

# ものは何でできている？ ～元素のお話～

京都大学大学院理学研究科 教授  
萩野浩一



京都府立東宇治高等学校  
Kyoto Prefectural HIGASHI UJI Senior High School



## 自己紹介

萩野浩一（はぎのこういち）

➤ 京都大学理学部で理論物理学（原子核理論）の研究をしています。

- ✓ 原子核ってどのくらい大きいの？
- ✓ 原子核ってどのくらい重いの？
- ✓ 原子核ってどんな形や色をしているの？
- ✓ 原子核ってどのように壊れるの？



大学では他にも



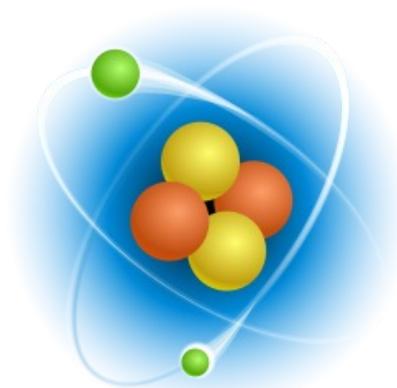
学生との勉強会  
(ゼミ)



授業



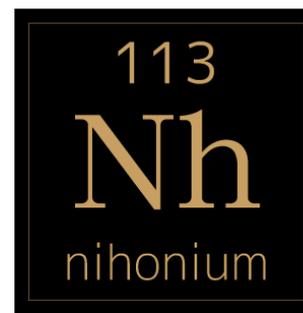
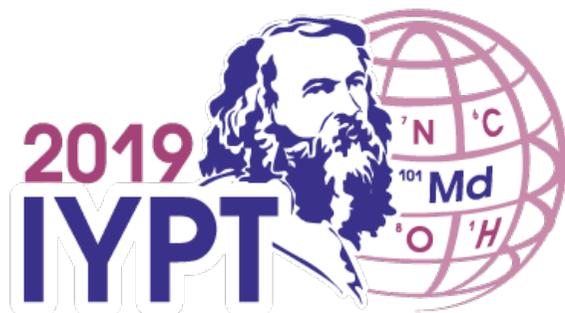
会議



などもしています。

# ものは何でできている？ ～元素のお話～

京都大学大学院理学研究科 教授  
萩野浩一



- 元素ってなんだろう？
- 湯川秀樹ってなにをした人？
- ニホニウムってなんだろう？



# まず皆さんにアンケート

1. ニホニウムって何か知っていますか？

2. เมนделレーエフって誰か知っていますか？

何をした人でしょう？

どこの国の人でしょう？

どの時代の人でしょう？

3. 湯川秀樹って誰か知っていますか？

何をした人でしょう？

どの時代の人でしょう？



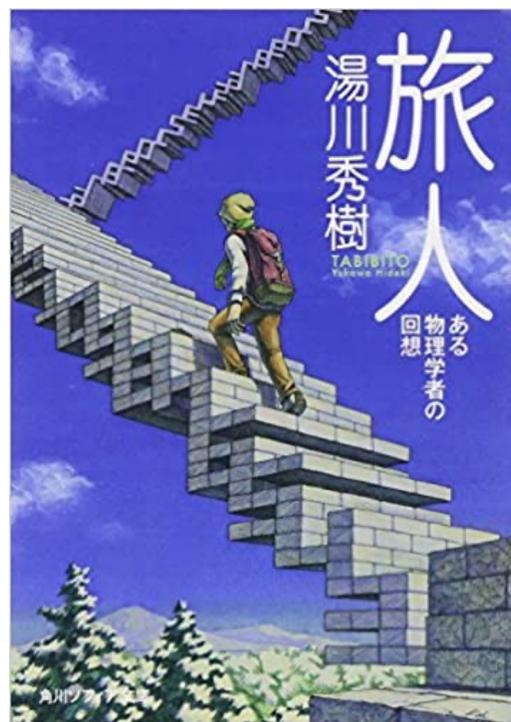
# 湯川秀樹



Wikipedia

- 明治40年(1907年)生まれ
- 昭和56年(1981年)没
- 京都帝国大学理学部物理学科卒業

日本で初めてのノーベル賞(物理学賞)  
を受賞



「旅人」  
湯川秀樹の自伝

# 湯川秀樹のことば

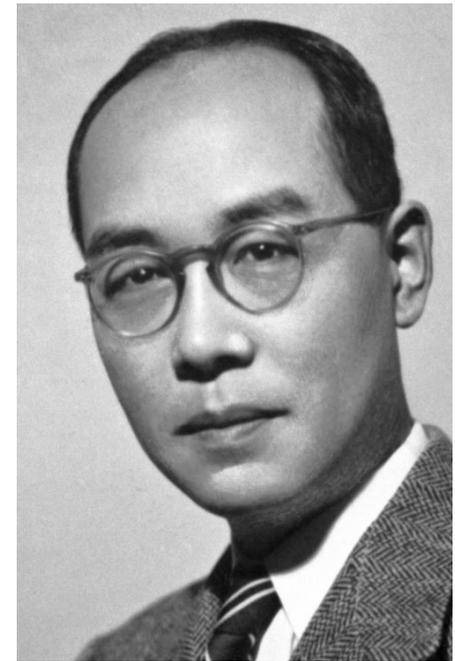
「私の中にあって、何十年にもわたって、私を動かし続けているのは、未知の世界へのあこがれである。私にとって、それは美しい世界であると期待されている。」

湯川秀樹 「自己発見」より

「未知の世界を探求する人々は、地図を持たない旅行者である。地図は探求の結果として、できるのである。」

湯川秀樹 「旅人」より

湯川秀樹はどのような「未知の世界」を探求したのか

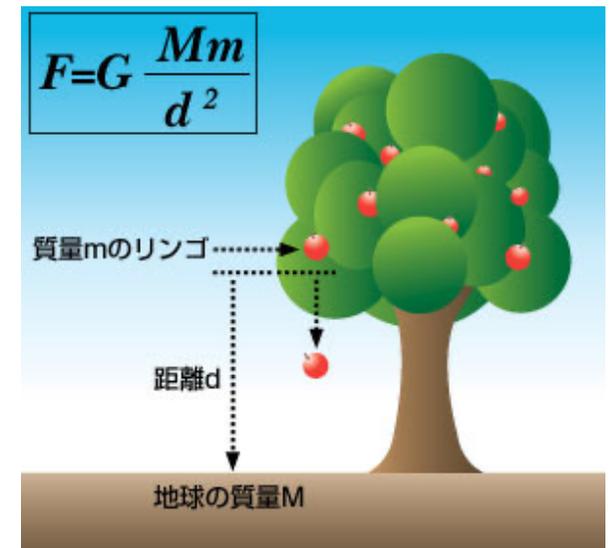


Wikipedia

## 湯川秀樹は何をした人なのか？

### 4つの力

- 重力(万有引力)
- 電磁気力(電気や磁石の力)
- 強い力(原子核の力)
- 弱い力(ニュートリノが関係する力)



JAXAのページより

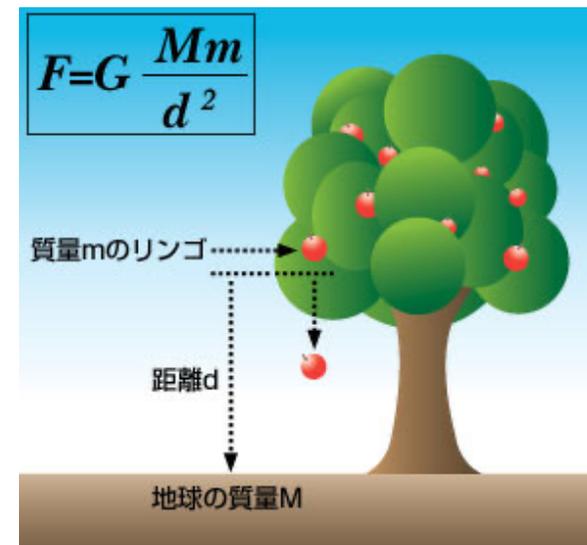


Wikipedia

# 湯川秀樹は何をした人なのか？

## 4つの力

- 重力(万有引力)
- 電磁気力(電気や磁石の力)
- ➔ • **強い力(原子核の力)**
- 弱い力(ニュートリノが関係する力)



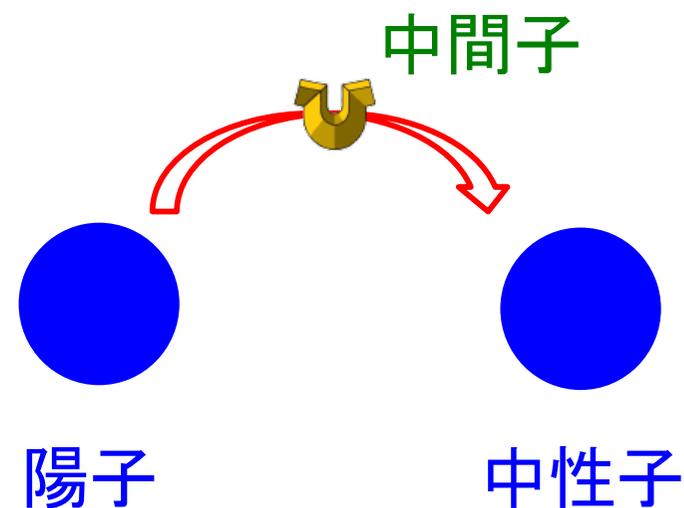
JAXAのページより



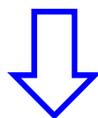
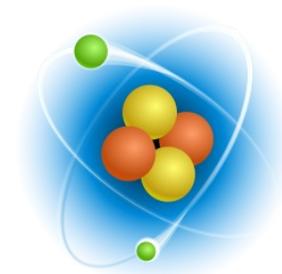
Wikipedia

□ 「強い力」を解明し、  
「中間子論」を提唱。  
(1935年 昭和10年)

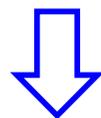
□ 1949年日本初の  
ノーベル賞受賞



「元素」の正体は「原子」



「原子」にも中身がある: 電子と原子核 (1911年)



原子核がなぜ存在しているのかというのが謎だった  
(当時はまだ重力と電磁気力しか分かっていなかった)。

湯川秀樹はこれを解明(1935年)。



素粒子  
物理学

原子核  
物理学

今日はこちら側の話

- 元素
- 原子
- 原子核

湯川秀樹は素粒子物理学・原子核物理学を開拓した人



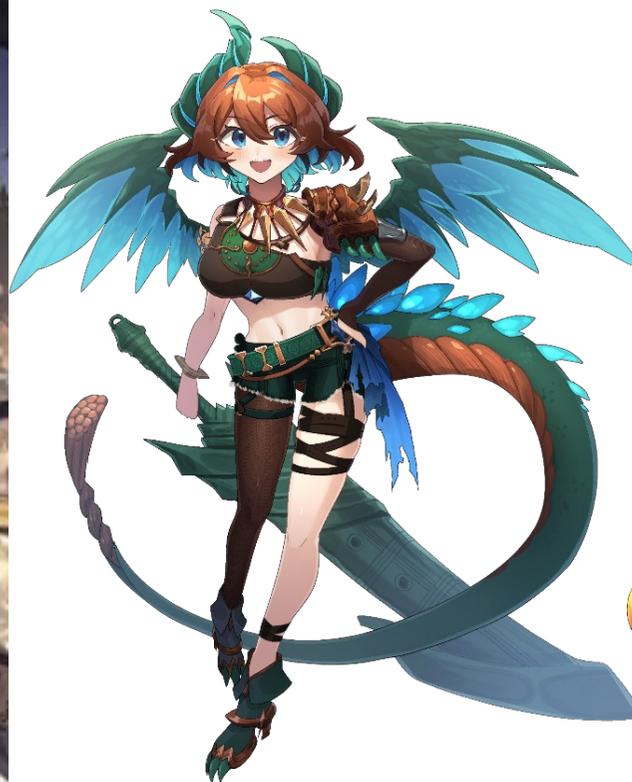
湯川秀樹著  
「目に見えないもの」  
(講談社学術文庫)

この本に書かれていることを  
少しかみ砕いて紹介します。

# 最近でた本



## 元素を擬人化



銅元素



カルシウム元素

著者の揚げ鶏々さんは近大4年生でイラストレーター

「もの」とは何だろうか？  
ものは何からできているのだろうか？

# 元素

この世の中にあるものは、  
すべて元素からできています。

元素 = すべてのものを作る材料



↑ 材料



↑ 材料

元素

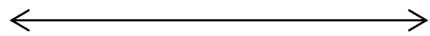
ものは何からできているのだろうか？

# 元素

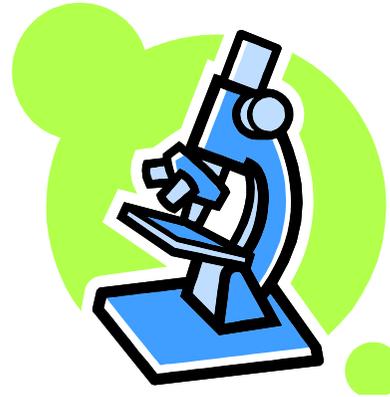
古代ギリシャ人： この世の中のものは火、風、水、土の4つの元素からつくられていると考えた。



