Elettronica dello Stato Solido
Esercitazione di Laboratorio 4:
Statistica di portatori

Daniele Ielmini

DEI – Politecnico di Milano

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

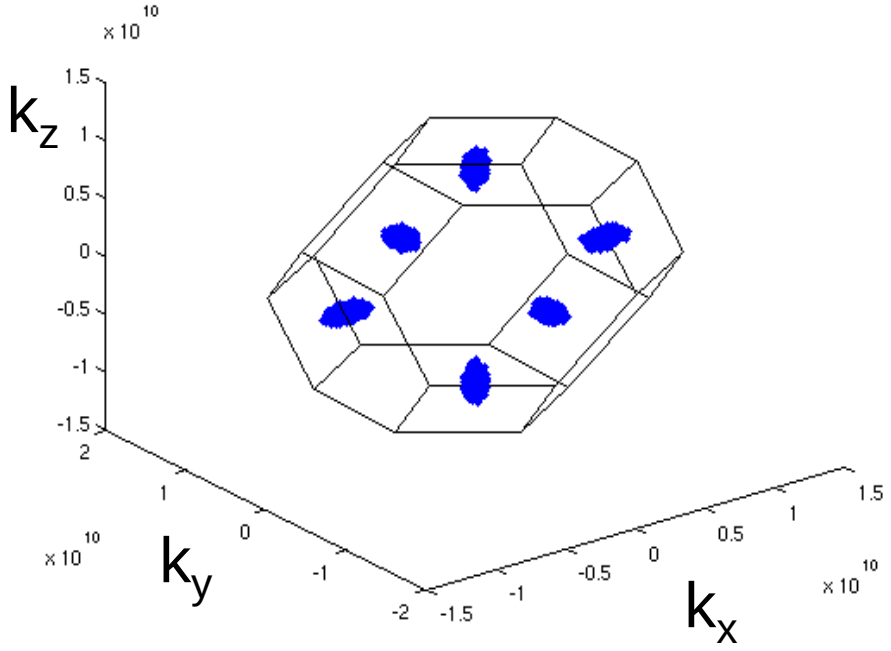
Esercizio 1 – Bande e popolamento

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[1]. Studiare le bande ed il relativo popolamento per:

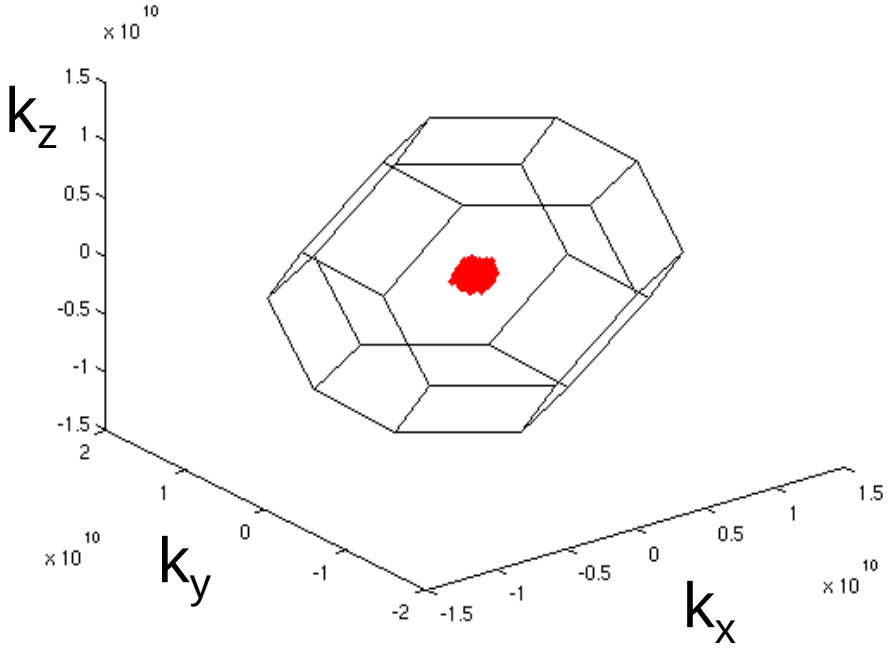
- *[Si, Ge]* spiegare:
  - La dipendenza dalla temperatura e dal livello di Fermi
  - La collocazione degli elettroni in Si e Ge (blu, azzurro)
  - La diversa collocazione di lacune pesanti (rosso) e leggere (rosa) nello spazio k.
- *[GaAs]* spiegare la distribuzione degli elettroni ad alta temperatura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

