



Magnetyczne własności jąder atomowych, podstawy obrazowania rezonansu magnetycznego

**Obrazowanie medyczne
Inżynieria Biomedyczna**





Magnetyczne własności jąder atomowych

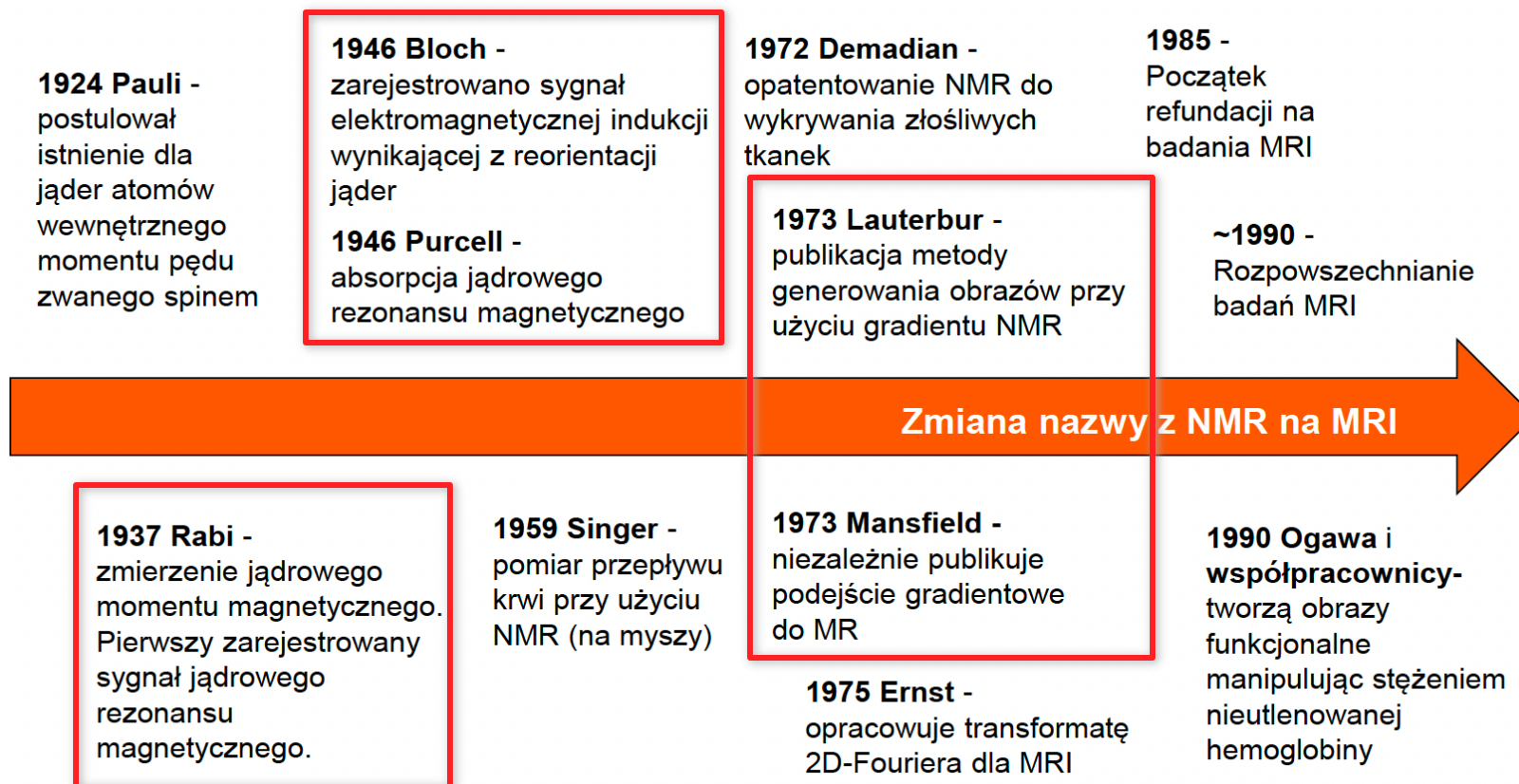
Zawartość wykładu:

- oddziaływanie statycznego pola magnetycznego na jądra atomowe
- rotacja and precesja
- wpływ elektromagnetycznych impulsów wielkoczęstotliwościowych
- zjawisko jądrowego rezonansu magnetycznego
- stałe czasowe relaksacji T1 i T2*





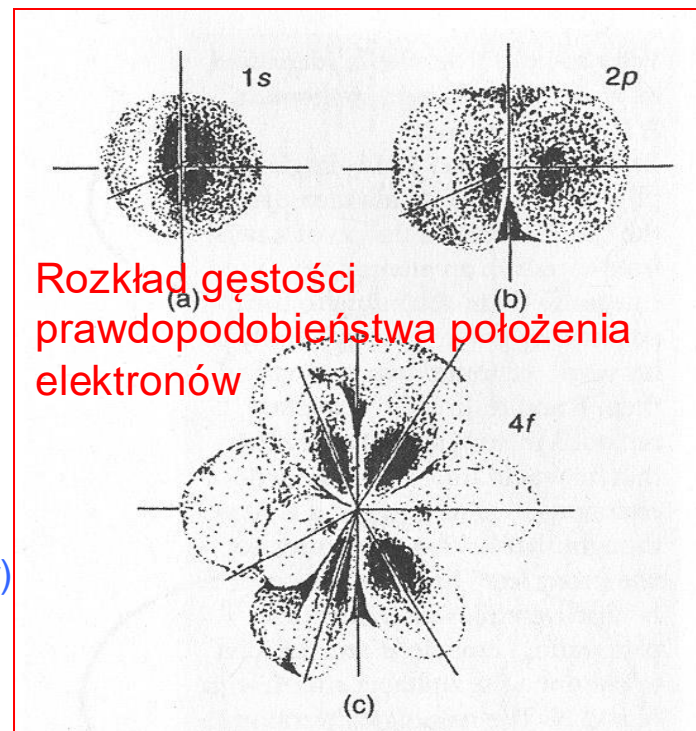
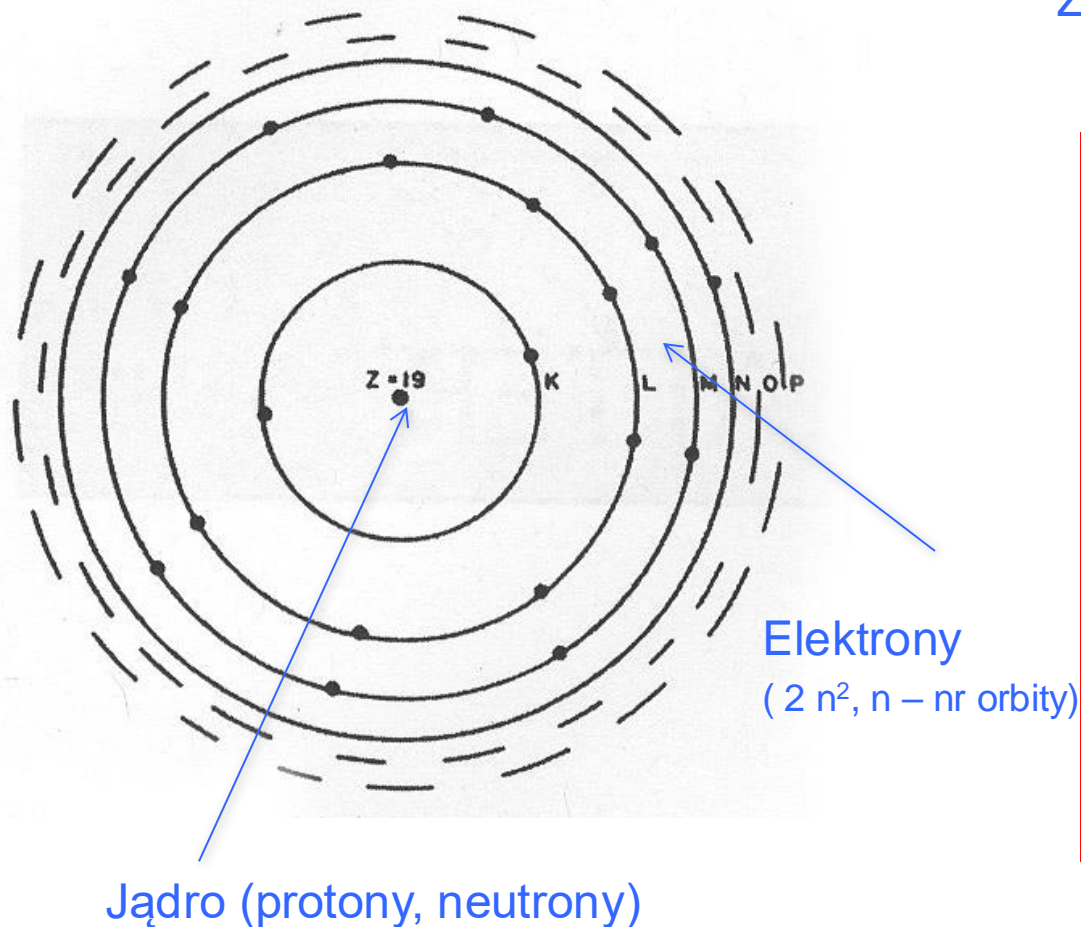
Historia rozwoju NMR/MRI





