

# 現代物理学の考え方

## その2

### 波としての電子と半導体

南方久和・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

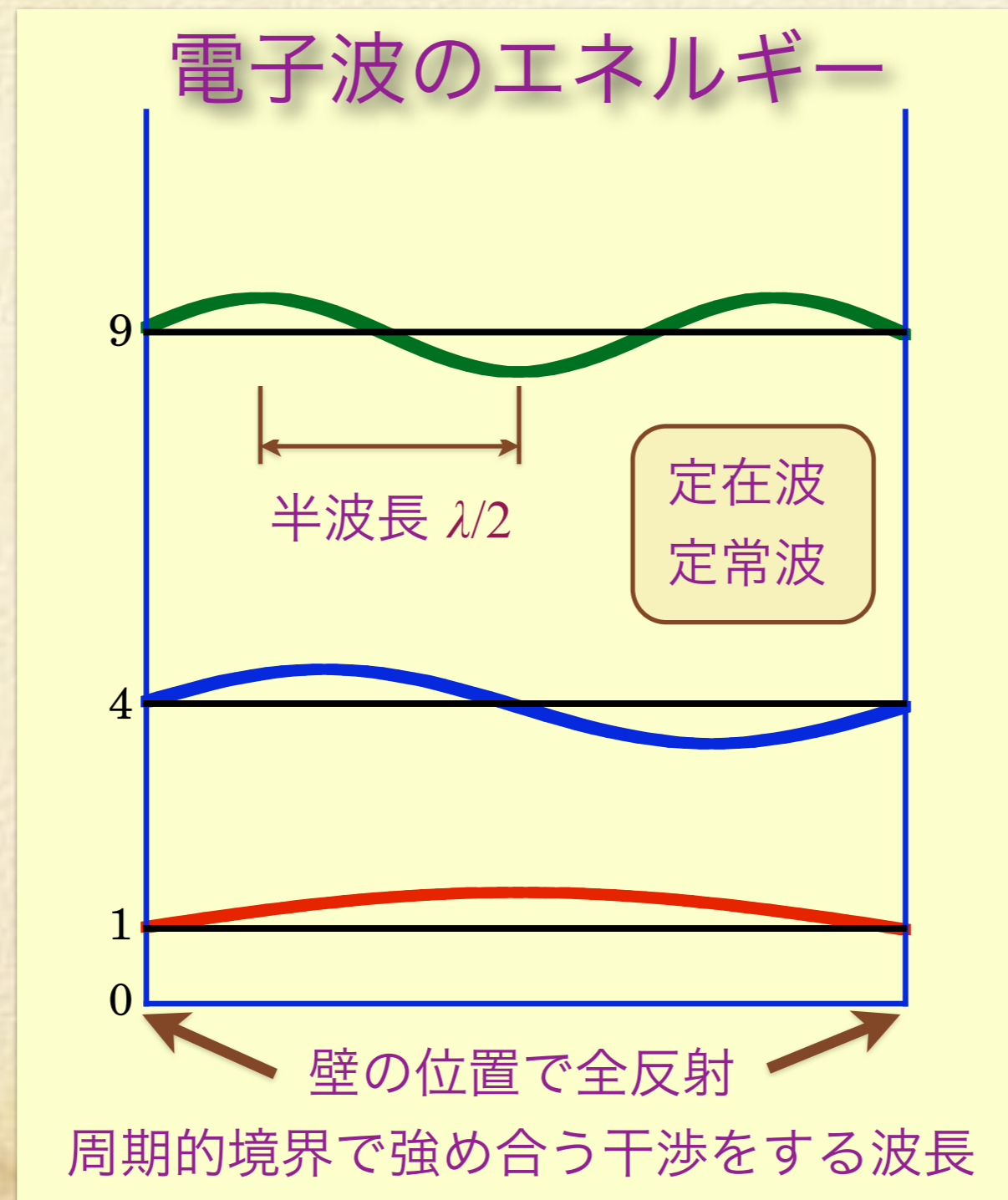


# 産業の米 半導体の中の電子

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



$$E = p^2 / 2m$$

$$p = h / \lambda$$

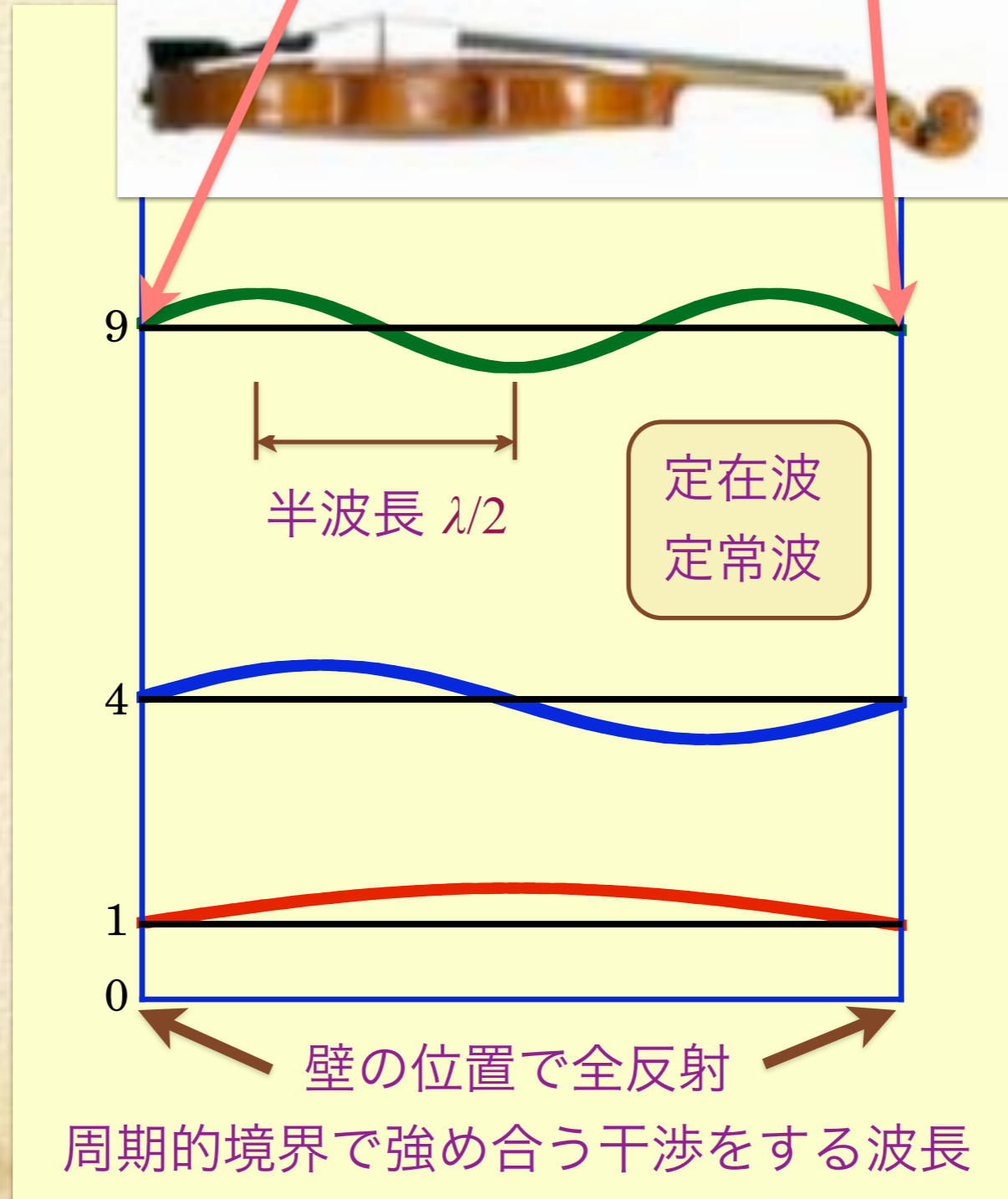
$$\Rightarrow E \propto 1 / \lambda^2$$



電子は、



である



$$E = p^2 / 2m$$
$$p = h / \lambda$$
$$\Rightarrow E \propto 1 / \lambda^2$$



電子は、

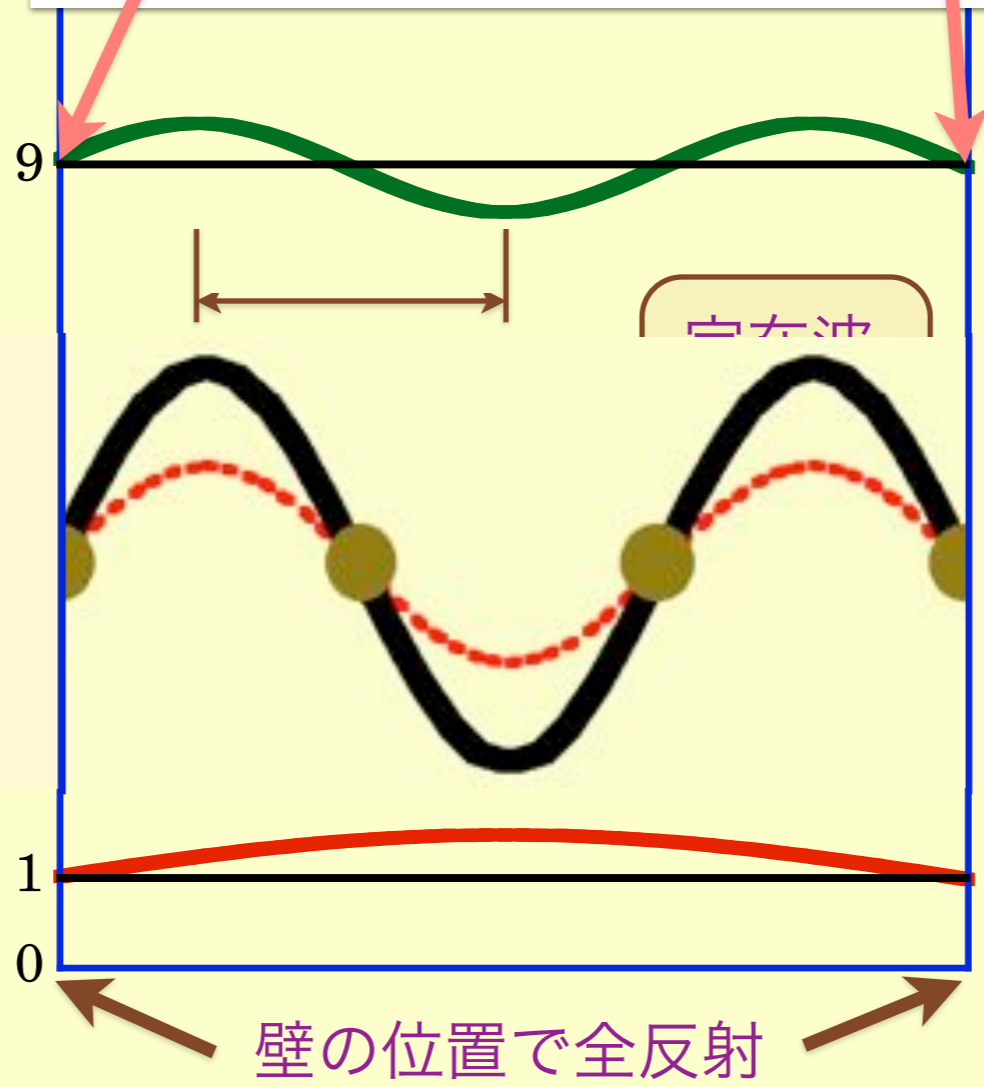


である

$$E = p^2 / 2m$$

$$p = h / \lambda$$

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



右左波

Pauliの排他律  
 1つの波数は1  
 つの電子のみ  
 フェルミ粒子

波長λはとびとびの  
 値しか取れない

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



## 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

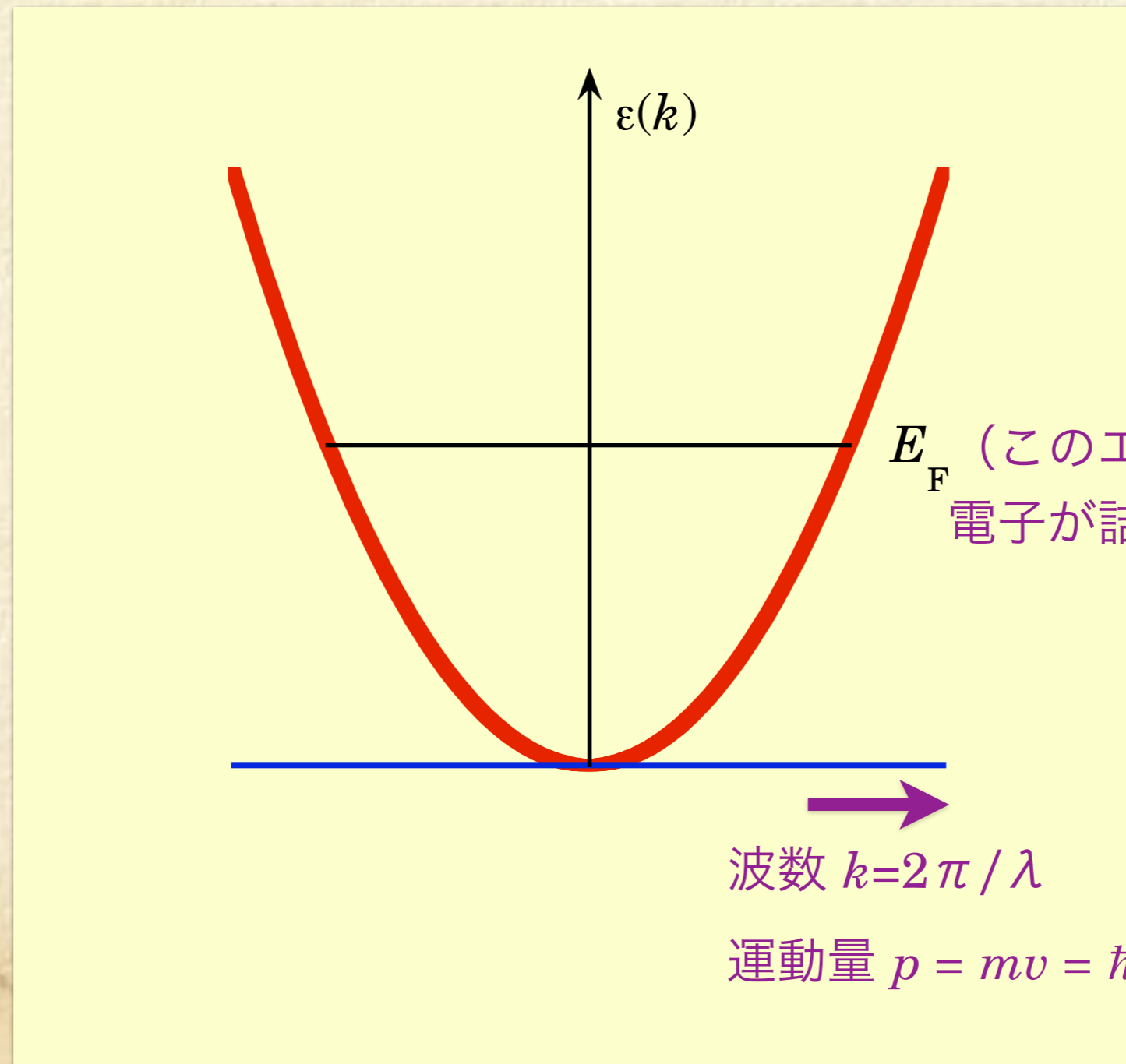
スピンの  $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$  (半整数) の粒  
子

スピンの  $0, 1, 2, 3, \dots$  (整数) の粒子

電子、陽子、中性子  
 $^3\text{He}$ 原子など

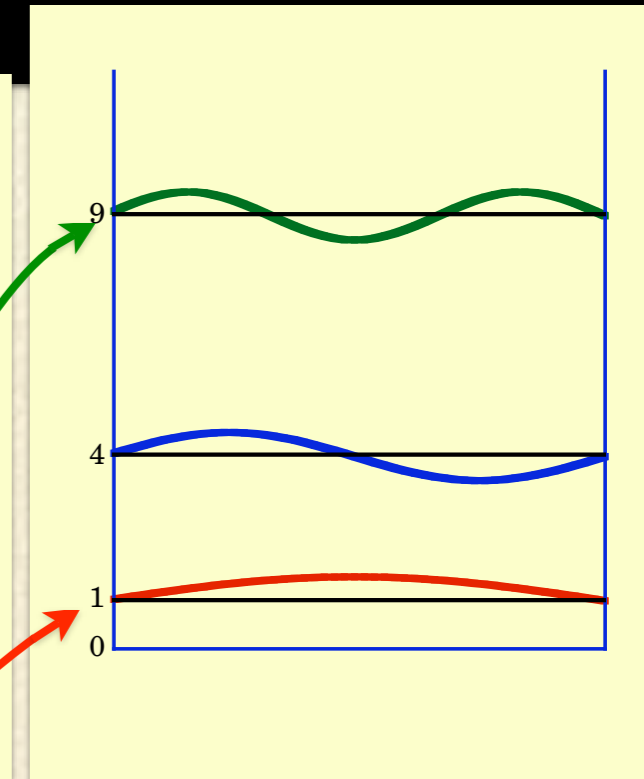
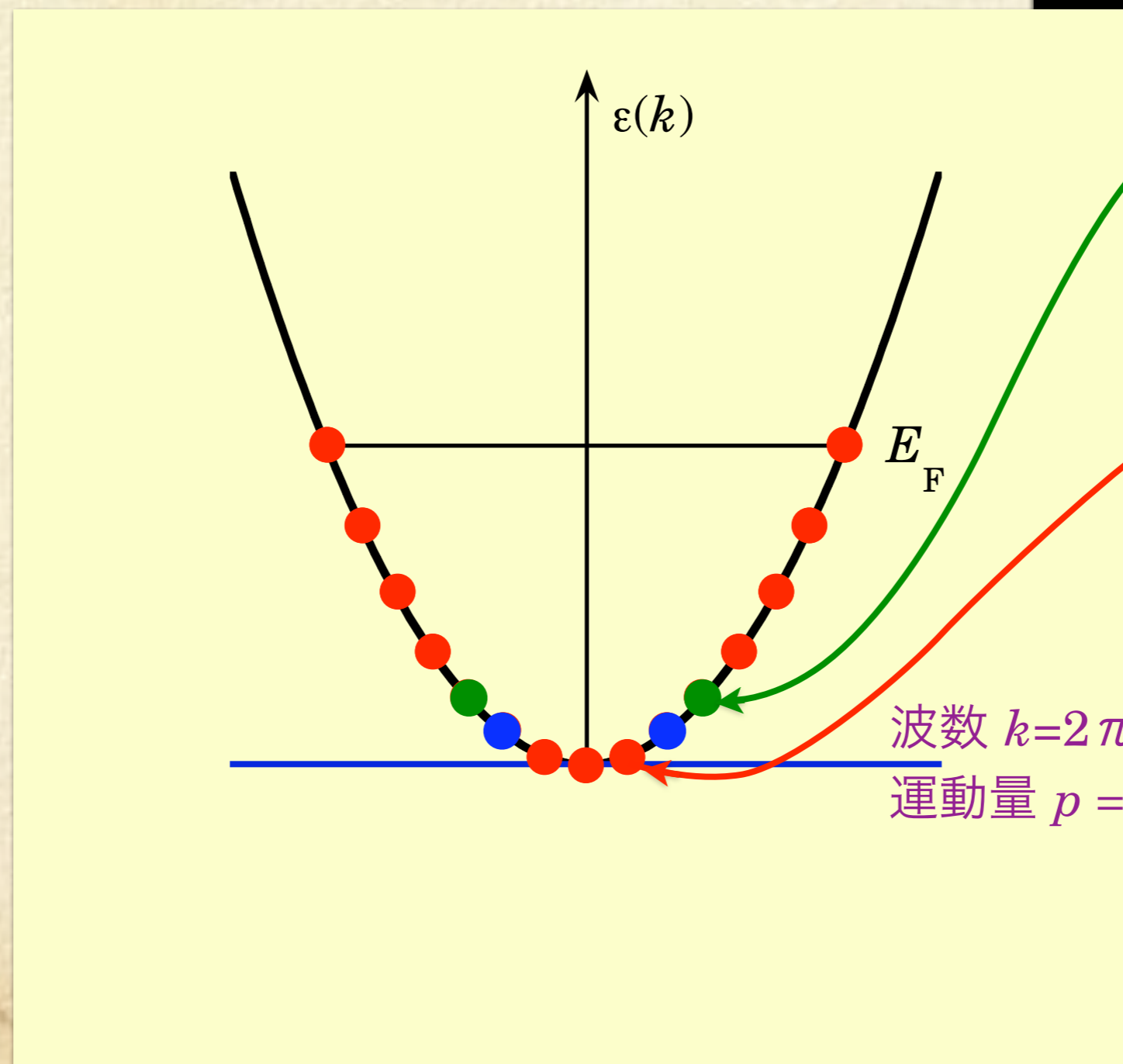
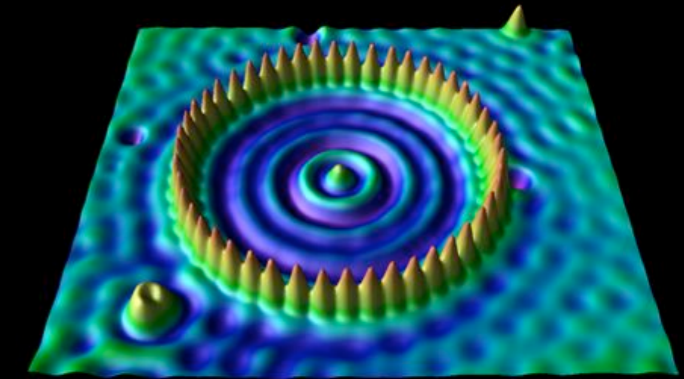
光子、重陽子、 $^4\text{He}$ 原子  
フォノンなど

