

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik 13 (1985/1986)

Številka 3

Strani 135-143

Janez Stepišnik:

SLIKANJE Z MAGNETNO RESONANCO

Ključne besede: fizika.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/13/785-Stepisnik.pdf>

© 1986 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

© 2010 DMFA - založništvo

Vse pravice pridržane. Razmnoževanje ali reproduciranje celote ali posameznih delov brez poprejšnjega dovoljenja založnika ni dovoljeno.

SLIKANJE Z MAGNETNO REZONANCO

Tehnološki napredek v zadnjem desetletju je prinesel precej novosti tudi v medicinsko diagnostiko. Odkrivanje bolezni in poškodb v notranjosti človeškega telesa je postalo hitrejše, natančnejše in varnejše. Pri slikanju z žarki x danes lahko dobimo sliko z manjšo dozo nevarnega ionizirajočega sevanja. Z njimi lahko tudi preseavamo telo iz različnih smeri in potem s pomočjo računalnika sestavimo sliko prereza skozi telo. Zdravnik tako lahko vidi notranje organe telesa, ne da bi moral zarezati z nožem. Razvili so tudi slikanje z ultrazvokom, ki je posebej primerno, kadar ne smemo uporabljati nevarnih žarkov x.

V zadnjem času pa se je pojavila še tehnika slikanja človeškega telesa z jedrsko magnetno resonanco. Pravijo ji tudi slikanje z NMR (nuklearna magnetna resonanca) ali NMR tomografija. Pri tem slikanju ne uporabljamo nevarnega ionizirajočega sevanja, podrobnosti znotraj telesa pa vidimo z visoko ločljivostjo in še v poljubnem prerezu skozi telo. Mogoči so tudi tridimenzionalni posnetki, ki kažejo več vzporednih ravnin hkrati. Podobno kot pri drugih tehnikah je na NMR sliki prerez notranjih organov telesa. Vidimo njihovo obliko. Iz NMR slike lahko zdravnik spozna še nekaj več o obolenju. Na njej so lahko tudi podrobnosti kemičnih sprememb v posameznem organu. Tako lahko zdravnik sklepa o vrsti obolenja v telesu ne le iz spremenjene oblike organa, ampak tudi neposredno, saj vidi sliko obolenja samega. Prav to daje NMR tehniki slikanja posebno veljavo med zdravniki.

Jedrska magnetna resonanca

Čeprav so pojav jedrske magnetne resonance že prej napovedovali, sta ga odkrila pred nekaj več kot tridesetimi leti F. Bloch in E.M. Purcell. Za odkritje sta prejela tudi Nobelovo nagrado. Jedrska magnetna resonanca ali s kratico NMR je povezana z magnetnimi lastnostmi atomskih jeder. Atomsko jedro ima spin. Beseda spin izhaja iz angleščine in pomeni vrtenje. Delci s spinom imajo namreč zelo podobne lastnosti, kot jih ima vrtavka, ki je hkrati še namagnetena (slika 1). Predstavljamo si lahko, da magnetne lastnosti nastanejo, ker se delci z nabojem vrtijo okoli svoje osi. Naboj, ki kroži, povzroči magnetno polje in magnetne lastnosti delca, zaradi vrtenja pa ima delec vrtilno količino kot vrtavka.

Kolikšen je spin jedra in s tem njegova vrtilna količina in magnetni moment, je odvisno od števila protonov in nevtronov v jedru in njihove razporeditve. Zapomnili si bomo samo to, da imajo različna atomska jedra različno

vrednost vrtilne količine in magnetnega momenta.

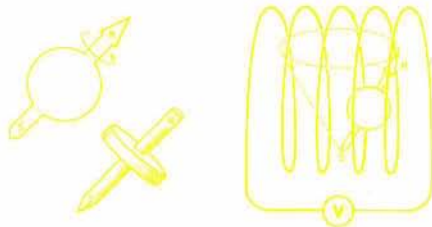
Torej atomsko jedro se obnaša kot namagnetena vrtavka. Kadar os vrtavke, ki se vrti na mizi, ni navpična, deluje navor zaradi sile teže. Navor povzroči, da njena os opleta.

