

Přednášky z lékařské biofyziky

Magnetická rezonanční tomografie (MRI)



Magnetická rezonanční tomografie

- Význačným rysem této zobrazovací metody je využití neionizujícího záření a z toho plynoucí absence genetického rizika.
- Magnetická rezonanční tomografie (*Magnetic resonance imaging* - MRI), zkráceně magnetická rezonance, je jednou z nejpokročilejších zobrazovacích metod, která poskytuje jak morfologické, tak i fyziologické (funkční) informace. První MR tomogram (příčný řez hrudníkem) získal R. Damadian v r. 1977.

Zdroje obrázků a různé připomínky najdete v komentářích jednotlivých snímků! Komentáře si zobrazíte např. jako „poznámky“ po změně zobrazení v PowerPointu. V textu je řada odkazů na velmi zajímavé dokumenty. Vzhledem k významu a složitosti této metody doporučujeme velmi pečlivé prostudování.

Spin

- Spin je specifickou vlastností subatomárních částic (elektronů, protonů atd.), stejně jako elektrický náboj a hmotnost. Spin vykazuje jisté zvláštní vlastnosti!
- Elektrony, protony a neutrony mají stejný spin, tj. $\frac{1}{2}$.
- Páry částic téhož druhu (např. 2 elektrony nebo 2 protony nebo 2 neutrony) mohou mít celkový spin rovný nule.
- Částice, která mají nenulový spin, působí jako malé magnety (říkáme, že mají „magnetický moment“) a jejich energie je ovlivněna, když je umístíme do magnetického pole.

Celkový jaderný spin (I)

- U MRI se zajímáme o **spin JADER**
- V medicíně jsou za účelem získání anatomických nebo fyziologických informací využívány magnetické vlastnosti především lehkých jader nuklidů, jako je **vodík** ^1H , fosfor ^{31}P , uhlík ^{13}C , fluor ^{19}F nebo sodík ^{23}Na .

Teoretický základ MRI

- Magnetický moment jádra μ je VEKTOROVÁ veličina úměrná spinovému momentu hybnosti S , který závisí na celkovém jaderném spinu I . ($\mu = \gamma S$, γ je **gyromagnetický poměr**)
- Za nepřítomnosti vnějšího magnetického pole mají magnetické momenty jader všechny možné (náhodné) směry, což vede k tomu, že:
Vektorový součet magnetických momentů jader v jednotkovém objemu látky, tj. **vektor magnetizace**, je roven **nule**.
Energie všech jader je stejná.

Jádra vodíku v homogenním magnetickém poli o indukci B

➤ Jestliže jádra *vodíku* umístíme do homogenního silného magnetického pole o magnetické indukci B:

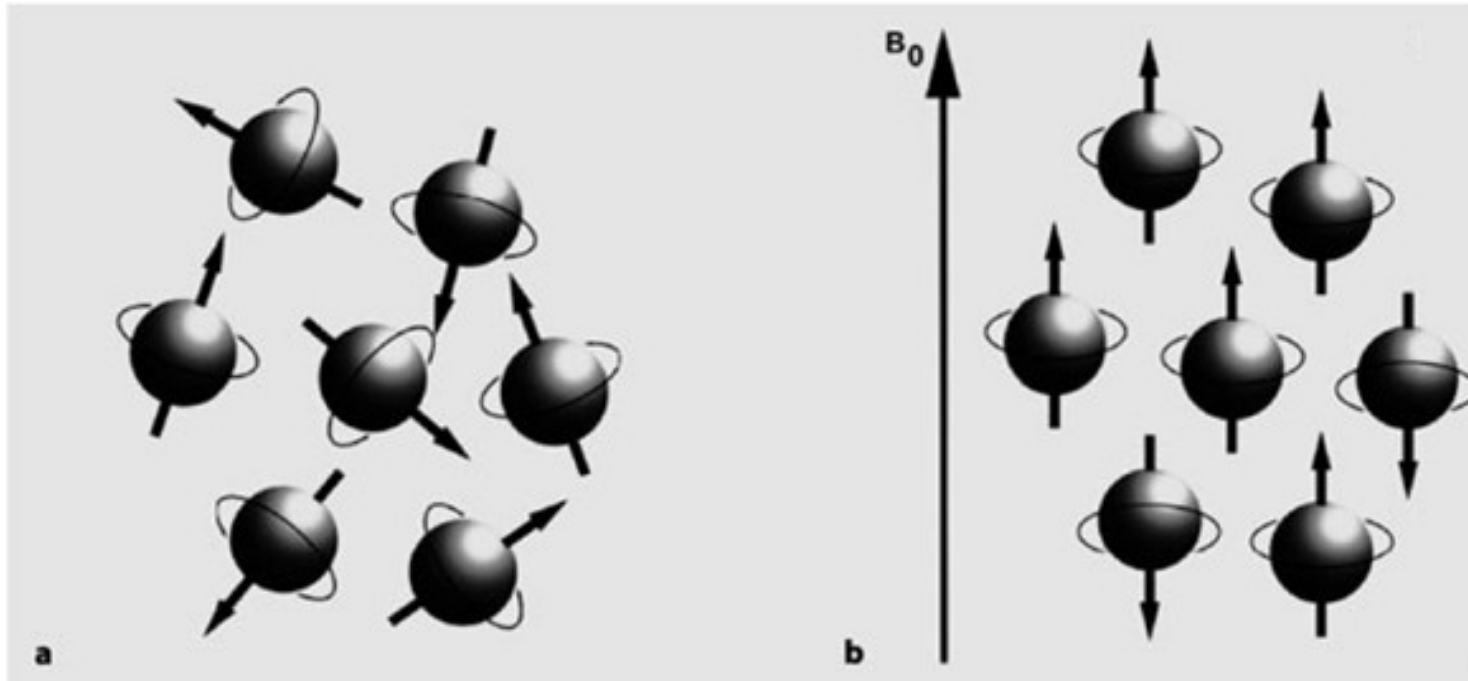
Jejich individuální magnetické momenty začnou vykonávat precesní pohyb s osou rovnoběžnou se směrem vektoru B a zorientují se buď ve směru stejném jako vektor B nebo opačném. Proto získávají pouze dvě možné hodnoty energie (vyšší a nižší energetický stav – při orientaci magnetického momentu ve směru nebo proti směru vnějšího pole). Úhlová frekvence tohoto precesního pohybu se nazývá **Larmorova úhlová frekvence** ω , přičemž platí:

$$\omega = \gamma B$$

γ = gyromagnetický poměr

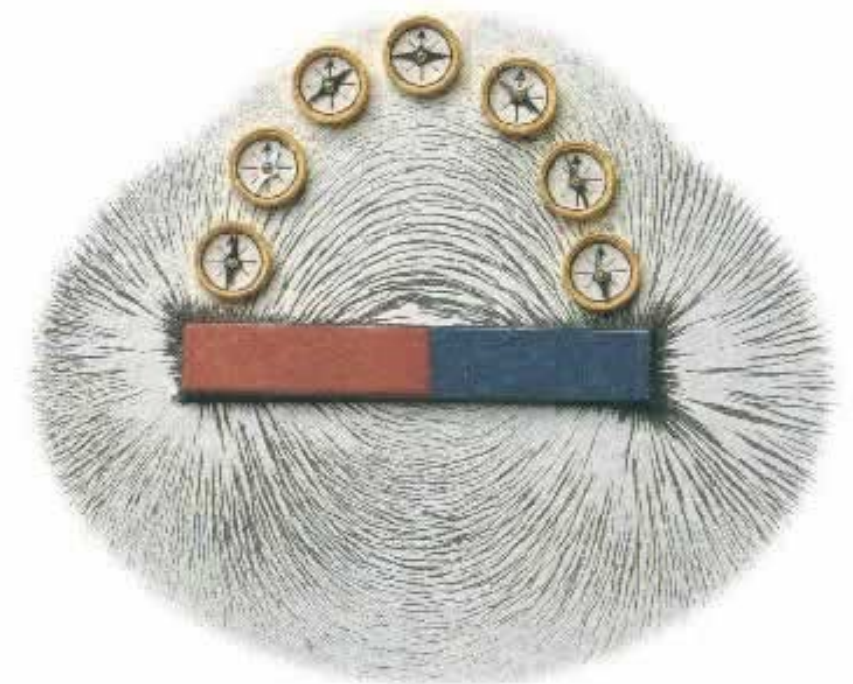
Hodnota této frekvence je u vodíku 42,6 MHz pro B = 1T

