

# Elettronica dello Stato Solido

## Esercitazione di Laboratorio 4:

### Statistica di portatori



Daniele Ielmini

DEI – Politecnico di Milano

[ielmini@elet.polimi.it](mailto:ielmini@elet.polimi.it)

# Outline

- Struttura a bande:
  - Si
  - Ge
  - GaAs
- Concentrazione di portatori all'equilibrio

# Outline

- Struttura a bande:
  - Si
  - Ge
  - GaAs
- Concentrazione di portatori all'equilibrio

# Esercizio 1 – Bande e popolamento

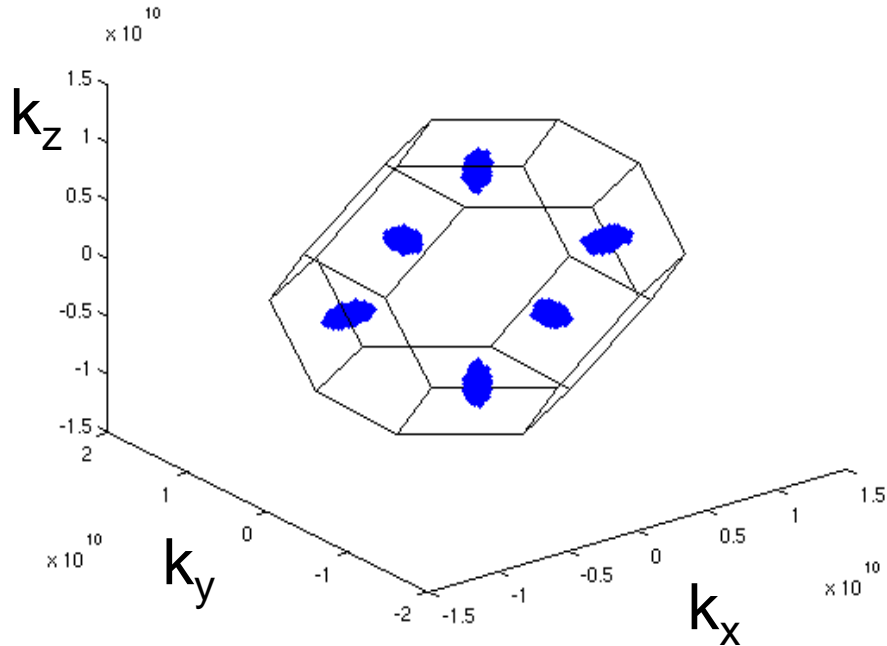
Si considerino gli script ***bs\_Si.m***, ***bs\_Ge.m*** e ***bs\_GaAs.m***, che raffigurano gli stati occupati in prima ZB per Si, Ge e GaAs, rispettivamente<sup>1</sup>.

Studiare le bande ed il relativo popolamento per:

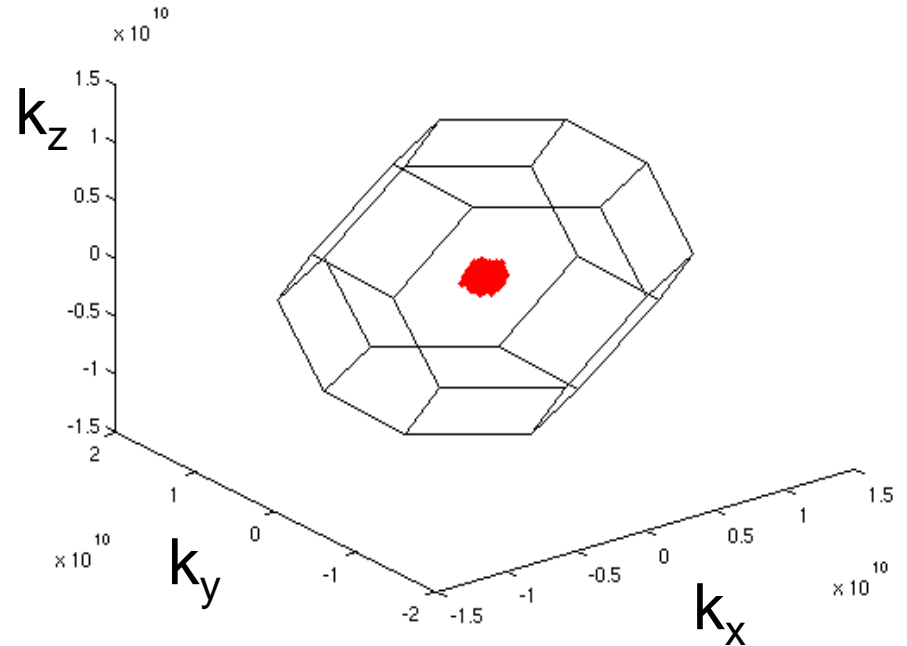
- *[Si, Ge]* spiegare:
  - La dipendenza dalla temperatura e dal livello di Fermi
  - La collocazione degli elettroni in Si e Ge (blu, azzurro)
  - La diversa collocazione di lacune pesanti (rosso) e leggere (rosa) nello spazio k.
- *[GaAs]* spiegare la distribuzione degli elettroni ad alta temperatura (qual è l'origine degli elettroni in azzurro?).

