

放射線と物質の 相互作用

OHO2023 (2023/9/5)

山崎寛仁

放射線を理解するための基礎知識

放射線とは何か？

- 高エネルギー電磁波（一部の紫外線，X線， γ 線）
速い粒子（電子（ β 線），中性子，原子核（ α 線）など）
- 法律では「電磁波又は粒子線のうち，**直接又は間接に空気を電離する能力を持つもの**（原子力基本法）」

- 物質を透過する
- 透過すると電気を帯びる
- 物質を励起する
- 光を出す（蛍光）
- 写真を感光する
- 化学反応を起こす

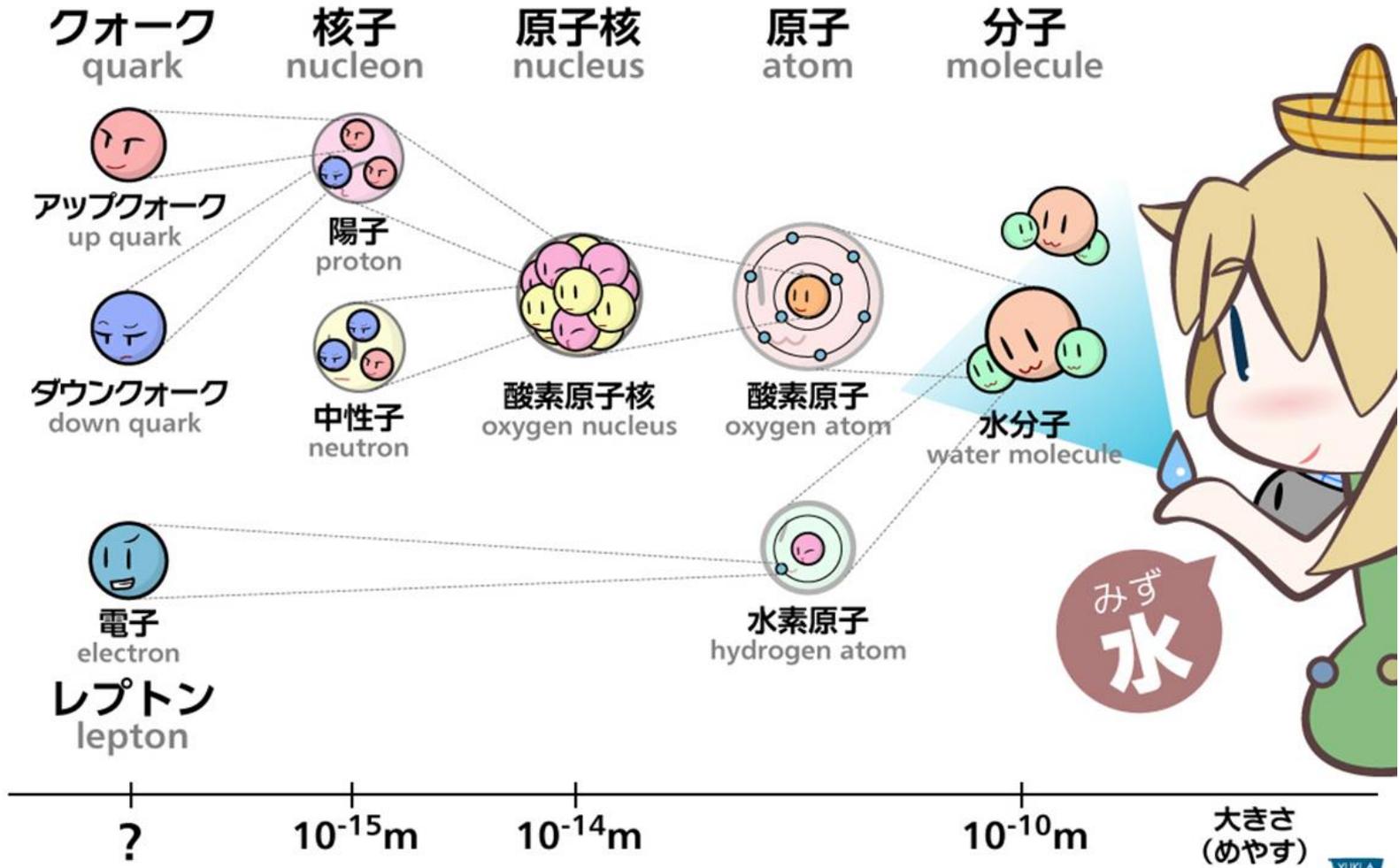


- **物質の構造を知る必要**

物質の構造と大きさ

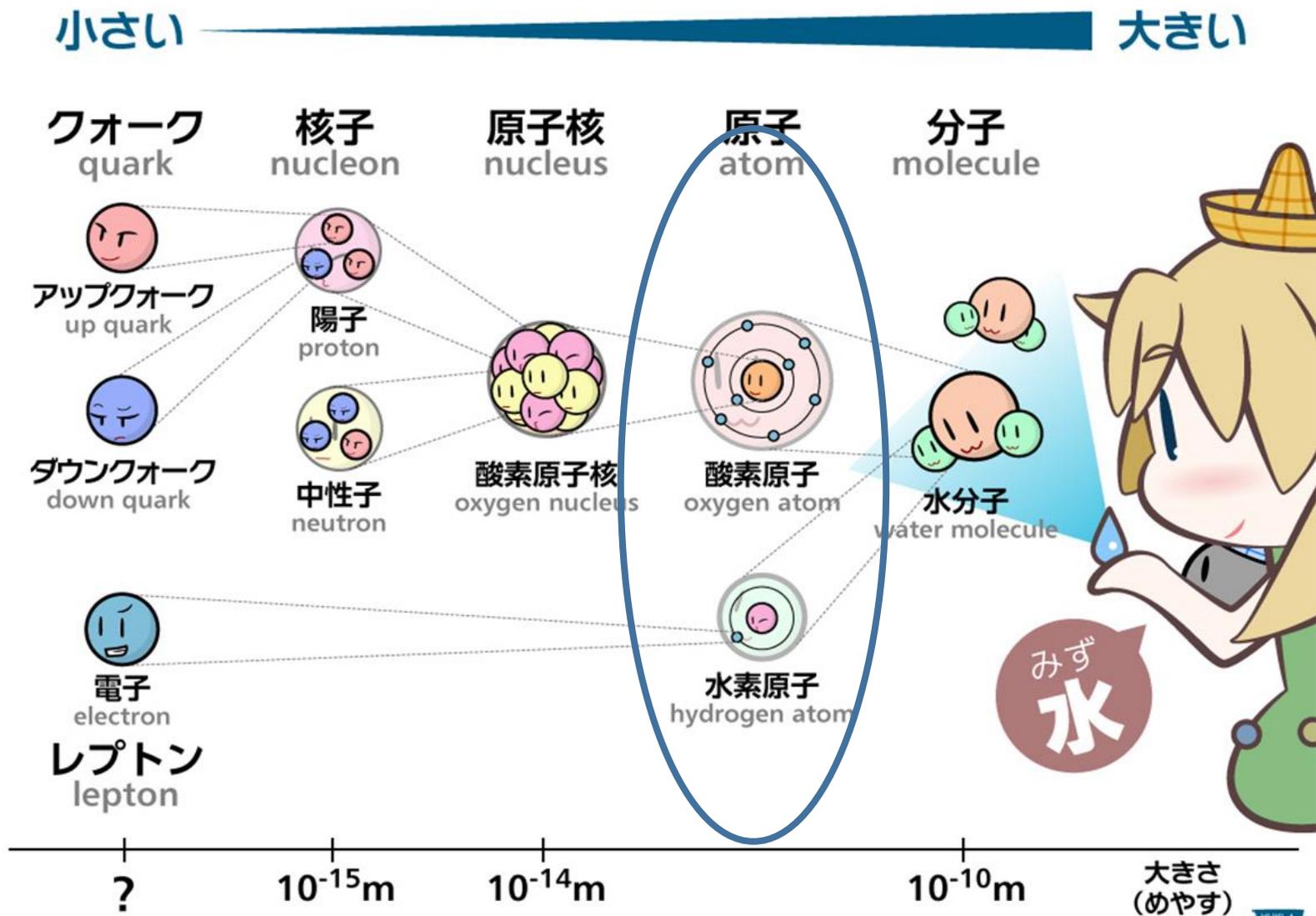
小さい

大きい

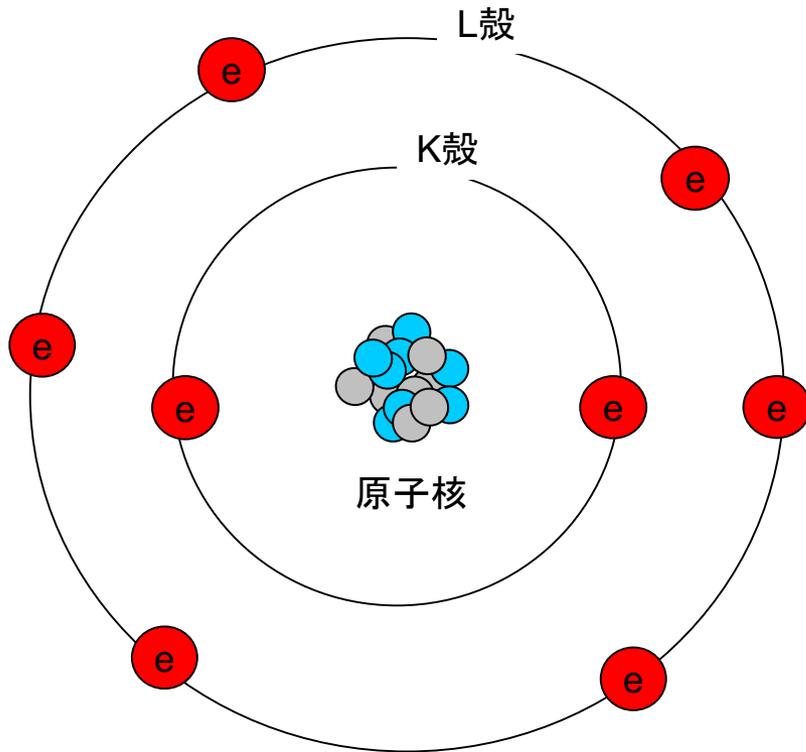


YUKI A.

原子・含まれる電子数



原子の構造



酸素原子の構造の模式図

- 原子の中心には**原子核**、その周りを**軌道電子**が周回
- 原子核はプラスの電荷、軌道電子はマイナスの電荷
- 原子は電荷を持たないので、原子核のプラスと軌道電子のマイナスの電荷は同じ
- 軌道電子は内側から順にK殻、L殻、M殻、N殻、O殻、P殻という軌道に入る
- 軌道電子はそれぞれの束縛エネルギーで原子に束縛されている
- 原子のエネルギー状態は軌道電子の配置のみで決まる

鉛原子内の電子の束縛エネルギー

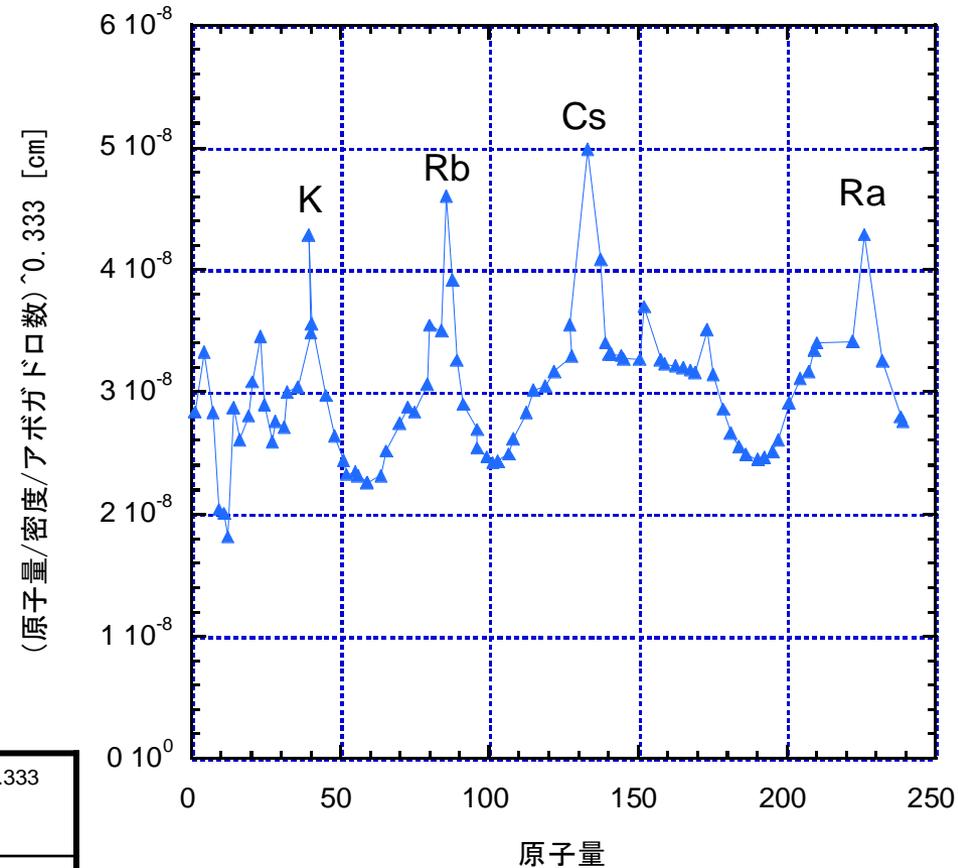
殻の名称	K	L	M	N	O	P
束縛エネルギー (keV)	88	14	3	<1	<1	<1

元素の性質は、電子数（原子核中の陽子数）で決定

原子の大きさ

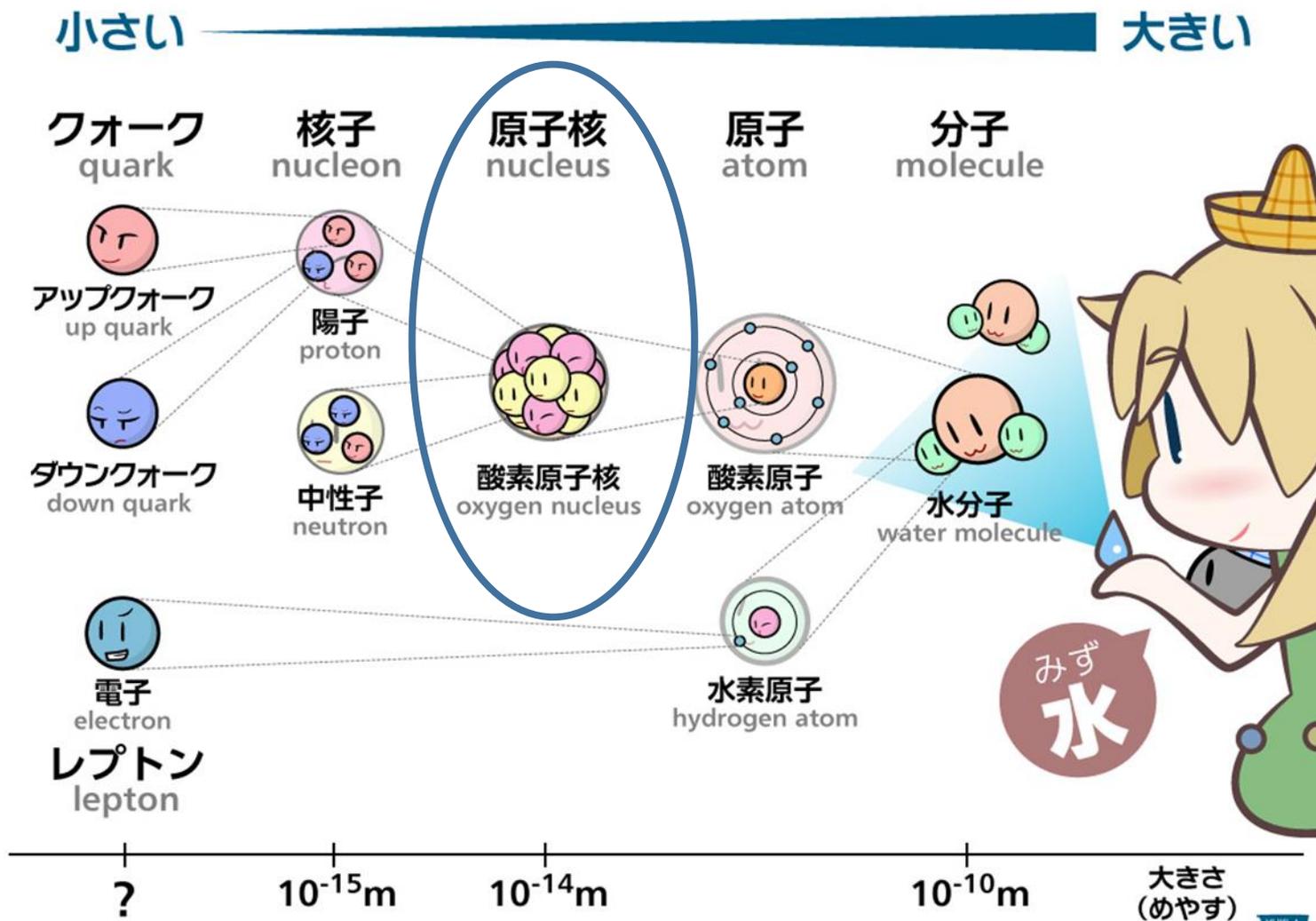
- 原子量 (A) を密度で割ると 1 mol 分の原子の体積
- 1 mol の体積をアボガドロ数 (N_0) で割り、立方根をとると、原子の大きさ (ただし、立方体と近似)
- 理科年表から固体水素とウランを計算すると、

	密度 ρ (g/cm ³)	原子量 A (g)	A/ρ (cm ³)	$(A/\rho/N_0)^{0.333}$ (cm)
固体水素	0.0763	1	13.1	2.84×10^{-8}
ウラン	18.95	238	12.6	2.80×10^{-8}



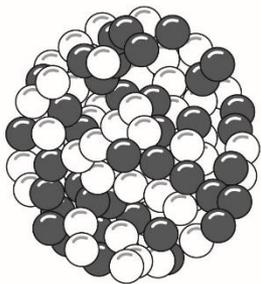
アルカリ金属、アルカリ土類などの例外に目をつぶれば、ほとんど同じ大きさ

原子核・陽子と中性子の数



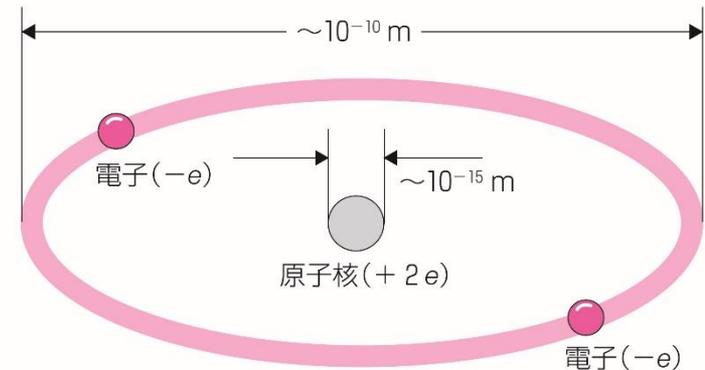
原子核の構造

- 原子核は陽子と中性子が少数 (約 200 個まで) 固く結びついてできている



- 陽子
- 中性子

図: 「(C) 2014公益社団法人日本アイソトープ協会 5版 やさしい放射線とアイソトープ」より



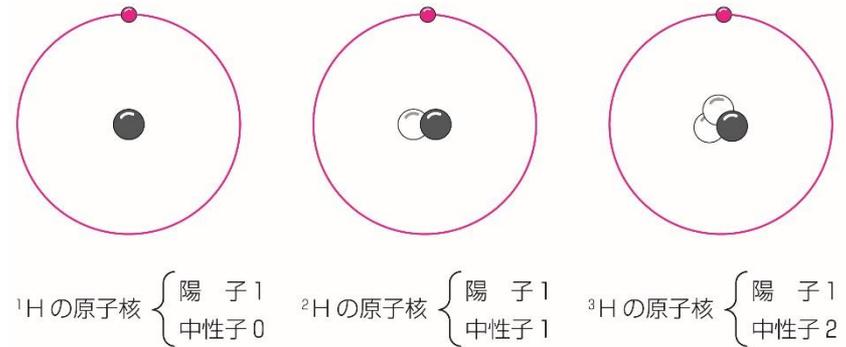
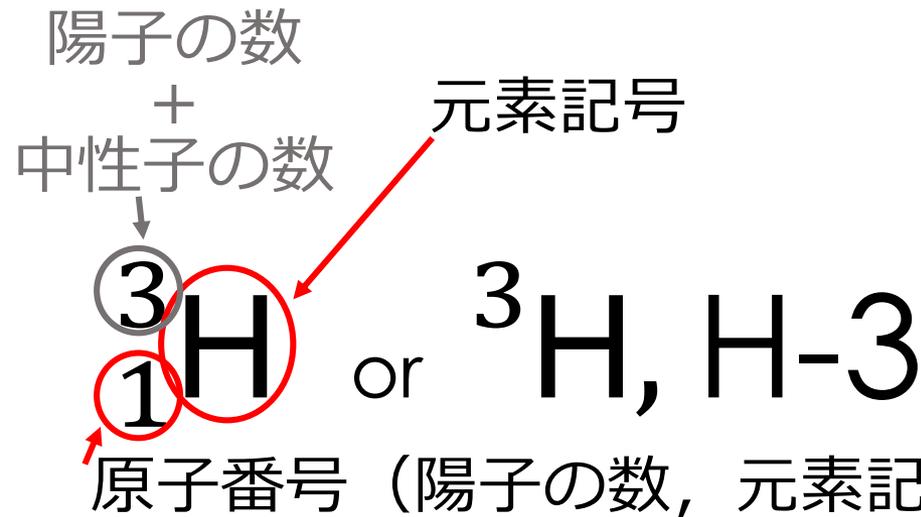
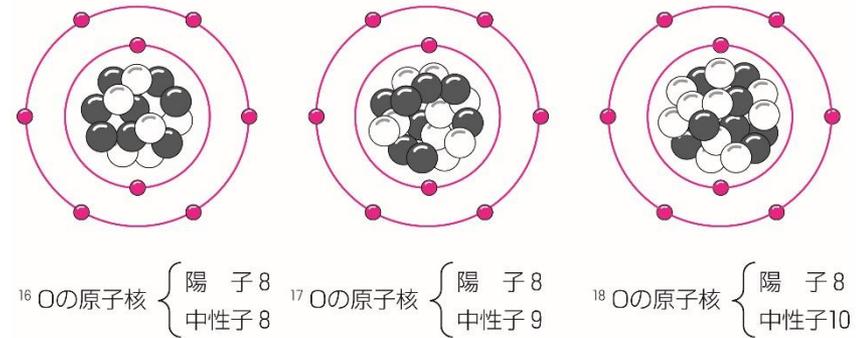
- 原子核を回る電子の数が元素の性質を、原子核中の陽子と中性子の数が原子核の性質を決める