Jádra vodíku v homogenním magnetickém poli o indukci B

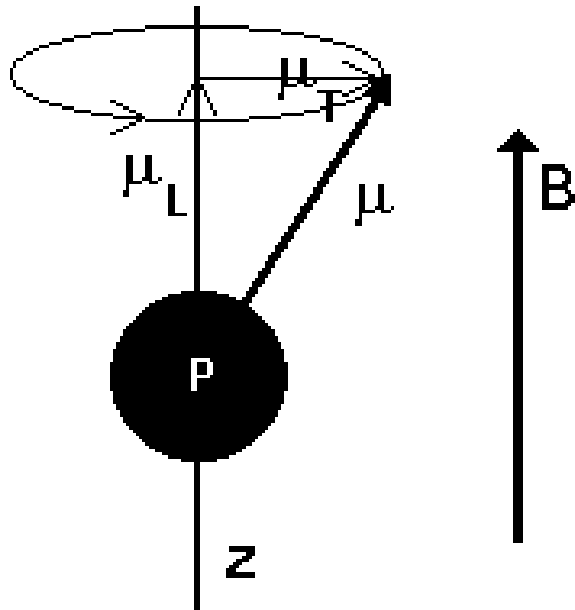


Orientace mag. momentů
v silném vnějším
statickém mag. poli

- Střelka kompasu
- Magnetický moment jádra



Vektor magnetizace



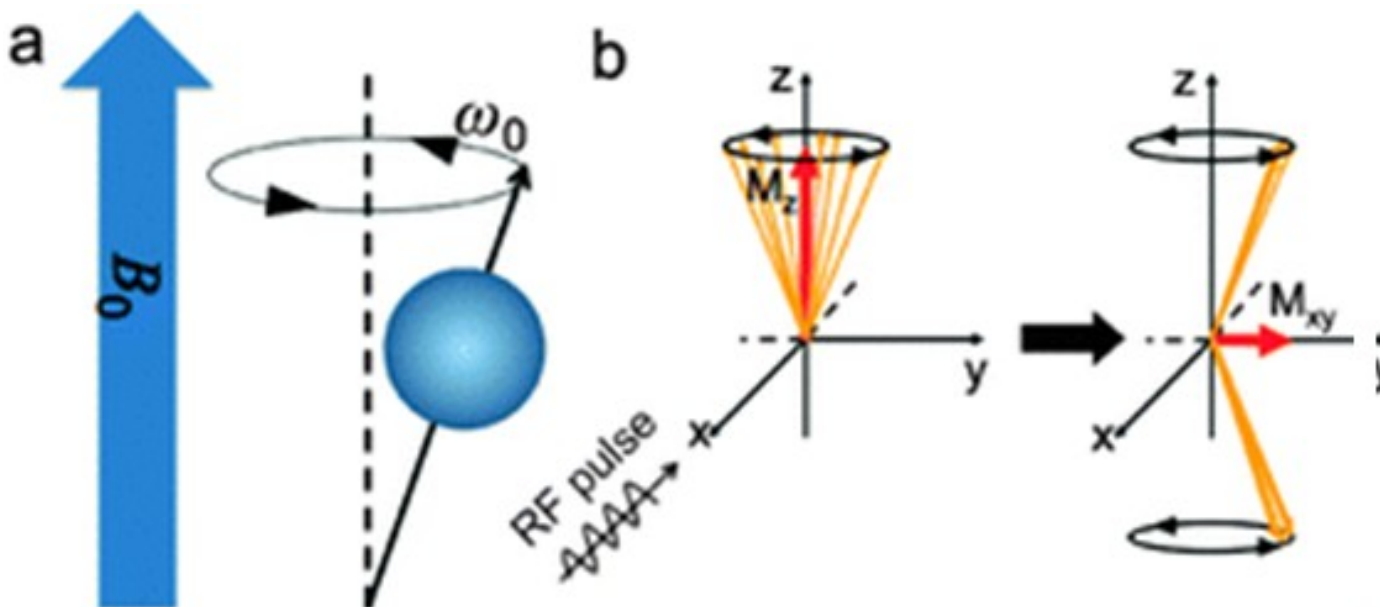
P - jádro vodíku (proton), B - vektor magnetické indukce, z - osa z, ztotožněná s osou precese (paralelní s B), μ - magnetický moment jádra, μ_L - průmět magnetického momentu jádra do směru osy z (vektorový součet těchto průmětů v objemové jednotce látky je vektorem **longitudinální magnetizace**), μ_T - průmět magnetického momentu jádra do roviny xy (vektorový součet těchto průmětů v objemové jednotce je vektorem **transverzální magnetizace**).

Měření hustoty vodíkových jader ve tkáních

Aby se (v těle pacienta) dostala jádra z nižšího energetického stavu do stavu s vyšší energií, musí být vystavena radiofrekvenčním impulsům s frekvencí *rovnou* frekvenci Larmorově, k čemuž slouží vysílací cívky (proto hovoříme u MRI o rezonanci, frekvence RF impulsů rezonuje s frekvencí precesního pohybu jader). Současně dochází k fázovému sladění precesního pohybu jader.

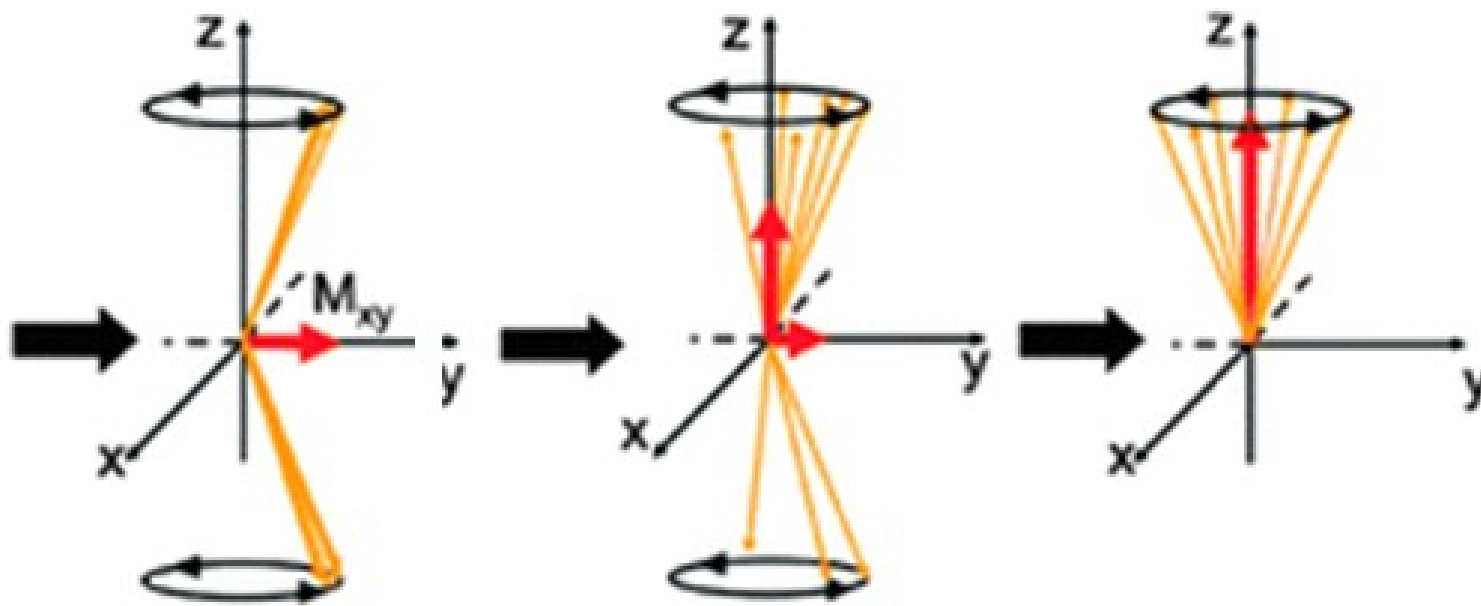
Vektor longitudinální magnetizace se orientuje do opačného směru.

Vektor transverzální magnetizace se objevuje a začíná rotovat v rovině xy.



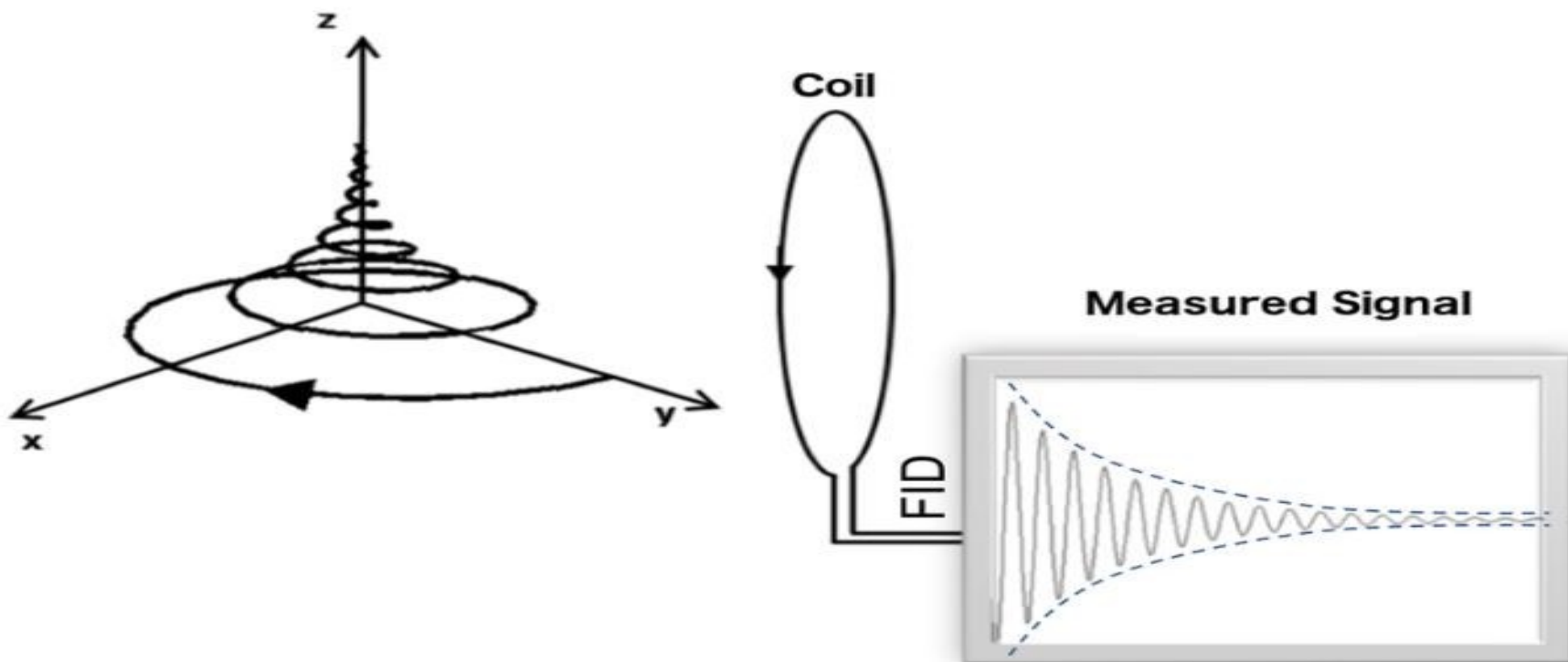
Měření hustoty vodíkových jader ve tkáních

Proces návratu do původního stavu si můžeme představit i jako postupné sklápění a překlápění vektoru magnetizace a rozfázování precesního pohybu jader z důvodu vzájemné interakce jaderných spinů mezi sebou.



Měření hustoty vodíkových jader ve tkáních

Návrat do základního stavu (relaxace) je provázen emisí kvant elektromagnetické energie, která jsou detekována pomocí přijímacích cívek – vzniká **signál nukleární magnetické rezonance (NMR)**. Tento signál je relativně silný, protože precesní pohyb jader je fázově sladěn. Amplituda rezonančního signálu (impulsu) je úměrná hustotě vodíkových jader ve tkáni (často se říká „spinové hustotě“).



