

Kratek uvod v radijsko astronomijo

ROK VOGRINČIČ

SANDOZ (Lek farmacevtska družba d.d.), Ljubljana, Slovenija.

Elektronska pošta: rokvoegrincic@gmail.com

Sprejeto

20. 11. 2024

Izdano

15. 9. 2025

DOPISNI AVTOR

E-pošta: rokvoegrincic@gmail.com

Ključne besede:

radijska astronomija,
interferometrija,
radijsko sevanje,
parabolični reflektor,
radijski sprejemnik

Povzetek Začetki radijske astronomije segajo v leto 1933, ko je Karl Jansky odkril radijski izvor v središču Galaksije. Grote Reber je leta 1937 zgradil prvi parabolični reflektor, s katerim je izdelal prve radijske zemljevide Rimske ceste. Med ključnimi odkritji je radijska emisija nevtralnega vodika pri valovni dolžini 21 cm, ki omogoča preučevanje strukture in rotacije Galaksije, saj radijsko valovanje prodira skozi goste oblake prahu, ki blokirajo vidno svetlobo. Radijsko emisijo delimo na termično (zaradi temperature telesa) in netermično, kot je sinhrotronsko sevanje, ki nastaja zaradi interakcije elektronov z magnetnimi polji. Radijski teleskopi, na primer parabolični reflektorji, zbirajo radijsko valovanje in ga usmerjajo v žarilec z anteno. Visoko ločljivost dosežejo z interferometrijo, ki združuje signale več anten in omogoča ustvarjanje podrobnih slik radijskih izvorov. Pri opazovanju se uporabljajo občutljivi radijski sprejemniki s širokopasovnimi ojačevalci in dolgim integracijskim časom, kar omogoča zaznavanje šibkih signalov iz vesolja.



<https://doi.org/12.18690/po.12.22.1-14.2025>

Besedilo © Vogrinčič, 2025



1 Začetki radijske astronomije

Prvo opazovanje izvenzemeljskih radijskih valov je leta 1933 izvedel Karl Guthe Jansky v Bellovih telefonskih laboratorijih v ZDA. Jansky je zgradil vrtljivo anteno, ki je delovala pri valovni dolžini 15 m, da bi preučeval smer prihoda atmosferskih motenj, ki povzročajo nezaželen radijski šum v komunikacijskih sprejemnikih. Do konca leta 1933 je ugotovil, da izvira sprejeti radijski šum iz treh virov: lokalnih neviht, kombiniranega sevanja oddaljenih neviht in izvenzemeljskega izvora v bližini središča Galaksije. Kasneje je dokazal, da radijsko sevanje prihaja iz vira, razpršenega po Rimski cesti, pri čemer je največja intenzivnost izvirala iz središča Galaksije. Jansky je prepoznal pomen svojega odkritja in predlagal gradnjo paraboličnega zrcala za nadaljnja opazovanja pri metrskih valovnih dolžinah.

Leta 1937 se je Grote Reber odločil nadaljevati Janskyevo odkritje, tako da je zgradil parabolični reflektor s premerom 9,5 m, glej Sliko 1. Svoj projekt je financiral sam.



Slika 1: Parabolični reflektor s premerom 9,5 m, ki ga je leta 1937 zgradil Grote Reber v Wheatonu, Illinois, ZDA.

Vir: [1]

Reber je začel opazovanja pri valovni dolžini 9 cm, saj je domneval, da bi pri krajših valovnih dolžinah dosegel boljšo ločljivost in če bi sevanje sledilo Planckovemu zakonu za črno telo, bi bila sprejeta moč višja. Ker mu ni uspelo zaznati izvenzemeljskega radijskega sevanja, je prešel na daljšo valovno dolžino-1,9 m. Pri tej valovni dolžini je pridobil prve radijske zemljevide Rimske ceste. Glavni vrh merjene intenzitete radijske emisije je našel v smeri ozvezdja Strelec ter nekaj manjših vrhov merjene intenzitete v ozvezdjih Laboda in Kasiopije. Domneval je, da sevanje izvira iz trkov med elektroni in protoni v ioniziranem medzvezdnem vodiku. Tem dognanjem je sledila vrsta pomembnih odkritij. Leta 1942 je bila prvič detektirana radijska emisija s Sonca. Kasneje istega leta so bila

opravljena prva uspešna opazovanja termične radijske emisije iz mirnega (neaktivnega) Sonca pri centimetrski valovni dolžini. Leta 1944 je Hendrik Christoffel Van de Hulst teoretično napovedal obstoj radijske emisije pri valovni dolžini 21 cm, ki prihaja iz nevtralnega atomskega vodika v vesolju. Ker je vodik glavna sestavina medzvezdne snovi, so ugotovili, da bi opazovanja te emisije lahko imela velik pomen za astronomijo. Sedem let kasneje je bila napoved eksperimentalno dokazana.

Najpomembnejši zgodnji teoretični napredek so dosegli Alfvén, Herlofson in Shklovsky z idejo o obstoju sinhrotronskega procesa, kot izvora najmočnejše kontinuirane radijske emisije, ki se pojavlja v različnih vrstah astronomskih izvorov. Leta 1946 so s pomočjo radijske interferometrije uspeli bistveno izboljšati ločljivost radijskih teleskopov. Ta tehnika uporablja več anten za snemanje radijskih izvorov, največja razdalja med njimi pa je tista, ki določa ločljivost sistema. Večja kot je razdalja (angl. baseline), višja je ločljivost sistema teleskopov. Pri velikih razdaljah (več sto do nekaj tisoč kilometrov) imenujemo tak sistem "Interferometrija dolge bazne črte" (angl. Very Large Baseline Interferometry, oziroma na kratko VLBI). Tehnika VLBI je bila prvotno razvita v 60. letih prejšnjega stoletja ter meri razliko v času prihoda radijskega signala na dva ali več radijskih teleskopov, ki istočasno opazujejo isti radijski izvor.

2 Radijsko valovanje

Radijsko valovanje je elektromagnetno valovanje z valovnimi dolžinami od milimetra do več metrov. Za njihovo zaznavo potrebujemo instrument, ki pretvori radijsko valovanje v izhodni signal, ki ga lahko slišimo ali vidimo. Valovna dolžina radijskega valovanja je običajno izražena v metrih, frekvenca pa v MHz (mega Hertz, $1 \text{ Hz} = 1/\text{sekunda}$).

Radijsko valovanje je tesno povezano z gibanjem elektronov. Ko se gibanje elektrona spremeni, na primer, ko pospeši ali pojema, povzroči motnjo v okoliškem električnem polju in tako ustvari elektromagnetno (EM) valovanje. Če elektron oscilira (se premika naprej in nazaj) pri določeni frekvenci, bo oddajal radijsko valovanje z nihajočimi električnimi in magnetnimi polji pri tej frekvenci. Ta proces se zgodi v radijskem oddajniku, kjer se na anteno pritiska izmenična napetost. To povzroči, da se elektroni v anteni premikajo naprej in nazaj s frekvenco oddajnika, kar proizvaja radijsko valovanje, ki se širi navzven. Obratno velja v primeru radijskega sprejemnika, kjer vpadno radijsko valovanje s svojo komponento električnega polja povzroči gibanje elektronov v sprejemni anteni, to pa inducira električni tok, ki niha s frekvenco vpadnega radijskega valovanja.

3 Procesi nastanka radijskega valovanja

3.1 Termično radijsko sevanje trdnin

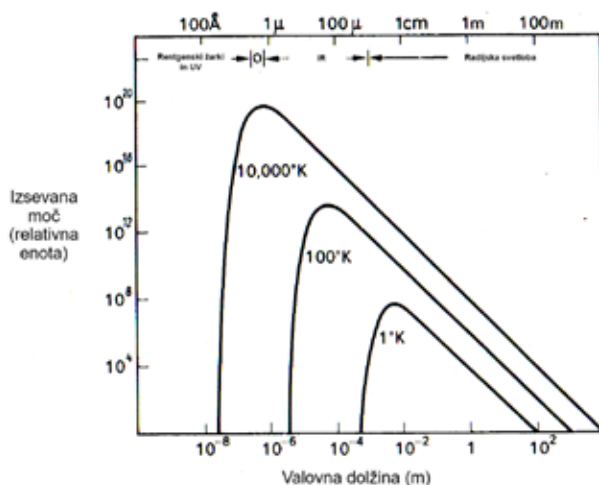
Gibanje električnih nabojev povzroči naravno termično sevanje trdnin. To sevanje je lahko zelo šibko, vendar se pojavi v zelo širokem razponu valovnih dolžin, vključno z radijskimi valovnimi dolžinami. Če je objekt vroč, postane vidno sevanje očitno, saj objekt začne žareti, najprej rdeče, nato belo, ko se temperatura zviša. Intenziteto radijskega sevanja, ki jo lahko pričakujemo pri različnih valovnih dolžinah, to je spekter sevanja

popolnega sevalca, je teoretično izpeljal Max Planck leta 1901. Odvisnost intenzitete sevanja od valovne dolžine je prikazana na Sliki 2.

