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

第7回　2026/11/2

第3章　現代物理学1：相対性理論（2）

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/

教科書 p58

1905年 物理学 奇跡の年

近代物理学の進展

1600 1700 1800 1900

天文学

ケプラー

力学

ガリレイ

光学

ニュートン

電磁気学

解析力学

熱学／流体力学

ファラデー

マクスウェル

現代物理学の進展

1905 1915 1925 60s 80s 00s

一般相対性理論

特殊相対性理論

光電効果

ブラウン運動

量子力学

統計力学

場の理論

原子核

宇宙物理学

量子重力理論?

素粒子論

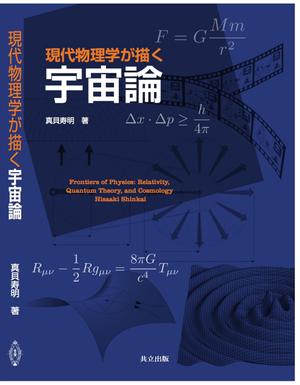
経済物理

複雑系

物性物理

物理化学

生物物理



19世紀末は「物理学は完成した」と考えられていた。



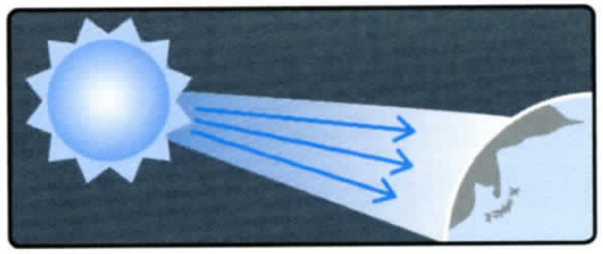
1905年から新たな物理学が拓けていった。

3.2.1 電磁気学で生じた疑問

疑問1 電磁波を伝えるもの(媒質)は何か?



音波は空気中の分子の振動が伝える。



電磁波(光)は真空中を満たす未知の媒質エーテルが伝える?

疑問2 電磁波が伝わる速度が「光速」であるとは、誰から見た時の光速なのか?

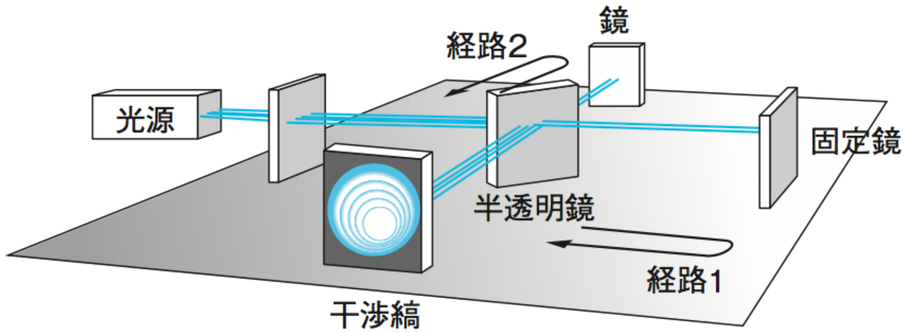


電磁波を伝える媒質として

「**エーテル**」(ether; 天空をみたす物質)

が存在するはずだ.

微小距離を測定する**干渉計**



エーテルは存在しない

（特殊）相対性理論(1905年)

- **発端：**
  電磁気学の式に出てくる「光速c」は誰から測った速さなのか．光は真空でも伝わるのか．

- **当時の考え：**
  光はエーテル中を伝わる．「光速c」は座標系によって変化するはずだ．ただし，エーテルは未発見．．．．

- **アインシュタインの考え：**
  光速度は誰から見ても一定，光は真空でも伝わり，物理法則は座標系によらず不変のものでなければならない．

これまでの物理学を否定せず，拡張した理論！

相対性理論、むずかしかったです。

6-4
相対性理論という言葉は聞いたことがあったけれど、今回詳しく内容を聞けて面白かったです！

相対性理論の話に途中からついていけなくなったので、解説書か、先生がNHKに出演していたものをこれから見てみようと思いました。

相対性理論が難しくて理解できないところが「こと」なのでおすすめのマンガなどはありますか。



特殊相対性理論

光の速さに近い場合の力学

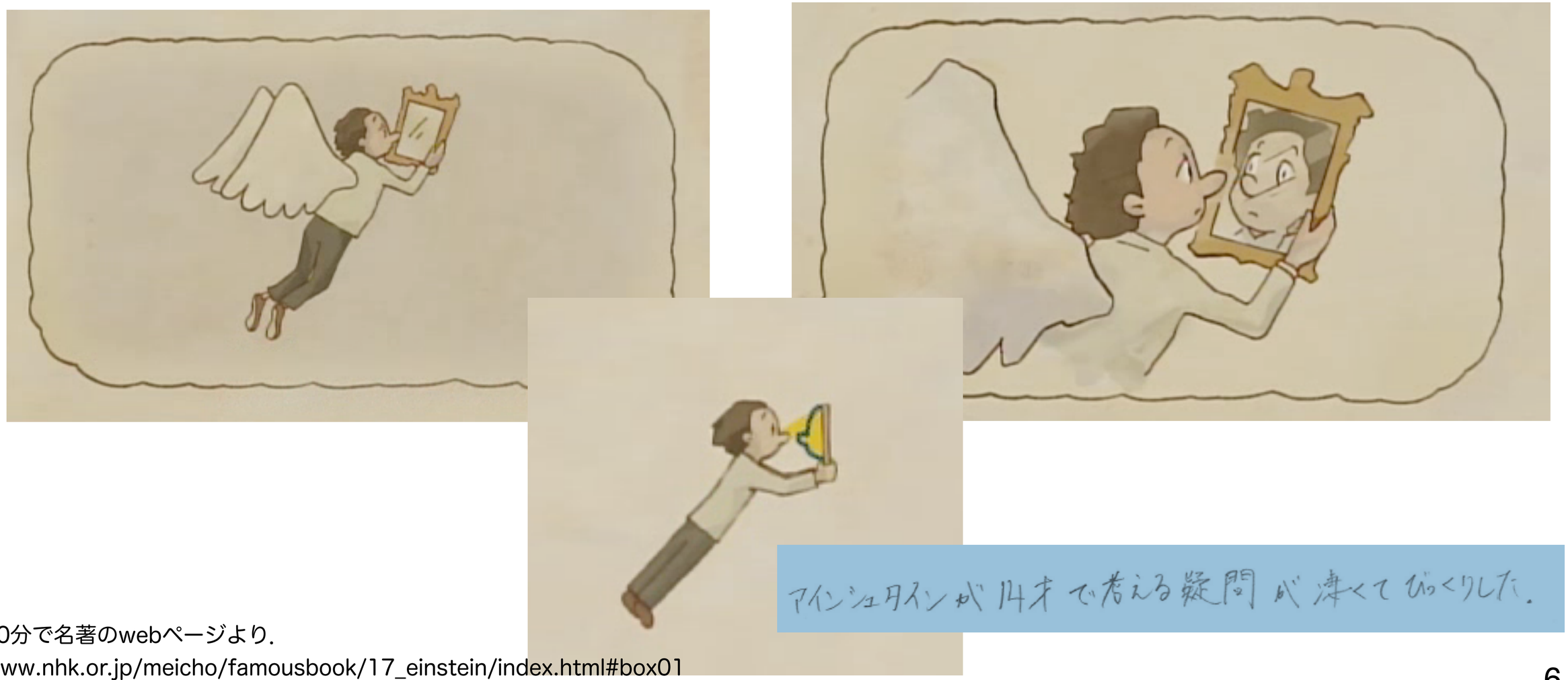
「時間の進み方は観測者によって異なる」

ニュートン力学

$$F = ma$$

アインシュタイン，14歳の時の疑問

光の速さで動く人が鏡をみると
自分の顔が映るのを見るのだろうか？



NHK 100分で名著のwebページより.
http://www.nhk.or.jp/meicho/famousbook/17_einstein/index.html#box01

前回のミニッツペーパーから



映らない　鏡は映らない　光を反射して映るので光と同じはやさだと反射しないのではないか

映らない　光速だと、速すぎて何も見えなくなるから写らない？

映らない 9

映る　40

映る ◎　映る；光速度一定の原理から。

映る △　映ると思う。
光の速さで動く人が鏡を自分で持って、見ているのであれば映ると思う。

映る △　映る。
光の速さで動く人でも、鏡と一緒に動いていれば観測できると思う。
鏡が一緒に動いていなければ、鏡に反射した光が観測者に届かないと思う。

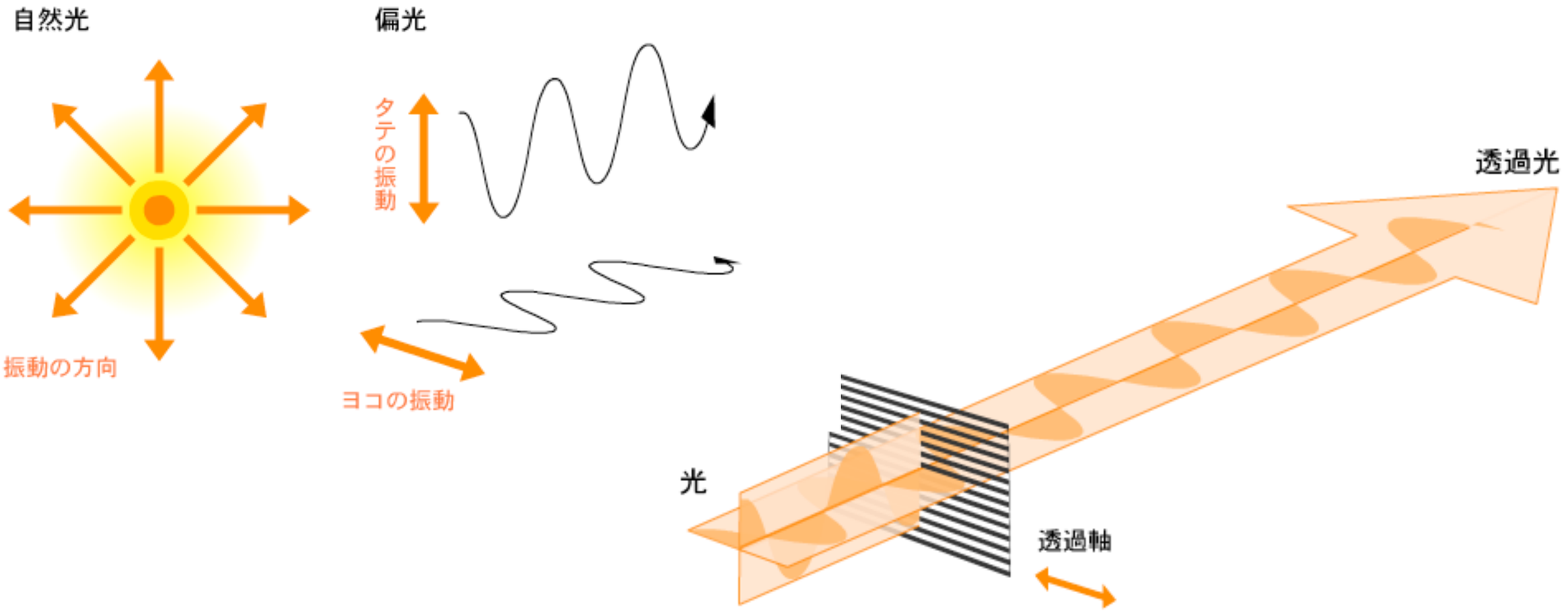
映る △　氏名
（同じスピードで）
映る　一緒に動いているから。

映る △　鏡も同じ速さで動いているので、鏡にうつる自分も止まっている時と同じように見えると思います。

光速は不変（誰から見ても同じ 30万km/s ）と考えるので，映る

【実験ですよ】

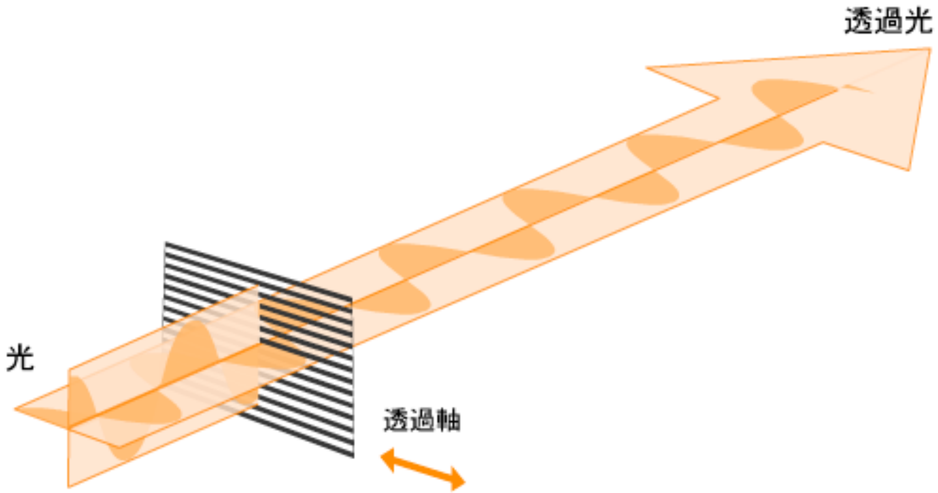
光は横波である

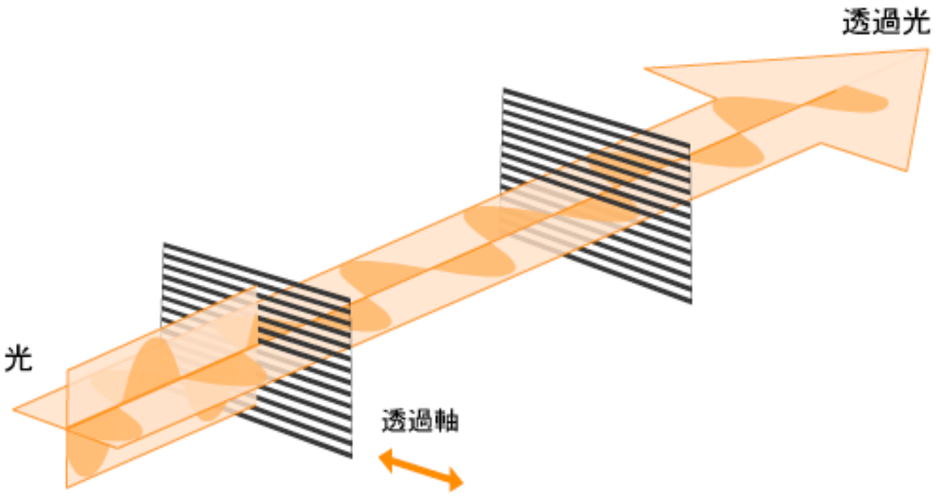


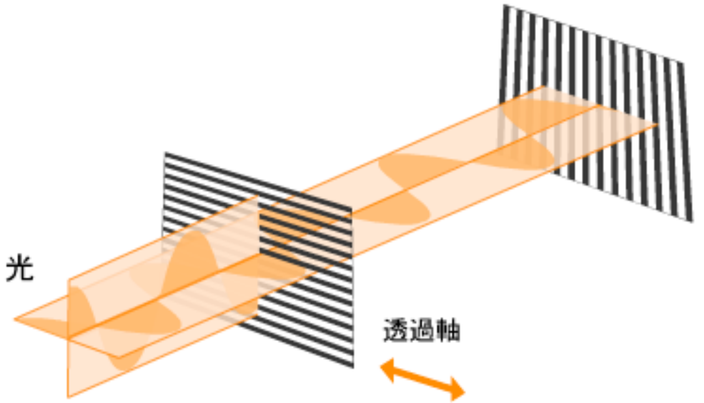
http://www.sanritz-corp.co.jp/henkoban.html

【実験ですよ】

光は横波である









http://www.sanritz-corp.co.jp/henkoban.html

前回のミニッツペーパーから

ノイズキャンセリング ヘッドホン

ノイズキャンセリングヘッドホンとは？

周囲の騒音を低減し、クリアなサウンドを再生する
ノイズキャンセリングヘッドホン

電車内や航空機※などでのリスニング時に、走行音やエンジンノイズなどさまざまな騒音を低減。
勉強や仕事のときなどは、気が散る原因となる周囲の雑音を低減し、静かな環境で聴けるので目的に集中できます。また、音量を上げ過ぎずに音楽を聴きとれるので、周囲への音漏れの心配がありません

■ノイズキャンセリングヘッドホンの活躍シーン



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





■ノイズキャンセリング機能の原理



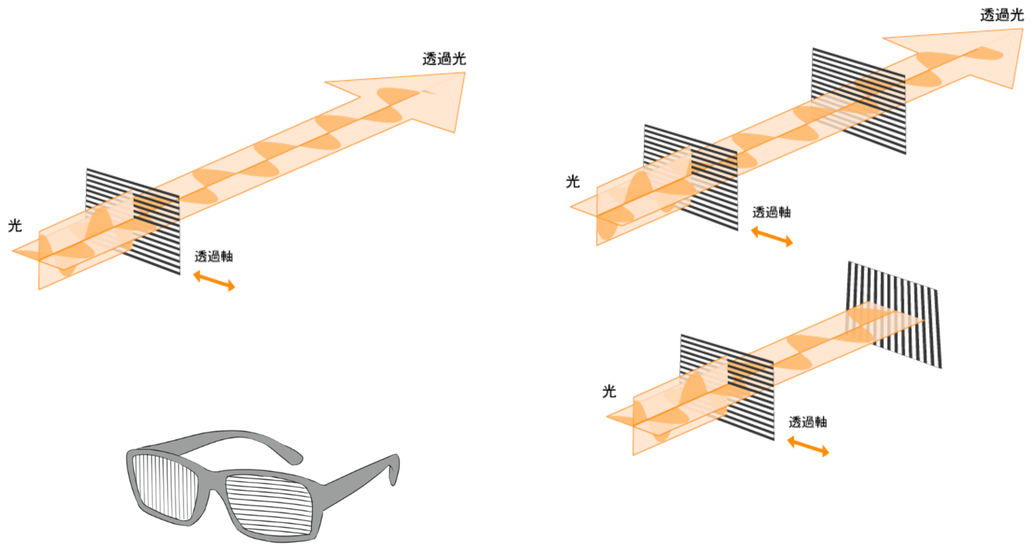
＊ノイズキャンセリング機能は、人が耳障りに感じやすい40～1,500Hzの音を低減させます。周囲からの騒音がまったく聞こえなくなるわけではありません

http://www.sony.jp/headphone/select/popup_noise_cancel.html

波は干渉する
（強めあったり弱めあったりする）

光は横波である

【実験ですよ】



光は波である．横波である

ノイキャンのしくみがわかってうれしかったです。
電車で人の声を遮断できるので好きです。

ノイズキャンセルのイヤホンのしくみを理解できました。周囲の雑音の反転した波を瞬時に出して打ち消し合うことがあんなに小さな機械でできるのがすごいと感じました。

3D映像を見るときに、メガネがいるものと、いらないものがありますが、メガネがいらない映像はどうなっているのでしょうか。

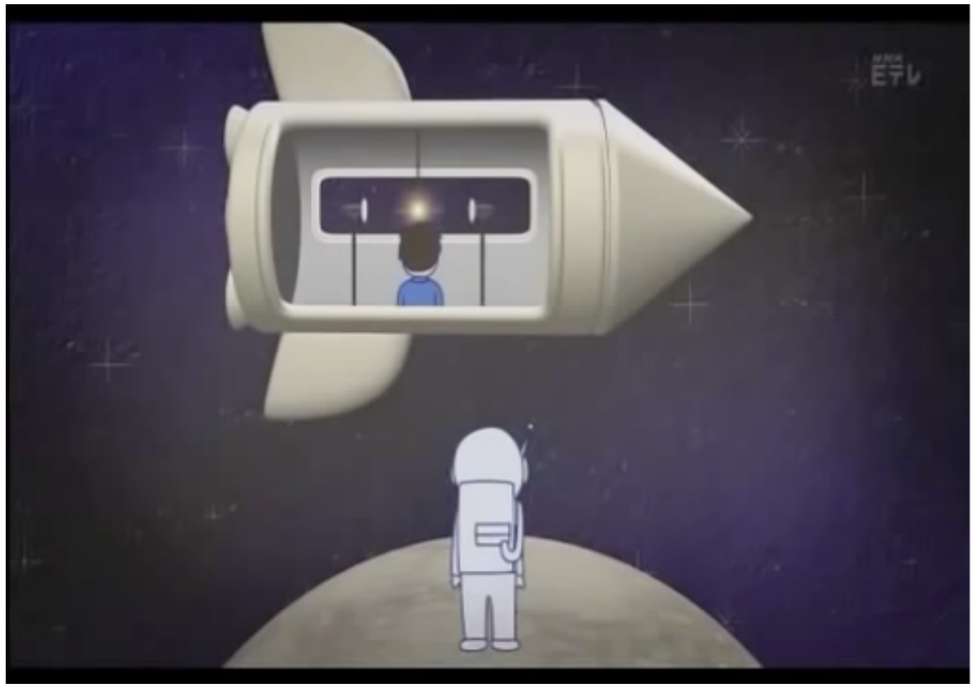
ユニバの年パスを持っているくらいユニバに行くので立体に見えるメガネで待ち時間に友達と遊んで話のネタにしようと思いました。

偏光について自分でも調べたいと思った。

偏光サングラスの謎がとけました！！
いつもこれはどういうしくみなんだろうと思っていたので！
わ。を理解できてうれしいです！

前回のミニッツペーパーから

誰から見ても光速は一定, と考えると...



光が左右両方の鏡に当たる時刻を判定する

左右両方に同時に光が到着

進行方向にある鏡に光が後に到着

相対性理論では,「同時」という言葉は意味を持たない

普段は意識していない時間にも, 不思議な仕組みがあると感じた。

光の速さや時間の進み方について普段の生活で考えないような疑問をもつことができました。

今回の講義で,「同時」という概念がかなりくつがえりました。同じ出来事なのに, 宇宙船の中と外で差があることにかなりおどろきました。

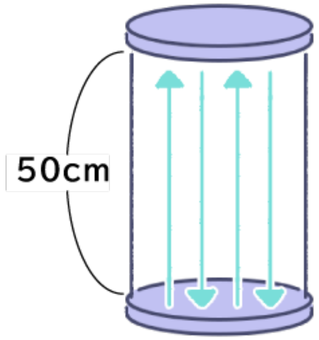
[6-4] 光の速さや時間の進み方は普段の生活ではあまり意識しないため, 不思議だなと感じました。時間は誰にとっても同じように進むと思っていたので, 状況によって変わるという考え方が印象に残った。

光の速さや時間の進み方について, 普段の生活では考えないようなことを知ることができて面白かった。特に速く動くことで時間の進みが変わるということが印象に残った。

時間の進み方は観測者によって異なる

誰から見ても光速は一定, と考えると...

光時計の思考実験



光時計

光が 2億9979万2458回往復すると「1 秒」を刻む時計



地球の人がロケット内の光時計を見ると ロケットが移動するので光は斜めの経路を進み その分長い距離を進まなければならない 光の速度は誰から見ても一定なので ロケット内の光時計は 2 億9979万2458回往復するのに地球の1秒より長い時間がかかる つまりロケット内の光時計はゆっくりと時を刻んでいる

動いている人の時間の進み方は 静止している人よりも遅い

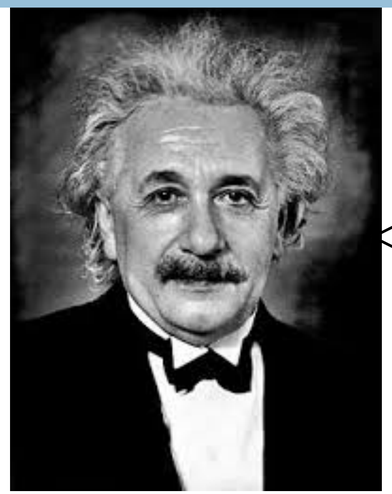
時間の進み方は**相対的**になる

前回のミニッツペーパーから

相対性理論では
時間の進み方は観測する人の運動状態によって異なる.

よく、お金持ちは有名人と対等なものは時間だと言われることがありますが、光の速さで動くと時間も対等ではなくなるのだなと思いました。

6-4 今日の宇宙船と小惑星の話で思い出したのですが、好きなアイドルの曲で「君といるときはあっという間だけど現国の時間はそっくりと針が進む」みたいな歌詞があってたしかにな。おもしろいなと思っていたのですが、これは金持ちの問題でおわ？科学的に何かあるのでしょうか。



熱いストーブの上に一分間手を載せてみてください。まるで一時間ぐらいに感じられるでしょう。ところがかわいい女の子と一緒に一時間座っていても、一分間ぐらいにしか感じられない。それが相対性というものです。

注：これは例えのジョークですよ

未来へのタイムトラベルは可能!!

