

ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE
Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-79/3(R)
9 Gennaio 1979

E. Righi e M. DiPofi: IL RISCHIO DA CAMPO MAGNETICO
DERIVANTE DA TECNOLOGIE NUCLEARI: CRITERI DI
PROTEZIONE SANITARIA.

E. Righi ^(x) e M. Di Pofi ^(o): IL RISCHIO DA CAMPO MAGNETICO DERIVANTE DA TECNOLOGIE NUCLEARI: CRITERI DI PROTEZIONE SANITARIA.

(Presentato al 41° Congresso della Società Italiana di Medicina del Lavoro e d'Igiene Industriale, Santamargherita Ligure - 4/7 Ottobre 1978).

SOMMARIO.

L'utilizzazione di campi magnetici ad alta intensità, ancorchè limitata al momento attuale a particolari settori come quello nucleare, è certamente destinata a più ampia diffusione, in considerazione delle prospettive di sviluppo scientifico e tecnologico.

Gli AA. dopo aver analizzato le tecnologie nucleari per le quali si propongono rischi da campo magnetico e dopo aver richiamato brevemente gli aspetti essenziali degli effetti biomagnetici, affrontano il problema della protezione sanitaria dalla noxa magnetica. In particolare si soffermano sugli aspetti protometrici fondamentali, sui limiti di esposizione attualmente disponibili e sulla sorveglianza medica. Gli AA. prospettano inoltre confronti e analogie con la radioprotezione proponendo, in via indicativa, la definizione di "dose magnetica effettiva" e criteri per la definizione della relazione dose-effetto.

SUMMARY.

The use of high intensity magnetic fields, even though is presently limited to few particular fields like the nuclear field is certainly open in the future to much wider scientific and technological applications.

The Authors first analyse the nuclear technologies where magnetic field risks exist and, after a short summary of the biological effects of magnetic fields, study the problem of health protection from magnetic noxa.

In particular they analyse the fundamentals of protection from magnetic fields, the exposure limits presently available and the medical supervision.

In addition the Authors compare this problem to radioprotection and propose a definition of "effective magnetic dose" and the criteria for the dose-effect relationship.

(x) Medico Autorizzato dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare.
(o) Medico Autorizzato del Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare.

PREMESSA.

Soltanto in questi ultimi venti anni l'interesse per i fenomeni di biomagnetismo si è rapidamente e notevolmente accresciuto come dimostrano i numerosi simposi e congressi tenuti sull'argomento, e i numerosi lavori sperimentali riportati in letteratura.

Tale interesse trova giustificazione nel progresso delle scienze e delle tecnologie soprattutto nucleari e spaziali.

Al momento attuale l'uomo può essere esposto a campi magnetici che dai 10^{-10} T dell'ambiente spaziale possono raggiungere i 100 T delle implosioni magnetiche, passando per il livello geomagnetico il cui valore è intorno ai $50 \mu\text{T}$ ⁽¹⁾.

La presente comunicazione ha lo scopo di individuare e discutere alcuni aspetti protezionistici connessi ai campi magnetici di interesse nell'ambito della ricerca nucleare e della fisica delle alte energie.

TECNOLOGIE E ANALISI DEI RISCHI.

Citeremo brevemente le caratteristiche essenziali delle macchine e degli impianti da noi considerati nell'ambito della nostra attività protezionistica.

Presso il Centro di Frascati del CNEN opera il Tokamak, macchina realizzata per lo studio preliminare di fenomeni fondamentali riguardanti la fusione controllata.

Nel Tokamak è in funzione un campo magnetico toroidale, integrato da un campo magnetico poloidale, capace di confinare quale "scatola magnetica" il plasma, cioè gas ionizzato portato ad altissime temperature (milioni di gradi), temperature alle quali nessun contenimento materiale può essere ovviamente adottato.

Presso i Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN la tecnologia dei magneti è notevolmente sviluppata per lo studio e la realizzazione delle strutture magnetiche necessarie per la guida e la deflessione dei fasci nelle macchine acceleratrici e per la rivelazione delle particelle elementari.

Presso Adone ("grande anello di accumulazione" da Ada, "anello di accumulazione") sono installati elettro-magneti quadrupolari (non permanenti a bassa "retentivity"), di tipo focalizzante ed elettromagneti bipolari per la guida del fascio.

Inoltre per la rivelazione delle particelle sono utilizzati alti campi magnetici su larghe superfici, come in particolare avviene nelle camere a bolle e in alcuni spettrometri (Magnete Esperienza Adone - MEA). In quest'ultimo caso, all'interno di grossi magneti vengono introdotti apparecchi di rivelazione di particelle.

