

Meccanismi di interazione ed effetti biologici del campo magnetico statico (B_0) nella risonanza magnetica ad uso clinico

Giulia CARPINELLI

Laboratorio di Biologia Cellulare, Istituto Superiore di Sanità, Roma

Riassunto. - In questo capitolo vengono ricordati i principali meccanismi fisici di interazione di un campo magnetico statico con il corpo umano durante l'esame a risonanza magnetica e se ne valutano gli effetti a livello di parametri fisiologici quali la conduzione nervosa e la pressione sanguigna. Vengono inoltre illustrate le cause di artefatti indotti nei tracciati ECG.

Parole chiave: campo magnetico statico, interazioni elettrodinamiche, potenziali di flusso, effetti magneto-meccanici, correnti di Faraday, artefatti ECG, conduzione nervosa, pressione arteriosa.

Summary (*Mechanisms of interaction and biological effects of static magnetic field (B_0) in clinical magnetic resonance*). - This chapter summarizes the main mechanisms of interaction of a static magnetic field with the human body, during magnetic resonance examinations. The biological effects are evaluated at the level of physiological parameters, such as neuronal conduction and blood pressure. The artifacts on ECG traces are also described in the light of the Lorentz and Faraday laws.

Key words: static magnetic field, electrodynamic interactions, magnetomechanic effects, flow potentials, Faraday currents, ECG artifacts, nervous conduction, blood pressure.

Introduzione

E' noto che alcuni organismi hanno una maggiore sensibilità a campi magnetici statici paragonabili a quello geomagnetico ($\sim 50 \mu\text{T}$). In natura è stato ad esempio trovato che il campo magnetico agisce sul volo delle api, sui movimenti migratori degli uccelli, sui movimenti dei molluschi, sulla direzione del moto di alcuni pesci come squali e razze.

Negli ultimi anni, con lo sviluppo delle macchine acceleratrici nella fisica delle alte energie, della ricerca nel campo della fusione controllata, dei sistemi di levitazione magnetica nei trasporti ed in modo particolare con l'impiego per scopi clinici della risonanza magnetica nucleare (RM), è andato crescendo l'interesse di studiare l'interazione della materia biologica con campi magnetici superiori a quello terrestre [1-5].

Campi magnetici statici artificiali sono prodotti da correnti elettriche unidirezionali o da magneti permanenti. Al momento, per le strumentazioni di RM ad uso clinico, vengono generalmente applicati campi magnetici di intensità compresi tra circa 0,2 e 2 T. L'uso di campi superiori a 2 T permette sia un miglioramento del rapporto segnale/rumore nelle immagini, che una riduzione dei tempi di scansione, ed inoltre consente di avere informazioni da analisi in alta risoluzione, in particolare su meccanismi metabolici o funzionali.

In questo contesto cercherò di illustrare quale sia il presente stato di conoscenza sui meccanismi con cui i campi magnetici statici interagiscono con i sistemi viventi, e gli effetti biologici ad essi associati.

Il corpo umano è relativamente "trasparente" al campo magnetico statico (B_0). Tuttavia le interazioni di B_0 con macromolecole anisotropiche o con cariche in movimento presenti nel corpo umano, possono interferire in misura significativa con alcuni importanti meccanismi fisiologici.

Durante l'analisi RM il paziente è sottoposto ad un campo statico ed omogeneo di induzione magnetica (B_0), tale che

$$B_0 = \mu H_0$$

dove B_0 è la densità di induzione magnetica, espressa in T (1 tesla = 10^4 gauss), H_0 è l'intensità del campo magnetico espressa in Oe (1 Oe = Ampère-spira/metro), e μ è la permeabilità magnetica del mezzo.

L'interazione del campo statico di induzione magnetica B_0 con la materia dà luogo a:

- 1) effetti magneto-meccanici;
- 2) effetti di induzione magnetica;

Gli effetti di interazione con stati elettronici di spin non sono di particolare rilievo per il corpo umano durante l'analisi RM.

