

- 1) 電子の粒子性と波動性
- 2) 波としての電子と半導体
- 3) ナノの世界を見る
- 4) 医療と現代物理
- 5) 電気の流れるプラスチック
- 6) 超伝導・超流動を見る

現代物理学の考え方

その2

波としての電子と半導体

溝口憲治

？ 疑問点 ？

半導体とは何？

電流（電荷の流れ）は何故流れるの？

電子($-e$)がいるから・・・ ホント？

あらゆる物質中には、ほぼ同じ密度で

大量の電子を持っている



産業の米 半導体の中の電子

電子は、確率振幅の波である

電子密度は、波の振幅の2乗



電子は、確率振幅の波である

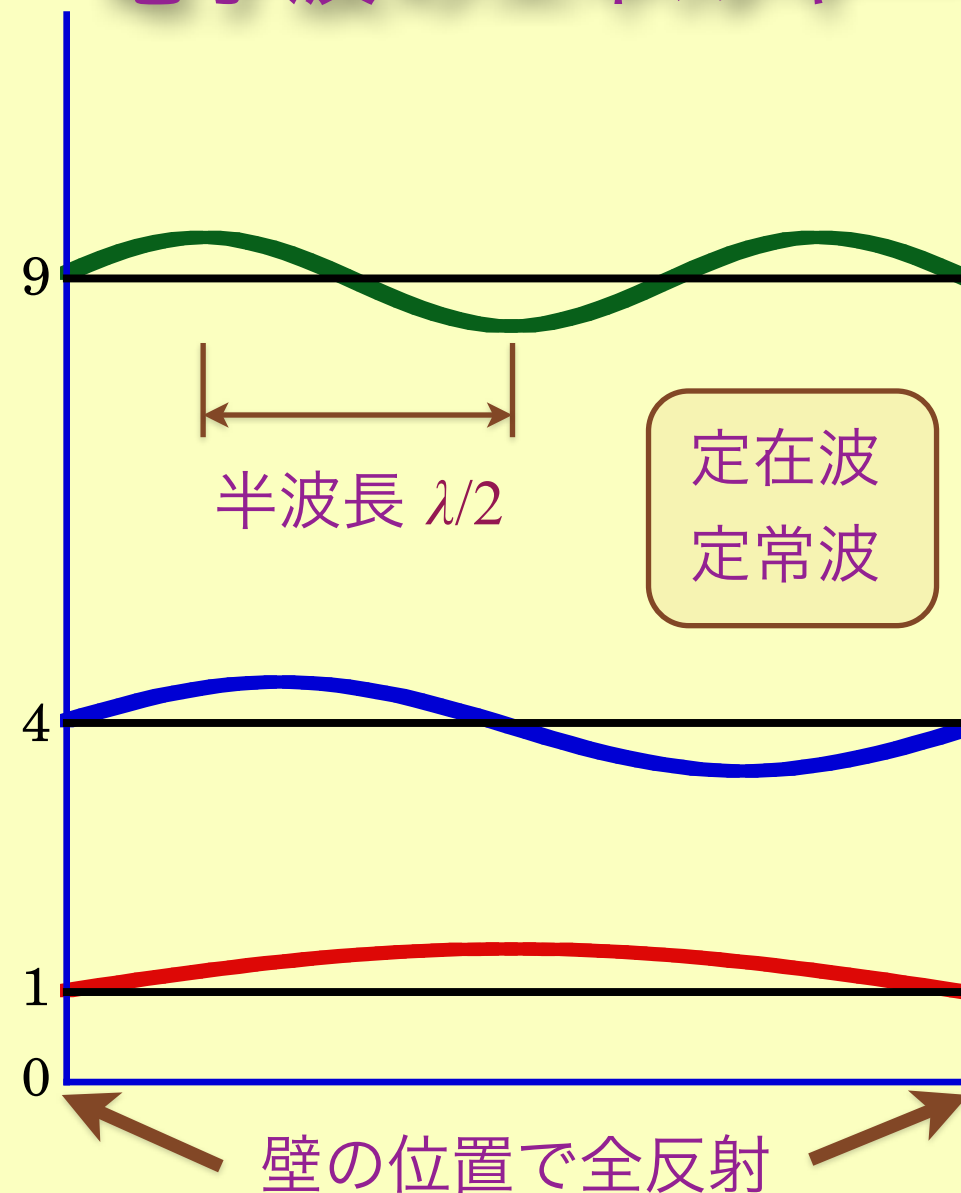
波長 λ , 振動数 f , 速度 v : $v = \lambda f$

歩幅

歩数

歩く早さ

電子波のエネルギー



周期的境界で強め合う干渉をする波長

波長 λ とエネルギー E

光: $E = hf = hc/\lambda \propto 1/\lambda$

$E = mc^2 = hc/\lambda \Rightarrow p = h/\lambda$

粒子: $E = mv^2/2$

$= p^2/2m$

$p(=mv) = h/\lambda$

$\Rightarrow E \propto 1/\lambda^2$



電子は、

である

速度 v : $v = \lambda f$

く早さ

波長 λ とエネルギー E

光: $E = hf = hc/\lambda \propto 1/\lambda$

$E = mc^2 = hc/\lambda \Rightarrow p = h/\lambda$

粒子: $E = mv^2/2$

$= p^2/2m$

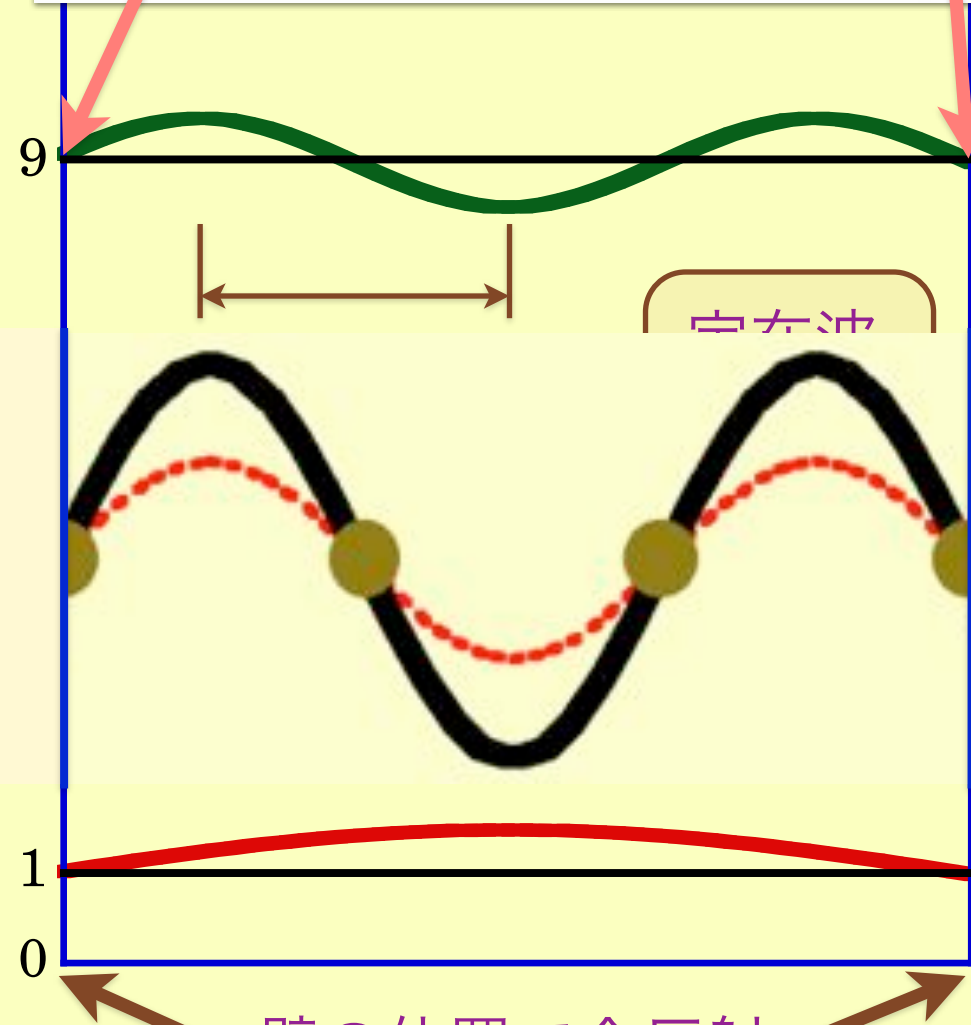
$p(=mv) = h/\lambda$

$\Rightarrow E \propto 1/\lambda^2$

波長 λ はとびとび
の値しか取れない

$\Rightarrow$ 量子化

量子力学の語源



壁の位置で全反射

周期的境界で強め合う干渉をする波長

Pauliの排他律

1つの波数は

1つの電子のみ

フェルミ粒子



フェルミ粒子 Fermi-粒子

ボーズ粒子 Bose-粒子

Pauli の排他律 に従う粒子



一つの量子状態には**最大
1つ**の粒子しか入れない

一つの量子状態に**いくつ
でも**粒子が入れる

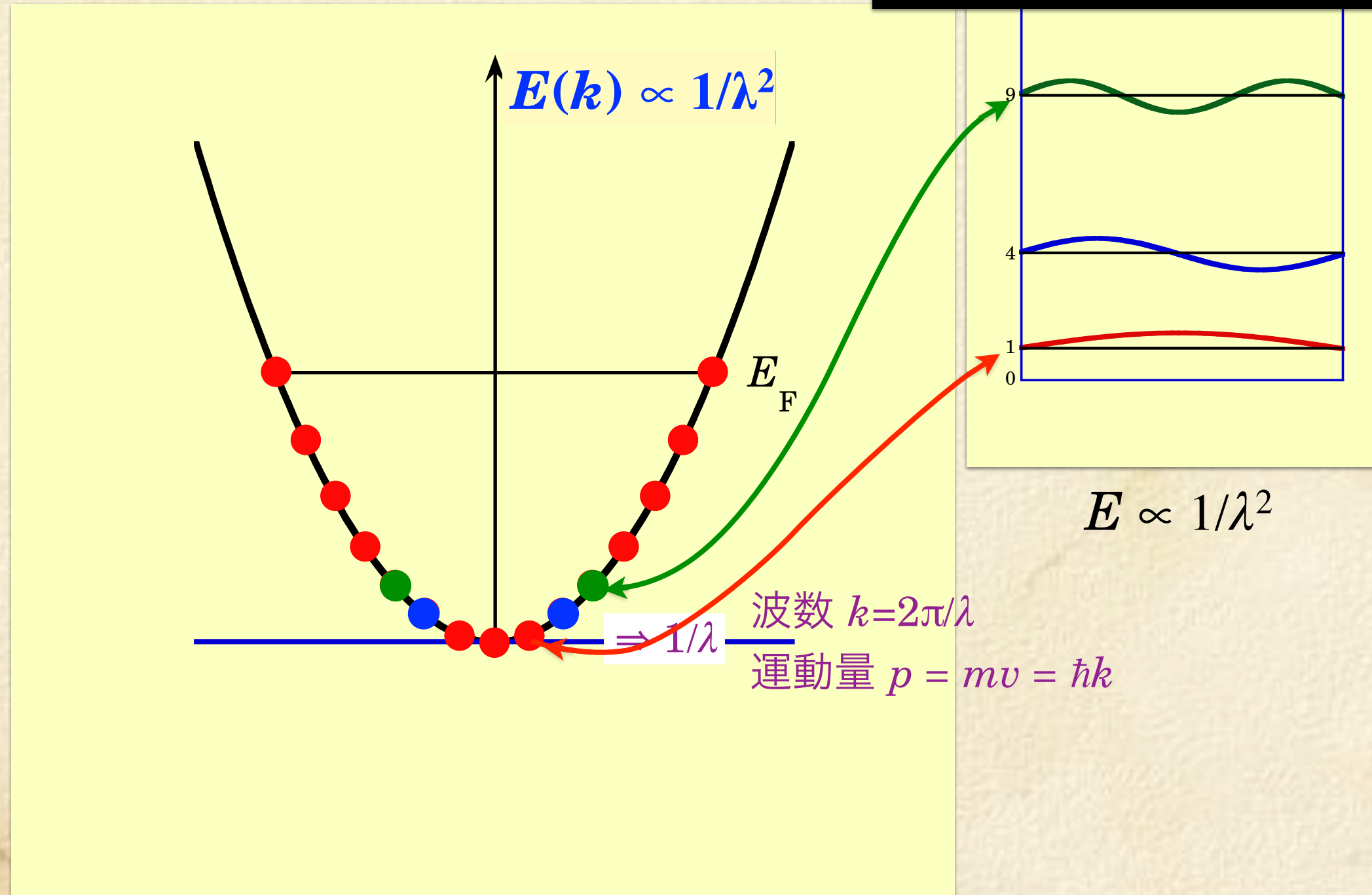
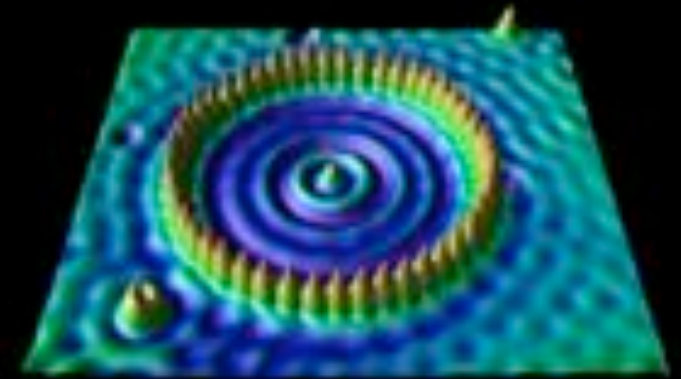
スピンの $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$ (半整数) の粒子