Najvišja intenziteta za katerokoli dano temperature T se pojavi pri valovni dolžini λ določeni z Wienovim zakonom:

$$\lambda_m T = C \quad (1)$$

kjer je C konstanta in znaša približno 0,29 cmK.



Slika 2: Spekter popolnega sevalca. Od leve proti desni si sledijo: rentgenski žarki, ultravijolična svetloba (UV), vidna svetloba označena z O, infrardeča svetloba (IR) ter radijska svetloba. Navpična os prikazuje relativno izsevano moč, spodnja vodoravna os prikazuje valovno dolžino v enotah metrov, zgornja vodoravna os pa prikazuje tipično vrednost valovne dolžine za različne vrste svetlobe. Radijska svetloba se začne pri valovni dolžini milimetra in je navzgor neomejena.

Vir: [2]

Za dolge valovne dolžine je intenziteta podana z Rayleigh-Jeansovim zakonom, ki pravi, da je moč sevanja P popolnega sevalca pri absolutni temperaturi T :

$$P = \frac{k_B T}{\lambda^2}, \quad (2)$$

kjer je k_B Boltzmannova konstanta in λ valovna dolžina izsevane svetlobe.

3.2 Termično in netermično sevanje plina

Termično sevanje črnega telesa je elektromagnetno sevanje, ki ga oddaja snov izključno zaradi svoje temperature. To sevanje doseže vrh pri krajših valovnih dolžinah. Črno telo je idealen oddajnik in absorber, ki seva energijo v zveznem spektru, podobnega imajo na primer zvezde.

Poleg termičnega sevanja pa lahko nabit delec, kot je elektron, pospeši ali upočasni v električnem polju drugega nabitega delca, običajno iona. V ioniziranem plinu (tipično

ioniziran zaradi UV ali rentgenskega sevanja, ki ga oddajajo vroče zvezde) so prisotni elektroni in ioni, ki se med seboj privlačijo ali odbijajo. Ko se elektron približa pozitivnemu ionu, nanj deluje privlačna električna sila. Elektron bo zaradi te sile spremenil svojo pot, kot je prikazano na Sliki 3. Sprememba gibanja (elektron se pospešeno giblje, saj njegov tir postane ukrivljen) ustvari radijsko valovanje (izseva se foton), katerega energija je enaka spremembi kinetične energije elektrona pri gibanju mimo v okolici iona. Sevanje, ki nastane na ta način, imenujemo zavorno sevanje in predstavlja obliko netermičnega sevanja.

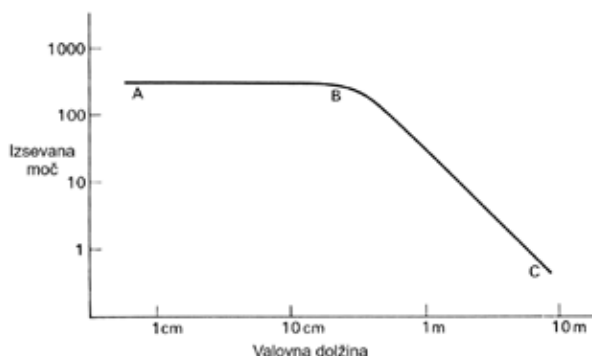


Slika 3: Pot gibajočega se elektrona, ki ga preusmeri pozitivni ion.

Vir: [2]

Spoznajmo še, kaj se zgodi z radijskim valovanjem, ko vstopi v ioniziran plin. Električno polje vpadnega radijskega valovanja pospeši elektrone in povzroči njihovo nihanje naprej in nazaj pri radijski frekvenci valovanja. Ko elektroni nihajo, tudi sami oddajajo valovanje pri isti radijski frekvenci. Sekundarno valovanje se združi z vpadnim valovanjem in rahlo spremeni njegovo pot. To spremembo smeri valovanja imenujemo lom ali refrakcija. Če je v ioniziranem plinu dovolj elektronov, je sekundarni val tako močan, da pride do popolnega odboja. Na ta način zgornji sloj Zemljine atmosfere, ki ga imenujemo ionosfera, odbije radijsko valovanje nekaterih zemeljskih oddajnikov nazaj proti Zemlji. Pri določeni gostoti elektronov v plinu pride do popolnega odboja, ki nastopi takrat, ko frekvenca radijskega valovanja vzbudi naravno frekvenco nihanja elektronov. To imenujemo kritična oziroma plazemska frekvenca. Več elektronov pomeni višjo plazemsko frekvenco.

Radijsko valovanje se lahko v ioniziranem plinu tudi absorbira. Predpostavimo, da je frekvenca dovolj visoka, da lahko radijsko valovanje potuje skozi ioniziran plin. Elektroni v plinu nihajo zaradi interakcije z radijskim valovanjem. Če je številska gostota elektronov

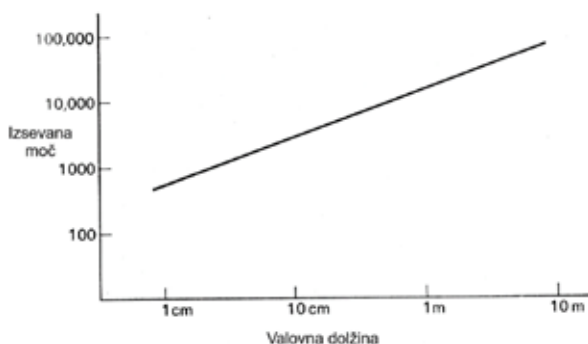


Slika 4: Spekter termičnega radijskega sevanja ioniziranega plina. Del AB ustreza kratkim valovom, ko je plin polprozoren. Pri dolgih valovih plin postane neprozoren za radijsko valovanje. Spekter, ki ga določa Rayleigh-Jeansov zakon, je del BC grafa.

Vir: [2]

dovolj velika, le-ti ne morejo nihati prosto brez da bi prišlo do trkov z atomi in ioni plina. Zaradi pogostih trkov gibanje elektronov postane naključno, tako da se energija, ki so jo prejeli iz radijskega valovanja, spremenijo v termično gibanje in posledično termično sevanje. Energija vpadnega radijskega valovanja je bila torej absorbirana in pretvorjena v toploto. Spekter termičnega radijskega sevanja ioniziranega plina pri določeni temperaturi je prikazan na Sliki 4.

Spekter netermičnega sevanja lahko matematično opišemo s potenčno funkcijo. Izsevna moč je proporcionalna λ^x , kjer je x spektralni indeks s povprečno vrednostjo okoli 0,6. Dva glavna kriterija za presojanje, kdaj je radijsko sevanje netermično, sta izjemna intenziteta in oblika spektra. Izredno visoka vrednost temperature T_B v enačbi za spektralno svetlost $P = \frac{kT_B}{\lambda^2}$ kaže na to, da je sevanje netermično. Primer takega spektra je prikazan na Sliki 5.



Slika 5: Tipičen spekter netermičnega sevanja. Vodoravna os kaže valovno dolžino valovanja, navpična os pa izsevno moč.

Vir: [2]

3.3 Sinhrotronsko sevanje

Če elektron spremeni svojo smer zaradi vpliva magnetnega polja, bo le-ta seval. Sinhrotronsko sevanje nastaja v zelo širokem frekvenčnem pasu. V astronomskih izvorih vidimo radijsko sevanje kombiniranega učinka velikega števila elektronov, z velikim razponom energij. Večino netermičnega radijskega sevanja lahko opišemo že pri nizkih magnetnih poljih, ki merijo le $10^{-4} - 10^{-5} \text{ G}$ (Gauss, $1 \text{ G} = 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{As}^2}$), tudi če so gostote elektronov majhne, vendar pod pogojem, da imajo ti visoko energijo. Potrebna energija elektrona za proizvodnjo opazovanega radijskega sevanja mora biti potem približno 1 GeV (giga elektronvolt).

3.4 Spektralne črte atoma

Ko atom absorbira energijo, preide v višje energijsko kvantno stanje. Da se lahko vrne v nižje energijsko kvantno stanje, mora oddati foton (delec svetlobe). Sprememba energije pri prehodu med takima kvantnima stanjema je enaka energiji izsevanega fotona, to je

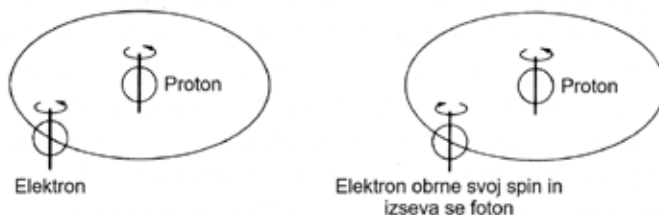
$E = hf$, kjer je h Planckova konstanta, f pa je frekvenca svetlobe. Če torej želimo najti radijske spektralne črte v astronomskih virih, mora biti na voljo dovolj atomov ali molekul v ustreznih kvantnih stanjih, da lahko pride do prehodov, pri čemer je sprememba energije obratno sorazmerna z valovno dolžino fotona. Manjša kot je sprememba energije, daljša je valovna dolžina. To je znano kot Rydbergova formula:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_0^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (3)$$

kjer je R Rydbergova konstanta, n_0 in n pa sta energijski stanji. Možnost za ta prehod je razmeroma majhna. Da bi na primer nastalo radijsko valovanje pri 3,3 cm, se mora sprememba energije zgoditi med stanji $n_0 = 90$ in $n = 91$.