Vrh osi opisuje kroge. Podobno se dogaja atomskemu jedru, kadar je v magnetnem polju. V tem primeru povzroča navor magnetno polje, ki deluje na magnetni moment jedra, kadar ni vzporeden smeri magnetnih silnic. In podobno kot vrtavka tudi jedro opleta. Frekvenca opletanja je večja, če je večji navor. Velja naslednja zveza med frekvenco opletanja in gostoto magnetnega polja

$$\nu = \gamma B_0 \quad (1)$$

kjer je γ sorazmernostni množitelj, odvisen od magnetnega momenta jedra. Različna jedra opletajo z različno frekvenco. Tako naprimer opleta v magnetnem polju z gostoto 1 T vodikovo jedro s frekvenco 42 MHz, fosforjevo s frekvenco 14 MHz in fluorovo s 40 MHz. Vodikovega jedra sicer ne vidimo, lahko pa opazujemo njegovo obnašanje posredno. Okoli vzorca navijemo tuljavo in "jedrski magneti", ki opletajo sem in tja, inducirajo v tuljavi električno napetost. Podobno, kot se zgodi, če v tuljavi premikamo magnet (slika 2). Pri indukciji sodeluje velika množica jeder. V enem gramu vode jih je kar 10^{22} . In če bi pri poskusu opletal vsak po svoje, bi se njihovi prispevki k napetosti medsebojno izničili. Pripraviti jih moramo, da bodo opletali sočasno, tako kot kaže slika 3. Kako to napravimo, bomo videli nekoliko kasneje. Oglejmo si najprej, kaj se dogaja z jedrskimi magneti, ko jih damo v magnetno polje.

Bodisi da snov vtaknemo med pole magneta ali pa magnetno polje nenadoma vključimo, jedrski magnetki ali spini občutijo spremembo magnetnega polja, ki je počasnejša, kot pa je frekvenca opletanja. V takem primeru se spini



zavrtijo v povprečju v smer magnetnega polja. Torej vsi kažejo v smer polja in nanje ne deluje navor polja. Iz te lege jih lahko zmaknemo tako, da prečno na stalno magnetno polje vključimo spremenljivo magnetno polje, ki niha z enako frekvenco, kot opletajo spini. Pravimo, da je dodatno magnetno polje v resonanci s spini. Ker niha s frekvenco, ki jo imajo tudi radijski valovi, ga imenujemo tudi radiofrekvenčno polje. Za kolikšen kot zmakne to polje spine iz prvotne smeri, je odvisno od njegovega trajanja. Radiofrekvenčno polje deluje tako v zelo kratkih časovnih intervalih ali sunkih. Sunke poimenujemo po njihovem delovanju na spine. Če se spini zavrtijo iz smeri polja v smer, ki je pravokotna na polje, pravimo, da je radiofrekvenčni sunek 90–stopinjski, če se pa zavrtijo v smer nasprotno polju, je sunek 180–stopinjski. Tako lahko sunek sočasno zavrti vse spine v smer prečno na magnetno polje. In potem lahko tudi vsi spini opletajo sočasno. V tuljavi se njihovi prispevki seštevajo in inducirana napetost je lahko tudi nekaj deset mikrovoltov. Tako smo spoznali, da jedrski spini pod vplivom magnetnega polja opletajo s frekvenco, ki je odvisna od gostote magnetnega polja. To pa zaznavamo preko napetosti, ki jo inducirajo v tuljavi, navito okoli vzorca. Oglejmo si sedaj, kako izkoriščamo ti lastnosti za slikanje z jedrsko magnetno resonanco.