# 電子は、確率振幅の波である





# 自由電子金属

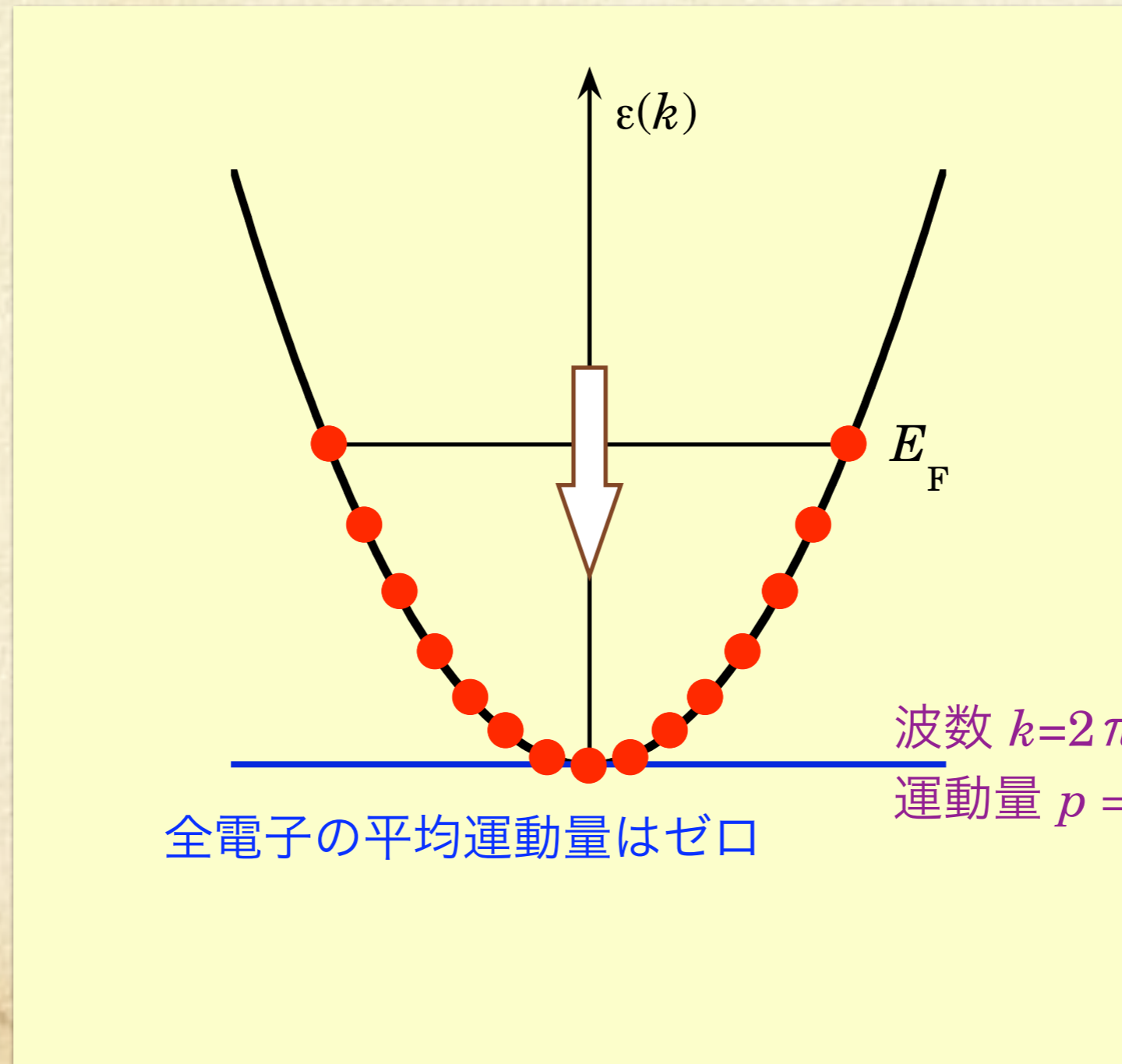


$$E = p^2/2m$$

波数  $k = 2\pi / \lambda$

運動量  $p = mv = \hbar k$

# 自由電子金属



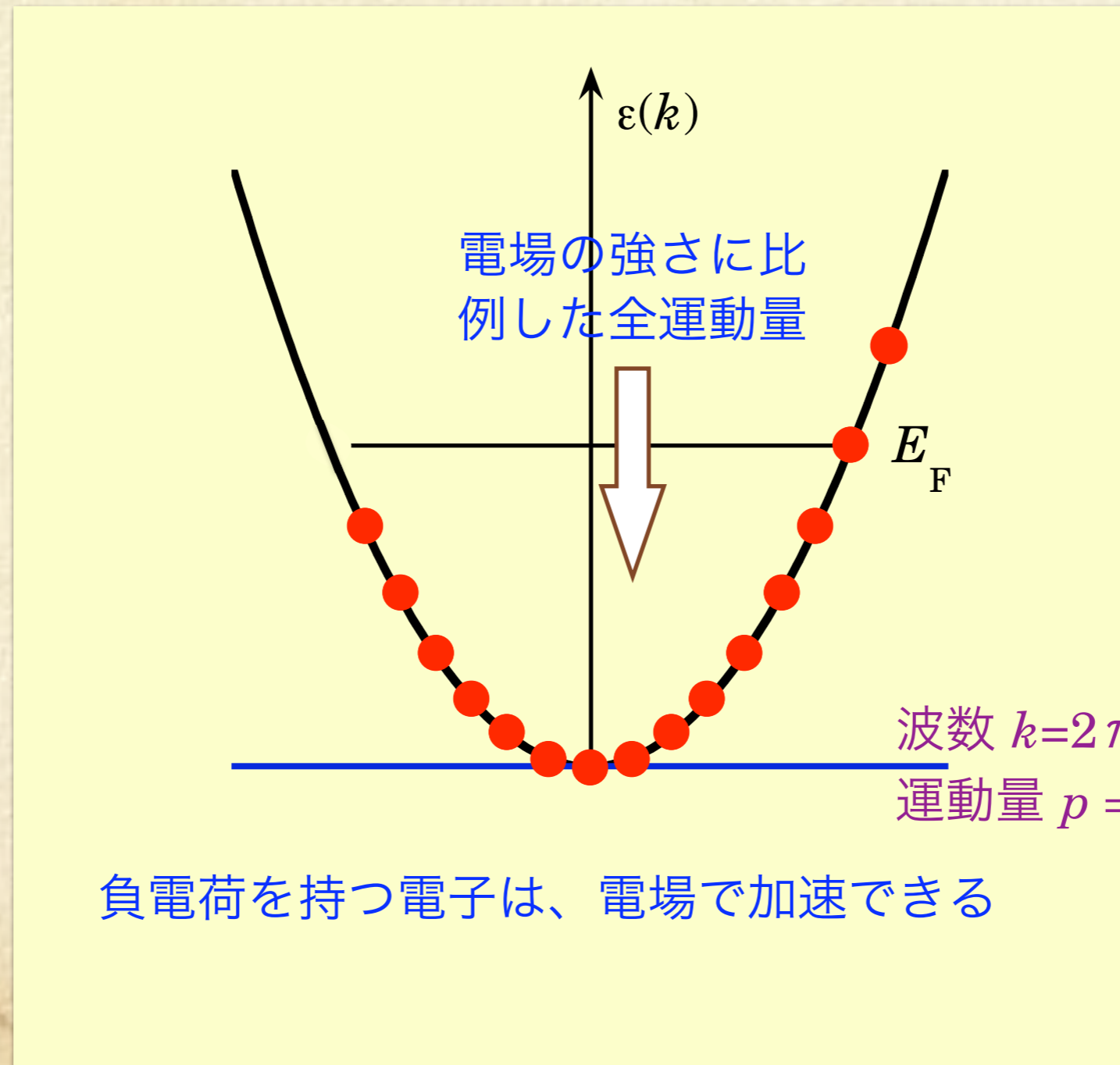
$$E = p^2 / 2m$$

波数  $k = 2\pi / \lambda$

運動量  $p = mv = \hbar k$

全電子の平均運動量はゼロ

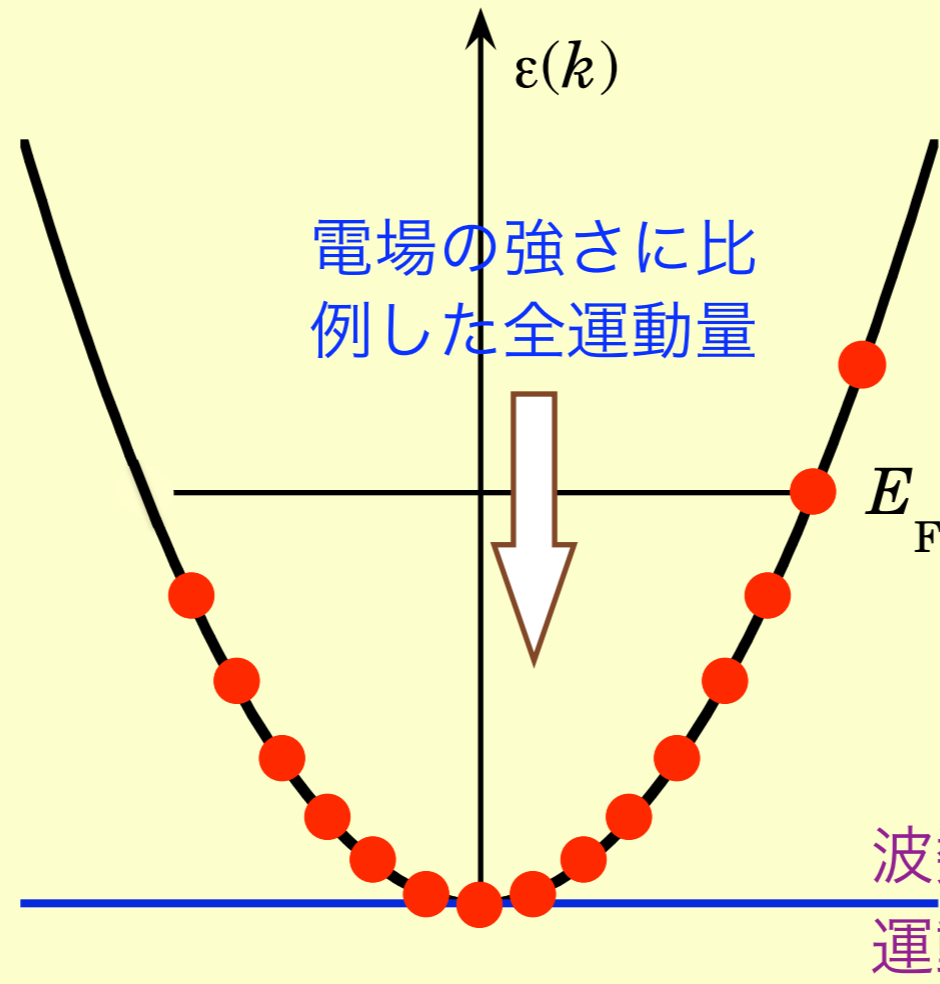
# 自由電子金属



# 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



$$E = p^2 / 2m$$

どんな物質でも、金属！

しかし、  
電子は、確率振幅の波である

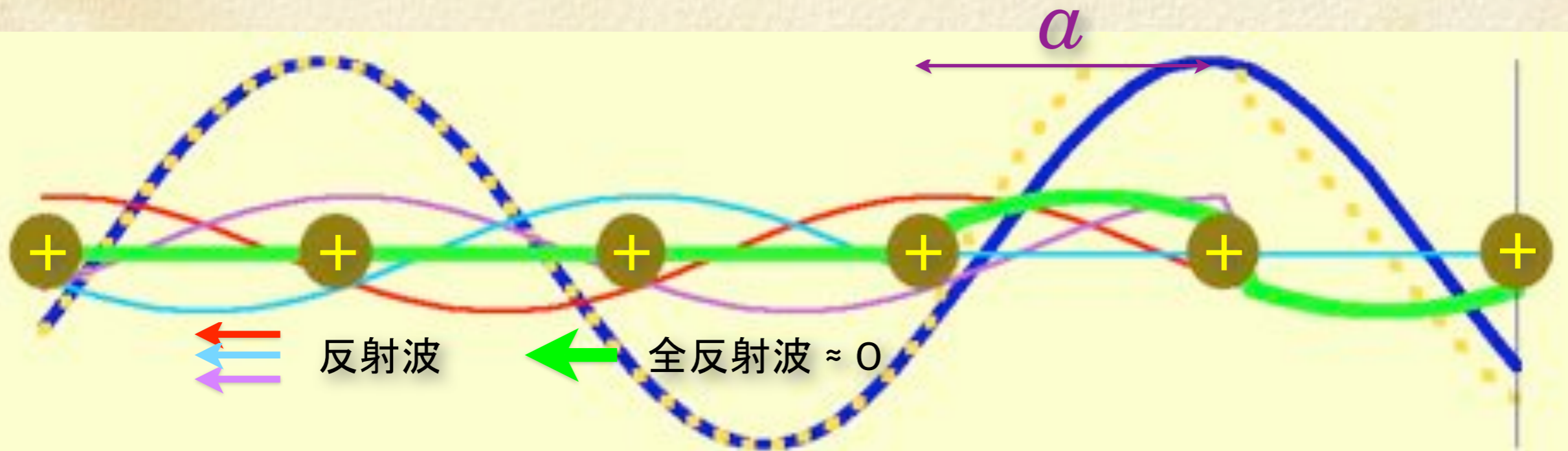
波は反射(散乱)する！

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

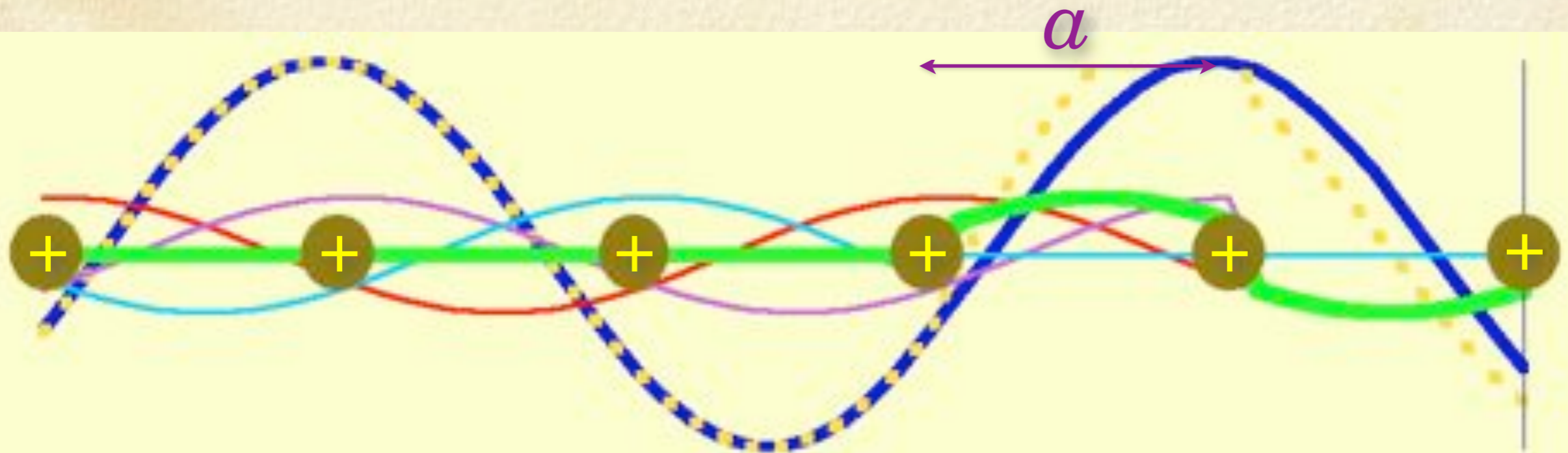
波長： $\lambda=3a$ の場合



入射波 入射波 + 全反射波 

# 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

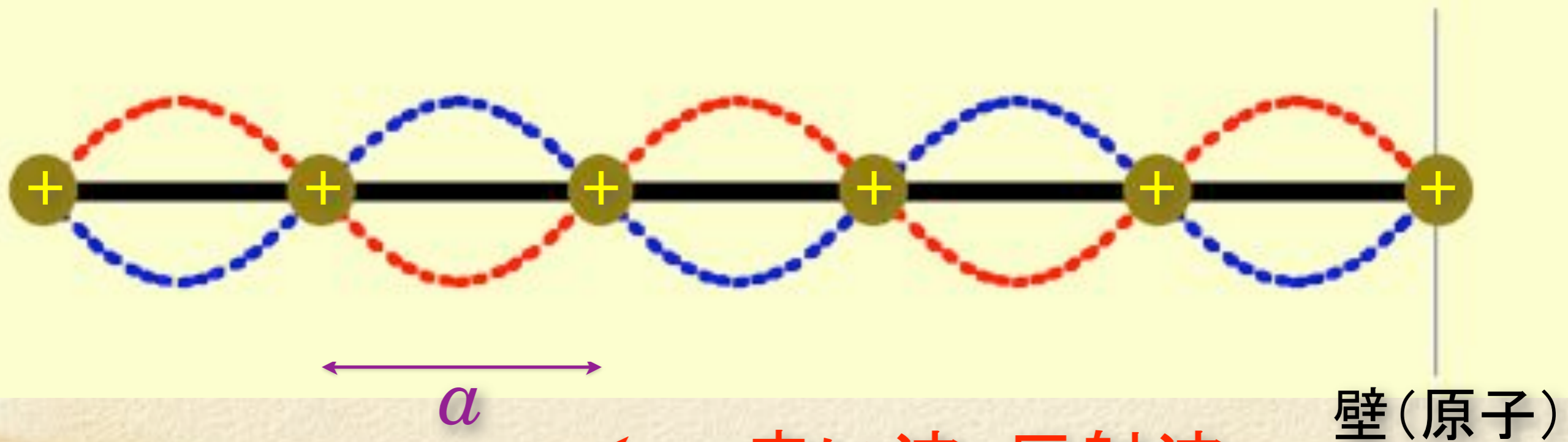
波長： $\lambda=3a$ の場合で見たように  
イオンが周期的に並んでいれば  
全く影響はない

波長： $\lambda=2a$  の例外  
を除けば・・・



# 同位相で反射される場合

波長： $\lambda=2a$       青い波：入射波 →

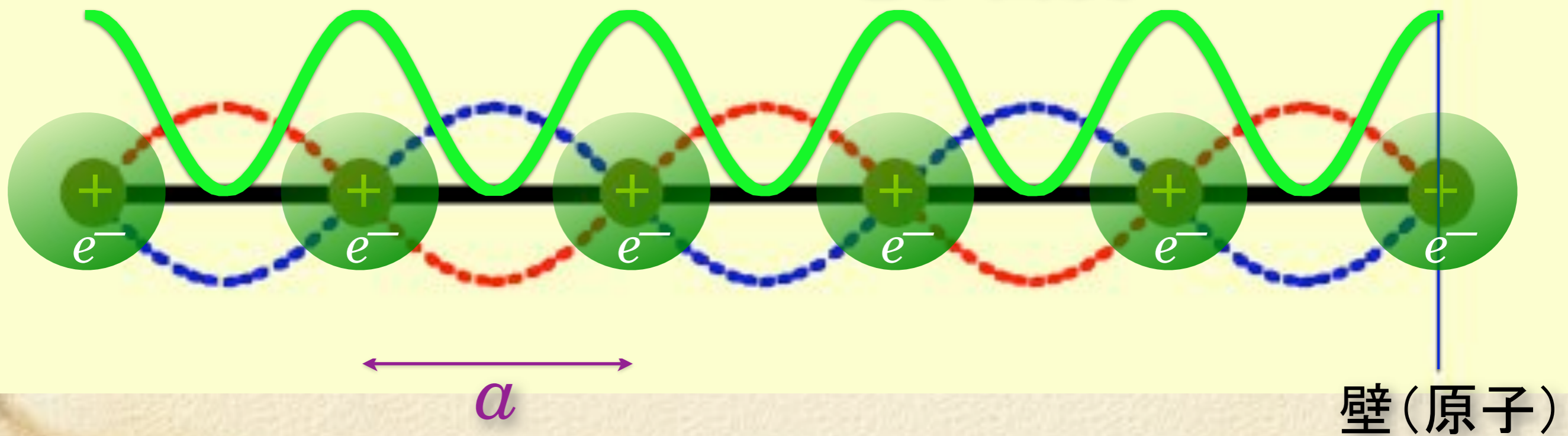


← 赤い波：反射波

# 同位相で反射される場合

波長： $\lambda=2a$

電子密度



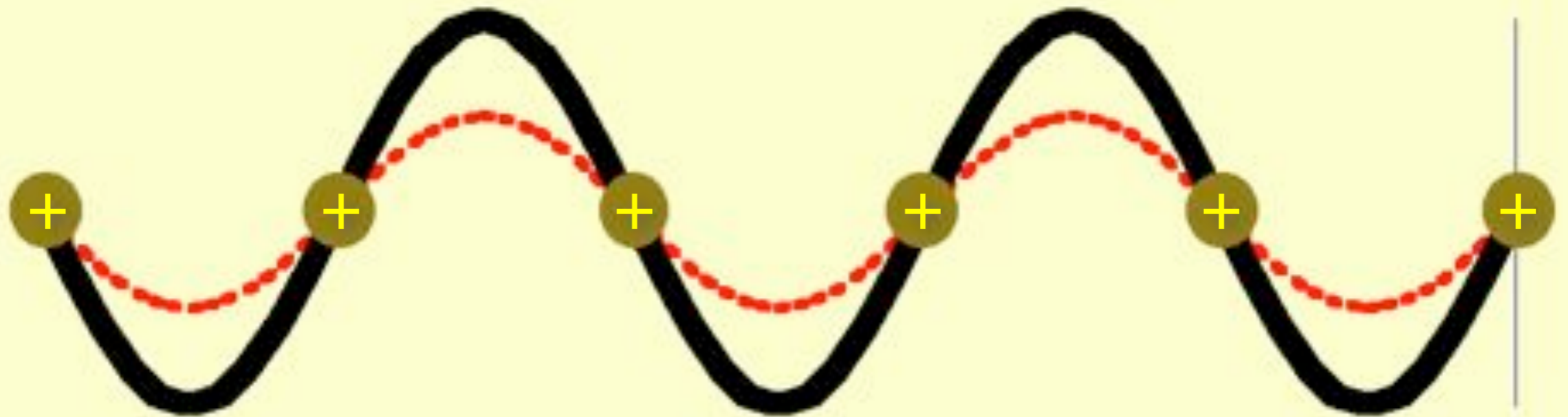
電子の最大密度は、**正イオンの真上**に来る！！

● **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： $\lambda=2a$

青い波：入射波 →

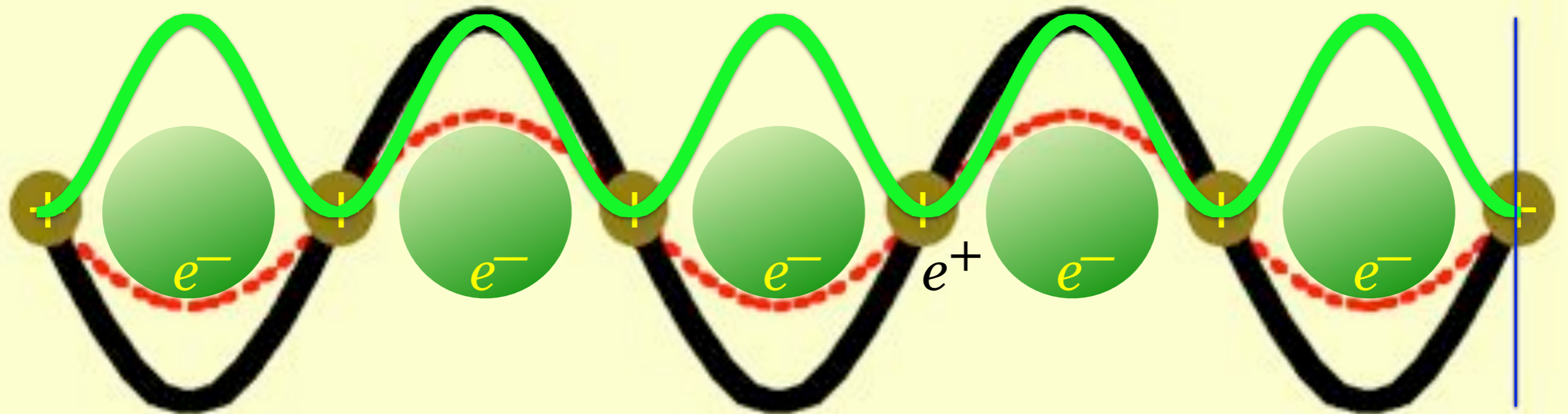


← 赤い波：反射波

壁(原子)

# 逆位相で反射される場合

波長： $\lambda=2a$



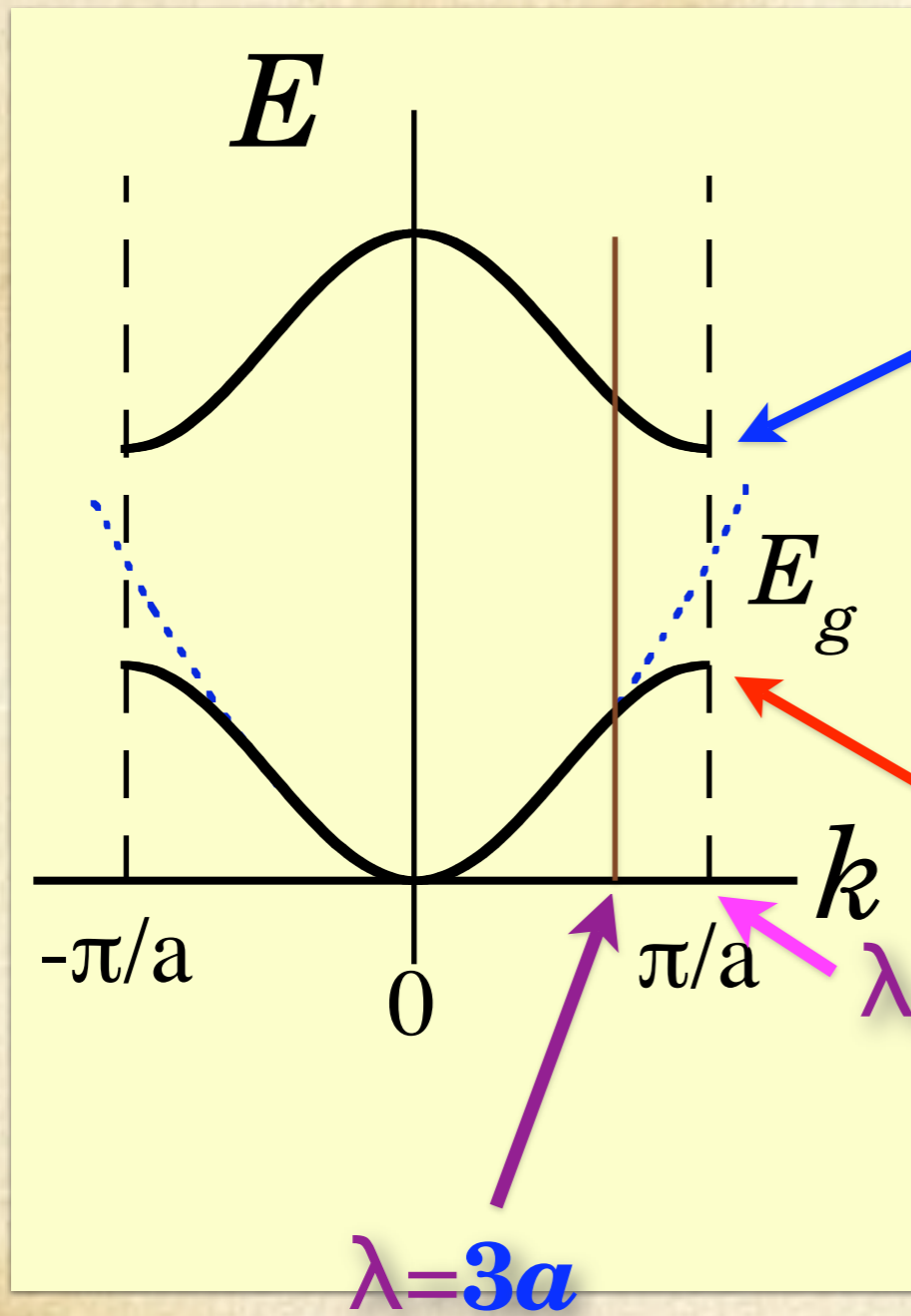
壁(原子)