Relaxační časy

Rozlišujeme dva **relaxační časy**:

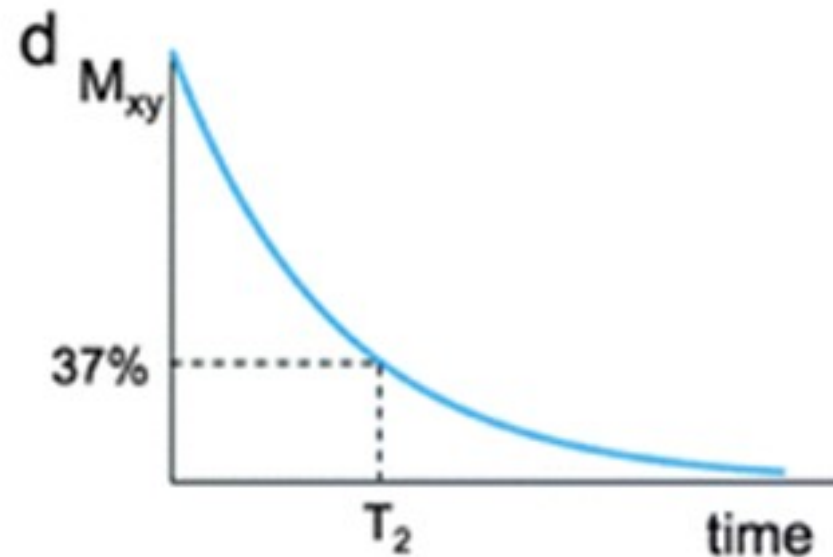
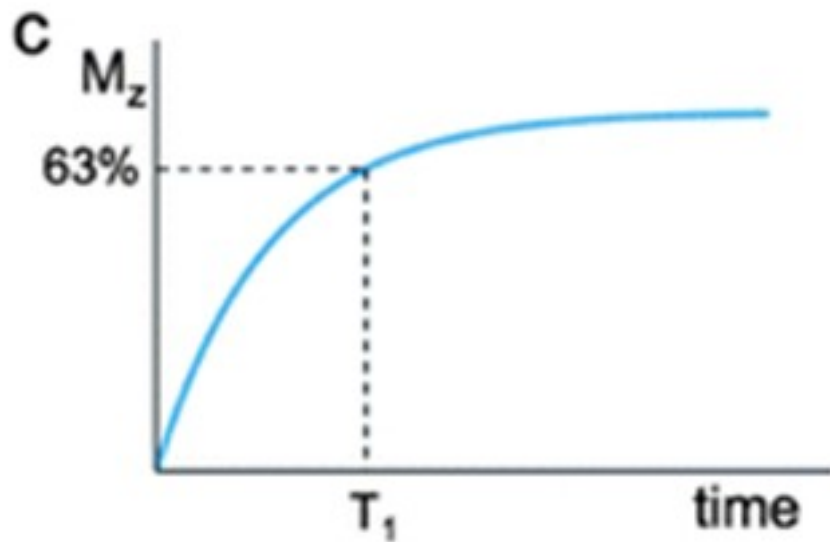
T_1 - longitudinální (spin-mřížkový) – čas potřebný pro návrat „populace“ jader do základního stavu. V biologickém prostředí: 150 - 2000 ms.

Vektor longitudinální magnetizace se během něj vrací do původního směru.

T_2 - transverzální (spin-spinový) - 2x - 10x kratší než T_1 . Po jeho uplynutí dochází rozfázování precesního pohybu jednotlivých jader.

Vektor transverzální magnetizace po uplynutí tohoto času mizí.

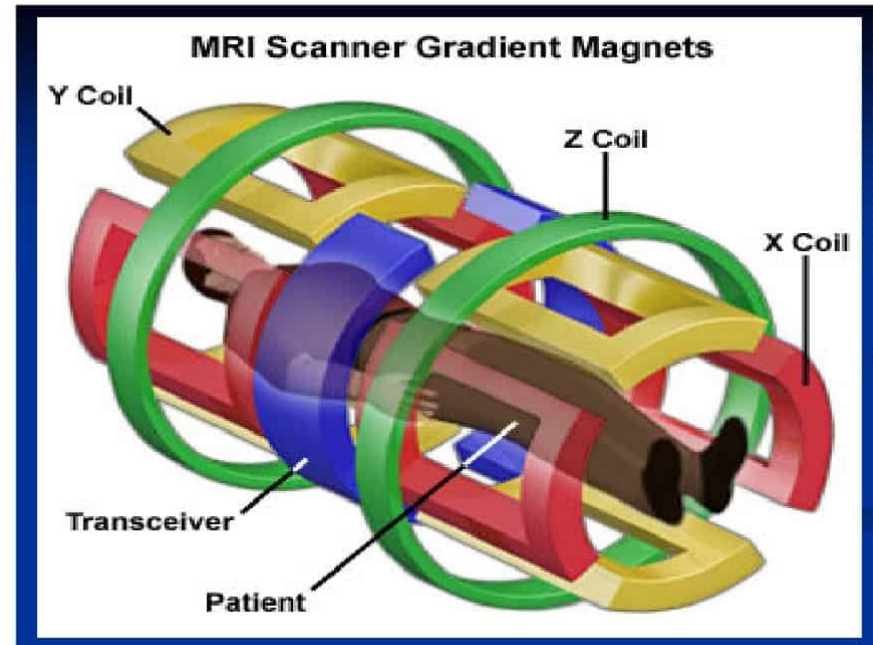
Relaxační časy



Typ látky	T_1 [ms]	T_2 [ms]
tuk	250	60
sval	900	50
krev	1400	100-200
mozek		
šedá hmota	950	100
bílá hmota	600	80
mozkomíšní tekutina	2000	250

Magnetická rezonanční tomografie (*Magnetic resonance imaging - MRI*)

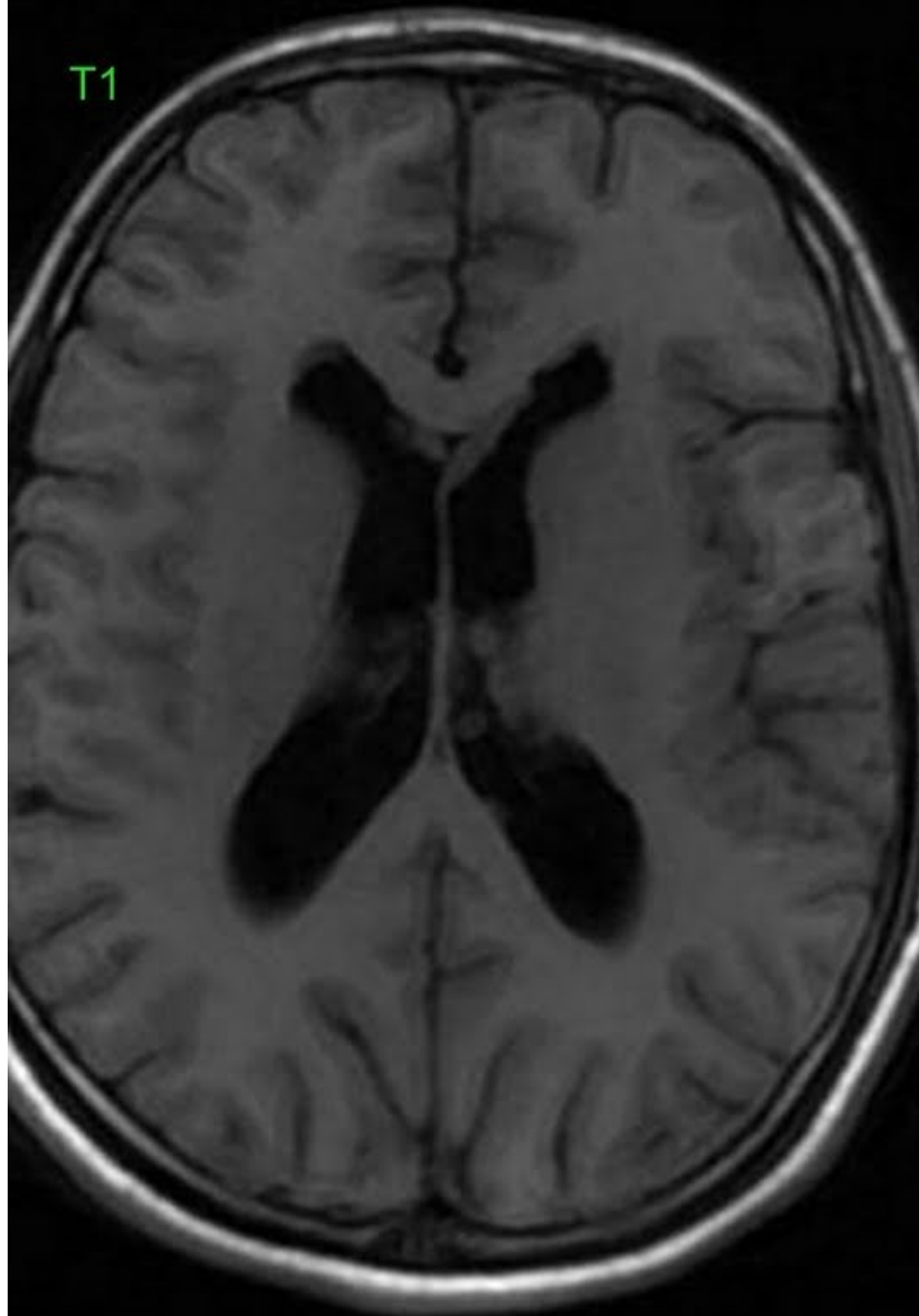
Abychom mohli rozlišit signály z různých částí pacientova těla, používají se **gradientní cívky**, které prostorově mění velikost magnetického pole. Např. gradient B podél osy z nám umožňuje identifikovat signály přicházející z různých plátek (řezů) těla pacienta, které jsou kolmé k ose z . Podobně lze aplikovat gradienty v jiných směrech.



