

Nr. 4 – 2015
77. årgang

Utgiver:
Norsk Fysisk Selskap

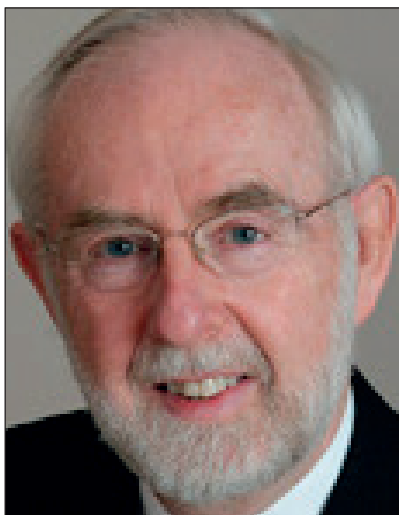
Redaktører:
Øyvind Grøn
Emil J. Samuelsen

Redaksjonssekretær:
Karl Måseide

Innhold

Øystein Elgarøy:	
Nobelprisen i fysikk 2015	95
Øyvind Grøn:	
Relativitetsteorien 100 år – Del II . . .	98
Emil J. Samuelsen:	
Topologiske isolatorer -	
Overflateleilande materiale	103
Kristian Fossheim:	
Maglev: Det flygande toget . . .	109
R. G. Berntsen og Ø. G. Grøn:	
Belysningsteknologiens utvikling . . .	114
Frå Redaktørane	94
Nytt fra NFS	94
Yaras Birkelandpris 2016	
Bokomtale	119
Jostein Riiser Kristiansen:	
Det usynlige universet	
Trim i FFV	121

Fra Fysikkens Verden



Nobelprisvinnerne i fysikk 2015:
Takaaki Kajita og Arthur B. McDonald
(Se artikkel)

Frå Redaktørane

"Lysåret 2015" går mot slutten, og lys og lys-teknologi har vore omtalt og presentert i fysikk- og teknologifora over heile verda. Lysåret 2015 har eigne nettsider (<http://light2015.org>), og NFS har denne hausten fått på plass ein norsk "lysblogg" (<http://lysåret.no>) med mange gode innslag. Desse sidene skal bli ståande utover 2015.

FFV har hatt lysrelaterte emne i alle nummer i år. I dette nummeret er emna henta frå to ytterpunkt i lyssamanheng, eit jordnært kvardagsleg, og eit meir himmelskodande. Berntsen og Grøns "Lysteknologiens rivende utvikling" dekkjer rettnok berre elektrisk lys. Dei første lyskjeldene som var flammande bål og brennande pinnar, er ikkje med, og heller ikkje bruken av olje-, gass- og karbid-lamper. Men utviklinga av elektrisk lys har vore rivande, frå bambusfibertrådlampene på 1850-talet, via Edison-lampene til lysrør, sparepærer og LED-lamper i våre dagar. Dette er eksempel på god skildring av lysteknologisk utvikling.

På den meir himmelskodande sida er Del II av Grøns skildring av den generelle relativitetsteorien, som jo er det teoretiske grunnlaget for dagens kosmologiske verdsbilde. Teorien feirar 100 år akkurat desse novemberdagane. Einstein si føreseiing om at lys vil bli avbøygd i gravitasjonsfelt, blei etterprøvd ved ei solformørking i 1919, og at målingane synte godt samsvar med teorien gjorde Einstein berømt. Han fekk etter kort tid status som tidenes største vitenskapshelt, ein helteglorie som ikkje er blitt mindre med åra. På den bakgrunn er det interessant når prestisjetidsskriftet *Nature*, 19. november 2015 (vol. 527, s. 298–300) har ein artikkel som modifiserer dette bildet av Einstein og gjer han meir menneskeleg. Han bygde sjølv sagt på store namn som Gauss, Riemann, Maxwell og Lorentz. Men han trong også anna hjelp undervegs, og det bad han om og fekk av ei rekke vener og kjenningar med namn som er mindre gloriøse. Artikkelen har tittel "*Einstein was no lone genius*".

Les elles omtale av ei ny, norsk populærvitenskapelig bok om kosmologi med mørk materie og mørk energi.

Emil J. Samuelsen

∞

Nytt fra NFS

Yaras Birkelandpris i fysikk og kjemi 2016

Yaras Birkelandpris i fysikk og kjemi deles ut på grunnlag av et doktorgradsarbeid utført ved et norsk universitet. Prisen alternerer mellom fysikk og kjemi. Den deles ut i kjemi i odde årstall og i fysikk i like årstall. **I 2016 deles prisen ut i fysikk.**

Prisen består av et pengebeløp på 100 000 kr og et diplom. Prisutdelingen skjer i forbindelse med Birkelandforelesningen som neste år blir gitt i Det Norske Videnskaps-Akademi torsdag 22. september 2016.

Aktuelle kandidater til årets Birkelandpris må ha avlagt doktorgrad i løpet av de to siste årene. Avhandlingen skal være i samsvar med den ånd som man finner i Kristian Birkelands forskning. Nøkkelord her er blant annet: Innovasjon, grense-sprengende, nyskapende, kobling mellom teori og empiri, tverrfaglighet, teknologisk nyvinning, industriell anvendelse og miljørelevans.

Forslag til kandidater kan fremmes av forskningsgrupper, veiledere og fast vitenskapelige ansatte ved norske universiteter. Forslaget skal inneholde navn på kandidaten, hvor arbeidet er utført, veileder, kandidatens nåværende arbeidsplass, en fylldig beskrivelse av doktorgradsarbeidet og en vurdering av arbeidets relevans innenfor dagens forskning. Kopi av doktoravhandlingen skal vedlegges, enten i papirutgave (3 eksemplarer) eller som et pdf-dokument. **Forslag sendes til Norsk Fysisk Selskap innen 15. mai.**

Professor Åshild Fredriksen
 Institutt for fysikk og teknologi
 Fakultet for naturvitenskap og teknologi
 UiT Norges arktiske universitet
 Postboks 6050 Langnes
 9037 Tromsø.
 e-post: ashild.fredriksen@uit.no

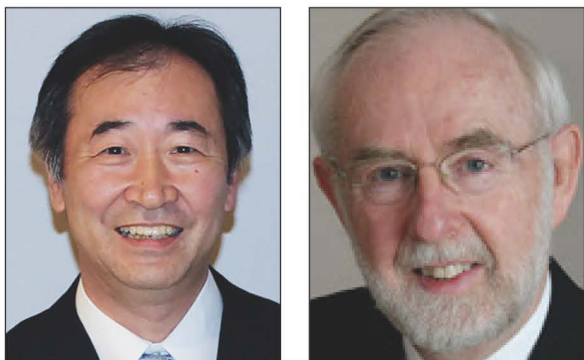
Åshild Fredriksen

∞

Nobelprisen i fysikk 2015: Oscillerende, massive nøytrinoer

Øystein Elgarøy *

Nobelprisen i fysikk for 2015 ble tildelt Takaaki Kajita og Arthur B. McDonald "for deres oppdagelse av nøytrinooscillasjoner, som viser at nøytrinoene har masse." Kajita er professor ved Universitetet i Tokyo og McDonald er professor ved Queens University, Kingston, Canada.



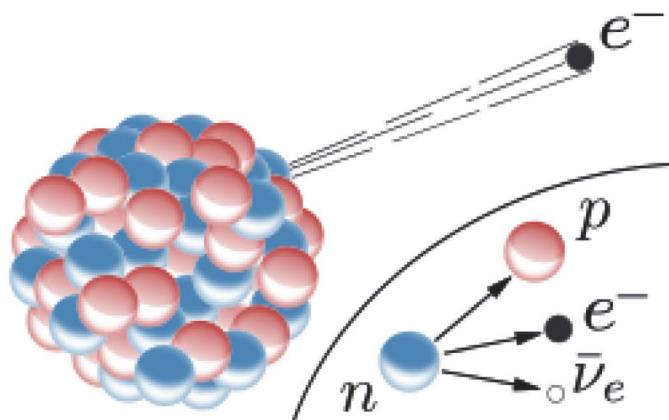
Figur 1. Takaaki Kajita og Arthur B. McDonald

Paulis dødssynd

Nøytrinoene har vist seg å være partikler med evne til å overraske. I partikkelfysikkens standardmodell (heretter omtalt som Standardmodellen) finnes de i tre varianter: Elektronnøytrinoet, myonnøytrinoet og taunøytrinoet. De er elektrisk nøytrale og deltar kun i prosesser formidlet av den svake kjernekräften. I tillegg er de masseløse, ifølge Standardmodellen.

Ideen om nøytrinoenes eksistens ble lansert av Wolfgang Pauli i 1930. Han gjorde det for å forklare hvordan energi, bevegelsesmengde og spinn kunne være bevart i betahenfall av atomkjerner. I betahenfall blir et nøytron omdannet til et proton og et elektron, se figur 2. Hvis dette var alt som skjedde, ville elektronet bli sendt ut med en fast energi bestemt av energiforskjellen mellom kjernens begynnelses- og slutttilstand. Eksperimenter viste imidlertid at elektronenergien fulgte en statistisk fordeling. Pauli postulerte derfor at en ekstra par-

tikkel ble sendt ut i prosessen, og energien ble fordelt mellom denne og elektronet på ulike måter fra henfall til henfall. Enrico Fermi ga denne hypotetiske partikkelen navnet "nøytrino", som betyr "den lille, nøytrale".



Figur 2. Betahenfall av en atomkjerne. Dersom bare ett elektron ble sendt ut, ville det alltid ha den samme energien. Men når et nøytron henfaller til et proton, sendes det også ut et antielektronnøytrino som tar med seg en varierende andel av energien.

Pauli mente selv at han hadde begått en "dødssynd" med dette nøytrinoet: Han hadde postulert eksistens av en partikkel det var umulig å finne eksperimentelt. Der tok han heldigvis feil. I 1956 påviste Frederick Reines og Clyde Cowan antipartikkelen til elektronnøytrinoet i en prosess der elektron-antinøytrinoet vekselvirker med et proton og danner et nøytron og et positron. Reines fikk Nobelprisen i fysikk i 1995 for denne oppdagelsen. Cowan døde i 1974, og nobelprisen deles ikke ut posthumt.

Nøytrinoer fra sola: Hvor blir de av?

Reines og Cowan brukte en kjernereaktor som nøytrinokilde i sitt eksperiment. Sentrum av sola er

* Institutt for teoretisk astrofysikk, Universitetet i oslo.

som en gigantisk fusjonsreaktor som også genererer nøytrinoer i store mengder. Det som skjer i solas kjerne er i essens at fire hydrogenkjerne fusjonerer til én heliumkjerne, og i prosessen produseres også seks gammafotoner og to elektronnøytrinoer. Solas totalt utstrålte effekt er $3,9 \cdot 10^{26}$ W, og i hver reaksjon frigjøres en energi lik $4,3 \cdot 10^{-12}$ J. Neglisjerer vi alle kompliserende faktorer, som for eksempel hvordan energien transporteres fra kjernen av sola, tilsier dette at det hvert sekund må skje 10^{38} fusjoner, og at det derfor produseres $2 \cdot 10^{38}$ elektronnøytrinoer per sekund. Det skulle tilsi at i jordas avstand fra sola, omtrent 150 millioner km, blir hver kvadratcentimeter hvert sekund bombardert med rundt 70 milliarder solare elektronnøytrinoer.

På 1960-tallet startet *Raymond Davis* de første forsøkene på å måle solas nøytrinostråling. Han utnyttet at elektronnøytrinoer som vekselvirker med kjernen i et kloratom produserer argonkjerne, og bygde en svær tank med klorforbindelsen karbontetraklorid (CCl_4). Dette var et tålmodighetsarbeide, for selv gjennom bly vil et typisk nøytrino kunne bevege seg mer enn ett lysår uten å vekselvirke med noe. Grunnen til dette er at nøytrinoer bare følger den svake kjernekraften (i tillegg til gravitasjon). Da Davis til slutt fikk samlet nok data, viste det seg at sola bare sendte ut rundt 1/3 av det forventede antallet elektronnøytrinoer (litt avhengig av nøytrinoenergien). Det opplagte spørsmålet som meldte seg, var om modellen for solas indre var feilaktig.

Ettersom astrofysikere, spesielt *John N. Bahcall*, lagde stadig mer raffinerte solmodeller, endret forutsigelsene for elektronnøytrinofluksen seg lite. Teori og eksperimenter kom ikke overens. Kunne forklaringen være at nøytrinoene oppførte seg annerledes enn forventet?

Italiensk avhopper med en idé det svingte av

Bruno Pontecorvo startet sin karriere som assistent til Enrico Fermi, og var gjennom hele karrieren opptatt av svakt vekselvirkende partikler, som nøytrinoer. I 1950 gjorde han noe så sjeldent som å hoppe av til Sovjetunionen, og han tilbrakte resten av karrieren ved kjerneforskningsinstituttet i Dubna, 110 km nord for Moskva. Det var her han utviklet ideen om at nøytrinoer kan oscillere.

I motsetning til andre masseløse partikler i Standardmodellen, for eksempel fotonet, har vi ingen sterke teoretiske argumenter for at nøytrinoene

må være masseløse. Gjennom 1950- og 60-tallet utviklet Pontecorvo ideer om konsekvensene av å gi nøytrinoer en liten masse. En av konsekvensene var at nøytrinoene som deltar i svake vekselvirkninger, kunne være kvantemekaniske superposisjoner av ulike massetilstander, og at denne superposisjonen ville endre seg i tiden mellom to vekselvirkninger. For å si det enklere, kunne et nøytrino starte som et elektronnøytrino i punkt A, men bli observert som et myon- eller taunøytrino en stund senere i punkt B? Nøytrinoer med masse vil oscillere mellom de ulike typene. Basert på denne ideen spekulerte Pontecorvo faktisk på om fluksen av elektronnøytrinoer fra sola var lavere enn modellene tilsa, allerede før Davis gjorde sine første målinger. Davis' eksperiment kunne bare finne elektronnøytrinoer. Dermed som en stor andel av dem var blitt til myon- eller taunøytrinoer på vei til jorda, ville de ikke bli registrert i detektorene hans, og dermed ville fluksen se ut til å være lavere enn solmodellen forutsa.

Pontecorvos nøytrinooscillasjoner ble etter hvert den heteste kandidaten til å løse det solare nøytrinoproblemet. Men ingen eksperimenter kunne vise at slike oscillasjoner foregikk.

Oscillasjoner oppdaget i nøytrinoer fra atmosfæren

Her kommer *Takaaki Kajita* inn i historien. Kajita leder eksperimentet *Super-Kamiokande*, en enorm tank, 40 m høy og bred, fylt med 50 000 tonn vann, 1 km under jordoverflaten i Kamioka, Japan. Vannet er svært rent, og det er omgitt av mer enn 10 000 fotomultiplikatorer som skal fange opp svake lysglimt fra elektroner og myoner som beveger seg gjennom vannet. Disse partiklene dannes når et passerende elektron- eller myonnøytrino en sjelden gang vekselvirker med atomene i vannet. Elektronene og myonene beveger seg raskere enn lyshastigheten i vannet, og da skapes såkalt cerenkovstråling. Nøytrinoene kommer i dette tilfellet ikke fra sola, men fra prosesser som oppstår når høyenergetisk kosmisk stråling treffer jordas atmosfære.

I 1998 publiserte Kajita og hans team resultater som viste færre myonnøytrinoer enn forventet.⁽¹⁾ Nøytrinoer vekselvirker såpass lite med materie at Super-Kamiokande også registrerer nøytrinoer som har beveget seg gjennom jordkloden fra motsatt side av jorda. En nærmere undersøkelse av dataene viste at underskuddet oppsto på grunn av disse nøytrinoene. Den nærliggende forklaringen var

at de måtte tilbakelegge en lenger strekning til detektoren enn nøytrinoene som ble produsert i atmosfæren rett over den. På veien til detektoren kunne de gjennomgå oscillasjoner og ville derfor komme fram som en annen type nøytrino. Elektronnøytrino-antallet som ble registrert, stemte med forventningene, så den beste forklaringen var at myonnøytrinoer ble til taunøytrinoer på vei til detektoren fra motsatt side av kloden.

Det solare nøytrinoproblemet løst

Tre år senere, i 2001, ble det solare nøytrinoproblemet løst en gang for alle. I en gammel gruve, to kilometer under overflaten i Sudbury, Canada, hadde *Art McDonald* og hans medarbeidere bygd en tank med 1000 tonn tungtvann og 9500 lysdetektorer. Hydrogenkjernene i et tungtvannmolekyl har et nøytron i tillegg til et proton, og dette gir mulighet for reaksjoner med alle de tre nøytrinotypene. Sudbury Neutrino Observatory (SNO) var det første eksperimentet som slik kunne registrere alle typer nøytrinoer fra sola. Dataene som ble samlet opp viste, som tidligere eksperimenter, et underskudd av elektronnøytrinoer sammenlignet med solmodellen.⁽²⁾ Da alle tre typer ble talt opp, var imidlertid antallet i samsvar med teorien.⁽³⁾ Konklusjonen var klar: *Elektronnøytrinoer fra sola blir til myon- og taunøytrinoer på vei til jorda.*

Hva betyr det at nøytrinoene har masse?

Kajitas og MacDonalds eksperimenter viste at nøytrinoer oscillerer, og dermed, i henhold til Pontecorvos hypotese, har masse. Betydningen av dette strekker seg langt utover at det løser det solare nøytrinoproblemet. Siden nøytrinoene er masseløse i Standardmodellen, viser eksperimentene deres at den modellen ikke er komplett. Det må finnes mer fysikk å oppdage.

Nøytrinoosillasjonene kan dessverre ikke fortelle oss hvor store nøytrinomassene er, da de avhenger av differensene mellom kvadratene av deres respektive masser. Oscillasjoner sier oss derfor bare noe om masseforskjellene.

Den generelle forventningen ser ut til å være at massene er av samme størrelsesorden som masseforskjellene. I så fall veier ett av nøytrinoene rundt 10^{-37} kg (svarende til en hvileenergi på 0,05 eV). Det er svært lite, bare en ti-milliondel av elektronets

masse. Et spørsmål som melder seg er hvorfor nøytrinomassene er så mye lavere enn andre partikkelmasser. En god forklaring på dette er nødt til å inneholde fysikk som går utover Standardmodellen.

Tidlig i universets historie ble det produsert store mengder nøytrinoer, og det har fra tid til annen vært spekulert på om de kan utgjøre den mørke materien i universet. Dessverre er de for lette til å kunne utgjøre et betydelig bidrag til denne, men kosmologiske observasjoner er en av de mest lovende veiene til å bestemme nøytrinomassene.⁽⁴⁾

Videre studier av nøytrinoosillasjoner har gitt indikasjoner på at det kan finnes nye overraskelser. Situasjonen er uklar, men enkelte eksperimenter peker i retning av at det finnes flere typer nøytrinoer enn de tre i Standardmodellen. Disse nye typene merker bare tyngdekraften, og de kalles derfor for *sterile nøytrinoer*.⁽⁵⁾

Kajitas og MacDonalds forskning har, som all stor forskning, både besvart gamle spørsmål og skapt nye. Oppdagelsen av nøytrinoosillasjoner har gjort nøytrinfysikk til et av de mest aktive og spennende områdene i partikkelfysikk og kosmologi. Vi venter i spenning på nye resultater. Hvis vi kan bruke historien som rettesnor, er flere overraskelser i vente.

