

RADIJACIONA BIOFIZIKA NEJONIZUJUĆE ZRAČENJE

UVOD

Elektromagnetsko zračenje nejonizujuće i jonizujuće, kao i sva korpuskularna zračenja pri dejstvu na živu materiju predmet su izučavanja *radijacione biofizike*. Pored fizike zračenja ona je tesno povezana sa *fotohemijom i fotobiologijom*.

Lasersko zračenje koje normalno spada u nejonizujuće obrađeno u poglavlju Optika u biomehatronici.

ZAKONI ZRAČENJA

Apsolutno crno telo.

Definišimo *monohromatsku emisiju snagu* E_λ tela kao energiju zračenja jedne talasne dužine (između λ i $\lambda + d\lambda$) za jedinicu vremena sa jedinične površine tela koje emituje. Ona zavisi od temperature tela. Za datu temperaturu postoji raspodela emisije energije zračenja po talasnim dužinama tj. njen energetski spektralni sastav. Ovo toplotno zračenje je prisutno kod svakog tela bez obzira na prirodu i na svakoj temperaturi višoj od apsolutne nule.

ZAKONI ZRAČENJA

Apsolutno crno telo.

Ako definišemo *veličinu fluksa zračenja* $\Phi = E / \Delta t$ kao odgovarajuću energiju zračenja u toku vremena (Δt) dobićemo *koeficijent apsorpcije* k kao:

$$k = \frac{\Phi_a}{\Phi_0}$$

gde je Φ_a - apsorbovani fluks zračenja, a Φ_0 upadni fluks zračenja i vrednost za k može biti od 0 do 1.

ZAKONI ZRAČENJA

Apsolutno crno telo.

Apsolutno crno telo ima za sve talasne dužine koeficijent apsorpcije jednak jedinici ($k = 1$) i predstavlja čisto idealiziranje fizičke stvarnosti, jer takvog tela u prirodi nema. Kao model apsolutnog crnog tela može poslužiti izvesna šupljina, koja ima mali otvor za ulazak zračenja. Isti otvor ujedno predstavlja i izvor zračenja kada crno telo figuriše kao emitor.

$$k = \frac{\Phi_a}{\Phi_0}$$

ZAKONI ZRAČENJA

Apsolutno crno telo.

Pod *sivim telom* nazivamo takvo telo čiji je koeficijent apsorpcije manji od jedinice i ne zavisi od talasne dužine odnosno podjednako apsorbuje sve talasne dužine. U prirodi ne postoje ni ovakva tela. Eventualno može se naći samo interval talasnih dužina koji odgovara definiciji za sivo telo. U nekim slučajevima čovečije telo može se smatrati sivim sa vrednoću $k = 0,9$.

Ako se koeficijent apsorpcije posmatra za jednu talasnu dužinu naziva se monohromatski koeficijent apsorpcije k_λ .

$$k = \frac{\Phi_a}{\Phi_0}$$

ZAKONI ZRAČENJA

Kirhofov zakon.

Uzmimo nekoliko različitih tela i zagrevajmo ih do različitih temperatura, pa ih postavimo u izolovanu sredinu sa adijabatskom izolacijom. U ovom prostoru neka vlada vakuum i neka se tela ne dodiruju. Posle izvesnog vremena dobićemo izjednačenje temperature svih tela bez obzira na njihov broj. Očigledno je da u ovom eksperimentu, koji nije samo misaoni, imamo procese emisije i apsorpcije zračenja.

ZAKONI ZRAČENJA

Kirhofov zakon.

Gornje stanje termodinamičke ravnoteže razmene energije apsorpcijom i emisijom pokazuje da se odnos monohromatske emisione snage (E_λ) prema apsorpciji (k_λ) stalna veličina i ne zavisi od prirode tela već samo od temperature (Kirchhof 1895) odnosno

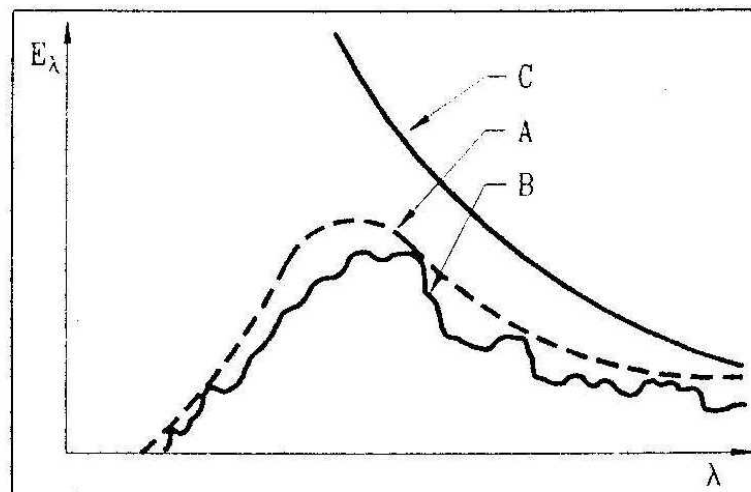
$$\frac{E_\lambda}{k_\lambda} = \varepsilon_\lambda(T) = \text{const}$$

Za crno telo gde je $k_\lambda = 1$ imamo $E_\lambda = \varepsilon_\lambda(T)$, te nam Kirhovov zakon kaže da crno telo ujedno predstavlja i idealni izvor toplotnog zračenja.

ZAKONI ZRAČENJA

Kirhofov zakon.

Na slici je dat je grafički prikaz monohromatske emisione snage E_λ u funkciji talasne dužine λ na istoj temperaturi za crno (kriva *A*) i realno (kriva *B*) telo. Kriva *C* je dijagram kako bi trebalo očekivati da bude spektar zračenja crnog tela uz pretpostavku kontinualne emisije zračenja. Očigledno je neslaganje ove distribucije za kratke talase.

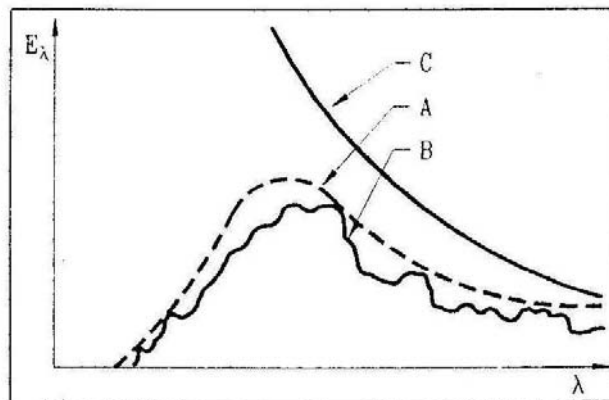


ZAKONI ZRAČENJA

Plankov zakon zračenja. Plank (Max Planck 1900) je kontinualnu emisiju toplotnog - nejonizujućeg zračenja koja neprekidno raste sa porastom frekvencije (kriva C) zamenio hipotezom da se emisija i apsorpcija zračenja vrši diskontinualno u određenim količinama- kvantima zračenja (fotonima) čija je energija ε jednaka

$$\varepsilon = h\nu$$

gde je $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Js čuvena Plankova konstanta, a ν frekvencija.



ZAKONI ZRAČENJA

Plankova kvantna teorija daje izraz koji potpuno zadovoljava i oblast kratkih talasa u energetskej distribuciji zračenja. Ova oblast je i oblast zračenja gde su kvantne osobine naročito izražene. Za E_λ Plankova teorija daje

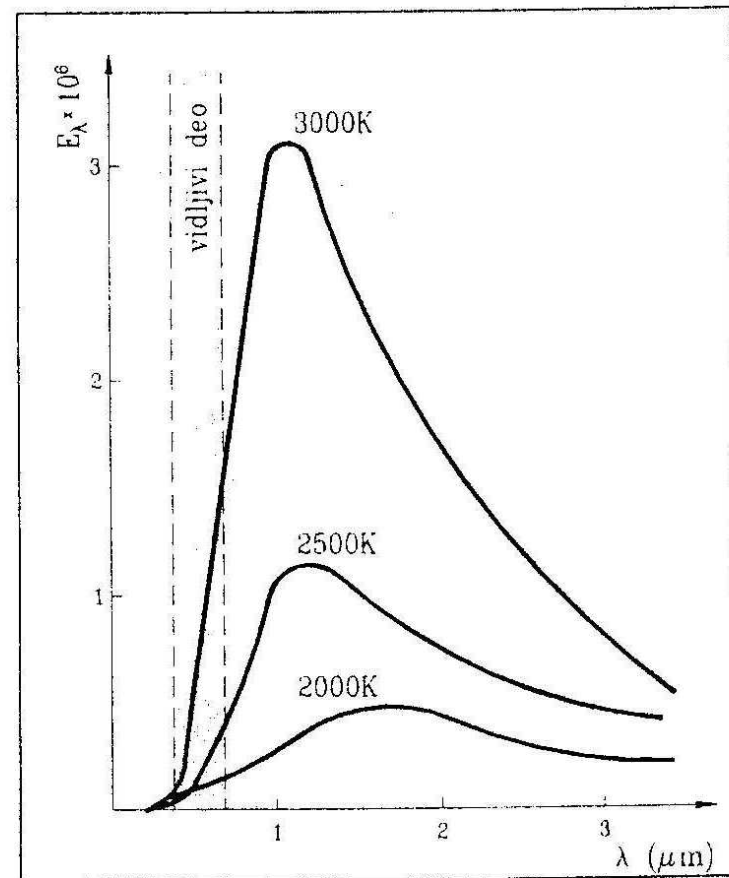
$$E_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1}$$

gde je k - Bolcmanova konstanta, c - brzina svedosti.
Po Planku sada foton ima masu i impuls ($p = h/\lambda$).

