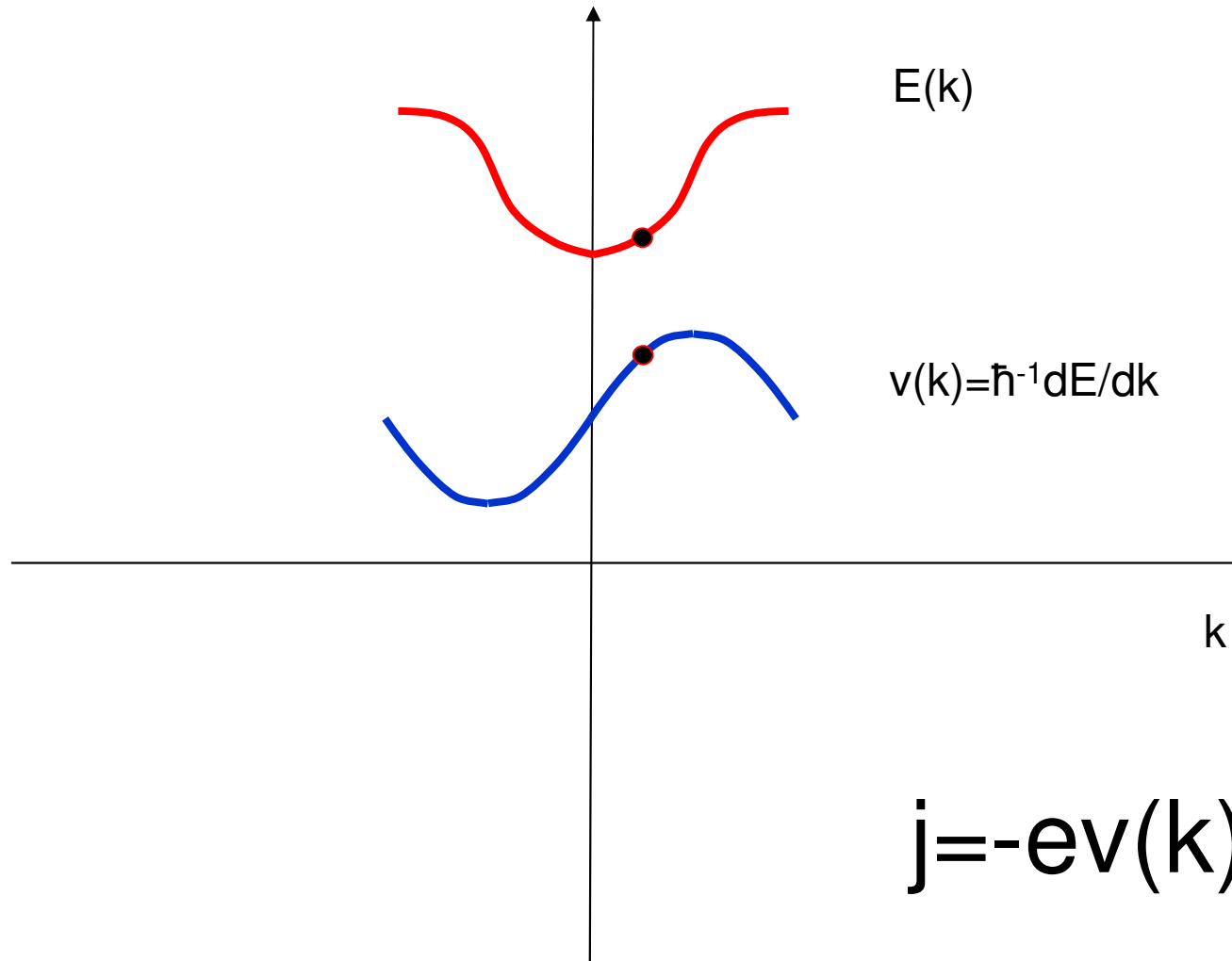
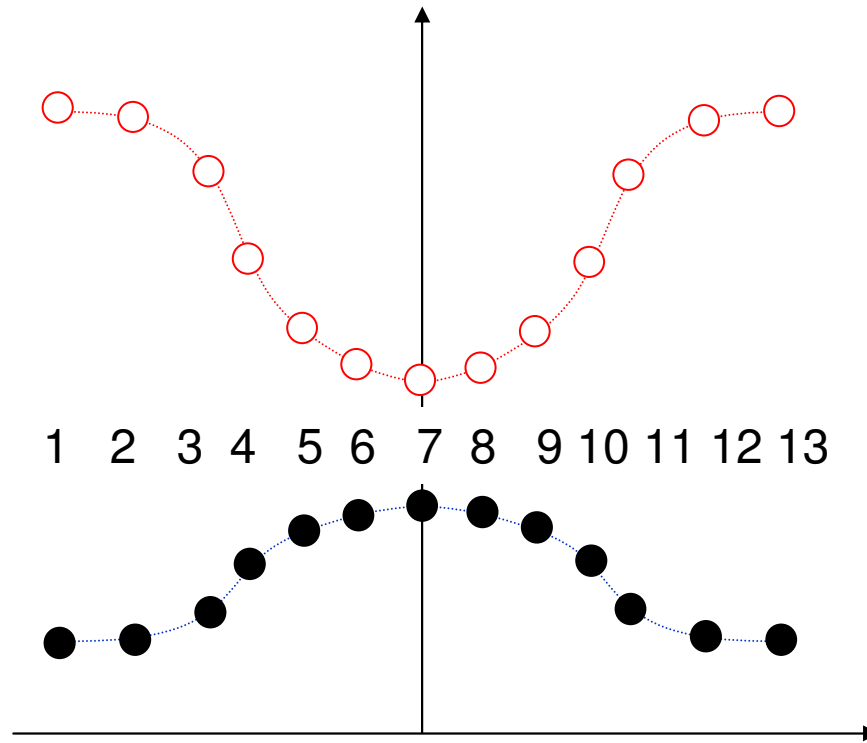


