

Norges teknisk-naturvitenskaplige universitet
Fakultet for naturvitenskap og teknologi

Nordlys

av

Sigmund Drangfelt
Sigrid Ina Simonsen
Trond Aarsland

Prosjekt i FY1303 Elektrisitet og magnetisme
Våren 2004

Abstract

Ser man på nordlyset en klar vinterkveld, er det ikke overraskende at nordlyset har vært gjenstand for overtro og myter av forskjellige slag rundt om i verden til alle tider. Det er funnet bevis for at folk i flere hundreår har prøvd å forklare nordlysets opphav og underlige oppførsel. Først på slutten av det 19. århundret kom teorier som er opphavet til dagens forklaring av nordlyset. Det var nordmannen Kristian Birkeland som tidligst lanserte ideen om at ladede partikler fra sola, såkalt plasma, kom inn i atmosfæren på grunn av jordas magnetfelt, og dermed tente atmosfæregassene så de ble lysende. Han gjorde også eksperimenter som bekreftet mange av hans teorier, men det skulle gå lang tid før hans ideer ble helt godkjente.

I dag vet vi, takket være moderne måleutstyr og satellitter, mye mer om jordas magnetosfære og dens påvirkning på nordlyset. Jorda omslutes av et magnetisk felt som solvinden styres inn etter. Dette magnetiske feltet, som vi kaller magnetosfæren, er en sammensetning av det geomagnetiske feltet og det interplanetariske magnetfeltet som har sitt opphav på sola. Solvinden er en kontinuerlig strøm av ladede partikler fra sola, men ved høy solaktivitet kan vi få store masseutsendelser med høy hastighet inn mot jorda. Dette skjer ved utblåsninger fra områder på sola hvor det magnetiske feltet er svært sterkt, i såkalte solflekker. I etterkant av slike hendelser kan vi se sprakende nordlys på himmelen. Partiklene fra solvinden kommer inn i atmosfæren ved polene og kolliderer med atmosfæregassene. Vi får en eksitering av molekyler og atomer som fører til spontane kvantesprang hvor det blir frigitt fotoner med en viss bølgelengde. Disse bølgelengdene avhenger av energidifferansen mellom kvantenivåene i atomet eller molekylet. De fotonene som befinner seg innenfor det synlige spekteret er det vi ser som nordlys eller sørlys. Nordlys kan framstå i alle de forskjellige fargene i spekteret, men de vanligste fargene er gulgrønt, rødt og blått. Nordlyset kan ha stor innvirkning på jordas magnetosfære og føre til en forskyvning i de magnetiske polene.

Innhold

1. KRISTIAN OLAF BERNHARD BIRKELAND (1867 – 1917)	4
1.1. NORSK HYDRO	4
1.2. NORDLYS	4
2. SOLA	6
2.1. INNLEDNING	6
2.2. MAGNETFELT OG SOLFLEKKER	7
2.3. SOLVIND	7
3. JORDAS MAGNETFELT	9
3.1. MAGNETOSFÆREN	9
3.2. VAN ALLEN-BELTET	11
4. EKSITERING OG EMISJON	16
5. OPPSUMMERING	20
6. LITTERATURLISTE	21
 VEDLEGG 1: MATEMATISK BESKRIVELSE AV MAGNETFELTET	 22
VEDLEGG 2: HØYDEN AV EN NORDLYSSTRØM	24

1. Kristian Olaf Bernhard Birkeland (1867 – 1917)

Mange har nok hørt eller lest om Kristian Birkeland (1867 – 1917) i en eller annen sammenheng. Men hva er han kjent for? For noen er det kanskje nordlys, for andre oppstarten av Norsk Hydro. Det siste er kanskje det den allmenne nordmann knytter til navnet. Men det trenger langt fra være noen av disse feltene en kjenner ham fra. Gjennom Birkelands 50 år korte liv tok han hele 59 patenter. Noen av disse er innen fettherding, tørking av fisk, redestillering og raffinering av uren olje, strømbrytere, radiotelefoni, medisinsk strålebehandling og mange flere (Birkeland Innovasjon web, Brekke web). Kanskje har en rett og slett bare sett navnet hans på den norske 200-kronersseddelen (Se under 1.2. Nordlys).

Birkeland startet som ren matematiker, fortsatte innen teoretisk fysikk og endte som eksperimentell fysiker (Brekke web). Hele 7 ganger var han nominert til nobelprisen i fysikk, uten å nå helt opp. Men det er ingen tvil om at vi snakker om en meget intelligent og allsidig person.

I denne oppgaven er det ikke plass til å gå inn på hele hans liv, men vi vil se nærmere på hans pionerarbeid knyttet til nordlyset. Noen ord om hans forhold til Norsk Hydro må det likevel først være plass til.

1.1. Norsk Hydro

12 av patentene hans var nettopp knyttet til etableringen av Norsk Hydro (Birkeland Innovasjon web). Sammen med ingeniør Sam Eyde (1866 – 1940) bygde han en ovn til kjemisk binding av nitrogen med oksyngengassen (luft), kjent som Birkeland-Eyde-ovnen. Hovedprinsippet var en elektrisk lysbue, som han i den forbindelse oppdaget og fikk testet ut. Han kontrollerte en elektronstrøm med et sterkt magnetfelt. Lysbuen som oppstod varmet opp luften og gjorde bindingen mellom nitrogen og oksygen mulig (Brekke web).

1.2. Nordlys

Asgeir Brekke beskriver Birkelands teori om nordlys på en enkel og oppsummerende måte:

Hovedideen i Birkelands teori var at elektrisk ladde partikler beveger seg med stor hastighet fra flekker på solens overflate. De blir innfanget av jordens magnetfelt og styrt ned til polområdene. Partiklene bremses i luften, og dermed tenner de atmosfæregassene slik at de lyser opp (Brekke web).

Kristian Birkeland gjorde eksperimenter for å teste sine teorier på laboratoriet. Han bygde blant annet lufttomme glassbur i størrelser fra 0,3 til 1,5 m³. Glassveggene kunne være opp til 1 dm tjukke, og trykket mot disse kunne være hele 10 tonn (Brekke web, Egeland web). Inne i buret plasserte han ulike terrellaer (hule metallkuler) med en elektromagnet inni. Dette representerte jorda i verdensrommet. Sola satte han opp som en katode i det ene hjørnet og satte på høyspenning mellom den og jorda. Dette førte til en strøm av elektroner fra sola, som så ble styrt av magnetfeltet fra jorda og dannet et lysbånd ved hver av polene. Dermed fikk han bekreftet noen av sine teorier om nordlys.

Han gikk også videre og sa at når elektronene bremses opp av kollisjonene med atmosfæren, bøyes de av og følger en linje parallelt med jordoverflaten. Dette er nordlysbuene.

Omkring 1910 gjorde han noe om på eksperimentet og satte solen i midten. Den inneholdt nå en elektromagnet og strålte fortsatt ut elektroner. På denne måten fikk han frem små flekker på kula hvor magnetfeltet var sterkere enn andre steder. Vi kjenner dem igjen som solflekker. Han kunne også si noe om deres plassering på soloverflaten. Uten å knytte det til Birkeland, kommer vi tilbake til dette i kapittel 2.2. Magnetfelt og solflekker.

Bortsett fra at Birkeland ikke kjente til magnetosfæren, skal vi videre i oppgaven se at hans teorier holder mål også i dag. Blant annet hans teori om en elektrisk strøm langs jordas magnetfelt var lenge omstridt. Den ble i flere tiår forkastet før den endelig ble bekreftet ved satellittenes fremvekst på 1960-tallet (Brekke web). Det er altså ikke uten grunn at nordmannen Kristian Olaf Bernhard Birkeland er verdenskjent som en pioner innen deler av fysikk og astrofysikk. I Norge er han som eneste fysiker hedret på en pengeseddel.



Figur 1: Her ser vi et kart over nordpolen, inkludert Skandinavia og Canada, som viser området for nordlyset. Nederst til høyre ser vi den elektriske strømmen som går parallelt med jordoverflaten (bildet er hentet fra Wikipedia web).



Figur 2: På den andre siden av seddelen ser vi til venstre glassboksen med "jordkula" og, bak Birkeland selv, ringer av nordlyset (bildet er hentet fra Wikipedia web).

2. Sola

Når vi skal si noe om nordlyset som beveger seg over himmelen er det vanskelig å unnlate å si noe om sola. Det er nettopp der det hele starter. Etter eksplosjoner på sola oppstår en solvind, bestående av elektrisk ladede partikler, som beveger seg med høy fart ut fra sola. Dersom utblåsningen skjer i retning av jorda, vil deler av vinden nå jordas magnetfelt og bli ført inn mot de magnetiske polene. Før vi ser på det som skjer omkring jorda, skal vi først se litt nærmere på sola og det som skjer på den.

2.1. Innledning

Gjennomsnittsavstanden fra jorda til sola er $1,5 \cdot 10^8$ km ($= 1 \text{ AU} = 1 \text{ astronomisk enhet}$). Solas radius er $6,96 \cdot 10^5$ km eller 109 ganger jordradien. Massen er $2,0 \cdot 10^{30}$ kg som tilsvarer $3,3 \cdot 10^5$ ganger jordas masse. I sentrum av sola er temperaturen svimlende $1,55 \cdot 10^7$ K, mens den ved overflaten er omtrent 5800 K (Freedman & Kaufmann 2002, s.391).

