

Fysikaalisten tieteiden esittely puolijohdesuperhiloista

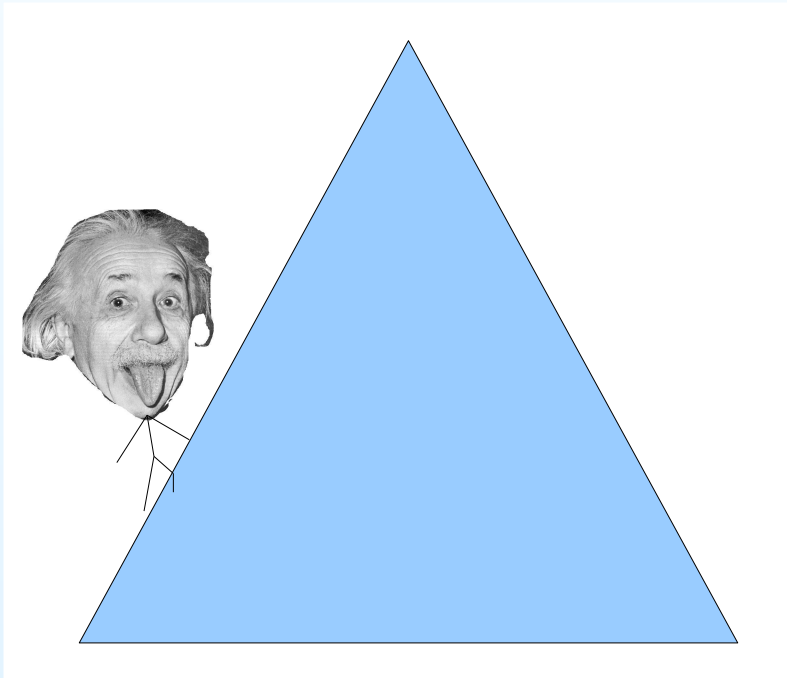
"Perhaps a thing is simple if you can describe it fully in several different ways without immediately knowing that you are describing the same thing."

-Richard P. Feynman, Nobel luento 1965



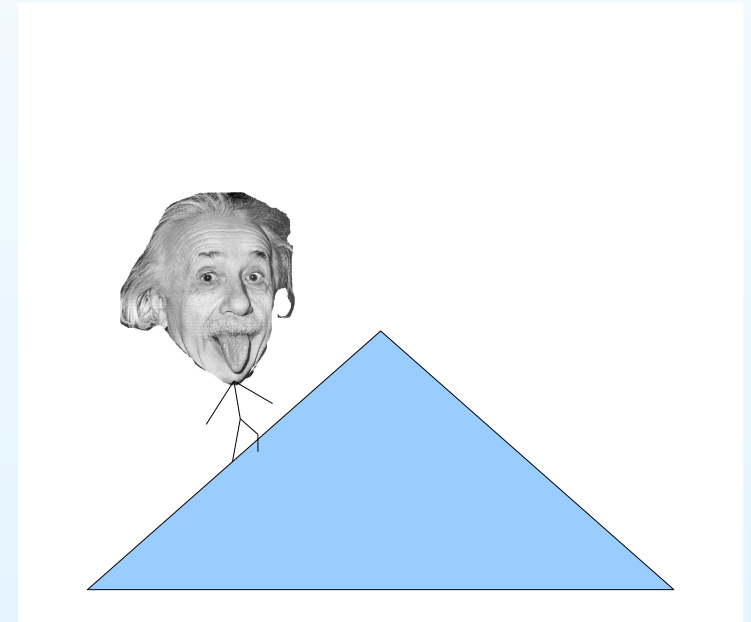
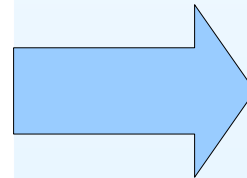
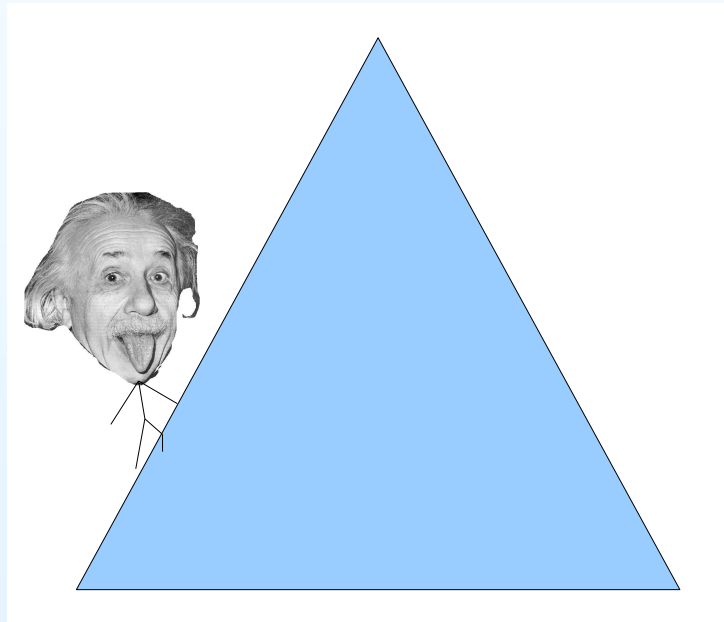
Motivaatio

Puolijohteiden fysiikassa: "Pyrkiä saamaan teknologia niin halvaksi, että jopa fyysikolla olisi siihen varaa."