コラム 16　浦島効果：未来へ行くタイムトラベルは可能！

特殊相対性理論によれば，高速で動いている人ほど 1 秒の間隔は開いてくる．計算式で表すと，速度 v で移動している人の時間 $\Delta T'$ は，静止している人の時間 ΔT と同じではなく，次式になる．

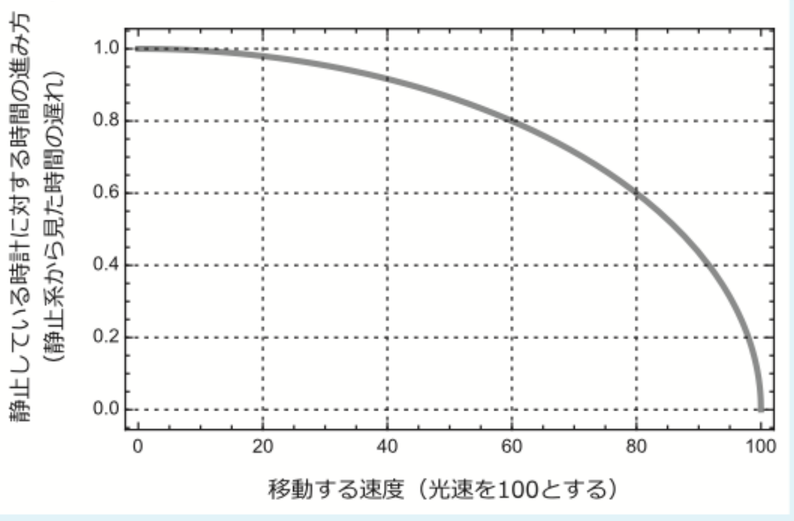
$$\Delta T' = \sqrt{1-(v/c)^2}\,\Delta T \qquad (3.4)$$

速度vで移動している人の1秒

静止している人の1秒

表 3.2

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



講義

今日の講義で，光の速度がどれだけ特別か実感できました。

動いている人の時間の進み方は，静止している人よりも遅い

前回のミニッツペーパーから

誰から見ても光速は一定, と考えると...

時間の進み方は相対的になる

地上の人の100年と日々ロケットに乗っている人の100年が違うことが面白かった。

時間の進み方が人によって異なるということが印象に残った。時間は絶対的なものだと思っていたが, 相対的なものだと知った。

今までは皆等しく同じ時間を過ごしているものだと思っていたので, 観測者の運動によって異なることが印象的だった。
移動速度によって時間の進み方が異なることは分かったが, 少しややこしくて難しいと感じた。

うごいているものと止まっているものから見たら遅く感じるなら, 止まっているものからうごいているものを見たら時間は速く感じるのですか。

静止している人から動いている人をみる
＝ 速度(+v)で移動

動いている人から静止している人をみる
＝ 速度(-v)で移動

▶▶▶ どちらでも, 相手の時計が遅れている, と主張する.

？？



「相手の時計が遅れている」というパラドックス

互いに「相手の時計が遅れている」というパラドックス

a 速度は相対的なものだ．地球からロケットを見れば速度は v でも，ロケットから地球を見れば地球は速度 $-v$ で動いていることになる．

b だから，地球の人はロケットの時計が自分より遅く進むと観測し，ロケットの人は地球の時計が自分より遅く進むと観測する．

c だから，お互いどちらも「相手の時計が遅れている」と主張する．

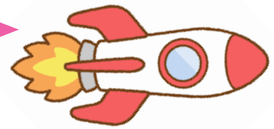


ロケットは速度 v で動いている.

だからロケットの時計の進みは遅くなる

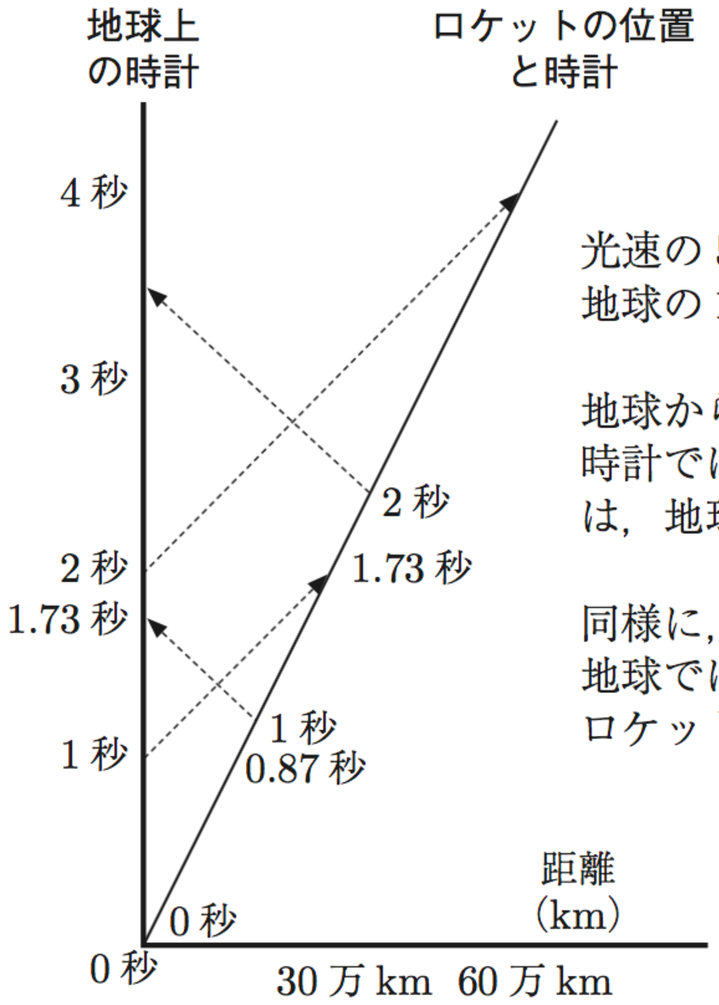
地球は速度 v で動いている.

だから地球の時計の進みは遅くなる



どちらも正しい

「相手の時計が遅れている」というパラドックス



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

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

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

図 3.16 「相手の時計の方が遅れている」という主張はどちらも正しい．

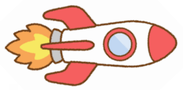
双子のパラドックス

双子のパラドックス

a 双子の兄と弟がいて，兄が光速の 80% のスピードで飛ぶロケットに乗って宇宙旅行に出た．目的地の星の近くまで一直線に飛び，すぐに引き返して戻ってきた．

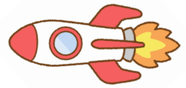
b ロケットで飛行中は，どちらも相手の時計の進み方が遅いと観測していた．

c それでは，地球時間で 30 年経って戻ってきた兄と，地球に残っていた弟が再会するとき，どちらが若いのか．



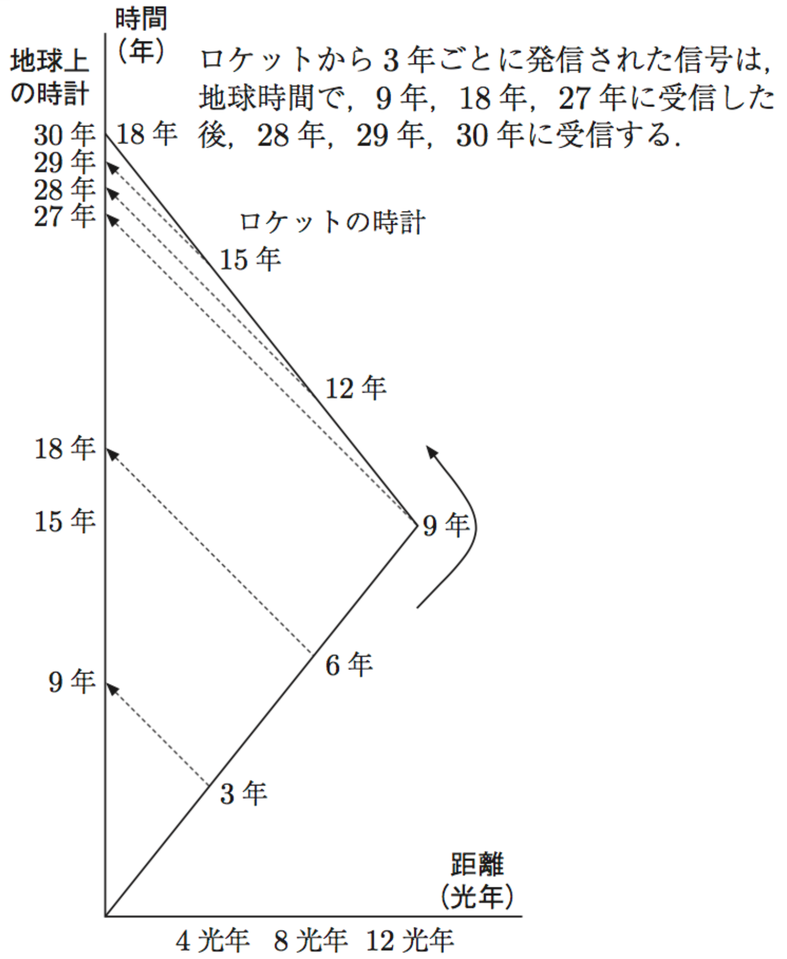
弟

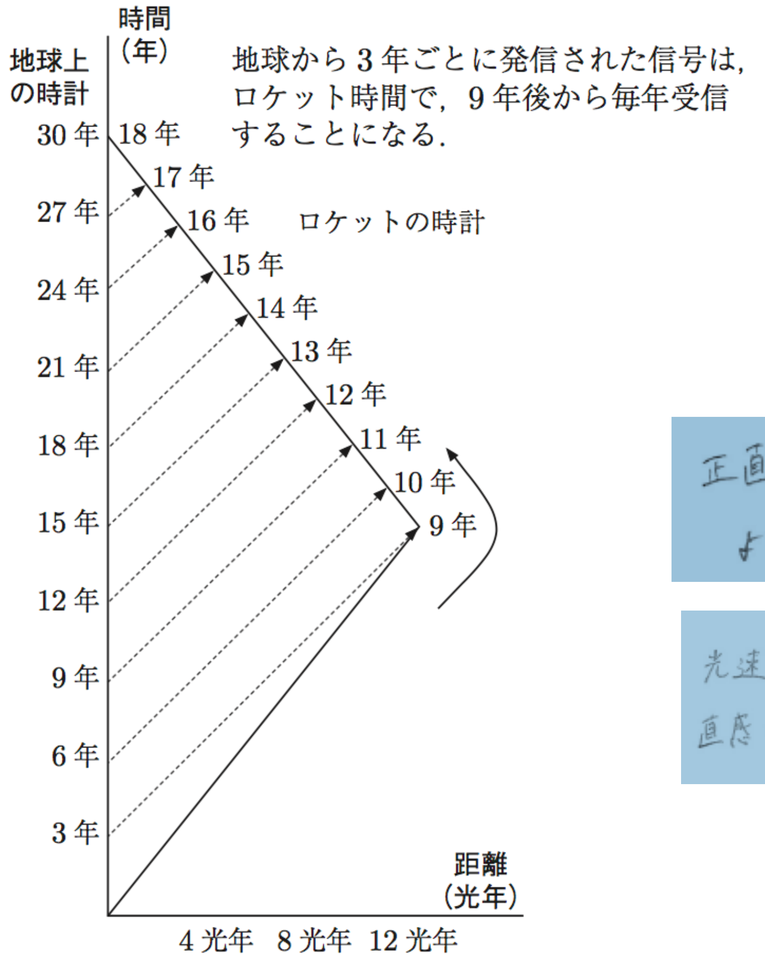




兄の方が若い

双子のパラドックス





正直、双子のパラドックスの時間経過の話がよく分からなかった。

光速で動く思考実験や双子のパラドックスの話をきいて、直感とは異なる時間の不思議さにとてもワクワクしました。

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

前回のミニッツペーパーから

「双子のパラドックス」の中で、「向きを変えたために」という部分がありますが、「速い方が時間が遅くなる」ため あまりパラドックスでないと感じました。むしろ「時計が遅れている」パラドックスの方が、直観的に変だな、と思いました。

「双子のパラドックス」を知り、数学の問題を思い出しました。先に家を出た弟(兄)を自転車で追いかける兄(弟)のヤツです。
※これ系は兄弟が例として利用されることが多いなぁと思いましたので。

高速で移動すると(光速に近いほど)未来へ行ける

これまでタイムトラベル論は現実的にむりだと思っていたけれども、今日の講義で、理論的には可能だと知り、すごくワクワクしました。

止まっている人から動いているものの速度が変わるのが理解を頑張ったけど難しかった。

タイムマシンが実現可能だということに驚いた。

コラム 16　浦島効果：未来へ行くタイムトラベルは可能！

特殊相対性理論によれば，高速で動いている人ほど 1 秒の間隔は開いてくる．計算式で表すと，速度 v で移動している人の時間 $\Delta T'$ は，静止している人の時間 ΔT と同じではなく，次式になる．

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

速度vで移動している人の1秒

静止している人の1秒

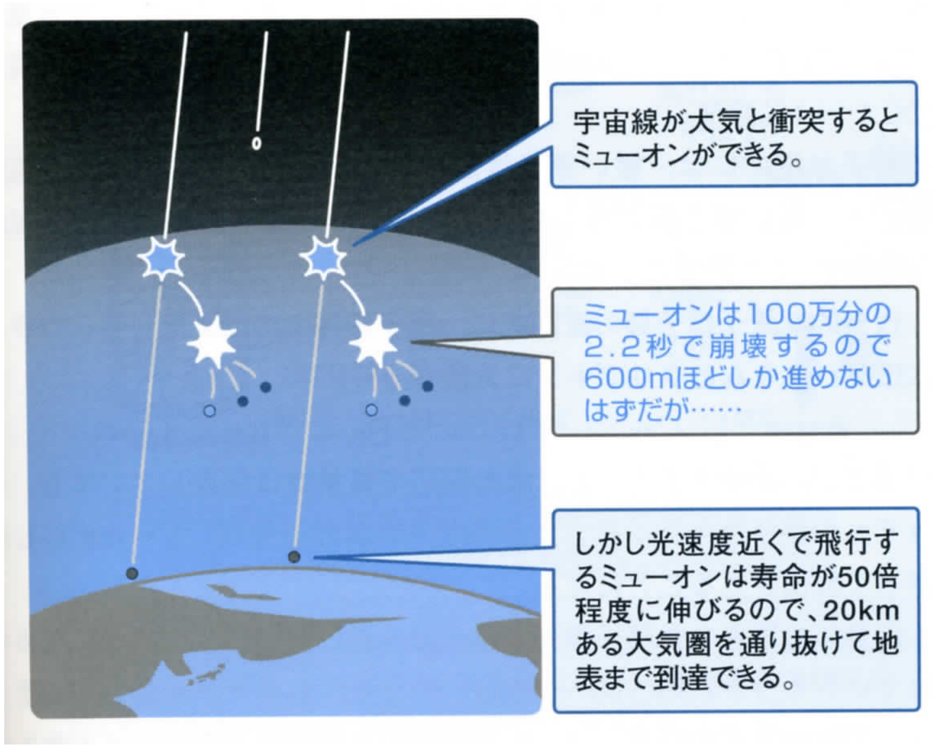
表 3.2

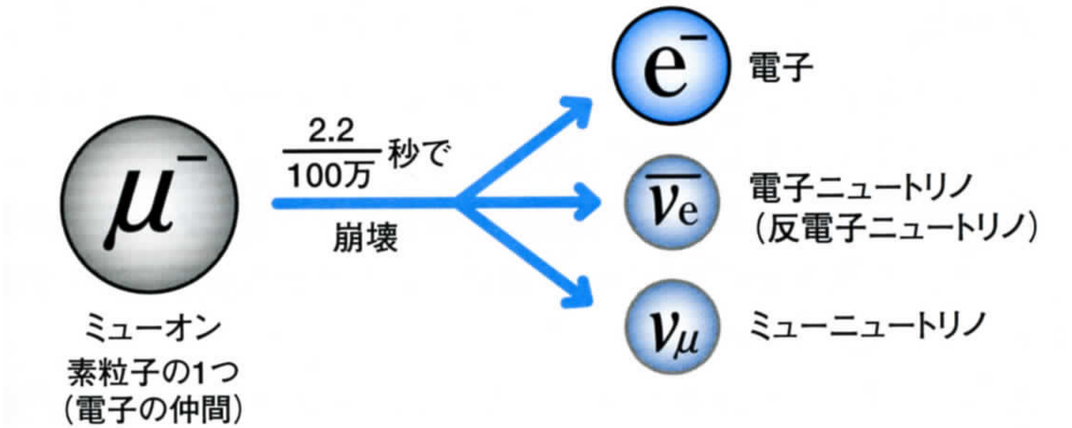
v	$\sqrt{1-(v/c)^2}$
$0.1\ c$	0.99499
$0.5\ c$	0.86603
$0.9\ c$	0.43589
$0.99c$	0.14107

過去へ行くタイムマシンを作るのはどのくらい難しいのでしょうか？タイムパラドックスへ おもしろかったです。
に関しての話が

過去へ行けるかどうかは来々週に話します

素粒子の寿命は確かに延びている！





教科書 p68

国際宇宙ステーションの乗務員の寿命も延びる！





ISSは秒速 7.8km
1年間乗務すると, . . .

0.01067秒 地表より時間が短くなる

1秒後の未来って、何が起きるんですかね。あまり変わらなさそう。

自覚できるほどの未来には行けないとおっしゃっていたが、旅客機の乗務員をしている人に出会うと、実際は少し未来を行きているということになるのですか。

▶▶▶乗務員は
わずかに未来へ

[illegible]
体重の女人の様な？の時計では高さで時間が違ったり速いなど(動きが)、高いほど差が出るのか？

光格子時計で, 移動速度の差が時間差になることは計測できるか？

▶▶▶できるはずだが, まだ持ち歩けない

教科書 p73

3.2.6 最も有名な物理の公式

4次元時空としてエネルギー保存則を考えると，．．．

$$E = mc^2$$

エネルギー　　質量x光速x光速

エネルギーは質量と等価である！

質量はエネルギーに変換できる！

3.2.6 最も有名な物理の公式

4次元時空としてエネルギー保存則を考えると，．．．

特殊相対性理論を使ってエネルギーを計算すると，

$$E = m\frac{c^2}{\sqrt{1-(v/c)^2}} = mc^2 + \frac{1}{2}mv^2 + \frac{3}{8}m\frac{v^4}{c^2} + \cdots \qquad (3.10)$$

となることがわかった．第 2 項は運動エネルギーだが，第 1 項は物体が静止しているときにももつ**質量エネルギー**である．第 3 項以下は相対論的補正項といえる．

静止質量エネルギー（エネルギーと質量の等価性）

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

Stephen Hawking（1942−2018）

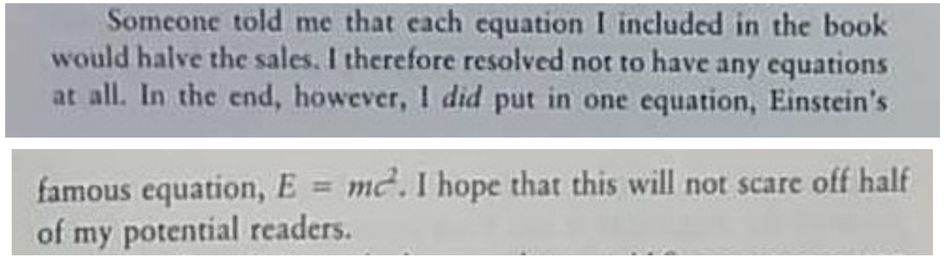


……本の中に数式を1つ入れるたびに，売れ行きは半減すると教えてくれた人がいる．そこで，数式はいっさい入れない決心をした．しかし，とうとう一つだけは入れることになってしまった．アインシュタインの有名な式 $E = mc^2$ である．この式が私の本の潜在的な読者をおびえさせ，半分に減らさないことを願っている．……



1988

Someone told me that each equation I included in the book would halve the sales. I therefore resolved not to have any equations at all. In the end, however, I did put in one equation, Einstein's famous equation, $E = mc^2$. I hope that this will not scare off half of my potential readers.



A Brief Interview with Stephen Hawking



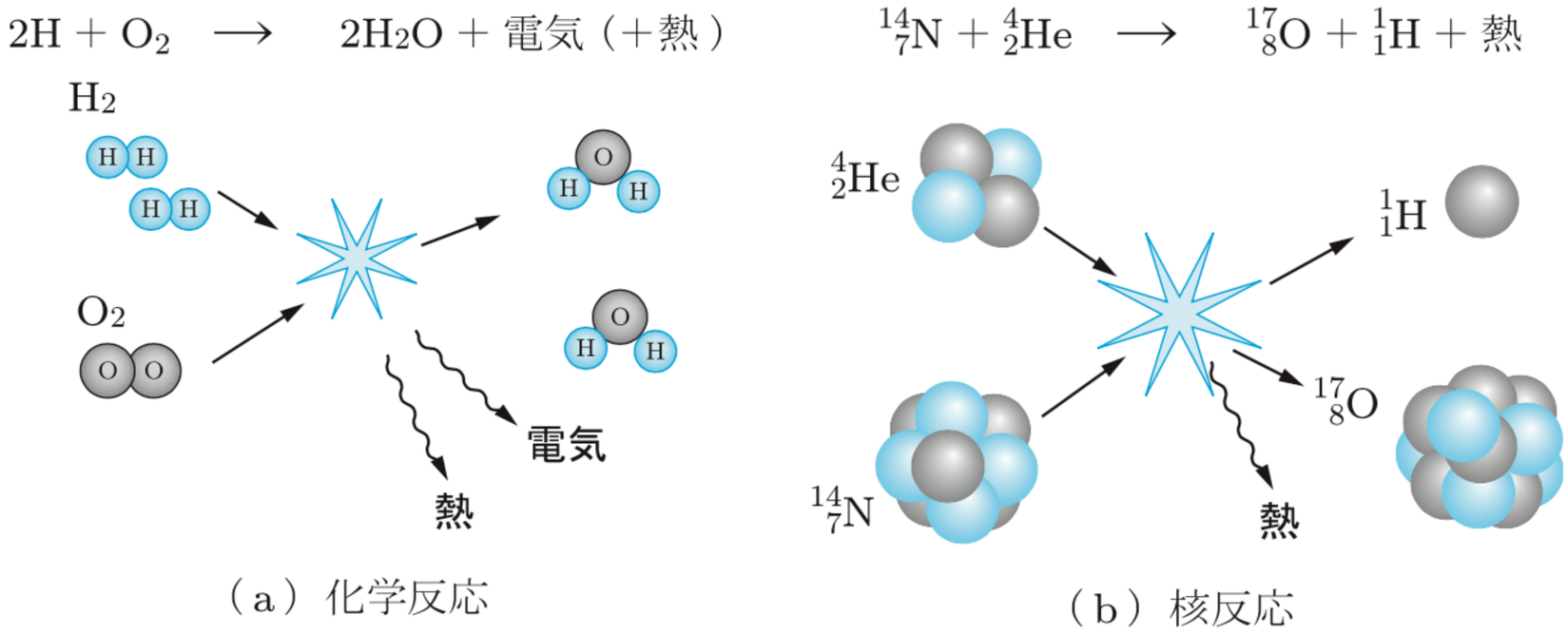
https://www.youtube.com/watch?v=hB60SVvZTEM

Start on Click, first 1'40" part

3.2.7 原子核反応

分子どうしの組み替えは，化学反応

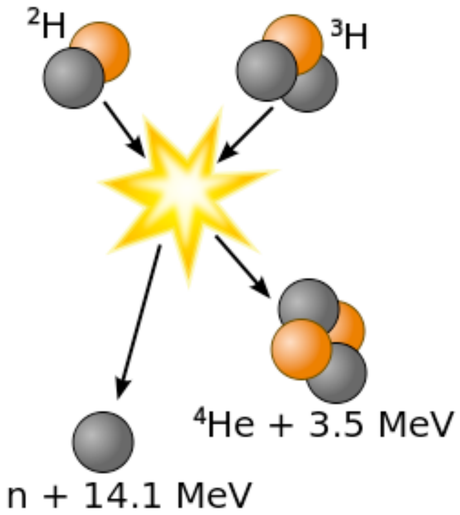
原子核の組み替えは，核反応

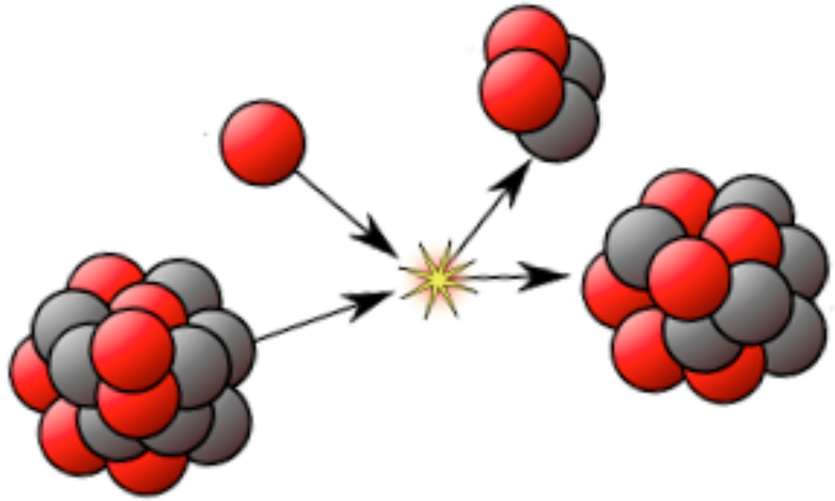


（a）化学反応　　（b）核反応

図 3.14: 化学反応は実験室レベル．核反応は，原子爆弾や水素爆弾，原子力発電や太陽の中心．エネルギーレベルがまったく異なる．

核融合 と 核分裂





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

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

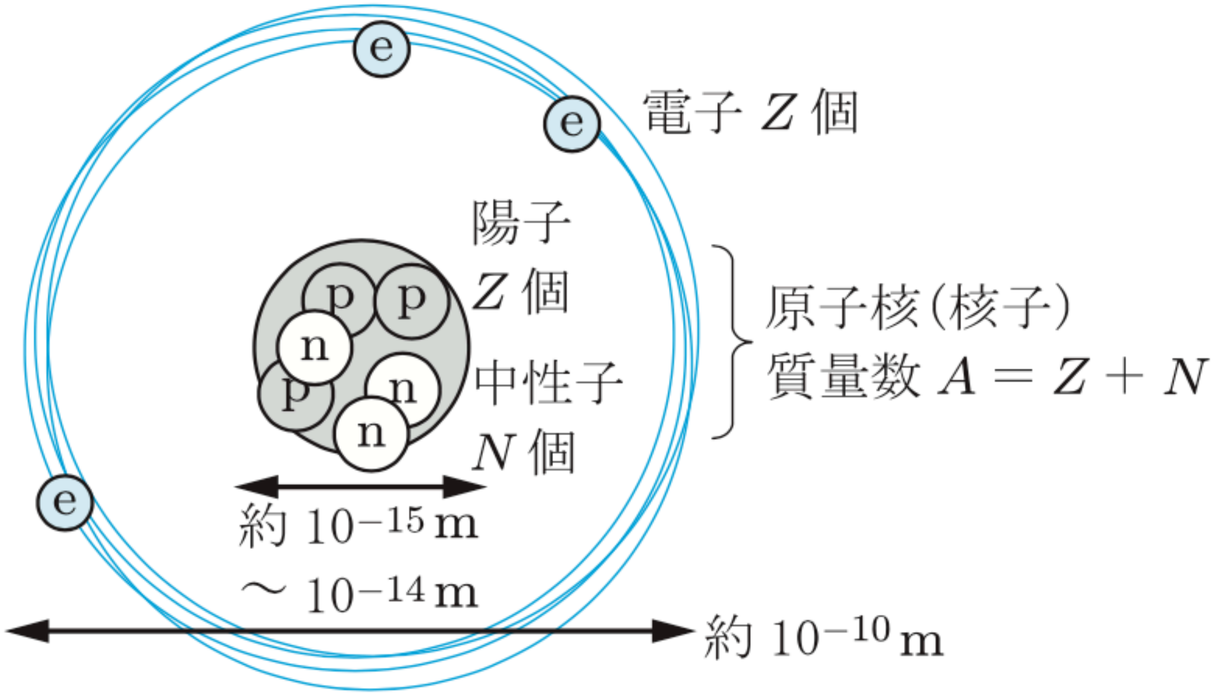
核融合
(nuclear fusion)

