

Inledning

Denna uppgift handlar om avancerade och effektiva metoder för att producera ånga, metoder som visat sig fungera experimentellt. Sfäriska nanostora silverpartiklar finns lösta i vatten (endast c:a 10^{13} partiklar per liter), och belyses med en fokuserad ljusstråle. En viss del av ljuset absorberas av nanopartiklarna, som blir varma och förångar vattnet, men endast volymen närmast partikeln och inte allt vatten. Ångan lämnar systemet i form av stigande ångbubblor. Alla detaljer i processen är ännu inte helt förstådda, men man vet att huvudprocessen är absorption av ljus genom s.k. elektroniska plasma-oscillationer av metalliska nanopartiklar. The device is known as a plasmonic steam generator.

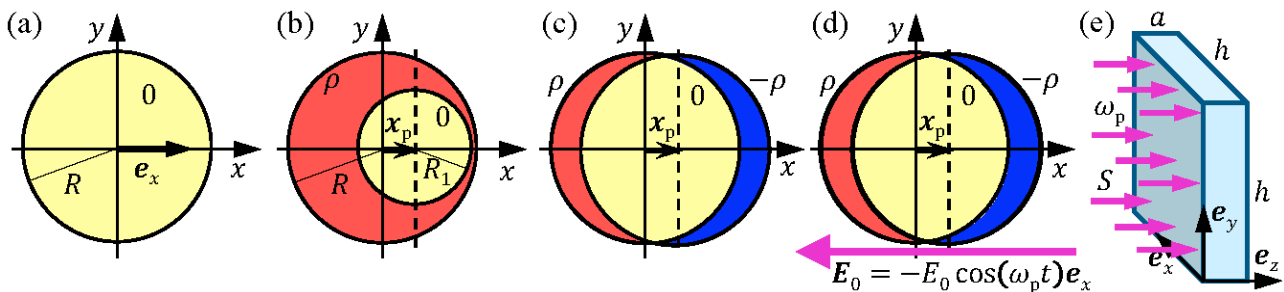


Figure 2.1 (a) A spherical charge-neutral nanoparticle of radius R placed at the center of the coordinate system. (b) A sphere with a positive homogeneous charge density ρ (red), and containing a smaller spherical charge-neutral region (0, yellow) of radius R_1 , with its center displaced by $\mathbf{x}_p = x_p \mathbf{e}_x$. (c) The sphere with positive charge density ρ of the nanoparticle silver ions is fixed in the center of the coordinate system. The center of the spherical region with negative spherical charge density $-\rho$ (blue) of the electron cloud is displaced by \mathbf{x}_p , where $x_p \ll R$. (d) An external homogeneous electric field $\mathbf{E}_0 = -E_0 \mathbf{e}_x$. For time-dependent \mathbf{E}_0 , the electron cloud moves with velocity $\mathbf{v} = d\mathbf{x}_p/dt$. (e) The rectangular vessel ($h \times h \times a$) containing the aqueous solution of nanoparticles illuminated by monochromatic light propagating along the z -axis with angular frequency ω_p and intensity S .

A single spherical silver nanoparticle

Throughout this problem we consider a spherical silver nanoparticle of radius $R = 10$ nm and with its center fixed at the origin of the coordinate system, see Fig. 2.1(a). All motions, forces and driving fields are parallel to the horizontal x -axis (with unit vector \mathbf{e}_x). The nanoparticle contains free (conduction) electrons moving within the whole nanoparticle volume without being bound to any silver atom. Each silver atom is a positive ion that has donated one such free electron.

2.1	Find the following quantities: The volume V and mass M of the nanoparticle, the number N and charge density ρ of silver ions in the particle, and for the free electrons	0.7
-----	---	-----

	their concentration n , their total charge Q , and their total mass m_0 .	
--	---	--

Det elektriska fältet i ett laddningsneutralt område inuti en laddad sfär

I fortsättningen antas att den relativa permittiviteten av alla ämnen är $\varepsilon = 1$. Inuti en homogent laddad sfär med laddningstätheten ρ och radien R bildas ett litet laddningsneutralt sfäriskt område med radien R_1 , då en motsatt laddningstäthet $-\rho$ adderas, med sitt centrum förskjutet med $\mathbf{x}_p = x_p \mathbf{e}_x$ från R -sfärens centrum, se fig. 2.1(b).

