

## 電子物性

**概要:** エレクトロニクスで使われている様々な電子材料の物性を理解するために、電磁気学、熱統計力学、量子力学等を用いて、水素原子をモデルにした原子の電子構造、7種類の晶系や14種類のブラベー格子などの結晶構造、弾性波近似からデバ依模型までの格子振動、物質中の電子、結晶の電子バンド構造、誘電体の誘電率と光の透過・反射との関係、磁性体の磁気的性質の起源と磁化率などについて学習する。

**到達目標:** 電子材料の電気的、磁気的、光学的な様々な性質を理解して、説明することができる。(知識・理解)



本講義の利用参考書:

- ・「新版電子物性」、松澤 剛雄・高橋 清・斉藤 幸喜 共著、(森北出版)、ISBN-13: 978-4627772021
- ・「固体物理学入門 第8版」、 Kittel著、(丸善)、ISBN-13: 978-4621076569
- ・「固体物理学 - 工学のために」、岡崎 誠 著、(裳華房)、ISBN-13: 978-4785322144



### 講義予定

- 第1回 電子物性の内容と概要説明 (スタートアップ授業)
- 第2回 量子力学の基礎I (量子、シュレーディンガー方程式)
- 第3回 量子力学の基礎II (閉じ込めポテンシャル、トンネル効果)
- 第4回 水素原子の電子構造
- 第5回 原子間結合の形成
- 第6回 原子・分子間結合の種類
- 第7回 結晶構造とブラベー格子、結晶面とミラー指数
- 第8回 格子振動とフォノンI (音響・光学モード、プランクの分布関数)
- 第9回 格子振動とフォノンII (格子比熱と熱伝導率)
- 第10回 金属の自由電子モデルI (状態密度、フェルミ球)
- 第11回 金属の自由電子モデルII (電子比熱、電気伝導度)、ホール効果
- 第12回 ほとんど自由な電子モデルI (結晶のバンド構造)
- 第13回 ほとんど自由な電子モデルIIとマックスウェルの方程式
- 第14回 誘電関数と光の反射
- 第15回 磁性



注意事項:

講義には**毎回出席**すること。出席者は講義室入口にある出欠調査のカードリーダーに学生証を当てること。

講義資料をMoodleと下記のWEBページに掲載するので、毎回講義前にその**講義資料を使って予習**すること。予習もせず、講義資料も持たずに、ただ講義室に座っているだけでは、講義内容は理解できない。

また、講義後にMoodleに復習のための課題を毎回出すので、その**課題をやること**。これも**成績に反映される**。

<https://www.cis.fukuoka-u.ac.jp/~tsuzuki/>



### 電子物性とは何か?:

物質の機械・熱・電気・磁気・光学的な様々な性質のことを物性という。世の中に存在する物質は様々な原子から構成されているが、物質の物性は構成原子の種類や結合の仕方等によって決まっている。特に、その物質を構成する原子の電子状態が物質の物性に大きく影響する。(原子核は、あまり影響しない)

物質内の原子や原子間結合、原子の周りにいる電子の状態やエネルギー等は、電磁気学、熱統計力学、量子力学等を用いて記述することができる。それらの道具を用いて、物質の巨視的な性質(物性)を原子レベルの微視的な観点から考察し、そのメカニズムを明らかにしようとする学問分野が電子物性である。



### 有用な電気・磁気的な物性の例:

**高温超電導体:** 無損失電線、リニアモーターカー(超電導電磁石)  
(1987年ノーベル物理学賞)

**巨大磁気抵抗効果:** 大容量ハードディスク、磁気抵抗メモリ、  
(2007年ノーベル物理学賞)

**C<sub>60</sub>, Carbon nanotube, Graphene:** 次世代超高速小型電子デバイス、  
(1996年ノーベル化学賞、2010年ノーベル物理学賞)

**有機半導体:** 導電性プラスチック、透明フレキシブル電子デバイス、  
プリンタブルエレクトロニクス、分子エレクトロニクス  
(2000年ノーベル化学賞)

**青色LED, 半導体レーザー:** 光通信、大容量光ディスク(BD、ホログラフィックメモリ)、  
(2000年、2014年ノーベル物理学賞)

**ネオジム磁石:** 超小型モータ、高効率発電機、

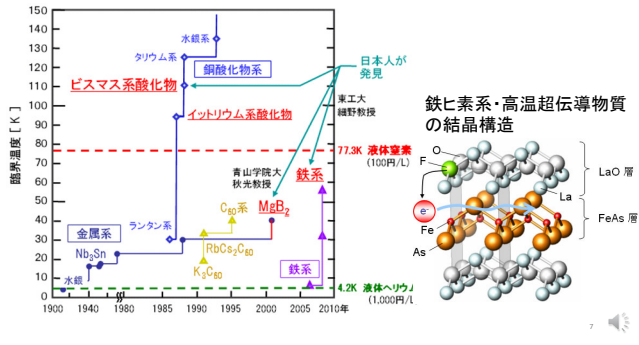
**量子ホール効果:** スピントロニクス  
(1985年、1998年ノーベル物理学賞)