- 原子核の大きさは、 $r_0 = 1.3 \times 10^{-15} \text{ m}$ として
$$R = r_0 \times A^{1/3}$$

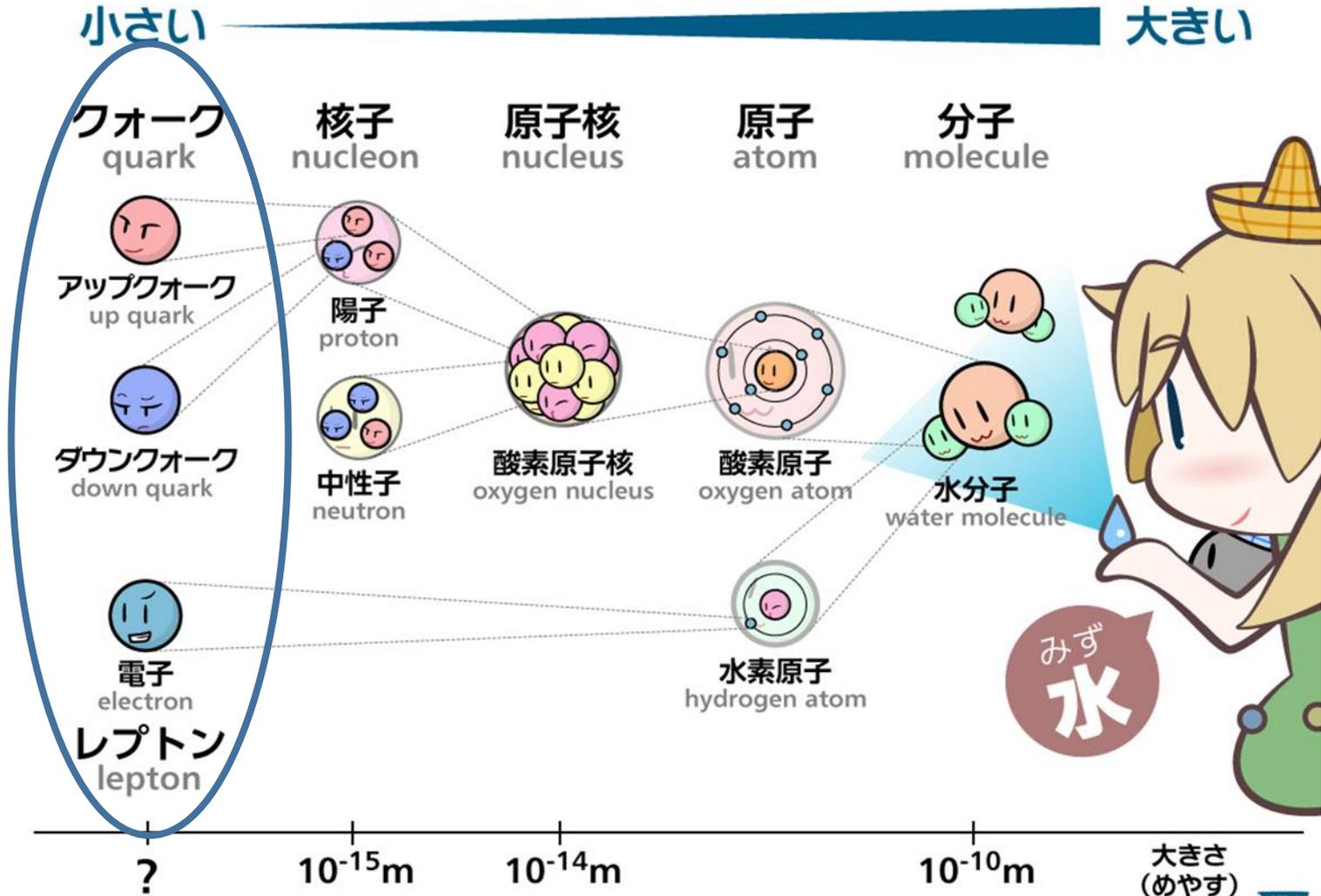
例えば、 $A=16$ の酸素原子核は $3.3 \times 10^{-15} \text{ m}$

同位元素の表し方

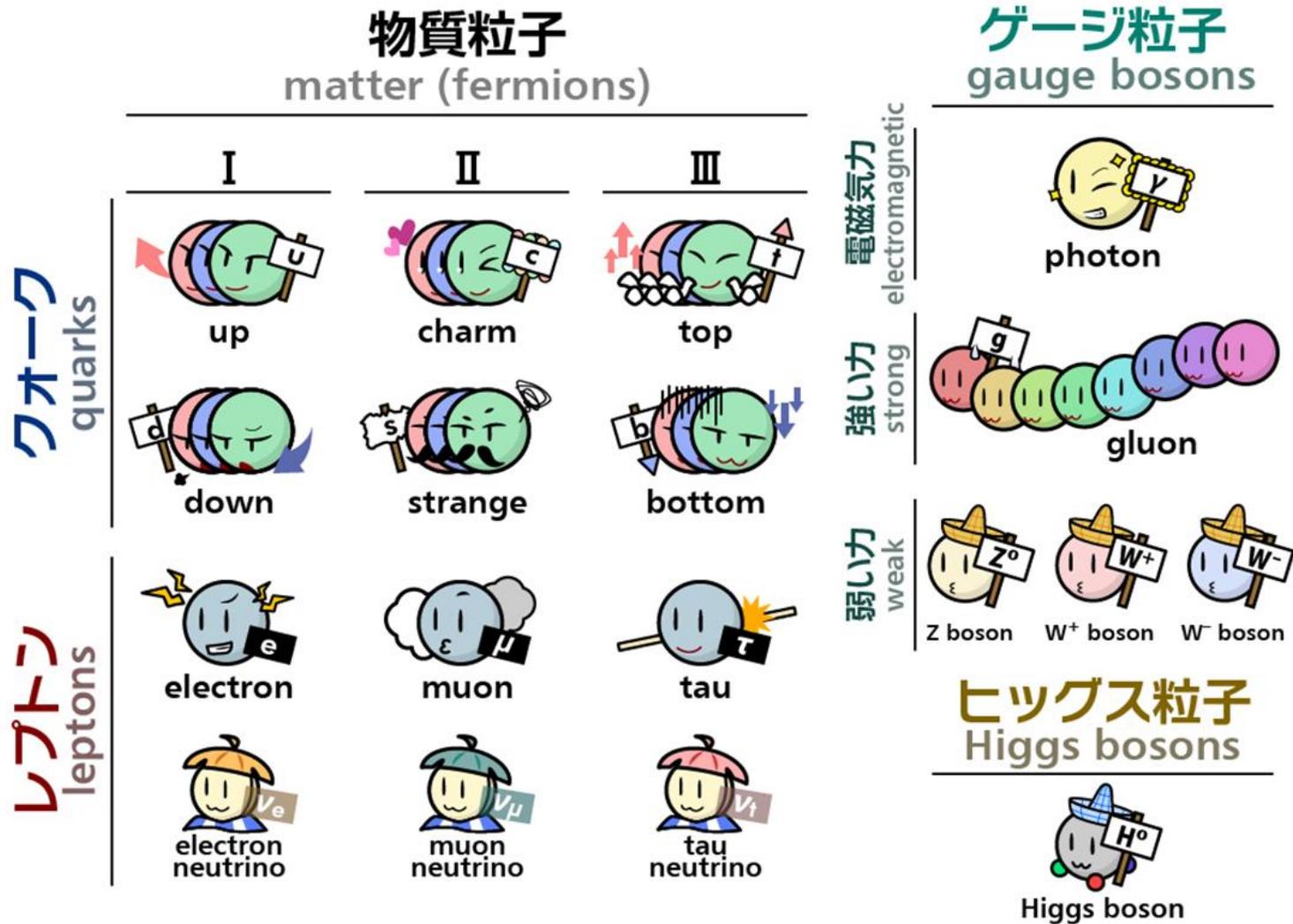
- **電子**：負電荷
- **陽子**：正電荷を持つ
- **中性子**：電荷を持たない
- 電子の数 = 陽子の数なので
原子番号が元素の性質を決める



素粒子と力

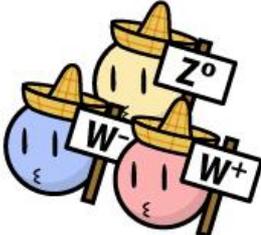


標準模型・物質と力の源



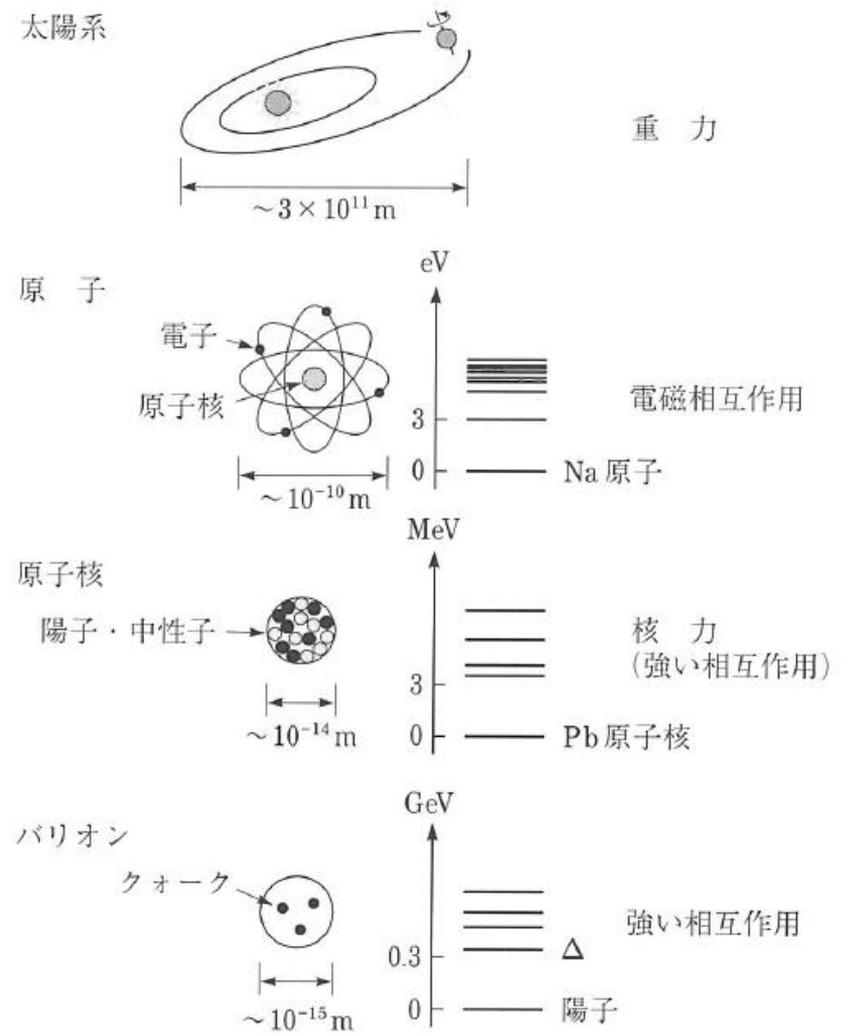
原子核・原子を作る力

基本相互作用 Fundamental Interaction

	電磁気力 Electromagnetic	弱い力 Weak	強い力 Strong	重力 Gravitation
比べた強さ relative strength	10^{36} とても強い	10^{28} 強い	10^{38} とてもとても強い	1 とても弱い
届く距離 long-distance behavior	∞ どこまでも届く	10^{-18} 原子核の 1/1000	10^{-15} 原子核サイズ	∞ どこまでも届く
力を伝える粒子 mediators	 photon	 weak boson	 gluon	 graviton?

物質の構成要素のスケールと相互作用

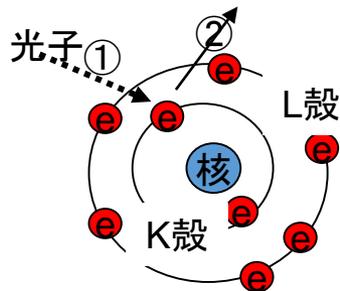
- 重力と電磁気力（電磁相互作用）は、無限遠まで到達
- もっとも大きなスケール（宇宙など）では重力
- 原子・分子のスケールでは電磁気力
- 原子核の結合エネルギーは強い力だが、現象論的に中間子の交換で生じる核力
- クォークの束縛や核子の励起状態は強い力
- クォークフレーバーの変化は弱い力



放射線の発生 (原子)

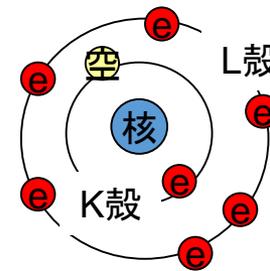
原子の電離

- a. 原子に入射した光が①、
軌道上の電子を弾き飛ばす②
→電離



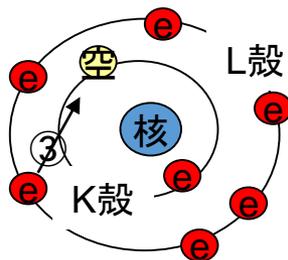
(a) 光子の入射と電離

- b. 電離の結果、軌道に穴が開く
(K殻に空孔)



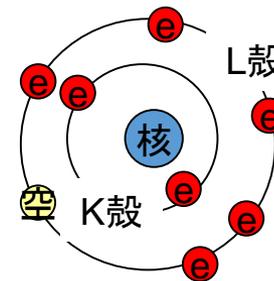
(b) 原子励起状態1 (K殻に空孔がある)

- c. 外側の殻から電子が移動し、
その空孔を埋める③ (緩和)



(c) 原子励起の緩和

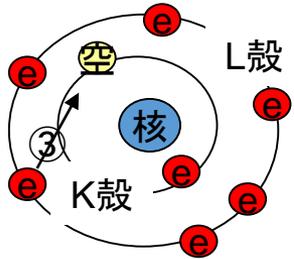
- c. 移動元のL殻に空孔、
K殻とL殻のエネルギー差が剰余



(d) 原子励起状態2 (L殻に空孔がある)

剰余エネルギー解放 (特性X線)

外側の殻から電子が移動し、その空孔を埋める③ (緩和)



原子励起の緩和

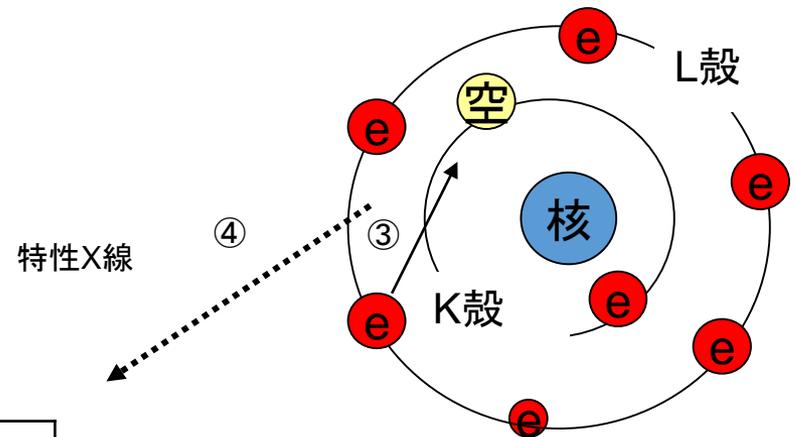
緩和過程で、剰余エネルギーが光子として放出される (④) 場合、放出される光子を**特性X線**とよぶ。

i殻に空孔ができ、ii殻の電子がi殻に移動した後に特性X線が放出される場合のX線のエネルギー E_g は

$$E_g = E_i - E_{ii}$$

鉛のK殻に空孔ができたとき

- L殻の電子がK殻の空孔に移動
 $E_g = 88 - 14 = 74 \text{ keV}$ (K_{α} 線)
- M殻の電子がK殻の空孔に移動
 $E_g = 88 - 3 = 85 \text{ keV}$ (K_{β} 線)



特性X線の発生機構

殻の名称	K	L	M	N	O	P
鉛原子軌道の束縛エネルギー (keV)	88	14	3	<1	<1	<1

特性エックス線の名称と放射強度

F-43

Table of Isotope 8th Edの付録F表6, 7

Table 6. Notations for X-ray Transitions

Classical designation (Siegbahn notation)	Associated initial - final shell vacancies
K_{α_1}	$K - L_3$
K_{α_2}	$K - L_2$
K_{α_3}	$K - L_1$
K_{β_1}	$K - M_3$
K_{β_2}	$K - N_2N_3$
K_{β_3}	$K - M_2$
K_{β_4}	$K - N_4N_5$
K_{β_5}	$K - M_4M_5$
$KO_{2,3}$	$K - O_2O_3$
$KP_{2,3}$	$K - P_2P_3$
L_{α_1}	$L_3 - M_5$
L_{α_2}	$L_3 - M_4$
L_{β_1}	$L_2 - M_4$
$L_{\beta_2,15}$	$L_3 - N_4N_5$
L_{β_3}	$L_1 - M_3$
L_{β_4}	$L_1 - M_2$
L_{β_5}	$L_3 - O_4O_5$
L_{β_6}	$L_3 - N_1$
L_{γ_1}	$L_2 - N_4$
L_{γ_2}	$L_1 - N_2$
L_{γ_3}	$L_1 - N_3$
L_{γ_6}	$L_2 - O_4$
L_{γ}	$L_2 - M_1$
L_{γ}	$L_3 - M_1$
Group designation	Associated transitions
K'_{β_1}	$K_{\beta_1} + K_{\beta_3} + K_{\beta_5}$
K'_{β_2}	$K_{\beta_2} + K_{\beta_4} + \dots$
L_{α}	$L_{\alpha_1} + L_{\alpha_2}$
L_{β}	$L_{\beta_1} + L_{\beta_2,15} + L_{\beta_3} + L_{\beta_4} + L_{\beta_5} + L_{\beta_6}$
L_{γ}	$L_{\gamma_1} + L_{\gamma_2} + L_{\gamma_3} + L_{\gamma_6}$

F-44

Table 7a. X-ray Energies and Intensities (per 100 K-Shell Vacancies)

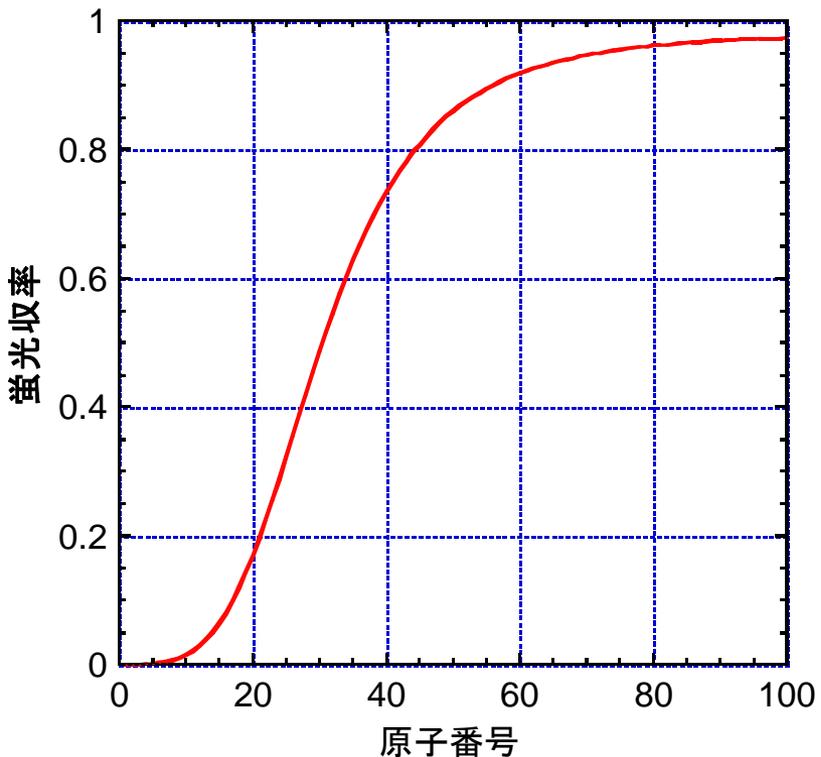
	⁵ B	⁶ C	⁷ N	⁸ O	⁹ F	¹⁰ Ne	¹¹ Na	¹² Mg	¹³ Al	¹⁴ Si	¹⁵ P	¹⁶ S	¹⁷ Cl	¹⁸ Ar	¹⁹ K
K_{α_1}	0.183 0.11 ₅	0.277 0.19 ₈	0.392 0.35 ₁₄	0.525 0.55 ₂₂	0.677 0.9 ₄	0.849 1.20 ₁₂	1.041 1.53 ₁₆	1.254 2.0 ₂	1.487 2.6 ₃	1.740 3.3 ₃	2.010 4.1 ₄	2.308 5.0 ₅	2.622 6.1 ₆	2.957 7.3 ₇	3.314 8.5 ₉
K_{α_2}	0.183 0.056 ₂₃	0.277 0.09 ₄	0.392 0.17 ₇	0.525 0.28 ₁₁	0.677 0.43 ₁₇	0.848 0.60 ₆	1.041 0.77 ₈	1.254 1.00 ₁₀	1.486 1.29 ₁₃	1.739 1.64 ₁₇	2.009 2.04 ₂₁	2.307 2.49 ₂₅	2.621 3.0 ₃	2.955 3.6 ₄	3.311 4.3 ₄
K_{β_1}									1.554 0.0155 ₁₆	1.836 0.056 ₆	2.136 0.122 ₁₂	2.464 0.229 ₂₃	2.816 0.38 ₄	3.190 0.58 ₆	3.590 0.77 ₈
K_{β_3}									1.554 0.0079 ₈	1.836 0.028 ₃	2.136 0.062 ₆	2.464 0.116 ₁₂	2.816 0.192 ₂₀	3.190 0.30 ₃	3.590 0.40 ₄
L_{β_1}														0.251 0.011 ₃	0.296 0.013 ₄
L_{β_3}														0.310 0.0038 ₁₃	0.359 0.0050 ₁₇
L_{β_4}														0.310 0.0024 ₉	0.359 0.0010 ₅
	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
K_{α_1}	3.692 9.8 ₄	4.091 11.3 ₅	4.511 12.8 ₆	4.952 14.5 ₇	5.415 16.4 ₇	5.899 18.3 ₈	6.404 20.2 ₉	6.930 22.1 ₁₀	7.478 24.0 ₁₁	8.048 26.0 ₁₂	8.639 28.0 ₁₃	9.252 29.8 ₁₄	9.886 31.3 ₁₅	10.544 32.7 ₁₆	11.222 34.1 ₁₇
K_{α_2}	3.688 4.93 ₂₂	4.086 5.88 ₂₅	4.505 6.4 ₃	4.945 7.3 ₃	5.405 8.3 ₄	5.888 9.3 ₄	6.391 10.2 ₅	6.915 11.2 ₅	7.461 12.2 ₆	8.028 13.3 ₆	8.616 14.3 ₆	9.225 15.2 ₆	9.855 16.1 ₆	10.508 16.8 ₆	11.182 17.6 ₆
K_{β_1}	4.013 1.02 ₅	4.461 1.22 ₆	4.932 1.42 ₆	5.427 1.64 ₇	5.947 1.84 ₈	6.490 2.14 ₁₀	7.058 2.40 ₁₁	7.649 2.65 ₁₂	8.265 2.88 ₁₃	8.905 3.10 ₁₄	9.572 3.39 ₁₂	10.264 3.70 ₁₃	10.982 3.98 ₁₄	11.726 4.25 ₁₅	12.496 4.54 ₁₆
K_{β_2}									10.366 0.0314 ₁₁	11.101 0.097 ₄	11.864 0.314 ₁₁	12.652 0.097 ₄	13.490 0.194 ₇	14.290 0.323 ₁₂	15.122 0.454 ₁₆
K_{β_3}	4.013 0.519 ₂₃	4.461 0.62 ₃	4.932 0.72 ₃	5.427 0.84 ₄	5.947 0.94 ₄	6.490 1.09 ₅	7.058 1.23 ₆	7.649 1.36 ₆	8.265 1.48 ₇	8.905 1.59 ₇	9.572 1.74 ₆	10.260 1.90 ₇	10.975 2.05 ₇	11.720 2.19 ₈	12.490 2.34 ₈
K_{β_5}							7.108 0.00127 ₇	7.706 0.00188 ₁₁	8.329 0.00264 ₁₅	8.977 0.00365 ₂₁	9.651 0.00504 ₂₅	10.350 0.0063 ₃	11.074 0.0078 ₄	11.826 0.0095 ₅	12.601 0.0116 ₆
L_{α_1}		0.396 0.026 ₇	0.452 0.063 ₁₆	0.511 0.12 ₃	0.572 0.19 ₅	0.637 0.26 ₇	0.776 0.33 ₈	0.851 0.41 ₁₀	0.929 0.50 ₁₃	0.999 0.60 ₁₅	1.072 0.65 ₁₃	1.142 0.70 ₁₄	1.212 0.81 ₁₆	1.282 0.87 ₁₇	1.379 0.98 ₂₀
L_{α_2}		0.396 0.0028 ₇	0.452 0.0070 ₁₉	0.511 0.013 ₃	0.572 0.021 ₅	0.637 0.029 ₇	0.776 0.037 ₉	0.851 0.045 ₁₁	0.929 0.056 ₁₄	0.999 0.066 ₁₇	1.072 0.072 ₁₅	1.142 0.077 ₁₆	1.212 0.090 ₁₈	1.282 0.096 ₁₉	1.379 0.108 ₂₂
L_{β_1}	0.350 0.016 ₄	0.400 0.020 ₅	0.458 0.050 ₁₂	0.518 0.096 ₂₄	0.581 0.15 ₄	0.648 0.20 ₅	0.717 0.25 ₆	0.791 0.31 ₈	0.868 0.34 ₉	0.949 0.39 ₁₀	1.035 0.42 ₁₁	1.125 0.46 ₁₂	1.219 0.49 ₁₂	1.317 0.52 ₁₃	1.420 0.58 ₁₅
L_{β_3}	0.412 0.0062 ₁₉	0.468 0.0075 ₂₃	0.529 0.009 ₃	0.590 0.010 ₃	0.652 0.012 ₄	0.720 0.014 ₄	0.792 0.016 ₅	0.866 0.018 ₅	0.940 0.020 ₆	1.022 0.021 ₆	1.107 0.023 ₇	1.195 0.024 ₇	1.294 0.025 ₇	1.386 0.027 ₈	1.492 0.029 ₉
L_{β_4}	0.412 0.0039 ₁₂	0.468 0.0048 ₁₅	0.529 0.0056 ₁₇	0.590 0.0067 ₂₀	0.652 0.0079 ₂₄	0.720 0.009 ₃	0.792 0.010 ₃	0.866 0.012 ₄	0.940 0.013 ₄	1.022 0.014 ₄	1.107 0.015 ₅	1.191 0.016 ₅	1.286 0.016 ₅	1.380 0.018 ₅	1.486 0.019 ₅
L_{β_5}		0.402 0.0017 ₄	0.456 0.0018 ₅	0.513 0.0022 ₆		0.640 0.0023 ₆	0.708 0.0022 ₆	0.779 0.0022 ₆	0.855 0.0022 ₆		1.020 0.0021 ₄	1.114 0.0027 ₅	1.212 0.0033 ₇	1.315 0.0038 ₈	1.424 0.0045 ₉
L_{β_6}												1.297 0.0012 ₄	1.412 0.0042 ₁₃	1.524 0.0047 ₁₅	1.648 0.0051 ₁₆
L_{γ_1}		0.353 0.020 ₅	0.401 0.022 ₆	0.454 0.026 ₇	0.510 0.025 ₆	0.568 0.026 ₇	0.628 0.028 ₇	0.693 0.028 ₇	0.760 0.028 ₇	0.831 0.028 ₇	0.907 0.029 ₇	0.984 0.030 ₈	1.068 0.031 ₈	1.155 0.031 ₈	1.245 0.034 ₉
L_{γ_2}		0.348 0.026 ₇	0.395 0.029 ₈	0.446 0.034 ₉	0.500 0.033 ₉	0.556 0.038 ₁₀	0.615 0.040 ₁₁	0.678 0.043 ₁₁	0.743 0.045 ₁₂	0.811 0.048 ₁₃	0.884 0.047 ₁₀	0.957 0.048 ₁₀	1.037 0.052 ₁₁	1.120 0.053 ₁₁	1.204 0.056 ₁₂