Motivaatio

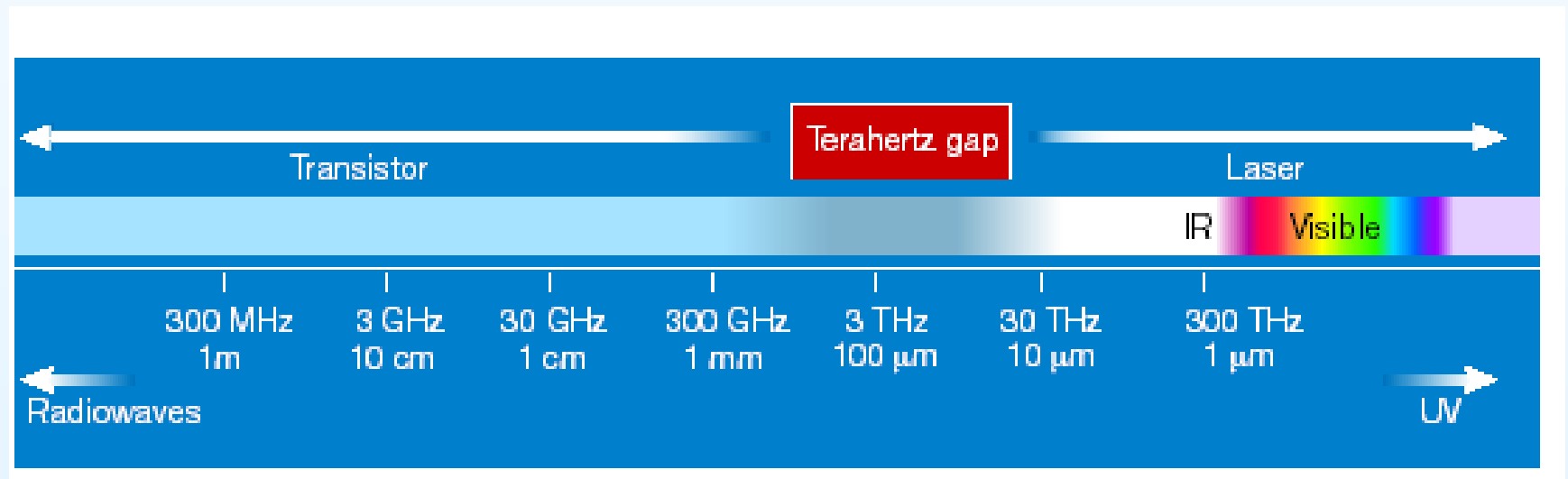
Puolijohteiden fysiikassa: "Pyrkiä saamaan teknologia niin halvaksi, että jopa fyysikolla olisi siihen varaa."



Motivaatio

Puolijohteiden fysiikassa: "Pyrkiä saamaan teknologia niin halvaksi, että jopa fyysikolla olisi siihen varaa."

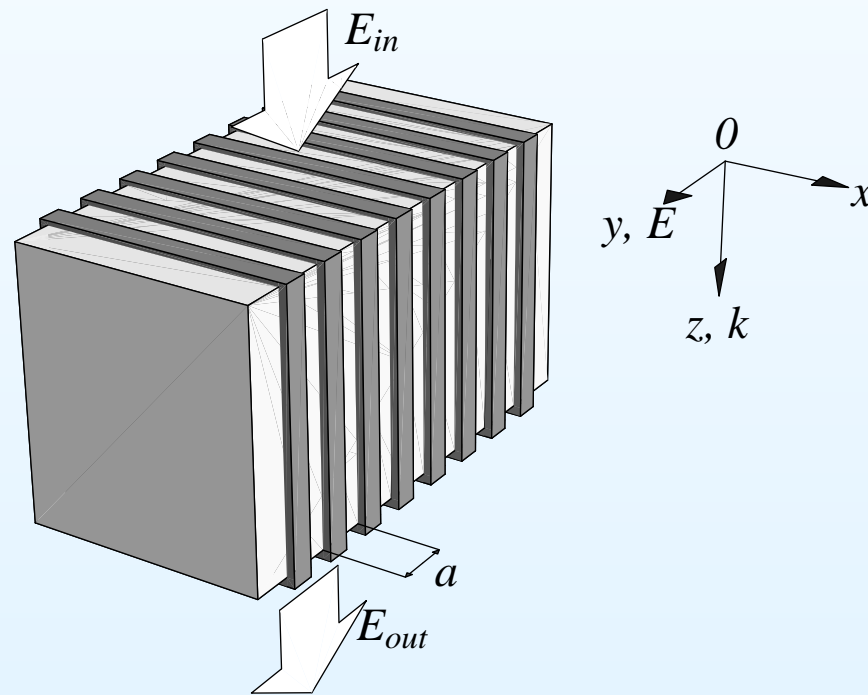
Erytyisesti superhiloissa: Täyttää teknologinen aukko säteilylähteissä ja ilmaisimissa taajuusalueella 100 GHz-10 THz.



