

安定な元素、不安定な元素

萩野 浩一

東北大学大学院理学研究科
物理学専攻



TOHOKU
UNIVERSITY

皆さんが奥さん、お子さん、お孫さん、などに最新の物理学の成果がどのようなものであるか、気楽に雑談をする際の材料になれば.....

1. 簡単な自己紹介
2. 元素について
3. 加速器について(日本の主な加速器施設とILC)
4. 新元素113番のはなし

簡単な自己紹介

名前: 萩野浩一 (はぎのこういち)

生年: 昭和46年 (45歳)

生まれ: 宮城県仙台市

(両親が仙台市出身)

育ち: 神奈川県平塚市、
北海道札幌市、
千葉県銚子市



簡単な自己紹介

- 略歴:**
- ・市立銚子高校
 - ・東北大学理学部(学部、大学院)
 - ・ワシントン大学(ポスドク研究員)
 - ・京都大学基礎物理学研究所(助手)
 - * 当時の所長: 益川敏英氏
 - ・東北大学理学部(助教授、准教授)

専門: 理論物理学(原子核理論)
新元素113番とも関連した研究

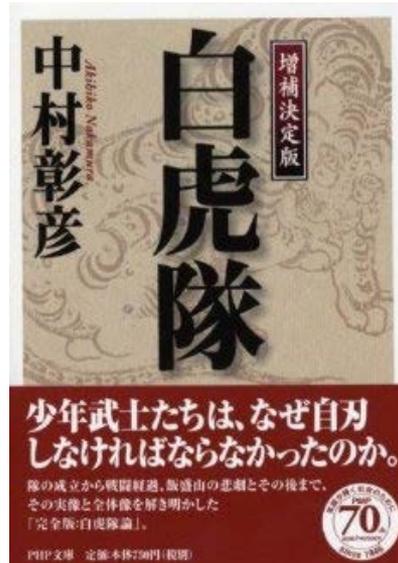
簡単な自己紹介

趣味：読書（主に歴史もの）、語学、旅行（史跡めぐり）

大学時代は茶道部

好きな言葉

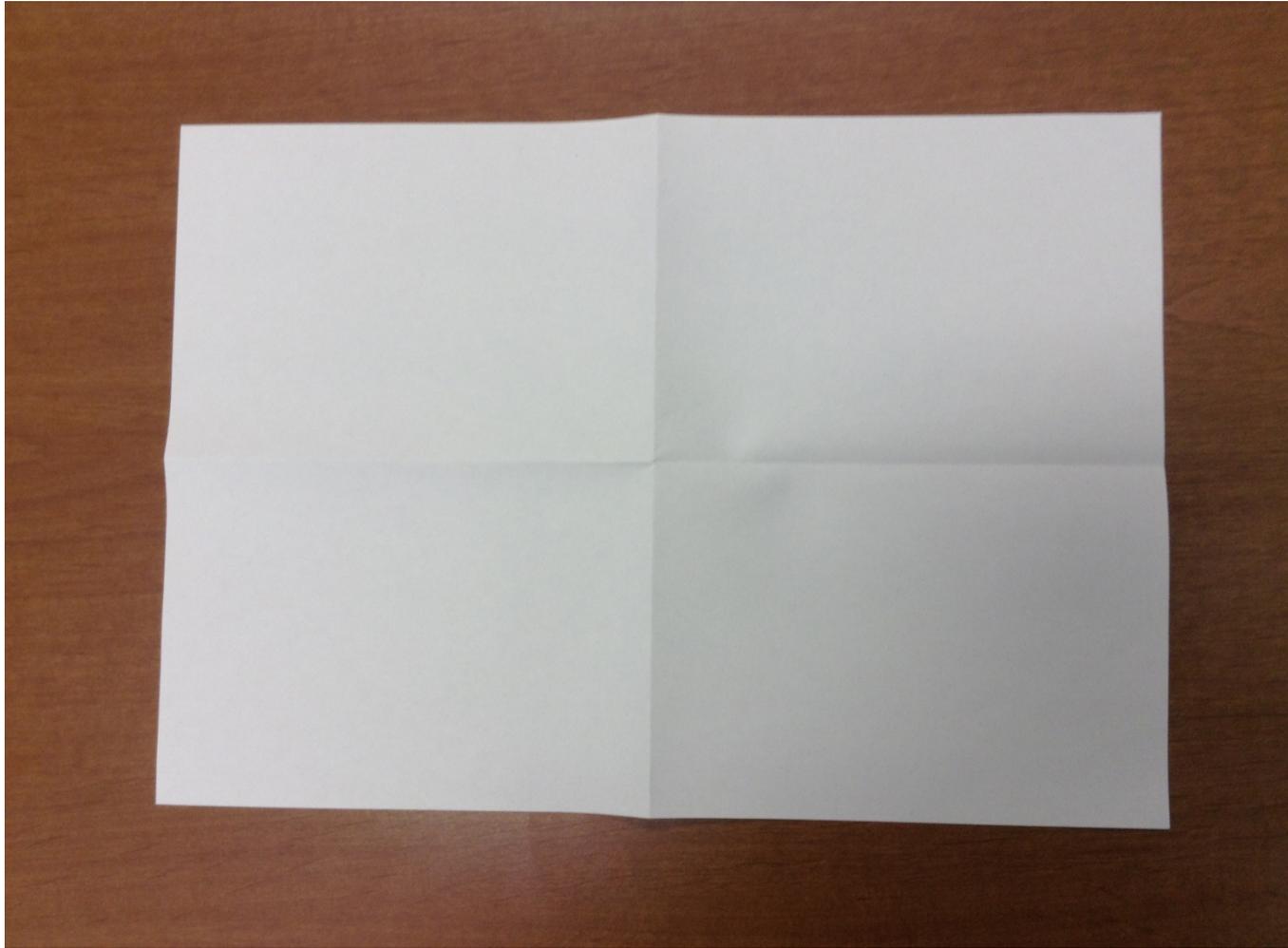
「故きを温ねて新しきを知る」（論語）



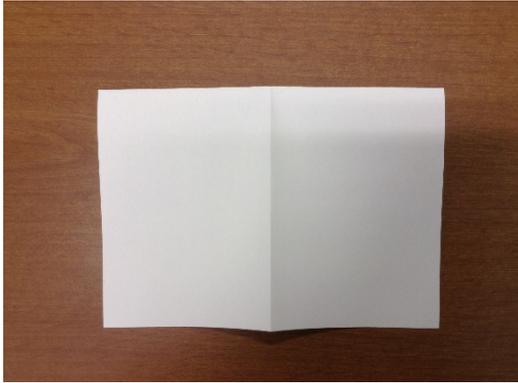
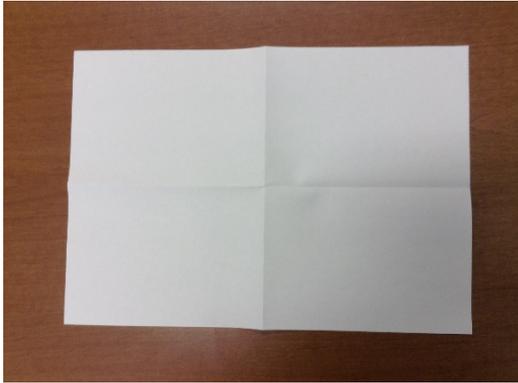
愛読書

元素について

一枚の紙



一枚の紙



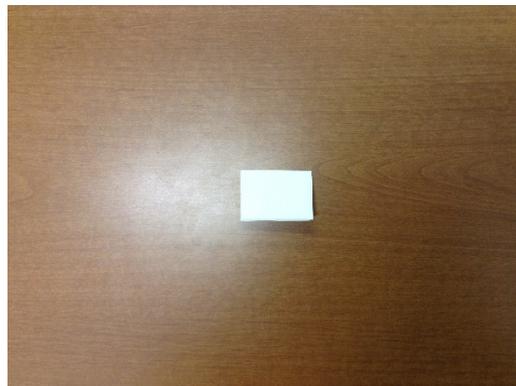
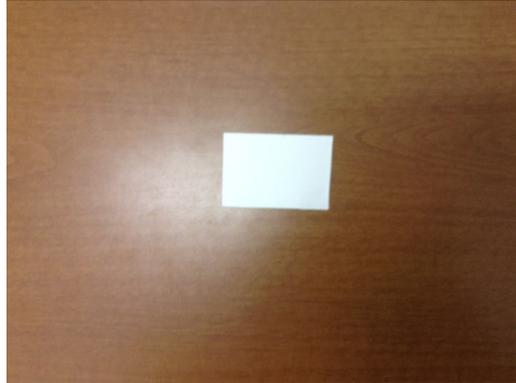
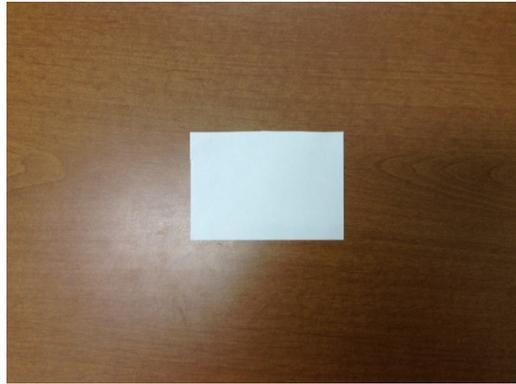
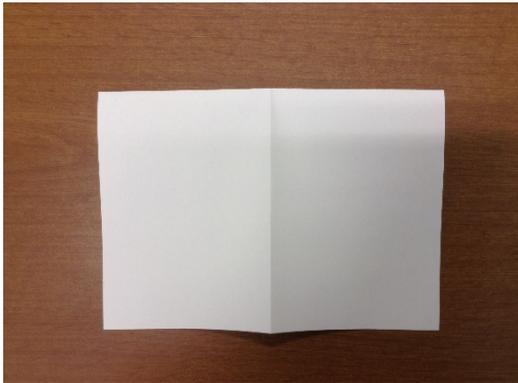
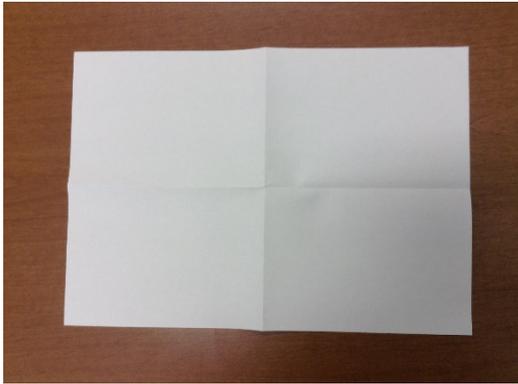
半分



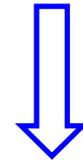
半分

小さな紙

一枚の紙



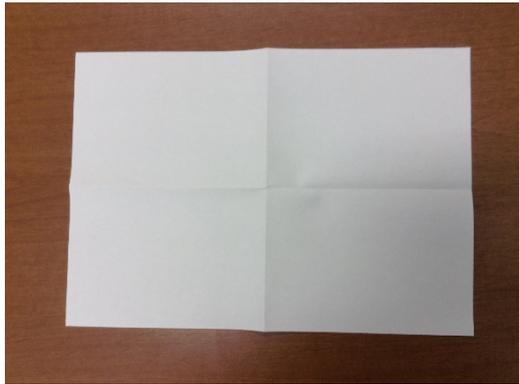
だんだん小さくなるけど紙は紙。



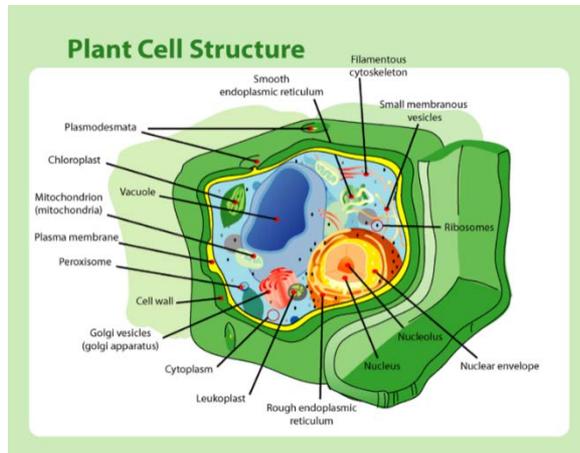
いつまでも紙は紙なのか？



木(植物)



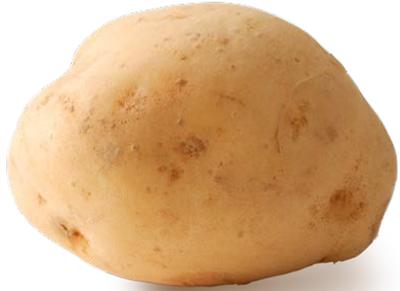
紙(A4だと21cm x 29.7cm)



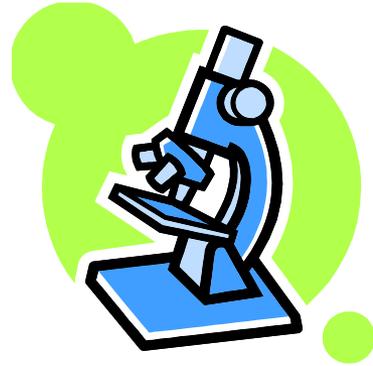
11~15回半分に
すると

細胞(5~100 μm)