model atomu Bohra

$Z : \# \text{ protonów} = \# \text{ elektronów}$



Właściwości jąder atomowych

jądro atomu wodoru, 1 proton

mechanika klasyczna

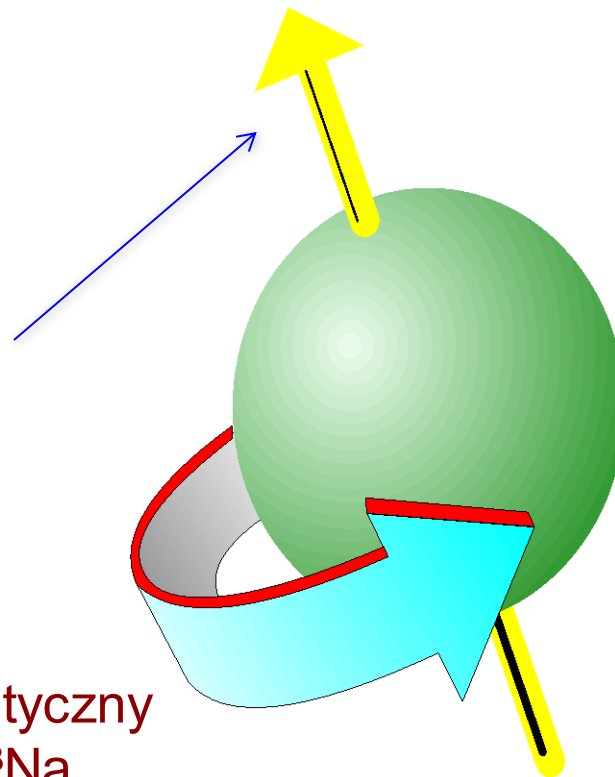
proton – cząstka naładowana dodatnio, wiruje generując pole magnetyczne.

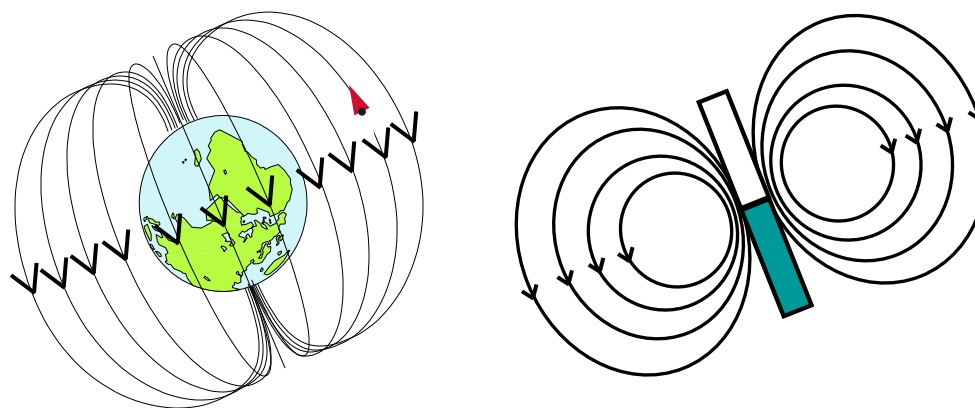
Taki “mały magnes” ma swój **moment magnetyczny**.

wirujący proton \Leftrightarrow spin

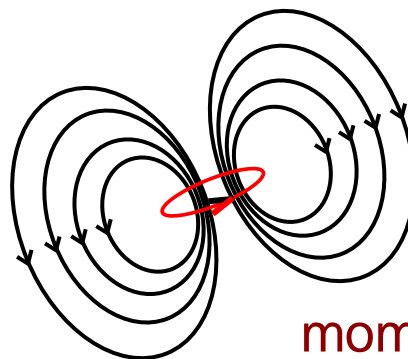
Inne jądra posiadające moment magnetyczny (# protonów \neq # neutronów): ^{15}N , ^{31}P , ^{23}Na

^{12}C i ^{16}O nie posiadają momentu magnetycznego

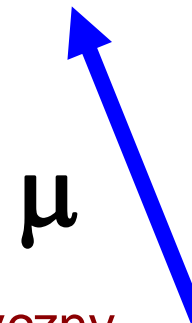




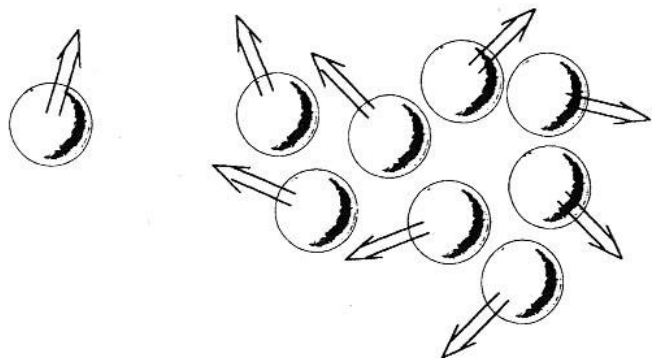
Pole magnetyczne
Ziemi, magnes, pętla
prądowa