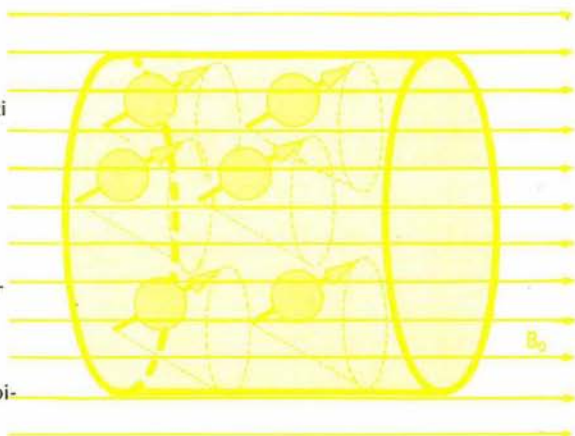
Slikanje s spini

Napetost, ki se inducira v tuljavi, je sorazmerna številu atomskih jeder, ki sodelujejo pri magnetni resonanci. To že dolgo uporabljajo naprimer za določevanje vsebnosti olja v semenih. V semenu imamo jedra vodika, ki je kemično različno vezan v vodi ali olju. Vodikova jedra pa čutijo tudi vpliv sosednjih magnetnih jeder. In če je vodik vezan v različne spojine, ima različno okolico in čuti drugačen vpliv sosedov. Opletanje spinov vodika v olju počasneje zamre kot v vodi.

Slika 1. Nekatera atomska jedra imajo podobne lastnosti kot namagne tena vrtavka. (skrajno levo)

Slika 2. Opletanje jedrskih spinov zaznamo s tuljavo, navito okoli vzorca. (levo)

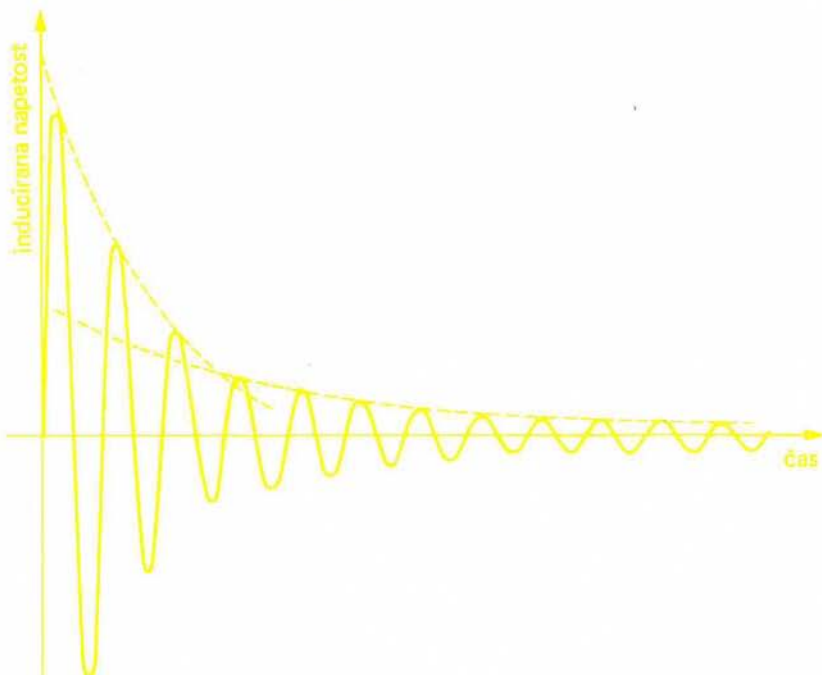
Slika 3. Sočasno opletanje spinov. (desno)



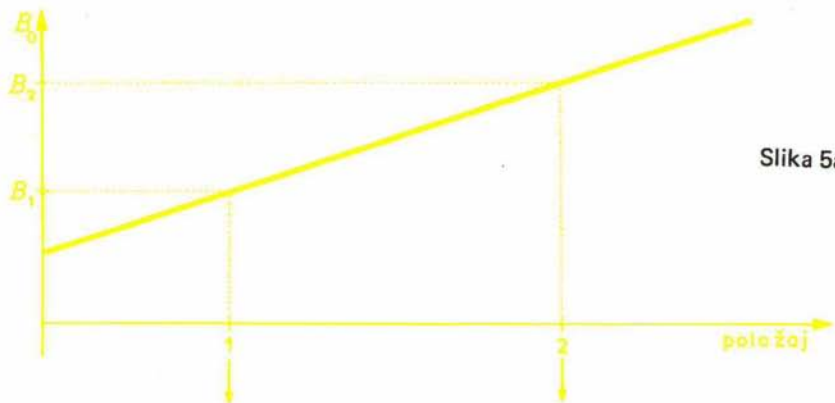
Inducirana napetost (slika 4) je v tem primeru seštevek dveh nihajočih napetosti z različnima časoma iznihanja. Njihova velikost je odvisna od vsebnosti vode in olja v semenu.

