

宇宙は何からできているのか？

全学教育科目「学問の面白さを知る」第3回

2023年4月28日

宇宙地球環境研究所・素粒子宇宙起源研究所・高等研究院

伊藤好孝

私の研究分野

銀河宇宙線

超新星残骸



3/4は陽子
1/4はヘリウム

一次宇宙線

太陽宇宙線

太陽

陽子・電子

エックス線

紫外線

大気

地表

パイ中間子

陽子

中性子

ガンマ線

ニュートリノ

二次宇宙線

陽子

中性子

ガンマ線

ニュートリノ

陽子

中性子

ガンマ線

宇宙からの放射線 [宇宙線]

http://www.ies.or.jp/ri_online/history/history002.html

宇宙地球環境研究所



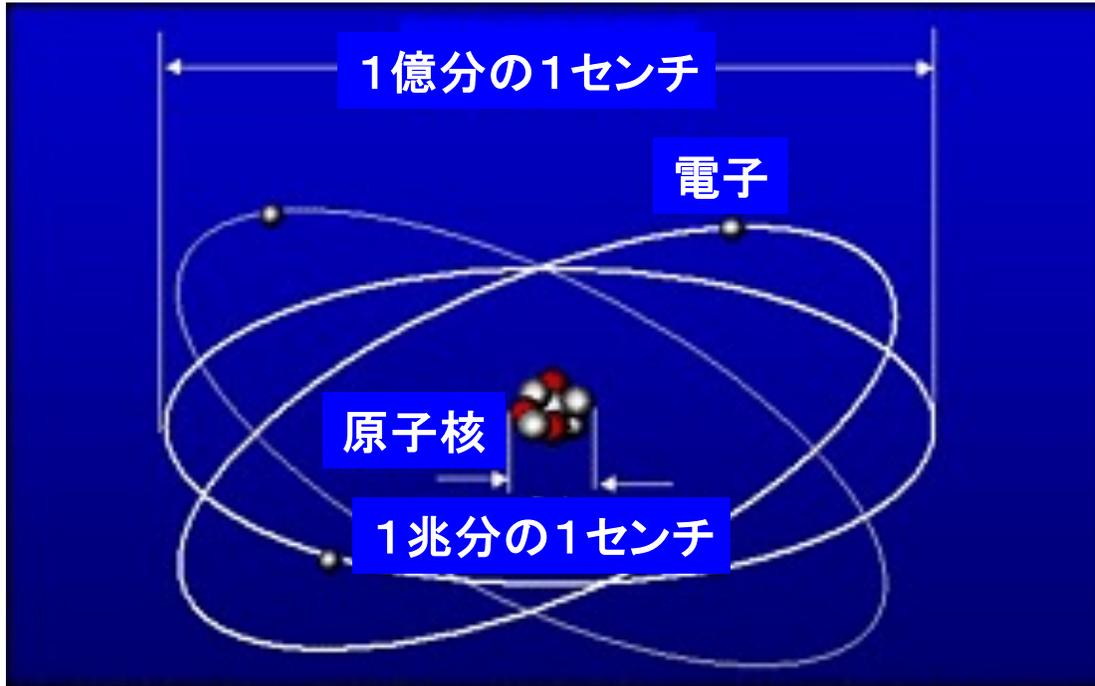
素粒子宇宙起源研究所

(KMI)



<https://www.nces.i.nagoya-u.ac.jp/NEP/about/maps.html>

宇宙線：素粒子と宇宙の両分野にまたがる学問

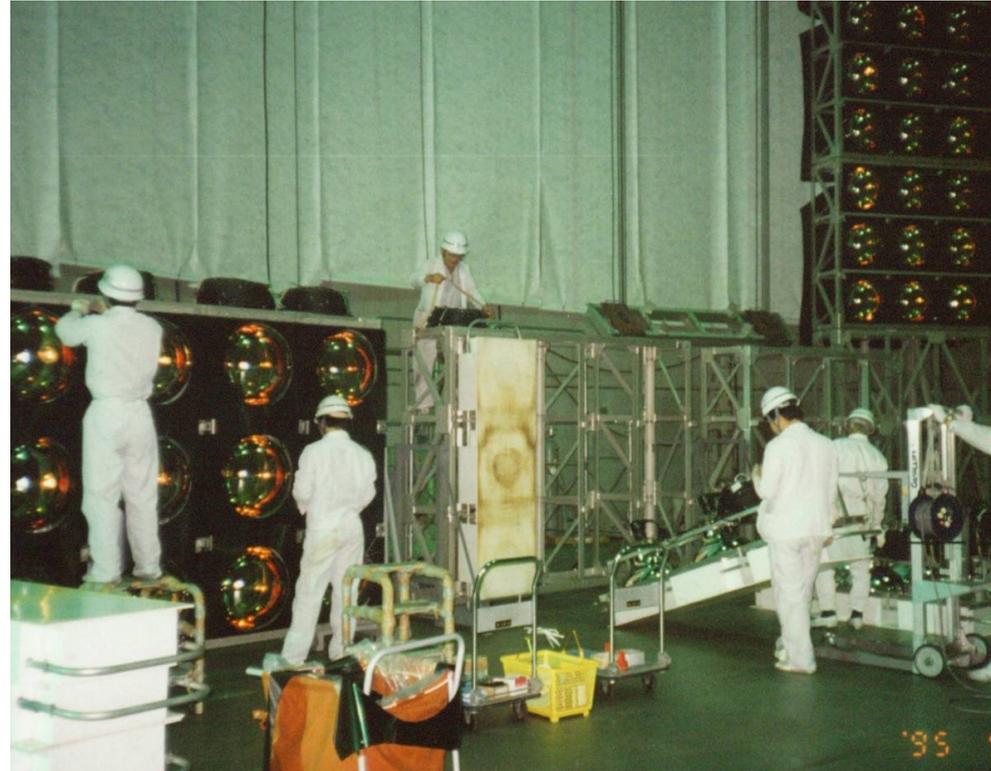


まったく違うサイズ！しかし...



最も小さい世界は最も大きい世界につながっている

自己紹介: スーパーカミオカンデを作っていた頃 (1995年)

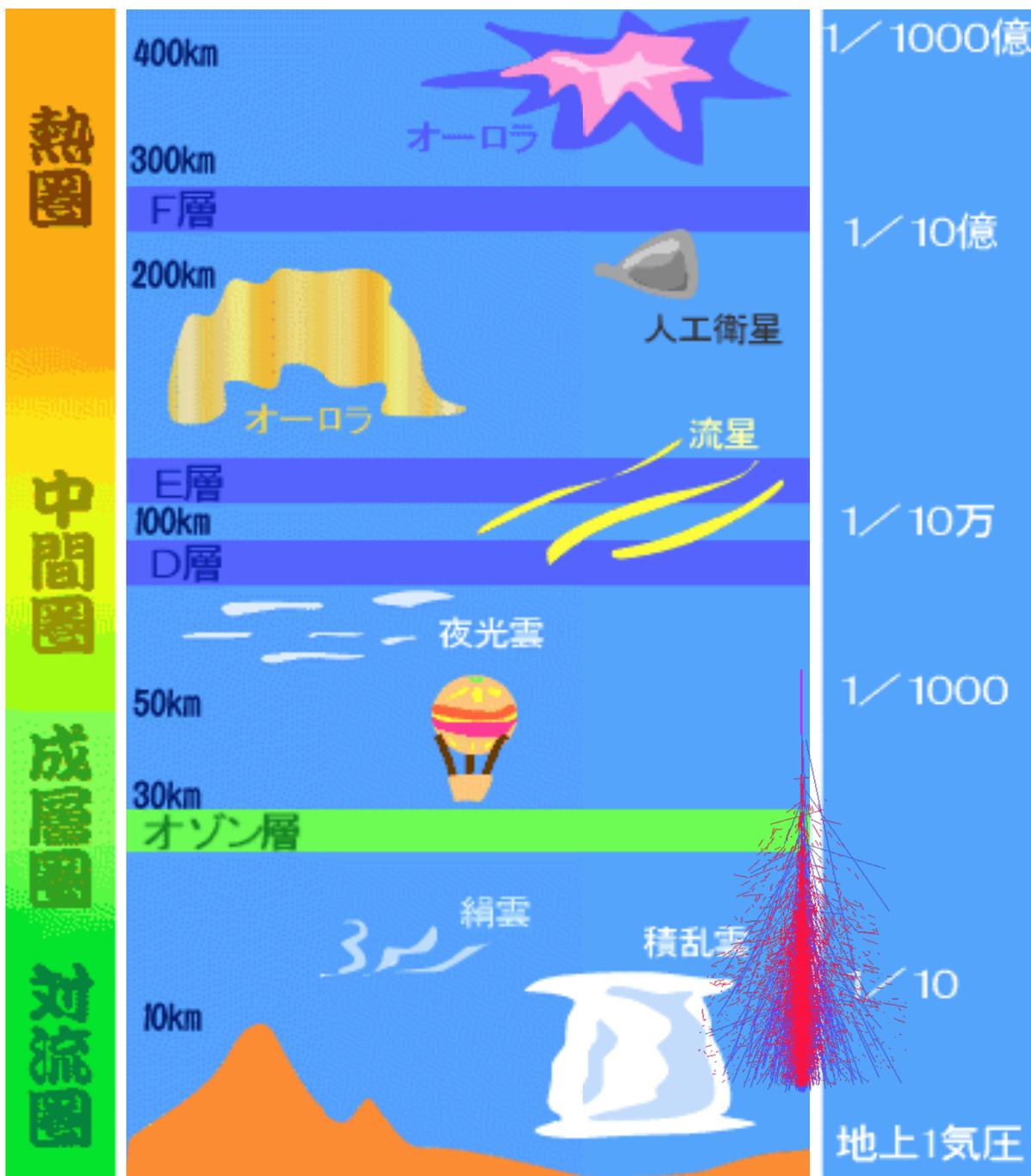


私 (伊藤) : 1995-2004年

東大宇宙線研神岡宇宙素粒子研究施設に在籍

梶田さんとスーパーカミオカンデ建設後、一緒に大気ニュートリノ振動の発見に立ち会う

その後、加速器長基線ニュートリノ振動実験、2004年から名大へ



地球のすぐ外側

大気圏

- 地球を覆う大気は高さ数百キロメートル上空まで続いている。
- 1気圧は1平方cmあたり約1キログラムの重さに相当。地上は10メートルの水の底にいるのと同じ。
- 宇宙線は大気中で反応し、数を増やしながら落ちてくる

宇宙線の発見



- 1911年、Hessは気球に乗って4000mまで上昇し、上に行くほど放射線が強くなることを発見した
- 1936年にノーベル賞を受賞
- 放射線は物質を電離（イオン化）する。



20世紀～放射能の発見

- 放射能

- ある種の原子核から「素粒子」が飛び出し別の原子核に変わってしまう現象（能力）

- 放射線

- その時飛び出してくる「素粒子」

- アルファ崩壊では
- ベータ崩壊では
- ガンマ崩壊では

ヘリウム原子核

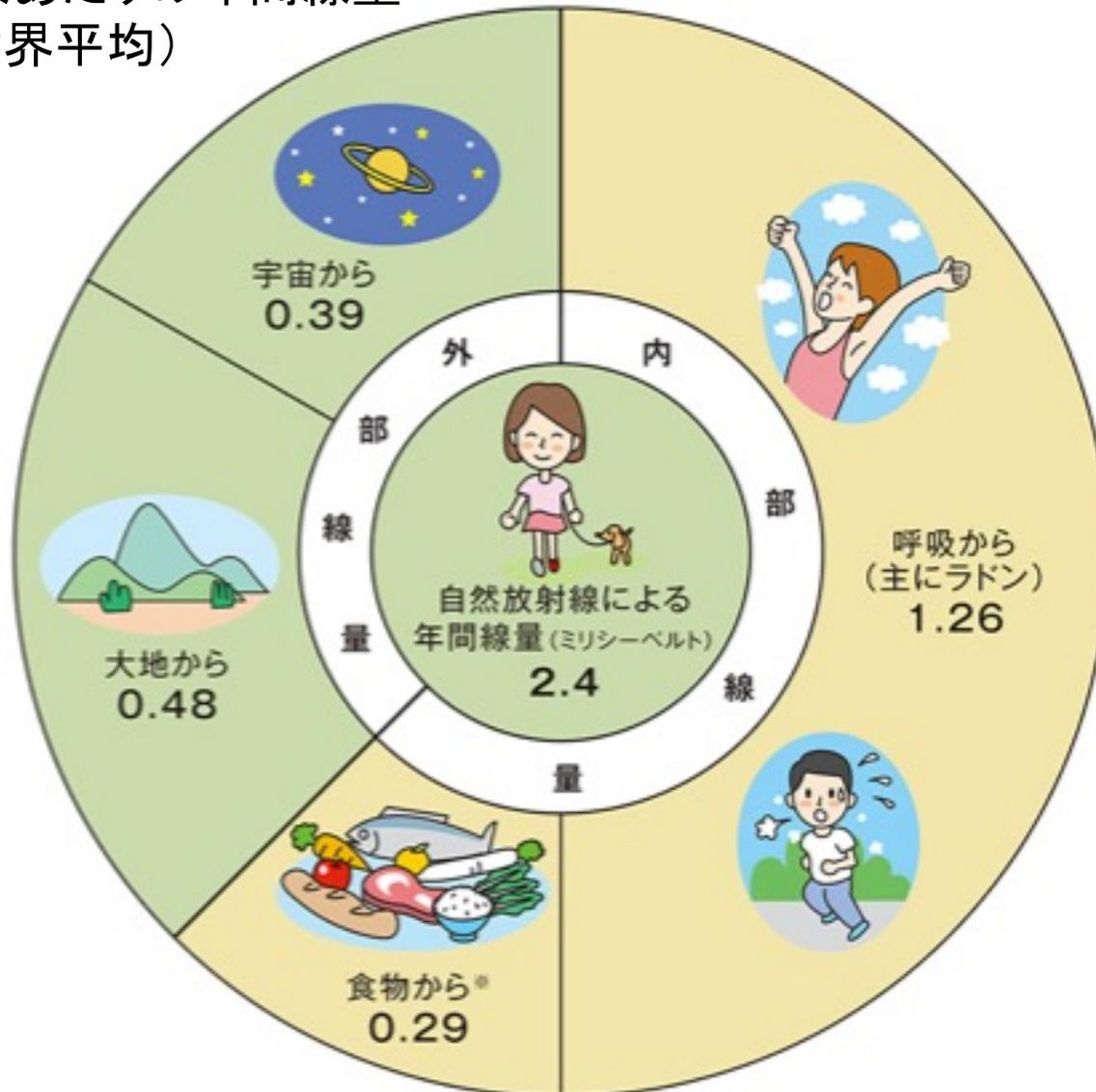
電子

ガンマ線

（光の一種）

環境放射線

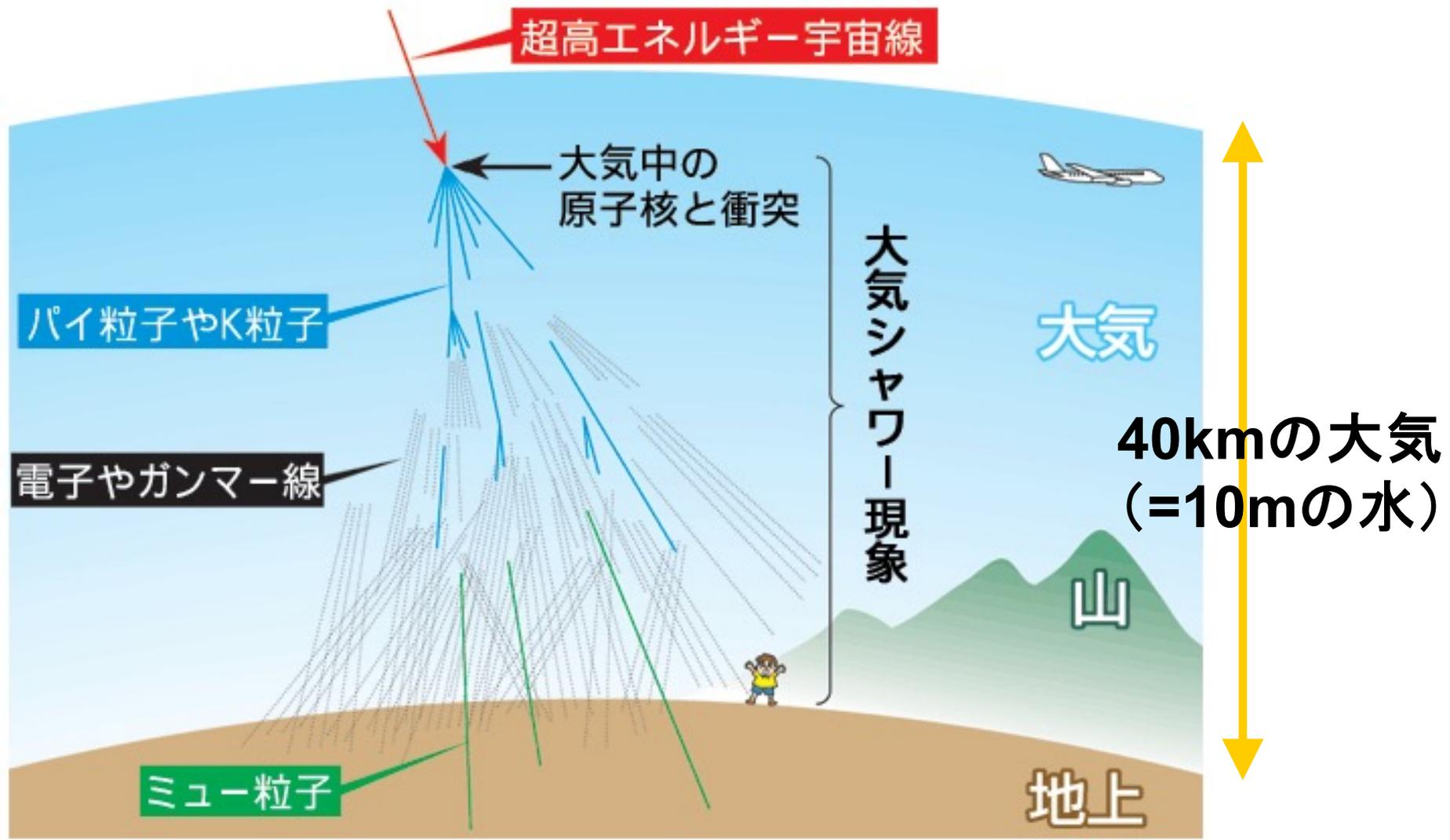
1人あたりの年間線量
(世界平均)



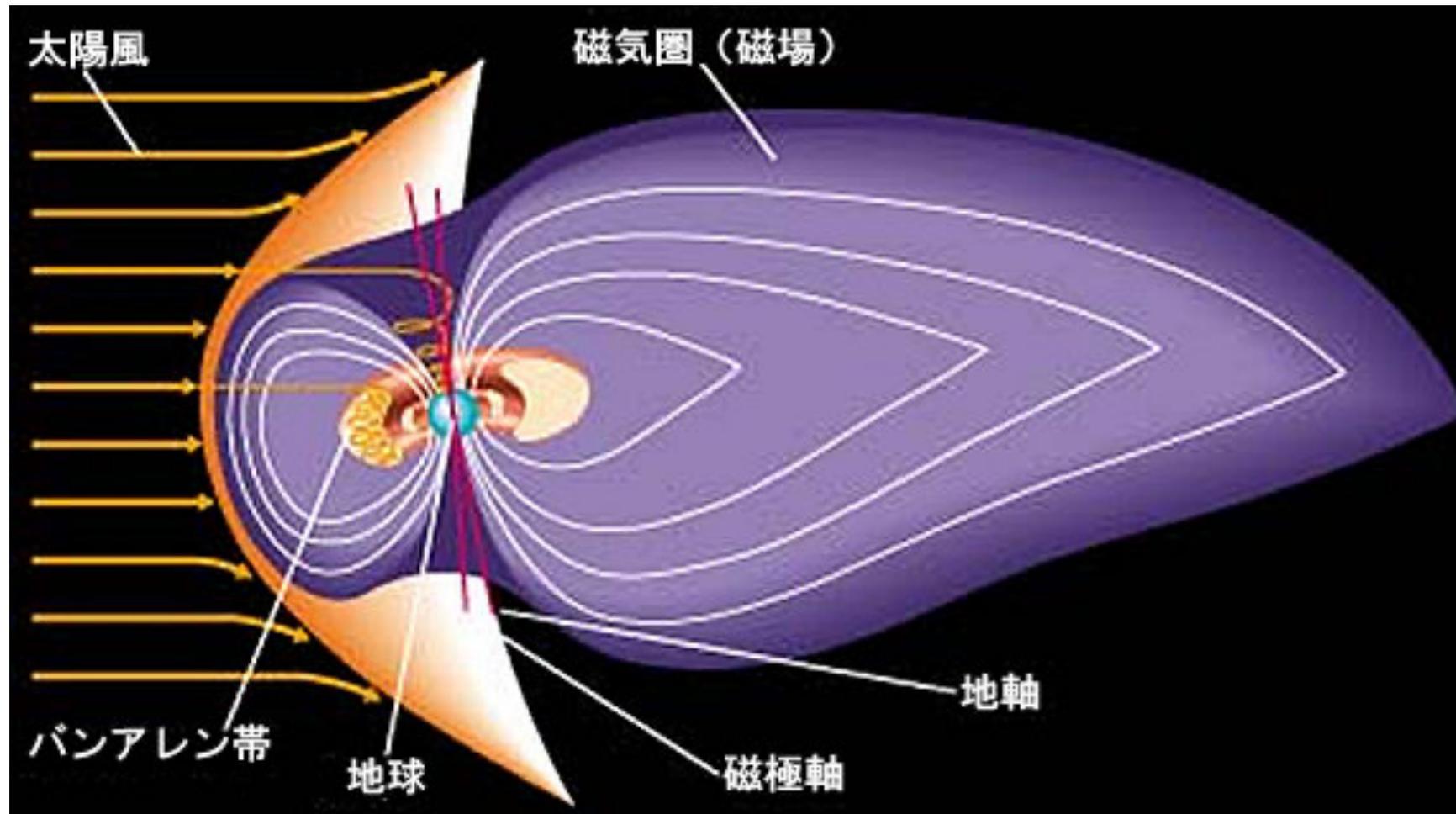
1シーベルト (1 Sv)

