

MAGNETNI KOMPAS PTIC

BENJAMIN BATISTIĆ
23 NOVEMBER 2009

KAZALO

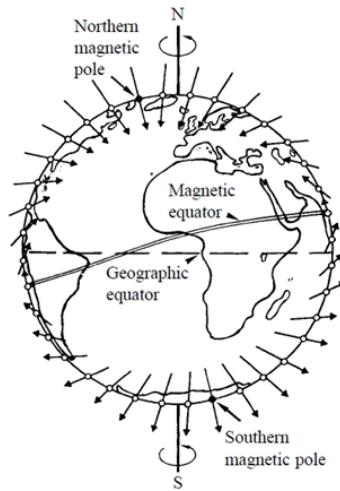
1. Uvod	1
2. Kaj so eksperimentalna dejstva in kakšna je teorija	1
2.1. Zemeljsko magnetno polje	1
2.2. Funkcionalne lastnosti magnetnega kompasa ptic	2
2.3. Različne teorije delovanja magnetnega kompasa	3
3. Mehanizem para radikalov (RPM)	4
3.1. Numerični eksperiment	6
3.2. Magnetni kompas ptic je vezan na vid	7
4. RPM, od hipoteze do realnosti	8
5. Zaključek	9
5.1. Osebno videnje problema	9
Literatura	11

1. UVOD

Osnovno vprašanje je, kako ptice selivke vedo kam leteti v času preseljevanja? Na hitro bi pomislili, da se morda naučijo prepoznavati okoljske znake, na primer, topografske značilnosti, zvezdna slika, dinamika sonca, skratka, takšno ali drugačno vrednotenje vidnega v skladu z neko izkušnjo. Človek si je sestavil kompas, ultimativno orientacijsko napravo, ki izkorišča prisotnost statičnega zemljinega magnetnega polja. Magnetni materiali čutijo v prisotnosti zunanjšega magnetnega polja navor, ki skuša zavrteti magnetne tako, da so silnice obeh polj, zunanjšega in tistega znotraj magnetne, poravnane. Ptice vsekakor ne premorejo dobesedno iste mehanične naprave, lahko pa bi izkoriščale osnovno idejo in se orientirale na osnovi magnetnega polja. Slika magnetnega polja je zelo surova in izčiščena informacija, dovolj interpretacijsko enolična, da bi jo lahko evolucija preferirala in razvila učinkovit bio-detektor. Uporaba magnetnega kompasa pri pticah je dejansko dokazana, najprej za *Erithacus rubecula* (Taščica) [1] in kasneje še za 17 ptic [2]. Naravno sledi naslednje vprašanje. Kaj je biofizikalni mehanizem za zaznavo magnetnih polj? Odgovora v resnici ne poznamo.

2. KAJ SO EKSPERIMENTALNA DEJSTVA IN KAKŠNA JE TEORIJA

2.1. Zemeljsko magnetno polje. Geomagnetno polje je dipolno polje, katerega poli ležijo zelo blizu zemljinih geografskih polov, definiranih z osjo vrtenja. Silnice polja kažejo iz tal na antarktičnem polu in poniknejo v tla na arktičnem polu,

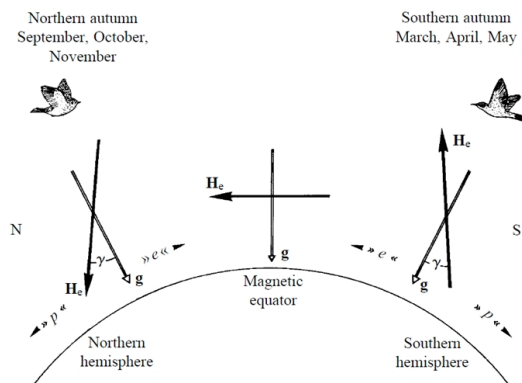


SLIKA 1. Shematični prikaz zemljinega magnetnega polja. Vir: [2]

vektor magnetnega polja je vzporeden zemljini površini skoraj natanko na polovici med poloma, na ekvatorju. Nagib (inklinacija) magnetnega polja je definiran s kotom, ki ga vektor magnetnega polja oklepa s horizontom, in je vzdolž vzporednika približno konstanten. Gostota magnetnega polja postopoma upada v smeri od pola ($0.6 G$) proti magnetnemu ekvatorju ($0.3 G$), približno simetrično na obeh hemisferah. Treba se je zavedati, da je zemeljsko magnetno polje precej šibko; tipična energija molekularnih dipolov v polju takšne gostote je za več kot 6 velikostnih redov manjša od tipične termodinamske fluktuacije $k_B T$. Magnetno polje, v kolikor ga uspemo zaznavati, je precej zanesljiv vir informacij; tako nagib, kot tudi absolutna velikost polja, so dovolj, da lahko povemo kje, oziroma kako daleč ali kako blizu magnetnega pola ali ekvatorja smo.