スピンの $0, 1, 2, 3, \dots$ (整数) の粒子

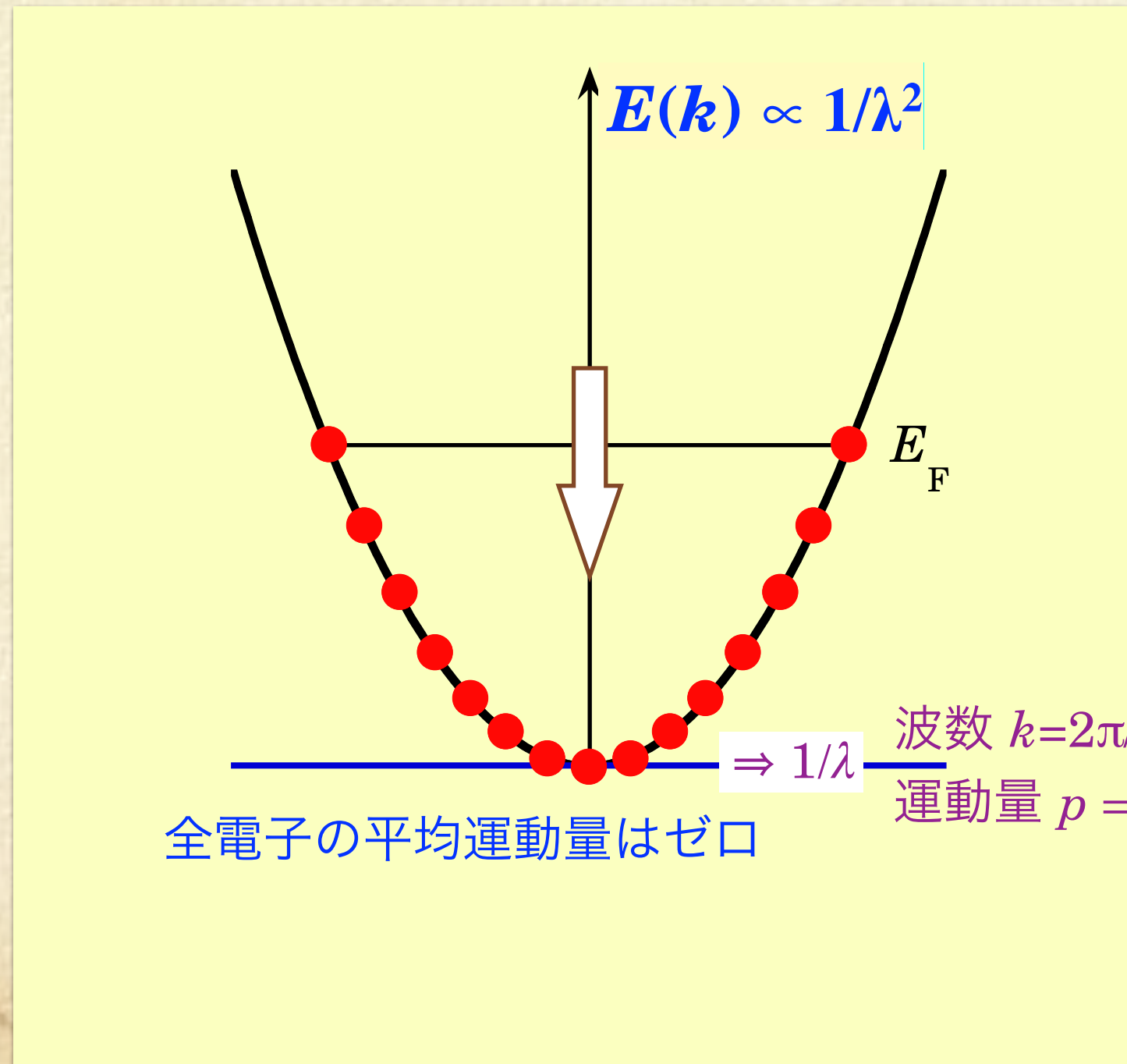
電子、陽子、中性子
 ^3He 原子など

光子、重陽子、 ^4He 原子
フォノンなど

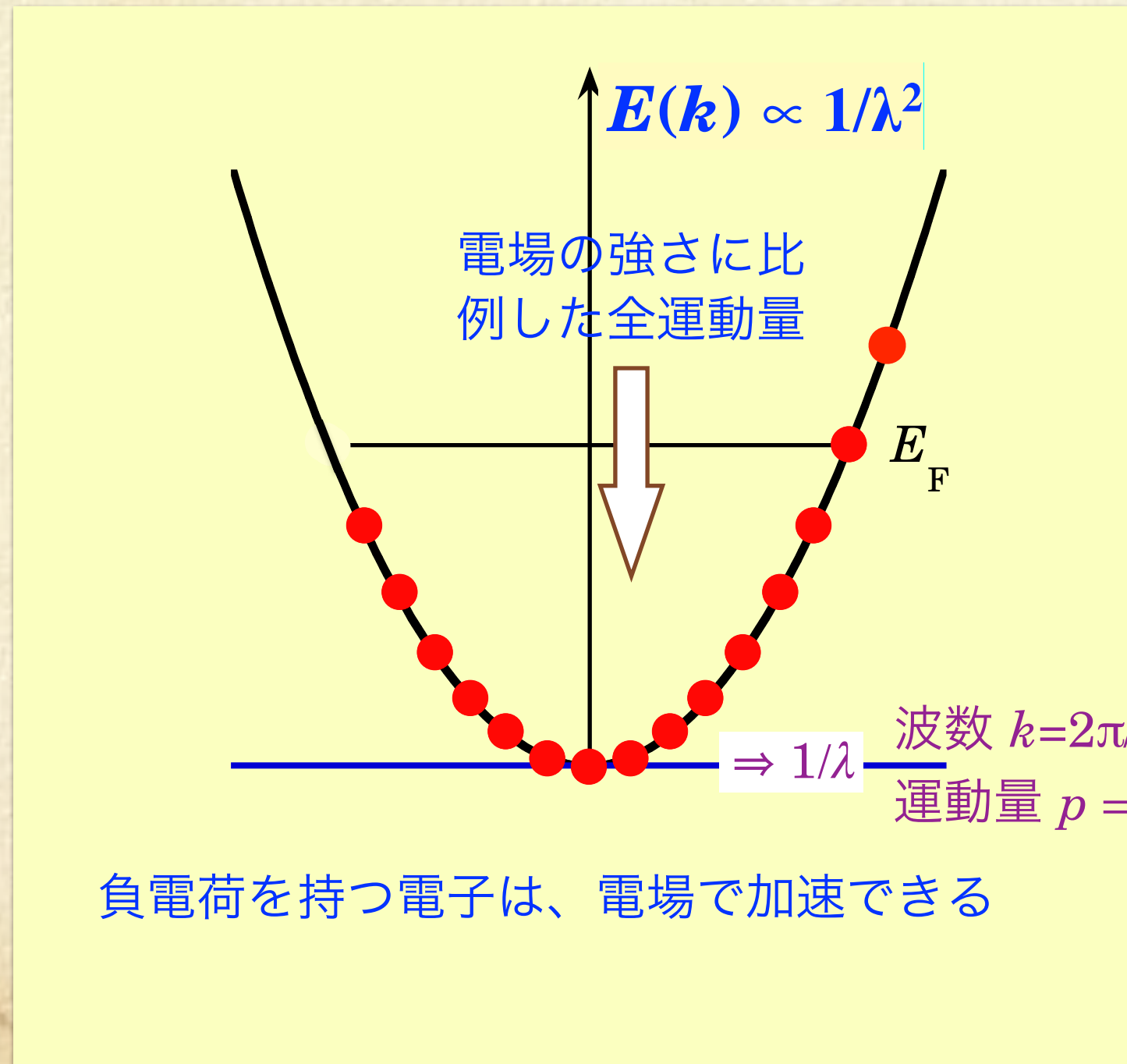
自由電子金属



自由電子金属



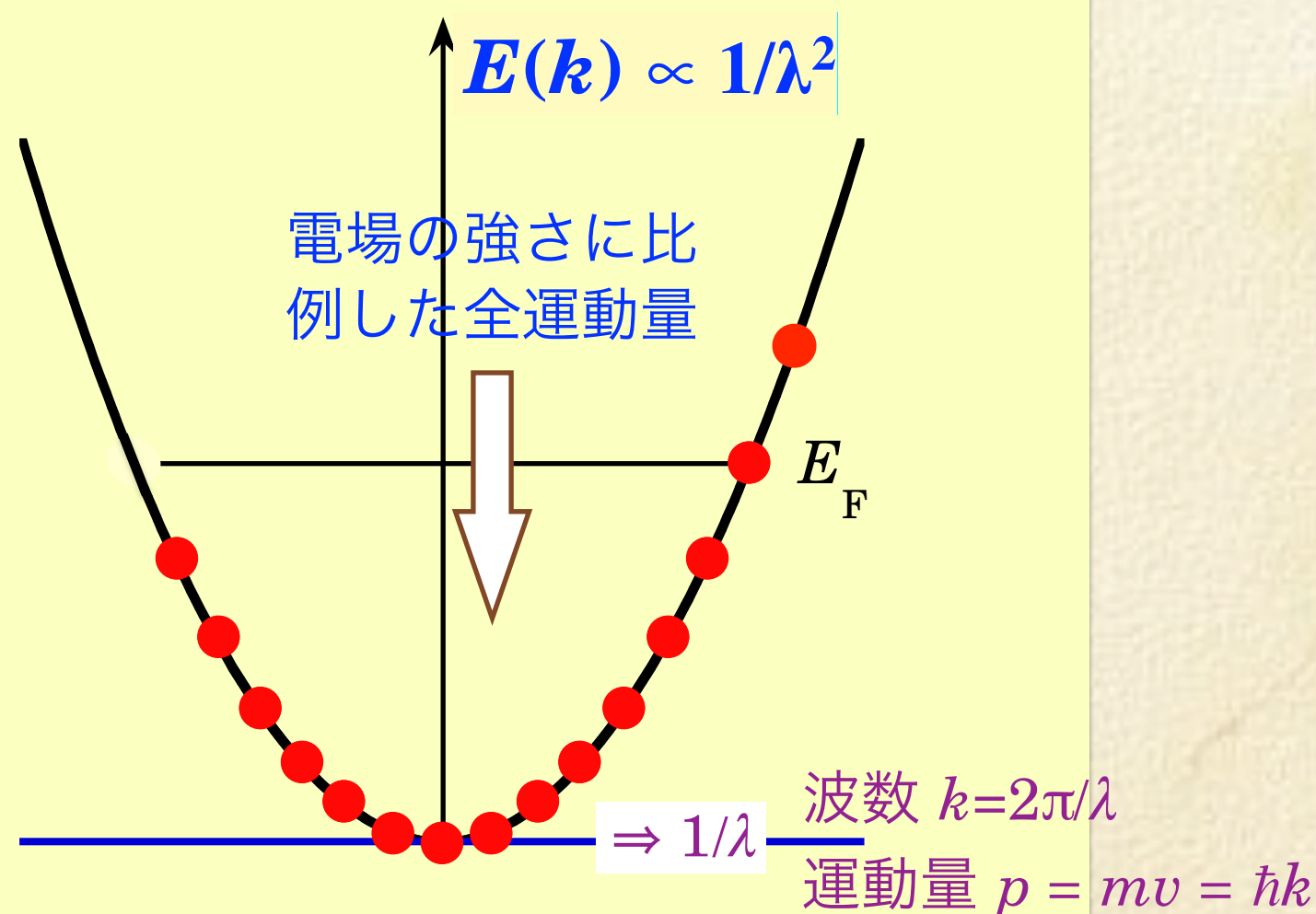
自由電子金属



自由電子金属

金属：オームの法則

加えた電場 E に比例した
電流 I が流れる



どんな物質でも、金属！

しかし、
電子は、確率振幅の波である

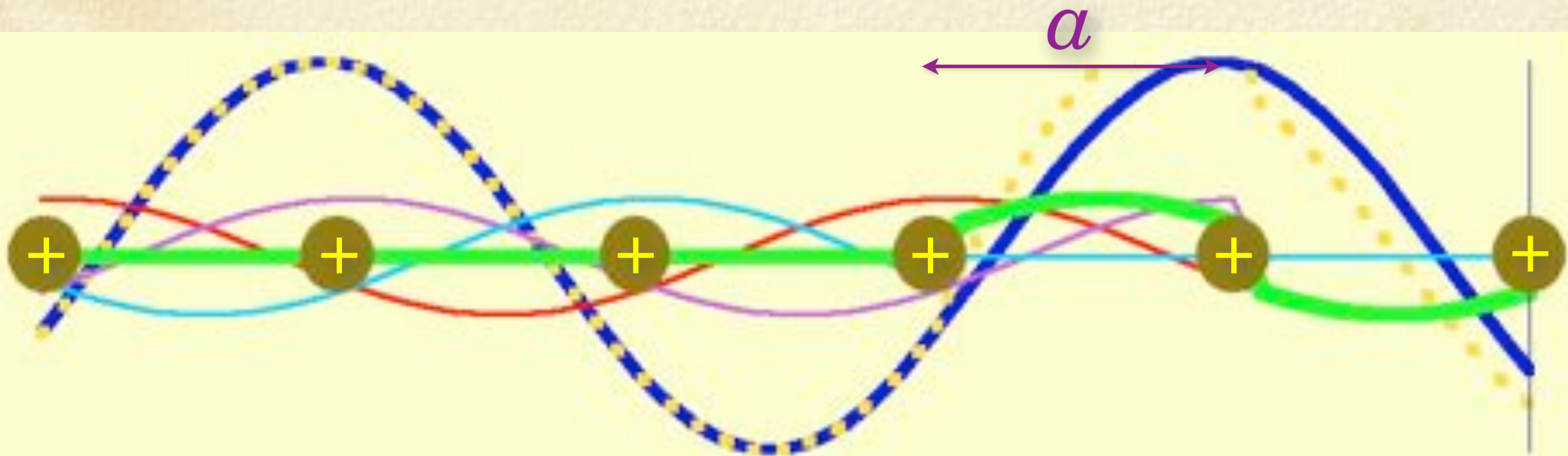
波は反射（散乱）する！

物質内のイオン

（電子が出た分、正電荷を持つ）

電子波のイオンによる反射の影響

波長： $\lambda=3a$ の場合



反射波は、互いに打ち消し合い
全く、電子波の進行に影響を与えない！！

電子波のイオンによる反射の影響 その2

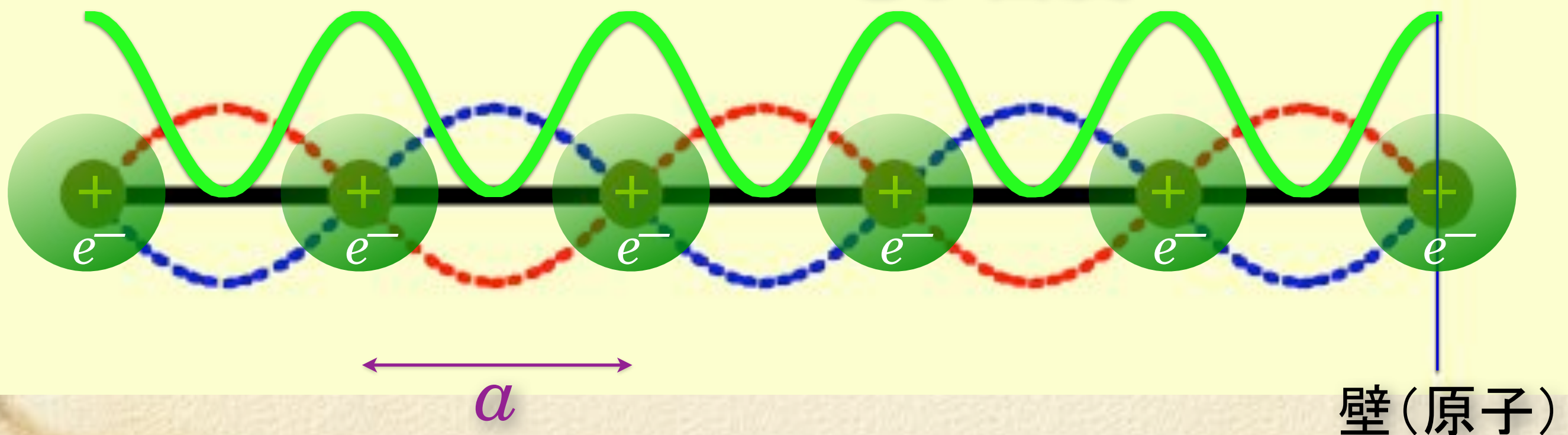
波長： $\lambda=3a$ の場合で見たように
イオンが周期的に並んでいれば
全く影響はない