空孔の緩和過程の蛍光収率

蛍光収率

空孔ができた場合に特性X線が放出される確率を**蛍光収率**という。蛍光収率は0と1の間の値をとる。K殻の蛍光収率は原子番号の増大とともに高くなる。

Table of Isotope 8th Edの付録F表3に数値



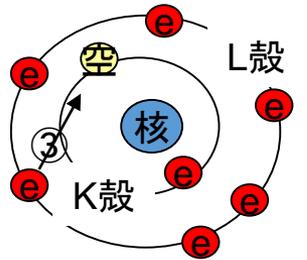
F-41

Table 3. Fluorescence and Coster-Kronig Yields

El	ω_K	ω_{L_1}	ω_{L_2}	ω_{L_3}	f_{12}	f_{13}	f'_{13}	f_{23}	El	ω_K	ω_{L_1}	ω_{L_2}	ω_{L_3}	f_{12}	f_{13}	f'_{13}
1 H	0.00002								71 Lu	0.949	0.120	0.234	0.220	0.19	0.28	0.0020
2 He	0.0001								72 Hf	0.950	0.128	0.246	0.231	0.18	0.28	0.0023
3 Li	0.0003								73 Ta	0.952	0.137	0.258	0.243	0.18	0.28	0.0026
4 Be	0.0007								74 W	0.954	0.147	0.270	0.255	0.17	0.28	0.0028
5 B	0.0014								75 Re	0.955	0.144	0.283	0.268	0.16	0.33	0.0030
6 C	0.0026								76 Os	0.957	0.130	0.295	0.281	0.16	0.39	0.0029
7 N	0.0043								77 Ir	0.958	0.120	0.308	0.294	0.15	0.45	0.0028
8 O	0.0069								78 Pt	0.959	0.114	0.321	0.306	0.14	0.50	0.0028
9 F	0.010								79 Au	0.960	0.107	0.334	0.320	0.14	0.53	0.0028
10 Ne	0.015								80 Hg	0.962	0.107	0.347	0.333	0.13	0.56	0.0030
11 Na	0.021								81 Tl	0.962	0.107	0.360	0.347	0.13	0.57	0.0032
12 Mg	0.029	0.000029	0.0012	0.0012	0.32	0.64	0.000020		82 Pb	0.963	0.112	0.373	0.360	0.12	0.58	0.0035
13 Al	0.039	0.000026	0.00075	0.00075	0.32	0.64	0.000016		83 Bi	0.964	0.117	0.387	0.373	0.11	0.58	0.0038
14 Si	0.050	0.000030	0.00037	0.00038	0.32	0.64	0.000014		84 Po	0.965	0.122	0.401	0.386	0.11	0.58	0.0042
15 P	0.064	0.000039	0.00031	0.00031	0.32	0.63	0.000012		85 At	0.966	0.128	0.415	0.399	0.10	0.59	0.0047
16 S	0.080	0.000074	0.00026	0.00026	0.32	0.62	0.000014		86 Rn	0.967	0.134	0.429	0.411	0.10	0.58	0.0052
17 Cl	0.099	0.00012	0.00024	0.00024	0.32	0.62	0.000014		87 Fr	0.967	0.139	0.443	0.424	0.10	0.58	0.0058
18 Ar	0.120	0.00018	0.00022	0.00022	0.31	0.62	0.000013		88 Ra	0.968	0.146	0.456	0.437	0.09	0.58	0.0064
19 K	0.143	0.00024	0.00027	0.00027	0.31	0.62	0.000012		89 Ac	0.969	0.153	0.468	0.450	0.09	0.58	0.0071
20 Ca	0.169	0.00031	0.00033	0.00033	0.31	0.61	0.000014		90 Th	0.969	0.161	0.479	0.463	0.09	0.57	0.0078
21 Sc	0.196	0.00039	0.00084	0.00084	0.31	0.60	0.000014		91 Pa	0.970	0.162	0.472	0.476	0.08	0.58	0.0084
22 Ti	0.226	0.00047	0.0015	0.0015	0.31	0.59	0.000015		92 U	0.970	0.176	0.467	0.489	0.08	0.57	0.0097
23 V	0.256	0.00058	0.0026	0.0026	0.31	0.58	0.000016		93 Np	0.971	0.187	0.466	0.502	0.07	0.57	0.011
24 Cr	0.288	0.00071	0.0037	0.0037	0.31	0.57	0.000018		94 Pu	0.971	0.205	0.464	0.514	0.05	0.56	0.013
25 Mn	0.321	0.00084	0.0050	0.0050	0.30	0.58	0.000019		95 Am	0.971	0.218	0.471	0.526	0.05	0.55	0.014
26 Fe	0.355	0.0010	0.0063	0.0063	0.30	0.57	0.000021		96 Cm	0.972	0.228	0.479	0.539	0.04	0.55	0.016
27 Co	0.388	0.0012	0.0077	0.0077	0.30	0.56	0.000023		97 Bk	0.972	0.236	0.485	0.550	0.04	0.54	0.017
28 Ni	0.421	0.0014	0.0086	0.0093	0.30	0.55	0.000024	0.028	98 Cf	0.972	0.244	0.490	0.560	0.03	0.54	0.019
29 Cu	0.454	0.0016	0.0100	0.011	0.30	0.54	0.000026	0.028	99 Es	0.972	0.253	0.497	0.570	0.03	0.54	0.021
30 Zn	0.486	0.0018	0.011	0.012	0.29	0.54	0.000028	0.026	100 Fm	0.973	0.263	0.506	0.579	0.03	0.53	0.023

剰余エネルギー解放 (オージェ電子)

外側の殻から電子が移動し、その空孔を埋める③ (緩和)



原子励起の緩和

緩和過程で、剰余エネルギーを電子として放出する(⑤)場合、放出される電子を**オージェ電子**とよぶ。

i殻に空孔ができ、ii殻の電子がi殻に移動した後にiii殻電子がオージェ電子として放出される場合の放出電子のエネルギー E_a は

$$E_a = E_i - E_{ii} - E_{iii}$$

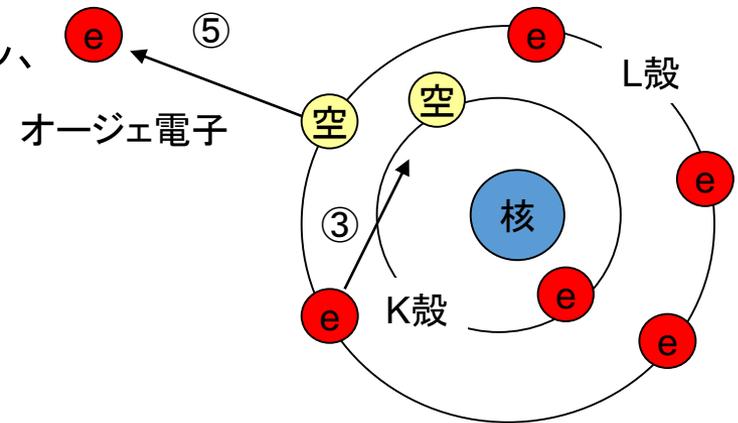
鉛のK殻に空孔ができL殻電子が空孔に移動し、

- L殻の電子がオージェ電子として放出

$$E_a = 88 - 14 - 14 = 60 \text{ keV}$$

- M殻の電子がオージェ電子として放出

$$E_a = 88 - 14 - 3 = 71 \text{ keV}$$



オージェ電子の発生機構

殻の名称	K	L	M	N	O	P
鉛原子軌道の束縛エネルギー (keV)	88	14	3	<1	<1	<1

空孔の緩和過程のオージェ電子の放出確率

オージェ電子の放出確率

原子の電子軌道に空孔ができ、その緩和過程で特性エックス線放射とオージェ電子放出は競合過程であり、どちらかの過程が起こる

K殻のオージェ電子放出確率は原子番号の増大とともに低くなる

Table of Isotope 8th Edの付録F表8に数値

F-55

Table 8. Auger-Electron Intensities per 100 K-Shell Vacancies

	18Ar	19K	20Ca	21Sc	22Ti	23V	24Cr	26Mn	26Fe	27Co	28Ni	29Cu	30Zn	31Ga	32Ge
K-L ₁ L ₁	6.1	5.8	5.6	5.4	5.2	5.0	4.8	4.6	4.4	4.2	4.0	3.8	3.6	3.4	3.3
K-L ₁ L ₂	6.7	6.4	6.2	6.0	5.8	5.6	5.4	5.1	4.9	4.7	4.5	4.3	4.0	3.8	3.7
K-L ₁ L ₃	12.8	12.2	11.7	11.3	10.9	10.4	10.0	9.4	9.0	8.5	8.0	7.5	7.1	6.7	6.3
K-L ₁ M ₁	1.35	1.39	1.40	1.38	1.36	1.32	1.28	1.23	1.17	1.12	1.07	1.02	0.97	0.94	0.91
K-L ₁ M ₂	0.63	0.69	0.72	0.71	0.70	0.69	0.68	0.65	0.62	0.60	0.57	0.55	0.53	0.52	0.51
K-L ₁ M ₃	1.20	1.30	1.35	1.34	1.31	1.28	1.24	1.19	1.13	1.08	1.02	0.97	0.92	0.89	0.86
K-L ₁ M ₄								0.030	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.032	0.033
K-L ₁ M ₅								0.0076	0.0176	0.026	0.032	0.037	0.040	0.042	0.044
K-L ₁ N ₁			0.159	0.150	0.141	0.132	0.123	0.113	0.097	0.085	0.078	0.075	0.074	0.083	0.089
K-L ₂ L ₂	1.23	1.18	1.13	1.10	1.07	1.03	0.99	0.94	0.90	0.85	0.81	0.76	0.72	0.68	0.64
K-L ₂ L ₃	30	29	28	27	26	24.9	23.8	22.5	21.4	20.3	19.1	18.0	16.8	15.8	14.9
K-L ₂ M ₁	0.65	0.67	0.67	0.66	0.65	0.63	0.61	0.59	0.56	0.54	0.51	0.49	0.46	0.45	0.43
K-L ₂ M ₂	0.221	0.239	0.248	0.247	0.244	0.239	0.233	0.224	0.214	0.204	0.195	0.185	0.176	0.170	0.165
K-L ₂ M ₃	2.53	2.7	2.8	2.8	2.7	2.7	2.6	2.46	2.33	2.21	2.10	1.98	1.88	1.81	1.74
K-L ₂ M ₄								0.043	0.042	0.041	0.041	0.041	0.041	0.043	0.044
K-L ₂ M ₅								0.028	0.065	0.096	0.119	0.137	0.148	0.156	0.162
K-L ₂ N ₁			0.074	0.070	0.066	0.062	0.057	0.053	0.045	0.040	0.037	0.035	0.034	0.038	0.041
K-L ₃ L ₃	17.2	16.5	15.7	15.2	14.6	14.0	13.3	12.6	12.0	11.3	10.6	9.9	9.3	8.6	8.0
K-L ₃ M ₁	1.25	1.28	1.28	1.25	1.22	1.18	1.13	1.08	1.02	0.97	0.92	0.86	0.81	0.72	0.66
K-L ₃ M ₂	2.53	2.7	2.8	2.8	2.7	2.7	2.6	2.46	2.34	2.22	2.10	1.99	1.88	1.66	1.54
K-L ₃ M ₃	2.9	3.1	3.2	3.2	3.1	3.0	2.9	2.8	2.6	2.50	2.37	2.24	2.11	1.88	1.74
K-L ₃ M ₄								0.194	0.188	0.184	0.181	0.180	0.179	0.144	0.132
K-L ₃ M ₅			0.142	0.083	0.046	0.028	0.0241	0.033	0.080	0.117	0.146	0.167	0.181	0.145	0.133
K-L ₃ N ₁								0.098	0.083	0.073	0.066	0.062	0.060	0.037	0.030
K-M ₁ M ₁	0.075	0.084	0.089	0.088	0.087	0.086	0.083	0.081	0.077	0.074	0.071	0.068	0.066	0.052	0.047
K-M ₁ M ₂	0.063	0.072	0.078	0.079	0.080	0.079	0.078	0.075	0.071	0.068	0.065	0.063	0.060	0.046	0.040
K-M ₁ M ₃	0.117	0.137	0.149	0.149	0.147	0.145	0.141	0.136	0.129	0.123	0.117	0.112	0.107	0.087	0.078
K-M ₁ N ₁			0.0213	0.0199	0.0187	0.0175	0.0163	0.0151	0.0130	0.0115	0.0107	0.0103	0.0104	0.0032	
K-M ₂ M ₃	0.217	0.26	0.29	0.30	0.29	0.29	0.28	0.27	0.26	0.245	0.234	0.223	0.214	0.177	0.160
K-M ₂ N ₁			0.0106	0.0100	0.0094	0.0088	0.0082	0.0076	0.0065	0.0058	0.0054	0.0052	0.0052	0.00214	0.00120
K-M ₃ M ₃	0.125	0.153	0.170	0.172	0.171	0.169	0.165	0.158	0.149	0.140	0.133	0.126	0.121	0.10	0.091
K-M ₃ M ₄								0.0176	0.0171	0.0169	0.0169	0.0170	0.0173	0.0123	0.0108
K-M ₃ M ₅								0.00252	0.0070	0.0106	0.0135	0.0157	0.0173	0.0123	0.0108
K-M ₃ N ₁			0.0177	0.0166	0.0156	0.0146	0.0136	0.0126	0.0108	0.0096	0.0089	0.0086	0.0086	0.0043	0.0030

原子の電子軌道に空孔が生成される原因

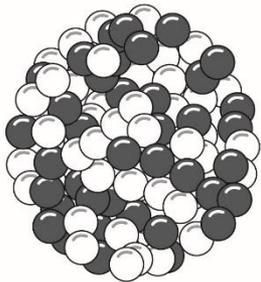
- 光電効果
- コンプトン散乱
- 軌道電子捕獲
- 内部転換

これらの過程は以降に説明

放射線の発生（原子核）

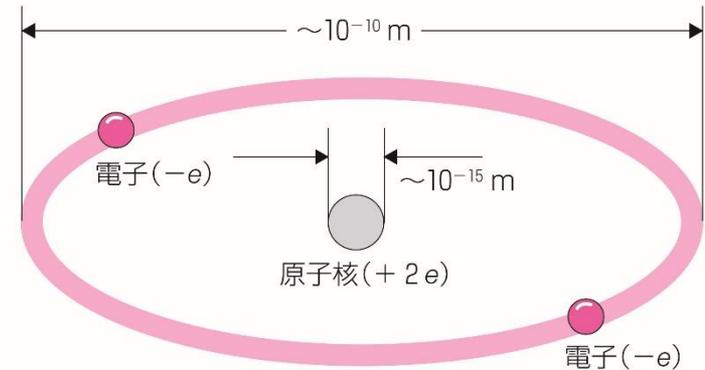
原子核の構造

- 原子核は陽子と中性子が少数 (約 200 個まで) 固く結びついてできている



- 陽子
- 中性子

図: 「(C) 2014公益社団法人日本アイソトープ協会
5版 やさしい放射線とアイソトープ」より



- 原子核中の陽子の数 (Z) と中性子の数 (N) が原子核の性質を決める
- 原子核の質量数 (A) は $A = Z + N$
- 原子は電氣的に中性であり、軌道電子の数と原子核中の陽子の数 (原子番号、 Z) は等しい

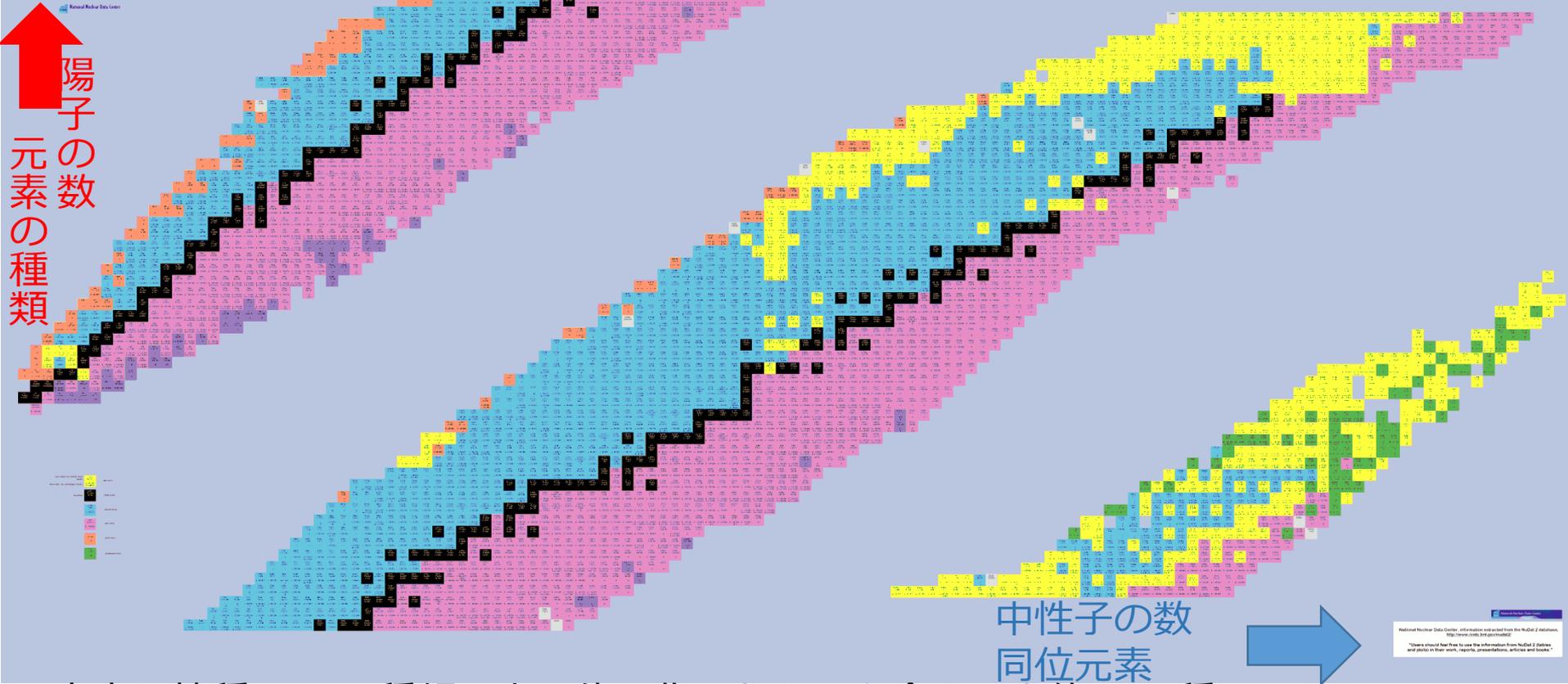
原子核語句あれこれ

- **核子**：原子核の構成要素である陽子と中性子は、電荷以外の性質がほとんど同じ→合わせて核子と称する
- **陽子**：電荷は +1
- **中性子**：電荷は中性、陽子よりわずかに重く、真空では
$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}$$
と半減期約10.8分で崩壊
- **原子質量単位**：中性のC-12原子の質量を 12 u とした質量単位
- **同位体**：陽子の数が等しい原子核
天然に同位体が存在するときの比：天然同位体存在度
- **同中性子体**：中性子の数が等しい原子核
- **同重体**：核子の数が等しい原子核
- **核異性体**：同じ核種、基底状態と寿命の長い励起状態

原子核の性質・核図表

BROOKHAVEN
NATIONAL LABORATORY

National Nuclear Data Center
@ Brookhaven National Laboratory



安定な核種：274種類，人工的に作ったものを含めると約2000種
(理研のRIBFでは今でも新核種を生成中)

核図表：元素の周期表に相当するが、陽子と中性子の数
NNDC, JAEA, IAEA, KARLSRUHER NUKLIDKARTE などが有名

安定・放射性同位元素

mass number and element symbol half-life	236U 2.342E7 Y	α 崩壊 alpha decay
decay types and percentage of decays	α : 100.00% sF: 9.4E-8%	
abundance	208Pb STABLE 52.4%	安定な原子核 stable nuclide
β^+ 崩壊 軌道電子捕獲	128Pr 2.84 s ϵ : 100.00%	beta+/ ϵ C decay
β^- 崩壊	20F 11.07 s β^- : 100.00%	beta- decay
陽子崩壊 人工同位元素のみ	120 0.40 MeV P	proton decay
自発核分裂	273Sg 1 M sF	spontaneous fission

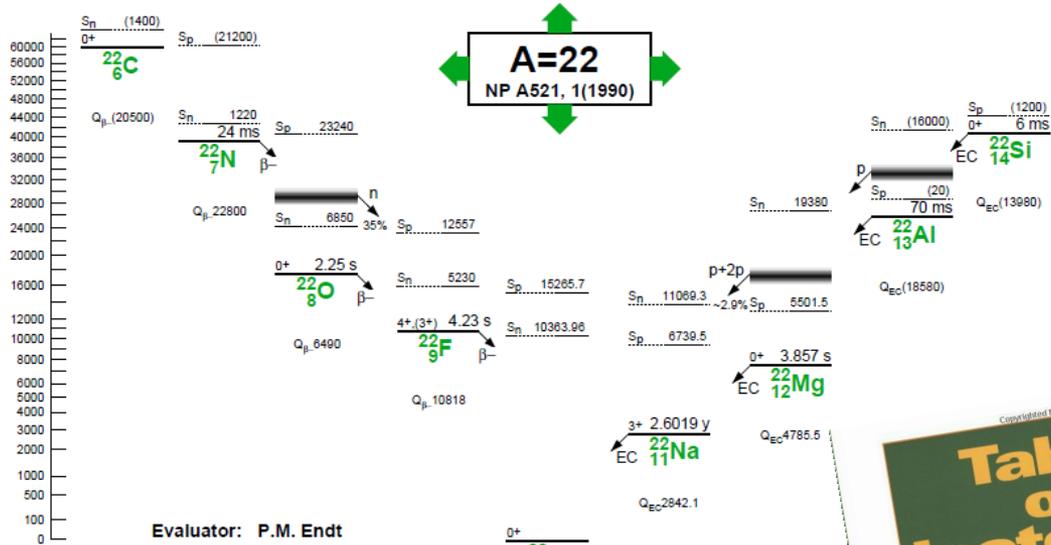
- 安定な原子核は壊れない
- 不安定な原子核は放射線を出して崩壊する
- 天然に存在する放射性同位元素は α , β 崩壊とまれに自発核分裂、それに伴う γ 線放出
- 人工的に作られた原子核では、自発核分裂、陽子崩壊も