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

Si – estrinseco

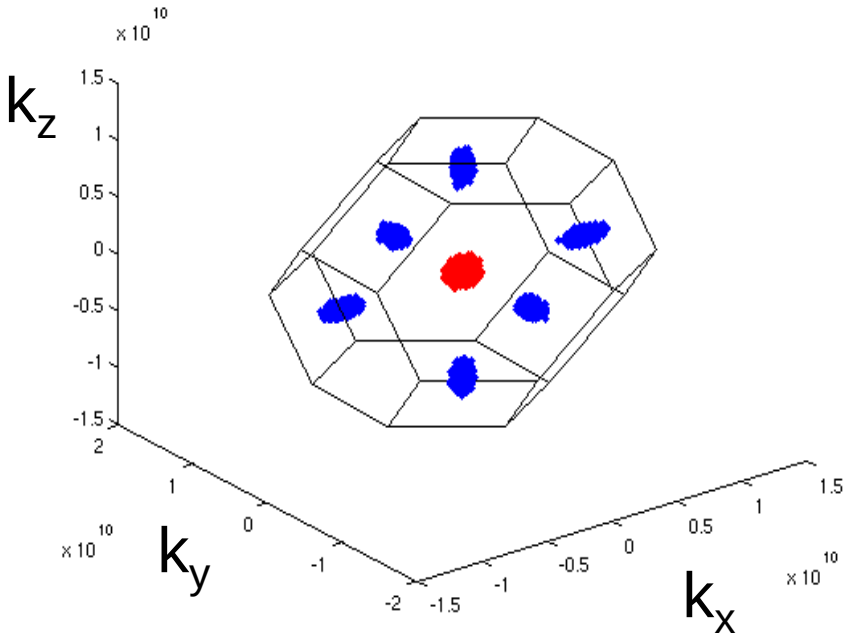


$E_F = E_C$-100meV

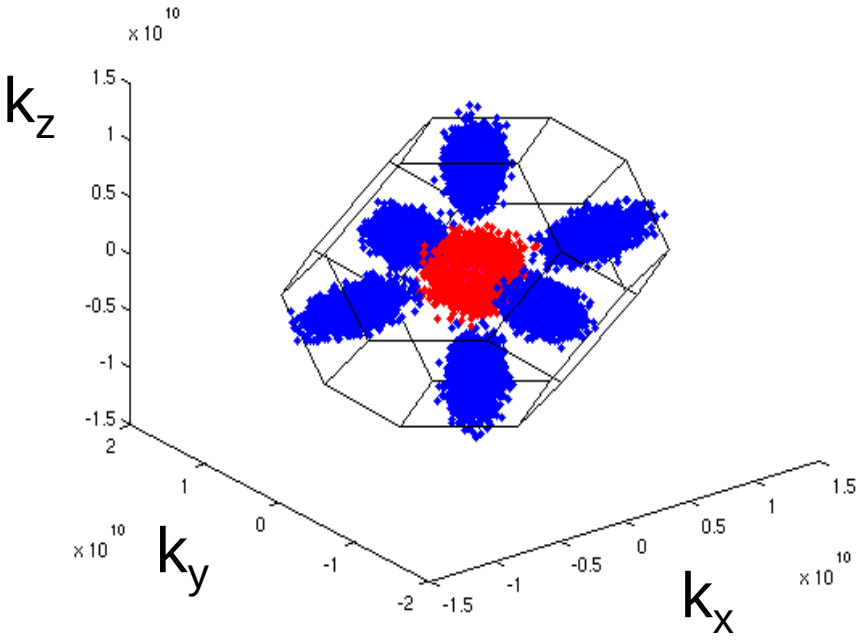


$E_F = E_V$+100meV

Si – intrinseco

