



Rødkælkens navigation via Jordens magnetfelt

1. Semesterprojekt

NatBach efterår 2019

Skrevet af:

Christian Adam Bruun Faber 67884

Freja Gjettermann 67841

Lauge Markers 69390

Sandra Nørager Jensen 67839

Stefan Roest 67877

Projektvejleder: Mathias Mikkelsen



Roskilde Universitet

Abstract

It has been well documented that some migratory birds use earth's magnetic field to navigate by under seasonal changes in the environment. The sense that allows these birds to register the magnetic field is known as magnetoreception. In this paper we will cover the theory behind the physics and chemistry of the European Robins magnetoreception. The theory postulates that the European Robin navigates by certain molecules in its retina, that when struck by high energy photons, splits into radical pairs which are influenced by the inclination of the magnetic field. We will make calculations and models to show how the bird's journey might be affected if the earth's magnetic poles were to be dislocated from where they are now. Based on the knowledge we have gathered; we will make assumptions about the extent of influence this dislocation will have on the bird's navigational skills. Finally, we will be covering how the magnetic radiation produced by humans, might be disrupting the bird's ability to navigate by earth's magnetic field.

Forsidebilledeⁱ

RUC logoⁱⁱ

Indholdsfortegnelse

Abstract.....	1
Indledning	3
Problemformulering.....	3
Uddybende problemformulering.....	3
Semesterbinding	3
Metode.....	4
Teori	4
Hvorfor migrerer rødkælken?	4
Magnetisme	4
Jordens magnetfelt	5
Kvantemekanisk sammenfildrede elektroner i et magnetfelt.....	6
Magnetoreception	7
Kryptokrom-proteiner.....	8
Dannelse af radikalpar i fuglen	9
Radikalpar	10
Hyperfine interaktioner: interaktioner inde i radikalerne	11
Produktmolekyler	15
Analyse.....	16
Hent data om jordens magnetfelt over Europa.....	16
Omregn til sfæriske koordinater.....	18
Omregn til koordinater i rummet	19
Bestem omdrejningsaksen.....	19
Drej jorden 24 grader mod øst	20
Indhent ny data om jordens magnetfelt ud fra de nye punkter.....	21
Diskussion	22
Konklusion.....	25
Perspektivering	25
Radiobølger.....	25
Vokabularium.....	27
Litteraturliste	28

Indledning

Vi mennesker har ingen idé om hvordan det føles, men vi ved at mange forskellige dyrearter har udviklet evnen til at fornemme jordens magnetfelt. Denne evne er kendt som magnetoreception, og fungerer som en ekstra sans. Mekanismerne bag magnetoreception er ikke ens i alle dyrearter. Visse trækfugle benytter sig af denne sans til at navigere med, når de migrerer under skiftende årstider.

I denne rapport vil vi tage udgangspunkt i teorien bag rødkælkens magnetoreception, som fungerer via kvantemekanisk sammenfiltrering, og redegøre for de spin-kemiske processer, som menes at være nøglen til rødkælkens navigationsevne. Vi vil diskutere hvordan det vil påvirke rødkælkens evne til at finde vej, hvis jordens nuværende magnetiske poler flyttes til et andet sted på kloden.

Rapporten er udarbejdet af fem 1. semesterstuderende fra Roskilde Universitets naturvidenskabelige linje. Målgruppen er andre 1. semesterstuderende på en naturvidenskabelig bachelor, primært studerende med interesse for biologi, fysik og kemi.

Problemformulering

Hvordan bruger rødkælken jordens magnetfelt til at finde vej når den migrerer, og kan den finde frem til et sted den tidligere har været, hvis jordens magnetiske poler forskydes?

Uddybende problemformulering

Når vi siger at jordens magnetiske poler forskydes, menes der, at jordens kerne skal betragtes som en stangmagnet. Denne stangmagnet vil vi gerne have drejet 24° om en omdrejningsakse, således, at begge poler bliver forskudt. Omdrejningsaksen er en ret linje, som går gennem jordens centrum og det geografiske nulpunkt. I vores beregninger tager vi udgangspunkt i en rødkælk som flyver stik syd. Med det sagt, flyver alle rødkælke ikke nødvendigvis stik syd, når de migrerer mod nye territorier.

Semesterbinding

Semesterbindingen lyder: Anvendelse af naturvidenskab i teknik og samfund.

Umiddelbart passer emnet ikke til semesterbindingen, da rødkælkens navigationsevne ingen betydning har for samfundet.

Opindeligt var vi begyndt at skrive om kvantekommunikation, hvilket hænger godt sammen med semesterbindingen. Kvantekommunikation bygger på naturvidenskabelige principper, som

bruges til at implementere noget nyt, hurtigere og bedre for samfundet. Dette emne fandt vi ud af er for svært for os som 1. semester studerende, der aldrig har haft dybdegående kurser om kvantefysik. Kvantekommunikation anvender kvantemekanisk sammenfiltring, som vi synes er meget fascinerende, og vi ville derfor rigtig gerne skrive et projekt baseret på dette fænomen. Rødkælkens magnetoreception ville ikke kunne fungere uden kvantemekanisk sammenfiltring, og vi valgte på den baggrund vores emne. Vi er klar over at emnet ikke opfylder semesterbindingen, men vil pointere at vi har fået grønt lys af vores vejleder til at skrive om dette.

Metode

Vi indsamler informationer fra naturvidenskabelige kilder som artikler, rapporter og bøger, derudover bruger vi optagede forelæsninger og undervisningsvideoer. Vi har lagt vægt på at være kildekritiske.

Teori

For at kunne besvare problemformuleringen vil vi forklare hvordan rødkælken benytter jordens magnetfelt til at navigere med, og kigge på hvilke andre sanser fuglen tager i brug, når den skal migrere, samt fortælle om hvad magnetisme og Jordens magnetfelt egentligt er.

Hvorfor migrerer rødkælken?

Rødkælken (også kaldet rødhals) er en lille sang- og trækfugl, som migrerer ved skiftende årstider. Den opholder sig i områder med rig adgang til føde. Det er typisk steder hvor temperaturen giver gode vilkår for føde i form af frugter, bær og insekter. Befinder den sig i et sådant miljø, vil den blive hvor den er. Rødkælken migrerer til mere frodige områder hvis disse betingelser ikke er opfyldt. Jagten efter føde sender visse rødkælke fra Skandinavien på en rejse så langt som til Nordafrika. Rødkælken har ikke nogen fast destination, når den starter sin rejse. Den leder efter et godt territorie, og slår sig ned hvis den finder et. Rødkælkene er territorielle fugle og migrerer ikke alle sammen. Har en rødkælk fundet et godt territorie med adgang til føde hele året rundt, vil den blive her hele dens liv (1-3 år).ⁱⁱⁱ

Magnetisme

Magnetisme er en kraft som opstår omkring elektrisk ladede partikler i bevægelse. Magneter er dipoler, hvilket vil sige at de har to modsatte poler, nord og syd. To modsatte poler i to magnetiske partikler tiltrækker hinanden, og to dipoler af samme type frastøder hinanden. Forskellige faktorer påvirker magnetismens styrke, fx størrelsen af partiklernes ladning og

farten af partiklerne. Den magnetiske kraft påvirker alle partikler med magnetiske egenskaber, som befinder sig i magnetfeltet. Vi vil især fokusere på de elektrisk negativt ladet elektroner, som altid har et impulsmoment, også kaldet spin. Elektroner i atomer og molekyler sætter sig i par, hvorved deres dipolers magnetiske moment udligner hinanden. Enkelte elektroner er altså magnetiske, i modsætning elektronpar.^{iv}

Jordens magnetfelt

Paleomagnetisk data (se vokabularium) viser at jordens magnetfelt har eksisteret i tre milliarder år. Jordens magnetiske dipoler har skiftet plads mange gange i jordens levetid, og man forventer at det vil ske igen inden for 100.000 år. Jordens magnetiske poler ligger i dag modsat, og en smule forskudt af de geografiske poler. Den magnetiske sydpol ligger altså tæt op ad den geografiske nordpol. Paleomagnetiske observationer fortæller at jordens kerne konstant regenererer magnetfeltet. Forskere antager at det sker pga. konvektionsdynamik mellem den flydende ydre kerne og den faste indre kerne, som begge består primært af jern. Konvektion dækker over bevægelsen af de flydende materialer i jordens kerne, forårsaget af temperaturforskelle i den indre og ydre kerne. Jordens indre kerne vokser og køler langsomt ned ved denne konvektion, da den trækker jern med en lavere temperatur ind til sig fra den ydre kerne. Denne proces afgiver varme og skaber opdrift af lette grundstoffer. Dette samt Coriolis kraften (se vokabularium) fra jordens rotation, skaber spiralformede baner hvori materiale fra jordens indre flyder væk fra kernen. Man går ud fra at det er dette der regenererer magnetfeltet. Se figur 1.^v

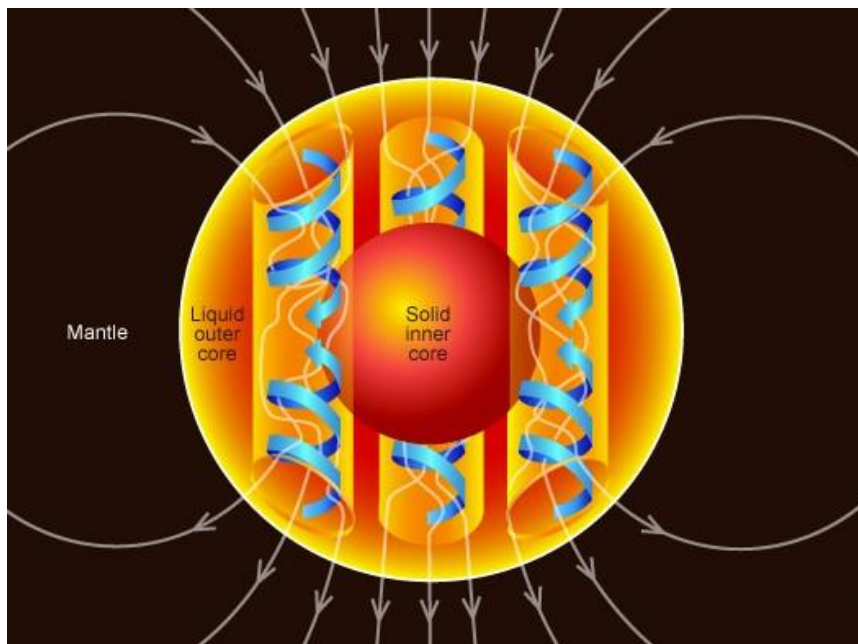


Figure 1: Illustration af hvordan jordens kerne regenererer magnetfeltet.^{vi}

Hældningen, også kaldet Inklinationen er vinklen mellem jordoverfladen og de magnetiske feltlinjer. Inklinationsvinklen på Jordens magnetfelt spænder fra 0° ved ækvator til 90° ved de magnetiske poler. Ved nordpolen vil magnetfeltet orientere sig ned mod jordens kerne, og ved sydpolen vil det orientere sig væk fra kernen. Hvis man står på ækvator, vil feltet orientere sig horisontalt, mod den magnetiske sydpol. Dette er illustreret på figur 2 nedenfor.^{vii}

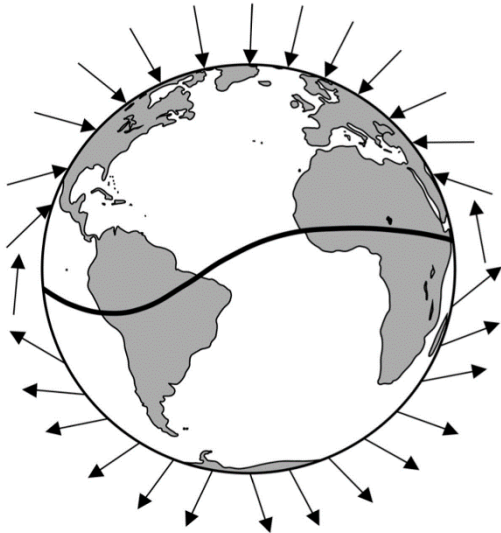


Figure 2: magnetfeltets inklination på jordoverfladen.^{viii}

Kvantemekanisk sammenfiltrede elektroner i et magnetfelt

Fænomenet kvantemekanisk sammenfiltring beskriver forholdet mellem to eller flere partiklers kvantemekaniske tilstande. Når partikler er sammenfiltrede, skal de ikke længere betragtes som individuelle partikler, men derimod som en sammenhængende enhed.

