

F05220T15

©2022 YHAL, YITP, Kyoto University  
京都大学基礎物理学研究所 湯川記念館史料室 physics  
Kyoto University, Kyoto 606, Japan

DEPARTMENT OF PHYSICS  
OSAKA IMPERIAL UNIVERSITY.

DATE.....

NO. 1

漢字 五月二十一日

Fe, Co, Ni の Ferromagnetism の Origin

(J. C. Slater, Phys. Rev. 49, 537, 1936)

理論物理学の理論は個々の物質の特性の性質を説明する一般的な現象の説明に外ならない。少数の物質に限らず、ほとんどの現象に對し、何故それらの物質が磁気的現象を示すかを説明するべく多くの場合困難である。

この Ferromagnetism の起源の性質を對しては、以前、Heisenberg-Bloch の一般論が知られていた。これは Fe, Co, Ni 等の Ferromagnetism の起源を説明するに困難であった。Slater はこの論文で、この現象を Ferromagnetism の起源の理論を quantitative に示した。これは理論として、ほとんどの物質を説明するに成功した。

是 Ferromagnetism の origin として、classical to Weiss の Hypothesis である。ferromagnetism 中の external field  $H$  である molecular field  $H_m$  である。これはこの物質の mag. polarization  $J$  である。従って total field  $H$

$$H + \gamma J$$

is the prob. of

the atoms, あるいは field  $H$  中の atom の spin orientation である resultant magnetic pol.  $J$  である。

$$T < \frac{2\gamma n \mu_0^2}{k} = \theta \quad \text{Curie Point}$$

の場合、 $H \rightarrow 0$  の limit における spontaneous magnetisation である。従って  $\mu_0 = \frac{h}{4\pi mc}$  (Bohr magneton)



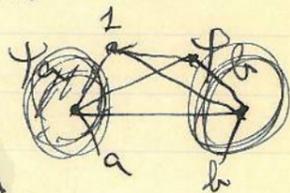
DEPARTMENT OF PHYSICS  
 OSAKA IMPERIAL UNIVERSITY.

DATE \_\_\_\_\_  
 NO. \_\_\_\_\_

この multiplicity が大きい state の方が stable である。その spin value of atoms である。 metallic crystal 中の atom の spin の sum である。この atom の valency exchange integral が negative である。 crystal 中の multiplicity が大きい。 total spin が大きい。 spin magnetic moment が stable である。 crystal の resultant が stable である。 spontaneous magnetization である。

その方が positive である。 most probable state である。 total spin max である。 magnetic moment である。 most probable である。 metal spontaneous magnetization である。 Heisenberg の Ferromagnetic substance である。 exchange integral (Anderson integral)

$$J = \int \psi_a(1) \psi_b(2) \psi_a(2) \psi_b(1) \left( \frac{1}{r_{ab}} - \frac{1}{r_{a1}} - \frac{1}{r_{b1}} + \frac{1}{r_{12}} \right) d\tau$$



これは (この) 場合 である。 neg. である。

この、 $\psi_a, \psi_b$  が s-state である。  $J$  が neg. である。

∴ 2 atoms  $\psi_a(1) \psi_b(2)$  である。  $\rho = \psi_a \psi_b$  である。



DEPARTMENT OF PHYSICS  
 OSAKA IMPERIAL UNIVERSITY.

DATE \_\_\_\_\_  
 NO. 5

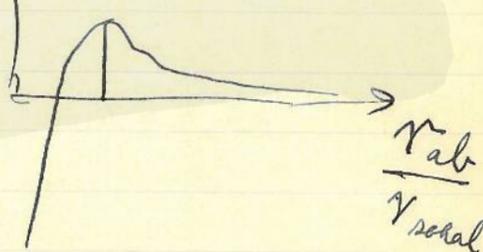
2 1234 Ni, Co, Fe y Au: (e, Yb y it Ferro. 24) 33  
 45 (1-15)

47 丁の 磁気的性質 について 24 y. 24 y pos. 45  
 47 丁の 磁気的性質 について 24 y. 24 y pos. 45  
 47 丁の 磁気的性質 について 24 y. 24 y pos. 45

47 丁の 磁気的性質 について 24 y. 24 y pos. 45  
 47 丁の 磁気的性質 について 24 y. 24 y pos. 45  
 47 丁の 磁気的性質 について 24 y. 24 y pos. 45

47 丁の 磁気的性質 について 24 y. 24 y pos. 45  
 47 丁の 磁気的性質 について 24 y. 24 y pos. 45  
 47 丁の 磁気的性質 について 24 y. 24 y pos. 45

47 丁の 磁気的性質 について 24 y. 24 y pos. 45  
 47 丁の 磁気的性質 について 24 y. 24 y pos. 45  
 47 丁の 磁気的性質 について 24 y. 24 y pos. 45