Referanser

1. Y. Fukuda et al. (Super-Kamiokande-kollaborasjonen): *Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos*, Physical Review Letters **81**, 1562 (1998)
2. Q.R. Ahmad et al. (SNO-kollaborasjonen): *Measurement of the Rate of $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$ Interactions Produced by ^8B Solar Neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory*, Physical Review Letters **87**, 071301 (2001)
3. Q.R. Ahmad et al. (SNO-kollaborasjonen): *Direct evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory*. Physical Review Letters **89**, 011301 (2002)
4. Ø. Elgarøy og Ø. Grøn: *Nøytrinoer og galakser*. Fra Fysikkens Verden **73**, Nr. 1, 27–29 (2011)
5. J.R. Kristiansen: *Finnes det sterile nøytrinoer?* Fra Fysikkens Verden **73**, Nr. 3, 98–101 (2011)

Den generelle relativitetsteorien 100 år

Del II: Treg draeffekt, rotasjon og frastøtende gravitasjon

Øyvind Grøn *



I den generelle relativitetsteorien utvidet Einstein relativitetsprinsippet til å omfatte akselerert bevegelse. Den trege draeffekten spiller en avgjørende rolle i denne sammenhengen. Vi omtaler her fire klassiske tester av relativitetsteorien. Einsteins relativistiske teori for tid, rom og gravitasjon danner i vår tid grunnlaget for å beskrive universet i stor skala. I denne sammenhengen omtales frastøtende gravitasjon som årsak til universets akselerasjon.

Treg draeffekt

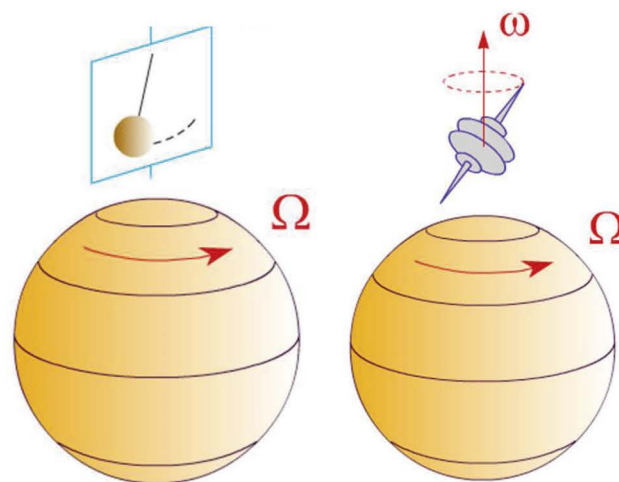
Da Einstein presenterte den generelle relativitetsteorien i sin store artikkel som ble publisert i 1916,⁽¹⁾ hadde det andre avsnittet overskriften: "Nødvendigheten av en utvidelse av relativitetsprinsippet." Her argumenterte Einstein for at relativitetsprinsippet må omfatte akselerert og roterende bevegelse.

I denne sammenhengen har Christian Møller skrevet: "Einstein ga en ny tolkning av de fiktive kreftene i et akselerert referansesystem: I stedet for å betrakte dem som uttrykk for en prinsipiell forskjell av bevegelseslikningene i et treghetssystem og et akselerert referansesystem, sa han at bevegelseslikningene skal ha samme form i alle typer referansesystemer. De 'fiktive kreftene' skulle oppfattes som reelle krefter på samme måte som de andre naturkreftene. Årsaken til at slike krefter opptrer i akselererte referansesystemer er ifølge relativitetsteorien at den kosmiske massen til de fjerne stjernene og tåkene er akselerert i forhold til slike systemer. De 'fiktive kreftene' oppfattes da som gravitasjonskrefter forårsaket av den akselererte kosmiske massen."⁽²⁾

En relativistisk effekt som har avgjørende betydning i sammenheng med en mulig utvidelse av relativitetsprinsippet til å omfatte akselerert bevegelse (se neste avsnitt), ble oppdaget av Einstein i 1912, tre år før han hadde den fulle relativitetsteorien ferdig. Han oppdaget da at dersom et massivt kuleskall akselereres, vil et legeme i sentrum av skallet få en akselerasjon i skallets retning.

I 1918 brukte de østerrikske fysikerne Josef Lense og Hans Thirring, den generelle relativitetsteorien til å undersøke slike gravitasjonsvirkninger, og disse er derfor kalt *Lense-Thirring-effekten*. Virkningen er at en akselerert eller roterende masse drar treghetssystemer med seg i samme retning som de akselererer eller roterer. Denne effekten kalles derfor også *treg draeffekt*. Den opptrer på liknende måte som magnetiske krefter i elektromagnetismen, men er knyttet til akselerasjon og ikke til hastighet, og kalles også for *den gravitomagnetiske effekten*.

Dette er en svak effekt. Jorda roterer én gang per døgn, og rommet rett utenfor dras så vidt litt med av jordrotasjonen, men mye langsommere. Dette forårsaker en dreining av svingeplanet til en



Figur 1. Figuren viser hvordan den trege draeffekten på grunn av jordrotasjonen virker på svingeplanet til en Foucaultpendel og retningen av en gyroskopakse ved jordas nordpol.

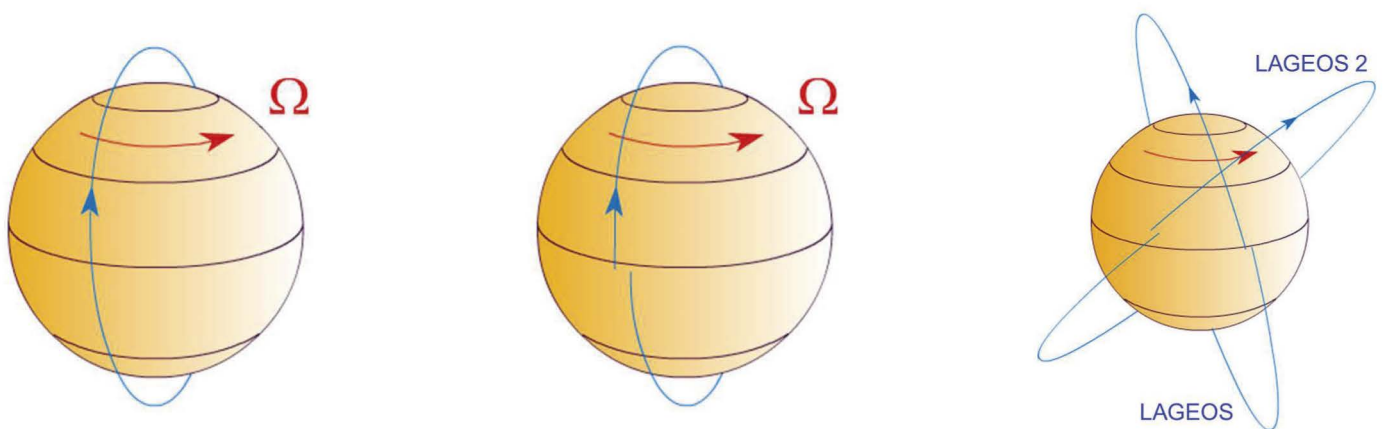
* Høgskolen i Oslo og Akershus, og Fysisk institutt, UiO.

pendel, og akseretningen til et gyroskop, for eksempel ved Nordpolen (figur 1). Det er en liten effekt. Mens jorda roterer én gang per døgn, vil et treghetssystem ved jordoverflaten bruke 30 millioner år på å rotere én runde. Dette ble målt ved hjelp av Lageos-satellittene omkring år 2000, og i Gravity Probe B-eksperimentet i 2008.⁽³⁾ I Lageos-eksperimentet ble dreiningen i forhold til stjernehimmelen av baneplanet til to satellitter som gikk over polene, målt (figur 2). I Gravity probe B-eksperimentet målte man dreiningen i forhold til en stjerne av aksene til fire gyroskoper i en satellitt (figur 3).

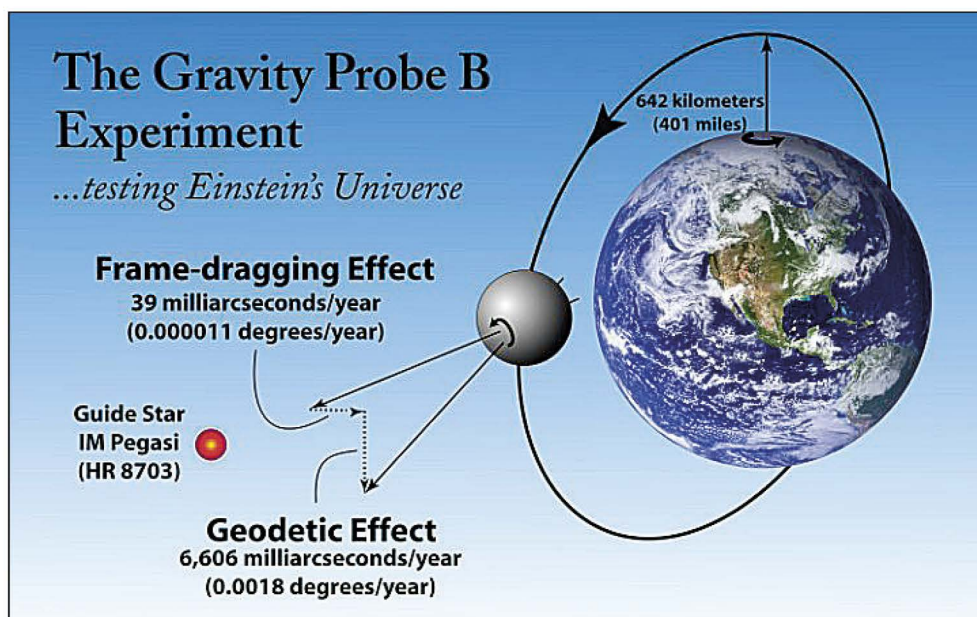
Er rotasjonsbevegelse relativ?

I 1966 undersøkte D.R. Brill og J.M. Cohen den trege draeffekten inne i et roterende kuleskall. De fant at dersom skallet har en radius lik sin egen schwarzschildradius, er det såkalt *perfekt draeffekt* innenfor skallet. Det betyr at rommet dras sammen med skallet. For eksempel vil svingeplanet til en foucaultpendel inni et slikt skall ikke rotere i forhold til skallet.

Videre skrev Brill og Cohen at et slikt skall kan betraktes som en idealisert universmodell. Denne modellen forklarer hvorfor stjernehimmelen ikke



Figur 2. Til venstre vises en lukket satellittbane slik Newtons gravitasjonsteori forutsier. Den generelle relativitetsteorien sier at jordrotasjonen drar med seg treghetssystemene slik at de roterer rundt jorda svært langsomt – en runde tar 30 millioner år. Denne såkalte trege draeffekten "åpner" en satellittbane som vist på den midterste figuren. Dette ble målt med Lageos og Lageos 2-satellittene som antydnet på den høyre delen av figuren.



Figur 3. Jordas avvik fra perfekt kuleform forårsaker en dreining av aksene til et gyroskop i en satellitt, kalt den geodetiske effekten. Jordas rotasjon forårsaker en trege draeffekten som igjen gir en dreining av gyroskopaksen kalt frame-dragging effekt på figuren. Størrelsene og retningene av disse effektene er vist på figuren. Det at de to dreiningene står vinkelrett på hverandre gjør at man kan skjelne dem fra hverandre.

roterer, observert i et treghetssystem.

En observatør med en Foucaultpendel på Nordpolen, vil se at pendelens svingeplan roterer sammen med stjernehimmelen. Ifølge Newtons teori er rotasjon absolutt, og observatøren kan forklare sin observasjon ved å si at verken pendelens svingeplan eller stjernehimmelen roterer. Det er jorda som roterer. Men ifølge Einsteins teori kan observatøren oppfatte jorda som ikke-roterende og pendelens svingeplan og stjernehimmelen som roterende. Forklaringen på svingeplanets rotasjon blir da at det er en gravitasjonsvirkning fra den roterende kosmiske massen. Denne massen forårsaker perfekt draeffekt i universet, og dette gjør at pendelens svingeplan roterer sammen med stjernehimmelen.

Konklusjonen blir at *mens rotasjonsbevegelse er absolutt ifølge Newtons teori, så er rotasjon relativ ifølge Einsteins teori.*

Fire klassiske tester av relativitetsteorien

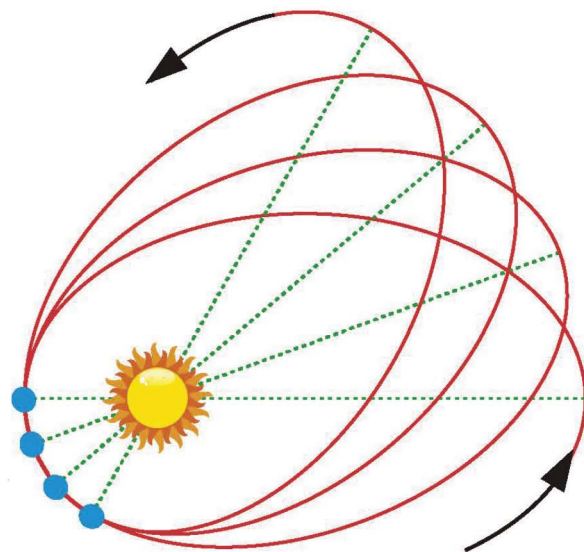
Ved å regne med svak feltapproksimasjon kan man utlede enkle matematiske uttrykk for fire relativistiske effekter i solsystemet: Merkurs perihelpresesjon, lysavbøyning, gravitasjonell frekvensforskyvning og gravitasjonell tidforlengelse.

Merkurs perihelpresesjon

Omkring år 1900 eksisterte et uløst problem, nemlig at den observerte bevegelsen til Merkur ikke passet med beregninger basert på Newtons gravitasjonsteori. Merkurs bane er en ellipse som roterer 574 buesekunder per 100 år. Dette kalles perihelpresesjonen til Merkur (figur 4).

Allerede i 1859 la astronomen Urbain Le Verrier merke til at gravitasjonsvirkningen fra de andre planetene i solsystemet bare bidro med 531 buesekunder. Det var en uoverensstemmelse på 43 buesekunder per 100 år. Dette ble bekreftet av andre astronomer utover mot år 1900. Man lurte blant annet på om årsaken kunne være en ukjent planet. Det ble flere ganger påstått at en slik planet var funnet, men ingen slike observasjoner ble bekreftet.

I november 1915 beregnet Einstein Merkurs perihelpresesjon ut fra den nesten ferdige relativitetsteorien. Han fant at relativitetsteorien ga 43 buesekunder større presesjon enn Newtons teori ga. *Relativitetsteorien løste det gamle problemet med Merkurs perihelpresesjon.* Einstein skrev i et kort til en kollega at han ble helt fra seg av glede. Han



Figur 4. Merkurs perihelpresesjon betyr at Merkurs ellipsebane roterer i forhold til stjernehimmelen.

skjønte nå at han var på riktig spor, og fullførte konstruksjonen av den generelle relativitetsteorien et par uker senere. Også den tyske matematikeren David Hilbert utledet de korrekte feltlikningene på samme tid.

Gravitasjonell lysavbøyning

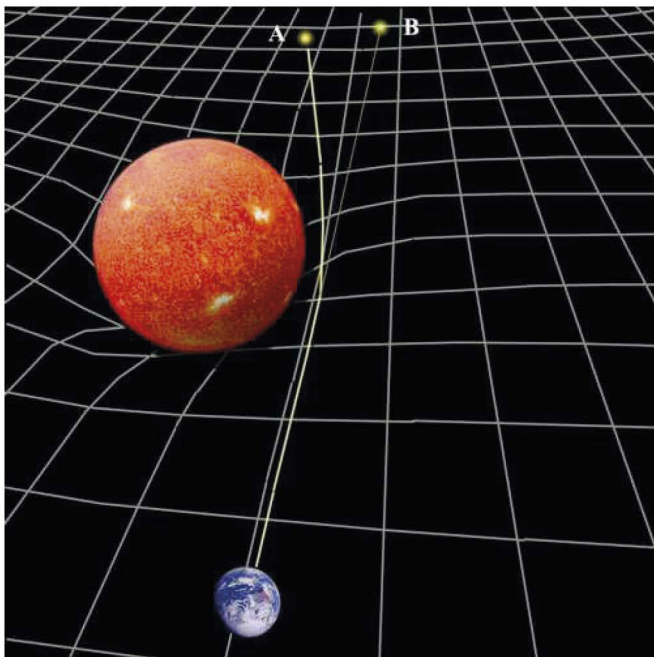
Lysavbøyning i gravitasjonsfelt ble omtalt i Del I av denne artikkelen. La oss rekapitulere hovedpunktene.

Einstein presenterte vinteren 1916 en beregning som viste at ifølge den generelle relativitetsteorien vil lys som passerer rett utenfor sola avbøyes med 1,75 buesekunder (figur 5).

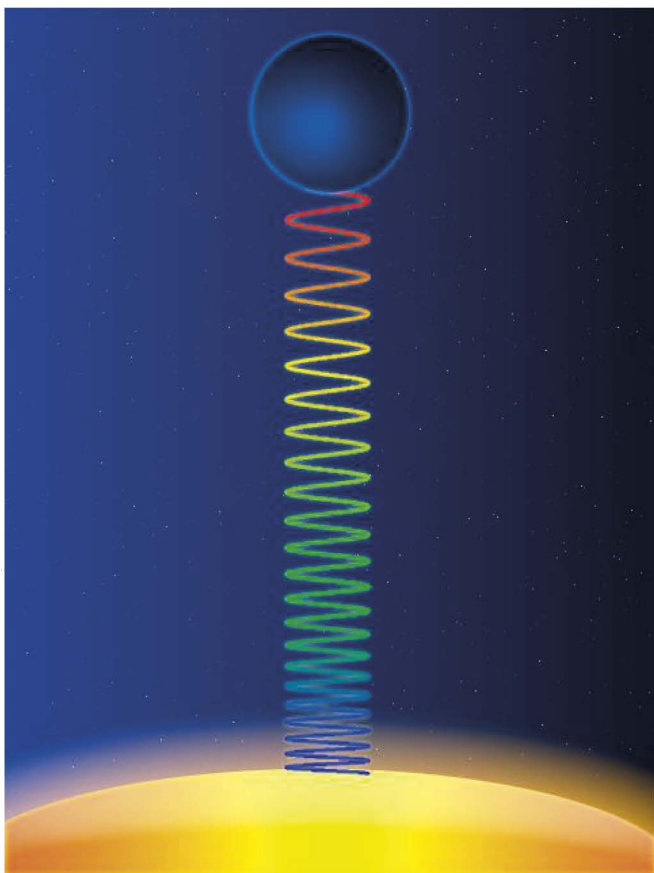
Denne forutsigelsen ble testet under en solformørkelse i 1919. Målingene var ikke spesielt nøyaktige, men de ga resultater som stemte bedre med Einsteins relativitetsteori enn med den newtonske beregningen til Soldner, som ga halvparten så stor avbøyning som relativitetsteorien.