このような違いは何故生じるのか？

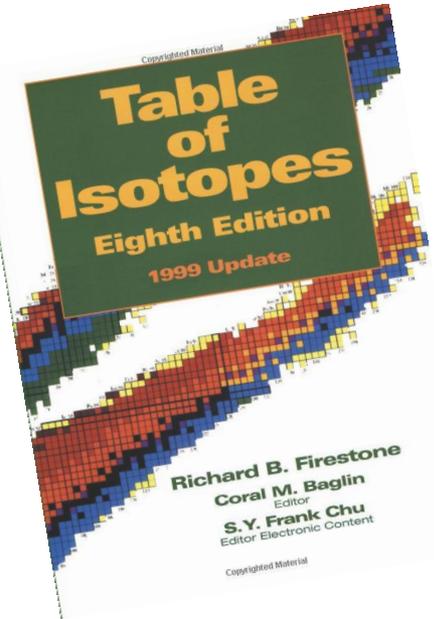
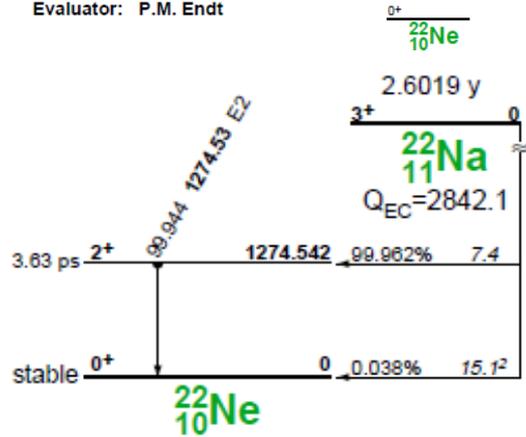
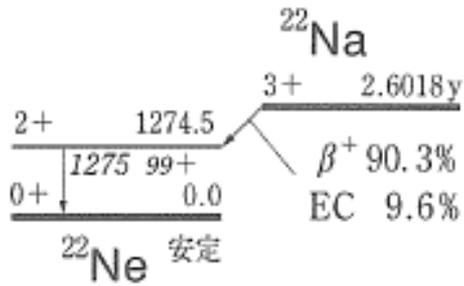


アイソトープ手帳

Table of Isotopes



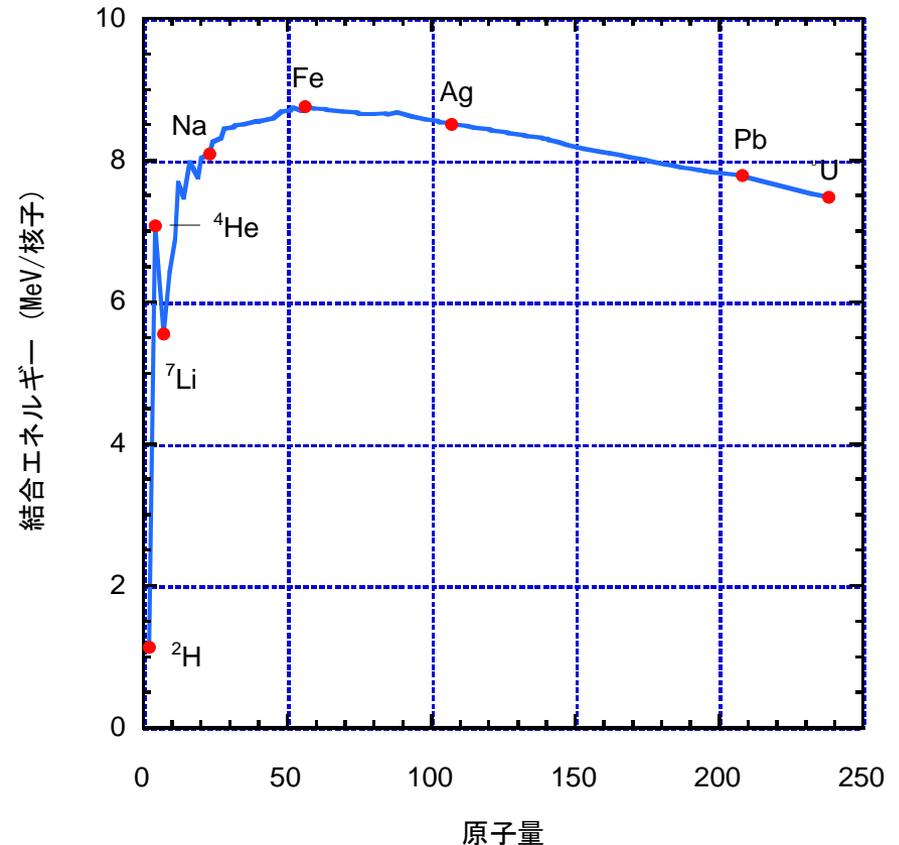
Evaluator: P.M. Endt



核種	半減期	壊変形式	おもなβ線(またはα線)のエネルギー(MeV)と放出割合	おもな光子のエネルギー(MeV)と放出割合	内部転換電子の放出割合[%]	実効線量率定数(空気衝突カーマ率定数)1cm線量当量率定数	おもな生成反応
$^{22}\text{Na} \uparrow$	2.6018y	β ⁺ EC	0.546- 89.8% 他 9.6%	1.275- 99.9% 0.511 an.		0.284 (0.280) 0.333	$^{23}\text{Na}(p, pn)^{22}\text{Na}$ $^{24}\text{Mg}(d, \alpha)^{22}\text{Na}$

原子核の結合エネルギー

- 原子の質量と、原子を構成する陽子、中性子、電子の質量の合計との差を質量欠損
$$\Delta M = (ZM_p + ZM_e + (A - Z)M_n) - M$$
- 質量欠損は、主に原子核の結合エネルギー
- 原子核の結合は“強い力”で起きるが、中間子の交換で“核力”が源と考えたほうが現象論的に便利
- 最も安定な原子核は Fe で、結合エネルギーは核子あたり約 8.8 MeV



原子核内の核子の結合エネルギー

Table of Isotope 8th edition からの引用



%: 98.90 3

Δ : 0.00 S_n : 18721.5 9 S_p : 15957.0 4

σ_γ : 0.00353 7 b



%: 91.72 30

Δ : -60601.3 14 S_n : 11197.5 4 S_p : 10183.58 17

σ_γ : 2.59 14 b



%: 0.7200 12

Δ : 40913.2 20 S_n : 5297.84 23 S_p : 6712 5

Q_α : 4678.7 7

σ_γ^0 : 98.3 8 b, σ_{abs} : 680.9 11 b, σ_f : 582.6 11 b

%: *Natural isotopic abundance* (atom percent basis) for elements as they occur on earth. The values are those adopted by the International Union of Pure and Applied Chemistry⁹.

Δ : *Mass excess* ($\equiv M-A$) on the unified mass scale ($\Delta^{12}\text{C}=0$), in units of keV. All values refer to masses of neutral atoms. Systematic values are given in parentheses.

S_n : *Neutron separation energy* ($M_N - M_{N-1} - M_n$) in units of keV. Systematic values are given in parentheses.

S_p : *Proton separation energy* ($M_Z - M_{Z-1} - M_p$) in units of keV. Systematic values are given in parentheses.

Q_x : *Decay energy* for decay mode $x = \beta^-, \text{EC} (\text{EC}+\beta^+), \alpha,$ or p decay in units of keV. Systematic values are given in parentheses.

: *Neutron cross sections*: these include values for σ_γ ($\equiv \sigma(n,\gamma)$, the neutron capture cross section), σ_α (n capture cross section for alpha particle emission), σ_p (n capture cross section for proton emission), σ_{abs} (“free” neutron scattering cross section) and σ_f (capture cross section for fission). Cross sections σ are those for thermal neutrons, σ^0 for 2200 m/sec neutrons, and σ^r for reactor neutrons. Designation of “from” or “to” is followed by the energy of the capture or product nuclear state.

Fe-56 の原子核の質量は？

よく使用する単位、数

- 自然単位系

- 光速(c)、プランク定数(\hbar)を 1 とする単位系

エネルギー (MeV), 運動量 (MeV/ c), 質量 (MeV/ c^2) はすべて MeV

- 何が便利？

特殊相対論の全エネルギーの式は、

$$E^2 = p^2 + m^2 \quad (E^2 = c^2 p^2 + m^2 c^4 \text{ よりうるさくない})$$

運動量に対応するド・ブロイ波長、コンプトン波長も、

$$\lambda = \frac{1}{p}, \quad \lambda_c = \frac{1}{m} \quad \left(\lambda = \frac{\hbar}{p}, \quad \lambda_c = \frac{\hbar}{mc} \text{ とあまりかわらないけど} \right)$$

- 実際の物理量との対応

$$\hbar = 1.054 \dots \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{sec} = 6.582 \dots \times 10^{-22} \text{ MeV} \cdot \text{sec}$$

$$c = 2.997 \dots \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$\hbar c = 197.326 \dots \text{ MeV fm} \sim 200 \text{ MeV fm}$$

1 GeV/ c の運動量を持つ電子のド・ブロイ波長は？

よく使用する単位、数

- よく使う数

- $\hbar c = 197.326 \dots \text{MeV fm} \sim 200 \text{ MeV fm}$

- $u = 931.494 \dots \text{MeV} = 1.660 \dots \times 10^{-27} \text{ Kg}$

- $m_e = 0.5109 \dots \text{MeV} = 9.109 \dots \times 10^{-31} \text{ Kg}$

- $m_p = 938.272 \dots \text{MeV} = 1.672 \dots \times 10^{-27} \text{ Kg}$
 $= 1.0072 \dots u = 1.836 \dots \times 10^3 m_e$

- $m_n = 939.565 \dots \text{MeV} = 1.0086 \dots u$

- $k_B = 1.380 \dots \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1} = 8.617 \dots \times 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$

- $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137.035\dots}$ (微細構造定数、電磁気力の強さ)

- 室温をエネルギーに換算すると？

- 室温は 300 K なので。。。

練習問題の答

- Fe-56の原子核の質量は?

$$\begin{aligned}M_{Fe} &= 56 * M_U + \Delta - 26M_e \\ &= 56 * 931.49 - \frac{60601.3}{1000} - 26 * 0.51 \\ &= 52090.2 \text{ MeV}\end{aligned}$$

- 1 GeV/c の運動量をもつ電子の波長は?

$$\lambda = 2\pi \frac{\hbar c}{p} = 2\pi \frac{197.33}{1000} \sim 1.24 \text{ fm}$$

- 室温をエネルギーに換算すると

$$E_{room} = k_B \times T = 1.38 \times 10^{-23} \times 300 = 4.14 \times 10^{-21} \text{ J}$$

$$4.14 \times 10^{-21} = \frac{1}{2} M_n v_n^2 = \frac{1}{2} 1.67 \times 10^{-27} v_n^2$$

$$v_n = 2.227 \times 10^3 \text{ m/s}$$

または、

$$E_{room} = 8.617 \times 10^{-5} \times 300 = 0.026 \text{ eV}$$

原子核の放射性壊変

- 多くの放射線は、**放射性同位元素の崩壊**で生じる
- 放射性同位元素の壊れやすさは**半減期**や**寿命**であらわす
- **1秒1個**崩壊する放射能を **1 Bq**

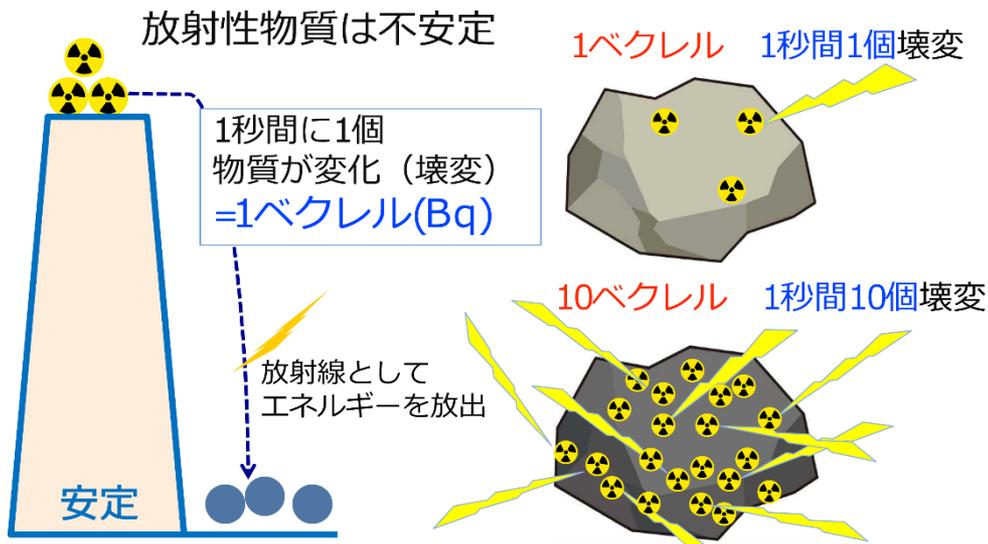


図:放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料 平成24年度版 ver.2012001 より

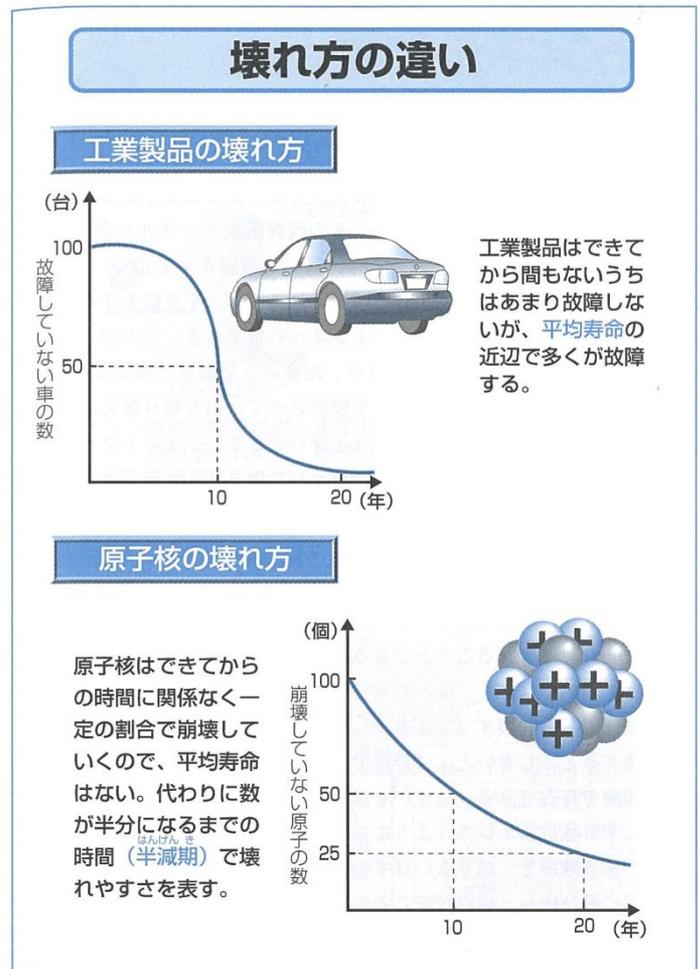


図:ナツメ社「図解雑学原子力」(竹田敏一)より

原子核の放射性壊変

- 多くの放射線は、**放射性同位元素の崩壊**で生じる
- 放射性同位元素が自発的に放射線を放出し別の原子になることを**放射性壊変**
- $A(t)$, $N(t)$ をある時間 t での放射能と同位元素の数とすると、

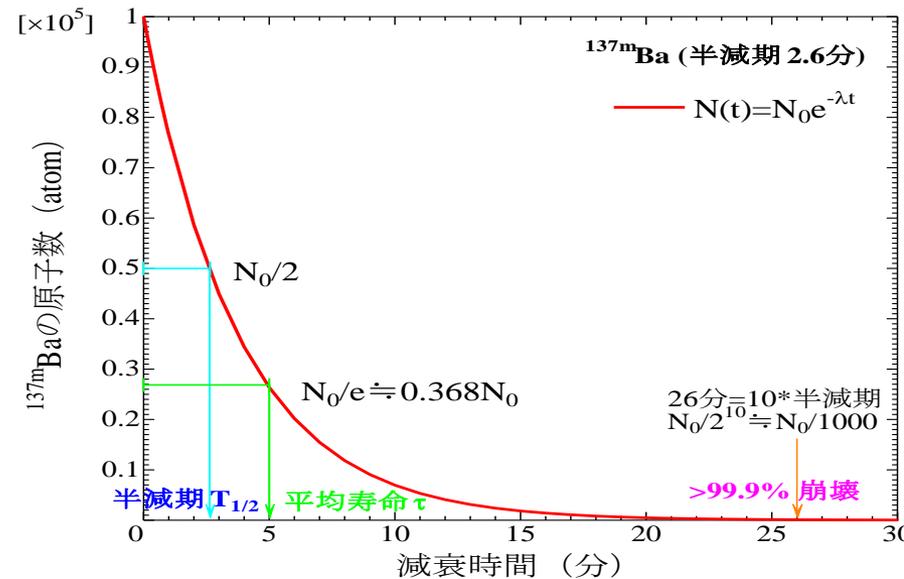
$$A(t) = -\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N(t),$$
$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t},$$

λ は崩壊定数であり、平均寿命の逆数

崩壊定数 λ 、平均寿命 τ 、半減期 $T_{1/2}$ には、

$$T_{1/2} = \ln 2 \frac{1}{\lambda} = \ln 2 \tau \sim 0.693 \tau,$$

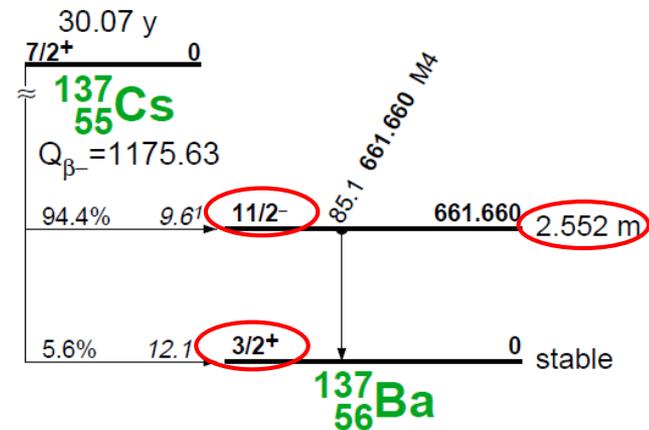
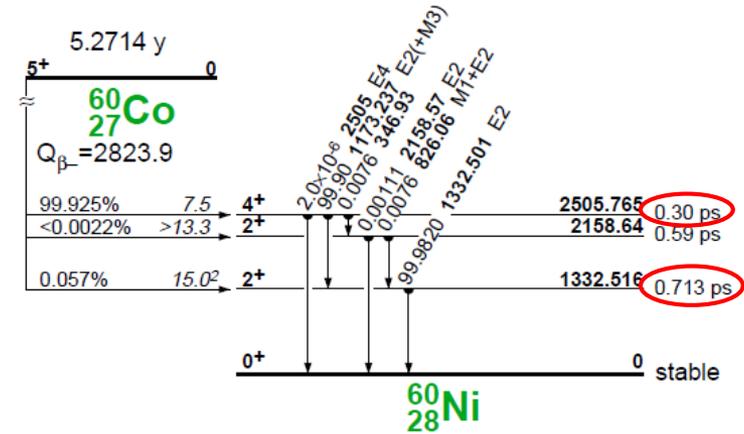
の関係がある



減衰曲線 (^{137m}Ba)

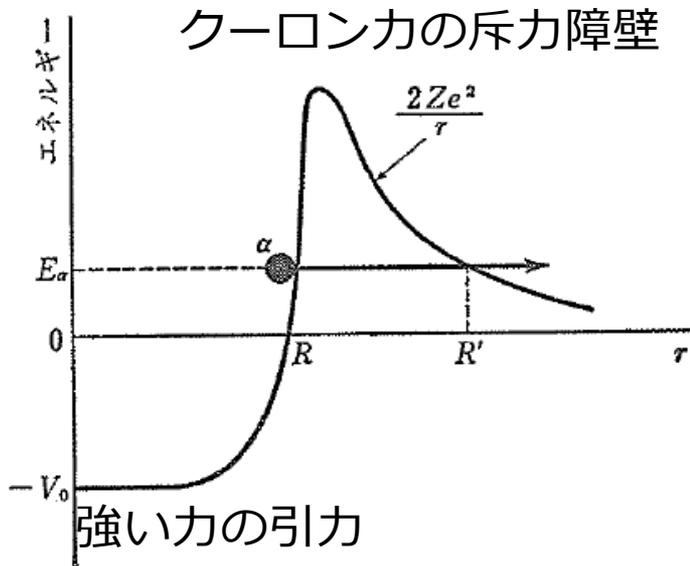
核異性体 (Nuclear Isomer)

- 多くの原子核の励起状態は、寿命が短い。ガンマ線を放出する励起状態は、電磁相互作用によって起こるので、粒子を放出する励起状態よりは寿命が長い
- チェックソースとしてよく使用されるCo-60の娘核 Ni-60 では、0.3 ps と0.7 ps と短寿命 ($4^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$)
- Cs-137の娘核 Ba-137m では2.5 min (150 sec) と桁(14桁!) 違いに長寿命 ($11/2^- \rightarrow 3/2^+$)

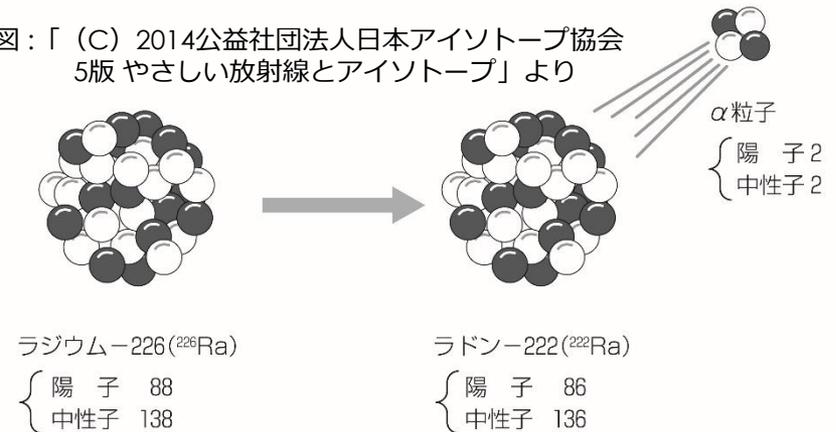


アルファ崩壊

- 原子核の結合エネルギー（強い力、核力）と電磁気力
トンネル効果でヘリウム原子核を放出



図：「(C) 2014公益社団法人日本アイソトープ協会
5版 やさしい放射線とアイソトープ」より

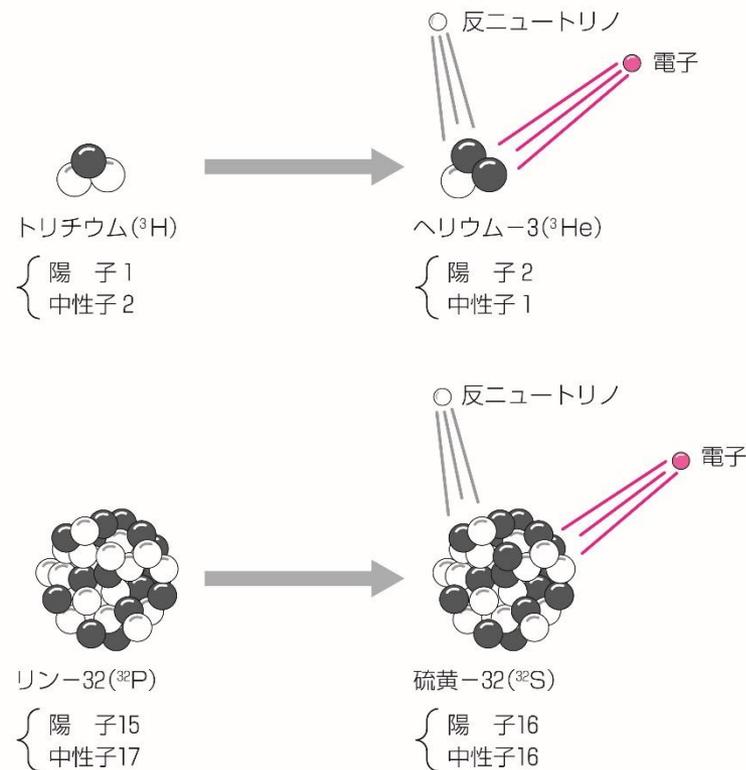


$$(Z, M) = (Z-2, M-4) + \alpha (2, 4)$$

八木浩輔、「原子核物理学」(1971)朝倉書店より、一部壊変

ベータ崩壊

- 弱い力で陽子と中性子を変換
- クォークの言葉でいうと、陽子は uud, 中性子は udd
- W^\pm の交換（弱い力）で u, d クォークの変換
- W^+ は陽電子とニュートリノ
- W^- は電子と反ニュートリノになって放出される

