプレートの境界付近にあり、過去には貞観地震（869年）や明治三陸地震（1896年）といった津波を伴う巨大地震が発生。原発自体も震災などで、当時の想定を超える揺れを3回経験し、一時停止した。

関西電力大飯原発の運転差し止めを命じる判決を言い渡した元裁判官の樋口英明さんは「この地震大国では再稼働するべきではない。原発周辺に住む住民全員が、現在の避難計画で無事に避難するのは極めて困難だろう」と指摘する。

女川原発の30キロ圏内には約19万人が暮らす。大きな事故が起きた場合、5キロ圏内と、避難時に5キロ圏内を通る約3千人がすぐに避難する計画だ。

だが、半島から外に抜ける陸路は3本に限られ、山間部の1本は震度6弱以上で通行止め、海岸線の2本は14カ所で津波浸水の恐れがある。

元日に発生した能登半島地震では、北陸電力志賀原発の30キロ圏内で、道路や海路の寸断により14の地区の150人以上が、最長16日間孤立した。女川原発の周辺住民も懸念を募らせる。

牡鹿半島の先端の石巻市鮎川浜で区長を務める鈴木正利さん(70)もその一人。しかし、逃げられない場合はどうすればいいのかと、市の説明会で訴えても、担当者は「それでも逃げて下さい」の一点張りだったという。住民の疑問は解消されないまま、原発は動き始めた。（岸めぐみ、田渕紫織）

脱炭素へ　柏崎刈羽再稼働を視野

東北電力は東日本大震災の前、女川原発1～3号機と東通原発（青森県）の計4基を動かしていた。2010年度の自社発電に占める割合は約3割で、約6割の火力に次ぐ主力電源だった。23年度は火力の割合が8割超になった。

東北電は女川原発の安全対策費に5700億円を投じた。2号機が動くことで、火力の燃料費が月70億円ほど抑えられるという。足元の燃料価格は落ち着いているが、再び急騰した場合、「節約効果」はさらに高まる。

国も電力の安定供給のためとして、東日本での再稼働に血道を上げてきた。東北電と東京電力は電気の周波数が同じで、電力を融通しやすい。

今夏の最大需要は、東北電が1400万キロワット、東電が5700万キロワットほどだった。出力82・5万キロワットの女川2号機が加わると、東日本の供給力に余裕が生まれる。今後は電力需要が伸びるとの予想がある一方で、脱炭素の流れが加速し、火力への風当たりは厳しい。

国が女川原発の先に見据えるのは、東京電力柏崎刈羽原発（新潟県）の再稼働だ。両原発とも、福島第一原発と同じ「BWR（沸騰水型炉）」。震災後に再稼働した西日本の12基は、すべて「PWR（加圧水型炉）」という異なるタイプだ。12月には同じBWRの中国電力島根原発も再稼働を予定しており、女川原発が「BWR陣営」の試金石となる。

電源構成に占める原発の割合は22年度に5・5%だった。エネルギー基本計画（エネ基）では、30年度には20～22%まで高めるとしており、実現に近づけるにはBWRの再稼働が欠かせない。

一方、原発は出力を変動させにくく、再生可能エネルギーの発電を一時的に止める「出力制御」が増えることへの懸念もある。春や秋は電気が余りやすく、再エネの電気がムダになりがちだ。（三輪悠平、中島嘉克）

視点　課題山積　推進でよいのか

女川原発2号機の再稼働で、政府の原発回帰はさらに進むことになる。

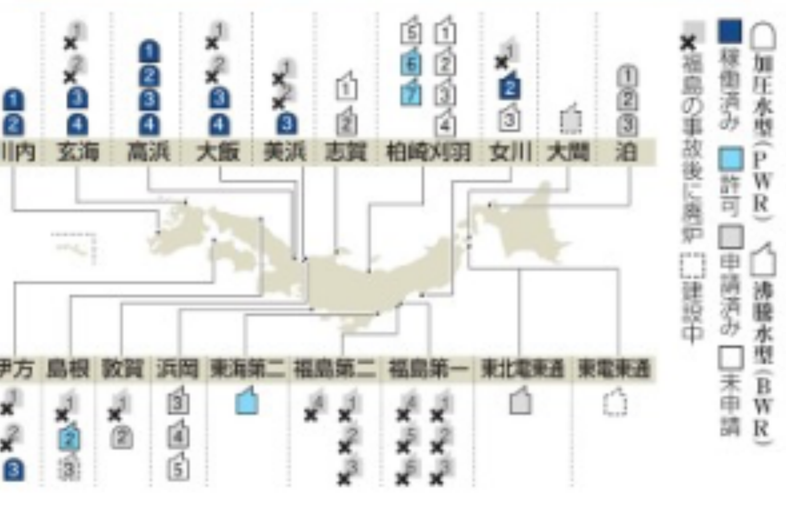
東日本大震災後の2012年9月、当時の民主党政権は「30年代に原発稼働ゼロ」を打ち出し、自公政権もエネルギー基本計画で「原発依存度の低減」を掲げた。

それが、22年のロシアのウクライナ侵攻で方針は一変した。岸田文雄前首相は22年8月に原発政策の転換を表明。大学教授や企業幹部らで構成する政府の有識者会議は原発活用の是非ではなく、原発推進を前提とした議論に多くを割き、半年後の23年2月には、「原発の最大限活用」を盛り込んだGX実現に向けた基本方針を閣議決定した。

これでは議論を尽くしたとは言えない。政府は電力の安定供給に貢献するというが、事故が起きれば取り返しのつかない被害が出る。福島の事故では、避難者が一時16万人超に達した。だが、衆院選でも論戦は低調だった。「選挙で原発政策が左右されるのは国益に沿わない」。そう語る経済系官庁の幹部もいた。

足元では、エネ基の改定作業が大詰めを迎えている。脱炭素に原発が不可欠だとし、新規投資を促すために必要な費用を電気料金に上乗せして国民から回収する案も俎上にあがっている。

だが、再生可能エネルギーが余っている地域に工場を立地する工夫や、節電の余地もある。核のごみの最終処分場の選定や核燃料サイクルの実現見通しも立っていない。このまま原発を推進してよいのか。山積する課題に向き合い、議論を深める必要がある。（福山亜希）



いちからわかる！　再稼働している原発　全国の状況は？

西日本で6原発12基。女川は福島第一と同じ型の炉

Q　国内で動いている原発はどのくらいあるのか。

A　2011年3月の東京電力福島第一原発の事故後、国内54基の原発はすべて停止した。その後、21基が廃炉になった。これまでに再稼働したのは6原発12基で、すべて西日本だ。東北電力女川原発2号機の再稼働は東日本では初めてとなる。

Q　再稼働には原子力規制委員会による審査が必要だ。

A　事故の教訓を反映し、原発を運転するために最低限必要な条件や設備などのルール（新規制基準）を規制委がつくった。地震や津波、火山の噴火など自然災害の想定が引き上げられたほか、原子炉の事故への対策が初めて義務化された。これらを満たさなければ再稼働が認められない。女川原発は防潮堤をかさ上げし、原子炉建屋の耐震補強などを行った。

Q　これまでの審査の進み方は？

A　原子炉のタイプによって差が出ている。原発は核分裂で起きる熱で水を沸騰させ、その蒸気で発電機につながった羽根車（タービン）を回して電気を作る。核燃料で沸騰させた水の蒸気で直接タービンを回すのが、沸騰水型炉（BWR）で、福島第一で使われていた。一方、加圧水型炉（PWR）は核燃料で温めた水を熱交換器に通して、…回す方式だ。関西電力や九州電力などが採用している。PWRの方が原子炉格納容器のサイズが大きく、安全対策が取りやすかったため、審査が先行した。

Q　再稼働した女川2号機は？

A　19年に新基準を満たすと判断され、BWRとして初めて再稼働した。出力は82・5万キロワットで、年間約162万世帯分の電力使用量をまかなう。東京電力柏崎刈羽6、7号機は17年にBWRで最初に新基準を満たすと認められたが、再稼働に必要な地元自治体の同意はまだ得られていない。中国電力島根原発2号機も12月上旬の再稼働を…

関心のあるテーマをお寄せください。wakaru@asahi.com

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・5万キロワット）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＝被災地も原発回帰、31面＝住民の思いは

東北電は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。東北電は5700億円を投じ、海抜29メートルの防潮堤の整備や、原子炉建屋の耐震工事などを行った。

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

震災前、国内では54基の原発が稼働していたが、一時全て停止した。13年に新規制基準が施行され、15年の九州電力川内原発（鹿児島県）を皮切りに、関西、四国の各電力の計12基が再稼働した。東日本初となる今回の再稼働で「原発回帰」は一層進み、政府は東京電力柏崎刈羽原発（新潟県）など他の原発の再稼働に弾みをつけたい考えだ。

一方、震災で、女川原発（敷地の高さ約14メートル）には約13メートルの津波が押し…

2024年11月4日

女川原発2号機　発電再開を延期

トラブルで原子炉停止

東北電力は3日、10月29日に再稼働させた女川原発（宮城県女川町、石巻市）2号機でこの日予定していた発電の再開を延期した、と発表した。

同社によると、原子炉の中にある中性子を計測する検出器が正常かどうかを調べるため、別の機器を原子炉に入れていたところ、途中で動かなくなった。機器は手動で引き抜き、回収された。同社は原子炉を停止し、トラブルの原因が分かるまで発電は延期する。周辺環境への放射能の影響はないという。

福島第一原発　溶け落ちた核燃料問題

デブリ 初の取り出し

成分分析し廃炉工程検討

福島第一

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ミリ以下、重さは3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、バ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「釣りざお式装置」を使うことになった。8月22日、着手直前で装置の接続順のミスが発覚。9月10日、当初計画から3年遅れで取り出しに着手したが、その後、カメラの映像が確認できなくなり、作業が中断した。カメラを交換し、10月28日に作業を再開した。（矢田文）

33　おくやみ・総合　14版　　2024年（令和6年）11月8日（金）

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

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）を起こ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。（福田恵大郎）▼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号機は損傷が激しく、水をためられない。人は近づけず、燃料デブリの取り出しは遠隔操作でできる装置での作業が基本だ。加えて、放射性物質を拡散させない対策が不可欠となる。

採取した燃料デブリは今後、日本原子力研究開発機構（JAEA）などで成分や構造などを調べる。核分裂反応が連鎖的に続く「臨界」のリスクや硬さを推定することで、燃料デブリの保管や取り出し方法の検討に生かせるという。

原子力規制委員会の山中伸介委員長は「燃料デブリを採取し、分析する」と話す。

「下請け任せ」露呈

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で成分や構造などを調べず、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できなくなった。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ーからこうしたリスクの情報はなかったとして、対応に問題はなかったと説明する。

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。

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、全体の数億分の1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）。

燃料デブリと言っても、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みられている。

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い。

政府と東電は、今回の試験的な取り出しに使う予定だったロボットアームは動作精度に課題があり、いまも試験が続く。東電は今年度中にロボットアームも使い始める方針だが、先行きは不透明だ。その次の取り出し量を段階的に増やす方法は検討中で、決まっていない。

大規模な取り出しをめざす3号機については、廃炉の進め方を助言する政府出資の「原子力損害賠償・廃炉等支援機構」（NDF）の小委員会が今年3月、二つの方法を提案した。充塡材で燃料デブリをいったん固め、削って取り出す「充塡固化工法」などだ。充塡材で放射線を遮れば現場の放射線量は下がると期待されるが、世界でも例がなく、放射性廃棄物が増える課題がある。

NDFの小委の提言を受け、東電は設計を検討中だ。ただ、既存の設備を解体したり、新たに大規模な設備を造ったりする必要があり、準備には時間がかかるとみられる。東電が目標とする30年代初めの開始が、さらに遅れる可能性もある。

大量の燃料デブリが取り出せたとしても、どこでどう処分するかが大きな課題だ。

福島県は、燃料デブリを含めた福島第一原発の放射性廃棄物をすべて県外で最終処分するよう、求めている。しかし、処分地探しなど具体的な議論は進んでいない。

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い上げ調査（2023年度）の結果を公表した。機能商品のうち2商品の機能性関与成分の量が、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。

小林製薬（大阪市）の機能性表示食品によ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

警察庁の露木康浩長官は7日の定例の記

地震から13年8ヶ月, はじめて数グラム取り出し.
残り880トン. 廃炉まで楽観的に見て170年以上.

福島第一原発　溶け落ちた核燃料問題

7　オピニオン　13版　朝日新聞　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

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
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
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

科学みらい部
福地慶太郎

デブリ回収難航 根拠なき「2051年完了」

「燃料デブリが原子炉内のどこにどれぐらい分布するかが正確にはわからない。しかも、高線量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。

東電の構想では、まずは2号機で試験的に3グラム以下を取り出し、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。

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日に装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収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。

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。

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

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「釣りざお式装置」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。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おろしていない。東電福島第一廃炉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。

／

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避難区域の住民は帰還できないような空気だった。何かしらの数字を出さざるを得なかった」

参考にしたのが1979年に事故を起こした米スリーマイル島（TMI）原発2号機だ。事故から11年後に99％の燃料デブリの取り出しが終わっていた。福島第一原発は1～3号機に燃料デブリがあるため、3倍の時間がかかるとみて、30～40年後（51年まで）の廃炉完了を目標にしたという。

だが、TMI原発と福島第一原発は状況が大きく異なる。TMI原発では原子炉圧力容器に水をはった状態で、燃料デブリを取り出すことができた。水は放射線を遮れるうえ、作業時に放射性物質の飛散を抑えられるという、大きなメリットがある。

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り、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。

そもそも事故を起こしていない原発でも、原子炉に核燃料がない状態から作業を始めて廃炉完了までに30～40年かかるとされる。このため、51年までに廃炉完了とする目標については、多くの専門家が「あり得ない」などと指摘している。

政府や東電は廃炉の工程をすぐには見直そうとしていない。専門家の間では、自主的に根拠のある見通しを示そうという動きが出ている。

／

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。

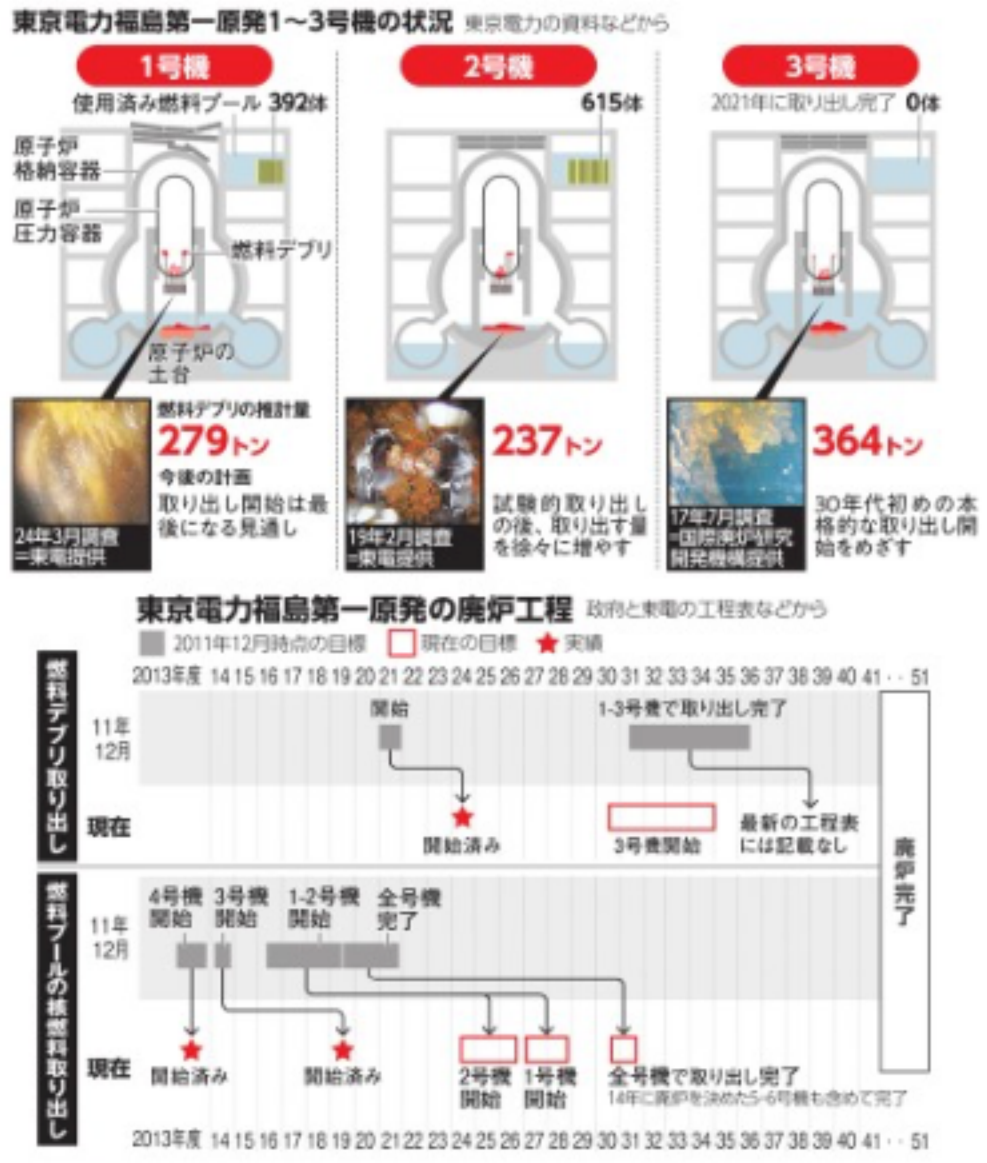
TMI原発では約132トンの取り出しに4年3カ月かかった。週休2日で作業が年間260日とすると、1日の取り出し量は120キロ。TMI原発より作業が難しい福島第一原発の取り出し量は、1日20キロ、もしくは50キロと仮定した。その場合、全量取り出しにかかる期間はそれぞれ170年、68年という結果だった。