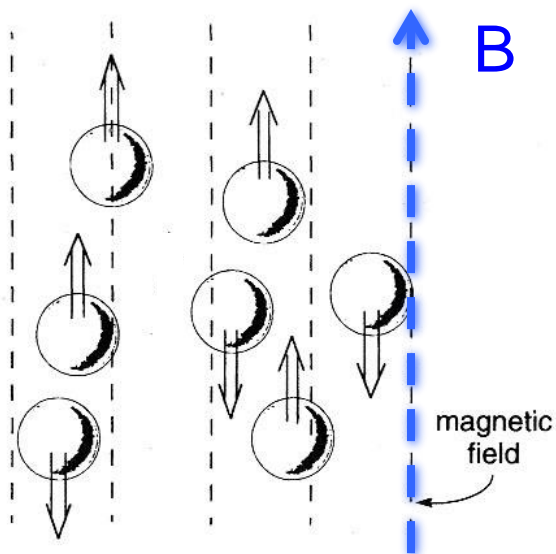
moment magnetyczny



Protony w polu magnetycznym



W stanie swobodnym, momenty magnetyczne jąder atomowych są ukierunkowane chaotycznie

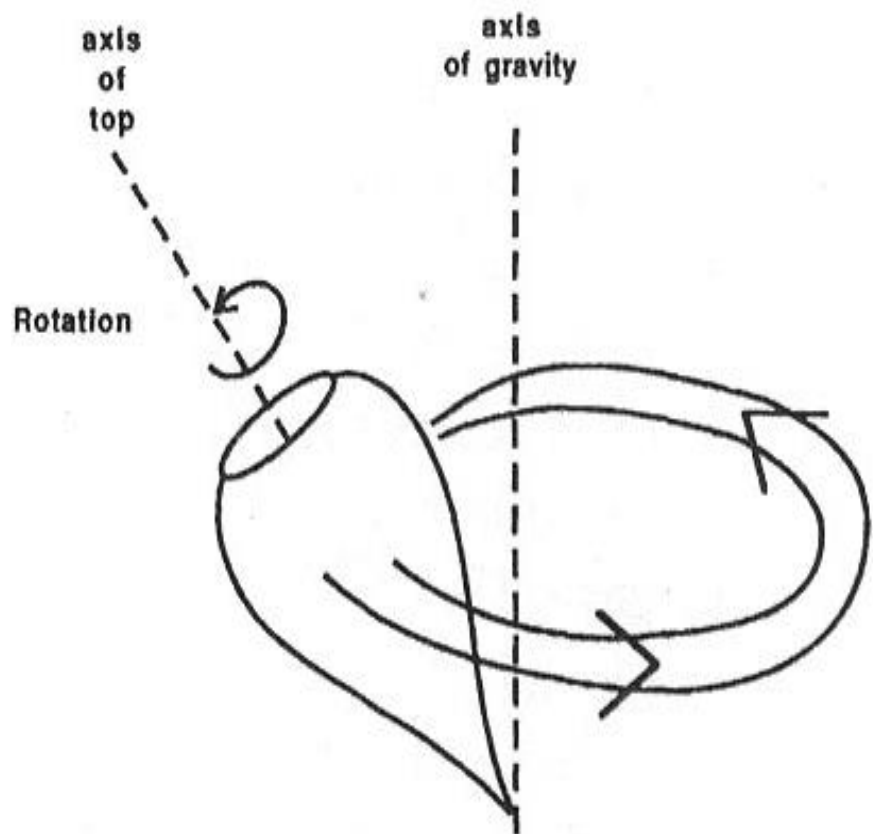


W obecności stałego pola magnetycznego momenty magnetyczne ustawiają się wzdłuż linii pola: równoległe (tych jest trochę więcej) lub antyrównoległe

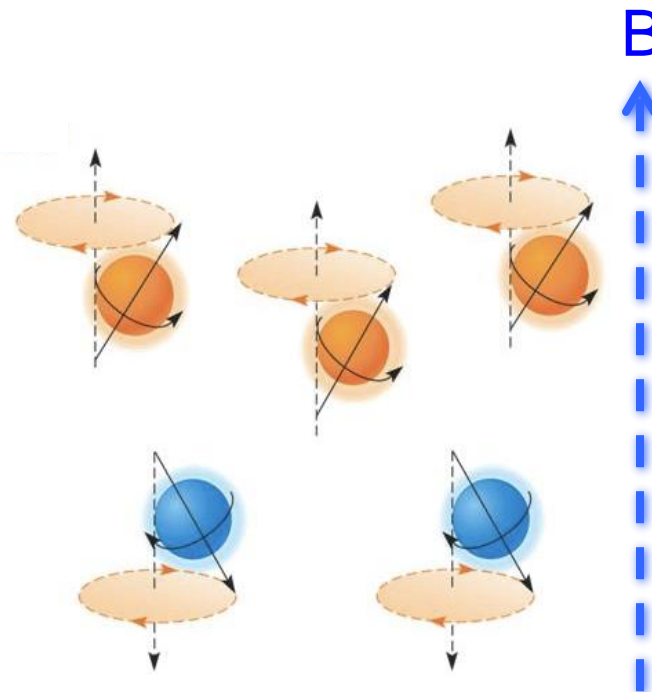


Protony w polu magnetycznym

Oprócz wyrównania wzdłuż linii sił pola magnetycznego, momenty magnetyczne protonów wykonują ruchy precesyjne wzdłuż linii pola