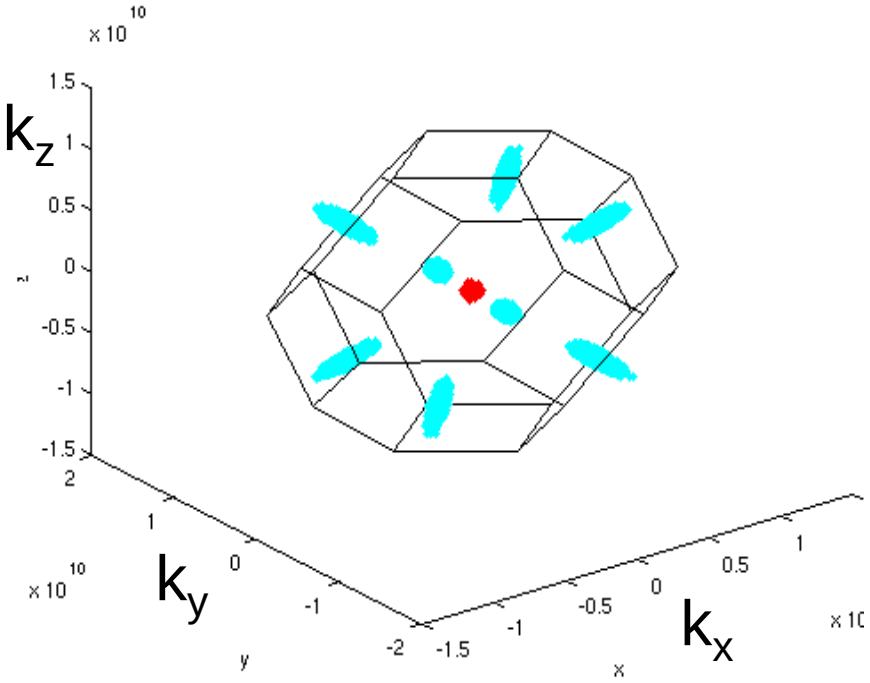


T=300K

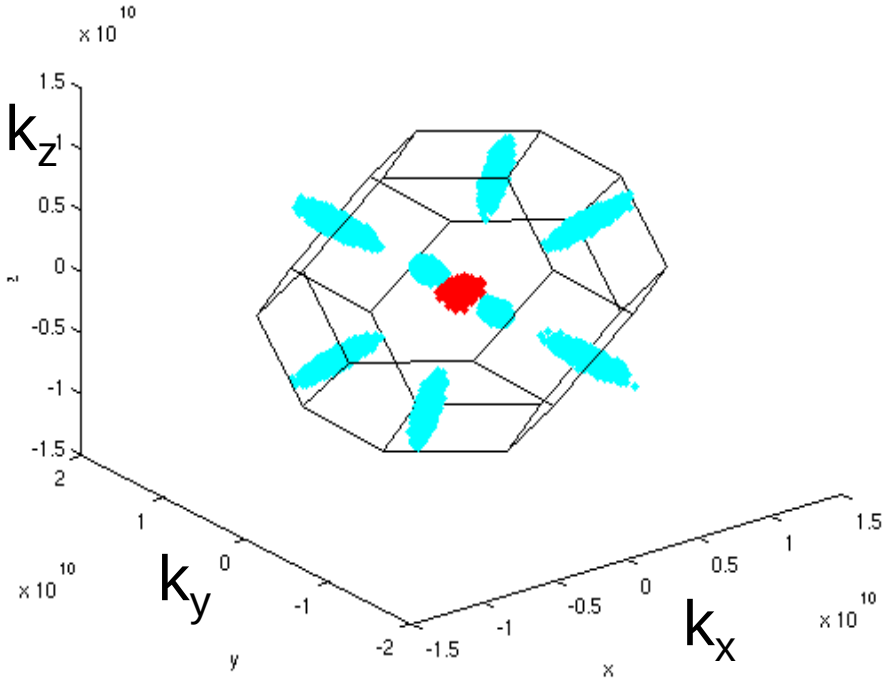


T=3000K

Ge - intrinseco

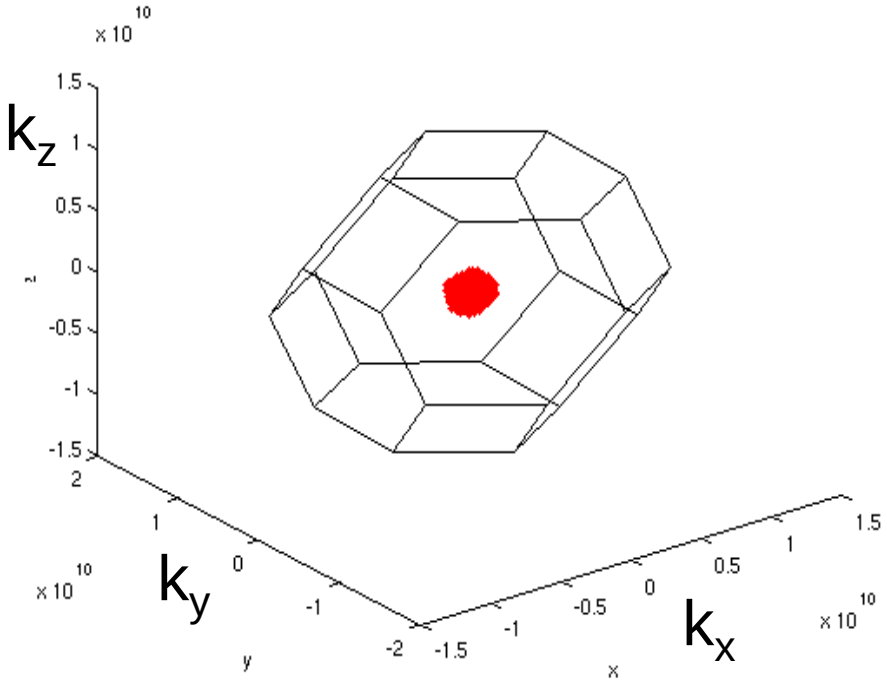


T=300K

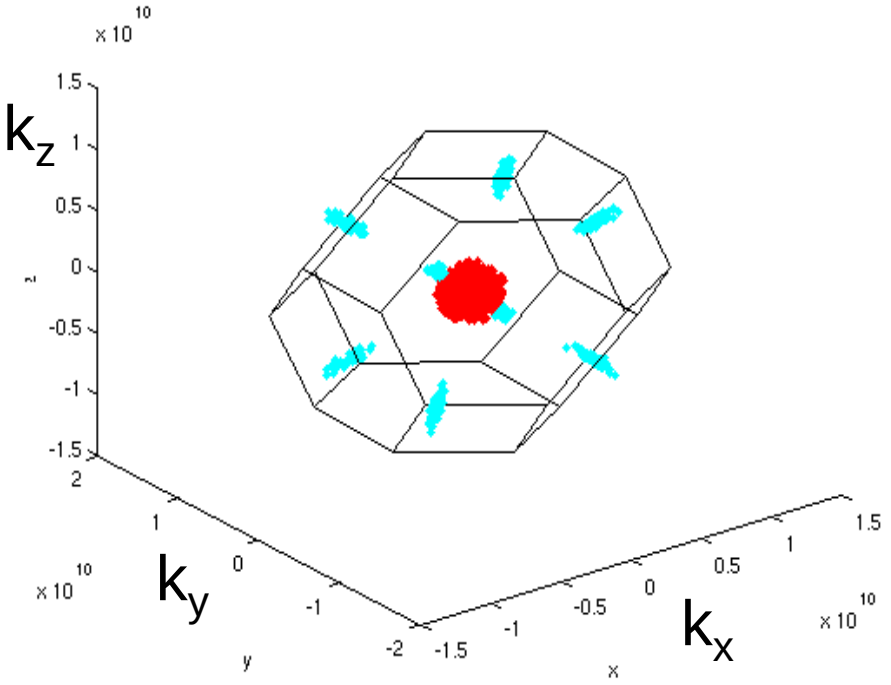


T=600K

GaAs



