

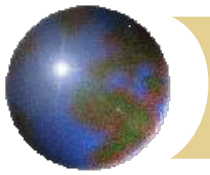
# *Nuklearna magnetska rezonancija*

## ***Osnovni pojmovi i uporaba u medicini***

*IV. godina medicina*

*veljača , 2006*

*J.Brņas-Kraljević*



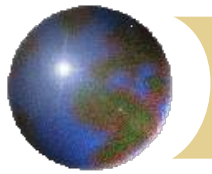
6 October 2003 The Nobel Assembly at

Karolinska Institutet has today decided to award The Nobel Prize in Physiology or Medicine for 2003 jointly to

**Paul C Lauterbur and Peter Mansfield**

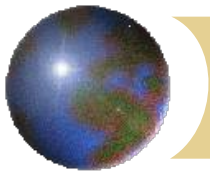
for their discoveries concerning **"magnetic resonance imaging"**

- ⊕ **Paul Lauterbur** (born 1929), Urbana, Illinois, USA, discovered the possibility to create a two-dimensional picture by introducing gradients in the magnetic field. By analysis of the characteristics of the emitted radio waves, he could determine their origin. This made it possible to build up two-dimensional pictures of structures that could not be visualized with other methods.
- ⊕ **Peter Mansfield** (born 1933), Nottingham, England, further developed the utilization of gradients in the magnetic field. He showed how the signals could be mathematically analyzed, which made it possible to develop a useful imaging technique. Mansfield also showed how extremely fast imaging could be achievable. This became technically possible within medicine a decade later.

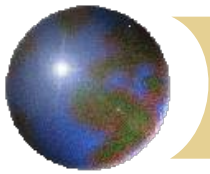


# Rječnik pojmova

- ❑ **magnetsko polje** – jakost polja – tesla (T)  
Zemljino magnetsko polje  $< 70 \mu\text{T}$  - u medicini **0,5 – 2,5 T**
- ❑ **homogeno** – jednaka jakost u svim točkama prostora
- ❑ **stalno** – vremenski nepromjenljiva jakost u točki polja
- ❑ **radiofrekventno** – frekvencija pravilne promjene jakosti magnetskog polja, u medicini **100 kHz – 10 GHz**
- ❑ **gradijent polja** – pravilna promjena jakosti polja po linearnoj dimenziji prostora- (T/m) – u medicini bolje što je strmiji –  
do **30 mT/m** (0,3 mT/cm)

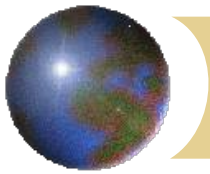


- ❑ **puls** – mjeri energiju koja je predana sistemu - vremensko trajanje magnetskog polja koje predaje energiju sistemu spinova
- ❑ **spin jezgre** – osnovno svojstvo čestice tvari - opisuje magnetska svojstva jezgre s neparnim brojem nukleona, u medicini jezgre sa spinskim brojem  $\frac{1}{2}$
- ❑ **magnetski moment** – fizikalna veličina kojom mjerimo magnetska svojstva jezgara sa spinom, temelj pojave NMR
- ❑ **rezonancija** – proces maksimalnog prijenosa energije između dva sistema – opisan **karakterističnom frekvencijom**
- ❑ **relaksacija** – procesi kojima se uzbuđeni sistem nakon prestanka uzbuđenja vraća u osnovno energijsko stanje – opisan **karakterističnim vremenom**



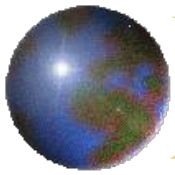
# ***Magnetska Rezonancija***

- ❑ mjere se magnetska svojstva atomskih jezgara u uzorku koji je u vanjskom magnetskom polju
- ❑ - kontrolirano se mijenja stanje sistema
  - **rezonancijska apsorpcija**
- ❑ - prati se povratak sistema u ravnotežu
  - **relaksacijska emisija**
- ❑ u proučavanju struktura molekula - to je **spektroskopijska metoda**
- ❑ u medicinskoj dijagnostici ili kao **spektroskopija** (MRS) ili kao **oslikavanje** (MRI)



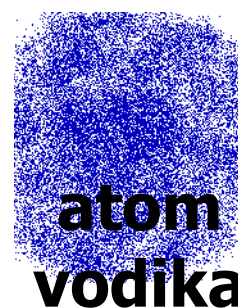
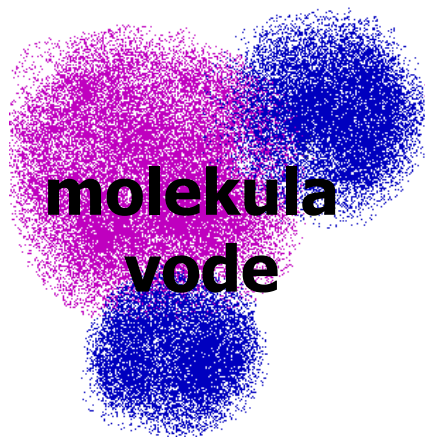
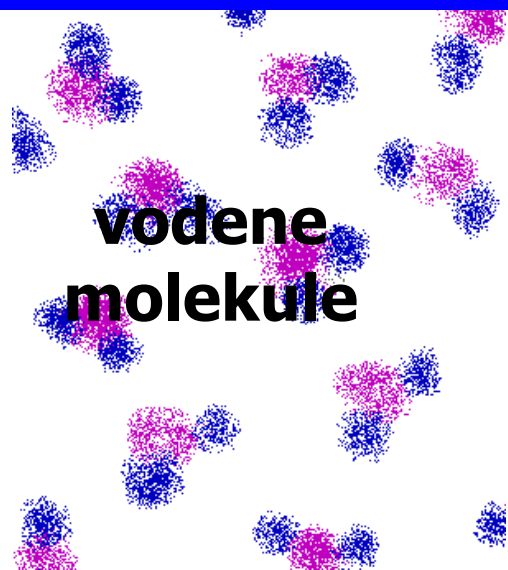
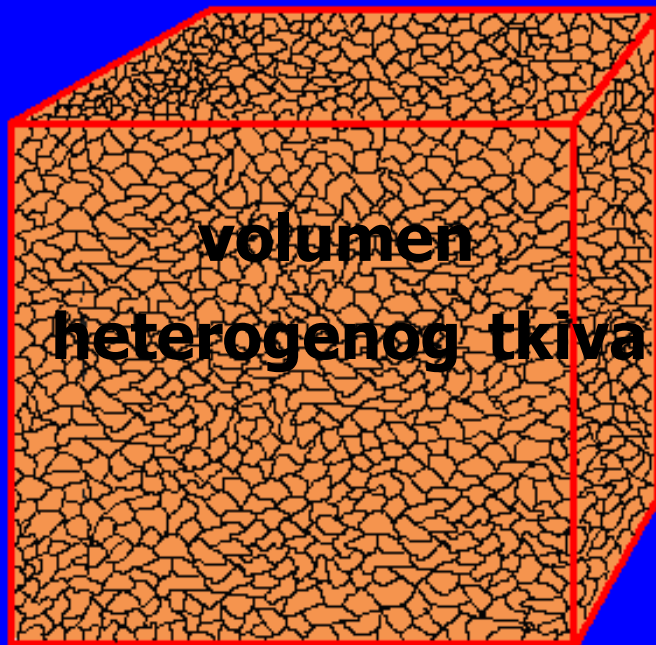
# Povijest

- ❑ 1944. F.Bloch i E.Purcell – nuklearna magnetska rezonancija
- ❑ 1971. R. Damadian – razlikuje  $T_1$  i  $T_2$  u tumorima
- ❑ 1973. P.Lauterbur – prvi MRI
- ❑ 1975. R.Ernst – fazno i frekventno pročitavanje signala i prikaz Fourier transformom – osnova svih MRI danas
- ❑ 1977. P.Lauterbur – neovisno R.Damadian – MRI cijelog tijela
- ❑ P.Mansfield – metoda jeke (EPI) – 5 min/slika – danas 5 s/slika
- ❑ 1986. NMR mikroskopija – rezolucija  $10 \mu\text{m}$  u volumenu  $\text{cm}^3$
- ❑ 1987. EPI metodom – srčani ciklus u stvarnom vremenu
- ❑ C.Dumoulin – angiografija - MRA - bez kontrastnog sredstva
- ❑ 1993. funkcionalni MRI
- ❑ 1995. spektroskopija *in vivo*
- ❑ 1998. kombinacija s drugim oslikavajućim metodama



- ❑ Što je to NMR ?
- ❑ Što je to MRI?
- ❑ Što je to fMRI?
- ❑ Što gledam, što vidim, što mjerim?
- ❑ Kako mjerim?