電子の最大密度は、**正イオン間**に来る！！

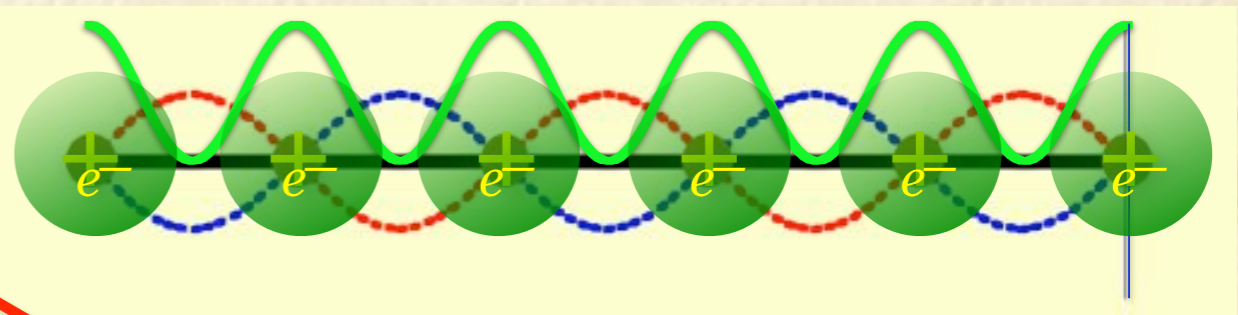
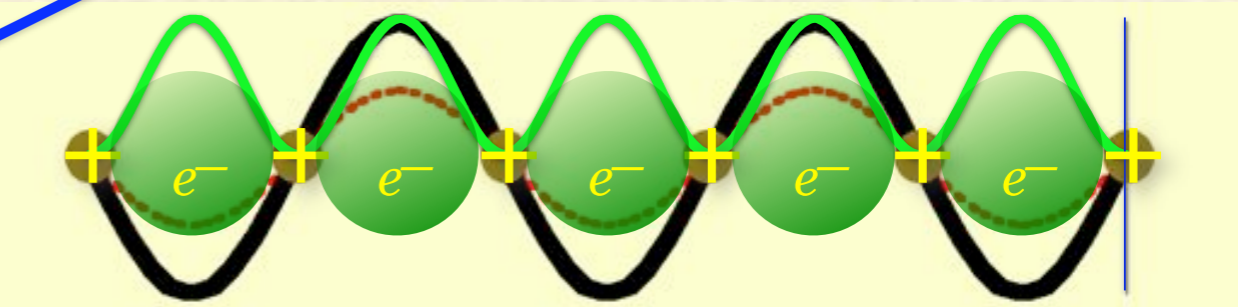
● クーロンエネルギーを損する  $\propto -\frac{e^2}{r^2}$



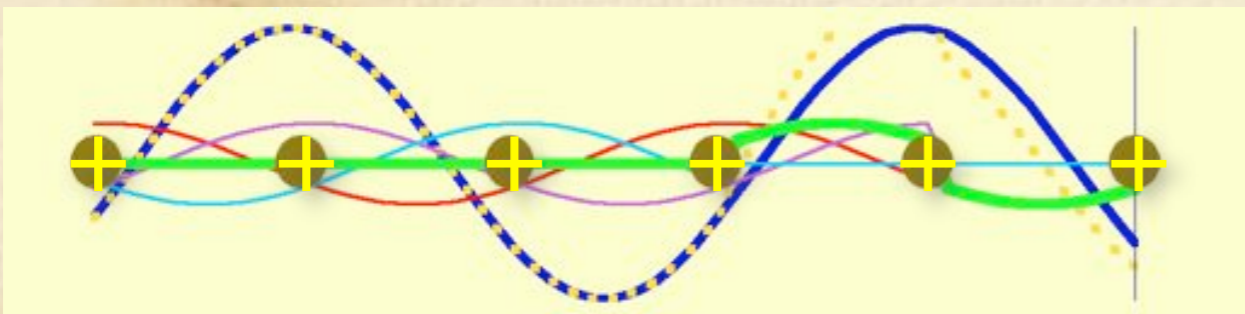
# エネルギーバンドとギャップ $E_g$



イオン間に電子

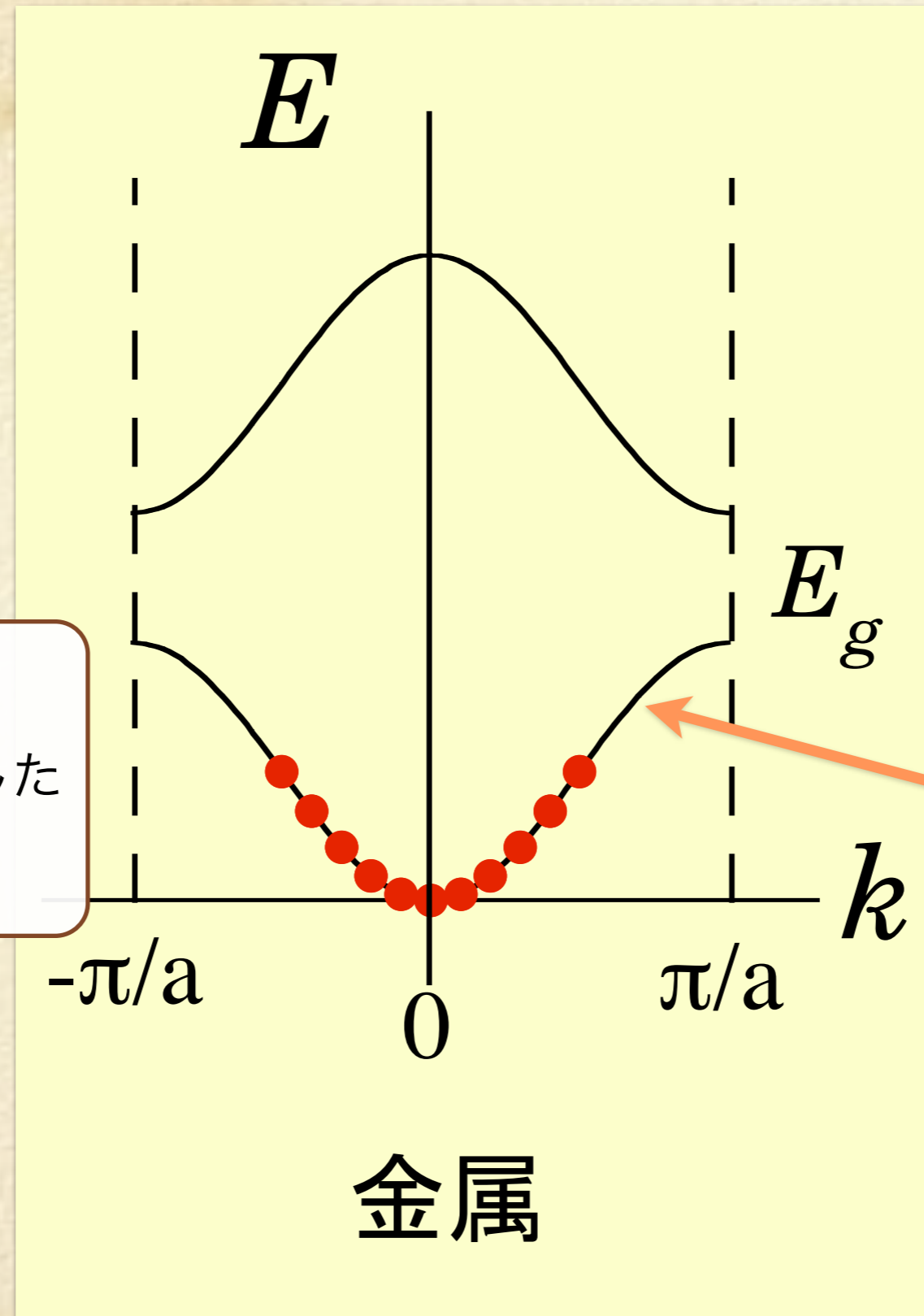


イオン上に電子

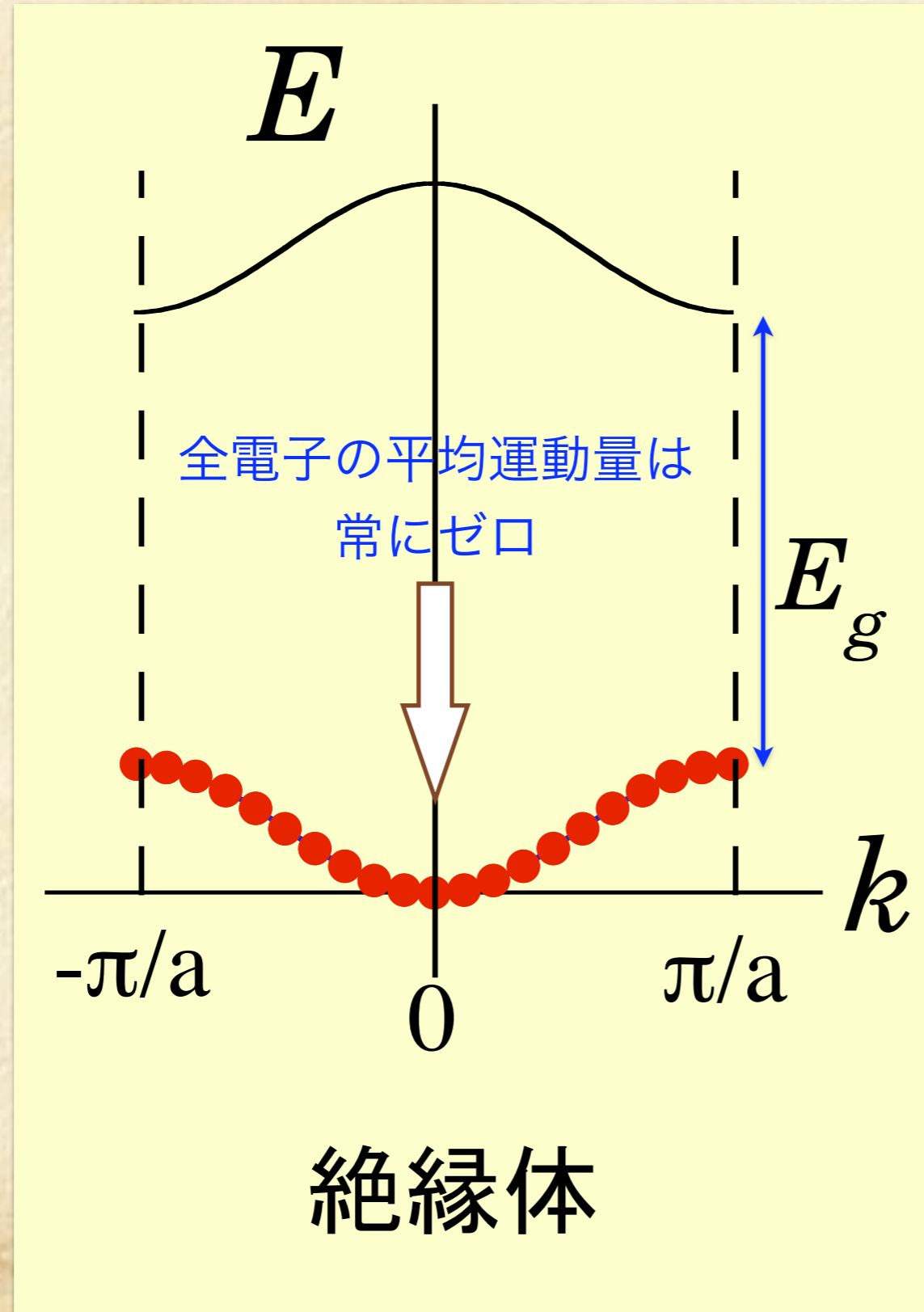


**金属：オームの法則**

加えた電場  $E$  に比例した  
電流  $I$  が流れる

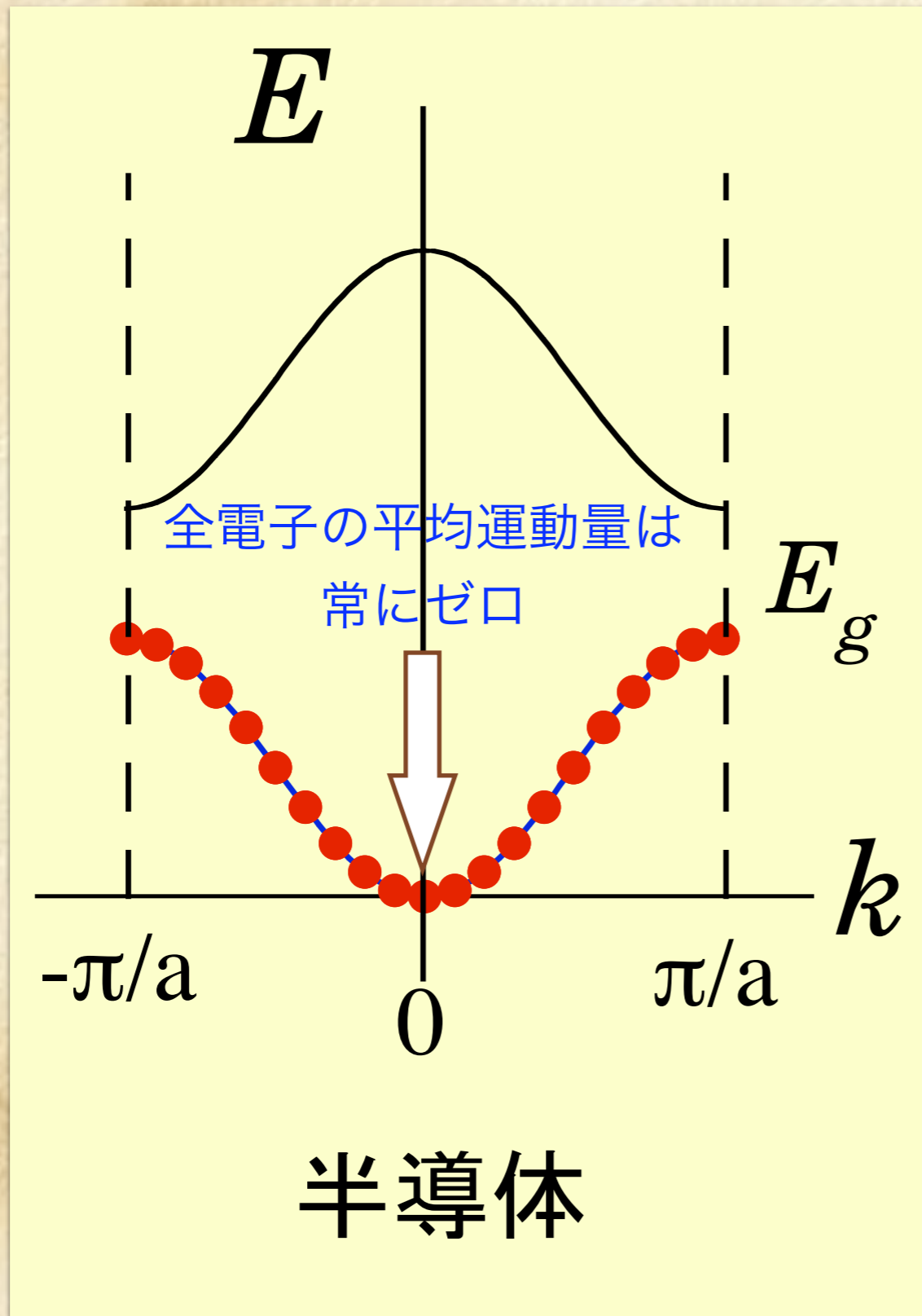


隙間が空いている



熱励起では飛び越せない！！

# 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 ≈ 1万1千度

室温：300度

≈ 0.025 eV

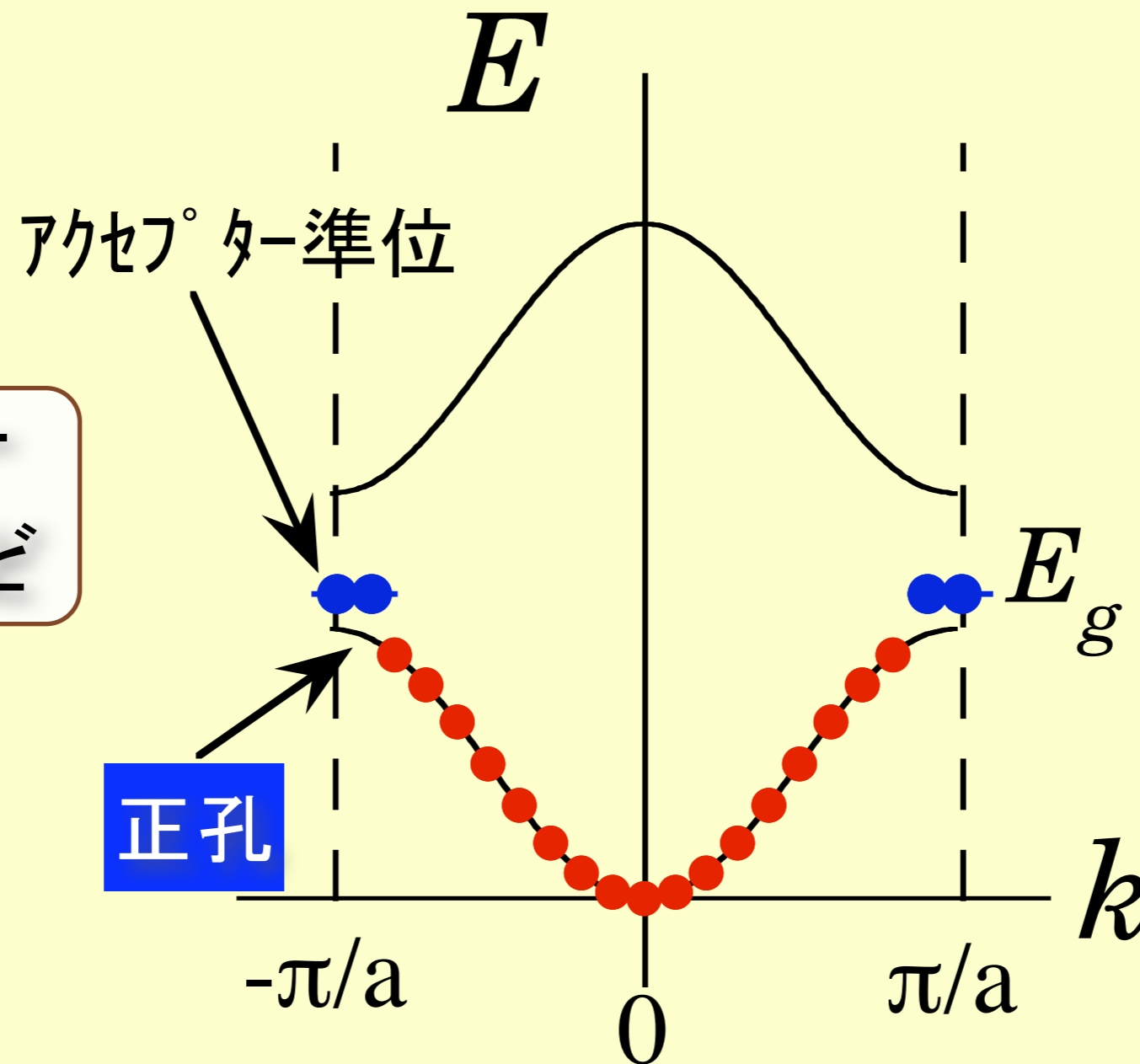




TMU

## 不純物ドーピング：不純物(p型)半導体

アクセプター  
B, Al, Ga, など



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 $\text{ms}^{-1}$	(exact)
Planck constant	$h$	$6.6261 \times 10^{-34}$ J s	( $\hbar = h/2\pi$ )
elementary charge	$e$	$1.6022 \times 10^{-19}$ C	
electron mass	$m_e$	$9.1094 \times 10^{-31}$ kg	
	$m_e c^2$	0.5110 MeV	
proton mass	$m_p$	$1.6726 \times 10^{-27}$ kg	
fine-structure constant	$\alpha$	1/137.036	
Rydberg constant	$R_\infty$	$10\,973\,732 \text{ m}^{-1}$	
	$R_\infty c$	$3.289\,842 \times 10^{15}$ Hz	
	$R_\infty hc$	13.6057 eV	
Boltzmann constant	$k_B$	$1.3807 \times 10^{-23}$ JK <sup>-1</sup>	

- Solids
- Liquids
- Gases
- Artificially Prepared

Period	Group 1 IA		Groups 2-10										Group 11 IB	Group 12 IIB	Group 13 IIIA	Group 14 IVA	Group 15 VA	Group 16 VIA	Group 17 VIIA	Group 18 VIIIA	
	1	1																			
2	2																				
3	3																				
4	4																				
5	5																				
6	6																				
7	7																				

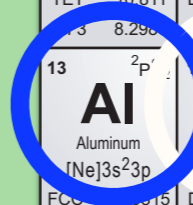


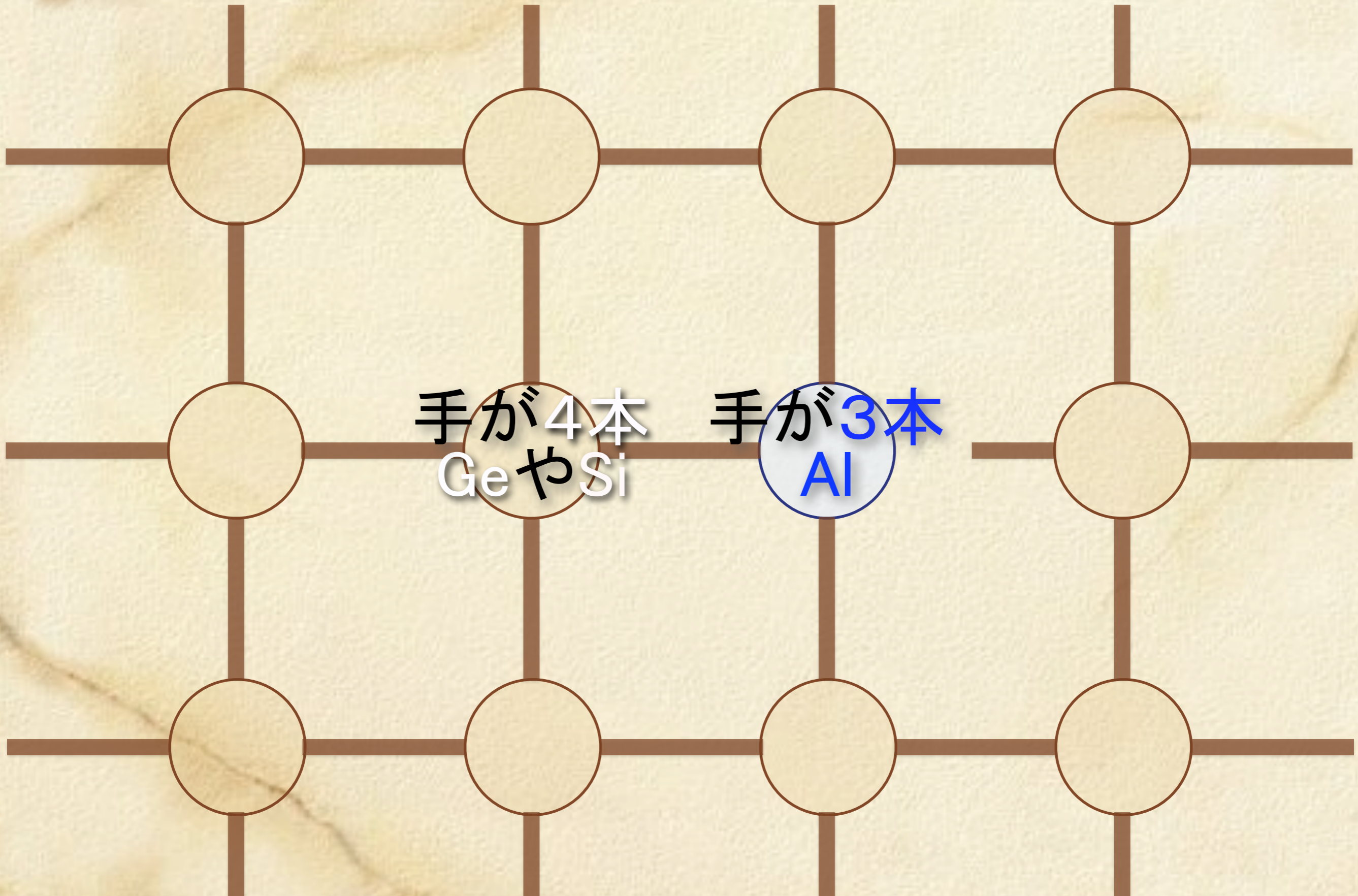
Diagram illustrating the structure of an element cell (Lawrencium, Lr) with labels for various properties:

- Atomic Number: 103
- Symbol: Lr
- Name: Lawrencium
- Ground-state Configuration:  $[\text{Rn}]5f^{14}7s^2 7p^?$
- Crystal Type (Common Crystal Phase): MCL (262)
- Lattice Constant (Å): 3.21 4.9 ?
- Ionization Energy (eV): 4.9 ?
- Ground-state Level:  $2P_{1/2}^?$
- Atomic Weight: (262)

Period	Lanthanides														Actinides													
	7	57-71														89-103												
8	72-86														88-102													
9	87-101														104-118													



