核図表でみる元素の世界





萩野浩一

東北大学大学院理学研究科 物理学専攻 原子核理論研究室

もくじ

下の4つに共通することは何?









金はどうやって 作られた?



3. 人類が知っている一番重い元素は何?

Group —	- 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 5	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		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		104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo
Lanthanides				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
Actinides				89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Acunides			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

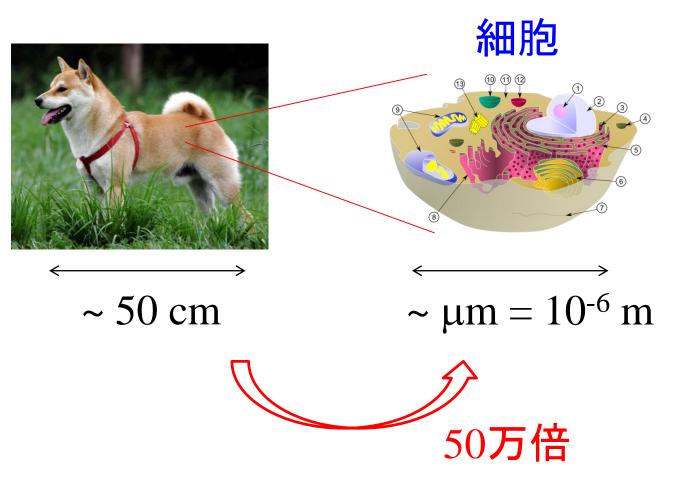
ワン!





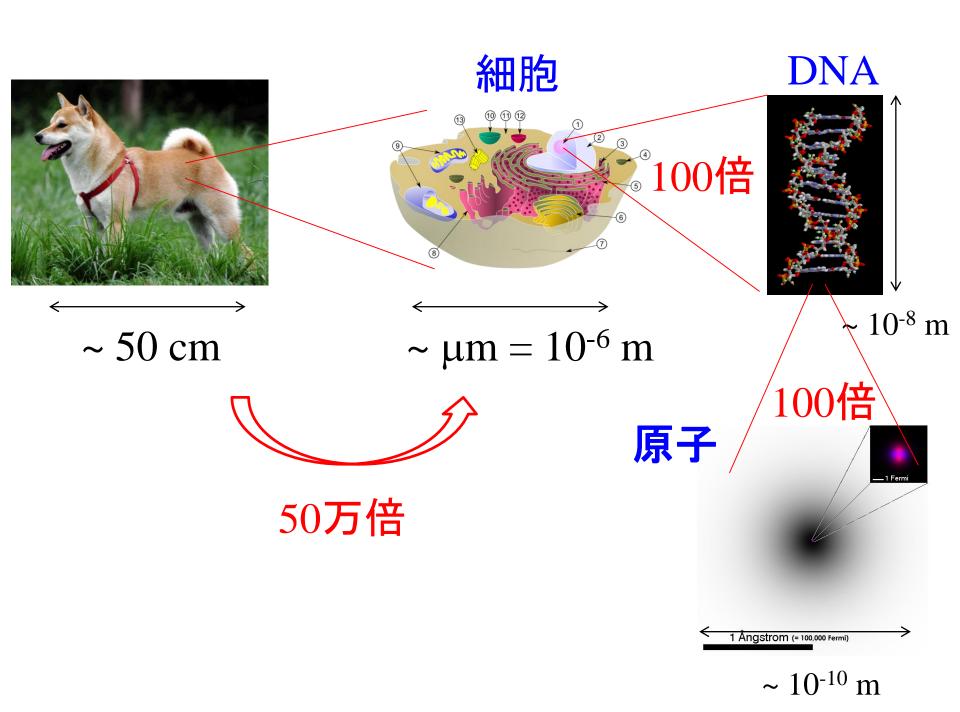
拡大してみてみると?





すべての生物(動植物)は細胞が基本単位。 人間の体も約60兆個の細胞でできている。

▶ 生物以外のものも含めると基本単位は何?



すべてのものは原子から組み立てられる

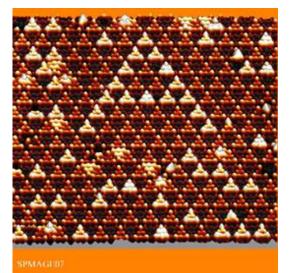




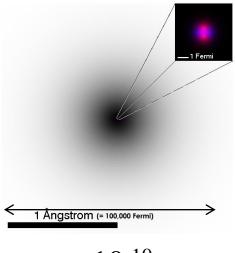




- タレス、デモクリトス(古代ギリシャ)
- ・ドルトン(19世紀初頭の化学者)
- ボルツマン(19世紀後期)
- アインシュタイン(1905年)



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)



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

すべてのものは原子から組み立てられる

たった一つの文章しか次世代の 人間に継承されないとしたら、ど んな文章を残せば最小限の言葉 で最大限の情報を伝えられるだ ろうか。その文章とは、 「万物は原子から構成されている」 である。 (リチャード・ファインマン)

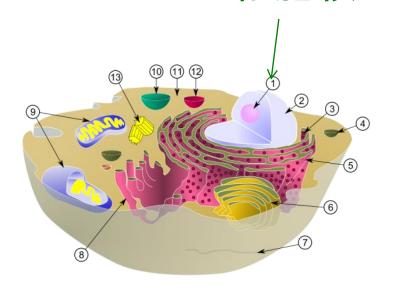


リチャード・ファインマン (1918-1988) 1965 年ノーベル物理学賞 受賞 (写真: The Nobel Foundation)

原子の中身 -1 Fermi

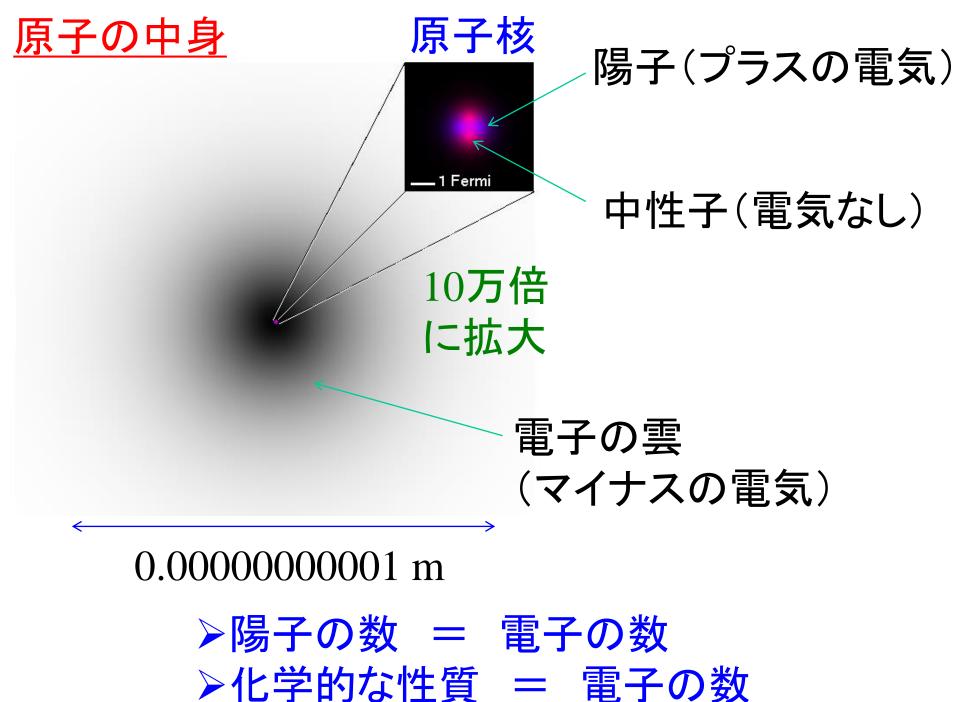
原子の核(原子核)