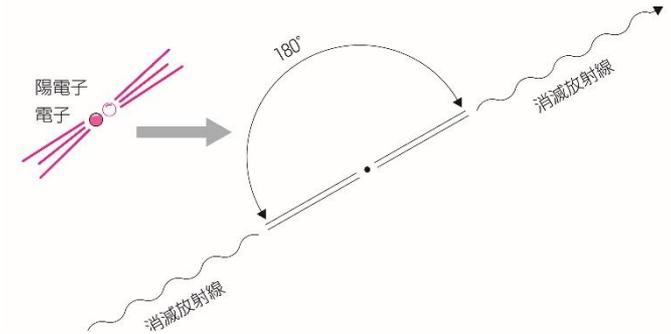


図：「(C) 2014公益社団法人日本アイソトープ協会
5版 やさしい放射線とアイソトープ」より

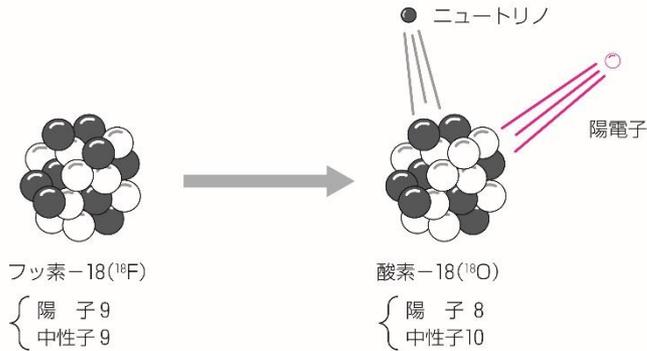
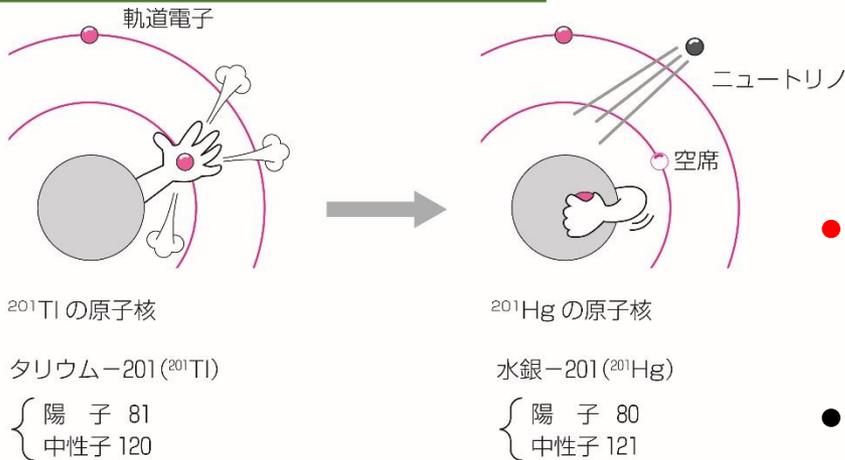
$$(Z, M) = (Z \pm 1, M) + e^\mp + \bar{\nu}/\nu$$

消滅ガンマ線と軌道電子捕獲

- 陽電子は正電荷を持つ電子の反物質
- β^+ 崩壊で放出された陽電子は、すぐに周りの電子と衝突して2つの γ 線になる



軌道電子捕獲



- 陽電子放出の代わりに軌道電子を捕獲
- 空席を埋めるため X線放出

ガンマ線とX線

- アルファ, ベータ崩壊の娘核

⇒ 大抵はエネルギーの高い
励起状態

- γ 線を放出もしくは、軌道電子にエネルギーを与えて放出
(内部転換) して安定になる

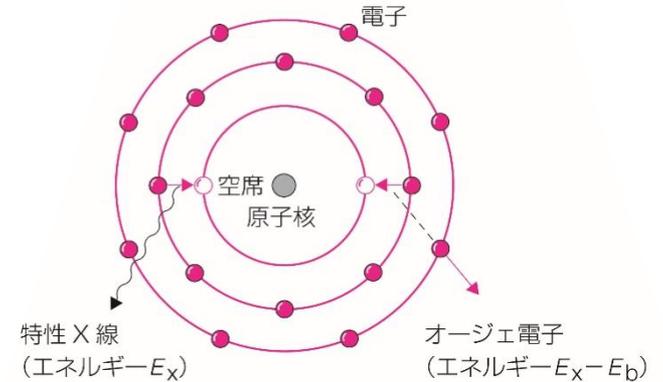
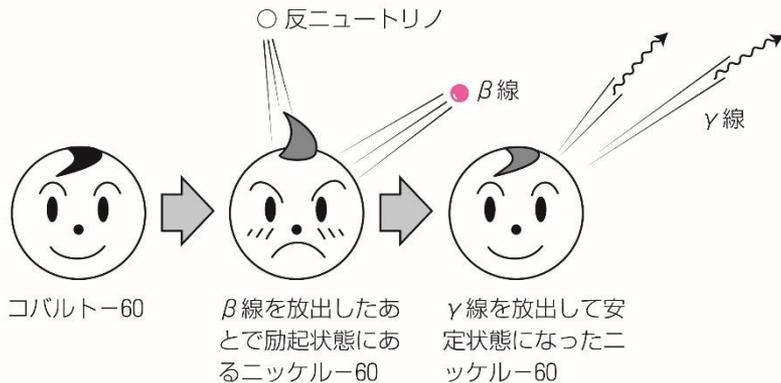


図: 「(C) 2014公益社団法人日本アイソトープ協会
5版 やさしい放射線とアイソトープ」より



{ 陽子 27
中性子 33

{ 陽子 28
中性子 32

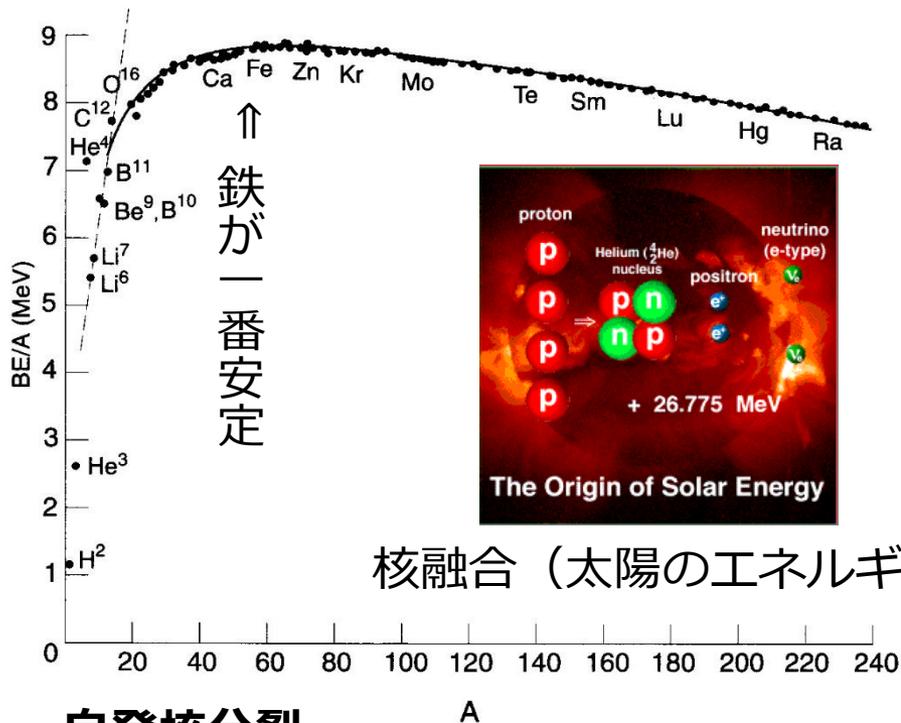
{ 陽子 28
中性子 32

- 内部転換電子で生じた軌道電子の空孔の緩和で特性X線やオージェ電子を放出

核分裂と核融合

- 強い力による引力とクーロン（電磁気）力のバランス

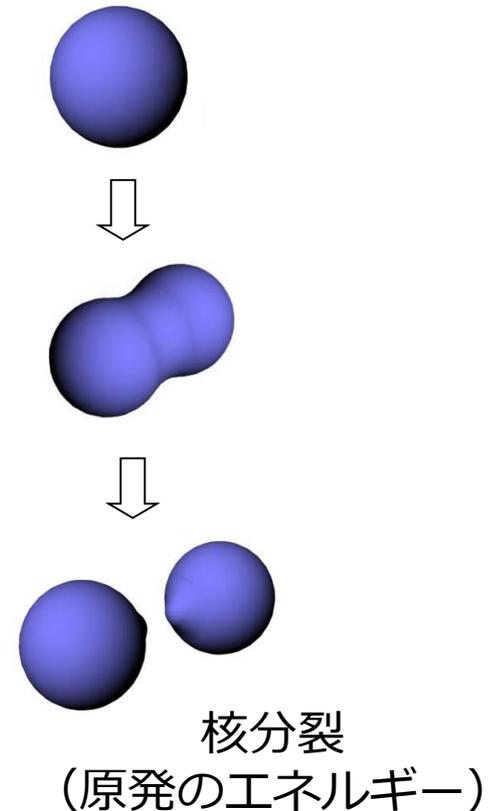
核子（陽子や中性子）一個あたりの結合エネルギー



自発核分裂

質量数の大きな原子核（Th以上）は、クーロン力で自発的に核分裂が起こる。自発核分裂の際には2～3個の中性子が同時に放出される。

$$M(\sim 240) = M(\sim 100) + M(\sim 140) + 2\sim 3n$$



Decay Scheme の読み方

分岐比

3種類(α 壊変、 β 壊変、 γ 線放出)の放射性壊変は通常競合して起こる。一個の原子核の崩壊に対するそれぞれの放出割合を分岐比という。

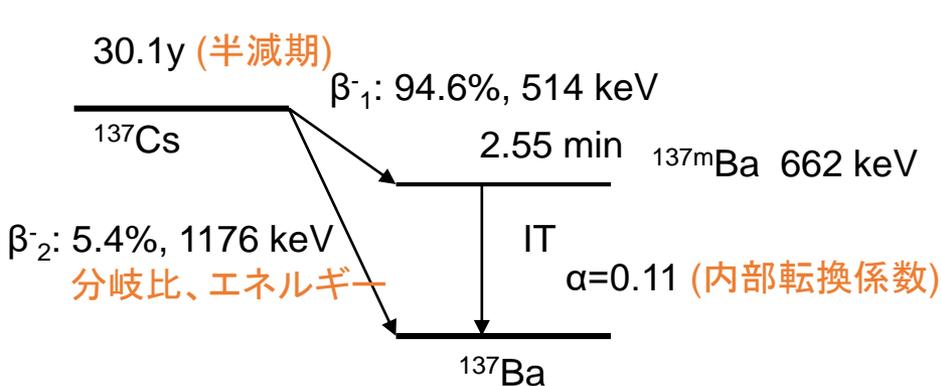
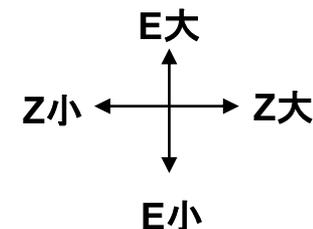
壊変図(Decay scheme)

原子核の励起エネルギー、壊変モード、 γ 線の強度比などを表した図

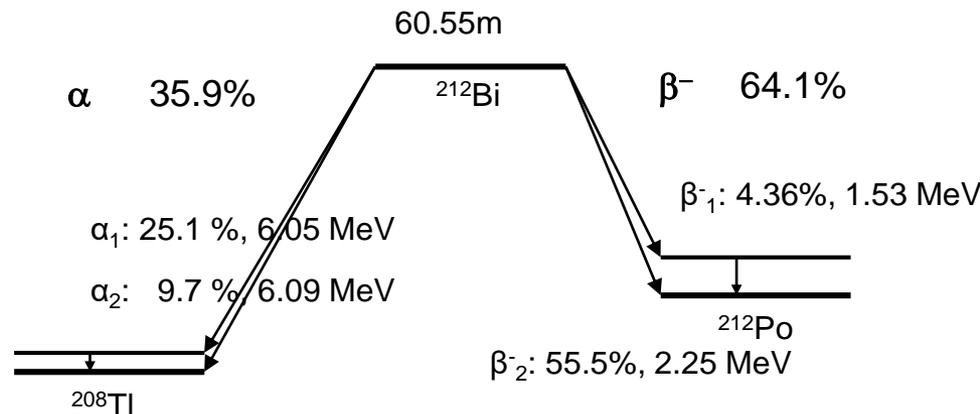
原子番号が減少(β^+ 、 α 壊変)・・・左斜めの矢印

原子番号が増加(β^-)・・・右斜めの矢印

原子番号が不変でエネルギーが減少(γ 線放出)・・・下向きの矢印



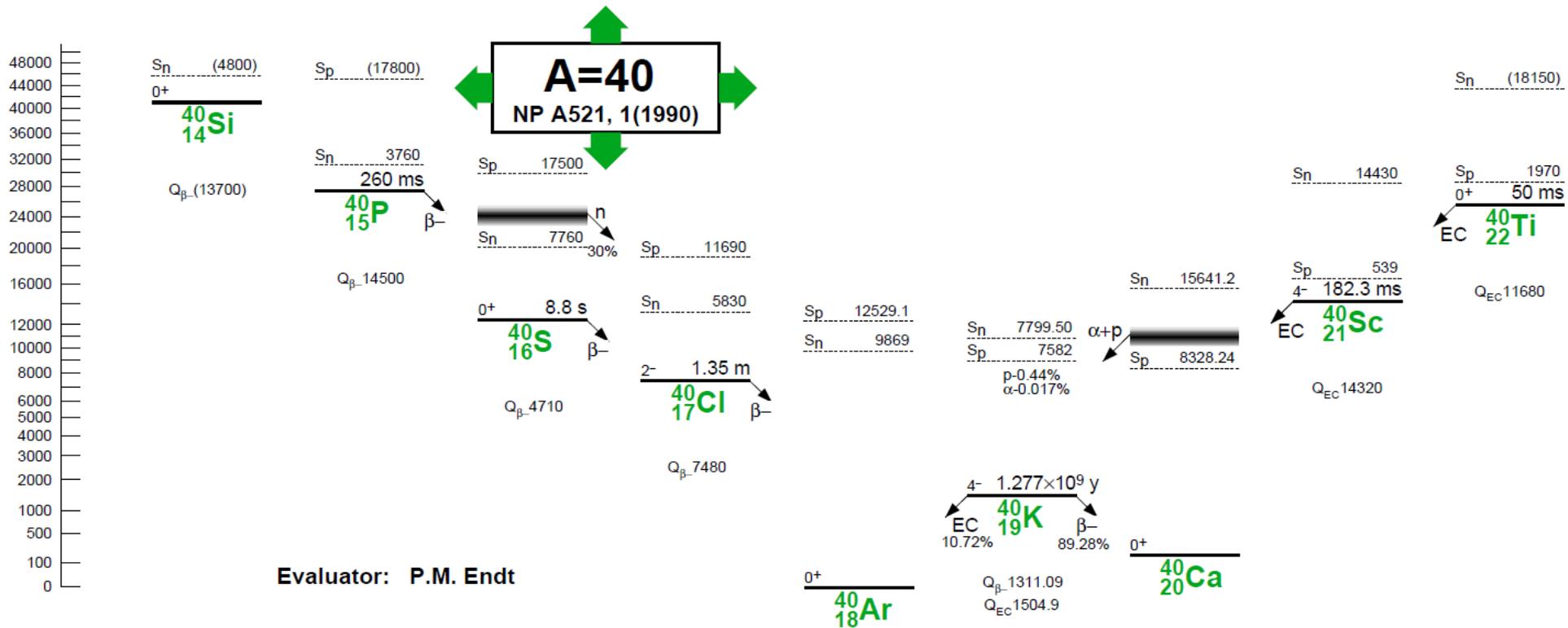
^{137}Cs の壊変図(核異性体を経由する壊変例)



^{212}Bi の壊変図(α 壊変と β^- 壊変を起こす例)

原子核の安定性

● 質量数 40 の例、ECと β^- の競合



図：「Table of Isotopes 8th Edition」より

放射能と放射線の強さ

- 放射能は放射線を出す能力のこと

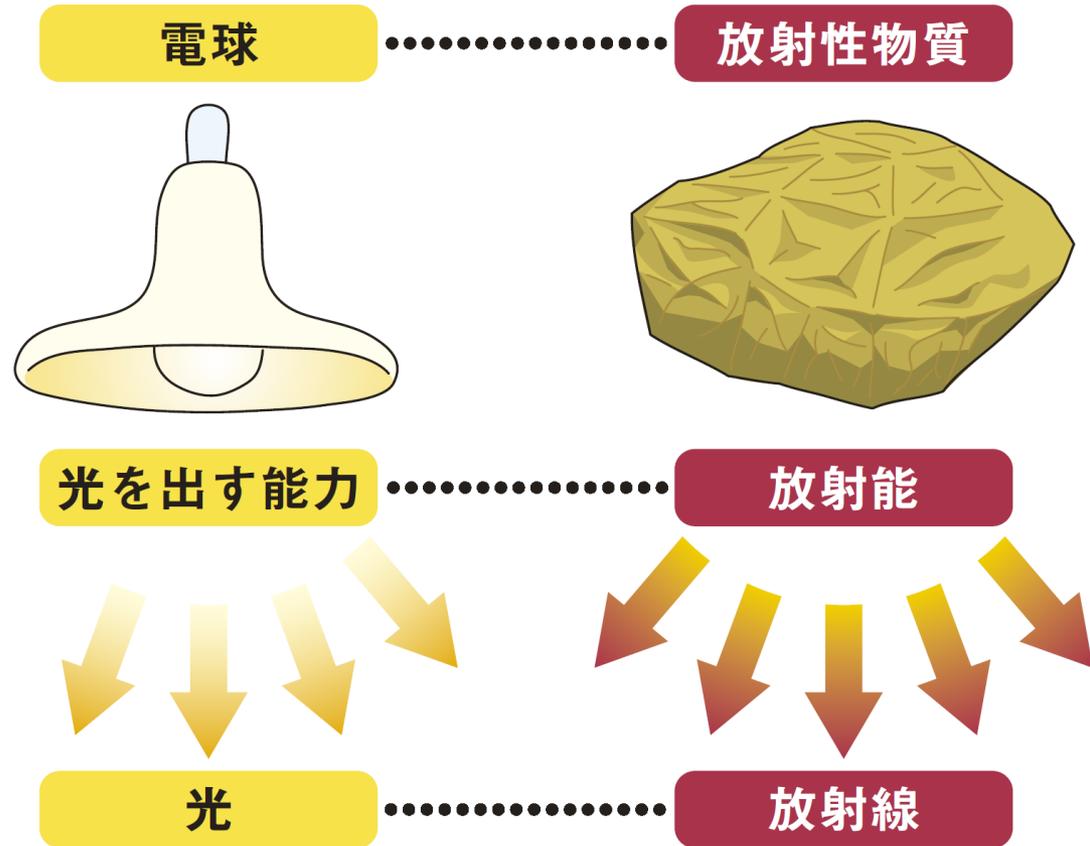
- 電球と放射性物質

- 放射能の強さは、一秒間に何個原子核が崩壊するかで表す

ベクレル (Bq)

- ‘放射性物質’と‘放射能’は同じ意味で使う場合もある

- 放射線の量は、グレイやシーベルト



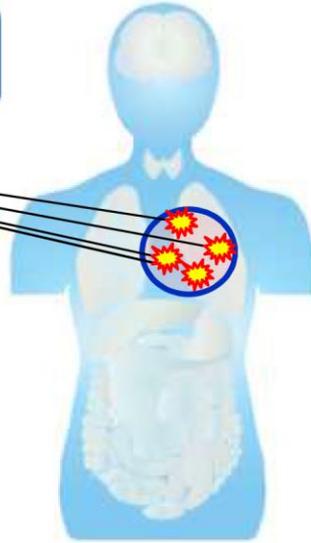
図：中学生・高校生のための放射線副読本より

ベクレル, グレイ, シーベルト

ベクレル (Bq)
放射能の強さ

グレイ (Gy) 放射線を受けた単位質量の
物質が吸収するエネルギー量

放射性物質
(あるいは放射線発生装置)



吸収線量
(Gy)

=

$$\frac{\text{吸収されたエネルギー (J)}}{\text{物質/生体の部分の質量 (kg)}}$$

換算
・放射線の種類
・臓器の感受性

シーベルト (Sv)

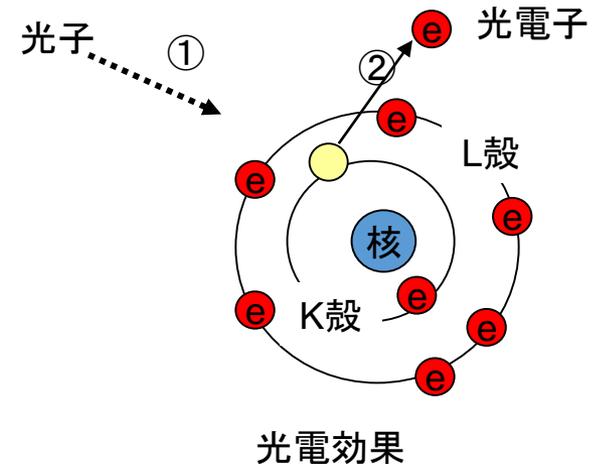
放射線の量を人体影響の
大きさを表す単位

放射線と物質の相互作用（光子）

X, γ 線と物質の相互作用 (光電効果)

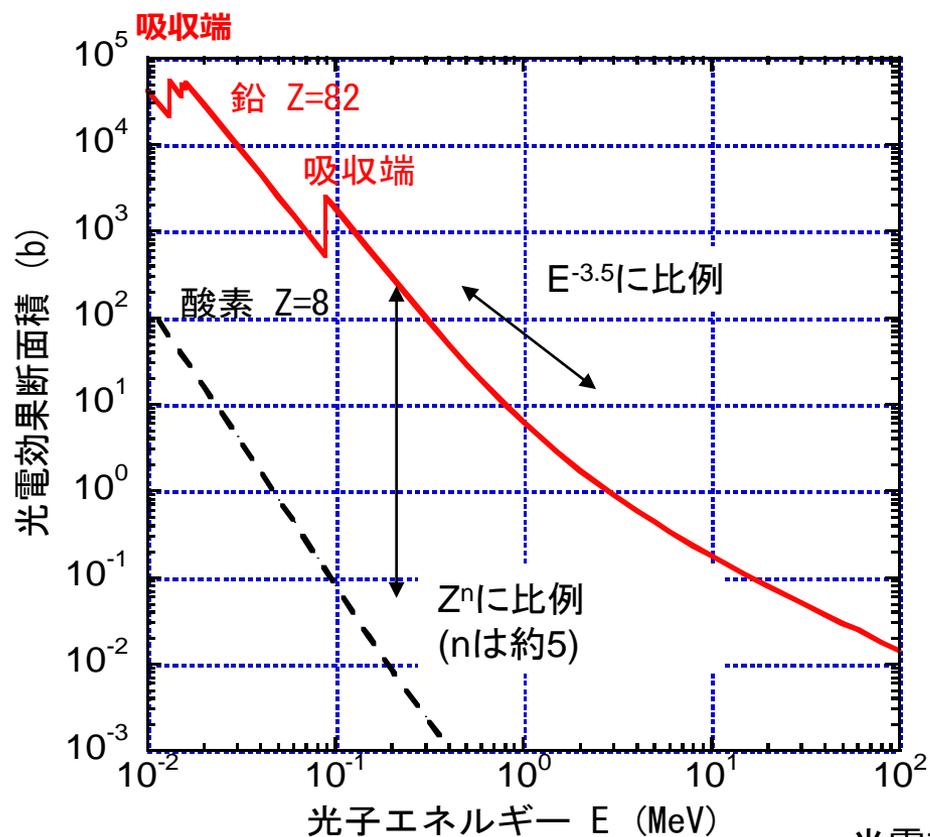
光電効果

光子が原子に吸収されて無くなり(①)、
軌道電子が原子から飛び出す(②)反応

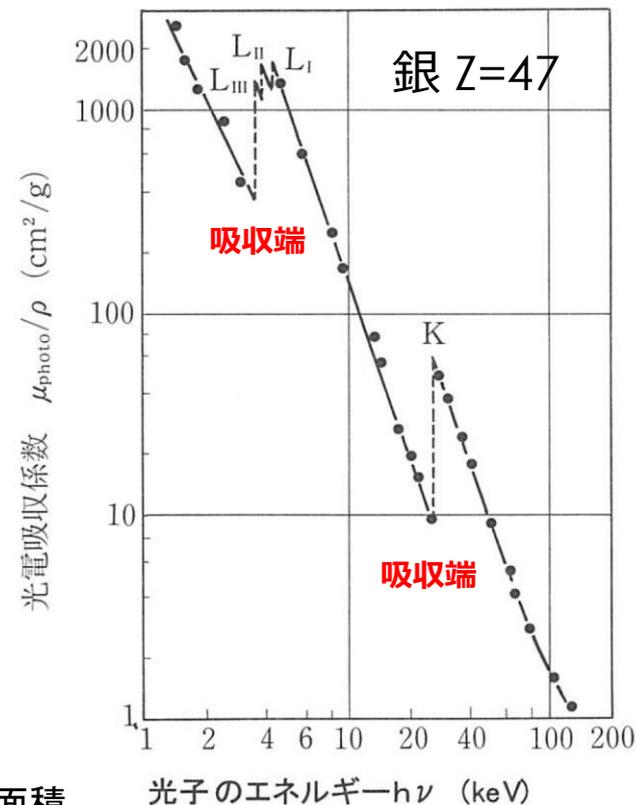


- ✓ 反応確率は Z^n に依存 ($n \sim 5$)
鉛などの重い原子では非常に重要
水などの軽い物質ではあまり重要ではない
- ✓ 反応確率は E^m に依存 ($m \sim -3.5$)
数100keV以下の低エネルギーで重要
それ以上のエネルギーでの重要度は低い
- ✓ 光電効果は、入射光子エネルギーが電子の束縛エネルギーを上回る殻について起きる→吸収端
- ✓ 複数の殻で光電効果が可能な場合には内側の殻ほど起こりやすい

