

Rádióspektroszkópiák, NMR, ESR, MRI

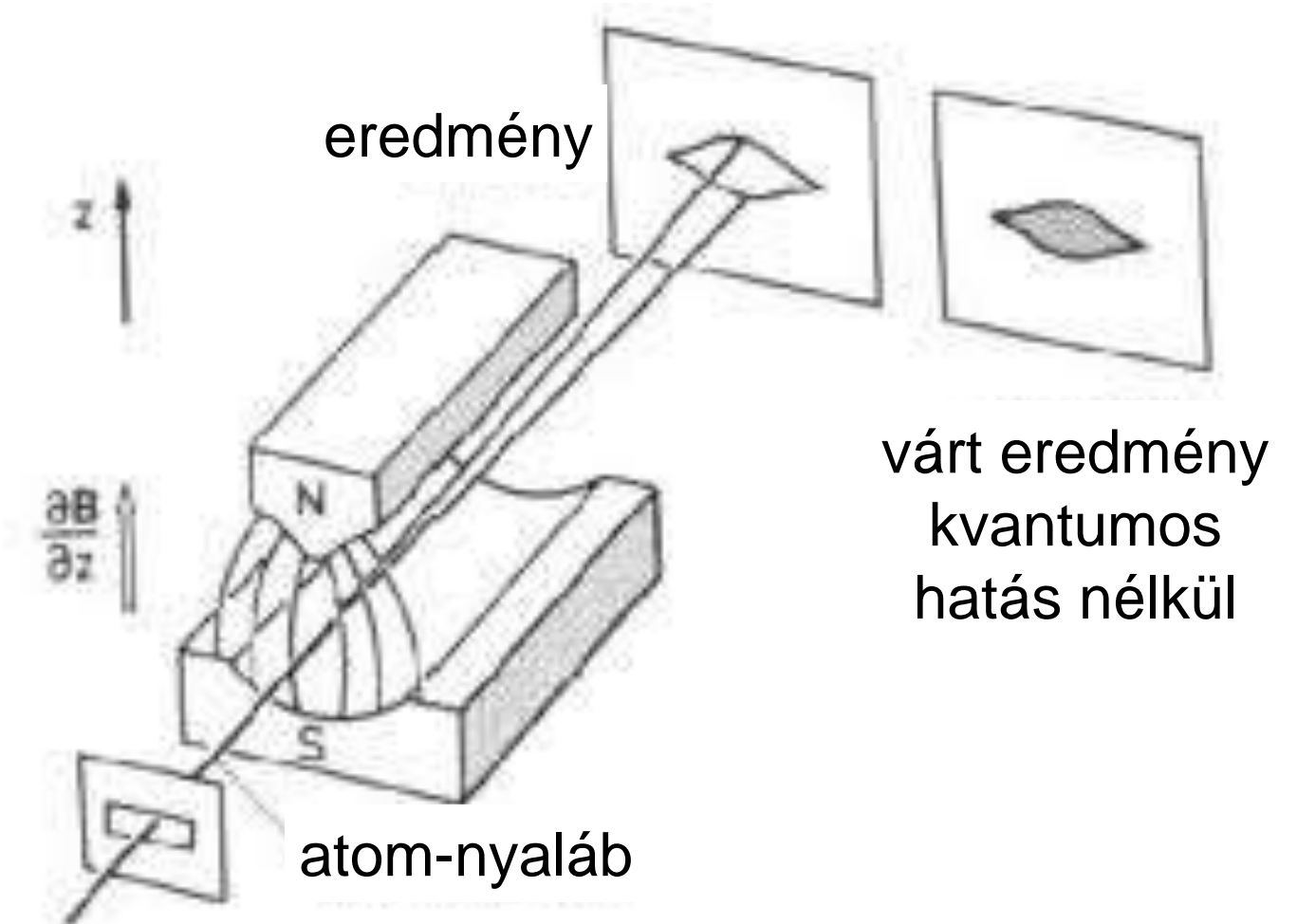
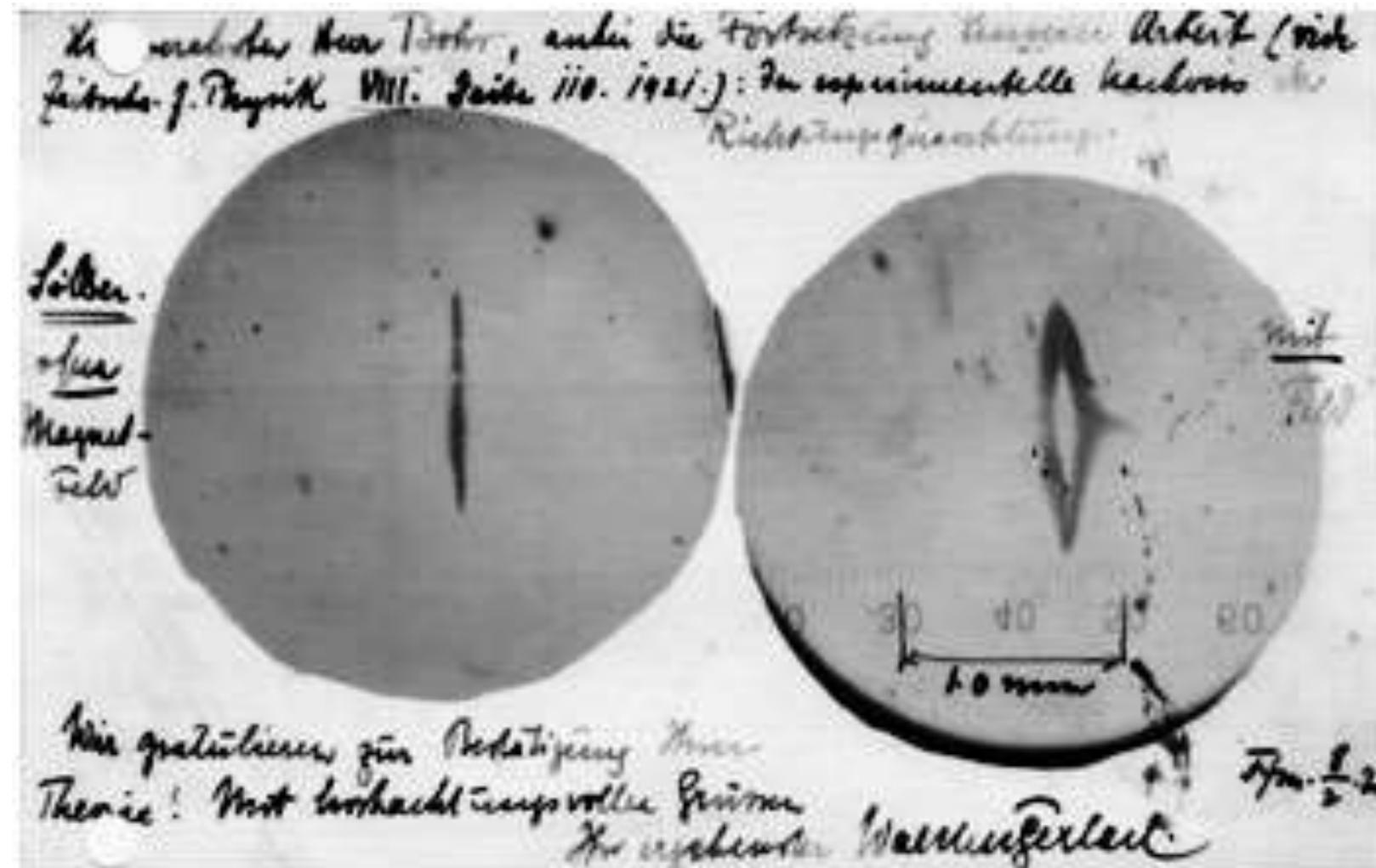
Kellermayer Miklós
(Schay Gusztáv)

Stern-Gerlach kísérlet (1922)

Walther Gerlach
(1889-1979)

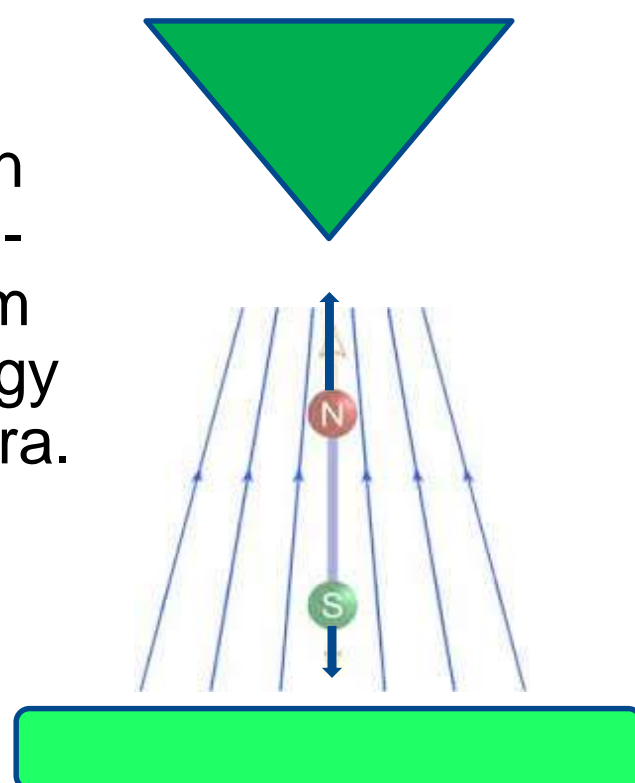


Otto Stern
(1888-1969)

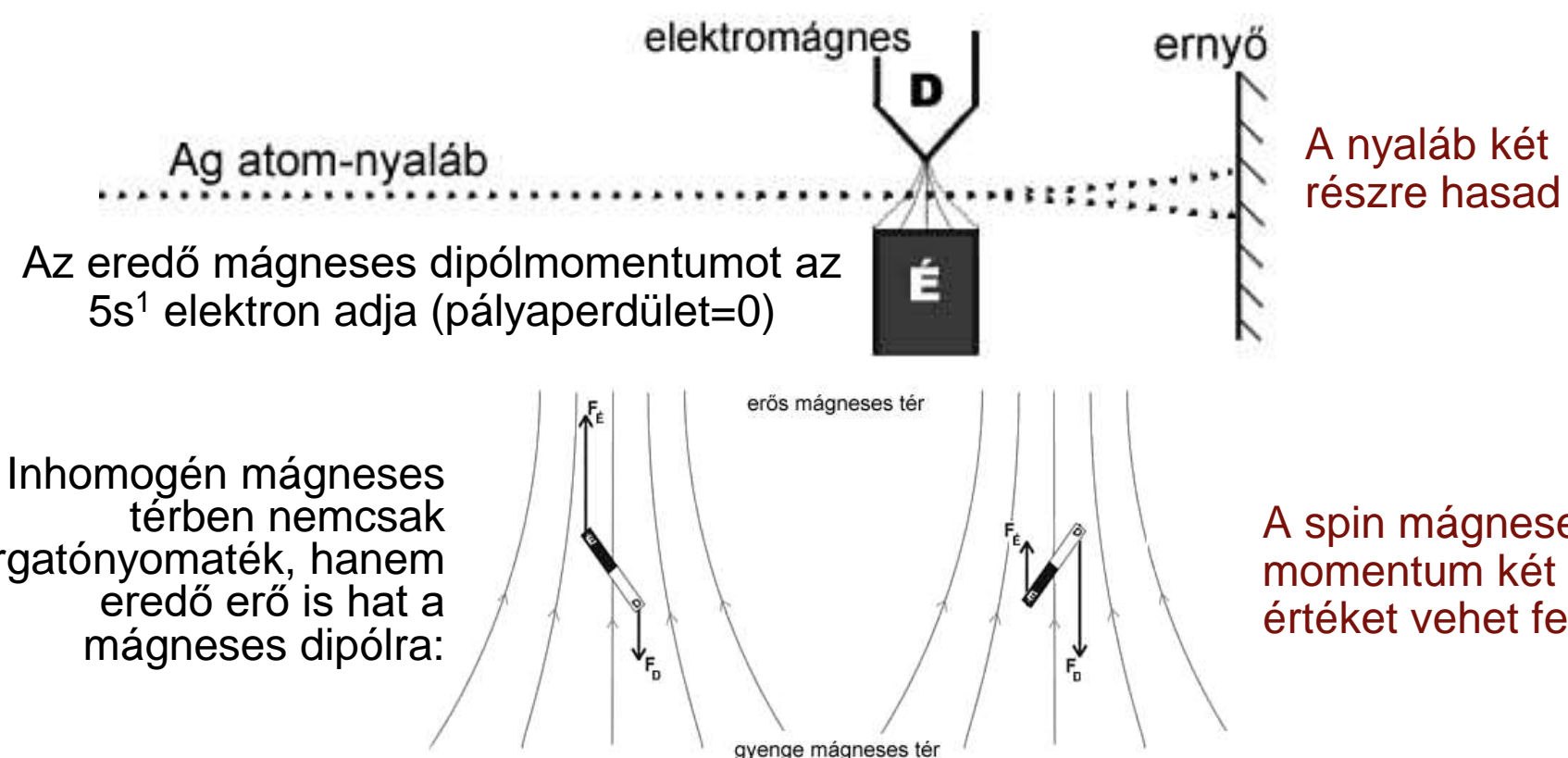


Atomi, molekuláris rendszerek elemi mágnesként viselkedhetnek

Inhomogén mágneses térben nemcsak forgatónyomaték, hanem **nettó erő** is hat egy mágneses dipólusra.



Mágneses magrezonancia ("nuclear magnetic resonance", NMR)
Nobel-díj, 1952



Isidor Rabi
(1898-1988)



Felix Bloch
(1905-1983)



Edward Mills Purcell
(1912-1997)

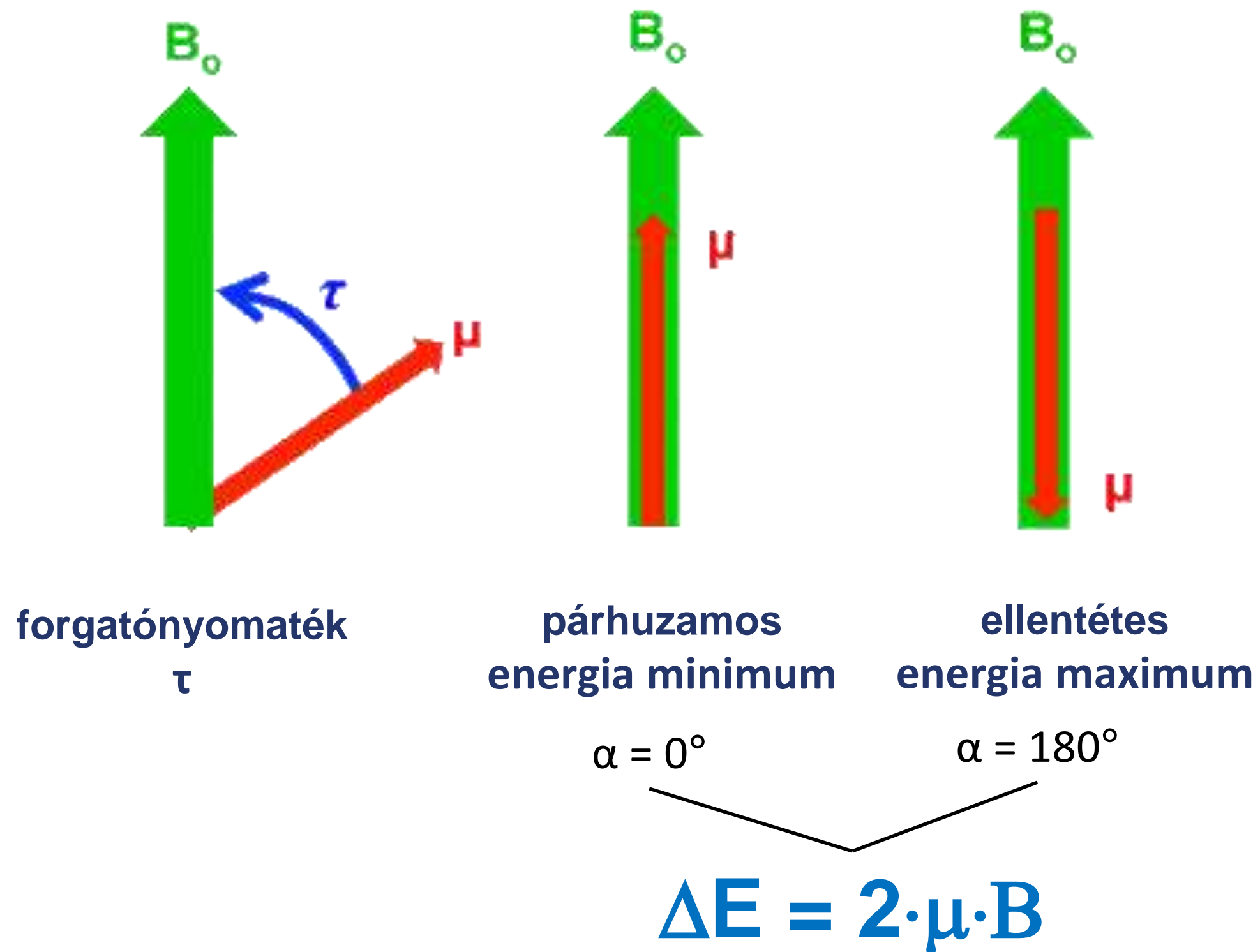
Mágneses rezonancia: Mágneses térbe helyezett minta általi, rezonancia-abszorpció jellegű elektromágneses energia elnyelés.

Elemi (kis) mágnes energiája külső mágneses térben

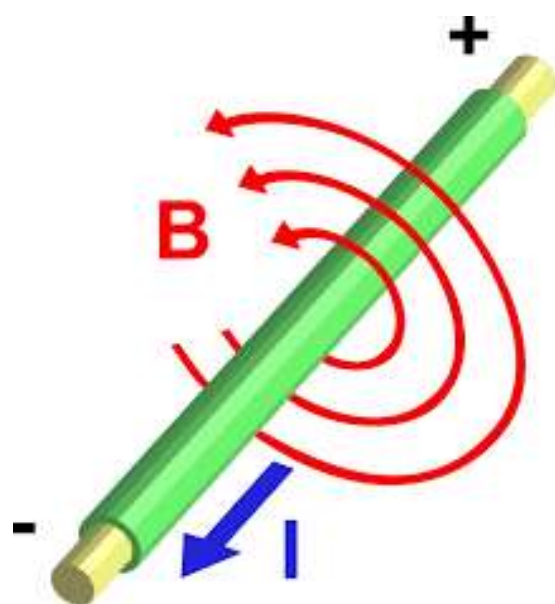
$$E_{\text{pot}} = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}$$

skalárszorzat!

$$\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B} = |\boldsymbol{\mu}| \cdot |\mathbf{B}| \cdot \cos(\alpha)$$



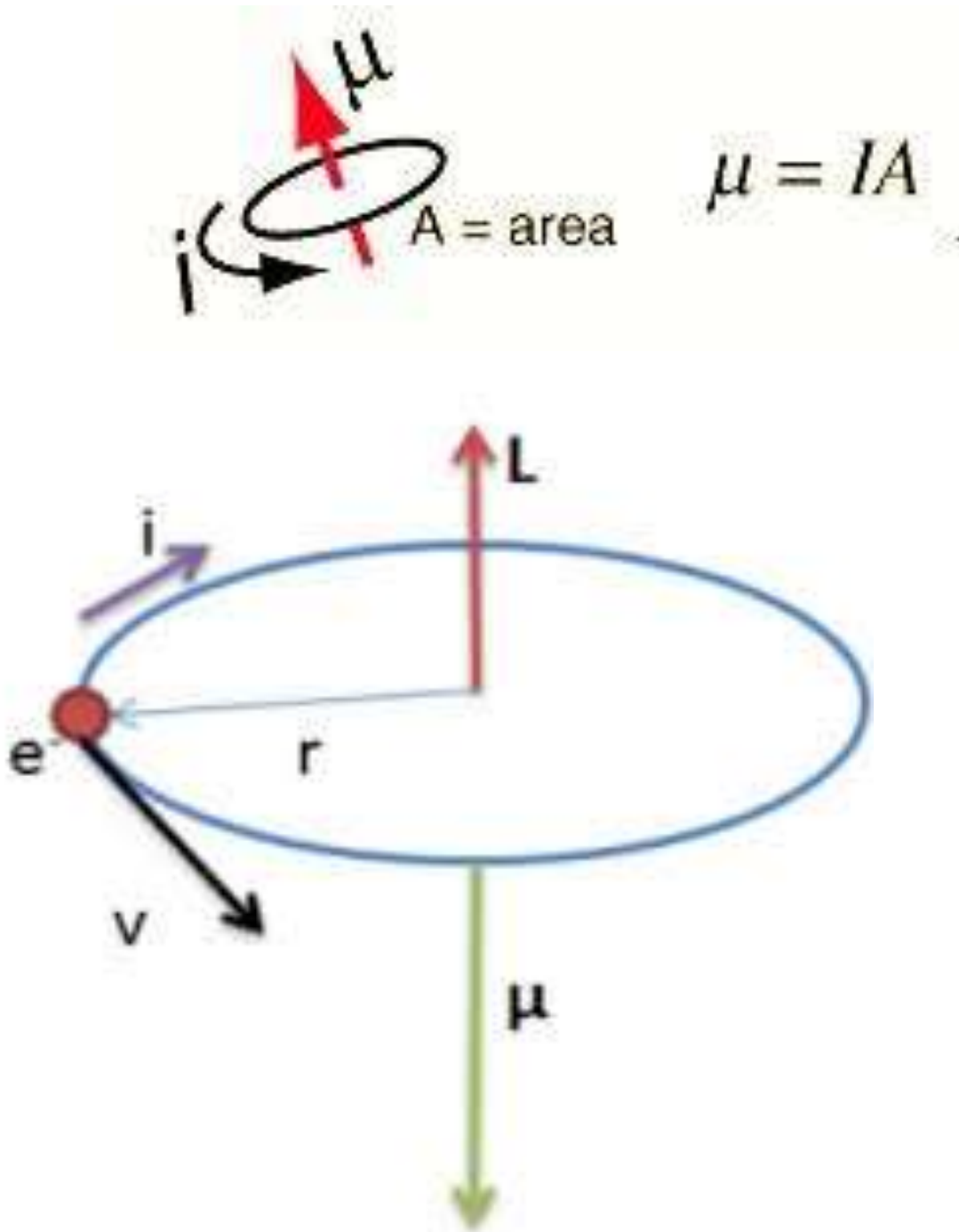
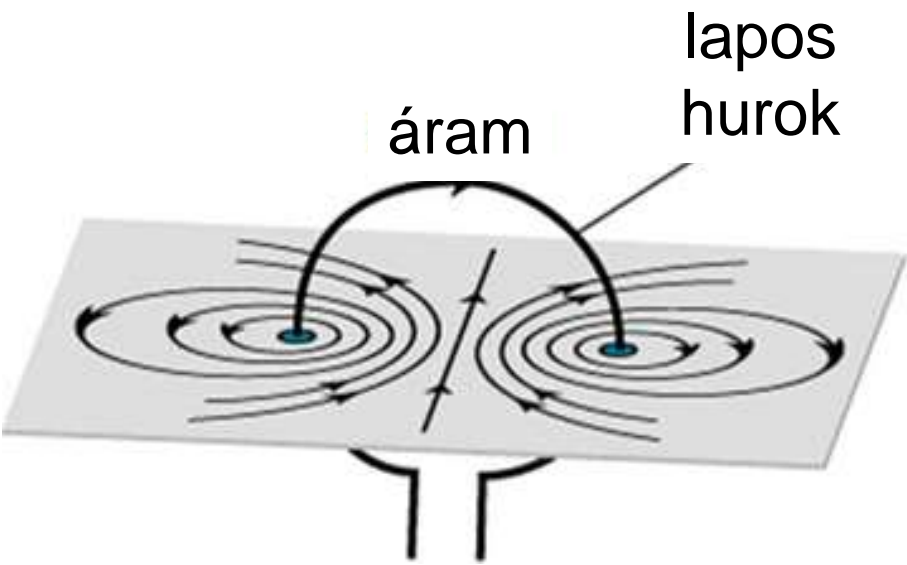
Mágneses terek az atomban



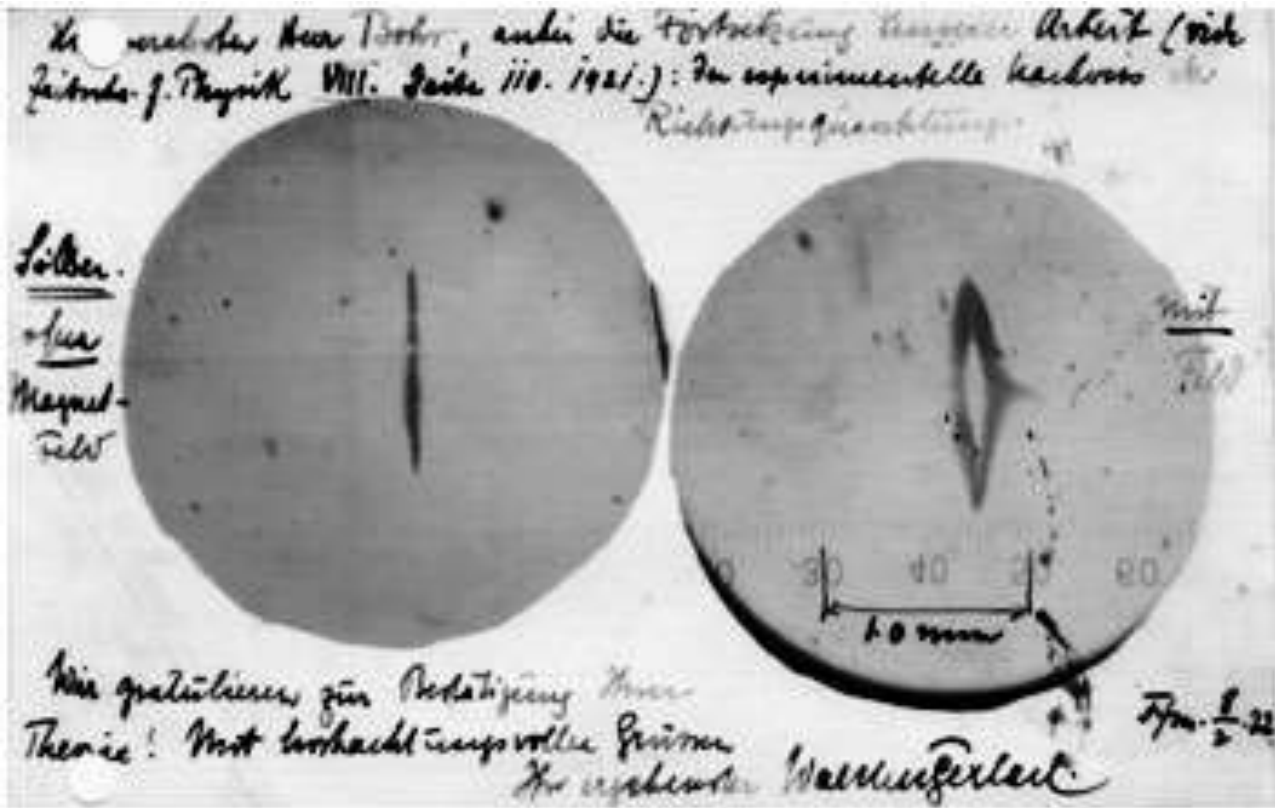
$$\sum_{loop} \mathbf{B} \cdot \Delta \mathbf{l} = \mu_0 I$$

Ampère törvény

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$ vákuumban



egyetlen elektronnak is van pálya-
momentumból fakadó mágneses tere

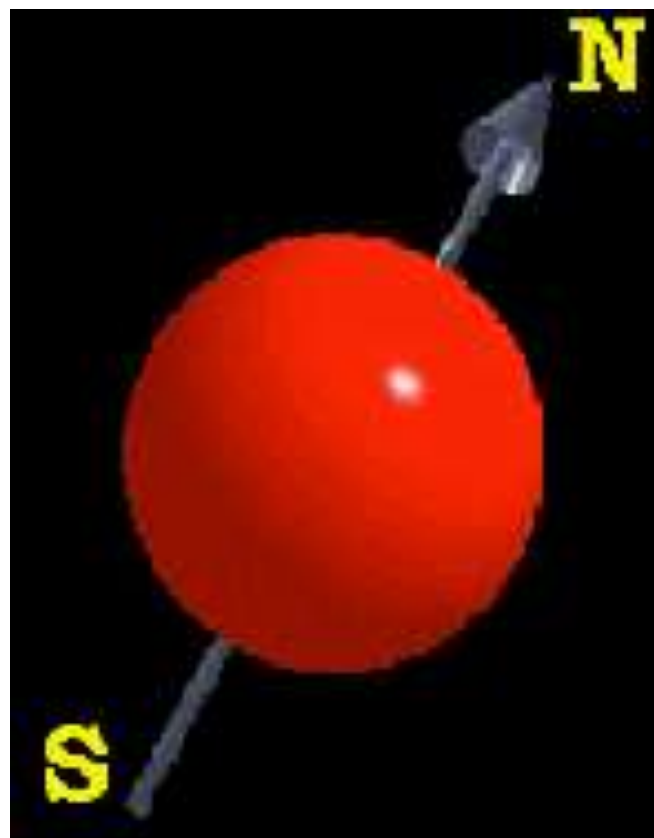


Ezen kívül van
még egy
mágneses
tulajdonság, a
SPIN



Eredő spinnel rendelkező rendszerek: elemi mágnesek

- Elemi részecskék (p, n, e) saját *spin*nel rendelkeznek.
- Elemi részecskék száma és bizonyos rendező elvek (pl. Pauli-elv) miatt *eredő spin* léphet fel.
- Atommag: páratlan tömegszám - feles magspin (^1H , ^{13}C , ^{15}N , ^{19}F , ^{31}P); páros tömegszám, páratlan rendszám - magspin egész; páros tömegszám és rendszám - magspin zérus.
- Elektron: eredő elektronspin stabil párosítatlan elektront tartalmazó rendszerekben (pl. szabad gyökök).
- Töltés és *eredő spin* miatt *mágneses momentum* lép fel.



Pörgettyűmodell

$$\begin{aligned} M_e &= -9.28 \cdot 10^{-24} \text{ J/T} \\ M_N &= 1.41 \cdot 10^{-26} \text{ J/T} \\ M_e/M_N &> 600 \end{aligned}$$

Magmágneses momentum:

$$M_N = \gamma_N L \qquad \gamma_N = g \frac{q}{2m}$$

γ_N = atommag giromágneses hányadosa (mágneses momentum és perdület aránya)

L = magspin ($L = \sqrt{l(l+1)}\hbar$), ahol l = eredő spinkvantumszám.