Gravitasjonell frekvensforskyvning

Den gravitasjonelle frekvensforskyvningen av lys – at frekvensen øker for lys som beveger seg nedover i et tyngdefelt (figur 6) – ble bekreftet i *Pound-Rebka-eksperimentet* som ble utført i 1960, fem år etter at Einstein døde. Her ble lys sendt fra loftet til kjelleren i det 22,5 m høye Jeffersontårnet ved Harvard universitetet i USA. I dette tilfellet forutsier relativitetsteorien at forholdet mellom frekvensendringen og frekvensen er $gh/c^2 = 2,5 \cdot 10^{-15}$, der g er tyngdeakselerasjonen og h



Figur 5. Banen til lyset fra en fjern stjerne avbøyes når lyset passerer sola. Stjernen er i posisjon A, men observert fra jorda ser det ut som om den befinner seg i posisjon B.



Figur 6. Illustrasjon av at frekvensen til lys øker når det beveger seg nedover i et tyngdefelt. Lyset blir blåere lenger nede.

er høydeforskjellen mellom sender og mottaker. Målingene stemte med dette med 10 % usikkerhet i måleresultatene.

Gravitasjonell tidsforlengelse

At tiden går langsommere langt nede i et tyngdefelt, ble eksperimentelt bekreftet i *Kafele-Keating-eksperimentet* i 1972. De tok med seg cesium-atomklokker på fly, og reiste først rundt jorda den ene veien og så motsatt vei. Reisetiden, t , målt med klokkene i flyene og med klokker som sto igjen på laboratoriet, t_0 , ble sammenliknet. Hvis vi for enkelthets skyld regner med at flyene beveger seg over ekvator med konstant hastighet, u , i en høyde, h , forutsier relativitetsteorien at forskjellen mellom reisetiden målt i flyene og med klokken som sto igjen på flyplassen er:⁽³⁾

$$t - t_0 \approx \left(\frac{gh}{c^2} - \frac{2R\Omega u + u^2}{2c^2} \right) t_0, \quad (1)$$

der R er jordas radius, Ω er jordas døgnlige vinkelhastighet, og u er positiv ved reise østover. Reisetiden var $t_0 = 1,2 \cdot 10^5$ s, dvs. litt over ett døgn.

Forutsigelsene var: For reise østover, $t - t_0 = -120$ ns, og for reise vestover, $t - t_0 = 250$ ns, (der ns står for nanosekunder). Målt med klokkene i flyet tar reisen kortere tid ved reise østover, dvs. samme vei som jorda roterer, enn ved reise vestover. Likning (1) viser at den lengste reisetiden fås med et fly som reiser vestover med hastighet $u = R\Omega$. Et slikt fly står stille i et referansesystem som ikke roterer i forhold til stjernehimmelen, og da går klokka fortest.

Hafele og Keating måtte bruke rutefly og integrere numerisk langs flyrutene for å finne de relativistiske forutsigelsene. Tallene blir da litt forskjellige fra dem formel (1) gir. Målingene bekreftet forutsigelsene deres med en nøyaktighet på omtrent 15 %.

Akselerert kosmisk ekspansjon

I 1928 oppdaget den belgiske kosmologen og pateren Georges Lemaître det som kalles *Hubbles lov*: at de fjerne galaksehoper fjerner seg fra oss med en hastighet som er proporsjonal med avstanden. Galaksehoper beveger seg fritt. Dette betyr at rommet observeres å ekspandere med en hastighet som er proporsjonal med avstanden fra observatøren. I stor nok avstand kommer vi til en flate rundt observatøren der rommet ekspanderer med lyshastigheten, og utenfor denne flaten "renner" romelven utover med overlyshastighet. Lys fra en kilde i dette fjerne området vil aldri kunne komme inn til observatøren. Det betyr at flaten

opptrer som en horisont. Det er umulig å se området utenfor.

Når det gjelder lyshastighetens rolle i universet er det slik at for legemer som beveger seg gjennom rommet, opptrer lyshastigheten som en hastighetsbarriere som det ikke er mulig å akselerere seg gjennom. Men *rommet selv kan bevege seg med overlyshastighet*. Det skjer innenfor overflaten av et svart hull og utenfor den kosmiske horisonten i et ekspanderende univers.

I 1998 ble det oppdaget at *universets ekspansjonsfart øker med tiden*. Dette kom høyst overraskende. Nesten alle hadde ventet at ekspansjonsfarten sakker av på grunn av den tiltrekkende gravitasjonen til materien i universet.

Frastøtende gravitasjon

I motsetning til Newtons gravitasjonsteori tillater Einsteins teori *frastøtende gravitasjon*. Ifølge relativitetsteorien har ikke bare masse, men også trykk og strekk en gravitasjonsvirkning. Hvis den vanlige massetettheten er ρ og trykket eller strekket er p (trykk, $p > 0$, og strekk, $p < 0$), så er gravitasjonen bestemt av "den gravitasjonelle massetettheten",⁽⁴⁾

$$\rho_G = \rho + 3p/c^2. \quad (2)$$

For stort nok strekk blir ρ_G negativ. Det betyr at gravitasjonen blir frastøtende.

Frastøtende gravitasjon er et relativistisk fenomen. Den Newtonske grensen av generell relativitetsteori kan tas ved å la $c \rightarrow \infty$. Da vil det siste leddet i uttrykket for ρ_G bli lik null, og $\rho_G = \rho$. I denne grensen har verken trykk eller strekk noen gravitasjonsvirkning. Hvis vi aksepterer at vanlig masse alltid er positiv, følger det at frastøtende gravitasjon ikke kan eksistere ifølge Newtons gravitasjonsteori.

Kvanteteorien sier at det ikke er mulig å tømme et område helt for energi. Det vil alltid være en "vakuumergergi" til stede som man ikke kan fjerne. I slutten av 1800-tallet kalte man vakuumet for "eter", og man tenkte seg at eteren var et medium som elektromagnetiske bølger, f.eks. lys, beveget seg i. I 1887 forsøkte Michelson og Morley å måle jordas hastighet gjennom eteren, men fant ingen hastighet.

I dag mener man at "eteren" ikke eksisterer, men at det er en vakuumergergi i rommet. Det aksepteres at man ikke kan måle hastighet i forhold til vakuumergergi. Alle egenskapene til vakuum er like

enten de måles av en observatør i bevegelse eller i ro. Når dette resultatet settes inn i relativitetsteorien finner man at vakuumet er i en tilstand av "strekk", $p = -\rho c^2$, og når vi setter dette inn i formel (2), finner vi at vakuumergets gravitasjonelle massetetthet er, $\rho_G = -2\rho$ som er negativ. Dette betyr at vakuumergergien virker på seg selv med frastøtende gravitasjon! Slik energi kalles nå for *mørk energi*.

Konklusjonen til kosmologene er at *universets akselererte ekspansjon skyldes frastøtende gravitasjon fra den mørke energien*. Omtrent 70 % av all energien i universet, inkludert all masse gjort om til energi ifølge $E = mc^2$, består av mørk energi.

Jeg har nylig utarbeidet hvordan Einsteins relativitetsteori ved hjelp av fenomenet perfekt treg draeffekt knytter det generelle relativitetsprinsippet sammen med tettheten av mørk energi i universet. Dersom man antar at rotasjonsbevegelse er relativ, og at vi bor i et univers med euklidisk romlig geometri fylt av støv (en gass med neglisjerbart trykk) og vakuumergergi med konstant energitetthet (gitt ved den kosmologiske konstanten Λ), så forutsier relativitetsteorien at vakuumergergiens nåværende andel av den totale energitettheten i universet, $\Omega_{\Lambda 0}$, må oppfylle likningen

$$\tanh\left(\frac{3}{2}\sqrt{\Omega_{\Lambda 0}}\right) = \sqrt{\Omega_{\Lambda 0}}. \quad (3)$$

Den reelle, positive løsningen av denne likningen er $\Omega_{\Lambda 0} = 0,7371$. Følgelig impliserer gyldigheten av det generelle relativitetsprinsippet ifølge relativitetsteorien at i et univers med euklidisk romlig geometri fylt av støv og mørk energi med konstant energitetthet, utgjør i vår tid den mørke energien 73,7 % av all energi og materie i universet. Dette stemmer godt med observasjoner, og løser det gamle problemet med at den observerte tettheten av vakuumergergien er mye mindre enn plancktettheten som kvanteteorien forutsier.⁽⁵⁾

Observasjonen av akselerert kosmisk ekspansjon lar seg ikke forklare innenfor Newtonsk gravitasjonsteori. Det er den ultimate bekreftelsen av Einsteins 100 år gamle relativitetsteori.⁽⁶⁾

Som alle andre teorier har relativitetsteorien begrenset gyldighetsområde. Grensen for relativitetsteoriens gyldighetsområde defineres i møte med kvanteteorien og opptrer ved Planckdimensjonene, for eksempel plancktiden, $t_p = \sqrt{\hbar G/c^5} = 5,4 \cdot 10^{-44}$ s, der $\hbar$ er den reduserte Plancks konstant. Dette innebærer blant annet at relativitetsteorien ikke kan brukes til å beskrive hva som skjedde i det første øyeblikket da universet oppsto. Vi trenger en kvantegravitasjonsteori.

Det å prøve å konstruere en slik teori er et aktivt forskningsområde i teoretisk fysikk. Det er mange kandidater til en slik teori, men foreløpig ingen som er allment akseptert.

Ved å forutsi eksistensen av objekter som ikke lar seg beskrive av teorien – sentrum i svarte hull og universets begynnelse – peker den generelle relativitetsteorien mot sin egen utilstrekkelighet og oppfordrer oss til å konstruere en ennå sterkere og mer omfattende teori.

Referanser

1. A. Einstein: *The Foundation of the General Theory of Relativity*. (Engelsk oversettelse av Einsteins tyske artikkel.) *The Principle of Relativity*, s 111-164, Dover (1952)
2. C. Møller: *The Theory of Relativity*. Oxford Clarendon Press, s 218 (1969)
3. Ø. Grøn: *To relativistiske effekter bekreftet i Gravity Probe B-eksperimentet*. FFV, **73**, Nr. 2, 39 (2011)
4. Ø. Grøn: *Lecture Notes on the General Theory of Relativity*. Springer-verlag, s. 175–176 og 201–202. (2009)
5. S. Weinberg: *The Cosmological Constant Problems*. ArXiv: astro-ph/0005265 (2000)
6. A. Einstein: *Relativitetsteorien*. Bokklubben Dagens Bøker. (2000)

∞

Topologiske isolatorar – overflateleiande materiale

Emil J. Samuelsen *

Topologiske isolatorar har vore eit "hot" forskningsfelt i faststoffteori dei siste ti åra. Det gjeld ein klasse materiale som kan vere elektriske isolerande inne i stoffet, men elektrisk leiande i kantane og på overflata. Somme kallar fenomenet eit paradigmeskifte for kvantemateriale, med betydeleg potensiale for teknisk utnytting. Effekten blei først utleidd teoretisk og litt seinare påvist i eksperiment. Artikkelen gir ei innføring i emnet med utgangspunkt i halleffekten, som oppstår når ladningar blir avbøygde i magnetfelt.

Innleiing

Topologiske isolatorar (forkorta til TI i denne artikkelen) dekker eit nytt og avansert tema: Materiale som samtidig er både isolerande og leiande.

Faktisk er det ikkje isolatoreigenskapen som er hovudsaka her, men heller den elektrisk leiingevna. Sidan det dreier seg om materiale som er elektrisk leiande i overflatesjiktet og isolerande i det indre, hadde "Overflateleiande materiale" vel vore eit betre namn. *Topologisk* er eit matematisk uttrykk som har med den ytre forma eller utforminga å gjere.

Den teoretiske bakgrunnen for TI kan vere krevande. Her skal eg gi ei framstilling som unngår å ta opp dei meir subtile sidene ved emnet, og enkelte detaljar er forklarte i eit Appendiks. Artikkelen tar utgangspunkt i halleffekten og kvante-halleffekten, som blir kort gjennomgått.

TI kan eksistere ved låge temperaturar i mange materiale som inneheld tunge atomslag med betydeleg sterk såkalla spinn-banekopling, og artikkelen nemner materialklassar der eigenskapen er observert eller spådd. For eventuell teknisk utnytting er ein på leit etter materiale som kan vere TI ved romtemperatur.

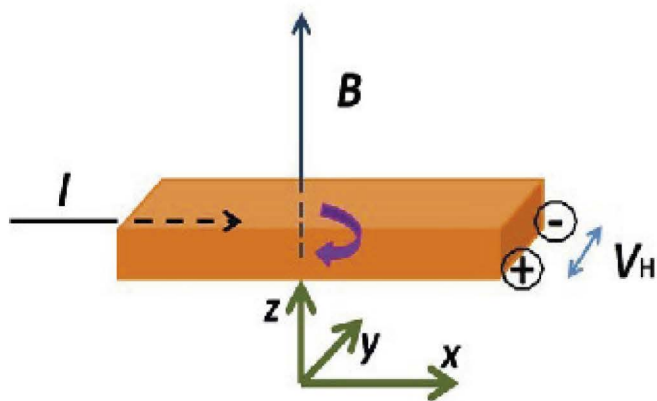
* Institutt for fysikk, NTNU, Trondheim.

Halleffekt

Når ein straumførande leidning blir utsett for eit magnetfelt loddrett på leidningen, vil det oppstå eit spenningsfall på tvers av leidningen. Dette blir kalla halleffekt, som ein kan beskrive utifrå lorentzkrafta $\mathbf{F}$ som påverkar ladning q som flyttar seg med fart $\mathbf{v}$, der det er magnetfelt $\mathbf{B}$ og elektrisk felt $\mathbf{E}$:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}). \quad (1)$$

Koordinatsystem for den følgjande utleiinga framgår av figur 1. Magnetfeltet vil gi ein kraftkomponent i y -retninga, som gir ladningsavbøying og ladningsoverskot på kantane av leidninga. Når straumen, I , går, og stasjonære forhold er inntrådt, vil



Figur 1. Bit av leidning med straumstyrke I utsett for magnetfeltet B , som bøyer av positiv ladning som vist med krum pil. Det gir opphav til tversspenninga V_H med antyda ladningsfordeling. Koordinatretningar brukte i teksten.

ladningsubalansen ha skapt ein elektrisk feltkomponent E_y som akkurat motsvarar avbøyingseffekten av B -feltet, slik at då er

$$E_y = v_x B \quad (2)$$

og spenningsfallet på tvers blir

$$V_H = E_y b = v_x B b. \quad (3)$$

Med ladningsberartettleik n i leidning med tverrmål $A = bd$, der b er breidda og d er tjukkleiken, kan straumstyrken uttrykkast som $I = nqv_x A$. Det gir

$$V_H = IB/(nqd). \quad (4)$$

Ein definerer gjerne ein hallkonduktans Σ_H , og ein tilsvarande hallresistans, R_H

$$\Sigma_H = I/V_H = nqd/B \quad R_H = B/(nqd). \quad (5)$$

Tversspenninga, V_H , kan målast direkte. Halleffekten blir brukt til måling av magnetfeltstyrke, og til å bestemme forteikn på ladningsberarar i halvleiarar.

Kvante-halleffekt

Ved låge temperaturar og for tynne lag (tilnærma todimensjonale) av det leiande materialet, og med sterke magnetfelt, opptre kvante-halleffekten. Den induerte tversspenninga blir kvantisert (Klaus von Klitzings nobelpris i 1985), og hall-konduktans og hall-resistans er uavhengige av prøvetjukkaleik og kan uttrykkast som

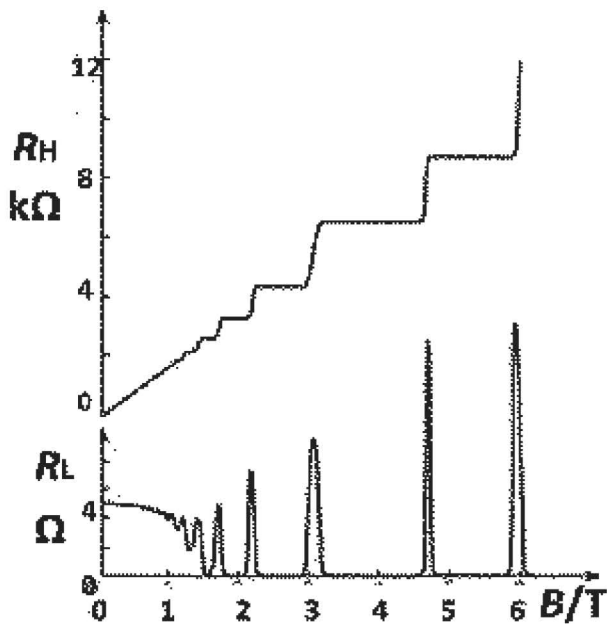
$$\Sigma_H = I/V_H = le^2/h \quad R_H = h/(le^2). \quad (6)$$

Her er e elementærladninga, h er planckkonstanten, og l er kvantetal som kan vere heile tal, men også brøk i mange tilfelle. Ein kan legge merke til at hallresistansen i (6) er heiltalige fraksjonar av naturkonstantkombinasjonen $h/e^2 = 25,81128 \text{ k}\Omega$, iblant kalla "von Klitzing-konstanten". Den blir til dels nytta som standard for elektrisk resistans.

Kvantiseringa er knytt til dei såkalla landaunivåa av elektrontilstandar i magnetfelt i metall og halvleiarar. B -feltet vil føre elektrona i *syklotronbanar* (sirkelbanar) omkring feltretninga. Ved høge temperaturar er frivegen for elektrona kort på grunn av kollisjonar med gittervibrasjonar, men ved låge temperaturar rekk elektrona å gjere mange omløp før dei blir spreidde. Kvantiseringa kjem av at elektron som sirkulerer mange gonger, må ha *same fase* ved kvart omløp for ikkje å interferere destruktivt (analogt med bohr-kvantisering av elektronbanen i hydrogenatomet, der baneomkretsen er multiplum av bølglengda). Kvar bane svarer til ein viss energi av typen $E = (l + 1/2)\hbar\omega_c$, der $\hbar\omega_c$ er syklotronvinkelfrekvensen uttrykt ved ladning, magnetfeltstyrke og ladningsmasse, m :

$$\omega_c = qB/m \quad (7)$$

Kvantiseringa blir observert ved låge temperaturar, $\leq 10 \text{ K}$, og ved sterke magnetfelt, $\geq 1 \text{ tesla}$, som vi ser av figur 2. Prøva i dette tilfellet var eit mikrometertynt lag av halvleiaraterialet galliumarsenid, GaAs. Ein kan sjå av figuren at straumresistansen R_L forsvinn og materialet er kvasi-supraleiande der hallresistansen har platå. Kvantetalet, l , er lågast for dei høgste B -felta, der jo $\omega_c = qB/m$ er størst, med verdiar 3 og 4 på dei øvre trinna. Klassisk halleffekt svarar til den rette linja i øvre kurve for låge feltstyrkar.