V nevtralnih atomih vodika (HI) pride do t.i. hiperfinih prehodov. Proton in elektron v njegovi okolici, se vrtita vsak okoli svojih osi, to količino imenujemo spin. Vrteča se delca delujeta kot majhna elektromagneta, saj gibajoči se naboj ustvari električni tok, ta pa povzroči nastanek magnetnega polja. Če sta spin protona in elektrona istosmerna, ima atom vodika nekoliko več energije kot takrat, ko sta nasprotno usmerjena. Ko elektron v višjem energijskem stanju spremeni smer svojega spina, pride do hiperfinega prehoda in odda se sevanje (foton) z valovno dolžino približno 21 cm, glej Sliko 6.

Verjetnost naravnega prehoda iz višjega energijskega stanja je tako majhna, da je povprečna frekvenca, s katero atom vodika proizvede sevanje pri 21 cm, le 1 na 11 milijonov let.



Slika 6: Nastanek vodikove spektralne črte pri 21 cm valovne dolžine. Na levi sliki imata proton in elektron istosmerna spina, na desni pa je spin elektrona nasproten spinu protona.

Vir: [2]

Kljub tej nizki verjetnosti prehoda je obseg medzvezdnega prostora tako ogromen, da je skupna količina sevanja zadostna, da jo lahko brez težav opazimo v naši Galaksiji. Radijska vodikova črta (emisija) nudi veliko informacij o galaktični strukturi. V tem območju ne obstaja nobena druga intenzivna radijska črta, ki bi motila opazovanje 21-centimetreške črte. Druga posebnost opazovanja spektralnih črt je, da omogočajo določanje hitrosti z Dopplerjevimi premiki. Dopplerjev premik izrazimo kot relativno spremembo valovne dolžine λ :

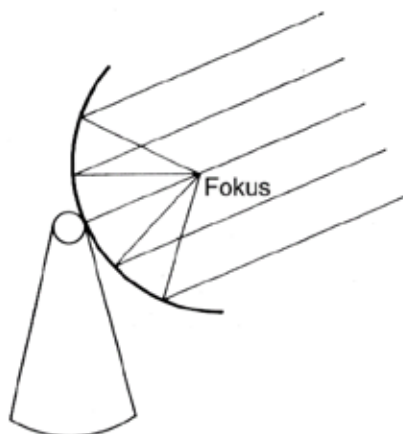
$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}, \quad (4)$$

kjer je v hitrost radijskega izvora, c pa je hitrost svetlobe v vakuumu. Če se na primer medzvezdni oblak vodika giblje proti nam, postane valovna dolžina opazovane 21-centimetreške črte nekoliko krajša, medtem ko se valovna dolžina poveča, če se oblak od nas oddaljuje. Tako lahko ugotovimo hitrosti medzvezdnih oblakov vodika, kar vodi do pomembnega znanja o strukturi in rotaciji Galaksije.

4 Radijski teleskopi

4.1 Parabolični reflektorji

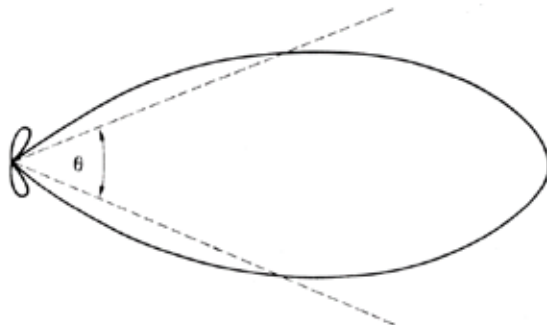
Parabolični reflektorji (zrcala) se uporabljajo za zbiranje radijskega valovanja in usmerja-



Slika 7: Radijski teleskop s paraboličnim reflektorjem. Vzporedni žarki (radijsko valovanje) iz vesolja se odbijejo s parabolične površine in se zberejo v gorišču.

Vir: [2]

nje tega v fokus, od koder se prenesejo na sprejemnik preko sprejemne linije, glej Sliko 7. Površina reflektorja radijskega teleskopa ne more biti stekleno zrcalo, kot smo ga vajeni pri optičnih teleskopih, ki delujejo v vidnem območju, temveč mora biti kovinsko. Površina je lahko kovinska mreža, če so luknje v mreži majhne v primerjavi z valovno dolžino vpadnega radijskega valovanja. Razlika med optičnim in radijskim teleskopom je v postavitvi gorišča. Radijsko valovanje se zbira v kovinskem žarilcu (angl. Feed) in se prenaša do radijskega sprejemnika po valovodu (angl. Waveguide). Za opazovanje nebesnih radijskih virov je zaželeno uporabiti teleskop z ozkim glavnim snopom ("vidno polje"), glej Sliko 8. Glavni snop sprejema največji signal, ko je usmerjen naravnost proti radijskemu viru. Če je usmerjen nekoliko stran od njega, še vedno prejme določen delež signala. Da bi ločili dva izvora, ki sta blizu skupaj, potrebujemo ozek snop, da zagotovimo dobro ločljivost. Obstajata dva dobra razloga, zakaj želimo velik radijski teleskop. Prvič, večja površina zbere več svetlobe. Drugič, večji kot je radijski teleskop, ožji snop lahko ima in je zato boljši pri ločevanju virov, ki so blizu skupaj. Širina snopa ali ločljivost radijskega teleskopa je podana kot:



Slika 8: Smerni diagram antene (radijskega teleskopa). Diagram prikazuje, kako je občutljivost antene na sprejeto moč odvisna od smeri. Kot θ med smerema, ki ustrežata polovici največje občutljivosti, se imenuje širina glavnega snopa in je na sliki označena s črtkanimi črtami.

Vir: [2]

$$\theta = \frac{\lambda}{D} \quad (5)$$

kjer je D premer parabole, λ pa je valovna dolžina vpadnega valovanja.

Pri radijskem teleskopu je pomembno, da je oblika reflektorja (zrcala) kar se da podobna paraboli, če pa površina odstopa več kot $\frac{\lambda}{16}$, pride do popačenja. Do tega pride zaradi temperaturnih nihanj, vetra, deformacij zaradi neenakomerno porazdeljene teže, itd.

4.2 Interferometer



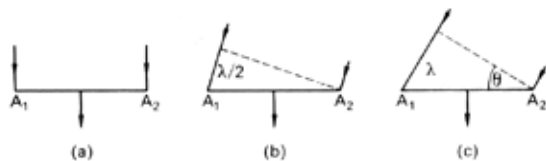
Slika 9: Interferometer z dvema antenama (A1 in A2). Signala obeh anten združimo na sprejemniku.

Vir: [2]

Interferometer je sestavljen iz dveh ločenih anten, povezanih skupaj, kombinirani signal pa se nato prenese na sprejemnik, kot je prikazano na Sliki 9.

Črta, ki povezuje obe anteni, se imenuje bazna linija (angl. Baseline). Da bi razumeli delovanje interferometra, si predstavljajmo, da opazujemo oddaljen radijski izvor in želimo videti, kako je signal na sprejemniku odvisen od smeri izvora. Če je smer izvora

pravokotna na bazno linijo interferometra, sta dva signala na dveh antenah v fazi in se zato seštevata, kot je prikazano na Sliki 10 (a). Kratko časovno obdobje pozneje bo izgledalo, kot da je izvor spremenil svojo smer glede na bazno linijo interferometra zaradi vrtenja Zemlje. Posledično signala na dveh antenah nista več v fazi. Ko je razlika poti enaka polovici valovne dolžine, $\frac{\lambda}{2}$, sta signala na dveh antenah popolnoma izven faze in se zato izničita, Slika 10 (b). Ko se izvor premika naprej, signali spet pridejo v fazo. Največji signal se ponovno doseže, ko je razlika poti enaka celi valovni dolžini, λ , Slika 10 (c). Če se izvor še naprej premika, signali izmenično prihajajo v in iz faze, kar daje serijo



Slika 10: Kombinacija signalov na interferometru sestavljenemu iz dveh antenah, A1 in A2. (a) in (c) Anteni sta v fazi (se seštejeta), (b) anteni sta izven faze (se odštejeta).

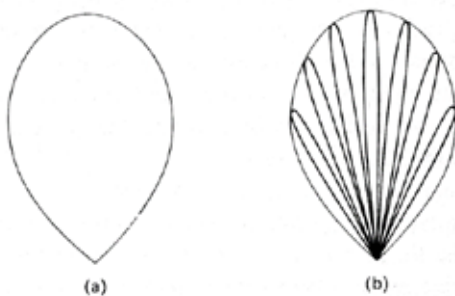
Vir: [2]

maksimumov in minimumov v interferenčnem vzorcu.