波長： $\lambda=2a$ の例外
を除けば・・・

同位相で反射される場合

波長： $\lambda=2a$

電子密度

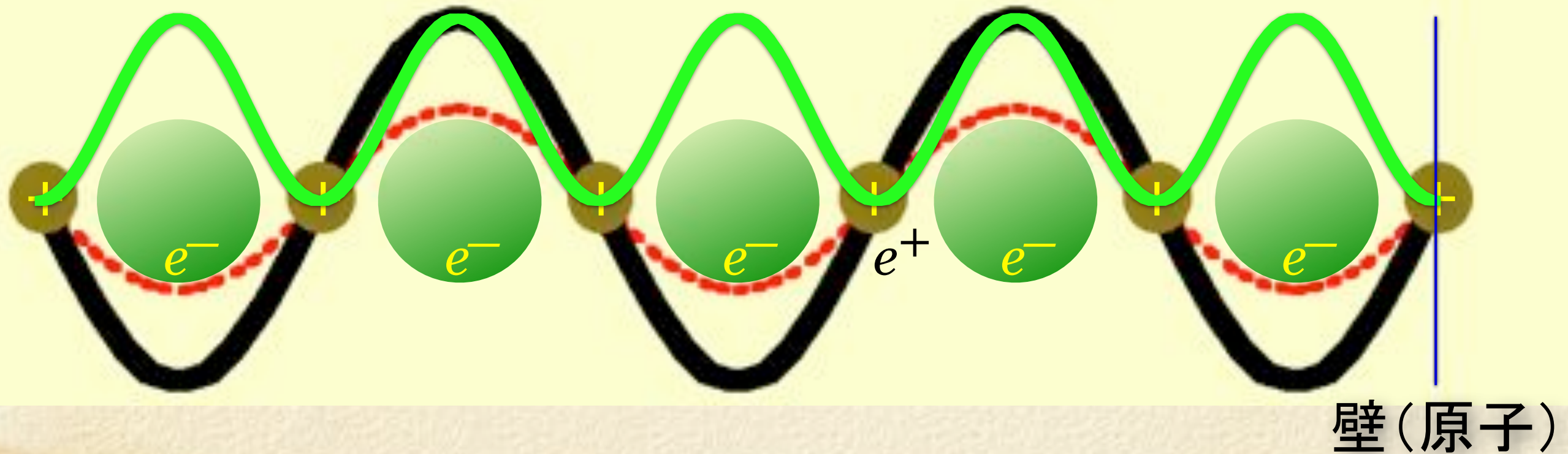


電子の最大密度は、正イオンの真上に来る！！

● クーロンエネルギーを得する $\propto -\frac{e^2}{r^2}$

逆位相で反射される場合

波長： $\lambda=2a$



電子の最大密度は、**正イオン間**に来る！！

● クーロンエネルギーを**損する** $\propto -\frac{e^2}{r^2}$

波長： $\lambda=2a$ の場合

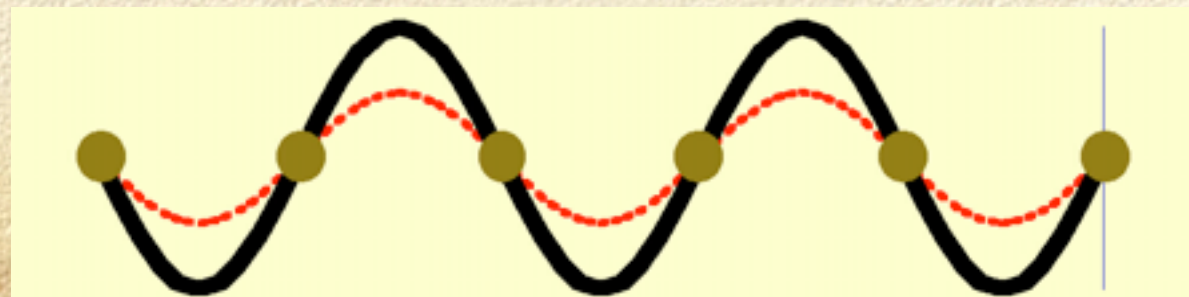
◎ 波の電子は2つの状態をとる：

- 1。クーロンエネルギーを**得**する
- 2。クーロンエネルギーを**損**する

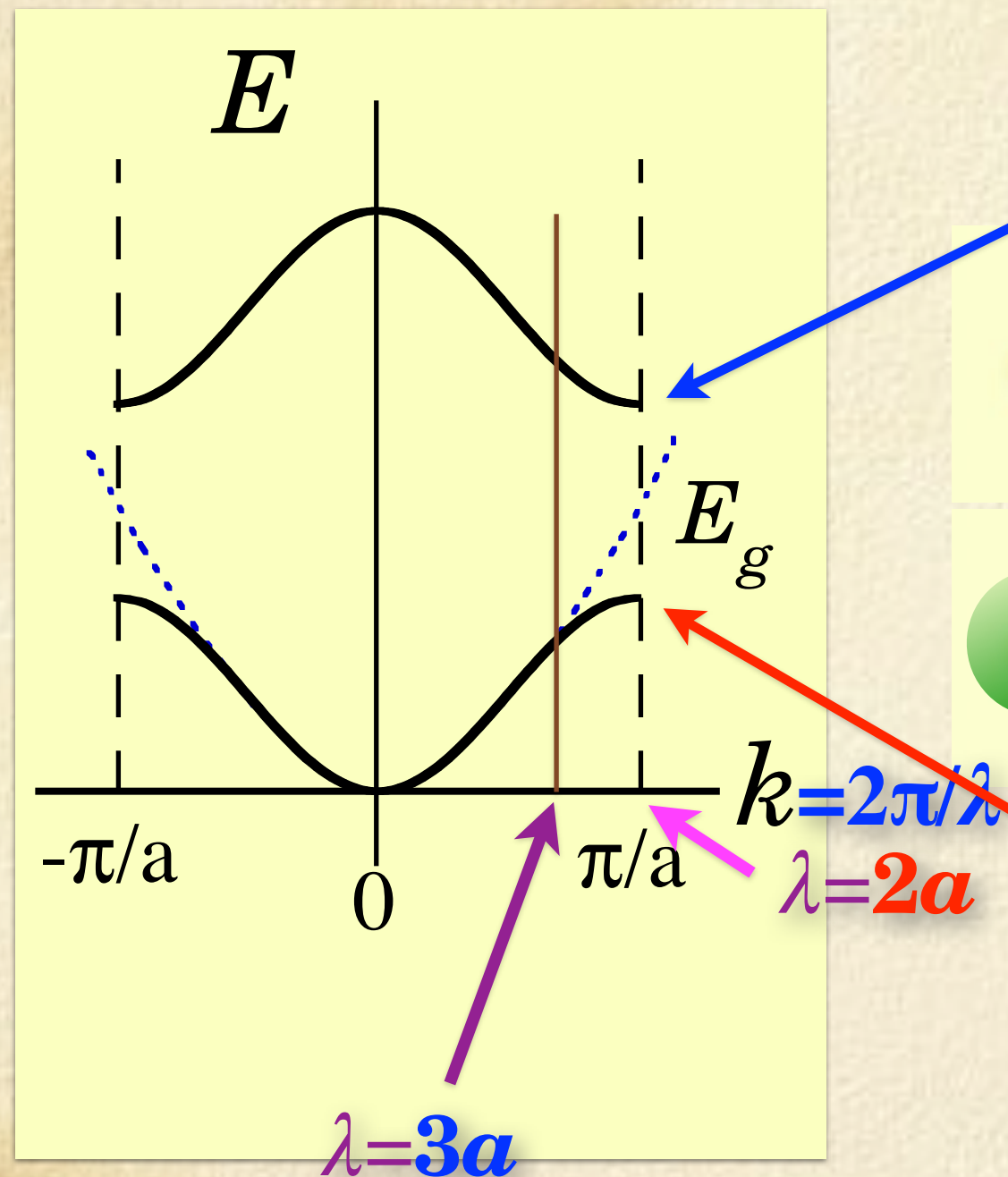
波長： $\lambda=2a$ までに

原子核イオンの数 N と同じ

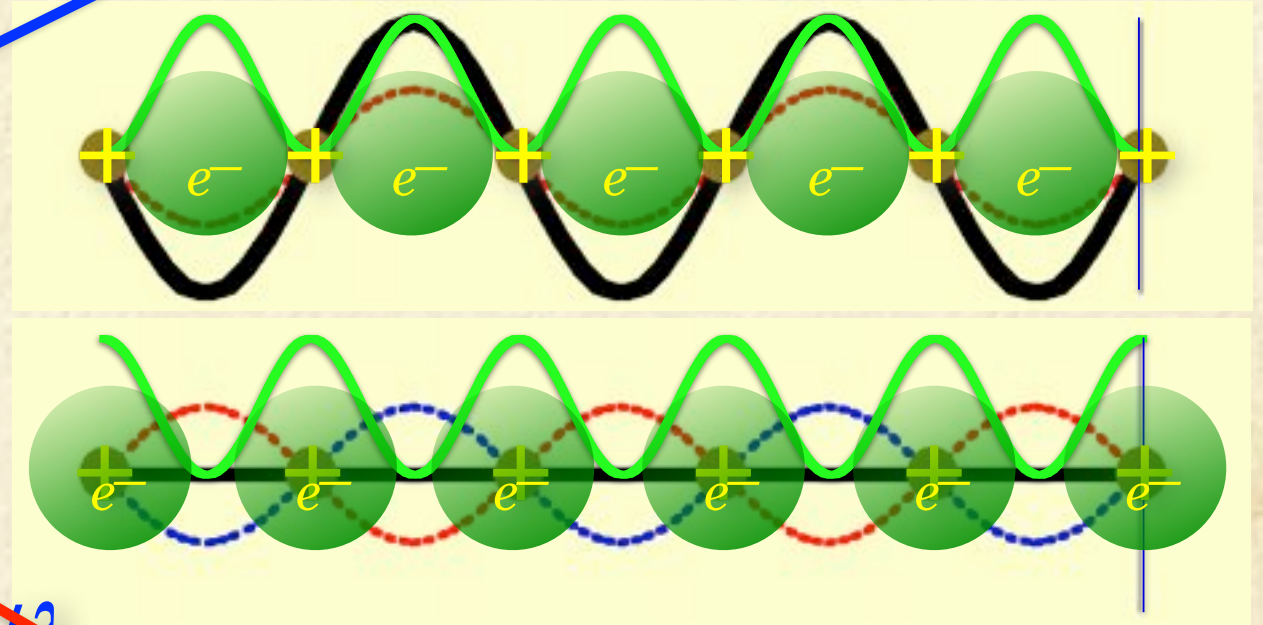
N 個の波長 λ が存在する



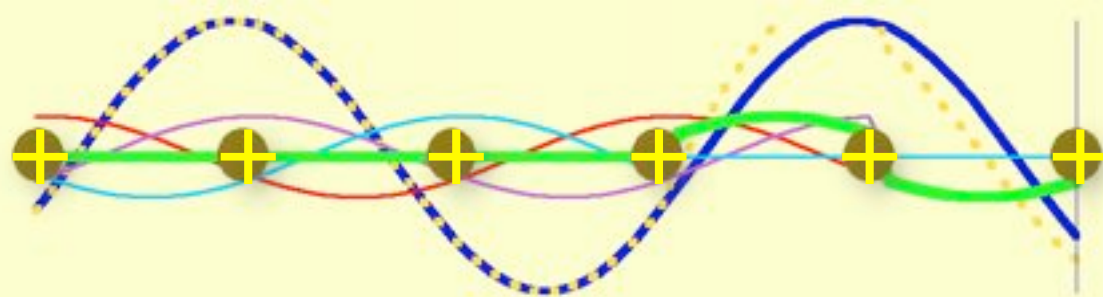
エネルギーバンドとギャップ E_g

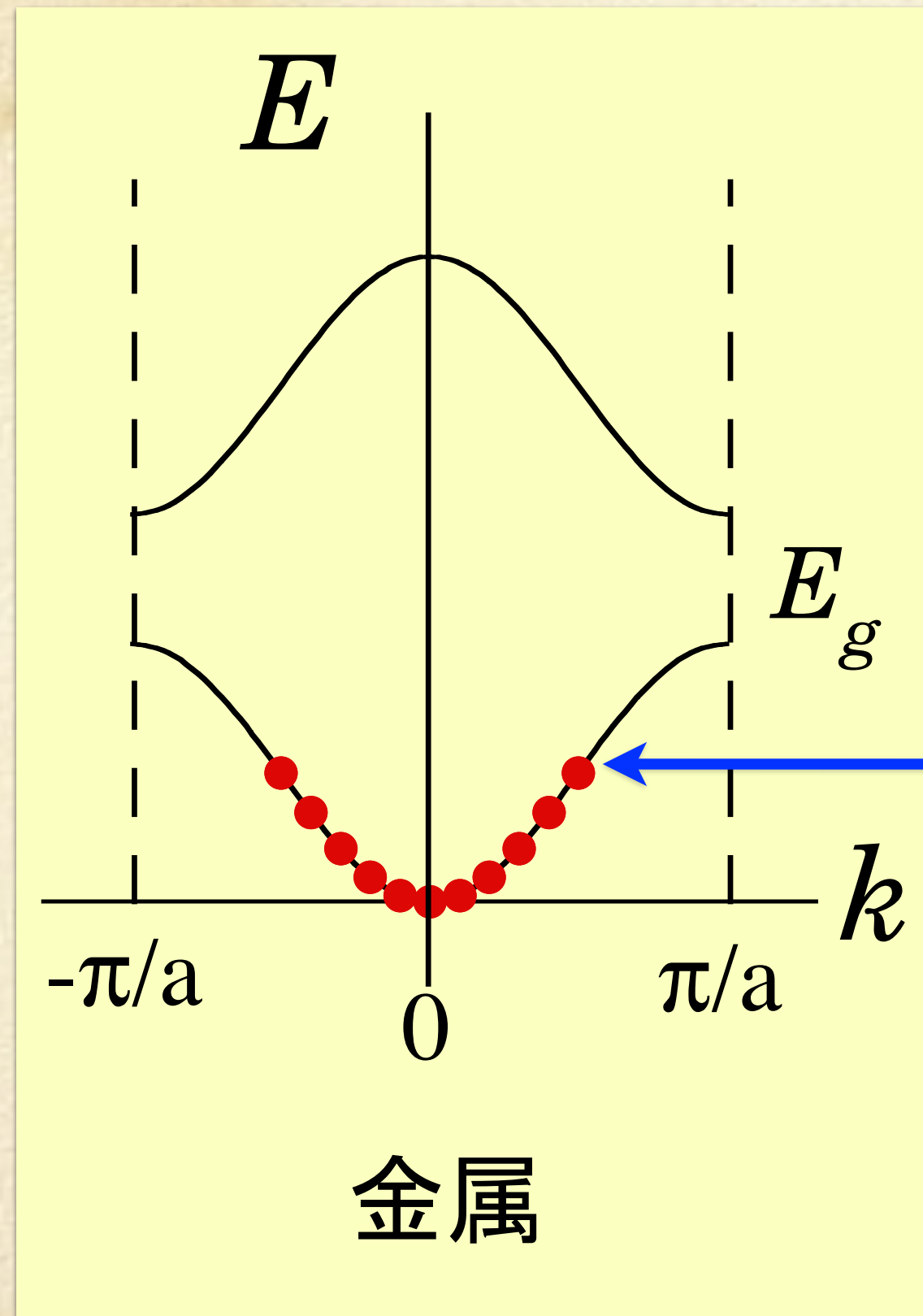


イオン間に電子



イオン上に電子



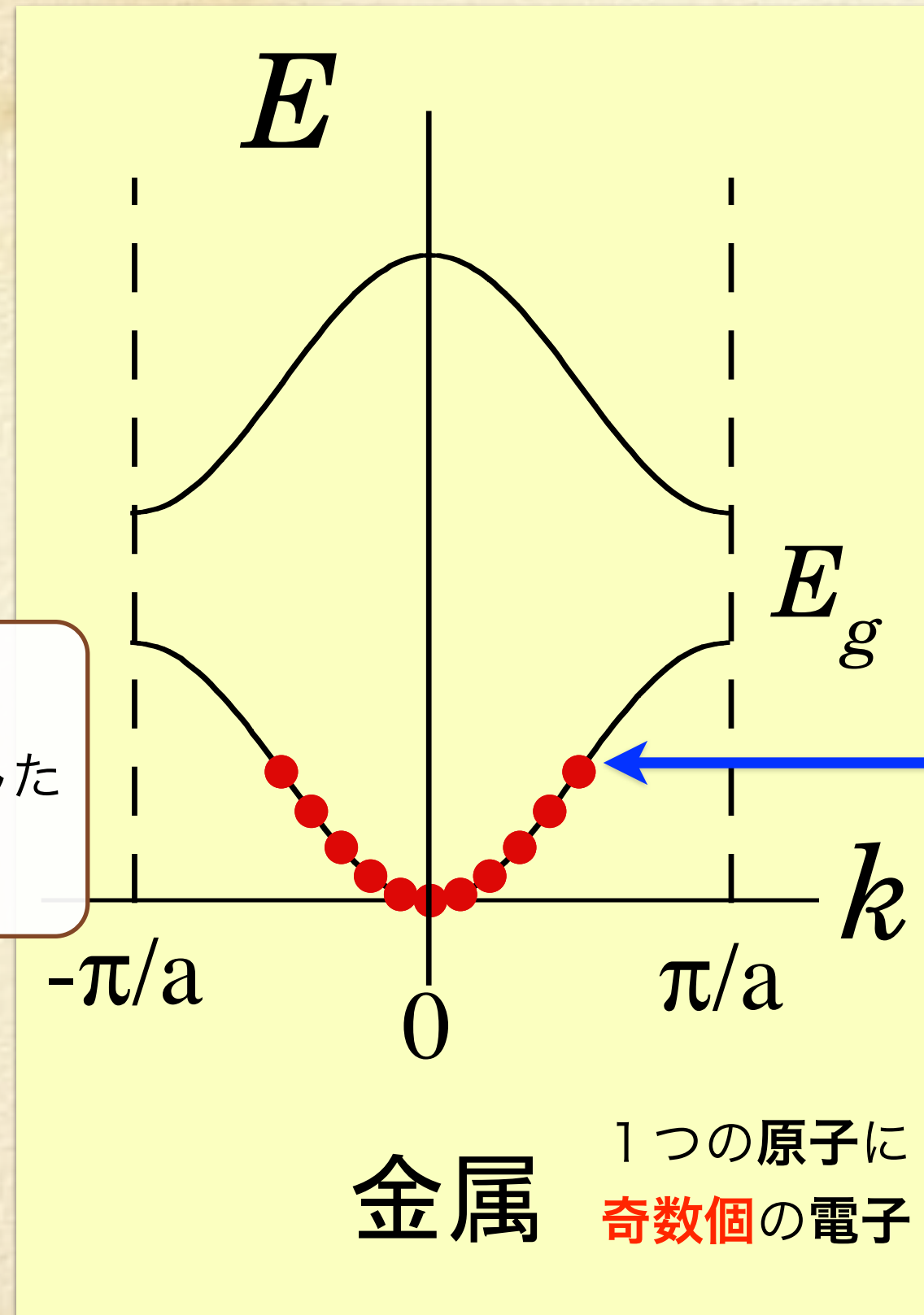


電子が **途中** まで詰まっている

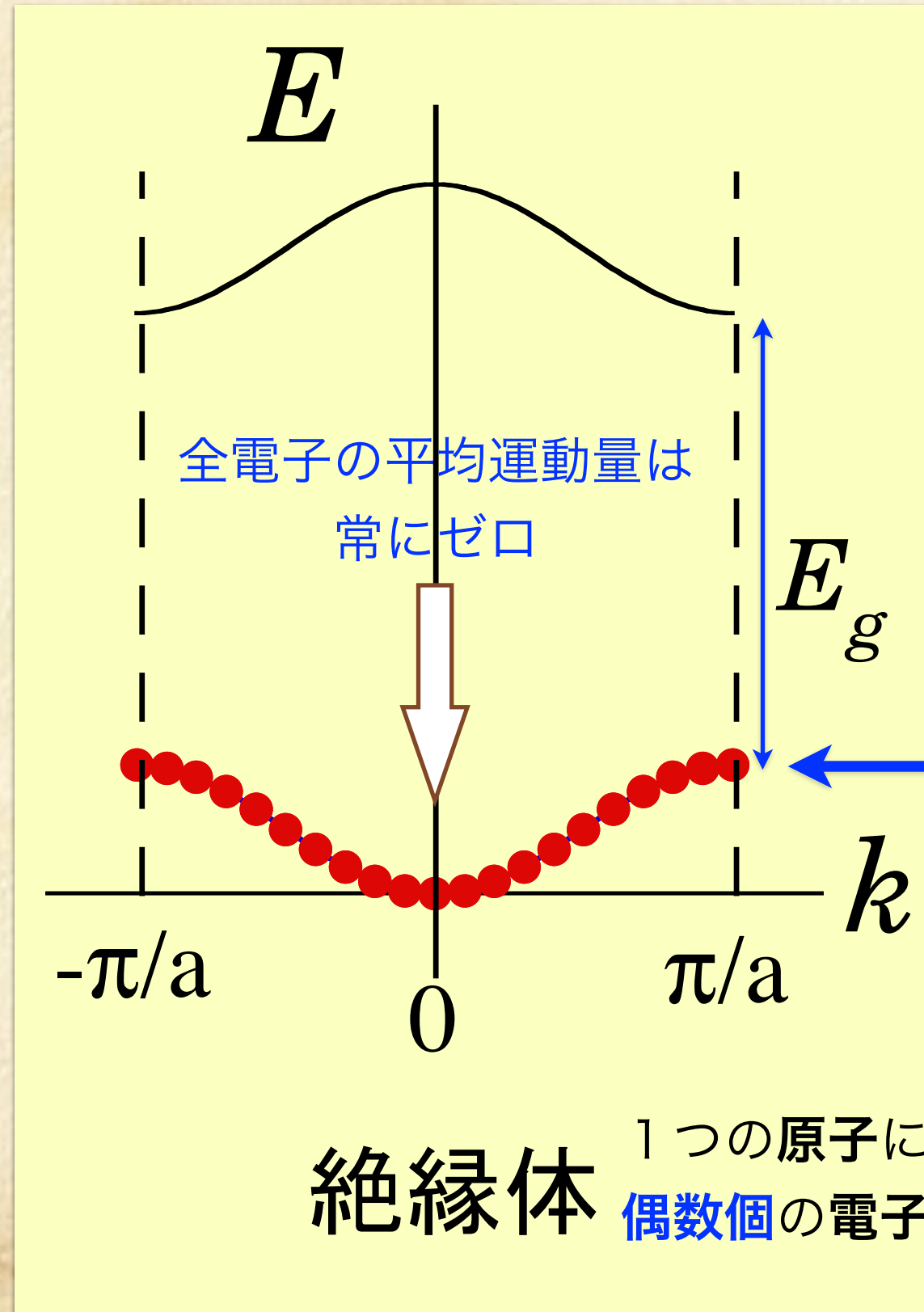
負電荷を持つ電子は、電場で加速できる

金属：オームの法則

加えた電場 E に比例した
電流 I が流れる



電子が **途中** まで
詰まっている



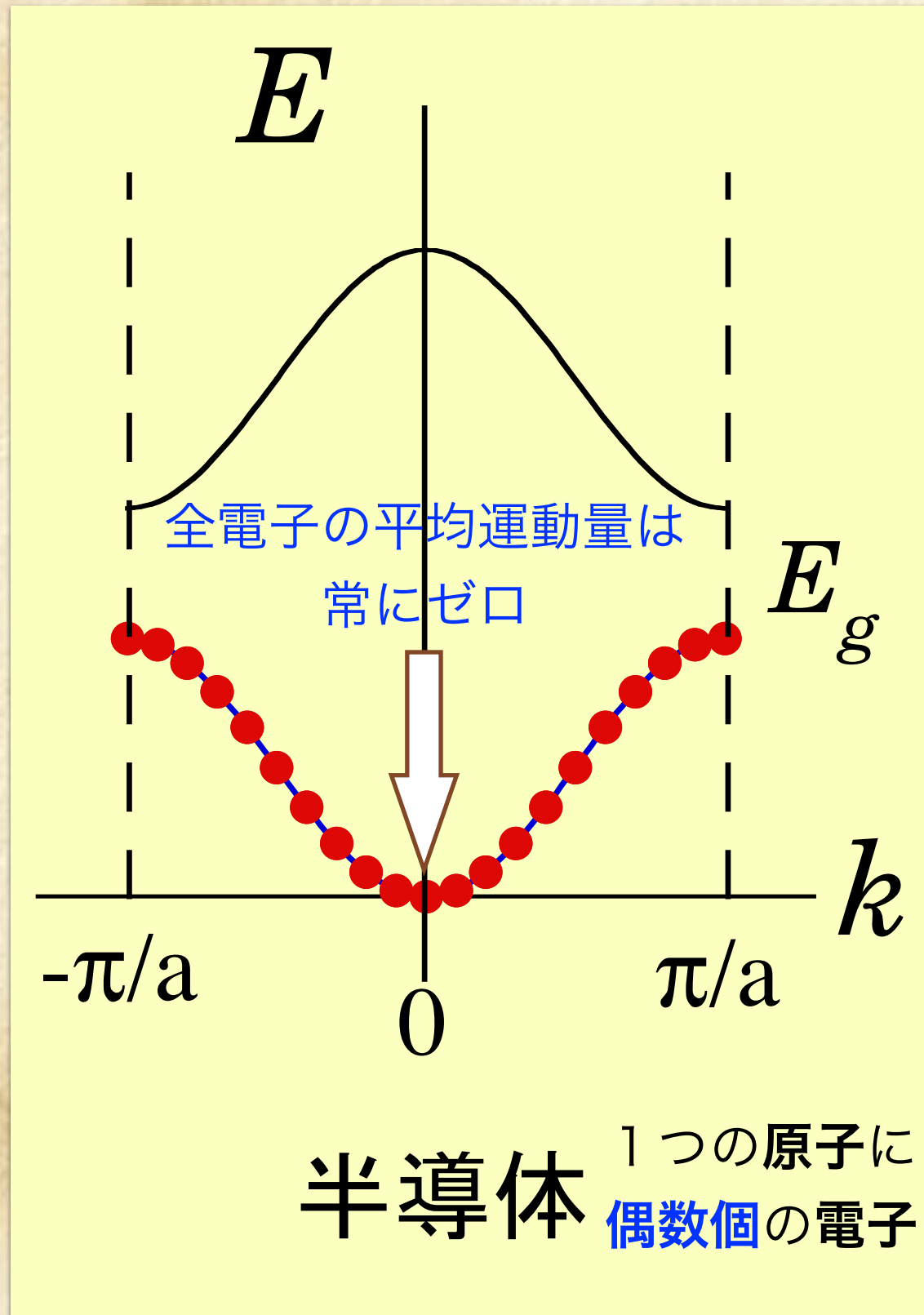
全電子の平均運動量は
常にゼロ

熱励起では飛び
越せない！！

電子が 目一杯
詰まっている

絶縁体 1つの原子に
偶数個の電子

真性半導体

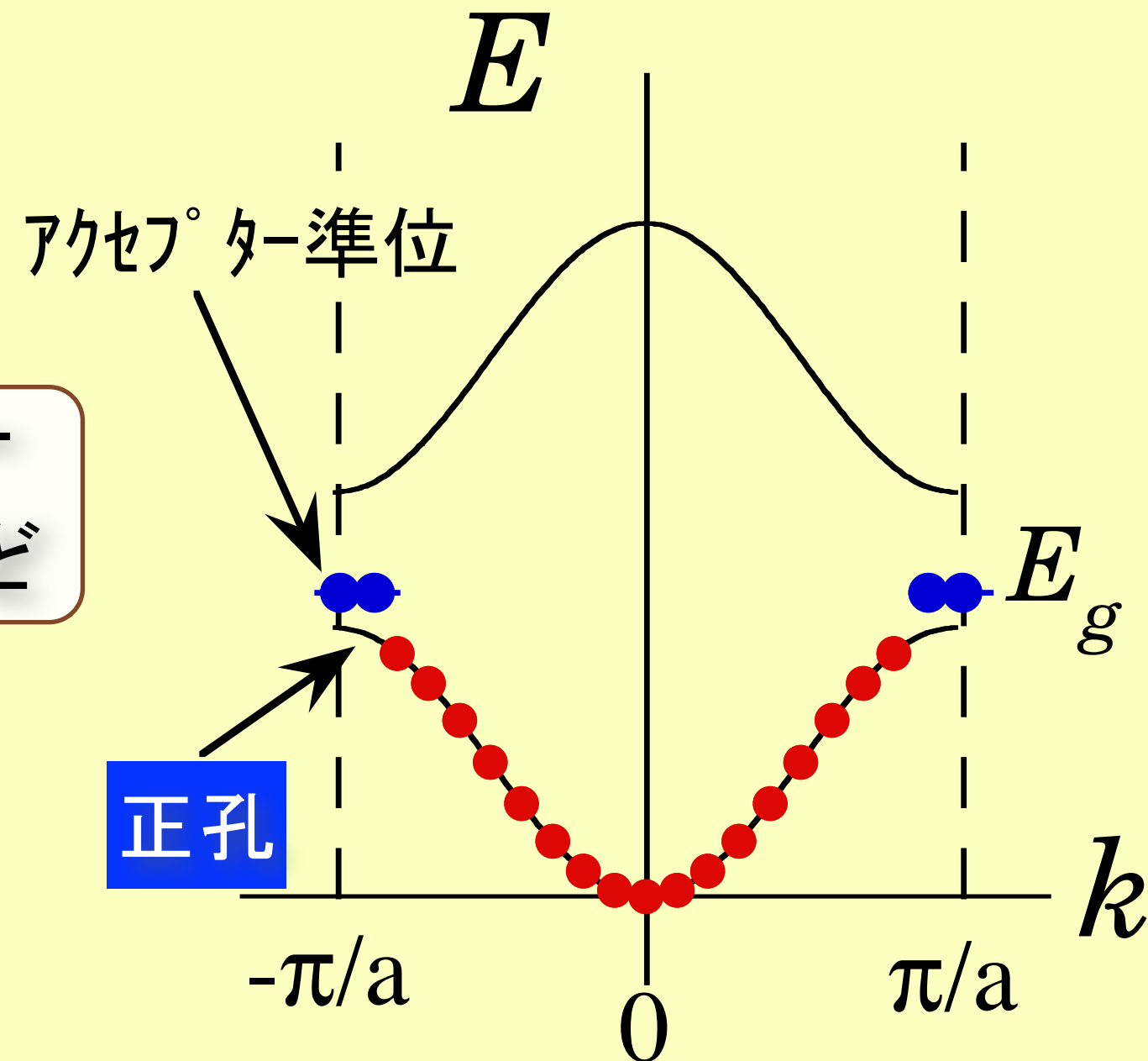


	Energy Gap
Diamond	5.4 eV
Si	1.11 eV
Ge	0.66 eV
GaAs	1.43 eV
CdS	2.42 eV

1 eV $\approx$ 1万1千度

室温：300 度
 ≈ 0.025 eV

不純物ドーピング：不純物（p型）半導体



アクセプター（p型）半導体

PERIODIC TABLE

Atomic Properties of the Elements

Frequently used fundamental physical constants

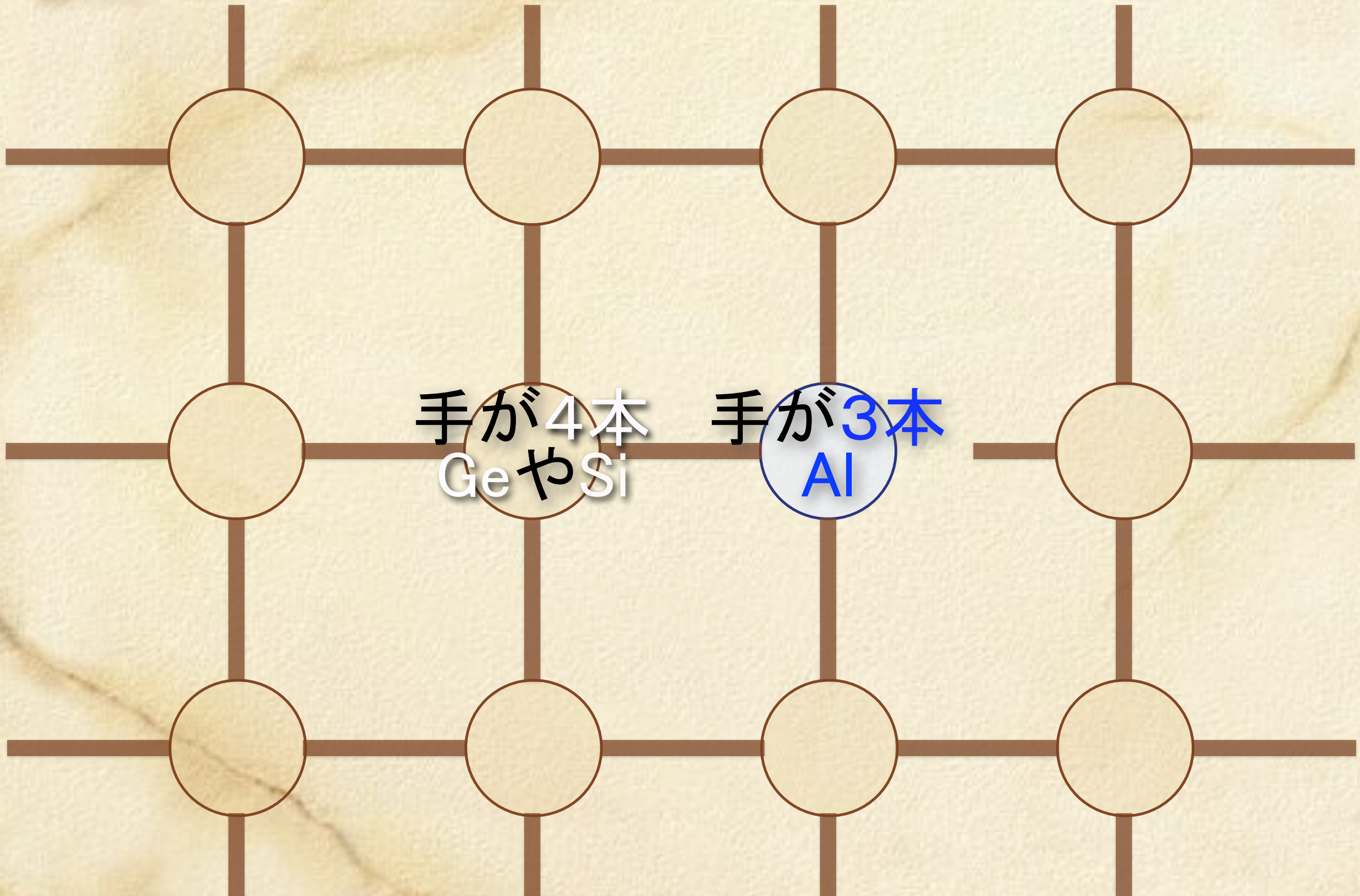
speed of light in vacuum	c	299 792 458 ms ⁻¹	(exact)
Planck constant	h	6.6261 × 10 ⁻³⁴ Js	($\hbar = h/2\pi$)
elementary charge	e	1.6022 × 10 ⁻¹⁹ C	
electron mass	m_e	9.1094 × 10 ⁻³¹ kg	
	$m_e c^2$	0.5110 MeV	
proton mass	m_p	1.6726 × 10 ⁻²⁷ kg	
fine-structure constant	α	1/137.036	
Rydberg constant	R_∞	10 973 732 m ⁻¹	
	$R_\infty c$	3.289 842 × 10 ¹⁵ Hz	
	$R_\infty hc$	13.6057 eV	
Boltzmann constant	k_B	1.3807 × 10 ⁻²³ JK ⁻¹	

Legend for element states:

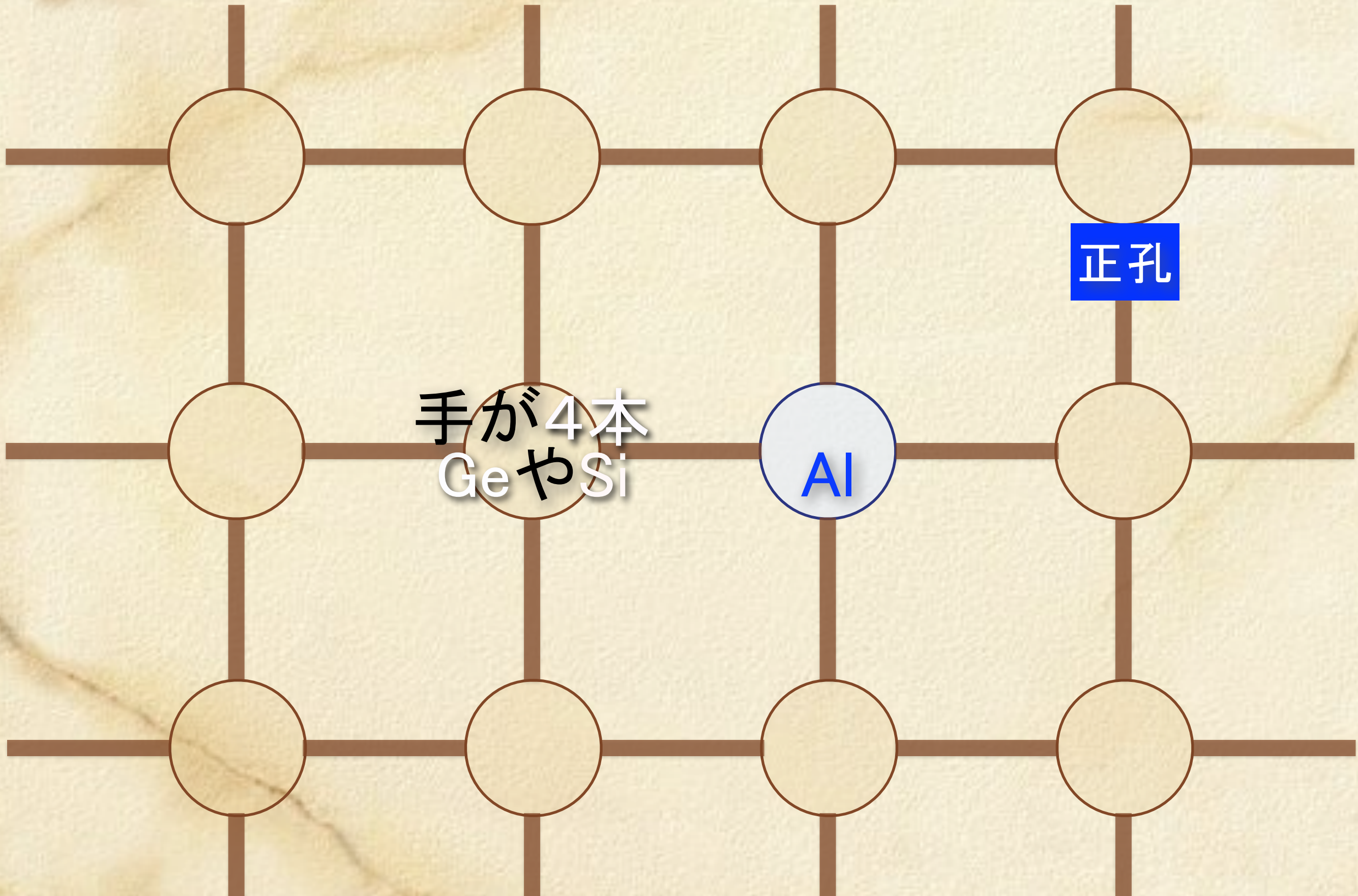
- Solids
- Liquids
- Gases
- Artificially Prepared

Group		Periodic Table																18																																									
1 IA																		VIIIA																																									
1	1 ²S_{1/2} H Hydrogen 1s HEX 1.00794 3.21 13.5984	2	2 ¹S₀ He Helium 1s² HEX 4.002602 3.57 24.5874																																																								
2	3 ²S_{1/2} Li Lithium 1s²2s BCC 6.941 3.49 5.3917	4 ¹S₀ Be Beryllium 1s²2s² HEX 9.012182 2.29 9.3227																																																									
3	11 ²S_{1/2} Na Sodium [Ne]3s BCC 22.9897 4.23 5.1391	12 ¹S₀ Mg Magnesium [Ne]3s² HEX 24.3050 3.21 7.6462	3	IIIB	4	IVB	5	VB	6	VIB	7	VII B	8	9	10	11	IB	12	IIB	13	IIIA	14	IVA	15	VA	16	VIA	17	VIIA	18	VIIIA																												
																				5	5 ²P_{1/2} B Boron 1s²2s²2p TET 10.811 4.3 8.296	6	6 ³P₀ C Carbon 1s²2s²2p² DIA 12.0107 7 11.26	7	7 ⁴S_{3/2} N Nitrogen 1s²2s²2p³ HEX 14.0067 4.039 14.5341	8	8 ³P₂ O Oxygen 1s²2s²2p⁴ CUB 15.9994 6.83 13.6181	9	9 ³P_{3/2} F Fluorine 1s²2s²2p⁵ MCL 18.9984 17.4228	10	10 ¹S₀ Ne Neon 1s²2s²2p⁶ FCC 20.1797 4.43 21.5645									13	13 ²P_{1/2} Al Aluminum [Ne]3s²3p FCC 26.9815 4.05 5.9858	14	14 ³P₀ Si Silicon [Ne]3s²3p² DIA 28.0855 5.43 8.1517	15	15 ⁴S_{3/2} P Phosphorus [Ne]3s²3p³ CUB 30.9738 7.17 10.4867	16	16 ³P₂ S Sulfur [Ne]3s²3p⁴ ORC 32.065 10.47 10.3600	17	17 ³P_{3/2} Cl Chlorine [Ne]3s²3p⁵ ORC 35.453 6.24 12.9676	18	18 ¹S₀ Ar Argon [Ne]3s²3p⁶ FCC 39.948 5.26 15.7596								
