

Algemene instructies

Theoretisch examen (30 punten)

8 juli 2026

Het niet naleven van één van de volgende regels kan leiden tot diskwalificatie. Het theorie-examen duurt 5 uur en is in totaal 30 punten waard. Het begin en einde van het examen worden aangekondigd, evenals elk uur, waarbij de verstreken tijd wordt vermeld. Dit gebeurt ook dertig, vijftien en vijf minuten voor het einde van het examen.

Vóór het examen

Open de enveloppen pas wanneer je daartoe instructies krijgt. De volgende spullen worden ter beschikking gesteld voor gebruik aan de tafel: (1) een pen, (2) een wetenschappelijke rekenmachine, een liniaal.

Tijdens het examen

- Gebruik de verstrekte pen om de vragen te beantwoorden.
- Gebruik de antwoordbladen voor je definitieve antwoorden. Vul de juiste vakjes in met je antwoorden en de nodige opmerkingen. Schrijf uitsluitend op de voorzijde van het papier. Teksten op de achterzijde van het papier worden niet gescand en worden niet beoordeeld door de correctoren.
- Voor berekeningen worden blanco werkbladen verstrekt met de titel **WORKSHEET**. Gebruik hiervoor uitsluitend de daarvoor bestemde werkbladen. Streep onnodige antwoorden en kladteksten die niet beoordeeld mogen worden door met een X. **Gebruik alleen de voorkant van elk blad en houd de marge aan de rand leeg. De achterkant van de pagina's wordt niet gescand en de inhoud ervan wordt niet in ogenschouw genomen.**
- Antwoorden moeten beknopt en leesbaar zijn. Gebruik vergelijkingen, logische operatoren, symbolen en schema's om je ideeën duidelijk weer te geven. Vermijd het gebruik van verklarende teksten, aangezien beoordelaars mogelijk niet meertalig zijn. **Wanneer gevraagd wordt een antwoord in bepaalde variabelen uit te drukken, kan het zijn dat niet alle gegeven variabelen in de uitdrukking voorkomen.**
- Je hoeft onzekerheidsmarges in je antwoorden niet te kwantificeren, tenzij anders aangegeven.

- Verlaat je plaats niet zonder toestemming. Als je hulp nodig hebt (naar het toilet gaan, water halen, enz.), steek dan het bordje met het opschrift „Help“ omhoog.

Aan het einde van het examen

- Stop onmiddellijk met schrijven zodra het einde van het examen wordt aangekondigd.
- Stop alle vellen in de daarvoor bestemde envelop. Leg ze met de bedrukte kant naar boven in deze volgorde: algemene instructies, vraagbladen, antwoordbladen, werkbladen. Sorteert ze op paginanummer.
- De surveillanten zullen aangeven wanneer je de zaal mag verlaten. Neem niets mee uit de zaal, ook de rekenmachine niet. Wij stellen je medewerking op prijs.

Specifieke instructies

Gebruik tijdens het hele examen altijd de waarden van de natuurkundige constanten die in de algemene instructies zijn aangegeven, tenzij anders vermeld. Geef bij numerieke berekeningen altijd de eenheden van de gebruikte grootheden aan. Succes, Ad en Bouke.

Fysische constanten

Referentiewaarden voor geselecteerde fysische constanten.

Constante	Notatie	Waarde	Eenheden
Lichtsnelheid in vacuüm	c	$2,99792458 \times 10^8$	$m \cdot s^{-1}$
Planck-constante	h	$4,135667696 \dots \times 10^{-15}$	$eV \cdot s$
Gereduceerde Planck-constante	$\hbar = h/2\pi$	$6,582119569 \dots \times 10^{-16}$	$eV \cdot s$
Getal van Avogadro	N_A	$6,02214076 \times 10^{23}$	mol^{-1}
Constante van Boltzmann	k_B	$8,617333262 \times 10^{-5}$	$eV \cdot K^{-1}$
Ideaal gasconstante	R	$8,31446261815324$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$
Elementaire lading	e	$1,602176634 \times 10^{-19}$	$A \cdot s$
Universele zwaartekrachtconstante	G	$6,67430(15) \times 10^{-11}$	$m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}$
Constante van Stefan-Boltzmann	σ	$5,670374419 \times 10^{-8}$	$kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-4}$
Vacuümpermeabiliteit	μ_0	$1,25663706127(20) \times 10^{-6}$	$kg \cdot m \cdot A^{-2} \cdot s^{-2}$
Permittiviteit in vacuüm	ϵ_0	$8,8541878188(14) \times 10^{-12}$	$A^2 \cdot s^4 \cdot kg^{-1} \cdot m^{-3}$
Massa van het elektron	m_e	$5,1099895069(16) \times 10^{-5}$	eV/c^2
Massa van het proton	m_p	$9,3827208943(29) \times 10^{-8}$	eV/c^2
Atomaire massa-eenheid	amu	$9,3149410372(29) \times 10^{-8}$	eV/c^2