Če je L dolžina bazne linije, potem sprememba Θ v smeri izvora da razliko poti $L\Theta$. Tako se signal spremeni od enega maksimuma do drugega, ko je

$$\Theta = \frac{\lambda}{L}(\text{rad}) \quad (6)$$

merjeno v enotah radianov (rad). Vzorec sprejema interferometra zato prehaja skozi serijo maksimumov in minimumov, širina vsakega režnja pa je enaka Θ . Posamezna antena ima širino snopa λ/D , kjer je D premer odprtine. Učinek povezovanja dveh anten v interferometer je razdelitev glavnega snopa ene antene na več režnjev, kot prikazuje Slika



Slika 11: (a) Sevalni diagram ene antene, (b) sevalni diagram interferometra.

Vir: [2]

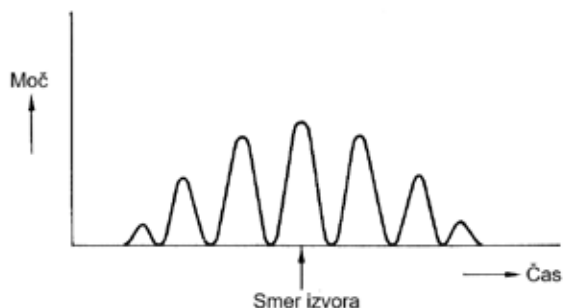
11.

Ločljivost interferometra izhaja iz širine režnja. Ta je odvisna od razdalje L med antenama (če je ta velika, je širina majhna). Na izhodu kaže sprejemnik interferometra serijo maksimumov in minimumov merjene amplitude moči, glej Sliko 12. Ta diagram predstavlja merjeno moč na izhodu zaradi točkastega radijskega izvora, ko ta prečka vidno polje anten. Smer izvora lahko natančno določimo na podlagi oblike režnjev. Pri osre-

dnjem maksimumu moči je izvor točno pod pravim kotom na bazno črto interferometra. Interferometer lahko uporabimo tudi za merjenje kotne velikosti izvora. Če opazujemo točkasti izvor, minimum merjene moči pade na nič. Če pa izvor ni točkast (npr. Sonce), lahko posamezne dele izvora obravnavamo kot točkaste in izmerimo njihov kombinirani učinek, kot prikazuje Slika 13. Končni interferenčni vzorec zaradi tega ne kaže ničelnih minimumov moči. Razmerje

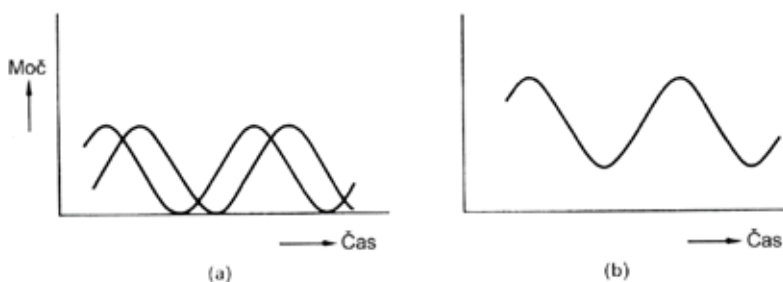
$$(P_{\max} - P_{\min}) / (P_{\max} + P_{\min}) \quad (7)$$

se imenuje vidnost režnja (angl. Fringe Visibility). Njegova vrednost predstavlja kotno širino izvora.



Slika 12: Prejeta moč točkastega izvora. Vodoravna os predstavlja čas merjenja, navpična os pa merjeno moč izvora. Osrednji vrh moči nam pove smer proti izvoru.

Vir: [2]



Slika 13: (a) Komponente prejete moči razsežnega (ne-točkastega) izvora. Vsaka krivulja je obravnavana kot točkasti izvor. (b) Končna moč razsežnega izvora.

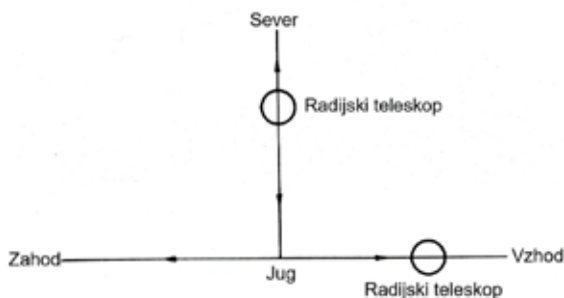
Vir: [2]

4.3 Spremenljivi interferometer

Več podrobnosti o strukturi radijskega izvora lahko pridobimo z merjenjem vidnosti režnja pri različnih razdaljah anten interferometra. Postopek vključuje Fourierjevo sintezo. Opazovanje izvora z interferometrom pri različnih dolžinah bazne črte je način iskanja sinusnega valovanja različnih amplitud in faz. Njihovo združevanje nam omogoča, da pridobimo strukturo izvora v enaki meri podrobnosti, kot če bi imeli eno anteno z enakimi dimenzijami odprtine, kot je največja razdalja med antenama v interferometru.

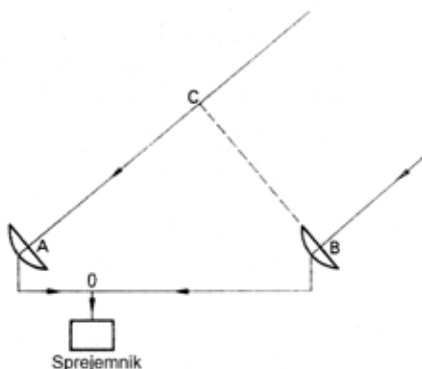
Interferometer so sprva spreminjali le vzdolž ene bazne črte, kasneje pa se je izkazalo, da je spremenljivi interferometer boljša metoda. Primer takega je bil sistem interferometra v obliki črke T, kot je prikazano na Sliki 14. V tem sistemu je ena bazna črta običajno obrnjena tako, da poteka od vzhoda proti zahodu (meri rektascenzijo, R.A.), druga pa od severa do juga (meri deklinacijo, Dec.). Danes je zelo priljubljen sistem v obliki črke Y, tak je na primer interferometer Very Large Array (VLA). S spreminjanjem bazne črte med antenami lahko preučujemo strukturo radijskega izvora.

Predpostavimo, da opazujemo pod povsem drugim kotom, kot je na primer prikazano na Sliki 15. Takrat je učinkovita bazna črta BC. Bazno črto lahko učinkovito spreminjamo s pomočjo premičnih anten (na primer antene na tirnicah). Signal pri C doseže sprejemnik po poti CA + AO, medtem ko pri B potuje po BO. Da bi izenačili te dolžine poti, je treba dolžino kabla do sprejemnika O ustrezno prilagoditi. V tem kontekstu je vredno omeniti, da radijski sprejemnik sprejema signale v območju frekvenc, osredotočenem okoli glavne frekvence. Posledično se hkrati sprejema niz nekoliko različnih frekvenc. Snopi interferometra se ujemajo, ko je skupna razlika poti do sprejemnika enaka nič. Če so poti različne, se snopi pri različnih frekvencah ne ujemajo več in postanejo manj ostri.



Slika 14: Interferometer s spremenljivo bazno črto. Vodoravna os poteka v smeri vzhod-zahod, navpična os pa v smeri sever-jug.

Vir: [2]

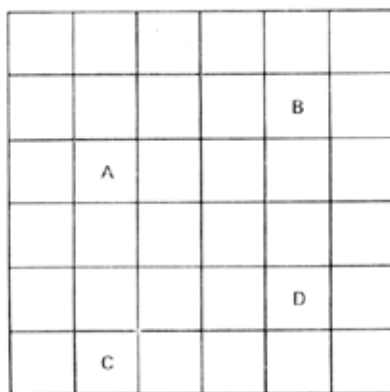


Slika 15: Efektivna bazna črta (BC) spremenljivega interferometra.

Vir: [2]

4.4 Sinteza odprtine

Predpostavimo, da imamo veliko odprtino razdeljeno na mrežo, kot je prikazano na Sliki 16 in da imamo anteno (radijski teleskop) v velikosti enega polja mreže. Odprtino definirajo antene, ki so vključene v interferometer. Če združimo signale, moramo dobiti enak rezultat kot za celotno veliko odprtino. Da bi jih združili, moramo vedeti, kako so antene med seboj povezane v fazi. Najboljši način vključevanja fazne povezave med sekcijami je pridobitev izhodnega signala iz dveh sekcij hkrati (na primer A-B in C-D). Ugotoviti moramo le, kakšne relativne lege se pojavijo v odprtini, opraviti opazovanja s pripadajočim interferometrom in nato združiti izhodne signale na pravilen način, da dobimo rezultat za celotno odprtino. Na splošno se vključuje vse relativne razdalje v odprtini. Združitev signalov na pravilen način bo dala enako ločljivost, kot ena sama velika odprtina. Ker opazujemo z majhnimi antenami, je zbirna površina in občutljivost veliko manjša, kot bi bila, če bi imeli eno samo anteno v velikosti velike odprtine.