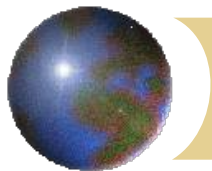
zanima me



ovo mjerim



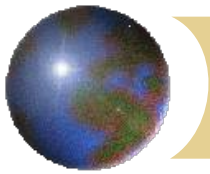




# Interakcija magnetskog momenta jezgre vodika i vanjskog magnetskog polja

- jezgra vodika ima spin pa su njena magnetska svojstva opisana **magnetskim momentom,  $\mu$** , i vlastitim magnetskim poljem
- u vanjskom magnetskom polju dva su moguća stanja magnetskog momenta: **u** ili **suprotno** smjeru vanjskog polja – govorimo o dva moguća stanja energije
- volumen puno vodika koji nije u magnetskom polju – magnetički su proizvoljno orijentirani u prostoru – **volumen nije magnetiziran**
- volumen u vanjskom magnetskom polju – napućenost energijskih stanja određena je Boltzmannovom raspodjelom 
$$\frac{N_{-1/2}}{N_{+1/2}} = e^{-\frac{\Delta E}{kT}}$$
- više je jezgri u smjeru magnetskog polja – **volumen je magnetiziran**
- pritom vrh magnetskog momenta pojedine jezgre precesira oko magnetskog polja Larmorovom frekvencijom, koja je zbog giromagnetske konstante karakteristična za jezgre

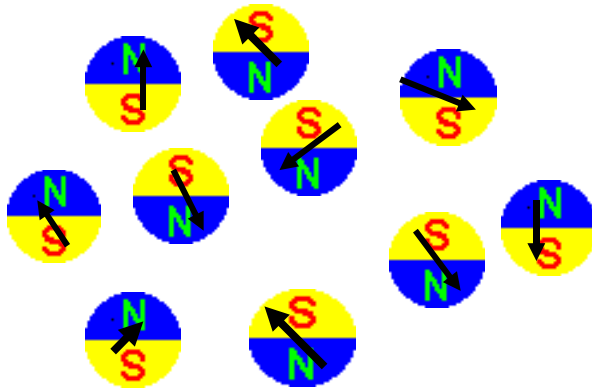
$$\omega = \gamma \cdot \mathbf{B}_0$$



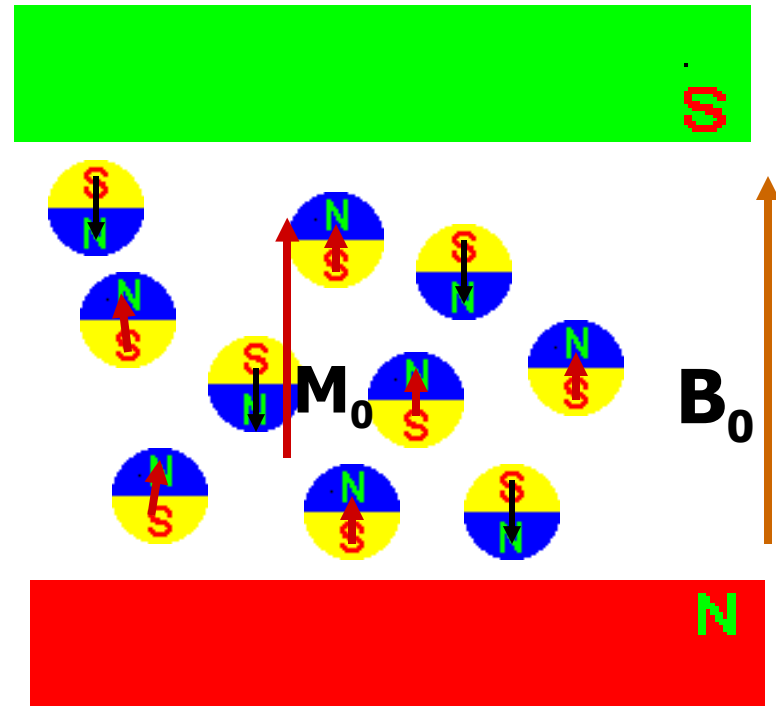
to si smijemo zamisliti ovako:

**homogeno stalno  
magnetsko polje  $B_0$**

**bez magnetskog polja**



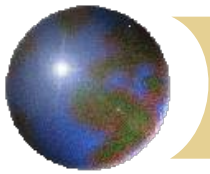
-proizvoljna usmjerenost magnetskih momenata - nema **makroskopske magnetizacije**



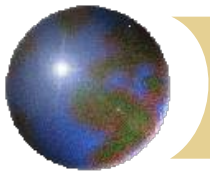
više je magnetskih momenata usmjereno u smjeru magnetskog polja - mjerimo **makroskopsku magnetizaciju** u smjeru  $B_0$  polja

**Posebno važno:**

**ne orijentiraju se jezgre, atomi ili molekule, nego magnetski moment!**

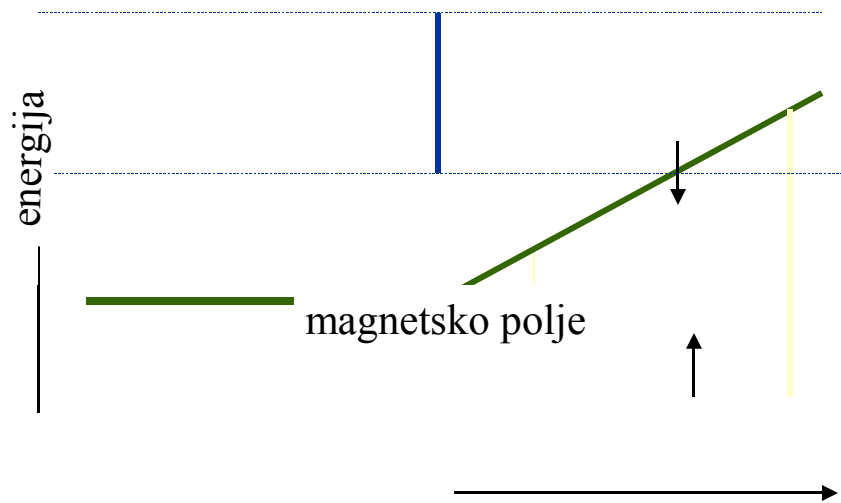


- uređeno stanje sistema u ravnoteži u magnetskom polju određeno - **makroskopskom magnetizacijom** u smjeru magnetskog polja
- proces **rezonancije** će biti ostvaren dovodenjem energije razlike stanja i prevodenjem jezgara u više energijsko stane - promjena iznosa i smjera makroskopske magnetizacije
- taj se proces ostvaruje radiofrekventnim magnetskim poljem frekvencije karakteristične za promatranu jezgru
- ako je frekvencija radiofrekventnoga polja jednaka Larmorovoj frekvenciji promatrane jezgre dolazi do interakcije magnetskih momenata i polja, mijenja se Boltzmannova raspodjela;
- što je veća razlika napučenosti u ravnotežnom stanju točnija su mjerenja rezonancije



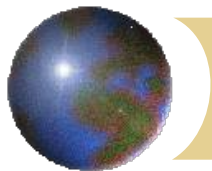
# Teorija – kvantna fizika

- usmjerenje vektora  $\downarrow$  ili  $\uparrow$  – prikaz je dva moguća energijska stanja magnetskih momenata u  $B_0$ .
- razlika napućenosti veća za polje veće jakosti
- **makroskopska magnetizacija** veća kod veće razlike napućenosti



kvant energije  $h\nu$  bit će apsorbiran ako je  $\Delta E = h\nu$

na toj vrijednosti polja mjerimo signal

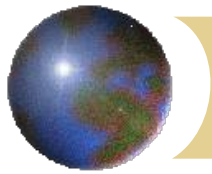


# osobine jezgri

jezgra	neparni		spin	prirodna napučenost	biološka napučenost	$\gamma$ / MHz/T
	protoni	neutroni				
<b><math>^1\text{H}</math></b>	1	0	1/2	99,98	0,63	42,58
$^2\text{H}$	1	1	1	0,015		6,54
<b><math>^{31}\text{P}</math></b>	0	1	1/2	100	0,0024	17,25
$^{23}\text{Na}$	2	1	3/2	100	0,0004	11,27
$^{14}\text{N}$	1	1	1	100	0,015	3,08
<b><math>^{13}\text{C}</math></b>	0	1	1/2	1,11	0,094	10,71
$^{19}\text{F}$	0	1	1/2			40,08

**prirodna napučenost- frakcija izotopa u tom elementu**

**biološka napučenost - zastupljenost određenog elementa u tkivu**



# Uvjet rezonancije

- razdvojenost stanja  $\Delta E = E_{+1/2} - E_{-1/2}$  ovisi o vanjskom magnetskom polju

$$\Delta E = \gamma \frac{h}{2\pi} B_0$$

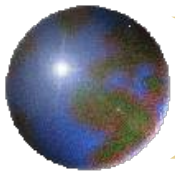
- apsorpcijom kvanta energije dolazi do prelaska u više stanje