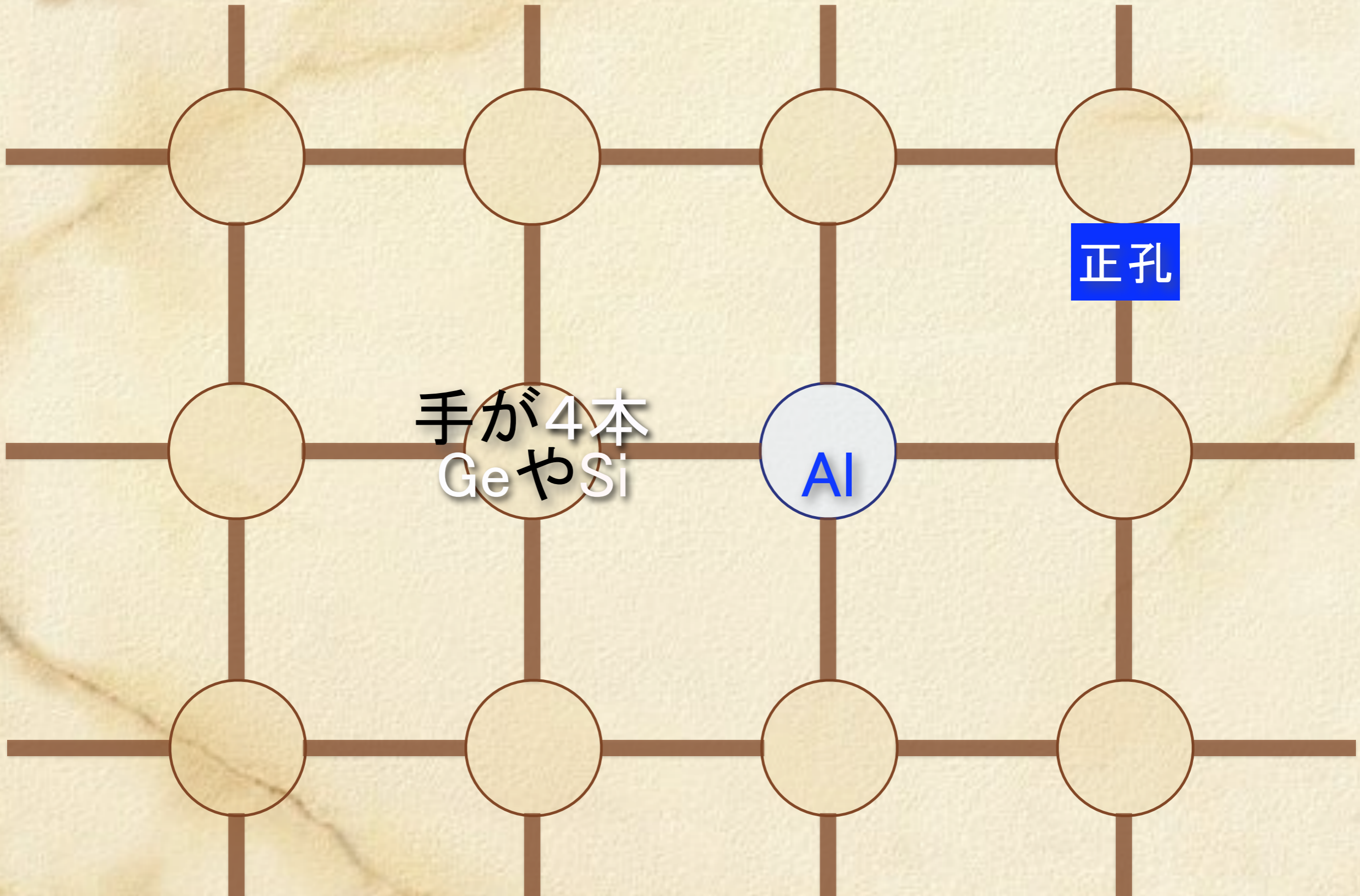
# p型半導体



手が4本  
GeやSi

手が3本  
AI

# p型半導体

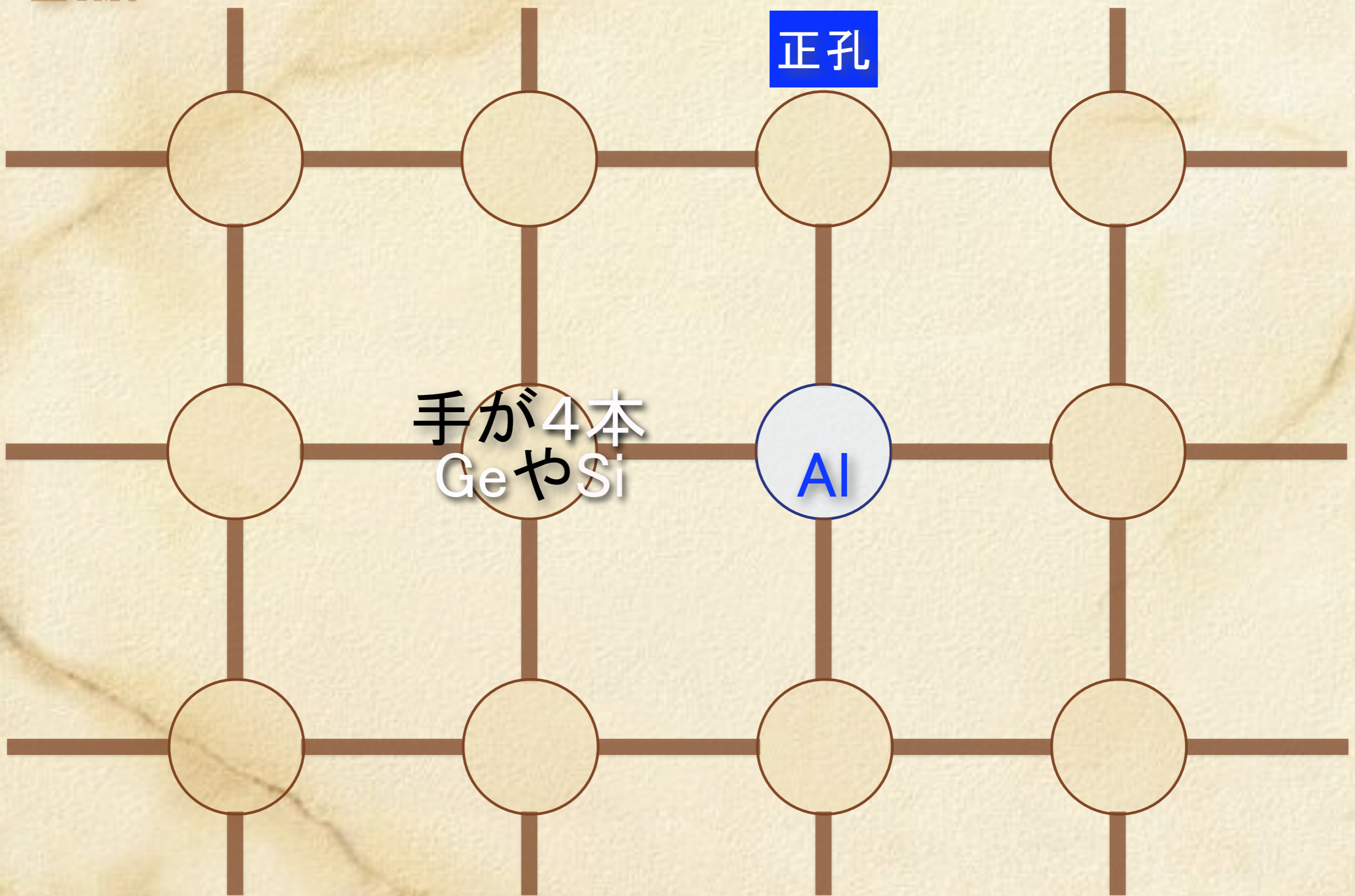


# p型半導体

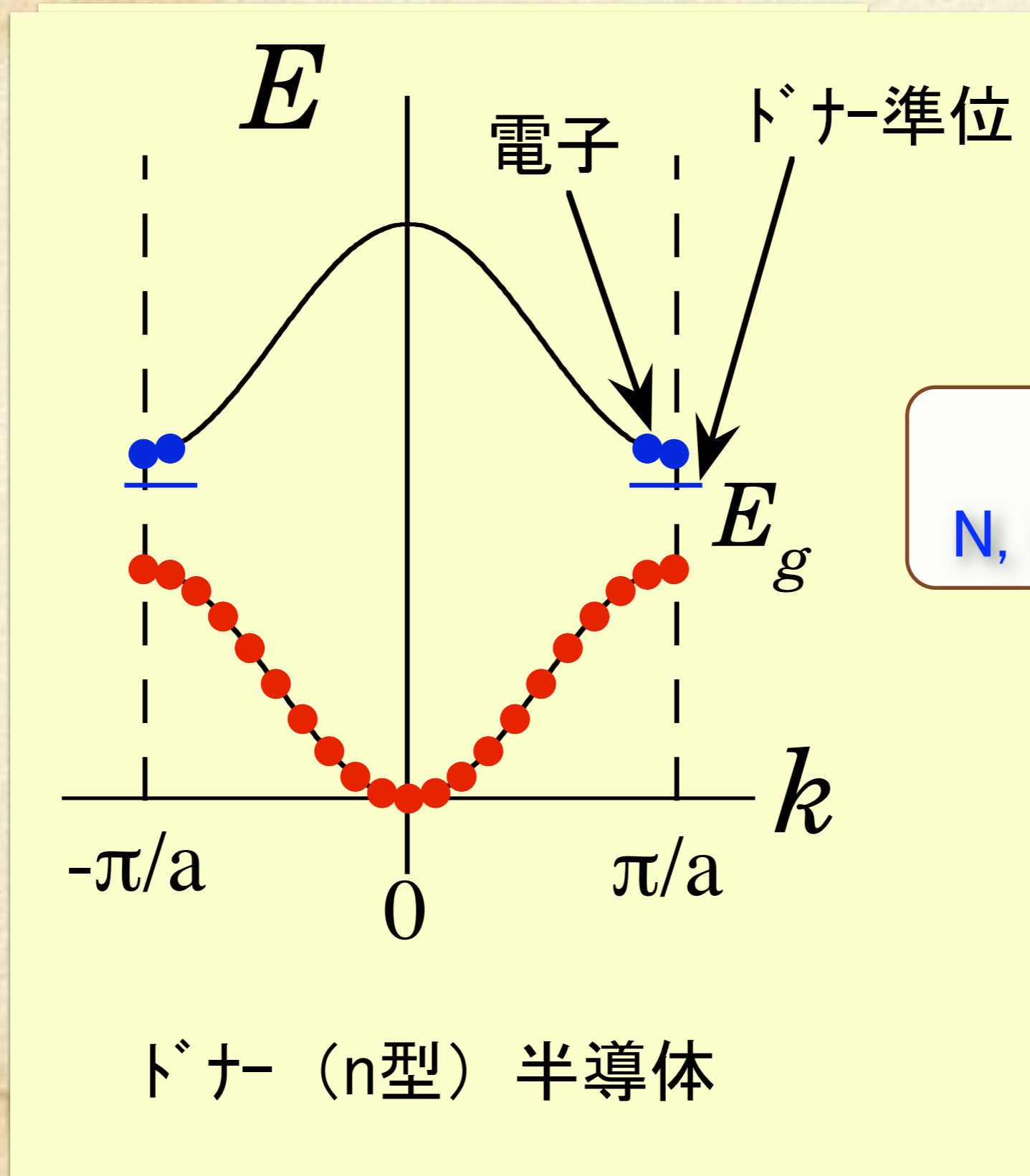
正孔

手が4本  
GeやSi

Al



# 電子ドナー・ドーピング: 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 $\text{ms}^{-1}$	(exact)
Planck constant	$h$	$6.6261 \times 10^{-34} \text{ Js}$	$(\hbar = h/2\pi)$
elementary charge	$e$	$1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$	
electron mass	$m_e$	$9.1094 \times 10^{-31} \text{ kg}$	
	$m_e c^2$	0.5110 MeV	
proton mass	$m_p$	$1.6726 \times 10^{-27} \text{ kg}$	
fine-structure constant	$\alpha$	1/137.036	
Rydberg constant	$R_\infty$	$10\,973\,732 \text{ m}^{-1}$	
	$R_\infty c$	$3.289\,842 \times 10^{15} \text{ Hz}$	
	$R_\infty hc$	13.6057 eV	
Boltzmann constant	$k_B$	$1.3807 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$	

- Solids
- Liquids
- Gases
- Artificially Prepared

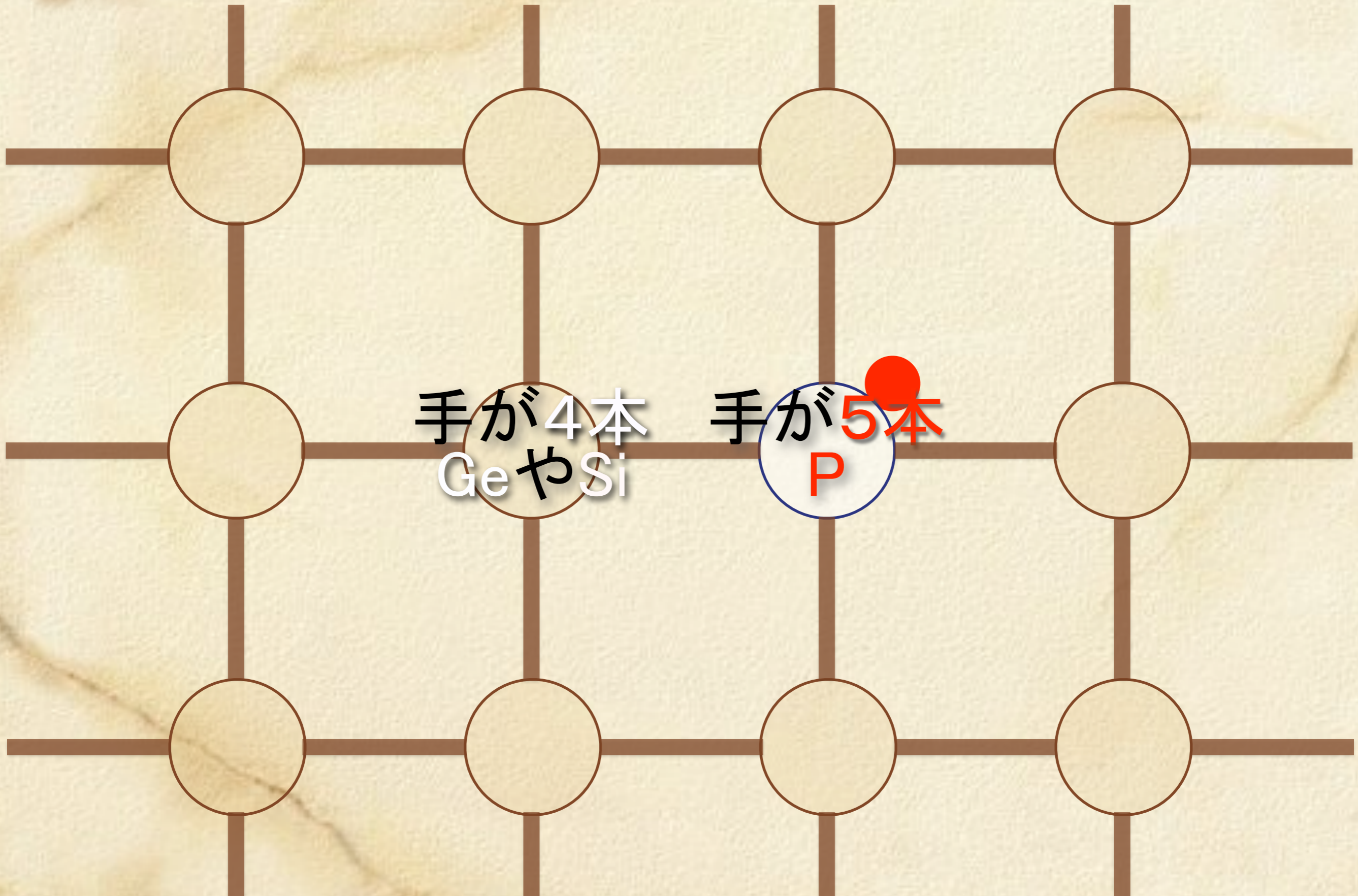
Period	Group 1 IA		Groups 2-10										Group 11 IB	Group 12 IIB	Group 13 IIIA	Group 14 IVA	Group 15 VA	Group 16 VIA	Group 17 VIIA	Group 18 VIIIA							
	1	<b>H</b> Hydrogen 1s HEX 1.00794 3.21 13.5984																				<b>He</b> Helium 1s <sup>2</sup> HEX 4.002602 3.57 24.5874					
2	<b>Li</b> Lithium 1s <sup>2</sup> 2s BCC 6.941 3.49 5.3917	<b>Be</b> Beryllium 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> HEX 9.012182 2.29 9.3227													<b>B</b> Boron 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p TET 10.811 8.73 8.2980	<b>C</b> Carbon 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup> DIA 12.0107 11.26	<b>N</b> Nitrogen 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>3</sup> HEX 14.0067 14.53	<b>O</b> Oxygen 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>4</sup> CUB 15.9994 6.83 13.6181	<b>F</b> Fluorine 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>5</sup> MCL 18.9984 17.4228	<b>Ne</b> Neon 1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup> FCC 20.1797 4.43 21.5645							
3	<b>Na</b> Sodium [Ne]3s BCC 22.9897 4.23 5.1391	<b>Mg</b> Magnesium [Ne]3s <sup>2</sup> HEX 24.3050 3.21 7.6462													<b>Al</b> Aluminum [Ne]3s <sup>2</sup> 3p FCC 26.9815 4.05 5.9858	<b>Si</b> Silicon [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>2</sup> DIA 28.0855 5.43 8.1517	<b>P</b> Phosphorus [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>3</sup> CUB 30.9738 7.17 10.4867	<b>S</b> Sulfur [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>4</sup> ORC 32.065 10.47 10.3600	<b>Cl</b> Chlorine [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>5</sup> ORC 35.453 6.24 12.9676	<b>Ar</b> Argon [Ne]3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup> FCC 39.948 5.26 15.7596							
4	<b>K</b> Potassium [Ar]4s BCC 22.9897 4.23 5.1391	<b>Ca</b> Calcium [Ar]4s <sup>2</sup> FCC 40.078 5.58 6.1132	<b>Sc</b> Scandium [Ar]3d <sup>1</sup> 4s <sup>2</sup> HEX 44.9559 3.31 6.5615	<b>Ti</b> Titanium [Ar]3d <sup>2</sup> 4s <sup>2</sup> HEX 47.867 2.95 6.8281	<b>V</b> Vanadium [Ar]3d <sup>3</sup> 4s <sup>2</sup> BCC 50.9415 3.02 6.7462	<b>Cr</b> Chromium [Ar]3d <sup>5</sup> 4s BCC 51.9961 2.88 6.7665	<b>Mn</b> Manganese [Ar]3d <sup>5</sup> 4s <sup>2</sup> CUB 54.938 8.89 7.4340	<b>Fe</b> Iron [Ar]3d <sup>6</sup> 4s <sup>2</sup> BCC 55.845 2.87 7.9024	<b>Co</b> Cobalt [Ar]3d <sup>7</sup> 4s <sup>2</sup> HEX 58.9332 2.51 7.8810	<b>Ni</b> Nickel [Ar]3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup> FCC 58.6934 3.52 7.6398	<b>Cu</b> Copper [Ar]3d <sup>10</sup> 4s FCC 63.546 3.61 7.7264	<b>Zn</b> Zinc [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> HEX 65.409 2.66 9.3942	<b>Ga</b> Gallium [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 3p ORC 69.723 4.51 5.9993	<b>Ge</b> Germanium [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>2</sup> DIA 72.64 5.66 7.8994	<b>As</b> Arsenic [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>3</sup> RHL 74.9216 4.13 9.7886	<b>Se</b> Selenium [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>4</sup> HEX 78.96 4.36 9.7524	<b>Br</b> Bromine [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>5</sup> ORC 79.904 6.67 11.8138	<b>Kr</b> Krypton [Ar]3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup> 4p <sup>6</sup> FCC 83.798 5.72 13.9996									
5	<b>Rb</b> Rubidium [Kr]5s BCC 85.4678 5.59 4.1771	<b>Sr</b> Strontium [Kr]5s <sup>2</sup> FCC 87.62 6.08 5.6949	<b>Y</b> Yttrium [Kr]4d <sup>5</sup> 5s <sup>2</sup> HEX 88.9059 3.65 6.2173	<b>Zr</b> Zirconium [Kr]4d <sup>2</sup> 5s <sup>2</sup> HEX 91.224 3.23 6.6339	<b>Nb</b> Niobium [Kr]4d <sup>4</sup> 5s BCC 92.9064 3.30 6.7589	<b>Mo</b> Molybdenum [Kr]4d <sup>5</sup> 5s BCC 95.94 3.15 7.0924	<b>Tc</b> Technetium [Kr]4d <sup>5</sup> 5s <sup>2</sup> HEX (98) 2.74 7.28	<b>Ru</b> Ruthenium [Kr]4d <sup>7</sup> 5s HEX 101.07 2.70 7.3605	<b>Rh</b> Rhodium [Kr]4d <sup>8</sup> 5s FCC 58.9332 3.80 7.4589	<b>Pd</b> Palladium [Kr]4d <sup>10</sup> FCC 58.6934 3.89 8.3369	<b>Ag</b> Silver [Kr]4d <sup>10</sup> 5s FCC 107.868 4.09 7.5762	<b>Cd</b> Cadmium [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> HEX 112.411 2.98 8.9938	<b>In</b> Indium [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p TET 114.818 4.59 5.7864	<b>Sn</b> Tin [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>2</sup> TET 118.710 5.82 7.3439	<b>Sb</b> Antimony [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>3</sup> RHL 121.760 4.51 8.6084	<b>Te</b> Tellurium [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>4</sup> HEX 127.60 4.45 9.0096	<b>I</b> Iodine [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>5</sup> ORC 126.904 7.27 10.4513	<b>Xe</b> Xenon [Kr]4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup> FCC 131.293 6.20 12.1298									
6	<b>Cs</b> Cesium [Xe]6s BCC 132.905 6.05 3.8939	<b>Ba</b> Barium [Xe]6s <sup>2</sup> BCC 137.327 5.02 5.2117	Lanthanides										<b>Hf</b> Hafnium [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>2</sup> 6s <sup>2</sup> HEX 178.49 3.20 6.8251	<b>Ta</b> Tantalum [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup> BCC 180.948 3.31 7.5496	<b>W</b> Tungsten [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup> BCC 183.84 3.16 7.8640	<b>Re</b> Rhenium [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>5</sup> 6s <sup>2</sup> HEX 186.207 2.76 7.8335	<b>Os</b> Osmium [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup> HEX 190.23 2.74 8.4382	<b>Ir</b> Iridium [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup> FCC 192.217 3.84 8.9670	<b>Pt</b> Platinum [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>9</sup> 6s FCC 195.078 3.92 8.9588	<b>Au</b> Gold [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s FCC 196.967 4.08 9.2255	<b>Hg</b> Mercury [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> RHL 200.59 2.99 10.4375	<b>Tl</b> Thallium [Hg]6p HEX 204.383 3.46 6.1082	<b>Pb</b> Lead [Hg]6p <sup>2</sup> FCC 207.2 4.95 7.4167	<b>Bi</b> Bismuth [Hg]6p <sup>3</sup> RHL 208.980 4.75 7.2855	<b>Po</b> Polonium [Hg]6p <sup>4</sup> SC (209) 3.35 8.414	<b>At</b> Astatine [Hg]6p <sup>5</sup> (210)	<b>Rn</b> Radon [Hg]6p <sup>6</sup> (FCC) (222) 10.7485
7	<b>Fr</b> Francium [Rn]7s (BCC) (223) 4.0727	<b>Ra</b> Radium [Rn]7s <sup>2</sup> (226) 5.2784											Actinides										<b>Rf</b> Rutherfordium [Rn]5f <sup>14</sup> 6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup> ? (261) 6.0?	<b>Db</b> Dubnium (262)	<b>Sg</b> Seaborgium (266)	<b>Bh</b> Bohrium (264)	<b>Hs</b> Hassium (277)
			<b>La</b> Lanthanum [Xe]5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> HEX 138.906 3.75 5.5769	<b>Ce</b> Cerium [Xe]4f <sup>1</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> FCC 140.116 5.16 5.5387	<b>Pr</b> Praseodymium [Xe]4f <sup>3</sup> 6s <sup>2</sup> HEX 140.908 3.67 5.473	<b>Nd</b> Neodymium [Xe]4f <sup>4</sup> 6s <sup>2</sup> HEX 144.24 3.66 5.5250	<b>Pm</b> Promethium [Xe]4f <sup>5</sup> 6s <sup>2</sup> (145) 5.582	<b>Sm</b> Samarium [Xe]4f <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup> RHL 150.36 9.00 5.6437	<b>Eu</b> Europium [Xe]4f <sup>7</sup> 6s <sup>2</sup> BCC 151.964 4.61 5.6704	<b>Gd</b> Gadolinium [Xe]4f <sup>7</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> HEX 157.25 3.64 6.1498	<b>Tb</b> Terbium [Xe]4f <sup>9</sup> 6s <sup>2</sup> HEX 158.925 3.60 5.8638	<b>Dy</b> Dysprosium [Xe]4f <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> HEX 162.500 3.59 5.9389											<b>Ho</b> Holmium [Xe]4f <sup>11</sup> 6s <sup>2</sup> HEX 164.930 3.58 6.0215	<b>Er</b> Erbium [Xe]4f <sup>12</sup> 6s <sup>2</sup> HEX 167.259 3.56 6.1077	<b>Tm</b> Thulium [Xe]4f <sup>13</sup> 6s <sup>2</sup> HEX 168.934 3.54 6.1843	<b>Yb</b> Ytterbium [Xe]4f <sup>14</sup> 6s <sup>2</sup> FCC 173.04 5.49 6.2542	<b>Lu</b> Lutetium [Xe]4f <sup>14</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup> HEX 174.967 3.51 5.4259
			<b>Ac</b> Actinium [Rn]6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> FCC (227) 5.31 5.17	<b>Th</b> Thorium [Rn]6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup> FCC 232.038 5.08 6.3067	<b>Pa</b> Protactinium [Rn]5f <sup>2</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> TET 231.036 3.92 5.89	<b>U</b> Uranium [Rn]5f <sup>3</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> ORC 238.029 2.85 6.1941	<b>Np</b> Neptunium [Rn]5f <sup>4</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> ORC (237) 4.72 6.2657	<b>Pu</b> Plutonium [Rn]5f <sup>6</sup> 7s <sup>2</sup> MCL (244) 6.0260	<b>Am</b> Americium [Rn]5f <sup>7</sup> 7s <sup>2</sup> (243) 5.9738	<b>Cm</b> Curium [Rn]5f <sup>8</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup> (247) 5.9914	<b>Bk</b> Berkelium [Rn]5f <sup>9</sup> 7s <sup>2</sup> (247) 6.1979	<b>Cf</b> Californium [Rn]5f <sup>10</sup> 7s <sup>2</sup> (251) 6.2817	<b>Es</b> Einsteinium [Rn]5f <sup>11</sup> 7s <sup>2</sup> (252) 6.42	<b>Fm</b> Fermium [Rn]5f <sup>12</sup> 7s <sup>2</sup> (257) 6.50	<b>Md</b> Mendelevium [Rn]5f <sup>13</sup> 7s <sup>2</sup> (258) 6.58	<b>No</b> Nobelium [Rn]5f <sup>14</sup> 7s <sup>2</sup> (259) 6.65	<b>Lr</b> Lawrencium [Rn]5f <sup>14</sup> 7s <sup>2</sup> 7p? (262) 4.9?										

