

Voorbeeldexamenopgaven VWO Correctievoorschrift

Quantumwereld Natuurkunde

Laserpulsen

1 maximumscore 3

uitkomst: $T = 4,5 \cdot 10^{-6}$ s

voorbeeld van een berekening:

Om bij de gegeven diameter en maximale draaifrequentie de kleinste pulsduur te halen, moeten de breedte van de openingen en de dichte stukken aan de rand gelijk zijn aan 1,0 mm.

Voor de omtrek van het wiel geldt: $O = 2\pi r = 2\pi 0,070 = 0,44$ m.

Voor het aantal segmenten (opening + dichte stukken) geldt dan

$$n = \frac{0,44}{2 \cdot 1,0 \cdot 10^{-3}} = 2,2 \cdot 10^2.$$

Voor de tijd van één rotatie van de schijf geldt:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1,0 \cdot 10^3} = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ s.}$$

Voor de tijd die bij 1 segment hoort, geldt: $T = \frac{1,0 \cdot 10^{-3}}{2,2 \cdot 10^2} = 4,5 \cdot 10^{-6}$ s.

- uitrekenen van het aantal openingen 1
- gebruik van $T = \frac{1}{f}$ 1
- completeren van de berekening 1

2 maximumscore 3

uitkomst: $a_{\text{mpz}} = 2,7 \cdot 10^6 \text{ ms}^{-2}$ ($= 2,8 \cdot 10^5 \text{ g}$)

voorbeeld van een berekening:

Voor de baansnelheid op de rand geldt: $v = \frac{2\pi r}{T} = \frac{2\pi 0,070}{0,001} = 4,4 \cdot 10^2 \text{ ms}^{-1}$.

Voor de middelpuntzoekende versnelling geldt:

$$a_{\text{mpz}} = \left(\frac{F_{\text{mpz}}}{m} = \frac{\frac{mv^2}{r}}{m} \right) = \frac{v^2}{r} = \frac{(4,4 \cdot 10^2)^2}{0,070} = 2,76 \cdot 10^6 \text{ ms}^{-2} = 2,8 \cdot 10^5 \text{ g.}$$

- gebruik van $v = \frac{2\pi r}{T}$ 1
- inzicht dat $a_{\text{mpz}} = \frac{v^2}{r}$ 1
- completeren van de berekening 1

| Vraag | Antwoord | Scores |
|-------|----------|--------|
|-------|----------|--------|

3 maximumscore 4

voorbeeld van een antwoord:

- Opmeten in de tekening levert: breedte fotonblok = 11 mm; afstand tussen spiegels = 70 mm. De pulsduur komt overeen met de breedte van het blok fotonen. De herhalings-tijd is twee maal de spiegela-fstand (fotonen moeten heen en weer).

$$\text{Dus geldt } \frac{\text{pulsduur}}{\text{herhalings-tijd}} = \frac{11}{2 \cdot 70} = 0,079.$$

- Bij een pulsduur van 20 femtoseconde geldt voor de lengte van de puls: $\ell = ct = 3,0 \cdot 10^8 \cdot 20 \cdot 10^{-15} = 6,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}$.

Voor de afstand tussen de spiegels geldt dan:

$$s = \frac{70}{11} \cdot 6,0 \cdot 10^{-6} = 3,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}.$$

- opmeten van de lengte van de fotonen en de afstand tussen de spiegels (met marges van 1 mm) 1
- inzicht dat de tijden zich verhouden als de afstanden 1
- inzicht dat $\ell = ct$ 1
- completeren van de bepalingen 1

Opmerking

Als de inverse van de gegeven verhouding berekend is: goed rekenen.

4 maximumscore 2

voorbeeld van een antwoord:

$$\text{Er geldt: } \Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}.$$

Als Δx groter dan 0 is, volgt hieruit dat Δp niet oneindig klein kan zijn. Dat wil zeggen dat niet alle fotonen dezelfde impuls hebben. Omdat impuls gerelateerd (omgekeerd evenredig) is aan golflengte betekent het dat er verschil in golflengte optreedt.

- inzicht in $\lambda = \frac{h}{p}$ 1
- completeren van het antwoord 1

| Vraag | Antwoord | Scores |
|-------|----------|--------|
|-------|----------|--------|

5 maximumscore 3

voorbeeld van een antwoord:

In de onbepaaldheidsrelatie van Heisenberg komt het product van Δp en Δx voor.

Bij een foton geldt: $p = \frac{h}{\lambda}$ en $E = hf = \frac{hc}{\lambda} = c \frac{h}{\lambda} = cp$.

Dus geldt: $p = \frac{1}{c}E$ zodat $\Delta p = \frac{1}{c}\Delta E$. Verder geldt: $\Delta x = c\Delta t$.

Dus geldt: $\Delta x \Delta p = \frac{1}{c}\Delta E c \Delta t = \Delta E \Delta t$.

- inzicht dat $E = \frac{hc}{\lambda}$ 1
- inzicht dat $\Delta x = c\Delta t$ 1
- completeren van de afleiding 1

6 maximumscore 3

voorbeeld van een antwoord:

Aflezen in figuur 5 levert: een maximale energie bij 770 nm en een minimale energie bij 870 nm.