$$h\nu = \Delta E = \gamma \frac{h}{2\pi} B_0$$

- osnovna relacija magnetske rezonancije

$$\omega = \gamma B_0$$

$\omega$  – Larmorova frekvencija

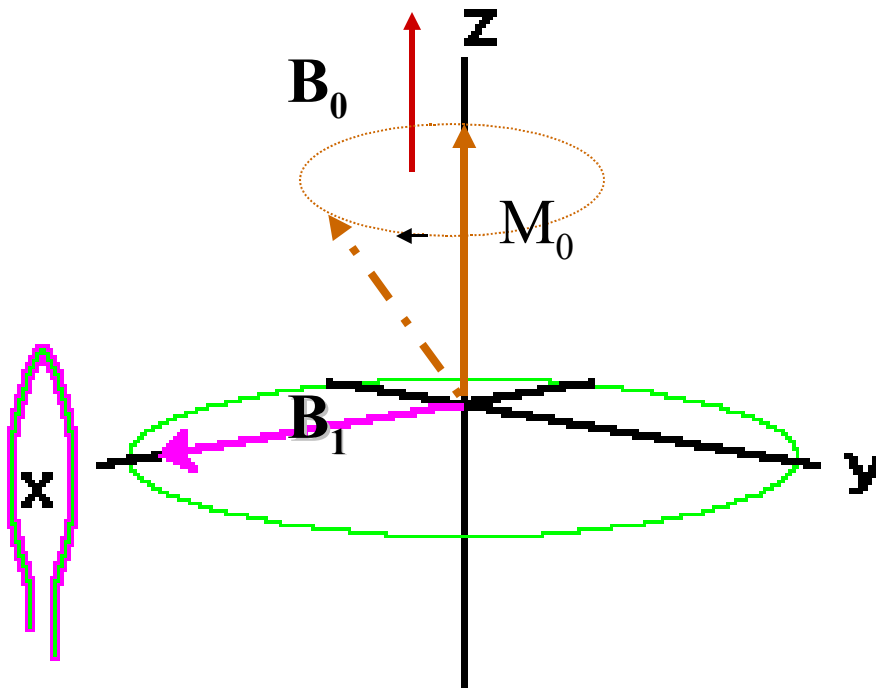


# Radiofrekventno magnetsko polje $B_1$

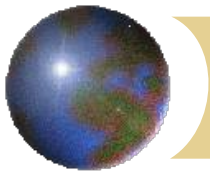
- rezonancijski prelazak uzrokovan je apsorpcijom energije vremenski promjenljivog magnetskog polja

$$B_1(t) = B_{1\max} \sin \omega t$$

- $B_1$  je okomito na polje  $B_0$ , a jakost polja je oko  $10^{-4} B_0$



- frekvencija  $B_1$  jednaka je Larmorovoj frekvenciji jezgri



$$\omega = \gamma B_0$$

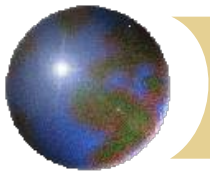
**$B_0 = \text{konst.}$**

- ❑ raznovrsne jezgre imaju različitu Larmorovu frekvenciju, jer je  $\gamma$  različit
- ❑ u spektru su njihove linije odvojene

**$\gamma = \text{konst.}$**

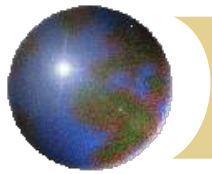
- ❑ istovrsne jezgre imaju različitu Larmorovu frekvenciju ako su u različitim magnetskim poljima
- ❑ kontrolirana nehomogenost polja je osnova primjene NMR kao metode oslikavanja





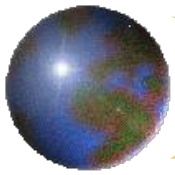
# Relaksacija

- ❑ nakon prestanka djelovanja uzbude sistem se vraća u ravnotežno stanje određeno Boltzmannovom raspodjelom – **proces relaksacije**
- ❑ postoje dva mehanizma relaksacije – oba su izvori informacija o dinamičkim osobinama sistema
- ❑ u magnetskoj rezonanciji mjerimo 4 osnovna parametra:
  - **makroskopsku magnetizaciju,**
  - **kemijski pomak,**
  - **vrijeme relaksacije  $T_1$ ,**
  - **vrijeme relaksacije  $T_2$**



# Kvaziklasični model

- ⊕ magnetski moment jezgre - štapičasti magnet
- ⊕ u  $B_0 = 0$  - zbog Brownovog gibanja nasumično su orijentirani
- ⊕ u  $B_0 \neq 0$  - magnetski momenti precesiraju Larmorovom frekvencijom oko smjera polja: veći broj oko + Z, manji broj oko - Z
- ⊕ faze precesije su različite: makroskopska magnetizacija je u smjeru magnetskog polja  $B_0$ , a nema komponentu u okomitoj ravnini
- ⊕ energija radiofrekventnog polja, prisiljava makroskopsku magnetizaciju na istodobnu precesiju oko oba polja
- ⊕ makroskopska magnetizacija precesira po spiralnoj putanji otklanjajući se prema XY ravnini i dalje prema smjeru -Z osi



# Makroskopska magnetizacija

- uzorak u  $B_0$  polju je magnetiziran
- u smjeru osi magnetskog polja (os +Z) mjerimo **makroskopsku magnetizaciju  $M_0$**  koja je određena kao:

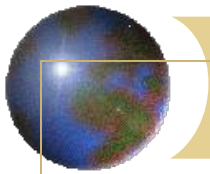
$$\frac{1}{V} \left( \sum_{i=1}^{N_{+1/2}} \mu_{zi} - \sum_{i=1}^{N_{-1/2}} \mu_{zi} \right)$$

pa ima samo **longitudinalnu komponentu**

- a izražena preko mjerljivih parametara:

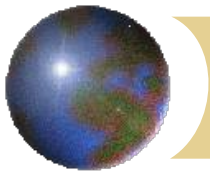
$$M_0 = \frac{N \gamma^2 \hbar^2 I^2}{12\pi^2 kT} B_0$$

$$N = N_{+1/2} - N_{-1/2}$$



# dakle, makroskopska magnetizacija

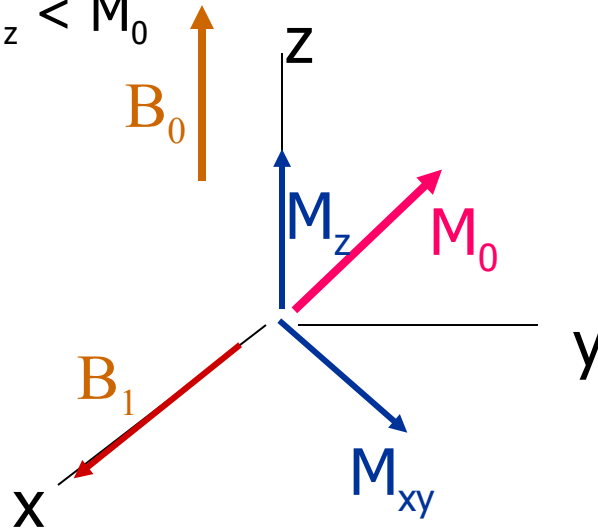
- povećava se s jakošću vanjskog magnetskog polja:  
**dobri instrumenti rade na velikim poljima**
- obrnuto je proporcionalna temperaturi:  
**povoljno je mjeriti na niskoj temperaturi, ali to nije moguće u medicinskoj primjeni**
- ovisi o gustoći jezgri koje mjerimo:  
**u medicini gledamo vodike iz molekula vode (koje su slobodne ili vezane) a njih je najviše u tkivu; ili vodike u mastima**

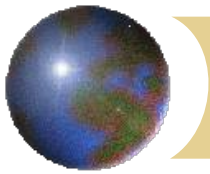


# Pojava

## transverzalne magnetizacije

- u ravnoteži nema **transverzalne magnetizacija,  $M_{xy}$** , jer su različite faze precesije pojedinih magnetskih momenata
- djelovanja magnetskog polja  $B_1$  uzrokuje ujednačavanje faza precesije i pojavu transverzalne magnetizacije
- zbog rezonancijske apsorpcije energije smanjuje se longitudinalna komponenta,  $M_z < M_0$

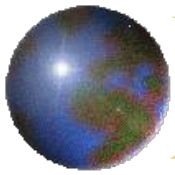




- ❑ u NMR eksperimentu **uvijek mjerimo transverzalnu magnetizaciju** – kao induciranu elektromotornu silu u prijemnoj zavojnici
- ❑ detektor je smješten u osi X
- ❑ iznosi  **$M_z$  i  $M_{xy}$**  ovise o vremenu djelovanja polja  $B_1$ . Kut odklona od smjera +Z je:

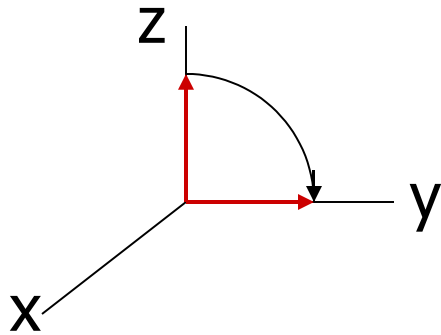
$$\vartheta = \gamma B_{1max} t_{\vartheta}$$

- ❑ iznos predane energije sistemu za vrijeme djelovanja radiofrekventnoga polja zovemo **puls**



# Karakteristični pulsevi

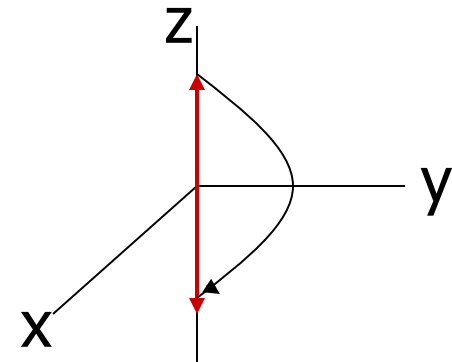
## $\pi/2$ puls



- trajanje  $B_1$  je toliko da se magnetizacija zakrene u smjer Y

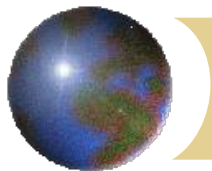
$$t_{\pi/2} = \frac{\pi/2}{\gamma B_{1\max}}$$