VRAAG T1 [10 pt]. Drie opgaven

Deze vraag bestaat uit drie onafhankelijke (afzonderlijke) opgaven.

T1-A [3,0 pt]. Hydrostatische sluis

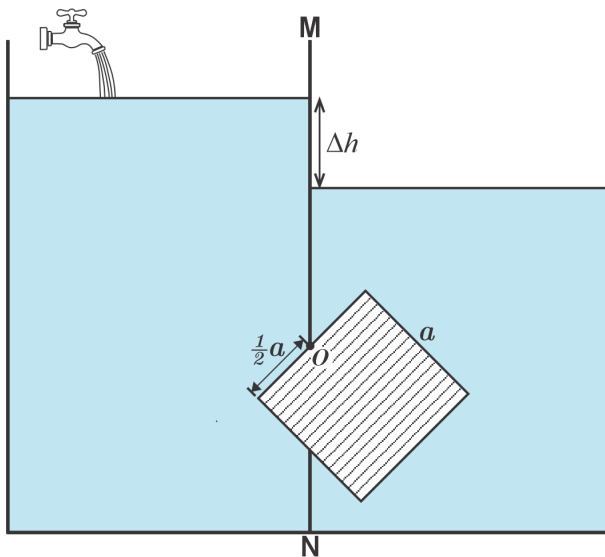


Fig. 1a.

Twee waterreservoirs worden gescheiden door een verticale wand MN, zoals weergegeven in figuur 1a. Het linkerreservoir kan water ontvangen uit een bron. Er moet worden gezorgd dat het maximaal mogelijke verschil tussen de waterstanden gelijk is aan $\Delta h = 1,41$ m. Om dit te bereiken, is er een sleuf met verticale afmeting $a\sqrt{2}/2$ in MN uitgesneden en afgedicht met een massief kubusvormig blok met een ribbe a . Het blok heeft een dichtheid van $3\rho_0$, waarbij ρ_0 de dichtheid van water is. Het blok is volledig ondergedompeld, vastgemaakt aan de wand bij punt O en kan zonder wrijving om de as draaien die loodrecht staat op het vlak van de figuur en door punt O loopt.

T1-A1 [3,0 pt] Bereken de waarde van a die ervoor zorgt dat het maximaal toegestane verschil in waterstanden niet wordt overschreden.

T1-B [3,5 pt]. Elektron-positronpaar

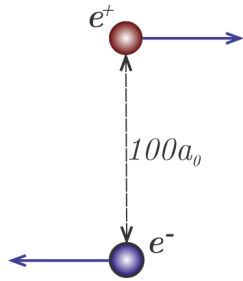


Fig. 1b.

Op een bepaald tijdstip bevindt een positron e^+ zich op een afstand van $100a_0$ van een elektron e^- . De deeltjes bewegen zodanig dat hun snelheden op dat moment antiparallel zijn en loodrecht staan op de verbindingsvector tussen de deeltjes, zoals weergegeven in figuur 1b. Het is bekend dat elk deeltje een impulsmoment van $\mu\hbar$ heeft ten opzichte van het massamiddelpunt van het systeem, waarbij μ een dimensieloze numerieke factor is. Neem aan dat de enige wisselwerking tussen e^+ en e^- elektrostatisch is (beide deeltjes hebben dezelfde massa m en een gelijke grootte van de lading, maar met tegengesteld teken). Neem verder aan dat dit systeem geïsoleerd is en dat de dynamica ervan klassiek en niet-relativistisch is.