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）

陽子・中性子・電子



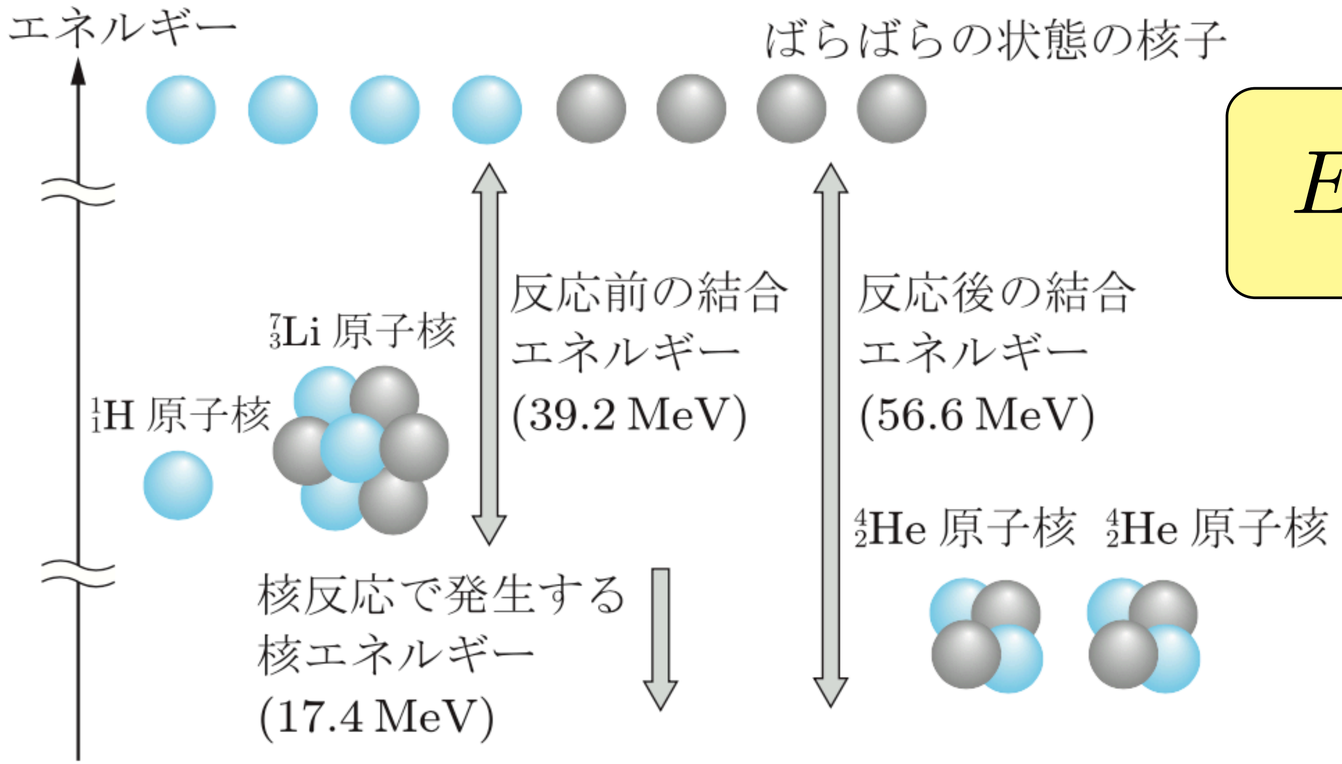
質量数 A
(核子の数)

$^{12}_{6}\mathrm{C}$

原子番号 Z
(陽子の数)

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

結合エネルギー



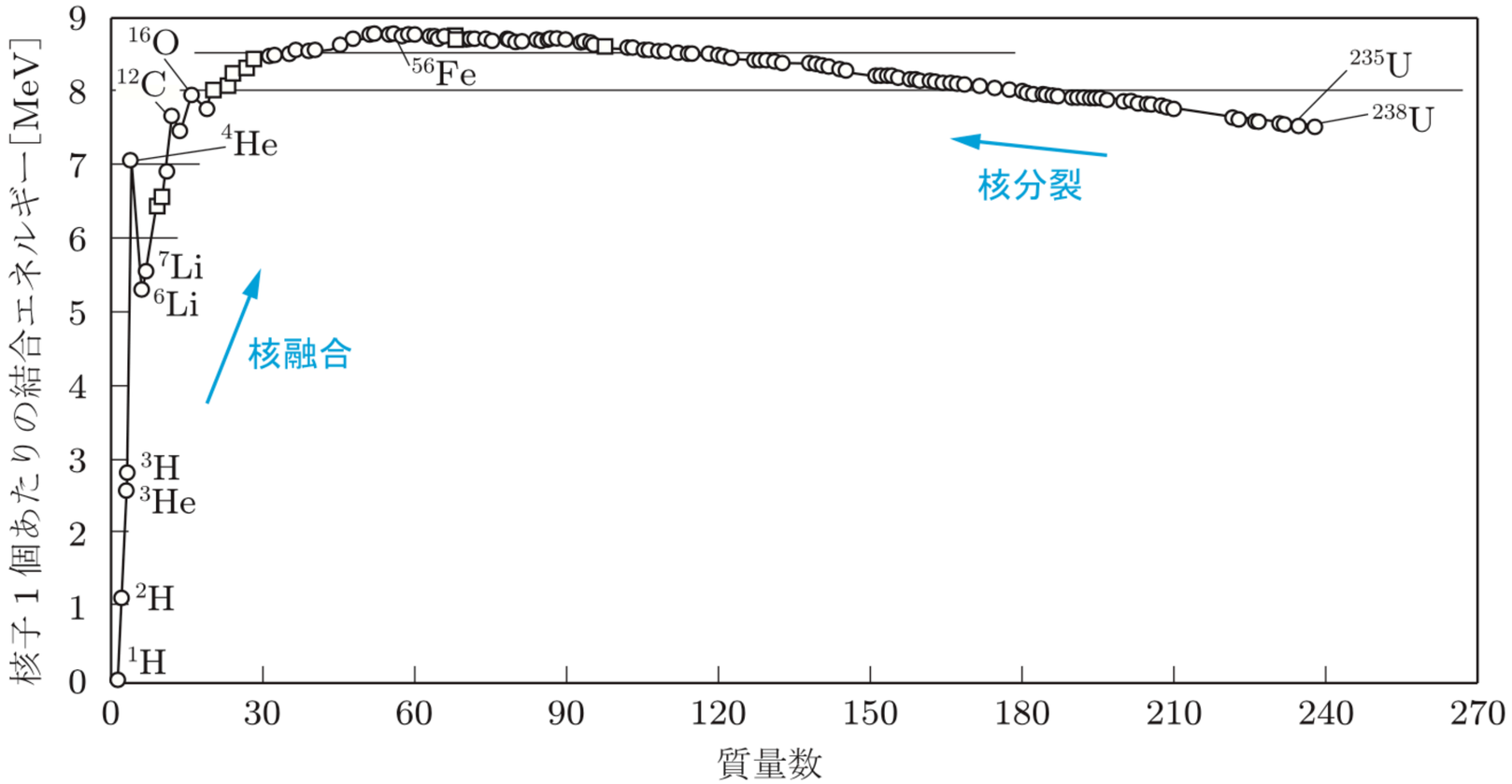
$$E = mc^2$$

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

教科書 p214

核融合も核分裂もどちらもおきる理由は何か？

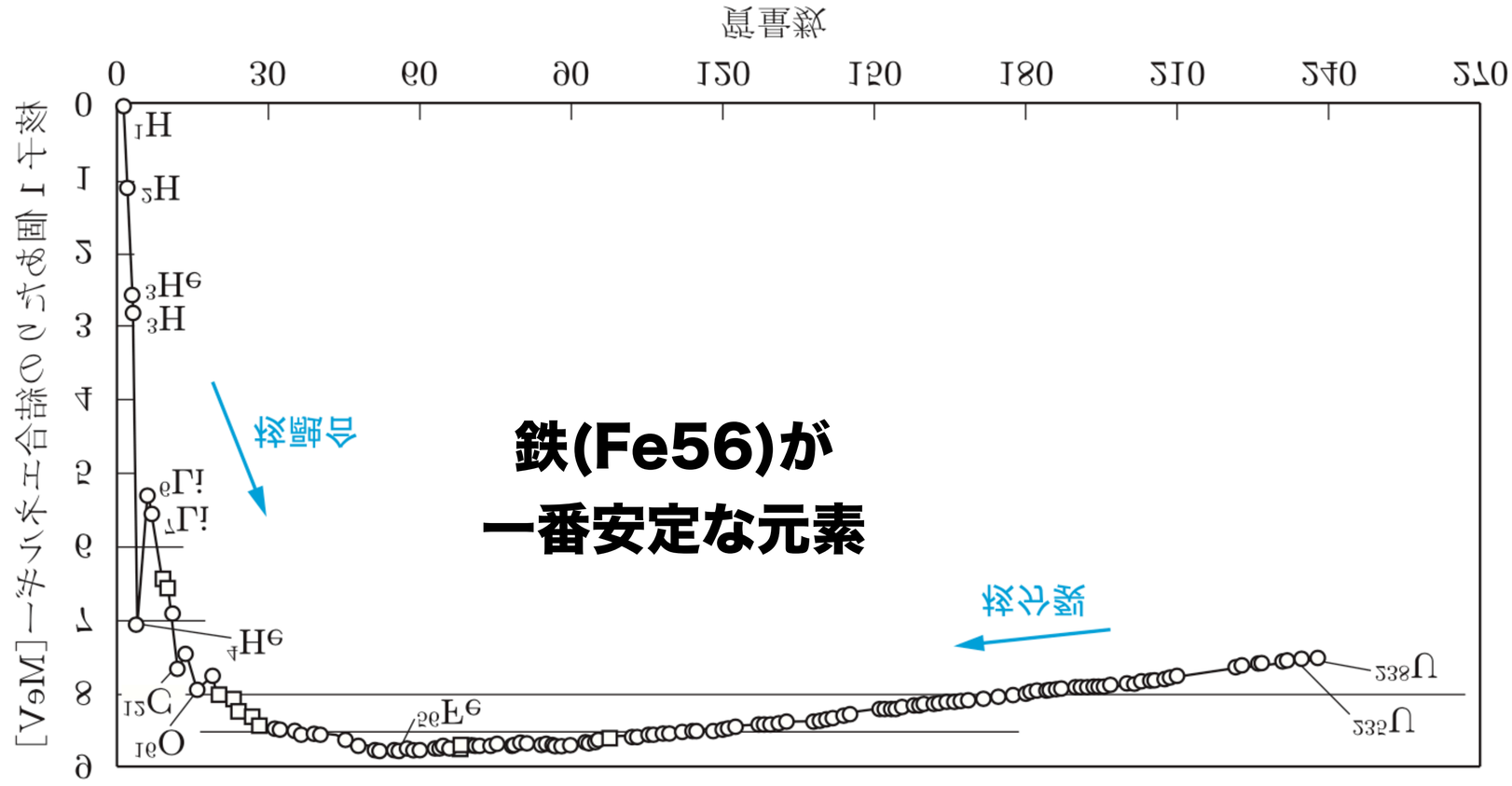
結合エネルギー（大）　→ →



→ →　質量数（大）

核融合も核分裂もどちらもおきる理由は何か？

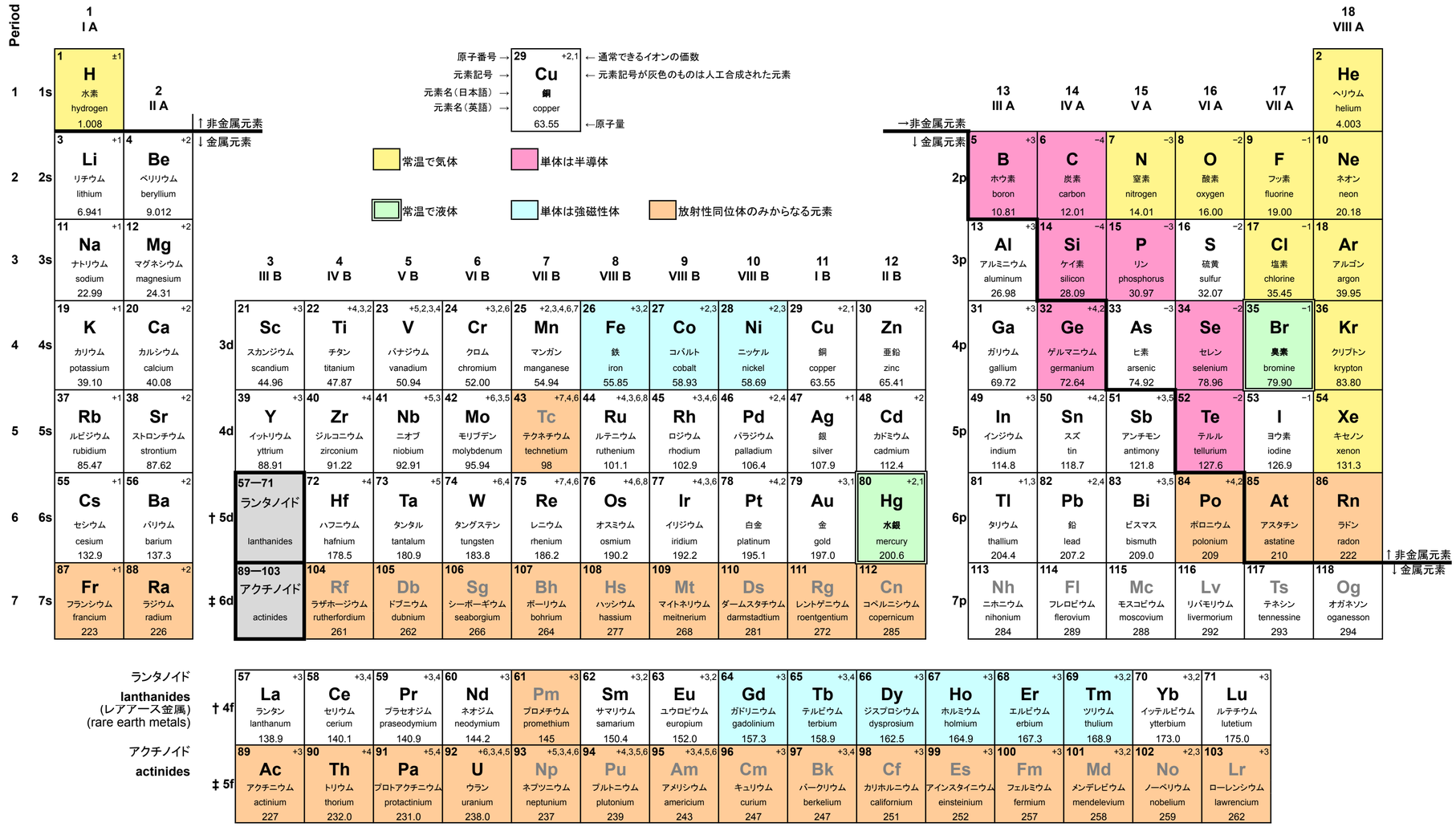
結合エネルギー（大）←←



→ →　質量数（大）

周期表（periodic table）

教科書　後ろ見開き



９３番以降は，すべて人工合成されたもの

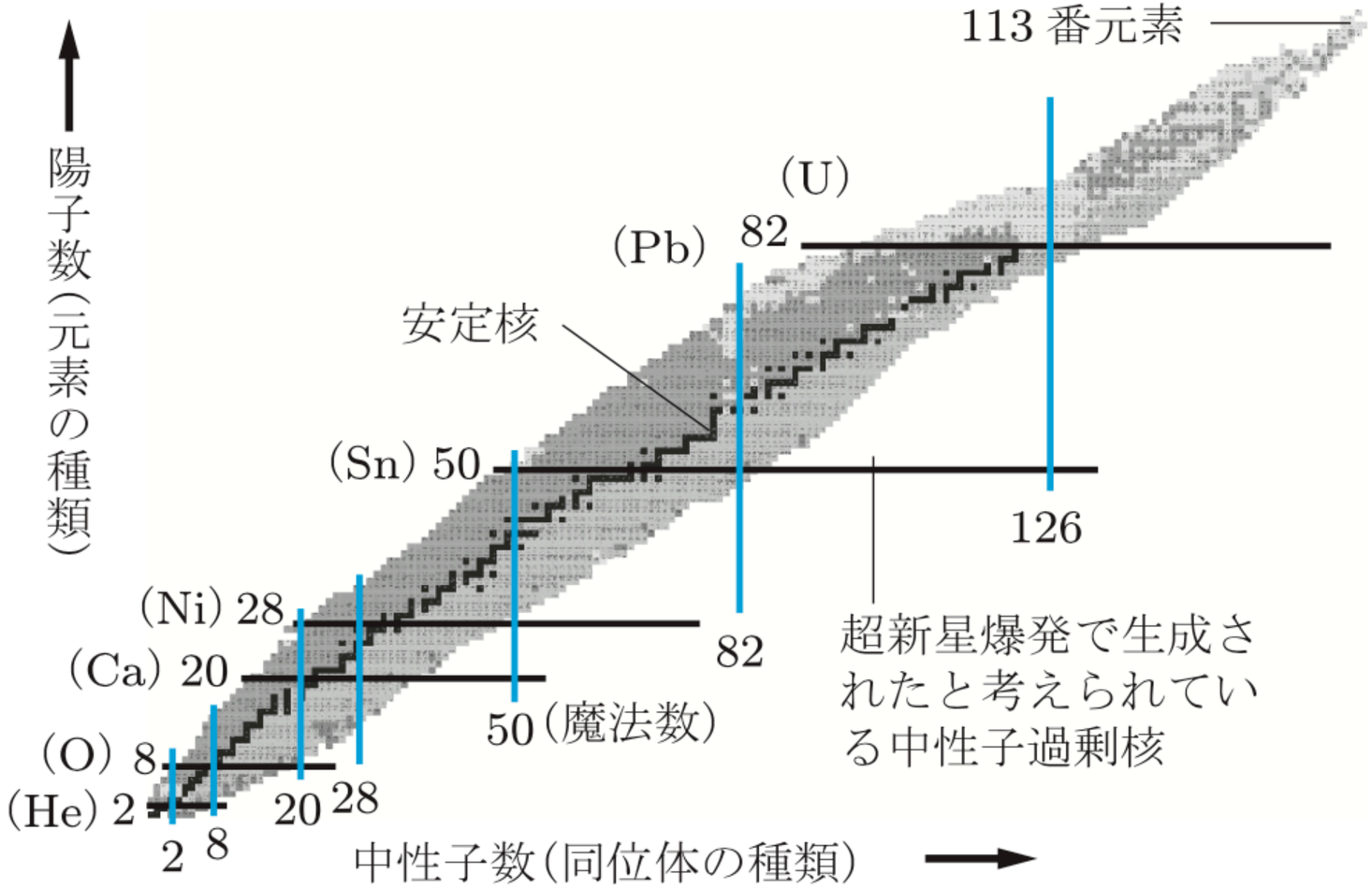
同位体（isotope）

●自然界に存在する同位体の例

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

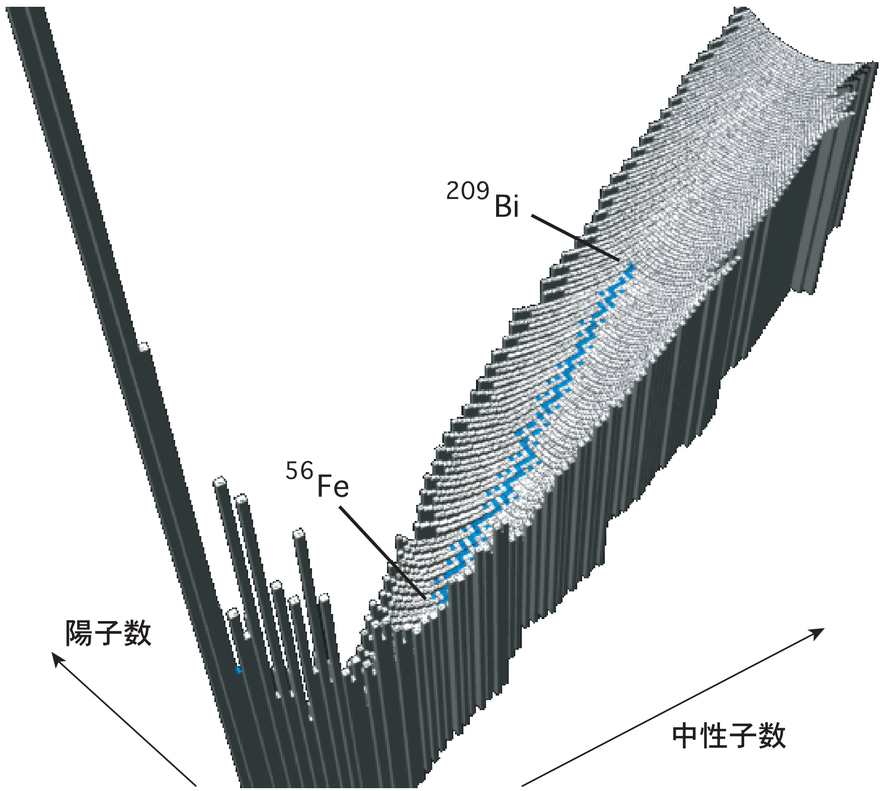
同位体の名称は，「炭素 12」のように「元素名 + 質量数」で表す．水素は例外的に，${}_{1}^{2}\mathrm{H}$（記号 D も用いる）を**重水素**という．また，**三重水素**（${}_{1}^{3}\mathrm{H}$ または T）も発見されている．

核図表

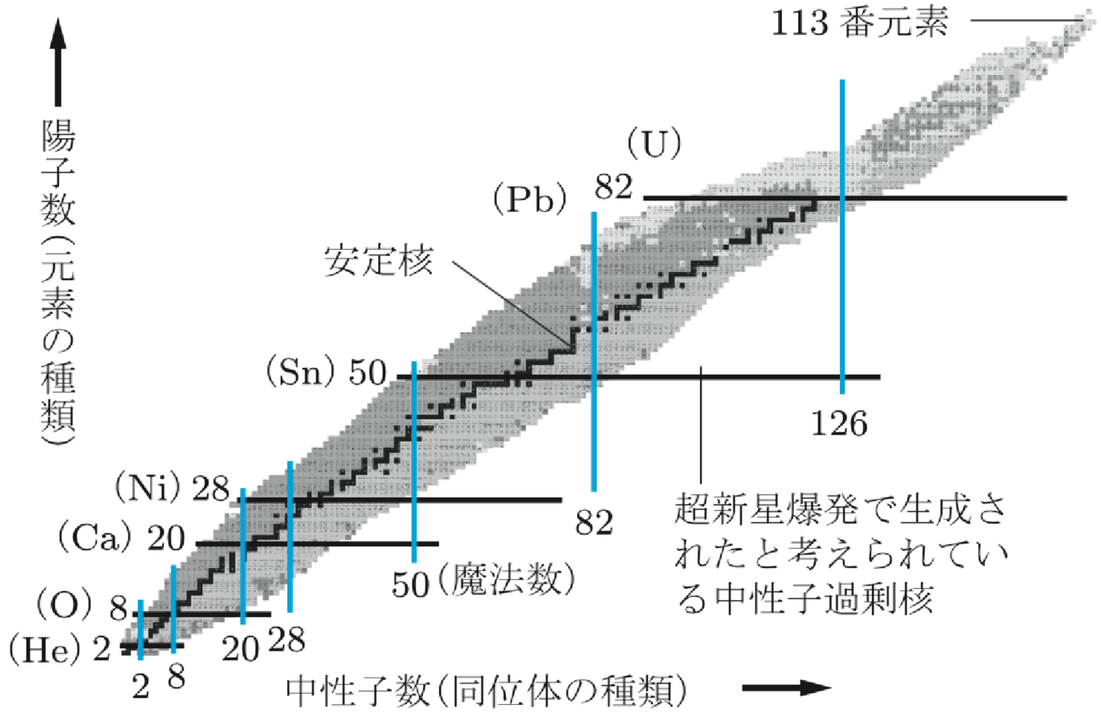

113 番元素
(U)
(Pb) 82
安定核
(Sn) 50
126
(Ni) 28
(Ca) 20
82
50（魔法数）
超新星爆発で生成されたと考えられている中性子過剰核
(O) 8
(He) 2
2
8
20
28
陽子数（元素の種類）
中性子数（同位体の種類）