**量子ドット:** 量子コンピュータ、単電子トランジスタ、

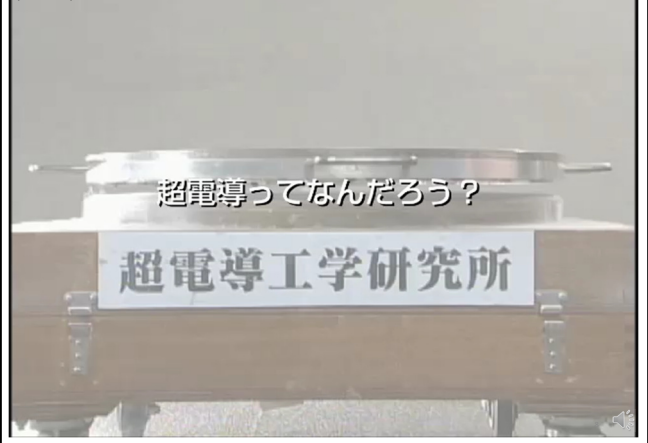


### 高温超電導体 (High- $T_c$ super conductor):

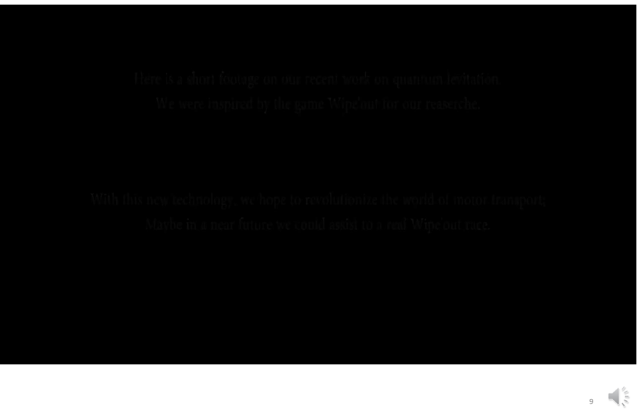
銅酸化物系や鉄ヒ素系のセラミックスは、100[K]前後で電気抵抗が完全に0となる。超電導電磁石等に使われている。現在は、室温で超電導になる物質の探索が行われている。



### (補足) 超電導:

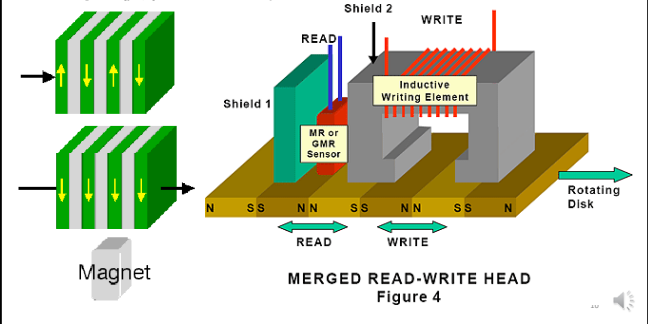


### リニアモーターカーの模型



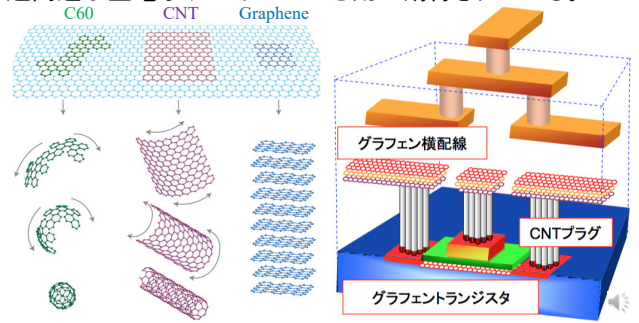
### 巨大磁気抵抗効果(Giant Magneto Resistive effect):

強磁性薄膜と非磁性薄膜の多層構造から構成される人工超格子に磁場を印加すると、その電気抵抗が大きく変化する効果を巨大磁気抵抗効果という。ハードディスクの磁気ヘッド等に使われている。