2.2. Funkcionalne lastnosti magnetnega kompasa ptic. V pionirskih eksperimentih [2], sta par Wiltschko eksperimentalno demonstrirala principe in režime delovanja magnetnega kompasa pri pticah:

- Ptice za orientacijo uporabljajo informacijo o nagibu magnetnega polja, a ne zaznajo njegove smeri [2]. Tako doživljajo magnetno polje na južni oziroma severni hemisferi enako. Dodaten mehanizem, ali znanje, je potrebno pri pticah, ki prečkajo ekvator, da se na to prečkanje pravilno odzovejo.
- Izkaže se, da je magnetni kompas ptic ozko kalibriran na ambientalno magnetno polje in deluje le v ozkem magnetnem oknu. Na primer; taščice, ki so bivale v ambientalnem polju velikosti $0.46 G$ so bile popolnoma disorientirane za polja manjša od $0.34 G$ in podobno za polja večja od $0.6 G$. Takšno vedenje bi bilo precej neznačilno, če bi ptice uporabljale mehanični kompas, kot si ga je omislil človek.
- Orientacijske sposobnosti ptic so močno odvisne od valovne dolžine ambientalne svetlobe ([6] in reference znotraj [5]). Izkaže se, da mora biti energija svetlobe dovolj velika, če želimo, da kompas deluje. Zanimiva so opažanja

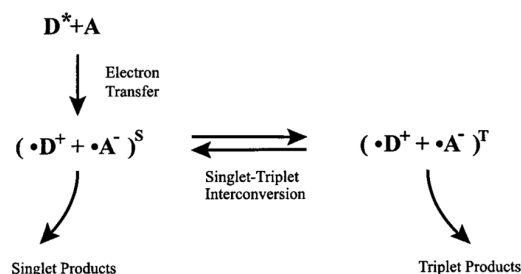


SLIKA 2. Magnetni kompas ptic je inklinacijski (orientacija je vezana na nagib magnetnega polja). Ptice iz južne in severne poloble se selijo na osnovi istega mehanizma; ne razločijo polaritete magnetnega polja. Vir [2]

[3], da taščice ne zmorejo orientacije v rumeno-oranžni svetlobi (z maksimumom pri 590 nm), čeprav se spekter krepko prekriva z zeleno svetlobo (širina 550 – 583 nm), kjer je bila orientacija odlična, in rumeno svetlobo (širina 572 – 609 nm), kjer orientacije ni bilo.

- Pri eksperimentih z golobi [7] so opazili, da se določeni predeli možganov, ki pripadajo optičnemu sistemu (nBOR in tectum opticum) odzivajo na spremembe ambientalnega magnetnega polja, kar se izkaže pogojeno s prisotnostjo vidne svetlobe in zdravo (nepoškodovano) mrežnico (reference znotraj [5]). Zanimiv eksperiment, ki pravtako potrjuje domnevo, da je magnetni kompas ptic vezan na vidni sistem, pokaže, da je magnetna orientacija ptic lateralizirana [9] (bolj razvita v eni od možganskih polovic). Eksperiment so izvedli tako, da so pticam pokrili eno od oči in merili sposobnost orientacije. S pokritim levim očesom so se testne ptice orinetirale odlično, s pokritim desnim očesom pa sploh ne.

2.3. Različne teorije delovanja magnetnega kompasa. Med različnimi teoretičnimi modeli zaznavanja magnetnega polja, ki so bili predlagani, sta zaživelale dva. V prvem naj bi receptorji izrabljali mehanske lastnosti magnetnih delcev (mineral magnetit), v drugem pa naj bi fotoreceptorski mehanizem, odvisen od magnetnega polja, neposredno vplival na očesno transdukcijo (proces pri katerem senzorni receptor pretvori stimulus iz okolja v akcijski potencial, ki se prenese v možgane). Magnetoreceptor na magnetitni bazi v različnih modelih vsebuje ali prosto vrteče eno-domenske magnetitne delce ali fiksirane super-paramagnetne magnetitne delce ali pa tekoči kristal, ki vsebuje magnetitne delce (vse relevantne reference v [5]). V magnetnih poljih, podobno šibkih kot je zemeljsko, lahko super-paramagnetni kristali generirajo dovolj velika magnetna polja, ki zaznavno vplivajo na dinamiko bližnjih kristalov. Interakcija med kristali lahko deformira celotno tkivo v katerega so ti kristali vpeti. Pravtako lahko medsebojno interagirajo celotne gruče kristalov, kar lahko privede do merljivih makroskopskih deformacij (pomembne reference znotraj [8]). V mehanizmih, ki delujejo na osnovi mehanike magnetitnih delcev, je zaenkrat težko prepoznati procese, ki bi pojasnili vse funkcionalne