Elektroner har egenskaben spin. Alle partikler med spin har et magnetisk moment, og kan betragtes som små stangmagneter, hvor deres spinvektor kan betragtes som den retning deres magnetiske nordpol peger. Elektronerne befinder sig i en tilstand kaldet superposition, hvilket betyder at deres spin er orienteret i alle og ingen retninger på samme tid. Når man måler på en elektrons spin, vil man dog kun kunne identificere det som enten "spin op" eller "spin ned".

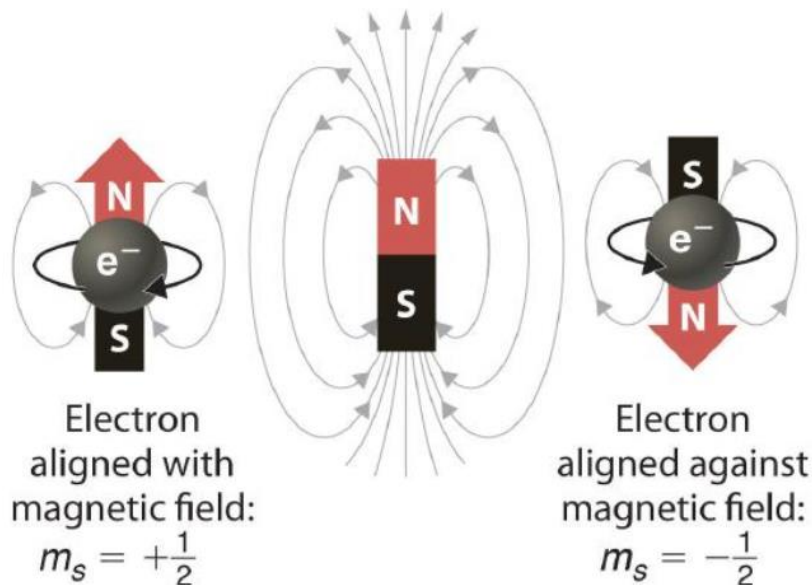


Figure 3: Elektroners spin i et magnetfelt viser sig at kunne identificeres som spin op eller spin ned.^{ix}

Er to elektroner sammenfiltrede betyder det, at den enes spin vil have indflydelse på den andens. Senere vil vi komme ind på hvorfor den kvantemekaniske sammenfiltring er essentiel for rødkælkens magnetoreception.

Elektroner der befinder sig i samme orbital i et atom, kan være sammenfiltrede. Rives disse elektroner ud af deres orbital, vil de stadig være sammenfiltrede i meget kort tid. Det viser sig at rødkælken kan generere disse sammenfiltringer i dens øje, og den kan bevare elektronernes sammenfiltrede stadie i op til et mikrosekund, hvilket er rigeligt med tid for at en spin-kemisk proces kan finde sted. Denne proces vil i sidste ende medvirke til at sende information til fuglen. Dette kommer vi nærmere ind på senere.^x

Magnetoreception

I 1859 blev det for første gang antaget af den russiske zoolog Alexander von Middendorff at visse trækfugle bruger det magnetiske felt til at navigere efter. De første forsøg der understøttede antagelsen om, at der var trækfugle som benyttede jordens magnetfelt til at navigere, blev udført for 50 år siden. I forsøgene lukkede man en rødkælk ned i en tragtformet kasse foret med kradsfølsomt papir på indersiden, hvor lys kunne komme igennem. Fuglen ville herefter forsøge at flyve mod den retning, den havde tænkt sig at flyve under sin migration. Herefter kunne man kigge på de efterladte kradsemærker på papiret, og finde ud af hvilken vej fuglen havde forsøgt at flyve. Dette forsøg blev lavet med en masse rødkælke, og det viste sig at fuglene foretrak at flyve i en bestemt retning, afhængigt af hvilken årstid det var. Der er siden blevet opstillet lignende forsøg, hvor der er blevet opstillet et eksternt magnetfelt, som rødkælkene befandt sig i. Hvis rødkælkene i forsøgene gerne ville mod nord, og nord- og sydpolen i magnetfeltet blev byttet rundt, tilpassede rødkælkene sig de nye magnetiske poler

og ville dermed forsøge at flyve mod den nye opstillede nordpol. Disse forsøg har dermed bevist at magnetfeltet påvirker rødkælkenes valg af flugtveje.^{xi}

I år 2000 teoretiserede den tyske biokemiker Klaus Schulten mekanismerne bag kompas-sansen i rødkælken. Han beskrev hvordan et bestemt molekyle, ved navn kryptokrom 4, kunne være ansvarlig for magnetoreception. Overraskende nok postulerede han, at man skulle ty til kvantemekanikken for at forstå de første skridt i denne proces.

Processen bag den kemiske reaktion som menes at være ansvarlig for magnetoreception i rødkælken, aktiveres af fotoner med en bølglængde mellem 450 til 600nm, som opfanges i rødkælkens øjne. Forskere har registreret høj hjerneaktivitet i fuglens visuelle center, under de sæsonskift hvor fuglen migrerer.

Man har i forsøg blokeret fuglens ene øje, og er kommet frem til at kompassansen kun aktiveres i hvert øjes korresponderende hjernehalvdel, dvs. at hvis fuglen mister et øje vil dens magnetoreception forringes drastisk.

Rødkælkens magnetoreception er lysafhængig, da processen kun aktiveres af fotoner.^{xii}

Rødkælkens kompassans fungerer anderledes end det kompas vi mennesker bruger. Rødkælken er nemlig ikke følsom over for polarisationen af jordens magnetfelt. Magnetisk polarisation betyder at et materiales atomare magnetiske komponenter er ensrettede. Dvs. at rødkælken ikke bruger retningen af jordens magnetfelt, men derimod hældningen af det magnetiske felt, som er inklinationen. Den kan på en eller anden måde fornemme inklinationen, og dermed få information om retningen af nord og syd. Dens egen vinkel i magnetfeltet i forhold til inklinationen har stor indflydelse på hvordan den "ser" jordens magnetfelt. Ved ækvator hvor inklinationen er 0°, vil rødkælken ikke kunne orientere sig efter nord og syd.

I rødkælken fungerer det sådan, at alt efter hvordan den er vinklet i forhold til magnetfeltet, vil udbyttet af bestemte biokemiske processer varierer. Forklaring følger.^{xiii}

Kryptokrom-proteiner

Kryptokrom-proteiner i fuglenes øjne, menes at være dét fotokemisk reaktive molekyle, som er ansvarligt for magnetoreception. Disse proteiner er ikke kun observeret i rødkælken, men i mange forskellige dyr og planter - heriblandt mennesker. Foto-excitation sker når der tilføjes energi fra en foton, hvilket kan få en elektron til at hoppe fra et energiniveau til et andet. Kryptokrom er det eneste protein i fuglen, der kan lave radikalpar ved foto-excitation. Derfor er kryptokrom den eneste kandidat for lysafhængig magnetoreception.^{xiv}

Der er foretaget forskellige undersøgelser af hhv. rødkælken og zebrafinken, som tyder på at begge trækfugle benytter kryptokrom-proteinet i deres øjne til at navigere. Undersøgelsen omhandlende zebrafinken blev foretaget af forskere fra Lund universitet i Sverige, og undersøgelsen omhandlende rødkælken blev foretaget af forskere fra Carl von Ossietzky universitet Oldenburg i Tyskland.

Begge undersøgelser viser at disse trækfugle benytter kryptokrom-proteinet, til at navigere via

jordens magnetfelt. I begge undersøgelser blev der kigget på fuglens 3 forskellige kryptokrom-proteiner, Cry1, Cry2 og Cry4. Man fandt ud af at mængdeproduktionen af Cry1 og Cry2 variere i løbet af dagen, hvorimod mængden af Cry4 er konstant, og tilmed øget i træksæsonen. Det menes at fuglene var nødt til at producere Cry4 hele tiden. Cry4 befinder talrigt i øjets nethinde hvor der modtages meget lys, og menes derfor at være subjektet for lysafhængig magnetoreception. Teorien lyder på at når solens lys rammer øjet, vil en foton med passende energimængde ramme Cry4, og tilføre energi til molekylet. Denne energi resulterer i to radikaler, med et delt par kvantemekanisk sammenfiltrede elektroner, hvis spin påvirkes af jordens magnetfelt. En nærmere beskrivelse af radikalpar kommer længere nede. Når fuglen bevæger sig i magnetfeltet, vil elektronerne lade sig påvirke af jordens magnetfelt og give fuglen signal om hvilken retning den skal flyve.^{xv}

Bananfluer har vist sig at have Cry4 i sig. Der er blevet udført et forsøg på bananfluer som ligner det forsøg rødkælken har været igennem. I et forsøg lukkede man bananfluer inde i midten af et rør, så de havde mulighed for at flyve i begge retninger. Ved at lave et statisk magnetfelt over røret viste det sig, at man kunne påvirke hvilken vej fluerne valgte at flyve. Før det statiske magnetfelt blev sat op, fløj fluerne i vilkårlige retninger, men efter magnetfeltet blev etableret havde fluerne samme flugtvej. Forsøget blev gentaget med muterede bananfluer, som alle manglede Cry4. Her viste det sig at fluerne ikke lod sig påvirke af det statiske magnetfelt. Dette understøtter teorien, om at Cry4 er kilden til magnetoreception. Men det er ikke Cry4 i sig selv som giver den magnetiske sans, men i stedet en biokemisk proces, som starter når fotoner fraspalter to radikaler fra kryptokrom-proteinet. Radikaler som er følsomme overfor jordens magnetfelt.^{xvi}

Dannelse af radikalpar i fuglen

Når en foton rammer Cry4, vil et molekyle [AB] inde i proteinet, splittes ved en elektronoverførsel, hvilket skaber et radikalpar bestående af to mindre molekyler $[A^+]\cdot$ og $[B^-]\cdot$. Elektronoverførslen sker i dette tilfælde fordi en elektron fra molekylet [AB] springer fra HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) til LUMO (lowest unoccupied Molecular Orbital). Et spring forårsaget af energien fra en blå eller grøn foton som rammer molekylet [AB]. Molekyler med elektroner i HOMO deler umiddelbart ikke deres elektroner. Disse molekyler er stabile og vil hverken give eller modtage ladninger ved elektronoverførsler. Men de fleste molekyler har også LUMO, dvs. en orbital hvor der er plads til en elektron med højere energiniveau. Dette gælder også for molekylet [AB]. Bliver [AB] ramt af en foton med den rigtige bølgelængde, vil fotonen tilføje en mængde energi til en af elektronerne i molekyles HOMO, som derefter vil hoppe op i molekylets LUMO. Sker dette vil molekylet være modtagelig overfor en elektronoverførsel fra et andet molekyle, vi kalder disse to for elektronmodtagende og -donerende molekyler. Elektronen fra det donerende molekyle vil hoppe over til HOMO i det modtagende molekyle.