C. Sirtori, Nature, 417, 132 (2002).

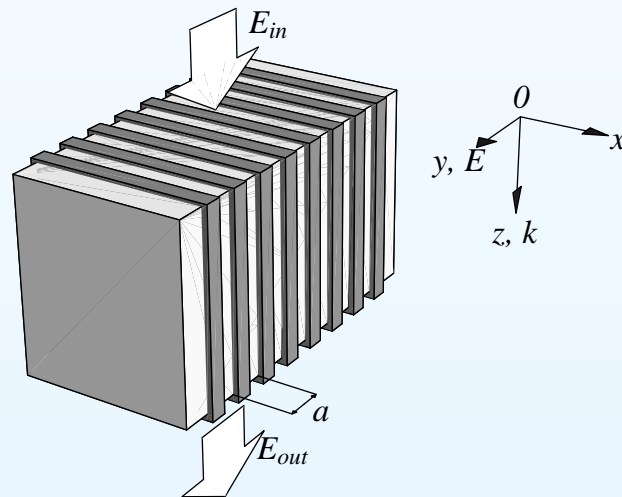
Puolijohdesuperhilat

Puolijohde superhilat Kahdesta puolijohteesta kerrostamalla valmistettuja nanorakenteita



Puolijohdesuperhilat

Puolijohde superhilat Kahdesta puolijohteesta kerrostamalla valmistettuja nanorakenteita

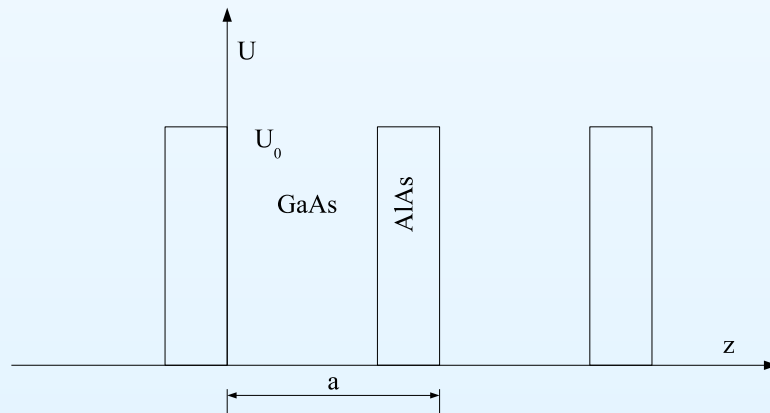


- Jakson pituus $a \approx 10$ nm
- Kerroksia $n. \sim 100$
- Superhila mikrometrien suuruusluokkaa

Puolijohdesuperhilat

Puolijohde superhilat Kahdesta puolijohteesta kerrostamalla valmistettuja nanorakenteita

Kvanttimekaniikka Elektronit kokevat efektiivisen jaksollisen potentiaalin samaan tapaan kuten tavallisissa puolijohteissa. Erona on, että keinotekoisien potentiaalin jakso on huomattavasti suurempi \Rightarrow Yllättäviä seurauksia aineen sähköisiin ominaisuuksiin.



- Jakson pituus $a \approx 10$ nm
- Kerroksia $n. \sim 100$
- Superhila mikrometrien suuruusluokkaa

Vapaa elektroni vs. puolijohde-elektroni

Vapaa elektroni: Kaikki energian arvot mahdollisia. Tutut elektronin liikettä kuvaavat yhtälöt $\varepsilon(p) = p^2/2m$,
 $v(p) = p/m = dE/dp$ ja $dp/dt = F$.

Vapaa elektroni vs. puolijohde-elektroni

Vapaa elektroni: Kaikki energian arvot mahdollisia. Tutut elektronin liikettä kuvaavat yhtälöt $\varepsilon(p) = p^2/2m$,
 $v(p) = p/m = dE/dp$ ja $dp/dt = F$.

Puolijohde-elektroni: Vain osa energian arvoista on mahdollisia. Sallitut energian arvot jakaantuvat energiavöiksi, joita erottavat kielletyt energiavälit.

Vapaa elektroni vs. puolijohde-elektroni

Vapaa elektroni: Kaikki energian arvot mahdollisia. Tutut elektronin liikettä kuvaavat yhtälöt $\varepsilon(p) = p^2/2m$, $v(p) = p/m = dE/dp$ ja $dp/dt = F$.

Puolijohde-elektroni: Vain osa energian arvoista on mahdollisia. Sallitut energian arvot jakaantuvat energiavöiksi, joita erottavat kielletyt energiavälit. Eräät elektronin liikettä kuvaavat yhtälöt muistuttavat vapaata hiukkasta $v(p) = dE/dp$, $dp/dt = F$. Nyt p on ns. kvasiliikemäärä, jonka funktiona sallitut energian arvot ovat periodisia. Periodisuuden vuoksi kvasiliikemäärä voidaan rajata alueelle $-\hbar\pi/a \leq p \leq \hbar\pi/a$.

Vapaa elektroni vs. puolijohde-elektroni

Vapaa elektroni: Kaikki energian arvot mahdollisia. Tutut elektronin liikettä kuvaavat yhtälöt $\varepsilon(p) = p^2/2m$, $v(p) = p/m = dE/dp$ ja $dp/dt = F$.

Puolijohde-elektroni: Vain osa energian arvoista on mahdollisia. Sallitut energian arvot jakaantuvat energiavöiksi, joita erottavat kielletyt energiavälit.

Eräät elektronin liikettä kuvaavat yhtälöt muistuttavat vapaata hiukkasta $v(p) = dE/dp$, $dp/dt = F$. Nyt p on ns. kvasiliikemäärä, jonka funktiona sallitut energian arvot ovat periodisia. Periodisuuden vuoksi kvasiliikemäärä voidaan rajata alueelle $-\hbar\pi/a \leq p \leq \hbar\pi/a$.

Relaatiot $E = p^2/2m$ ja $v = p/m$ EIVÄT ole voimassa. Epäpuhtauksien ja fononien (kidevärähtelyjen) aiheuttaman sironnan vuoksi systeemissä esiintyy dissipaatiota (elektronit menettävät energiaansa), ja pyrkivät kohti tasapainojakaumaa.