Slika 16: Sinteza odprtine s štirimi antenami (A, B, C in D).

Vir: [2]

5 Radijski sprejemnik

Radijski sprejemnik mora biti izjemno občutljiv in stabilen. Uporablja se za merjenje prejetega radijskega signala. Najpomembnejše zahteve za občutljiv sprejemnik so:

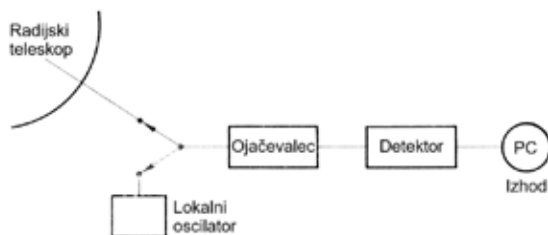
Radijski elementi ne smejo povzročati občutnega šuma;

Vhod mora imeti široko pasovno širino;

Izhod mora biti povprečen čez čim daljše obdobje. Temu pravimo integracijski čas;

Na Sliki 17 so prikazani bistveni koraki sistema za merjenje moči astronomskih virov. Radijsko valovanje, ki ga zbere radijski teleskop, se pripelje do gorišča in se preko valovnega vodnika prenese na predojačevalec. Ker radio-frekvenčni (RF) signal hitro oscilira, ga je treba pretvoriti v enosmerni tok, da se ustvari izhodni signal, ki ga je mogoče zabeležiti. Prejeto moč lahko izmerimo s primerjavo z referenčnim izvorom (tipično je to lokalni oscilator). Signal gre skozi predojačevalec, ki je pogosto ohlajen pod temperaturo

okolice, da se s tem zmanjša termični šum. Radijski sprejemnik za namene merjenja astronomskih izvorov je občutljiv, ker ima široko vhodno pasovno širino za radijske frekvence in dolgo časovno konstanto izhoda (povprečenje čez dolga obdobja).



Slika 17: Sistem radijskega sprejemnika za merjenje astronomskih izvorov.

Vir: [2]

Literatura

https://en.wikipedia.org/wiki/Grote_Reber (Dostopano 19. 11. 2024)

HEY, J. S., 1971, *The Radio Universe* 2nd Edition, Pergamon Press Ltd.

https://en.wikipedia.org/wiki/Rydberg_formula (Dostopano 19. 11. 2024)

SAJE, TADEJA, 2017, Radioteleskop za vodikovo črto 21cm [na spletu]. Magistrsko delo. (Dostopano 19. 11. 2024). Pridobljeno s: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=88901>

Regeneracija pri plaščarju Ciona

ŠPELA GORIČKI¹ IN WILLIAM JEFFERY²

Sprejeto

16. 12. 2024

Izdano

15. 9. 2025

¹ Scriptorium biologorum – Biološka pisarna d.o.o., Nikole Tesla 6, Murska Sobota, goricki.spela@gmail.com

² University of Maryland, Department of Biology, College Park MD, ZDA

DOPISNI AVTOR

goricki.spela@gmail.com

Povzetek Ciona intestinalis je plaščar (poddeblo Tunicata, deblo strunarji/Chordata), ki je spoznan za enega najbližjih živečih sorodnikov vretenčarjev. Vendar pa ima Ciona v osupljivem nasprotju z večino vretenčarjev, ki kažejo omejene sposobnosti regeneracije, močne regenerativne sposobnosti. Na primer: strukture, odstranjene iz distalnega dela telesa, kot sta sifon (prebavna odprtina) in možgani, se lahko popolnoma regenerirajo iz preostalega proksimalnega dela telesa v le nekaj tednih. Preučevali smo nekatere celične in molekularne mehanizme, ki sodelujejo pri regeneraciji distalnih delov telesa. Odstranitev distalnih struktur sproži celično smrt (apoptozo) na mestu rane in pošlje signal rastnega faktorja *Wnt* v škržno košaro – dihalni in prehranjevalni organ, ki se nahaja v proksimalnem delu telesa. Matične celice v škržni košari se aktivirajo za delitev in pošiljanje migratornih predniških celic na mesto rane, kjer se diferencirajo v regenerirajoča distalna tkiva in organe. Distalna regeneracija zahteva izražanje številnih genov, vključno s hsp70, ki je nujen za pravilno zvijanje proteinov, in genov, vključenih v signalno pot Delta/Notch, ki usmerja diferenciacijo v obnovljajočih se tkivih. Namen prihodnjih študij o regeneraciji pri Cioni je pojasniti, zakaj je večina vretenčarjev izgubila sposobnost regeneracije in razviti načrt za obnovev te sposobnosti.

Ključne besede:

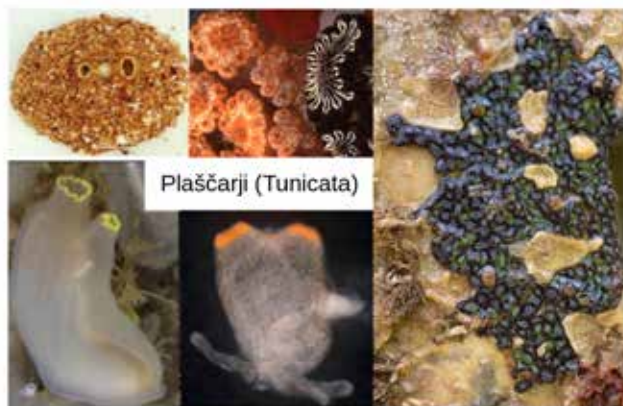
regeneracija,
matične celice,
signalizacija Wnt,
Delta-Notch pot,
asimetrična regeneracija.



UVOD

Regeneracija je obnavljanje obrabljenih ali poškodovanih in odmrlih delov telesa. Vseživljenjska zaloga pluripotentnih matičnih celic je osnovna zahteva regeneracije. To so še nediferencirane celice, ki so sposobne celične delitve bodisi na dve enaki nediferencirani celici (simetrična delitev) bodisi na dve različni hčerinski celici, od katerih ena ostane nediferencirana, druga pa gre na pot diferenciacije in obnove tkiv in organov (asimetrična delitev). Večina sesalcev, vključno s človekom, ima tekom odraslega življenja, ko se rast preneha, omejene sposobnosti regeneracije. Največkrat je regeneracija omejena le na nekatere telesne organe ali strukture, najbolj očitno in vseprisotno pa je nezmožnost obnove poškodovanih ali izrabljenih celic značilna za sesalčje možgane (Brookes in Kumar, 2008).

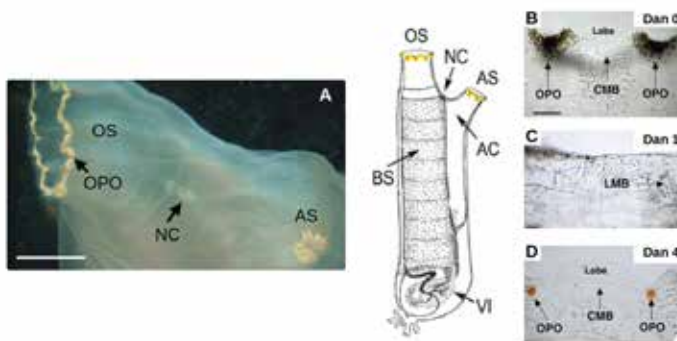
Plaščarji so kljub drugačnemu videzu vretenčarjem sorodne morske živali, ki lahko živijo samotarsko ali pa se združujejo v kolonije, v katerih si osebki delijo določene življenjske naloge (Slika 1). Nekateri plaščarji živijo pritrjeni na podlago, drugi so celo življenje plavajoči, večina pa ima žabjim paglavcem bolj ali manj podobno ličinko. Na osnovi primerjalne anatomije ličinke in zaporedja DNA so plaščarji spoznani za evlucijsko sestrsko vejo vretenčarjev (Delsuc in sod., 2006).



Slika 1. Nekaj primerov pritrjenih plaščarjev, ki jih združujemo v razred kozolnjakov (Ascidiacea). V smeri urinega kazalca začenši levo zgoraj: solitarna vrsta *Molgula oculata*, dve različno obarvani obliki kolonijske vrste zvezdasti zdrizavec (*Botryllus schlosseri*), prevleka kolonij zvezdastega zdrizavca (*B. schlosseri*), posamezen osebek (zooid) kolonijske vrste *Ecteinascidia turbinata* in solitarni črevesasti kozolnjak (*Ciona intestinalis*) – naš modelni organizem. Slovenska poimenovanja vrst po Turk, 2007.

