



放射線

鳥居 寛之
小豆川勝見
渡辺雄一郎
著
中川 恵一
執筆協力

科学的に
理解する

基礎からわかる東大教養の講義

丸善出版

「放射線を科学的に理解する

— 基礎からわかる東大教養の講義 —

鳥居寛之・小豆川勝見・渡辺雄一郎 著

中川恵一 執筆協力

丸善出版

本体 2500円＋税

- 1章 放射線とは？《放射線入門》
 - 2章 放射線の性質《放射線物理学 I》
 - 3章 原子力発電で生み出される放射性物質
《原子核物理学・原子力工学》
 - 4章 放射線量の評価《放射線物理学 II》
 - 5章 放射線の測り方《放射線計測学》
 - 6章 環境中での放射性物質《環境放射化学》
 - 7章 放射線の細胞への影響《放射線生物学》
 - 8章 放射線の人体への影響《放射線医学》
 - 9章 放射性物質と農業《植物栄養学・土壤肥料学》
 - 10章 放射線の防護と安全《放射線防護学》
 - 11章 役に立つ放射線《放射線の利用・加速器科学》
- Q&A

放射線を理解するには、物理学・化学・生物学・医学・工学など多くの分野の知識が必要です。しかしこれらすべてを網羅することは難しく、系統立てて学べる機会は非常に少ないのが実情です。

本書は東京大学教養学部で行われた講義をもとに、放射線について多角的に学べるよう配慮しています。日常生活や原発事故にかかわる具体的な例を引きながらやさしくていねいに解説しましたので高校生や一般の方にも広く読んでいただきたいと願っています。

<http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lecture/radiolect-kn.html>

2021年度 Aセメスター 主題科目学術フロンティア講義

放射線

を

科学的に

理解する

金曜 5 限

@ 21 KOMCEE
(West)

K303教室

& @ Zoom



γ 線



中性子線



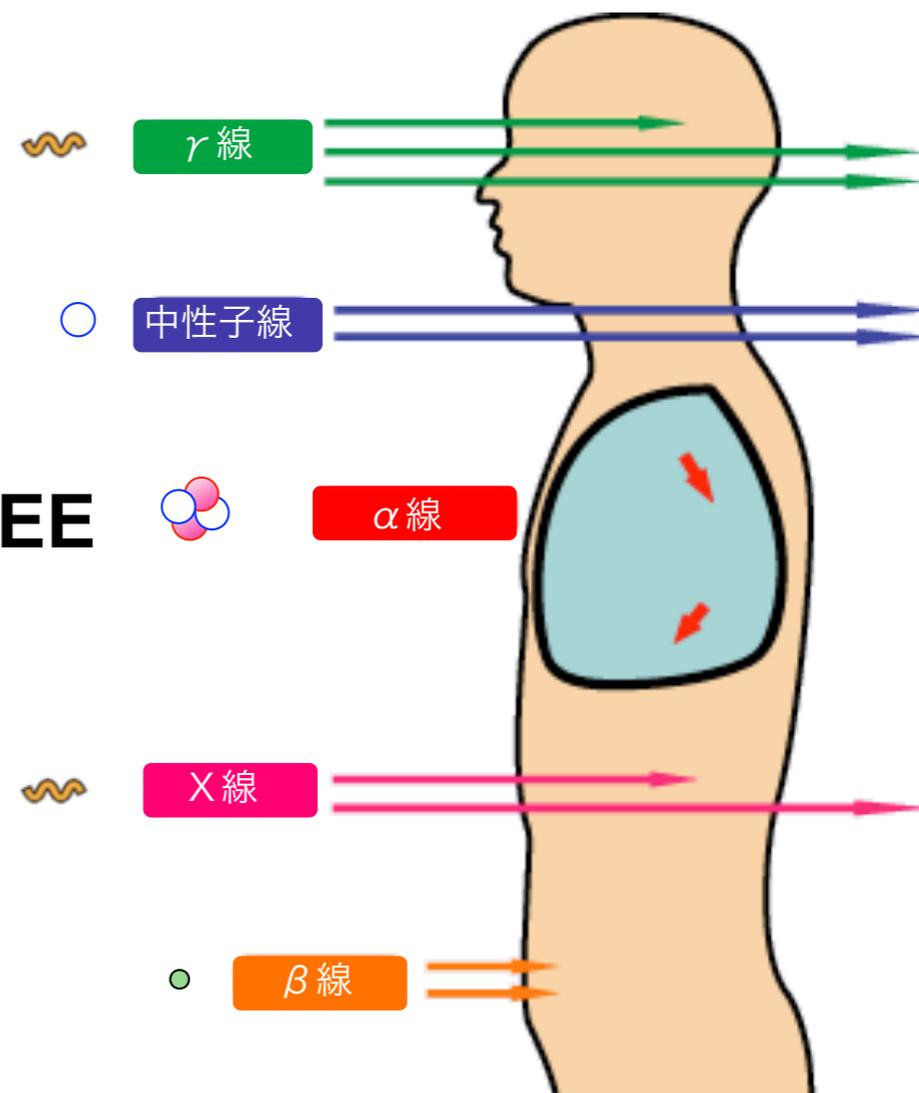
α 線



X線



β 線



担当教員 鳥居 寛之 (粒子線物理学)

理学系研究科

小豆川 勝見 (環境分析化学)

総合文化研究科

渡邊 雄一郎 (生命環境応答学)

総合文化研究科

東京大学 教養学部 / 大学院総合文化研究科

2021年度 Aセメスター 主題科目学術フロンティア講義

金曜 5 限

@ 21 KOMCEE
(West)

K303教室

& @ Zoom

放射線

を

科学的に

理解する

2021 / 12 / 3 (金)

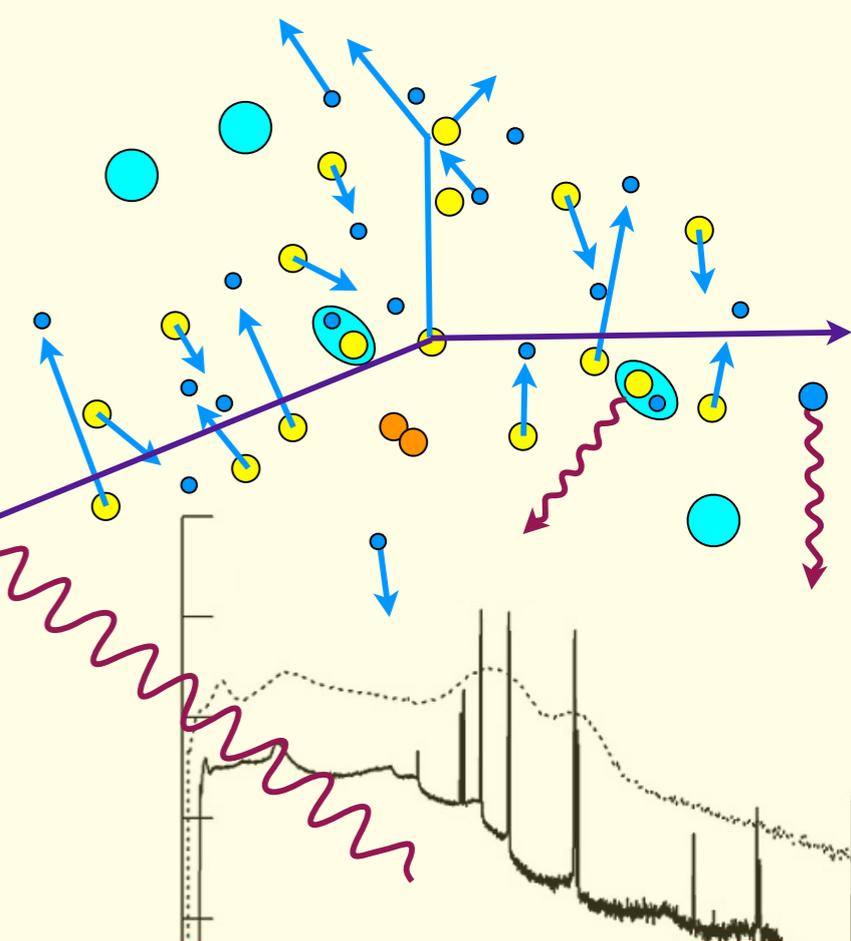
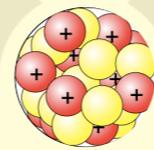
第8回

原子核物理学

原子核模型と核構造、核崩壊と核分裂

鳥居 寛之

東京大学理学部



放射線を科学的に理解する

- 10/ 8 放射線入門 【鳥居】
- 10/15 放射線物理学 【鳥居】
- 10/22 放射線計測学 【小豆川】
- 10/29 放射線物理・化学 【鳥居】
- 11/ 5 放射線生物学 【渡邊】
- 11/12 環境放射化学 【小豆川】
- 11/19 被曝調査・医療支援 【坪倉】
- 12/ 3 原子核物理学 【鳥居】
- 12/10 原子力工学と原子力事故 【鳥居】
- 12/17 環境放射化学 【小豆川】
- 12/24 放射性物質汚染と農業 【藤原】
- 1/ 7 放射線の利用 【渡邊】
- 1/18* 加速器科学・放射線防護学
・まとめ 【鳥居】

* 印：火曜振替

鳥居 寛之 《理学部》

渡邊 雄一郎

小豆川 勝見

《教養学部》

坪倉 正治 《福島県立医大》

藤原 徹 《農学部応用生命化学》

ゲスト講師

- 1章 放射線とは？ 《放射線入門》
- 2章 放射線の性質 《放射線物理学Ⅰ》
- 3章 原子力発電で生み出される放射性物質
《原子核物理学・原子力工学》
- 4章 放射線量の評価 《放射線物理学Ⅱ》
- 5章 放射線の測り方 《放射線計測学》
- 6章 環境中での放射性物質 《環境放射化学》
- 7章 放射線の細胞への影響 《放射線生物学》
- 8章 放射線の人体への影響 《放射線医学》
- 9章 放射性物質と農業
《植物栄養学・土壌肥料学》
- 10章 放射線の防護と安全 《放射線防護学》
- 11章 役に立つ放射線
《放射線の利用・加速器科学》

Q&A

準教科書



基礎からわかる東大教養の講義

丸善出版

「放射線を科学的に理解する

— 基礎からわかる東大教養の講義 —」

鳥居寛之・小豆川勝見・渡辺雄一郎 著

中川恵一 執筆協力

丸善出版

本体 2500円+税

成績評価

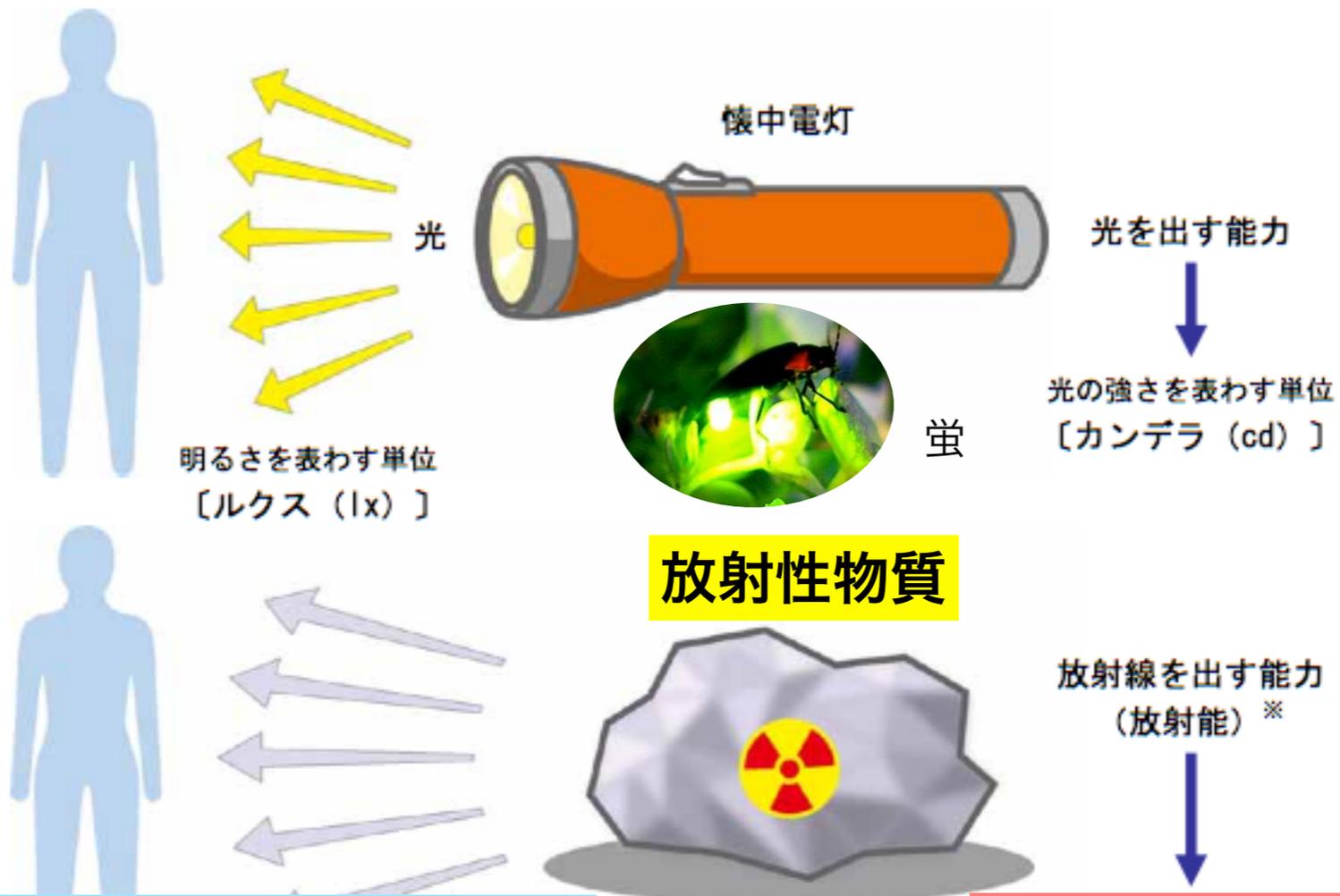
合否判定（点数なし） 2単位

出席： チャット窓に、まだの人は
学生証番号&氏名を記入

講義スライド：

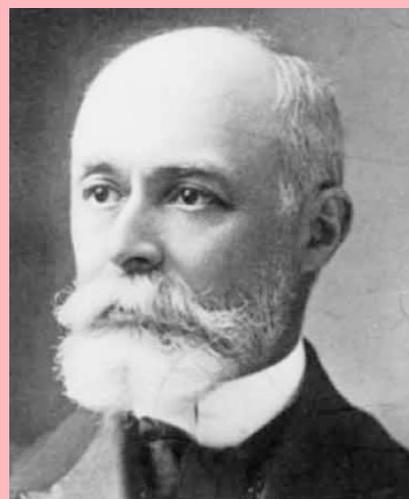
専用 web page からダウンロード

放射能と放射線



放射線の強さ・影響を表す単位
シーベルト [Sv]

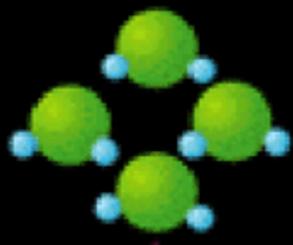
放射能の強さを表す単位
ベクレル [Bq]



放射能 (radioactivity) の単位

[Bq] | Bq = 1 dps, [Ci] | Ci = 37 GBq
 Becquerel decay/disintegration per second Curie 1 キュリー = 370億ベクレル





分子
molecule

nm (10^{-9} m)

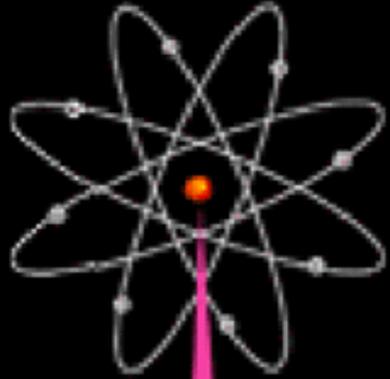
ナノメートル

化学

eV

電子ボルト

Chemistry



原子
atom

Å (10^{-10} m)

オングストローム

原子物理学

Atomic Physics

eV – keV

数電子ボルト～

キロ電子ボルト

錬金術はなぜ失敗したか



原子核
nucleus

原子核物理学

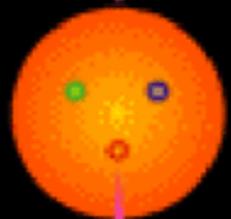
Nuclear Physics

fm (10^{-15} m)

フェムトメートル

MeV

メガ電子ボルト



陽子
proton

素粒子物理学

Particle Physics

am (10^{-18} m)

アトメートル

GeV

ギガ電子ボルト



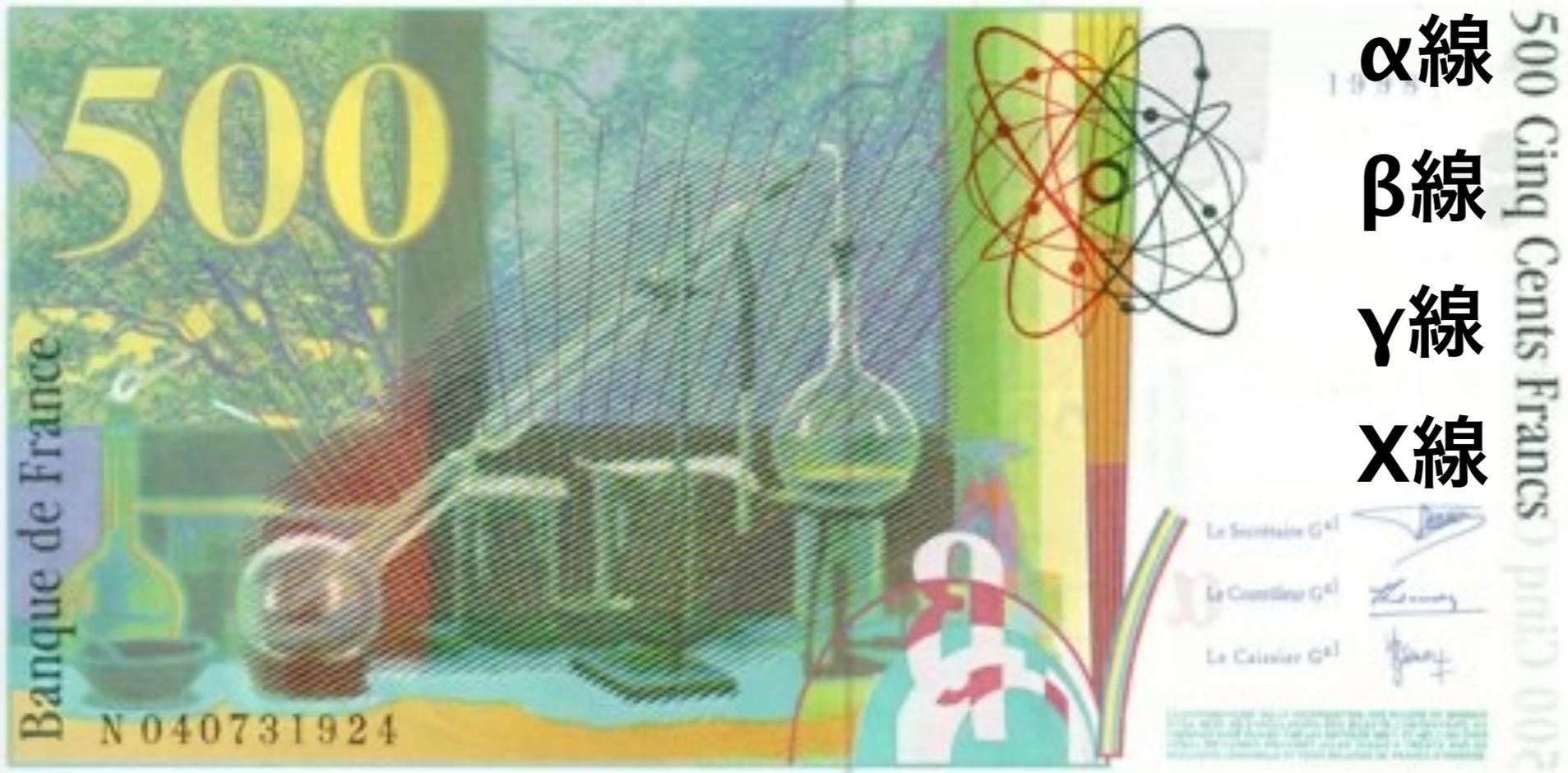
クォーク
quark



M. Curie & P. Curie

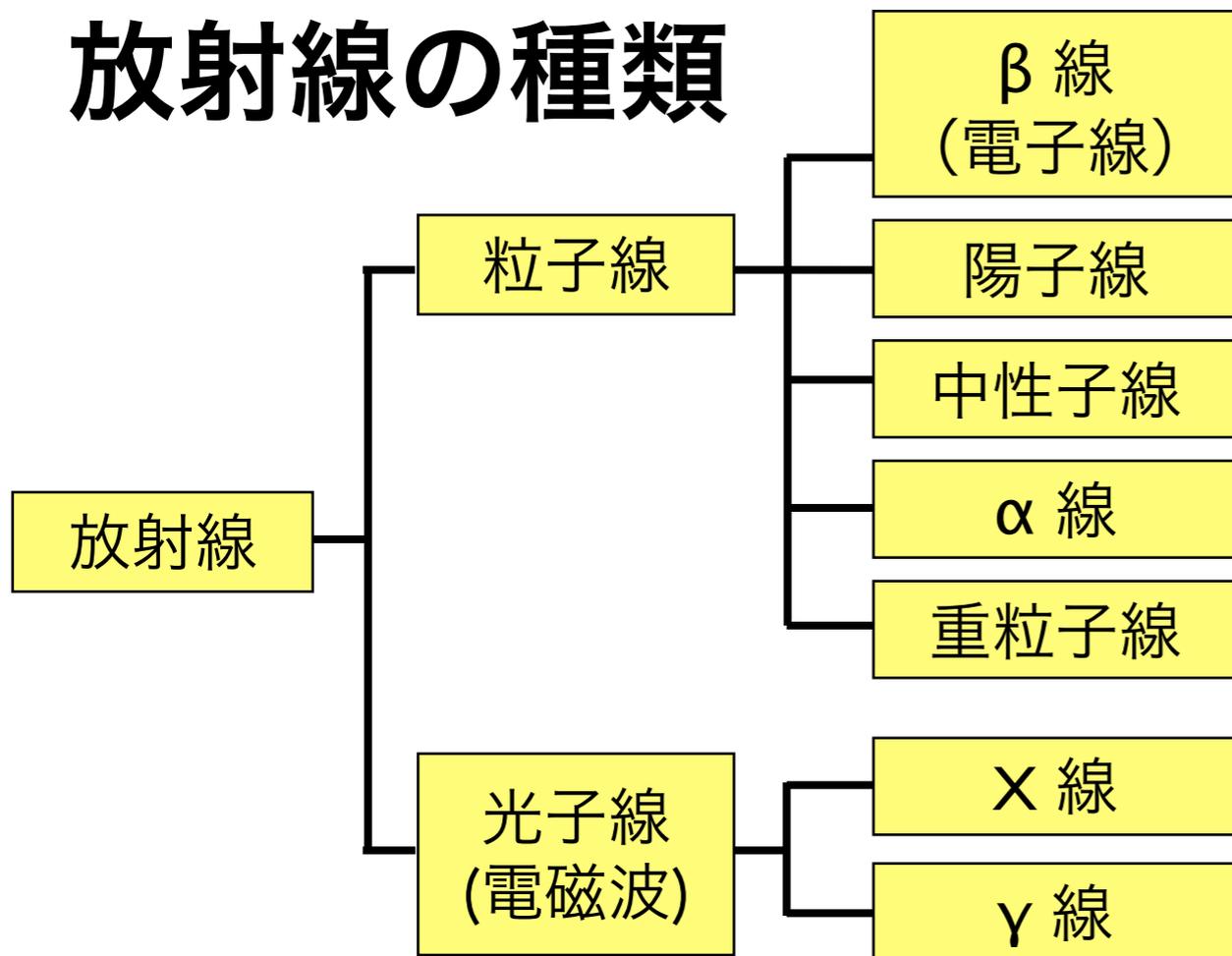


Billet de 500 Francs Français
en circulation: 1993–1999



- α線 ヘリウム原子核
- β線 高速の電子
- γ線 光子（電磁波）
- X線 光子（電磁波）

放射線の種類



原子核 N

α線 $M_\alpha \approx 4 \text{ GeV}/c^2$
 $\frac{A}{Z}N \rightarrow \frac{A-4}{Z-2}M + \frac{4}{2}\alpha$

β線 $m_e \approx 0.5 \text{ MeV}/c^2$
数十 keV ~ MeV
 $\frac{A}{Z}N \rightarrow \frac{A}{Z+1}M + \frac{0}{-1}\beta + \bar{\nu}_e$
 $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$

γ線 電磁波
 $\frac{A}{Z}N^* \rightarrow \frac{A}{Z}N + \frac{0}{0}\gamma$

放射線のもつエネルギーは？

☞ 数十 keV ~ 数 MeV (α, β, γ)

Cf. 原子の束縛エネルギーは？

☞ 最外殻電子で 10 eV 程度
 (1 eV = 96 kJ/mol)

放射線の速度は？

☞ 光速の数% ~ 100%

X線 電磁波
 $A^* \rightarrow A + h\nu(\text{X-ray})$
原子 A **I ~ 100 keV**
制動放射 **~ 数 MeV**

原子核物理学

原子 = atom

molecule < mole + -cule
(小さな塊)

ラテン語

atom < atomus < ατομος < a- + témnein + -os
(切ることができない)

古典ギリシャ語

anatomy < ana- + témnein

tomography < tomo- + -graphy

tom-, -tome, -tomy = to cut

-graphy = writing, drawing

周期表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18																																
1	1 H 1.0079	Atomic Sym Mass																2 He 4.0026																																
2	3 Li 6.941	4 Be 9.0121	<table border="1"> <tr> <td>C 固体</td> <td colspan="5">金属</td> <td colspan="2">非金属元素</td> </tr> <tr> <td>Hg 液体</td> <td>アルカリ金属</td> <td>アルカリ土類金属</td> <td>ランタノイド</td> <td>遷移元素</td> <td>卑金属</td> <td>非金属元素</td> <td>希ガス</td> </tr> <tr> <td>H 気体</td> <td></td> <td></td> <td>アクチノイド</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Rf Unknown</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>										C 固体	金属					非金属元素		Hg 液体	アルカリ金属	アルカリ土類金属	ランタノイド	遷移元素	卑金属	非金属元素	希ガス	H 気体			アクチノイド					Rf Unknown								5 B 10.811	6 C 12.010	7 N 14.006	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.179
C 固体	金属					非金属元素																																												
Hg 液体	アルカリ金属	アルカリ土類金属	ランタノイド	遷移元素	卑金属	非金属元素	希ガス																																											
H 気体			アクチノイド																																															
Rf Unknown																																																		
3	11 Na 22.989	12 Mg 24.305											13 Al 26.981	14 Si 28.085	15 P 30.973	16 S 32.065	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948																																
4	19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.955	22 Ti 47.867	23 V 50.941	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.38	31 Ga 69.723	32 Ge 72.64	33 As 74.921	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.798																																
5	37 Rb 85.467	38 Sr 87.62	39 Y 88.905	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.96	43 Tc (97.907)	44 Ru 101.07	45 Rh 102.90	46 Pd 106.42	47 Ag 107.86	48 Cd 112.41	49 In 114.81	50 Sn 118.71	51 Sb 121.76	52 Te 127.60	53 I 126.90	54 Xe 131.29																																
6	55 Cs 132.90	56 Ba 137.32	57-71	72 Hf 178.49	73 Ta 180.94	74 W 183.84	75 Re 186.20	76 Os 190.23	77 Ir 192.21	78 Pt 195.08	79 Au 196.96	80 Hg 200.59	81 Tl 204.38	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98	84 Po (208.98)	85 At (209.98)	86 Rn (222.01)																																
7	87 Fr (223)	88 Ra (226)	89-103	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (264)	108 Hs (277)	109 Mt (268)	110 Ds (271)	111 Rg (272)	112 Cn (285)	113 Nh (284)	114 Fl (289)	115 Mc (288)	116 Lv (292)	117 Ts	118 Og (294)																																

For elements with no stable isotopes, the mass number of the isotope with the longest half-life is in parentheses.

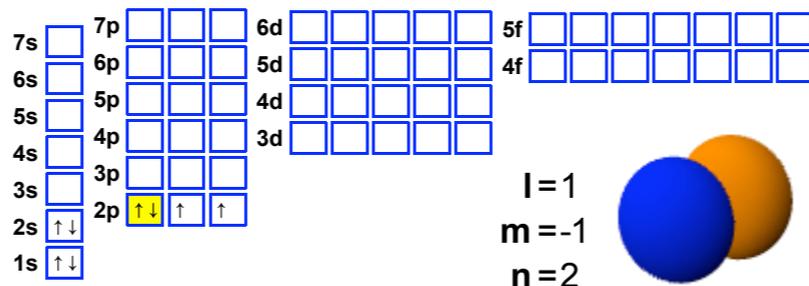
周期表 Design and Interface Copyright © 1997 Michael Dayah. <http://www.ptable.com/> Last updated: May 30, 2008

57 La 138.90	58 Ce 140.11	59 Pr 140.90	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.92	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.25	69 Tm 168.93	70 Yb 173.05	71 Lu 174.96
89 Ac (227)	90 Th 232.03	91 Pa 231.03	92 U 238.02	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (262)

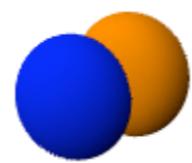
周期表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H 1	2 He 0																
2	3 Li 1	4 Be 2																
3	11 Na 1	12 Mg 2																
4	19 K 1	20 Ca 2	21 Sc 3	22 Ti 4	23 V 5	24 Cr 6	25 Mn 4	26 Fe 3	27 Co 4	28 Ni 4	29 Cu 2	30 Zn 2	31 Ga 3	32 Ge 4	33 As 5	34 Se 6	35 Br 7	36 Kr 4
5	37 Rb 1	38 Sr 2	39 Y 3	40 Zr 4	41 Nb 5	42 Mo 6	43 Tc 7	44 Ru 6	45 Rh 6	46 Pd 4	47 Ag 4	48 Cd 2	49 In 3	50 Sn 4	51 Sb 5	52 Te 6	53 I 7	54 Xe 6
6	55 Cs 3	56 Ba 2	57-71 Lanthanides	72 Hf 4	73 Ta 5	74 W 6	75 Re 7	76 Os 7	77 Ir 6	78 Pt 6	79 Au 7	80 Hg 2	81 Tl 3	82 Pb 4	83 Bi 5	84 Po 6	85 At 7	86 Rn 6
7	87 Fr 3	88 Ra 2	89-103 Actinides	104 Rf 4	105 Db 5	106 Sg 6	107 Bh 7	108 Hs 7	109 Mt 6	110 Ds 6	111 Rg 7	112 Cn 2	113 Nh 3	114 Fl 4	115 Mc 5	116 Lv 6	117 Ts 7	118 Og 6

8
O
酸素
15.9994
[He]2s² 2p⁴



l=1
m=-1
n=2



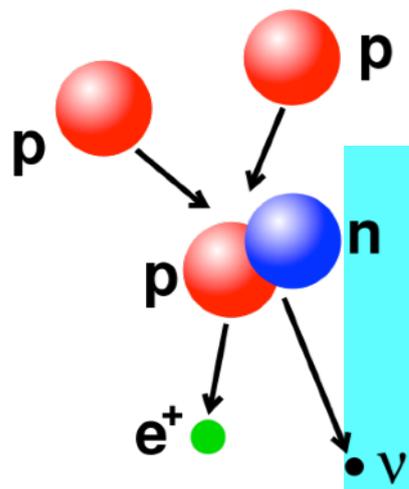
s
p
d
f

1s² 2s² 2p⁴

For elements with no stable isotopes, the mass number of the isotope with the longest half-life is in parentheses.

周期表 Design and Interface Copyright © 1997 Michael Dayah. <http://www.ptable.com/> Last updated: May 30, 2008

57 La 3	58 Ce 4	59 Pr 4	60 Nd 3	61 Pm 3	62 Sm 3	63 Eu 3	64 Gd 3	65 Tb 4	66 Dy 3	67 Ho 3	68 Er 3	69 Tm 3	70 Yb 3	71 Lu 3
89 Ac 3	90 Th 4	91 Pa 5	92 U 6	93 Np 6	94 Pu 6	95 Am 4	96 Cm 4	97 Bk 4	98 Cf 4	99 Es 4	100 Fm 3	101 Md 3	102 No 3	103 Lr 3



Periodic Table of Elements

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

陽子 p
 重陽子 pn
 三重陽子 pnn
原子核
 アルファ粒子
 $\alpha = ppnn$
 ${}^3\text{He}^{++} = ppn$

H	Hydrogen	水素	氫 qīng
${}^1\text{H}$ (H)	Protium	軽水素	気 piē
${}^2\text{H}$ (D)	Deuterium	重水素	気 dāo
${}^3\text{H}$ (T)	Tritium	三重水素	気 chuān
He	Helium	ヘリウム	氦 hài
${}^4\text{He}$	Helium-4	ヘリウム4	
${}^3\text{He}$	Helium-4	ヘリウム3	原子

シリーズ「元素と周期表」第4回(終)

「放射性物質」とは何か?

