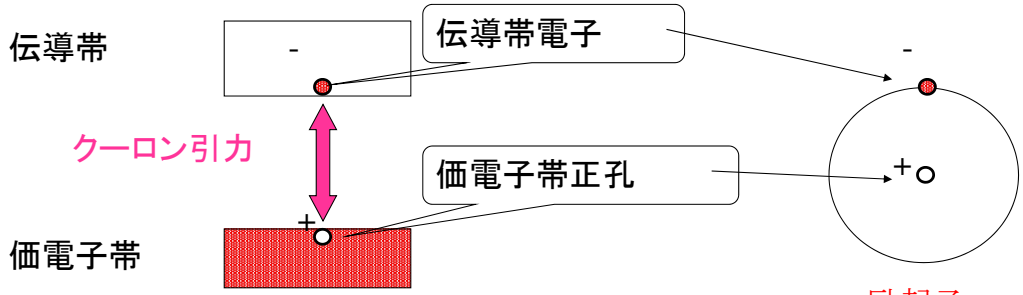
光量子エレクトロニクス特論

1. 電磁気学の復習
2. 量子力学の復習
3. 状態ベクトルとシュレディンガー方程式
4. 時間依存のシュレディンガー方程式
5. 密度行列法
6. 電子と光の相互作用-古典振動子モデル
7. 電子2準位系とブロッホ方程式
8. 電子2準位系におけるコヒーレント光非線形効果
9. 2原子分子のエネルギー準位
10. 固体のエネルギー準位
11. 光学遷移と次元性
12. 光学遷移におけるクーロン相互作用の効果
13. フラーレンの電子状態と光学遷移
14. ナノチューブの電子状態と光学遷移
15. まとめ

励起子

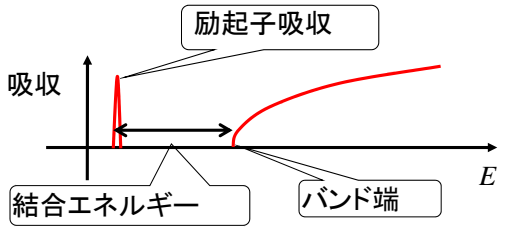
伝導帯電子と価電子帯正孔の間にはクーロン引力がはたらく
→正孔に電子が束縛された状態⇒励起子



励起子は結晶の中を運動し、中性の粒子のように振舞う。

結晶に励起子を作る吸収
⇒励起子吸収帯

バンド端より、電子と正孔の
結合エネルギー分だけ
低エネルギー



励起子

伝導帯電子と価電子帯正孔の間にはクーロン引力がはたらく
→正孔に電子が束縛された状態⇒励起子

$$\left\{-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2+U(r)\right\}\Psi=E\Psi$$

$$U(r)=-\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r}$$

$$\Psi(r,\theta,\varphi)=R(r)\Theta(\theta)\Phi(\varphi)$$

$$E_n=-\left(\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\right)^2\frac{me^4}{2\hbar^2}\frac{1}{n^2}$$

$$a_0=\frac{4\pi\varepsilon_0\hbar^2}{me^2}$$

$$\longrightarrow \quad m\to\mu,\quad \left(\frac{1}{\mu}=\frac{1}{m_e}+\frac{1}{m_h}\right)$$

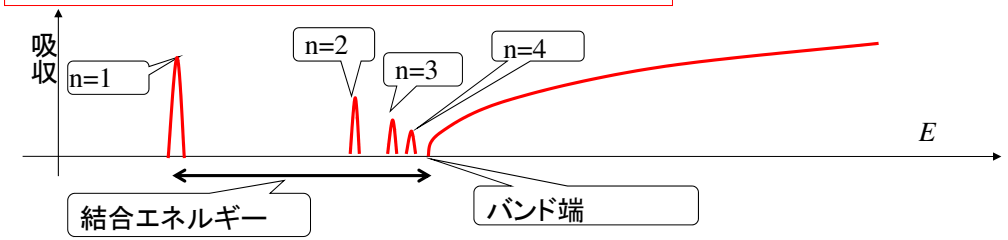
$$\varepsilon_0\to\varepsilon$$

水素原子と同様、励起子の束縛状態にも
主量子数nの違う励起子半径の異なる状態がある。

水素原子のエネルギー：$E_n=-R_H'/n^2$（主量子数 n）
R_H'：リドベルグ単位　換算質量μに比例し、
誘電率の2乗に反比例する。
（$\mu^{-1}=m_e^{-1}+m_h^{-1}$、通常$m_e<<m_h$より、$\mu\sim m_e$）