Den enorme energiutviklingen i kjernen skjer ved at hydrogen fusjonerer til helium. Dette både gir og krever enorm varme. På grunn av solas store masse, er gravitasjonskrafta veldig sterk nær sentrum. Dette medfører et enormt trykk som igjen øker temperaturen og gjør prosessen mulig.

Solas atmosfære består i hovedsak av tre lag. Fotosfæren, kromosfæren og koronaen. Fotosfæren er innerst og omkring 200 km tjukk. Temperaturen er som på solas overflate, omkring 5800 K. Dette laget gir sola en ren overflate og emitterer det gule lyset som vi ser.

Utenfor finner vi kromosfæren. Den har en mye mindre tetthet enn fotosfæren, ca. 10^{-4} av tettheten til fotosfæren eller 10^{-8} av atmosfæren vi puster i på jorda (Freedman & Kaufmann 2002, s.402), og strekker seg 5-10.000 kilometer utover. Temperaturen varierer fra 10.000 K og oppover.

Ytterst er koronaen. Den danner en udefinert overgang til resten av verdensrommet. Temperaturen her ligger mellom 1 og 2 millioner K. Men fordi laget nesten er tomt for partikler, altså nærmest vakuum, er den termiske energien lav. Det betyr at vi ikke ville oppleve 1 millioner K som varmere enn at vi kunne stukket hånden inn og kjent på den. Freedman & Kaufmann sammenligner dette med en steikeovn som er oppvarmet. Du kjenner forskjell på å holde hånda i lufta inne i ovnen og å ta på veggene på innsida. Varmen er forskjellig, men temperaturen er den samme.

På grunn av de store temperaturene i koronaen har mange av elektronene revet seg løs fra atomene. Dermed er det mange ioner, dvs ladede partikler i koronaen. På grunn av den høye farten (1 million km/t) disse partiklene har forsvinner noe av de ut av koronaen og danner det vi kaller solvind. Dette skjer hele tiden og blir ofte nevnt som et aspekt ved *den stille solen*, som det kalles når solaktiviteten er lav (normaltilstand).

Det er ennå ingen entydig teori som kan beskrive hvordan temperaturen i koronaen blir så høy (Stix 2002, s.394). Også om bevegelser og hendelser inni sola og mellom sola og fotosfæren hersker det ulike teorier for hva som egentlig skjer og hva som er årsak til det som skjer. Likevel skal vi her grovt skissere de viktigste fenomenene knyttet til opphavet til nordlys.

2.2. Magnetfelt og solflekker

Magnetfeltet på sola endrer seg med en syklus på 22 år. Årsaken til endringene er at ulike deler av sola roterer med ulik hastighet. For eksempel roterer sola en runde på 25 dager ved ekvator mens den bruker nærmere 35 dager nærmere polene (Freedmann & Kaufmann 2002, s.406-407). Det er også ulike rotasjonshastigheter inne i sola. I en syklus på 11 år beveger de sterkeste feltlinjene seg fra et sted nærmere polene på sola og mot ekvator. Etter hvert som de forsvinner ved ekvator oppstår de igjen nærmere polene, men nå har polene byttet side. Det vil si at det som tidligere var sørpolen, nå har blitt nordpolen. Derfor hører vi både om en 11- og en 22- års syklus på sola. Det er ingen som kjenner detaljene i samspillet mellom og hastighetene til magnetfeltene på sola (Stix 2002, s.295). Det er heller ikke en viktig del av denne oppgaven.

Det er disse magnetfeltene som danner solflekkene vi noen ganger kan se med det blotte øye. I innledningen nevnte vi at det var enormt varmt i solas kjerne. Den varmen flyttes utover ved blant annet en metode som kalles konveksjon eller varmestrømning. På grunn av den høye temperaturen består massen stort sett av elektroner og ioner. Ved hjelp av konveksjon fraktes massen i lommer gjennom sirkelbevegelser opp mot overflata/fotosfæren (Freedmann & Kaufman 2002, s.394-395). Varmer masser flyttes utover og kalde masser innover mot solas sentrum.

Denne bevegelsen av ladede partikler skaper et magnetfelt, og jo større fart disse partiklene har og jo større ladning som blir forflyttet, jo større blir det magnetiske feltet. Når feltet blir spesielt stort, presses den varme massen (dvs. den ladede gassen, eller plasmaet) bort. Dette fører til noen kaldere områder i fotosfæren. På grunn av temperaturen, som er 1000-1500 K kaldere enn i området rundt, kan vi ut fra Stefan-Boltzmanns lov om energifluks, F , som er proporsjonal med fjerde potens av temperaturen, T , se at utstrålingen er mindre her.

$$F = \sigma T^4 \quad (1)$$

Regner vi på det, ser vi at energifluksen er 30 % mindre her enn i områdene rundt. Disse områdene, som kalles solflekker og kan være flere titusen kilometer i diameter, ser derfor mørkere ut.

En solflekk kan vare fra noen timer til noen måneder, og ofte opptrer de i grupper. Mange solflekker betyr høy aktivitet på sola. Solflekken i seg selv har ikke noe med nordlyset å gjøre, men viser oss når aktiviteten er høy eller lav på sola. Høy aktivitet på sola gir mye nordlys på jorda.

2.3. Solvind

Vi har allerede nevnt solvind i forbindelse med de enorme temperaturene i koronaen og de tilhørende store hastighetene til partiklene. Mer enn 10 millioner tonn masse forsvinner fra sola per år på denne måten (University of Tennessee, web).

Ikke alle refererer til den kontinuerlige strømmen av partikler når de snakker om solvind. Noen mener at det er noen spesielle og større eksplosjoner eller masseutsendelser fra sola som skal ha det navnet. I oppgaven her skal vi kalle begge deler for solvind, for i begge tilfellene er det en strøm av ladede partikler som er på vei bort fra sola. Likevel, det er først og fremst solvinden som oppstår i forbindelse med eksplosjonene som danner grunnlaget for nordlyset vi kan observere. Årsaken til det er at det er langt større mengder masse som sendes av gårde.

Det er ikke klart hva som er årsak til disse store masseutsendelsene som finner sted på sola, og da særlig ved høy solaktivitet. En av teoriene er at det er magnetfelt med motsatte poler som kommer nær hverandre og danner en form for kortslutning. Vi skal ikke gå nærmere inn på det her. Det vi kan konstatere er at den kontinuerlige strømmen av partikler ut fra sola har en hastighet på 3-400 km/s, mens de partiklene som blir slynget ut fra sola etter en spesiell hendelse (eksplosjon) har hastigheter på mellom 700 og 900 km/s. Generelt er det elektroner og protoner, 3-4 prosent er heliumkjerner (alfa-partikler) og en liten del er tyngre ioner (Stix 2002, s.404). Masseutsendelsene ved en slik ejeksjon kan være på opptil 10^{12} kg, 1 milliard tonn! (Freedmann & Kaufmann 2002, s.413). Det er enorme mengder, men ikke betydelig i forhold til solas totale masse.

Det er viktig å merke seg at ikke all solvind beveger seg mot jorda. Utsendelser kan selvfølgelig skje i alle retninger ut fra sola. Den lille andelen av solvinden som beveger seg i retning jorda, vil i første omgang treffe på jordens magnetiske omgivelser; jordas magnetosfære.

3. Jordas magnetfelt

3.1. Magnetosfæren

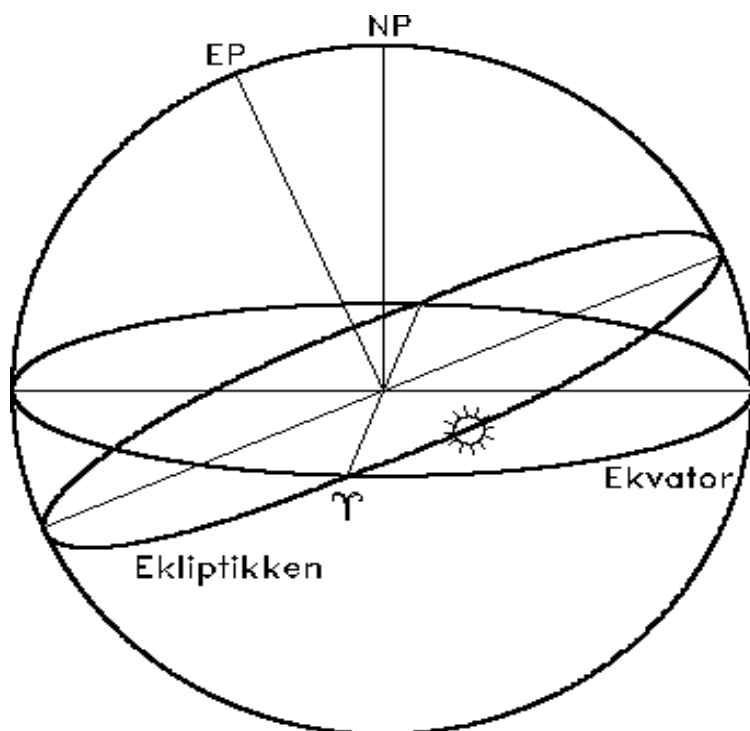
Jorda er opphav til et magnetisk felt som den omkranser seg selv med. Vi tenker oss at jorda har en intern dynamo som har skapt og som opprettholder dette feltet. En intern dynamo kan opprettholde et magnetisk felt rundt et legeme dersom visse kriterier er oppfylte. Legemet må rotere og inneholde en elektrisk ledende væskefase. I tillegg må konvektiv bevegelse opptre i denne væskefasen. Det kan tenkes at jorda oppfyller alle disse kriteriene. Jordas rotasjon er rask nok, og den inneholder flytende jernholdig bergmasse som kan lede elektrisk strøm. For å drive dynamokonveksjonen må jorda ha en høy nok temperaturgradient gjennom den elektrisk ledende fasen. I jorda opprettholdes denne temperaturgradienten av gravitasjonsenergi fra opprinnelig oppsamlet masse, nedbrytning av radioaktive elementer og varme fra kjemiske transformasjoner. Denne interne dynamoen er selvopprettholdende.