松岡さんは「3グラム以下の取り出しに難航している現状を踏まえれば、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継続管理とする「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う。



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。更地をめざすのか、一部の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、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100億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の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。

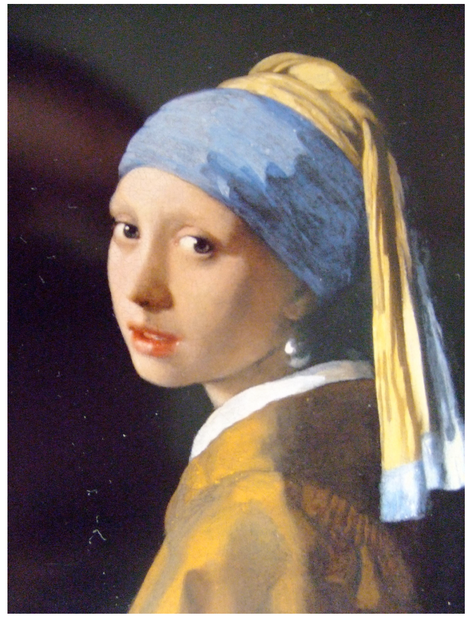
福島では地元の住民や専門家、東電社員らが対話し、廃炉の将来像を探る「1F地域塾」が22年から続く。廃炉作業について助言する「原子力損害賠償・廃炉等支援機構」も今年6月、原発事故の避難指示が出るなどした13市町村で住民の声を直接聞く場を設けた。

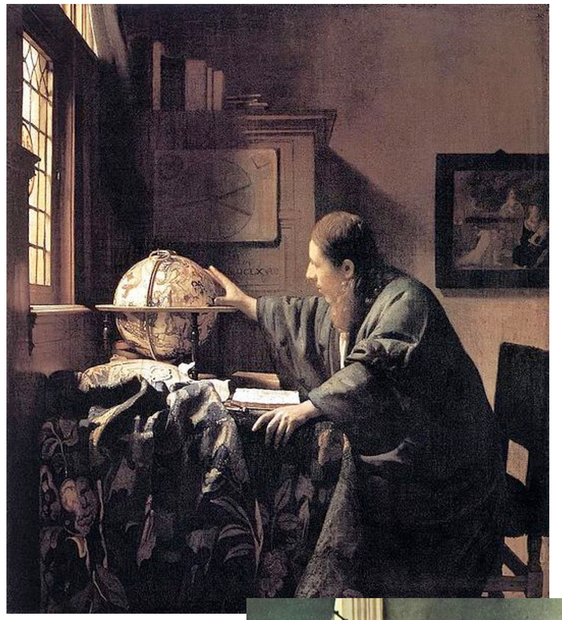
政府と東電はこうした取り組みを参考に、丁寧な対話を重ね現実的な工程を探るべきだ。

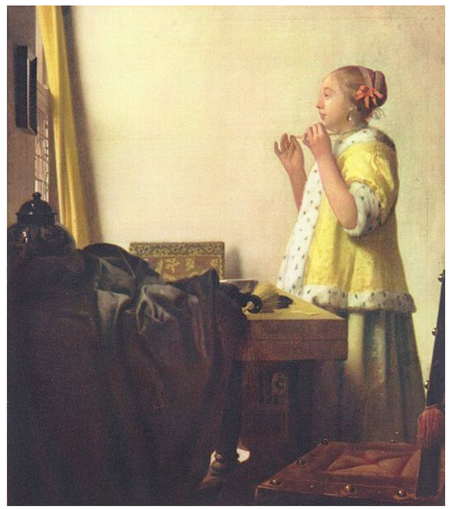
オッペンハイマー 予告編（2024）1:30’

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

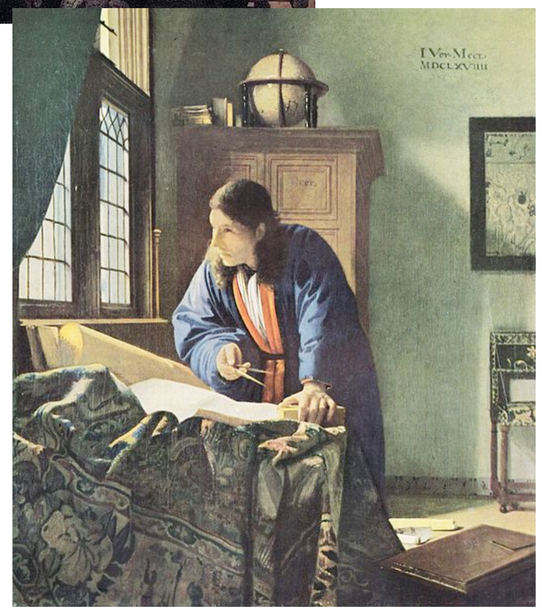
ヨハネス・フェルメール Johannes Vermeer（1632−75）







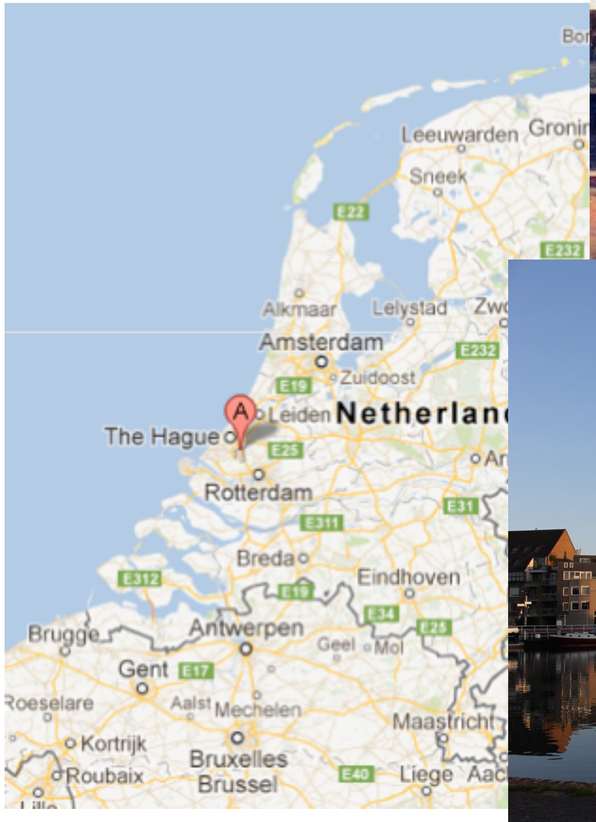
真珠の耳飾りの女 (1665頃)
真珠の首飾りの女 (1664頃)
牛乳を注ぐ女 (1658頃)
天文学者 (1668)
地理学者 (1669)



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)

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.

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．

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．

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

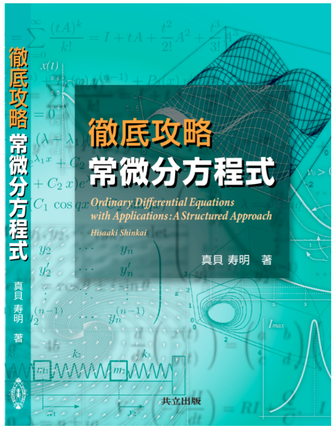
(1) この微分方程式を，$y = \cdots$ の積分形にせよ．

コラム 5 (フェルメールの贋作事件)

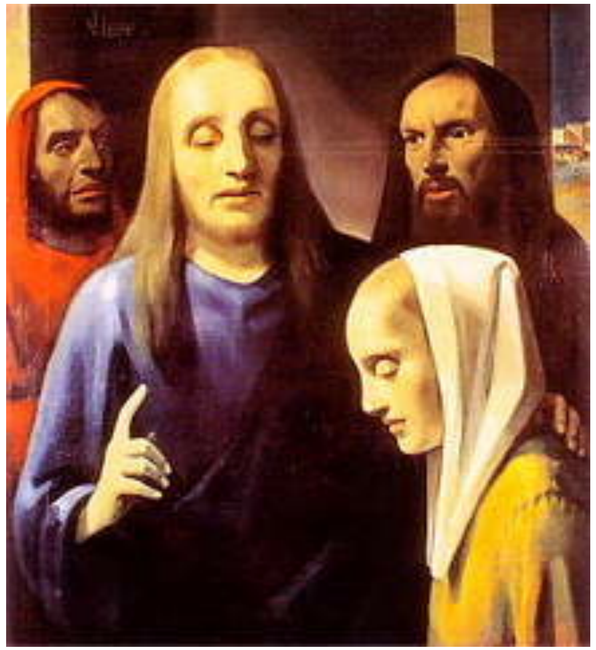
19 世紀，絵画研究家 Thoré Bürger（トレ・ビュルガー）が Vermeer（フェルメール） の作品として認定した絵画は 70 点以上にのぼる．しかし，これらの作品の多くは，その後の研究によって別人の作であることが明らかになり，次々と作品リストから取り除かれていった．20 世紀に入ると，このような動きと逆行するように Vermeer の贋作が現れてくる．中でも最大のスキャンダルといわれるのが Han van Meegeren （ハン・ファン・メーヘレン）による一連の贋作事件である．

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ボイマンス美術館が，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．

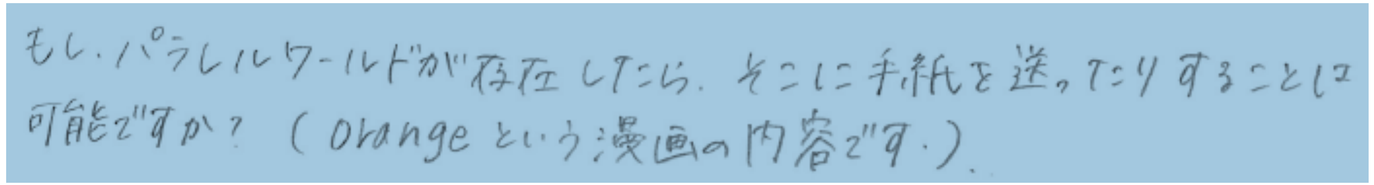
前回のミニッツペーパーから

【7-3】(次回以降の講義関連)

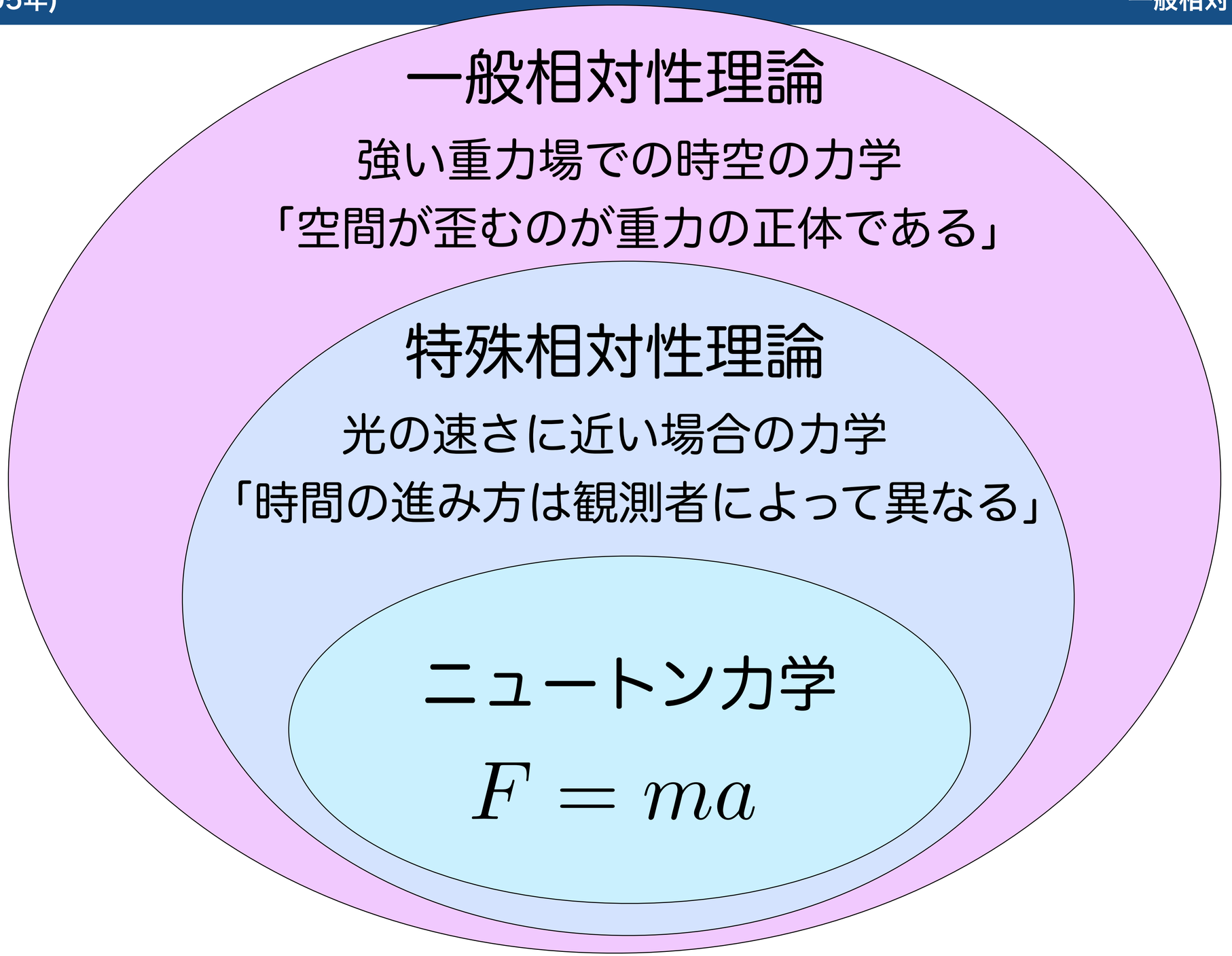
次の学説で, 過半数の宇宙物理学者が信じているものはどれか(複数).

7	(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
5	(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
16	(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
21	(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
17	(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
29	(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
11	(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.

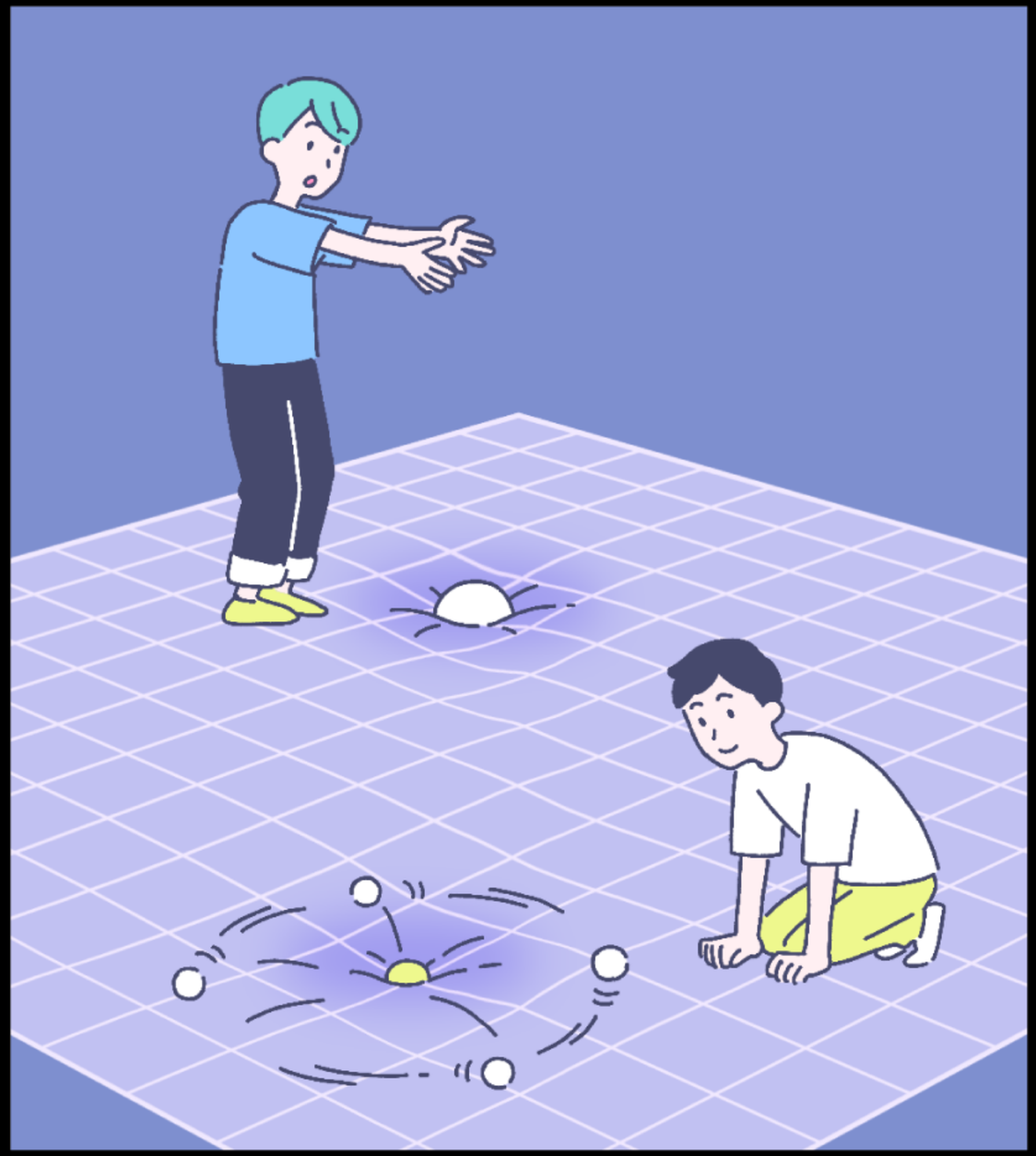
みなさんの願望？
(34名回答)



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
$F = ma$

一般相対性理論



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

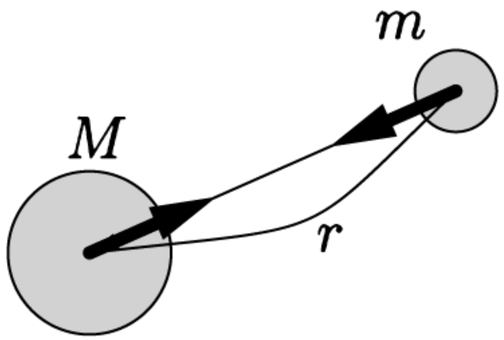
すべてのものは 引力で引き合う

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

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

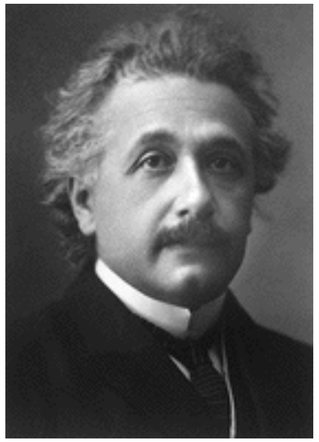
でつねに引力である　Gは定数であり 万有引力定数と呼ぶ



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.