<sup>1</sup> Approssimazioni: (i) Bande paraboliche; (ii) Maxwell-Boltzmann; (iii) Considerati solo gli stati in banda, non stati donori/accettori

# Si – estrinseco

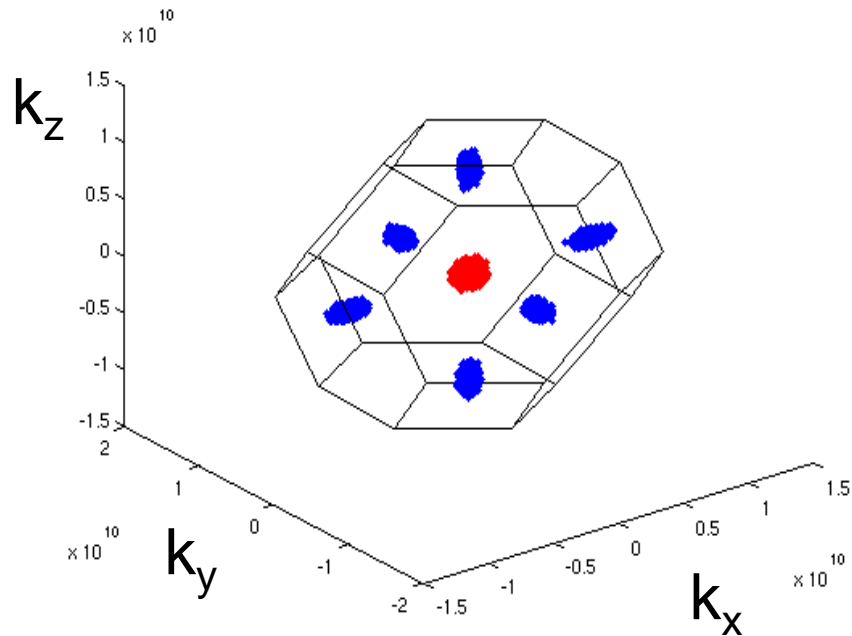


$$E_F = E_C - 100 \text{ meV}$$

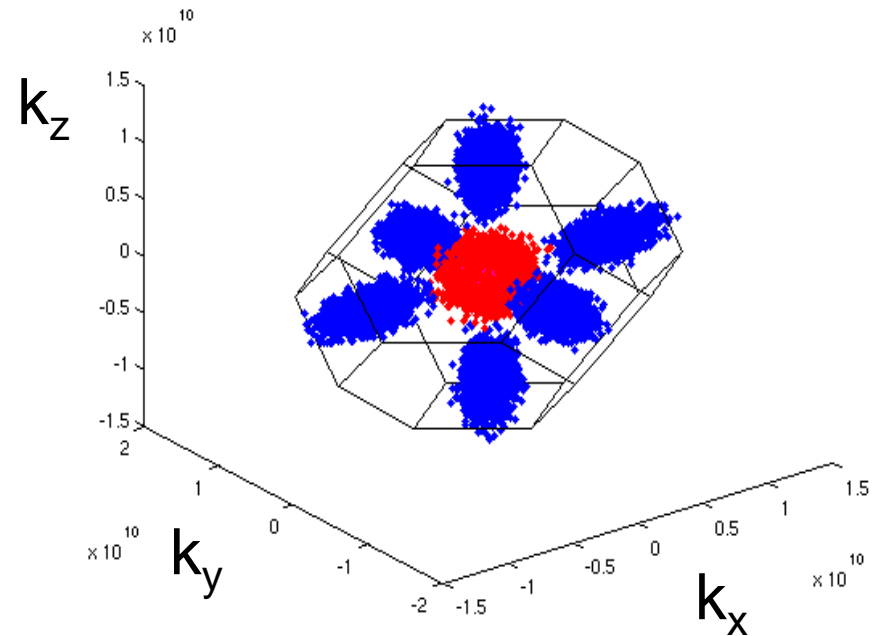


$$E_F = E_V + 100 \text{ meV}$$

# Si – intrinseco

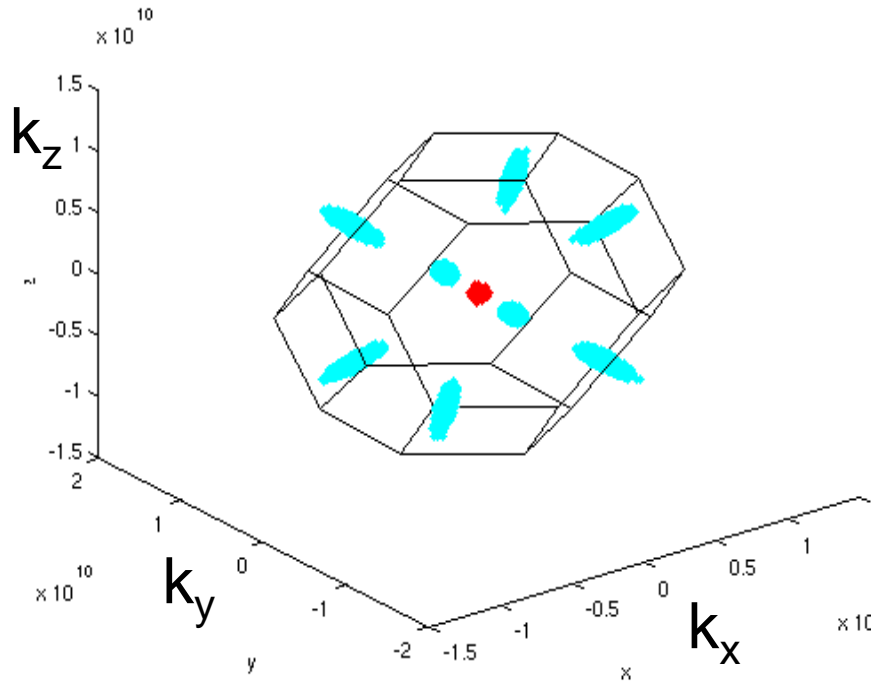