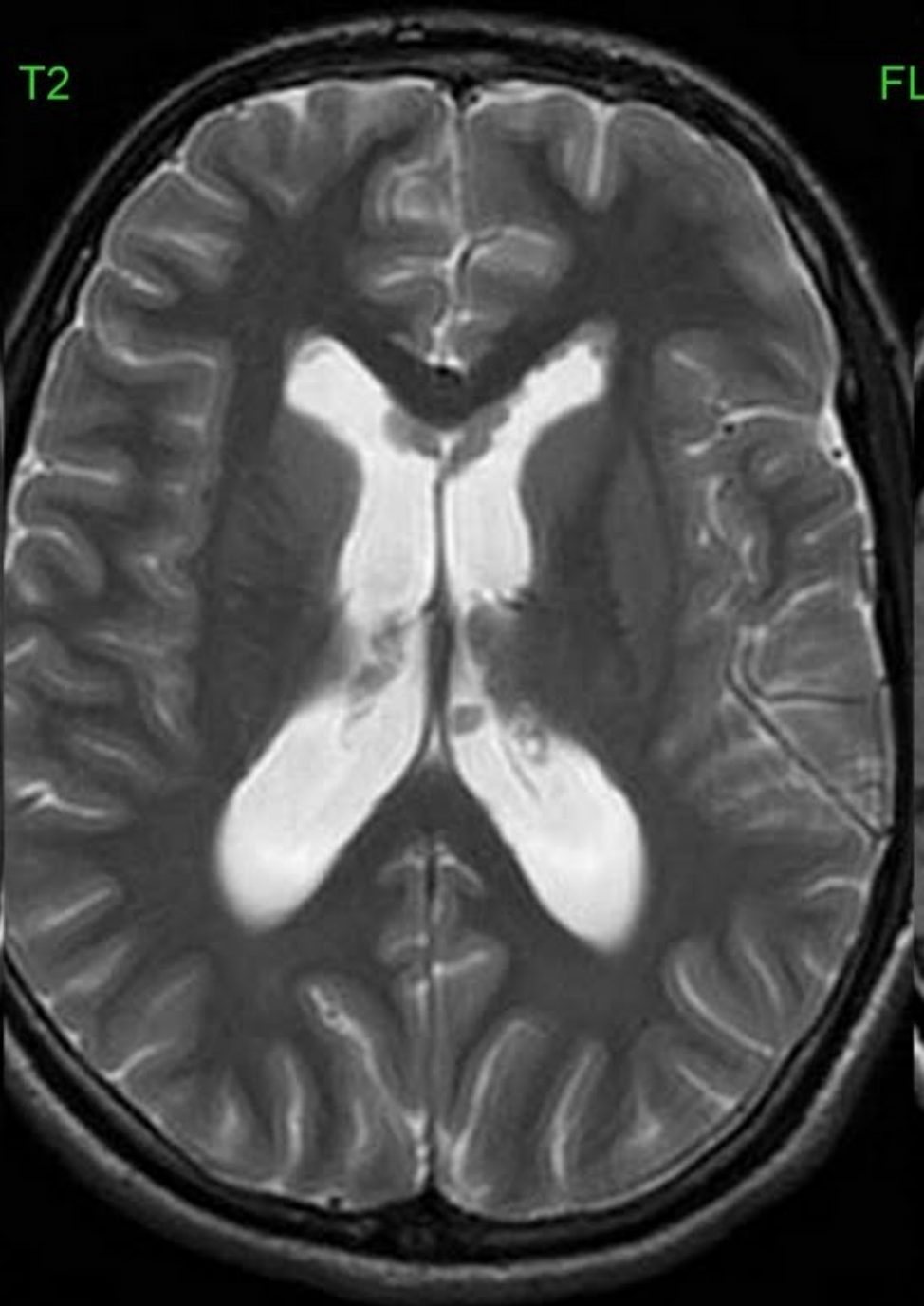
Magnetická rezonanční tomografie (*Magnetic resonance imaging* - MRI)

- Výsledný obraz se získává podobným způsobem zpracování informace jako u CT (konkrétně Fourierovou transformací).
- Můžeme zviditelnit místní rozdíly hustoty vodíkových jader (*proton density* - PD) nebo rozdíly v relaxačních časech (následující slide).

T1



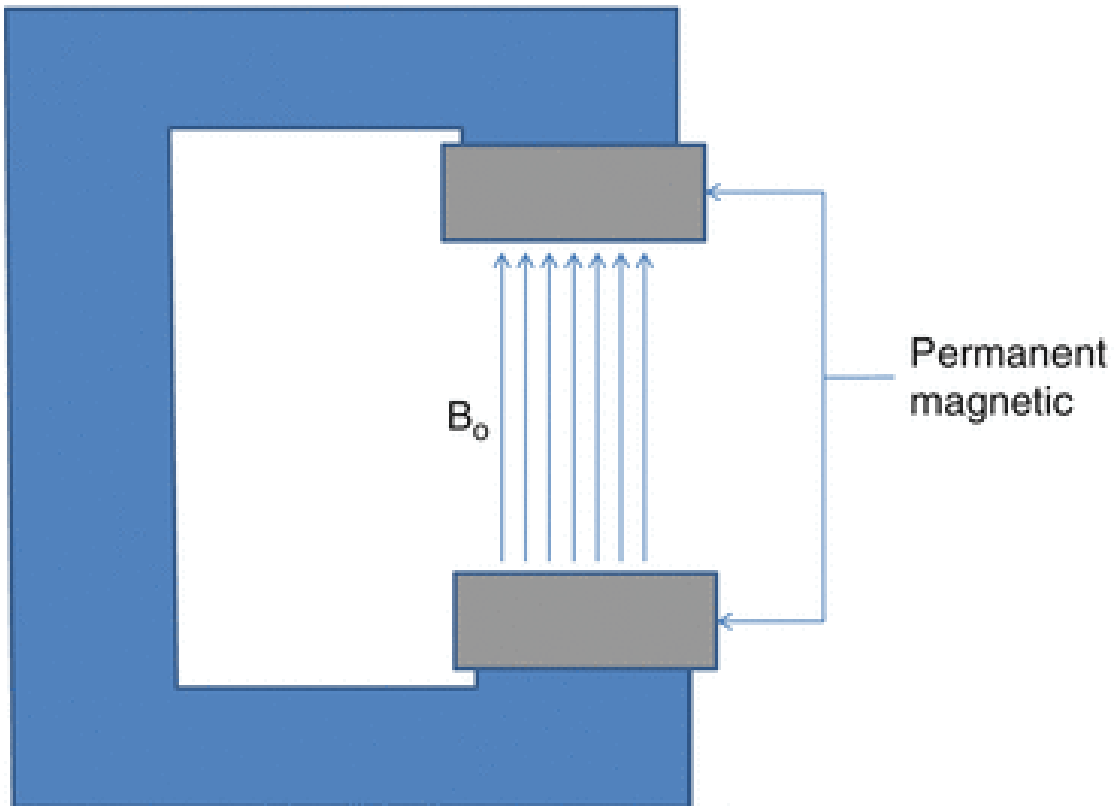
T2



FL

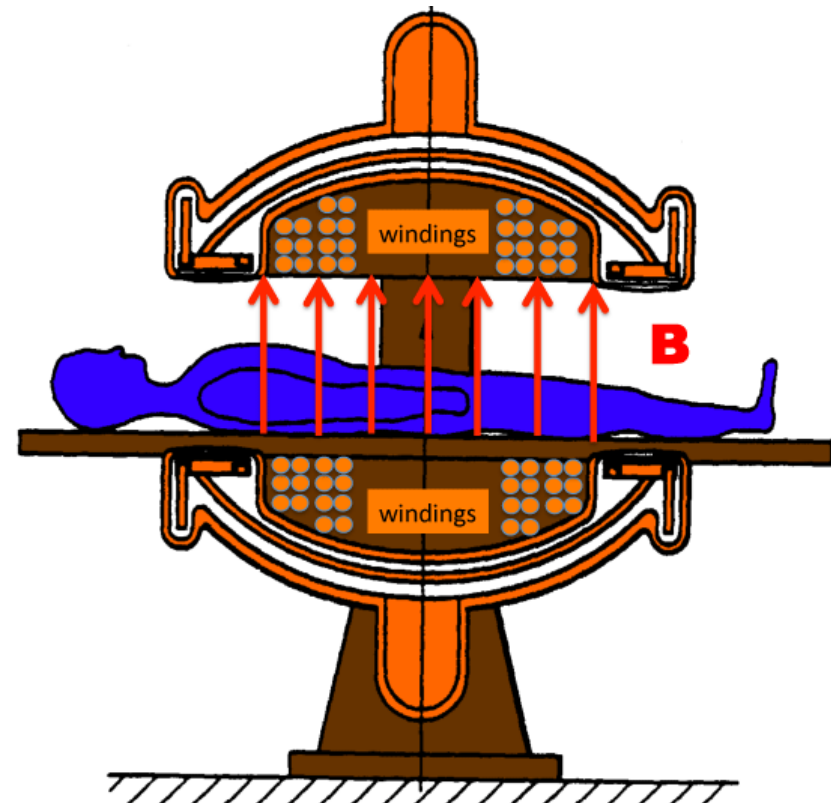
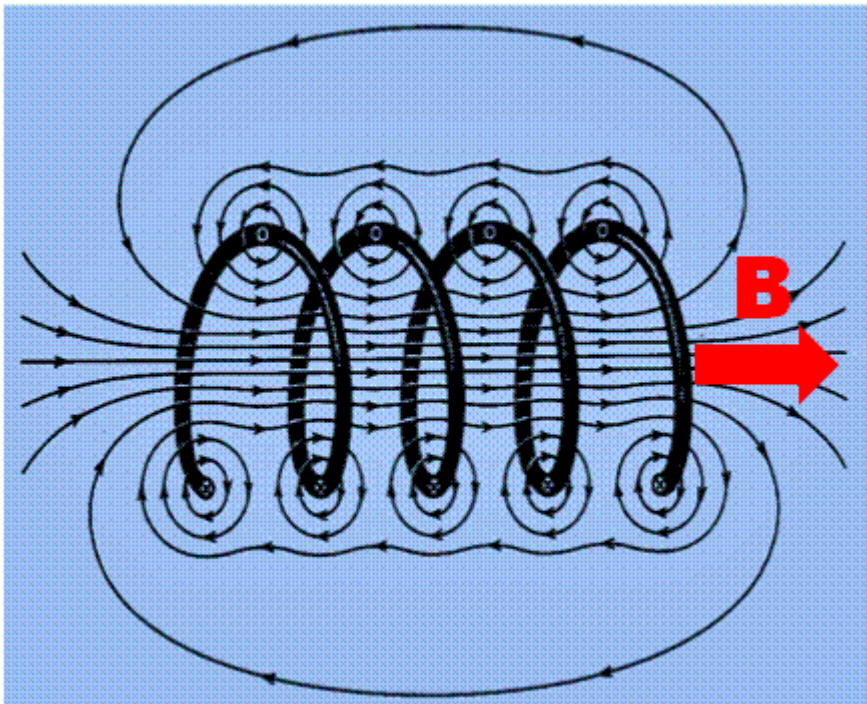
Technické aspekty

- Až do hodnoty $B = 0,4 \text{ T}$ lze použít obřích permanentních (kovových) magnetů (levný provoz, avšak nízké rozlišení kontrastu, nehomogenita pole, velká hmotnost).



