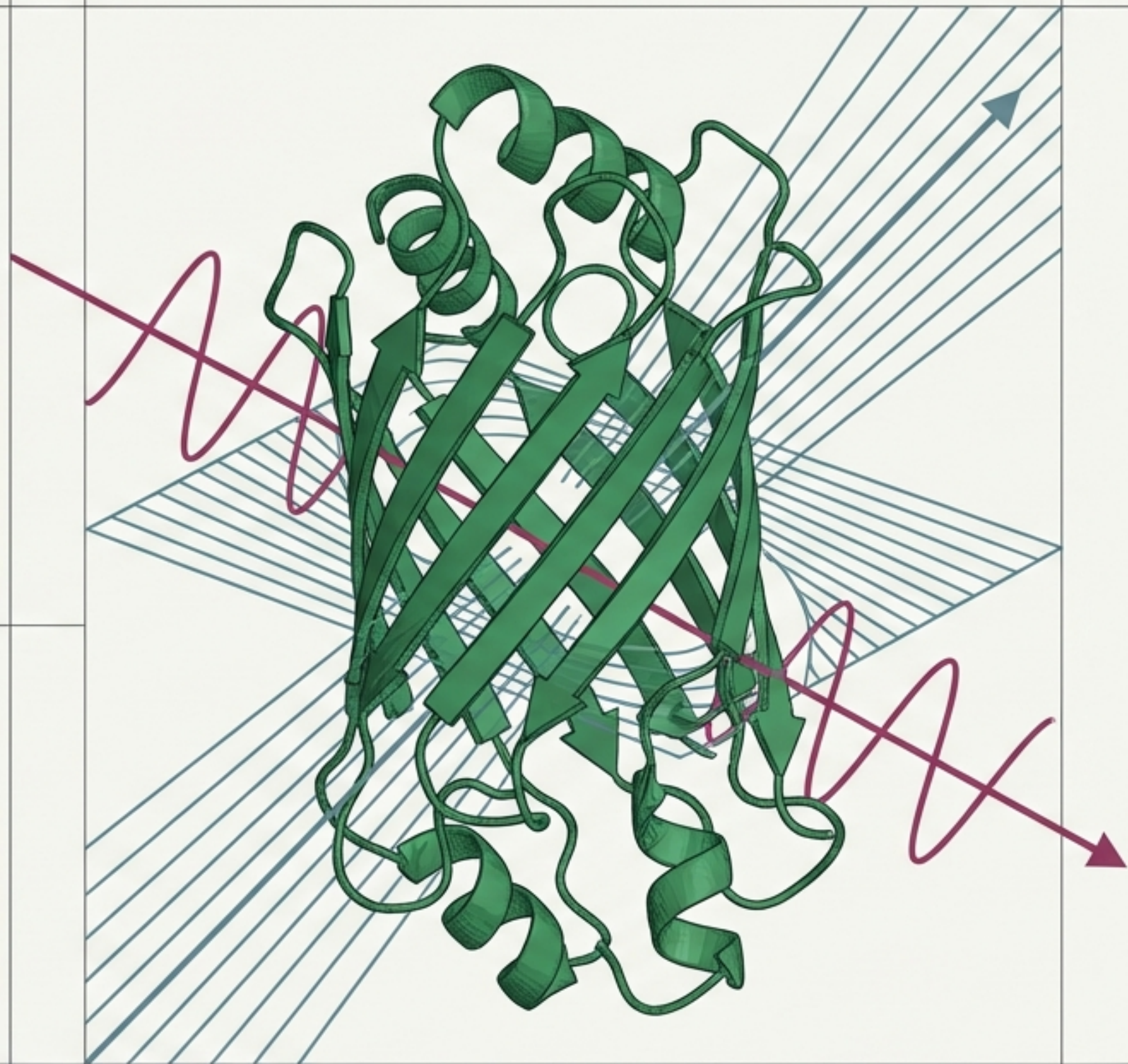
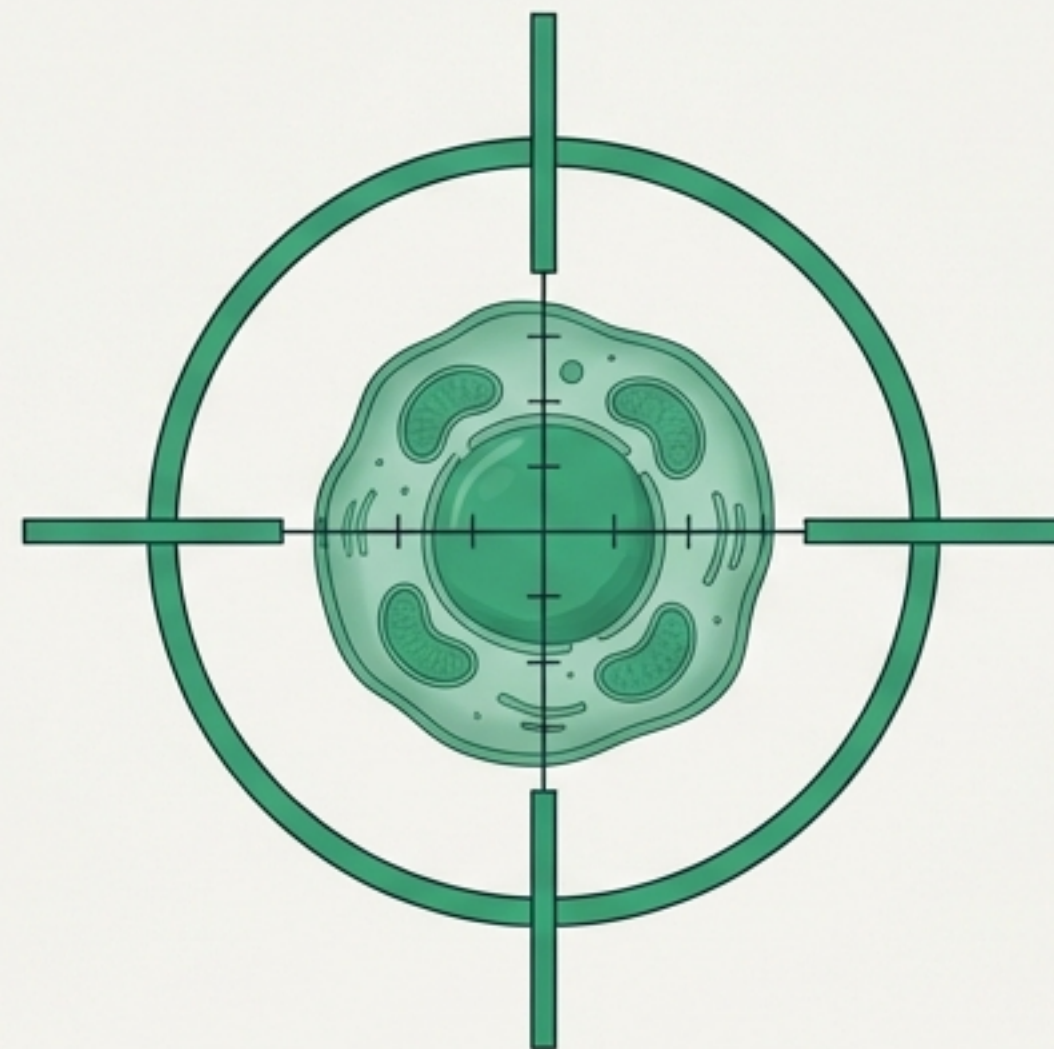
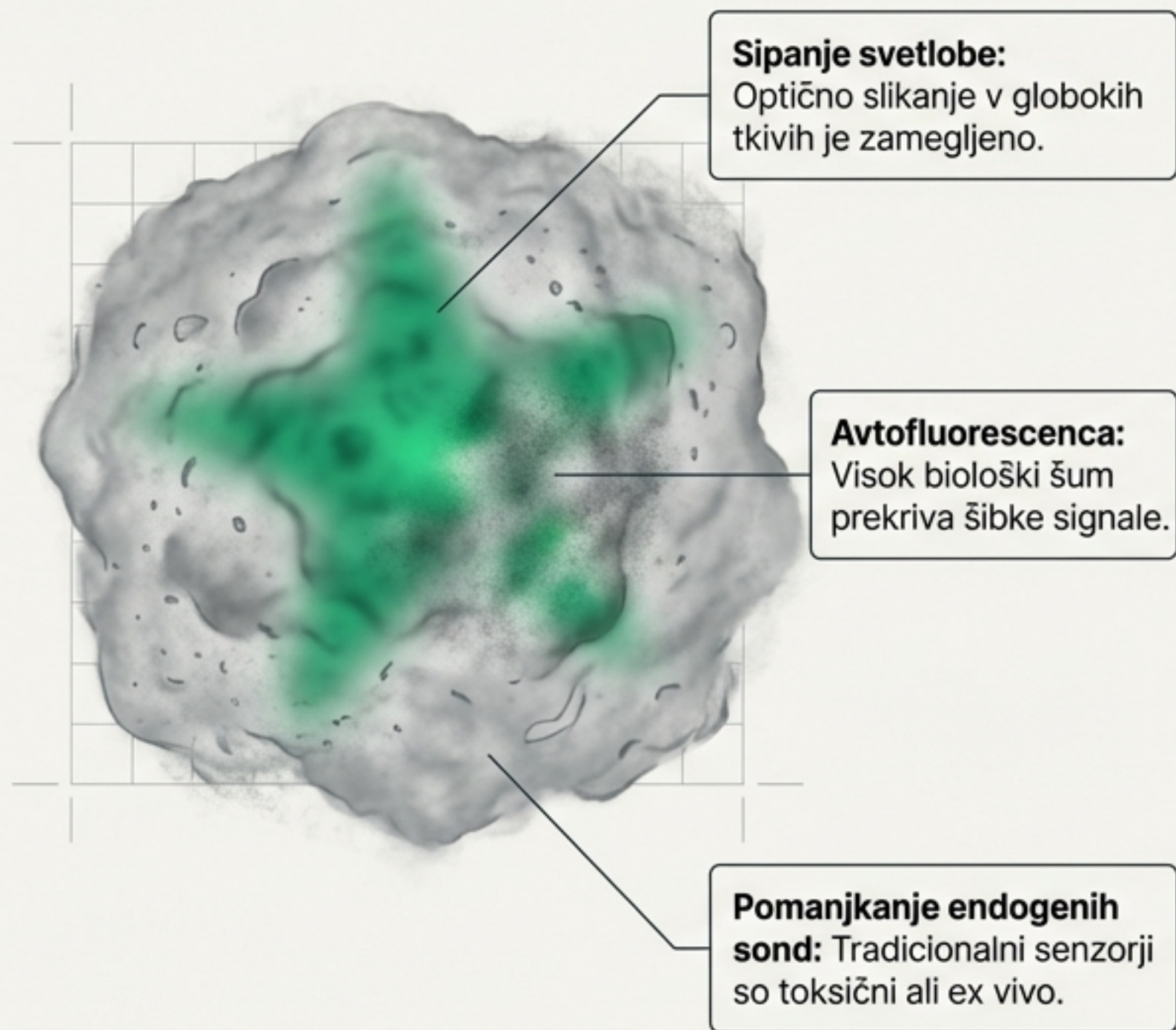