Elektronspin mágneses momentuma:

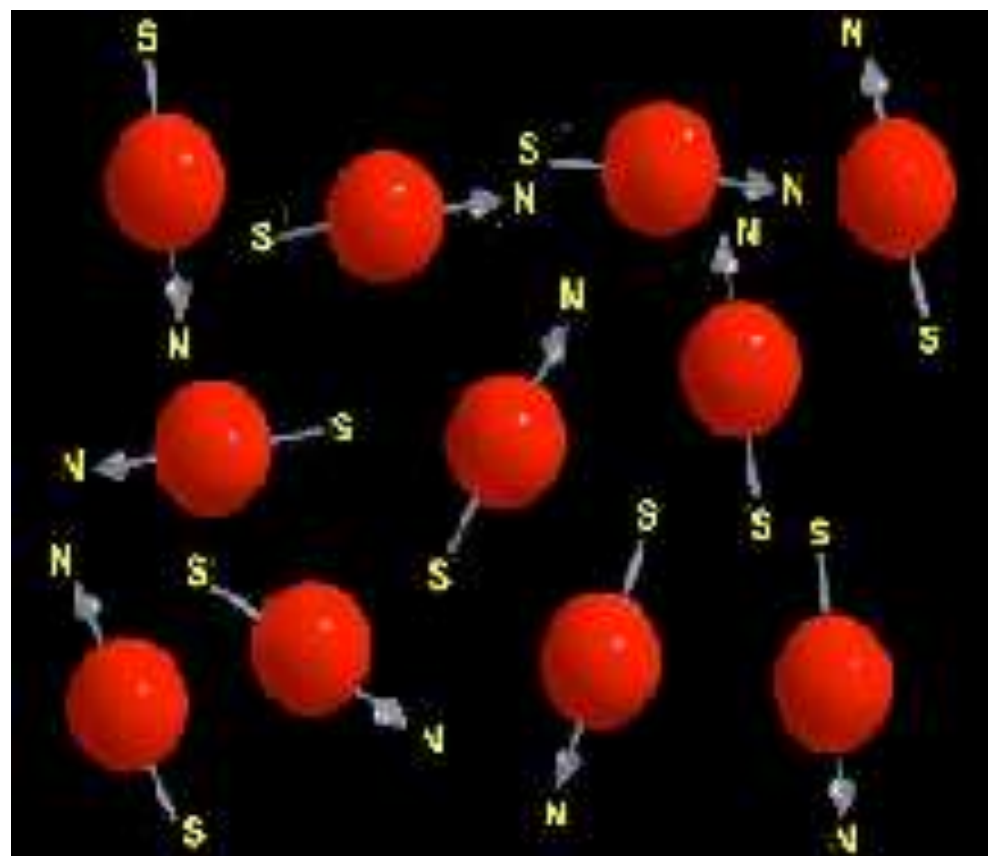
$$M_e = -g\mu_\beta \sqrt{S(S+1)}$$

g = elektron g -faktora (a mágneses momentum és giromágneses hányados kapcsolatát leíró dimenzió nélküli arányszám)

μ_β = Bohr magneton (az elektron mágneses dipólmomentum egysége) $\mu_\beta = \frac{e\hbar}{2m_e}$

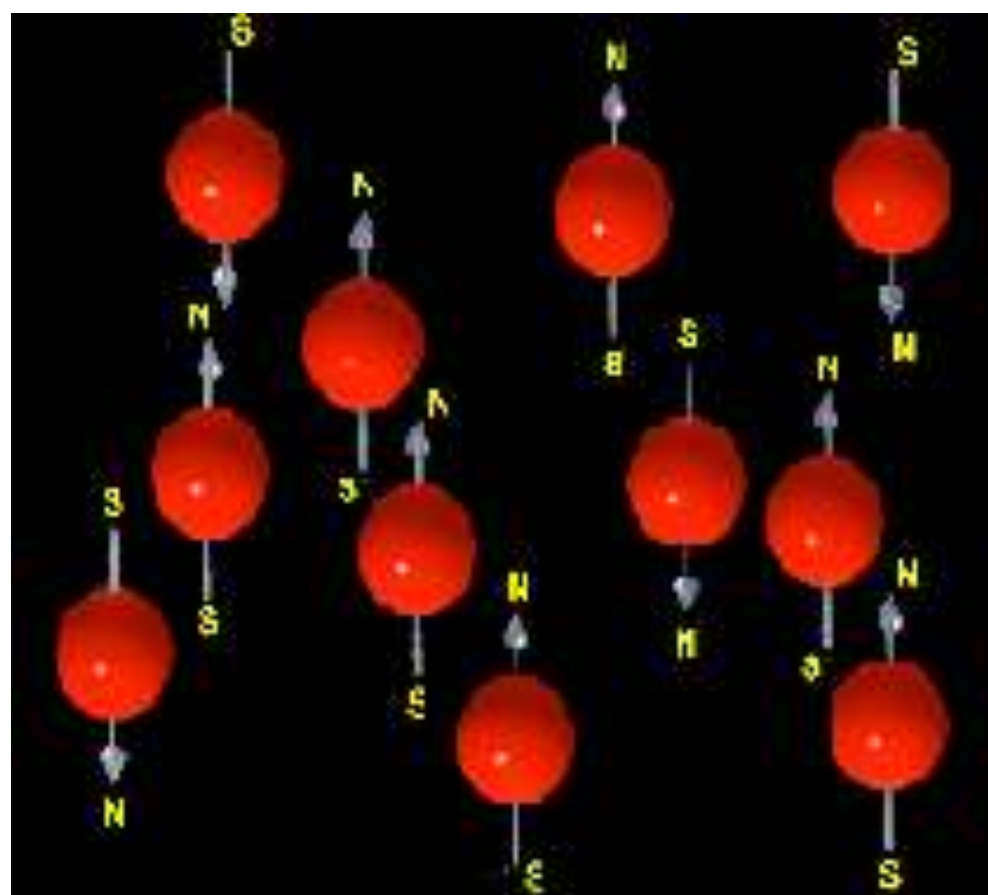
S = spinkvantumszám

Mágneses térben a spinek orientálódnak



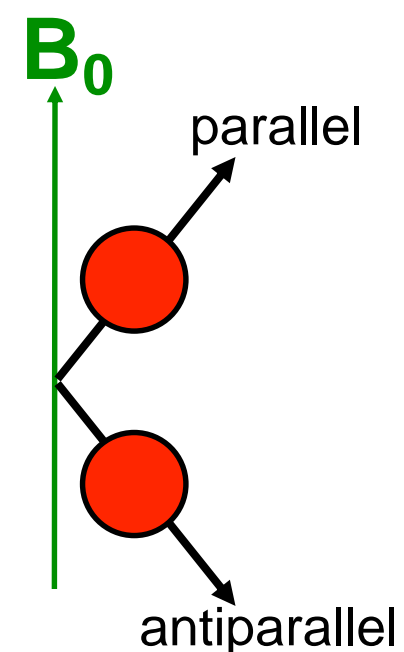
Mágneses tér hiányában:
elemi mágnesek orientációja random

Paramágnesség: külső mágneses tér hatására fellépő mágnesezettség (mágneses dipólok orientációja).

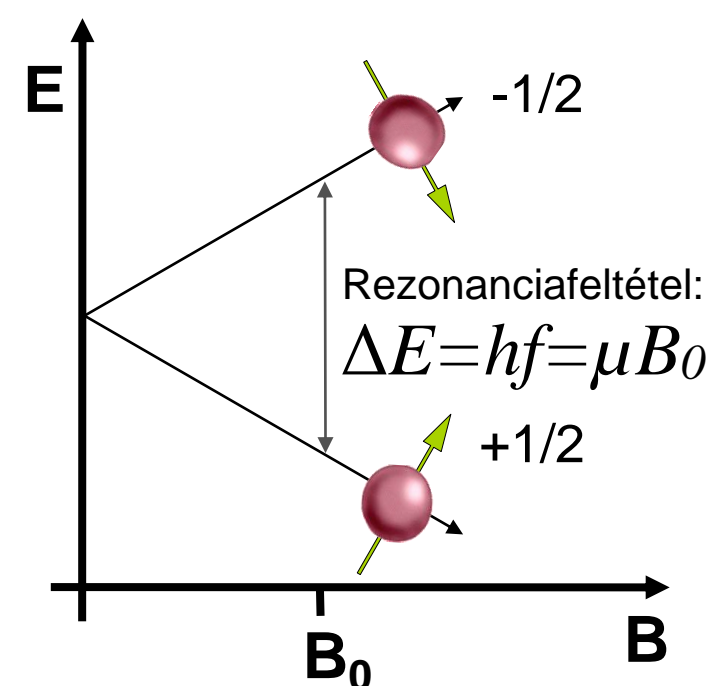


Mágneses térben: Zeeman-felhasadás

elemi mágnesek
orientálódnak



energiaszintek
felhasadnak



Edward Purcell, 1946

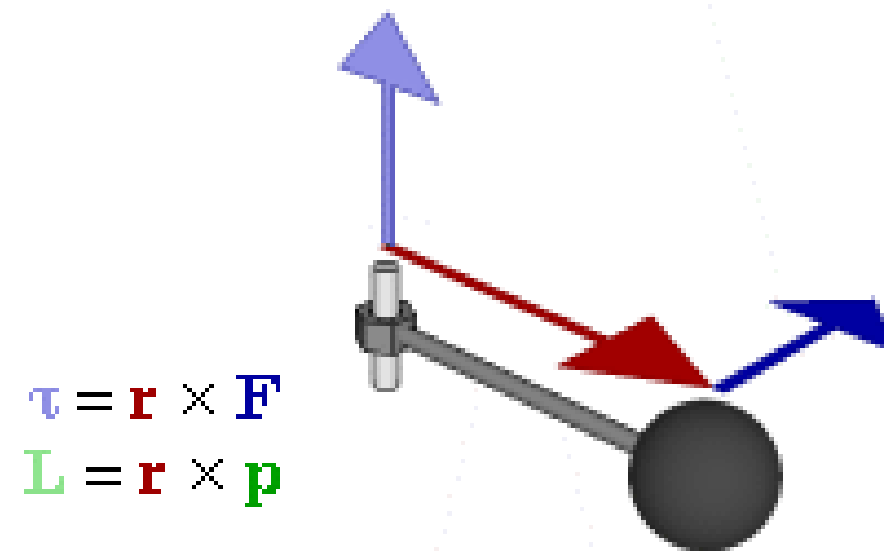
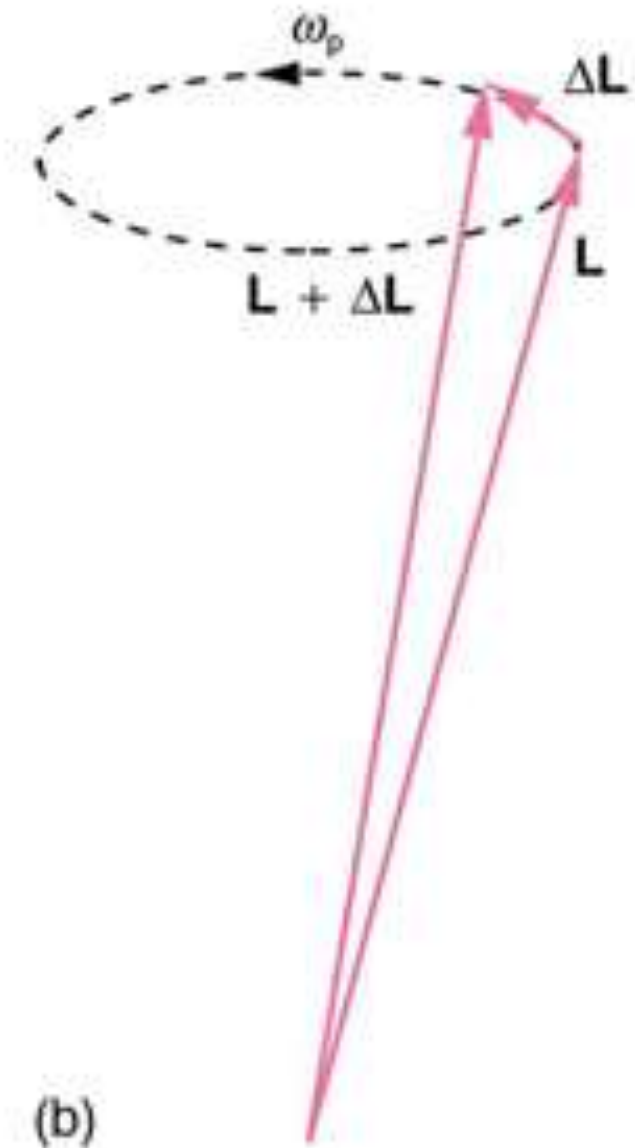
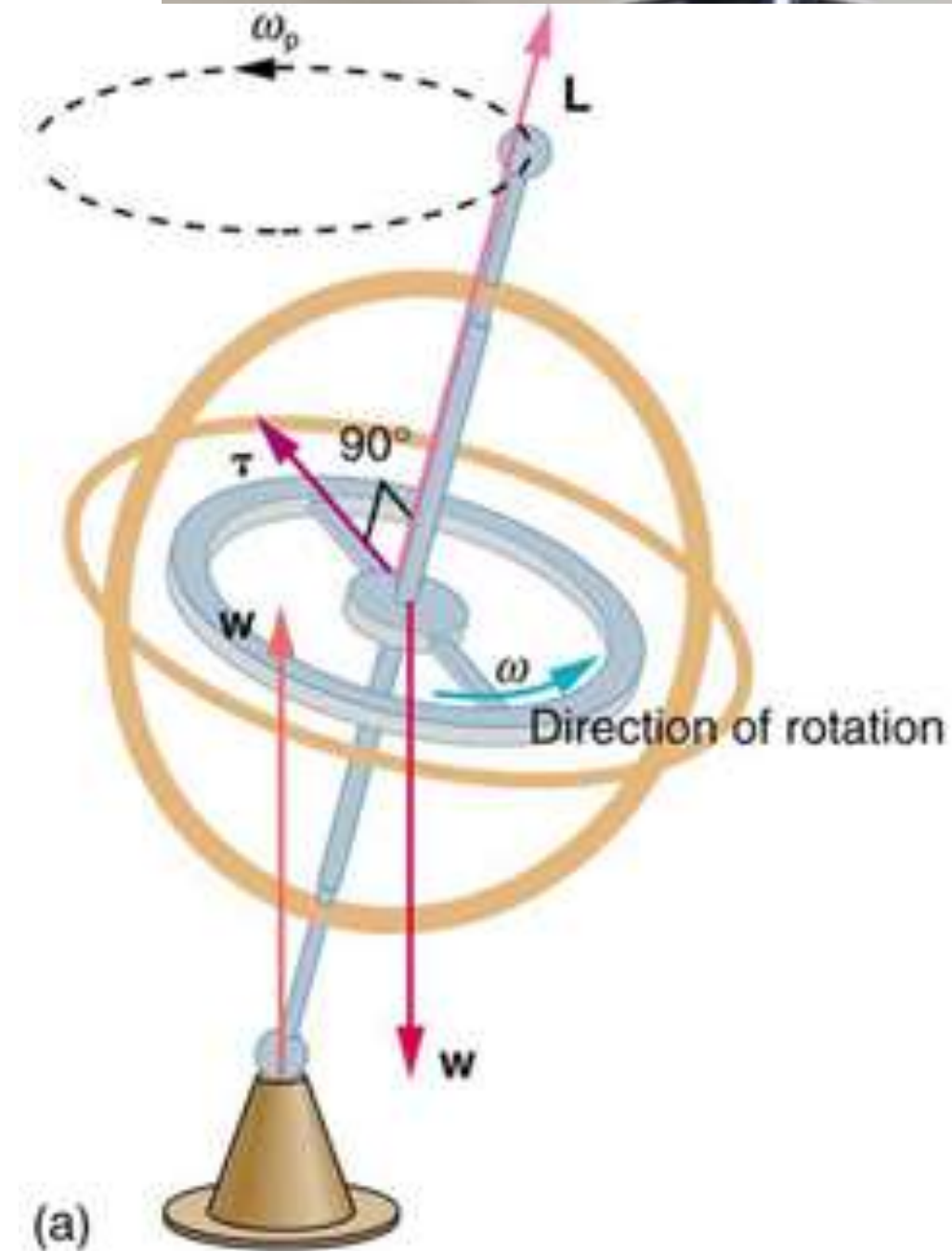


Pieter Zeeman,
1865-1943

Klasszikus mechanika: egy pörgettyű precesszál külső erőterben



L: perdület



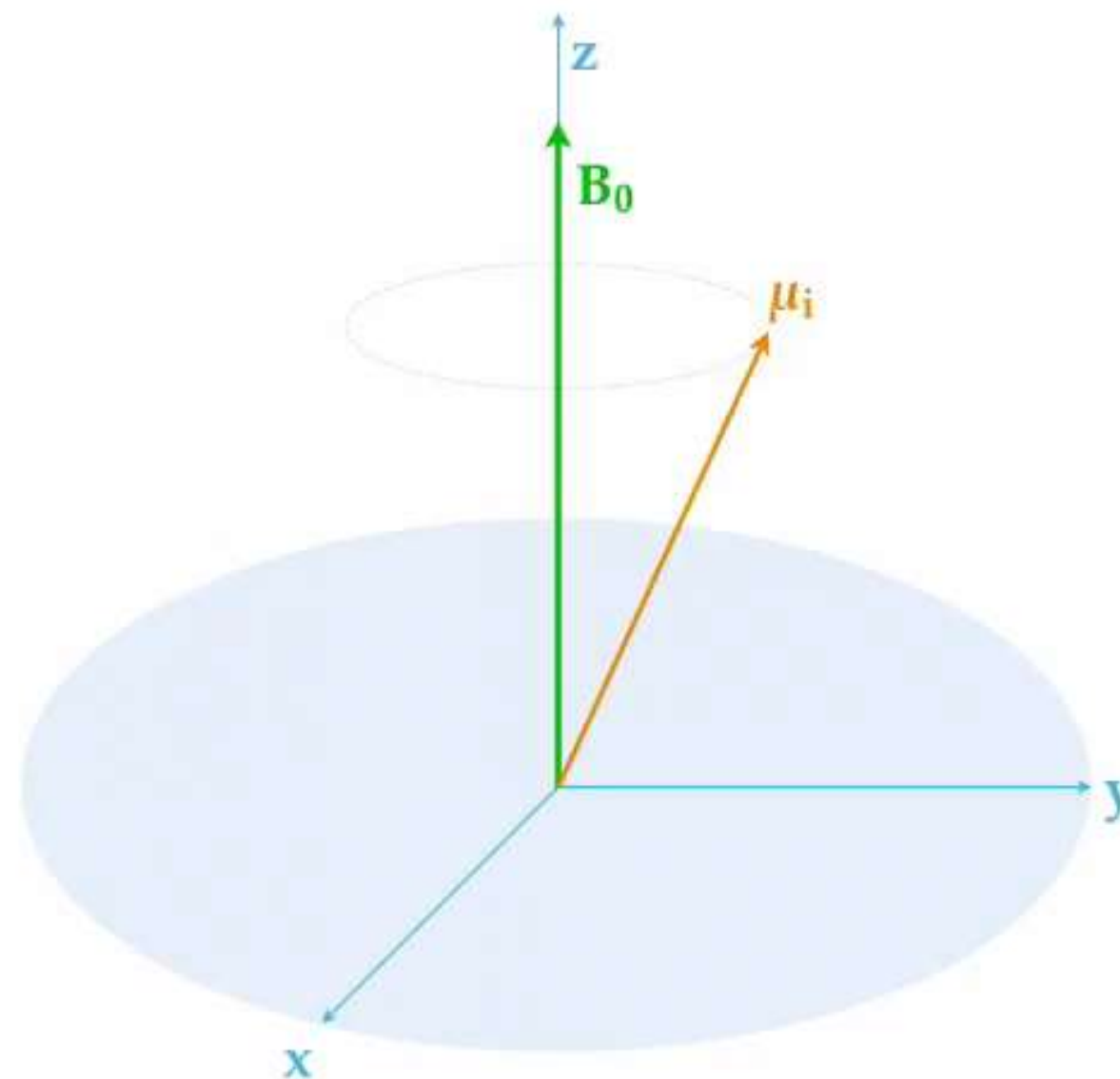
$$\frac{\Delta L}{\Delta t} = \tau$$

τ : forgató-nyomaték

Az orientált spinek precessziós mozgást végeznek



Pörgettyű precessziós mozgása



Elemi mágneses momentum (μ_i) precessziós mozgása mágneses tér iránya körül (mágneses indukció: B_0) az xyz vonatkoztatási térben

Precessziós vagy Larmor frekvencia:

$$\omega_0 = \gamma B_0$$

$$f_{Larmor} = \frac{\gamma}{2\pi} B_0$$

Rezonanciafeltétel:

$$\Delta E = \frac{h\omega_0}{2\pi}$$

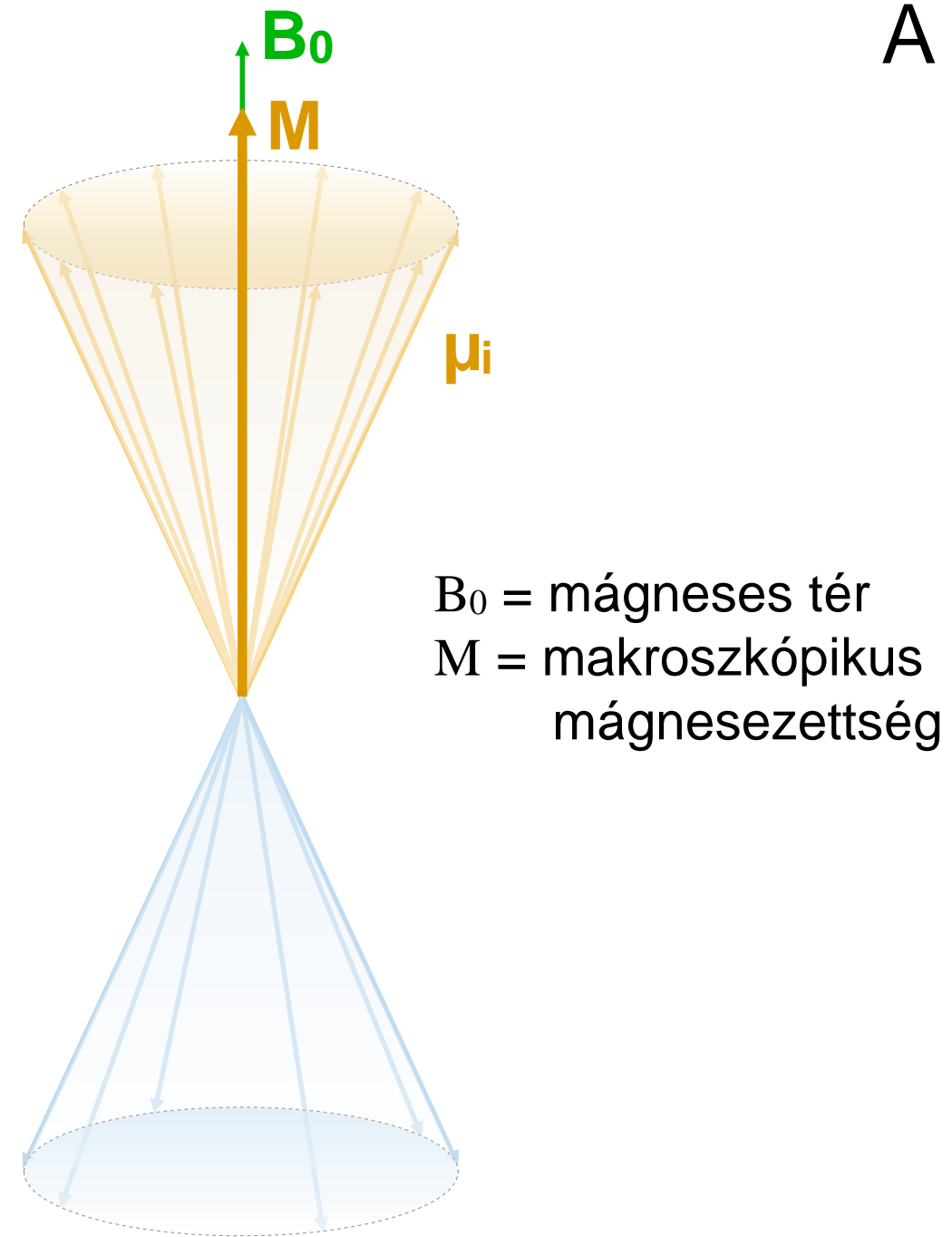
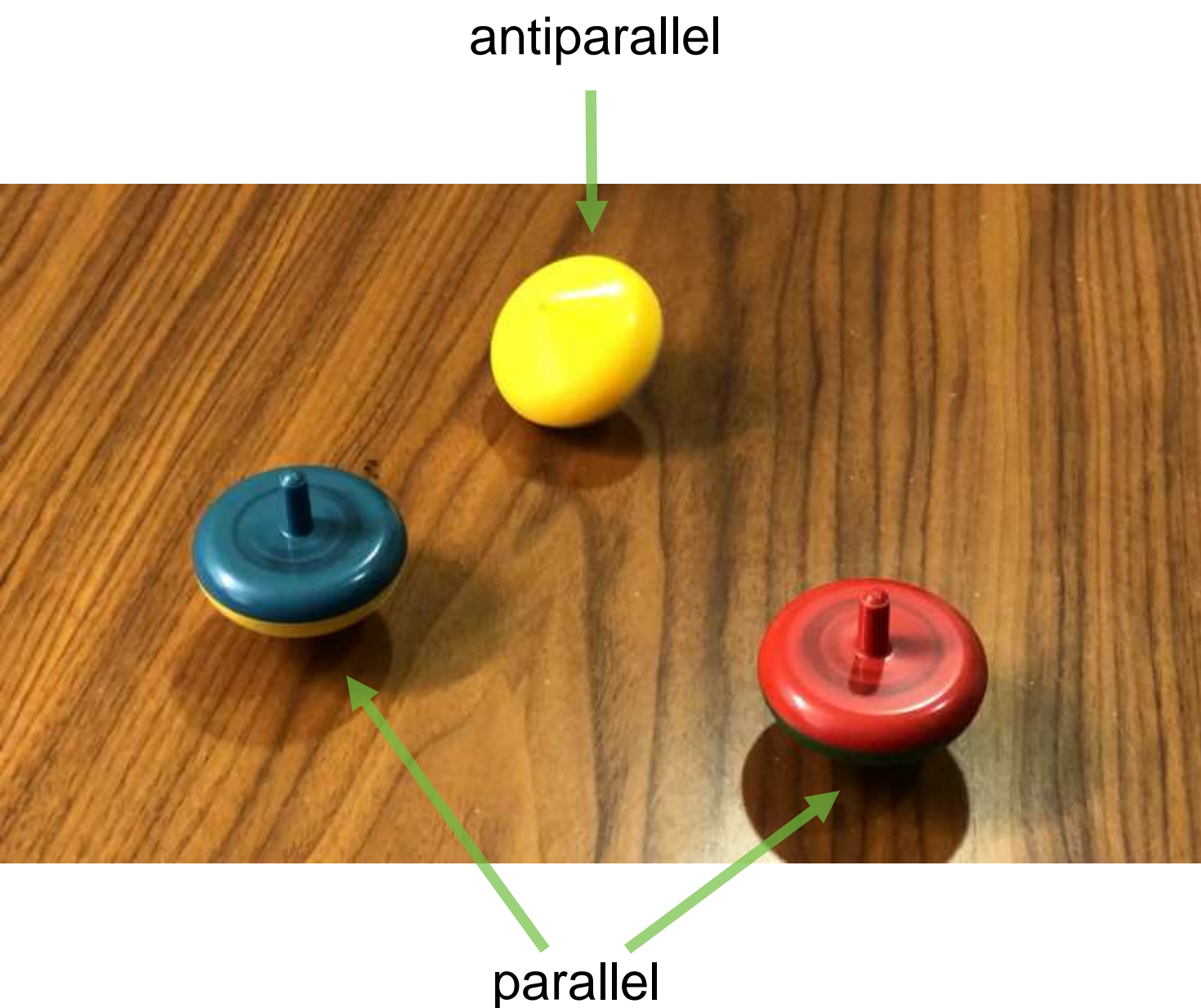


Felix Bloch, 1946

Makroszkópos mágnesezettség

Különböző energiaszinteken spintöbbslet miatt

Alacsony energiájú állapot
parallel a proton esetében



B_0 = mágneses tér
 M = makroszkópikus
mágnesezettség

Nagy energiájú állapot
antiparallel a proton esetében

A nagy (parallel) ill. alacsony
(antiparallel) energiájú
spinállapotok aránya:

$$\frac{N_{antiparallel}}{N_{parallel}} = e^{-\frac{\Delta E}{k_B T}}$$

(Boltzmann-eloszlás)

MRI-ben alkalmazott
mágneses térerő:
Föld mágneses térerejének
20-50 ezerszerese

A két állapot aránya gerjesztés nélkül

$$\Delta E = g \cdot \mu_N \cdot B_0 = \mathbf{g_P \cdot \mu_N \cdot H}$$

egyetlen protonra $g_P = 5.59$; $\mu_N = 5.05 \cdot 10^{-27} \frac{J}{T}$

$$\Delta E = 5.59 \cdot 5.05 \cdot 10^{-27} \frac{J}{T} \cdot \mathbf{3T} = 8.469 \cdot 10^{-26} J = 5.29 \cdot \mathbf{10^{-7} eV}$$

A gerjesztési energia rendkívül kicsi még nagyon erős mágneses térben is!

$$\frac{N_{antiparallel}}{N_{parallel}} = e^{-\frac{\Delta E}{k_B T}} = \mathbf{0.9999794002}$$

5M protonból mindössze 102 db-al van több az alapállapotban mint a gerjesztett állapotban 25 °C-on
(a többi mágneses tere páronként kioltja egymást)