T=300K



T=600K

Limiti approssimazione parabolica

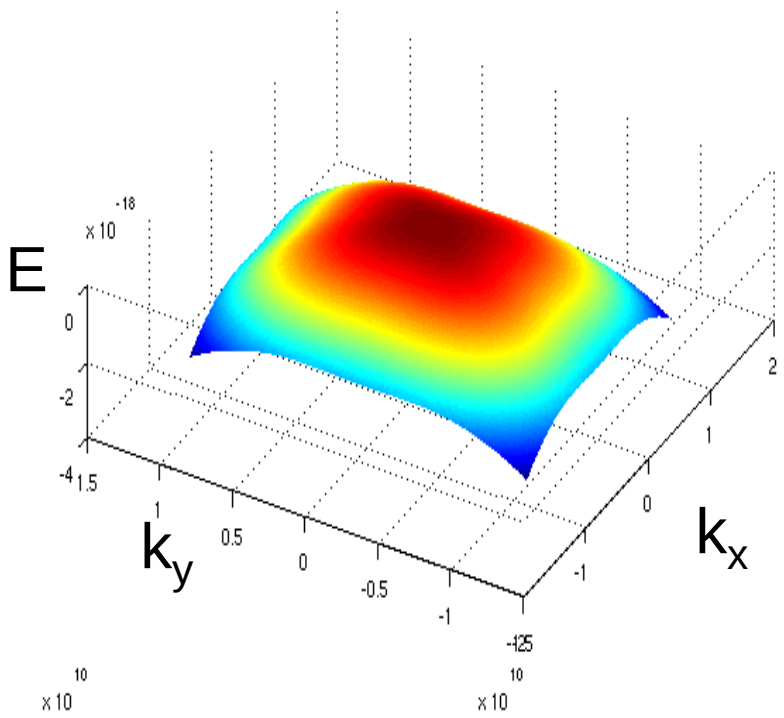
- Alle alte temperature si esplorano stati non parabolici
- La banda di valenza è 'warped' (incurvata) per effetto dell'anisotropia:

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

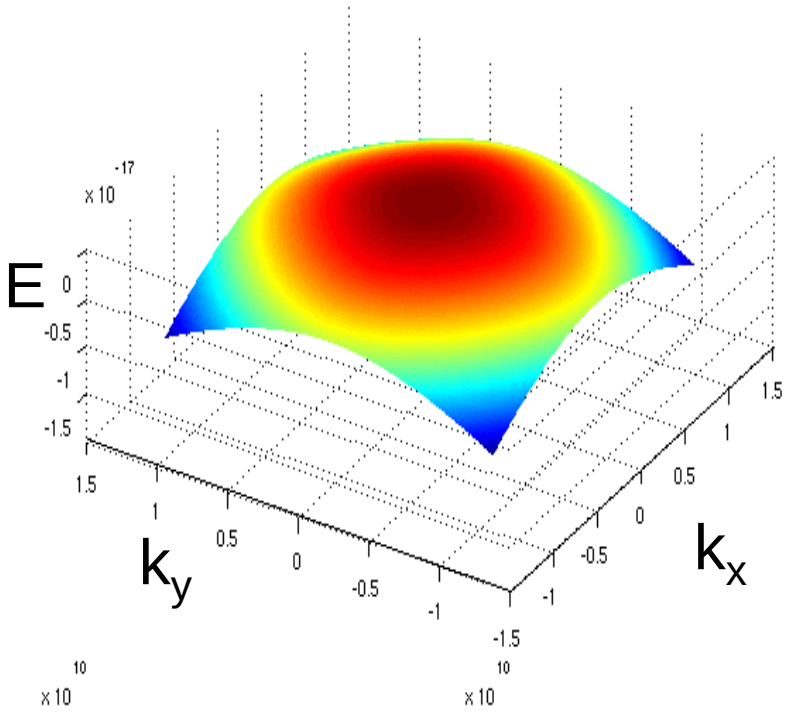
- Dove A, B e C sono parametri ad hoc, $k^2=k_x^2+k_y^2+k_z^2$, + e – valgono per la lh e la hh rispettivamente

	A	B	C^2
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
Γ	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

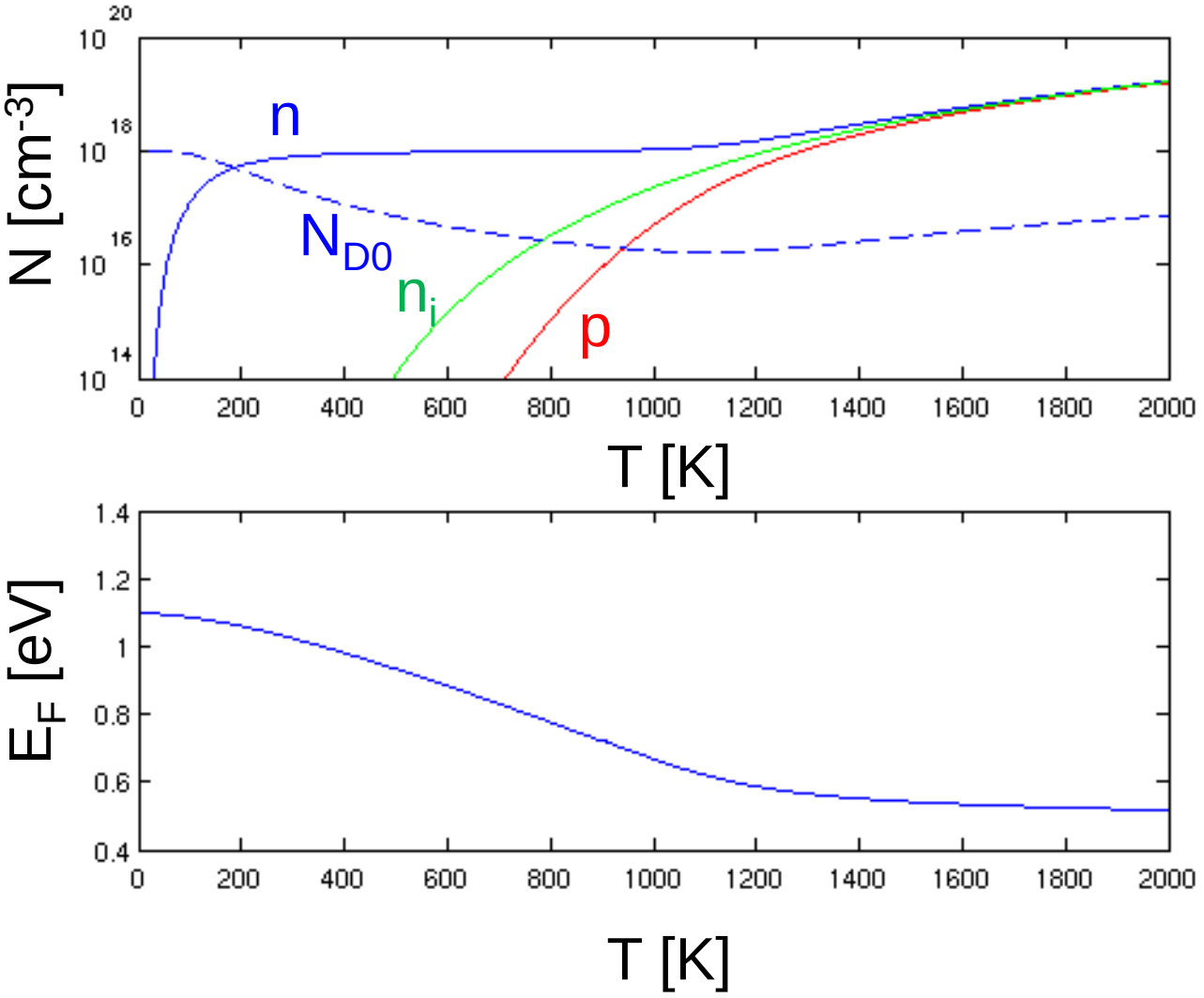
- Concentrazione di portatori all'equilibrio