Kvantna spinska resonanca v bioloških sistemih

Nova doba senzoričnih tehnologij:
Od usmerjene evolucije do
multimodalnega slikanja z
beljakovinami MagLOV.



Meje trenutnega biološkega slikanja



Rešitev: Potrebujemo biološki kvantni senzor, ki se lahko genetsko kodira in deluje neposredno v živih celicah.

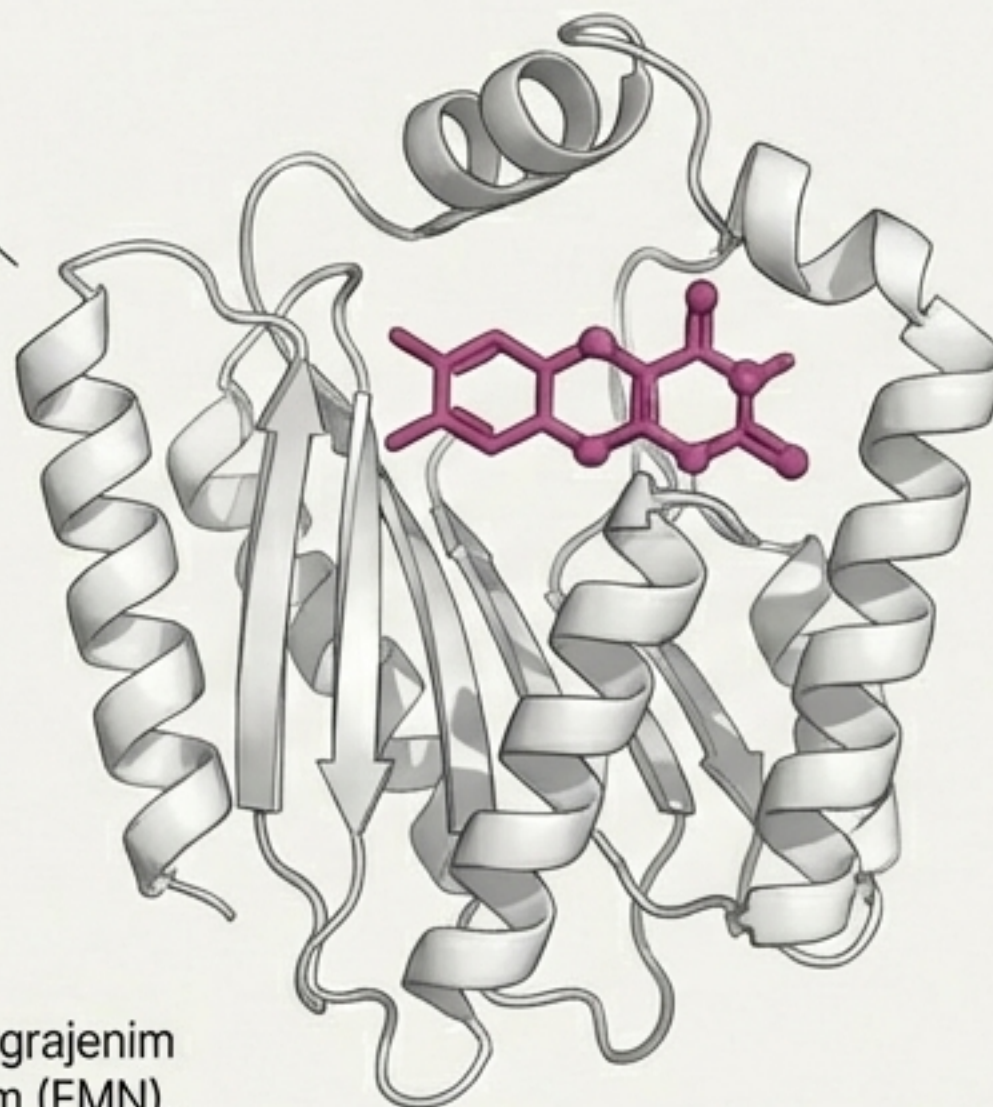
Predstavitev MagLOV: Biološki kvantni senzor