Dit levert: $\Delta E = E_{\max} - E_{\min} = \frac{hc}{\lambda_{\max}} - \frac{hc}{\lambda_{\min}} =$
 $\frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3,00 \cdot 10^8}{770 \cdot 10^{-9}} - \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3,00 \cdot 10^8}{870 \cdot 10^{-9}} = 3,0 \cdot 10^{-20} \text{ J}$.

Dan geldt: $\Delta E \Delta t = 3,0 \cdot 10^{-20} \cdot 20 \cdot 10^{-15} = 6,0 \cdot 10^{-34}$.

Bovendien: $\frac{h}{4\pi} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{4\pi} = 5,3 \cdot 10^{-35}$.

Dus geldt: $\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$

- uitrekenen van het energieverval van de puls 1
- uitrekenen van $\Delta E \Delta t$ 1
- controleren van de tweede Heisenbergrelatie en conclusie 1

Davisson - Germer experiment

7 maximumscore 3

antwoord: $v = 4,4 \cdot 10^6 \text{ ms}^{-1}$

voorbeeld van een berekening:

Volgens de wet van behoud van energie geldt:

$$\Delta E_e = \Delta E_k$$

$$qU = \frac{1}{2}mv^2$$

$$v = \sqrt{\frac{2qU}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 54}{9,11 \cdot 10^{-31}}} = 4,4 \cdot 10^6 \text{ ms}^{-1}$$

- inzicht in $\Delta E_e = \Delta E_k$ met $\Delta E_e = qU$ en $\Delta E_k = \frac{1}{2}mv^2$ 1
- opzoeken van de lading en de massa van een elektron 1
- completeren van de berekening 1

8 maximumscore 2

voorbeeld van een antwoord:

Als de versnelspanning vergroot wordt, zal het elektron een grotere kinetische energie (en dus een grotere snelheid) krijgen.

Het versnelgedeelte van de opstelling staat parallel aan de schuifweerstand. Deze weerstand moet dus vergroot worden. Het schuifcontact moet daarbij naar beneden verschoven worden.

- inzicht dat de versnelspanning vergroot moet worden 1
- inzicht dat de weerstand dan groter moet worden en conclusie 1

9 maximumscore 2

voorbeeld van een antwoord:

In de grafiek is duidelijk een variatie in waargenomen intensiteit waar te nemen. Dit is uitsluitend verklaarbaar via interferentie en dientengevolge moeten de elektronen hier worden opgevat als golven.

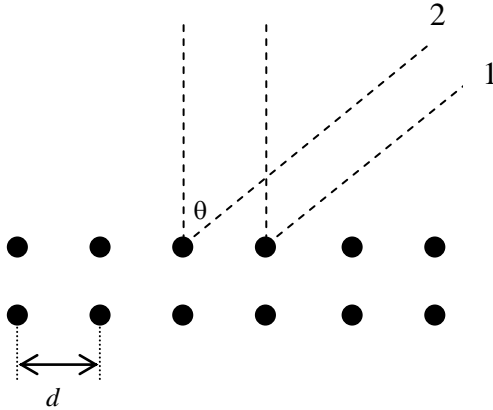
- inzicht dat interferentie optreedt 1
- inzicht dat interferentie slechts optreedt bij golven 1

10 maximumscore 2

voorbeeld van een antwoord:

Straal 2 legt een grotere afstand af dan straal 1.

Het afstandsverschil is gelijk aan $d \sin \theta$. Aangezien dat de lichtstralen elkaar versterken moet het faseverschil tussen de stralen gelijk zijn aan een geheel getal (1, 2, enz.). Het weg-lengteverschil is daarmee gelijk aan een geheel veelvoud van de golflengte: $n\lambda$.



- inzicht in constructieve interferentie
- consequente conclusie

1

1

11 maximumscore 4

voorbeeld van een antwoord:

Voor de golflengte geldt: $\lambda = \frac{h}{p}$.

Voor de kinetische energie geldt dan: $E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{p^2}{2m}$.

Voor de impuls geldt dus: $p = \sqrt{2mE_k}$.

Met $E_k = qU = eU$ levert dit: $p = \sqrt{2meU}$.

De formule voor de de Broglie-golflengte wordt daarmee: $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meU}}$.

- gebruik van $\lambda = \frac{h}{p}$
- inzicht dat $E_k = \frac{p^2}{2m}$
- inzicht in $E_k = qU = eU$
- completeren van de afleiding

1

1

1

1

| Vraag | Antwoord | Scores |
|-------|----------|--------|
|-------|----------|--------|

12 maximumscore 4

uitkomst: $d = 2,2 \cdot 10^{-10}$ m

voorbeeld van een bepaling:

Voor de de Broglie golflengte geldt:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meU}} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 1,60 \cdot 10^{-19} \cdot 54}} = 1,67 \cdot 10^{-10} \text{ m.}$$

Het maximum ligt bij een hoek van 50° .