Infine, attualmente sta progredendo la tecnica di realizzazione dei superconduttori (materiali come il Ni-Ti con bassa resistenza elettrica a basse temperature), con possibilità quindi di produrre campi magnetici molto più intensi di quanto ottenibile con conduttori convenzionali.

Da questi brevi riferimenti tecnologici è possibile tentare una classificazione di massima dei rischi connessi all'impiego di magneti nel settore considerato.

Un primo rischio di esposizione a campi magnetici si realizza nella fase di messa a punto, cioè di taratura del magnete.

Un'altra eventualità si propone nelle vicinanze della macchina acceleratrice in condizione di "magnete in funzione", durante l'approntamento delle esperienze.

Una modalità di esposizione piuttosto importante si ha quando il ricercatore deve accedere per esigenze sperimentali all'interno di grossi magneti in funzione. In genere si tende in queste operazioni a non "spegnere" il magnete, in quanto ciò risulterebbe scomodo sperimentalmente a motivo del fenomeno dell'isteresi, cioè della cosiddetta "inerzia magnetica".

Di minore momento risultano essere, ai fini del rischio, i sistemi "chiusi" (non accessibili), anche se di alta intensità, come nel caso del Tokamak.

Da non trascurare inoltre la possibilità di un rischio infortunistico da attrazione magnetica che può comportare la proiezione di oggetti metallici contro il corpo dell'operatore, nonché l'eventualità di produzione di correnti indotte su conduttori a contatto dell'operatore stesso.

EFFETTI BIOMAGNETICI.

Sono attualmente numerose le informazioni riguardanti gli effetti da campo magnetico su organismi e strutture a diverso livello biologico, e cioè membrane, cellule, tessuti, alghe, insetti, uccelli, anfibi, topi, piccole scimmie, primati, uomo.

E' opinione di molti studiosi che, se il biomagnetismo è ormai un fenomeno ben documentato, è certamente ancora grossolana la conoscenza dei meccanismi che lo regolano.

Tra i più importanti fattori fisici che è necessario considerare nella caratterizzazione del campo ai fini biologici occorre ricordare l'intensità, il gradiente e la direzione del campo al quale il campione biologico è esposto.

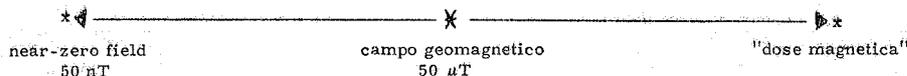
In questa sede non riteniamo opportuno per ovvie ragioni di brevità soffermarci sui vari fenomeni fisici precursori degli effetti biomagnetici.

Ci riferiamo in particolare alla produzione di forze elettromotrici in conduttori mobili, alla forza esercitata su portatori di cariche in movimento, alla torsione esercitata su dipoli magnetici permanenti e su particelle non sferiche para - o diamagnetiche, alla forza esercitata su dipoli magnetici permanenti o su particelle para - o diamagnetiche.

Nell'intento di compendiare nella maniera più sintetica possibile la vasta gamma degli effetti biomagnetici noti, riteniamo utile segnalare la classificazione proposta da J. M. Barnothy (2), da noi integrata con osservazioni di altri AA. (Tabella I).

TABELLA I
EFFETTI BIOMAGNETICI

* esp. BEISCHER sull'uomo (19, 20): riduzione della frequenza critica di fusione	* <u>stress group</u> (2) ritardo nell'accrescimento rigetto di tumori trapiantati variazioni ematologiche effetti sul S. N. C. scomparsa del ciclo estrale abbassamento della temperatura corporea riassorbimento dell'embrione nell'utero diminuzione respirazione tissutale
* esp. HALPERN e van DYKE sui topi (17, 18): posizione supina, cannibalismo, arresto della riproduzione in F ₄ , alopecia progressiva, morte prematura, sviluppo di tumori connettivali ed epiteliali	* <u>sensory group</u> (2) navigazione degli uccelli migratori senso direzionali degli insetti radioestesia
	* <u>genetic code group</u> (2) * effetti sinergici (6) * magnetofosfeni (6, 7) * orientamento macromolecolare (emazie falciformi) (4, 5) * effetto "radioprotettore" (21, 22, 23)



Nella prima classe (sensory group) vengono compresi gli effetti riconducibili ad una magnetorecezione sensoriale anche per campi dell'ordine di quello geomagnetico.