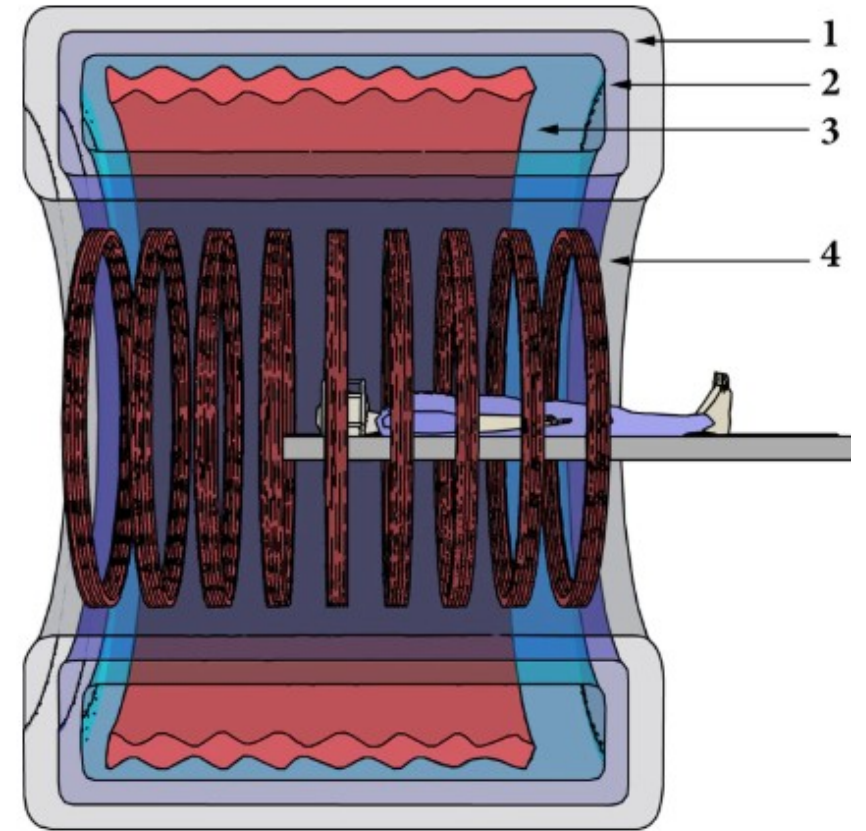
Technické aspekty

- Elektromagnety (persistent) (v provedení solenoidním (tomografickém) nebo dipolárním (otevřený systém)) poskytují silnější pole, avšak vyžadují velké množství elektrické energie = drahý provoz (představte si jako MR cívku zapojenou do elektrické zásuvky).



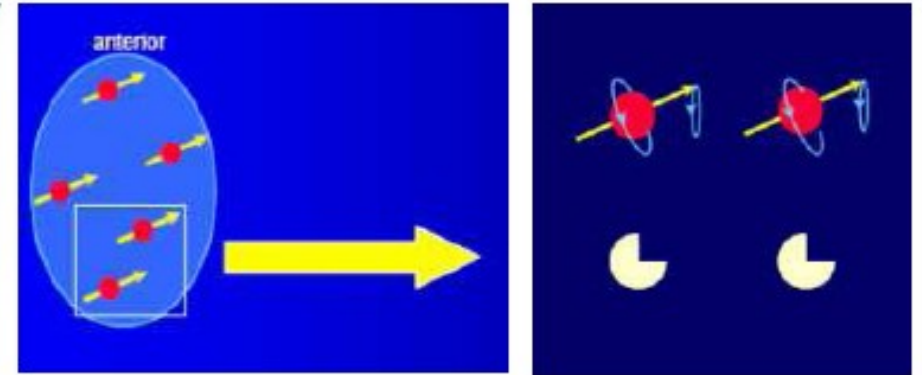
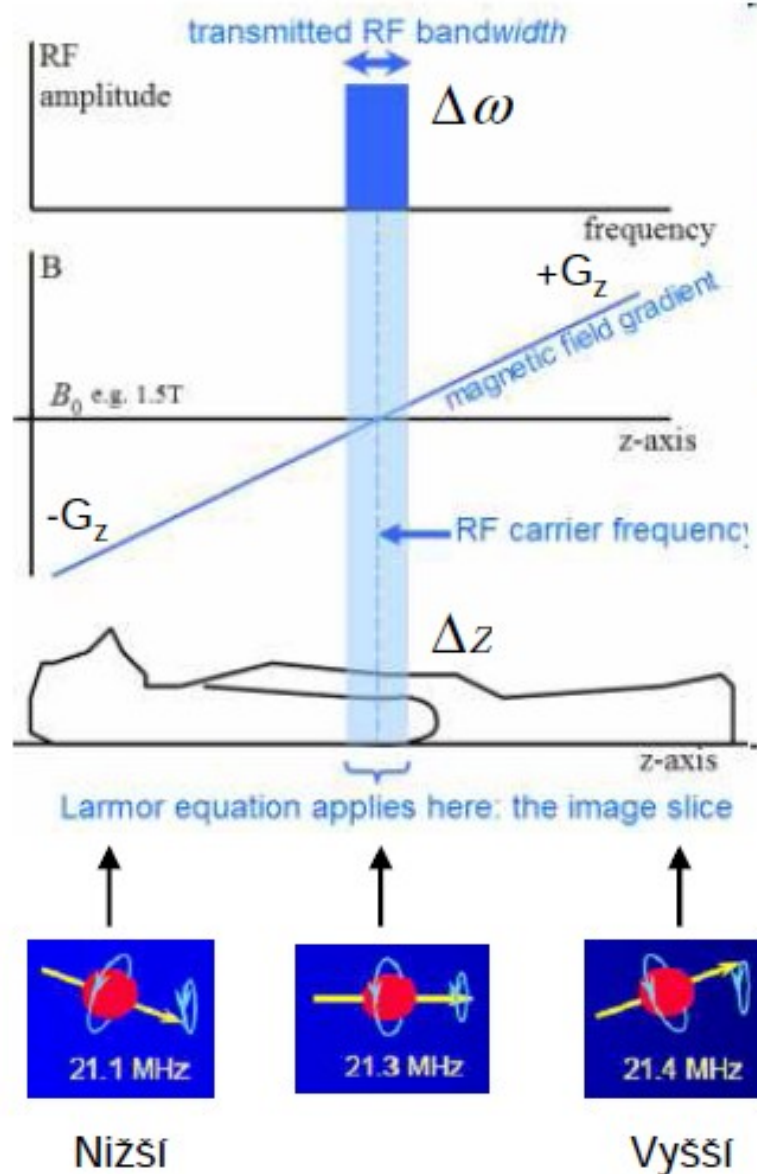
Technické aspekty

Nejlepší rozlišení kontrastu mají magnety se **supravodivým vinutím cívek**. Poskytují dnes magnetické pole až do hodnoty $B = 10 \text{ T}$, avšak musejí být chlazeny kapalným heliem = vysoké pořizovací náklady, ale nižší provozní. V praxi používané hodnoty B se pohybují v rozmezí 1 – 3 T.

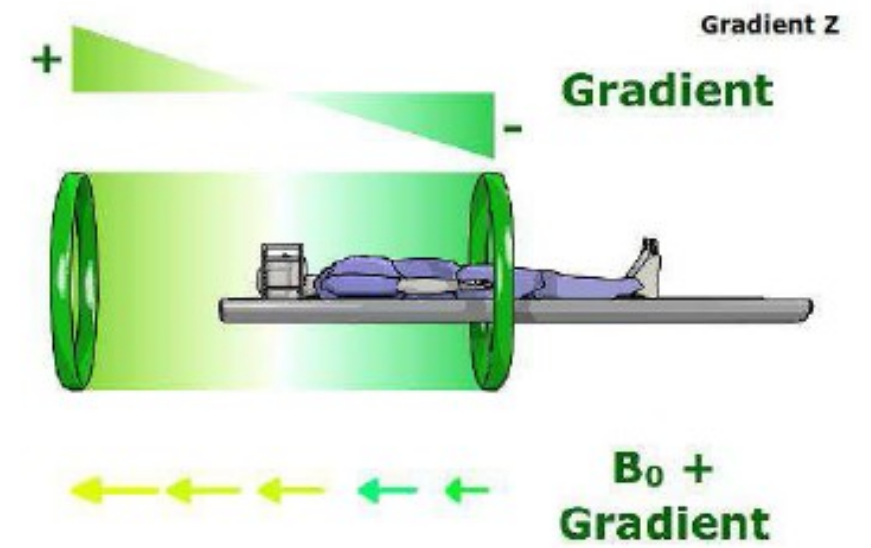


Technické aspekty

➤ **Gradients** magnetického pole (řádově $\text{mT}\cdot\text{m}^{-1}$) se získávají přidavnými cívkami.