Un elettrone in una banda non piena trasporta corrente

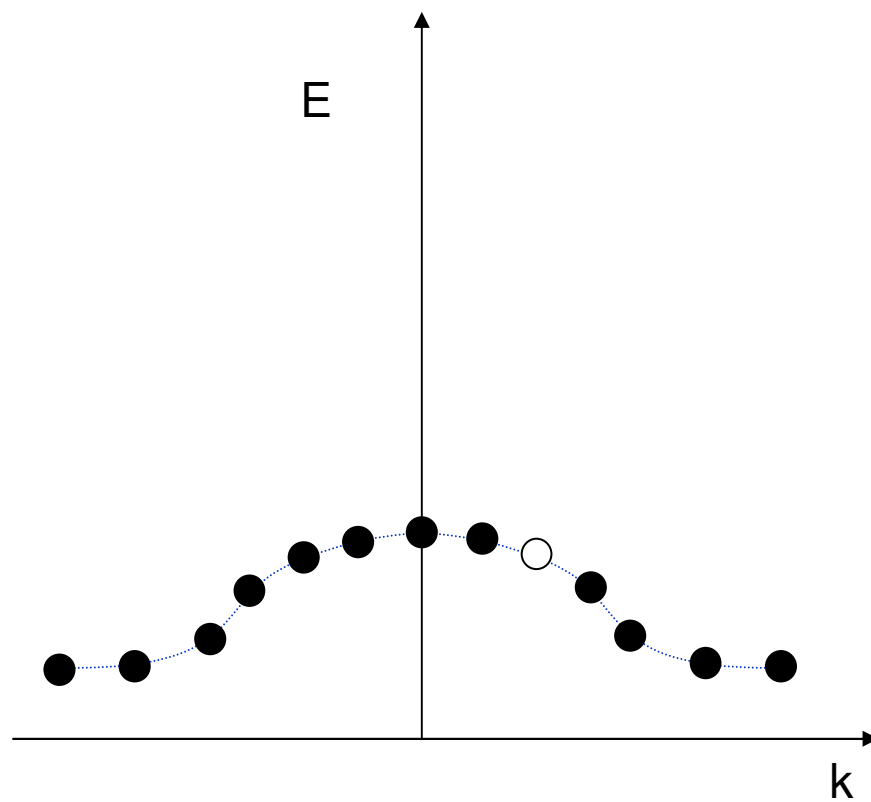


Gli elettroni di una banda vuota (piena) non trasportano corrente elettrica

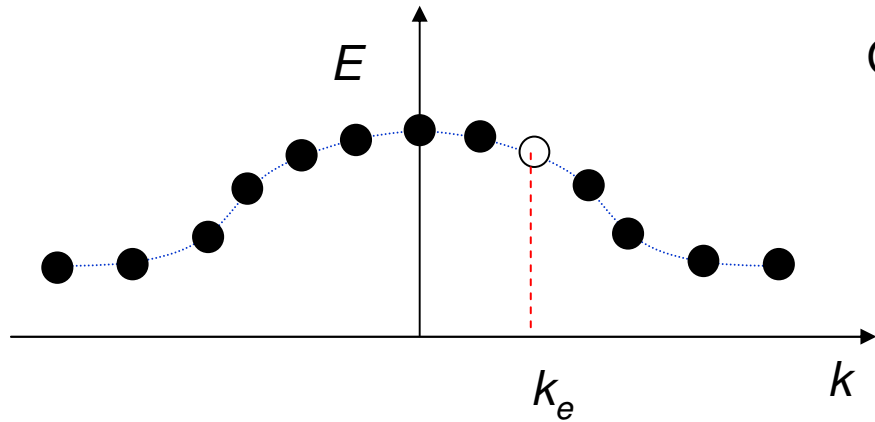


$$\vec{j} = \sum_{\mathbf{k}} -e\vec{v}(\mathbf{k}) = 0$$

Cosa succede ad una banda piena cui manca un elettrone?
Intuitivamente trasporta corrente.



Lacuna: stato a N-1 elettroni all'interno di una banda con N stati



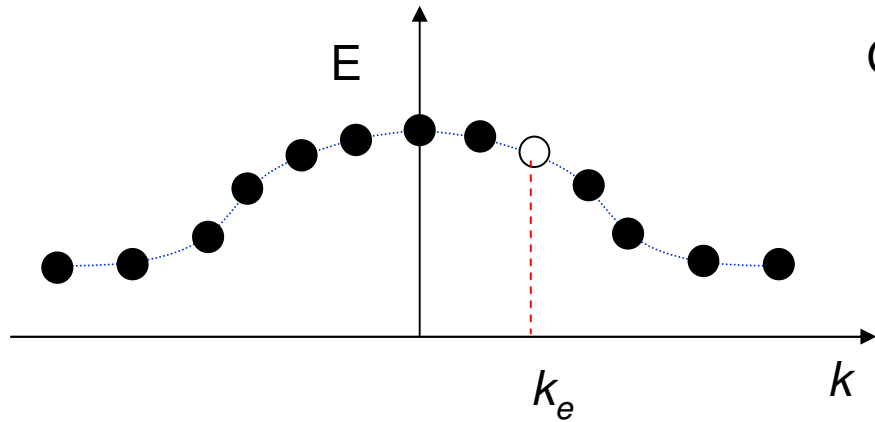
Qual'è l'energia dello stato di lacuna?

$$E_h \equiv \sum_{k \neq k_e} E(k)$$

$$E_h \equiv \sum_k E(k) - E(k_e) = E_o - E(k_e)$$

$$E_h = -E_e$$

Lacuna: stato a N-1 elettroni all'interno di una banda con N stati



Qual'è il momento dello stato di lacuna?