4	19 ²S_{1/2} K Potassium [Ar]4s BCC 22.9897 4.23 5.1391	20 ¹S₀ Ca Calcium [Ar]4s² FCC 40.078 5.58 6.1132	21	21 ²D_{3/2} Sc Scandium [Ar]3d4s² HEX 44.9559 3.31 6.5615	22	22 ³F₂ Ti Titanium [Ar]3d²4s² HEX 47.867 2.95 6.8281	23	23 ⁴F_{3/2} V Vanadium [Ar]3d³4s² BCC 50.9415 3.02 6.7462	24	24 ⁷S₃ Cr Chromium [Ar]3d⁵4s BCC 51.9961 2.88 6.7665	25	25 ⁶S_{5/2} Mn Manganese [Ar]3d⁵4s² CUB 54.938 8.89 7.4340	26	26 ⁵D₄ Fe Iron [Ar]3d⁶4s² BCC 55.845 2.87 7.9024	27	27 ⁴F_{9/2} Co Cobalt [Ar]3d⁷4s² HEX 58.9332 2.51 7.8810	28	28 ³F₄ Ni Nickel [Ar]3d⁸4s² FCC 58.6934 3.52 7.6398	29	29 ²S_{1/2} Cu Copper [Ar]3d¹⁰4s FCC 63.546 3.61 7.7264	30	30 ¹S₀ Zn Zinc [Ar]3d¹⁰4s² HEX 65.409 2.66 9.3942	31	31 ²P_{1/2} Ga Gallium [Ar]3d¹⁰4s²3p ORC 69.723 4.51 5.9993	32	32 ³P₀ Ge Germanium [Ar]3d¹⁰4s²4p² DIA 72.64 5.66 7.8994	33	33 ⁴S_{3/2} As Arsenic [Ar]3d¹⁰4s²4p⁴ RHL 74.9216 4.13 9.7886	34	34 ³P₂ Se Selenium [Ar]3d¹⁰4s²4p⁴ HEX 78.96 4.36 9.7524	35	35 ³P_{3/2} Br Bromine [Ar]3d¹⁰4s²4p⁵ ORC 79.904 6.67 11.8138	36	36 ¹S₀ Kr Krypton [Ar]3d¹⁰4s²4p⁶ FCC 83.798 5.72 13.9996																									
5	37 ²S_{1/2} Rb Rubidium [Kr]5s BCC 85.4678 5.59 4.1771	38 ¹S₀ Sr Strontium [Kr]5s² FCC 87.62 6.08 5.6949	39	39 ²D_{3/2} Y Yttrium [Kr]4d5s² HEX 88.9059 3.65 6.2173	40	40 ³F₂ Zr Zirconium [Kr]4d²5s² HEX 91.224 3.23 6.6339	41	41 ⁶D_{1/2} Nb Niobium [Kr]4d⁴5s BCC 92.9064 3.30 6.7589	42	42 ⁷S₃ Mo Molybdenum [Kr]4d⁵5s BCC 95.94 3.15 7.0924	43	43 ⁶S_{5/2} Tc Technetium [Kr]4d⁵5s² HEX (98) 2.74 7.28	44	44 ⁵F₅ Ru Ruthenium [Kr]4d⁷5s HEX 101.07 2.70 7.3605	45	45 ⁴F_{9/2} Rh Rhodium [Kr]4d⁸5s FCC 58.9332 3.80 7.4589	46	46 ¹S₀ Pd Palladium [Kr]4d¹⁰ FCC 58.6934 3.89 8.3369	47	47 ²S_{1/2} Ag Silver [Kr]4d¹⁰5s FCC 107.868 4.09 7.5762	48	48 ¹S₀ Cd Cadmium [Kr]4d¹⁰5s² HEX 112.411 2.98 8.9938	49	49 ²P_{1/2} In Indium [Kr]4d¹⁰5s²5p TET 114.818 4.59 5.7864	50	50 ³P₀ Sn Tin [Kr]4d¹⁰5s²5p² TET 118.710 5.82 7.3439	51	51 ⁴S_{3/2} Sb Antimony [Kr]4d¹⁰5s²5p³ RHL 121.760 4.51 8.6084	52	52 ³P₂ Te Tellurium [Kr]4d¹⁰5s²5p⁴ HEX 127.60 4.45 9.0096	53	53 ³P_{3/2} I Iodine [Kr]4d¹⁰5s²5p⁵ ORC 126.904 7.27 10.4513	54	54 ¹S₀ Xe Xenon [Kr]4d¹⁰5s²5p⁶ FCC 131.293 6.20 12.1298																									
6	55 ²S_{1/2} Cs Cesium [Xe]6s BCC 132.905 6.05 3.8939	56 ¹S₀ Ba Barium [Xe]6s² BCC 137.327 5.02 5.2117	Lanthanides Actinides		72	72 ³F₂ Hf Hafnium [Xe]4f¹⁴5d²6s² HEX 178.49 3.20 6.8251	73	73 ⁴F_{3/2} Ta Tantalum [Xe]4f¹⁴5d³6s² BCC 180.948 3.31 7.5496	74	74 ⁵D₀ W Tungsten [Xe]4f¹⁴5d⁴6s² BCC 183.84 3.16 7.8640	75	75 ⁶S_{5/2} Re Rhenium [Xe]4f¹⁴5d⁵6s² HEX 186.207 2.76 7.8335	76	76 ⁵D₄ Os Osmium [Xe]4f¹⁴5d⁶6s² HEX 190.23 2.74 8.4382	77	77 ⁴F_{9/2} Ir Iridium [Xe]4f¹⁴5d⁷6s² FCC 192.217 3.84 8.9670	78	78 ³D₃ Pt Platinum [Xe]4f¹⁴5d⁹6s FCC 195.078 3.92 8.9588	79	79 ²S_{1/2} Au Gold [Xe]4f¹⁴5d¹⁰6s FCC 196.967 4.08 9.2255	80	80 ¹S₀ Hg Mercury [Xe]4f¹⁴5d¹⁰6s² RHL 200.59 2.99 10.4375	81	81 ²P_{1/2} Tl Thallium [Hg]6p HEX 204.383 3.46 6.1082	82	82 ³P₀ Pb Lead [Hg]6p² FCC 207.2 4.95 7.4167	83	83 ⁴S_{3/2} Bi Bismuth [Hg]6p³ RHL 208.980 4.75 7.2855	84	84 ³P₂ Po Polonium [Hg]6p⁴ SC (209) 3.35 8.414	85	85 ³P_{3/2} At Astatine [Hg]6p⁵ (210) (210)	86	86 ¹S₀ Rn Radon [Hg]6p⁶ (FCC) (222) 10.7485																									
7	87 ²S_{1/2} Fr Francium [Rn]7s (BCC) (223) 4.0727	88 ¹S₀ Ra Radium [Rn]7s² (226) 5.2784			Lanthanides Actinides		104	104 ³F₂ Rf Rutherfordium [Rn]5f¹⁴6d²7s²? (261) 6.0 ?	105	105 ³F₂ Db Dubnium (262)	106	106 ³F₂ Sg Seaborgium (266)	107	107 ³F₂ Bh Bohrium (264)	108	108 ³F₂ Hs Hassium (277)	109	109 ³F₂ Mt Meitnerium (268)	110																																								