Genetsko kodiran

Sintetiziran neposredno v celici preko DNK. Ne potrebuje zunanjih kemičnih dodatkov.

Sobna temperatura

Za razliko od mnogih kvantnih sistemov deluje v živih celicah pri standardnih pogojih.



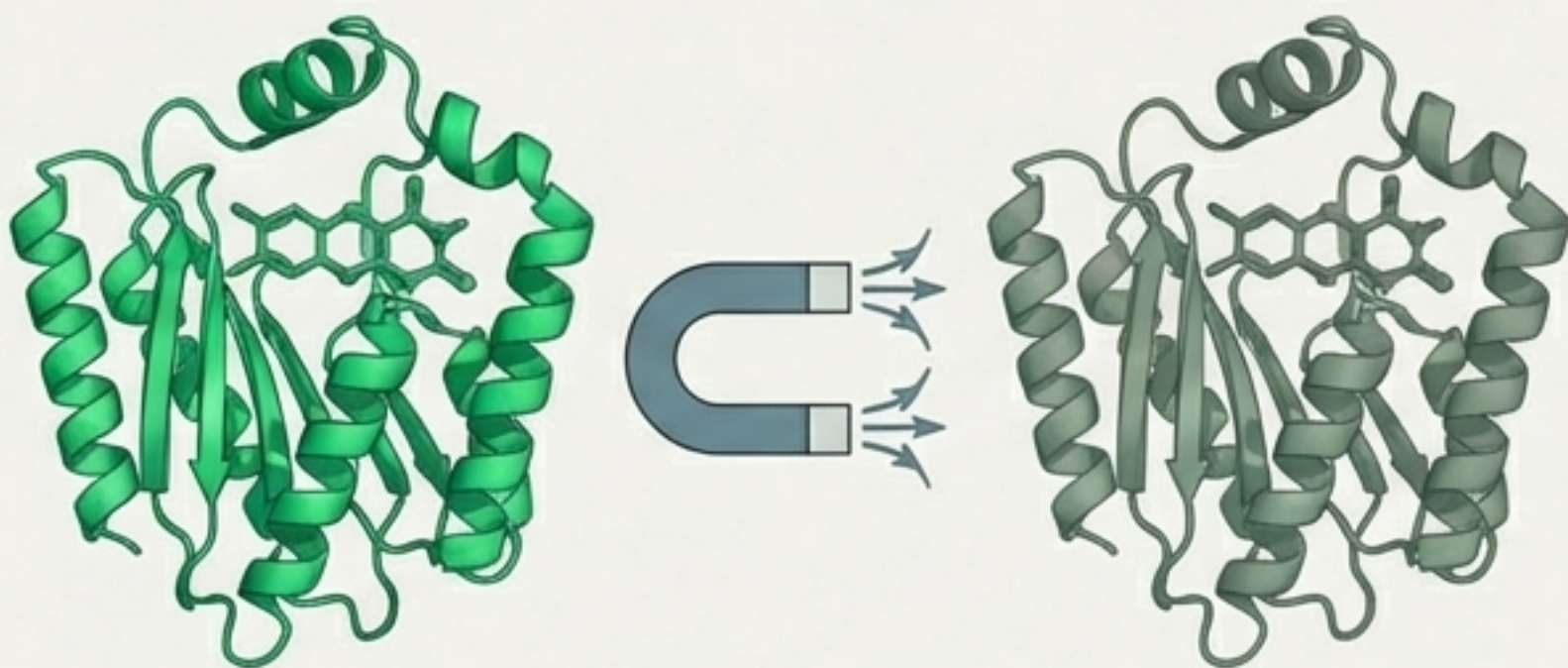
Struktura asLOV2 domene z vgrajenim flavinskim kofaktorjem (FMN).

In vivo delovanje

Omogoča slikanje in meritve neposredno v biološkem okolju (bakterije, tkiva).