ZAKONI ZRAČENJA

Spektar energije zračenja crnog tela u funkciji temperature.

Na slici je data je grafička zavisnost E_λ po talasnim dužinama u funkciji apsolutne temperature za apsolutno crno telo prema Plankovoj formuli.

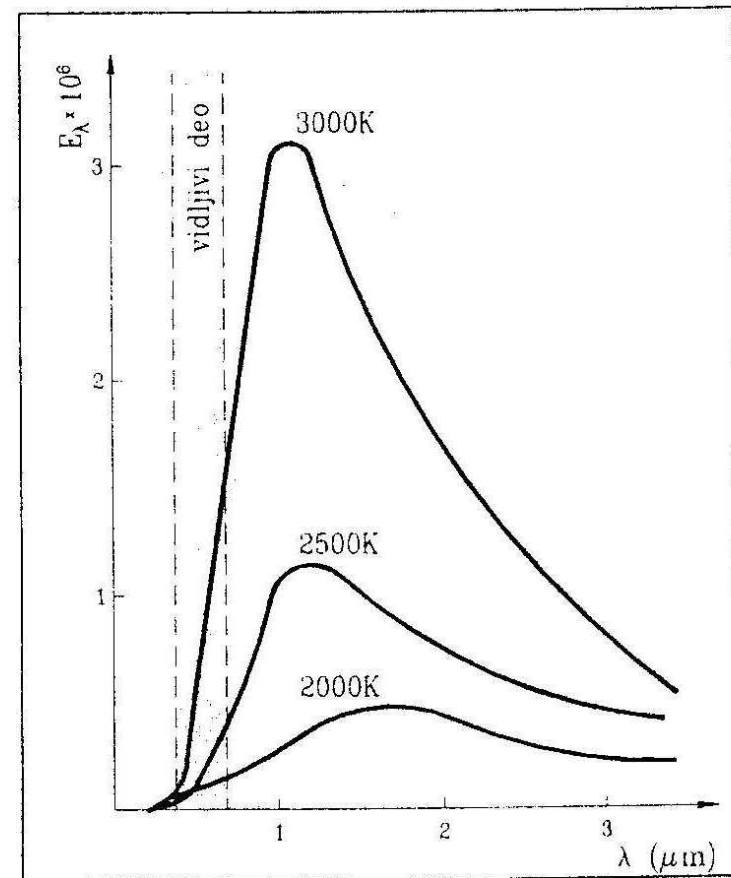


Sl. 1.2.

ZAKONI ZRAČENJA

Jasno se uočava da je spektar za datu temperaturu kontinualan, spektralna emisiona energija dostiže maksimum pri određenoj talasnoj dužini λ_{\max} . Sa povišenjem temperature λ_{\max} se pomera na kraćim talasima. Na kraćim talasnim dužinama pad E_λ je mnogo oštriji nego u oblasti dugih talasa.

Oblast vidljivog zračenja - svetlosti je samo jedan uski deo opšteg spektra.



Sl. 1.2.

ZAKONI ZRAČENJA

Stefanov i Vinov zakon. Plankov zakon zračenja tako je univerzalan da niz zakona koji su empirijski bili izvedeni ranije neposredno sleduju iz njega.

Ako se izračuna ukupna emisiona snaga E apsolutno crnog tela tj.

$$E = \int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda$$

dobijamo poznati Stefanov zakon:

$$E\left[\frac{W}{m^2}\right] = \sigma T^4$$

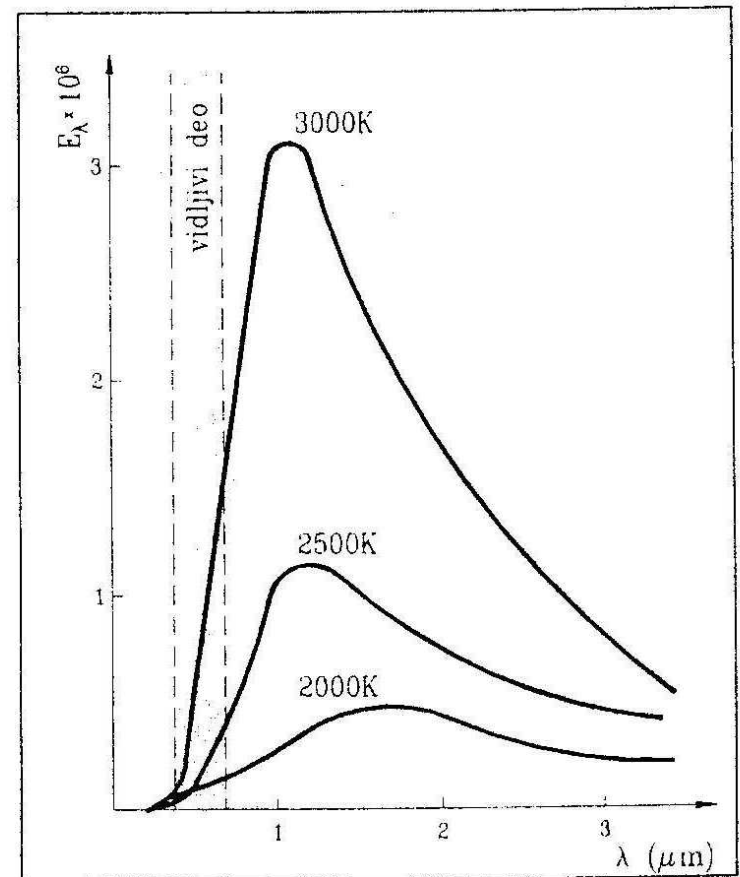
gde je σ Stefan-Bolcmanova konstanta i iznosi $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$. Savremena medicinska termografija zasnovana je baš na ovom zakonu.

ZAKONI ZRAČENJA

S obzirom da za maksimum funkcije $E_\lambda = f(\lambda, T)$ odgovara $dE_\lambda / d\lambda = 0$, dobićemo poznati Vinov (Wien) zakon pomeranja, odnosno proizvod vrednosti λ_{\max} i apsolutne temperature apsolutno crnog tela je stalna vrednost.

$$\lambda_{\max} T = b$$

gde je $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ mK}$ i naziva se Vinova konstanta. Zakon zadovoljava i siva tela.



Sl. 1.2.

TERMOGRAFIJA

Iz Plankovog zakona zračenja

$$E_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1}$$

vidi se da čvrsta i tečna tela emituju infracrveno odnosno toplotno zračenje čak i na vrlo niskim temperaturama (do 1,5 K). U stvari detekcija IC zračenja najlakše se vrši merenjem temperature. Tako je i otkriveno ovo zračenje u spektru Sunca. Upravo Sunce je i najveći izvor IC zračenja i 50% isijavanja Sunca pada u IC oblast. Oblast IC zračenja spada između talasnih dužina $\lambda_1 = 750\text{nm}$ do $\lambda_2 = 1\text{mm}$.

Celokupni spektar IC zračenja podeljen je u 3 oblasti:

- blisko IC zračenje ($\lambda = 750\text{nm} \div 4\mu\text{m}$)
- srednje IC zračenje ($\lambda = 4\mu\text{m} \div 30\mu\text{m}$)
- daleko IC zračenje ($\lambda = 4\mu\text{m} \div 1\text{mm}$)

TERMOGRAFIJA

Čovek takođe shodno Plankovom i Vinovom zakonu zrači u IC oblasti. Maksimalno zračenje je na talasnoj dužini $\lambda_{max} = 9,5 \mu\text{m}$ što spada u srednju oblast (4-30 μm) IC spektra.

Merenje temperature i njeno registrovanje na bazi IC zračenja specijalnim detektorima (tečni kristali, termistori, fotodioda) naziva se *termografija*.

TERMOGRAFIJA

Površinska termometrija sa tečnim kristalima.

Razvitak fizike kondenzovane materije doprineo je uvođenje jedne vrste medicinske termometrije, koja se bitno razlikuje od klasičnih metoda. Upravo, *tečni kristali* imaju osobinu da promenom temperature reflektuju odnosno rasejavaju dnevnu svetlost strogo selektivno po talasnim dužinama. Time za posmatrača menjaju boju u funkciji temperature i dobijamo pogodan termometar.

Tečni kristali se mogu napraviti u pogodnim formama, a koji vrlo brzo, tj. za nekoliko sekundi daju temperaturu. Jedna od pogodnih formi je njihovo raspršenje recimo na kožu i onda praćenje temperaturske distribucije. Sva inflamaciona mesta (mesta ispod kojih se nalaze vene i arterije) promene boju sloja tečnih kristala. Naročito je od interesa pronalaženja mesta potkožnih tumora.