光電効果の断面積の例



光電効果断面積



飛び出す電子（光電子）のエネルギー

$$E = k_0 - BE$$

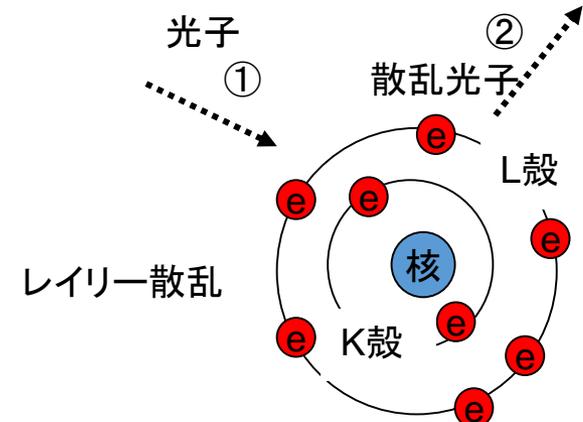
100 keV 光子が鉛のK殻で光電効果を起こすと、 $E = 100 - 88 = 12$ keV

運動量とエネルギー保存を同時に満たすため、自由電子では起こらない反応

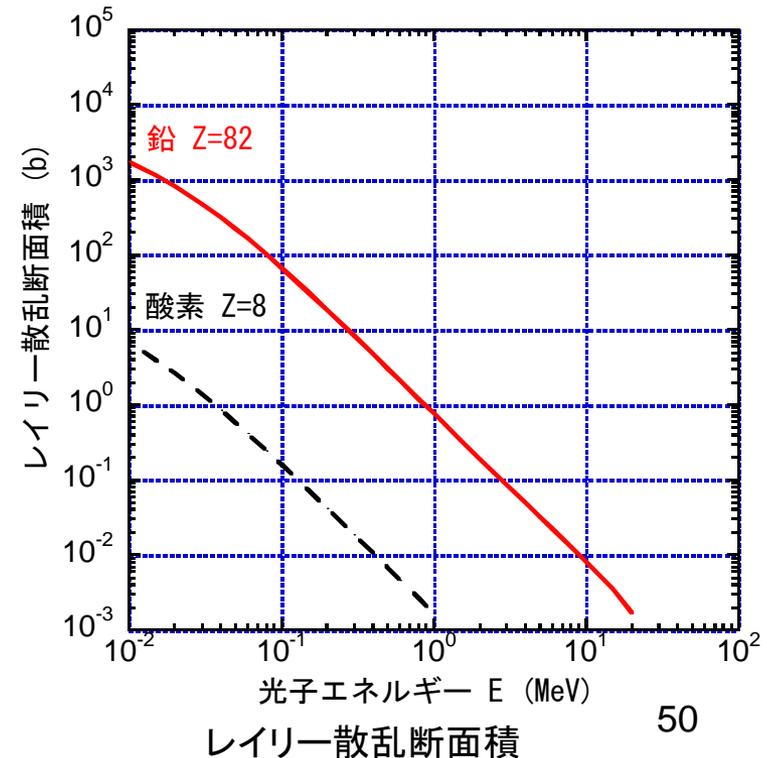
X, γ 線と物質の相互作用 (レイリー散乱)

レイリー散乱

入射光子 (①)を、原子内のすべての軌道電子が一体となって散乱(②)する反応



- ✓ 原子の重さが、光子の質量よりもはるかに重いため、原子の受け取る運動エネルギーはきわめてわずか
- ✓ 散乱前後の光子のエネルギーは変わらず、方向だけが変わる→光子の弾性散乱
- ✓ レイリー散乱の断面積は、 Z の2乗に比例

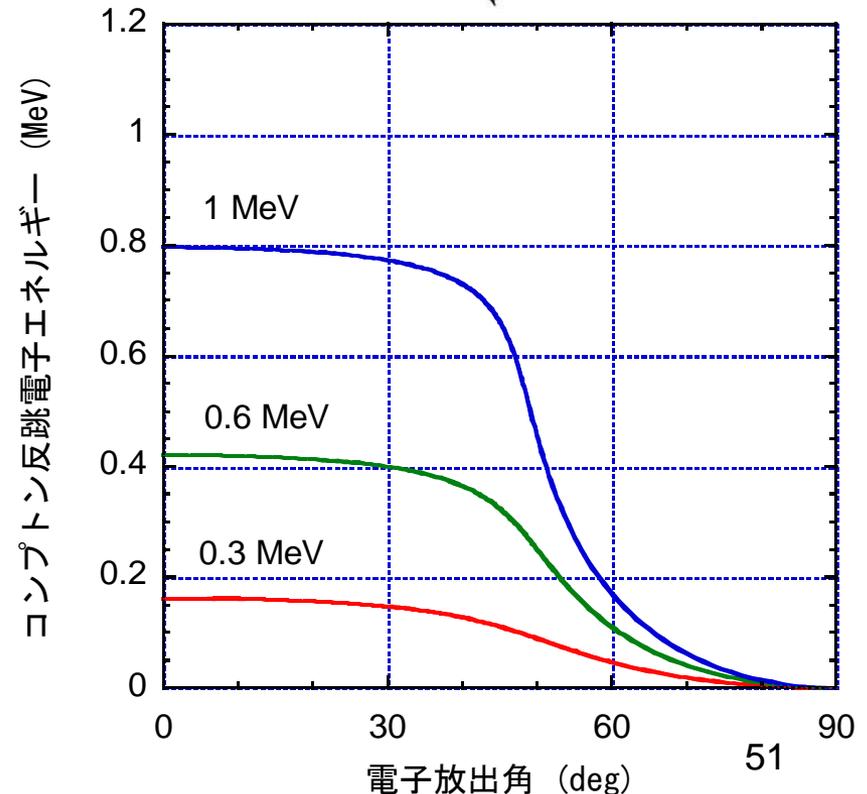
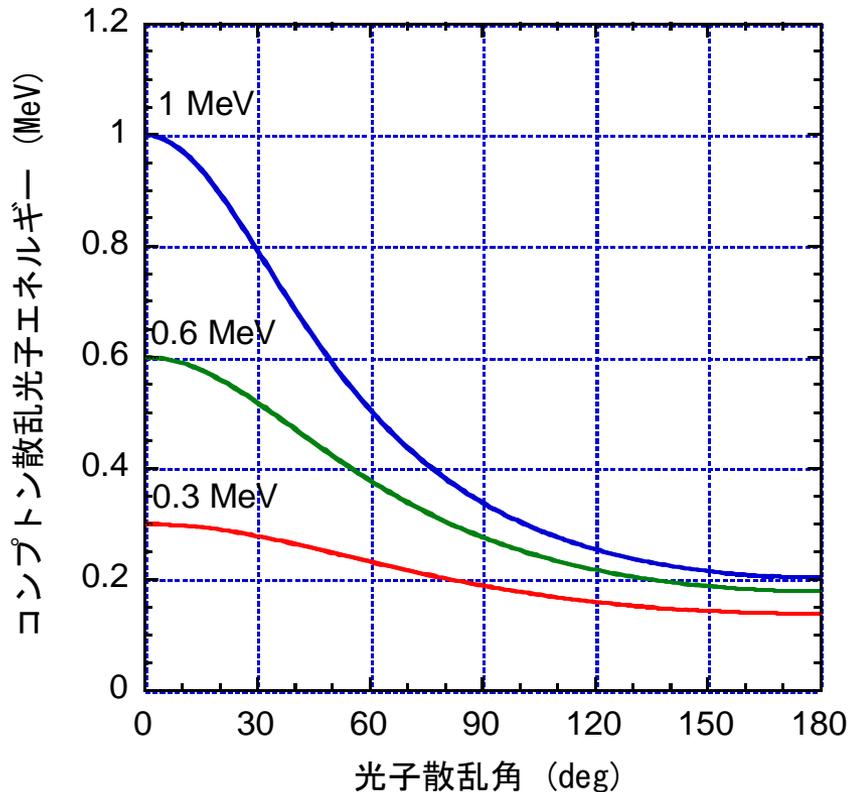
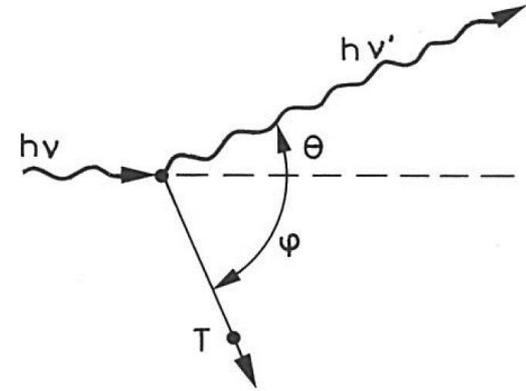


X, γ 線と物質の相互作用 (コンプトン散乱)

コンプトン散乱

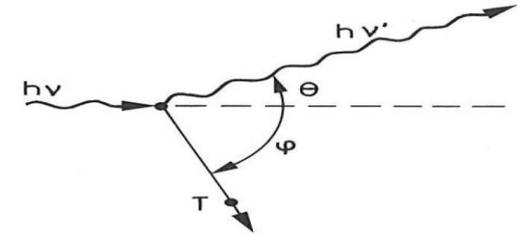
自由電子と光子の散乱

- ✓ 自由電子との散乱なので、断面積はZ(標的となる電子の数)に比例

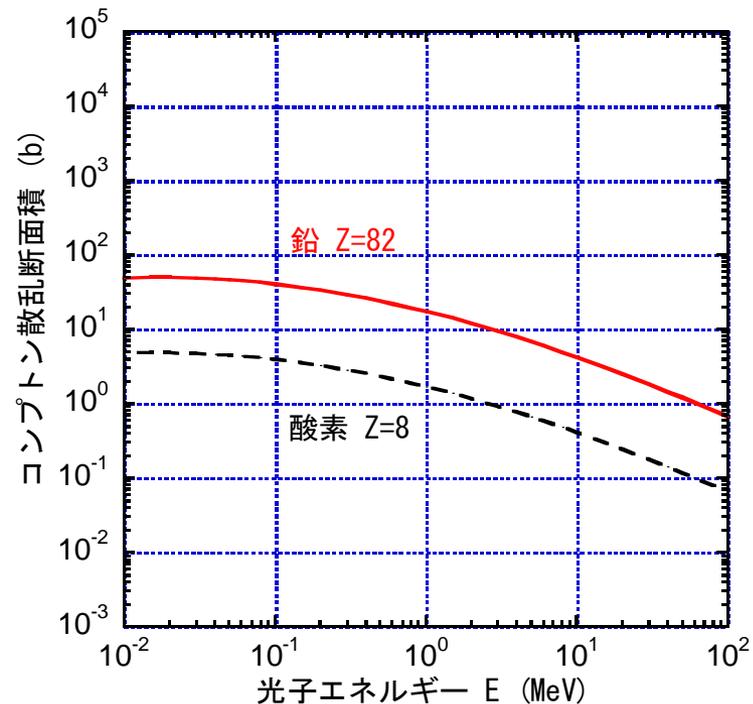
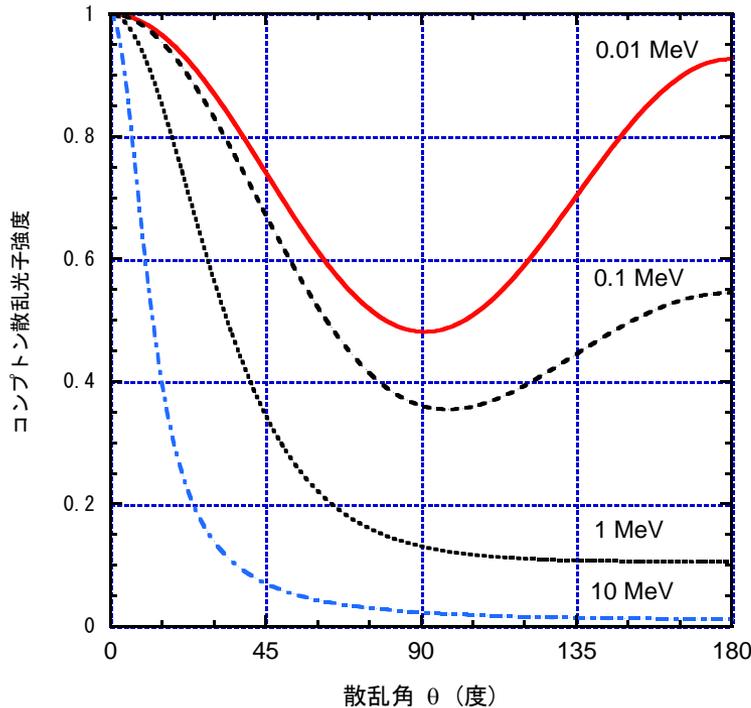


コンプトン散乱

- ✓ 自由電子との散乱なので、断面積はZ(標的となる電子の数)に比例
- ✓ 散乱後のエネルギーはエネルギー-運動量保存から計算
- ✓ 角度微分断面積は有名なクライン・仁科の式で計算

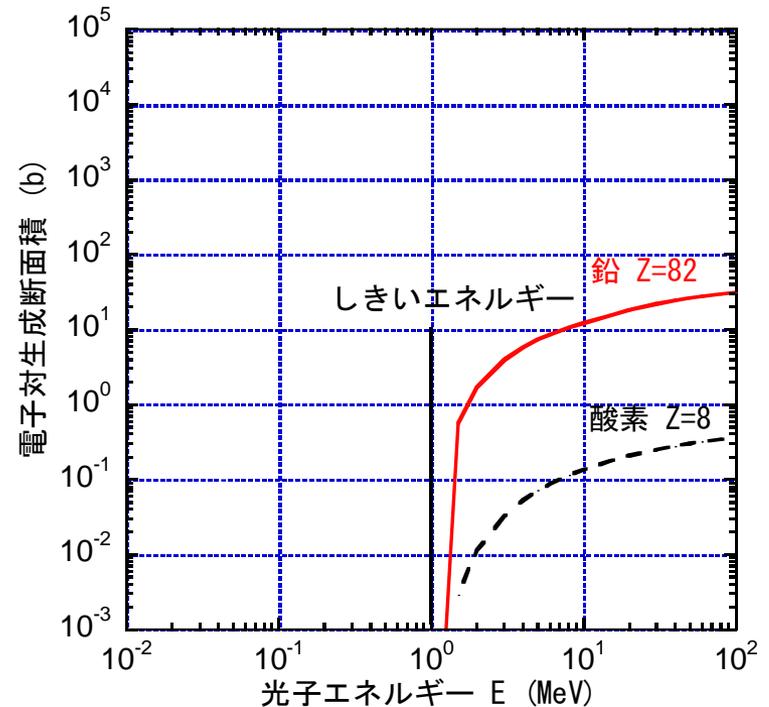
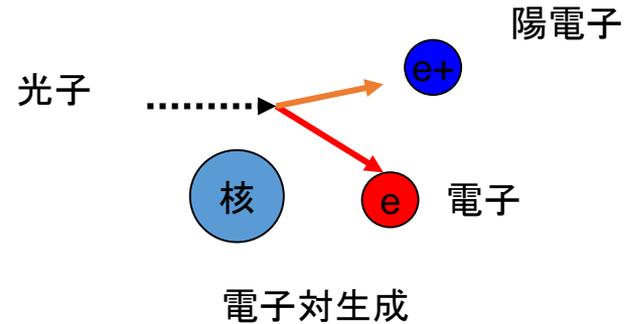


$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_e}(1 - \cos\theta)}$$



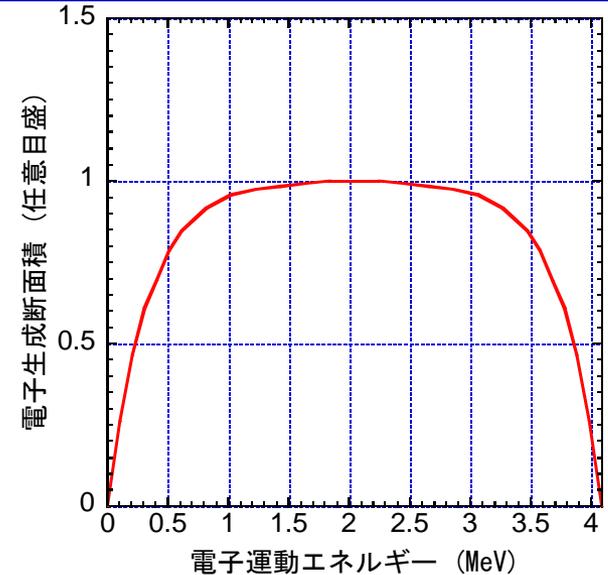
電子対生成

- ✓ 光子が、原子核や原子中の電子の強い電場を感じて消滅し、電子と陽電子を生成する反応を、**電子対生成**
- ✓ 電子と陽電子を生成する反応のため、しきい値が存在し、電子と陽電子の質量の和 (1.022... MeV) に等しい
- ✓ Cs-137からのガンマ線 (661 keV) では電子対生成は起きないが、Co-60からのガンマ線 (1173 keV, 1332 keV) では起きる
- ✓ 断面積は $Z(Z+1) \log E$ に比例

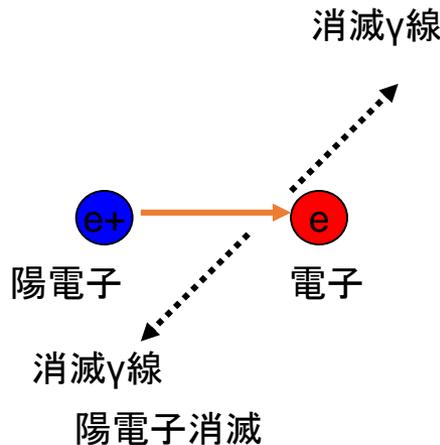


電子対生成と陽電子消滅

- ✓ 電子対生成で発生した電子と陽電子のエネルギーは連続分布
- ✓ 電子と陽電子が同じエネルギーになることは極めてまれ



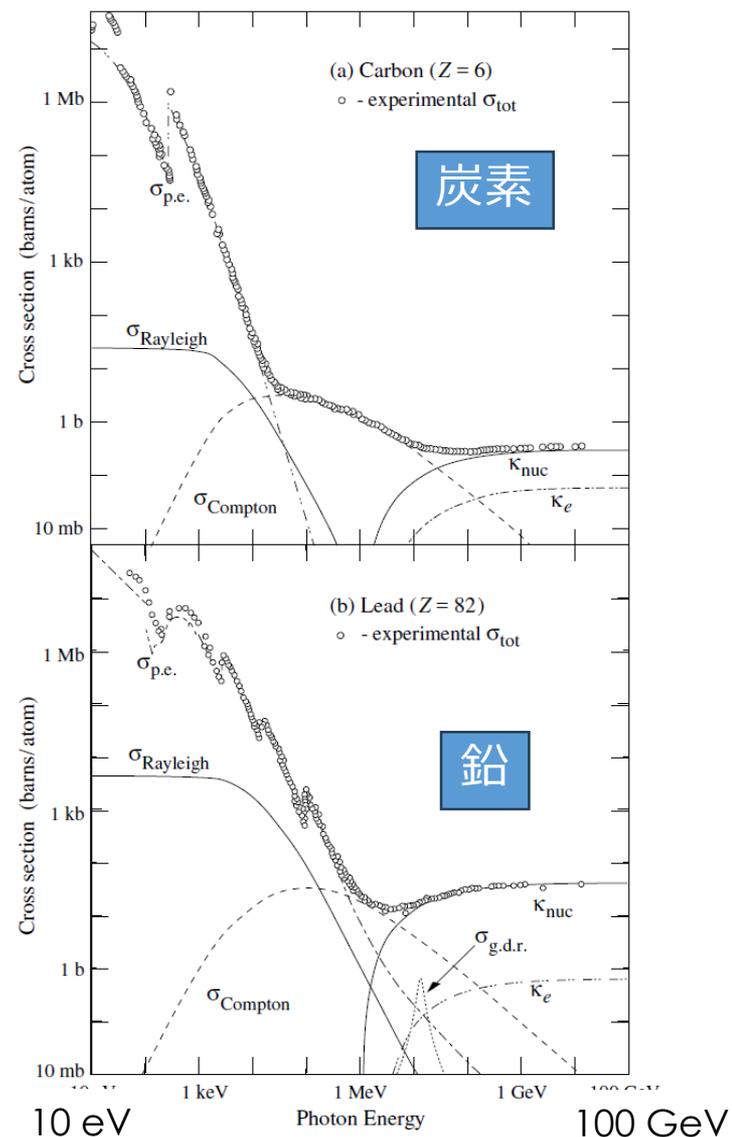
5.11 MeVの光子が電子対生成を起こす場合の電子のエネルギー分布



- ✓ 電子対生成で発生した陽電子は物質中の電子と衝突し消滅 → **2つのガンマ線**
- ✓ 陽電子が物質中で静止してから消滅 → **0.511 MeV のガンマ線**が生成
- ✓ 運動中に衝突する確率は低い

光子と物質の相互作用

- ✓ 軽い物質と光子の相互作用
 - ✓ 30 keV以下は**光電効果**
 - ✓ 0.1 – 10 MeVは**コンプトン反応**が主要な反応
 - ✓ 30 MeV以上は**電子対生成**
- ✓ 重い物質と光子の相互作用
 - ✓ 1 MeV以下は**光電効果**
 - ✓ 1 MeV付近の狭い範囲が**コンプトン反応**
 - ✓ 数 MeVを超えると**電子対生成**
 - ✓ 10 MeV付近に原子核反応からの寄与 (**巨大双極子共鳴**)



放射線と物質の相互作用 (荷電粒子)

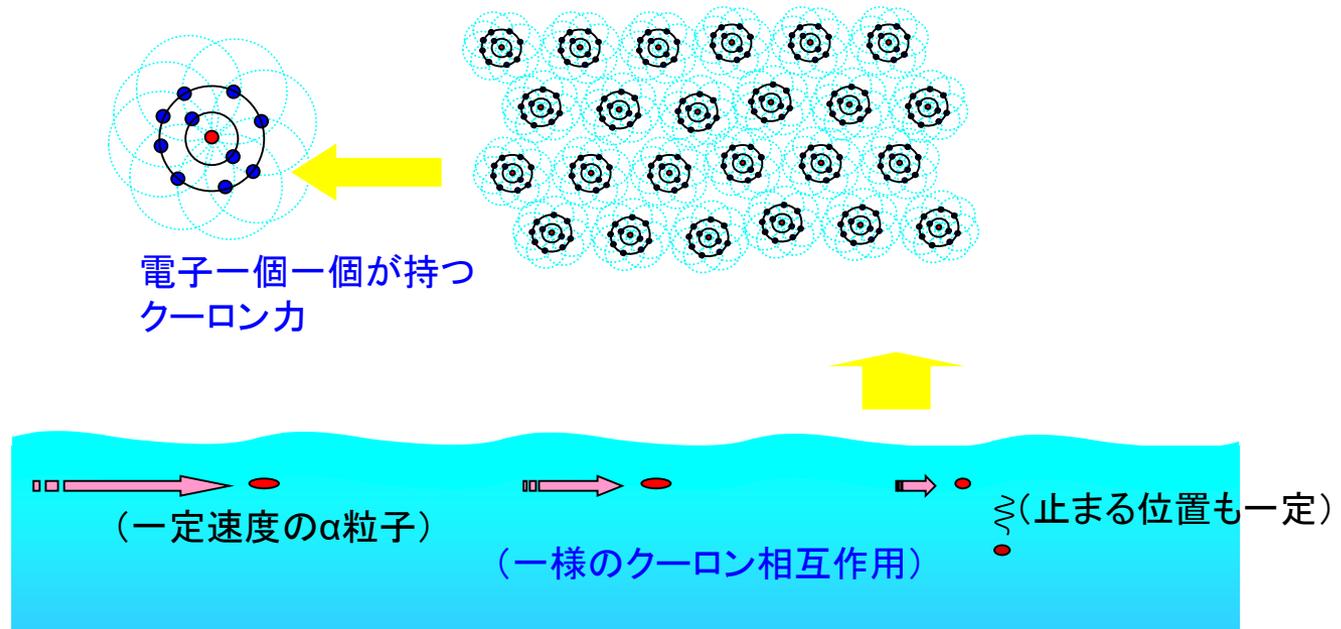
荷電粒子と物質の相互作用

- ✓ 法律上のベータ線
 - ✓ 電子および陽電子線
- ✓ 法律上の1 MeV以上の電子線
軽い荷電粒子線
- ✓ 法律上の重荷電粒子線
 - ✓ アルファ線
 - ✓ 重陽子線、陽子線
 - ✓ 重粒子(バリオン)で電荷を持つ物(Δ^{++} , Δ^{\pm} , Σ^{\pm} , $N^{*\pm}$ 等)とその複合粒子(重イオン)線
- ✓ 法律に含まれない荷電粒子線
 - ✓ ミュー粒子、タウ粒子線
 - ✓ 荷電中間子(π^{\pm} , ρ^{\pm} , K^{\pm} 等)線
重い荷電粒子線