Puolijohde-elektroni vs. superhila-elektroni

Puolijohde-elektroni: Sallitut energian arvot jakaantuvat energiavöiksi, joita erottavat kielletyt energia-aukot. Elektronin liikettä kuvaavat yhtälöt $v(p) = dE/dp$, $dp/dt = F$. Kvasiliikemäärä p on rajattu alueelle $-\hbar\pi/a \leq p \leq \hbar\pi/a$. Epäpuhtauksien ja fononien aiheuttaman sironnan vuoksi systeemissä esiintyy dissipaatiota.

Puolijohde-elektroni vs. superhila-elektroni

Puolijohde-elektroni: Sallitut energian arvot jakaantuvat energiavöiksi, joita erottavat kielletyt energia-aukot. Elektronin liikettä kuvaavat yhtälöt $v(p) = dE/dp$, $dp/dt = F$. Kvasiliikemäärä p on rajattu alueelle $-\hbar\pi/a \leq p \leq \hbar\pi/a$. Epäpuhtauksien ja fononien aiheuttaman sironnan vuoksi systeemissä esiintyy dissipaatiota.

Superhila-elektroni: Mahdollisuus säädellä jaksollisuutta a sekä energiavöiden ja energia-aukkojen leveyttä.

Puolijohde-elektroni vs. superhila-elektroni

Puolijohde-elektroni: Sallitut energian arvot jakaantuvat energiavöiksi, joita erottavat kielletyt energia-aukot. Elektronin liikettä kuvaavat yhtälöt $v(p) = dE/dp$, $dp/dt = F$. Kvasiliikemäärä p on rajattu alueelle $-\hbar\pi/a \leq p \leq \hbar\pi/a$. Epäpuhtauksien ja fononien aiheuttaman sironnan vuoksi systeemissä esiintyy dissipaatiota.

Superhila-elektroni: Mahdollisuus säädellä jaksollisuutta a sekä energiavöiden ja energia-aukkojen leveyttä. Mielenkiintoisia ilmiöitä, kun alimman energiavyön leveys Δ on riittävän pieni, että sähkökenttä voi kiihdyttää elektronit suurimpaan sallittuun energiaan kyseisellä vyöllä ennen kuin sirontaa ennättää tapahtua.

Puolijohde-elektroni vs. superhila-elektroni

Puolijohde-elektroni: Sallitut energian arvot jakaantuvat energiavöiksi, joita erottavat kielletyt energia-aukot. Elektronin liikettä kuvaavat yhtälöt $v(p) = dE/dp$, $dp/dt = F$. Kvasiliikemäärä p on rajattu alueelle $-\hbar\pi/a \leq p \leq \hbar\pi/a$. Epäpuhtauksien ja fononien aiheuttaman sironnan vuoksi systeemissä esiintyy dissipaatiota.

Superhila-elektroni: Mahdollisuus säädellä jaksollisuutta a sekä energiavöiden ja energia-aukkojen leveyttä. Mielenkiintoisia ilmiöitä, kun alimman energiavyön leveys Δ on riittävän pieni, että sähkökenttä voi kiihdyttää elektronit suurimpaan sallittuun energiaan kyseisellä vyöllä ennen kuin sirontaa ennättää tapahtua. Jos energia-aukko kahden alimman vyön välillä on riittävän suuri, elektronit eivät pysty enää kiihtymään sähkökentän vaikutuksesta \Rightarrow Elektronit jäävät värähtelemään edestakaisin (ns. Bloch-värähtelyt).

Yksittäisistä elektroneista elektronijoukkoihin

- Jakauma $f(\mathbf{p}, \mathbf{r}, t)$ kertoo liikemäärän \mathbf{p} omaavien elektronien lukumäärän paikassa \mathbf{r} ajanhetkellä t .

Yksittäisistä elektroneista elektronijoukkoihin

- Jakauma $f(\mathbf{p}, \mathbf{r}, t)$ kertoo liikemäärän \mathbf{p} omaavien elektronien lukumäärän paikassa \mathbf{r} ajanhetkellä t .

Eräänlainen yleistys jatkuvuusyhtälölle on fenomenologinen Boltzmannin yhtälö

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \dot{\mathbf{p}} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{p}} + \dot{\mathbf{r}} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} = \left. \frac{\partial f}{\partial t} \right|_{\text{scatt}}$$

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{F}, \quad \mathbf{v} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{p}}$$

Yksittäisistä elektroneista elektronijoukkoihin

- Jakauma $f(\mathbf{p}, \mathbf{r}, t)$ kertoo liikemäärän \mathbf{p} omaavien elektronien lukumäärän paikassa \mathbf{r} ajanhetkellä t .

Eräänlainen yleistys jatkuvuusyhtälölle on fenomenologinen Boltzmannin yhtälö

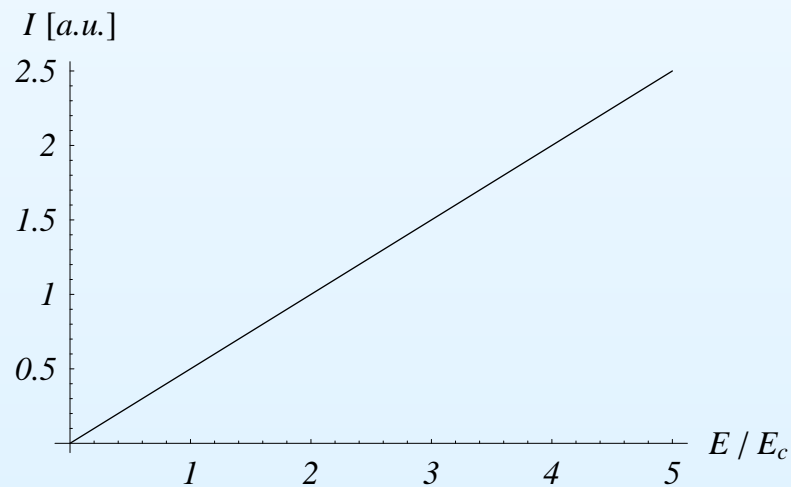
$$\frac{\partial f}{\partial t} + \dot{\mathbf{p}} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{p}} + \dot{\mathbf{r}} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} = \left. \frac{\partial f}{\partial t} \right|_{\text{scatt}}$$

