

Il MUOS (*Mobile User Objective System*), un radar installato in Sicilia proprio all'interno della riserva "Sughereta di Niscemi", è una delle quattro sentinelle del sistema globale che la US Navy ha realizzato nei vari angoli del mondo per tenere sott'occhio tutto il pianeta. La storia di questo impianto è fatta di promesse non mantenute, di interventi politici pro MUOS poi sconfessati dalla magistratura, di proteste organizzate nel tentativo di interloquire con quei poteri, che pure erano sembrati disponibili.

Al fondo delle azioni del movimento NO MUOS, che qui vengono ricordate insieme all'analogo caso di Radio Vaticana che all'inizio degli anni Duemila scosse il mondo politico italiano, c'è una preoccupazione chiara: le onde elettromagnetiche di alta frequenza, radiofrequenze e microonde "fanno male"? Per fornire una risposta scientificamente fondata a questa domanda, dopo una rapida ricapitolazione dei principi fisici, viene chiarito perché sia legittimo parlare di "elettrosmog" e come siano fuorvianti certe affermazioni "rassicuranti" sull'equilibrio evolutivo. L'inoltrarsi nei complessi temi dell'interazione tra campi elettromagnetici e sistemi biologici consente poi una critica profonda e puntuale ai modelli e ai limiti d'esposizione vigenti, mostrando, per esempio, che il valore di campo elettrico previsto dalla normativa italiana come "livello d'attenzione", immediatamente all'esterno del nostro corpo, si ritrova tale e quale ancora 5 centimetri dentro il cervello.

Ma la *dora* scientifica non accetta ancora, in Occidente, l'esistenza degli *effetti specifici* della radiazione, cui invece risalgono, tra l'altro, numerose patologie nervose, tumori come neuroomi acustici e glioblastomi per le micro-onde e leucemie soprattutto infantili nella regione dei campi elettromagnetici a bassa frequenza.

Aurelio Angelini, insegna Sociologia dell'ambiente, Ecologia e Sociologia urbana nell'Università degli Studi di Palermo. Esperto in pianificazione, gestione, politiche ambientali e del patrimonio UNESCO, è presidente del DESS-UNESCO e direttore della Fondazione UNESCO Sicilia.

Massimo Scalia: noto esponente dell'"ambientalismo scientifico" e leader del movimento antinucleare, ha promosso come membro della Camera dei Deputati per i Verdi (1987-2001) la chiusura definitiva delle centrali nucleari e le leggi per il risparmio energetico e le fonti rinnovabili. Coordina la sezione Bioelettromagnetismo del CIRPS, Centro Interuniversitario di Ricerca Per lo Sviluppo sostenibile.

FrancoAngeli
La passione per le conoscenze

€ 17,00 (I)

ISBN 978-88-917-5260-4



2000.1473 A. ANGELINI, M. SCALIA LA SENTINELLA GLOBALE

Aurelio Angelini, Massimo Scalia

LA SENTINELLA GLOBALE

I campi elettromagnetici del MUOS
di Niscemi e i loro effetti



FrancoAngeli

Il volume è stato realizzato con il contributo di AIL – Associazione Italiana contro le Leucemie-
linfomi e mieloma sezione Palermo-Trapani.



Sez. Palermo-Trapani

Copyright © 2017 by FrancoAngeli s.r.l., Milano, Italy.

Ristampa	Anno
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9	2017 2018 2019 2020 2021 2022 2023 2024 2025 2026

L'opera, comprese tutte le sue parti, è tutelata dalla legge sui diritti d'autore.
Sono vietate e sanzionate (se non espressamente autorizzate) la riproduzione in ogni modo e forma
(comprese le fotocopie, la scansione, la memorizzazione elettronica) e la comunicazione
(ivi inclusi a titolo esemplificativo ma non esaustivo: la distribuzione, l'adattamento, la traduzione e la
rielaborazione, anche a mezzo di canali digitali interattivi e con qualsiasi modalità attualmente nota od in
futuro sviluppata).

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume
dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n.
633. Le fotocopie effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque
per uso diverso da quello personale, possono essere effettuate a seguito di specifica autorizzazione
rilasciata da CLEARedi, Centro Licenze e Autorizzazioni per le Riproduzioni
Editoriali (www.clearedi.org; e-mail autorizzazioni@clearedi.org).

Stampa: Geca Industrie Grafiche, Via Monferrato 54, 20098 San Giuliano Milanese.

Aurelio Angelini, Massimo Scalia

LA SENTINELLA GLOBALE

**I CAMPI ELETTROMAGNETICI DEL MUOS
DI NISCEMI E I LORO EFFETTI**

EDIZIONI
FrancoAngeli

Indice

Introduzione , di <i>Gianni Mattioli</i>	pag.	7
1. Rischio ambientale e movimento NO MUOS	»	13
1.1. La riserva naturale	»	14
1.2. Il rischio	»	15
1.3. Alcune evidenze epidemiologiche	»	17
1.4. Un caso emblematico: Radio Vaticana	»	19
1.5. Il movimento NO MUOS	»	24
1.6. I cittadini di Niscemi invocano il Principio di precauzione	»	26
2. Effetto termico ed effetti speciali. La posizione «ufficiale»	»	31
3. Il campo elettromagnetico e le onde elettromagnetiche	»	35
3.1 I campi, le leggi e le equazioni di Maxwell	»	35
3.2 Le onde elettromagnetiche	»	44
3.2.1. Fenomeni periodici e oscillatore armonico	»	44
3.2.2. Lo spettro elettromagnetico	»	48
3.2.3. Onde piane e campo lontano	»	50
3.2.4. Intensità di radiazione	»	53
4. Campi naturali e campi artificiali. Epidemiologie	»	55
4.1 Fondo naturale e fondo artificiale	»	55
4.2 Equilibrio evolutivo con i CEM	»	58
4.3 Epidemiologie	»	60
5. I campi ad alta frequenza entrano dentro la testa?	»	65
5.1 Il «proiettile» quantistico e un fenomeno epigenetico	»	65
5.2 Campi elettromagnetici incidenti, campi elettromagnetici interni	»	71

5.3 Il limite di esposizione di 10 mW/cm ² per le microonde. Una breve storia	pag.	75
5.4 Il modello di Kritikos-Schwan	»	79
5.5 Il modello di Kuster-Balzano. Che cos'è il SAR?	»	82
5.6 Un arzilla vegliardo: Ronold King e i modelli fisico-matematici rigorosi	»	86
5.7 I limiti di esposizione non garantiscono la protezione della salute	»	91
6. Gli effetti biologici	»	93
6.1 La pompa ionica Na ⁺ /Ca ⁺²	»	93
6.2 L'effetto finestra	»	99
7. I campi elettromagnetici di Niscemi	»	103
7.1 Niscemi	»	103
7.2 Naval Radio Transmitter Facility (NRTF): un «esercizio»	»	104
7.3 RADAR ed effetti specifici	»	108
8. Modelli di interazione	»	115
8.1 Cercando di spiegare gli effetti specifici: la «coerenza»	»	115
8.2 Cercando di spiegare gli aspetti specifici: la «risonanza»	»	117
8.3 Campi estremamente deboli: il «paradosso kT» e l'«effetto Zhadin»	»	119
9. Bibliografia di riferimento	»	125
Sitografia	»	126

Introduzione

di *Gianni Mattioli*

Interdisciplinarietà, multidisciplinarietà e transdisciplinarietà sono parole d'ordine di quella che è ormai definita co-costruzione della conoscenza, dei saperi; e sono ripetutamente risuonate anche nel Decennio per l'Educazione allo Sviluppo Sostenibile proclamato dall'Unesco per il 2005-2014. Non è un caso allora che i due autori di questo libro, che sono stati insieme a me co-presidenti del comitato scientifico che ha seguito per la Commissione Nazionale Italiana la vicenda Unesco, si ritrovino a dar mano a un testo nel quale non soltanto si fondono molteplici competenze – giuridiche, sociologiche, ambientali, naturalistiche, fisiche, biofisiche, ingegneristiche, mediche e storiche – ma che trae sostanza e argomenti dal rapporto diretto con le popolazioni interessate e quelle più coinvolte dal problema: l'installazione nella riserva naturale “*sughereta di Niscemi*” di un radar, il MUOS (*Mobile User Objective System*), che è una delle quattro “sentinelle” che perlustrano il pianeta nel sistema integrato messo a punto dall'*US Navy* per la sicurezza, e ovviamente non solo, degli Stati Uniti d'America. Le altre tre sono localizzate in Virginia, nelle Hawaii e in Australia.

La globalità di questo sistema di telecomunicazione, e soprattutto il suo carattere militare, fanno capire l'“irrinunciabilità” all'installazione del MUOS pretesa dagli Stati Uniti nei confronti del nostro Paese, alleato storico e leale; ne consegue inevitabilmente la grande difficoltà dei cittadini che, individualmente ma più efficacemente riuniti in comitati, hanno protestato e hanno lottato, e lottano, contro il MUOS. E così anche questa storia si iscrive tra quelle che negli ultimi quarant'anni hanno caratterizzato le contestazioni delle popolazioni a progetti che passano completamente al di sopra della loro testa, e sulla loro pelle, che non possono certo essere liquidate con l'ormai logora sindrome «NIMBY» (Never In My Back Yard), come si attarda a fare talvolta certa informazione o certa imprenditoria, pigra e arroccata nel suo furbesco provincialismo. Non è il problema di qualche cassonetto di rifiuti, della salubrità di un piccolo *reservoir* d'acqua dol-

ce, della costruzione di un parcheggio sotterraneo da trenta posti nella piazza adiacente, tutti beninteso meritevoli di attenzione, discussione e decisione il più possibile condivisa. Le questioni qui raccontate evocano la grande battaglia contro la colossale antenna (17.000 km quadrati di estensione) progettata negli anni '70 nel Wisconsin per le trasmissioni coi sottomarini atomici in onde a bassissima frequenza; o quella storicamente famosa di Rachel Carson contro la Monsanto, che portò all'eliminazione del DDT e alla costituzione dell'EPA (*Environment Protection Agency*) come agenzia autonoma. O, per restare in casa nostra, l'epopea della battaglia antinucleare, che ha interessato due generazioni e si è conclusa con il no al nucleare in ben due referendum (1987, 2011). In queste, come in tante altre grandi battaglie, la rivendicazione dei cittadini di avere voce in capitolo per decisioni importanti che riguardano loro e le generazioni future si è sempre più arricchita di uno scambio di conoscenze, di culture, di saperi scientifici. Una crescita di conoscenze che non è davvero avvenuta nei tradizionali termini di trasmissione del sapere secondo i canoni di una lezione universitaria "frontale", ma che è invece proceduta nel confronto degli "esperti" con le esperienze e il vissuto locali, nello scambio di vedute con le intelligenze di coloro che meglio conoscono le caratteristiche del territorio e dell'ambiente perché ci vivono da una vita.