SLIKA 3. Magnetno odvisna reakcijska shema para radikalov. Tri faze: nastanek para, oscilacije $S \leftrightarrow T$ in rekombinacija. Vir [5]

lastnosti magnetnega kompasa ptic, kot so navedene v prejšnjem podpoglavju. Kakorkoli, narejenih je mnogo eksperimentov, ki kažejo, da ta mehanizem pojasni navigacijsko sposobnost živali kot so raki, ribe, želve,

Iz množice mehanizmov, ki delujejo na osnovi foto-stimulirane magnetorepcije izpostavimo le najbolj popularnega, to je mehanizem radikalnih parov. Razlog za njegovo preferenco je v prvi vrsti vgrajena foto-občutljivost, ki je konsistentna z eksperimentalnimi opažanji in drugo, kar ga izpostavlja iz množice sorodnih kandidatov je, da lahko v specifičnih pogojih deluje v režimu dovolj majhnega magnetnega polja.

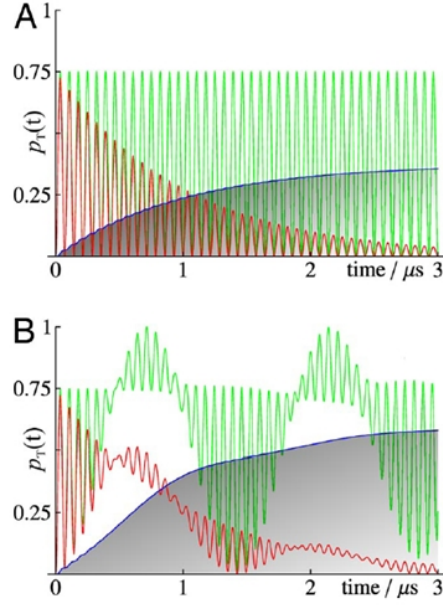
3. MEHANIZEM PARA RADIKALOV (RPM)

Osnovna ideja [4] mehanizma para radikalov (Radical Pair Mechanism, RPM), pojasni zaznavo šibkih magnetnih polj, na osnovi zaznave magnetno odvisne makroskopske populacije produktov, ki nastanejo v reakcijah pri katerih sodelujejo pari radikalov. Mehanizem sam ne razlaga kako se neko makro-kemično stanje substrata prevede v uporabni signal (transdukcija), ki ga lahko obdelujejo možgani, pač pa se osredotoča zgolj na dejstvo, da je lahko stanje substrata zelo občutljivo na prisotnost magnetnega polja. Najpreprostejša reakcija, v kateri sodelujejo pari radikalov bi bila preprosta rekombinacija elektronov, toda to samo po sebi ni bistveno, bistveno je, da se produkti diferencirajo glede na to, v kakšnem stanju, tripletnem ali singletnem, je bil radikalni par v trenutku reakcije.

Reakcijska shema poteka preko treh korakov.

1) *Natanek para.* V prvem koraku vzbujena donorska molekula D^* prenese elektron na akceptorsko molekulo A , kar povzroči nastanek para radikalov $D^+ + A^-$. Da bi lahko opazovali efekte magnetnega polja, je pomembno, da par radikalov nastane v spinsko-koreliranem singletnem ali tripletnem stanju. Spinsko koreliran par radikalov lahko nastane, na primer, z fotoinduciranim prenosom elektrona. V takšnem primeru, se prenos sproži zaradi eksitacije donorja pri absorpciji fotona. Pred absorpcijo fotona bosta donor in akceptor skoraj zagotovo v singletnem stanju, torej bo singletno tudi vzbujeno stanje. Ker prenos elektrona ne spremeni korelacije med spini, bo radikalni par pravtako v singletnem stanju.

2) *Oscilacije singlet-triplet.* Singletno stanje para radikalov ni lastno stanje skupnega Hamiltoniana, ki v tej sliki vključuje še hiperfino sklopitev s spinom jedra, zato sistem oscilira med singletnim in tripletnim stanjem. Moramo si predstavljati, da zaradi majhne razlike v hiperfini sklopitvi obeh radikalov, elektrona precedirata z



SLIKA 4. Delež tripletnih stanj $p_T(t)$ v odsotnosti zunanega magnetnega polja, brez rekombinacije (zeleno) in z rekombinacijo (rdeče): A) brez zunanega magnetnega polja B) v prisotnosti majhnega zunanega magnetnega polja, kjer se pojavi majna modulacija s frekvenco Zeemanove sklopitve, ki spremeni tripletni donos (modro). Vir [12]

različnima frekvencama, kar privede do oscilacij skupnega spina. V tej sliki zane-marimo druge sklopitve in privzamemo, da so relaksacijski časi (časi potrebni za rekombinacijo), daljši od periode oscilacij med tripletnim in singletnim stanjem.