1) Effetti magneto-meccanici

Possiamo suddividere gli effetti magneto-meccanici in due classi: A) traslazione magneto-meccanica e B) orientazione di momenti magnetici o di molecole biologiche.

A) Traslazione magneto-meccanica

La traslazione magneto-meccanica è dovuta all'effetto di gradienti spaziali di campo magnetico. Questi possono indurre moti di traslazione su materiali paramagnetici e ferromagnetici. Negli esseri viventi, essendo molto limitata la presenza di questi materiali, l'effetto di traslazione è generalmente trascurabile.

B) Orientazione di momenti magnetici o di molecole biologiche

In un campo magnetico statico omogeneo, sia molecole con proprietà diamagnetiche che paramagnetiche risentono di una coppia di forze che tende ad orientarle, minimizzando la loro energia libera.

Alcune molecole e strutture cellulari hanno suscettività magnetica che varia con la direzione. Questo effetto è stato ben studiato per insiemi di macromolecole diamagnetiche aventi differente suscettività magnetica lungo l'asse principale di simmetria. Inclusi in questa classe sono macromolecole o aggregati come [7-11]:

- cristalli liquidi
- globuli rossi falciformi
- l'insieme di fotopigmenti, quale la rodopsina nei dischi del segmento esterno dei bastoncelli della retina.

Se rappresentiamo, come nella Fig. 1, una particella diamagnetica, il momento della forza Γ a cui questa è soggetta in un campo magnetico H_0 è dato dalla relazione

$$\Gamma = \mathbf{M} \wedge \mathbf{H}_0$$

dove \mathbf{M} è il vettore di magnetizzazione per unità di volume.

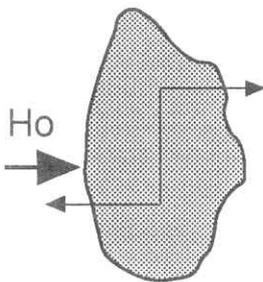


Fig. 1. - Effetto di riorientazione esercitato dal campo magnetico H_0 su una particella diamagnetica.

L'energia di magnetizzazione o energia di interazione del campo \mathbf{H} con molecole biologiche caratterizzate da una suscettività diamagnetica tensoriale \mathbf{X} è data da:

$$W = 1/2 \int_V \mathbf{H} \mathbf{X} \mathbf{H} \, dv$$

La forza applicata a tali molecole dipende dalla loro suscettività e dall'orientazione delle molecole stesse rispetto al campo.

L'energia di magnetizzazione aumenta con il quadrato di H . Ad esempio, ad un campo di 2 T, l'energia sarà 4 volte superiore all'energia associata ad un campo di 1 T. A questi valori di campo l'energia di magnetizzazione per strutture cellulari e subcellulari è dell'ordine di 10^{-14} - 10^{-12} erg, valori questi confrontabili con l'energia termica a temperatura ambiente (circa $4 \cdot 10^{-14}$ erg).

2) Effetti di induzione magnetica

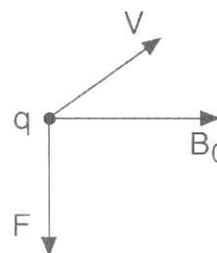
Gli effetti di induzione magnetica, indotti dall'interazione del campo \mathbf{B}_0 con correnti ioniche, si possono classificare in: A) effetti di interazioni elettrodinamiche e B) effetti conseguenti alla generazione di correnti di Faraday.

A) Interazioni elettrodinamiche con elettroliti in movimento

La legge fisica alla base di questa interazione è la legge di Lorentz, che esprime la forza (detta di Lorentz), esercitata da un campo di induzione magnetica uniforme \mathbf{B}_0 su una carica q in movimento con velocità \mathbf{v} .