今では、ものを小さくしていくと  
**「原子」**  
になることが分かっている。



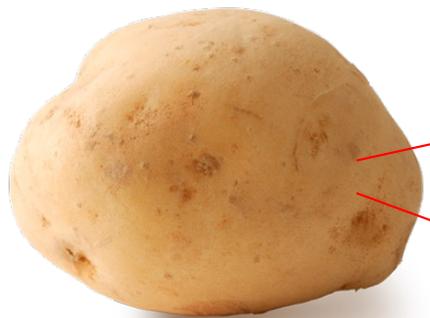
~ 10 cm



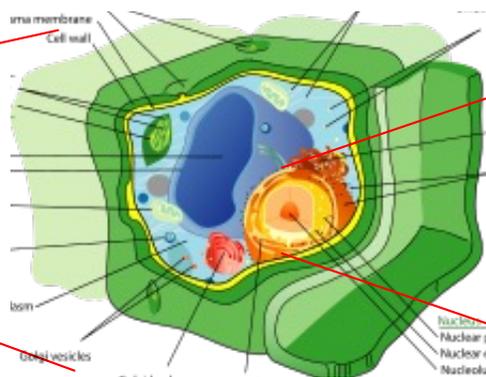
拡大して見てみると。。。？

さいぼう  
細胞

DNA

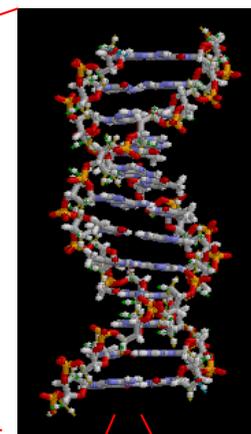


~ 10 cm



~  $\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$

100倍



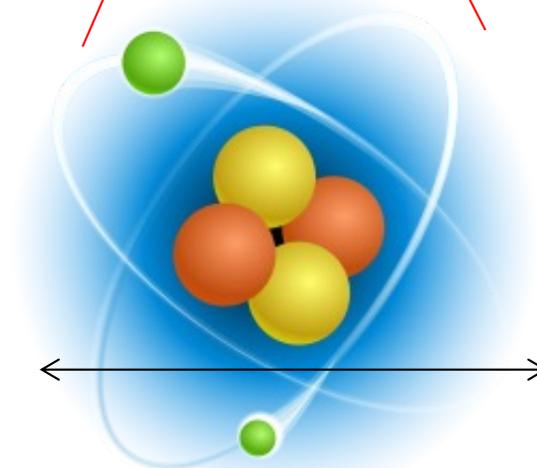
~  $10^{-8} \text{ m}$



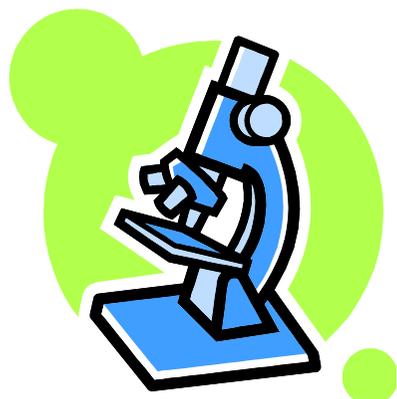
10万倍

げんし  
原子

100倍



~  $10^{-10} \text{ m}$



# すべてのものは原子から組み立てられる



- タレス、デモクリトス(古代ギリシャ)
- ドルトン(19世紀初頭の化学者) 日本:江戸時代後期
- ボルツマン(19世紀後期) 日本:明治時代前期

## ドルトンの倍数比例の法則

一酸化炭素では炭素:酸素=1:1、二酸化炭素では 1:2 など

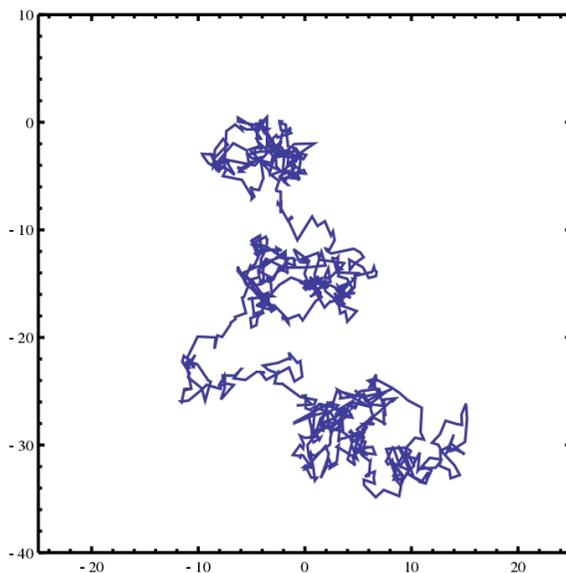
## ボルツマン

原子論に基づき熱力学を構築

# すべてのものは原子から組み立てられる



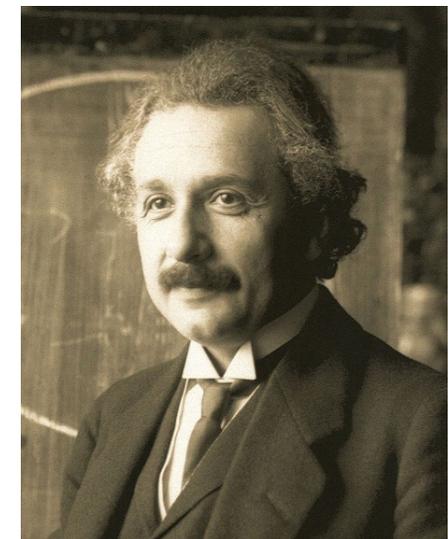
- タレス、デモクリトス(古代ギリシャ)
- ドルトン(19世紀初頭の化学者) 日本:江戸時代後期
- ボルツマン(19世紀後期) 日本:明治時代前期
- **アインシュタイン(1905年)**



## ブラウン運動

花粉から出た微粒子の運動。  
1827年ブラウンが発見。

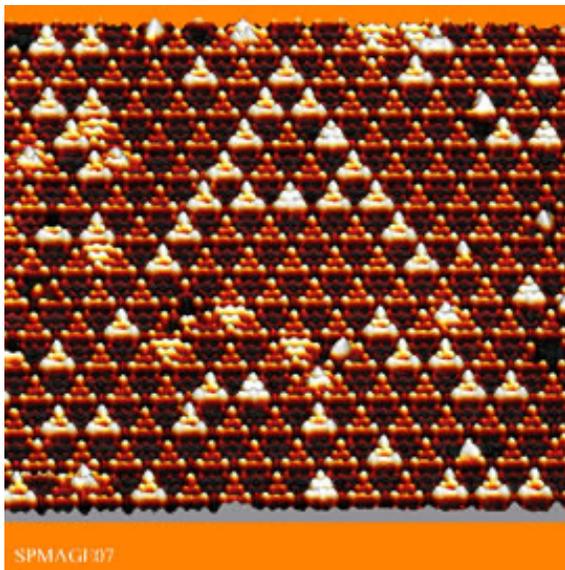
Wikipedia



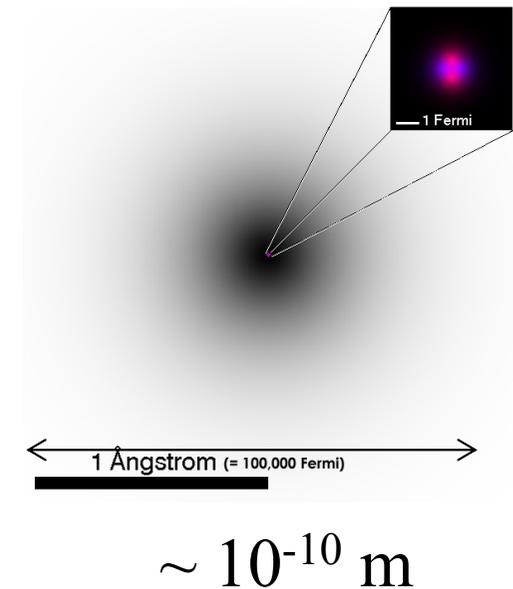
# すべてのものは原子から組み立てられる



- タレス、デモクリトス(古代ギリシャ)
- ドルトン(19世紀初頭の化学者)
- ボルツマン(19世紀後期)
- アインシュタイン(1905年)



走査トンネル顕微鏡  
の写真  
(東北大学物理学専攻  
表面物理研究室)



# すべてのものは原子から組み立てられる

たった一つの文章で現代科学の  
成果をまとめると：

「すべてのものは原子からできて  
いる」

(リチャード・ファインマン)



リチャード・ファインマン  
(1918-1988)  
1965年ノーベル物理学賞  
受賞  
(写真: The Nobel Foundation)



## 空気について

なぜなぜ

部屋の中にいつもいるけど、誰にも見えないものは、なあんだ？

## 空気について

なぜなぜ

部屋の中にいつもいるけど、誰にも見えないものは、なあんだ？

答え：空気

空気

- ✓ 普段意識しないけど、空気がないと生きられない
- ✓ 目には見えない
- ✓ においもない
- ✓ ぶつかっても、ぶつかってるようには感じない
- ✓ でも風が吹けば何かが動いているのを感じられる  
→何かがある(それが空気)

「空気とは何か？」

を考えるのはみんなが科学のことを考える格好の機会」

## 日中に見られる青空



ROOM写真素材ルーム  
<https://photo-room.net/1567/>

## 夕陽のオレンジ

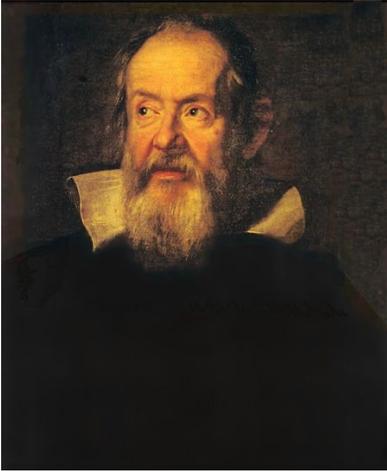


Wikipedia

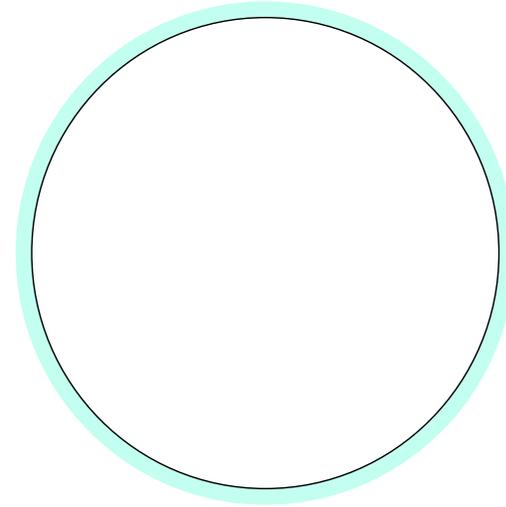
この違いも空気があればこそ

## 空気の重さについて

空気にも重さがある！



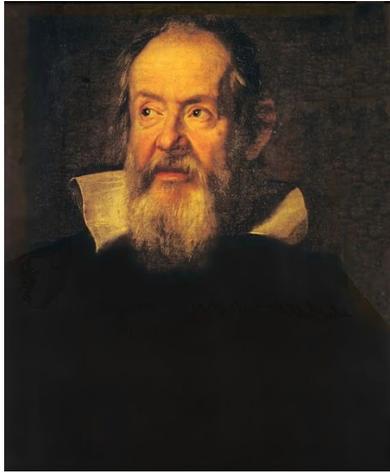
ガリレオ・ガリレイ



重さがあるからこそ、  
地球に引っ張られて  
留まっている  
(宇宙空間に広がらない)