Pri slikanju želimo izvedeti, kako se razlikuje porazdelitev vode na posameznih mestih. Pri magnetni resonanci izrabimo zato lastnost spinov, da je njihovo opletanje odvisno od jakosti magnetnega polja. Če se magnetna poljska gostota spreminja vzdolž vzorca, je frekvenca opletanja spinov odvisna od položaja spina. Slika 5a prikazuje primer dveh vzorcev vode v različnem magnetnem polju. Napetost, ki jo inducira voda v sprejemni tuljavi, utripa (slika 5b). Frekvenca utripanja je enaka razliki frekvenc opletanja spinov v obeh vzorcih. Podrobna frekvenčna analiza, ki ji pravimo tudi Fourierova analiza, nam pa pokaže (slika 5c), da se prispevka vzorcev k napetosti ne razlikujeta samo v frekvencah, ampak tudi v velikosti. Frekvenčna slika nam pokaže, da sta vzorca na različnih mestih, ker imata signala različno frekvenco, razlika v velikosti pa pove, da je v enem več vode kot v drugem.

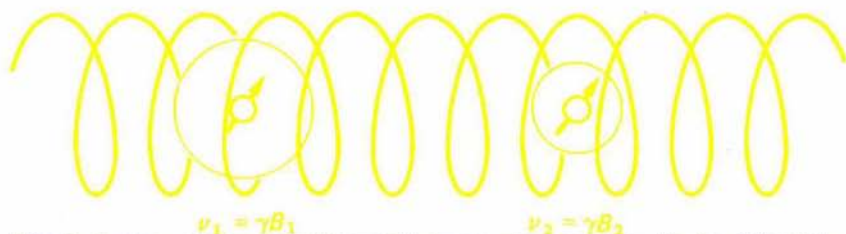
Tako smo spoznali osnovno zamisel slikanja z magnetno resonanco. Spini v nehomogenem magnetnem polju opletajo z različnimi frekvencah in analiza inducirane napetosti nam da frekvenčno porazdelitev, ki je sorazmerna krajevni



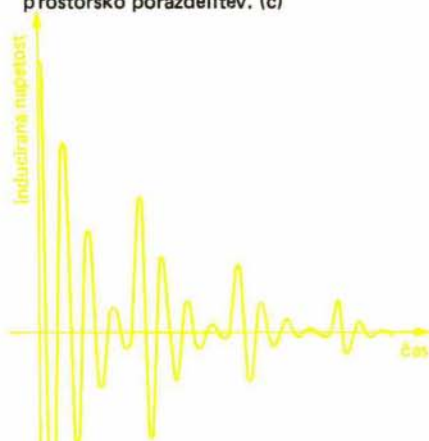
Slika 4. Časovna odvisnost inducirane napetosti vzorca, ki vsebuje vodo in olje.



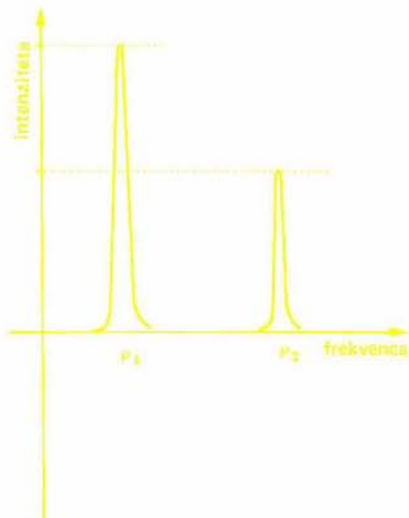
Slika 5a.