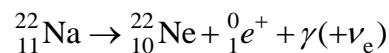
De formule $n\lambda = d \sin \theta$ levert dan: $d = \frac{n\lambda}{\sin \theta} = \frac{1,67 \cdot 10^{-10}}{\sin(50^\circ)} = 2,2 \cdot 10^{-10}$ m.

- gebruik van $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meU}}$ 1
- gebruik van $n\lambda = d \sin \theta$ 1
- aflezen van de hoek θ van het maximum (met een marge van 2°) 1
- completeren van de bepaling 1

Onderzoek naar metaalmoeheid

13 maximumscore 3

voorbeeld van een antwoord:



- symbool positron juist 1
- positron en gamma-foton rechts van de pijl 1
- correcte reactievergelijking 1

Opmerking

Het gamma-foton moet in de reactievergelijking voorkomen.

14 maximumscore 3

uitkomst: $t = 7,0$ jaar

voorbeeld van een berekening:

Er geldt: $A = A_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{\frac{1}{2}}}}$.

Invullen levert: $0,17 = 1,1 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{\frac{1}{2}}}} \rightarrow t = 2,69 \cdot t_{\frac{1}{2}} = 2,69 \cdot 2,6 = 7,0$ jaar.

- gebruik van $A = A_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{\frac{1}{2}}}}$ 1
- opzoeken halveringstijd van Na-22 1
- completeren van de berekening 1

15 maximumscore 2

voorbeeld van een antwoord:

- Omdat de energieën verschillend zijn, kan de volgorde bepaald worden. Noodzakelijke voorwaarde is dat het foton met een energie van 1,3 MeV eerder gedetecteerd wordt dan een foton met een energie van 0,51 MeV.
- De tijd tussen de twee detecties mag niet groter en niet kleiner zijn dan natuurkundig mogelijk is bij één positron.

- inzicht dat de detectievolgorde 1,3 MeV - 0,51 MeV moet zijn 1
- inzicht dat alleen natuurkundig toelaatbare verschildijden geaccepteerd worden 1

| Vraag | Antwoord | Scores |
|-------|----------|--------|
|-------|----------|--------|

16 maximumscore 4

voorbeeld van een antwoord:

– Er geldt: $\lambda_B = \frac{h}{p}$ met $p = mv$ en $E_k = \frac{1}{2}mv^2$.

Combineren levert: $\lambda_B = \frac{h}{\sqrt{2mE_k}}$.

Invullen levert: $\lambda_B = \frac{6,626 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 4 \cdot 10^{-2} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}}} = 6,1 \cdot 10^{-9} \text{ m.}$

– Dit komt overeen met $\frac{6,1 \cdot 10^{-9}}{0,41 \cdot 10^{-9}} = 15$ roosterafstanden.

- inzicht dat $\lambda_B = \frac{h}{mv}$ 1
- inzicht dat $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ 1
- vergelijken van de de Broglie-golflengte met de roosterafstand 1
- completeren van de berekeningen 1

17 maximumscore 3

voorbeeld van een antwoord:

- De gestippelde lijn geeft de waarschijnlijkheidsverdeling W van het positron: de kans is in het midden van het roostergat het grootst omdat er afstotende positieve ladingen omheen zijn. De getekende lijn is de waarschijnlijkheidsverdeling W van het elektron.
- Doordat de waarschijnlijkheidsverdeling W van het positron zich concentreert bij het roostergat, wordt de kans om een elektron aan te treffen en tot annihilatie te komen kleiner. Daarmee wordt de levensduur verlengd.

- inzicht dat de waarschijnlijkheid van een positron in het roostergat groter is dan daarbuiten 1
- inzicht dat een grote waarschijnlijkheid van het ene deeltje samenvalt met een kleine waarschijnlijkheid van het andere deeltje 1
- inzicht dat in een roostergat de annihilatiekans afneemt en dus de levensduur toeneemt 1

| Vraag | Antwoord | Scores |
|-------|----------|--------|
|-------|----------|--------|

18 maximumscore 3

voorbeeld van een antwoord:

Er is kans op annihilatie als de twee waarschijnlijkheidsverdelingen W in figuur 5 elkaar overlappen. Te zien is dat deze overlap bij meerdere ontbrekende ionen afneemt. Dit verklaart dat de levensduur toeneemt bij het aantal ontbrekende atomen.

- inzicht dat de overlap van de waarschijnlijkheidsverdelingen een maat is voor de kans op een annihilatiereactie 1
- inzicht dat de overlap tussen de waarschijnlijkheidsverdelingen afneemt 1
- consequente conclusie 1

Kleurstof in een CD-R

19 maximumscore 3

antwoord: $n = 2,5 \cdot 10^7$

voorbeeld van een berekening:

Er geldt: $E = Pt$. Dit levert: $t = \frac{E}{P} = \frac{1,5 \cdot 10^{-9}}{75 \cdot 10^{-3}} = 2,0 \cdot 10^{-8}$ s.

Voor het aantal spots per seconde geldt dan: $n = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2,0 \cdot 10^{-8}} = 2,5 \cdot 10^7$.