En selvopprettholdende intern dynamo må ha ytre påvirkning for å komme i gang. På jorda startet det sannsynligvis med at et eksternt magnetfelt en gang traff jorda i nord-sør-retning og penetrerte dens roterende flytende fase. Dette feltet ble da tvinnnet opp i asimutale feltlinjer. Denne tvinningen er med på å konsentrere og forsterke kjernens magnetiske felt. Konveksjonen og rotasjonen sammen vil da løfte feltlinjene mot polene. Dette vil i tur forsterke det opprinnelige eksterne magnetiske feltet. Etter et punkt vil denne prosessen bli selvopprettholdende, og jordas magnetfelt vil bli regenerert kontinuerlig.

Magnetfeltet med opphav i jordas sentrum kan sammenlignes med magnetfeltet rundt en dipol. Jorda har et magnetisk dipolmoment på $7,91 \cdot 10^{22} \text{ Am}^2$ (Beatty m.fl. 1999) Det er dette magnetfeltet som er opphavet til jordas magnetosfære.

En planets magnetosfære har en presis definisjon; nemlig området rundt en planet der dets eget magnetiske felt dominerer oppførselen av elektrisk ladede partikler (Harwit M 1998). Formen på jordas magnetosfære er ikke kun bestemt av jordas eget magnetfelt. I det interplanetariske rom som jorda befinner seg i, blir magnetosfæren utsatt for påvirkning fra sola. Det er her snakk om solvind og det interplanetariske magnetfelt (IMF). Solvind er ladede partikler fra sola og IMF er solas magnetfelt som strekker seg utover i solsystemet. Disse to gjør at magnetosfæren til jorda blir presset sammen på dagsiden og strukket utover på nattsiden av jorda. Figur 4 illustrerer hvordan magnetosfæren til jorda ser ut.

Det interplanetariske magnetfeltet er ikke bare med på å forme jordas magnetosfære. Den er også grunnen til at ladede partikler fra solvinden kan trenge forbi jordas magnetiske skjold og inn i magnetosfæren. IMF er rettet loddrett ut fra sola og loddrett inn på sola. Disse feltlinjene blir bøyd av på grunn av solens rotasjon og feltet vil da ta form av en vannspreder. Feltlinjene er rettet utover og innover i ulike sektorer slik at når jorda passerer gjennom rommet vil den oppleve at IMF endrer retning. Videre ligger IMF i ekliptikkplanet, dvs. planet gjennom solas bane på himmelen. Se Figur 3.

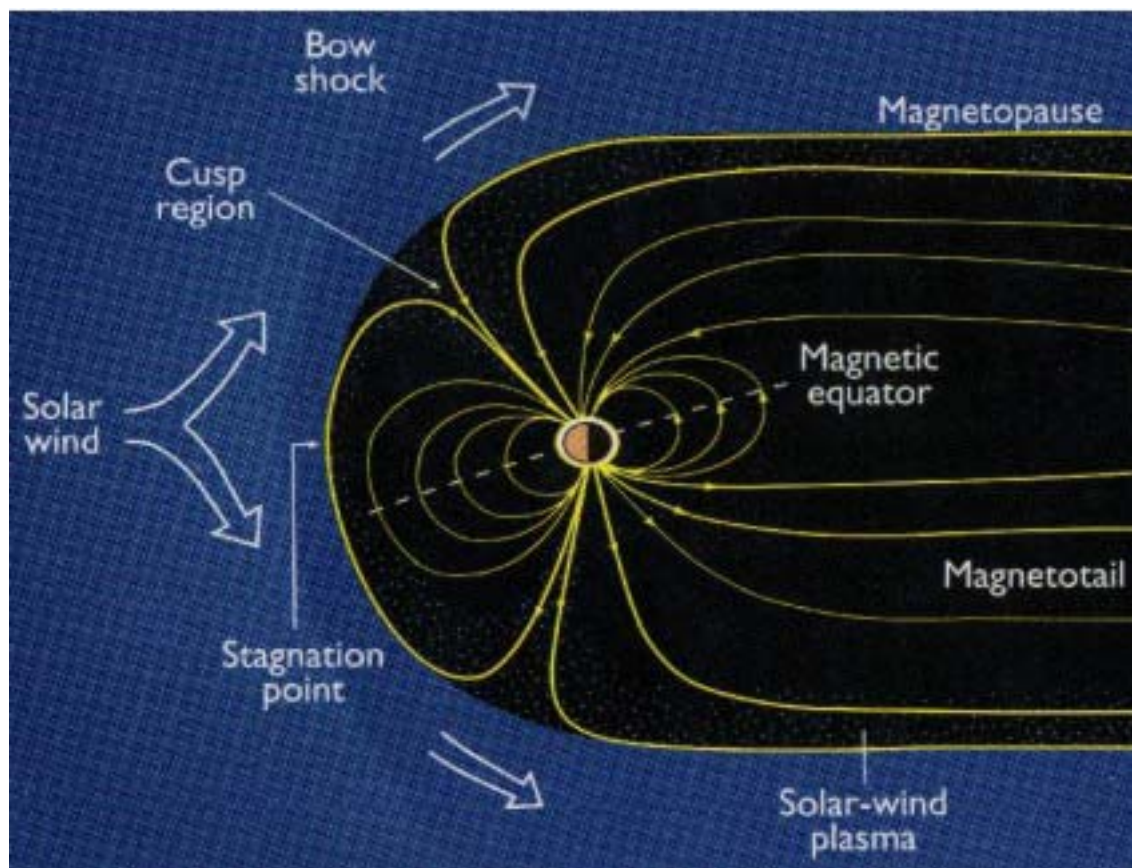


Figur 3: Forholdet mellom himmelkula med himmelekvator, og solas tilsynelatende bane over himmelen i løpet av året, ekliptikken. Planet gjennom ekliptikken kalles ekliptikkplanet. Det faller naturligvis sammen med jordbanens plan.

Siden jordas magnetiske dipolakse er nesten vinkelrett på ekliptikken er det kun en liten komponent av IMF som er rettet i samme retning som dipolaksen. Siden IMF endrer retning noen ganger i løpet av jordas omløp, vil også komponenten i retning dipolaksen skifte. Slik blir det grunnlag for to ulike situasjoner. Dersom IMF-komponenten i dipolretning er parallell med jordas magnetfelt i ekliptikkplanet, vil denne delen av jordas magnetfelt bli styrket. Samtidig vil IMF-komponenten være antiparallell med jordas magnetfelt i dipolaksen, som på denne måten svekkes. Denne situasjonen fører til at jordas magnetiske skjold styrkes og det blir vanskeligere for partikler i solvinden å trenge inn i magnetosfæren. Da sier man at magnetosfæren er lukket.

I den andre situasjonen befinner jorda seg i en slik posisjon at IMF har skiftet innretning. Da vil IMF være antiparallell med feltet i ekliptikken og parallell med feltet langs dipolaksen. Vi ser at situasjonen er snudd. IMF svekker feltet i ekliptikkplanet og dermed også det magnetiske skjoldet til jorda. Videre vil feltet i dipolaksen styrkes. Det blir på denne måten lettere for partikler i solvinden å trenge inn i jordas magnetosfære, og man sier at magnetosfæren er åpen (Brekke web).

Fra dette kan man tydelig se at det interplanetariske magnetfelt, som har sitt opphav på sola, spiller en vesentlig rolle i å kanalisere inn ladete partikler i solvinden inn i jordas magnetosfære. Disse partiklene vil i så påvirkes av andre krefter som får dem til å opptre på en spesiell måte i jordas magnetosfære, og til sist enten bli slynget bort fra jorda eller inn mot de magnetiske polene, og danne nordlys og sørlys.