Ciona je vrsta plaščarja, ki celo življenje živi samotarsko in se prehranjuje tako, da iz vode filtrira mikroskopske organske delce. Najdemo jo v vseh morjih sveta, tudi v Jadranskem morju, kamor se je razširila s pomočjo pomorskega transporta – je torej invazivna vrsta. V nasprotju s človekom pa ima *Ciona* močne regenerativne sposobnosti (Whittaker, 1975; Dahlberg in sod., 2008; Auger in sod., 2010; Jeffery, 2015a). Na primer: strukture, odstranjene z vrhnjega (distalnega) dela telesa, kot sta prebavni od-

prtini (sifona) in možgani, se lahko popolnoma regenerirajo iz preostalega dela telesa v le nekaj tednih (Slika 2). Zanimivo je, da je regeneracija pri *Cioni* asimetrična: proksimalne strukture, ki vsebujejo drobovino, lahko regenerirajo distalne strukture, ki smo jih omenili prej, distalne strukture pa ne morejo regenerirati proksimalnih struktur (Hirschler, 1914; Jeffery in Gorički, 2021). Preučevali smo nekatere celične in molekularne mehanizme, ki sodelujejo pri regeneraciji distalnih delov telesa. Namen naših raziskav o regeneraciji pri *Cioni* je pojasniti, zakaj je večina vretenčarjev izgubila sposobnost regeneracije in razviti načrt za obnove te sposobnosti.



Slika 2. Anatomija *Cione*. OS – Oralni (dotekalni) sifon, AS – atrialni (izmetalni) sifon, NC – možgani (živčni vozli), BS – škrgna košara, VI – drobovina (želodec, srce, gonade), AC – kloaka. A. Pogled od zgoraj na distalni del telesa. OPO – oranžno pigmentirani oceli. Merilo: 10 mm. B. Rob intaktnega sifona pri mladem osebkju. Lobe – mišična krpa, CMB – krožna mišična vlakna. Merilo: 1 mm. Merilo je enako na slikah C. in D. C. Rob odrezanega vrha sifona en dan po odstranitvi. LMB – vzdolžna mišična vlakna. D. Rob sifona med regeneracijo četrty dan po odstranitvi prvotnega sifona.

METODE

Za preučevanje regeneracije pri *Cioni* se je v zadnjih desetletjih razvilo več dobrih orodij. Večino laboratorijskih poskusov izvajamo na mladih, pravkar preobraženih osebkjih, ki jih pripravimo s pomočjo in vitro fertilizacije v petrijevki (*Ciona* ima zunanjo oploditev) in gojimo v pretočnih sistemih s tretirano morskovo vodo (da preprečimo kontaminacije in okužbe) v kontroliranih pogojih dneвно-nočnega ritma osvetlitve in temperature vode ter ob natančnem doziranju hrane (fitoplankton) (Joly in sod., 2007; Dahlberg in sod., 2009; Jeffery, 2015b, c; Jeffery, 2019; Jeffery in Gorički, 2021). Drug nepogrešljiv pogoj uspešne realizacije in interpretacije laboratorijskih poskusov pa je dobra informacijska podprst, ki vključuje sekvenciran in anotiran (okarakteriziran) genom (Dehal in sod., 2002), dostopnost številnih, tudi še neobjavljenih, izsledkov in rezultatov preučevanj plaščarjev na različnih področjih (molekularna in celična biologija, sistematika, evolucija, fiziologija, ekologija itd.) ter zmogljivi serverji in dobri algoritmi, vključno s strojnimi učenjem, ki so sposobni analizirati ogromne količine podatkov v razumnem času.

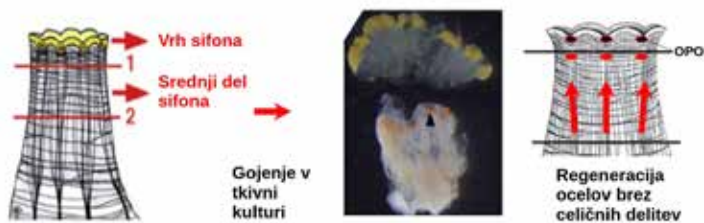
Štirje konceptualni tipi laboratorijskih poskusov so danes potrebni za ugotavljanje vzročno-posledičnih povezav med dvema ali več dogodki na področju preučevanja regene-

racije. (1) Kvantitativna analiza: povečana ali zmanjšana koncentracija neke intrinzične molekule ali pogostost nekega dogodka mora biti značilna za pojav, ki ga proučujemo. V ta sklop spadajo primerjalne analize transkriptoma (koncentracije molekul mRNA specifičnih genov), mikromreže in kvantitativna PCR (Hamada in sod., 2015; Jeffery in sod., 2023). (2) Kvalitativna analiza: prisotnost neke molekule ali dogodka mora biti značilna za tkiva, ki jih preučujemo. V ta sklop spadajo različne in-situ tehnike uporabe specifičnih markerjev, npr. barvanje markerjev matičnih celic z alkalno fosfatazo, barvanje proteinov PIWI, detekcija fragmentacije DNA med apoptozo s testom TUNEL (Jeffery, 2015b; 2019), detekcija podvajanja DNA med delitvijo celic z inkubacijo v raztopini fluorescentno označenih nukleotidov EdU ter in-situ hibridizacija s specifično RNA sondo, ki se prilega tarčni mRNA (Hamada in sod., 2015; Jeffery in Gorički, 2021; Jeffery in sod., 2023). (3) Inhibicija delovanja neke molekule ali odstranitev domnevne- ga vzroka se mora izraziti v upadu ali odstranitvi pojava, ki ga preučujemo (posledice): farmakološki testi, kjer preučujemo pojav v prisotnosti specifičnih zaviralcev določenih molekul (drog), interferenca RNA, v kateri z dodatkom majhnih specifičnih molekul RNA blokiramo prevajanje tarčnih mRNA v funkcionalno beljakovino (Jeffery in Gorički, 2021; Jeffery in sod., 2023). (4) Indukcija pojava s pomočjo dodatka rekombinantne molekule ali uspešna stimulacija (rešitev) pojava v prisotnosti inhibitorja neke molekule (Jeffery in Gorički, 2021).

REZULTATI

1. Identifikacija niše matičnih celic pri *Cioni*

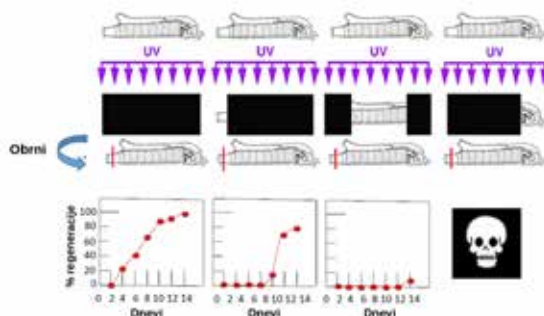
Ko smo od preostalega telesa izolirali osrednji del sifona in ga inkubirali v gojišču, so se na njegovem zgornjem robu pravilno pojavili skupki pigmentiranih čutilnih celic, t.i. oceli, do obnove mišičnih krp med njimi pa ni prišlo (Slika 3) (Auger in sod., 2010).



Slika 3. Poskus ex-situ regeneracije srednjega dela sifona (obroča). 1 – prvi rez, 2 – drugi rez. OPO - ocel.

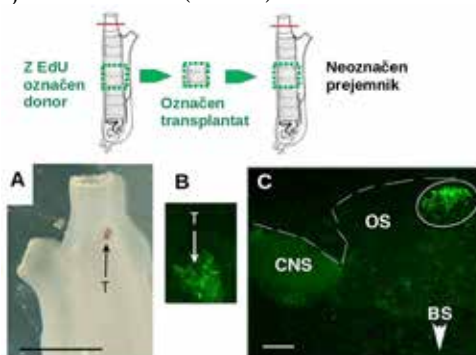
Iz tega sledi, da se nekaj predniških celic sicer nahaja v samem sifonu in tvorijo prvi fiziološki odziv na poškodbo, se pa te celice ne delijo in torej ne morejo izpeljati popolne regeneracije vrhnjega dela sifona. Za slednjo je potrebna celična delitev in migracija matičnih celic iz bolj oddaljenega vira. Ta vir smo s pomočjo testov, ki nam razkrijejo molekule ali procese, značilne za pluripotentne matične celice, našli v škržni košari

(Jeffery, 2015b). To je dobro prekravljen dihalno-prebavni organ v osrednjem delu telesa *Cione*. Test pomnoževanja celic je pokazal, da se po poškodbi sifona matične celice v škržni košari začnejo deliti, nastale predniške celice pa potujejo od tam na mesto poškodbe. Ko smo z UV žarki obsevali škržno košaro, smo uničili te celice in do regeneracije sifona ni prišlo (Slika 4).



Slika 4. Iskanje vira matičnih celic za obnovo sifona z uničujočim obsevanjem različnih delov telesa *Cione*. Del telesa, ki ga nismo nameravali obsevali, smo pred UV žarki zaščitili z za svetlobo neprepustno ploščo (črni pravokotniki). Prvi stolpec: kontrola. Drugi stolpec: z obsevanjem sifona smo uničili predniške celice v sifonu, zato smo regeneracijo opazili kasneje, ko so na mesto poškodbe prispele predniške celice iz bolj oddaljenega vira. Tretji stolpec: z obsevanjem škržne košare smo uničili matične celice, zato do regeneracije sifona ni prišlo. Četrti stolpec: živali, ki smo jim obsevali drobovino, niso preživele poskusa.