Gerjesztés fotonabszorpcióval

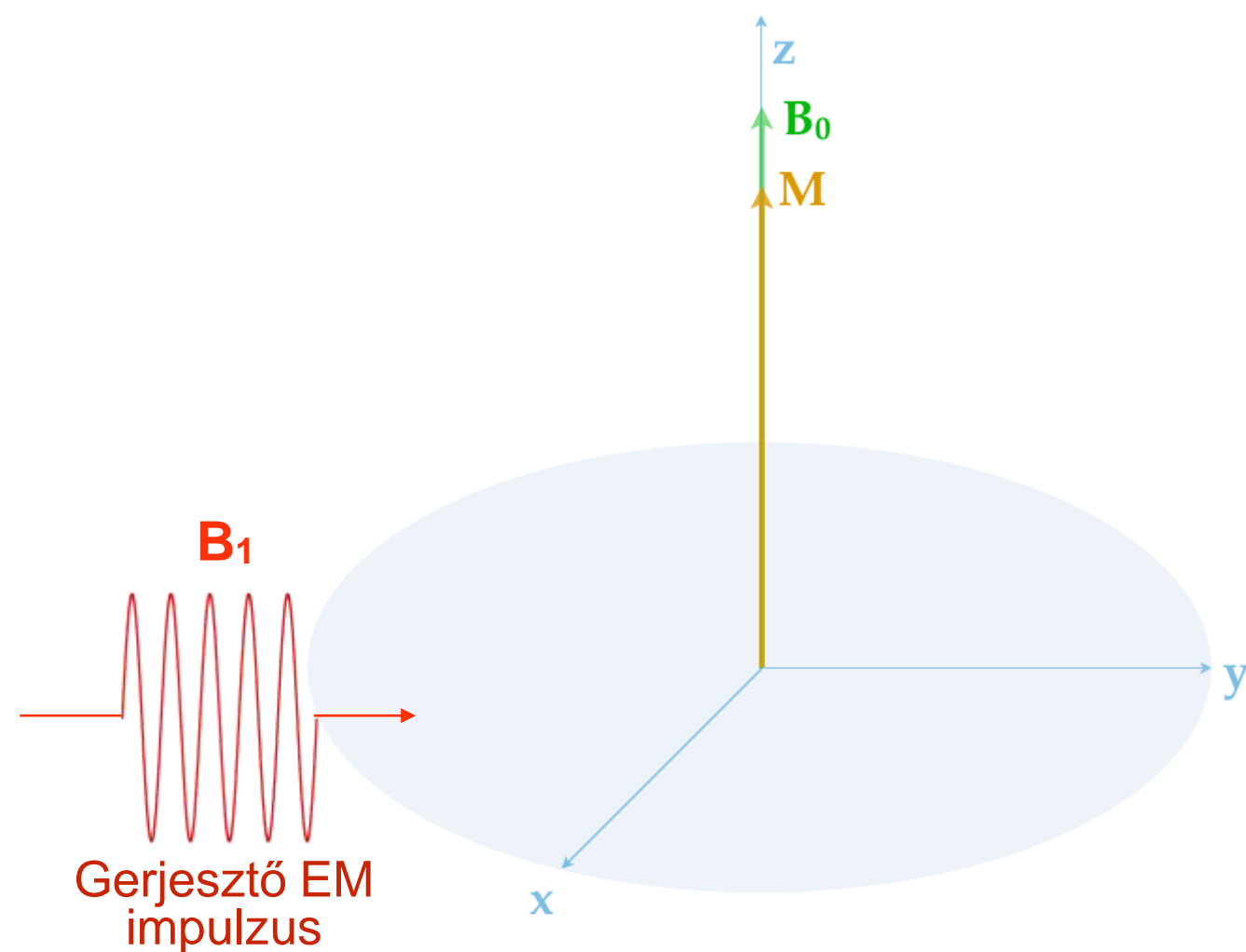
$$f = \frac{\Delta E}{h} = \frac{8.469 \cdot 10^{-26} J}{6.63 \cdot 10^{-34} Js} = 1.27 \cdot 10^8 \frac{1}{s} = 127 MHz$$

Rádiófrekvenciás gerjesztés és emisszió

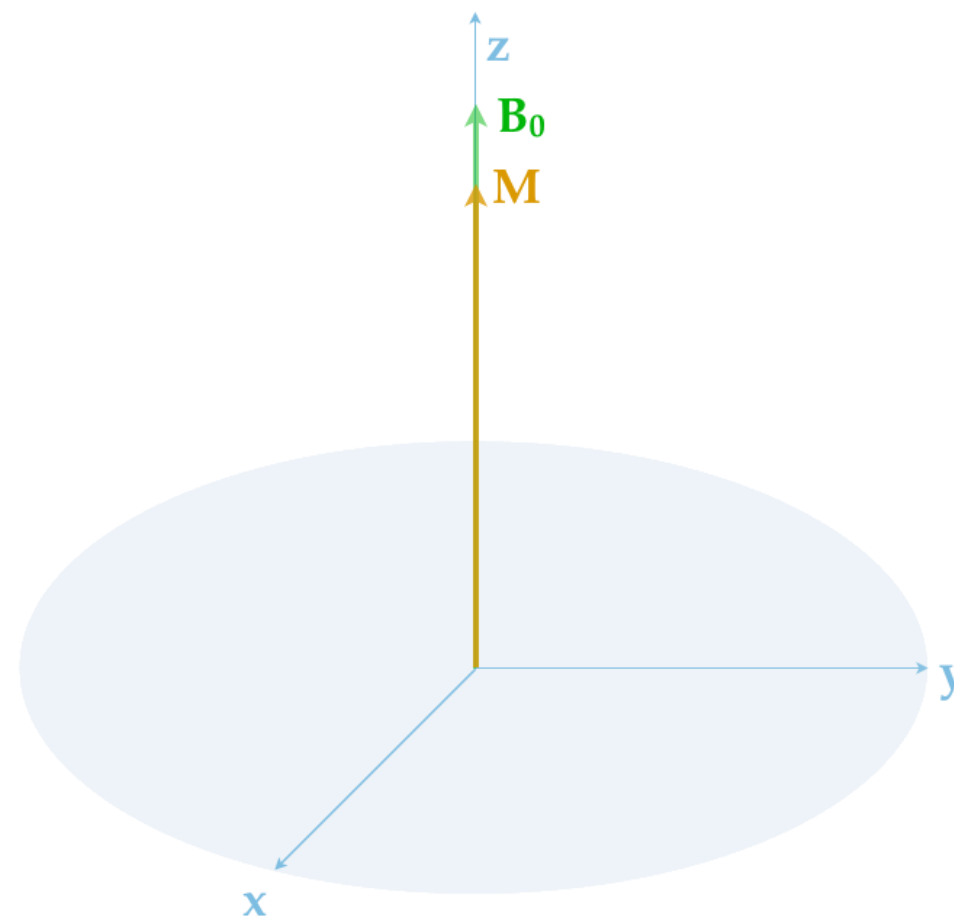
Gerjesztés

Rezonancia feltétel: Larmor frekvencia

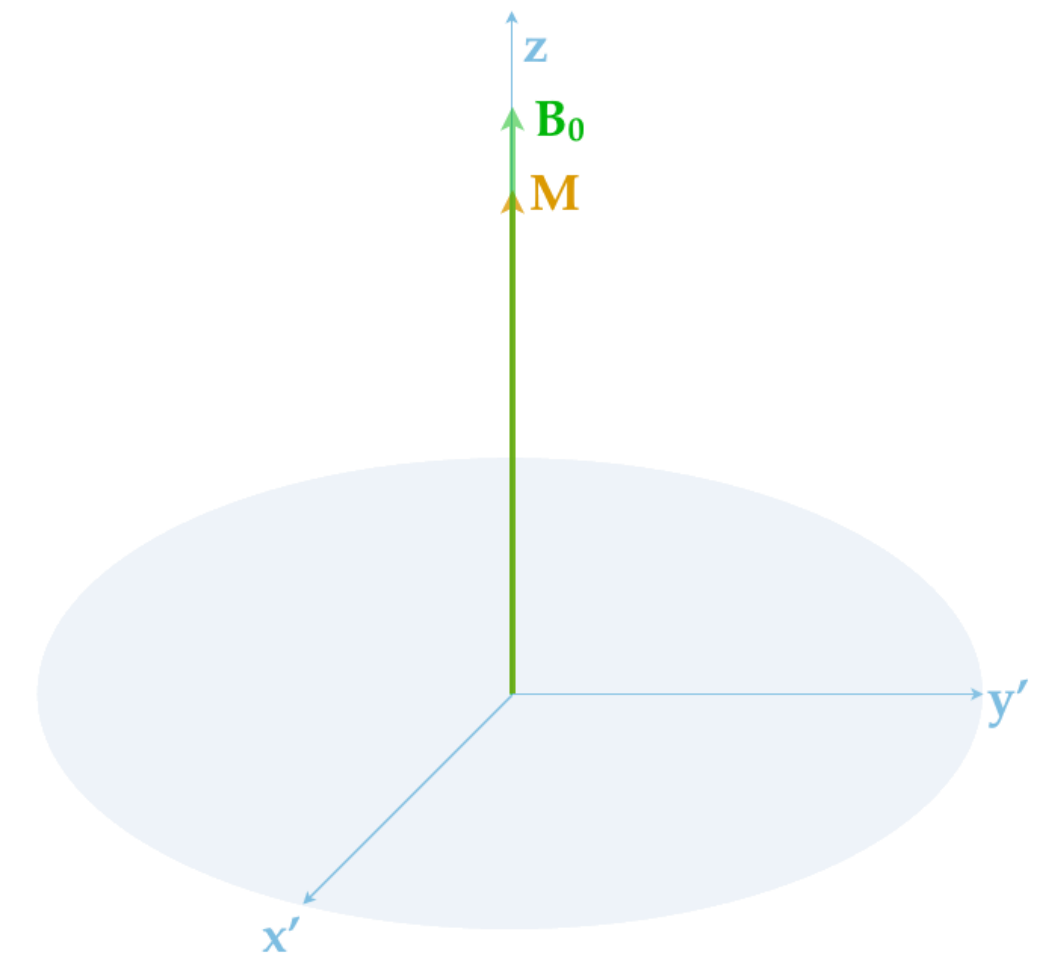
Alkalmazott elektromágneses sugárzás: rádióhullám (NMR, MRI), mikrohullám (ESR)



Gerjesztés a valós koordináta rendszerben (x, y, z)



z-tengely körül, M-mel együtt forgó koordináta rendszer koncepciója (x' , y' , z) (vonatkoztatási rendszer)



Gerjesztés a vonatkoztatási rendszerben (x' , y' , z): az eredő mágnesezettségi vektor (M) 90°-kal elfordul (z-tengelytől az $x'y'$ - és xy-síkba)

B_0 = mágneses tér

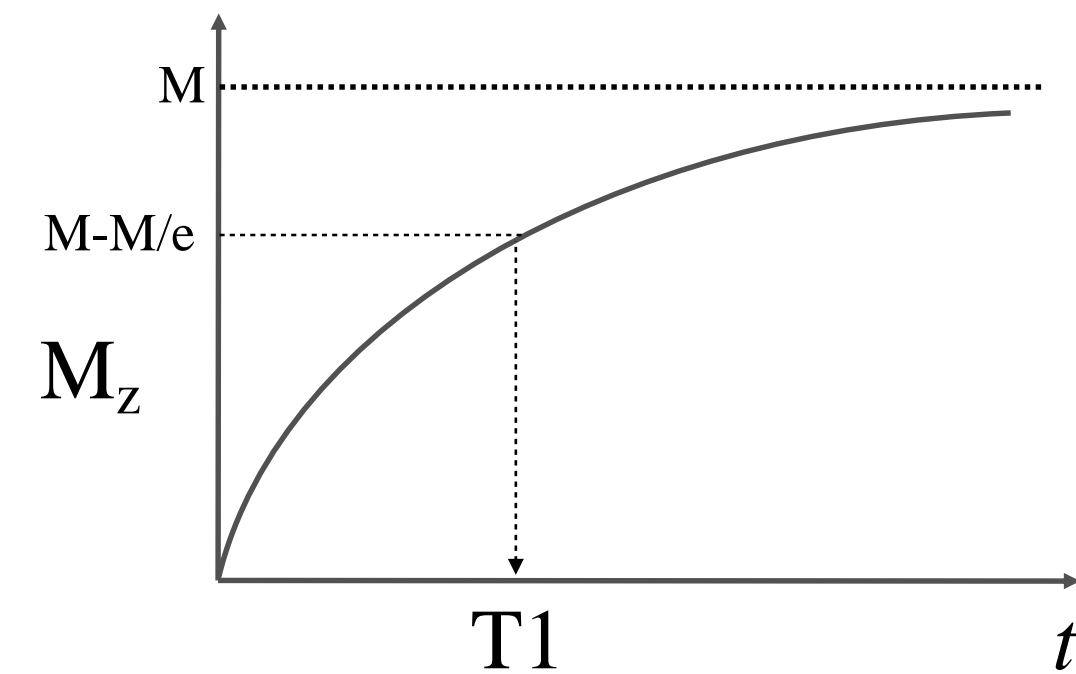
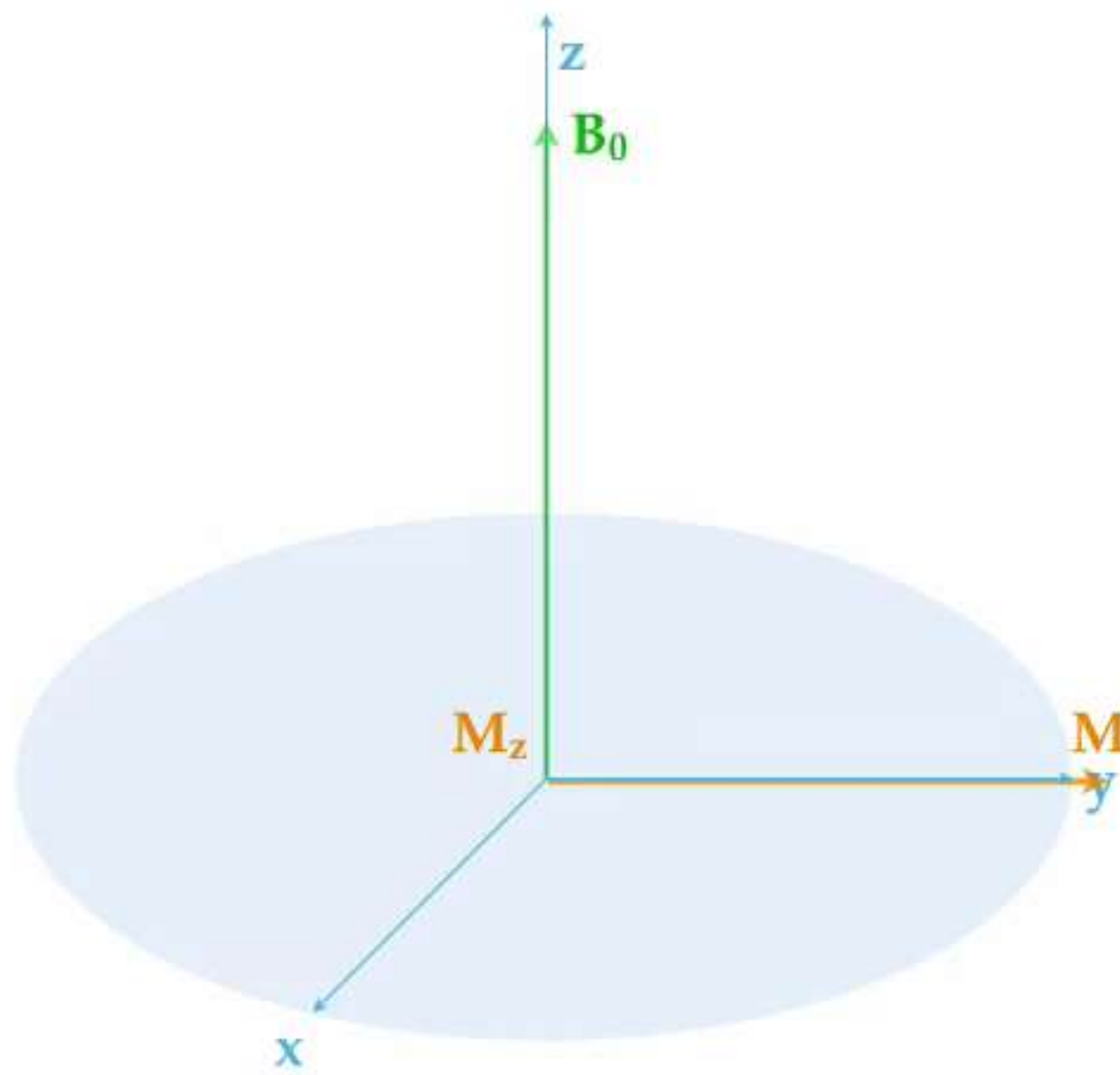
M = makroszkópos mágnesezettség

B_1 = besugárzott elektromágneses tér

Spin-rács relaxáció

T1 vagy longitudinális relaxáció

Az eredő mágneszettségi vektor (M) relaxation) of the z -tengelymenti vektoriális komponensének (M_z) visszatérése (relaxációja) a külső mágneses téri irányába



T1 relaxációs idő:
elemi mágnes (proton) és
környezete közötti kölcsönhatásra utal

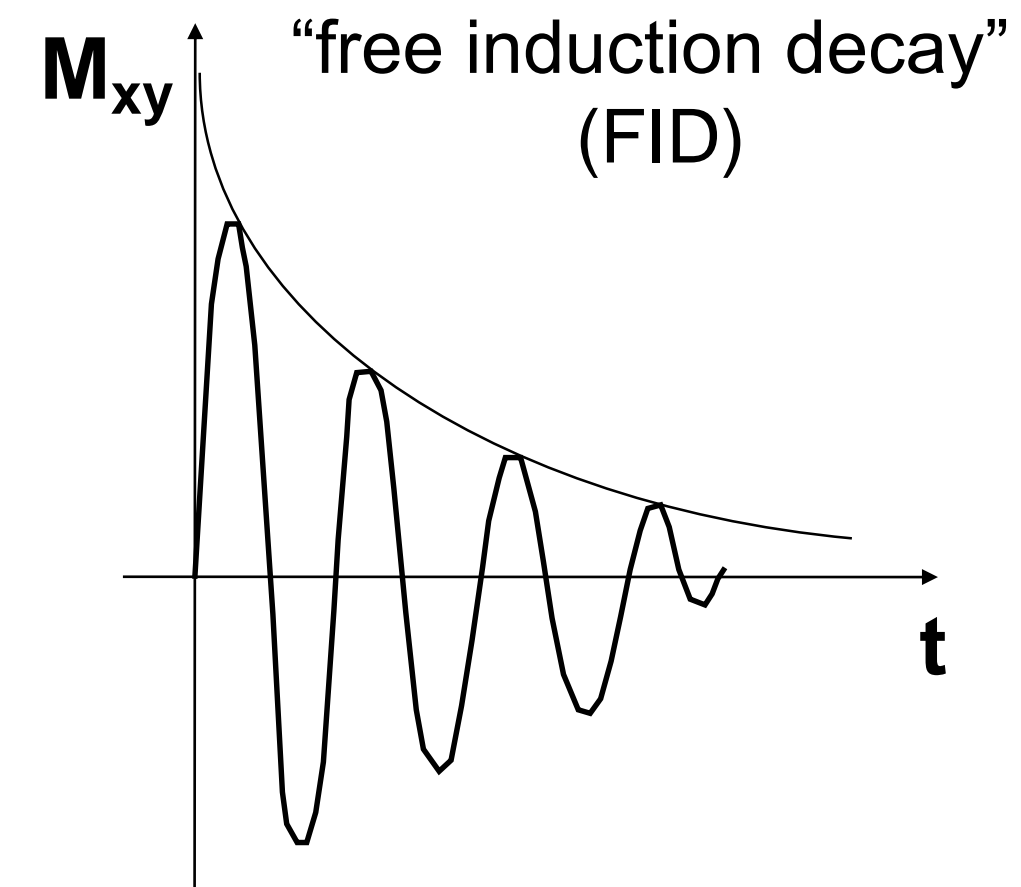
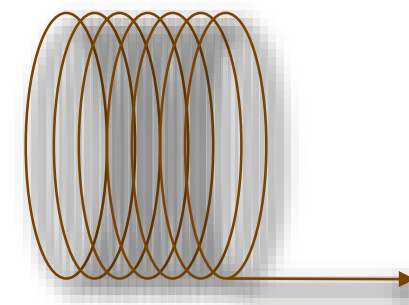
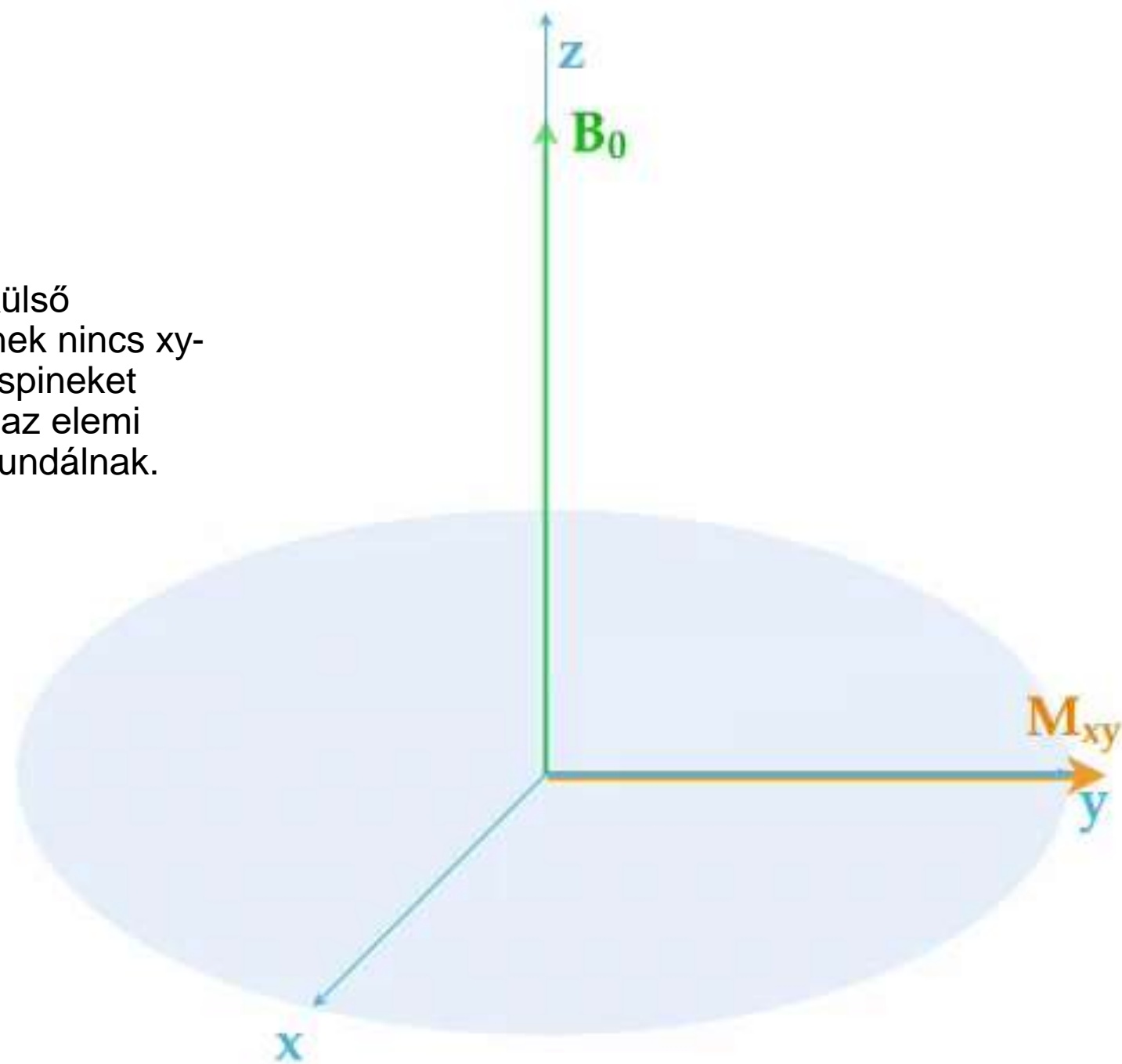
M_z : M z -tengelymenti vektoriális komponense

Spin-spin relaxáció

T2 vagy tranzverzális relaxáció

Az elemi mágneses momentumok (μ_i) szétterülése (diffúziója) a tranzverzális (xy) síkban, amely az eredő mágnesezettség (M) xy -síkbeli vektoriális komponensének (M_{xy}) lecsengéséhez (relaxációjához) vezet

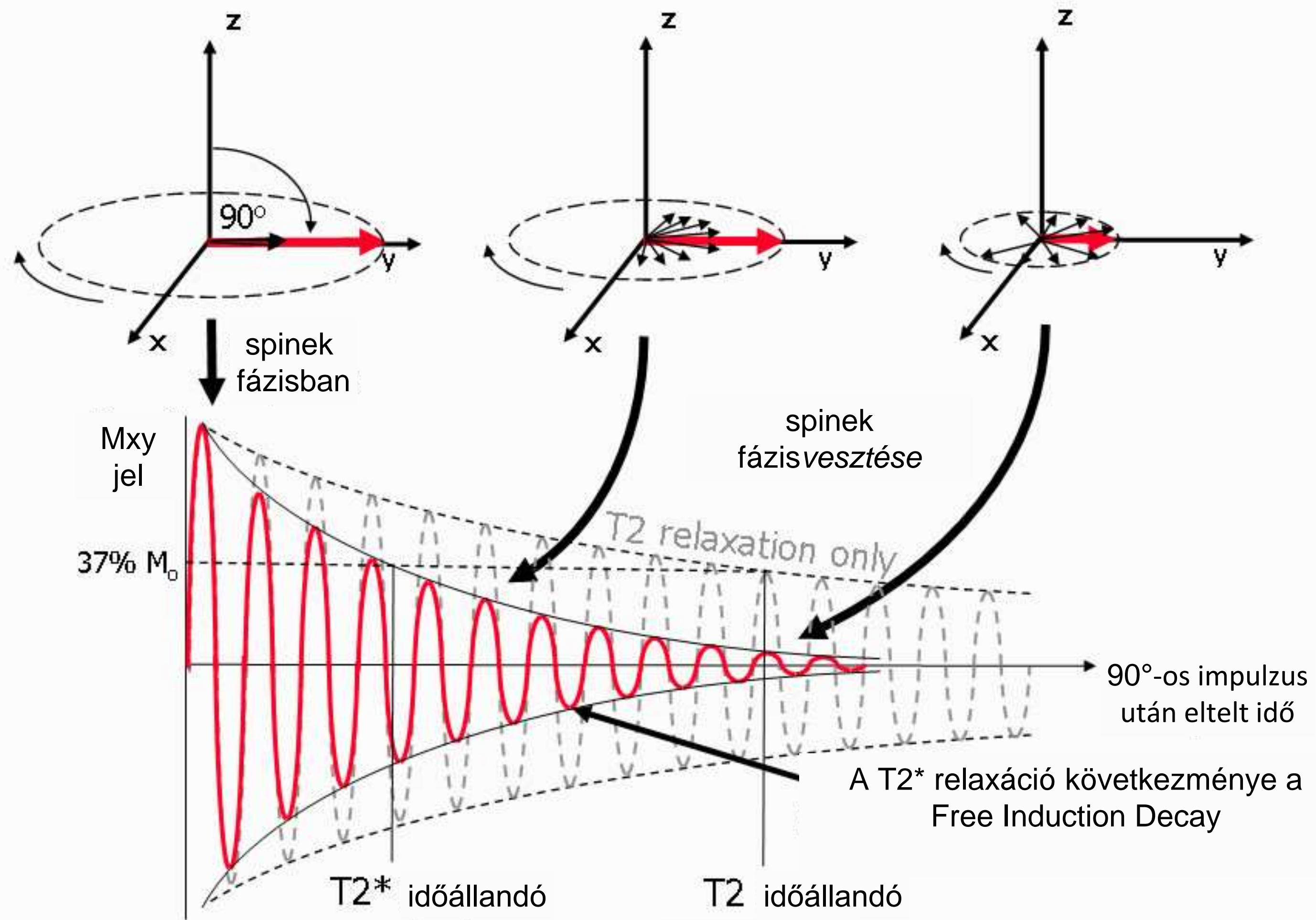
N.B.: mivel a külső mágneses térnek nincs xy -komponense (spineket orientáló erő), az elemi spinek szétdiffundálnak.