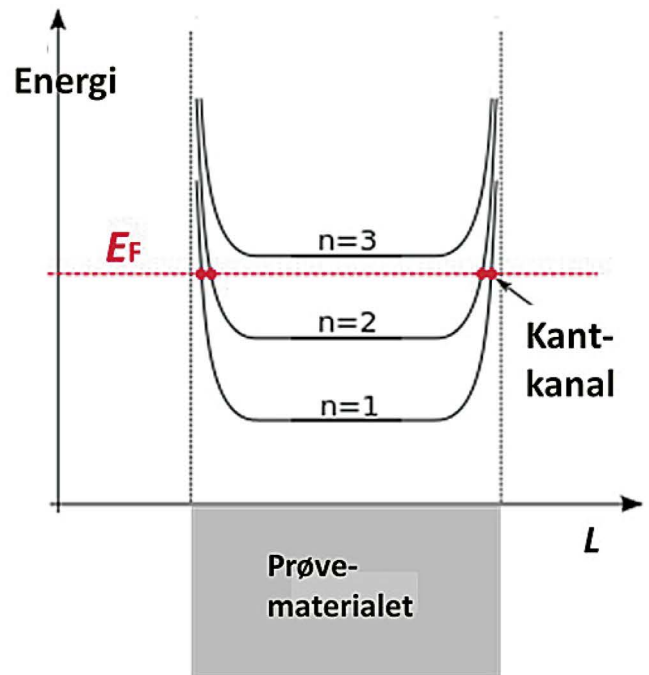
Figur 2. Kurvene viser observert effekt av aukande påtrykt magnetisk felt B på ei mikrometertynn GaAs-prøve. Øvre kurve: Observert hallresistans som er kvantisert. Nedre kurve: Observert resistans i retning av påtrykt elektrisk spenning (dvs. langs leiendinga). Merk at der er ingen straumresistans i lei- dningsretninga for slike B -felt der hallresistansen har platå (Wikipedia commons).

Kanteffektar

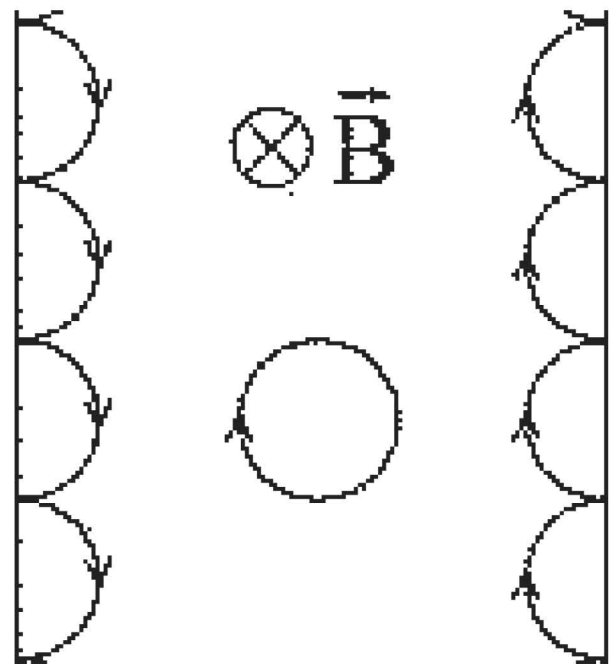
Generelt er elektrontilstandane ikkje like for elek- trona i det indre av materialet og i overflatesjikt- tet. For i overflata er dei berre påverka av na- boskapen *innover* i materialet, mens det er vakuum (eller gass) på utsida, og det krevst høg energi for eventuelt å løfte elektrona ut i det fri. Dette er forsøkt illustrert i figur 3 ved at energinivåa bøyer mot høgre verdier ved overflata, noko som gir opp- hav til spesielle overflate- eller kant-effektar i fast materiale. For store materialstykkje med dimen- sjonar i millimeter og centimeter-området spelar overflatesjiktet mindre rolle, men i nano- og mikro- materiale vil overflata vere viktig, og kan, som vi skal sjå, gi materialet nye og avanserte eigenska- par. Som illustrert i figur 4 for ei todimensjonal (2d) prøve vil det bli ein resultant-elektronstraum som sirkulerer langs prøvekantane, loddrett på B - feltretninga.

Topologisk leiing

I materiale som blir kalla "topologiske isolatorar" (TI), skjer prosessar av den typen vi akkurat beskreiv, men med den viktige skilnaden at det skjer



Figur 3. Skjematisk om energinivå på kantane og inne i ma- terialet med utstrekning i L -retninga. Dei tre landau-nivåa har konstante energiverdiar inne i materialet, men bøyer oppover i kantane. Kjemisk potensial E_F (ferminivået) er raudstipla, og fell mellom to energinivå, slik at det indre av materialet er isolerande eller halvleiande. I overflatesjiktet er energinivåa omtrent samanfallande, så eksitasjon skjer lett mellom dei, og straum kan flyte her (Wikipedia commons).



Figur 4. Elektronane sine sirkelbanar i B -feltet (som her går innover i papirplanet) blir brotne ved kantane, og det gir som resultat ein netto elektronstraum nedover i venstre kant og op- pover i høgre kant, altså ein elektronstraum som sirkulerer langs kanten av prøva (Wikipedia commons).

utan at det trengst eit ytre påtrykt magnetfelt.

Teoretisk utleiing av TI er frå 2006 knytt til todimensjonale nanostrukturar.⁽¹⁾ Alt året etter kom eksperimentelle resultat som syntest å bekrefte eksistensen av 2d TI. Dette er eit unikt tilfelle av eit teoretisk materialfysisk resultat, ved at det *etterpå* blei verifisert eksperimentelt. Det vanlegaste i materialfysikken er at eksperimenta har komme først, og den teoretiske analysen og forståinga er blitt gitt i ettertid.

Men teori blir gjerne utvikla på idealiserte materialmodellar, for eksempel utan å ta høgd for gitterfeil og forureiningar. I praksis kan eksperimentelle resultat avvike betydeleg frå det ideelle, noko tolkingane må ta omsyn til.

Todimensjonale system

Topologiske isolatorar skil seg frå ordinær kvantehalleffekt ved at kantstraum opptrer *utan* at det trengst eit ytre påtrykt magnetfelt. På eit vis kan ein seie at materialet sjølv har eit medbrakt B -felt som gjer jobben, i form av spinn-bane-kopling, uttrykt som vektorprodukt av elektronet sitt eigenspinn, $\mathbf{S}$, (elektronspinn) og banespinn, $\mathbf{L}$. Meir detaljert omtale er gitt i Appendikset.

På grunnlag av dette "medbrakte" B -feltet seier teorien at det skal kunne gå *to motgåande* elektronstraumar (både $+L$ og $-L$) langs kanten, og at spinnnet for elektrona i dei to straumane også er motsette ($+S$ og $-S$). Sjå illustrasjonen i figur 5. Dette er verkeleg ein overraskande og ny type elektronisk tilstand i fast materiale.

Vi har her å gjere med ein situasjon der kanttilstanden er okkupert med både pluss-spinn- og minus-spinn-elektron, noko som gjer kantstraumane sær "robuste" for forstyrrelsar i form av spreining. Begge spinntilstandane er "fulle", uttrykt i kvantemekanisk sjargong, og slike fulle tilstandar er stabile. Det er dette robust-poenget som er opphavet til den nokså merkelege nemninga "topologisk", som er knytt opp mot tidsinversjonssymmetri for vektorproduktet $\mathbf{L} \cdot \mathbf{S}$.

Topologi

I matematisk topologi er kvar type topologisk form (kalla "genus") *robust* mot mindre ytre endringar og deformasjonar. Eksempel: Ein ball kan deformerast til eit egg eller ein amerikansk fotball, eller andre former beslekta med ei kule, for dei er alle av den same topologi (genus 0 i dette tilfellet). Ballen kan t.d. ikkje deformerast til ein

badering (genus 1) eller ei kringle (genus 2) utan store inngrep-operasjonar. For meir om matematisk topologi, sjå referanse.⁽³⁾

Tredimensjonale system

Muleg eksistens av TI i tredimensjonale (3d) materiale blei utleidd teoretisk i 2007, og like etter påvist eksperimentelt. Mens 2d-TI-straumane går langs kantane, går straumane i 3d-TI på overflatene. Dei kan gå i alle retningar, med elektronspinnnet alltid loddrett på forplantingsretninga, som illustrert i figur 6 i Appendiks. Når ei svak ytre elektrisk spenning blir sett på materialstykket i ei retning, vil straum flyte i den retninga og også i motsett retning. Spinnnet for dei to retningane er motsette, og er alltid loddrett på straumretningane, til liks med kantstraumane for 2d. Men å påvise to motgåande straumar er ikkje lett, og andre metodar enn straummåling for å identifisere 3d TI må nyttast. I Appendikset er det skildra korleis fotoelektronspektroskopi (på engelsk forkorta til ARPES) blir nytta for å identifisere 3d TI ved hjelp av elektronenergisektret.

Materiale med TI-eigenskapar

Dei første eksperimenta var på eit *todimensjonalt* materiale, i form av kvantebrønn-konstruksjon av tynne sjikt av kvikksølv-tellurid, HgTe, plassert mellom lag av halvleiande kadmiumdopa HgTe på begge sider. Ved hjelp av påtrykt elektrisk potensial kunne dei regulere graden av n- eller p-doping av materialet. Detaljerte konduktivitetsmålingar med ulike prøvetjukkuleikar (i området 5-12 nm) med og utan påtrykt B-felt, gav indirekte indikasjonar på TI-tilstand i temperaturområdet kring 1 K. Sjølv kantstraumane er det ikkje endeframt å påvise fordi dei går i motsette retningar og opphevar kvarandre, både i straumstyrke og i indusert magnetfelt, men langsgåande leiingsevne kan målast. Viktig resultat var at hallresistans som også vart målt, var i godt samsvar med verdien $(1/2)h/e^2$ frå likning (6), og uavhengig av prøvebreidda b .⁽²⁾

Tredimensjonale TI blei hovudtema frå 2008 og utover, med mange materialkandidatar, spesielt vismuthaldige materiale. Mest studert er Bi₂Te₃.^(4,5)

Påvisinga av TI-eigenskapar kan skje med ulike metodar, ofte i kombinasjon, som sveipe-tunneleringsmikroskopi (STM) og resistansmålingar, jamvel om også det indre av materialet kan gi

bidrag til resistansen pga. gitterfeil og forureiningar. Mest overtydande er "vinkeloppløyst fotoelektron-spektroskopi". Eit måleresultat er omtalt og vist i Appendiks.

Mange TI-materiale er etter kvart funne med atom av dei tyngre grunnstoffa i gruppe V og VI i det periodiske systemet: vismut, tellur, selen og antimon. Hit høyrer Bi_2Te_3 , Bi_2Se_3 og Bi_2Sb_3 , forutan rein Bi og Sb og ein del andre variantar, og dopa utgaver av desse. Også gruppe IV-grunnstoffet tinn (Sn) kan nemnast, t.d. i samansettinga SnTe . Tinn inngår også i blanding med bly (Pb) i $\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$ og $\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Se}$, som er materiale der TI-eigenskapen er stabilisert ved *krySTALLINSK* symmetri.^(6,7) Materiale av eit noko anna slag er samarium heksaborid SmB_6 , som mange no er interesserte i, og det er også stor interesse for såkalla "halv-heuslermateriale", t.d. lantan-platinavismutat (LaPtBi) og andre liknande.

For oss norske kan det vere av interesse at i denne samanhengen blir nemnt eit naturleg mineral med norsk finnestad og norsk namn, kobolt-triarsenidet (CoAs_3), kjent under namnet *skutteruditt* etter Skutterud ved Modum. Skutterudittar er også kjendte som gode termoelektriske materiale, ein eigenskap dei deler med m.a. Bi_2Se_3 og Bi_2Sb_3 .

TI som ein kjenner i dag, er i stor grad avgrensa til låge temperaturar, men TI-eigenskapar ved romtemperaturar ville vere særst interessante for teknisk utnytting. Sn-Pb-Te og Sn-Pb-Se-materiala har TI-eigenskapar til godt over 100 K temperatur, og blir rekna som lovande for utvikling av høgtemperatur-TI.

Utnytting av TI

Fenomenet "Topologiske isolatorar" er eit særst aktivt forskingsfelt i teoretisk faststoffysikk, og er av stor fundamental interesse. Det er likeeins stor interesse for TI-materiale for mulege tekniske bruksområde. Her blir serleg framheva bruk i eventuell framtidig "spinntronikk", som er elektronikk basert på utnytting av *elektronspinn*. Eit godt eksempel finst på spinntronikk som alt er i bruk: magnetiske lesehovud for utlesing frå harddiskar, ved bruk av "gigantisk magnetoresistans". Men utover det er det framleis ein lang veg å gå før spinntronikk får eit gjennombrot i teknisk samanheng.⁽⁸⁾ Fordelen med spinntronikk skal vere kortare reaksjonstider enn i dagens ldningsbaserte elektronikk, og spinntroniske installasjonar basert på TI verkar spesielt attraktive, fordi signaltransporten kan ventast

å bli særst robust mot forstyrringar. Også i samband med eventuelle framtidige "kvante-datamaskinar" blir spinntronikk nemnt.

Appendiks

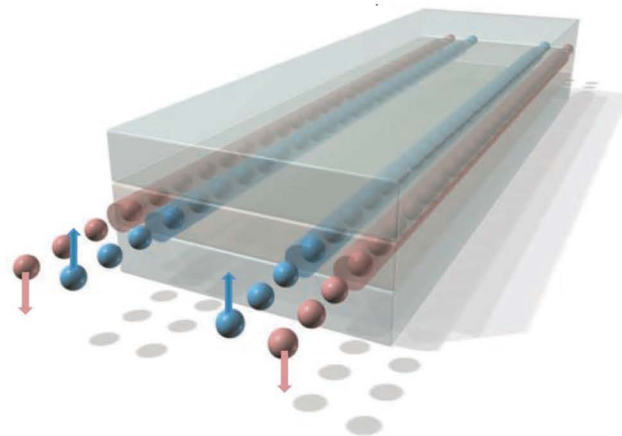
Spinn-banekopling

Spinn-banekopling betyr at det er *kopling mellom elektronspinn, S , og banespinn, L* , som inngår i energioperatoren for systemet som $\mathcal{H}_{s-o} = \gamma \mathbf{L} \cdot \mathbf{S}$, med γ som ein koplingsparameter. Elektronspinnnet er som kjent hovudansvarleg for magnetisme i faste stoff, og spinn-baneleddet kan styre L og S til å vere parallelle eller antiparallelle, avhengig av forteiknet til γ . I begge tilfelle kan systemet sjølv innrette seg slik at elektronspinnnet tar retning loddrett på elektronbanen og prøveflata, og derved skapar kantstraumar som sirkulerer langs ytterkantane.

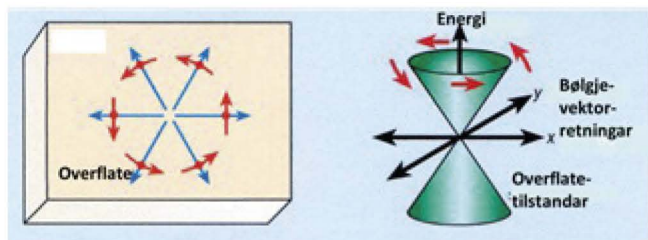
Her er det eit poeng at vinkelimpulsar som L og S kvar for seg er av ein slik natur at dei skiftar forteikn om ein tenker seg *tida* skifte forteikn, men produktet $L \cdot S$ blir verande det same, og er altså *tidsinvariant*. På det grunnlaget kan ein vente at det etter teorien skal kunne gå *to motgåande* elektronstraumar (både $+L$ og $-L$) langs kanten, og at spinnnet for elektrona i dei to straumane også er motsette ($+S$ og $-S$), som illustrert i figur 5.

Tredimensjonal TI og electronenergi

På venstre side av figur 6 er illustrert at overflatestraumen kan gå i alle retningar, og at spinnnet alltid er retta loddrett på elektronretninga.



Figur 5. Skjematisk framstilling av 2d topologisk leiing. Pluss-spinnelektron (blå kuler med pil opp) og minus-spinnelektron (lysraud kuler med pil ned) går i kanalar ved kantane. Ved eksperimentell påvising av 2d TI var det aktive, midtre sjiktet HgTe, av tjukkeleik 6–12 nm. Sjikta over og under var kadmiumdopa HgTe (Etter ref. (2) med løyve).



Figur 6. Til venstre elektronstraumretningar (blå piler) på overflata av ein 3d TI med spinn (raude piler) loddrett på. Til høgre energidispersjonsrelasjonen vist som kjegler, dvs. energien er lineær mot bølgevektoren. NB! Dei raude pilene viser spinn, og ikkje sirkulasjonsretning! (Etter ref. (4) med løyve).

Høgre side viser teoretisk relasjon mellom energi og bølgevektor ($k = 2\pi/\lambda$ i $\text{\AA}^{-1}$; λ er elektronbølglengda) for overflateelektrona (dispersjonsrelasjon). Vi går ikkje inn på utleiinga for dette, men nøyer oss med å konstatere at elektronenergien er *lineært* proporsjonal med elektronet sin bølgevektor, ulikt tilsvarende *parabolske* (dvs. kvadratiske) relasjonar for elektron inne i materialet. På figuren har denne relasjonen form som ei kjegle, fordi han illustrerer relasjonen i eit plan (x-y-plan).