細胞核

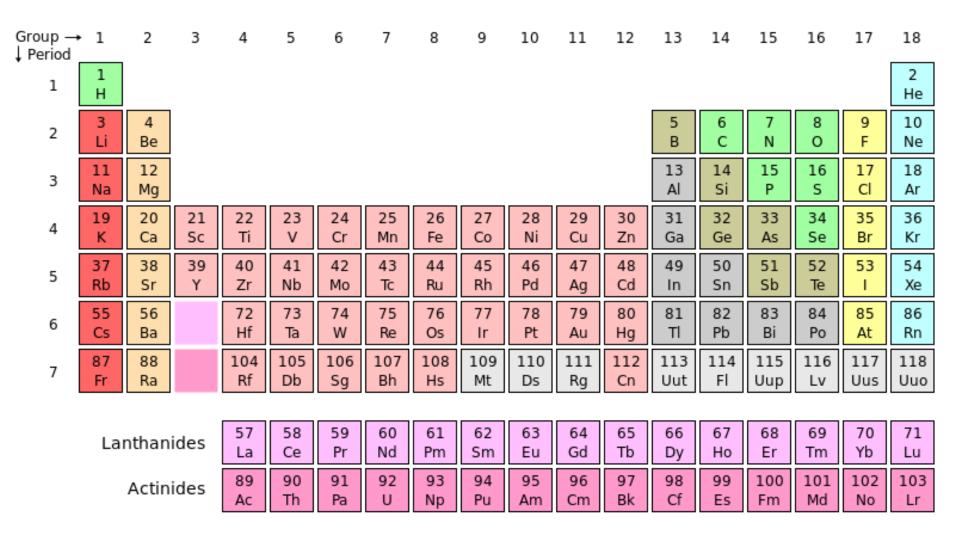


原子の中身

(参考)細胞の中身



元素の周期表



化学的な性質(=電子の数=陽子の数)によって原子を並べたもの=元素

人の体はどんな元素から出来ている?

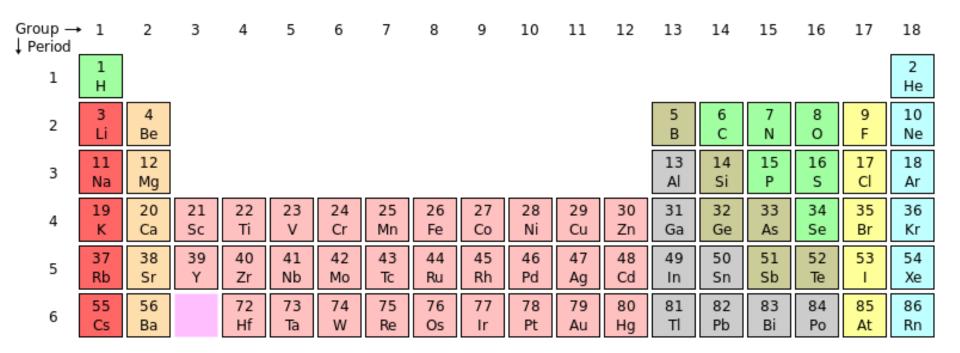
酸素 43 kg セリウム 40 mg バリウム 22 mg 炭素 16 kg ヨウ素 20 mg 水素 7 kg スズ 20 mg 窒素 1.8 kg カルシウム 1.0 kg チタン 20 mg ホウ素 18 mg リン 780 g ニッケル 15 mg カリウム 140 g セレン 15 mg 硫黄 140 g クロム 14 mg ナトリウム 100 g マンガン 12 mg 塩素 95 g マグネシウム 19 g ヒ素 7 mg リチウム 7 mg 鉄 4.2 g フッ素 2.6 g セシウム 6 mg 亜鉛 2.3 g 水銀 6 mg ゲルマニウム 5 mg ケイ素 1.0 g モリブデン 5 mg ルビジウム 0.68 g ストロンチウム0.32 g コバルト 3 mg 臭素 0.26 g アンチモン 2 mg 銀 2 mg 鉛 0.12 g ニオブ 1.5 mg 銅 72 mg アルミニウム 60 mg ジリコニウム 1 mg ランタン 0.8 mg カドミウム50 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",

Oxford, 1998

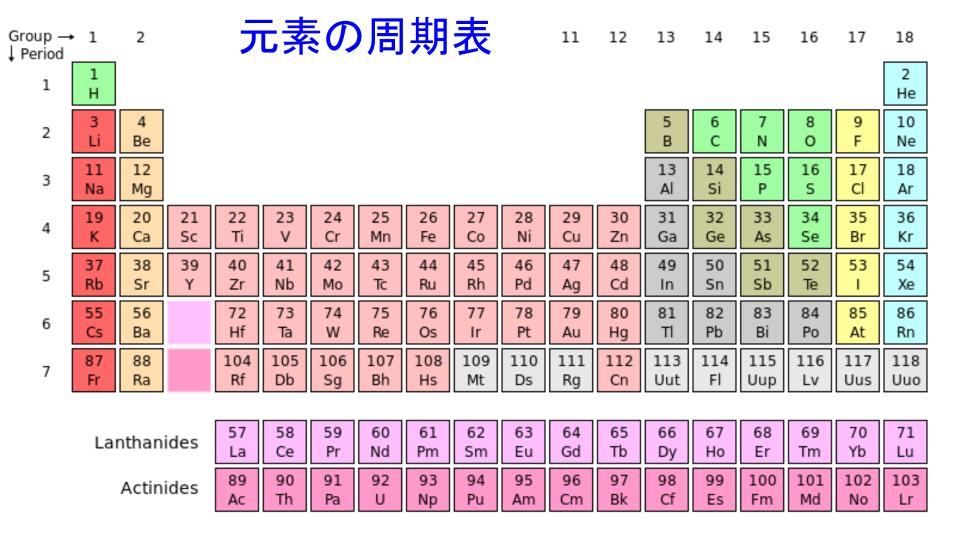


元素の周期表

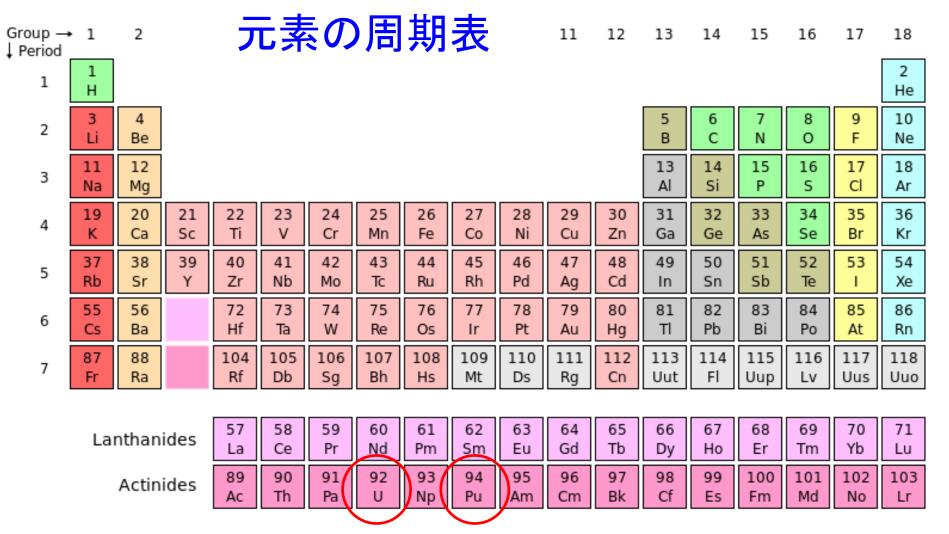


周期的に同じ性質を持つ元素が並ぶ (メンデレーエフ 1869年)

──→ 未知の原子の性質が予言できる ガリウムの発見(1874 年) ゲルマニウムの発見(1879年)



最も重い元素は何?



最も重い元素は何?