結晶中での電子の有効質量m_e＜電子質量
〃　誘電率　＞　真空の誘電率
→　励起子の結合エネルギー<<水素原子の結合エネルギー

n=1、n=2、･･･の励起子吸収のスペクトルの模式図



問：電子の有効質量が電子質量の0.05倍、誘電率が真空の10倍のとき、n=1の状態の励起子の束縛エネルギーとボーア半径はいくらか？
また、何度くらいまで安定か？

但し、水素原子のn=1の束縛エネルギー＝13.5eVおよびボーア半径=5.29×10^{-11}mを用いて良い。

問：電子の有効質量が電子質量の0.05倍、誘電率が真空の10倍のとき、n=1の状態の励起子の束縛エネルギーとボーア半径はいくらか？
また、何度くらいまで安定か？

但し、水素原子のn=1の束縛エネルギー＝13.5eVおよびボーア半径=5.29×10^{-11}mを用いて良い。

問：電子の有効質量が電子質量の0.05倍、誘電率が真空の10倍のとき、n=1の状態の励起子の束縛エネルギーとボーア半径はいくらか？
また、何度くらいまで安定か？

但し、水素原子のn=1の束縛エネルギー＝13.5eVおよびボーア半径=5.29×10^{-11}mを用いて良い。

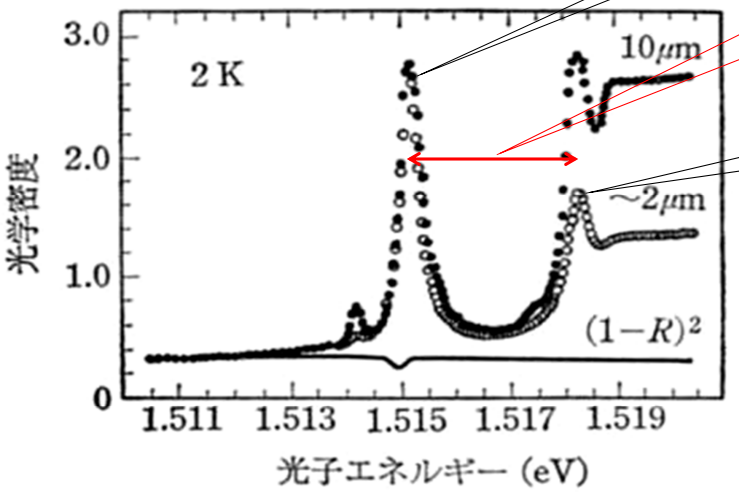
励起子の種類
（励起子半径の大きさによる分類）

励起子半径が格子間距離に比べて
ずっと大きな励起子 ⇒ ワニア励起子
同程度な励起子 ⇒ フレンケル励起子

半導体では比誘電率が大きく、有効質量が小さい
⇒ 励起子半径大 ⇒ ワニア励起子
束縛エネルギー小

ハロゲン化アルカリ、希ガス固体、分子性結晶
⇒ 励起子半径小 ⇒ フレンケル励起子
束縛エネルギー大
原子から原子へと励起エネルギーが移動していく
（分子から分子）

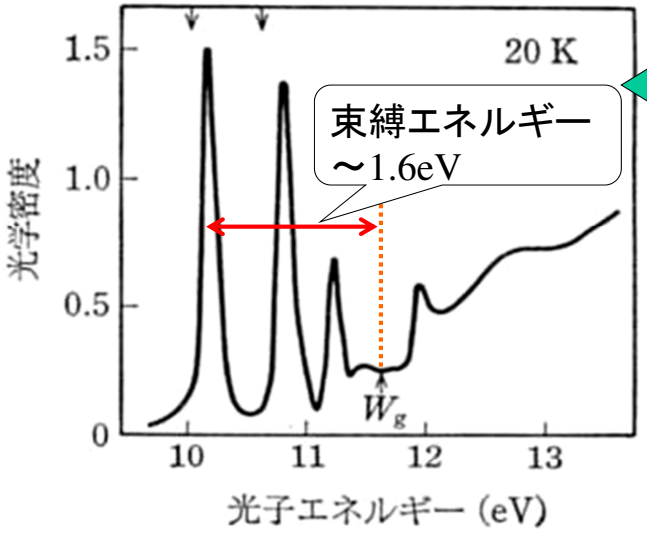
ワニア励起子の例
GaAsの吸収スペクトル



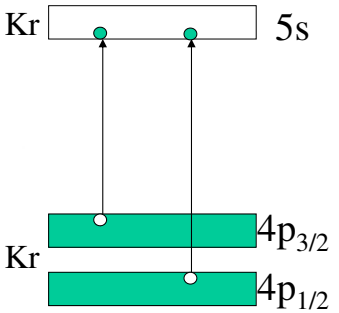
$R_H/1^2 - R_H/2^2$
$= 3R_H/4$
$= 3\text{meV}$
$\Rightarrow R_H = 4\text{meV}$

図 5.30 GaAs の吸収スペクトル[16]（実線は表面の反射による補正項を示す）

固体クリプトンの吸収スペクトル



GaAsの400倍！
フレンケル励起子



スピン軌道相互作用による分裂

図 5.32 固体クリプトンの吸収スペクトル[1] 上の矢印は Kr 原子の $4p^6-4p^55s$ 遷移による吸収線の位置を示す.