Slika 5. V nehomogenem magnetnem polju imata vzorca na mestu 1 in 2 različno frekvenco. (a) Inducirana napetost utripa. (b) Frekvenčna analiza napetosti pokaže tudi prostorsko porazdelitev. (c)



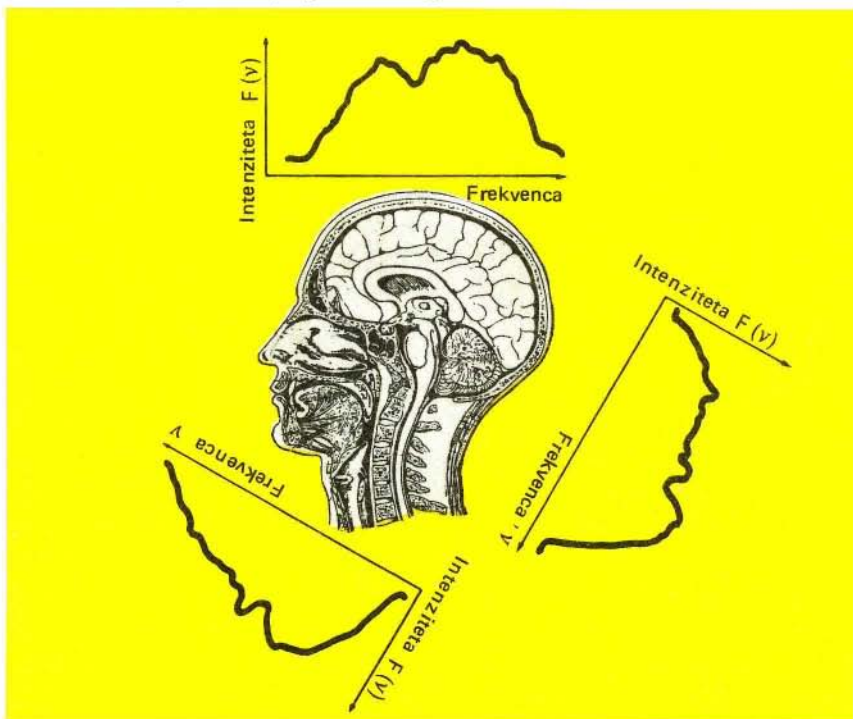
Slika 5b.



Slika 5c.

porazdelitvi prispevkov k inducirani napetosti. Tako bi lahko napravili sliko porazdelitve vode v nekem vzorcu tako, da bi ga dali v magnetno polje, ki bi bilo v vsaki točki prostora drugačno. Spini vode v vzorcu bi vsi opletali z različnimi hitrostmi. Frekvenčna analiza inducirane napetosti bi dala porazdelitev spinov po frekvencah. Če bi poznali, kakšno je magnetno polje na posameznih mestih vzorca, bi tudi vedeli, kateremu delu vzorca pripadajo spini, ki opletajo z določeno frekvenco. Frekvenčna porazdelitev spinov bi dala tudi njihovo prostorsko porazdelitev. To bi bila tudi tridimenzionalna slika porazdelitve vode v vzorcu.

V opisanem primeru smo predpostavili, da je bila smer magnetnega polja ves čas enaka, spreminjala se je le njegova gostota. Takega magnetnega polja praktično ni mogoče napraviti. Če se spreminja njegova gostota, se vedno vrtil tudi njegova smer. Zato v uporabi delamo s šibkim nehomogenim magnetnim poljem, ki ga dodamo k močnemu homogenemu polju. Pri tem spremembo smeri polja zanemarimo in upoštevamo le komponento v smeri homogenega magnetnega polja. Velikost te komponente naj bi se linearno spreminjala s krajem. Govorimo, da ima polje linearni gradient v določeni smeri. In če slišimo



Slika 6. Sliko porazdelitve vodika v glavi sestavimo iz več enodimenzionalnih slik.