Insomma la co-creazione di conoscenza e di sapere, necessaria per affrontare e talvolta risolvere il grande problema che incombe sulla comunità, piccola o grande che sia, è stata la caratteristica dominante di molte importanti battaglie che hanno caratterizzato in tutto il mondo l'emergere e il faticoso affermarsi di una consapevolezza nuova dei cittadini, che ha indotto, in vari casi obbligato, le grandi imprese a realizzare concrete azioni di *social responsibility*, quando non, addirittura, a eliminare o modificare prodotti, a cambiare modi di produzione nel nome di un maggior rispetto della salute dell'uomo e dell'ambiente. Ed è la presa d'atto di questa evoluzione storica che legittima l'enfasi con la quale l'Unesco soprattutto, tra le varie agenzie delle Nazioni Unite, rileva il nuovo modo di produrre conoscenza e suggerisce criteri e metodi di *education* volti all'obiettivo finale della costituzione di una società sostenibile.

Il libro di Angelini e Scalia è completamente interno a questo nuovo assetto, del resto non poteva essere altrimenti visto che i due autori, al di là delle loro pur rilevanti competenze scientifiche hanno speso gran parte della loro vita pubblica nel confronto con i movimenti che sono stati in questi decenni il sale della vita sociale e morale del nostro Paese. E qualcuno di questi movimenti hanno contribuito a fondarlo.

Ma che cosa ci trova nel libro uno come me, che pure non è digiuno della materia, o come tanti altri lettori che non hanno seguito in questi anni la battaglia del MUOS?

Innanzitutto emergono con chiarezza nel capitolo d'apertura i connotati di questa interessante attualissima vicenda, a partire dai dati, tecnici e non solo, che ne costituiscono la materia palpitante. La puntuale descrizione della riserva *sughereta di Niscemi* – la preziosità della sua flora e della sua fauna, gli stupendi paesaggi situati all'inizio delle alture degli Iblei – rimanda all'incompatibilità tra la definizione di *riserva naturale orientata*, nella quale è vietata *ex lege* la realizzazione di infrastrutture, reti, tralicci, antenne, impianti, nuove costruzioni, e la stazione MUOS, per collocare la quale gran parte di una collina è stata disboscata e spianata. Silenti, o tennanti e alla fine conniventi coloro che hanno il potere di rilasciare concessioni o il dovere di conservare e promuovere le prerogative alla base della previsione di tutela.

A tutt'oggi la piena entrata in funzione del radar è bloccata dalla magistratura; forse anche perché le emissioni delle altre antenne operanti nella stazione dal 1991 hanno già raggiunto un livello *border line*, come segnalò una rilevazione dell'Agenzia per la Protezione Ambientale della Sicilia; livello che sarebbe ovviamente superato dalle emissioni del MUOS. Nella lotta che da tempo comitati e cittadini hanno intrapreso è proprio il tema degli effetti sulla salute dell'esposizione ai campi elettromagnetici a rappresentare la preoccupazione dominante, *aggravata dal livello di segretezza sui dati* che impedisce una conoscenza di base completa, senza la quale, come rilevò una memoria tecnica ad hoc predisposta nel 2014, le valutazioni non possono avere un carattere definito e stringente.

In particolare, per gli aspetti sanitari è necessaria un'indagine epidemiologica; e nel libro viene ricordato nel primo capitolo un caso che presenta significative analogie col MUOS, quello di *Radio Vaticana*, una gigantesca stazione trasmittente a circa 30 km da Roma che è proprietà di uno stato straniero, lo Stato Città del Vaticano. In quella storia, fine del secolo scorso e primi anni di questo, si ebbe un conflitto all'interno del Governo, del quale come Ministro per le Politiche Comunitarie fui un po' più che testimone, al quale corrispose quello tra i comitati locali e gli esperti "ufficiali" successivamente nominati dal Governo italiano, che addirittura insolentirono il rapporto che era stato predisposto al termine di una seconda indagine dall'Osservatorio Epidemiologico (OER) del Lazio, rigoroso e aperto alle preoccupazioni della popolazione. Il rapporto OER venne in seguito ospitato da una rivista di alto profilo internazionale, ma solo la determinazione di un giudice, che ordinò un altro rapporto per l'incidente probatorio nel corso di un successivo procedimento, riuscì a

dare giustizia ai parenti dei morti per leucemia, soprattutto bambini, collegate alle emissioni di Radio Vaticana; nel 2011, cioè dieci anni dopo che la prima causa contro le “antenne vaticane” era stata intentata presso il Tribunale penale di Roma.

Proprio per poter intervenire prima dei risultati epidemiologici, che richiedono indagini complesse e molto tempo per essere effettuate – già, che cosa si fa nel frattempo, negli anni necessari, vedi Radio Vaticana, per il completamento dell’indagine epidemiologica? – i cittadini di Niscemi si sono appellati al “principio di precauzione” secondo i criteri e le condizioni elaborati dalla Commissione UE (*Comunicazione*, febbraio 2000), che non erano stati definiti nel Trattato di Maastricht; e resta questo un nodo sostanziale della vicenda.

C’è però un altro interrogativo che riguarda non solo il futuro più o meno immediato, ma quel che sta succedendo e che può essere compendiato nella domanda popolare: “Le radiazioni elettromagnetiche, in particolare quelle della banda di frequenza dove opera il MUOS – radiofrequenze (RF) e micro-onde (MW) – fanno male?”. Qui il testo si allarga e si approfondisce in un’ampia analisi e in significativi resoconti, che recano evidenti le preoccupazioni dei “committenti”. Il libro è infatti l’esito di un convegno promosso a Palermo, a fine marzo 2013 nel bell’orto botanico della città, dalla Facoltà di Sociologia Ambientale e dall’Associazione Italiana contro la Leucemia. Raccontano le cronache che la partecipazione fu così numerosa, attenta e motivata che i promotori decisero di affidare agli autori qualcosa che andasse al di là delle relazioni, pur molto apprezzate in quella sede.

Ecco allora che nel libro compare un intero capitolo, il terzo, dedicato all’abc sui campi e sulle leggi dell’elettromagnetismo e, soprattutto, sul che cosa sono un’onda e uno spettro elettromagnetici. Sembra un po’ snob la postilla che avvisa il lettore che se quelle cose uno le sa già può andare oltre. In realtà è abbastanza chiara l’origine di quel che viene presentato come una sorta di “bignami” per rinfrescare la memoria: la necessità di rispondere alla tenacia con cui, ovunque si presenti il problema dell’esposizione alla radiazione elettromagnetica, i cittadini che non si accontentano delle chiacchiere da bar si impegnano per capire direttamente, per poter verificare il più da vicino possibile i dati e le interpretazioni fornite dagli esperti, anche quando sono ritenuti affidabili. È insomma la volontà di non delegare passivamente, ma di confrontarsi per sapere e far sapere in un rapporto che supera, come già anticipavamo, il tradizionale schema della trasmissione del sapere.

La critica ai modelli sui quali si basano i limiti all’esposizione fissati in questi cinquant’anni da vari organismi tecnici internazionali, accennata fin

dal secondo capitolo, viene portata avanti in modo rigoroso e completo nel quinto; e a quei modelli se ne sostituiscono altri che ben spiegano, numeri alla mano, come i campi elettromagnetici della banda di frequenza MW (cellulari, radar) entrano nella nostra testa, in contrasto con la *doxa* scientifica che afferma invece che si fermano «rispettosamente» sulla cute, con valori che ancora 5 cm dentro il cervello sono, ad esempio, superiori al valore d'attenzione fissato dalla normativa italiana. Ma in aria libera, non dentro la testa!

Ne consegue che i limiti “ufficiali” potrebbero addirittura non tutelare dai cosiddetti «*effetti termici*», quelli cioè legati al trasferimento in forma di calore al nostro corpo, ai suoi organi o ai sistemi biologici di cui è composto, dell'energia trasportata dalle onde elettromagnetiche. E pensare che *gli effetti termici sono gli unici presi in considerazione nella fissazione dei limiti “ufficiali” di esposizione*, perché sono ormai settant'anni – da quello che qui vien definito l' «*ukase* dell'AMA», l'Associazione dei medici americani – che va avanti, da parte degli organismi tecnici internazionali che fissano quei limiti, il pervicace diniego di «*effetti specifici*» della radiazione, diversi cioè da quelli termici e che si dispiegano sui tempi più lunghi delle patologie del sistema nervoso o dell'insorgenza di leucemie o tumori al cervello (neuro-gliomi, glioblastomi). Si apprende anche che, al contrario di quanto spesso stampa e media affermano, questa posizione di diniego non è affatto universale; è anzi alla base della non accettazione di quei limiti da parte di vari Paesi, Russia in testa, le cui scuole scientifiche sottolineano l'esigenza di tener conto degli effetti specifici con dei limiti decisamente più restrittivi di quelli in vigore in molti Paesi Occidentali.