Esercizio 2 – Portatori e Temperatura

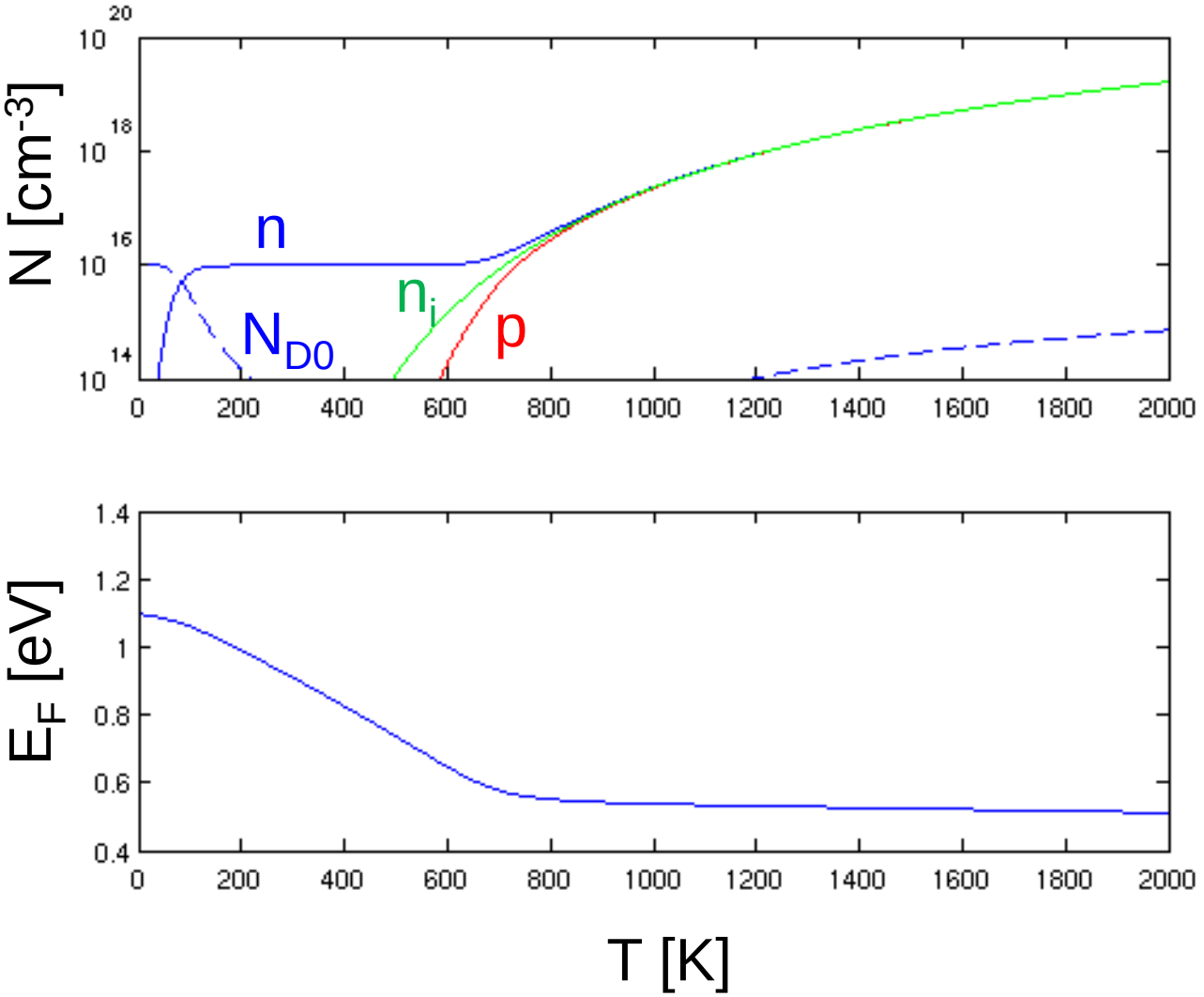
Con l'ausilio dello script ***cc.m***, calcolare la concentrazione di portatori all'equilibrio al variare della temperatura per Si drogato n (e.g. $N_D = 10^{18}$ cm^{-3}, $N_A = 10^{14}$ cm^{-3}). Dare ragione dei risultati ottenuti, in particolare:

- 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 $N_D = 10^{16}$ cm^{-3} (E_F vs. T, intervallo estrinseco)

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



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

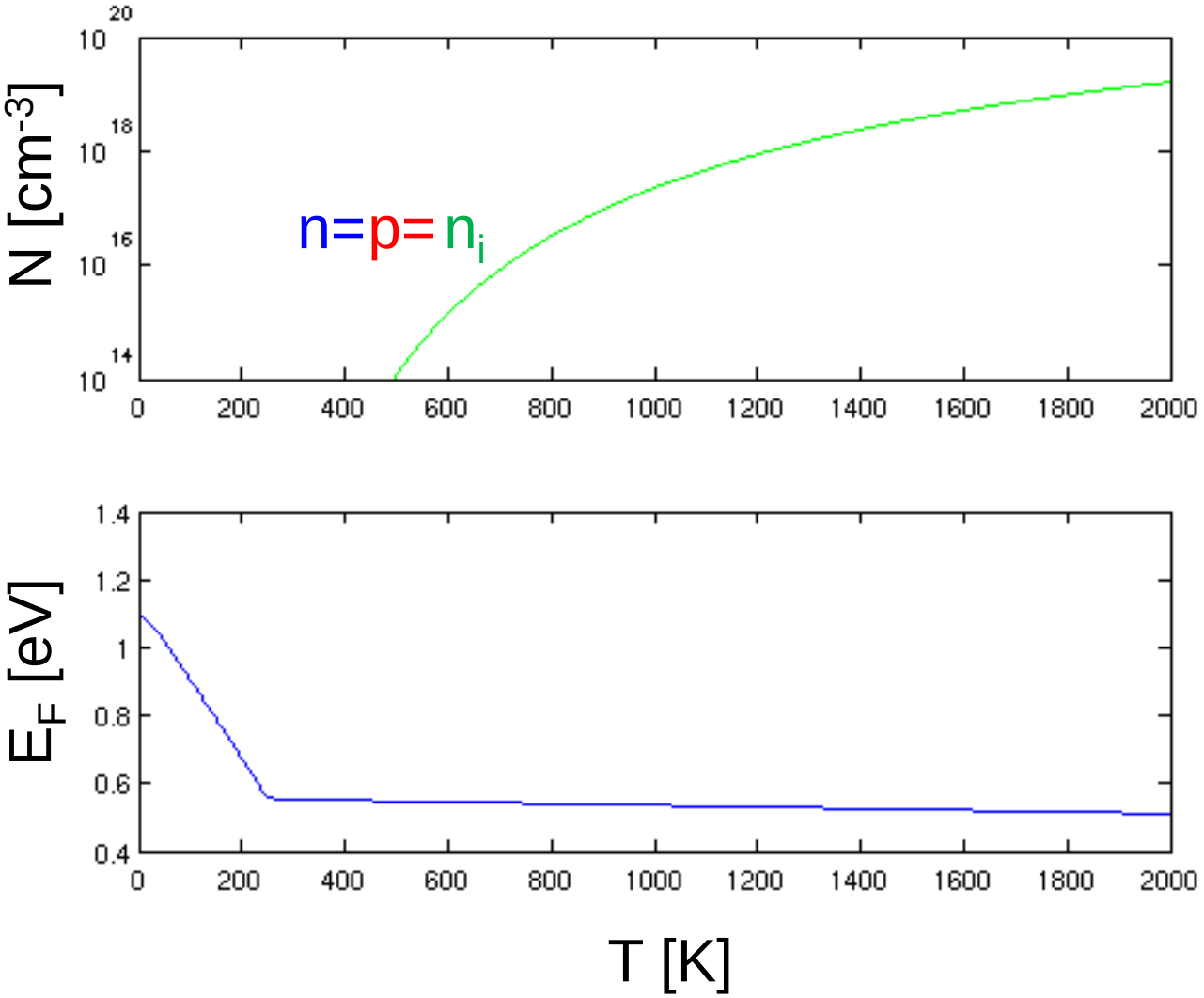
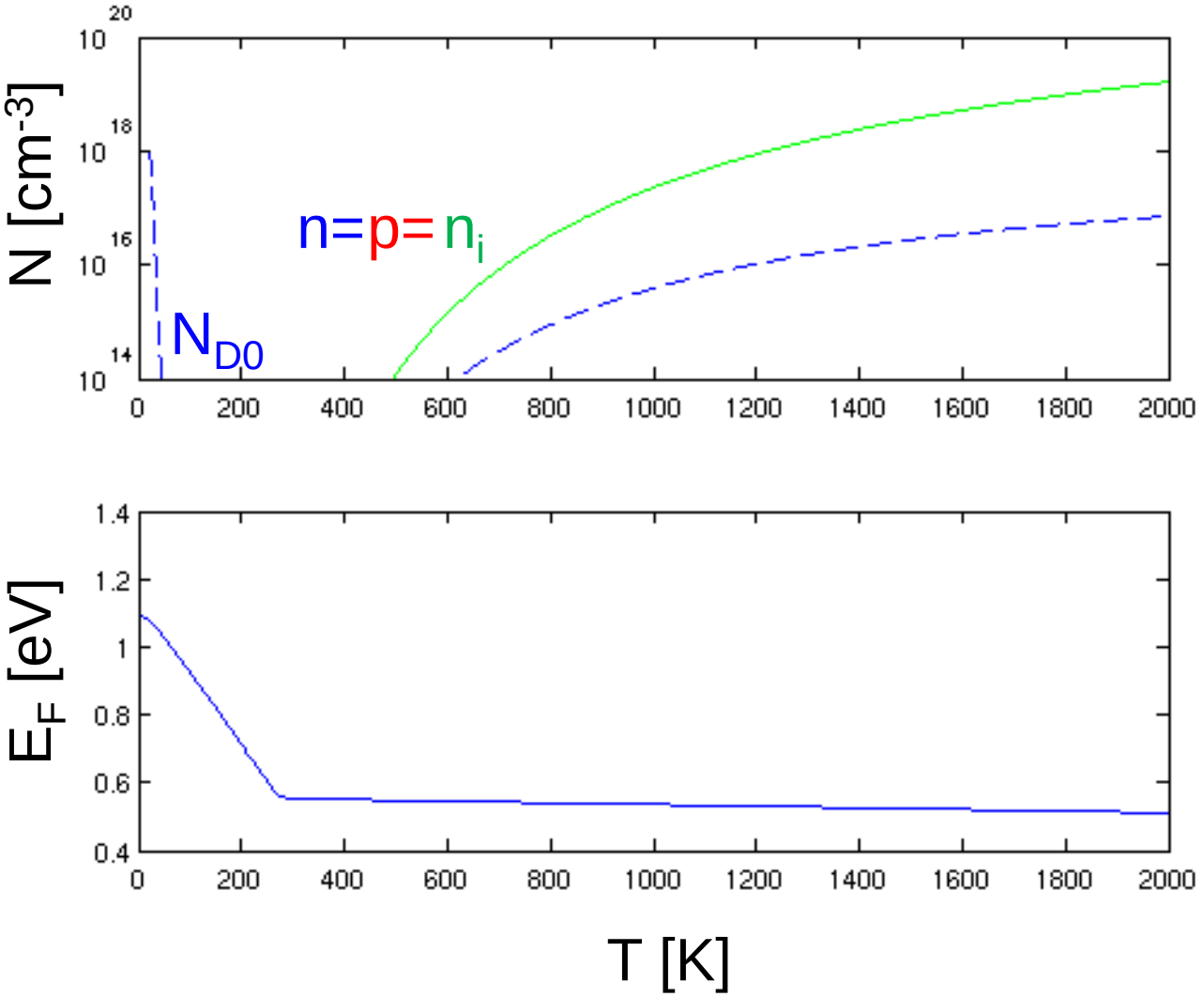


Esercizio 3 – Si intrinseco vs. compensato

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

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

Si intrinseco



Si compensato