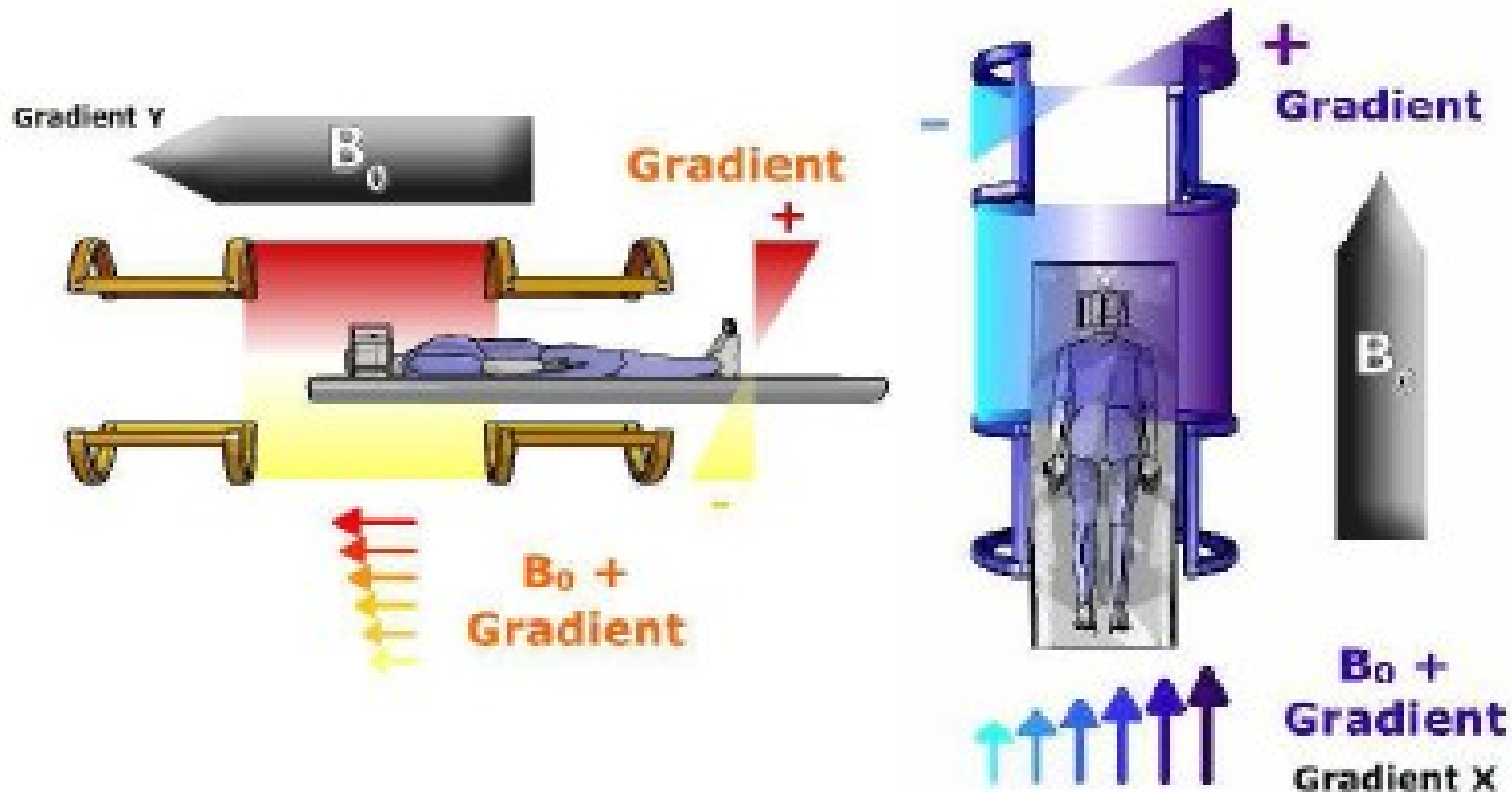
Všechna jádra uvnitř zvolené tomografie precesují se stejnou frekvencí i fází.



$$\Delta\omega = \gamma \cdot G_z \cdot \Delta z$$

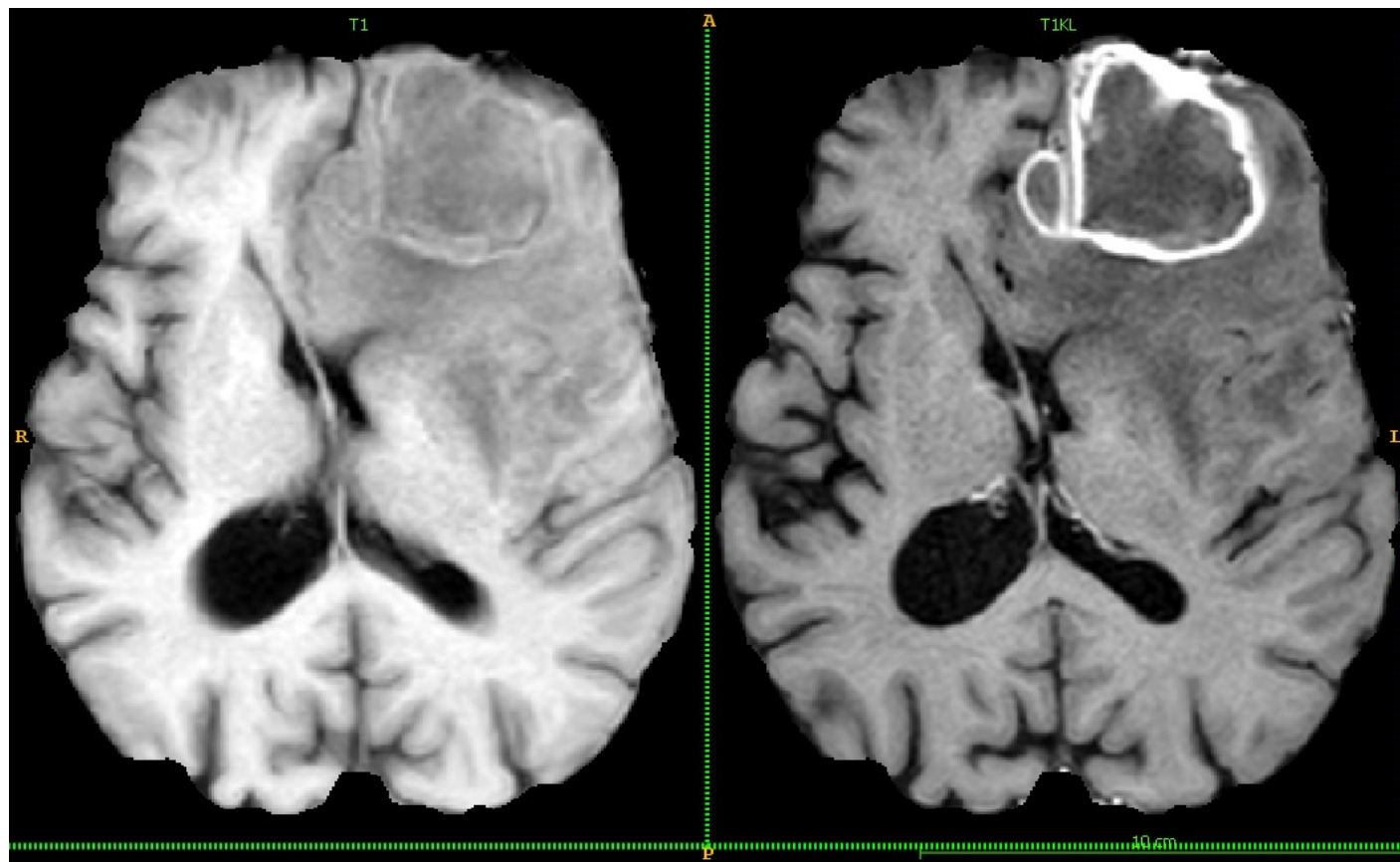
Technické aspekty

➤ **Gradienty** magnetického pole (řádově $\text{mT}\cdot\text{m}^{-1}$) se získávají přídatnými cívkami.



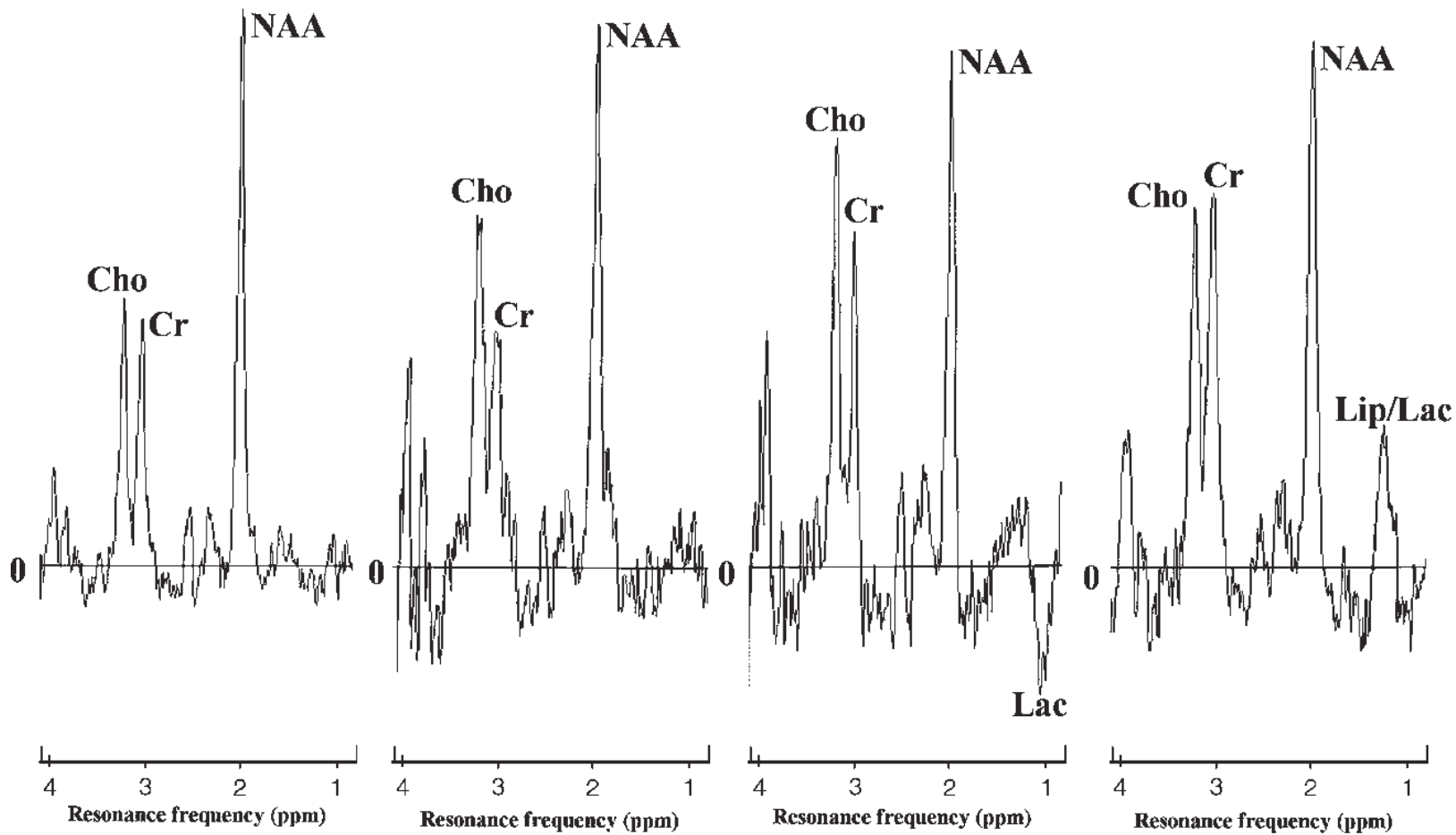
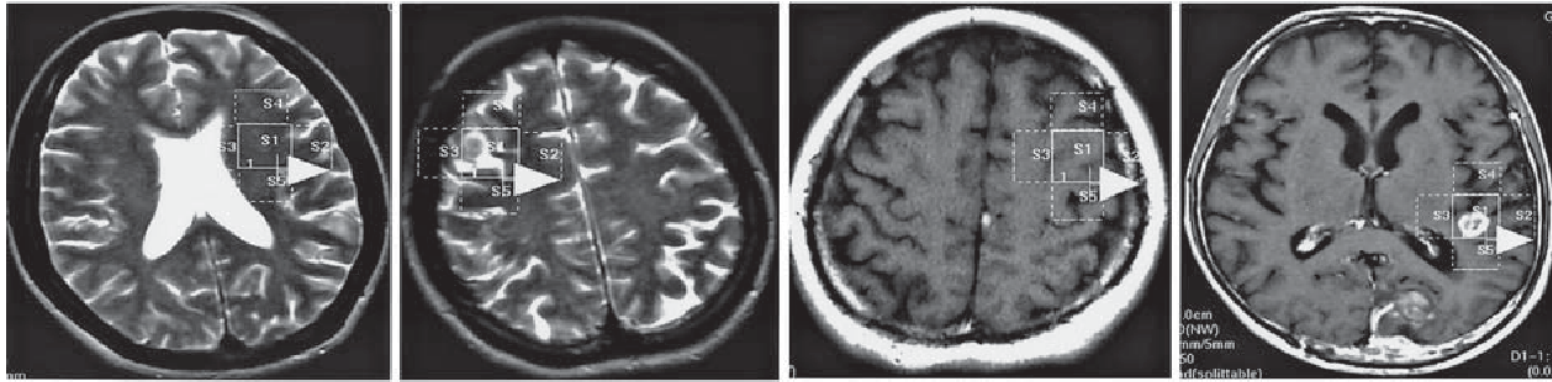
MR a kontrastní látky