In questo clima di acceso, e ormai secolare, dibattito gli autori forniscono una pluralità di argomenti francamente scientificamente convincenti alla richiesta dell'attenersi al principio di precauzione, e non solo per il MUOS. Per questo è loro preoccupazione bacchettare alcune inevitabili “smorfie” dei cittadini esasperati dai dinieghi ufficiali, che si tratti delle “certezze” che si richiedono alla scienza o alle indagini epidemiologiche, o delle semplificazioni parascientifiche tipo il «proiettile quantistico» o della gara sulla «cadaverologia», il “noi abbiamo più morti per tumore di ogni altro comune”, che se viene proclamato in tutti i comuni italiani pone inevitabilmente il problema dell'affidabilità statistica di una tale infelice rivendicazione.

Ma se al lettore vengono forniti importanti elementi generali, la critica affilata alle linee guida dell'Organizzazione Mondiale della Sanità, la motivazione per una richiesta generale di *ridurre di molto gli attuali limiti d'esposizione* per tutti, in un mondo densamente “popolato” da campi elettromagnetici artificiali, che cosa altro poter dire agli abitanti che vivono nel

territorio dov'è collocato il MUOS? Accanto alla descrizione e alle stime dei possibili rischi, quali possono essere ricavati per analoghi irraggiamenti, nell'ultimo capitolo del libro, l'ottavo, viene fornita come utile «esercizio» la stima dei valori dei campi che impattano sul corpo in virtù dell'unica antenna in «bassa frequenza», 46 kHz, che nella stazione emittente di Niscredi opera su tutte le 24 ore. Certo, i dati di emissione e gli effetti dell'irraggiamento non sono quelli reali, non disponibili come si è già spiegato, ma, tratti da una situazione del tutto simile, concorrono a rafforzare i motivi per una battaglia per il rispetto della salute.

E in quel capitolo finale c'è anche posto, quando si parla di «campi estremamente deboli», per ammonire coloro che rifiutano di ammetterne gli effetti – dovrebbero tra l'altro riuscire a spiegare come sia allora possibile un famoso effetto, l'«effetto Zhadin», verificato e riprodotto sperimentalmente – ma anche coloro che magari animati da buona volontà rischiano però di trasformare in *mantra* i richiami alla «coerenza» della materia biologica o alla «biorisonanza» nel tentativo di spiegare le complesse dinamiche, alcune a livello quantistico, che provocano tali effetti.

1. Rischio ambientale e movimento NO MUOS

Il sistema di comunicazione satellitare MUOS (*Mobile User Objective System*) è un impianto di telecomunicazioni satellitare della marina militare statunitense. Il sistema a terra si compone di quattro stazioni, che sono state localizzate: in Virginia (USA), Hawaii, Australia e Niscemi (Italia). Sono impianti ad altissima frequenza (UHF, *Ultra High Frequency*) a banda stretta, ed è dotato di cinque satelliti geostazionari. Ogni stazione a terra si compone di tre grandi parabole del diametro di 18,4 metri, che trasmetteranno in banda Ka e due antenne elicoidali, alte 149 metri, in banda UHF.

La stazione MUOS italiana sorge in Sicilia, a Niscemi, nella base militare americana NRTF-8 (*Naval Radio Transmitter Facility*), che ricade in una zona di massima tutela ambientale, l'area naturale classificata dalla regione come «*Riserva orientata Sughereta di Niscemi*», uno dei pochi parchi naturali con alberi da sughero ormai rimasti in Italia, tutelata da leggi che vietano qualsiasi intervento umano e che, oltre a essere Sito di Interesse Comunitario, è anche una componente rilevante della rete europea Natura 2000, Bio-regione del Mediterraneo.

In un'area classificata come *riserva orientata* sono consentiti solo interventi colturali, agricoli e silvo-pastorali non in contrasto con la conservazione dell'ambiente e l'Unione europea vieta la realizzazione di infrastrutture, reti, tralicci, antenne per telecomunicazioni, impianti, nuove costruzioni e l'apertura di strade e piste. In evidente violazione di queste norme, gran parte di una collina è stata disboscata e spianata per creare la superficie su è collocata la stazione MUOS.

A causa delle loro dimensioni un eventuale incidente o cattivo funzionamento delle tre antenne paraboliche del MUOS e delle due torri radio alte fino a 149 metri, che «illuminano» un quarto del Pianeta (il loro raggio operativo copre un quarto dell'intero pianeta), può provocare conseguenze gravi per le persone e per l'ambiente. Inoltre questa stazione diventerebbe uno dei principali obiettivi militari di potenze (o terroristi) avverse agli USA, in quanto il MUOS è lo strumento cruciale per la comunicazione militare degli Stati Uniti sullo scacchiere mondiale.

L'impianto si aggiunge alle 41 antenne già in funzione dal 1991 che, secondo il monitoraggio dell'Agenzia Regionale di Protezione Ambientale (ARPA), sarebbe già adesso ai limiti delle emissioni previste e pertanto una nuova installazione non potrebbe che superarli.

1.1 La riserva naturale

La base NRTF-8 si trova all'interno della riserva «la Sughereta di Niscemi», istituita il 25-07-1997, dalla regione siciliana e successivamente inserita nella Rete Natura 2000 come Sito di Interesse Comunitario (SIC). L'area di riserva è estesa per Ha 1179,36, l'area di preriserva è estesa per Ha 1760,01, per un totale di Ha 2.939,37. La riserva è gestita dall'azienda Foreste Demaniali della Regione Siciliana.

La riserva rappresenta una delle ultime aree boschive naturali della Sicilia centro-meridionale, ridotta nelle dimensioni e nella qualità dell'ecosistema da uno sfruttamento che negli anni è stato progressivo e crescente, da una serie di ripetuti incendi dolosi, dal pascolo abusivo e dal disboscamento a scopo agricolo-pastorale. Strettamente legata alle caratteristiche botanico-faunistiche del vicino «Bosco di A. Pietro», con il quale – un tempo – doveva giungere a formare un'unica, estesa e condivisa superficie boschiva, l'area protetta occupa una zona posta nella parte meridionale dell'altipiano su cui sorge il centro abitato di Niscemi e che costituisce l'inizio delle alture dei Monti Iblei, con una quota massima di 320 metri s.l.m.

I boschi della zona di Niscemi, un tempo assai estesi e rigogliosi, costituivano una delle risorse primarie di quell'area e, per tale ragione, sono stati interessati nel tempo ad una serie di vicissitudini che ne hanno fatto passare di mano in mano la proprietà, i diritti di uso e sfruttamento; una ricca documentazione raccolta con grande meticolosità (Marsiano A., 1984, *Gli usi civici e i boschi del comune di Niscemi*) rievoca la storia dei boschi di Niscemi e la loro determinante influenza sulle sorti delle attività lavorative ed economiche, nonché sugli usi e costumi delle popolazioni di quel territorio, a partire dall'epoca feudale fino ai giorni nostri.

L'elemento di maggiore interesse dell'area per quanto riguarda la flora, è certamente la Quercia da sughero, presente con esemplari anche maestosi e plurisecolari, a cui si associano anche numerosi esemplari di Quercia spinosa, di Leccio e Roverella, in associazione ai quali si favorisce la conservazione di felci, funghi, muschi e licheni; nelle aree periferiche cresce l'Olivo e una – talvolta – fitta macchia sempreverde mediterranea ad Oleastro, Carrubo e Palma nana.

Tra le specie arbustive più diffuse, è possibile osservare il Cisto rosso, la Rosa di S. Giovanni, il Caprifoglio delle macchie, la Ginestrella comune, il Cisto femmina, la Dittinella o Gnidio dai frutti velenosi. E, ancora, diffusi nell'area numerosi esemplari di Corbezzolo, Lentisco, Erica, Fillirea, il Leccio e il Salice bianco.

Nelle zone più umide del Bosco, sono presenti stupendi esemplari di Salice fragile, di Pioppo nero e Pioppo tremulo. In contrada Pisciotto troviamo il più grande esemplare di quercia da sughero di questi boschi: è un maestoso esemplare dalla circonferenza di 5,36 metri.

È presente anche una leguminosa endemica e rara: l'Astragalo di Huet, tipico degli ambienti steppici. Ricordiamo anche alcune orchidee spontanee come la Serapide lingua, l'Ofride gialla, l'Orchide a farfalla, il *Limodorum abortivum* dal fusto violetto, l'*Orchis provincialis*. Il bosco è anche l'unico luogo della provincia dove fiorisce l'*Ophrys lunulata*, una rara specie endemica siciliana; e l'*Ophrys lacaitae* che vegeta solo in Sicilia e nell'Italia meridionale tirrenica. Troviamo anche il Cerro, una quercia dalle foglie allungate e caduche. Nell'ex feudo Arcia e precisamente nella valle Madoni troviamo una delle zone più integre. Negli avvallamenti in cui vi è un maggior tasso di umidità sono presenti le specie più igrofile come il Salice bianco, la Coda di Cavallo e la Canna.

Per quanto riguarda la fauna, l'area è luogo ideale per ospitare mammiferi e volatili di ogni genere e specie. Accertata la presenza dell'Istrice e del Topo quercino, resta in forse la presenza del Ghiro e del Gatto selvatico, di cui sono state rinvenute tracce. Numerosi gli esemplari di Coniglio selvatico e Donnola. Tra i tanti uccelli censiti nella zona, spicca la segnalazione del Picchio rosso maggiore, del Gheppio, della Poiana e dello Sparviero, ma anche della Coturnice, del Pendolino, del Rampichino, dell'Upupa, della Ghiandaia marina, del Gruccione e della Cannaiola.

La riserva ospita anche numerosi rettili, tra cui il Congilo, il Colubro leopardiano, dagli splendidi colori ocra, rosso e giallo, e la Vipera comune. Presenti anche numerose varietà di farfalle, tra cui si segnalano *Limentis reducta*, Polissena, il Bombice della Quercia e il Silvano azzurro.

Infine, numerosi sono gli insetti come lo Scarabeide e il Coleottero che vive nei grossi rami della Quercia da sughero.