- gebruik van $E = Pt$ 1
- in rekening brengen van factor 2 1
- completeren van de berekening 1

20 maximumscore 3

uitkomst: $p = 0,14$ nm en $q = 0,19$ nm

voorbeeld van een bepaling:

Als x het aantal C-atomen is, kan de lengte L geschreven worden als:

$$L = (x+1)p + 2q.$$

Uitwerken levert: $L = px + p + 2q$.

Voor de trendlijn geldt: $y = 0,14x + 0,51$.

Dit levert: $p = 0,14$ nm en $p + 2q = 0,51$.

Dit levert: $q = 0,19$ nm.

- inzicht dat geldt: $L = px + p + 2q$ 1
- omwerken van deze vergelijking en vergelijken met de formule van de trendlijn 1
- completeren van de bepaling 1

| Vraag | Antwoord | Scores |
|-------|----------|--------|
|-------|----------|--------|

21 maximumscore 2

voorbeelden van een antwoord:

methode 1

Reken twee punten uit.

Lees bijvoorbeeld de waarden uit figuur 3 en 4 af, voor $x = 3$ en $x = 11$.

Invullen voor $x = 3$ levert: $\frac{n}{L} = \frac{6}{0,95} = 6,4$.

Invullen voor $x = 11$ levert: $\frac{n}{L} = \frac{14}{2,1} = 6,7$.

Conclusie: het aantal vrije elektronen per lengte-eenheid neemt toe.

- aflezen van waarden in figuur 3 en 4 bij waarden van x 1
- completeren van de berekening en conclusie 1

methode 2

Combineren van de twee formules $L = 0,14c + 0,5124$ en $n = c + 3$ geeft

$\frac{n}{L} = 7,14 - \frac{6,66}{L}$. Hier volgt uit dat $\frac{n}{L}$ toeneemt, als L groter wordt.

- combineren van de twee formules tot een formule voor $\frac{n}{L}$ 1
- consequente conclusie 1

methode 3

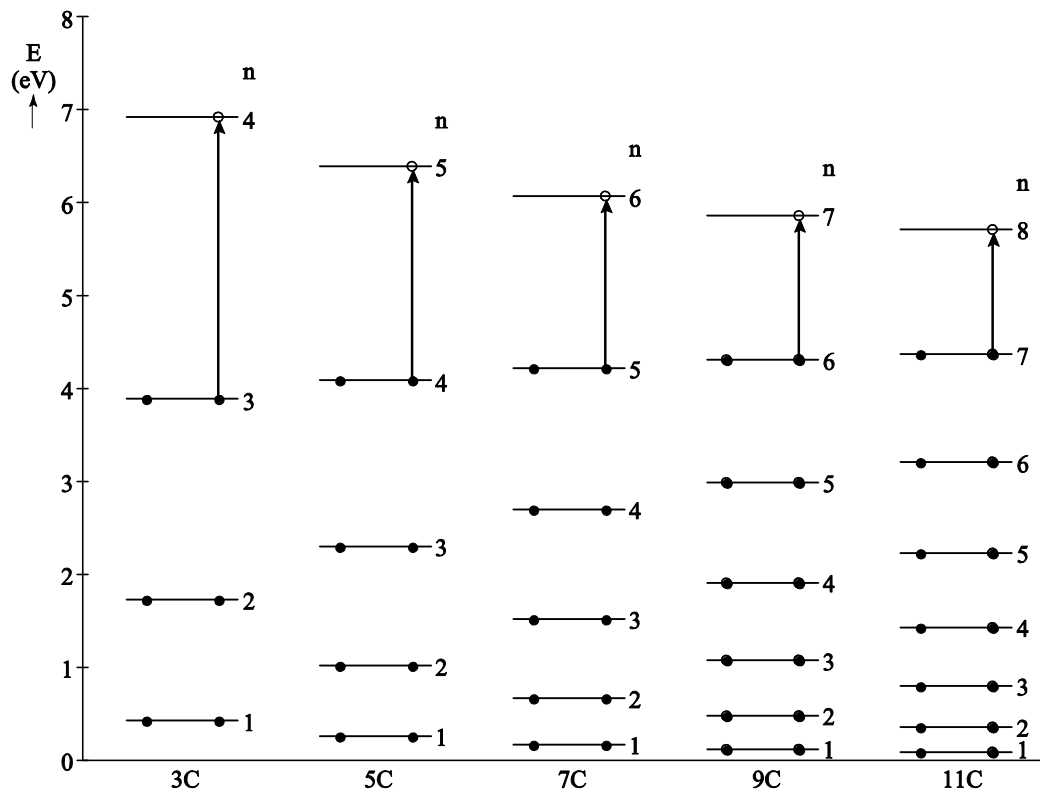
Vergelijken van de formules voor L in figuur 3 en voor n in figuur 4, laat zien dat n bij een toename van het aantal C-atomen sterker toeneemt dan L .

($1x$ vs $0,14x$). Hier volgt uit dat $\frac{n}{L}$ toeneemt, als L groter wordt.

- inzicht dat n bij een toename van het aantal C-atomen sterker toeneemt dan L 1
- consequente conclusie 1

22 maximumscore 4

voorbeeld van een antwoord:



methode 1

De energieniveaus zijn evenredig met n^2 .