$T=300\text{K}$

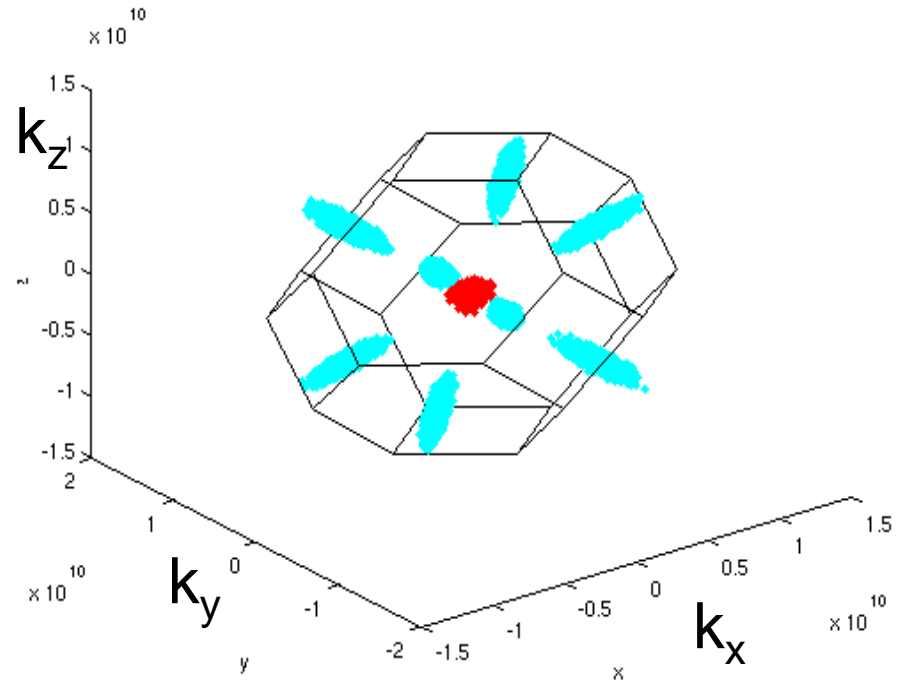


$T=3000\text{K}$

# Ge - intrinseco

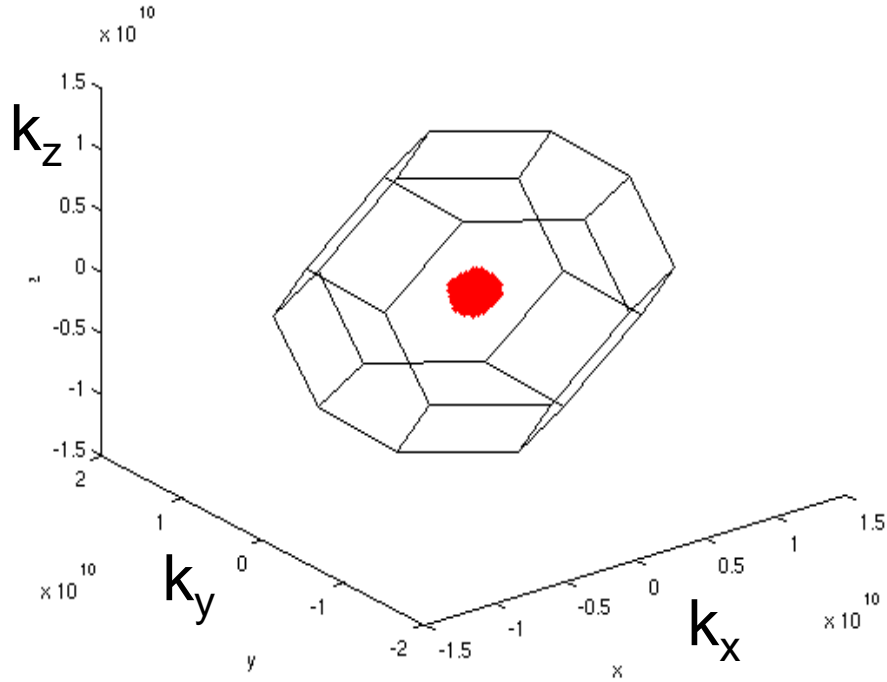


$T=300\text{K}$

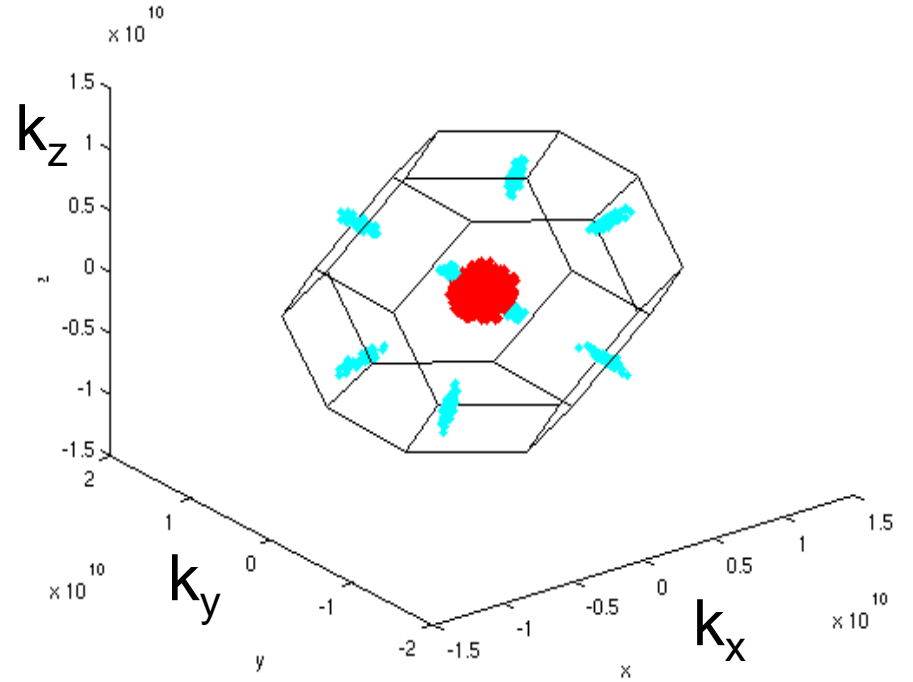


$T=600\text{K}$

# GaAs



$T=300\text{K}$



$T=600\text{K}$



# Limiti approssimazione parabolica

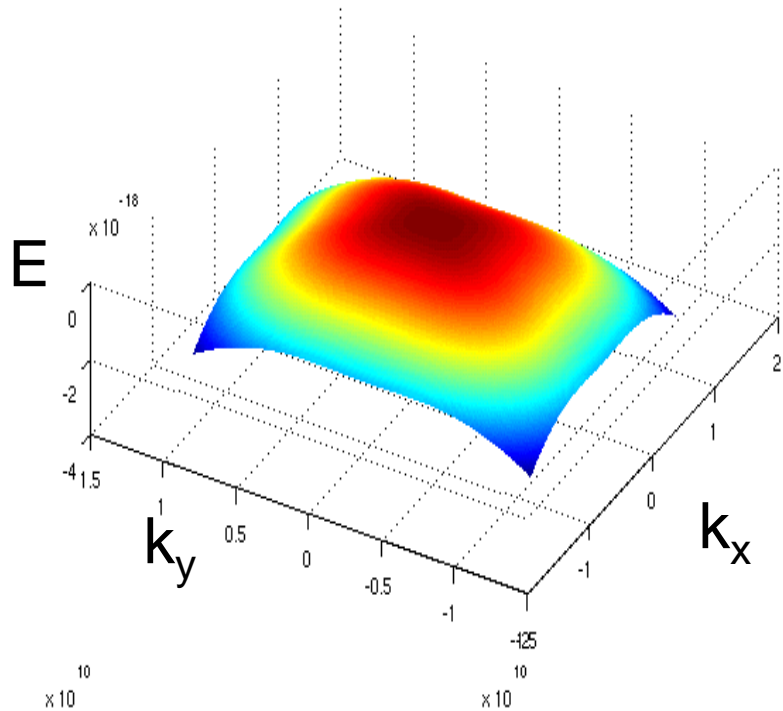