1.2 Il rischio

Nel nostro contesto il rischio è la possibilità che qualche danno colpisca la salute, l'ambiente, gli animali e le cose. Le compagnie assicurative abitualmente utilizzano il rischio per valutare la probabilità di un evento, men-

tre la società ha da sempre affrontato le conseguenze del rischio come occasione per stabilire nuovi strumenti legislativi o per adottare politiche a tutela della salute e dei problemi ambientali. La valutazione dell'aumento del rischio è una valutazione della probabilità che una certa minaccia per la salute pubblica e per l'ambiente sia cresciuta secondo quanto permette di asserire un'analisi scientifica dei dati disponibili. La valutazione può includere dati tossicologici e/o epidemiologici relativi al livello di esposizione e ci fornisce un'analisi sistematica dei rischi. Sebbene i metodi per affrontare il rischio sono basati sulla scienza, essi sono raramente puntuali perché quasi mai possono fornire certezze assolute. Nel governare i rischi, si valutano le opzioni e di adottano quelle che riducono il rischio.

Quando siamo di fronte alla mancanza di stime del rischio certe, anche perché a volte non è possibile ottenerle, i decisori politici devono utilizzare l'analisi qualitativa del rischio per identificare le iniziative che possono rappresentare un rischio per la nostra salute e per l'ambiente.

Le popolazioni locali, e non solo, sono molte preoccupate per l'impatto sanitario e ambientale del sistema MUOS, per gli scenari che si determinerebbero nel caso di cattivo funzionamento o incidente, per le conseguenze prodotte dalla somma delle emissioni degli impianti esistenti con quello che si vuole realizzare, in considerazione del fatto quelli attualmente in funzione operano già ai limiti stabiliti dalla normativa vigente in materia di campi elettromagnetici ad alta frequenza, secondo quanto risulta dal monitoraggio effettuato dall'ARPA Sicilia.

Peraltro questa attività di monitoraggio da parte dell'ARPA Sicilia è stata giudicata inadeguata da parte degli esperti indicati dagli attivisti NO MUOS. E sulle capacità tecniche dell'Agenzia si era espresso davanti al parlamento italiano Francesco Messineo, Procuratore Distrettuale Antimafia di Palermo: «L'ARPA non esegue attività di analisi o di monitoraggio, cioè non collabora alle nostre indagini, asserendo di non disporre dei mezzi necessari. I funzionari dell'ARPA non hanno la qualità di ufficiali di polizia giudiziaria, né vi è in corso alcuna procedura per conferire tale qualità, quindi per noi l'ARPA è un referente di scarsissima entità»¹.

Il dibattito scientifico riguardante i possibili effetti dei campi elettromagnetici artificiali sulla salute dell'uomo è costellato da punti di vista differenti, tra coloro che mettono in primo piano i rischi potenziali e coloro che in assenza di una serie storica di dati epidemiologici mettono in evidenza l'assenza di rischi. Ma sappiamo che per consolidare dei dati scientifici e la loro interpretazione è richiesto del tempo – talvolta molti mesi o anni – e

¹ www.camera.it/bicamerale/leg16/rifiuti/missioni/03Sicilia_Occidentale/M_Rif_B_20090915%2003%20Procuratori%20PA.pdf.

nel frattempo non si può però restare inerti di fronte a rischi potenziali già largamente prevedibili. Così del resto è stato per tante vicende negli ultimi decenni, basti ricordare le assicurazioni «scientifiche» che sono state date sull'amianto, in attesa di una consolidata serie statistica.

Per i gravi rischi a cui verrebbe esposta l'intera area è opportuno valutare con grande attenzione la situazione attuale, attraverso un monitoraggio in continuo, un'indagine sugli effetti prodotti dall'attuale sistema operativo e una valutazione ambientale sullo scenario futuro, che prenda in considerazione le emissioni prodotte dai due apparati al massimo della potenza di esercizio. Inoltre, è necessario realizzare un'analisi di scenario dei rischi sanitari e ambientali nel caso di incidente, terremoto, terrorismo, ecc.

1.3 Alcune evidenze epidemiologiche

A partire dalla fine degli anni '60 sono state pubblicate le prime ricerche sul rischio per la salute derivante dall'esposizione a campi elettromagnetici e, in particolar modo, ai campi a bassa frequenza, denominati anche ELF (*Extremely Low Frequencies*), e generati per lo più dalle linee elettriche e dai comuni elettrodomestici nella gamma di frequenza compresa tra 0 e 300 hertz (hertz = unità di misura della frequenza, pari a un ciclo al secondo).

Studi epidemiologici effettuati negli Stati Uniti, Danimarca e Svezia mettevano in evidenza gli effetti dannosi riportati come conseguenza dell'esposizione a campi elettromagnetici di alta frequenza, compresa cioè tra i 100 kHz e i 30 GHz.

I primi effetti dannosi sul piano sanitario erano di tipo indiscutibilmente termico e rilevabili nel breve termine. I primi dati riguardavano il riscaldamento del corpo e di alcuni organi bersaglio particolarmente esposti alle radiazioni, con conseguenti possibili lesioni cerebrali, cataratte, ustioni interne, variazioni della permeabilità cellulare, del metabolismo, del sistema immunitario. Si osservava che l'esposizione prolungata a campi elettromagnetici anche di bassissima frequenza, tra 0 e 300 HZ, poteva influire nell'insorgere di disturbi come affaticamento, irritabilità, difficoltà di concentrazione, depressione, diminuzione della libido, cefalee, insonnia, sterilità e aumento degli aborti. Veniva sottolineato anche il rischio rilevante per gravissime malattie degenerative come i tumori del sistema linfatico.

Tali rischi non divennero allarme sociale a causa del fatto che non si disponeva di dati statistici sugli effetti sulla salute e sugli scenari probabilistici dovuti all'esposizione. Relegando la vicenda a disputa scientifica.

L'inizio dello studio degli effetti sulla salute da esposizione a campi elettromagnetici risale agli anni '50 allorché Wertheimer e Leeper (1979,

Electrical wiring configurations and childhood cancer, «American Journal of Epidemiol.») indagarono sul rischio oncogeno associato all'esposizione a campi ELF considerando i casi di tumori infantili verificatisi a Denver negli anni 1950-79 tra i residenti in un raggio di 40 metri da linee elettriche.

Lo studio venne criticato per una presunta carenza sotto il profilo metodologico nella determinazione dei campi elettromagnetici e dei livelli di esposizione. La ricerca venne ripresa successivamente da David Savitz ed altri nel 1987 (1988, *Case-control study of childhood cancer and exposure to 60 HZ electric and magnetic fields*, «American Journal of Epidemiol.») che venne incaricato dal Dipartimento sanitario dello Stato di New York che aveva deciso di verificare gli inquietanti risultati ottenuti da Wertheimer e Leeper. La nuova indagine effettuata nella stessa città di Denver sulla popolazione adulta (1982, *Adult cancer related to electricalwires near the home*, «International Journal of Epidemiol.») aprì uno squarcio nel muro che era stato eretto dopo lo studio di Wertheimer e Leeper.

Successivamente sono stati svolti numerosi studi epidemiologici e le rassegne aggiornate della letteratura scientifica sono state curate da David Savitz (1993, *Overview of epidemiologic reseach on electric and magnetic fields and cancer*, «American Industrial Hygiene Association Journal») e Magnani C. (1994, *Recenti indagini epidemiologiche sull'associazione tra campi elettromagnetici ELF e leucemie*. Atti di «Radiazioni non ionizzanti: effetti biologici, sanitari ed ambientali. AIRP»). Con il rapporto ISTISAN (Istituto Superiore di Sanità) del 1998, viene riconosciuto un ruolo apprezzabile dell'esposizione ai campi elettromagnetici nell'eziologia della leucemia infantile anche se il carattere causale di tale associazione non è per ora adeguatamente dimostrato.

Le indagini epidemiologiche successive hanno evidenziato che il rischio aggiuntivo di leucemia infantile, con una metodologia di misurazione dell'esposizione nelle 24 ore, varia indicativamente tra un 30% e un 60% in più.

Per quanto riguarda gli effetti non tumorali, già negli anni '60 e '70 apparvero alcune segnalazioni di autori russi in merito ad un'accresciuta prevalenza di disturbi neurologici e circolatori e di alterazioni ematologiche nei lavoratori delle sottostazioni ad alta tensione (Asanova e Ravov, 1966, Korobkova, 1972, Sazonova, 1975). Asanova e Ravov, in particolare, descrissero casi di cefalea associata a indolenza, affaticamento, irritabilità, disturbi del sonno comparsi alcuni mesi dopo l'avvio del funzionamento delle stazioni.

Nel 1997 viene redatto il documento della Commissione dell'Unione Europea *Possible health implications of subjective symptoms and electromagnetic fields*, in cui viene indicato come trattare gli individui che dichia-

rano di avere ipersensibilità elettromagnetica o sintomatologia soggettiva che la cultura scientifica europea considera come condizione reale nel senso che molti soggetti colpiti soffrono realmente e alcuni in modo grave. Le conclusioni del documento della Commissione UE danno una spiegazione logico-scientifica dell'incertezza, evidenziando che bisogna seguire un approccio scientifico che faccia ricorso al criterio dell'osservazione piuttosto che a quello sperimentale.

Nello stesso anno, uno studio di ricercatori neozelandesi ha preso in esame una zona vicina a linee ad alta tensione nell'area metropolitana di Auckland con esposizioni da 0,1 a 2 microtesla. 540 persone sono state sottoposte a test e i risultati sono stati valutati coerenti con un effetto diretto dell'esposizione cronica a campo magnetico a 50 HZ sul sistema nervoso. I risultati evidenziano gli effetti psicologici dell'esposizione cronica a campi elettromagnetici a 50 HZ, in persone che abitano nelle vicinanze delle linee ad alta tensione (1997, *Psychological Effects of Chronic Exposure to 50HZ Magnetics Fields in Humans Living Near Extra-High-Voltage Transmission Lines*, «Bioeletromagnetics»).