De Bohr-straal a_0 wordt gegeven door $a_0 = 4\pi\epsilon_0\hbar^2/(me^2)$.

T1-B1 [1,0 pt] Als $\mu = 4$, is het stelsel gebonden, wat betekent dat de deeltjes in een gesloten baan rond het massamiddelpunt van het stelsel bewegen. Bepaal de maximale afstand tussen e^+ en e^- in termen van a_0 .

T1-B2 [2,5 pt]. Als $\mu = \frac{15}{2}$, is het systeem ongebonden, wat betekent dat de deeltjes zich niet langer in een gesloten baan rond het massamiddelpunt van het systeem bevinden. Laat $\vec{u}_\infty$ de snelheid zijn van e^+ ten opzichte van e^- wanneer de afstand tussen beide naar oneindig gaat. Bereken de hoek tussen $\vec{u}_\infty$ en de aanvankelijke bewegingsrichting van e^+ . Geef je antwoord in graden.

Hint 1: de excentriciteit ε van de in dit geval relevante kegelsnede wordt gegeven door

$$\varepsilon = \sqrt{1 + \frac{4L^2E}{k^2e^4m}}$$

waarbij E en L respectievelijk de totale energie en de grootte van het totale impulsmoment zijn en k is de constante van Coulomb $k = 1/(4\pi\epsilon_0)$.

Hint 2: De vergelijking van een kegelsnede in poolcoördinaten is

$$r = \frac{a}{1 - \varepsilon \cos(\theta)}$$

T1-C [3,5 pt]. Fotodissociatie van ozon

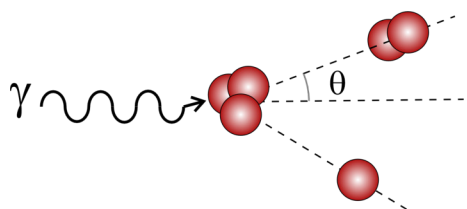


Fig. 1c.

Een foton met hoekfrequentie ω raakt een in rust verkerend ozonmolecuul O_3 , waardoor dit wordt gedissocieerd (uit elkaar valt) in een zuurstofmolecuul O_2 en een zuurstofatoom O , zoals weergegeven in figuur 1c. Het foton wordt bij dit proces geabsorbeerd. Laat U_i en U_f respectievelijk de energieën van de grondtoestanden van de ozon- en zuurstofmoleculen zijn. Neem aan dat dit systeem geïsoleerd is en dat de dynamica ervan klassiek is (potentiële energieën dragen niet bij aan de massa en de beweging van de zuurstofatomen is niet-relativistisch). Gebruik de relatie $p = E/c$ voor de lineaire impuls van het foton, waarbij E de energie ervan is.

T1-C1 [2,5 pt]. Neem θ als de hoek tussen de impuls van het uitgaande O_2 en het invallende foton. Bepaal de minimale hoekfrequentie $\omega_{\min}$ die nodig is om deze dissociatie bij deze hoek te laten plaatsvinden. Geef je antwoord in termen van $\hbar$, c , θ , $\Delta U = U_f - U_i$ en de massa m van een zuurstofatoom.

T1-C2 [1,0 pt]. Indien $\theta = \pi/6$, bereken dan de waarde van $\hbar\omega_{\min} - \Delta U$. Geef je antwoord in elektronvolt (eV). Neem $\Delta U = 1,10$ eV en $m = 16,0$ amu.

Hint:

$$(1+x)^r = 1 + rx + \frac{r(r-1)}{2!}x^2 + \frac{r(r-1)(r-2)}{3!}x^3 + \dots$$

VRAAG T2 [10 pt]. Koken met zonlicht?