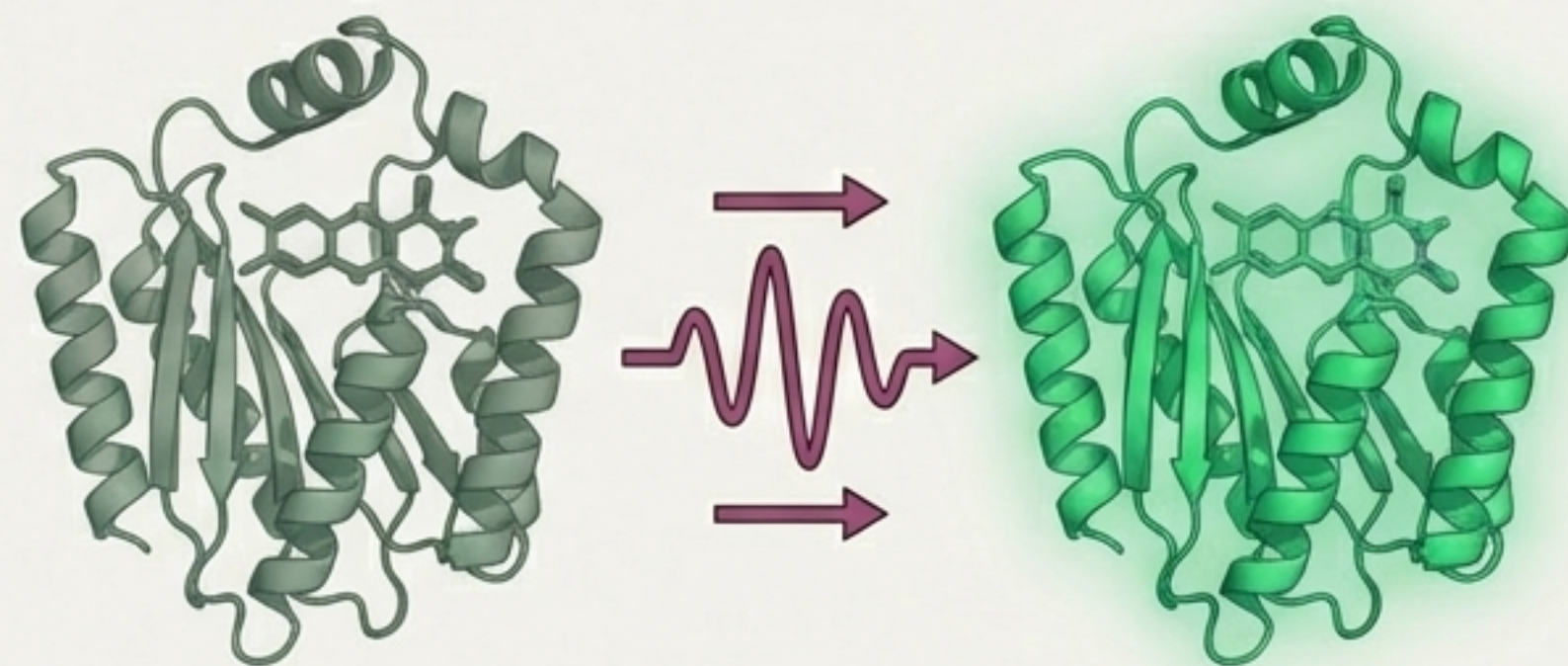
Osnove kvantnega stikala: Vhod in izhod

MFE: Učinek magnetnega polja



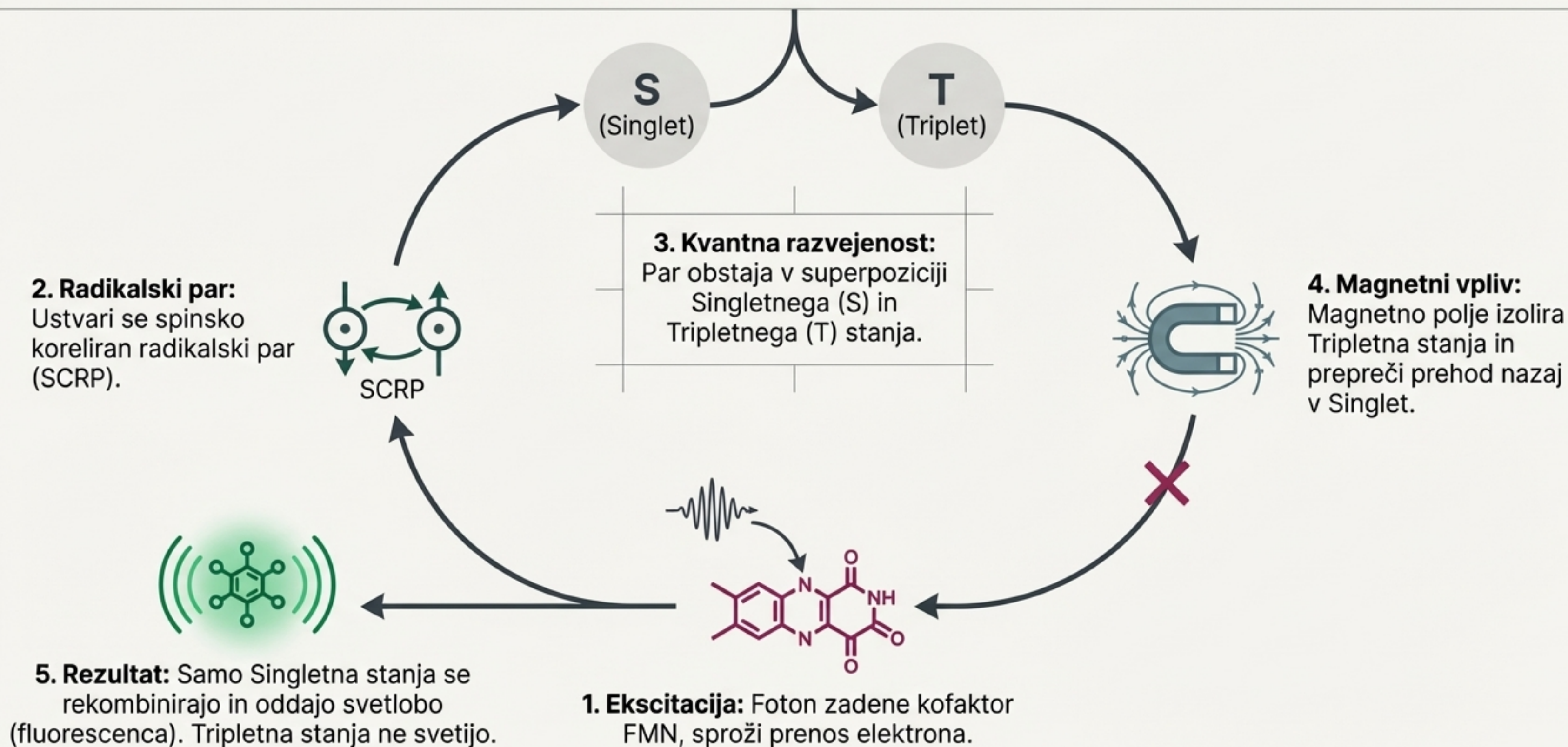
- **Vhod:** Statično magnetno polje (B_0)
- **Pojav:** Učinek magnetnega polja (MFE)
- **Izhod:** Zatemnitev. Fluorescenca pade (do -50 %).