## $\pi$ puls



- nakon ovog pulsa magnetizacija se zakreće u smjer -Z

$$t_{\pi} = \frac{\pi}{\gamma B_{1\max}}$$



# Kemijski pomak

- ❑ nije gola jezgra u polju  $B_0$ , nego u atomu, pa osjeća doprinos lokalnih magnetskih polja okolnih elektrona - prvenstveno iz vlastitog atoma

$$B_{ef} = B_0 - B_{lok} = B_0 (1 - \sigma)$$

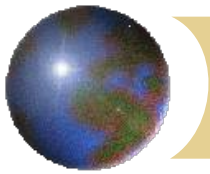
- ❑  $\sigma$  - zasjenjenje - ovisi o kemijskom sastavu molekula u kojima se nalaze rezonirajuće jezgre
- ❑ **efektivno polje** je uvijek manje od  $B_0$ , zbog dijamagnetskog efekta elektrona

$$\omega_{pravo} = \gamma (B_0 - B_{lok})$$

- ❑ postoji, dakle, pomak u rezonancijskoj frekvenciji za istovrsne jezgre u stalnom magnetskom polju, ali u različitim molekulama
- ❑ to je **kemijski pomak**, - definira se prema standardnom uzorku (ppm)

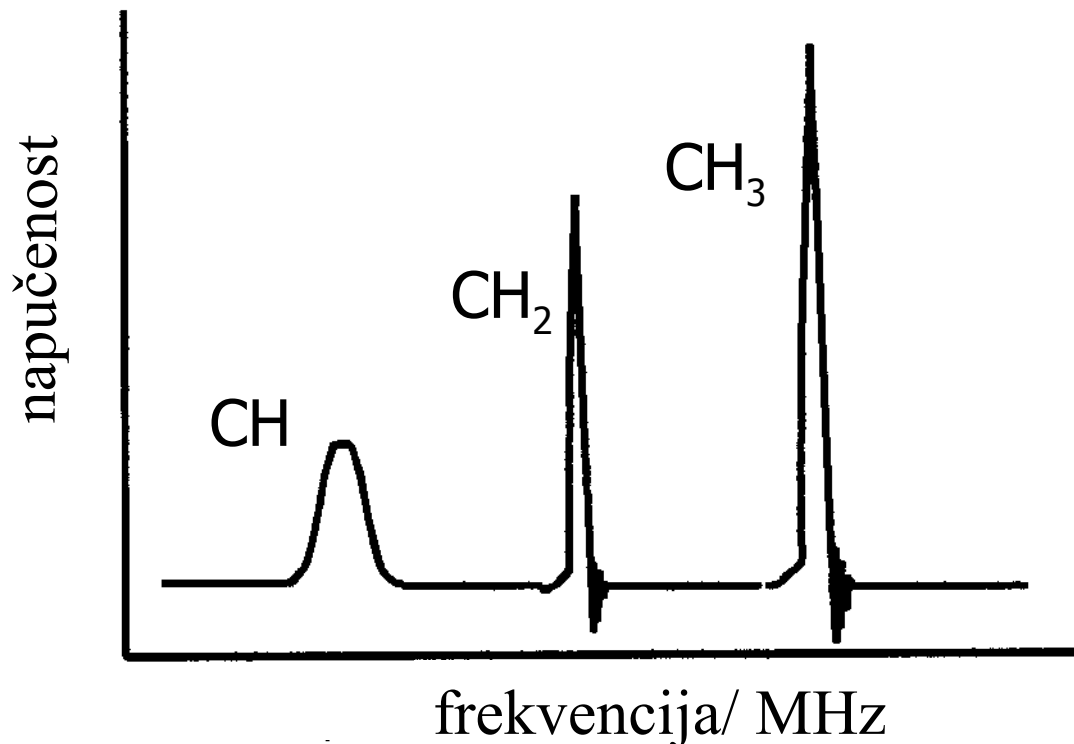
$$\omega = 10^6 \left( \frac{\omega_{stand} - \omega_{mjer}}{\omega_{stand}} \right)$$

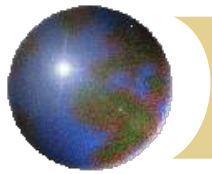




$$\omega + \Delta\omega = \gamma(B_0 - B_{lok})$$

- ❑ **intrinzički** - određen kemijskom okolinom jezgre koju promatramo
- ❑ **inducirani** - određen svojstvima okoline u kojoj se nalazi molekula - otapalo, pH, temperatura, paramagnetski centri, sekundarna i tercijarna struktura kod proteina, denaturacija proteina, različiti patološki procesi
- ❑ dijagnostička vrijednost u **spektroskopiji *in vivo***





# Relaksacijski procesi – vremena relaksacije

- ❑ relaksacijskim procesima predaje se energija okolini  
 **smanjuje energija sistema**
- ❑ i izmjenjuje energija među promatranim jezgrama  
 **povećava entropija**
- ❑ oba su procesa određena dinamičkim osobinama sistem
- ❑ u biološkim sistemima tkiva se razlikuju u relaksacijskim parametrima
- ❑ procesi su efikasni - signal rezonancije mjeri se trajno, iako je razlika naseljenosti mala
- ❑ procesi relaksacije su nasumični događaji opisani eksponencijalnim funkcijama s karakterističnim vremenima
- ❑ parametri relaksacije –  
 **vremena relaksacije  $T_1$  i  $T_2$**

# Relaksacija spina u rešetku - $T_1$

□ energija apsorbirana u spinskom sistemu se predaje lokalnim magnetskim poljima – koja potječu od rotacije okolnih molekula

□ rotaciju opisuje korelacijsko vrijeme:  $\tau_c = \frac{4\pi\eta a^3}{3kT}$

□  $\tau_c \sim 10^{-11}$  s za male molekule  $\omega_{rot}$  velika

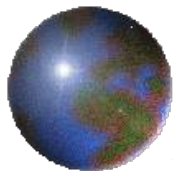
□  $\tau_c \sim 10^{-8}$  s za velike molekule  $\omega_{rot}$  mala  $\approx \omega$  (Larmorova frekvencija)

□ kad su u okolini spinskog sistema velike molekule, relaksacija je brža  
 $\Rightarrow T_1$  kraće

□ u čistoj vodi relaksacija je spora  $\Rightarrow T_1$  duže

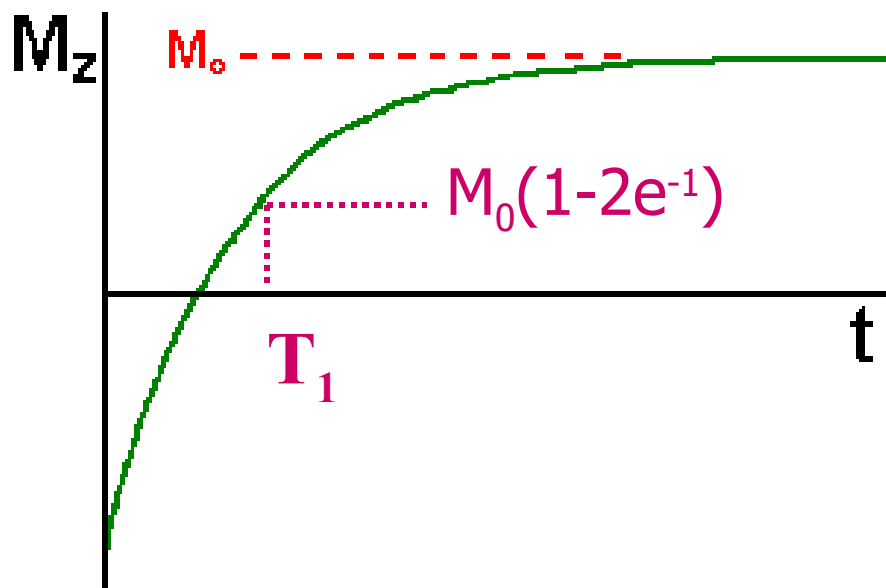
□  $T_1$  ovisi o temperaturi i viskoznosti okoline - mjera je molekularnih gibanja