3) *Reakcija*. Končno, singletni in tripletni pari reagirajo in rezultirajo v različnih produktih, kar zmanjšuje populacijo radikalnih parov z ustreznimi hitrostmi k_S in k_T .

Za izračun donosa produktov iz reakcije radikalnih parov v tripletnem stanju, privzamemo, da je radikalni par geometrično fiksiran v substratu in da je njegovo začetno stanje singletno. Tripletni donos Φ^T je definiran kot količina produktov, ki prehaja preko tripletnega reakcijskega kanala,

$$(1) \quad \Phi^T = \int_0^\infty k_T T(t) dt,$$

kjer je $T(t)$ delež parov radikalov v tripletnem stanju v poljubnem času t in k_T reakcijska konstanta, ki določa hitrost reakcij. $T(t)$ lahko dobimo, če poznamo dinamiko statističnega operatorja $\rho(t)$,

$$(2) \quad T(t) = \text{Tr}[Q^T \rho(t)],$$

kjer $\text{Tr } A = \sum_i A_{ii}$, in Q^T je projektor na tripletna stanja. Časovni razvoj statističnega operatorja zadošča stohastični Liouvillovi enačbi,

$$(3) \quad \dot{\rho} = -\frac{i}{\hbar}[H, \rho]_- - \frac{k_S}{2}[Q^S, \rho]_+ - \frac{k_S}{2}[Q^T, \rho]_+.$$

Tukaj $[A, B] = AB \pm BA$, Q^S je projektor na singletna stanja, in H je spinski Hamiltonski operator. Začetni pogoj za statistični operator je $\rho(0) = Q^S/\text{Tr } Q^S$, ker je, po predpostavki, par radikalov ob nastanku v singletnem stanju. Zadnja dva člena v enačbi 3 opisujeta disipacijo radikalnih parov preko singletnega in tripletnega reakcijskega kanala, medtem ko prvi člen opisuje oscilacije med tripletnimi in singletnimi stanji.

V modelu brez izgube splošnosti predpostavimo, da sta reakcijski hitrosti k_S in k_T od spina neodvisni, $k_S = k_T = k$, kar dopušča, da pišemo,

$$(4) \quad \rho(t) = \frac{1}{N} e^{-iHt/\hbar} Q^S e^{iHt/\hbar} e^{-kt}.$$

Tukaj je N število jedrskih spinskih stanj. Če vstavimo enačbo 4 v enačbo 2 dobimo,

$$(5) \quad T(t) = \frac{e^{-kt}}{N} \sum_{m=1}^{4N} \sum_{n=1}^{4N} Q_{mn}^T Q_{mn}^S \cos[(\omega_m - \omega_n)t],$$

kjer $\hbar\omega_i$ predstavlja energijo i -tega lastnega stanja Hamiltonjana H . Ko izračunamo še integral v enačbi 1 dobimo celoten tripletni donos,

$$(6) \quad \phi^T = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^{4N} \sum_{n=1}^{4N} Q_{mn}^T Q_{mn}^S \frac{k^2}{k^2 + (\omega_m - \omega_n)^2}.$$

Pri dovolj šibkih magnetnih poljih Zeemanov efekt povzroči razcep sicer degeneriranih spinskih stanj in posledično oscilacije med tripletnim in singletnim stanjem. Oscilacije lahko povečajo tripletni donos Φ^T , slika 4. Drugače je, če je magnetno polje preveliko, primerljivo z velikostjo hiperfine sklopitve. V tem primeru se singletna in tripletna stanja razcepijo preveč, kar privede do upada tripletnega donosa. Zanimiva fizika je torej v režimu šibkih polj (majhnih v primerjavi s hiperfino sklopitvijo), kjer je tripletni donos Φ^T odvisen ne samo od jakosti magnetnega polja pač pa tudi od hitrosti reakcij k .