Některé paramagnetické atomy mohou zesílit signál. Z tohoto důvodu se používá jako kontrastní prostředek pro MRI např. **gadolinium**. Gadolinium je chemicky vázáno k vhodné látce, např. DTPA - diethylén-triamino-penta-octové kyselině.



MR - spektroskopie

➤ Přesná hodnota Larmorovy frekvence se mírně mění (posunuje) podle polohy vodíku v molekule (tzv. chemický posun). Dobře měřitelné jsou například různé posuny pro vodík ve skupinách =CH- nebo -CH₂-. Toto nám umožňuje identifikovat různé chemické změny *in-vivo* pomocí **NMR – spektroskopie** a pomoci při diferenciaci tumorů (následující snímek). Metoda má mimo oblast medicíny ohromný dopad na strukturní studie v organické chemii.



Normal type

Type I A

Type I B

Type I C

Bezpečnostní aspekty

- Magnet může poškodit jiné [lékařské přístroje](#) nebo [ovlivnit jejich funkci](#). Proto je MRI přísně kontraindikováno u pacientů s nějakým elektronickým zařízením v těle (kardiostimulátory, kochleární implantáty aj. pokud nejsou vysloveně MR kompatibilní)
- Železné předměty jsou silně přitahovány do [portálu přístroje](#) – mohou přístroj poškodit a způsobit zranění. MRI je přísně kontraindikováno u pacientů s jakýmkoliv železnými tělesy v těle (nekompatibilní implantáty, projektily, střepiny granátů aj.)
- MRI se nedoporučuje v prvním trimestru těhotenství.
- Menší problémy mohou způsobovat jakékoliv kovy v těle nebo na povrchu těla (ohřev, svědění, artefakty v obraze). Například: šperky, některé maskary, stará tetování, [zubní výplně](#), korunky a můstky, [implantáty](#) aj.)
- Někteří pacienti trpí úzkostí nebo jsou uvnitř přístroje neklidní, protože vyšetření doprovází značný hluk. Běžná je klaustrofobie.

Důležité upozornění

Magnetické paměti (např. kreditní karty, flash disky) mohou být v blízkosti přístroje zničeny.