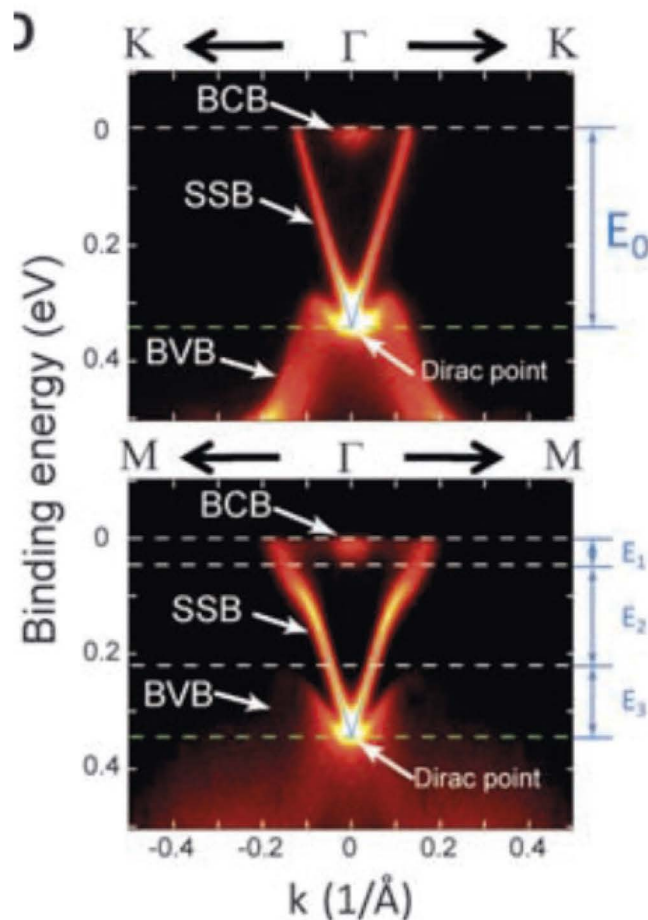
Lineær dispersjonsrelasjon for partikkeltilstandar blir kalla *dirac-eksitasjonar*, som gjeld for "masselause" partiklar som foton (lys). Dirac-eksitasjonar forekjem også i det todimensjonale materialet grafén, som i mange samanhengar er eit interessant elektronisk materiale.⁽⁹⁾ Men i grafénet sitt karbon, C, som er eit lett grunnstoff (nr. 6), er spinn-banekoplinga for svak til at grafén kan klassifiserast som eit TI-materiale. Interessante TI-materiale innheld tyngre atomslag.

Fotoelektronspektroskopi av TI

Med fotoelektronspektroskopi kan viktige detaljar om energispektret til overflateelektrona studerast. På engelsk heiter metoden "*Angular resolved photoelectron spectroscopy*" (ARPES).

I ARPES blir prøva belyst av monokromatisk ultrafiolett lys, som frigjer elektron frå overflata. Dei frigjorte elektrona blir analyserte med omsyn på energi, retning og spinn, og det gir mellom anna informasjon om dispersjonsrelasjonen mellom elektrona sin energi og vinkelbølgevektor i valte retningar i prøva.

Figur 7 viser målte dispersjonsrelasjonar, dvs. bindingsenergi (i eV) mot vinkelbølgevektor for elektron, observert med ARPES i Bi_2Te_3 ved temperatur 15 K. Kurvene merka SSB (*surface state band*)



Figur 7. Fotoelektronspektra av Bi_2Te_3 i to retningar (kalla K-G-K og M-G-M). Overflatesignalet er dei V-forma kurvene merka SSB (*surface state band*), som er signaturen til TI. BVB og BCB er frå det indre av materialet (*bulk valence band* og *bulk conduction band*). (Etter ref. (6) med løyve).

band) viser overflateelektron, mens BVB (*bulk valence band*) og BCB (*bulk conduction band*) er merka for elektron i det indre ("bulk"). Både indre elektron og kantelektron er altså til stades. Det V-forma bildet illustrerer at elektrona har den forventede dirackarakteren. Prøva var av millimeterstorleik.

Referansar

1. B.A. Bernevig og S-C. Zhang: *Quantum spin Hall effect*. Physical Review Letters **96**, 10682-1-4 (2006); B.A. Bernevig og medarbeidarar: *Quantum spin Hall effect and topological phase transition in HgTe quantum wells*. Science **314**, 1757–1761 (2006)
2. M. König og medarbeidarar: *Quantum spin Hall insulator state in HgTe quantum wells*. Science **318**, 766–770 (2009)
3. Saul Stahl og Catherine Stenson: *Introduction to topology and geometry*. Bok 2. utgave. John Wiley & Sons (2013)

4. C. Kane og J. Moore: *Topological insulators*. Physics World **24**, 32–36 (2011)
5. Y.L. Chen og medarbeidarar: *Experimental realization of 3d topological insulator, Bi_2Te_3* . Science **325**, 178–181 (2009)
6. Y. Tanaka og medarbeidarar: *Experimental realization of topological crystalline insulators*. Nature Physics **8**, 800–803 (2012)
7. P. Dziawa og medarbeidarar: *Topological crystalline insulator states*. Nature Materials **11**, 1023–1026 (2012)
8. A. Hirohata og K. Takanashi: *Future perspectives for spintronic devices*. J. Phys. D: Appl. Phys. **47**, 1930001–40 (2014)
9. Emil J. Samuelsen: *Grafén i fokus*. Fra Fysikkens Verden **76**, Nr. 2, 60–62 (2014)

∞

Maglev: Det flygande toget

Kristian Fossheim *

Magnetisk leviterte tog med fart på 500 km/time og meir, er den einaste revolusjonerande nye form for passasjertransport som er utvikla etter at flyet vart oppfunne. I denne artikkelen gjer vi greie for dei fysiske prinsippa som ligg til grunn for den elektrodynamiske versjonen, EDS, som Japan satsar stort på i sitt superleiande Maglev-prosjekt. Første etappe blir opna i 2027.

Innleiing

Alt for 30 år sidan siterte Aftenposten denne artikkelforfattaren på at det i framtida vil vere teknisk mogeleg å reise med magnetisk leviterte, "flygande" tog mellom Trondheim og Oslo, ei strekning på 500 km, på ein time. I Tyskland var slik testfart demonstrert alt i 1979. I dag er slike superraske tog ikkje lenger berre ein teknologisk framtidsvisjon. Det er ein realitet både i Japan, på ei 42 km testlinje, og i Kina som flytog på ei 30 km strekning i Shanghai. Japan har gått vidare, og tek ei klart førande rolle i verda med sitt Maglev. Vi vil heretter bruke namnet Maglev berre om det japanske toget, ofte referert til som *superconducting Maglev*. Når dette prosjektet bør interessere fysikarar, er det mellom anna nettopp fordi superleiarar (sjå faktaboks) har ei sentral rolle. Maglev representerer eit tidsskifte i passasjertransport,

og er eit teknologiprojekt som i kostnad direkte kan samanliknast med heile det amerikanske Apollo-programmet, inklusive månelandinga, i tidsrommet 1959–1973.

Ideen om å bygge magnetisk leviterte tog er over 100 år gamal.⁽¹⁾ Det møysommelege arbeidet med utvikling av denne teknologien har ei historie som er for lang til å gå inn i her. I hovudsak har arbeidet basert seg på to konkurrerande konsept. Desse blir omtala som *electromagnetic suspension* (EMS), og *electrodynamic suspension* (EDS). Ein viktig praktisk skilnad mellom dei er at svevehøgda med EMS er berre 1 cm, mens den for EDS er 10 cm. Mellom anna dette gjer at EDS er langt å føretrekkje ved høg fart. EDS er ein totalt stabil teknologi. Om straumen går, krusar toget inn til stans på hjul. Det er denne teknologien Japan satsar på med sitt Maglev, mens tysk industri har falle ned på EMS i togsystemet *Transrapid*. Av plassomsyn skal vi i denne artikkelen berre diskutere EDS.

Maglev utkonkurrerer flyet

Til samanlikning kan det vere greitt å ha i minnet to konvensjonelle hurtigtog: det franske TGV og det japanske Shinkansen (populært kalla *bullet train*). Ein fart på 250–300 km/time kan reknast som høg fart for begge desse. I passasjertransport er høg fart svært viktig. Shinkansen på strekninga Tokyo–Osaka (Tokaido Shinkansen) transporterer over 150 millionar passasjerar årleg. Det går opptil 13 fulle

* Institutt for fysikk, NTNU, Trondheim.

tog i timen i kvar retning – kvart med 1300 passasjerar – på denne strekninga.

Ein fart på 500 km/time kan vi sjå som ein god referanse for høg fart med magnetisk leviterte tog basert på EDS. Å reise med eit slikt tog mellom to byar vil innebere nær to timar innspart tid samanlikna med ein flytur, fordi reisene til og frå flyplassane er eliminerte. Det japanske superhurtigtoget, Maglev, som hausten 2014 vart vedteke utbygd, har alt i mange år vore under fullskala utprøving, (sjå foto av toget på figur 1), og i april 2015 kunne prosjektleiinga notere fartsrekord med 603 km/time. I Kina tok dei i bruk det tyske Transrapid som flytog i Shanghai for over 10 år sidan. Byggekostnaden var 1,33 milliardar US \$. På den 30 km lange strekninga er reisetida litt over 7 minutt.

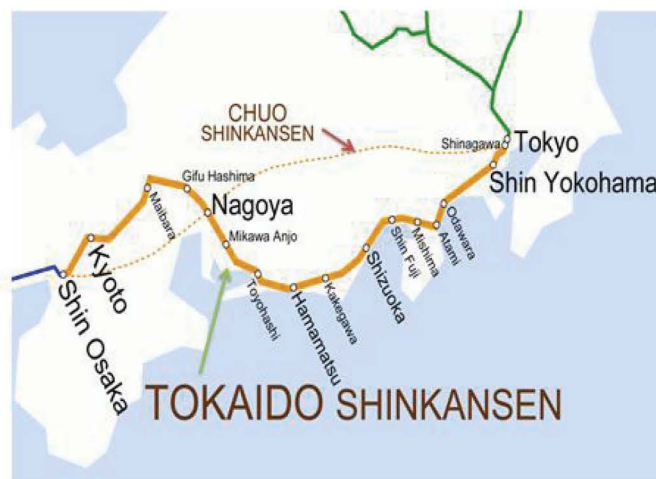


Figur 1. Det japanske toget Maglev i sin "guideway". Spolane som ligg inne i dei solide bjelkeveggane (spolehus) på begge sider av toget, vekselverkar med superleiar-magnetane og både løfter toget, driv det fram og styrer det. (For å sjå dette toget i fart, skriv inn teksten: "riding the superconducting maglev train" på Google). Den spesielle "snuten" hjelper til med å redusere luftmotstanden, den viktigaste friksjonskrafta.

Likevel er flytoget i Shanghai mest som eit "leiketog" samanlikna med Maglev, som Central Japan Railway skal setje i drift på den 286 km lange strekningen Tokyo–Nagoya i 2027, med ein marsjfart på 505 km/time, og seinare bygge ferdig heilt fram til Osaka i 2045 (sjå kart, figur 2).

Det er venta at flyet blir heilt utkonkurrert på denne strekninga. Sitat frå japansk studie:⁽²⁾

Travel time is of great importance to Japanese travelers. For example, a 50 % travel time reduction by the proposed superconducting maglev HSR in the Tokyo–Osaka market is expected to wipe out airline travel in this route.



Figur 2. Kartet viser lina til dagens hurtigtog (tjukk strek), Tokaido Shinkansen, mellom Tokyo og Osaka, og det framtidige Chuo Shinkansen (Maglev, tynn strek) på strekninga Tokyo–Nagoya–Osaka.

Ikkje berre vil reisetida bli korta ned med Maglev, men togtransporten vil gå utan CO₂-ureining, altså med ein stor miljøvinst samanlikna med fly. Maglev-toget vil vere i fullt samsvar med vår tids krav til miljøriktig energibruk. Det er bruken av superleiande magnetar om bord i toget som gjer den mest avanserte og raskaste forma for Maglev mogeleg. Dette seier mykje om det tekniske nivået. Japan satsar her stort på den mest avanserte forma for bakketransport som er utvikla til nå.

Finansiering

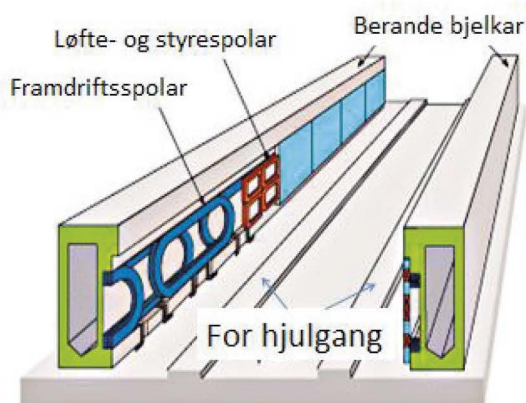
Maglev blir bygd av det private selskapet Central Japan Railway Company som finansierer heile prosjektet sjølv, utan statsstøtte. Den medfølgjande skyhøge investeringskostnaden på minst 70–80 milliardar dollar skal venteleg kunne betale seg ved relativt liten fysisk slitasje og enorm passasjermengde. Energikostnaden vil, ikkje særleg overraskande, vere største posten i driftsbudsjettet, godt over 50 %. Når styresmaktene er så positive til prosjektet, er det sjølv sagt basert på tillit til dei samfunnsøkonomiske vinstane. Tilliten og optimismen i marknaden er stor. Aksjekursen for Central Japan Railway Company har auka med ein faktor 3 dei siste to åra.

Teknologi og energibruk

Magnetisk leviterte tog er altså ein prinsipielt ny transportmetode samanlikna med all tidlegare

hjulgåande transport, ja eigentleg det einaste verkeleg nye massetransportmiddelet sidan flyet vart oppfunne. Der er ingen bevegelege delar, anna enn toget sjølv. Tog og spolar i "guideway" (sjå figur 1 og 3) utgjer til saman det som blir kalla ein lineær motor. Maglev er basert på utnytting av elektromagnetiske krefter etter enkle grunnprinsipp i fysikken: 1) Faradays og Lenz' lover ligg til grunn for både bere- og styreprinsippet for toget i sin kanalforma guideway, og 2) Framdrift skjer etter prinsippet for ein lineærmotor, der viklingane langs heile guidewayen utgjer statoren, og togsettet sjølv fungerer som den bevegelege rotoren, takka vere vekselverknaden mellom framdriftsspolane i guidewayen og polane i dei superleiande magnetane. Ein kan sjå det slik at eit segment av den vanlege sirkulære motorforma er forstørra opp til ein radius som jordradien, og dermed følgjer jordoverflata, noko vi opplever som rettlinja transport. Eit kort segment av statoren er illustrert i figur 3.

Langsgåande spolehus og skinner (Guideway)



Figur 3. Stator i lineærmotoren for Maglev: Spolehus med viklingar for løfting, styring og framdrift. Toget er skinnegåande på gummi hjul berre under akselerasjon til marsjfart, og under nedbremsing. Toget løfter seg når farten er over 130 km/time. Då svevar det 10 cm over skinnegangen.

Det kan vere på sin plass her å fastslå kva Lenz' lov seier for vårt tilfelle: Når ein magnetpol bevegar seg nær ein elektrisk spole, blir det indusert ein straum i spolen som søkjer å motverke årsaka. Dermed oppstår det eit magnetfelt i spolen som vil ha anten N- eller S-polaritet, og ein kraftverknad som vil vere fråstøytande eller attraktiv, avhengig av om magneten bevegar seg i retning til eller frå straumsløyfa. Og i tillegg: Di raskare magneten bevegar seg, di sterkare straum og di sterkare magnetfelt vil spolen generere. Det er dette som ligg til

grunn for all verknad dei superleiande magnetane i toget har. Maglev med superleiarmagnetar løfter seg difor ikkje i det heile når toget står i ro. (Dette er motsett av EMS-teknologien). Først når toget når ein fart på minst 130 km/time vil kreftene som løfter toget vere sterke nok til at toget "tar av" frå skinnegangen.

Men om prinsippa er enkle, er teknikken likevel kompleks, og må kunne seiast ikkje å stå noko tilbake for til dømes moderne passasjerfly i så måte. Og flyr gjer det då og, utan fysisk kontakt med korke skinnegang eller sidevangar under marsjfart.

Friksjonskreftene kjem frå luftmotstand, og set ei praktisk grense for kor høg fart toget kan bruke. Vi kan her minne om Rayleighs likning, som seier at luftmotstanden for ein gjenstand med tverrsnittsareal A , som bevegar seg med høg fart, v , i ei væske eller ein gass med tettheit ρ , møter ei friksjonskraft (*drag force*), F_d , som er proporsjonal med kvadratet på farten:

$$F_d = 1/2 C_d A \rho v^2$$

Her er C_d ein numerisk konstant, avhengig av forma på gjenstanden som er i bevegelse. Energi-forbruket per sekund er produktet av kraft og fart, og går difor med tredje potens av farten:

$$E_d = F_d v \propto A \rho v^3$$

Dette tyder at om Maglev skulle auke marsjfarten frå 500 km/time til 600 km/time, ville det auke effektforbruket med 73 %. Samtidig går reisetida ned, så energiforbruket ville auke med 30 %. Lufttettheiten ρ ved jordoverflata er ei ulempe for tog samanlikna med fly som kan velje å gå opp i svært tynn atmosfære.

Tryggleiksaspekt må og vege sterkt inn i vurderingane når det gjeld fart. Japanske jarnbaner har eineståande rulleblad på tryggleiksområdet. Valet har falle på ein toppfart på 505 km/time. Gjennomsnittsfarten på strekninga Tokyo – Nagoya er planlagd til 429 km/time. Maglev har høg akselerasjon og retardasjon. Maksfart blir oppnådd på omkring eitt minutt. Mykje av energien som går med til akselerasjon, blir gjenvunnen under nedbremsing. For energibruken er det viktig at energien i spolane berre blir tilført på ei kort strekning av guidewayen, der toget faktisk er til kvar tid. Styring av toget må vere komputer-automatisert. Eit menneske kan rett og slett ikkje reagere raskt nok.

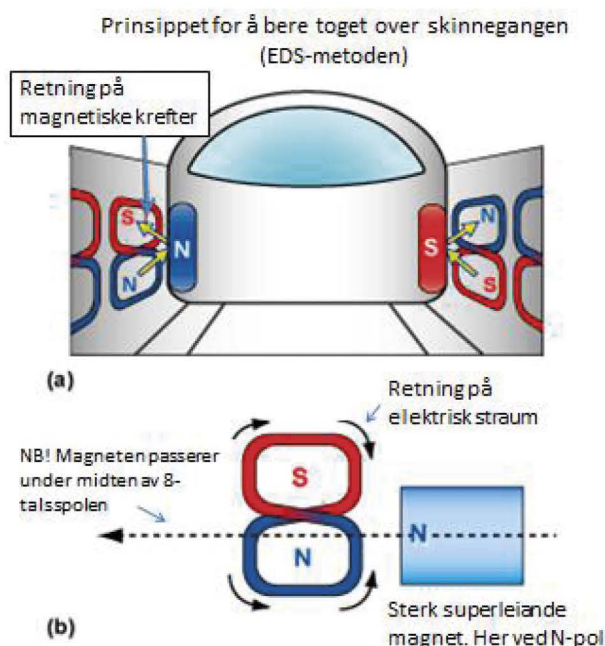
Når det gjeld energibruk generelt, går det føre seg ein intens konkurranse "på papiret" mellom ulike modellar av Transrapid og Maglev. Men det

er ingen tvil om at denne nye typen togtransport er konkurransefør samanlikna med konvensjonelle tog når passasjergrunnlaget er stort nok. Energibruken er effektiv og vedlikeholdet svært lågt. Mange land er i dag i "startgropa". Vyene, til dømes i USA, er store, men berre tida vil vise kva dei faktisk kan realisere.