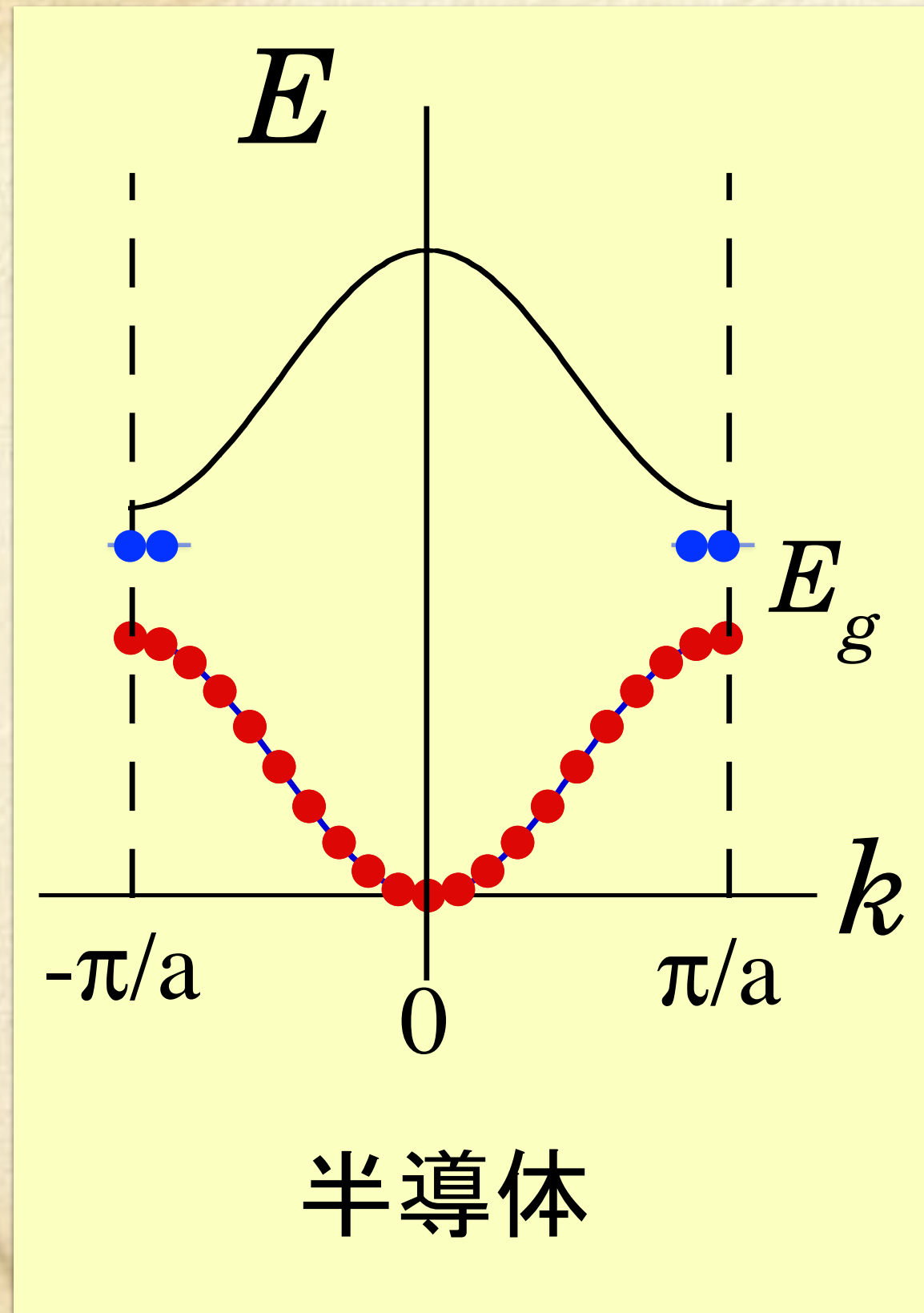
p型半導体



p型半導体

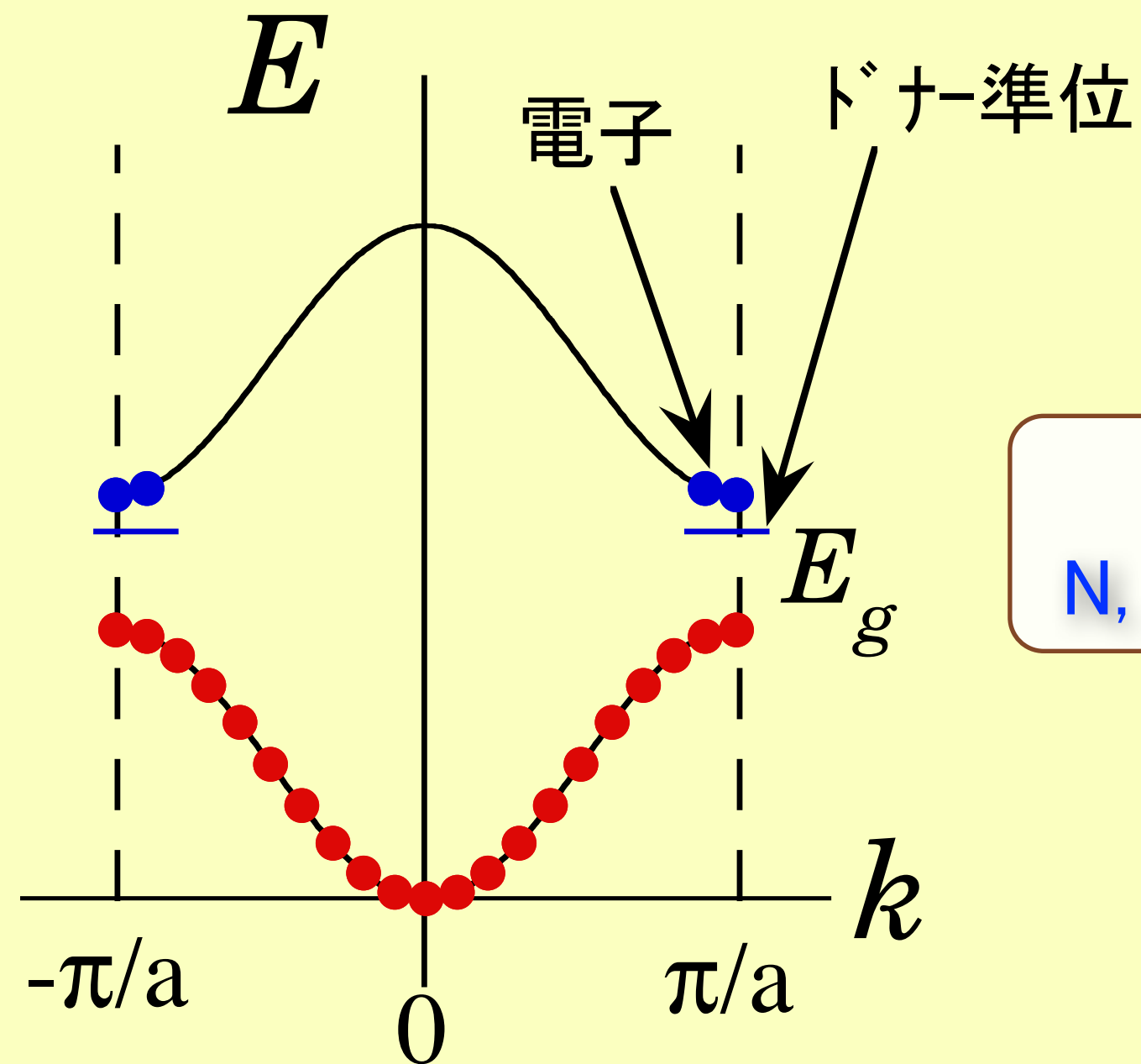


電子ドナー・ドーピング: n 型半導体



ドナー
N, P, As, など

電子ドナー・ドーピング: n 型半導体



ドナー
N, P, As, など

ドナー (n型) 半導体

PERIODIC TABLE

Atomic Properties of the Elements

Frequently used fundamental physical constants

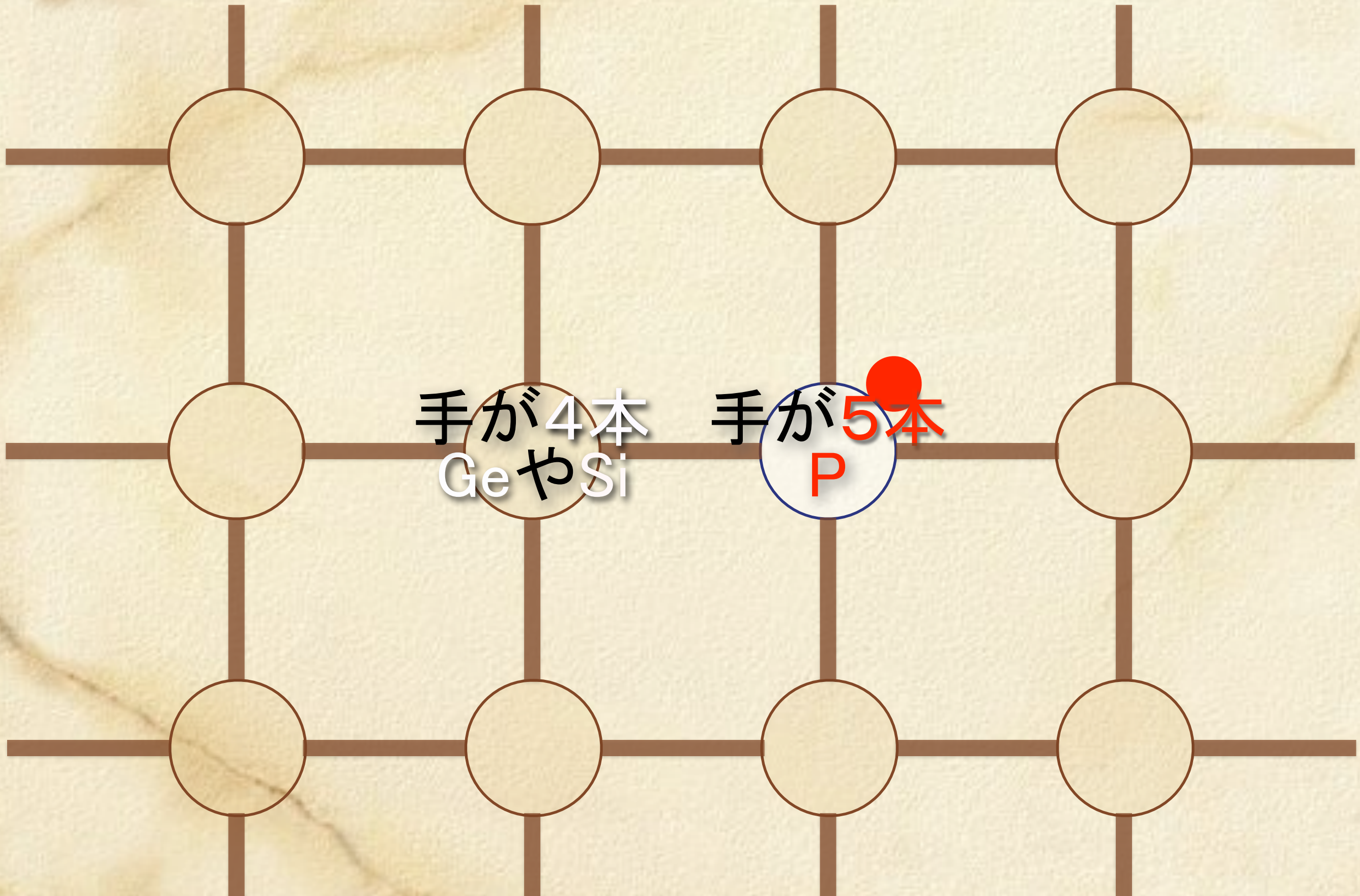
speed of light in vacuum	c	299 792 458 ms ⁻¹	(exact)
Planck constant	h	6.6261 × 10 ⁻³⁴ Js	($\hbar = h/2\pi$)
elementary charge	e	1.6022 × 10 ⁻¹⁹ C	
electron mass	m_e	9.1094 × 10 ⁻³¹ kg	
	$m_e c^2$	0.5110 MeV	
proton mass	m_p	1.6726 × 10 ⁻²⁷ kg	
fine-structure constant	α	1/137.036	
Rydberg constant	R_∞	10 973 732 m ⁻¹	
	$R_\infty c$	3.289 842 × 10 ¹⁵ Hz	
	$R_\infty hc$	13.6057 eV	
Boltzmann constant	k_B	1.3807 × 10 ⁻²³ JK ⁻¹	

Legend for element states:

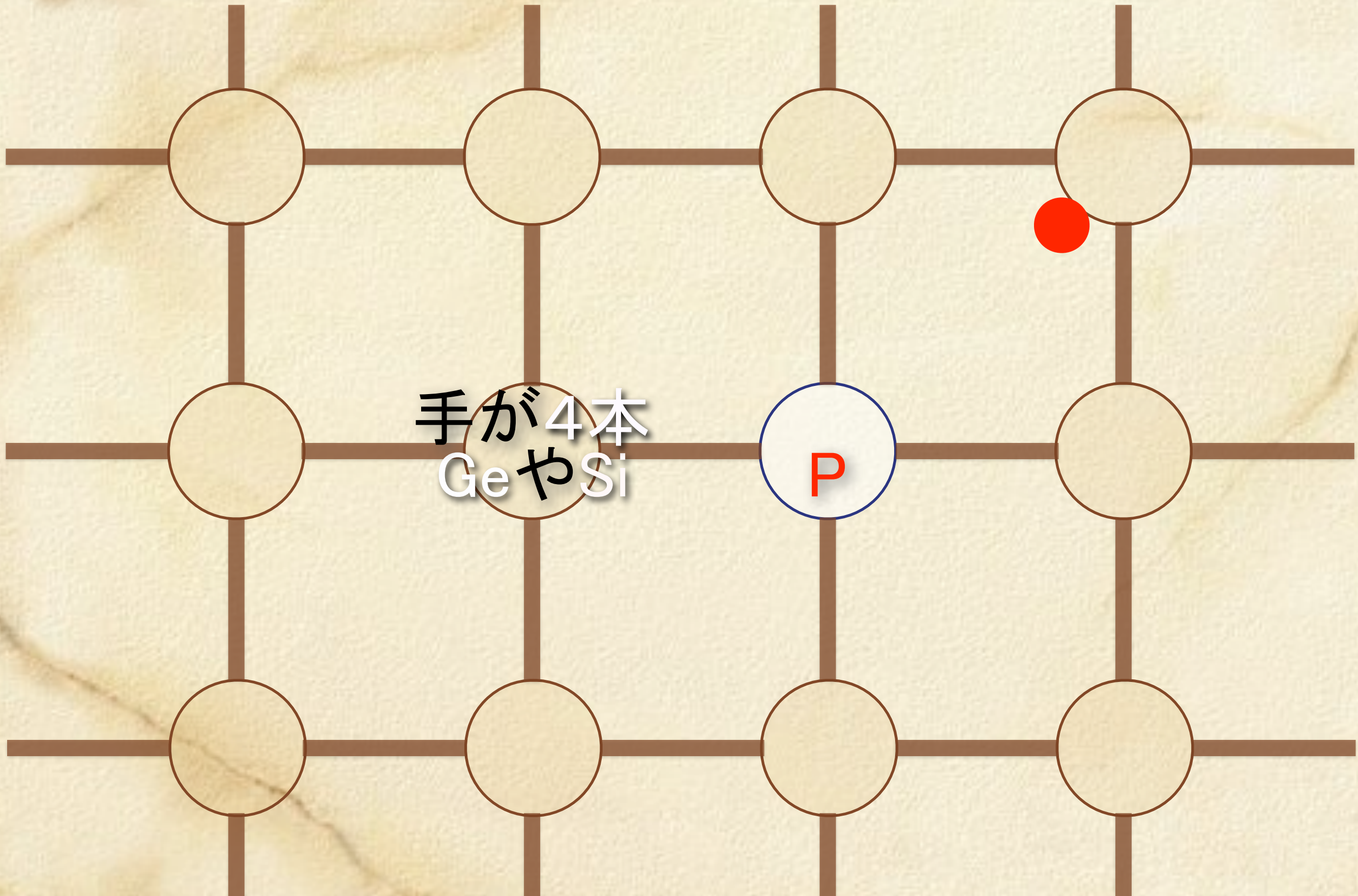
- White box: Solids
- Blue box: Liquids
- Pink box: Gases
- Yellow box: Artificially Prepared