Appartengono molto probabilmente a questa classe i meccanismi che regolano la navigazione degli uccelli migratori, il senso direzionale degli insetti, l'orientamento delle planarie e, non meraviglia, il fenomeno della reattività di tipo raddomatico o radioestesico.

Una seconda classe prevede effetti da stress (stress group), alla cui base sono i fenomeni fisici in precedenza indicati.

Gli effetti sperimentalmente osservati e riferiti a questa classe sono:

1) Effetti ematologici. Topi trattati con un campo magnetico verticale e omogeneo di 4200 Oe hanno presentato una diminuzione dal 20 al 40% dei leucociti circolanti nelle prime due settimane di esposizione. Questa prima riduzione era seguita da un temporaneo aumento del tasso leucocitario che poteva raggiungere anche i valori normali.

Successivamente insorgeva una seconda diminuzione dei leucociti che raggiungevano un valore minimo intorno al trentesimo giorno di esposizione. Se i topi erano rimossi dal campo in corrispondenza del primo o del secondo minimo, il numero dei leucociti aumentava drasticamente e in circa due settimane superava il valore basale di circa il 20%⁽³⁾.

Di notevole interesse risulta anche il fenomeno di orientamento macromolecolare indotto da un campo magnetico di 350 mT su emazie falciformi in direzione perpendicolare al campo stesso⁽⁴⁾. Si consideri al riguardo che in via teorica è stato calcolato che per ottenere fenomeni di allineamento rotazionale di eritrociti normali sarebbero necessari campi magnetici di intensità dell'ordine di 30 T⁽⁵⁾.

2) Effetti sul Sistema Nervoso Centrale. Campi magnetici alternati o pulsati applicati in sede temporale con frequenza da 10 a 100 Hz e con intensità da 20 a 100 mT possono provocare il fenomeno dei magnetofosfene, e cioè l'insorgenza di sensazioni luminose generalmente incolori o leggermente bluastre o giallastre che compaiono alla periferia del campo visivo per progredire poi verso il centro^(6,7).

L'intensità del magnetofosfene raggiunge il massimo tra 20 e 30 Hz, e a questo punto la sensazione luminosa guizzante appare sincronizzata con il campo.

Con un campo magnetico continuo, i fosfene compaiono all'apertura e alla chiusura del campo e la loro intensità è tanto più grande, quanto è più rapida la variazione del campo stesso.

Fosfene più deboli sono ottenuti quando l'asse del nervo ottico è parallelo alle linee di flusso.

Sono diversi i meccanismi fisiopatogenetici proposti per spiegare l'insorgenza dei magnetofosfene.

Tra questi ricordiamo la stimolazione della retina da parte di correnti indotte, l'effetto di Hall, la stimolazione diretta della retina con trasformazioni cis-trans del retinene, la stimolazione diretta della corteccia cerebrale.

Con campi da 0,5 a 1T vengono indotte rotazioni misurabili dei bastoncelli retinici⁽⁸⁾ e ciò contribuisce ad aumentare l'interesse nei riguardi dell'occhio come probabile "organo critico".

Per quanto riguarda più in generale gli effetti del campo magnetico sul S. N. C. i dati sperimentali, sebbene numerosi, risultano essere attualmente di difficile correlazione tra di loro⁽⁹⁾.

Tuttavia, in via generale, è possibile ritenere che campi magnetici di alta intensità inducono modificazioni apprezzabili dell'attività bioelettrica cerebrale.

Alterazioni elettroencefalografiche sono state osservate da Beischer su scimmie scoiattolo sottoposte a campi di alta intensità⁽¹⁰⁾.

Anche Kholodov ha rilevato modificazioni elettroencefalografiche in conigli esposti a campi di 800 Oe⁽¹¹⁾.

Altri effetti osservati sperimentalmente su animali di laboratorio sono:

3) Ritardo nella guarigione delle ferite e nella rigenerazione dei tessuti.

- 4) Abbassamento della temperatura corporea.
- 5) Ritardo nell'accrescimento.
- 6) Rigetto di tumori trapiantati.
- 7) Scomparsa del ciclo estrale.
- 8) Riassorbimento dell'embrione nell'utero.
- 9) Diminuzione della respirazione tissutale.
- 10) Alterazioni epatiche.

J. M. Barnothy ipotizza infine una terza classe (genetic code group) nella quale vanno considerati gli effetti causati molto probabilmente da meccanismi perturbativi del tunneling dei protoni a livello dei ponti di idrogeno che legano le basi dei nucleotidi del DNA durante la duplicazione del DNA stesso con possibili errori nel codice genetico.