Bygginga av guideway for Maglev er svært omfattande, men den mest kostnadsdrivande faktoren er likevel det at nær 90 % av togstrekninga skal leggast i tunnel, til dels djupare enn 40 meter. Dette skuldast mellom anna at toget skal leggast i tunnel under utbygde byområder der det alt finst etablerte installasjonar og eigedomsrettar ned til ei viss djupt under bakken.

Den elektrodynamiske metoden

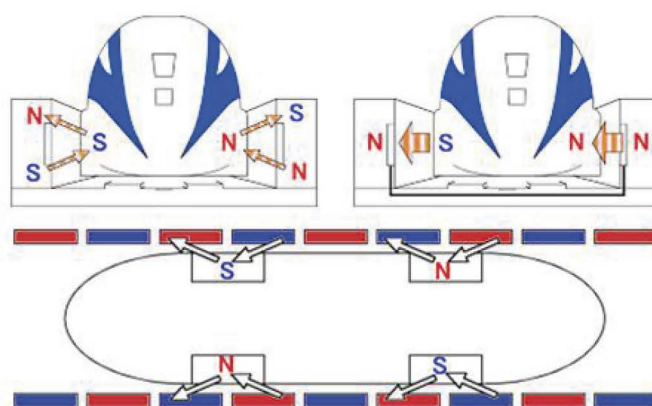
Løfte- og styringsprinsipp for Maglev er illustrert i figur 4.



Figur 4. Løfte- og styringsprinsipp for Maglev. (a) viser konfigurasjon av 8-tals spolar i guideway, og superleiande magnetpolar i toget. Kraftverknad mellom desse løfter og styrer toget. Polaritetane er motsette på motsette sider av toget. Dermed samverkar alle krefter både til å bere toget oppe, og til å halde det på plass sidevegs i guideway. (b) viser detaljar der N-magnetpol i toget passerer 8-tals spole. Begge delsløyfer bidreg til løftet. (Figur frå http://www.hk-physics.org/articles/maglev/maglev_e.html/)

Status

Når Maglev-togstrekninga på 286 km mellom Tokyo og Nagoya opnar i 2027, som den første delen av Chuo Shinkansen, blir turen tilbakelagd på 40 minutt, med ein marsjfart på 505 km/time. Hittil er det bygd ei strekning på 42 km, den såkalla Yamanashi Maglev Test Line, for utvikling og utprøving av toget. Toget skal ha seks stoppestadar mellom Tokyo og Nagoya. Komplexiteten i Maglev-teknologien er forsøkt illustrert i figur 6.



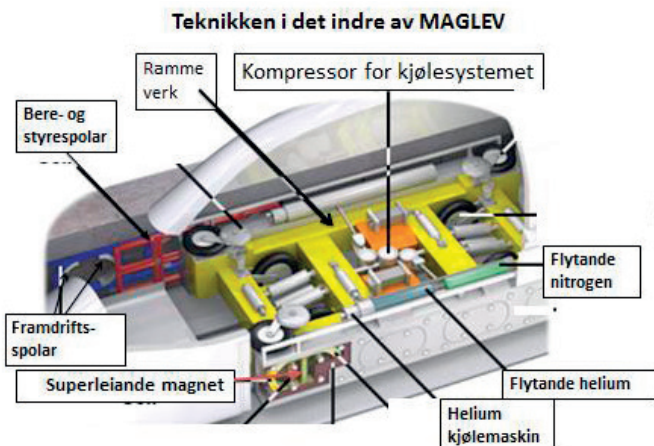
Figur 5. Øvt til venstre: Prinsippet for å bere toget oppe ved EDS-teknologi (sjå og teksten til figur 4).

Øvt til høgre: Spolane er kopla saman under togsinnene. Om toget kjem nærare spolen på den eine sida, genererer det ein straum i spolen som skapar fråstøying på den sida av toget, og ei attraktiv kraft på motsett side der toget er lengst unna. Dette utgjør ei sjølvregulerande mekanisme for å halde toget på plass midt i guidewayen.

Nedste figur viser toget i fart mot venstre, og illustrerer magnetpolkonfigurasjonane i spolar og magnet på eit bestemt tidspunkt. Alle samverkar til å dra toget mot venstre. I neste augneblink har toget flytta seg eit hakk mot venstre. Polane i magnetane i toget er uendra, men AC-straumen i spolane må nå ha skifta polariteten for å oppretthalde draget forover (mot venstre). Kor fort denne endringa skjer, er bestemt av frekvensen. Det er altså frekvensen i AC-straumen i spolane som bestemmer farten til toget.

Vi har understreka at superleiarteknologi er viktig i dette teknologieventyret. Dette er historias andre storskalabruk av superleiar ved sida av MR. Vegen frå oppdaging av superleiar til storskalabruk i Maglev, og til dømes i CERN i Genève, er ein odysse i forskingsuniverset som er ganske einestående i vitenskapshistoria. Noko av den historia er nedfelt i boka om 10 nobelprisvinnarar,⁽³⁾ og i læreboka "Superconductivity: Physics and applications."⁽⁴⁾

I denne artikkelen har vi sett på eitt prosjekt i Japan. Men forutan Shanghai har også Korea bygd eit svevetog, og der er planar om bygging av



Figur 6. Innblikk i kompleksiteten i teknologien i Maglev. Vi lar figuren tale for seg sjølv. Legg merke til at kjøleanlegg for både flytande nitrogen (77 K) og flytande helium (4,2 K) kreves for kvar magnet i toget.

ulike svevetog i fleire land. I Kina vil det om kort tid bli teke i bruk eit nytt flytog, liknande som i Shanghai. Eit oversyn over historie og framtidige planar i fleire land finst til dømes på nettstaden <https://en.wikipedia.org/wiki/Maglev>. Men ein må hugse på at slike artiklar ofte manglar oppdatering. Andre liknande tog som *Chuo Shinkansen Maglev*, ser vi ikkje konturane av i dag.

Superleiar

For lesarar som ikkje er kjende med superleiing, skal vi kort nemne nokre fakta: I 1911 vart superleiing, det vil seie leiing av elektrisk straum utan motstand, oppdaga i nedfrosne kvikksølv. Seinare har nye metalliske grunnstoff og legeringar vist same eigenskap, etter kvart også ei lang rekke andre typar materiale, til dømes krystallinske koparoksid og organiske faststoff. Felles for dei første superleiarane som vart oppdaga, var at dei alle måtte kjølast ned mot temperaturar i området 0-20 K. Dette var situasjonen heilt til 1986-87, då forskarar ved IBM-laboratoria i Rüschlikon ved Zürich, i USA, Japan og Kina braut barrieren som syntes å eksistere i området 20-40 K. Diverse koparoksid var dei første materiala som viste seg å opne opp for ei sensasjonell nyutvikling. Nå klatra temperaturen for superleiing raskt oppover, passerte kokepunktet for nitrogen ved 77 K, og nådde i eitt tilfelle over 160 K. Nasjonar som Sveits, Japan, Kina og USA vart dei førande. Norske forskarar ved NTNU, SINTEF, Universitetet i Oslo, og på Kjeller deltok aktivt. Superleiarar har hittil funne sin viktigaste bruk til magnetar, særleg i MR-utstyr, som blir brukt på sjukehus verda rundt. Sjå ref. 4.

Referansar

1. Mesteparten av stoffet i denne artikkelen, både fakta og illustrasjonar, er bygd på ei lang rekke Internett-kjelder, mellom anna på artiklar og figurar i Wikipedia. Det er i denne situasjonen mest uråd å finne ut kven som eigentleg har opphavsrett til figurar som blir brukte ulike stader utan referanse. Men heimesidene til *Central Japan Railway Company* har vore spesielt viktige og etterrettelege.
2. Xiaowen Fu, Tae H. Oum, and Jia Yan An: *Analysis of Travel Demand in Japan's Inter-city Market: Empirical Estimation and Policy Simulation*. Forthcoming in *Journal of Transport Economics and Policy*.
3. Kristian Fossheim: *Superconductivity: Discoveries and discoverers. Ten physics Nobel laureates tell their story*. Springer (2012)
4. Kristian Fossheim and Asle Sudbø: *Superconductivity: Physics and Applications*. Wiley (2004)

∞



Belysningsteknologiens rivende utvikling

Robert G. Berntsen * og Øyvind G. Grøn * *



Vi gir en kort oppsummering av lyspærenes historie. Deretter presenterer vi en del begreper som er mye brukt innenfor belysningsteknologiens fagområde. Videre forteller vi om forskjellen på ulike typer lyspærer og runder av med å gi en oversikt over lyspærenes egenskaper.

Innledning

I desember 2013 vedtok FNs generalforsamling at 2015 skulle være *Det internasjonale året for lys og lysteknikk*.

Menneskers daglige aktivitet er avhengig av lys. Tilgang på lys etter mørkets frembrudd er en viktig faktor i det kulturelle liv så vel som i det daglige arbeidet for mange mennesker. I utviklingsland er tilgang på kunstig belysning i den mørke tiden av døgnet en utfordring ikke minst økonomisk. Tilgang på elektrisitet mangler for mer enn 1 milliard mennesker i verden. Nye avanserte og energieffektive lyskilder har allerede gjort sitt inntog i denne delen av verdens befolkning. Lyskilder kombinert med solcellelading har skapt nye muligheter for millioner av mennesker.

I 2012 var verdens forbruk av energi ca. 105 000 TWh. Av dette var 18,1 % elektrisitet.⁽¹⁾ Det Internasjonale Energibyrået, IEA, anslår at rundt 20 % av verdens elektrisitetsforbruk i dag går til belysning. I tillegg kommer lys på båter, fly, tog, biler, plattformer til havs osv. Lyskilder som bruker mindre strøm, er derfor av stor global betydning i tillegg til at det kan redusere kostnadene lokalt.

For oss mennesker er synlig lys elektromagnetisk stråling i bølgelengdeområdet 380 til 750 nm. Lys beskrives i dag dels som bølger og dels som partikler kalt fotoner. Et foton er et lyskvant med energi $E = hc/\lambda$, der h er planckkonstanten, c er lyshastigheten og λ er bølgelengden.

Historien om elektrisk belysning

Elektrisk belysning kom som en følge av at et praktisk batteri ble utviklet ca. år 1800. To parallelle utviklingsløp for lyskilder startet nesten samtidig. Den første lysbuelampen ble utviklet i 1802 og var starten på en rekke varianter og forbedringer som førte til dagens gassutladningslamper, lysrør, sparepærer, xenonlamper i biler og varianter som kvikksølvdamplamper, natriumdamp-lamper osv. Gassutladningslamper er en klasse lyskilder som brukes for å lyse opp veier, idrettsplasser og veldig store lokaler. Virkemåten minner om lysrør, men i tillegg til, eller i stedet for, kvikksølv inneholder lampen metallhalider, natrium og gasser som til sammen gir tilnærmet hvitt lys og høy virkningsgrad. Xenonlamper for billykter tilhører denne kategorien.

Nesten samtidig med utviklingen av lysbuelampen startet en utvikling av glødetrådspærer. Utviklingen av glødetrådspærer foregikk gjennom hele 1800-tallet. Frem til 1880 ble det benyttet et filament (glødetråd) av platina eller iridium. Mye av utviklingen dreide seg om å utvikle nødvendig teknologi som f.eks. å tømme lyspærer for luft. I perioden 1860–1902 ble kullfilamenter benyttet av blant andre Swan og Edison, og særlig Edison lyktes, sannsynligvis fordi han fikk til å lage lyspærer med vakuum. I 1902 startet æraen med metallfilamenter. Først tantal, frem til 1909, og senere wolfram som tok helt over som filament. Problemet med wolfram var bearbeidingen av metallet til tynne tråder. Wolfram er vanskelig å forme. En rekke forbedringer som spiralisering og dobbelspiralisering, av filamentet har økt lysmengden pr. watt.

Nye typer lyspærer

Den tredje grenen av lyskilder (i tillegg til lysbuelamper og glødetrådslamper) er lysemitterende dioder (LED). Utviklingen med LED-pærer har virkelig satt fart i overgang til ny teknologi. Nobelprisen i fysikk for 2014 gikk til tre japanske forskere

* rgberntsen@yahoo.com

* * oyvind.gron@hioa.no

som har bidratt til å utvikle blå LED-kilder og dermed gjort det mulig å konstruere LED-lyskilder som gir tilnærmet hvitt lys.⁽²⁾

LED-pærer har kommet for alvor ut i markedet de siste tre årene. Teknologien er i ferd med å bli "moden", og de fleste standardpærer for vanlig bruk finnes allerede som LED-lyspærer. Prisene er fremdeles høye, men det lave strømforbruket, ned til en tiendedel av en vanlig glødepære, og levetid som er ti ganger lengre, gjør disse lyskildene meget attraktive.

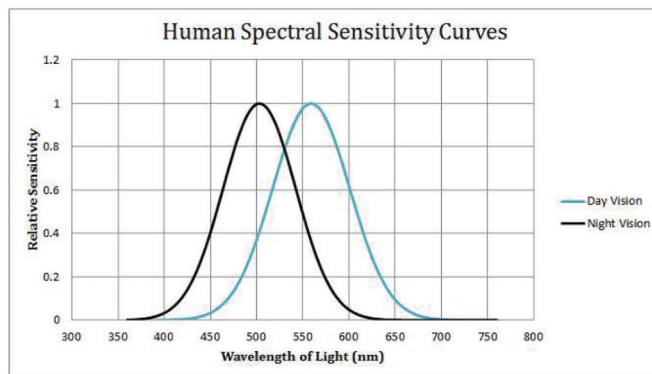
Enheter for lys og belysning

Lysstyrke er definert som lysfluksen i en gitt retning per romvinkelenhet, steradian (sr), og måles i candela (cd). Størrelsen 1 cd defineres nå (fra 1979) som lysstyrken til en monokromatisk lyskilde som sender ut lys med en bølgelengde på 555,17 nm ($540 \cdot 10^{12}$ Hz) og en effekt på 1/683 W/sr: $1 \text{ cd} = 1/683 \text{ W/sr}$.

Dette brukes for å kalibrere måleutstyr. Bølgelengden er nær grønt, der øyet har størst følsomhet for lys. For andre farger må effekten justeres for at øyet skal se den samme lysstyrken. Tallet 1/683 har sammenheng med at måleenheten tidligere var "normallys", som svarte til lysstyrken fra en bestemt type stearinlys ("candela" kommer fra "candle").

Når man måler "lyseffektiviteten" til en lampe, må man ta hensyn til den spektrale følsomheten for det menneskelige øyet. Følsomheten til øyet avhenger av bølgelengden til lyset og av lysnivået. Ved dagslys ser vi hovedsakelig ved hjelp av "tap-pene" i øyet, og da er følsomheten størst ved bølgelengden 555 nm, som svarer til grønt lys – det området der sola har størst strålingsintensitet. (Darwin ville neppe kalt dette en tilfeldighet.) Dette kalles det fotopiske synsområdet og omtales til vanlig som "dagsyn". Ved nattnsyn er det særlig "stavene" i øyet som sørger for at vi ser, og da er følsomheten størst ved bølgelengden 507 nm, som svarer til blå-grønt lys. Dette kalles det skotopiske synsområdet eller "nattnsyn" (figur 1).

I mørke har vi sjelden fullt nattnsyn, for "lysforurensning" (slik en astronom ser det) finnes de fleste steder der det er mennesker. I stedet vil den spektrale følsomheten til øyet innstille seg mellom dagsyn og nattnsyn. Dette kalles det mesotopiske synsområdet. Ved slik belysning vil øyets følsomhetskurve ligge mellom den svarte og den blå kurven i figur 1.



Figur 1. Følsomhetskurver for øyet. Kurvene viser "relativ følsomhet" som funksjon av lysets bølgelengde for nattnsyn (svart kurve) og dagsyn (blå kurve). Relativ følsomhet er et mål for hvor mye lys som øyet må motta for å danne et synsinntrykk, normert til å ha verdien 1 ved øyets maksimale følsomhet.⁽³⁾

Den totale lysfluksen en lyskilde sender ut, måles i enheten lumen (lm). $1 \text{ lm} = 1 \text{ cd} \cdot 1 \text{ sr}$.

Romvinkelen til hele kulesfæren er 4π sr. Hvis en lyskilde med en lysstyrke på én cd sender ut like mye lys i alle retninger, blir lysfluksen $1 \text{ cd} \cdot 4\pi \text{ sr} = 12,57 \text{ lm}$.

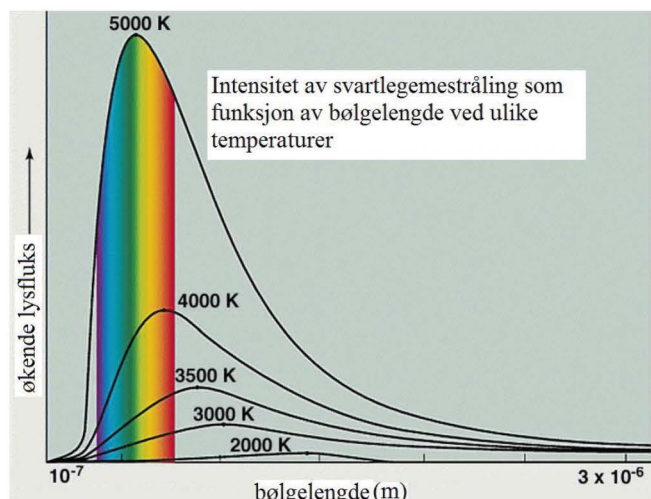
Belysning er lysfluks per flateenhet som faller på en belyst flate, og måles i lux (lx). $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$.

Enhetene cd, lm og lx er fotometriske enheter som tar hensyn til øyets spektrale følsomhetskurve (figur 1).

Fargetemperatur

Begrepet fargetemperatur⁽⁴⁾ har sammenheng med fordelingen av bølgelengder (farger i det synlige spektrum) som stråler fra et "svart legeme" ved en gitt temperatur, målt i kelvin. Definisjonen er: *Fargetemperaturen knyttet til en gitt farge er den temperatur et svart legeme må varmes opp til for å avgi lys med intensitetsmaksimum ved denne fargen.* Denne definisjonen er basert på Wiens forskyvningslov som sier at temperaturen, målt i kelvin, til et svart legeme som stråler med maksimal intensitet ved en bølgelengde, λ , er $T = b/\lambda$, der $b = 2,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}$.

Selv om spektret fra varmestråling ser kontinuerlig ut, vet vi fra kvantefysikken at det har en diskret natur. Men for alle praktiske formål kan vi betrakte det som kontinuerlig. Eksempel på stråling fra "svarte legemer" er glødetråden i vanlige lyspærer (og halogenpærer) og fra solens overflate. En teoretisk forklaring på spektralfordelingen (figur 2) ble første gang gitt av den tyske fysikeren Max Planck i 1900 gjennom Plancks strålingslov.



Figur 2. Energispekteret fra et "svart legeme" ved ulike temperaturer. Den synlige delen av spektret for et menneskelig øye er fra ca. 380 til 750 nm. I en glødetrødslampe med en glødetråd av wolfram er temperaturen typisk omkring 2800 K.