Nel 1998, vengono elaborate le *Linee guida per la limitazione dell'esposizione a campi elettrici e magnetici variabili nel tempo ed a campi elettromagnetici (fino a 300 Ghz)* da parte della Commissione Internazionale per la Protezione dalle Radiazioni Non Ionizzanti (ICNIRP), in base al principio di precauzione.

1.4 Un caso emblematico: Radio Vaticana

Tornando all'Italia, emerge nel 2001 un caso clamoroso, ricco di risvolti internazionali perché riguarda le emissioni di Radio Vaticana, una potente stazione trasmittente nell'area a Nord di Roma, ma di proprietà di uno stato sovrano straniero, lo Stato Città del Vaticano (SCV). Il conflitto nasce dall'incompatibilità tra le emissioni elettromagnetiche di Radio Vaticana e i limiti d'esposizione fissati dalla normativa italiana. Quei limiti vanno rispettati anche da SCV? Il caso giudiziario che ne scaturisce, complesso, avrà un lungo iter processuale, sempre accompagnato dal gruppo di cittadini che per primo si era appellato alla giustizia.

Nel 2001 infatti l'Osservatorio Epidemiologico (OER) dell'Agenzia di Sanità della Regione Lazio, rilascia un suo secondo rapporto che, dopo aver condotto uno studio sull'associazione tra i campi elettromagnetici e le leucemie infantili nei territori circostanti gli impianti di Radio Vaticana, situata a Cesano, un paese a una trentina di km da Roma, conclude che non si può escludere con certezza la produzione di eventi dannosi, suggerendo ul-

teriori ricerche (Michelozzi P., Capon A., Kirchmayer U., Forastiere F., Barca A., Sperati A., Papini P. e Papucci C.A., 2001, *Mortalità per leucemia nella popolazione adulta ed incidenza di leucemia infantile in un'area caratterizzata dalla presenza di un sito di emissioni di radiofrequenze*, «ASP – Osservatorio epidemiologico, aprile 2001»).

Questo rapporto viene respinto nelle conclusioni di un contro-rapporto di un Gruppo Internazionale di Studio (GIS) nominato dal Governo, che accusa con parole pesanti il rapporto OER di aver usato in modo del tutto inadeguato il metodo statistico, sostanzialmente trovando solo quel che avevano voluto.

Il GIS inaugura il ben noto stile – modo aggressivo e argomenti tagliati giù con sicumera – che dieci anni prima aveva caratterizzato negli Stati Uniti gli interventi di alcuni scienziati, accademici o provenienti dai centri studi militari, che si erano adoperati con successo in una battaglia contro un rapporto dell'EPA (*Environmental Protection Agency*) che aveva osato sostenere che i campi elettromagnetici ELF, quegli degli elettrodotti, erano degli agenti *probabilmente* dannosi per la salute.

Seguendo quella falsa riga il GIS attacca lancia in resta gli epidemiologi dell'OER in nome di un «superiore metodo scientifico», del quale sono ovviamente custodi i componenti del GIS. Quelli dell'OER hanno piegato la statistica agli umori locali, inventando un'inesistente associazione statistica tra leucemie e «antenne vaticane»: «L'indagine è stata condotta “a posteriori”, dopo che localmente era noto l'allarme per casi di leucemia “causate” dalle antenne vaticane: sono stati condotti studi che appaiono più intenzionati a trovare una qualche significatività statistica “any possible” per riportare l'associazione, piuttosto che una verifica “fredda” dell'ipotesi zero (nessuna associazione), questo fortemente pregiudica il calcolo di una vera probabilità statistica di qualsiasi risultato» (Greco D., Boyle P., Masera G. e Mertelsmann R., 2001, *Esposizione a campi di radiofrequenza e leucemia infantile: stato attuale delle conoscenze scientifiche in rapporto alle problematiche dell'area di Cesano*, «ISS, ISTISAN OI/25, 3 settembre 2001, www.iss.it/pubblicazioni»).

È importante spazzare via ogni dubbio sui rischi e rintracciare quelli che seminano ingiustificato allarme tra la popolazione. Chi sono gli untori? Una certa stampa mai paga di sensazionalismo e una folla di pseudo-scienziati e di politicanti di marca ambientalista. Basta leggere quel che scrive Greco, uno degli autori del contro-rapporto: «... Purtroppo l'ultimo rapporto [si riferisce alla seconda indagine OER, N.d.A.] arriva ai mass-media e si scatena un grande allarme pubblico: Radio Vaticana, con le sue sacre antenne, uccide i bambini con la leucemia; niente di più allettante per il giornalismo scandalistico, tranquillamente sostenuto da numerosi **presudo-scienziati...**».

E ancora: «... L'allarme investe il mondo politico, le aree ambientaliste ingaggiano una battaglia contro il Vaticano arrivando alla concreta minaccia di "togliere la corrente elettrica" all'impianto radio...» (Greco D., 2001, *Radio vaticana e leucemie: un allarme senza risposta*, «Epidemiologia e Prevenzione», 25, 6, p. 244).

La disputa tra esperti si sposta alla fine del 2001 sulla rivista «Epidemiologia e Prevenzione», dove gli epidemiologi dell'OER intervengono a valanga, mentre resta il solo Greco, vedi sopra, a difendere le ragioni del contro-rapporto. L'anno seguente lo studio dell'OER viene pubblicato su una rivista di indubbio peso internazionale, l'«American Journal of Epidemiology», con buona pace del «superiore metodo scientifico» di Greco e compagni.

Nel frattempo un pubblico ministero della Procura di Roma ha citato in giudizio la trasmittente vaticana. Il 13 marzo 2001 l'aula del tribunale è gremita di cittadini, quando il giudice annuncia che, poiché la Santa Sede non ha trasmesso la citazione agli accusati invocando il principio di extraterritorialità, la notificazione non è valida; si procederà nei confronti degli accusati – due religiosi, il direttore generale della Radio e il presidente del comitato di gestione – secondo le vie ordinarie previste dal codice italiano. Si sono costituite intanto come parti civili i genitori dei bambini morti di leucemia e la figlia di un vigilante del servizio di sicurezza della Radio, sei ore al giorno, morto di cancro.

Martedì 19 febbraio 2002 il giudice Calabria pronuncia la sentenza: non vi sarà alcun procedimento contro Radio Vaticana in virtù dell'articolo 11 dei Patti Lateranensi, che regolano i rapporti tra Stato italiano e Santa Sede e garantiscono l'extraterritorialità anche per le proprietà dello SCV, come la Radio; l'ipotizzato crimine di emissioni dannose non può pertanto essere giudicato da un tribunale ordinario. Per i cittadini di Cesano, il comitato e i gruppi ambientalisti è una doccia fredda: «Vergogna, vergogna. Delinquenti. Mafiosi. Questa è licenza di uccidere. La legge non è uguale per tutti .. » sono alcune delle frasi che accompagnano il verdetto di poche righe e rimarcano il senso d'impotenza di famiglie angosciate che considerano iniqua la sentenza.

Il procedimento giudiziario continuerà invece ancora a lungo, fino a quando il 24 febbraio del 2011 la suprema Corte di Cassazione condanna in via definitiva Radio Vaticana per il reato di «getto pericoloso di cose», articolo 674 del Codice penale, e stabilisce un risarcimento ai cittadini. Si tratta di una sentenza storica.

Il ricorso contro la Radio Vaticana era iniziato, come si è già detto, con la denuncia di comitati di cittadini che segnalavano il funzionamento anomalo di alcuni elettrodomestici, citofoni, lampadari che diventavano in

qualche modo duplicatori del segnale di Radio Vaticana. Il procedimento penale era iniziato in seguito al superamento dei limiti di emissione delle onde elettromagnetiche, che era stato evidenziato dalla pubblicazione degli impressionanti risultati di una prima indagine epidemiologica condotta dall'OER nel periodo 1993 – 1998 nel territorio limitrofo all'impianto della radio.

In una delle fasi del processo contro Radio Vaticana, che è durato 11 anni, il Giudice per le indagini preliminari (Gip) richiede nel 2006 un'altra perizia epidemiologica per valutare il rischio di mortalità per danni ai sistemi emo-linfo-poietico (ELP) degli oltre centomila abitanti dell'area interessata; e su questa base pervenire giudizialmente all'incidente probatorio.

I risultati dell'indagine – un'ulteriore difficoltà era la presenza nel territorio interessato di un'altra stazione radio, più piccola, «Radio MariTele» – vengono presentati al Gip nel giugno del 2010, in uno studio noto nel procedimento giudiziario come «Studio Marconi» e condotto da Andrea Micheli dell'Istituto Nazionale dei Tumori di Milano.

Poiché le aree di influenza di Radio Vaticana e Radio MariTele avevano un'intersezione non trascurabile, i risultati furono l'esito di due studi separati ma entrambi relativi ai danni ai sistemi ELP: il primo studio, M.1.1, riguarda i rischi di morte associati alla presenza di Radio Vaticana, corretti per gli effetti dovuti a Radio MariTele; il secondo, M.1.2, riguarda i rischi di morte associati alla presenza di Radio MariTele, corretti per gli effetti implicati dalla vicinanza a Radio Vaticana. Veniva presentato anche un terzo studio, I.1, sui rischi di leucemia o linfoma nelle aree vicine a entrambe le stazioni relativamente a 26.630 persone di età compresa tra 0 e 14 anni.

È necessario ricordare che i risultati delle indagini epidemiologiche sono espressi in OR (*Odd Ratios*): quando $OR = 1$ ciò significa che non c'è differenza tra gli esposti (il campione) e i non esposti (il controllo); quando $OR = 2$ allora il campione ha una probabilità due volte più grande che il controllo di contrarre la patologia associata all'esposizione.