Alle tre classi proposte da Barnothy, è possibile aggiungere secondo St. Lorant⁽⁶⁾ una quarta classe rappresentata dagli effetti biomagnetici che compaiono soltanto in presenza di altri parametri fisici quali le radiazioni ionizzanti, la temperatura, la tensione di ossigeno, ecc.

Questi fattori fisici renderebbero metastabile un organismo in maniera tale da rendere efficace l'azione del campo magnetico.

Questo effetto combinato può spiegare il motivo per cui alcuni studi su materiali biologici sottoposti a campo magnetico hanno avuto sinora risultati non univoci.

Malgrado la eterogeneità dei dati sperimentali, è stato possibile individuare alcuni caratteri comuni degli effetti biomagnetici⁽¹²⁾.

1. Sembra esistere una soglia di intensità del campo al di sotto della quale il campo è inefficace. Il valore della soglia appare correlato al parametro esaminato. Al di sopra della soglia l'effetto non risulta aumentare proporzionalmente all'intensità del campo.
2. L'effetto biomagnetico non presenta una insorgenza immediata, ma richiede una esposizione continua al campo per un certo periodo di tempo (periodo di latenza), che può essere dell'ordine di giorni o settimane.
3. Gli effetti biomagnetici sembrano essere pressochè completamente reversibili e non esistono prove sperimentali che dimostrino effetti cumulativi causati da ripetute esposizioni senza adeguati tempi di recupero tra le esposizioni stesse.
4. Le variazioni della posizione dell'organismo esaminato rispetto alla direzione o al vettore gradiente del campo magnetico possono invertire totalmente o parzialmente gli effetti fisici cumulativi a motivo della loro reversibilità, in modo tale che l'effetto biomagnetico globale può risultare attenuato o al limite anche trascurabile.
5. Alcuni effetti possono persistere dopo la cessazione della esposizione al campo magnetico.

PROTEZIONE SANITARIA.

Il rischio da campo magnetico risulta essere limitato attualmente a particolari settori, come quello nucleare, anche se si aprono già interessanti vie di applicazione nel campo dei trasporti, delle telecomunicazioni, della medicina.

Per quanto concerne la definizione del rischio ricordiamo i parametri essenziali che consentono la caratterizzazione del campo magnetico ai fini biologici (intensità, direzione e gradiente del campo), i quali dovrebbero figurare per una corretta valutazione protezionistica nella scheda di posto di lavoro dell'operatore esposto a questo rischio.

Qualche difficoltà può sorgere dall'esame della letteratura a motivo dell'uso talora indifferenziato delle unità di misura.

Infatti, talvolta è possibile ritrovare l'intensità del campo H espressa non Oe, ma in G, che correttamente è invece l'unità di misura dell'induzione magnetica (B).

Ciò dipende dal fatto che essendo

$$B = \mu H$$

dove μ indica la permeabilità magnetica del mezzo, quando μ è uguale a 1 (come avviene nel sistema cgs nel vuoto e praticamente anche nell'aria), l'induzione magnetica misurata in G è numericamente uguale alla intensità del campo misurata in Oe.

Tuttavia, in magnetobiologia quando la permeabilità magnetica μ è sconosciuta oppure è variabile nell'ambito dello stesso campione è molto più appropriato descrivere il campo magnetico indicando il valore dell'intensità H (in Oe o in Oe/h).

Per completezza ricordiamo anche che nel sistema internazionale MKSA, il G è stato sostituito da T (1 T = 10^4 G) e l'Oe dall'Ampere-spira/metro (1 Oe = 79.58 Asp/m) (Tabella II).

TABELLA II

UNITA' DI MISURA DEL CAMPO MAGNETICO

Termini	Unità cgs	Unità mksa	Equivalenze
Densità di flusso B	gauss (G)	tesla (T)	1 T = 10^4 G
Intensità del campo H	cersted (Oe)	ampere-spira/metro (As/m)	1 Oe = 79.58 As/m

Sono attualmente disponibili limiti di esposizione, sia pure a carattere orientativo, proposti da studiosi e da organismi scientifici sulla base dei dati invero non numerosi, ricavati dalla lettura e riguardanti in particolare l'esposizione dell'uomo.

Beischer⁽¹³⁾, in occasione di una indagine effettuata negli Stati Uniti presso laboratori di fisica nucleare su casi di esposizione accidentale a campi magnetici fino a 2 T, ha rilevato che, al di là di modeste sensazioni gustative e di odontalgie in portatori di otturazioni metalliche, non si erano manifestati altri effetti, durante o dopo l'esposizione, ascrivibili a campo magnetico.