□ tkiva imaju različiti  $T_1$



# Određivanje $T_1 - \pi - \tau - \pi/2$

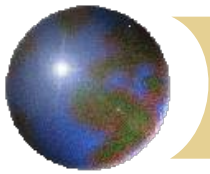
- primijenimo  $\pi$  puls
- longitudinalna magnetizacija mijenja se od  $-M_0$  prema  $+M_0$ :



$$M_z(t) = M_0 \left( 1 - 2e^{-t/T_1} \right)$$

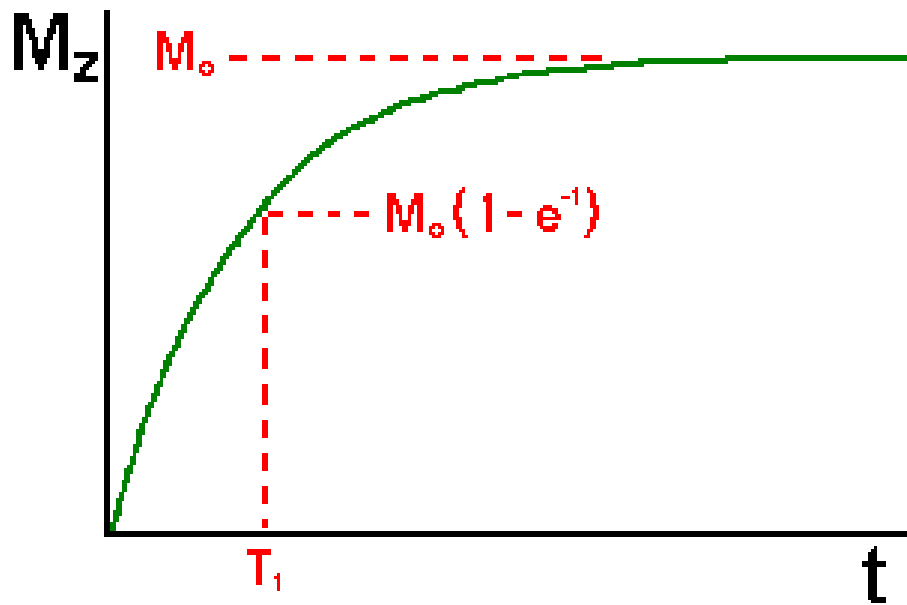
- $T_1$  odredimo iz

$$M_z(T_1) = M_0 - 2 \frac{M_0}{e}$$



□ primijenimo  $\pi/2$  puls

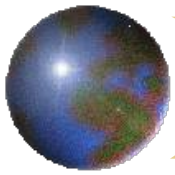
□ longitudinalna magnetizacije raste od 0 prema  $+M_0$



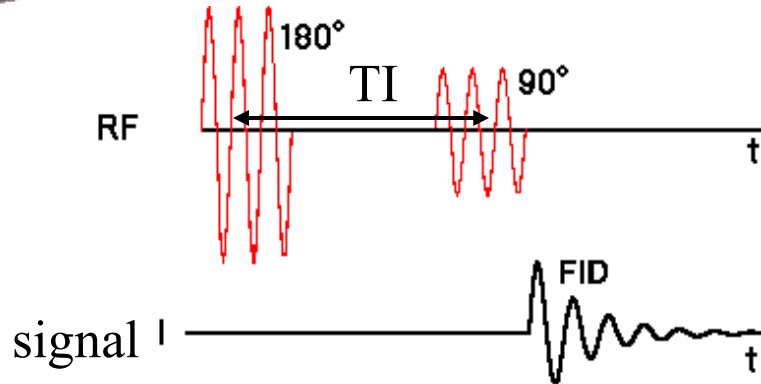
$$M_z(t) = M_0 \left( 1 - e^{-t/T_1} \right)$$

□  $T_1$  odredimo iz

$$M_z(T_1) = M_0 - \frac{M_0}{e}$$



# Obrnuti oporavak - IR



- longitudinalna magnetizacija je  $180^\circ$  pulsom okrenuta u  $-Z$  smjer i nakon prestanka pulsa vraća se u ravnotežnu vrijednost
- $90^\circ$  pulsom koji je primijenjen prije potpune relaksacije transverzalna magnetizacija proporcionalna je relaksiranim spinovima
- u zavojnici detektora inducira se FID
- intenzitet Fourierovog transformna nakon jednog mjerenja je

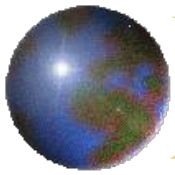
$$S = k\rho ( 1 - 2e^{-TI/T1} )$$

- a nakon ponavljanja

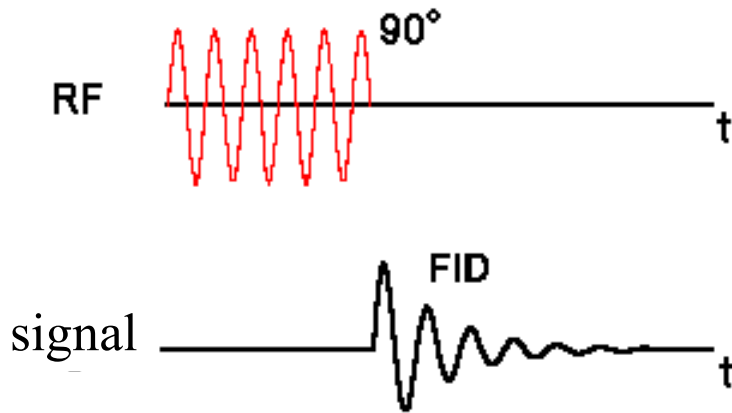
$$S = k\rho ( 1 - 2e^{-TI/T1} + e^{-TR/T1} )$$

TR – vrijeme ponavljanja sekvenci

TI – vrijeme između pulseva

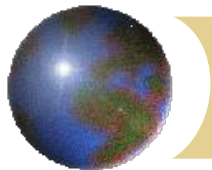


# Samo slijed $\pi/2$ pulsa



- ❑ magnetizacija je 90 pulsom rotirana u XY ravninu
- ❑ prestankom pulsa vraća se u ravnotežu
- ❑ u detektorskoj zavojnici mjeri se FID
- ❑ intenzitet FT signala ovisi o vremenima između ponavljanja pulseva – TR

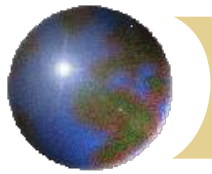
$$S = k\rho \left( 1 - e^{-TR/T_1} \right)$$



# $T_1$ i $T_2$ za različita tkiva

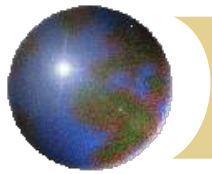
<b>tkivo</b>	<b><math>T_1</math> /s</b>	<b><math>T_2</math> /ms</b>	<b>gustoća vodika</b>
CST	0,8 - 20	110 - 2000	70 - 230
bijela tvar	0,76 – 1,08	61 - 100	70 - 90
siva tvar	1,09 – 2,15	61 - 109	85 - 125
membrana	0,5 – 2,2	50 - 165	5 - 44
mišići	0,95 – 1,82	20 - 67	45 - 90
mast	0,2 – 0,75	53 - 94	50 - 100





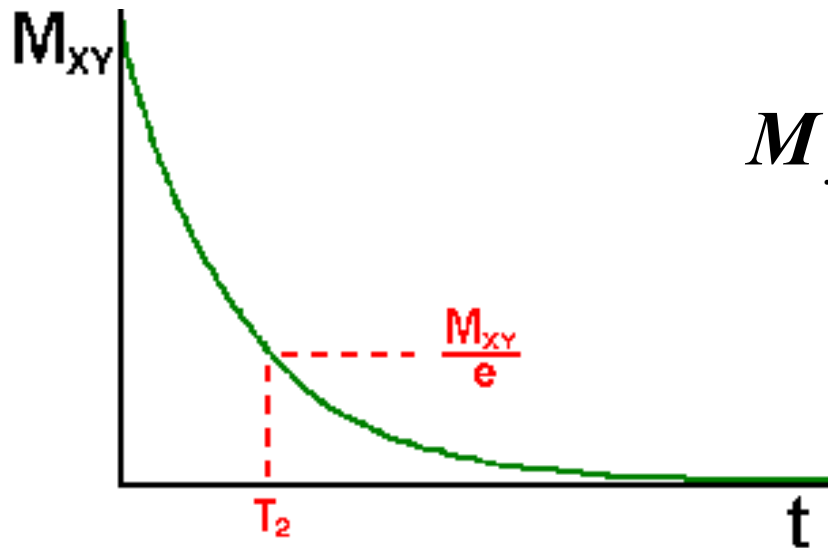
# Spin-spin relaksacija - $T_2$

- ❑ prestankom djelovanja radiofrekventnog polja magnetski momenti međusobno izmjenjuju energiju
- ❑ zbog malih nehomogenosti magnetskih polja Larmorove frekvencije se razlikuju - faze precesije postaju različite
- ❑ transverzalna magnetizacija se eksponencijalno smanjuje
- ❑ izmjena energije unutar spinskog sistema je veća ako su jezgre bliže i ako su manje pokretne -  $T_2$  je znatno kraće u čvrstom stanju
- ❑ tkiva imaju različite vrijednosti  $T_2$
- ❑ **za svaku jezgru u nekoj okolini  $T_2 \leq T_1$**