- Alle alte temperature si esplorano stati non parabolici
- La banda di valenza è 'warped' (incurvata) per effetto dell'anisotropia:

$$E_V - E = A k^2 \pm \sqrt{B^2 k^4 + C^2 (k_x^2 k_y^2 + k_x^2 k_z^2 + k_y^2 k_z^2)}$$

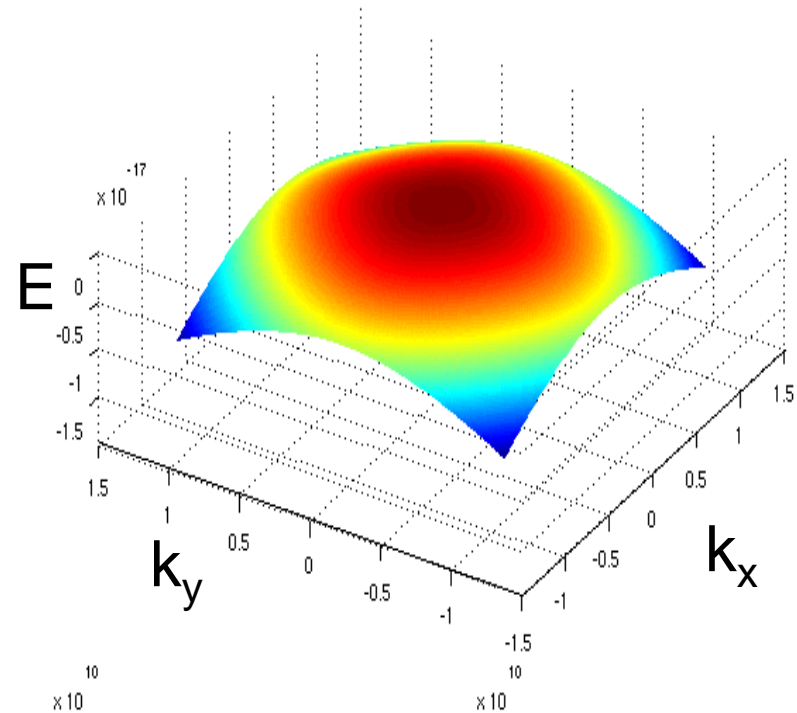
- Dove A, B e C sono parametri ad hoc,  $k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$ , + e – valgono per la lh e la hh rispettivamente

	A	B	C <sup>2</sup>
Si	4.28	0.68	24
Ge	13.38	8.5	173
GaAs	6.9	4.4	43

# Warped valence band



Light hole



Heavy hole

# Nota: zona di Brillouin

- Si traccia facilmente in 3D congiungendo i punti W (vertici della zona)
- Coordinate punti ad alta simmetria (in unità  $2\pi/a$ ):