L'Autore stabiliva che 2 T possono essere tollerati dall'uomo in esposizioni per brevi periodi al corpo intero o a parti di esso, ritenendo inoltre non esserci effetti da esposizioni cumulative a campi di 0.5 T per un totale di 3 giorni per anno per uomo.

Sulla base della letteratura disponibile fino al 1970, la direzione dello Stanford linear accelerator center (SLAC) ha formulato limiti di esposizione per campi magnetici statici, tuttora in vigore⁽⁶⁾ (Tabella III).

Novitskiy et al.⁽¹⁴⁾ hanno riportato uno studio condotto da Vyalov nell'Unione Sovietica su 1500 lavoratori professionalmente esposti a campi magnetici. L'esposizione avveniva per tempi dal 20 al 60% del turno lavorativo e a livelli di 350-3500 Oe per le mani e di non più di 150-250 Oe per la testa. I sintomi a carattere generale accertati consistevano in cefalea, stancabilità, ipotensione arteriosa e diminuzione dei globuli bianchi. A carico delle mani furono riscontrati aumento della temperatura cutanea, edema sottocutaneo, iperidrosi e desquamazione in sede palmare.

Tale indagine ha consentito a Vyalov di proporre a sua volta limiti di esposizione, anche questi riferiti a campi magnetici statici (Tabella IV).

TABELLA III

LIMITE DI ESPOSIZIONE PER CAMPI MAGNETICI ADOTTATI DALLO STANFORD LINEAR ACCELERATOR CENTER (SLAC)⁽⁶⁾

	Periodi protratti (ore)	Periodi brevi (minuti)
Corpo intero o testa	20 mT	200 mT
Braccia e mani	200 mT	2 T

TABELLA IV

LIMITE DI ESPOSIZIONE PER CAMPI MAGNETICI PROPOSTI DA A. M. VYALOV^(x)

	Campo	Gradiente
Campo intero	30 mT	50-200 mT/m
Mani	70 mT	100-200 mT/m

(x) - Citato da Novitskiy et al.⁽¹⁴⁾

Come si può osservare dalle Tabelle, i limiti di esposizione proposti da Vyalov per le mani sono sensibilmente più bassi di quelli proposti dallo SLAC, molto probabilmente a motivo degli effetti locali osservati dallo studioso sulle mani stesse.

Brechna⁽¹⁾ riporta in forma sintetica i limiti di esposizione adottati negli Stati Uniti e nella Unione Sovietica e definiti "abbastanza arbitrari" dallo stesso Autore (Tabella V).

TABELLA V

LIMITI DI ESPOSIZIONE ADOTTATI NEGLI STATI UNITI E NELL'UNIONE SOVIETICA⁽¹⁾

Esposizione continua delle mani	< 2×10^{-1} T e	$1 - 2 \times 10^{-1}$ T/m di gradiente del campo
Esposizione continua del corpo intero	< 3×10^{-2} T e	$0,5 - 2 \times 10^{-1}$ T/m di gradiente del campo
Esposizione continua della testa	< 2×10^{-2} T e	10^{-1} T/m di gradiente del campo

N. B. - Per brevi periodi di tempo (min) l'intensità di esposizione al campo può essere superiore di un ordine di grandezza ai valori indicati.

Al momento attuale non sono disponibili limiti di esposizione per campi magnetici alternati, essendo ancora limitate le conoscenze sugli effetti biologici connessi alla esposizione dell'uomo a detti campi⁽¹⁵⁾.

Ci sembra suggestivo tentare qualche analogia di natura dosimetrica con la radioprotezione, sollecitati in questo dalla nostra attività di medici autorizzati.

Accanto ad una "dose magnetica di esposizione" esprimibile in Oe, è possibile a nostro giudizio individuare alcuni fattori che consentirebbero una prima definizione di "dose magnetica assorbita".

Tra i fattori da noi considerati annoveriamo in primo luogo il μ che esprime, come già detto, la permeabilità magnetica del mezzo, non sempre nota in magnetobiologia e spesso variabile nell'ambito dello stesso campione (fattore μ).

Un altro fattore è rappresentato dalla eventuale presenza del vettore gradiente del campo, espressione della disomogeneità spaziale del campo stesso (fattore gradiente).

Sembra che campi magnetici continui e omogenei inferiori a 100.000 Oe dimostrino una scarsa azione sui processi biologici. Infatti è necessario raggiungere campi magnetici continui dell'ordine di 100.000 Oe per aumentare il livello di energia molecolare in modo sufficiente a modificare le costanti cinetiche di alcune reazioni biochimiche⁽⁷⁾.