核融合も核分裂もどちらもおきる理由は何か？

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

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？

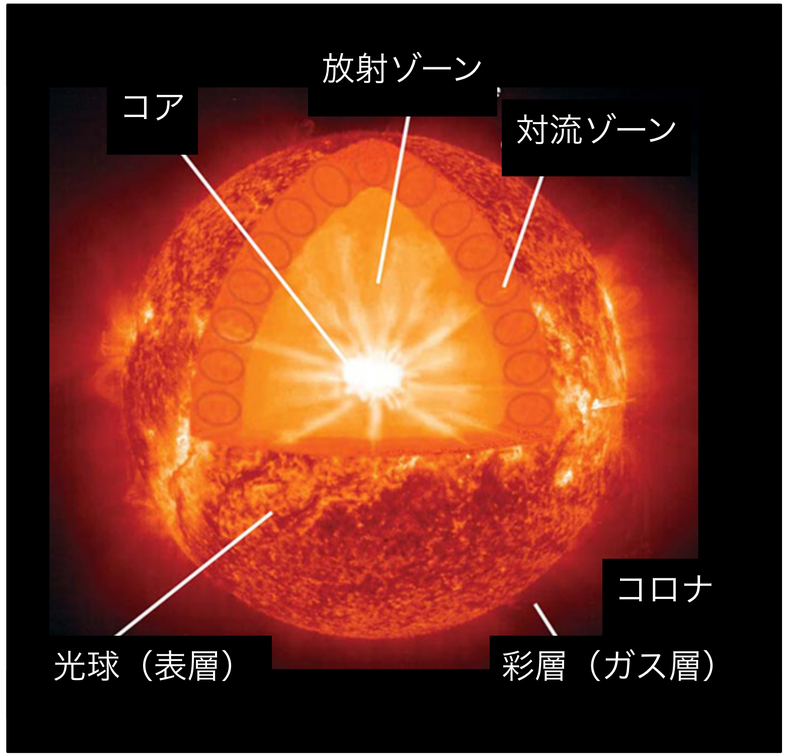
太陽系の起源は約 50 億年前と考えられている．物理学がそろい始めた 19 世紀末，太陽のエネルギー源は何か，という大問題が解けずにいた．（当時，太陽の年齢は 3 億年以上ということしかわかっていなかったが）単純に化学反応で説明するには寿命が長すぎていたのだ．ケルビンとヘルムホルツ (von Helmholtz, H. L. F. 1821–94) は「太陽は大きな重力で収縮しているため，周囲に熱を放出する」という説を考えたが，それでも太陽年齢は 2000 万年以上にはならなかった．

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

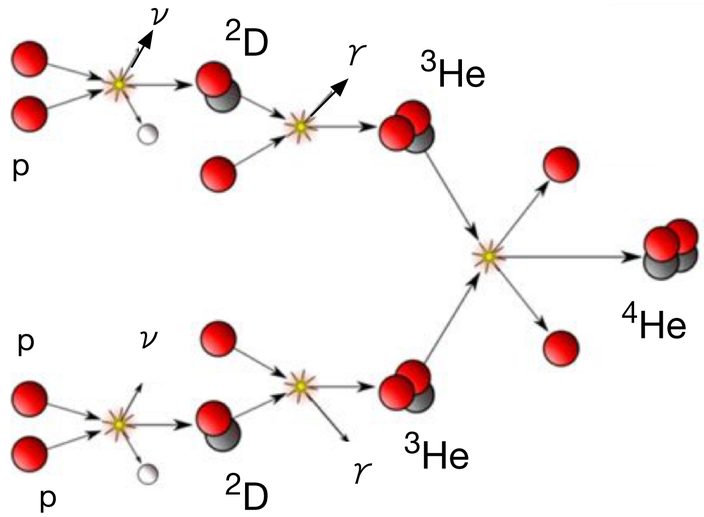
3.2.8 星の一生



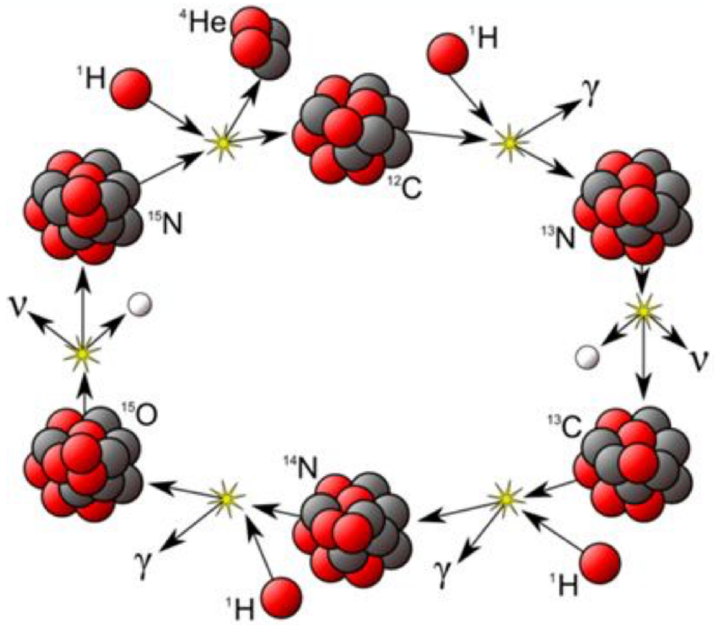
陽子(proton)
中性子(neutron)
陽電子(positron)

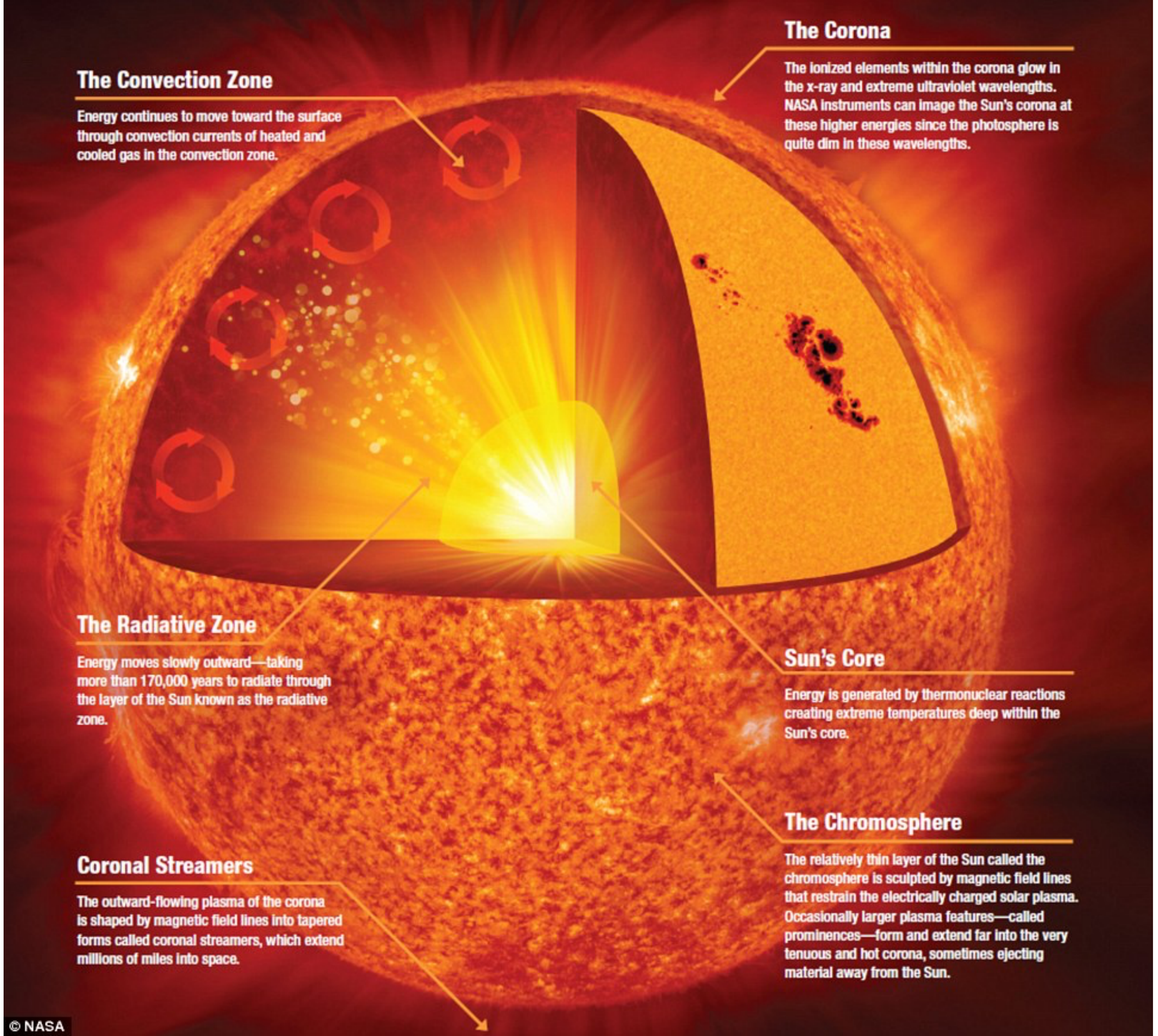
γ ガンマ線
ν ニュートリノ

ppチェイン



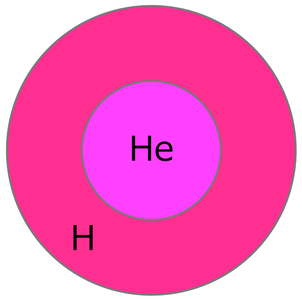
CNOサイクル




The Corona
The ionized elements within the corona glow in the x-ray and extreme ultraviolet wavelengths. NASA instruments can image the Sun's corona at these higher energies since the photosphere is quite dim in these wavelengths.
The Convection Zone
Energy continues to move toward the surface through convection currents of heated and cooled gas in the convection zone.
The Radiative Zone
Energy moves slowly outward—taking more than 170,000 years to radiate through the layer of the Sun known as the radiative zone.
Sun's Core
Energy is generated by thermonuclear reactions creating extreme temperatures deep within the Sun's core.
The Chromosphere
The relatively thin layer of the Sun called the chromosphere is sculpted by magnetic field lines that restrain the electrically charged solar plasma. Occasionally larger plasma features—called prominences—form and extend far into the very tenuous and hot corona, sometimes ejecting material away from the Sun.
Coronal Streamers
The outward-flowing plasma of the corona is shaped by magnetic field lines into tapered forms called coronal streamers, which extend millions of miles into space.
© NASA

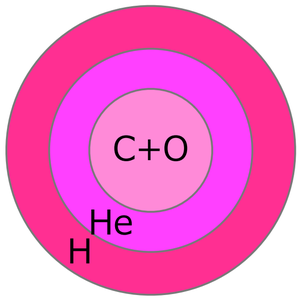
鉄まで核融合が進むと燃え終わる

水素Hからヘリウムheへ (pp chain)



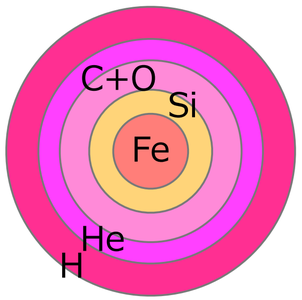
中心部がHeになると，核融合止まる.
冷却し，収縮し，温度上昇して，次の核融合に点火

ヘリウムHeからCNOへ (pp chain)



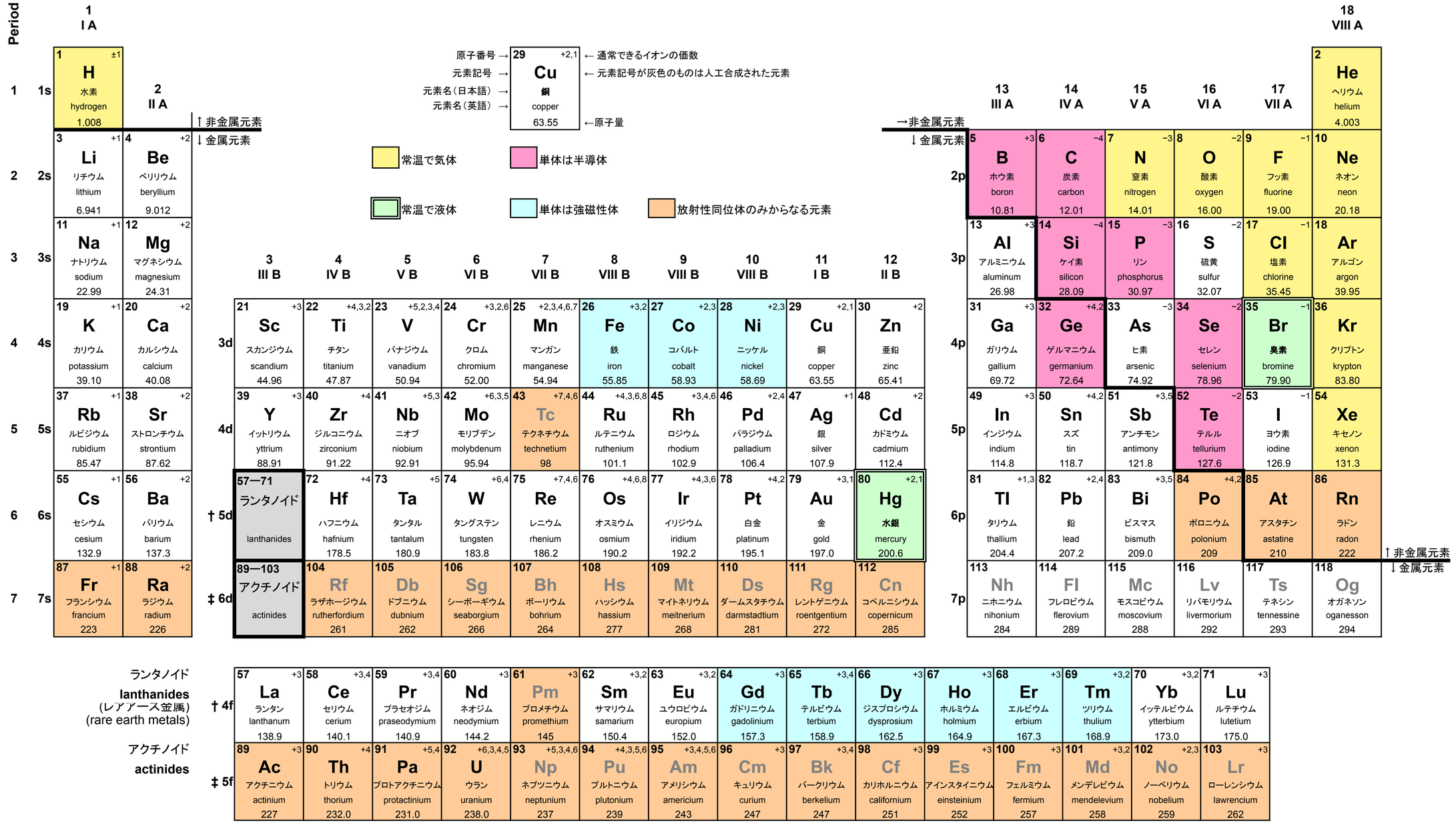
中心部がCNOになると，核融合止まる.
冷却し，収縮し，温度上昇して，次の核融合に点火

中心部がFeになると，．．．



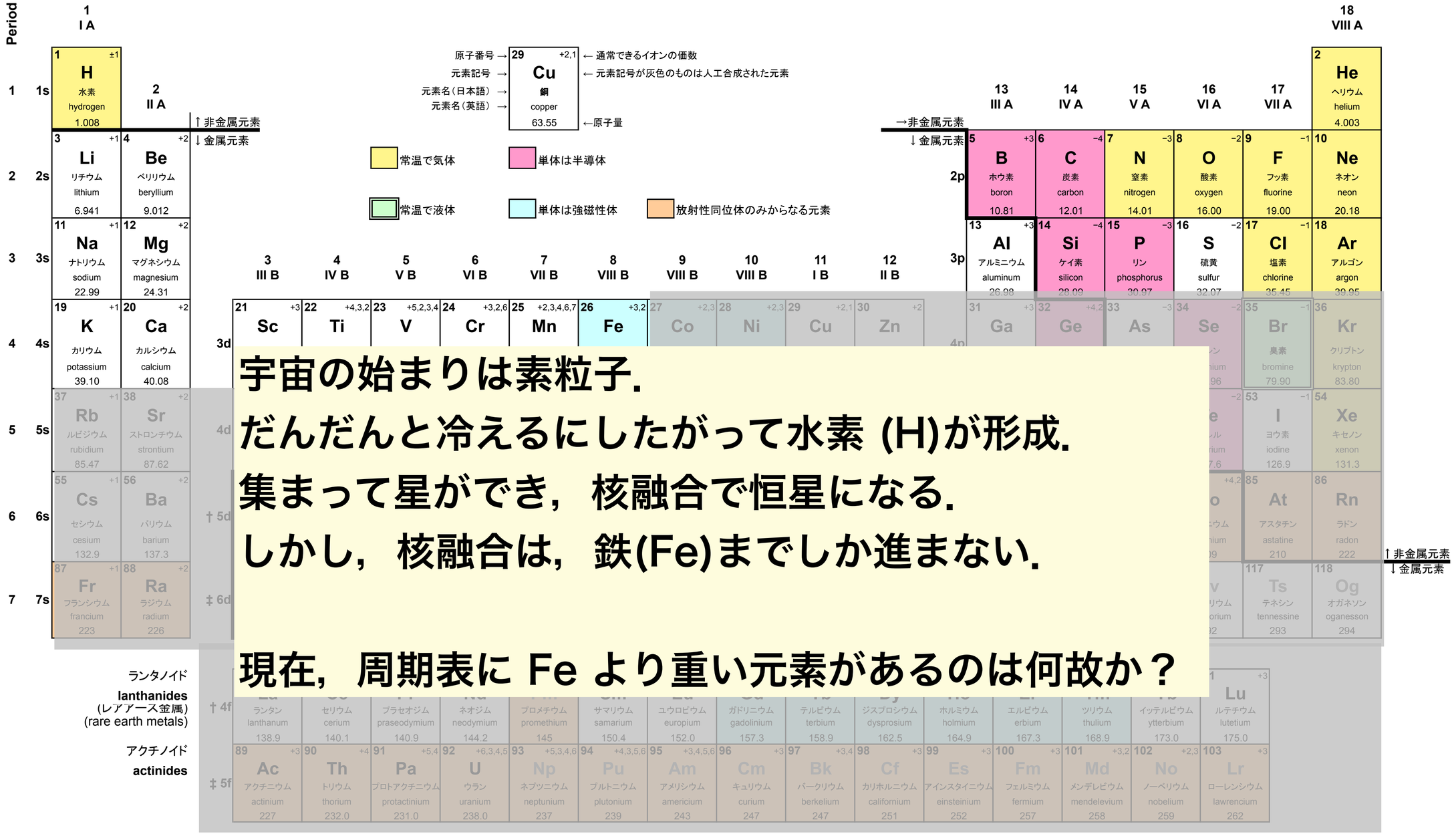
周期表 (periodic table)

教科書　後ろ見開き



周期表 (periodic table)

教科書　後ろ見開き



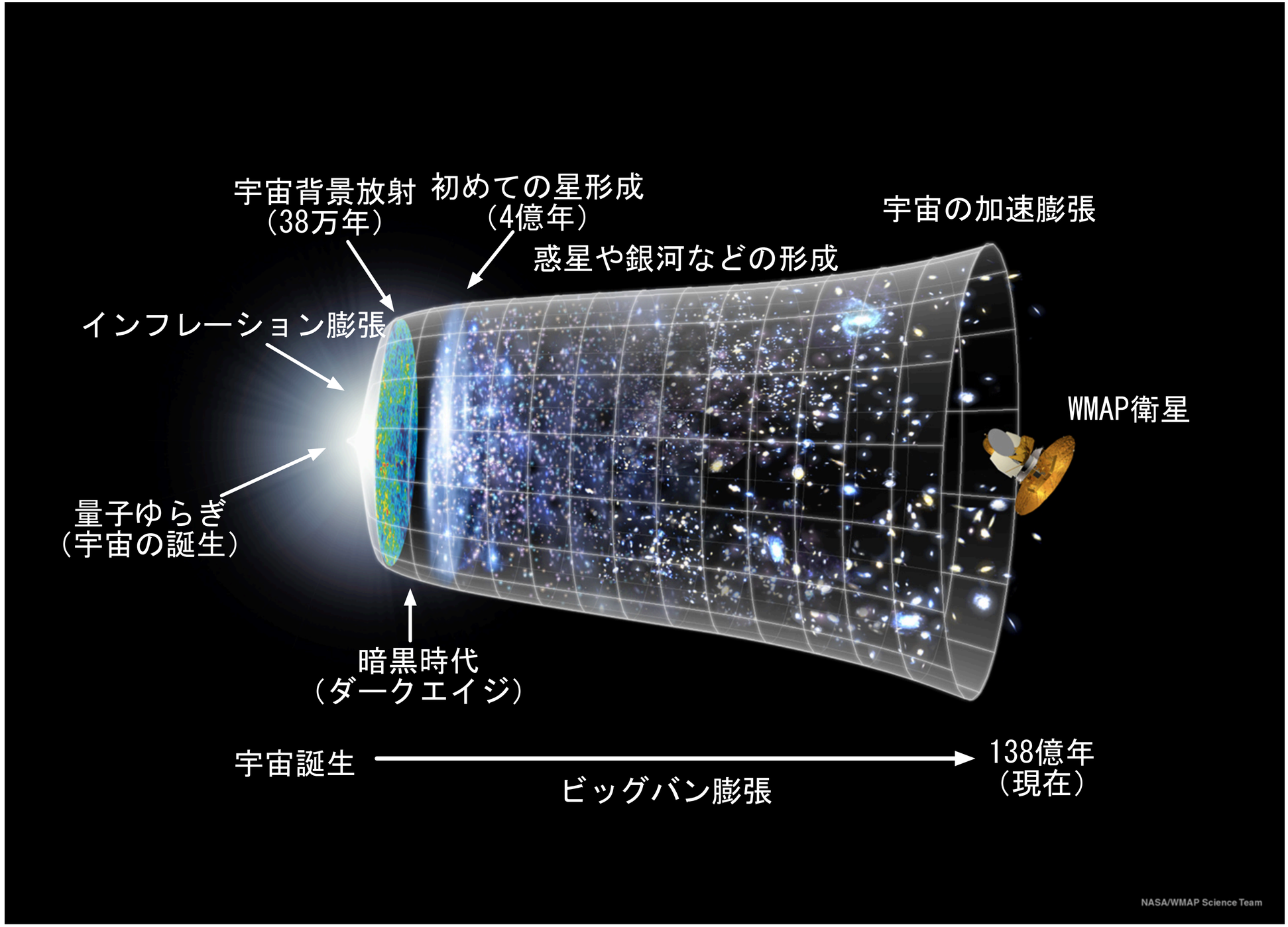
宇宙の始まりは素粒子.

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.