Tale una forza è espressa dalla relazione

$$\mathbf{F} = q (\mathbf{v} \wedge \mathbf{B}_0)$$



$$(q > 0)$$

La forza di Lorentz provoca deviazione nella direzione perpendicolare sia al campo magnetico sia alla direzione originaria dello ione in movimento.

Nel caso di cariche che si muovono sotto l'azione di potenziali elettrici presenti in elettroliti solidi o nella materia biologica, l'effetto della forza di Lorentz è di per sé molto piccolo, dato che le velocità di traslazione raggiunte dalle cariche sono molto lente (di molto inferiori, ad esempio, a quelle associate all'agitazione termica).

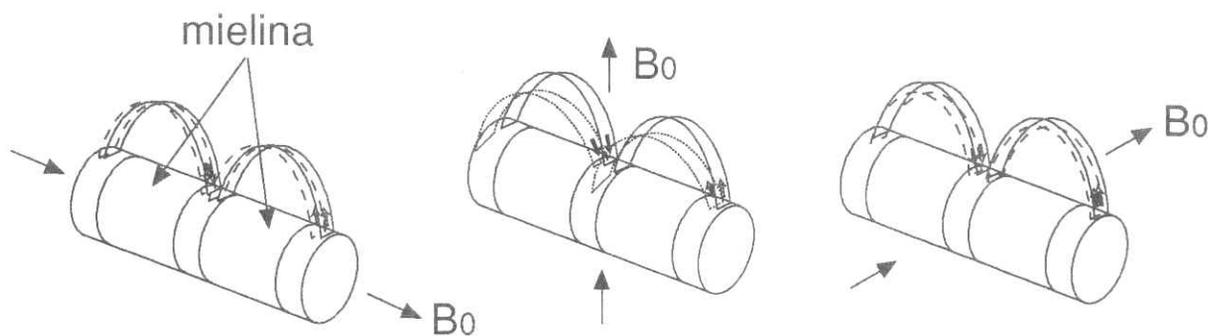


Fig. 2. - Alterazioni indotte sulle correnti ioniche di una fibra nervosa da diverse orientazioni del campo B_0 (modificato da [14]).

Nel caso di elettroliti che passano attraverso canali, l'interazione di B_0 con gli ioni in condizioni di equilibrio segue la legge di Lorentz, ed il modulo della forza applicata è dato dalla relazione:

$$q v B_0 \sin \theta$$

dove θ è l'angolo tra la direzione della carica in movimento e B_0 .

L'interazione di B_0 con cariche in movimento può indurre nell'uomo alterazioni su parametri fisiologici quali la conduzione nervosa, i potenziali e le correnti indotte associate al flusso sanguigno, e sul flusso sanguigno stesso.

Conduzione nervosa

Consideriamo le fibre nervose periferiche ed il sistema nervoso centrale.

L'interazione delle correnti ioniche con il campo B_0 deflette gli anelli di corrente responsabili della trasmissione nervosa [12-14]. È chiaro come questo effetto dipenda dall'intensità di B_0 e dall'angolo formato dalla carica rispetto alla direzione di B_0 (Fig. 2).

Teoricamente dovrebbe anche variare la velocità di corrente ionica. Si è tuttavia calcolato che è necessario un campo di 24 T per indurre una riduzione del 10% nella conduzione nervosa.

Potenziali di flusso

A causa del movimento impresso a cariche in movimento sia il flusso sanguigno che il movimento dei polmoni durante la respirazione ed il battito cardiaco generano potenziali elettrici, in un campo magnetico statico [15-17]. I potenziali elettrici associati a questi movimenti, sono proporzionali all'intensità di campo magnetico e al diametro del vaso sanguigno ed hanno il massimo valore per flussi perpendicolari al campo magnetico. L'ampiezza e la polarità di tali potenziali dipendono anche dall'orientazione del flusso rispetto al campo B_0 . Il voltaggio magnetico idrodinamico è espresso dalla relazione

$$E = B v d \sin \theta$$

$E =$ potenziale di flusso
 $B =$ densità di flusso (T)
 $d =$ diametro del vaso (m)
 $v =$ velocità del flusso (m/sec)