Group		Periodic Table																18																	
1																		VIII																	
1A																																			
1	1 ²S_{1/2} H Hydrogen 1s HEX 1.00794 3.21 13.5984	2	2 ¹S₀ He Helium 1s² HEX 4.002602 3.57 24.5874																																
2	3 ²S_{1/2} Li Lithium 1s²2s BCC 6.941 3.49 5.3917	4 ¹S₀ Be Beryllium 1s²2s² HEX 9.012182 2.29 9.3227																																	
3	11 ²S_{1/2} Na Sodium [Ne]3s BCC 22.9897 4.23 5.1391	12 ¹S₀ Mg Magnesium [Ne]3s² HEX 24.3050 3.21 7.6462	3	IIIB	4	IVB	5	VB	6	VIB	7	VIIB	8	VIII	9	VIII	10	VIII			11	IB	12	IIB	13	IIIA	14	IVA	15	VA	16	VIA	17	VIIA	18
4	19 ²S_{1/2} K Potassium [Ar]4s BCC 22.9897 4.23 5.1391	20 ¹S₀ Ca Calcium [Ar]4s² FCC 40.078 5.58 6.1132	21 ²D_{3/2} Sc Scandium [Ar]3d4s² HEX 44.9559 3.31 6.5615	22 ³F₂ Ti Titanium [Ar]3d²4s² HEX 47.867 2.95 6.8281	23 ⁴F_{3/2} V Vanadium [Ar]3d³4s² BCC 50.9415 3.02 6.7462	24 ⁷S₃ Cr Chromium [Ar]3d⁵4s BCC 51.9961 2.88 6.7665	25 ⁶S_{5/2} Mn Manganese [Ar]3d⁵4s² CUB 54.938 8.89 7.4340	26 ⁵D₄ Fe Iron [Ar]3d⁶4s² BCC 55.845 2.87 7.9024	27 ⁴F_{9/2} Co Cobalt [Ar]3d⁷4s² HEX 58.9332 2.51 7.8810	28 ³F₄ Ni Nickel [Ar]3d⁸4s² FCC 58.6934 3.52 7.6398	29 ²S_{1/2} Cu Copper [Ar]3d¹⁰4s FCC 63.546 3.61 7.7264	30 ¹S₀ Zn Zinc [Ar]3d¹⁰4s² HEX 65.409 2.66 9.3942	31 ²P_{1/2} Ga Gallium [Ar]3d¹⁰4s²3p ORC 69.723 4.51 5.9993	32 ³P₀ Ge Germanium [Ar]3d¹⁰4s²4p² DIA 72.64 5.66 7.8994	33 ⁴S_{3/2} As Arsenic [Ar]3d¹⁰4s²4p³ RHL 74.9216 4.13 9.7886	34 ³P₂ Se Selenium [Ar]3d¹⁰4s²4p⁴ HEX 78.96 4.36 9.7524	35 ³P_{3/2} Br Bromine [Ar]3d¹⁰4s²4p⁵ ORC 79.904 6.67 11.8138	36 ¹S₀ Kr krypton [Ar]3d¹⁰4s²4p⁶ FCC 83.798 5.72 13.9996																	
5	37 ²S_{1/2} Rb Rubidium [Kr]5s BCC 85.4678 5.59 4.1771	38 ¹S₀ Sr Strontium [Kr]5s² FCC 87.62 6.08 5.6949	39 ²D_{3/2} Y Yttrium [Kr]4d5s² HEX 88.9059 3.65 6.2173	40 ³F₂ Zr Zirconium [Kr]4d²5s² HEX 91.224 3.23 6.6339	41 ⁶D_{1/2} Nb Niobium [Kr]4d⁴5s BCC 92.9064 3.30 6.7589	42 ⁷S₃ Mo Molybdenum [Kr]4d⁵5s BCC 95.94 3.15 7.0924	43 ⁶S_{5/2} Tc Technetium [Kr]4d⁵5s² HEX (98) 2.74 7.28	44 ⁵F₅ Ru Ruthenium [Kr]4d⁷5s HEX 101.07 2.70 7.3605	45 ⁴F_{9/2} Rh Rhodium [Kr]4d⁸5s FCC 58.9332 3.80 7.4589	46 ¹S₀ Pd Palladium [Kr]4d¹⁰ FCC 58.6934 3.89 8.3369	47 ²S_{1/2} Ag Silver [Kr]4d¹⁰5s FCC 107.868 4.09 7.5762	48 ¹S₀ Cd Cadmium [Kr]4d¹⁰5s² HEX 112.411 2.98 8.9938	49 ²P_{1/2} In Indium [Kr]4d¹⁰5s²5p TET 114.818 4.59 5.7864	50 ³P₀ Sn Tin [Kr]4d¹⁰5s²5p² TET 118.710 5.82 7.3439	51 ⁴S_{3/2} Sb Antimony [Kr]4d¹⁰5s²5p³ RHL 121.760 4.51 8.6084	52 ³P₂ Te Tellurium [Kr]4d¹⁰5s²5p⁴ HEX 127.60 4.45 9.0096	53 ³P_{3/2} I Iodine [Kr]4d¹⁰5s²5p⁵ ORC 126.904 7.27 10.4513	54 ¹S₀ Xe Xenon [Kr]4d¹⁰5s²5p⁶ FCC 131.293 6.20 12.1298																	
6	55 ²S_{1/2} Cs Cesium [Xe]6s BCC 132.905 6.05 3.8939	56 ¹S₀ Ba Barium [Xe]6s² BCC 137.327 5.02 5.2117	Lanthanides Actinides		72 ³F₂ Hf Hafnium [Xe]4f¹⁴5d²6s² HEX 178.49 3.20 6.8251	73 ⁴F_{3/2} Ta Tantalum [Xe]4f¹⁴5d³6s² BCC 180.948 3.31 7.5496	74 ⁵D₀ W Tungsten [Xe]4f¹⁴5d⁴6s² BCC 183.84 3.16 7.8640	75 ⁶S_{5/2} Re Rhenium [Xe]4f¹⁴5d⁵6s² HEX 186.207 2.76 7.8335	76 ⁵D₄ Os Osmium [Xe]4f¹⁴5d⁶6s² HEX 190.23 2.74 8.4382	77 ⁴F_{9/2} Ir Iridium [Xe]4f¹⁴5d⁷6s² FCC 192.217 3.84 8.9670	78 ³D₃ Pt Platinum [Xe]4f¹⁴5d⁹6s FCC 195.078 3.92 8.9588	79 ²S_{1/2} Au Gold [Xe]4f¹⁴5d¹⁰6s FCC 196.967 4.08 9.2255	80 ¹S₀ Hg Mercury [Xe]4f¹⁴5d¹⁰6s² RHL 200.59 2.99 10.4375	81 ²P_{1/2} Tl Thallium [Hg]6p HEX 204.383 3.46 6.1082	82 ³P₀ Pb Lead [Hg]6p² FCC 207.2 4.95 7.4167	83 ⁴S_{3/2} Bi Bismuth [Hg]6p³ RHL 208.980 4.75 7.2855	84 ³P₂ Po Polonium [Hg]6p⁴ SC (209) 3.35 8.414	85 ³P_{3/2} At Astatine [Hg]6p⁵ (210) (210)	86 ¹S₀ Rn Radon [Hg]6p⁶ (FCC) (222) 10.7485																
7	87 ²S_{1/2} Fr Francium [Rn]7s (BCC) (223) 4.0727	88 ¹S₀ Ra Radium [Rn]7s² (226) 5.2784			Lanthanides Actinides		104 ³F₂ Rf Rutherfordium [Rn]5f¹⁴6d²7s²? (261) 6.0 ?	105 ³F₂ Db Dubnium (262)	106 ³F₂ Sg Seaborgium (266)	107 ³F₂ Bh Bohrium (264)	108 ³F₂ Hs Hassium (277)	109 ³F₂ Mt Meitnerium (268)	110 ³F₂ Uun Ununnilium (281)	111 ³F₂ Uuu Unununium (272)	112 ³F₂ Uub Ununbium (285)	Ununquadium Ununhexium		Ununseptium Ununoctium																	
				103 ²P_{1/2} ? Lr Lawrencium [Rn]5f¹⁴7s²7p? MCL (262) 3.21 4.9 ?					114 ³F₂ Uuq Ununquadium (289)			116 ³F₂ Uuh Ununhexium (292)																							
				57 ²D_{3/2} La Lanthanum [Xe]5d6s² HEX 138.906 3.75 5.5769	58 ¹G₄ Ce Cerium [Xe]4f5d6s² FCC 140.116 5.16 5.5387	59 ⁴I_{9/2} Pr Praseodymium [Xe]4f36s² HEX 140.908 3.67 5.473	60 ⁵I₄ Nd Neodymium [Xe]4f46s² HEX 144.24 3.66 5.5250	61 ⁶H_{5/2} Pm Promethium [Xe]4f56s² (145) 5.582	62 ⁷F₀ Sm Samarium [Xe]4f66s² RHL 150.36 9.00 5.6437	63 ⁸S_{7/2} Eu Europium [Xe]4f76s² BCC 151.964 4.61 5.6704	64 ⁹D₂ Gd Gadolinium [Xe]4f75d6s² HEX 157.25 3.64 6.1498	65 ⁶H_{15/2} Tb Terbium [Xe]4f96s² HEX 158.925 3.60 5.8638	66 ⁵I₈ Dy Dysprosium [Xe]4f106s² HEX 162.500 3.59 5.9389	67 ⁴I_{15/2} Ho Holmium [Xe]4f116s² HEX 164.930 3.58 6.0215	68 ³H₆ Er Erbium [Xe]4f126s² HEX 167.259 3.56 6.1077	69 ²F_{7/2} Tm Thulium [Xe]4f136s² HEX 168.934 3.54 6.1843	70 ¹S₀ Yb Ytterbium [Xe]4f146s² FCC 173.04 <																		

n型半導体

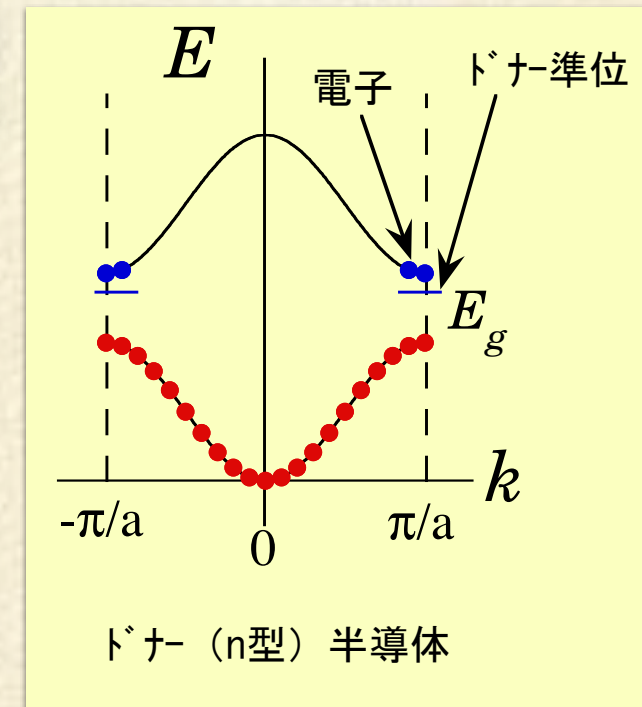
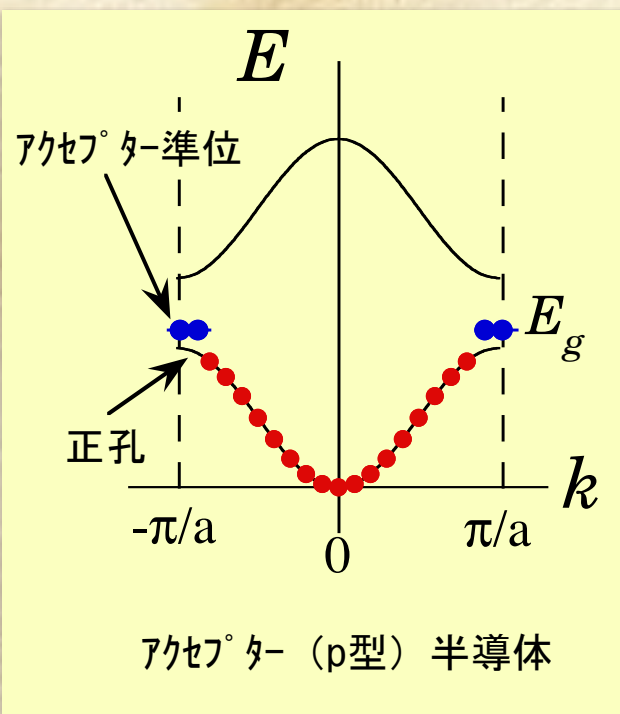


n型半導体

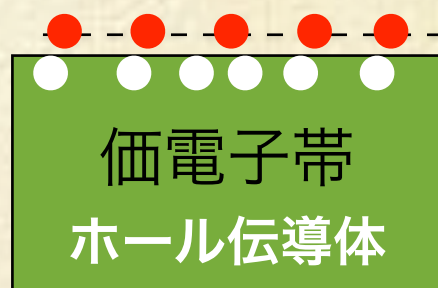


半導体の機能

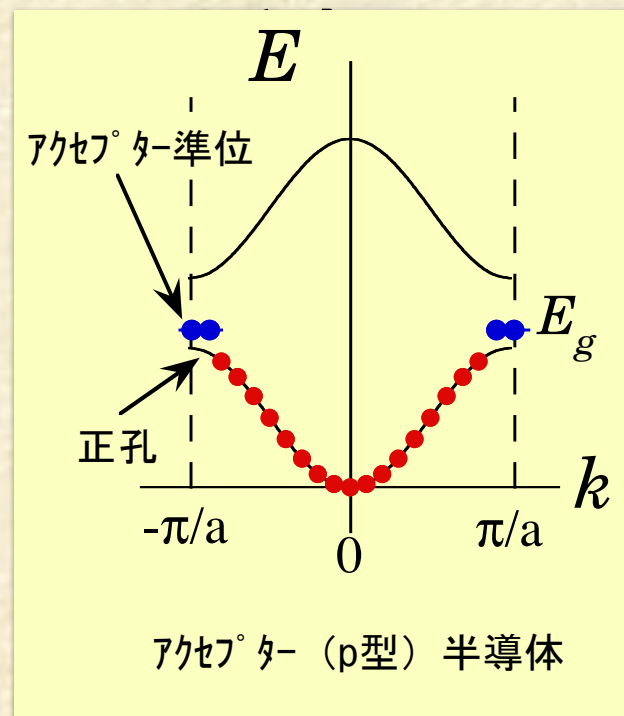
2種類の半導体：p型とn型



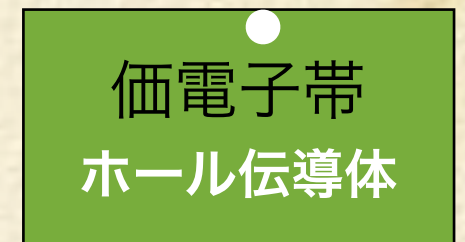
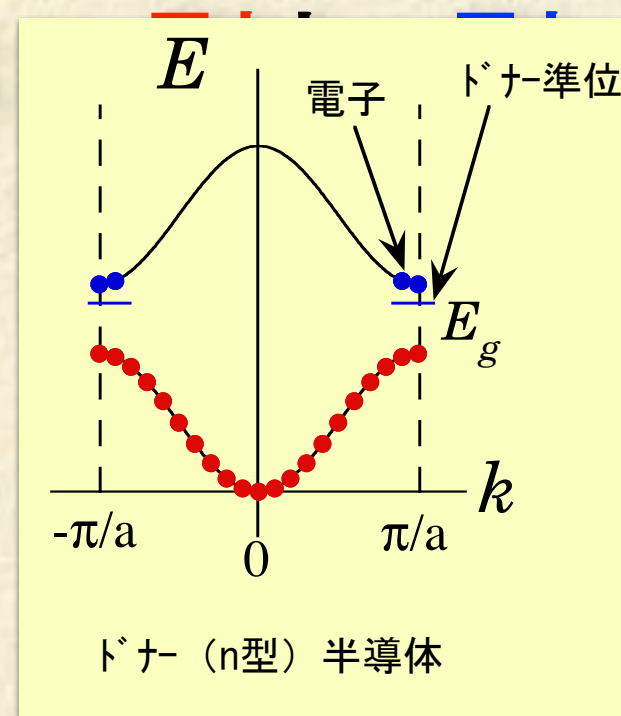
半導体の機能