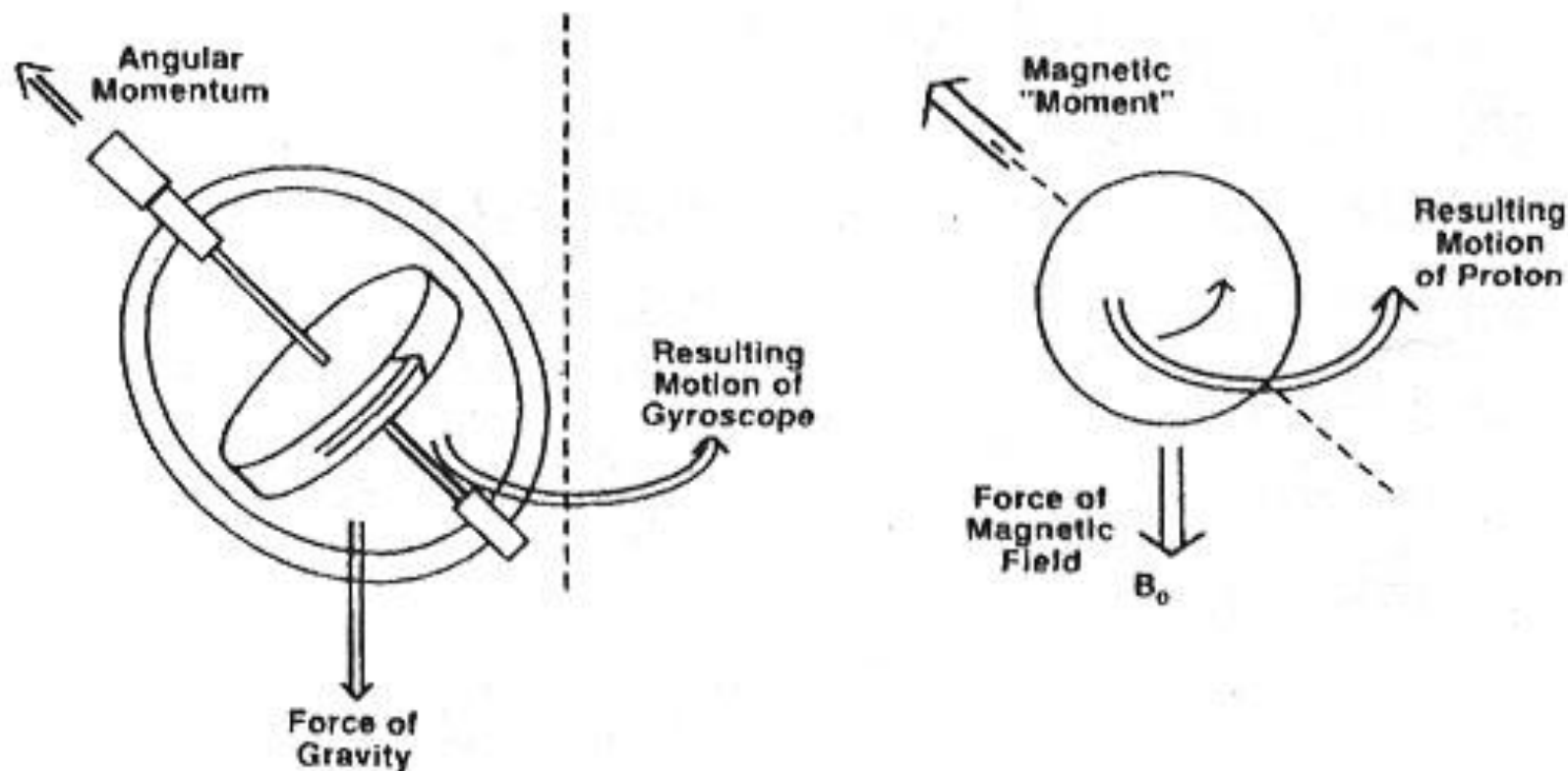
Precession



Analogia z wirującym bączkiem



Protony w polu magnetycznym



Precesja wynika z oddziaływania sił na wirujący obiekt. Moment pędu i grawitacja powodują precesję żyroskopu; moment magnetyczny i zewnętrzne pole magnetyczne powodują precesję protonu.



Zależność pomiędzy wartością indukcji pola B [T]
i częstotliwością precesji f [Hz]:

$$f = \gamma B$$

γ – współczynnik giromagnetyczny

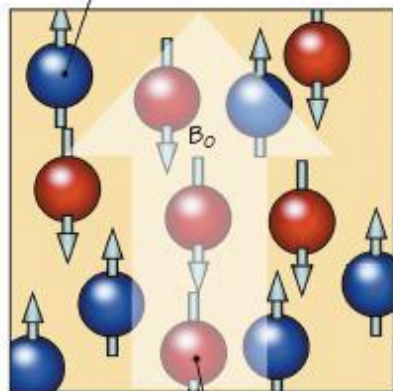
γ (H) = 42.58 MHz/T, zatem dla typowego skanera 1.5T $f \approx 64$ MHz

Częstotliwość precesji to częstotliwość Larmora



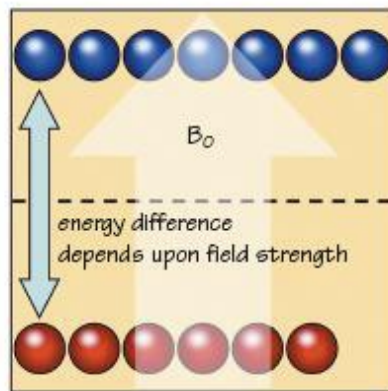
Rozkład pola magnetycznego dla wszystkich protonów