ODMR: Optično zaznana magnetna resonanca

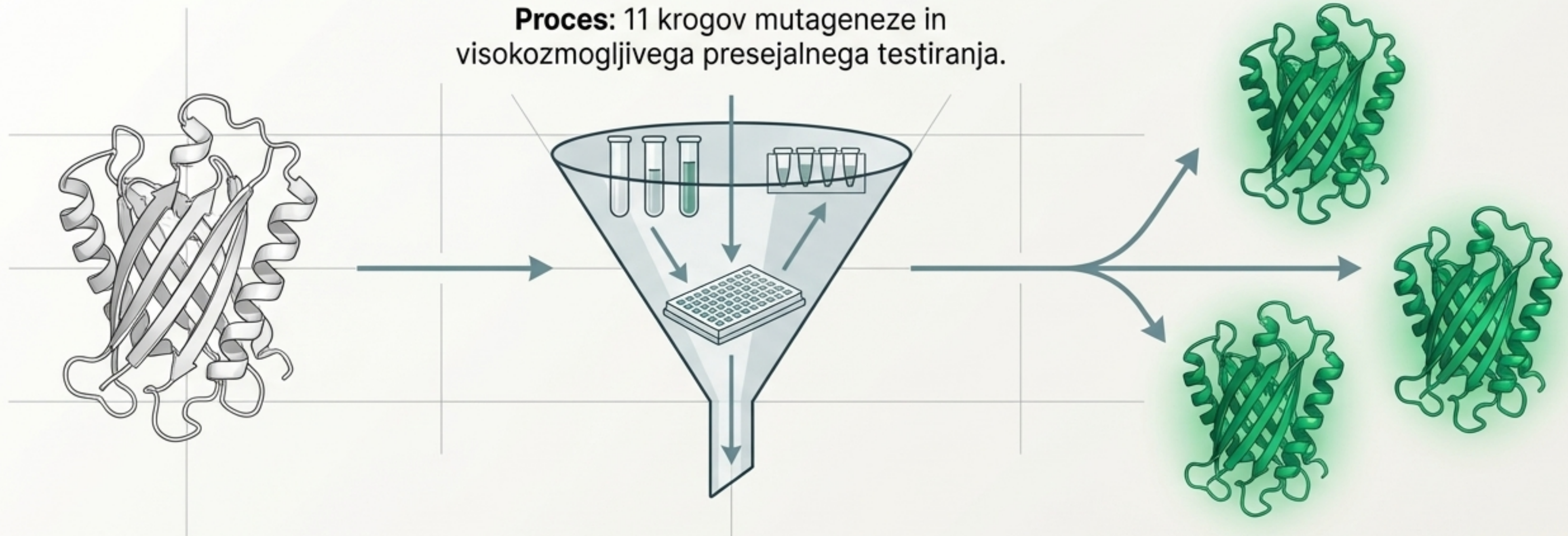


- **Vhod:** Resonančna radijska frekvenca (RF / B_1)
- **Pojav:** Optično zaznana magnetna resonanca (ODMR)
- **Izhod:** Osvetlitev. Fluorescenca se poveča.

Mehanizem: Kvantni spini in radikalski pari



Inženiring: Usmerjena evolucija kvantnih senzorjev



Izhodišče: AsLOV2 C450A

Naravna rastlinska beljakovina z minimalnim odzivom.

Optimizacija: Selekcija kolonij z največjo razliko v fluorescenci (magnet vklopljen/izklopljen).

Rezultat: Družina variant MagLOV

Optimizirano za moč signala (MFE magnitude) in hitrost odziva (MFE saturation rate).

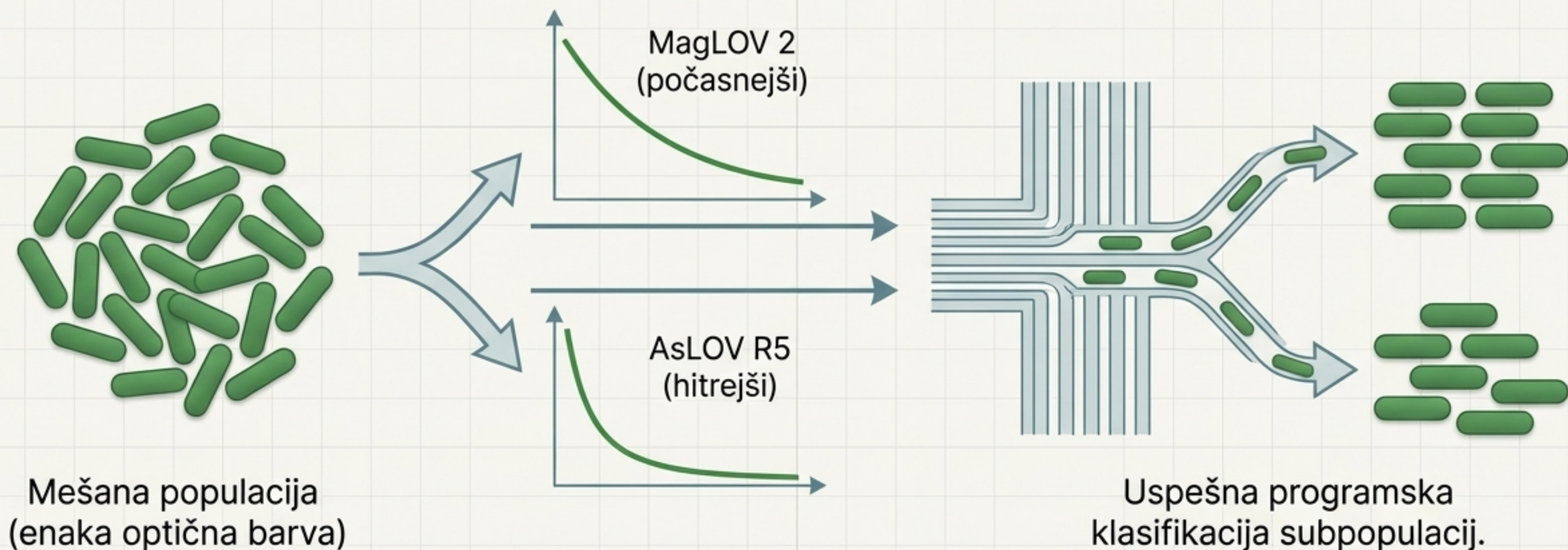
Arzenal senzorjev MagLOV: Primerjalna matrika

Varianta	MFE Amplituda	Hitrost nasičenja (τ)	ODMR Kontrast	Idealna aplikacija
AsLOV R2	Zmerna	 5.85 s	Nizek	Zgodnji prototip
MagLOV	Visoka	 2.02 s	Zmeren	Splošno slikanje
MagLOV 2	Najvišja (do -50%)	 2.43 s	Visok (10%)	Najboljše za Lock-in detekcijo
MagLOV 2 fast	Zmerna	 1.07 s	Zelo visok	Najboljše za hiter ODMR in multipleksiranje

Aplikacija 1a: Multipleksiranje z dinamiko spinov

Izziv: Ločevanje celic z enakim barvnim spektrom (npr. vse svetijo zeleno).

Rešitev MagLOV: Razlikovanje celic ne po barvi, temveč po njihovi hitrosti magnetnega odziva (časovna konstanta τ).



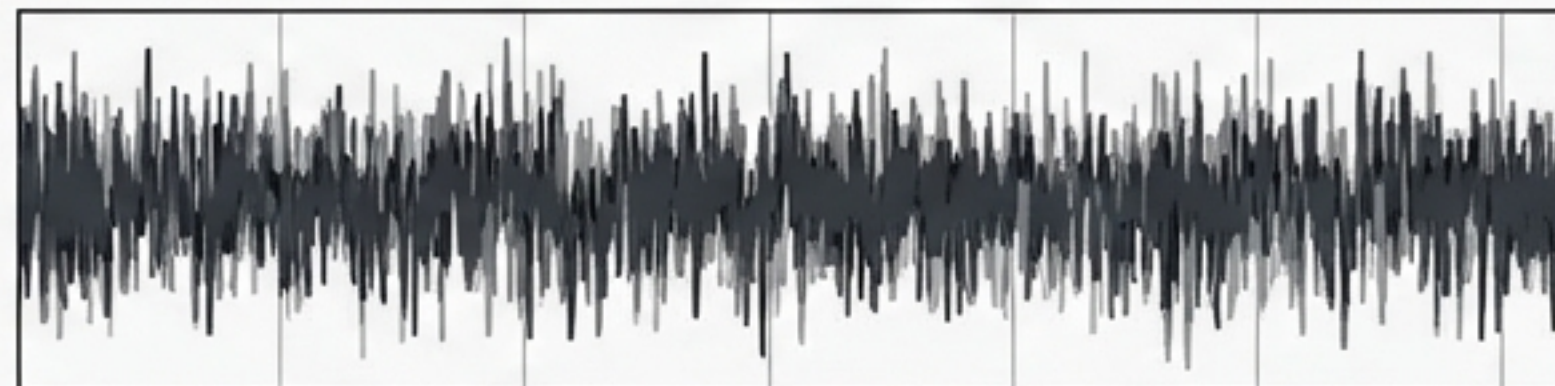
Aplikacija 1b: Lock-in detekcija šibkih signalov

Izziv: Detekcija izjemno majhnih količin biomarkerjev v tkivu z visoko avtofluorescenca.