T2 relaxációs idő:

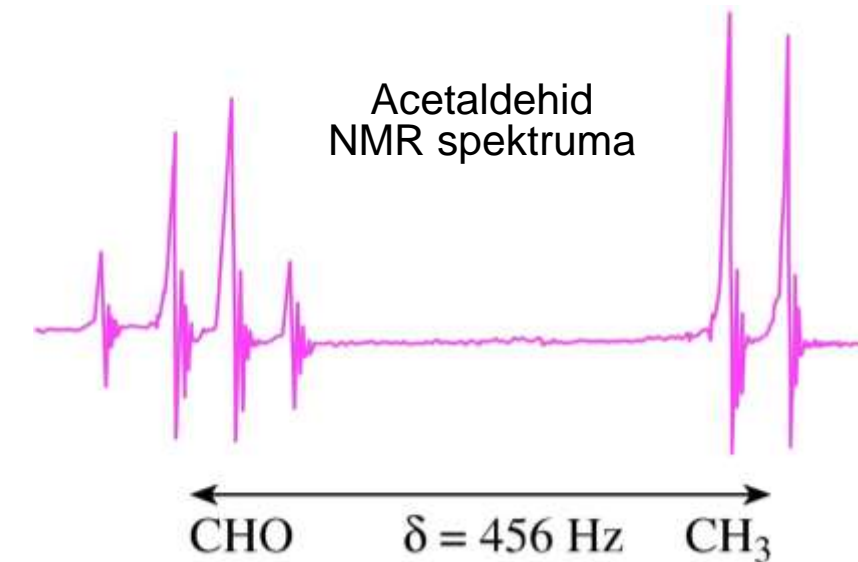
elemi mágnesek (protonok)
közötti kölcsönhatásra utal

M_{xy} : M xy -síkbeli vektoriális komponense

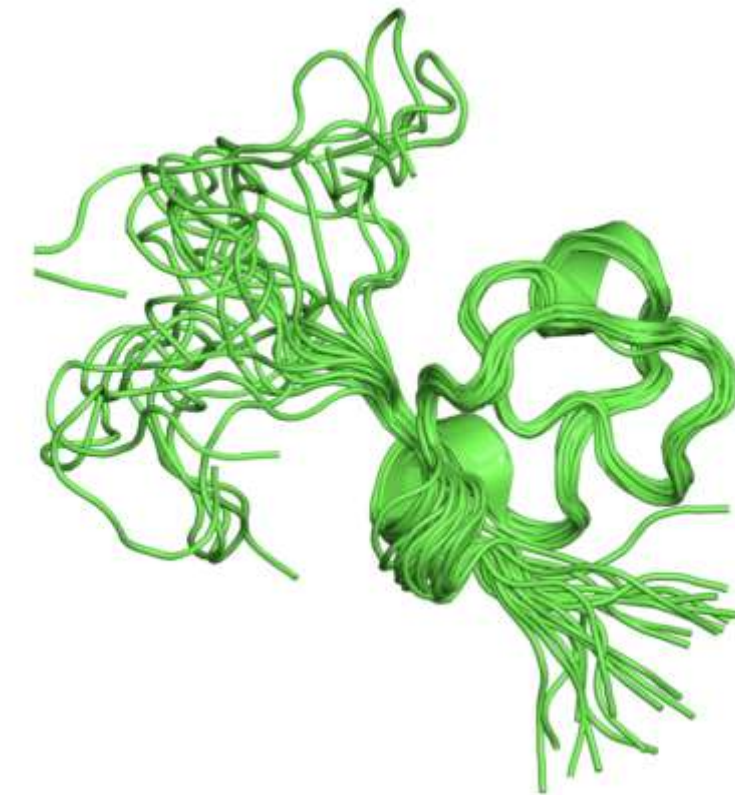
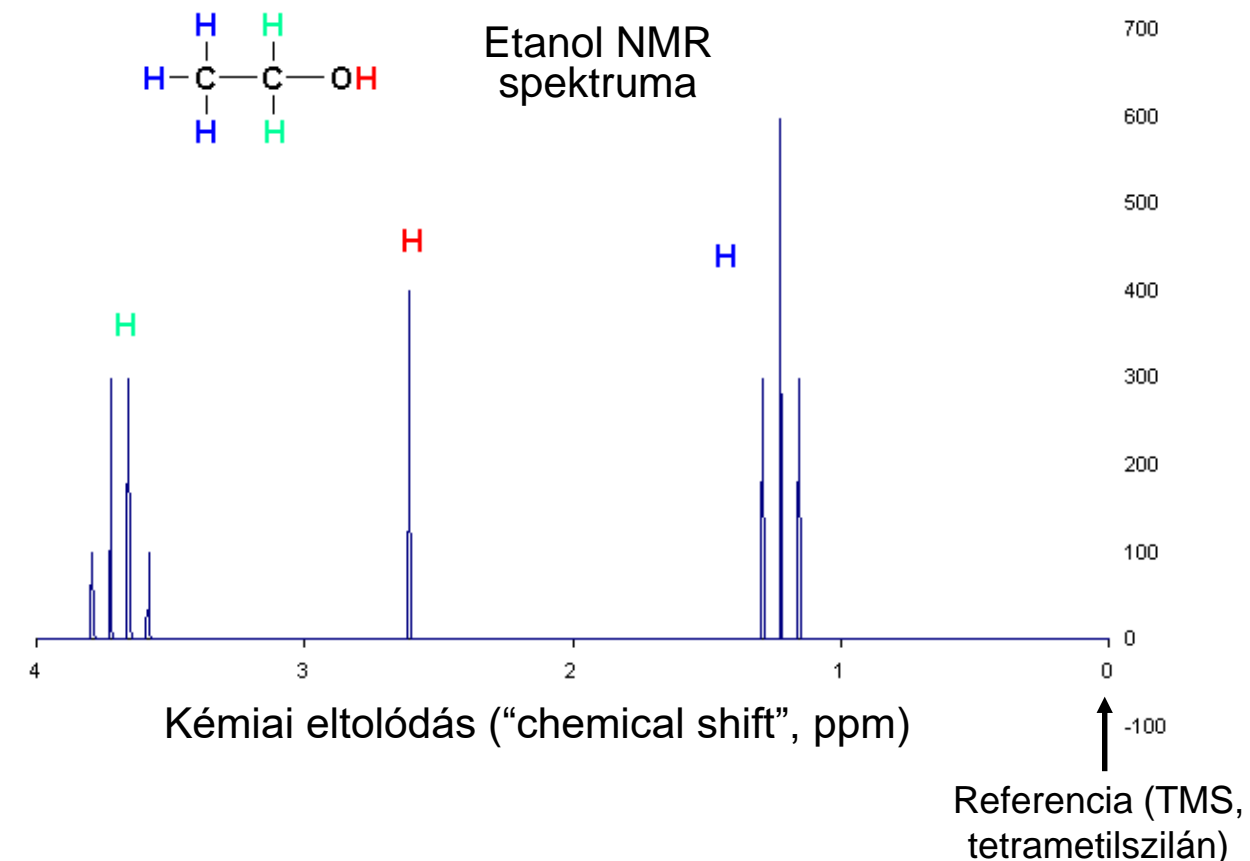


NMR spektroszkópia

- NMR spektroszkópia vagy Mágneses Rezonancia Spektroszkópia (MRS)
- Spektroszkópai módszer az atommagok körüli lokális mágneses tér mérésére. A mágneses térbe helyezett atommagok rezonanciafrekvenciáit mérjük meg.
- NMR spektrométer: Folyékony He által hűtött mágnes, nagy mágneses térerő (spektrális felbontás a térerővel egyenesen arányos)
- NMR spektrum: elnyelt elektromágneses sugárzás intenzitása frekvencia függvényében.
- “NMR-vonal” görbe alatti területe az abszorbeáló atommagok számával arányos.
- Elektronfelhő (i.e., annak szerkezete) befolyásolja a lokális mágneses teret: frekvenciafeltétel elhangolódik (“kémiai eltolódás”). Kémiai szerkezetmeghatározás lehetősége.
- Fehérje NMR: dinamika mérésének lehetősége, rendezetlen fehérje elemek detektálása



900 MHz NMR, 21.1 T mágnes



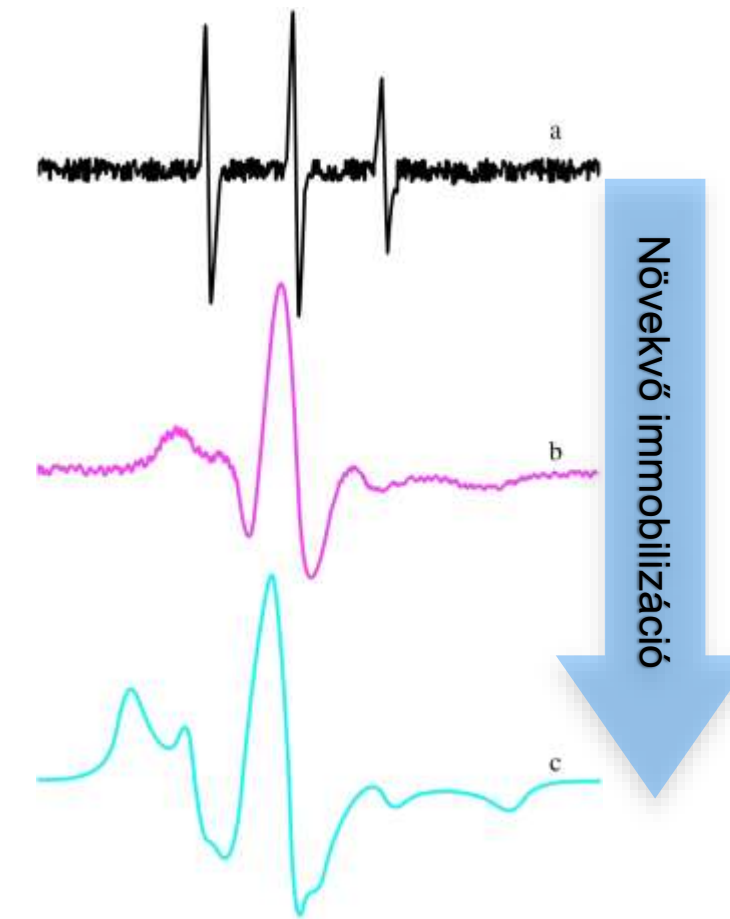
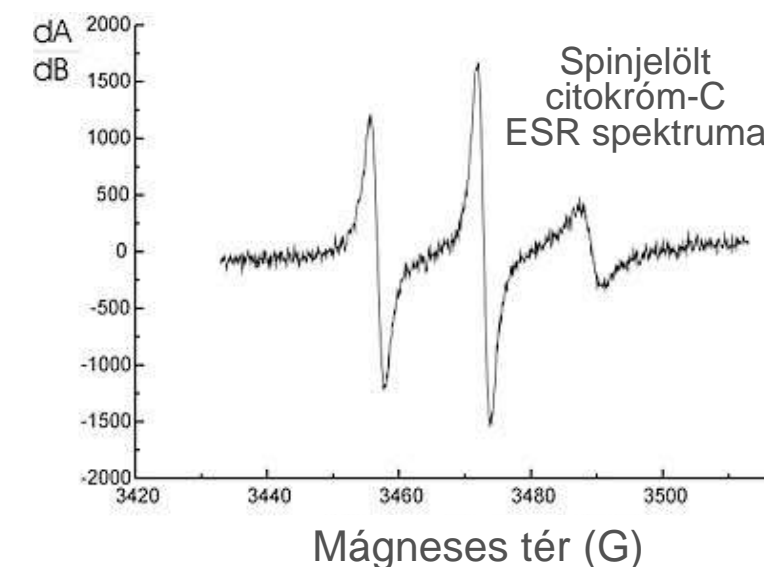
Somatomedin B domén
(szuperponált szerkezetek)

ESR spektroszkópia

- Elektronspin rezonancia (ESR) vagy elektron paramágneses rezonancia (EPR) spektroszkópia
- Spektroszkópai módszer a páratlan elektront tartalmazó anyagok vizsgálatára.
- ESR spektrum: elnyelt elektromágneses sugárzás intenzitása a mágneses tér függvényében.
- NMR-énél alacsonyabb mágneses tér, de nagyobb elektromágneses sugárzási frekvenciák (GHz, mikrohullám <1T térben is).
- **Spin-jelölés:** stabil párosítatlan elektront tartalmazó vegyülettel való jelölés. "Site-directed" (célzott) spinjelölés: pontmutációval tervezetten bevitt reaktív aminosav oldalláncok (-SH) spinjelölése.
- Mozgási (rotációs) sebességek mérési lehetősége a 10^{-4} - 10^{-2} s időtartományban.



Jevgenyij Zavoisky, 1944



Immobilizáció hatása az ESR spektrumra

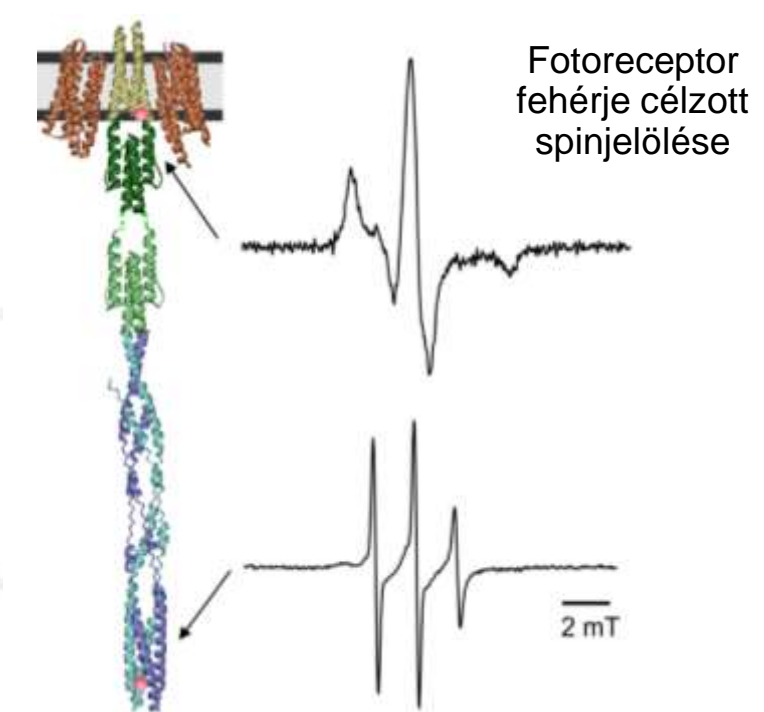


"Site-directed" (célzott) spinjelölés

Hozzáférhetőség
(teljesítmény
szaturáció)

Proximitás
(spin-spin
csatolás)

[NIEDDA]
[O₂]
Mobilitás
(spektrum vonal
alak)

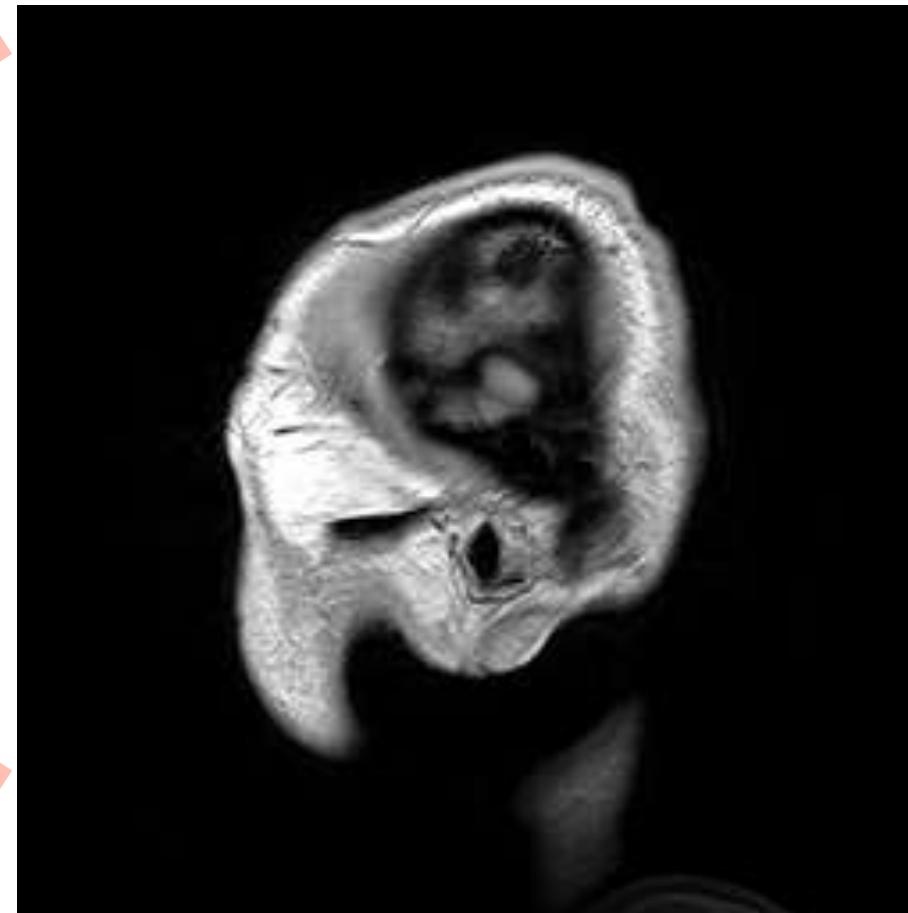


MRI: orvosi diagnosztikát forradalmasító képkotó módszer

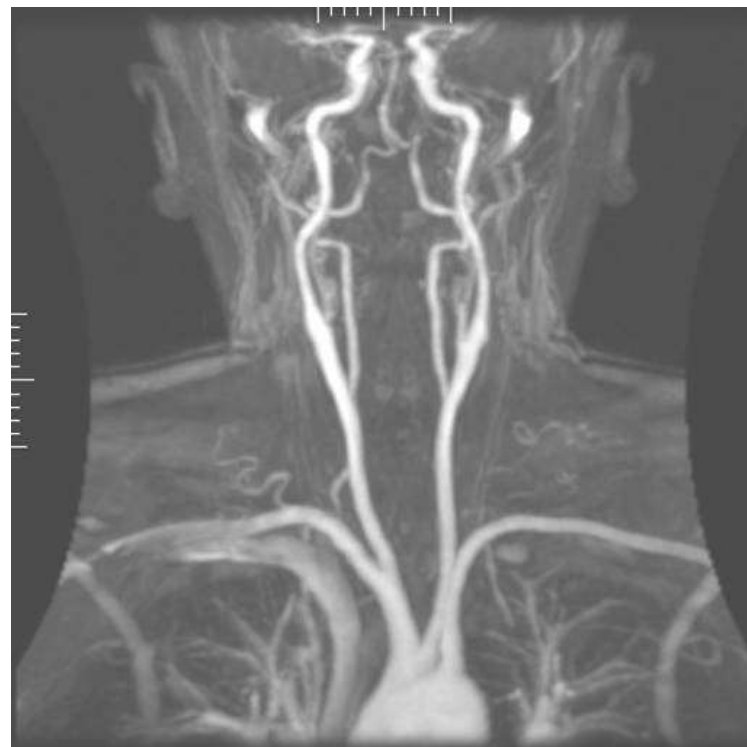
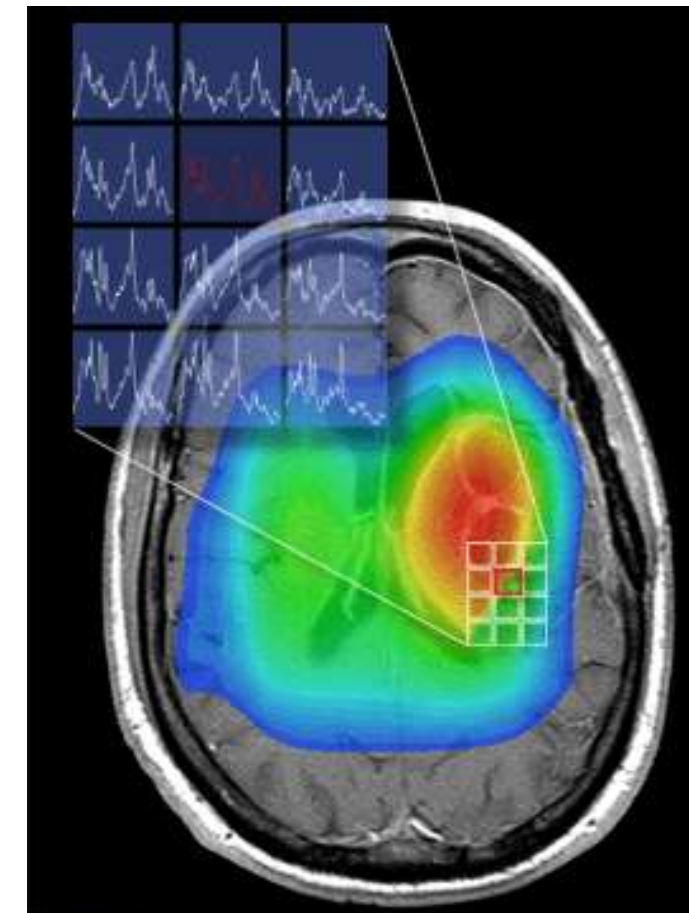


Non-invazív

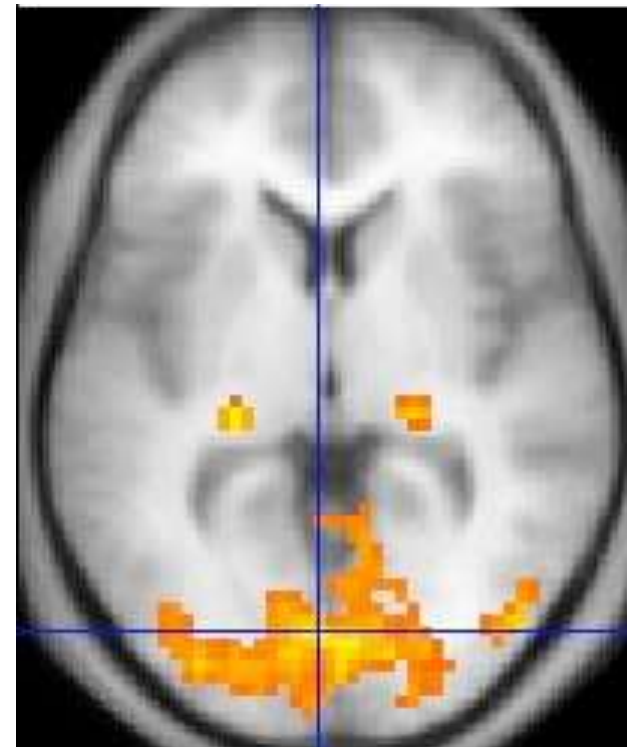
Nagyfelbontású, anatómiai MRI



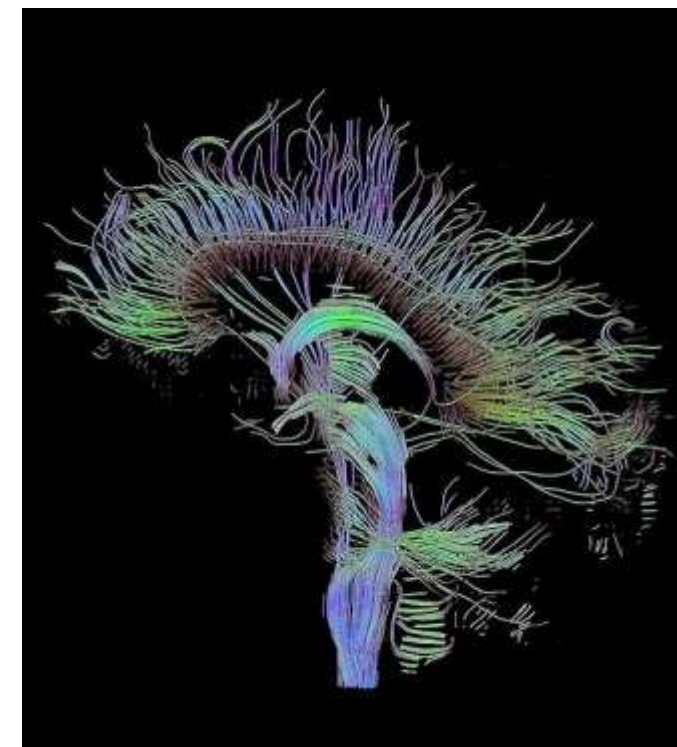
MRI spektroszkópia



MRI angiográfia



Funkcionális MRI (fMRI)

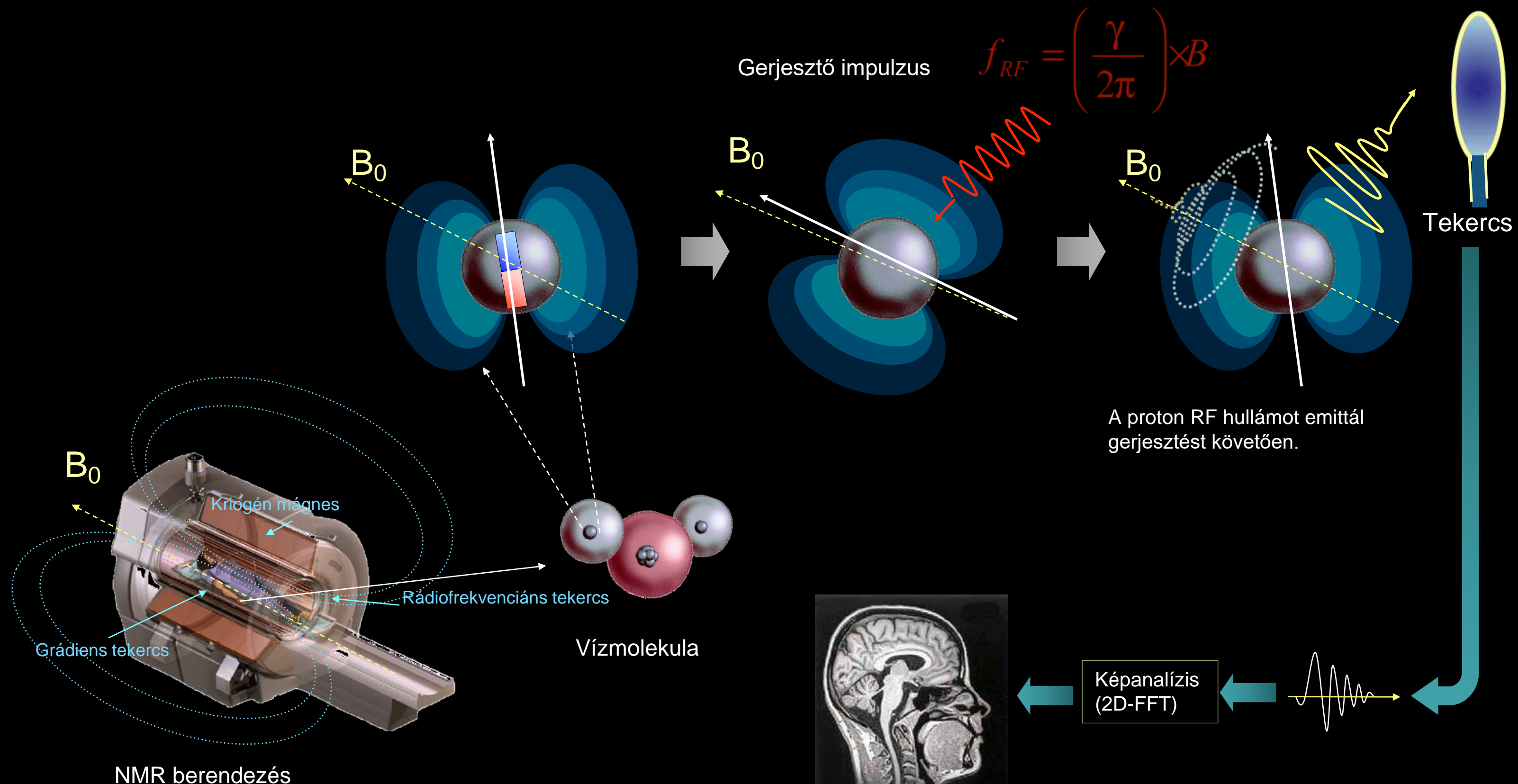


Diffúziós MRI
(tractographia)



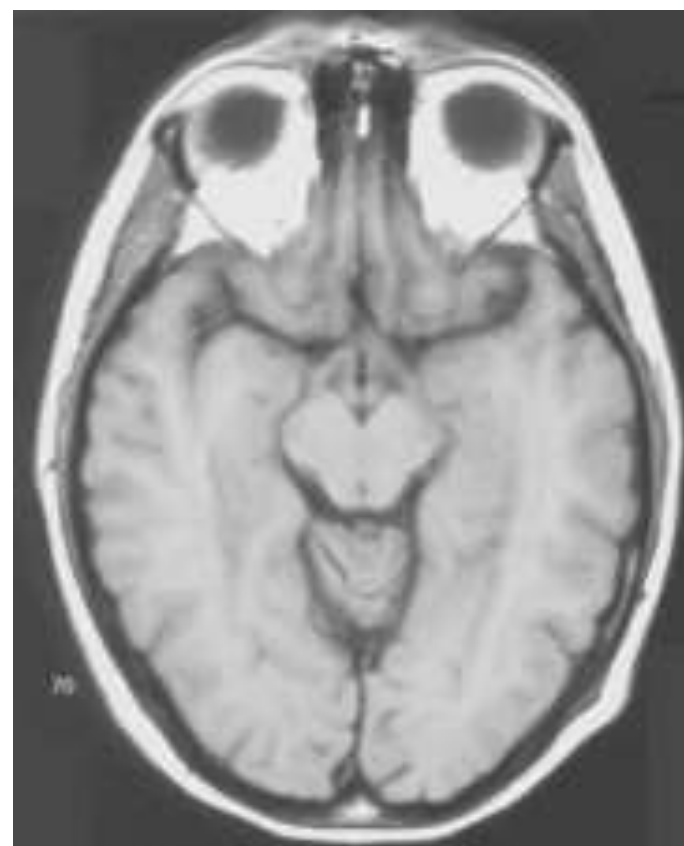
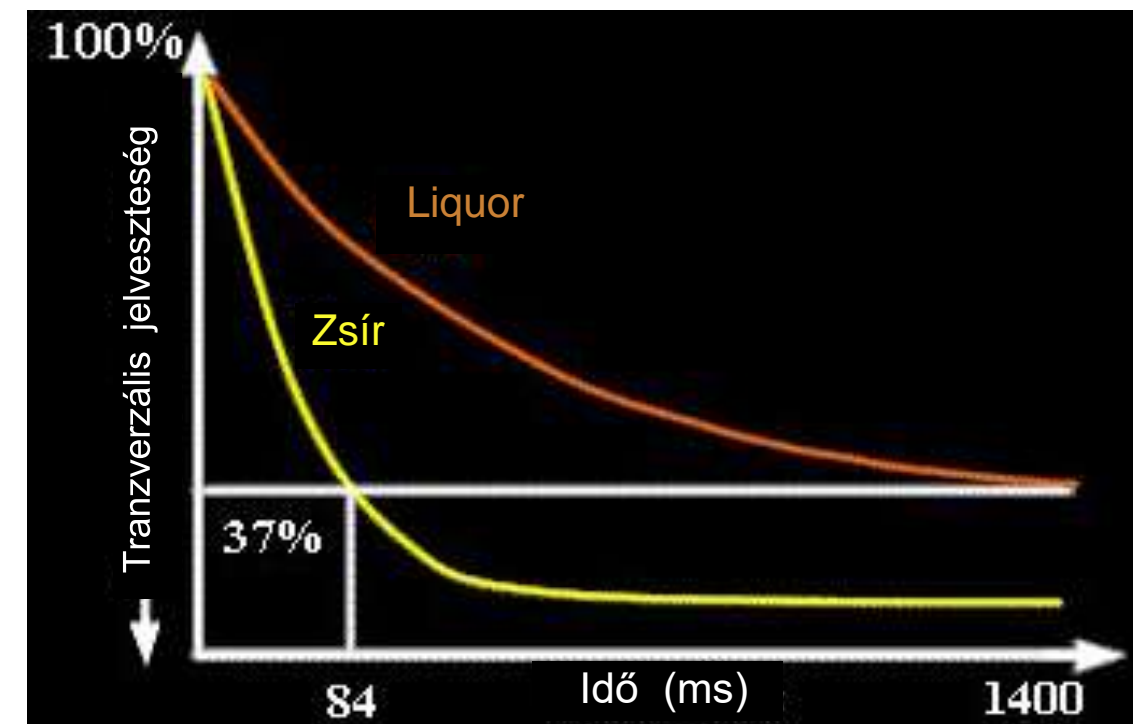
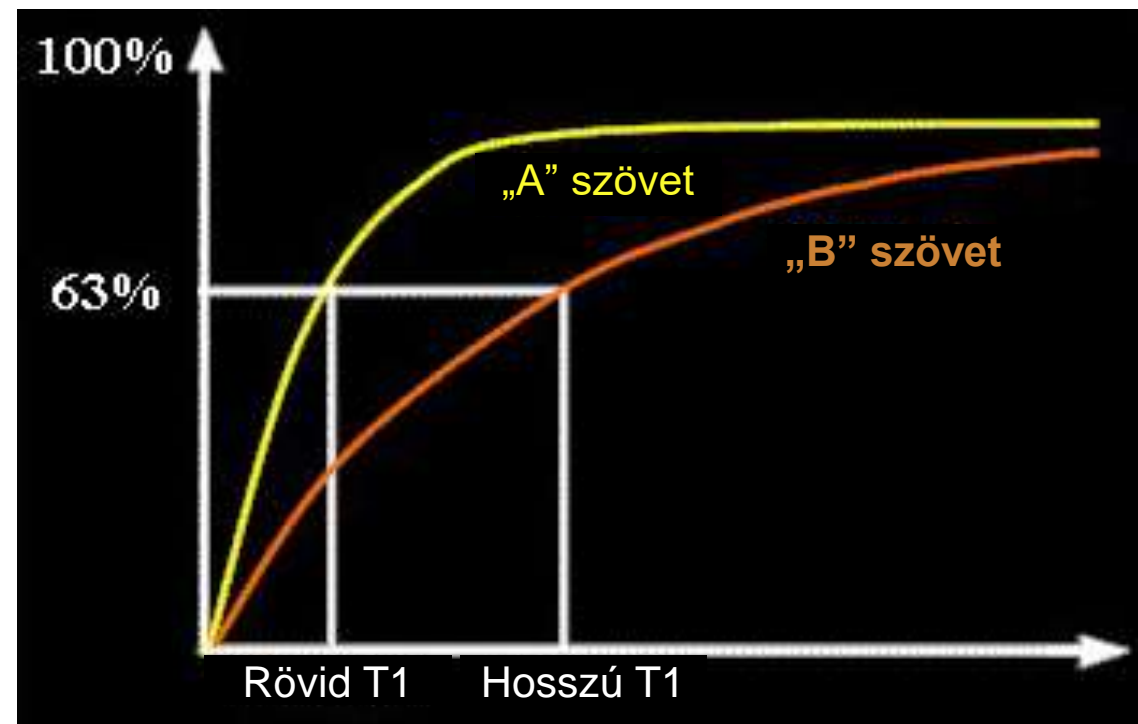
Musculoskeletalis MRI