p 型半導体



半導体

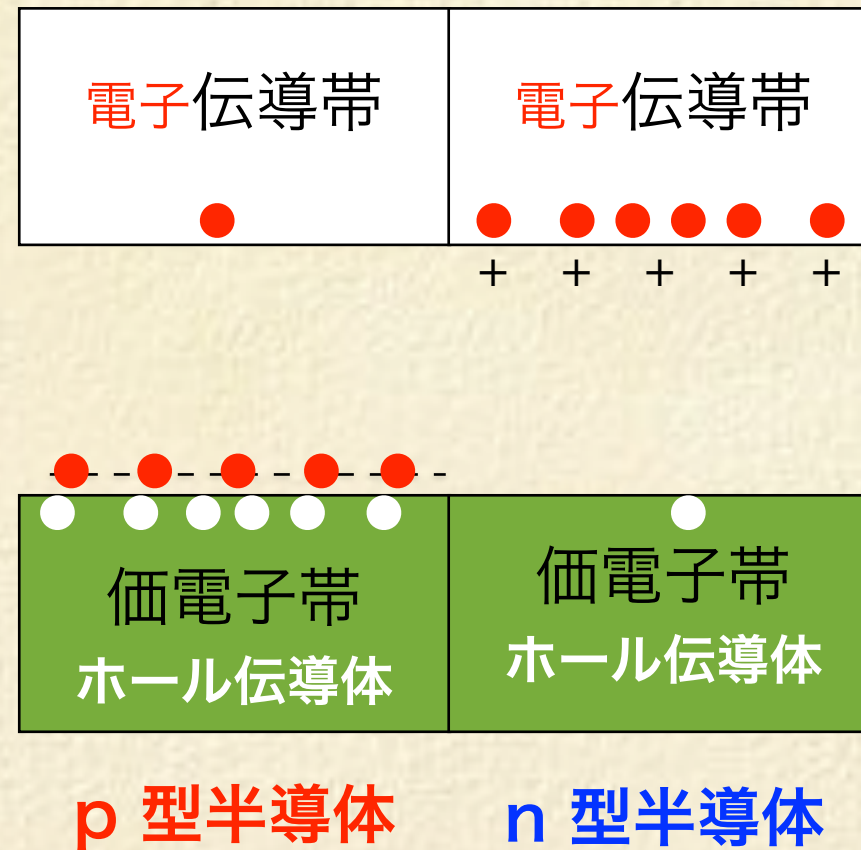


n 型半導体

最も簡単な p 型と n 型の組合せ

p-n 接合

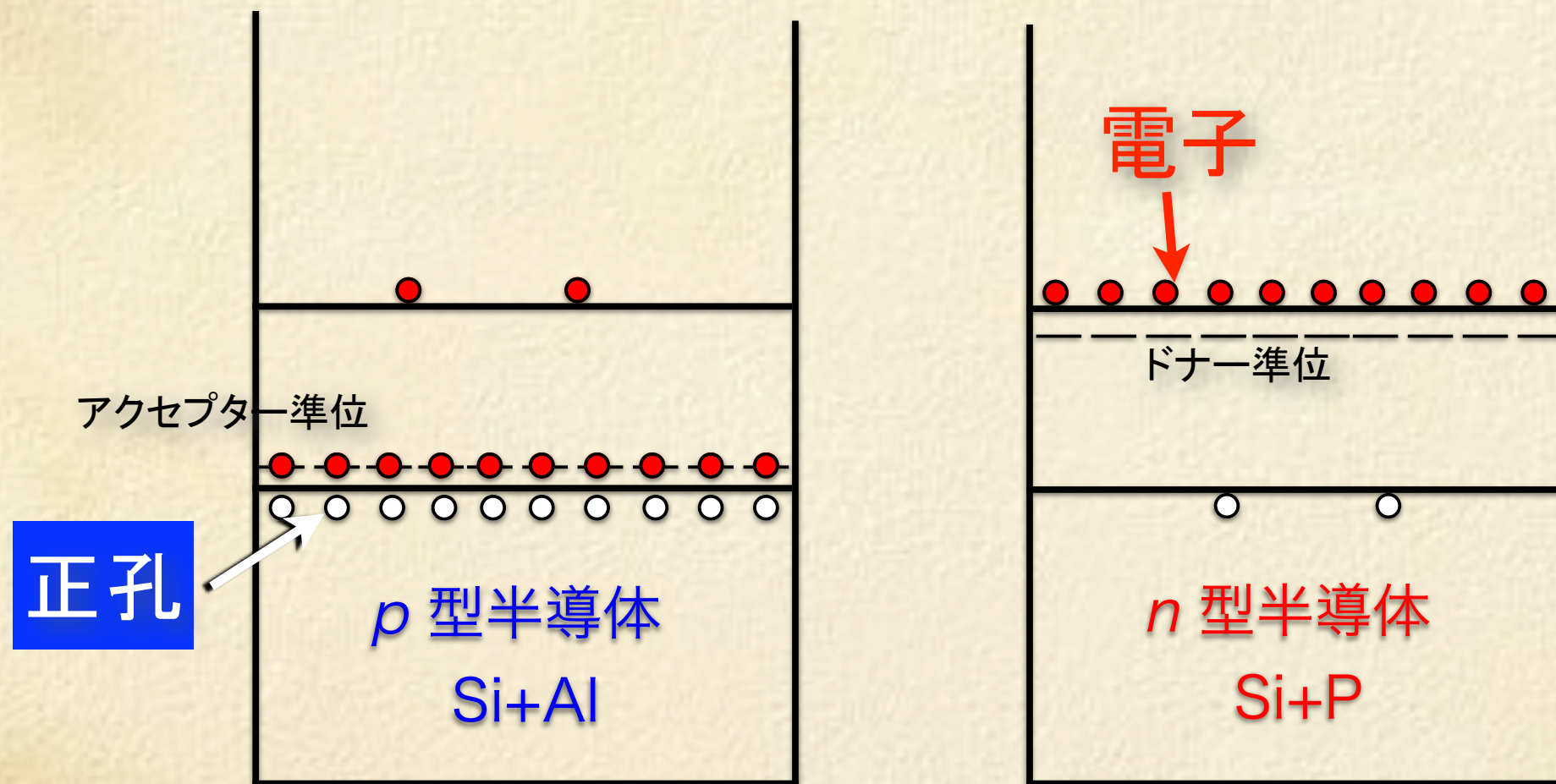
半導体の機能



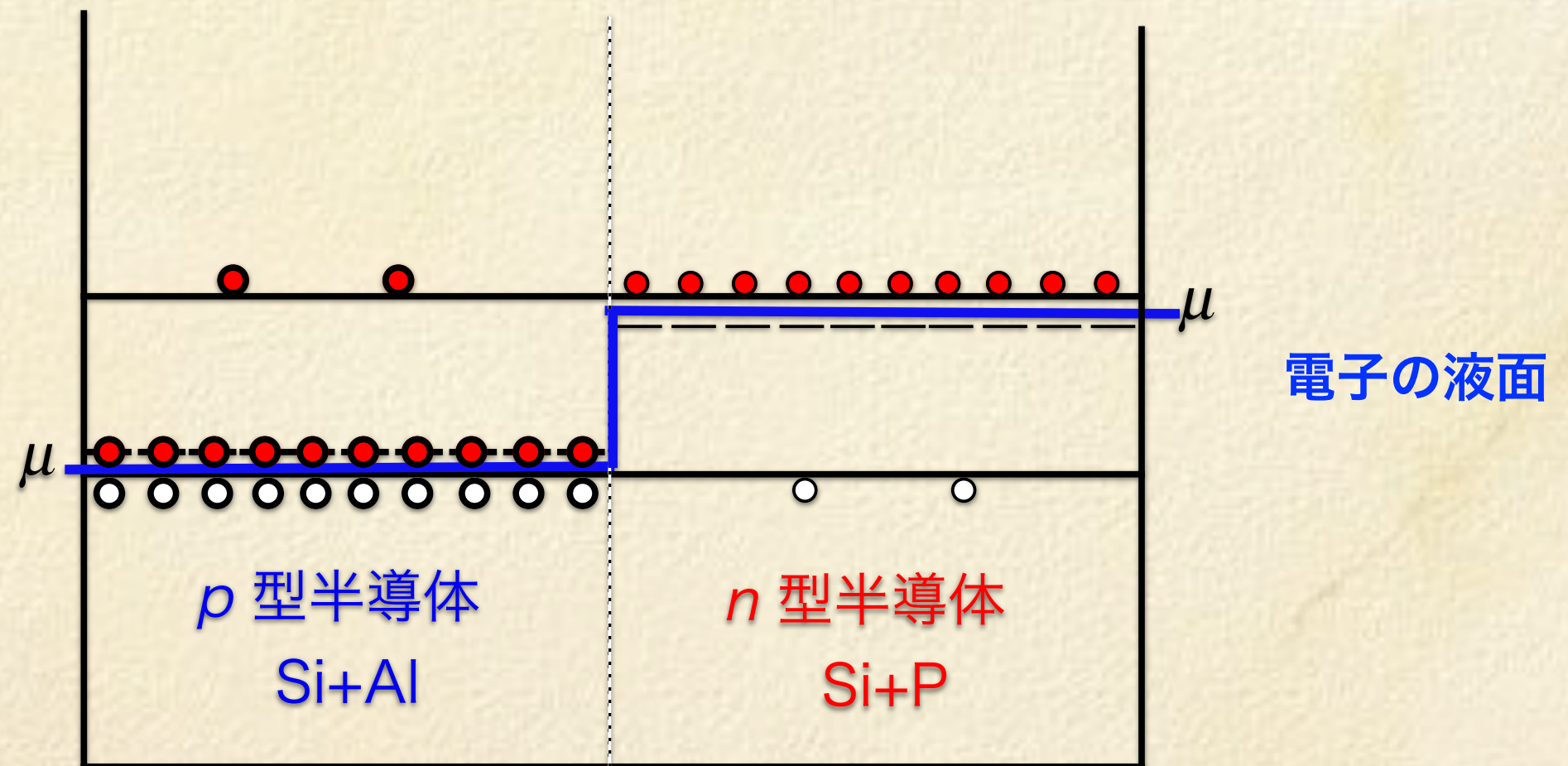
p*-*n 接合

外部電圧により、流れる電流を制御出来る

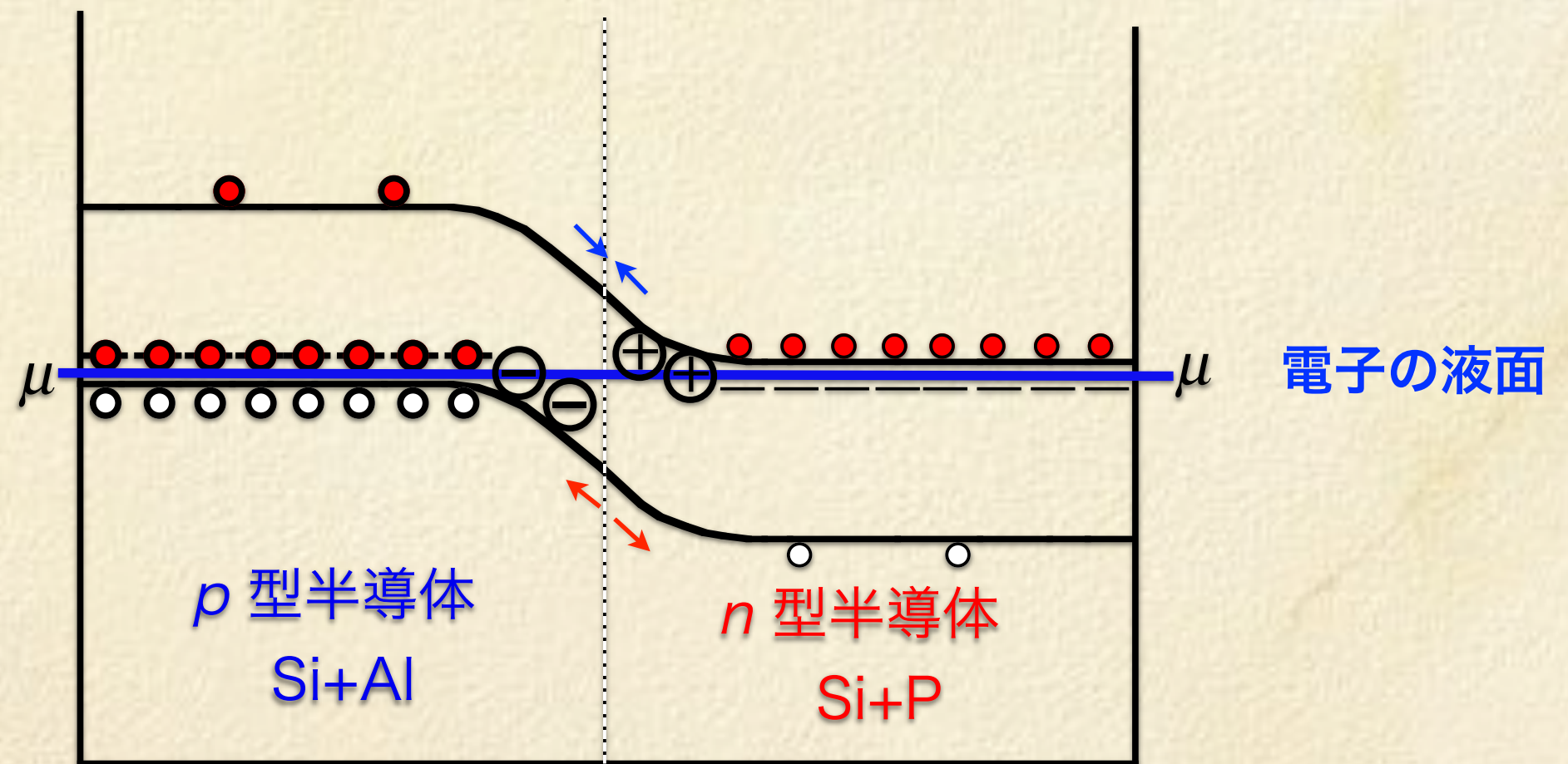
p - n 接合



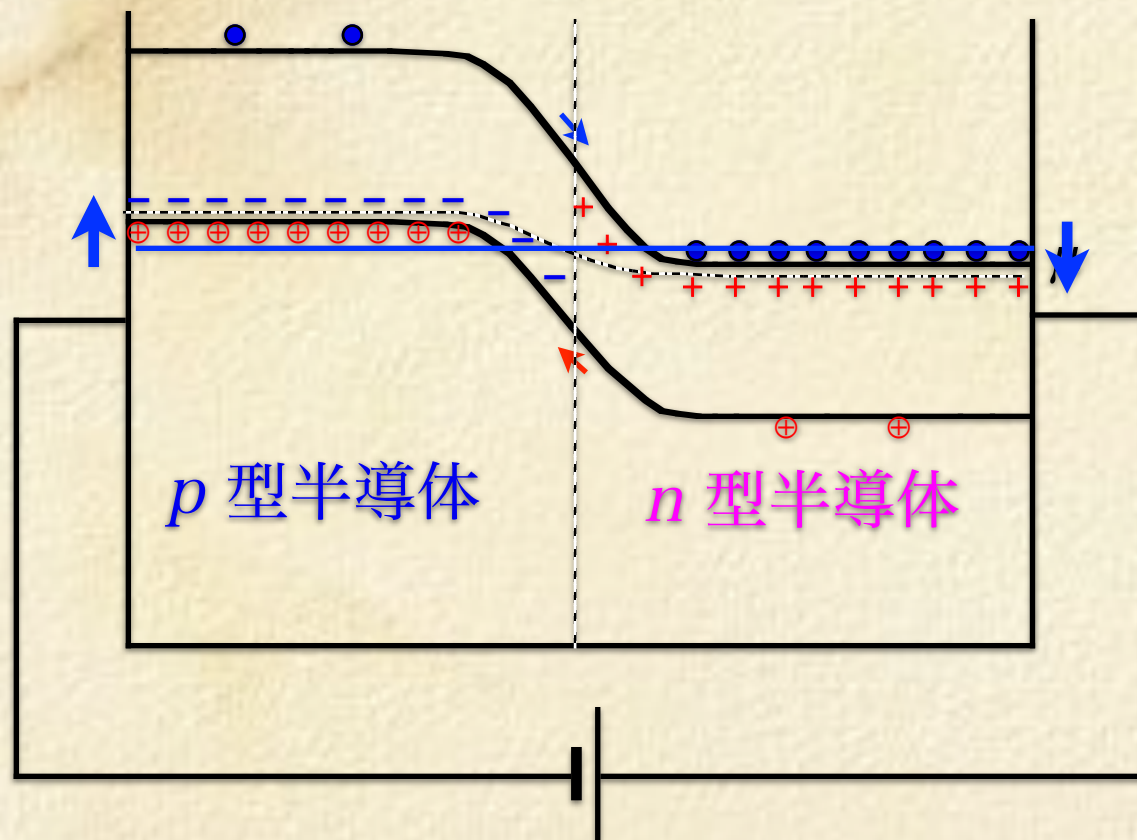
p - n 接合



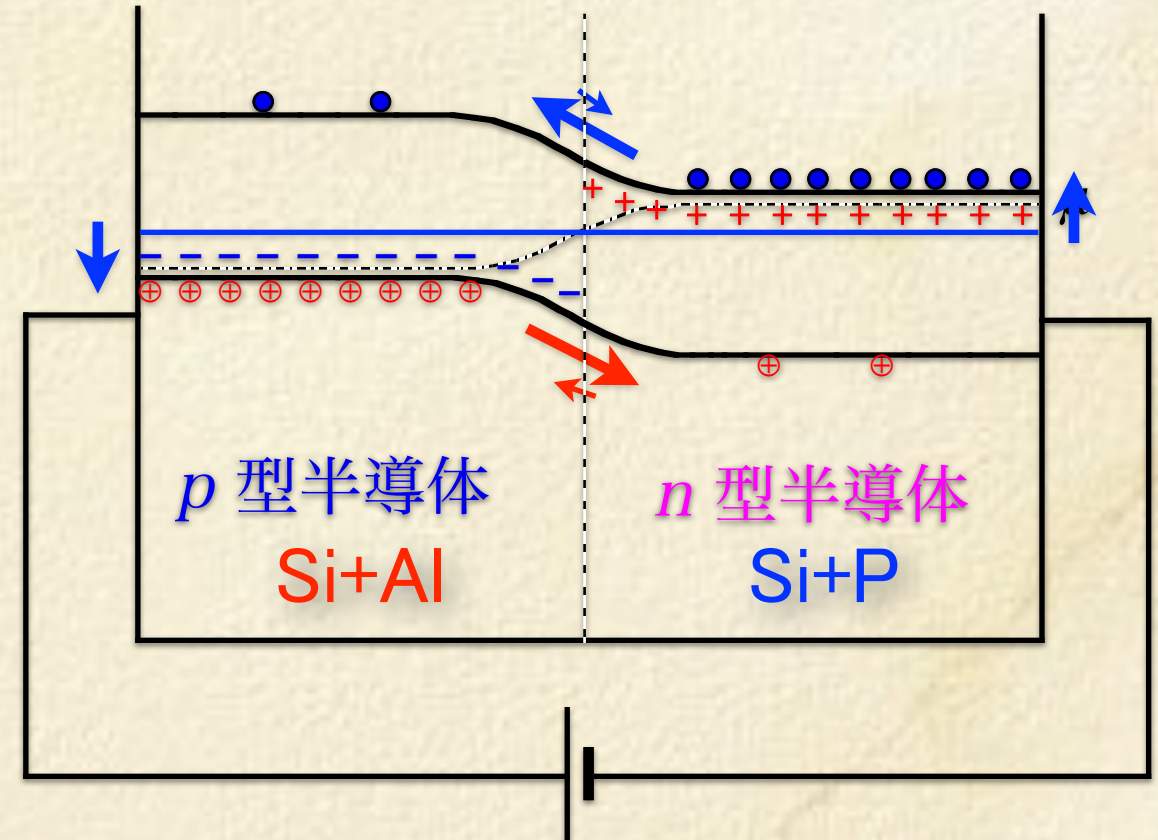
p - n 接合



p-n 接合ダイオードの動作



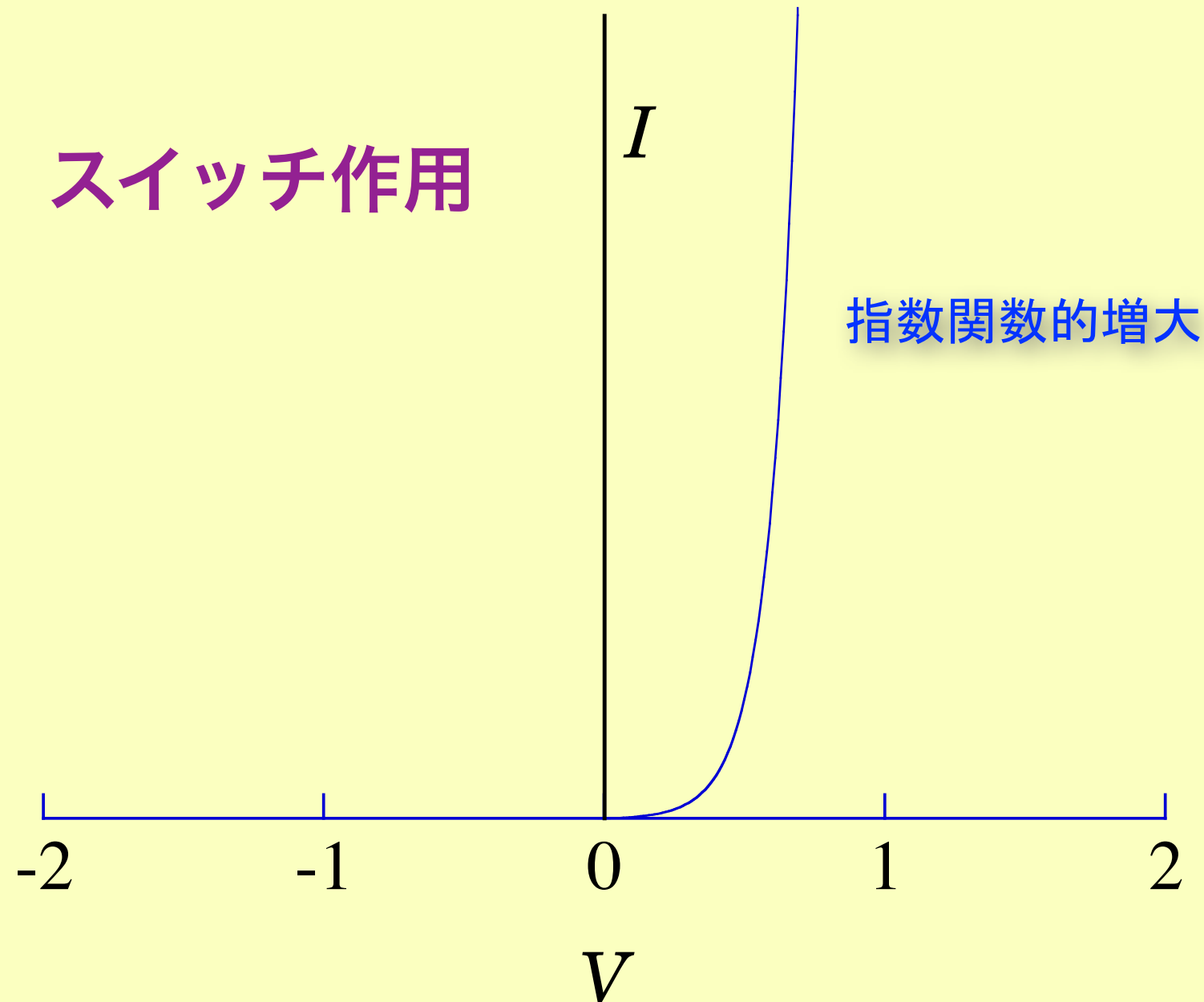
逆(−電圧)バイアス



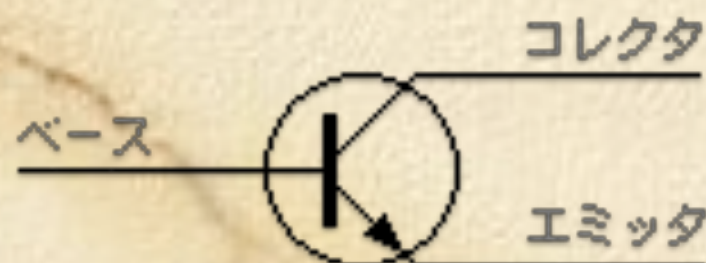
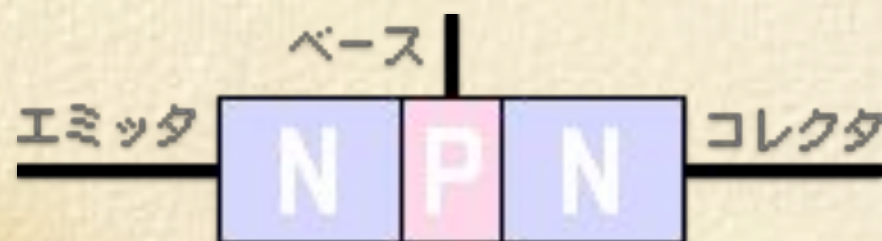
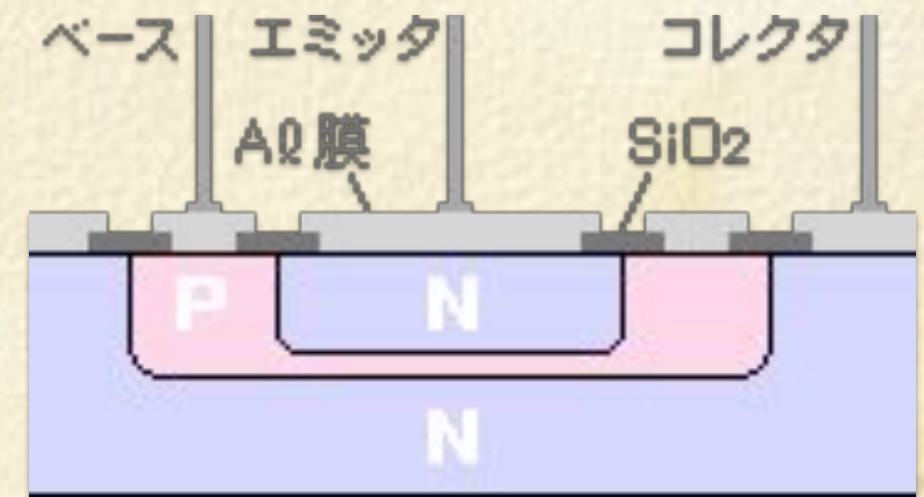
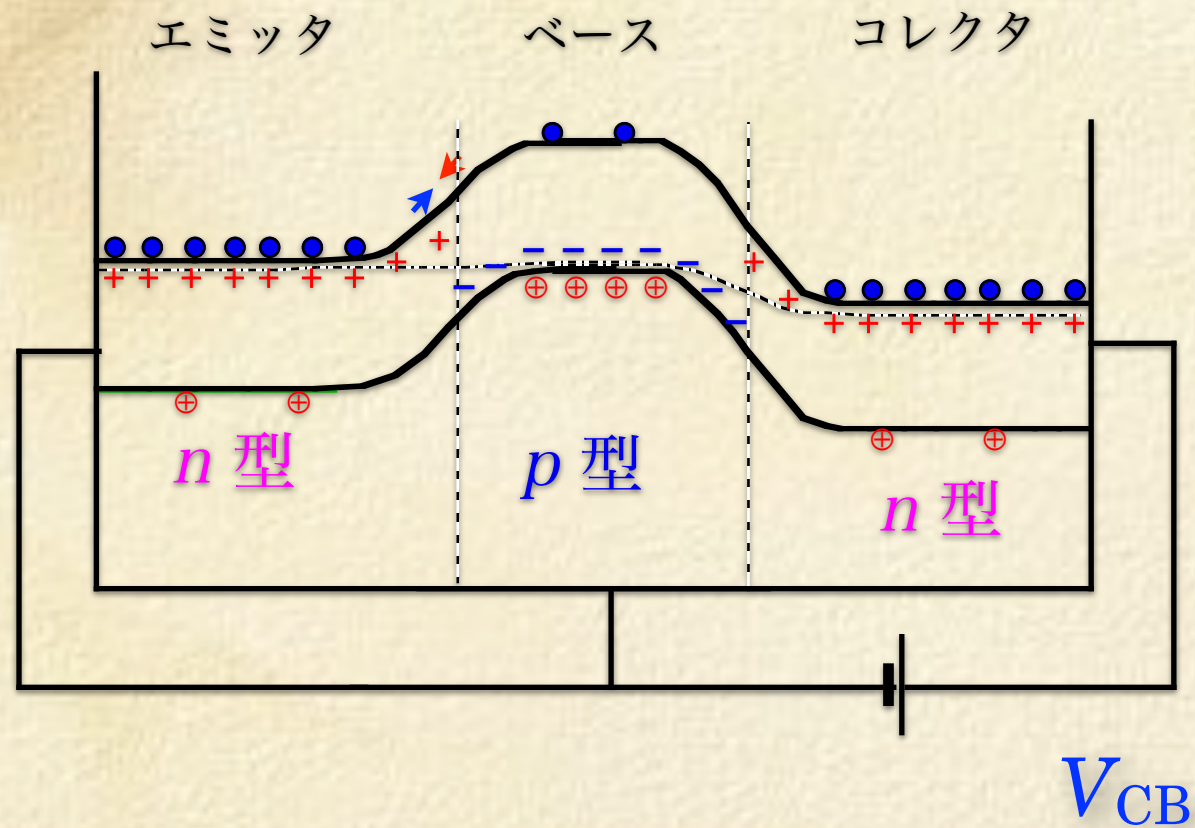
順(+電圧)バイアス

p - n 接合ダイオードの V - I 特性