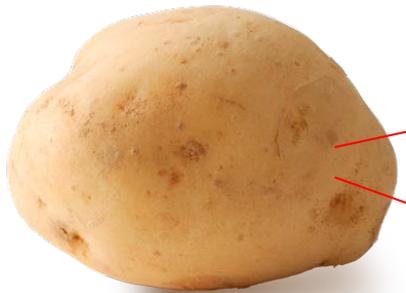
元素について



~ 10 cm

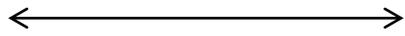
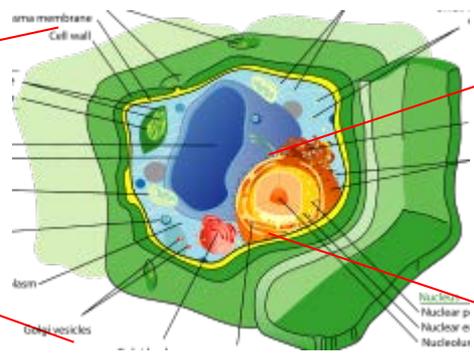


拡大して見てみると。。。？



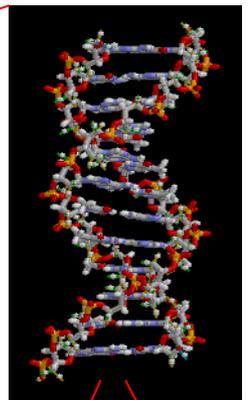
~ 10 cm

細胞



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

DNA



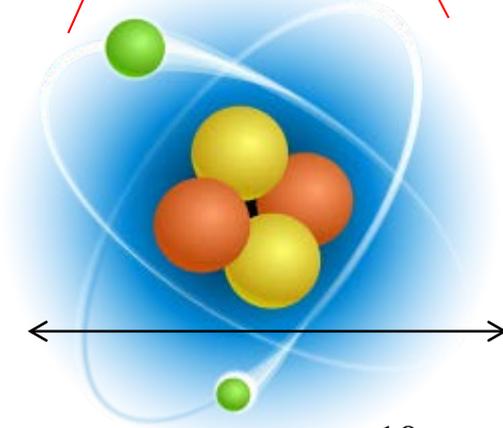
~ 10^{-8} m

100倍



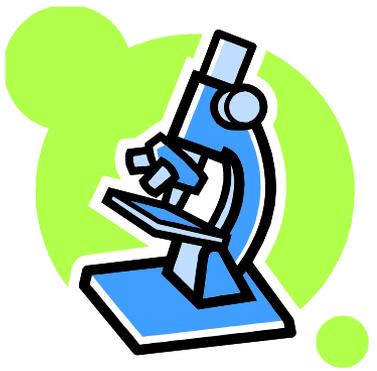
10万倍

原子



~ 10^{-10} m

100倍



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。

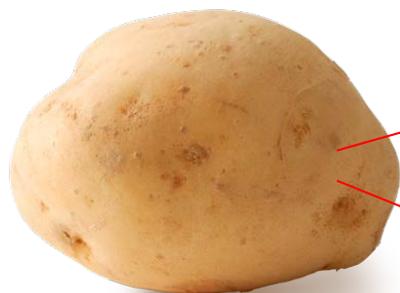
(リチャード・ファインマン)



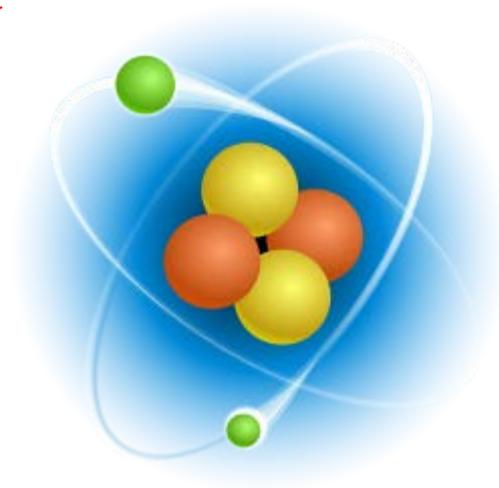
リチャード・ファインマン
(1918-1988)

1965年ノーベル物理学賞
受賞

(写真: The Nobel Foundation)



100億倍



げんし
原子

原子にもいろいろな種類 = 元素

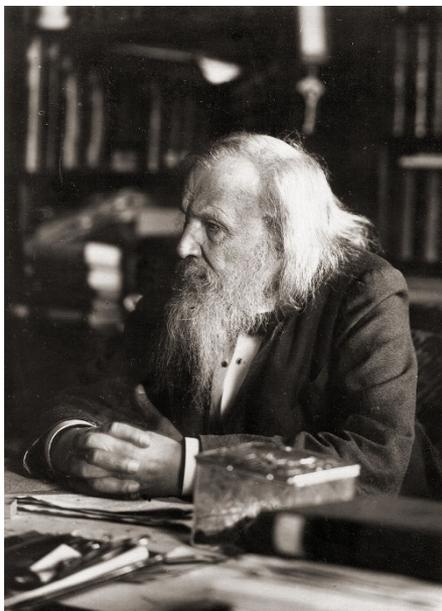
- 水素
 - 酸素
 - 炭素
 - カルシウム
 - マグネシウム
 - 硫黄
- など。

この世の中には約90種類の元素がある

重い順に並べると

- | | | | | |
|------------|-------------|------------|-------------|---------------|
| 1. 水素 | 20. カルシウム | 39. イットリウム | 58. セリウム | 77. イリジウム |
| 2. ヘリウム | 21. スカンジウム | 40. ジルコニウム | 59. プラセオジウム | 78. 白金 |
| 3. リチウム | 22. チタン | 41. ニオブ | 60. ネオジウム | 79. 金 |
| 4. ベリリウム | 23. バナジウム | 42. モリブデン | 61. プロメチウム | 80. 水銀 |
| 5. ホウ素 | 24. クロム | 43. テクネチウム | 62. サマリウム | 81. タリウム |
| 6. 炭素 | 25. マンガン | 44. ルテニウム | 63. ユウロビウム | 82. 鉛 |
| 7. 窒素 | 26. 鉄 | 45. ロジウム | 64. ガドリニウム | 83. ビスマス |
| 8. 酸素 | 27. コバルト | 46. パラジウム | 65. テルビウム | 84. ポロニウム |
| 9. フッ素 | 28. ニッケル | 47. 銀 | 66. ジスプロシウム | 85. アスタチン |
| 10. ネオン | 29. 銅 | 48. カドミウム | 67. ホルミウム | 86. ラドン |
| 11. ナトリウム | 30. 亜鉛 | 49. インジウム | 68. エルビウム | 87. フランシウム |
| 12. マグネシウム | 31. ガリウム | 50. スズ | 69. ツリウム | 88. ラジウム |
| 13. アルミニウム | 32. ゲルマニウム | 51. アンチモン | 70. イッテルビウム | 89. アクチニウム |
| 14. ケイ素 | 33. ヒ素 | 52. テルル | 71. ルテチウム | 90. トリウム |
| 15. リン | 34. セレン | 53. ヨウ素 | 72. ハフニウム | 91. プロトアクチニウム |
| 16. 硫黄 | 35. 臭素 | 54. キセノン | 73. タンタル | |
| 17. 塩素 | 36. クリプトン | 55. セシウム | 74. タングステン | 92. ウラン |
| 18. アルゴン | 37. ルビジウム | 56. バリウム | 75. レニウム | |
| 19. カリウム | 38. ストロンチウム | 57. ランタン | 76. オスミウム | |

元素の周期表



水兵リーベ僕の船
七曲りシブプス・クラーク
か！

メンデレーエフ
(1834-1907)

Group → ↓ Period	1	2	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 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		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 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
----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

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

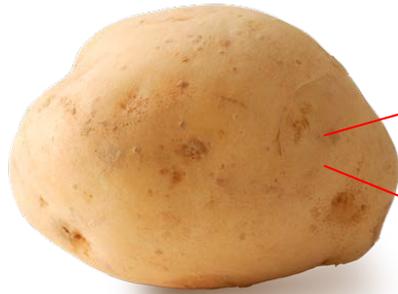
セリウム 40 mg
バリウム 22 mg
ヨウ素 20 mg
スズ 20 mg
チタン 20 mg
ホウ素 18 mg
ニッケル 15 mg
セレン 15 mg
クロム 14 mg
マンガン 12 mg
ヒ素 7 mg
リチウム 7 mg
セシウム 6 mg
水銀 6 mg
ゲルマニウム 5 mg
モリブデン 5 mg
コバルト 3 mg
アンチモン 2 mg
銀 2 mg
ニオブ 1.5 mg
ジルコニウム 1 mg
ランタン 0.8 mg

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

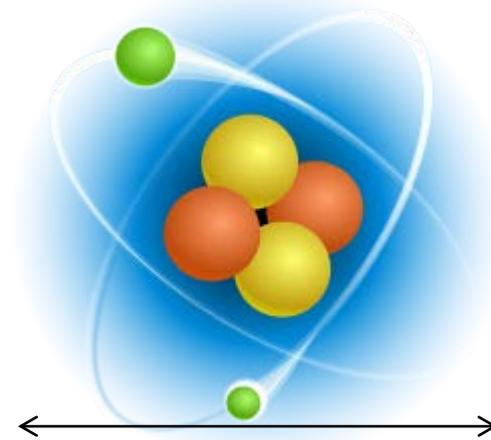


John Emsley,
“The Elements”,
3rd ed. Clarendon Press,
Oxford, 1998

原子にもいろいろな種類 = 元素



100億倍



原子

~ 10^{-10} m



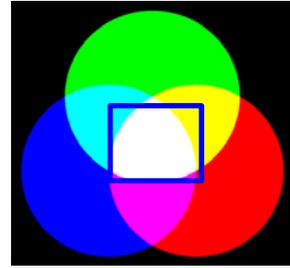
原子にも中身がある

原子の中身を見るためには
どうすればよいか？

そもそも、ものが見えるとはどういうことか？

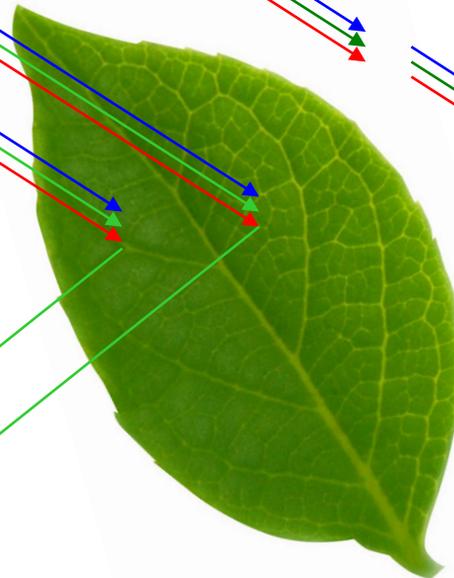


そもそも、ものが見えるとはどういうことか？



太陽

緑色の光だけが
が反射
(他の色は吸収)



葉に光が当たら
なければ緑は
反射しない

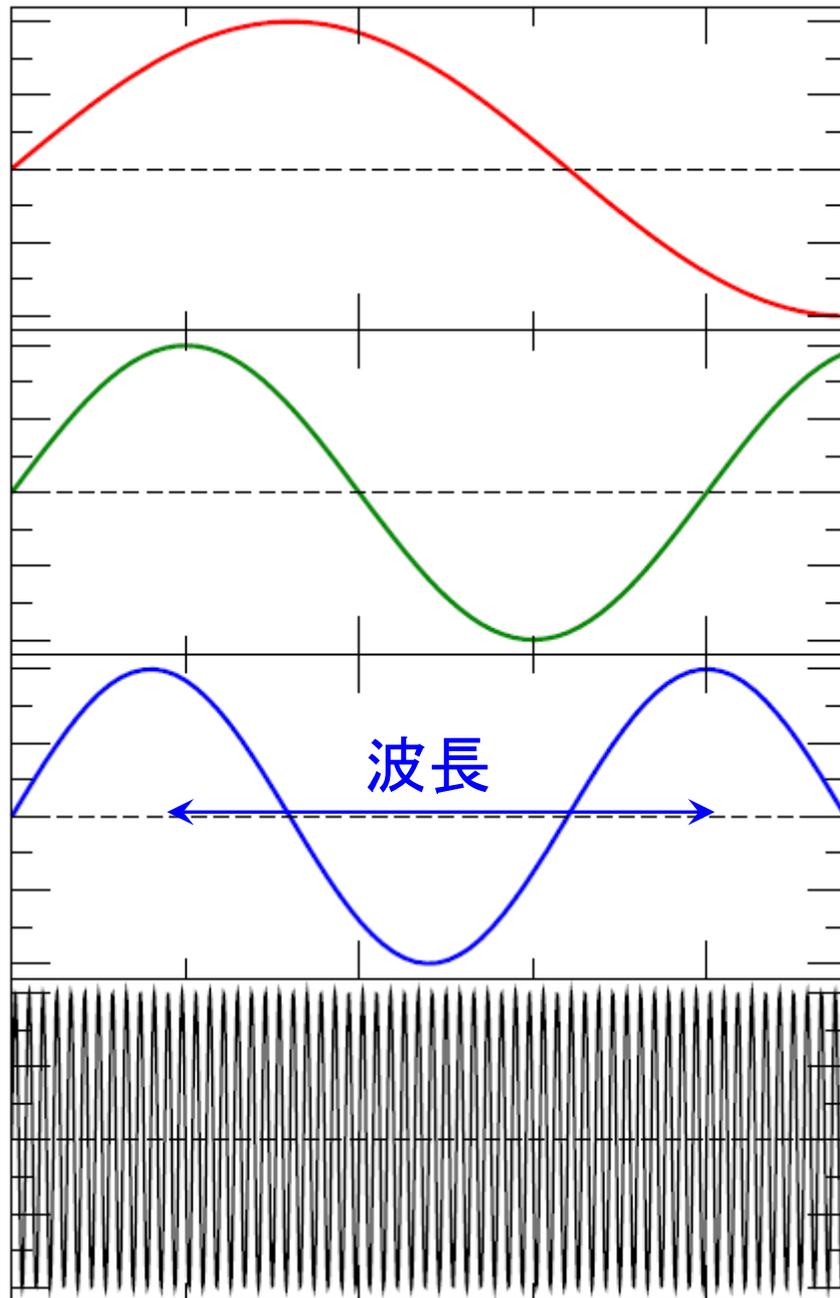


葉の形

光=波(電磁波)