被爆量の単位。
放射線で1kgあたり
1Jのエネルギーの
被爆を受けること。

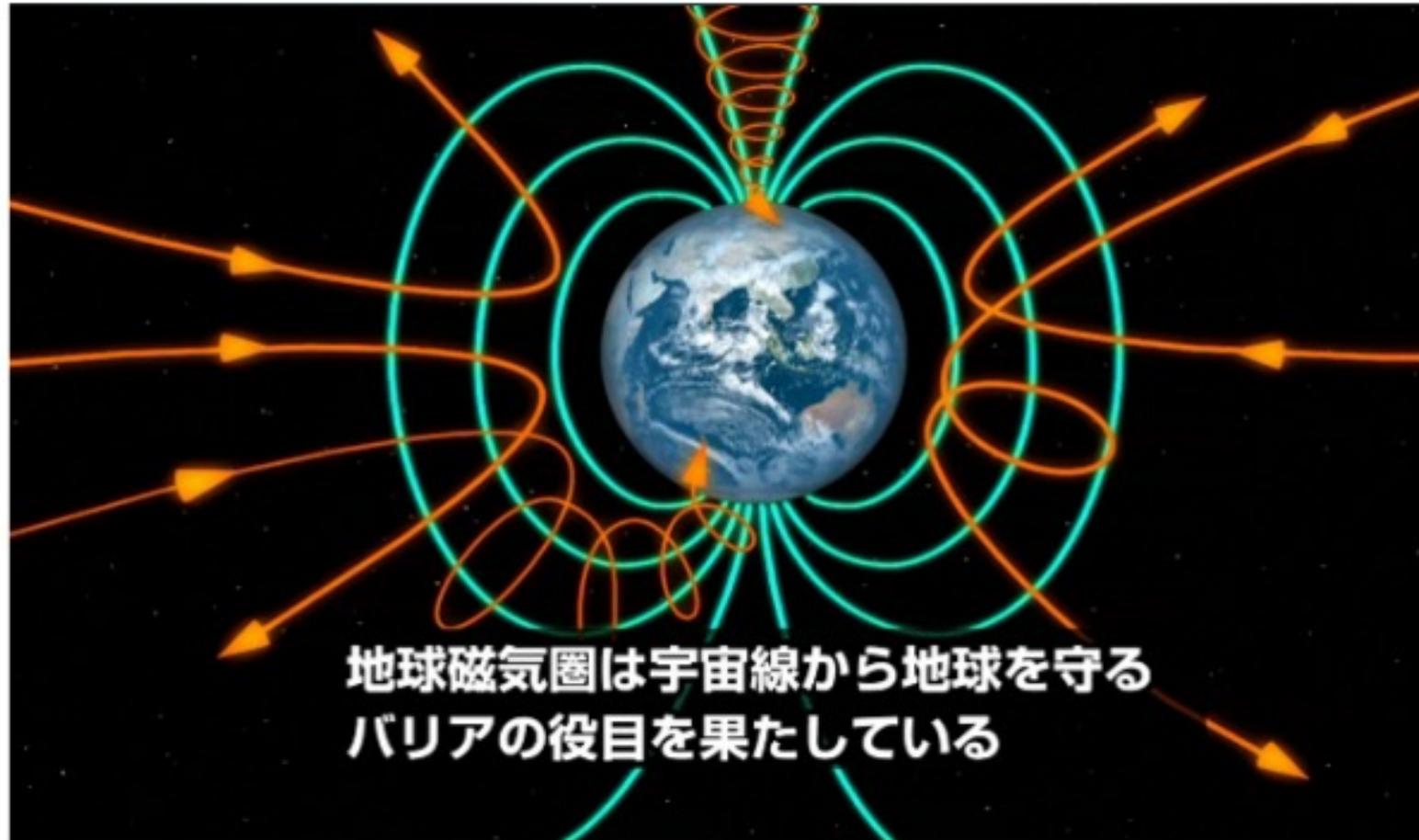
大気が宇宙線を吸収する



地球を取り巻く放射線と磁場

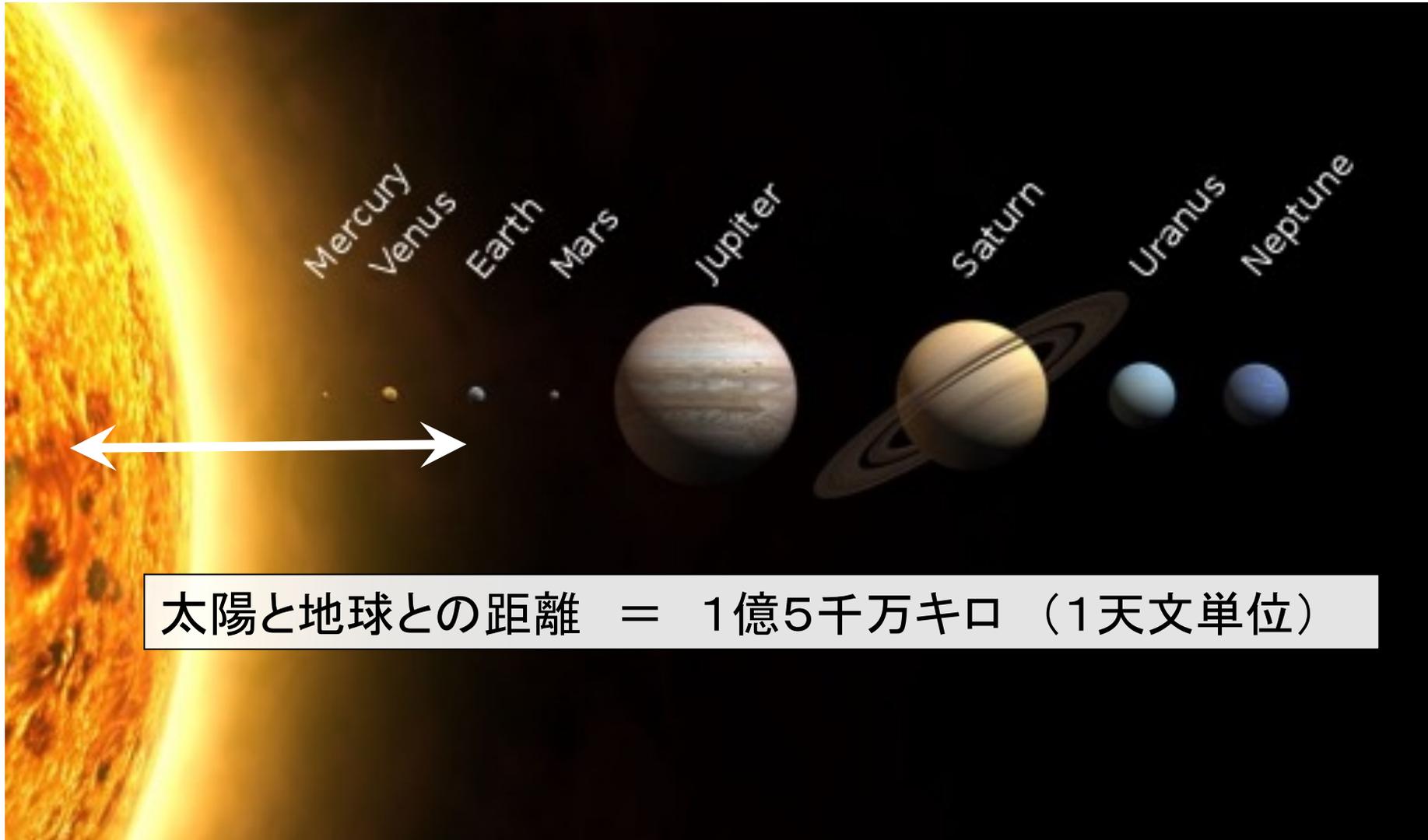


地磁気が宇宙線を弾き飛ばす



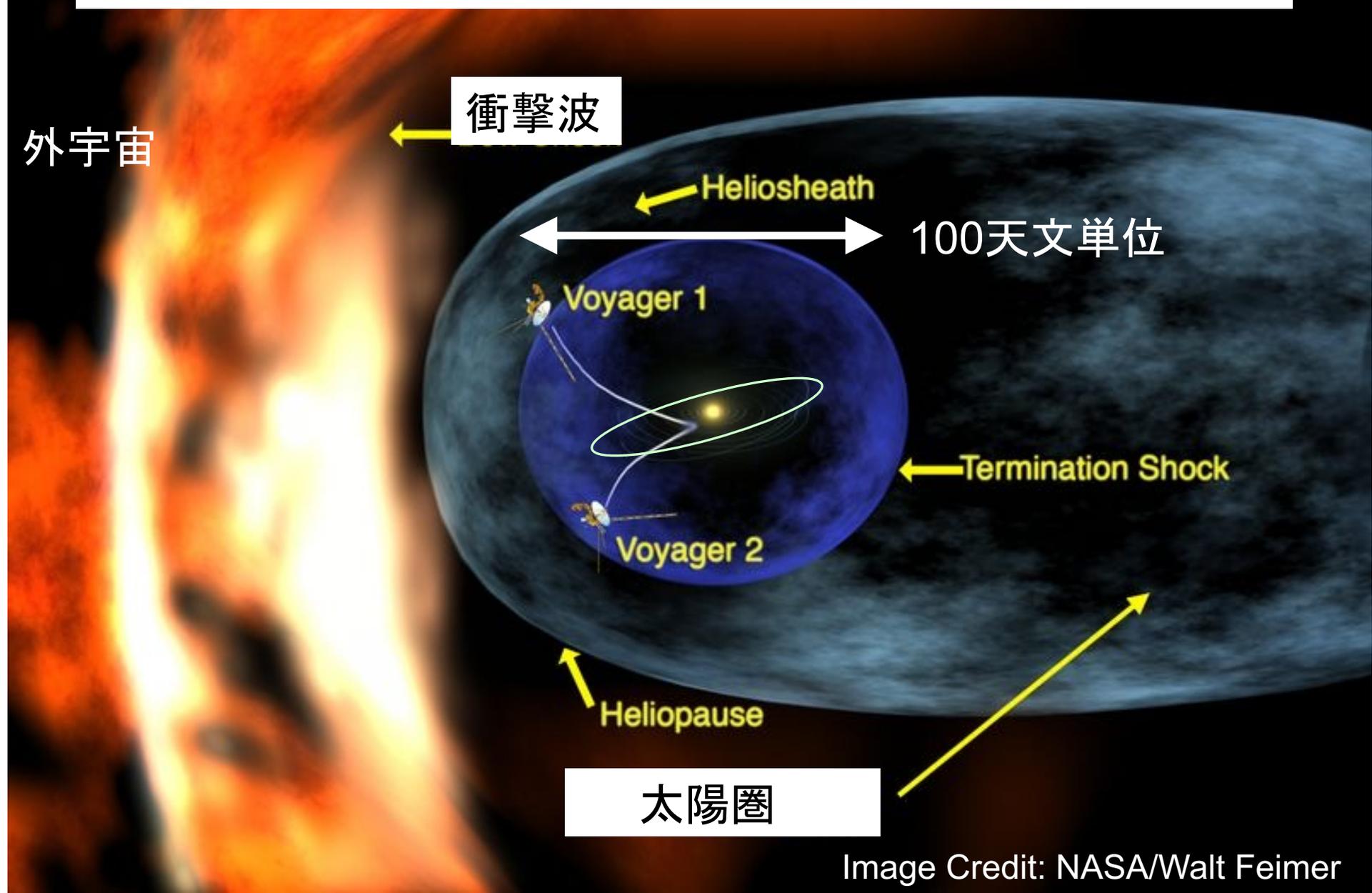
<http://swc.nict.go.jp/knowledge/magnetosphere.html>

太陽系



WP - Planets2008.jpg, CC 表示-継承 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=45708230>による

太陽圏 = 太陽系を覆う磁場の繭



太陽が生まれた星間ガス(超新星爆発の跡)

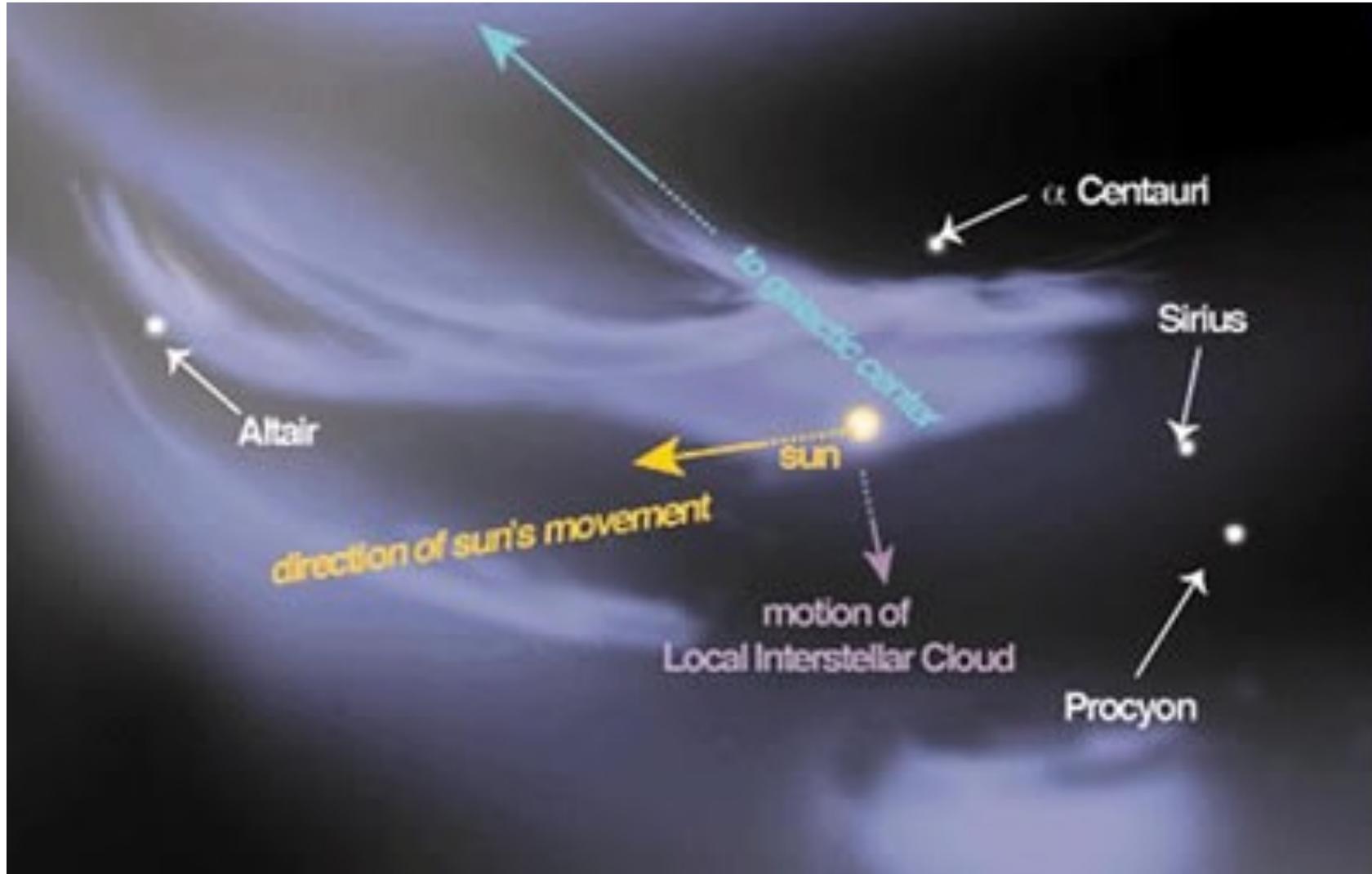
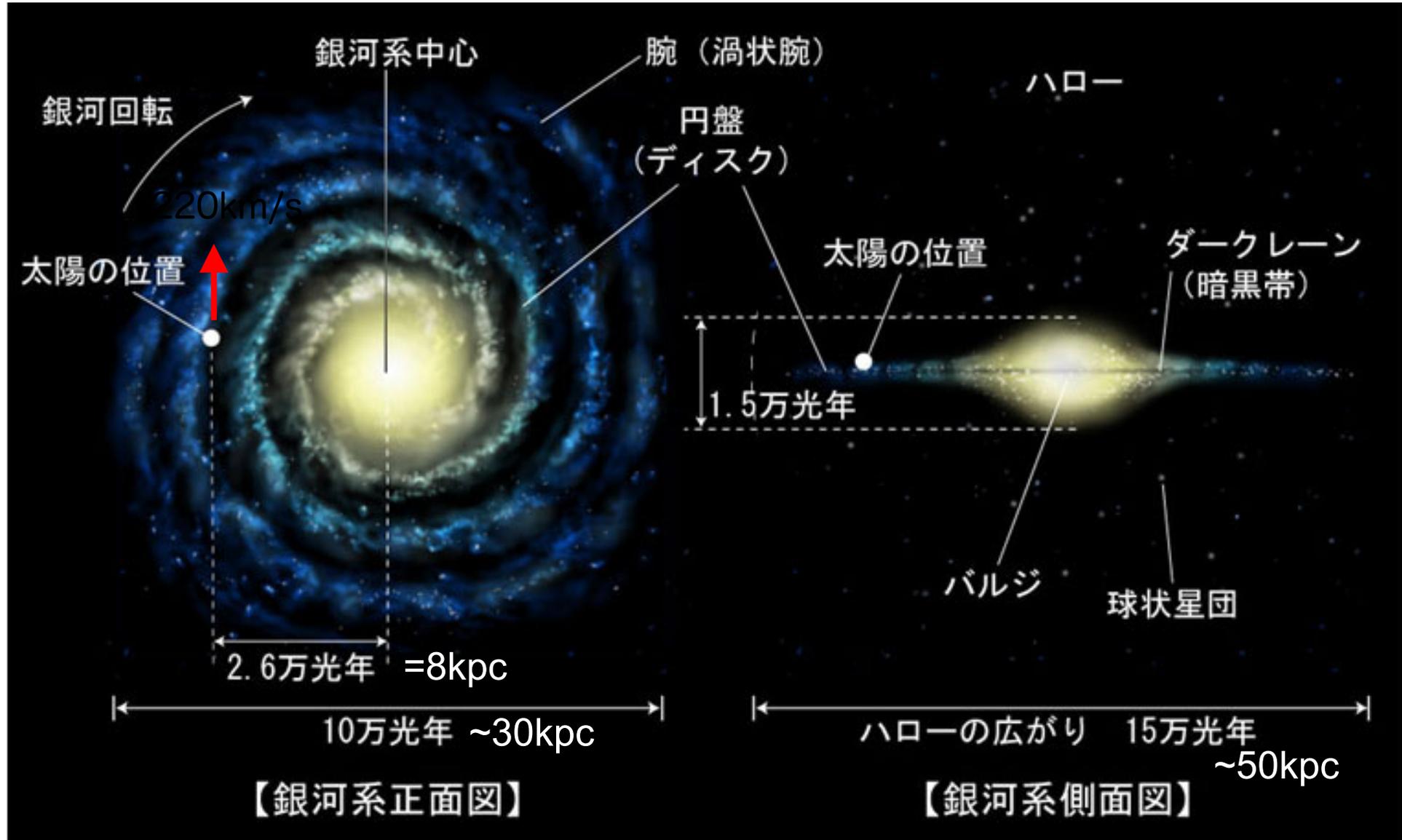


Illustration Credit & Copyright: Linda Huff ([American Scientist](#)), [Priscilla Frisch](#) ([U. Chicago](#))

銀河系の構造

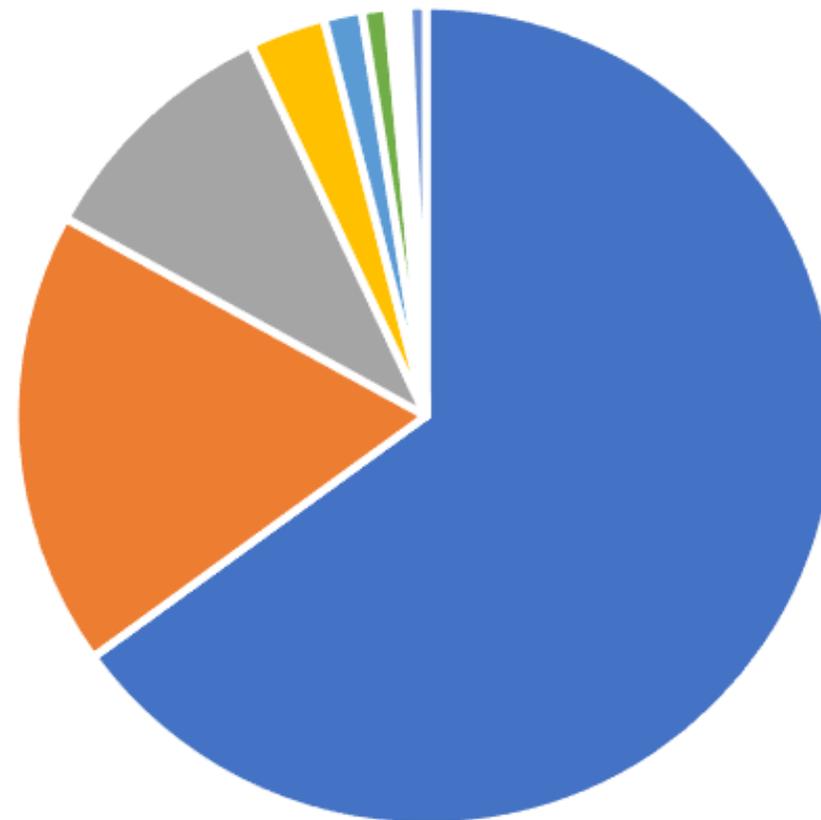


わたしたちを作っているもの

クイズ：人体を作っている元素ベスト10は？

我々を作っている元素

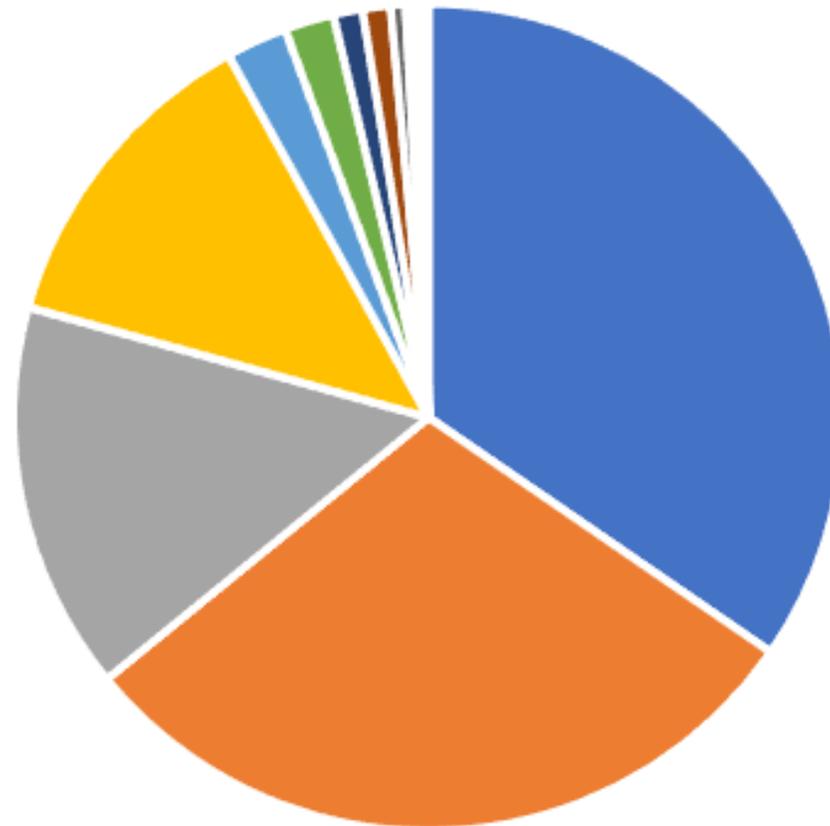
人体を作る元素（重量比%）



- 酸素
- 炭素
- 水素
- 窒素
- カルシウム
- リン
- 硫黄
- カリウム
- ナトリウム
- 塩素
- マグネシウム
- 鉄
- その他

地球を作っている元素

地球を作る元素 (重量%)