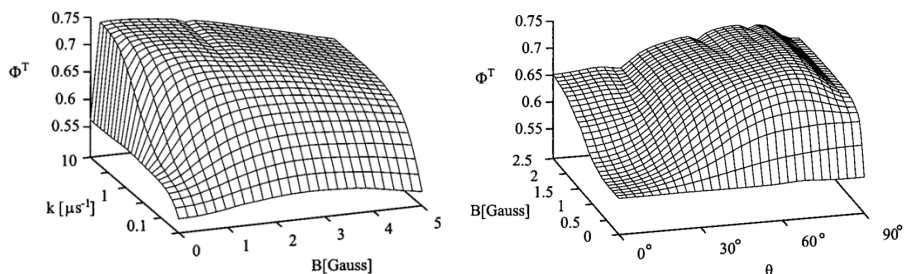
3.1. Numerični eksperiment. V članku [5], predstavi raziskovalna skupina zelo preprosto realizacijo modela parov radikalov. Za par radikalov $j, j = 1, 2$, kjer vsakemu pripada spin elektrona S_j in spin jedra I_j z veliostjo $1/2$, sestavijo Hamiltonian,

$$(7) \quad H(\mathbf{B}) = H_1(\mathbf{B}) + H_2(\mathbf{B}),$$

kjer,

$$(8) \quad H_j(\mathbf{B}) = \gamma \mathbf{S} \cdot (\mathbf{B} + \mathcal{A}_j \cdot \mathbf{I}_j).$$

Tukaj je standardno $\gamma = g\mu_B$, kjer $g=2$ in μ_B je Bohrov magneton. \mathcal{A}_j predstavlja tenzor hiperfine sklopitve, in je anizotropen. Anizotropnost tenzorja \mathcal{A} omogoča odvisnost tripletnega donosa od rotacije magnetnega polja glede na glavne osi tenzorja. S tem postane takšen model operativen v smislu orientacije glede na



SLIKA 5. Odvisnost tripletnega donosa Φ^T od hitrosti rekombinacije parov radikalov k in gostote zunanega magnetnega polja B , ki tvori z z -osjo para radikalov kot 68° (prva slika), in odvisnost tripletnega donosa od gostote magnetnega polja ter kota magnetnega polja glede na z -os (druga slika). Vir [5]

magnetno polje, kot ga opazamo pri pticah selivkah. V konkretnem eksperimentu konstruirajo anizotropnost z naslednjo izbiro tenzorjev,

$$(9) \quad \mathcal{A}_1 = \begin{pmatrix} 10G & 0 & 0 \\ 0 & 10G & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

in

$$(10) \quad \mathcal{A}_2 = \begin{pmatrix} 5G & 0 & 0 \\ 0 & 5G & 0 \\ 0 & 0 & 5G \end{pmatrix}.$$

Anizotropen je le tenzor \mathcal{A}_1 in glavne osi obeh tenzorjev sovpadajo. Kljub preprostosti modela so dobljeni rezultati dovolj bogati. Kot lahko vidimo na sliki 5, lahko zelo majhno magnetno polje, manjše od $0.5G$, povzroči znaten porast tripletnega donosa, ki je tem bolj izrazit čim manjša je hitrost rekombinacije k . Za večja magnetna polja opazimo upad tripletnega donosa. Morda bolj pomembno je, da se model odziva na variacije naklona magnetnega polja glede na os para radikalov, o čemer se lahko prepričamo na isti sliki 5. Kotna odvisnost tripletnega donosa je prikazana zgolj na intervalu $[0^\circ, 90^\circ]$, zaradi simetrije na inverzijo smeri magnetnega polja in zrcaljena preko z -osi.

3.2. Magnetni kompas ptic je vezan na vid. Spoznali smo, da bi lahko ptice zaznavale obliko lokalne magnetne slike izkoriščajoč mehanizem para radikalov, vendar je nujno, da je molekularni sistem v katerem se mehanizem izvaja, orientacijsko fiksiran. Tega ne moremo pričakovati, če je reagent v tekoči fazi, kjer nenehno prerivanje med molekulami hitro izpovpreči vse anizotropne efekte. Radikali morajo biti vsaj delno imobilizirani in orientirani. V članku [5] predlagajo, da so celice, ki so odgovorne za zaznavo magnetnega polja porazdeljene po očesni mrežnici in poravnane s čepki in paličicami (fotoreceptorske celice). Prav tako, naj bi bile molekule, ki tvorijo ustrezne pare radikalov, orientacijsko fiksirane znotraj celice. Torej bodo celice na različnih mestih na mrežnici videle magnetno polje pod različnimi koti in se posledično različno odzivale, pač v skladu z anizotropno naravo interakcije parov radikalov z magnetnim poljem.