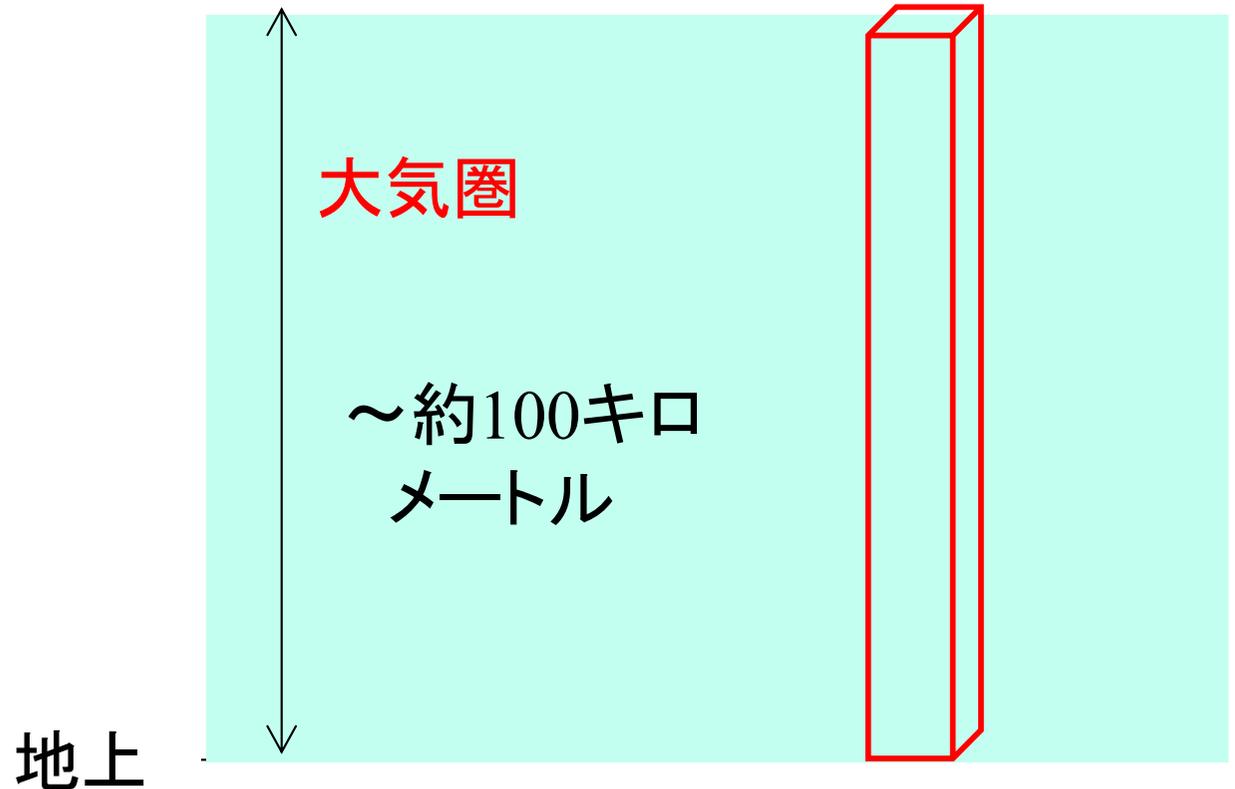
## 空気の重さについて

空気にも重さがある！



ガリレオ・ガリレイ

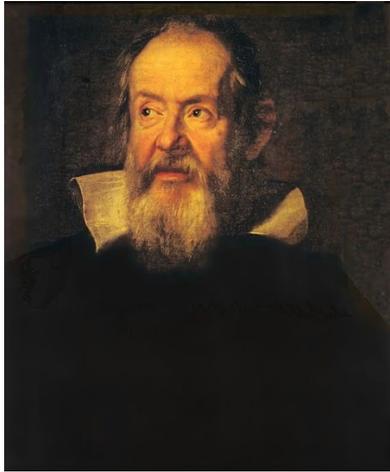
どのくらい重いのか？



1cm x 1cm の正方形  
の上の空気を全部  
足すと。。。。

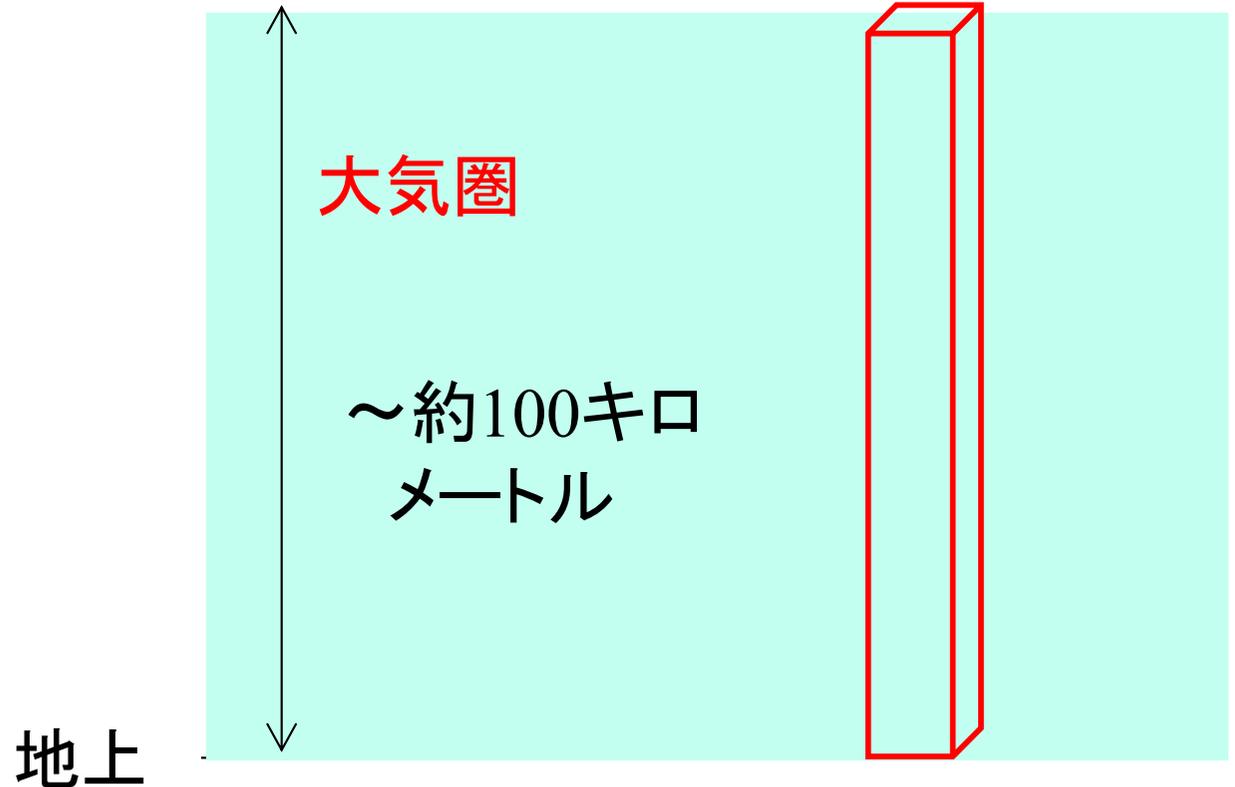
## 空気の重さについて

空気にも重さがある！



ガリレオ・ガリレイ

どのくらい重いのか？



1cm x 1cm の正方形  
の上の空気を全部  
足すと。。。。

答えは約 1kg  
= 1気圧

## 空気の重さについて

空気にも重さがある！

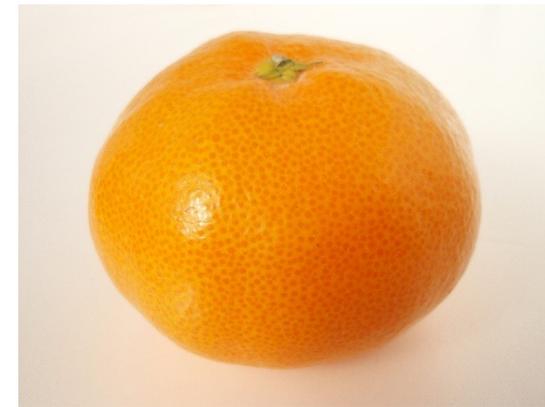
空気の密度 = 1リットルあたり 1.2 g

(気温20度、1気圧、湿度 65% のとき)

80リットルなら  $1.2 \text{ (g/L)} \times 80 \text{ (L)} = 96 \text{ g}$



参考



みかん1つ分くらい

## 空気の重さについて

空気にも重さがある！

空気の密度 = 1リットルあたり 1.2 g

(気温20度、1気圧、湿度 65% のとき)

クイズ: 水1リットルと空気  $1m^3$  ではどちらが重いでしょうか？

## 空気の重さについて

空気にも重さがある！

空気の密度 = 1リットルあたり 1.2 g

(気温20度、1気圧、湿度 65% のとき)

クイズ: 水1リットルと空気  $1m^3$  ではどちらが重いでしょうか？

答え: 空気  $1m^3$

空気は意外と重い

$1m^3 = 1,000$  リットル

→ 空気の重さは  $1.2 \times 1,000 = 1,200$  g = 1.2 kg

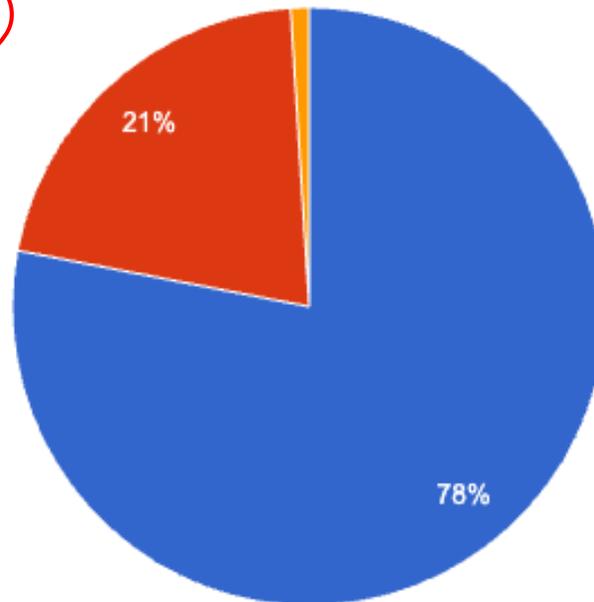
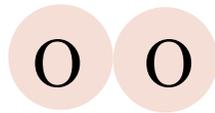
水1リットルの重さ = 1 kg

## 空気の成分について

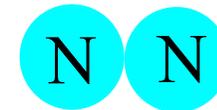
空気に重さがあるのは、空気が粒(分子)で出来ているから:

窒素:体積の約78%+酸素:体積の約21%  
(重さの割合だと、窒素:約75.5%、酸素:23%)

酸素(約21%)



窒素(約78%)



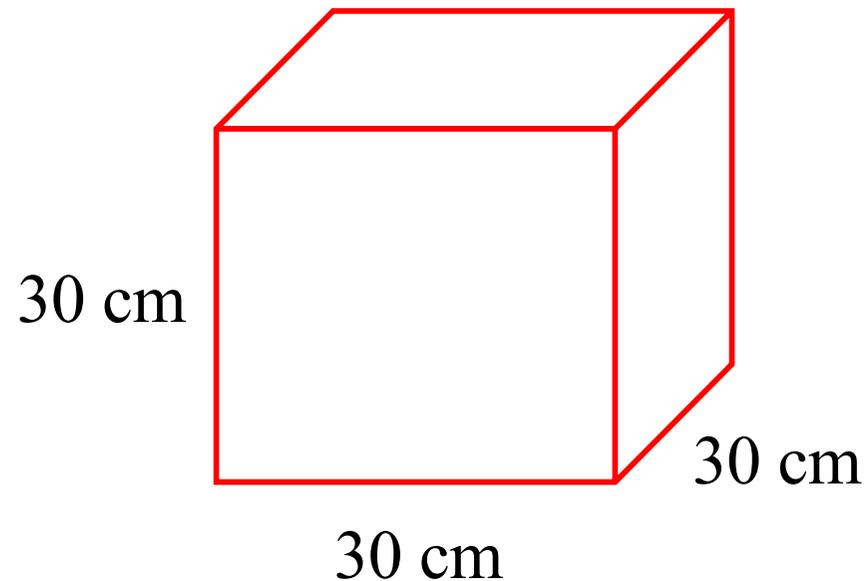
なんでこんなに窒素が多いのか？

→窒素分子はとても安定で、一度出来たらほとんど変化しないため

## 空気の成分について

窒素：体積の約 78% + 酸素：体積の約 21%  
(重さの割合だと、窒素：約 75.5%、酸素：23%)

皆さんの目の前の 30 cm x 30 cm x 30 cm の空間を想像してください。  
その中に何個くらいの窒素分子 ( $\text{N}_2$  分子) があると思いますか？



## 空気の成分について

窒素：体積の約 78% + 酸素：体積の約 21%  
(重さの割合だと、窒素：約 75.5%、酸素：23%)

皆さんの目の前の 30 cm x 30 cm x 30 cm の空間を想像してください。  
その中に何個くらいの窒素分子(N<sub>2</sub>分子)があると思いますか？

答え：

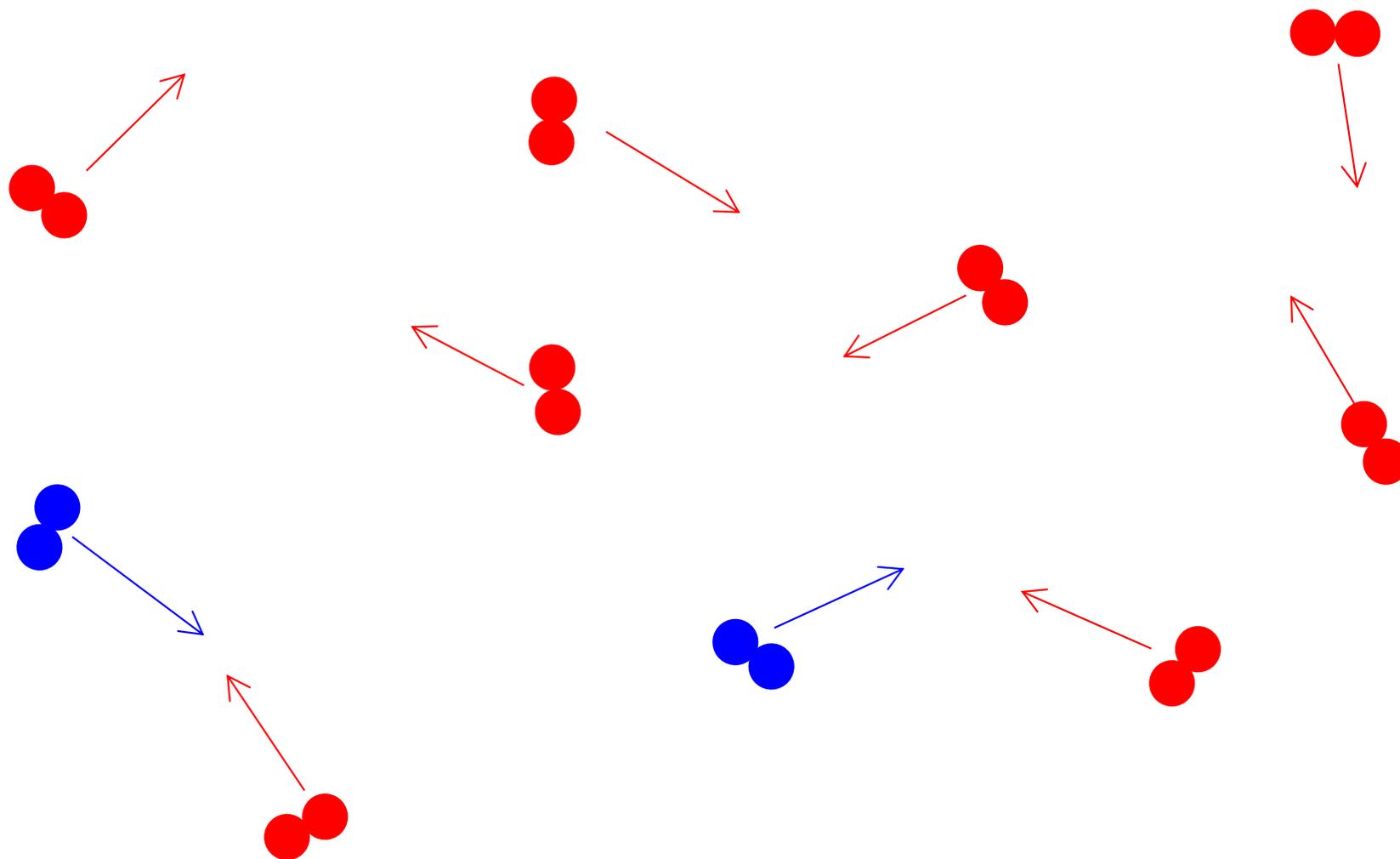
約 750000000000000000000000 個!!

=  $7.5 \times 10^{23}$  (7500垓) 個



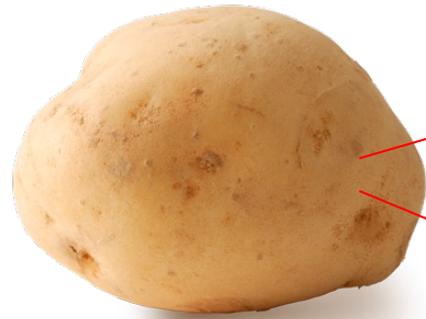
なんとゼロが22 個!!  
一、十、百、千、万、億、兆、  
京、垓、序(じょ)、穰(じょう)、...

室温で分子は秒速約300メートル  
で飛んでいる(新幹線の約4倍の速さ)

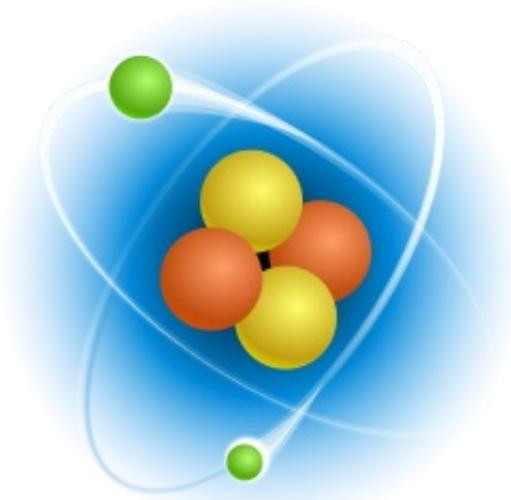


口を開けていると1秒あたり約3桁個の分子が飛び込んでくる!!

# ジャガイモも拡大すると原子の集まり



100億倍



げんし  
原子

100グラムのジャガイモの中には、

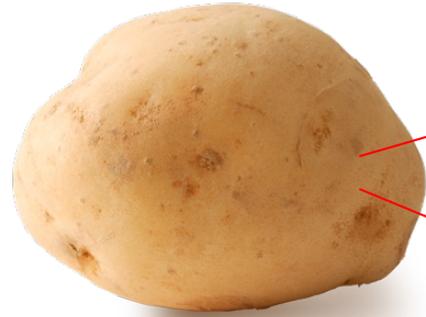
約100000000000000000000000000000 個

(10序 =  $10^{25}$  個)の原子が入っている!!