- 鉄
- ケイ素
- ニッケル
- カルシウム
- ナトリウム
- マンガン
- その他
- 酸素
- マグネシウム
- 硫黄
- アルミニウム
- クロム
- コバルト

元素周期律表

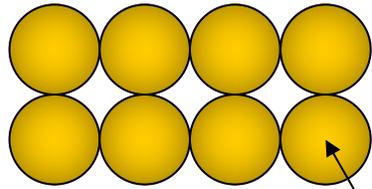
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	1 H 1.008	The Periodic Table of The Elements(2017) Edited by Chemistry Labo., Univ. of Kochi																2 He 4.003	
2	3 Li 6.941	4 Be 9.012	atomic number				metallic						5 B 10.81	6 C 12.01	7 N 14.01	8 O 16.00	9 F 19.00	10 Ne 20.18	
			Symbol				amphoteric												
			atomic weight				non-metallic												
3	11 Na 22.99	12 Mg 24.31					inert gas						13 Al 26.98	14 Si 28.09	15 P 30.97	16 S 32.07	17 Cl 35.45	18 Ar 39.95	
							unknown												
4	19 K 39.10	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.87	23 V 50.94	24 Cr 52.00	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.93	28 Ni 58.69	29 Cu 63.55	30 Zn 65.38	31 Ga 69.72	32 Ge 72.63	33 As 74.92	34 Se 78.97	35 Br 79.90	36 Kr 83.80	
5	37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.91	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.95	43 Tc [99]	44 Ru 101.1	45 Rh 102.9	46 Pd 106.4	47 Ag 107.9	48 Cd 112.4	49 In 114.8	50 Sn 118.7	51 Sb 121.8	52 Te 127.6	53 I 126.9	54 Xe 131.3	
6	55 Cs 132.9	56 Ba 137.3	L	72 Hf 178.5	73 Ta 180.9	74 W 183.8	75 Re 186.2	76 Os 190.2	77 Ir 192.2	78 Pt 195.1	79 Au 197.0	80 Hg 200.6	81 Tl 204.4	82 Pb 207.2	83 Bi 209.0	84 Po [210]	85 At [210]	86 Rn [222]	
7	87 Fr [223]	88 Ra [226]	A	104 Rf [267]	105 Db [268]	106 Sg [271]	107 Bh [272]	108 Hs [277]	109 Mt [276]	110 Ds [281]	111 Rg [280]	112 Cn [285]	113 Nh [284]	114 Fl [289]	115 Mc [288]	116 Lv [293]	117 Ts [293]	118 Og [294]	
			L	57 La 138.9	58 Ce 140.1	59 Pr 140.9	60 Nd 144.2	61 Pm [145]	62 Sm 150.4	63 Eu 152.0	64 Gd 157.3	65 Tb 158.9	66 Dy 162.5	67 Ho 164.9	68 Er 167.3	69 Tm 168.9	70 Yb 173.1	71 Lu 175.0	
			A	89 Ac [227]	90 Th 232.0	91 Pa 231.0	92 U 238.0	93 Np [237]	94 Pu [239]	95 Am [243]	96 Cm [247]	97 Bk [247]	98 Cf [252]	99 Es [252]	100 Fm [257]	101 Md [258]	102 No [259]	103 Lr [262]	

物質をばらばらにしていくと

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/43/Toi_250kg_gold_bar.jpg



拡大すると



金原子

最小の単位 = 素粒子



クォーク

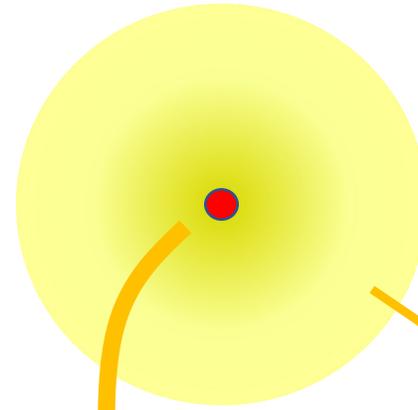
q

電子

e^-

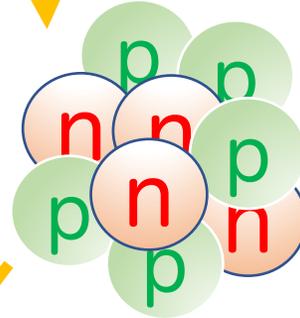
10^{-18} m以下

金の原子



10^{-10} m

金の原子核



10^{-14} m

陽子と
中性子

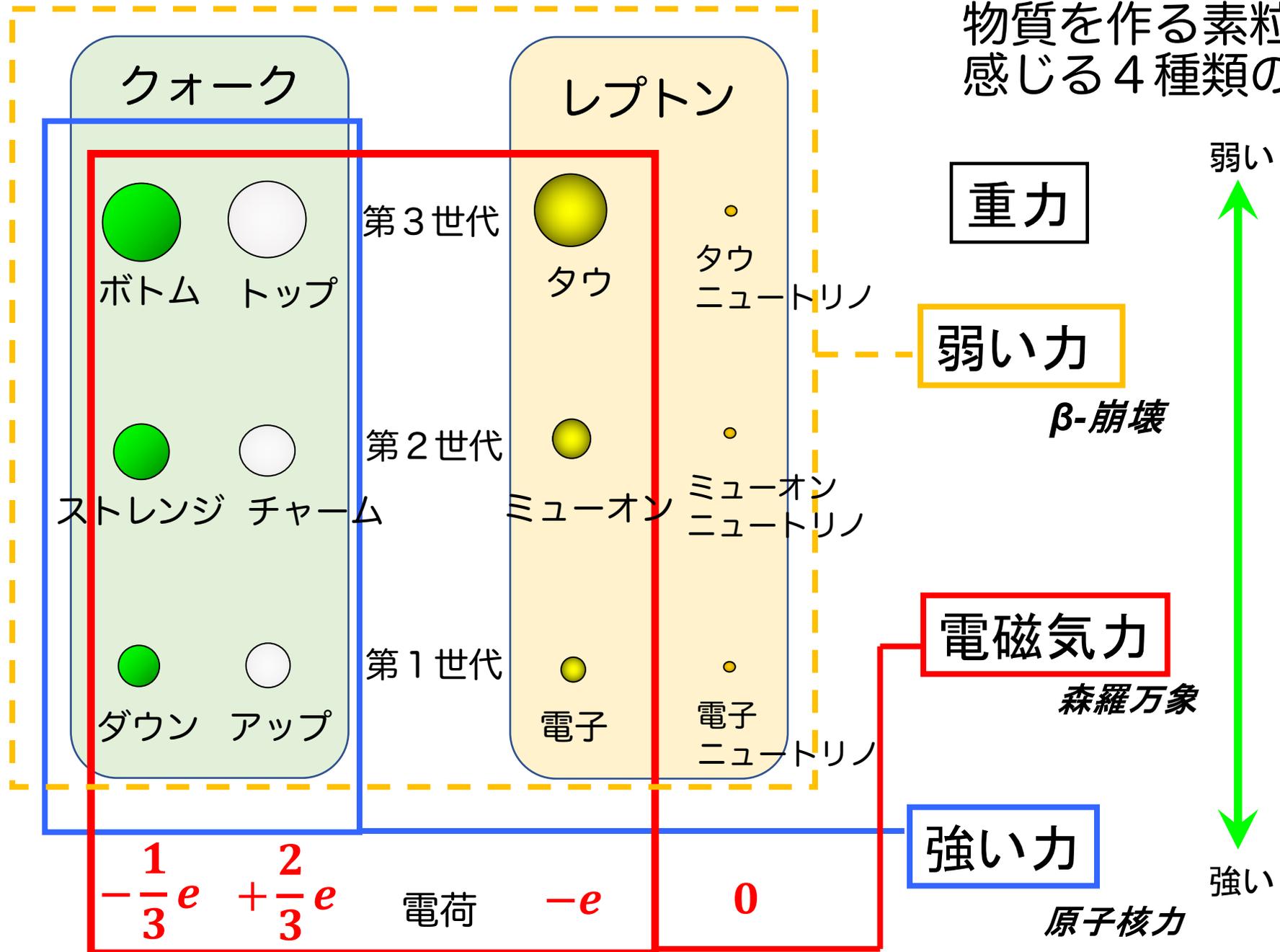


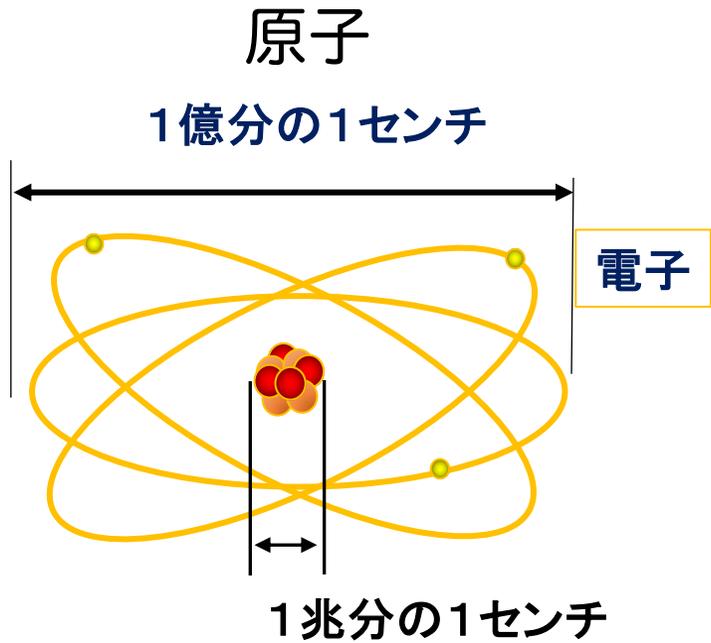
10^{-15} m

q

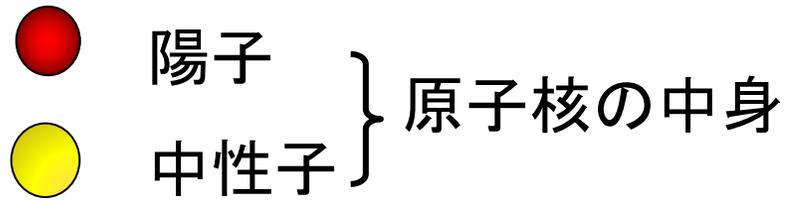
e^-

物質を作る素粒子と 感じる4種類の力

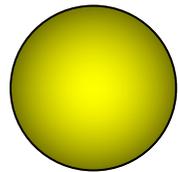




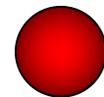
中性子とニュートリノ



ベータ崩壊



中性子



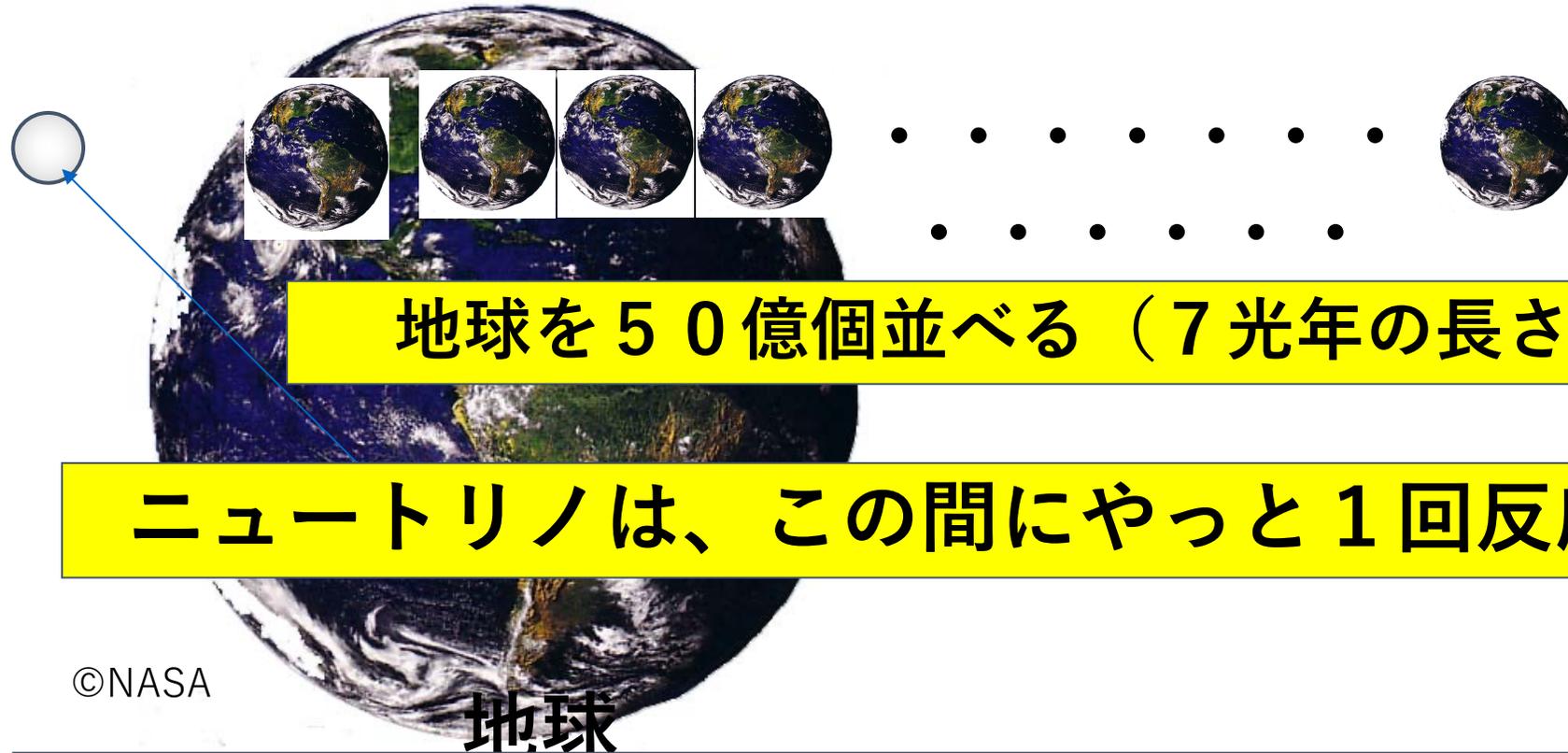
ニュートリノ

- 陽子の相棒
- 電荷を持っていない
- 電荷以外陽子とほぼ同じ
- 寿命をもつ
- 約15分で陽子、電子、ニュートリノ²³崩壊

電子の相棒

- 電荷を持っていない
 - ずっと軽い
 - なかなか衝突しない
- なぜか3種類ある**

ニュートリノはなかなかぶつからない



地球を50億個並べる（7光年の長さ）

ニュートリノは、この間にやっと1回反応する程度

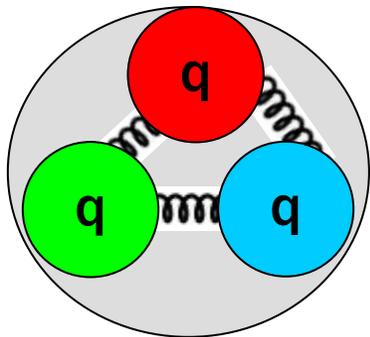
©NASA

地球

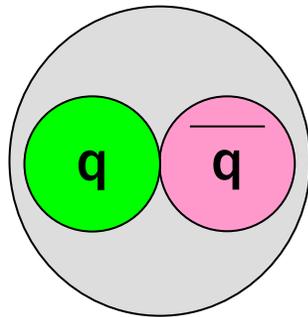
しかし、たくさんニュートリノがあれば、小さな物体でもどれかは希に反応する。

陽子の構造（クォーク模型）

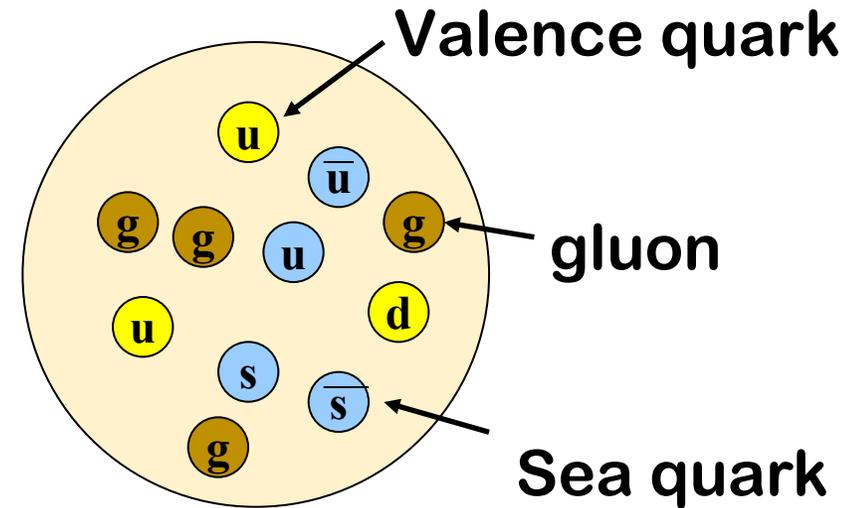
- 陽子（バリオン：重粒子）は3つの電荷芯（3個のクォーク）
- 陽子はuud, 中性子はuddの組み合わせ（u:アップ、d:ダウン）
- パイ中間子（メソン：中間子）は2つ（クォークと反クォーク）
- クォークは色電荷（赤、青、緑）を持ち、運動量の1/3を担う
- 白色だけがエネルギーが低くなる（クォーク閉じ込め）
- 色電荷を運ぶ粒子：グルーオン（糊粒子）



Baryon
(陽子、中性子など)



Meson
(パイ中間子など)



超高エネルギーでは、陽子の中にはクォーク・反クォーク対が充満

素粒子の“重さ”

■水素原子

- アボガドロ数 (6×10^{23}) 個集まると1gになる
- 大部分は陽子の重さ

■電子の重さ

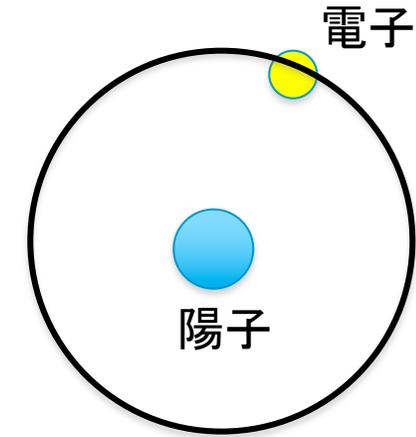
- 陽子の2000分の1
- 比電荷の測定と電荷素量の測定

■ニュートリノは電子の50万分の1よりさらに軽い

- 軽すぎて測定不能だった。

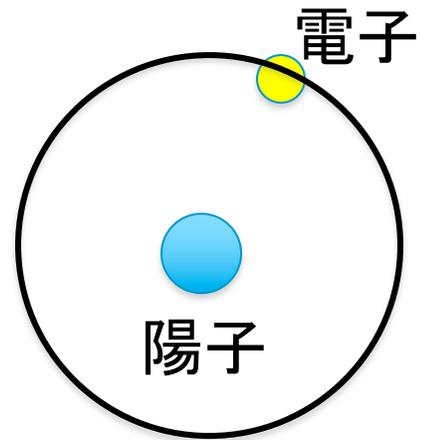
■素粒子の世界では重さの単位は eV/c^2

- エネルギーを光速の2乗で割ると重さの次元になる ($E = mc^2$)

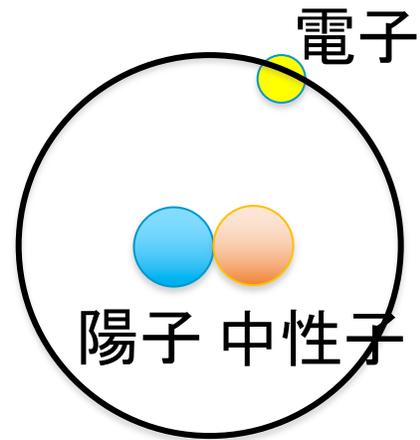


水素原子

元素と同位体



水素原子(H)



重水素原子 (D)

重水

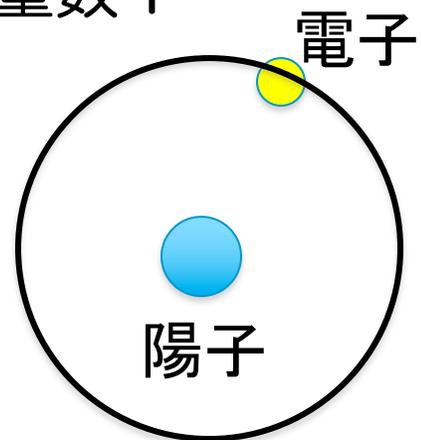
(軽) 水



@Nobel Museum

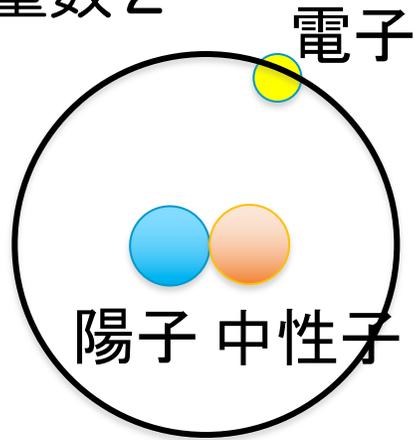
元素と同位体

原子番号 1
質量数 1



水素原子(H)

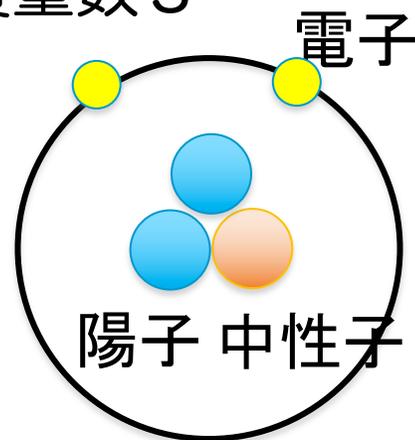
原子番号 1
質量数 2



重水素原子 (D)

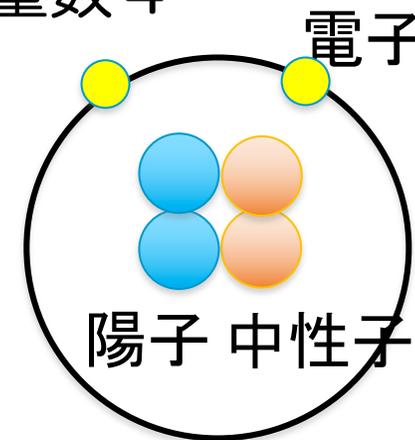
水素同位体

原子番号 2
質量数 3



ヘリウム3原子
(³He)