自然界: プルトニウム (Z=94) → 極微量存在 ウラン(Z=92) **何がこの番号を決めている?**

58 59 62 63 67 68 69 70 71 60 66 Lanthanides La Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Dγ Ηо Er Tm Yb Lu 89 90 92 94 95 96 98 99 100 101 102 103 Actinides Es Ac Pa Νp Pu Am Cm Bk Fm Md No Lr

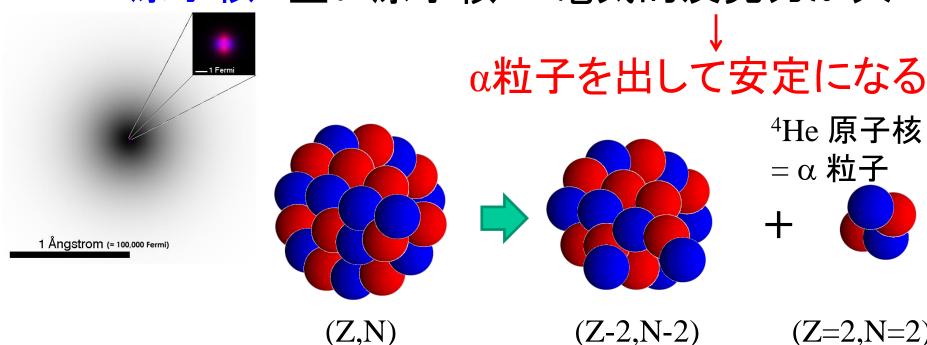
最も重い元素は何?

自然界にある元素: プルトニウムPu (Z=94) → 極微量存在

ウランU (Z=92)

何が最も重い元素の番号を決めているのか?

原子核 重い原子核→電気的反発力が大



(Z-2,N-2)

(Z=2,N=2)

重い原子核の寿命

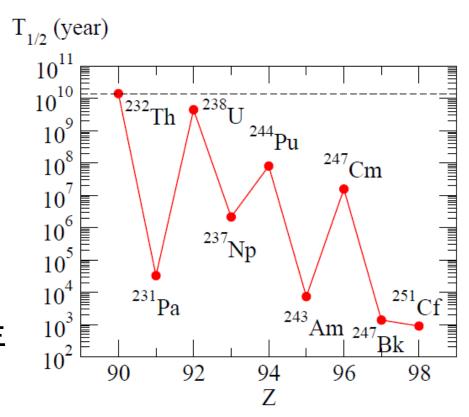
 232Th
 140.5 億年

 238U
 44.7 億年

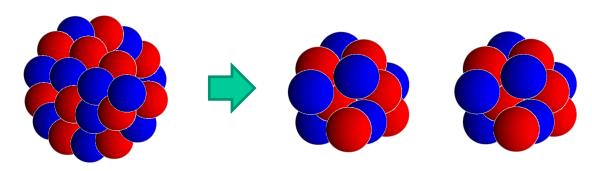
 244Pu
 8000 万年

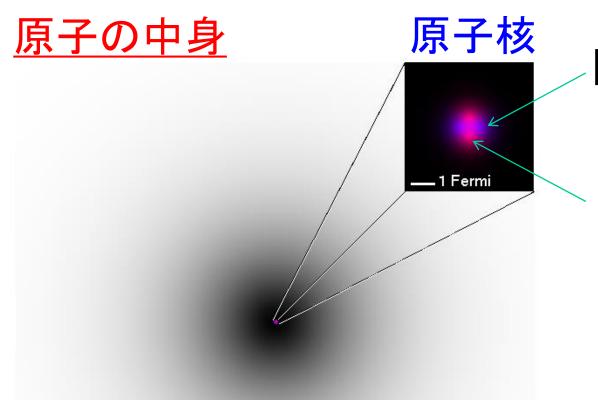
 247Cm
 1560 万年

(参考)宇宙の年齢:137億年 地球の年齢:45.4億年



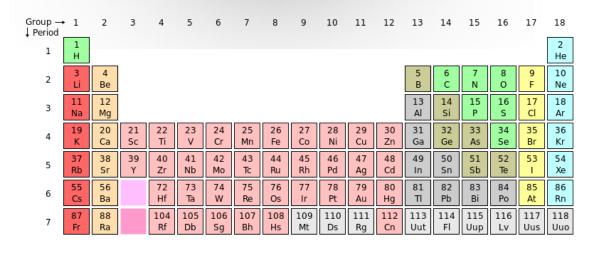
*もつと重い原子核は核分裂で壊れることも:





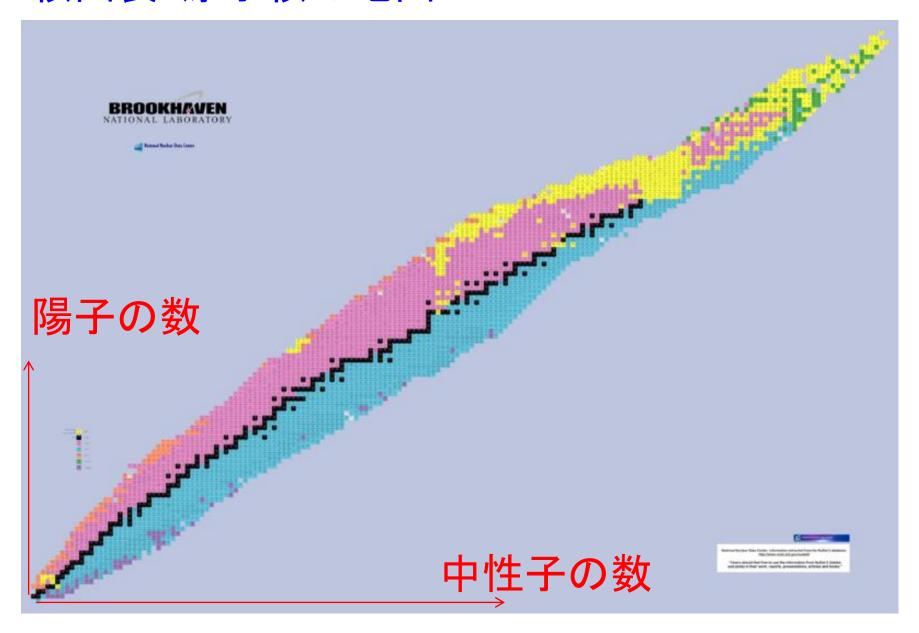
陽子(プラスの電気)

中性子(電気なし)

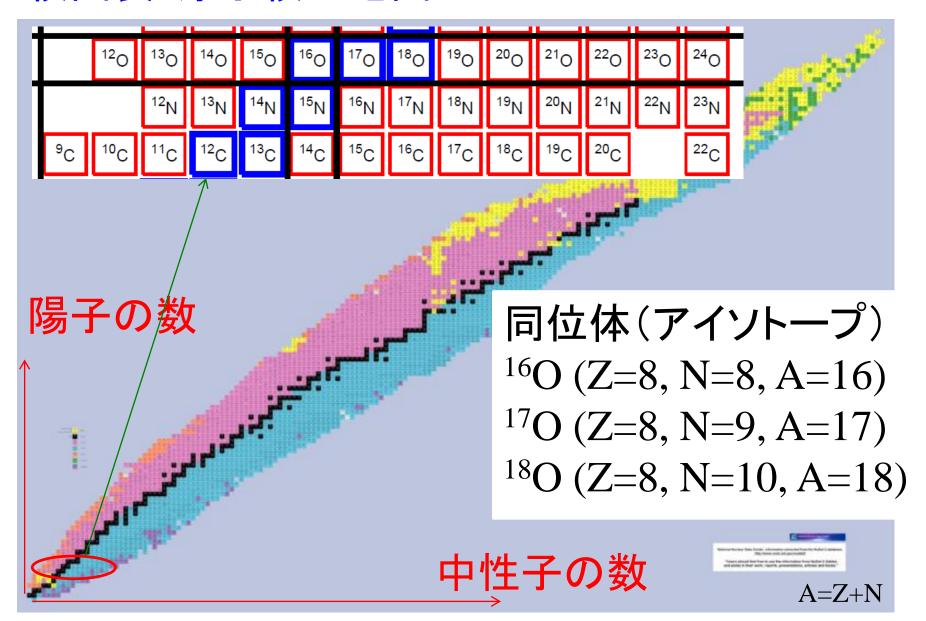


-----中性子は?