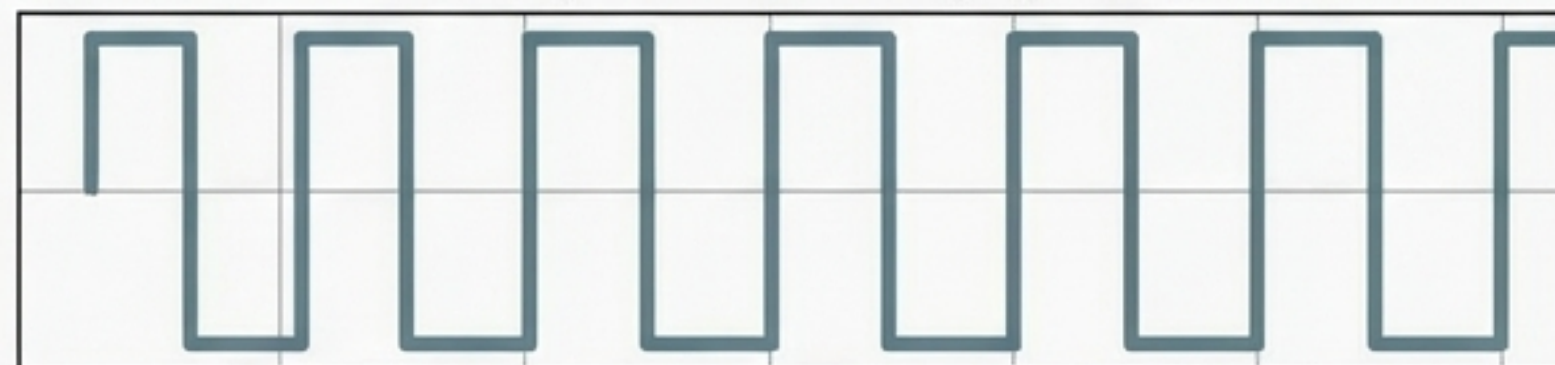
Rešitev MagLOV: Modulacija magnetnega polja omogoča lock-in ojačanje. Ker šum (avtofluorescenca) ne reagira na magnet, lahko z analizo frekvence izluščimo le signal beljakovine MagLOV.

Rezultat: Natančnost klasifikacije 99 % celo pri celicah z minimalno ekspresijo MagLOV.

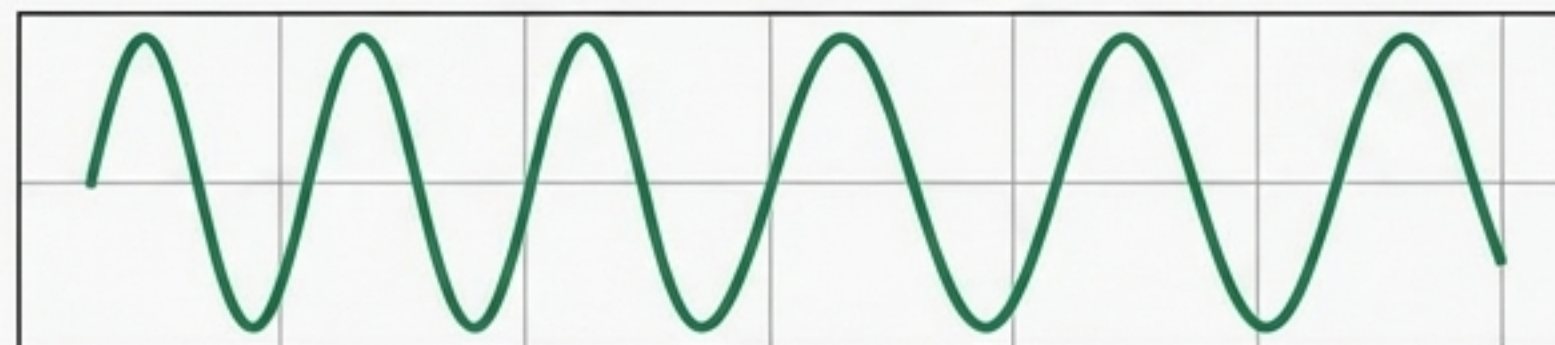
Biološki šum in sipanje



Pulsirajoče magnetno polje (B0)