Fargetemperaturen sier noe om fordelingen av lysstyrken i de forskjellige fargene i det synlige spekteret. Hvis lyskilden har mye rødt lys og lite blått lys (lav fargetemperatur), vil objekter i en slik belysning se rødere ut enn i en belysning som inneholder mer blått lys og mindre rødt lys (høyere fargetemperatur). En gitt endring av fargetemperatur ved lav temperatur har en større visuell effekt enn den samme endring ved høyere temperatur.

Lysrør har ikke et slikt kontinuerlig spektrum, men et sammensatt spektrum som skapes ved å bruke en blanding av forskjellige fluorescerende belegg på innsiden av lysrøret. Dette belegget sender ut synlig lys når det utsettes for den ultrafiolette strålingen som kommer fra kvikksølvatomene i røret. Det kombinerte lysspekteret kan da gi en tilnærming til et kontinuerlig lysspektrum som vi får fra svarte legemer. Fargetemperaturen til en ikke-kontinuerlig lyskilde er temperaturen til en kontinuerlig lyskilde med samme lysstyrke og farge som ligner mest.

CIE-Ra verdien

CIE (*Commission internationale de l'éclairage*) har laget en standard for å måle lyskilders evne til å vise fargene til standardiserte objekter i forhold til en referanselyskilde. På pakkene står det enten Ra eller CRI (*color rendering index*) og et tall som gir uttrykk for dette. Vanlige lyspærer har kontinuerlig spektrum og CRI = 100.

CRI-verdien kommer frem ved å sammenligne

en lyskilde som skal testes med en standard kontinuerlig lyskilde ved samme fargetemperatur og måle verdier for et sett med 8 standardiserte fargeprøver. CRI-verdien er gjennomsnittet av testresultatene der 100 er beste resultat. Lysrør har verdier fra 65 til 95, mens moderne LED-pærer kan ha verdier fra 75 til 95.

Hvilken fargetemperatur bør lyset ha?

Synet vårt foretrekker lavere fargetemperatur ved lave lysnivåer, mens ved høye lysnivåer foretrekker vi høyere fargetemperatur. Når lysnivået faller, vil det menneskelige øye gradvis ta i bruk stav-cellene (i motsetning til tappene i fullt dagslys). Se figur 1. Stavene bruker vi ved nattsyn. Stavcellene er mye mer følsomme for blått lys og nærmest blinde for rødt lys. Derfor vil ting se blåere ut for øyet vårt i svak belysning. Dette kalles purkinjeeffekt.⁽⁵⁾

Den hollandske legen Kruithof utførte forsøk for å finne ut hvilket lys som ble oppfattet som mest behagelig og foretrukket.⁽⁶⁾ Kruithof utarbeidet en kurve for fargetemperatur og belysning som var foretrukket, og laget veiledende data for belysning i oppholdsrom hjemme og i arbeidslokaler. Basert på Kruithofs arbeider benyttes i stor utstrekning lysrør med høyere fargetemperatur (3000 til 6000 K, og en belysning på over 500 lux) i arbeidslokaler, mens hjemmebelysning gjerne holdes på 2700 K.

Halogenpærer

En halogenpære er en glødetrødspære som har små mengder halogengass inne i pæren. Halogengassen kan være brom eller jod. Kombinasjonen av halogen og wolfram sørger for det som kan kalles en halogensyklus. Halogenet danner en kjemisk forbindelse (halid) med wolframatomer som fordampes fra glødetråden. Under gunstige temperaturforhold vil halidmolekylet sveve rundt til det treffer glødetråden og spaltes igjen. Dermed har wolframatomet blitt transportert tilbake til glødetråden, og innsiden av glasset holdes rent. Tapet fra glødetråden kompenseres, og det er mulig å holde høyere temperatur på tråden som gir høyere fargetemperatur og større lysutbytte. Halogenpærer holder seg nærmest uforandret gjennom hele sin levetid.

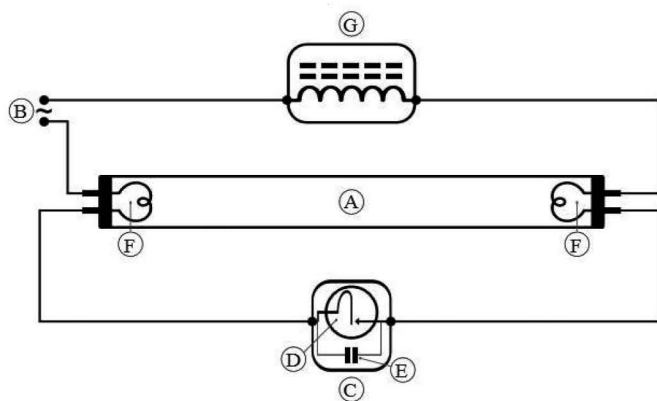
Halogenpærer er laget av kvartsglass for å tåle høyere temperatur og avstanden mellom glasset og

glødetråden er liten, slik at temperaturen i gassen holdes høy i hele volumet.

Lysrør

Et lysrør har en liten mengde kvikksølv pluss en edelgass som kan være argon, xenon, neon eller krypton. Trykket i røret er omtrent 0,3 % av atmosfærisk trykk. Innsiden av røret har et belegg av flere typer fluoriserende stoff. I hver ende har røret elektroder som kan sende ut elektroner i startfasen, typisk laget av wolfram med et belegg av en blanding av barium-, strontium-, og kalsiumoksid som skal sørge for at elektroden kan skape ionisering ved forholdsvis lav temperatur.

Under drift har den elektriske motstanden i lysrøret negativ temperaturkoeffisient (motstanden minker ved økende temperatur i røret, og strømmen vil kunne øke) som innebærer at strømmen i røret må begrenses ved hjelp av en ytre krets (figur 3). Typisk kan det være en induktiv impedans i serie med røret når det opereres på vekselstrøm. For at strømmen som trekkes fra el-nettet skal ha samme fase som spenningen, inneholder armaturen også en kondensator som justerer fasen. Denne strømreguleringskretsen kalles gjerne ballast.



Figur 3. Figuren viser et koplingsskjema for lysrør og armatur. A: lysrør, B: vekselspenning inngang, C: starter, D: startbryter, E: kondensator, F: glødefilamenter, G: ballast (induktiv impedans/spole).⁽⁶⁾

I et lysrør er det kvikksølvatomer som sender ut ultrafiolett lys etter kollisjoner med energirike elektroner. Lysrøret inneholder små mengder kvikksølv og en gass som ioniseres slik at den leder strøm. Det ultrafiolette lyset omdannes til synlig lys i fluoriserende stoff på innsiden av røret. Dette belegget omtales gjerne med fellesbetegnelsen "fosfor". Tiden fra energien tas opp av et atom og til den

frigjøres igjen, ligger på brøkdel av mikrosekunder. For å nå full lysstyrke må kvikksølvet være i dampform. Temperaturen på rørveggen har betydning for at partialtrykket til kvikksølvdamperen skal bli tilstrekkelig.

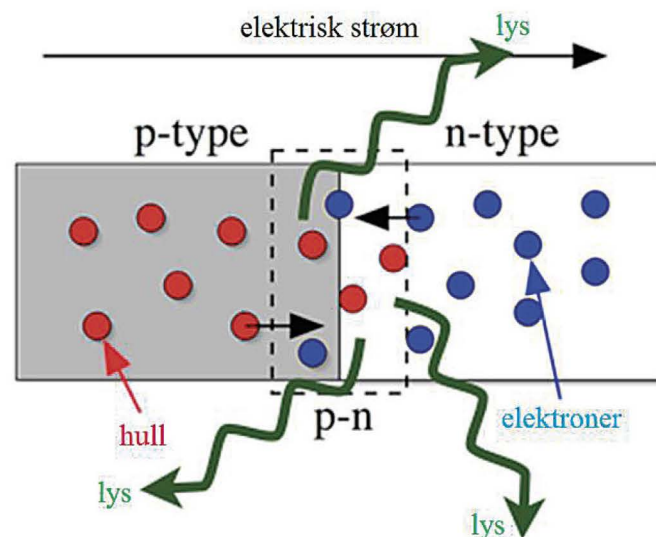
For å starte prosessen i et lysrør trengs det gjerne en spenningspuls i tillegg til ionisering rundt endeelektrodene. Dermed starter et ioniseringsskred inne i røret slik at gassen blir ionisert gjennom hele røret, og strømmen i røret bygger seg raskt opp til den begrenses av den ytre kretsen. Derfor har armaturer for lysrør spesielle startere eller tennere, som sørger for for-gløding av elektrodene og en eller flere startpulser.

Sparepærer

Sparepærer er små lysrør som er bøyd slik at de tar liten plass, og er utstyrt med en elektronisk driverkrets og sokkel som gjør at de kan erstatte vanlige pærer. Egenskapene til lyset og virkemåten er den samme som for tradisjonelle lysrør. Disse små lysrørene inneholder også kvikksølv, og generelt er det et ønske om å redusere bruken av kvikksølv i samfunnet.

LED – Lysemitterende diode

En prinsippsskisse av en lysemitterende diode er vist i figur 4.



Figur 4. Figuren viser en diode som sender ut lys når et elektron kombineres med et elektronhull og frigjør energi som lys.

En LED er en diode som sender ut lys når det går strøm gjennom den. Dette kalles *elektroluminesens*. Dioden består av en overgang mellom en

p-type og en n-type halvleder. I en n-type halvleder er det frie elektroner som man har fått ved å "dope" materialet med små mengder fremmedatomer. De frie elektronene har litt større energi enn elektroner i halvlederens atomer. Man sier at de er i "ledningsbåndet" til halvlederen, som representerer energien til frie elektroner i halvlederen. Tilsvarende i p-type halvledere har man atomer med underskudd på elektroner, som kalles "elektronhull". Disse "hullene" er knyttet til halvlederens såkalte "valensbånd", som representerer energien til de ytterste elektronene i atomene. Et elektron har større energi når det er fritt enn når det er i et atom, dvs. det har større energi i ledningsbåndet enn i valensbåndet.

Det såkalte "båndgapet" til en halvleder er den energien et elektron må tilføres for å gå fra en bundet tilstand (toppen av valensbåndet) til å bli fritt (i ledningsbåndet), slik at det kan bidra til å lede elektrisk strøm.

Når dioden påtrykkes en spenning slik at den leder strøm, vil elektroner fra n-type-lederen passere over til p-type-lederen og kombineres med "hull". Elektronene går fra ledningsbåndet i n-type-lederen og "faller" ned i valensbåndet i p-type-lederen. Dermed taper elektronene energi. Energien som frigjøres, fører til utsending av lys med en frekvens som avhenger av båndgapets størrelse. Jo større båndgapet er, jo mer energirikt blir lyset, og jo høyere er frekvensen, mens bølgelengden er mindre. Fargen på lyset avhenger av hvor stort båndgapet til halvlederen er.

Utviklingen av LED-er har i stor grad dreid seg om å finne halvledere med de riktige egenskapene, og som produserer mye lys når de leder strøm. Nobelprisen i fysikk i 2014 ble tildelt de tre japanske forskerne Shuji Nakamura, Isamu Akasaki og Hiroshi Amano for utvikling av praktiske blå LED-er som har gitt grunnlaget for hvite LED-lamper.⁽²⁾ LED-pærer har nå en virkningsgrad på samme nivå som, eller bedre enn, lysrørsbaserte sparepærer. Det er grunn til å forvente at LED-pærer vil bli betydelig bedre i årene som kommer.

En LED-pære med tilnærmet hvitt lys kan oppnås på forskjellig vis. Den kan bestå av tre LED med henholdsvis rødt, grønt og blått lys, som justeres slik at kombinasjonen oppfattes som hvit for øyet. En slik kombinert LED-pære er avhengig av at diodene beholder den innbyrdes lysstyrken for at fargen skal være uendret. På den andre siden, kan en slik pære ha individuell styring på del-fargene slik at den kan skifte farge under bruk. Den kan bestå

av en blå LED som sammen med "fosfor" omdanner noe av det blå lyset til lengre bølgelengder slik at det til sammen oppfattes som hvitt. Fordelen med fluorescens-baserte lyskilder er at de beholder fargen selv om lysnivået varierer.

Fluorescens

For å gjøre om ultrafiolett eller blått lys til synlig lys og andre farger, brukes et belegg som skaper fluorescens. I lysrør velges fluorescerende materiale som sender ut lengre bølgelengder enn det har absorbert, og med en fordeling som gir ønsket kvalitet på lyset. Det brukes stoffer som inneholder grunnstoffene europium og terbiumioner.⁽⁷⁾ Disse har emisjon i flere farger jevnt fordelt i det synlige spektret, som gir lys med høyt CRI-tall (Ra-tall). For LED-er med blått lys påføres "fosforet" på selve lysdioden slik at noe av lyset absorberes og energien sendes ut igjen med andre farger, slik at totalen ser hvit ut. Navnet "fluorescens" ble valgt i 1852 av George G. Stokes fordi fluoritt med små mengder europium sender ut blått lys når det blir belyst med ultrafiolett stråling. Fluorescens opptrer når et elektron i et molekyl går fra en eksitert tilstand til grunn-tilstanden samtidig med at et foton sendes ut. Typisk for "fosforet" som benyttes i lyskilder, er at et elektron eksiteres til et høyere energinivå ved å absorbere et foton fra den blå eller ultrafiolette delen av spektret, og det sendes ut et foton med lavere energi. En del av den absorberte energien overføres til materialet som varme.

Hvordan blir fremtidens lyskilde?

Vi tror LED-lyskilder vil bli dominerende de nærmeste årene. LED-lyspærer kombinerer nesten alle de beste egenskapene til de forskjellige teknologiene i en og samme pære. Foruten å ha levetid helt opp til 30 000 timer, er virkningsgraden stadig blitt forbedret. Formen og utseende på LED-pærene finnes allerede i nesten alle typer vi er vant med. Fullverdige alternativer for små halogenpærer mangler ennå, men de første LED-lyspærene som kan erstatte små halogenpærer, er allerede på markedet. LED-pærer er allerede i ferd med å ta over markedet for sparepærer.

Et svakt punkt er regulerbare LED-pærer som går inn i vanlige armaturer. Mange LED-pærer lar seg regulere (merket "Dimmable") men ikke riktig slik vi er vant til fra glødetrådspærer. Til gjen-

gjeld har det kommet LED-lys som kan reguleres meget bra av tilpassede regulatorer, og som også senker fargetemperaturen tilsvarende som halogenpærer gjør når de skrus ned.

Allerede er lommelykter, hodelykter, mye av belysningen i nye biler og de første veibelysningene LED-baserte. LED-pærer som brukes i et hjem, vil med gjennomsnittlig 4 timers bruk hver dag, vare i over 20 år. På en hytte som benyttes fem uker hvert år betyr det at en lyspære kan vare i 200 år. Lyspærer kan bli "arvegods".

Referanser

1. Internett: *World energy consumption*.
https://en.wikipedia.org/wiki/World_energy_consumption/
2. Helge Weman: *Nobelprisen i fysikk 2014*. Fra Fysikkens Verden **76**, Nr. 4, 104-107 (2014)
3. Internett: *Understanding photometry and incandescent light sources*.
<http://laser.physics.sunysb.edu/~carolyn/report/>
Se også:
A.I. Vistnes: *Svingninger og bølger*. Kap. 10. *Lysmåling. Dispersjon av lys. Farger*. Internett:
<http://www.uio.no/studier/emner/matnat/fys/FYS2130/v15/laerebokkapitler-2015.html/>
4. Internett: *Farvetemperatur*.
<http://www.wikiwand.com/da/Farvetemperatur/>
5. Internett: *Purkinje effect*.
http://en.wikipedia.org/wiki/Purkinje_effect/
6. Internett: *Kruithof curve*.
http://en.wikipedia.org/wiki/Kruithof_curve/
7. Internett: *Fluorescent lamp*.
https://en.wikipedia.org/wiki/Fluorescent_lamp/

∞

Husk å melde
adresseforandring
til sekretæren
i NFS!

Bokomtale

Jostein Riiser Kristiansen: *Det usynlige universet. Verdensrommets mørke hemmeligheter*. Humanist Forlag (2015), 244 sider. ISBN 978-82-8282-118-6. 369 kr.

"Det vesentligste er usynlig for øyet"

(Antoine de Saint-Exupery: *Den lille prinsen*)

Kosmologi er vitenskapen om det altomfattende universet. Ambisjonen er å forstå hvordan verden er oppstått, har utviklet seg og vil ende. Et prosjekt av en slik kaliber krever solid kunnskap om de naturlover som hersker i kosmos og om innholdet i dette verdensaltet. Men fysiske eksperimenter og astronomiske observasjoner som holdes opp mot teoretiske betraktninger, har avslørt at mesteparten av denne materien er både mystisk og ukjent.

Jostein Riiser Kristiansen har nå skrevet ei grei og lettfattelig populærvitenskapelig bok om dette emnet. Tittelen er: *Det usynlige universet. Verdensrommets mørke hemmeligheter*. Det er prisverdig at Humanist Forlag gir ut denne boka, for det er sannelig ingen overflod av norsk litteratur om naturvitenskap for den vitebegjærlige del av allmennheten.

Det er to helt forskjellige gåter i moderne kosmologi som forfatteren tar for seg. Det ene problemet er gravitasjonsvirkningen fra den vanlige materien. Det viser seg å være for lite materie til å forklare bevegelsen av stjerner i galakser og til å sørge for at galaksene i galakseklynger ikke sprer seg ut i det veldige verdensrommet.

Det er Newtons gravitasjonsteori som benyttes for å behandle disse fenomen, ikke Einsteins subtile generelle relativitetsteori. Men galaksehopen ser ut til å være stabile, og medlemmene i klyngene holder trofast sammen over enorme tidsspenn. Stjernene i galaksenes ytre områder vandrer trutt og jevnt sin altfor raske ferd fjernt fra sin galakses sentrum.

Hvor er så gravitasjonstjoret som holder stjerner og galakser på plass? Astronomene og fysikerne har bare et navn på den nødvendige massen de ikke ser. De kaller den *mørk materie*, for denne merkelige form for materie skal ikke vekselvirke via elektromagnetiske krefter. Om vi skal observere fysiske

objekter i global skala, må de sende ut elektromagnetiske bølger. Men vi observerer hverken lys eller usynlig elektromagnetisk stråling i tilstrekkelig mengde.

Det er ingen mangel på forslag fra de teoretikerne som sysler med partikkelfysikk, om hva dette kan være: WIMP (*weakly interactive massive particles*), nøytralinoer, gravitinoer, fotinoer, aksioner, superstrenger eller andre merkelige "dyr i vår herres store hage".

Riiser Kristiansen har en god framstilling av et himmelfenomen der den mørke materien virkelig viser seg i all sin prakt. Det gjelder *Prosjektilhopen* der det ene området sender ut røntgenstråling, mens den altoverveiende massen befinner seg på begge sider av strålingskilden.