Diagram illustrating the structure of an element's data box (example: Lawrencium, Lr, Atomic Number 103):

- Atomic Number:** 103
- Symbol:** Lr
- Name:** Lawrencium
- Ground-state Configuration:** [Rn]5f<sup>14</sup>7s<sup>2</sup>7p?
- Crystal Type (Common Crystal Phase):** MCL (262)
- Lattice Constant (Å):** 3.21 4.9?
- Atomic Weight:** (262)
- Ionization Energy (eV):** 4.9?
- Ground-state Level:** 2P<sub>1/2</sub>?



# n型半導体



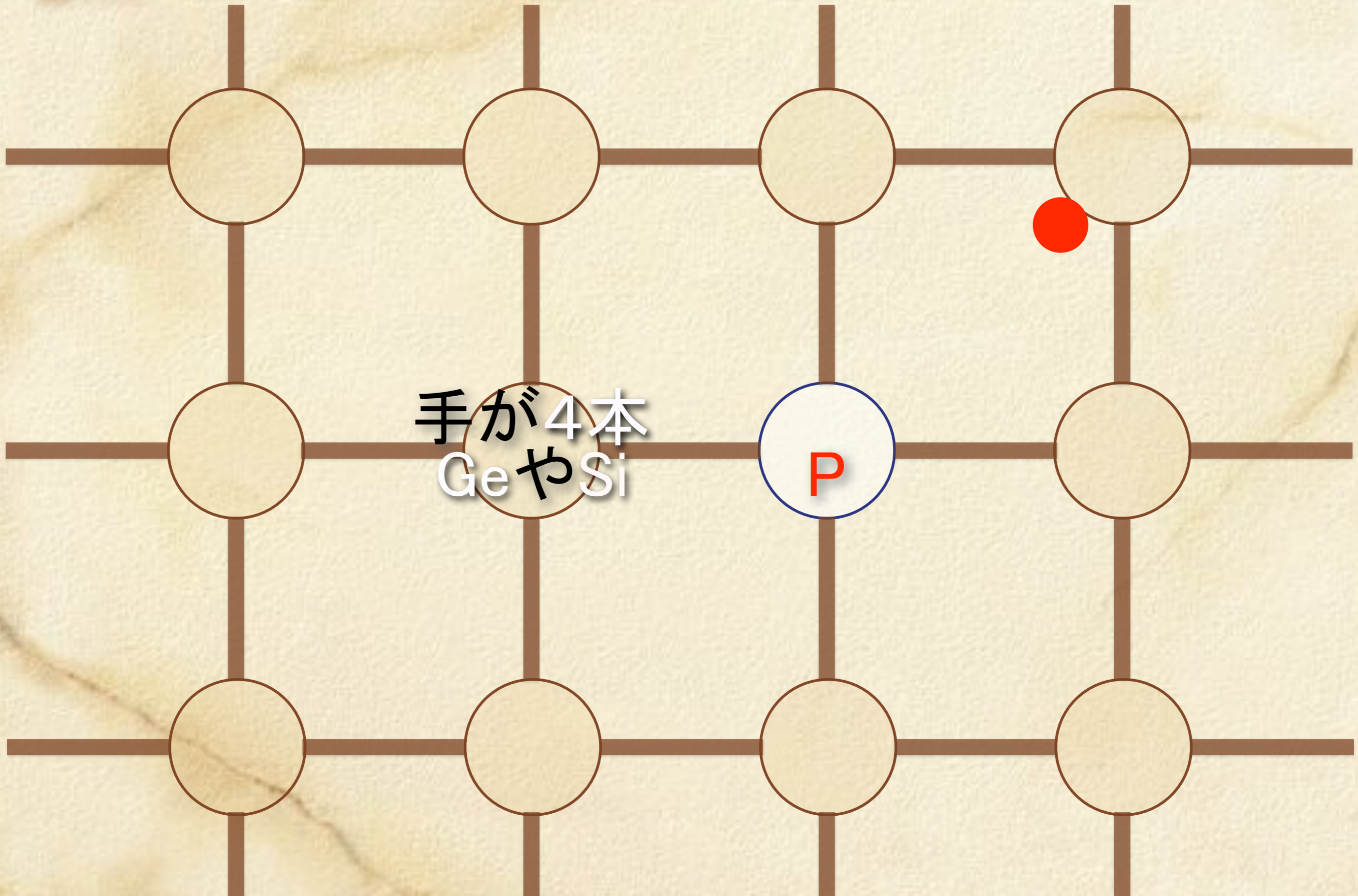
手が4本  
GeやSi

手が5本  
P





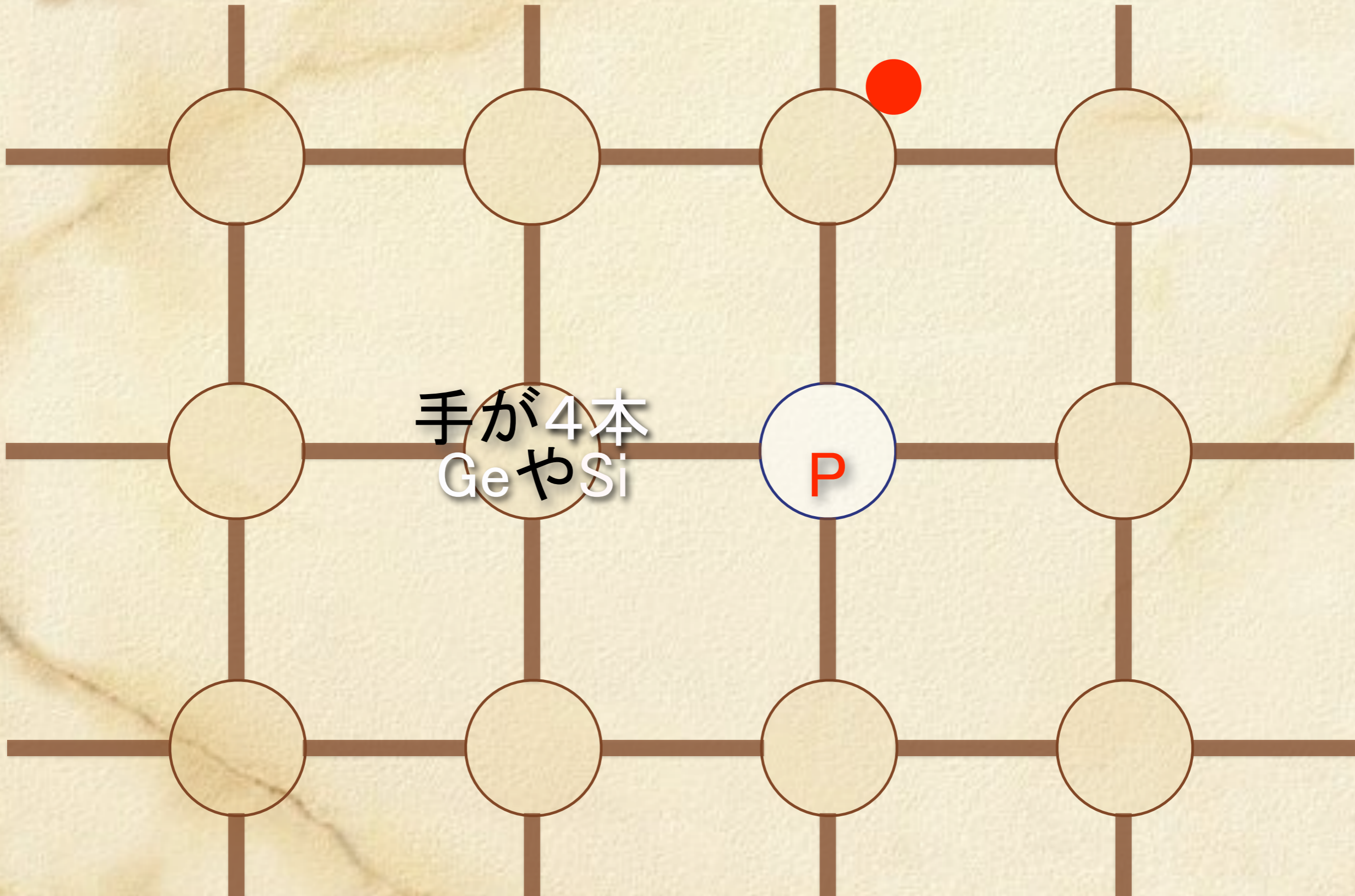
# n型半導体



手が4本  
GeやSi

P

# n型半導体



手が4本  
GeやSi

P

# 半導体の機能

2種類の半導体：**p型**と**n型**

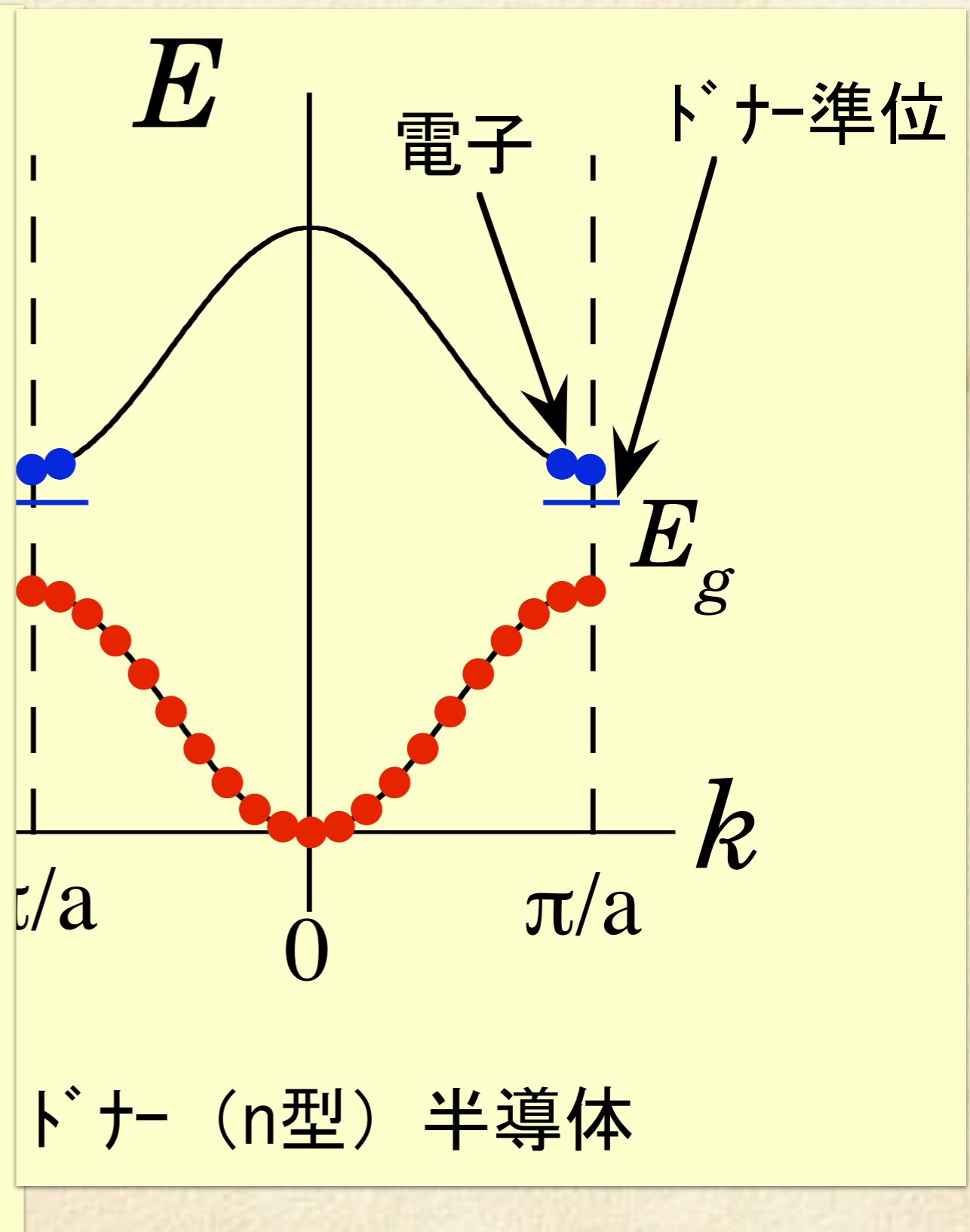
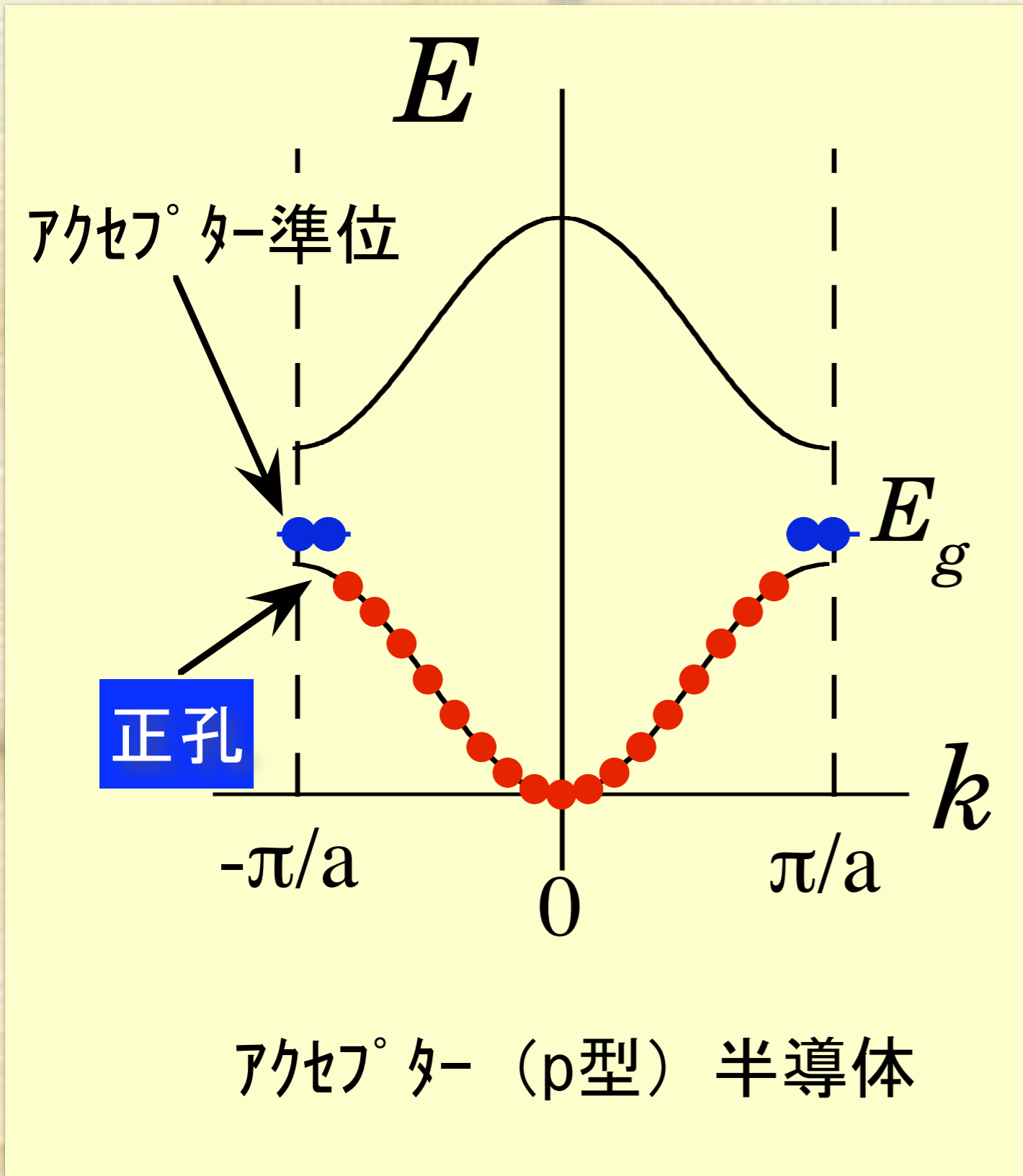
**2種類**を組み合わせると、**電流**を**制御**できる

最も簡単な **p型**と**n型**の組合せ

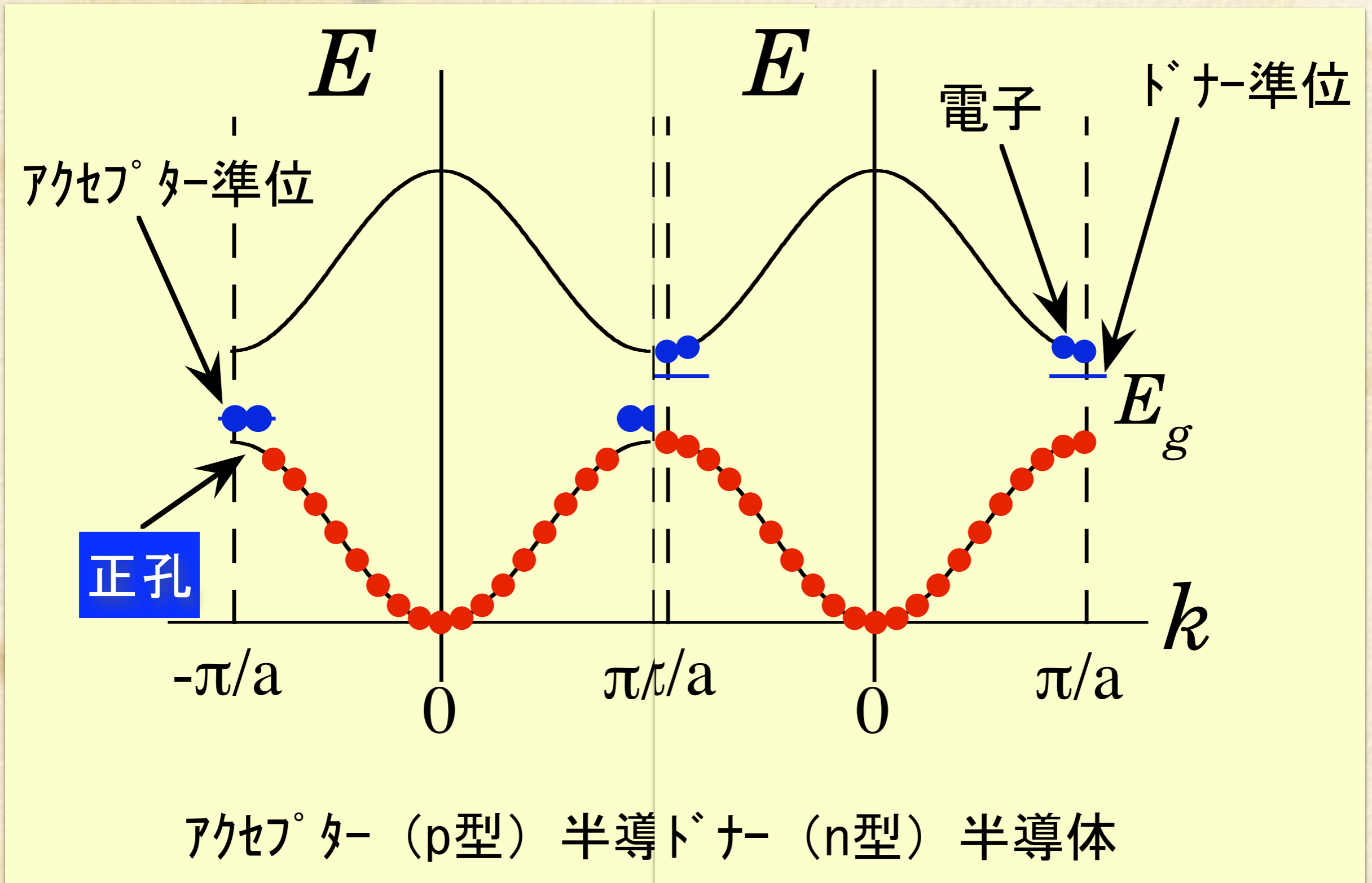
**p-n** 接合

外部電圧により、流れる**電流**を  
制御出来る

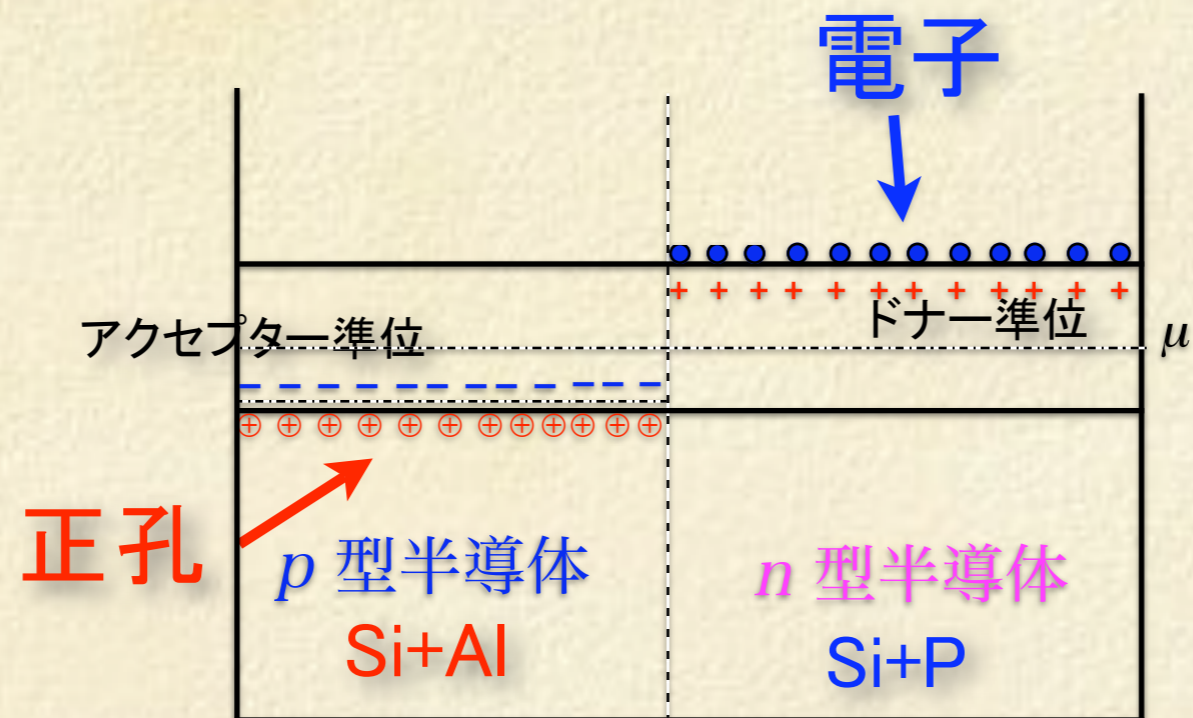
# *p-n* 接合の機能



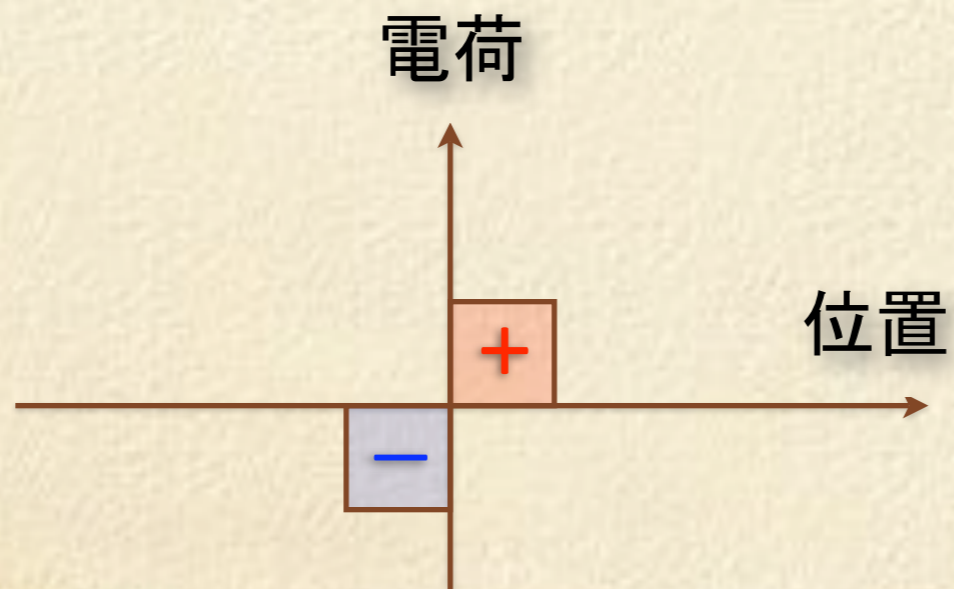
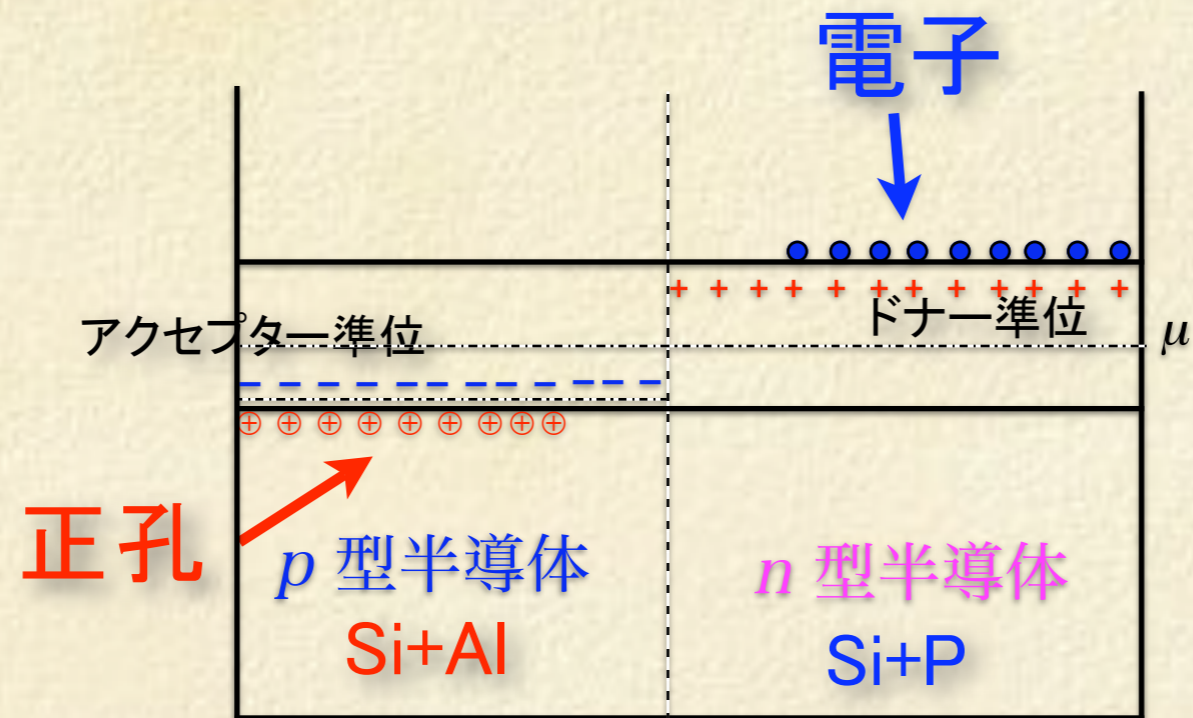
# *p-n* 接合の機能



