



# 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

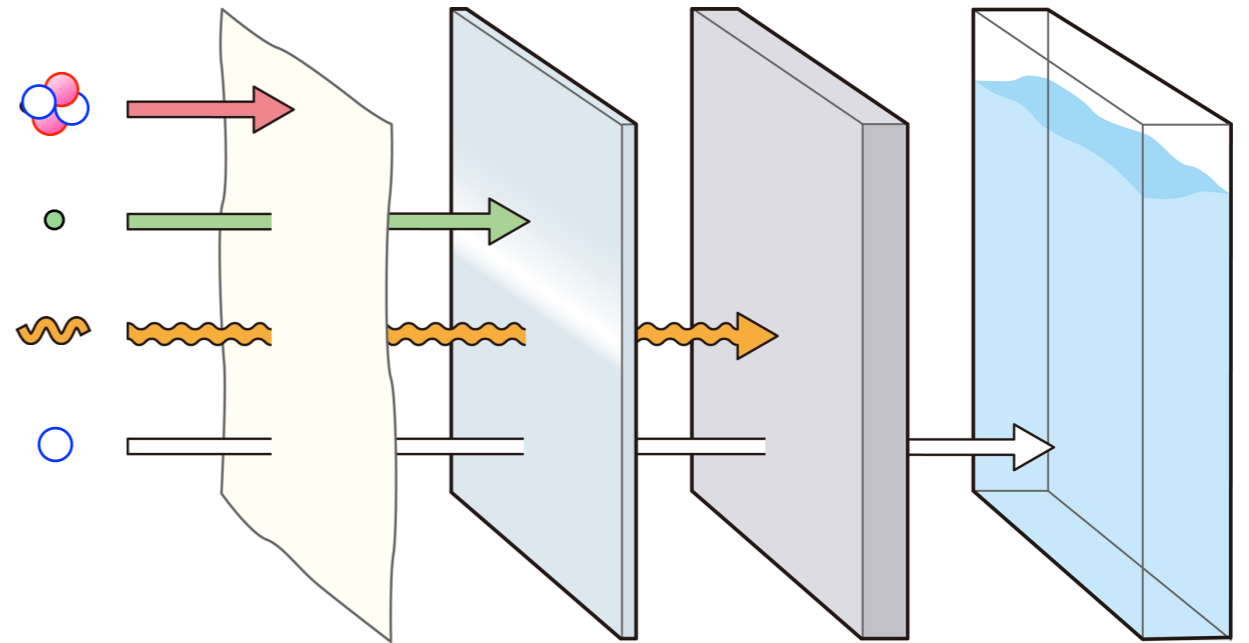
- 1章 放射線とは？《放射線入門》
  - 2章 放射線の性質《放射線物理学 I》
  - 3章 原子力発電で生み出される放射性物質  
《原子核物理学・原子力工学》
  - 4章 放射線量の評価《放射線物理学 II》
  - 5章 放射線の測り方《放射線計測学》
  - 6章 環境中での放射性物質《環境放射化学》
  - 7章 放射線の細胞への影響《放射線生物学》
  - 8章 放射線の人体への影響《放射線医学》
  - 9章 放射性物質と農業《植物栄養学・土壌肥料学》
  - 10章 放射線の防護と安全《放射線防護学》
  - 11章 役に立つ放射線《放射線の利用・加速器科学》
- Q&A

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是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>

# 放射線の科学と安全



2015 / 4 / 22 (水)

## 第2話 原子核物理学・放射線物理学

原子核と放射能・放射線の種類・放射線と物質との相互作用

# 原子核物理学

# 火力発電と原子力発電の違い

火力

化学的燃焼

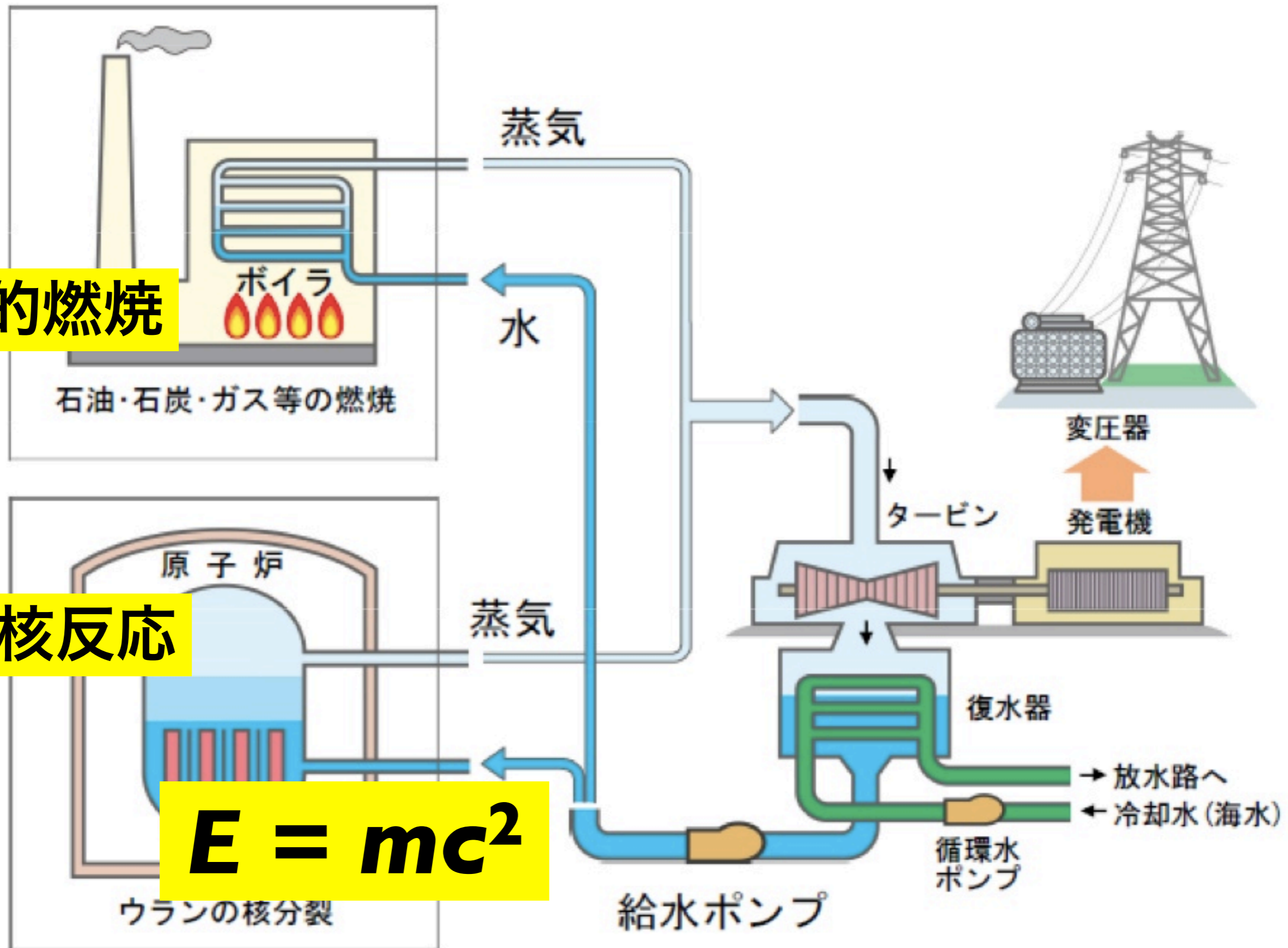
石油・石炭・ガス等の燃焼

原子核反応

原子力

$$E = mc^2$$

ウランの核分裂





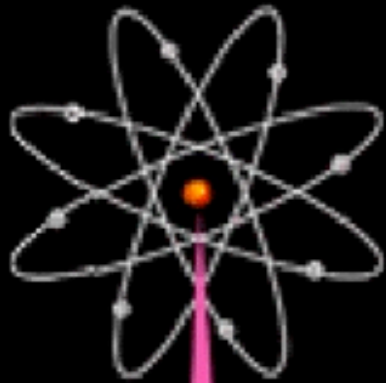
分子  
molecule

nm ( $10^{-9}$  m) 化学  
ナノメートル

eV Chemistry  
電子ボルト

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

原子物理学 Atomic Physics



原子  
atom

Å ( $10^{-10}$  m)  
オングストローム Ångström

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



クォーク  
quark

am ( $10^{-18}$  m)  
アトメートル

GeV  
ギガ電子ボルト

# 周期表

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

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

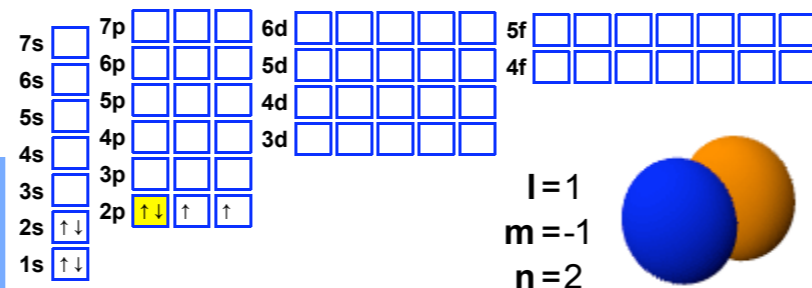
周期表 Design and Interface Copyright © 1997 Michael Dayah. <http://www.ptable.com/> Last updated: May 30, 2008

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

# 周期表

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

8  
**O**  
酸素  
15.9994  
[He]2s<sup>2</sup> 2p<sup>4</sup>



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

# 元素周期表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	1 氢	Atomic Sym																	2 氦
2	3 锂	4 铍	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;">                     1 氢 Hydrogen 1.00794 1s<sup>1</sup> </div> <div> <span style="border: 1px solid orange; padding: 2px;">α</span> A衰变  <span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">p</span> Proton emission  <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">n</span> Neutron emission  <span style="border: 1px dashed gray; padding: 2px;">SF</span> Spontaneous fission                 </div> <div> <span style="border: 1px solid blue; padding: 2px;">β</span> β衰变  <span style="border: 1px solid purple; padding: 2px;">β+</span> Beta+ decay  <span style="border: 1px dashed purple; padding: 2px;">EC</span> Electron capture  <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">□</span> Stable                 </div> </div>															10 氖	
3	11 钠	12 镁	Selected All															18 氩	
4	19 钾	20 钙	21 钪	22 钛	23 钒	24 铬	25 锰	26 铁	27 钴	28 镍	29 铜	30 锌	31 镓	32 锗	33 砷	34 硒	35 溴	36 氪	
5	37 铷	38 锶	39 钇	40 锆	41 铌	42 钼	43 锝	44 钨	45 铼	46 铂	47 金	48 汞	49 铊	50 铅	51 铟	52 锡	53 碘	54 氙	
6	55 铯	56 钡	57-71 镧系	72 铪	73 钽	74 钨	75 铼	76 铂	77 金	78 汞	79 铊	80 铅	81 铟	82 锡	83 铋	84 钋	85 砹	86 氡	
7	87 钫	88 镭	89-103 锕系	104 𨭎	105 𨭏	106 𨭐	107 𨭑	108 𨭒	109 𨭓	110 𨭔	111 𨭕	112 𨭖	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo	

铼

镅

这些原理没有一致稳定的同位素,大量的同位素最长的半衰期

元素周期表 设计版权 © 1997 Michael Dayah. <http://www.dayah.com> d: May 30, 2008

57 镧	58 铈	59 镨	60 钕	61 钐	62 铈	63 铈	64 钆	65 铈	66 铈	67 铈	68 铈	69 铈	70 铈	71 镱
89 锶	90 钇	91 铈	92 铈	93 铈	94 铈	95 铈	96 铈	97 铈	98 铈	99 铈	100 铈	101 铈	102 铈	103 铈



# 113 Uut (ジャポニウム Jp ??) 生成 2004年 理研 森田浩介氏ら

## 周期表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 <b>H</b> 1.0079	Atomic Sym Mass																2 2 <b>He</b> 4.0026
2	3 3 <b>Li</b> 6.941	4 4 <b>Be</b> 9.0121	C 固体 Hg 液体 H 気体 Rf Unknown										5 5 <b>B</b> 10.811	6 6 <b>C</b> 12.010	7 7 <b>N</b> 14.006	8 8 <b>O</b> 15.999	9 9 <b>F</b> 18.998	10 10 <b>Ne</b> 20.180
3	11 11 <b>Na</b> 22.989	12 12 <b>Mg</b> 24.305	金属 アルカリ金属 アルカリ土類金属 ランタノイド 希ガス										13 13 <b>Al</b> 26.981	14 14 <b>Si</b> 28.085	15 15 <b>P</b> 30.973	16 16 <b>S</b> 32.065	17 17 <b>Cl</b> 35.453	18 18 <b>Ar</b> 39.948
4	19 19 <b>K</b> 39.098	20 20 <b>Ca</b> 40.078	21 21 <b>Sc</b> 44.955	22 22 <b>Ti</b> 47.867	23 23 <b>V</b> 50.941	24 24 <b>Cr</b> 51.996	25 25 <b>Mn</b> 54.938	26 26 <b>Fe</b> 55.845	27 27 <b>Co</b> 58.933	28 28 <b>Ni</b> 58.693	29 29 <b>Cu</b> 63.546	30 30 <b>Zn</b> 65.38	31 31 <b>Ga</b> 69.723	32 32 <b>Ge</b> 72.64	33 33 <b>As</b> 74.921	34 34 <b>Se</b> 78.96	35 35 <b>Br</b> 79.904	36 36 <b>Kr</b> 83.80
5	37 37 <b>Rb</b> 85.467	38 38 <b>Sr</b> 87.62	39 39 <b>Y</b> 88.905	40 40 <b>Zr</b> 91.224	41 41 <b>Nb</b> 92.906	42 42 <b>Mo</b> 95.96	43 43 <b>Tc</b> (98)	44 44 <b>Ru</b> 101.07	45 45 <b>Rh</b> 102.905	46 46 <b>Pd</b> 106.42	47 47 <b>Ag</b> 107.868	48 48 <b>Cd</b> 112.411	49 49 <b>In</b> 114.818	50 50 <b>Sn</b> 118.710	51 51 <b>Sb</b> 121.757	52 52 <b>Te</b> 127.60	53 53 <b>I</b> 126.905	54 54 <b>Xe</b> 131.29
6	55 55 <b>Cs</b> 132.905	56 56 <b>Ba</b> 137.327	57-71 57-71 <b>La-Lu</b>	72 72 <b>Hf</b> 178.49	73 73 <b>Ta</b> 180.948	74 74 <b>W</b> 183.84	75 75 <b>Re</b> 186.207	76 76 <b>Os</b> 190.23	77 77 <b>Ir</b> 192.22	78 78 <b>Pt</b> 195.084	79 79 <b>Au</b> 196.967	80 80 <b>Hg</b> 200.59	81 81 <b>Tl</b> 204.38	82 82 <b>Pb</b> 207.2	83 83 <b>Bi</b> 208.980	84 84 <b>Po</b> (209)	85 85 <b>At</b> (210)	86 86 <b>Rn</b> (222)
7	87 87 <b>Fr</b> (223)	88 88 <b>Ra</b> (226)	89-103 89-103 <b>Ac-Lr</b>	104 104 <b>Rf</b> (261)	105 105 <b>Db</b> (262)	106 106 <b>Sg</b> (266)	107 107 <b>Bh</b> (264)	108 108 <b>Hs</b> (277)	109 109 <b>Mt</b> (268)	110 110 <b>Ds</b> (271)	111 111 <b>Rg</b> (272)	112 112 <b>Cn</b> (285)	113 113 <b>Uut</b> (284)	114 114 <b>Uuq</b> (289)	115 115 <b>Uup</b> (288)	116 116 <b>Uuh</b> (292)	117 117 <b>Uus</b> (294)	118 118 <b>Uuo</b> (294)

113 Jp ??  
Japonium ??

116 Lv  
Livermorium

114 Fl  
Flerovium

超重元素  
For elements with no stable isotopes, the mass number of the isotope is in parentheses.

周期表 Design and Interface Copyright © 1997 Michael Dayah. <http://www.ptable.com>

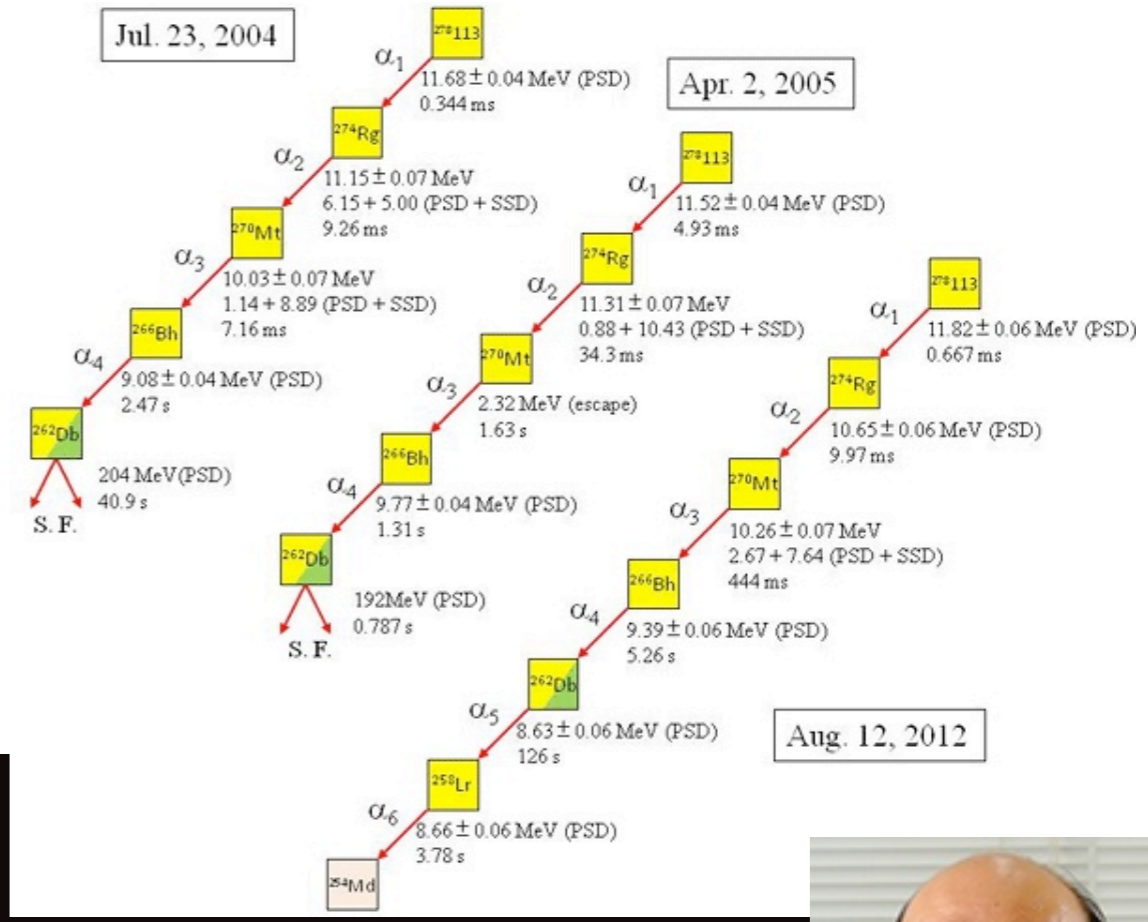
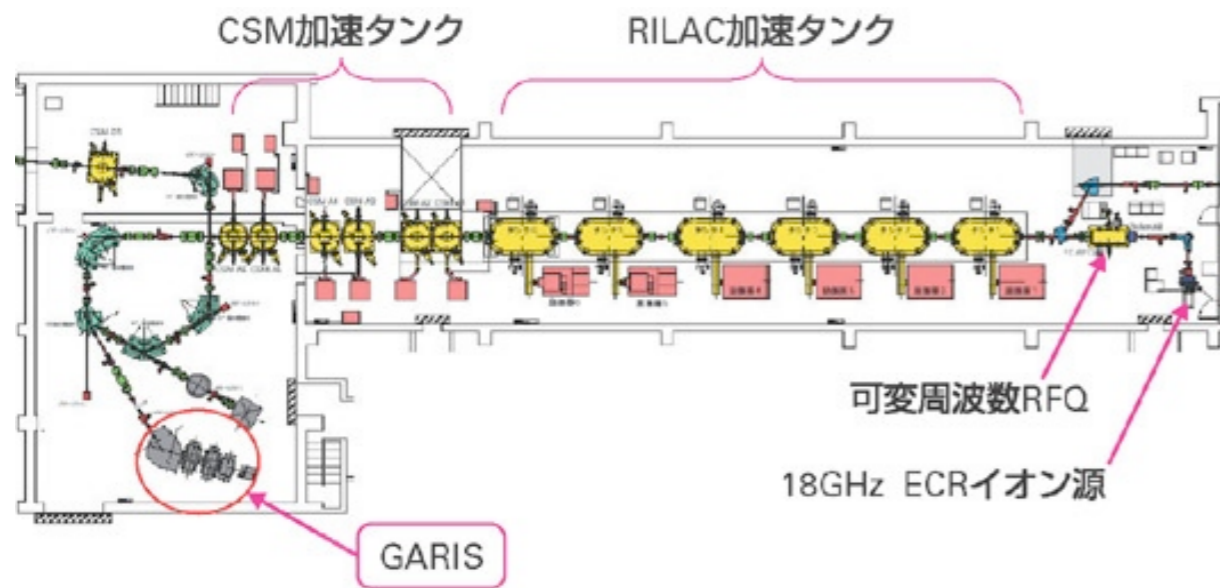
57 <b>La</b> 138.90	58 <b>Ce</b> 140.11	59 <b>Pr</b> 140.90	60 <b>Nd</b> 144.24	61 <b>Pm</b> (145)	62 <b>Sm</b> 150.36	63 <b>Eu</b> 151.96	64 <b>Gd</b> 157.25	65 <b>Tb</b> 158.92	66 <b>Dy</b> 162.50	67 <b>Ho</b> 164.93	
89 <b>Ac</b> (227)	90 <b>Th</b> 232.03	91 <b>Pa</b> 231.03	92 <b>U</b> 238.02	93 <b>Np</b> (237)	94 <b>Pu</b> (244)	95 <b>Am</b> (243)	96 <b>Cm</b> (247)	97 <b>Bk</b> (247)	98 <b>Cf</b> (251)	99 <b>Es</b> (252)	100 <b>Fm</b> (257)

米口の共同研究

ロシア合同原子核研究所の原子核反応研究室創設者 Georgy **Flërov**  
米国 Lawrence-**Livermore** 国立研究所

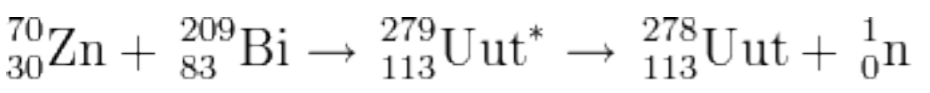
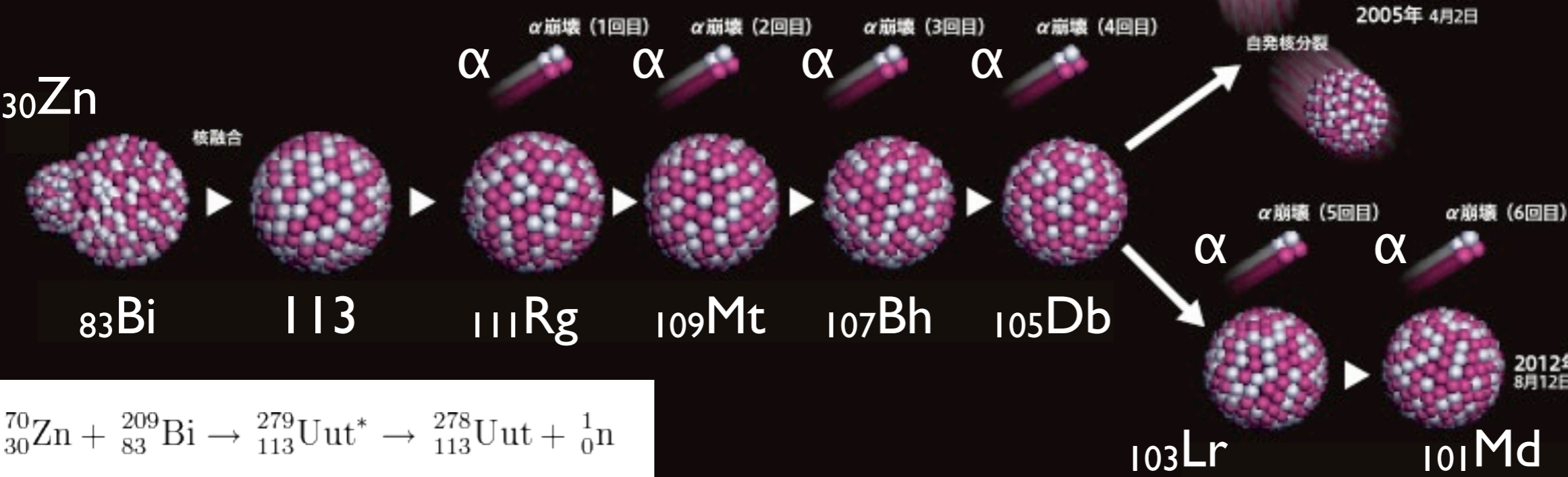
# 超重元素 $_{113}\text{Uut}$ (ジャポニウム Jp ?) 生成

2004, 05, 12年、理研 森田浩介氏ら



## $^{278}_{113}\text{Uut}$ の合成と崩壊の様子

原子番号30の亜鉛 ( $^{70}\text{Zn}$ ) と原子番号83のビスマス ( $^{209}\text{Bi}$ ) が核融合を起こし、原子番号113の $^{279}\text{Uut}^*$ が合成された。2004年と2005年に合成した113番元素 ( $^{278}\text{Uut}$ ) は、4回の $\alpha$ 崩壊を繰り返し、原子番号105のドブニウム ( $^{262}\text{Db}$ ) は自発核分裂を起こして2個の原子核となった。2012年に合成した $^{278}\text{Uut}$ は、 $^{262}\text{Db}$ からさらに2回の $\alpha$ 崩壊を繰り返し、原子番号103のローレンシウム ( $^{258}\text{Lr}$ )、原子番号101のメンデレビウム ( $^{254}\text{Md}$ ) となった。3個の $^{278}\text{Uut}$ の崩壊の様子から、113番元素の平均寿命は2ミリ秒であることが分かった。



## 自発核分裂

2004年 7月23日  
2005年 4月2日



2012年 8月12日

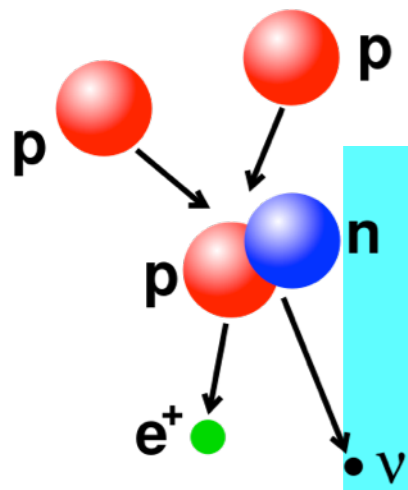
# Periodic Table of Elements

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18																																					
1	1 H 1 1.00794	<table border="0"> <tr> <td>Atomic Name</td> <td>Hydrogen-3</td> <td><math>\alpha</math> Alpha decay</td> <td><math>\beta</math> Beta decay</td> <td>Selected</td> <td>All</td> </tr> <tr> <td>Mass</td> <td>3.01604927767</td> <td><math>p</math> Proton emission</td> <td><math>\beta^+</math> Beta+ decay</td> <td>5 B</td> <td>6 C</td> </tr> <tr> <td>Binding Energy</td> <td>2.827266</td> <td><math>n</math> Neutron emission</td> <td><math>EC</math> Electron capture</td> <td>7 N</td> <td>8 O</td> </tr> <tr> <td>Abundance</td> <td>0%</td> <td><math>SF</math> Spontaneous fission</td> <td><input type="checkbox"/> Stable</td> <td>9 F</td> <td>10 Ne</td> </tr> <tr> <td>Half-Life</td> <td>12.32 y</td> <td></td> <td></td> <td>13 Al</td> <td>14 Si</td> </tr> <tr> <td>Decay Width</td> <td>1.174e-30</td> <td></td> <td></td> <td>15 P</td> <td>16 S</td> </tr> </table>																	Atomic Name	Hydrogen-3	$\alpha$ Alpha decay	$\beta$ Beta decay	Selected	All	Mass	3.01604927767	$p$ Proton emission	$\beta^+$ Beta+ decay	5 B	6 C	Binding Energy	2.827266	$n$ Neutron emission	$EC$ Electron capture	7 N	8 O	Abundance	0%	$SF$ Spontaneous fission	<input type="checkbox"/> Stable	9 F	10 Ne	Half-Life	12.32 y			13 Al	14 Si	Decay Width	1.174e-30			15 P	16 S	2 He 2
Atomic Name	Hydrogen-3	$\alpha$ Alpha decay	$\beta$ Beta decay	Selected	All																																																		
Mass	3.01604927767	$p$ Proton emission	$\beta^+$ Beta+ decay	5 B	6 C																																																		
Binding Energy	2.827266	$n$ Neutron emission	$EC$ Electron capture	7 N	8 O																																																		
Abundance	0%	$SF$ Spontaneous fission	<input type="checkbox"/> Stable	9 F	10 Ne																																																		
Half-Life	12.32 y			13 Al	14 Si																																																		
Decay Width	1.174e-30			15 P	16 S																																																		
2	3 Li 2 6.941	4 Be 2 9.012182	5 B 2 10.811	6 C 3 12.0107	7 N 3 14.00643	8 O 3 15.99903	9 F 2 18.998403	10 Ne 3 20.1797	11 Na 2 22.989769	12 Mg 3 24.3047	13 Al 2 26.981538	14 Si 4 28.08558	15 P 3 30.973762	16 S 5 32.06	17 Cl 3 35.453	18 Ar 7 39.948																																							
3	11 Na 2 22.989769	12 Mg 3 24.3047	13 Al 2 26.981538	14 Si 4 28.08558	15 P 3 30.973762	16 S 5 32.06	17 Cl 3 35.453	18 Ar 7 39.948	19 K 3 39.0983	20 Ca 9 40.078	21 Sc 5 44.955912	22 Ti 6 47.88	23 V 4 50.9415	24 Cr 5 51.9961	25 Mn 4 54.938045	26 Fe 7 55.845	27 Co 5 58.933195	28 Ni 8 58.6934	29 Cu 2 63.546	30 Zn 7 65.38	31 Ga 2 69.723	32 Ge 7 72.64	33 As 3 74.9216	34 Se 9 78.96	35 Br 2 79.904	36 Kr 9 83.80																													
4	37 Rb 5 85.4678	38 Sr 9 87.62	39 Y 5 88.90584	40 Zr 8 91.224	41 Nb 5 92.90638	42 Mo 9 95.94	43 Tc 5 (98)	44 Ru 10 98.9062	45 Rh 5 101.072	46 Pd 9 106.36	47 Ag 6 107.8682	48 Cd 11 112.411	49 In 2 114.818	50 Sn 11 118.710	51 Sb 3 121.757	52 Te 11 127.6	53 I 3 126.905	54 Xe 13 131.29	55 Cs 4 132.905	56 Ba 8 137.327	57-71 Lanthanides	72 Hf 8 178.49	73 Ta 7 180.948	74 W 7 183.84	75 Re 2 186.207	76 Os 11 190.23	77 Ir 7 192.222	78 Pt 9 195.084	79 Au 5 196.967	80 Hg 11 200.59	81 Tl 3 204.38	82 Pb 6 207.2	83 Bi 3 208.98	84 Po 3 (209)	85 At 1 (210)	86 Rn 2 (222)																			
5	87 Fr 3 (223)	88 Ra 4 (226)	89-103 Actinides	104 Rf 1 (261)	105 Db 1 (262)	106 Sg 1 (263)	107 Bh 2 (264)	108 Hs 2 (265)	109 Mt 1 (266)	110 Ds 1 (271)	111 Rg 1 (272)	112 Cn 1 (285)	113 Uut 1 (284)	114 Fl 1 (289)	115 Uup 1 (288)	116 Lv 1 (293)	117 Uus 1 (294)	118 Uuo 1 (294)																																					