不安定な原子核が、壊れて放射線を出す

放射性物質の「放射性」という名前は、「放射線」を出すことに由来します。放射線とは、高いエネルギーをもつ、粒子の流れや光(電磁波)のことです。

それではなぜ、放射性物質は放射線を出すのでしょうか。その秘密は、原子核にあります。放射性物質に含まれる原子核は不安定で、しばらくすると壊れたり変化したりします。その際に副産物として出るのが、放射線なのです。

原子核が不安定で、壊れたり変化したりする原子を、「放射性同位体」といいます。同位体とは、原子核の陽子の数が同じで、中性子の数がことなる原子のことです。放射性物質は、放射性同位体を含んでいる物質です。放射性同位体について、くわしくみていきましょう。

協力

桜井 弘 京都薬科大学名誉教授

鳥居寛之 東京大学大学院総合文化研究科助教

石岡典子 量子科学技術研究開発機構 上席研究員

大島康宏 量子科学技術研究開発機構 主任研究員

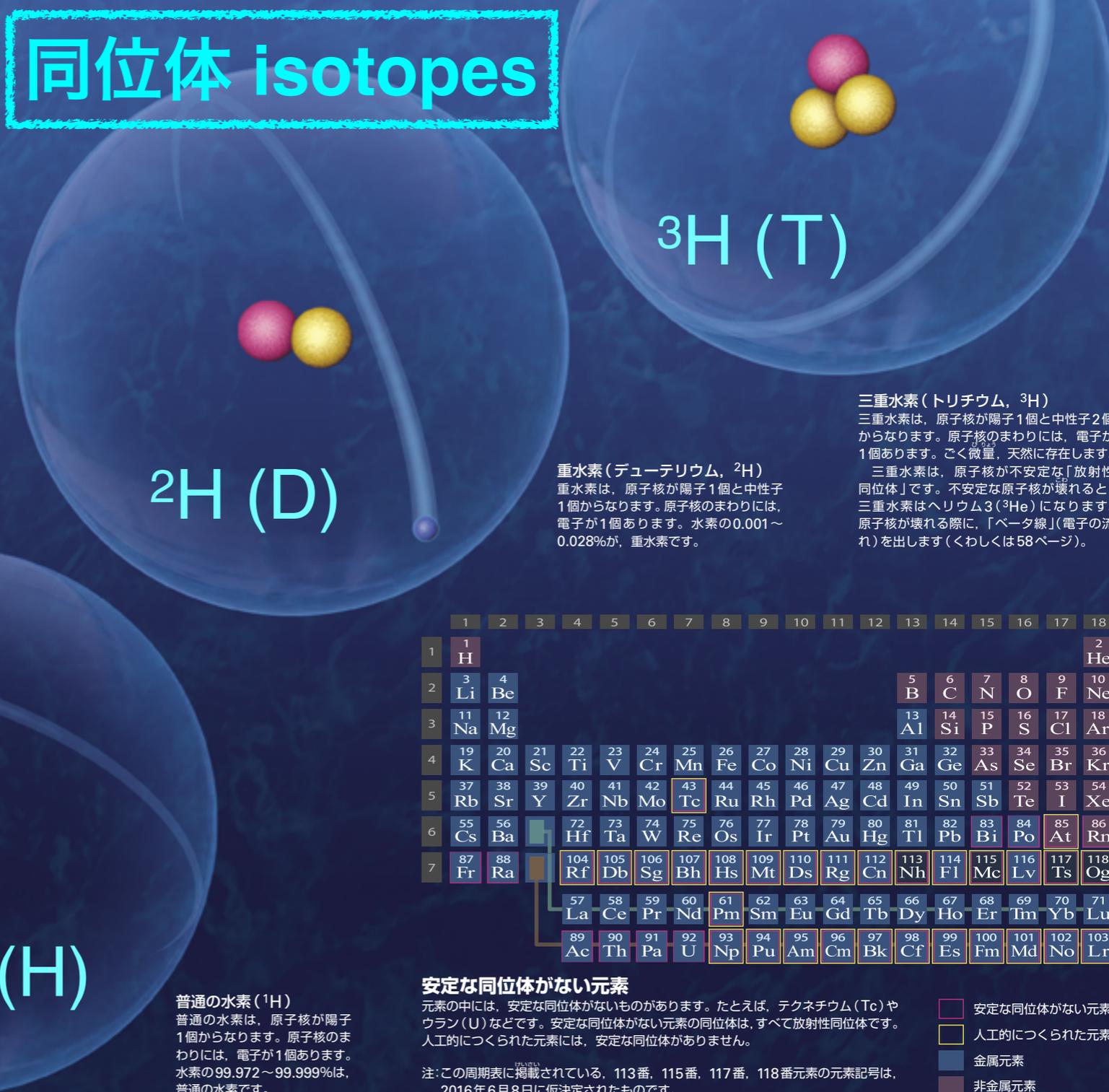
水素の同位体と放射性同位体

水素には、3種類の同位体があります。普通の「水素(^1H)」、「重水素(^2H)」、「三重水素(^3H)」です*。このうち、三重水素が、放射性同位体です。同位体は、化学的性質はほぼ同じです。

*: 元素記号の左上に書かれる数字は、「質量数」といいます。質量数は、原子核を構成する陽子の数と中性子の数をたした数です。

同位体 isotopes

放射性同位体 radioisotope = RI



^2H (D)

^3H (T)

^1H (H)

重水素(デューテリウム, ^2H)
重水素は、原子核が陽子1個と中性子1個からなります。原子核のまわりには、電子が1個あります。水素の0.001~0.028%が、重水素です。

三重水素(トリチウム, ^3H)
三重水素は、原子核が陽子1個と中性子2個からなります。原子核のまわりには、電子が1個あります。ごく微量、天然に存在します。三重水素は、原子核が不安定な「放射性同位体」です。不安定な原子核が壊れると、三重水素はヘリウム3(^3He)になります。原子核が壊れる際に、「ベータ線」(電子の流れ)を出します(くわしくは58ページ)。

普通の水素(^1H)
普通の水素は、原子核が陽子1個からなります。原子核のまわりには、電子が1個あります。水素の99.972~99.999%は、普通の水素です。

安定な同位体がない元素

元素の中には、安定な同位体がないものがあります。たとえば、テクネチウム(Tc)やウラン(U)などです。安定な同位体がない元素の同位体は、すべて放射性同位体です。人工的につくられた元素には、安定な同位体がありません。

注: この周期表に掲載されている、113番、115番、117番、118番元素の元素記号は、2016年6月8日に仮決定されたものです。

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

- 安定な同位体がない元素
- 人工的につくられた元素
- 金属元素
- 非金属元素

放射性物質とは

放射性核種
= 放射性同位体
= 不安定原子核

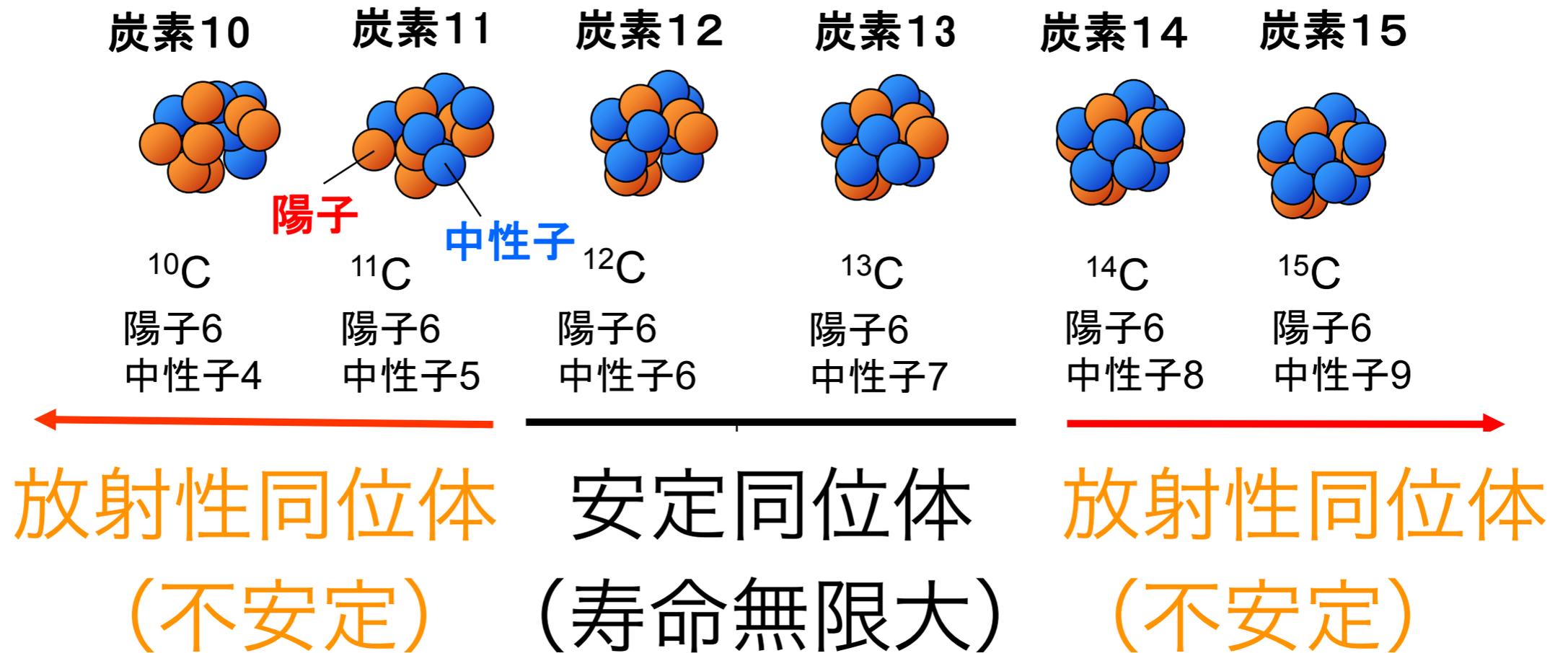
を含む原子からできている物質

$$\text{質量数 } A = Z + N$$



陽子数 Z が同じなら化学的には同じ元素
中性子数 N が違う原子核が多種存在する

炭素原子核の例



同位体 (原子番号(=陽子数)は同じで中性子数が異なる**原子核**)

同位体間では化学的性質は同じ

半減期

19.3秒

20.3分

99%

1%

存在比

5730年

2.4秒

炭素10

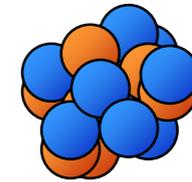
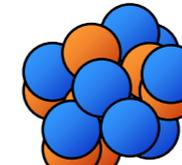
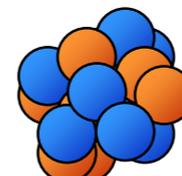
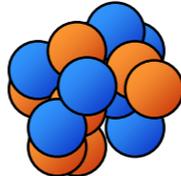
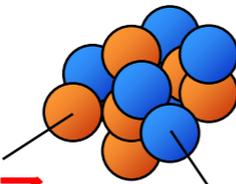
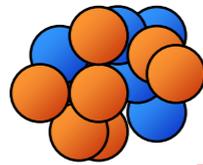
炭素11

炭素12

炭素13

炭素14

炭素15



^{10}C

^{11}C

^{12}C

^{13}C

^{14}C

^{15}C

陽子6
中性子4

陽子6
中性子5

陽子6
中性子6

陽子6
中性子7

陽子6
中性子8

陽子6
中性子9

陽子過剰になると？

(寿命がある： β^+ 壊変、電子捕獲(EC))

天然に存在=**安定同位体**
寿命が無限大

中性子過剰になると？

(寿命がある： β^- 壊変)

放射性同位体

半減期

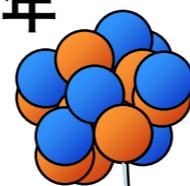
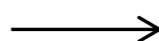
5730 ± 40年



中性子

炭素14

(放射性同位体)



陽子

窒素14

(安定)

+ e^-

電子

(β 線:放射線)

+ $\bar{\nu}_e$

反ニュートリノ

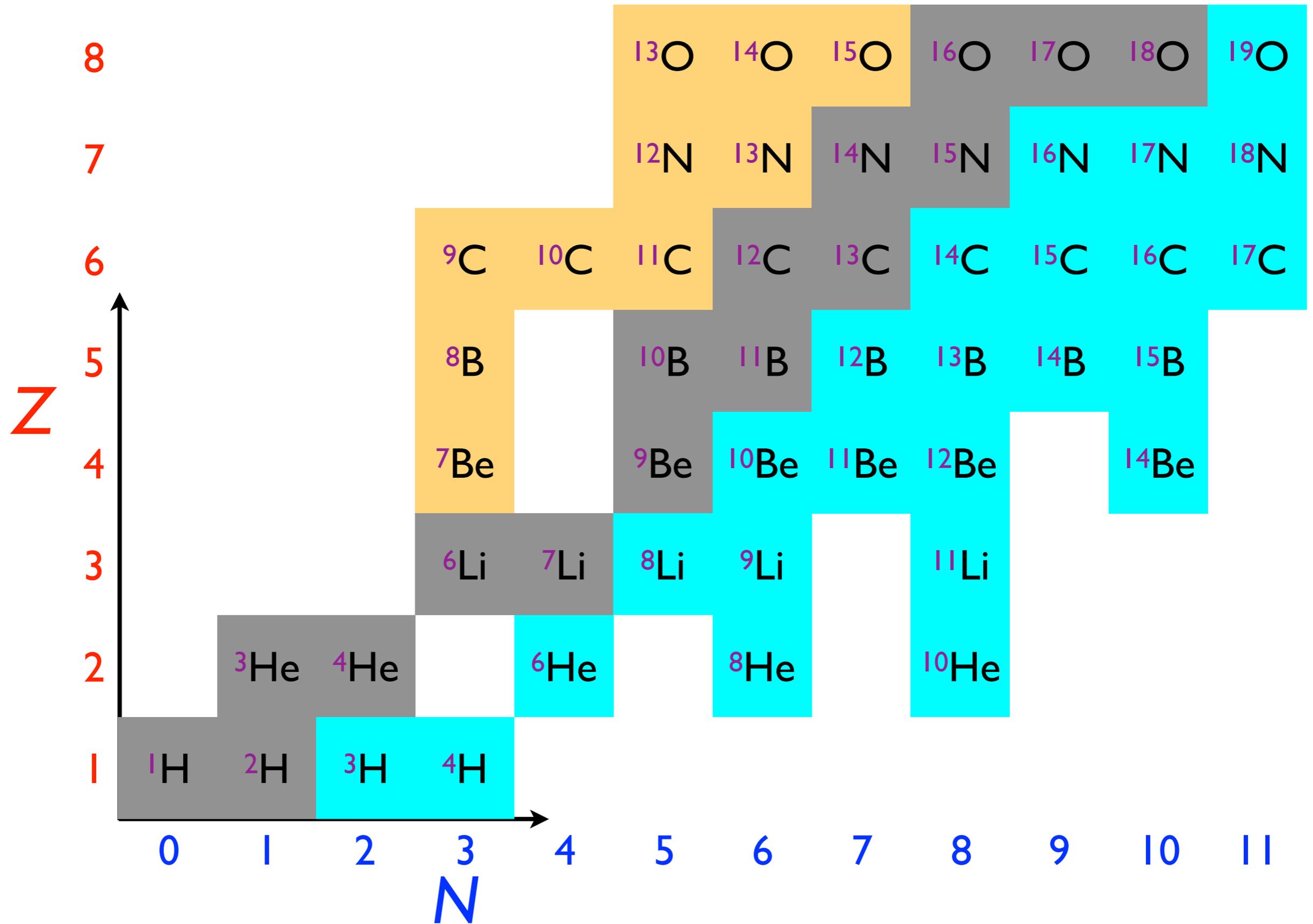
放射性同位体

ベータマイナス壊変 (崩壊)

β^- decay



核图表



核種の数

安定核種 約300種

実験的に確認 3000種

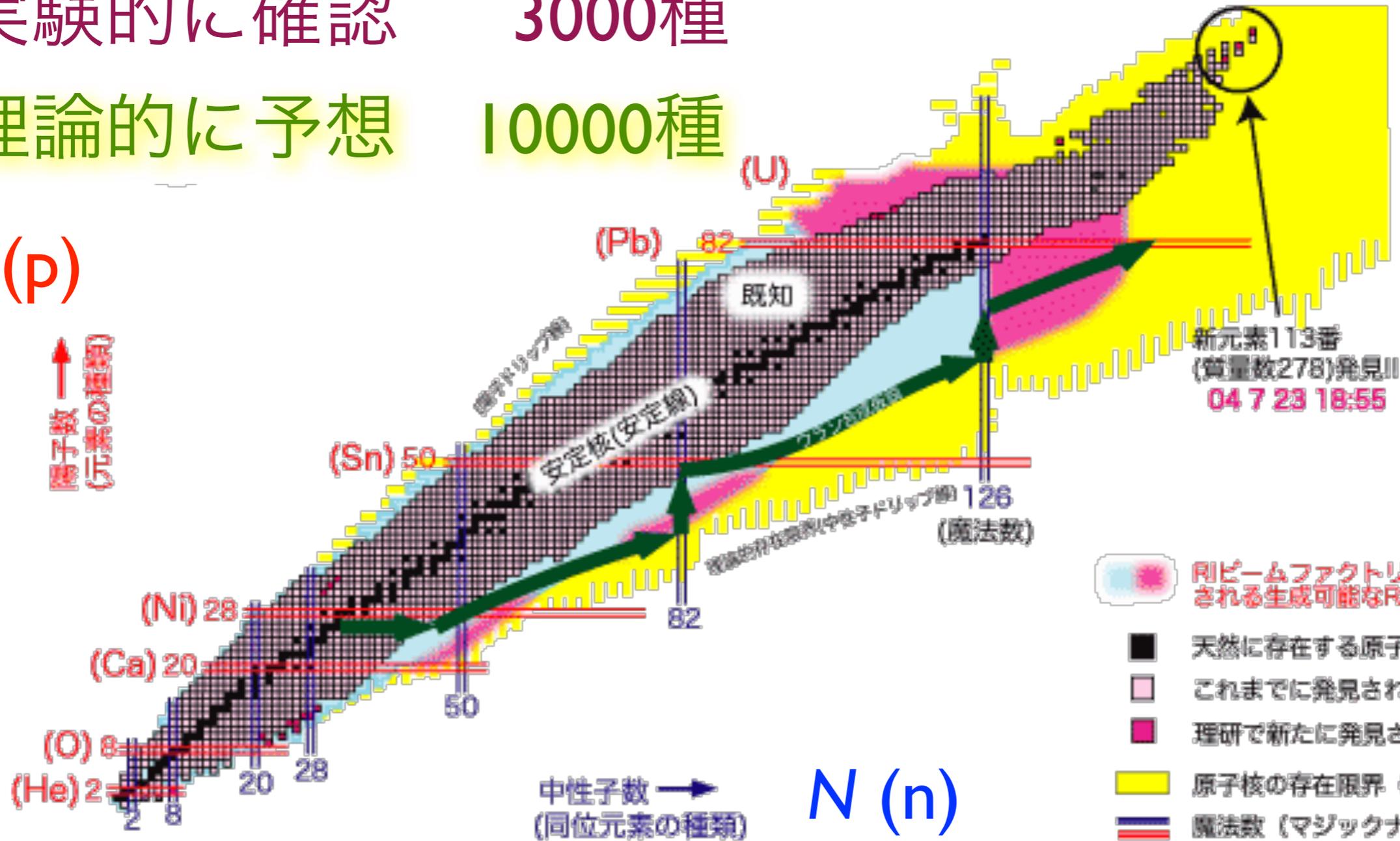
理論的に予想 10000種

原子核物理学

Nuclear Physics

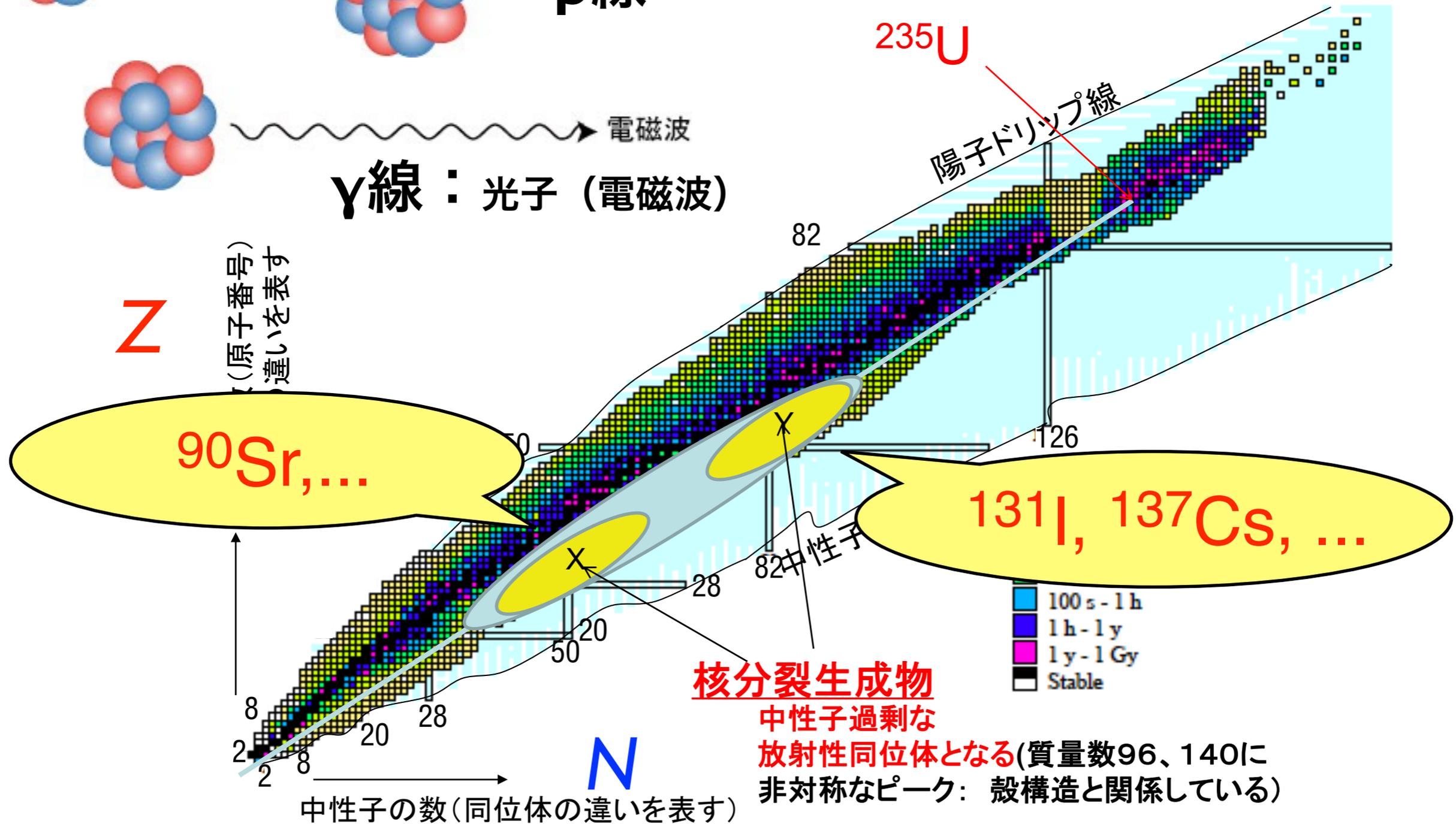
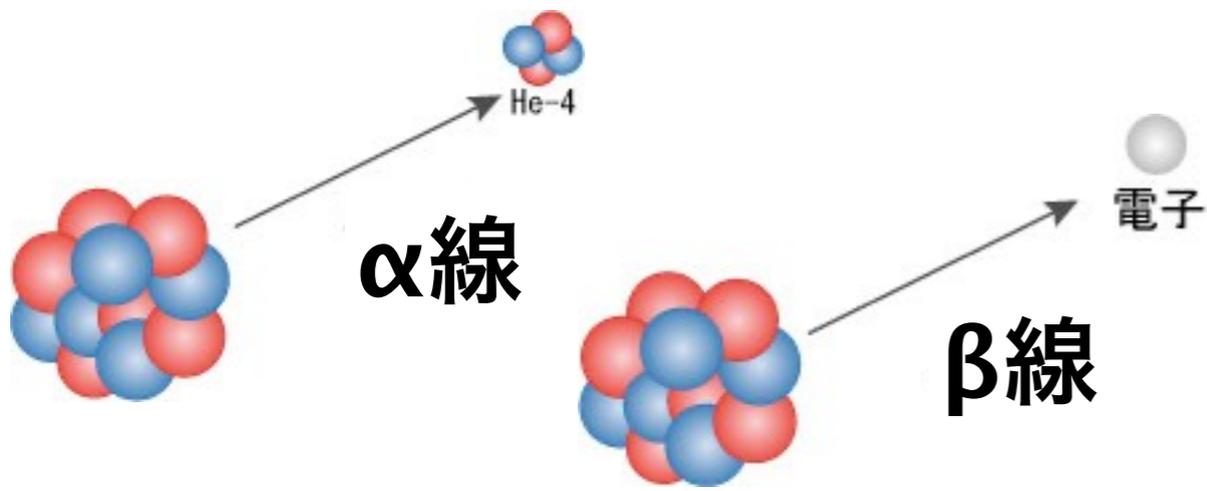
Z (p)

↑
陽子数
(元素の種類)



Nuclear Chart 核図表

放射能とは 放射性物質が放射線を出す能力のこと。



Nuclear Chart 核図表

関連する核種の分類

isotope	同位体	Z	${}^A_Z\text{N}_N$	${}^{A'}_Z\text{N}_{N'}$	${}^{A''}_Z\text{N}_{N''}$
isotone	同中性子体 (同調体)	N	${}^A_Z\text{N}_N$	${}^{A'}_{Z'}\text{N}_N$	${}^{A''}_{Z''}\text{N}_N$
isobar	同重体	A	${}^A_Z\text{N}_N$	${}^A_{Z'}\text{N}_{N'}$	${}^A_{Z''}\text{N}_{N''}$
mirror nuclei	鏡映核, 鏡像核	$A, Z \leftrightarrow N$	${}^A_Z\text{N}_N$	${}^A_{Z'}\text{N}_{N'}$	$Z' = N$ $N' = Z$
isodiapher	同余体	$N - Z$	${}^A_Z\text{N}_N$	${}^{A-2x}_{Z-x}\text{N}_{N-x}$	
isomer	核異性体	Z, N	${}^A_Z\text{N}_N$	${}^{Am_1}_Z\text{N}_N^{(*)}$	${}^{Am_2}_Z\text{N}_N^{(*)}$

原子核物理学

Nuclear Physics

β 崩壊

isobar
同重体

α 崩壊

isodiapher
同余体

isotone
同中性子体

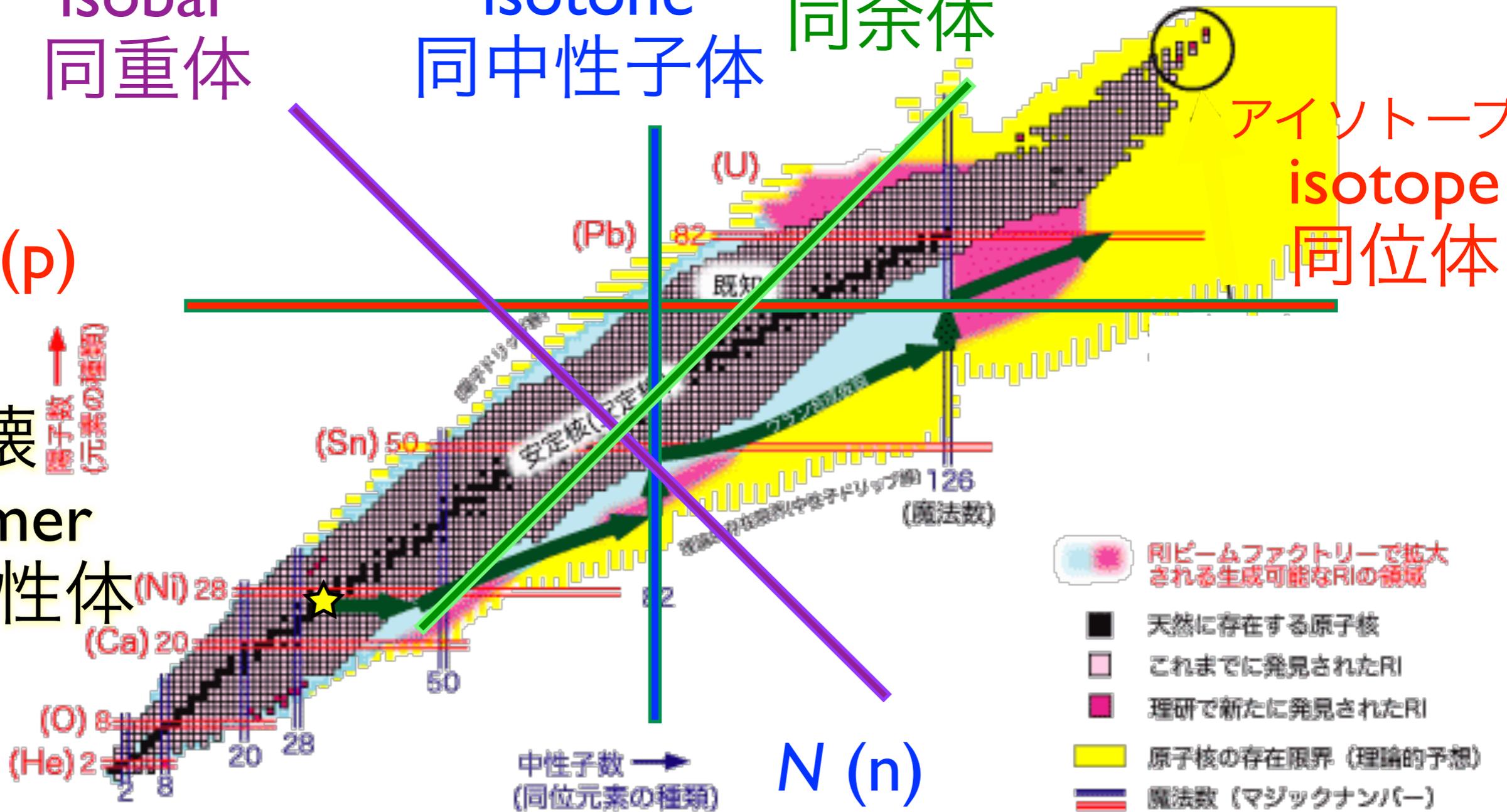
Z (p)