low-energy spin-up nucleus

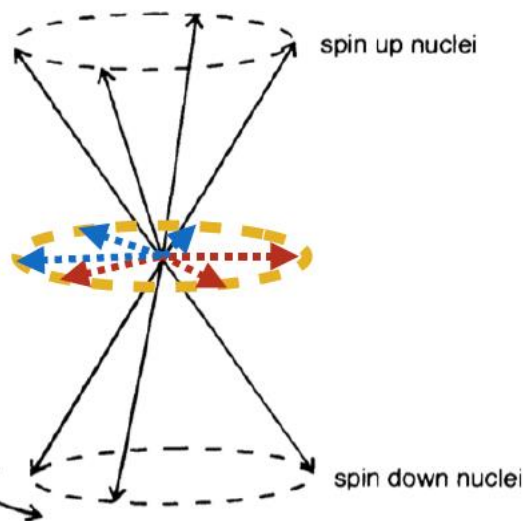


high-energy spin-down nucleus

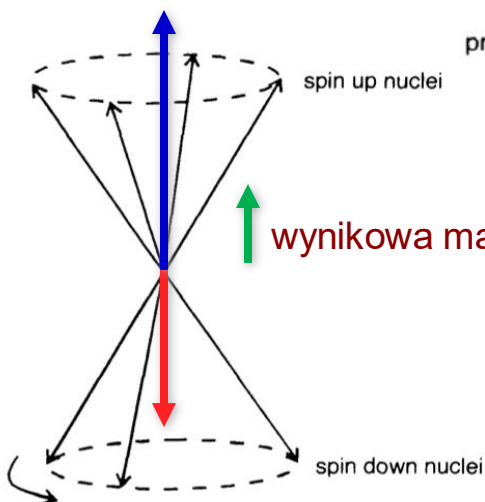
low-energy spin-up population



high-energy spin-down population

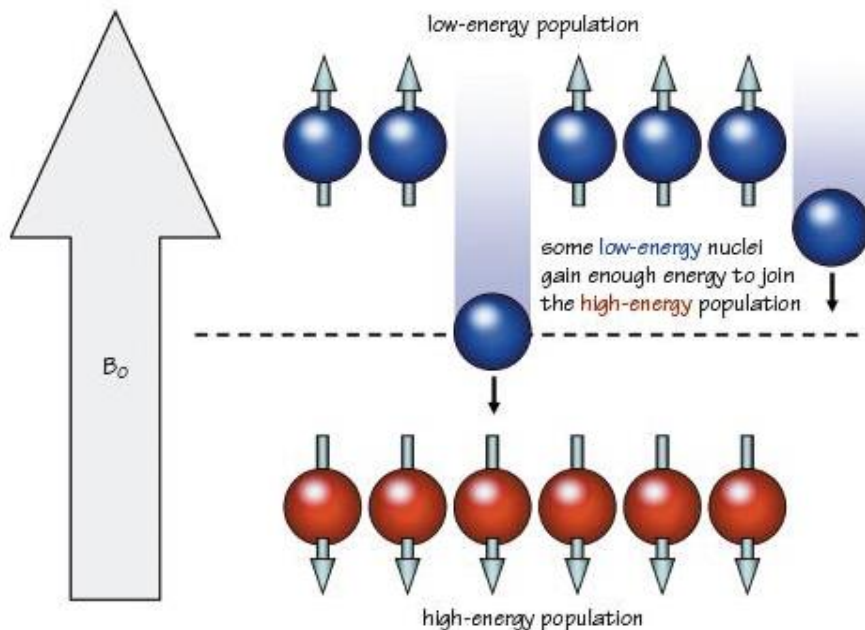


magnetyzacja porzeczna = 0



wynikowa magnetyzacja podłużna

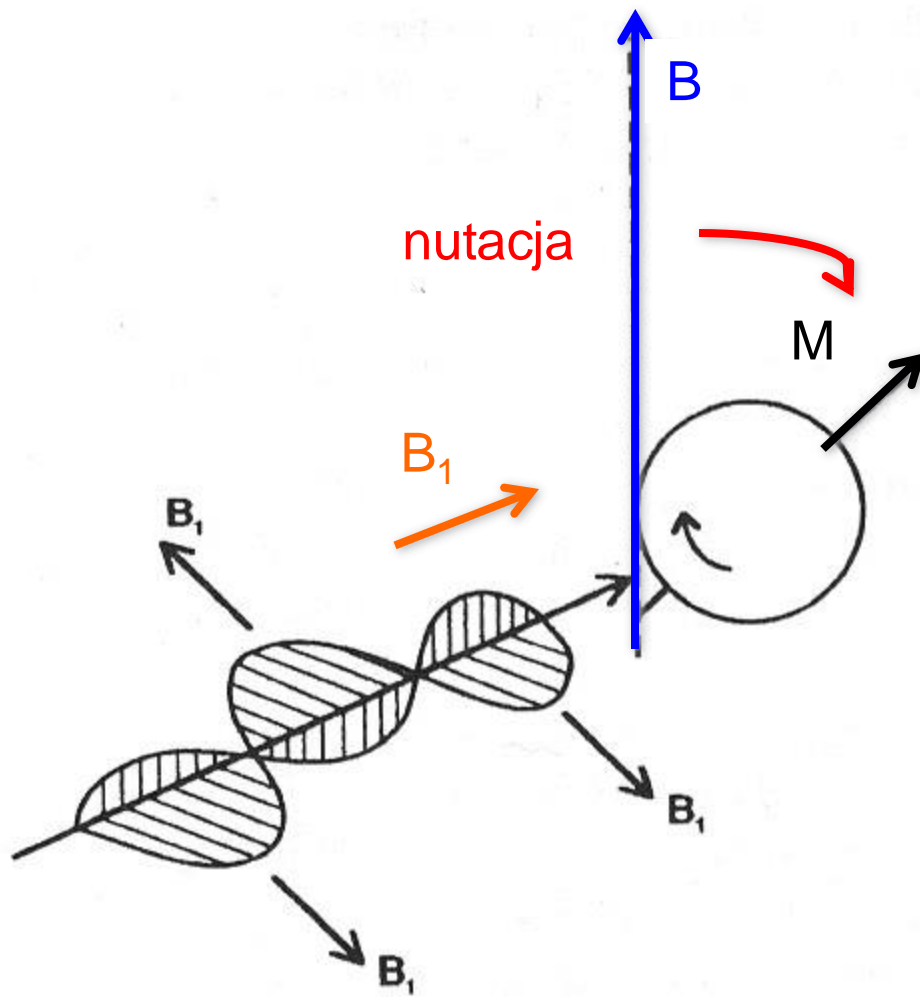
Efekt dodatkowego impulsu elektromagnetycznego



podanie impulsu RF (zmienne pole magnetyczne) o częstotliwości Larmora spowoduje wywołanie zjawiska **rezonansu**

-> energia impulsu zostanie pochłonięta przez jądra atomowe powodując, że część z nich zmieni orientację momentów magnetycznych na antyrównoległą