TERMOGRAFIJA

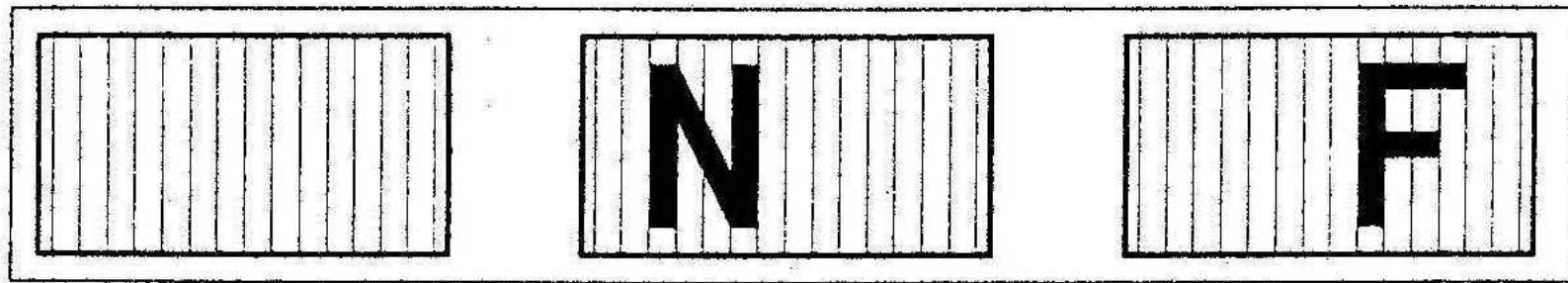
Površinska termometrija je bazirana na tečnim kristalima tj. telima koje imaju osobinu tečnosti, ali i osobine čvrstih tela. Tečna karakteristika je njihova fluidnost, dok optička anizotropija daje im osobine čvrstih tela - kristala.

Osobina da selektivno rasejavaju svetlost iskorišćena je kao indikator temperature u boji. Upravo molekulska struktura tečnih kristala se menja sa temperturom s obzirom da su same molekulske sile vrlo slabe. To dovodi do znatnih i brzih promena optičkih karakteristika, a u prvom redu rasejanje svetlosti, gde im se onda boja menja od crvene do ljubičaste, tj. mogu da dobiju sve boje spektra.

TERMOGRAFIJA

Kod brzog dijagnosticiranja temperature pacijenata da li je normalna (N) ili febrilna (F) na plastičnoj traci raspoređeni su tečni kristali u slovu N i F.

Na taj način tečni kristali u slovu N dobiće jednu boju ako je temperatura ispod 37°C . Ako je temperatura iznad 37°C dobiće boju kristali u slovu F, inače na sobnoj temeperaturi slova se ne vide.



Takođe dovođenje električnih potencijala menja fazu tečnog kristala odnosno boju. Ovde je zapravo i najveća današnja primena tečnih kristala, jer su konstruisane diode od tečnih kristala (LCD) koji se koriste kao indikatori brojeva na malim elektronskim kalkulatorima ili časovnicima.

TERMOGRAFIJA

Medicinska termografija. Beskontaktno merenje temperature površine tela na bazi precizne i vrlo tačne detekcije infracrvenog zračenja naziva se *medicinska termografija*.

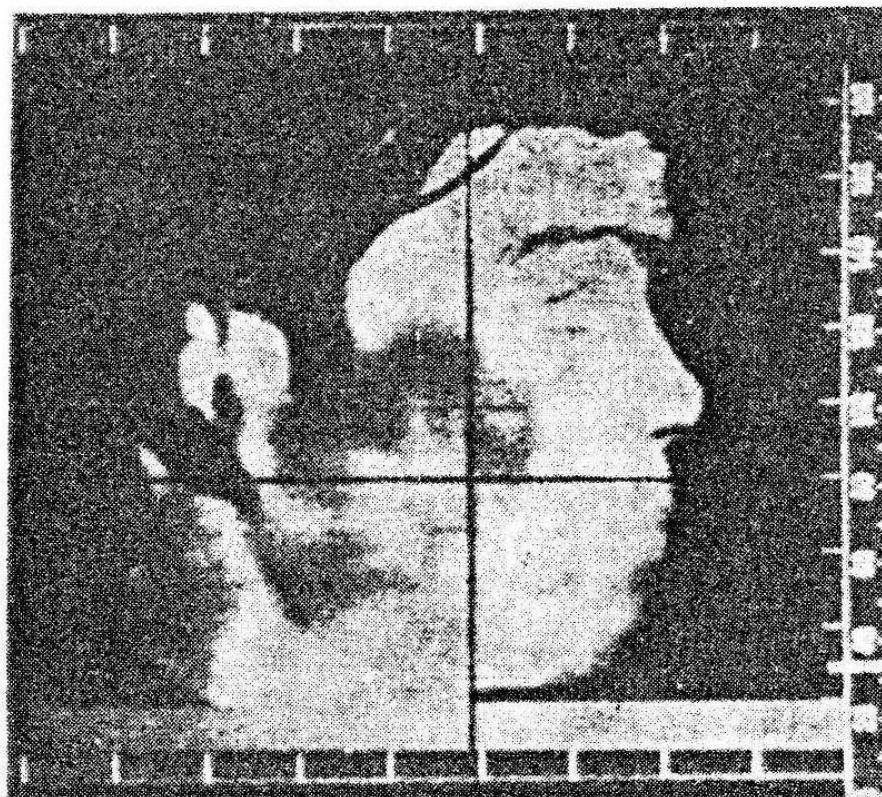
Medicinska termografija registruje apsolutne temperature tačaka sa površine kože čoveka, njegovu promenu u toku vremena, daje celokupnu temperatursku distribuciju određenog vidnog polja i registruje to vidno polje konvencionalnom fotografijom na kojoj je prikazana i termalna slika.

Pacijent se pri snimanju nalazi u normalnim komfornim uslovima i za 10 s se snimanje izvodi sa rastojanja uz dobijenu temperatursku rezoluciju od $0,03^{\circ}\text{C}$ sa tačnošću od 1%.

Dobijeni termogrami su pokazali veliku korist u ranoj dijagnozi raka dojki, nedostacima periferne cirkulacije, kao i smetnji u arterijskom toku i trombozi, moždanoj apopleksiji kod ljudi koji rade pod stalnom vibracijom.

TERMOGRAFIJA

Na slici je termogram glave sa vrućim tačkama "koje odgovaraju svetlijim mestima". Posebno se vidi da je uho hladno-tamno, jer skoro ima temperaturu ambijenta.



TERMOGRAFIJA

Zakoničnosti pri snimanju termograma. Stefanov zakon funkcionalne zavisnosti energetske emisije crnog tela od temperature je direktno primenjeno na čovečije telo, koga smatramo da je sivo telo. Koeficijent apsorpcije zračenja k ujedno predstavlja i koeficijent *emisivnosti*, te se stoga Stefanov zakon transformuje u:

$$E_1 = k\sigma T_1^4$$

gde je E_1 radijaciona energija tela na temperaturi T_1 .

S druge strane mora se uzeti radijaciona energija ambijenta sa temperaturom T_2 . Tada je samo radijaciona energija E_2 sa tela usled ambijenta:

$$E_2 = \sigma T_2^4 - k\sigma T_2^4 = \sigma(1 - k)T_2^4$$

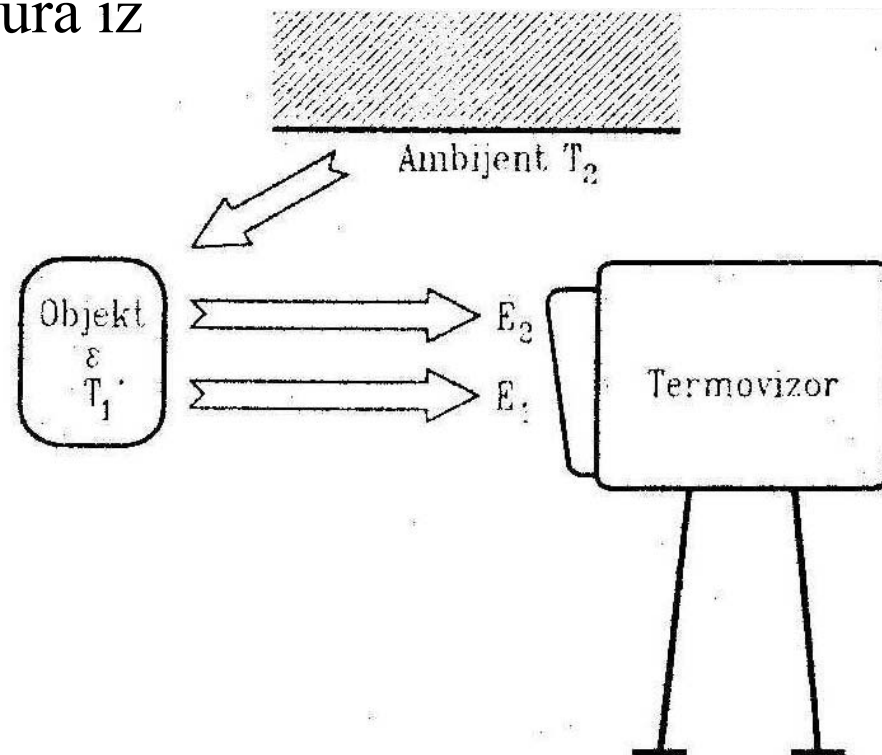
TERMOGRAFIJA

Radijaciona energija koja ulazi u termovizor

je:
$$E = E_1 + E_2$$

i treba da se izračuna temperatura iz

$$\sigma T_1^4 = \frac{E - \sigma T_2^4}{k} + \sigma T_2^4$$



UVOD U NUKLEARNU MAGNETNU REZONANCIJU

Nuklearno-magnetno-rezonantna spektroskopija (NMR) je svestrana spektroskopska disciplina koja može da registruje signale atoma iz različitih položaja u molekulu i pri tome da svaki signal dovede u vezu sa nekom od poznatih spinskih interakcija, glavnim izvorima podataka o molekulskoj strukturi i dinamici. NMR spektroskopija je danas, uz rendgeno-strukturnu analizu (kristalografiju rendgenskih zraka), jedina metoda kojom može da se odredi struktura biopolimera sa razlaganjem na atomskom nivou.