γ 崩壊

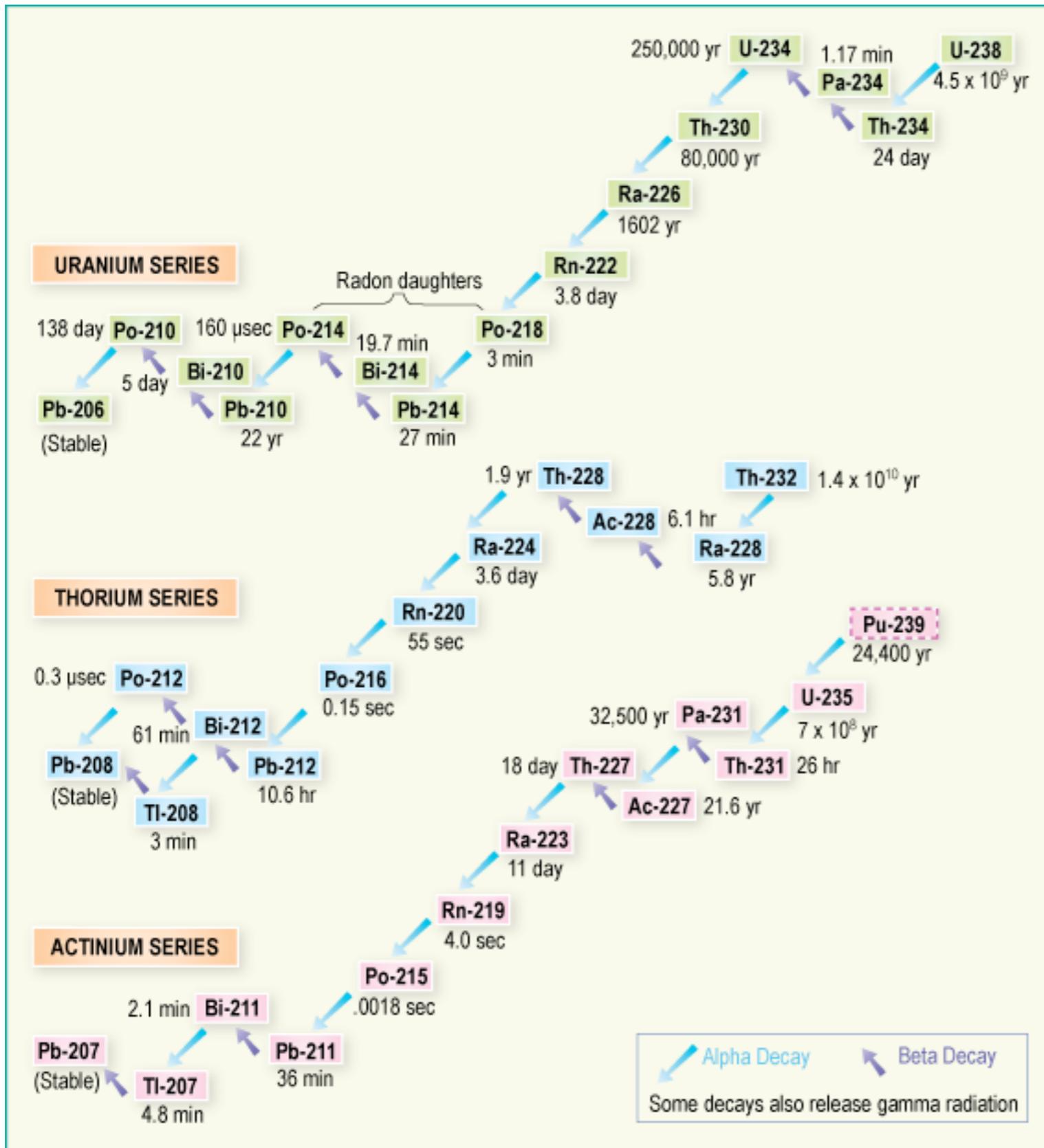
isomer
核異性体

↑ 原子種 (Z) の種類
↑ 原子種 (N) の種類

アイソトープ
isotope
同位体



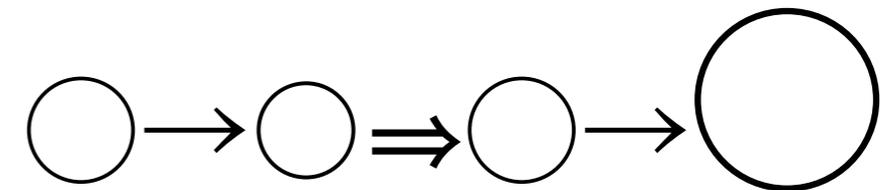
Nuclear Chart 核図表



壊変 (崩壊) 系列

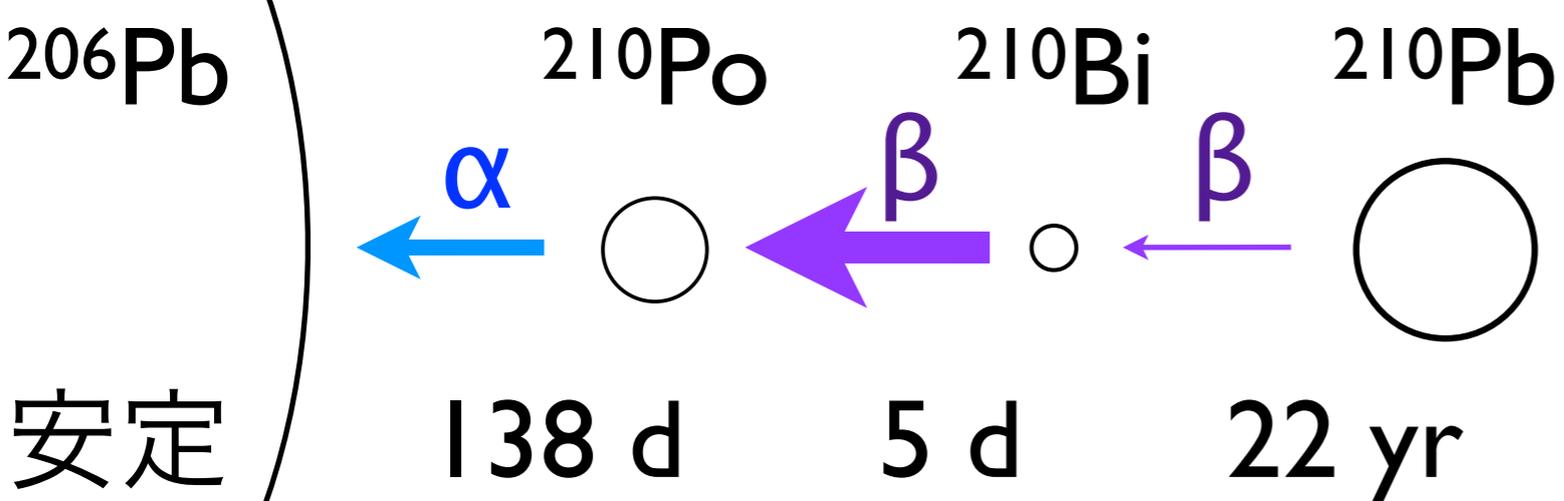
- (4n) トリウム系列
- (4n+1) ネプツニウム系列
- (4n+2) ウラン系列
- (4n+3) アクチニウム系列

放射平衡



壊変 (崩壊) 系列

(4n+2) ウラン系列



放射平衡

壊変 (崩壊) 系列

(4n+2) ウラン系列

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3$$

$$\frac{dN_4}{dt} = \dots\dots\dots$$

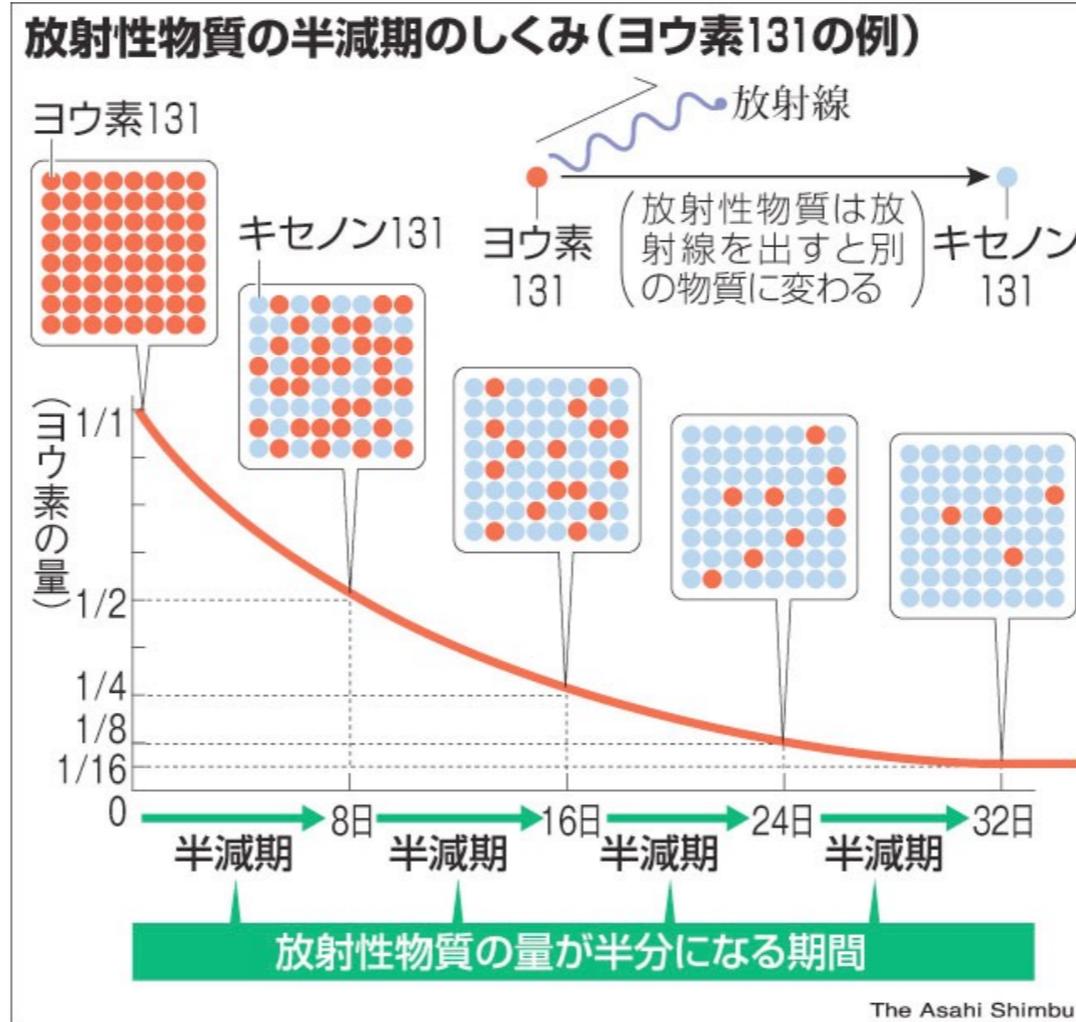
$\lambda = 1/\tau$ λ : 崩壊レート、 τ : 寿命

半減期の1.44倍

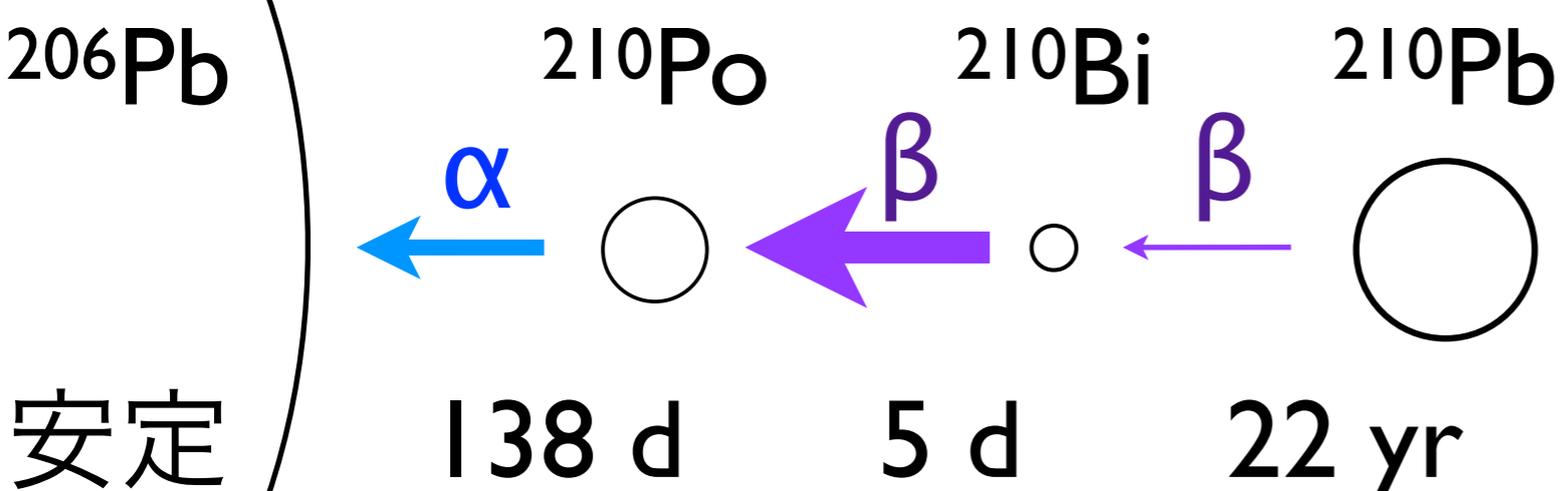
$$N_1 = N_{10} e^{-\lambda_1 t}$$

崩壊レートは定数

個々の崩壊は
確率的に起こる

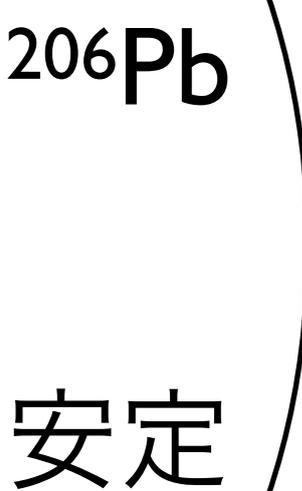


The Asahi Shimbun



放射平衡

安定



壊変 (崩壊) 系列

(4n+2) ウラン系列

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3$$

$$\frac{dN_4}{dt} = \dots\dots\dots$$

$\lambda = 1/\tau$ λ : 崩壊レート、 τ : 寿命
 半減期の1.44倍

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} \{e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\} + N_{20} e^{-\lambda_2 t}$$

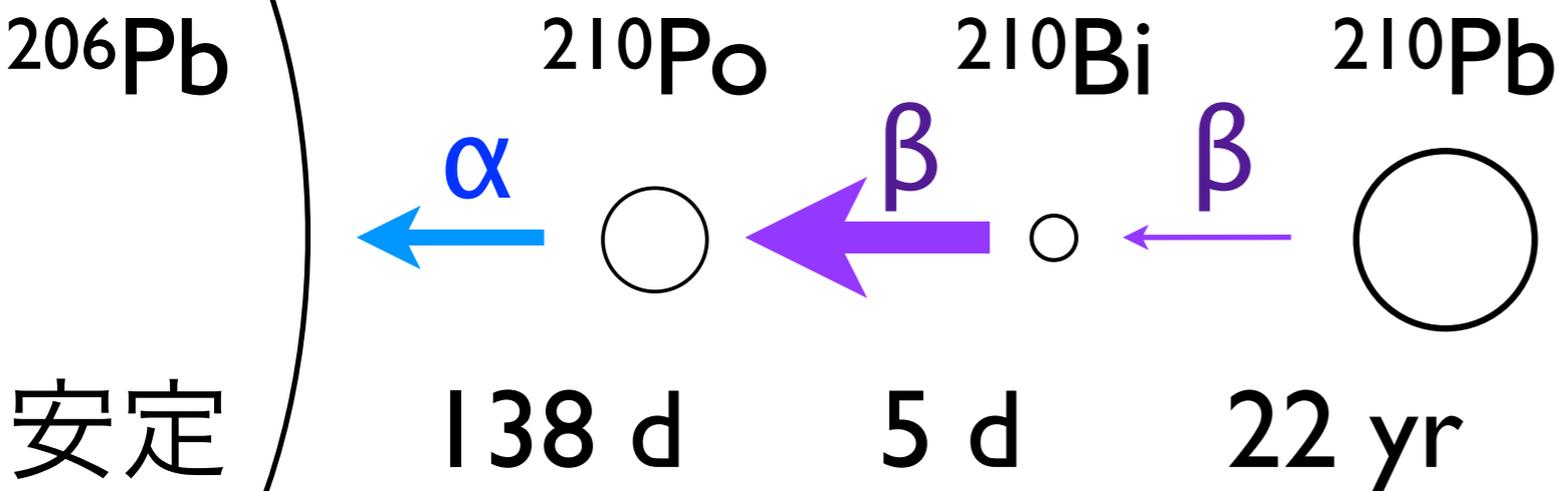
$$N_2 \approx \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} e^{-\lambda_1 t}$$

過渡平衡
 ($\lambda_1 < \lambda_2$, t が十分長い)

$$N_2 \approx \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1$$

永続平衡
 ($\lambda_1 \ll \lambda_2$, τ_1 がとても長い)

放射平衡



原子核物理学

原子核模型と核構造

最も安定な原子核は？

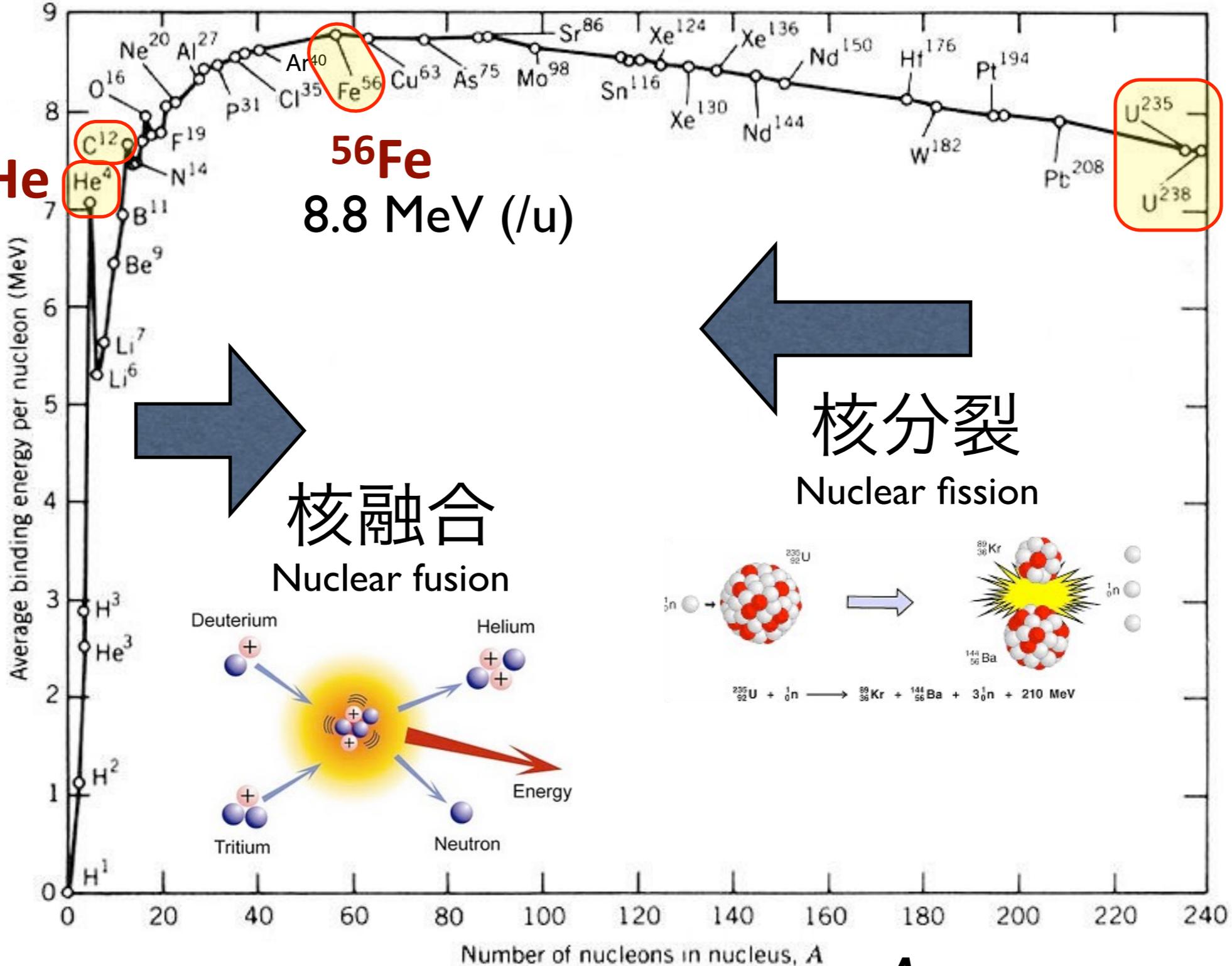
核子あたりの結合エネルギー (MeV) — (MeV/u)

9

4He

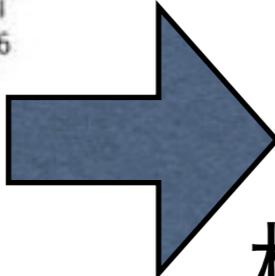
5

0

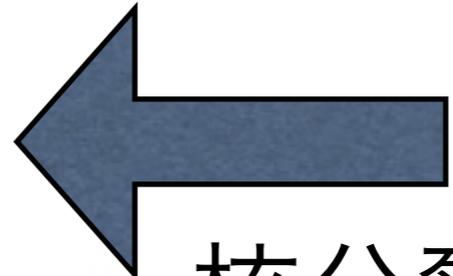
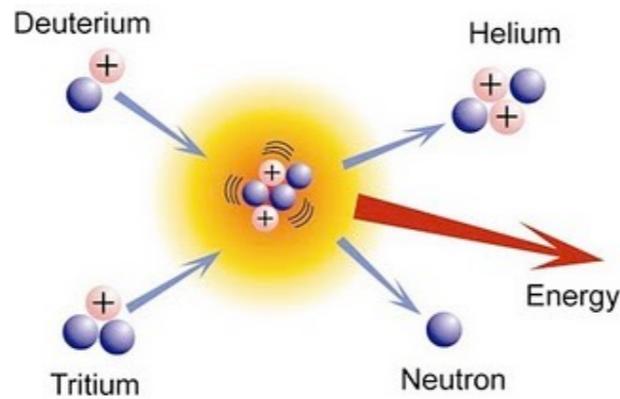


${}^{56}\text{Fe}$
8.8 MeV (/u)

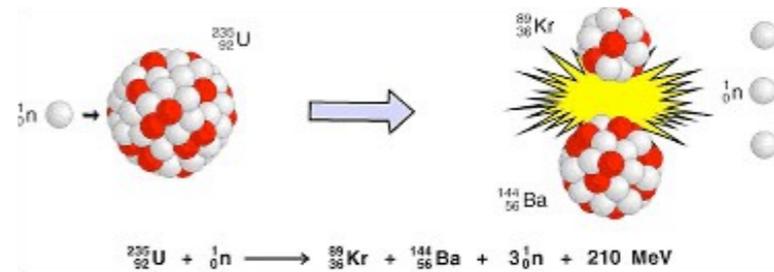
${}^{235}\text{U}$



核融合
Nuclear fusion



核分裂
Nuclear fission



A

核融合

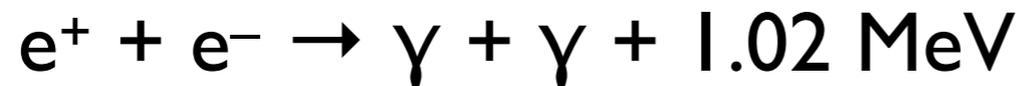
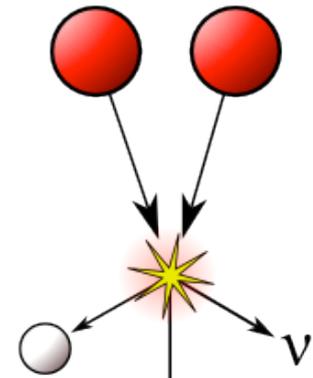
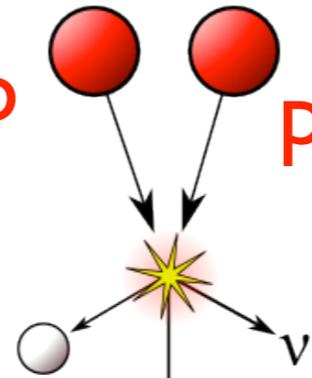
Nuclear fusion

太陽では水素 (${}^1\text{H}$) からヘリウム (${}^4\text{He}$) を合成

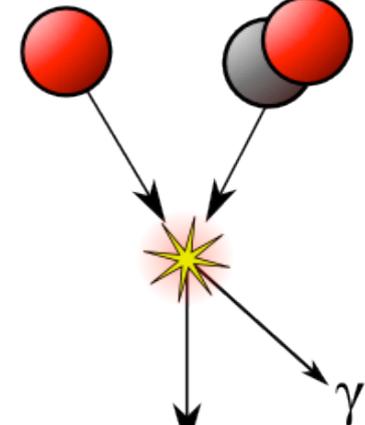
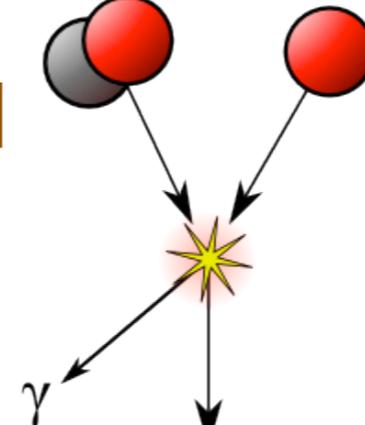
原子核 p

原子核 α

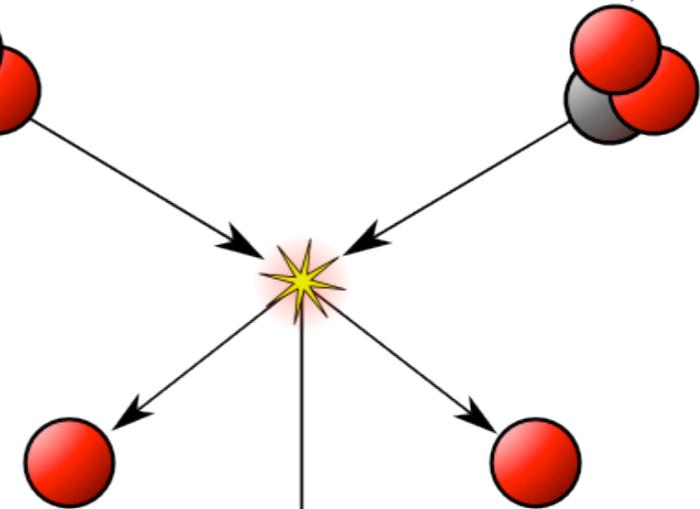
${}^1\text{H} = p$



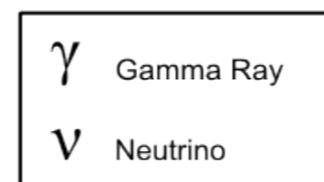
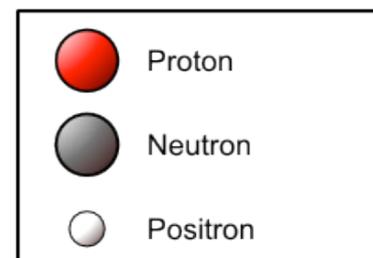
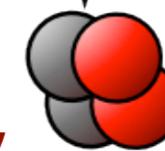
${}^2\text{D} = d$



${}^3\text{He}$



${}^4\text{He} = \alpha$



Weizsäcker-Bethe の (半経験的) 質量公式

$$M_{\text{nucl}}(Z, N) = Z M_p + N M_n - E_B / c^2 \quad \text{液滴モデル}$$

$$M_{\text{atom}}(Z, N) = Z M_H + N M_n - E_B / c^2 \quad (\text{電子の束縛エネルギーは無視})$$

$$E_B / c^2 = \Delta M \quad (\text{質量欠損})$$

$$E_B(Z, N) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c Z^2 / A^{1/3} - \frac{a_a}{4} (N - Z)^2 / A - \delta$$

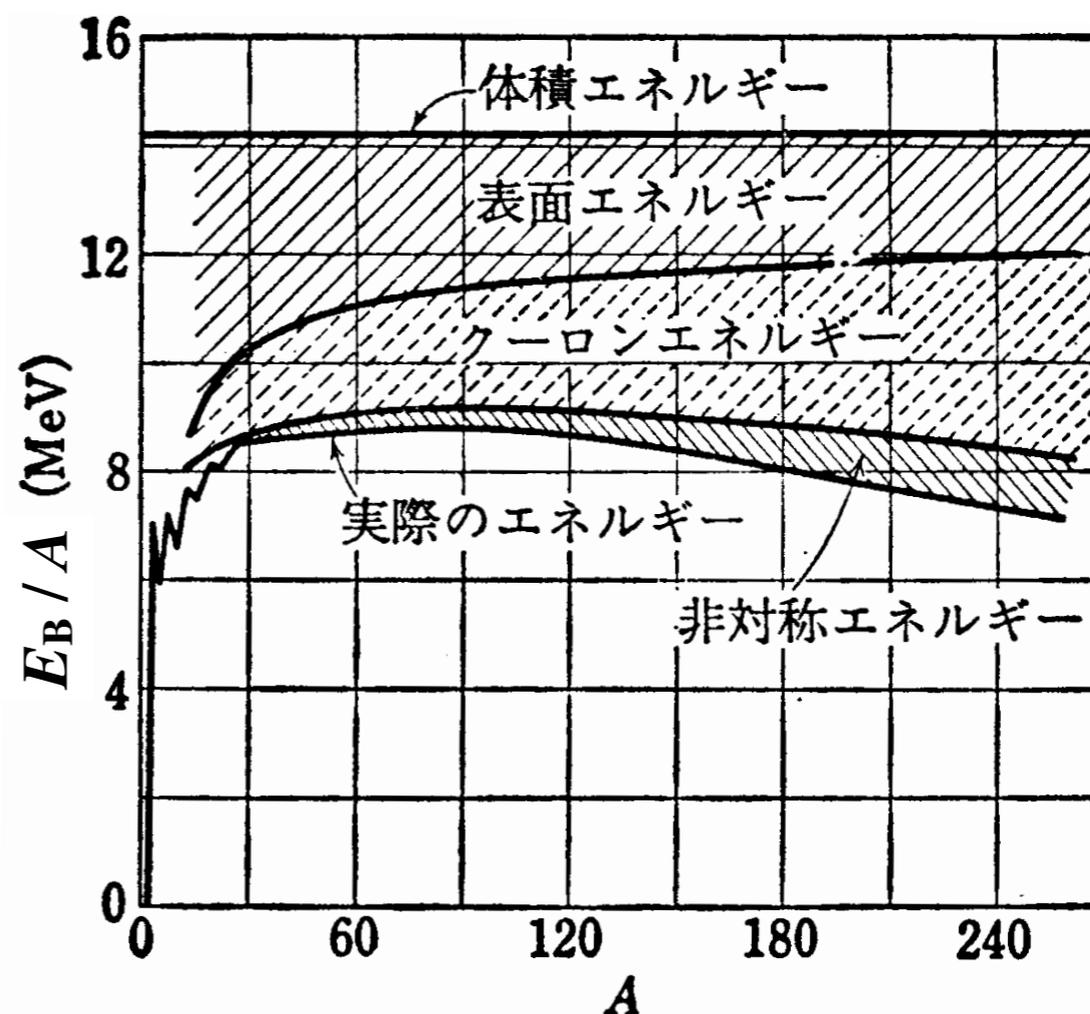
体積エネルギー

クーロンエネルギー

対称エネルギー

対エネルギー

表面エネルギー



「全原子核の地図」核図表とは

核図表の見かた

核図表

Chart of Nuclides

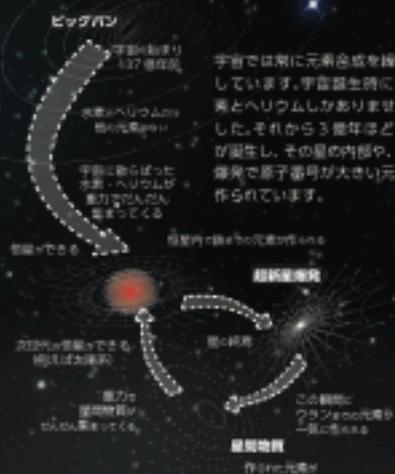
●今から137億年前、ビッグバンによって私たちの宇宙は生まれました。でもその時に存在した元素は水素とヘリウムだけ。それから3億年ほど経て星が生まれると、その中で重い元素が創られ始め、星の爆発に起きる超新星爆発で、より重い元素が一気に創られたと考えられています。私たちの体を含め、宇宙を構成する物質は全てこれらの元素から出来ています。一方、元素の本体は陽子と中性子からなる原子核です。陽子と中性子の微妙なバランスが崩れる原子核の成り立ちを調べることは、物質の起源を調べることにはなりません。ここに挙げる核図表は全ての原子核を示した地図であり、元素合成と宇宙の歴史も対比されています。原子核は果たしてどのように生まれたのか、またどのようなものなのか、核図表を一瞥に見てみましょう。

原子核の大きさ

原子の大きさは約1000万分の1mm、黒粒の顕微鏡でざりざり見える大きさです。しかし丸の本体は原子の中心にある原子核です。原子核の大きさは原子のさらに10万分の1ですから、まったく見ることは出来ません。たとえ見えても私たちは原子核が陽子（+の電気を持つ）と中性子（電気を持たない）という2種類の粒子の塊であることを知っています。



私たちの体は星くずでできている



縦軸は陽子数であり、元素の種類でもあります。下から上に向かって陽子数が増えていくため、縦軸の順番と一致です。横軸は中性子数で左から右に向かって中性子の数が増えていきます。つまり横一線では同じ陽子数で、違う中性子数で構成される同位元素になります。

高い所は安定域^①とされ、天然に存在する原子核です。オレンジ色の所はこれまでに発見、合成された原子核です。白い所は理論的に存在するとされる原子核で未発見の原子核です。黒は結合エネルギー^②を表していて、高いほど原子核が不安定といえます。

原子核の表記方法

陽子数・中性子数・元素記号

例えはヘリウム4では

${}^4_2\text{He}$

例えは炭素13では

${}^{13}_6\text{C}$

と表す。①(右の核図表では陽子数は省略)

真上からみた立体核図表



●皆さんご存知の周期表は元素を原子番号順に並べた表です。性質の似た元素が縦に揃うよう工夫されているから、目立つ不思議な形状をしています。

一方、核図表は単純に原子番号(つまり陽子数)の数を増やして、陽子数と中性子数の数によっておよそ1万種類あると言われています。同じ陽子数(元素)でも様々な中性子数の原子核が存在することがこの表からわかります。同じ元素で、違った中性子数である元素を「同位元素^③」と書います。

この表の「高さ」というか「谷の深さ」はそれぞれの原子核の結合エネルギー^④を表しています(深い方が強い)。結合力の強い安定核^⑤が、あたかも谷筋を流れる川のようなので、これを「ハイゼンベルグ^⑥の谷」と呼びます。