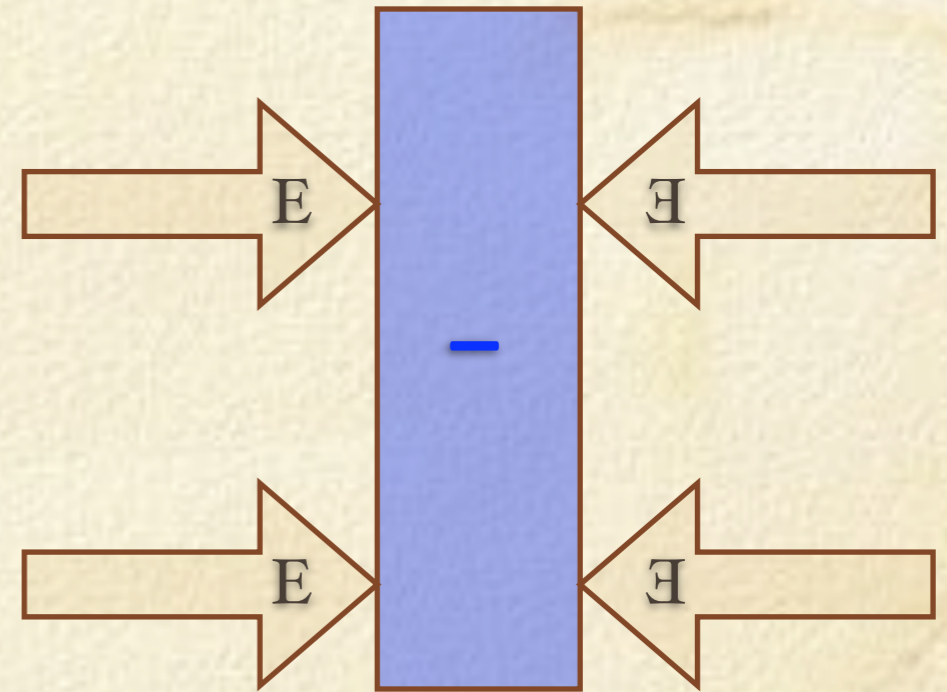
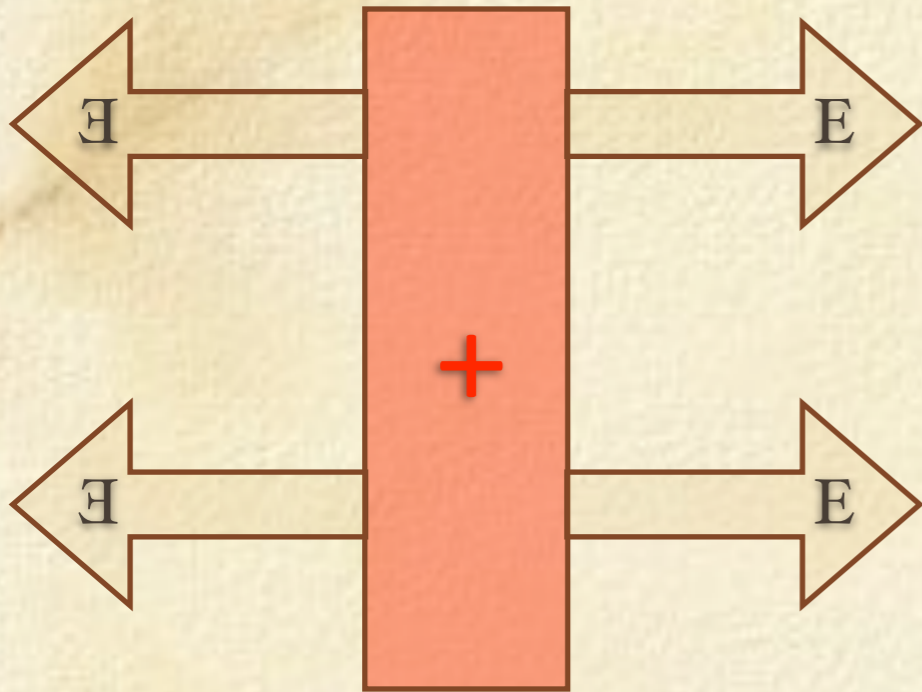
# *p-n* 接合の機能



# *p-n* 接合の機能

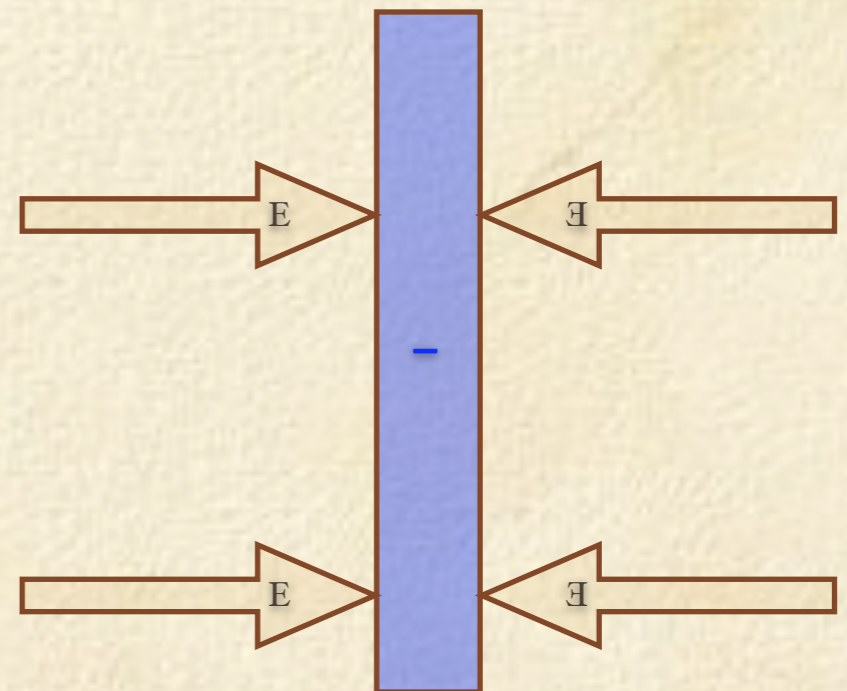
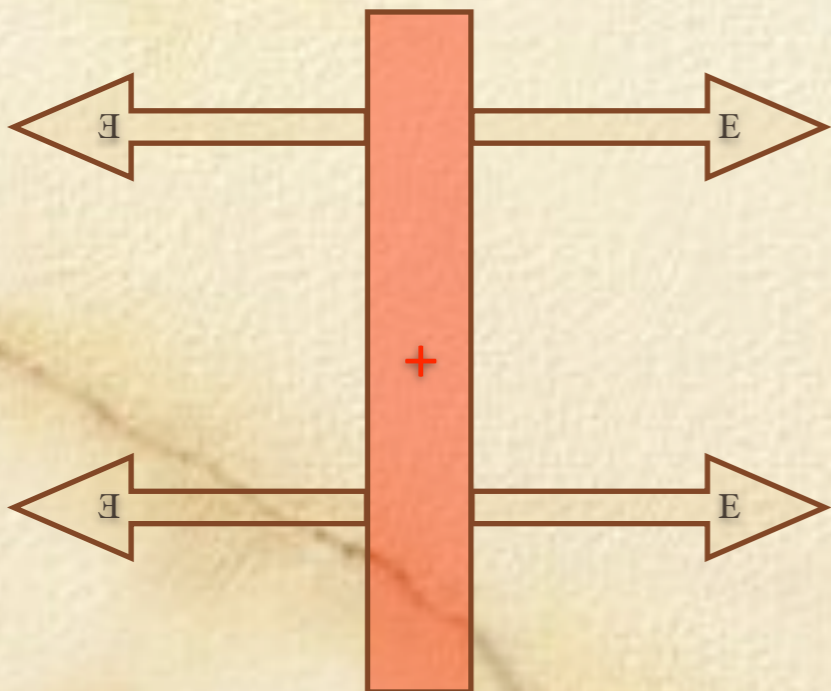
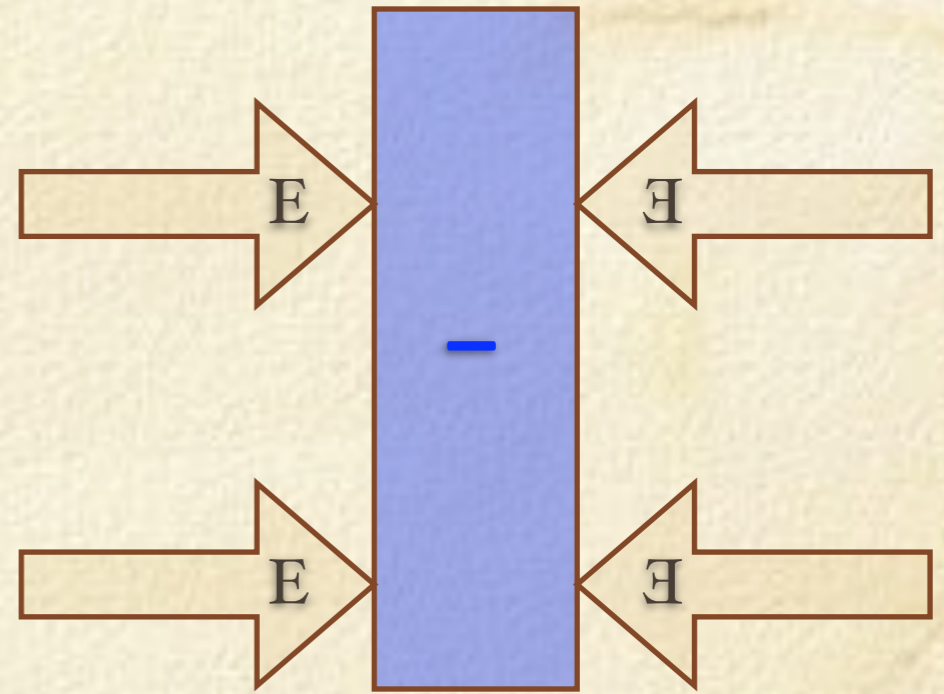
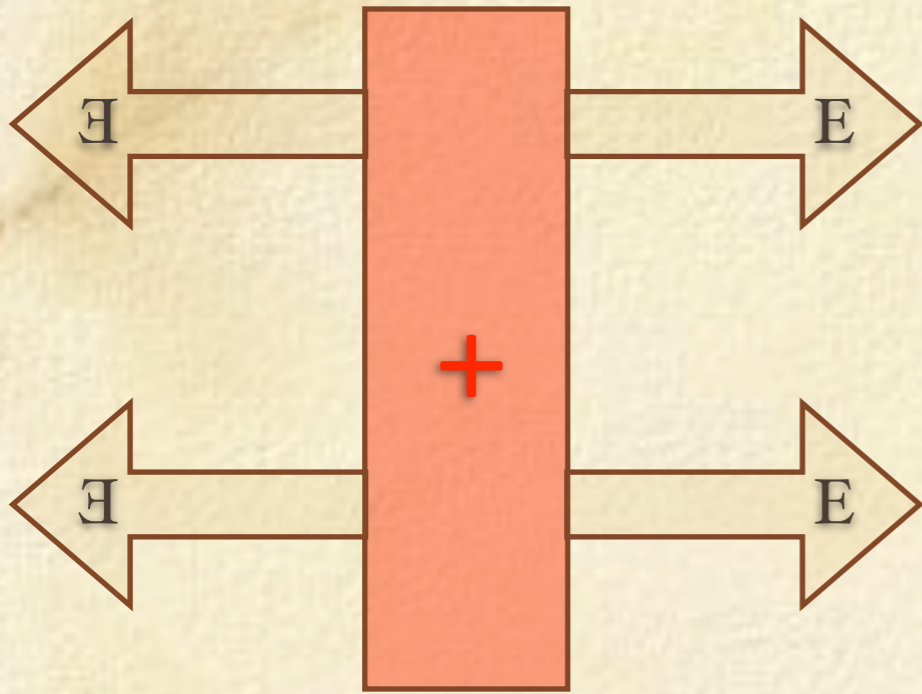