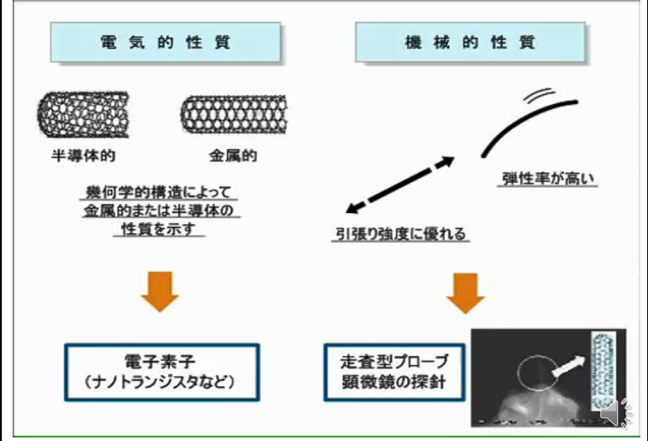


### C<sub>60</sub>, Carbon nanotube(CNT), Graphene:

グラファイト(黒鉛)の単層シートをグラフェンといい、それを球形や円筒形に丸めるとC<sub>60</sub>とCNTになる。グラフェンやCNTはシリコンよりも電子移動度の高い半導体で、次世代超高速小型電子デバイスへの応用が期待されている。



### カーボンナノチューブの解説:



**有機半導体(Organic Semiconductor):**  
 多環芳香族等の共役電子系を持つ有機化合物は、電導性があり半導体の性質を示す。それらの有機化合物を用いたフレキシブルで安価な電子デバイスが開発されている。

The diagram shows a cross-section of an organic FET (OFET) structure. From top to bottom, the layers are: Drain Electrode (ドレイン・ソース電極), Organic Semiconductor Layer (有機半導体薄膜), Gate Insulating Layer (ゲート絶縁膜), and Plastic Substrate (プラスチック基板). The gate electrode (ゲート電極) is located at the bottom. Labels include: フレキシブルシート, インクジェットプリンタ, プリントブルエレクトロニクス, ドレイン・ソース電極, 有機半導体薄膜, ゲート絶縁膜, プラスチック基板, ゲート電極, and 有機FET.

On the left is the cover of 'NIKKEI ELECTRONICS ASIA EDITION' with the headline 'From Printable to Printed: Manufacturing Electronics through Printing Technology'.

**(補足) フレキシブル有機ELパネル:**

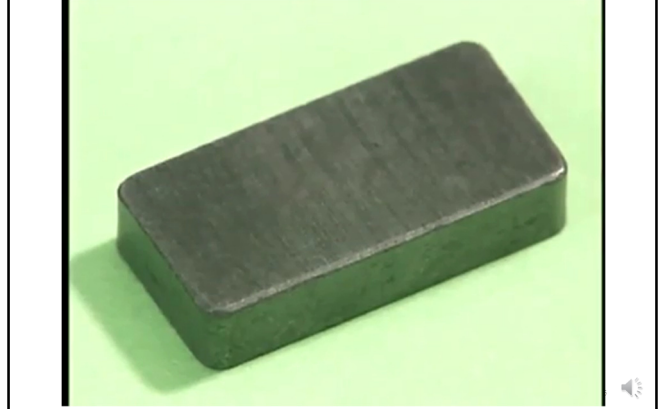


**半導体レーザー (Laser Diode):**

発光ダイオード(LED)と共振器構造を組み合わせて波長と位相の揃った光を出す。小型で消費電力が少なく安価なため、光通信、光ディスク、オプティカル・マウス、レーザーポインター、レーザープリンター等様々な電子機器のレーザー光源として使われている。

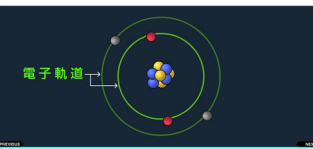
The schematic diagram shows a laser diode structure with a P-electrode on top and an N-electrode on the bottom. The semiconductor layers consist of a positive semiconductor, hetero interfaces, and a negative semiconductor. An emission region is shown between the hetero interfaces. A cleavage plane is indicated at the bottom. A photograph shows a laser diode chip emitting a blue laser beam.