Bij 5C lezen we voor $n=4$ af: $E_4 = 4$ eV.

De waarde voor $n=1$ is hiervan $\frac{1}{16}$ deel. Dus $E_1 = 0,25$ eV.

$E_2 = 4E_1 = 1$ eV en $E_3 = 9E_1 = 2,3$ eV.

| Vraag | Antwoord | Scores |
|-------|----------|--------|
|-------|----------|--------|

methode 2

Er geldt: $E_n = n^2 \frac{h^2}{8mL^2}$.

Uitrekenen of aflezen in figuur 3 levert: $L = 1,21$ nm.

Invullen levert: $E_1 = 1^2 \frac{(6,63 \cdot 10^{-34})^2}{8 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} (1,21 \cdot 10^{-9})^2} = 4,19 \cdot 10^{-20} \text{ J} = 0,26 \text{ eV}$

$E_2 = 4E_1 = 4 \cdot 0,26 = 1,0 \text{ eV}$.

$E_3 = 9E_1 = 9 \cdot 0,26 = 2,3 \text{ eV}$.

- gebruik van $E_n = n^2 \frac{h^2}{8mL^2}$ 1
- aflezen van L met een marge van 0,04 m 1
- completeren van de berekeningen 1
- tekenen van de waarden in de figuur op de uitwerkbijlage met een marge van 10% 1

Opmerkingen

- *Tekenen zonder toelichting binnen een marge van 10%: maximaal 1 scorepunt toekennen*
- *Bepalen van de energieën door interpoleren tussen de verschillende ketens: maximaal 2 scorepunten toekennen.*

23 maximumscore 3

antwoord: de keten met 9C

voorbeeld van een antwoord:

Voor de energie van een foton met golflengte van 800 nm geldt:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 2,998 \cdot 10^8}{800 \cdot 10^{-9}} = 2,483 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,55 \text{ eV}.$$

De pijl in de figuur moet overeenkomen met deze energie.

Dit is bij 9C.

- inzicht dat de energie overeenkomt met de pijl in de figuur 1
- gebruik van $E = \frac{hc}{\lambda}$ 1
- completeren van de berekening en consequente conclusie 1

Opbrengst van het foto-elektrisch effect

24 maximumscore 2

voorbeeld van een antwoord:

- Als de spanning toeneemt, blijft de stroomsterkte gelijk.
- Doordat de elektronen de kathode verlaten, krijgt de kathode een positieve spanning, die de elektronen aantrekt. / De elektronen verlaten de kathode in diverse richtingen. Als de spanning van de anode niet hoog genoeg is worden niet alle vrijgemaakte elektronen aangetrokken.

- inzicht dat de stroomsterkte gelijk blijft als de spanning stijgt 1
- inzicht dat de elektronen op de kathode een positieve lading achterlaten / in alle richtingen de kathode verlaten 1

25 maximumscore 3

voorbeeld van een afleiding:

$$I = n_e e \text{ en } P_{\text{licht}} = n_f E_f \text{ Dus: } I = n_e e = \eta_Q n_f e = \frac{\eta_Q e}{E_f} P_{\text{licht}}$$

- inzicht dat $I = n_e e$ 1
- inzicht dat $P_{\text{licht}} = n_f E_f$ 1
- completeren van de afleiding 1

26 maximumscore 3

uitkomst: $\eta_Q = 5,5 \cdot 10^{-5}$ (met een marge van $0,2 \cdot 10^{-5}$)

voorbeeld van bepaling:

Er geldt:

$$\lambda = 410 \text{ nm} \rightarrow E_f = \frac{hc}{\lambda} = \frac{9,626 \cdot 10^{-34} \cdot 2,998 \cdot 10^8}{410 \cdot 10^{-9}} = 4,83 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 3,02 \text{ eV}$$

$$I = \frac{\eta_Q e}{E_f (\text{J})} P_{\text{licht}} = \frac{\eta_Q}{E_f (\text{eV})} P_{\text{licht}} \rightarrow 5,5 \cdot 10^{-8} = \frac{\eta_Q}{3,02} \cdot 3,0 \cdot 10^{-3} \rightarrow \eta_Q = 5,5 \cdot 10^{-5}$$

- gebruik van $E_f = \frac{hc}{\lambda}$ 1
- inzicht dat $I = \frac{\eta_Q}{E_f (\text{eV})} P_{\text{licht}}$ 1
- completeren van de bepaling 1