Quando il paziente viene posto nel campo magnetico per l'esame RM, l'angolo formato dal vaso rispetto a B_0 è di 90° . Ciò comporta che l'effetto idrodinamico è massimo. In particolare, nell'aorta, che nell'uomo adulto ha un diametro di 2,5 cm, considerati i parametri di potenziale di flusso, risulta che E è di circa 16 mV/T

Questo fenomeno è associato alla forza elettromotrice del flusso sanguigno. Quando questo è perpendicolare al campo magnetico statico si osservano alterazioni del tracciato dell'elettrocardiogramma (ECG). Come è noto, quest'ultimo è la rappresentazione grafica dell'andamento temporale della corrente elettrica generata dal muscolo cardiaco durante la contrazione.

L'ECG normale presenta deflessioni caratteristiche che riflettono la polarizzazione degli atri (onda P), dei ventricoli (Q, R, S) e la ripolarizzazione dei ventricoli (onda T) (Fig. 3).

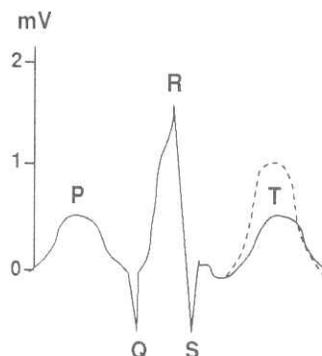


Fig. 3. - Rappresentazione schematica di un tracciato ECG ed alterazione indotta sull'onda T da un campo magnetico statico perpendicolare all'aorta.

Deviazioni del tracciato ECG possono segnalare la presenza di una patologia cardiaca, ma se queste alterazioni sono osservate a livello dell'onda T in presenza di campo magnetico non riflettono alterazioni del battito cardiaco e sono reversibili. L'alterazione dell'onda T è infatti solo il risultato dei potenziali indotti dal flusso.

B) Effetti conseguenti alle correnti di Faraday

Un secondo effetto che induce "artefatto" nel tracciato ECG è l'induzione di Faraday ad alti campi. Tale effetto consiste nella generazione di un potenziale elettrico pari a

$$E \text{ (volt)} = -10^{-4} H \text{ da/dt}$$

dove a è l'area di interesse perpendicolare al campo.

Si calcola che in un torace di 20 cm di diametro che si espande di 2 mm in 100 ms, in un campo di 2 T si genera un voltaggio di circa 2 mV. Questo effetto è sensibile alla orientazione degli elettrodi, ma non alla direzione del flusso relativamente al campo B_0 .

Le interazioni elettrodinamiche fino ad ora descritte inducono anche effetti magnetoidrodinamici. In particolare, il voltaggio magnetoidrodinamico può provocare aumento della pressione arteriosa PA secondo la relazione:

$$PA = P_0 \left(1 + \frac{1}{4} \left(\frac{B_0 \cdot d}{2} \left(\frac{\sigma}{v} \right)^{1/2} \right)^2 \right)$$

- v = viscosità cinematica del sangue
- σ = conducibilità elettrica del sangue
- d = diametro del vaso

La pressione ed il flusso subiscono alterazioni in presenza di un campo magnetico perpendicolare alla direzione del flusso.

Dalla relazione precedentemente indicata si possono calcolare le percentuali di variazione dei valori pressori a differenti campi di induzione magnetica. Questo effetto è maggiore per vasi di diametro maggiore, quindi anche per questo l'effetto è massimo sull'aorta.

Campo di induzione magnetica	Aumento PA (%)
2 T	1
3	3
4	5
5	7
6	10

E' stato comunque dimostrato che tutti gli effetti indotti dal campo magnetico statico sono reversibili in breve tempo dopo l'esposizione.