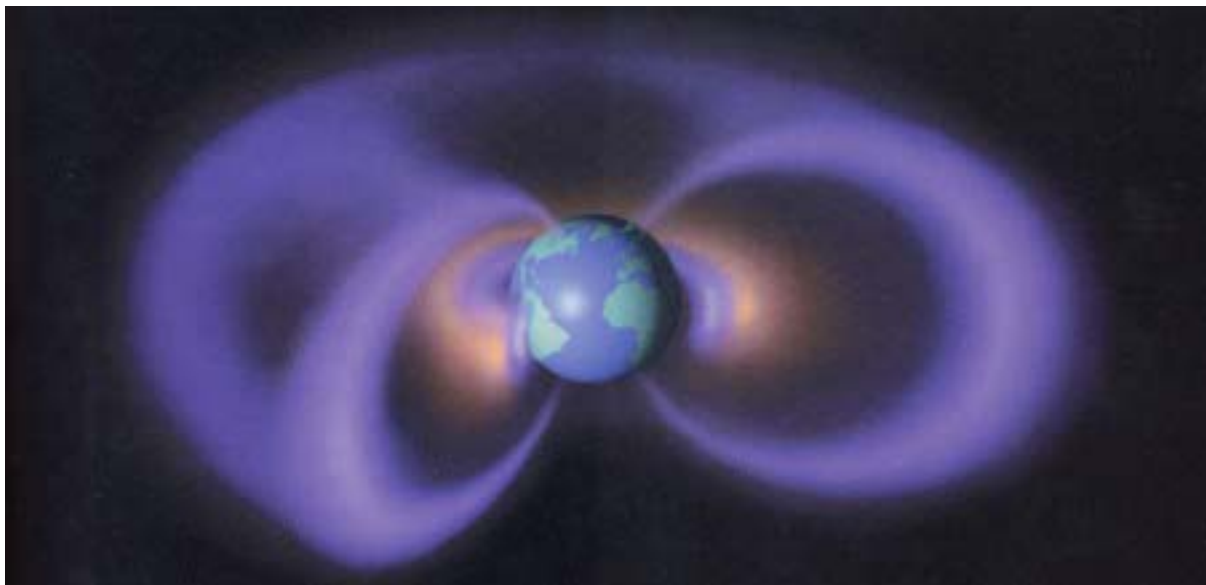


Figur 4: Jordas magnetosfære (Beatty m.fl. 1999)

3.2. Van Allen-beltet

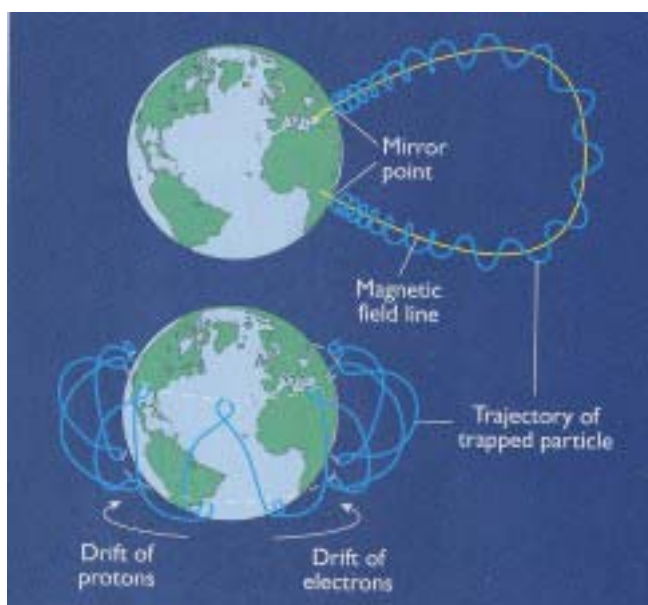
Nordlys kommer fra partikler som er fanget i jordas magnetosfære. Disse ladede partiklene er i all hovedsak konsentrert i van Allenbeltene og i et plasmaområde i magnetosfærens hale på nattsiden av jorda. Van Allenbeltene, også kalt strålingsbelter, er belter rundt jorda hvor det er en høy konsentrasjon av ladede partikler. I Figur 5 er disse beltene illustrert. Det er ulike teorier om hvor disse ladede partiklene har sitt opphav. Den mest anerkjente teorien hevder at disse ladede partiklene stammer fra solvinden. Det innerste beltet består av protoner med energi på rundt 50MeV og er gjennomsnittlig 4000 kilometer over jordas overflate. Det ytterste beltet er fylt med elektroner med energi på rundt 30 MeV og befinner seg gjennomsnittlig 170.000 kilometer over jordens overflate (North, 1997). Dette bildet blir mer nyansert i "The New Solar System". Her hevdes det at mesteparten av partiklene kommer fra jordas ionosfære og fra intergalaktisk stråling. Det vil da si at nærmest jorda er det oksygenioner, elektroner og protoner fra jordas ionosfære som dominerer sammen med høyenergetiske elektroner og protoner som stammer fra splitting av nøytroner i intergalaktisk stråling. Lenger ut er det partikler fra solvinden som dominerer (Beatty m.fl., 1999).

Når van Allenbeltene overfylles vil partiklene kolliderer med hverandre oftere, og presses inn i jordas atmosfære. Dette fører til nordlys. Siden partiklene i van Allenbeltene beveger seg frem og tilbake mellom de magnetiske polene, vil hendelser som skjer på den nordlige delen av beltene bli avspeilet på den sørlige. Dette vil si at når det er nordlys på den nordlige halvkule, vil det med stor sannsynlighet også forekomme sørlys av samme karakter på den sørlige halvkule.



Figur 5: Strålingsbeltene rundt jorda. Disse kalles også van Allenbeltene (Beatty m.fl. 1999)

Årsaken til at det dannes to strålingsbelter rundt jorda er ladede partiklers makroskopiske bevegelser i magnetosfæren. Figur 6 viser disse bevegelsene. Ladede partikler beveger seg i to retninger. De beveger seg opp og ned mellom de magnetiske polene og driver samtidig rundt jorda i øst-vest retning. Etter en viss tid vil partiklene ha beveget seg i et volum av rommet som utgjør van Allenbeltene.

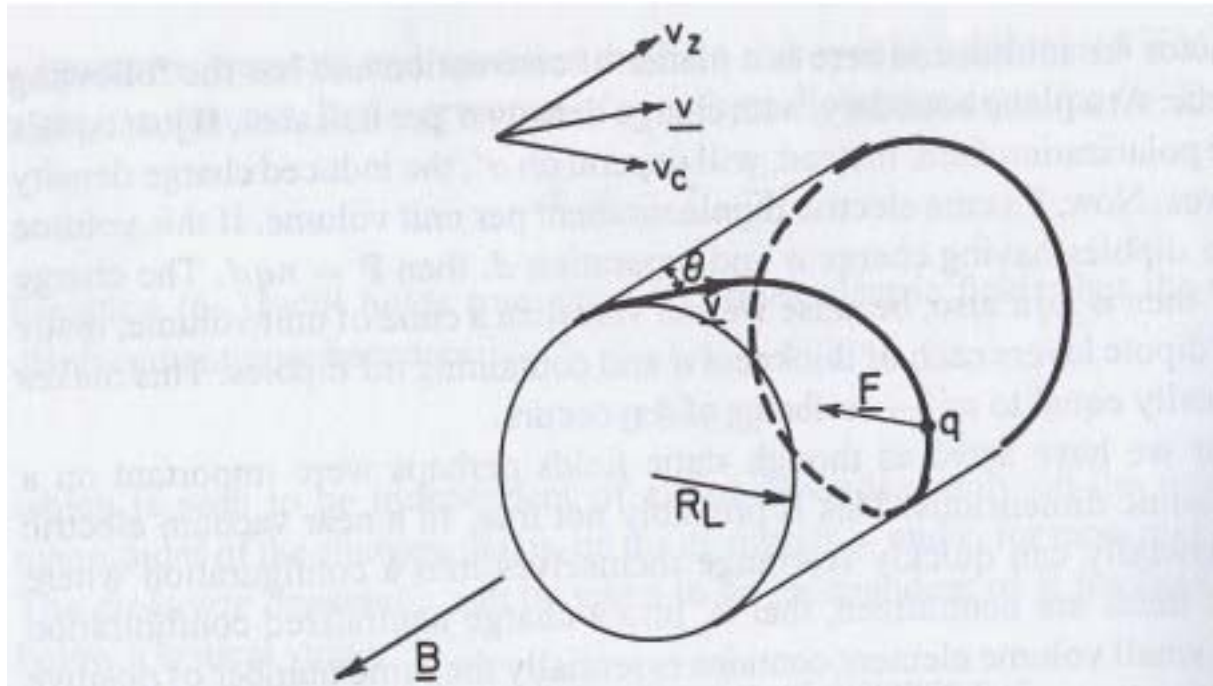


Figur 6: Ladede partiklers makroskopiske bevegelser i jordas magnetfelt (Beatty m.fl. 1999)

Forklaringen på hvorfor ladede partikler beveger seg frem og tilbake mellom de magnetiske polene er at magnetfeltet er sterkere ved polene og svakere midt mellom polene. En elektrisk ladet partikkel som entrer et magnetisk felt vil påvirkes av Lorentzkraften (2).

