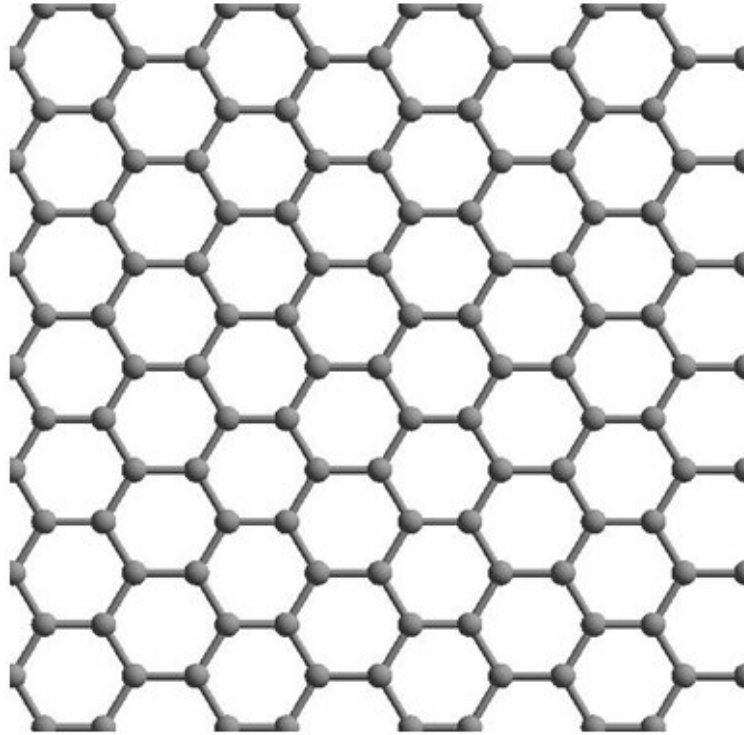


**Problem 1.** Figuren nedan visar ämnet grafén. The figure below shows graphene.



a) Rita en translationsvektor  $\mathbf{T}$  i figuren som lämnar mönstret oförändrat. Draw in the figure a translation vector  $\mathbf{T}$  which transforms the lattice into itself. (1p)

*Lösning:* There is an infinity of correct solutions; the shortest ones have the length and direction of the distance between next-nearest carbon atoms.

1

b) Markera i den här figuren en fullständig mängd av gitterpunkter. Draw in this figure dots for a complete set of lattice points. (1p)

*Lösning:* Half as many lattice points as carbon atoms.

1

c) Rita en rektangulär enhetscell i figuren; hur många gitterpunkter innehåller den? Draw a rectangular unit cell in the figure; how many lattice points does it contain? (1p)

*Lösning:* The smallest rectangular cell contains two lattice points (four atoms).

1

**Problem 2.** a) Explain in words and graphically the difference between permanent magnets and plain iron. (1p)

*Lösning:*

The explanation for the different behavior of iron and of permanent magnets is that it is difficult to move the domain walls in permanent-magnet materials. In pure iron, domain walls move easily, because they are quite wide and because there are no obstacles. In steel magnets, there are inclusions that pin domain walls. And in harder magnetic materials, the walls are narrower (because of a larger magnetocrystalline anisotropy) and pinned by metallurgical structure. A sketch must compare hysteresis loops, where the coercive field is much larger (more than about  $10^3$  larger) for the permanent magnet.

1

b) Give examples of applications of hard and soft magnetic materials. (1p)

*Lösning:*

Hard magnets: toys, fridge magnets, compass needles, electric generators on bicycles, DC motors, loudspeakers, the "voice coil magnet" that move the read head in computer disk drives.

Soft magnets: cores of transformers, of electromagnets and of medium-wave antennas; tape heads in video recorders and read heads in hard drives; shielding of magnetic fields.

Materials for erasable magnetic recording are in between.

c) Describe the magnetic structure of a ferromagnetic material when total magnetisation is zero. (1p)

*Lösning:*

1

**Problem 3.** Den stora skillnaden mellan kondenserad materia (fasta ämnen och vätskor) å ena sidan och gaser å andra sidan ligger i deras kompressibilitet. För många vanliga ämnen är bulkmodulen av storleksordningen  $10^{11}$  pascal - det är en miljon gånger större än för gas vid standardtryck. Vad är orsaken till kondenserad materias inkompressibilitet?

The big difference between condensed matter (solids and liquids) on the one hand and gases on the other hand lies in their compressibility. The bulk modulus of many common substances is of the order of magnitude of  $10^{11}$  pascal - which is a million times larger than that of gas at standard pressure. What is the cause of the incompressibility of condensed matter? (2p)

*Lösning:*

Orsaken är Paulis uteslutningsprincip. Koncentrationen av valenselektroner är ganska uniformt hög i metaller, halvledare och salter (lite mindre i molekylära vätskor och fasta ämnen). Vid kompression måste elektronenergierna gå upp (till exempel Fermienergi i metaller). Det krävs alltså högt tryck för att åstadkomma lite kompression.

Paulis princip i sin tur beror på att elektroner är fermioner, ouskiljbara partiklar med halvtaligt spinn, som måste ha asymmetrisk vågfunktion med avseende på partikelbyte.

Endast fasta ämnen är elastiska för skjuvning. Förklara med en skiss den naive teorin för det elastiska områdets gräns.