2.2	Visa att det elektriska fältet inuti det laddningsneutrala området är homogent där $\mathbf{E}_{\text{ind}} = A (\rho/\varepsilon_0) \mathbf{x}_p$. Bestäm också A .	1,0
-----	---	-----

Den återförande kraften på det förskjutna elektronmolnet

I det följande studeras den kollektiva rörelsen av fria elektroner genom att betrakta dem som en negativt laddad sfär med homogen laddningstäthet $-\rho$ med centrum i \mathbf{x}_p , som kan röra sig längs x -axeln relativt centrum hos den positivt laddade sfären (silverjoner) fixerad i origo hos koordinatsystemet, se fig. 2.1(c). Antag att en yttre kraft \mathbf{F}_{ext} flyttar elektronmolnet till en ny jämviktsposition $\mathbf{x}_p = x_p \mathbf{e}_x$ där $|x_p| \ll R$. Förutom små nettoladdningar i motsatta ändar av nanopartikeln förblir den laddningsneutral. Detta svarar mot $R_1 \rightarrow R$ i föregående uppgift.

2.3	Uttryck i termer av \mathbf{x}_p följande två storheter: Den återförande kraften \mathbf{F} som silverjonerna utövar på elektronmolnet och arbetet W_{e1} som den externa kraften \mathbf{F}_{ext} uträttar vid förflyttningen av elektronmolnet.	0,9
-----	--	-----

Den sfäriska silvernanopartikeln i ett konstant yttre elektriskt fält

En silvernanopartikel placeras i vakuum och påverkas av av en yttre \mathbf{F}_{ext} från ett konstant yttre elektriskt fält $\mathbf{E}_0 = -E_0 \mathbf{e}_x$, vilket förflyttar elektronmolnet en liten sträcka $|x_p|$, där $|x_p| \ll R$.

2.4	Uttryck förflyttningen x_p av elektronmolnet i E_0 , och den elektronladdning $-\Delta Q$ genom the yz -planet i mitten av silvernanopartikeln.	0,5
-----	---	-----

Ekvivalent kapacitans och induktans för en en silvern nanopartikel

Både för ett konstant och ett tidsberoende fält E_0 , kan nanopartikeln beskrivas som med en ekvivalent elektrisk krets. Den ekvivalenta kapacitansen kan fås genom sambandet arbetet W_{el} som åtgår för att separera laddningarna ΔQ till energin hos kondensatorn med laddningen $\pm \Delta Q$. Separationen ger en ekvivalent spänning V_0 över kondensatorn.

2.5a	Uttryck systemets ekvivalenta kapacitans C , i ϵ_0 and R , och beräkna värdet.	0,5
2.5b	Bestäm, för denna kapacitans, den ekvivalenta spänning V_0 uttryckt i E_0 och R , som en ekvivalent kondensator ska anslutas till för att laddningsmängden ΔQ ska lagras.	0,3

För ett tidsberoende elektriskt fält E_0 , rör sig elektronmolnet med hastigheten $\mathbf{v} = v \mathbf{e}_x$, fig. 2.1(d). Det har kinetiska energin W_{kin} och ger en elektrisk ström I genom det fixa yz -planet. Den kinetiska energin hos elektronmolnet kan tillskrivas till energin hos en ekvivalent spole med induktansen L och strömmen I .

2.6a	Uttryck både W_{kin} och I i termer av hastigheten v .	0,7
2.6b	Uttryck den ekvivalenta induktansen L i termer av partikelns radie R , elektronens laddning e och massan m_e , the elektronkoncentrationen n , och beräkna dess värde.	0,5

Plasmonresonansen för en silvern nanopartikel

Från analysen ovan följer att rörelsen hos elektronmolnet runt jämvikstläget kan beskrivas med en ideal LC -krets som oscillerar vid sin resonansfrekvens. Denna svängning hos elektronmolnet är en s.k. plasmonresonans, med plasmafrequensen ω_p .

2.7a	Ge ett uttryck för plasmafrequensen ω_p för elektronmolnet uttryckt i elektronladdningen e och massan m_e , elektrontätheten n och permittiviteten ϵ_0 .	0,5
2.7b	Beräkna ω_p i rad/s och våglängden λ_p i nm för ljus i vakuum med $\omega = \omega_p$.	0,4

Silvern nanopartikeln belyst med ljus med plasmafrequensen

I resten av uppgiften, belyses nanopartikeln med monokromatiskt ljus med vinkelplasmonfrekvensen ω_p och intensiteten $S = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2 = 1.00 \text{ MW m}^{-2}$. När våglängden är stor, $\lambda_p \gg R$,

kan nanopartikeln anses befinna sig i ett homogent harmoniskt oscillerande fält $\mathbf{E}_0 = -E_0 \cos(\omega_p t) \mathbf{e}_x$. Drivet av \mathbf{E}_0 , kommer oscillerar elektronmolnets centrum $\mathbf{x}_p(t)$ med samma frekvens med hastigheten $\mathbf{v} = d\mathbf{x}_p/dt$ och konstant amplitud x_0 . Denna oscillerande elektronrörelse leder till absorption av ljus. Energin som tas upp av partikeln omvandlas antingen till värme inuti partikeln eller återemitteras av partikeln som spritt ljus.