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (2)$$

Kryssproduktet mellom farten og magnetfeltet viser at denne kraften alltid virker vinkelrett på både feltet og hastigheten. Partikkelen vil derfor få en spiralbevegelse langs magnetfeltet. Magnetfeltet utfører ikke arbeid på partikkelen, og partikkelen vil derfor ikke endre sin energi i denne overgangen i bevegelsesmønster. Spiralbevegelsen kan beskrives ved vinkelen θ , som ligger mellom hastighetsvektoren i retning langs feltet, v_z , og hastighetsvektoren i retning sirkelbevegelsen, v_c . Ligningen for θ er gitt i (3) og Figur 7 viser skjematisk framstilling av spiralbevegelsen og størrelsene v_z , v_c og θ .



Figur 7: Skjematisk framstilling av en ladet partikkels spiralbane i et magnetisk felt, samt komponenthastighetene v_z , v_c og vinkelen θ (Harwit M 1998).

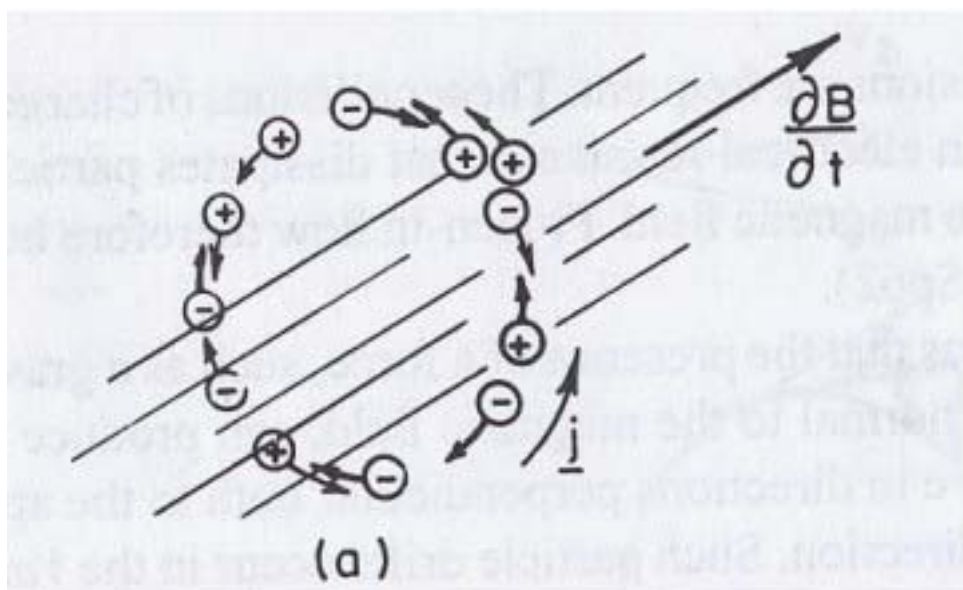
$$\tan \theta = \frac{v_c}{v_z} \quad (3)$$

Radien til en slik bevegelse kalles Larmorradius, R_L .

Videre viser Faradays lov hvordan ladede partikler akselereres i magnetiske felt. Faradays lov er vist på integralform i ligning 4. Her er t tiden en partikkel bruker på å bevege seg i avstanden s i magnetfeltet $\vec{B}$, og $\vec{E}$ er elektrisk strøm.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \vec{B} \cdot d\vec{s} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (4)$$

I Figur 8 er dette skjematisk fremstilt. Når det magnetiske felt økes eller svekkes, vil også strømmen i sirkelbane rundt feltretningen øke eller avta. Dette vil si at ladede partikler akselereres eller retarderes ettersom feltstryken endres.



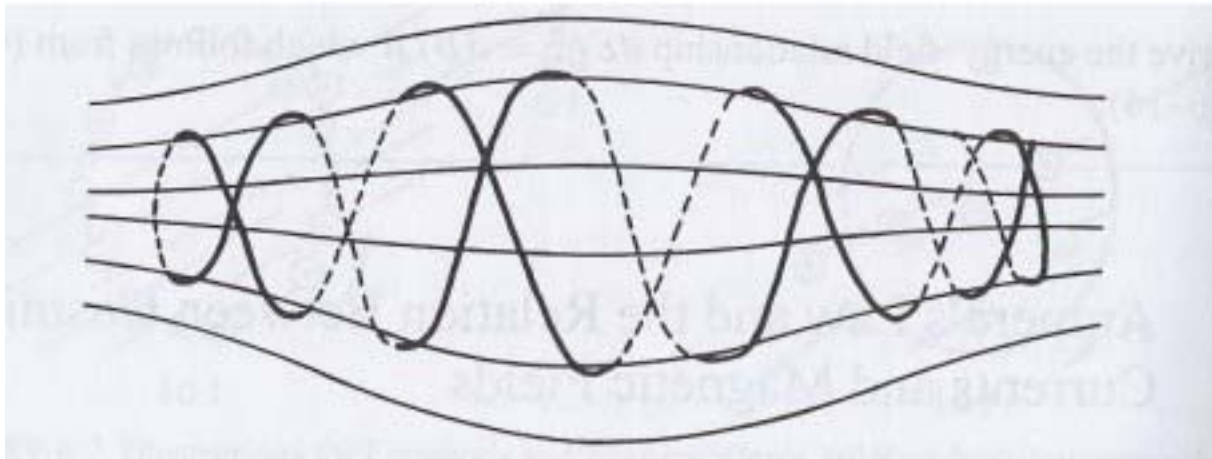
Figur 8: Skjematisk fremstilling av Faradays lov. Endring i magnetisk feltstyrke er opphav til en økende elektrisk strøm i en sirkelbane rundt feltretningen (Harwit M 1998).

En ladet partikkel som er fanget i magnetfeltet til jorda vil bevege seg i en spiralbane langs feltlinjene mot magnetisk nord- eller sørpole. Den vil bevege seg inn i et område der magnetfeltet blir sterkere og sterkere. Ifølge Faradays lov vil dette føre til en økning i den sirkulære hastigheten, v_c . Siden magnetfeltet ikke utfører arbeid på partikkelen, kan ikke den totale hastigheten, v , endres. Endring i kinetisk energi i hastighetskomponenten i sirkelretning må derfor bli overført fra komponenten i feltretningen. Dette fører til at den ladede partikkelen vil få mindre hastighetskomponent i feltretning og en øket hastighetskomponent i sirkelretning. Når den ladede partikkelen har trengt langt nok inn i området med økende magnetisk felt, vil all kinetisk energi i feltretning være overført til sirkelbevegelse. Vinkelen θ vil da være $\pi/2$, og den ladede partikkelen vil reflekteres og akselerere ut av det sterke felt mot svakere felt. På denne måten vil ladede partikler i jordas magnetfelt bevege seg mellom magnetisk nord- og sørpole.

Den magnetiske kraften virker vinkelrett på hastigheten, og er gitt ved:

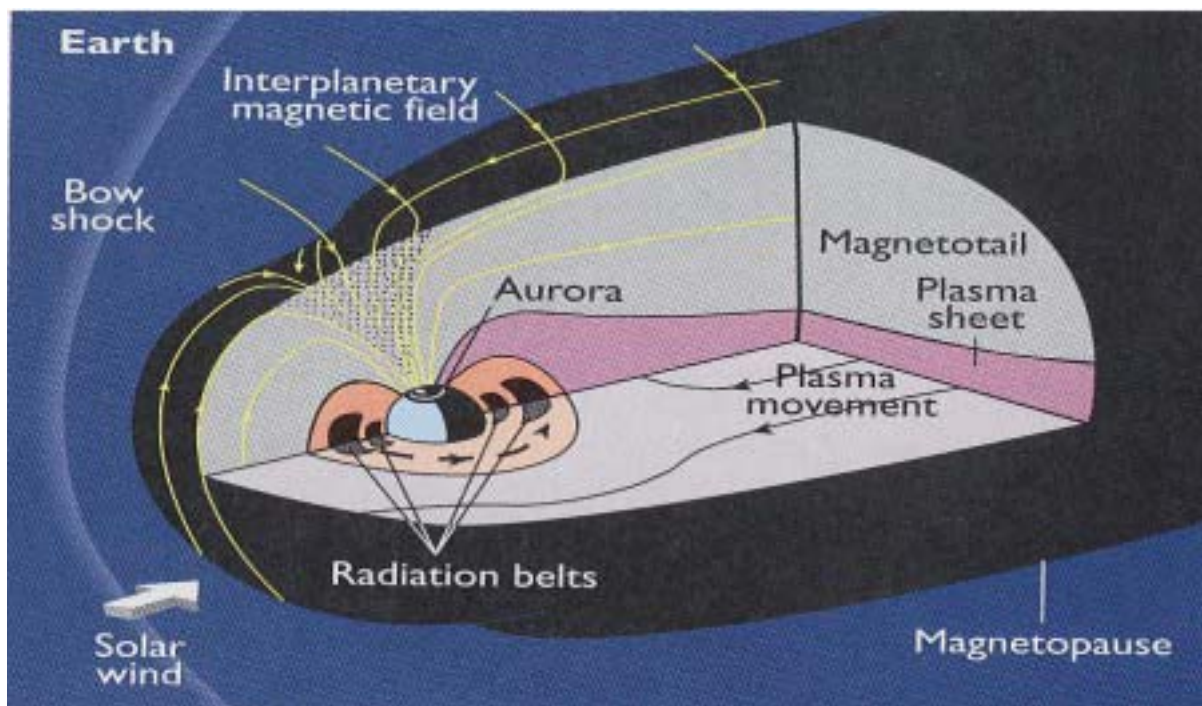
$$F = qvB = m \frac{v^2}{R} \quad (5)$$

Her er B den magnetiske feltstyrken, q ladningen og m massen til partikkelen, v hastigheten i sirkelretningen og R radien til sirkelbevegelsen. Vi ser av denne formelen at radien, R , er omvendt proporsjonal med den magnetiske feltstyrken, B . Det vil si at dersom den magnetiske feltstyrken øker, vil radien minke. Dette fysiske fenomenet kalles en magnetisk flaske. I Figur 9 er ideen om en magnetisk flaske skjematisk fremstilt.