原子番号 2
質量数 4



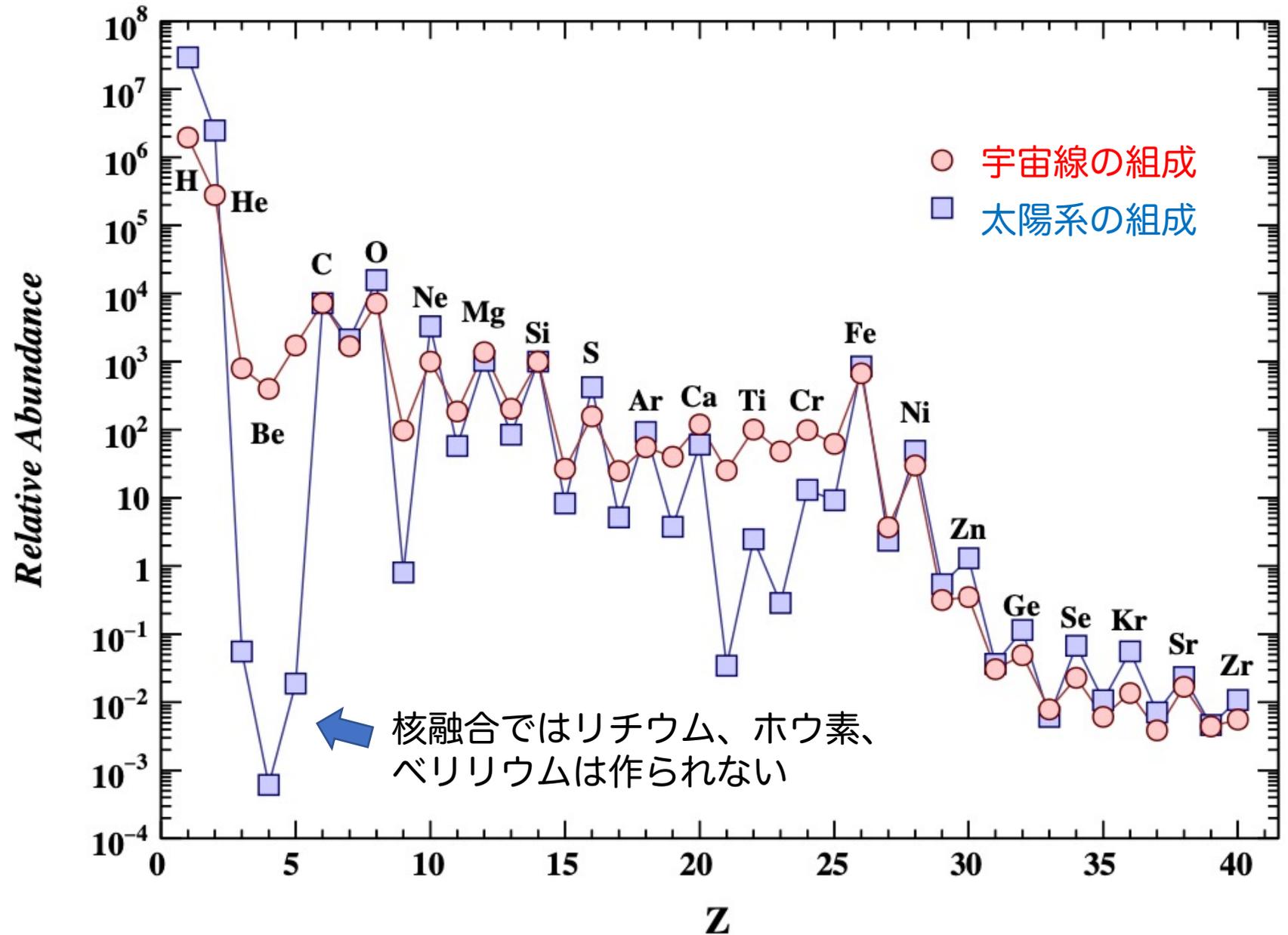
ヘリウム4原子
(⁴He)

ヘリウム同位体

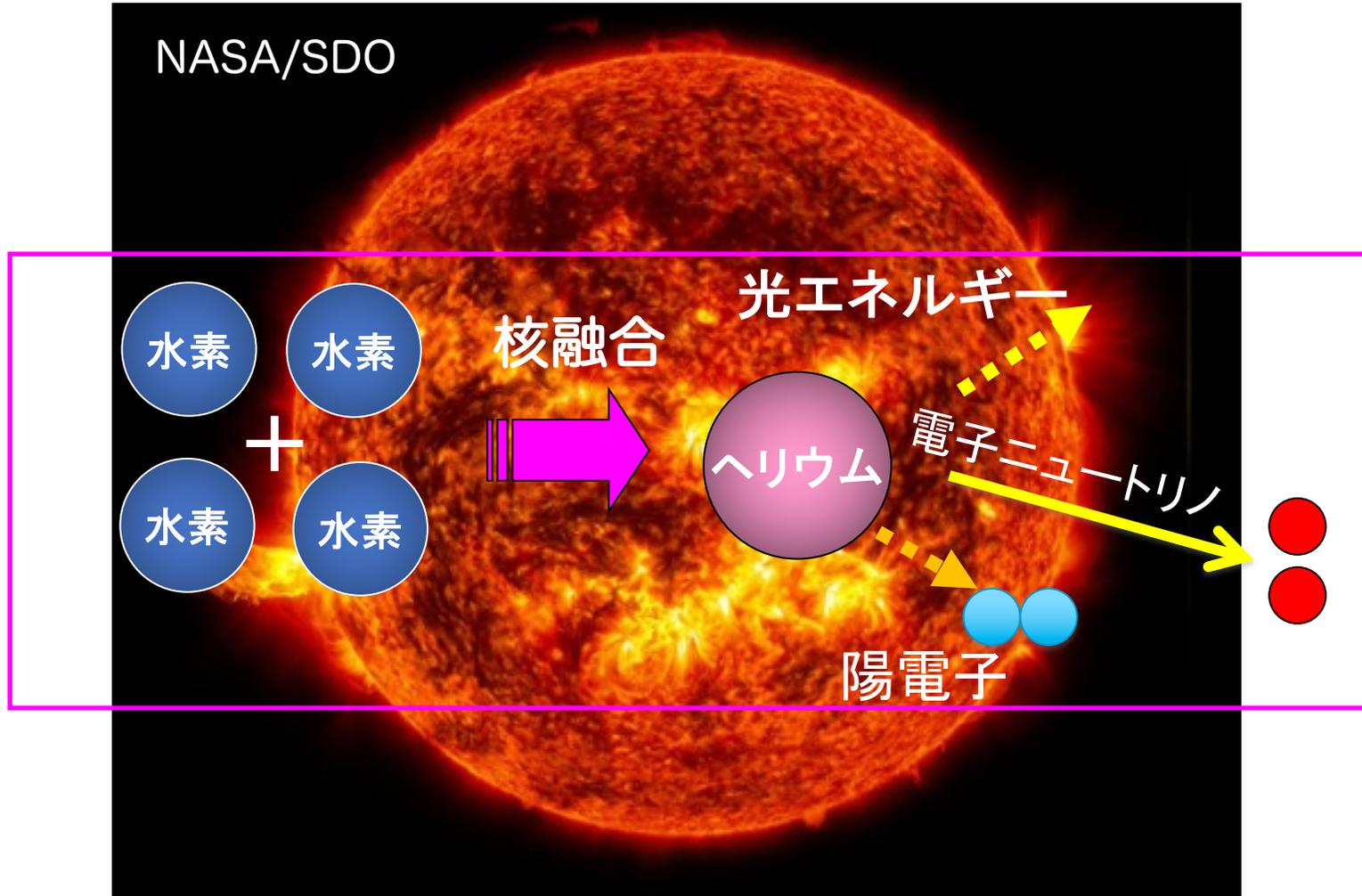
宇宙の 元素組成

- 太陽系と宇宙線の元素組成はよく似ている。
- 宇宙のどこでも元素組成はほぼ同じとわかる
- 宇宙の大部分は水素とヘリウム

Particle Data Group (pdg.lbl.gov) の図を改変



太陽のエネルギー源：水素の核融合



John Bahcal
ジョン・バコール

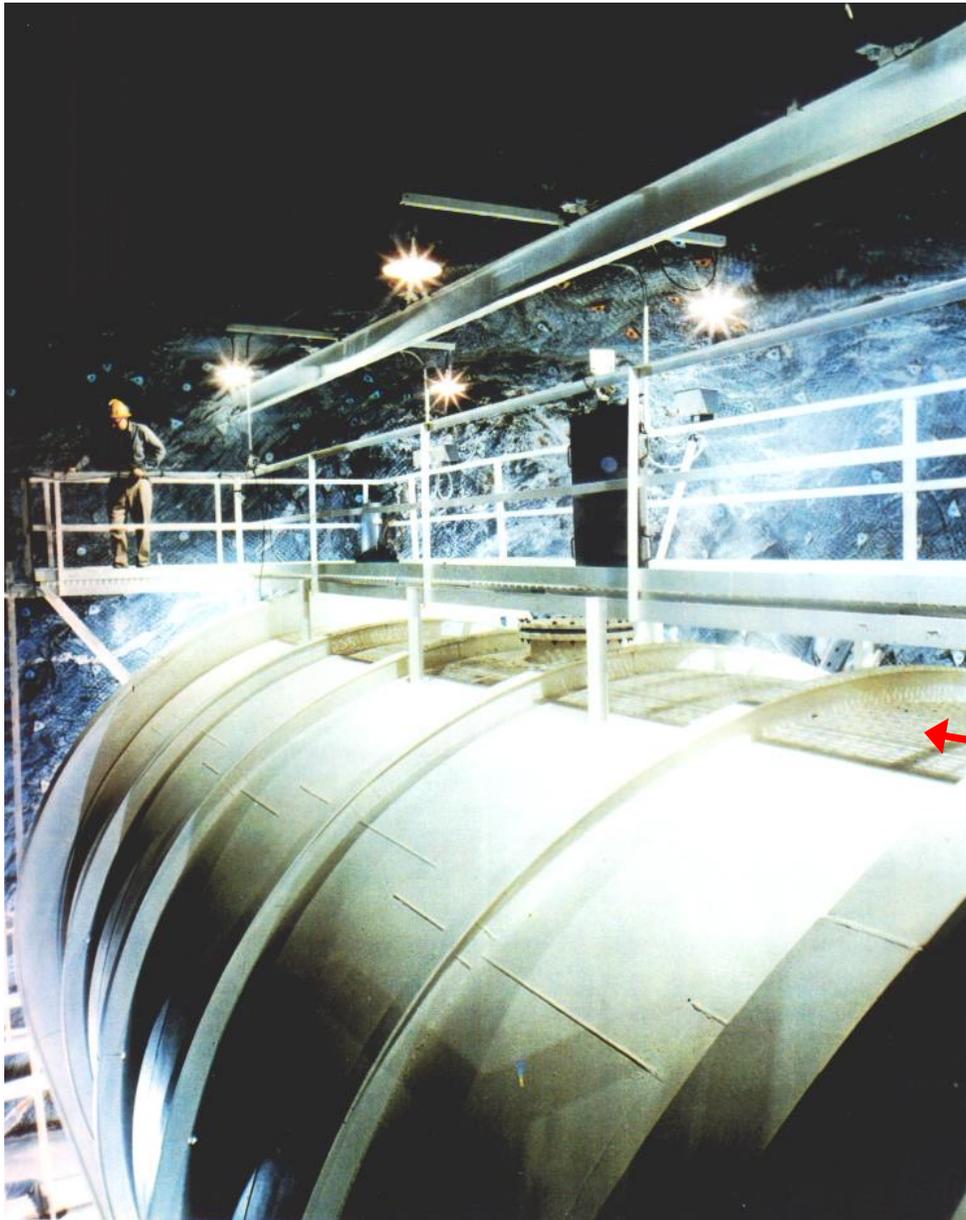


太陽核融合での
ニュートリノ生成
モデルを計算

John N. Bahcall. (2023, April 12).
In Wikipedia.
https://en.wikipedia.org/wiki/John_N._Bahcall

太陽からのニュートリノ：核融合の証拠
~660億 個/秒/cm²

世界初の太陽ニュートリノ観測(1970～)



デービスらによるHomestake実験

615トンの四塩化炭素を入れたタンクの中で、ニュートリノと塩素の反応により生まれるアルゴン原子の数を数えた。



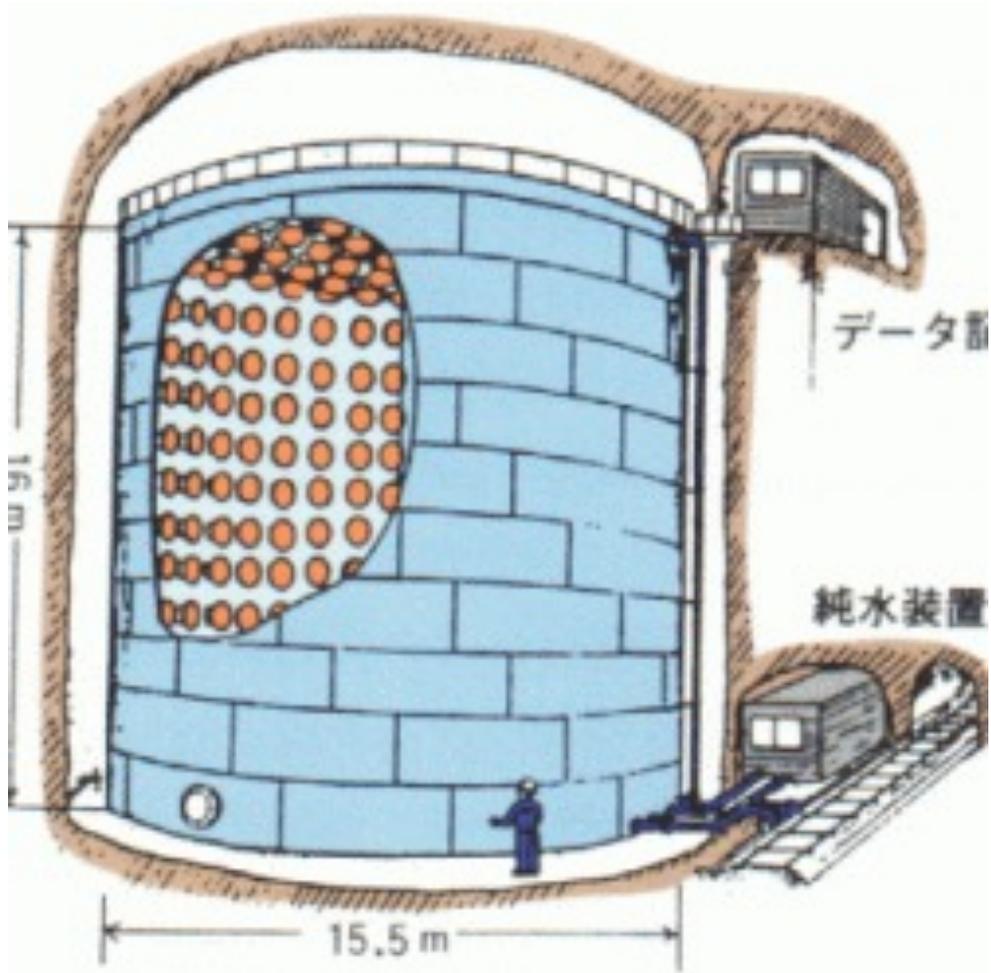
デービス博士は小柴さんと
2002年ノーベル賞同時受賞

生まれたアルゴン原子
の数は、2日に1個。

予想値の約1/3。

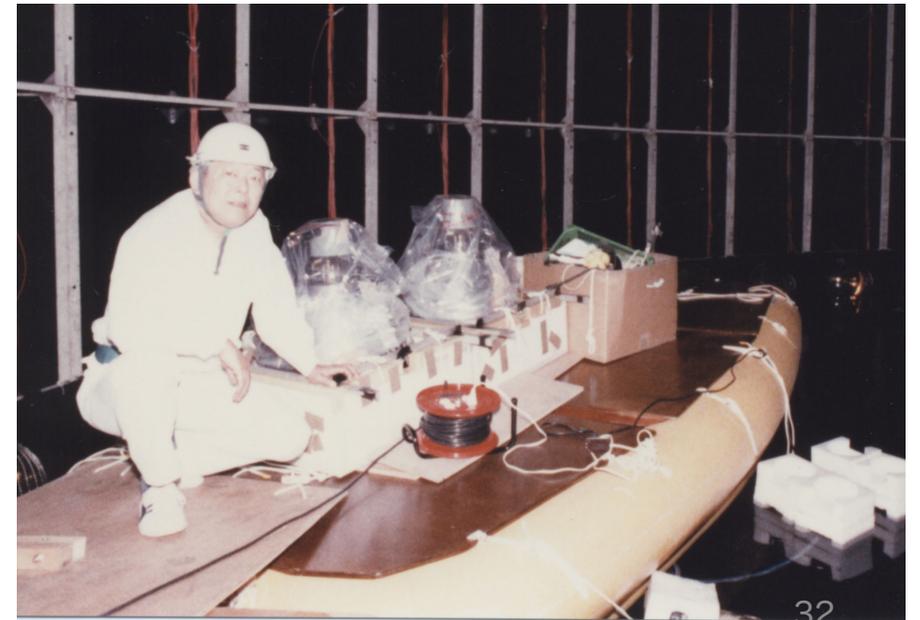
ニュートリノ振動の
最初のヒント

カミオカンデ実験（1983－1996年）



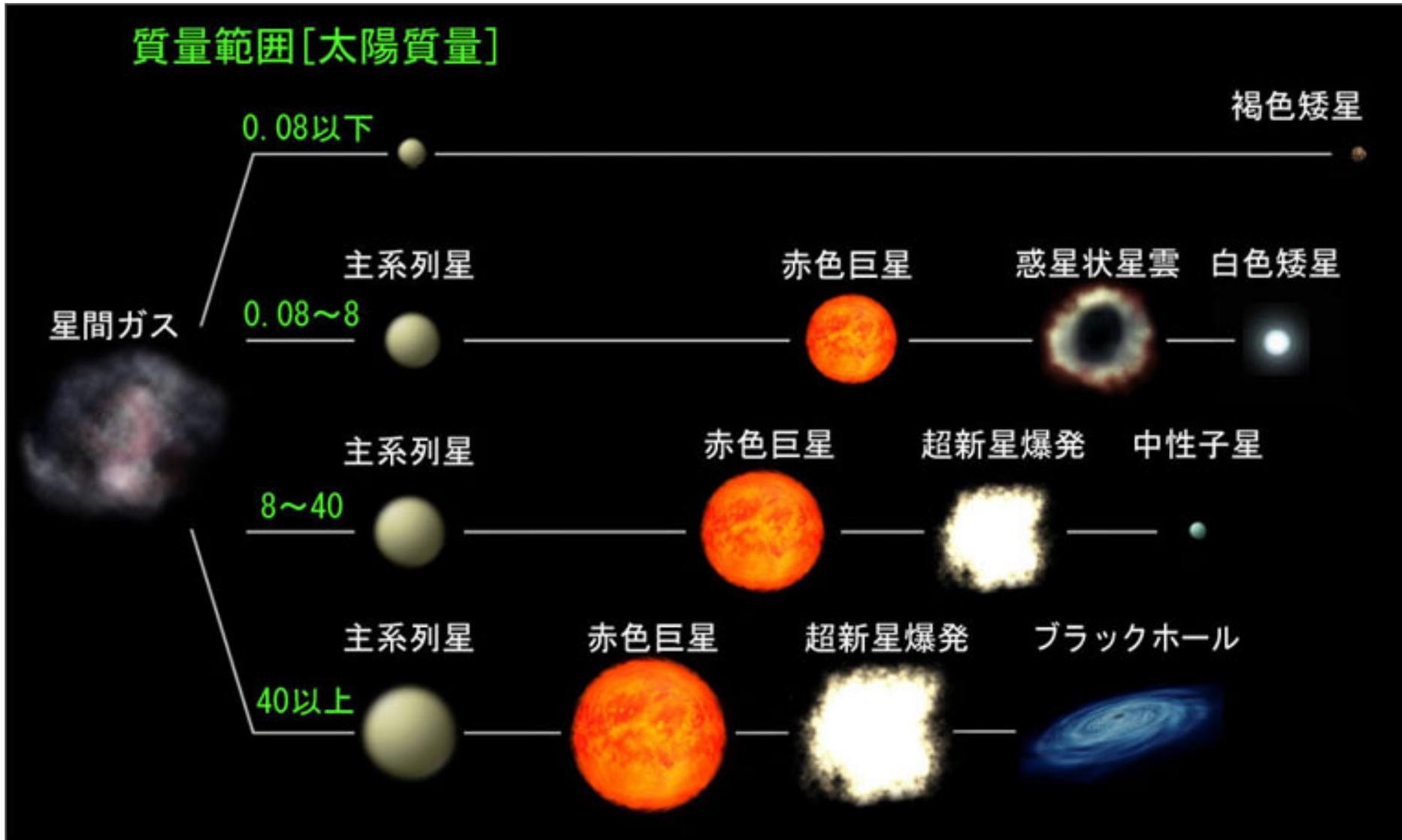
岐阜県神岡町神岡鉱山
地下1000メートルの場所に
3000トン水タンクを建設

1000本の20インチ光電子
増倍管



<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/news/2017/02/SN1987A-en.html>

星の質量と運命



星の核融合での重い元素の合成

4個の水素からヘリウム
($4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$)

太陽と同程度の温度、密度
(10^7K 、 150g/cm^3)

3個のヘリウムから炭素
($3 {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C}$)

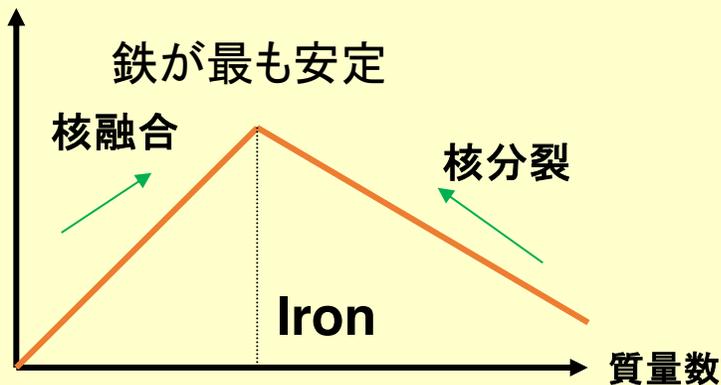
より高い温度、密度
(10^8K 、 10^4g/cm^3)

炭素から酸素、ネオン、ナトリウム、マグネシウム...
(${}^{12}\text{C}$ 、 ${}^{16}\text{O}$ 、 ${}^{12}\text{C} + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{20}\text{Ne}$ 、 ${}^{23}\text{Na}$ 、 ${}^{24}\text{Mg}$...)