MRI: az emberi test makroszkópikus mágnesezettségét hozza létre

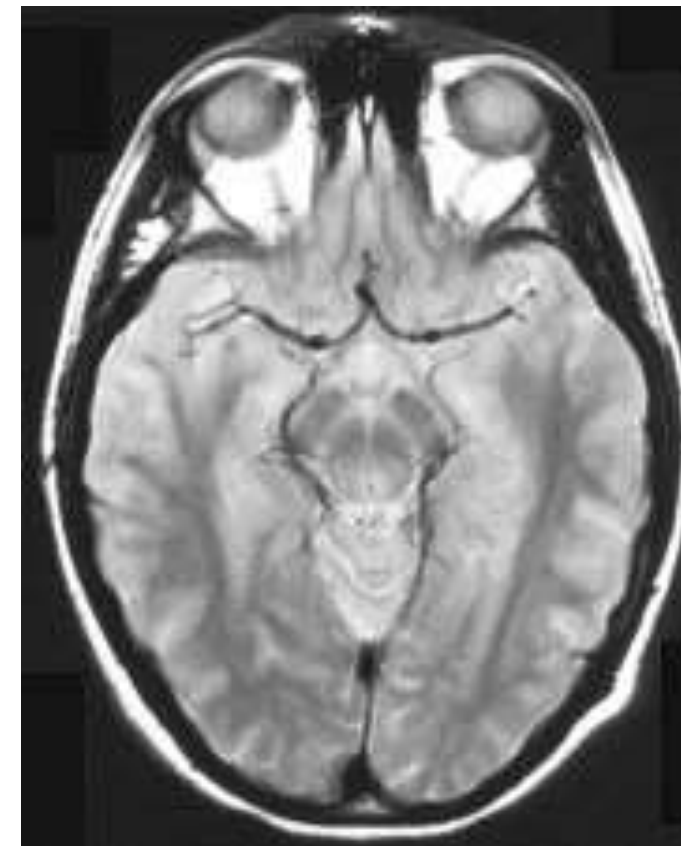


MRI 1: kontraszt

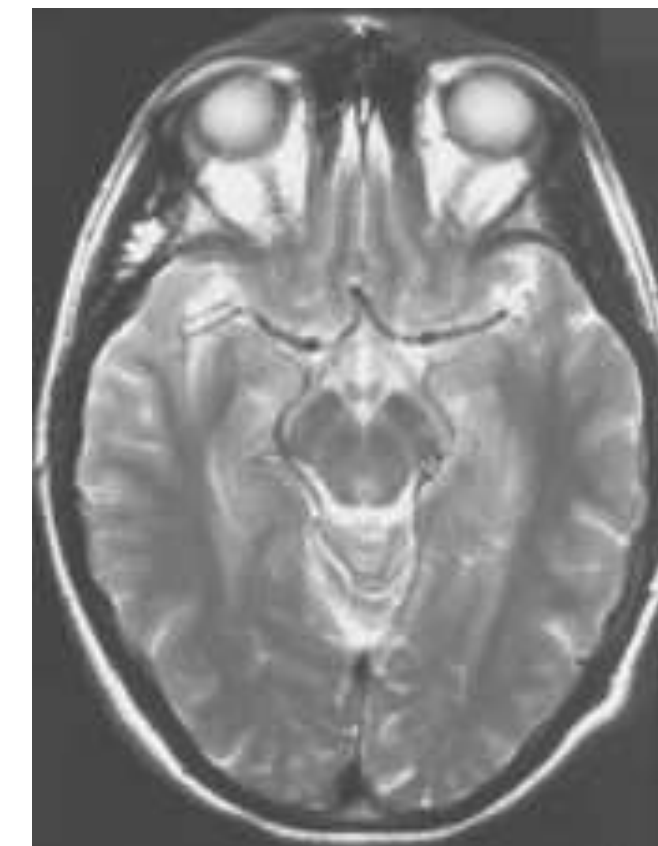
Színkontraszt a spinsűrűség (proton denzitás, PD) és relaxációs idők (T1, T2) alapján



T1-súlyozás



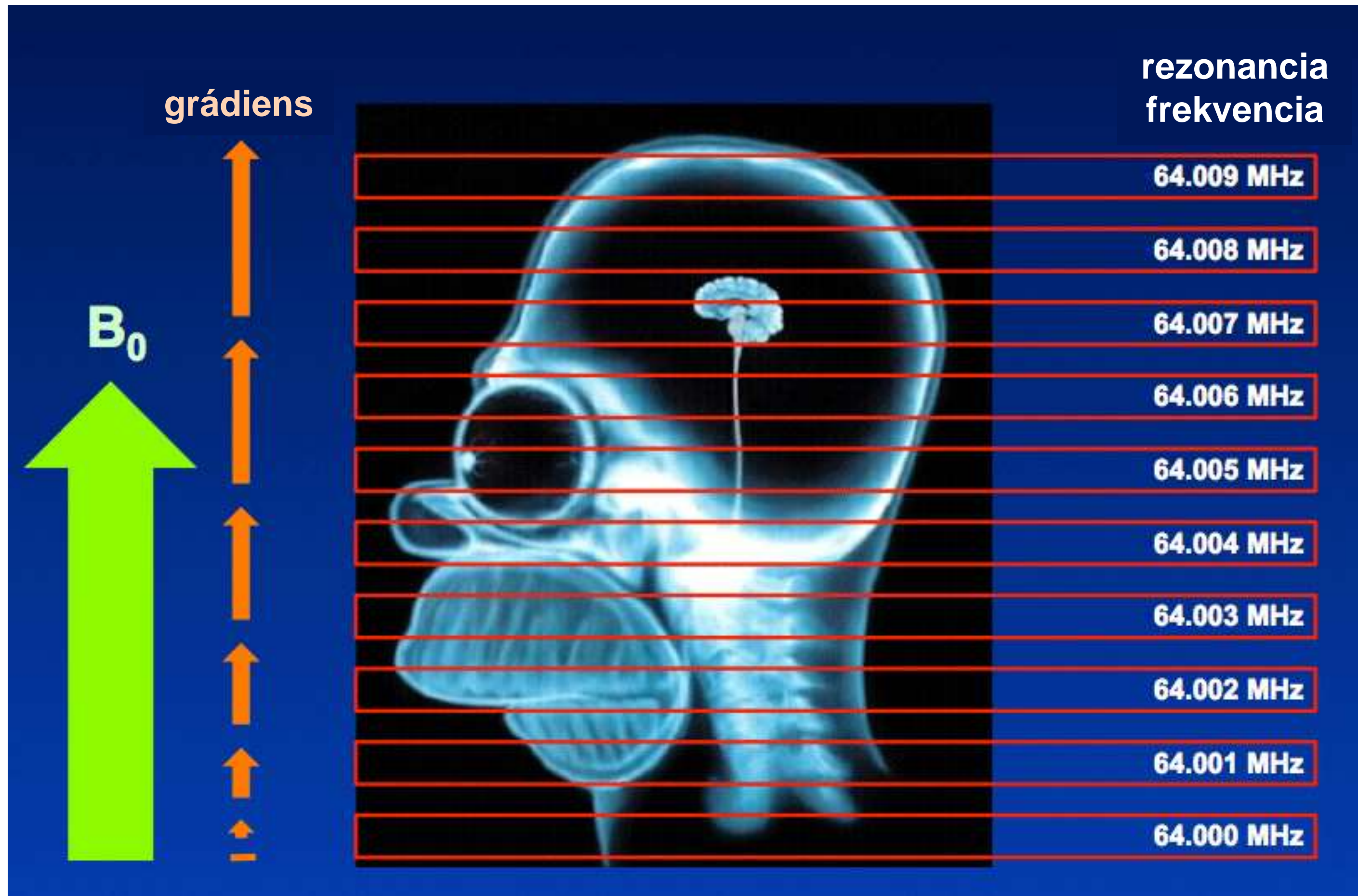
protonsűrűség-súlyozás



T2-súlyozás

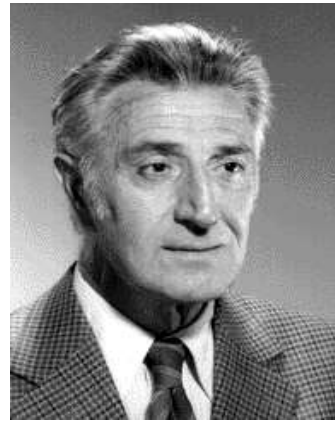
Grádiens: A mágneses térerősség a hely függvényében változik

Ezzel kiválasztható egy rezonáns szelet

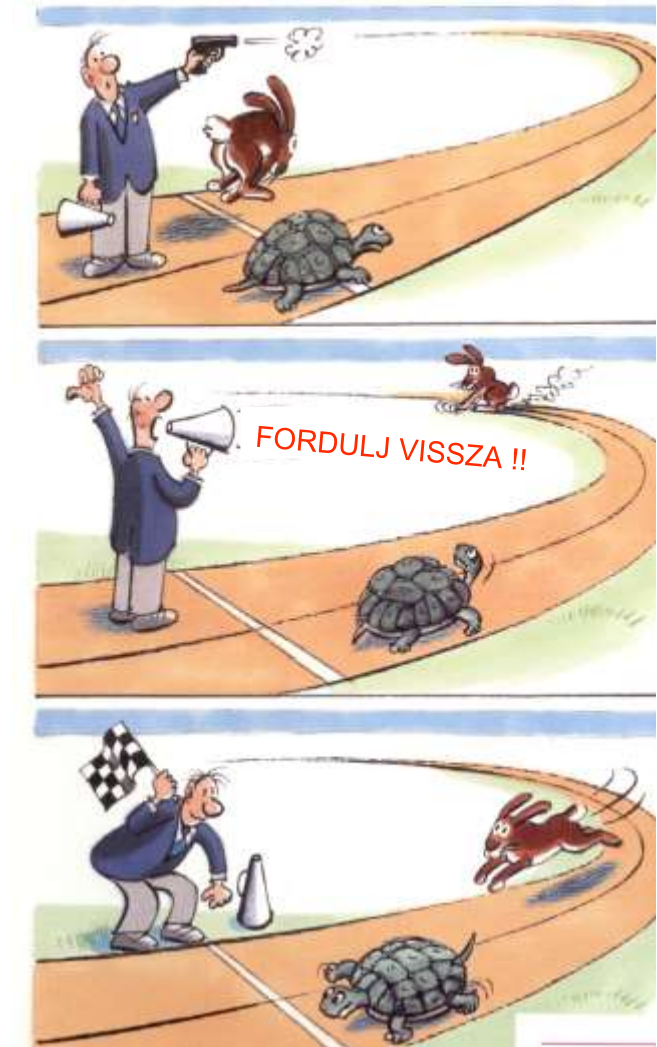
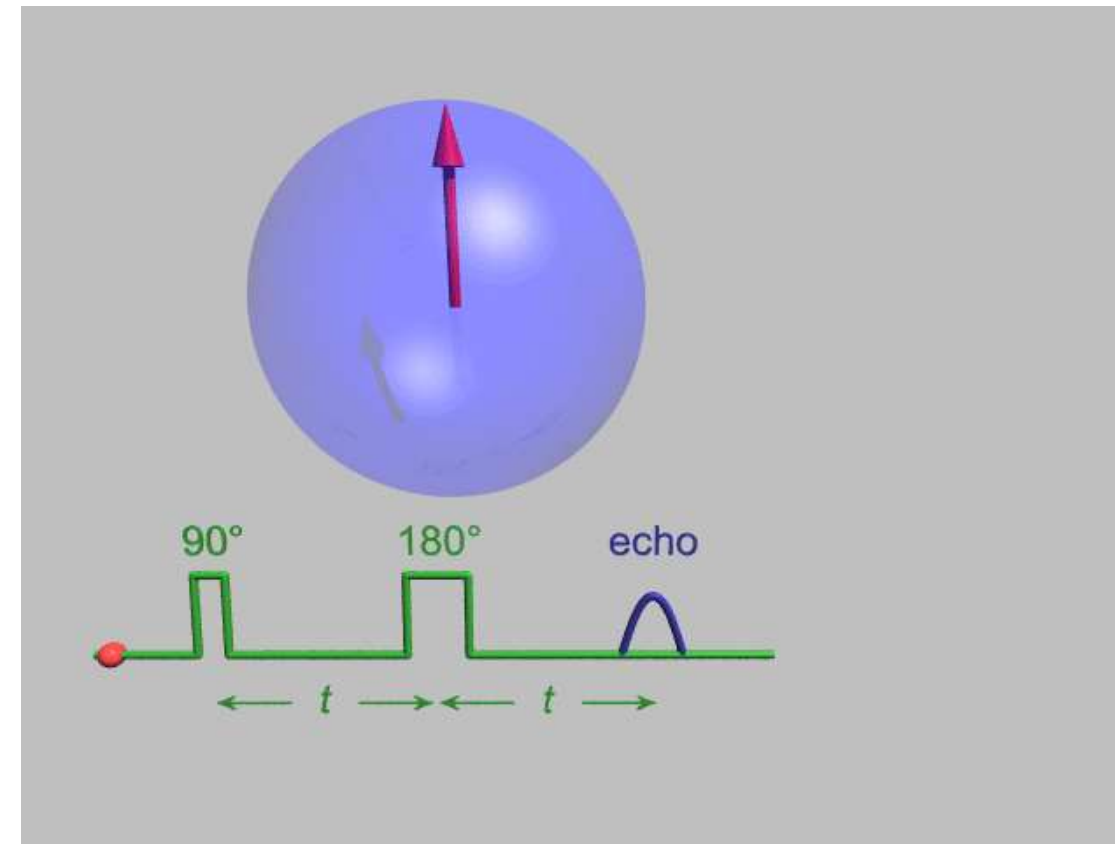
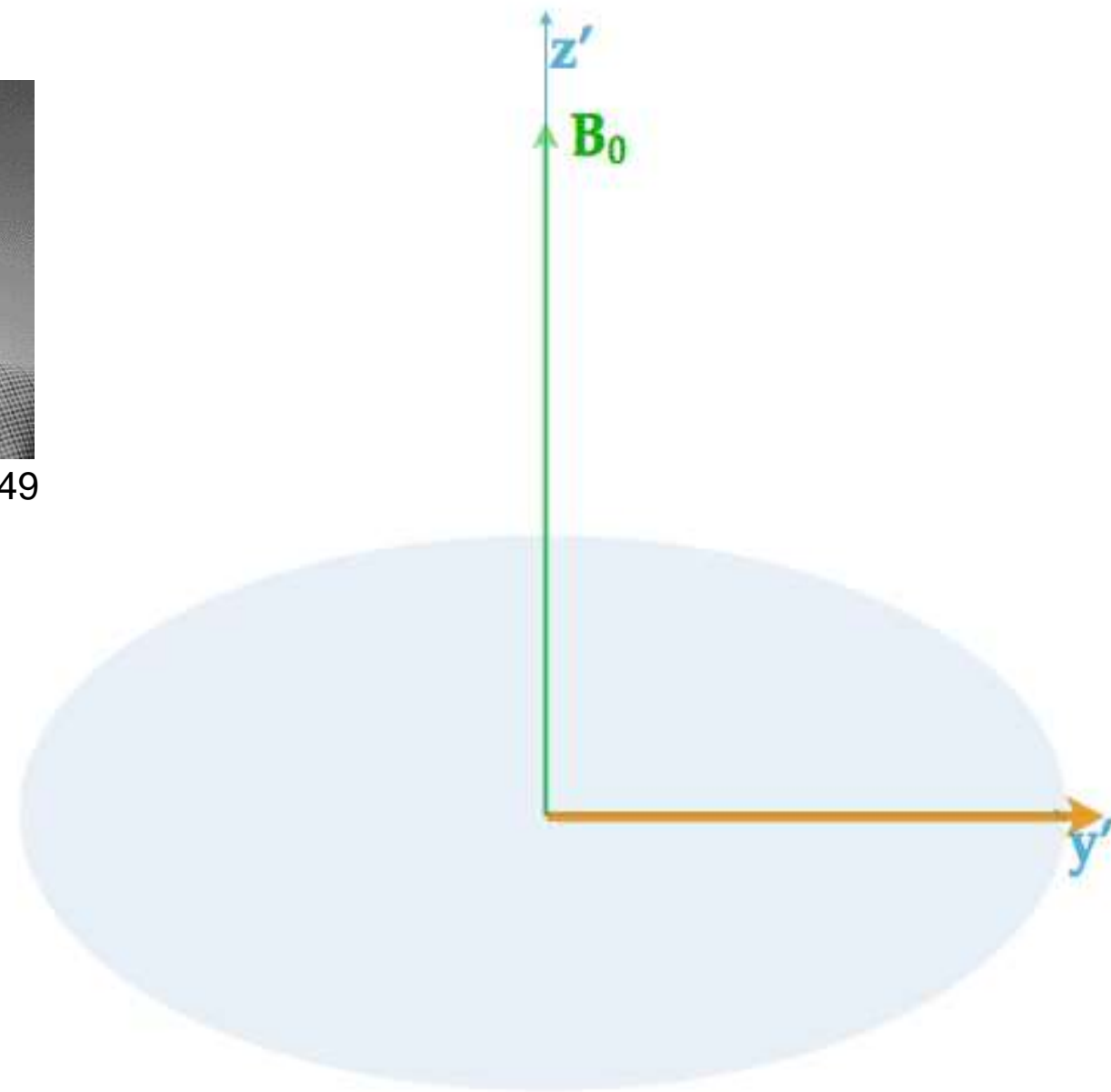


Relaxációs idő mérése: spin-echo kísérlet

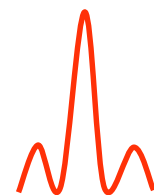
Ismétlődő gerjesztő, refókuszáló és “visszhang” impulzusok: spin-echo szekvencia



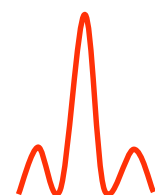
Erwin Hahn, 1949



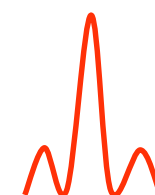
Gerjesztő
impulzus (90°)



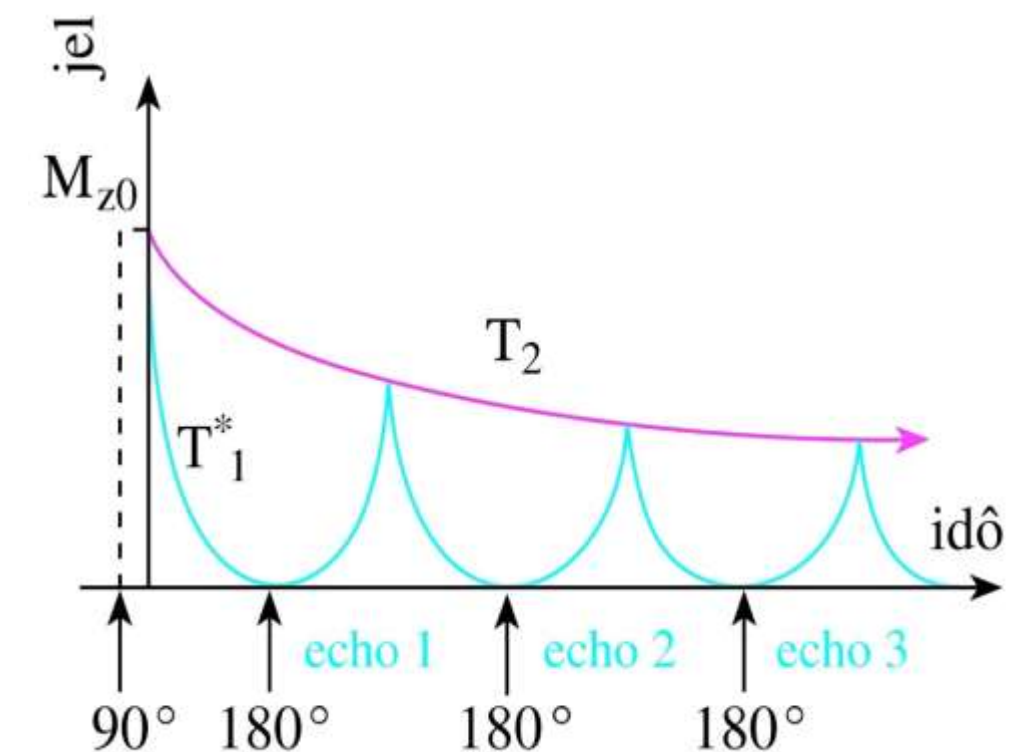
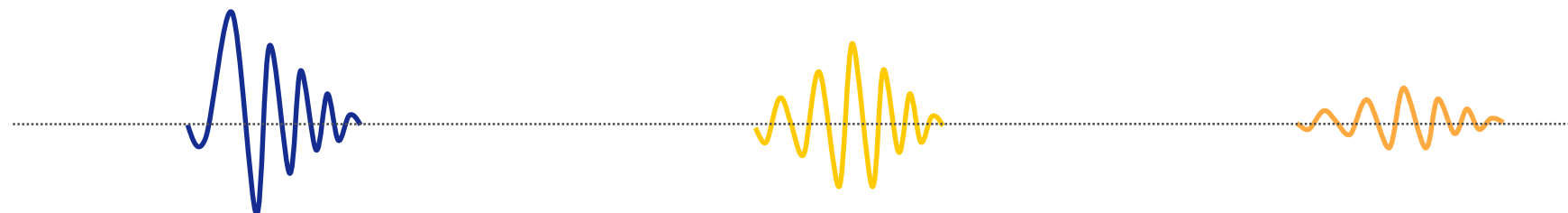
Refókuszáló
impulzus (180°)



Refókuszáló
impulzus (180°)



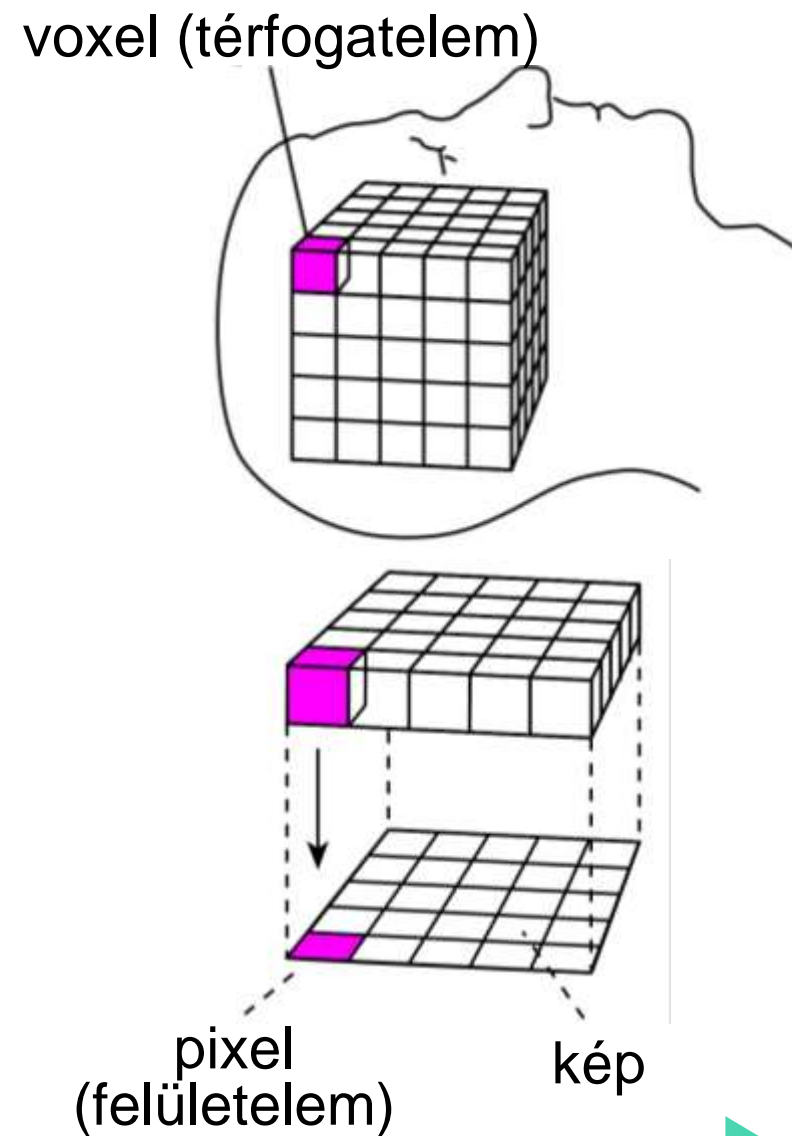
Kattogó hang az MRI-ben:
impulzusok generálása



MRI 2: Térbeli kódolás



Paul C. Lauterbur
(1929-)

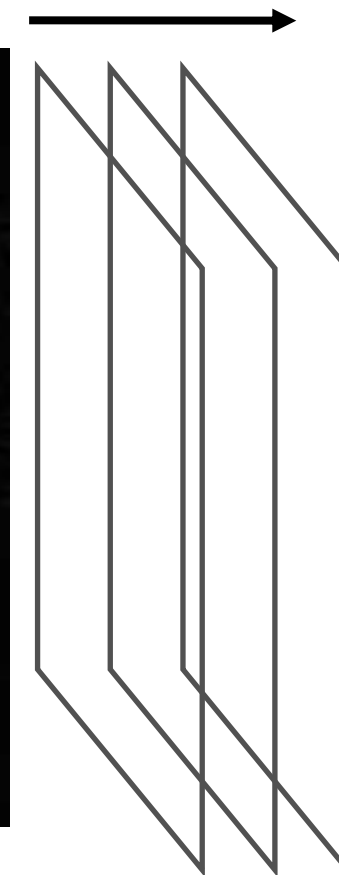
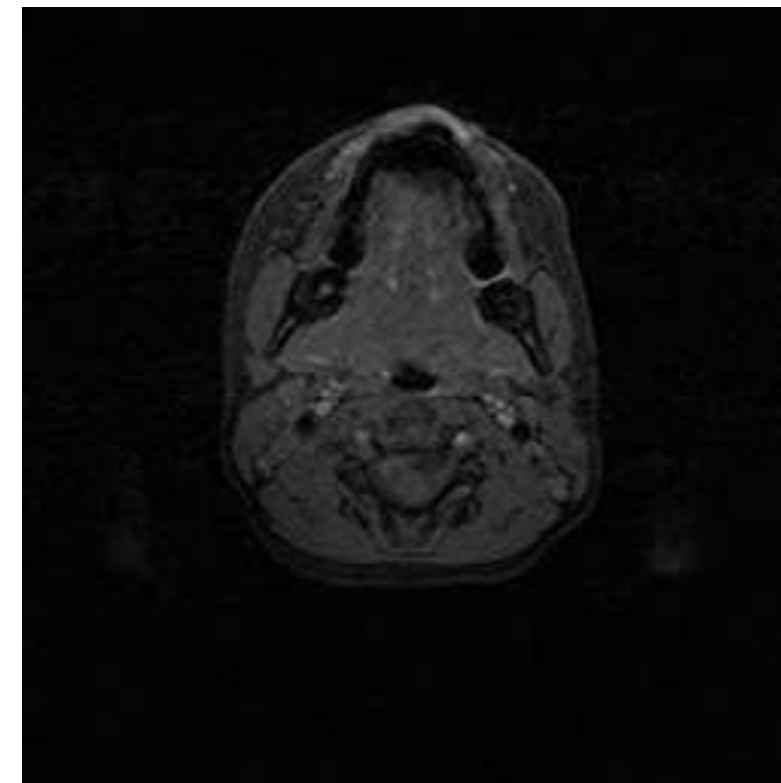


B_z

B_y

B_x

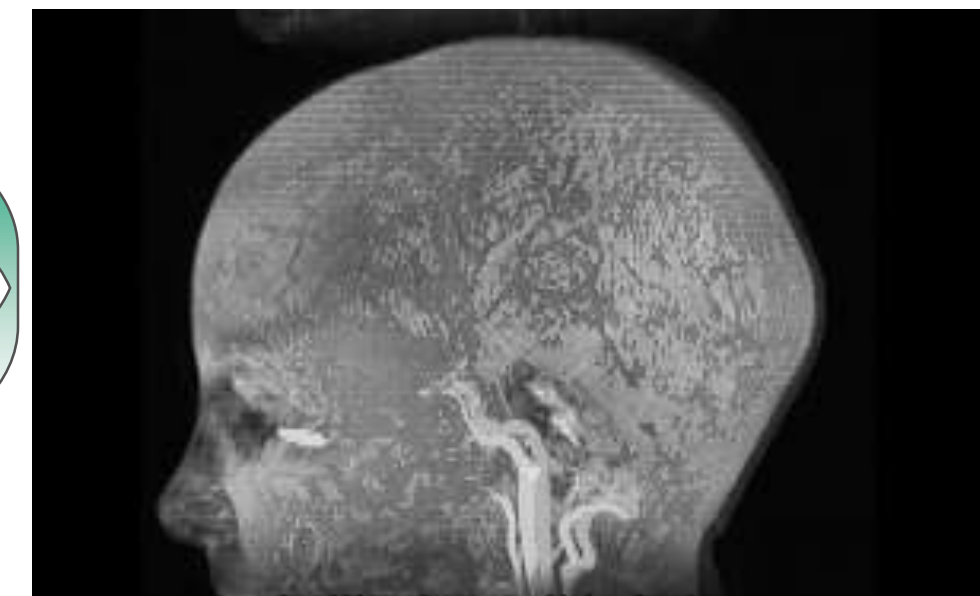
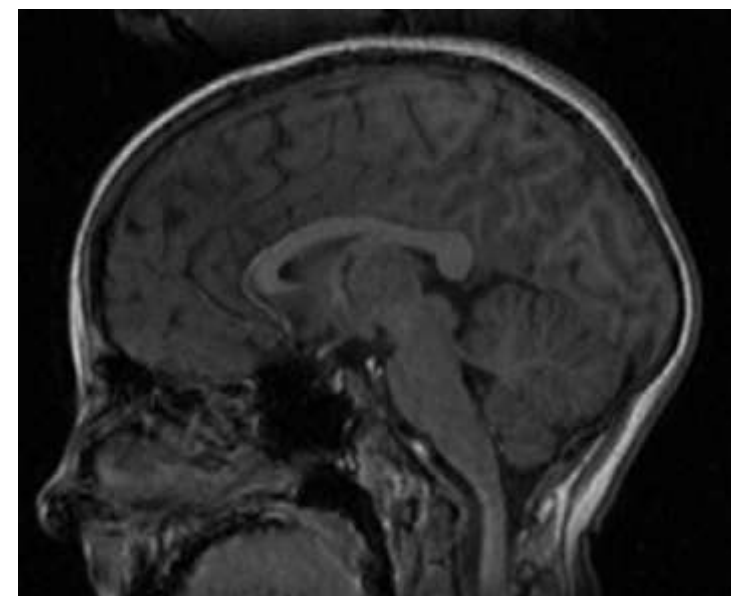
- Elemi 3D képpontok (voxel) definiálása és címezhetősége: gradiens tér segítségével
- Alapja: rezonanciafeltétel