# Određivanje $T_2$

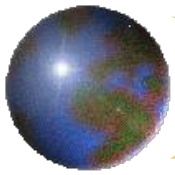
- primijenimo  $\pi/2$  puls
- mjerimo isčezavanje transverzalne magnetizacije



$$M_{xy}(t) = M_0 e^{-t/T_2}$$

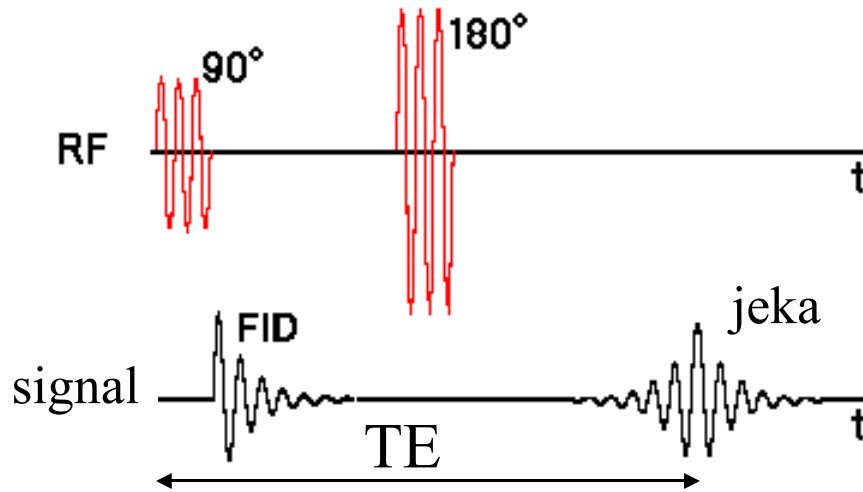
- određujemo  $T_2$  iz

$$M_{xy}(T_2) = \frac{M_0}{e}$$



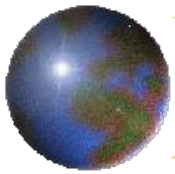
# Slijed pulseva - spinska jeka

- za određivanje  $T_2$  uobičajen je slijed spinske jeka



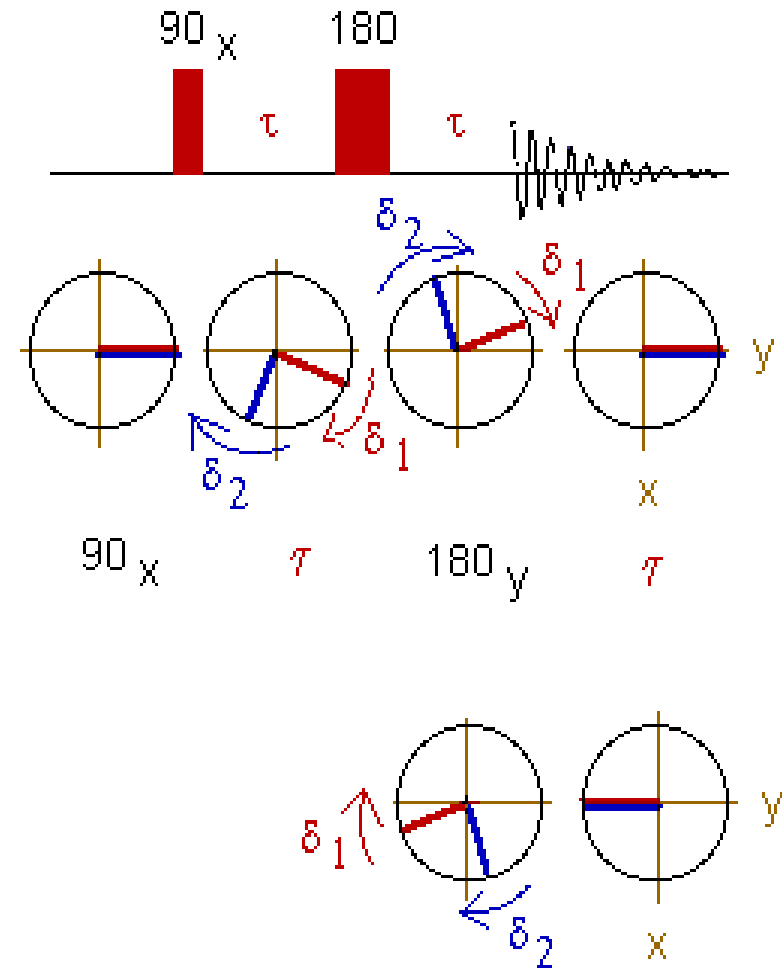
$$S = k\rho \left( 1 - e^{-TR/T_1} \right) e^{-TE/T_2}$$

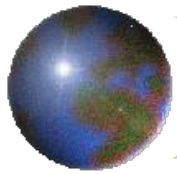
- veličina signala ovisi o vremenima između pulseva (TE) i o vremenu ponavljanja (TR)



# Kako nastaje spinska jeka

- 90° puls inducira transverzalnu magnetizaciju
- prestankom pulsa ona isčezava jer momenti gube fazu zbog malo različitih  $\omega$  - FID
- nakon vremena  $\tau$  180° puls oko osi Y uzrokuje da su momenti opet u fazi nakon vremena  $2\tau$
- to je signal jeke



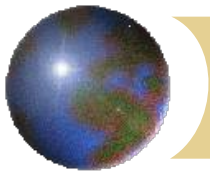


# Blochove rovnice

$$\frac{dM_{x'}}{dt} = (\omega_0 - \omega)M_{y'} - \frac{M_{x'}}{T_2}$$

$$\frac{dM_{y'}}{dt} = -(\omega_0 - \omega)M_{x'} + 2\pi\gamma B_1 M_z - \frac{M_{y'}}{T_2}$$

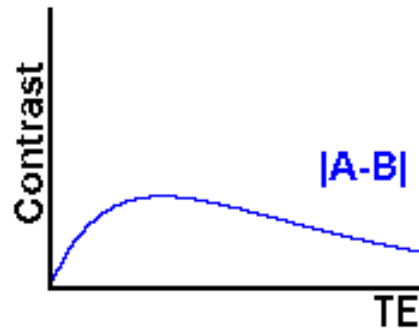
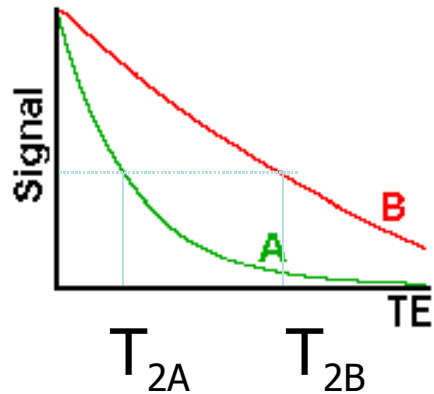
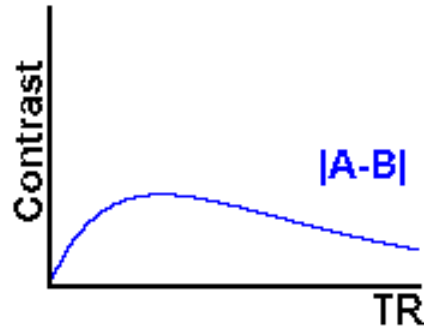
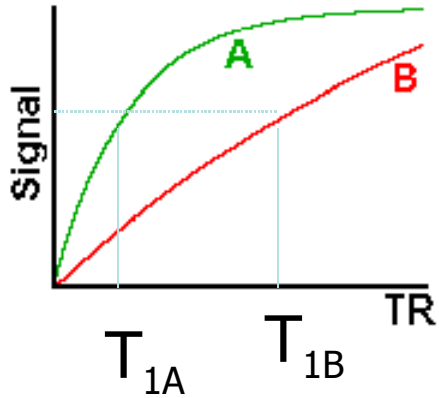
$$\frac{dM_z}{dt} = -2\pi\gamma B_1 M_{y'} - \frac{(M_z - M_{z_0})}{T_1}$$



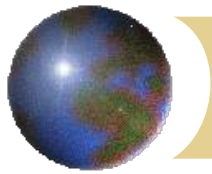
# Odnos vremena $T_1$ i $T_2$

- ❑ u čistoj vodi  $T_1 \approx T_2 \sim 3 \text{ s}$
- ❑ tumorsko tkivo ima više vode -  $T_1$  duže nego za zdravo tkivo
- ❑ u čvrstim tvarima  $T_1 \sim \text{min, h}$  ;  $T_2 \sim 10^{-6} \text{ s}$
- ❑ razlike u vremenima relaksacije za različita tkiva pogodne za dobivanje kontrasta na MRI slici
- ❑ snimamo primjenom kombinacije pulseva
- ❑ nužno ih je višestruko ponavljati, jer su signali mali
- ❑ podešavanjem uvjeta snimanja dobiva se veliki anatomske kontrast iako su gustoće tkiva slične

# Kontrast u MRI



- ❑ biološki parametri su vremena relaksacije
- ❑  $T_1$  i  $T_2$  su osnovni parametri za građenje kontrasta
- ❑ podešavaju se vremena između pulseva  $\pi$  i  $\pi/2$
- ❑ za snimanje se odabere vrijeme koje osigurava najveću razliku u mjerenom signalu iz tkiva s različitim vremenima relaksacije
- ❑ poboljšanje kontrasta podešavanjem vremena između slijeda pulseva



# $T_1$ izvor kontrasta

- ❑ razlike u  $T_1$  izvor kontrasta: niz  $\pi - \tau - \pi/2$
- ❑  $\pi$  puls zakreće magnetizaciju u -Z
- ❑ nakon vremena  $\tau$ ,  $M_z$  će biti veća u tkivu s kraćim  $T_1$

$$M_{zk} > M_{zd}$$

- ❑  $\pi/2$  puls zakreće tu komponentu magnetizacije u XY ravninu:

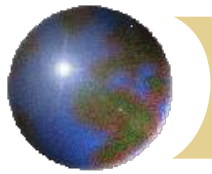
$$M_{xyk} > M_{xyd}$$

- ❑ u prijemnoj zavojnici mjerimo signal (S):

$$S(M_{xyk}) > S(M_{xyd})$$

$\tau$  odaberemo tako da bude  $M_{xyk} - M_{xyd} = \max$





## $T_2$ izvor kontrasta

- razlike u  $T_2$  izvor kontrasta: niz  $\pi/2 - \tau - \pi$ 
  - pojava spinske jeke (Hahn 1950)
- $\pi/2$  puls zakreće magnetizaciju u XY ravninu
- nakon vremena  $\tau$ ,  $M_{xy}$  će biti veća u tkivu s dužim  $T_2$