Efekt dodatkowego impulsu elektromagnetycznego

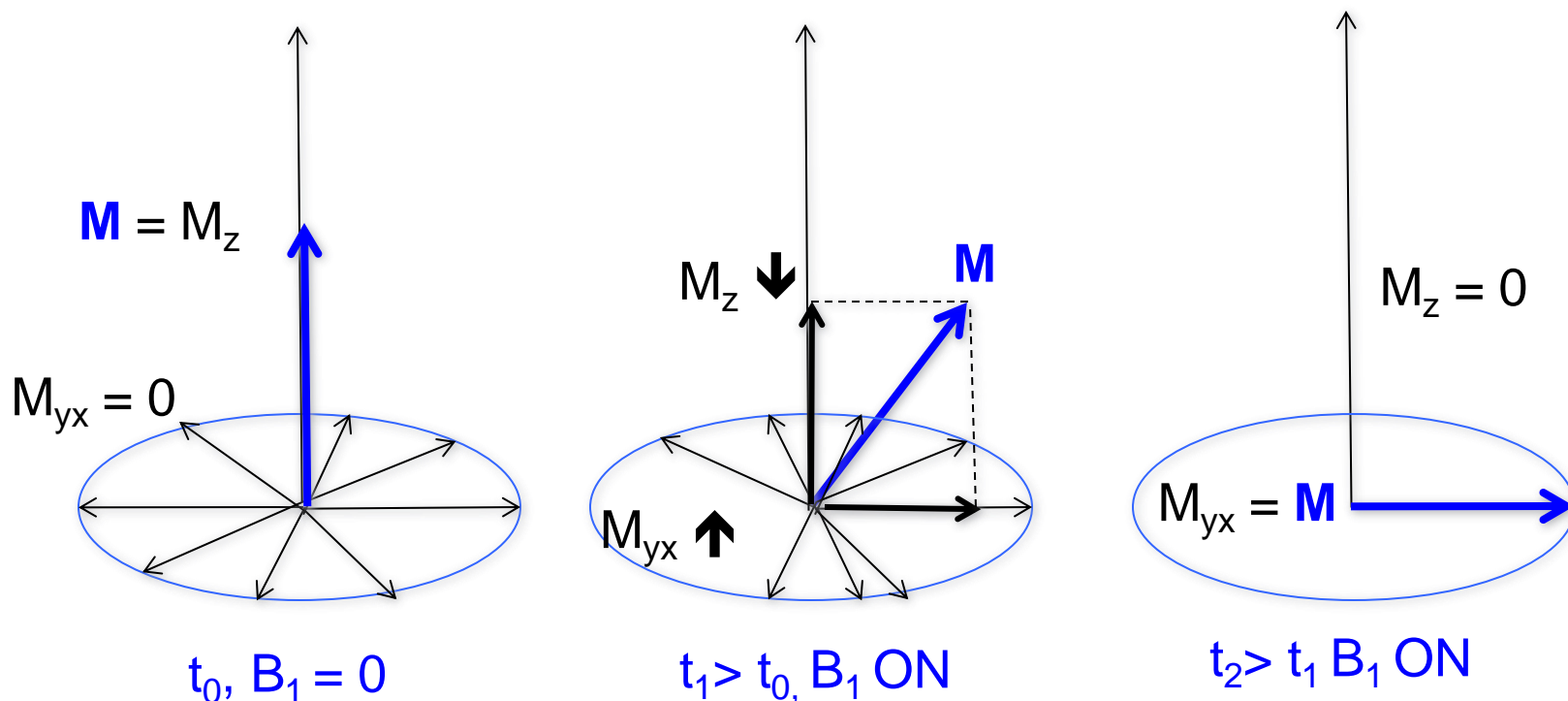


Zastosowanie takiego impulsu (zmienne pole magnetyczne B_1) spowoduje odchylenie wynikowego wektora magnetyzacji od kierunku linii pola B

Efekt dodatkowego impulsu elektromagnetycznego

odchylenie wynikowego wektora magnetyzacji:

- maleje składowa podłużna magnetyzacji (wyrównywanie się liczby spinów w obydwu stanach energetycznych) M_z
- rośnie składowa poprzeczna magnetyzacji (fazowanie się spinów) M_{xy}



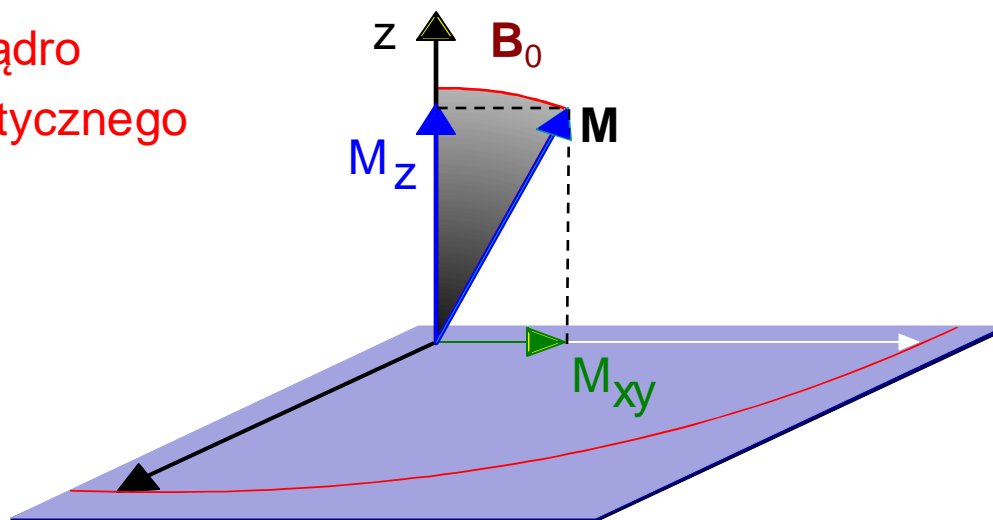


Kiedy impuls zanika ($B_1=0$) następuje powrót do stanu ustalonego

- wzdłużna magnetyzacja M_z odtwarza swoją wartość
- poprzeczna magnetyzacja M_{xy} znika
- obydwoóm procesom przypisane są różne stałe czasowe T_1 i T_2