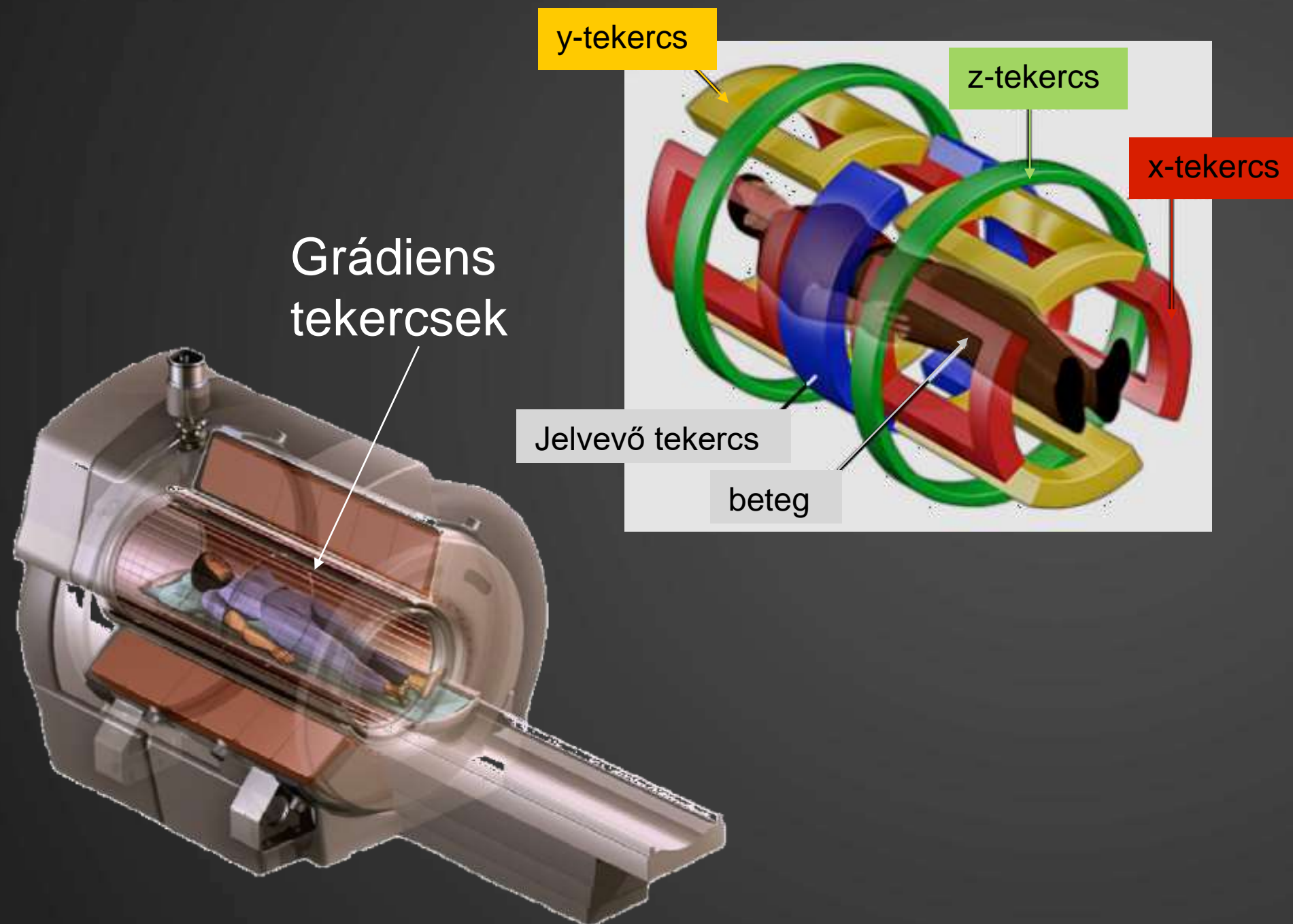
Újraszeletelés
merőleges síkban



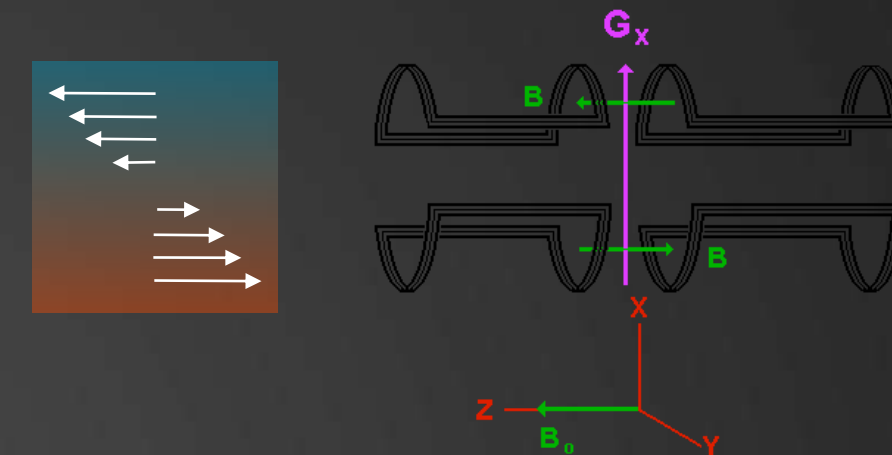
Térbeli projekció
(„volume rendering”)



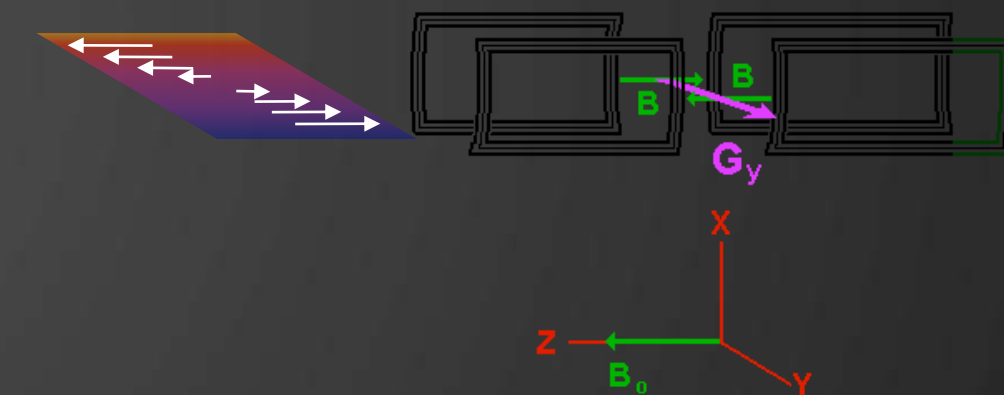
Térben változó mágneses tér létrehozása: “grádiens” tekercsekkel



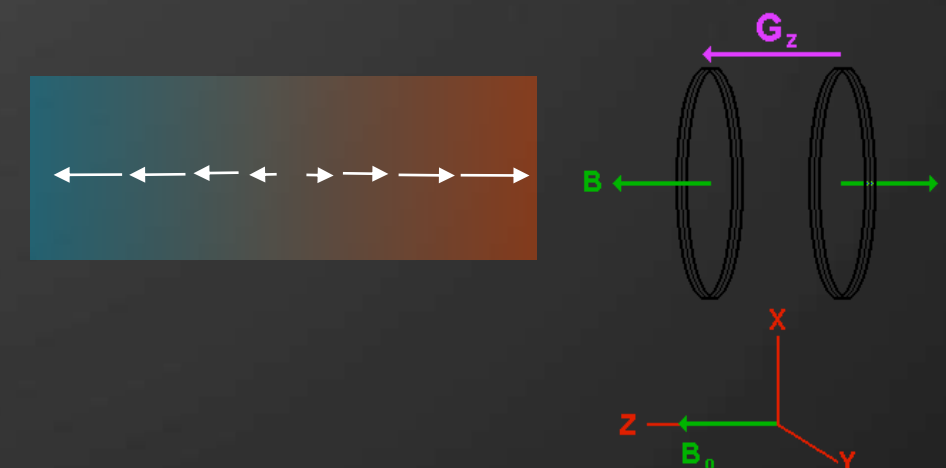
X-grádiens tekercs



Y-grádiens tekercs



Z-grádiens tekercs



MRI 3: képrekonstrukció

1. "Backprojection"

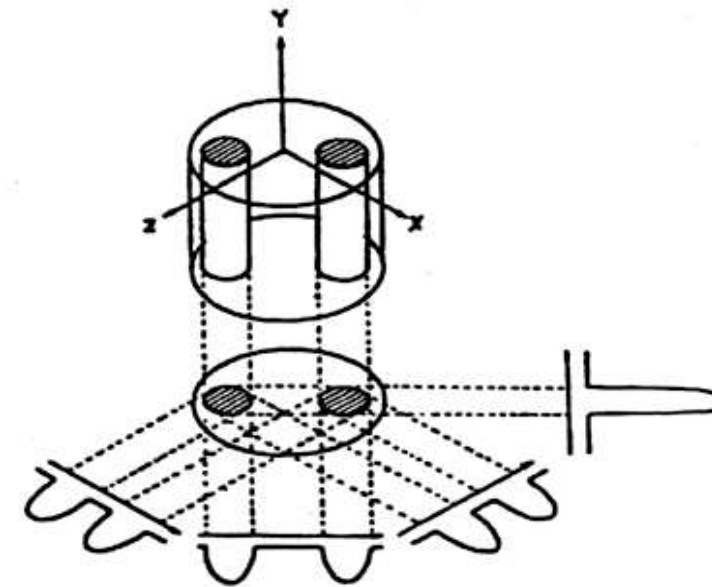
- „visszavetítés”
- mint a CT esetében



Paul Lauterbur,
1973, Illinois



Peter Mansfield,
1973, Nottingham



Visszavetítés elve



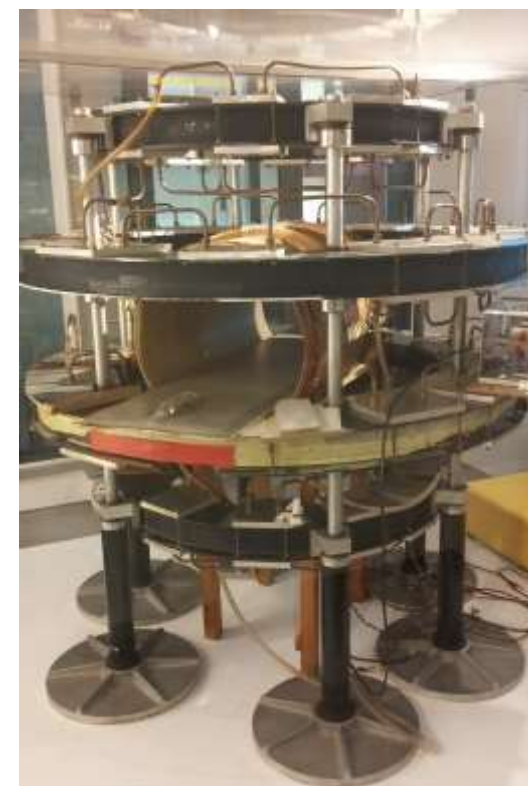
Rekonstruált kép (két
kémcső keresztmetszete)

2. 2D Fourier transzformáció

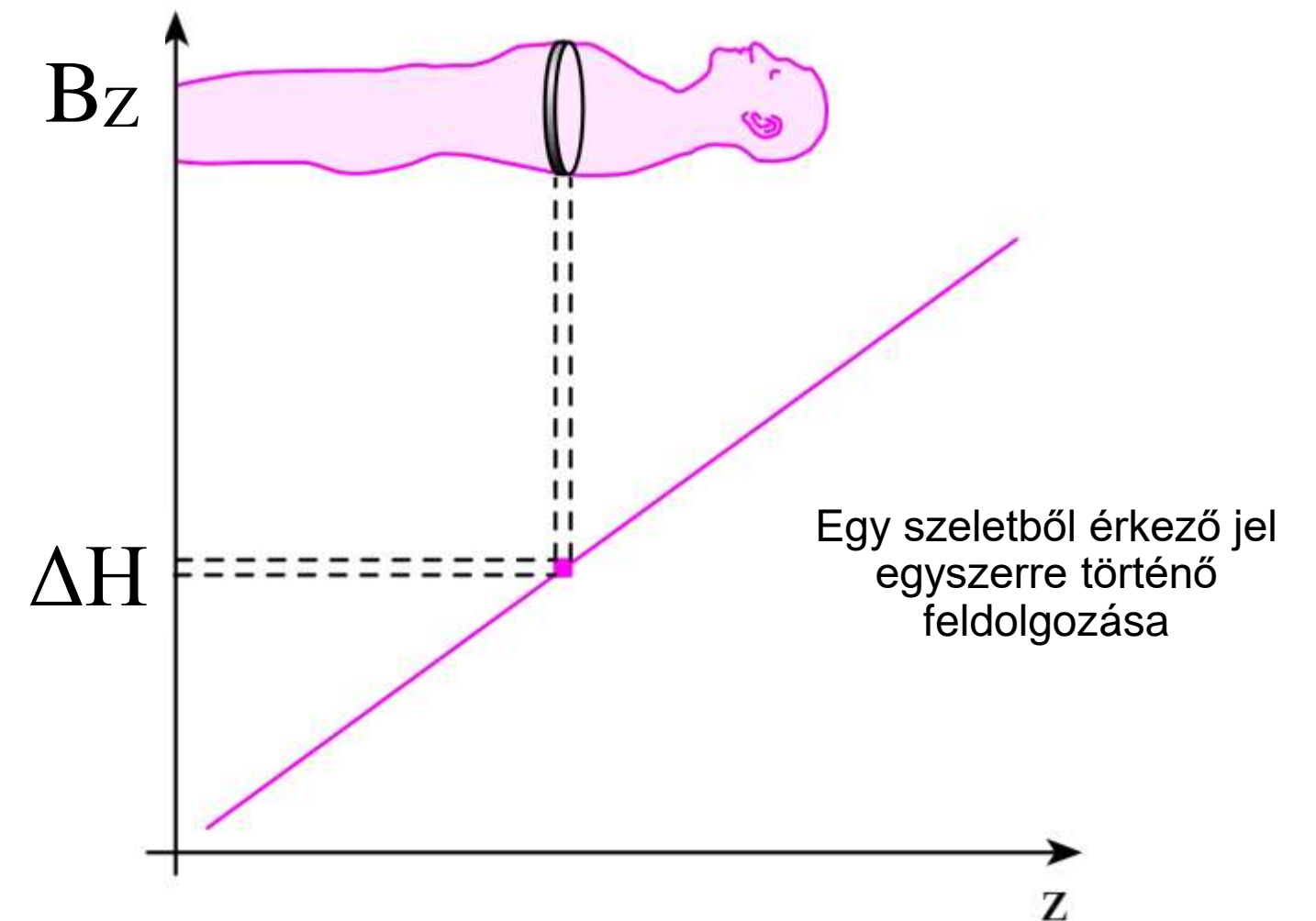
- jelenleg alkalmazott
módszer
- „NMR Fourier
Zeugmatography”



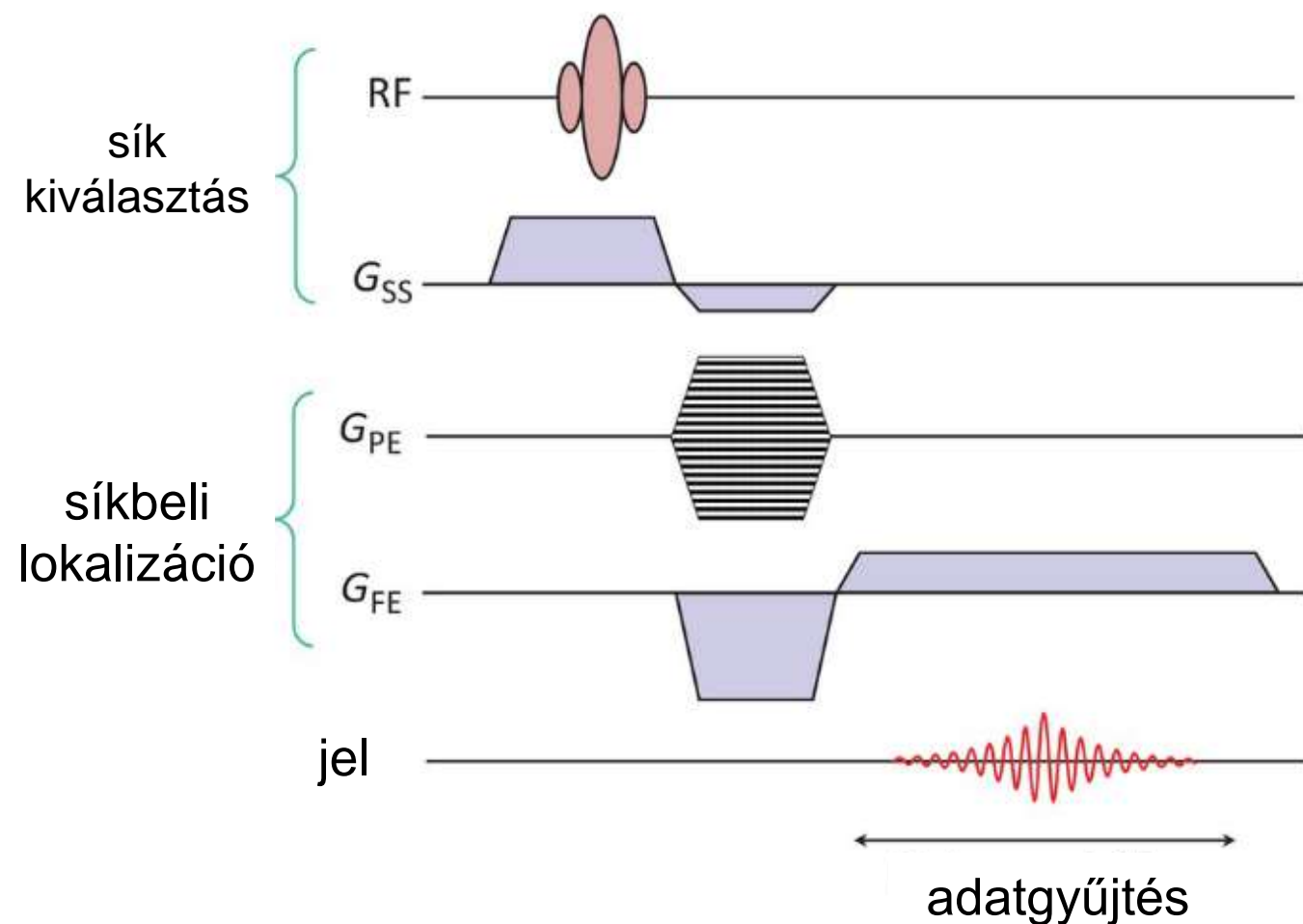
Richard Ernst,
1974, Zürich



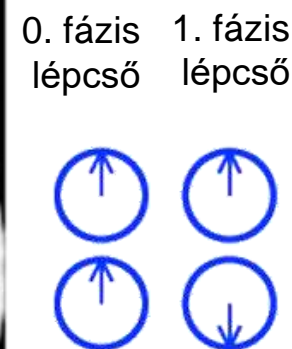
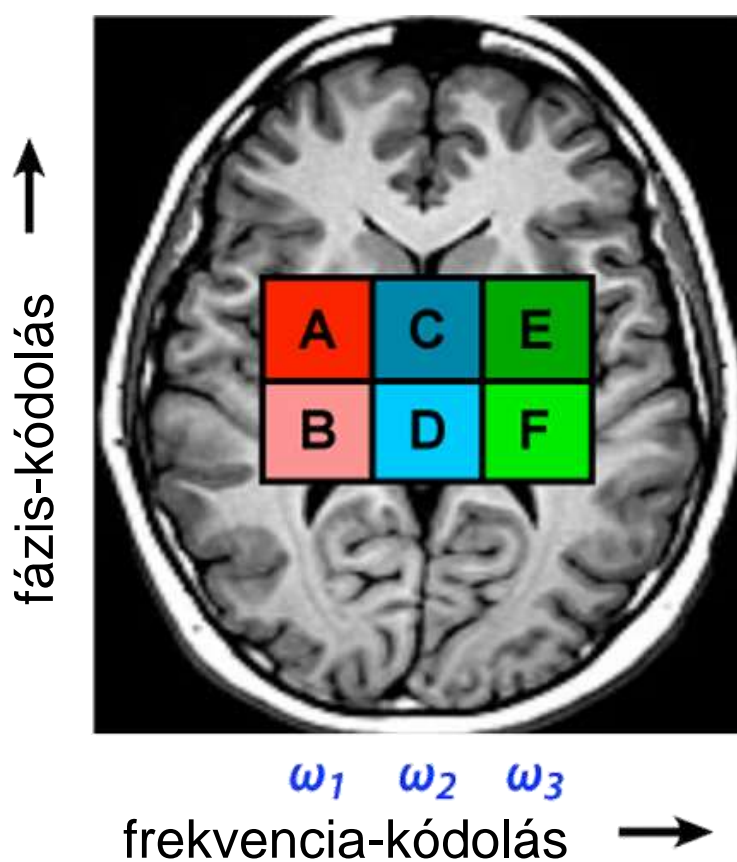
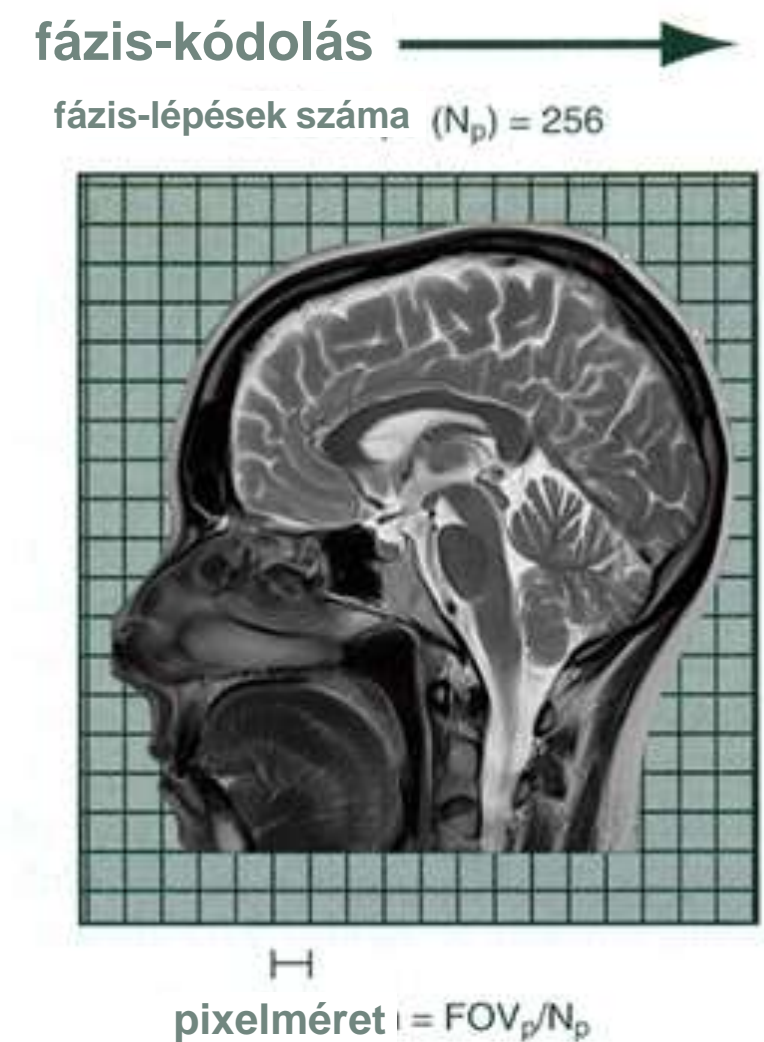
“MRI Scanner Mark One”,
Aberdeen, Skócia



képrekonstrukció: FT módszer



- A szelet kiválasztása a 90° -os gerjesztési impulzus alatt történik.
- A szelet síkjában a 180° -os impulzus-echo alatt további mágneses gradienst alkalmazunk a fázis és frekvenciakódoláshoz.
- Minden echo jelhez több voxel járul hozzá különböző frekvenciákkal.
- A frekvenciakomponenseket az FT segítségével nyerjük ki az összetett jelből.
- Az adatgyűjtést többször meg kell ismételni.

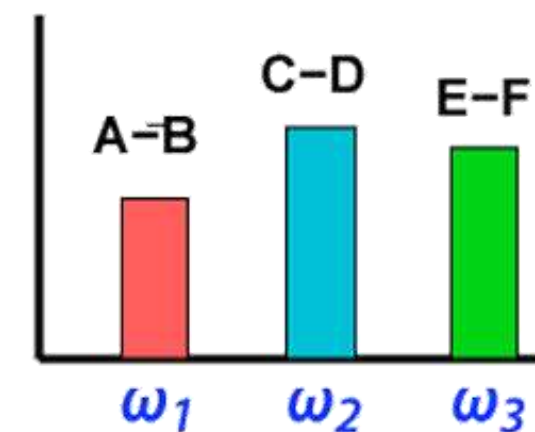
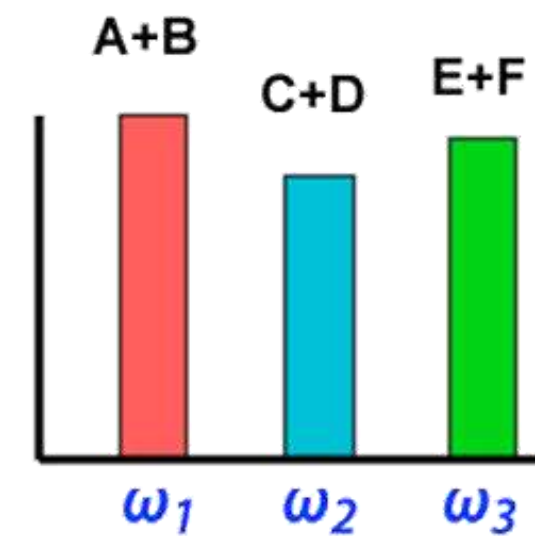
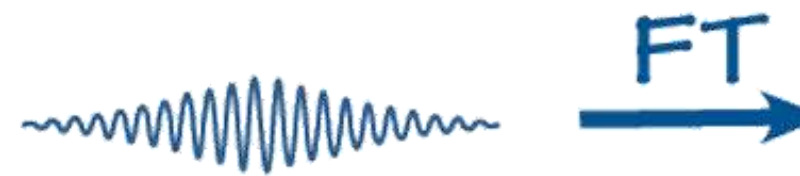


0. fázis lépcső

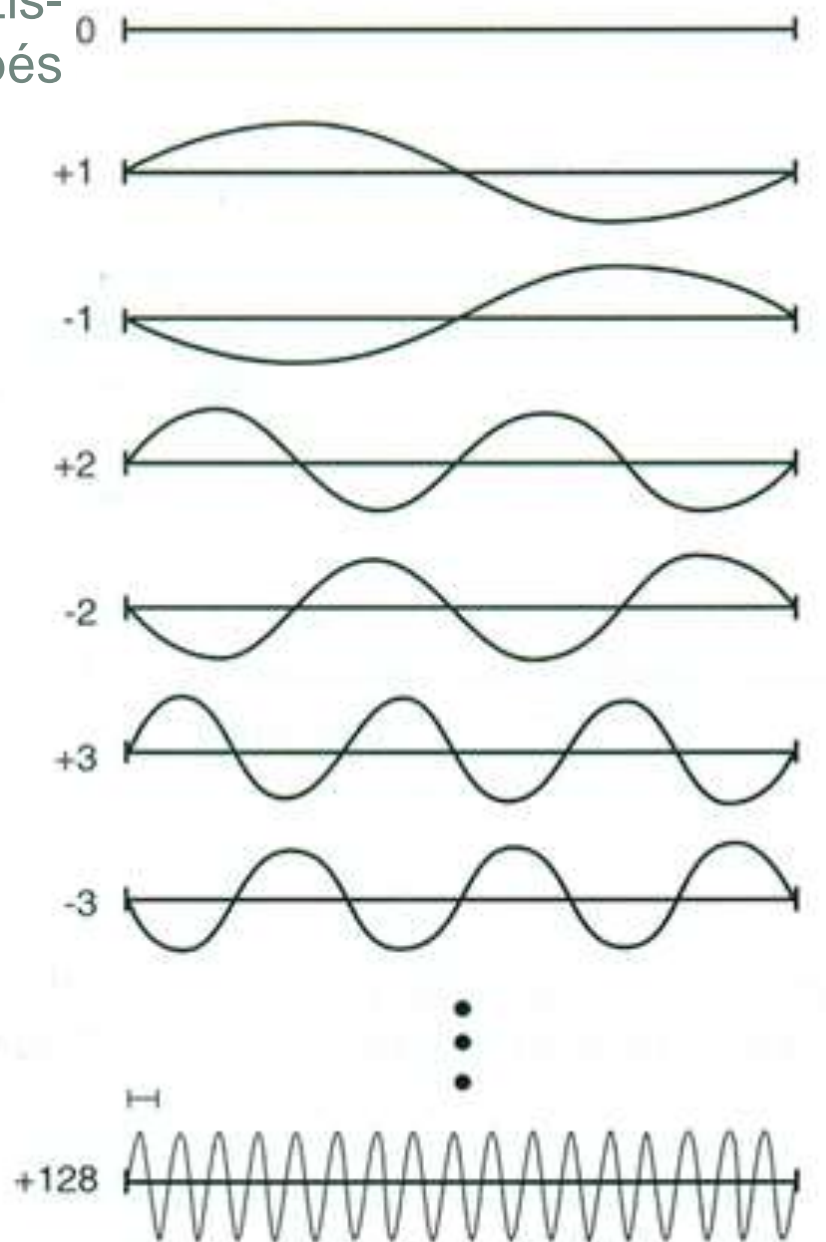


kompozit jel minden pixel részvételével minden fázislépésben

1. fázis lépcső

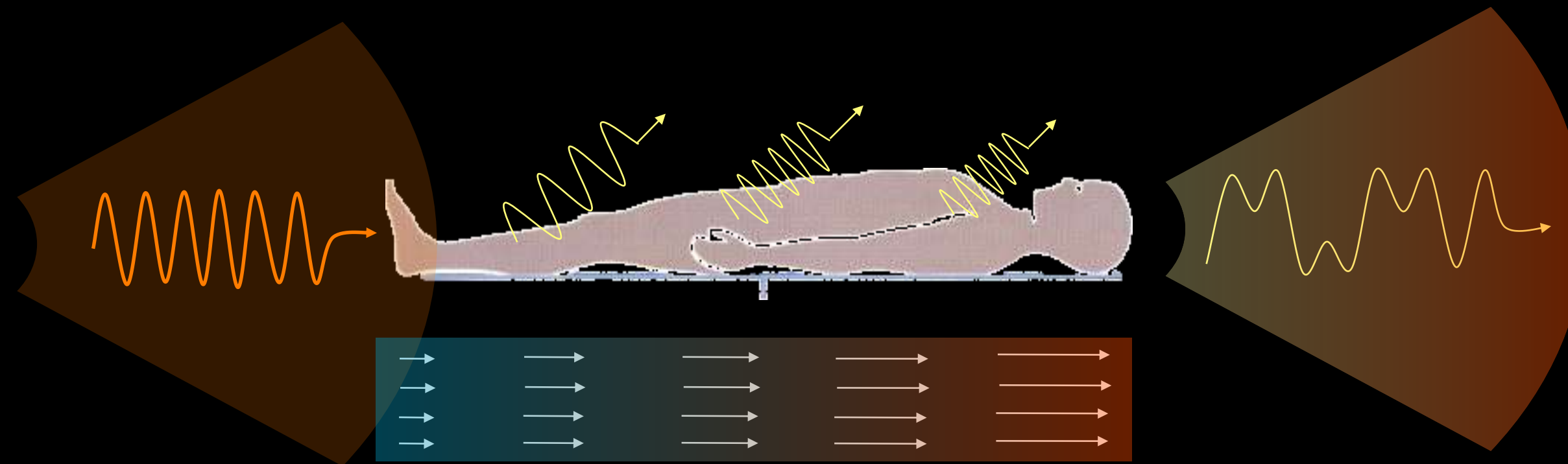


fázis-lépés

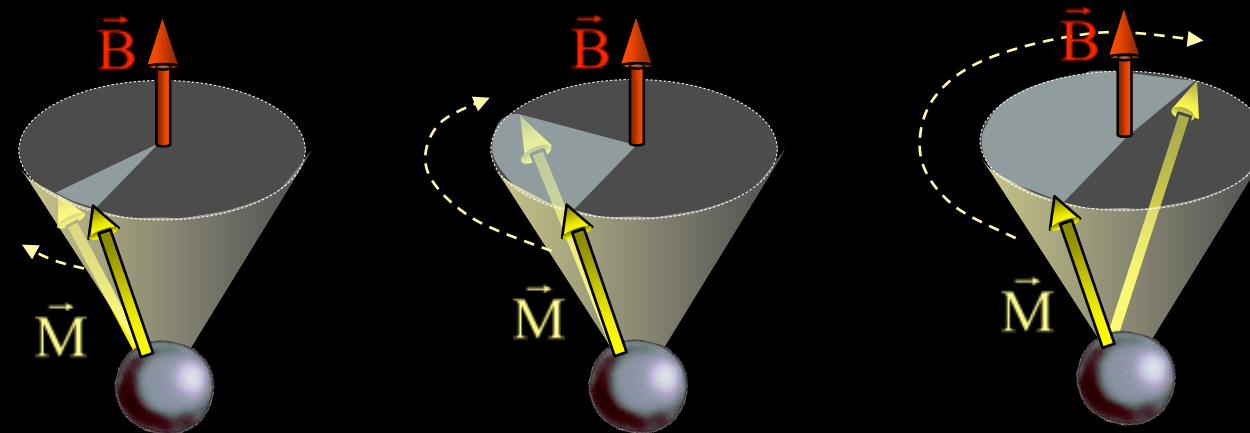
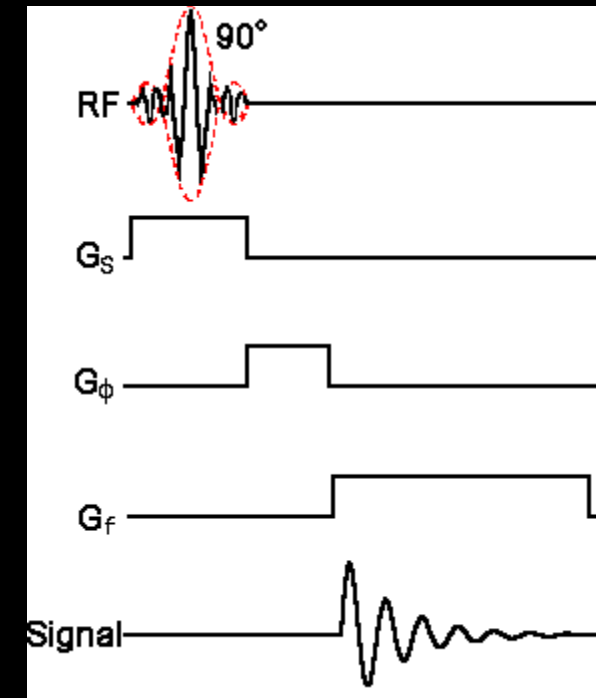