Beischer⁽¹⁶⁾ ha dimostrato che un campo magnetico con un gradiente superiore a 6.000 Oe/cm ha un effetto letale sulla Drosophila, mentre non è stato osservato alcun effetto con gradienti inferiori, anche quando l'intensità del campo raggiungeva i 100.000 Oe.

Eventuali effetti biomagnetici potranno risultare attenuati rispetto a quelli attesi in considerazione dell'intensità e del gradiente del campo, qualora il soggetto esposto si muova in senso rotatorio intorno ad un asse perpendicolare alla direzione del campo o al vettore gradiente (fattore spaziale).

Nel determinismo dell'effetto biomagnetico si dovrà tener conto del tempo di induzione dell'effetto stesso.

A tale riguardo, potrà inoltre risultare interessante, in questo specifico settore, definire il tempo necessario affinché un effetto fisico a carattere vettoriale possa indurre un effetto biomagnetico prima di essere invertito parzialmente o totalmente da un effetto fisico vettoriale opposto (fattore temporale).

La "dose magnetica assorbita", sulla scorta dei fattori sopra considerati, potrebbe essere

definita più adeguatamente come "dose magnetica effettiva" e a tale riguardo ci domandiamo quale possa essere l'unità di misura che la esprime correttamente.

Nella costruzione della curva dose effetto si può ragionevolmente assumere come punto 0 il livello del campo geomagnetico, cioè di quel campo che da sempre costituisce una componente costante dell'habitat e della evoluzione biologica dell'uomo.

A tale riguardo occorre considerare, tra gli altri, un fattore che diversifica l'andamento della relazione dose-effetto a seconda che sia riferito al campo magnetico o alle radiazioni ionizzanti.

Ci riferiamo in particolare alla cosiddetta "privazione magnetica", cioè a quella condizione in cui l'uomo o animali da esperimento sono sottoposti a campi magnetici significativamente inferiori al campo geomagnetico, manifestando in tale circostanza effetti biologici interpretabili come fenomeni "magnetocarenziali" (Tabella I).

Non ci è noto un analogo fenomeno, per quanto riguarda le radiazioni ionizzanti, definibile come "privazione da fondo naturale".

Halpern e Van Dyke^(17, 18) hanno effettuato una esperienza a lungo termine (per 2 anni) di "privazione magnetica" (intorno a $1 \pm 0,5$ mOe) su topi bianchi posti in appositi cilindri di "Mu-metal" orientati nella direzione est-ovest.

Mentre i soggetti di controllo, posti in cilindri simili di alluminio, non mostravano alterazioni patologiche significative, i topi sottoposti a "privazione magnetica" presentavano sorprendentemente un quadro caratterizzato da posizione supina, da cannibalismo, da arresto della riproduzione in quarta generazione, da alopecia progressiva nel 14% della popolazione adulta, da morte prematura entro i 6 mesi e da sviluppo di tumori connettivali ed epiteliali.

Beischer^(19, 20) ha condotto uno studio su soggetti volontari sottoposti per 10 giorni a "privazione magnetica" dello stesso ordine di grandezza di quello sopra indicato (intorno a 0,5 mOe). Furono eseguite numerose indagini cliniche quali determinazione del peso, della temperatura corporea, della funzionalità respiratoria, della pressione del sangue, analisi ematologiche ed ematochimiche, ECG, EEG, esami oculistici e neuropsichici. I risultati di questi esami furono in gran parte negativi. Tuttavia, in alcuni soggetti fu riscontrata una significativa diminuzione della frequenza critica di fusione che ritornava alla norma sospendendo la privazione magnetica.

Sebbene la frequenza critica di fusione sia oggi intesa come un test sensibile dell'efficienza circolatoria retinica e cerebrale, queste fini modificazioni non possono essere intese come segno di danno. Esse indicano però che la privazione magnetica ha sull'uomo un effetto biologico e prospettano la possibilità che periodi più prolungati di isolamento magnetico possano indurre effetti più gravi.

Le suddette esperienze, che appartengono alla ormai non più limitata letteratura sul "near-zero magnetic field", oltre ad avere un contenuto biologico inconsueto, pongono problemi almeno teorici nella costruzione della curva dose-effetto in cui, assunto il livello del campo geomagnetico come punto 0, i fenomeni di privazione magnetica comportano l'introduzione di una funzione negativa.