Het herverdelen van de lichtstralen in gebieden met hoge en lage intensiteit als gevolg van reflectie of breking kan leiden tot de vorming van *caustieken*: krommen die ontstaan door de snijpunten van oneindig dicht bij elkaar liggende lichtstralen. Figuur 2a toont bijvoorbeeld de caustiek die wordt gevormd door stralen die parallel op een halfcilindrische spiegel vallen. Figuur 2b toont een foto van de caustiek die ontstaat door de weerkaatsing van licht op de bodem van een koffiekopje. Het helderste en centrale punt van de caustiek wordt de *cusp* genoemd; op dit punt is de lichtintensiteit maximaal.

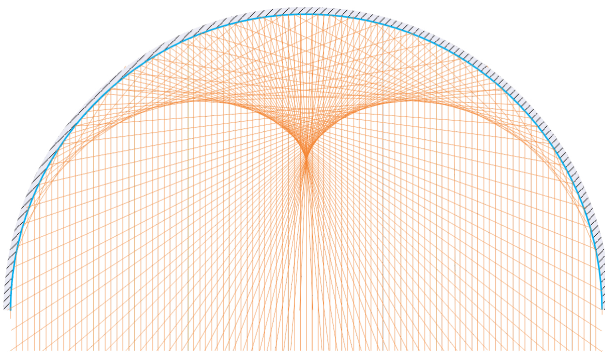


Fig. 2a.



Fig. 2b.

Caustieken kennen talrijke toepassingen in de wetenschap, variërend van hoogprecieze optica en kwantumoptica tot astrofysica. In deze vraag bestudeer je de vorming van caustieken door lichtreflectie op een halfcilindrische spiegel met straal R , zoals weergegeven in figuur 2c. Je onderzoekt ook andere aspecten van deze spiegel, zoals de toepassing ervan in *zonnekooktoestellen*.

Ga er in deze opgave van uit dat de invallende stralen afkomstig zijn van een externe lichtbron op grote afstand en evenwijdig zijn aan de optische as van de spiegel. Vanwege de symmetrie volstaat het om de weerkaatsing in één vlak te bestuderen. Figuur 2d toont een dergelijk vlak, de spiegel en het coördinatensysteem dat in deze opgave wordt gebruikt.

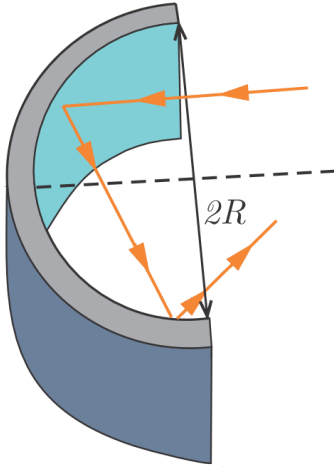


Fig. 2c.

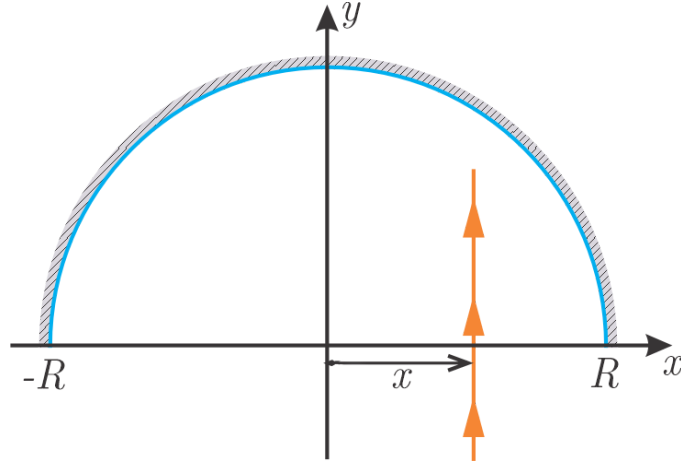


Fig. 2d.

T2-A [1,5 pt]. Meervoudige reflecties

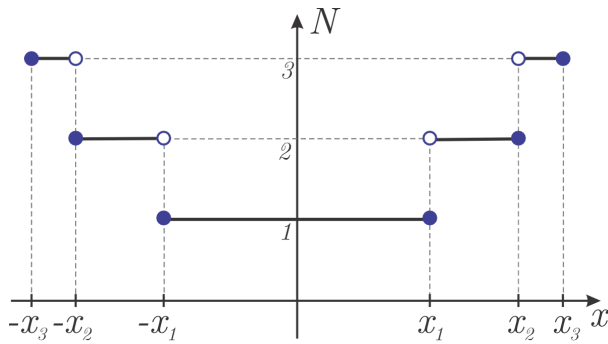


Fig. 2e.