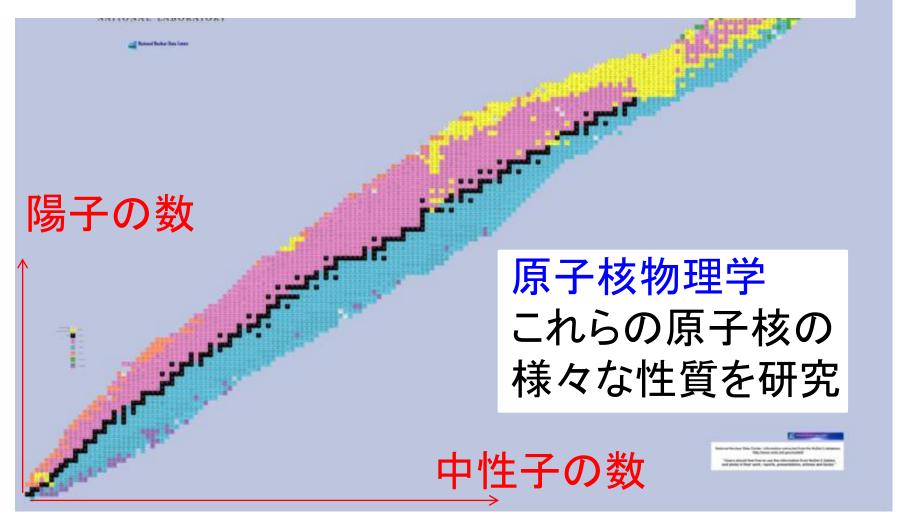
核図表:原子核の地図



核図表:原子核の地図

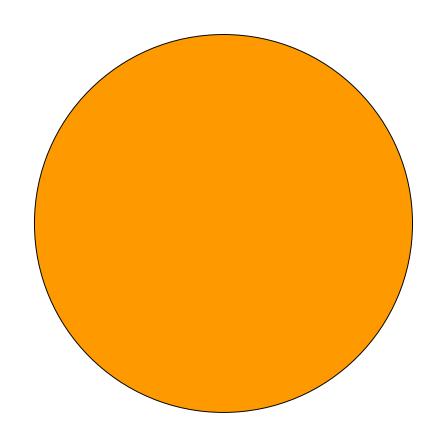


- •自然界にある安定な原子核: 287種
- ・これまで人工的に作られた原子核:約3,000種
- •理論上存在が予想される原子核:約10,000種



原子核物理学で研究していることの例

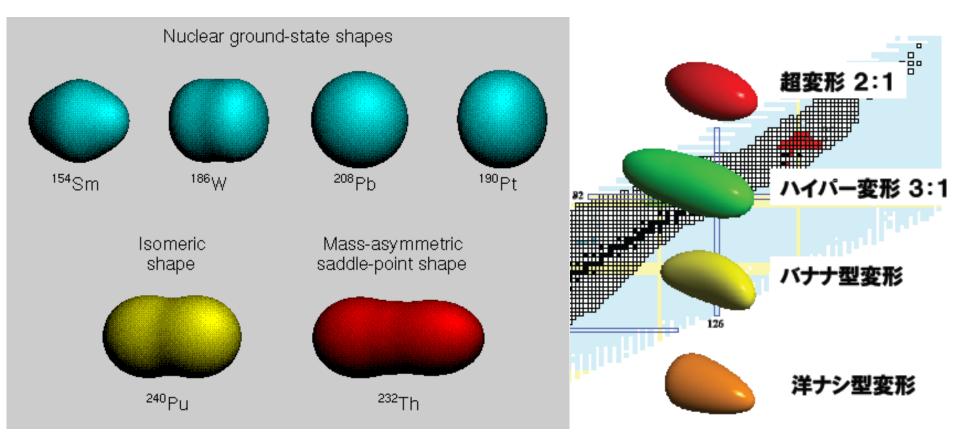
▶原子核はどういう形をしているの?



原子核はまん丸?

原子核物理学で研究していることの例

▶原子核はどういう形をしているの?



http://t2.lanl.gov/tour/sch001.html

原子核は陽子と中性子の組み合わせの仕方に よって様々な形をとり得る!

→ 宇宙でうまれた





ビッグバン (137億年前)

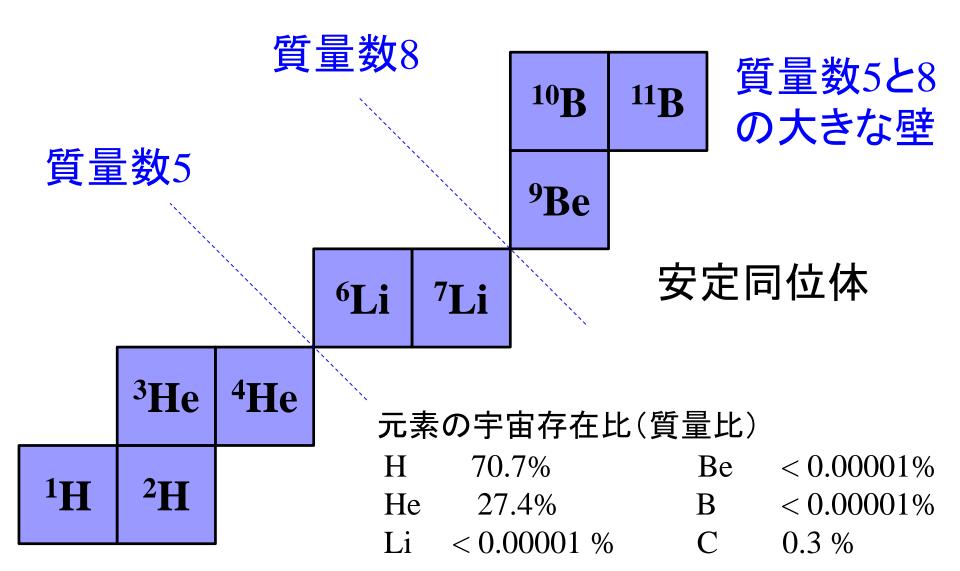






Li

Li がほんのちょっとしか できなかったわけ



→ 宇宙でうまれた





ビッグバン (137億年前)

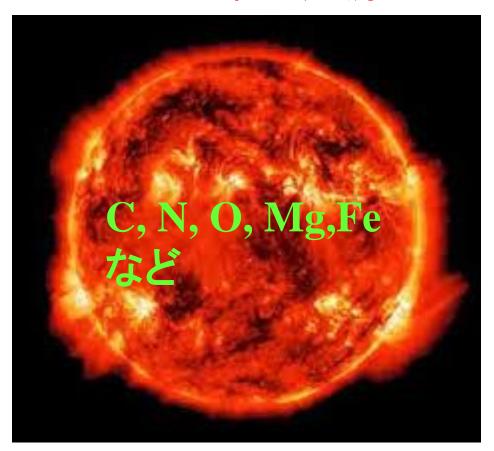






Li

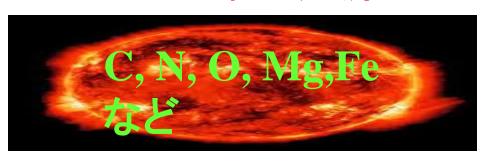
Feまでの元素の起源





(大質量)星の内部での核融合反応 ――→ 恒星が光っているもと

Feまでの元素の起源

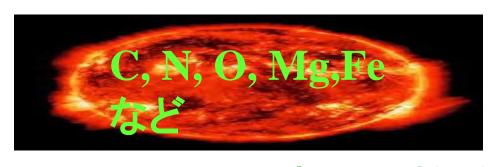




(大質量)星の内部での核融合反応 ―― 恒星が光っているもと

- Feまでは発熱反応
- Feから先は吸熱反応
 - → 核融合は鉄(Fe)で止まる 鉄より重い元素(例えば鉛など)は どのように出来たのか?