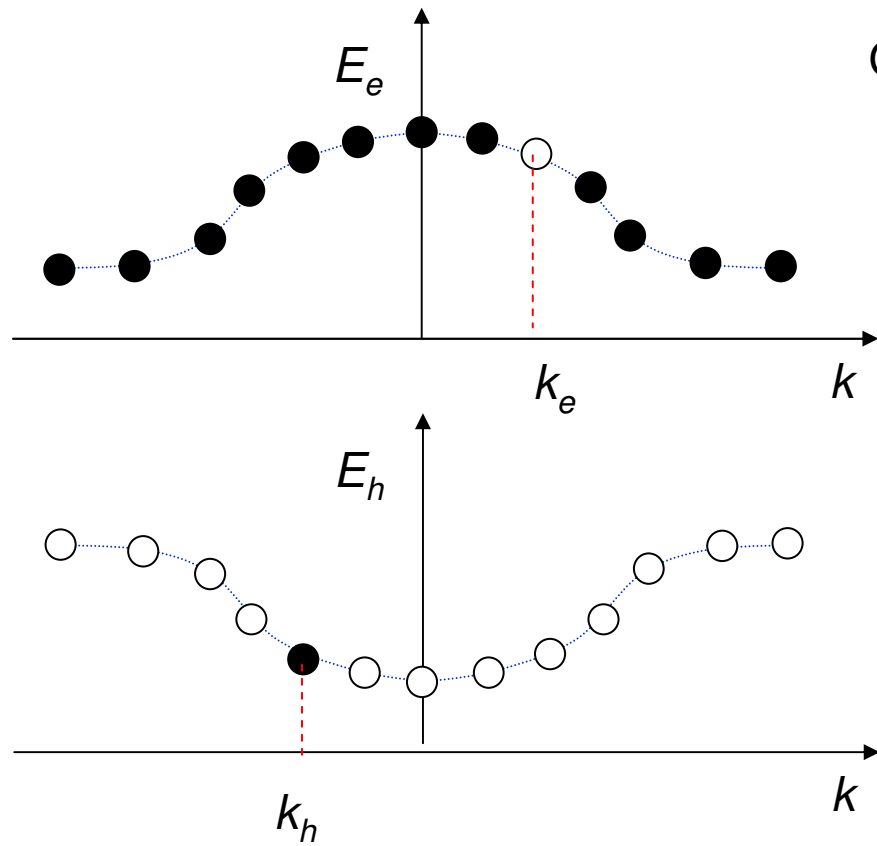
$$|\psi_h\rangle \equiv \prod_{k \neq k_e} |\psi(k)\rangle$$

$$|\psi_h\rangle = \prod_{k \neq k_e} u_k e^{ikr} = \prod_{k \neq k_e} u_k \prod_{k \neq k_e} e^{ikr} = \prod_{k \neq k_e} u_k e^{\sum_{k \neq k_e} ikr} =$$

$$= U_{k_e} e^{ir \left(\sum k - k_e \right)} = U_{k_e} e^{-ik_e r}$$

$$k_h = -k_e$$

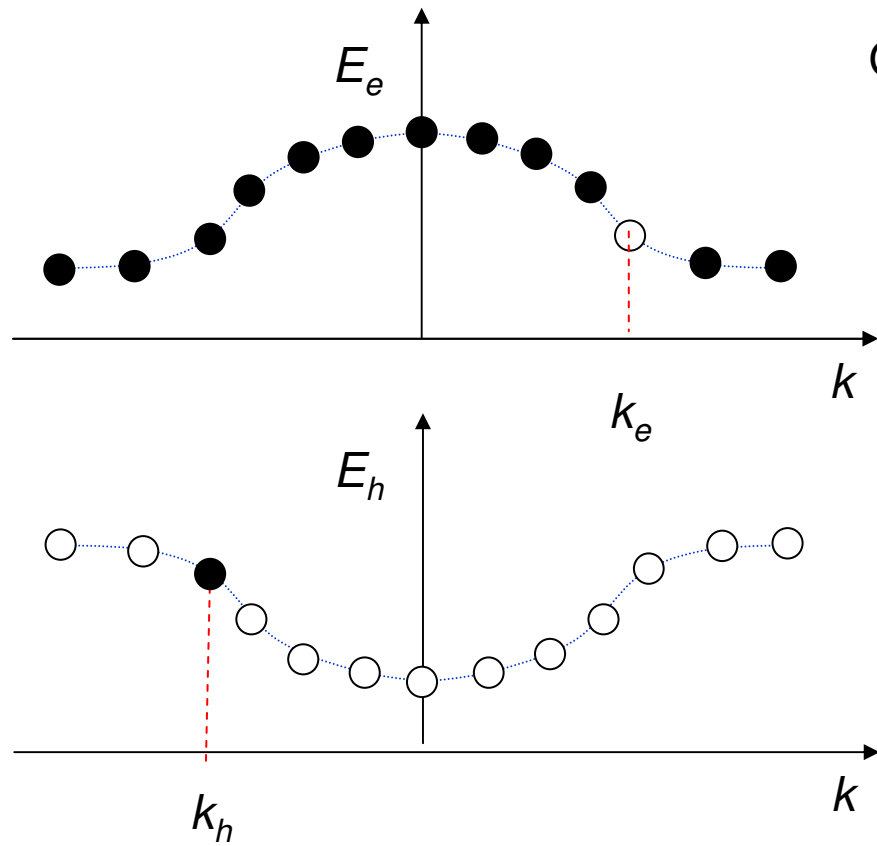
Lacuna: stato a N-1 elettroni all'interno di una banda con N stati



Qual'è la velocità dello stato di lacuna?

$$\begin{cases} E_h(\vec{k}_h) = -E_e(\vec{k}_e) \\ \vec{k}_h = -\vec{k}_e \end{cases}$$

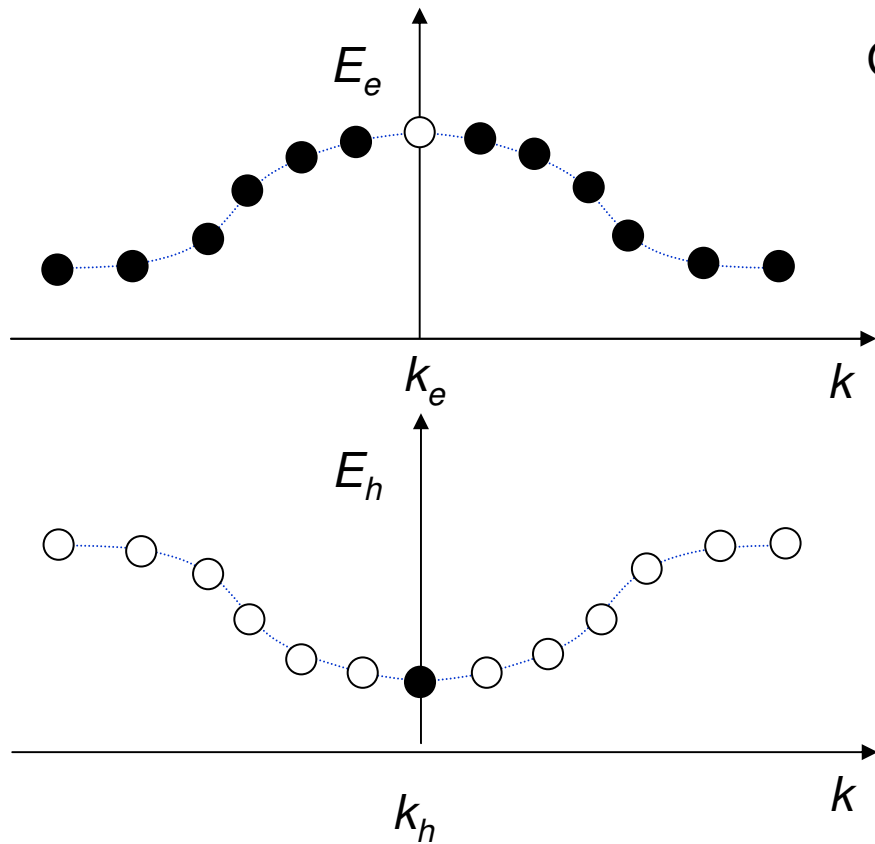
Lacuna: stato a N-1 elettroni all'interno di una banda con N stati