za gradient polja v smeri osi z, pomeni to, da se je polje spremenilo v smeri osi z. Inducirana napetost z linearnim gradientom nam da po frekvenčni analizi enodimenzionalno porazdelitev spinov v določeni smeri. Sliko pa lahko dobimo, če s pomočjo računalnika sestavimo več enodimenzionalnih porazdelitev, posnetih v različnih smereh (slika 6). Slikanje je torej sestavljeno iz vrste meritve, kjer najprej počakamo, da se spini uredijo v smer, ki jo ima stalno magnetno polje. Večja je njegova gostota, več spinov se postavi v smer polja. Takoj nato spine sočasno zavrtimo prečno na magnetno polje z 90—stopinjskim radiofrekvenčnim sunkom. V času, ko spini opletajo, pa vključimo še magnetno polje z gradientom v določeni smeri. Po frekvenčni analizi inducirane signala dobimo enodimenzionalno porazdelitev spinov v vzorcu.

V uporabi pa so tudi drugačna zaporedja delovanja posameznih polj. Zanimiv je način, kjer namesto stalnega gradienta uporabimo hitro se spreminjajoči gradient magnetnega polja. To pomeni, da v času prostega opletanja spinov hitro menjamo smer gradienta magnetnega polja. Tako je že v enem posnetku skritih več enodimenzionalnih porazdelitev. Če podatke frekvenčne analize uredimo, nam da že ena meritev celo sliko prereza. Ker si meritve lahko slede v razmakih po nekaj 100 milisekund, lahko na tak način posnamemo film gibanja posameznih organov telesa. Na primer gibanje zaklopk srca, kroženje krvi ali kaj podobnega.

Že v prvem primeru smo omenili, da lahko ločimo vodo in olje z magnetno resonanco. V resnici lahko ločimo med seboj vse različne vrste kemične vezave vodika. In s posebnimi zaporedji delovanja posameznih polj lahko napravimo NMR posnetke prereza skozi telo, na katerem je upodobljena le porazdelitev določene spojine vodika. Tako lahko opazujemo, na katerem mestu v telesu se ta snov kopiči ali izginja, koliko je je v primeri z drugimi spojinami vodika itd. Na tak način lahko tudi razlikujemo v telesu rakasti in nerakasti tumor. In prav to daje novemu slikanju posebno veljavo.

Videli smo, da izkorišča nova tehnika slikanje prosto opletanje jedrskih magnetnih momentov s frekvenco, ki je odvisna od položaja jedra. Če se atomi ali molekule gibljejo z enega mesta na drugo, se frekvenca opletanja spreminja. To lahko zaznamo v signalu magnetne resonanice, ki se inducira v tuljavi. Tako razberemo s slike posnete z magnetno resonanco tudi podrobnosti o gibanju molekul. Lahko napravimo sliko hitrostne porazdelitve tekočine v cevi, ali krvi v žilah v telesu. Zdravnik torej dobi še dodatni podatek, ki mu pomaga ugotoviti vrsto obolenja.

Doslej smo omenjali le sliko porazdelitve vode ali drugih vodikovih spojin. Tudi druga atomska jedra z magnetnim momentom nam lahko vsaj v načelu naslikajo svojo porazdelitev tako kot vodikovo jedro. Občutljivost slikanja pa je odvisna od velikosti magnetnega momenta in od pogostnosti te vrste atomskega jedra. Napravljeni so bili že NMR posnetki porazdelitve fosforja in fluora v živih organizmih. Vendar še največ obeta vodikovo jedro. V naravi ga je izredno veliko in ima tudi največji magnetni moment.

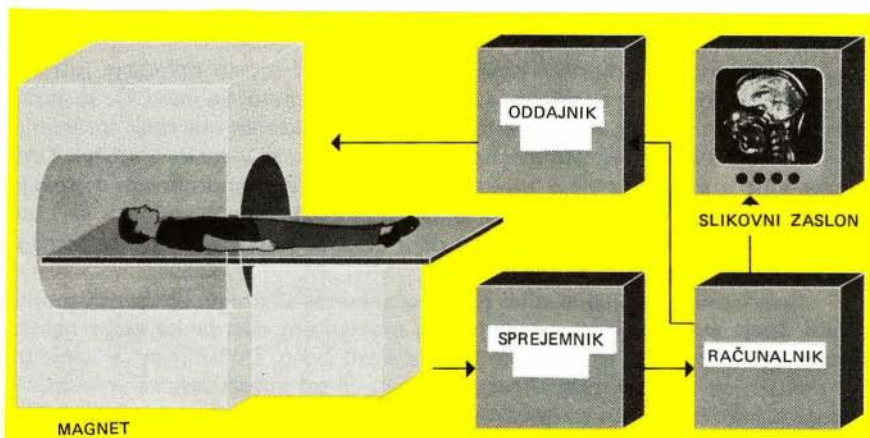
Naprava za slikanje z magnetno resonanco