(ちょっとその前に)星の一生について



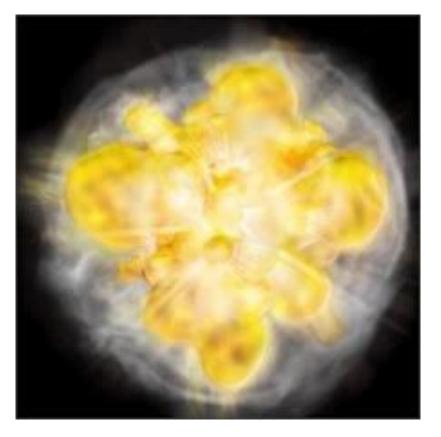


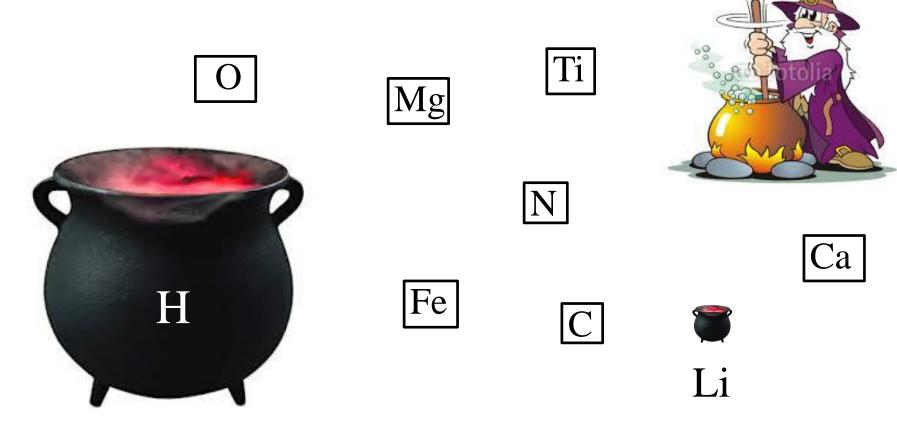
(大質量)星の内部での核融合反応



核融合の燃料がなくなると

- ✓ 重力により縮む
- ✓ 耐えられなくなると爆発 (超新星爆発)





Si



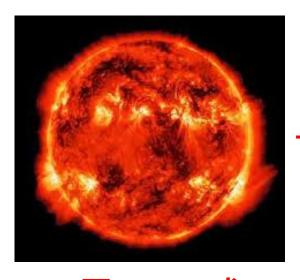
超新星爆発により 元素が宇宙空間に ばらまかれる



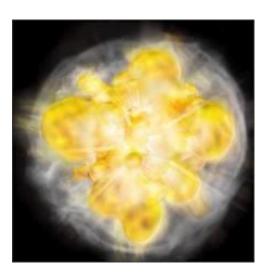
サイクルのくりかえし



星間ガス

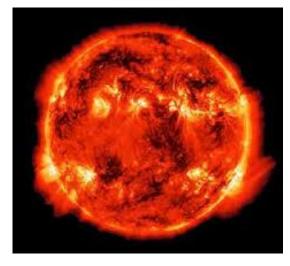


星の形成



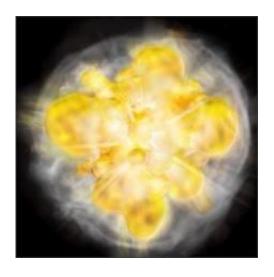
超新星爆発

中性子の吸収



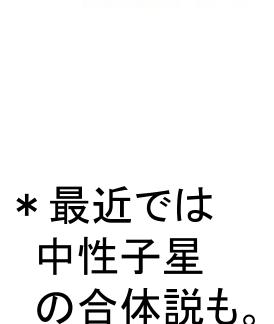
赤色巨星

s-プロセス Ba, La, Pb, Bi など



超新星爆発

r-プロセス Th, Eu, U など





金やウランがどうやって出来たのかは実はあまりよくわかっていない。

ビッグバン 137億年前

最初の星の形成:

誕生から2億年

大質量星の内部

C, N, O, Fe 超新星爆発

~90種類の 重元素蓄積

46億年前



Sプロセス H, He Bi まで 次世代の 星の誕生

C, N, O, Fe, Si, Au??, U??

超新星残骸から 星間物質へ

生命の誕生と進化

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

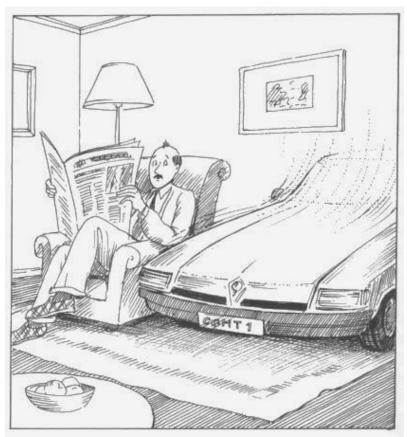
電磁波:波

光子

ハイゼンベルクの不確定性原理

 $\Delta p \cdot \Delta x \ge 10^{-34}$ J s

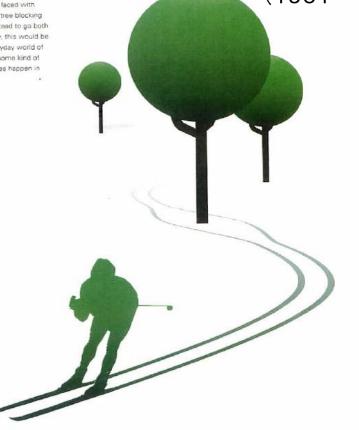
位置と運動量を同時に決めることはできない



just how strange the behaviour of quantum particles really is, it would be as though a skier, faced with having to go round a tree blocking his path, decided instead to go both ways at once. Clearly, this would be regarded, in our everyday world of trees and skiers, as some kind of hoax. But it really does happen in the quantum world.



ハイゼンベルク (1901~1976)



What if his car leaked out of its locked garage?

ハイゼンベルクの不確定性原理

 $\Delta p \cdot \Delta x > 10^{-34}$

位置と運動量を同時に決めることはできない

…もし $\Delta p \cdot \Delta x > 10$ Jsだったら



ハイゼンベルク $(1901 \sim 1976)$

What if his car leaked out of its locked garage?

車が壁をすり抜ける!?



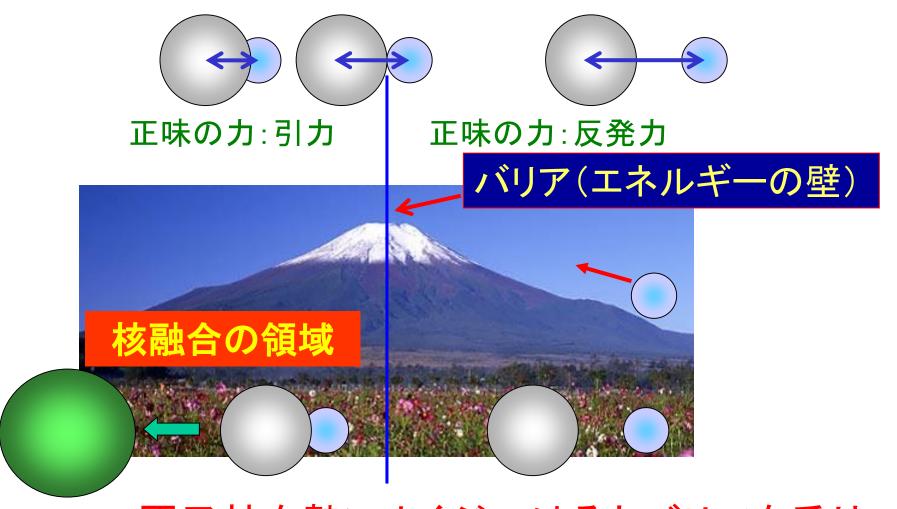
実際には電子や原子核の ように質量が軽い場合のみ トンネル現象が起きる

電子の質量:約 10-27 g

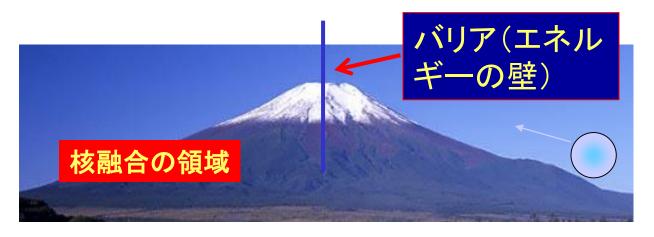
陽子の質量:約10-24 g

星の中での核融合反応

強い力(引力) vs 電磁力(反発力)