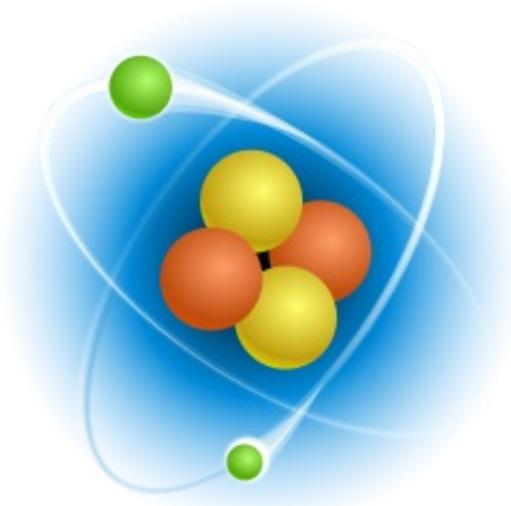
なんとゼロが25 個!!

一、十、百、千、万、億、兆、  
京、垓、序(じょ)、穰(じょう)、...

# ジャガイモも拡大すると原子の集まり



100億倍



げんし  
原子

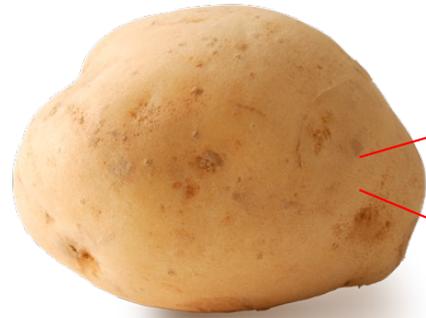
100グラムのジャガイモの中には、

**約100000000000000000000000000000 個**

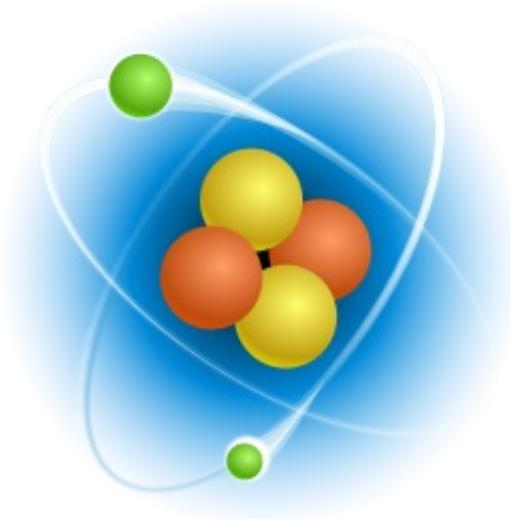
(10序 =  $10^{25}$  個)の原子が入っている!!

ジャガイモ100グラムに入っている水分子を仮に1直線上に並べて  
みたら地球を何周分？

**答え:1千万周くらい。新幹線だと10万年かかる。**



100億倍



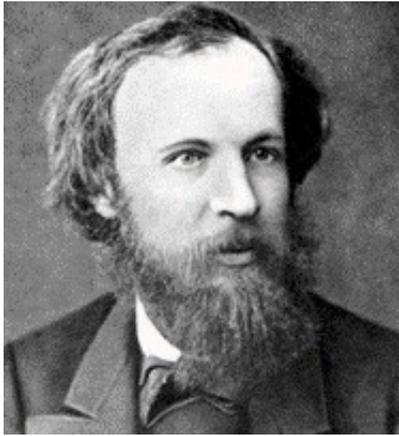
原子

原子にもいろいろな種類 = 元素

- 水素(すいそ) H
- 酸素(さんそ) O
- 炭素(たんそ) C
- カルシウム Ca
- マグネシウム Mg
- 硫黄(いおう) S

地球上にある原子は  
約90種類

など。



# メンデレーエフの元素周期表(オリジナル)

Ann. Suppl. 8, 133 (1871).

未知の元素  
を予言できた

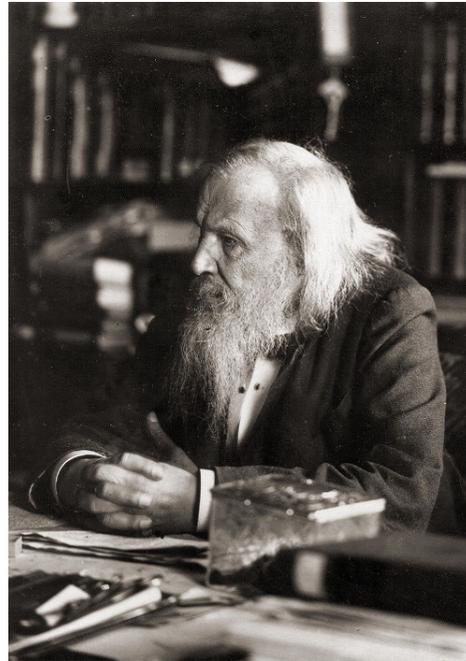
① 水素 重さ 1						性質の 不明
② リチウム 重さ 7	③ ベリウム 重さ 9.4	④ ほう素 重さ 11	⑤ 炭素 重さ 12	⑥ 窒素 重さ 14	⑦ 酸素 重さ 16	⑧ 小フ素 重さ 19
⑨ ナトリウム 重さ 23	⑩ マグネシウム 重さ 24	⑪ アルミニウム 重さ 27.3	⑫ けい素 重さ 28	⑬ 矽 重さ 32	⑭ 硫黄 重さ 32	⑮ 塩素 重さ 35.5
⑯ カルシウム 重さ 39	⑰ カルシウム 重さ 40	? 重さ 44	⑲ チタン 重さ 50?	⑳ バナジウム 重さ 51	㉑ クロム 重さ 52	㉒ マンガン 重さ 55
㉓ 銅 重さ 63	㉔ 亜鉛 重さ 65	? 重さ 68	? 重さ 72	㉖ ヒ素 重さ 75	㉗ セレン 重さ 78	㉘ 臭素 重さ 80
㉙ 亜鉛 重さ 85	㉚ 亜鉛 重さ 87	? 重さ 88?	㉛ 亜鉛 重さ 90	㉜ ニオブ 重さ 94	㉝ モリブデン 重さ 96	㉞ 鉛
㉟ 鉛 重さ 108	㊱ カリウム 重さ 112	㊲ インジウム 重さ 113	㊳ 錫 重さ 118	㊴ アンチモン 重さ 120		



ガリウムの発見  
(1874)

ゲルマニウムの発見  
(1879)

# 元素の周期表

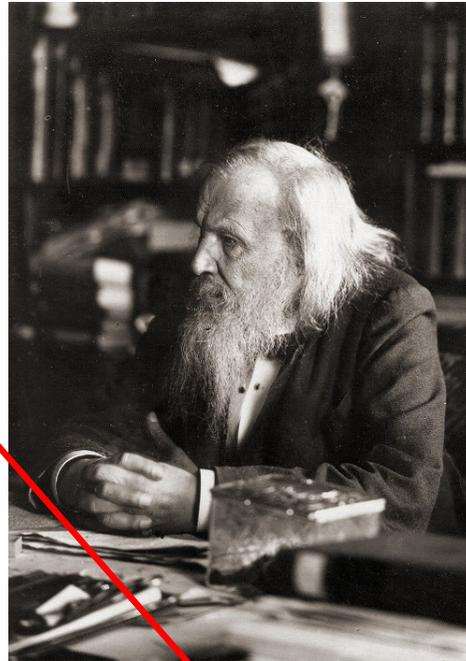


メンデレーエフ  
(1834-1907)

Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Period 1	1 H																	2 He
Period 2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
Period 3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
Period 4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
Period 5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
Period 6	55 Cs	56 Ba	* 71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
Period 7	87 Fr	88 Ra	* 103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
			* 57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb		
			* 89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No		

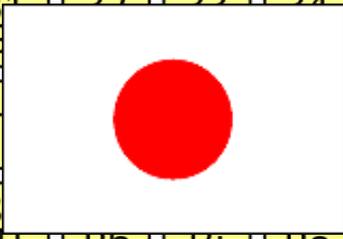
# 元素の周期表

ニホニウム



メンデレーエフ  
(1834-1907)

Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Period 1	1 H																	2 He
Period 2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
Period 3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
Period 4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
Period 5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
Period 6	55 Cs	56 Ba	* 71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
Period 7	87 Fr	88 Ra	* 103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
			* 57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb		
			* 89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No		





## ニホニウム命名記念式典(平成29年3月14日、日本学士院)

皇太子殿下(当時):「高校2年生の時の化学の夏休みの宿題は元素の周期表を30枚以上手書きで書くというものでした。」



Q.人間の体の中には何種類くらいの  
の元素がある？

1. 15種類くらい？
2. 30種類くらい？
3. 50種類以上

Q.人間の体の中には何種類くらいの  
の元素がある？

1. 15種類くらい？
2. 30種類くらい？
3. 50種類以上

# 人の体はどんな元素から出来ている？

酸素 43 kg  
炭素 16 kg  
水素 7 kg  
窒素 1.8 kg  
カルシウム 1.0 kg  
リン 780 g  
カリウム 140 g  
硫黄 140 g  
ナトリウム 100 g  
塩素 95 g  
マグネシウム 19 g  
鉄 4.2 g  
フッ素 2.6 g  
亜鉛 2.3 g  
ケイ素 1.0 g  
ルビジウム 0.68 g  
ストロンチウム 0.32 g  
臭素 0.26 g  
鉛 0.12 g  
銅 72 mg  
アルミニウム 60 mg  
カドミウム 50 mg

セリウム 40 mg  
バリウム 22 mg  
ヨウ素 20 mg  
スズ 20 mg  
チタン 20 mg  
ホウ素 18 mg  
ニッケル 15 mg  
セレン 15 mg  
クロム 14 mg  
マンガン 12 mg  
ヒ素 7 mg  
リチウム 7 mg  
セシウム 6 mg  
水銀 6 mg  
ゲルマニウム 5 mg  
モリブデン 5 mg  
コバルト 3 mg  
アンチモン 2 mg  
銀 2 mg  
ニオブ 1.5 mg  
ジルコニウム 1 mg  
ランタン 0.8 mg

ガリウム 0.7 mg  
テルル 0.7 mg  
イットリウム 0.6 mg  
ビスマス 0.5 mg  
タリウム 0.5 mg  
インジウム 0.4 mg  
金 0.2 mg  
スカンジウム 0.2 mg  
タンタル 0.2 mg  
バナジウム 0.11 mg  
トリウム 0.1 mg  
ウラン 0.1 mg  
サマリウム 50 µg  
ベリリウム 36 µg  
タングステン 20 µg

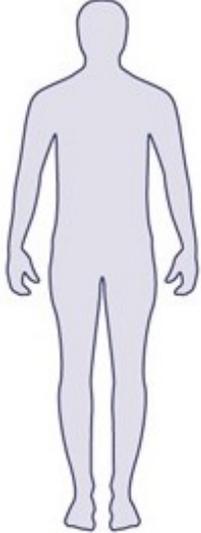


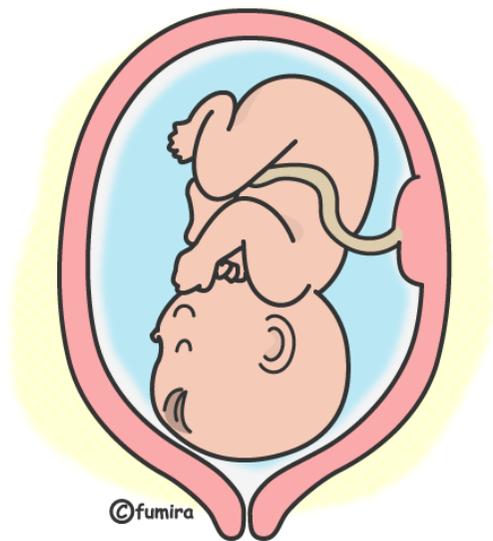
John Emsley,  
“The Elements”,  
3rd ed. Clarendon Press,  
Oxford, 1998

# 人の体はどんな元素から出来ている？

元素周期表

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po		
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv		
La	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm				
Ac	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md				





## 羊水に含まれる主な元素

1. 水素
2. 酸素
3. ナトリウム
4. 塩素
5. カリウム
6. カルシウム
7. マグネシウム

生命は海から生まれた?

## 海水に含まれる主な元素

1. 水素
2. 酸素
3. ナトリウム
4. 塩素
5. マグネシウム
6. 硫黄
7. カリウム
8. カルシウム

# 「〇〇番」元素とは？

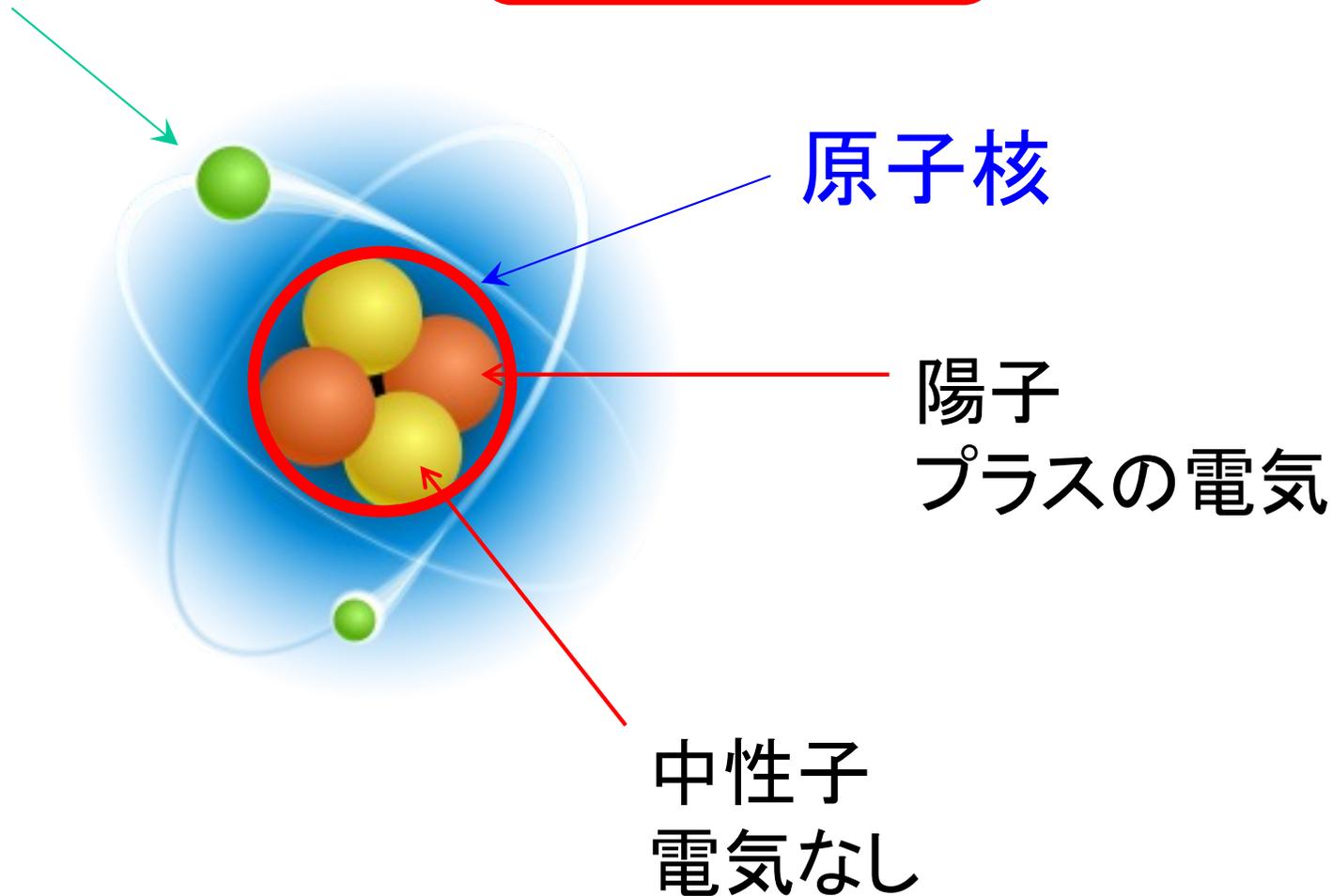
原子の中身

例えば、酸素は8番元素

電子  
マイナスの電気

ただし、この図は  
大間違い！

=陽子が8個  
(電子も同数)