# 電荷とそれが作る電場

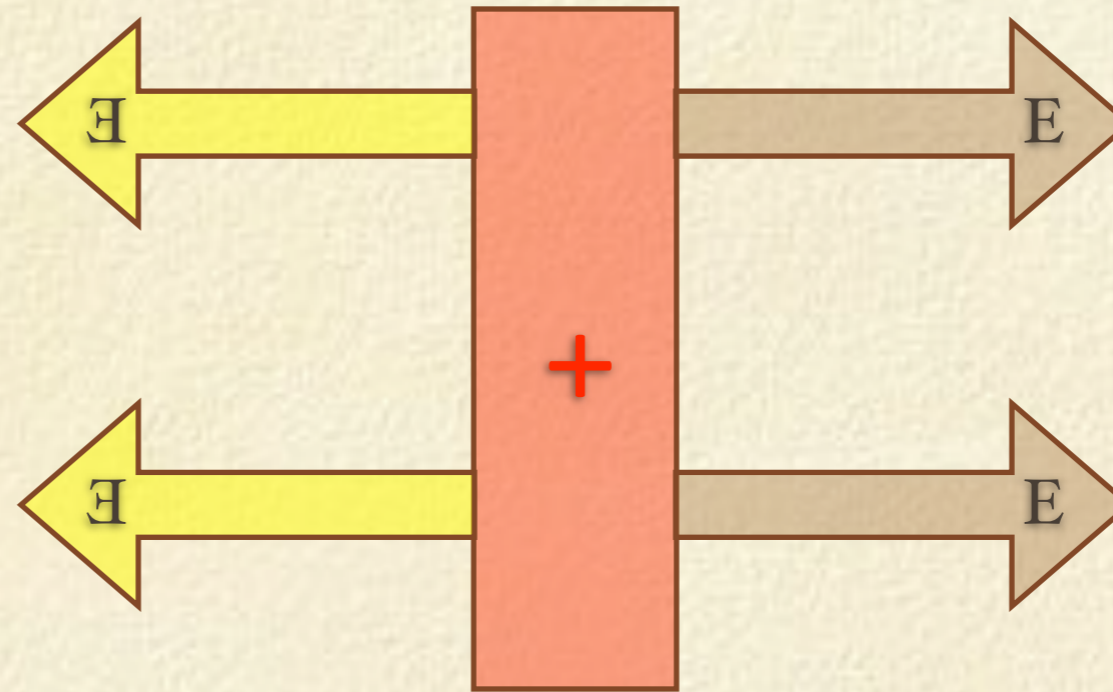




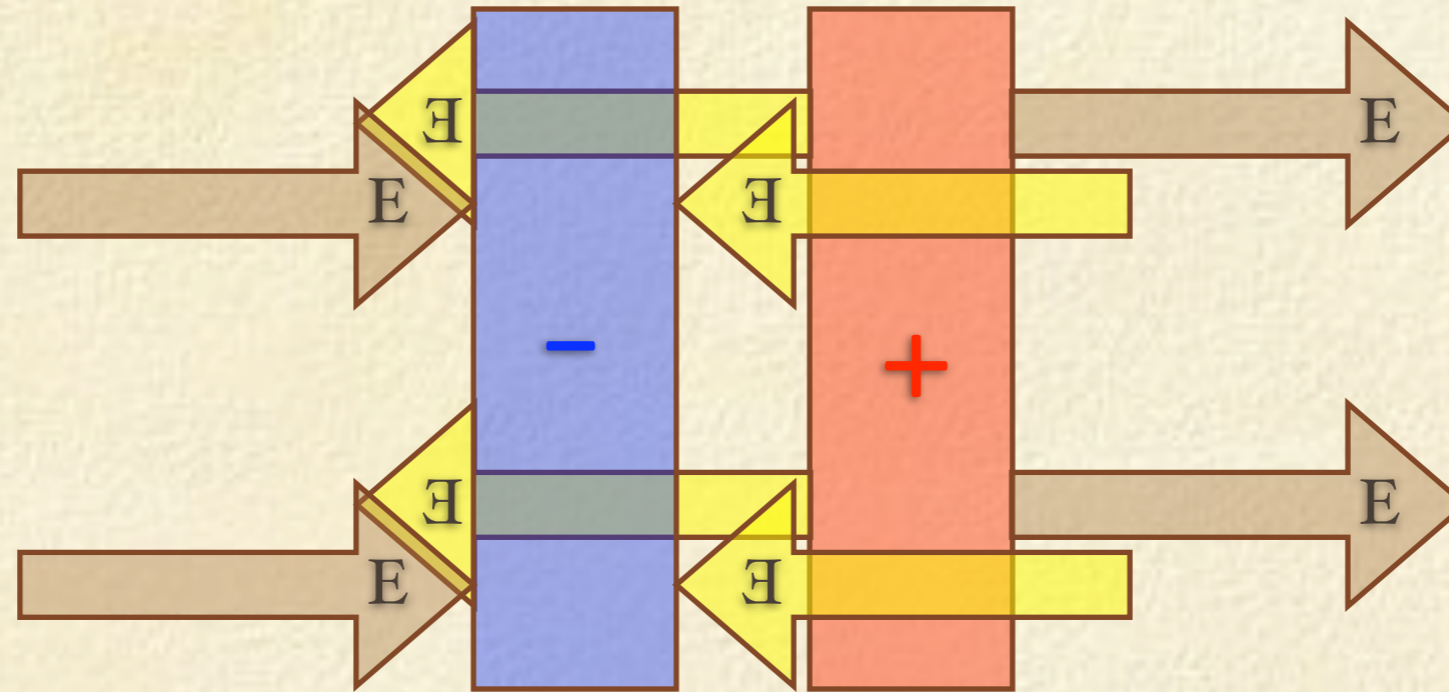
# 電荷とそれが作る電場



# 電荷とそれが作る電場

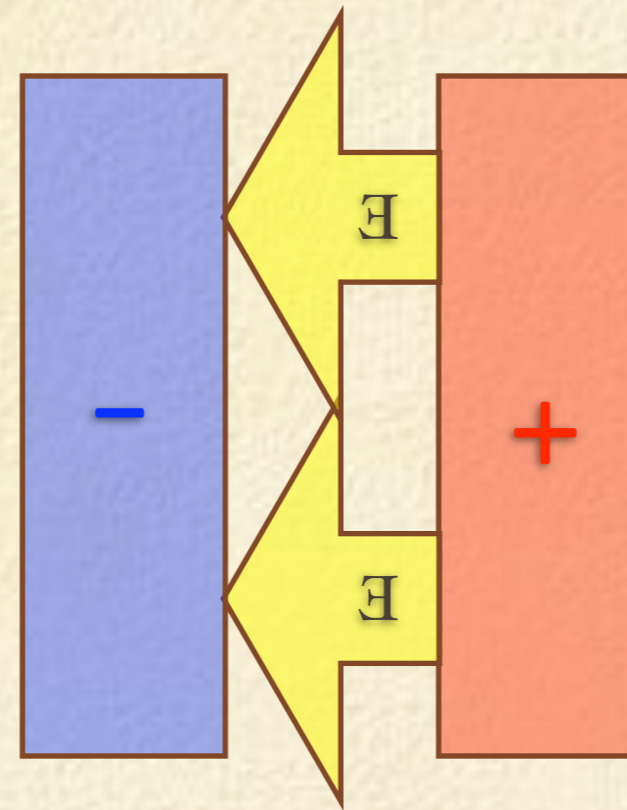


# 電荷とそれが作る電場



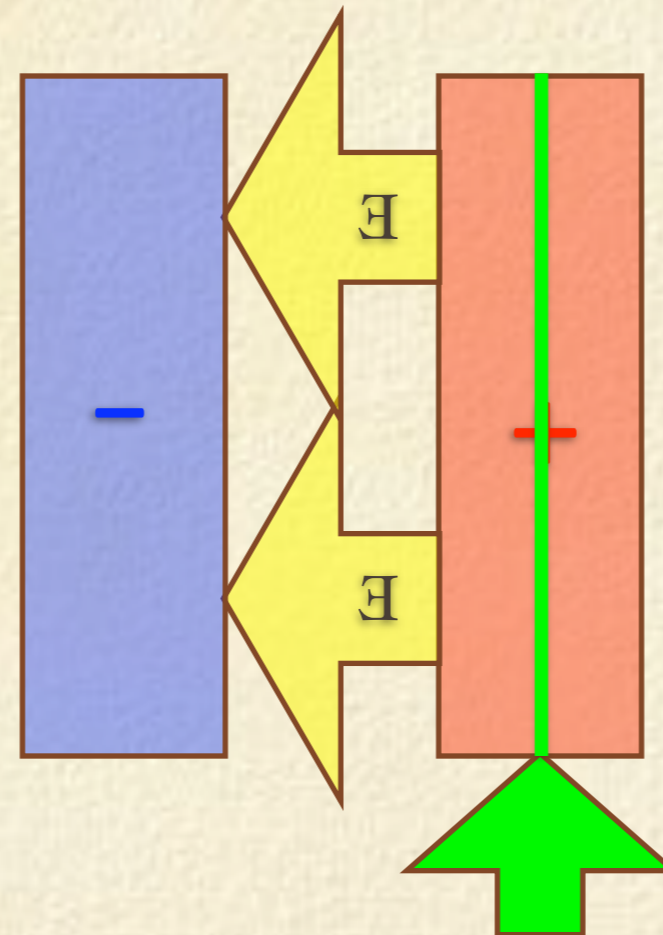


# 電荷とそれが作る電場



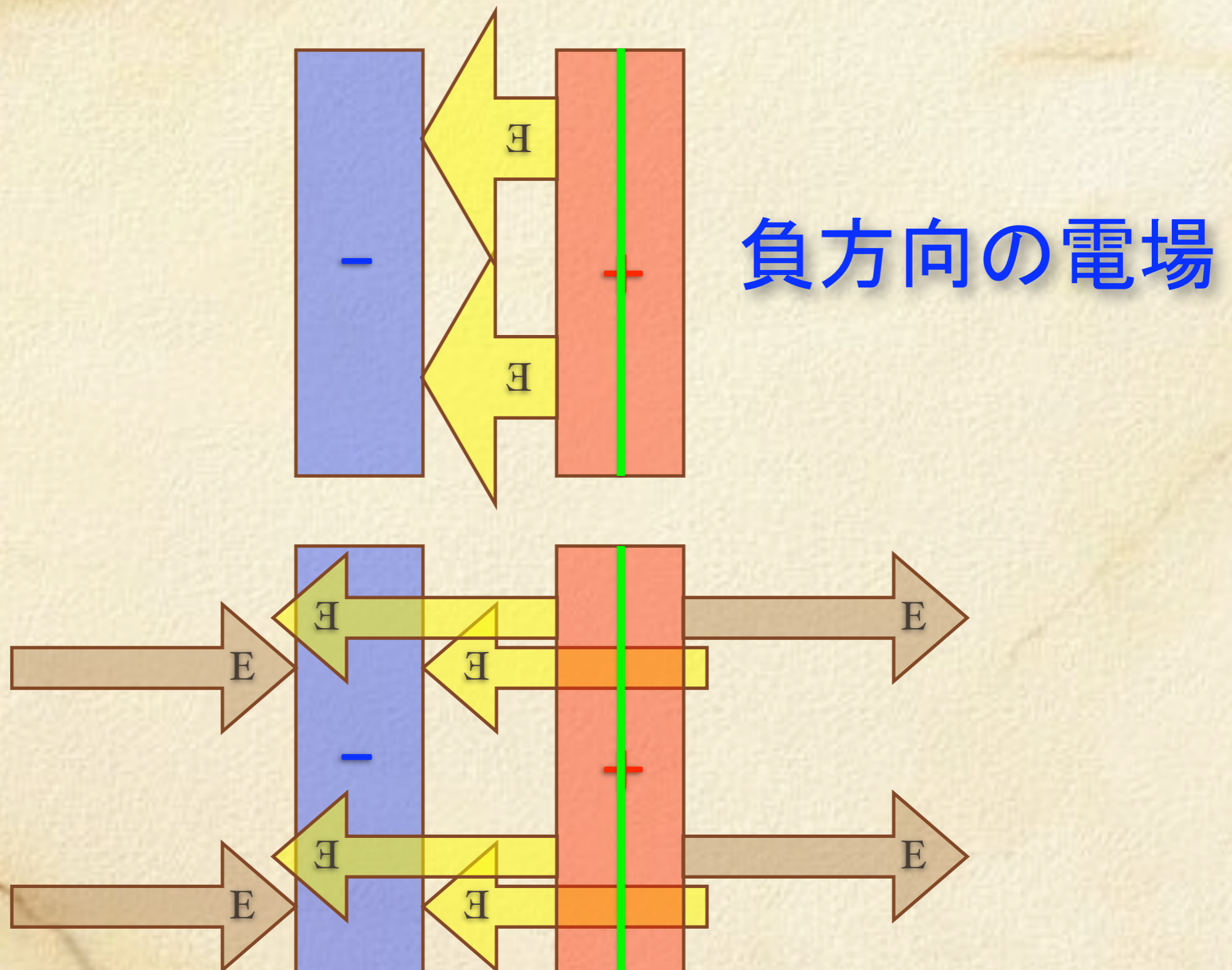
負方向の電場

# 電荷とそれが作る電場

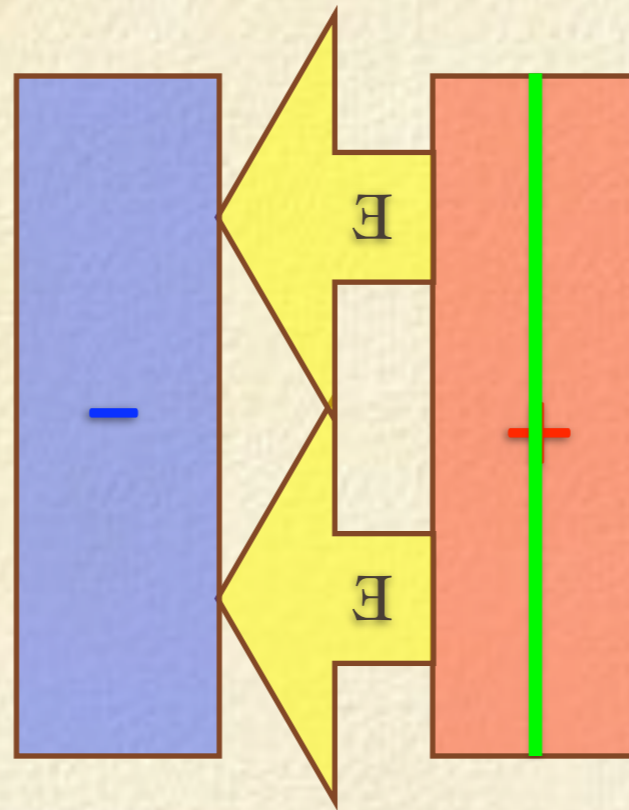


負方向の電場

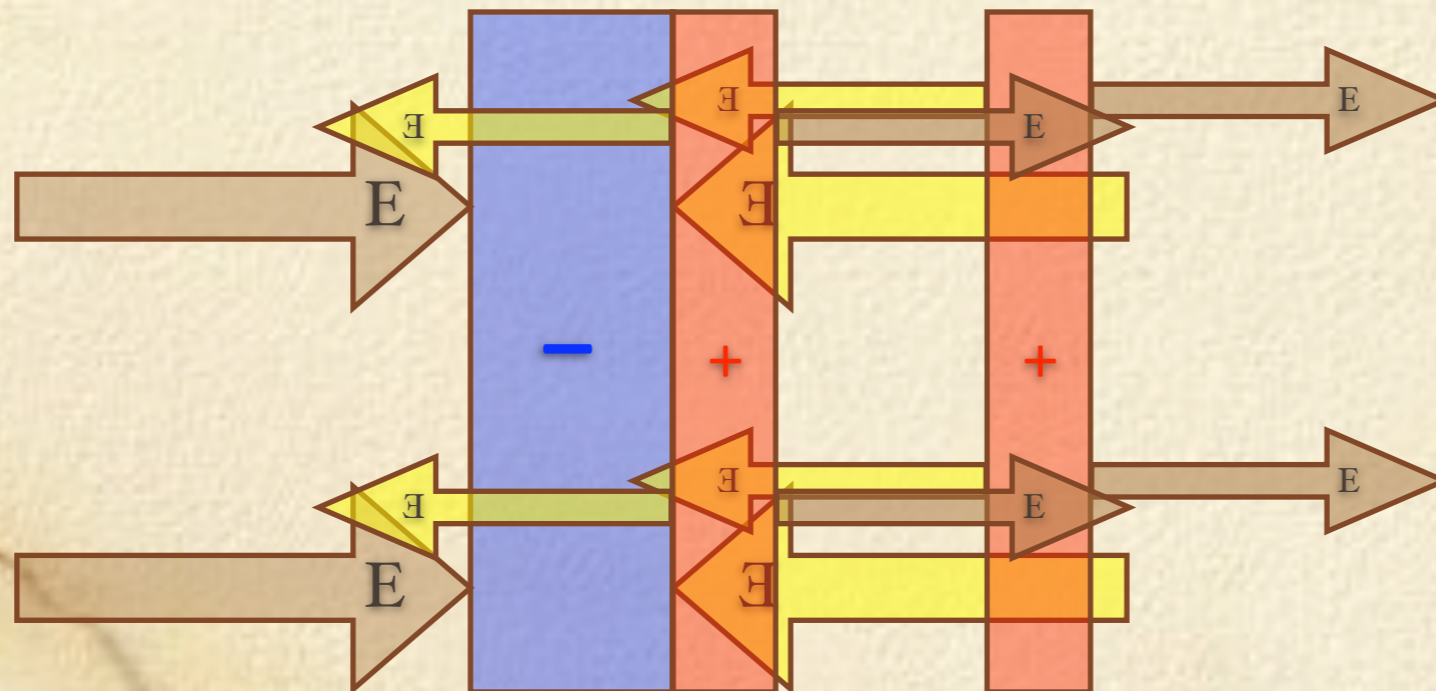
# 電荷とそれが作る電場



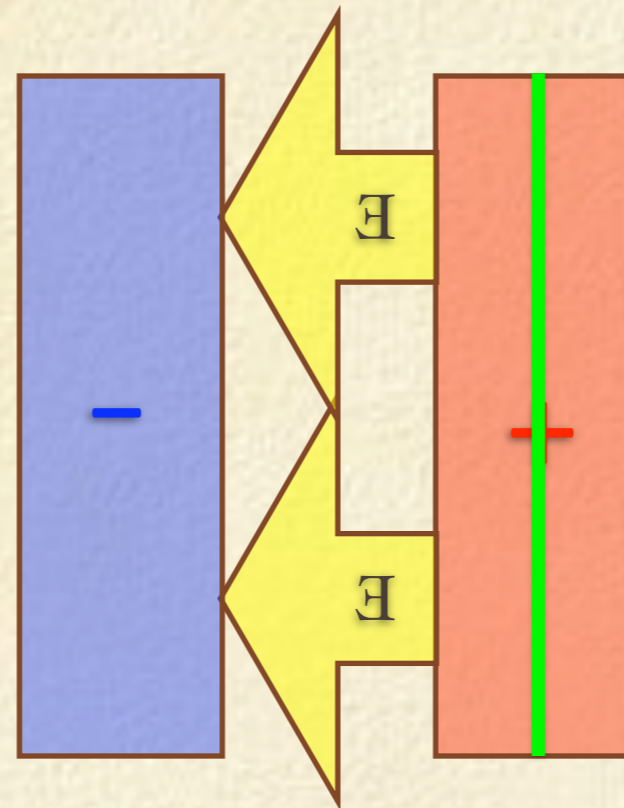
# 電荷とそれが作る電場



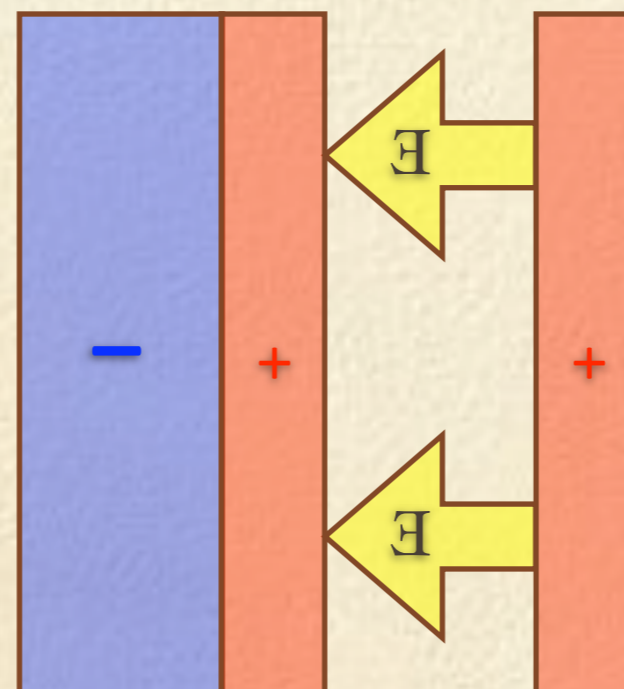
負方向の電場



# 電荷とそれが作る電場

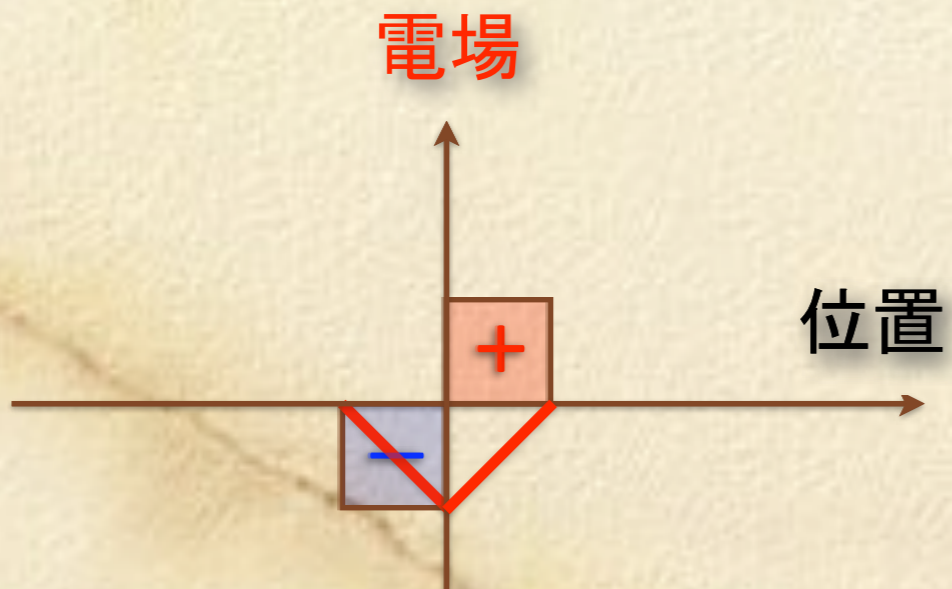
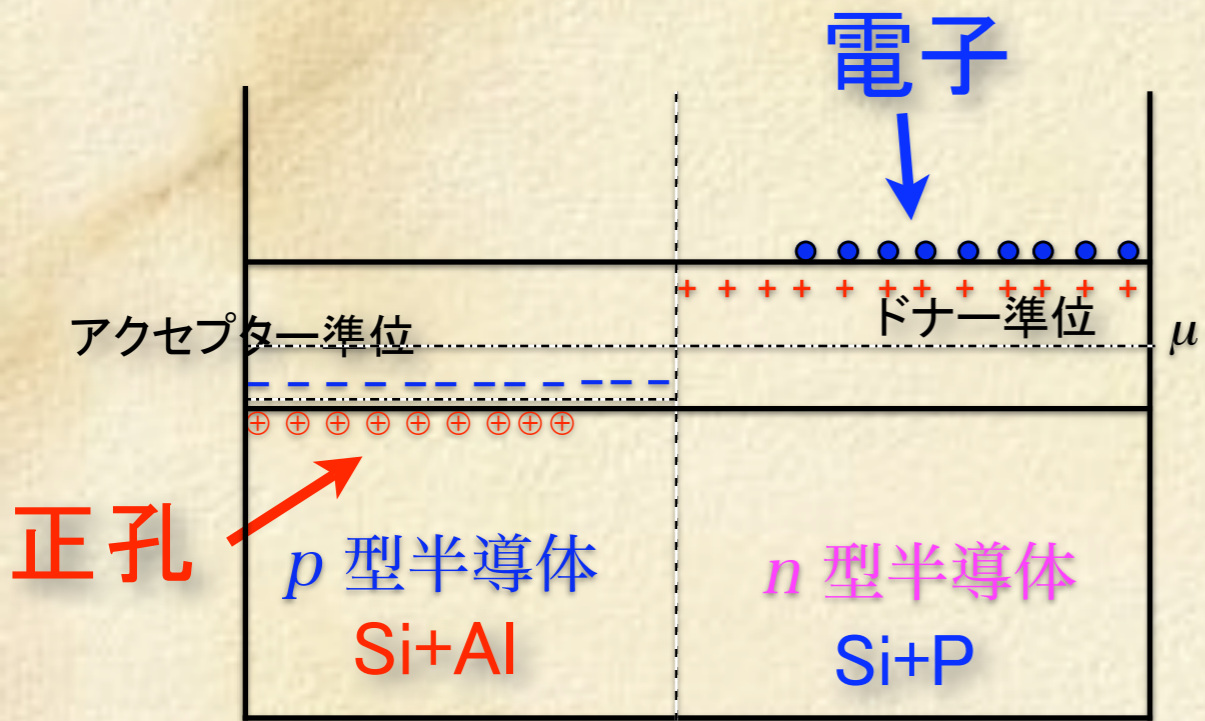


負方向の電場

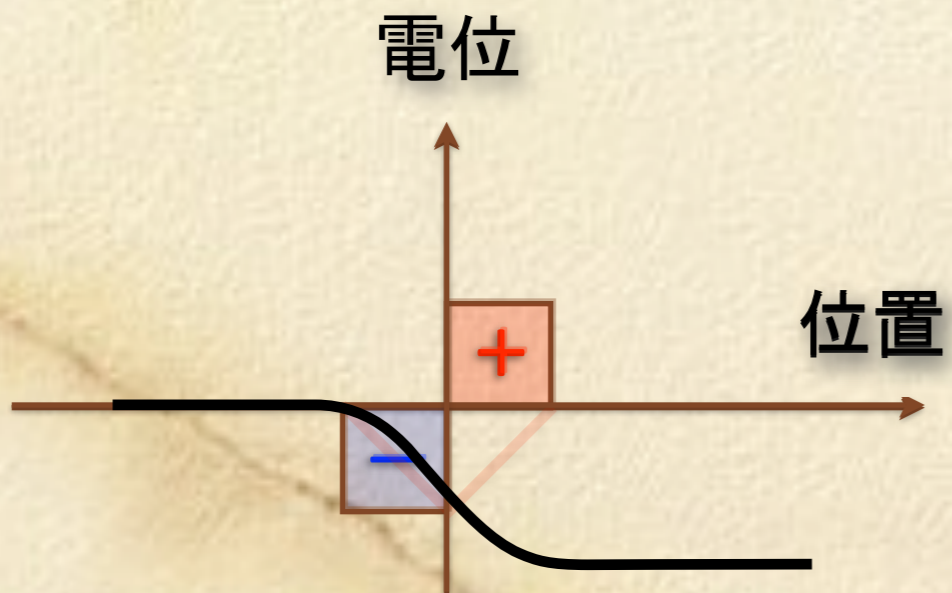
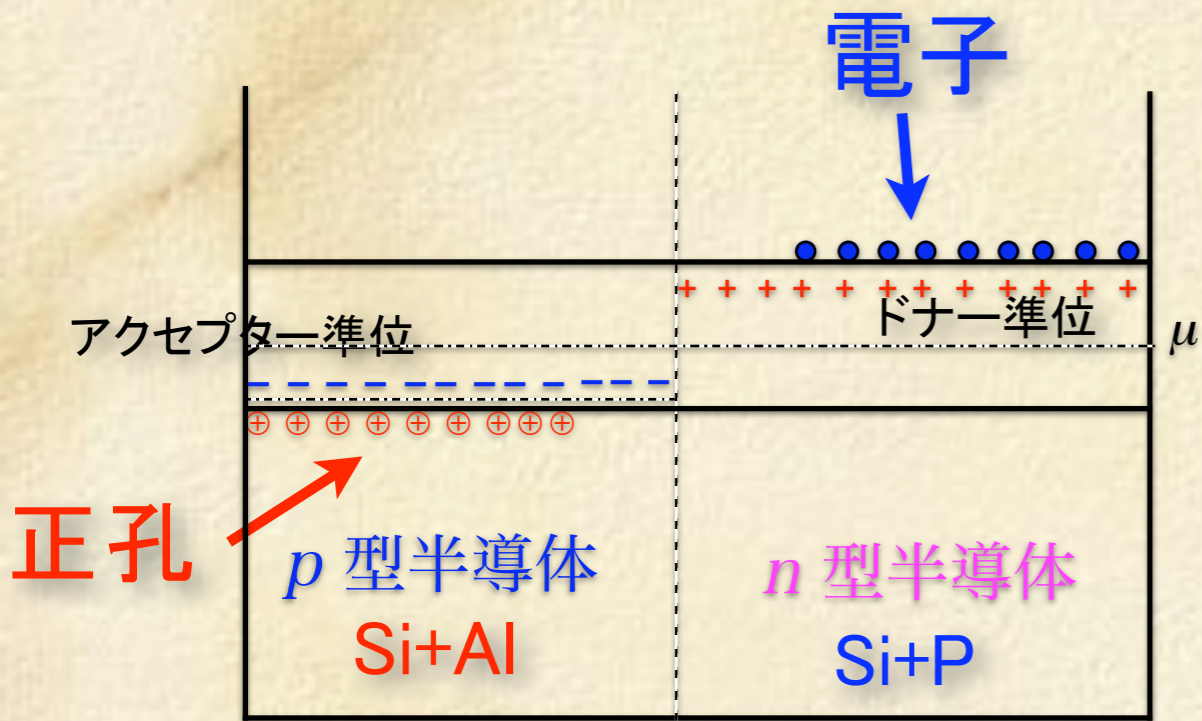




# $p$ - $n$ 接合の機能

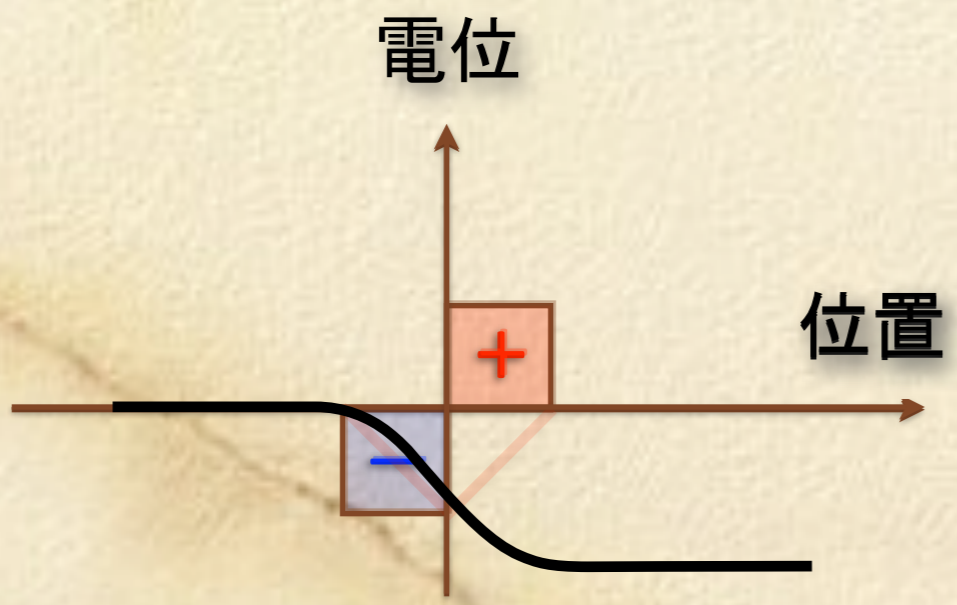
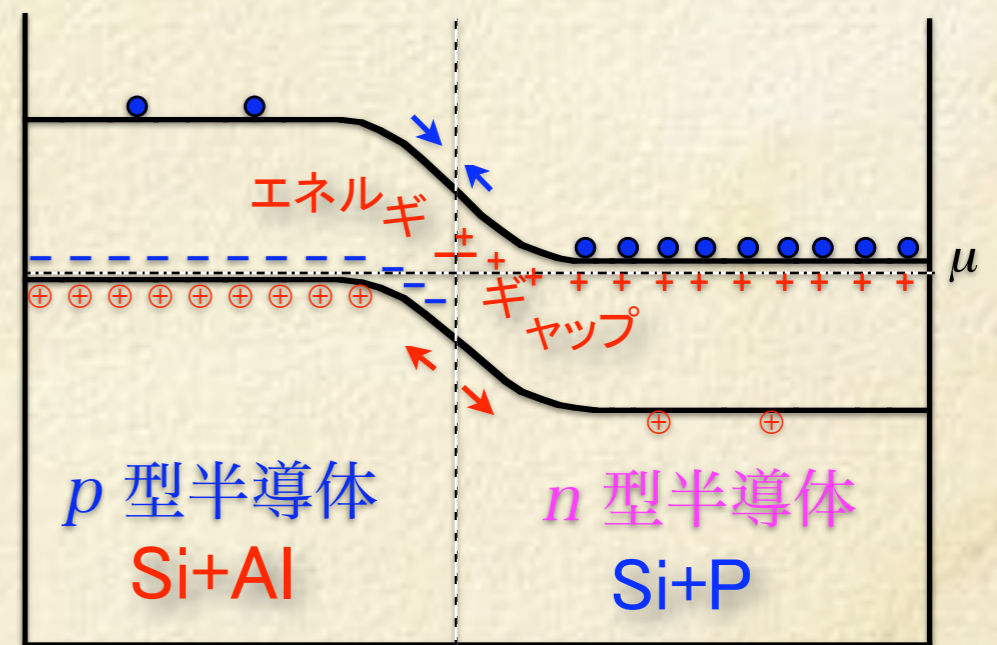
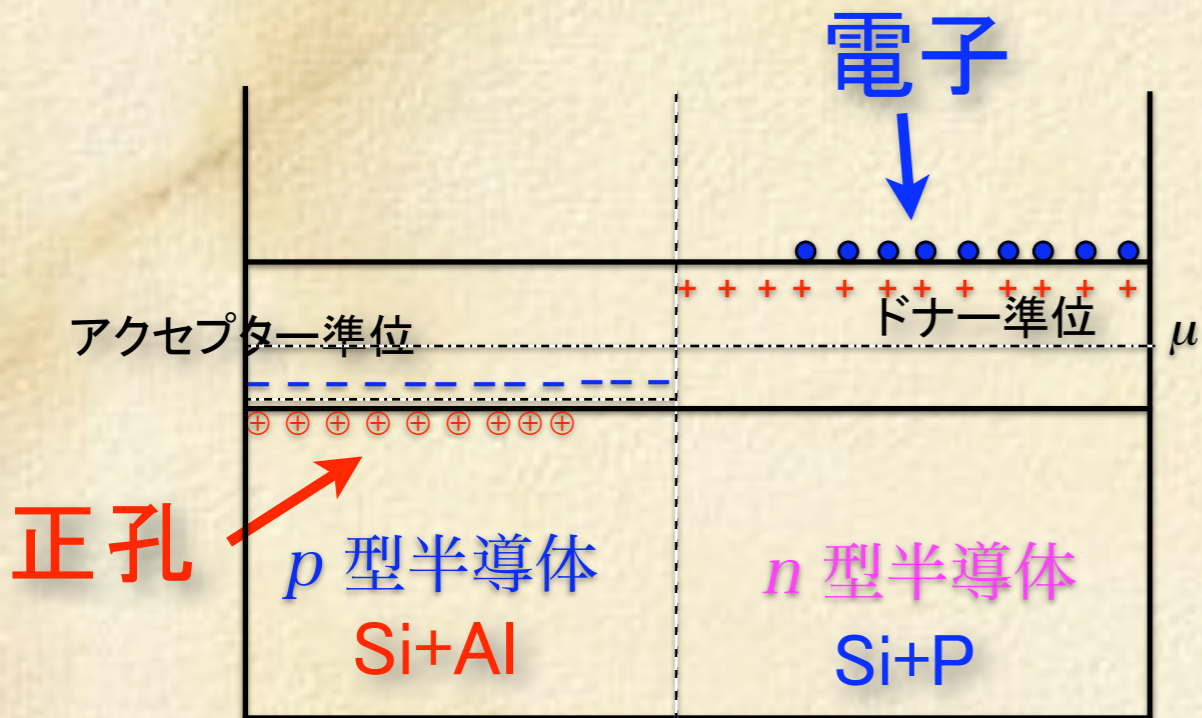