Figur 9: Skjematisk fremstilling av en magnetisk flaske (Harwit M 1998)

I tillegg til at ladede partikler samles i strålingsbeltene rundt jorda, vil en god del ladede partikler fra solvinden samle seg opp i jordas magnetosfærehale. Her vil det etter en stund akkumuleres plasma i et område kalt plasmabeltet (Beatty m.fl. 1999) (Figur 10). Dette området består hovedsaklig av elektroner og protoner fra solvinden som har lekket inn gjennom magnetopausen (Figur 4). Når det skjer en endring i solvindens intensitet, vil det påvirke magnetosfæren og dermed også magnethalen til jorda. Dette kan føre til en magnetisk substorm som endrer magnethalens struktur og som vil sende store mengder plasma utover i halen og innover mot jorda. Dette fører til flotte nordlysforekomster.



Figur 10: Jordas magnetosfære med både strålingsbeltene og plasmabeltene indikert (Beatty m.fl. 1999)

4. Eksitering og emisjon

De ladede partiklene som kommer inn i jordas magnetfelt fra sola, dras inn i atmosfæren ved polene. Lufta i atmosfæren består grovt sagt av 80 % molekylært nitrogen (N_2) og 20 % molekylært oksygen (O_2), og når partiklene som kommer inn i atmosfæren og kolliderer med disse molekylene kan vi få en eksitering av molekylene. Det vil si at elektronene i atomene ”hopper” fra et energinivå til et energinivå med høyere verdi i atomet. Atomet blir ustabilt og kvitter seg med denne energien i løpet av et mikrosekund eller mindre ved at det, idet elektronet faller tilbake til sitt opprinnelige nivå, sender ut et foton med en bølgelengde som avhenger av forskjellen i energi mellom de to energinivåene. Dette kalles emisjon av fotoner. Energien til et foton er gitt ved:

$$E = hf \quad (6)$$

der

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (7)$$

Her er f frekvensen og λ bølgelengden til fotonet, $c (= 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s})$ er lysets hastighet og $h (= 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J/s})$ er Plancks konstant.

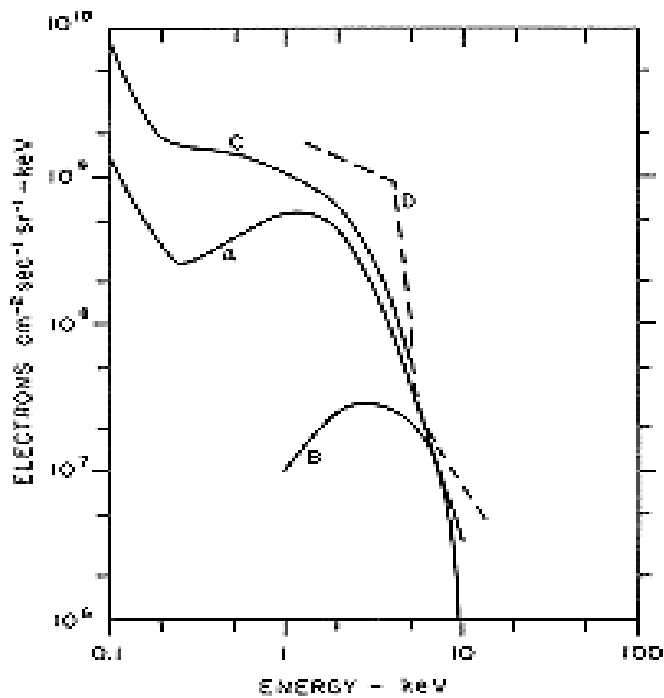
Dersom kvantespranget skjer mellom energinivå E_1 og E_2 , der $E_2 > E_1$, er bølgelengden til lyset som sendes ut gitt ved:

$$\lambda = \frac{hc}{E_2 - E_1} \quad (8)$$

Energinivåene i nitrogenatomene og oksygenatomene er ulike og de emiterte fotonene fra oksygen og nitrogen vil derfor ha ulike bølgelengder. I tillegg kan elektronene i hvert atom slås over en, to eller flere energinivåer og dermed sende ut fotoner med forskjellige bølgelengder. De fotonene som befinner seg innenfor den synlige delen av det elektromagnetiske spekteret er det vi ser som nordlys. De observerte bølgelengdene i nordlysspekteret er nesten alle fra nøytralt eller ionisert N_2 , O , O_2 og N med omtrent samme rekkefølge i betydningen av dem. Det viser seg at den vanligste bølgelengden er 557,7 nm (gulgrønt) og 630,0 nm (gulrødt) fra oksygenemisjon, og 427,8 nm (blått) fra N_2 -emisjon. Fotonene med bølgelengde 557,7 nm tilsvarer et kvantesprang fra den ustabile tilstanden 1N til den stabile tilstanden 1D , og er den aller mest dominerende nordlysemisjonen. Dette er noe underlig, og viser at det må være et enormt stort antall oksygenatomer i 1S -tilstanden under nordlys. Den lange levetiden, hele 0,75 s, til den metastabile 1S -tilstanden, gjør at atomet lett kan utsettes for kollisjoner med andre partikler i lufta. Den ekstra energien til atomet vil da forsvinne og muligheten for et kvantesprang fjernes.

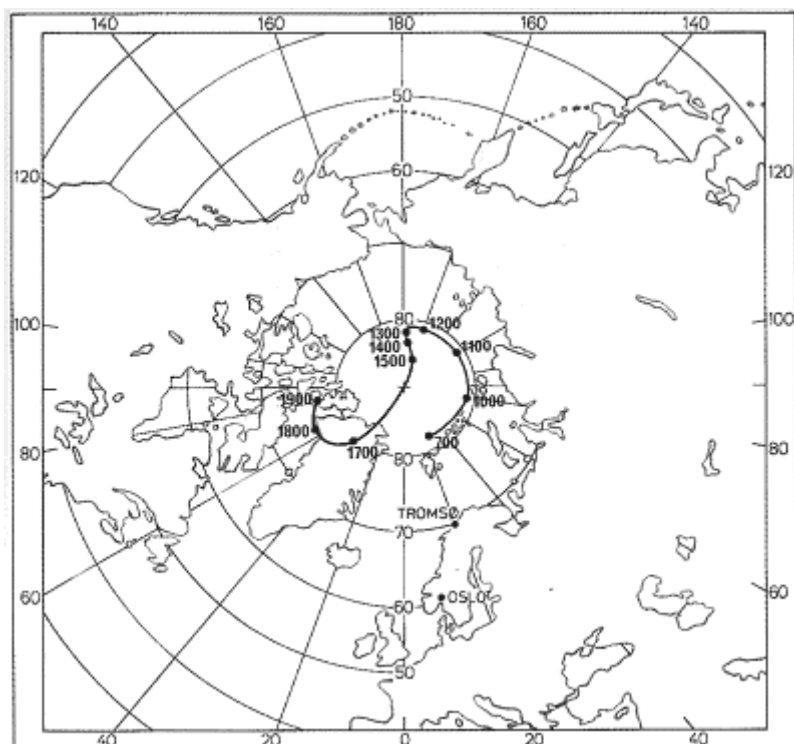
Nordlys forekommer gjennomsnittlig i en høyde på 120 km opp i atmosfæren. Det sterke, grønne lyset forekommer som regel i en høyde fra 120 til 180 km, det røde ofte høyere enn det, mens det lilla og blå vanligvis forekommer under 120 km. Når sola er stormfull, kan det røde lyset forekomme i høyder på 90 til 100 km (Se vedlegg 2). Partiklene som kommer fra sola inn i jordas atmosfære behøver en viss energi for å kunne trenge seg ned langs

magnetfeltlinjene og kollidere med atomene og molekylene i lufta. De fleste elektronene fra sola som kommer inn i atmosfæren har en energi på mellom 1 keV og 10 keV, men her er det en vesentlig forskjell på kvelds- og morgennordlys. Om kvelden har de fleste elektronene en lavere energi enn om morgenen, så morgennordlyset befinner seg på en noe lavere høyde enn kveldsnordlyset. Kveldsnordlys vil derimot være mer intens enn morgennordlys da det er ca. 100 ganger så mange elektroner pr. energienhet om kvelden som om morgenen for den hyppigst forekommende energien. Figur 11 viser energien til innstrømmende elektroner forbundet med ulike nordlysformer ved forskjellige posisjoner i forhold til nordlysovalen.