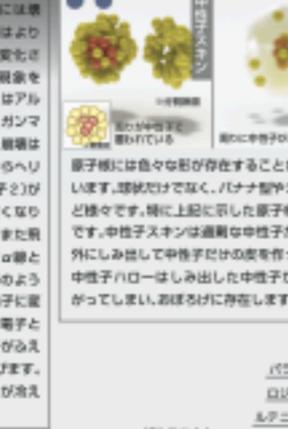
1 原子核=陽子+中性子



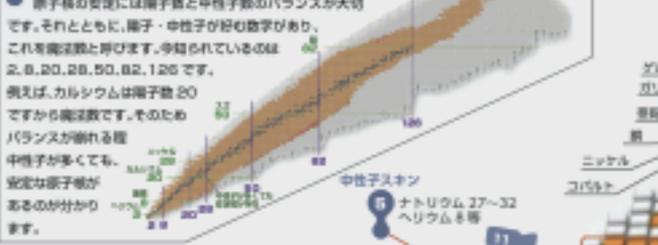
2 原子核の崩壊-アルファ崩壊、ベータ崩壊



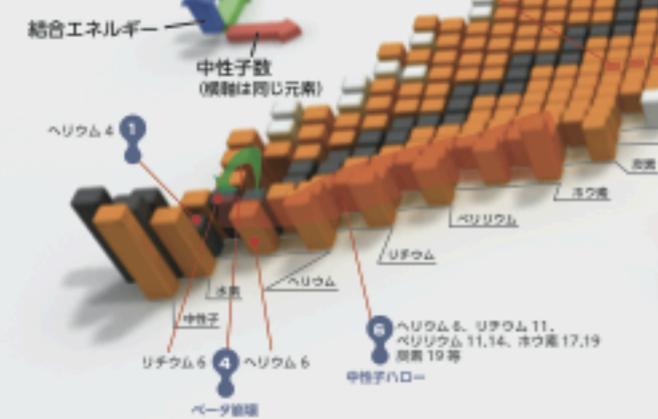
3 塊だけじゃない-色々な原子核



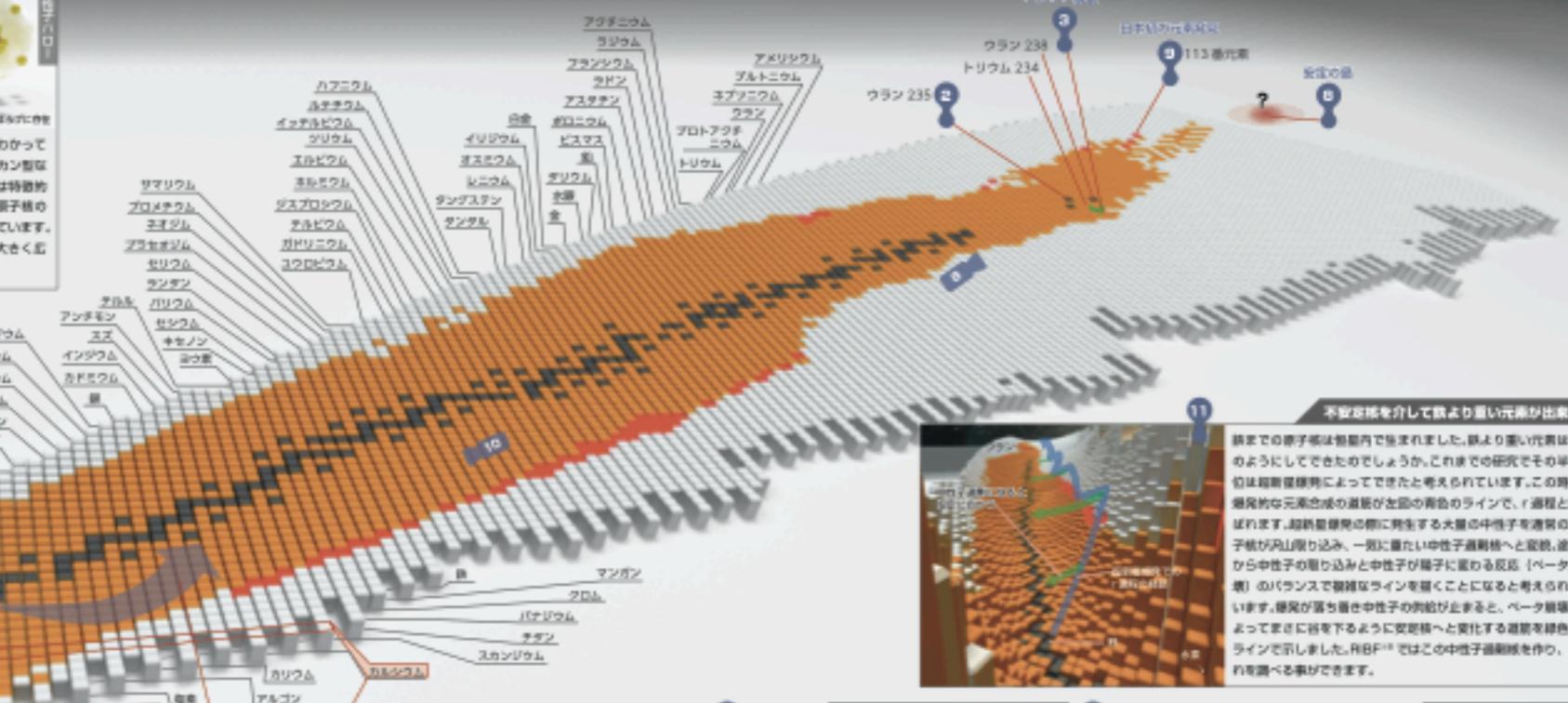
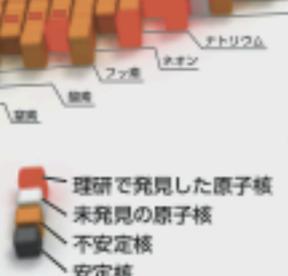
4 魔法数(マジックナンバー)



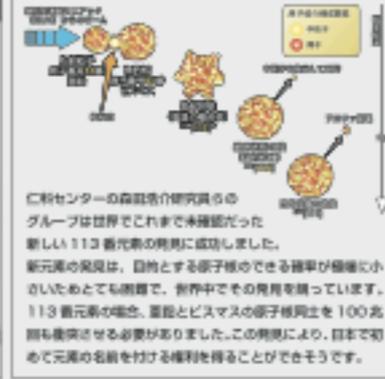
5 陽子数(元素の種類)



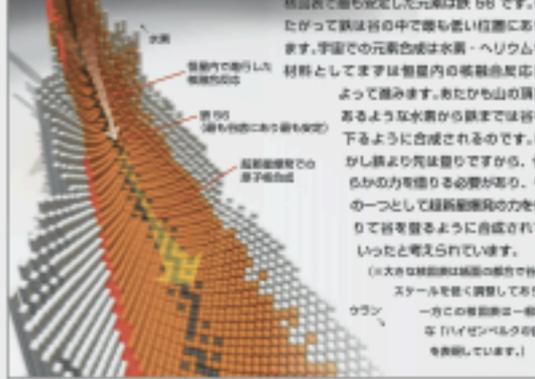
6 理研で発見した原子核



9 日本史上初の元素発見「113番元素」

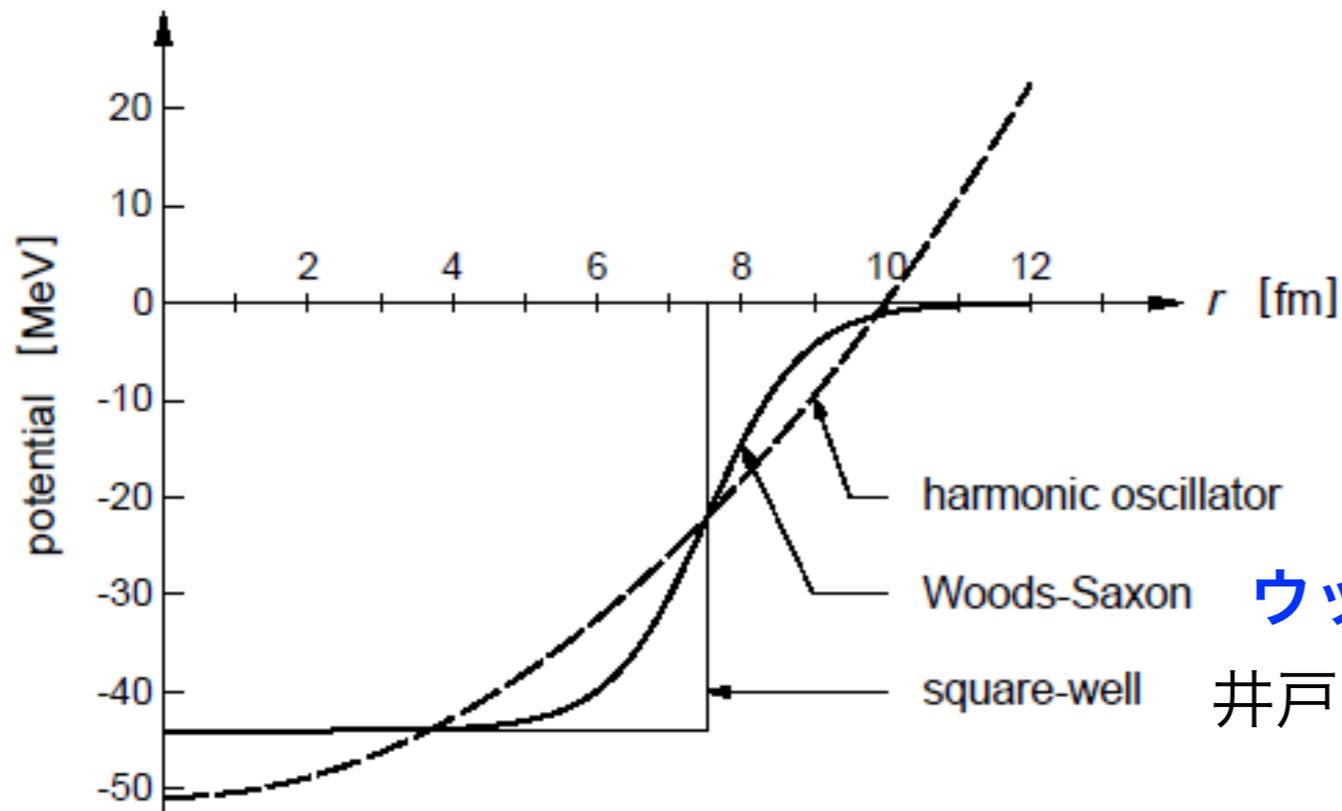


10 谷はターニングポイント

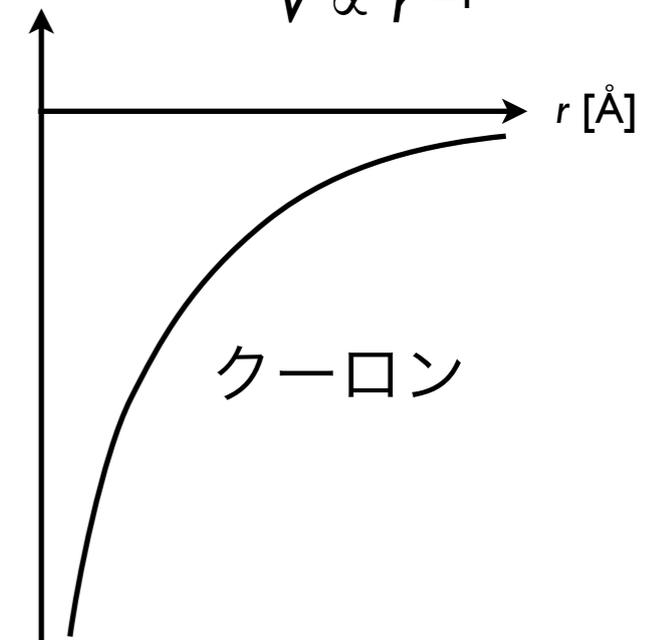


① 「安定域」 自然界に存在する原子核の領域のことです。② 「結合エネルギー」 原子核を構成する陽子と中性子をバラバラにするのに必要なエネルギーのことです。③ 「同位元素」 陽子数と同じで中性子数が異なる原子核のことです。④ 「結合エネルギー」 原子核を構成する陽子と中性子をバラバラにするのに必要なエネルギーのことです。⑤ 「安定核」 自然界に存在する原子核のことです。⑥ 「ハイゼンベルグの谷」 核図表でも安定化した元素は68です。したがって核図表の中で最も高い位置にあります。宇宙での元素合成は水素・ヘリウムを材料としてまず宇宙内の核融合反応によって進みます。あなたが山の頂に居るよう水素が核融合で崩壊するよう崩壊するように合成されるのです。しかし崩壊は必ずしも必要ありません。何かの力を借りる必要があります。その一つとして超新星爆発の力を借りて崩壊するように合成されると考えられています。(「スウェーデン」は核融合の場を待たず、ステップを踏んでおり、一方の超新星爆発は「核融合」を伴っています。)

原子核のポテンシャル



cf. 原子のポテンシャルは
 $V \propto r^{-1}$



原子核の大きさは $r = 1.2 A^{1/3} \text{ fm}$ ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$)

原子核は密度一定 (密度の飽和性)

核力 = 「強い相互作用」 “Strong Interaction”

力の到達距離は核子のサイズ

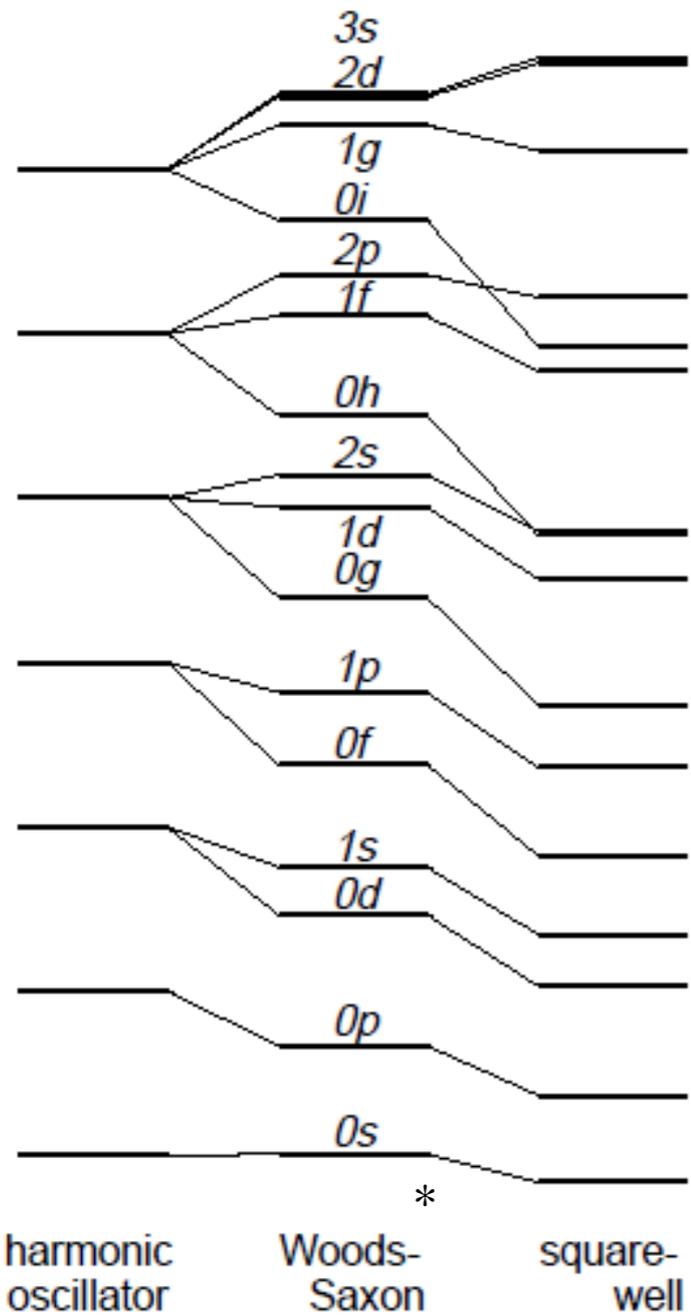
湯川ポテンシャル $1/\kappa = \hbar / m_{\pi}c$

湯川の間接子論

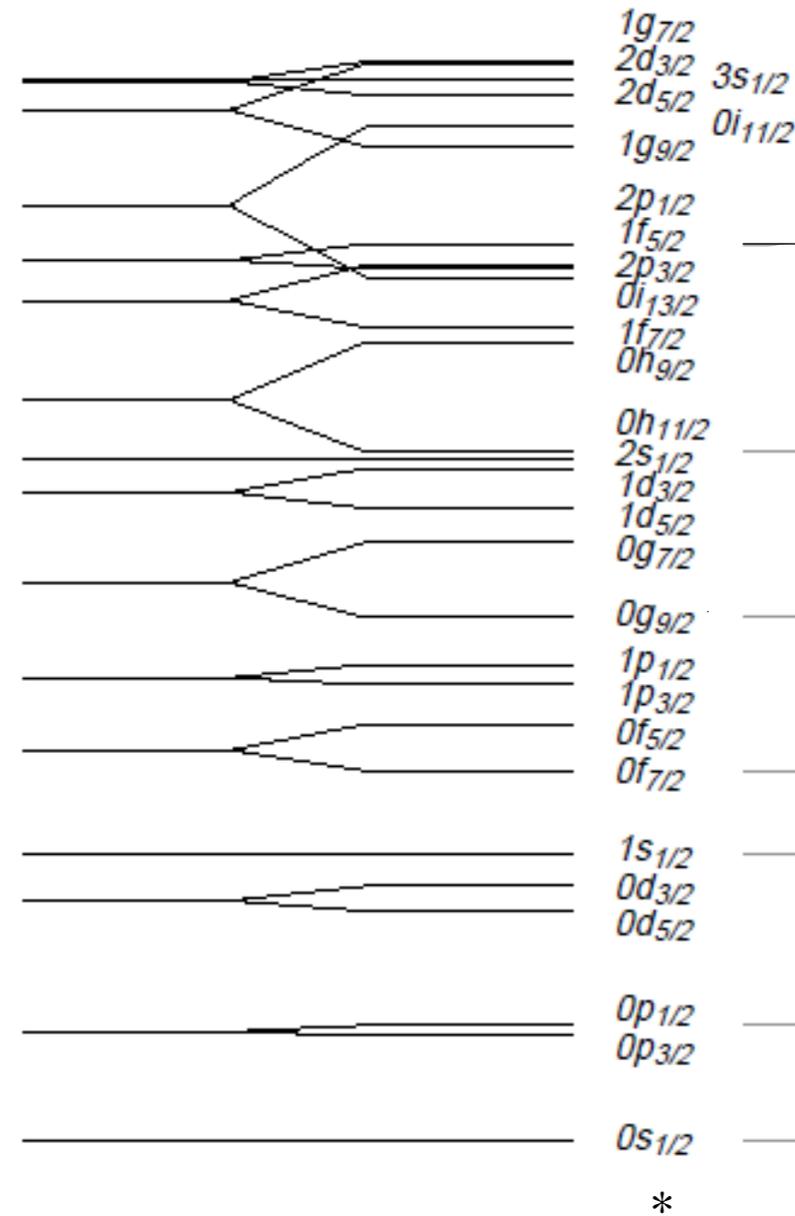
$$V(r) \propto -\frac{e^{-\kappa r}}{r}$$

β 崩壊(壊変) : 「弱い相互作用」 “Weak Interaction”

原子核構造の殻模型 Shell model



1g	18	154
0i	26	136
2p	6	110
1f	14	106
0h	22	92
2s	2	70
1d	10	68
0g	18	58
1p	6	40
0f	14	34
1s	2	20
0d	10	18
0p	6	8
0s	2	2



126
82
50
28
20
8
2

魔法数
magic number

+ スピン軌道結合

(実際の原子核では準位の順番が少し異なる)

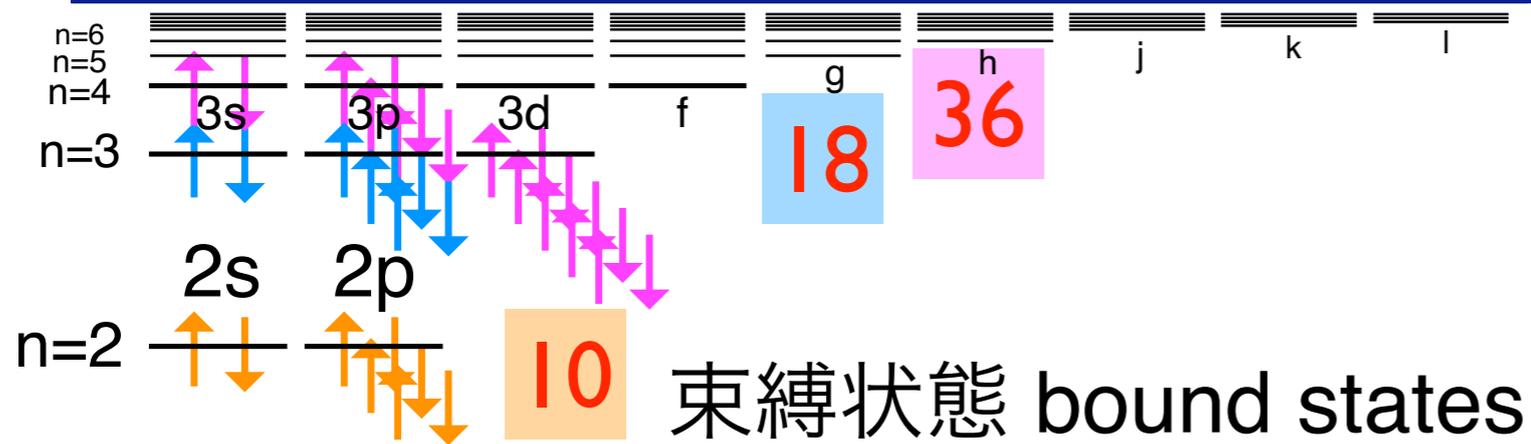
調和振動子 ウッズ・サクソン型
井戸型

ウッズ・サクソン型ポテンシャル

(*) 主量子数はこの図より1つ大きく取る場合の方が一般的

連続状態 continuum

原子のエネルギー準位



1s
↑↓
2
魔法数
magic number

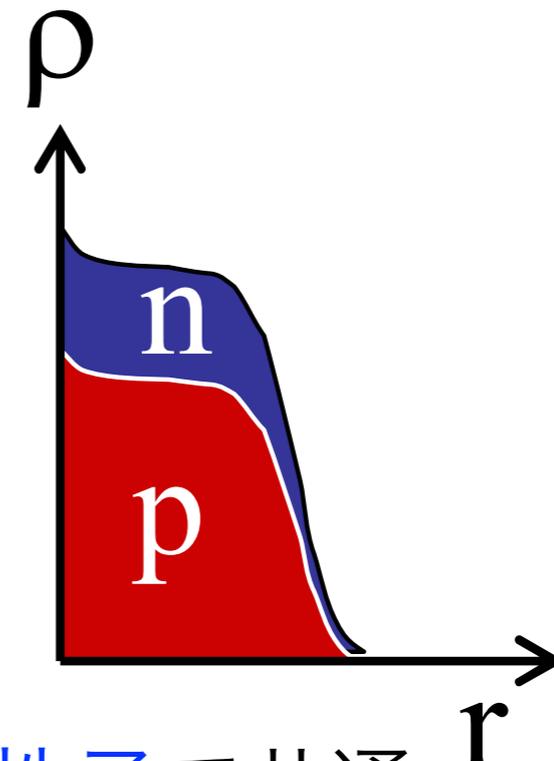
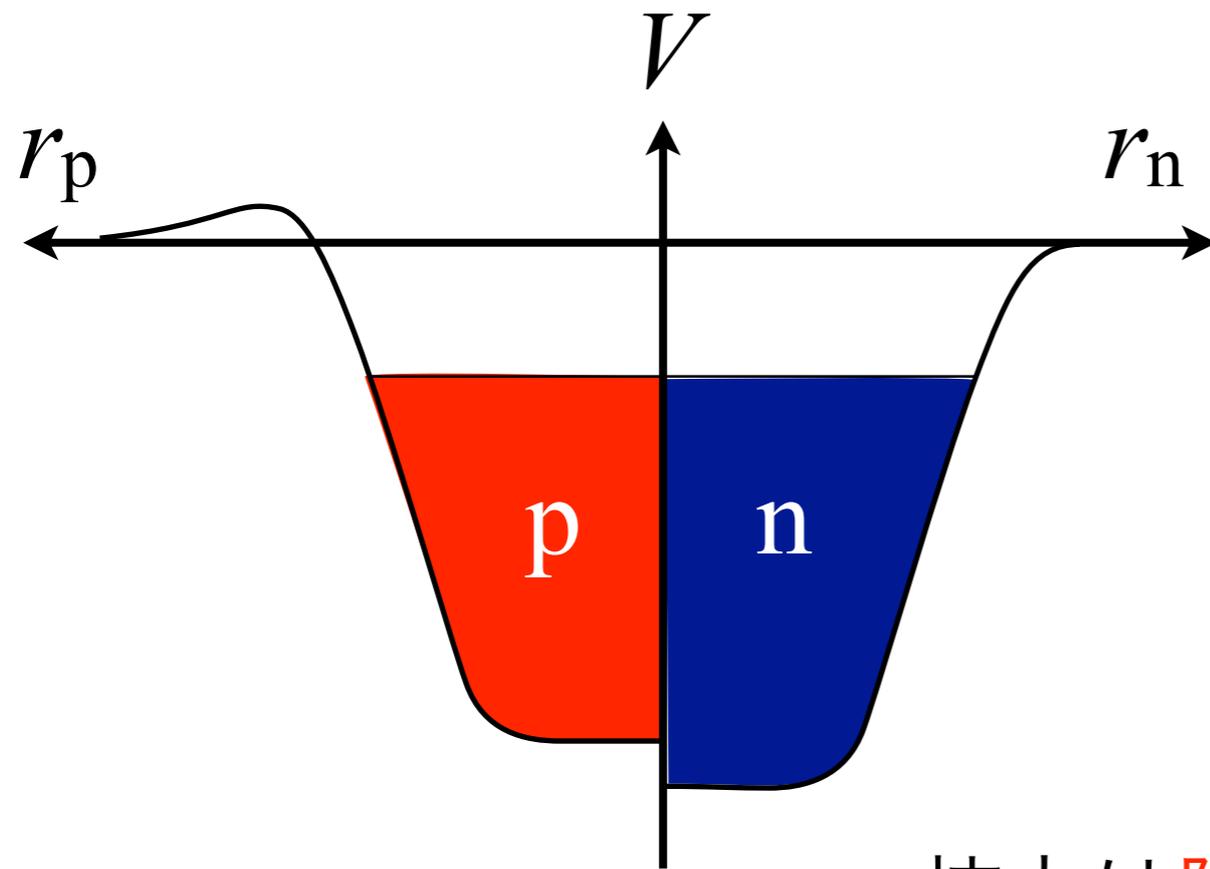
閉殻
closed shell

魔法数	電子配置	元素
2	1s ²	He
10	1s ² 2s ² 2p ⁶	Ne
18	[Ne] 3s ² 3p ⁶	Ar
36	[Ar] 4s ² 3d ¹⁰ 4p ⁶	Kr
54	[Kr] 5s ² 4d ¹⁰ 5p ⁶	Xe
86	[Xe] 6s ² 4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6p ⁶	Rn

貴ガス

原子核のポテンシャル

密度分布



核力は陽子と中性子で共通

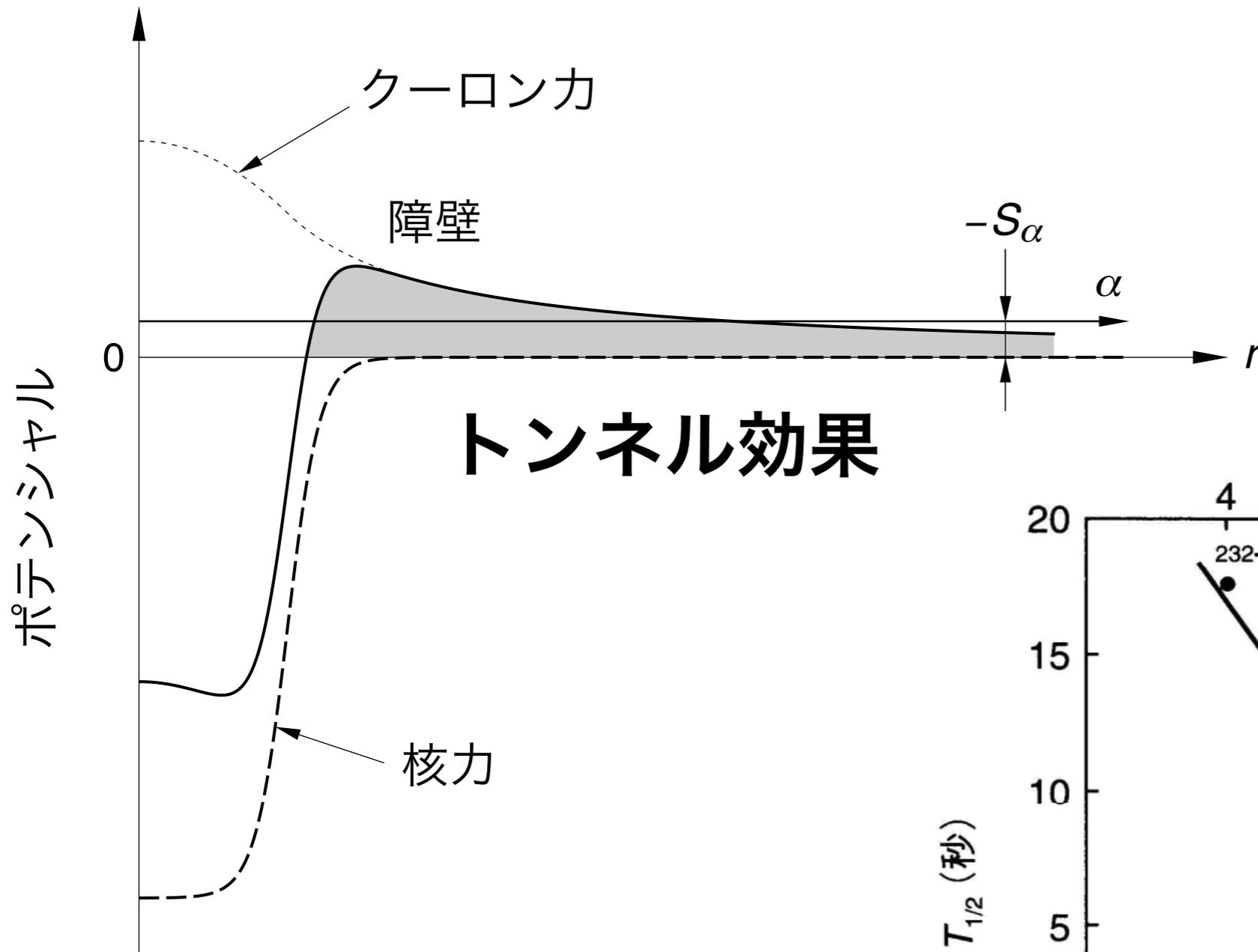
陽子のポテンシャルは
クーロン反発により上昇。 $\propto Z^2 / A^{1/3}$

(特に重い原子核で) 中性子の方が数多く入る。

陽子数も中性子数も魔法数となる (二重閉殻、double magic)

原子核は特に安定。 e.g. ${}^4_2\text{He}_2$ ${}^{16}_8\text{O}_8$ ${}^{40}_{20}\text{Ca}_{20}$ ${}^{48}_{20}\text{Ca}_{28}$ ${}^{208}_{82}\text{Pb}_{126}$

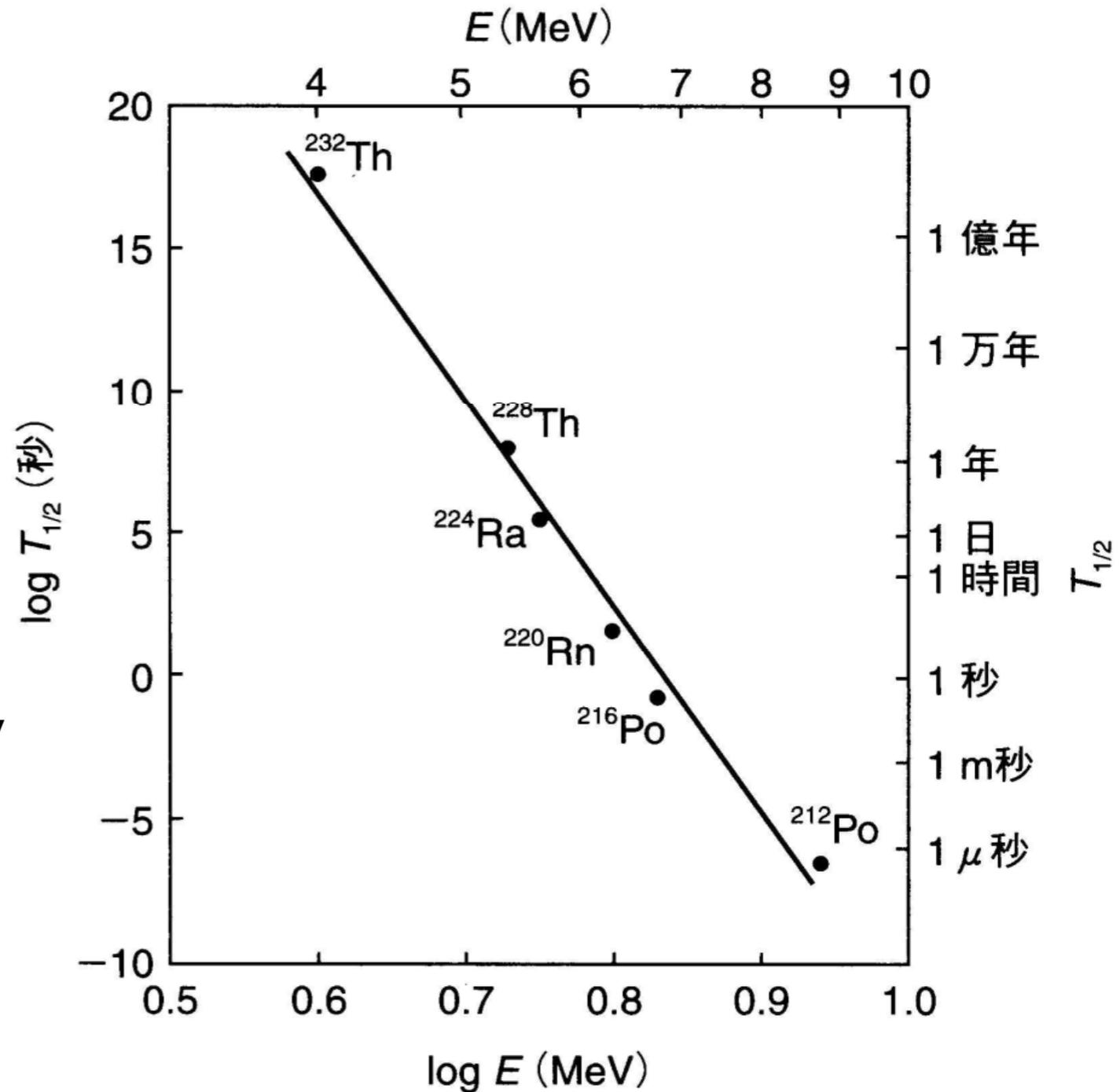
α 壊変 (崩壊)