Lo studio di mortalità M.1.1 ha preso in considerazione 137 morti avvenute nell'area di studio nel periodo 1997-2003, analizzando 105 di queste morti, appaiate per sesso e età alla morte, in rapporto a 105 controlli. Le conclusioni tratte dallo Studio Marconi M.1.1 (Radio Vaticana) furono:

MARCONI ha evidenziato rischi importanti in particolare (NB: di seguito si considerino con cautela le distanze citate perché per necessità approssimate):

- (i) per la fascia di esposti tra 5 e 9 km dall'emittente, per almeno 10 anni, di donne e uomini di tutte le età, dove il rischio di morte per tumori emolinfopoietici aggiustato per età e sesso (in appaiamento), fumo attivo, rischio occupazionale e per esposizione a MariTele era, **significativamente, $OR = 3,12$** [1,00 - 9,69], inoltre,

- (ii) per le esposte per almeno 10 anni del solo contingente femminile di tutte le età nella fascia tra 6 - 12 km dall'emittente dove il rischio di morte per tumori emolinfopoietici aggiustato per età (in appaiamento) e per esposizione a MariTele, **significativamente**, era **OR = 4,79** [1,04 - 21,91], inoltre,
- (iii) per la fascia di esposti per almeno 10 anni, tra i soli adulti, uomini e donne (maggiori di 21 anni d'età) nella fascia tra 5 e 9 km dall'emittente, dove il rischio di morte per tumori emolinfopoietici aggiustato per età e sesso (in appaiamento), fumo attivo, occupazione e per esposizione a MariTele era, **significativamente**, **OR = 3,44** [1,05 - 11,27], e infine
- (iv) per la fascia di esposti per almeno 10 anni, tra 6 e 12 km dall'emittente, per quanto concerne l'analisi per patologia relativa ai soli decessi per leucemia, uomini e donne di tutte le età, dove il rischio di morte aggiustato per età e sesso (in appaiamento), fumo attivo, occupazione e per esposizione a MariTele **significativamente** era **OR = 6,69** [1,45 - 30,78]; le analisi per patologia, sebbene relative a numerosità ridotte e perciò associate a una elevata ampiezza degli intervalli intorno alla stima puntuale, **mostravano che il rischio era solo presente per i soggetti deceduti per leucemia;**
- (v) tutte le analisi condotte in M.1.1, coerentemente, hanno indicato condizioni di eccesso di rischio di morte su valori oscillanti in tutta l'area in studio sino a 12 km dall'emittente, con eccessi **importanti e significativi, con però mancata evidenza di rischio per gli esposti adulti sino a 5 km dall'emittente.**

Lo studio MARCONI suggerisce che vi sia stata un'associazione importante, coerente e significativa tra esposizione residenziale all'emittente ed eccesso di rischio di morte per leucemia. (*Procedimento penale n. 33642/03. Perizia mediante indagine epidemiologica. Incidente probatorio. Milano, 25 giugno 2010*, ordinato dal giudice per le indagini preliminari, Zaira Sechi, del Tribunale penale di Roma, p. 136) (neretto dal testo originale)

Le conclusioni di Studio Marconi riguardo all'impatto sanitario di Radio Vaticana e Radio MariTele sui bambini, studio I.1, furono le seguenti:

MARCONI ha evidenziato rischi importanti in particolare (nb: di seguito si considerino con cautela le distanze citate perché, per necessità, approssimate):

- i) per i bambini che hanno abitato per più tempo della loro vita nella fascia tra 6 e 12 km da Radio Vaticana il rischio (OR) di incidenza per leucemie e linfomi, aggiustato per età e sesso (in appaiamento) e distanza da elettrodotti, **significativamente**, era **OR = 5,19** [1,54 - 17,54], mentre, aggiustato per età e sesso (in appaiamento), distanza da elettrodotti e per esposizione a MariTele, **significativamente**, era **OR = 4,63** [1,28 - 16,78];
- ii) per i bambini che hanno abitato per più tempo della loro vita nella fascia tra 6 e 12 km da Radio Vaticana e **anche** nella fascia sino a 6 km da MariTele il rischio (OR) di incidenza per leucemie e linfomi, aggiustato per

età e sesso (in appaiamento) e distanza da elettrodotti, **significativamente**, era **OR = 3,85** [1,21 - 12,26];

iii) il rischio era ancora più evidente nel sottogruppo dei casi con età maggiore di 1 anno di quanto già non fosse nell'intera casistica;

iv) il rischio era associato all'insieme delle patologie: leucemie e linfomi.

Lo studio MARCONI suggerisce che vi sia stata una associazione importante, coerente e significativa, tra esposizione residenziale alle strutture di Radio Vaticana ed eccesso di rischio di malattia per leucemia e linfomi nei bambini, e che le strutture di MariTele, in modo limitato e additivo, abbiano plausibilmente contribuito all'incremento di quel rischio. (ibidem, p. 138)

1.5 Il movimento NO MUOS

Per tutto il periodo dell'iter autorizzativo e di costruzione del MUOS, gli abitanti di Niscemi e gli attivisti NO MUOS provenienti da tutta la Sicilia, hanno presidiato le strade di accesso alla Base.

Anche se il MUOS non è ancora operativo, la base è già oggi in attività in quanto ospita ben 41 antenne di un sistema che è stato realizzato nel 1991.

Il movimento NO MUOS è una realtà complessa e molto variegata, che conta diverse anime che lavorano tra loro in maniera indipendente o coordinata. È costituito da cittadini siciliani, dagli abitanti di Niscemi e possono contare sul sostegno di tanti italiani. Le tematiche che li unisce riguardano, lo sviluppo sostenibile del territorio, la pace e lo smantellamento degli apparati MUOS e delle 41 antenne.

Le iniziative che sono state organizzate in questi anni, hanno riguardato la salvaguardia: della salute, degli ecosistemi a partire dalla riserva naturale "Sughereta di Niscemi", campagne d'informazione e di raccolta firme, petizioni, confronto con le istituzioni e azioni legali. Il movimento è organizzato in comitati locali, che sono coordinati, ma senza vincolo, da un coordinamento regionale siciliano. È stata costituita un'associazione con lo scopo di gestire il sito WEB e l'informazione e la comunicazione, e si avvale del sostegno della "Mamme NO MUOS", di gruppi antimafia e di associazioni culturali e ambientali.

Il 10 ottobre del 2006, il Ministero della Difesa italiano esprime parere favorevole al programma MUOS presentato dagli USA. La stazione MUOS in un primo momento è stata prevista a Sigonella (cittadina che si trova a pochi chilometri dalla città di Catania). Ma una simulazione informatica del sistema MUOS, fornita dai consulenti di Maxim Systems, indica un possibile rischio che l'attività degli apparati possa determinare gravi interferenze alle attività aeronautiche della base USA di Sigonella. La relazione

convince il governo USA a spostare la stazione MUOS a Niscemi, nella base NRTF-8 in cui sono installate 41 antenne e che già sotto il comando militare della base di Sigonella. Nonostante l'area nella quale dovrà sorgere il MUOS è area di "riserva naturale", il progetto presentato dalla autorità militari USA, ottiene 8 settembre del 2008 tutti i nulla osta, con il parere positivo del comune di Niscemi, da parte della regione siciliana competente in materia ambientale e paesaggistica.

Il 25 febbraio del 2009 nasce il primo Comitato NO MUOS e tre giorni dopo il consiglio comunale di Niscemi approva una mozione contro l'installazione del MUOS.

La prima manifestazione di protesta si svolge il 2 marzo del 2009 e nei giorni successivi nasce il «Coordinamento dei Comitati NO MUOS» ed il coordinamento dei consigli comunali del comprensorio.

Il 30 dicembre del 2009 l'assessorato Regionale Territorio ed Ambiente approva un decreto di modifica del perimetro della *Riserva Sughereta* e ne riduce la superficie della riserva, l'estensione delle aree classificate *zona A* (in cui è vietato realizzare costruzioni, elettrodotti, acquedotti, linee telefoniche ed impianti tecnologici a rete).

Viene ritardato l'inizio dei lavori, in seguito alle mobilitazioni popolari contro la base che fanno vacillare le certezze politiche che fino al quel momento avevano accompagnato l'opera.

Il 21 settembre del 2010, il segretario alla Difesa statunitense Robert Gates incontra il Ministro della Difesa italiano Ignazio La Russa a Roma per sbloccare la costruzione del MUOS. In un cable, inviato dall'ambasciatore Alexander Vershbow e pubblicato da *Wikileaks*, in riferimento al MUOS si legge: «... Il Segretario alla Difesa ha richiesto che La Russa si attivi per assicurare l'approvazione finale per il sito, evidenziando che se la costruzione dell'antenna non fosse cominciata entro marzo, gli Stati Uniti avrebbero potuto avere il bisogno di cercare altrove nel Mediterraneo».

Il presidente della regione siciliana il 28 giugno del 2011, sottoscrive con il Ministro della Difesa, un protocollo d'intesa per il quale la Regione Siciliana si impegna a «concludere positivamente» l'iter di approvazione. Il Ministro promette di adottare le «necessarie misure di mitigazione» (tra cui la verniciatura "mimetica" delle parabole!) e le compensazioni si riducono alla ripavimentazione delle provinciali che insistono sulla base NRTF-8. Il 16 settembre del 2010, la Regione Siciliana, dà il via libera alla realizzazione degli interventi per la realizzazione della stazione MUOS.

Il 20 giugno del 2012 gli USA lanciano il primo satellite MUOS-1 ed il 24 luglio del 2012 si concludono i test sul secondo satellite (MUOS-2), la

Lookheed-Martin dichiara che sarà in grado di rispettare i tempi per la messa in orbita, prevista per il 2013.

Il Consiglio Comunale di Niscemi in risposta ai test, delibera la «Dichiarazione territorio comunale smilitarizzato». Il 6 ottobre del 2012, la Procura di Caltagirone mette i sigilli al cantiere della stazione MUOS di Niscemi per violazione della normativa ambientale relativa alla tutela dei Parchi e delle riserve, dichiara in sostanza che sono state realizzate opere incompatibili con lo status di *riserva* dell'area interessata per la costruzione del MUOS. Decreto di sequestro che il 14 settembre del 2012 verrà revocato dal Tribunale di Catania. Vengono tolti i sigilli al cantiere e l'impianto viene restituito al Ministero della Difesa.