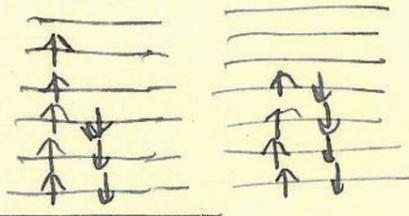


47 丁の 磁気的性質 について 24 y. 24 y pos. 45  
 47 丁の 磁気的性質 について 24 y. 24 y pos. 45  
 47 丁の 磁気的性質 について 24 y. 24 y pos. 45

47 丁の 磁気的性質 について 24 y. 24 y pos. 45  
 47 丁の 磁気的性質 について 24 y. 24 y pos. 45  
 47 丁の 磁気的性質 について 24 y. 24 y pos. 45



DEPARTMENT OF PHYSICS  
 OSAKA IMPERIAL UNIVERSITY.



DATE .....  
 NO. 7

銅の 3d 軌道に 10 個の電子が 1 個 electron ずつ。  
 $Ni^{2+}$ ,  $Co^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$  → 2 個の electron energy band の場合  
 10 個の電子が 2 個の band に入る。  $Ni$  の 3d 軌道は 9.5 eV,  $Co$  の 8.5 eV,  $Fe$  の 7.5 eV 程度である。(Mott (Proc. Phys. Soc. 47, 571), 1955 の conduct. 理論の 5 章 12 節を  
 参考せよ)

2 個の band の orbital 及び orientation (m) による energy change と spin 及び orientation による energy 差。  
 2 個の band の case ... 2 個の band の perturbation theory を用いて  
 2 個の band の parallel spin の case において electron の pair  
 による exchange integral の sum の 1 項をとり  
 1 項の energy の change である。 exchange integral は  
 positive 故に 1 個の electron pair が 1 個の band に  
 ... 3d 軌道に  $N(10-n)$  個の電子が入ると right spin  
 が  $n$  個、left spin が  $(5-n)$  個の場合が most stable  
 である。

1 個の band に入ると energy level の下の方に入ると  
 1 個の band に入ると energy の band と 1 個の band  
 による 1 個の band に入ると stable state として 0 spin 及び  
 maximum spin の state である。 - 1 個の energy level の  
 1 個の band に入ると energy の band と 1 個の band  
 band の case である。 1 個の band に入ると  
 unfilled shell の nonoverlapping の場合) Ferromagnetic  
 である。



DEPARTMENT OF PHYSICS  
 OSAKA IMPERIAL UNIVERSITY.

13.5  
 18  
 ---  
 1080  
 135  
 ---  
 243.0

13.5 volt  $\rightarrow$  109.737  $\text{cm}^{-1}$   
 NO. 9 22

13.5 volt  $1.1 \times 10^4$

exchange energy の値  $18 \times 10^2 \text{ cm}^{-1} \rightarrow 18 \times \frac{13.5}{11} \times 10^{-2} = 0.22 \text{ volt}$   
 ~~$18 \times 10^2 \text{ cm}^{-1}$~~   $- 1866 \text{ cm}^{-1}$  per atom  
 $= 0.22 \text{ eV}$  per atom

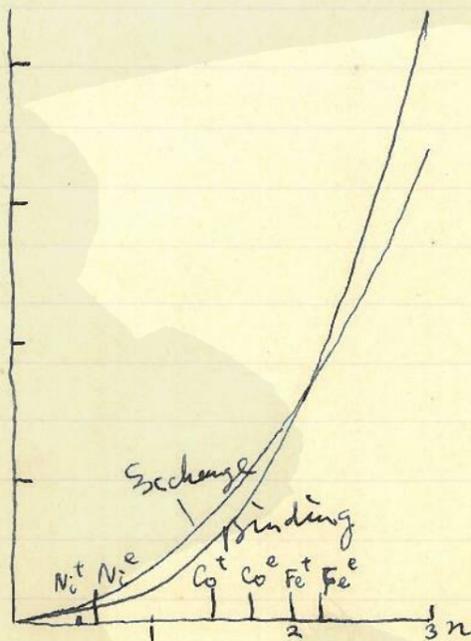
この binding energy of nonmag state の s mag. state  
 の差を  $n$  とし  $n$  の関数として  $n$  の関数として

$n$  が小さいときは binding energy exchange energy の方が  
 大きく  $n$  が 2 magnetic state が stable になり、 $n$  が 3  
 になると  $n$  の関数として

Nickel の場合は  $n$  を extrapolate して  $n=0.5$

Mott の experiment は  $n=0.6$  である、 $n$  が  $n=1$  の  
 間では Ni は ferromagnetic 領域である。

