Trekvogels en quantummechanica

Trekvogels leggen vaak indrukwekkende afstanden af tussen de gebieden waar ze broeden en die waar ze overwinteren. In het extreme geval van de rosse grutto kan deze migratie een reis van Alaska naar Nieuw-Zeeland omvatten: een lange tocht over de Grote Oceaan, zonder visuele herkenningspunten. Hoe komen deze vogels dan toch op hun bestemming aan? Een mogelijk antwoord komt verrassenderwijs uit de quantummechanica.



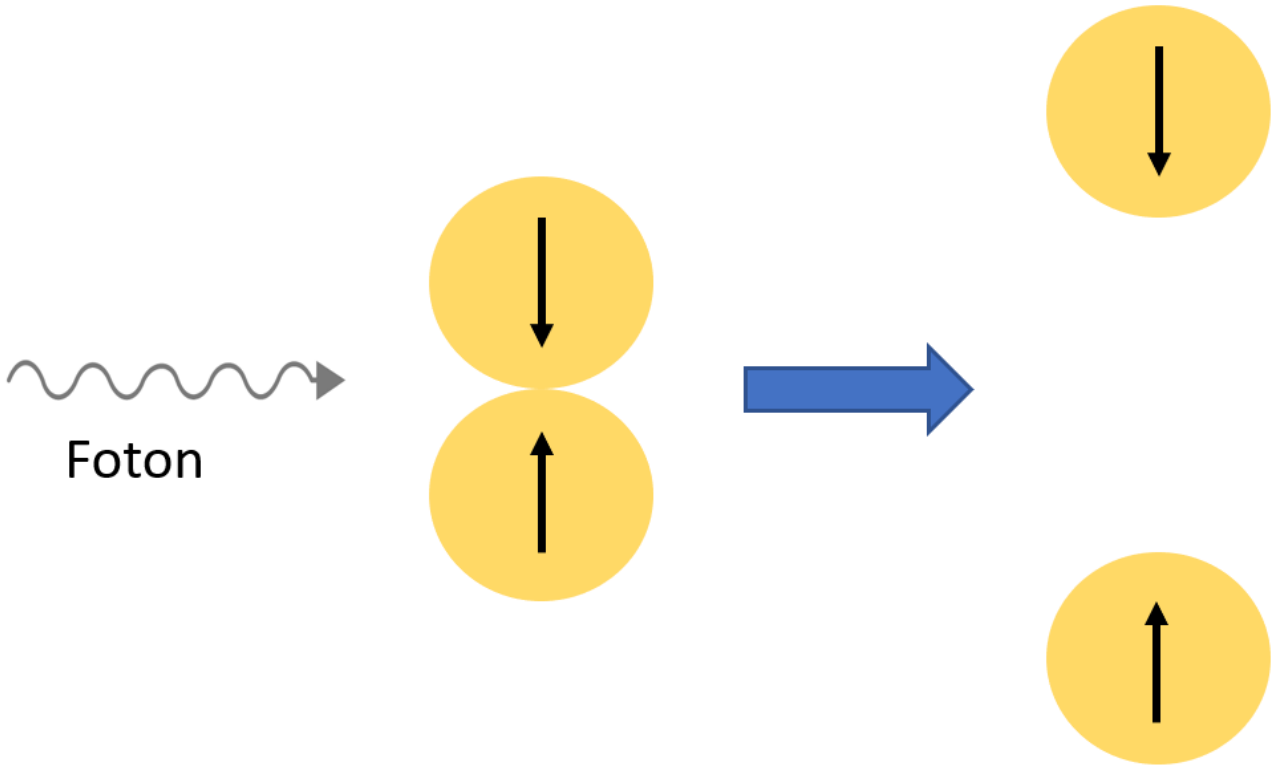
Afbeelding 1. De rosse grutto.De rosse grutto verblijft tijdens zijn migratie ook in Nederland, vooral in de Waddenzee. Foto: Karen Arnold.