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{F}, \quad \mathbf{v} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{p}}$$

- Lisäksi tarvitaan yhtälöt kuvaamaan voimaa \mathbf{F} superhilassa. Sähkö- ja magneettikenttien \mathbf{E} ja \mathbf{B} tapauksessa ne saadaan Maxwellin yhtälöistä.
- Yhtälöiden tarkka ratkaiseminen mahdollista vain numeerisesti.

Jännite-virta relaatiot homogeenisissa näytteissä

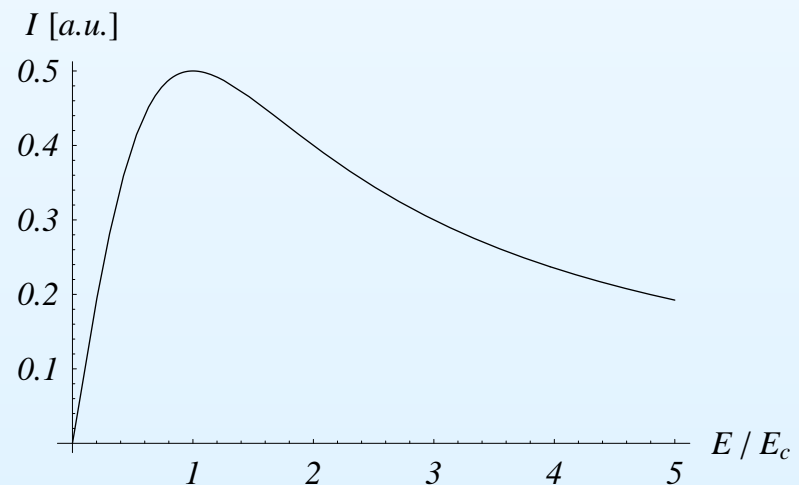
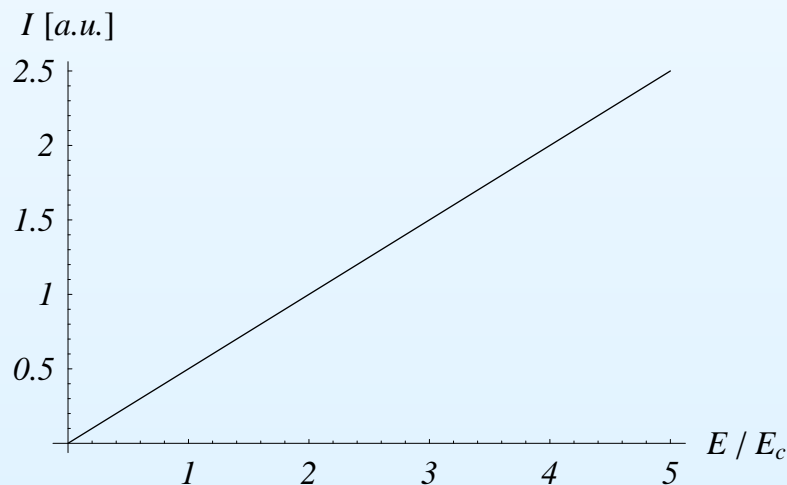
Normaalisti: Mitä suurempi sähkökenttä, sitä nopeammin elektronit kiihtyvät, ja sitä suurempi virta.



Jännite-virta relaatiot homogeenisissa näytteissä

Normaalisti: Mitä suurempi sähkökenttä, sitä nopeammin elektronit kiihtyvät, ja sitä suurempi virta.

Puolijohdesuperhilat: Riittävän suuressa sähkökentässä, yksittäinen elektroni voi kulkea kenttää vastaan.