UVOD U NUKLEARNU MAGNETNU REZONANCIJU

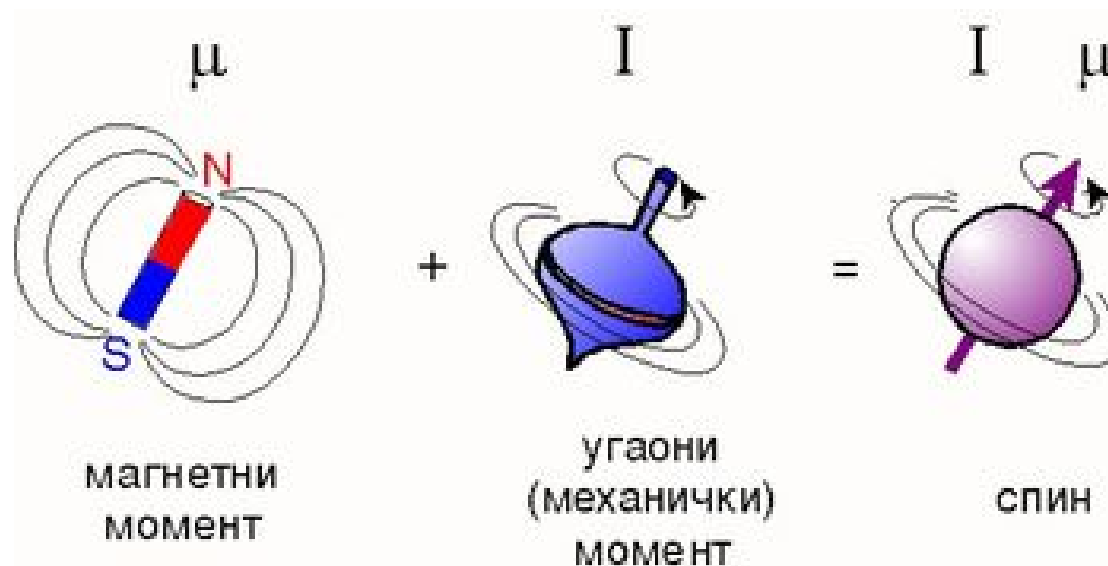
NMR je nastao iz puke radoznalosti, dakle želje fizičara da saznaju nešto više o strukturi atomskog jezgra. Razvoju metode su dosta doprineli hemičari u želji da razumeju strukture organskih molekula. Onda je metoda prodrila u biohemiju za određivanje strukture bioloških makromolekula. Istovremeno je našla mesto u biologiji za nedestruktivno ispitivanje bioloških procesa da bi danas postala nezamenljiva dijagnostička metoda za snimanje mekih tkiva. Godine 1984. Američko udruženje radiologa je, da bi uklonilo asocijaciju na nuklearne reakcije i bombe, iz naziva metode ispustilo nuklearna, pa je u medicini NMR poznat kao magnetna rezonancija.

FIZIČKI OSNOVI NUKLEARNE MAGNETSKE REZONANCIJE

Atomska jezgra elemenata sa neparnim brojem protona i/ili neutrona poseduju mehanički moment (spin) i njemu pridruženi magnetni moment. Spin atomskog jezgra, i njemu pridruženi magnetni moment, nisu kuriozitet već fundamentalna osobina protona i neutrona, poput mase ili naelektrisanja. Dakle, magnetni moment atomskog jezgra je univerzalna osobina hemijskih elemenata. Samo jezgra sa parnim brojem protona i parnim brojem neutrona nemaju magnetni moment, recimo ^4He , ^{12}C , ^{16}O ... Međutim, za svaki element sa parnim rednim brojem (parnim brojem protona) može se naći stabilni izotop sa neparnim masenim brojem (neparnim brojem neutrona) iz kojeg se NMR signal može detektovati, na primer, ^3He , ^{13}C , ^{17}O ...

FIZIČKI OSNOVI NUKLEARNE MAGNETSKE REZONANCIJE

Spin. Striktno, spin čestice se odnosi na njen sopstveni mehanički moment. Međutim, često se naziv koristi i za česticu kao celinu, tj. za kombinaciju magnetnog i mehaničkog momenta. Spin atomskog jezgra je zbir (ne uvek prost) spinova protona i neutrona koji ulaze u njegov sastav.



FIZIČKI OSNOVI NUKLEARNE MAGNETSKE REZONANCIJE

Van magnetskog polja energija izolovanog nuklearnog spina ne zavisi od njegove orijentacije. To je hipotetička situacija, jer su u atomima i molekulima nuklearni spinovi okruženi elektronima. Oko elektrona se prostire magnetsko polje koje potiče od sopstvenog spina elektrona ili od njegovog orbitalnog kretanja. Dakle, u materiji koja nas okružuje nuklearni spinovi se nalaze u magnetskom polju, ali se ta interakcija za sve praktične svrhe može zanemariti. Recimo, interakcija nuklearnih spinova sa magnetskim poljem elektrona (ili, ekvivalentno, interakcija elektrona sa magnetskim poljem jezgra) ispoljava se kroz hiperfino cepanje spektralnih linija što se može opaziti samo u specijalnim slučajevima i sa instrumentima vrlo visoke moći razlaganja. Mali je broj hemijskih reakcija (ili prirodnih procesa) čiji ishod zavisi od postojanja nuklearnog spina. U odsustvu spoljašnjeg magnetskog polja nuklearni spin je praktično nevidljiv.

FIZIČKI OSNOVI NUKLEARNE MAGNETSKE REZONANCIJE

Unet u magnetsko polje, nuklearni spin se orijentiše, poput magnetne igle kompasa u magnetskom polju zemlje. Zbog kvantne prirode fenomena, moguće su samo diskretne orijentacije čiji je broj definisan spinskim kvantnim brojem I . Broj orijentacija je $2I + 1$; u najjednostavnijem slučaju, kada je $I = 1/2$, broj orijentacija je 2, pa nuklearni spin može da se orijentiše samo "paralelno" ili "antiparalelno" spoljašnjem magnetskom polju. Znaci navoda ukazuju da je takva predstava samo približna. Naime, spin poseduje i mehanički moment, dakle ponaša se i kao čigra.

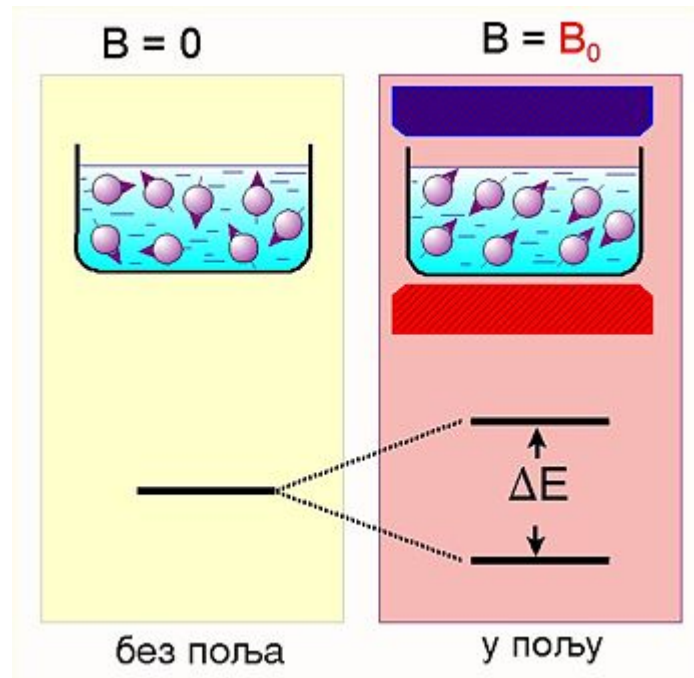
FIZIČKI OSNOVI NUKLEARNE MAGNETSKE REZONANCIJE

Po analogiji, kao što zemljino gravitaciono polje ne može da obori čigru (dok se okreće) već je samo navodi na precesiono kretanje, tako i spoljašnje magnetsko polje ne može potpuno da orijentiše spin, već ga navodi na precesiono kretanje. Dakle, u spoljašnjem magnetskom polju spin precesuje oko pravca polja nagnut pod određenim uglom. Pri tome je precesiona frekvencija jednaka rezonantnoj frekvenciji.