Uppvärmningen orsakas av slumpartade inelastiska kollisioner, där varje fri electron då och då träffar en silverjon och förlorar hela sin kinetiska energy, som förvandlas till vibrationer hos silverjonerna (värme). Den genomsnittliga tiden mellan kollisionerna är $\tau \gg 1/\omega_p$, där för silvernanopartiklar kan användas $\tau = 5.24 \times 10^{-15}$ s.

2.8a	Ange ett uttryck för tidsmedelvärdet av den genererade värmeeffekten P_{heat} i nanopartikeln och tidsmedelvärdet $\langle I^2 \rangle$, av kvadraten på strömstyrkan, vilket innehåller tidsmedelvärdet $\langle v^2 \rangle$ av hastigheten hos elektronmolnet.	1,0
2.8b	Ange ett uttryck för den ekvivalenta ohmska resistansen R_{heat} i en ekvivalent resistormodell av nanopartikeln med värmeeffekten P_{heat} på grund av elektronmolnets strömstyrka I . Beräkna det numeriska värdet av R_{heat} .	1,0

Den inkommande ljusstrålen förlorar i medeltal en viss effekt P_{scat} på grund av spridning mot elektronmolnet (återemission). P_{scat} beror på egenskaperna hos det spridande elektronmolnet (amplitud Qx_0 och plasmafrekvens ω_p) och hos ljuset (ljusfarten c och permittiviteten ϵ_0 i vakuum). P_{scat} ges i dessa variabler av $P_{\text{scat}} = \frac{1}{12\pi} (Qx_0)^\alpha \omega_p^\beta c^\gamma \epsilon_0^\delta$.

2.9	Utnyttja uttrycket för P_{scat} för att finna ett uttryck för den ekvivalenta spridningsresistansen R_{scat} (analogt med R_{heat}) i en ekvivalent resistormodell, och beräkna R_{scat} .	1,0
-----	---	-----

Ovanstående ekvivalenta kretselement kombineras till en LCR -kretsmodell av silvernanopartikeln, som drivs av en harmonisk oscillerande ekvivalent spänning $V = V_0 \cos(\omega_p t)$, bestämd av det inkommande ljusets elektriska fält E_0 .

2.10a	Härled uttryck för de genomsnittliga värmeförlusterna P_{heat} och P_{scat} uttryckta i elektriska fältets amplitud E_0 vid plasmafrekvensen.	1,2
2.10b	Beräkna de numeriska värdena på E_0 , P_{heat} , och P_{scat} .	0,3

Ångbildning med hjälp av ljus

En vattenlösning av silvernano-partiklar har en koncentration $n_{np} = 7.3 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$. Den placeras i en rektangulär genomsiktig behållare av storlek $h \times h \times a = 10 \times 10 \times 1.0 \text{ cm}^3$ och belyses med ljus med normalt infall vid plasmafrequensen, med samma intensitet $S = 1.00 \text{ MW m}^{-2}$ som ovan, se fig. 2.1(e). Vattnets temperatur är $T_{wa} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ och vi antar, i överensstämmelse med observationer, att nanopartikelns hela värmeförluster går till bildandet av ånga vid $T_{st} = 110 \text{ }^\circ\text{C}$, utan att höja vattnets temperatur.

Den plasmoniska ånggenerators termodynamiska verkningsgrad η definieras av kvoten $\eta = P_{st}/P_{tot}$, där P_{st} är effekten som går till produktion av ånga i hela behållaren, medan P_{tot} är det inkommande ljusets totala effekt.

Större delen av tiden är varje nanopartikel omgiven av ånga istället för vatten och kan därmed beskrivas som om den befann sig i vakuum.

2.11a	Beräkna totala massan ånga per sekund, μ_{st} , som produceras av den plasmoniska ånggeneratoren genom belysning av ljus vid plasmafrequensen och med intensiteten S .	0,6
2.11b	Beräkna det numeriska värdet på den plasmoniska ånggenerators termodynamiska verkningsgrad η .	0,2