Vi har nu to molekyler med en uparret elektron i hver, en i HOMO hos donoren og en i LUMO hos modtageren.^{xvii}

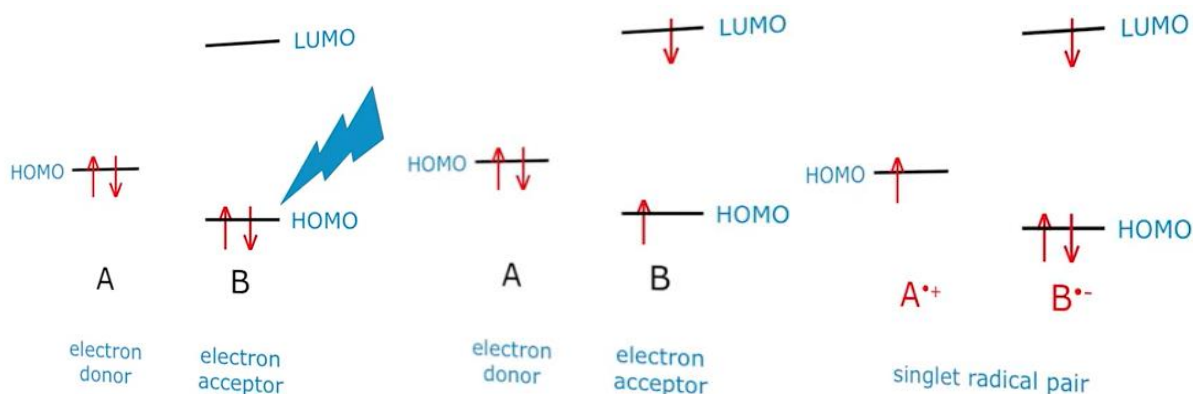


Figure 4: Illustration af et molekyle i Cry4, som rammes af en foton og omdannes til 2 radikaler.^{xviii}

På de to første billeder skal A og B betragtes som to dele af et elektrisk neutralt molekyle. På det sidste billede (længst til højre) skal $[A^+]\cdot$ og $[B^-]\cdot$ ses som to radikaler.

Radikalpar

De fleste molekyler har et lige antal elektroner. Atomerne i molekyler er for det meste holdt sammen ved at dele en elektron fra hvert sit atom, i en kovalent binding. Elektronpar har ikke noget magnetisk moment. Cry4 er ikke magnetisk, da alle dets elektroner er parret. Men de fraspaltede radikaler $[A^+]\cdot$ og $[B^-]\cdot$ vil hver have en fri elektron. Den overskydende elektron i hvert radikale er nu uparret (deler ikke længere orbital med en anden elektron), derfor får hver radikal en ladning. Det ene radikal vil have en elektron i overskud, ergo en negativ ladning, det andet radikal har en elektron i underskud, og får derfor en positiv ladning.

Et radikalpar er to radikaler som dannes samtidig fra samme molekyle. Ved spaltningen deler de mellem sig to elektroner fra samme orbital. Paulis eksklusionsprincip siger at disse to elektroner skal have modsat spin af hinanden, da de tidligere har delt samme orbital. Samtidig er de forbundet ved kvantemekanisk sammenfiltring. Derfor vil elektronernes spin stadig påvirke hinanden, efter de er blevet fordelt ud på hver sit radikal. Alle reaktioner som involverer begge radikaler vil bevare spin. Loven for spinvinkel moment siger nemlig, at spin vil bevares i en hver reaktion hvis ikke en ydre kraft påvirker systemet. Når elektronerne har modsat spin er de på singlet tilstand. De radikalpar der produceres fra Cry4, vil altid dannes på singlet tilstand.

En elektron har altid spin $\frac{1}{2}$ eller $-\frac{1}{2}$. I singlet tilstand er spin kvantetallet 0, da de to spin udligner hinanden $\frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0$ ($\uparrow\downarrow$).

Radikalpar kan påvirkes til også at kunne være på triplet tilstand. Her er elektronernes spin parallelle ($\uparrow\uparrow$) eller ($\downarrow\downarrow$). Her er spin kvantetallet $\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$ eller $-\frac{1}{2} - \frac{1}{2} = -1$.

Hvis de to radikaler ikke ligger alt for tæt på hinanden vil deres magnetiske interaktion være så svag, at et magnetfelt på kun $50\mu\text{T}$ (som jordens magnetfelt) kan påvirke dem og ændre deres tilstand.^{xix}

Hyperfine interaktioner: interaktioner inde i radikalerne

Nogle atomers kerner har spin, og er derfor magnetiske. I radikalerne, vil kernernes spin reagere med elektronens spin, hvilket kaldes hyperfine interaktioner.

1-Hydrogen (H) og 14-Nitrogen (N) har kerne spin, og næsten alle organiske radikalpar har en eller flere H- og N-kerner. I organiske radikaler sidder den frie elektron ikke fast til et atom, dens orbital er spredt ud over hele radikalet, derfor kan den lave hyperfine interaktioner med alle H- og N-kerner i radikalet. Grundet elektronens superposition kan disse interaktioner tilmed ske samtidig.

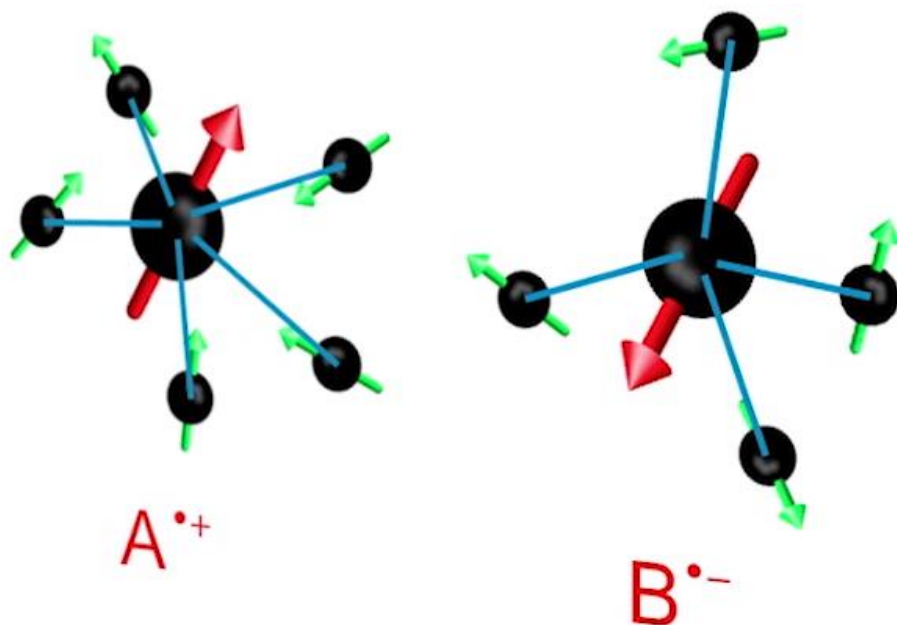


Figure 5: Illustration af elektronernes hyperfine interaktioner med kernerne i hvert radikale. De røde pile repræsenterer elektronernes spin, og de grønne pile repræsenterer kernernes spin. Radikalparret er her på singlet tilstand.^{xx}

Når den frie elektron interagerer med H- og N-kernerne, vil der nogle steder skabes et større magnetfelt end andre steder i radikalet, hvilket gør radikalet anisotropisk. Anisotropi betyder at et materiales fysiske egenskaber er retningsafhængige, dvs. at visse materialer har forskellige egenskaber, afhængigt af hvilken vej de vender i forhold til den kraft de interagerer med. De hyperfine interaktioner ændrer sig afhængigt af magnetfeltets retning i forhold til radikalerne.

For at rødkælken skal kunne bruge de hyperfine interaktioners anisotropiske egenskaber til at detektere retningen af jordens magnetfelt, er det derfor essentielt at alle kryptokrom-

molekylerne sidder i en bestemt fast struktur. Sådan at radikalerne derfor altid vil reagere på samme måde, med retningen af jordens magnetfelt.

Hyperfine interaktioner sker spontant mellem en kerne og en elektron, hvis de begge har spin. Herved opstår der et magnetfelt mellem kernen og elektronen. Hyperfine interaktioner skaber ofte et meget stærkere magnetfelt, end jordens magnetfelt. Jordens magnetfelt modificerer derfor blot elektronens position i forhold til kernerne.

De hyperfine interaktioner i radikalet $[A^+]$, kan omvende elektronens spin i radikalet så den får samme retning som i det korresponderende radikal $[B^-]$. Hvis dette sker, vil radikalparret gå fra den oprindelige singlet-tilstand, hvor elektronerne havde modsat spin, til en triplet tilstand, hvor deres spin er parallelle. Men elektronparrene ændrer ikke bare deres tilstand én gang, de oscillerer (flere millioner gange i sekundet). Dette sker fordi elektronernes spintilstand fluktuerer (se vokabularium) med meget høj hastighed pga. de hyperfine interaktioner. Radikalparrene kan ses som værende enten på singlet- eller triplet tilstand, afhængigt af hvilket spin de to elektroner har. Hastigheden hvormed dette sker, er bestemt af de hyperfine interaktioners styrke, altså det magnetfelt der dannes mellem elektronen og kernen. Vi husker at de hyperfine interaktioner bliver påvirket af jordens magnetfelt. Sandsynligheden for om radikalparrene er på singlet eller triplet-tilstand, påvirkes altså af både indre og ydre magnetfelter, henholdsvis magnetfeltet mellem elektronen og kernen og jordens magnetfelt.