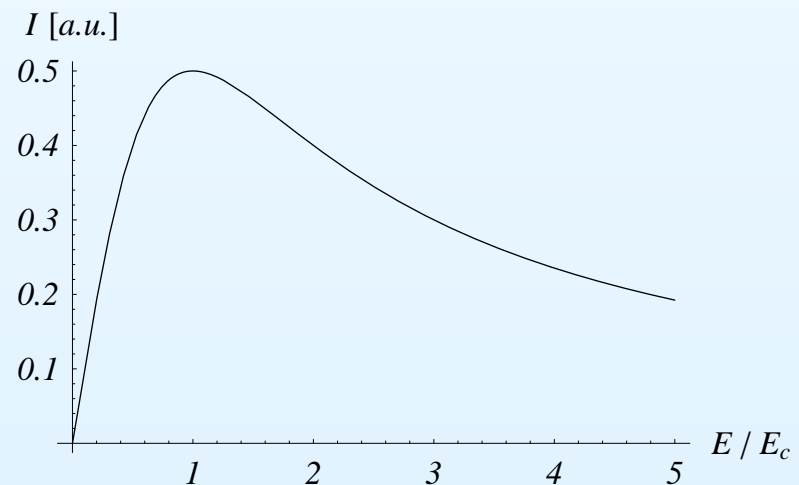
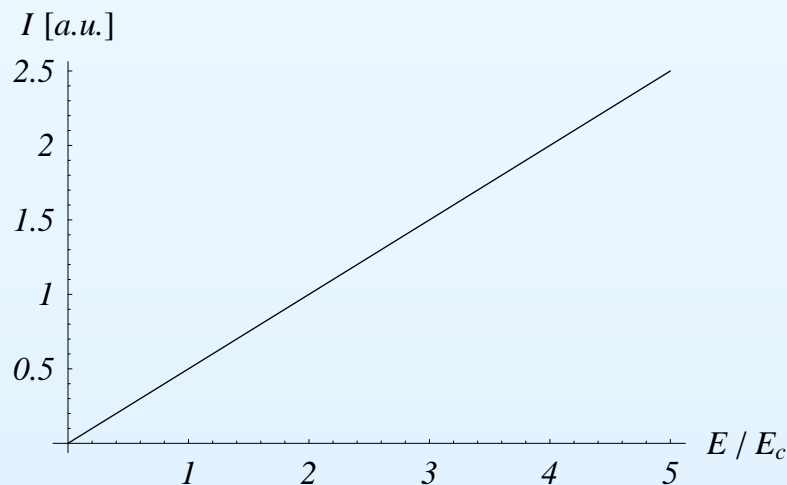


Jännite-virta relaatiot homogeenisissa näytteissä

Normaalisti: Mitä suurempi sähkökenttä, sitä nopeammin elektronit kiihtyvät, ja sitä suurempi virta.

Puolijohdesuperhilat: Riittävän suuressa sähkökentässä, yksittäinen elektroni voi kulkea kenttää vastaan.

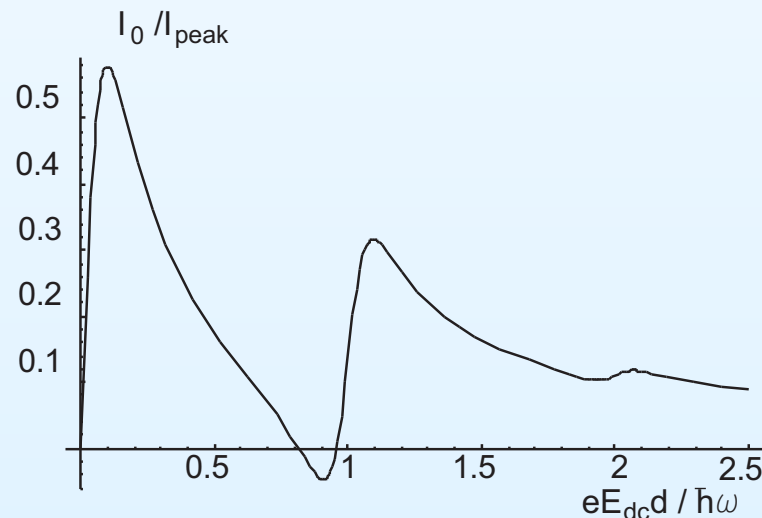
Epästabiilisuus: Virta *pienenee* jännitettä kasvatettaessa \Rightarrow Sähkökenttä ei säily homogeenisena vaan superhila jakaantuu alueisiin, joissa sähkökentän arvot poikkeavat toisistaan (liikkuvat dipoli-domainit \Rightarrow ns. Gunn ilmiö).



Yllättäviä ilmiöitä homogeenisissa superhiloissa

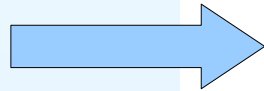
Sähkömagneettinen säteilykenttä aiheuttaa esimerkiksi:

- Virran oskillaatioita harmoonisilla taajuuksilla.
- Muutoksia virran aikakeskiarvossa:
 - Dynaaminen lokalisoituminen (virtaus katoaa)
 - Negatiivinen johtavuus (virtaus väärään suuntaan)
 - Voimakas virran vahvistuminen kun säteilykvantin energia resonanssissa systeemiin liittyvien energiatasojen energiaeron kanssa ("Shapiro steps").

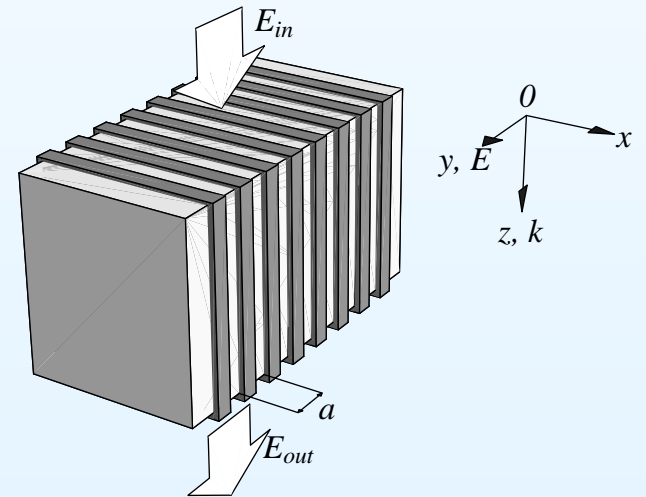


Yllättäviä ilmiöitä homogeenisissa superhiloissa

- Sähkömagneettisessa kentässä voidaan lisäksi tutkia mm. kaaosta hallituissa koeolosuhteissa.