MRI: térbeli kódolás és képrekonstrukció

a precesszió térfüggő frekvenciaváltozásán alapul



RF tekercs



Fourier
transzformáció

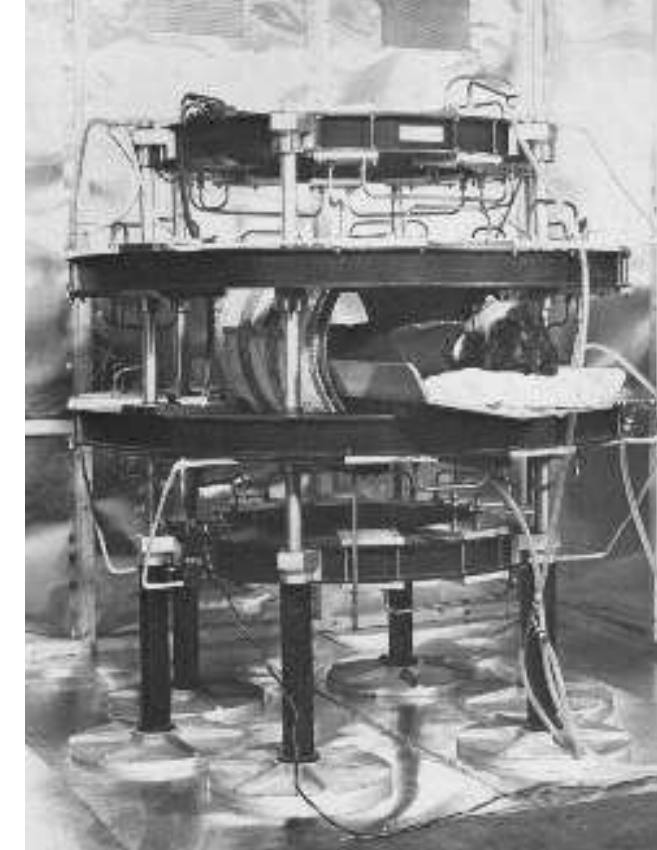


MRI 4: szkennerek

Hőskor



Indomitable (rettenthetetlen, Damadian)



MRI Scanner Mark One (Ernst)

Jelen



3T MRI



Nytott MRI egység



Intervenciós MRI egység

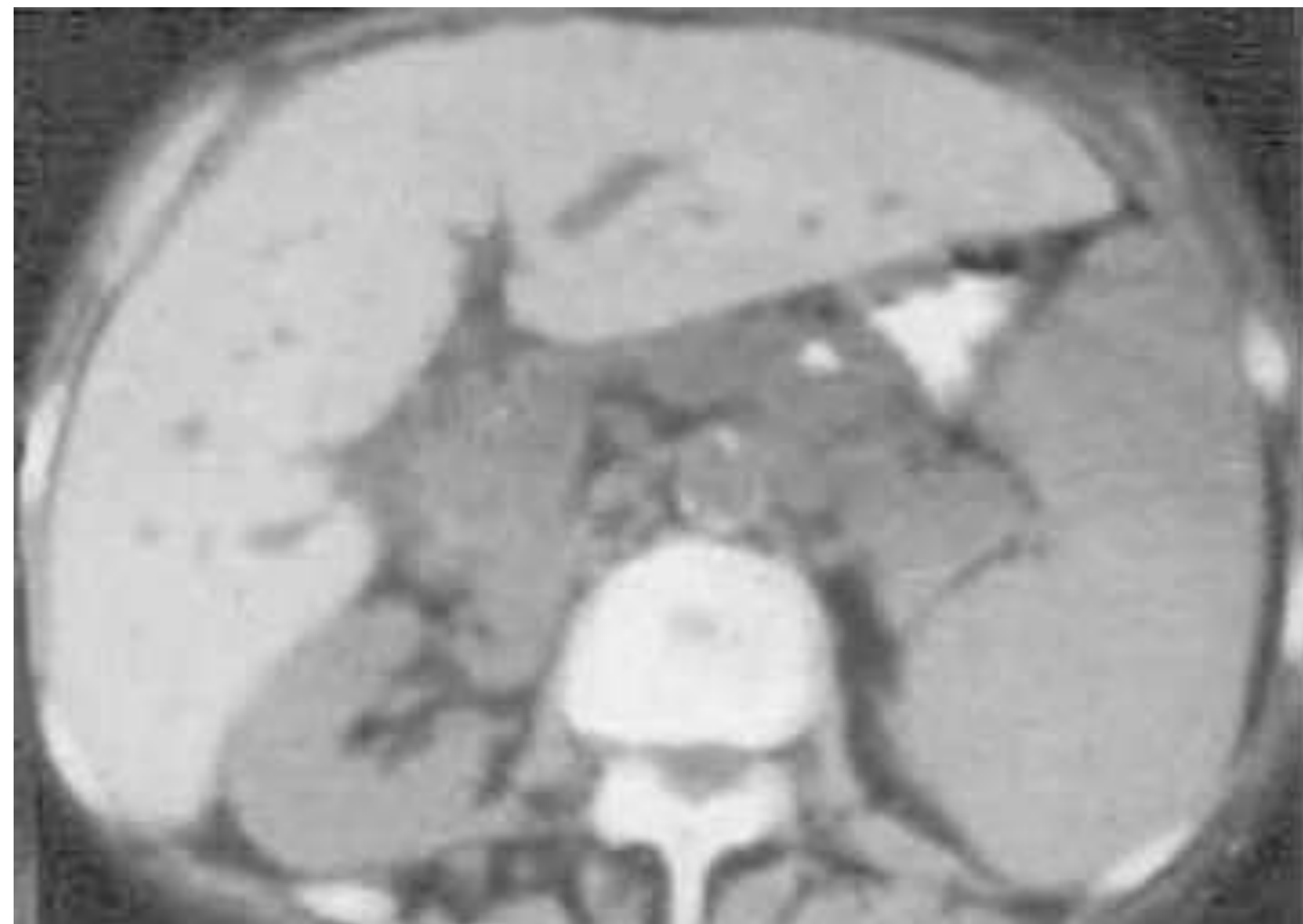


Mobil MRI

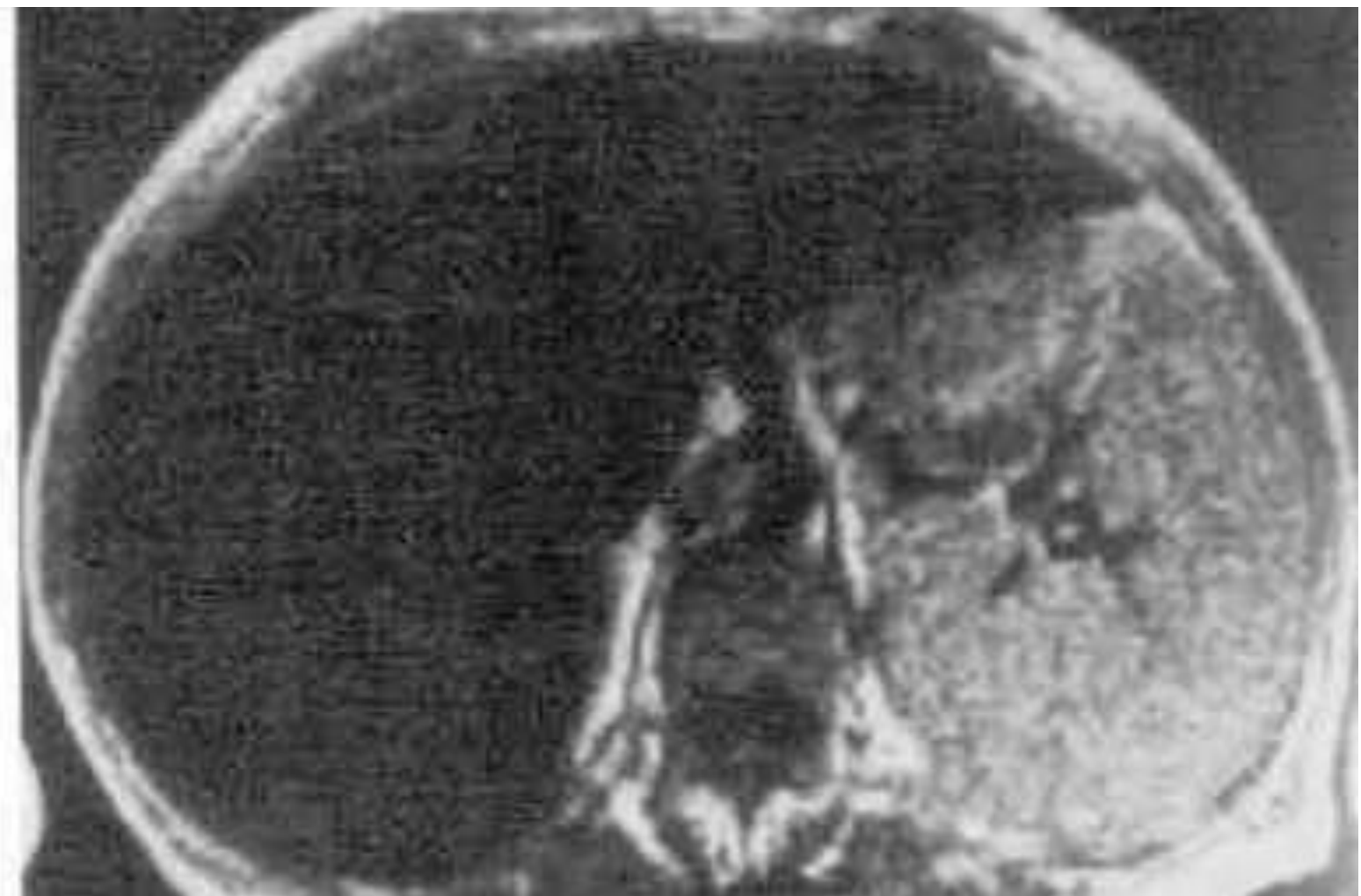
MRI 5: kontrasztanyagok

Pozitív: paramágneses elemek (T1 kontraszt): Gd, Mn

Negatív: szuperparamágneses, ferromágneses (T2 kontraszt): FeIII, MnII



CT

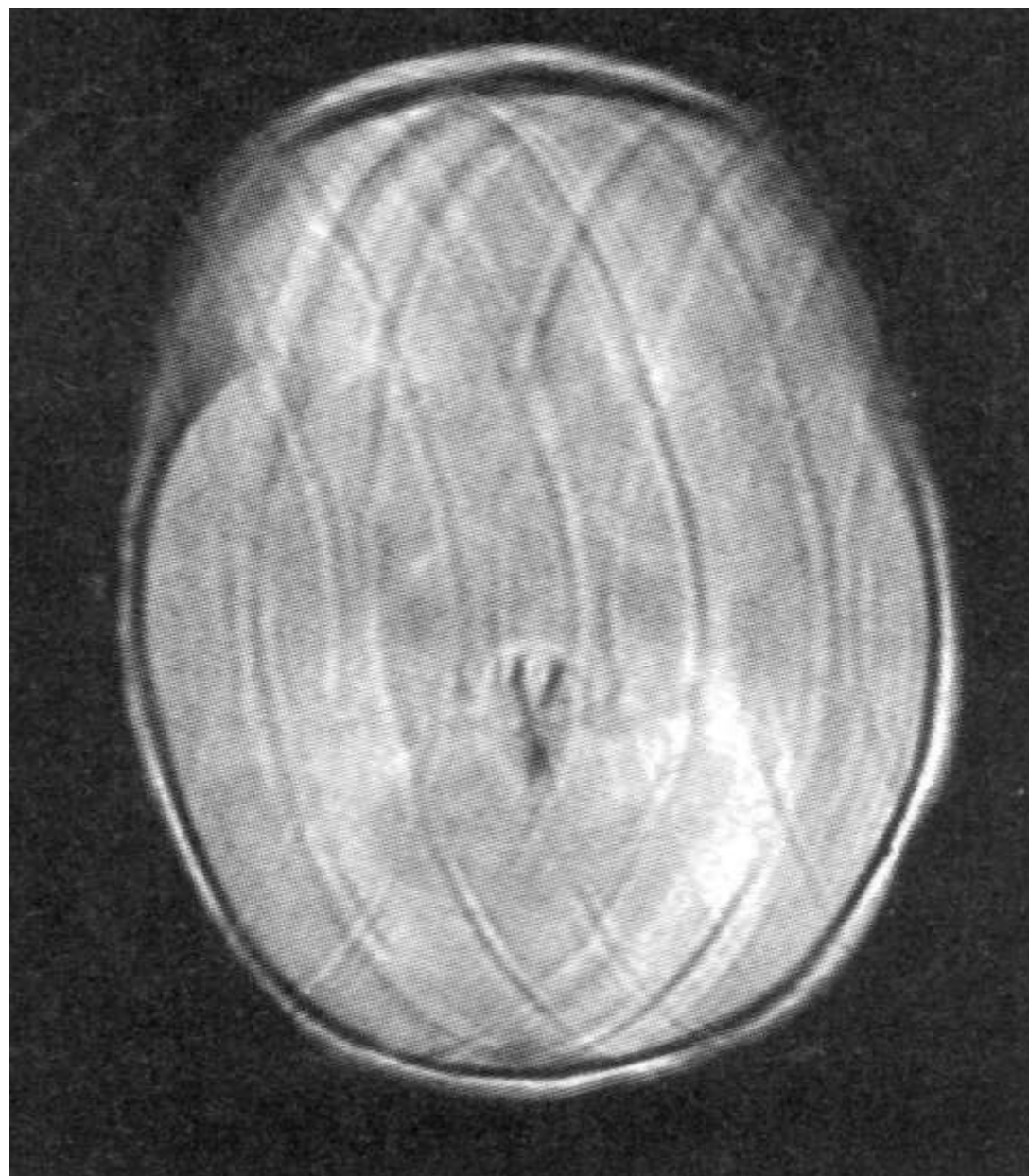


MR T2

Haemochromatosis hepatis (vasfelhalmozódás a májszövetben)

MRI 6: műtermékek

- Mozgás
- Fémek (implantátum, sérülés)



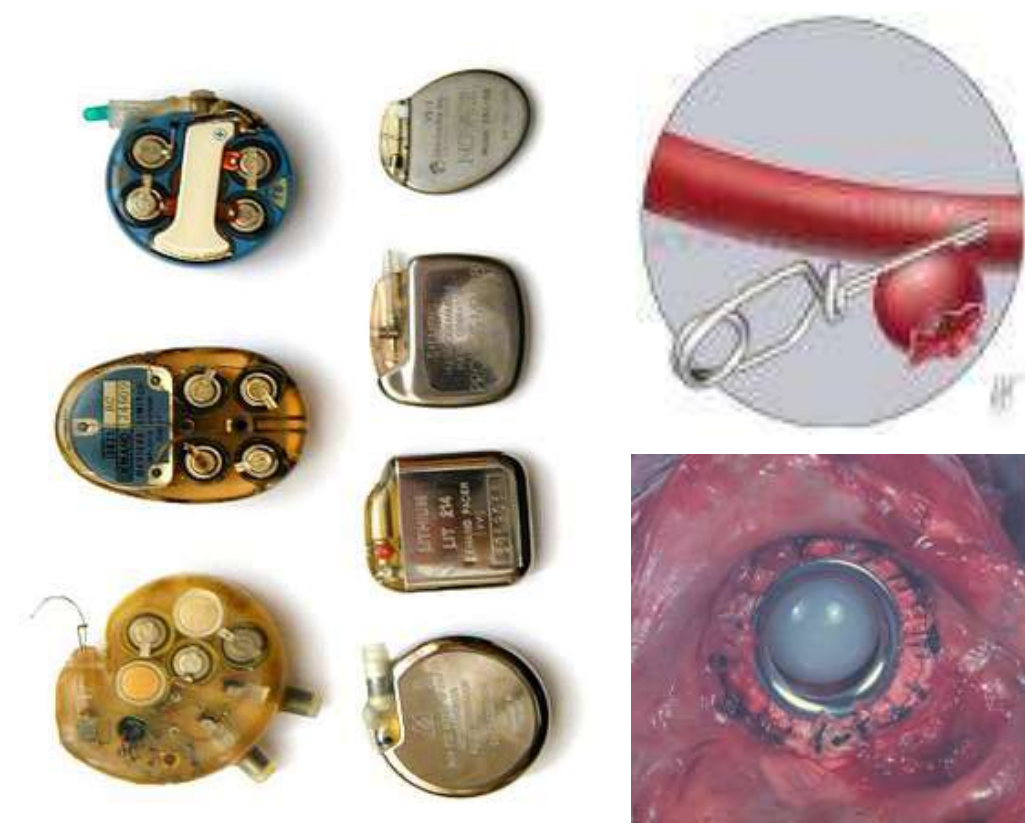
Mozgási műtermék



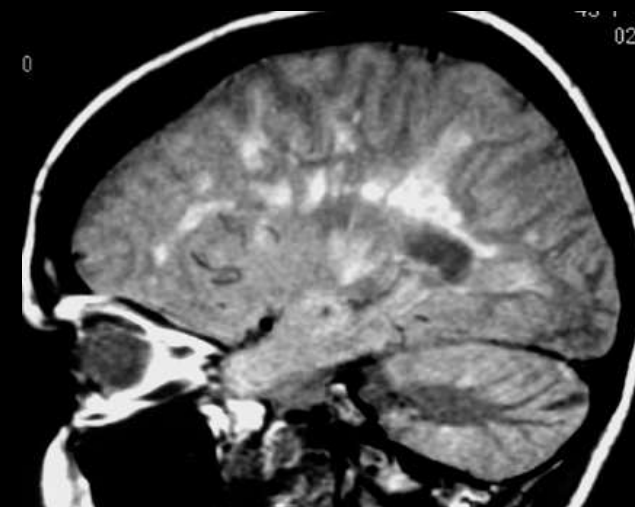
Fém az orbitában

MRI 7: veszélyek, kontraindikációk

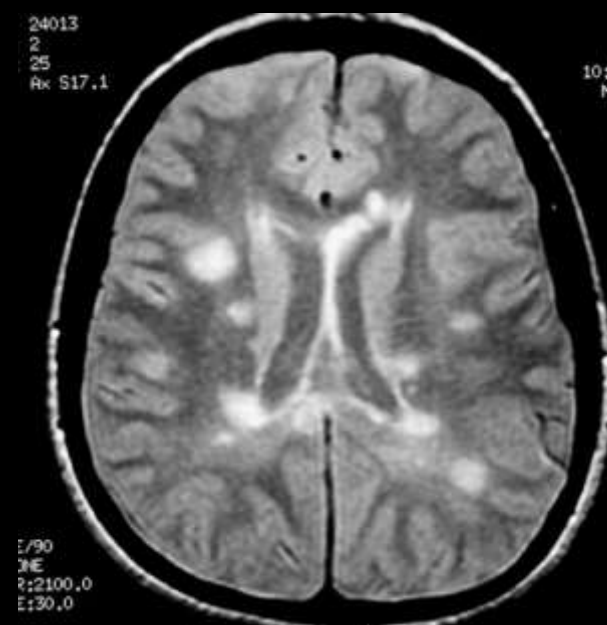
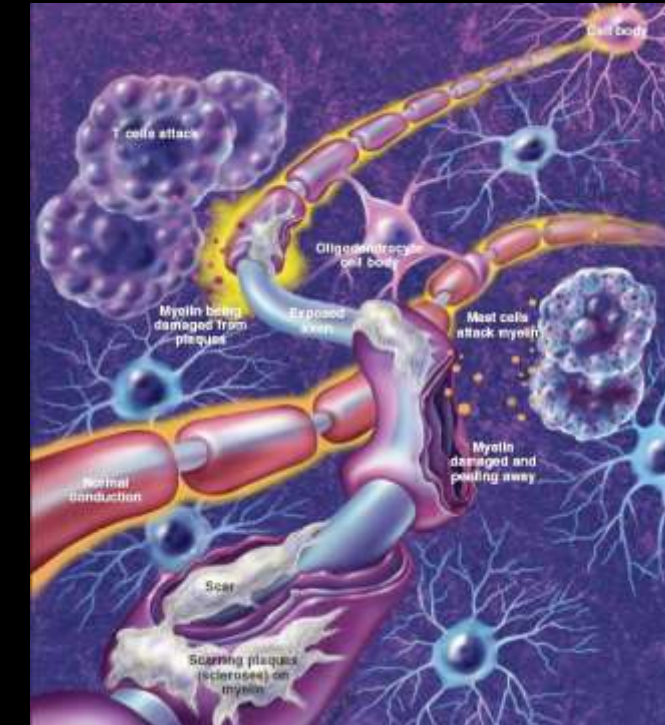
- Sztatikus mágneses tér - fémtárgyak
Kontraindikációk: beépített eszközök (pacemaker, defibrillátor, hallókészülék, csontnövekedést serkentő készülék, gyógyszeradagoló), neurostimulátorok, agyi aneurysma csatok, régi típusú szívbillentyűk
- Grádiens tér - áramindukció
- Rádiófrekvenciás tér - hőhatás (szemlencse, here)



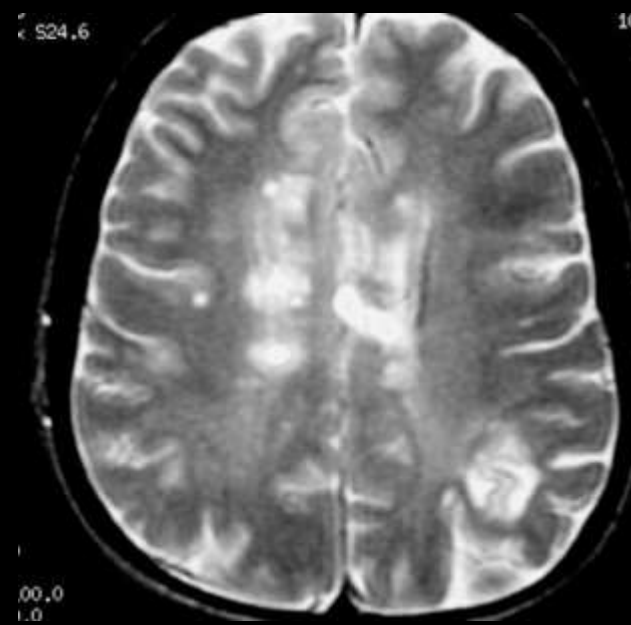
MRI alkalmazások: anatómiai képalkotás - sclerosis multiplex



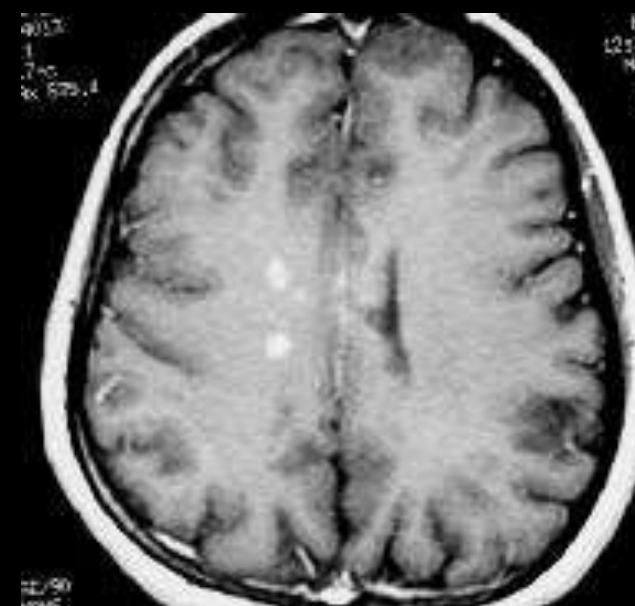
Proton súlyozás
(sagittalis)



Proton súlyozás
(transversalis)



T2 súlyozás
(transversalis)

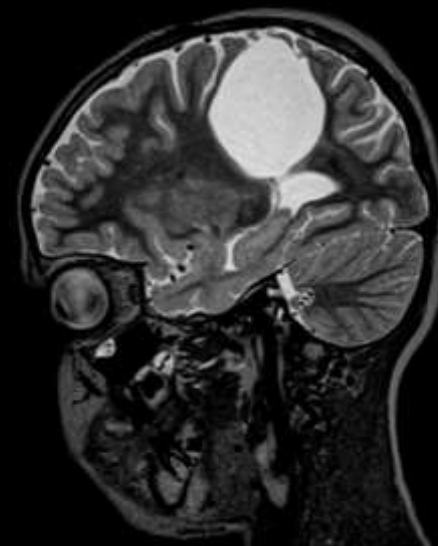


T1 súlyozás
(kontrasztanyaggal)

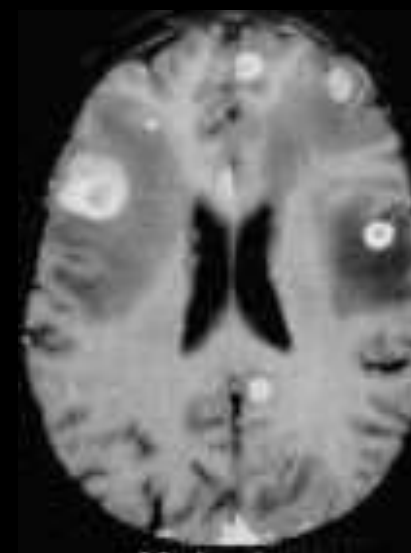
Anatomiai képalkotás: Onkológia



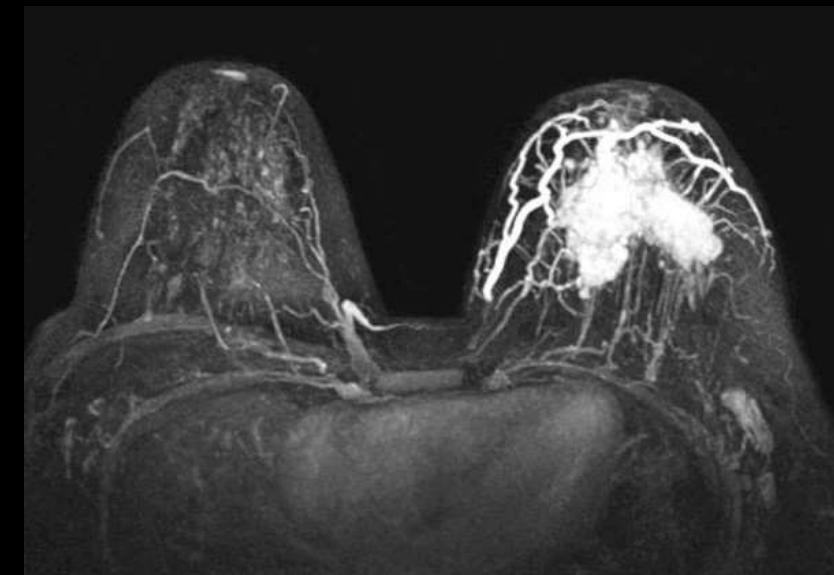
T2 súlyozás
(chondrosarcoma)



T2 súlyozás
(cysta)



Proton sűrűség
(Agyi metastasis)



T1 súlyozás kontrasztanyaggal
(Emlő carcinoma)