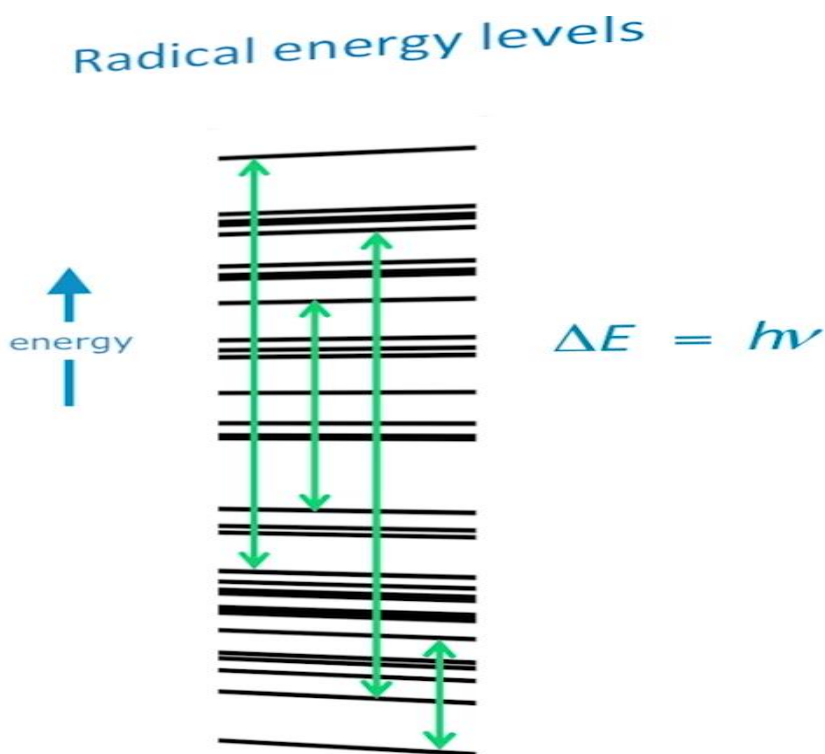


Figure 6: Illustration af forskellen i energiniveauerne mellem elektron og kerner i et radikal.^{xxi}

Så hvorfor sker disse oscillationer?

ΔE repræsenterer forskellen i energiniveauer mellem elektronens og kernerens spin i et radikal. Er der mange kerner med spin vil der være mange energiniveauer, da elektronen vil interagere med alle kernerne. ΔE er proportionel med frekvensen. Er ΔE stor vil frekvensen være høj, hvilket betyder at oscillationerne vil ske hurtigere.

$$\Delta E = h * \nu$$

Hvor ν er frekvensen og h er Planks konstant (se vokabularium).

Indfører vi et magnetfelt omkring disse radikaler, ser vi at raten hvormed oscillationerne finder sted vil ændre sig. Dette sker fordi magnetfeltet interagerer med elektronens spin, hvilket derfor fører til en ændring i energiniveauerne, ΔE .

Hydrogens og Nitrogens hyperfine interaktioner i radikalerne har en styrke fra 10-1000 mikro Tesla. Dette svarer til en frekvens fra 300 kHz til 30 MHz. Tiden det tager for en betydelig omdannelse fra singlet til triplet og omvendt, er typisk 10 nanosekunder til 1 mikrosekund.

På figur 7 ses tre grafer, som beskriver sandsynligheden for at finde radikalparrene på singlet tilstand. Da radikalparrene altid dannes på singlet tilstand, starter grafen i 1.0, altså 100%.

På den første graf (sort) ses radikalparrene upåvirket af et magnetfelt, dvs. At sandsynligheden for at finde radikalparret på singlet tilstand er upåvirket.

På den anden graf (blå) udsættes radikalparrene for et magnetfelt. Som tidligere nævnt er de anisotropiske og vender i dette tilfælde, på en sådan måde, at de kun påvirkes af magnetfeltet i en relativ lille grad.

På den tredje graf (rød) er magnetfeltet drejet 90°, dette medfører at radikalparrenes oscillationsfrekvens påvirkes i langt højere grad. Der vil nu opstå en overlejret frekvens på 1,4MHz, som svarer til en periode på 700 ns, ovenpå den allerede eksisterende oscillationskurve.

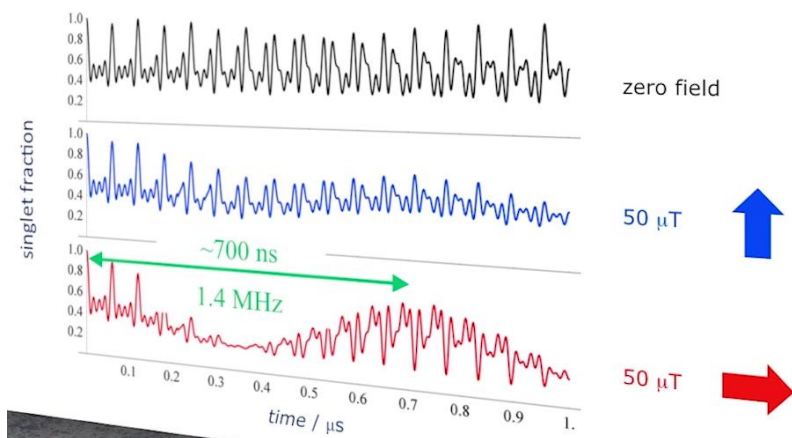


Figure 7: Illustration af jordens magnetfelts indflydelse på oscillationsfrekvensen. Graferne beskriver sandsynligheden for at radikalparret er på singlet tilstand som funktion af tiden.^{xxii}

Spin-dynamikkerne af singlet-triplet oscillationerne, afhænger altså af tilstedeværelsen og ikke mindst retningen af det magnetiske felt i forhold til radikalerne, det har stor betydning for både hastigheden og antallet af oscillationer.

Vi kigger igen på energiniveauer men glemmer de hyperfine interaktioner. Ved fraværet af et magnetfelt og en magnetisk kerne oplever elektronparret ingen magnetisk interaktion overhovedet. spin op ($\uparrow$) og spin ned ($\downarrow$) har her samme energiniveauer. Hvis man tilføjer et magnetfelt, vil forskellen i energiniveauet (ΔE) imellem elektronerne forøges. Konsekvensen af denne energiforskel, vil medføre, at elektronen med spin ned ($\downarrow$) vil få stabiliseret sit spin, fordi dens spin vender imod magnetfeltets retning, hvorimod elektronen med spin op ($\uparrow$) vil destabiliseres, da dens spin er orienteret i samme retning som magnetfeltet.

Vi kan udregne energiniveauerne i et magnetfelt via formlen.

$$\Delta E = h * V_L = g_e * \mu_B * B$$

$$\text{Planks konstant } h = 6.626 * 10^{-34} \text{ J} * \text{s}^{-1}$$

$$\text{Larmor frekvensen } V_L \text{ (Hz)}$$

$$\text{Bohr magnetonet } \mu_B = 9.274 * 10^{-24} \text{ J T}^{-1}$$

$$g_e = \text{Elektron gværdi} = 2.0023$$

$$B = \text{magnetfeltets styrke}$$

B er styrken af det magnetiske felt, som forårsager splittelsen af elektronerne. I dette tilfælde jordens magnetfelt.

Larmor-frekvensen i jordens magnetfelt for en fri elektron er 1,4 MHz korresponderende til en periode på 700 ns. Hvis der ikke sker hyperfine interaktioner, og den uparrede elektron interagerer med et ydre magnetfelt, vil der ske en opdeling af energiniveauet som svarer til Larmor-frekvensen.

Vi ser ud fra ligningen at jo stærkere magnetfeltet er, jo højere vil energisplittelsen mellem de to elektroner være, derved vil der ske flere oscillationer ved en høj B-værdi, det betyder at Larmor-frekvensen er direkte proportionel med styrken af magnetfeltet.

Larmor-frekvensen kan defineres som proportionalitetskonstanten $2.8 \cdot 10^{10}$ ganget med styrken af et givent magnetfelt (B).^{xxiii}

Indtil videre har vi forklaret at jordens magnetfelt kan ændre spin-dynamikken, og ændre sandsynligheden for hvilken tilstand radikalerne er i.

Produktmolekyler

Radikalparrenes tilstand er ikke i ligevægt, derfor skal der som tidligere nævnt kun meget lidt til at ændre deres tilstand.

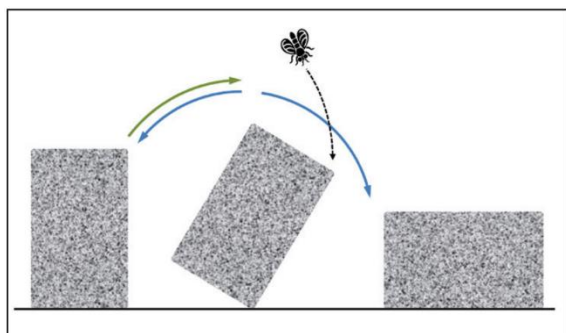


Figure 8: Dette billede er en analogi, som viser at en meget lille kraft (fluen) kan påvirke et ikke-ligevægtigt radikalpars tilstand. Fluen på billedet symboliserer jordens magnetfelt, stenen repræsenterer de ikke-ligevægtige radikalpars tilstand.^{xxiv}

Radikalpar på singlet-tilstand kan omdannes til både produktmolekyler og Cry4. Radikalparrene på triplet-tilstand kan derimod kun omdannes til produktmolekyler. Det betyder at jo flere radikaler vi har på triplet-tilstand, jo flere produktmolekyler vil der opstå. Sandsynligheden for om radikalparrene omdannes til Cry4 eller til produktmolekyler, afhænger derfor af sandsynligheden for om radikalparrene er på singlet eller triplet tilstand, hvilket, som vi husker afhænger af deres vinkel ift. jordens magnetfelt.

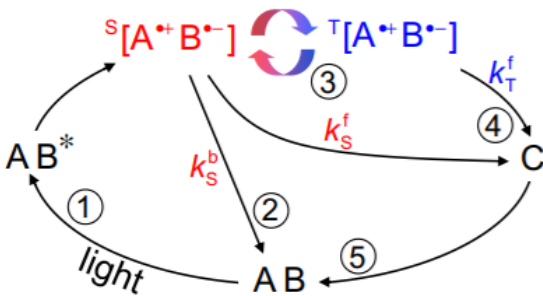


Figure 9: Illustration af radikalarrens oscillationer fra singlet til triplet. Samt reaktionerne af radikalarrene fra enten singlet eller triplet.^{xxv}

Radikalarrene i fuglens øje vil blive omdannet efter nogle få mikrosekunder, til enten reaktanter eller produktmolekyler.

Jordens magnetfelt blander sig med singlet-triplet oscillationerne og modificerer udbyttet af produktmolekylerne. Størrelsen af udbyttet af produktmolekylerne afhænger af orienteringen af radikalarret med hensyn til retningen af jordens magnetfelt.