エネルギーが高い
ほど波長が短い

光でものを見るため
には、その大きさ以下の
波長でなければ
ならない



可視光(赤)

~ 800 nm

可視光(緑)

~ 500 nm

可視光(青)

~ 400 nm

X線

~ 1 pm

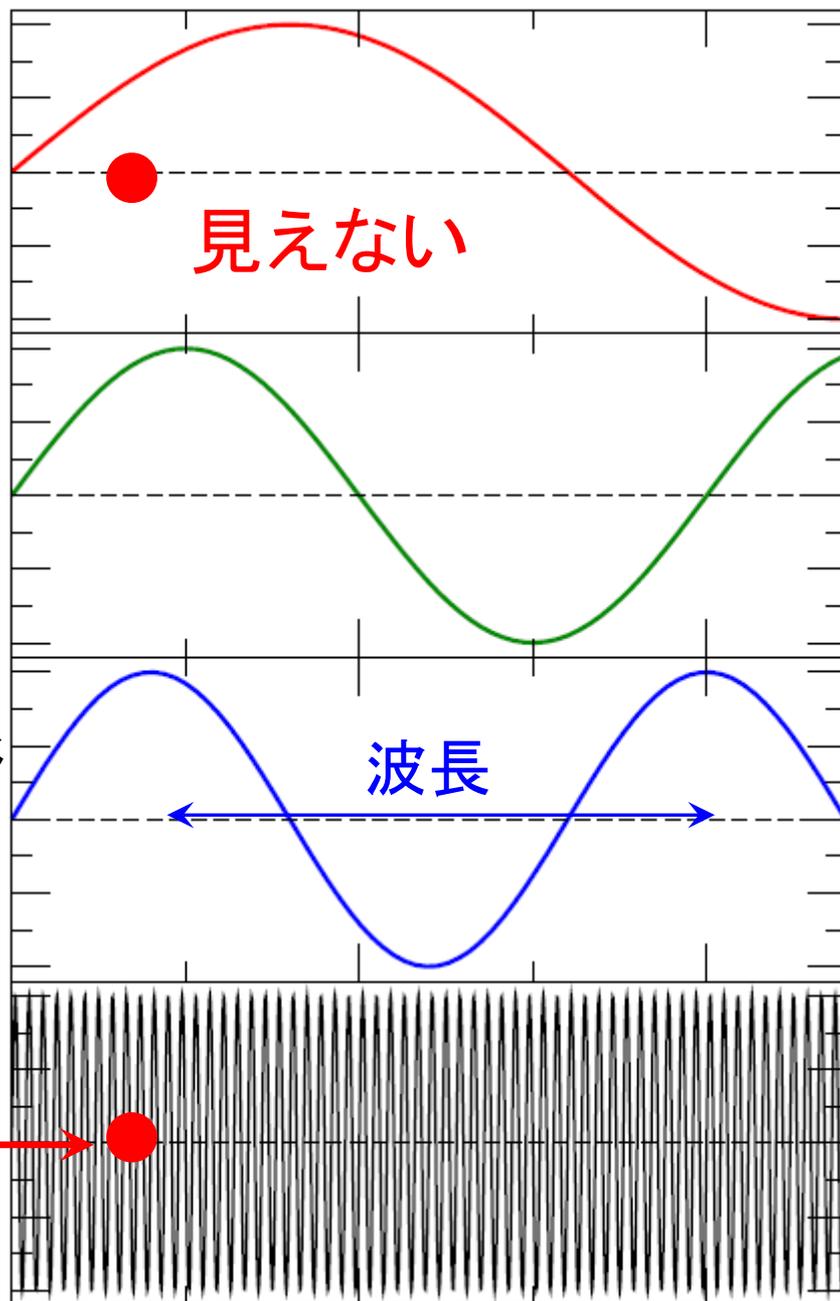
- 10 nm

光でものを見るためには、その大きさ以下の波長でなければならない



小さなものを見るためには、X線やガンマ線が必要。

見える
(細かくスキャンされる)



可視光(赤)
~ 800 nm

可視光(緑)
~ 500 nm

可視光(青)
~ 400 nm

X線
~ 1 pm
- 10 nm

(余談) X線の医学への応用

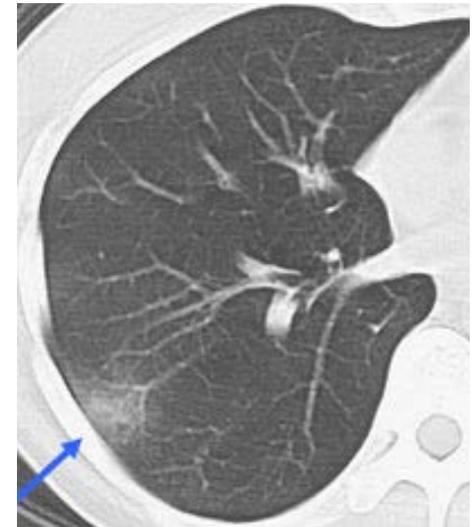
X線：放射線の一種

レントゲン(X線)
により身体の内部を映像化

放射線によるガン治療

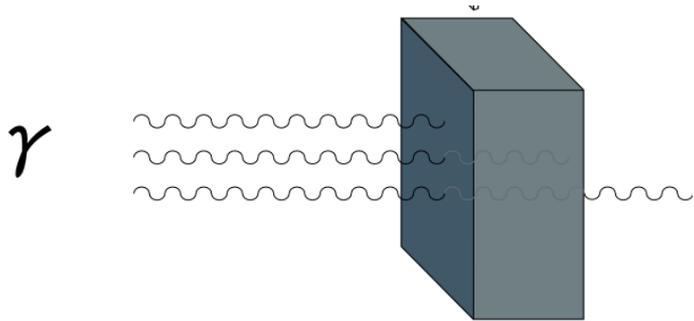


成人男性の胸部X線写真

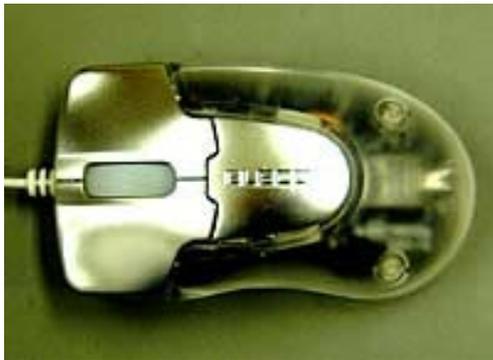


(余談)放射線の工業的応用

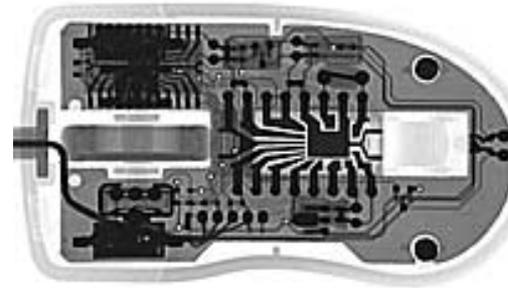
放射線の透過能力 → 工学的応用に重要



γ 線やX線は物体を容易に透過する性質を持つ



X線 →



http://www.enepa.ne.jp/radio/radio_16.html

- 物を壊さずに検査ができる(非破壊検査)。
- 航空機や船のエンジンの検査に使える(目に見えない傷の発見など)。

(余談)放射線の農業への応用

- じゃがいもの発芽をおさえる
- 品種改良
- 害虫駆除

ゴーヤと害虫駆除と放射線



1993年までは沖縄に行かなければゴーヤは食べれなかった。



ウリミバエのため



- 放射線をあててウリミバエを不妊化。
- 根絶に成功。
県外出荷が可能になった。

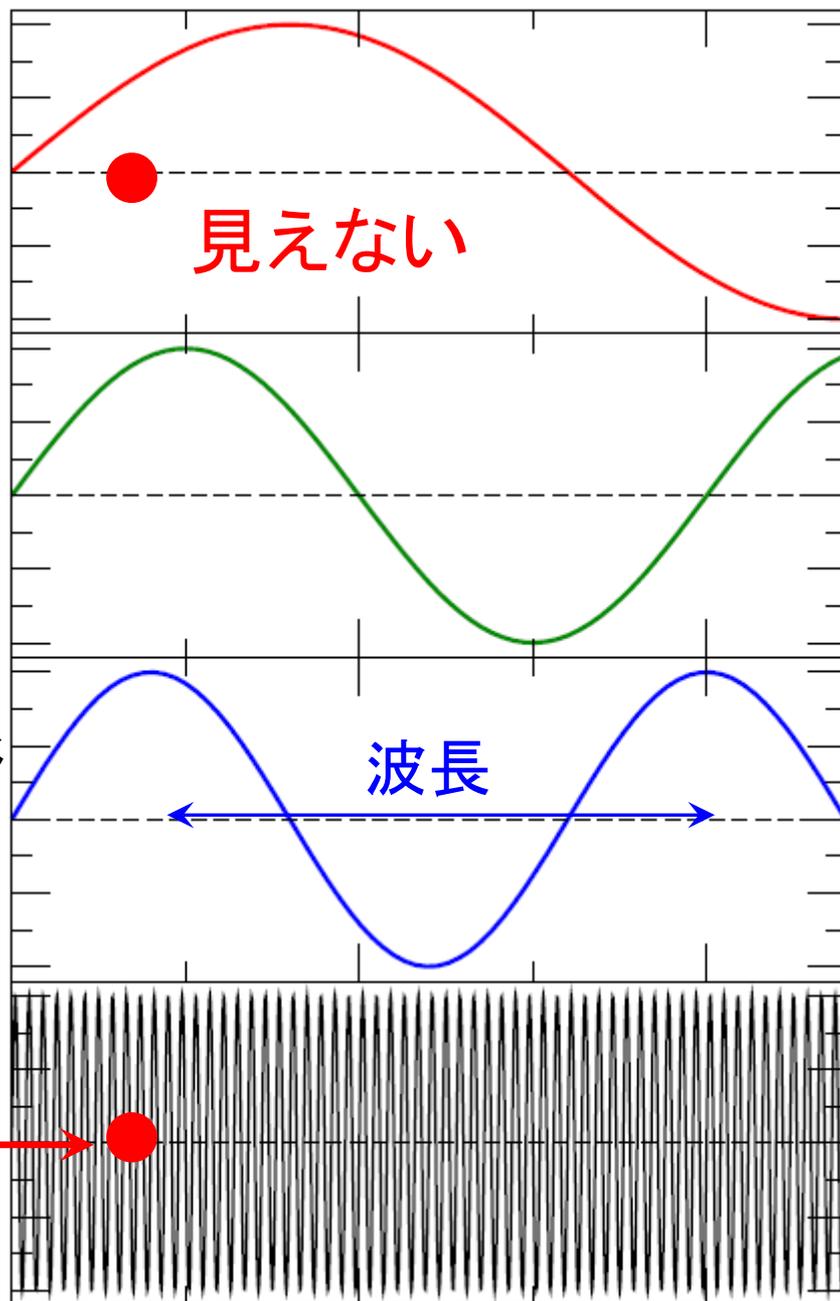
「不妊虫放飼(ふにんちゅうほうし)」

光でものを見るためには、その大きさ以下の波長でなければならない



小さなものを見るためには、X線やガンマ線が必要。

見える
(細かくスキャンされる)



可視光(赤)
~ 800 nm

可視光(緑)
~ 500 nm

可視光(青)
~ 400 nm

X線
~ 1 pm
- 10 nm

量子力学

すべての粒子は波の性質も持っている(ド・ブロイ波)