Na sliki 7 vidimo, da je naprava za slikanje sestavljena iz magneta, gradientnih in radiofrekvenčnih tuljav z ustreznimi elektronskimi podsklopi ter računalnika, ki nam sestavi sliko in jo prikaže na zaslону.

Magnet mora biti dovolj velik, da gre vanj človeško telo, obenem pa zahtevamo, da je gostota polja v reži povsod enaka. Spremeni se lahko največ za milijoninko svoje vrednosti. Ti zahtevi pa pomenita, da je magnet najbolj drag in zahteven del naprave. Običajno uporabljajo superprevodne magnete, ki jih je treba hladiti s tekočim helijem. Obdajo ga pa še z magnetno in radiofrekvenčno zaščito tako, da je videti kot da bi bil nameščen v tunelu.

Gradientne tuljave napravijo nehomogeno magnetno polje, ki ga spreminjamo v poljubni smeri v reži magneta. To so lahko obrnjene Helmholtzove tuljave, sklop štirih vzporednih vodnikov, ali tuljave, na katerih je vodnik navit s spremenljivo gostoto navojev in še v različnih smereh. Za popoln sklop gradientnih tuljav, kjer ima gradient poljubno smer, uporabimo več različnih načinov skupaj.

S spremenljivim magnetnim poljem radiofrekvenčnih tuljav vrtimo spine, obenem to tuljavo uporabimo tudi za zaznavanje opletanja atomskih jeder. To je lahko kar običajna valjasta tuljava. Z računalnikom krmilimo celotno napravo in obdelujemo signal, ki se inducira v tuljavi. Sposoben mora biti kopičenja številnih podatkov, saj si mora zapomniti vrsto zaporednih meritev in tudi hitro opraviti Fourierjevo analizo in sestaviti sliko. Kako pomemben je računalnik, nam pove podatek, da je zamisel o slikanju z magnetno resonanco stara že več kot trideset let. Leta 1952 jo je predlagal R. Gabillard. Šele razvoj računalnikov pa je omogočil uspešno uresničitev te zamisli.