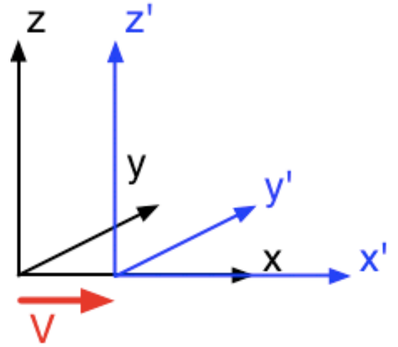
一般相対性理論の出発点

★ 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・光速度一定の原理

(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) **光速度一定の原理**：真空中の光の速度は，すべての局所慣性系で等しい．

光速度は常に一定である

† 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．

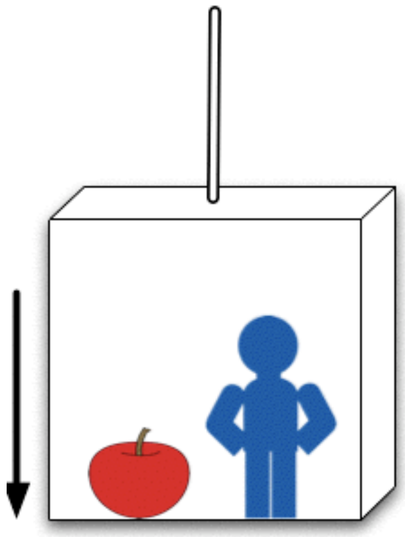
加速度をどう扱おうか？ 慣性力（遠心力）を考えるのは煩わしい...

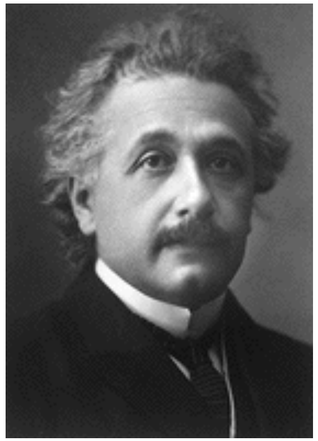
加速度運動している系では慣性力を考えて運動方程式を立てなければならない...

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．

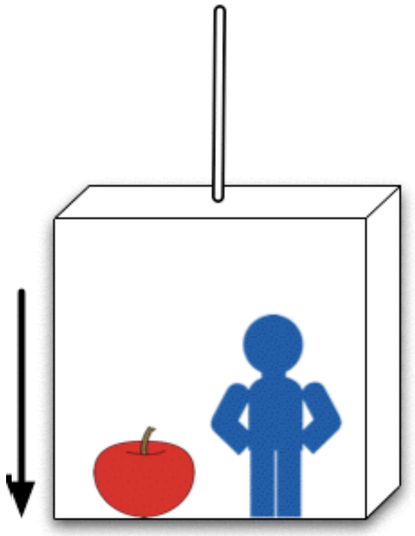
エレベータのひもが切れたらどうなるだろうか？？

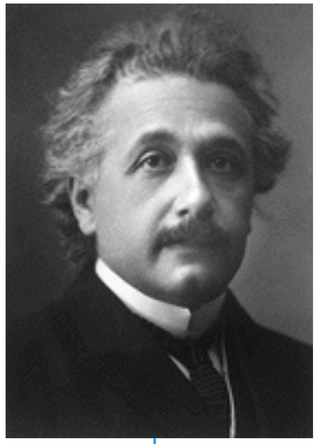




エレベータの思考実験

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**）

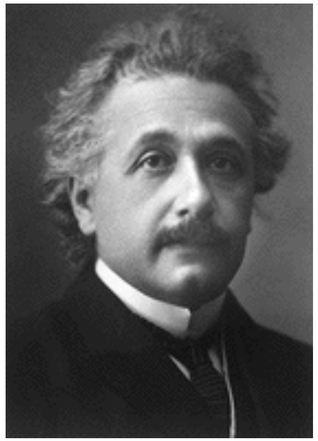
エレベータ内では重力を消すことができるけど，．．．．
エレベータを大きなサイズにすると消すことができない．．

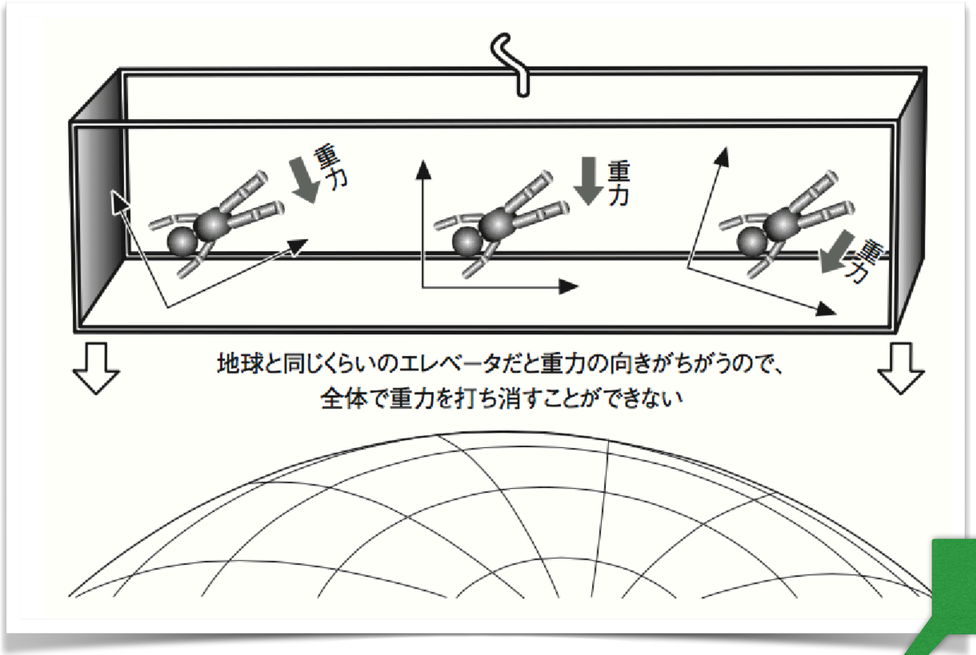
人生で最も幸福なひらめき

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.

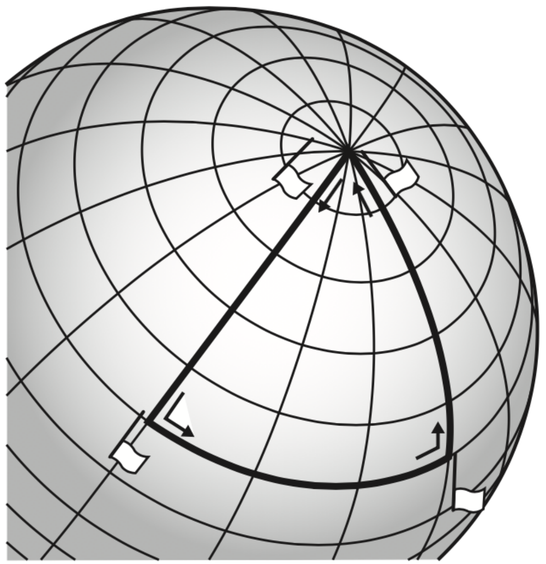
＝重力の正体は，時空のもつ曲がり具合である.

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

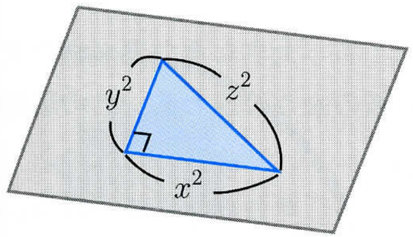
曲がった空間の数学？



正の曲率（地球表面）

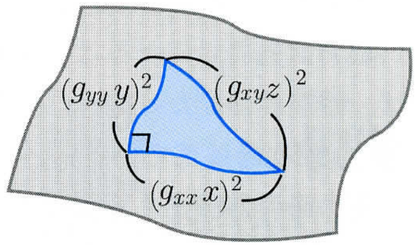
時空の曲がりを表す計量 $g_{\mu\nu}$

平らな面ではピタゴラスの定理が成り立つ。



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

曲がった空間でも成立するために計量関数で調整する。



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

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

４次元距離を一般化した「計量(metric)」

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

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

平らな時空(flat spacetime)では,

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

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

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．

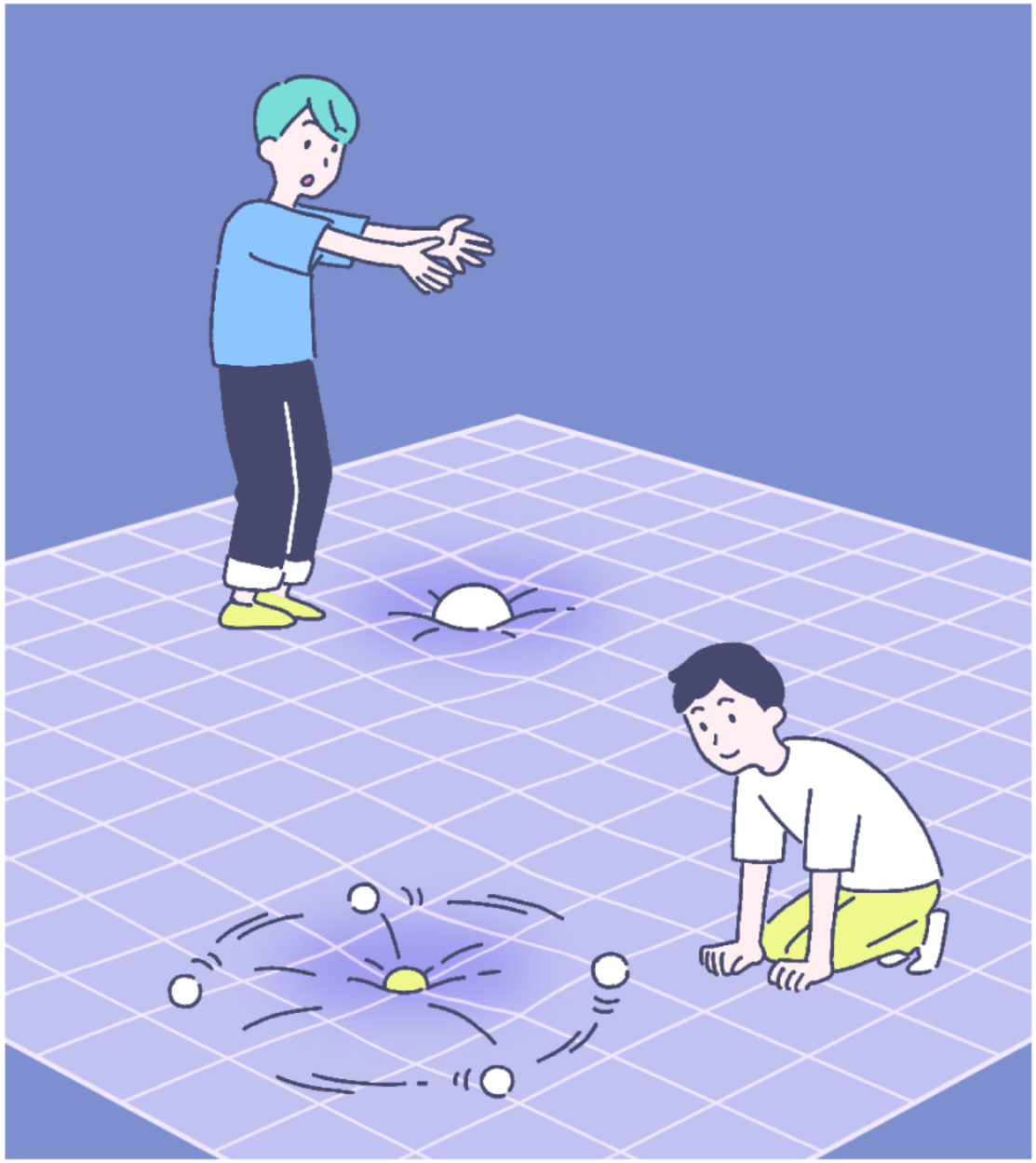
$$ds^2 = \sum_{\mu=0}^{3} \sum_{\nu=0}^{3} g_{\mu\nu}(x) dx^\mu dx^\nu = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

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

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

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

一般相対性理論(1915年)



◆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

$$F = G\frac{Mm}{r^2} \tag{2.2}$$

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

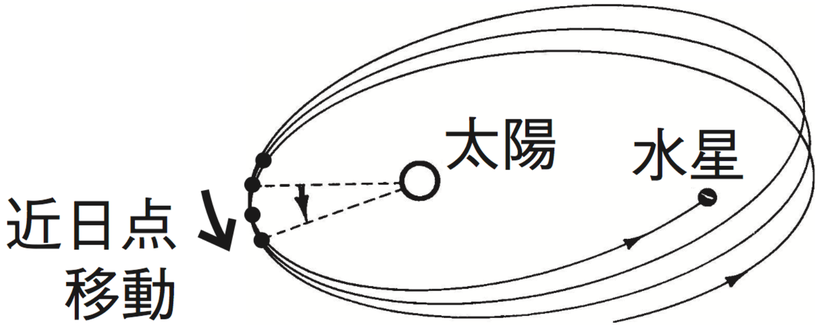
水星の近日点移動

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　物理
mathematics　数学
statistics　統計学
genetics　遺伝学

Yの科学

astronomy　天文学
economy　経済学
biology　生物学
archaeology　考古学
anthropology　人類学
sociology　社会学