**ネオジム磁石(Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B):** 現時点で最強の永久磁石である。80年代に住友特殊金属が開発した。



**原子の内部構造:**

物質を構成する実質的な最小単位は原子である(実際は、さらに素粒子に分解できる)。原子の内部構造は、 $+Ze$ の電荷を持つ原子核のまわりを、 $-e$ の電荷を持つ $Z$ 個の電子がまわっている( $Z$ は原子番号、 $e$ は電荷素量)。個々の電子が回っている( $Z$ 個の)軌道を、電子軌道という。(原子核は $Z$ 個の陽子と $Z$ 個程度の中性子からなる。)



	電気量 [C]	質量 [kg]
電子	$-1.6 \times 10^{-19}$	$9.1 \times 10^{-31}$
陽子	$+1.6 \times 10^{-19}$	$1.7 \times 10^{-27}$
中性子	0	$1.7 \times 10^{-27}$

原子核の周りには、電子が「電子軌道」という決まった軌道を回っています。通常、電子の数は陽子の数と同じです。

**周期律表 (periodic table): 原子の種類**

アルカリ土類金属																		IV族半導体										不活性元素	
1	2											13	14	15	16	17	18												
3	4											5	6	7	8	9	10												
11	12											13	14	15	16	17	18												
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36												
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54												
55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86												
87	88	89-104	105	106	107	108	109	110	111	112	ハロゲン元素																		
Fr	Ra	103	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt																					

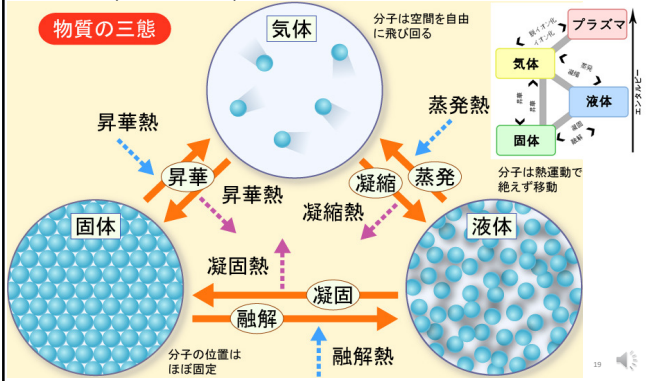
縦の列は化学的性質が似ている。

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

注意) Snは室温では金属だが13°C以下のα構造は半導体である。

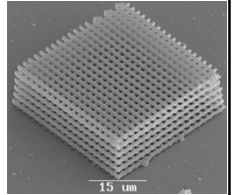
### 物質形態:

**固体** (低温): 例は氷、**液体** (中温): 水、**気体** (高温): 水蒸気、**プラズマ** (さらに高温): 電離した水素・酸素原子、



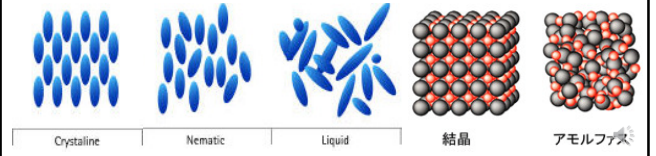
### 固体の種類:

**分子(molecule)**: いくつかの原子が結合した物質、  
**結晶(crystal)**: 多数の原子や分子が規則的に配列した物質、  
**非晶質(amorphous)**: 原子や分子が不規則に配列した物質、  
**液晶(liquid crystal)**: 結晶と液体の間状態にある有機高分子の物質。



### その他

**人工構造物**: 量子ドット、人工超格子、フォトニッククリスタル等。

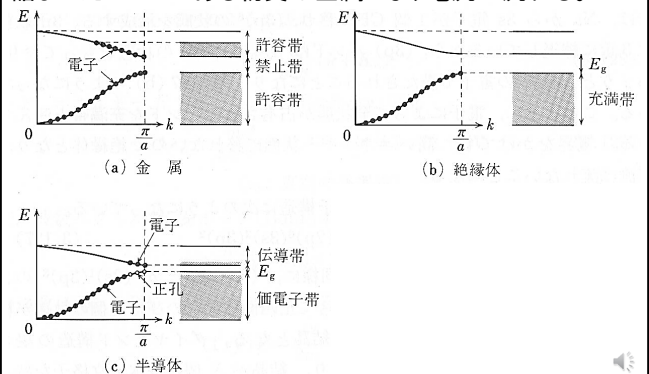


### 物質の電気的性質:

- 絶縁体(不導体)・半導体・金属(導体)の違いは、原子レベルで見ると電子が原子核を離れて物質中を自由に移動できるかどうかである。この自由に動き回れる電子のことを伝導電子という。一般的に、物質の組成や結晶構造から電気的性質を簡単に見分けられる様な法則性はないが、計算機シミュレーション等である程度の予測はできる。