Qual'è la velocità dello stato di lacuna?

$$\begin{cases} E_h(\vec{k}_h) = -E_e(\vec{k}_e) \\ \vec{k}_h = -\vec{k}_e \end{cases}$$

Lacuna: stato a N-1 elettroni all'interno di una banda con N stati

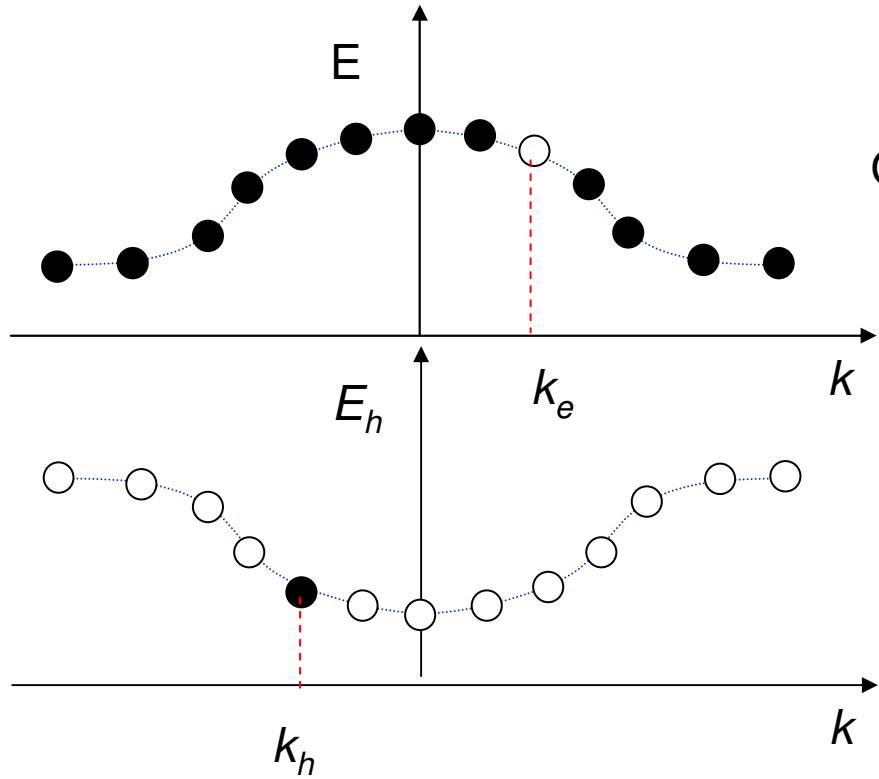


Qual'è la velocità dello stato di lacuna?

$$\begin{cases} E_h(\vec{k}_h) = -E_e(\vec{k}_e) \\ \vec{k}_h = -\vec{k}_e \end{cases}$$

Lacuna è una quasi particella

Lacuna: stato a N-1 elettroni all'interno di una banda con N stati



Qual'è la velocità dello stato di lacuna?

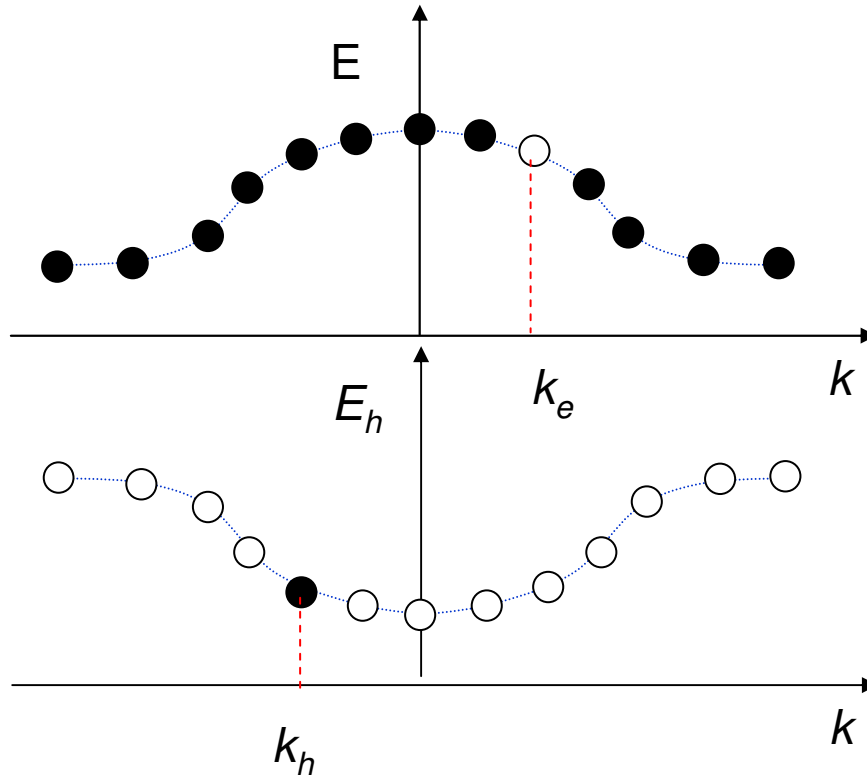
$$\begin{cases} E_h(\vec{k}_h) = -E_e(\vec{k}_e) \\ \vec{k}_h = -\vec{k}_e \end{cases}$$

$$\vec{v}_h(\vec{k}_h) = \vec{\nabla}_{k_h} E_h$$

$$\vec{v}_h(\vec{k}_h) = \vec{\nabla}_{-k_e} (-E_e) = \vec{\nabla}_{k_e} E_e = \vec{v}_e(\vec{k}_e)$$

$$\vec{v}_h(\vec{k}_h) = \vec{v}_e(\vec{k}_e)$$

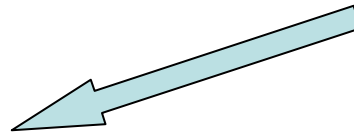
Lacuna: stato a N-1 elettroni all'interno di una banda con N stati



Qual'è l'inerzia dello stato di lacuna?