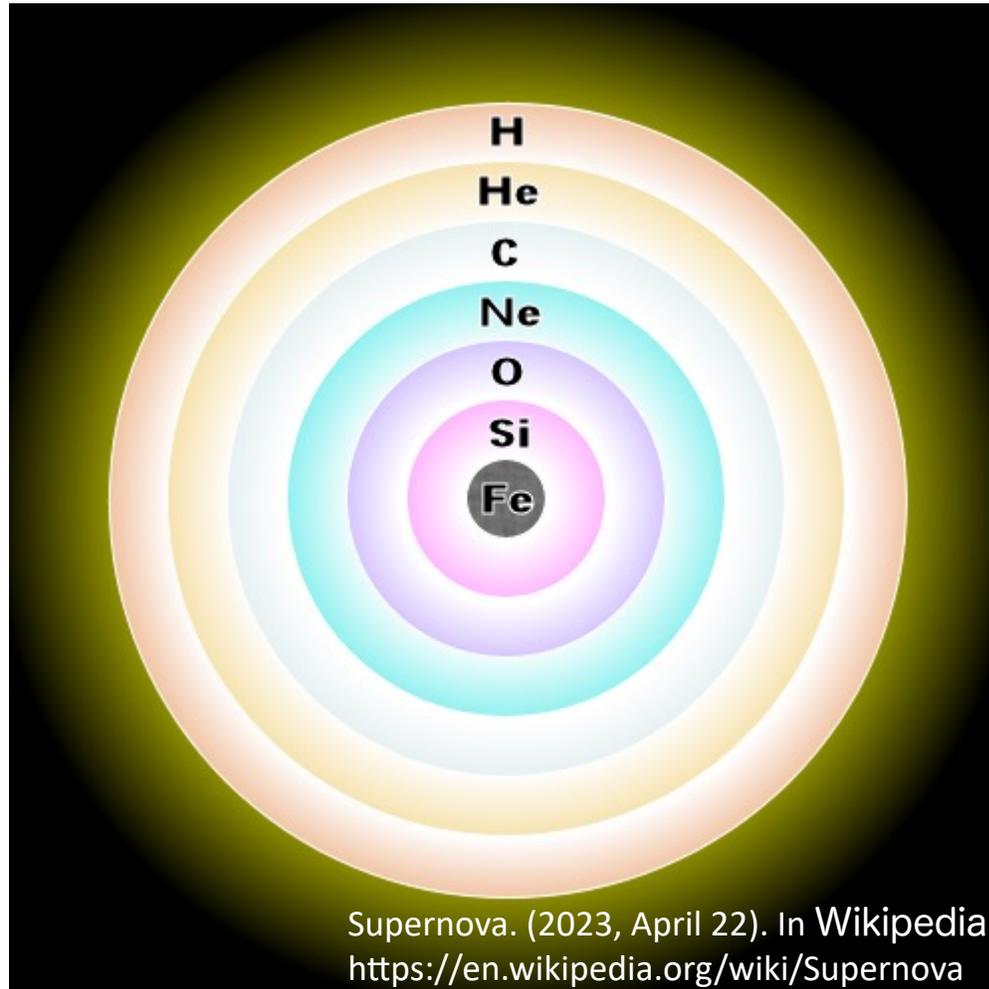
Very high temp/dens

酸素からシリコン、最後に鉄
 ${}^{16}\text{O} + {}^{16}\text{O} \rightarrow \text{Si}$ 、 Mg 、 S 、 Ar 、 Ca ...
 $\text{Si} + \text{Si} \rightarrow \text{Cr}$ 、 Fe 、 Ni

質量欠損(束縛エネルギー)



超新星爆発直前の星の玉ねぎ構造



表層から芯へ

水素(H)

ヘリウム(He)

炭素(C)

ネオン(Ne)

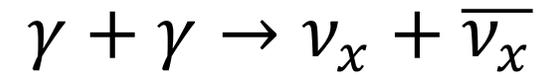
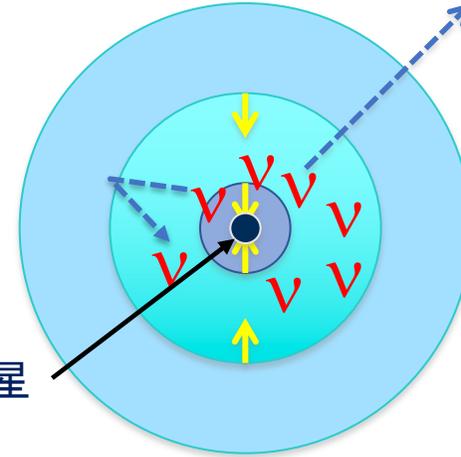
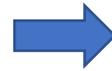
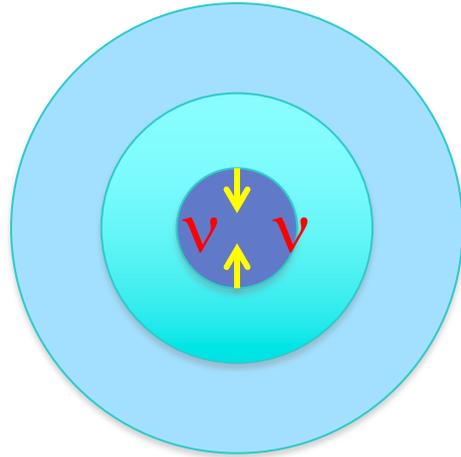
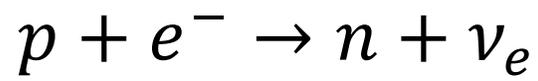
酸素(O)

シリコンSi

鉄(Fe)

鉄の芯が表層の重さを支えきれなくなると、電子が原子核中の陽子に捕獲されて中性子になって原子が潰れ、超新星爆発が始まる。

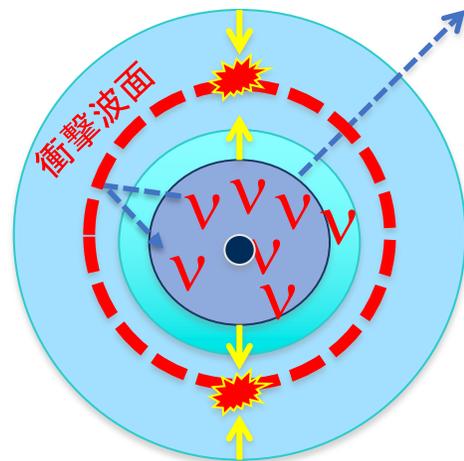
重力崩壊型超新星の爆発過程



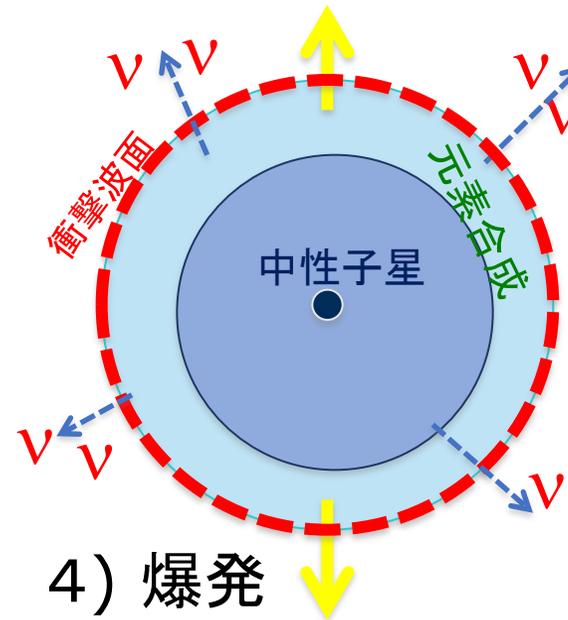
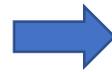
中性子星

1) 鉄のコアの中性子化
(陽子の電子捕獲反応)

2) ニュートリノ閉じ込め

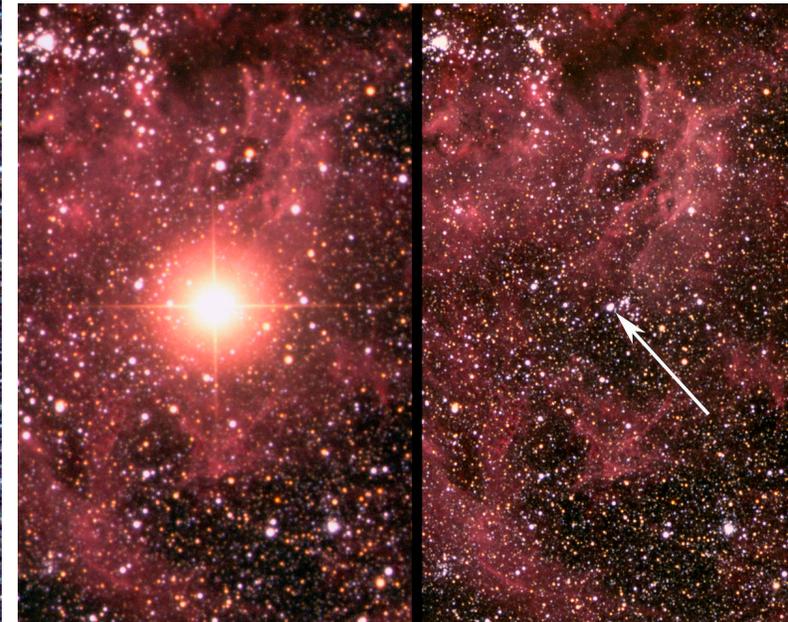
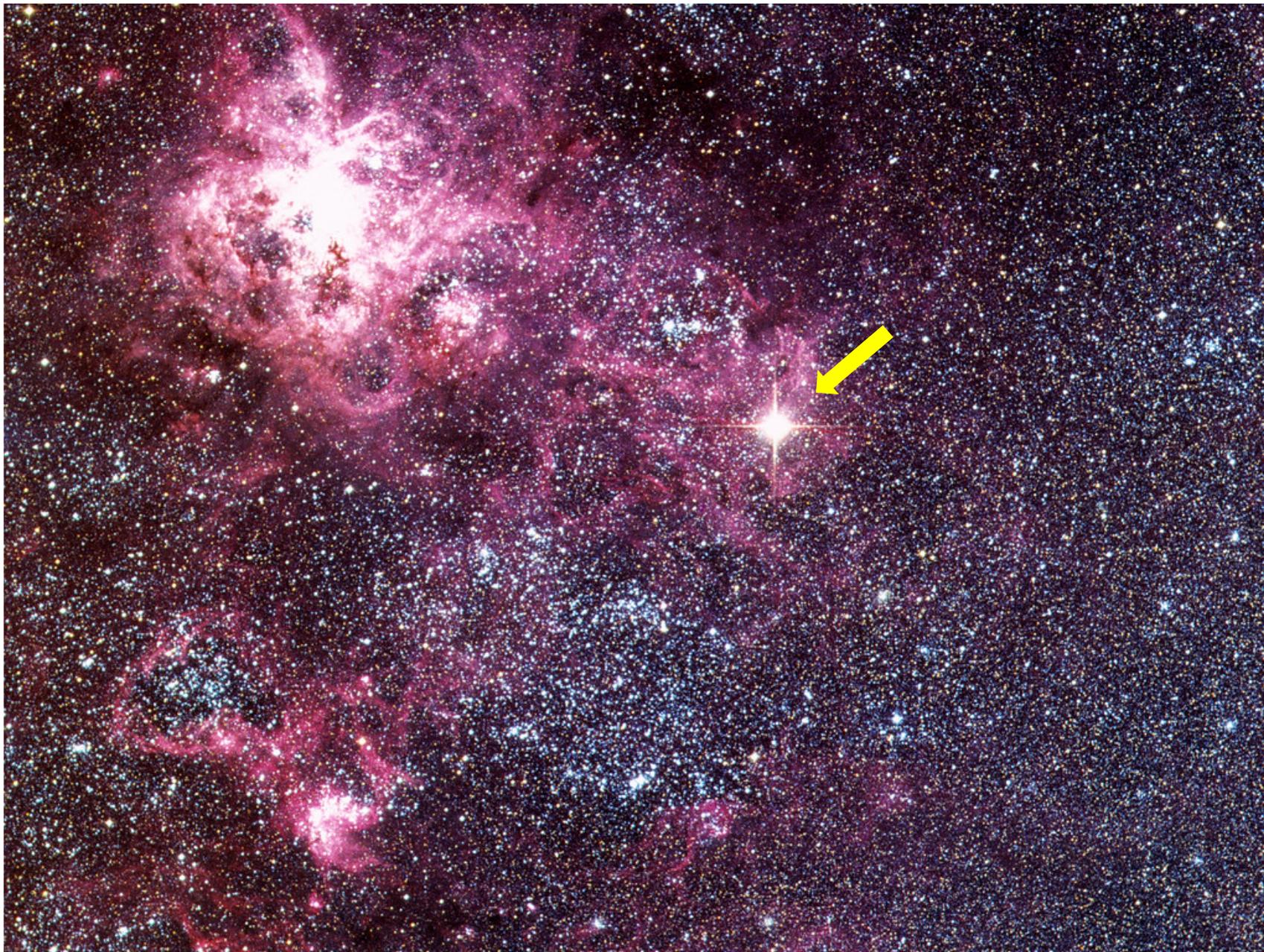


3) コアバウンス



4) 爆発

超新星1987a



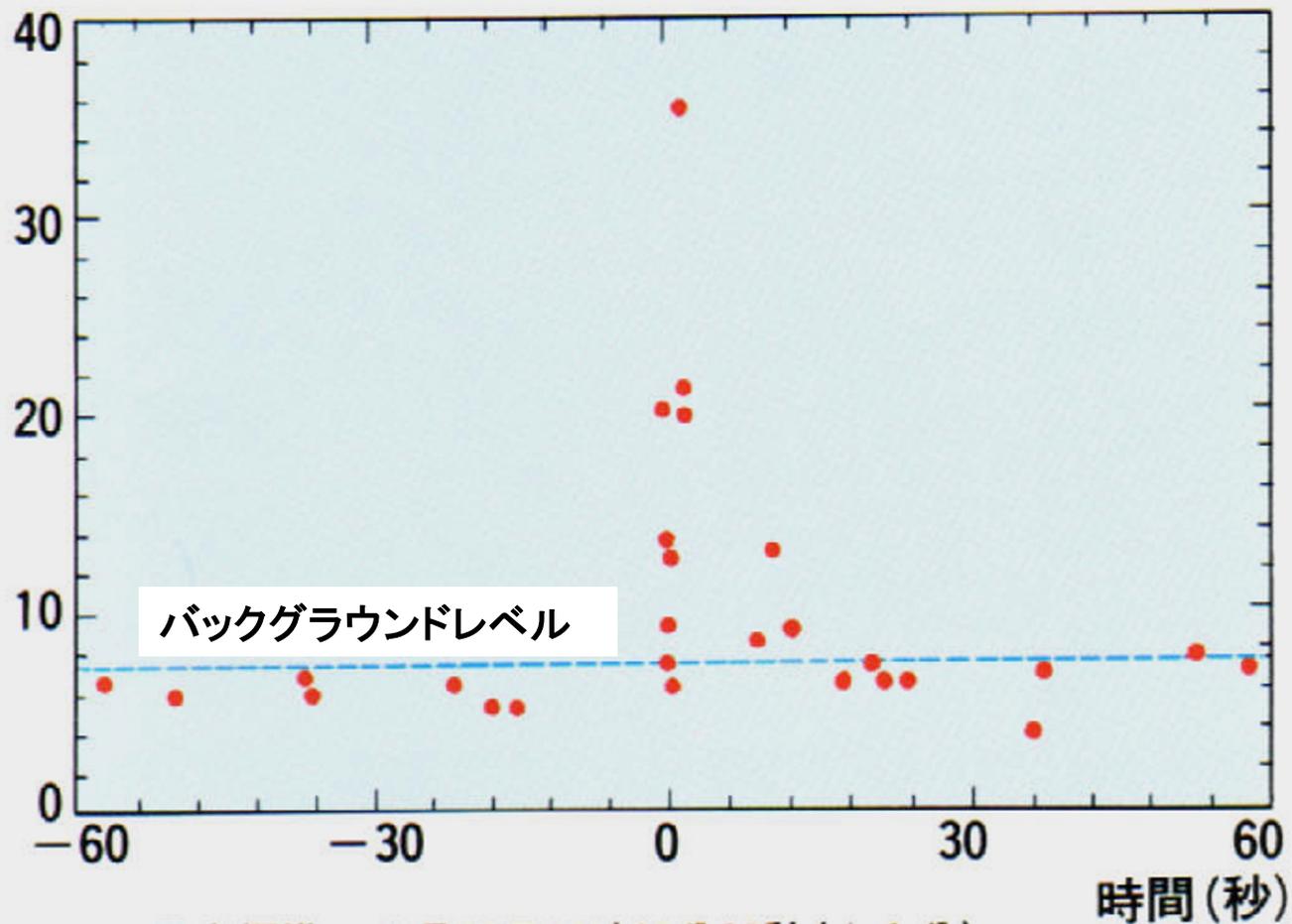
Credit: David Malin / Australian
Astronomical Observatory.
(<https://angelrls.wordpress.com/tag/lm>
c)

Credit: ESO (<https://www.eso.org/public/italy/images/eso0708a>)

カミオカンデが捉えた超新星のデータ

超新星爆発の瞬間

ニュートリノのエネルギー



日本標準 2月23日16時35分35秒(±1分)

グリニッジ標準時 2月23日7時35分35秒(±1分)

13秒間に11個の
ニュートリノを捕らえ
た $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$

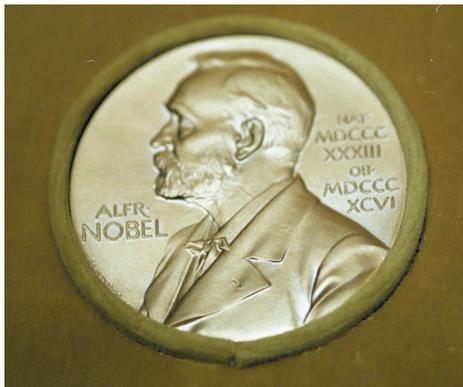
その瞬間に通り抜けて
行ったニュートリノの数
は、1000億個/cm²

小柴昌俊 2002年ノーベル物理学賞

天体物理学、特に宇宙ニュートリノの検出に対するパイオニア的貢献

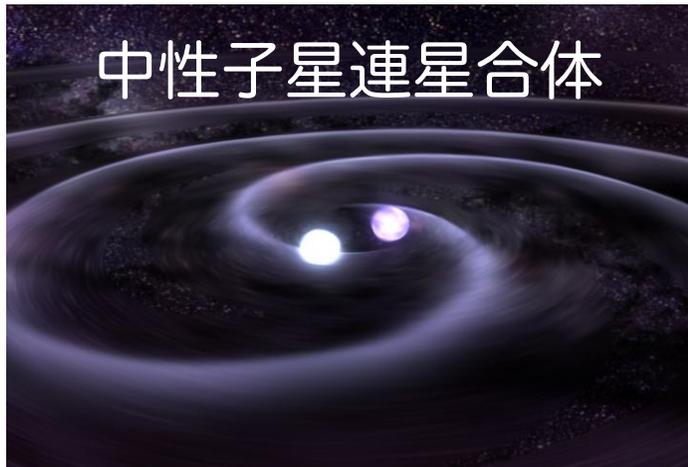


Masatoshi Koshiba. (2023, February 11). In *Wikipedia*.
https://en.wikipedia.org/wiki/Masatoshi_Koshiba



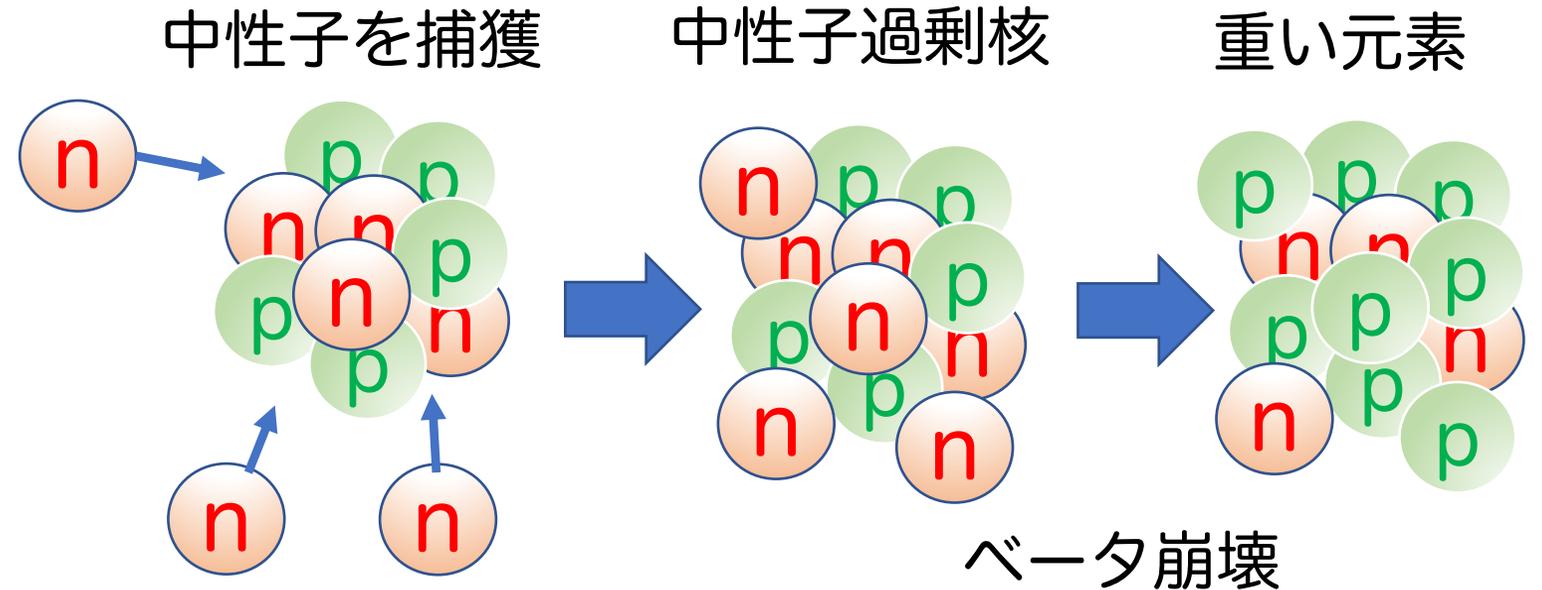
ノーベル・ディプロマ(副賞の盾)