放射線と物質の相互作用 (重い荷電粒子)

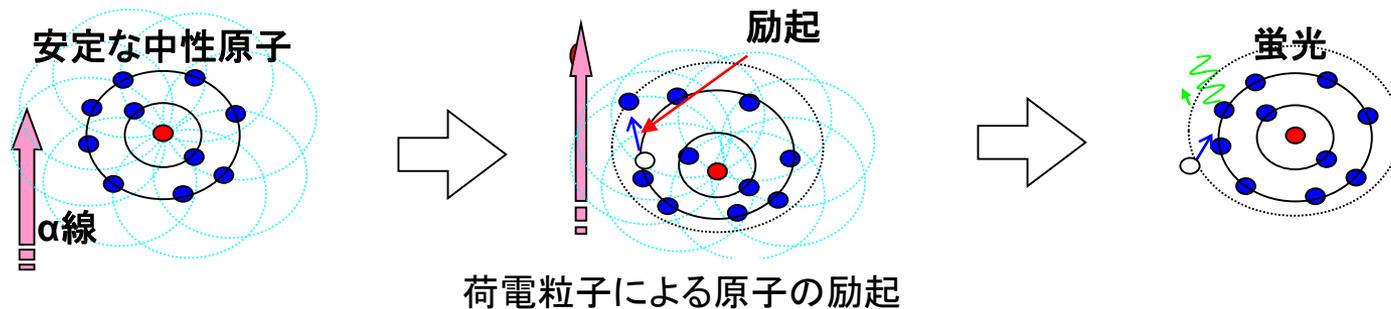
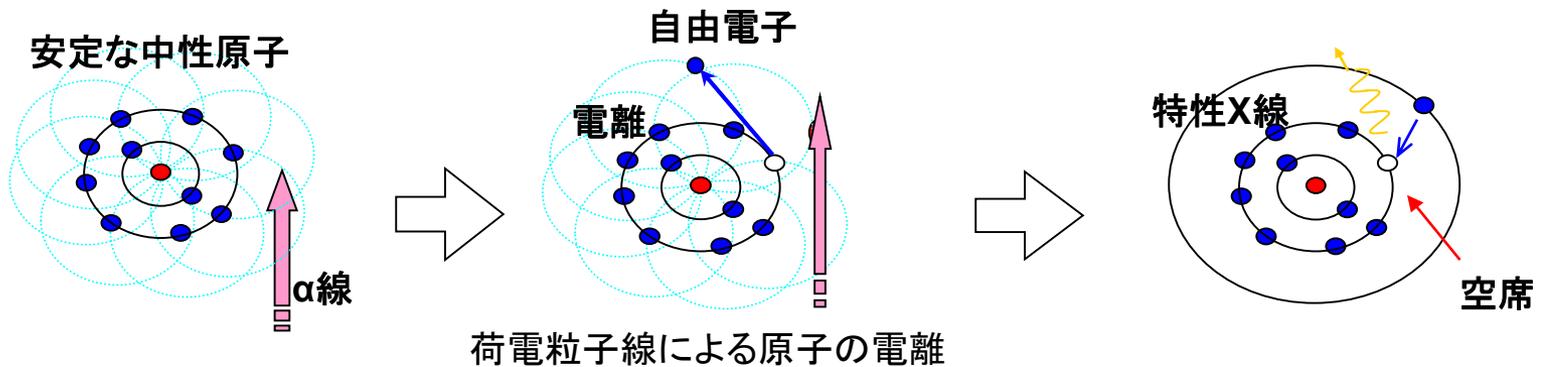
重い荷電粒子と物質の相互作用

- ✓ 物質中の電子が形成する電場と相互作用
- ✓ 電子と比較して入射粒子の質量が桁違いに大きい
ため、**方向を変えずにエネルギーを失い減速**
- ✓ エネルギーは原子との衝突で、**励起**や**電離**
- ✓ 極く稀に原子核の電場で大きく方向を変える
→ ラザフォード散乱



電離と励起

- ✓ 荷電粒子が原子との衝突でエネルギーを失う
- ✓ 失ったエネルギーは、原子の「電離」と「励起」
- ✓ 電離で出た電子のエネルギーが高いとき (数100 eV)
デルタ線→周囲の原子を電離(二次電離)
アルファ線の場合、60~70%が二次電離



阻止能

✓ 荷電粒子が物質中で単位長あたりに失うエネルギー

阻止能

$$\frac{dE}{dx} = \frac{z^2 e^4}{4\pi\epsilon_0^2 m_e v^2} nZ \left\{ \ln \frac{2m_e v^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 \right\}$$

ϵ : 真空の誘電率

z : 荷電粒子の原子番号

m : 電子の静止質量

v : 荷電粒子の速度

n : 原子数密度 (atom/cm³)

Z : 物質の原子番号

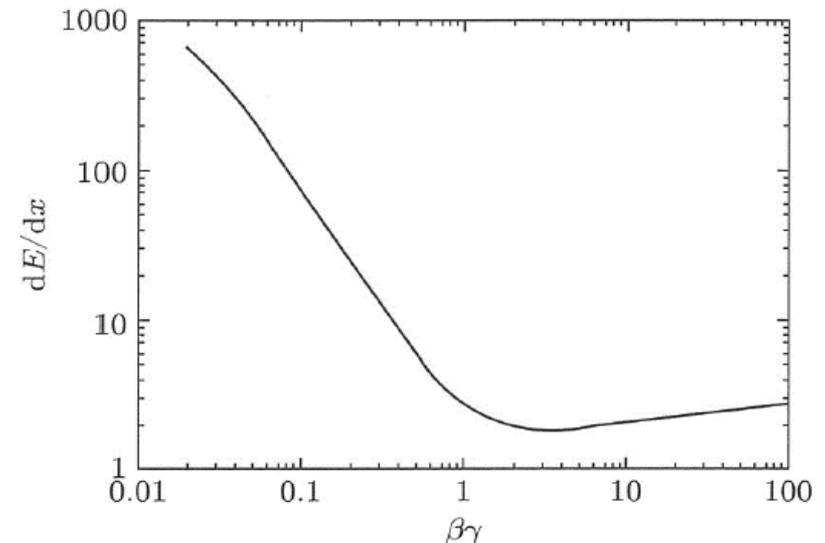
I : 原子の平均励起エネルギー

β : v/c

式の詳細より、依存性が重要

入射粒子の電荷の自乗に比例し、速度の自乗に反比例

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dx} &\propto \frac{z^2}{v^2} \propto \frac{z^2 M}{E} \\ &\propto \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} (4 \ln \beta\gamma - 2\beta^2 \dots) \end{aligned}$$

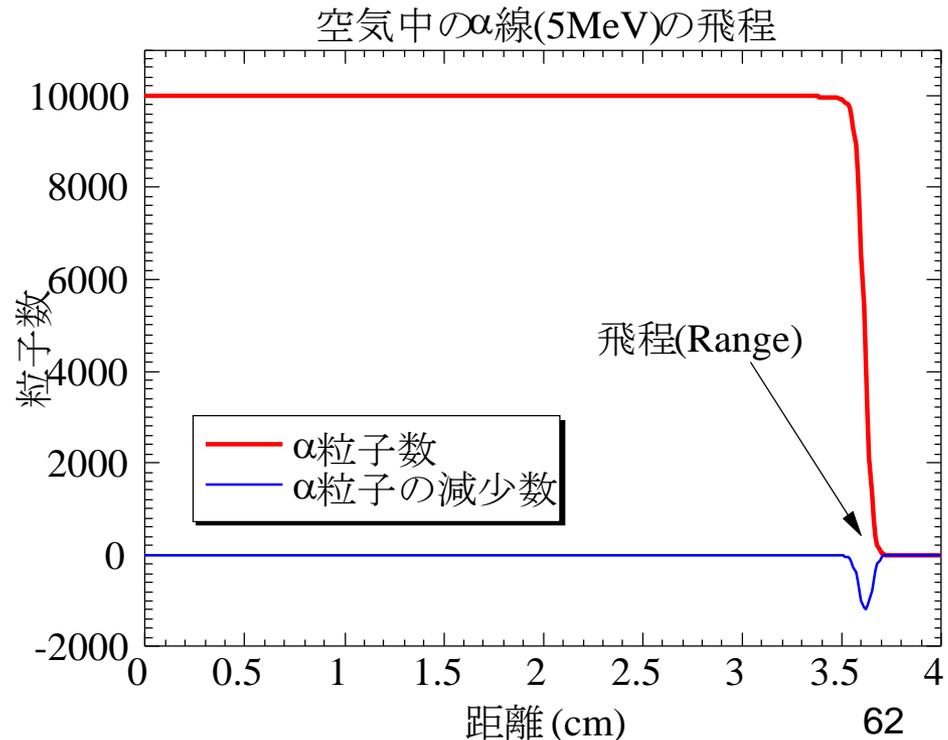


飛程

- ✓ 荷電粒子が物質中でエネルギーを失い静止するまでに進んだ距離：**飛程** (阻止能の逆数を静止まで積分)
- ✓ 阻止能と同様、式の詳細より依存性が重要
 - ✓ 入射粒子の電荷の自乗に反比例し、速度の4乗に比例

$$R = \int_{E_{in}}^0 \frac{1}{-\frac{dE}{dx}} dE$$

$$R \propto \frac{1}{\left(\frac{z^2 M}{E}\right)} dE \propto \frac{1}{z^2 M} E_{in}^2 \propto \frac{Mv^4}{z^2}$$



質量阻止能・質量飛程

$$\frac{dE}{dx} = \frac{z^2 e^4}{4\pi\epsilon_0^2 m_e v^2} nZ \left\{ \ln \frac{2m_e v^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 \right\}$$

$$R = \int_{E_{in}}^0 \frac{1}{-\frac{dE}{dx}} dE$$

- ✓ $nZ = \rho N_A Z/A$ (N_A はアボガドロ定数)、物質の A/Z は2前後で水素以外物質の種類にあまり依存しない
 - ✓ 単位長さの単位として、 $[g/cm^2]$ を取ると、阻止能、飛程ともに物質にあまり依存しない
- **質量阻止能、質量飛程**

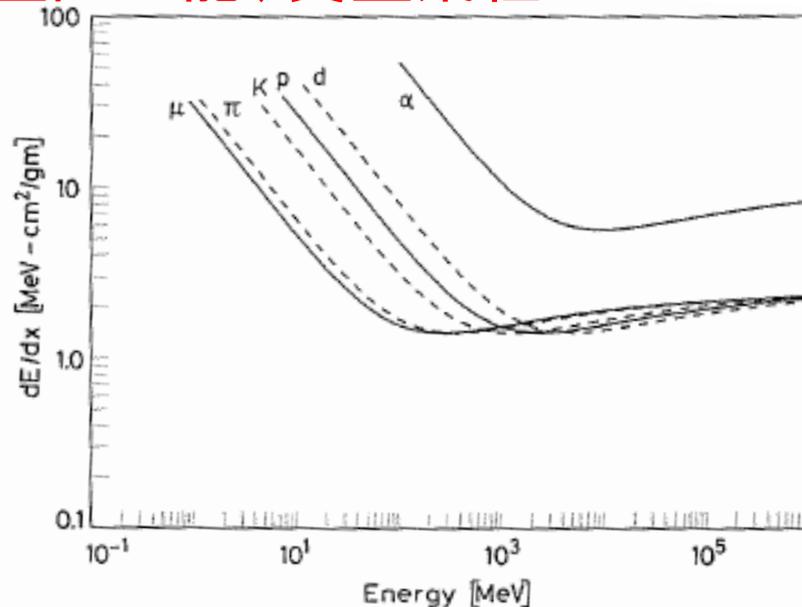
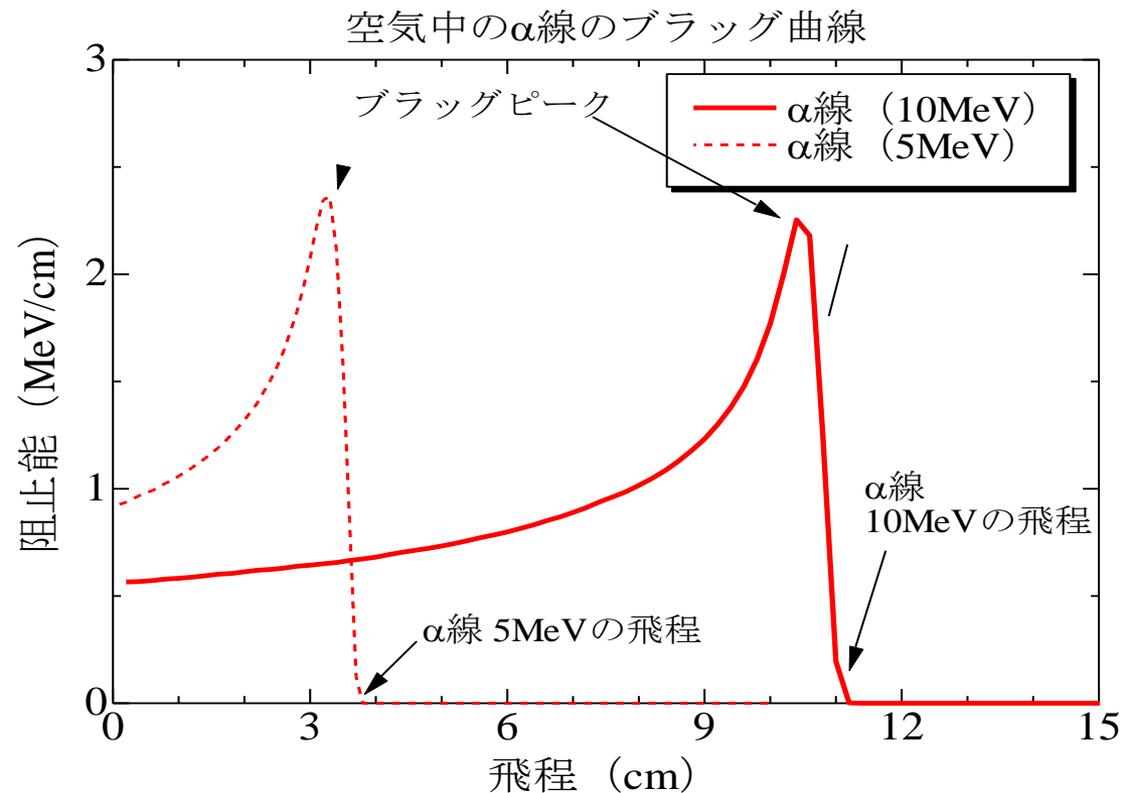


Fig. 2.4. The stopping power dE/dx as function of energy for different particles

ブラッグピーク

- ✓ 阻止能は、速度の2乗に反比例
- ✓ 粒子が静止する直前で非常に大きくなる
- ✓ 物質中の距離と阻止能の関係：**ブラッグ曲線**
- ✓ 静止直前の阻止能が大きくなる振舞：**ブラッグピーク**
→ **がんの重粒子線治療の原理**

$$\frac{dE}{dx} \propto \frac{z^2}{v^2} \propto \frac{z^2 M}{E}$$

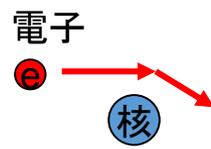


放射線と物質の相互作用 (軽い荷電粒子、ベータ線)

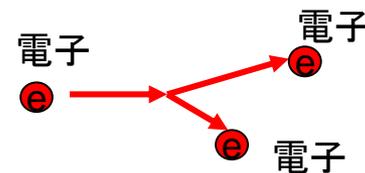
軽い荷電粒子 (e^{\pm}) と物質の相互作用

相互作用の対象	衝突	放射
原子核	ラザフォード散乱	制動放射
電子	非弾性散乱	制動放射

- ✓ 電子・陽電子は質量が軽く、**衝突**と**放射**がおきる
- ✓ 原子核との衝突は、方向のみを変える(弾性散乱)
- ✓ 電子との散乱では**電離**や**励起**(非弾性散乱)
- ✓ 低いエネルギーでは**衝突**による**励起**や**電離**がエネルギーを失う主要過程



原子核による電子の散乱
(ラザフォード散乱)



電子と電子の非弾性散乱

e^\pm と物質の相互作用 (放射)

- ✓ 制動放射の確率は、物質の原子番号の2乗に比例
- ✓ 制動放射の確率は、入射粒子質量の2乗に反比例
 - ✓ 通常電子の制動放射だけを考えれば良い
- ✓ 制動放射の角度広がりを目安は $1/\gamma$ [rad]

PHYSICAL REVIEW VOLUME 83, NUMBER 2 JULY 15, 1951
 Energy-Angle Distribution of Thin Target Bremsstrahlung
 L. I. SCHEFF
 Stanford University, Stanford, California
 (Received April 4, 1951)

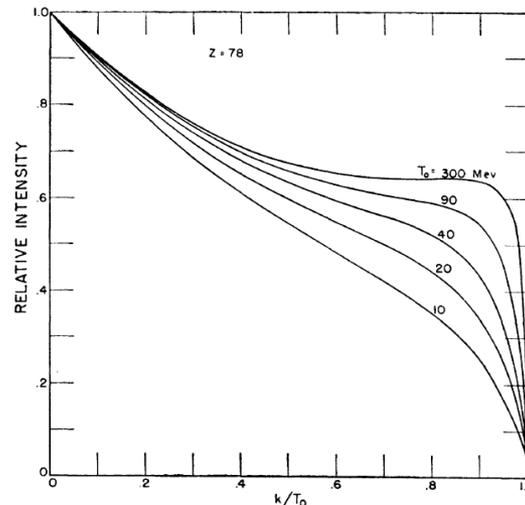
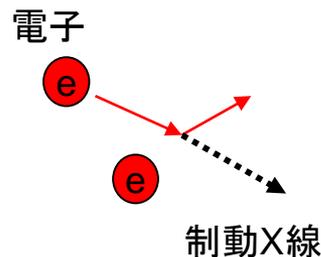
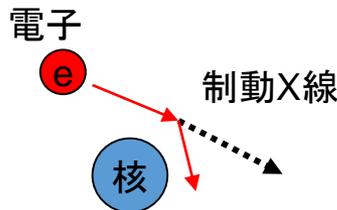


FIG. 4. Dependence of the bremsstrahlung spectrum shape on the electron kinetic energy for a platinum target ($Z=78$). The relative intensity (defined as proportional to the product of the photon energy and number per unit time) is integrated over the photon direction and is normalized to unity for zero photon energies. The intensity values were computed from Formula 3BS(e).

REVIEWS OF MODERN PHYSICS VOLUME 31, NUMBER 4 OCTOBER, 1959

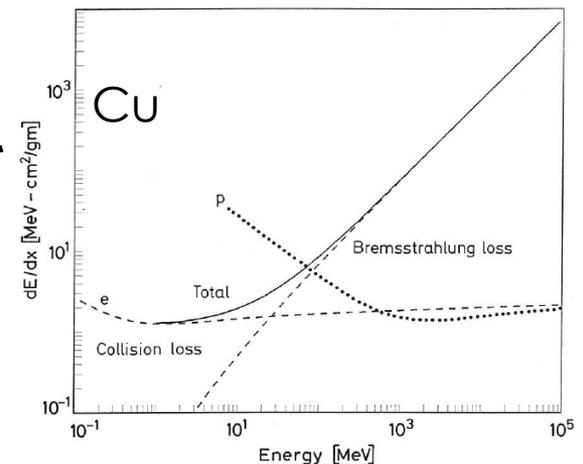
Bremsstrahlung Cross-Section Formulas and Related Data*

H. W. KOCH AND J. W. MOTZ
 National Bureau of Standards, Washington, D. C.

e^\pm の阻止能と放射長

- ✓ 重い荷電粒子が物質中を進む際に、単位長さあたりに衝突で失うエネルギー → **阻止能**
- ✓ e^\pm は、電子同士の非弾性散乱によるエネルギー損失を**衝突阻止能**、制動放射の損失を**放射阻止能**
- ✓ Cuの場合、24.8 MeV 以下は衝突阻止能が大、それ以上は放射阻止能が主
- ✓ このエネルギーを**臨界エネルギー**
- ✓ 放射によって失うエネルギーのみを考え、 $1/e$ になる距離を**放射長**

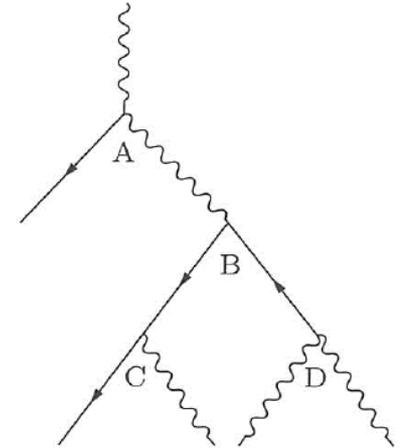
物質	放射長 (g/cm ²)
グラファイト	42.70 (密度による)
Al	24.01 (8.9 cm)
Cu	12.86 (1.43 cm)
Pb	6.37 (0.56 cm)
乾燥空気 (1気圧)	36.62 (304 m)



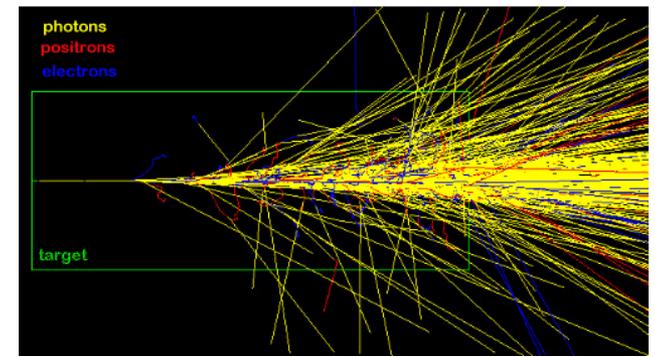
W.R. Leo "Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments" より

物質中の電磁カスケード

- ✓ 高エネルギーの電子または光子が物質に入射
- ✓ 高エネルギー電子が制動放射で**電子と光子**に
- ✓ 光子は対生成で**電子と陽電子** or コンプトン散乱で**光子と電子**に
- ✓ これらの繰り返しを**電磁カスケード**、**電子・陽電子と光子の一群を電磁シャワー**、**電子・光子シャワー**
- ✓ シャワー中の粒子の平均エネルギーが**臨界エネルギー**を下回るまで成長、その後衝突過程で**エネルギーを損失**



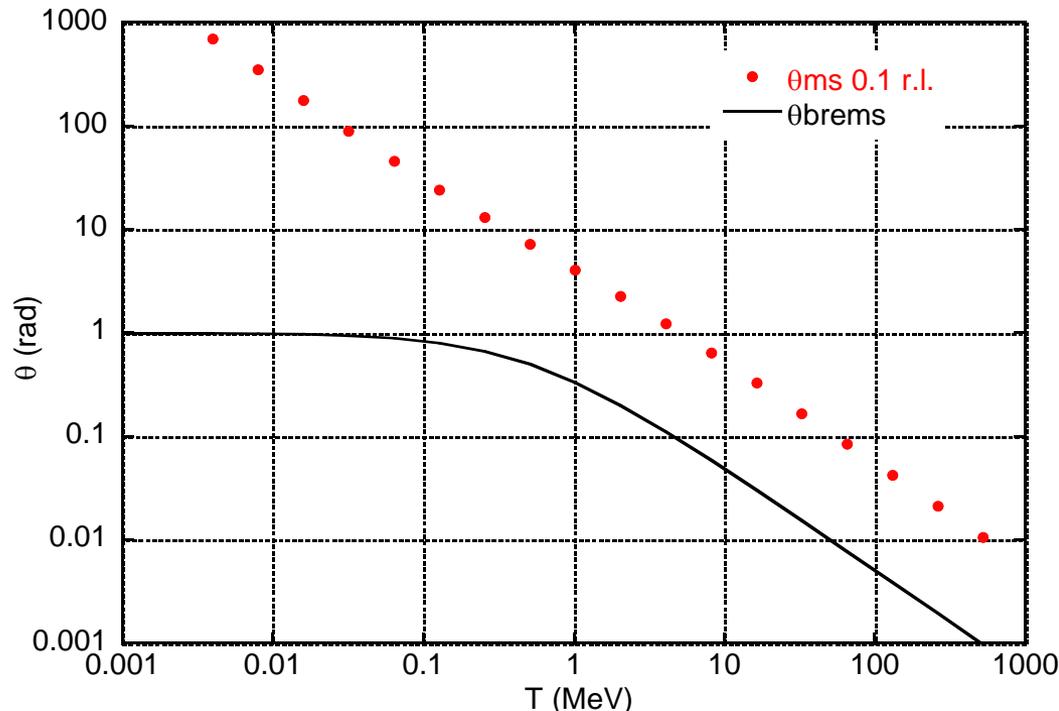
Massive shower in a tungsten cylinder (outlined in green) produced by a single 10 GeV incident electron.