	$k_x$	$k_y$	$k_z$
$\Gamma$	0	0	0
X	0	0	1
W	1/2	0	1
K	3/4	3/4	0
L	1/2	1/2	1/2

# Outline

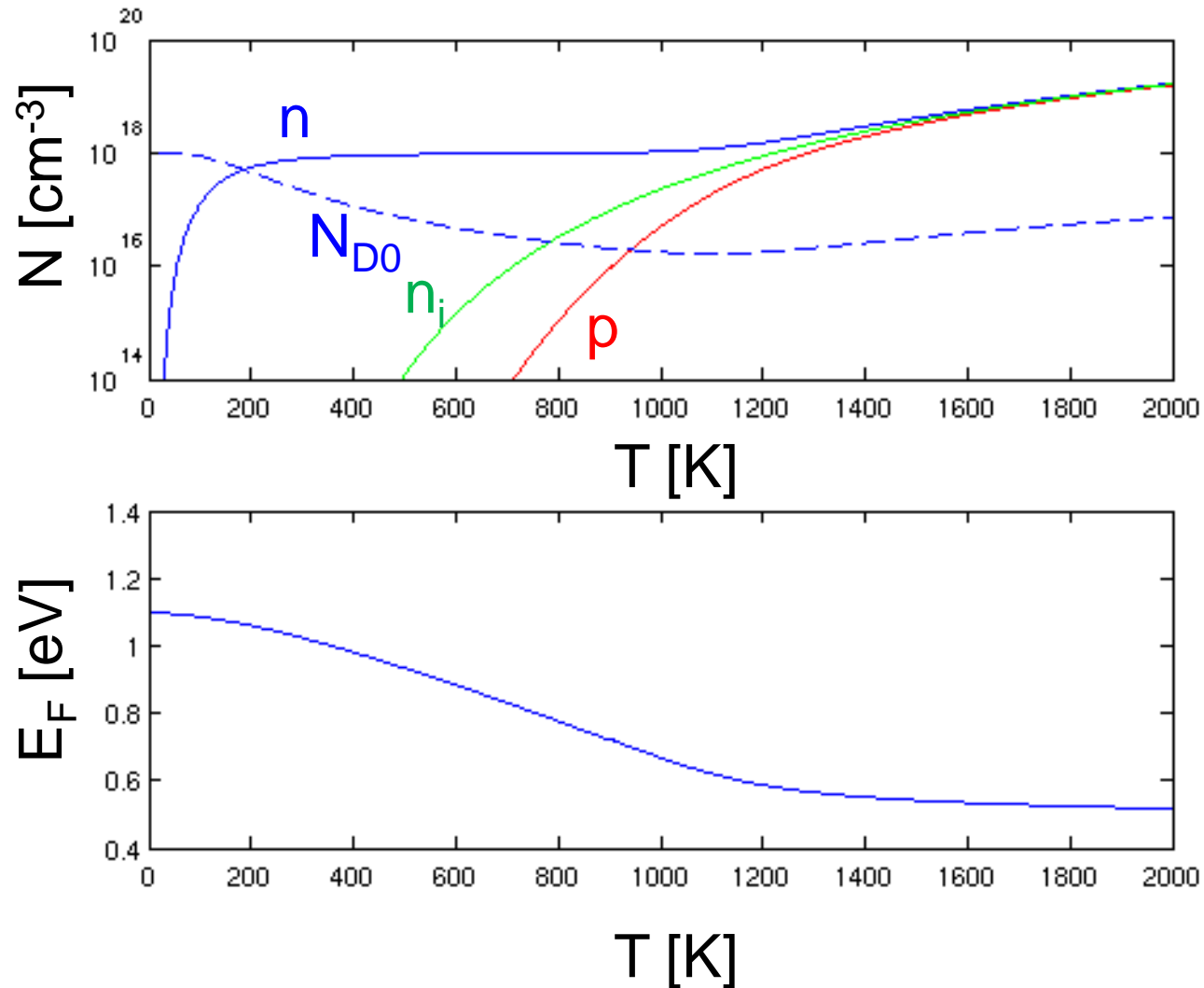
- Struttura a bande:
  - Si
  - Ge
  - GaAs
- Concentrazione di portatori all'equilibrio