鉄より重い元素はどこで生まれたか？



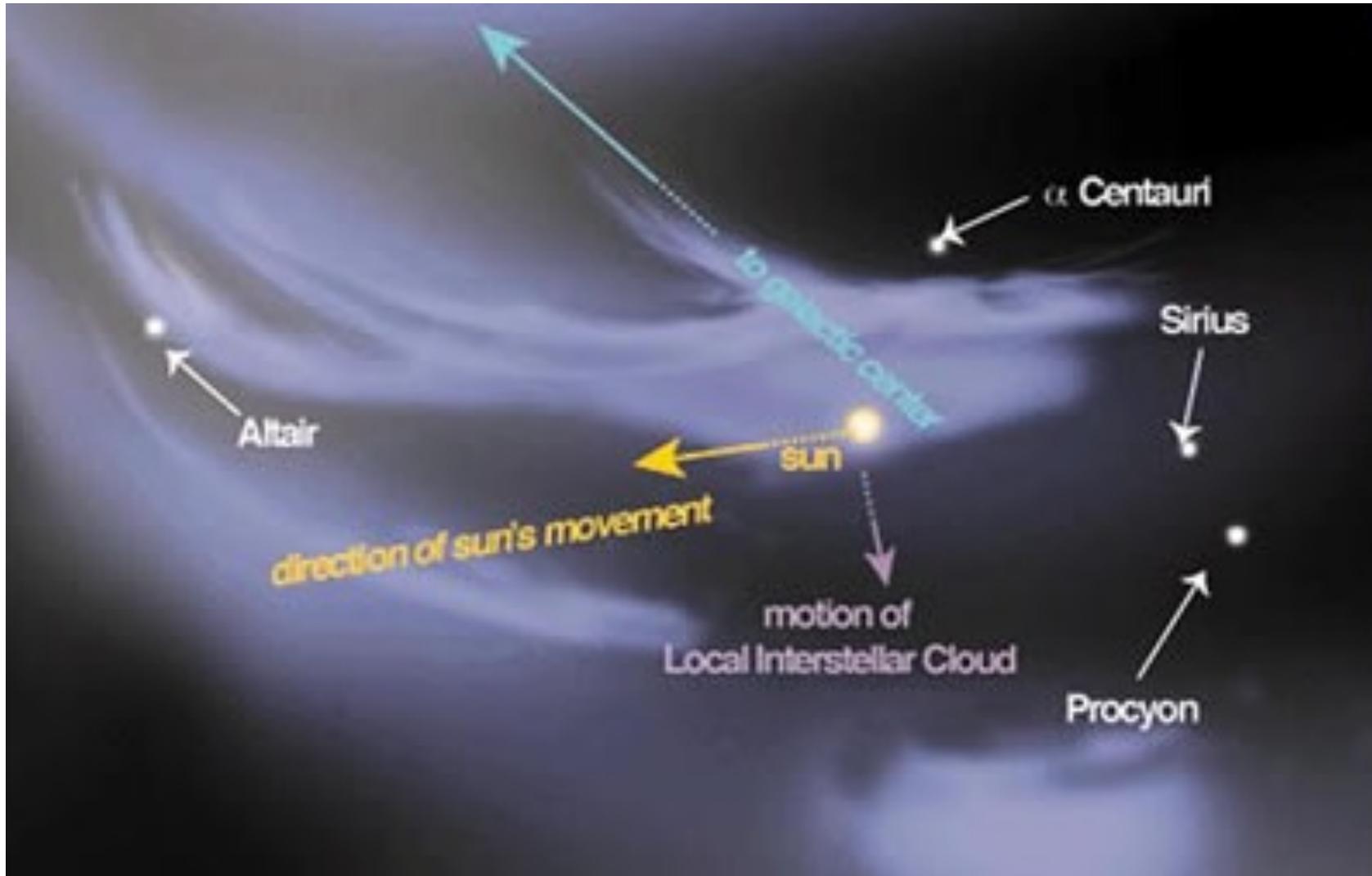
NASA/Goddard Space Flight Center

中性子が大量に存在する環境で起こる (r過程)



ガンマ線バーストからの重力波イベントGW170817が作った“キロノヴァ”の観測により初めて確認された

太陽はかつての超新星爆発の残骸を集めてできた



「我々は星くずの子」
(カール・セーガン)

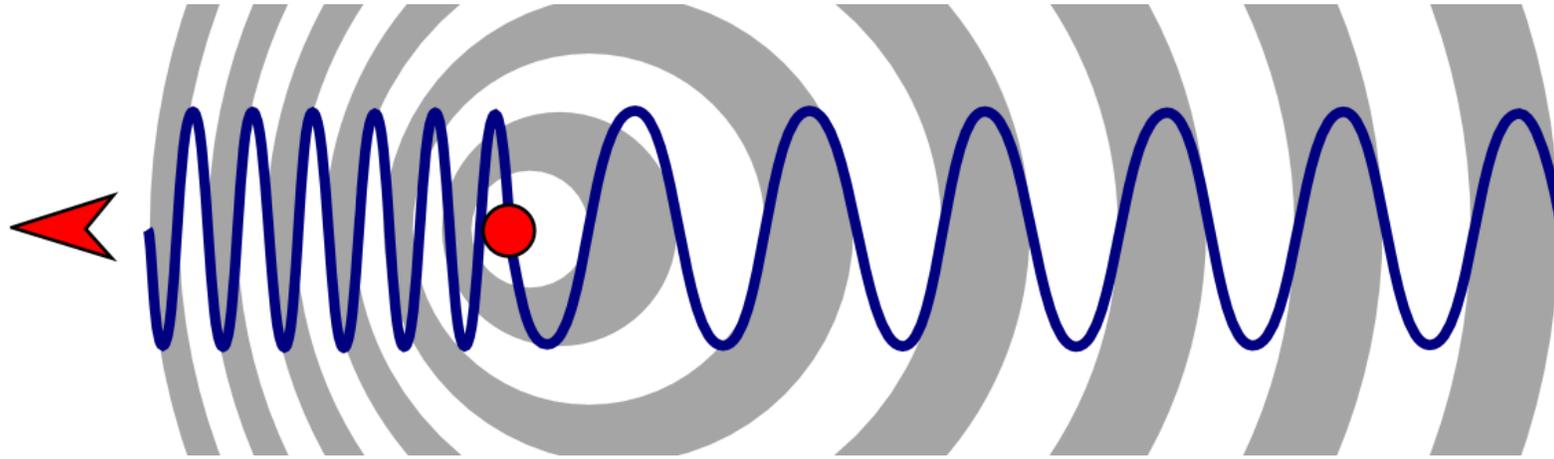
宇宙創生のはじめの3分間



スティーブン・ワインバーグ著
ダイヤモンド社 (1977/10/1)

https://m.media-amazon.com/images/I/41npJ525dJL._SX346_BO1,204,203,200_.jpg

ドップラー効果



近づく物の音の周波数は高くなり、波長は短くなる。

遠ざかる物の音の周波数は低くなり、波長は長くなる。

$$\text{聞こえる周波数} = \text{元の周波数} \times \left[\frac{1}{1 - V/C} \right]$$

$$\text{聞こえる音の波長} = \text{元の波長} \times (1 - V/C)$$

V: 車の速度(近づく方が正)

C: 音速

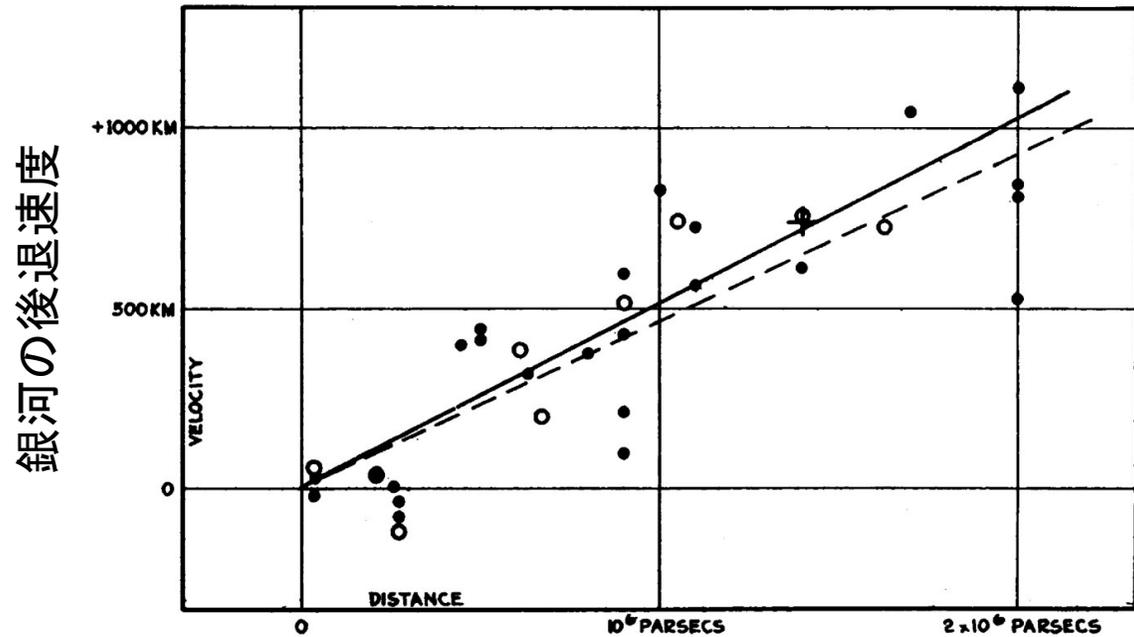
波長 = C/周波数



エドウィン・ハッブル

宇宙膨張の発見

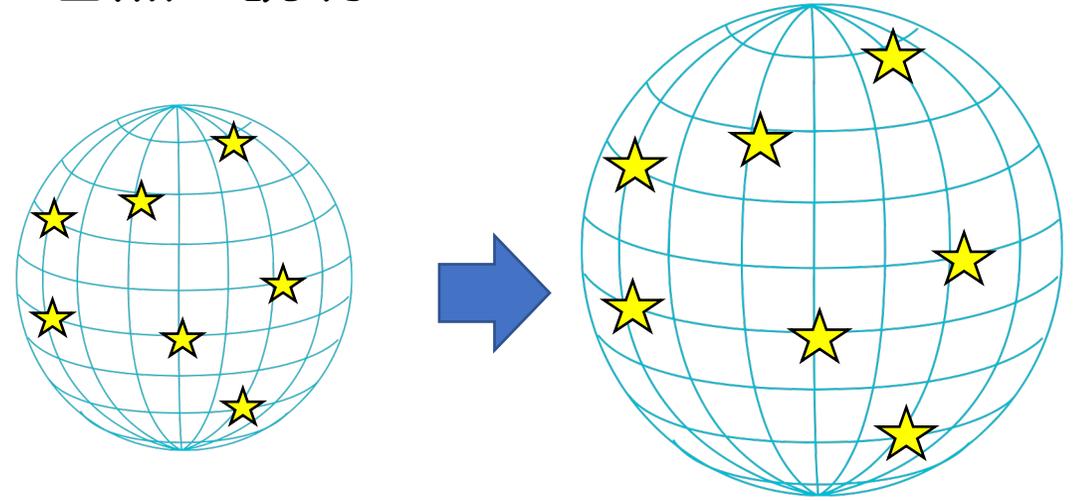
- ハッブルは銀河のスペクトルを測定、ドップラー効果から後退速度を求めた
- 後退速度が、その銀河までの距離に比例していることを発見
→ ハッブルールメートルの法則



銀河までの距離

Hubble, E. (1929). A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. Proceedings of the National Academy of Sciences, 15(3), 168-173.
<https://doi.org/10.1073/pnas.15.3.168>

- 宇宙が膨張していると考えると自然に説明できる



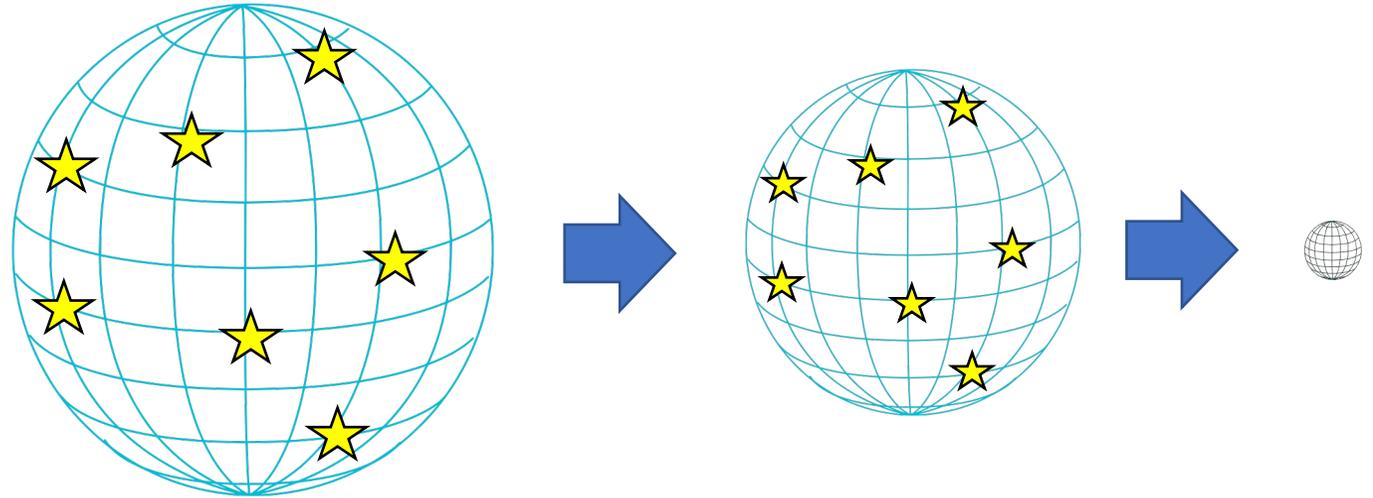
<https://svgsilh.com/svg/304160-00bcd4.svg> を
 改変

ビッグバンか、定常宇宙か？

フレッド・ホイルの定常宇宙論：宇宙は過去も未来も変化していない

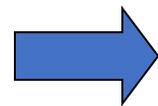


<https://edwinhubble.com>



<https://svgsilh.com/svg/304160-00bcd4.svg> を
改変

宇宙膨張の発見：膨張速度から逆算すると約130億年前に宇宙はある一点から発生したことになる。



ビッグバンのアイデア

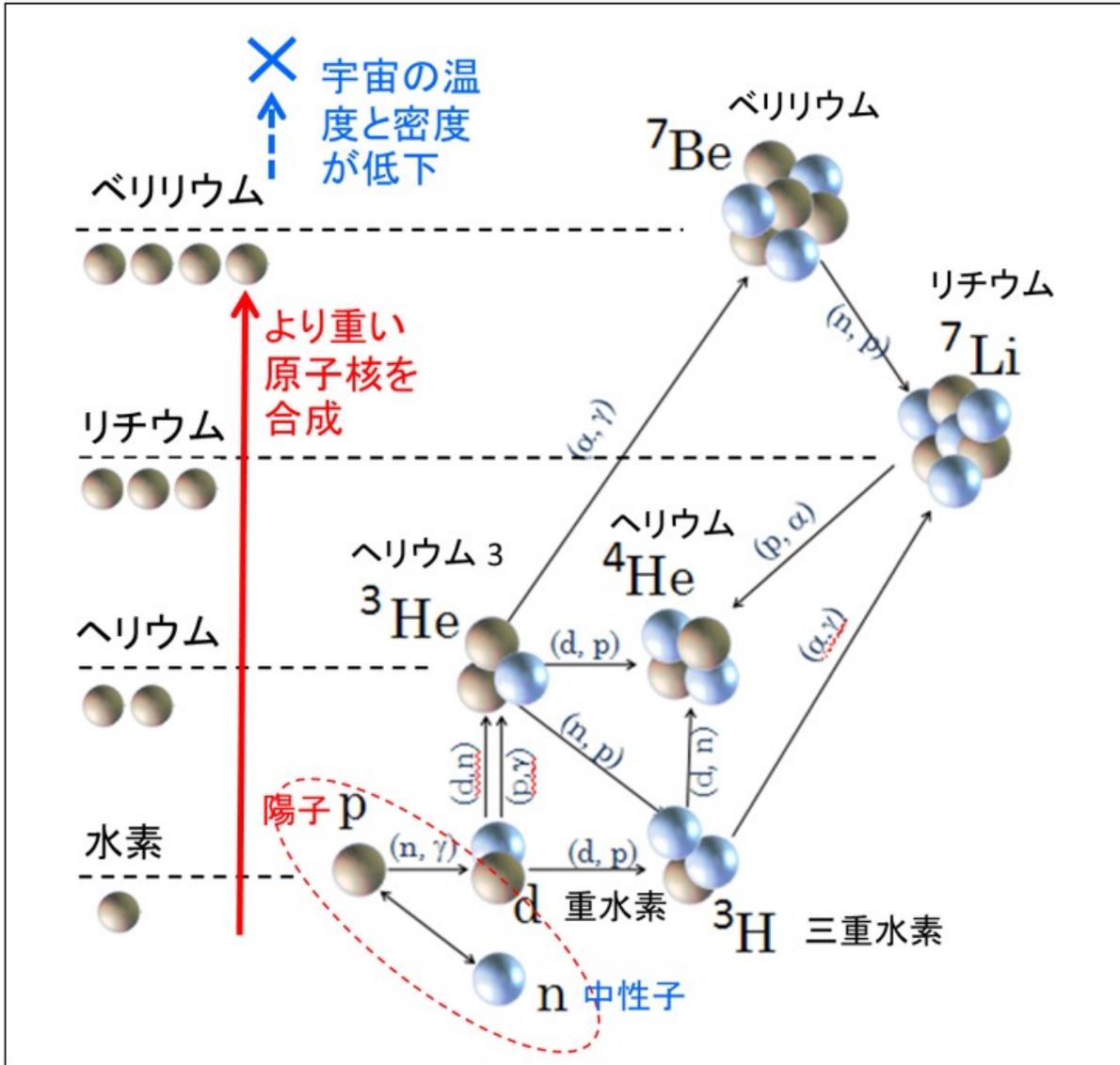
(しかし、ハッブル自身は定常宇宙論を信じていたようである)

宇宙の原始ヘリウムはビッグバンで合成された



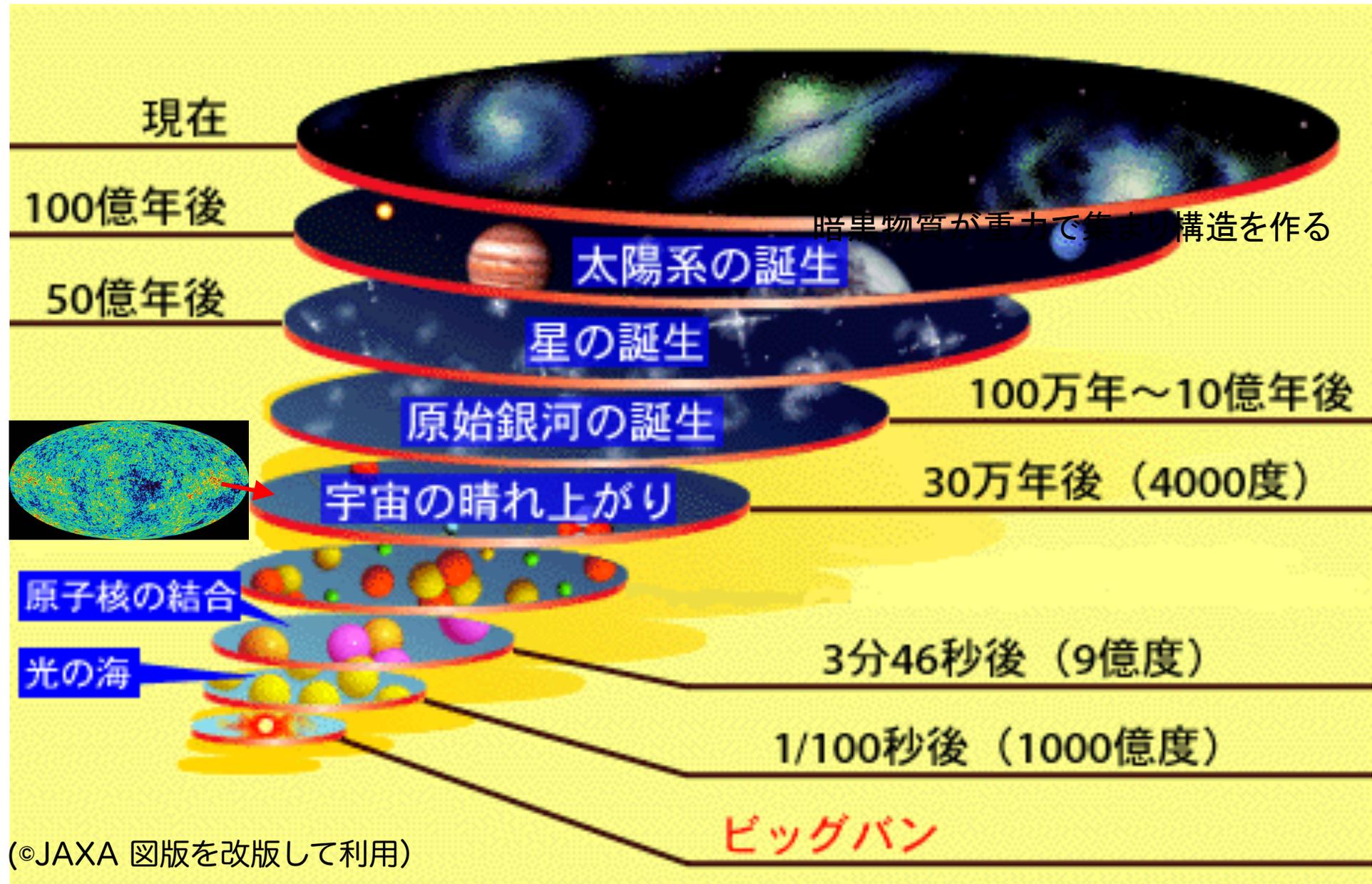
宇宙のヘリウムは水素の次に多く、全元素の1/4

(天文学辞典より転載 <https://astro-dic.jp/gamow-george>
https://en.wikipedia.org/wiki/File:George_Gamow.jpg)



- 星の核融合で水素からヘリウムは合成されるが、宇宙誕生以来の星でできたヘリウムでは全く足りない
- ガモフは宇宙初期は宇宙全体が星の内部のように高温だったとし、宇宙全体で熱核融合が起こり元素が合成されたと考えた