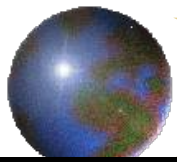
$$M_{xyd} > M_{xyk}$$

- $\pi$  puls uzrokuje smanjenje razlike u fazi precesije
- nakon vremena  $\tau$  pojavljuje se signal **spinske jeke** -  $S_j$  koji ovisi o  $\tau$
- u prijemnoj zavojnici registramo signal:

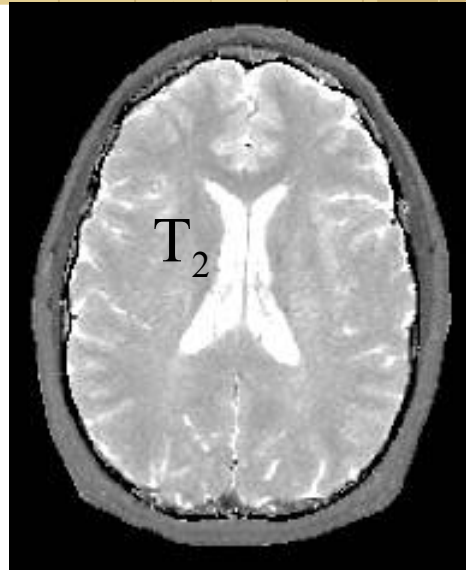
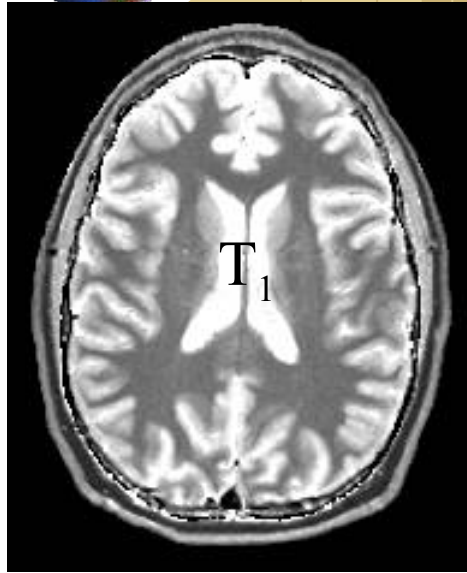
$$S_j \sim e^{-k\tau}$$

$$S_j(M_{xyd}) > S_j(M_{xyk})$$

- $\tau$  odaberemo tako da bude  $M_{xyd} - M_{xyk} = \max$



# Kontrast



**tkivo**

**$T_1$  /s**

**$T_2$  /ms**

**gustoća vodika**

siva tvar

1,09 – 2,15

61 - 109

85 - 125

bijela tvar

0,76 – 1,08

61 - 100

70 - 90

CSF

0,8 - 20

110 - 2000

70 - 230

mast

0,2 – 0,75

53 - 94

50 - 100

mišići

0,95 – 1,82

20 - 67

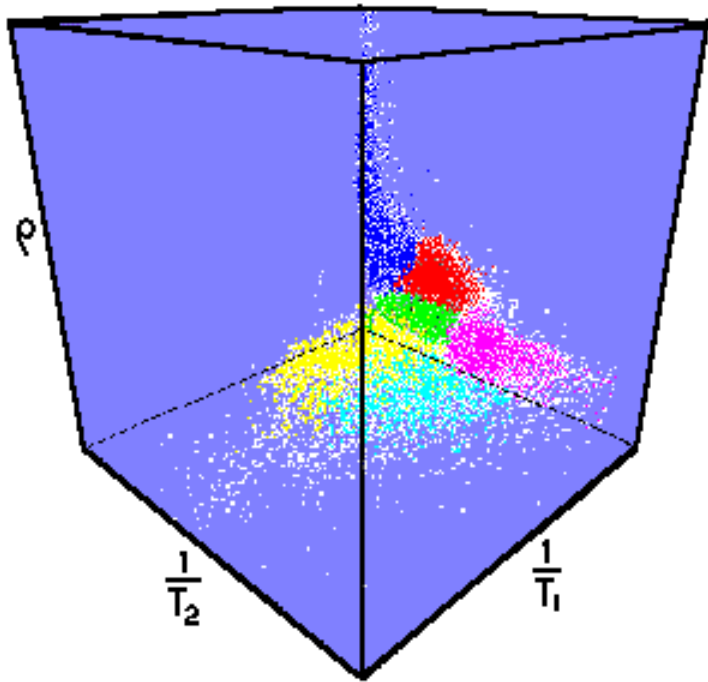
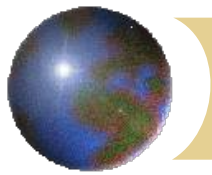
45 - 90

koža

0,5 – 2,2

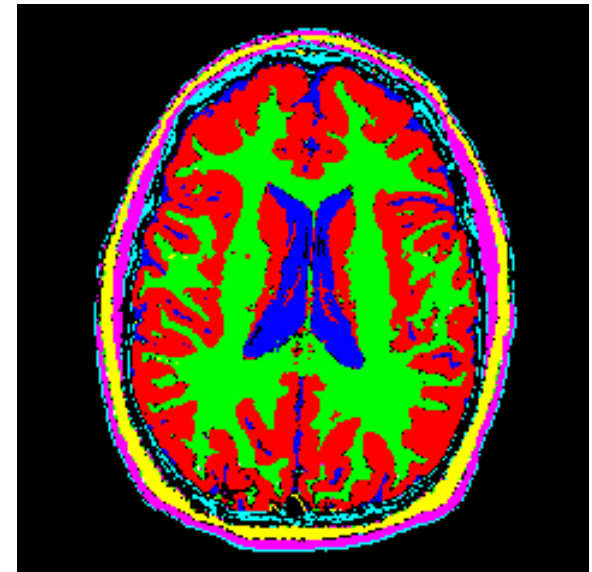
50 - 165

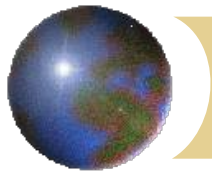
5 - 44



- siva tvar
- bijela tvar
- CSF
- mast
- mišići
- koža

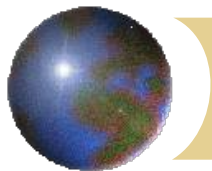
- siva tvar
- bijela tvar
- CSF
- mast
- mišići
- koža





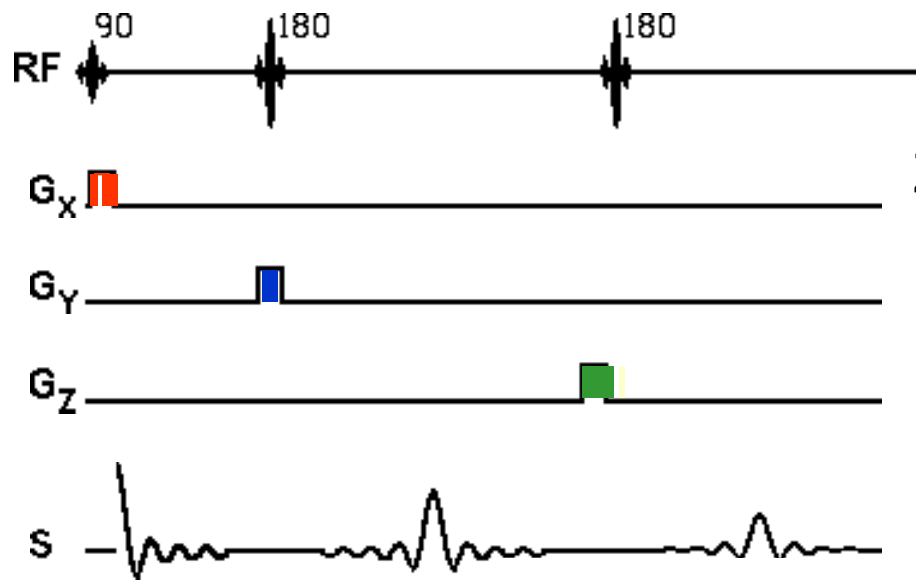
# MR spektroskopija (MRS)

- ❑ u medicini rabimo jezgre s magnetskim momentom koje su u karakterističnim molekulama tkiva
- ❑ spektralne linije potječu od izabrane jezgre u različitim molekulama ili atomskim skupinama
- ❑ spektri kemijskog pomaka dobivaju se iz pobude malih volumena u tkivu
- ❑ promjene u položaju ili intenzitetu linija ili pojava novih linija ukazuju na metaboličke ili strukturalne promjene

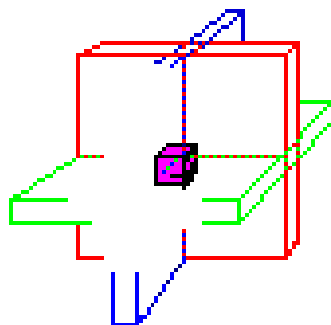
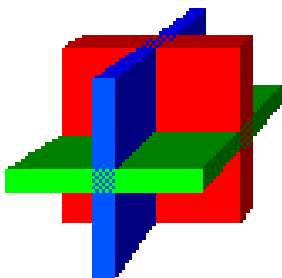