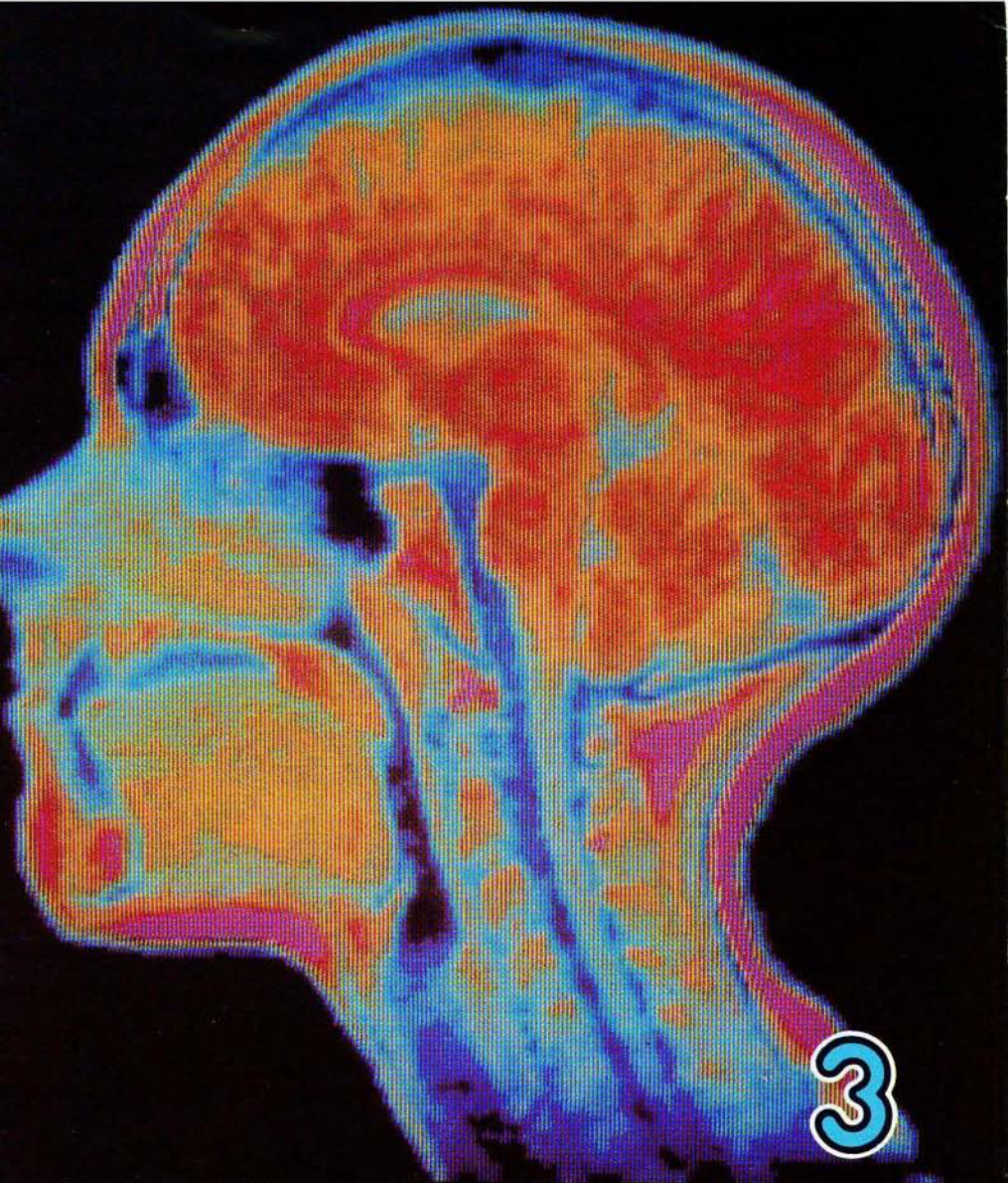
Slika 7. Naprava za slikanje z jedrsko magnetno resonanco.

Zaključek

Kljub številnim možnostim za ugotavljanje bolezni, ki jih slikanje z magnetno resonanco ponuja, se uporaba ni tako razširila kot so pričakovali. Krivo je to, da je naprava draga in zapletena. Uspešno lahko deluje le v dobro opremljenem kliničnem centru. Mimogrede povemo, da se tudi v kliničnih centrih v Ljubljani in drugih večjih jugoslovanskih mestih že zanimajo za nakup naprave.

K visoki ceni prispeva predvsem magnet, ki mora imeti dovolj veliko režo, da gre vanjo človeško telo. Na Oddelku za fiziko ljubljanske Univerze in Inštitutu Jožef Stefan smo, zato pred dobrim letom začeli razmišljati o napravi brez magneta, ki bi shajala kar z zemeljskim magnetnim poljem. Da vse skupaj ni iz trte zvito pove podatek, da so prosto opletanje magnetnega momenta jeder prvič opazovali, skoraj hkrati, v šibkem zemeljskem polju in v veliko močnejšem polju elektromagneta. Poznejši razvoj pa je to tehniko potisnil nekoli v stran. Računi so pokazali, da bi bilo mogoče za slikanje s pridom izkoristiti homogenost in stabilnost zemeljskega magnetnega polja. Napravili smo že prve poskuse in posnetki imajo pričakovano ločljivost. To nam daje precej upanja, da bomo z izpolnjeno napravo lahko uspešno slikali človeško telo.

Janez Stepišnik



3

PRESEK

DRUŠTVO MATEMATIKOV, FIZIKOV IN ASTRONOMOV SRS LETNIK 13, 1985-86.