ビッグバンと宇宙はじめての3分間



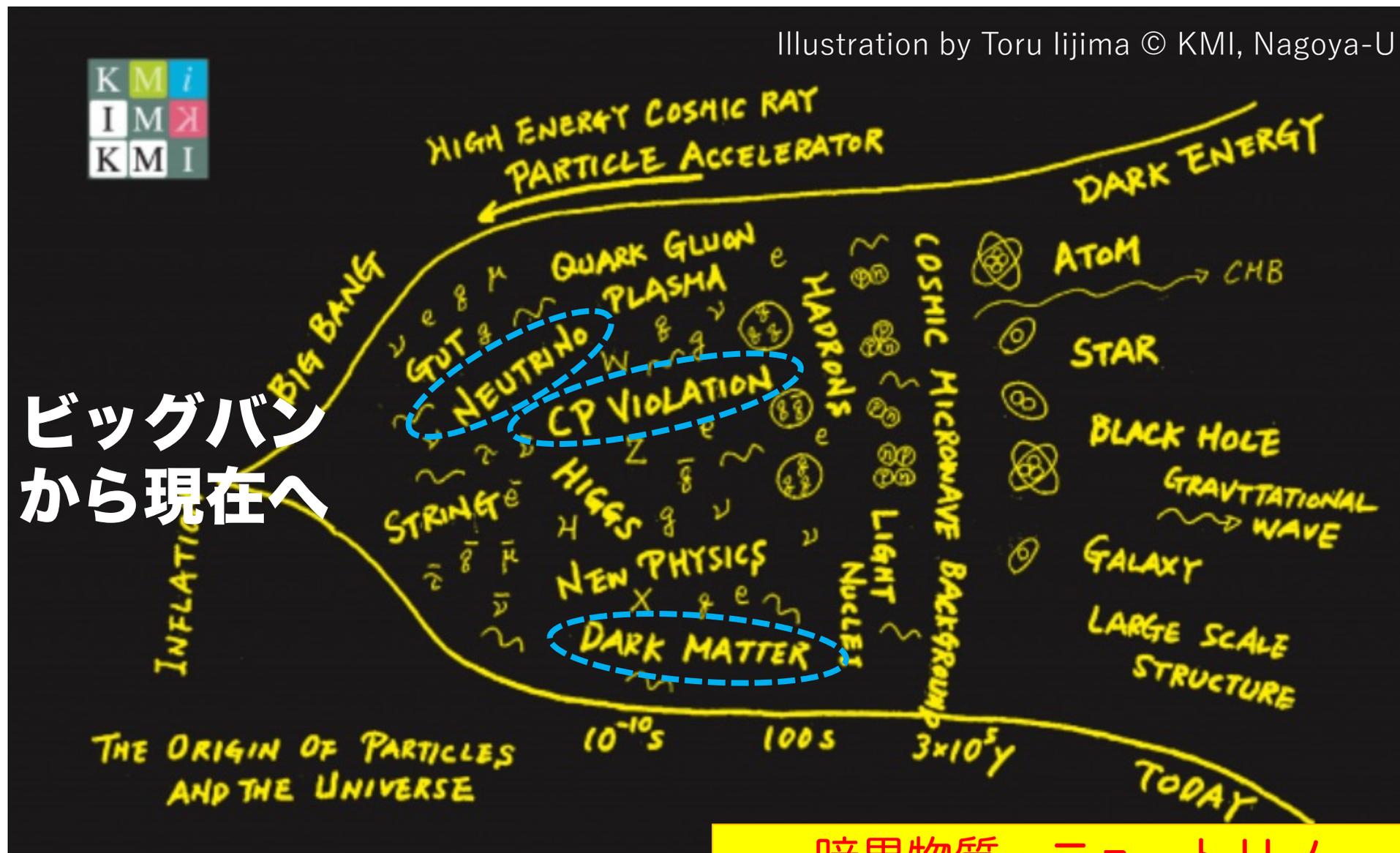
(©JAXA 図版を改版して利用)

ビッグバン直後 = 高エネルギーの素粒子の世界

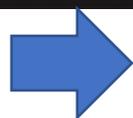
Illustration by Toru Iijima © KMI, Nagoya-U



ビッグバン
から現在へ



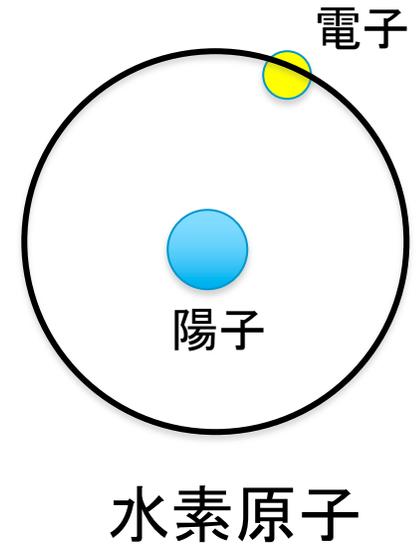
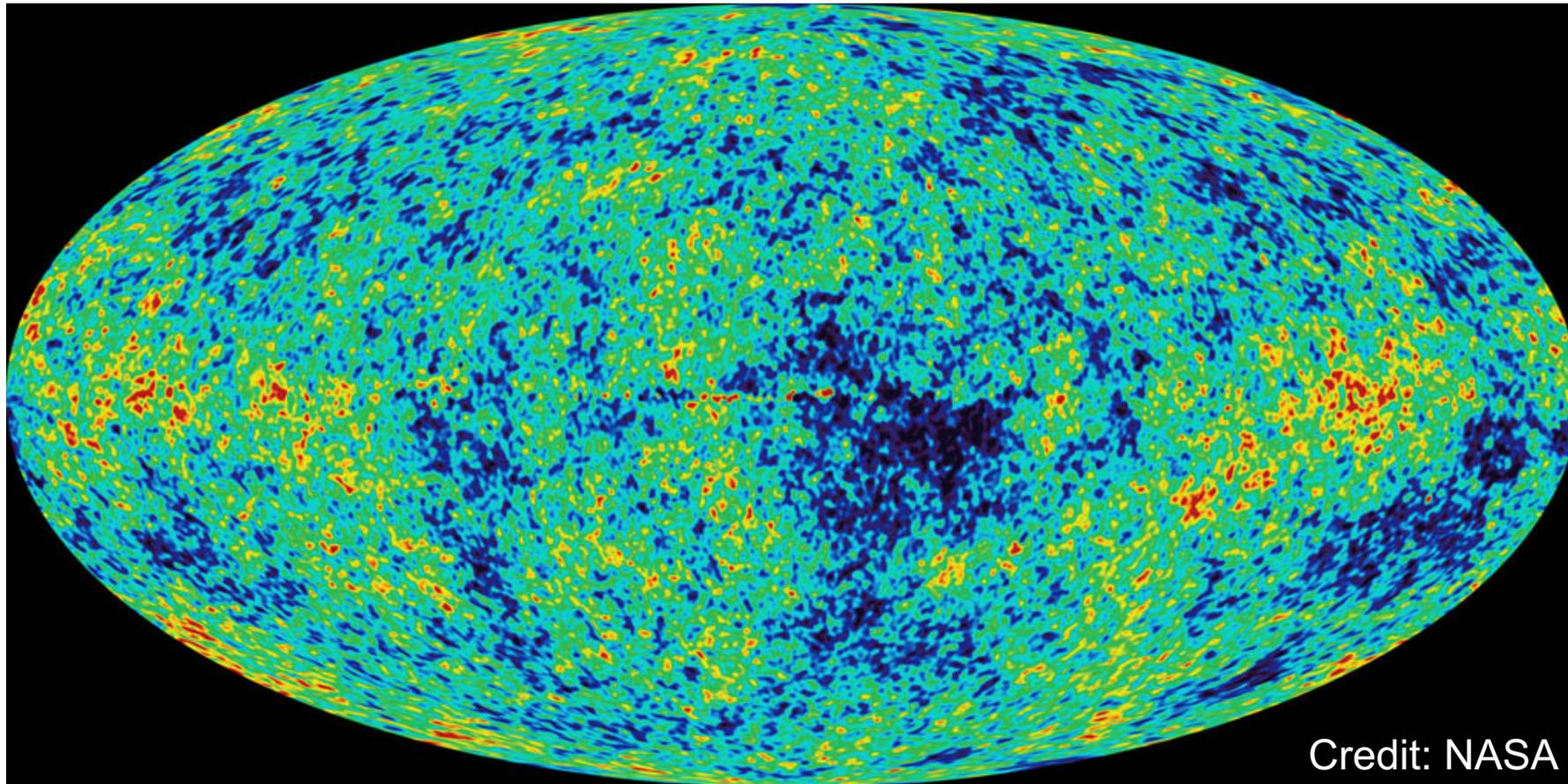
宇宙の始まりのなぞ



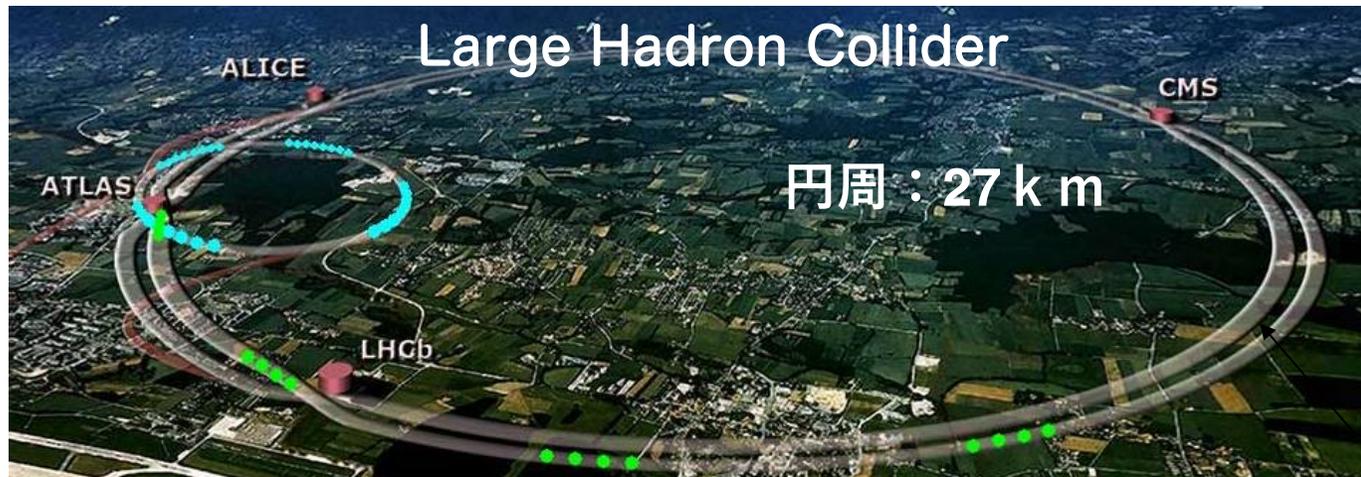
- 暗黒物質・ニュートリノ
- 消えた反物質のなぞ

ビッグバンの証拠：宇宙背景放射

- ビッグバン後37万年後、宇宙の温度が下がると電子が陽子につかまる
- 陽子と電子が結合して水素原子になった時の温度(約3000K)
- 3000Kから輻射される光の波長がドップラー効果で引き伸ばされる→宇宙の全方向から来る同じ波長のマイクロ波
宇宙最初の光で充満、その温度にムラが見られる。



超高温での物質のふるまい→素粒子実験の世界



Credit: CERN

つくばの高エネルギー加速器研究機構のBファクトリー（電子陽電子衝突型加速器）と東海村で稼動予定のJPARC。B中間子やニュートリノなど様々な素粒子を作る

スイスのジュネーブで稼動予定のLHC。光速度の0.99999999999999989倍まで加速した陽子と陽子を正面衝突。

KEK-B factory



Credit: KEK

J-PARC



消えた反物質のなぞ

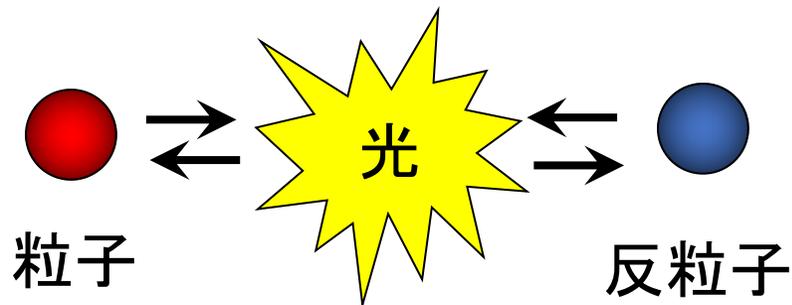
スーパーカミオカンデ
(写真 東京大学宇宙線研究所)

物質と反物質



ディラック

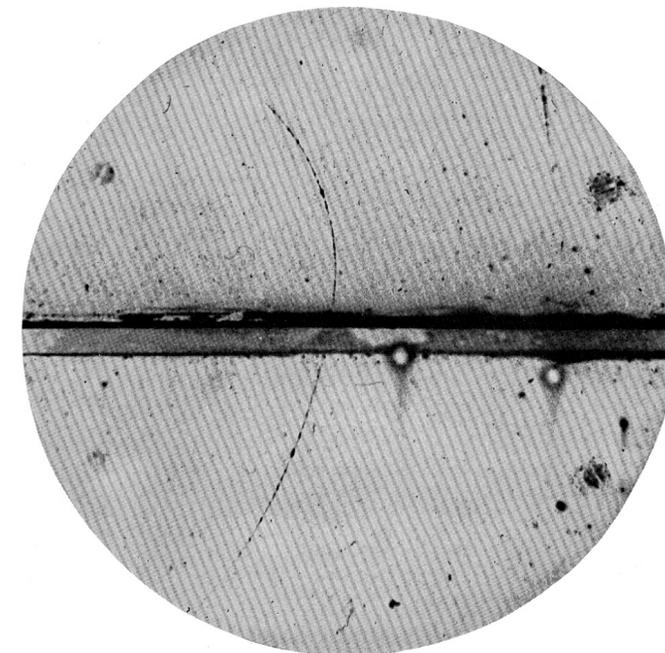
[https://us02web.zoom.us/meeting/register/t/ZYlf-6qqz0uG9xQ2ycXN-m23HJ9CgoflMp8](https://us02web.zoom.us/join/https://us02web.zoom.us/meeting/register/t/ZYlf-6qqz0uG9xQ2ycXN-m23HJ9CgoflMp8)



- すべての素粒子には電荷が反対な他はまったく同じ性質の「反粒子」がある
- 光から「対生成」する。
- 「対消滅」して光になる。
- 量子力学を作ったディラックが予言

霧箱で見つかった陽電子の飛跡

Physical Review 43 (6): 491–494



- 1932年、アンダーソンが宇宙線の中に陽電子を発見（最初の反粒子）

粒子と反粒子の記法

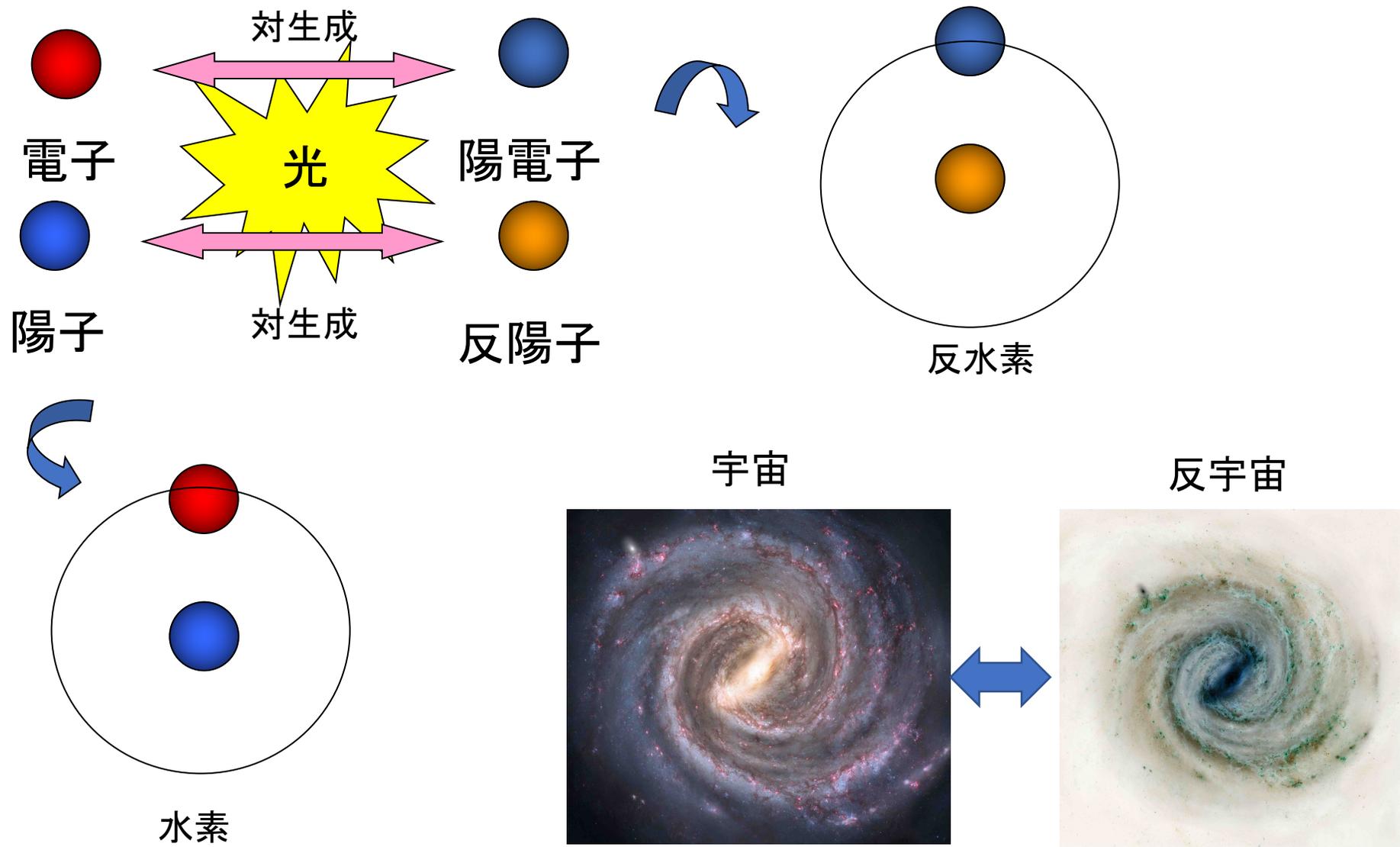
e^- e^+ \bar{e} とは余り書かない
電子 反電子
(歴史的に陽電子と呼ばれる)

p \bar{p} p^- とは余り書かない
陽子 反陽子

← bar と読む

電荷を持っていれば+と-の区別
電荷が無ければ bar をつけることが多い

反物質で出来た反宇宙？



未来への課題；消えた反物質のなぞ

- 光から「物質」・「反物質」が同数生まれたのなら、なぜすべて対消滅して光にもどってしなわないのか？
- 「物質」と「反物質」が宇宙の別々の場所に存在して出会わないからだろうか？
- しかし、反物質のみでできた反宇宙は見つかっていない
- 粒子と反粒子の振る舞いの差(CP非対称性) にヒント？

小林誠



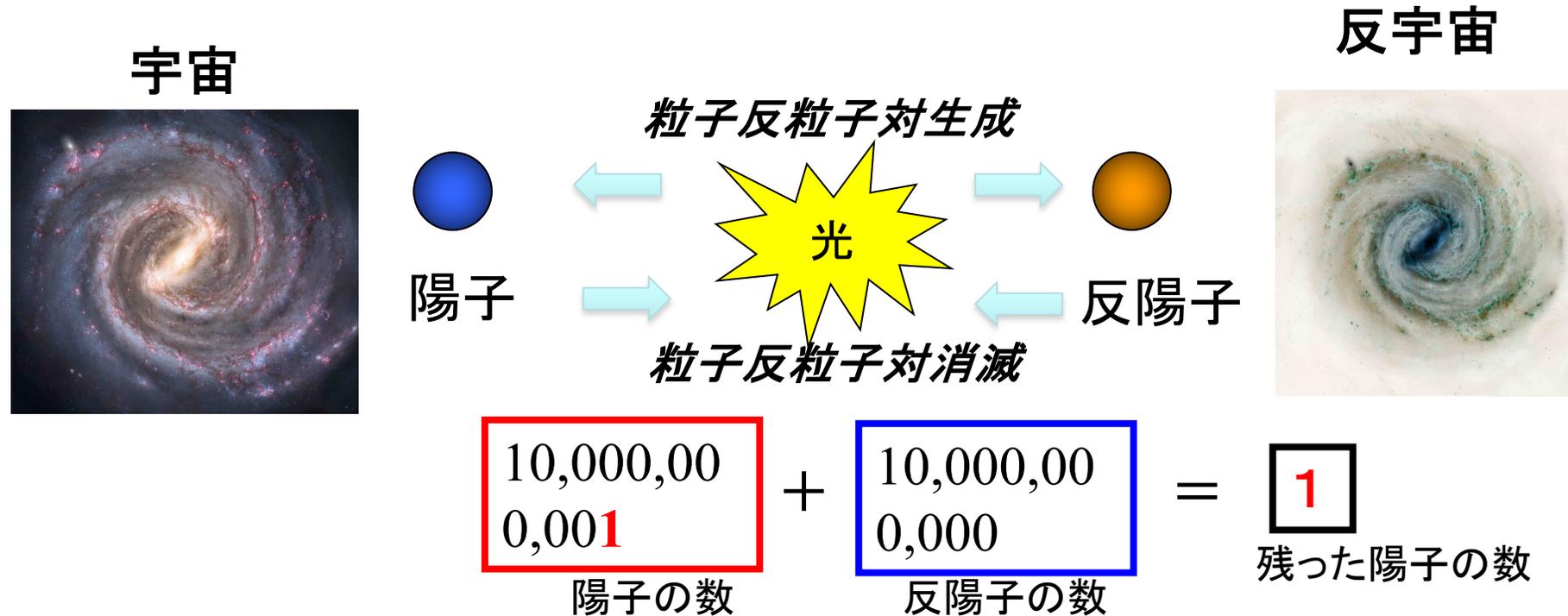
益川敏英



2008年ノーベル物理学賞受賞

CP対称性の破れを説明するため、
素粒子が3世代あると予言した事に対し
て

なぜ反宇宙は存在しない？



- 生成時は粒子・反粒子同数
- その後の反応・崩壊過程の中に粒子反粒子(CP)非対称性
- その結果、粒子と反粒子の数に食い違い発生
- 大半は対消滅するが、「おつり」が残る(100億分の1)