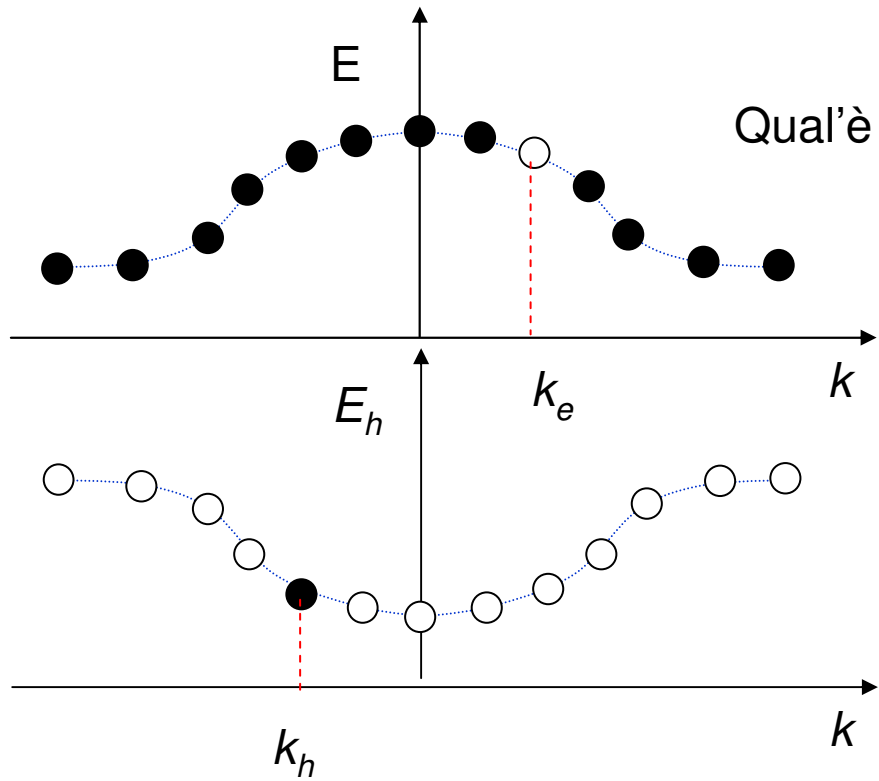
$$\begin{cases} E_h(\vec{k}_h) = -E_e(\vec{k}_e) \\ \vec{k}_h = -\vec{k}_e \end{cases}$$

$$m_h(\vec{k}_h) = \frac{\hbar^2}{\vec{\nabla}_{k_h} \cdot (\vec{\nabla}_{k_h} E_h)}$$



$$m_h(\vec{k}_h) = \frac{\hbar^2}{\vec{\nabla}_{k_h} \cdot (\vec{\nabla}_{k_h} E_h)} = \frac{\hbar^2}{\vec{\nabla}_{-k_e} \cdot (\vec{\nabla}_{-k_e} (-E_e))} = -m_e(\vec{k}_e)$$

Lacuna: stato a N-1 elettroni all'interno di una banda con N stati

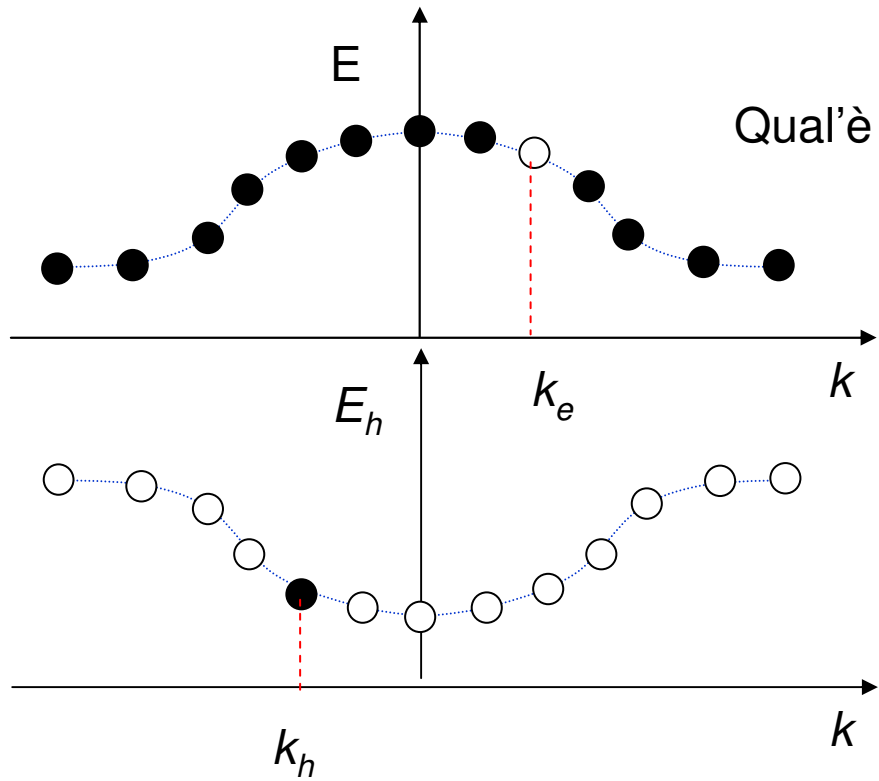


Qual'è la corrente trasportata dallo stato di lacuna?