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



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

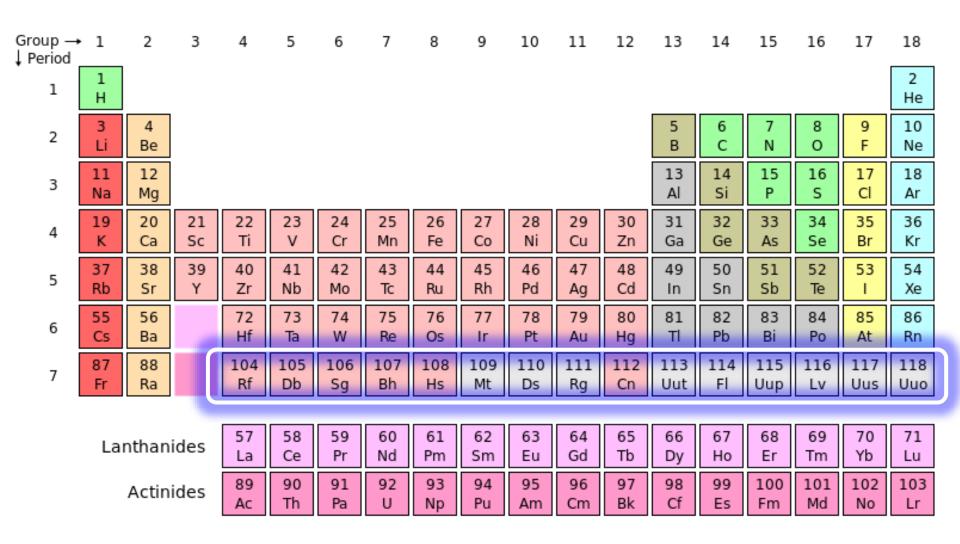
━━ 「量子トンネル現象」で星は輝いている



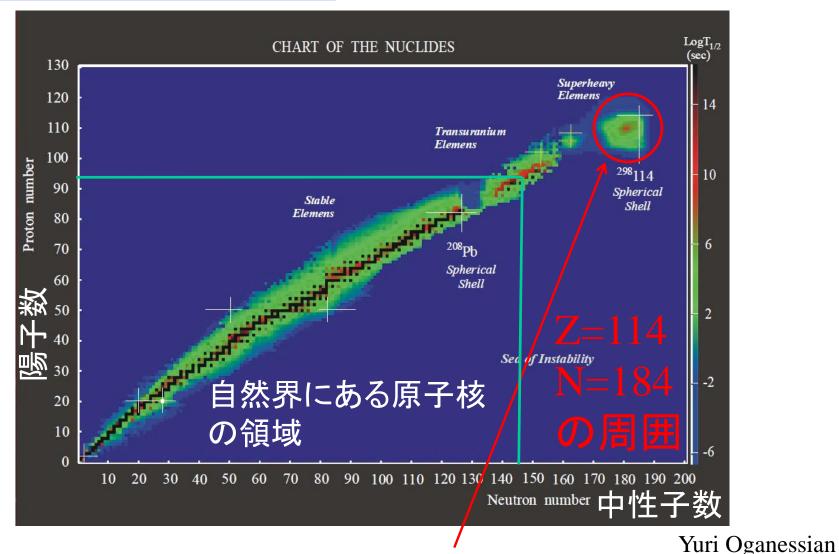


ジャック・デュケノワ著「おばけパーティー」より

超重元素(超重原子核)



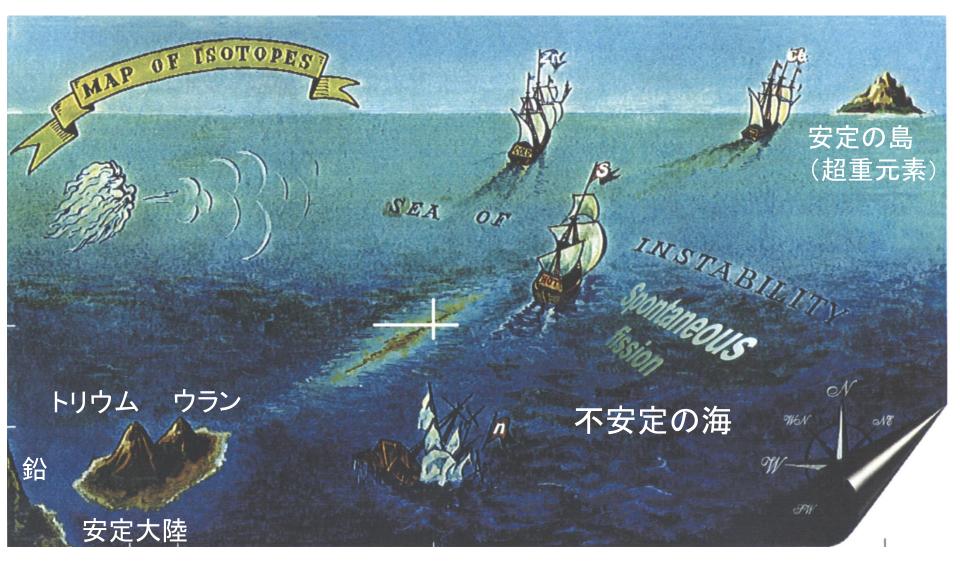
超重元素(超重原子核)



原子核の安定領域の理論的予言

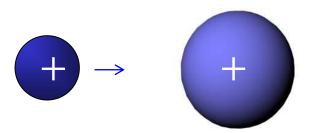
(1966年: スピアテッキら)

安定の島(超重元素)を目指して

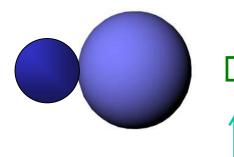


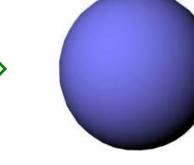
どのように超重元素(=人工元素)を作る?

核融合反応(例えば 70Zn + 209Bi → 279113 反応)









大きな 原子核

2つのプラスの電気の 固まりは反発



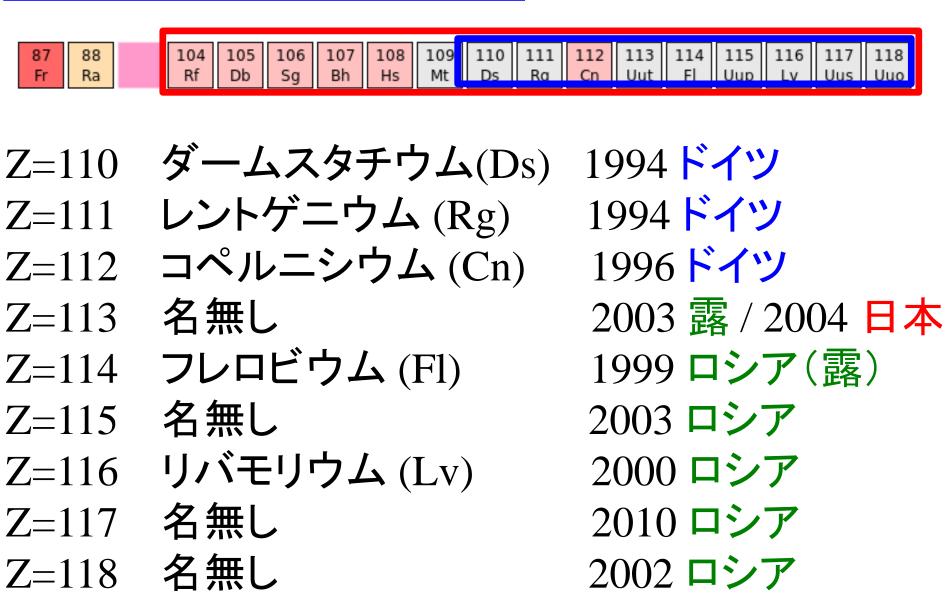
加速器を使って勢いよく

近づける

強い相互作用 原子 (核力)核子を くっつける力 (湯川秀樹によって解明)