サハロフの3条件

ビッグバン直後の宇宙で

- (1) バリオン数保存を破る反応の存在(陽子崩壊)
- (2) CP非保存 (粒子と反粒子の振る舞いの差)
- (3) 熱平衡状態からはずれる

を満たせば、
宇宙に「物質」だけを少し多くできる

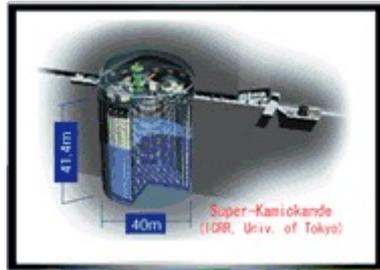
バリオン数：陽子（中性子）の総数



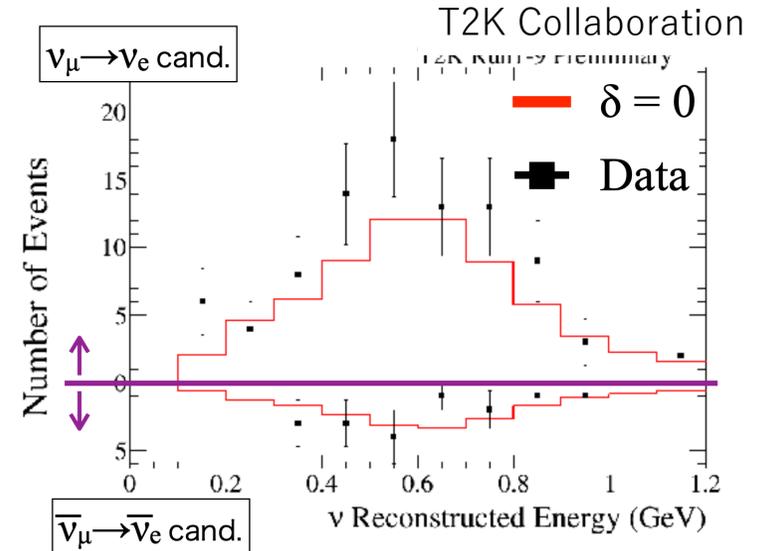
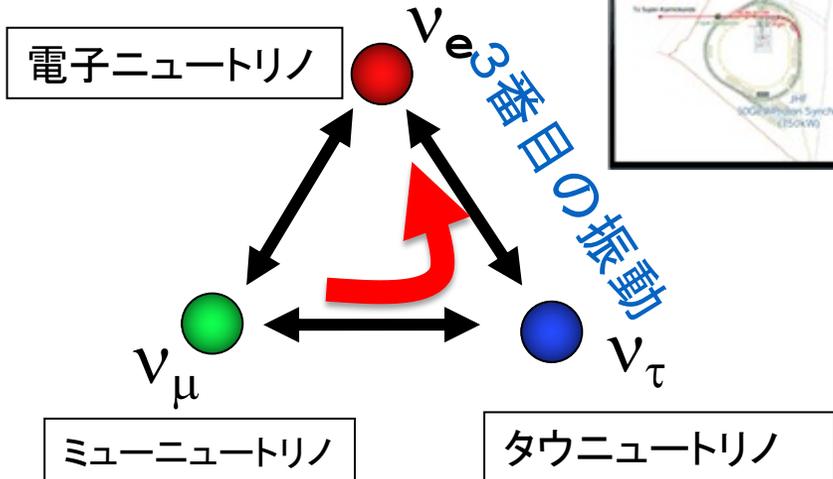
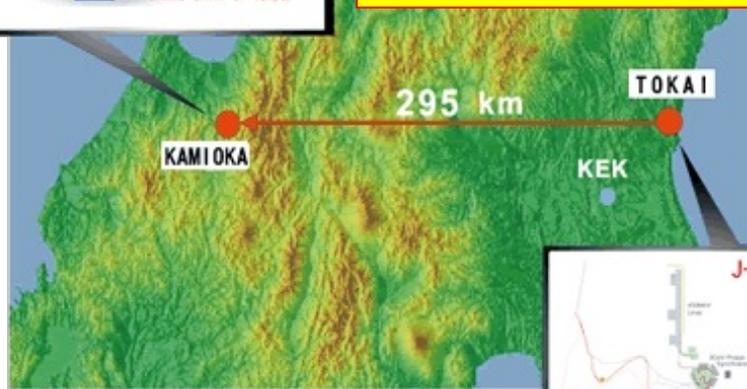
アンドレイ・サハロフ

RIA Novosti archive, image #25981 /
Vladimir Fedorenko / CC-BY-SA 3.0

T2K実験（東海から神岡）でニュートリノ振動でのCPの破れ ニュートリノと反ニュートリノで振動の違いの兆候？



2011年6月
第3の振動モードを確認
 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$



nature

Subscribe

Nature 580, 305 (2020)

EDITORIAL · 15 APRIL 2020

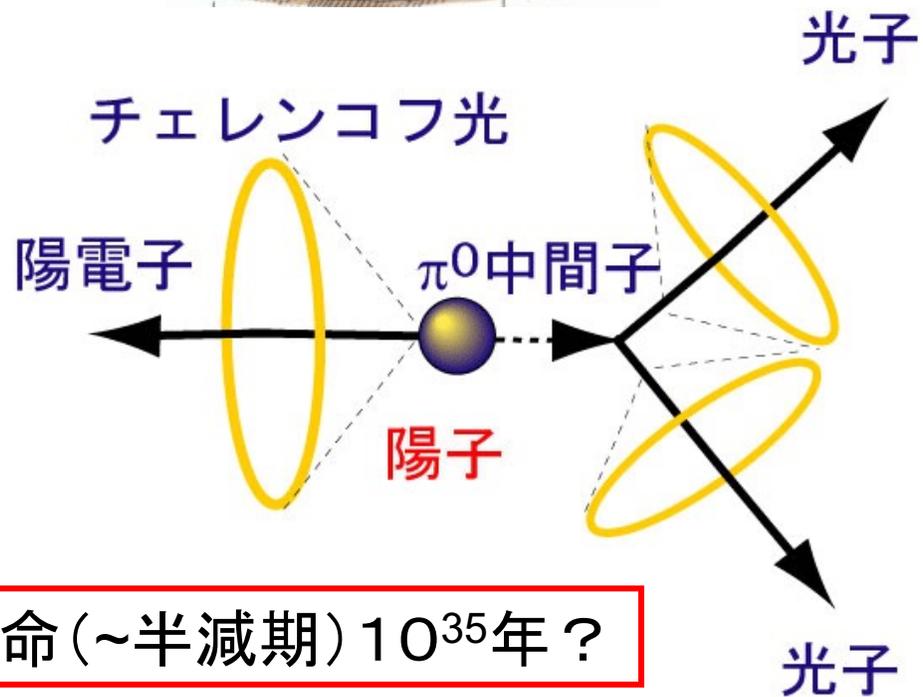
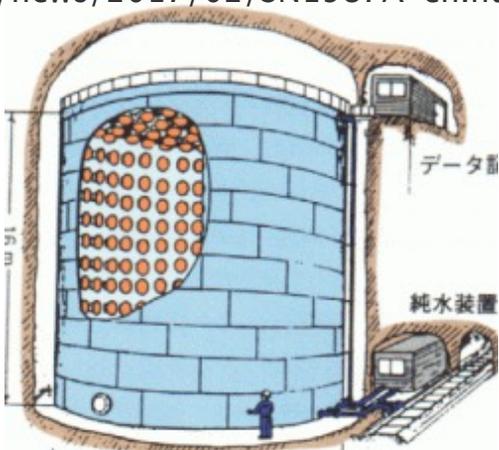
Neutrinos could shed light on why the Universe has so much more matter than antimatter

A major finding in particle physics reminds us of the importance of robust preliminary results – and paves the way for more exciting discoveries.

2020年、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ と反 $\nu_\mu \rightarrow$ 反 ν_e
の違いを観測(ν でのCPの破れ)

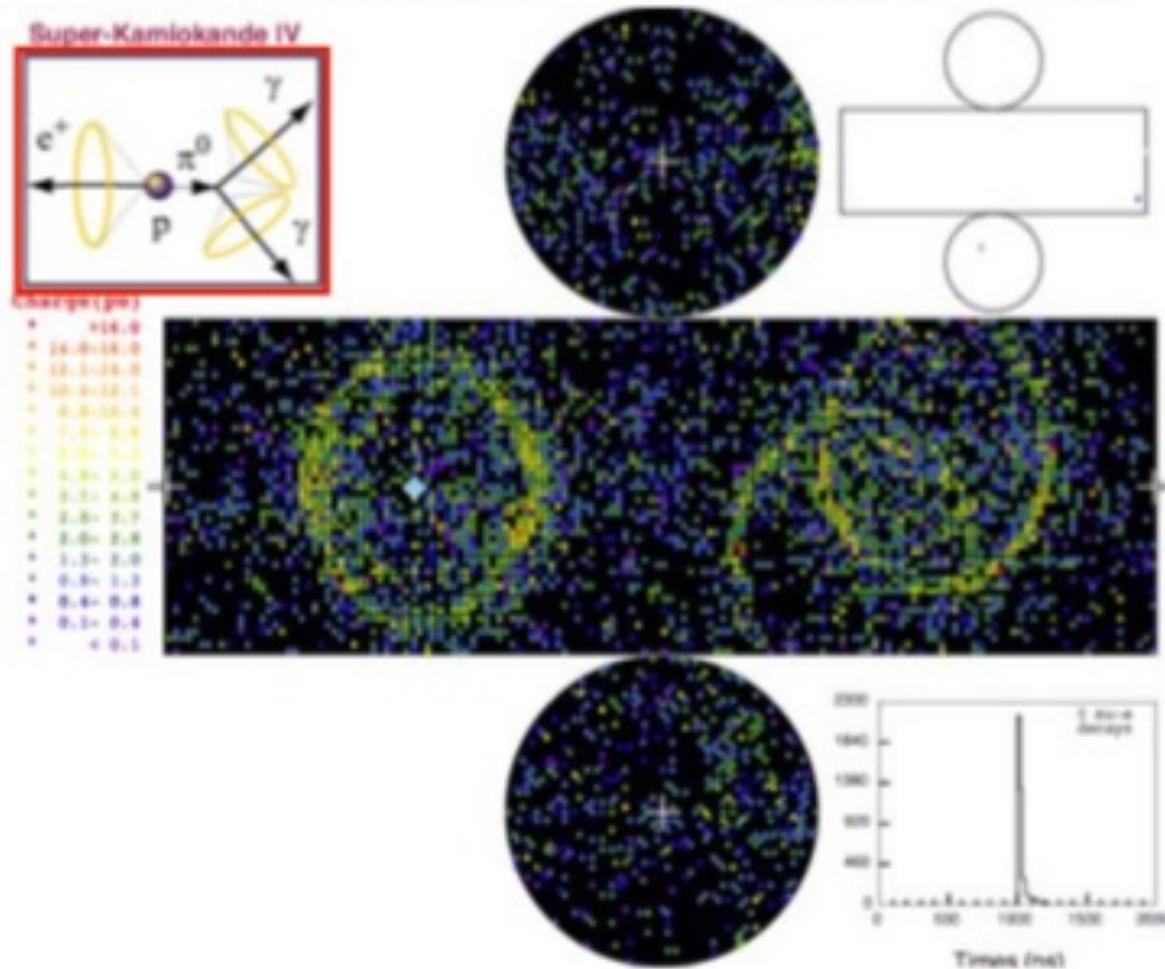
カミオカンデ実験の本来の目的：陽子崩壊の探索

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/news/2017/02/SN1987A-en.html>



寿命 (~半減期) 10^{35} 年?

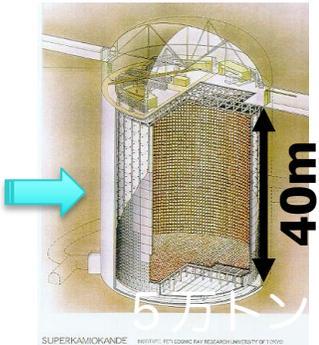
Cherenkov ring image in Super-K



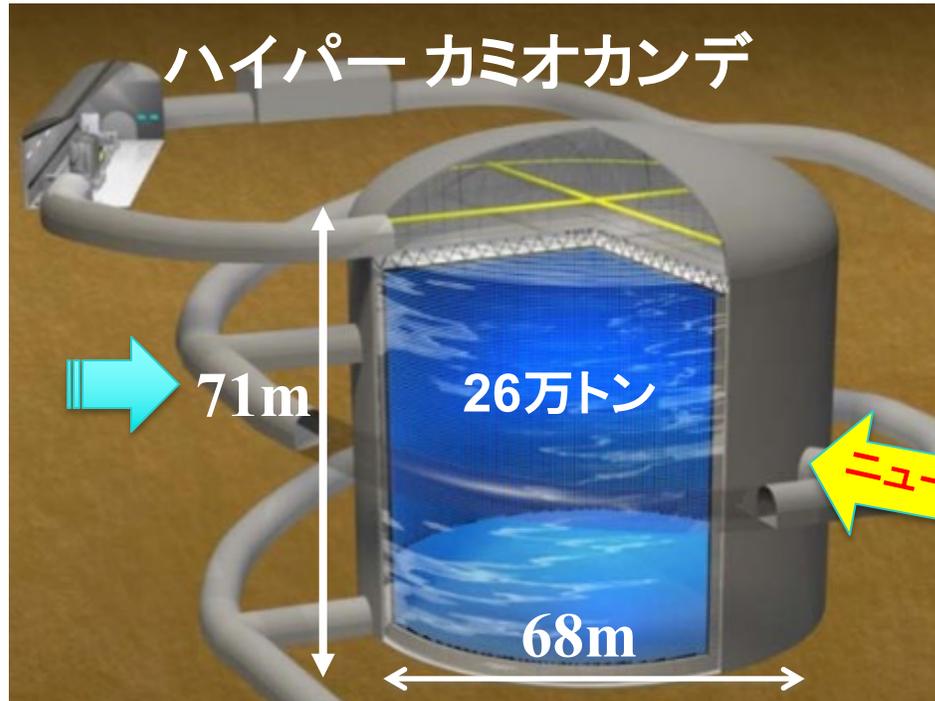
カミオカンデからスーパーカミオカンデ そしてハイパーカミオカンデへ

スーパーカミオカンデの8倍の有効体積

カミオカンデ
10m
3千トン



スーパー
カミオカンデ



人工のニュートリノビーム
を打ち込む

茨城県東海村
J-Parc加速器



提供JAEA/KEK J-PARCセンター

→ニュートリノをつかって、
物質と反物質の謎を解き明かす

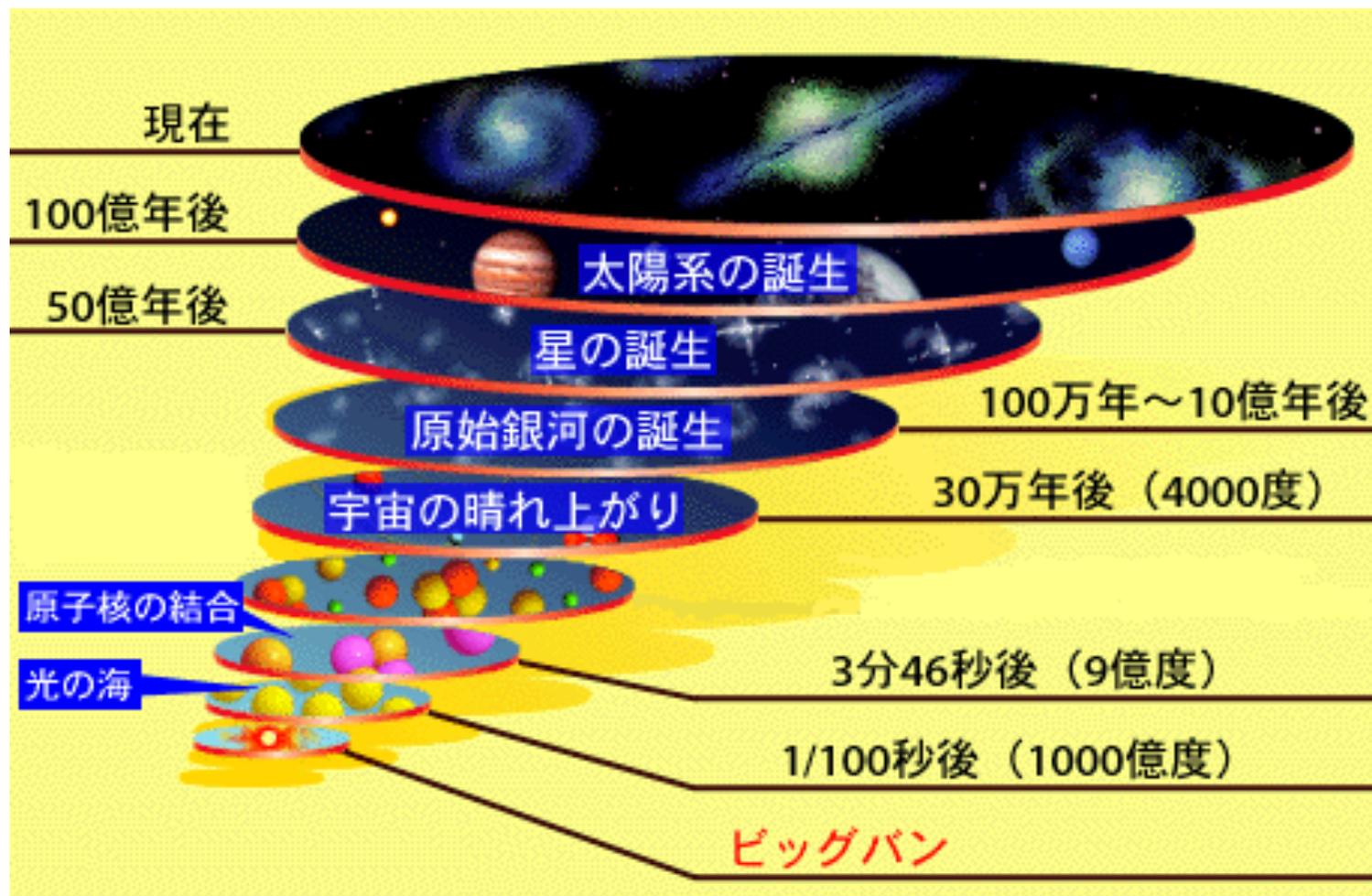
ニュートリノ振動のCP非対称性
陽子崩壊の発見

ハイパーカミオカンデ建設中

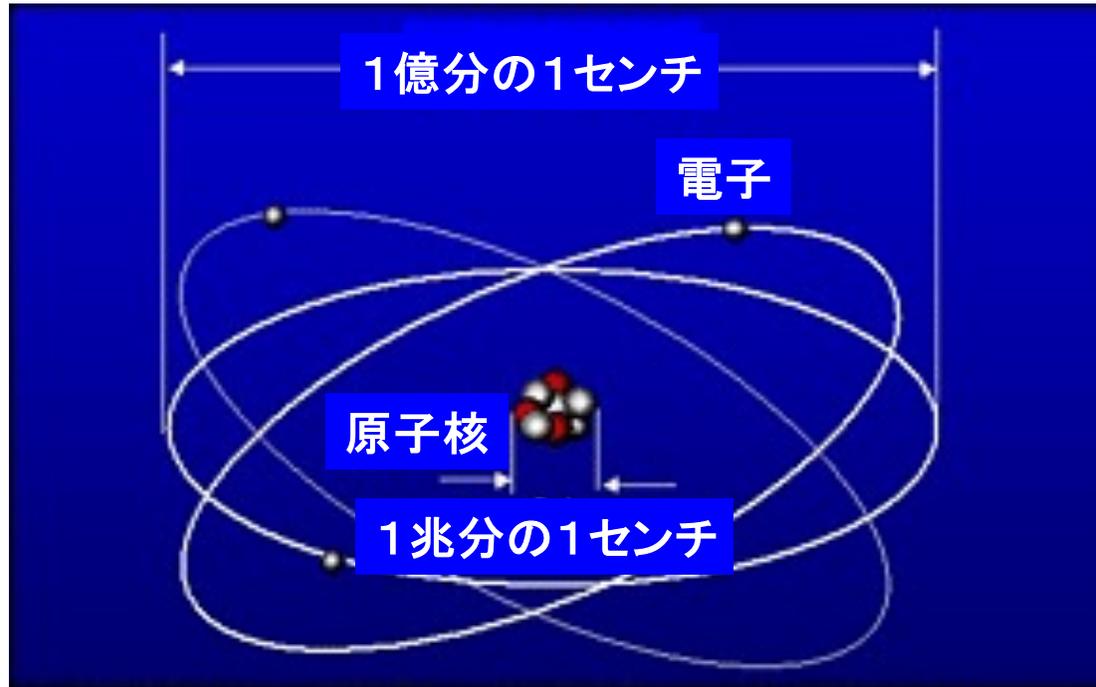
©ハイパーカミオカンデ研究グループ
(東京大学宇宙線研究所HPより)



最も大きい宇宙の始まりを知るには最も小さい素粒子の世界を知る必要



素粒子と宇宙



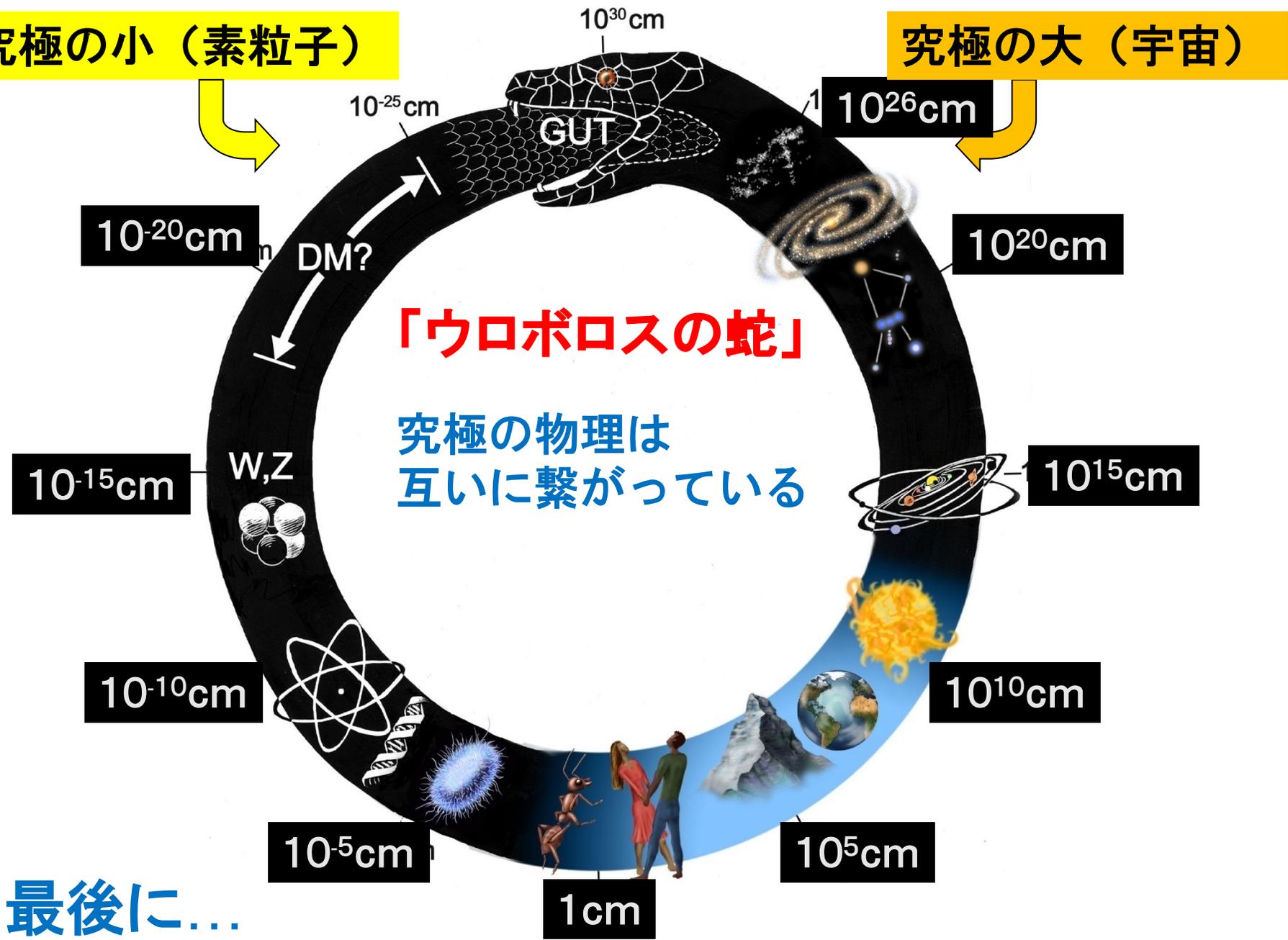
まったく違うサイズ！しかし...



最も小さい世界は最も大きい世界につながっている

究極の小（素粒子）

究極の大（宇宙）



おしまい