Izluščen MagLOV signal

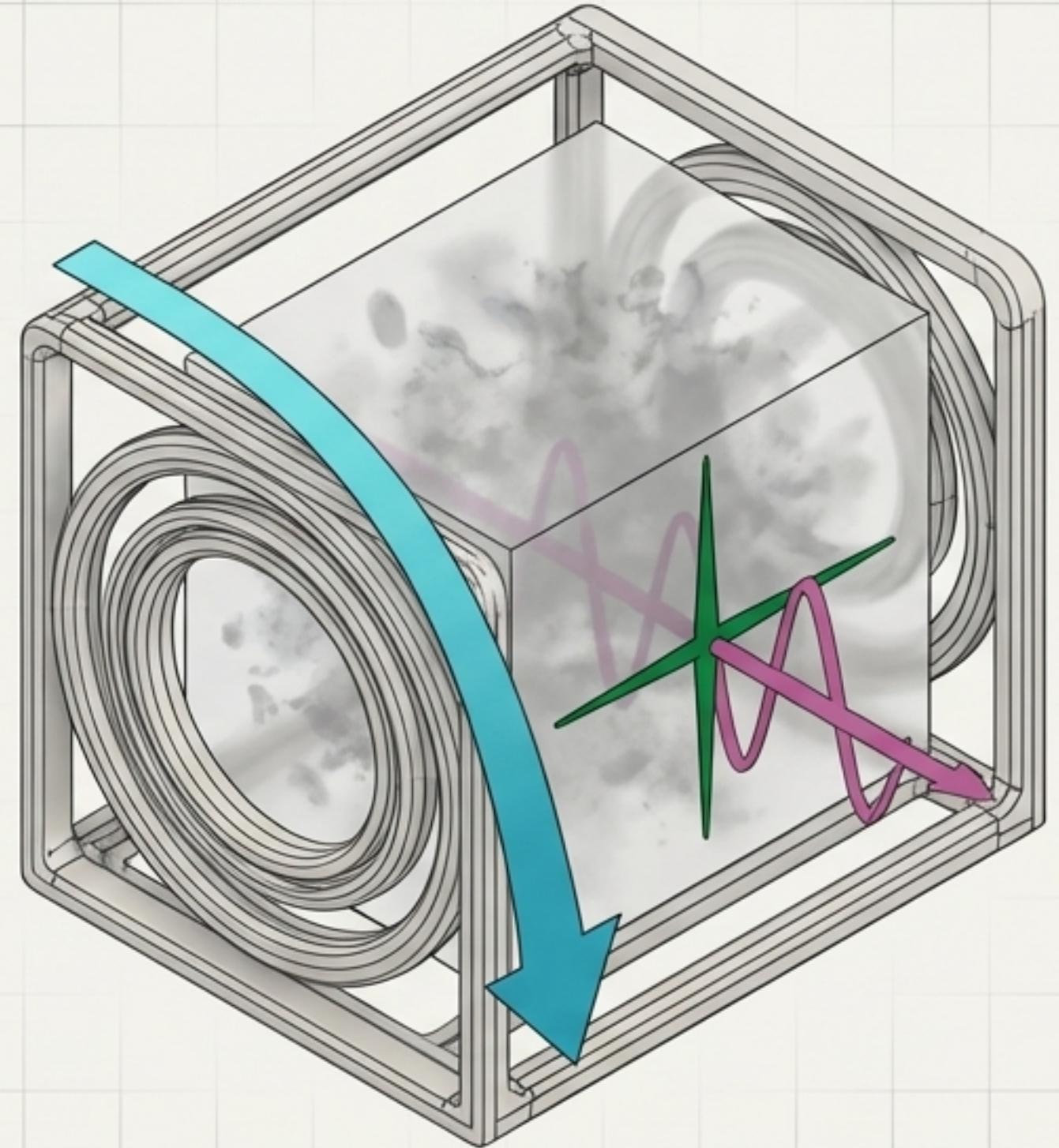


Aplikacija 2: Genetsko kodiran fluorescenčni MRI

Izziv: Optična mikroskopija izgubi prostorsko ločljivost v globokem tkivu zaradi sipanja svetlobe.

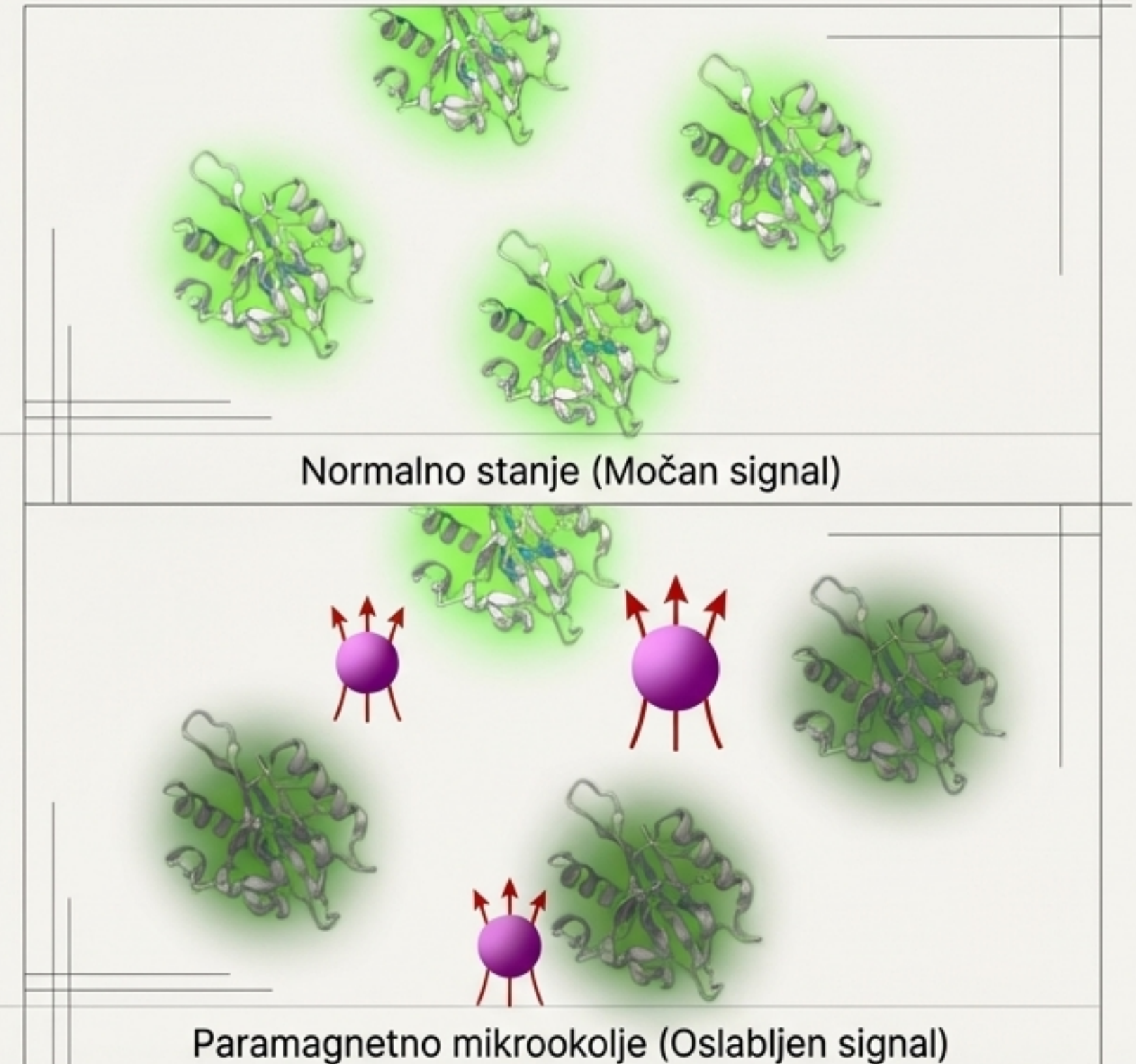
Rešitev MagLOV: Uporaba magnetnih gradientov. ODMR resonanca se zgodi le tam, kjer se ujemata specifično magnetno polje in RF frekvenca.

Rezultat: Slikanje globine (z-os) ne glede na to, kako motno je tkivo. Svetlobo le zbiramo, medtem ko **lokacijo določa magnetna resonanca.**



Aplikacija 3: Kvantno zaznavanje mikrookolja

- **Izziv:** Merjenje lokalnih kemičnih ali magnetnih sprememb znotraj žive celice brez uničenja tkiva.
- **Rešitev:** Beljakovina MagLOV deluje kot senzor za paramagnetne ione (npr. Gadolinij).
- **Mehanizem:** Okoliški prosti radikali povzročijo relaksacijo spinov kofaktorja FMN. Večja kot je koncentracija ionov, šibkejši je MFE signal.
- **Rezultat:** Možnost in vivo merjenja celičnega stresa ali prisotnosti paramagnetnih metaloproteinov.