Da Cry4 genereres med konstant rate, er mængdeforholdene af Cry4 og produktmolekyler i fuglens nethinde, på et hvilket som helst tidspunkt, et direkte udtryk for hvordan fuglen vender i magnetfeltet. Mængdeforholdene bestemmer de kommende biokemiske reaktioner, som i sidste ende vil videregive et signal til fuglens nervesystem, og informere den om retningen af magnetfeltet.^{xxvi}

Analyse

For at kunne blive klogere på, hvilken indflydelse en ændring af jordens magnetfelt på 24° vil have på rødkælkens navigationsevne. Vi vil starte med at tage udgangspunkt i den tidligere beskrevet magnetoreception. I vores analyser antager vi at Rødkælken flyver stik syd, med det sagt flyver alle rødkælke ikke nødvendigvis stik syd, når de migrerer mod nye territorier

Magnetoreceptionen er som tidligere nævnt en af de sanser, som rødkælken benytter til at navigere med. Ved at dreje jordens magnetfelt med 24° , vil vi undersøge hvor denne sans vil guide fuglen hen. I vores beregninger tager vi udgangspunkt i at rødkælken udelukkende navigerer efter magnetoreception. Det gør vi med de følgende steps:

Hent data om jordens magnetfelt over Europa

Kortet nedenfor viser den præcise inklinationsvinkel over jorden. Den grønne streg repræsenterer en inklinationsvinkel på 0° . De røde linjer viser den nordlige halvkugles inklinationsvinkel, og de blå linjer viser inklinationsvinklerne på den sydlige halvkugle. Der er 4 grader mellem hver streg, og de fede streger repræsenterer hver $20'$ ende grad.

Det første vi gør, er at indsamle data om jordens magnetfelt til 70 forskellige punkter fordelt over Europa med 5 bredde- eller længdegrader mellem hvert punkt. Nedenfor på Figur 13 ses det område som vores indsamlede data dækker over.

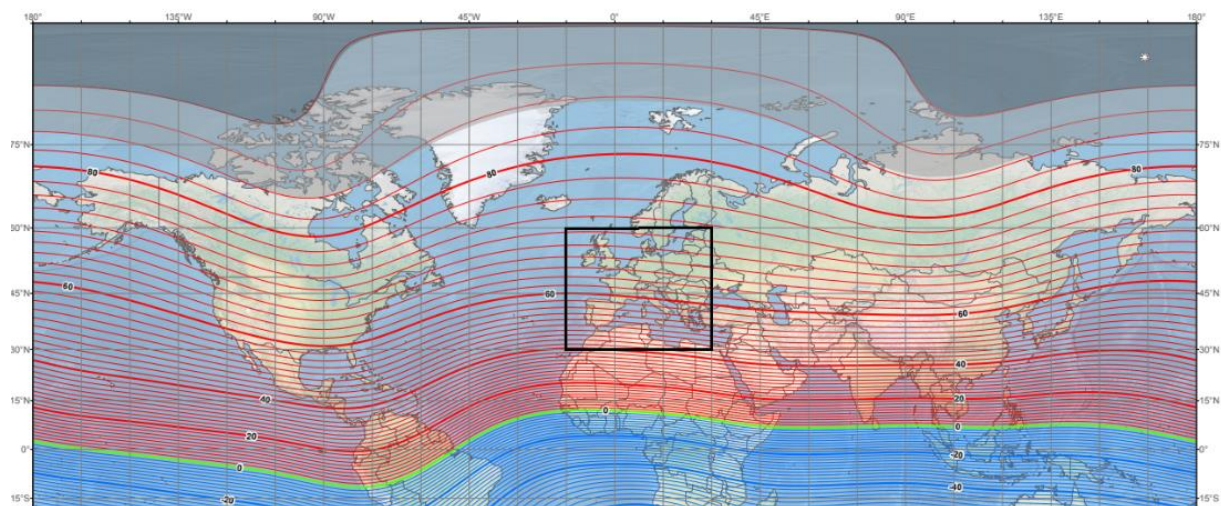


Figure 10: Magnetfeltets inklinations på jordoverfladen. Firkanten markerer det areal, som vores datapunkter dækker over.^{xxvii}

De informationer vi får oplyst til hver af punkterne kan ses på figur 11 nedenfor.

Magnetic Field							
Model Used:	WMM-2020						
Latitude:	60° N						
Longitude:	15° W						
Elevation:	0.0 km Mean Sea Level						
Date	Declination (+ E - W)	Inclination (+ D - U)	Horizontal Intensity	North Comp (+ N - S)	East Comp (+ E - W)	Vertical Comp (+ D - U)	Total Field
2019-12-11	-8.0141°	72.6054°	15,308.7 nT	15,159.2 nT	-2,134.3 nT	48,866.1 nT	51,207.9 nT
Change/year	0.2639°/yr	-0.0071°/yr	14.1 nT/yr	23.8 nT/yr	67.9 nT/yr	24.0 nT/yr	27.2 nT/yr
Uncertainty	0.45°	0.21°	128 nT	131 nT	94 nT	157 nT	145 nT

Figure 11: Data om jordens magnetfelt til punktet (-15°,60°).^{xxviii}

Disse informationer er taget fra det første punkt med de geografiske koordinater:

breddegrad (θ)=15° vest

Længdegrad (ϕ)=60° nord

For hvert punkt noterer vi inklinationen, da det som tidligere nævnt er denne faktor rødkælken navigerer efter.

Vi betragter de 70 startpunkter i et koordinatsystem i planen, hvor øst repræsenterer x-aksen og nord repræsenterer y-aksen. Disse startpunkter kan vi skrive op således:

$$a_{geo} = (\theta_{geo}, \phi_{geo}) = (-15^\circ, 60^\circ)$$

Nedenfor på figur 12 ses de 70 startpunkter over Europa, og deres tilhørende inklinasjon:

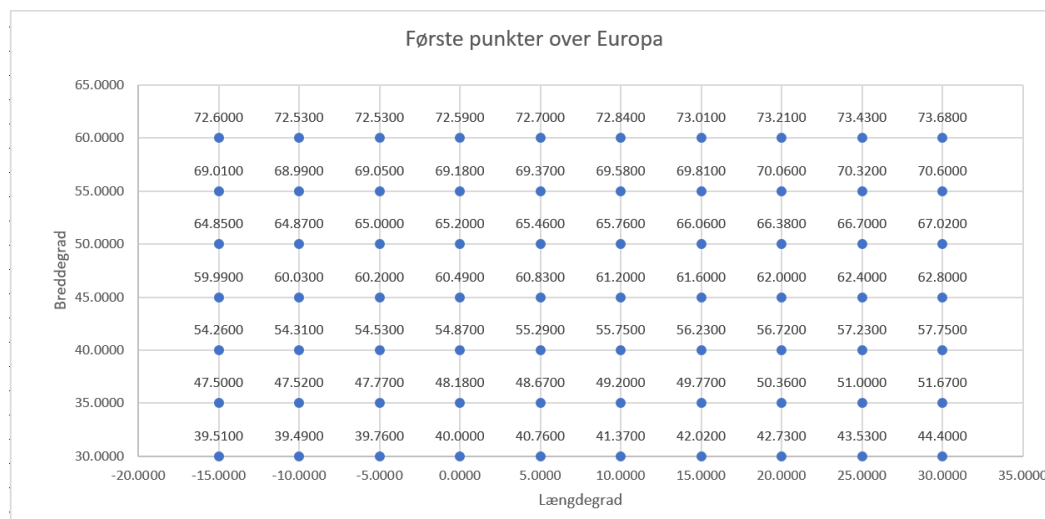


Figure 12: Inklinationen til vores 70 startpunkter, fordelt over Europa.

Omregn til sfæriske koordinater

Vi omregner de geografiske koordinater til sfæriske koordinater, da dette er første skridt til at kunne omregne koordinaterne til tredimensionelle vektorer. Dette gøres ved at bevare breddegraden som den er, og trække længdegraden fra 90° .

$$a_{sfær} = (\theta_{sfær}, \varphi_{sfær}) = (\theta_{geo}, 90^\circ - \varphi_{geo})$$

$a_{sfær}$ = Det valgte startpunkt over EU, angivet som en vektor i rummet, beskrevet med sfæriske koordinater

$\theta_{sfær}$ = Breddegraden i sfæriske koordinater

$\varphi_{sfær}$ = Længdegrader i sfæriske koordinater

Vores første aflæste punkt ($a_{sfær_1}$) kan altså omregnes således:

$$a_{sfær_1} = (\theta_{sfær_1}, \varphi_{sfær_1}) = (\theta_{geo_1}, 90^\circ - \varphi_{geo_1}) = (-15^\circ, 90^\circ - 60^\circ) = (-15^\circ, 30^\circ)$$

Omregn til koordinater i rummet

Man kan omregne sfæriske koordinater til en vektor i rummet med denne formel:

$$\mathbf{a} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin(\theta_{sfær}) * \cos(\varphi_{sfær}) \\ \sin(\theta_{sfær}) * \sin(\varphi_{sfær}) \\ \cos(\theta_{sfær}) \end{pmatrix}$$

Ved at indsætte de sfæriske koordinater fra vores første målte punkt får vi følgende koordinater:

$$\mathbf{a}_1 \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin(\theta_{sfær_1}) * \cos(\varphi_{sfær_1}) \\ \sin(\theta_{sfær_1}) * \sin(\varphi_{sfær_1}) \\ \cos(\theta_{sfær_1}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin(30) * \cos(-15) \\ \sin(30) * \sin(-15) \\ \cos(30) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0.4830} \\ \mathbf{-0.1294} \\ \mathbf{0.8660} \end{pmatrix}$$

Bestem omdrejningsaksen

Vi skal nu definere den omdrejningsakse, som vi ønsker at rotere vores punkter omkring. Vi benytter de geografiske koordinaters 0 punkt som ligger på ækvator, stik syd for Greenwich (London) som vist på figur 13. Omdrejningsaksen er en ret linje som går gennem jordes centrum og det geografiske nulpunkt.

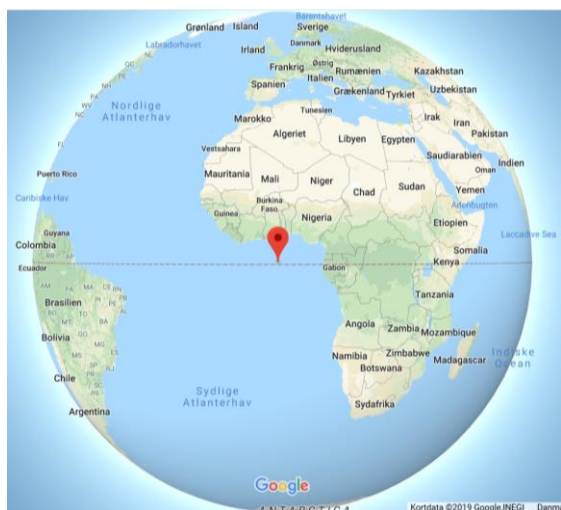


Figure 13: Illustration af det geografiske nulpunkt.^{xxix}

Omdrejningsaksen i geografiske koordinater kan altså skrives op som $\mathbf{k}=(0,0)$.