トンネル効果

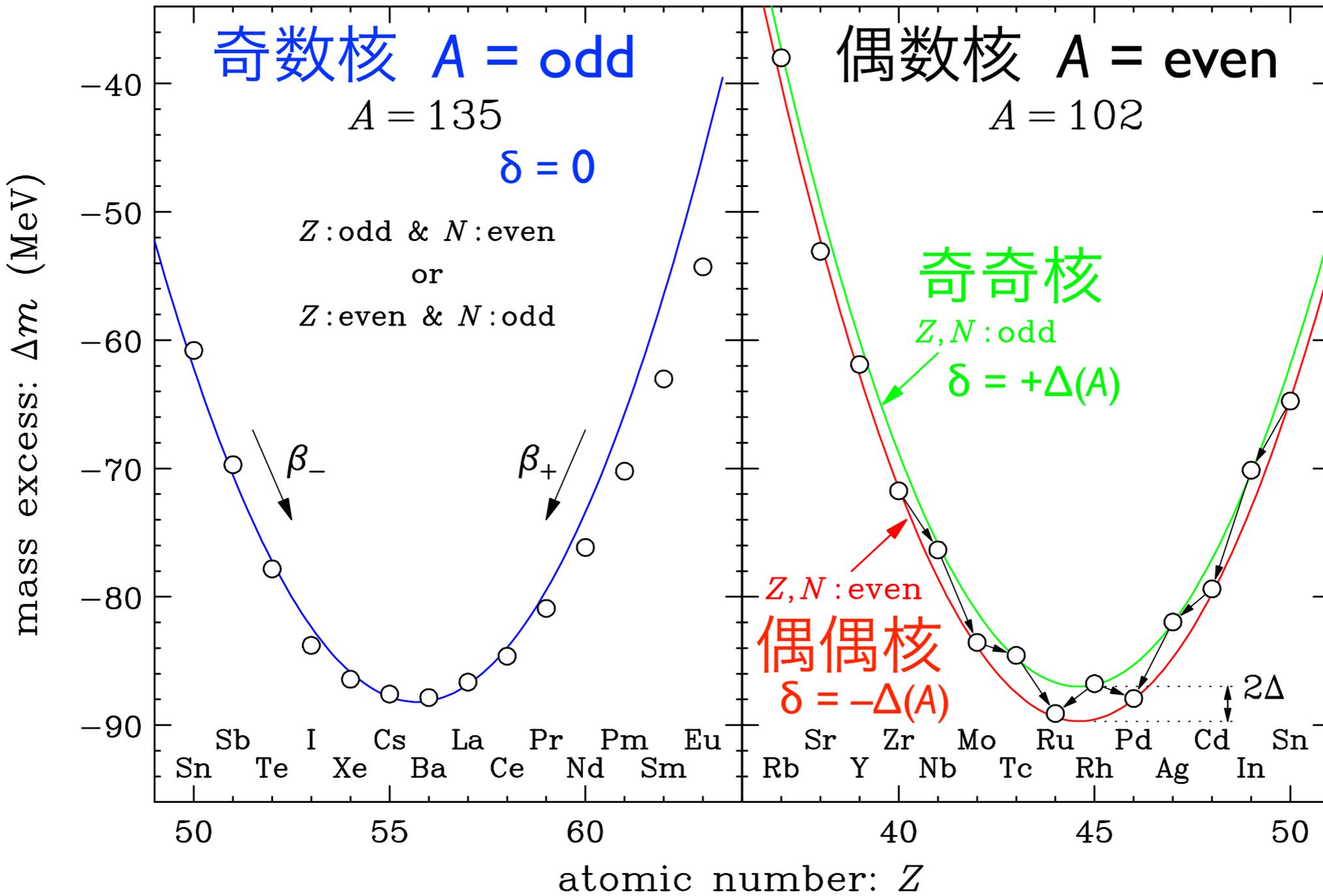
Geiger-Nuttall law Gamow's theory

^{232}Th の壊変に伴って生じる α 放出核種の半減期 $T_{1/2}$ と α 線の最大エネルギー E の関係。縦軸、横軸とも二つの表示単位で示されている



原子核束縛エネルギーの偶奇依存性

-E_B 束縛エネルギー (MeV)

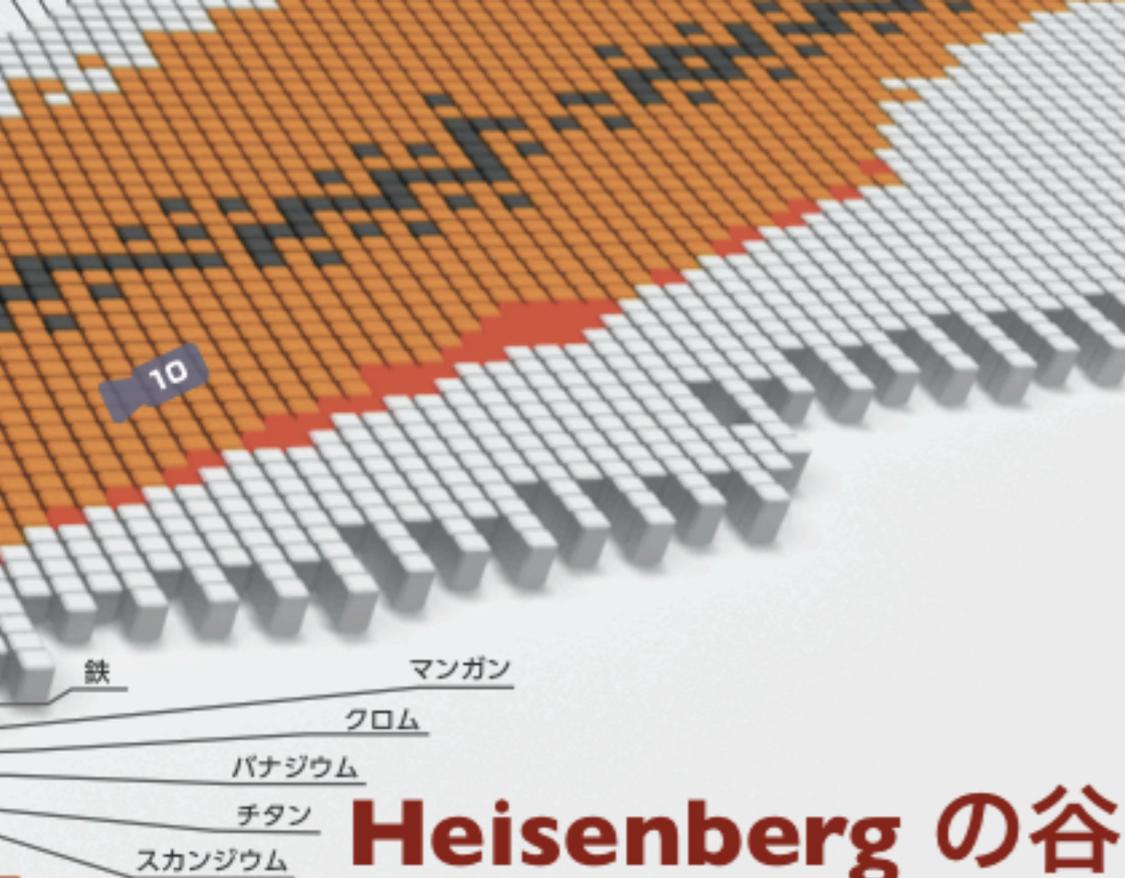


$$-E_B = \dots + \frac{a_a}{4} (N - Z)^2 / A + \delta$$

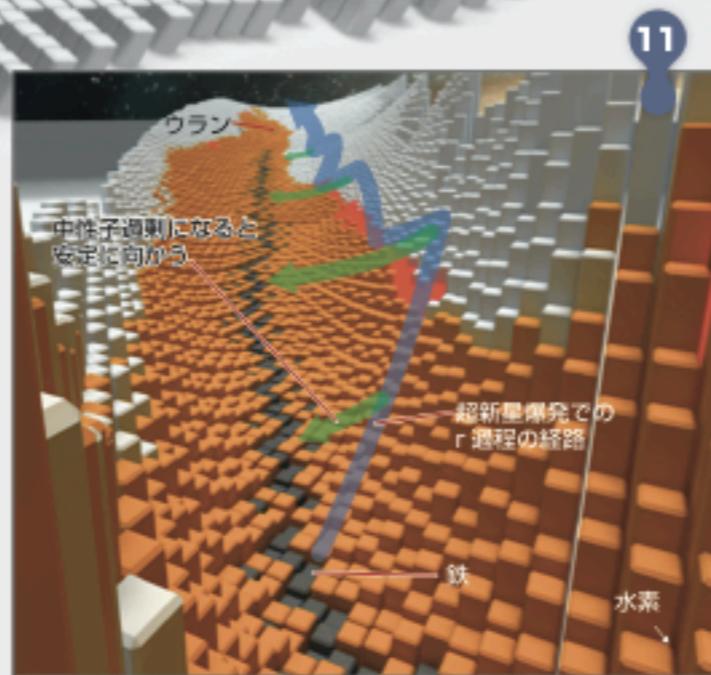
対称エネルギー

対エネルギー

(大阪大学 故岡村弘之先生の講義資料より借用)



Heisenberg の谷

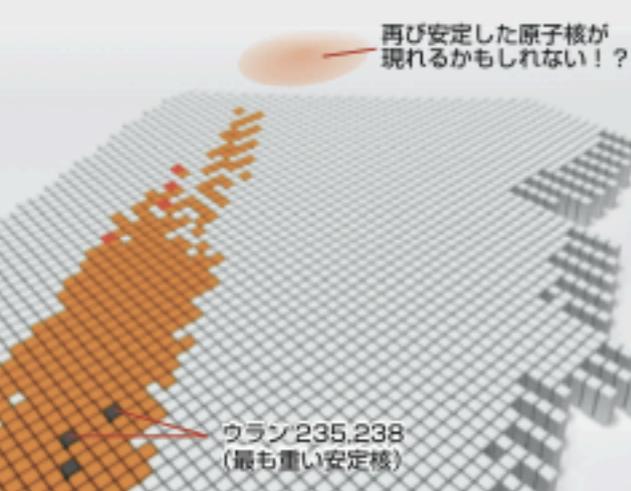


不安定核を介して鉄より重い元素が出来る

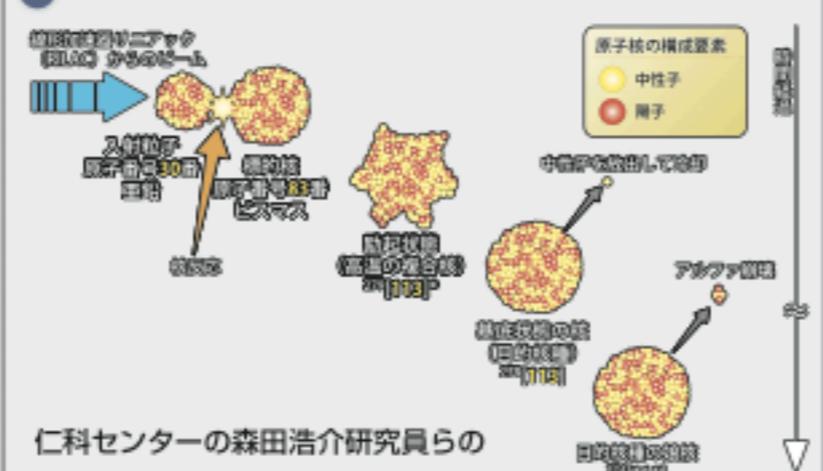
鉄までの原子核は恒星内で生まれました。鉄より重い元素はどのようにしてできたのでしょうか。これまでの研究でその半分位は超新星爆発によってできたと考えられています。この時の爆発的な元素合成の道筋が左図の青色のラインで、r過程と呼ばれます。超新星爆発の際に発生する大量の中性子を通常の原子核が沢山取り込み、一気に重たい中性子過剰核へと変換。途中から中性子の取り込みと中性子が陽子になる反応（ベータ崩壊）のバランスで複雑なラインを描くことになると考えられています。爆発が落ち着き中性子の供給が止まると、ベータ崩壊によってまさに谷を下るように安定核へと変化する道筋を緑色のラインで示しました。RIBF^{※8}ではこの中性子過剰核を作り、それを調べる事ができます。

安定の島

来、超重原子核は非常に不安定ですが、理論的にうな離れた位置に安定核が存在するかもしれない。このあたりに魔法数が存在すると思えるからです。周りは全て不安定原子核の海の中にあることから、安定の島と呼ばれています。

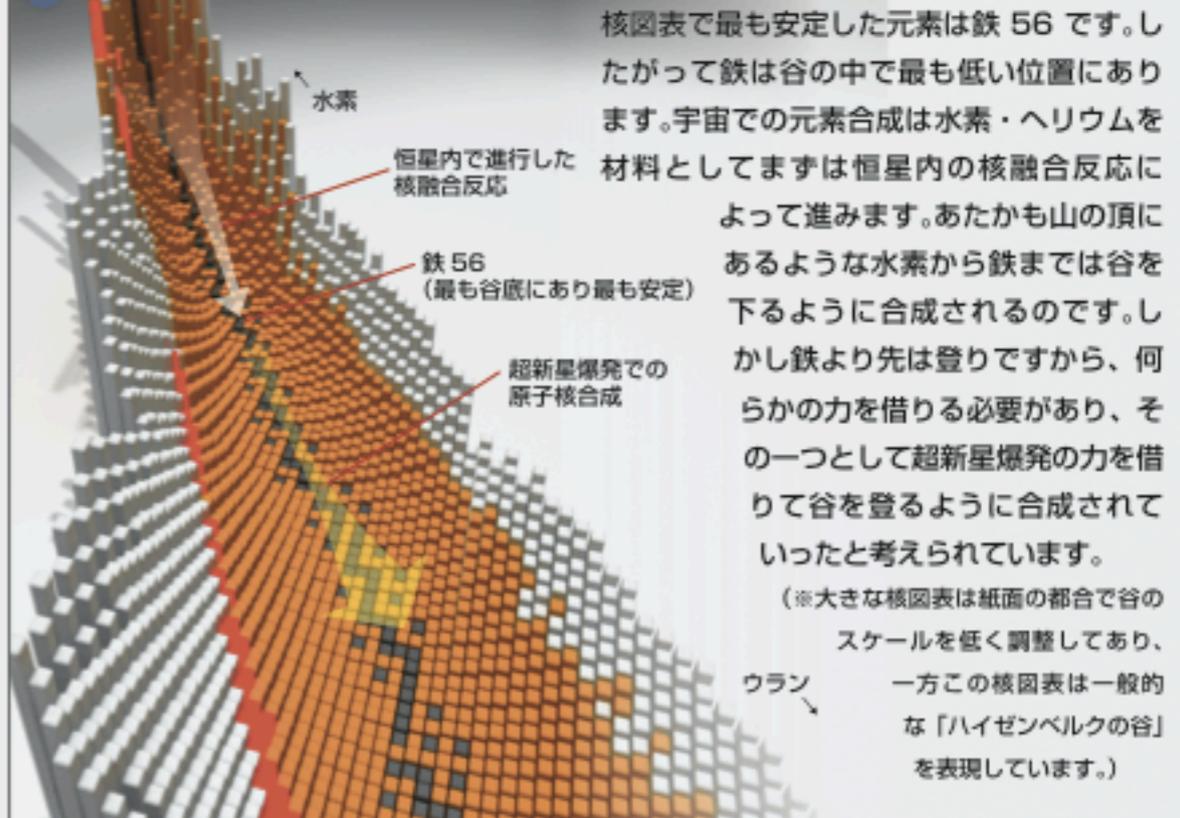


9 日本史上初の元素発見「113番元素」



仁科センターの森田浩介研究员らのグループは世界でこれまで未確認だった新しい113番元素の発見に成功しました。新元素の発見は、目的とする原子核のできる確率が極端に小さいためとても困難で、世界中でその発見を競っています。113番元素の場合、亜鉛とビスマスの原子核同士を100兆回も衝突させる必要がありました。この発見により、日本で初めて元素の名前を付ける権利を得ることができそうです。

10 鉄はターニングポイント



核図表で最も安定した元素は鉄56です。したがって鉄は谷の中で最も低い位置にあります。宇宙での元素合成は水素・ヘリウムを材料としてまずは恒星内の核融合反応によって進みます。あたかも山の頂にあるような水素から鉄までは谷を下るように合成されるのです。しかし鉄より先は登りですから、何らかの力を借りる必要があります。その一つとして超新星爆発の力を借りて谷を登るように合成されていたと考えられています。
(※大きな核図表は紙面の都合で谷のスケールを低く調整しており、一方この核図表は一般的な「ハイゼンベルクの谷」を表現しています。)

などのように半減期が地球の年齢よりも長
 ったときに失われるエネルギーを結合エネ

ルギーと言います。低い所にある原子核ほど失ったエネルギーが大きく壊れにくい、つまり安定になります。
 ※8「RIBF」：RIビームファクトリー。理研仁科加速器研究センターの日本を代表する原子核研究施設の総称。

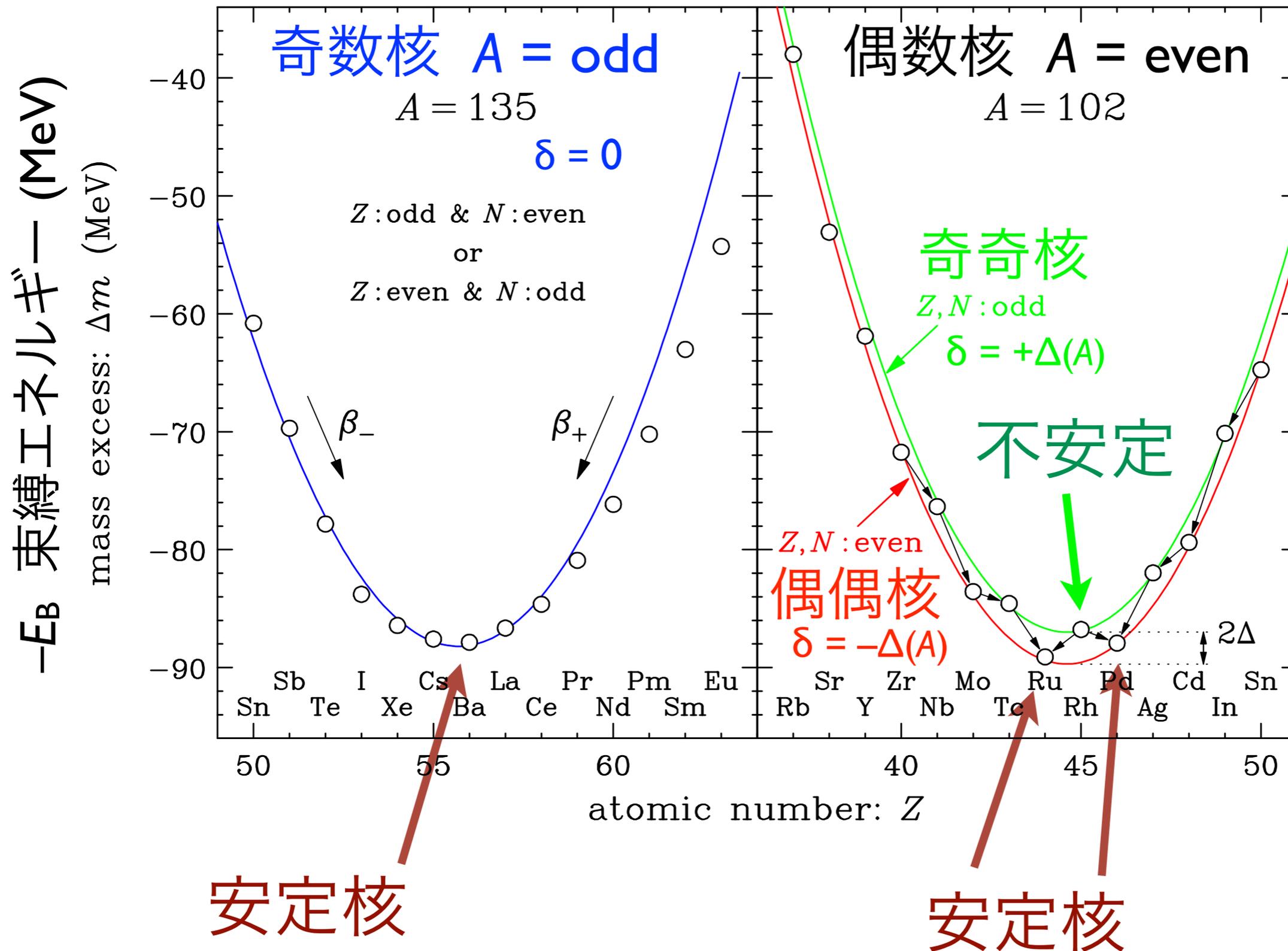
RIKEN NISHINA CENTER

陽子数

中性子数

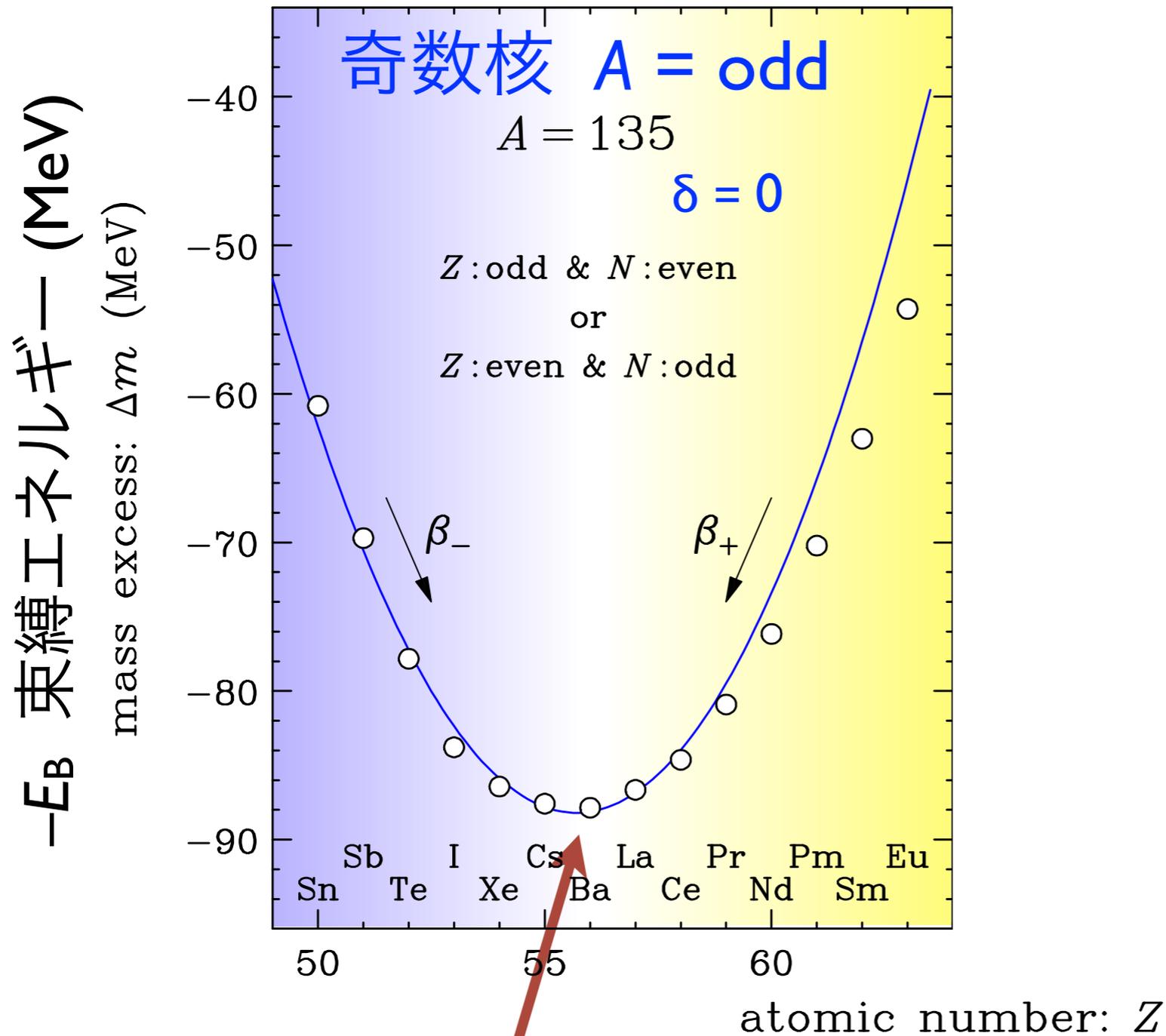


原子核束縛エネルギーの偶奇依存性



安定核の 60% は偶偶核。安定な奇奇核は 4 つのみ。 ${}^2_1\text{H}_1$ ${}^6_3\text{Li}_3$ ${}^{10}_5\text{Be}_5$ ${}^{14}_7\text{N}_7$

原子核束縛エネルギーの偶奇依存性

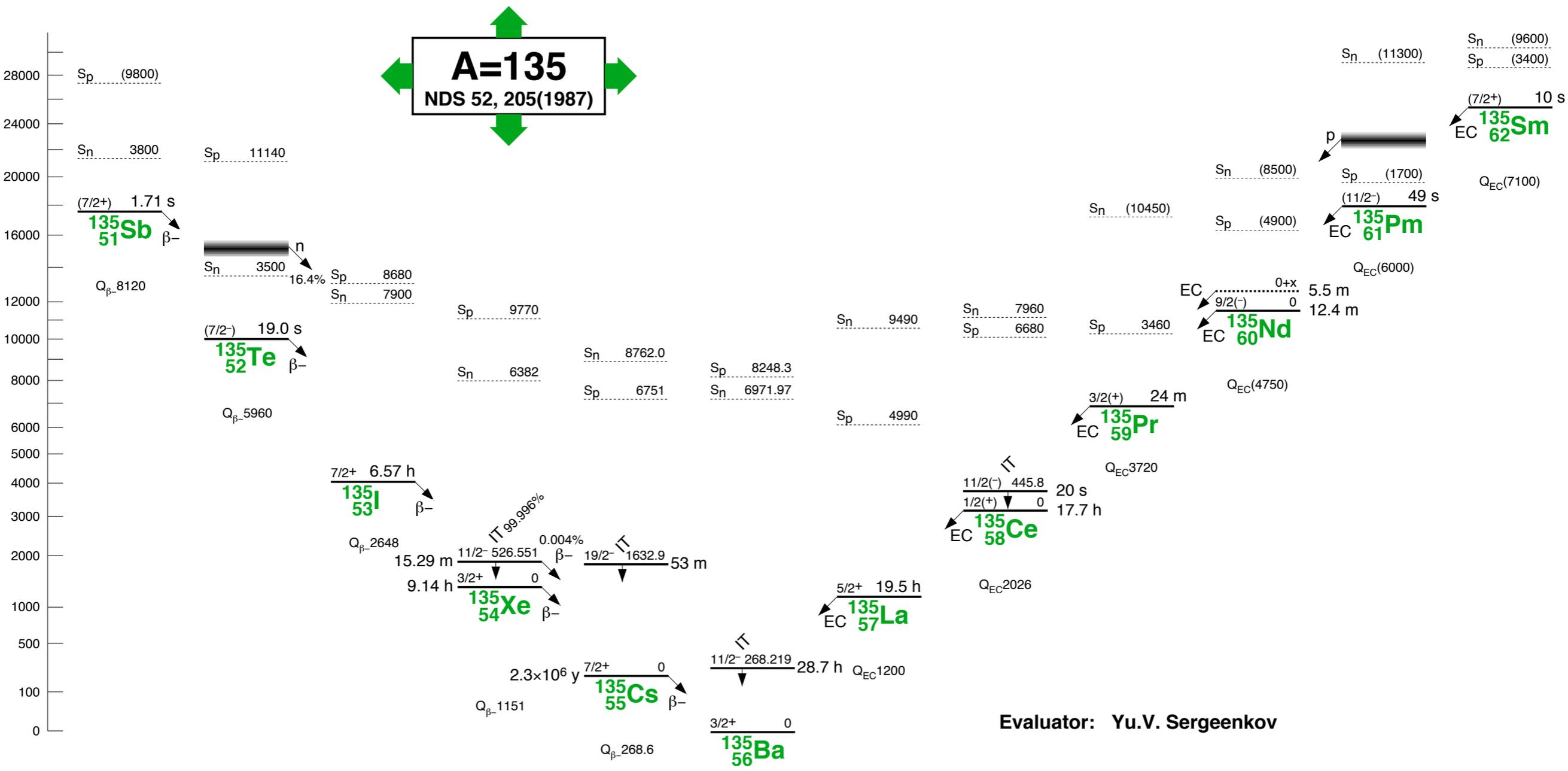


安定核



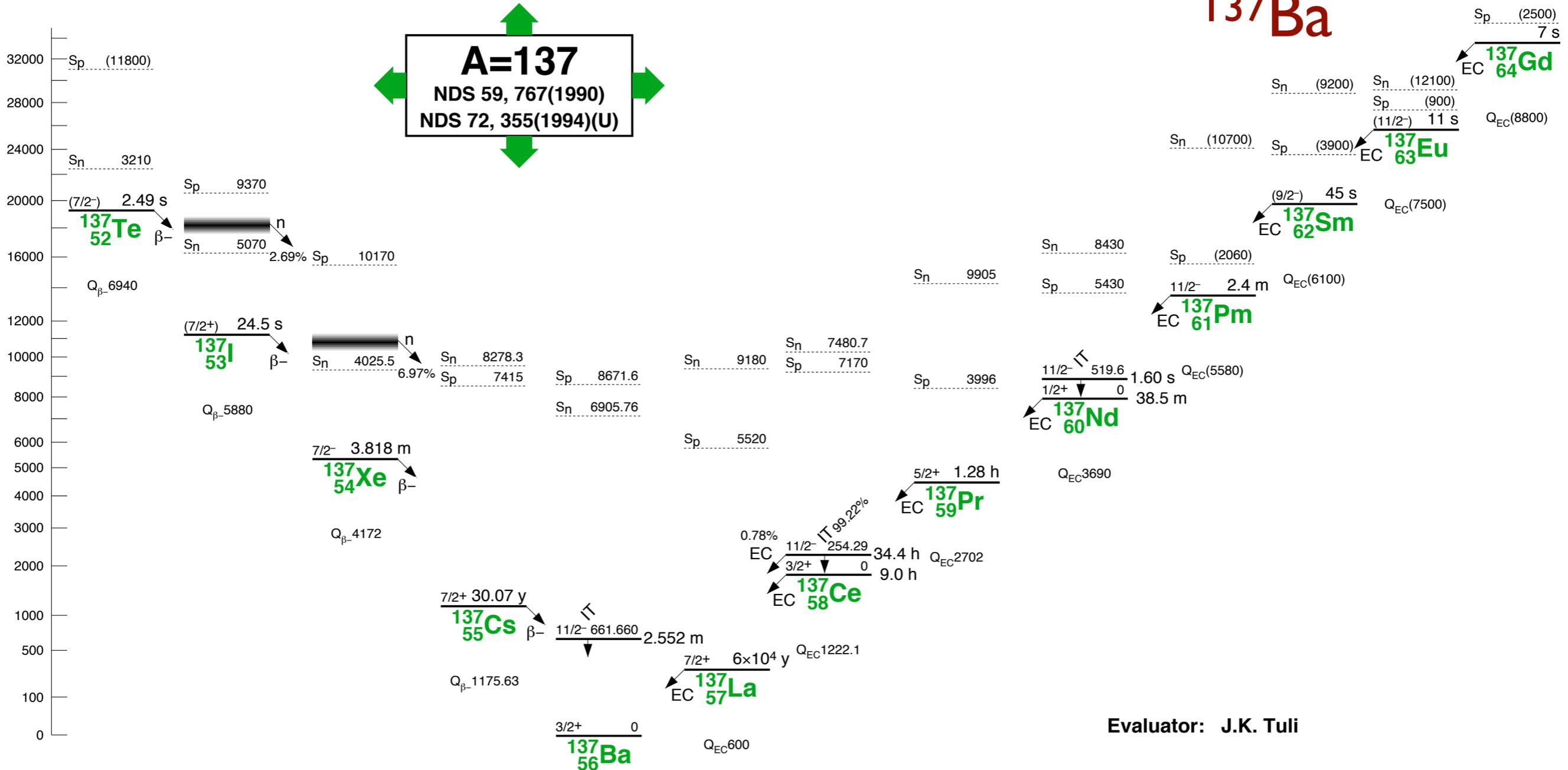
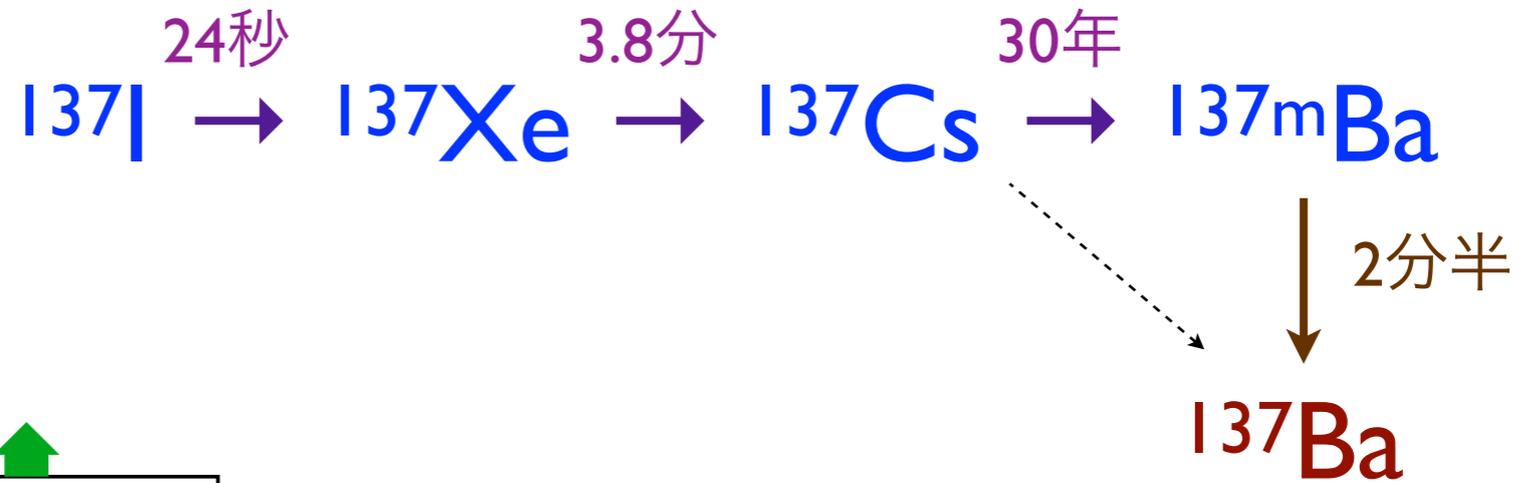
原子炉内では $^{135}\text{Xe} + n \rightarrow ^{136}\text{Xe}$ (中性子捕獲反応)