In conclusione ai valori di campo magnetico statico generalmente utilizzati nella RM ad uso clinico (≤ 2 T) gli effetti magnetomeccanici e di induzione magnetica, sinora accertati, provocano alterazioni lievi e reversibili su parametri fisiologici quali la conduzione nervosa e la pressione sanguigna.

Lavoro presentato su invito.
Accettato il 14 dicembre 1993.

BIBLIOGRAFIA

1. BUDINGER, T.F. 1979. Thresholds for physiological effects due to RF magnetic fields used in NMR imaging. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS26**: 2821-2825.
2. TENFORDE, T.S. & BUDINGER, T.F. 1987. Biological effects and physical aspects of NMR imaging and *in vivo* spectroscopy. In: *NMR in medicine. The instrumentation and clinical applications*. S.R. Thomas & R.L. Dixon. (Eds). AIP, New York. pp. 493-548. (Med. Phys. Monogr. no. 14).
3. WEHRLI, F.W. 1991. Past, present, and future of magnetic resonance. In: *Clinical CT and MRI*. D. Buthiau (Ed.) Frison Roche, Paris. pp. 111-126.
4. GROSS, L. 1964. Lifespan increase of tumor-bearing mice through pretreatment: In: *Biological effects of magnetic fields*. M.F. Bamothy (Ed.). Vol. 1. Plenum Press, New York. pp. 132-139.
5. *Magnetic fields effects on biological systems*. 1979. T.S. Tenforde (Ed.). Plenum Press, New York.
6. MARET, G., BOCCARA, N. & KIEPENHEUER, J. 1986. *Biophysical effects of steady magnetic fields*. Springer-Verlag, Berlin/New York.
7. WOLFF, S., CROOKS, L.E., BROWN, P. *et al.* 1980. Tests for DNA and chromosomal damage induced by nuclear magnetic resonance imaging. *Radiology* **136**: 707-710.
8. MILD, K., SANDSTROM, M. & LOVTRUP, S. 1981. Development of *Xenopus laevis* embryos in a static magnetic field. *Bioelectromagnetics* **2**: 199-201.
9. MURAYAMA, M. 1965. Orientation of sickled erythrocytes in a magnetic field. *Nature* **206**: 420-422.
10. HONG, F., T., MAUZERALL, D. & MAURO, A. 1971. Magnetic anisotropy and the orientation of retinal rods in a homogeneous magnetic field. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **68**: 1283-1285.
11. DE CERTAINES, J.D. 1992. Molecular and cellular responses to orientation effects in static and homogeneous ultra high magnetic fields. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* **649**: 35-43.
12. WIKSWO, J.P. & BARACH, J.P. 1980. An estimate of the steady magnetic field strength required to influence nerve conduction. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* **27**: 722-723.
13. SCHWARTZ, J.L. 1978. Influence of a constant magnetic field on nervous tissues. I. Nerve conduction velocity studies. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* **25**: 467-473.
14. BUDINGER, T.F. & CULLANDER, C. 1983. Biophysical phenomena and health hazards of *in vivo* magnetic resonance. In: *Clinical magnetic resonance imaging*. A.R. Margulis, C.B. Higgins, L. Kaufman & L.E. Crooks (Eds). Ch. 19. Radiology Research and Education Foundation, San Francisco.
15. TOGAWA, T., OKAI, O. & OSHIMA, M. 1967. Observation of blood flow EMF in externally applied strong magnetic fields by surface electrodes. *Med. Biol. Eng.* **5**: 169-170.
16. BATTOCLETTI, J.H., HALBACH, R. E., SALLES-CINHA, S.X. & SANCES, A.Jr. 1983. Nuclear magnetic resonance and transcutaneous electromagnetic blood flow measurement. *J. Microw. Power* **18**: 221-232.
17. EASTERLY, C.B. 1982. Cardiovascular risk from exposure to static magnetic fields. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* **43**: 533-539.