- 物質内では、構成原子の電子軌道から結晶全体に広がるエネルギーバンド構造が形成され、電子はそのエネルギーバンドの中に入っている。バンドに部分的に空きがあると、電子は物質内を移動できて金属や半導体となるが、全てのバンドが満席か空の状態では、電子は物質内を移動できずに絶縁体となる。

**電気伝導とバンド構造**: 電子が満席か空のバンドしか無い物質は絶縁体となり電流が流れない。電子が中途半端に詰まったバンドがある物質は金属となり電流が流れる。



### 物質の磁气的性質:

- 反磁性・常磁性・強磁性の違いは、原子核の周りをまわる電子の数や原子間の結合状態等で決まる。一般的に、物質の組成や結晶構造から磁气的性質を簡単に見分けられる様な法則性はないが、計算機シミュレーション等である程度の予測はできる。
- 物質の磁气的性質は、物質中の電子の自転運動(スピン)と、原子核の周りをまわる軌道運動を起源としている。つまり、電荷を帯びた電子が動くとき電流が流れて磁場が発生する。巨視的な磁性には原子核はあまり関係ない。
- 原子の各電子軌道には通常2個ずつ対になって電子(対電子)が入り、互いのスピンを打ち消し合っている。しかし、不對電子を持つ原子(もしくは原子イオン)がある様な一部の物質では、電子スピンの磁性が打ち消されずに残り、強磁性が発現する。

### 物質の光学的性質:

- 物質の光学的性質(屈折率や反射率等)は、主に物質の誘電関数 $\epsilon(\omega)$ (誘電率)の値で決まる。物質の色や透明度も、ほぼ誘電関数で決まっている。
- 物質の誘電関数は、電磁波(光)が外から入射した時に物質内部にある電子がどう応答するかを表わしている。また、誘電関数は電磁波の振動数 $\omega$ の関数になっていて、一般に複素数である。
- 物質内で電磁波が吸収される現象(光吸収)は、物質内の様々な励起過程(エネルギー吸収過程)に関係している。一般に、特定の励起過程は、特定の波長の電磁波のみを吸収する。

**次回の予告:**

**ド・ブロイの物質波(de Broglie wave):**

全ての物質は”粒子性”と”波動性”を合わせ持つ。この物質の”波動性”のことをド・ブロイの物質波という。

**量子力学(Quantum Mechanics)の基礎:**

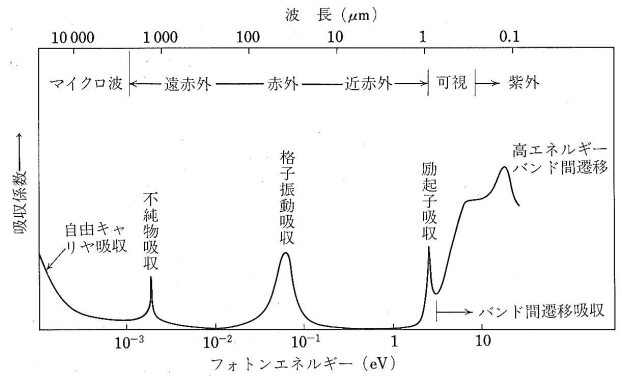
世の中の物質は、”波動”でもあり”粒子”でもある”量子”である。その存在は空間的に広がっており、波動関数 $\psi$ であらわされる。波動関数の2乗が物質の存在確率となる。

**シュレーディンガー方程式(Schrödinger equation):**

$$\left\{ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x) \right\} \varphi(x) = E\varphi(x), \quad (2.12)$$

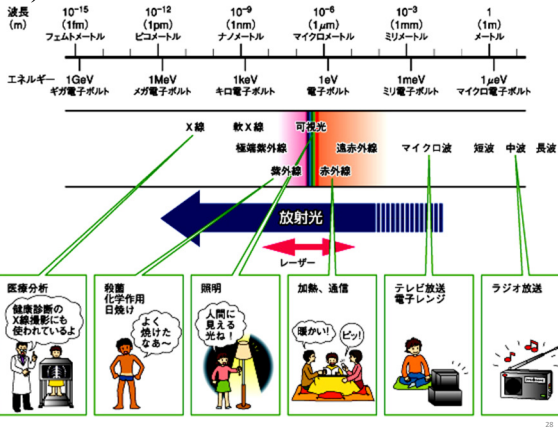
25

**(参考) 物質での光吸収スペクトルの例:**



27

**(参考) 光の波長とエネルギー:**



28