$$\begin{cases} E_h(\vec{k}_h) = -E_e(\vec{k}_e) \\ \vec{k}_h = -\vec{k}_e \\ \vec{j}_h(\vec{k}_h) = -\sum_{k \neq k_e} e\vec{v}_e(\vec{k}) \end{cases}$$

$$\vec{j}_h(\vec{k}_h) = -\sum_{k \neq k_e} e\vec{v}_e(\vec{k}) = -\left[\sum_k e\vec{v}_e(\vec{k}) - (e\vec{v}_e(\vec{k}_e)) \right] = e\vec{v}_e(\vec{k}_e)$$

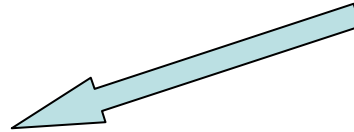
Lacuna: stato a N-1 elettroni all'interno di una banda con N stati



Qual'è la corrente trasportata dallo stato di lacuna?

$$\begin{cases} E_h(\vec{k}_h) = -E_e(\vec{k}_e) \\ \vec{k}_h = -\vec{k}_e \end{cases}$$

$$\vec{j}_h(\vec{k}_h) = e\vec{v}_e(\vec{k}_e)$$

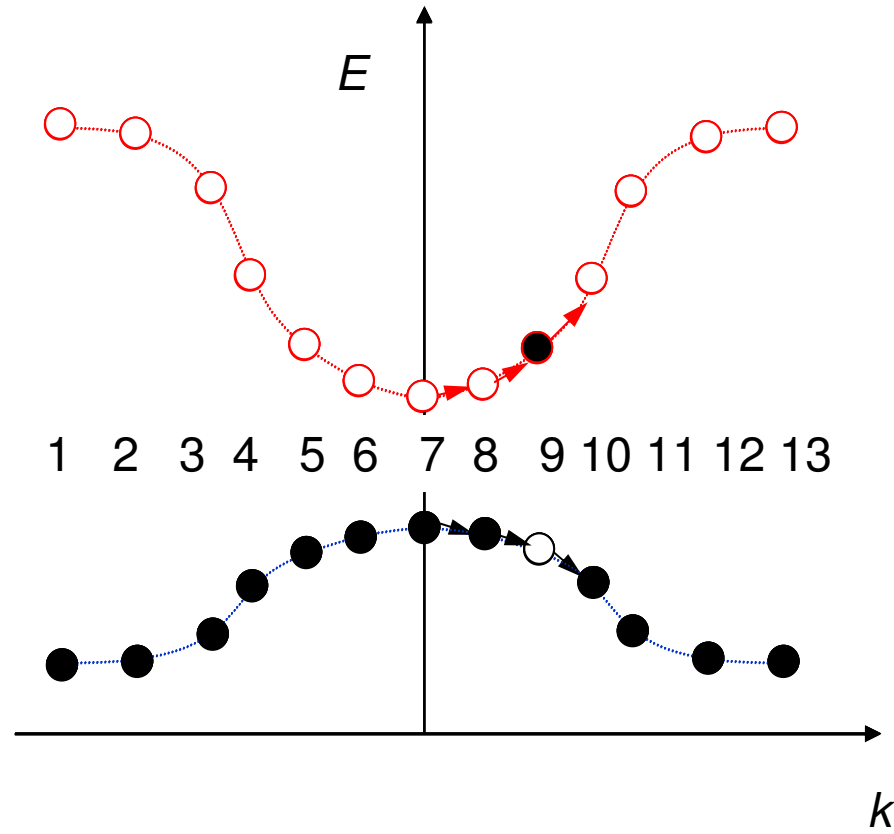


$$\vec{j}_h(\vec{k}_h) = e\vec{v}_e(\vec{k}_e) = e\vec{v}_h(\vec{k}_h)$$

$$Q_h = +e$$

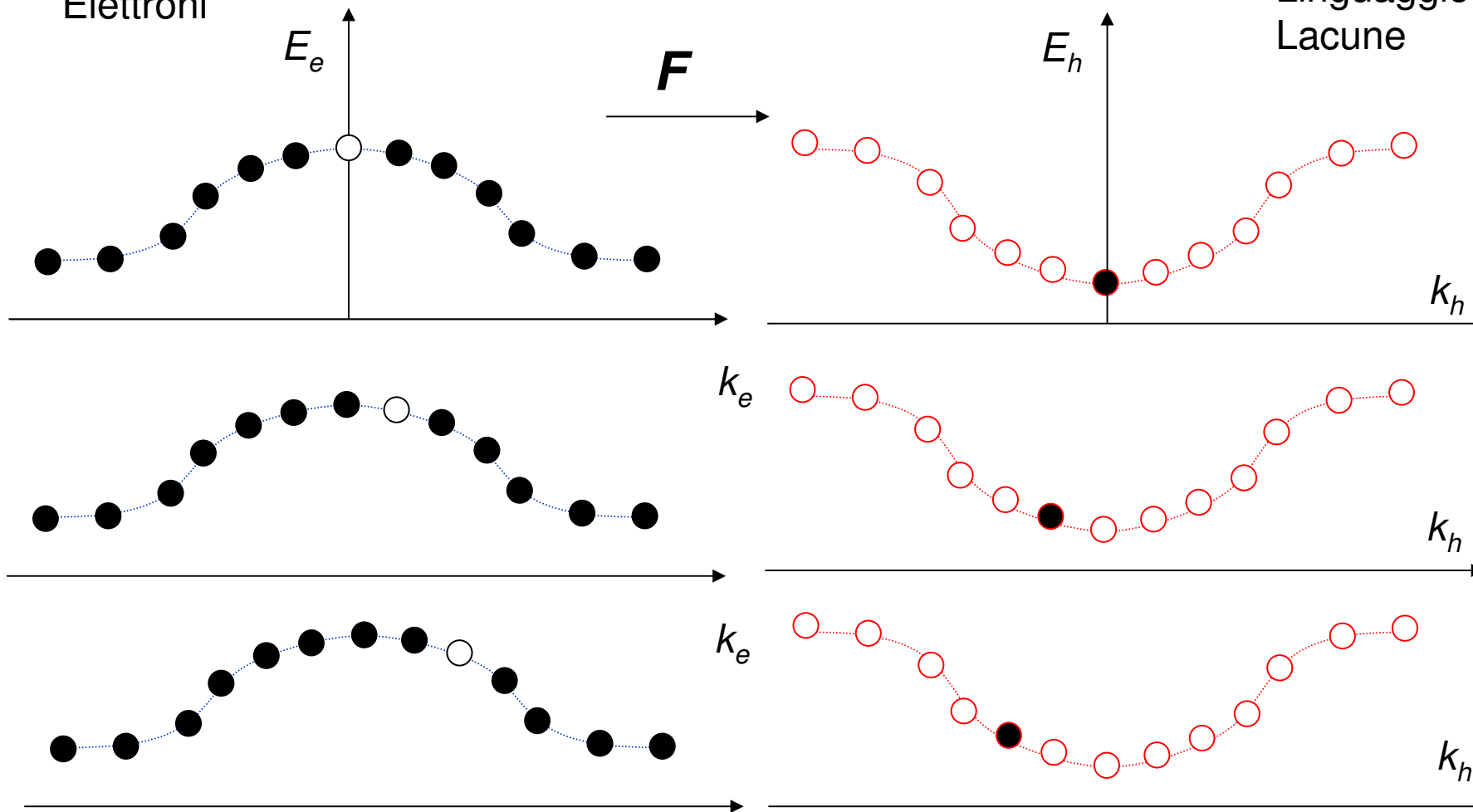


$$\vec{F} = \hbar \frac{d\vec{k}}{dt}$$



Linguaggio
Elettroni

Linguaggio
Lacune

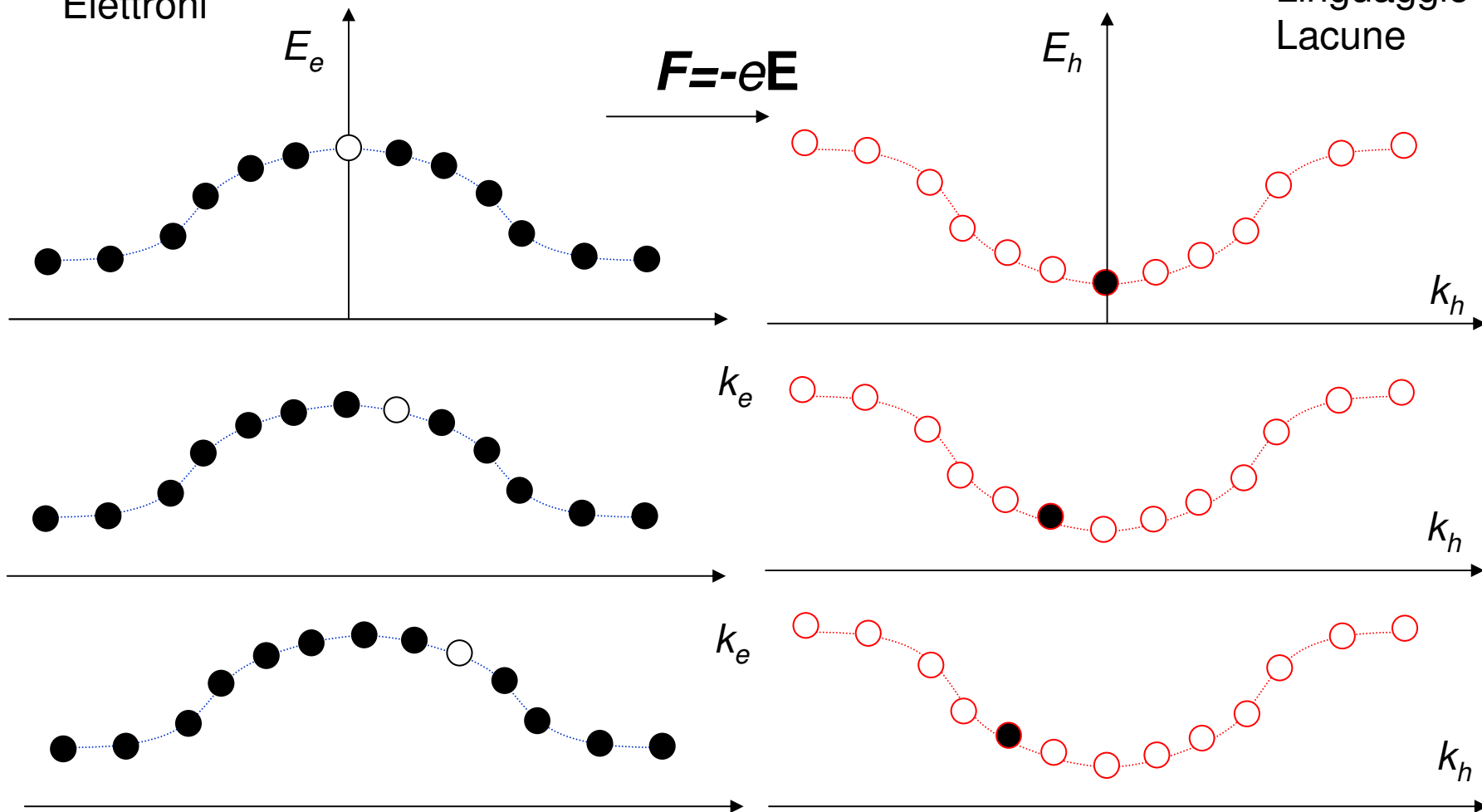


$$\vec{F} = \hbar \frac{d\vec{k}_e}{dt}$$

$$\vec{F} = -\hbar \frac{d\vec{k}_h}{dt}$$

Linguaggio
Elettroni

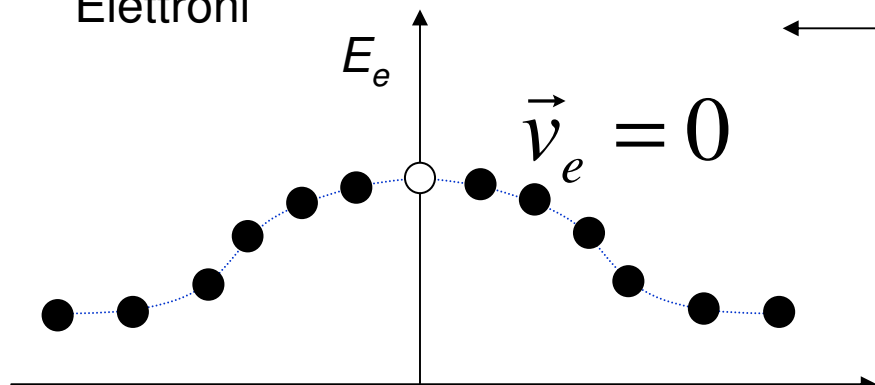
Linguaggio
Lacune



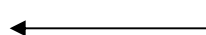
$$-e\vec{E} = \hbar \frac{d\vec{k}_e}{dt} = \vec{F}_e \quad \longrightarrow$$