| Vraag | Antwoord | Scores |
|-----------|--|------------------|
| 27 | maximumscore 2 voorbeeld van een antwoord: Als de frequentie beneden een grens komt, is er onafhankelijk van de intensiteit geen foto-elektrisch effect, het gaat dus niet om een collectief verschijnsel. | |
| | <ul style="list-style-type: none"> inzicht dat beneden een bepaalde energie / frequentie geen foto-elektrisch effect plaatsvindt, onafhankelijk van de lichtintensiteit completeren van het antwoord | 1 1 |
| 28 | maximumscore 3 uitkomst: $\eta_Q = 4 \cdot 10^{-5}$ voorbeeld van een berekening: $\eta_Q = (1 - 0,4) \cdot 0,83 \cdot (1 - 0,8) \cdot 0,04 \cdot (1 - 0,99) = 4 \cdot 10^{-5}$ | |
| | <ul style="list-style-type: none"> inzicht dat de rendementen van de deelprocessen met elkaar vermenigvuldigd moeten worden inzicht dat bij stap 1, 3 en 4b het complementaire percentage genomen moet worden completeren van de berekening | 1 1 1 |
| 29 | maximumscore 4 voorbeeld van een antwoord: – De waarde van η_Q daalt naar 0 bij $\lambda = 277$ nm. Daar geldt $E_f = W_u$, dus het betreft hier de grensgolflengte van koper. – Aflezen van een waarde in figuur 4 levert: bij $\lambda = 230$ nm geldt $\eta_Q = 4 \cdot 10^{-4}$. Daarbij geldt: $E_f = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 2,998 \cdot 10^8}{230 \cdot 10^{-9}} = 8,637 \text{ J} = 5,39 \text{ eV}$. Invullen levert: $\eta_Q = k(E_f - W_u)^2 \rightarrow 4,0 \cdot 10^{-4} = k(5,39 - 4,48)^2 \rightarrow k = 4,8 \cdot 10^{-4} \text{ (eV}^{-2}\text{)}$ | |
| | <ul style="list-style-type: none"> inzicht dat $\eta_Q = 0$ bij de grensgolflengte van koper aflezen van waarden uit de grafiek waarvoor $\eta_Q \neq 0$ met een marge van $0,2 \cdot 10^{-4}$ berekening van E_f in eV completeren van de bepaling van k | 1 1 1 1 |

Scanning tunneling microscoop (STM)

30 maximumscore 3

voorbeeld van een antwoord:

In de x - en y -richting van figuur 1 passen 4 atoomafstanden op 2 nm, dus de atoomafstand is ongeveer 0,5 nm. De hoogte is vergelijkbaar met een atoomafstand, maar in werkelijkheid niet groter dan 0,025 nm.

De gevraagde factor is $\frac{0,5}{0,025} = 20$, dat is in de orde van grootte 10.

Dus antwoord c is goed.

- vergelijken van de breedte van de foto met de breedte van een atoom 1
- vergelijken van de hoogte van een atoom met 0,025 nm 1
- completeren van de bepaling 1

31 maximumscore 2

voorbeeld van een antwoord:

De tunnelstroom I_t neemt toe, omdat de naald dichterbij het oppervlak komt. Omdat de tunnelstroom I_t constant moet blijven, moet dit gecompenseerd worden met een grotere afstand d .

- inzicht dat de tunnelstroom I_t toeneemt 1
- completeren van de uitleg 1

32 maximumscore 2

uitkomst: $I_t = 2 \cdot 10^{-5} \text{ nA} = 2 \cdot 10^{-14} \text{ A}$

voorbeeld van berekening:

Bij 1,5 nm is de afstand toegenomen met $5 \cdot 0,1 \text{ nm}$, I_t is dus een factor 10^5 kleiner. $I_t = 2 \cdot 10^{-5} \text{ nA} = 2 \cdot 10^{-14} \text{ A}$.

- inzicht dat de afstand $5 \cdot 0,1 \text{ nm}$ groter wordt 1
- completeren van de berekening 1

33 maximumscore 1

voorbeeld van een antwoord:

De STM meet minieme variaties in d : deze moeten niet het gevolg zijn van willekeurige trillingen.

| Vraag | Antwoord | Scores |
|-------|----------|--------|
|-------|----------|--------|

34 maximumscore 2

voorbeeld van een antwoord:

- Er geldt: $\lambda_B = \frac{7,45 \cdot 10^{-8}}{\sqrt{T}} = \frac{7,45 \cdot 10^{-8}}{\sqrt{273+20}} = 4,35 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 4,35 \text{ nm}$.
- Als $d > \lambda_B$, is de waarschijnlijkheid om elektronen in de naald aan te treffen nul: er is dan geen tunneleffect.

- berekenen van λ_B 1
- inzicht dat de afstand in de orde van grootte van de de Broglie-golflengte moet zijn 1

Opmerking

Bij deze vraag hoeft geen rekening gehouden te worden met significantie.

35 maximumscore 3

voorbeeld van een antwoord:

- Als de naald op de juiste, gemiddelde hoogte boven het oppervlak staat, moet het PZT-element d niet aanpassen: $U_{\text{PZT}} = 0 \rightarrow U_{\text{ref}} = U_t$.
 U_{ref} zorgt er dus voor dat de naald standaard op de ingestelde hoogte blijft.
- Als $U_t > U_{\text{ref}}$ is er een atoom aangetroffen: d moet groter, dus het PZT-element wordt korter.
- d wordt zo vergroot dat I_t en dus U_t weer de oorspronkelijke waarden krijgen. Dan geldt weer: $U_{\text{ref}} = U_t \rightarrow U_{\text{PZT}} = 0$.