Il 20 febbraio del 2013, Il Presidente del Consiglio uscente, Mario Monti, dichiara in campagna elettorale che sul MUOS ci sono obblighi internazionali ineludibili.

Nell'ottobre del 2012, s'era insediato il nuovo governo della regione, presieduto da Rosario Crocetta che in campagna elettorale si era schierato contro il MUOS, ed il 30 marzo del 2013, l'assessore regionale all'Ambiente e al Territorio firma la revoca delle autorizzazioni per la costruzione del MUOS.

Il 5 aprile del 2013 si svolge a Niscemi una grande manifestazione nazionale a Niscemi a cui partecipano più di 10.000 persone al corteo che da contrada Apa si snoda fino alla base NRTF-8. Alcuni giorni dopo gli attivisti NO MUOS presentano un esposto in cui denunciano che nonostante la revoca delle autorizzazioni proseguono i lavori nel cantiere.

Il 12 agosto del 2013, a conclusione di una manifestazione nella *Sughereta*, un gruppo di manifestanti riesce ad aprire un largo varco nella recinzione permettendo ai manifestanti di invadere pacificamente la base militare.

Mentre le dispute legali, le manifestazioni e i presidi davanti alla base si moltiplicano, i lavori per la realizzazione dell'impianto proseguono nonostante divieti e revoche e il 13 febbraio 2015, viene lanciato il terzo satellite MUOS, e pochi giorni dopo il 18 il TAR di Palermo accoglie i ricorsi contro la realizzazione del MUOS. Interviene anche, la Procura di Caltagirone che sequestra nuovamente il 14 aprile del 2015 MUOS, per violazione delle norme ambientali.

1.6 I cittadini di Niscemi invocano il Principio di precauzione

In presenza di visioni scientifiche differenti sul tema dei *Campi elettromagnetici*, si sono sviluppati tre correnti di pensiero e di approccio giuridi-

co. Il primo, prevede fino a quando non vi siano evidenze scientifiche più stabili, è opportuno limitarsi a fissare standard di esposizione per la protezione della salute dei soli effetti acuti ed a breve termine, gli unici accertati oltre ogni ragionevole dubbio (*wait and see*). Il secondo orientamento, si ispira al principio di precauzione. L'assenza di certezze scientifiche su danni provocati a salute o ad ambiente non è sufficiente come ragione giustificatrice del rinvio dell'adozione delle necessarie misure di tutela (*better safe than sorry*); per il terzo ed intermedio orientamento, che si rifà alla c.d. *prudent avoidance* («evitare per prudenza»), bisognerebbe adottare misure per evitare le esposizioni nei casi in cui ciò comporti costi modesti ossia l'adozione di provvedimenti semplici e a costo contenuto².

Il Principio di precauzione trova origine nella **Convenzione sulla diversità biologica**, firmata a **Rio de Janeiro** nel **giugno 1992** e approvata dalla **Comunità economica europea** con la **Decisione** del Consiglio del **25 ottobre 1993**.

Il Trattato europeo conteneva un solo riferimento esplicito al principio di precauzione³, e più precisamente, nel titolo consacrato alla protezione ambientale. Tuttavia, nella pratica, il campo d'applicazione del principio è molto più vasto e si estende anche alla politica dei consumatori e alla salute umana, animale o vegetale.

In assenza di una definizione del principio di precauzione nel Trattato o in altri testi comunitari il Consiglio, nella sua risoluzione del 13 aprile

² Cfr. Borzi, *Inquinamento elettromagnetico: spunti sulla disciplina comunitaria e nazionale tra precauzione e sostenibilità (parte prima)*, in «Ambiente e sviluppo», 136 ss.; ID., *Inquinamento elettromagnetico: spunti sulla disciplina comunitaria e nazionale tra precauzione e sostenibilità (parte seconda)*, in «Ambiente e sviluppo», 223 ss.; Cassese, *La nuova disciplina sulla protezione della esposizione a campi elettromagnetici*, in «Gior. dir. amm.», 2001, 329 ss.; Cocco, *Inquinamento da campi elettromagnetici e normativa di tutela*, Torino, 2001, 65; Fonderico, *Tutela dell'inquinamento elettromagnetico e amministrazione «precauzionale»*, cit., 335 ss.; Patruno, *L'elettrosmog in alcune pronunce giurisprudenziali*, in «Giur. merito», 2000, 1290 ss.; Tumbiolo, *La tutela dell'inquinamento elettromagnetico nell'evoluzione giurisprudenziale*, in «Riv. giur. ambiente», 2001, 513 ss.

³ Il trattato sull'Unione Europea, sottoscritto a Maastricht (7 febbraio 1992) in materia di ambiente, pone come obiettivo quello di «salvaguardare, proteggere e migliorare la qualità dell'ambiente, di contribuire alla protezione della salute umana, di garantire un'utilizzazione accorta e razionale delle risorse naturali». I principi che ispirano l'azione comunitaria sono:

- il principio dell'azione preventiva, secondo il quale è necessario adottare le misure necessarie per evitare e prevenire i danni ambientali;
- il principio della correzione dei danni provocati dall'ambiente, in base al quale deve essere rimossa immediatamente la fonte di inquinamento ambientale;
- il principio «chi inquina paga». Questo principio impone il risarcimento della collettività a colui che produce danni all'ambiente;
- il principio della precauzione, secondo il quale coloro che svolgono attività potenzialmente dannose per l'ambiente devono ricercare rimedi atti a impedire un tale evento.

1999, ha chiesto alla Commissione di elaborare degli orientamenti chiari ed efficaci al fine dell'applicazione del principio.

Con la **Comunicazione** COM(2000) 1, del 2 febbraio 2000 la Commissione europea ha posto le fondamenta della futura politica comunitaria per l'applicazione del principio.

Nella sua Comunicazione, la Commissione analizza i fattori che provocano il ricorso al principio di precauzione e le misure risultanti da un tale ricorso. Propone anche orientamenti per l'applicazione del principio.

I fattori che originano il ricorso al principio di precauzione sono contenuti nel documento e la Commissione precisa in quali casi si applica il principio di precauzione:

- I. i casi in cui i dati scientifici sono insufficienti, poco conclusivi, non certi
- II. i casi in cui da una precedente valutazione scientifica emerge che si possono ragionevolmente temere effetti potenzialmente pericolosi per l'ambiente, la salute umana, animale o vegetale.

Il ricorso al principio si inserisce nel quadro generale dell'analisi del rischio (che comprende, oltre la valutazione del rischio, la gestione e la comunicazione del rischio) e nel quadro della gestione del rischio che corrisponde alla presa di decisione.

La Commissione sottolinea che il principio di precauzione può essere invocato solo nell'ipotesi di un rischio potenziale, e che non può in nessun caso giustificare una presa di decisione arbitraria. Il ricorso al principio di precauzione è pertanto giustificato solo quando riunisce tre condizioni:

1. l'identificazione degli effetti potenzialmente negativi
2. la valutazione dei dati scientifici disponibili
3. l'ampiezza dell'incertezza scientifica.

Quello che invocano in ultima istanza i movimenti NO MUOS e che e alla fine di tale percorso non ci dovesse essere una conclusione scientifica convergente, si deve applicare il Principio di Precauzione, stabilito in sede europea nel campo delle decisioni politiche per la protezione dell'ambiente, quando i dati scientifici non consentono una valutazione completa del rischio.

Tale principio viene soprattutto applicato nei casi di pericolo per la salute umana, animale o vegetale, per la sicurezza alimentare, per l'ambiente e le risorse naturali. Intendendo con il termine "precauzione" una limitazione di rischi ipotetici o basati su indizi, il principio di precauzione si applica non a pericoli già identificati, ma a pericoli potenziali, di cui non si ha ancora conoscenza. Di conseguenza il principio di precauzione può essere in-

vocato quando è necessario un intervento urgente di fronte a un possibile pericolo.

Nella Costituzione italiana l'applicazione del principio di precauzione interessa aspetti di grande rilievo. Dai diritti oggetto della misura di cautela (come la tutela della salute) e l'esercizio delle competenze ripartite fra i livelli territoriali di governo.

Secondo la Corte di Giustizia⁴, le disposizioni del trattato che esprimono gli obiettivi fondamentali e i principi essenziali hanno valore costituzionale, e preso atto dell'apporto chiarificatore e talvolta creativo, della medesima Corte nell'interpretazione delle disposizioni che enunciano principi vincolanti per gli Stati membri, ci è sembrato opportuno accennare anche sulla sua giurisprudenza. Si tratta peraltro di una scelta di opportunità, priva di qualsiasi valenza definitiva in ordine alla possibile assimilazione della Corte europea alle giurisdizioni costituzionali, nel significato originario di questa espressione.

⁴ Corte di giustizia, parere 1/91 del 14 dicembre 1991, in *Raccolta*, 1991, 6079. Sul tema vedi Gaja G., *Introduzione al diritto comunitario*, Roma-Bari, 1999, terza edizione, p. 97 e ss.

2. Effetto termico ed effetti specifici. La posizione «ufficiale»

La modellistica, i criteri e i valori desunti per la valutazione dei limiti d'esposizione in corrispondenza alle bande di frequenza delle varie emissioni elettromagnetiche, cui si rifà la gran parte dei Paesi nel formulare le norme nazionali, sono stati proposti nel passato da diversi organismi tecnici internazionali e trasformati poi in linee guida di protezione sanitaria. In particolare, partendo dalla prima proposta dell'ANSI (*American National Standards Institute*) del 1966 i limiti di esposizione per le radio frequenze (RF) e per le micro-onde (MW) sono stati successivamente aggiornati ogni cinque anni senza significative modifiche fino al 2005, quando l'IEEE (*Institute for Electrical and Electronic Engineers*) ha pubblicato lo standard IEEE C95.1 nel quale i limiti venivano ridotti di 10 volte per le aree controllate e di 50 volte per i gruppi critici, *ma solo per frequenze al di sotto del Giga-herz (GHz)*.