Jeg er litt forundret over at forfatteren synes å reservere ordet *kollisjon* for sammenstøt mellom objekter som er "kittet" sammen av elektromagnetiske krefter. I fysikk er det vanlig å benevne enhver påvirkning (*interaction*) for kollisjon uansett om kreftene skyldes gravitasjon, elektromagnetisme eller sterke/svake vekselvirkninger. Så det er nok noe overilet å hevde at mørk materie ikke kolliderer. I det tidlige univers samlet jo mørk materie seg via gravitasjon til mektige "brønner". Disse slukene ble den nøytrale materie tiltrukket av og falt ned i. Slik ga den mørke materien opphav til galakser og galaksehoper.

Forfatteren har et lett og ledig språk og er frisk i tonen med humor. Likevel har jeg ikke noe til overs for slang-ord som "nope" og "jepp". Nei og ja er vel ikke avleggs, selv om en muligens henvender seg til et ungdommelig publikum. Jeg likte de enkle, men artige tegningene til Herbjørn Skogstad/Herb. Men jeg synes det var litt snurrig å fornye språket med begrepet *snurr*. Der har vi allerede det gode ordet *spinn* som gir de rette assosiasjoner i forbindelse med rotasjonsbevegelse.

Riiser Kristiansen må innom svært mange emner fra astronomi og fysikk når han tar oss med på ferden gjennom kosmos. Han forteller om lys og spektrallinjer, om pioneren Fritz Zwicky sin kamp med skeptiske kolleger, om parallaksemåling og om cepheidestjerner som standard lyskilder.

Forfatteren skriver godt om ladning og elektromagnetiske bølger. Likevel synes jeg ikke skribenten kommer særlig godt fra det når han skal forklare feltbegrepet. Jeg har følelsen av at ordet nærmest blir tatt stillferdig i bruk, men at den intuitive oppfatningen uteblir. Det var fra salig Isaachsen sin uovertrufne lærebok for gymnasene jeg fikk ordentlig

føling for dette begrepet.

Vi får høre om hvordan teoretikerne forutsa den elektromagnetiske bakgrunnsstrålingen i verdensrommet, den som radioastronomene deretter nærmest snublet over. Jeg er rett og slett begeistret over den klare figuren med tilhørende tekst som avslører forholdene i universet omtrent 380 000 år etter selve skapelsen. Men jeg er ikke med på at Gamow sin fysikk ikke ble tatt på alvor fordi han skrev populærvitenskap. Bøkene hans har utvilsomt tjent som stimulans for framtidige fysikere. En kan bare håpe at foreliggende bok også kan gi slik inspirasjon.

I den siste delen av boka behandler Riiser Kristiansen den kosmologiske betydning av den såkalte *mørke energi*. Før ble dette leddet kalt *Einsteins kosmologiske konstant*, og bare de kosmologene som hadde sans for intrikat matematikk nærte gode følelser for denne kompliserende faktoren. Den tilhørte da geometrien for rom og tid. Det moderne synet er at den representerer en merkelig type vakuum-energi som gjemmer seg i selve rommet.

I dette avsnittet sleiver forfatteren litt, for han hevder først at det er gigantiske stjerner som gir supernovaeksplosjoner. Men et par sider deretter forteller han at supernoaer av type IA stammer fra hvite dvergstjerner som eksploderer. De hvite dvergene er ikke giganter. Jeg er heller ikke med på at stjerner ikke kan produsere tyngre stoffer enn oksygen i sitt varme indre. Virkelig tunge stjerner produserer mesteparten av de lette grunnstoffer ved fusjon like til kjerneområdet består av jern. Tyngre elementer kan ikke produseres ved fusjon, for da må en tilføre ekstra energi. Derfor er det egentlig frigjort gravitasjonsenergi fra supernovaeksplosjonene som gir de stoffene som er tyngre enn jern.

Forfatteren har en aldeles ypperlig betraktning som illustrerer at vakuum-energi forblir konstant mens energien til vanlig materie tynnes ut når universet ekspanderer. Jeg må tilstå at jeg ble henrykt over sammenlikningen med vanlige sauer og sauer i rasende formering som slippes sammen på beite. Det var også herlig å oppleve hvor lett og lekende Riiser Kristiansen forklarer at fotoner som har passert store galaksehoper, har fått en mer blålig farge enn andre lyspartikler.

Jeg har ingen sans for notelista som finnes her. Disse henvisningene kan bare borge for at forfatteren bygger på solid faglitteratur og ikke farer med løsprat. Men jeg tror ikke at det publikum som boka er skrevet for, kan ha noen nytte av disse notene.

Konklusjonen og dommen min er at boka treffer blink for ungdom og lekfolk som faktisk er interessert i naturvitenskap. Her får de vite at dagens astrofysikk er utrolig spennende og stadig reviderer vår kunnskap om og syn på universet.

Henning Knutsen
Universitetet i Stavanger

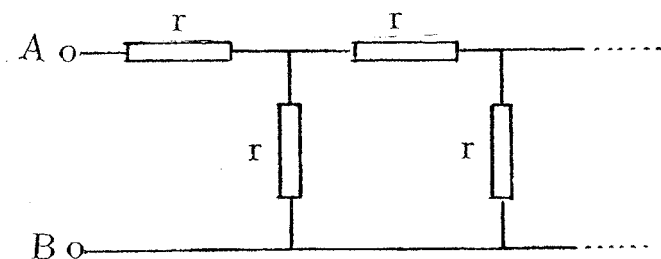
∞

Trim i FFV

Løsning på FFVT 3/15

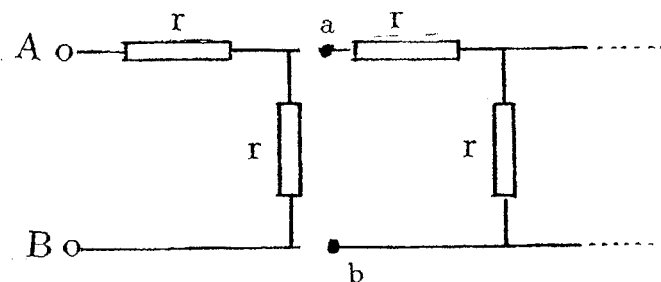
Uendelig system av resistanser

a) Figuren viser et uendelig system av enkelresistanser, hver av størrelse r :

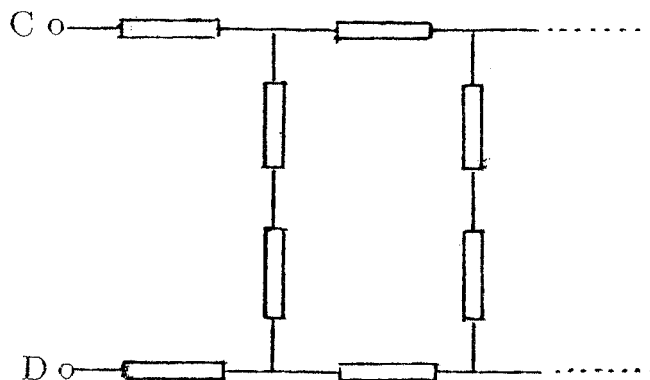


Oppgaven gikk ut på å finne resistansen R mellom A og B . Resistansen mellom punktene a og b i figuren nedenfor er naturligvis også R , slik at resistansen mellom A og B er lik r i serie med en parallellkopling av r og R :

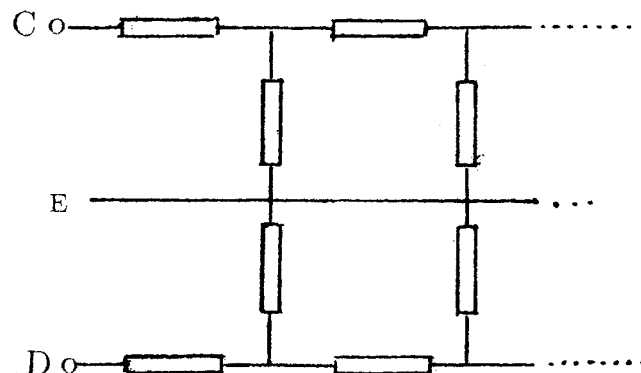
$$R = r + \frac{1}{\frac{1}{r} + \frac{1}{R}}, \quad \text{som gir} \quad R = \frac{r}{2}(1 + \sqrt{5}).$$



b) Spørsmålet var nå å finne resistansen R_b mellom C og D i følgende uendelige system:



En kan benytte en liknende metode som i punkt a) for å finne en likning for resistansen R_b . Enda enklere er å trekke en ekstra leder gjennom midtpunktene av de loddrette grenene. Av symmetrigrunner ligger alle disse midtpunktene på samme potensial og den ekstra lederen endrer derfor ingen ting.



Vi ser at resistansen mellom punktene C og E må være lik resistansen R funnet i oppgave a), og totalresistansen mellom C og D er det dobbelte:

$$R_b = 2R = (\sqrt{5} + 1)r.$$

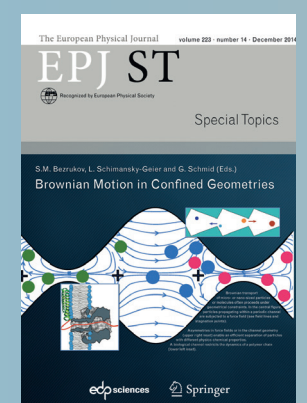
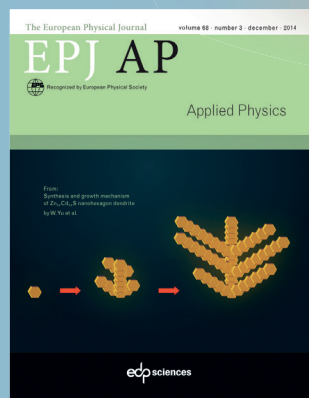
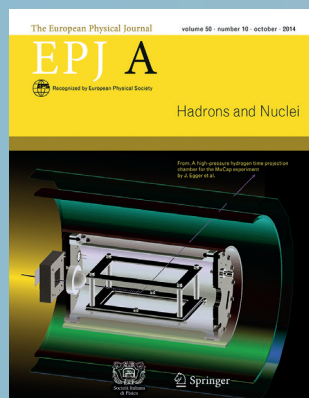
FFVT 4/15

Kameler

Ved årets kamelstevne ble de fem tilstedeværende kameleierne bedt om å notere antall kameler som var til stede på stevnet. De oppga tallene 20, 22, 25, 27 og 30. Tallene var forskjellige fordi det viste seg at de hadde glemt å inkludere egne dyr.

Hvor mange kameler var det i hver av de fem flokkene?

∞



traditional journals (open access choice available)

- EPJA - Hadrons and Nuclei
- EPJB - Condensed Matter and Complex Systems
- EPJD - Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics
- EPJE - Soft Matter and Biological Physics
- EPJAP - Applied Physics
- EPJPlus
- EPJST - Special Topics
- EPJH - Historical Perspectives on Contemporary Physics

EPJ COLLECTION

Run by international boards of experts
First class editorial offices

Read in 8,000 institutions worldwide
Indexed in all main citation databases

full open access journals

EPJC - Particles and Fields
EPJ Data Science
EPJ Photovoltaics
EPJ Nonlinear Biomedical Physics
EPJ Techniques and Instrumentation
EPJ Quantum Technology
EPJAM - Applied Metamaterials
EPJN - Nuclear Sciences & Technologies
EPJ Web of Conferences

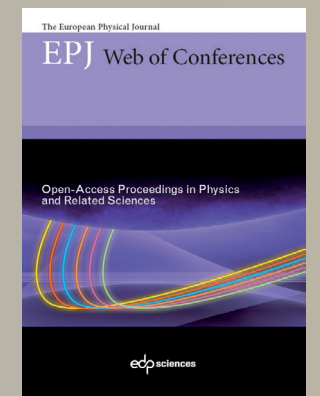
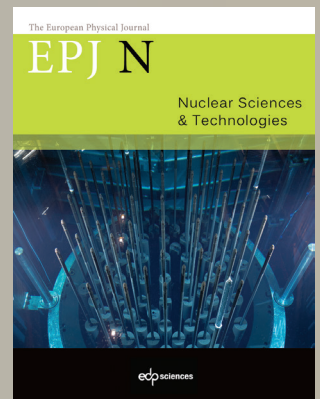
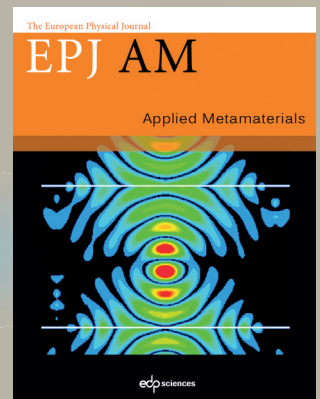
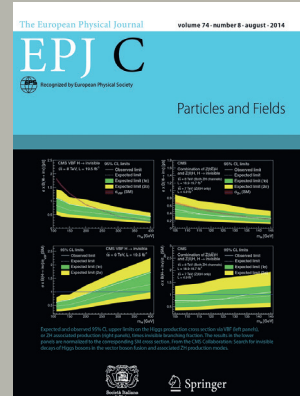
Share your Knowledge

Article categories:

Regular articles, letters, tools for experiment & theory, reviews, colloquia, historical documents and personal recollections.

Issue types:

Regular issues, discussion-and-debate issues, topical issues, focus points.



Avsender:
Fra Fysikkens Verden
Fysisk institutt, Universitetet i Oslo
Boks 1048 Blindern
0316 Oslo

B



NORGE P.P. PORTO BETALT

Retningslinjer for forfattere

FRA FYSIKKENS VERDEN utgis av Norsk Fysisk Selskap og sendes til alle medlemmer. Disse er vanligvis utdannet fra universiteter og høyskoler med fysikk i sine fagkretser. Andre kan også abonnere på bladet. Blant disse er elever og biblioteker ved videregående skoler. Bladet gis ut fire ganger i året, i mars, juni, oktober og desember. Tidsfristene for stoff er 1. februar, 1. mai, 1. september og 1. november. Opplaget er f.t. 1400.

FORMÅLET MED FFV er å gi informasjon om aktuelle tema og hendinger innen fysikk, og å bygge bro mellom forskere, fysikklærere, studenter og andre interesserte. Ikke minst ønsker FFV å være til hjelp for elever og lærere i videregående skoler og andre undervisningsinstitusjoner. Dette krever at artikler og annet stoff er skrevet på norsk og på en lett forståelig måte. Faguttrykk må defineres. En verbal form er oftest å foretrekke fremfor matematikk. Men det må brukes standard begreper og enheter. Matematikken må være forståelig for vanlige fysikkstudenter. Artiklene i FFV skal primært gi informasjon til dem som er utenfor det aktuelle fagfeltet. Artikler som bare forstås av en liten faggruppe har ingen plass i bladet. Alt stoff blir vurdert redaksjonelt, og redaksjonen forbeholder seg rett til å foreta mindre endringer.

MANUSKRIPTER leveres i en form som forfatteren mener er direkte publiserbar. De skal leveres elektronisk, helst som e-post. Dersom formatet ikke er ren tekst (helst LATEX) eller i Microsoft Word, må det merkes med hvilket tekstbehandlingsprogram som er brukt. Under alle omstendigheter må redaksjonen kunne forandre teksten direkte.

ARTIKLER bør ikke være lengre enn 6 sider med trykt tekst og figurer. Større avsnitt i teksten bør markeres med undertitler. Unngå fotnoter. Referanser kreves ikke, men det er ønskelig med en liste over lett tilgjengelig tilleggstoff.

SMÅSTYKKER: Gratulasjoner, nekrologer, bokomtaler, skolestoff, møtereferater etc. mottas gjerne, men de må ikke være lengre enn 1–2 sider. Bokkronikker kan være noe lengre. Doktoromtaler begrenses til en halv side inkludert bilde.

ILLUSTRASJONER er en viktig del av en artikkel. Legg derfor mye omtanke i figurene. All tekst skal være på norsk. Figurene vil som regel bli trykt i en spaltebredde på 8,6 cm. De bør være på elektronisk form i et standard grafisk format og med god oppløsning. Vi kan unntaksvis motta figurer eller bilder som urastrerte kopier. Figurer og tabeller skal være referert i den løpende teksten, og ønsket plassering må markeres. Hvis forfatterne selv ikke har laget figurene, skal opprinnelsen oppgis. Forfatterne må selv innhente tillatelse til bruk av slike illustrasjoner.

FORSIDEBILDER velges som regel i tilknytning til en av artikkelen. De må være teknisk gode og lette å forstå.

KORREKTUR: Forfatterne får tilsendt korrektur som må returneres snarest. Det må ikke gjøres unødige endringer i korrekturene.

Norsk Fysisk Selskap

STYRE

President:

Professor Åshild Fredriksen
Inst. for fysikk og teknologi, UiT
e-post: ashild.fredriksen@uit.no

Visepresident:

Professor Are Raklev
Fysisk institutt, UiO
e-post: a.r.rachlow@fys.uio.no

Styremedlemmer:

Forsker Thomas Gjesteland
Inst. for fysikk og teknologi, UiB
Seniorforsker Rolf Korneliussen
Havforskningsinstituttet i Bergen
Professor Jan Petter Hansen
Inst. for fysikk og teknologi, UiB
Professor Håvard Helstrup
Høgskolen i Bergen
Professor Eli Olaug Hole
Fysisk institutt, UiO
Professor Jon Samseth
Høgskolen i Oslo og Akershus, Lillestrøm
Lektor Morten Trudeng
Asker videregående skole

Selskapets sekretær:

PhD-stipendiat Ole Meyer
Inst. for fysikk og teknologi, UiT,
Pb. 6050 Langnes, 9037 Tromsø,
e-post: nfs.styret@gmail.com
Bankgiro: 7878.06.03258

Fra Fysikkens Verden

Redaktører:

Professor Øyvind Grøn
Høgskolen i Oslo og Akershus, og
Fysisk institutt, UiO
e-post: oyvind.gron@hioa.no
Professor Emil J. Samuelsen
Inst. for fysikk, NTNU
e-post: emil.samuelsen@ntnu.no

Redaksjonssekretær:

Karl Måseide
Fysisk institutt, UiO
e-post: k.a.maseide@fys.uio.no

Redaksjonskomité:

Professor Odd-Erik Garcia
Institutt for fysikk, UiT
Professor Per Chr. Hemmer
Institutt for fysikk, NTNU
Professor Ellen K. Henriksen,
Fysisk institutt, UiO
Professor Per Osland
Inst. for fysikk og teknologi, UiB

Ekspedisjonens adresse:

Fra Fysikkens Verden
Fysisk institutt, Universitetet i Oslo,
Boks 1048 Blindern, 0316 Oslo.
Tlf.: 22 85 64 28 / 22 85 56 68
Fax.: 22 85 64 22 / 22 85 56 71

Fra Fysikkens Verden kommer ut 4 g. årlig.
Abonnement tegnes hos selskapets sekretær.
Årsabonnement 200 kr. (Studenter 100 kr.)