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

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

57 La 3	58 Ce 8	59 Pr 3	60 Nd 7	61 Pm 3	62 Sm 8	63 Eu 4	64 Gd 7	65 Tb 3	66 Dy 8	67 Ho 5	68 Er 11	69 Tm 5	70 Yb 11	71 Lu 4
89 Ac 3	90 Th 6	91 Pa 6	92 U 6	93 Np 3	94 Pu 6	95 Am 3	96 Cm 8	97 Bk 5	98 Cf 7	99 Es 4	100 Fm 4	101 Md 3	102 No 3	103 Lr 1



# Periodic Table of Elements

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

Name: Hydrogen-3  
 Mass: 3.01604927767  
 Alpha decay:  $\alpha$   
 Beta decay:  $\beta$   
 Selected: All  
 He 2

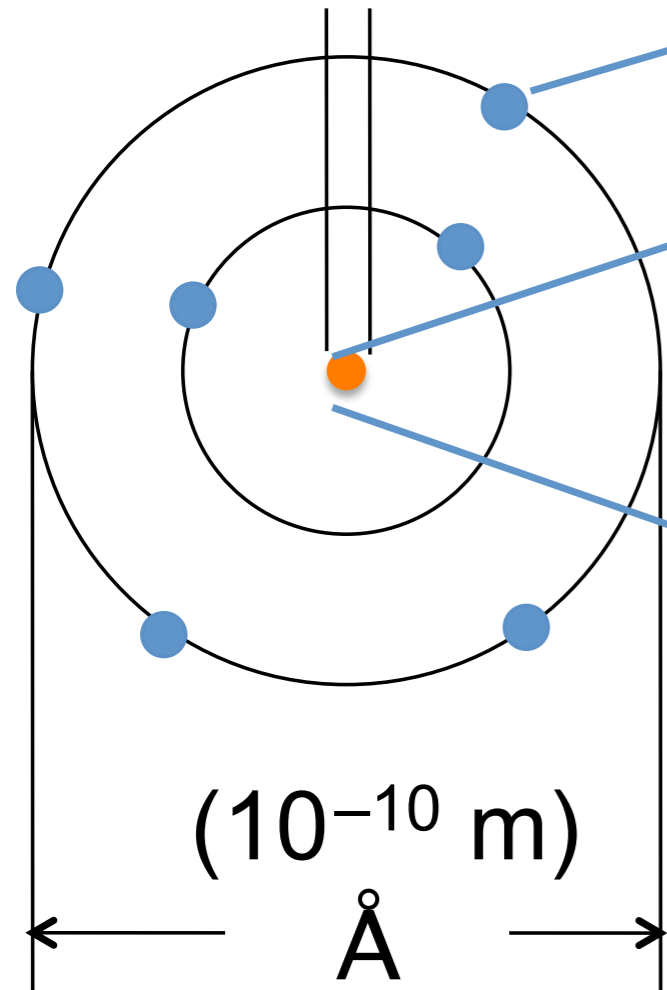
陽子 p  
 重陽子 pn  
 三重陽子 pnn  
**原子核**  
 アルファ粒子  
 $\alpha = ppnn$   
 ${}^3\text{He}^{++} = ppn$

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	<b>原子</b>

# 原子と原子核

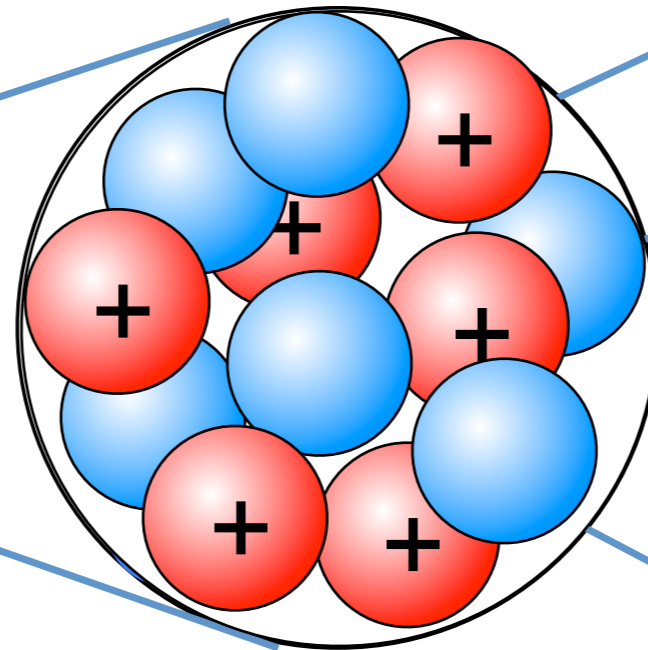
$(10^{-15} - 10^{-14} \text{ m})$   
1 - 10 fm

軌道電子



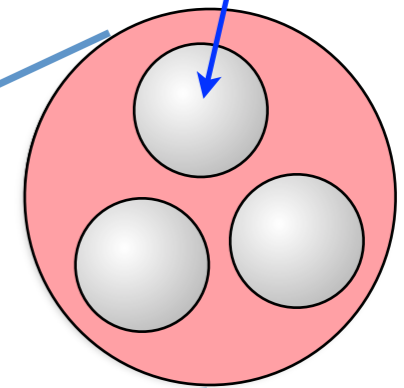
$(10^{-10} \text{ m})$   
 $\text{\AA}$

原子

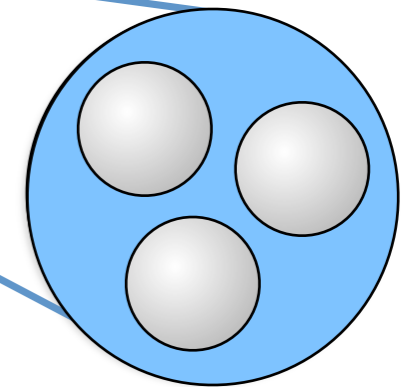


原子核

クォーク



陽子



中性子

炭素原子  ${}^6_{12}\text{C}$  の模式図

# 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

# 放射性物質とは

放射性核種  
= 放射性同位体  
= 不安定原子核

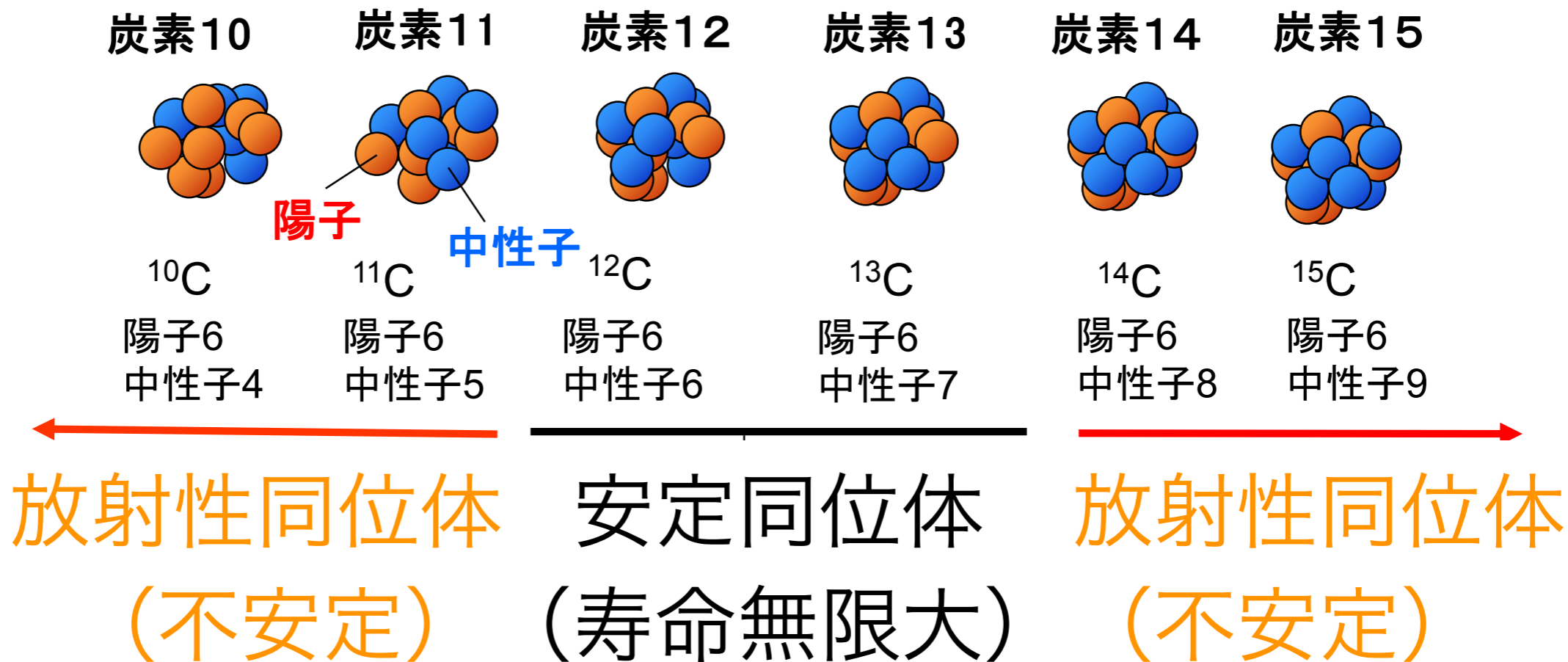
を含む原子からできている物質

$$\text{質量数 } A = Z + N$$



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



# 核種の表記法

nuclide



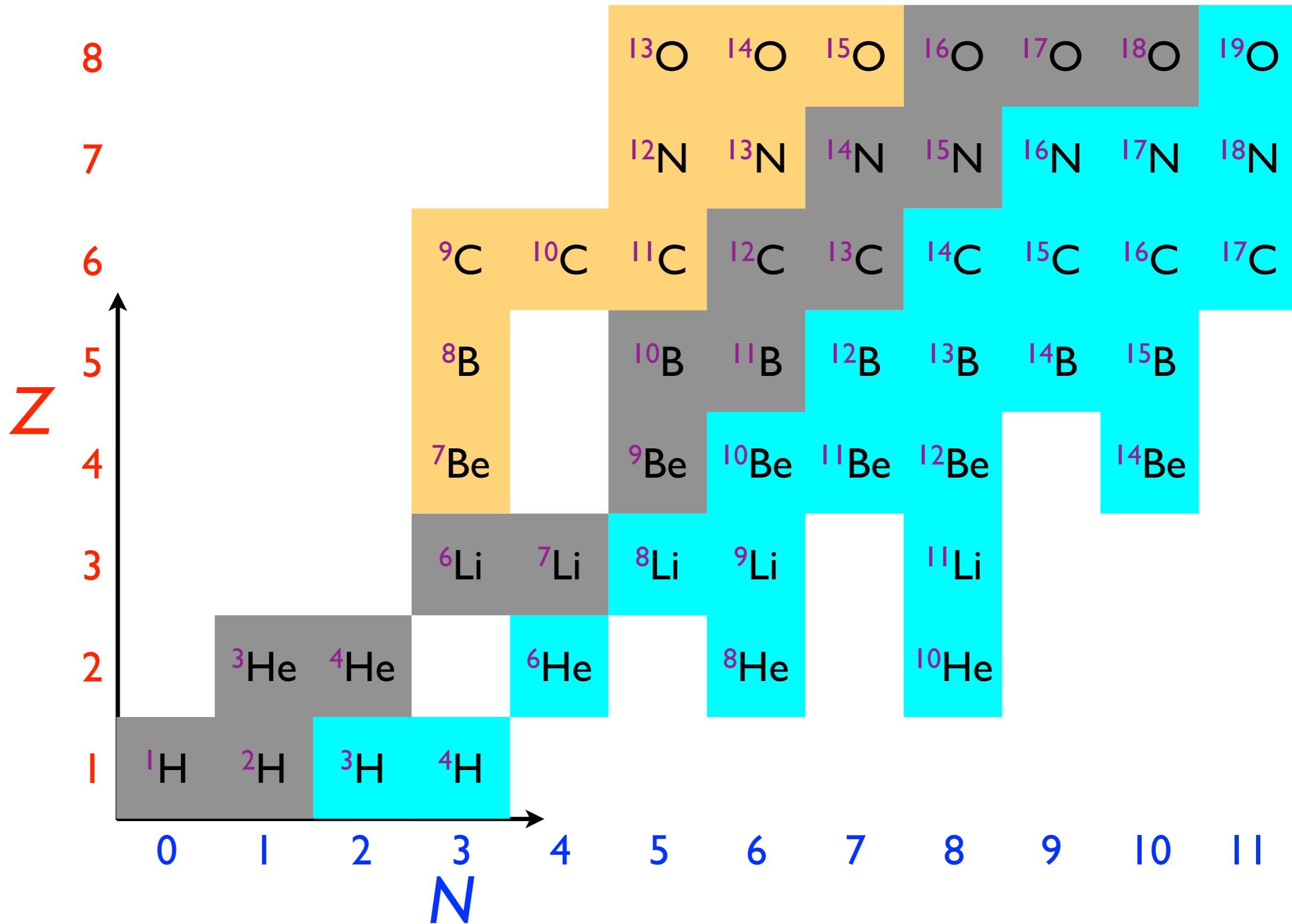
C-12

炭素12





# 核图表



# Nuclear Science

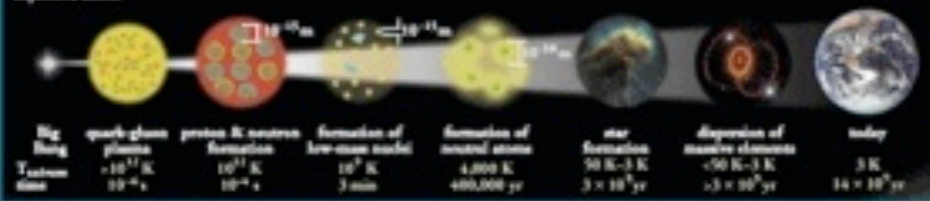
**Nuclear Science** is the study of the structure, properties, and interactions of the atomic nuclei. Nuclear scientists calculate and measure the masses, shapes, sizes, and decays of nuclei at rest and in collisions. They ask questions, such as "Why do nucleons stay in the nucleus? What combinations of protons and neutrons are possible? What happens when nuclei are compressed or rapidly cooled? What is the origin of the nuclei found on Earth?"

**Legend**

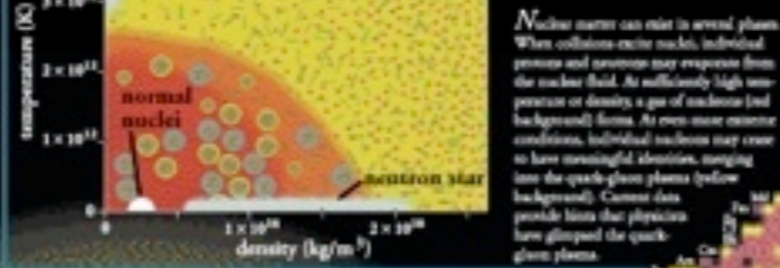
- electron ( $e^-$ )
- quark
- photon ( $\gamma$ )
- gluon field
- gluon
- neutrino ( $\nu$ )
- gluon
- photon ( $\gamma$ )
- Neutron =  $A - Z$
- Proton =  $Z$
- Atomic Number =  $Z$
- Mass Number =  $A$

## Expansion of the Universe

After the Big Bang, the universe expanded and cooled. At about  $10^{-35}$  second, the universe consisted of a soup of quarks, gluons, electrons, and neutrinos. When the temperature of the Universe,  $T_{univ}$ , cooled to about  $10^9$  K, this soup condensed into protons, neutrons, and electrons. As time progressed, some of the protons and neutrons formed deuterium, helium, and lithium nuclei. Still later, electrons combined with protons and these low-mass nuclei to form neutral atoms. Due to gravity, clouds of atoms condensed into stars, where hydrogen and helium fused into more massive chemical elements. Expanding stars (supernovae) from the most massive elements and disperse them into space. Our earth was formed from supernova debris.

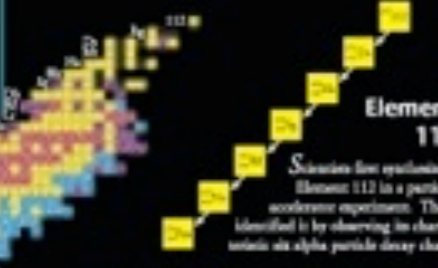


## Phases of Nuclear Matter



## Unstable Nuclei

Stable nuclei form a narrow white band on the Chart of the Nuclides. Scientists produce unstable nuclei for from this band and study their decays, thereby learning about the extremes of nuclear conditions. In its present form, this chart contains about 2500 different nuclides. Nuclear theory predicts that there are at least 4000 more to be discovered with  $Z \leq 112$ .



## Radioactivity

Radioactive decay transforms a nucleus by emitting different particles. In alpha decay, the nucleus releases a  $^4_2\text{He}$  nucleus—an alpha particle. In beta decay, the nucleus either emits an electron and antineutrino for a proton and neutrino or captures an atomic electron and emits a neutrino. A positron is the antiparticle of the electron. Antineutrino is composed of anti-particles. Both alpha and beta decays change the original nucleus into a nucleus of a different chemical element. In gamma decay, the nucleus lowers its internal energy by emitting a photon—a gamma ray. This decay does not modify the chemical properties of the atom.

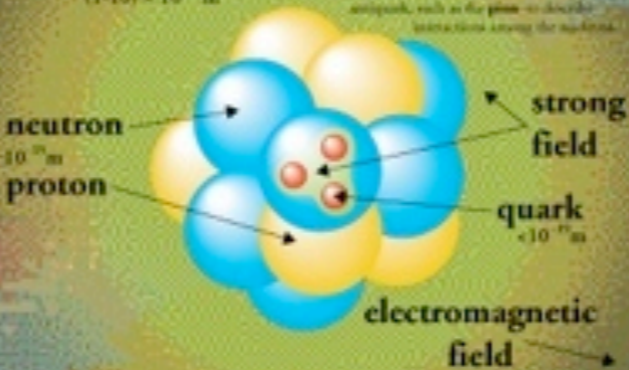
**Alpha Decay:**  $^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^{222}_{86}\text{Rn} + ^4_2\text{He}$

**Beta Minus Decay:**  $^{14}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N} + e^- + \bar{\nu}_e$

**Beta Plus Decay:**  $^{11}_6\text{C} \rightarrow ^{11}_5\text{B} + e^+ + \nu_e$

**Gamma Decay:**  $^{226}_{88}\text{Ra}^* \rightarrow ^{226}_{88}\text{Ra} + \gamma$

## The Nucleus



## Nuclear Energy

Nuclear reactions release energy when the total mass of the products is less than the sum of the masses of the initial nuclei. The "lost mass" appears as kinetic energy of the products ( $E = mc^2$ ). In fusion, a massive nucleus splits into two major fragments that usually eject one or more neutrons. In fission, low mass nuclei combine to form a more massive nucleus plus one or more ejected particles—neutrons, protons, photons, or alpha particles.

**Fusion:**  $^2_1\text{H} + ^3_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^1_0\text{n}$

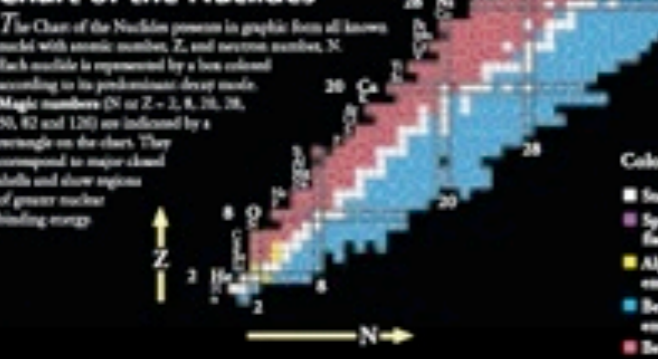
**Fission:**  $^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{141}_{54}\text{Xe} + ^{92}_{38}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$

**Fusion (Sun):**  $^2_1\text{H} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^3_2\text{He} + ^1_0\text{n}$

**Fission (Sun):**  $^4_2\text{He} + ^{12}_6\text{C} \rightarrow ^{16}_8\text{O} + ^4_2\text{He}$

In the early stages of nuclear evolution, of our sun and other stars, hydrogen fuses to form helium, releasing energy in the form of photons (light) and neutrinos. During the later stages of nuclear evolution, more massive nuclei up to and beyond uranium are synthesized by fusion. By measuring the number of reactions that come from the Sun, scientists recently have demonstrated that reactions must have a mass greater than zero.

## Chart of the Nuclides



## Applications

**Radioactive Dating:** Naturally occurring radioactive isotopes such as  $^{14}\text{C}$  are used to date objects that were once living, such as wood. For example, from a study of artifacts found at the site, scientists determined that the landscape was built nearly 4,000 years ago.

**Smoke Detectors:** Many smoke detectors use a small amount of the alpha emitter  $^{241}\text{Am}$  to ionize the air. Smoke entering the detector reduces the current and sets off the alarm.

**Nuclear Medicine:** Radioactive isotopes, such as  $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , and  $^{131}\text{I}$ , are commonly used in the diagnosis and treatment of illness. Positron emission tomography (PET) is used in medical diagnosis. Technetium-99m ( $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ) is generally regarded as the most important of these isotopes.

**Space Exploration:** Uranium and alpha particles in naturally occurring uranium present in Martian rocks. On Earth, nuclear reactors are used to study some form, structural components or an environment.

**Nuclear Reactors:** Nuclear reactions are the basis of  $^{235}\text{U}$  or  $^{239}\text{Pu}$  nuclei to produce electric power. Reactors and other nuclear applications generate radioactive waste. Disposal of this waste is a subject of current research.

**Magnetic Resonance Imaging:** Magnetic Resonance Imaging (MRI) makes use of atomic transitions involving the magnetic field of a nucleus to study the local chemical environment. This technique accurately maps the density of hydrogen to produce three-dimensional images of the human body.

www.CPEPweb.org

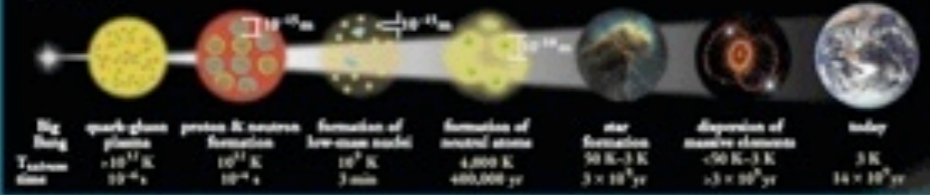
# Nuclear Science

Nuclear Science is the study of the structure, properties, and interactions of the atomic nuclei. Nuclear scientists calculate and measure the masses, shapes, sizes, and decays of nuclei at rest and in collisions. They ask questions, such as "Why do nucleons stay in the nucleus? What combinations of protons and neutrons are possible? What happens when nuclei are compressed or rapidly rotated? What is the origin of the nuclei found on Earth?"

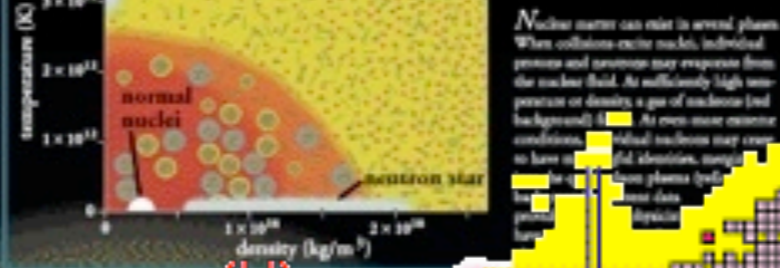
Legend: electron (e<sup>-</sup>), proton (p<sup>+</sup>), neutron (n<sup>0</sup>), quark, gluon field, gluon, photon, neutrino (ν), antineutrino (ν̄), photon (γ), Neutron = A - Z

## Expansion of the Universe

After the Big Bang, the universe expanded and cooled. At about 10<sup>-35</sup> second, the universe consisted of a soup of quarks, gluons, electrons, and neutrinos. When the temperature of the Universe, T<sub>universe</sub>, cooled to about 10<sup>12</sup> K, this soup condensed into protons, neutrons, and electrons. As time progressed, some of the protons and neutrons formed deuterium, helium, and lithium nuclei. Still later, electrons combined with protons and these low-mass nuclei to form neutral atoms. Due to gravity, clouds of atoms condensed into stars, where hydrogen and helium fused into more massive chemical elements. Expanding stars (supernovae) from the most massive elements and disperse them into space. Our earth was formed from supernova debris.



## Phases of Nuclear Matter

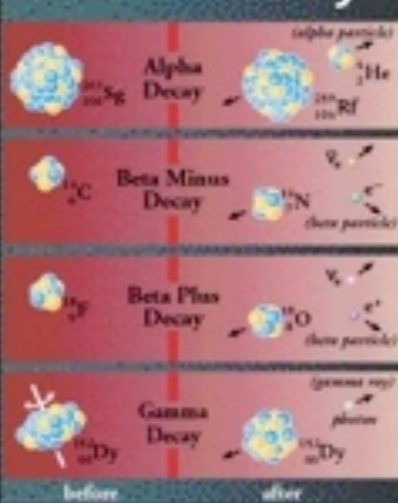


## Unstable Nuclei

Stable nuclei form a narrow white band on the Chart of the Nuclides. Scientists produce unstable nuclei for from this band and study their decays, thereby learning about the extremes of nuclear conditions. In its present form, this chart contains about 2500 different nuclei. Nuclear theory predicts that there are about 5000 more.

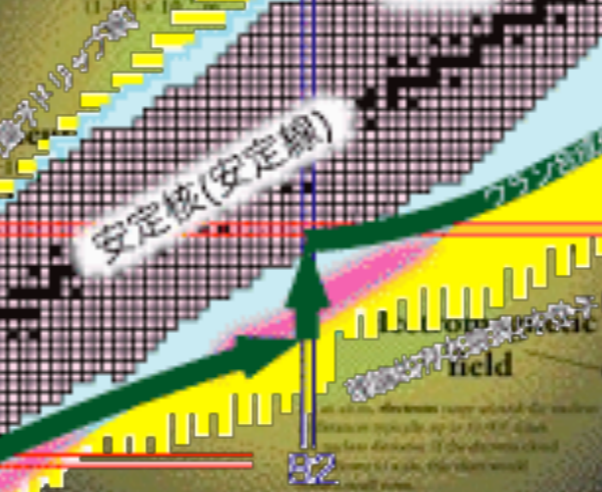


## Radioactivity



Radioactive decay transforms a nucleus by emitting different particles. In alpha decay, the nucleus releases a <sup>4</sup>He nucleus (an alpha particle). In beta decay, the nucleus either emits an electron and an antineutrino (beta minus) or captures an atomic electron and emits a neutrino (beta plus). Gamma decay involves the emission of high-energy photons.

## The Nuclear Field



## Chart of the Nuclides



Color Key:  
 ■ Stable  
 ■ Spontaneous fission  
 ■ Alpha particle emission  
 ■ Beta minus emission  
 ■ Beta plus emission or electron capture

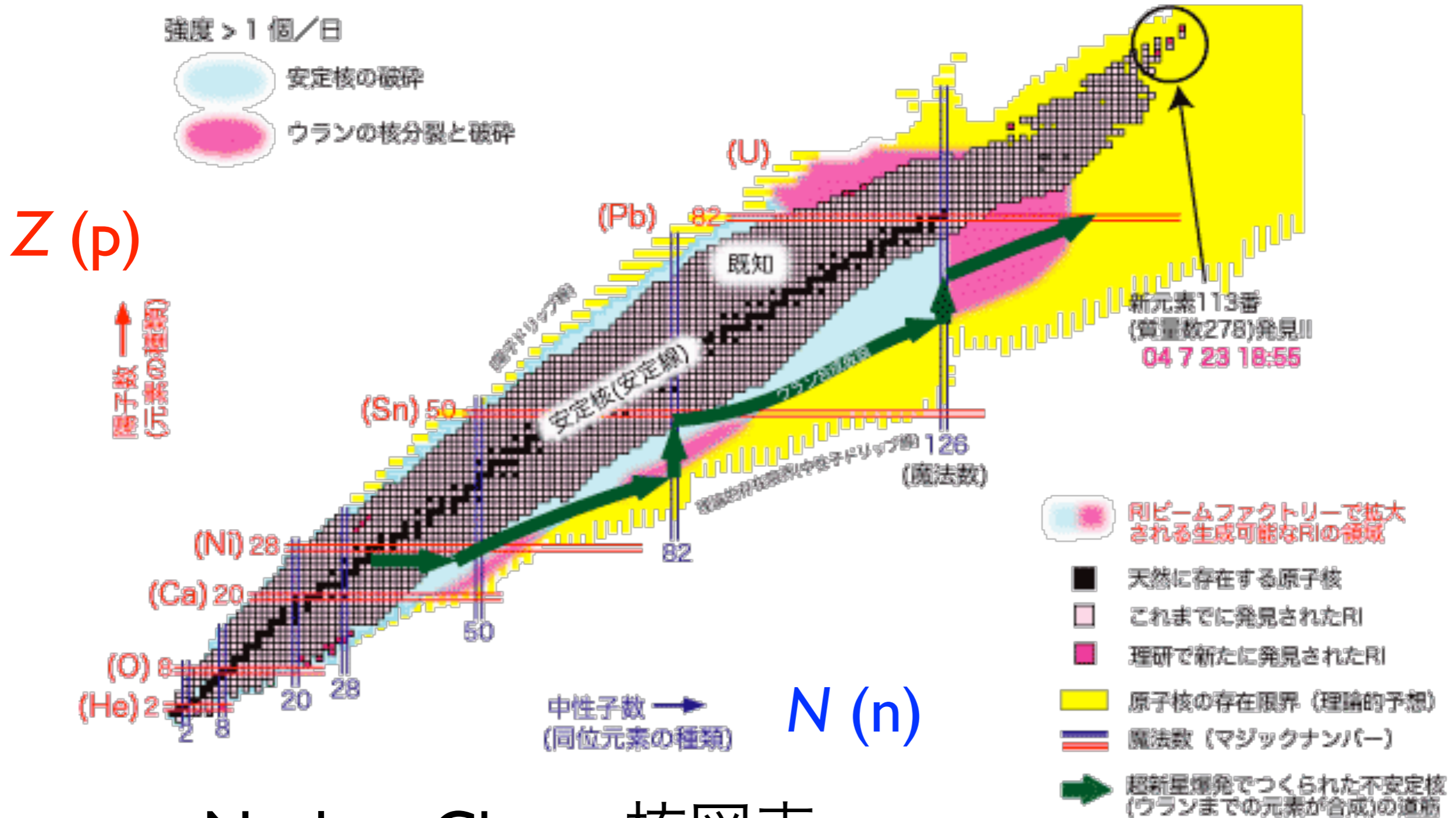
## Applications

- Radioactive Dating:** Nearly every radioactive isotope such as <sup>14</sup>C is used to date objects that were once living, such as wood. For example, from a study of willows found at the site, scientists determined that the bridge was built nearly 4,000 years ago.
- Smoke Detectors:** Many smoke detectors use a small amount of the alpha emitter <sup>241</sup>Am to ionize the air. Smoke entering the detector reduces the current and sets off the alarm.
- Nuclear Medicine:** Radioactive isotopes, such as <sup>99m</sup>Tc, <sup>67</sup>Ge, and <sup>131</sup>I, are commonly used in the diagnosis and treatment of disease. Positron emission tomography (PET) is a common use of <sup>18</sup>F in medical imaging.
- Space Exploration:** Radium and alpha particles in naturally occurring thorium present in Martian rocks. On Earth, nuclear reactors are used to supply some form of electrical power to an exploration station.
- Nuclear Reactors:** Nuclear reactions are the basis of <sup>235</sup>U or <sup>239</sup>Pu nuclei to produce electric power. Reactors and other nuclear applications generate radioactive waste, disposal of the waste is a subject of current research.
- Magnetic Resonance Imaging:** Magnetic Resonance Imaging (MRI) makes use of atomic transitions involving the magnetic field of a nucleus to study the local chemical environment. This technique accurately maps the density of hydrogen to produce three-dimensional images of the human body.