Het is al langer dan een halve eeuw bekend dat trekvogels het magnetische veld van de

aarde gebruiken om precies te kunnen navigeren, maar het mechanisme dat dit mogelijk maakt is nog steeds onbekend – vanuit zowel het perspectief van de natuurkunde als dat van de biochemie. De meest veelbelovende hypothese is het zogeheten *radicaalpaarmechanisme*, dat voldoet aan verschillende experimenteel vastgestelde eigenschappen van het kompas van de trekvogels, zoals het feit dat de vogels gevoelig zijn voor de richting van het magnetische veld, maar niet de polariteit. Het is nog niet zeker dat het radicaalpaarmechanisme daadwerkelijk de manier is waarop trekvogels aan de hand van het aardmagnetisch veld de weg vinden, maar het goede nieuws is dat het idee wel onderbouwd wordt door solide theorie, én dat in het lab aangetoond is dat het werkt. In dit artikel bespreken we de natuurkundige basis van het radicaalpaarmechanisme.

Het radicaalpaar

De werking van het radicaalpaarmechanisme is gebaseerd op de *spins* (zie dit artikel voor meer over spin) van elektronen en protonen. De spin van deze deeltjes is een eigenschap die je kunt vergelijken met de oriëntatie van een kleine ingebouwde staafmagneet – denk aan een kompasnaald. Het radicaalpaarmechanisme wordt verondersteld zich in een groot biomolecuul in het netvlies van een vogel af te spelen. Chemische (“covalente”) bindingen in zo’n molecuul bestaan uit twee elektronen die zich in een “tegengestelde” spintoestand bevinden, zodat één spin bijvoorbeeld omhoog wijst, en de andere omlaag. Elektronen zijn namelijk fermionen, en deeltjes van dit type kunnen niet in dezelfde spintoestand zijn wanneer ze zich op dezelfde positie bevinden. Wanneer een foton (afkomstig van de zon) nu de covalente binding raakt, wordt dit deeltje geabsorbeerd, en de opgenomen energie zorgt ervoor dat de elektronen worden opgesplitst. Ze verspreiden zich over het biomolecuul, zonder dat de spintoestand verandert. Omdat elektronen zich in de scheikunde vaak in paren bevinden, heeft een atoom met zo’n los elektron een speciale naam: een *radicaal*. Er worden in dit proces dus twee radicalen geproduceerd, vandaar de naam van het radicaalpaarmechanisme.



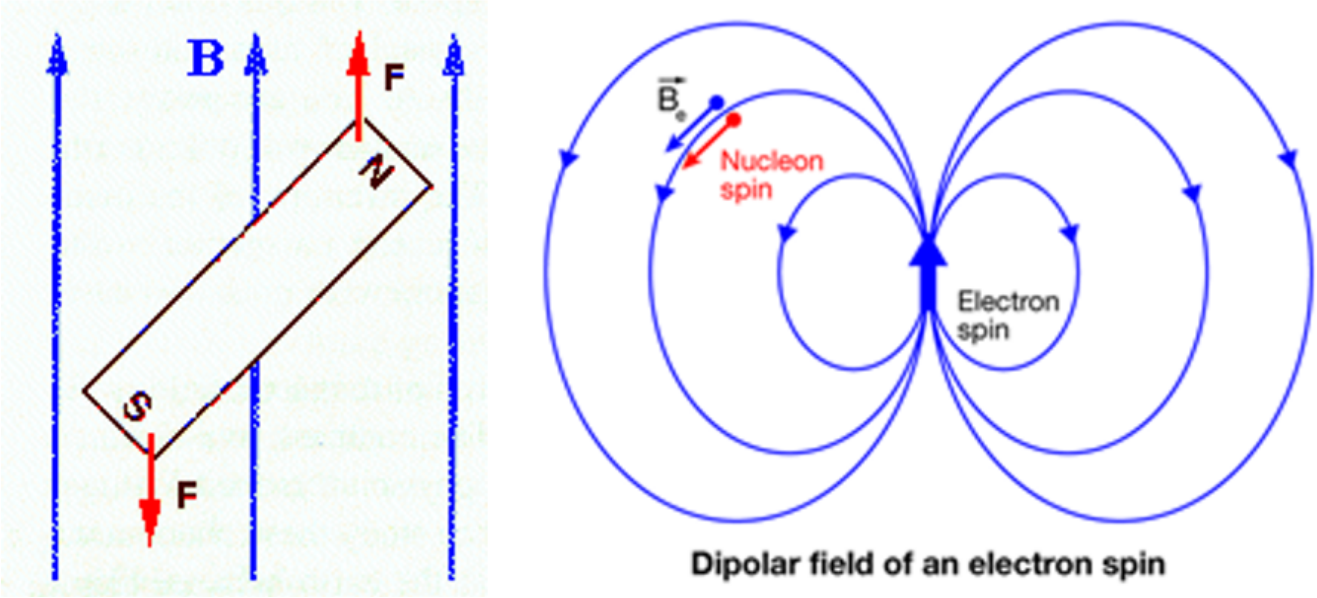
Afbeelding 2. Het ontstaan van een radicaalpaar.Een foton wordt geabsorbeerd door een covalente binding en splitst de twee elektronen. Zo wordt een radicaalpaar gecreëerd. De elektronen hebben tegengestelde spins, afgebeeld als zwarte pijlen. Afbeelding foton: stackoverflow.