4. RPM, OD HIPOTEZE DO REALNOSTI

Ali lahko uporabimo neko kemično reakcijo za ugotavljanje smeri magnetnega polja zemlje? Na prvi pogled bi bila večina poznavalcev skeptičnih. Interakcijska energija tipične molekule z zemeljskim magnetnim poljem velikosti $0.5 G$ je za več kot šest velikostnih redov manjša od termične energije tipične molekule, ki pa je dodatno še 10-100 krat manjša od tipičnih vezavnih energij. Težko bi verjeli, da je kakšno kemično ravnovesno stanje sistema zaznavno odvisno od tako minorne perturbacije, kot je zemeljsko magnetno polje. Toda, kljub pomislekom smo se prepričali, kako smiseln je mehanizem parov radikalov z ozirom na vsa eksperimentalna dejstva. Raziskovalci s tega področja se zadnje čase precej trudijo definirati okvirje znotraj katerih naj bi se gibali specifični parametri molekule, ki bi ustrezale sistemu v katerem poteka RPM. Popularen potencialni kandidat v procesu RPM je molekula (protein) Cryptochroma, za katero je znano, da tvori stabilne radikalne pare, ki nastajajo pri absorpciji zeleno-modre svetlobe, v skladu z opažanji pri pticah in je hkrati dokazano prisotna v mrežnici (taščice) [10, 11]. Toda, ni še jasno pokazano, da se Cryptochroma ustrezno odziva v pogojih v katerih se orientirajo ptiči (dovolj šibka magnetna polja). Poleg eksperimentalnih ocen imamo na voljo tudi teoretične ocene tipičnih parametrov na osnovi preprostih modelov (kot je omenjen v prejšnjem poglavju):

- Ustrezna molekula v RPM naj bi bila preprosta, sestavljena le iz nekaj molekul vodika in dušika, sicer bi kompleksne notranje sklopitve zasenčile prisotnost zemeljskega magnetnega polja. Eksperimenti kažejo, da se velikost hiper-fine sklopitve z jedri ^1H in ^{14}N , giblje na intervalu $1 G - 0.1 G$, kar da za oceno periode oscilacij med singletnim in tripletnim stanjem približno 10 ns. Dodatna občutljivost na magnetno polje je posledica Zeemanove interakcije magnetnih momentov dveh elektronov, ki prispeva še dodatno oscilacijo med singletnimi in tripletnimi stanji, ki ustreza periodi 700 ns v magnetnem polju velikosti $5 G$ [12].
- Zahtevati moramo, da je življenjski čas (čas potreben za rekombinacijo) dosti daljši od periode oscilacij med tripletnim in singletnim stanjem. Temu pogoju zadostimo, če par radikalov vztraja v spinsko koreliranem stanju več kot $1 \mu\text{s}$. V tem primeru mora biti k velikostnega reda 10^6 s^{-1} . k_T in k_S naj bosta istega velikostnega reda, zato da bosta singletni in tripletni reakcijski kanal enakovredna. Račun pokaže [12, 13], da je relativna sprememba tripletnega donosa zaradi dodatnega magnetnega polja sigmoidno odvisna od življenjskega časa $1/k$ in postane neodvisna (saturira) od življenjskih časov daljših od $1 \mu\text{s}$ za magnetna polja velikosti $5 G$. Zaradi tega si lahko mislimo, da bi daljši življenjski časi para radikalov morda predstavljali neučinkovitost, oziroma slabšo odzivnost.
- Aproksimativna teorija [12] nam da oceno razmika robov (tukaj si zamislimo rob orbitale), r_e , dveh radikalov. Za življenjske čase, ki smo jih ocenili na $1 \mu\text{s}$, mora biti ta razdalja manjša od 1.5 nm. Po drugi strani, pa iz zahteve, da je interakcija med radikali vsaj enakega velikostnega reda kot interakcija z zunanjim magnetnim poljem, če ne manjša, da za spodnjo mejo razmika med centri radikalov $r_c > 3.5 \text{ nm}$. Kar je preveč in nekonsistentno z oceno za r_e . Teorija predpostavlja, da se lahko na določeni razdalji $0.2 \text{ nm} < r_c$ izniči izmenjalna in dipolna interakcija, kar bi pomenilo, da je premer radikala približno 0.5 nm.