Dette punkt kan omregnes til de sfæriske koordinater: $\mathbf{k}=(0,90)$, som så kan omregnes til en vektor $\mathbf{k}$ med x,y og z koordinaterne:

$$\mathbf{k} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Drej jorden 24 grader mod øst

Efter at have omregnet vores 70 datapunkter til vektorer i rummet, og defineret en omdrejningsakse, kan vi nu dreje jorden 24° mod øst, for herefter at indsamle data om jordens magnetfelt til de nye forskudte punkter. Dette gøres med denne formel:

$$\mathbf{b} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \cos(\beta) * \mathbf{a} + \sin(\beta) * (\mathbf{k} \times \mathbf{a}) + (\mathbf{k} \cdot \mathbf{a}) * (1 - \cos(\beta)) * \mathbf{k}$$

b= En vektor i rummet, der definerer det forskudte punkt på jordens overflade

β = Roteringsvinklen

a= Det valgte startpunkt over Europa, angivet som en vektor i rummet

k= Omdrejningsaksen

De nye koordinater til vores første vektor (**a**₁) er altså:

$$\begin{aligned} \mathbf{b}_1 \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} &= \cos(\beta) * \mathbf{a}_1 + \sin(\beta) * (\mathbf{k} \times \mathbf{a}_1) + (\mathbf{k} \cdot \mathbf{a}_1) * (1 - \cos(\beta)) * \mathbf{k} \\ &= \cos(24) * \begin{pmatrix} 0.4830 \\ -0.1294 \\ 0.8660 \end{pmatrix} + \sin(24) * \left(\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0.4830 \\ -0.1294 \\ 0.8660 \end{pmatrix} \right) + \left(\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0.4830 \\ -0.1294 \\ 0.8660 \end{pmatrix} \right) \\ &\quad * (1 - \cos(24)) * \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{0.4830} \\ \mathbf{0.2340} \\ \mathbf{0.8438} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Disse punkter skal nu omregnes til geografiske koordinater igen. Dette gøres ved først at omregne til sfæriske koordinater:

$$\begin{aligned} b_{sfær} &= (\theta_{sfær}, \varphi_{sfær}) = \left(\tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right), \frac{\tan^{-1}(\sqrt{x^2 + y^2})}{z} \right) \\ b_{sfær_1} &= \left(\tan^{-1} \left(\frac{y_1}{x_1} \right), \frac{\tan^{-1}(\sqrt{x_1^2 + y_1^2})}{z_1} \right) = \left(\tan^{-1} \left(\frac{0.2340}{0.4830} \right), \frac{\tan^{-1}(\sqrt{0.4830^2 + 0.2340^2})}{0.8438} \right) \\ &= (25.8528^\circ, 32.4576^\circ) \end{aligned}$$

Og herefter omregnes de til geografiske koordinater:

$$b_{geo} = (\theta_{geo}, \varphi_{geo}) = (\theta_{sfær}, 90^\circ - \varphi_{sfær})$$

$$b_{geo_1} = (\theta_{sfær_1}, 90^\circ - \varphi_{sfær_1}) = (25.8528, 90^\circ - 32.4576) = (25.8528^\circ, 57.5424^\circ)$$

Nedenfor ses det område de nye koordinater dækker over.

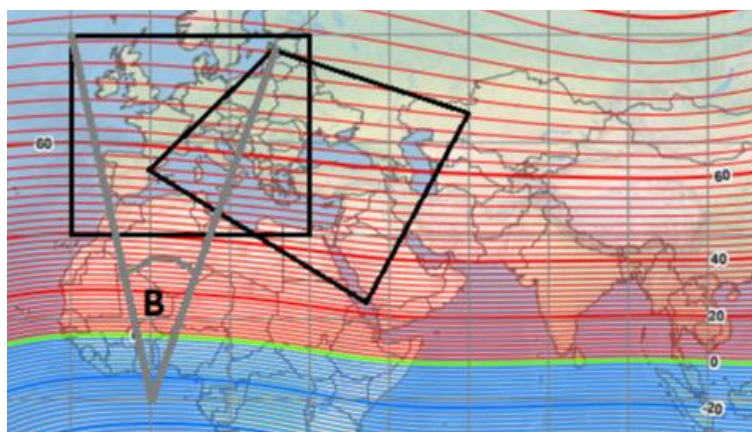


Figure 14: Det areal som hhv. Start- og slutpunkterne dækker over, samt vinklen mellem dem, taget fra det geografiske nulpunkt.^{xxx}

Indhent ny data om jordens magnetfelt ud fra de nye punkter

Efter at have udregnet de nye punkter på jordens overflade, indsamler vi data om magnetfeltet til disse punkter. Vi får følgende informationer fra det første forskudte punkt (b_{geo_1}):

Magnetic Field							
Model Used:	WMM-2020						
Latitude:	57.5424° N						
Longitude:	25.8528° W						
Elevation:	0.0 km Mean Sea Level						
Date	Declination (+ E - W)	Inclination (+ D - U)	Horizontal Intensity	North Comp (+ N - S)	East Comp (+ E - W)	Vertical Comp (+ D - U)	Total Field
2019-12-11	-12.2760°	71.3006°	16,400.1 nT	16,025.2 nT	-3,487.0 nT	48,453.9 nT	51,154.1 nT
Change/year	0.2635°/yr	-0.0240°/yr	24.5 nT/yr	40.0 nT/yr	68.5 nT/yr	5.6 nT/yr	13.2 nT/yr
Uncertainty	0.43°	0.21°	128 nT	131 nT	94 nT	157 nT	145 nT

Figure 15: Data om jordens magnetfelt til punktet (25.8528°, 57.5424°).^{xxxi}

Vi benytter nu de nye indsamlede informationer om inklinationen og forskyder dem tilbage ind over Europa. De nye inklinationsvinkler kan ses herunder på figur 16.

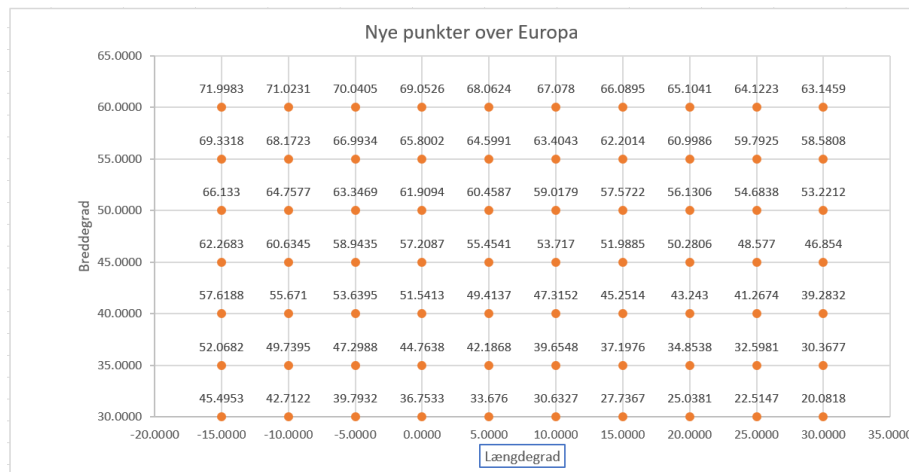


Figure 16: Inklinationen til vores 70 slutpunkter, fordelt over Europa.

Diskussion

I dette afsnit vil vi tolke på udregningerne fra vores analyse. Vi vil tage udgangspunkt i magnetfeltets inklination på startpunkterne over Europa, og sammenligne med inklinationen på de nye punkter.

I analysen har vi lavet nogle udregninger på hvordan jordens magnetfelt ser ud, når det bliver drejet 24° mod vest.

På figur 17 nedenfor, ses inklinationen til vores 70 punkter over Europa. For lettere at kunne forstå grafen, har vi indført nogle linjer, som illustrerer ændringen af inklination over Europa. På figuren kan man se, at linjerne nogenlunde følger Jordens breddegrader. De hælder en smule mod øst, hvilket stemmer godt overens med inklinationslinjerne på figur 14.

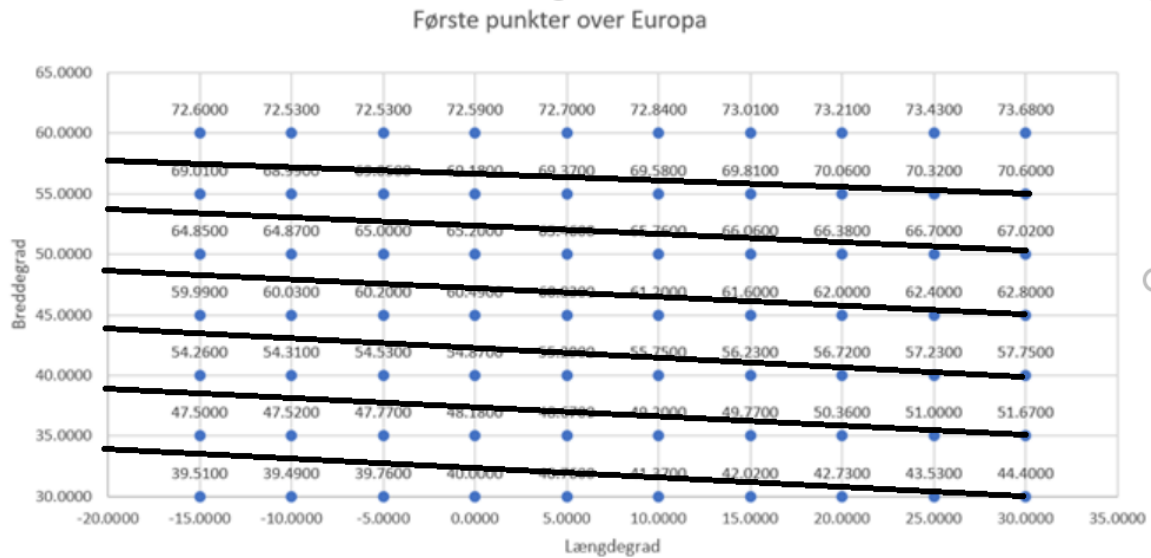


Figure 17: Inklinationen til vores 70 startpunkter, fordelt over Europa. De sorte linjer viser den samme inklination på hele linjen.

På figur 18 illustreres inklinationslinjerne over Europa med de nye forskudte punkter. Her ses det tydeligt at linjerne nu hælder mod vest. Der er også kommet et større spænd mellem min. og max. inklinationen over vores område. Da vi har drejet området således, at det dækker over flere breddegrader, vil forskellen mellem min. og max. inklination i området være større. Se figur 14.