中性子過剰核は β^- 壊変 (崩壊) を繰り返しながら 安定核までたどり着く。

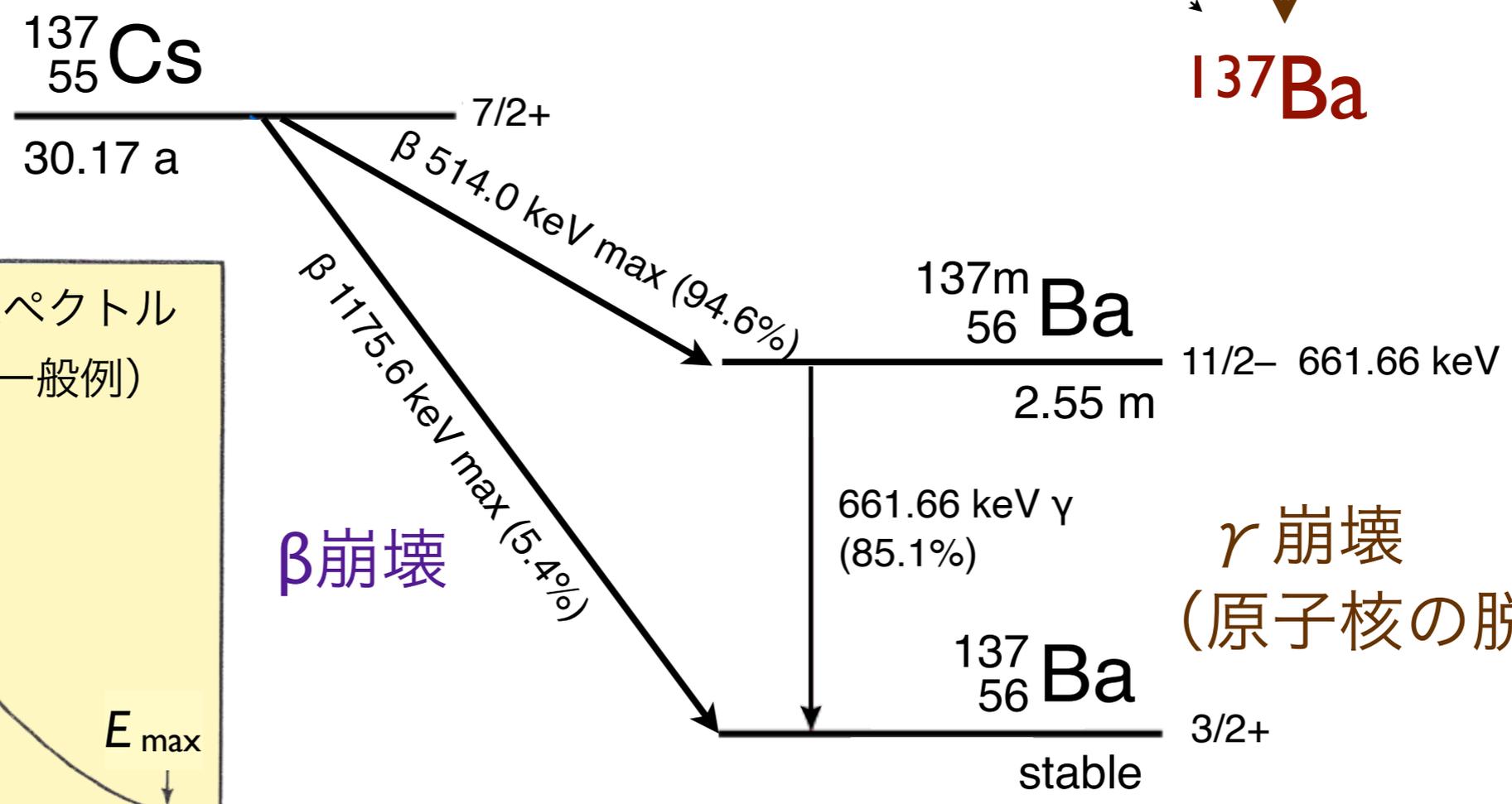


原子炉内では $^{135}\text{Xe} + n \rightarrow ^{136}\text{Xe}$ (中性子捕獲反応)

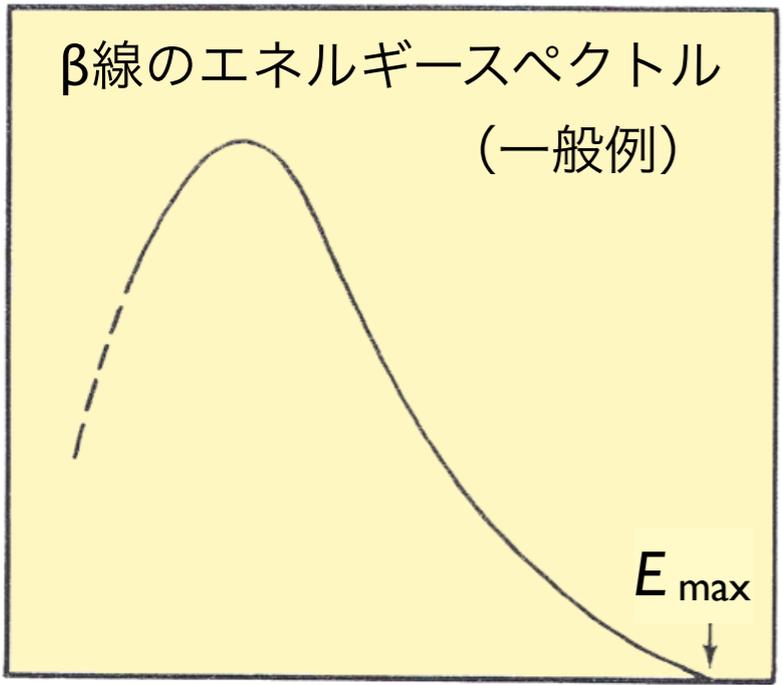
中性子過剰核は β^- 壊変 (崩壊) を繰り返しながら 安定核までたどり着く。



中性子過剰核は β^- 壊変 (崩壊) を繰り返しながら 安定核までたどり着く。

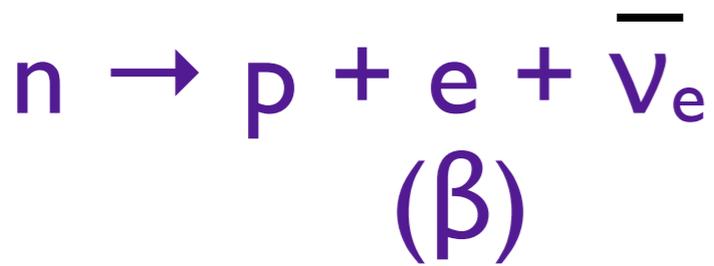


粒子数の分布



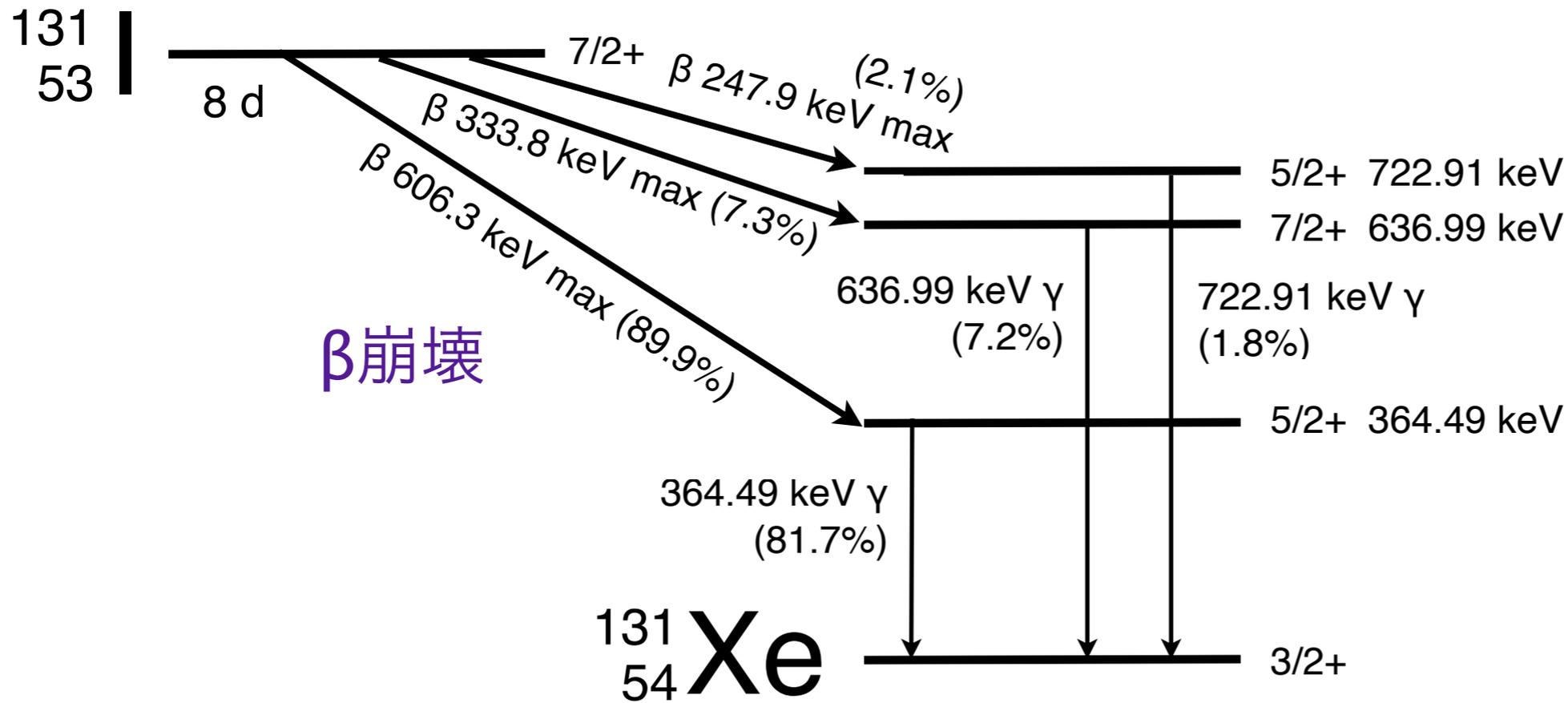
エネルギー E_β

β線 (連続スペクトル)

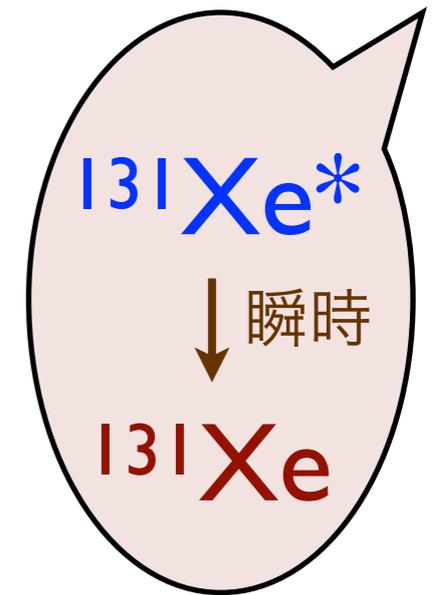


γ線 (定まったエネルギー)

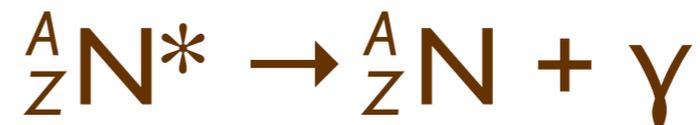
γ崩壊 (原子核の脱励起)



β 崩壊

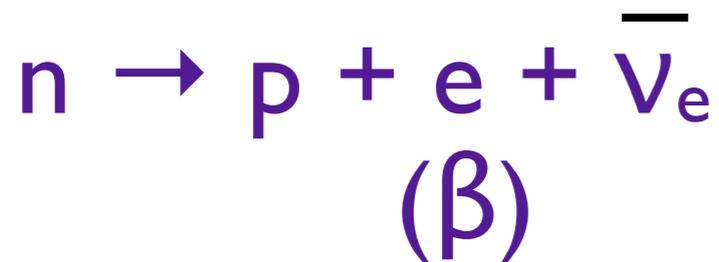


γ 線：原子核の脱励起



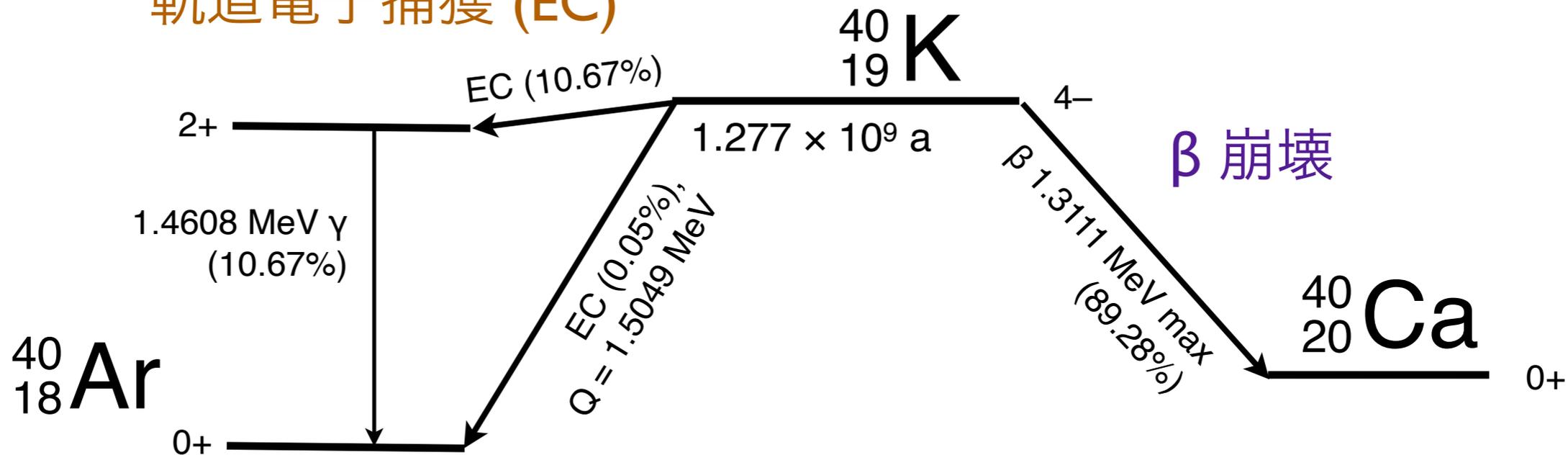
γ 線（定まったエネルギー）

β 線（連続スペクトル）

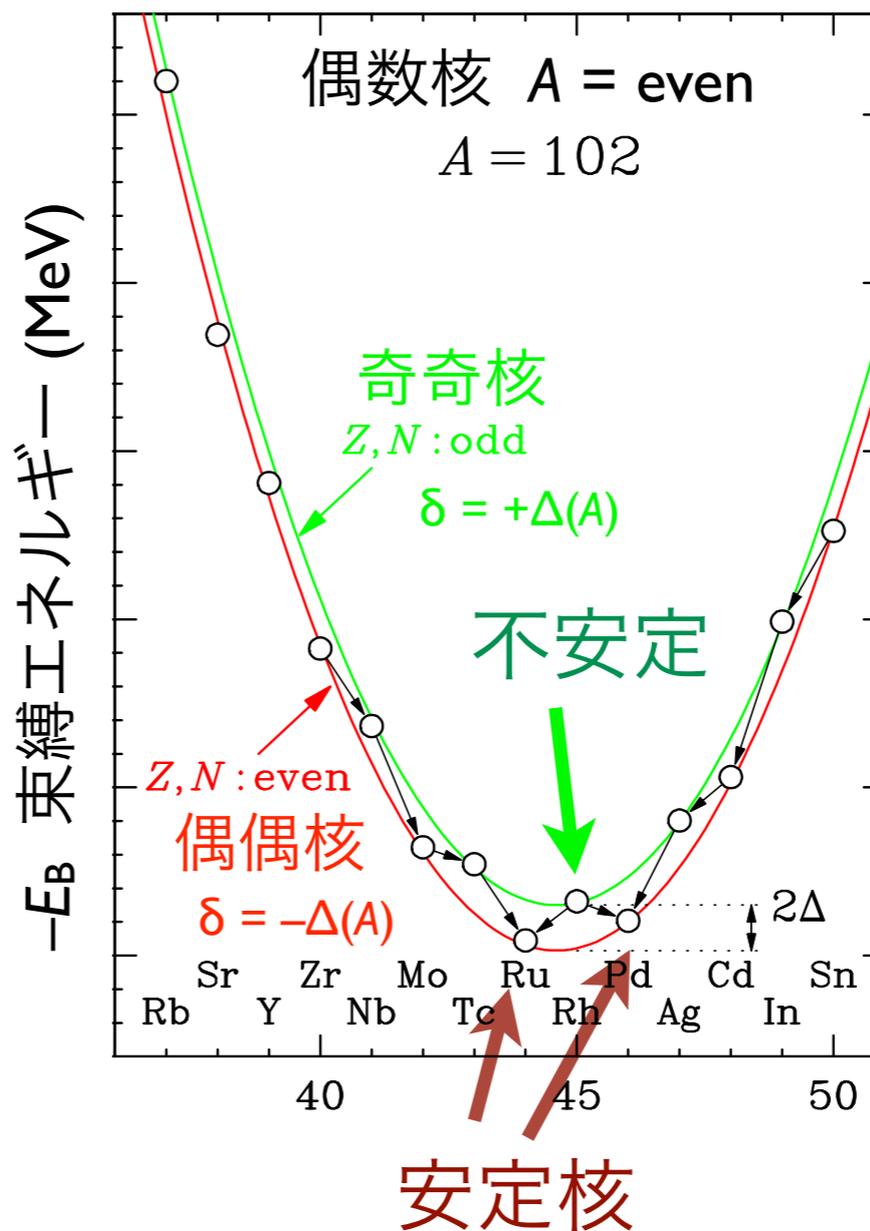


原子核のエネルギー

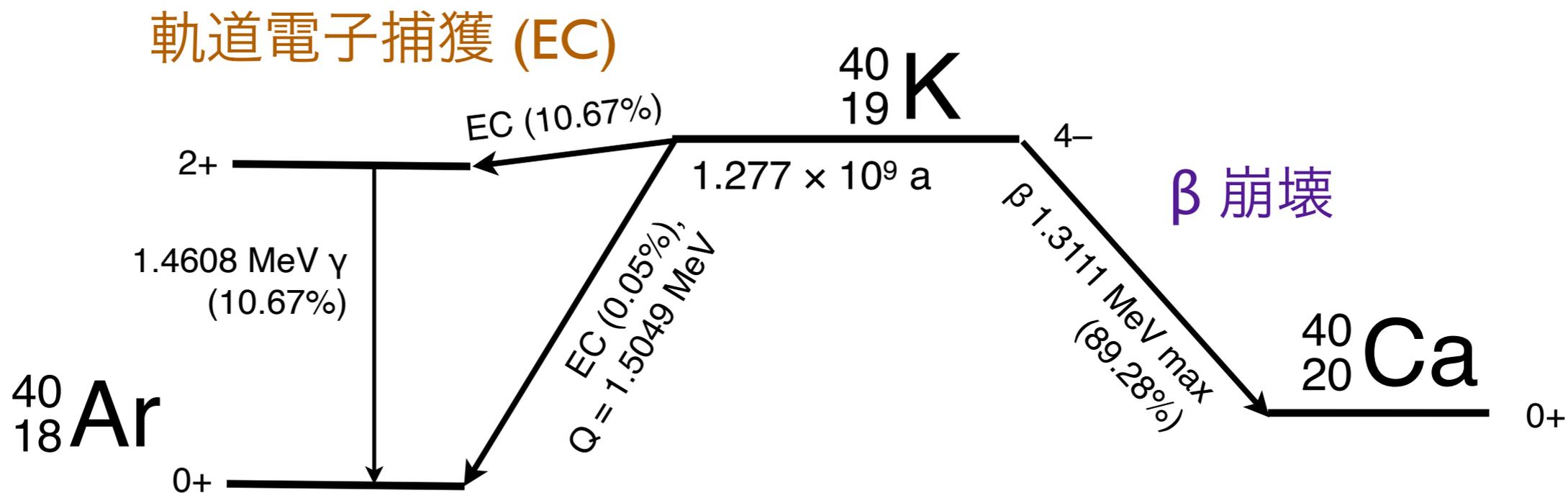
軌道電子捕獲 (EC)



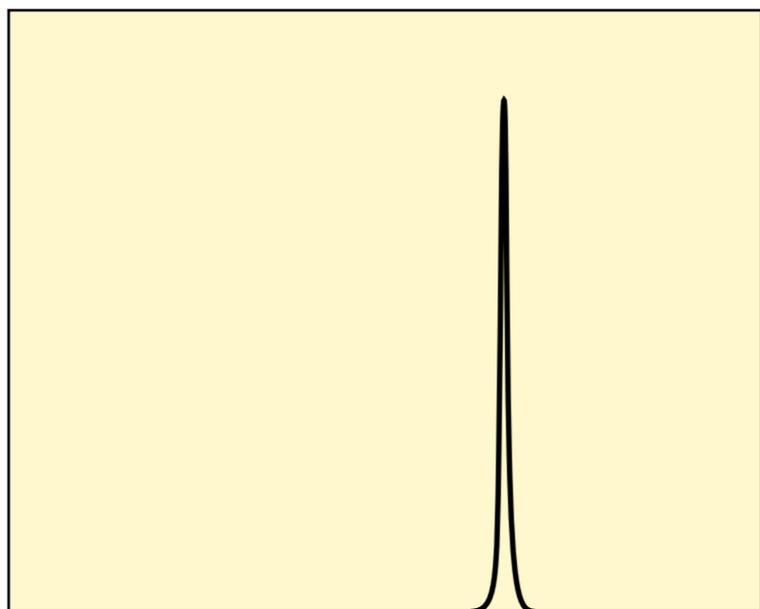
40K の崩壊 (壊変) 図式



原子核のエネルギー



粒子数の分布

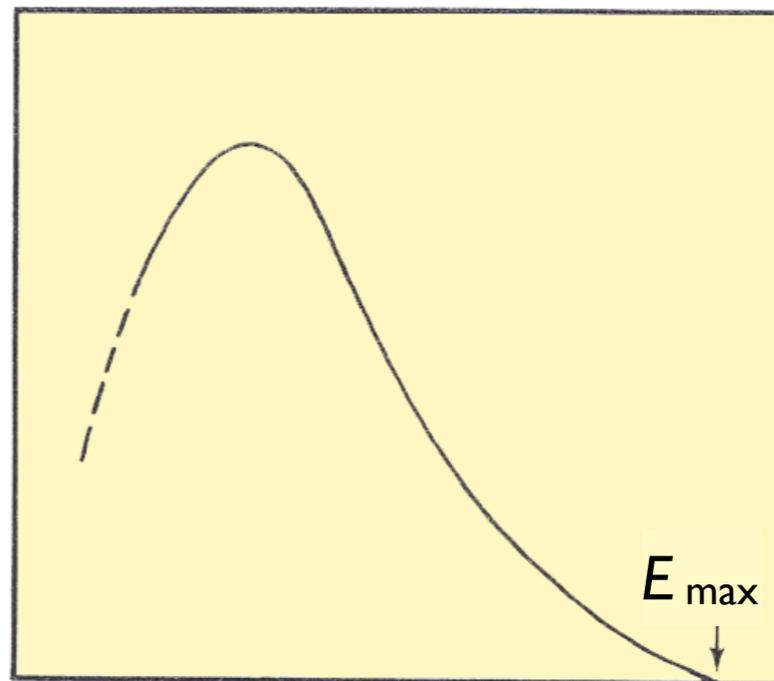


エネルギー E_γ

γ 線 (定まったエネルギー)



粒子数の分布



エネルギー E_β

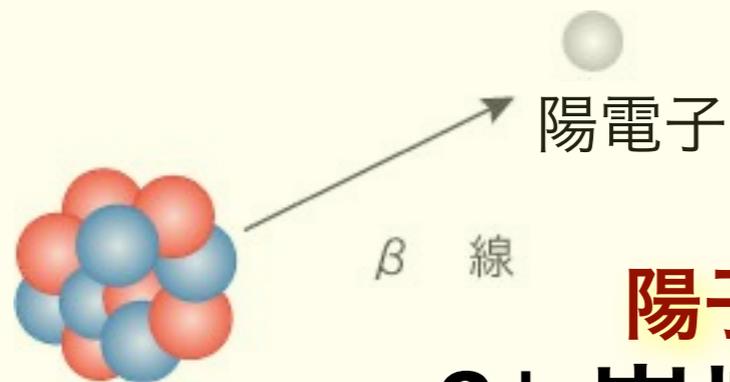
β 崩壊

β 線 (連続スペクトル)

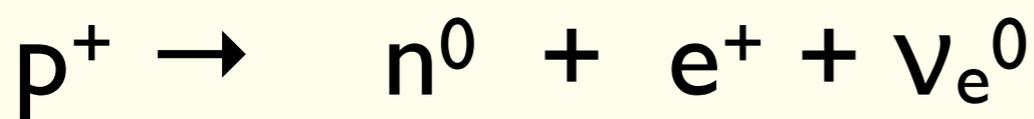


数十 keV ~ MeV

原子核 N

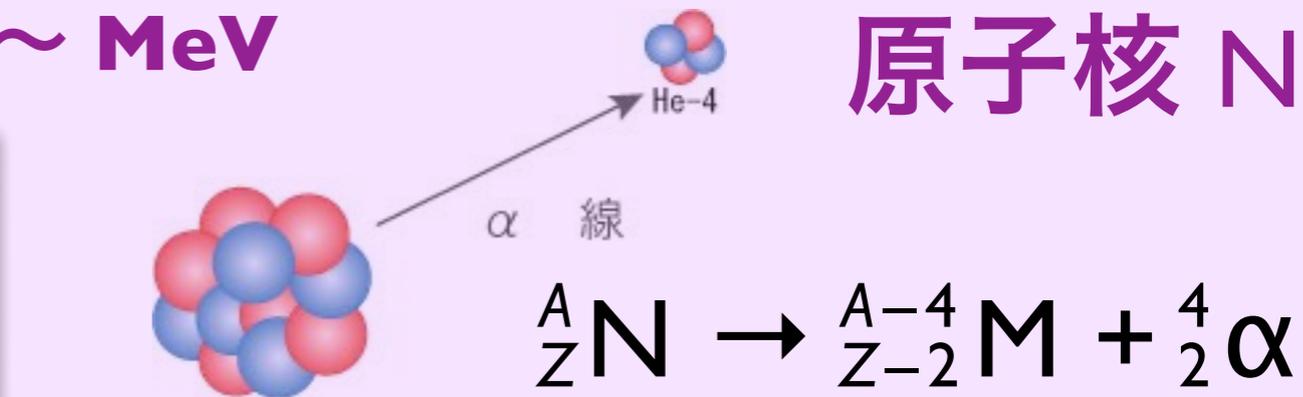
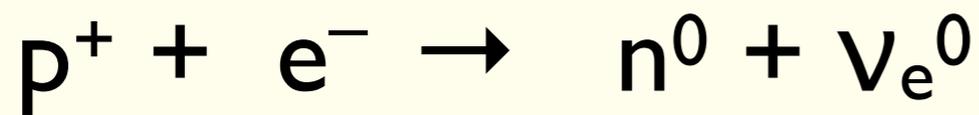
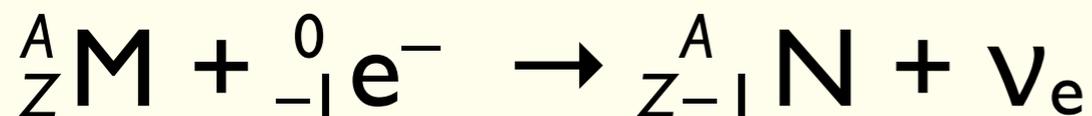


陽子過剩核
 β^+ 崩壊 (壊変)



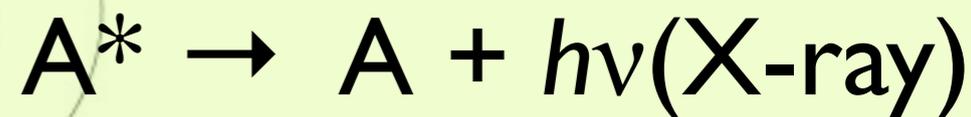
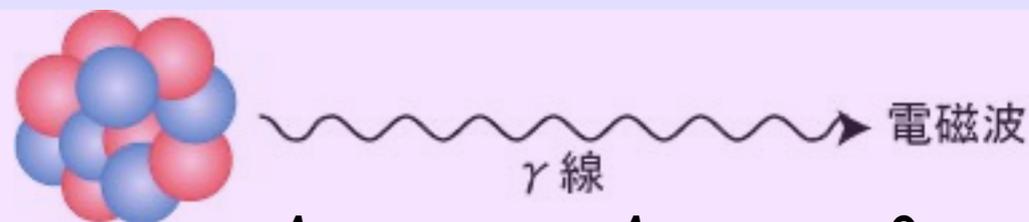
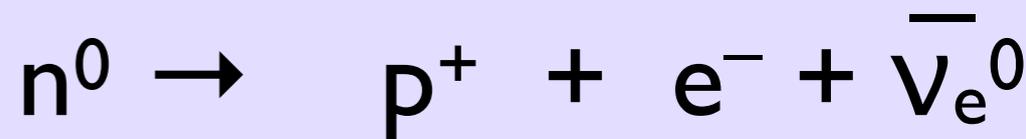
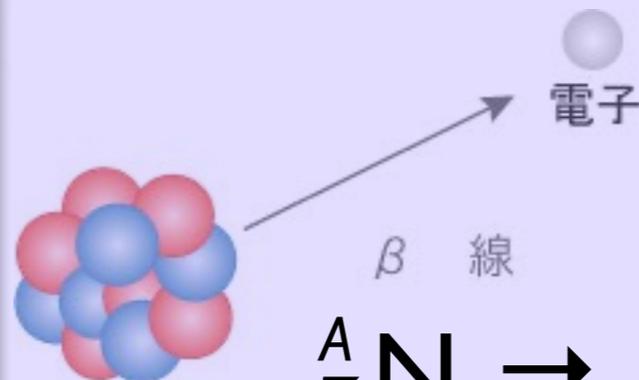
軌道電子捕獲 (EC)

Electron Capture



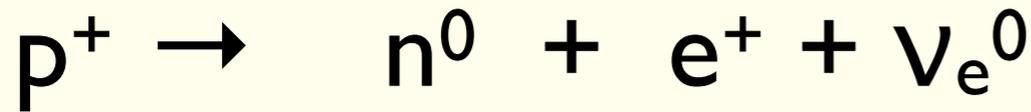
中性子過剩核

β^- 崩壊 (壊変)