Only solids have shear elasticity. Explain with a drawing how large the elastic range would be in a naive theory. (1p)

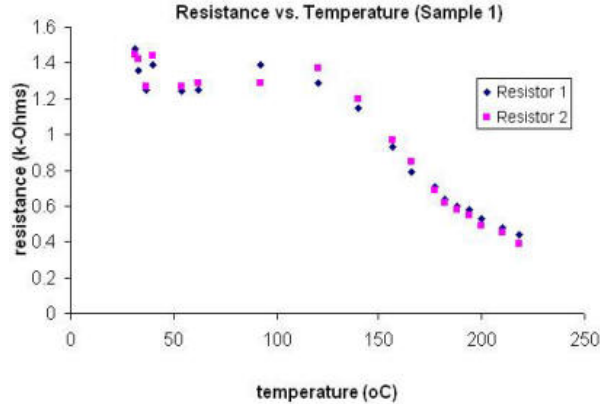
*Lösning:*

Se figur 3.10 i Turton.

2

1

**Problem 4.** Grafen nedan ger mätdata på ett motstånd gjort av p-dopat kisel som funktion av temperatur.



a) Ge en kvalitativ förklaring för resistansens temperaturberoende. (1p)

*Lösning:* Motståndet går ner vid hög temperatur för att antalet termiskt över bandgapet exciterade laddningsbärare tilltar. Vid lägre temperaturer är laddningsbärarkoncentrationen konstant, bestämd av dopningen.

1

b) Uppskatta materialets bandgap ur mätdata och jämför med literaturvärde (1p)

*Lösning:*

Vid 500 K är motståndet ungefär 400  $\Omega$ ; vid 400 K ungefär 1400  $\Omega$ . Det ger:

$$\ln \frac{1400}{400} = \frac{E_g}{2 \cdot 400 k_B} - \frac{E_g}{2 \cdot 500 k_B} \Leftrightarrow 1,25 = \frac{E_g}{k_B} \left( \frac{1}{4000} \right) \Leftrightarrow E_g = 5000 k_B = 6,9 \cdot 10^{-20} \text{ J} = 0,43 \text{ eV.}$$

Värdet i tabellen är 1,1 eV vid 300 K. Genom att ta 150°C istället för 125° hade man nog fått ett bättre värde.

c) Uppskatta koncentrationen av bor-atomer i materialet. (1p)

*Lösning:*

Vid ungefär 400 K är ser den intrinsiska ledningsförmågan ungefär lika stor som den till följd av dopning. Koncentrationen av intrinsiska laddningsbärare vid 400 K är ungefär  $1,5 \cdot 10^{16} e^{-\frac{E_g}{2 \cdot 400 k_B}} / e^{-\frac{E_g}{2 \cdot 300 k_B}} = 1,5 \cdot 10^{16} e^{\frac{1,1 e}{2400 k_B}} = 1,5 \cdot 10^{16} e^{5,3} = 3 \cdot 10^{18} \text{ m}^{-3}$ .

d) Gör en skiss som visar bandgapet, acceptornivån och Fermi-nivån vid  $T = 0$ . (1p)

*Lösning:*

Acceptornivån ligger nära valensbandet, vid  $T = 0$  ligger Fermi-nivån däremellan.

e) Hur stor är laddningsbärarnas hastighet vid 200°C? (1p)

*Lösning:* Koncentrationen är låg, Fermi-temperaturer är mycket mindre än rumstemperatur, så vi kan använda ekvationen för Boltzmangas:

$$E_{kin} = \frac{3}{2} k_B T \Rightarrow v = 10^5 \text{ m/s.}$$

**Problem 5.** a) Give an account of the fundamental forces according to the Standard Model. Tell about ranges, strengths, what each force is acting on, types of charges, the names of the force-mediating particles. (3p)

Berätta om de fundamentala växelverknings enligt Standardmodellen - räckviddar, styrka, vad kraften verkar på, laddningstyper, namnen på de kraftförmedlande partiklarna. (3p)

*Lösning:*

Standardmodellen beskriver naturkrafterna med kvantfältteorier, där bosoner förmedlar växelverkan mellan fermioner. Räckvidden är begränsad av de kraftförmedlande partiklarnas massorna.

Det finns ingen kvantteori för gravitationen, men räckvidden är oändlig ( $1/r^2$ ), så den hypotiska kraftförmedlande gravitonen måste vara massalös. Gravitation verkar på allting med massa - det finns bara en typ av laddning. Gravitationskraften är mellan två protoner är mycket svagare än den elektromagnetiska kraften mellan dem.

Fältteorin för elektromagnetism är QED, kvantelektrodynamik. Den förmedlas av fotonen, som är massalös - räckvidden är oändlig. Kraften verkar på alla partiklar med elektrisk laddning: elektron, myon, tauon, samt på kvarkarna och på de laddade vektorbosonerna. Styrkan är mycket större än gravitationen. Det finns två typer av laddning: + och -.

Den svaga kraften förmedlas av vektorbosonerna,  $W^\pm$  och  $Z^0$ , som har massor på ungefär 80 GeV, så att kraften har en räckvidd på  $10^{-18}$  m. Kraften orsakar övergångar mellan olika typer av kvarkar, varvid leptoner och neutriner är inblandade (exempel: neutronens  $\beta$ -sönderfall). På kort avstånd är den lika stark som den elektromagnetiska kraften, som den kan unifieras med i kvantfältteorin för elektrosvag växelverkan.

Den starka kraften (färgkraften) verkar mellan kvarkar som kan ha tre typer av laddning: röd, grön eller blå. Kraften verkar också på gluonerna själva. Det gör att kraften inte avtar med avstånd, utan att den har ett konstant värde på ungefär 100 newton mellan två kvarkar. Den sammanhållande kraften mellan färgneutrala protoner och neutroner är en rest av den starka kraften mellan kvarkarna, ungefär som Van-der-Waals-kraften är en rest av Coulombkraften mellan de elektriska laddningarna inuti atomer.

3