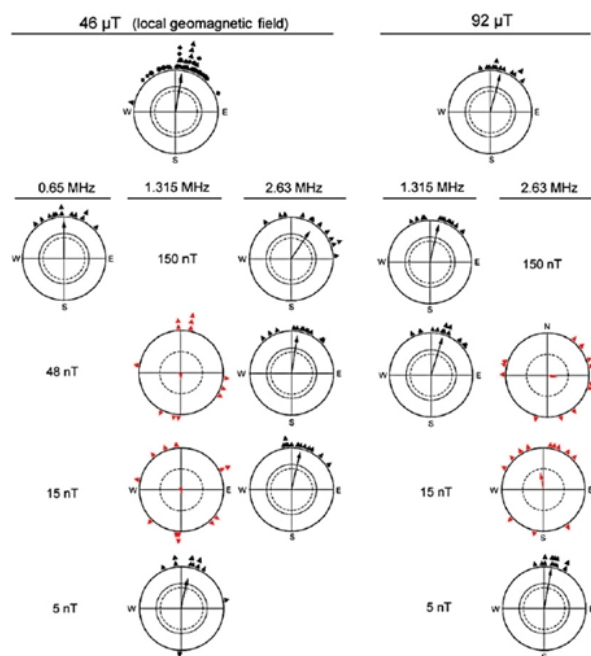
- Ker je magnetno polje šibko, so posledice polja verjetno zaznavne šele, ko se seštejejo prispevki na večjem volumnu. Izračuni dajo oceno, da je potrebno 10^8 parov radikalov na volumnu 0.4 mm^3 , da bi lahko zanesljivo zaznavali anomalije velikostnega reda 2% zemeljskega magnetnega polja [8].

Precej živahno je preučevanje magnetorepcije v povezavi z orientacijo ptic v prisotnosti oscilirajočega magnetnega polja in kvantne kontrole [14, 15, 16]. V eksperimentu [14], so bile ptice izpostavljene različnim frekvencam magnetnega polja (0.05 G in 26° glede na zemeljsko magnetno polje velikosti 0.47 G) na intervalu od 0.01 Mhz do 7 Mhz . Do frekvence 0.1 Mhz so se ptice orientirale normalno, na intervalu $0.1 \text{ Mhz} - 0.5 \text{ Mhz}$ pa so kazale aksialno motnjo orientacije. To pomeni, da so se orientirale ali v pravo, ali v nasprotno smer z dobro definirano osjo. Aksialna motnja naj bi bila značilna za mejni režim delovanja magnetnega kompasa ptic. Nizko-frekvenčna polja, katerih perioda je dosti daljša od življenjskega časa para radikalov, lahko obravnavamo kot statična. Smiselno bi bilo pričakovati, da se prisotnost oscilirajočega polja izrazi pri frekvencah, ki sovpadajo z življenjskim časom para radikalov, kar da za oceno spodnje meje življenjskega časa $> 0.2 \mu\text{s}$. Da bi nadalje razumeli lastnosti para radikalov so poskusili, če se ptice na katero frekvenco, ki bi bila povezana z Zeemanovo interakcijo, odzivajo še posebej izrazito. Magnetni moment v prisotnosti zunanega magnetnega polja B_0 prične precesirati okoli smeri polja z Larmorjevo frekvenco, ki je za elektronski spin enaka $\nu_L = \gamma_e B_0 / 2\pi$. Ptice so adaptirali na ambientalna polja, ki ustrezajo Larmorjevi frekvenci $1.315 \text{ Mhz} \rightarrow 0.42 \text{ G}$ in $2.63 \text{ Mhz} \rightarrow 0.42 \text{ G}$, ter spremljali kako so vrednosti velikosti magnetnega polja pri katerih magnetni kompas odpove odvisne od frekvence. Izkáže se, zelo signifikantno, da relativno šibko magnetno polje prave (Larmorjeve) frekvence zadošča za disorientacijo ptic, Slika 6. To resonančno vedenje pri frekvencah, ki ustrezajo Zeemanovi sklopitvi, pojasnjujejo z radikalnim parom, kjer eden od elektronov ne čuti hiperfine sklopitve z jedrom [12]. Kar moramo pričakovati na osnovi eksperimentov z oscilirajočim poljem, je presenetljiva stabilnost kvantne prepletenosti dveh ločenih radikalov. Na osnovi modeliranja ustrezne Lindbladove verzije časovnega razvoja statističnega operatorja (Master equation) se skuša kvantificirati robustnost na različne motnje zaradi sklopitve para radikalov z okolico [15] in posledice kvantne kontrole [16] na delovanje mehanizma para radikalov in s tem povezana možnost uporabe različnih tehnik kvantne kontrole za nadaljne raziskave na tem področju.

5. ZAKLJUČEK

Seznani smo se s problematiko orientacije ptic na osnovi magnetnega polja. Vemo, da je magnetni kompas ptic inklinacijski, kar pomeni, da ptice zaznavajo nagib magnetnega polja ne pa tudi polaritete. Videli smo kako je delovanje kompasa pogojeno s prisotnostjo ustrezne svetlobe in kako bi lahko ta kompas našel svoj prostor v očesu. Podrobneje smo si ogledali model para radikalov, ki razlaga delovanje kompasa na osnovi foto-senzibilnih kemičnih procesov, nismo pa pozabili omeniti alternativ, ki delovanje kompasa razlagajo analogno s človeškim izdelkom - mehanično, s prisotnostjo magnetnih delcev. Na koncu smo kritično ovrednotili RPM in postavili okvirje katerim mora zadoščati realizacija takšnega mehanizma.