Nasprotno pa smo s presaditvijo dela zdrave škržne košare z označenimi matičnimi celicami pokazali, da se prav te celice po delitvi vertikalno premaknejo na mesto poškodbe in tam tvorijo manjkajoče dele telesa (Slika 5).

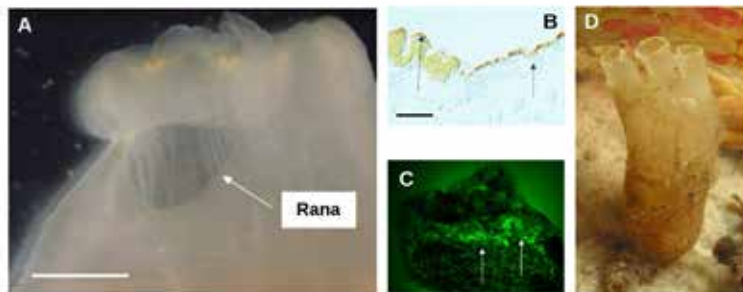


Slika 5. Regeneracija dela sifona iz označenega vsadka (transplantata). A. Položaj vsadka (T) v prejemniku pred odstranitvijo vrha oralnega sifona. Merilo: 10 mm. B. Fluorescentno označene celice koščka škržne košare. C. Nekaj dni po presaditvi so fluorescentno označene celice iz vsadka tvorile nediferencirano tkivo (blastemo) na robu ostanka sifona (označen s črtno črto). OS – oralni sifon, CNS – možgani, BS – škržna košara. Merilo: 1 mm.

Migratorne predniške celice so specifično obnovile uničena tkiva (Jeffery, 2019; Jeffery and Gorički, 2021): med regeneracijo katerega od sifonov smo označene celice po nekaj dneh zaznali v blastemi na robu sifona, a nikjer drugje, če pa so bili odstranjeni možgani, so se pojavile samo v obnavljajočih se možganih. Tako lahko zaključimo, da vsebuje škržna košara nišo matičnih celic za regeneracijo različnih delov telesa *Cione*, oziroma, da se različni deli telesa pri *Cioni* regenerirajo iz celic, ki prihajajo iz istega vira.

2. Za regeneracijo je potrebna celična smrt (apoptoza)

Logično vprašanje, ki sledi tem ugotovitvam, je: kateri proces definira specifični cilj, kamor se morajo usmeriti migratorne predniške celice iz škrne košare? Na mestu poškodbe se namreč najprej pojavijo celice imunskega sistema, ki odstranijo poškodovane in odmrle celice (nekrotično tkivo) ter preprečujejo vdor patogenov v telo. Poleg njih pa smo s posebnim testom opazili še en pojav: nekatere zdrave celice na robu mesta poškodbe se »žrtvujejo« in umrejo v procesu programirane celične smrti oz. apoptoze (Jeffery, 2019). Če smo apoptozo na mestu poškodbe preprečili z inhibitorji kaspaz (encimi proteaze, ki razgrajujejo beljakovine in sprožijo apoptozo), do regeneracije sifonov ni prišlo (Jeffery in Gorički, 2021). Nasprotno pa smo z odpiranjem ran na različnih mestih v distalnem delu telesa sprožili apoptozo na robu rane, delitev matičnih celic v škržni košari in tvorbo dodatnih sifonov (Von Haffner, 1933; Slika 6) ali celo dodatnih možganov (neobjavljeni rezultati).



Slika 6. Tvorba dodatnega sifona na bazi obstoječega. A. Na robu nezaceljene rane so nekaj dni po poškodbi vidni pigmentirani oceli. Merilo: 5 mm. B. Temneje označene apoptotične celice na robu rane. Merilo: 1 mm. Merilo je enako na sliki C. C. Fluorescentno označene migratorne predniške celice, ki so prispele na rob rane. D. Odrasel osebek *Cione* s tremi sifoni.

3. Identifikacija signalnih molekul, ki sprožajo in usmerjajo regeneracijo

Umirajoče (apoptotične) celice na robu rane pošljejo signal v škržno košaro, kjer se nahajajo matične celice. Te se pod vplivom signalne molekule ali molekul aktivirajo za delitev in pošiljanje migratornih matičnih celic na mesto rane, kjer se diferencirajo v regenerirajoča distalna tkiva in organe. Od številnih možnih kandidatov, ki bi lahko

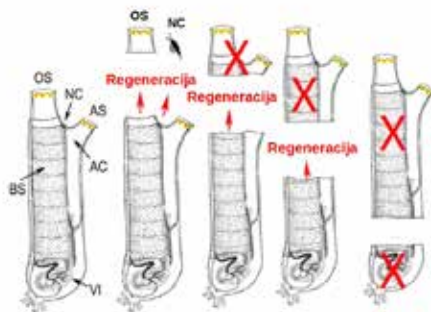
imeli vlogo signalne molekule v tem procesu, smo preizkusili učinek rastnih faktorjev, kot so FGF, BMP in Wnt (Jeffery in Gorički, 2021). Intaktne osebke smo najprej inkubirali v raztopini posamezne molekule, nato smo jim odrezali sifon in jih nazadnje inkubirali v raztopini inhibitorjev kaspaz. Le z dodatkom rekombinantne molekule Wnt3a smo obrnili učinek inhibitorjev kaspaz in dosegli pomnoževanje matičnih celic v škržni košari ter regeneracijo sifonov. To pomeni, da apoptotične celice na mestu poškodbe spodbudijo matične celice v škržni košari k delitvi preko signalne poti Wnt/ β -catenin. Signalna pot Wnt/ β -catenin ima ključno vlogo v treh cikličnih procesih: imunski odziv, celične delitve in cirkadiani (dnevno-nočni) ritem (Lecarpentier in sod., 2019). Migratorne predniške celice po vsej verjetnosti nato proti cilju usmerjajo molekule netrini. To je družina signalnih beljakovin, ki delujejo kot kemotaktični vodniki celicam in aksonom. Povečano izražanje gena *netrin4* v začetni fazi regeneracije sifona smo zaznali tudi v naših poskusih (neobjavljeni rezultati).

V naslednji fazi pa je treba na novo prispele celice v blastemi usmeriti na pot diferenciacije. V naših poskusih smo se osredotočili na povečano izražanje genov, ki kodirajo signalne molekule sistema Delta/Notch. Ob inhibiciji te signalne poti se mišična vlakna v sifonih niso diferencirala, prav tako ni bilo opaziti diferenciacije ocelov (Hamada in sod., 2015). Molekule mRNA sistema Delta/Notch pa so, presenetljivo, med regeneracijo sifona prisotne ne le v regenerirajočem sifonu, ampak tudi v škržni košari. Ob inhibiciji signalne poti Delta/Notch smo opazili tudi, da so se matične celice v škržni košari prenehale deliti. Med regeneracijo pri *Cioni* bi lahko v škržni košari torej prihajalo do interakcije signalnih poti Wnt/ β -catenin in Delta/Notch. Spomnimo, čeprav sta aktivni istočasno, imata ti dve signalni poti v splošnem na celico nasproten učinek. Sistem Wnt/ β -catenin navadno spodbuja celico k delitvi, Delta/Notch pa diferenciacijo v mišična ali nevralna tkiva. Predlaganih je več možnih mehanizmov, po katerih bi lahko Notch omejeval signalizacijo Wnt, vključno z neposredno inhibicijo (Acar in sod., 2021; Gao in sod., 2021). Naši rezultati pa kažejo, da če ni diferenciacije celic v sifonu (Delta/Notch), se matične celice v škržni košari ne delijo, kljub temu, da jih k temu spodbujajo apoptotične celice na robu sifona (Wnt/ β -catenin). Možno je, da to predstavlja zaščito pred tvorbo neoplazem (raka). Mehanizem, po katerem matične celice zaznajo signal Delta/Notch a se ne diferencirajo, še ni znan. Lahko da gre za razlike v koncentraciji signalnih molekul ali številu receptorjev (Jeffery in Gorički, 2021).

4. Za regeneracijo je potreben tudi stres

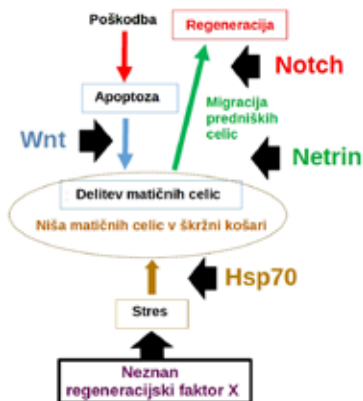
Zanimivo je, da je regeneracija pri *Cioni* asimetrična: proksimalne strukture lahko regenerirajo distalne strukture, distalne strukture pa ne morejo regenerirati proksimalnih struktur (Jeffery in Gorički, 2021). Distalna regeneracija zahteva izražanje številnih genov tudi v škržni košari. Med temi so v naših poskusih izrazito izstopali nekateri geni iz sistema šaperonov Hsp70 (Jeffery in sod., 2023). To so beljakovine, ki pomagajo drugim beljakovinom pri pravilnem zvijanju (Mayer in Bukau, 2005). Še posebej so značilne za odziv celice na temperaturni stres, ko beljakovinom pomagajo obdržati pravilno konfiguracijo. Geni iz sistema Hsp70 pa so se v škržni košari izrazili med

regeneracijo sifona le, če je bila ta povezana s proksimalnim delom telesa, ki vsebuje drobovino. Če smo žival prečno prepolovili in distalnemu delu nato odrezali sifon, je proksimalni del obnovil manjkajoča sifona in možgane, distalni del pa ne, kljub temu, da je vseboval del škvržne košare (Slika 7).