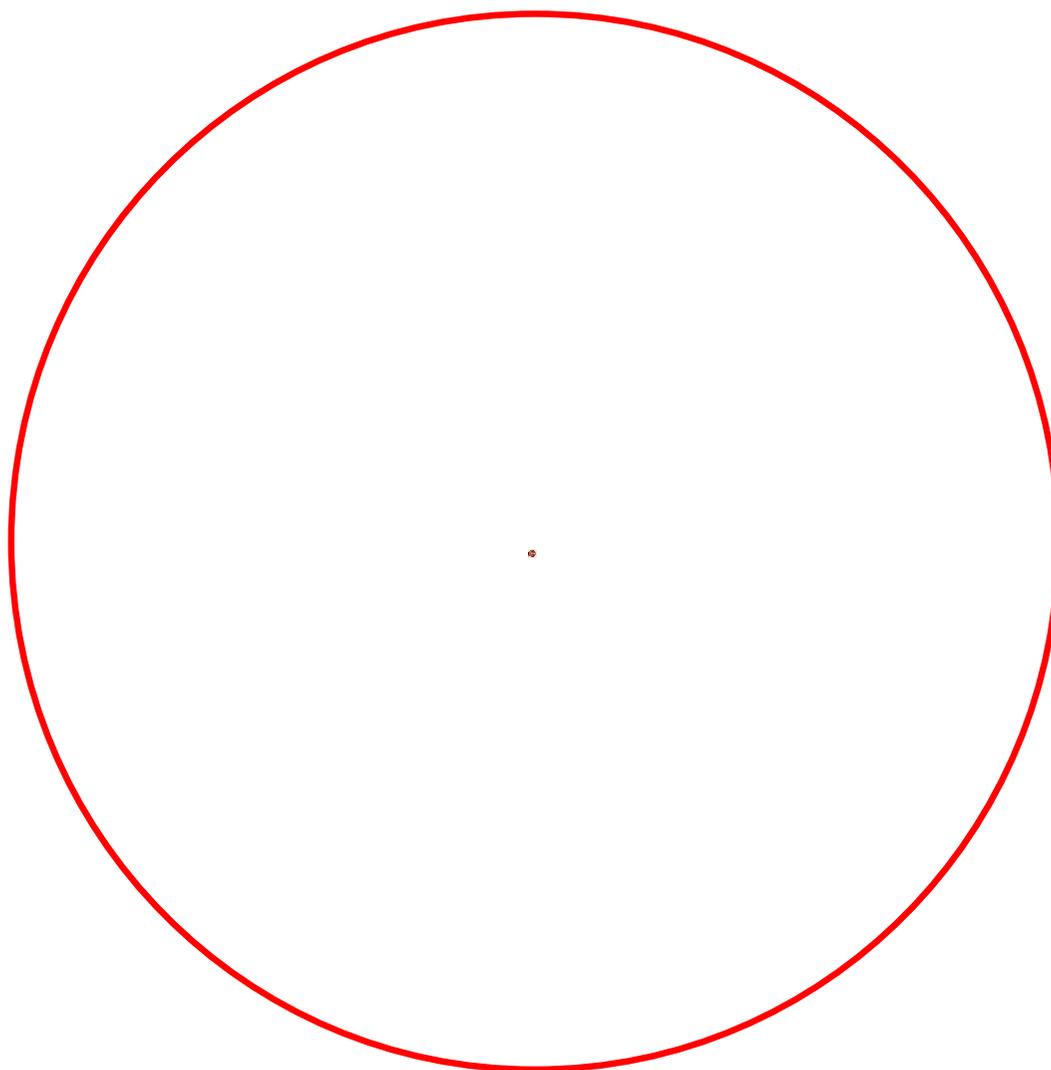


原子の大きさを京都御苑  
くらいの大きさだとすると。。。。



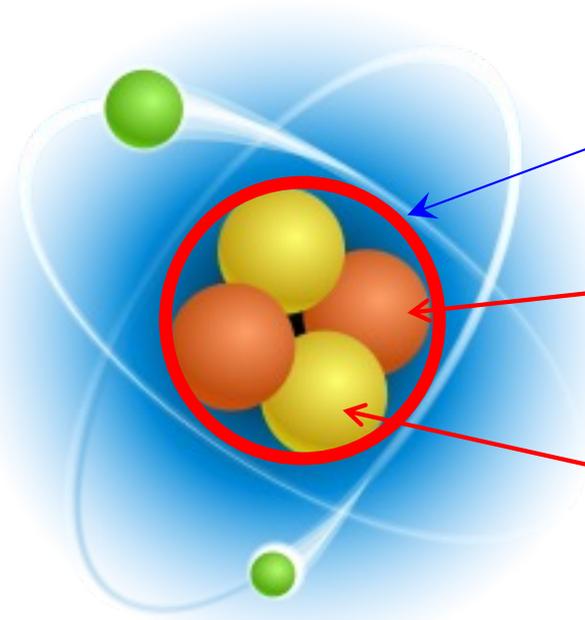
原子の大きさを京都御苑  
くらいの大きさだとすると。。。





原子の大きさを京都御苑  
くらいの大きさだとすると。。。





原子核

陽子  
プラスの電気

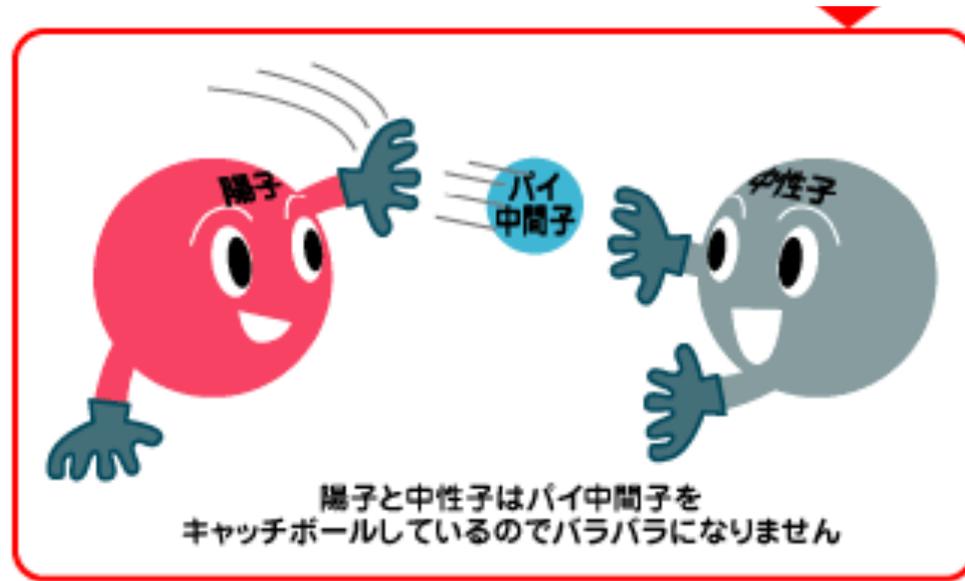
中性子  
電気なし

## 湯川秀樹が挑戦した謎

どうやって原子核のような小さな場所に陽子を閉じ込めておけるのか？

十の電気と十の電気は反発。距離が近ければ近いほど反発力は大きい。



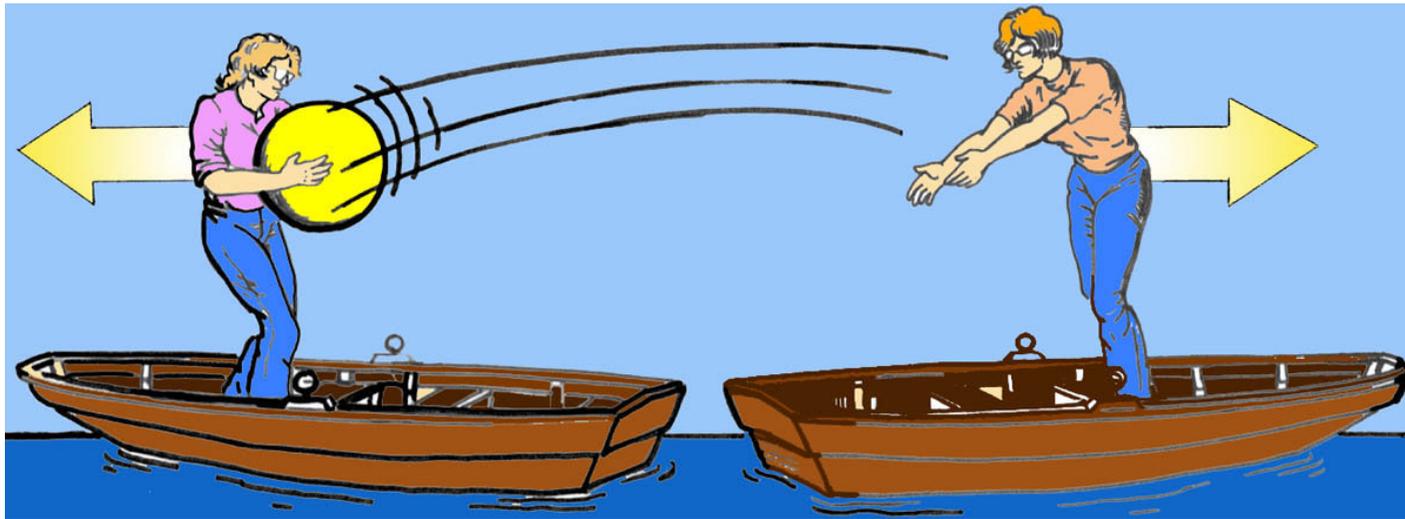


国立科学博物館の図より

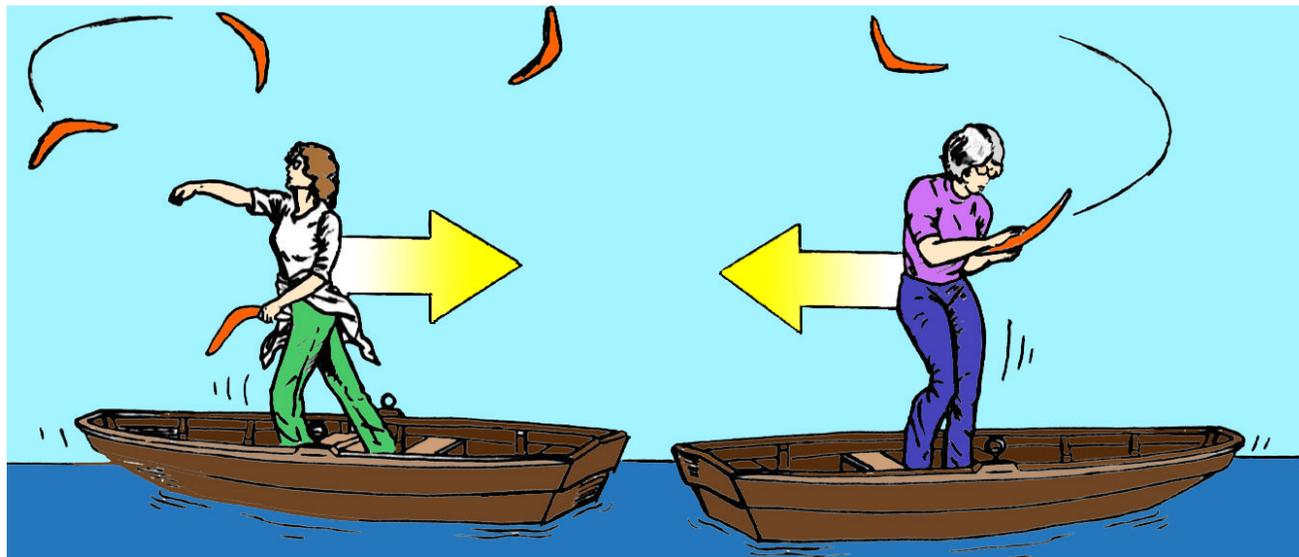
## 湯川秀樹の答え(1935年)

- ✓ 電気の力とは全く違う力
- ✓ 新しい粒子「中間子」をキャッチボール  
→原子核がバラバラにならない。

宇宙を作っている一番元の力がわかった！



[https://www.fnal.gov/pub/today/archive/archive\\_2013/images/NS130315\\_Figure01.jpg](https://www.fnal.gov/pub/today/archive/archive_2013/images/NS130315_Figure01.jpg)