- inzicht dat de referentiespanning overeenkomt met de uitgangspositie van de naald 1
- inzicht dat bij een positieve spanning de naald korter moet worden 1
- inzicht dat de stand dan de nieuwe uitgangspositie is 1

36 maximumscore 3

voorbeeld van een antwoord:

- De elektronen moeten door de naald worden aangetrokken en door het metaaloppervlak worden afgestoten om makkelijker aan het metaal kunnen ontsnappen. De spanning tussen de naald en het oppervlak moet dus een positieve waarde hebben.
- Door de energie van het elektrische veld wordt de hoogte van de energie-barrière verlaagd, waardoor er een grotere tunnelkans ontstaat.

- inzicht dat de elektronen aangetrokken moeten worden 1
- consequente conclusie 1
- inzicht dat de energiebarrière verlaagd wordt 1

TEM, Transmissie Elektronen Microscoop

37 maximumscore 2

voorbeeld van een antwoord:

De grootte λ verwijst naar het **golf** karakter, terwijl alleen geladen **deeltjes** met een spanning U te versnellen zijn.

Beide begrippen komen in deze relatie dus naast elkaar voor.

- inzicht in het begrip golf-deeltjedualiteit 1
- completeren van de uitleg 1

38 maximumscore 3

voorbeeld van een afleiding:

Er geldt volgens Heisenberg:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi} \rightarrow \Delta x = \frac{d}{2\pi} \text{ en } \Delta p \approx p = \frac{h}{\lambda} \rightarrow \frac{d}{2\pi} \cdot \frac{h}{\lambda} \geq \frac{h}{4\pi} \rightarrow d \geq \frac{\lambda}{2}$$

- gebruik van $\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$ 1
- gebruik van $\Delta x = \frac{d}{2\pi}$ en $\Delta p \approx p = \frac{h}{\lambda}$ 1
- completeren van de afleiding 1

39 maximumscore 3

voorbeeld van een antwoord:

– Voor de kleinste afmeting geldt:

$$d = \frac{20 \cdot 10^{-9}}{50} \rightarrow \lambda \leq 2d = 8,0 \cdot 10^{-10} = 0,80 \text{ nm}$$

Deze golflengte is veel kleiner dan de kleinste golflengte van zichtbaar licht.

– $\lambda = 0,80 \text{ nm} \rightarrow \sqrt{U} = \frac{1,226}{0,80} \rightarrow U = 2,3 \text{ V.}$

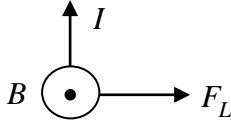
- inzicht dat $\lambda \leq 8,0 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ en conclusie 1
- gebruik van $\lambda_B = \frac{1,226}{\sqrt{U}}$ 1
- completeren van de berekening 1

| Vraag | Antwoord | Scores |
|-------|----------|--------|
|-------|----------|--------|

40 maximumscore 3

voorbeeld van een antwoord:

- Bij negatieve waarden van B worden de elektronen naar rechts afgebogen. Het negatieve magneetveld is dus uit het vlak van tekening gericht:



- Naarmate de elektronen verder van de as passeren, moeten ze sterker afgebogen worden. Dit vereist een sterker magneetveld B .
- inzicht dat negatieve waarden van B corresponderen met afbuiging naar rechts 1
- bepalen van de richting van dit magneetveld 1
- inzicht dat elektronen sterker afgebogen moeten worden naarmate ze verder van de as passeren 1

41 maximumscore 3

uitkomst: $a = 1,9 \cdot 10^{16} \text{ ms}^{-2}$

voorbeeld van een berekening:

Voor de versnelling geldt:

$$a = \frac{F_L}{m} = \frac{Bqv}{m} = \frac{0,12 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 9,2 \cdot 10^5}{9,1 \cdot 10^{-31}} = 1,9 \cdot 10^{16} \text{ ms}^{-2}$$

- inzicht dat $a = \frac{F_L}{m}$ 1
- gebruik van $F_L = Bqv$ 1
- completeren van de berekening 1

42 maximumscore 1

voorbeeld van een antwoord:

| eigenschappen object | weinig doorlating | veel doorlating |
|----------------------|-------------------|-----------------|
| zeer dun plakje | | X |
| aangehecht metaal | X | |

| Vraag | Antwoord | Scores |
|-------|----------|--------|
|-------|----------|--------|

43 maximumscore 2

voorbeeld van een uitleg:

De magnetische lenzen convergeren de elektronen naar één punt. Na dat punt divergeren de elektronen. Hierdoor worden de elektronen ver uit elkaar getrokken, waardoor het beeld groter wordt.

- inzicht dat de magnetische lenzen de elektronen convergeren 1
- completeren van de uitleg 1

Opmerking

een redenering over positieve lenzen die in dit geval en vergroot beeld vormen, uiteraard goed rekenen.

Waterstofatoom

51 maximumscore 4

voorbeeld van een antwoord:

- $E_t = E_t - P_{str} \cdot dt$
- Het elektron is gebonden in het atoom. Dit wordt aangegeven met een negatieve energie.
- Uit $r = \frac{c_2}{E_t}$ volgt $c_2 = E_t r$. Met $r = a_0 = 52,9$ pm.