Přístroje pro MRI

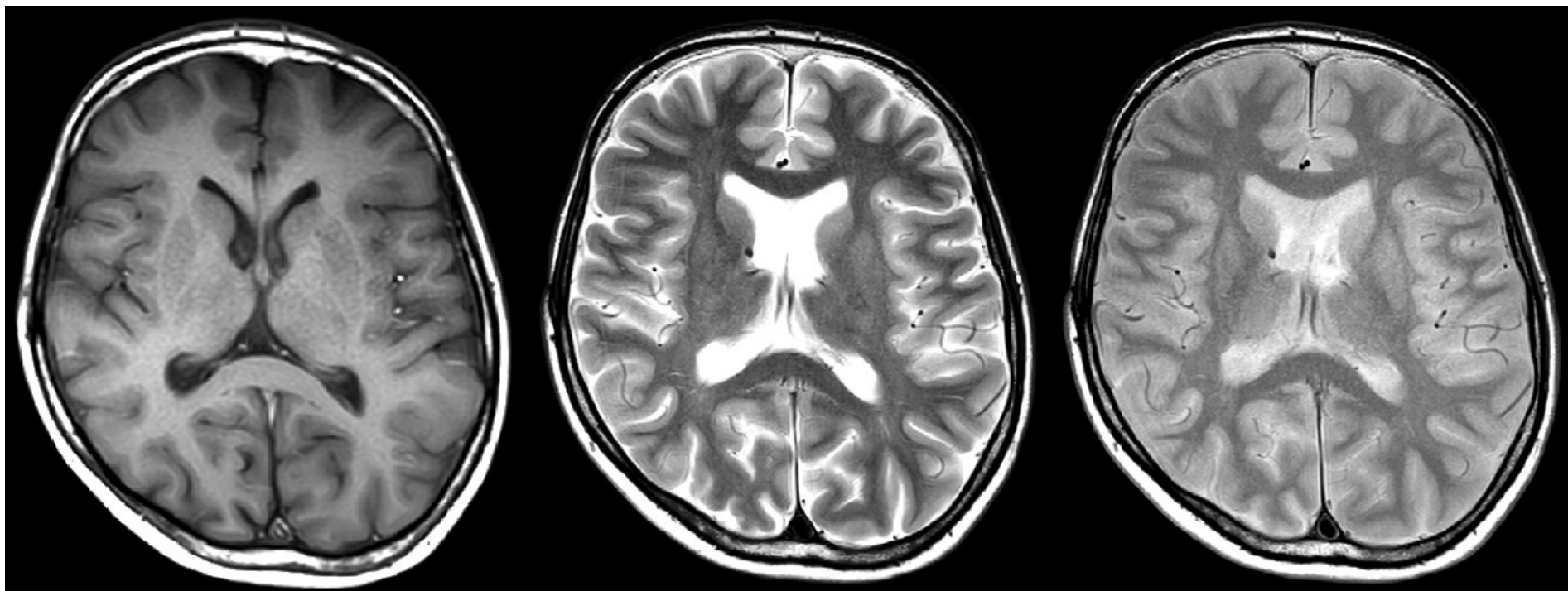


Příčný řez mozkiem

T1

T2

PD



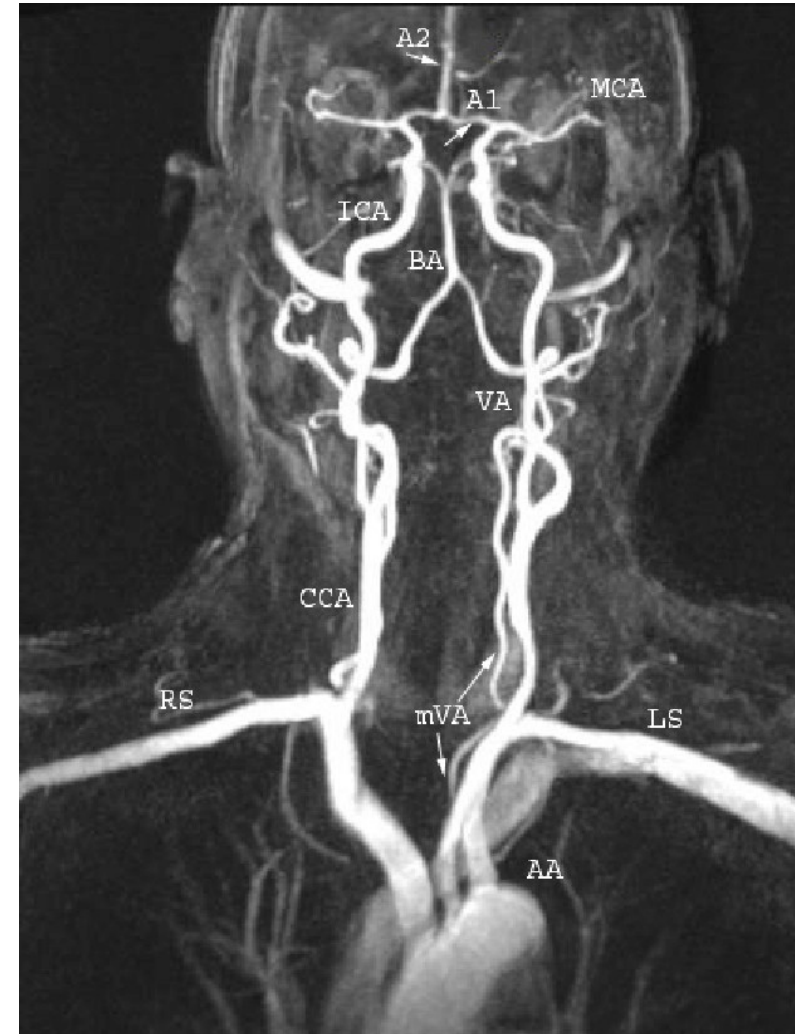
PD = proton density

MR – Angiogram

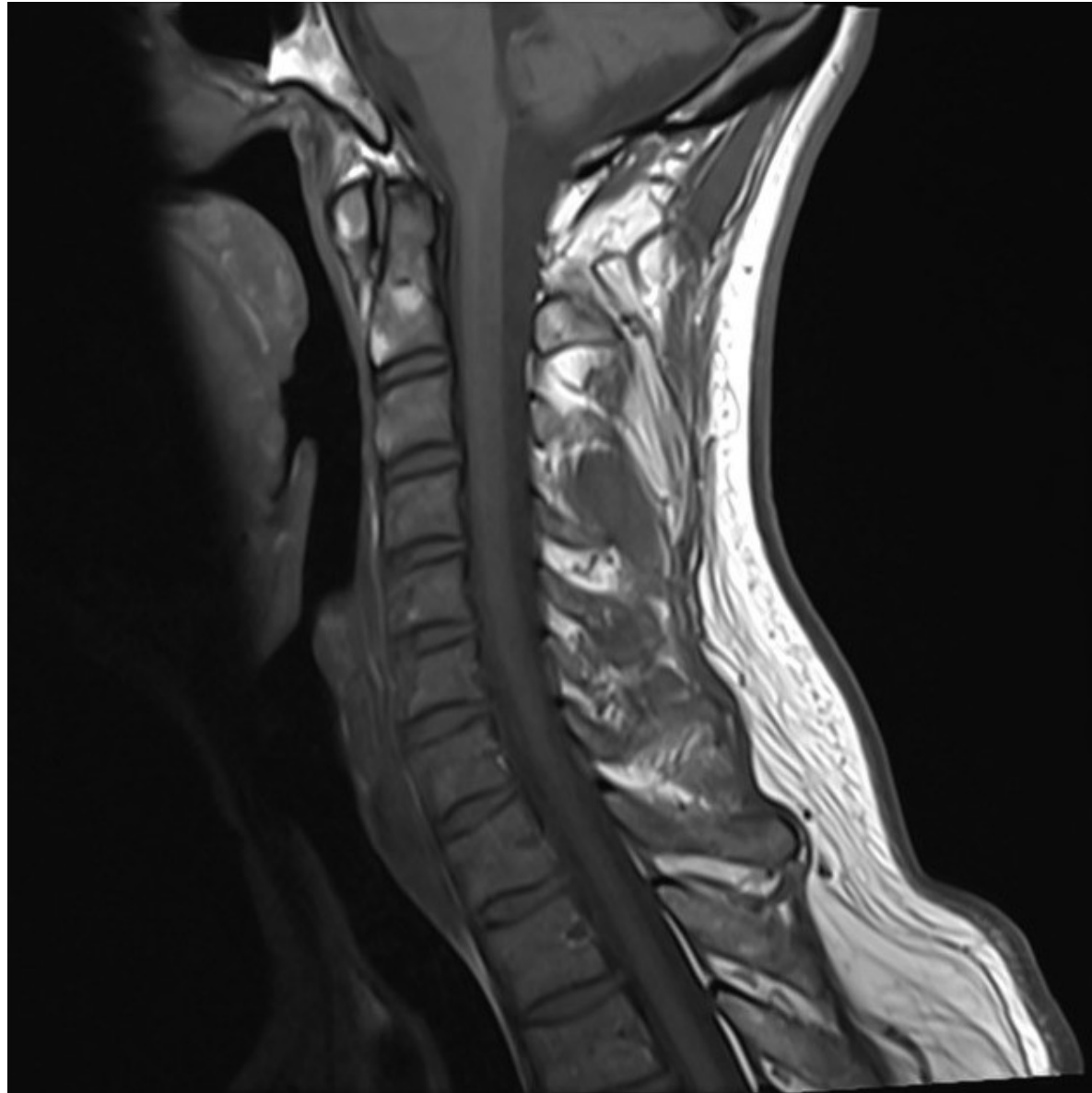
bez kontrastní látky



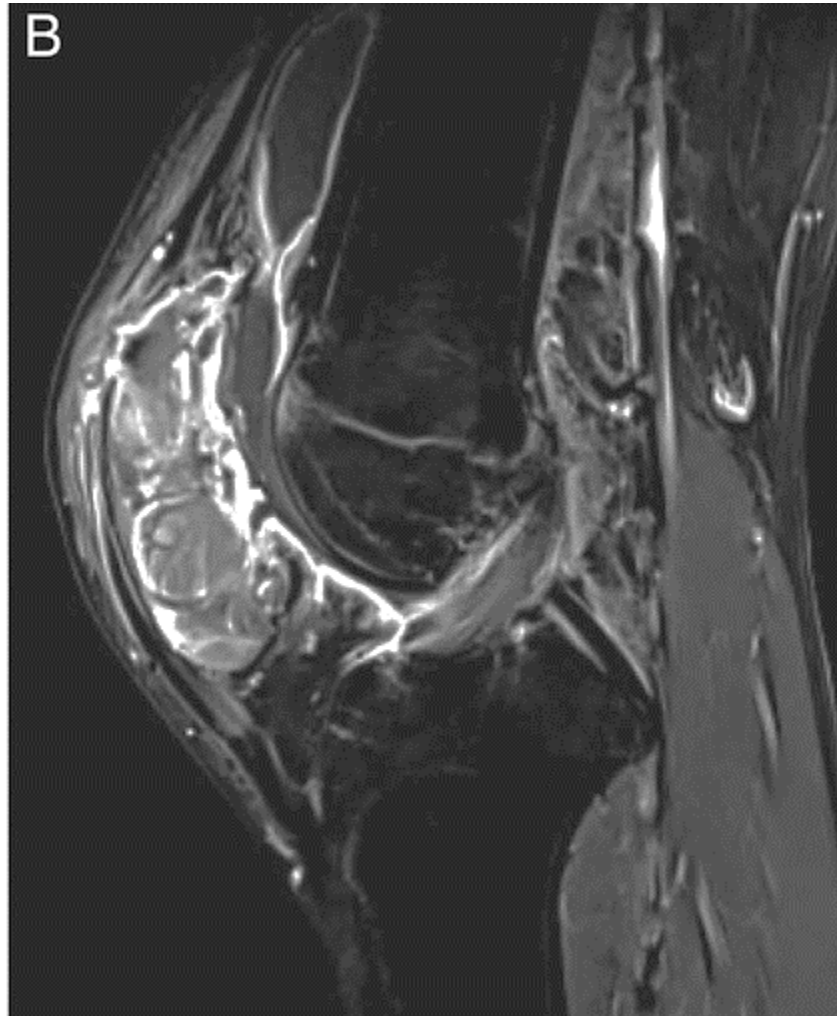
s kontrastní látkou



Sagitální T1 snímek krční páteře

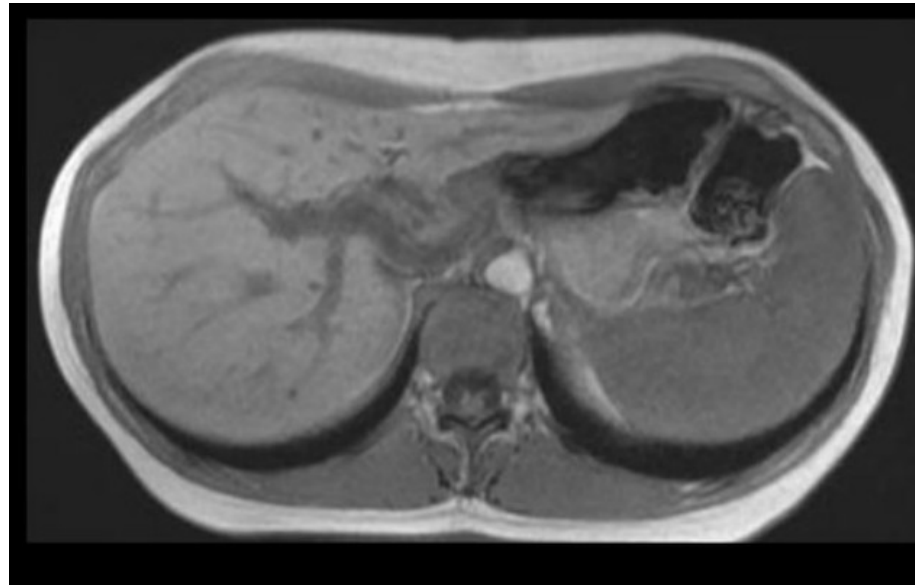


Sagitální rovina kolenem

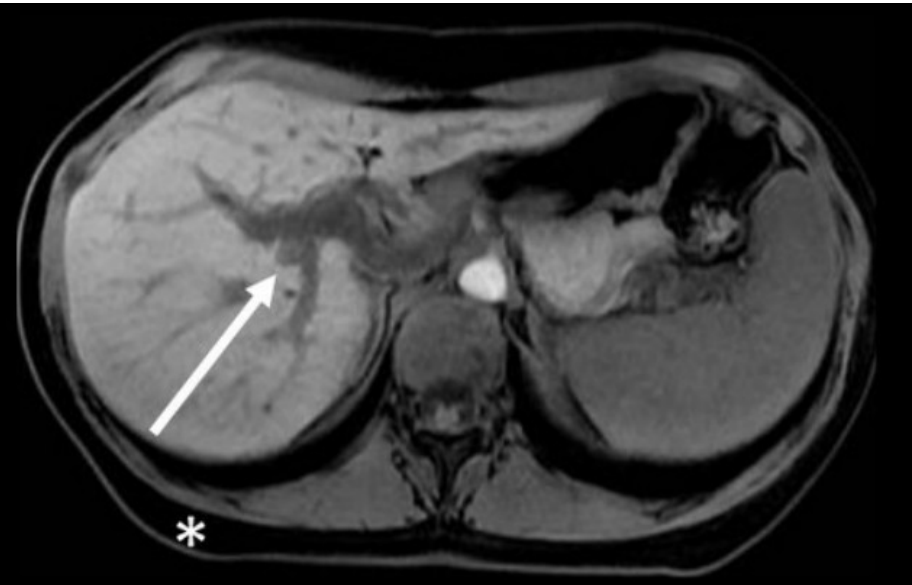


Příčná rovina játry

T1



T1 s potlačením tuku



Série anglických lekcí k hlubšímu pochopení MRI

1. přednáška

<https://www.youtube.com/watch?v=Khn-azofAD4>

Autoři:

**Vojtěch Mornstein, Marek Dostál,
Carmel J. Caruana, Ivo Hrazdira,**

Poslední revize: duben 2024