Multimodalno senzorično orodje

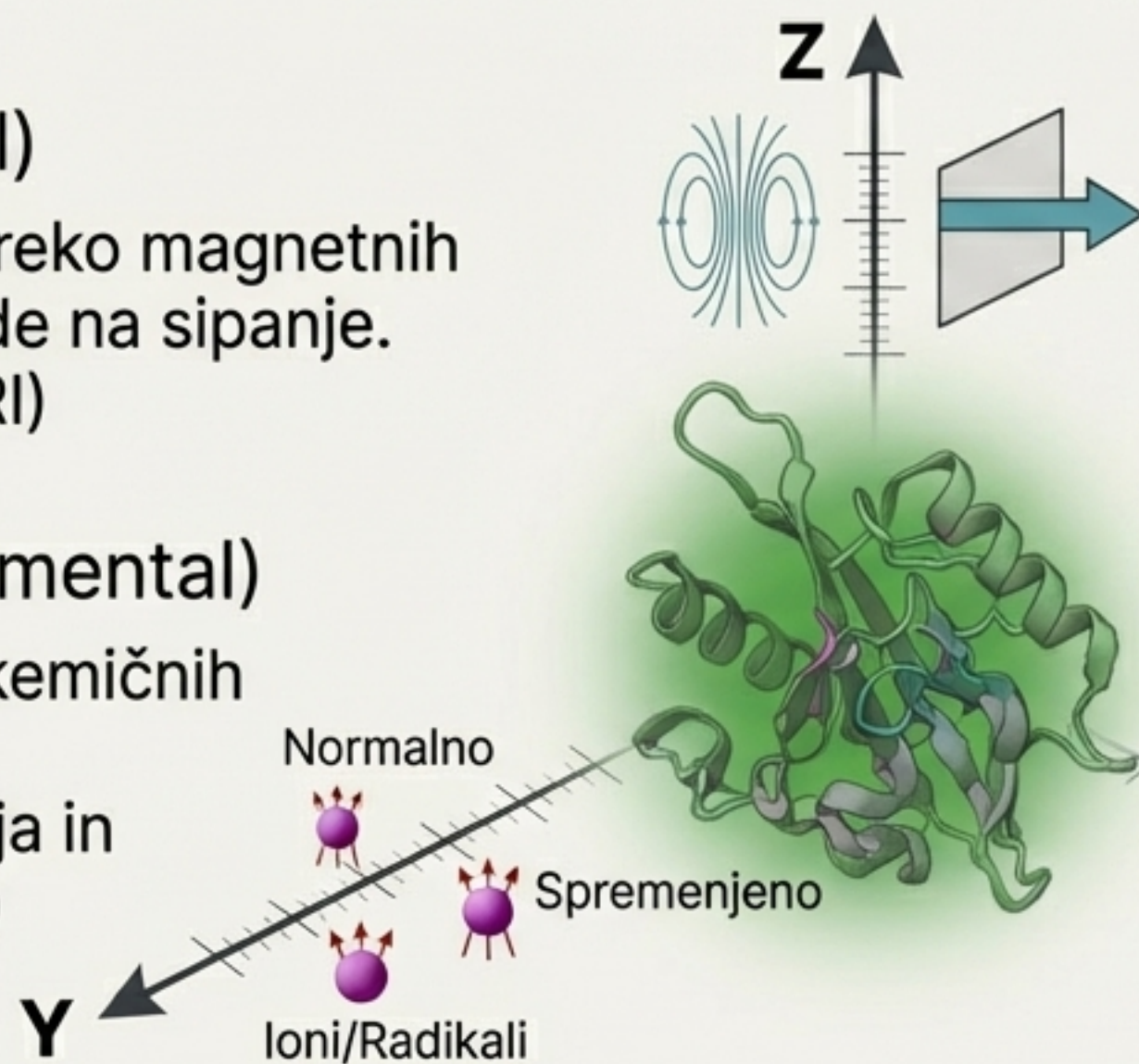
Pravi preboj ni le ena specifična aplikacija. Z eno samo genetsko modifikacijo se standardna celica spremeni v popolnoma programabilen, večdimenzionalen kvantni senzor.

Prostor (Spatial)

Sledenje lokaciji preko magnetnih gradientov ne glede na sipanje.
(Fluorescenčni MRI)

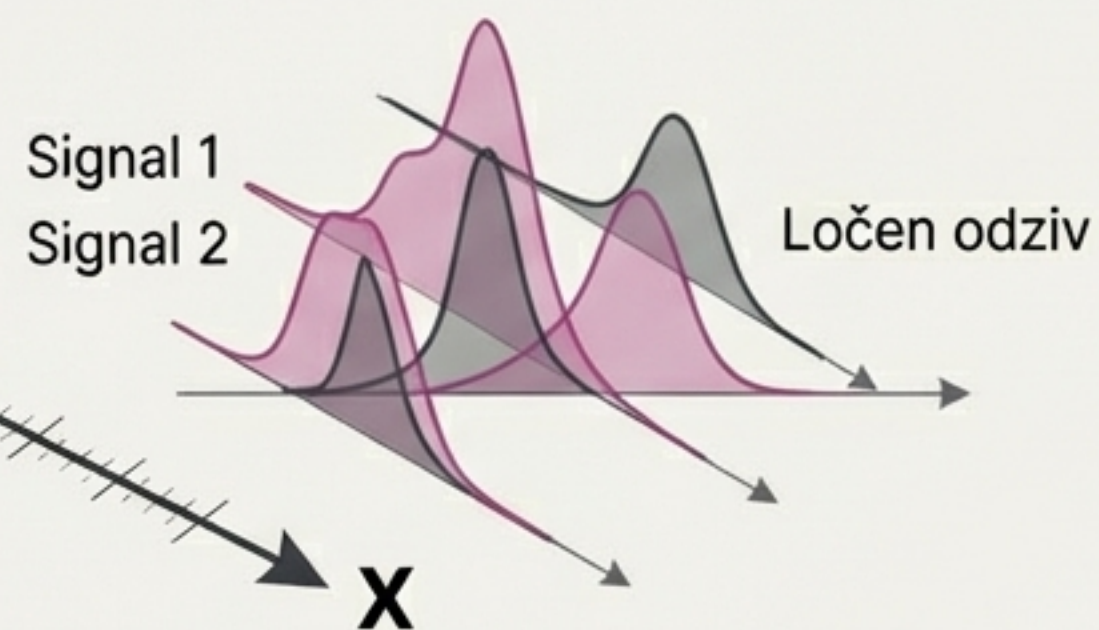
Okolje (Environmental)

Merjenje lokalnih kemičnih sprememb v živo.
(Senzor mikrookolja in relaksacija spinov)



Čas (Temporal)

Ločevanje signalov preko dinamike odziva.
(Multipleksiranje in Lock-in)



Prihodnost kvantne biologije

“MagLOV predstavlja paradigmo kvantnega slikanja iz in vitro fizikalnih eksperimentov v in vivo biološka orodja.”

Ključne prednosti platforme:

- **Popolna prilagodljivost:** Lastnosti se lahko programirajo in izboljšujejo z modifikacijo DNK.
- **Endogena integracija:** Senzor se lahko poveže z biološkimi procesi, genetskimi signali ali celičnim stresom.
- **Nova meja:** Od izključno opazovalne tehnologije k sistemom za magnetno biološko aktivacijo (nadzor celic z magnetnimi polji).