Sembrerebbe quasi che, in analogia a quanto accade per alcuni fattori vitali (vitamine, oligoelementi, ecc.), siano prospettabili condizioni di ipo- e di ipermagnetismo, intendendo come eumagnetismo quello connesso al campo geomagnetico.

Ricordiamo anche che può sussistere un effetto combinato di tipo sinergico, così come descritto nella 4^a classe degli effetti biomagnetici proposta da St. Lorant, effetto che si evidenzia soltanto se il campo magnetico agisce in sinergia con le radiazioni ionizzanti (o con altri fattori fisici).

Per contro, è stato anche descritto un effetto "radioprotettore" del campo magnetico come sembrano dimostrare le esperienze di Barnothy⁽²¹⁾, di Tobias⁽²²⁾ e di Miro⁽²³⁾.

Il primo Autore ha osservato un aumento significativo del tempo di sopravvivenza di topi sottoposti per 14 giorni ad un campo magnetico di 4.200 G e successivamente a DL 50 di radiazioni ionizzanti.

Tobias, esponendo *Tribolium confusum* a dosi mortali di raggi gamma e successivamente a

campi magnetici di 6.000 G ha osservato una sopravvivenza di questi animali.

Miro ha confermato tali risultati utilizzando campi elettromagnetici iperfrequenti.

Noi non disponiamo di elementi di interpretazione, sia pure orientativi, sul fenomeno dell'effetto combinato sia sinergico che antagonista tra campo magnetico e radiazioni ionizzanti, che nei casi prospettati viene a realizzarsi con esposizioni non simultanee ai due agenti fisici.

Per esposizioni simultanee, invece, è stato descritto da J. M. Barnothy⁽²⁾ il possibile meccanismo di interazione tra campo magnetico e radiazioni ionizzanti che consisterebbe nella influenza del campo magnetico sulla distribuzione nel contesto biologico degli ioni prodotti dalle radiazioni.

Naturalmente, considerata la complessità dei problemi prospettati e la nostra formazione prevalentemente operativa, noi ci siamo limitati ad elaborare alcune considerazioni e a sottolineare dati che riteniamo significativi.

Rimandiamo alla competenza dei radiobiologi e dei teorici della radioprotezione la valutazione delle descritte possibili analogie e interazioni tra campo magnetico e radiazioni ionizzanti.

Per quanto concerne la sorveglianza medica, riteniamo che al momento attuale non sia possibile effettuarla con criteri mirati, a motivo della difficoltà di individuazione degli organi definibili come "critici", mutuando un termine radioprotezionistico corrente.

Infatti, non è ancora attuabile la composizione di una scala di sensibilità dei vari organi e tessuti all'agente magnetico.

E' opportuno quindi adottare nel frattempo criteri diagnostici allargati, comprendenti in via indicativa gli accertamenti clinici e di laboratorio utilizzati da Beischer nella citata esperienza di privazione magnetica e adatti, a nostro giudizio, anche nella protezione sanitaria da ipermagnetismo.

Auspichiamo comunque che il rischio professionale da campo magnetico trovi presto un preciso riscontro nella legislazione di natura protezionistica sia per gli aspetti di medicina preventiva che per quelli di ordine assicurativo.

Sotto il profilo igienistico, precisiamo brevemente che il monitoring deve essere effettuato con accorgimenti di coordinamento dell'asse dello strumento con le linee di forza, allo scopo di non sottostimare il campo reale.

Potrà anche essere utilmente costruita una mappa magnetica con criteri di tipo "iso - H".

CONCLUSIONI.

Nel concludere, ci auguriamo che, malgrado la molteplicità dei problemi prospettati e la scarsità delle soluzioni proposte, il nostro contributo possa essere ugualmente ritenuto in qualche misura valido per avviare un allineamento dei criteri di protezione sanitaria in uso per altre noxae professionali a questo particolare ambito.

Certo è che l'attuale settorialità del rischio nel contesto nucleare e il parallelismo tra rischio da campo magnetico e da radiazioni ionizzanti, chiama il medico autorizzato ad affrontare questo specifico problema sanitario con criteri analoghi a quelli caratteristici della radioprotezione.

Il problema protezionistico del campo magnetico è comunque destinato con ogni probabilità ad ampliarsi tenuto conto delle previsioni di sviluppo scientifico e tecnologico in questo settore. Tra l'altro si consideri con St. Lorant⁽⁶⁾, in una prospettiva presumibilmente non lontana, l'eventualità non soltanto teorica di diffusione su aree piuttosto vaste (di alcuni km) di frange di campi magnetici di livello compreso tra 200 e 1000 μ T provenienti da reattori a fusione.