Figuur 2e toont het verband tussen de x -coördinaat van een invallende straal en het aantal N reflecties dat deze ondergaat, tot en met $N = 3$. Terwijl x varieert over het interval $(-R, R)$, varieert de variabele N over alle natuurlijke getallen groter dan of gelijk aan 1. De maximale afstand tot de optische as waarbij een invallende straal maximaal N keer door de spiegel kan worden gereflecteerd, wordt aangeduid met x_N .

T2-A1 [1,5 pt]. Bepaal de algemene uitdrukking voor x_N in de oneindige reeks x -coördinaten $x_1, x_2, x_3, \dots$ van stralen met ten hoogstens N reflecties. Druk je antwoord uit in termen van R en N .

T2-B [4,0 pt]. Zonnekooktoestel

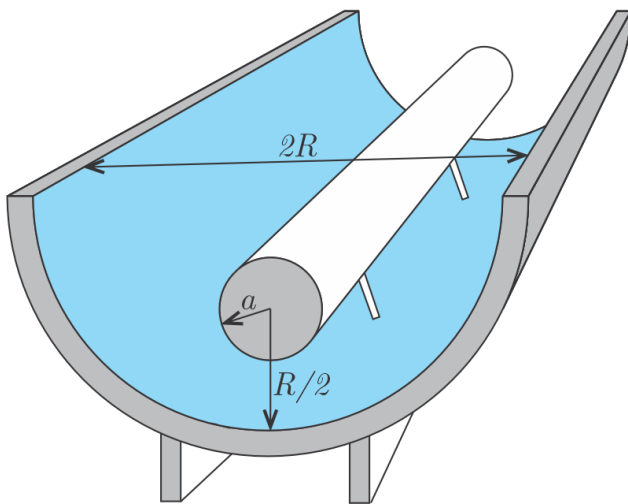


Fig. 2f.

Beschouw een systeem dat bestaat uit een halfholle cilindrische spiegel en een cilindrische buis. De cilinder is volledig absorberend: elke lichtstraal die erop valt, wordt geabsorbeerd. De straal van de spiegel is R . De straal van de buis is a . De assen van de spiegel en de buis zijn evenwijdig. Het middelpunt van de buis bevindt zich op een afstand van $R/2$ van de spiegel op het symmetrievlak van het systeem, zoals weergegeven in figuur 2f. De spiegel vangt zonnestraling op om voedsel in de buis te verwarmen. Neem aan dat het zonlicht een constante en gelijkmatige intensiteit (vermogen per oppervlakte-eenheid) heeft en dat de lichtstralen evenwijdig zijn aan de optische as van de spiegel. Neem verder aan dat a zodanig is dat elke straal die door de buis wordt geabsorbeerd, hooguit één keer door de spiegel wordt gereflecteerd. Laat $\theta_{\max}$ de maximale invalshoek op de spiegel zijn (gemeten ten opzichte van de normaal getrokken op het invalspunt) van een gereflecteerde straal die de buis raakt.

T2-B1 [2,0 pt]. De straal van de buis is $a = \alpha \sin(\theta_{\max}) + \beta \sin(2\theta_{\max})$. Druk α en β uit in termen van R .

Als je α en β niet kunt vinden, gebruik dan de gegeven formule voor de rest van de opgave.

T2-B2 [1,5 pt]. Stel dat P_0 het vermogen is dat de buis zou ontvangen als de spiegel er niet was. Noteer de verhouding P/P_0 tussen P_0 en het daadwerkelijk ontvangen vermogen P in termen van $\theta_{\max}$.

T2-B3 [0,5 pt]. Als $R = 1,0$ m, bereken dan de waarde van a zodanig dat $P = 5P_0$ geldt. Geef je antwoord in cm.