www.CPEPweb.org



# RIKEN



## Nuclear Chart 核図表

# 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

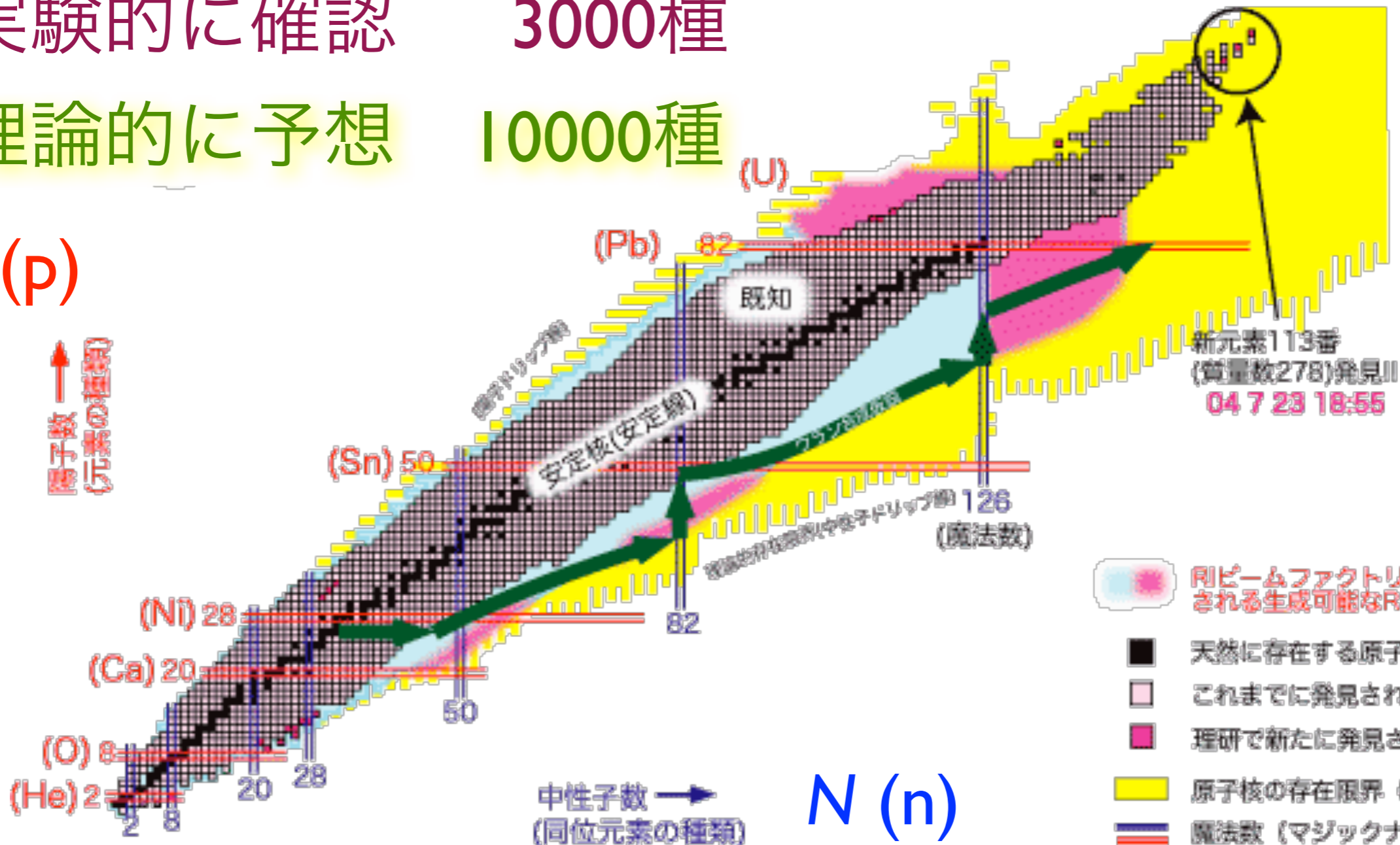
10000種

# 原子核物理学

Nuclear Physics

Z (p)

↑ 陽子数  
(元素の種類)



Nuclear Chart 核図表

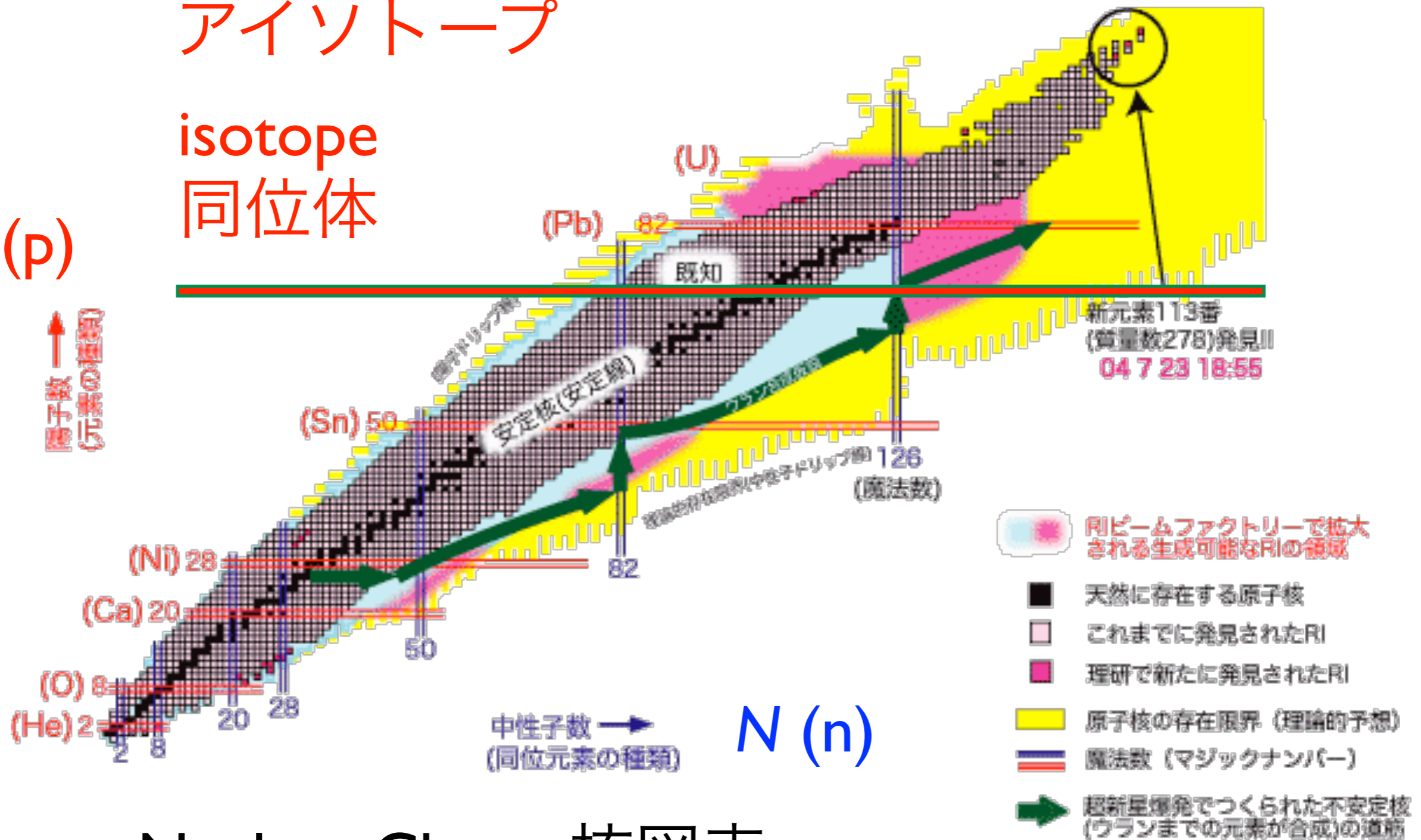
# 原子核物理学

## Nuclear Physics

アイソトープ

isotope  
同位体

Z (p)



Nuclear Chart 核図表

# 原子核物理学

Nuclear Physics

$\beta$  崩壊

isobar  
同重体

$\alpha$  崩壊

isodiapher  
同余体

isotone  
同調体

アイソトープ  
isotope  
同位体

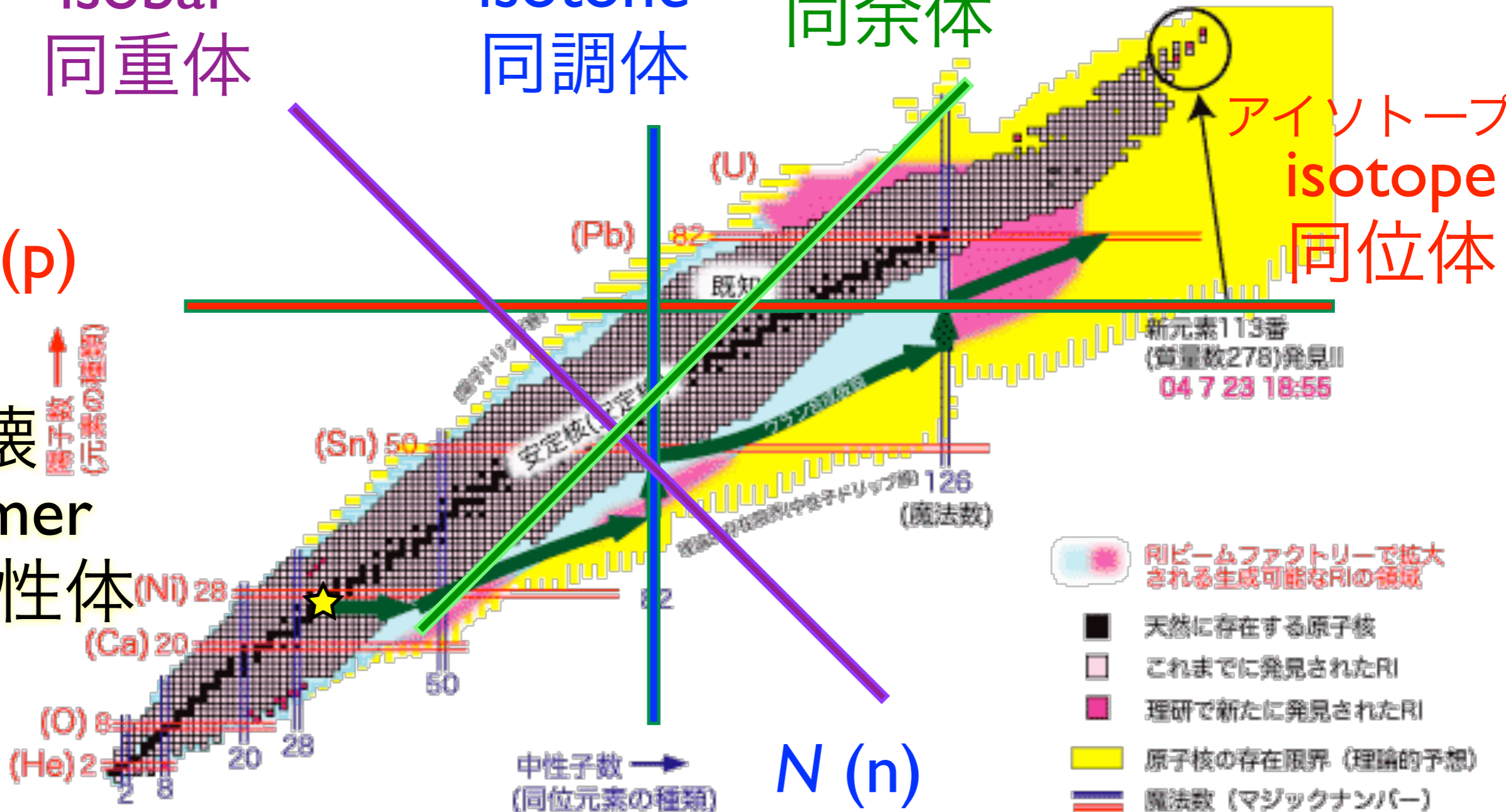
$Z (p)$

↑ 原子序数  
↑ 陽子の数  
↑ 陽子の種類

$\gamma$  崩壊

isomer

核異性体



新元素113番  
(質量数278)発見!!  
04 7 23 18:55

Nuclear Chart 核図表



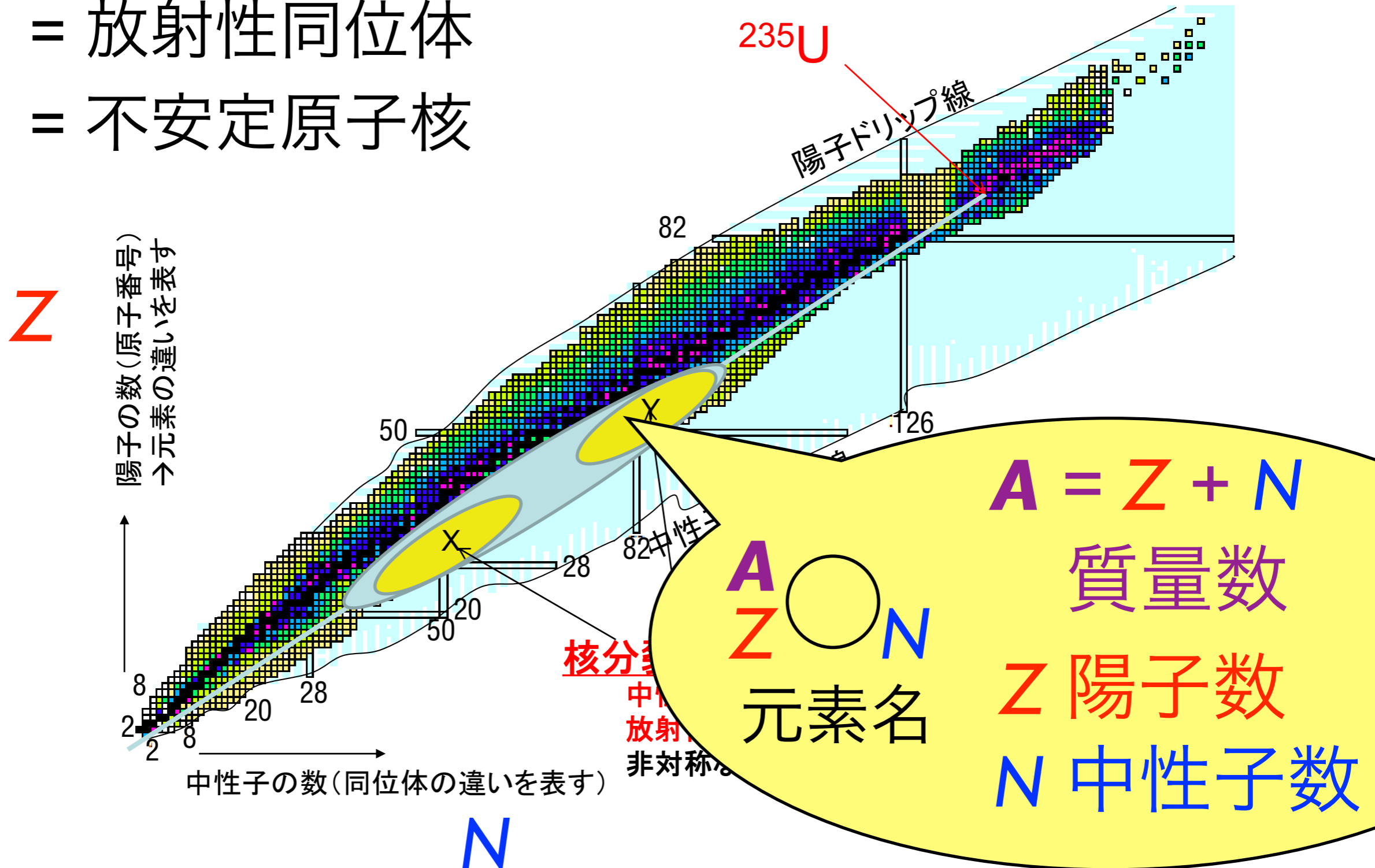
# 放射性物質とは

放射性核種

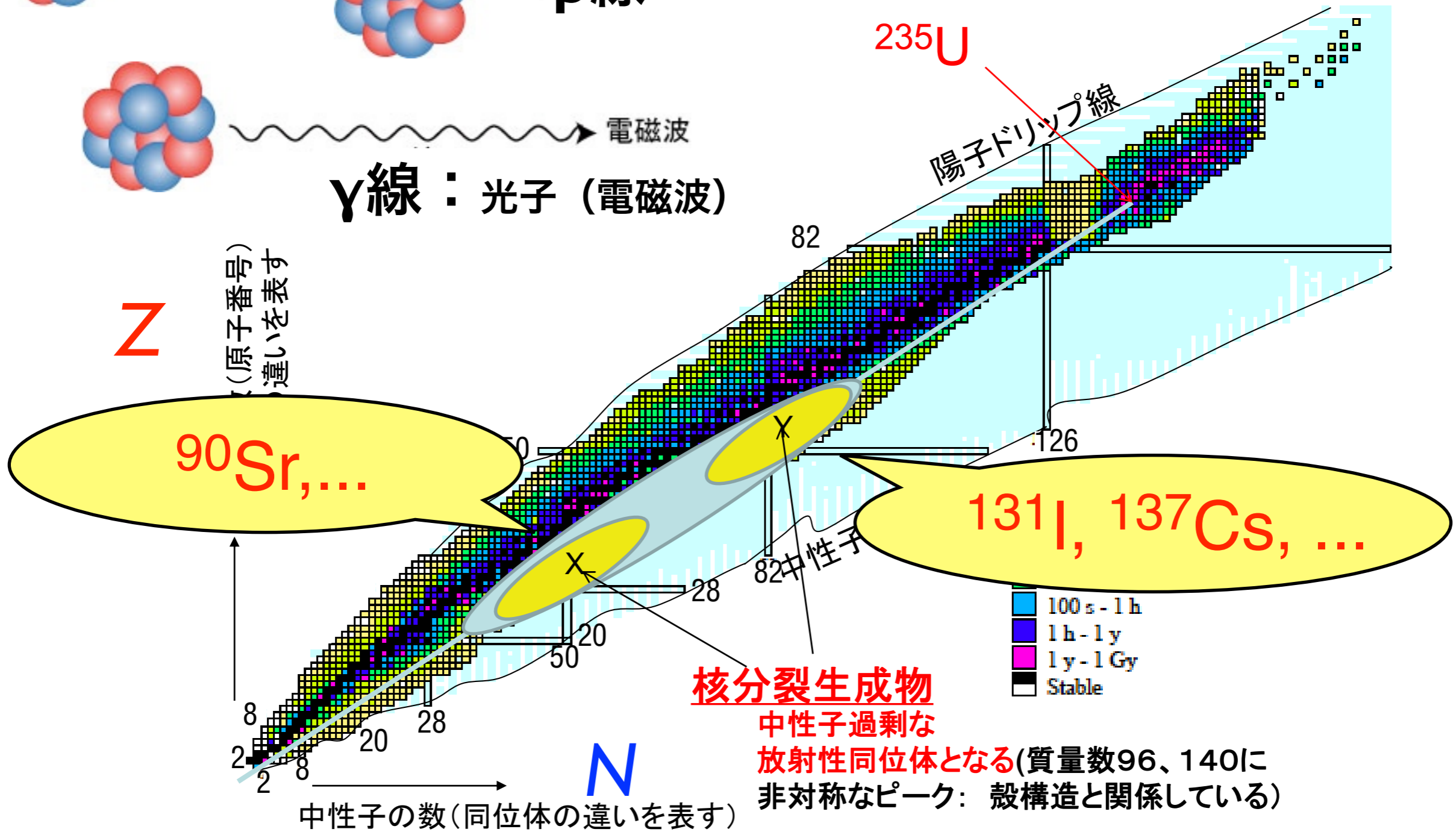
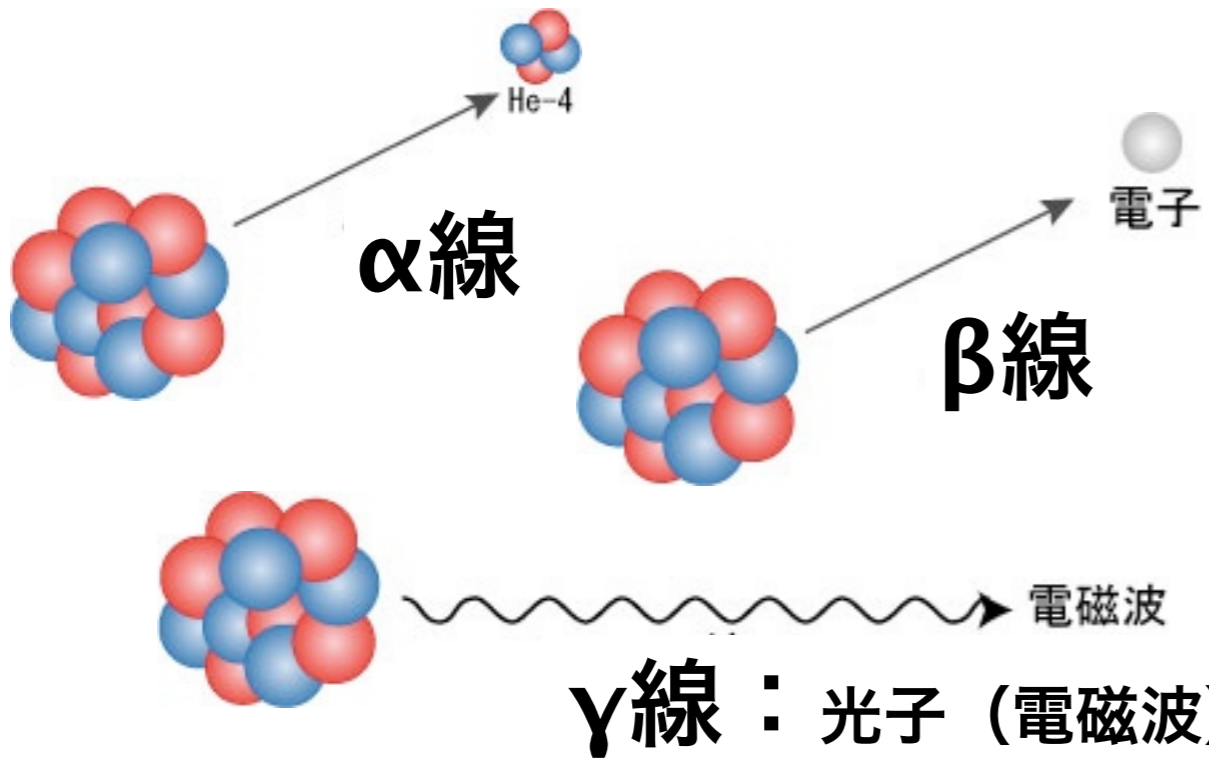
= 放射性同位体

= 不安定原子核

核図表

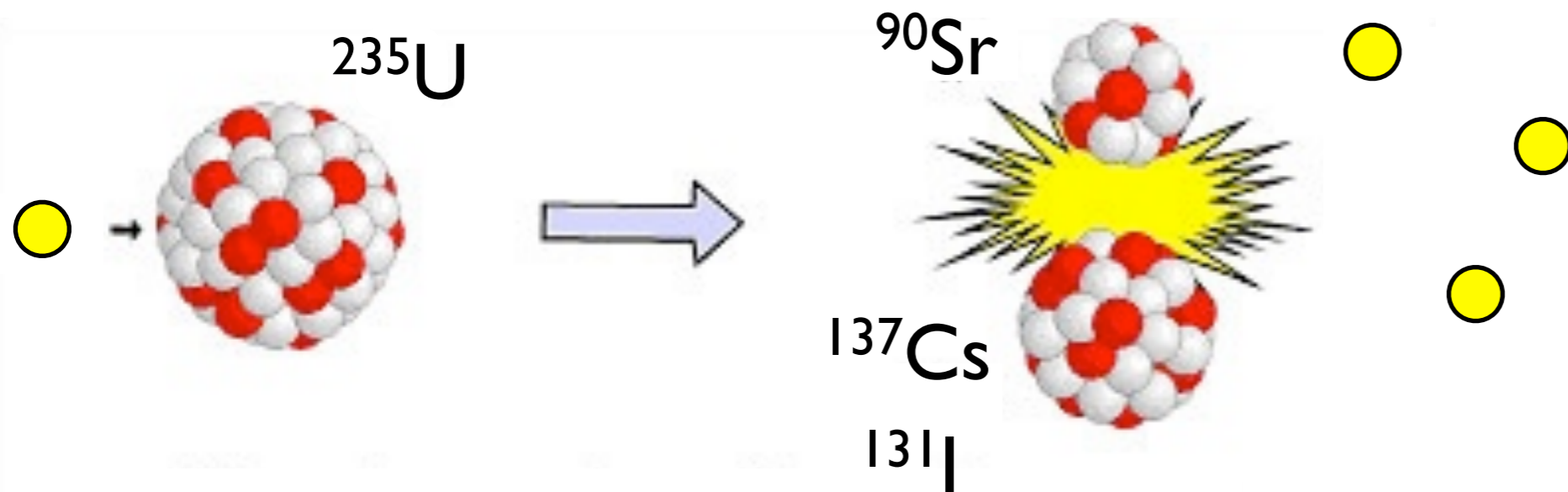


放射能とは 放射性物質が放射線を出す能力のこと。



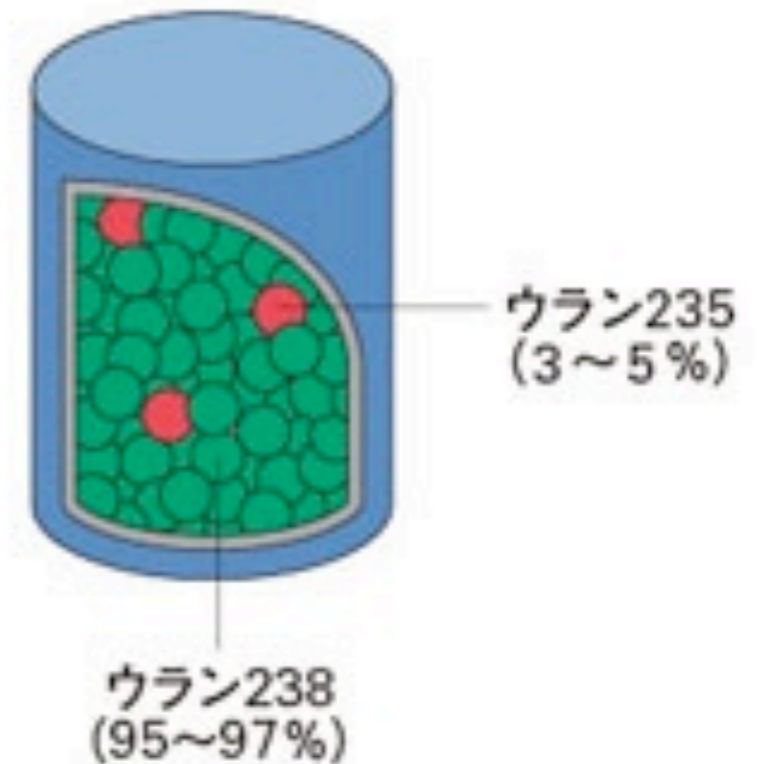
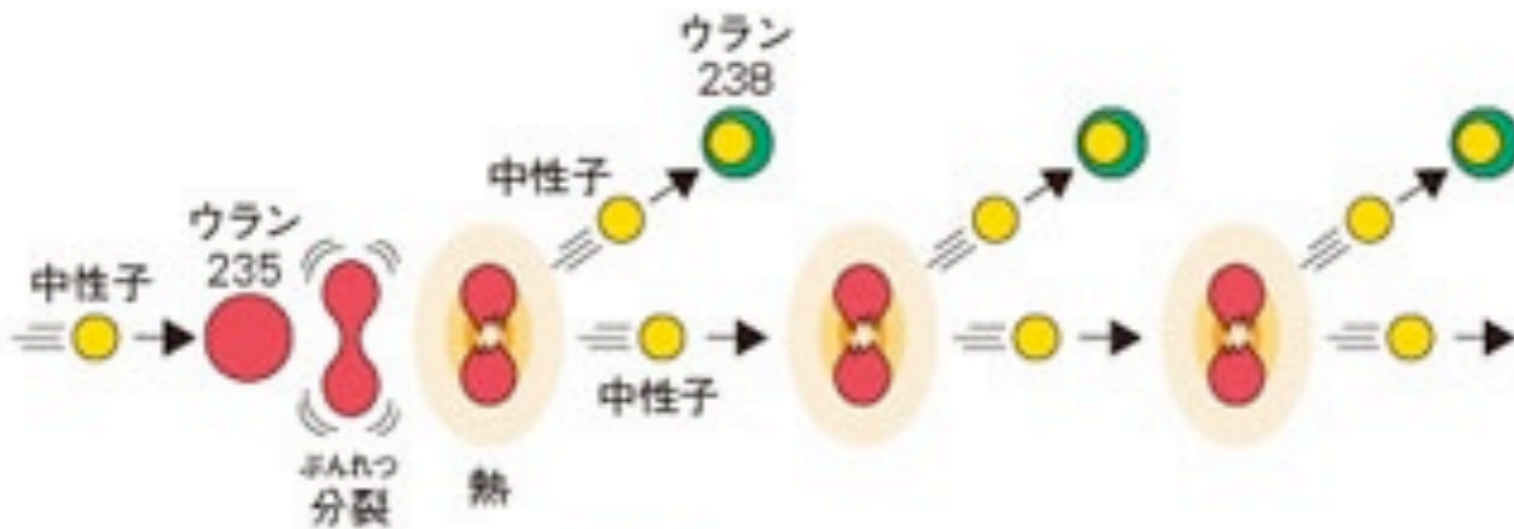
Nuclear Chart 核図表