Gevoeligheid voor het aardmagnetisch veld

Eenmaal los van elkaar gaan de elektronen interacties aan met de omliggende nucleaire spins van atomen die onderdeel uitmaken van het biomolecuul, en met het externe aardmagnetisch veld. Deze wisselwerkingen heten respectievelijk de hyperfijninteractie en de Zeeman-interactie, en ze beïnvloeden de richting van de elektronspins (zie dit artikel voor een geschiedenis van het Zeeman-effect). Omdat de twee elektronen een verschillende omgeving in het molecuul hebben, is hun hyperfijninteractie niet precies hetzelfde, en kan het gebeuren dat ze van een tegengestelde spintoestand naar dezelfde spintoestand veranderen; in vaktermen is de twee-elektron-spintoestand niet langer een *singlet* maar een *triplet,* omdat de nieuwe toestand een drievoudige symmetrie heeft. Na korte tijd (die onder andere afhangt van de structuur van het molecuul) komen de elektronen weer samen. Dan kan de covalente binding weer hersteld worden – of niet. Dit is afhankelijk van de spintoestand van de elektronen: met tegengestelde spins (in de singlet-toestand) kunnen ze

weer een covalente binding vormen, en met gelijke spins (in de triplet-toestand) niet.

Dit mechanisme speelt zich natuurlijk niet af in een enkel molecuul, maar in een heleboel tegelijk. De hoeveelheid radicaalparen die opnieuw een binding vormen wordt de “singletfractie” genoemd, en deze fractie van paren blijkt vervolgens via de Zeeman-interactie gevoelig te zijn voor het aardmagnetisch veld. Het idee is dat de vogel vervolgens de toestand van de singlet-fractie op biochemische wijze kan aanvoelen, en zo de externe magnetische veldsterkte kan waarnemen.