粒子を加速器で加速してエネルギーを上げれば、小さいものも見えるようになる。

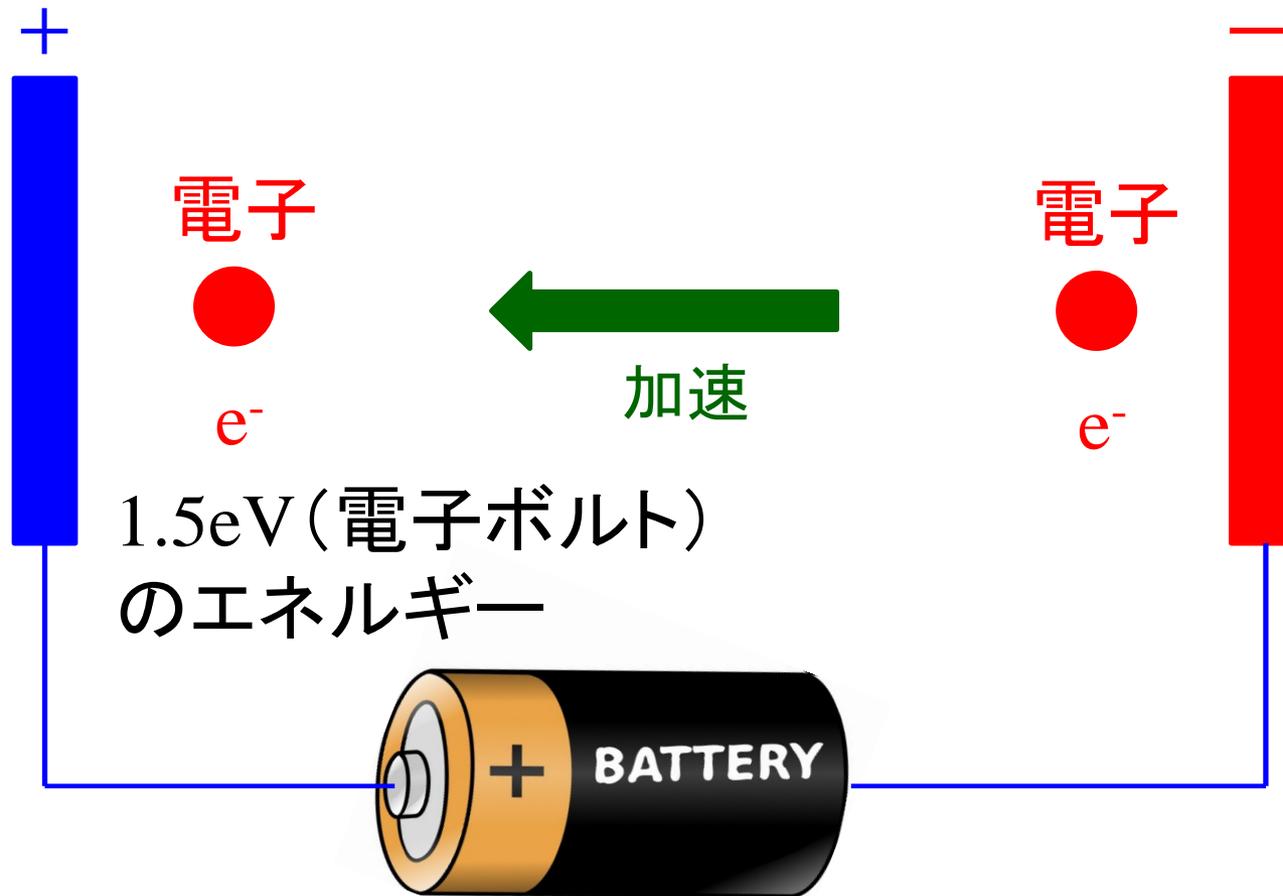


ド・ブロイ(18972-1987)



電子顕微鏡
(光学顕微鏡より高い分解能)

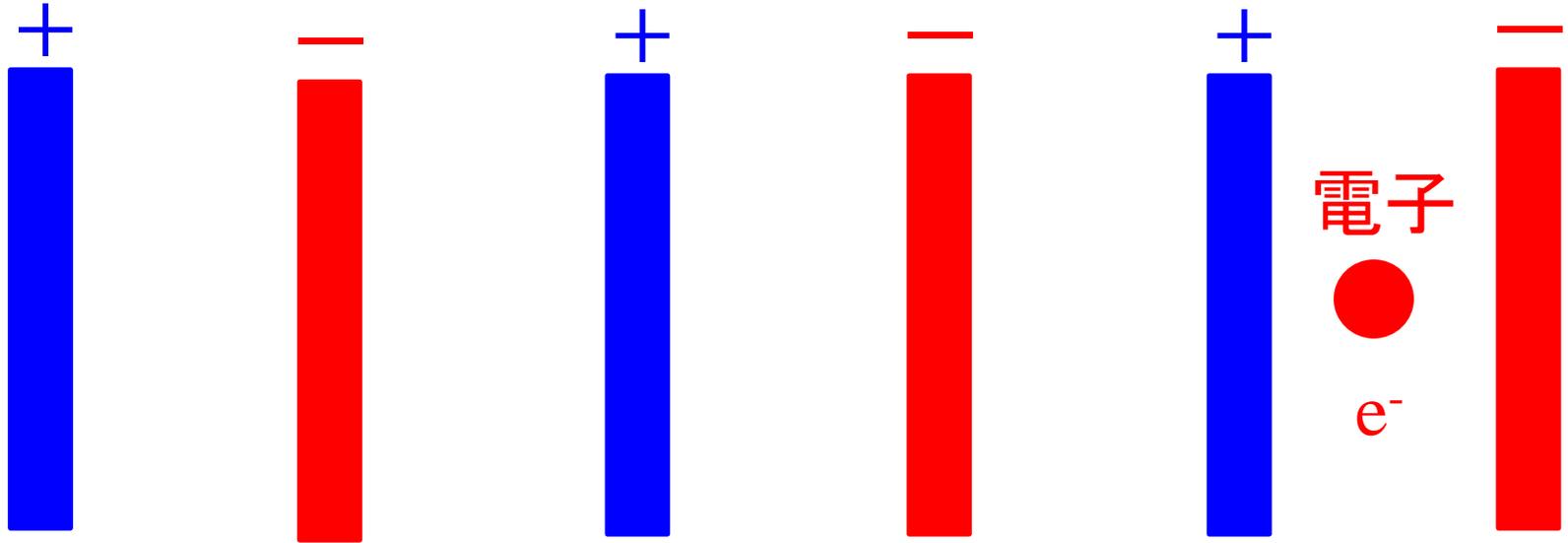
加速器の原理と日本の主な加速器施設



素粒子・原子核の実験ではこれでは十分なエネルギーが得られない(高電圧が必要だが、数千万ボルトが限界)