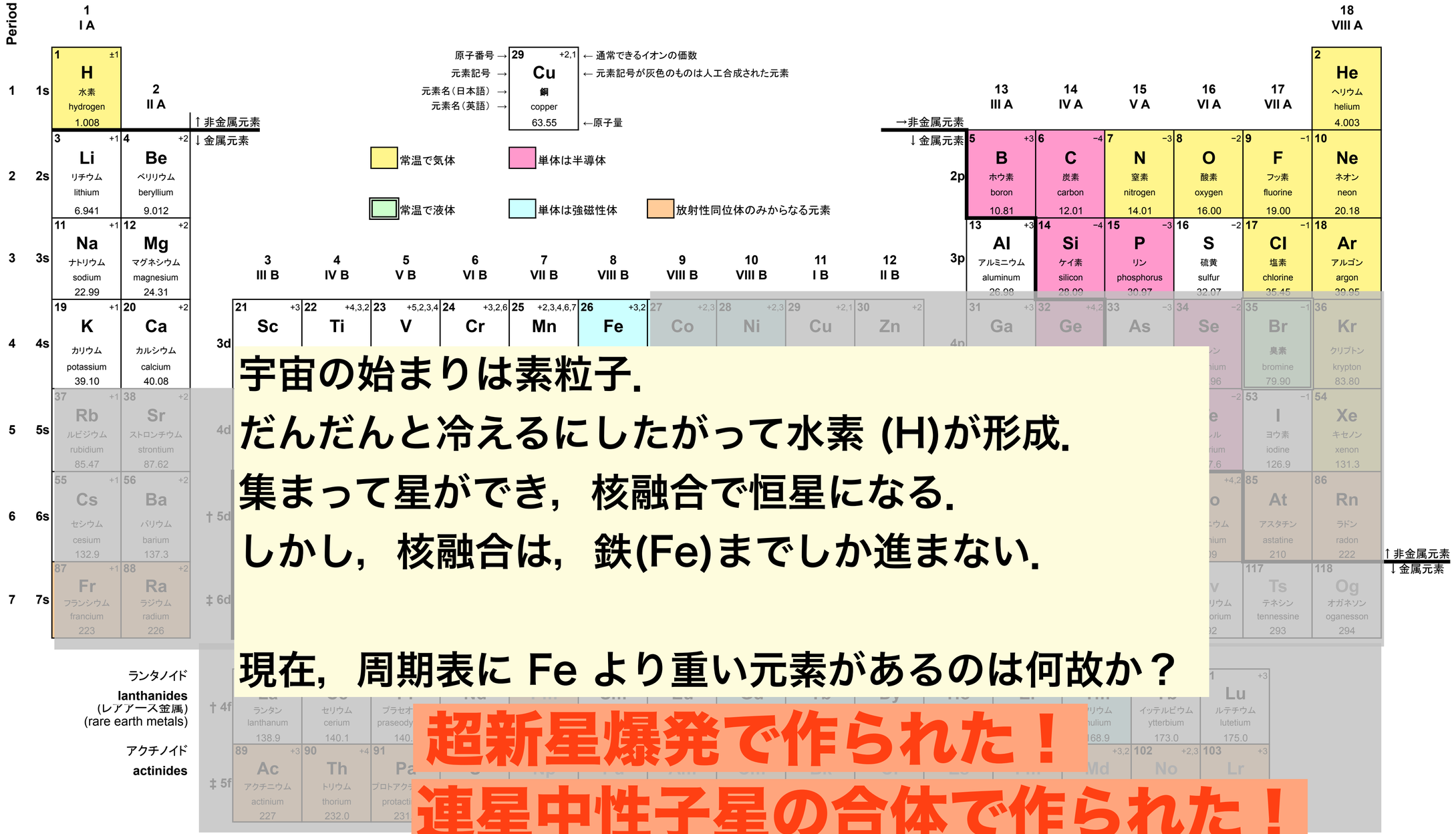
しかし，核融合は，鉄(Fe)までしか進まない.

現在，周期表に Fe より重い元素があるのは何故か？


宇宙背景放射
（38万年）
初めての星形成
（4億年）
宇宙の加速膨張
惑星や銀河などの形成
インフレーション膨張
WMAP衛星
量子ゆらぎ
（宇宙の誕生）
暗黒時代
（ダークエイジ）
宇宙誕生
138億年
（現在）
ビッグバン膨張
NASA/WMAP Science Team

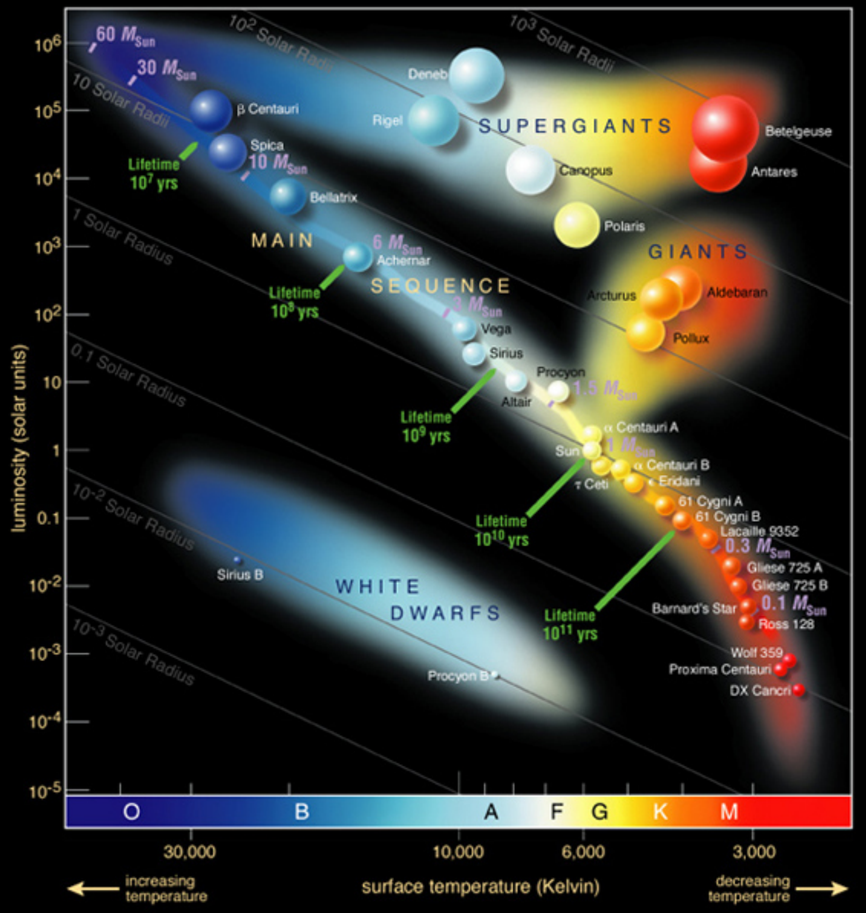
周期表 (periodic table)

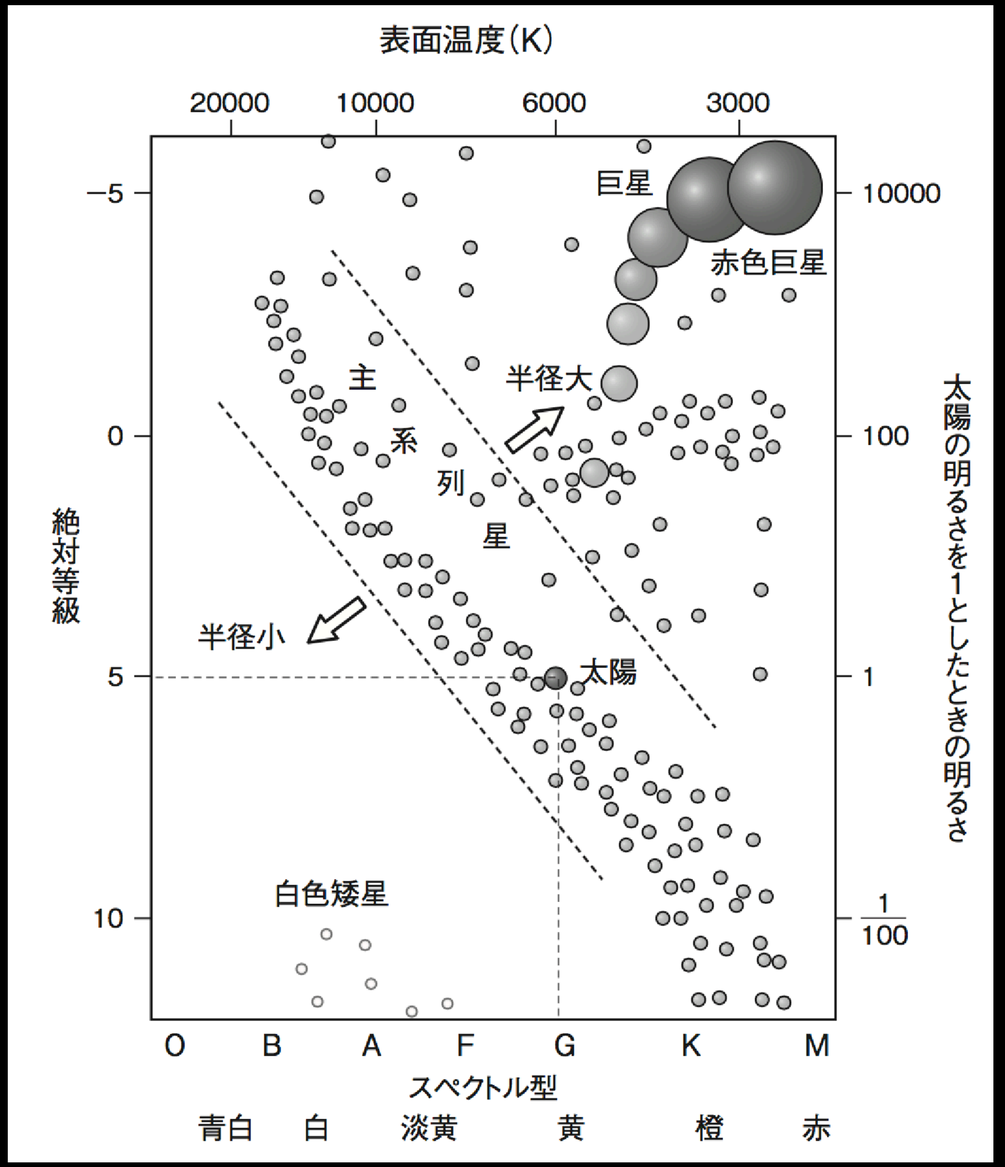
教科書　後ろ見開き



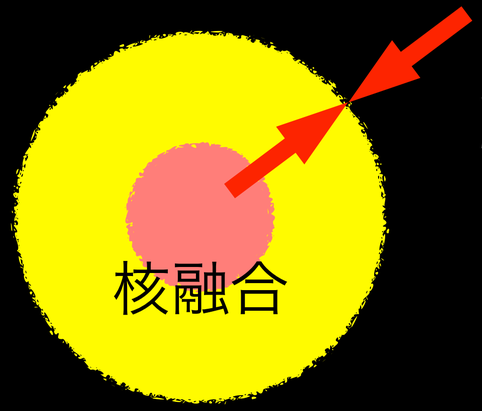
HR図 (Hertzsprung-Russell Diagram)

教科書 p79





超新星爆発のしくみ（1）星の燃焼



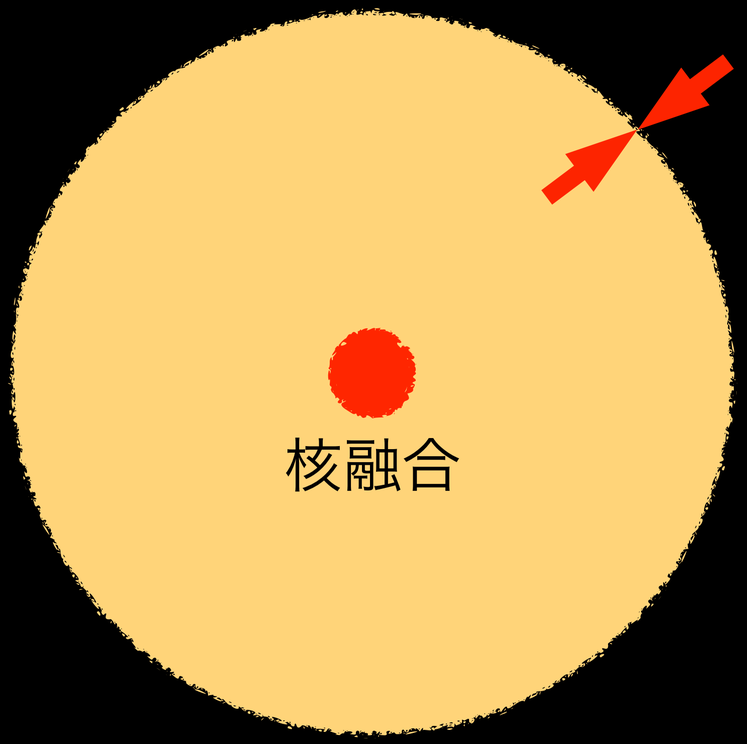
内向きの力：重力

外向きの力：熱による放射圧

✳現在の太陽：水素がヘリウムに核融合

✳放射圧＝重力　となるところで星の半径が決まる

超新星爆発のしくみ（2）星の燃焼の最後



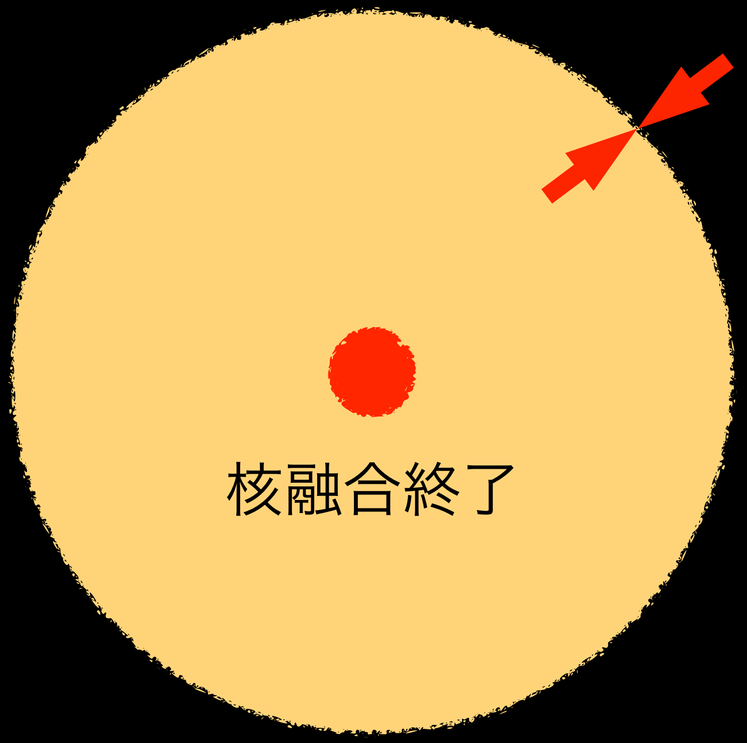
内向きの力：重力

外向きの力：
熱による放射圧

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

✳放射圧＝重力　となるところで星の半径が決まる

超新星爆発のしくみ（3）核融合終了



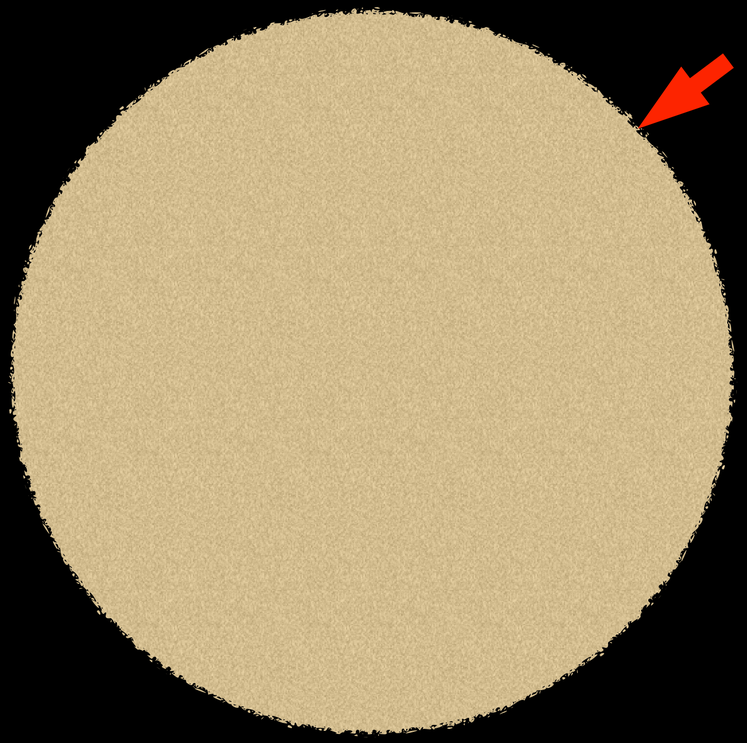
内向きの力：重力

外向きの力：
熱による放射圧

✳核融合反応は鉄まで進むと終了

✳放射圧がなくなるので星の収縮が始まる

超新星爆発のしくみ（4）重力崩壊

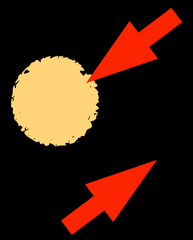


内向きの力：重力

✳収縮が始まる

超新星爆発のしくみ（5）重力崩壊後の運命1





内向きの力：重力

外向きの力：
電子の縮退圧

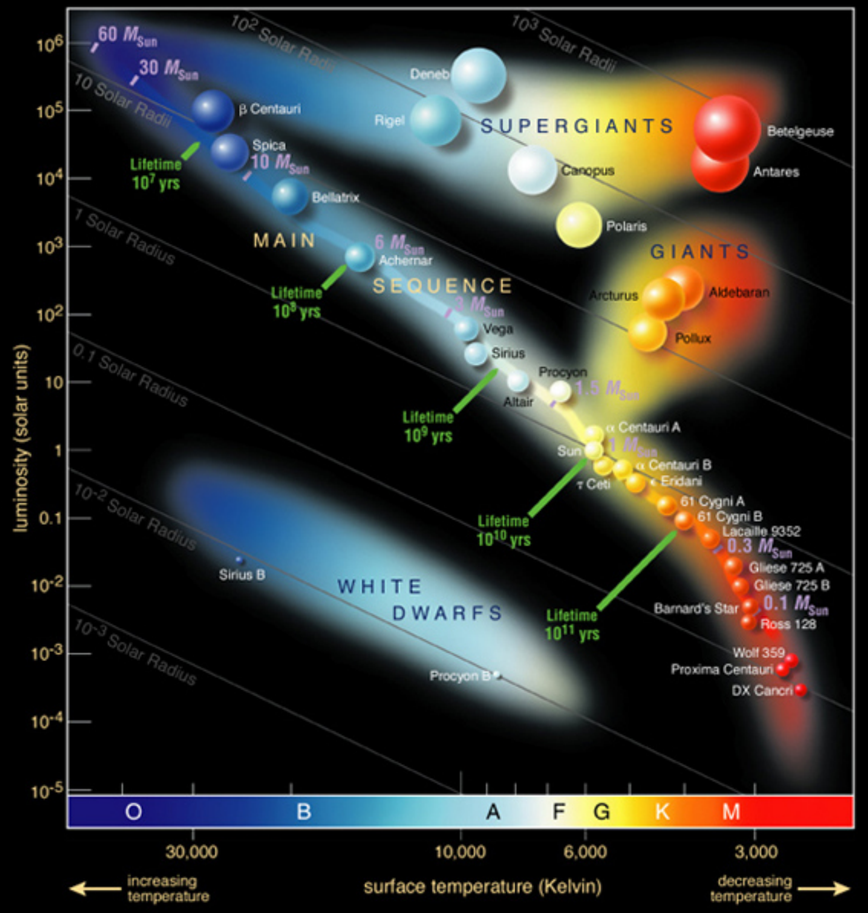
✳密につまった物質が星を支えるようになる

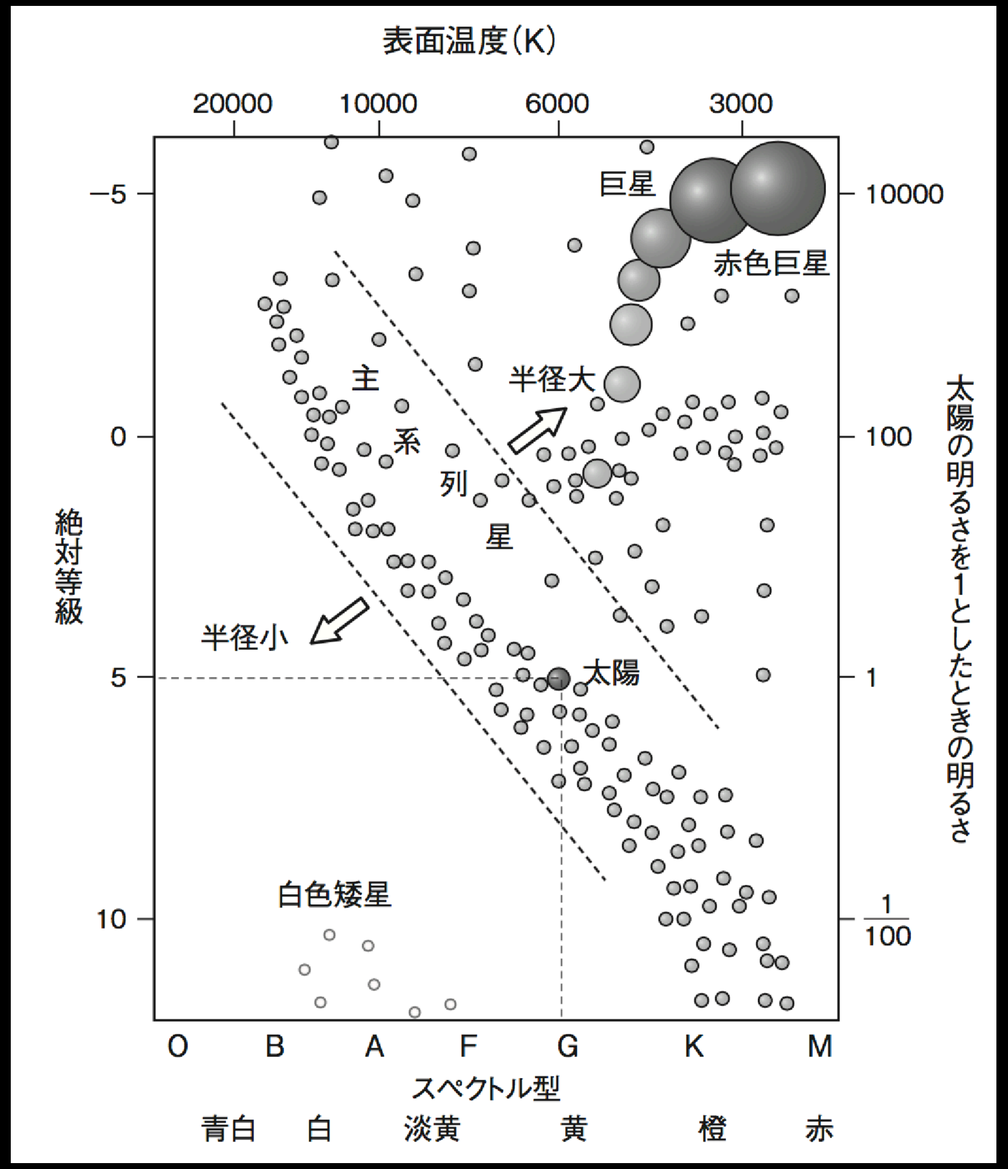
【運命その1】電子の縮退圧で支える「白色矮星」になる

1933年チャンドラセカールの考え

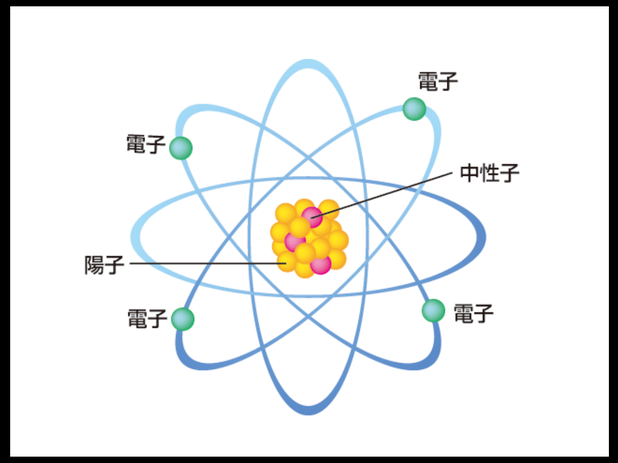
HR図 (Hertzsprung-Russell Diagram)