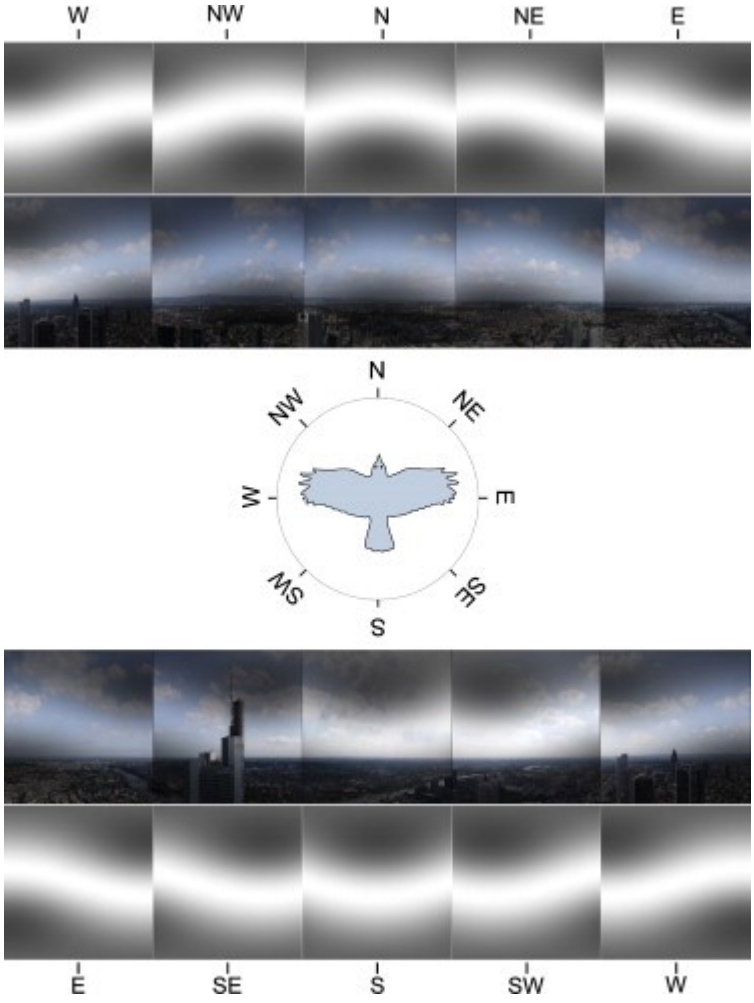


Afbeelding 3. De Zeeman- en hyperfijninteracties.Links de macroscopische versie van de Zeeman-interactie: een magnetische dipool (denk aan een staafmagneet) draait onder invloed van een magnetisch veld tot deze is uitgelijnd met dat magnetische veld. In de Zeeman-interactie in dit artikel is de dipool de spin van het elektron, en het externe magnetische veld dat van de aarde. Rechts is de hyperfijninteractie afgebeeld: in het magnetische veld dat de spin van een deeltje creëert, draait de spin van een ander deeltje, op vergelijkbare wijze als in de Zeeman-interactie. Nu komt het “externe” magnetische veld echter niet van buiten, maar van een andere spin in de buurt. Afbeeldingen: The University of Tennessee, Department of Physics and Astronomy en APS/Alan Stonebraker.

Het kompas

Nu hebben we een manier om de veld*sterkte* waar te nemen, maar dat is nog niet genoeg voor een kompas. Om de *richting* van het externe magnetische veld waar te nemen, moet ergens in het radicaalpaarmechanisme een gevoeligheid voor de oriëntatie van het

biomolecuul ten opzichte van de magnetische veldrichting vandaan komen. De hyperfijninteractie kan deze gevoeligheid hebben, maar alleen wanneer de interactie niet perfect symmetrisch is. Dit werkt als volgt: als de hyperfijninteractie van het elektron met de omliggende atomen sterker is in een bepaalde richting, dan heeft het elektron een referentie-richting om te vergelijken met het externe magnetische veld, wat ervoor zorgt dat de interactie gevoelig is voor rotaties. Deze gevoeligheid voor rotaties is precies wat we nodig hebben om het radicaalpaarmechanisme als kompas te laten werken! Gelukkig zijn er genoeg biomoleculen bekend met zulke asymmetrische hyperfijninteracties.



Afbeelding 4. Het radicaalpaarmechanisme als kompas.Een idee voor de implementatie van het radicaalpaarmechanisme als kompas in het netvlies van trekvogels: als de moleculen waarin het radicaalpaarmechanisme zich afspeelt zich verspreid over het netvlies bevinden, dan varieert de singlet-fractie met de kromming van het netvlies, wat een soort kaart van het magnetisch veld op het netvlies

oplevert. Als dit vertaald wordt in een kleurovergang (grijs onder en boven) bovenop het normale zicht van de vogel, dan kan de vogel de richting van het magnetisch veld zien. Afbeelding: Acuity of a cryptochrome and vision-based magnetoreception system in birds, I. Solov'Yov, H. Mouritsen en K. Schulten.

Cryptochrome

Er is een kandidaatmolecuul waarin het radicaalpaarmechanisme zich in principe zou moeten kunnen voltrekken, met de mooie naam *cryptochrome*. Dit molecuul is gevonden in de netvliezen van trekvogels, maar het is nog niet zeker dat het radicaalpaarmechanisme in dit molecuul ook echt aan de basis ligt van hun kompas. Er zijn inmiddels wel uitgebreide computermodellen gemaakt van het gedrag van cryptochrome-moleculen, en op natuurkundig niveau lijkt alles goed te werken.

Gebeurt wat de computermodellen ons vertellen ook echt in het oog van vogels? Daarnaar wordt op dit moment nog uitgebreid onderzoek gedaan. Wellicht weten we binnenkort dus zeker hoe de rosse grutto met zo'n indrukwekkende precisie navigeert.