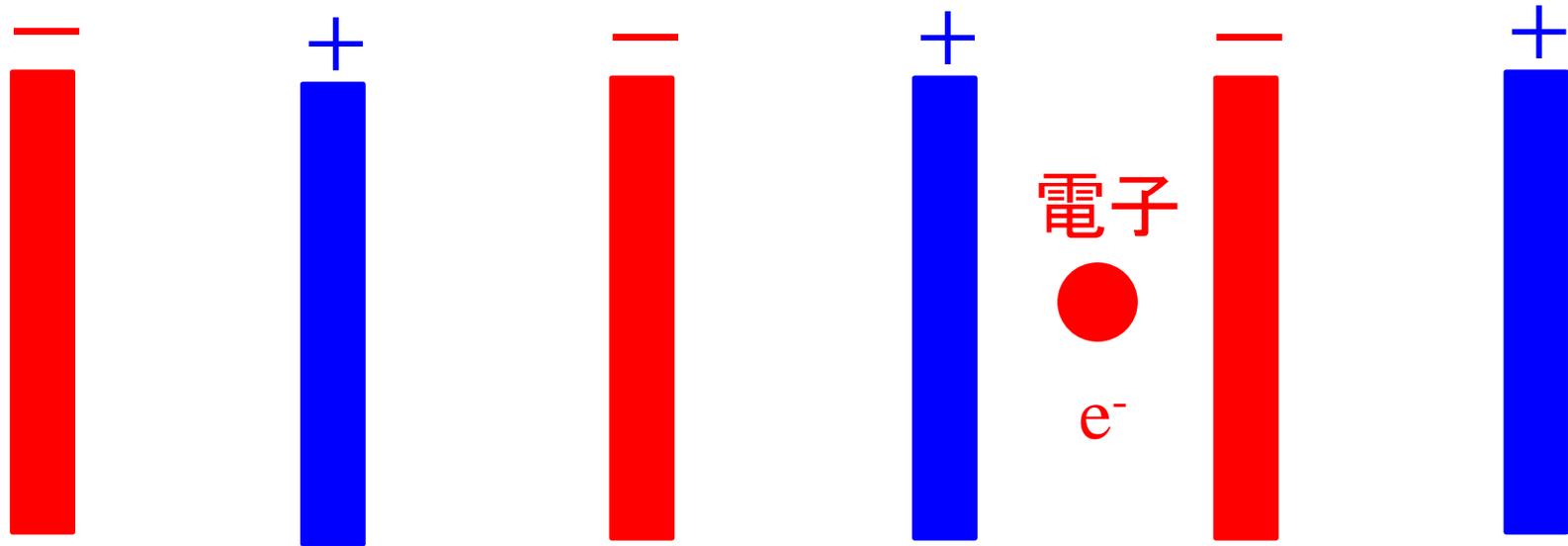
加速器の原理と日本の主な加速器施設

高周波(強力な電波)を用いる



加速器の原理と日本の主な加速器施設

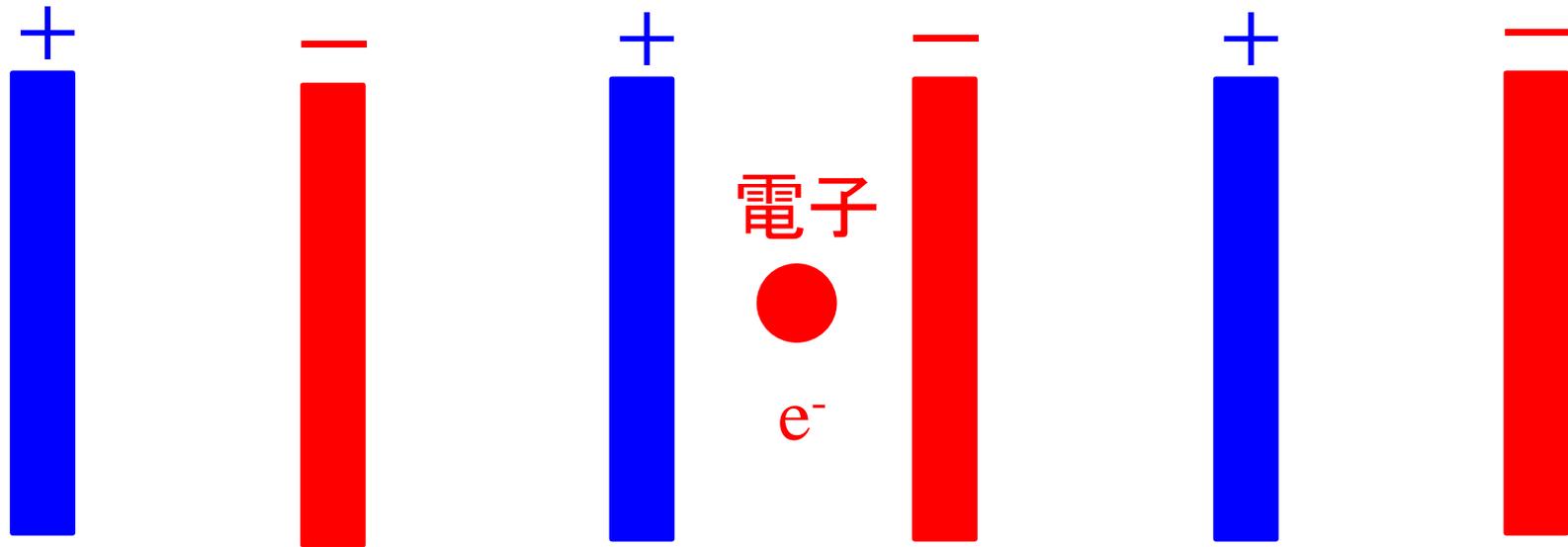
高周波(強力な電波)を用いる



高周波の周期を荷電粒子の移動に合わせる
→ 段階的に加速

加速器の原理と日本の主な加速器施設

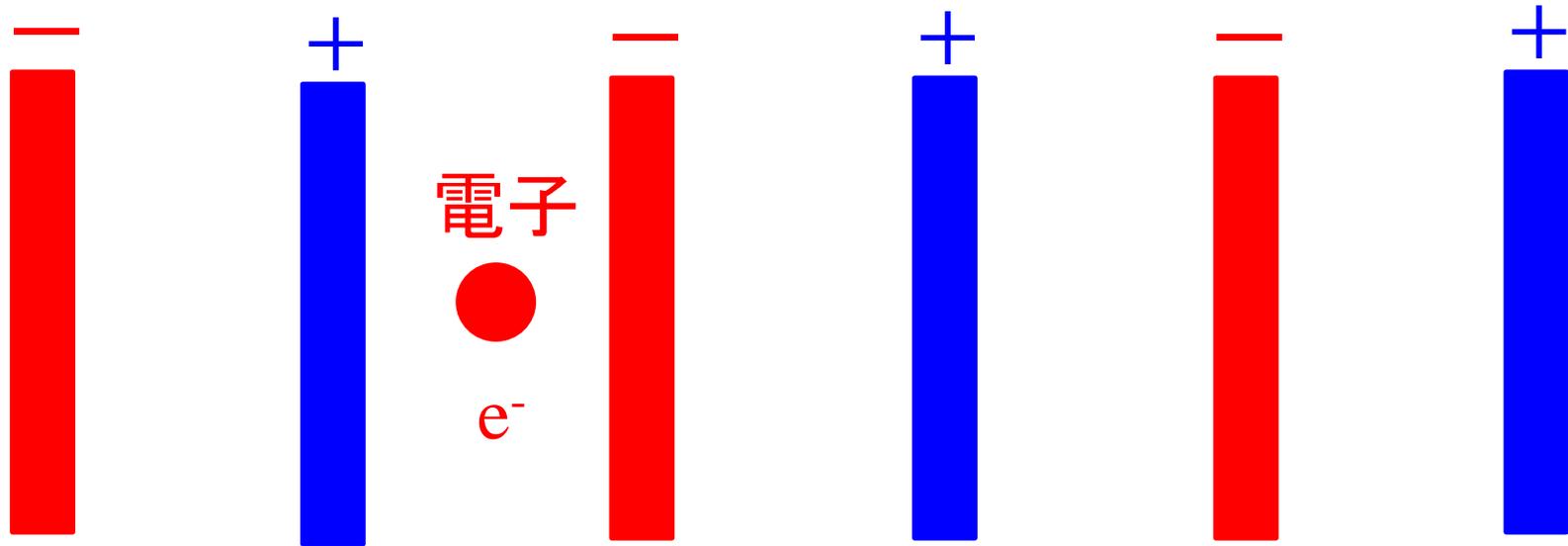
高周波(強力な電波)を用いる



高周波の周期を荷電粒子の移動に合わせる
→ 段階的に加速

加速器の原理と日本の主な加速器施設

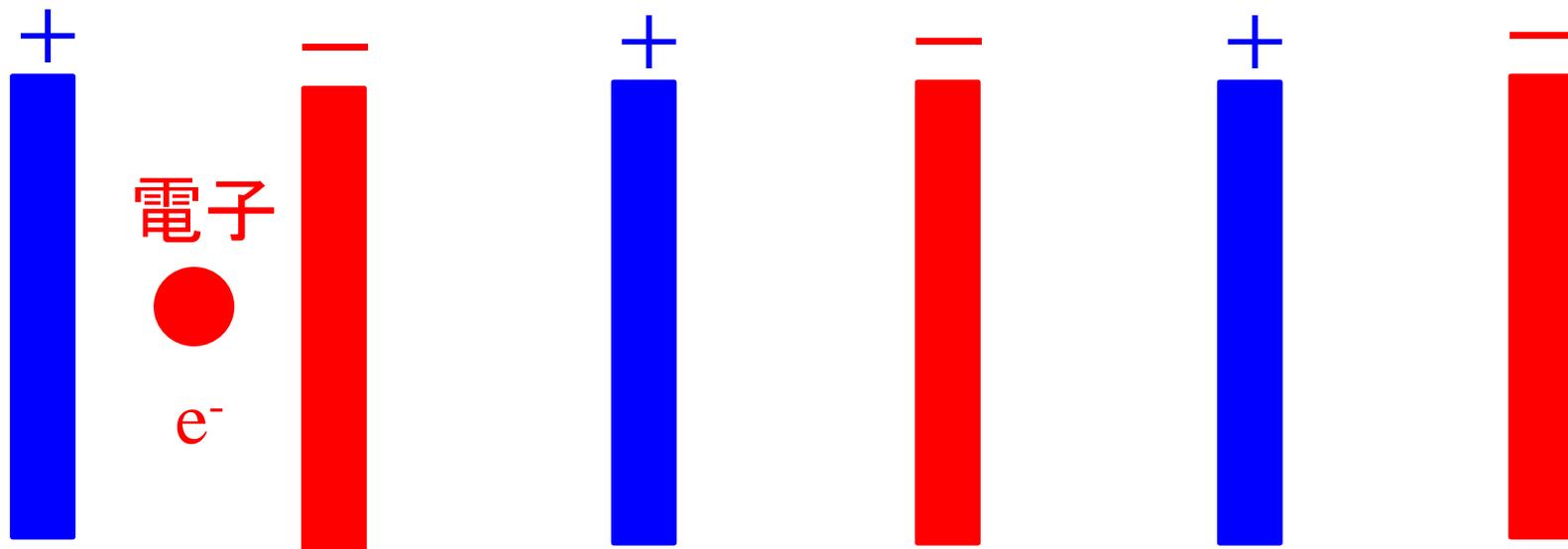
高周波(強力な電波)を用いる



高周波の周期を荷電粒子の移動に合わせる
→ 段階的に加速

加速器の原理と日本の主な加速器施設

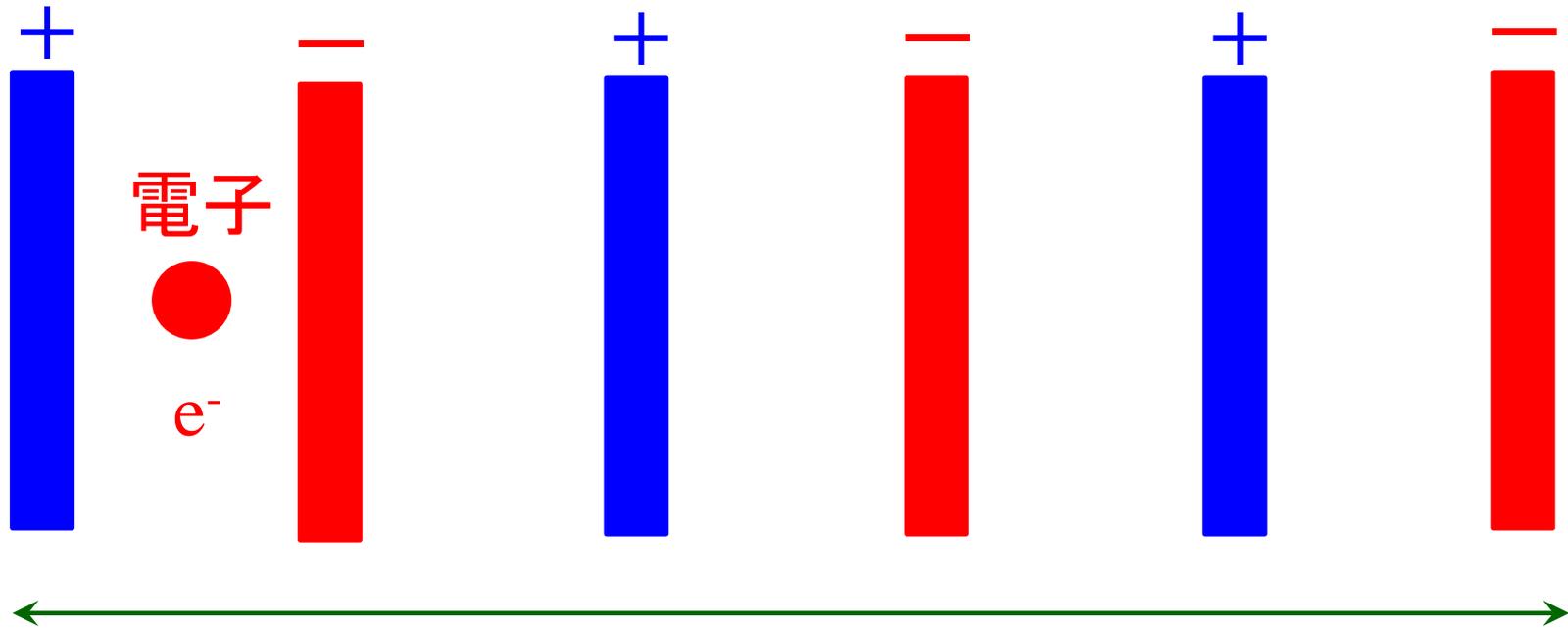
高周波(強力な電波)を用いる



高周波の周期を荷電粒子の移動に合わせる
→ 段階的に加速

加速器の原理と日本の主な加速器施設

線形加速器(リニアック)



高エネルギーを得ようとするとき長距離の加速が必要
(小規模のものは医療用にも応用
:がんの放射線治療)

国際線形加速衝突器

(International Linear Collider: ILC)



全長31 km

電子+陽電子 加速衝突装置

到達エネルギー 500GeV → 1000GeV

全長 31km → 50km

北上山地 (岩手県~宮城県)

ILC Scheme | ©www.form-one.de

周波数: ~ GHz

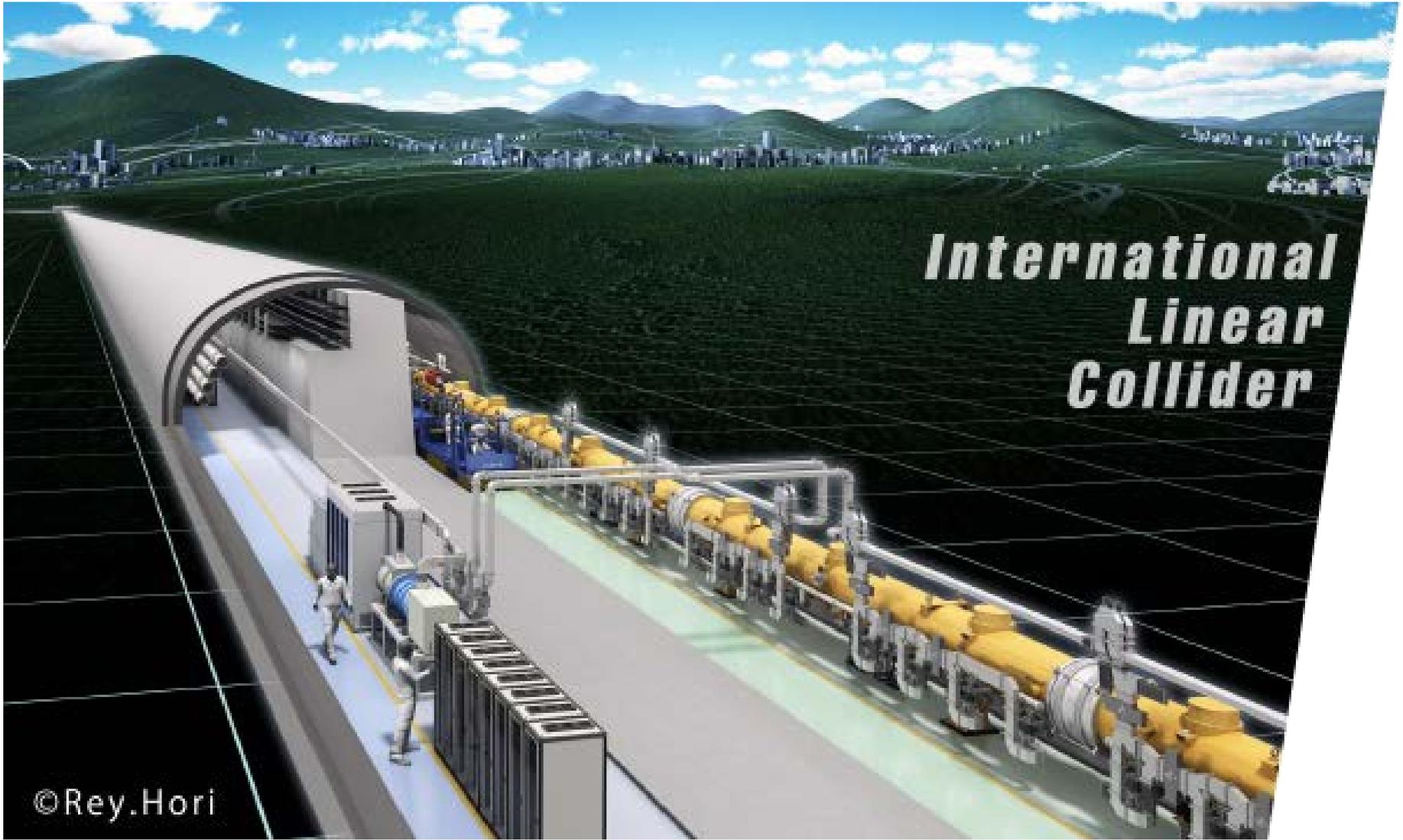
加速電圧: ~ 31.5 MV/m

宇宙初期の状態を作って物質の起源の謎に迫る

4

活断層
確実度Ⅲ
(新編 日本の活断層1991)
Dランク
(北上地域からの提出資料)





***International
Linear
Collider***

©Rey.Hori

	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
政府間交渉	■				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
機器・施設詳細設計	■				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
国際研究所の準備	■				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
”青信号”	■	■	■	●	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
国際合意の形成	■	■	■	■			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
国際研究所の設立	■	■	■	■			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
調達の準備	■	■	■	■			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
建設	■	■	■	■	■	■										■
竣工	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

実現に向けた検討が進行中

cf. 予算（建設費：1兆円を超える額、
 運転経費：最低年間400億円）

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex)

大強度陽子加速器施設(茨城県東海村)