体系化の学問
対象物の性質を理論で説明

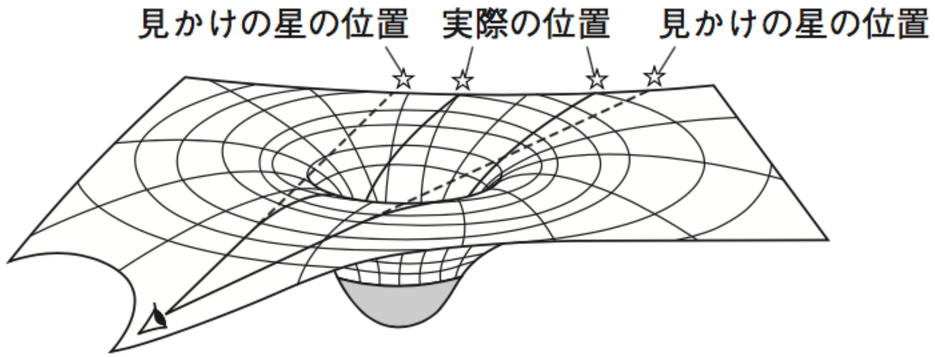
発見の学問
対象物を分類し記載

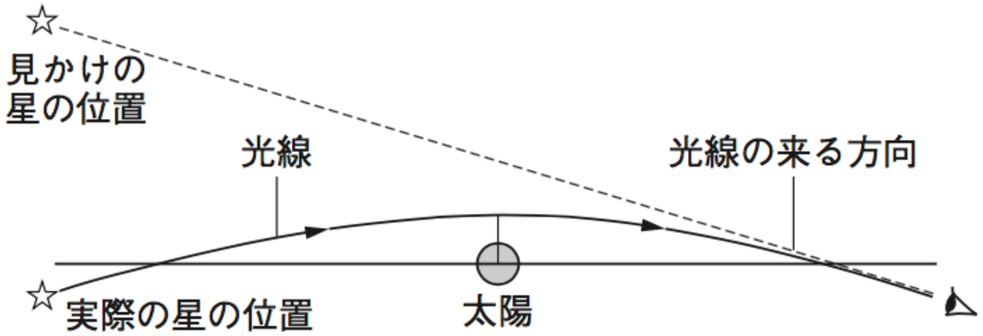
相対性理論

ブラックホール
膨張宇宙
重力波

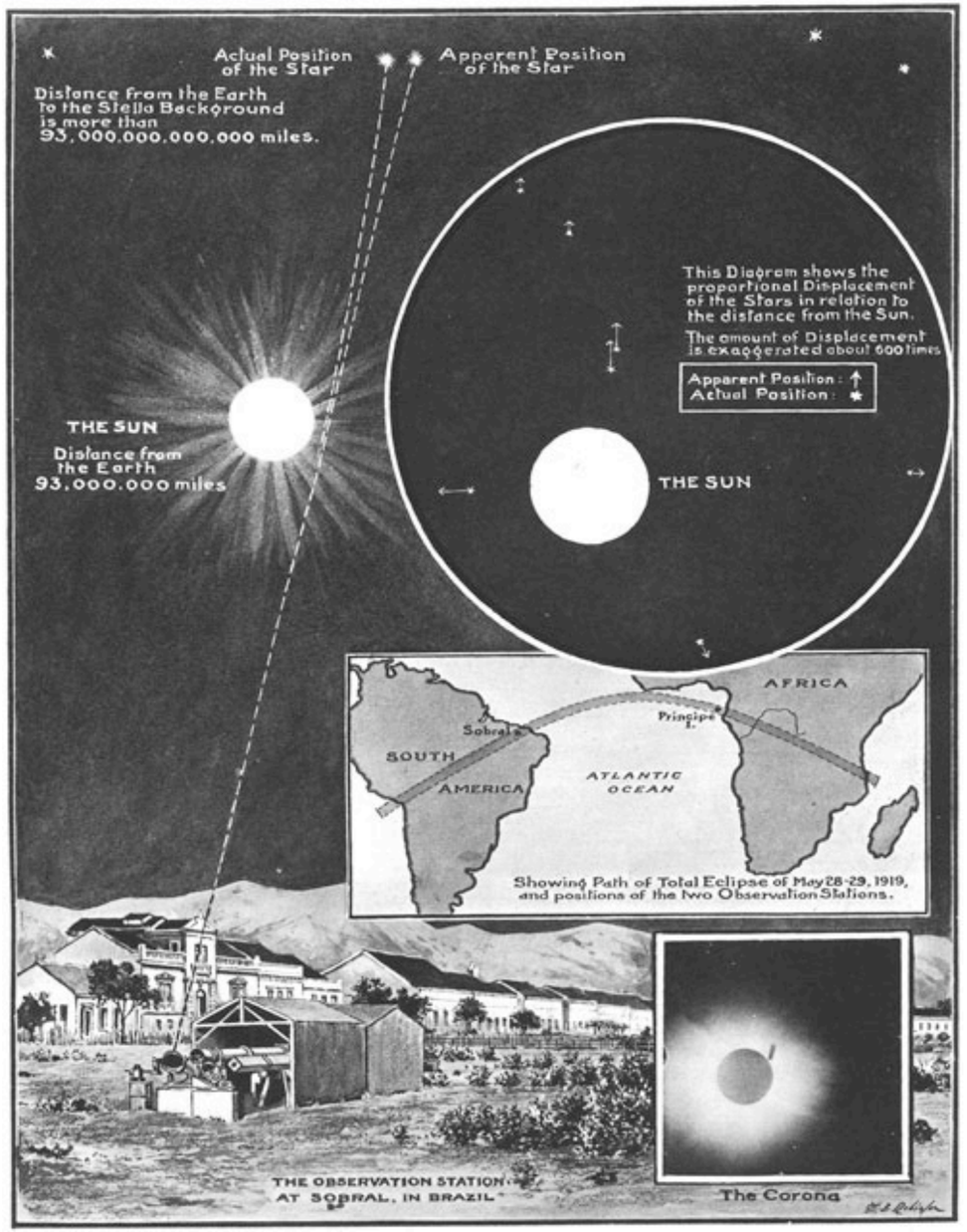
重力レンズ効果 ▶▶▶ 1919年の皆既日食で確認

- 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



教科書 p88

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.

LIGHTS ALL ASKEW IN THE HEAVENS

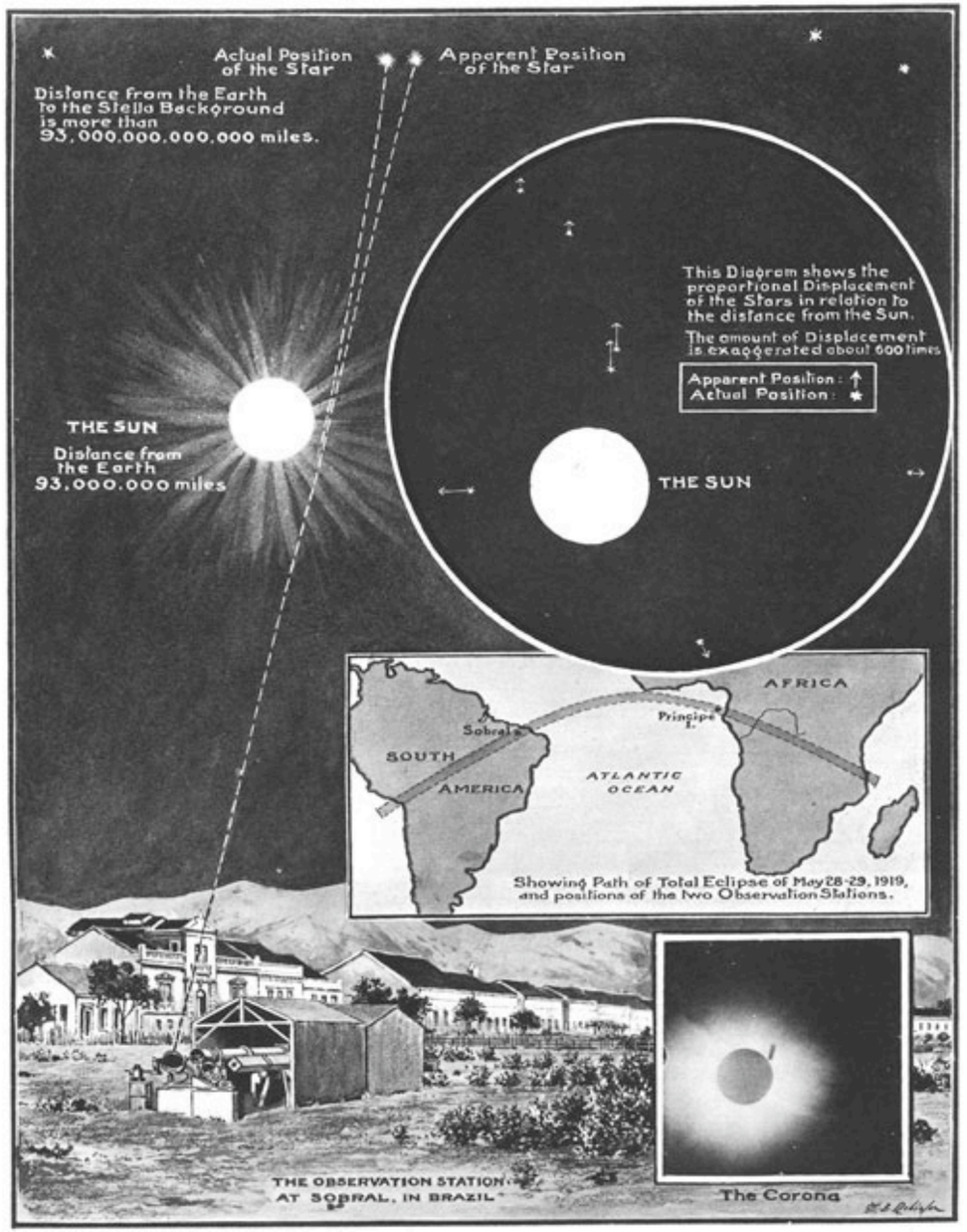
Men of Science More or Less Agog Over Results of Eclipse Observations.

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.



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

【話題】

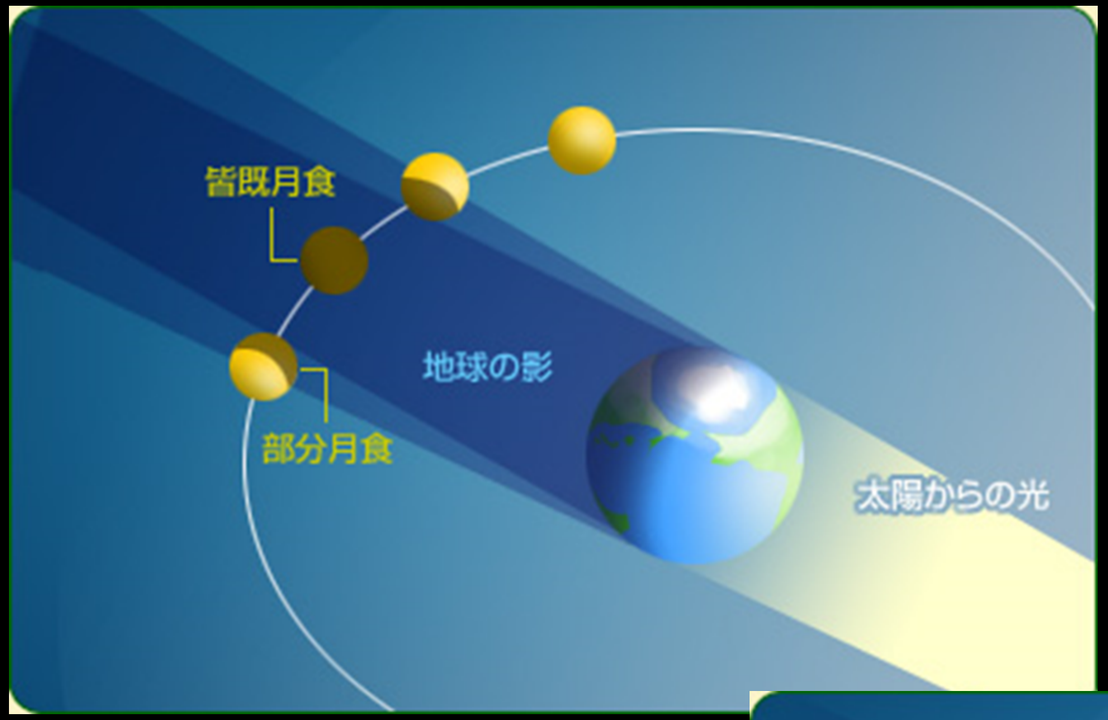
「一般相対性理論を理解しているのは世界に3人と言われていますが？」

Arthur Stanley Eddington
(1882–1944)

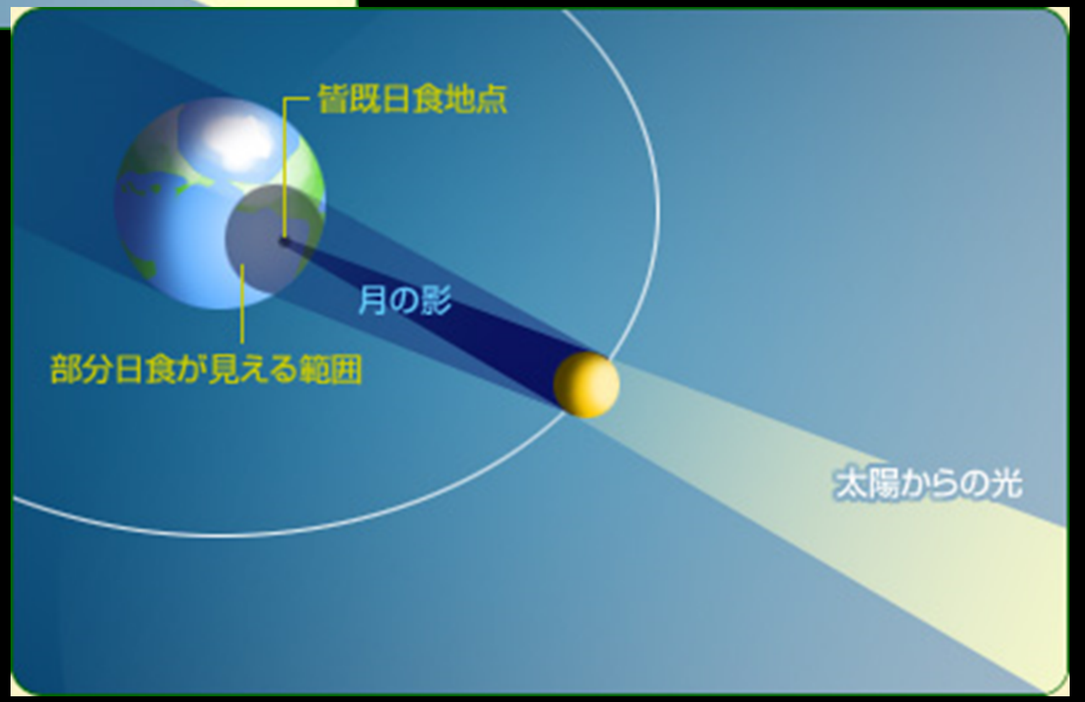
He was an early advocate of Einstein's General Relativity, and an interesting anecdote well illustrates his humour and personal intellectual investment: Ludwig Silberstein, a physicist who thought of himself as an expert on relativity, approached Eddington at the Royal Society's (6 November) 1919 meeting 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人と言われていますが？」
Eddington「...」
Silberstein「そう謙遜なさらないで」
Eddington「いや, 誰が3人目かを考えていたんです」

月食のしくみ

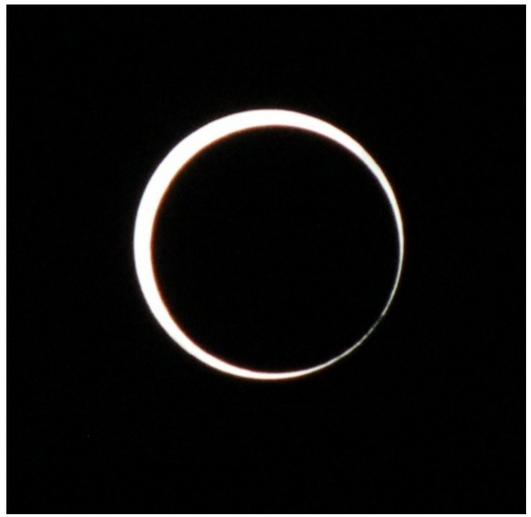


日食のしくみ



2012年5月21日　金環日食

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接触時にベーリ・ビーズが肉眼でもよく分かる綺麗な日食でした。