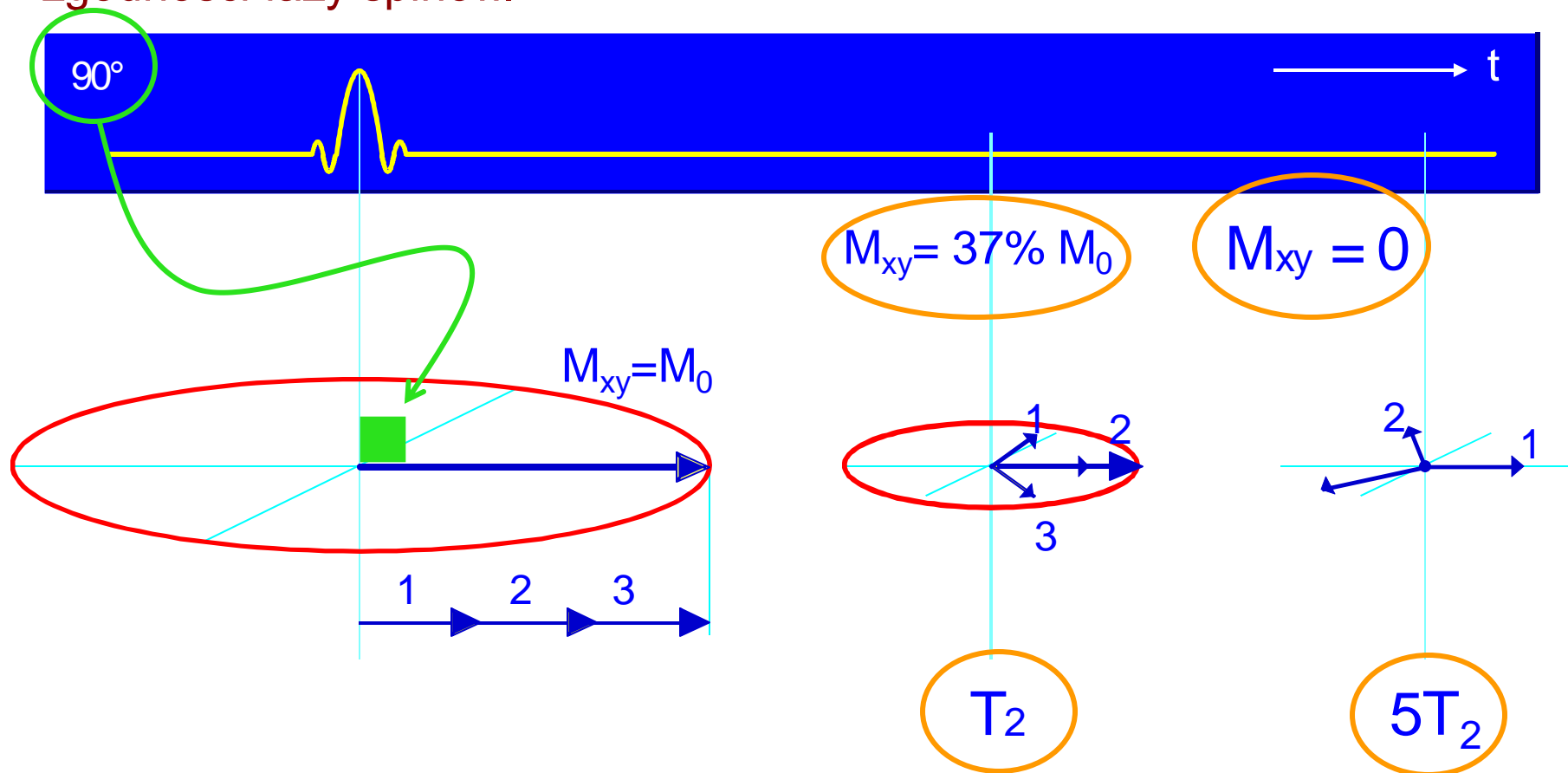
energia jest oddawana przez jądro

-> generacja impulsu elektromagnetycznego



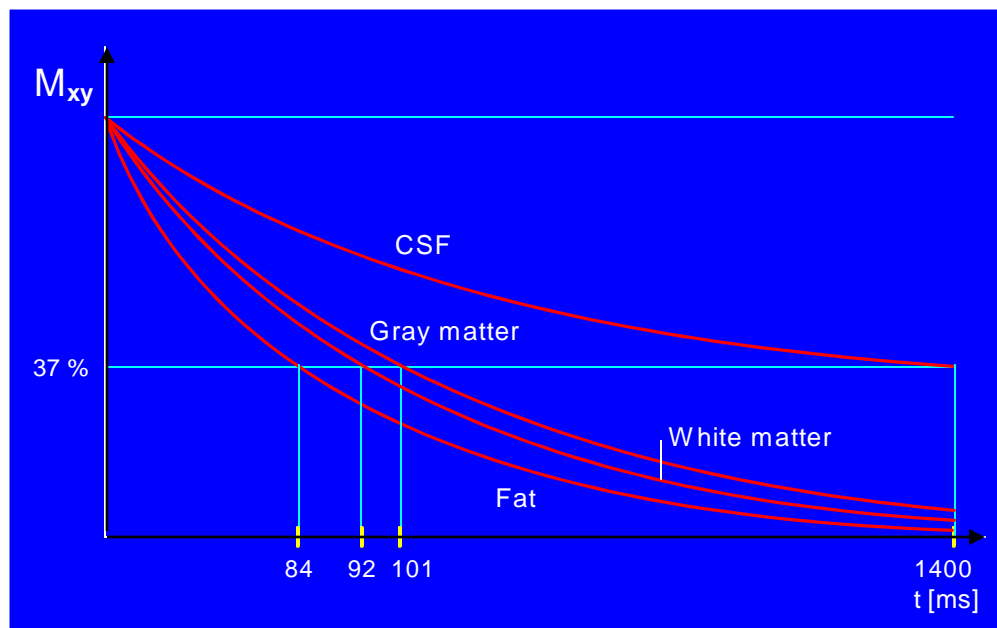
Relaksacja spin – spin (poprzeczna): T_2

Jest spowodowana przez wymianę energii pomiędzy sąsiednimi jądrami (jądra posiadają swoje pola magnetyczne). Skutkuje zanikiem zgodności fazy spinów.



Relaksacja spin – spin (poprzeczna): T_2

Wartość T_2 zależy od właściwości biofizycznych tkanek, ruchliwości cząstek, gęstości “upakowania” cząstek



T_2 [ms] dla pola 1 T

mięśnie	45
tłuszcz	84
istota biała	92
istota szara	101
płyn R-M (CSF)	1400

Drobny szczegół dotyczący T_2

Zanik spójności fazy spinów zależy tak naprawdę od dwóch czynników:

- niejednorodności zewnętrznego pola magnetycznego (T_2')
- procesów wymiany energii pomiędzy sąsiednimi spinami zależnymi od ich liczby i częstotliwości oscylacji (T_2)

Obydwa procesy mają charakter wykładniczy określony przez wynikową stałą czasową

* oznacza stałą obejmującą obydwa procesy

$$\frac{1}{T_2^*} = \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_2'}$$

Ta wartość koduje zanik M_{xy}

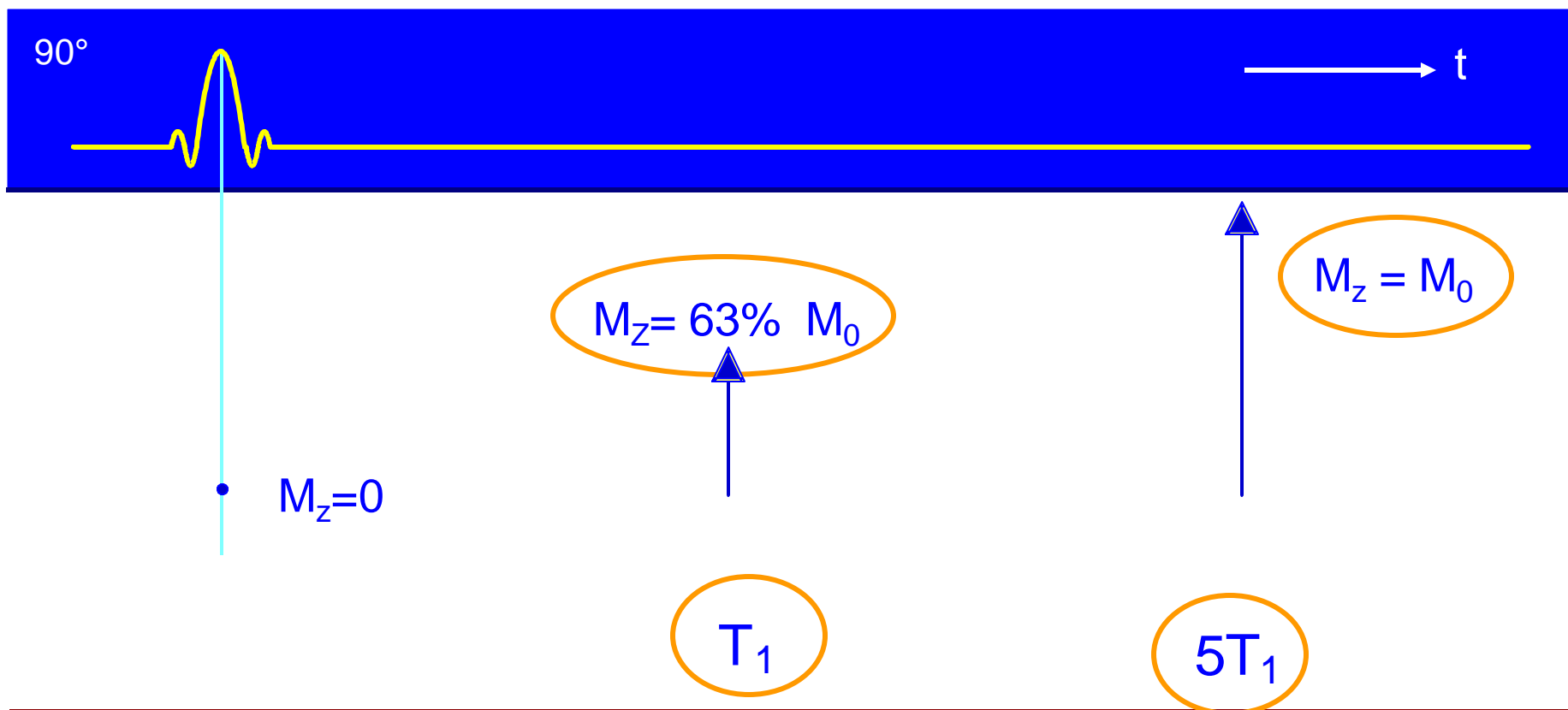
Tę wartość chcemy mierzyć

Ta wartość zależy od jakości pola magnetycznego skanera (zależy od x, y, z, t)



relaksacja spin – sieć (podłużna) – T_1

Przekazywanie energii do otoczenia (sieci). Następuje powrót jąder atomowych do stanu ustalonego (więcej jąder w położeniu równoległym do linii pola B)