# *p-n* 接合の機能

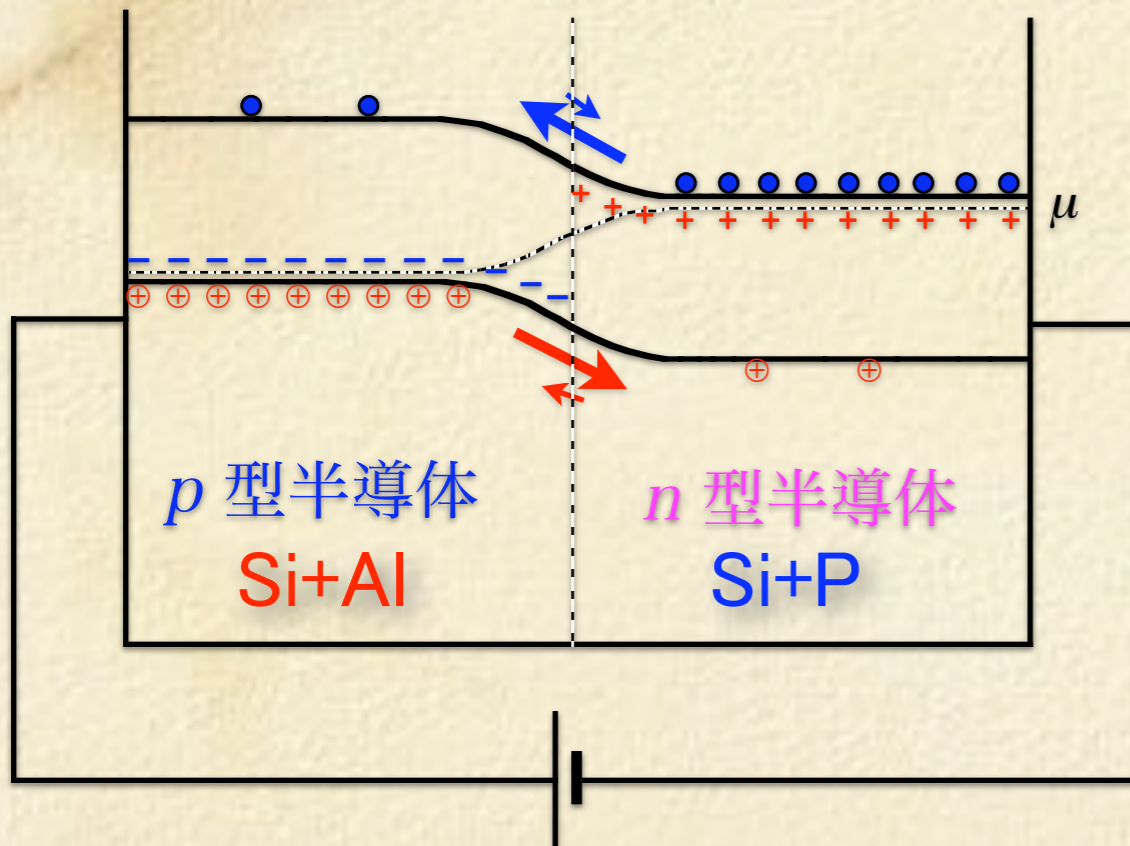




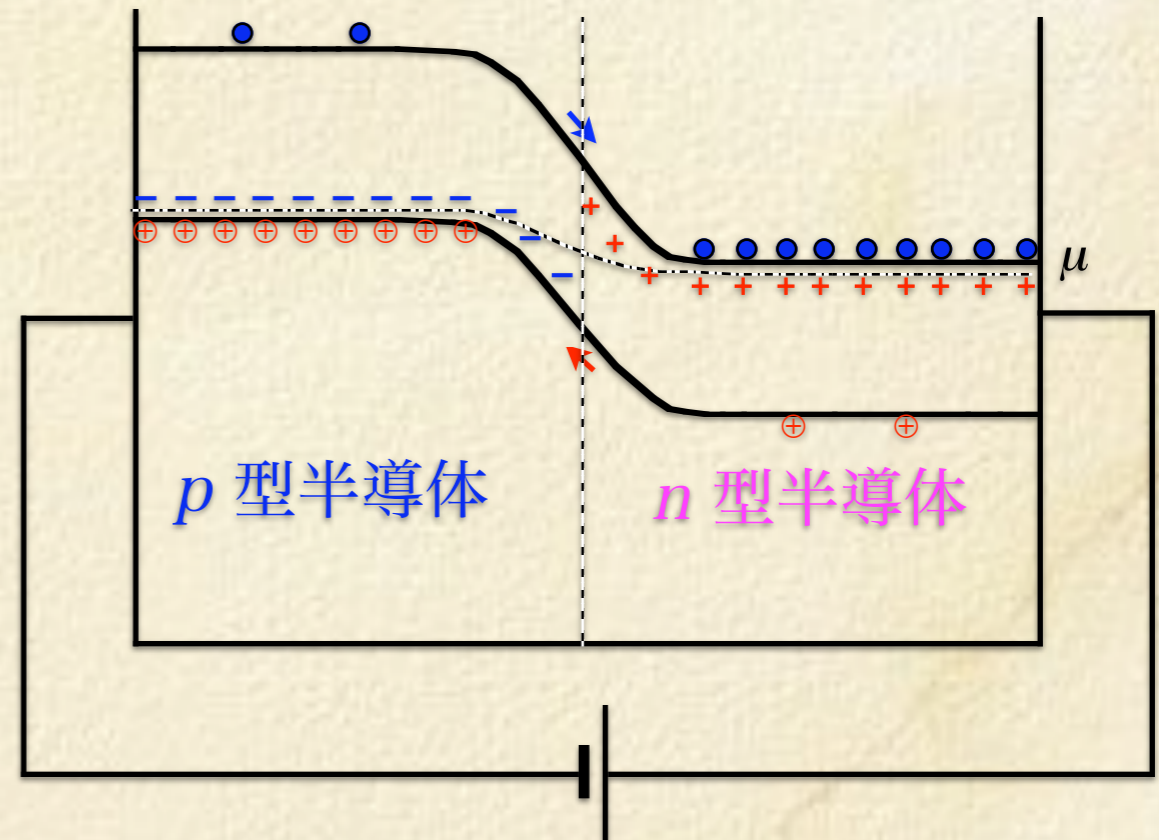
# *p-n* 接合の機能



# *p-n* 接合ダイオードの動作

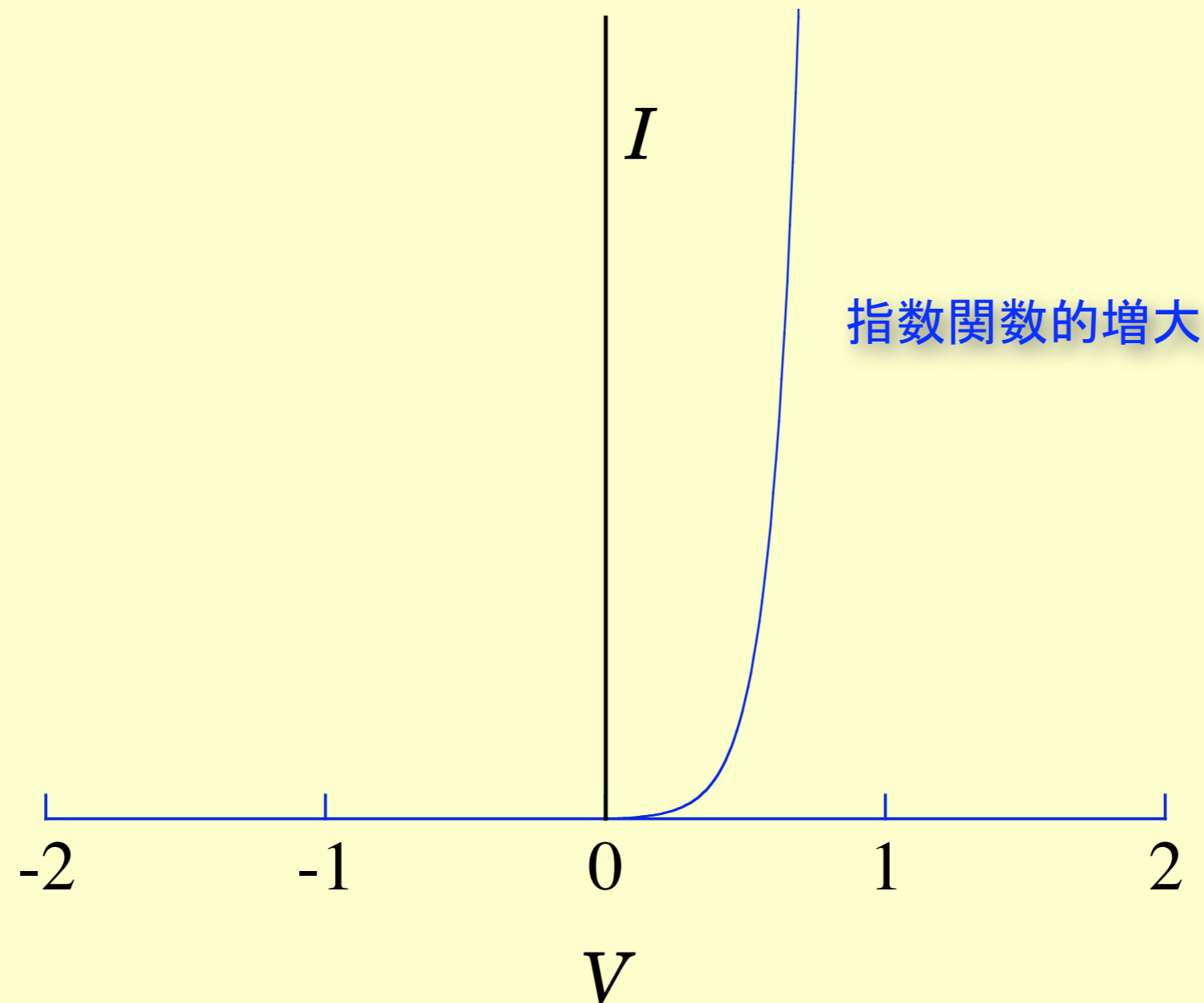


順バイアス

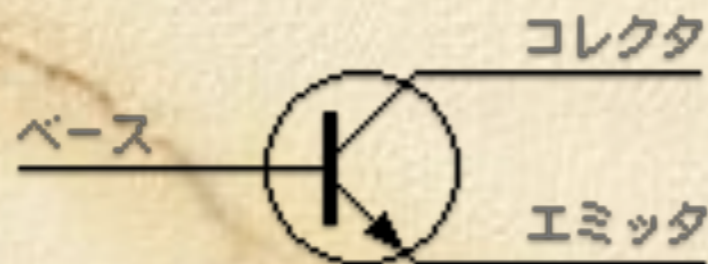
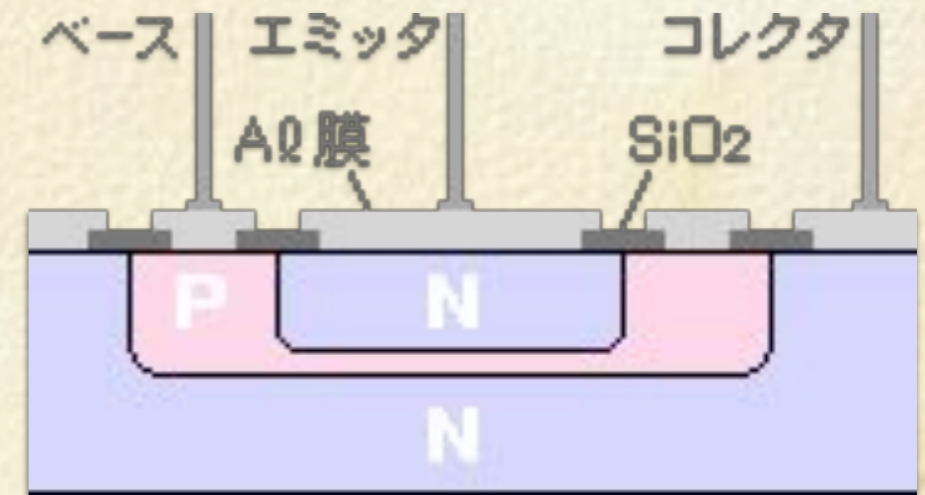
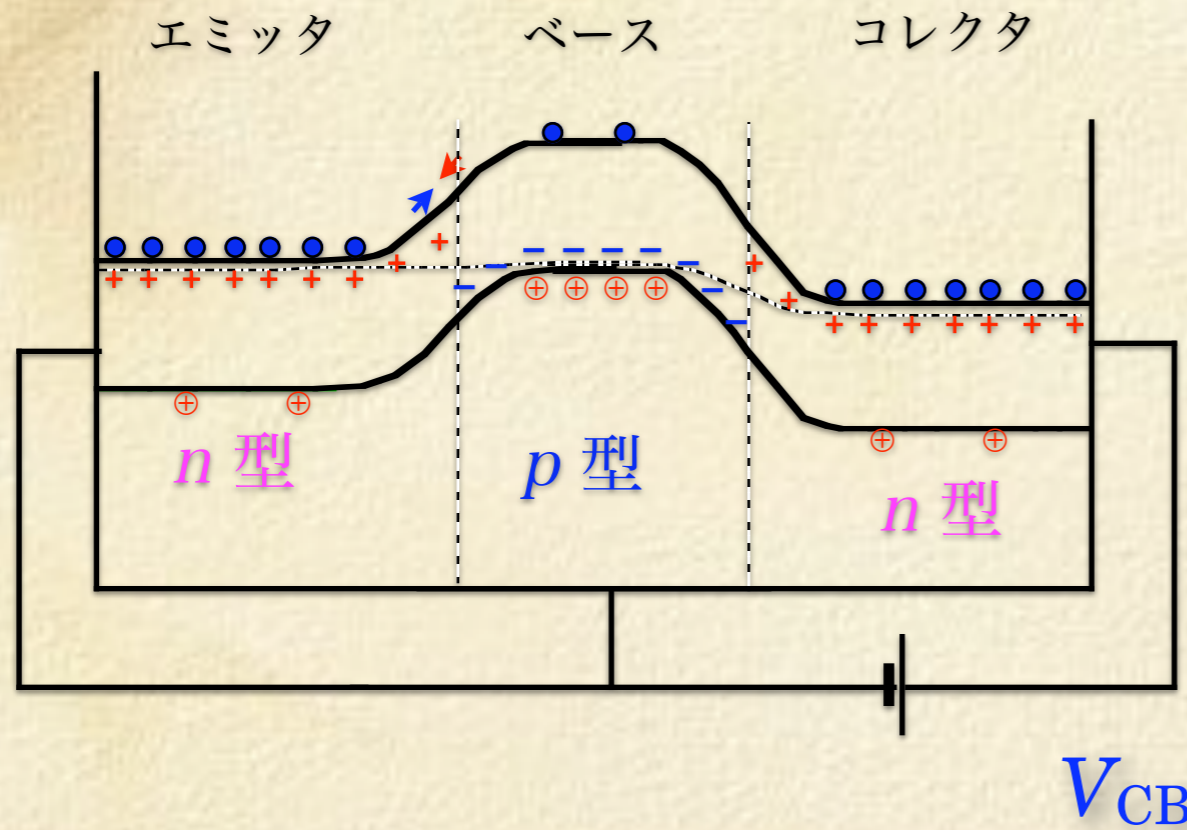


逆バイアス

# $p$ - $n$ 接合ダイオードの $V$ - $I$ 特性

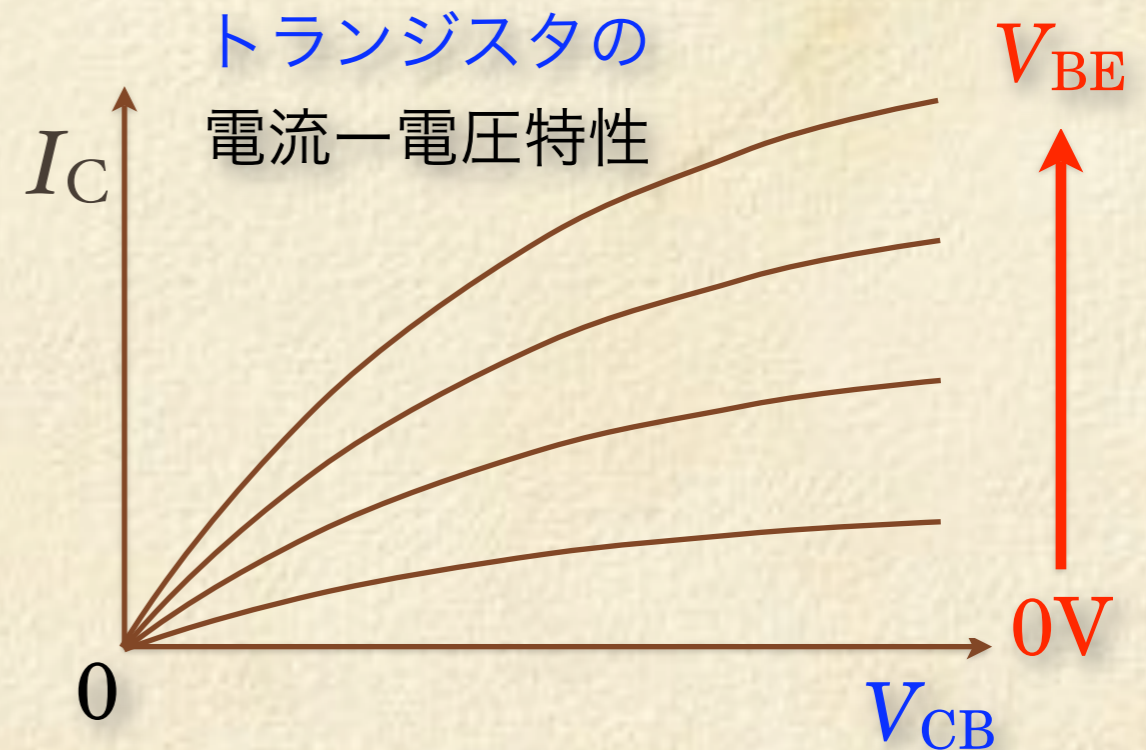
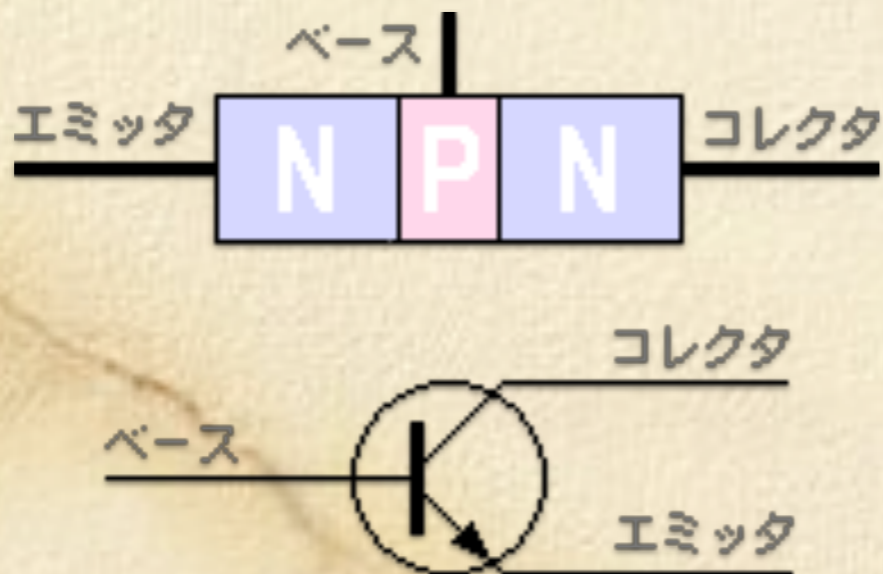
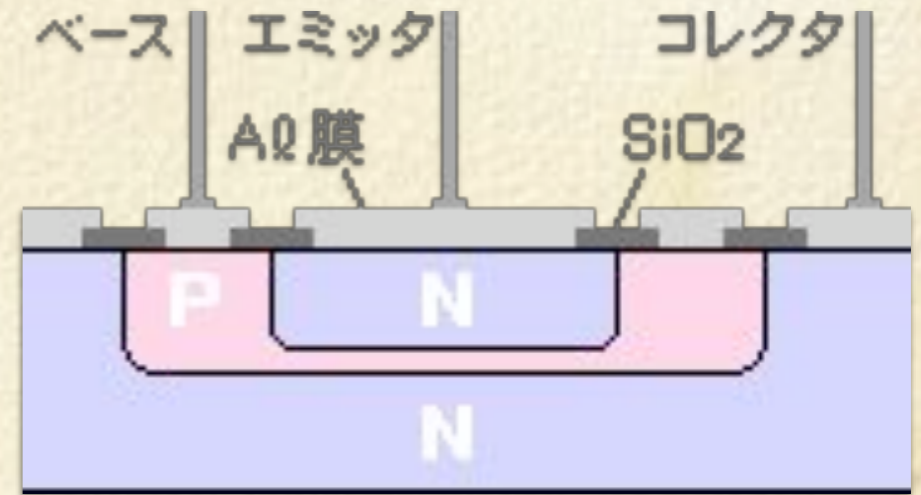
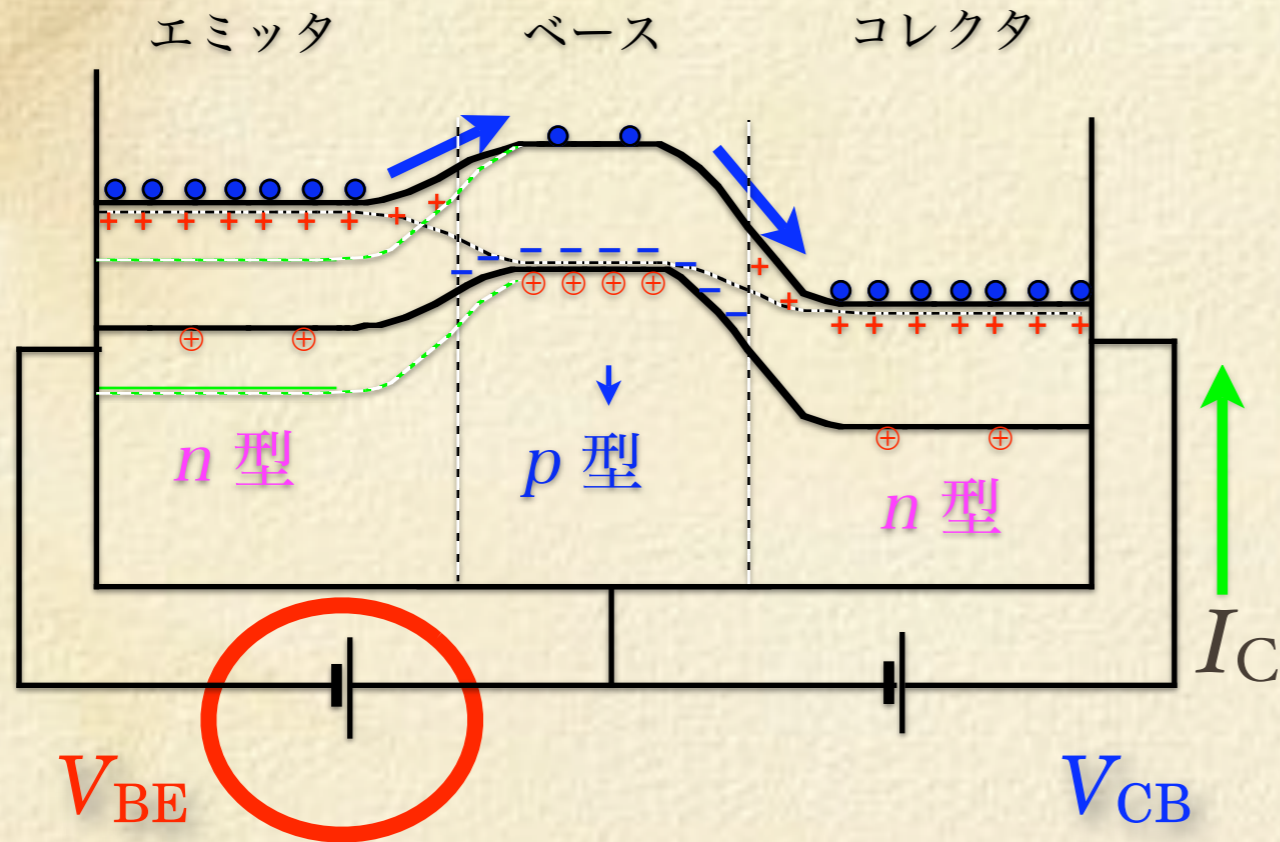


# *n-p-n*トランジスタの動作





# *n-p-n*トランジスタの動作



# 電子立国 日本の自叙伝

## トランジスタの開発



香子立園

日本の自叙伝