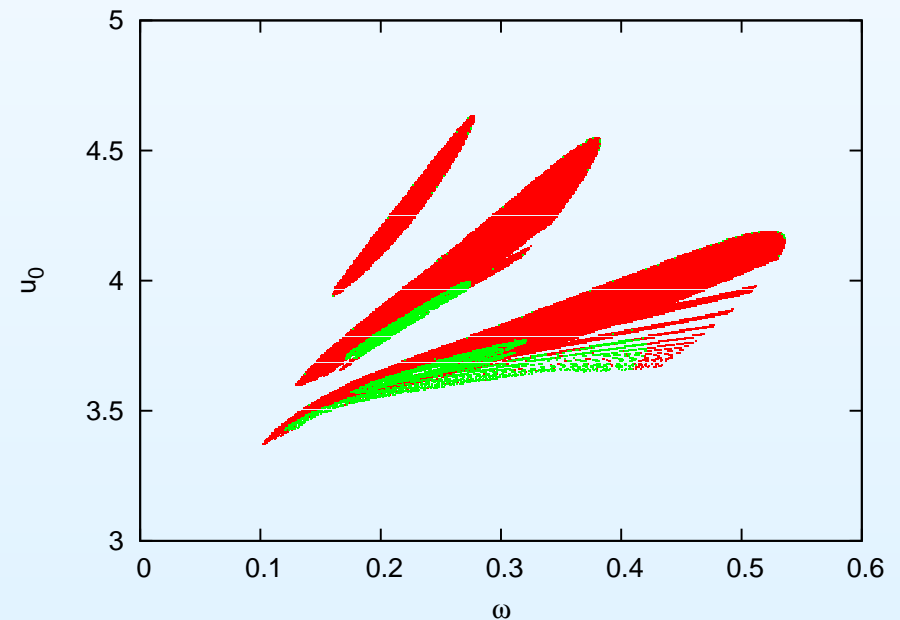
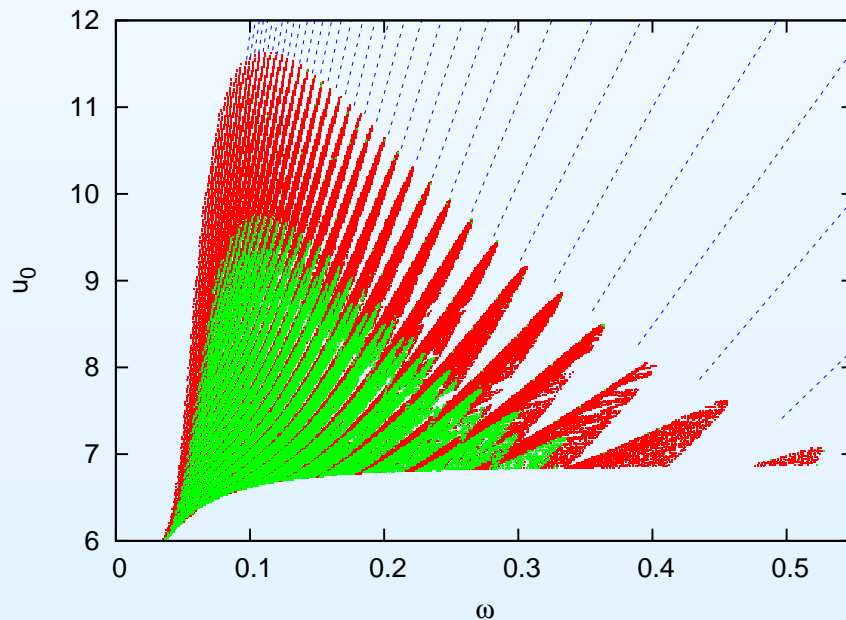


Vs.



Yllättäviä ilmiöitä homogeenisissa superhiloissa

- Sähkömagneettisessa kentässä voidaan lisäksi tutkia mm. kaaosta hallituissa koeolosuhteissa.
- Esimerkkejä kaaoksesta ja rektifikaatiosta erilaisilla dissipaation arvoilla lateraalisissa superhiloista (J. Isohätälä kantaa vastuun):



THz alueen säteilylähteet ja ilmaisimet

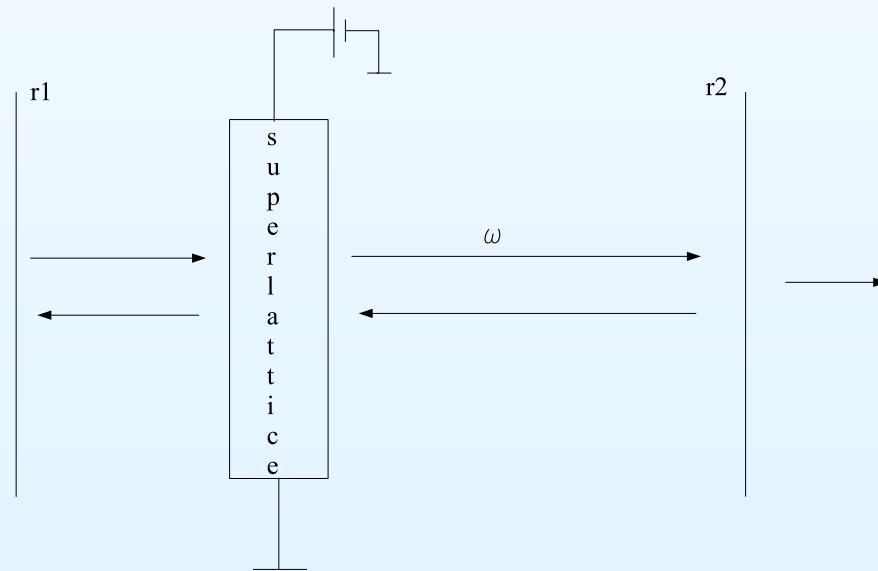
Ilmaisimen toiminta voi perustua esimerkiksi virran aikakeskiarvon muuttumiseen, kun THz-säteilyä kohdistetaan superhilaan. Virtavaste $R = \Delta I/P$, missä P on tulevan säteilyn teho, voi olla useita prosentteja ns. ideaalisesta kvanttihyötysuhteesta $e/\hbar\omega$ [A. A. Ignatov ja A-P. Jauho, J. Appl. Phys., 85, 3643 (1999)].