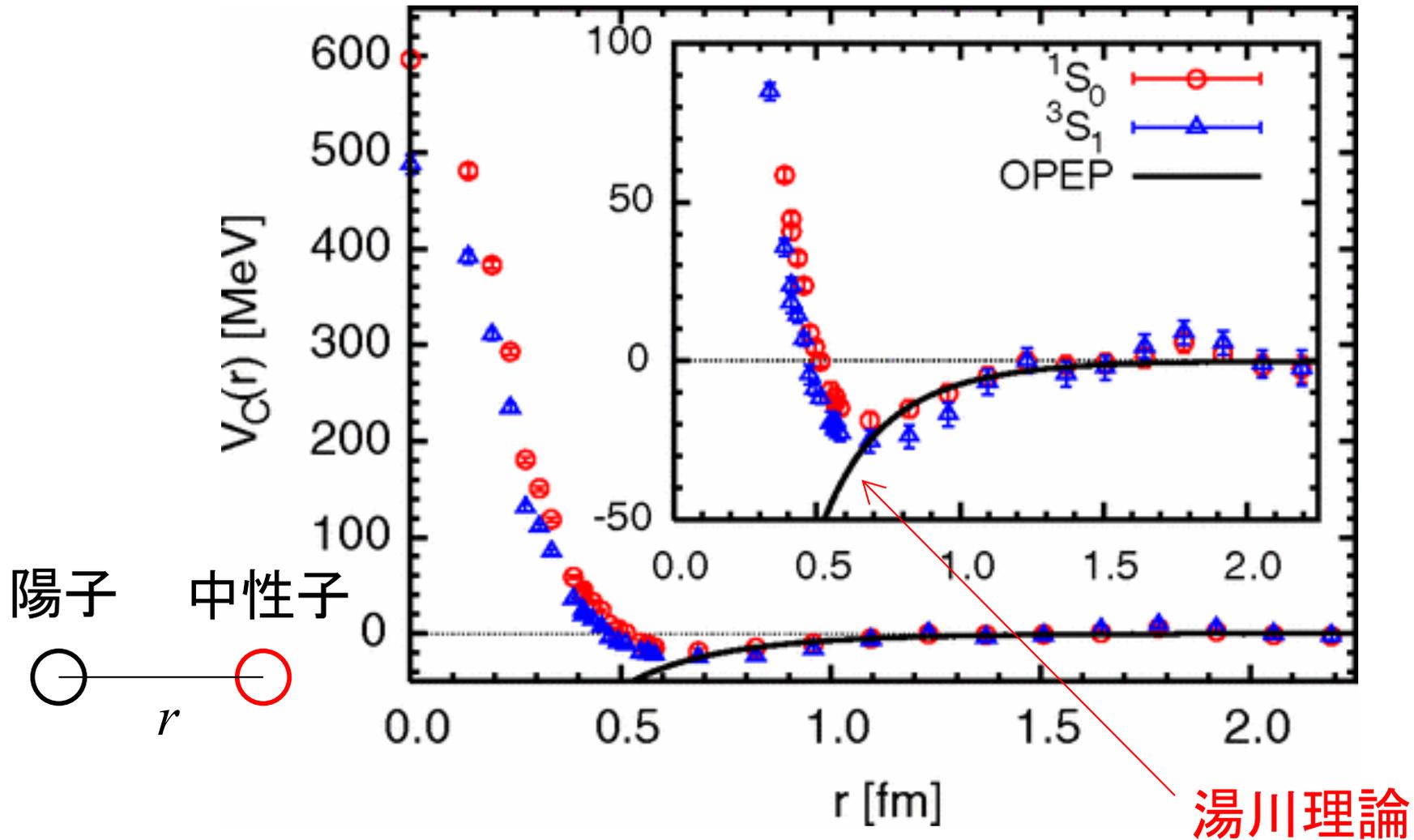


<https://makemephy.wordpress.com/2013/10/10/exchange-particles-and-feynman-diagrams/>

中間子はその後、実在が確かめられた(1947年、パウエル)  
→湯川秀樹ノーベル賞受賞 (1949年)

湯川の予言は、最近になってスパコンを使った大規模計算でも確かめられた。

「格子量子色力学(格子QCD)」



N. Ishii, S. Aoki, and T. Hatsuda, Phys. Rev. Lett. 99 (2007) 022001

Q. 元素はどこで出来たのでしょうか？

1. 宇宙でできた。
2. 南極の氷の中でできた。
3. 富士山が噴火したときにできた。

Q. 元素はどこで出来たのでしょうか？

- 1. 宇宙でできた。
- 2. 南極の氷の中でできた。
- 3. 富士山が噴火したときにできた。

# 元素のルーツ: 元素のファミリーヒストリー

→ 元素はすべて宇宙で生まれた



ビッグバン  
(138億年前)



Li



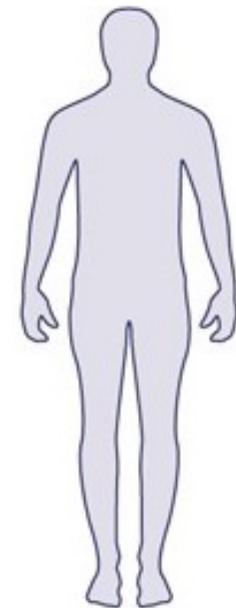


「知ろうとすること。」  
早野龍五、糸井重里 著  
新潮文庫

「僕たちの体の中の水素は  
138億歳。」

つまり、ビッグバンの時に  
できた水素が巡り巡って  
僕たちの体の中にある。」

酸素 43 kg  
炭素 16 kg  
水素 7 kg



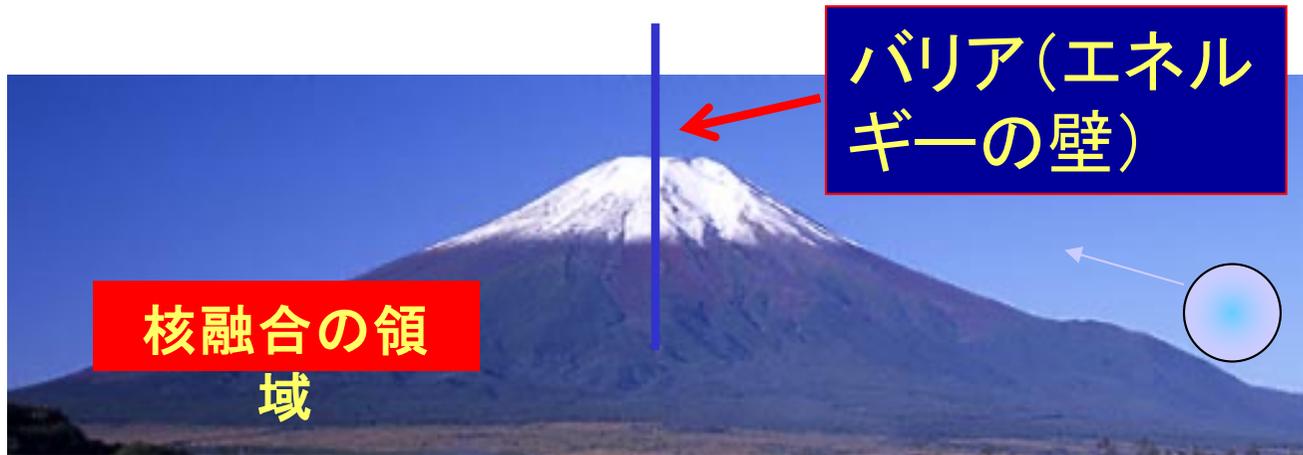
体重70キログラム

Fe までの元素はどのように出来たのか?

## Feまでの元素の起源



(大質量)星の内部での核融合反応  
→ 恒星が光っているもと



原子核を勢いよくぶつけるとバリアを乗り越えて核融合が起きる  
...しかし、星(太陽)の中では「勢い」(エネルギー)が足りない

# 量子力学(りょうしりきがく)

物質は波の性質と粒子の性質の両方を持っている

電子: 粒子  
ド・ブロイ波

電磁波: 波  
光子

# ハイゼンベルクの不確定性原理

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq 10^{-34} \quad \text{J s}$$

位置と運動量を同時に決める  
ことはできない



ハイゼンベルク  
(1901~1976)



「見て楽しむ量子物理学の世界」  
ジム・アルカーリー著

# ハイゼンベルクの不確定性原理

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq 10^{-34} \quad \text{J s}$$

位置と運動量を同時に決めることはできない

....もし  $\Delta p \cdot \Delta x \geq 10 \quad \text{J s}$  だったら.....



ハイゼンベルク  
(1901~1976)



What if his car leaked out of its locked garage?

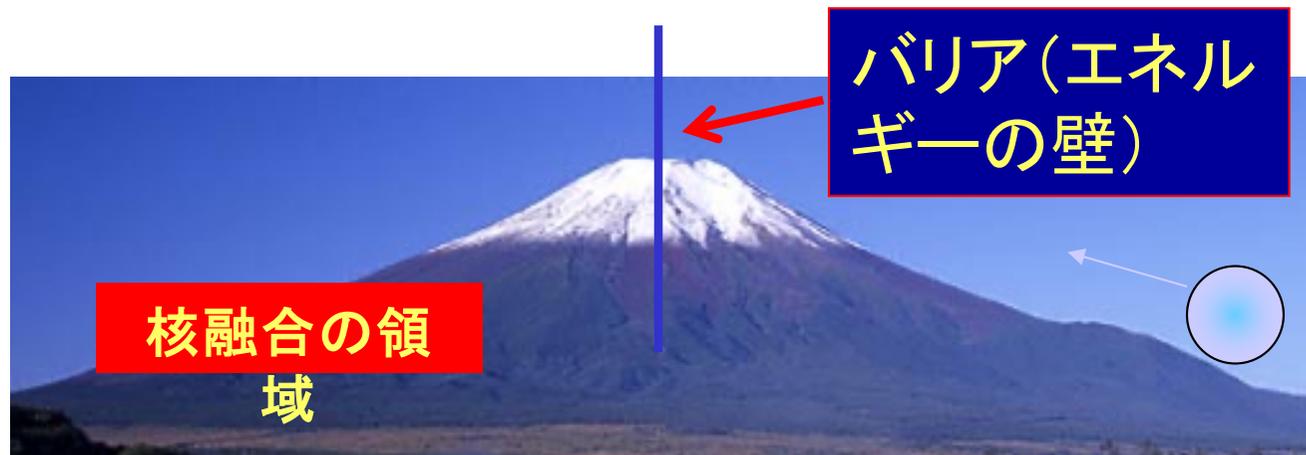
車が壁をすり抜ける!?



実際には質量が軽い場合のみ

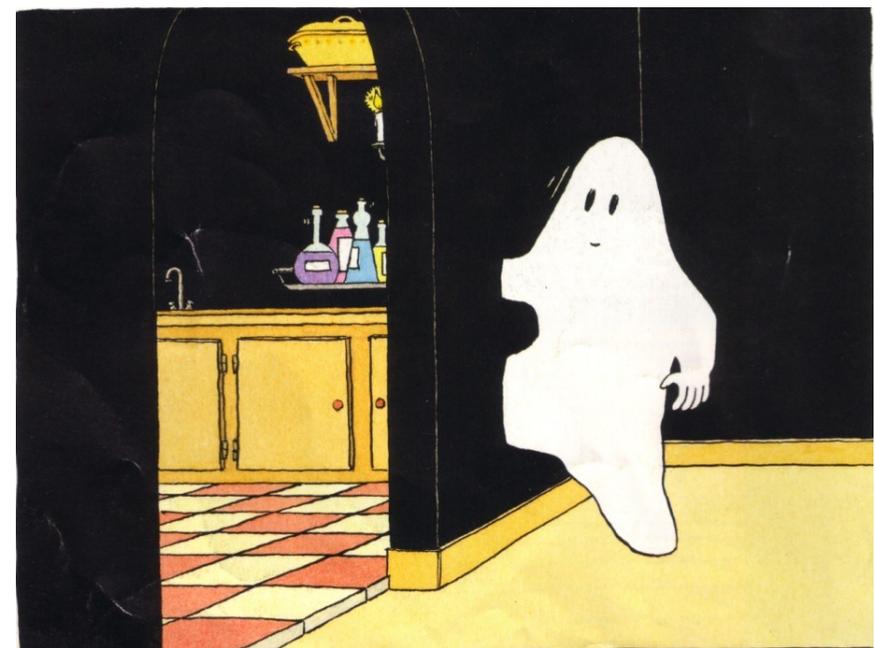
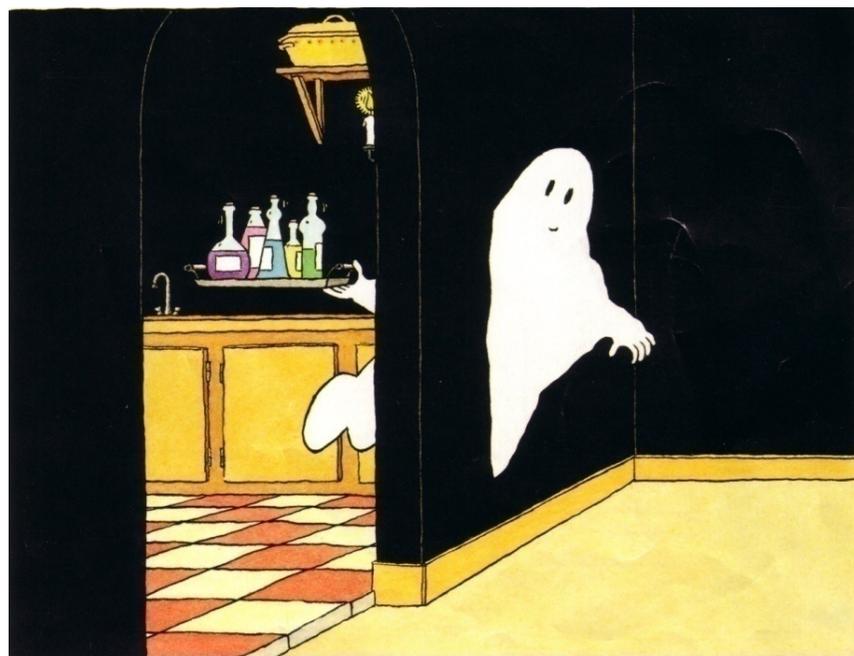
電子の質量: 約  $10^{-27} \text{ g}$

陽子の質量: 約  $10^{-24} \text{ g}$



原子核を勢いよくぶつけるとバリアを乗り越えて核融合が起きる  
...しかし、星(太陽)の中では「勢い」(エネルギー)が足りない

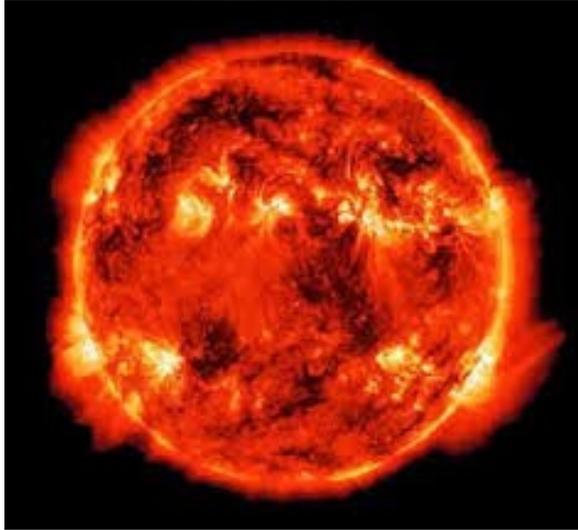
→ 「量子トンネル現象」で星は輝いている



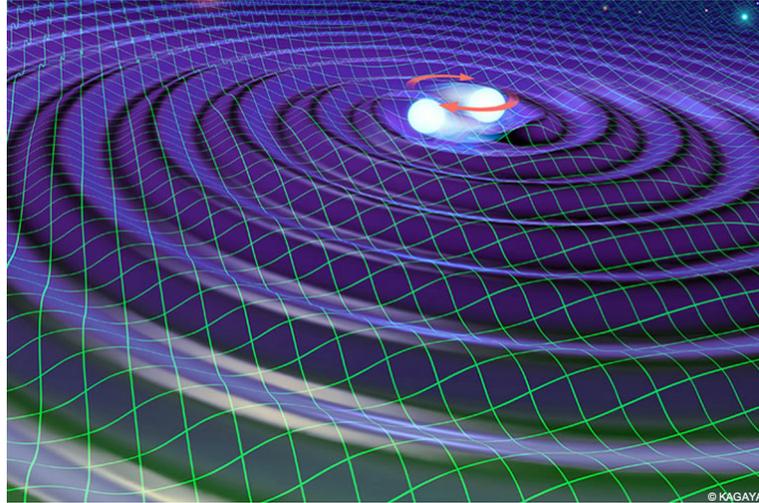
ジャック・デュケノワ著「おばけパーティー」より

Fe より重い元素はどのように出来たのか?