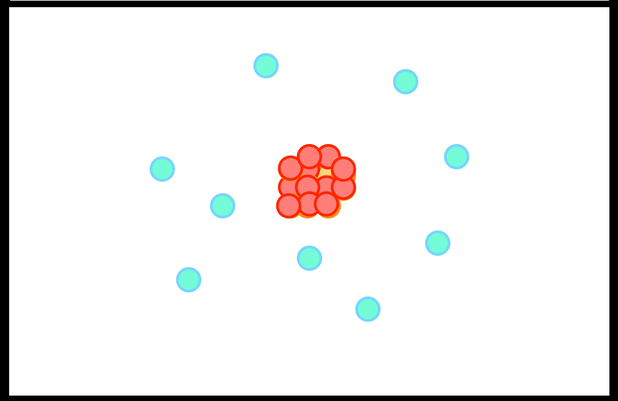
教科書 p79

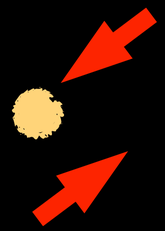




超新星爆発のしくみ（6）重力崩壊後の運命2







内向きの力：重力

外向きの力：
中性子の縮退圧

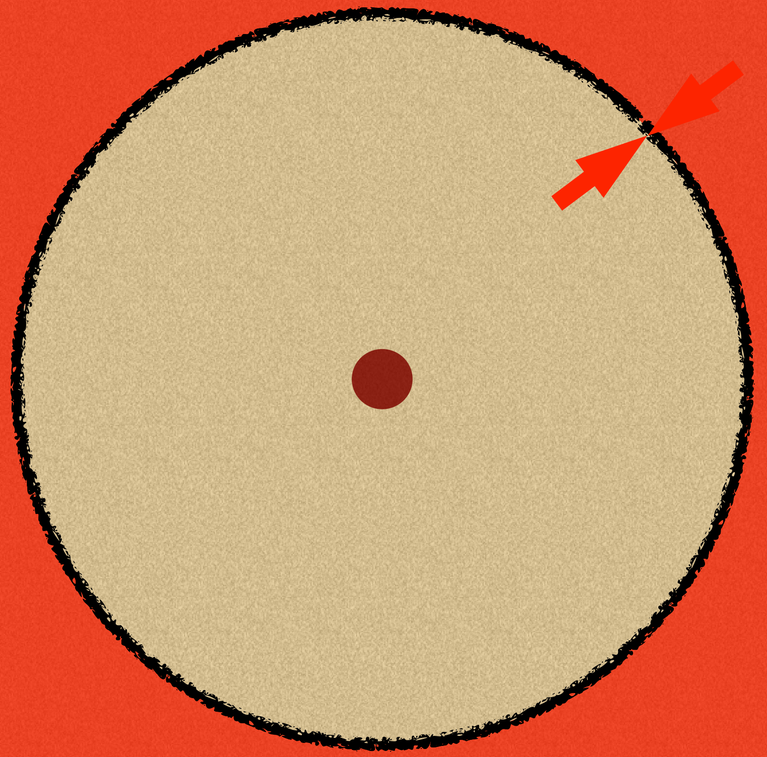


✳密につまった物質が星を支えるようになる

【運命その2】中性子の縮退圧で支える「中性子星」になる

1938年ツヴィッキーの考え

超新星爆発のしくみ（7）さらに降り積もると･･･

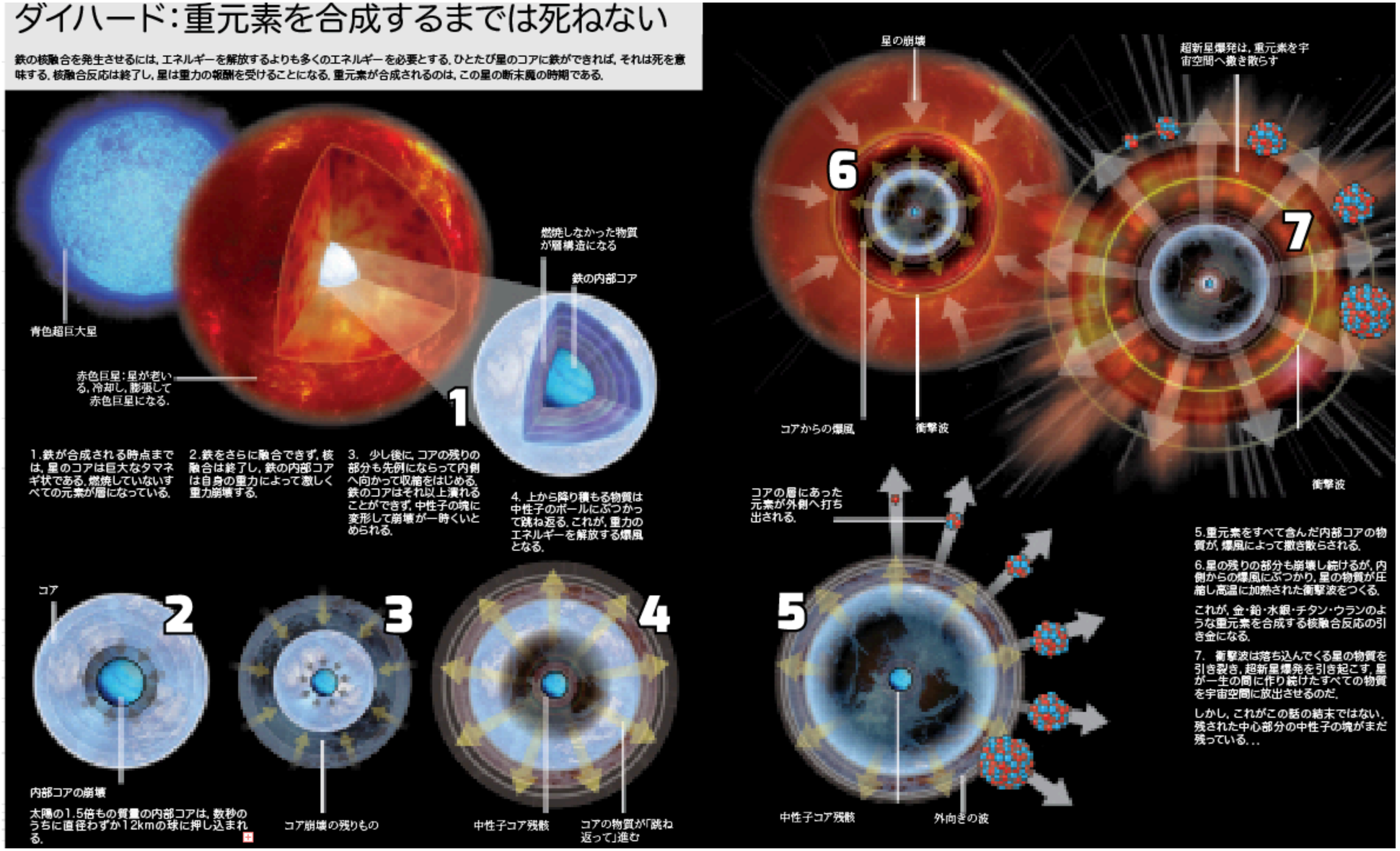


内向きの力：重力
外向きの力：
　中性子の縮退圧

硬い殻ができる

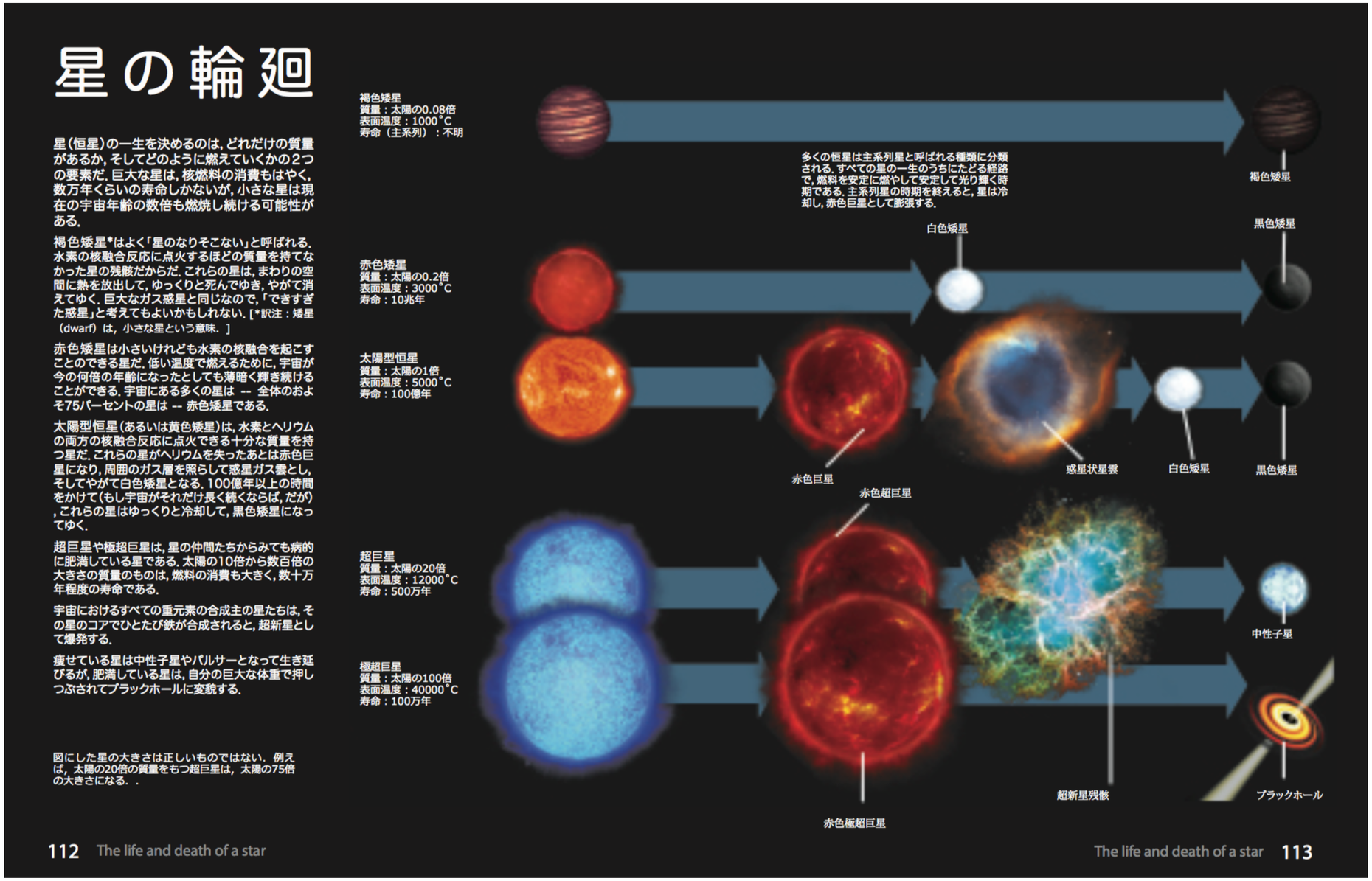
✳収縮が始まる
中性子の塊ができる.
さらに外側からガスが落下すると. . .

星の一生



「宇宙のつくり方」Ben Gilliland著，真貝・鳥居訳（丸善，2016/12）

星の輪廻



「宇宙のつくり方」Ben Gilliland著，真貝・鳥居訳（丸善，2016/12）

超新星爆発のしくみ

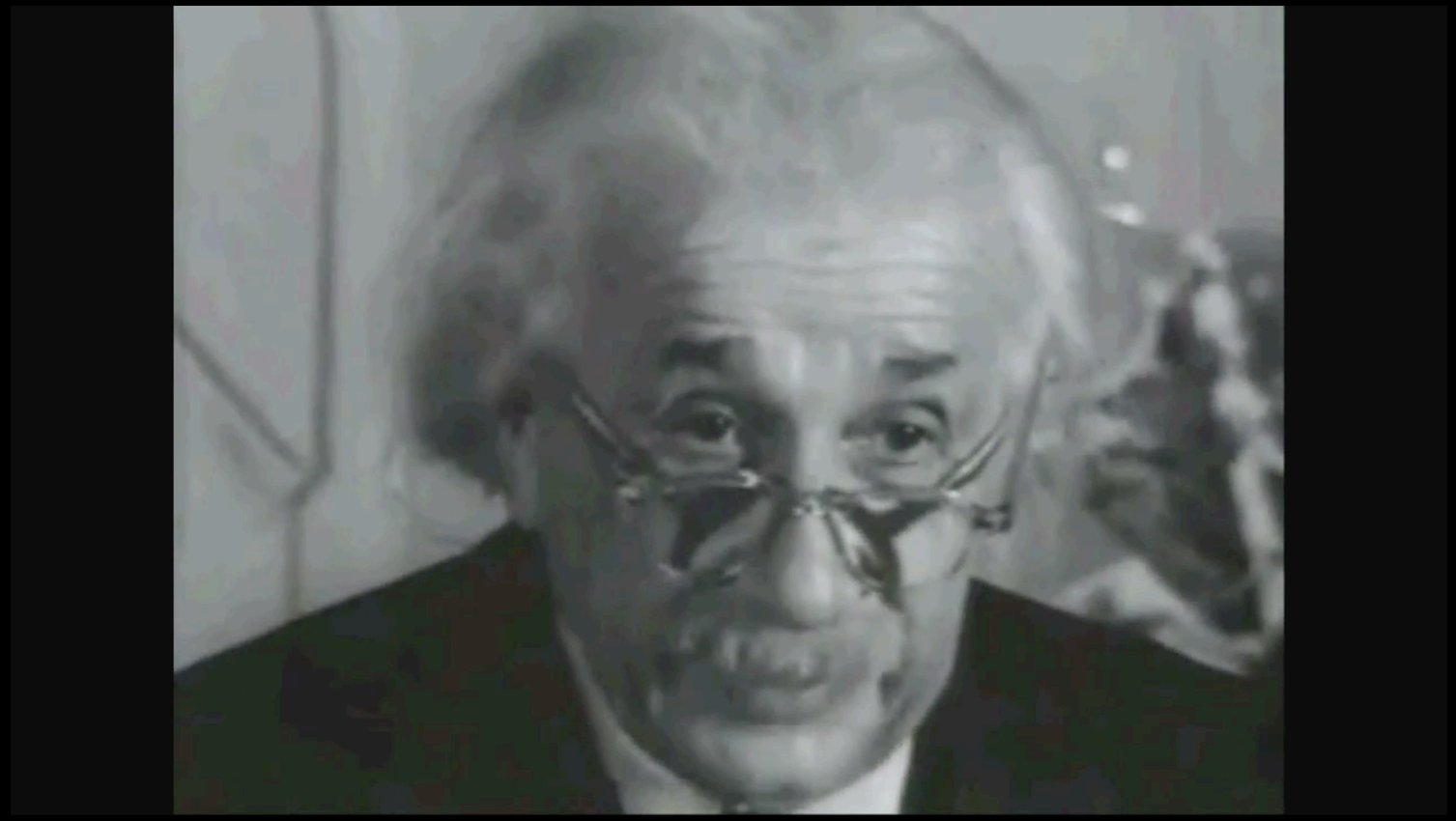
- 星の内部で原子核融合が進む：
  水素　H → ヘリウム　He → リチウム　Li
  …… → 鉄　Fe
- 質量を失って，膨張する.　　放射の力＞重力
- 核融合が生じなくなる.　　放射の力＜重力
  急速に潰れる.
- 星の内部は押しつぶされて，
  原子核　は　中性子の固まり　に
- 大爆発：
  外から降り積もってきた物質が中性子核ではね返る

$$E = mc^2$$

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

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

- **応用：**
  核融合反応：星の輝く原理，水素爆弾
  核分裂反応：原子爆弾，原子力発電



Einstein 自身による $E = mc^2$ の説明

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

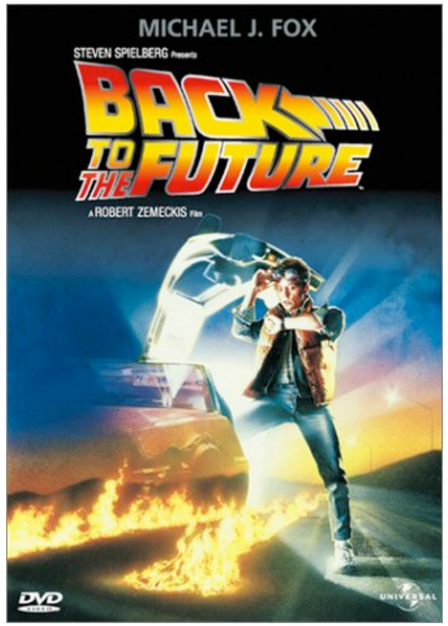
Furthermore, the equation $E = mc^2$, in which energy is put equal to mass, multiplied by the square of the velocity of light, showed that very small amounts of mass may be converted into a very large amount of energy and vice versa.

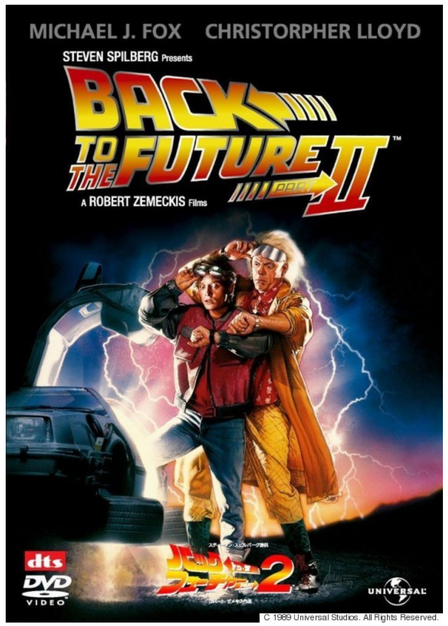
The mass and energy were in fact equivalent, according to the formula mentioned before.

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

前回のミニッツペーパーから

タイムマシーンの映画でお薦めは？







定番ですが「バック・トゥ・ザ・フューチャー」です。これは予告にはもしろいです。

バックトゥーザフューチャーが好きすぎて他をしりません

「バックトゥザフューチャー」です。タイムマシンというカテゴリに限らず、好きな映画を上げていわれても、この映画を挙げます。
あるいは、ドラマですが、医療ものの「仁-JIN-」も面白かったです。

バック・トゥーザフューチャー　バックトゥーザフューチャー
しかはてきません

"バック・トゥ・ザ・フューチャー"。過去に戻って、未来が変わるところがおもしろい。

前回のミニッツペーパーから

タイムマシーンの映画でお薦めは？

ドラえもん

ドラえもん













ドラえもんしか思い浮かびませんでした。

ドラえもん のび太のタイムマシン!! (子供のころ見て、面白かった)

前回のミニッツペーパーから

タイムマシーンの映画でお薦めは？

ターミネーター

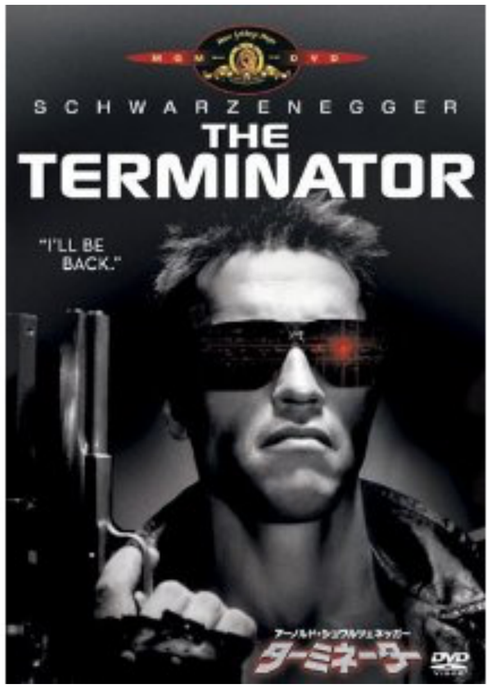
ターミネーター、ハリーポッターとアズカバンの囚人

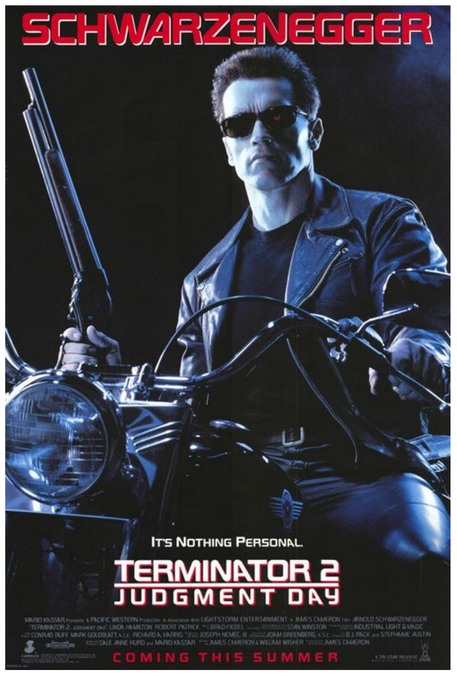
ターミネーター

ターミネーター

「ハリーポッターとアズカバンの囚人」

ターミネーター









前回のミニッツペーパーから

タイムマシーンの映画でお薦めは？

タイムマシン映画ではないですが、「時をかける少女」がおすすめです。

マシンではないが、「時をかける少女」





時をかける少女（タイムマシンというか、タイムリープ？）

時をかける少女





アバウト・タイム

アバウトタイム～愛おしい時間について～

君が愛したすべての僕へ
僕が愛したすべての君へ

前回のミニッツペーパーから

タイムマシーンの映画でお薦めは？



本能寺ホテル



侍タイムスリッパー



ソンジェ背負って走れ（韓国ドラマ）



韓国のドラマの「それ」

「麗～花萌ゆる8人の皇子たち」



「シャークネード・ラスト・チェーンソー」←B級映画です。シリーズ全て見ないと話を理解できないと思います。

前回のミニッツペーパーから

タイムマシーンの映画でお薦めは？



※実際の商品イメージとは異なります。



サマータイムマシンブルース



http://looper.gaga.ne.jp

LOOPER







真貝 寿明
3時間前・編集済み・

なぜか今日は三宅裕司さんと対談.
劇団スーパーエキセントリックシアターがタイムトラベルをネタにした
「虹を渡る男たち」を11月に公演.
http://www.set1979.com/perform/detail/16.php
パンフレットに登場するとか.
台本の矛盾をたくさん指摘してしまってゴメンなさい.

Chat talk with Yuji Miyake, one of the leading comedian in Japan, whose company will show a play based on time travel this November. I apology for pointing out many inconsistencies in the scenario.

いいね！　コメント　シェア

大西 浩次さん、岡﨑 弥生さん、中根 秀夫さん、他32人が「いいね！」と言っています。



スペシャル対談

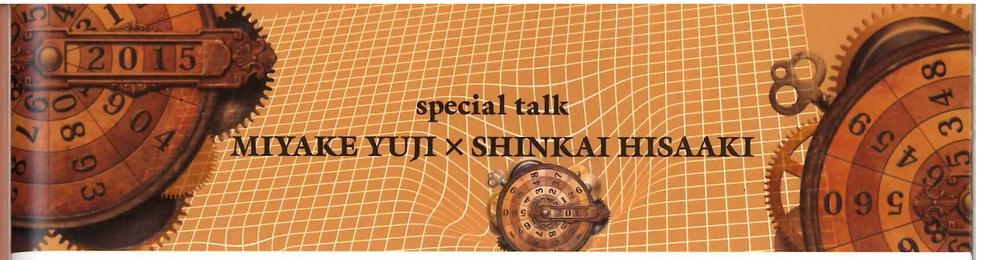
人類悲願の夢。「タイムマシン」に「どこでもドア」、実現するのはどっち!?

三宅裕司×真貝寿明



足を捕まえて頭から落とそうが、必ず半回転して着地する猫を見ると、角運動量保存則に反しているのではと気になり、学問的に証明しようとするのが理論物理学者なら、そんな猫の動きが何かギャグのネタ、何かのオチに使えないかと脳細胞がむずむずするのが喜劇をこよなく愛し、邁進し続ける役者にして座長。落下する猫を見るだけでも、文学的に言えば天と地ほど、物理学的に言えばざっと10万光年ほど(根拠は全くない)の差がある学者と座長が、今回の舞台のキモとなるタイムマシンの可能性をめぐって、初対談。果たして話は噛み合うか？　それとも予想外のクォンタム・リープ(飛躍的進歩)を遂げるか？　検証するのは、いま、この頁をご覧のあなた、だ。

Text：浜 美雪



超タイムリー?

三宅　今日は「どこでもドア」がないにもかかわらず、京都からお越しいただいて、ありがとうございます。

真貝　いえいえ(笑)。それより、あまりにタイムリーなお話なのでびっくりしました。

三宅　タイムリーって？

真貝　『バック・トゥ・ザ・フューチャー2』(85年に公開され、世界中で大ヒットしたSF映画)に登場する"未来"が今年なんです。正確には2015年の10月21日なんですよ。

三宅　うわ、あの白髪が逆立った博士が創ったタイムマシンで行く未来がいまなんですか？

真貝　はい。だから、今回の舞台はものすごい盛り上がるんじゃないかと。

三宅　やっぱ持ってるな、俺は(笑)。ただ、物理の知識がちょっとなあ(笑)。そもそもタイムマシンって、どういう理論に基づいてるんですか？

真貝　アインシュタインが作った、相対性理論です。相対性理論は2つあって、特殊相対性理論と一般相対性理論と名前がついています。

三宅　ああ、すごい有名だけど一般人には相性が悪いのか、さっぱりわからないっていう、あの理論ですね(笑)。

真貝　その理論です(笑)。今年の11月はアインシュタインが一般相対性理論を作ってちょうど100年になるんですよ。だから、今回の舞台のポスターには『一般相対性理論100年記念』と入れてください。

三宅　もうタイムリー過ぎる(笑)。その相対性理論って、うんとわかりやすく言うと、どんな理論なんですか？

真貝　光の速さに近づくと時間の進み方が遅くなり、強い重力があると時間や空間が歪んでしまうという理論です。

三宅　歪むんですか……。

真貝　はい。大きくて重い星のまわりの空間って、重力のせいで歪んでいるため、光が曲がって進むんです。

三宅　曲がるって、光が屈折するってことですか？

真貝　それと似た現象と言えますね。光にとってはまっすぐ進んでいるつもりなのですが、遠くから見ると曲がってしまっている、ということになります。この現象を「重力レンズ効果」と呼んでいます。そして重力がものすごく巨大で強力になると、歪みもものすごいことになって、光も抜け出せなくなる。伸びすぎたトランポリンが破けたようになる。それがブラックホールなんです。

三宅　そのブラックホールに、僕も入りかけてます(笑)。

真貝　じゃ、ちょっと話を変えましょう(笑)。あの、人によって時間が長く感じる人と短く感じる人がいますよね？　例えば浦島太郎。

三宅　そうか！　竜宮城で遊んでたのは短い時間のつもりだったけど、戻ってきたら何十年と経ってて……。

真貝　そうそう。辺りにはもう知り合いがいなかった、っていう。

浦島太郎の逸話はご存じの通り『日本書紀』や『丹後国風土記』にも登場しますし、『万葉集』にも歌われています(編者註　巻九、高橋虫麻呂の長歌「詠水江浦嶋子一首」に浦島伝説のもととなったエピソードが歌われている)。

三宅　神社もありますからね。僕、行って来ましたよ、浦島神社(京都府与謝郡伊根町本庄浜に現存)に。

真貝　へえ！

三宅　その浦島伝説を物理学的に考えるとどうなんですか？

真貝　浦島太郎が光の速さに近い亀に乗って行って帰ってきたとすれば、物理学的にはまあ、起こり得るという。

三宅　光の速さで動く亀か……。

真貝　「速く動くと時の経つのが遅くなる」というのが相対性理論の結論で、それは実証されてもいるんです。ですから、ちょっと竜宮城に行ってたつもりが、帰ってみたら300年経ってたということにもなり得ます。

三宅　ただ、物理学的にはあり得ても、助けた亀が光に近い速さだったというのがちょっとね(笑)。

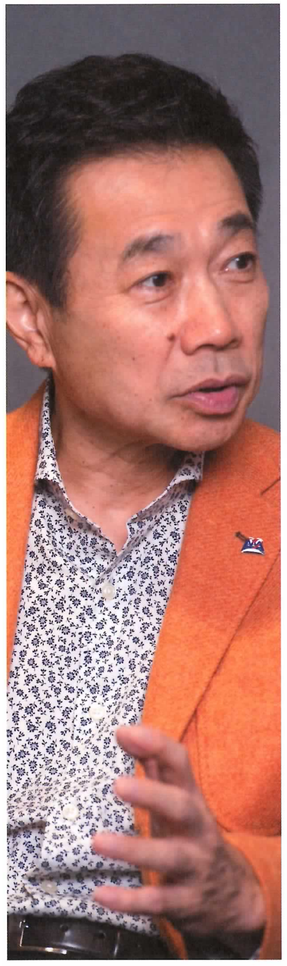
真貝　もしかすると竜宮城が光速近くで飛ぶロケットだったのかも。

タイムマシンは可能?