# 原子核分裂反応



熱中性子

減速

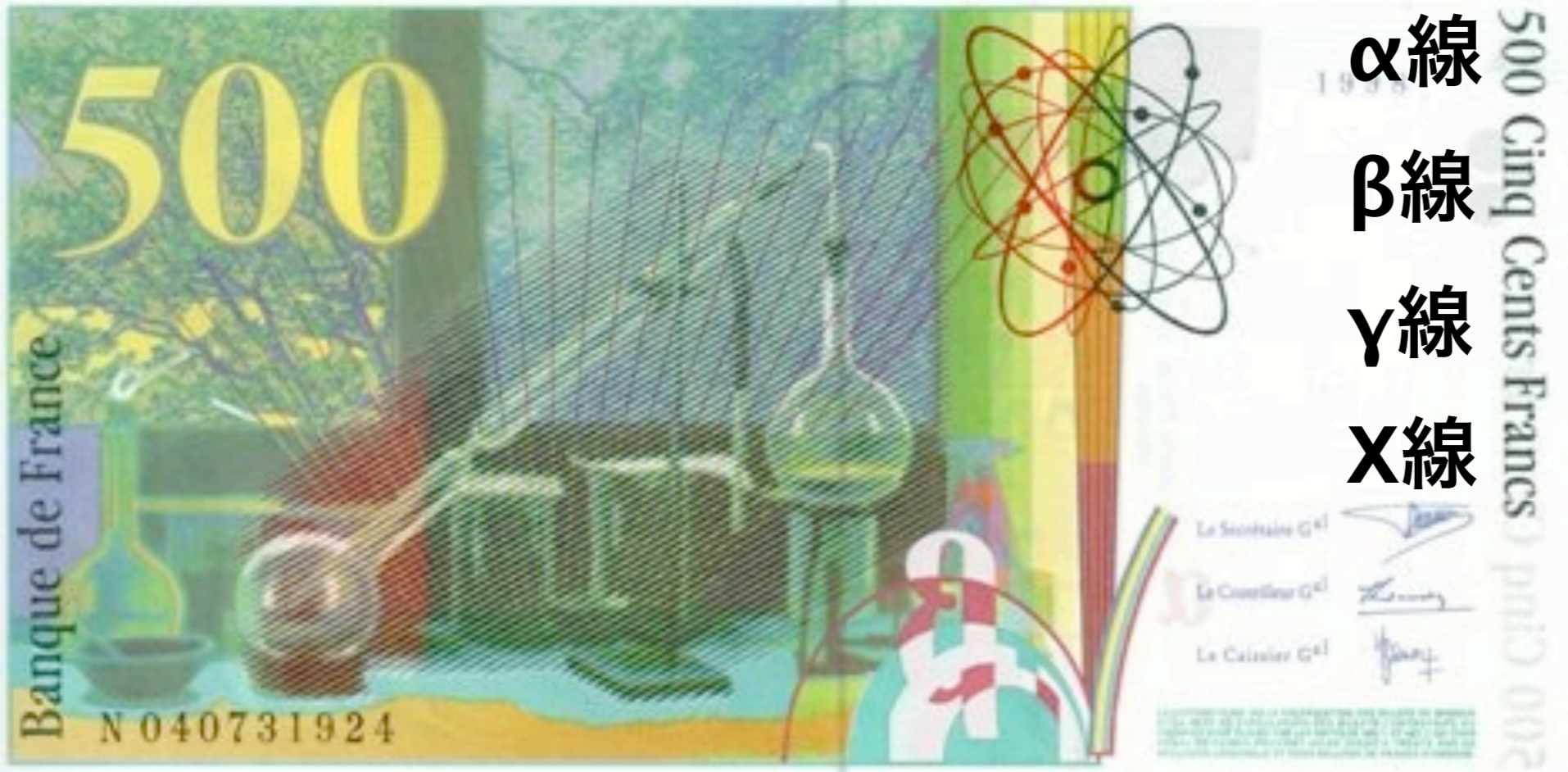


中性子 + ウラン **235** / **238**

# 放射線の種類



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）

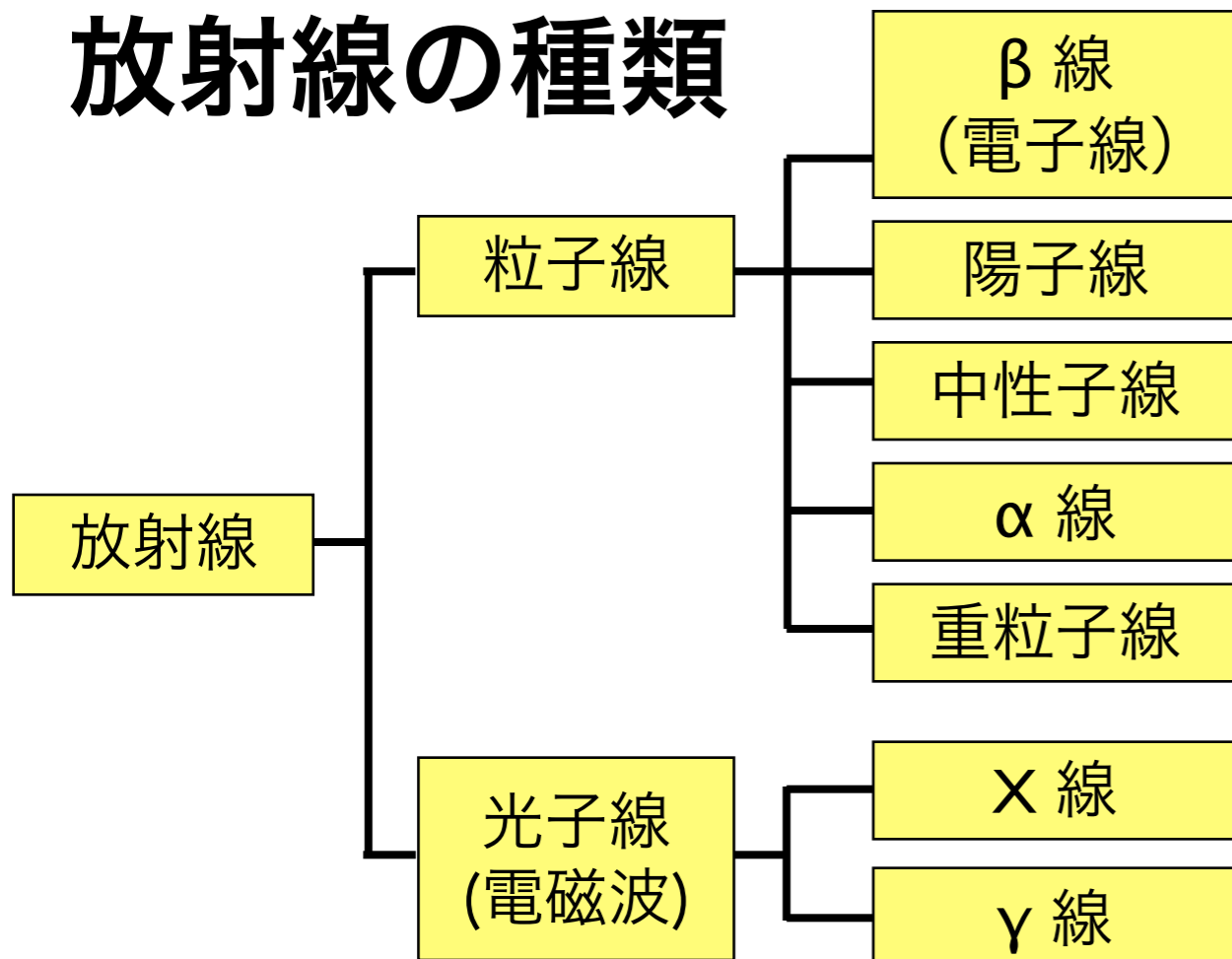
**VIDEO**

# 放射線とは

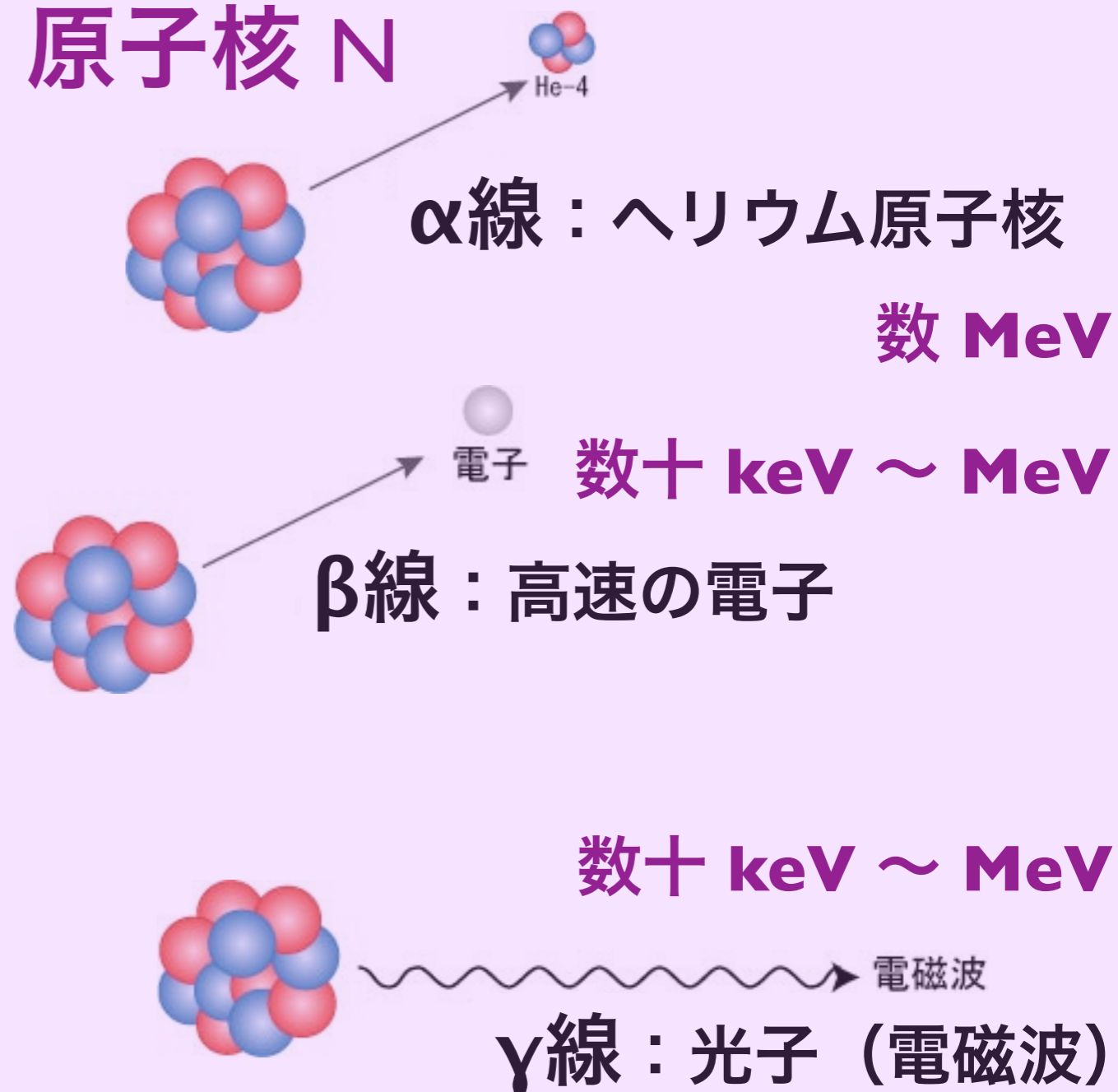
日本原子力文化振興財団：エネコチャンネルのビデオ映像「探検！身近な放射線」より抜粋

<http://eneco.jaero.or.jp/20110322/>

# 放射線の種類



## 原子核 N



放射線のもつエネルギーは？

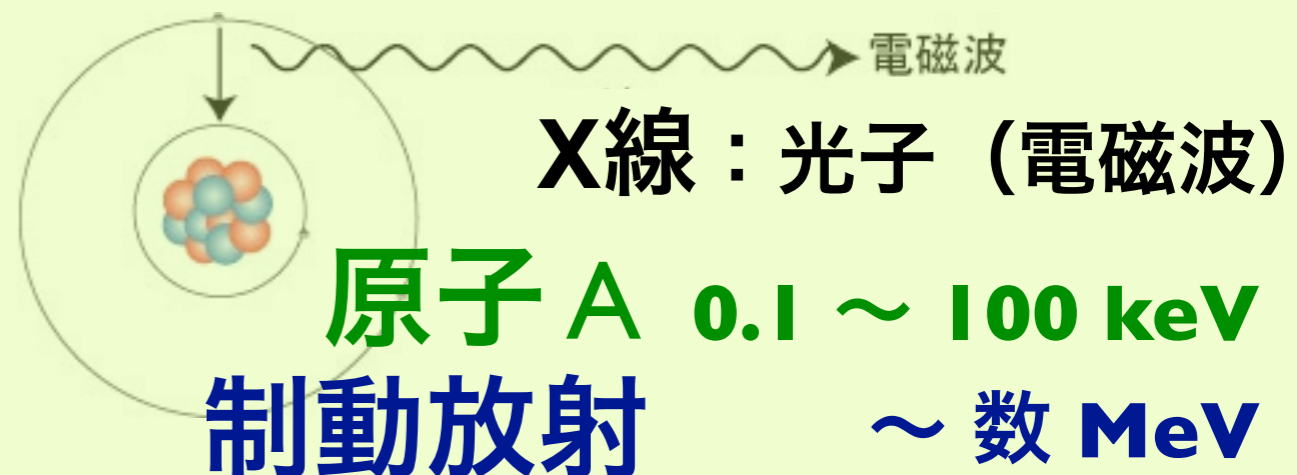
☞ **100 keV ~ 数 MeV** ( $\alpha, \beta, \gamma$ )

Cf. 原子の束縛エネルギーは？

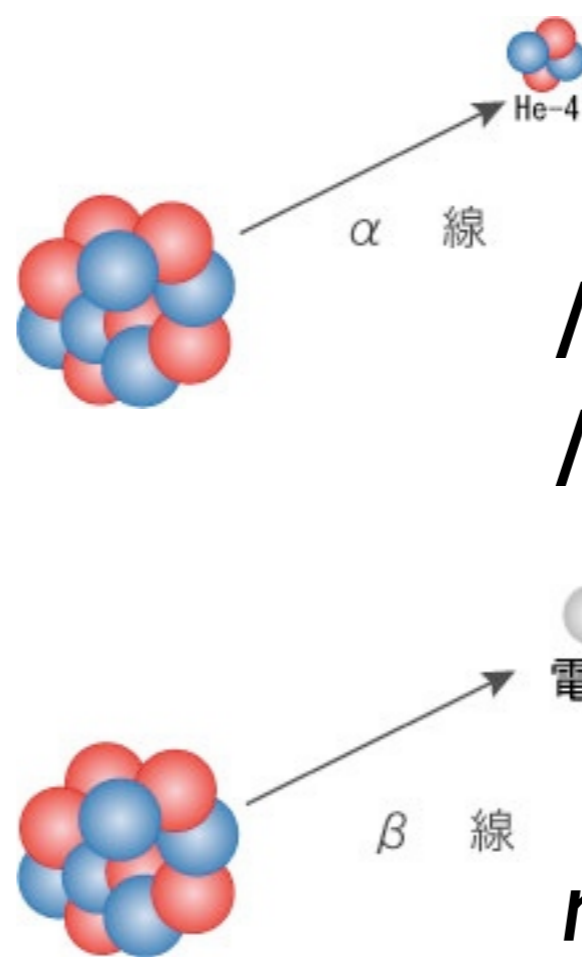
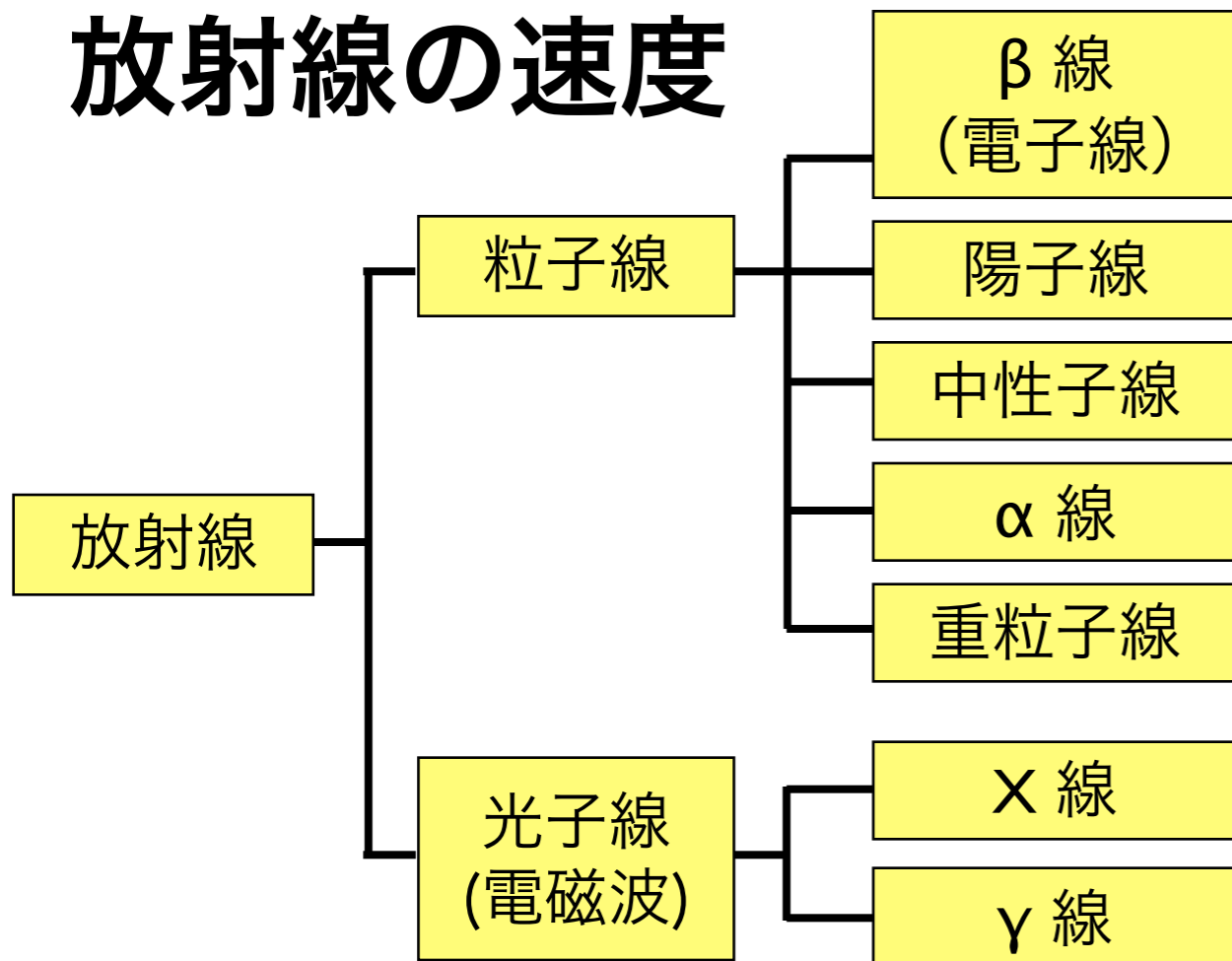
☞ 最外殻電子で **10 eV 程度**  
(1 eV = 96 kJ/mol)

放射線の速度は？

☞ **光速の数% ~ 100%**



# 放射線の速度



$$M_{\alpha} \approx 4 \text{ GeV}/c^2$$

~~$$1.67 \times 10^{-27} \text{ kg} \times 4$$~~

$$M_p = 938 \text{ MeV}/c^2$$

$$M_n = 940 \text{ MeV}/c^2$$



~~$$9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$~~

$$m_e = 511 \text{ keV}/c^2$$

$$\approx 0.5 \text{ MeV}/c^2$$

放射線のもつエネルギーは？

👉 **100 keV ~ MeV** for  $\alpha/\beta/\gamma$

**Cf. 原子の束縛エネルギーは？**

**荷電粒子の質量は？**

~~$$T = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} mc^2 \beta^2$$~~

$$\beta = v/c$$

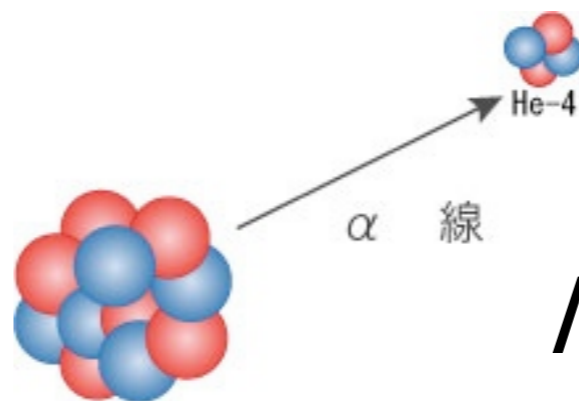
5 MeV の  $\alpha$ 線の速度は？

1 MeV の  $\beta$ 線の速度は？



# 放射線の速度

- X線・γ線は光なので、光速。
  - $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$
- α線は光速の数パーセント。  
(ニュートン力学で計算)
- β線は運動エネルギー 0.7 MeV 以上なら光速の 90% 以上。
  - 相対性理論により計算する。
  - ニュートン力学で計算すると光速を超えるが、間違い。

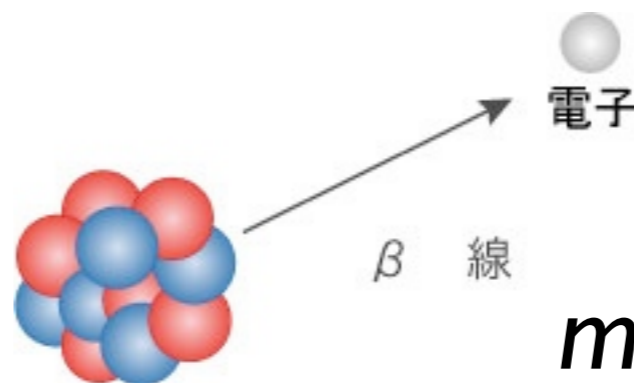


$$M_\alpha \approx 4 \text{ GeV}/c^2$$

~~$$1.67 \times 10^{-27} \text{ kg} \times 4$$~~

$$M_p = 938 \text{ MeV}/c^2$$

$$M_n = 940 \text{ MeV}/c^2$$



~~$$9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$~~

$$m_e = 511 \text{ keV}/c^2$$

$$\approx 0.5 \text{ MeV}/c^2$$

$$E = mc^2 \gamma = mc^2 \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$\beta = v/c$$

$$T = E - mc^2$$

$$\approx \frac{1}{2} mv^2 \quad (v \ll c)$$

放射線のもつエネルギーは？

👉 **100 keV ~ MeV** for α/β/γ

**Cf. 原子の束縛エネルギーは？**

**荷電粒子の質量は？**

# α 崩壊 (壊変)

decay

# β<sup>-</sup> 崩壊 (壊変)

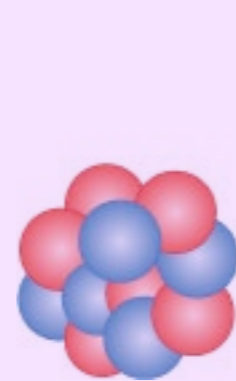
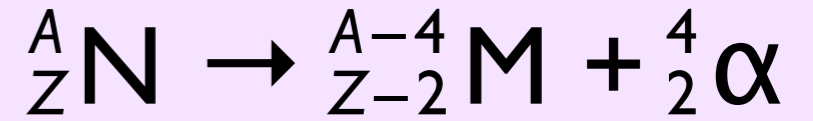
# γ 崩壊 (壊変)