THz alueen säteilylähteet ja ilmaisimet

Ilmaisimen toiminta voi perustua esimerkiksi virran aikakeskiarvon muuttumiseen, kun THz-säteilyä kohdistetaan superhilaan.

Säteilylähteen toiminta voi perustua esimerkiksi:

- Bloch-värähtelyjen ja sironnan yhteisvaikutuksesta aiheutuvaan negatiiviseen dynaamiseen johtavuuteen.

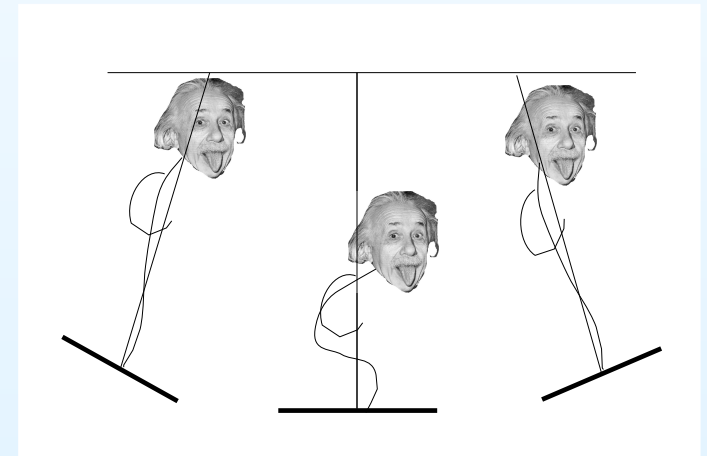
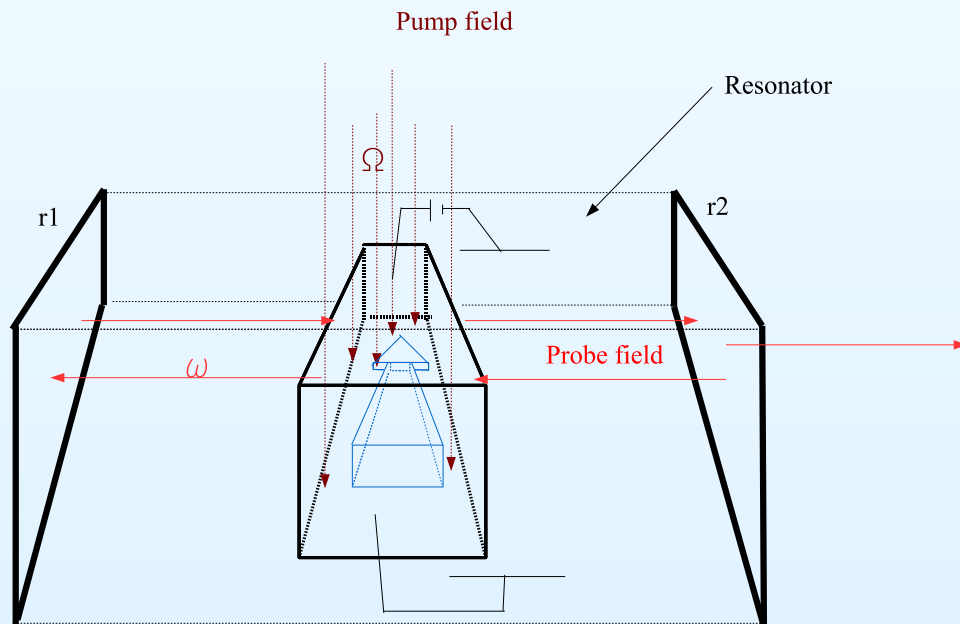


THz alueen säteilylähteet ja ilmaisimet

Ilmaisimen toiminta voi perustua esimerkiksi virran aikakeskiarvon muuttumiseen, kun THz-säteilyä kohdistetaan superhilaan.

Säteilylähteen toiminta voi perustua esimerkiksi:

- Bloch-värähtelyjen ja sironnan yhteisvaikutuksesta aiheutuvaan negatiiviseen dynaamiseen johtavuuteen.
- Parametriseen vahvistukseen.



THz alueen säteilylähteet ja ilmaisimet

Ilmaisimen toiminta voi perustua esimerkiksi virran aikakeskiarvon muuttumiseen, kun THz-säteilyä kohdistetaan superhilaan.

Säteilylähteen toiminta voi perustua esimerkiksi:

- Bloch-värähtelyjen ja sironnan yhteisvaikutuksesta aiheutuvaan negatiiviseen dynaamiseen johtavuuteen.
- Parametriseen vahvistukseen.

Epästabiilisuus: Domainien muodostuminen saattaa aiheuttaa ongelmia realisoinnissa. Asettamalla tarkoitusta varten suunniteltu superhila oikeanlaiseen sähkömagneettiseen kenttään on kuitenkin ehkä mahdollista päästä eroon tästä ongelmasta.

Ludwig Eduard Boltzmann (20.2.1844 – 5.9.1906)