T2-C [4.5 pts]. Caustieken en Cus

T2-C1 [0,5 pt]. Beschouw een straal A die onder een hoek θ op de spiegel valt, zoals weergegeven in figuur 2g. Na reflectie is de vergelijking van deze straal in het coördinatensysteem gedefinieerd in figuur 2g van de vorm: $y = m_A x + b_A$. Schrijf m_A en b_A uit in termen van θ en R .

Hint: dit is de verwachte vorm: $m_A = K_1 \cot(K_2 \theta)$ en $b_A = K_3 \sec(K_4 \theta)$ met K_i numerieke constanten.

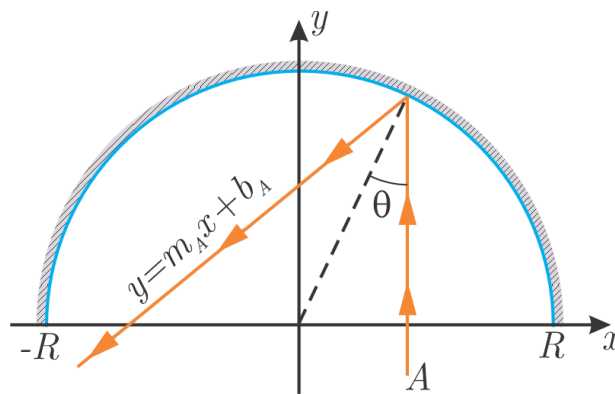


Fig. 2g.

T2-C2 [2,0 pt]. Beschouw nu een straal B , evenwijdig aan A , die het oppervlak raakt onder een hoek $\theta + \Delta\theta$, waarbij $\Delta\theta \ll \theta$. Na reflectie is de vergelijking die bij deze straal hoort: $y = m_B x + b_B$. Schrijf m_B en b_B uit in termen van θ , $\Delta\theta$ en R , waarbij je een benadering maakt in de eerste orde in $\Delta\theta$.

T2-C3 [1,0 pt]. Bepaal de coördinaten van het snijpunt (X_c, Y_c) tussen de gereflecteerde stralen van A en B . Schrijf je antwoord in termen van R en θ .

T2-C4 [1,0 pt]. Voor $\theta \ll 1$ geldt: $Y_c = v|X_c|^{p/q} + u$. Druk v en u uit in termen van R en bepaal gehele getallen p en q (of equivalent: geef de breuk p/q).

VRAAG T3 [10 pt]. Op jacht naar het absolute nulpunt

Een koelcyclus moet worden uitgevoerd door een systeem met eigenschappen die toelaten om zo'n temperatuur te bereiken. Honderd jaar geleden, in 1926, stelden de chemicus William Giauque en, onafhankelijk daarvan, de natuurkundige Peter Debye voor om paramagnetische zouten te gebruiken als ideale systemen om temperaturen tot ver onder 1 K te verlagen. Inderdaad, vanaf het daaropvolgende decennium werden temperaturen tot wel 0,0044 K bereikt (Wander de Haas en Gerrit Wiersma, 1935, Leiden Cryogenic Laboratories). In deze vraag wordt de paramagnetische Carnot-koelcyclus bestudeerd.

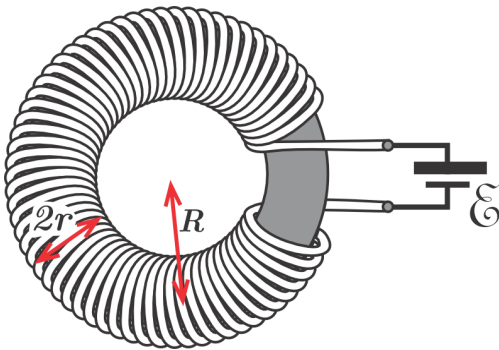


Fig. 3a.