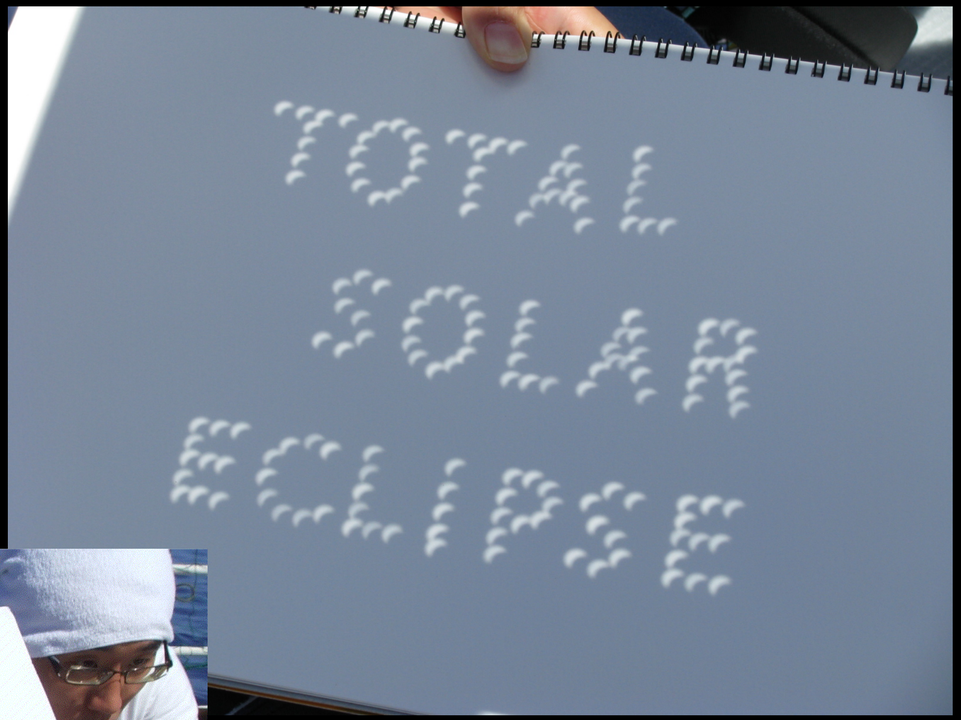
縣 秀彦
8月22日 ·

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

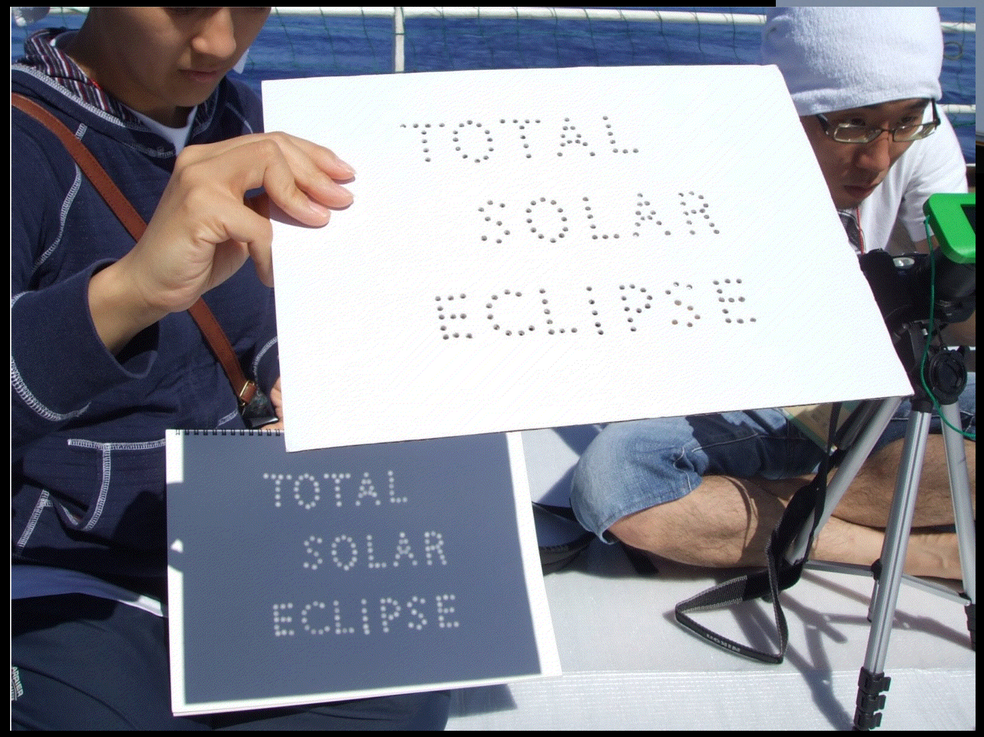
2009年7月22日　皆既日食

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　福江彗氏撮影

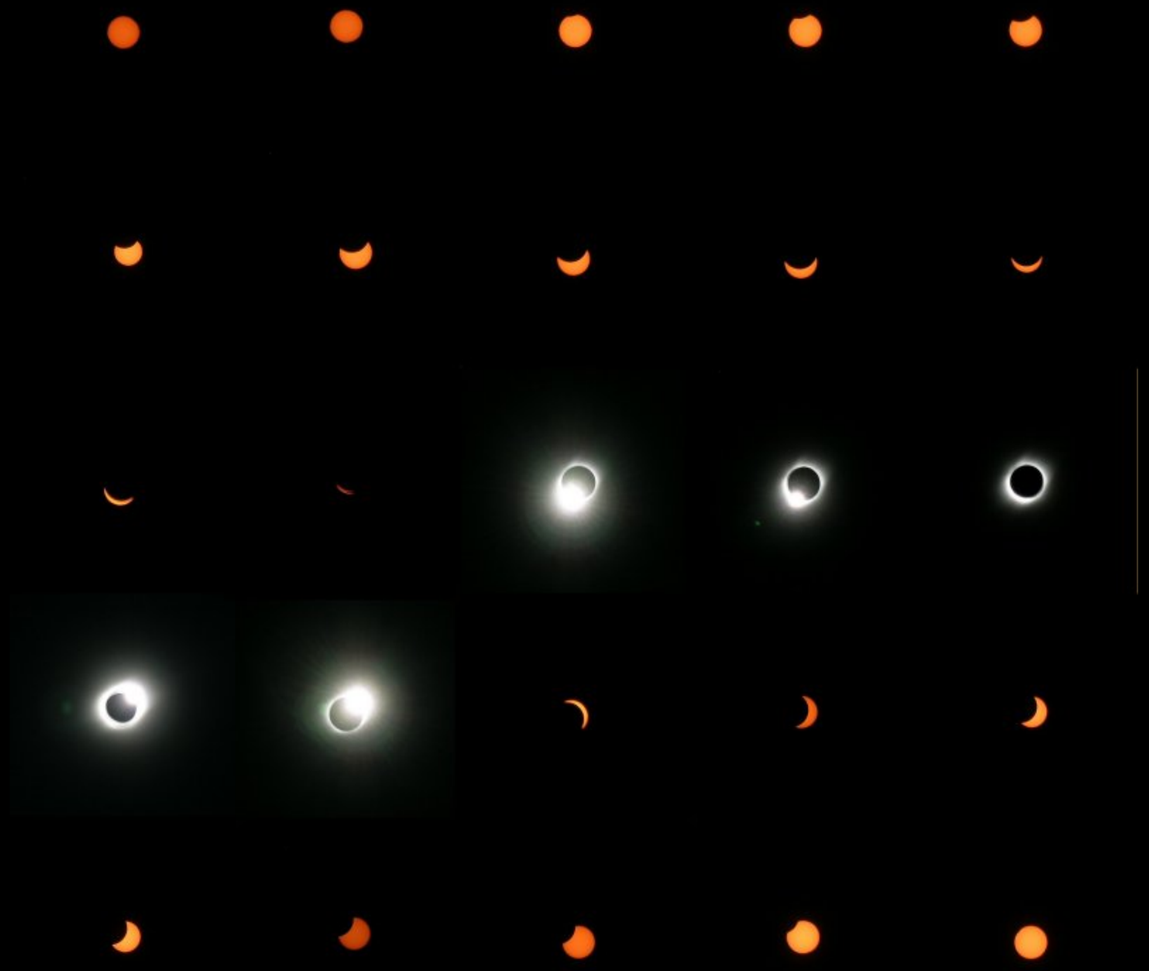
2009年7月22日11時25分　大鐘卓哉氏撮影

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　福江彗氏撮影

2009年7月22日11時29分　真貝寿明撮影

2009年7月22日11時28分　大鐘卓哉氏撮影

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

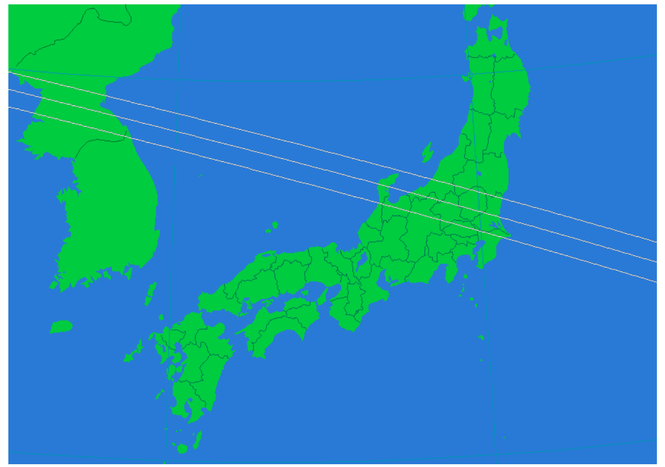
2009年7月22日　福江彗氏撮影

2009年7月22日　福江彗氏撮影

日本でみられる皆既日食

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
関東ー北陸皆既日食
最大2分54秒

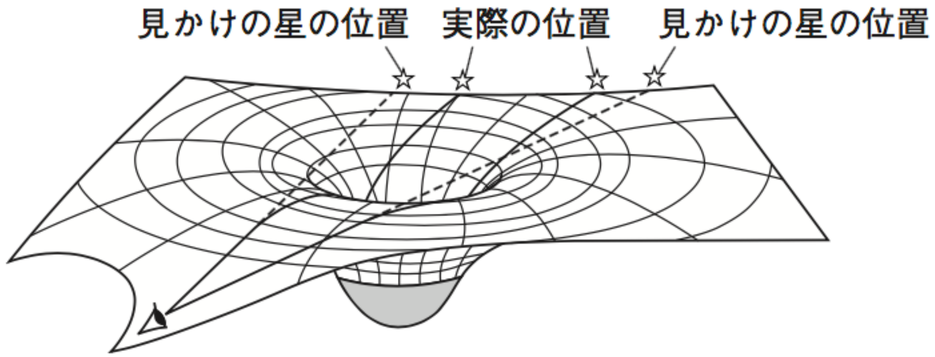


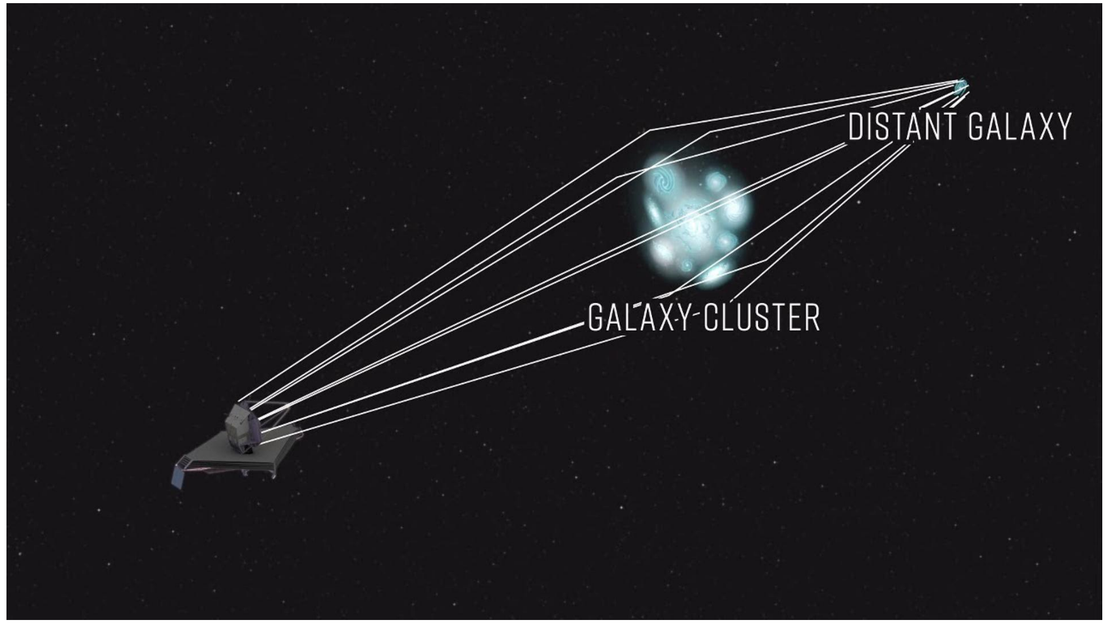
世界でみられる皆既日食

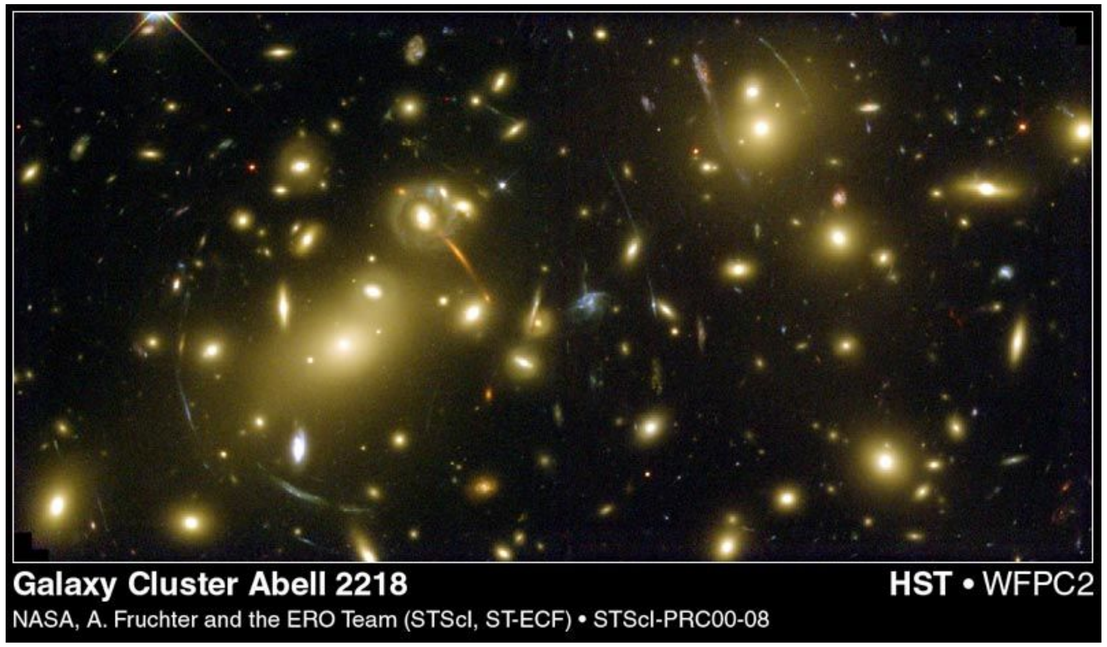
日付	種類	食の経路等
2012年11月14日	皆既	オーストラリア北部から南太平洋を通過し、チリの西方洋上で終わる。ニュージーランド北島で食分0.8前後。
2015年3月20日	皆既	グリーンランド、アイスランドの南沖から北極を通過。ユーラシア北西部・北アフリカで部分食を観測できる。
2016年3月9日	皆既	インドネシアを通過し北太平洋に至る。日本では全国で部分食が見られる。
2017年8月21日	皆既	北太平洋中部に始まり北米大陸を横断、中部大西洋で終わる。
2019年7月3日	皆既	南太平洋、南米のチリ、アルゼンチンで観測できる。
2020年12月14日	皆既	太平洋西部に始まり南米大陸南部を通過、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





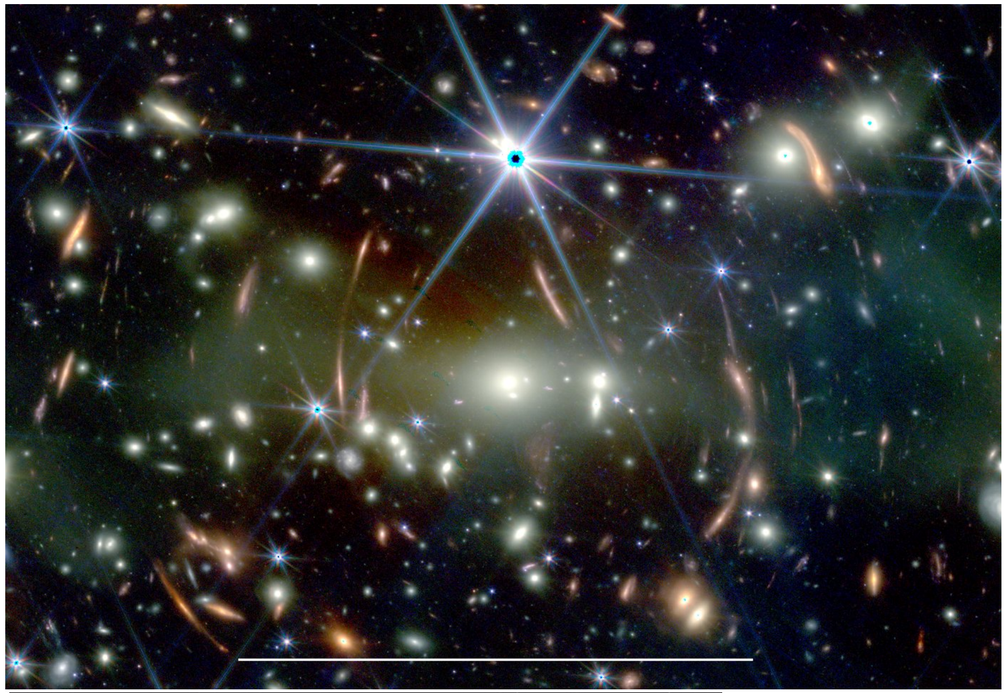


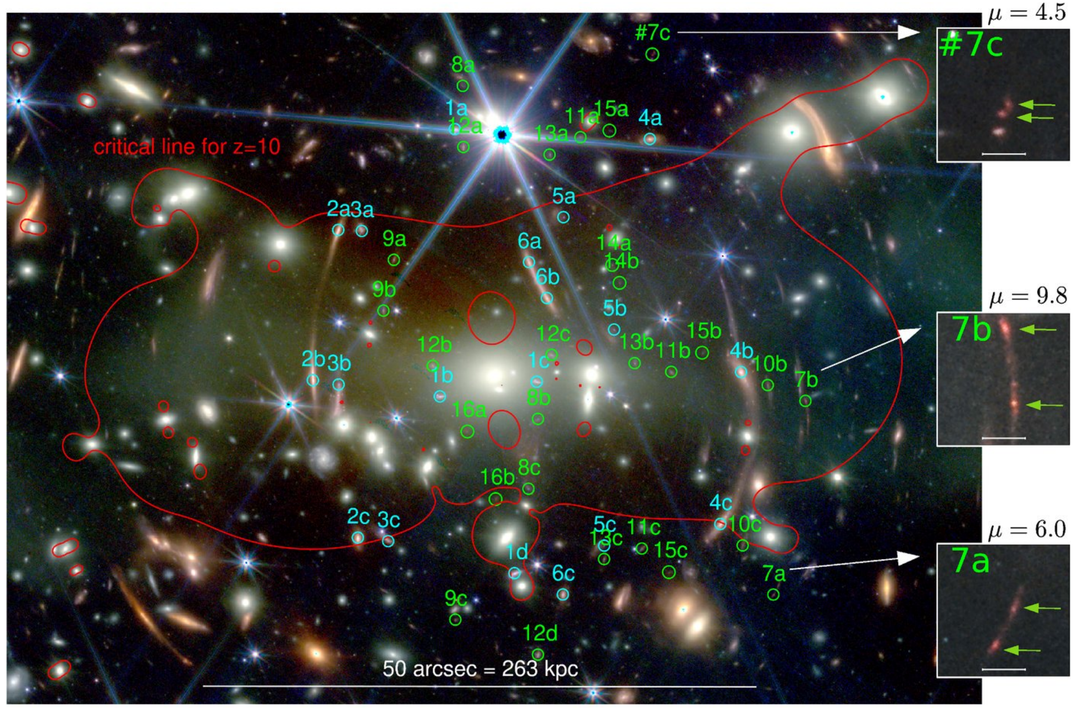
https://newatlas.com/space/james-webb-space-telescope-gravitational-lensing/

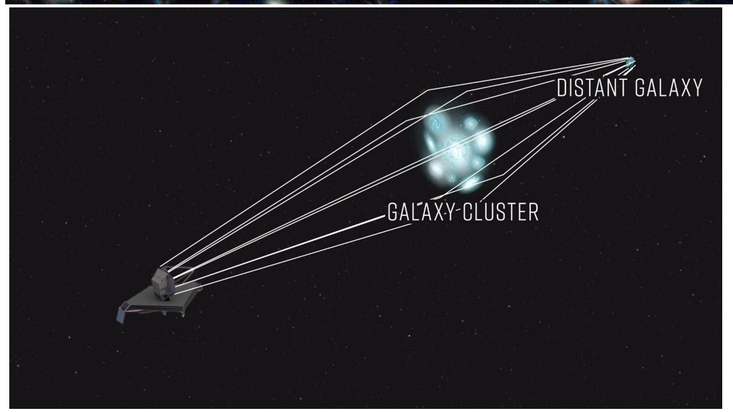
重力レンズ効果 ▶▶▶ 銀河によるその背後の銀河からの光線湾曲

- 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.