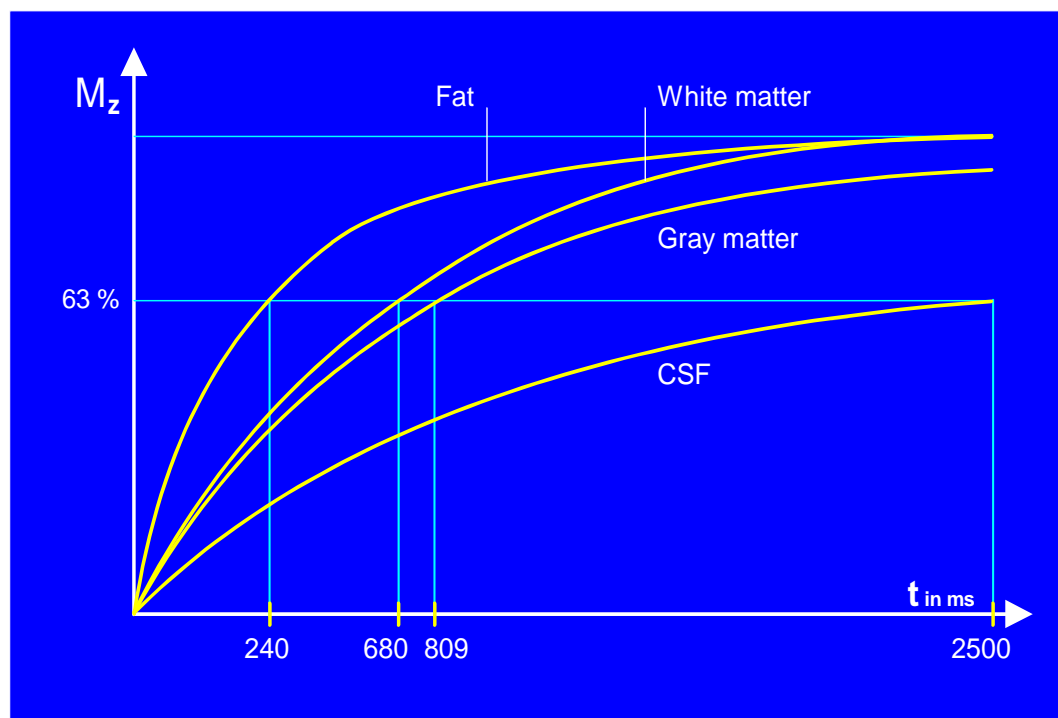




relaksacja spin – sieć (podłużna) – T_1

Wartość T_1 zależy od częstotliwości oscylacji sąsiednich molekuł poruszających się bezładnym ruchem cieplnym

T_1 [ms] dla pola $B = 1$ T

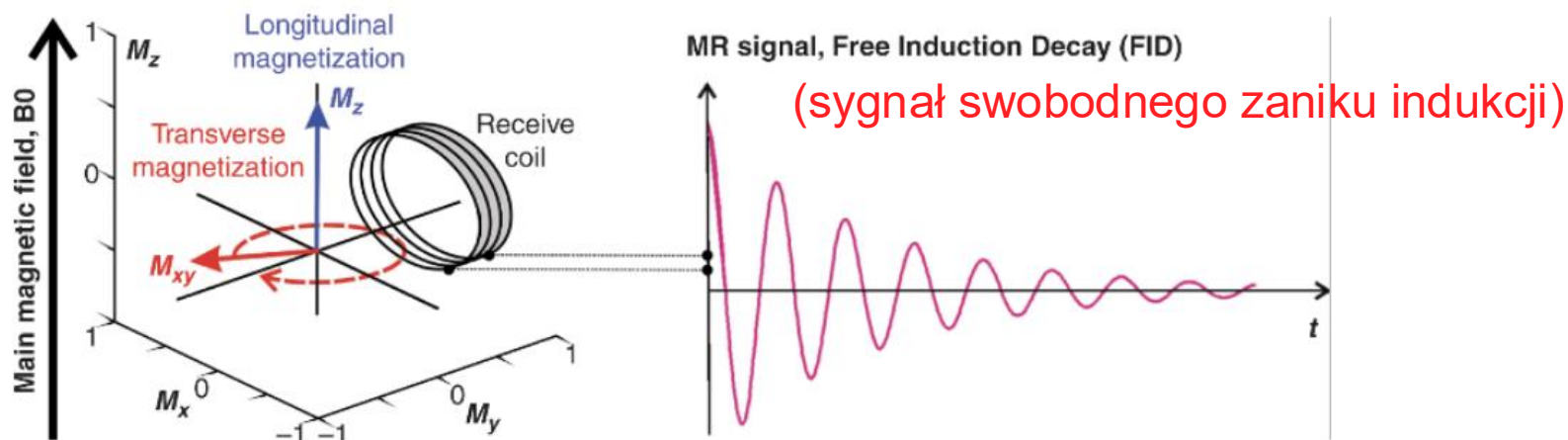


tłuszcz	240
mięśnie	730
istota biała.	680
istota szara	809
CSF	2500

$$T_1 > T_2^*$$



Źródło sygnału RM



Zmieniające się pole magnetyczne indukuje prąd w pętli przewodzącego drutu (prawo Faradaya = zasada indukcji elektromagnetycznej). Proton ma moment magnetyczny, a zatem działa jak mały magnes. Precesujące protony, których pola magnetyczne przecinają płaszczyznę cewki indukują w niej prąd elektryczny. Prąd ten jest „sygnałem” FID rezonansu magnetycznego indukowanym w cewce odbiornika – pochodzi tylko od wektora magnetyzacji poprzecznej (!?!)



- W. R. Hendee, E.R. Ritenour, Medical Imaging Physics, Wiley-Liss, 2002
- C. Guy, D. ffytche, An Introduction to The Principles of Medical Imaging, Imperial College Press, 2008
- B. Ciesielski, W. Kuziemski, Obrazowanie metodą rezonansu magnetycznego w medycynie, Tutor 1994
- C. Westbrook, C. Roth, J. Talbot, MRI in Practice, Blackwell Publishing, 2005
- H. Schild, MRI made easy (... well almost), Schering AG, 1990