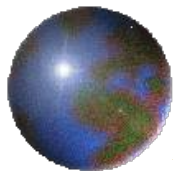
# Spektroskopija *in vivo*

point resolved spectroscopy - PRESS

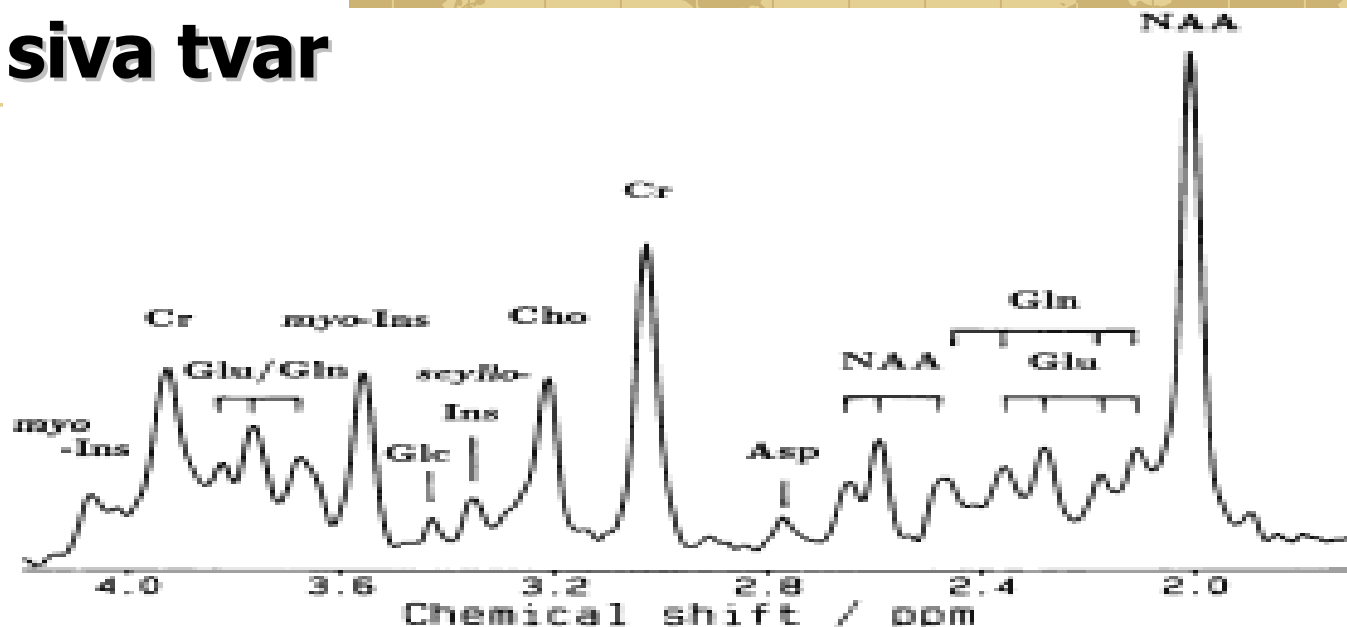


- dobro odabranim gradientima magnetskog polja  $B_0$  u X-, Y- i Z-smjeru snima se signal samo iz malog volumena
- spektar je prikaz kemijskih pomaka
- može se odrediti koncentracija pojedine aminokiseline
- određuje se struktura malog volumena
- u kombinaciji s oslikavanjem fMRI

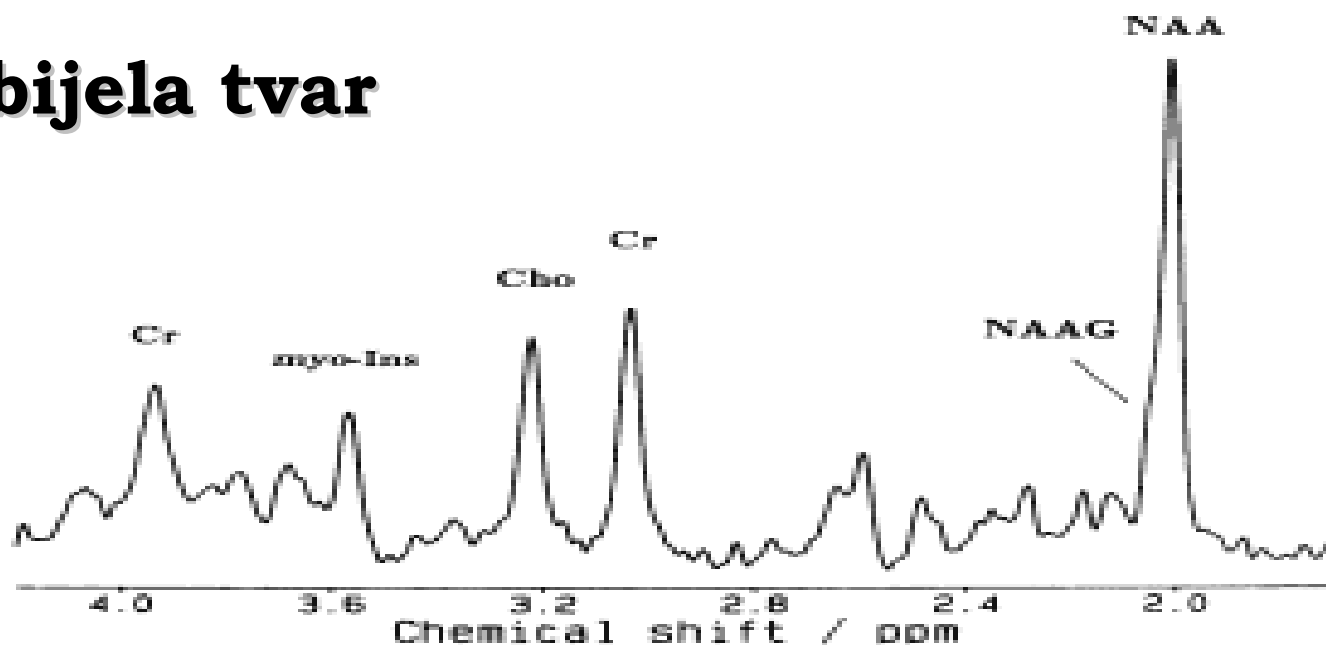


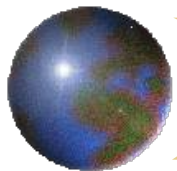


# siva tvar

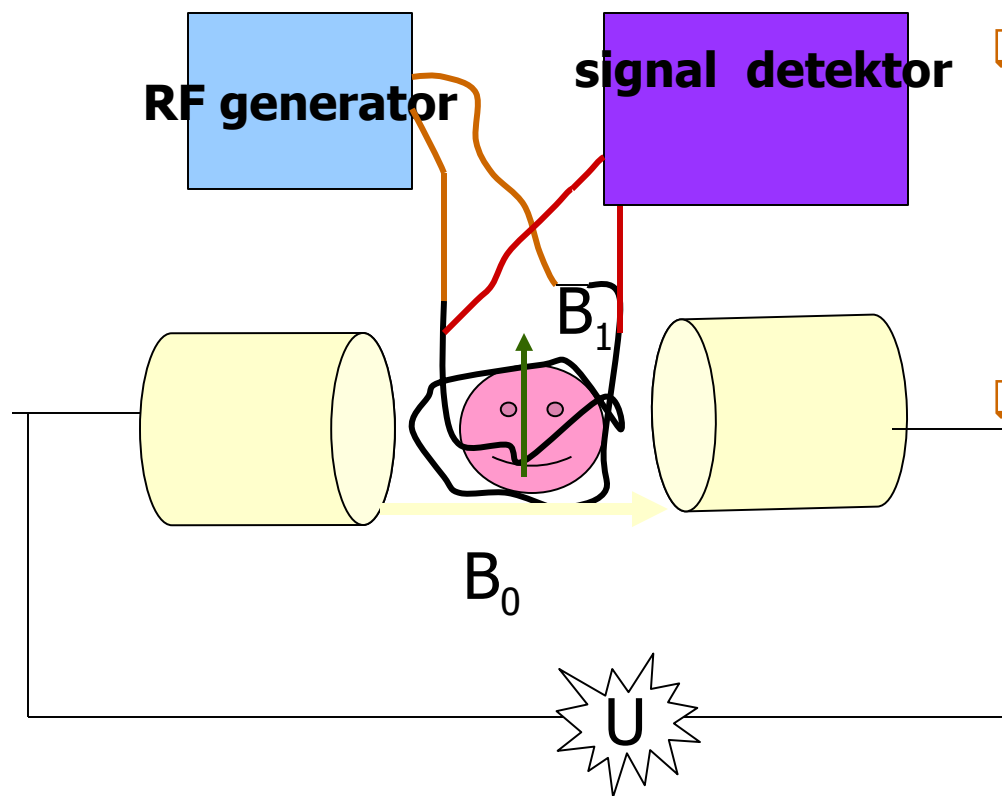


# bijela tvar





# Uređaj za magnetsku rezonanciju



- stalno homogeno magnetsko polje - elektromagnet ili supravodljivi magnet
- istraživački uređaji - do 14 T; medicinski uređaji - do 2,3 T
- radiofrekventno magnetsko polje frekvencije 600 MHz, odnosno 64 MHz - inducira se u zavojnici, jakost  $B_1$  je  $10^{-4} B_0$
- prijamna zavojnica + sustav za registraciju