FIZIČKI OSNOVI NUKLEARNE MAGNETSKE REZONANCIJE

Energija spina u spoljašnjem magnetskom polju, kao i kod makroskopskog magnetnog momenta, zavisi od ugla koji spin zaklapa sa poljem. Pošto svakom uglu odgovara određena energija to su i moguća energijska stanja nuklearnog spina podeljena na diskretne, dobro definisane nivoe. Energijska razlika među susednim nivoima zavisi od prirode spinova i jačine (indukcije) spoljašnjeg magnetskog polja. Što je jače polje, to je i razlika veća.

FIZIČKI OSNOVI NUKLEARNE MAGNETSKE REZONANCIJE



Nuklearni spinovi van magnetskog polja haotično su orijentisani. Spinska magnetna energija jednaka je nuli. U magnetskom polju, spinovi se orijentišu, ali zbog kvantne prirode pojave, samo u smeru polja ili suprotno polju. Zbog toga se i njihov energijski nivo cepa na dva, jer paralelna orijentacija ima različitu energiju od antiparalelne.

FIZIČKI OSNOVI NUKLEARNE MAGNETSKE REZONANCIJE

Spinovi iz jednog energijskog nivoa u drugi mogu da pređu pod uticajem elektromagnetnih talasa, ali samo ako je energija kvanta elektromagnetnog talasa jednaka energijskoj razlici među nivoima. Iz uslova za jednakost energija (koji se naziva i rezonantni uslov) sledi da, u datom polju, prelaz mogu da izazovu samo elektromagnetni talasi određene frekvencije. Kada se energije poklope, onda spin ima jednaku verovatnoću da se nađe u nekom od dozvoljenih stanja, dakle, dolazi do **rezonancije**. Otuda je i metoda dobila ime **nuklearna magnetna rezonancija (NMR)**:

- **nuklearna**, jer se radi o spinovima atomskog jezgra;
- **magnetna**, jer su u pitanju magnetni prelazi;
- **rezonancija**, zato što se elektromagnetnim talasima, pri izjednačavanju energija, spinski sistem dovodi u rezonanciju.

FIZIČKI OSNOVI NUKLEARNE MAGNETSKE REZONANCIJE

Pošto je broj spinova u nižem energijskom nivou veći od broja spinova u višem energijskom nivou, ukupan rezultat je da prilikom rezonancije dolazi do apsorpcije radiotalasa.

NMR spektar je slika, pri konstantnom spoljašnjem magnetskom polju apsorbovanih talasa, uređena po njihovim frekvencijama. Intenzitet spektralne linije proporcionalan je broju spinova i jačini magnetskog polja.

FIZIČKI OSNOVI NUKLEARNE MAGNETSKE REZONANCIJE

Energija magnetnog momenta μ u magnetskom polju B_0 (indeks nula se koristi da se naglasi da je u pitanju statičko polje, dakle polje koje se ne menja tokom vremena) izražava se i izračunava na isti način kao i energija makroskopskog dipola u odgovarajućem polju. Ona je jednaka negativnom skalarnom proizvodu vektora polja i momenta, dakle, proizvodu između jačine polja i projekcije dipola na pravac polja (sa znakom minus). U NMR-u se obično uzima da polje B_0 deluje duž z-ose, pa je tada:

$$E = -\mu_z B_0$$

FIZIČKI OSNOVI NUKLEARNE MAGNETSKE REZONANCIJE

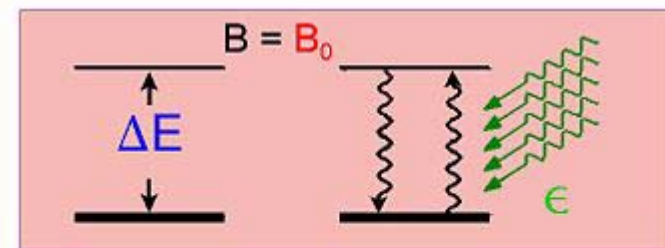
Zbog kvantne prirode spinskog magnetnog momenta moguće su samo dve orijentacije sa projekcijama $\mu_z = +\mu/2$ i $\mu_z = -\mu/2$, pa je energijska razlika među spinskim stanjima:

$$\Delta E = -\mu B_0$$

S druge strane, energija fotona je:

$$\varepsilon = \hbar\omega$$

gde je \hbar Plankova konstanta, a ω njegova kružna frekvencija.



$$\Delta E = \mu_B B_0$$

енергијска разлика
спинских стања

$$\varepsilon = \hbar\omega$$

енергија
фотона

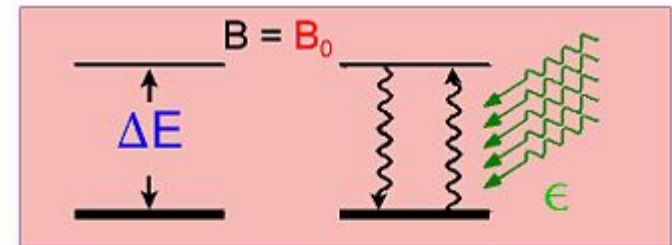
FIZIČKI OSNOVI NUKLEARNE MAGNETSKE REZONANCIJE

Iz rezonantnog uslova (jednakost energije fotona i energijske razlike među spinovima):

$$\Delta E = \epsilon$$

nalazimo da je frekvencija elektromagnetnog zračenja koje može da izazove rezonanciju u polju B_0 :

$$\omega = \frac{\mu}{\hbar} B_0$$



$$\Delta E = \mu_B B_0$$

енергијска разлика
спинских стања

$$\epsilon = \hbar\omega$$

енергија
фотона

резонантни услов

$$\Delta E = \epsilon$$

FIZIČKI OSNOVI NUKLEARNE MAGNETSKE REZONANCIJE

Pošto se preko Plankove konstante izražava ugaoni moment čestice (žiroskopski efekat) to se odnos magnetnog i ugaonog momenta naziva **žiromagnetni odnos** i obeležava se sa γ :

$$\gamma = \frac{\mu}{\hbar}$$

Tada se osnovna jednačina NMR-a najčešće piše u obliku:

$$\omega = \gamma \mathbf{B}_0$$

FIZIČKI OSNOVI NUKLEARNE MAGNETSKE REZONANCIJE

Dakle, rezonantna frekvencija proporcionalna je primenjenom spoljašnjem polju. To je frekvencija koja izaziva rezonanciju u nuklearnom sistemu preko koje detektujemo prisustvo spinova. Vrednosti žiromagnetnih odnosa se od izotopa do izotopa razlikuju, pa je u datom magnetskom polju svaki izotop ima sopstvenu rezonantnu frekvenciju.

MAGNETNA REZONANCA LJUDSKOG TELA

Zašto se magnetna rezonanca u medicini oslanja na ispitivanje atoma vodonika? Postoji više razloga. Fenomen magnetne rezonance javlja se samo u slučajevima nekih atoma sa neparnim atomskim brojem. Vodonik ispunjava ovaj uslov. Najvažniji atomi ljudskog tela su: vodonik (^1H), fosfor (^{31}P) i natrijum (^{23}Na). Međutim, molekul koji je najviše zastupljen u ljudskom organizmu je voda. Mišićno tkivo sadrži od 72% do 75% vode; udeo vode u moždanom tkivu dostize i do 85% vode. Kako je svaki molekul vode izgrađen iz jednog atoma kiseonika i dva atoma vodonika, u organizmu je najveći broj upravo vodonikovih atoma. Osim brojnosti, specifičnost vodonikovih atoma je i ta što vodonik, u odnosu na druge atome, pokazuje i veću osetljivost na različite faktore. Iz ovih razloga, za snimanja i ispitivanja, najpodesniji je vodonik.

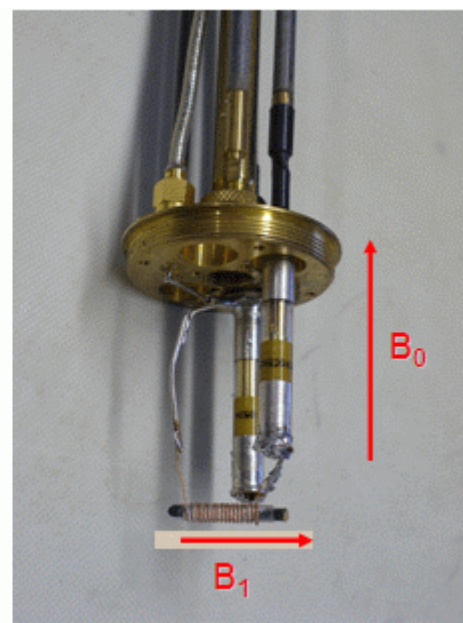
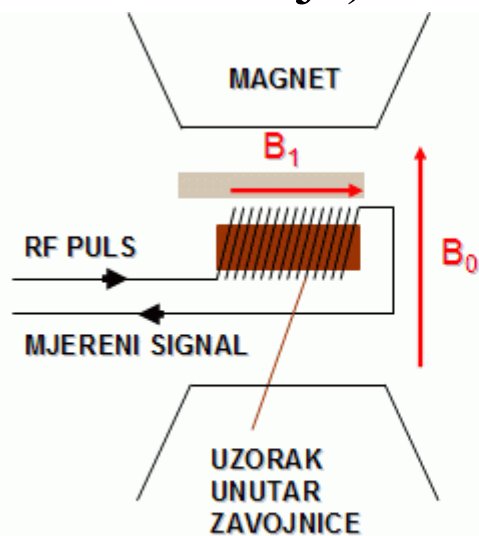
MAGNETNA REZONANCA

LJUDSKOG TELA

Vodonikovi atomi ponašaju se kao magneti. Broj vodonikovih atoma koji intereaguju sa magnetnim poljem zavisi od snage samog polja. Magnetno polje u stvari reaguje sa spinovima protona. Spinovi protona predstavljaju smer okretanja samog protona. Iz ovog razloga se pri MR snimanju primenjuju jaki magneti. Jačina njihovog polja može dostizati jačinu i do 30000 puta veću od jačine polja Zemlje. Magnetno polje usmerava kompas, kao i vodonikove atome i ovo usmeravanje ima dva vida: ka severu i ka jugu. Da bi se promenio pravac atoma, iz jednog u drugi, potrebna je određena količina energije, koja se dovodi putem radio talasa. Kako svaki sistem teži minimumu energije, dovedena energija će biti reemitovana, takođe u obliku radio talasa koji se detektuje. Reemitovani radio talasi (relaksacija) sadrže neophodnu informaciju za snimanje magnetnom rezonancom.