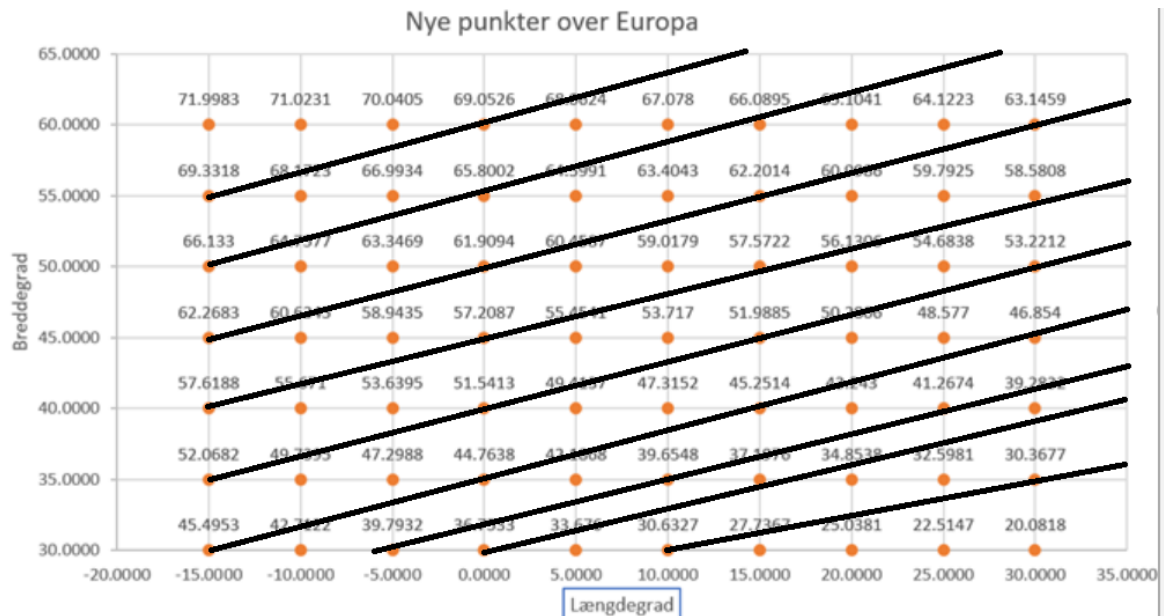


Figure 18: Inklinationen til vores 70 slutpunkter, fordelt over Europa. De sorte linjer viser den samme inklination på hele linjen.

Hvis vi tager udgangspunkt i at rødkælken migrerer sydpå fra København (Danmark) til San Marino (Italien), vil rødkælken flyve på tværs af inklinationslinjerne i det nuværende magnetfelt.

Hvis fuglen på samme måde flyver på tværs af inklinationslinjerne i det nye forskudte magnetfelt, vil den ikke længere flyve med kurs mod San Marino.

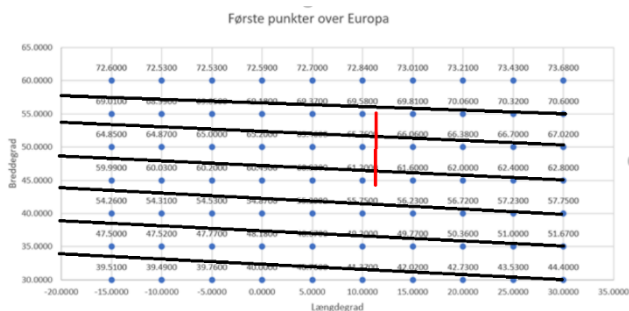


Figure 19: Inklinationen til vores 70 startpunkter, fordelt over Europa. De sorte linjer viser den samme inklination på hele linjen. Den røde streg viser en mulig kurs rødkælken kunne migrere efter.

På figur 19 er der vist strækning fra København (INC 69.68) (55.6,12.5) til Italien (44.2,12.5) (INC 55.11) med det originale magnetfelt og de originale punkter.

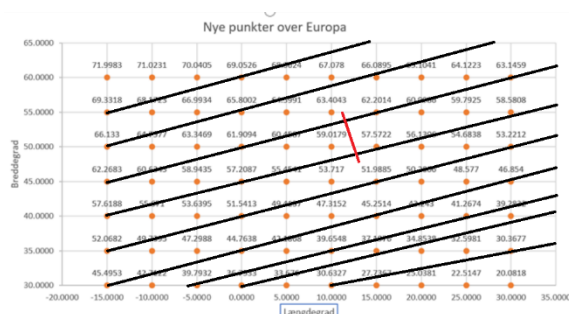


Figure 20: Inklinationen til vores 70 slutpunkter, fordelt over Europa. De sorte linjer viser den samme inklination på hele linjen. Den røde streg viser den nye kurs rødkælken vil tage hvis den flyver efter samme inklination.

På figur 20 er der vist strækning fra København (55.6,12.5) til Italien (44.2,12.5) med det forskudte magnetfelt over de originale punkter)

Rødkælkens magnetiske kompas vil, i det forskudte magnetfelt, i stedet guide den mod et punkt 60 km nord for Berlin. Den vil følge denne retning, og fortsætte til den når frem til dens ønskede naturforhold.

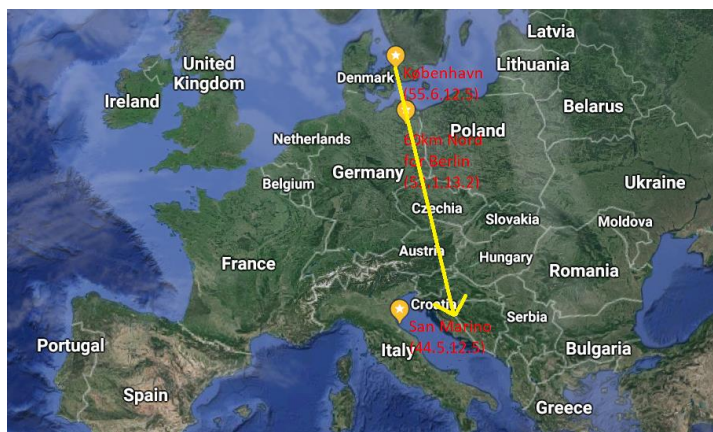


Figure 21: Start punkt (København). Mulig endestation i det oprindelige magnetfelt (San Marino). Efter en forskydning af jordens magnetfelt er Inklinationen 60km nord for Berlin magen til den inklination som lå på San Marino i det tidligere magnetfelt . Pilen illustrerer rødkælkens retning i det nye magnetfelt.

Konklusion

Rødkælken bruger inklinationsvinklen af jordens magnetfelt til at finde vej sydpå. Dette kan den gøre pga. radikalpar som dannes inde i fuglens øje, hvormed en signalgivende biokemisk proces vil give fuglen information om magnetfeltets retning.

Radikalparrene dannes når fotoner med bølgelængde fra 450 til 600 nm rammer proteinet kryptokrom4, som er placeret i fuglens nethinde.

Alt efter hvordan rødkælken vender i forhold til magnetfeltets inklinationsvinkel, vil der dannes en bestemt mængde af produktmolekyler, som starter en signalgivende biokemiske proces.

Mængdeforholdet mellem produktmolekyler og reaktanter, fortæller fuglen om retningen af nord og syd.

Rødkælken stopper ikke ved en bestemt inklinationsvinkel, men bruger den til at bestemme sin kompasskurs når den migrerer. Det er derimod adgangen til føde, der afgør hvor fuglen vælger at stoppe. Hvis rødkælken fulgte en bestemt kompasskurs, for at finde frem til et bestemt sted på jorden, i det nuværende magnetfelt, vil den samme kompasskurs i det forskudte magnetfelt guide den et andet sted hen. En forskydning af magnetfeltet vil give rødkælken en ny retning, og den vil derfor ikke kunne finde tilbage til et sted den tidligere har været.

Perspektivering

Radiobølger

Menneskeskabt stråling kan gå ind og påvirke rødkælkens kompassans, så den bliver desorienteret og ikke kan fornemme retningen af jordens magnetfelt.

Eksperimenter har vist, at rødkælken forstyrres af radiobølger, som udsendes fra alle vores elektroniske apparater, trådløse netværk og radiosignaler.

Prof. Henrik Mouritsen fandt ud af dette i et af sine forsøg med rødkælken, idet at rødkælkene lige pludselig ikke kunne navigere efter et magnetfelt, som de ellers havde kunne i alle forrige forsøg. Dette forsøg foregik i storbyen Oldenburg, og Mouritsen fik den idé at afskærme for den elektromagnetiske støj, så den blev ca. 100 gange svagere. Da forsøget blev afskærmet på denne måde, kunne fuglene igen orientere sig efter magnetfeltet.

I flere eksperimenter er det blevet bevist at trækfuglenes kompassans bliver forstyrret af radiobølger, men at de genvinder kompassansen, når de ikke længere udsættes for radiobølgerne. Fuglene tager ikke permanent skade af strålingen, idet deres kompassans fungerer igen lige så snart de ikke er nær strålingen.

Radiobølger er en undergruppe af elektromagnetiske bølger. Elektromagnetiske bølger består både af et elektrisk felt og et magnetfelt. Disse svinger med en bestemt frekvens, som bestemmer hvilken type stråling det er.

Radiobølger spænder bredt og kan have en frekvens mellem 10^2 - 10^7 Hz.

ELECTROMAGNETIC SPECTRUM

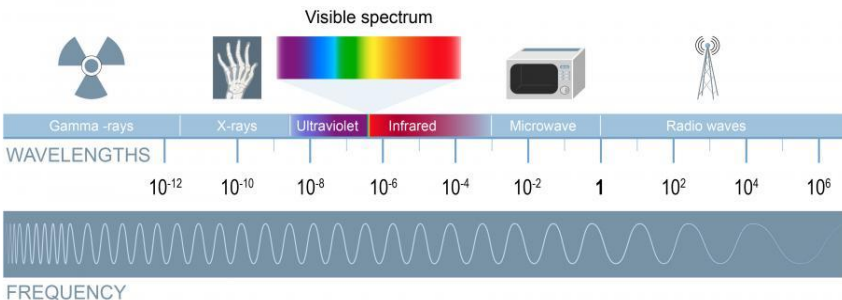


Figure 22: Det elektromagnetiske spektrum, men bølglængder og frekvens. ^{xxxii}

Figurtekst: På billedet ses det elektromagnetiske spektrum. Det ses at radiobølger ligger i spektret med lavest frekvens.

Da radikaler er magnetiske, kan de som tidligere beskrevet påvirkes af magnetfelter, og derfor også af det svingende magnetfelt i radiobølger.

I princippet kan det elektriske felt fra radiobølger også påvirke radikalerne, men denne effekt er for lille til at have nogen særlig betydning her.

Radiobølgernes påvirkning på radikalerne har indflydelse på hvordan radikalparrene hele tiden skifter mellem singlet og triplet tilstand. Radiobølgernes påvirkning kan betyde at radikalparrene befinder sig længere tid på singlet tilstand end på triplet. På singlet tilstand kan de, som forklaret i teoriafsnittet, gå tilbage til at blive kryptokrom, og derfor vil der dannes færre produktmolekyler, så fuglene ikke kan orientere sig optimalt. På den måde påvirker radiobølgerne mængden af produktmolekyler der dannes og dermed det signal der fortæller fuglen om retningen af jordens magnetfelt.