磁石 (SとS、NとNは反発)

これまでに到達した超重元素



*いずれも安定の島は未確認

新元素の名前

IUPAC/IUPAP 合同作業部会で新元素の認定

→ 発見者に命名権が与えられる

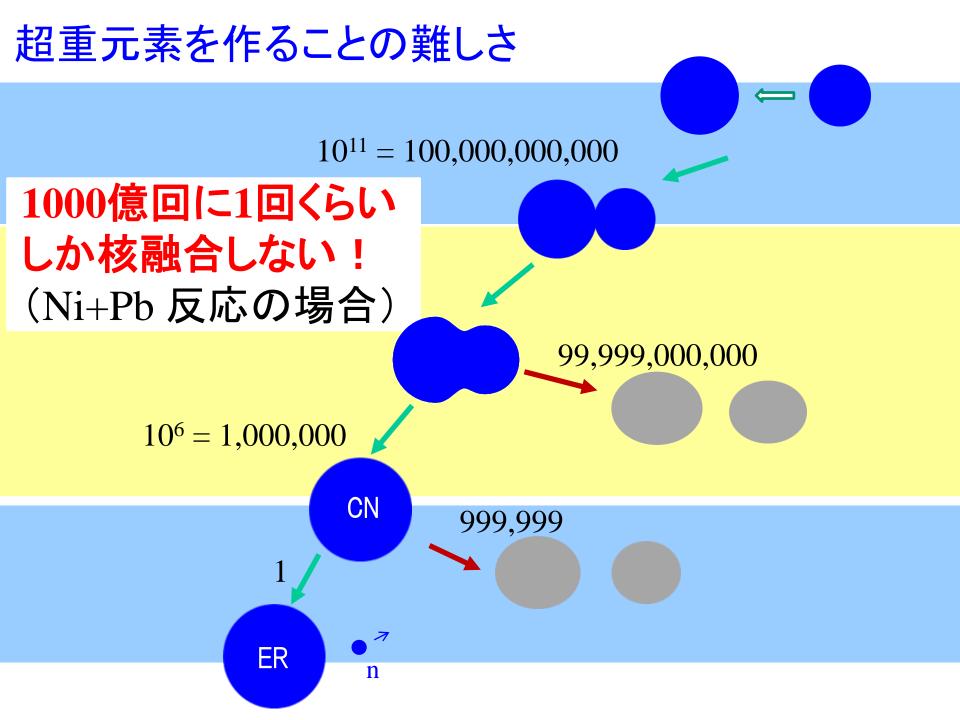




IUPAC = 国際純正·応用化学連合

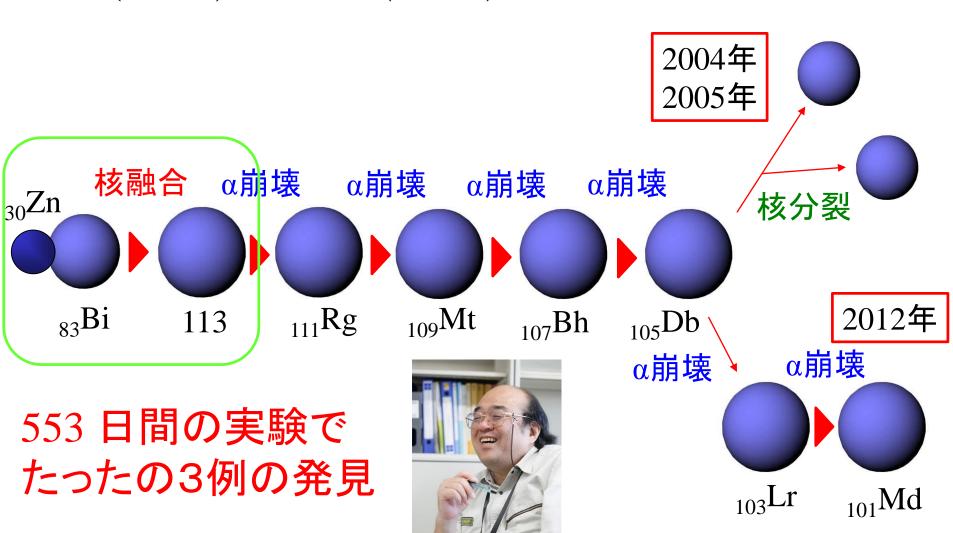
IUPAP = 国際純正·応用物理学連合

化学や物理の世界の国連



新元素113番(理化学研究所•九大 森田浩介博士)

70
Zn (Z=30) + 209 Bi (Z=83) \longrightarrow 278 113 + n



112~114番元素

	発見	認定
112:コペルニシウム (Cn)	1996ドイツ	2011
113:名無し	2003 露 / 2004 日	未
114:フレロビウム (Fl)	1999 ロシア	2011

ロシア: 「熱い」タイプの核融合反応

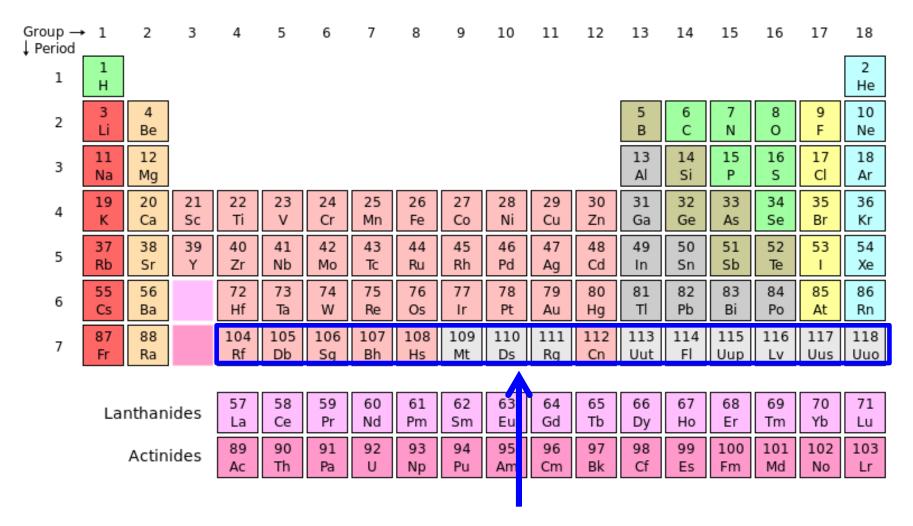
出来る量は比較的多いが、出来たかどうかの判定がやや難しい

日本:「冷たい」タイプの核融合反応

出来る量は少ないが、出来たかどうか確実

113番元素: IUPAC/IUPAP合同作業部会で審議中日本に命名権がくるといいのですが。。。。

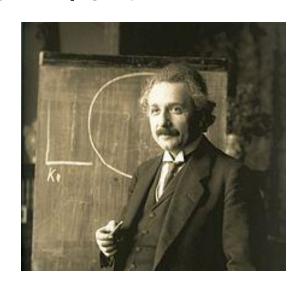
超重元素の化学



- ▶超重元素を周期表のここに置けるの?
- → つまり、Lv は O, S, Se, Te, Po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