# 原子の脱励起 制動放射

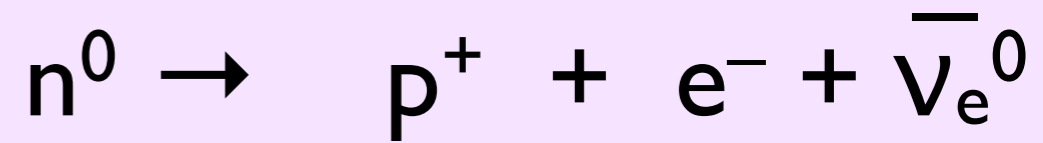
原子核 N



α線



β線



電子

数十 keV ~ MeV

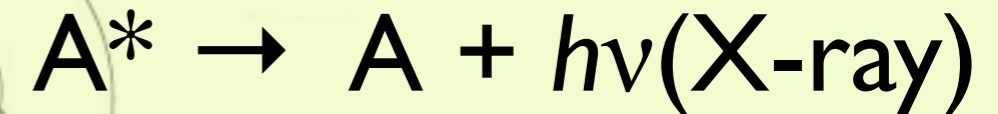


γ線

電磁波



X線



原子 A 0.1 ~ 100 keV

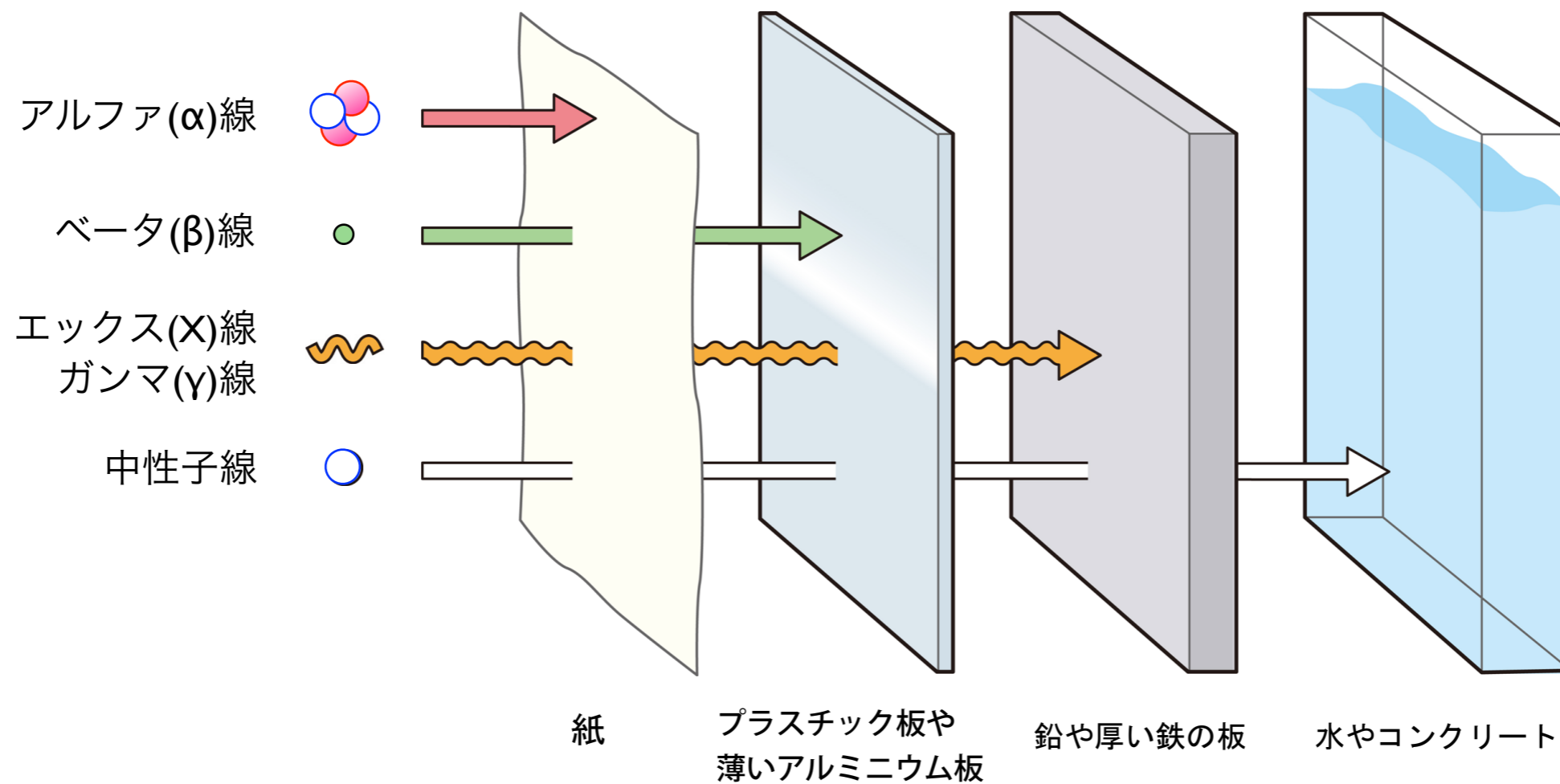
制動放射

~ 数 MeV

# 放射線と物質との相互作用

## 荷電粒子の減速

# 放射線の種類と透過力

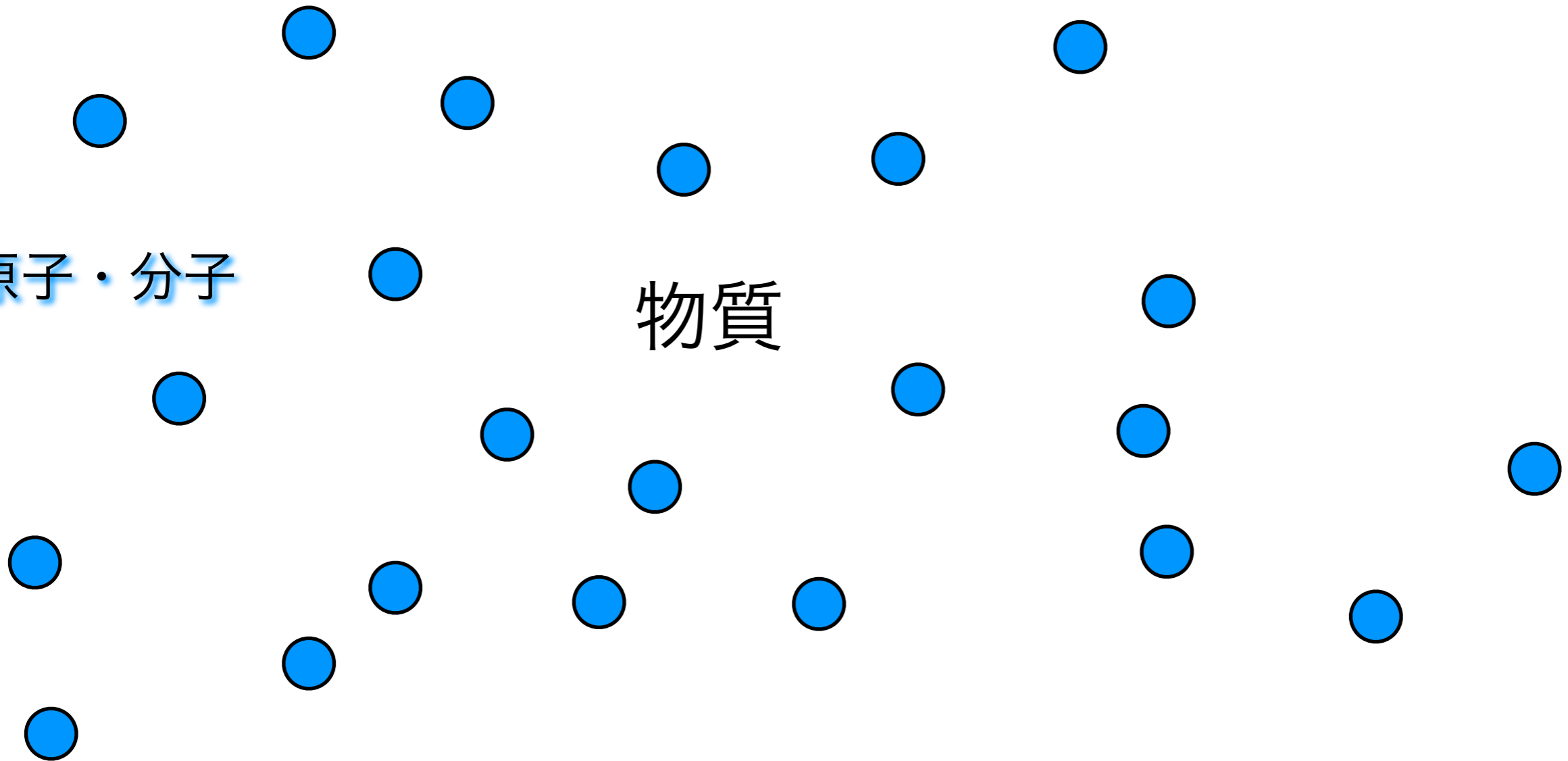


# 荷電粒子のエネルギー損失過程

荷電粒子：  
クーロン力

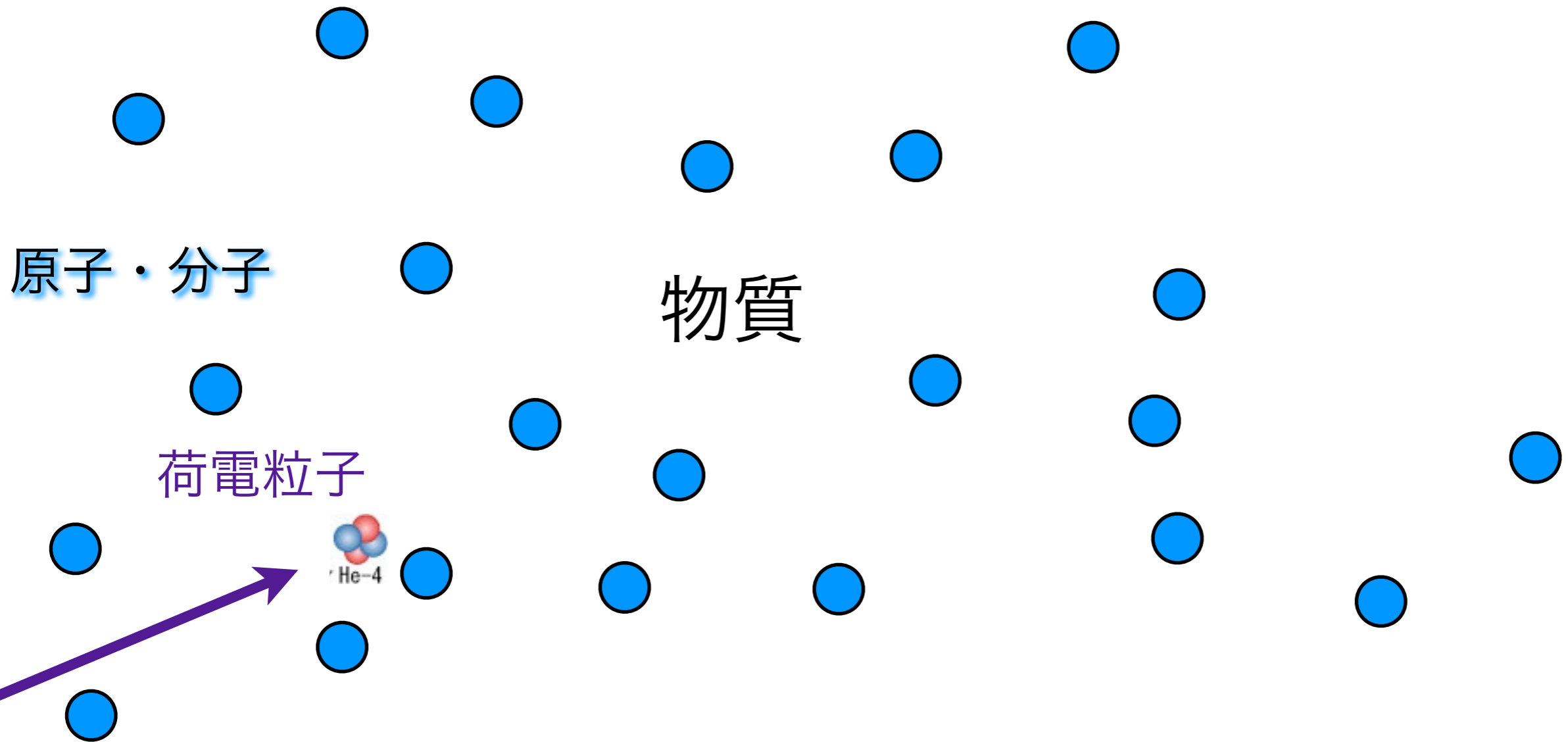
原子・分子

物質



# 荷電粒子のエネルギー損失過程

荷電粒子：  
クーロン力

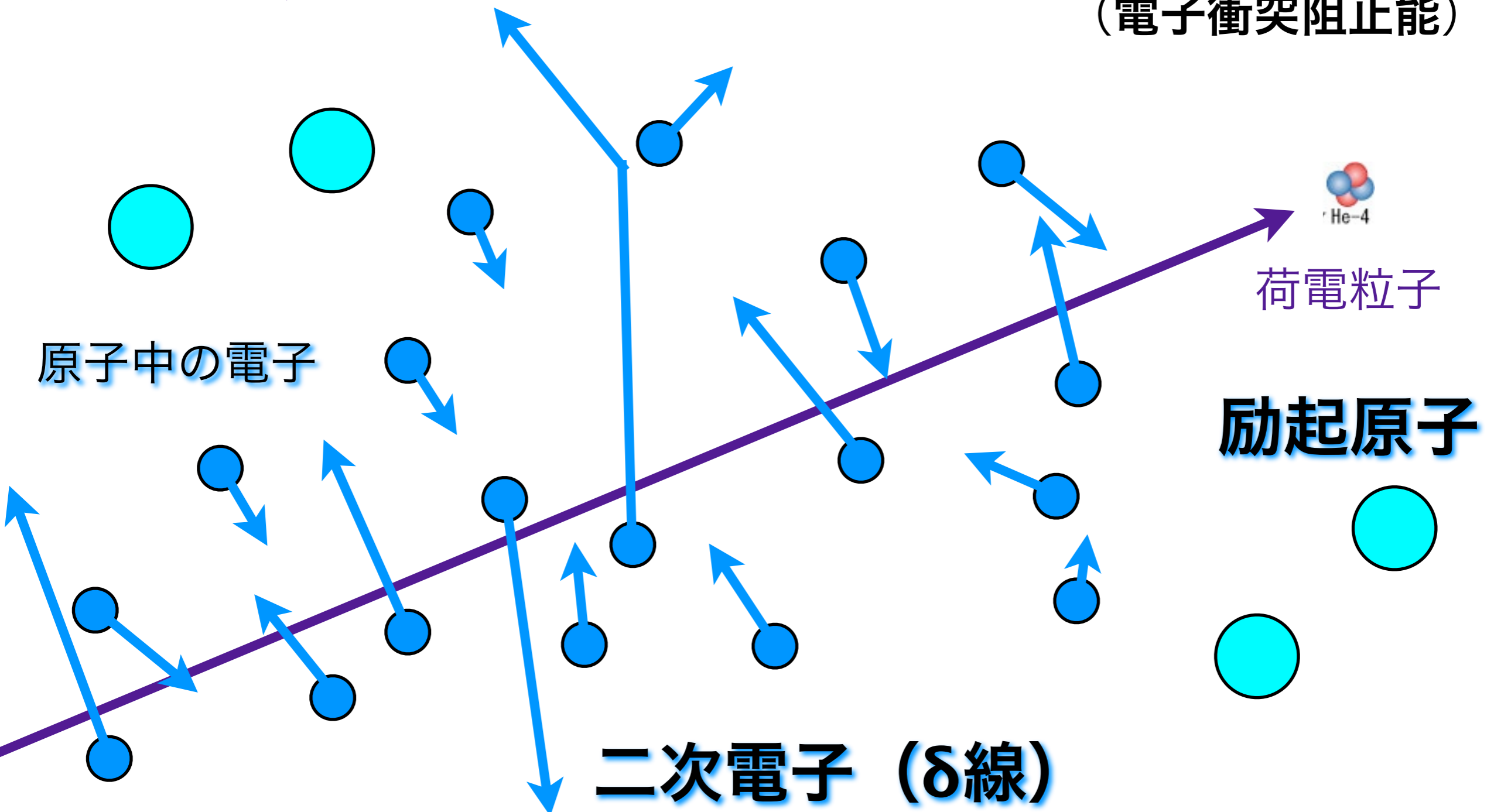


# 荷電粒子のエネルギー損失過程

物質中の原子を電離・励起し、多数の電子を散乱して運動エネルギーを受け渡し、その分だけ減速される。

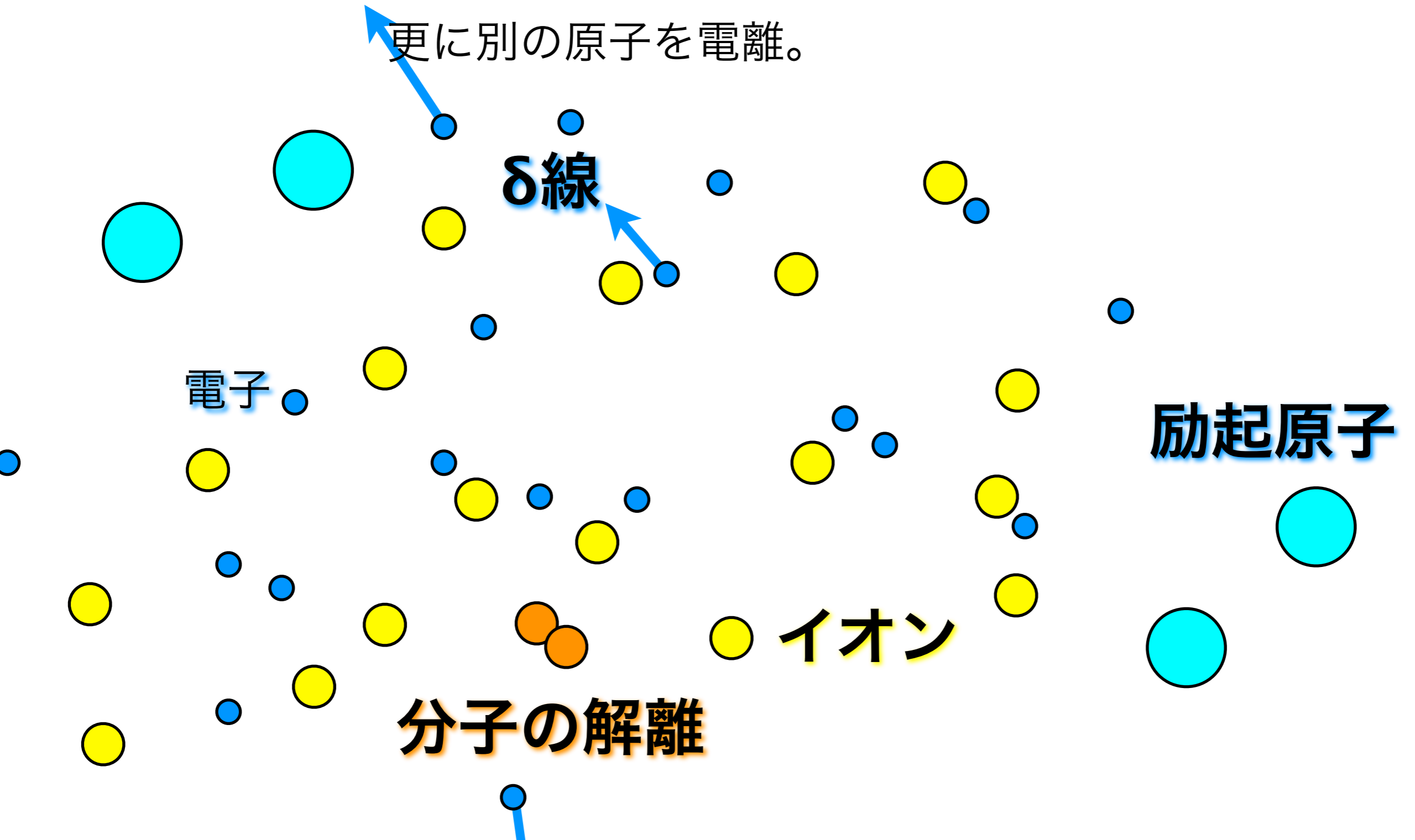
(電子衝突阻止能)

荷電粒子：  
クーロン力



# 荷電粒子通過後の軌跡近傍の様子

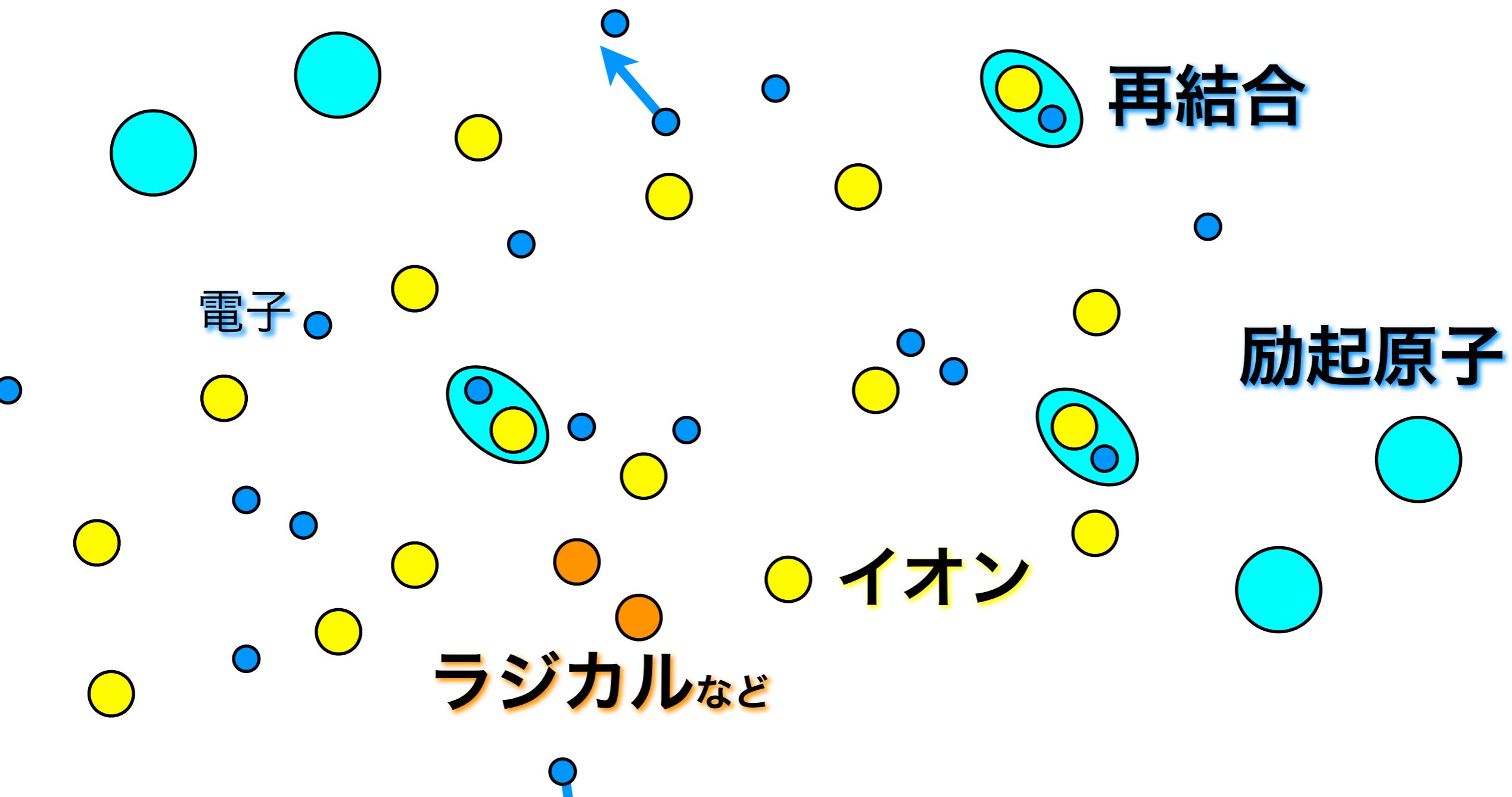
物質中の原子は電離・励起されてイオンや励起原子を生じ、運動エネルギーを受け取った電子は二次電子として更に別の原子を電離。





# 荷電粒子通過後の軌跡近傍の様子

物質中の原子は電離・励起されてイオンや励起原子を生じ、運動エネルギーを受け取った電子は二次電子として更に別の原子を電離。また再結合によりX線が発生。



# 荷電粒子通過後の軌跡近傍の様子

物質中の原子は電離・励起されてイオンや励起原子を生じ、運動エネルギーを受け取った電子は二次電子として更に別の原子を電離。再結合・脱励起によりX線が発生。

励起原子

電子

イオン

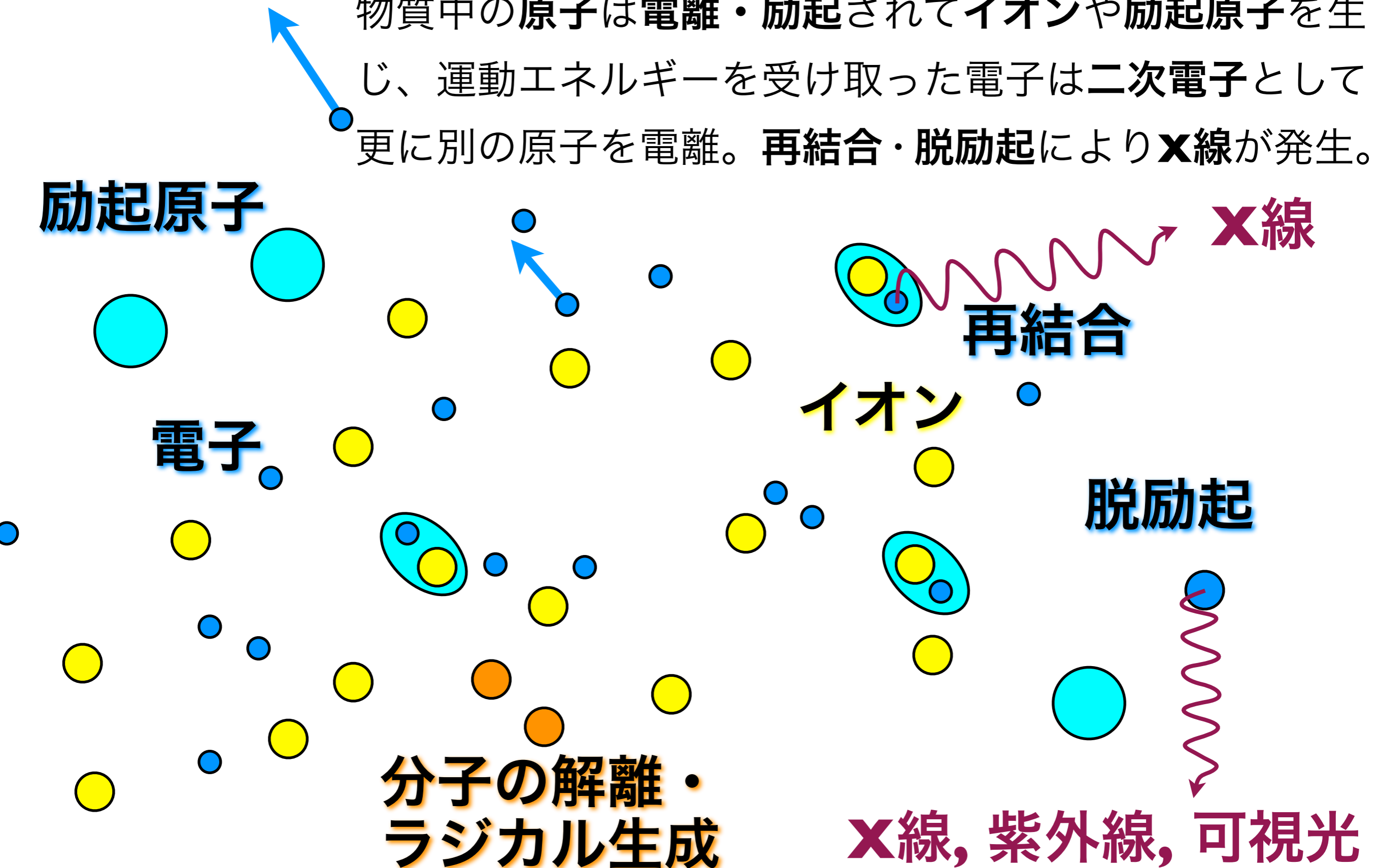
分子の解離・ラジカル生成

再結合

脱励起

X線

X線, 紫外線, 可視光



# 荷電粒子通過後の軌跡近傍の様子

物質中の原子は電離・励起されてイオンや励起原子を生じ、運動エネルギーを受け取った電子は二次電子として更に別の原子を電離。再結合・脱励起によりX線が発生。

原子の電離（イオン化）・励起

励起原子の脱励起

X線、紫外線・可視光

イオン・電子の再結合

化学結合の切断、組み替え

ラジカル、活性分子の生成

DNA の損傷

シンチレーション光

(放射線による原子・分子の蛍光)

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle$$

## 荷電粒子

### 阻止能

(エネルギー損失) Stopping power (Energy loss)

荷電粒子：クーロン力

**エネルギー損失**

物質中の原子を電離・励起して電子に運動エネルギーを受け渡し、その分だけ減速される（電子衝突阻止能）。

原子核は重いので、与える運動エネルギーは小さい。

● **重い粒子**：陽子線(p) /  $\alpha$ 線 / 重粒子線 /  $\pi$ 中間子 /  $\mu$ 粒子

1個の電子に与えるエネルギーは微小。多数個の電子との散乱により減速される。運動量変化も小さいので軌道はほぼ直線。

● **軽い粒子**：電子(e<sup>-</sup>)・陽電子(e<sup>+</sup>)

1回の散乱で失うエネルギーが大きい。ジグザグの軌道も。大きな運動エネルギーをもつ二次電子を生成しうる。

エネルギーが高く、電離能力をもつ二次粒子（大抵は二次電子）のことを  $\delta$  線 と呼ぶことがある。

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。

# 阻止能（エネルギー損失、線エネルギー付与）

Stopping power

Energy Loss

Linear Energy Transfer : LET

陽子線(p) /  $\alpha$ 線 / 重粒子線 : 高 LET 放射線

中性子線(n) : 物質中の陽子を叩いて弾き出すので、  
高い LET を与える。

電子( $\beta$ )線 : 低 LET 放射線

光子(X線,  $\gamma$ 線) : 物質中の電子を弾き出す。

あるいは高エネルギーでは電子陽電子対を生成する。  
低い LET。

物質の種類にさほど依らない

$$\begin{array}{l} \text{質量阻止能} \\ \text{MeV} / (\text{g} / \text{cm}^2) \end{array} \quad - \frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \frac{z^2}{v^2} = \frac{z^2 M/2}{Mv^2/2} \propto \frac{z^2 M}{T}$$

# 飛程

Range

阻止能の逆数を積分。

陽子線(p) /  $\alpha$ 線 / 重粒子線：短い飛程。

外部被曝に対して、遮蔽は容易。

中性子線(n)：電子と相互作用しないので遠くまで飛ぶ。

陽子を叩き出せば一気に減速するが、核子同士なので反応断面積が小さい（反応確率が小さい）。

短い飛程。水素原子を含む物質で遮蔽。

電子( $\beta$ )線：p,  $\alpha$ , 重粒子線に比べて長めの飛程。

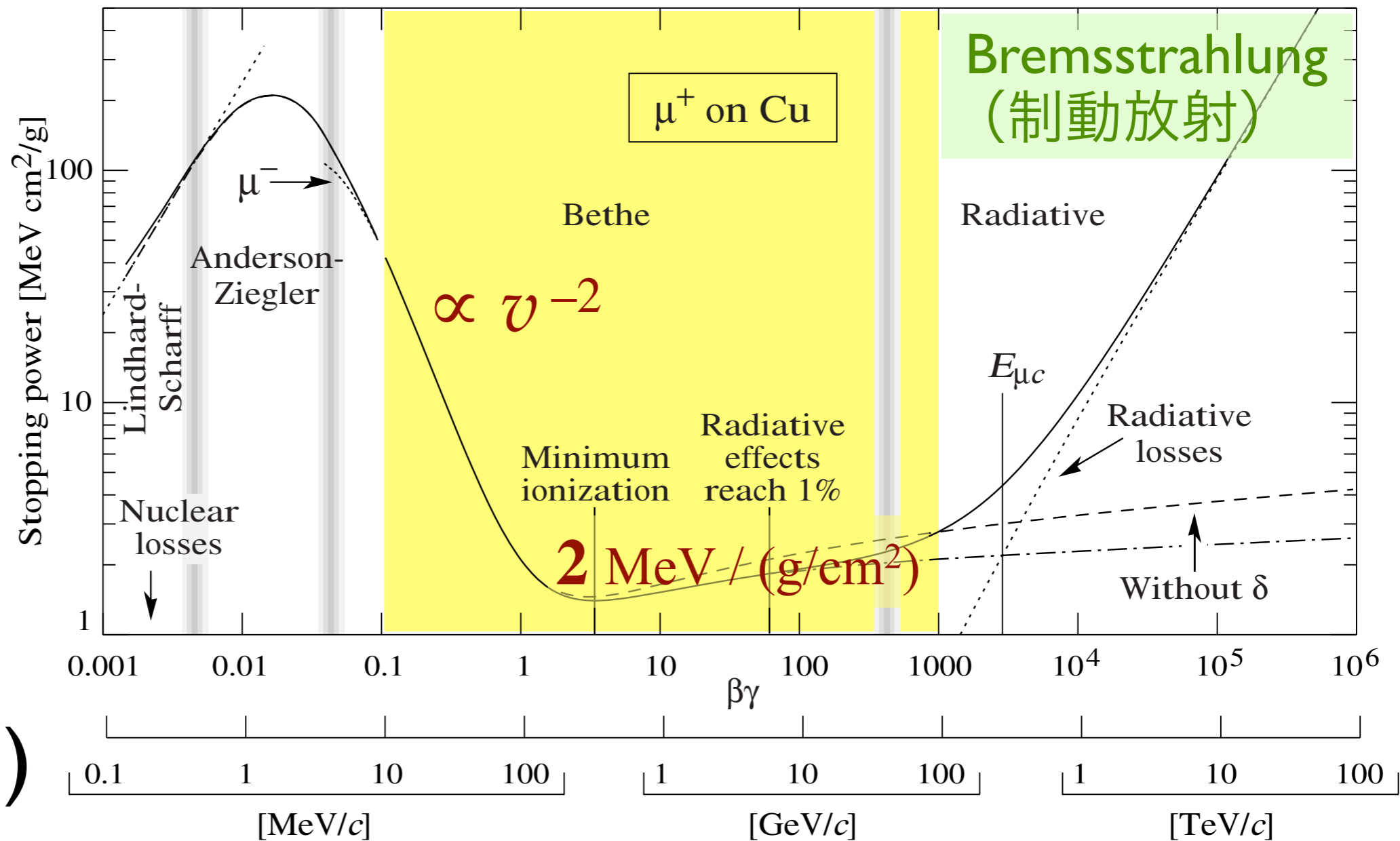
軽いので散乱されやすい（相手も電子）。

物質の種類にさほど依らない

$$\begin{array}{l} \text{質量阻止能} \\ \text{MeV} / (\text{g} / \text{cm}^2) \end{array} \quad - \frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \frac{z^2}{v^2} = \frac{z^2 M/2}{Mv^2/2} \propto \frac{z^2 M}{T}$$

$$-\frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle$$

高エネルギー物理学業界では  $\rho$  を書かない  
( $x$  について、 $\rho$  を含んだ次元だと見なす)  
ことが多い。前のスライドではそう表記。



( 線エネルギー付与 )  
keV / μm

### 27.2.2. Stopping power at intermediate energies :

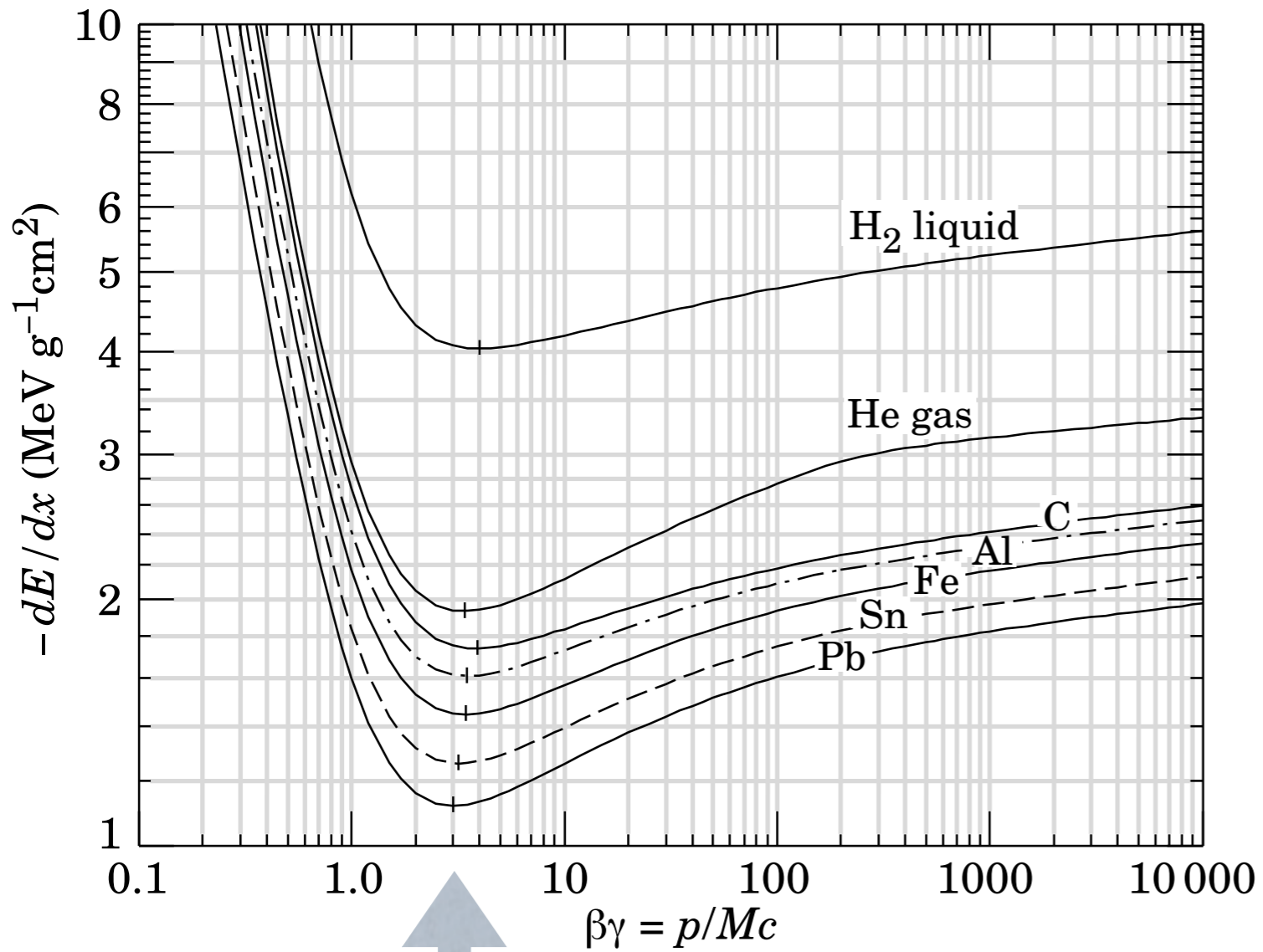
The mean rate of energy loss by moderately relativistic charged heavy particles,  $M_1/\delta x$ , is well-described by the “Bethe” equation,

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]. \quad (27.3)$$

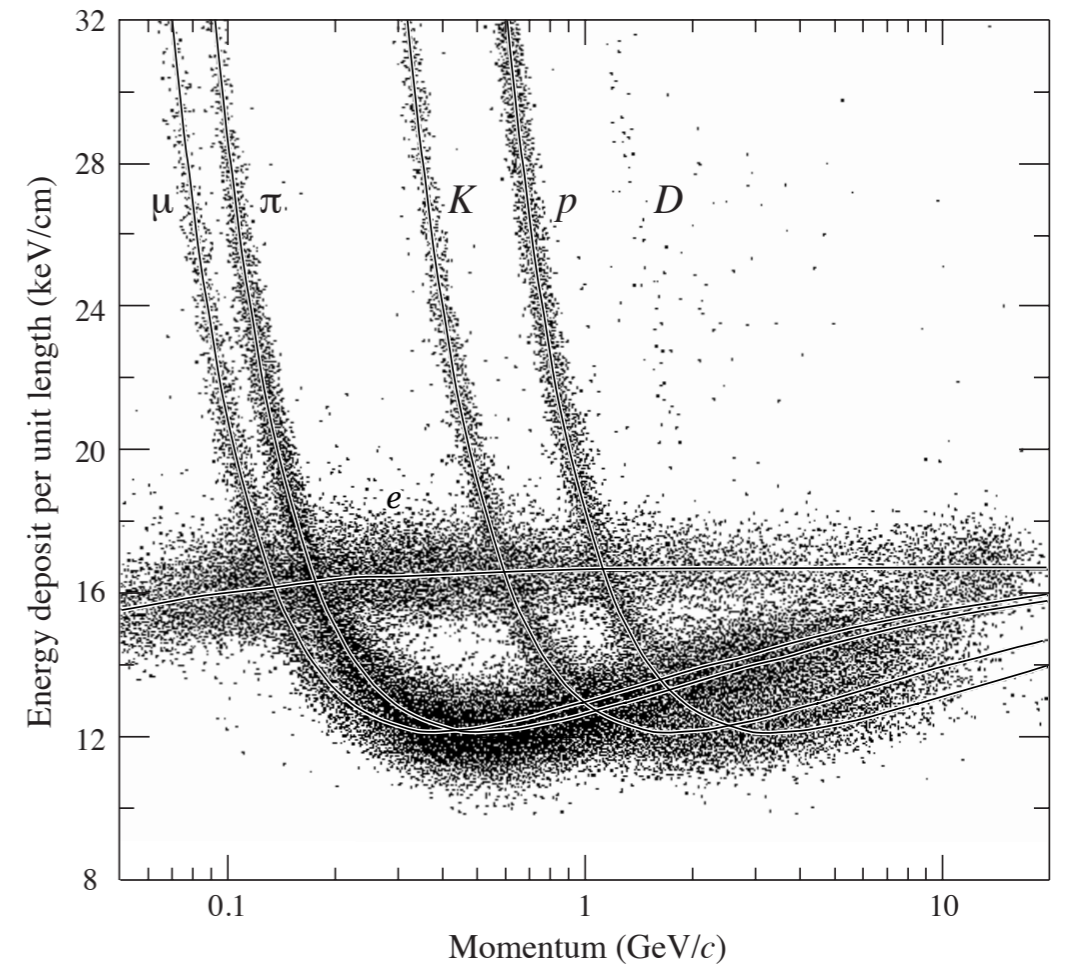
質量阻止能  
MeV / (g / cm²)

$$-\frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \frac{z^2}{v^2} = \frac{z^2 M/2}{Mv^2/2} \propto \frac{z^2 M}{T}$$