三宅　もし光の速さで移動出来る手段が発明されたら、未来にも行けるんでしょうか？

真貝　あり得ますね。

三宅　それは実際に未来に行けるよう



なタイムマシンが作れるってことですか？　それとも理論上あり得るってことですか？

真貝　作るのはいまの技術では、難しいでしょうね。もっとも僕の専門は物理学といっても理論物理で、数式をいじっては、こういうのがあり得るとか、できるとかできないとか議論しているだけなんですけど。

三宅　その理論物理からみてもタイムマシンはむずかしいと。

真貝　理論上は可能です。でも、いまのロケットの速さはせいぜい秒速20キロとかそんなもんですから。それを30万キロ出せって言われたらもう桁が違うわけですね。

三宅　なるほど。でもまあ、理論上は未来には行ける？

真貝　はい。

三宅　じゃあ、過去は？

真貝　いい質問ですね。それが難しいというのをですね、今日はお伝えしなくちゃいけないと思いまして。

三宅　ぎくっ（笑）。どういうことで難しいんですか？

真貝　えっとですね、物理って因果関係を非常に大事にする学問なんです。力を加えたら物が動く、原因があって結果があるという因果関係が完璧に成立していないと、エネルギー保存則とか運動量保存則も成立しなくなっちゃう。そうなるともう、物理そのものが全部崩れてしまう、何も予言できない、物理が用をなさなくなってしまうんです。

三宅　前提がすべて覆っちゃうわけだ。

真貝　はい。例えば未来からやってきた人からパンチを一発食らったとしましょう。でも、そのパンチは原因も結果もつながってないわけですよね。

三宅　未来から来た人から、パンチを食らわなきゃならない原因がないですものね。

真貝　しかもパンチを食らった結果、飛ばされて倒れたとする。その力はどこから発生したのか、因果関係を破ることになる。

　物理学的な言い方をすると、エネルギーが保存しないことになる。今までずっとエネルギー保存則が成り立っていたところに、唐突に力が加わって動き始めると、エネルギーは保存しないってことになるので矛盾が生じるんです。

三宅　うわっ、ここ難しいな。エネルギーが保存しないっていう言葉がちょっと分かんないです。

真貝　じゃ、ジェットコースターで考えてみましょう。あれって、一番初めはグイッて吊り上げられて……。

三宅　カチャカチャカチャカチャって上がりきったあと、ゴーッって猛スピードで下ってきますよね。

真貝　で、下っていったかと思うとまた上がって、また下りてというのをエンジンなしで繰り返していく。

　そうした動きは、一番初めにコースターが吊り上げられた高さで決まります。初めの位置エネルギーが運動エネルギーに変わってジェットコースターを動かしている。

三宅　だけど、最初に吊り上げられたときの高さのエネルギーは超えないわけでしょ？

真貝　ええ。トータルで絶対に超えることは出来ません。

　なのに、ちょっと過去に行って、コースターをひと押ししたとしたら、はじめの高さを超えてしまうかもしれない。それはちょっとないだろうということになってしまう。

三宅　なるほどね。でも残念だなあ。

時間順序保護仮説

真貝　とはいえ、因果関係を崩さないようなものであれば、可能かも……というような理論もあることはあります。

三宅　やっぱりね（笑）。

真貝　一番有名なのは、キップ・ソーンという偉大な物理学者が考えた「ワームホール」。

三宅　あれがきついと腕が回しづらくて……って、それはアームホールだっての（笑）。

真貝　ははは。さっき言いましたブラックホールっていうのは何でも吸い込むわけですけど、物事にはすべからく表と裏があるように、方程式の答えもプラスマイナス逆のものが出てくるわけで、吸い込み口があるのなら、吐き出し口もあるだろうと。それがホワイトホールであり、ワームホールは、ブラックホールとホワイトホールをつなぐ抜け道のようなものとして考え出されたものです。

三宅　それはありそうだなあ。

真貝　でも、ブラックホールは実際に観測されているんですが、ホワイトホールは観測されていません。

三宅　見つけて欲しいなあ。

真貝　ホワイトホールがなくても、ワームホールを考えることはできます。離れた2つの場所を結ぶ抜け道があってもアインシュタイン方程式には矛盾しません。ワームホールは「どこでもドア」と同じなんです。

三宅　あり得ますか？

真貝　少なくとも、パッとドアを開いて向こうに行くっていうのは、理論上は否定されていない。あ……誤解の無いように言っておきますが、できるとは言っていません。ですが、否定もされてない。

三宅　なんか、大臣の答弁みたいですね（笑）。

真貝　はなはだ遺憾ですが（笑）。

三宅　僕らはお客さんを楽しませるために題材としてタイムトラベルを使ってるわけなので、理論にばかりこだわってもいられない。理論を超えた夢のある要素もないと駄目なんですよ。

真貝　でしょうね。でも、そうは言っても、因果関係がおかしくなってしまうのは困るわけでしょ？

三宅　いわゆる「親殺しのパラドックス」ですね。

真貝　はい。タイムマシンで過去に行って、もし自分の親を殺しちゃったら自分が生まれなくなっちゃうからおかしいだろうっていう。

　でも、それを解決する方法としてパラ





真貝　すごい発想が自由ですね。そこへいくと車椅子の物理学者として有名なスティーヴン・ホーキングなんか、タイムマシンはできないだろうって、非常に否定的ですから。

三宅　それはどういう根拠で？

真貝　時間順序保護仮説っていうんですけど。

三宅　えっ、自宅待機保護施設？

真貝　いえ、時間順序保護仮説（笑）。

三宅　要するに、時間の順序を守れってこと？

真貝　はい。ホーキングによれば、過去を変えようとしても何らか抵抗力が生じて変えることができないと。

三宅　はあ……順番を守らない奴が出てくると、それを阻止しようとする勢力が出張ってくる。

真貝　そう。そういう警察官みたいな勢力が発動するんじゃないかという考えです。でも、あくまで仮説ですけど。

三宅　宇面だけみると難しそうですけど、言ってる内容は人間臭い（笑）。

真貝　ですね。今回の台本、読ませていただいたんですけど、ホーキングが考えたことに近いような部分があって、興味深かったです。

三宅　遺伝子操作だとかクローンだとか、科学技術が進化すればするほど、神の領域に近づいていくわけですけど、果たして人間にはそこまで行ってもいい資格があるだろうかっていうことが、永遠の命題としてあるわけで、そのあたりのメッセージもさりげなく籠められたらなあって思ってるんです。

真貝　そこまで深かったんですか（笑）。

物理学者の気分転換は物理学？

三宅　ところで、そもそも何で物理学をやろうと思ったんですか？

真貝　中学のときに非常に実験好きの物理の先生がいて、毎回教室いっぱいに実験装置を並べて、次から次へと実験していくんですよ。例えば、静電気の実験で電気が逃げないようにゴム長靴を履いて自分の体に静電気をためて、毛が逆立っちゃった電気人間状態になって、生徒に触っちゃバチバチッてやったり。

三宅　それ、ものすごい印象に残りますよね！

真貝　で、「あー、こんな楽しいことがあるのか」と思って。

三宅　僕も中学のとき、技術家庭の先生が生徒を叱るときにやってましたっけ。生徒に電線のはじっこを持たせて、バチッ、ギャーッって（笑）。軽く感電させるお仕置きって、ひどいよね（笑）。

真貝　やらせてるほうは楽しいですけどね（笑）。

　ただ、僕は不器用で実験が苦手だったので、理論物理の方に進んだんです。

レルワールド（並行宇宙）ということを言っている人もいます。

三宅　そこですよ（笑）。

真貝　過去を変えたとしても、変えられた過去がいまある現在とは別の現在につながっている筋道があり得るという考え方ですけど、それは証明されてはいない。ただ、そういう考え方を数式上で解明していこうとするのが理論物理学なんです。

三宅　是非証明してほしいですねえ、「どこでもドア」。僕らの舞台なら場面場面「どこでもギャグ」は実現してるんですけどね（笑）。



数式を出してシミュレーションをする研究なので、宇宙全体がどうなっているかとかいう話は出来ても「あの星何？」とか訊かれても、よく分からない（笑）。

三宅　天文学者じゃないですもんね。でも、その髪の毛が逆立つ先生がいなかったら物理に興味持ってなかったかもしれない？

真貝　かもしれませんね。

三宅　先生の存在って大きいんですね。

　僕はどういう芝居を作ろうかとか、どういう演出にしようかとか悶々とすることがよくあるんですけど、真貝さんもそういうことってあるんですか？

真貝　あります。というより解けない問題ばっかりなので、わかんないわかんないって毎日悶々としてます（笑）。

三宅　そういうとき、気分転換のために芝居を観たり映画を観たりするなんてことは？

真貝　気分転換になってるかどうかは別として、僕はタイムマシン物の映画は結構見るんですけど、矛盾なく作られてる作品は観てて面白いですね。でも一番の気分転換は歩き回ることですかね。

三宅　歩き回るとき物理のことは考えてる？

真貝　ですね。というか研究ってずっと同じことを考えているわけじゃなくて、ブラックホールはどうなっているのかとか、宇宙膨張はどうなっているかとか、行き詰まったら別のテーマを考えたりすると、気分転換になりますね。

三宅　別ったって、物理は物理でしょ。それが気分転換になるっていうのはすごいですね。

真貝　というのも、物理って同じ考え方で類推していくと違うものが解けることがある。そこが面白いんです。ですから、いろんな式をシミュレートしているうちに、それがどこかで役に立つなんて可能性もあるわけです。

三宅　それは人生にもいえますね。あのラグビーの五郎丸選手のキックの精度が高いのは、以前はサッカーをやってたからだそうですけど、人間って、失敗も含めていろんな経験が結果的にすごいアイディアのもとになったり、いざというときに物を言ったりしますからね。

真貝　三宅さんの気分転換法は？

三宅　僕はギャグを考えてて行き詰まったりするとドラムを叩いたりするんですけど、それが結局はライブに役立つことになるし、ギャグにも幅が出てくるような気がします。音楽って、ギャグにすごく役立つので。

真貝　音楽がギャグに役立つ？　それは僕にはちょっと難しいですね（笑）。

三宅　実は、ギャグってリズムが大事なんです。同じこと言うんでも、タイミングがちょっとでもずれるとちっとも面白くならない。間延びしたら間抜けだし、早すぎても前の台詞とかぶっちゃって伝わらないですから。

真貝　なるほど！

三宅　こういう台詞やひと言があると説得力が増して、お客さんたちがなるほどなって思う言葉ってありますか？

真貝　やっぱり時間順序保護仮説ですかね。で、その仮説には抜け道があった……とか。

三宅　ええと、自宅待機、

真貝　時間順序……

三宅　あ、時間順序ほうかせつ？

真貝　放火はちょっと（笑）。

三宅　火付けてどうする（笑）。えっと、時間順序保護法。

真貝　安保関連法じゃないんですから（笑）。

三宅　ですよね。どうも言葉があらぬ方に歪んじゃうな（笑）。ええと、時間順序保護仮説。

真貝　はい！　この一言でSF好きのお客さんもなるほどなと思ってくださるんじゃないかと。

三宅　いいことを伺いました。

笑いは時空を超える？

三宅　いまさらこんなこと訊くのも何ですが、もし一回だけ過去に戻れるとしたら、いつに戻って、何をやり直したいですか？



真貝　僕は、中学高校と男子校だったうえに大学は物理学科で、女子学生はゼロ。大学院でもずっと男社会でなかなか女性と出会う機会がなかったので、もし戻れるんだったら中高ぐらいはもうちょっと華やかな青春を体験したいですね。三宅さんはどうですか？

三宅　僕はね……ないんですよ。

真貝　それを言えるのは格好いいなあ。

三宅　でもまあ強いて言うなら……大学のバンドの合宿のときですかね。

　後輩と酒飲みながら「男は酒を飲んでも、酒に飲まれちゃいかん」みたいな話をさんざんした翌朝、トイレに行こうとしたら、その手前にもどした跡があったんで、「酒に飲まれちゃだめだってあれほど言ったのに。ここまで来れたなら、なぜトイレまで我慢しなかった！」って後輩たちを叱ってるうちにはたと気づいたんですよ、もどしたのは俺だったって（笑）。

真貝　なので、そこに戻りたい？

三宅　戻って、もどさないようにしたい（笑）。

　でもそれより、未来ですよ。

真貝　『バック・トゥ・ザ・フューチャー』ですか。

三宅　そうです！

　僕はとにかく、今回の舞台をよりいいものにしたいですね。真貝さんのようなタイムマシンに詳しい人が観たとしても、多少理論的には無理があったり矛盾があったとしても、笑ってるうちに楽しんでしまえるような。

　笑いって矛盾があるからこそ生まれると思うし、矛盾をも超越してしまう力があるのも笑いだと思うので。

真貝　笑いは矛盾があるから生まれる、笑いは矛盾をも超越する……名言ですねえ。舞台、楽しみにしてます！

三宅　ご期待ください！　だけど、なんで物理の用語になるとちゃんと言えないかなあ、困ったもんだ（笑）。ええと、時間順序保管法でしたっけ？

真貝　はははは。記憶が前に戻っちゃいましたね（笑）。

三宅　ってことは、笑いは時空をも超える？

真貝　うーん（笑）。





真貝寿明（しんかいひさあき）

1966年東京都生まれ、横浜育ち。早稲田大学理工学部物理学科卒。ペンシルバニア州立大・理化学研究所などの研究員を経て、現在、大阪工業大学情報科学部教授。専門は一般相対性理論で、最近は高次元重力理論における時空特異点形成を研究している。ワームホールを通り抜けられるのか真面目にシミュレーションした学術論文もある。

著書には大学生向けの数学書のほか、一般向けに『図解雑学 タイムマシンと時空の科学』（ナツメ社）、『ブラックホール・膨張宇宙・重力波　一般相対性理論の100年と展開』（光文社新書）、『日常の「なぜ」に答える物理学』（森北出版）などがある。



タイムトラベル映画を科学する

過去の歴史はかえられる？　「時間の逆行」ってどういう意味？

SF映画をきっかけに科学に興味をもった，という人も多いのではないだろうか。SF映画は科学の入り口として格好の存在だといえるだろう。そこで本記事では，SF映画の中でも定番のテーマといえる「タイムトラベル」をあつかった名作の数々を題材に，「時間の科学」について解説していく。映画のストーリーのネタバレは極力さけるようにしてある。ただ，記事に登場する右にあげた映画を見たあとのほうが，本記事の科学解説をより楽しめるだろう。

監修　真貝寿明　大阪工業大学教授　山崎詩郎　東京工業大学助教



「のび太の新恐竜」（2020年）

「サマータイムマシン・ブルース」（2005年）
ブルーレイ＆DVD発売中
発売元：ショウゲート／販売元：ポニーキャニオン

「バック・トゥ・ザ・フューチャー」（1985年）
ブルーレイ：2075円（税込）
DVD：1571円（税込）
発売元：NBCユニバーサル・エンターテイメント

「インターステラー」（2014年）
ダウンロード販売中，デジタルレンタル中
ブルーレイ：2619円（税込）　DVD：1572円（税込）
発売元：ワーナー・ブラザース ホームエンターテイメント
販売元：NBCユニバーサル・エンターテイメント
[c] 2014 Warner Bros. Entertainment, Inc. and Paramount Pictures. All Rights Reserved.

「TENET テネット」（2020年）
ダウンロード販売中，デジタルレンタル中
ブルーレイ＆DVDセット（3枚組　ボーナス・ディスク付）：4980円（税込）
発売元：ワーナー・ブラザース ホームエンターテイメント
販売元：NBCユニバーサル・エンターテイメント
Tenet © 2020 Warner Bros. Entertainment Inc. All rights reserved.

「タイムマシン」（2002年）
デジタル配信中
DVD特別版：1572円（税込）
発売元：ワーナー・ブラザース ホームエンターテイメント
販売元：NBCユニバーサル・エンターテイメント
© 2002 Warner Bros Entertainment Inc. All Rights Reserved.

ほかにも，記事中では，「猿の惑星」（1968年），「ターミネーター」（1984年），「ターミネーター：ニュー・フェイト」（2019年）について簡単に言及してある。

著名な小説家で「SFの父」ともよばれるH.G.ウェルズ（1866～1946）の代表作に『タイムマシン』がある。タイムマシンを発明した主人公が遠い未来へと旅立ち，そこで人類の衝撃の運命を目にする――といったストーリーだ。

注目すべきことは，この小説の発表が1895年ということだ。物理学者アルバート・アインシュタイン（1879～1955）が「時間の流れは，運動速度によって，速くなったり遅くなったりしうる」ということを「特殊相対性理論」によって明らかにしたのは，1905年のことである。それ以前は，「時間の流れはあらゆる場所で一定であり，変化しない」と考えられていたのだ。相対性理論の発表から10年も前に，ウェルズは時間を「第4の次元」ととらえ，3次元の空間と同じように移動できるという設定を小説にもちこんだのである。

未来へ行くタイムマシンは実現可能！

ウェルズの『タイムマシン』は，1960年と2002年に映画化された。2002年版では，主人公がタイムマシンに乗ると，周囲の時間がものすごい勢いで流れていくように描写されている。つまりタイムマシン自体は空間的にはずっと同じ場所にとどまりつづけ，タイムマシンの中の時間の流れだけが周囲よりも遅くなっているわけだ※1。さて，このようなタイムマシンは実現可能なのだろうか？　なお，本記事での「実現可能」とは，「近未来の人類のテクノロジーで実現可能」という意味ではなく，「物理法則がそれを禁じてはおらず，現在の文明をはるかにしのぐ超文明であれば実現可能かもしれない」といった意味である。

結論からいうと，似たようなタイムマシンは実現可能だ。「ブラックホール」のそばにしばらく滞在したあと，そこからはなれることができれば，映画『タイムマシン』のような未来旅行が可能になるのだ。

1915年～1916年にアインシュタインが発表した「一般相対性理論」によると，重い天体のそばでは，時間の流れが遅くなることがわかっている。ただし通常の天体では，その効果は微々たるものだ。1立方センチメートルあたり数億トンもの超高密度の天体「中性子星」でさえ，その表面での時間の進み方は，地球の5分の4程度だ。中性子星の表面の重力は，地球の約1000億倍以上もある。こんなとんでもない天体でさえ，ウェルズのタイムマシンほどの時間の遅れは生みだせないのである。

しかし宇宙にはこれ以上の時間の遅れを生みだせる天体が存在する。それがブラックホールだ。ブラックホールとは，太陽の20倍程度以上の質量の恒星が，生涯の最期に大爆発（超新星爆発）をおこしたあとに残される天体である。もとの恒星の中心部分は自らの重力でかぎりなくちぢんでいき，「特異点」とよばれる1点につぶれてしまう。その結果，特異点の周囲には，強力な重力によって，いったん飲みこまれると，光を含む，あらゆるものが脱出できなくなる領域が生じる。この領域がブラックホールである。

ブラックホールのそばでは，時間の流れが極端に遅くなる。たとえば，ブラックホールの中心から，その半径の1.3倍の場所では，時間の進み方が地球の2分の1になるのだ。そしてブラックホールの表面では，時間の流れが完全に止まってしまう。つまり，ブラックホールの表面近くまで行き，そこにしばらく滞在し，その後そこからはなれることができれば，ウェルズのタイムマシンなみの時間旅行も可能になるわけだ。

問題はブラックホールから無事はなれることができるかだ。宇宙に存在するブラックホールのほとんどは，質量が太陽の10倍程度以下の「恒星質量ブラックホール」である※2。太陽の10倍の質量のブラックホールの場合，その半径は約30キロメートルだ（なお，ブラックホールの半径は質量に比例する）。このようなブラックホールの場合，近づくと「潮汐力」によってあらゆる物体はあっという間に引き裂かれてしまう。ブラックホールに足から近づいていったとすると，足側の方が重力が強く，頭側の方が重力が弱いので，人体は上下に引っ張られるような力を受ける。これが潮汐力だ。タイムトラベルのた

※1：単純にこのような設定だとすると，外から見るとタイムマシンはそこに存在しつづけているように見えるはずだ。ただし，映画ではタイムトラベル中のタイムマシンは外から見えない設定のようだ。

※2：宇宙誕生直後には，密度のゆらぎから直接，大小さまざまな「原始ブラックホール」が生まれたという説もある。これが事実なら，たくさんの原始ブラックホールが存在するかもしれない。

SF映画を もっと楽しもう！

空想と現実科学の絶妙な関係

SF（サイエンス・フィクション）は，科学を学ぶ入口として格好の題材だ。SFは人々の想像力をかきたて，科学の発展をうながす推進力にもなってきた。実際，SFでえがかれた空想的なアイデアが研究に活かされたり，実証されたりした事例も少なくない。本記事では，SFの定番ともいえる「宇宙」をめぐるSF作品をいくつか取り上げ，科学的に考察するとともに，それらに関連する最新の科学理論や技術についても解説する。物語の核心にふれるようなネタバレはないため，まだ見たことのない作品が登場しても，安心してほしい。

監修　真貝寿明　大阪工業大学教授
倉谷 滋　理化学研究所チームリーダー



『**パッセンジャー**』
デジタル配信中
Blu-ray 1,980円（税込）／
DVD 1,408円（税込）
発売・販売元：ソニー・ピクチャーズ エンタテインメント



『**スター・ウォーズ エピソード4 新たなる希望**』
ディズニープラスで配信中



『**アバター**』
ディズニープラスのスターで配信中



『**エイリアン**』
ディズニープラスのスターで配信中



『**メッセージ**』
デジタル配信中
Blu-ray 2,619円（税込）／
DVD 2,075円（税込）／
4K ULTRA HD & ブルーレイセット 7,480円（税込）
発売・販売元：ソニー・ピクチャーズ エンタテインメント

宇宙を題材とするSFといえば，『スター・ウォーズ』（1977年）を思いうかべるという人は多いだろう。その舞台は，直径12万光年の広大な銀河系だ。現実の私たちが住んでいる天の川銀河（直径：約10万光年）とほぼ同じ大きさである。

この架空の銀河系には，数十万をこえる惑星からなる巨大国家，銀河共和国（のちの銀河帝国）が存在した。惑星間の自在な往来は，宇宙船が光速をこえて移動する技術「ハイパードライブ」によって実現しているが，この技術についてはのちに解説する。まずは，1977年に公開された『スター・ウォーズ エピソード4 新たなる希望』の主人公ルーク・スカイウォーカーの故郷である惑星タトゥイーンに目を向けてみたい。

空気から水をつくる新技術

タトゥイーンは，銀河帝国の中心地から4万3000光年もはなれた辺境の惑星である。ルークはこの惑星に住むラーズ夫妻の養子として育てられた。

ラーズ夫妻がいとなむ家業についてくわしく知っているという人は，実はそれほど多くないかもしれない。それは「水分農家」とよばれる，農作物ではなく水分を収穫する農家である。タトゥイーンは砂漠の惑星であり，雨はいっさい降らない。そのため貧しい水分農家たちは，「水分凝結機」という特殊な装置を利用して水分を収穫し，裕福な住人たちに販売することで生計を立てているのだ。

水分凝結機とは，空気中のわずかな湿気（水蒸気）を冷却して，水に変換する装置だ。映像をよく見ていると，ラーズ家の敷地内の至るところに高さ3〜5メートルほどの白い塔のような機械が立っているのがわかる。それが，「GX-8水分凝結機」である。プリトーミン・エンバイロメンタル社という架空のメーカーの製品で，1日に最大1.5リットルの水を生成できるという。

実はこの水分凝結機，現実の世界で近年，実用化が進んでいる。イスラエルのベンチャー企業ウォーターゲン社が開発し，2018年から販売しているのだ。同社が「空気から水をつくる」技術を開発した背景には，イスラエルは国土の約60％が砂漠であり，以前から水不足が国家の深刻な問題となっていたことがある。装置の基本的なしくみは『スター・ウォーズ』に登場する水分凝結機と同じで，空気中のわずかな水蒸気を冷却し，水に変換する。湿度は20％以上あれば水が生成できる。家庭向けにはウォーターサーバー型の製品「GENNY（ジェニー）」が販売されており，1日に最大30リットルもの水をつくることができるという（家庭向けは湿度が40％以上必要）。