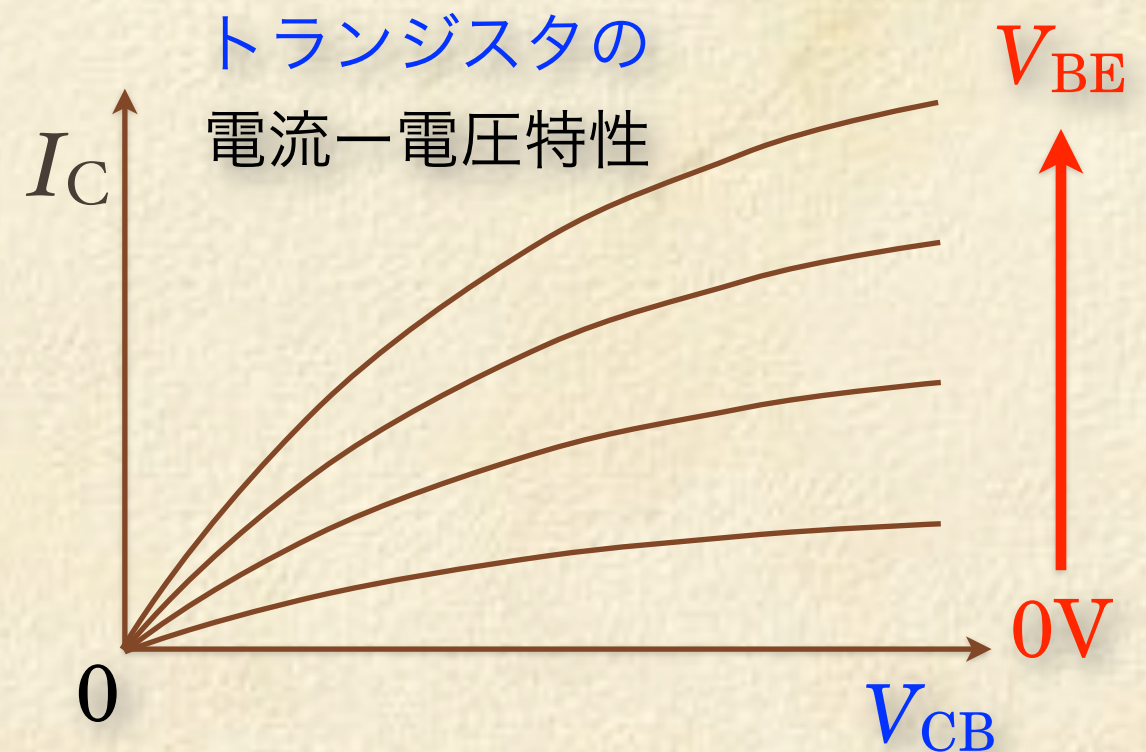
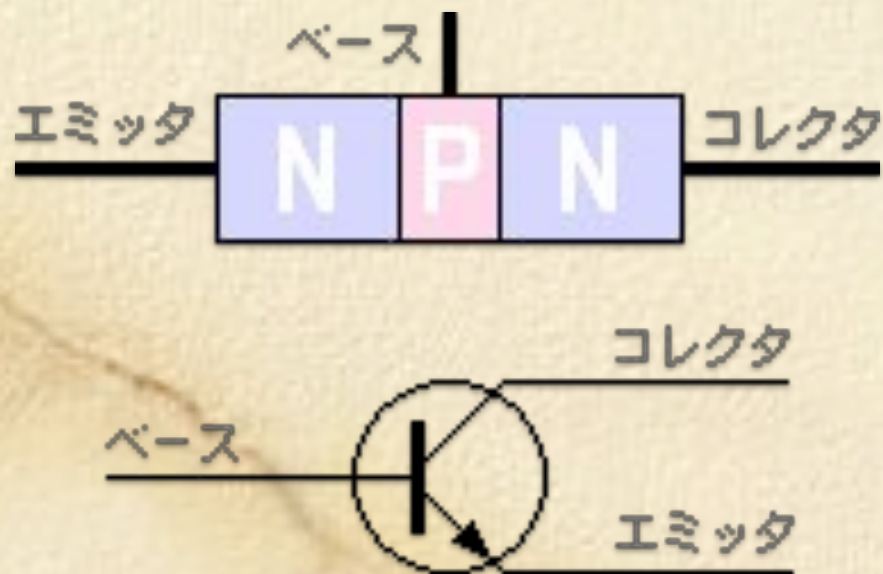
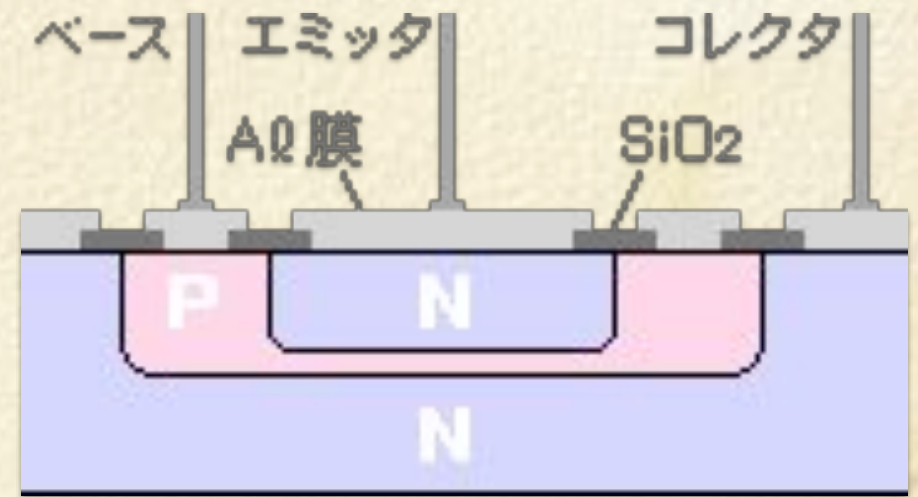
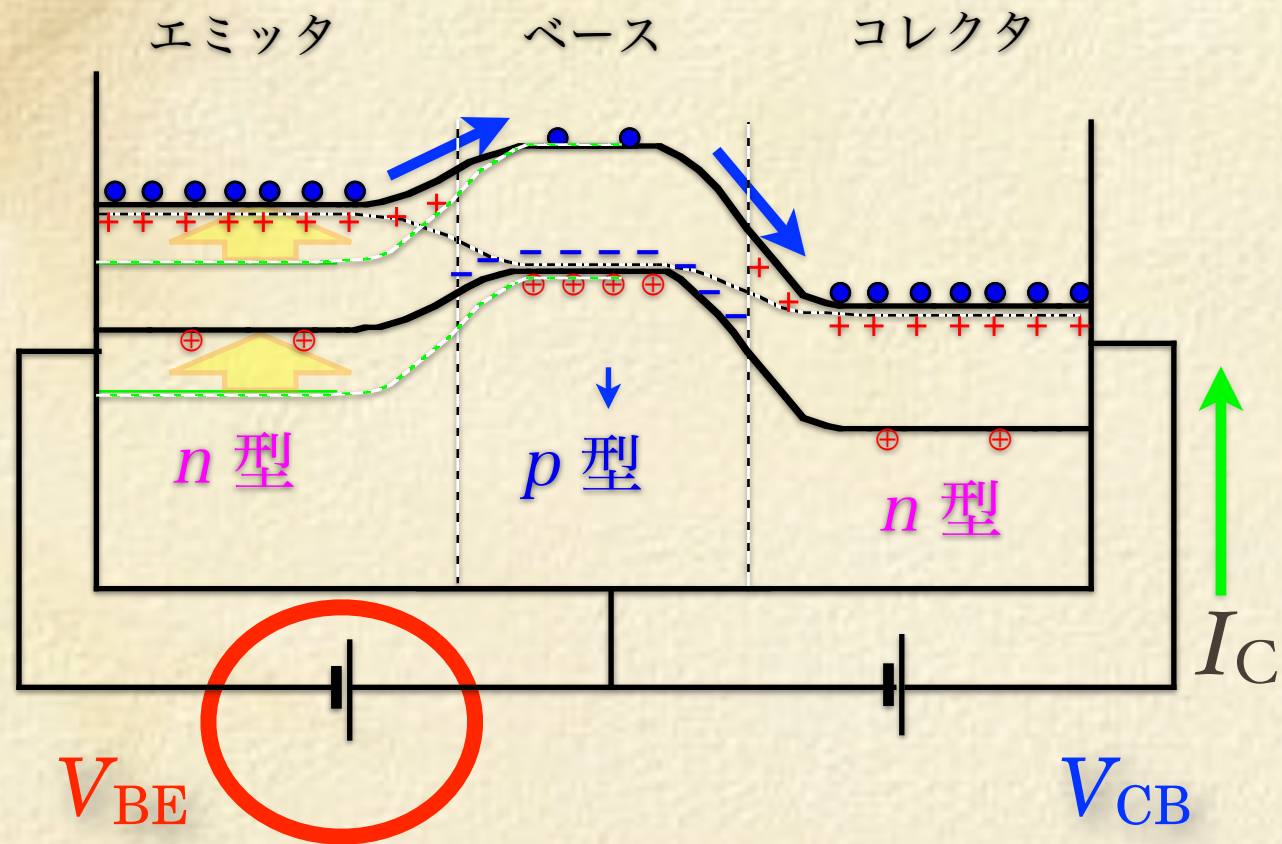
スイッチ作用



*n-p-n*トランジスタの動作



*n-p-n*トランジスタの動作



電子立国 日本自叙伝

トランジスタの開発

電子立国

日本の自叙伝

講義に関するコメント等

<http://spinman.phys.se.tmu.ac.jp/lecture/>

ミラーサイト：

<http://kem3.com/esrp/lecture/>

メールアドレス：

mizoguchi@phys.se.tmu.ac.jp

kem@kem3.com

「講義レポート」について

講義内容の感想文

皆さんのこれまでの人生で得て来た知識を総動員して、講義内容の自分なりの理解・考え方をまとめる

A4用紙 1頁 程度（表紙は不要）

提出：次回講義の終了時

講義に関するコメント等

<http://spinman.phys.se.tmu.ac.jp/lecture/>

ミラーサイト：

<http://kem3.com/esrp/lecture/>

メールアドレス：

mizoguchi@phys.se.tmu.ac.jp

kem@kem3.com