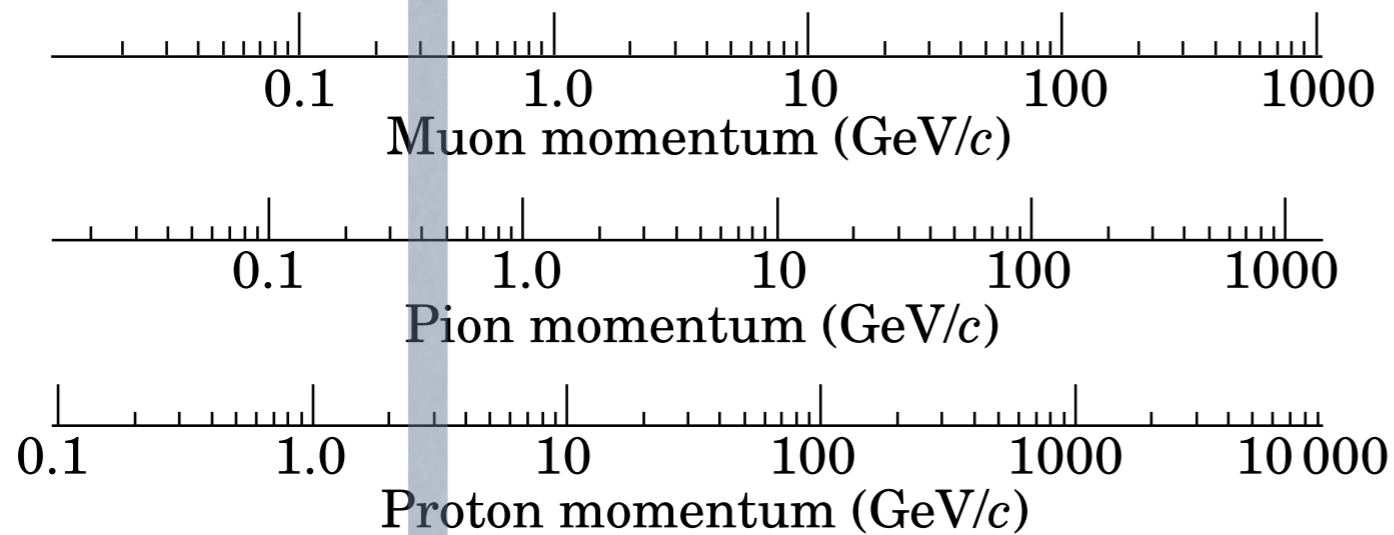




# 粒子識別



(8.5 atm Ar-CH<sub>4</sub> 80:20)

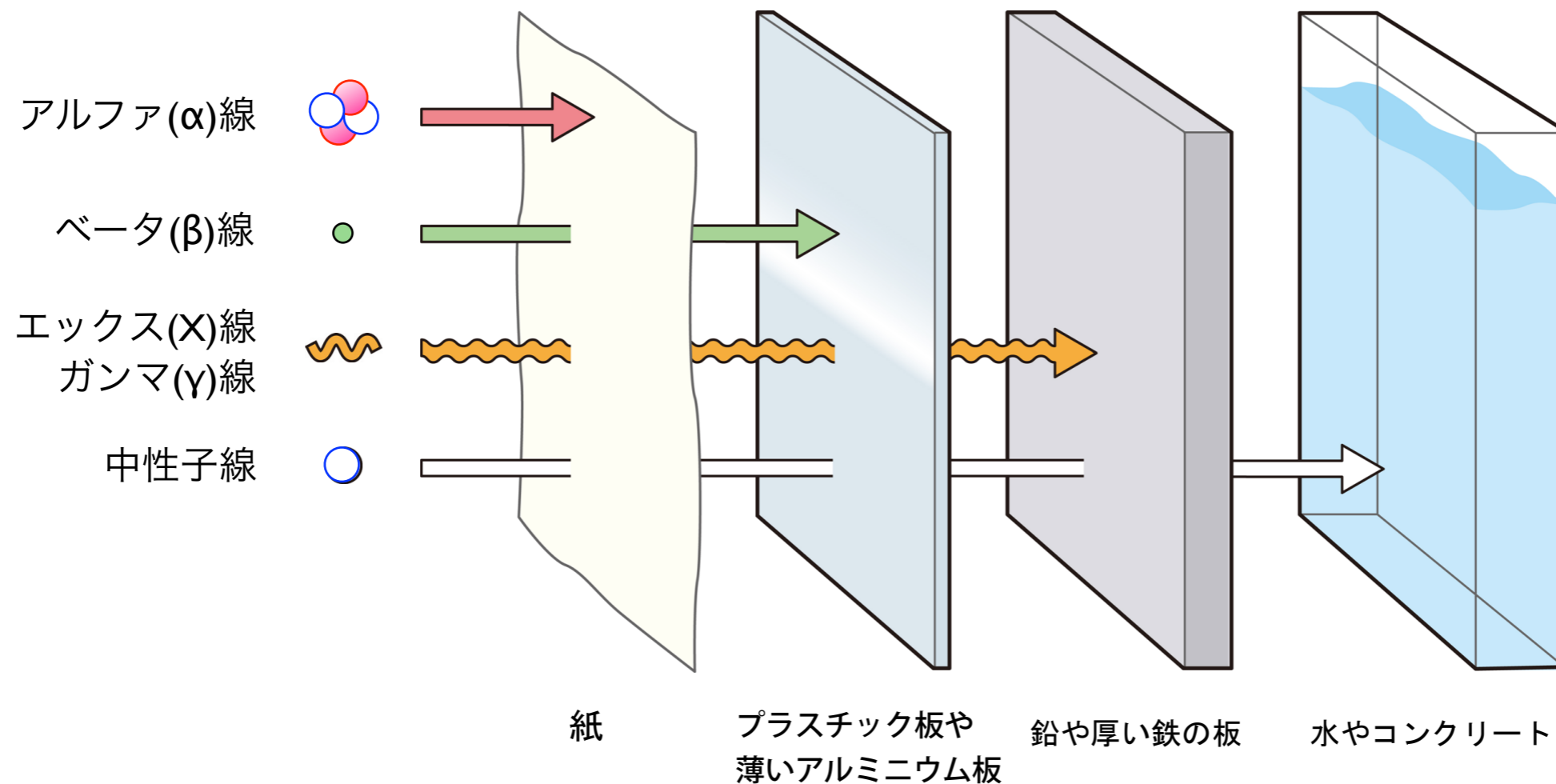


minimum ionizing  $\approx 2 \text{ MeV} / (\text{g}/\text{cm}^2)$

# 飛程

Range

阻止能の逆数を積分。



質量阻止能  
MeV / (g / cm<sup>2</sup>)

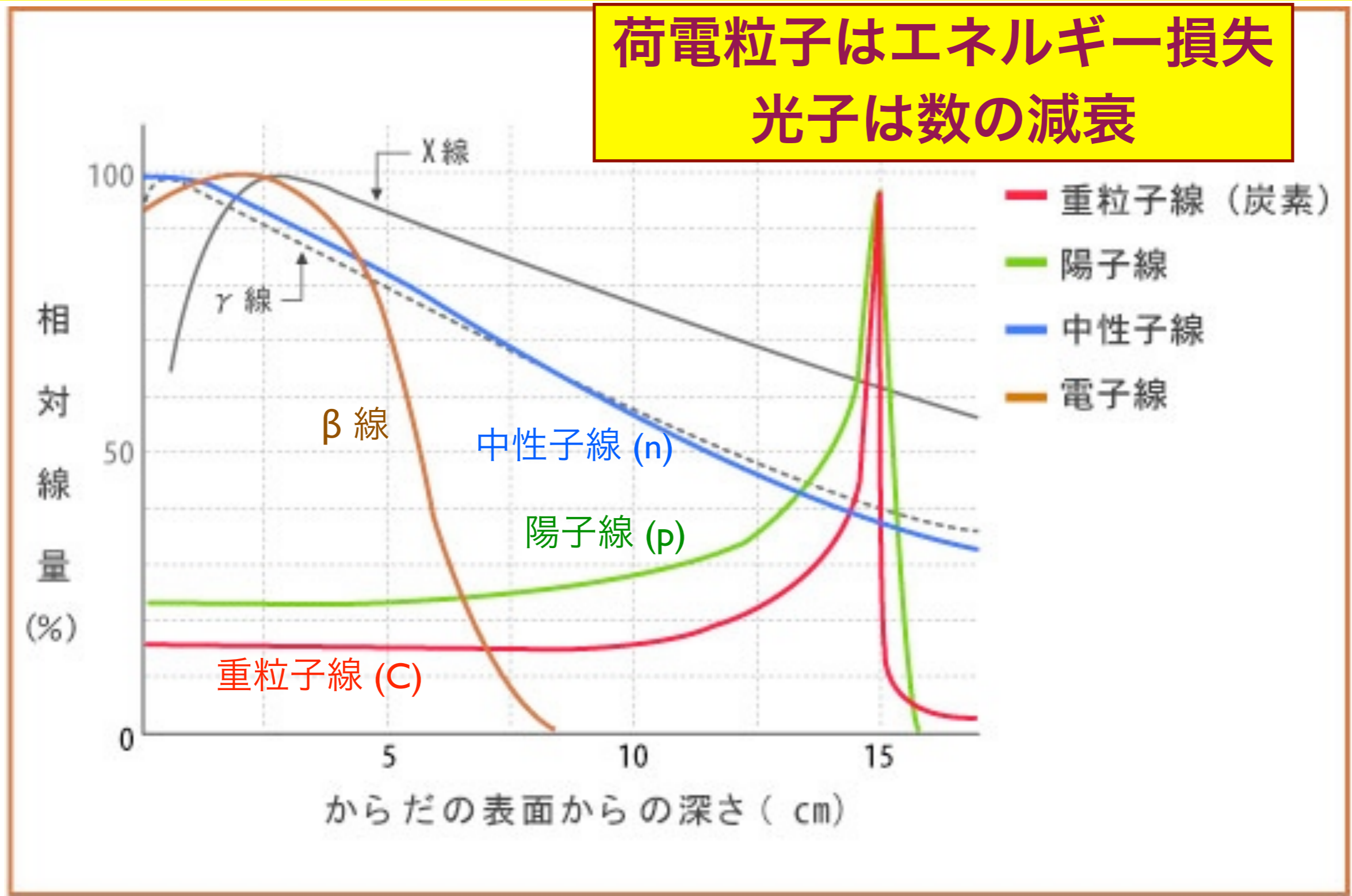
$$-\frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \frac{z^2}{v^2} = \frac{z^2 M/2}{Mv^2/2} \propto \frac{z^2 M}{T}$$

陽子(p)、 $\alpha$ 、重粒子線は飛程が揃っている。

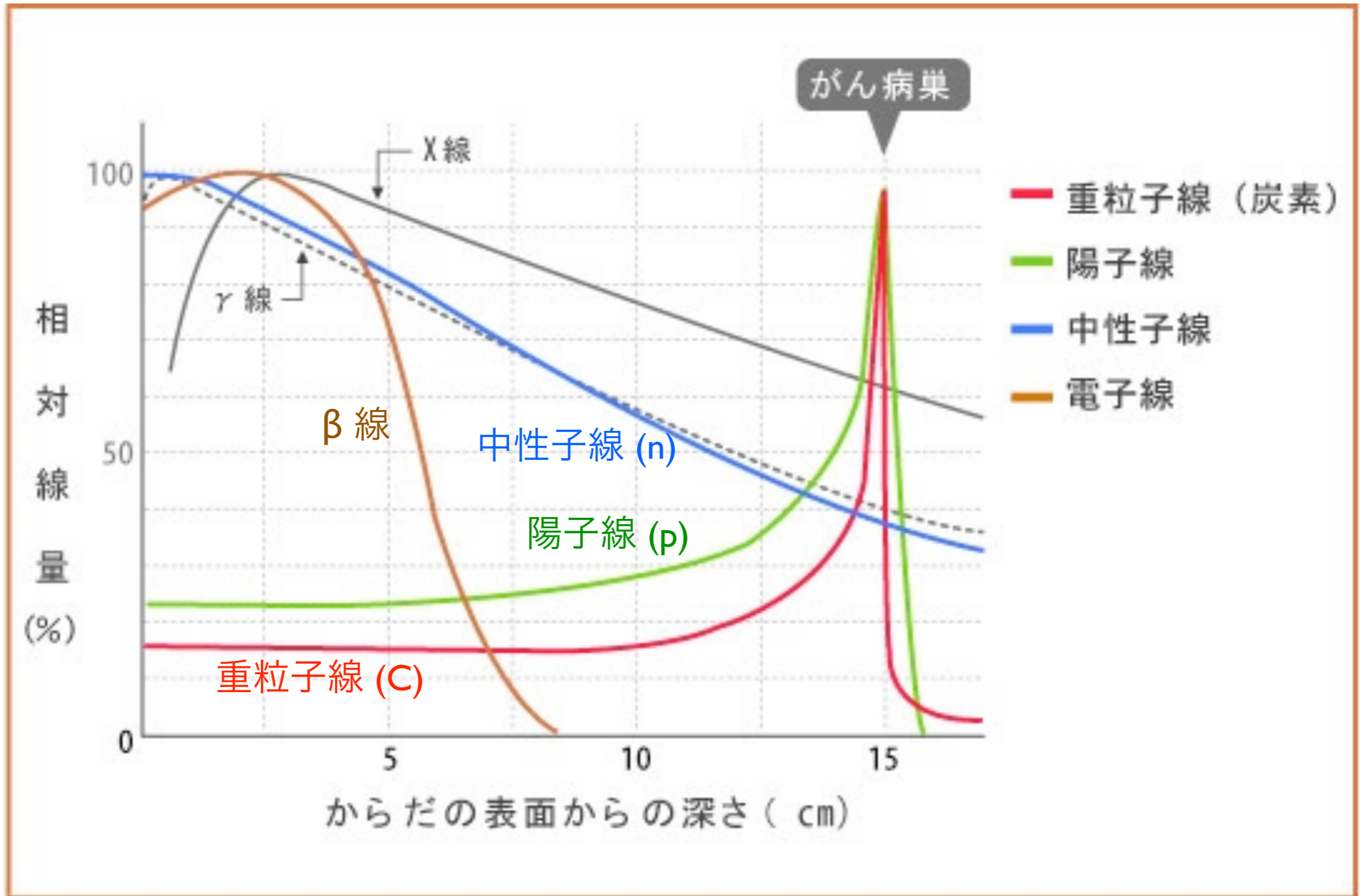
電子( $\beta$ )は散乱されやすく、飛程を直線距離(物質厚)で測るとばらつきが大きい。

中性子(n)、光子(X,  $\gamma$ ) は反応が確率的に起こるため、指数関数的減衰をする。

**荷電粒子はエネルギー損失  
光子は数の減衰**



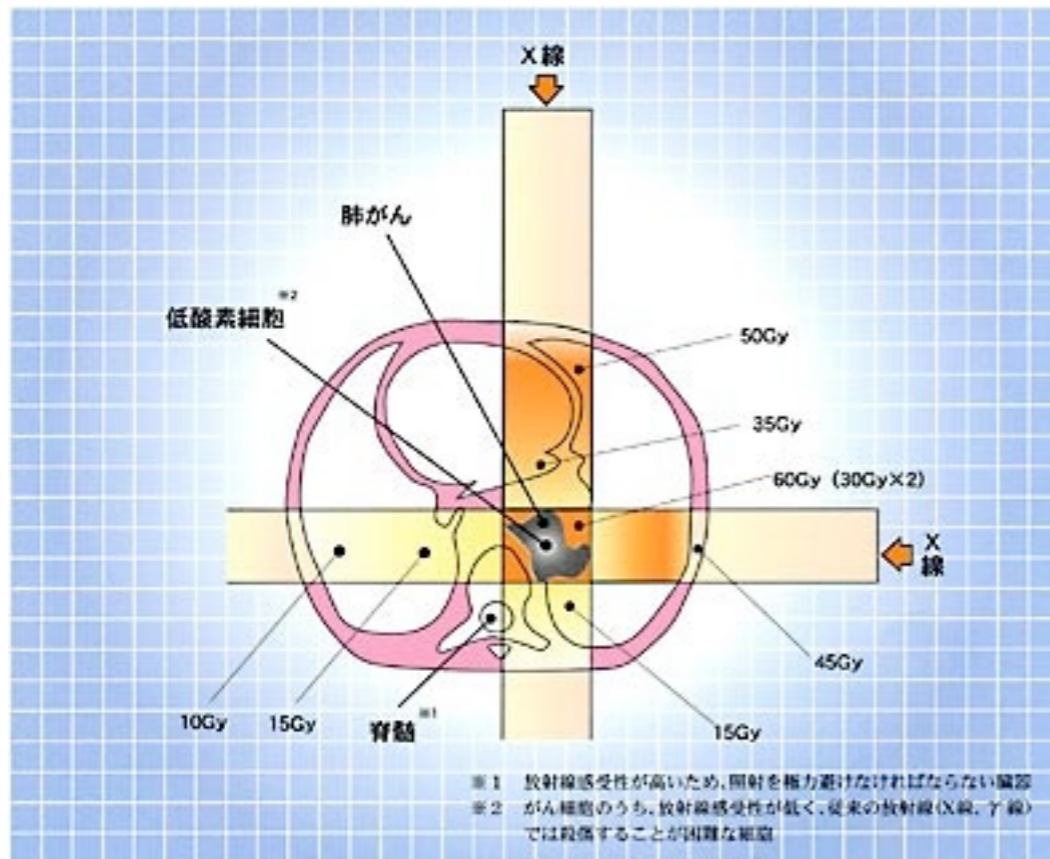
# Bragg peak



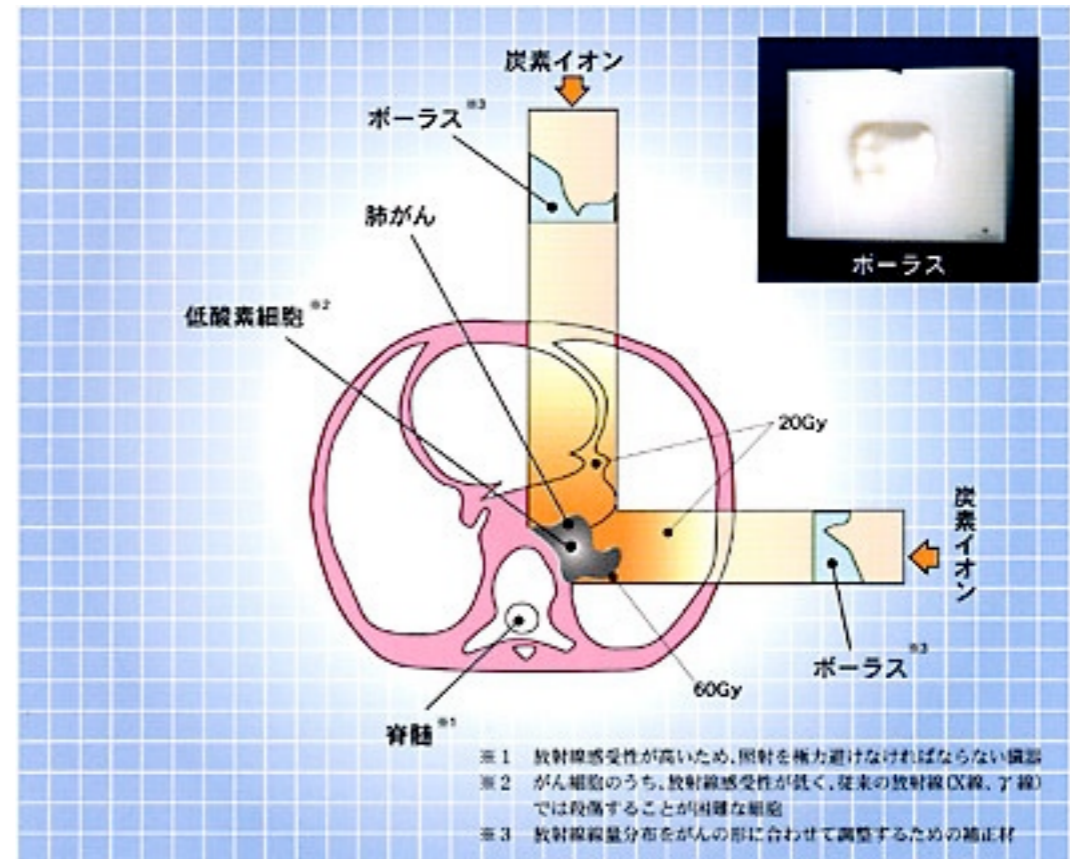
# 放射線医療：がん治療

# 数 Gy を複数回

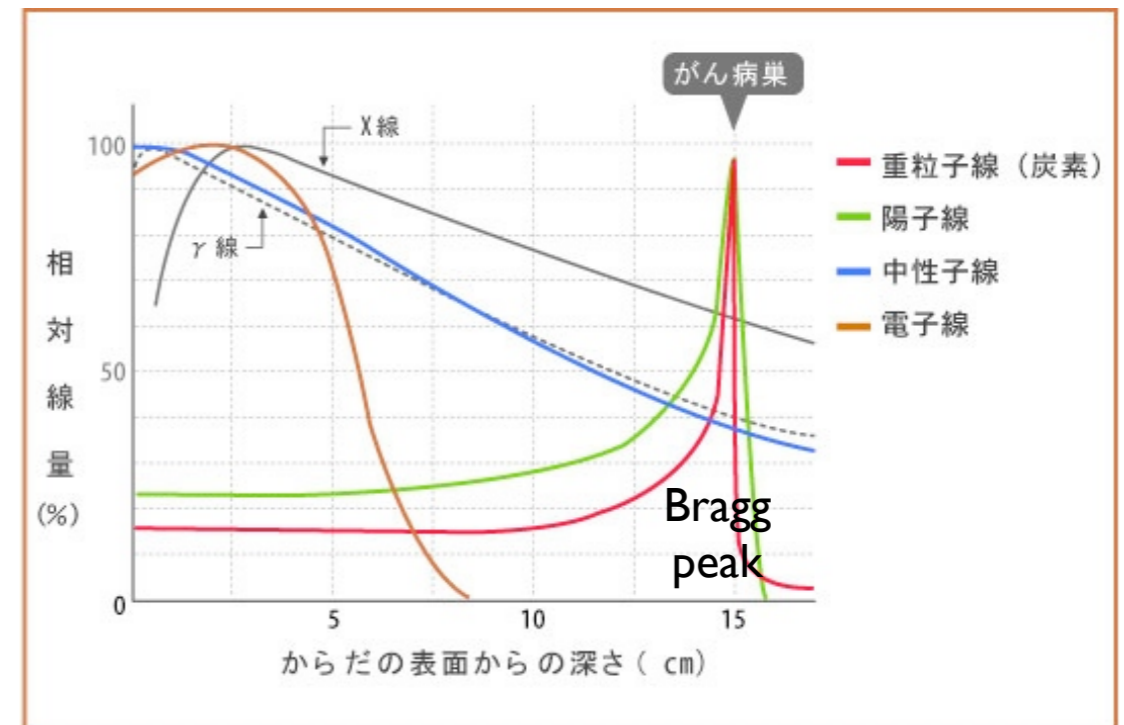
## X線



## 重粒子線 (炭素イオン)



他には：ガンマナイフ、  
陽子線、パイ中間子  
研究中：反陽子



# 放射線と物質との相互作用

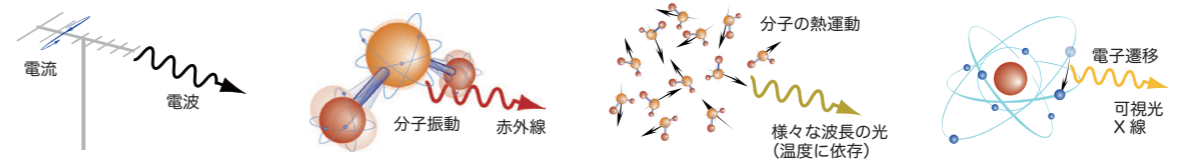
## 光子の減衰

# 光マップ THE LIGHT MAP

光は、自然界にいつも存在していて、あらゆる植物や生物、人間の生命と営みを支えています。太陽からの光は、地球上に温度をもたらす、植物の光合成のエネルギーとなります。蛍光灯やランプは私たちの生活を明るく照らします。レーザーは材料を加工したり、手術や治療をします。ラジオやテレビや携帯電話の信号を送る電波、電子レンジで使われるマイクロ波、電気こたつや電熱線で加熱に用いる赤外線、日焼けや殺菌作用がある紫外線、レントゲン写真に用いるX線や、原子崩壊のときに発生するγ線などすべて、光のなかまです。この光マップは、光が自然界や私たちの生活の中でどのようにつくられ、どのように使われているかをまとめたものです。

## 光の起源

光はどこで生まれるのでしょうか。光子（フォトン）は電子が加速度を持って動くことによって生まれます。アンテナの中で電子が動くと、低い周波数の光である電波が出ます。複数の原子から構成されている分子の中で原子が互いに動く（分子振動）と、原子の中にある電子も一緒に動くので光が生まれます。その光は赤外線です。水や空気の温度が高くなると、水分子が激しく動き回り、電子も共に動くので光が出ます。温度と光の周波数は対応します。分子の振動はランダムですので、熱が発する光（黒体放射）は単色の光ではなく様々な周波数の光が出ます。原子の周りを回る電子が別の軌道に移ると（電子遷移）、光が出ます。これは振動数の高い可視光です。原子の内殻の電子が遷移するとX線が生まれます。

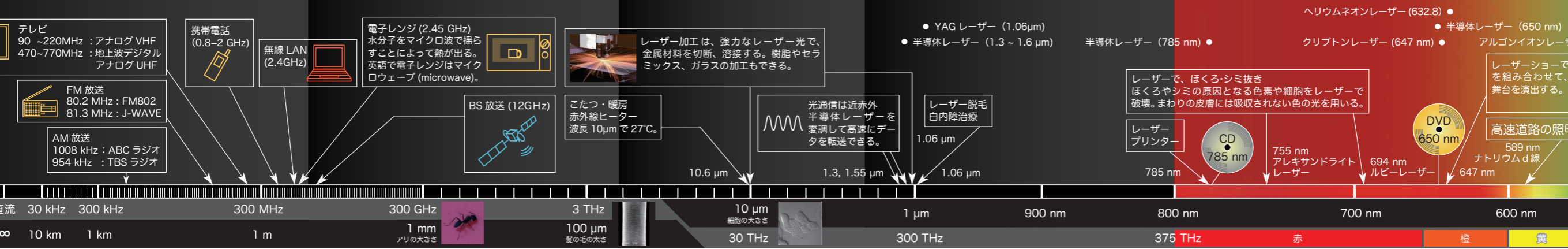


## 波としての光

光は空間横波です。振動数は1秒間の振動の回数（周波数）です。振動数と距離のかけ算は波長です。振動数や波長に関係なく一定で進む速度があります。

## 粒としての光

光の強度は光子の密度（振動数）に相当するエネルギーです。ちょうど、電流が明るいか暗いかは光子の密度（振動数）に相当するエネルギーです。



## 電波領域（電波も光）

アンテナで送受信

- テレビ: 90~220MHz: アナログ VHF, 470~770MHz: 地上波デジタル アナログ UHF
- 携帯電話 (0.8~2 GHz)
- 無線 LAN (2.4GHz)
- 電子レンジ (2.45 GHz): 水分子をマイクロ波で揺らすことによって熱が出る。英語で電子レンジはマイクロウェーブ (microwave)。
- FM 放送: 80.2 MHz: FM802, 81.3 MHz: J-WAVE
- AM 放送: 1008 kHz: ABC ラジオ, 954 kHz: TBS ラジオ
- BS 放送 (12GHz)

## 遠赤外光

低温の黒体放射

電波望遠鏡: 波長約1mmから1cmの電波を検出する望遠鏡。日本では野辺山宇宙電波観測所にある。温度が非常に低い星間ガスなどからの黒体放射を観測する。

黒体放射: 物体はその温度に応じて様々な波長の光を放射する。この現象を黒体放射という。

自由電子レーザー (FEL): 紫外から赤外までの広範囲で波長を自由に選択して強力な光をつくる。高速の自由電子を磁場によって蛇行させて発生したシンクロトロン放射からレーザー光線をつくる。国内では大阪大学、東京理科大学などにある。

## 中赤外光

分子振動・格子振動、有機分子が見える領域

有機分子の指紋領域: 中赤外は分子の振動単位が豊富。有機分子の“指紋領域”と呼ばれる。

二酸化炭素 (C=O 基): 4.3 μm  
水・アルコール (O-H 基): 2.9 μm  
メタン (C-H 伸縮): 3.3 μm  
トルエン (ベンゼン環): 6.7 μm

二酸化炭素の吸収スペクトル

## 近赤外光

物質と相互作用しない、物質が透明な領域（光通信に使われる）

監視カメラ (ナイトビジョン): 近赤外光を照射し、カメラで検知する。目に見えない波長なので、暗闇でも相手に気付かれない。防犯のほか、軍事用にも用いられる。

センサー・赤外線通信 (IrDA): 自動ドアやトイレ、照明用のセンサーや、テレビやステレオのリモコン、パソコンの通信にも近赤外光が使われる。

## 可視光

人間の目に見える光、外殻電子遷移エネルギー

血液の赤色はヘモグロビンの色。動脈は酸素を含んで鮮やかな赤色。静脈では黒っぽい色になる。波長 800 nm で入れかわる吸収率から、近赤外光を使って血中酸素濃度を計測することができる。

紅葉: アントシアン、カロテノイド、クロロフィル。秋になると、葉緑素のクロロフィルが分解されてカロテノイドの黄色に、その後、アントシアンがつくられて赤色に変わる。

3次元ナノ加工は、近赤外パルスレーザーを用いて、レーザー光の波長よりも遙かに小さい100nmの分解能で立体加工を実現。

細胞手術では、近赤外パルスレーザーを細胞内に集光して、細胞内部を加工、刺激する。

半導体量子ドット: 直径数nmの半導体粒子で蛍光を発する。小さい粒子ほど短い波長で光る。

ルビーの赤は不純物のクロムの色。世界初のレーザーはルビーから出た光。

太陽電池は、電卓、腕時計、街路灯から人工衛星にまで使われる。光のエネルギーでクリーン発電。

## 可視光

人間の目に見える光、外殻電子遷移エネルギー

花火の色は、金属元素の炎色反応の色。それぞれの元素特有の色を出し燃える。

発光ダイオードは、発光効率の高光源として、信号機、パイロットランプ、街のイルミネーション、車のヘッドライト、光合成等、多目に使用される。

太陽が黄色に見えるのは、500nm付近の黒体放射のため。表面温度は約6,000°C。

ホテルの発光の源はルシフェリン。熱をほとんど出さずに発光する。

白色をつくるには青と赤が必要。テレビの液晶の画素、CRTの蛍光体

色づくのは光の干渉

向から伝わってくる光が重なり合うと、互いにめかたり弱めかたりします。シャボン玉や油膜が七色に見えますが、これは膜の表面と裏面反射した光が干渉するからです。立体像である(1971年ノーベル賞)は、光の干渉を使っています。光は**コヒーレント** (可干渉) であるといえます。コヒーレントな光を出す装置です。

七色に光るシャボン玉

クレジットカードのホログラム

空の青色は光の散乱

光が小さな粒子（分子）に当たると散乱します。波長の短い光は長い波長の光よりよく散乱します。空が青いのも夕焼けが赤いのも光の散乱の効果です。もとの光から色ずれて散乱する光があります。**ラマン散乱**といひ、分子や結晶の振動エネルギーが光子に足し算(引き算)されるために生じます。この色のずれを計測して、半導体結晶の欠陥や分子の種類を分析する技術があります。

空の色は散乱された青い光

虹の七色は光の屈折

光が空気から水やガラスに入ると、曲がります。この現象を屈折といひます。屈折率は光の波長(色)によって異なります。万有引力の法則で有名なニュートンはプリズムを使って太陽の光には様々な色が混ざっていることを発見しました。雨上がりの路地に虹が見えるのは空気中の水滴がプリズムとして太陽光を分光するからです。最先端の光学には、**負の屈折率**の物質(逆方向に光が曲がる)を人工的に作る研究が進んでいます。

折れたように見えるけど...