Invullen levert $c_2 = -2,18 \cdot 10^{-18} \cdot 52,9 = -1,15 \cdot 10^{-16}$.

- $E_t = E_t - P_{str} \cdot dt$ 1
- inzicht dat een binding overeenkomt met een negatieve energie 1
- inzicht dat $c_2 = E_t r$ met $r = a_0 = 52,9$ pm 1
- completeren van de berekening 1

52 maximumscore 2

voorbeeld van een antwoord:

- De negatieve helling van de grafiek wordt steeds negatiever, dus de naar binnen gerichte radiale snelheid neemt continu toe.
- Op dat tijdstip nadert de straal tot nul, dus het elektron valt op de kern.

- inzicht dat het elektron met toenemende snelheid naar de kern valt 1
- inzicht dat het elektron op $t = 1,55 \cdot 10^{-11}$ s op de kern aankomt 1

53 maximumscore 2

voorbeeld van een uitleg:

Er is geen precieze bepaling van \vec{r} en \vec{p} mogelijk zodat het elektron niet volgens de klassieke wetten met $\vec{r} = \vec{p} = 0$ op de kern kan vallen. Dit zou namelijk $\Delta p \Delta r = 0$ opleveren en dat is in strijd met het onbepaaldheidsprincipe.

- inzicht dat een val op de kern $\Delta p = 0$ oplevert 1
- completeren van de uitleg 1

| Vraag | Antwoord | Scores |
|-------|----------|--------|
|-------|----------|--------|

54 maximumscore 3

antwoord:

| | Myrthe | Jim | Johan | Ingrid | José |
|----------|--------|-----|-------|--------|------|
| gelijk | | x | x | x | |
| ongelijk | x | | | | x |

- indien alle antwoorden correct 3
- indien vier of drie antwoorden correct 2
- indien twee of een antwoord correct 1

55 maximumscore 2

voorbeeld van een antwoord:

Uit de formule: $p = \frac{h}{2\pi r}$ volgt: $pr = \frac{h}{2\pi}$.

Invullen levert: $\Delta p \Delta r \leq \frac{h}{2\pi}$. Omdat $\frac{h}{2\pi}$ groter is dan $\frac{h}{4\pi}$, is dit niet strijdig

met $\Delta p \Delta r \geq \frac{h}{4\pi}$.

- inzicht dat $pr = \frac{h}{2\pi}$ inhoudt dat $\Delta p \Delta r \leq \frac{h}{2\pi}$ 1
- combinatie met het onbepaaldheidsprincipe en conclusie 1

56 maximumscore 3

voorbeeld van een berekening:

$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{p^2}{2m}$ met $p = \frac{h}{2\pi r}$. Hieruit volgt dat:

$$E_k = \frac{h^2}{8\pi^2 m r^2} \rightarrow k_1 = \frac{h^2}{8\pi^2 m} = \frac{(6,626 \cdot 10^{-34})^2}{8\pi^2 \cdot 9,109 \cdot 10^{-31}} = 6,10 \cdot 10^{-39} \text{ J m}^2.$$

- inzicht dat $E_k = \frac{p^2}{2m}$ met $p = \frac{h}{2\pi r}$ 1
- inzicht dat $k_1 = \frac{h^2}{8\pi^2 m}$ 1
- completeren van de berekening 1

| Vraag | Antwoord | Scores |
|-------|----------|--------|
|-------|----------|--------|

57 maximumscore 3

voorbeeld van een antwoord:

$$- \frac{dE_t}{dr} = 0 \rightarrow -2k_1 r^{-3} - (-k_2 r^{-2}) = 0 \rightarrow r = \frac{2k_1}{k_2}.$$

$$- \frac{2k_1}{k_2} = \frac{2 \cdot 6,10 \cdot 10^{-39}}{2,31 \cdot 10^{-28}} = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m} = a_0.$$

- inzicht dat $\frac{dE_t}{dr} = 0$ leidt tot $-2k_1 r^{-3} - (-k_2 r^{-2}) = 0$ 1
- herleiding tot $r = \frac{2k_1}{k_2}$ 1
- completeren van de berekening en conclusie 1

58 maximumscore 2

voorbeeld van een antwoord:

Invullen van $r = \frac{2k_1}{k_2}$ in $E_t = k_1 r^{-2} - k_2 r^{-1}$ geeft: $E_t = \frac{k_2^2}{4k_1} - \frac{k_2^2}{2k_1} = -\frac{k_2^2}{4k_1}$.

Invullen levert: $E_t = -\frac{(2,31 \cdot 10^{-28})^2}{4 \cdot 6,10 \cdot 10^{-39}} = -2,18 \cdot 10^{-18} \text{ J} = -13,6 \text{ eV}$.

- gebruik van $r = \frac{2k_1}{k_2}$ of $r = a_0$ in $E_t = k_1 r^{-2} - k_2 r^{-1}$ 1
- invullen van constanten in E_t en omrekenen naar eV 1