Si verrebbe così a creare un inquinamento che potrà interessare per lunghi periodi e con livelli significativamente superiori a quello geomagnetico frazioni non trascurabili della popolazione.

E' auspicabile che la protezione sanitaria da noxa magnetica sia annoverata per tempo e compiutamente nell'ambito degli interessi scientifici e operativi della medicina preventiva.

BIBLIOGRAFIA.

- (1) - H. Brechna, Medical applications and biological effects of magnetic fields, in Proc. on 5th Intern. Conf. on Magnet Technology, Roma, 1975 (N. Sacchetti, M. Spadoni and S. Stipcich, Eds.), (CNEN, 1975), p. 351.
- (2) - J. M. Barnothy, Introduction, in Biological effects of magnetic fields (M. F. Barnothy ed.) (Plenum Press, 1964), vol. 1, p. 3.
- (3) - M. F. Barnothy, Hematological Changes in Mice (M. F. Barnothy ed.), in Biological effects of magnetic fields, (Plenum Press, 1964), vol. 1, p. 109.
- (4) - M. Murayama, Orientation of sickled Erythrocytes in a Magnetic Field, *Nature* 206, 420 (1965).
- (5) - P. W. Neurath, Simple Theoretical Models for Magnetic Interactions With Biological Units in Biological effects of magnetic fields, (M. F. Barnothy, ed.) (Plenum Press, 1964) vol. 1, p. 25).
- (6) - S. J. St. Lorant, Biomagnetism: a review, SLAC-PUB-1984 (1977).
- (7) - L. Miro, Champs magnétiques et biologie, *Mèd. et Hyg.*, 25, 1059 (1967).
- (8) - N. Chalozonitis et al., citati da St. Lorant (6).
- (9) - R. O. Becker, The effect of magnetic fields upon the central nervous system, in Biological effects of magnetic fields (M. F. Barnothy ed.), (Plenum Press, 1969) vol. 2^o, p. 207.
- (10) - D. E. Beischer and J. C. Knepton, The electroencephalogram of the Squirrel monkey in very high magnetic field, NAMI-972, U. S. Naval Aerospace Medical Institute, Pensacola, Florida (1966).
- (11) - J. U. A. Kholodov et al., Investigations of the reactions of mammalian brain to static magnetic fields in Biological effects of magnetic fields (M. F. Barnothy ed.), (Plenum Press, 1969), vol. 2^o, p. 215.
- (12) - M. F. Barnothy, Introduction in Biological effects of magnetic fields (Plenum Press, 1969), vol. 2^o, p. XI.
- (13) - D. E. Beischer, Human tolerance to magnetic fields, *Astronautics*, 7, 24 (1962).
- (14) - Y. I. Novitskii et al., Radiofrequencies and microwaves. Magnetic and electrical fields, NASA TTF-14. 021 (1971).
- (15) - S. M. Michaelson, Radiofrequency and microwave energies, magnetic and electric fields in Foundations of space biology and medicine (M. Calvin, G. O. Gazenko, eds.), (NASA, 1975), vol. 2, book 2.
- (16) - D. E. Beischer, Biomagnetics, Lectures in Aerospace Medicine, USAF School of Aerospace Medicine, (1963), p. 365.
- (17) - H. Van Dyke and M. H. Halpern, Observations on selected life processes in null magnetic fields, *Anat. Record*, 151, 480 (1965).
- (18) - H. Van Dyke and M. H. Halpern, Unpublished data. Hahnemann Medical College, Philadelphia Penn. n 1966 (citati da Brechna (1)).
- (19) - D. E. Beischer et al., Exposure of man to low intensity magnetic fields, Pensacola, Fla, Nav. Sch. Aerosp. Med., NSAM-823 (1962).
- (20) - D. E. Beischer et al., Exposure of man to low intensity magnetic fields in a coil system, Pensacola, Fla., Nav. Aerosp. Med. Inst., NAMI-1018 (1967).
- (21) - M. F. Barnothy and J. M. Barnothy, Biological effect of a magnetic field and radiation syndrome, *Nature*, 181, 1785 (1958).
- (22) - C. A. Tobias et al., Interaction of radiation and other environmental stresses in biological systems, Proc. of 2^o International Symposium on Basic Environmental Problems of Man in Space - Paris 1965 (Springer 1967).
- (23) - L. Miro et al., Effect radioprotecteur des ondes ultra-courtes vis à vis des bactéries, 1^{er} Congrès Français d'Electronique Médicale et de Génie Biologique - Tours, 1967.