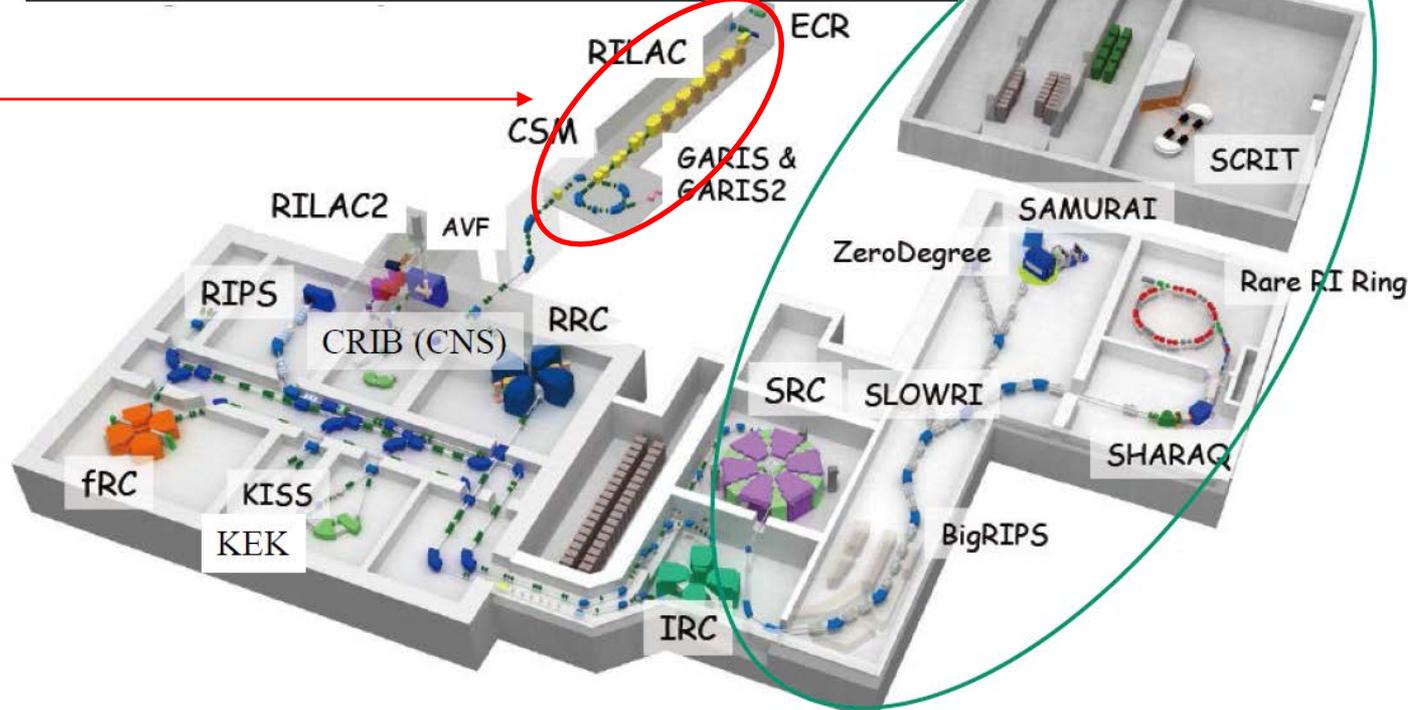


- 原子核・素粒子物理の研究
- 生命科学の研究
- 放射性廃棄物の核変換の研究

理化学研究所 RIBF

(Radioactive Isotope Beam Factory) 埼玉県和光市

RI 「放射性同位元素 (RI)」を
B 「ビーム」としてとりだし
F 「ファクトリー」のように大量生産する。



- 不安定原子核の物理
- 元素の起源の研究
- 超重元素(新元素113番)の研究



理研重イオン線形加速器 RILAC (~ 40 m)

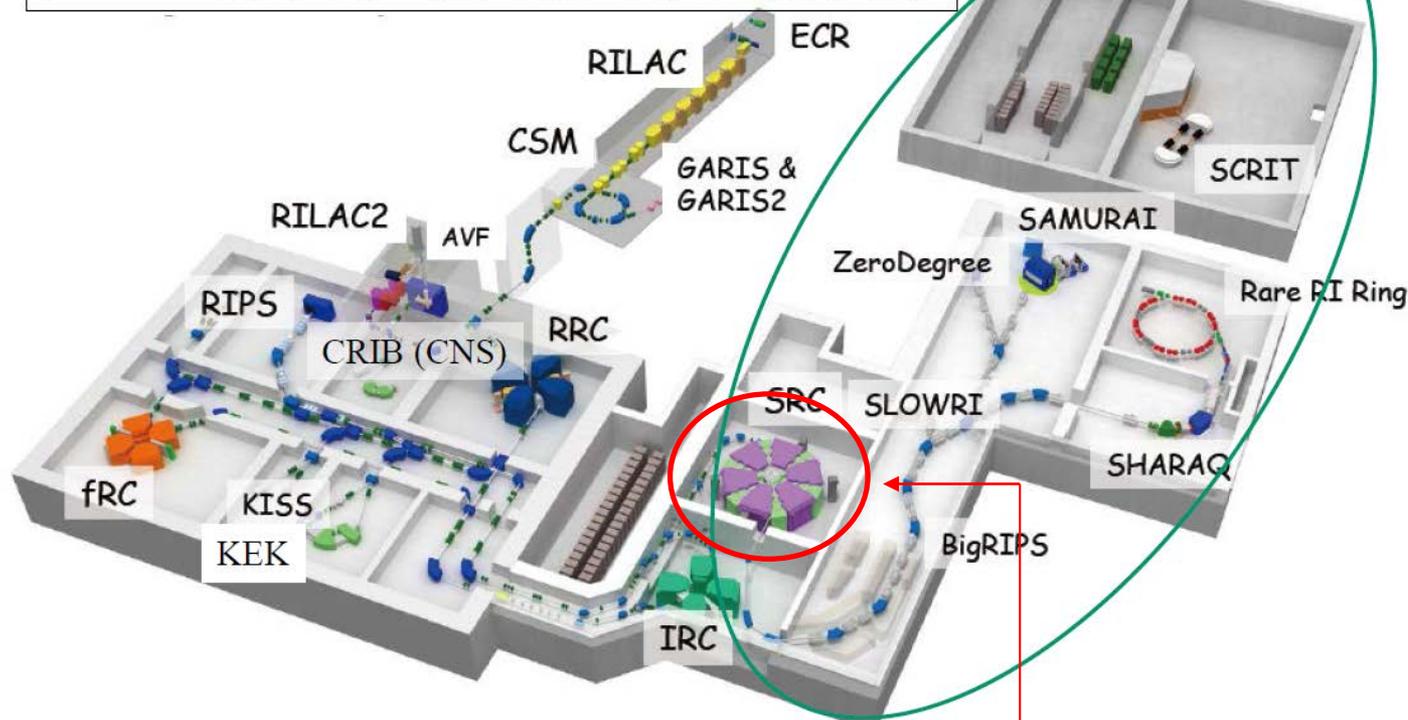
113番元素の発見
(森田浩介氏)



理化学研究所 RIBF

(Radioactive Isotope Beam Factory) 埼玉県和光市

RI 「放射性同位元素 (RI)」を
B 「ビーム」としてとりだし
F 「ファクトリー」のように大量生産する。



- 不安定原子核の物理
- 元素の起源の研究
- 超重元素 (新元素113番) の研究

理研RIBF 超伝導リングサイクロトロン (SRC)

直径 18.4 m



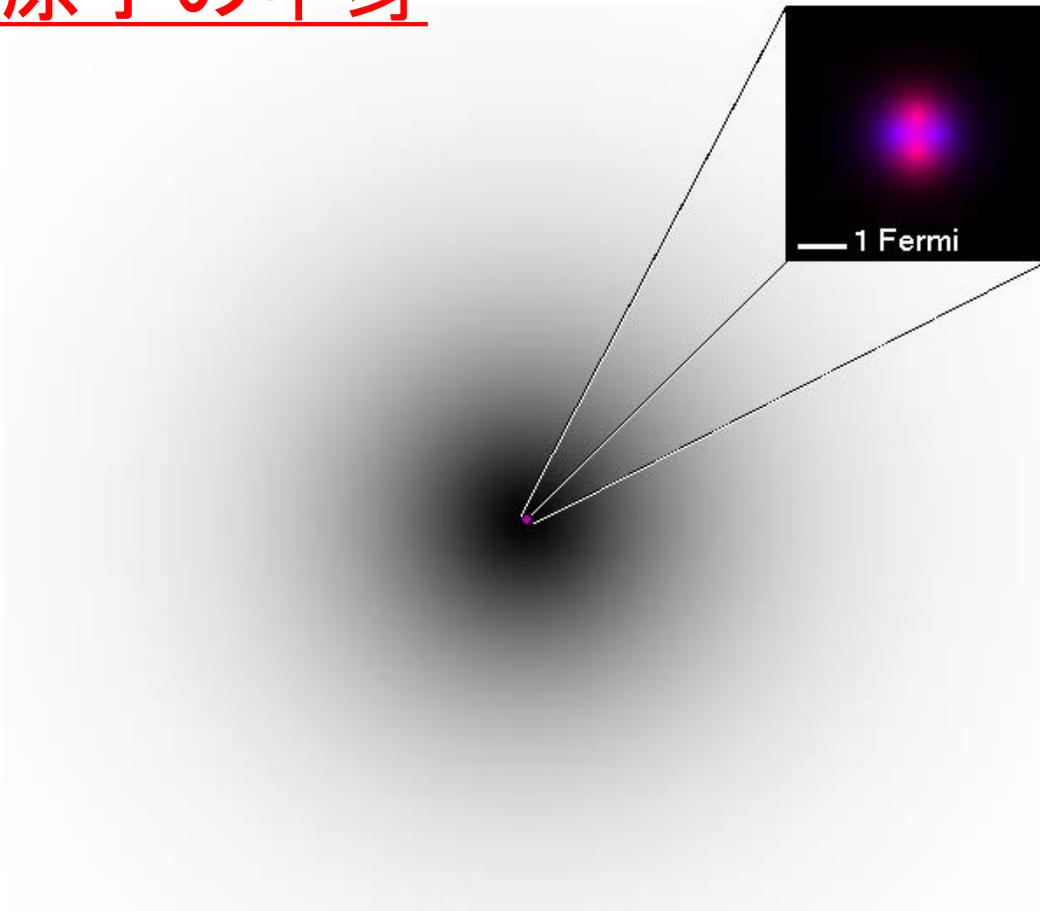
世界最強の加速器

(円形加速器: 磁場で軌道を曲げる)

水素からウランまでの元素を高速に加速

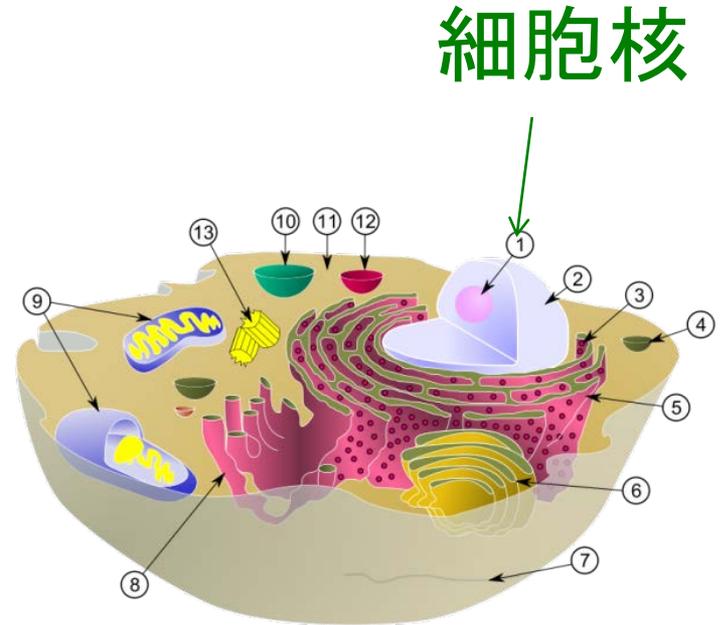
→ 中性子過剰原子核の生成

原子の中身



原子の中身

原子の核(原子核)



(参考)細胞の中身

原子の中身

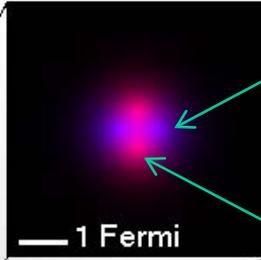
原子核

陽子 (プラスの電気)

中性子 (電気なし)

10万倍
に拡大

電子の雲
(マイナスの電気)



0.000000000001 m

元素の周期表

Group → ↓ Period	1	2										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 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		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 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			

最も重い元素は何？

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 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

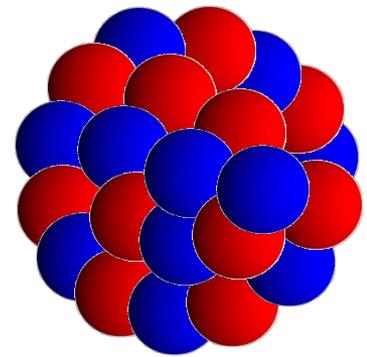
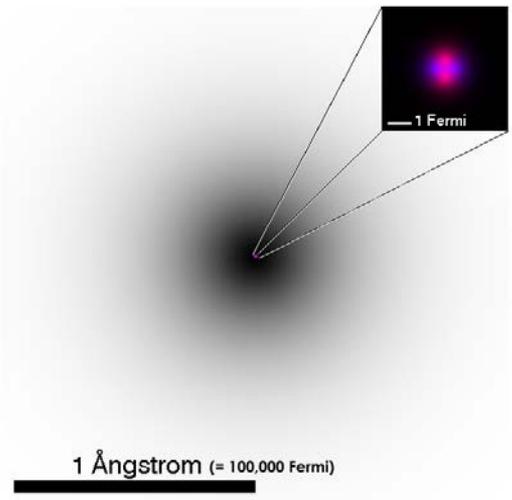
最も重い元素は何？