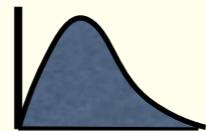


原子 A 1 ~ 100 keV

β⁺ 崩壊 (壊変)

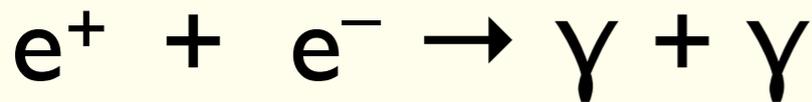


軌道電子捕獲と競合



連続スペクトル
(エネルギー分布)

陽電子消滅



511 keV 511 keV

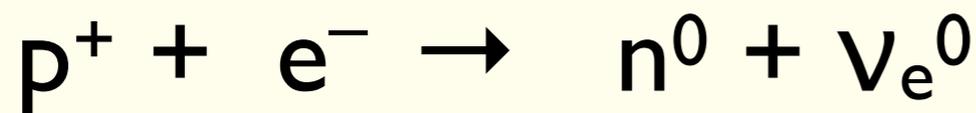
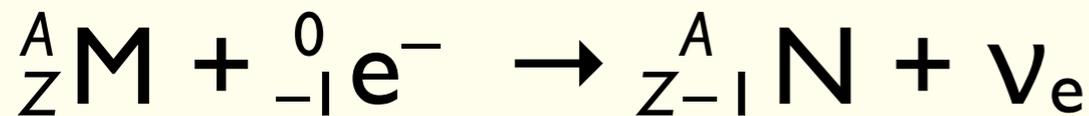


線スペクトル
(定まったエネルギー)

陽子過剰核

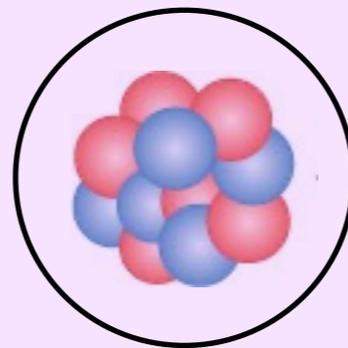
軌道電子捕獲 (EC)

Electron Capture

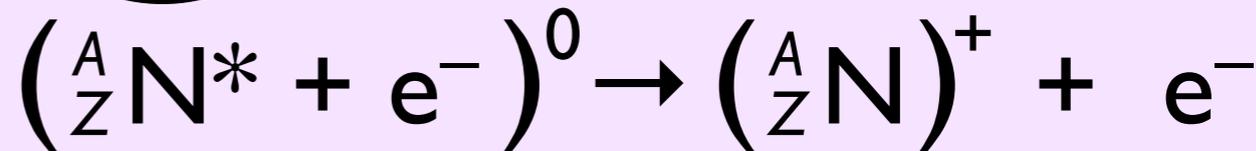


内部転換 (IC)

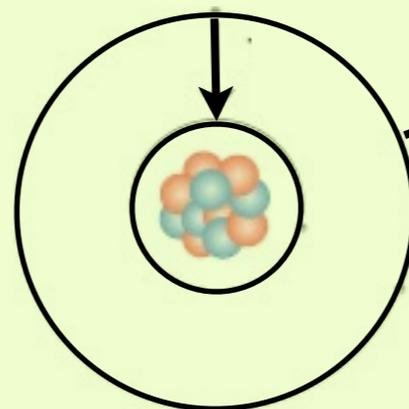
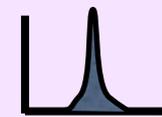
Internal Conversion



励起原子核 (核異性体)

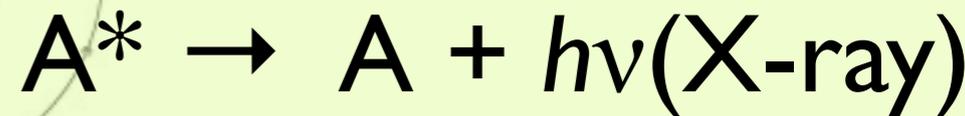
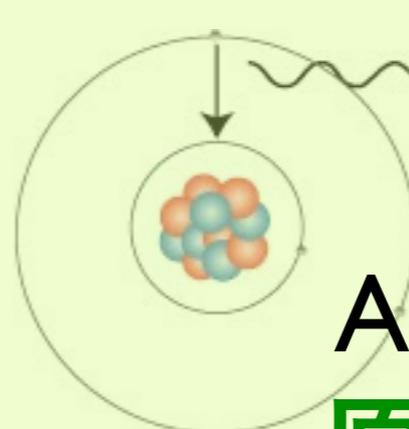


γ 壊変 (核異性体転移) と競合
重い原子核で起こりやすい。



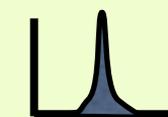
オージエ (Auger) 電子

特性X線とオージエ電子は互いに競合
軌道電子捕獲・内部転換・光電効果により
原子内殻軌道にできた空孔を埋める原子過程。



原子 A 1 ~ 100 keV

特性X線



PET (Positron Emission Tomography) 陽電子断層撮影法

組織の”はたらき”を知る

^{18}F -FDG (fluorodeoxy glucose), $^{15}\text{O}_2$, H_2^{15}O



放射線医療：診断

e^+



陽電子 positron

電子 electron



e^-

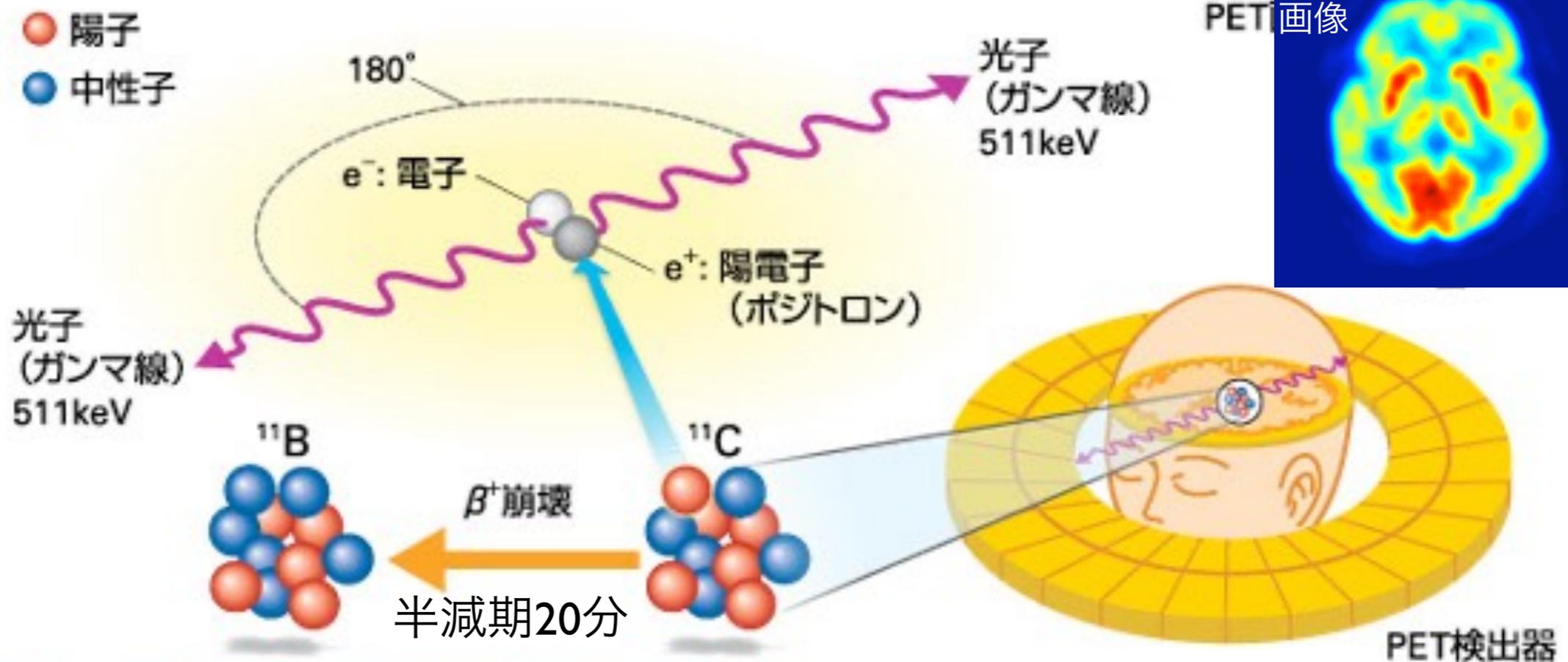
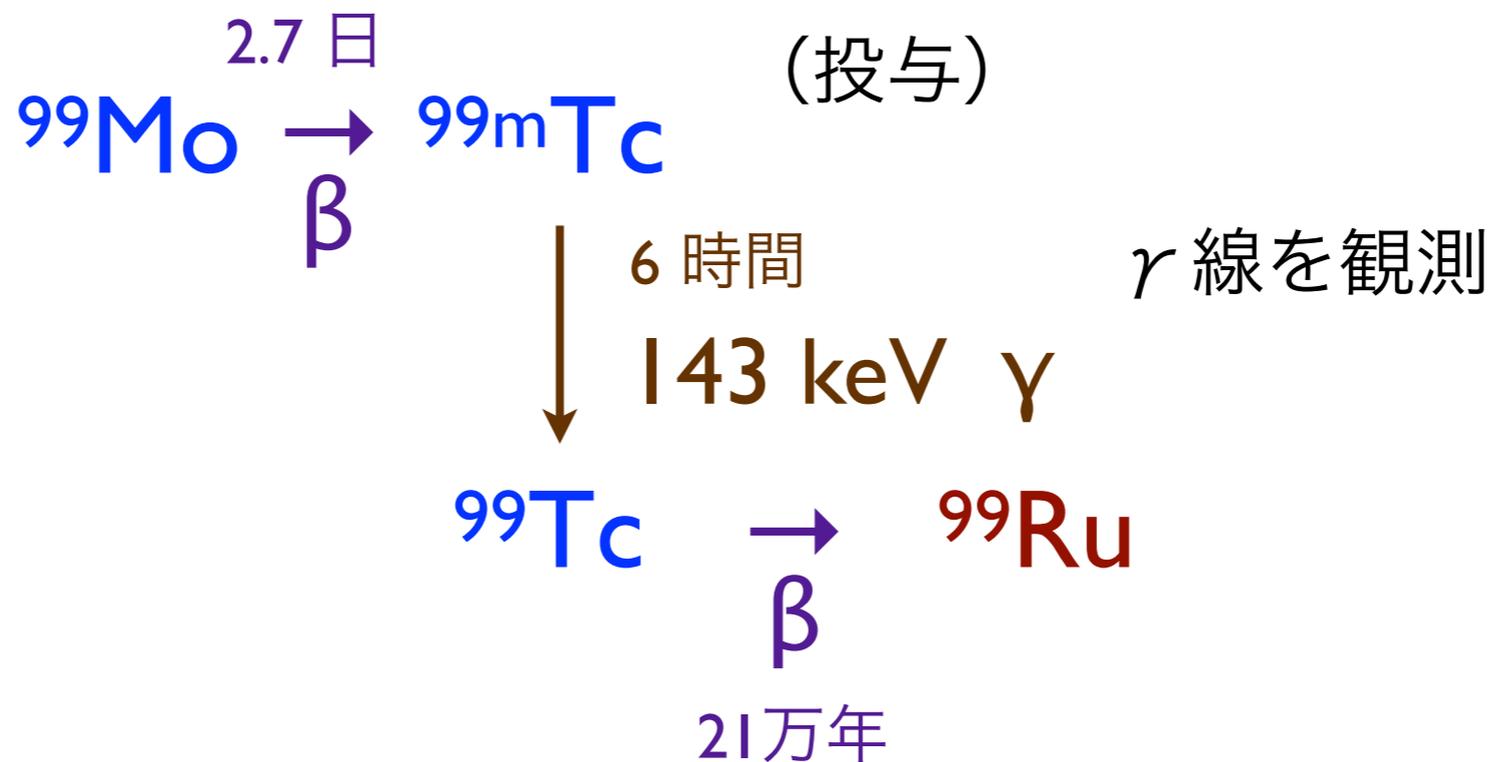


図1 PET (陽電子放射断層画像撮影法) の仕組み

調べたい分子に陽電子を放出する放射性核種を付け、静脈注射によって投与する。例えば、炭素 11 (^{11}C) はホウ素 11 (^{11}B) に崩壊するとき、陽電子を 1 個放出する。その陽電子が近くにある電子と衝突し、両方向にガンマ線が放出される。検出器がガンマ線をとらえることで断層画像が得られ、分子がどこに、どれだけ存在しているのかを知ることができる。

^{11}C , ^{13}N ,
 ^{15}O , ^{18}F

海外の研究用原子炉
で生成・空輸



安定同位体が存在しない元素

幻のニッポニウム (小川正孝)
テクネチウム ${}_{43}\text{Tc}$
プロメチウム ${}_{61}\text{Pm}$

ビスマス ${}_{83}\text{Bi}$ 以上の原子番号の元素

安定同位体が1つだけの元素



${}_{55}^{133}\text{Cs}$ ${}_{79}^{197}\text{Au}$ など 26元素

安定同位体が多数

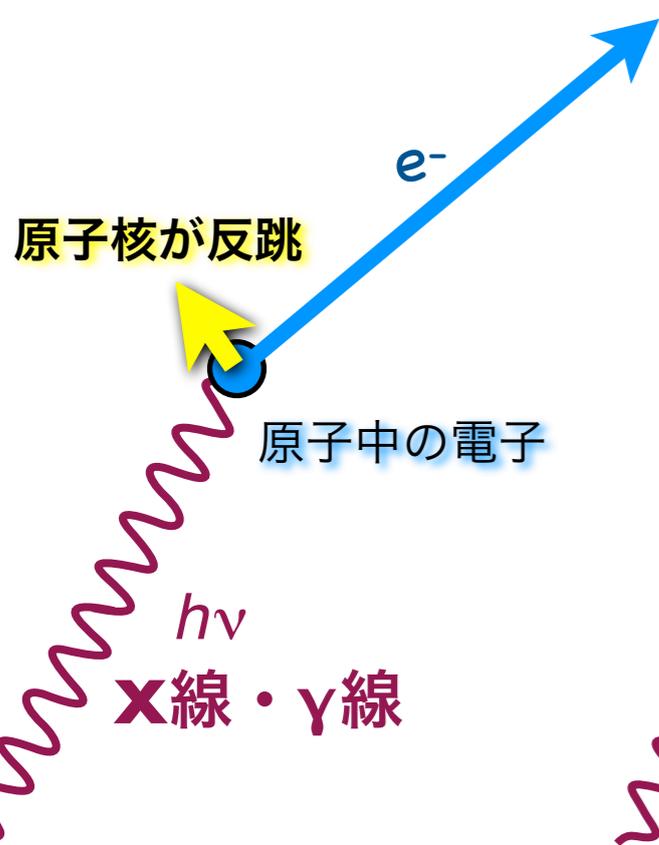
112, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 122, 124 ${}_{50}\text{Sn}$

放射線と物質との相互作用

制動放射

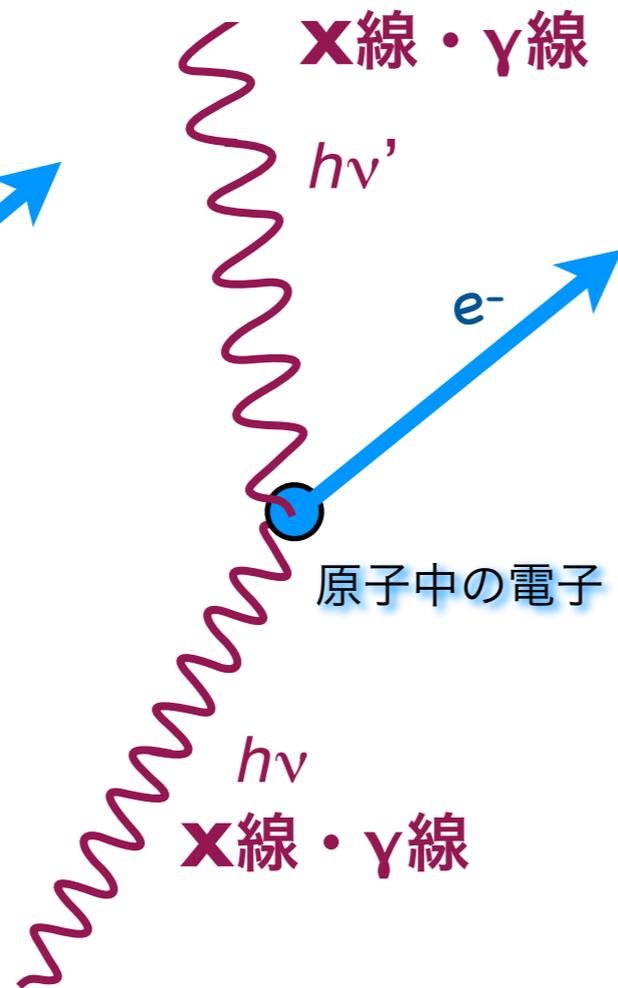
光子 (X線・γ線) の関わる相互作用

光電効果



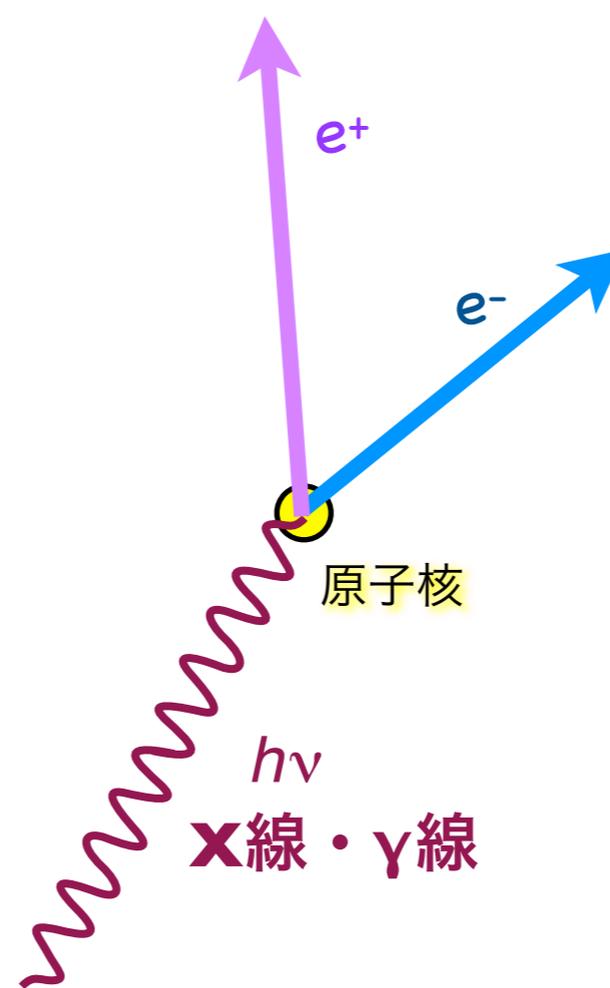
光子が原子中の電子1個をたたき出す。光子は消滅。

コンプトン散乱



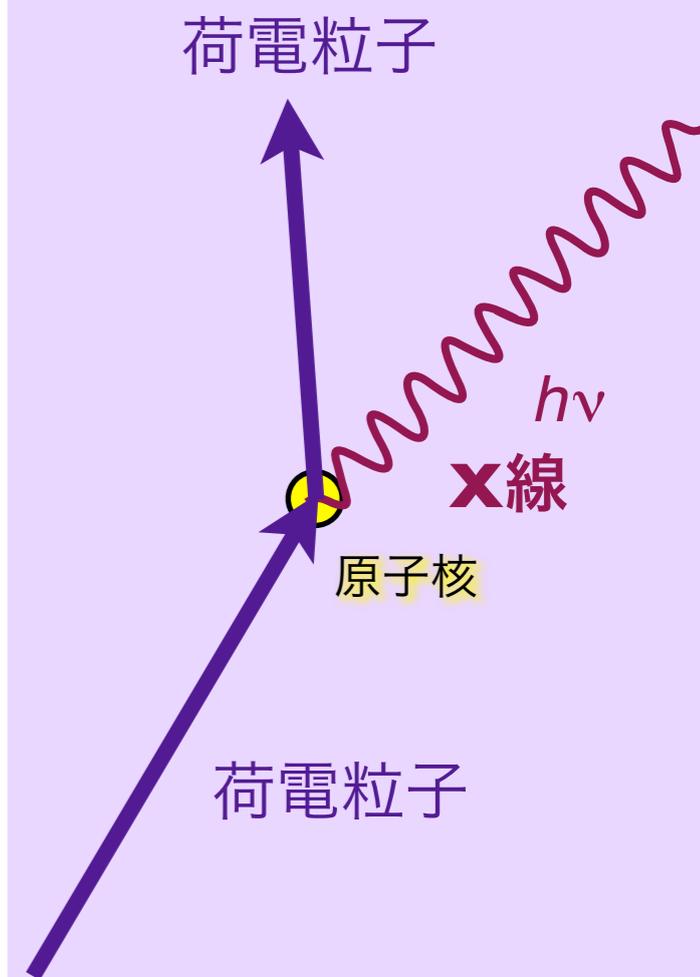
光子が電子1個に散乱され、光子は大きくエネルギーを減じる。

電子対生成



MeV以上の光子が電子・陽電子の対を生成する。

制動放射

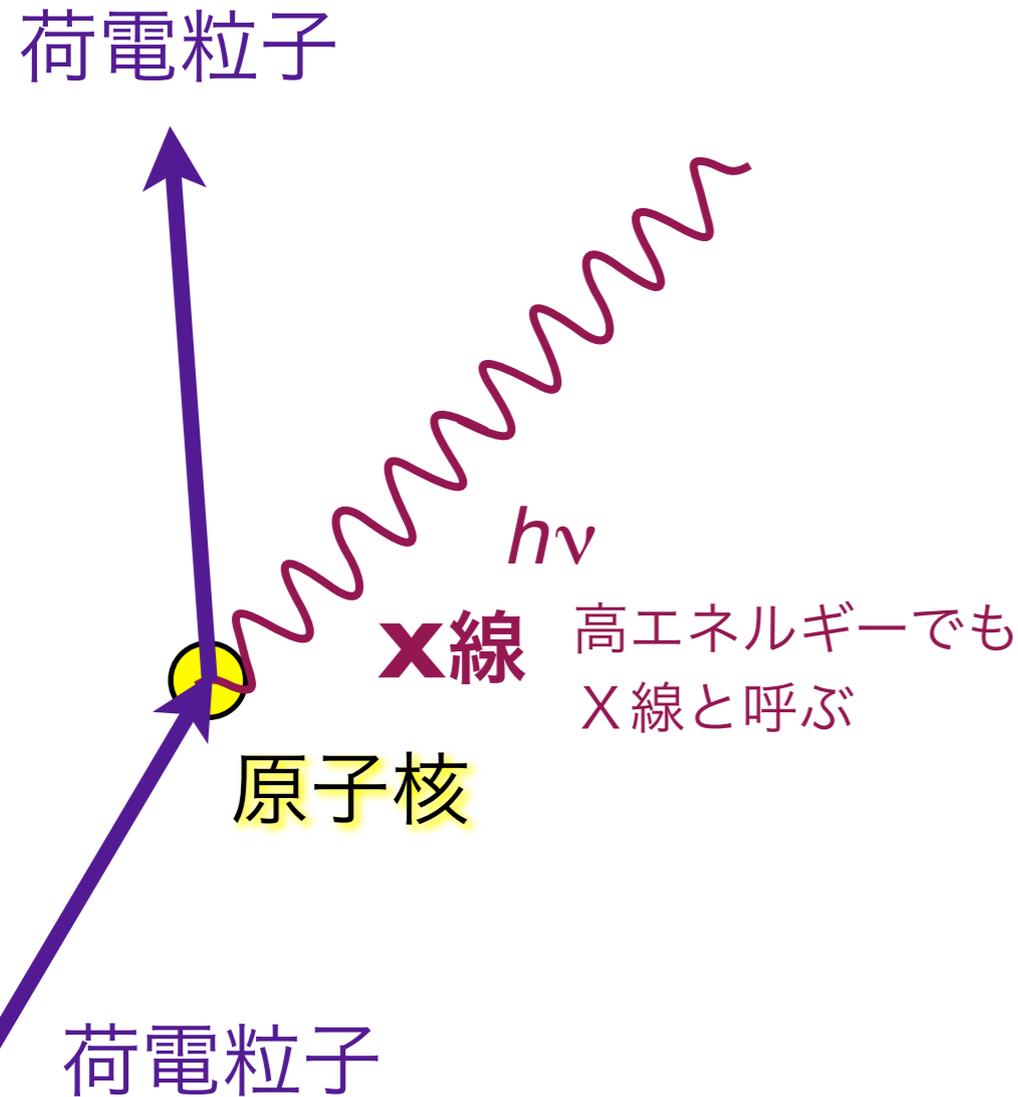


荷電粒子が制止したり軌道を曲げられたりするとき光子を放出する。

高エネルギーの電子線 (β線と同じ) が発生

制動放射

(Bremsstrahlung)



X線

制動放射

荷電粒子が加速度を受けて
光子 (X線, γ 線) を放出

$$\Delta E \propto Z^2$$

制動放射：放射阻止能 S_{rad}

$$\frac{S_{\text{rad}}}{S_{\text{col}}} = \frac{(E + m_e c^2) Z}{1600 m_e c^2}$$

衝突阻止能 S_{col} との比

電子 (β 線)

Pb (鉛; $Z = 82$)

$$\frac{S_{\text{rad}}}{S_{\text{col}}} \approx \frac{E Z}{800 \text{ MeV}} \approx \frac{E / \text{MeV}}{10}$$

β 線 (電子線) を鉛で止めてはいけない

陽子・ α 線

S_{col}

制動放射は無視できる。電子衝突阻止能が
支配的。(ただし、GeV を超える場合は別。)

放射線化学

単位長あたりの電離（電子・イオン対）数 = **比電離**

阻止能 ÷ 比電離 = W 値

W 値：1つの電離を生じるに要する平均エネルギー。

荷電粒子の種類やエネルギーによらない。

イオン化エネルギーより大きな値となる（励起による損失があるため）

物質によらず **W ≈ 30 eV** 程度。

放射線化学

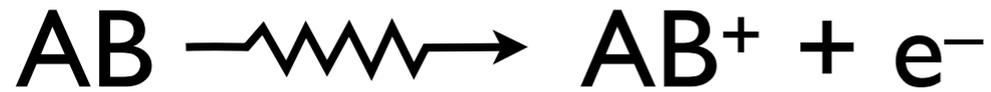
G 値（放射線化学収率）：

放射線のエネルギーを物質が吸収することで 100 eV あたりに
変化または生成する原子・分子・イオンの数。

通常はたかだか 10 だが、連鎖反応では巨大になることも。

放射線が誘起する素反応

(一部抜粋)



電離 (イオン化)



励起

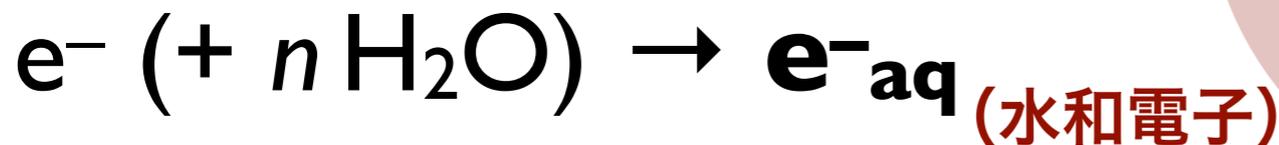
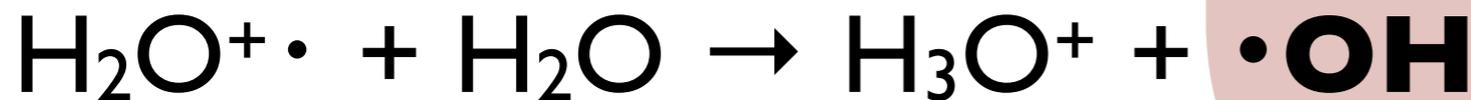
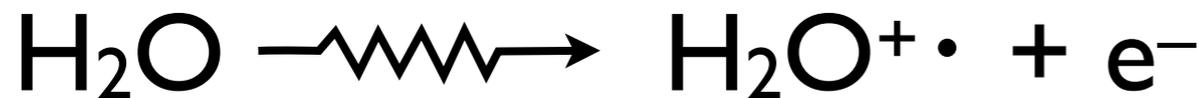


再結合



ラジカル生成

水中での反応



酸素効果



(ヒドロペルオキシラジカル)



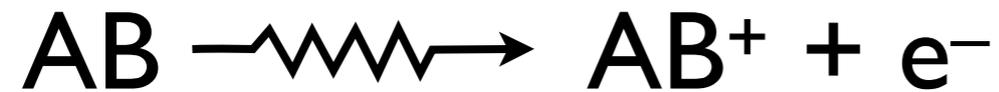
(スーパーオキシドアニオン)



(過酸化水素)

(活性酸素)

放射線が誘起する素反応



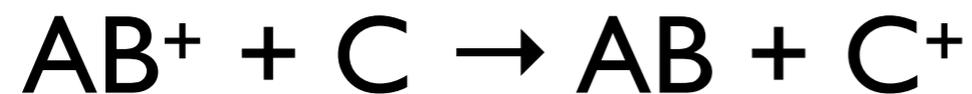
電離（イオン化）



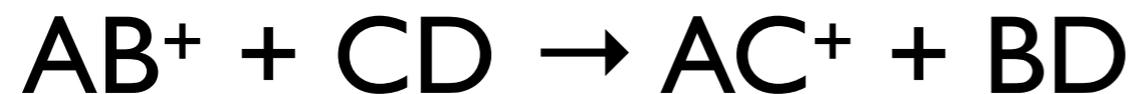
励起



再結合



電荷移動



イオン分子反応



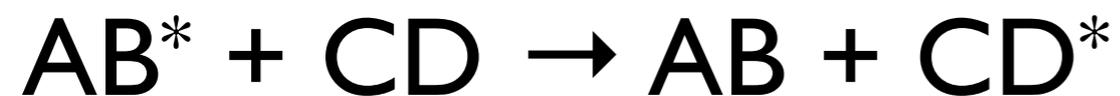
電子捕捉



ラジカル生成



脱励起・蛍光放出



励起移動

水中での反応

γ線照射による
放射線化学収率
(G値)

100 eV あたりに変化・生成する
原子・分子・イオンの数。

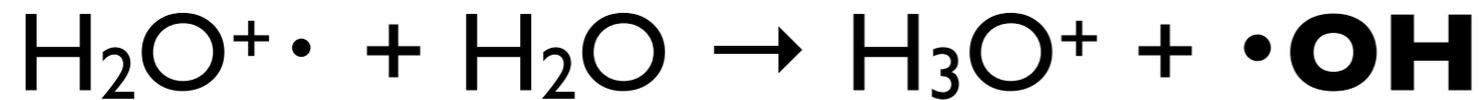


電離 (イオン化)

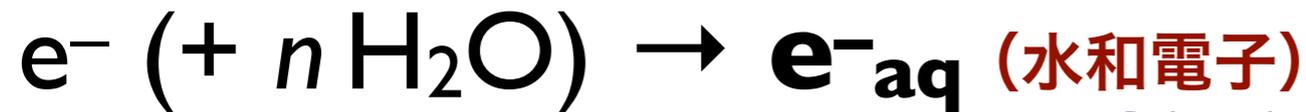


励起

$G(\cdot\text{OH}) = 2.7$
(ヒドロキシルラジカル)



イオン分子反応

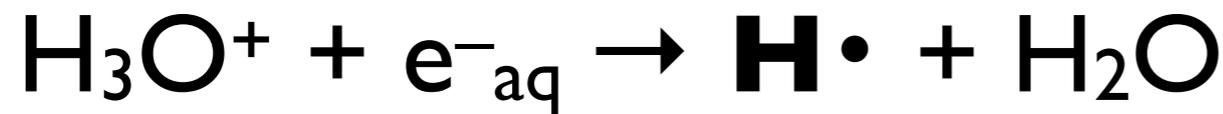


水和電子生成

$G(\text{e}^-_{\text{aq}}) = 2.65$



解離 (ラジカル生成)



電子捕捉

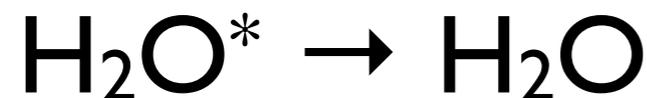
(水素ラジカル) $G(\text{H}\cdot) = 0.55$



再結合



電子捕捉



脱励起



分子生成



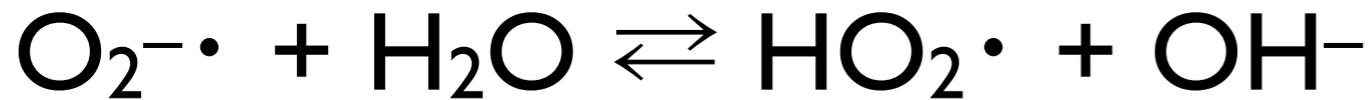
分子生成



分子生成

酸素効果

(活性酸素)