物質中の多重散乱

- ✓ 物質中で多数回の小角散乱の繰り返し
- ✓ 電子の進行方向が、ガウス分布の角度拡がり

$$\theta_{\text{ms}}[\text{deg}] = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0.038 \ln \left(\frac{x}{X_0} \right) \right]$$



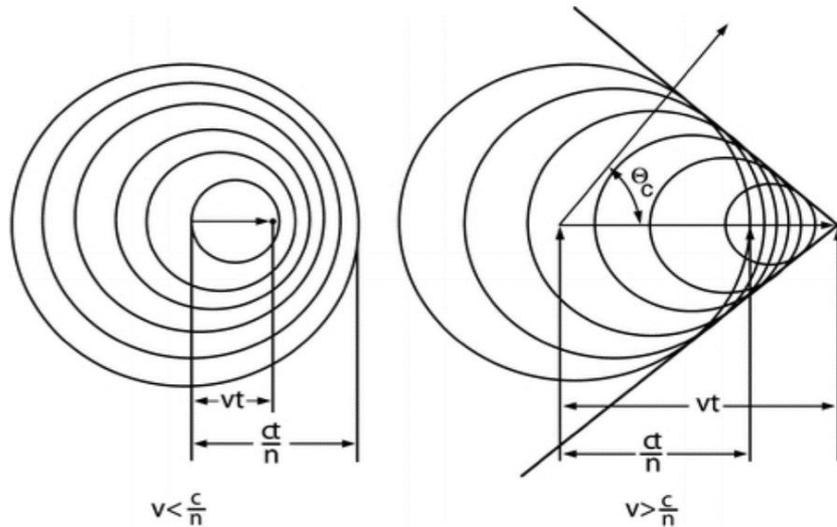
制動放射光子の放出角度および多重散乱角度 (0.1 X_0 の場合)

その他の放射

✓ チェレンコフ放射

- ✓ 媒質中で荷電粒子が媒質中光速度を超
- ✓ 粒子からの電場の波頭が光となって放射

$$\cos\theta = \frac{1}{n\beta}$$



✓ 遷移放射

- ✓ 誘電率が異なる2媒質の境界を荷電粒子が通過する際に起きる

✓ シンクロトロン放射

- ✓ 荷電粒子が磁場中で進行方向を変えるときに起きる

放射線と物質の相互作用 (中性子、電荷を持たない)

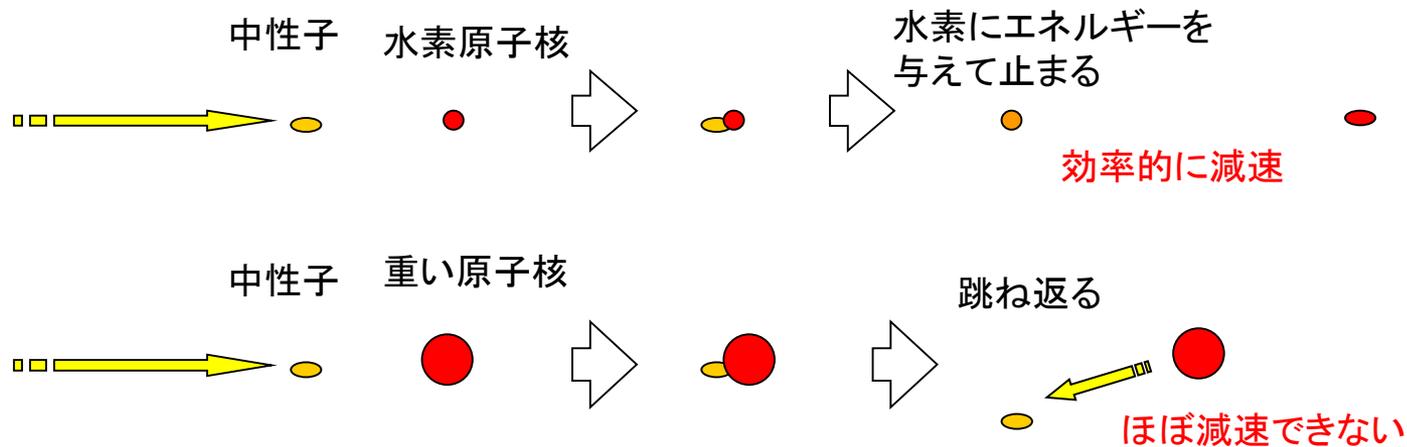
中性子と物質の相互作用

- ✓ 中性子は電荷を持たないため、これまで主な相互作用の**クーロン相互作用**を受けない
- ✓ 電子と相互作用せずに、**原子核と相互作用**
- ✓ 中性子と原子核との核反応は、中性子の持つエネルギーによって様相が異なる
- ✓ 中性子のエネルギーによる分類と、代表的な反応

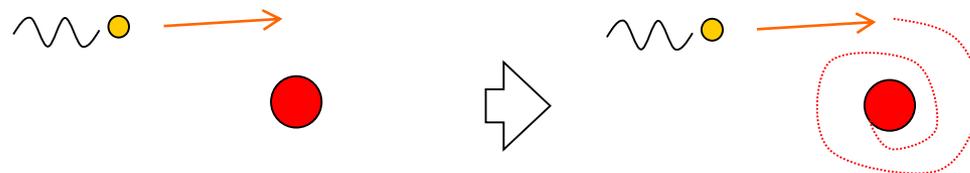
エネルギー	名称	代表的な核反応
$< 0.025 \text{ eV}$	冷中性子	
$\sim 0.025 \text{ eV}$	熱中性子 ($\sim 300 \text{ K}$)	中性子捕獲反応
$0.1 \text{ eV} \sim 1 \text{ keV}$	熱外中性子	
$> 0.1 \text{ MeV}$	速中性子	散乱 (弾性、非弾性)

速中性子と熱中性子の反応

- ✓ 中性子は物質中の原子核との核反応(吸収、散乱)
- ✓ 速中性子を減速するためには、水素との反応が有効

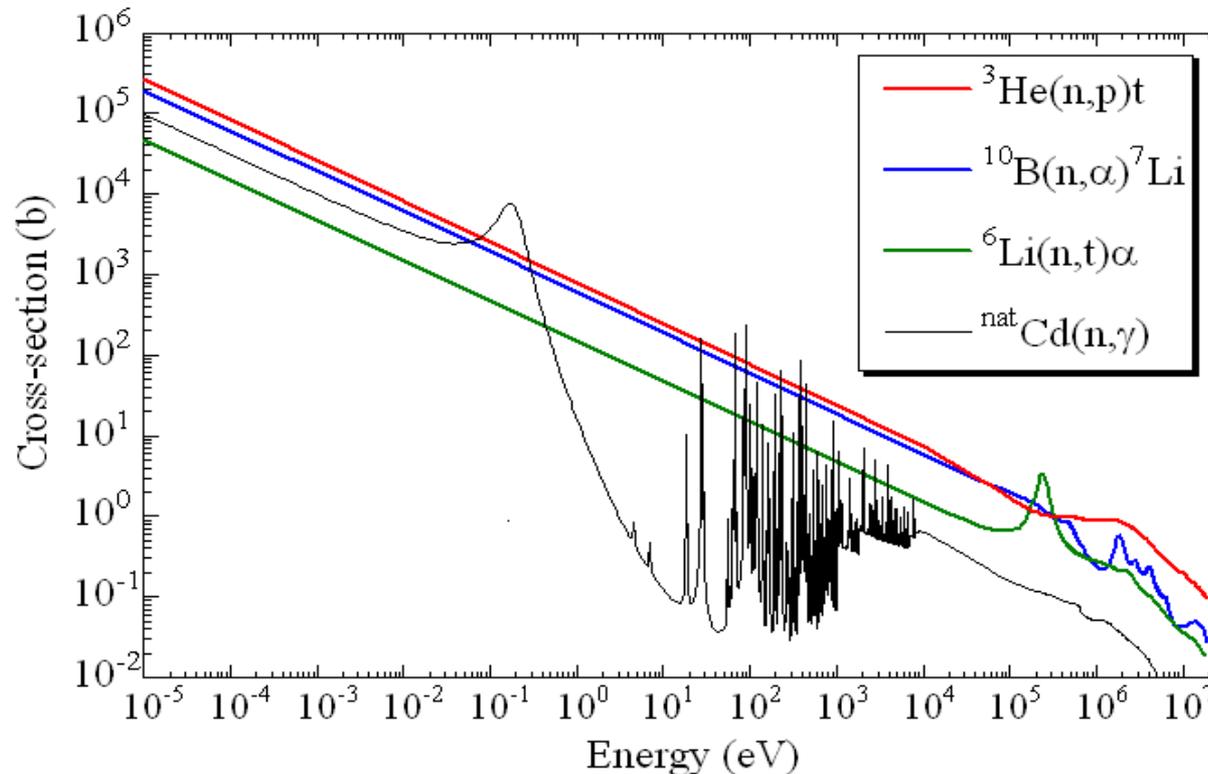


- ✓ 遅い中性子は原子核のポテンシャルに捕まり捕獲



中性子の捕獲反応

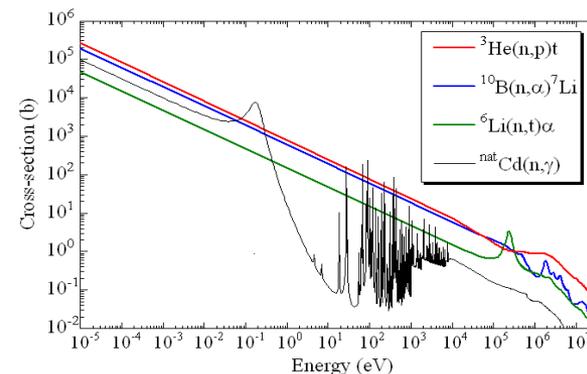
- ✓ 遅い中性子は原子核の幾何学的な断面積(バーンのオーダー)より大きな反応断面積



応用利用される中性子捕獲反応断面積の例

中性子捕獲反応の応用

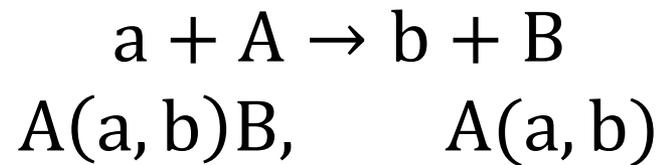
- ✓ 熱中性子の遮へい材: $^{113}\text{Cd}(n, \gamma)^{114}\text{Cd}$ 、 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$
- ✓ 熱中性子の検出器: BF_3 比例計数管[$^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$]、 ^3He 比例計数管[$^3\text{He}(n, p)\text{T}$]、 $^6\text{Li}(\text{Eu})$ シンチレータ [$^6\text{Li}(n, t)\alpha$]、核分裂比例計数管 [$^{235}\text{U}(n, f)$]、金箔放射化検出器 [$^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$]
- ✓ ホウ素中性子捕獲治療 (BNCT):
Boron Neutron Capture Therapy [$^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$]



放射線と物質の相互作用 (その他の核反応)

核反応の表記

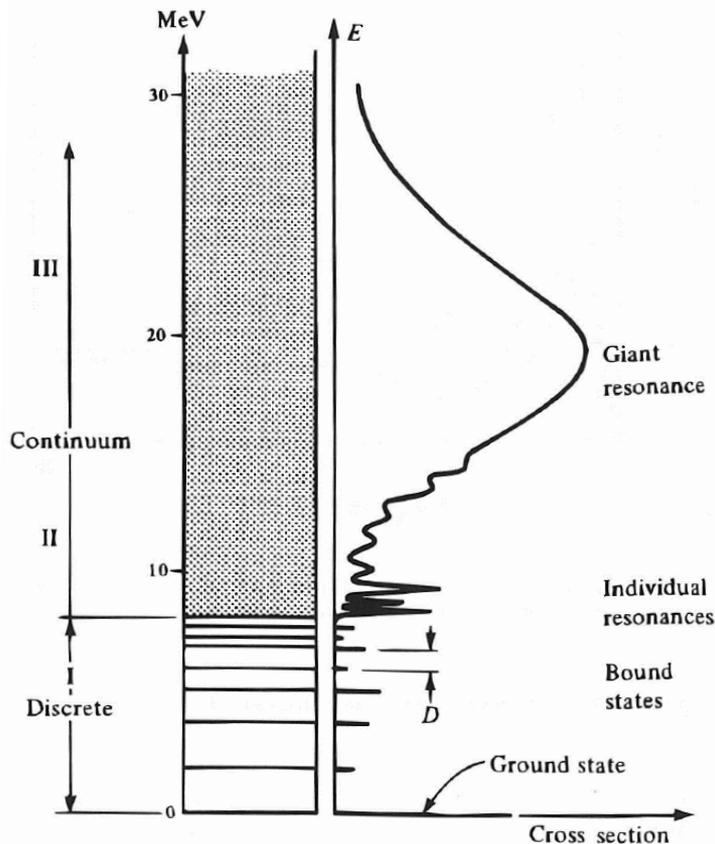
- ✓ 入射粒子、放出粒子を a, b
- ✓ 標的となる核(親核)、反応後の核(娘核)を A, B



ΔZ ΔA	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
+2				($\alpha, 4n$)	($\alpha, 3n$)	($\alpha, 2n$)	(α, n)
+1		(p, 3n)	(p, 2n)	(p, n) (d, 2n) (γ, π^-)	(p, γ) (d, n)	(α, pn)	(α, p)
0			(γ, n) (n, 2n)	標的核 (γ, γ), (p, p), (n, n)等	(n, γ) (d, p)		
-1	(p, α)	(d, α)	(γ, p)	(n, p) (γ, π^+)			
-2	(n, α)						

原子核の励起

- ✓ 励起エネルギーの低い領域: 核構造による束縛状態
- ✓ 高い励起エネルギー: 粒子放出を伴う連続状態
- ✓ 励起エネルギーで 10 ~ 20 MeV: 巨大双極子共鳴



- ✓ 束縛領域: ガンマ線の放出
- ✓ 共鳴状態: 中性子等の粒子放出
- ✓ 巨大共鳴: 前平衡状態からの粒子放出と熱平衡過程からの蒸発放出
- ✓ それ以上: 核子共鳴の励起、核子の多数回反応と蒸発放出(核破碎)
- ✓ 例えば、鉛に 1 GeV の陽子が入射すると、核破碎で~25の中性子放出

電磁相互作用による原子核反応

Q^2 は 4 元運動量移行

$$q^2 = (p - p')^2$$

$$= 2m^2 - 2(E E' - |p||p'| \cos\theta)$$

$$Q^2 = -q^2$$

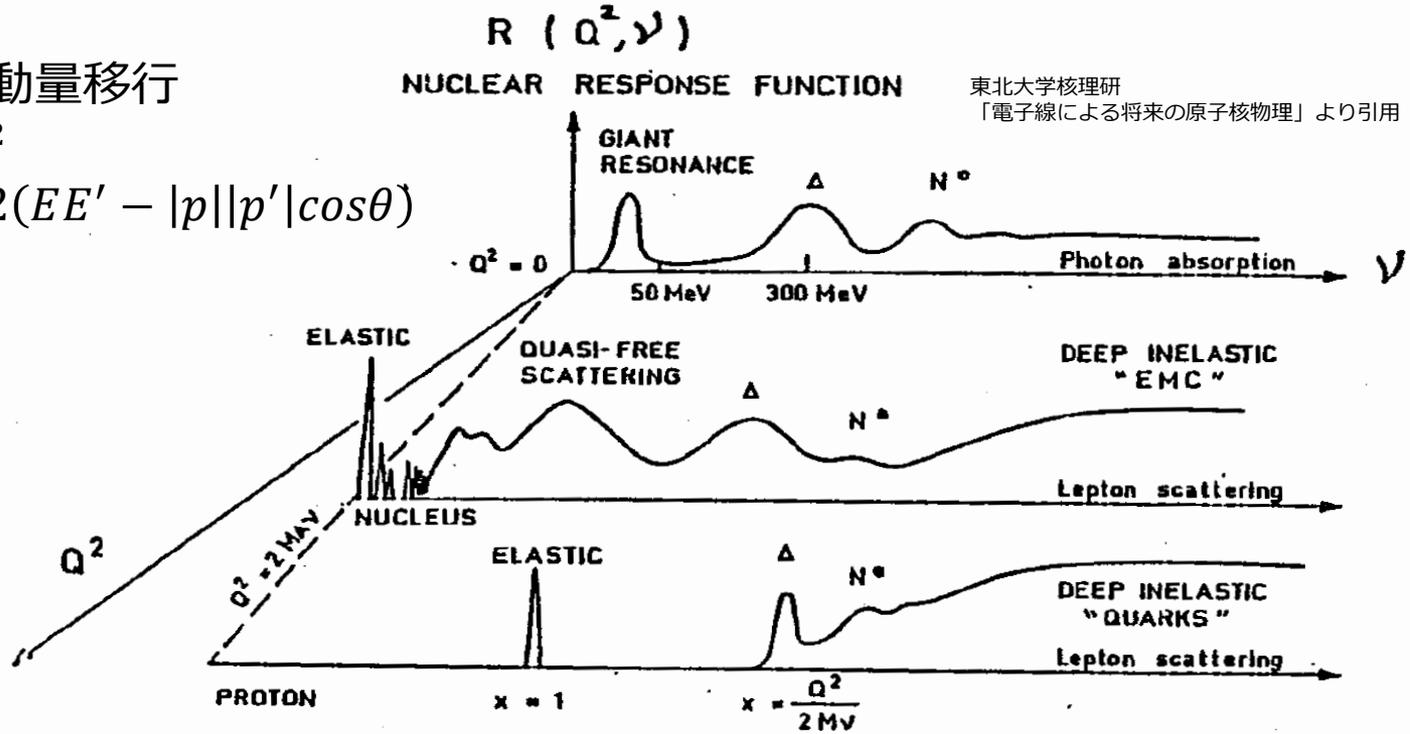


図 2-1 光吸収, 電子散乱の原子核および核子による応答関数 (水野義之氏による)。

✓ $Q^2 = 0$ が光核反応

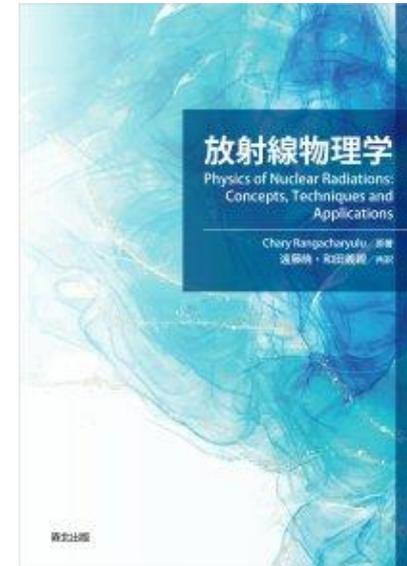
✓ 陽子を標的とした電子散乱は弾性散乱から Δ までなし

まとめに変えて

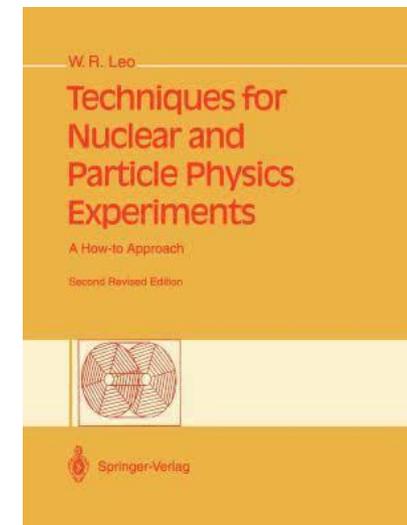
- ✓ 放射線は、原子、原子核の励起エネルギーの高い状態から発生する
- ✓ 放射線と物質の相互作用によって、様々な反応がおきる
- ✓ 荷電粒子、光子と物質の相互作用は、主に電磁相互作用である
- ✓ 中性子と物質の相互作用は、強い相互作用(核力による反応)である
- ✓ 原子核や核中の核子が励起され、そこからの崩壊によって粒子が放出される
- ✓ 放出された、中性子、中間子などを二次ビームとして利用
(特定の二次ビームの生成については以降の講義)

参考書

放射線物理学 Chary Rangacharyulu著
(森北出版) 遠藤暁・和田義親訳
新品だと4,400円



Techniques for Nuclear and Particle
Physics Experiments 2nd Ed.
(Springer-Verlag, New York Berlin Heidelberg)
W. R. Leo
アマゾンで paper back 18,527円, Kindle 13,746円



参考書

Review of Particle Physics and Particle Physics Booklet
(Summary of RPP)

(R.L. Workman et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2022, 083C01 (2022))
See <https://pdg.lbl.gov/>.

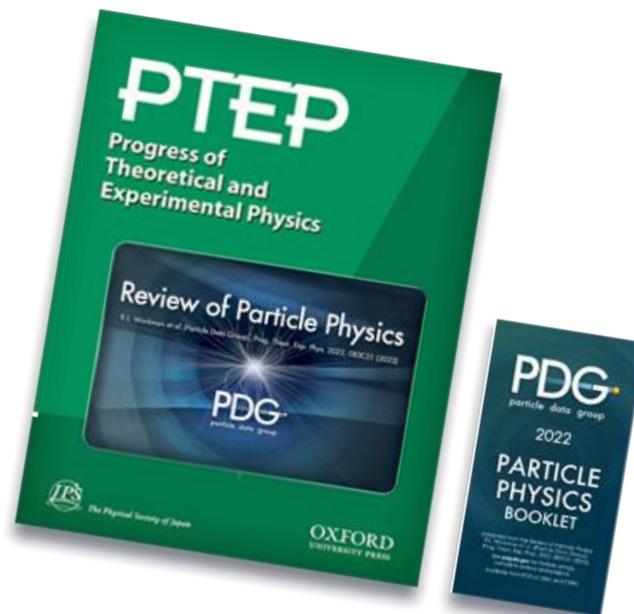
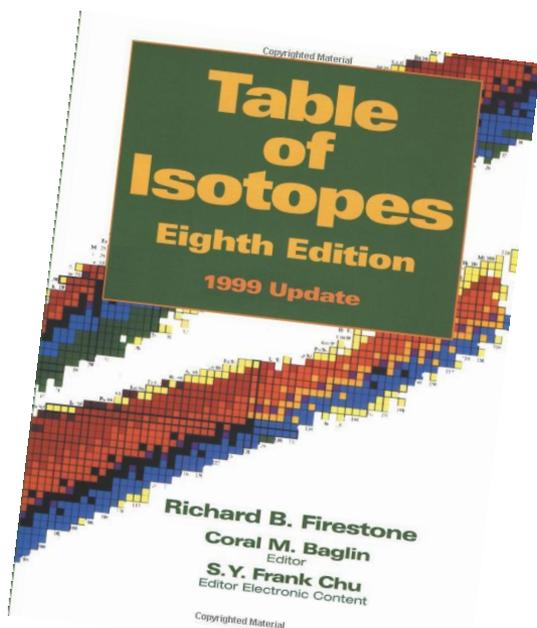


Table of Isotope 8th edition
1999 Update
Amazon ￼ ¥65,375