$$E = mc^2$$

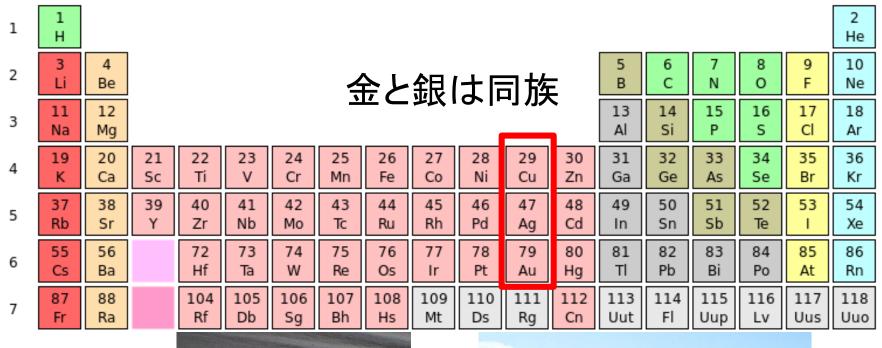


ディラック方程式(相対論的量子力学)を解くと、 原子中の電子のエネルギーは、

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

相対論的効果

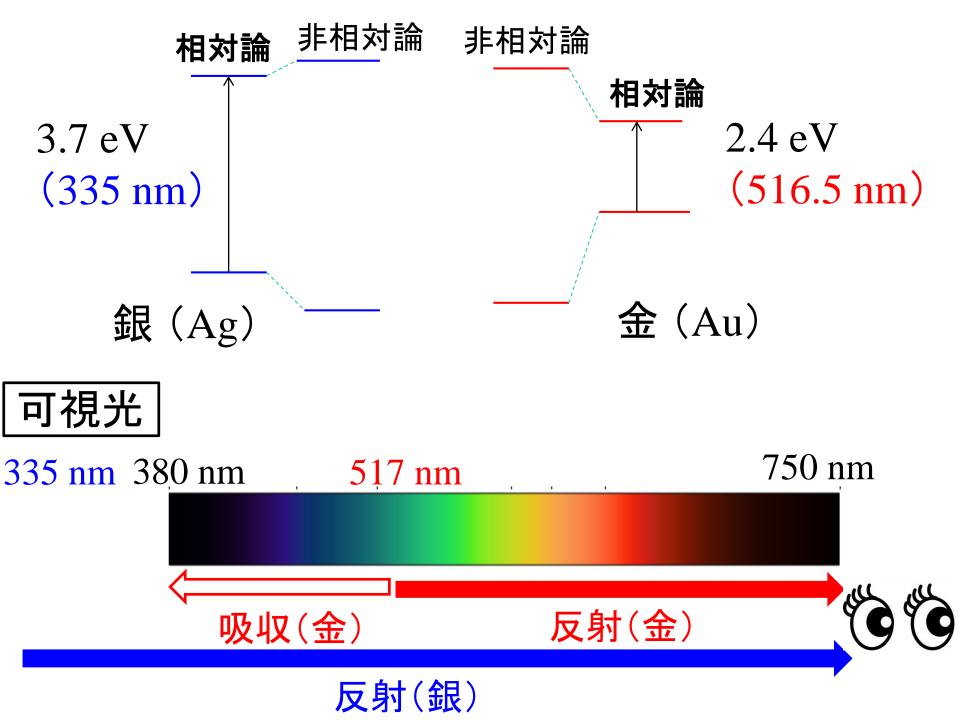
相対論的効果で有名な例:金の色

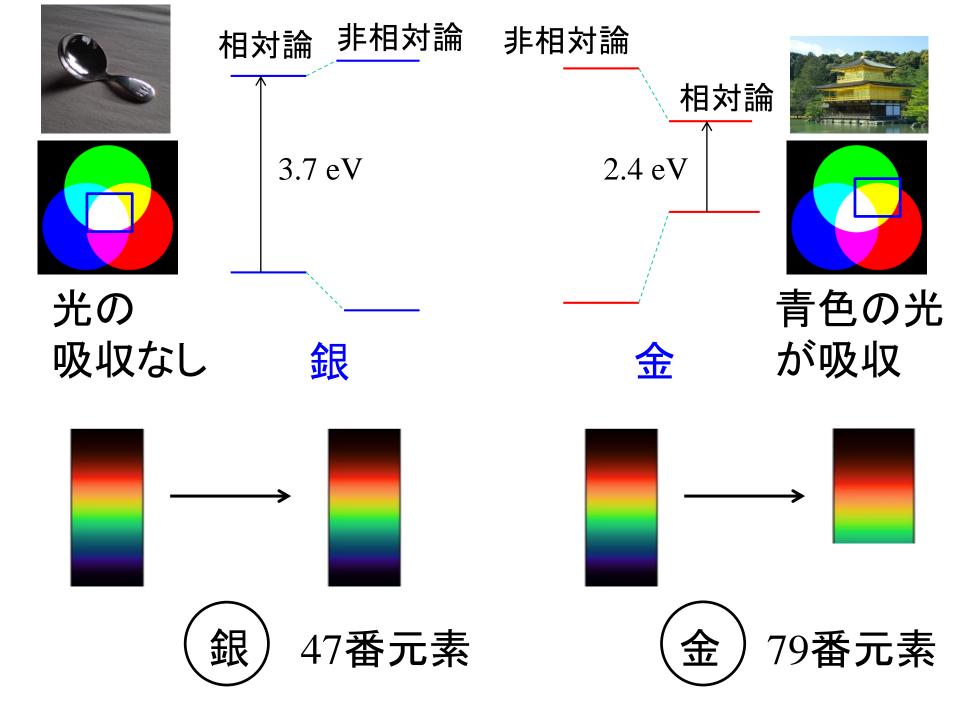




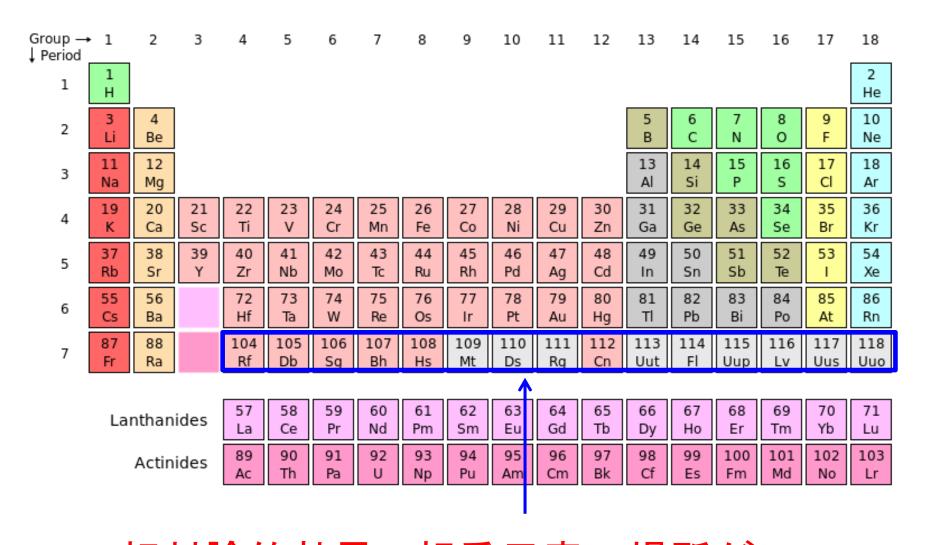


相対論的効果がなければ金の色は銀みたいだった!

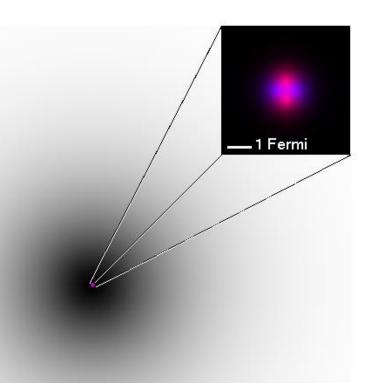




超重元素の化学



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
- *東北大学サイエンスカフェ「新元素113番のはなし」

Youtube で見れます

下の4つに共通することは何?









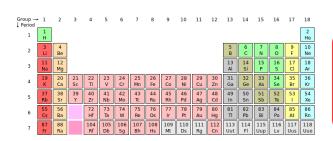
すべて原子からできている。

3. 人類が知っている一番 重い元素は何?

 金はどうやって 作られた?



原子核による中性子 の吸収。でも完全に はわかっていない。



118番元素。日本で作られたのは113番元素。