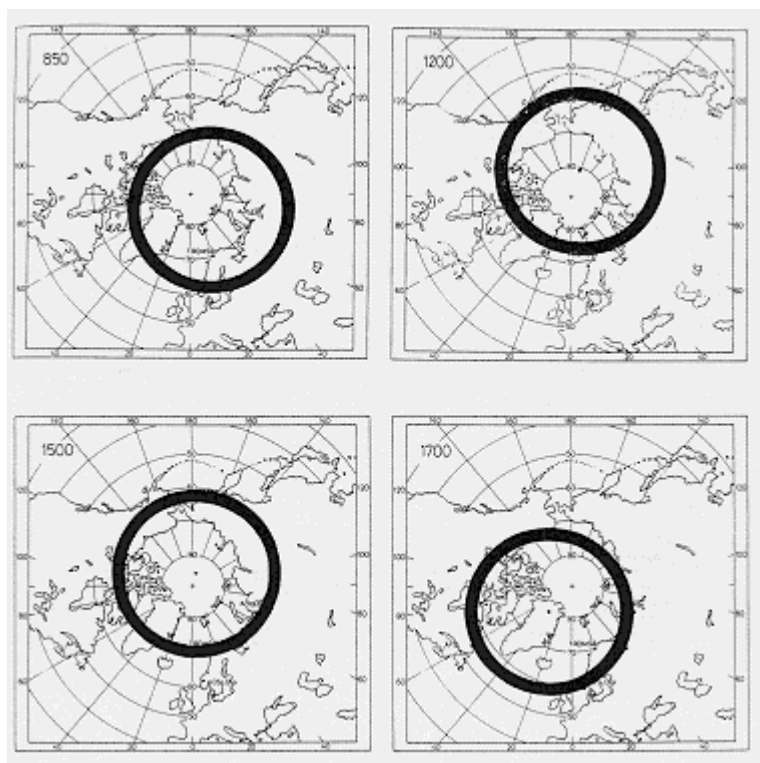


Figur 11: Energispektra av innstrømmende elektroner forbundet med ulike nordlysformer ved forskjellige posisjoner i forhold til nordlysovalen. A: tidlig om kvelden i ovalen; B: tidlig om morgenen i ovalen; C: bred, svak nordlysbue; D: svært forstyrret oval og sterkt nordlys ved midnatt. (Brekke, 1998)

Nordlysbuene over himmelen er deler av en sammenhengende, lysende ring sentrert rundt jordas geomagnetiske pol. Siden jordas magnetosfære avhenger både av jordas geomagnetiske poler og det interplanetariske magnetfeltet, IMF, vil nordlysovalen presses litt sammen på den siden som vender mot sola. Det er viktig å merke seg at de geomagnetiske polene ikke alltid har sammenfalt med nord- og sørpolen, som avhenger av jordas rotasjonsakse (Se vedlegg 1). I løpet av historien har de geomagnetiske polene flyttet på seg, og dermed har også posisjonen til nordlysovalen endret seg. Grunnen til driften i det magnetiske system på jorda er, som nevnt, fremdeles uvisst. Figur 12 viser hvordan den geomagnetiske nordpolen har flyttet på seg i løpet av tiden, og er basert på historisk data. Figur 13 viser posisjonen til nordlysringen for fire ulike perioder i historien.



Figur 12: I løpet av tiden har den geomagnetiske nordpolen flyttet seg rundt i det polare området. Figuren viser en rekonstruksjon av denne bevegelsen. Tallene i figuren er årstall. (Fra Brekke, 1998)



Figur 13: Posisjon til nordlysringen for fire perioder i historien (Fra Brekke, 1998).

I dag ligger ringen sentralt over Troms og Finnmark her i Norge. Om nye 3-400 år vil nordlysforholdene ikke lenger være optimale ved rakettskytefeltet på Andøya, hvor mye av dagens nordlysforskning skjer.

De magnetiske polene er ikke det samme som de geomagnetiske polene. De magnetiske polene er de polene som kompassnåla retter seg inn etter, og er en sammenheng mellom det interplanetariske magnetfeltet og jordas geomagnetiske felt. De geomagnetiske polene er imaginære, de representerer bare retningen på det magnetiske feltet nær jorda, med en tenkt dipol som utgangspunkt. De elektriske strømmene i atmosfæren som oppstår i forbindelse med nordlys vil kunne påvirke de magnetiske polene. Magnetfeltet til jorda vil derfor være mer urolig ved høye breddegrader enn ellers. De største utslagene får man midt på dagen, da den elektriske ledningsevnen i de høyere atmosfærelag er størst, og dermed også strømmene. Det har hendt at kompassnåla har vridd seg hele 10 grader i løpet av en halvtime når nordlyset har opptrådt.

5. Oppsummering

Nordlyset kommer av ladede partikler fra sola som blir fanget opp av jordas magnetfelt og deretter ledet inn mot de magnetiske polene. Når de entrer jordas atmosfære, vil molekylene og atomene i atmosfæren eksiteres. Idet de relaxeres igjen, slippes det ut lys i form av fotoner som vi ser som nordlys her på jorda. Dette fenomenet har fengslet mennesker i uminnelige tider, men det var en nordmann ved navn Kristian Birkeland som innledet den moderne forskningen på nordlyset. Gjennom nye eksperimenter kunne han vise at nordlyset kom nettopp av ladede partikler fra sola som traff jorda ved polområdene.

Fra sola er det en konstant strøm av ladede partikler utover i solsystemet. Denne strømmen er ikke uniform. På grunn av solas komplekse magnetfelter vil den slynge ut store mengder partikler i korte og lokale utblåsninger. Selv om magnetfeltene er sammensatte og uforutsigbare, er det en fast syklus i solas aktivitetsnivå. Det går 11 år mellom hver gang solaktiviteten er på et maksimum.

Når partiklene fra sola når jorda vil det meste av plasmaet ledes rundt jorda på grunn av det geomagnetiske feltet som danner et magnetisk skjold. Det interplanetariske magnetfeltet fra sola vil styrke eller svekke jordas magnetiske skjold dersom det står henholdsvis parallelt eller antiparallelt med skjoldet. Når det svekkes vil partikler fra solvinden lettere trenge inn i magnetosfæren, hvor de vil bli fanget. Partiklene beveger seg langs feltlinjene og etter en tid danner de strålingsbelter rundt jorda, Van Allenbeltene. Når disse blir overfylte, eller når det er en markant endring i solvinden, vil partikler bli presset inn i atmosfæren og vi får nordlys. Ladede partikler som entrer jordas atmosfære vil kolliderer med og føre til eksitasjon av molekyler høyt oppe i atmosfæren. Eksitasjon betyr at et elektron i molekylet slås til et høyere energinivå. Når så elektronet faller tilbake til et lavere nivå igjen, vil det frigjøre denne energidifferansen i form av elektromagnetisk stråling, et foton. Disse fotonene har bølgelengder som tilsvarer energidifferansen, og noe av strålingen ligger i spekteret for synlig lys. Siden atmosfæren i hovedsak består av 80 % N_2 og 20 % O_2 , er det klart at de fleste fotonene kommer fra kvantesprang i disse molekylene. Det er det gulgrønne lyset fra oksygenemisjon som er det aller mest dominerende i nordlyset. Etter det kommer gulrødt lys fra oksygenemisjon og blått lys fra nitrogenemisjon. Disse forskjellige fargene oppstår i forskjellige høyder over jorda.

Nordlyset er mer enn bare de fargene en ser på himmelen. De elektriske strømmene som oppstår i ionosfæren, den øverste delen av atmosfæren, på grunn av nordlys, vil kunne påvirke magnetosfæren og føre til forandringer i posisjonene til de magnetiske polene.