5.1. Osebno videnje problema. Kljub temu, da smo se osredotočili na mehanizem para radikalov na osnovi mnogih funkcionalnih lastnosti kompasa ptic, ki bi



SLIKA 6. Orientacijske sposobnosti taščic v prisotnosti oscilirajočega magnetnega polja (puščice na robu kažejo porazdelitev po smeri, puščica na sredini ustreza povprečni smeri, dolžina le-te pa statistični signifikanci). (Levo) Odziv v lokalnem geomagnetnem polju. (Desno) Odziv v dvakrat večjem polju po treh urah adaptacije na spremenjene pogoje. (Zgornja diagrama) Orientacija brez prisotnosti oscilirajočega polja. (Spodnji diagrami) Ustrezajo odzivom v prisotnosti oscilirajočega polja različne jakosti. Vidimo, da so v prvem primeru (Levo) ptice pri Larmorjevi frekvenci 1.315 Mhz disorientirane že pri zelo šibkem polju 0.015 G, medtem ko se pri polovični in dvakratni Larmorjevi frekvenci orientirajo odlično še pri 10-krat močnejšem polju. Podobno opazimo tudi na diagramih, ki ustrezajo statičnemu magnetnemu polju velikosti 0.92 G. Vir [14]

jih sicer težko pojasnili, ne bi izključeval alternativne teorije. Očitno RPM deluje dobro in pojasnjuje vse, v principu. Težava je v realizaciji, ki nikakor ne zadosti pogoju operativnosti v tako šibkih poljih kot je zemeljsko (razen v kakšnih pogojih, nezdružljivih z življenjem). Se pravi; bilo bi marsikaj boljše, če bi lahko magnetno polje, ki vpliva na kemične procese pri RPM nekako ojačali. To bi lahko dosegli, če bi družno z molekulami, ki so funkcionalne v RPM, sobivala kakšna skladno urejena super-paramagnetna struktura, ki bi ojačala lokalno magnetno polje, ampak katere mehanska odzivnost bi bila za magnetorepcijo nebitvena. To bi predstavljalo nekakšno sintezo obeh principov.

LITERATURA

1. Wiltschko W, Merkel F, *Verh. dt. zool. Ges.*, **59**, 362-367 (1966)
2. Wiltschko W, Wiltscho R, *J. Exp. Biol.*, **199**, 29-38 (1969)
3. Wiltschko W, Wiltschko R, *Erithacus rubecula. J. Comp. Physiol. A.*, **184**, 295-299 (1999)
4. Schulten K, 1982. *Festkörperprobleme* **22**, 61-83 (1982)
5. Ritz T, Adem S, Schulten K, *Biophys J*, **78**, 707-718 (2000)
6. Wiltschko W, Wiltschko R, *J. Exp. Biol.*, **204**, 3295-3302 (2001)
7. Semm P, Beason R C, *Brain Res. Bull.*, **25**, 735-740 (1990)
8. Johnsen S, Lohmann K J, *Nature Rev. Neuro.*, **6**, 703-712 (2005)
9. Wiltschko W, Traudt T, Gunturkun O, Prior H, Wiltschko R, *Nature*, **419**, 467-470 (2002)
10. Möller A, Segasser S, Wiltschko W, Schierwater B, *Naturwissenschaften*, **91**, 585-588 (2004)
11. Mouritsen H, Jenssen-B U, Liedvogel M, Feenders G, Stalleicken J, Dirks P, Weiler R, *PNAS*, **101**, no.39, 14294-14299 (2004)
12. Rodgers C T, Hore P J, *PNAS*, **106**, no.2, 353-360 (2009)
13. Timmel C R, Till U, Brocklehurst B, McLauchlan K A, Hore P J, *Mol Phys*, **95**, 71-89 (1998)
14. Thorsten R, Wiltschko R, Hore P J, Rodgers C T, Stapput K, Thalau P, Timmel C R, Wiltschko W, *Biophys. J.*, **96**, 3451-3457 (2009)
15. Gauger E, Rieper E, Morton J J L, Benjamin S C, Vedral V, *arXiv: 0906.3725v3* (2009)
16. Cai J, Guerreschi G G, Briegel H J, *arXiv: 0906.2383v2* (2009)