# Esercizio 2 – Portatori e Temperatura

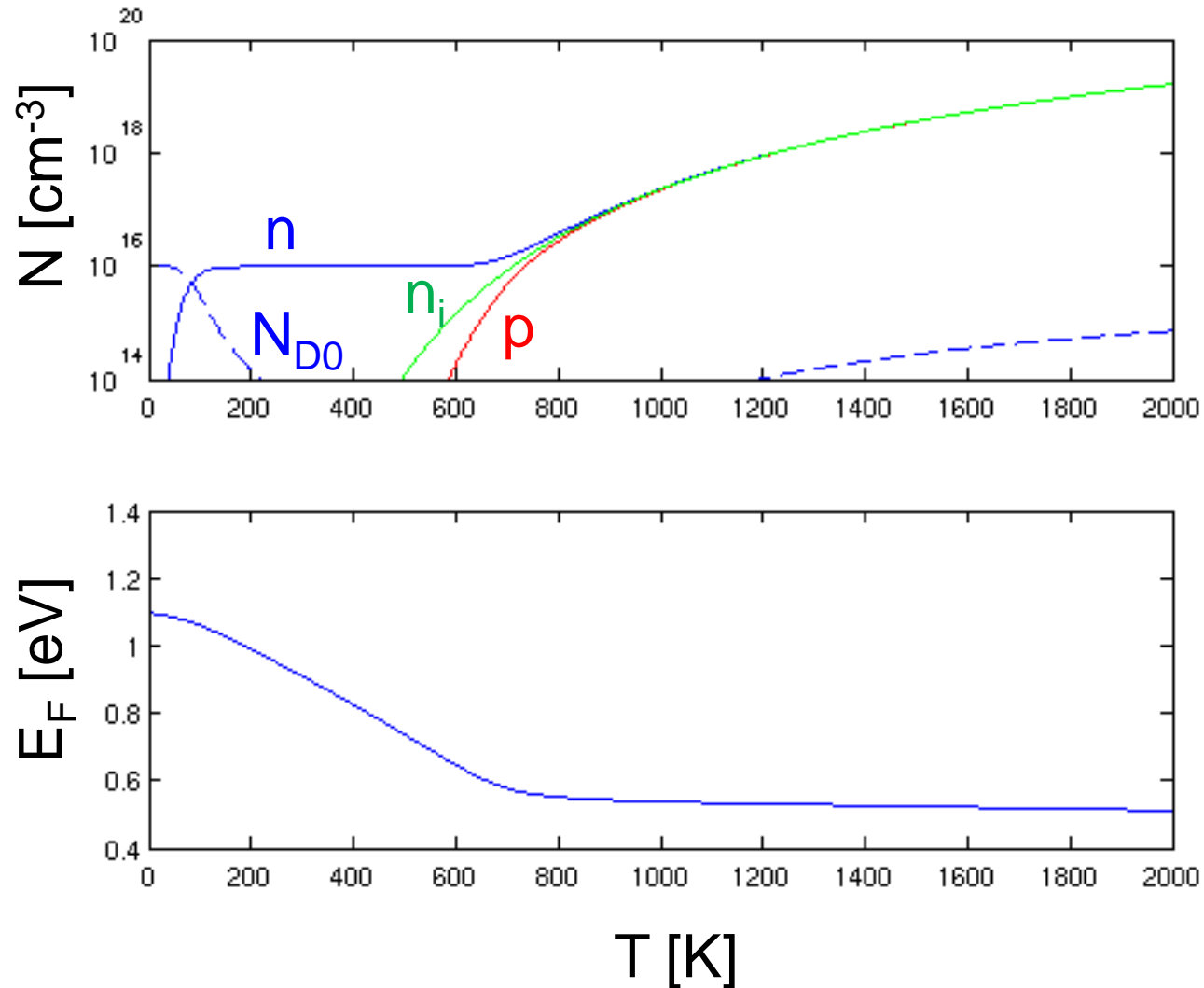
Con l'ausilio dello script **cc.m**, calcolare la concentrazione di portatori all'equilibrio al variare della temperatura per Si drogato n (e.g.  $N_D = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_A = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ). Dare ragione dei risultati ottenuti, in particolare:

- Studiare il limite di  $E_F$  per  $T \rightarrow 0$  (freeze-out)
- Spiegare l'andamento di  $N_{D0}$  (donori non ionizzati) al variare della temperatura
- Confrontare con  $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  ( $E_F$  vs.  $T$ , intervallo estrinseco)