タトゥイーンの「双子の太陽」

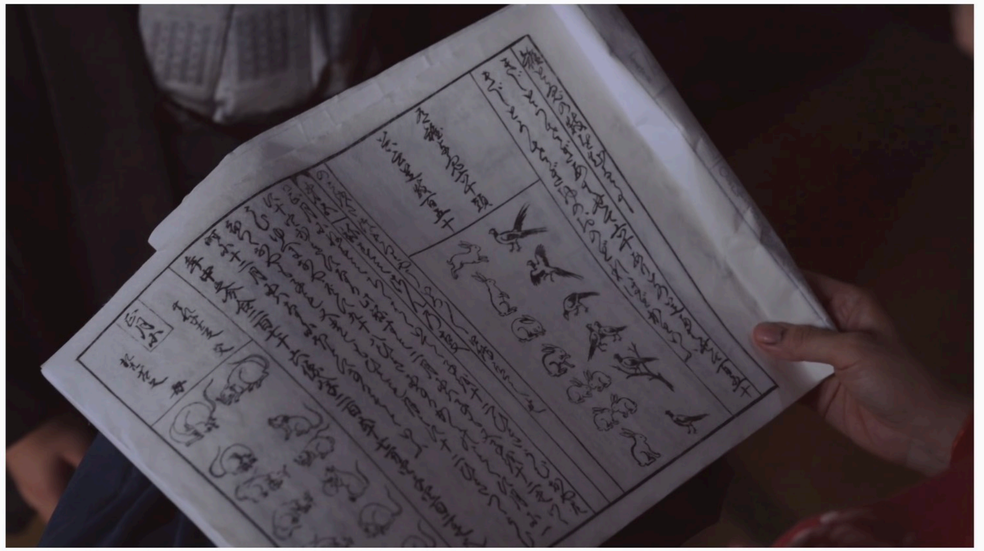
さて，タトゥイーンはそもそもなぜ，砂漠が広がる灼熱（しゃくねつ）の惑星なのだろうか。映画ではその理由もきちんと描写されている。それは，タトゥイーンには太陽が2個あるからなのだ。2個の太陽とは，タトゥⅠとタトゥⅡという「双子の太陽」である。すなわち，タトゥⅠとタトゥⅡは「連星」であり，タトゥイーンはその連星のまわりを304日かけて公転している惑星だ。実際に，『スター・ウォーズ エピソード4 新たなる希望』では主人公ルークが荒涼とした砂漠の地で，隣りあう「双子の夕日」を見つめるという名シーンがある（114ページの画像）。

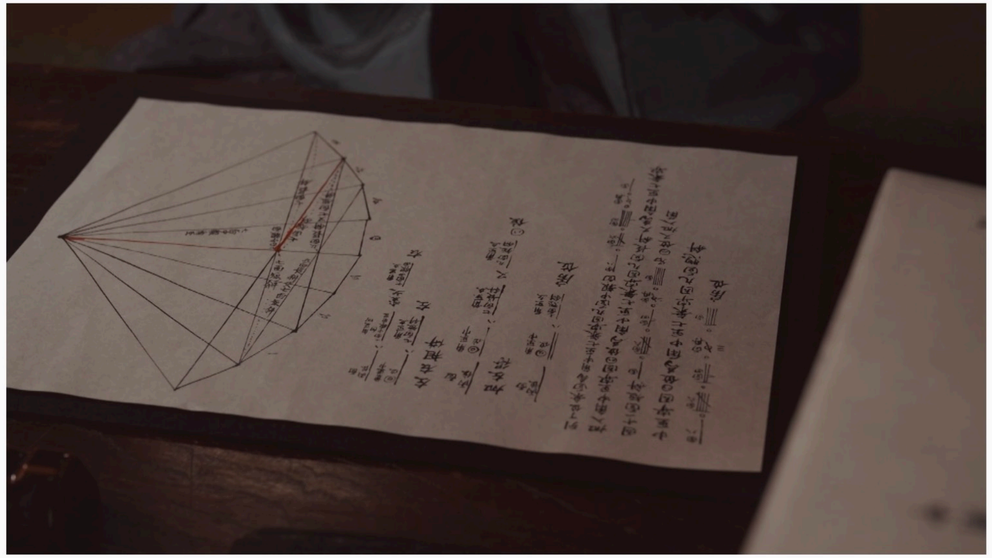
連星とは，二つ以上の恒星が重力によってたがいに結びつき，共通の重心のまわりを公転する恒星系のことをいう。現在では，宇宙に存在する恒星の半数以上が連星だといわれている。だが，連星のまわりを公転する惑星は，『スター・ウォーズ エピソード4 新たなる希望』が公開された1977年の時点では一つも観測されていなかった。つまり，タトゥイーンから望む「双子の夕日」の情景は，当時まだ空想にすぎなかったのである。

連星のまわりを公転する惑星がはじめて観測されたのは，2011年のことだ。地球から，はくちょう座の方向に約200光年はなれた場所に，「ケプラー16」という連星がある。ケプラー16は，ケプラー16Aとケプラー16Bという恒星で構成されている。さらにその連星から半径約1億500万キロメートルはなれた円軌道を公転している土星サイズの惑星が，2011年に観測された「ケプラー16b」である。ただし，ケプラー16bは砂漠の

※作品名の（　）は作品が発表された年をあらわす。続編がある作品においては，その第1作の公開年のみを記載している。
※作品の考察には筆者の憶測が含まれている。







いろはの恋は時代をかける
第１話 江戸娘が令和の教師にタイムスリップ？！300年の時を越えたロマンティックコメディ！

【話題】



昭和から令和にタイムスリップしてしまった阿部サダヲが，コンプライアンスがちがちの令和でハラスメント男となってしまう話

【ワームホールについて】

ワームホールに関する数式

ワームホール解として，Schwarzschild 座標 (t, r, θ, φ) を用いて，

$$ds^2 = -e^{2\phi_\pm(r)}dt^2 + \frac{dr^2}{1 - b_\pm(r)/r} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta\, d\varphi^2)$$

の計量を仮定する．Einstein 方程式 $G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$ は，

$$T_{tt} = \rho, \qquad T_{rr} = -\tau, \qquad T_{\theta\theta} = T_{\varphi\varphi} = p$$

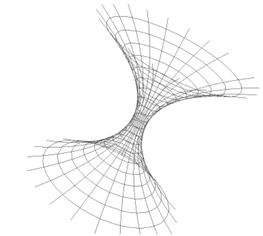
とすると，

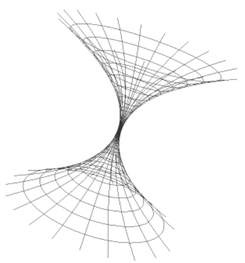
$$\begin{aligned} 8\pi G\rho &= \frac{b'}{r^2}, \\ 8\pi G\tau &= \frac{b}{r^3} - 2\left(1 - \frac{b}{r}\right)\frac{\phi'}{r}, \\ 8\pi G p &= \left(1 - \frac{b}{r}\right)\left\{\phi'' + \phi'\left(\phi' + \frac{1}{r}\right)\right\} - \frac{1}{2r^2}(b'r - b)\left(\phi' + \frac{1}{r}\right) \end{aligned}$$

である．整理すると，

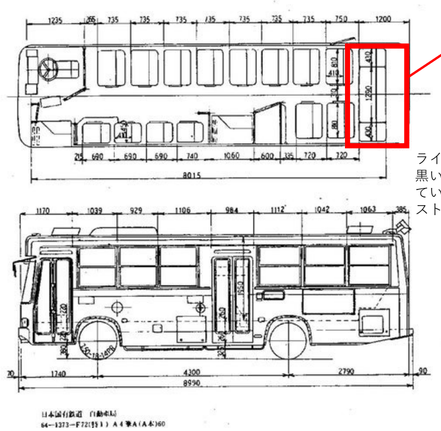
$$\begin{aligned} b' &= 8\pi G\rho r^2, \\ \phi' &= \frac{b - 8\pi G\tau r^3}{2r^2(1 - b/r)}, \\ \tau' &= (\rho - \tau)\phi' - 2(p + \tau)/r \end{aligned}$$

となり，これらを解けばワームホール解が得られる．

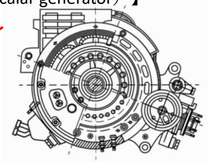




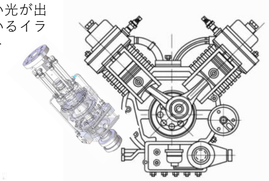
【タイムトラベルバス　設計図】



【エキゾチックスカラー・発生装置（exotic-scalar generator）】



ライトから黒い光が出ているイラスト



※エンジンに小型負のエネルギー発電機が組み込まれている設計

※ライト部分からも負のエネルギーを照射できるようにしている記載をする

週刊文春
2024/1

いまなんつった？

「時かけ、みたいな？」

宮藤官九郎

元旦に奥さんの実家へ挨拶に行き、夕方、娘と帰省するため東北新幹線に乗り込む直前、ホームでチラ見したスマホの画面に『地震が来ます』という文字が。え？　いやいや、気のせいだよな。

着席し、揺れを感じることもないまま5分……10分……ようやく車内アナウンスが。

「只今、北陸地方を震源に強い揺れを感知したため」

気のせいじゃなかった。地震探知システムの進化に驚きつつ、天災に盆も正月もないのかと、改めて戦慄しました。痛ましい。新年を迎えるために大掃除したばかりだったでしょうに。

被害に遭われた皆さまには、心からお見舞い申し上げます。

律儀で奥ゆかしい日本人としては、被災地の様子が連日報道されると、俺だけ私だけ、こんな暖かい部屋で、ぬくぬくと風呂上がりに缶ビール飲んでていいのか？　なんだか後ろめたくなって来る。それは真っ当な思考だし、戦地の映像を観ていても思うことです。ただ、それが連日だと、観ること自体がストレスになって来ます。それを発散しようとして、友達に喋る感覚で、余計なことをポストしたり、そんなポストを発見して逆上したり拡散したり。「私はこんなに我慢してるのに、我慢してない人がいまーす！」

元気な人まで元気がないフリしなくて良いと思うんです。元気な人は、元気に普段通りの生活をして経済を活性化させて無理のない範囲で募金すれば、なにも後ろめたくない、のでは？　ごめんなさい。新年早々もの申したりして。改めて、見た目より元気な53歳として北陸の皆さんのために出来ることをやります。

金曜ドラマ『**不適切にもほどがある！**』。

昭和の不適切オヤジが令和にタイムスリップ！「わ〜タイムリープものなんですねぇ」「時かけ、みたいな？　楽しみ〜」

いや、違う。違わないけど違う。そんなに行ったり来たりするわけじゃないんです。『時かけ』って『時をかける少女』のこと？　尾道三部作に数えられる不朽の名作を落語の演目みたいに略さないで。

タイムスリップは主人公を浦島太郎状態にするための、あくまで物語の導入の装置であって本筋ではない。しかし脚本の打ち合わせでも、気がつくとタイムマシンの構造について話し合っている。

「50歳の主人公が38年後に来たら、88歳の自分に会ってしまいますね」

いや、だから、そこはそんなに広げるつもりないの。単に時代錯誤なおっさんの悲哀を笑うのでは一方的過ぎると思って。昭和には昭和の正義があり、カッコ良さがあり、令和を生きる我々の目から鱗が落ちるような教訓があるかも知れない。また逆に、昭和では声を大にして言えなかったことを、令和の価値観で一刀両断したり。

「え？　令和から昭和へタイムスリップするパターンもあるんですか？　少年時代の自分に会ってしまうと、タイムパラドクスが起きて、未来が変わってしまいます」

みんな『バック・トゥ・ザ・フューチャー』好きなんだな。

イラストレーション　しのざきゆうこ



連載 766

53

くどうかんくろう　1月26日（金）22時から、新作ドラマ『不適切にもほどがある！』がTBSで放送スタート！　また、作・演出を手がけた新作歌舞伎『唐茄子屋　不思議国之若旦那』が、シネマ歌舞伎として全国の映画館で上映中です！



インターステラー

インターステラー
人生で1番おもしろいと思った映画でした。

プリントにものってますが、インタステラーは私も
おもしろいとおもいました。結末の円？になった
地球のすがたが奇妙で印象にのこっています。





映画『インターステラー』予告編3【HD】2014年11月22日公開　2’18”

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



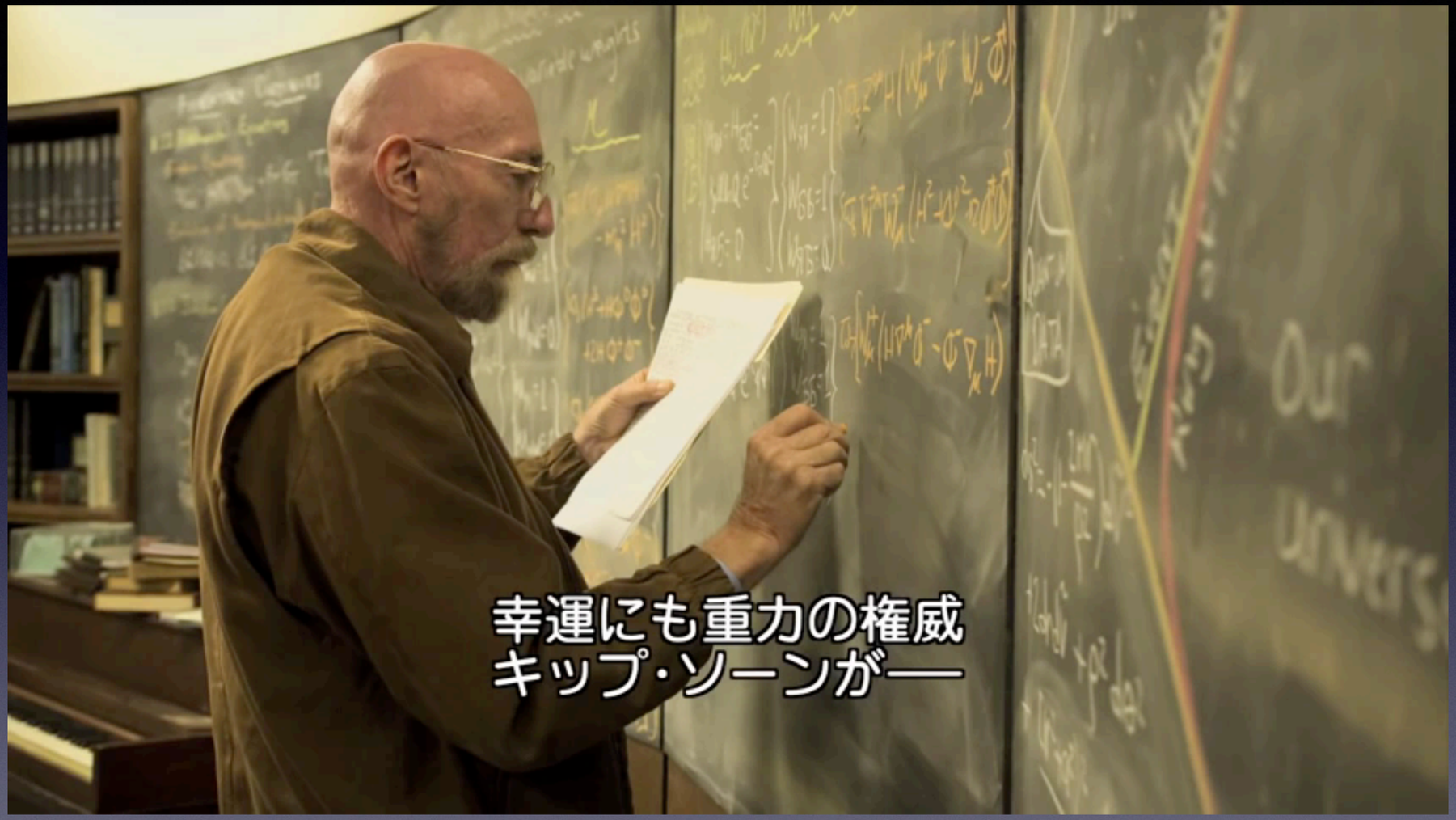




Interstellar (2014)

Executive Producer: Kip Thorne

https://www.youtube.com/watch?v=qZZ9jRan9eo



Interstellar (2014)

映画『インターステラー』スペシャル映像【HD】2014年11月22日公開 part 5’00

https://www.youtube.com/watch?v=qZZ9jRan9eo

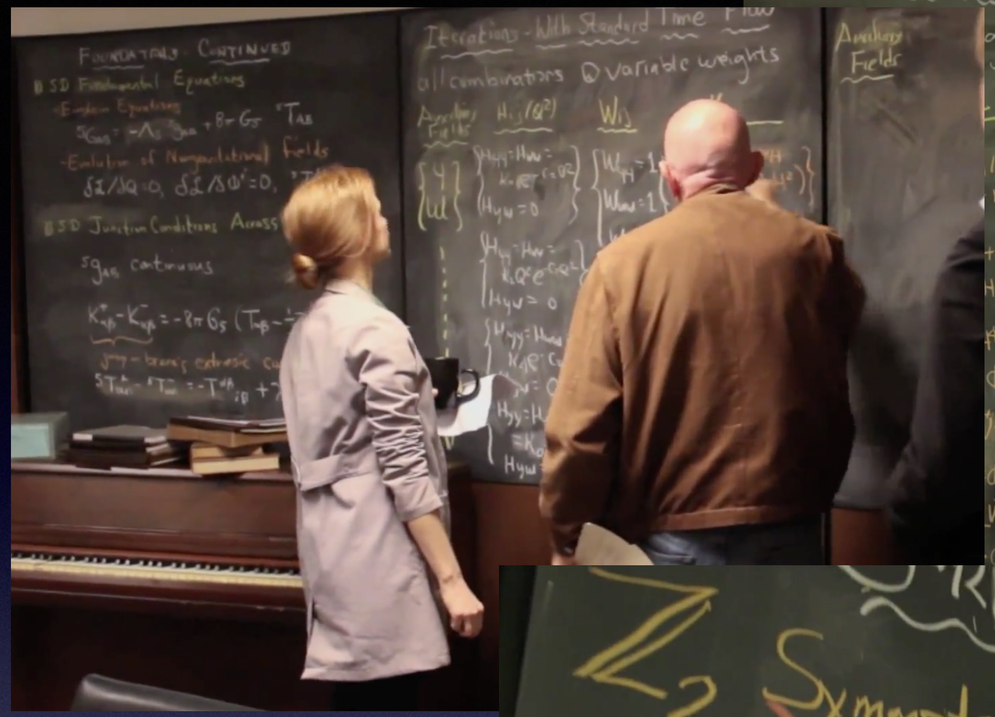




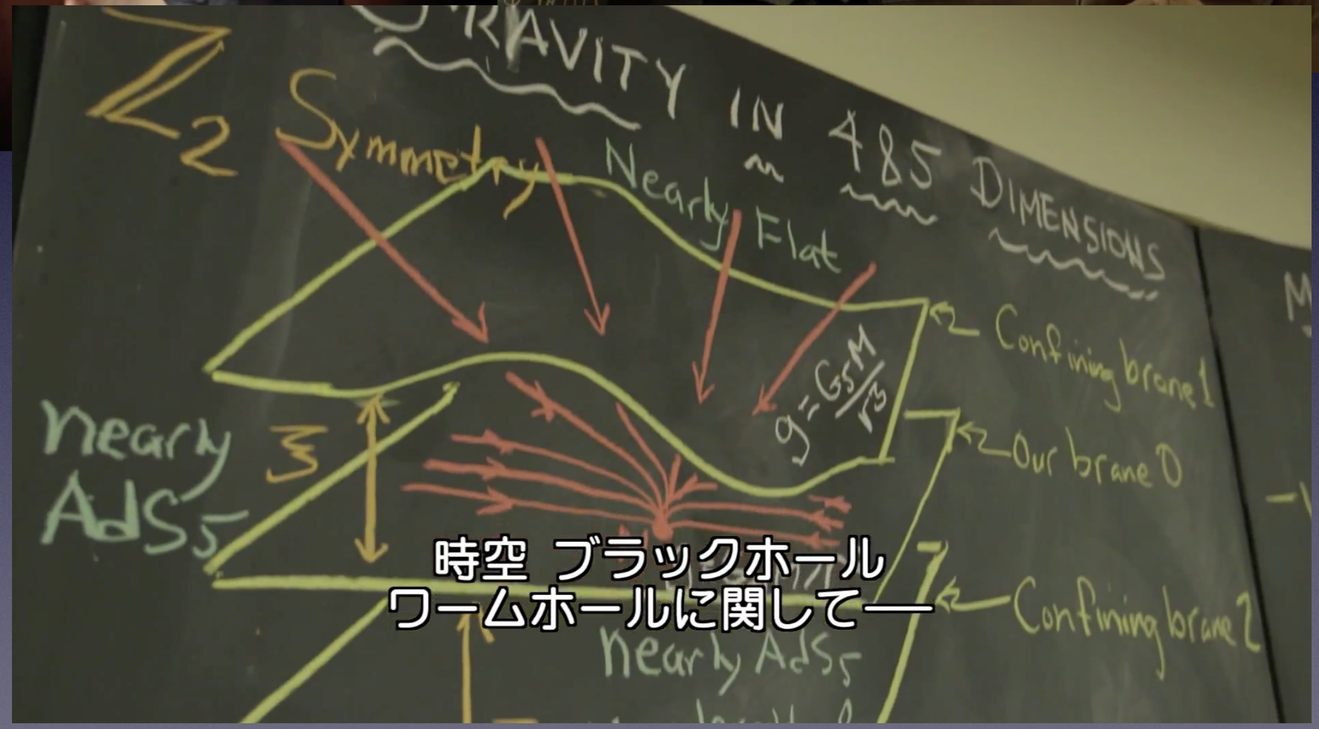
Interstellar (2014)

Executive Producer: Kip Thorne

https://www.youtube.com/watch?v=qZZ9jRan9eo

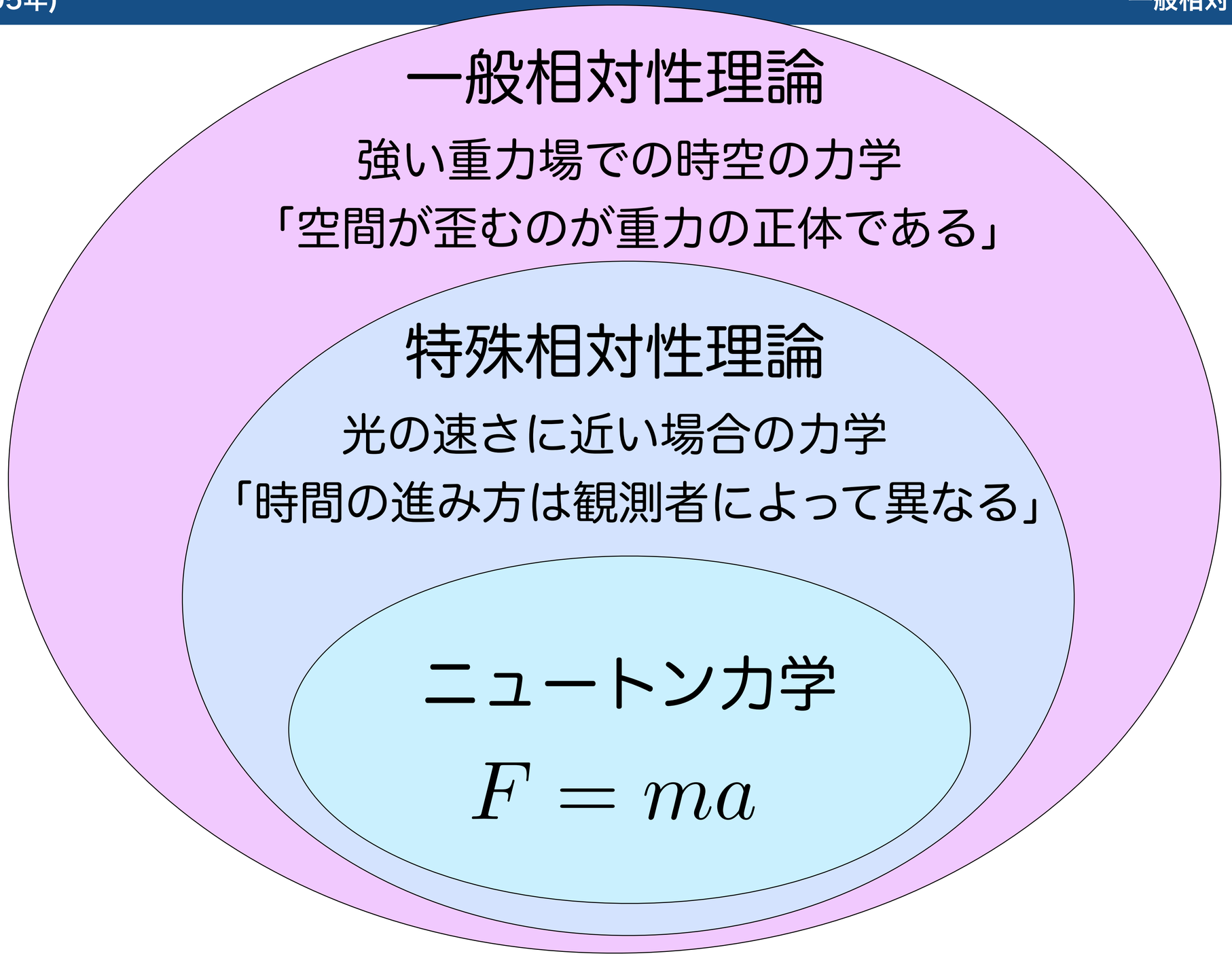






Interstellar (2014) **Executive Producer: Kip Thorne**

https://www.youtube.com/watch?v=qZZ9jRan9eo


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
$F = ma$

本日のミニッツペーパー記入項目

出席票を兼ねます.

【7-1】(本日の講義から)

核融合反応と核分裂反応, どちらも生じる理由は何か.

【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.

【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).

(1) なんでも吐き出すホワイトホールが存在する.
(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.
(3) パラレルワールドが存在する.
(4) 宇宙は何度もビッグバンを繰り返す.
(5) 宇宙は11次元時空として誕生した.
(6) ブラックホールは蒸発して消える.
(7) 情報は瞬間移動できる.

【7-4】通信欄. (感想・講義で取り上げて欲しい疑問・要望・連絡事項など、何かあれば)