$$e\vec{E} = \hbar \frac{d\vec{k}_h}{dt} = \vec{F}_h \quad \longleftarrow$$

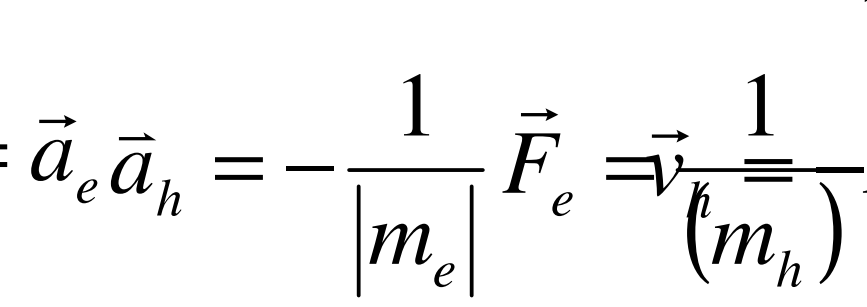
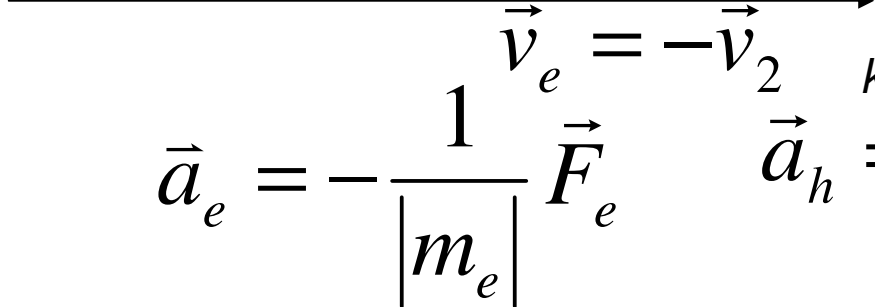
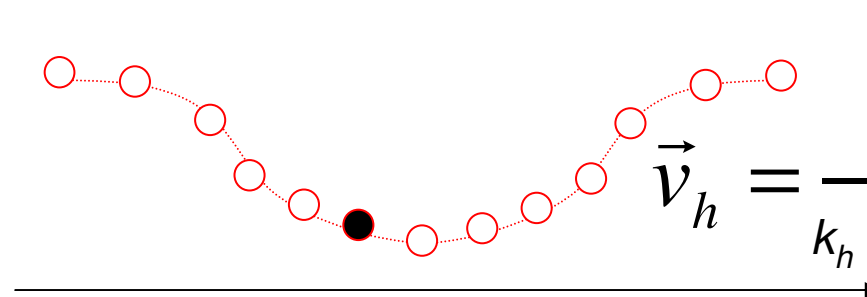
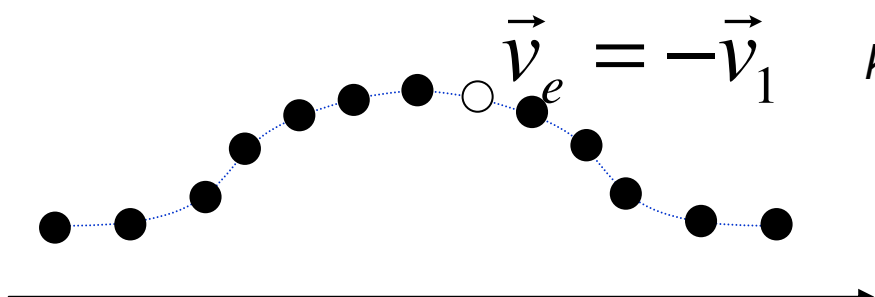
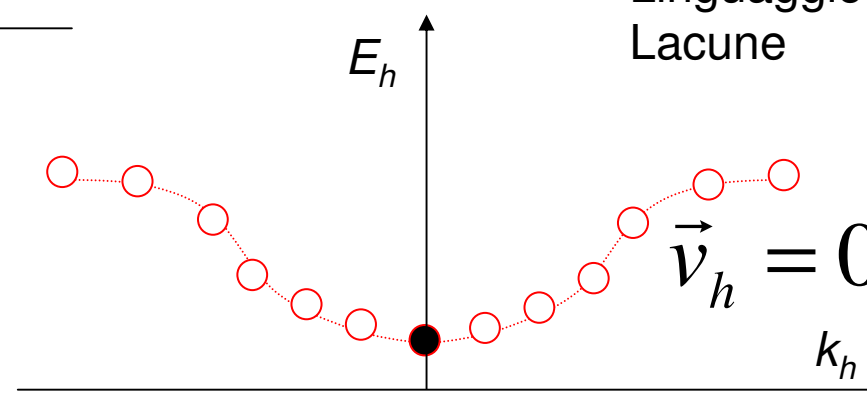
Linguaggio
Elettroni



E



Linguaggio
Lacune



$$\vec{a}_e = -\frac{1}{|m_e|} \vec{F}_e$$

$$\vec{a}_h = \vec{a}_e \vec{a}_h = -\frac{1}{|m_e|} \vec{F}_e = \vec{v} \frac{1}{(m_h)} \vec{F}_h$$

\vec{F}_e

\vec{F}_h

Lacuna

- Energia uguale e opposta all'energia dell'elettrone mancante

$$E_h = -E_e$$

- Momento uguale e opposto al momento dell'elettrone mancante

$$\vec{k}_h = -\vec{k}_e$$

- Velocità uguale alla velocità dell'elettrone mancante

$$\vec{v}_h(\vec{k}_h) = \vec{v}_e(\vec{k}_e)$$

- Massa uguale e opposta alla massa dell'elettrone mancante

$$m_h(\vec{k}_h) = -m_e(\vec{k}_e)$$

- Carica uguale e opposta a quella dell'elettrone mancante

$$Q_h = +e$$

- Teoremi accelerazione

$$\vec{F}_h = \hbar \frac{d\vec{k}_h}{dt}$$

$$\vec{a}_h = \frac{1}{(m_h)} \vec{F}_h$$