$n$  を Co, Fe を extrapolate  
 して  $n$  の関数として  $n$  の  
 curve を  $n$  とし、 $n$  の関数として  
 ~~$n$  の関数として  $n$  の関数として~~  
 ~~$n$  の関数として  $n$  の関数として~~  
 $n$  を Co, Fe の crystal  
 structure と関係する。この  $n$  の  
 ~~$n$  の関数として  $n$  の関数として~~  
 vol. 2 の  $n$  を Ni, Co, Fe  
 の ferromag. 領域の  $n$  の  
 non-mag. 領域の  $n$  の  
 値を示す。



$$\frac{v}{c} \cdot hc \rightarrow h\nu$$

DEPARTMENT OF PHYSICS  
 OSAKA IMPERIAL UNIVERSITY.

$$271 \times \frac{13.5}{11 \times 10^4}$$

DATE \_\_\_\_\_  
 NO. 10

$$\begin{array}{r} 271 \\ 13.5 \\ \hline 813 \end{array} \quad 0.0330$$

$$\begin{array}{r} 271 \\ 11) 3658.5 \\ \hline 330 \end{array}$$

Nickel の場合 magnetic state & non-mag. state の energy difference は  $n = 0.6 \times 10^4 \text{ cm}^{-1} = 0.033 \text{ volt}$   
 $k_B \theta = 440 \text{ cm}^{-1}$  の order of mag.  
 従って 3d の band の top の concentration は 2% 以下  
 の energy は Curie energy の 1/5 - 2% の order of mag. 以下  
 である。

この electron の specific heat は T 以下で 1/5 以下  
 である (lattice vibration 以下) Ni の case  
 は anomalously である。これは Keesom の model  
 による band の top の concentration は 2% 以下  
 である。  $C_v = 0.0011 T \text{ cal per mol per degree}$   
 exp.  $0.001744 T$ , order of mag.

Slater の d-d の exchange (s-d) の exchange による  
 free electron の magnetic theory による  
 説明は 2% 以下である。又 iron の case  
 の band の top の concentration は 2% 以下  
 である。

DEPARTMENT OF PHYSICS  
 OSAKA IMPERIAL UNIVERSITY.

DATE \_\_\_\_\_  
 NO. 8

|       | K | L <sub>I</sub> | L <sub>II</sub> | M <sub>I</sub> | M <sub>II</sub> | M <sub>III</sub> | N <sub>I</sub> | N <sub>II</sub> | N <sub>III</sub> | N <sub>IV</sub> | N <sub>V</sub> |   |
|-------|---|----------------|-----------------|----------------|-----------------|------------------|----------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------|---|
| n     | 1 | 2              | 2               | 3              | 3               | 3                | 4              | 4               | 4                | 4               | 4              |   |
| k     | 1 | 2              | 2               | 1              | 2               | 3                | 1              | 2               | 3                | 4               | 4              |   |
| mult. | s | s              | p               | s              | p               | d                | s              | p               | d                | f               | f              |   |
| 2 H   |   |                |                 |                |                 |                  |                |                 |                  |                 |                |   |
| He    |   |                |                 |                |                 |                  |                |                 |                  |                 |                |   |
| Li    |   |                |                 |                |                 |                  |                |                 |                  |                 |                |   |
| Be    |   |                |                 |                |                 |                  |                |                 |                  |                 |                |   |
| 18 Ar |   |                |                 |                |                 |                  |                |                 |                  |                 |                |   |
| 19 K  |   |                |                 |                |                 |                  |                |                 |                  |                 |                |   |
| 20 Ca |   |                |                 |                |                 |                  |                |                 |                  |                 |                |   |
| 21 Sc |   |                |                 |                |                 |                  |                |                 |                  |                 |                |   |
| 22 Ti | 2 | 2              | 6               | 2              | 6               | 10               | 2              |                 |                  |                 |                |   |
| 26 Fe | 2 | 2              | 6               | 2              | 6               | 10               | 2              | 6               | 10               | 14              | 18             | 2 |
| 27 Co | 2 | 2              | 6               | 2              | 6               | 10               | 2              | 6               | 10               | 14              | 18             | 2 |
| 28 Ni | 2 | 2              | 6               | 2              | 6               | 10               | 2              | 6               | 10               | 14              | 18             | 2 |
| 29 Cu | 2 | 2              | 6               | 2              | 6               | 10               | 2              | 6               | 10               | 14              | 18             | 2 |
| 57 La | 2 | 2              | 6               | 2              | 6               | 10               | 2              | 6               | 10               | 14              | 18             | 2 |
| 58 Ce | 2 | 2              | 6               | 2              | 6               | 10               | 2              | 6               | 10               | 14              | 18             | 2 |
| 64 Gd | 2 | 2              | 6               | 2              | 6               | 10               | 2              | 6               | 10               | 14              | 18             | 2 |
| 71 Yb | 2 | 2              | 6               | 2              | 6               | 10               | 2              | 6               | 10               | 14              | 18             | 2 |
| 72 Hf | 2 | 2              | 6               | 2              | 6               | 10               | 2              | 6               | 10               | 14              | 18             | 2 |