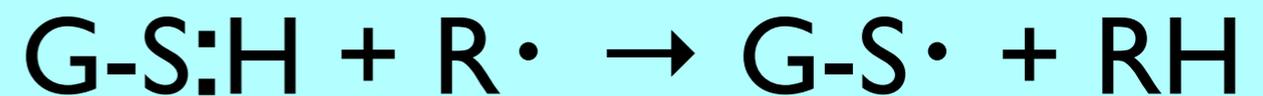
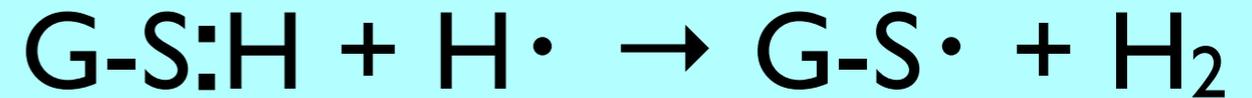
放射線防護剤

(ラジカルスカベンジャー)

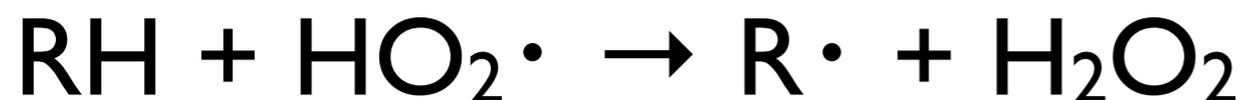
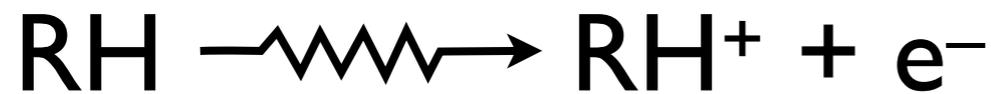
SH基, S-S 結合

例: システイン、システアミン

(グスタチオン)

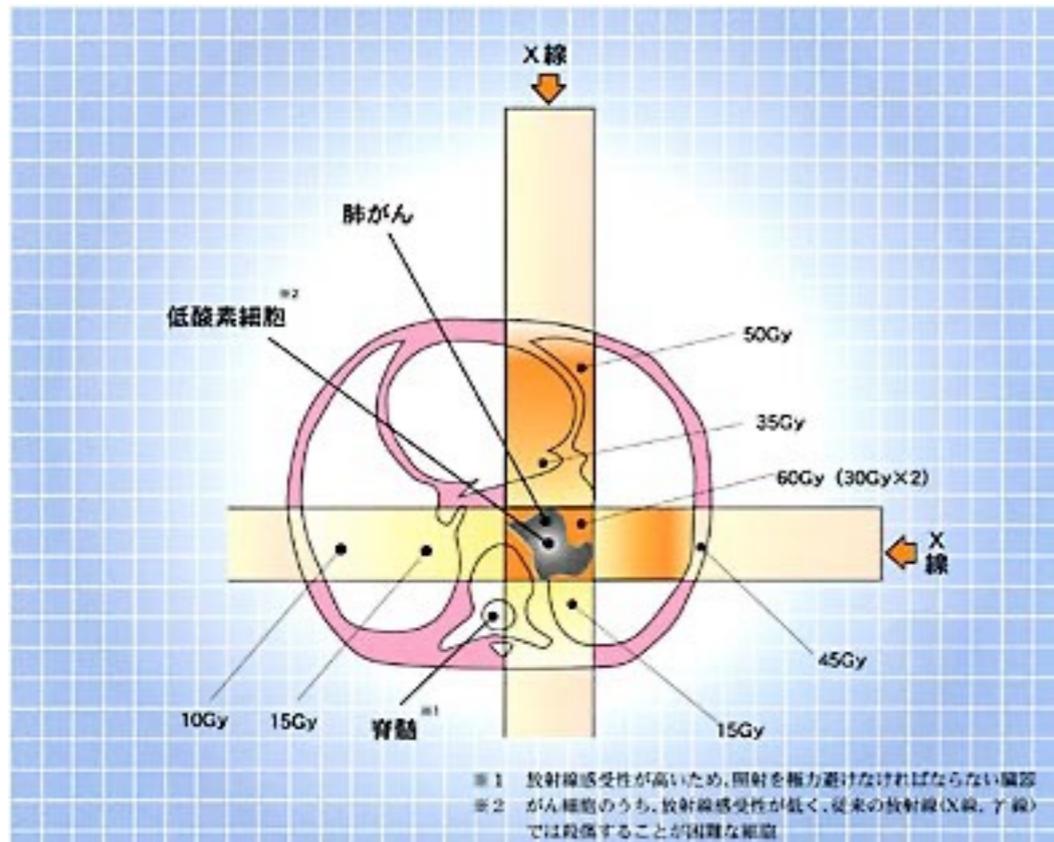


有機物の放射線化学反応



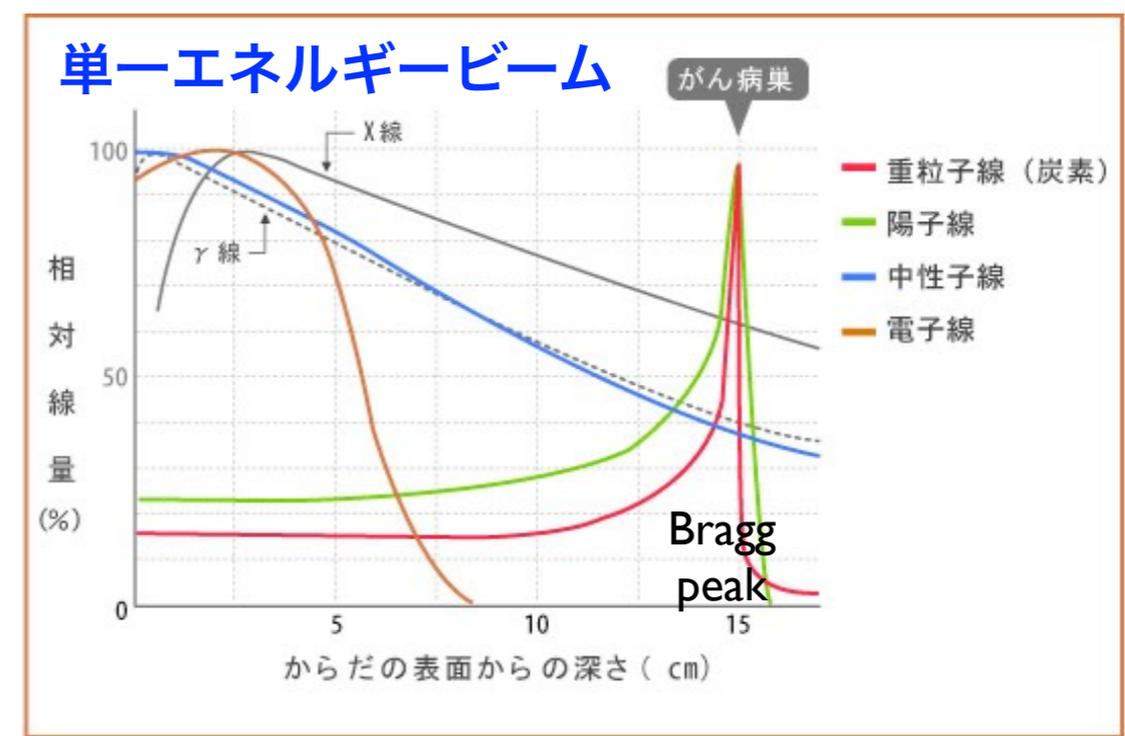
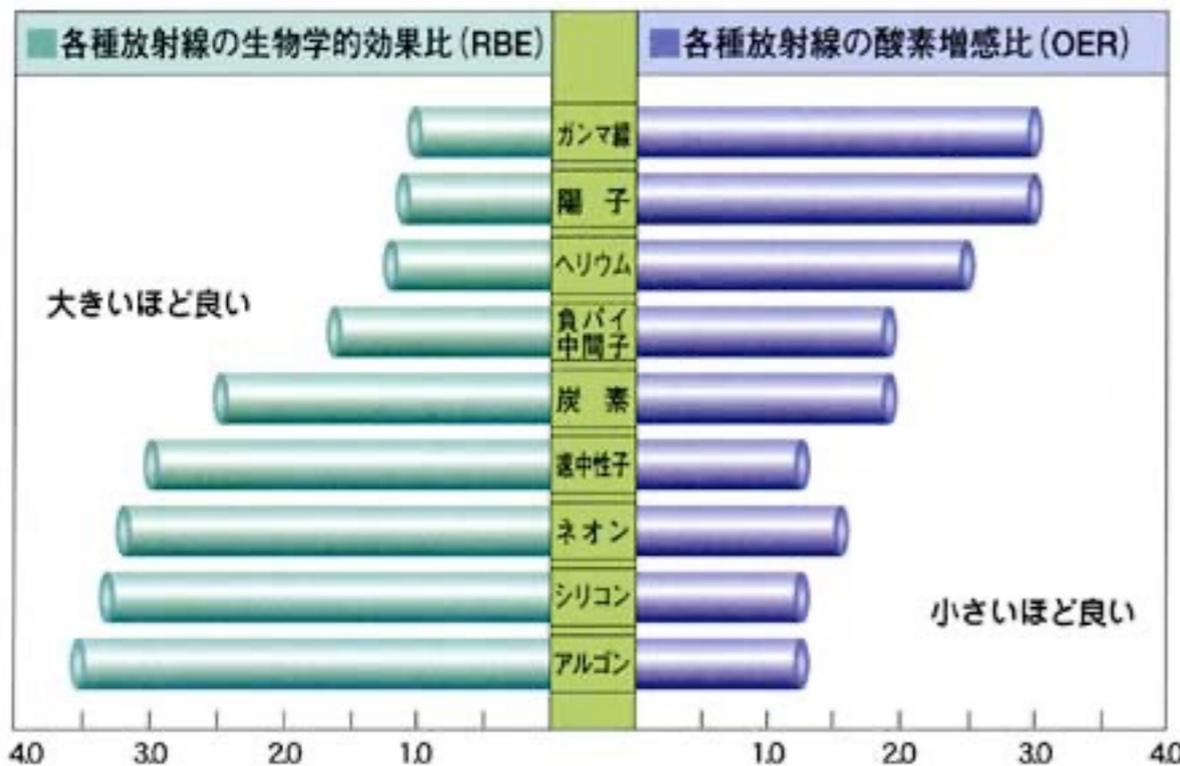
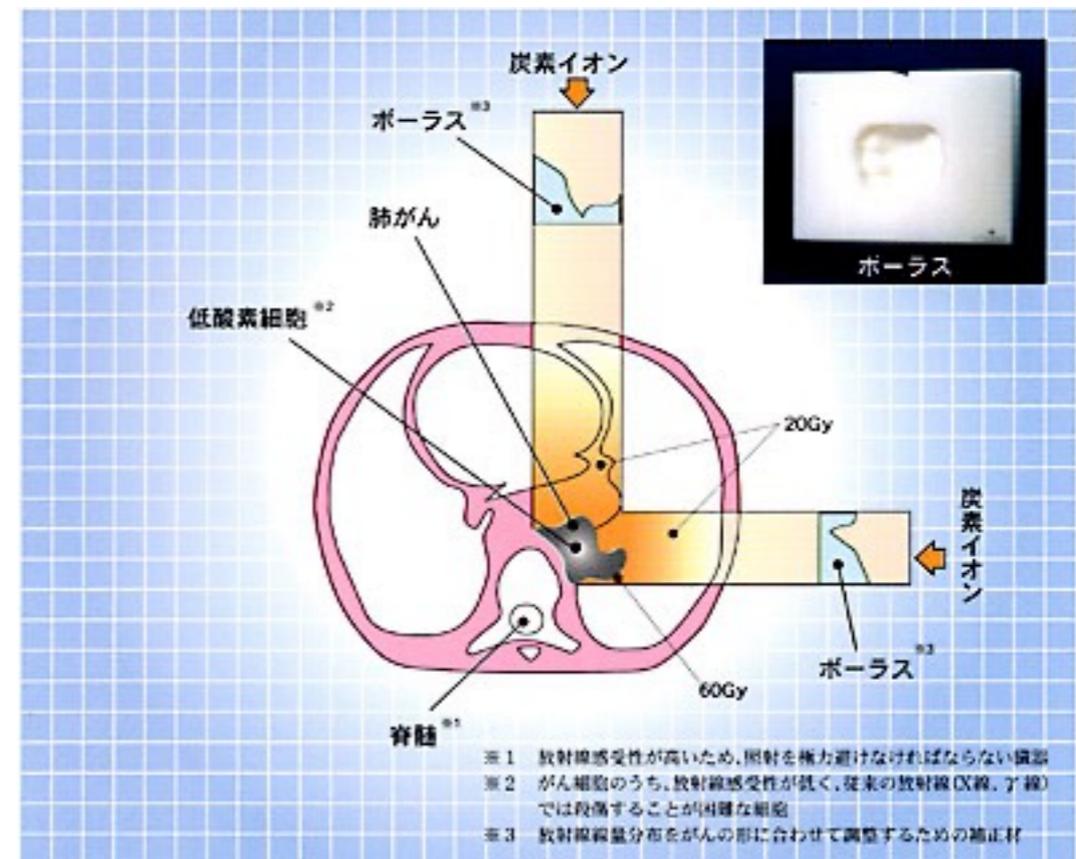
放射線 がん治療

X線



数 Gy を複数回

重粒子線 (炭素イオン)



電子線・ガンマ線照射によるグラフト重合

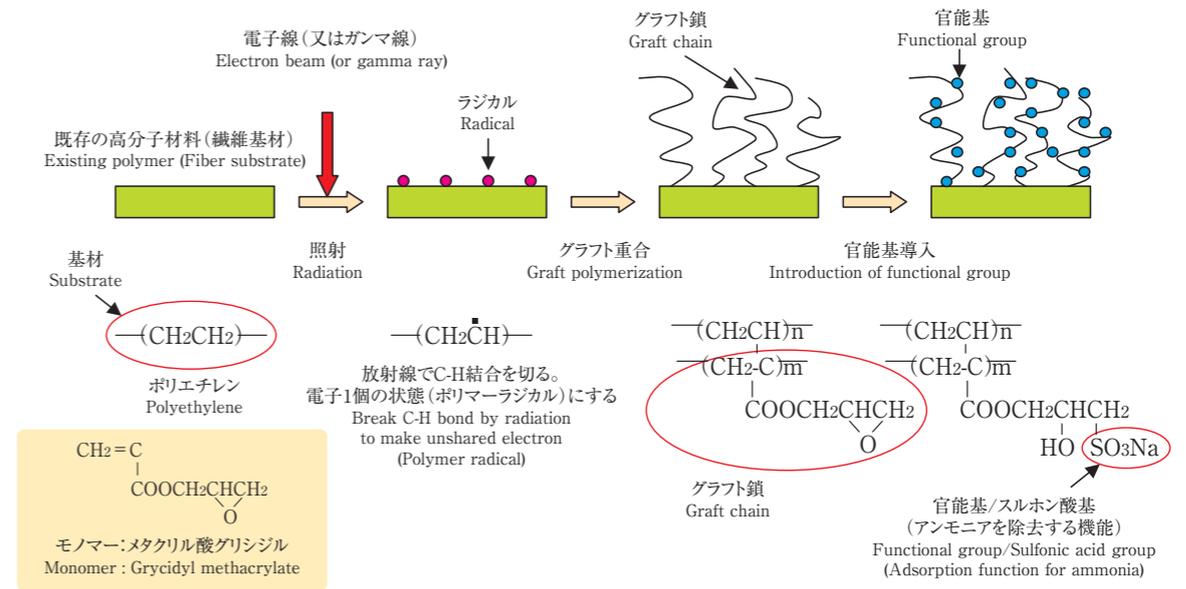
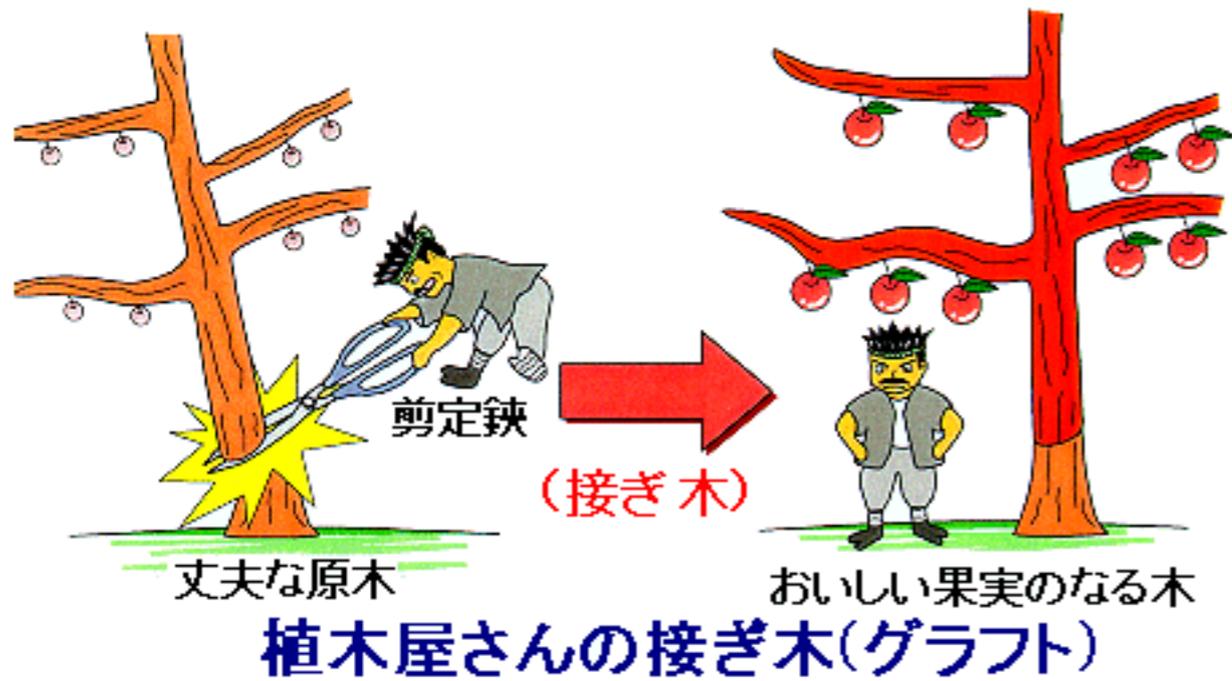


図1 放射線グラフト重合法によるイオン交換体の合成方法
Fig. 1 Reaction scheme of ion exchange material by radiation induced graft polymerization

エバラ時報 No. 216 (2007-7) 藤原邦夫氏論文より引用

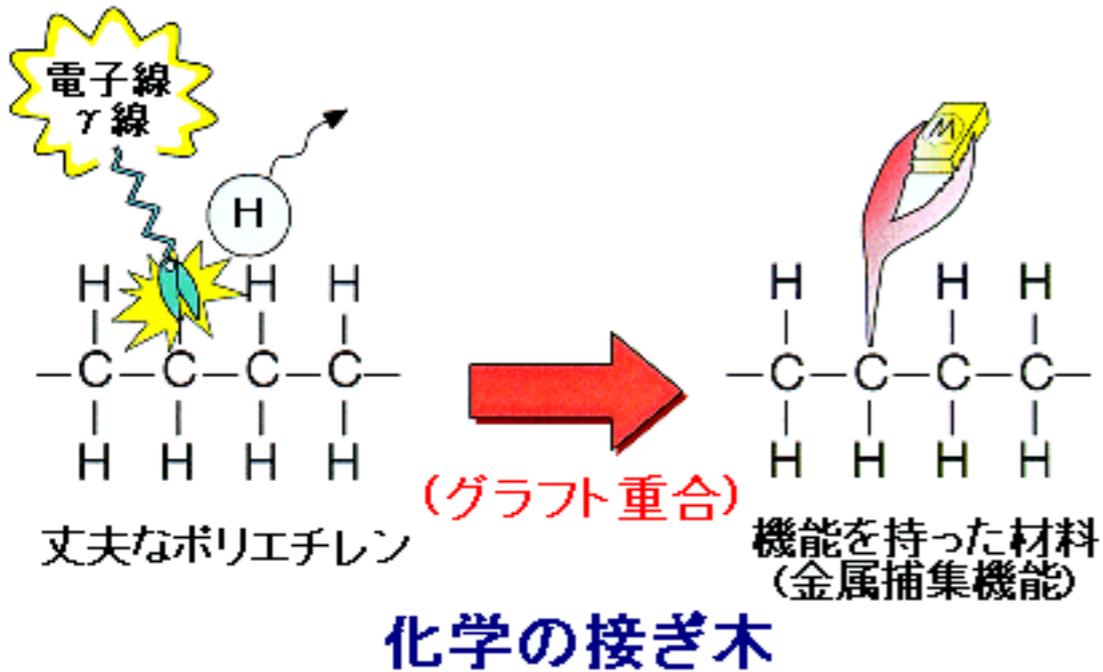


図1 接ぎ木の技術とグラフト重合

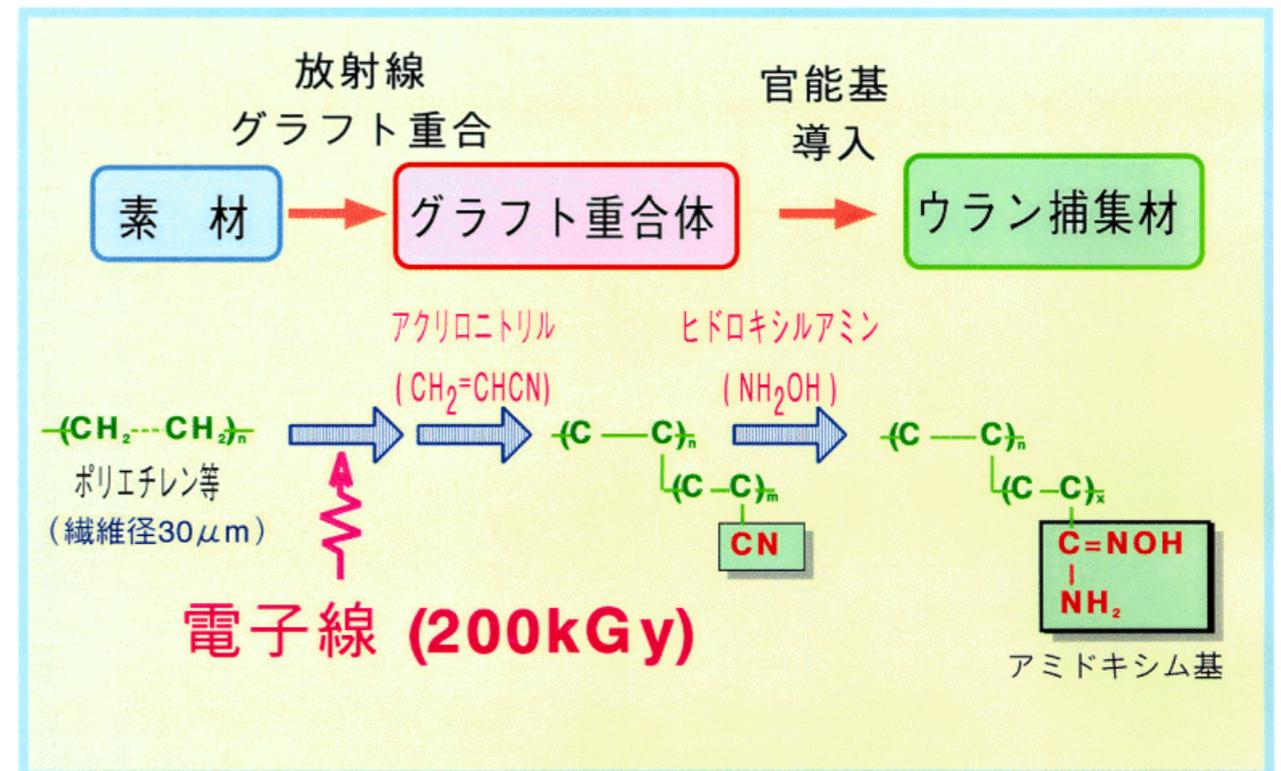
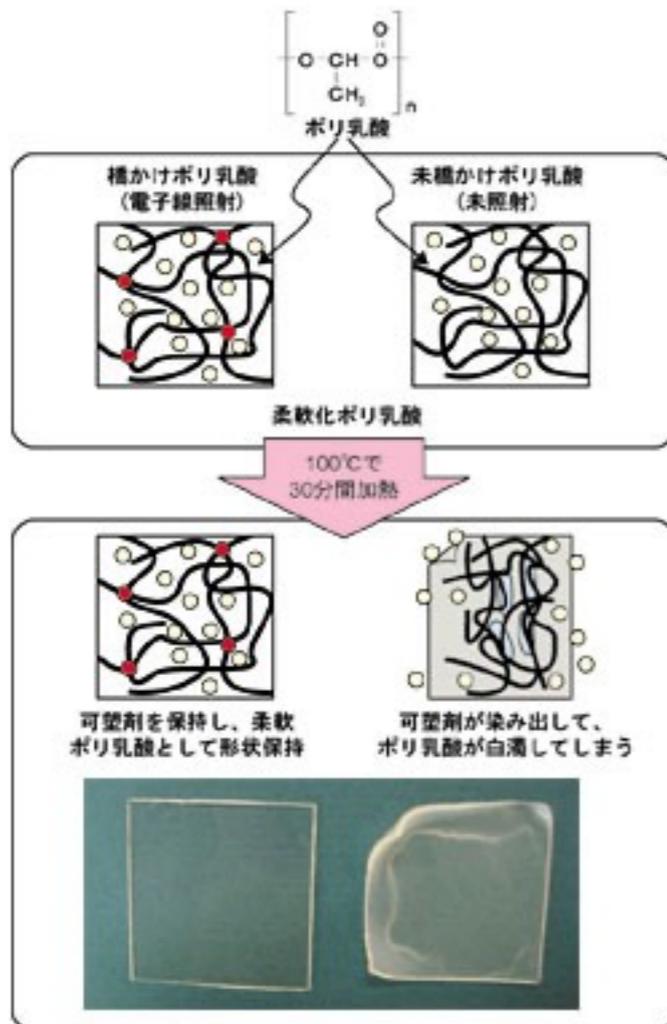


図2 放射線グラフト重合によるウラン捕集材の合成法

[出典]片貝 秋雄、瀬古 典明、川上 尚志、斉藤 恭一、須郷 高信、原子力学会誌 40(11)、879(1998)

放射線橋かけ反応

セルロースゲルの製法と性質

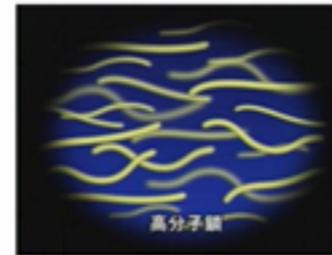


▲放射線橋かけ軟質ポリ乳酸の耐熱性

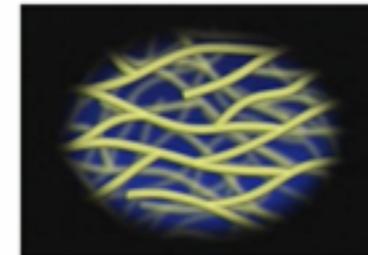


電子線、γ線照射

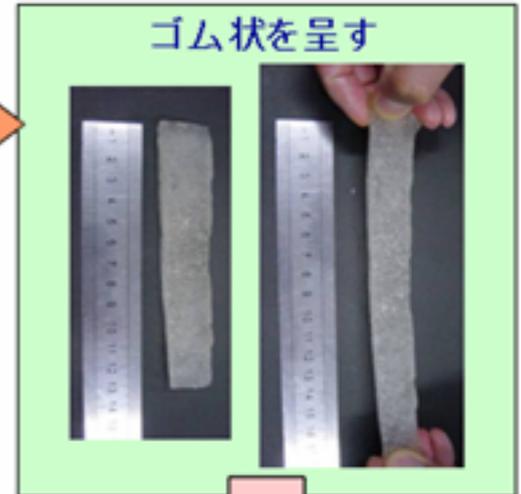
照射前



橋かけ(分子鎖の結合)



ゴム状を呈す



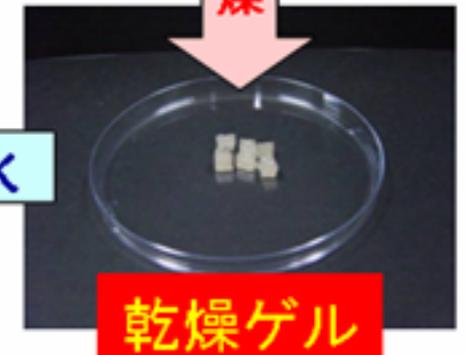
乾燥

吸水



模擬牛糞尿 (1%KCl+1.5%Na₂HPO₄)

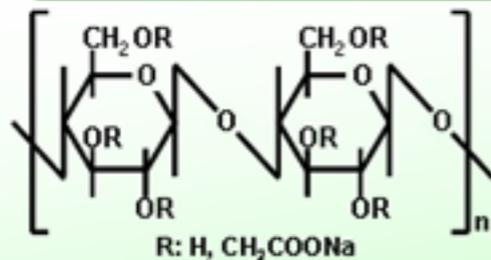
7日間形状保持



ゲルの特長

- 資源循環型
 - ・ 天然由来の材料
 - ・ 土壤中での分解
- 乾燥ゲル1gの吸水量(g)
 - ・ 純水 : 360
 - ・ 人工尿 : 94
 - ・ 模擬牛糞尿 : 79

カルボキシメチルセルロース(CMC)の特徴



- CMCは天然セルロースを原料として得られる水溶性高分子です。
- CMSは人体に無害で、緩やかな生分解性を有す、環境にやさしい素材です。
- CMCは食品、医薬品、化粧品から、繊維産業、窯業、建設業などの分野まで幅広く利用されています。

工業分野での利用

○ラジアルタイヤ、耐熱電線

ラジアルタイヤは、有機繊維で補強されたゴムで高圧に耐えられる構造になっています。成形器で熱と圧力を加えてタイヤの形にしますが、この時、繊維補強ゴムは大きな変形を受け、補強繊維のずれやはみ出しがおきやすくなります。これを防ぐため、繊維補強ゴムに電子線を照射して強度を上げます。(市場規模:平成15年度1兆円)

また、電線の被覆に使われているゴムやプラスチックはそのまま熱を加えると溶けて流れ落ちます。電子線を照射すると熱を加えても溶けにくくなります。

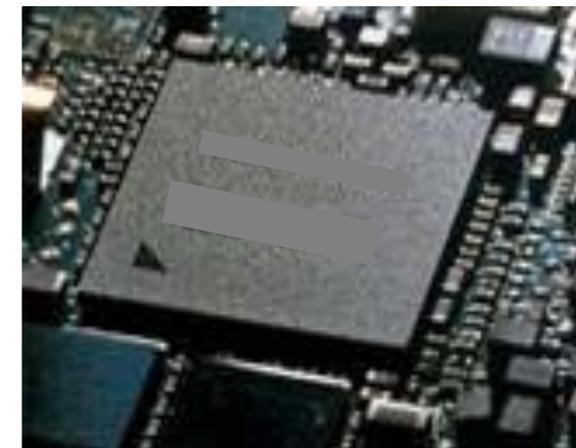


ラジアルタイヤ、耐熱電線

○半導体

IC(集積回路)の回路のパターンの線は髪の毛の太さの50~100分の1であり、その細工をするためにリソグラフィといった技術が使われる。リソグラフィは版画の技術のようなもので、半導体表面に光や放射線を当てると化学変化する感光剤を塗り、加工したい形状に切り抜いた板(マスク)をのせて放射線を当てて、マスクの型どおりに加工するもの。イオンビームや中性子ビームを利用した不純物導入等も行っています。

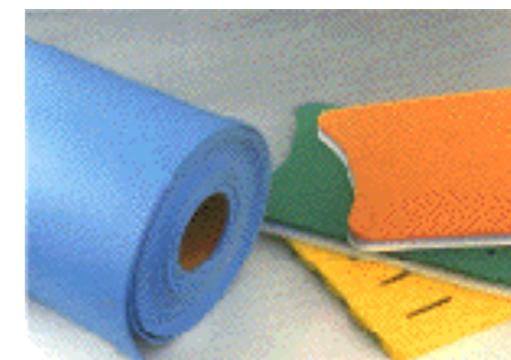
(市場規模:平成15年度6.3兆円)



半導体

○発泡材料(緩衝材料、断熱材料)

お風呂場で使うバスマット、あるいはプールで使うビート板に使用されている発泡ポリエチレンをご存じですか。あの防水性、浮力が高く、ほどよく硬い素材は、ポリエチレンに放射線を照射し、加熱することで内部に細かい気泡をつくりだしたもので、これもいまから20年以上も前に開発された素材です。



発泡ポリエチレン

講義スライド、講義予定

ITC-LMS を参照。または、講義 web page

<http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lecture/>

東大教養 放射線 講義



検索

連絡先

torii-radio@radphys4.c.u-tokyo.ac.jp

担当教員：鳥居 寛之

Fine. Per oggi è tutto.

Fini pour aujourd'hui

That's all for today.

Всё за сегодня.

오늘은 이만 마치겠습니다.

今天就学到这儿了。

Ci vediamo la prossima volta.

On se voit la prochaine fois.

See you next time.

Увидимся в следующий раз.

또 만납시다.

下次见。

Fine.

Grazie per la vostra attenzione.

Gratias ago pro audientia vestra.

Спасибо за внимание.

Dankon pro via atento.

Merci de votre attention.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

Thank you for your attention.

경청해 주셔서 감사합니다.

感謝您的聆聽。

谢谢您的关注。

ご清聴ありがとうございました。

鳥居 寛之

Hiroyuki A. TORII