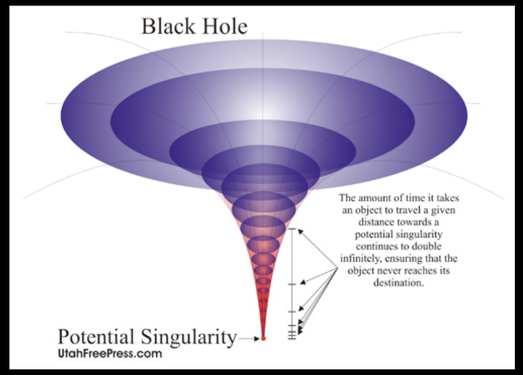
Gravity Ink. - Einstein's Gravity (Episode 1)

LISAcommunity 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

ブラックホール
Black-hole

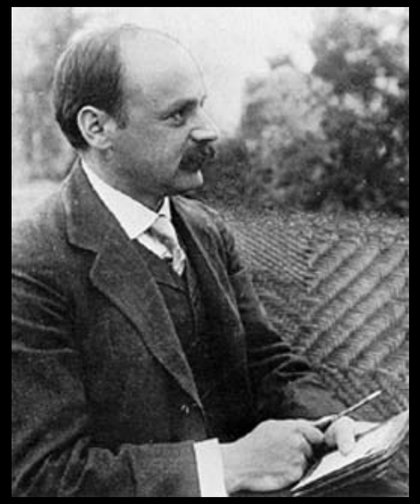


まず，方程式を解いたのは，シュバルツシルドだった.

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.