中性子の吸収



赤色巨星



中性子星の合体

重力波

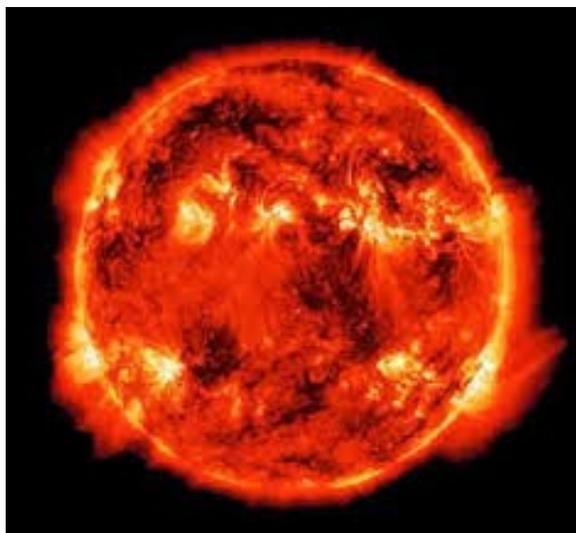


実は、金の起源はよくわかっていない

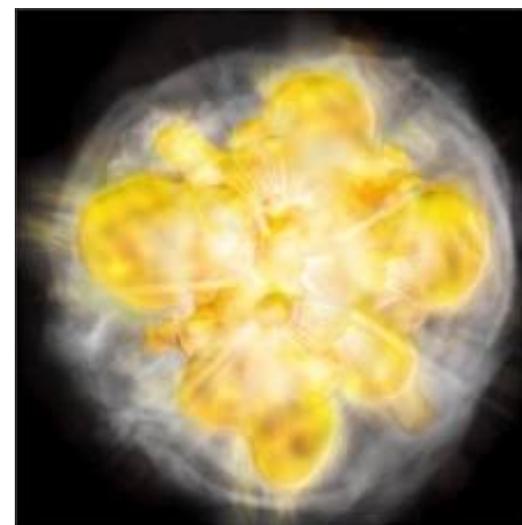
# 星の一生



星間ガス



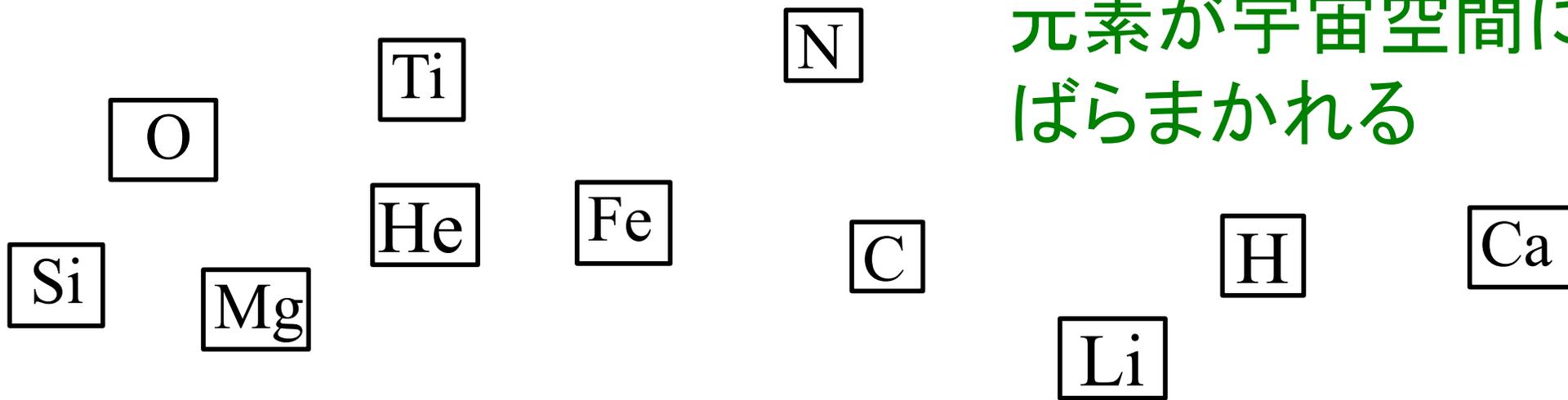
星ができる



超新星爆発



元素が宇宙空間にばらまかれる

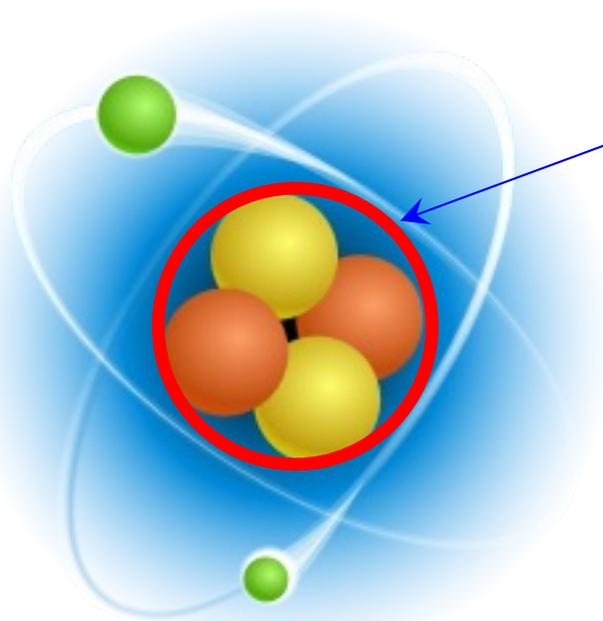


## ニホニウムの作り方

地球上には約90種類の元素（ウランが一番重い）

もっと重い元素はないの？

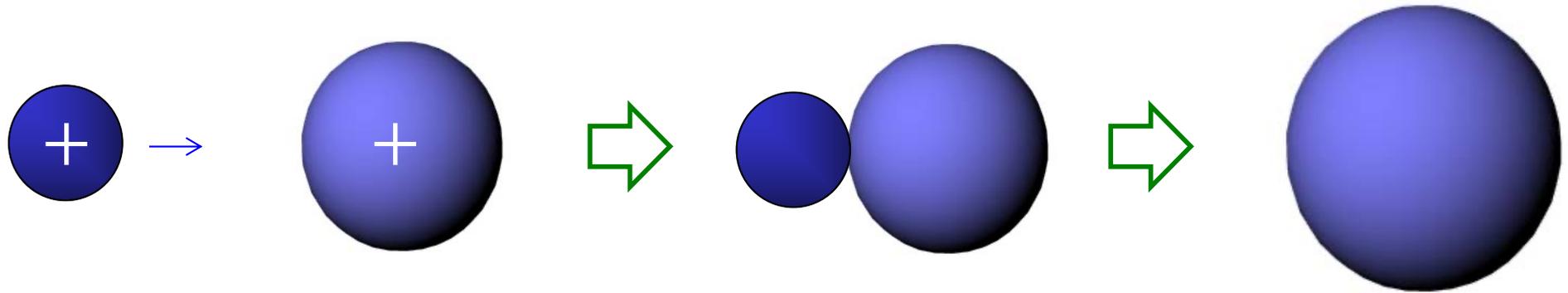
→ あります。でも人工的に作らなければなりません。



原子核

原子核と原子核をくっつけて  
大きな原子核を作る

# 原子核と原子核をくっつける



加速器を使って  
勢いよくぶつける

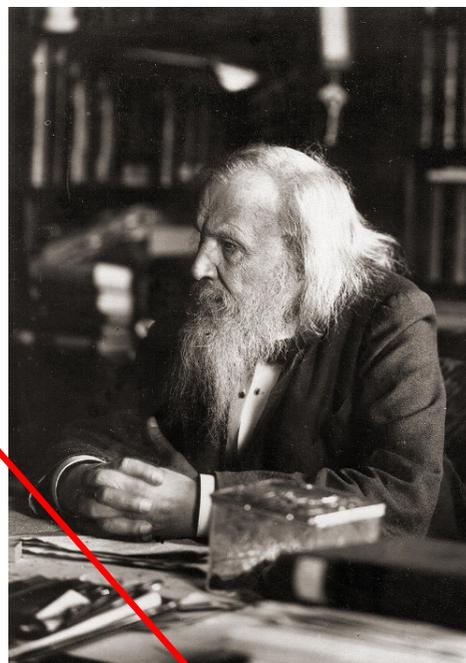
大きな  
原子核



The diagram shows two blue spheres, one small and one large, positioned side-by-side but not touching. A large green arrow points down from the fusion diagram above to this diagram, indicating that fusion does not occur. Below the spheres is the text: でも、ほとんどはくっつけてもすぐ離れてしまう (大きな原子核ができない)

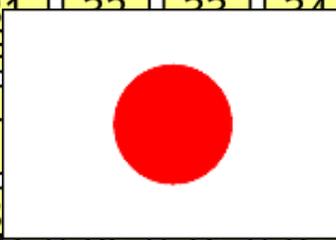
# 元素の周期表

ニホニウム



メンデレーエフ  
(1834-1907)

Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18														
Period 1	1 H																	2 He														
Period 2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne														
Period 3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar														
Period 4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr														
Period 5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe														
Period 6	55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
Period 7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og



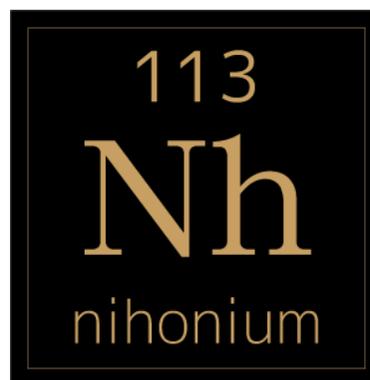
元素楽章  
(揚げ鶏々)\*



# 森田浩介さん

亜鉛 (30) とビスマス(83) をぶつけて113番元素の合成に成功！

→ 約10年で3個の113番元素を作った



ニホニウム

5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	日本国旗		53 I	54 Xe	
6	55 Cs	56 Ba	57 La	* 72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	85 At	86 Rn			
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	* 104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
	*			58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
	*			90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

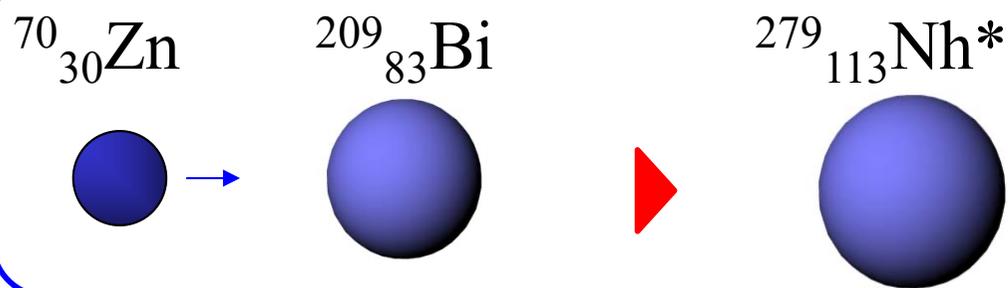
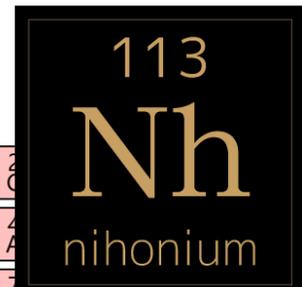
# 113番元素ニホニウム Nh

<p>113</p> <p><b>Nh</b></p> <p>nihonium</p>	<p>115</p> <p><b>Mc</b></p> <p>moscovium</p>
<p>117</p> <p><b>Ts</b></p> <p>tennessine</p>	<p>118</p> <p><b>Og</b></p> <p>oganesson</p>

2016年11月



Group →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
↓ Period																		
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											8 O	9 F	10 Ne			
3	11 Na	12 Mg											16 S	17 Cl	18 Ar			
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	34 Se	35 Br	36 Kr			
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Au	52 Te	53 I	54 Xe			
6	55 Cs	56 Ba	57 La *	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	84 Po	85 At	86 Rn			
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac *	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
				58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
				90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	



核融合反応

Wikipedia

ところで



中国

「国家語言委員会」が新しい漢字を制定

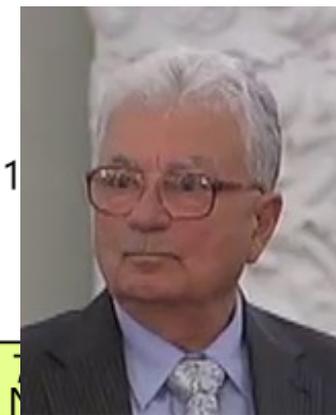
石田さん: 周期表に名前が載っています！

金田さん: 惜しかったです！

115番がテネシンだったら周期表に名前が載っていました

# 次のステップは？

Group →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Period ↓	1																		
1	1 H																		
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6	55 Cs	56 Ba	57 La	* 72 Hf	* 73 Ta	* 74 W	* 75 Re	* 76 Os	* 77 Ir	* 78 Pt	* 79 Au	* 80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	* 104 Rf	* 105 Db	* 106 Sg	* 107 Bh	* 108 Hs	* 109 Mt	* 110 Ds	* 111 Rg	* 112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og	
8	119 Ns?	120*	121*	122*	123*	124*	125*	126*	127*	128*	129*	130*	131*	132*	133*	134*	135*	136*	137*
9				58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
10				* 90 Th	* 91 Pa	* 92 U	* 93 Np	* 94 Pu	* 95 Am	* 96 Cm	* 97 Bk	* 98 Cf	* 99 Es	* 100 Fm	* 101 Md	* 102 No	* 103 Lr		