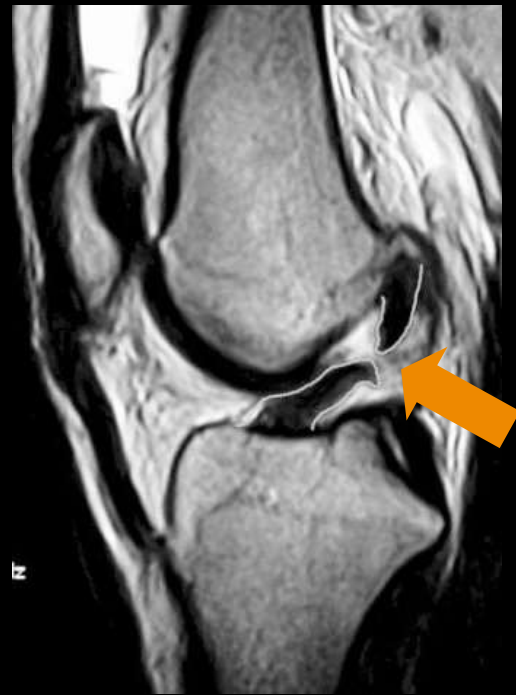


T2 súlyozás
(cervix carcinoma)

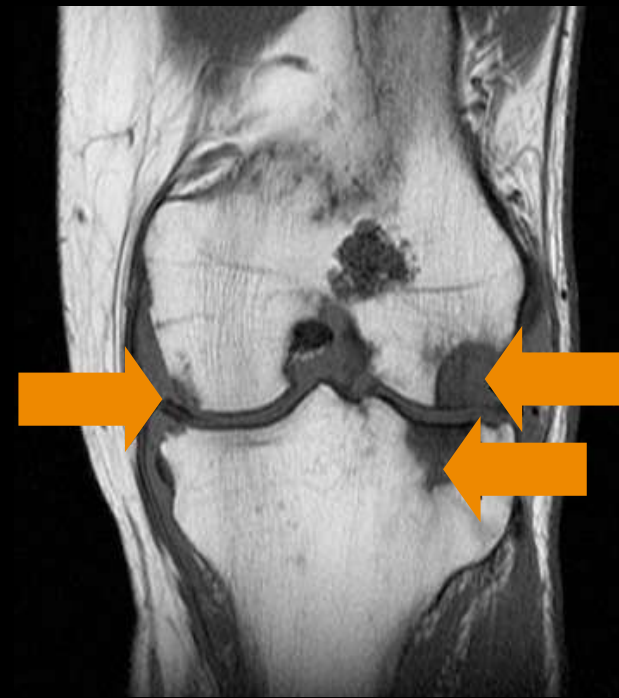


T2 súlyozás
(prostata carcinoma)

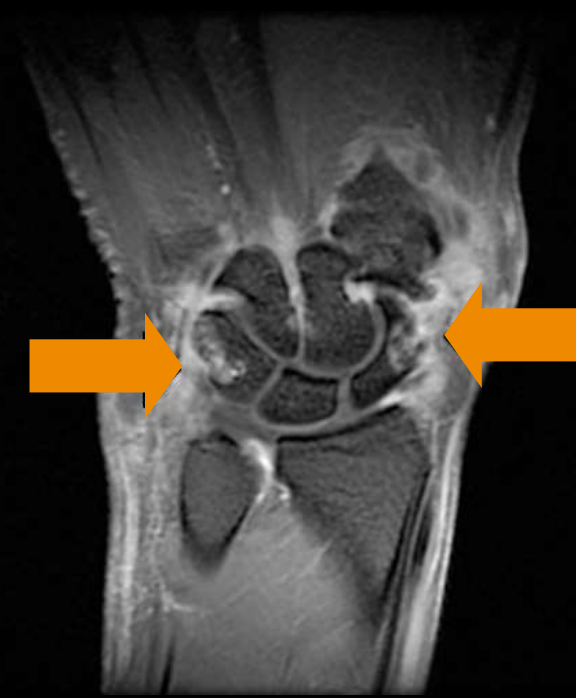
Anatomiai képalkotás csont és lágyrészek



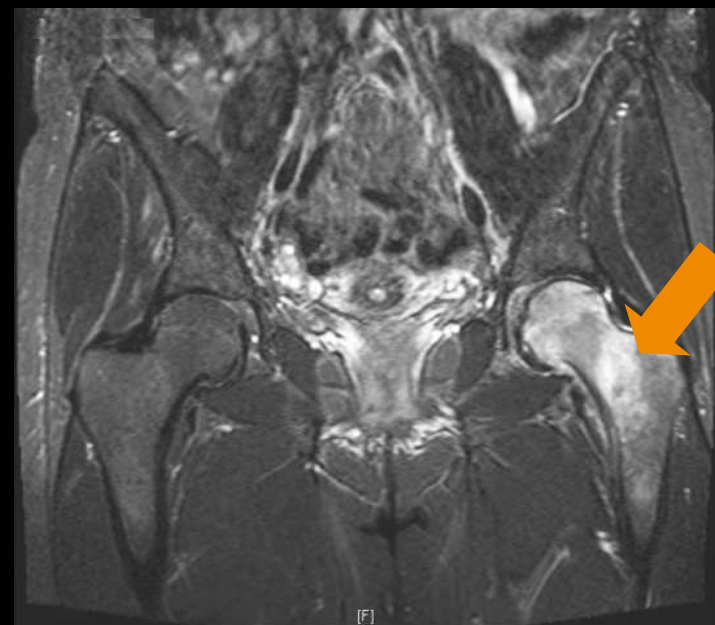
T2 súlyozás
(szalag szakadás)



Rheumatoid arthritis
térd



Rheumatoid arthritis
csukló

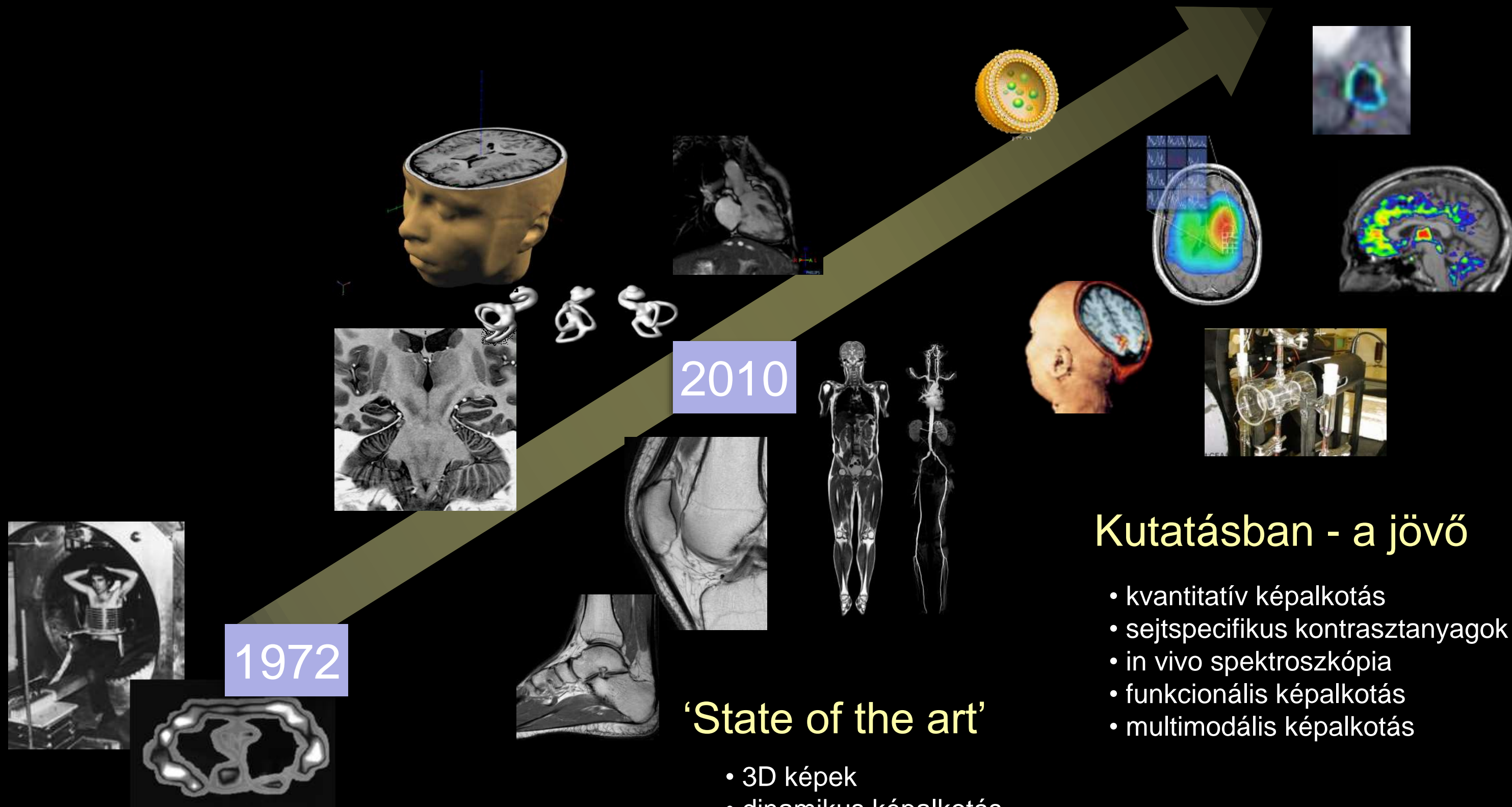
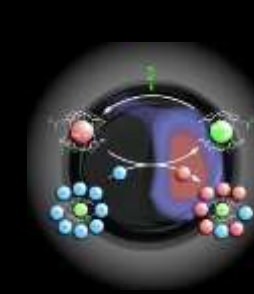


Osteoporosis (femur)



T2 súlyozás
(hernia)

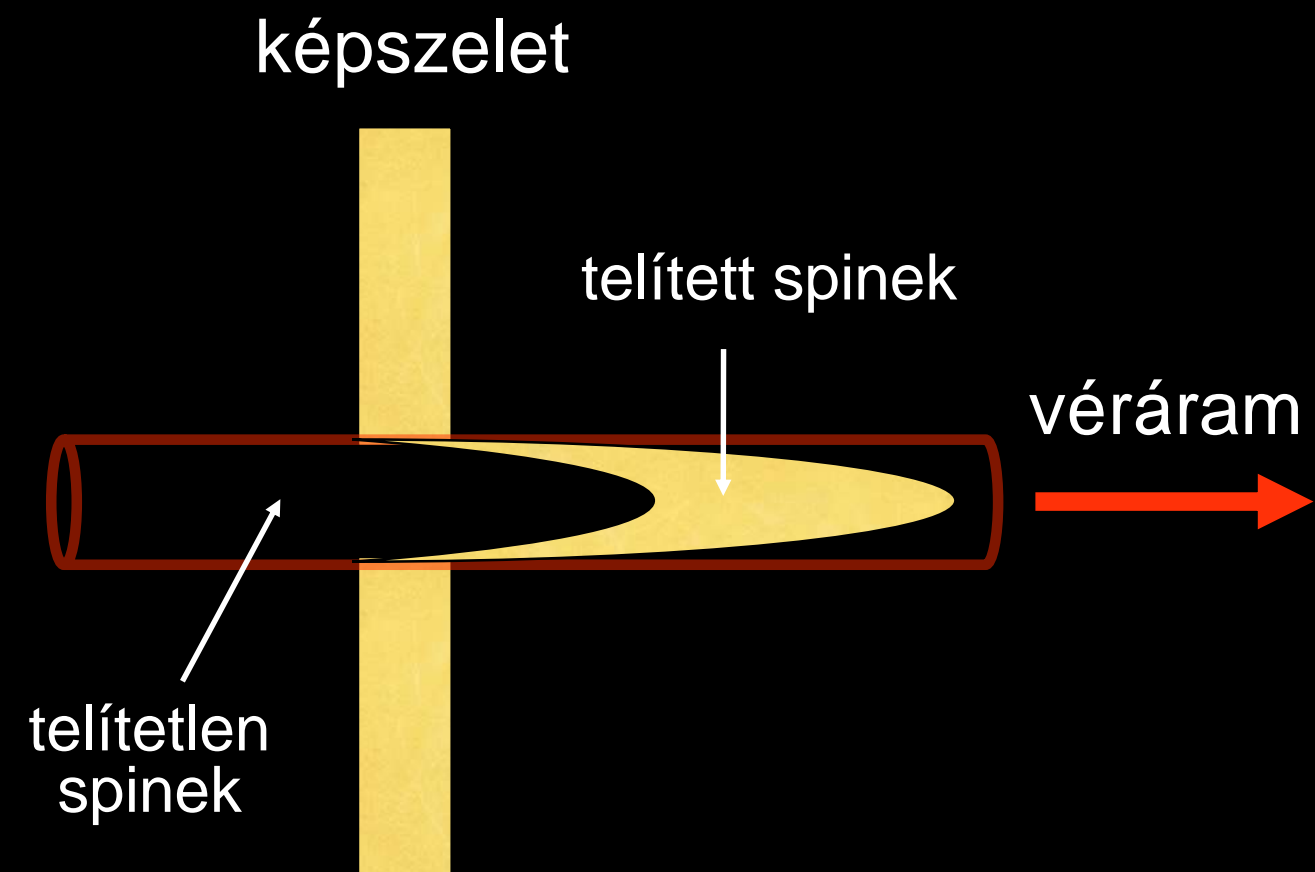
Az MRI sokkal több mint anatomiai képalkotás ...



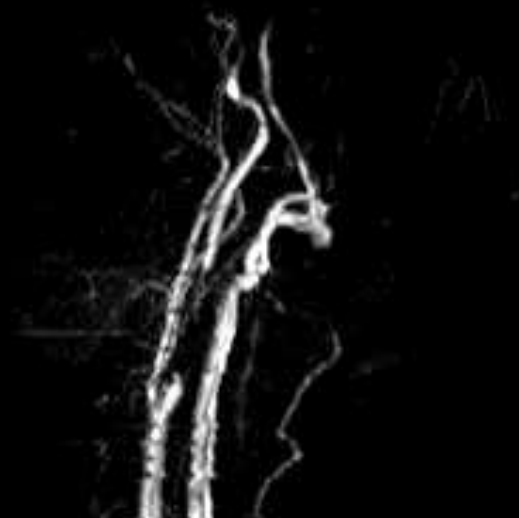
Első MRI képek

MRI:

Non-invazív angiográfia



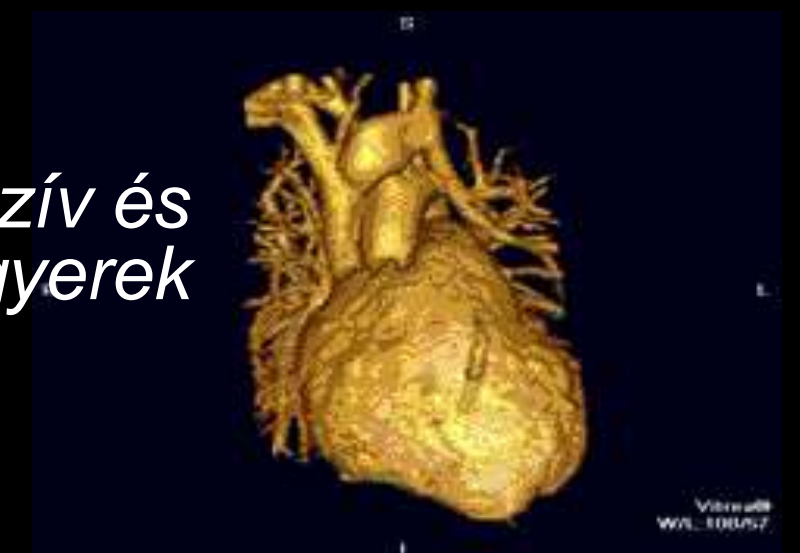
*Arteria
carotis*



*Circulus
arteriosus
Willisii*



*Szív és
nagyerek*



MRI mozgókép (valós idő)

Nagy időfelbontású felvételek alapján - EKG szinkronizáció



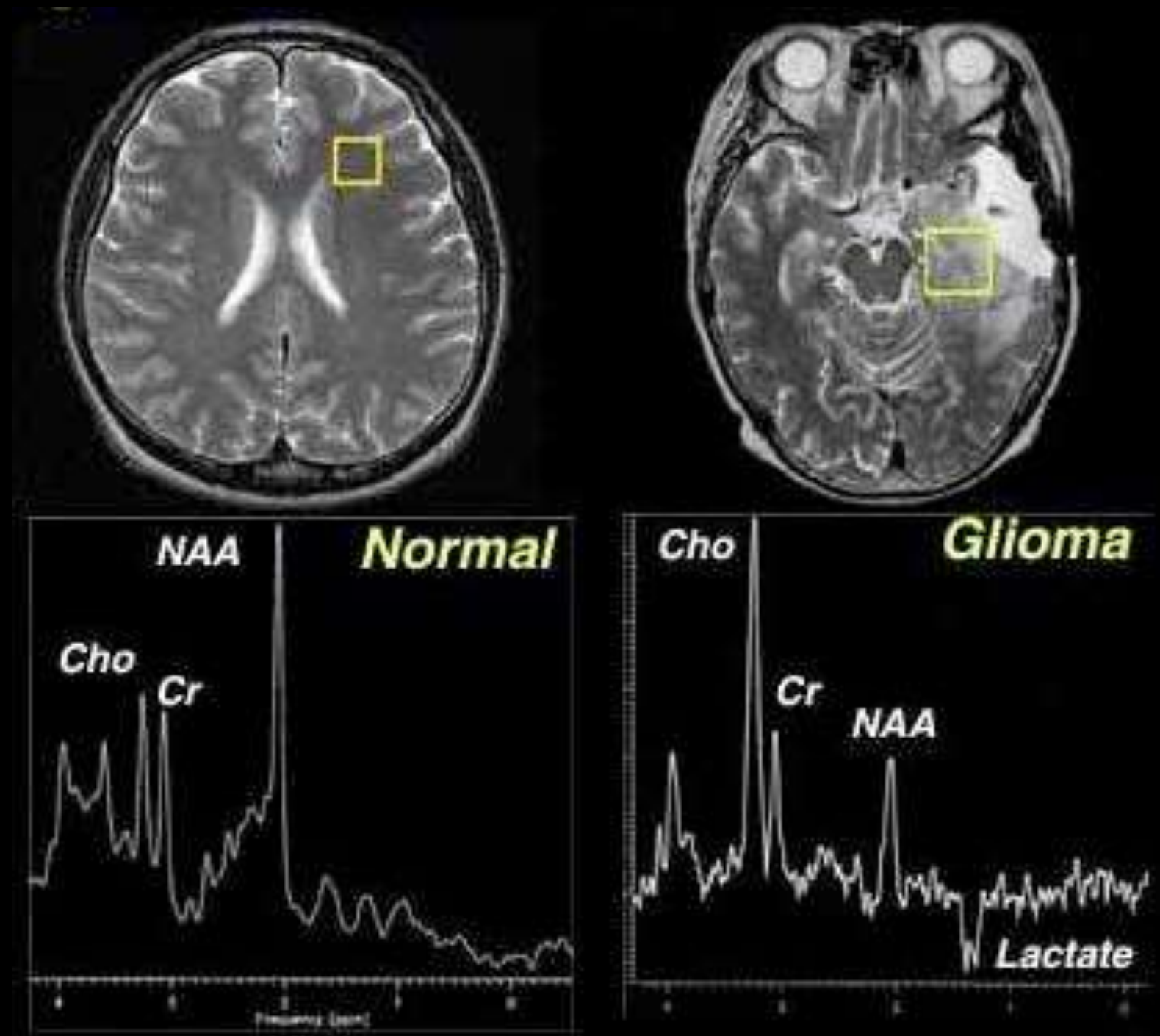
Véráramlás a szív üregeiben



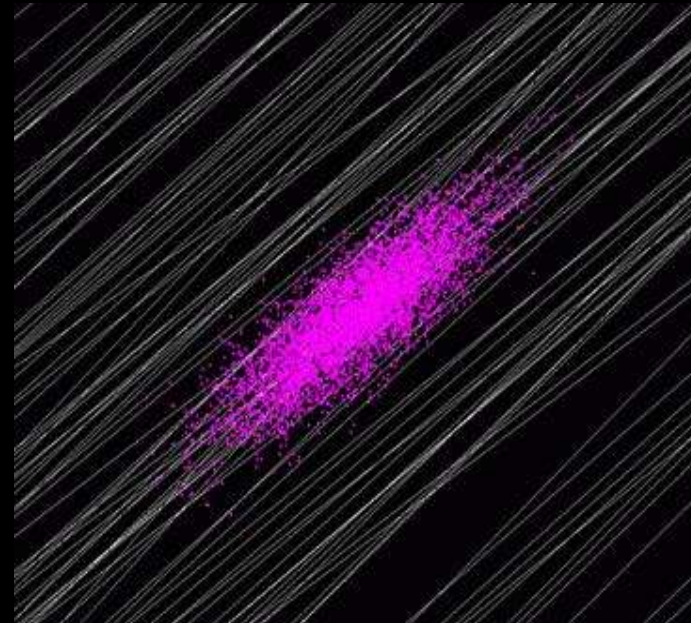
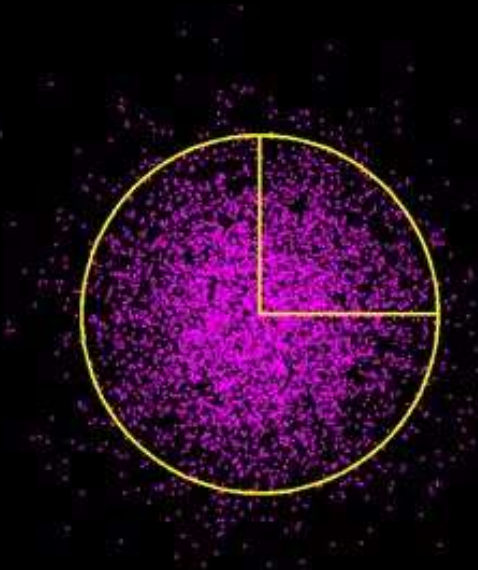
Aortabillentyű nyitódása - záródása

MR Spektroszkópia

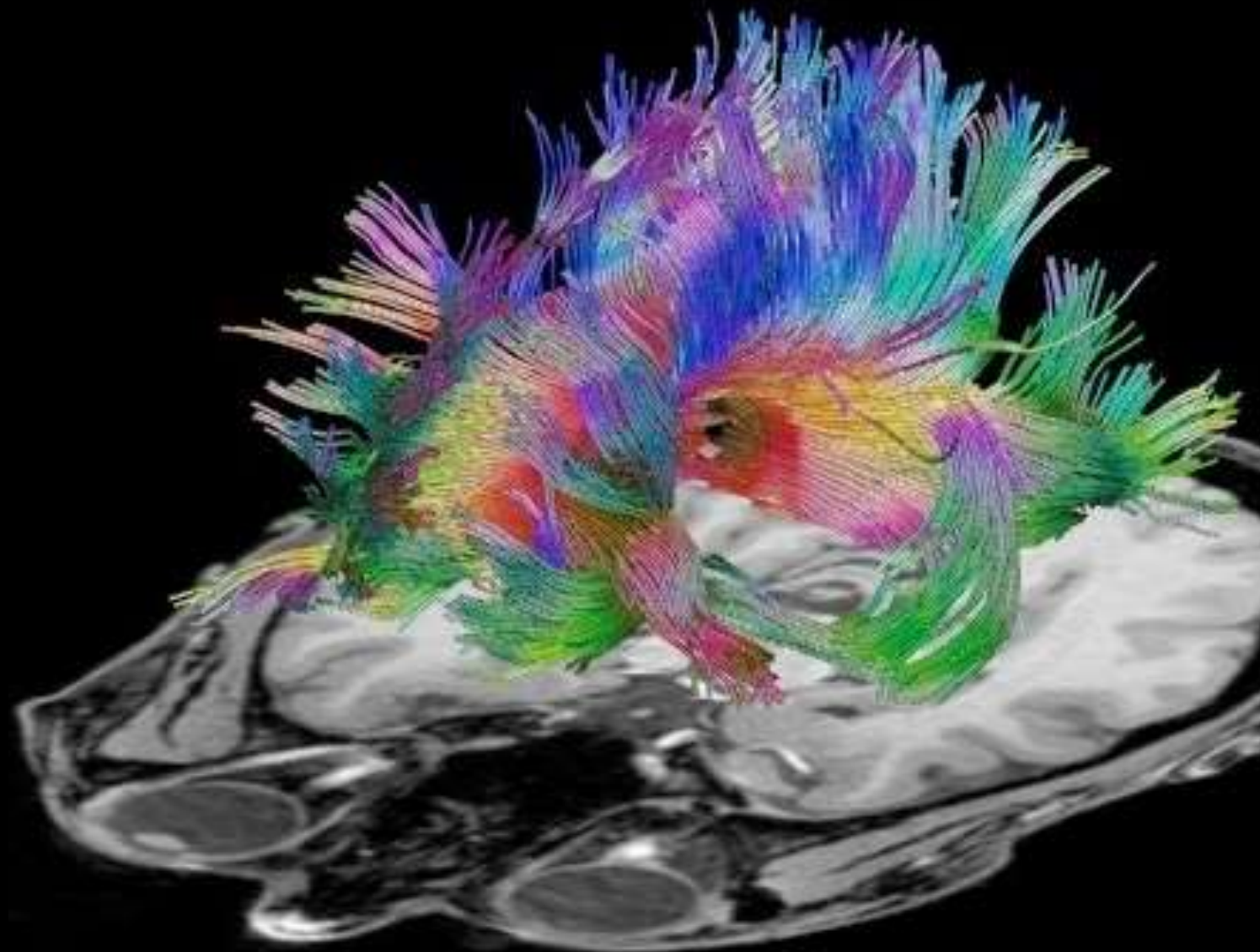
- Kémiai eltolódás (chemical shift)
- Metabolitok azonosítása
- Tumordiagnosztika



Diffúziós képalkotás



Anizotróp vízdiffúzió:
kontrasztkpződés

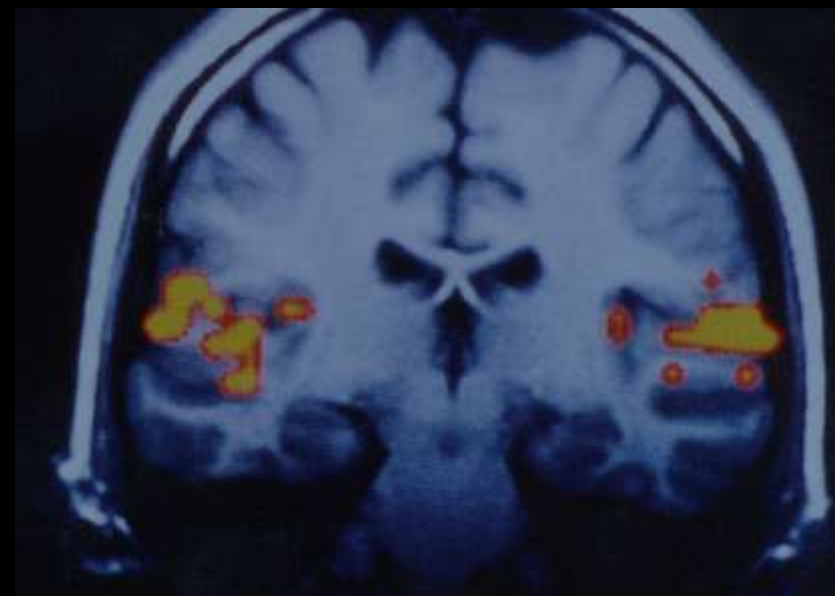
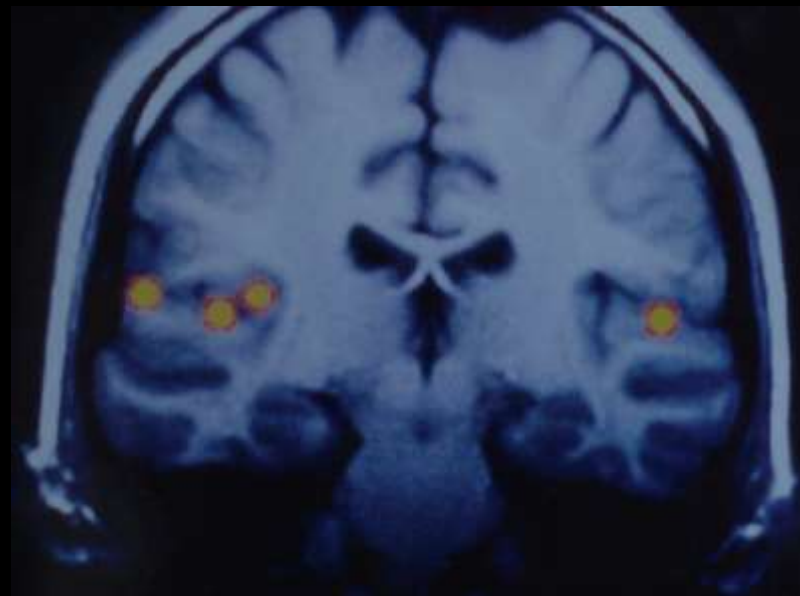


Idegpályák vizsgálata:
traktográfia

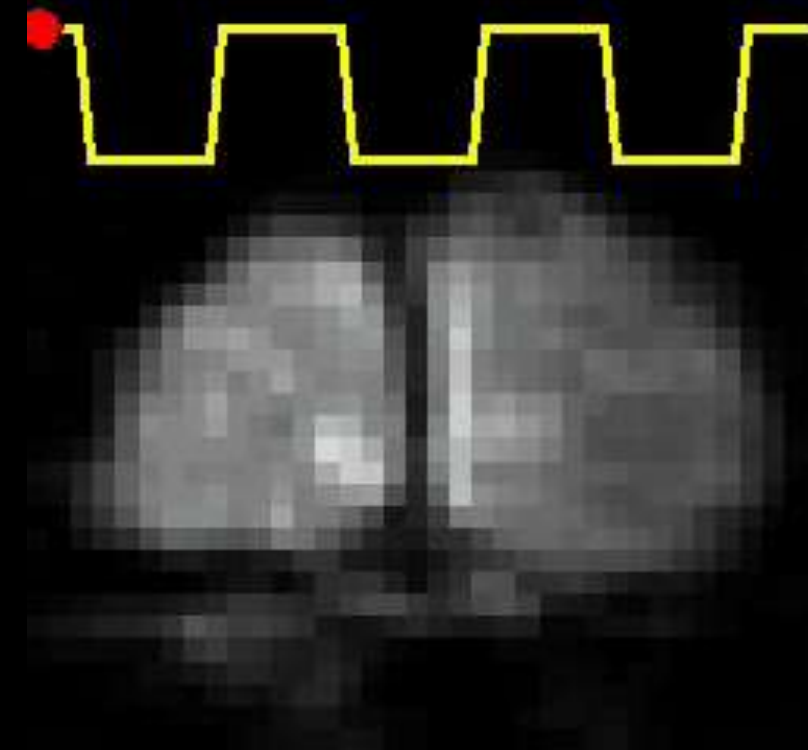
Corpus callosum

Funkcionális MRI (fMRI)

Élettani folyamattal szinkron felvett
Nagy időfelbontású képsorozat



Aktiváció az acusticus
cortexben



Villogó fény hatása a
látókéregre

MRI információ szuperponálása egyéb információval (PET)



Intracranialis tumor



PET jel: szemmozgítás során aktivált
kortikális részek
Térbeli rekonstrukció