教科書 p92

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

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

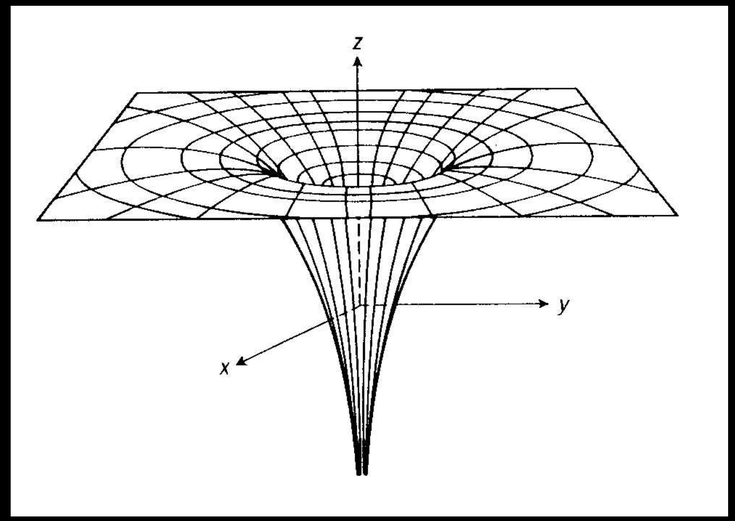
困ったことに, ……

r=0 で特異点

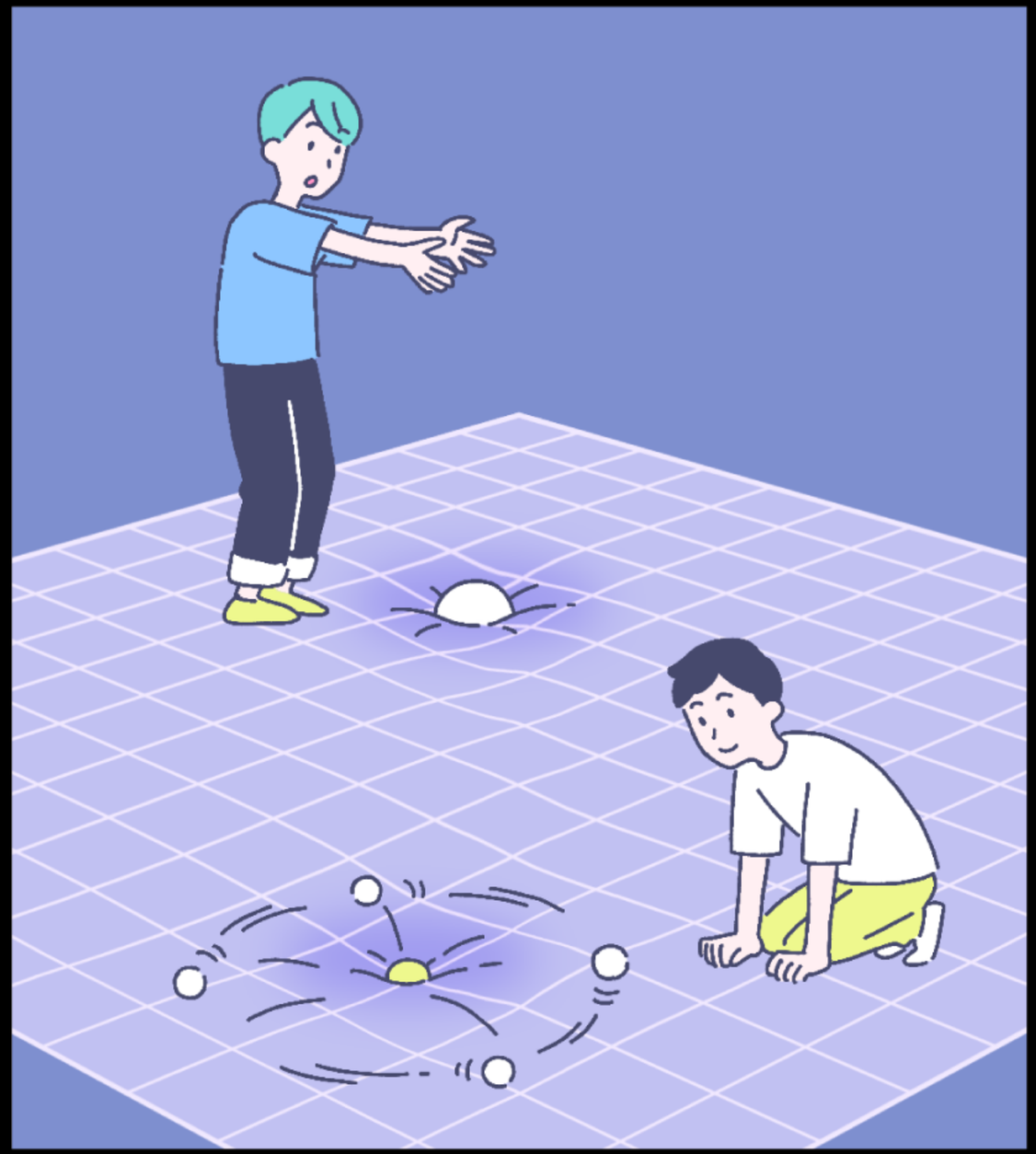
⇒ 今でも困ってる

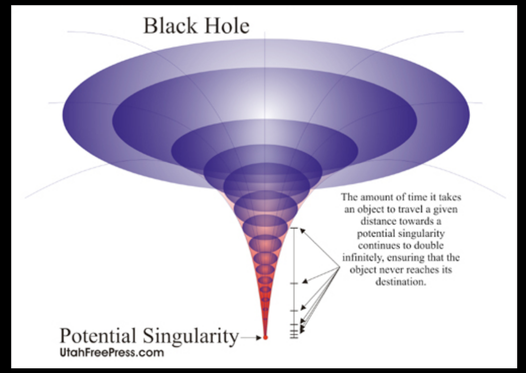
r=2GM/c² でも特異点

⇒ ブラックホールの境界



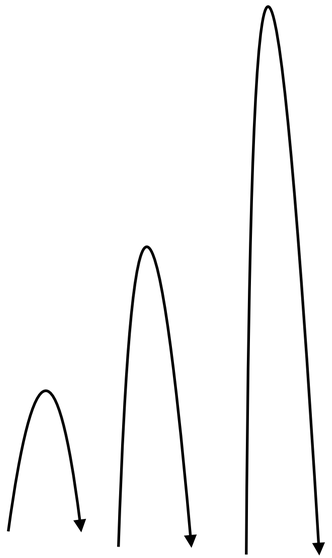
3.4 相対論の産物:(1) ブラックホールと時空特異点

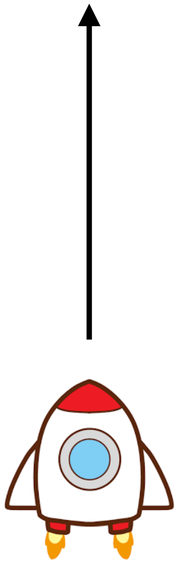




光も脱出できない天体とは・・・

ボールを速く投げ上げると，
高くまで飛ぶ



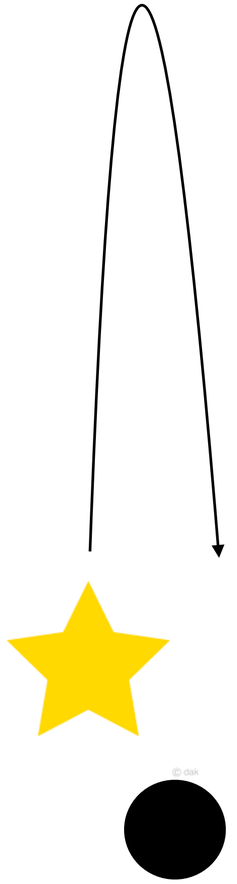


地球からの脱出速度
秒速 12 km

秒速
30万 km

光は当然
脱出できる

とてつもなく　重くて小さな天体では

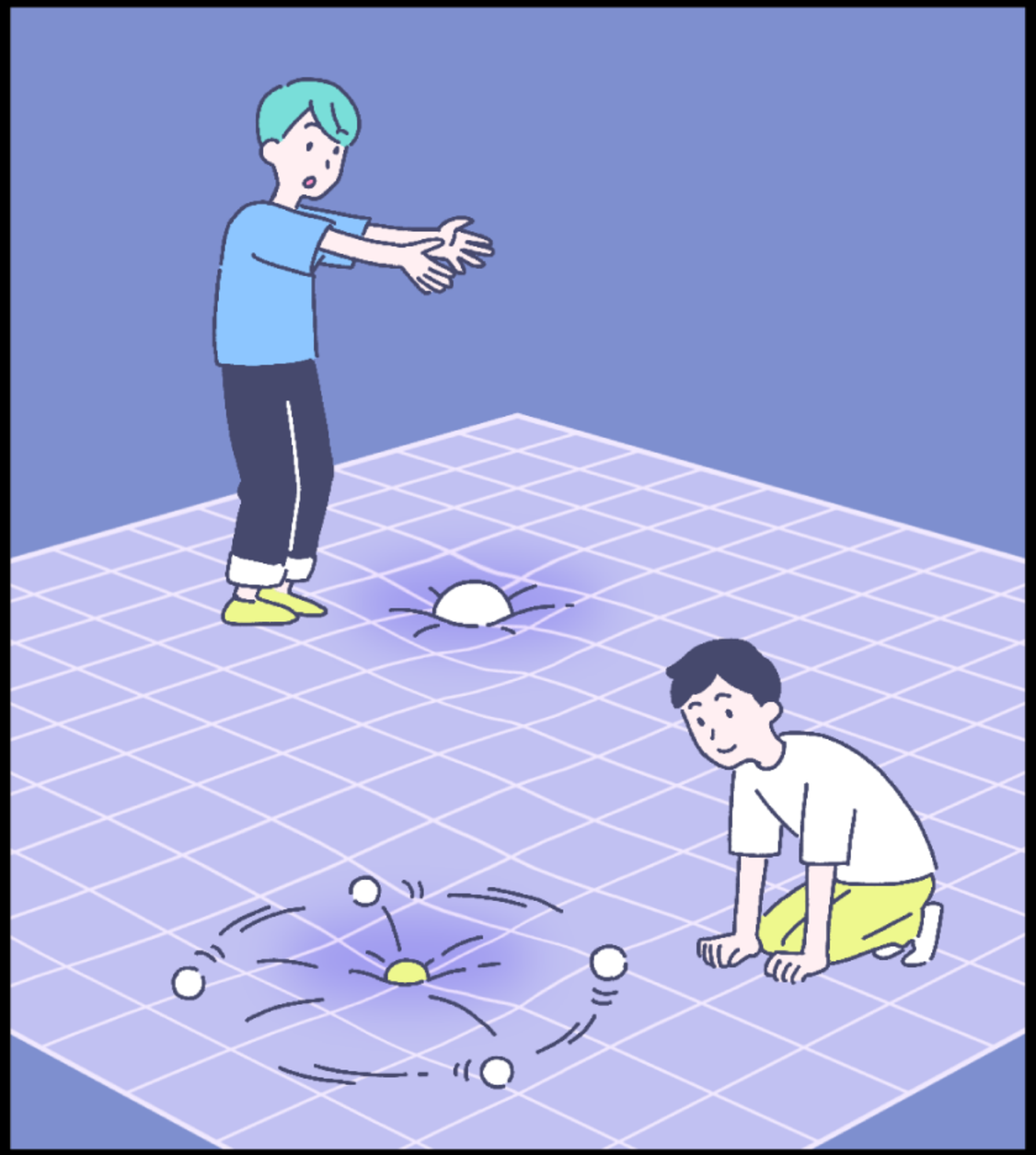


光も
脱出できない

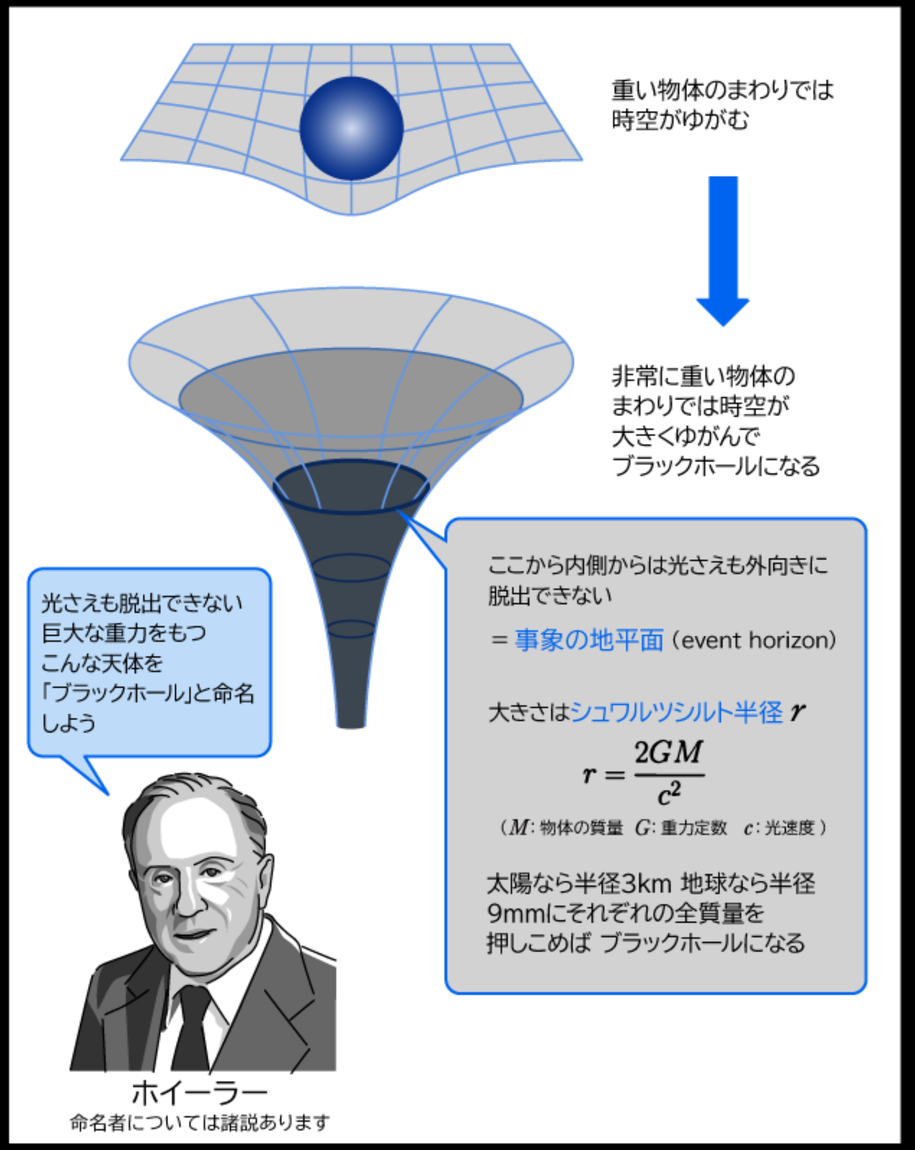
**地球質量が半径9mmに
なったら，**

ブラックホール

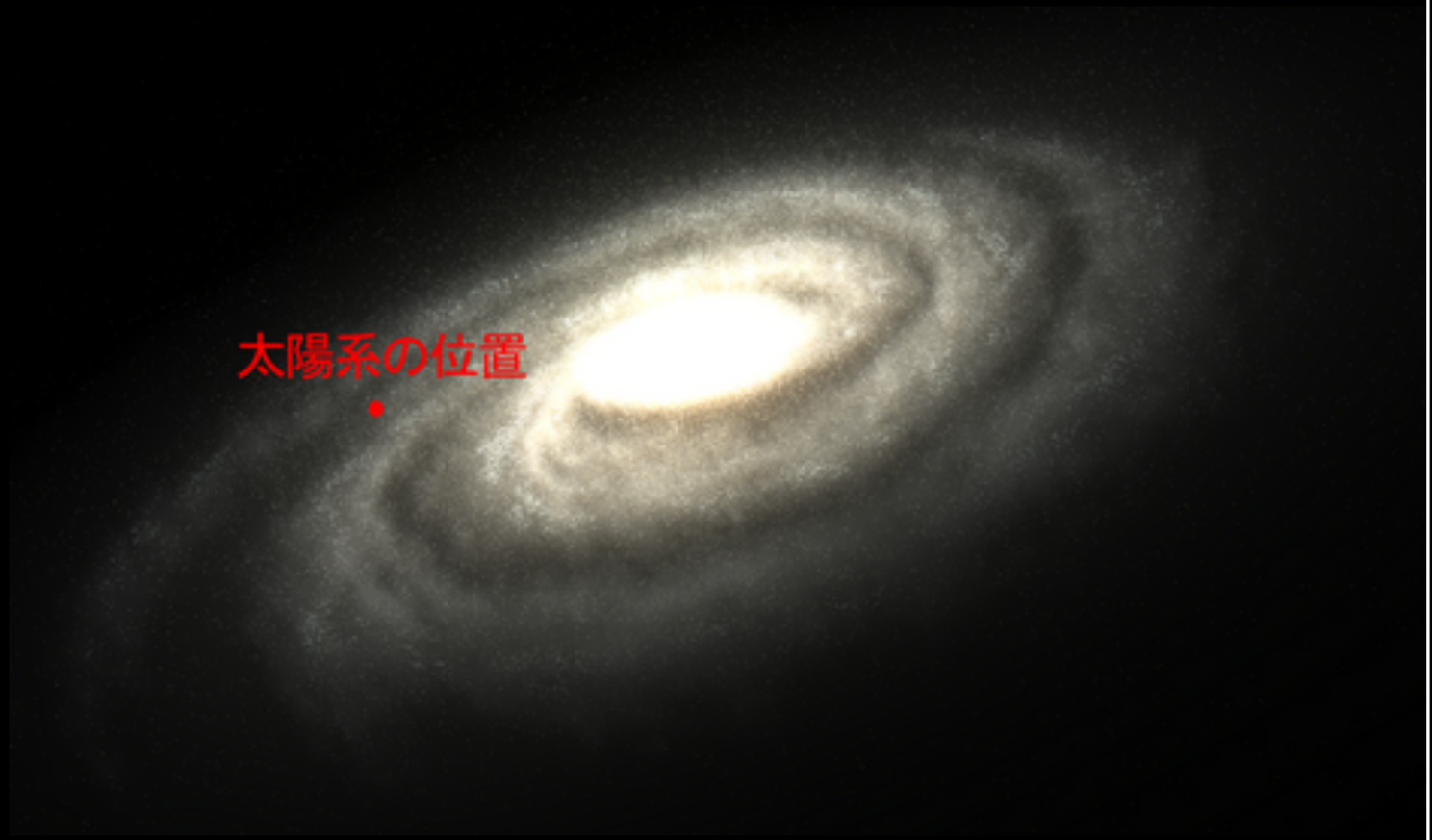
ブラックホール

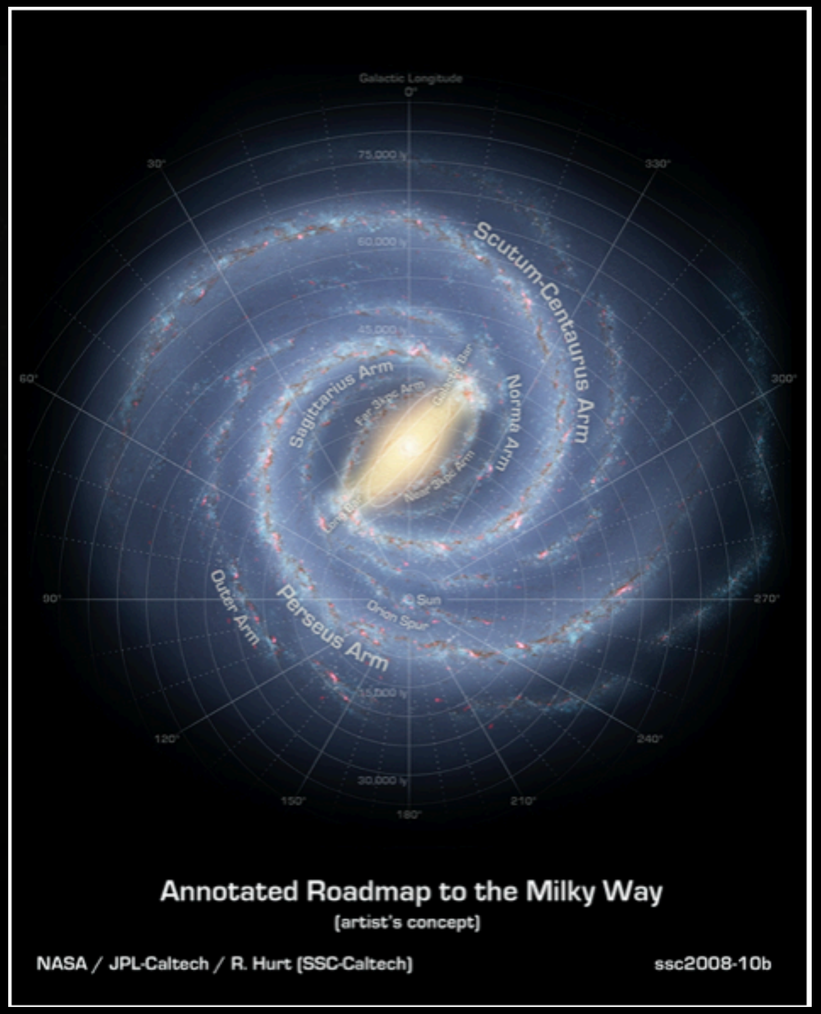


ブラックホール
＝重力が強すぎて 光さえも出られない天体
＝因果的に隔離される領域　境界＝地平面（ホライズン）



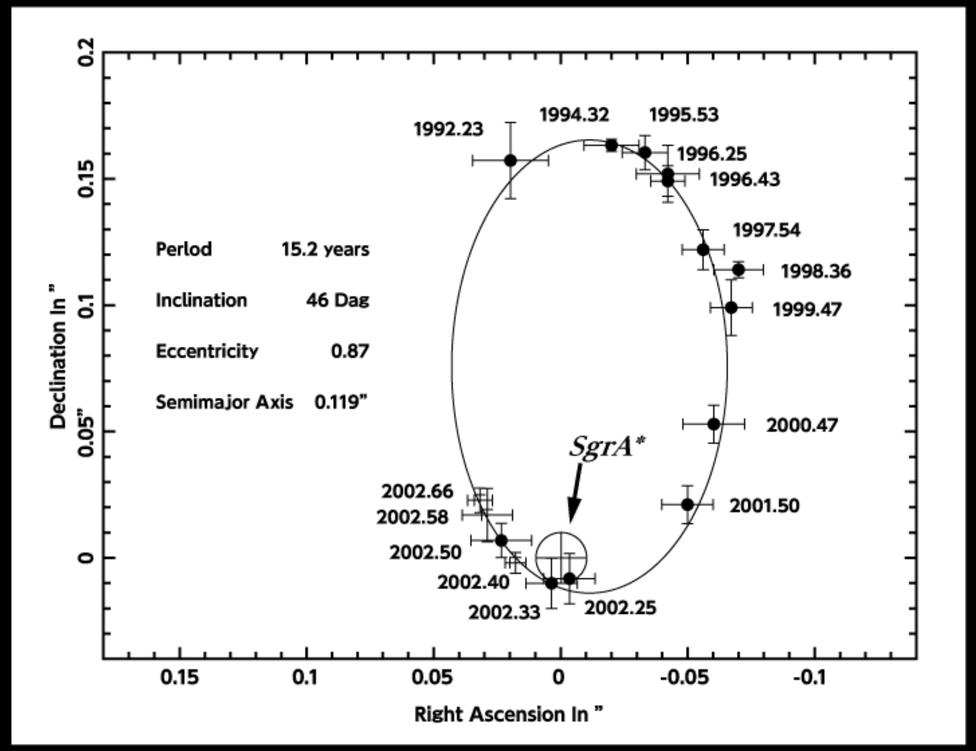
天の川銀河

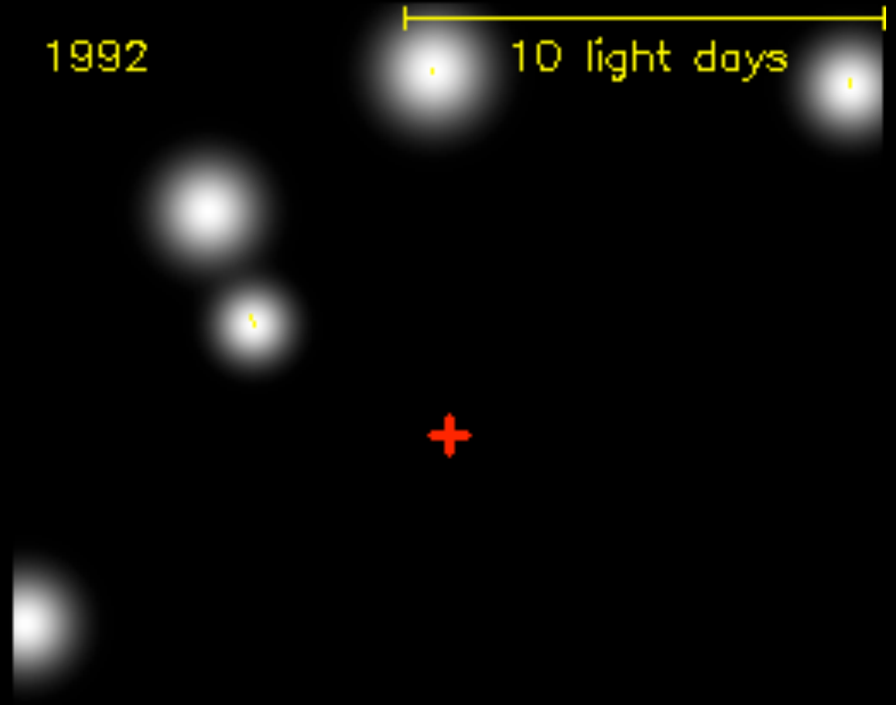


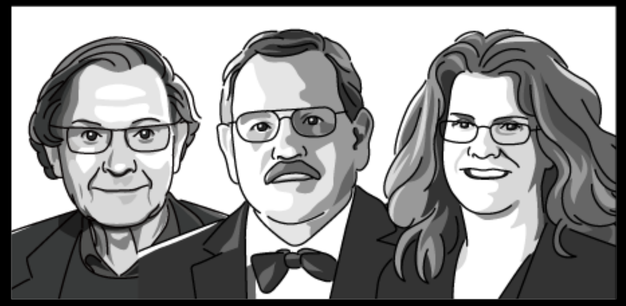


出典　天文学辞典(日本天文学会）HP

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

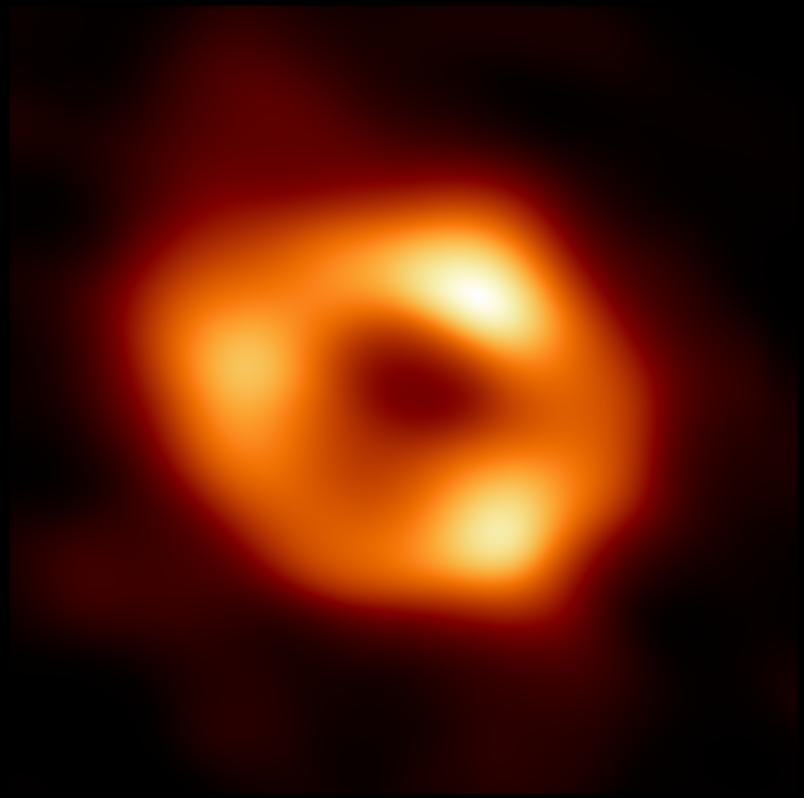
ロジャー・ペンローズ
「ブラックホール形成が一般相対性理論におけるごく自然な帰結となることの発見に対して」
ラインハルト・ゲンツェル
アンドレア・ゲズ
「天の川銀河の中心に超大質量なコンパクト天体を発見したことに対して」

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）

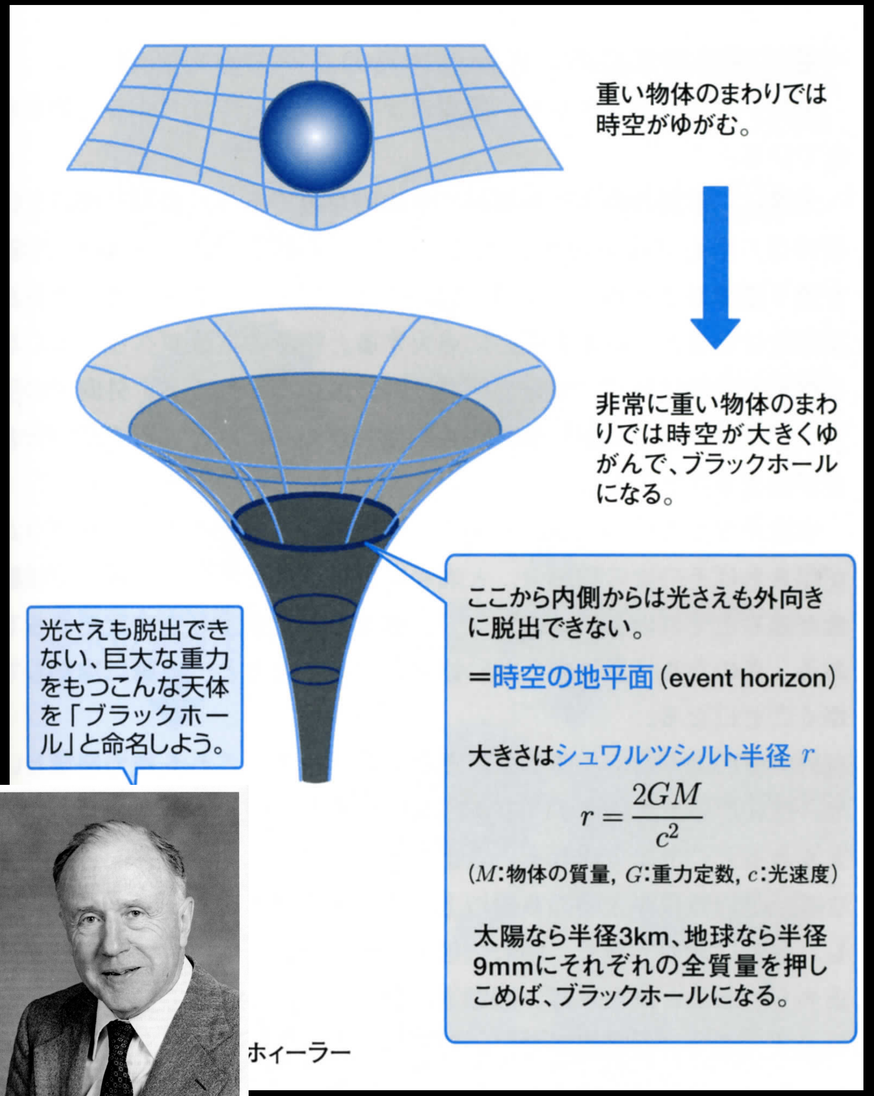
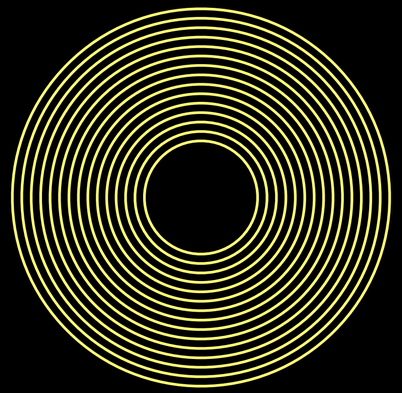