何が最も重い元素の番号を決めているのか？

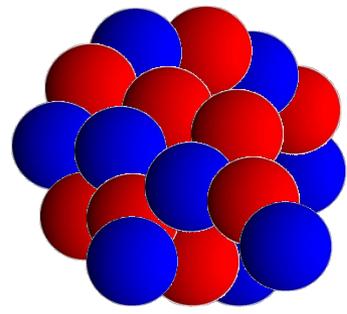
重い原子核 → 電気的反発力が大



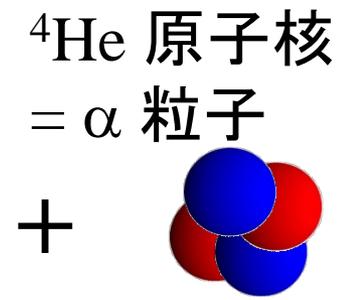
α粒子を出して安定になる



(Z,N)



(Z-2,N-2)



(Z=2,N=2)

重い原子核の寿命

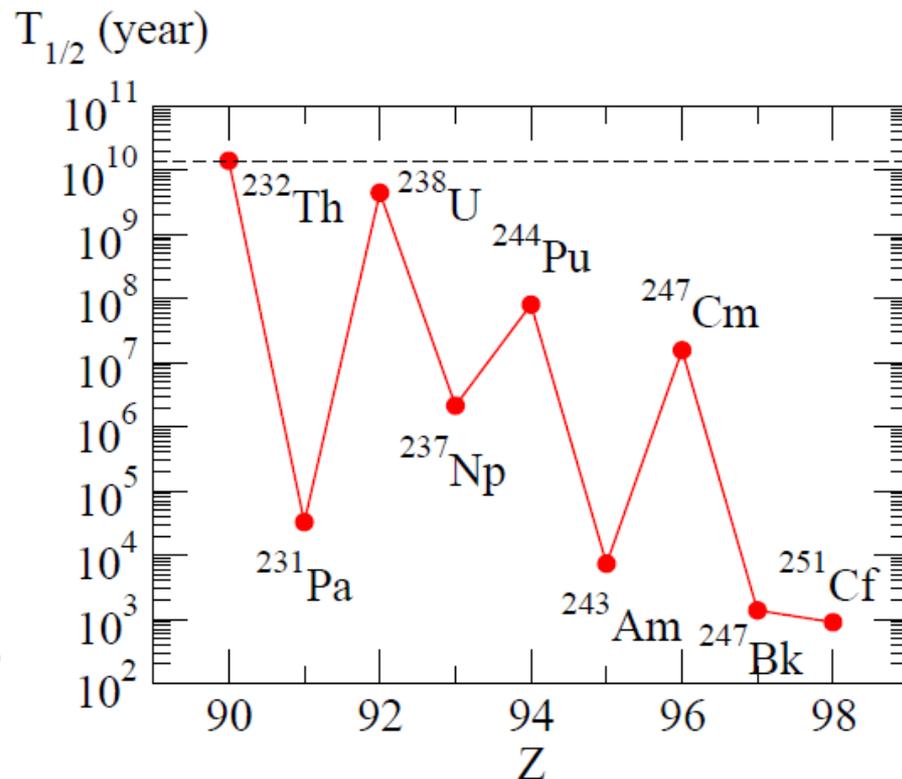
^{232}Th 140.5 億年

^{238}U 44.7 億年

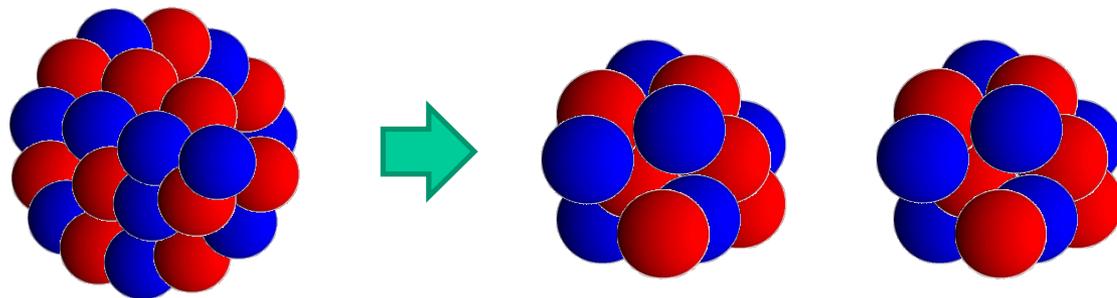
^{244}Pu 8000 万年

^{247}Cm 1560 万年

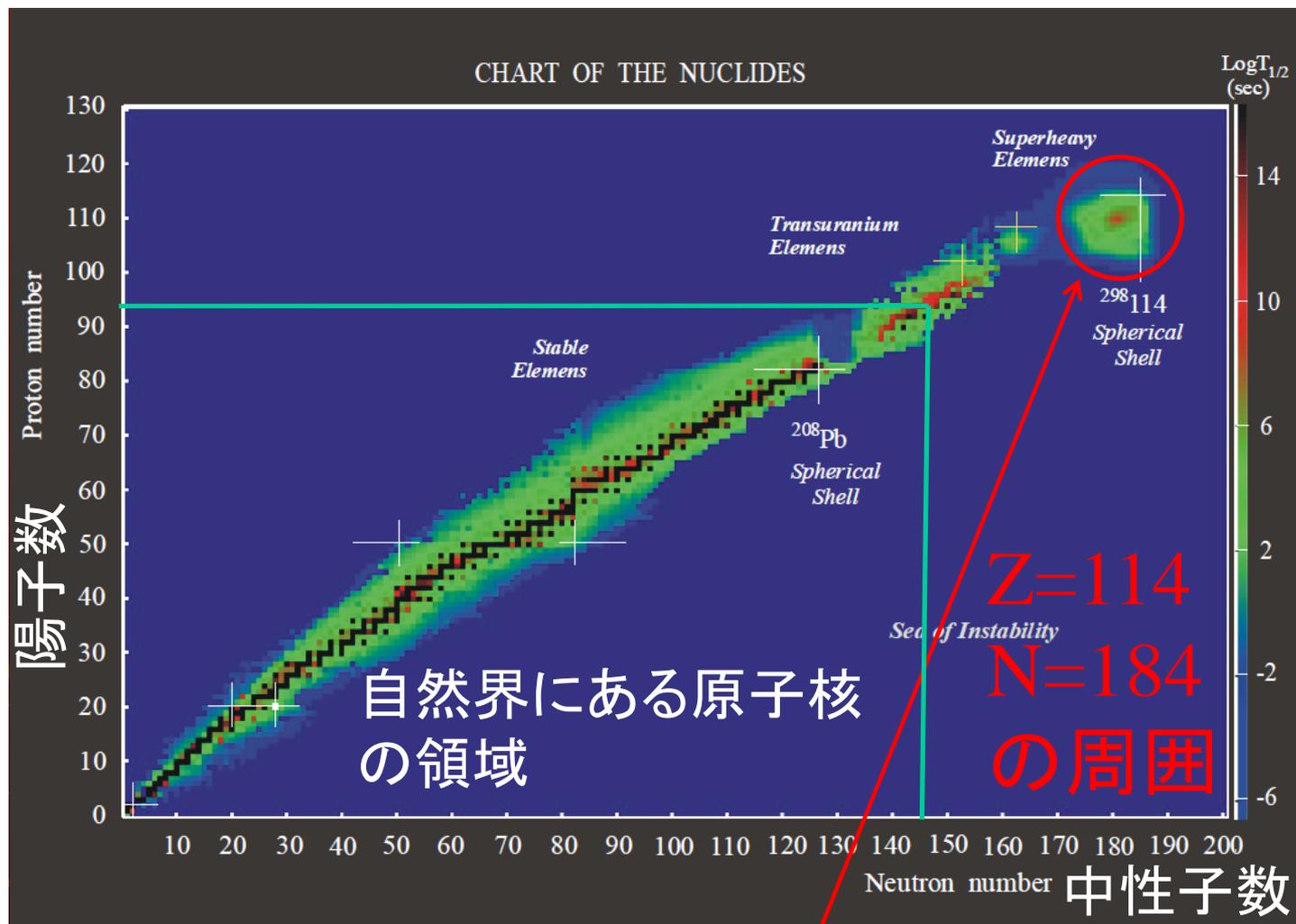
(参考) 宇宙の年齢: 137億年
地球の年齢: 45.4億年



* もっと重い原子核は核分裂で壊れることも:



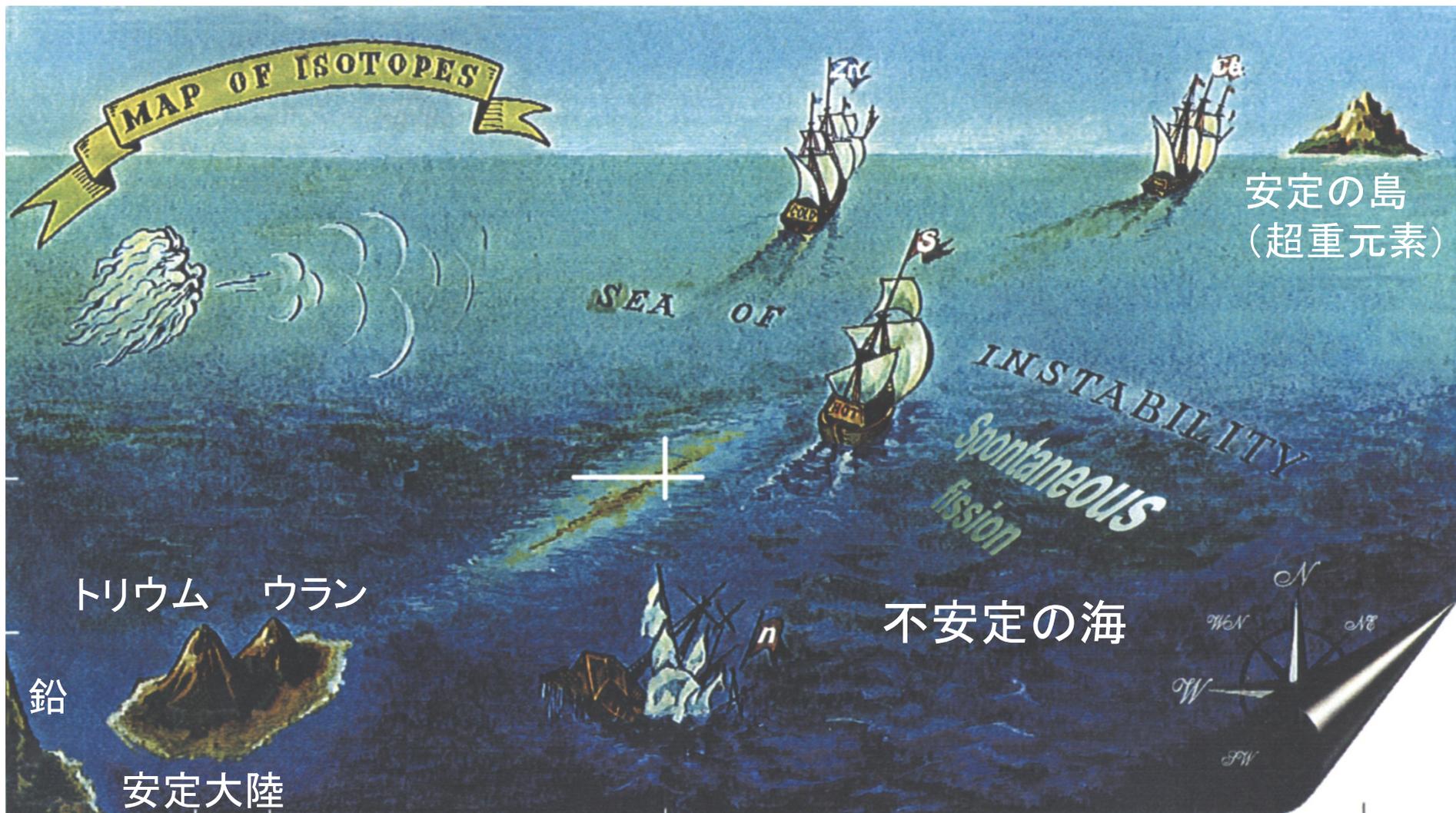
超重元素(超重原子核)



Yuri Oganessian

原子核の安定領域の理論的予言
(1966年: スビアテッキら)

安定の島(超重元素)を目指して

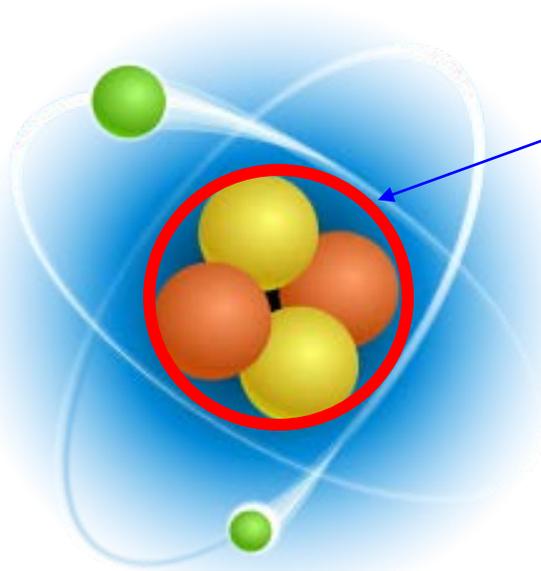


Yuri Oganessian

超重元素(超重原子核)