Beschouw een torus met een grote straal R en een kleine straal $r \ll R$, vervaardigd uit een homogeen, isotroop paramagnetisch materiaal, waaromheen een geïsoleerde geleidende draad is gewikkeld. De uitinden van de draad zijn aangesloten op een externe spanningsbron (die krijg in deze opgave de naam "emf" of " $\mathcal{E}$ "), zoals weergegeven in figuur 3a. De weerstand van de draad is zo laag dat energieverliezen als gevolg van de opwarming van de draad verwaarloosbaar zijn. De wikkeling is dicht, met in totaal N windingen. Er wordt aangenomen dat $r \ll R$ zodat de velden $\vec{H}$ en $\vec{B}$ en de magnetisatie $\vec{M}$ over de gehele torus bij benadering constant zijn. Laat V en A respectievelijk het volume en de dwarsdoorsnede van de torus zijn. Hierna wordt de afkorting Pm-T gebruikt om naar de paramagnetische torus te verwijzen.

In paramagnetische materialen is $\vec{M}$ evenwijdig aan $\vec{H}$ en geldt de volgende relatie:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M}.$$

Conventie voor het teken van energieoverdracht: in deze opgave worden arbeid (W) en warmte (Q) als positief beschouwd wanneer ze het systeem binnenstroomt, en als negatief wanneer ze het systeem uitstromen.

T3-A [1,0 pt]. Arbeid in de Pm-T

Hint: in magnetische materialen geldt $\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = I_C$, waarbij I_C de netto vrije stroom is die door het gebied stroomt dat wordt begrensd door de gesloten kromme C .

T3-A1 [0,2 pt]. Stel dat H de grootte is van $\vec{H}$ in de torus. Druk H uit in termen van N , A , V en de elektrische stroom I in de draad.

T3-A2 [0,6 pt]. Stel dat dW_{emf} de arbeid is die de externe spanningsbron verricht om de grootte van $\vec{B}$ met dB te veranderen. Schrijf dW_{emf} uit in termen van V , H en dB .

T3-A3 [0,2 pt]. De totale arbeid die door de spanningsbron wordt verricht, dW_{emf} , kan in twee delen worden opgesplitst: de arbeid die zou worden verricht om het magnetische veld te veranderen als de toroïde een vacuümkernel zou hebben, dW_{vac} , en de arbeid die op het paramagnetische materiaal zelf wordt verricht, dW . Druk dW uit in termen van μ_0 , H , V en dM .

T3-B [3,0 pt]. Warmte en temperatuur in het Pm-T-systeem

In de volgende tabel worden twee thermodynamische systemen met elkaar vergeleken: het ideale gas en het Pm-T-systeem. Gebruik deze informatie en je antwoord op vraag T3-A3 om de volgende vragen op te lossen. Deze informatie wordt ook gebruikt in deel C. Als je in vraag T3-A3 geen antwoord hebt gevonden voor dW , mag je $dW = \alpha \mu_0 V H dM$ gebruiken, waarbij α een getal is. Het volume V van de paramagnetische torus is constant, zodat er geen werk door druk plaatsvindt. Hieronder is T in alle gevallen de temperatuur.

IDEALE GAS	PARAMAGNETISCHE TORUS
Toestandsgrootheden: P , V en temperatuur T	Toestandsgrootheden: H , M en temperatuur T
Constanten: R , γ en het aantal mol n	Constanten: K , λ en het aantal mol n
Toestandsvergelijking: $PV = nRT$	Toestandsvergelijking: $TMV = nKH$
Warmtecapaciteit bij constante V : $C_V = nR/(\gamma - 1)$	Warmtecapaciteit bij constante M : $C_M = n\lambda/T^2$
De interne energie U in elk proces voldoet aan $dU = C_V dT$	De interne energie U voldoet in elk proces aan $dU = C_M dT$

K en λ zijn constanten die worden bepaald door het materiaal van de torus. Je mag de vergelijkingen in de tabel direct gebruiken zonder ze te bewijzen.

T3-B1 [1,5 pt]. Als de grootte van $\vec{H}$ verandert van H_i naar H_f bij een constante temperatuur T , wordt er energie Q overgedragen tussen de Pm-T en zijn omgeving. Schrijf Q uit in termen van μ_0 , n , V , K , H_i , H_f en T .

T3-B2 [1,5 pt]. Als de grootte van $\vec{H}$ adiabatisch verandert van H_i naar H_f , verandert de temperatuur van de Pm-T van T_i naar T_f . Druk $\Delta T = T_f - T_i$ uit in termen van μ_0 , V , n , K , λ , H_i , H_f en T_i .