プリズムで屈折して色分けされた光

光は回折する

光の進路に障害物を置くと、光は障害物の裏側にも回り込んで伝わっていきます。細い光線をつくらうとして細い穴に光を通して、すぐ広がってしまいます。光の回折を利用して光を選択することができます。細かい周期構造に光を照射すると、それぞれの構造で回折した光が干渉し、角度によって違う色が見えます。CDやDVDの表面が七色に見えるのは、記録ビットの列が回折格子として働くためです。タマシヤやチョウの羽、貝殻も、表面に周期構造があって七色に見えます。このように回折で現れる色のことを**構造色**といひます。

モルフォ蝶と、羽の電子顕微鏡写真

七色に光るCDの表面

光子ロケットは光の放射圧

光が物質の境界面で屈折や反射、散乱すると、物質に力がかかります。光の放射圧は、400年前に予言されたといひられています。天文学者のケプラーは彗星(ほうき星)の尾がいつも太陽と反対側にのびのびを見て、太陽からの光の圧力のせいだと考えました。スティブン・チューらは光の放射圧で原子を冷却する技術を発明しノーベル賞を受賞しました。SF小説には放射圧で飛ぶ光子ロケットが出てきます。JAXAやアメリカでは実際にソーラーセイル宇宙船を研究しています。

ハレー彗星

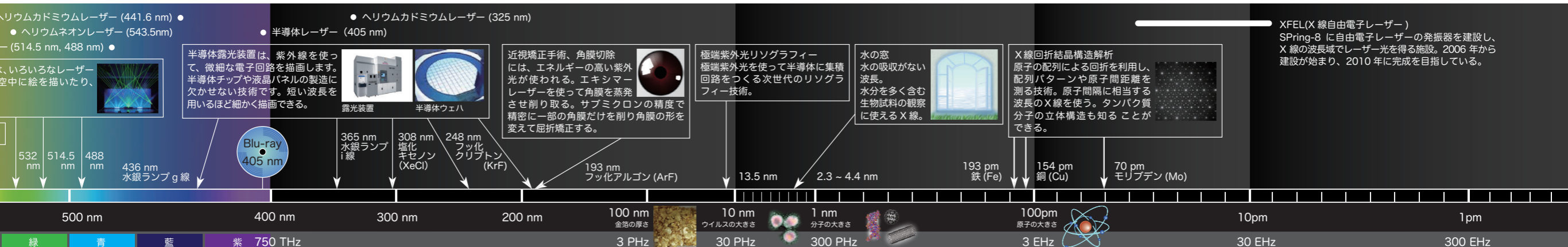
アメリカで光が進む

「波」として伝わります。粗密波（縦波）の音波とは異なり、光は進行方向と直交する方向に電場と磁場が交流して振動する電磁波です。単位は Hz)、波長は 1 回振動する間に真空中を進む距離 (単位は m) 光が一秒間に進む距離、つまり速度を表します。真空中の光の速度は、 $3 \times 10^8$  m/s です。

光が非常に弱くなってくると、光が粒々であることが見えてきます。光を光子 (フォトン) といい、光子の粒々がたくさん集まって「電子」の流れの集まりで、水が「水分子」の集まりなように、密度が決まります。光子一つ一つは、光の色、つまり波長 (あるいは周波数) を持っています。

### 光に関連するノーベル賞

- |       |                                |       |  |       |  |       |  |
|-------|--------------------------------|-------|--|-------|--|-------|--|
| 1901年 | X線の発見 (W. レントゲン)               | 1924年 | X線分光学 (K. M. G. シーグバーン)                        | 1961年 | γ線の共鳴吸収とメスbauer効果の発見 (R. L. メスbauer)         | 1997年 | レーザー冷却法による中性原子の凝縮 (S. チュー、C. コーエンタウジ、W. D. フィリップス) |
| 1907年 | 干渉計の考案と分光学の研究 (A. マイケルソン)      | 1927年 | コンプトン効果の発見 (A. H. コンプトン)                       | 1964年 | レーザーの発明 (C. H. タウンズ、N. G. バソフ、A. M. プロホロフ)   | 1999年 | フェムト秒化学 (A. H. ズウェイル) (化学賞)                        |
| 1908年 | 光の干渉を利用した天然色写真 (G. リップマン)      | 1930年 | ラマン効果の発見 (C. V. ラマン)                           | 1964年 | X線回折法による生物物質の分子構造の研究 (D. M. ホジキン) (化学賞)      | 2000年 | 高速・光電子技術のための半導体ヘテロ構造の開発 (Z. I. アルフォーロフ、H. クレーマー)   |
| 1909年 | 無線通信 (G. マルコーニ、C. F. ブラウン)     | 1932年 | 量子力学の創始 (W. K. ハイゼンベルグ)                        | 1965年 | 量子電磁力学 (朝永振一郎、J. シュウィンガー、R. P. ファインマン)       | 2002年 | 宇宙ニュートリノ検出 (R. デービス Jr.、小柴昌俊)                      |
| 1914年 | 結晶によるX線回折 (M. フォン・ラウエ)         | 1936年 | X線、電子線回折による分子構造の研究 (P. J. W. デバイ) (化学賞)        | 1966年 | 光ポンピング法による原子の励起 (A. カスレ)                     | 2002年 | タンパクのレーザーイオン化法 (J. B. フェン、田中耕一) (化学賞)              |
| 1915年 | X線結晶解析 (W. H. ブラッグ、W. L. ブラッグ) | 1953年 | 位相顕微鏡の発明 (F. ツェルニケ)                            | 1971年 | ホログラフィーの発明 (D. ガボア)                          | 2003年 | 核磁気共鳴画像化法 (P. ラウターバー、P. マンスフィールド) (生物・医学賞)         |
| 1918年 | エネルギー量子説 (M. K. E. L. プランク)    | 1954年 | 波動関数の統計的解釈の提唱 (M. ボルン)                         | 1974年 | 電波天文学における先駆的研究 (M. ライル)                      | 2005年 | 光コヒーレンスの量子理論 (R. J. グラウバー)                         |
| 1921年 | 光電効果の法則の発見 (A. アインシュタイン)       | 1954年 | 原子核反応とγ線に関する研究 (W. ボーテ)                        | 1979年 | X線 CT (G. N. ハウンズフィールド、A. M. コーマック) (生物・医学賞) | 2005年 | 光周波数コム技術などレーザー精密分光法の開発 (J. L. ホール、T. W. ヘンシュ)      |
| 1923年 | 光電効果の研究 (R. A. ミリカン)           | 1958年 | チェレンコフ効果の発見 (P. A. チェレンコフ、I. M. フランク、I. E. タム) | 1981年 | レーザー分光学 (N. ブルームバーク、A. L. ショーロー)             |       |  |
|       |                                |       |  | 1981年 | 高分解能光電子分光法 (K. M. シーグバーン)                    |       |  |



紫外光	軟X線 (極短紫外を含む)	X線	γ線
目に見えない光、外殻電子遷移エネルギー	内殻電子遷移エネルギー、水に吸収されない	内殻電子遷移エネルギー	原子核・素粒子の遷移エネルギー
<p><b>紫外線洗浄</b> 半導体基板や金属、セラミックス、プラスチック表面の洗浄、改質に紫外線を使う。</p> <p><b>紫外線殺菌</b> 熱を与えずに、水、食品、医薬品などを殺菌する。</p> <p><b>オゾン層</b> 地球上の生物に害のある紫外線を遮ってくれる。</p> <p><b>光触媒は、紫外光を吸収して、窓ガラスや壁の汚れを分解する。</b> 酸化チタン</p> <p><b>SPring-8</b> 兵庫県佐用郡にある大型の放射光施設。X線から赤外線まで広い波長範囲で世界最高輝度の光をつくる。周長 1.4 km の蓄積リングと呼ばれる軌道に電子を閉じ込め、光速近くまで加速した電子からのシンクロトロン放射でX線を得る。</p>	<p><b>レーザープラズマ光源</b> 高出力のレーザー光をターゲットに当てて発生するプラズマから軟X線を出す。未来の半導体製造光源。</p> <p><b>軟X線顕微鏡</b> 「水の窓」を使えば、高い空間分解能で生物試料を生きたまま観察できる。軟X線は大気をほとんど伝わらないので、装置を真空中に置く。</p> <p><b>X線のレンズ</b> 軟X線やX線の領域では、ガラスも金属も屈折率がほぼ1.0で、反射も屈折もしない。浅い角度の反射でX線の進行方向を変えて集光する。</p> <p><b>ウォルター鏡</b> ゾーンプレートでX線を回折して集光する方法もある。</p> <p><b>フレネルゾーンプレート</b> 反射には、Mo/Si や Cr/Sc などの多層膜が用いられる。</p> <p><b>静電気除去</b> 空気中の分子を分解してイオンを発生し、基板の帯電を除去する。</p>	<p><b>レントゲン写真</b> からだが見え透る。X線が透過しにくい骨が影となって映る。胃を見るときはバリウム(造影剤)を飲む。</p> <p><b>X線CT (コンピュータ断層撮影)</b> 様々な方向でX線を照射して測定した透過強度から、コンピュータ解析によって断層像を取得する。</p> <p><b>X線天文衛星さすく</b> X線は大気層で吸収されるため、望遠鏡を搭載した衛星を宇宙まで飛ばして観測する。</p> <p><b>XPS (X線光電子分光)</b> X線を試料に当てて出る光電子から、半導体の構成元素や電子状態を分析する。</p>	<p><b>PET (ポジトロン断層法)</b> 放射性分子をマーカーにした新しいがん検診技術。</p> <p><b>γ線バースト</b> 太陽系外からやってくる原因不明の突発的なガンマ線。</p> <p><b>強い放射線</b> 強力なX線やγ線は人体に致命的な障害をもたらす。</p> <p><b>放射線治療</b> 弱い放射線を使えばがん細胞を退治できる。</p> <p><b>γ線滅菌</b> 弱いγ線なら医療器具などの滅菌にも使える。じゃがいもの発芽防止にもγ線を照射する。</p>

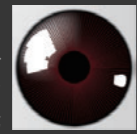
<p><b>光は横波</b> 水面や金属の表面、照葉樹の葉の表面で反射すると、電場が反射面に垂直な方向に揺れている光がよく反射され、光の揺れる方向に偏りが生じます。これを偏光といいます。</p> <p>偏光フィルターは、特定の方向に揺れる光だけをカットします。偏光メガネやカメラのフィルターに使われます。テレビやパソコンの液晶ディスプレイは偏光を利用した表示装置です。電圧で液晶分子の向きをそろえ、光の透過を偏光制御します。</p>	<p><b>光の速度は</b> 真空中で1秒間に30万 km。これは1秒間に地球を7周半回ることができる速さです。月までは1.3秒、太陽までは8.3分かかります。光の速さで1年かかる距離を1光年といいます。太陽から最も近い恒星は4.2光年の距離にあり、銀河系の直径は10万光年です。夜空には数多くの星が見えますが、この光は何年も何十年も昔に星を出した光です。真空中の光の速さは、電波も可視光もX線も同じです。また、この速度を超えることは不可能とされています。</p> <p>しかし、速度を遅くすることはできます。屈折率の高いプラスチックやガラスの中での光の速さは、真空中に比べて1.33分の1、1.5分の1になります。最近、<b>フォトリソグラフィ</b>や<b>プラズマディスプレイ</b> (金属薄膜) で、速度がとても遅い<b>スローフォトン</b>をつくり出す研究が進んでいます。</p>	<p><b>太陽の七変化</b> 太陽の色は、黄色がかった白色に見えます。太陽の黒体放射で発生した様々な色の光が混ざっているからです。しかし日の出、日の入りの太陽は赤く見えます。陽が傾くと光が大気を通る距離が増え、短波長の光がチリや水滴に散乱されて届かなくなるからです。日没の時、一瞬だけ赤が緑色に見えることがあります。<b>グリーンフラッシュ</b>と呼ばれる現象です。太陽が完全に沈んだ瞬間、地球の大気層のプリズム効果で太陽光が屈折し、緑色の光だけが届いて見えます。空気が澄んで地平線や水平線が見える場所であらに見る珍しい現象です。</p>	<p><b>色の見え方</b> 人間は600万~1,000万色を識別できるとされていますが、目の中には、赤、緑、青のセンサーしかありません (犬、猫は2色、鳥は4色)。このセンサーに入る光のバランスで色を認識しています。たとえば、赤と緑の光が同時に目に入ると黄色に、すべての色が混ざると白く見えます。この3色は<b>光の3原色</b>といい、テレビ等の発色に使われます。</p> <p>絵の具やインクは光を吸収して色をつくり出します。赤の絵の具は赤色以外の光を吸収し、赤色の光だけを反射します。シアン (Cyan)、マゼンタ (Magenta)、黄色 (Yellow) の3色 (<b>色の3原色</b>) を使えば様々な色をつくることができ、印刷物はこれに黒を組み合わせてつくり出します。</p>
--	--	--	---

光源の光学 (日本分光学会 測定法シリーズ 38) 河田聡編 第2版 (学会出版センター、2002年)、「レーザーハンドブック」レーザー学会編 第2版 (オーム社、2005年)、「岩波物理辞典」第3版 (岩波書店、1976年) 株式会社日本テクニメッド、日本電子株式会社、八幡ホテルの郷 (群馬県棟東村)、原田康英、日立化成工業株式会社、平岩亜紀、広島県、福原達人、福岡教育大学三井住友カード株式会社、山口大学、米徳大輔、ランダム大阪株式会社、株式会社リアルハーツ、理化学研究所、株式会社レーザーマックス、DOD/USN、James Owen、Microbiology Bytes、NASA、The Planetary Society、Robert Merlino



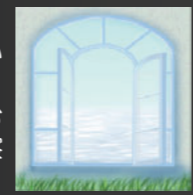
325 nm)

近視矯正手術、角膜切除には、エネルギーの高い紫外光が使われる。エキシマレーザーを使って角膜を蒸発させ削り取る。サブミクロンの精度で精密に一部の角膜だけを削り角膜の形を変えて屈折矯正する。

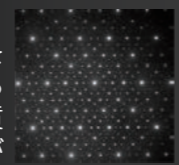


極端紫外光リソグラフィー 極端紫外光を使って半導体に集積回路をつくる次世代のリソグラフィー技術。

水の窓 水の吸収がない波長。水分を多く含む生物試料の観察に使えるX線。



X線回折結晶構造解析 原子の配列による回折を利用し、配列パターンや原子間距離を測る技術。原子間隔に相当する波長のX線を使う。タンパク質分子の立体構造も知ることができる。



XFEL(X線自由電子レーザー) SPring-8に自由電子レーザーの発振器を建設し、X線の波長域でレーザー光を得る施設。2006年から建設が始まり、2010年に完成を目指している。



### 紫外光

外殻電子遷移エネルギー

紫外線洗浄 半導体基板や金属、セラミックス、プラスチック表面の洗浄、質に紫外線を使う。

紫外線殺菌 水、食品、薬品などを殺菌する。

オゾン層 紫外線 可視光

酸化チタン 触媒は、紫外光を吸収して、窓ガラスや壁の汚れを分解する。

SPring-8 兵庫県佐用郡にある大型の放射光施設。X線から赤外線まで広い波長範囲で世界最高輝度の光をつくる。周長1.4kmの蓄積リングと呼ばれる軌道に電子を閉じ込め、光速近くまで加速した電子からのシンクロトロン放射でX線を得る。

真空紫外 200nm~10nmの紫外線は大気の中を伝わらない。太陽からの真空紫外線は、地表まで到達しない。微細加工などの応用が期待されている光だが、真空環境が必要。

eV (エレクトロンボルト) 光のエネルギーを表す単位にeVがある。波長1μmの光は1.24eVに相当する。光の波長とエネルギーは反比例し、波長100nmの光は12.4eV、波長1nmでは1.24keV(1240eV)と、波長が短いほど高いエネルギーを持つ。

アト秒レーザー アト秒(atto)は0.000000000000000001秒(0が18個)。そんな一瞬しか光らないパルスレーザー。このレーザーを使えば、電子が止まって見える。100アト秒では光はたった30nmしか進めない。真空紫外線や軟X線の光でつくられる。

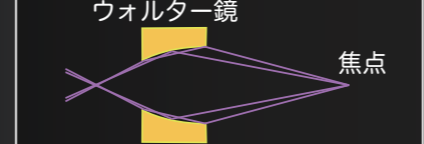
### 軟X線 (極短紫外を含む)

内殻電子遷移エネルギー、水に吸収されない

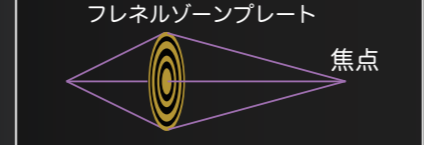
レーザープラズマ光源 高出力のレーザー光をターゲットに当てて発生するプラズマから軟X線を出す。未来の半導体製造光源。

軟X線顕微鏡 「水の窓」を使えば、高い空間分解能で生物試料を生きたまま観察できる。軟X線は大気をほとんど伝わらないので、装置を真空中に置く。

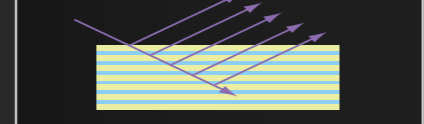
X線のレンズ 軟X線やX線の領域では、ガラスも金属も屈折率がほぼ1.0で、反射も屈折もしない。浅い角度の反射でX線の進行方向を変えて集光する。



ゾーンプレートでX線を回折して集光する方法もある。



反射には、Mo/SiやCr/Scなどの多層膜が用いられる。



静電気除去 空気中の分子を分解してイオンを発生し、基板の帯電を除去する。

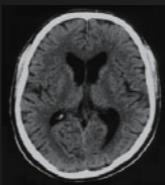
### X線

内殻電子遷移エネルギー

レントゲン写真 からだが透けて見える。X線が透過しにくい骨が影となって映る。胃を見るときはバリウム(造影剤)を飲む。空港の手荷物検査もX線。



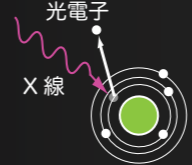
X線CT (コンピュータ断層撮影) 様々な方向でX線を照射して測定した透過強度から、コンピュータ解析によって断層像を取得する。



X線天文衛星すざく X線は大気層で吸収されるため、望遠鏡を搭載した衛星を宇宙まで飛ばして観測する。



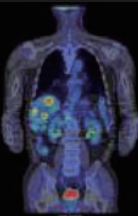
XPS(X線光電子分光) X線を試料に当てて出る光電子から、半導体の構成元素や電子状態を分析する。



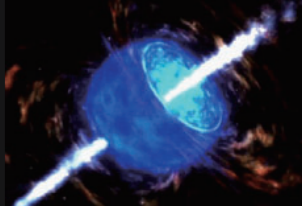
### γ線

原子核・素粒子の遷移エネルギー

PET (ポジトロン断層法) 放射性分子をマーカーにした新しいがん検診技術。



γ線バースト 太陽系外からやってくる原因不明の突発的なガンマ線。



強い放射線 強力なX線やγ線は人体に致命的な障害をもたらす。

放射線治療 弱い放射線を使えばがん細胞を退治できる。

γ線滅菌 弱いγ線なら医療器具などの滅菌にも使える。じゃがいもの発芽防止にもγ線を照射する。



## 荷電粒子（ $\alpha$ 線・ $\beta$ 線など）の減速（エネルギー損失）

荷電粒子は物質中の電子を蹴散らかしつつ  
徐々にエネルギーを失って減速する。

重い粒子は飛程がほぼ揃っている。

単位距離当たりの**エネルギー損失**  $-\left\langle\frac{dE}{dx}\right\rangle$  が重要

## 光子（X線・ $\gamma$ 線）の減衰（減弱）

光子は原子に吸収されたり、大きく散乱されて  
一気にエネルギーを失う反面、何も相互作用せず  
素通りするものも多い。☞ **光子数の指数関数的減少**

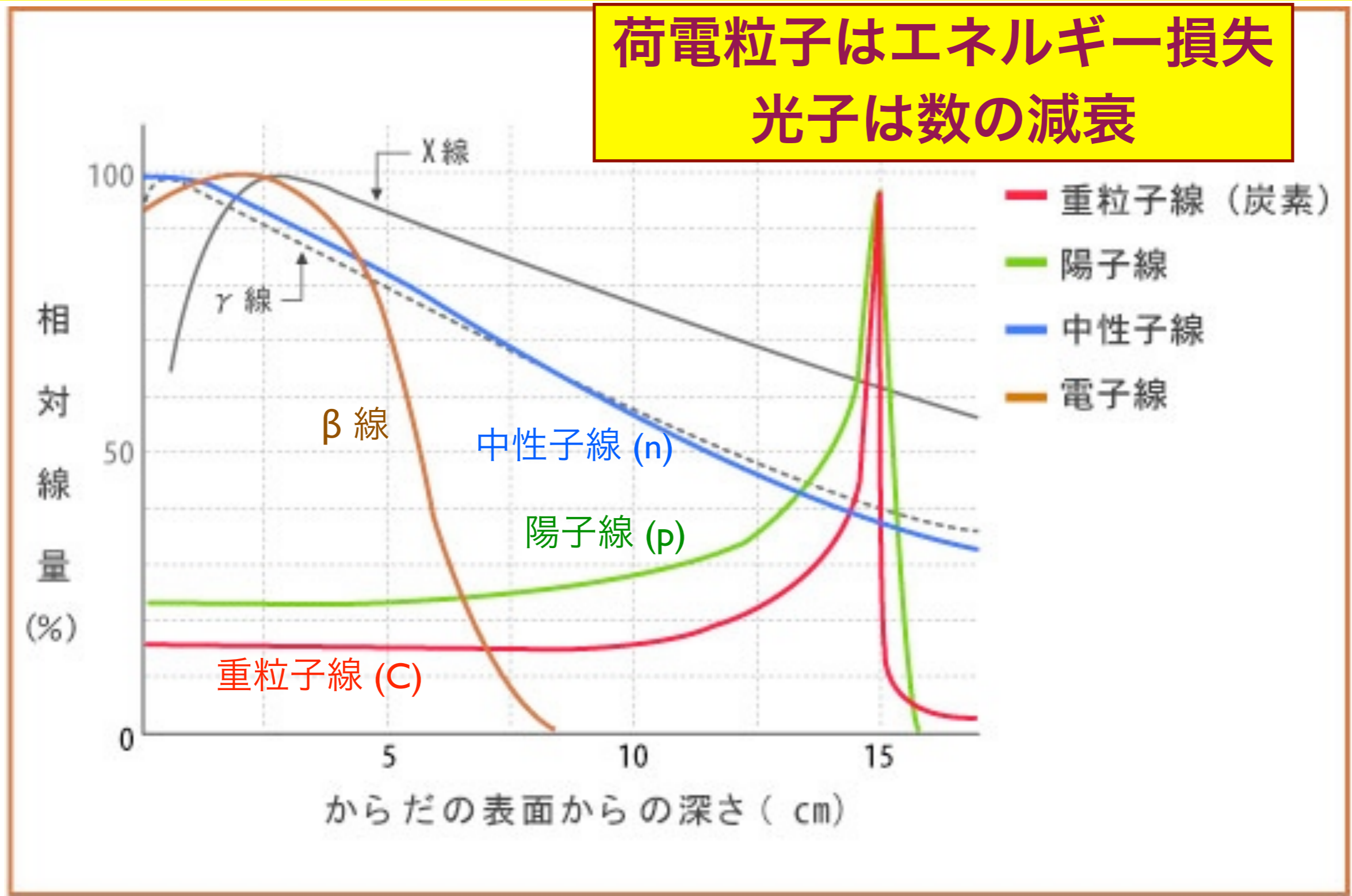
**反応断面積  $\sigma$** （単位距離当たりの**反応確率**を与える）が重要

陽子(p)、 $\alpha$ 、重粒子線は飛程が揃っている。

電子( $\beta$ )は散乱されやすく、飛程を直線距離(物質厚)で測るとばらつきが大きい。

中性子(n)、光子(X, $\gamma$ )は反応が確率的に起こるため、指数関数的減衰をする。

**荷電粒子はエネルギー損失  
光子は数の減衰**



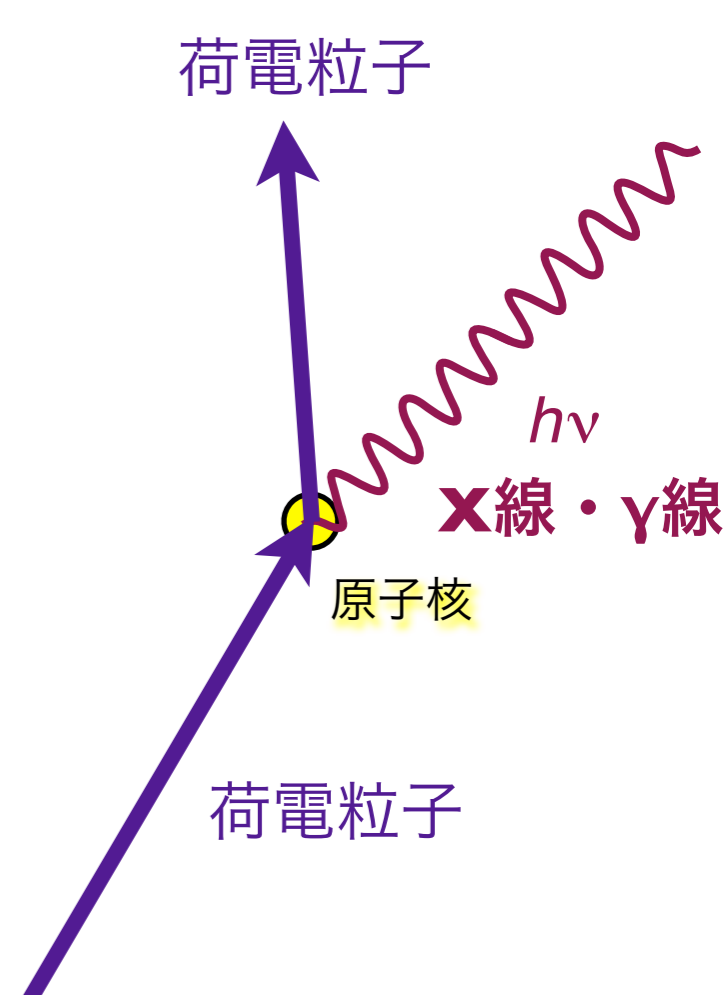
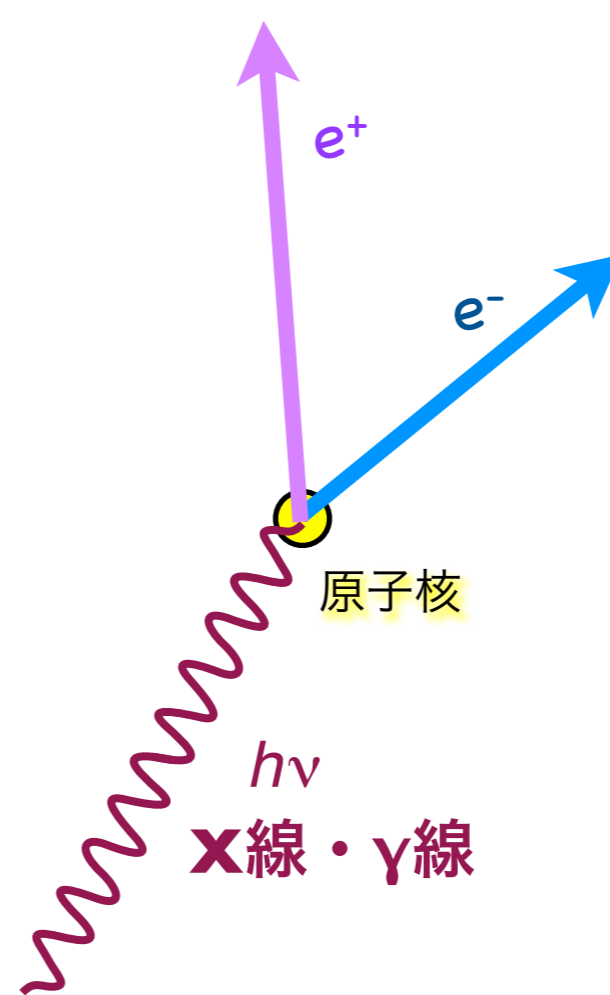
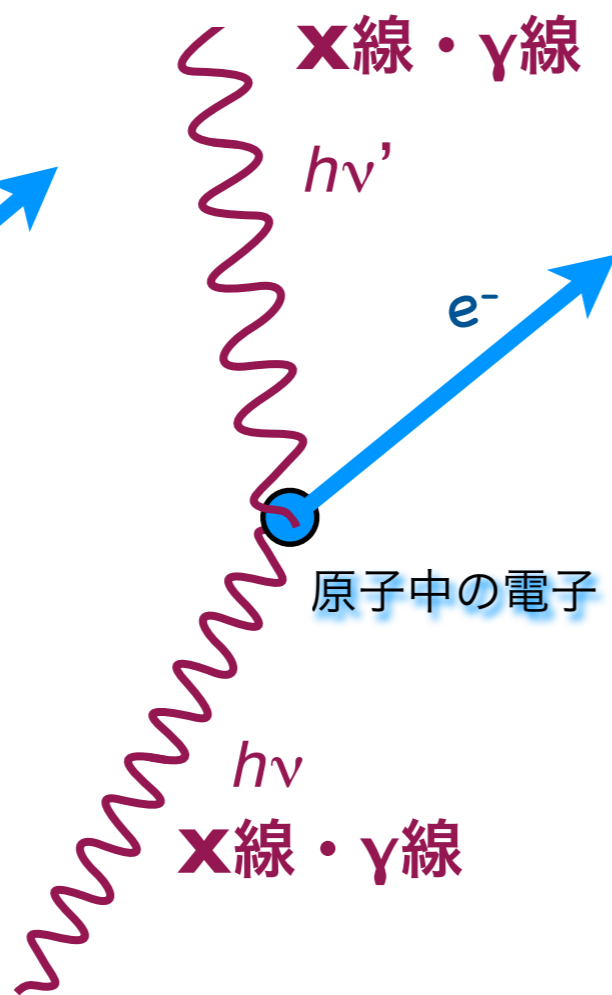
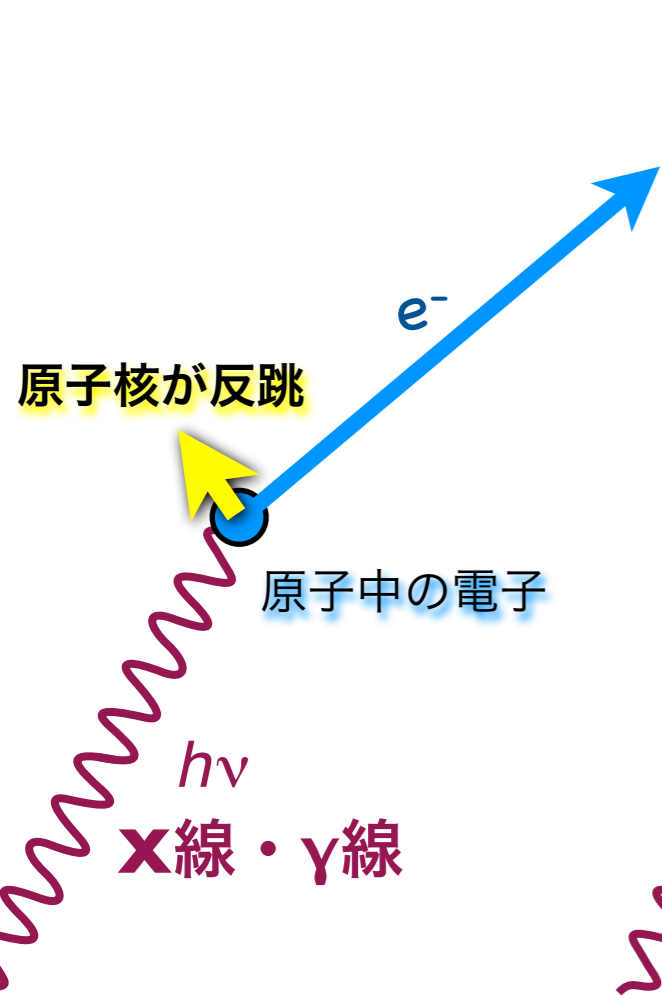
# 光子 (X線・γ線) の関わる相互作用