# Silicio drogato n ( $N_D = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ )



# Silicio drogato n ( $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ )



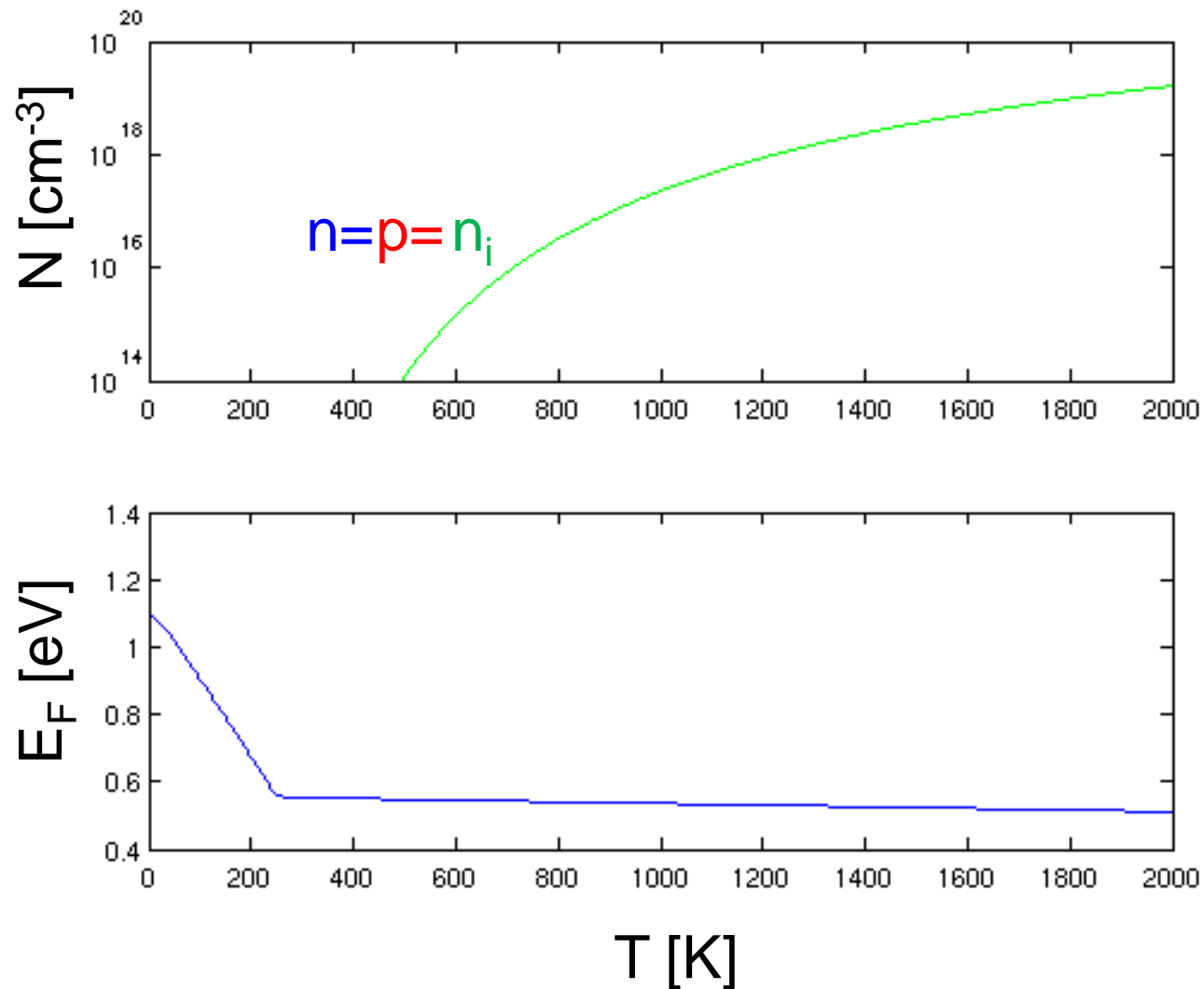
# Esercizio 3 – Si intrinseco vs. compensato

Mediante lo script **cc.m**, calcolare la concentrazione di portatori all'equilibrio al variare della temperatura nel caso di Si intrinseco (e.g.  $N_D = 10^8 \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_A = 10^2 \text{ cm}^{-3}$ ). In particolare:

- Studiare il limite di  $E_F$  per  $T \rightarrow 0$  (freeze-out)
- Confrontare con  $N_D = 1.00001 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  e  $N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  (compensazione).



# Si intrinseco



# Si compensato