T3-C [6,0 pt]. Carnot-koelkast van het Pm-T

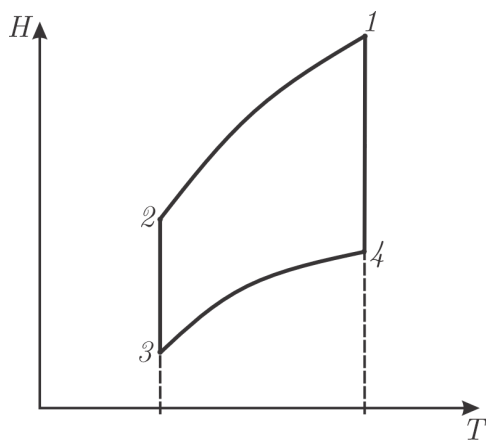


Fig. 3b.

Het H -versus- T -diagram van de Carnot-koelcyclus $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1$, uitgevoerd door de Pm-T, is weergegeven in figuur 3b. In deze cyclus geldt:

T_h : temperatuur van het warme reservoir,

T_c : temperatuur van het koude reservoir,

Q_h : absolute waarde van de aan het warme reservoir afgegeven warmte,

Q_c : absolute waarde van de uit het koude reservoir geabsorbeerde warmte.

T3-C1 [0,2 pt]. Geef T_h en T_c aan op de T -as van het H -tegen- T -diagram. Geef ook de processen aan waarin respectievelijk de overdrachten van Q_h en Q_c plaatsvinden.

T3-C2 [1,5 pt]. Stel dat M_1 , M_2 , M_3 en M_4 de groottes zijn van $\vec{M}$ op de hoekpunten van deze cyclus. Schrijf M_1 uit in termen van M_2 , M_3 en M_4 .

T3-C3 [0,8 pt]. Stel dat we, om 1,00 L vloeibaar helium dat aanvankelijk een temperatuur van 1,00 K heeft, af te koelen, gebruikmaken van 2,0 mol Pm-T, bestaande uit *kaliumchromaat*. Voor dit materiaal geldt $K = 1,87 \times 10^{-6} \text{ K} \cdot \text{m}^3/\text{mol}$, de dichtheid is 2730 kg/m^3 en de molaire massa is 0,19 kg/mol. De Pm-T voert een Carnot-koelcyclus uit met $H_1 = 411624 \text{ A/m}$, $H_2 = 311306 \text{ A/m}$, $H_3 = 204618 \text{ A/m}$ en $H_4 = 240446 \text{ A/m}$. Bereken na één werkcyclus de eindtemperatuur van het vloeibare helium. Neem aan dat voor het vloeibare helium zowel de soortelijke warmtecapaciteit $c = 100 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ als de dichtheid $\rho = 130 \text{ kg/m}^3$ constant blijven.

T3-C4 [2,0 pt]. Om de temperatuur van een lichaam met een constante warmtecapaciteit C_c continu te verlagen, mogen er in de loop van de tijd Carnot-cycli plaatsvinden, zodanig dat het vermogen P dat aan de koelmachine wordt overgedragen, constant blijft. Vervolgens wordt aangenomen dat de temperatuur T_h van het hete reservoir constant blijft en dat in elke werkcyclus de temperatuur T_c van het gekoelde lichaam met dT_c daalt, waarbij aan de relatie $dQ_c/dQ_h = T_c/T_h$ wordt voldaan. Als bij $t = 0$ geldt $T_c = T_0$, bepaal dan de tijd t gedurende welke de Carnot-koelkast moet werken om het gekoelde lichaam een temperatuur $T < T_0$ te laten bereiken. Druk je antwoord uit in termen van C_c , T_h , P , T_0 en T .

T3-C5 [1,5 pt]. Het rendement van een koelkast wordt uitgedrukt door de *prestatiecoëfficiënt* $\text{COP} = Q_c/W$. Bepaal de totale COP van de koelkast uit vraag T3-C4, waarbij alle cycli tot tijdstip t zijn uitgevoerd. Geef je antwoord in termen van T_0 , T_h en T .