Slika 7. Asimetrična regeneracija pri *Cioni*. Proksimalni del telesa, ki vsebuje drobovino, lahko regenerira distalne strukture, distalne strukture pa ne morejo regenerirati niti odstranjenega sifona niti proksimalnih struktur.

Regeneracija sifona v distalnem delu brez drobovine je bila uspešna le ob kratkotrajni inkubaciji na višji temperaturi (25 °C) (Jeffery in sod., 2023). Ta temperaturni šok je sprožil izražanje genov Hsp70 v distalnem fragmentu in posledično delitev celic v škvržni košari ter regeneracijo sifona. V nobenem primeru pa se ni regeneriral proksimalni del živali, tudi pri presaditvi delujočega srca ali gonad v distalni del (Jeffery in sod., 2023). Zato predpostavljamo, da je za regeneracijo distalnih delov telesa *Cione* potreben še neznan dejavnik, ki se nahaja v proksimalnem delu telesa. Trenutno nadaljujemo z raziskovanjem osnov za asimetrično regeneracijo, pri čemer želimo ugotoviti vlogo asimetrične celične smrti in identiteto proksimalne komponente X (Slika 8).



Slika 8. Poenostavljen trenutni model celičnih in molekularnih procesov med regeneracijo distalnih struktur pri *Cioni*.

5. Sposobnost regeneracije upada s starostjo

Sposobnost regeneracije pa se ne razlikuje le med različnimi deli telesa, ampak se spreminja tudi tekom življenja *Cione* (Dahlberg in sod., 2009; Auger in sod., 2010; Jeffery, 2012). Če se omejimo na regeneracijo po metamorfozi in opazujemo osebke velikosti 1 cm do 14 cm, delež regeneriranih osebkov s starostjo upada, podaljšuje pa se čas regeneracije, in to tako sifonov kot možganov. Pri starejših osebkih (starost 12–14 mesecev) opazimo v škržni košari manj matičnih celic in manj celičnih delitev med regeneracijo kot pri mlajših osebkih (6 mesecev) (Jeffery, 2012). Kot pa kažejo neuspešni poskusi regeneracije s presaditvijo dela škržne košare z mlajšega osebka na starejšega, spremembe v niši matičnih celic niso edini vzrok regenerativnega staranja.

SKLEPI

Problem izrabe in odmiranja celic, organov in osebkov se v evoluciji rešuje na dva medsebojno izključujoča načina. Na eni skrajnosti so celice, tkiva in organizmi, ki so tolerantni na stres, poškodbe in bolezni. Za te je značilno hitro nadomeščanje oz. regeneracija odmrlih delov telesa. Na drugi skrajnosti pa so celice, organi in vrste, ki so razvile različne mehanizme zaščite pred poškodbami, boleznimi in drugimi stresorji. Pri teh je poudarek na dolgoživosti a hkrati zmanjšani sposobnosti regeneracije.

Kako nam torej lahko *Ciona* pomaga odgovoriti na vprašanje, zakaj so sesalčji možgani izgubili sposobnost regeneracije? Nekaj hipotez:

niše matičnih celic se domnevno nahajajo zunaj možganov in so od njih ločene s krvno-možgansko pregrado, ki je neprepustna za migratorne predniške celice;

za regeneracijo je potrebna apoptoza, ki je lahko v možganih potlačena in nezadostna, da bi sprožila celične delitve in regeneracijo;

signalne molekule, ki so potrebne v procesu regeneracije ali njihovi receptorji bi lahko v možganih manjkali.

Še druge možnosti bi lahko odkrili s pomočjo nadaljnjega preučevanja regeneracije pri *Cioni*.

VIRI

Acar, A., Hidalgo-Sastre, A., Leverentz, M. K., Mills, C. G., Woodcock, S., Baron, M., Collu G. M. in Brennan, K. (2021). Inhibition of Wnt signalling by Notch via two distinct mechanisms. *Sci Rep.* 11: 9096.

Auger, H., Sasakura, Y., Joly, J.-S. in Jeffery, W. R. (2010). Regeneration of oral siphon pigment organs in the ascidian *Ciona intestinalis*. *Dev Biol.* 339: 374–389.

Brockes, J. P. in Kumar, A. (2008) Comparative aspects of animal regeneration. *Annu Rev Cell Dev Biol.* 24: 525–549.

Dahlberg, C., Auger, H., Dupont, S., Sasakura, Y., Thorndyke in M., Joly, J.-S. (2009). Refining the *Ciona intestinalis* model of central nervous system regeneration. *PLoS One* 4(2): e4458.

- Dehal, P., Satou, Y., Campbell, R. K., Chapman, J., Degnan, B., De Tomaso, A., Davidson, B., Di Gregorio, A., Gelpke, M., Goodstein, M., Harafuji, N., Hastings, K. E. in drugi. (2002). The draft genome of *Ciona intestinalis*: Insights into chordate and vertebrate origins. *Science* 298: 2157–2167.
- Delsuc, F., Brinkmann, H., Chourrout, D., Phillipe, H. (2006). Tunicates and not cephalochordates are the closest living relatives of vertebrates. *Nature* 439: 965–968.
- Gao, J., Fan, L., Zhao, L., Su, Y. (2021). The interaction of Notch and Wnt signaling pathways in vertebrate regeneration. *Cell Regen.* 10: 11.
- Hamada, M., Gorički, Š., Byerly, M. S., Satoh, N. in Jeffery, W. R. (2015). Evolution of the chordate regeneration blastema: Differential gene expression and conserved role of notch signaling during siphon regeneration in the ascidian *Ciona*. *Dev Biol.* 405: 304–315.
- Hirschler, J. (1914). Über die Restitutions- und Involutionen voränge bei operierten Exemplaren von *Ciona intestinalis* Flem. (Teil I) nebst Bemerkungen über den Wert des Negativen für das Potenzproblem. *Arch mikr Anat.* 85: 205–227.
- Jeffery, W. R. (2012). Siphon regeneration capacity is compromised during aging in the ascidian *Ciona intestinalis*. *Mech Ageing Dev.* 133: 629–636.
- Jeffery, W. R. (2015a). Closing the wounds: one hundred and twenty five years of regenerative biology in the ascidian *Ciona intestinalis*. *Genesis* 53: 48–65.
- Jeffery, W. R. (2015b). Distal regeneration involves the age dependent activity of branchial sac stem cells in the ascidian *Ciona intestinalis*. *Regeneration* 2: 1–18.
- Jeffery, W. R. (2015c). The tunicate *Ciona*: A model system for understanding the relationship between regeneration and aging. *Invertebr Reprod Dev.* 59(Suppl 1): 17–22.
- Jeffery, W. R. (2019). Progenitor targeting by adult stem cells in *Ciona* homeostasis, injury, and regeneration. *Dev Biol.* 448: 279–290.
- Jeffery, W. R. in Gorički, Š. (2021). Apoptosis is a generator of Wnt-dependent regeneration and homeostatic cell renewal in the ascidian *Ciona*. *Biol Open* 10(4): bio058526.
- Jeffery, W. R., Li, B., Ng, M. Li, L., Gorički, Š. in Ma, L., (2023). Differentially expressed chaperone genes reveal a stress response required for unidirectional regeneration in the basal chordate *Ciona*. *BMC Biol.* 21: 148.
- Joly, J.-S., Kano, S., Matsuoka, T., Auger, H., Hirayama, K., Satoh, N., Awazu, S., Legendre, L. in Sasakura, Y. (2007). Culture of *Ciona intestinalis* in closed systems. *Dev Dyn.* 236:1832-1840.
- Lecarpentier, Y., Schussler, O., Hébert, J.-L., in Vallée, A. (2019). Multiple targets of the canonical WNT/ β -Catenin signaling in cancers. *Front Oncol.* 9: 1248.
- Mayer, M. P. in Bukau, B. (2005). Hsp70 chaperones: Cellular functions and molecular mechanism. *CMLS Cell Mol Life Sci.* 62: 670–84.

Turk, T. (2007). Pod gladino Mediterana. Ljubljana: Založba Modrijan, 590 str.

Von Haffner, K. (1933). Die Überzäligen Siphonen und Ocellen von *Ciona intestinalis* L. (Experimentell-morphologische Untersuchungen). Z Wiss Zool. 143: 16–52.

Whittaker, J. (1975). Siphon regeneration in *Ciona*. Nature 255: 224–225.