Idet der over de sidste 20 år er sket stor udvikling i elektronik, som udsender radiobølger, bliver radiobølgerne mere udbredt og vil derfor have større sandsynlighed for at ramme rødkælken og påvirke dens orienteringsevne.

Dette kan medvirke, at færre rødkælke finder deres vej sydpå, da chancen for at flyve ind over et område med radiobølger bliver større og større, idet vi får flere trådløse apparater. ^{xxxiii},

Vokabularium

Paleomagnetisk data: Er geofysiske data hentet fra målinger af jordens magnetfelt som ses i sten og sedimenter. Dataene bruges til at redegøre for forhistoriske ændringer i jordens magnetfelt.^{xxxiv}

Corioliskraften: Da jorden roterer, vil bevægelser på den nordlige halvkugle se ud som om de drejer mod højre, hvis vi betragter dem fra jorden. På den sydlige halvkugle vil bevægelserne se ud som om de drejer mod venstre.^{xxxv}

Spin-kemi: Videnskaben som undersøger magnetfelters indflydelse på kemiske reaktioner.^{xxxvi}

Paulis Eksklutionsprincip: To elektroner skal have modsat spin for at dele samme orbital.^{xxxvii}

Oscillation: En periodisk variation af en bestemt partikels tilstand.^{xxxviii}

Plancks konstant (efter Max *Planck*): fundamental naturkonstant med værdien $h = 6,626070040 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ ^{xxxix}

Sekventiel: noget der foregår i en bestemt rækkefølge^{xl}

Litteraturliste

- ⁱ Michelle Starr, "Birds Can See Earth's Magnetic Fields, And Now We Know How That's Possible", ScienceAlert, set 12. december 2019, <https://www.sciencealert.com/birds-see-magnetic-fields-cryptochrome-cry4-photoreceptor-2018>.
- ⁱⁱ "Logoer til download", RUC.dk, set 16. december 2019, <https://ruc.dk/logoer-til-download>.
- ⁱⁱⁱ Melissa Mayntz, "European Robin - Not the Redbreast You Are Thinking Of", The Spruce, 14. april 2019, <https://www.thespruce.com/european-robin-profile-387247>. set 16-12-2019
- ^{iv} Jim Lucas, "What is Magnetism? | Magnetic Fields & Magnetic Force | Live Science", 29. juli 2015, <https://www.livescience.com/38059-magnetism.html>. set 16-12-2019
- ^v Gary A Glatzmaier, "Geodynamo", set 10. december 2019, <https://websites.pmc.ucsc.edu/~glatz/geodynamo.html>.
- ^{vi} "Geodynamo | Vulkane Net Newsblog", set 12. december 2019, <http://www.vulkane.net/blogmobil/wiki/geodynamo/>.
- ^{vii} Y. Usui m.fl., "Evidence for a 3.45-billion-year-old magnetic remanence: Hints of an ancient geodynamo from conglomerates of South Africa", *Geochemistry Geophysics Geosystems* 10 (2009): Q09Z07, <https://doi.org/10.1029/2009GC002496>. set 16-12-2019
- ^{viii} Kenneth J. Lohmann og Catherine M. F. Lohmann, "There and Back Again: Natal Homing by Magnetic Navigation in Sea Turtles and Salmon", *Journal of Experimental Biology* 222, nr. Suppl 1 (6. februar 2019), <https://doi.org/10.1242/jeb.184077>. set 16-12-2019
- ^{ix} David M. Hanson m.fl., "8.4: An Electron Has an Intrinsic Spin Angular Momentum", Chemistry LibreTexts, 17. juni 2014, [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Map%3A_Physical_Chemistry_\(McQuarrie_and_Simon\)/08%3A_Multielectron_Atoms/8.04%3A_An_Electron_Has_an_Intrinsic_Spin_Angular_Momentum](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Map%3A_Physical_Chemistry_(McQuarrie_and_Simon)/08%3A_Multielectron_Atoms/8.04%3A_An_Electron_Has_an_Intrinsic_Spin_Angular_Momentum). set 16-12-2019
- ^x Philip Ball, "Understanding Quantum Entanglement - with Philip Ball", (13. februar 2019), https://www.youtube.com/watch?v=5_0o2fJhtSc. set 16-12-2019
- ^{xi} Jim Al-Khalili, *Do Birds Navigate Using Quantum Physics? | The Secrets Of Quantum Physics | Spark*, 2018, https://www.youtube.com/watch?v=TVorG6_csSA. set 16-12-2019
- ^{xii} Al-Khalili. https://www.youtube.com/watch?v=TVorG6_csSA set 16-12-2019
- ^{xiii} Peter Hore, "Peter Hore on Radical pair mechanism of magnetoreception", (Forelæsning, 10. december 2017), <https://www.youtube.com/watch?v=FytxLiHlah4>. set 16-12-2019
- ^{xiv} Seeker, "This Quantum 'Sixth Sense' Could Allow Birds to Navigate Earth's Magnetic Field - YouTube", 16. juni 2018, <https://www.youtube.com/watch?v=PRYmx7Lk9F0>. set 16-12-2019
- ^{xv} Seeker. <https://www.youtube.com/watch?v=PRYmx7Lk9F0>, set 16-12-2019
- ^{xvi} Claus Nielsen, "Fugle i kvantemekanik by Hjerneblod - issuu", marts 2014, https://issuu.com/hjerneblod/docs/fugle_i_kvantemekanik?fbclid=IwAR0TveWopY-oaxh4pRzKDvuG6LAXuUEYtkpB2R73-AztaQ9VpOV-r5F97is. set 16-12-2019
- ^{xvii} Peter Hore, "Peter Hore on Radical pair mechanism of magnetoreception", (Forelæsning, 10. december 2017), <https://www.youtube.com/watch?v=FytxLiHlah4>, set 16-12-2019, 0:00:00-0:54:16
- ^{xviii} Peter Hore, "Peter Hore on Radical pair mechanism of magnetoreception", (Forelæsning, 10. december 2017), <https://www.youtube.com/watch?v=FytxLiHlah4>, set 16-12-2019, 0:00:00-0:54:16
- ^{xix} Peter Hore, "Peter Hore on Radical pair mechanism of magnetoreception", (Forelæsning, 10. december 2017), <https://www.youtube.com/watch?v=FytxLiHlah4>. set 16-12-2019, 0:00:00-0:54:16
- ^{xx} Peter Hore, "Peter Hore on Radical pair mechanism of magnetoreception", (Forelæsning, 10. december 2017), <https://www.youtube.com/watch?v=FytxLiHlah4>. set 16-12-2019, 0:00:00-0:54:16
- ^{xxi} Peter Hore, "Peter Hore on Radical pair mechanism of magnetoreception", (Forelæsning, 10. december 2017), <https://www.youtube.com/watch?v=FytxLiHlah4>. set 16-12-2019, 0:00:00-0:54:16
- ^{xxii} Peter Hore, "Peter Hore on Radical pair mechanism of magnetoreception", (Forelæsning, 10. december 2017), <https://www.youtube.com/watch?v=FytxLiHlah4>. set 16-12-2019, 0:00:00-0:54:16

-
- ^{xxiii} Peter Hore, "Peter Hore on Radical pair mechanism of magnetoreception", (Forelæsning, 10. december 2017), <https://www.youtube.com/watch?v=FytxLiHlah4>. set 16-12-2019, 0:00:00-0:54:16
- ^{xxiv} Peter Hore, "The Quantum Robin", *NAVIGATION NEWS*, u.å. set 16-12-2019
- ^{xxv} Peter Hore, "Peter Hore on Radical pair mechanism of magnetoreception", (Forelæsning, 10. december 2017), <https://www.youtube.com/watch?v=FytxLiHlah4>. set 16-12-2019, 0:00:00-0:54:16
- ^{xxvi} Peter Hore, "Peter Hore on Radical pair mechanism of magnetoreception", (Forelæsning, 10. december 2017), <https://www.youtube.com/watch?v=FytxLiHlah4>. set 16-12-2019, 0:00:00-0:54:16
- ^{xxvii} The National Geospatial-Intelligence Agency, "World Magnetic Model | NCEI", 1. februar 2019, <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/>. set 16-12-2019
- ^{xxviii} National Geophysical Data Center, "NCEI Geomagnetic Calculators", set 11. december 2019, <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#igrfwmm>.
- ^{xxix} "Google Maps", Google Maps, set 16. december 2019, <https://www.google.com/maps/place/0%C2%B000'00.0%22N+0%C2%B000'00.0%22E/@-0.621412,-1.3145849,3z/data=!4m2!3m1!1s0x0:0x0>.
- ^{xxx} The National Geospatial-Intelligence Agency, "World Magnetic Model | NCEI". <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/> set 16-11-2019
- ^{xxxi} National Geophysical Data Center, "NCEI Geomagnetic Calculators". <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#igrfwmm> set 16-11-2019
- ^{xxxii} Claus Nielsen og Ilia solov'yov, "Er radiobølger skadelige?", 11. juni 2019, <https://videnskab.dk/teknologi-innovation/er-radioboelger-skadelige>. set 16-12-2019
- ^{xxxiii} Claus Nielsen og Ilia solov'yov. <https://videnskab.dk/teknologi-innovation/er-radioboelger-skadelige> set 16-12-2019
- ^{xxxiv} Gyldendal - Den Store Danske, "palæomagnetisme | Gyldendal - Den Store Danske", 24. august 2017, http://denstoredanske.dk/It,_teknik_og_naturvidenskab/Geologi_og_kartografi/Mineraler/palæomagnetisme. set 16-12-2019
- ^{xxxv} "Effektkoefficienten", set 16. december 2019, <http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/da/tour/wres/coriolis.htm>.
- ^{xxxvi} Hore, "The Quantum Robin". http://hore.chem.ox.ac.uk/PDFs/The_Quantum_Robin.pdf, set 16-12-2019
- ^{xxxvii} "Pauli Exclusion Principle", Chemistry LibreTexts, 2. oktober 2013, [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Electronic_Structure_of_Atoms_and_Molecules/Electronic_Configurations/Pauli_Exclusion_Principle](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Electronic_Structure_of_Atoms_and_Molecules/Electronic_Configurations/Pauli_Exclusion_Principle). set 16-12-2019
- ^{xxxviii} "oscillation | Gyldendal - Den Store Danske", set 16. december 2019, http://denstoredanske.dk/It,_teknik_og_naturvidenskab/Matematik_og_statistik/Analyse,_vektor-_og_matrixregning_og_funktionsteori/oscillation.
- ^{xxxix} "Plancks konstant | Gyldendal - Den Store Danske", set 16. december 2019, http://denstoredanske.dk/It,_teknik_og_naturvidenskab/Fysik/Klassisk_mekanik_og_kvantefysik/Plancks_konstant.
- ^{xl} "sekventiel — Den Danske Ordbog", set 16. december 2019, <https://ordnet.dk/ddo/ordbog?query=sekventiel>.