113  
**Nh**  
nihonium

118  
**Og**  
oganeson

第7周期がすべて埋まる → 次は第8周期へ！

理研では、119番元素の探索中

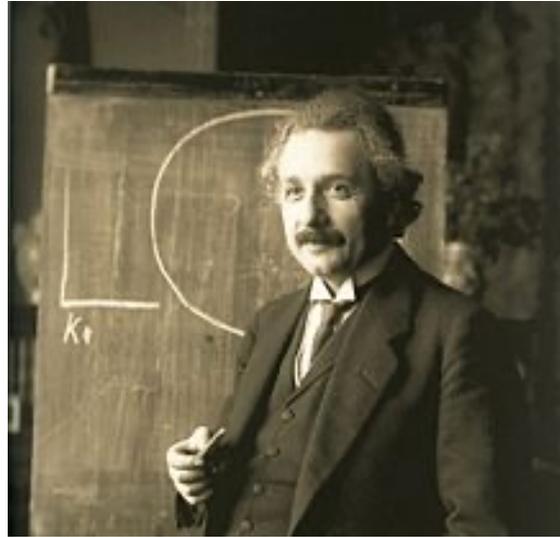
# 超重元素の化学

Group →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Period ↓																		
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57 La *	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac *	104 Rf *	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
				* 58 Ce	* 59 Pr	* 60 Nd	* 61 Pm	* 62 Sm	* 63 Eu	* 64 Gd	* 65 Tb	* 66 Dy	* 67 Ho	* 68 Er	* 69 Tm	* 70 Yb	* 71 Lu	
				* 90 Th	* 91 Pa	* 92 U	* 93 Np	* 94 Pu	* 95 Am	* 96 Cm	* 97 Bk	* 98 Cf	* 99 Es	* 100 Fm	* 101 Md	* 102 No	* 103 Lr	

- 超重元素を周期表のここに置けるの？
- つまり、Nh は B, Al, Ga などと同じ性質？

# 相対論的効果：原子番号の大きい元素で重要

$$E = mc^2$$



ディラック方程式(相対論的量子力学)を解くと、  
原子中の電子のエネルギーは、

$$E_{1S} = mc^2 \sqrt{1 - (Z\alpha)^2} \sim mc^2 \left( 1 - \frac{(Z\alpha)^2}{2} - \frac{(Z\alpha)^4}{8} + \dots \right)$$

相対論的効果

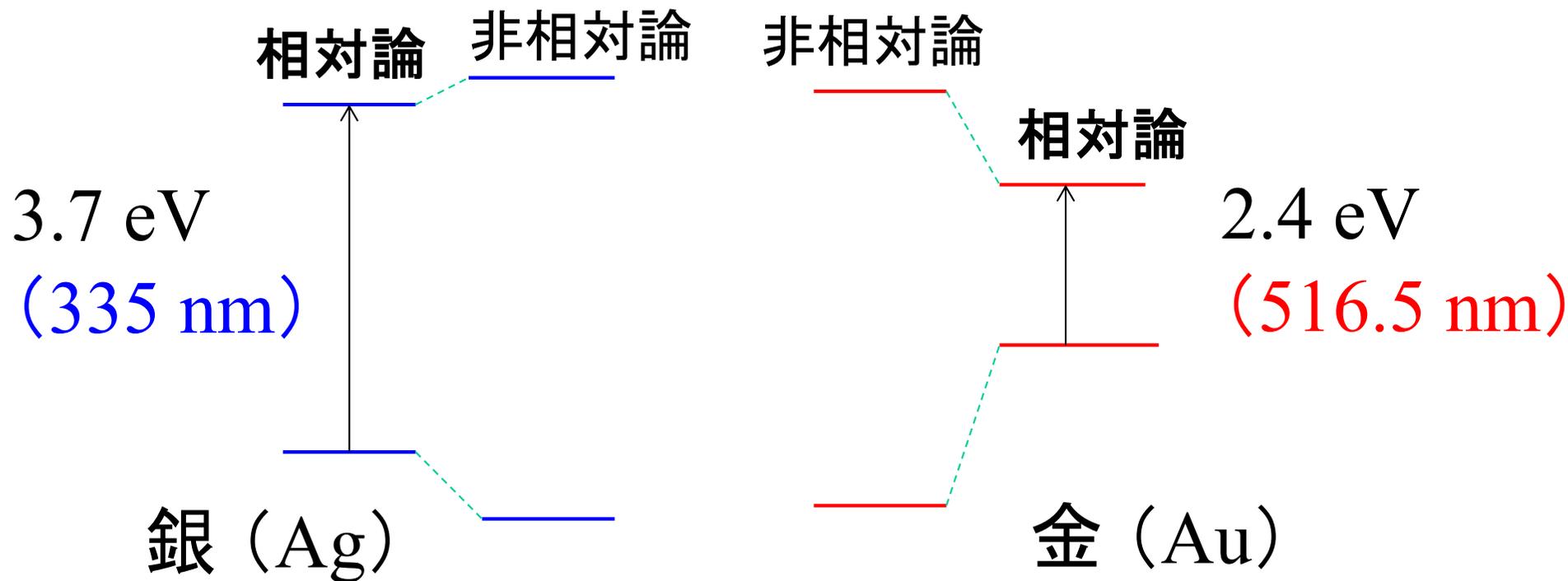
# 相対論的効果で有名な例：金の色

1	1 H																		2 He
2	3 Li	4 Be										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne		
3	11 Na	12 Mg										13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar		
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6	55 Cs	56 Ba	57 La	* 72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	* 104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og	

金と銀は同族

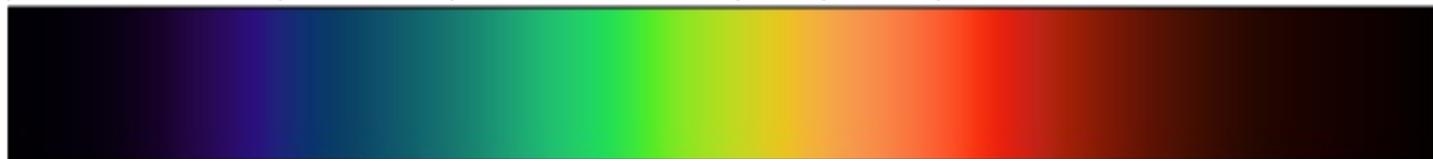


相対論的効果がなければ金の色は銀みたいだった!



可視光

335 nm 380 nm 517 nm 750 nm

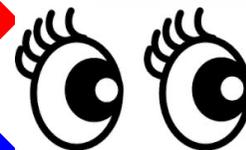


吸收(金)

反射(金)

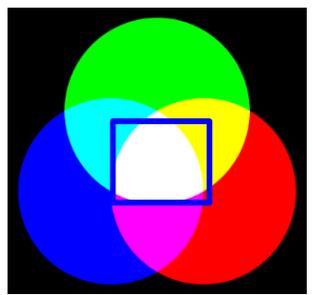
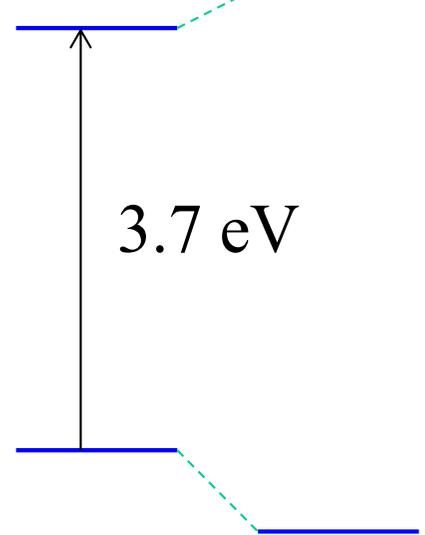


反射(銀)





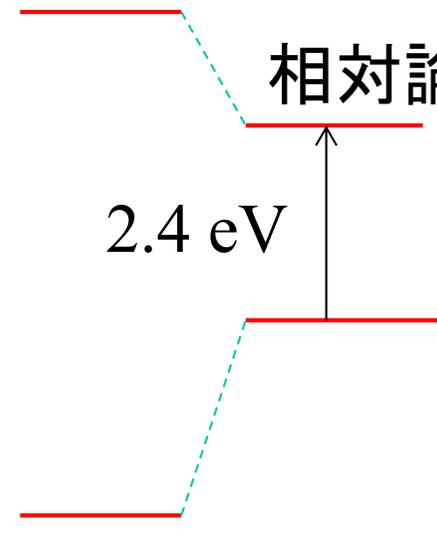
相対論 非相対論



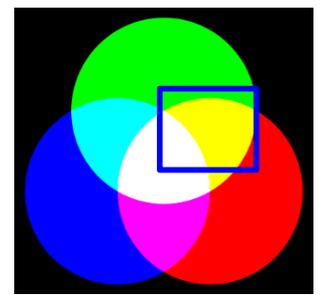
光の  
吸収なし

銀

非相対論



相対論



青色の光  
が吸収

金



銀

47番元素



金

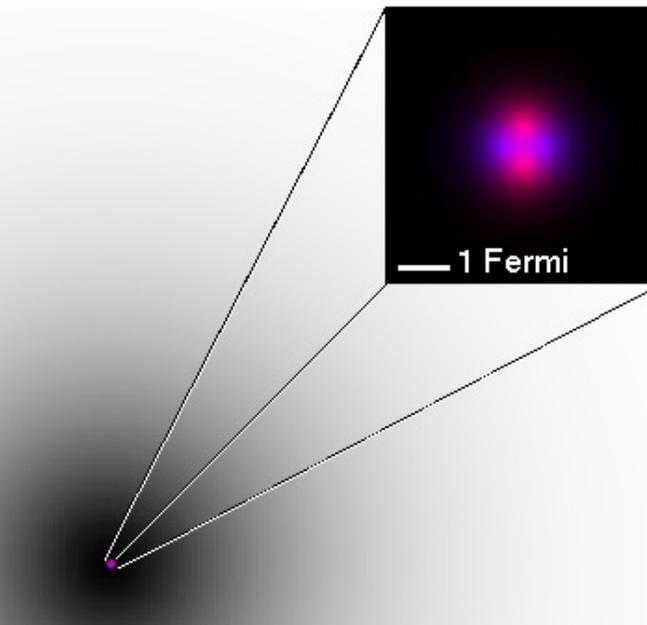
79番元素

# 超重元素の化学

Group →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Period ↓																			
1	1 H																		2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6	55 Cs	56 Ba	57 La *	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac *	104 Rf *	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og	
				* 58 Ce	* 59 Pr	* 60 Nd	* 61 Pm	* 62 Sm	* 63 Eu	* 64 Gd	* 65 Tb	* 66 Dy	* 67 Ho	* 68 Er	* 69 Tm	* 70 Yb	* 71 Lu		
				* 90 Th	* 91 Pa	* 92 U	* 93 Np	* 94 Pu	* 95 Am	* 96 Cm	* 97 Bk	* 98 Cf	* 99 Es	* 100 Fm	* 101 Md	* 102 No	* 103 Lr		

相対論的効果で超重元素の場所が  
どのように変わるのか? → 未解決の謎

## まとめ



## 原子核

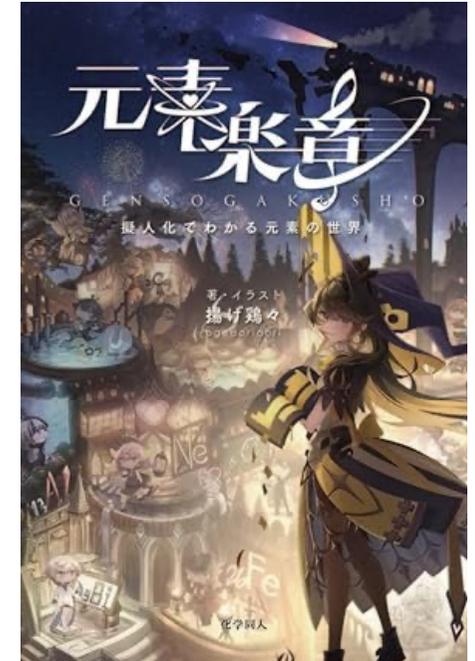
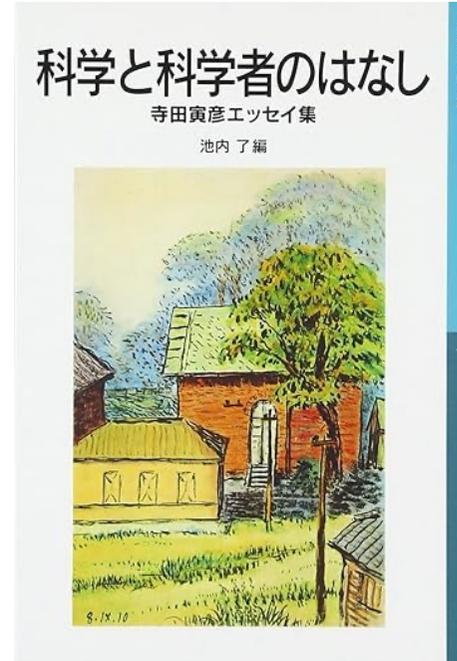
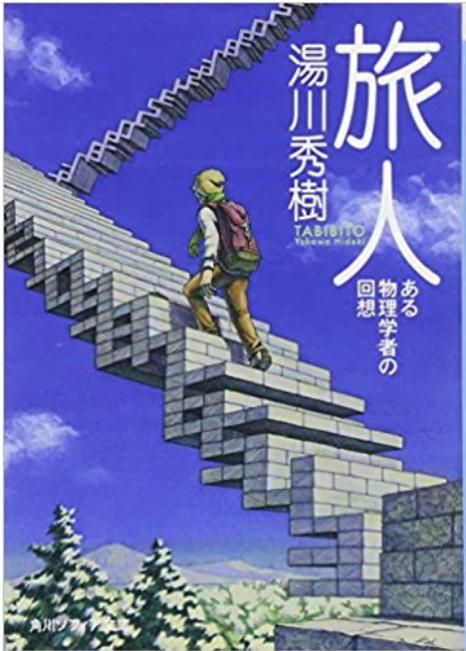
### □ 小さな小さな原子核が元素にとっては大きな役割

- 自然界にある最も重い元素
- 元素の起源・星が燃えている理由
- 超重元素

- ✓ 今、118番元素 Og まで。次は119番、120番。
- ✓ 新しい周期表を作る

### □ 湯川秀樹は元素の元になっている力を解明した人

# おすすめの読み物



ネットで検索してください！