表 4.1: シュヴァルツシルト半径（対応するブラックホールの大きさ）．質量 M の物体がどの位の半径 $R_{\rm Sch}$ に押し込まれたらブラックホールになるか，という目安．Sgr A* は天の川銀河中心の超巨大ブラックホール．

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

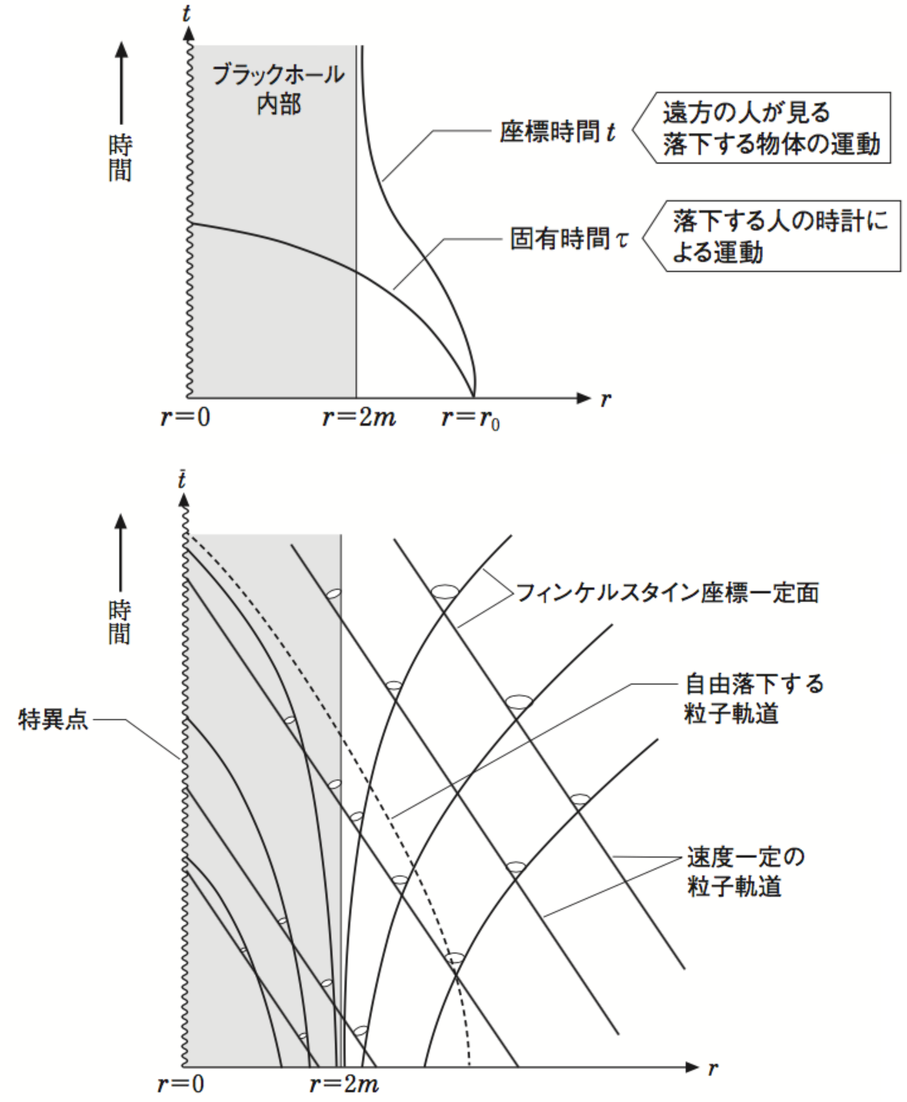


図27　シュヴァルツシルト解の振る舞い　〔上〕もともとの座標で見ると、星が重力崩壊して落ち込んでいく人は有限時間で落下するが、遠方から見ている人にとっては無限の時間が経っても地平面までしか到達しないように見える。〔下〕縦軸と横軸がもとのシュヴァルツシルト座標で、フィンケルスタインの考案した座標は図中の実線。フィンケルスタインの考案した座標を使うと、地平面を通過して扱うことが可能になる。各時刻と位置から光を出した時の円錐も描いてある。

GPS（Global Positioning System）

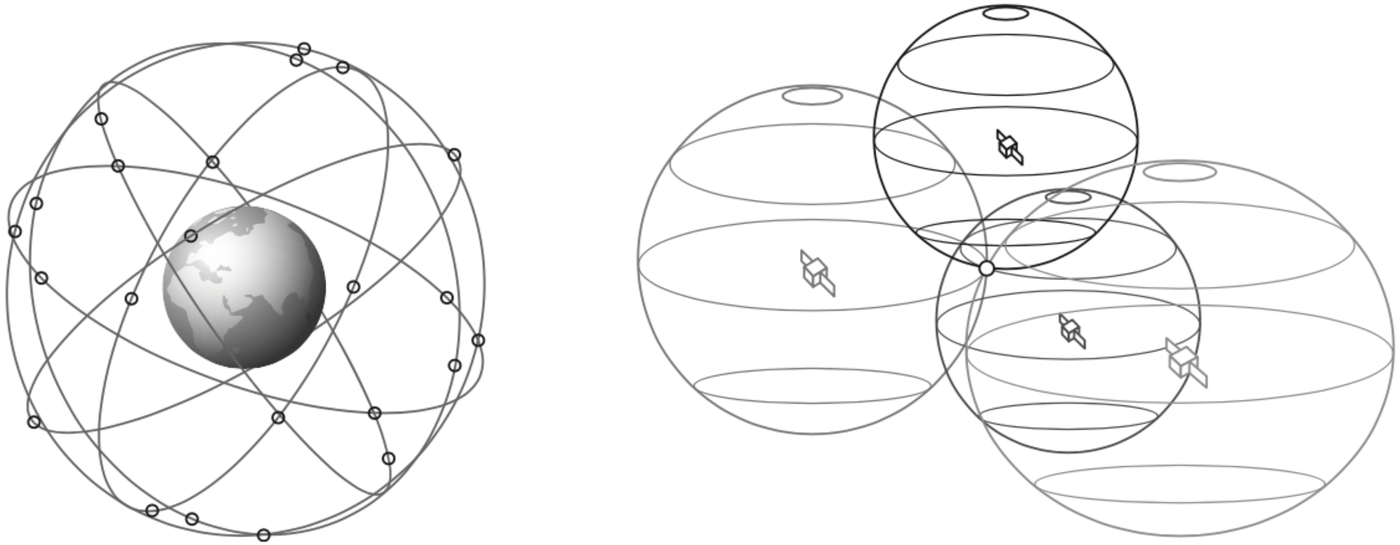


図 3.43 GPS システム．2 台の GPS 衛星からの電波を使うと重なり合う部分は 1 つの円周上，3 台からの電波では 3 点に絞られ，4 台の衛星からの情報を使うと 1 点に絞られる．

正確な位置と時刻の情報を含んだ電波で，

３角測量→精度±15m

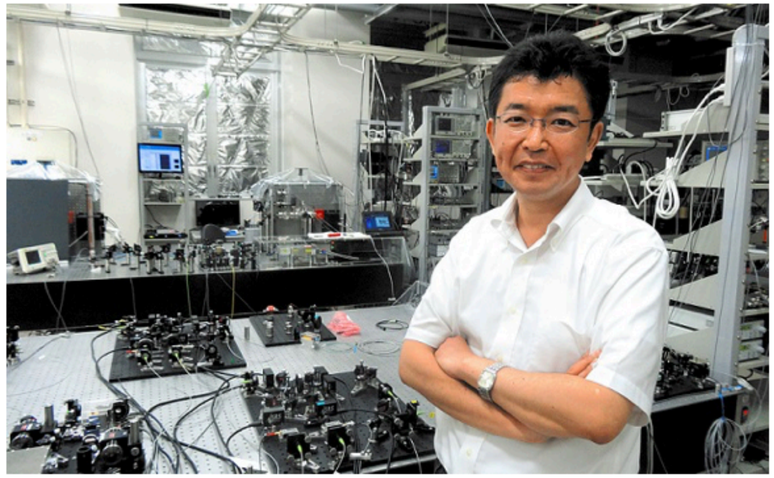
高速飛行の特殊相対論効果と

地球重力の一般相対論効果

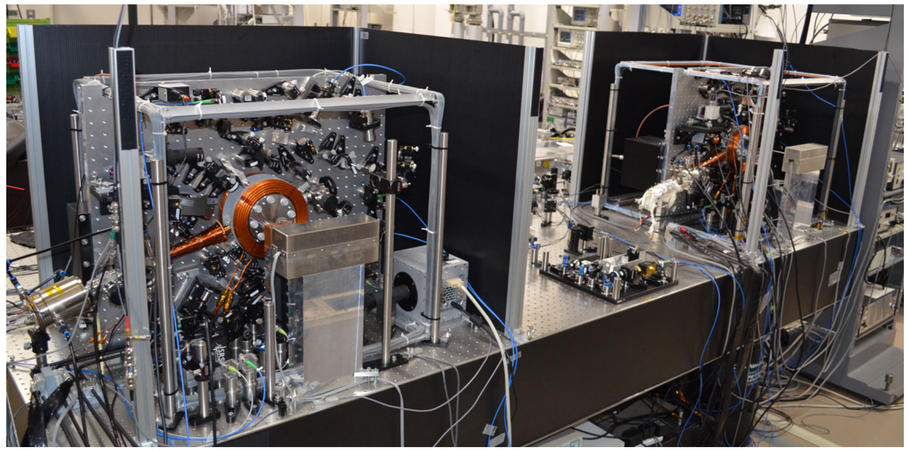
⇒１日につき，38×10^{-6}秒ずつ衛星の時計を遅らせる必要あり

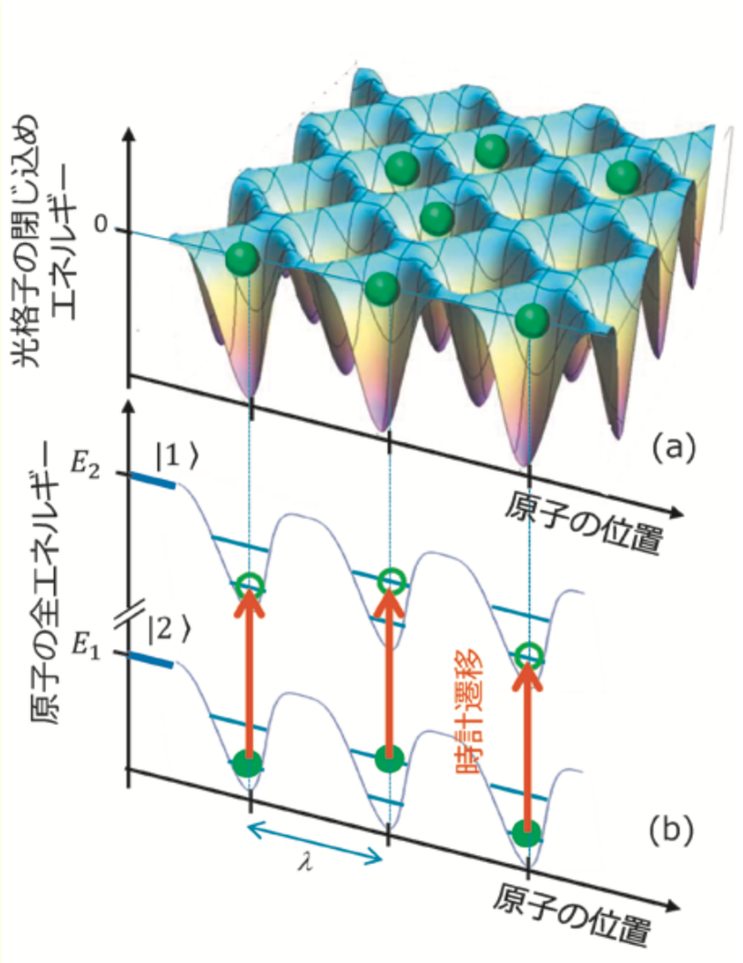
一般相対性理論は正しい

もっとも精密な時計＝光格子時計



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^{-18} の精度を実現

（300億年でずれは1秒以内）

スカイツリーの上下で時間の進み方が違う

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

1 週間の計測．平均して，差が

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

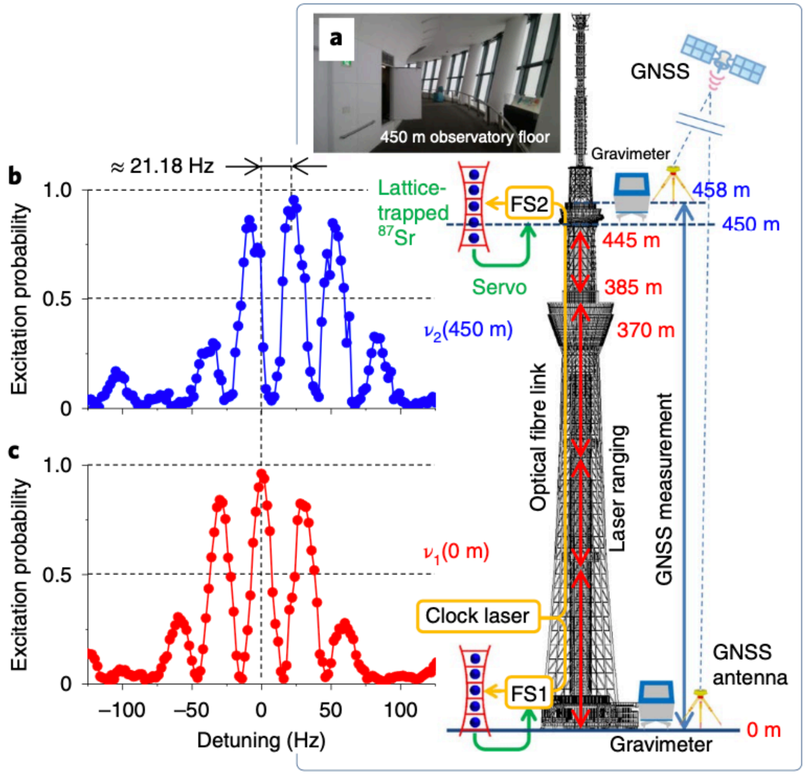
$$\frac{g\Delta h}{c^2} = (49337.1 \pm 1.4) \times 10^{-18}$$

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

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．



nature photonics
LETTERS
https://doi.org/10.1038/s41566-020-0619-8
Check for updates

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

Masao Takamoto[1,2], Ichiro Ushijima[3], Noriaki Ohmae[1,2], Toshihiro Yahagi[4], Kensuke Kokado[4], Hisaaki Shinkai[5] and Hidetoshi Katori[1,2,3]✉

Nature Photonics, 14 (2020) 411

もっとも精密な時計＝光格子時計

Physics Today 2020 July

冷蔵庫サイズの時計で，高度差450mを ±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.

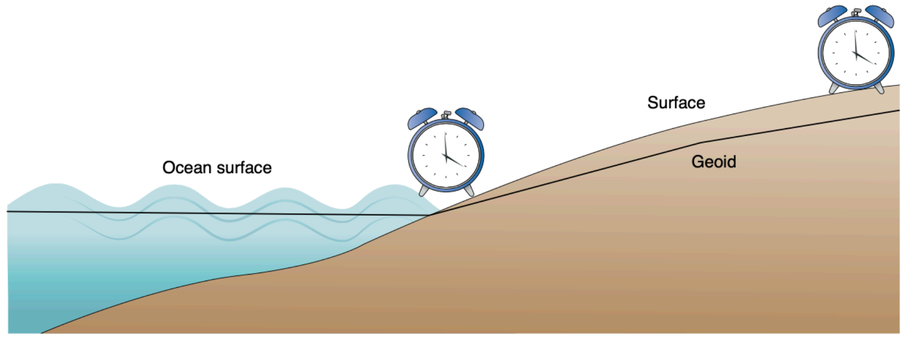


Fig. 1 | Illustration of how in the future relativistic geodesy might be done with clocks. The geoid is an equipotential surface of the Earth's gravitational potential, indicated by the black line. While the mean ocean surface is closely aligned with the geoid, the surface of land can significantly differ. 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

本日のミニッツペーパー記入項目　出席票を兼ねます.

【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ー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)