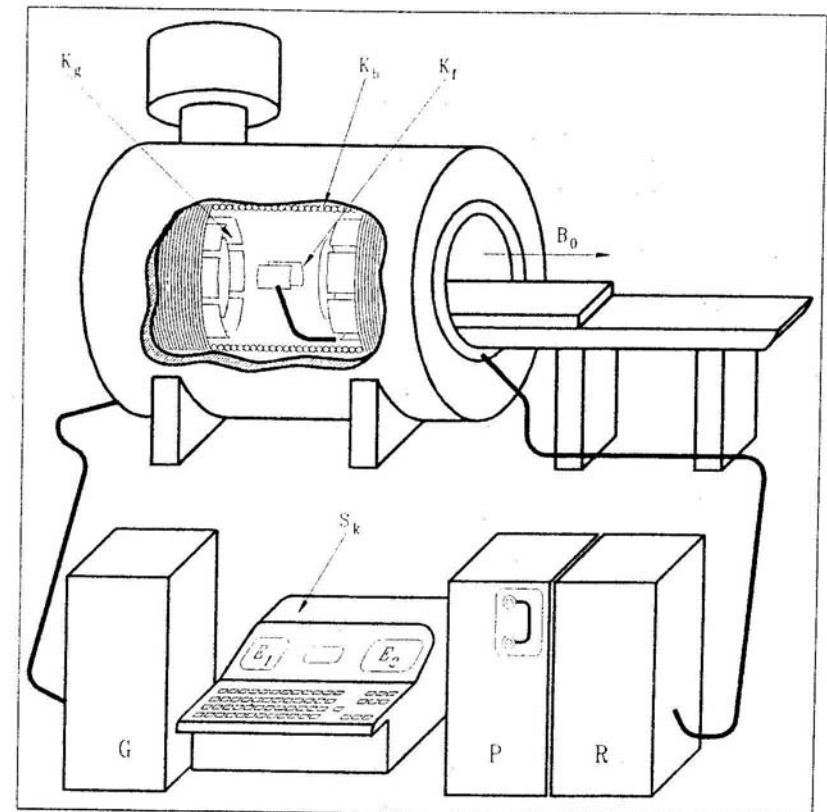
UREĐAJ ZA SNIMANJE MAGNETNOM REZONANCOM

Magnet proizvodi B_0 magnetno polje za proceduru snimanja. Unutar magneta su gradijent kalemi za proizvodnju gradijenta B_0 u X, Y i Z pravcima. Unutar gradijent kalemova je RF (radio frekventni) kalem koji proizvodi B_1 magnetno polje neophodno za rotiranje spinova za 90° i 180° ili za bilo koju drugu vrednost odabranu od strane pulsno snopa (pulsno delovanje). RF kalem takođe detektuje signal spinova u telu.



UREĐAJ ZA SNIMANJE MAGNETNOM REZONANCOM

Pacijent se smešta unutar magneta sa ravnom pločom koju kontroliše kompjuterski sistem. Ploča ima tačnost pozicije u iznosu od 1 mm.

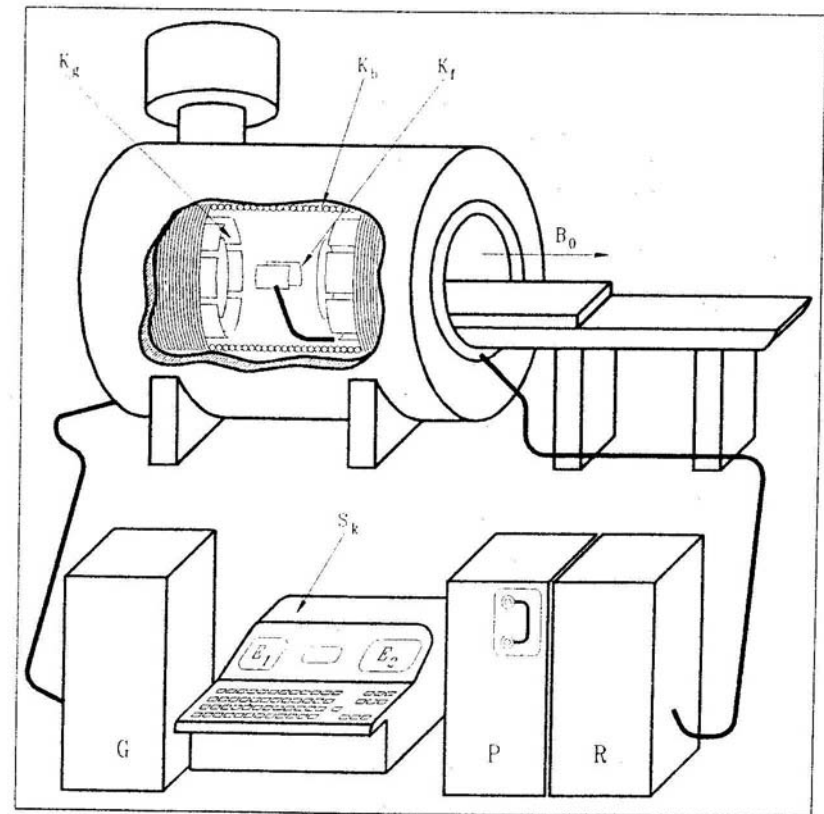


Slika 9.1

UREĐAJ ZA SNIMANJE MAGNETNOM REZONANCOM

Konstantno homogeno magnetsko polje B_0 od 0,2 T do 2T, dobija se pomoću snažnog elektromagneta ili superprovodnog magneta oblika šupljeg valjka. Maksimalna jačina polja koja može da se dobije putem stalnih magneta iznosi 0,3T, dok se jačina polja koju proizvode superprovodni magneti kreće između 1,5T i 2T. Svaka vrsta ima svoje prednosti, međutim, veća jačina polja omogućava kraće vreme merenja i bolji kvalitet snimka.

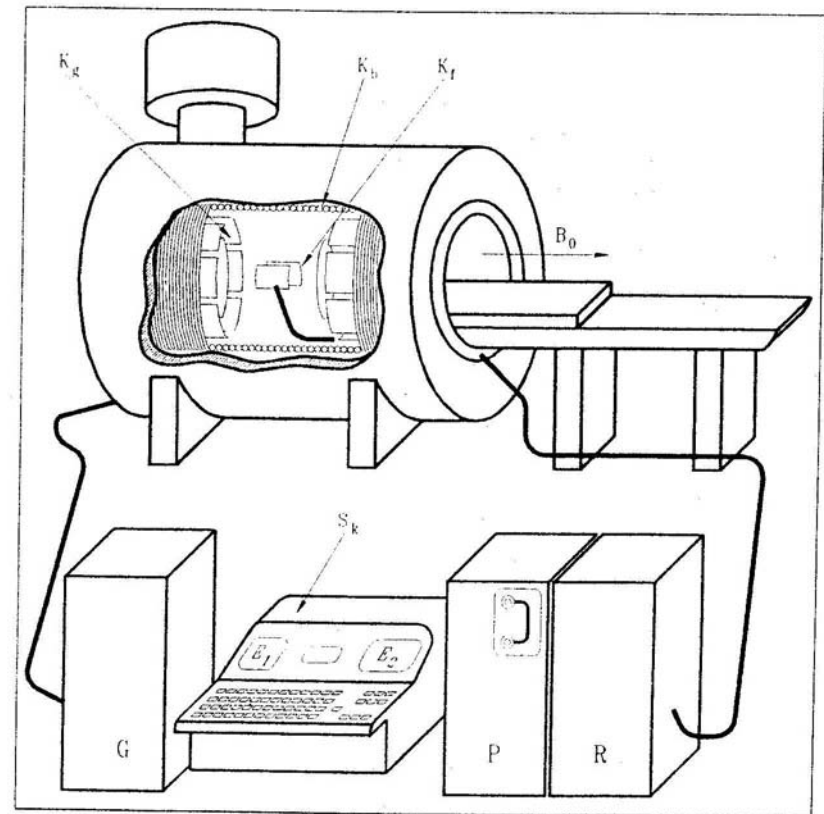
Biomehatronika



Slika 9.1.