## 光電効果

## コンプトン散乱

## 電子対生成

## 制動放射



# 光子

紫外線

X

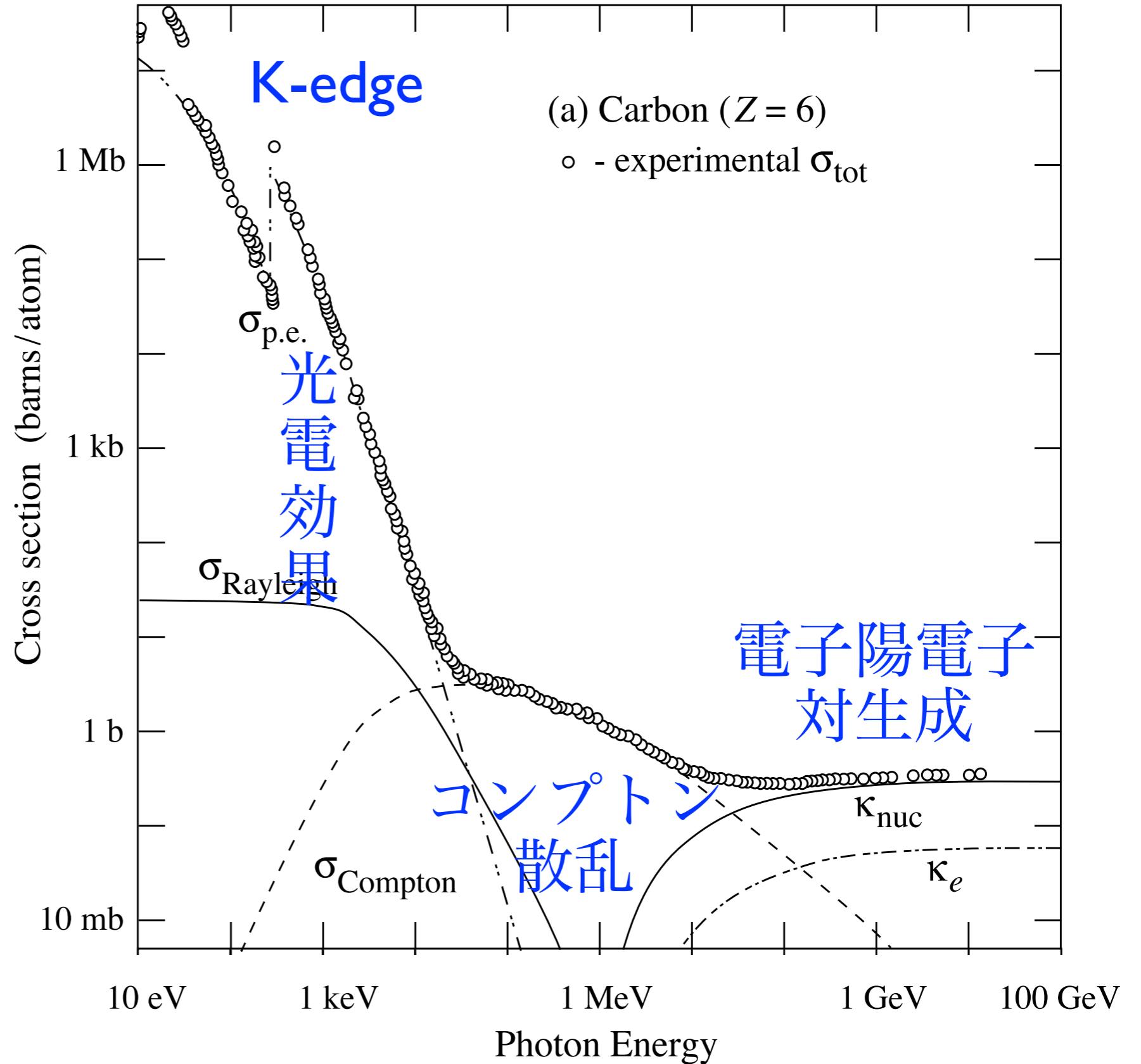
線

γ

線

## 反応断面積

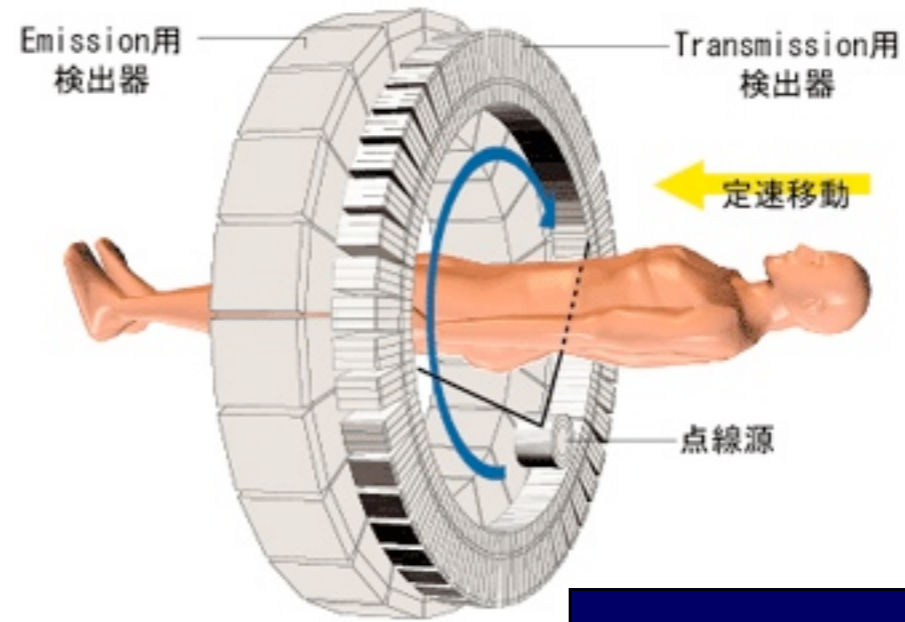
1 barn  
=  $10^{-28} \text{ m}^2$   
=  $100 \text{ fm}^2$



## 胸部単純X線撮影

### 胸部正面像

- ・立位
- ・吸気呼吸停止
- ・管電圧120kVp程度
- ・撮影時間～50ミリ秒
- ・X線投影：背→腹

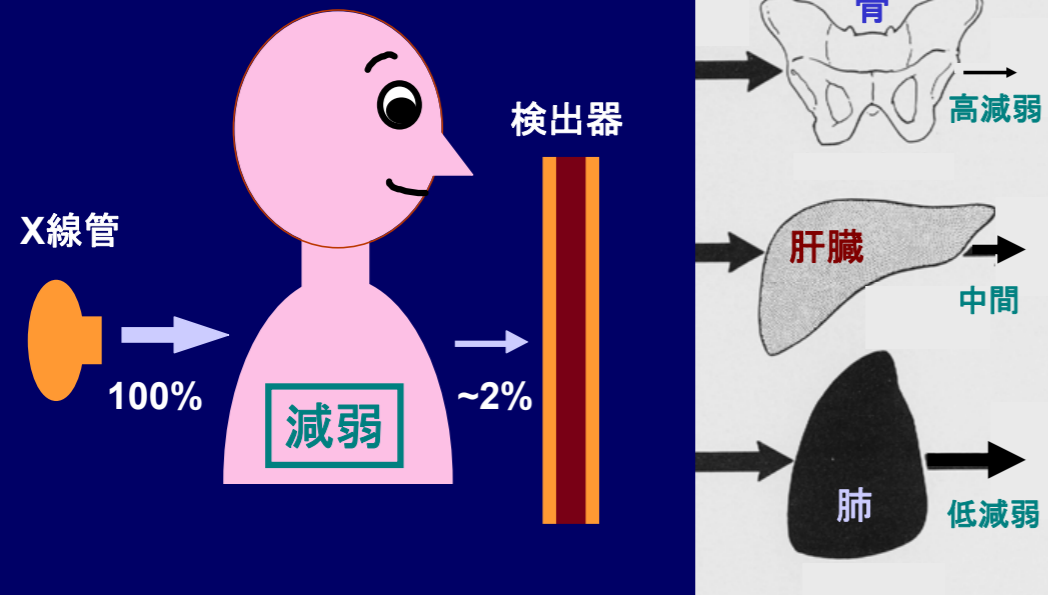
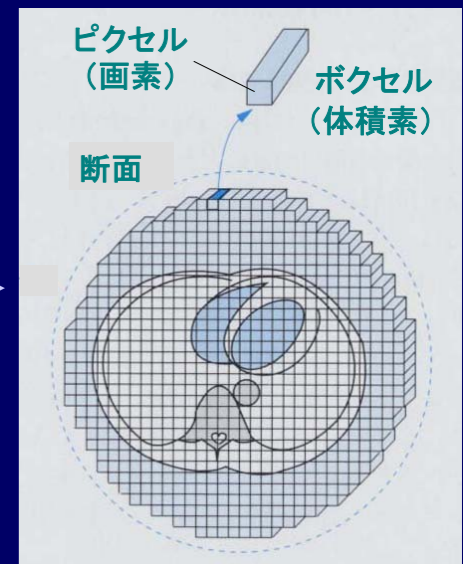
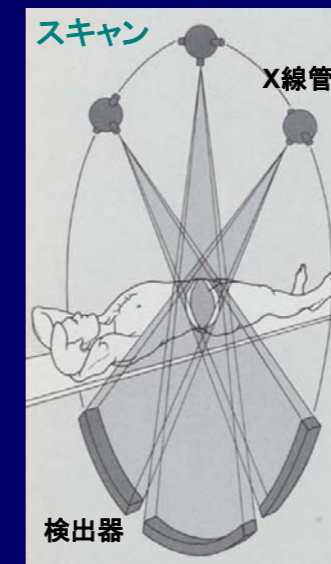


# X線 CT

# レントゲン(X線)撮影

国立循環器病センター 内藤博昭先生のスライドより借用

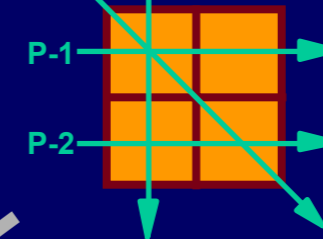
## X線コンピュータ断層撮影法:CT



### 未知の線減弱係数

$\mu_1$	$\mu_2$
$\mu_3$	$\mu_4$

### X線投影



### 連立方程式

- P-1;  $\mu_1 + \mu_2 = 8$
- P-2;  $\mu_3 + \mu_4 = 9$
- P-3;  $\mu_1 + \mu_3 = 6$
- P-4;  $\mu_1 + \mu_4 = 5$

### 解答

1	7
5	4

## 逆問題

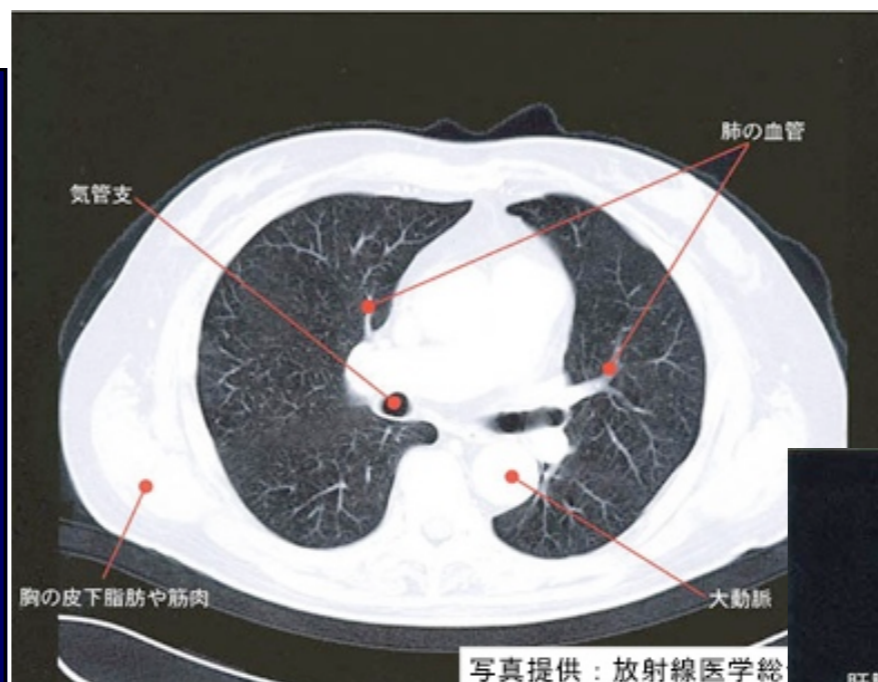
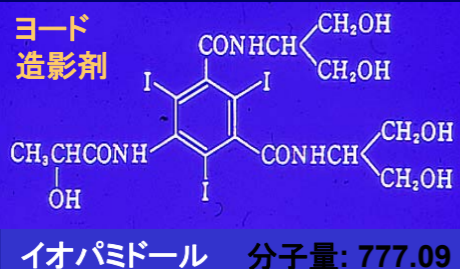
## X線検査用造影剤

### \* 陽性造影剤

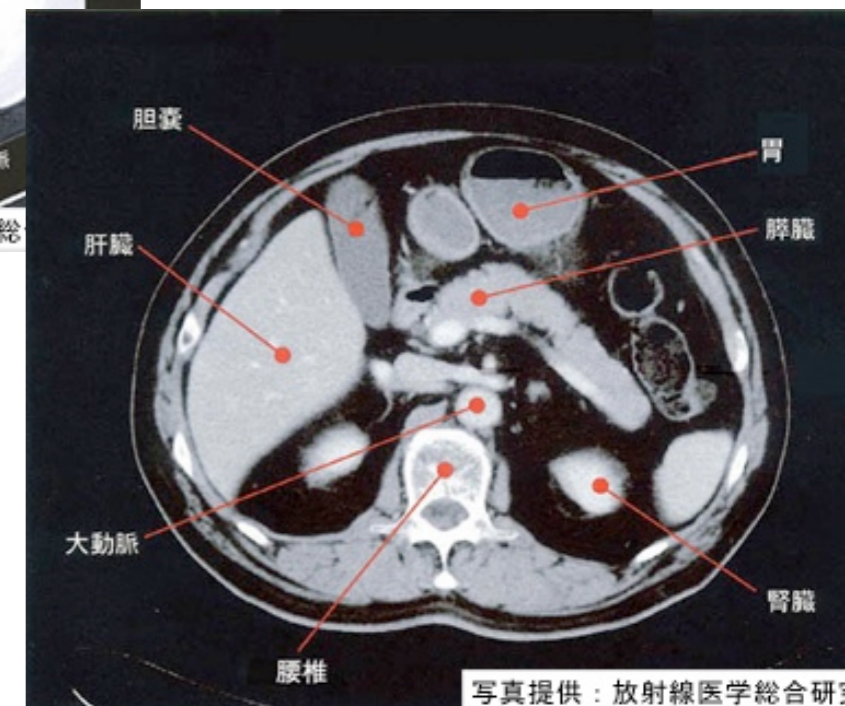
	元素	原子番号	K吸収端
・ヨード造影剤: 血管造影用	I	53	33.16 keV
・硫酸バリウム: 消化管造影用	Ba	56	37.41 keV
・キセノンガス(脳血流CT)	Xe	54	34.56 keV

### \* 陰性造影剤

- ・気体: 空気, 酸素, 炭酸ガス...
- ・オリーブ油(膀胱CT)



写真提供: 放射線医学総研



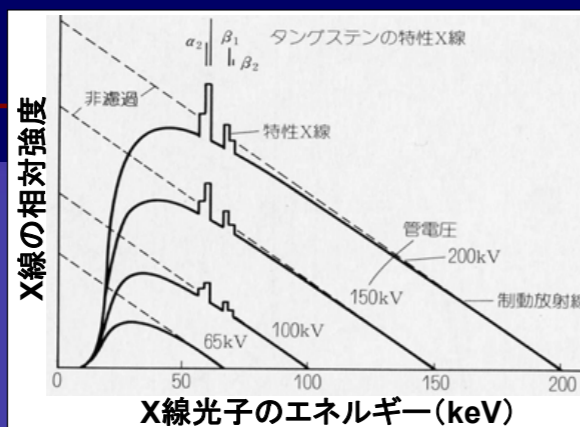
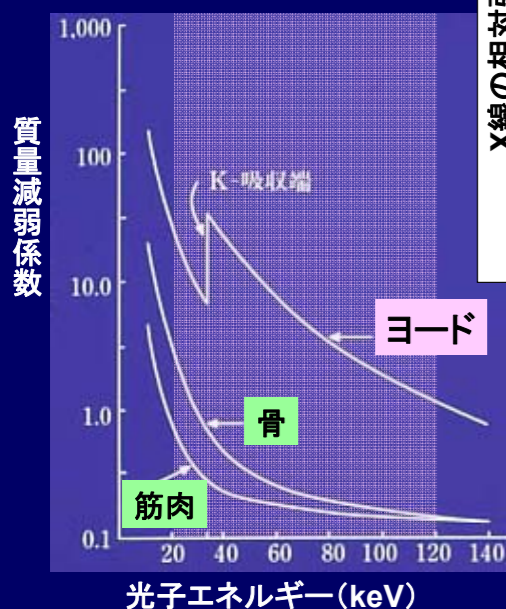
写真提供: 放射線医学総合研

(減弱)

# 造影剤 (I, Ba, Xe): Z 大 = 減衰係数 大

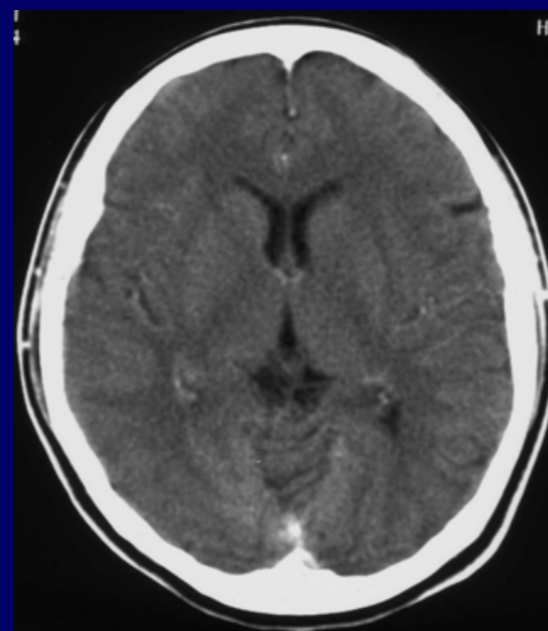
国立循環器病センター 内藤博昭先生のスライドより借用

## X線の発生と減弱

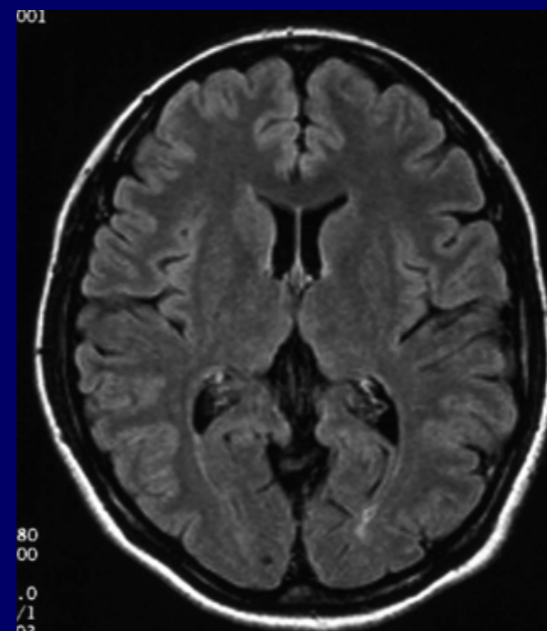


- \* 光電効果: 光電吸収
- ・元素のK吸収端 (keV):  
H 0.0136, C 0.283, O 0.531
- \* コンプトン散乱: 非弾性散乱

X線コンピュータ断層撮影法  
X-Ray CT:  
Computed Tomography



磁気共鳴画像診断法  
MRI: Magnetic  
Resonance Imaging



# 放射線と物質との相互作用

## 中性子の反応と放射化



# 中性子の反応と放射化

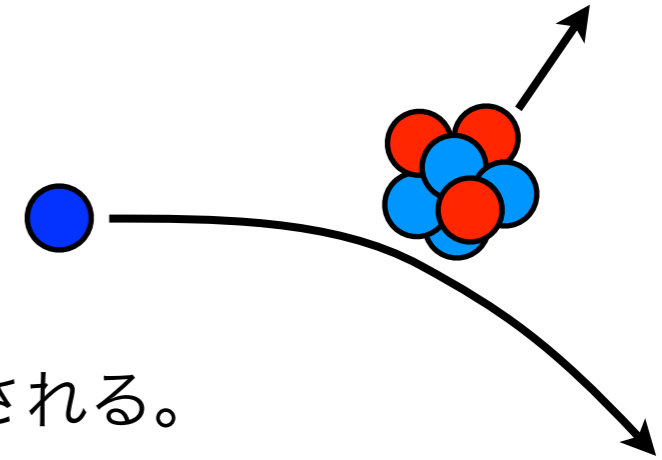
## 中性子の弾性散乱

高速中性子は原子核と衝突を繰り返して減速する。  
衝突毎にエネルギーを指数関数的に減らす。

中性子は、同じ質量をもつ陽子により最も効率的に減速される。

中性子の遮蔽には、水やコンクリートなど、水素原子を含む物質を用いる。

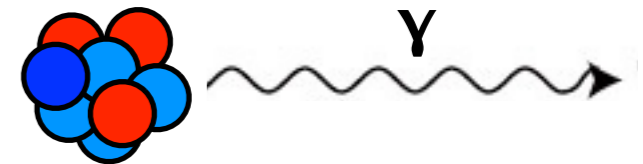
陽子など散乱された原子核が高 LET の荷電粒子として原子・分子をイオン化する。



## 中性子の吸収と核反応

質量数が1つ大きい原子核を形成したあと、 $\gamma$ 線などを放出。

放射化の原因となる。



## 放射化

放射性物質でないものが放射線照射によって放射性を帯びること。

中性子や、10 MeV 以上の  $\gamma$  線による核反応で放射性核種が生じることがある。

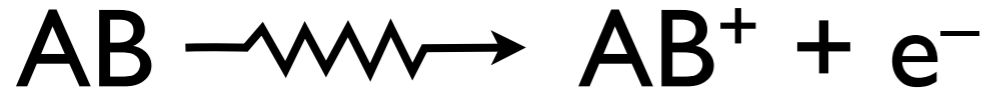
通常の放射性核種による  $\beta$  線や  $\gamma$  線、原子からの X 線などでは起こらない。

加速器施設や原子炉などの第一種管理区域では放射化に注意が必要。

# 放射線化学

# 放射線が誘起する素反応

(一部抜粋)



電離 (イオン化)



励起

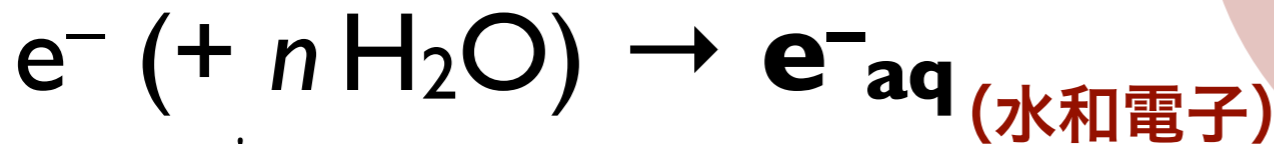
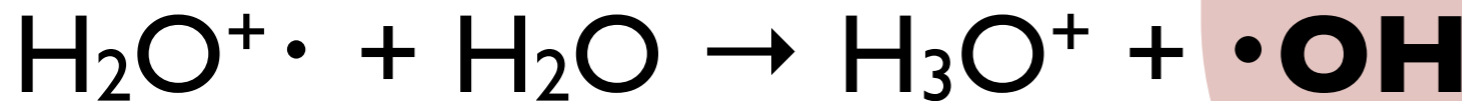
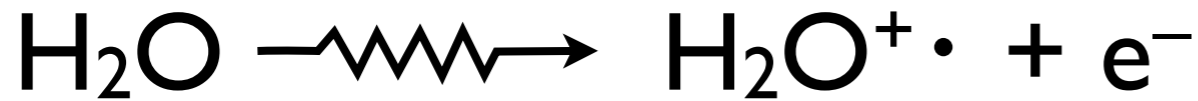


再結合



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)



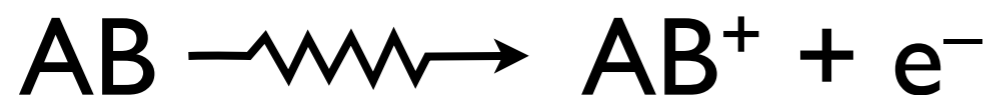
(スーパーオキシドアニオン)



(過酸化水素)

(活性酸素)

# 放射線が誘起する素反応



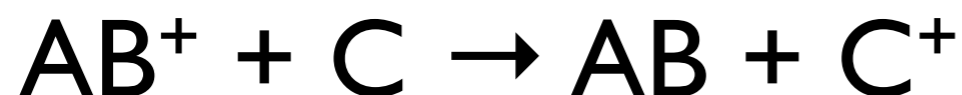
電離（イオン化）



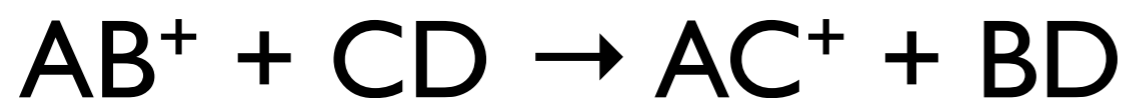
励起



再結合



電荷移動



イオン分子反応



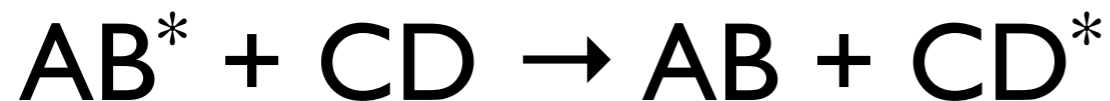
電子捕捉



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)

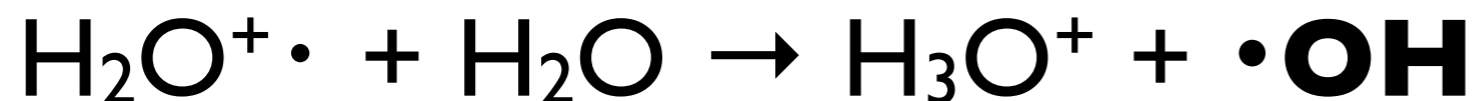


電離 (イオン化)

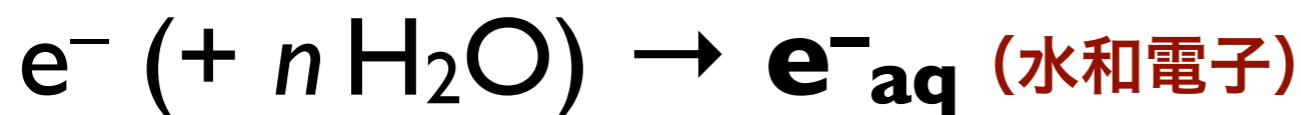


励起

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



イオン分子反応

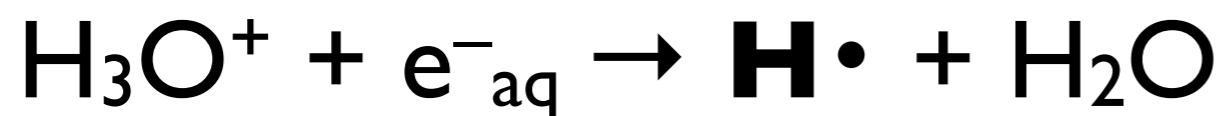


水和電子生成

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



解離 (ラジカル生成)



電子捕捉

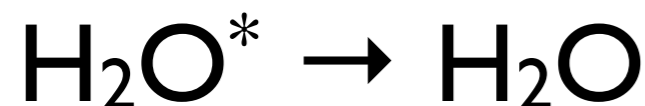
(水素ラジカル)  $G(\text{H}\cdot) = 0.55$



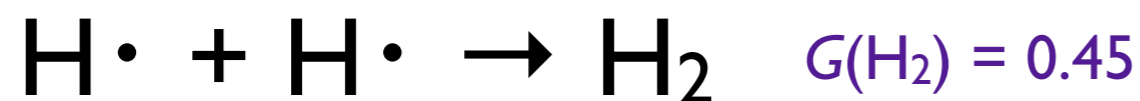
再結合



電子捕捉



脱励起



分子生成



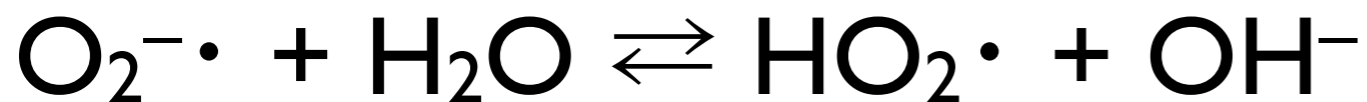
分子生成



分子生成

# 酸素効果

(活性酸素)



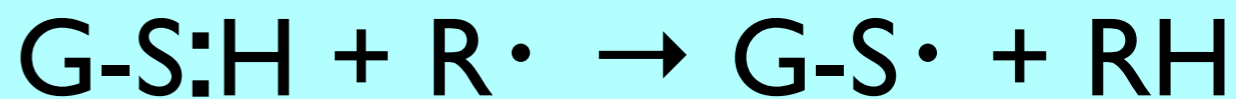
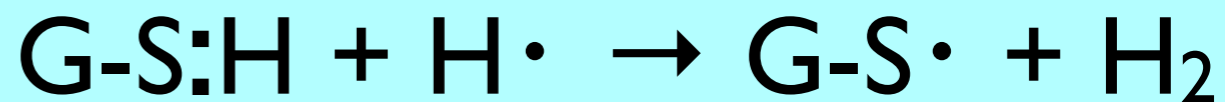
## 放射線防護剤

(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