6. Litteraturliste

- Brekke, Asgeir (1998), *Fysikk i den polare atmosfæren og nordlyset*:
http://www.afl.hitos.no/mfysikk/atm/polatm_innh.htm, Nordlysobservatoriet,
Universitetet i Tromsø,
- Beatty J.K., Collins Petersen C., Chaikin A (1999), *The New Solar System*, 4.edition, Sky
Publishing Corporation
- Birkeland Innovasjon, *Hvem var Kristian Birkeland?*,
http://birkeland.uio.no/omoss_hvemvar.html, Universitetet i Oslo
- Egeland, Alv: Kristian Olaf Bernhard Birkeland, *En biografi om en av Norges fremste
vitenskapsmenn*, <http://www.museumsnett.no/ntm/no/forskning/birkeland/birkeland.htm>
- Freedman, Roger A. & Kaufmann, William J. (2002), *Universe*, 6.utgave, W.H. Freeman
and Company, New York
- Harwit M, (1998), *Astrophysical Concepts*, 3. edition, , Springer-Verlag New York
- Kjeldseth-Moe, Olav,
http://www.astro.uio.no/ita/undervisning/a101/olavkm/forel/fl/dell_b.html
- Nordlyssenteret (2003), *Nordlys* (Northern lights) <http://www.northern-lights.no/>
- North, G. (1997), *Astronomy Explained*, Springer Verlag Berlin
- Stix, Michael (2002), *The Sun, An Introduction*, 2.utgave, Springer Verlag Berlin
- Thorsen Thor A. (1999), Miljøforum, *Nordlyset*, <http://www.uio.no/miljoforum/stral/t3>
- University of Tennessee, Web syllabus, <http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/index.html>,
Dept. Physics & Astronomy
- Wikipedia, the free encyclopedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Norwegian_200_krones_note

Vedlegg 1: Matematisk beskrivelse av magnetfeltet

Matematisk kan en beskrive det geomagnetiske feltet med potensialet til en magnetisk dipol med dipolmomentet $\mathbf{M}_0$ i første tilnærming. Dette momentet består egentlig av tre delkomponenter: $\mathbf{M}_1$, $\mathbf{M}_2$ og $\mathbf{M}_3$ (figur 1) hvor $\mathbf{M}_1$ er rettet antiparallelt til jordas rotasjonsakse, og $\mathbf{M}_2$ og $\mathbf{M}_3$ ligger i ekvatorplanet. Summen av disse tre er det endelige dipolmomentet

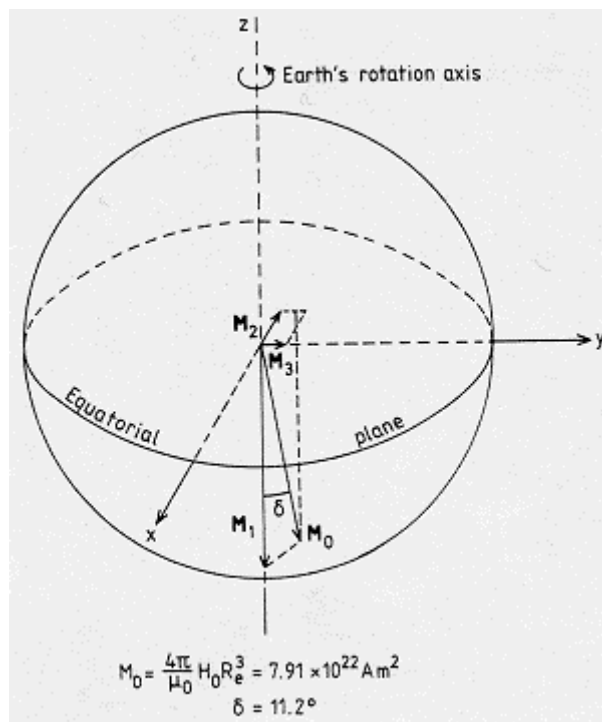
$$\mathbf{M}_0 = \mathbf{M}_1 + \mathbf{M}_2 + \mathbf{M}_3 \quad (1)$$

hvor

$$\mathbf{M}_1 = -7,77 \cdot 10^{22} \hat{z} \text{ (A m}^2\text{)} \quad (2)$$

$$\mathbf{M}_2 = -0,48 \cdot 10^{22} \hat{x} \text{ (A m}^2\text{)} \quad (3)$$

$$\mathbf{M}_3 = 1,41 \cdot 10^{22} \hat{y} \text{ (A m}^2\text{)} \quad (4)$$



Figur 1

De tre dipolleddene $\mathbf{M}_1$, $\mathbf{M}_2$ og $\mathbf{M}_3$ som en i første tilnærming kan beskrive jordas magnetfelt med. Summen av disse tre momentene er det endelige magnetiske dipolmoment $\mathbf{M}_0$ som danner vinkelen δ med jordas rotasjonsakse. (Brekke, 1998, side 35/50, del 2).

$$\mathbf{M}_0 = 7,91 \times 10^{22} \text{ A m}^2 \quad (5)$$

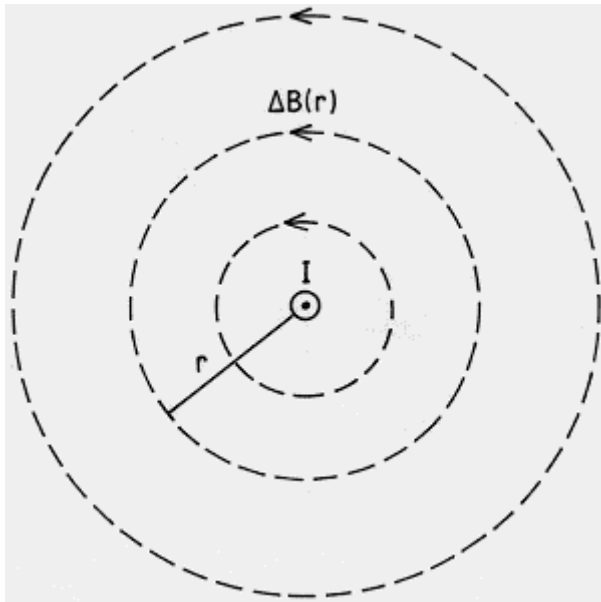
Vinkelen, δ , som $\mathbf{M}_0$ danner med jordaksen, er gitt ved:

$$\tan \delta = \frac{(M_2^2 + M_3^2)^{1/2}}{M_1} \quad (6)$$

Innsatt finner en:

$$\delta = 10,8^\circ \quad (7)$$

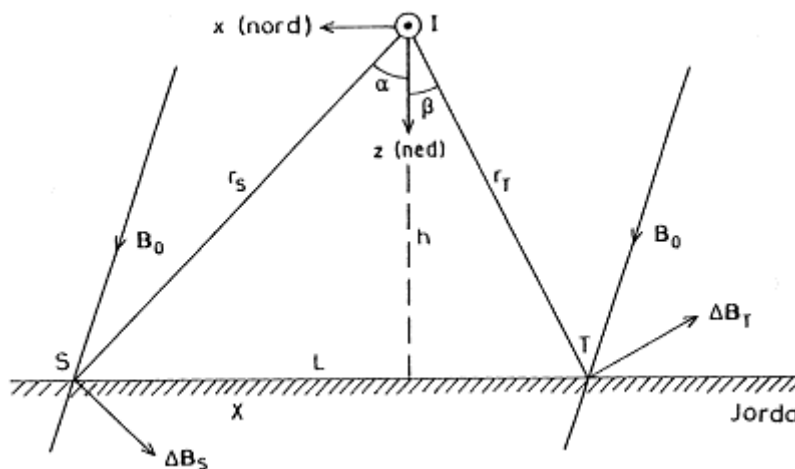
Vedlegg 2: Høyden av en nordlysstrøm



Figur 2: Magnetfeltet rundt en rett strømførende leder kan tegnes som lukkede sirkler med lederen i sentrum.

Rundt en uendelig lang, rett leder som fører en strøm I , vil det dannes magnetfeltlinjer som danner konsentriske ringer rundt lederen. Om lederen med strømmen I er rettet ut av planet som figur 2 viser, vil magnetfeltlinjene danne lukkede sirkler rettet mot klokka, med sentrum i lederen. I avstand r fra lederen vil magnetfeltstyrken $\Delta B(r)$ på grunn av strømmen I være gitt ved

$$\Delta B(r) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (8)$$



Figur 3: En skjematisk illustrasjon av en uendelig lang, rett elektrisk linjestrøm forbundet med nordlys.

En kan tenke seg at den elektriske strømmen forbundet med en nordlysbue er en uendelig lang, rett linjestrøm ut av planet, eller i øst-vest-retning, som vist i figur 3. Her er den

elektriske strømmen med strømstyrke I seg i en høyde h over bakken mellom to punkt S og T i avstand L fra hverandre. L er ikke større enn at magnetfeltlinjene $\mathbf{B}_0$ på de to stedene er parallelle. $\mathbf{B}_0$ er gitt ved

$$B_0 = B_0^x \hat{x} + B_0^z \hat{z} \quad (9)$$

På de to stedene S og T måles de magnetiske utslagene $\Delta \mathbf{B}_S$ og $\Delta \mathbf{B}_T$ på grunn av strømmen henholdsvis. Disse utslagene er gitt ved

$$\Delta B_S = \Delta X_S \hat{x} + \Delta Z_S \hat{z} \quad (10)$$

$$\Delta B_T = \Delta X_T \hat{x} + \Delta Z_T \hat{z} \quad (11)$$

På grunn av Amperes lov (8) må $\Delta \mathbf{B}_S$ og $\Delta \mathbf{B}_T$ stå loddrett på linjene r_S og r_T henholdsvis. Vi finner derfor ved hjelp av likeformede trekanter at

$$\tan \alpha = \frac{x}{h} = \frac{\Delta Z_S}{\Delta X_S} \quad (12)$$

$$\tan \beta = \frac{L-x}{h} = \frac{\Delta Z_T}{\Delta X_T} \quad (13)$$

Ved å legge sammen (12) og (13) og løse med hensyn på h , får vi

$$h = \frac{L}{\frac{\Delta Z_S}{\Delta X_S} + \frac{\Delta Z_T}{\Delta X_T}} \quad (14)$$

Dermed er høyden bestemt av målingene av utslagene i magnetfeltene fra to steder i en kjent avstand fra hverandre.