UREĐAJ ZA SNIMANJE MAGNETNOM REZONANCOM

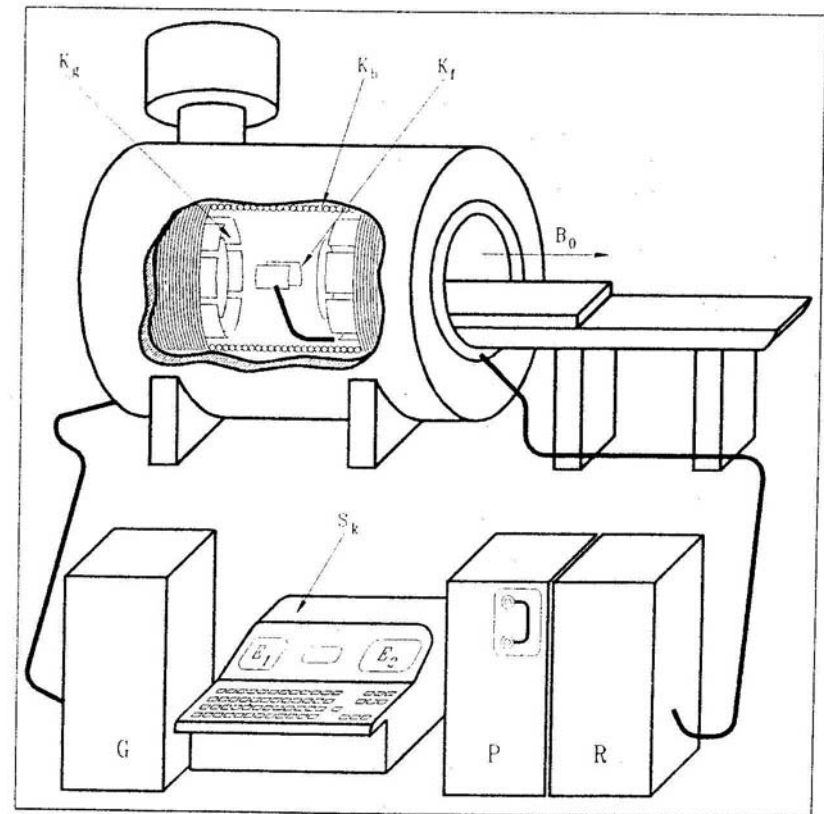
Magnet za snimanje je najskuplja komponenta MRI sistema. Magnet superprovodnog tipa je u stvari elektromagnet napravljen od superprovodljive žice. Ova žica ima otpor približno jednak 0 onda kada se hladi do temperature bliske apsolutnoj nuli ($-273,15^{\circ}\text{C}$ ili 0 K) dok je u tečnom helijumu.



Slika 9.1

UREĐAJ ZA SNIMANJE MAGNETNOM REZONANCOM

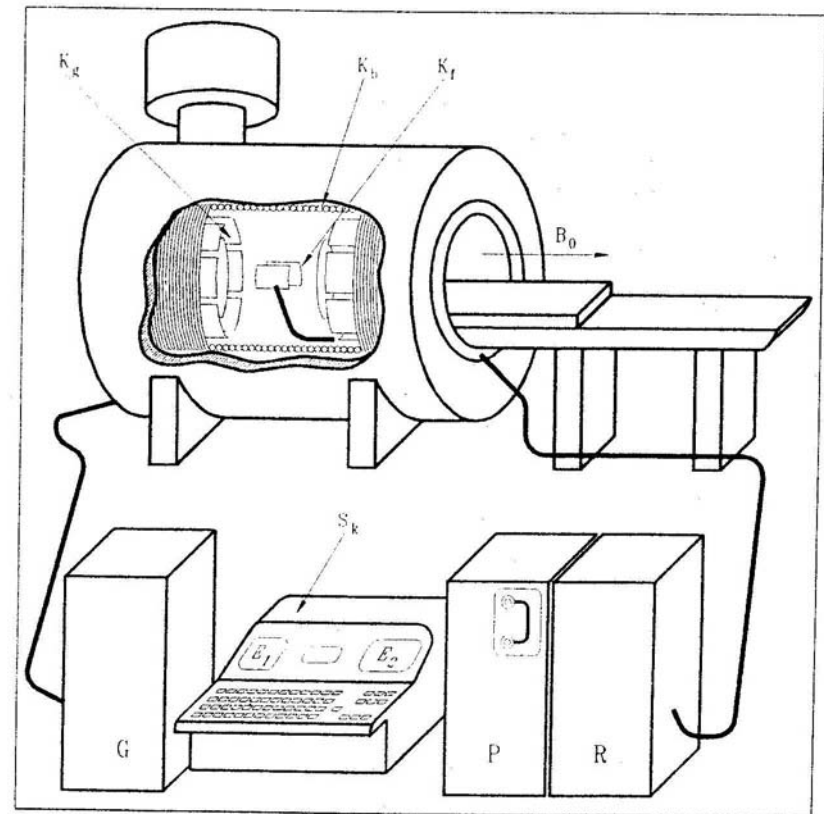
U unutrašnjost kalema elektromagneta K_b koncentrično su postavljeni: kalem za gradijente polja (G_x, G_y, G_z) označeni sa K_g i radiofrekventni kalem K_f za dobijanje oscilatornog magnetskog polja B_1 , tj. rf-pulsa kao i za detektovanje NMR signala.



Slika 9.1.

UREĐAJ ZA SNIMANJE MAGNETNOM REZONANCOM

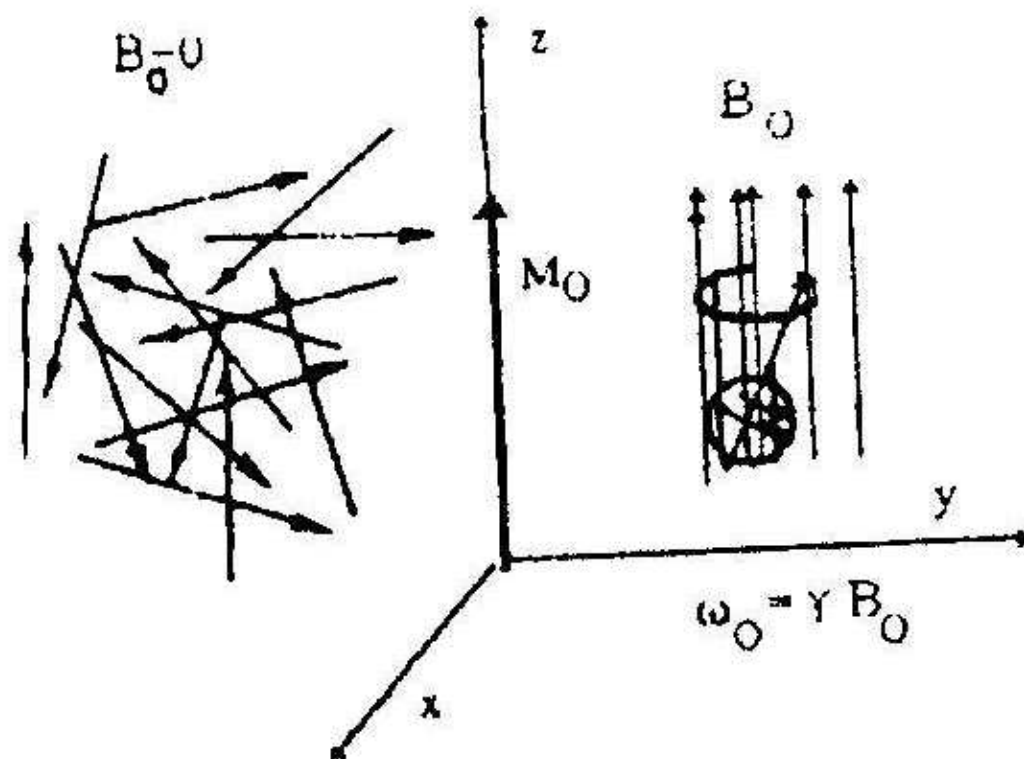
Iz rf-kalema detektovani signali stižu u računar, gde se obradom dobijaju kompletni podaci i slika na ekranima E_1 i E_2 , koji su ugradjeni u komandni sto, S_k . Komandni sto je povezan sa svim delovima sadržanim u uređaju za MNR-tomografiju: snažnim izvorom električne energije, sistemom za magnetska polja i računarom. Na tasteru T komandnog stola se zadaje režim rada i traže određene informacije o ispitivanom sistemu.



Slika 9.1.