-	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	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

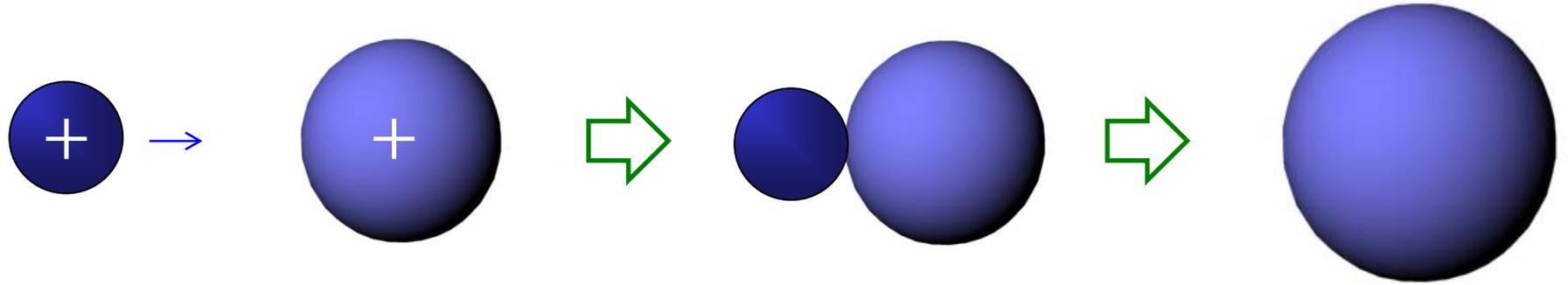
Lanthanides	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
Actinides	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr



原子核

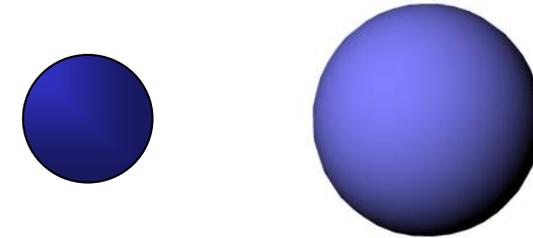
原子核と原子核をくっつけて
大きな原子核を作る

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

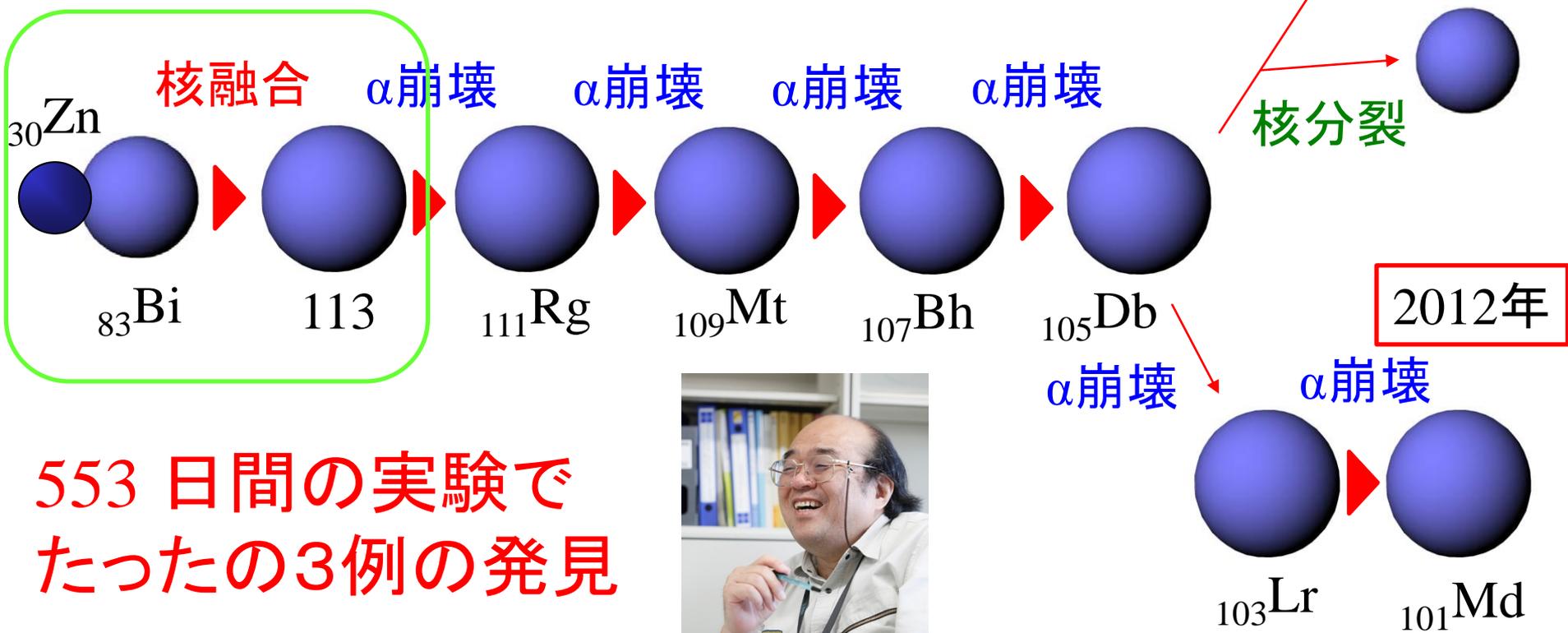


でも、ほとんどはくっつけても
すぐ離れてしまう
(大きな原子核ができない)

新元素113番 (理化学研究所・九大 森田浩介博士)



光速の約10パーセント
まで加速



これまでに到達した超重元素

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
----------	----------	--	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	------------	-----------	------------	-----------	------------	------------

Z=110	ダームスタチウム(Ds)	1994	ドイツ
Z=111	レントゲニウム (Rg)	1994	ドイツ
Z=112	コペルニシウム (Cn)	1996	ドイツ
Z=113	名無し	2003	露 / 2004 日本
Z=114	フレロビウム (Fl)	1999	ロシア(露)
Z=115	名無し	2003	ロシア
Z=116	リバモリウム (Lv)	2000	ロシア
Z=117	名無し	2010	ロシア
Z=118	名無し	2002	ロシア

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	2016
114:フレロビウム (Fl)	1999 ロシア	2011

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	2016
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: 確実性が評価され日本に命名権!

幻の元素、ニッポニウム (Np)

1908年:「43番目の元素」として新元素を発見し
ニッポニウム (Np) と命名したと発表。

→ その後疑問視され、周期表からは落とされる
(実は75番元素レニウム(当時未発見)だった)



小川正孝
(1865－1930)



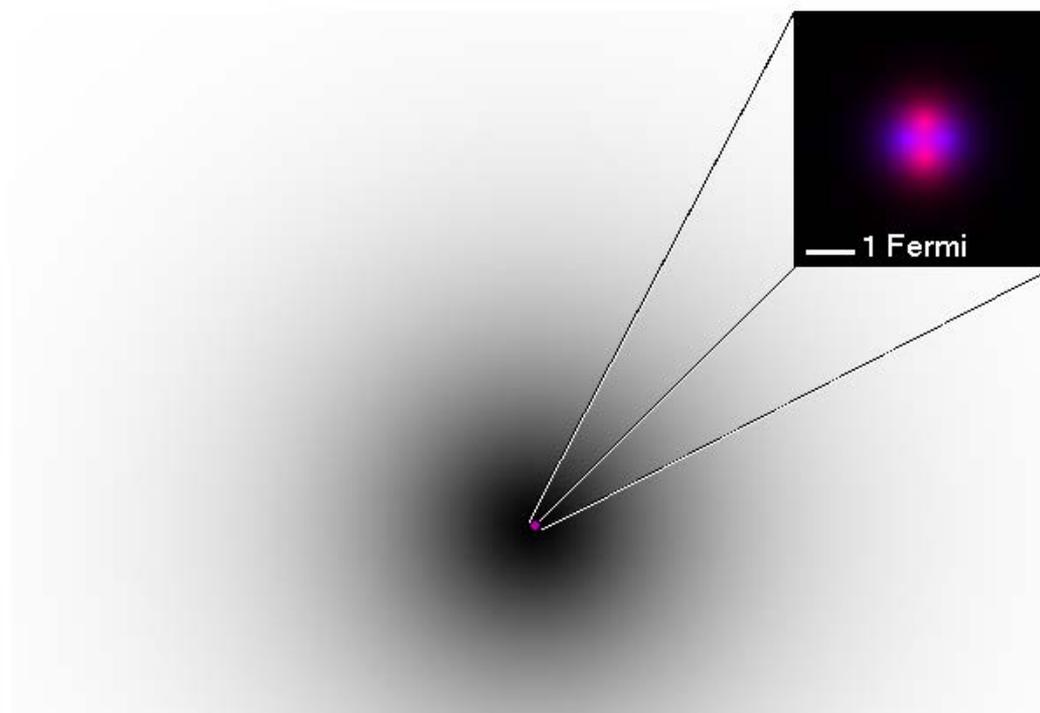
東北大学第4代総長
(1919－1928)

写真提供:宮城の
新聞



モリブデナイト
(モリブデン鉱石)

まとめ



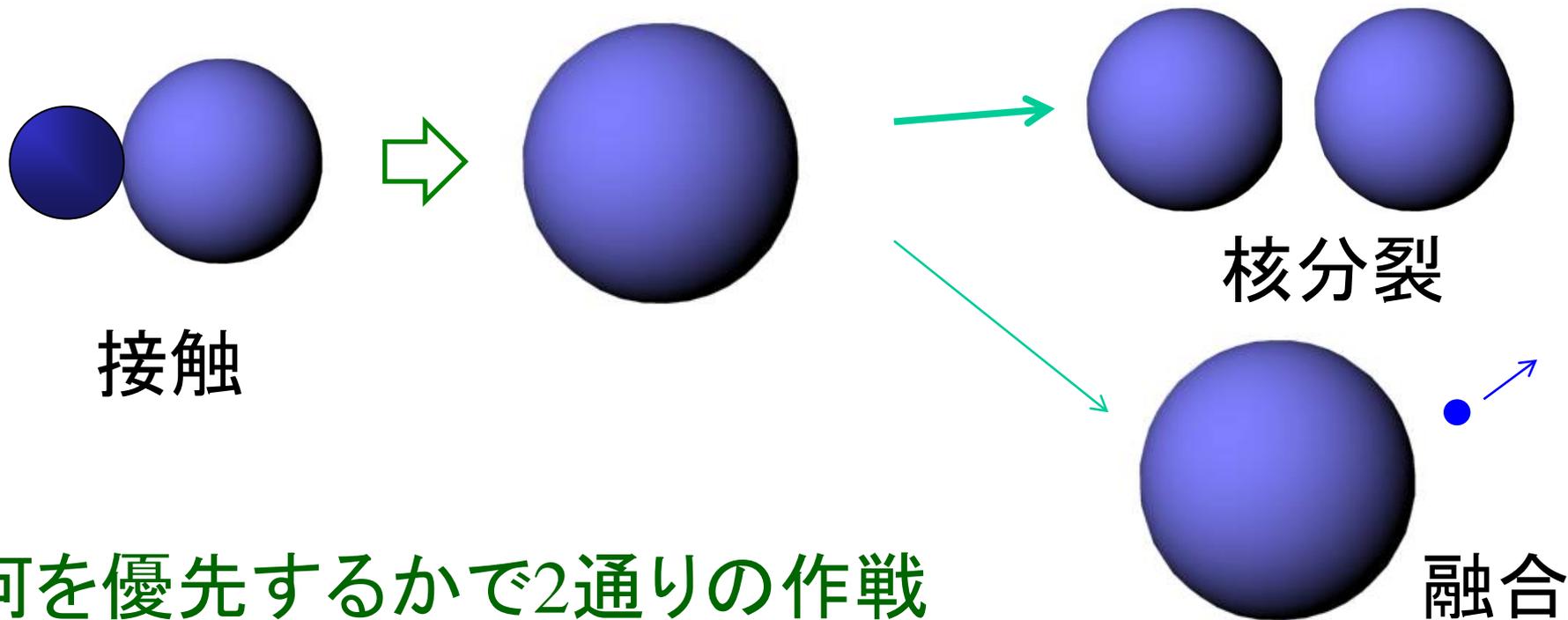
原子核

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
- 超重元素(113番元素)
- 加速器の役割

113番元素の名前と記号(今年の秋~冬?)

ご清聴ありがとうございました。



	熱い核融合	冷たい核融合
例	$^{48}\text{Ca} + ^{243}\text{Am}$ $\rightarrow ^{287}_{115} + 4n$	$^{70}\text{Zn} + ^{209}\text{Bi}$ $\rightarrow ^{278}_{113} + 1n$
対称度	小	大
接触確率	大	小
生き残り確率	小	大