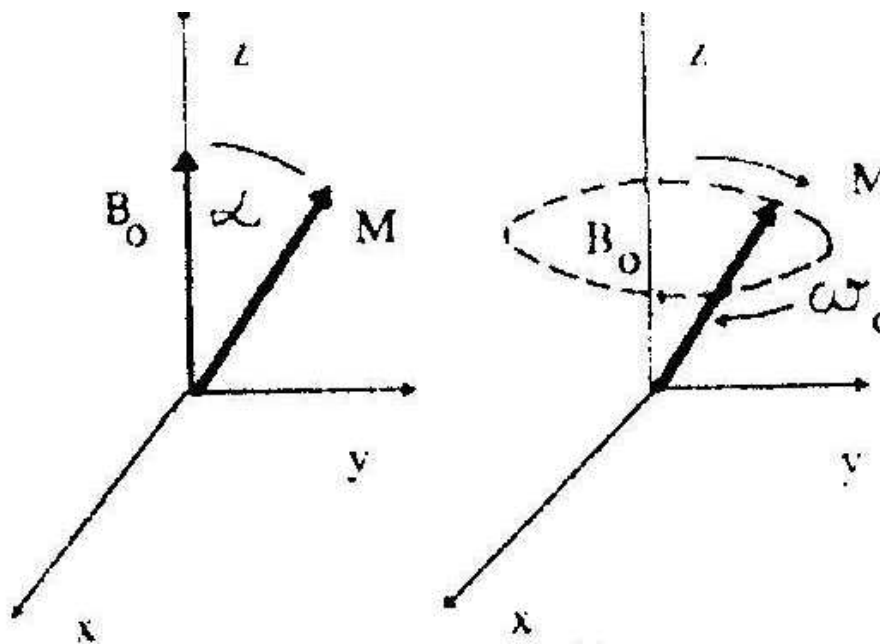
DIJAGNOSTIKA MAGNETNOM REZONANCOM

Eksitacija. Ako je tkivo u spoljašnjem magnetskom polju, to polje će izazvati da se elementarni magnetski momenti M orijentišu.



DIJAGNOSTIKA MAGNETNOM REZONANCOM

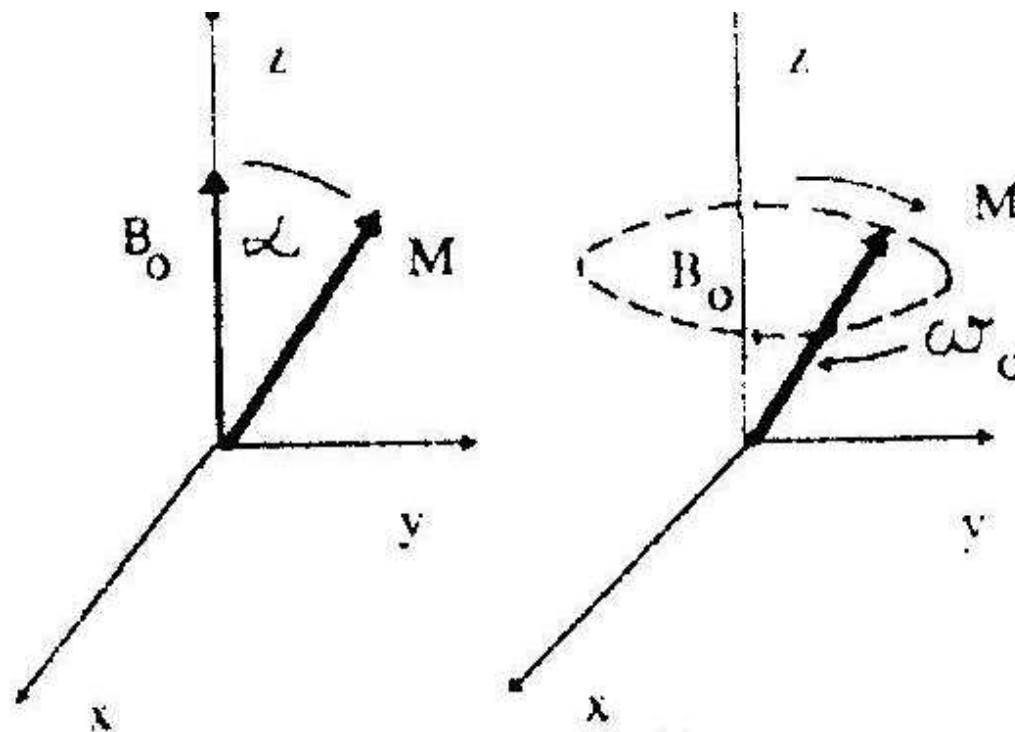
Ova magnetizacija će biti ugaono pomerena od pravca spoljašnjeg polja B (paralelno osi O_z). Obeležimo ovaj ugao sa α .



DIJAGNOSTIKA MAGNETNOM REZONANCOM

Isti rezultat se dobija ako se na tkivo primeni radio frekvencijski (RF) impuls na rezonantnoj učestanosti sa širinom impulsa $T = \alpha/K$, gde je K konstanta. Pri ovome vektor M rotira oko ose O_z Larmourovom brzinom. Lako zaključujemo da možemo izborom širine impulsa uticati i birati ugao α .

Biomehatronika

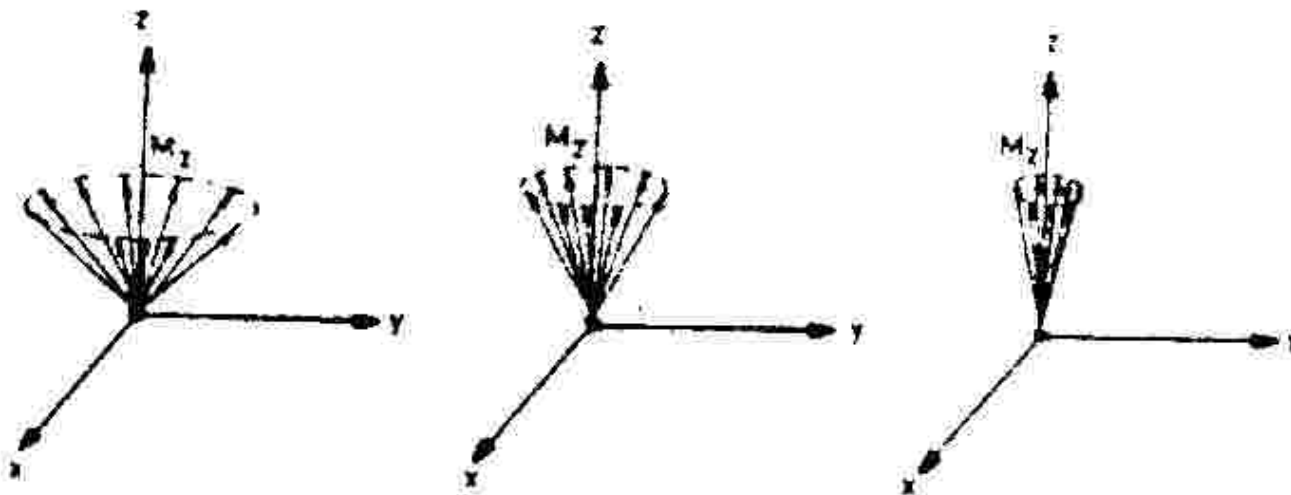


Radijaciona biofizika – nejonizujuće
zračenje

51

DIJAGNOSTIKA MAGNETNOM REZONANCOM

Emisija. Kada se ukine RF polje magnetizacija počinje da se vraća ka O_z osi po svom pravcu. To indukuje NMR signal u prijemnom kalemu koji se postavlja normalno na ravan vektora magnetizacije. Preciznije, pojedinačni magnetski moment počinje da bude van faze, pa neto efekat u ravni xOz opada. Amplituda opada po eksponencijalnom zakonu sa konstantom T_2 .



DIJAGNOSTIKA MAGNETNOM REZONANCOM

Simultano sa "defaziranjem" postoji i relaksacioni proces M_z komponente prema stanju M_0 koje je postojalo pre uključenja spoljašnjeg polja. I ovo slabljenje je eksponencijalno, ali sa vremenskom konstantnom T_1 , Možemo napisati:

$$A = A_0 e^{-\frac{t}{T_1}} e^{-\frac{t}{T_2}}$$

Relaksaciono vreme T_1 se odnosi na spin-rešetka relaksaciju i rezultat je interakcije pobudjenog jezgra i kristalne rešetke u kojoj se nalazi to jezgro. Ovo se naziva i *longitudinalna relaksacija*.

DIJAGNOSTIKA MAGNETNOM REZONANCOM

Relaksaciono vreme T_2 se naziva spin-spin relaksacija i označava vreme potrebno da se iz sistema u kome su spinovi u fazi predje u sistem u kome su spinovi van faze. Ova relaksacija se naziva i *transverzalna relaksacija*. Transverzalne relaksacije su brže od longitudinalnih. Oba vremena su karakteristična za određenu molekularnu sredinu i uslove okoline posmatranog jezgra. U tipičnoj situaciji za jezgro vodonika ^1H je relaksaciono vreme T_2 reda 0.04 do 2 sekunde.

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_0 e^{-\frac{t}{T_1}} e^{-\frac{t}{T_2}}$$

DIJAGNOSTIKA MAGNETNOM REZONANCOM

Ovi relaksacioni procesi su najvažniji za NMR. U prikazivanju slike, promene u relaksacionom vremenu za različite biološke strukture su ključ kontrastnog mehanizma za anatomska posmatranja. Na primer, u obolelom tkivu relaksaciono vreme može biti i 100% veće nego u zdravom istom tkivu. Pored prikazivanja relaksacionog vremena prikazuje se i gustina protona, što još više poboljšava kvalitet ove tehnike.

$$A = A_0 e^{-\frac{t}{T_1}} e^{-\frac{t}{T_2}}$$