Il valore di riferimento resta 10 mW/cm^2 , cioè 100 W/m^2 , stabilito nel lontano 1953 e proposto come ragionevole compromesso da Robert Schwan nel «dibattito sulle micro-onde» che ebbe luogo allora negli Stati Uniti tra militari e grandi società del settore delle telecomunicazioni. Ne ripareremo in seguito. Per le frequenze ELF (*Extremely Low Frequencies*, quelle degli elettrodotti) la WHO (*World Health Organization*) stabilì nel 1984 linee guida e limiti di esposizione, valori che sono stati autonomamente confermati nel 1989 dall'ICNIRP (*International Commission on Non Ionizing Radiation Protection*).

Questi criteri escludono, hanno storicamente escluso, l'esistenza di effetti specifici della radiazione elettromagnetica, qualunque sia la banda di frequenza in cui avviene l'emissione, al contrario di quanto avviene per le radiazioni ionizzanti (quelle connesse ad attività nucleari, a certe produzioni industriali o ad alcune applicazioni mediche). L'unico *effetto* riconosciuto da queste norme tecniche «ufficiali» è quello «*termico*», cioè la conver-

sione in calore dell'energia trasportata dalle onde elettromagnetiche; conseguentemente i limiti di esposizione vengono fissati secondo il criterio che l'intensità della radiazione incidente non possa provocare un riscaldamento della temperatura corporea superiore a 1°C in rapporto a una prefissata durata dell'esposizione.

La salvaguardia sanitaria garantita dalle norme tecniche internazionali copre pertanto solo gli aspetti *acuti*, cioè quelli che scompaiono quando si rimuove la loro causa, ma non si estende alla valutazione di possibili danni sanitari legati agli *effetti specifici*, che si dispiegano su tempi più lunghi e che possono riguardare molteplici patologie dei sistemi nervosi, centrale e vago, come anche l'induzione di tumori, eminentemente leucemie (effetti non termici o di lungo termine). Tutti *questi effetti di lungo termine* sono detti anche *cronici* e, a causa della loro origine, sono *effetti non termici*.

Sono *più di cent'anni* che studiosi, ricercatori in fisica o in biologia, ingegneri e medici sperimentano e discutono sui possibili effetti specifici dei campi elettromagnetici (CEM) di intensità anche molto debole. L'insieme di questi studi ha mostrato, al di là di ogni ragionevole dubbio, che *gli effetti specifici esistono*, come mostrano molti esperimenti in vitro e in vivo e come hanno confermato importanti indagini epidemiologiche; e dipendono dall'intensità dei campi incidenti e soprattutto dalla loro frequenza, con l'evidenza di «effetti finestra» (in frequenza). È una storia molto lunga, assai interessante per i suoi profili scientifici ed epistemologici; ancora di più, per tutti i cittadini, per i potenziali impatti sulla salute.

Per oltre quarant'anni, a partire dall'ultimo decennio del secolo XIX, il confronto scientifico avvenne sulla base della discussione di esperimenti di laboratorio e dei tentativi di una loro interpretazione, soprattutto in Europa, ma poi anche negli Stati Uniti. Nel 1935 questa dialettica fu stroncata da una presa di posizione dell'*American Medical Society* (AMA), allora la più potente organizzazione dei medici americani. Infatti, il rapporto dell'indagine commissionata dall'AMA al suo *Council of Physical Therapy* escludeva la possibilità di effetti specifici e affermava: «... *The possibility of special selective thermal action is a very remote one...*». L'intervento dell'AMA aggiunse una nuova dimensione all'argomento degli effetti specifici, che sino a quel momento era rimasto confinato al dibattito interno tra un limitato numero di scienziati coinvolti nella ricerca. La dichiarazione coinvolgeva infatti tutta la categoria medica e, anche se per il resto degli anni '30 e quasi tutti gli anni '40 furono pubblicati numerosi articoli in cui si descrivevano effetti specifici, il punto di vista ufficiale, ovvero quello a cui si adeguarono i medici orientati alla ricerca, fu quello termico.

La posizione dell'AMA e le argomentazioni del rapporto finale hanno fatto scuola; e nei 70 anni successivi gli statement delle varie corporazioni

– molto noto quello dell’*American Physical Society* del 1995, ribadito dieci anni dopo nel 2005 – hanno seguito quella falsa riga abbastanza pedissequamente.

È l’attuale posizione ufficiale dell’Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO) e dell’ICNIRP, ricordata in apertura. Vale la pena rilevare subito che questa posizione, al contrario di quanto spesso viene affermato anche sulla stampa e in TV, non è affatto universale.

I limiti di esposizione per la radiazione a radiofrequenza e microonde della Russia e di altri Paesi dell’Est sono decisamente più restrittivi sia di quelli degli Stati Uniti che dei Paesi dell’Europa Occidentale; si tratta di una situazione che si protrae da quasi 50 anni, dovuta principalmente alla differenza di vedute su ciò che gli standard di esposizione dovrebbero proteggere.

In estrema sintesi: gli *standard russi sono più restrittivi* di quelli occidentali perché riflettono anche la preoccupazione *per gli effetti non termici* e per i sintomi soggettivi. Inoltre, chi si rifà alla «scuola russa» insiste sulla necessità di tener conto dei possibili effetti cumulativi dovuti a ripetute esposizioni a livelli relativamente bassi di campo elettromagnetico; ed anche ai campi di alta frequenza modulati con segnali di bassa frequenza.

I tentativi di superare queste differenze sono a tutt’oggi falliti a causa degli approcci troppo differenti per consentire un’armonizzazione. Oltre alla Russia, gli Stati che non si riconoscono nelle linee guida dell’ICNIRP sono Italia, Svizzera, Belgio (regione Vallone), Liechtenstein, Austria (città di Vienna), Lussemburgo, Spagna (Castiglia), Canada, Polonia, Bulgaria, Cile e, per alcuni importanti aspetti, anche la Cina.

In questa relazione, al di là dell’abc sui campi elettromagnetici, si affronteranno alcune questioni di merito che hanno dato luogo a questo Convegno. L’interesse è focalizzato sul *MUOS (Mobile User Objective System)*, che è un sistema di comunicazione satellitare tecnicamente simile alla telefonia 3G, il cui intervallo operativo di frequenza è $\nu = 27 - 40$ GHz e la cui potenza massima di trasmissione è $P = 1600$ W. Il sistema è dotato anche di antenne che irradiano nella banda UHF (*Ultra High Frequency*); sempre nello stesso sito è operativa sull’arco delle 24 ore la *NRTF (Naval Radio Transmitter Facility)* che emette su 46 kHz.

Nel corso della relazione saranno presentati i più importanti modelli sui quali si basano i criteri “ufficiali” e i conseguenti limiti di esposizione. Verrà argomentata la critica sull’inadeguatezza di tali modelli e verranno proposti modelli più avanzati e più affidabili insieme alle loro stime, *in virtù delle quali resterà provata come errata, per esempio, la radicata convinzione diffusa anche tra diversi uomini di scienza che la radiazione RF o MW si fermi, rispettosamente, sulla cute della testa senza penetrare dentro*

la materia cerebrale. Saranno anche presentati e discussi alcuni dei più significativi esperimenti comprovanti effetti specifici indotti dai CEM; infine verrà data, nella forma di un mero esercizio, la stima del valore dei campi emessi da una sorgente analoga alla NRFT e dei corrispondenti campi interni nella regione cute-osso del cranio, sulle membrane cellulari e nell'interno delle cellule.

È assolutamente necessario *premettere che tutte le considerazioni e le stime sono a monte di una campagna di caratterizzazione elettromagnetica del sito attorno al MUOS, che è necessaria e che richiede la conoscenza completa delle sorgenti radianti che operano in quell'area.* Una conoscenza non disponibile ora, e difficilmente accessibile anche in futuro a causa del segreto militare su quelle installazioni. Per approfondimenti sui temi del Bioelettromagnetismo e sulla «lunga storia» cui ho accennato rimando chi fosse interessato a due testi di carattere divulgativo [1a, 1b].

3. Il campo elettromagnetico e le onde elettromagnetiche*

3.1 I campi, le leggi e le equazioni di Maxwell

Siamo abituati a parlare di campo elettrico e di campo magnetico, e questo “campo elettromagnetico” sembra una complicazione tecnicistica, roba da ingegneri. Questo tutt’uno è invece la realtà fisica, presente negli infiniti dispositivi di cui viviamo circondati, della quale quei due campi separati sono solo casi particolari. Percorriamo la strada che ci porta a comprendere questa realtà richiamando, seppure con un vocabolario *basic*, pochi elementi fondamentali dell’elettromagnetismo.

Dai tempi della mela di Newton si è diventati familiari con la *forza di gravitazione*, che è detta universale perché descrive l’attrazione tra due corpi in ogni luogo dell’universo. La sorgente di questa forza è la *massa* che ogni corpo possiede, cioè la *quantità di materia* di cui è fatto: è la *massa* che genera una modificazione dello spazio circostante che chiamiamo *campo gravitazionale*.

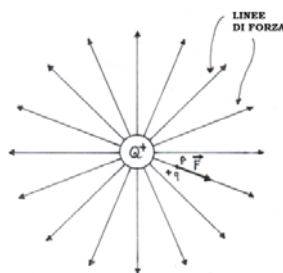


Fig. 1 - Campo elettrico generato da una carica $+Q$, con relative linee di forza. Una carica “di prova” dello stesso segno $+q$ viene respinta con una forza F dal campo elettrico E

* In questo capitolo vengono richiamate per comodità del lettore alcune nozioni di elettromagnetismo e concetti base dell’esposizione ai campi elettromagnetici, che potranno tranquillamente essere omesse da chi già possiede queste conoscenze.

Non esiste invece una carica magnetica – una calamita o l’ago di una bussola hanno sempre un polo Nord e un polo Sud, e anche se li si suddivide via via in parti sempre più piccole non si riesce a isolare un polo dall’altro – ma, proprio pensando a un magnete molto piccolo (Fig. 2), esso costituisce un **dipolo magnetico**, che genera un **campo magnetico H**.

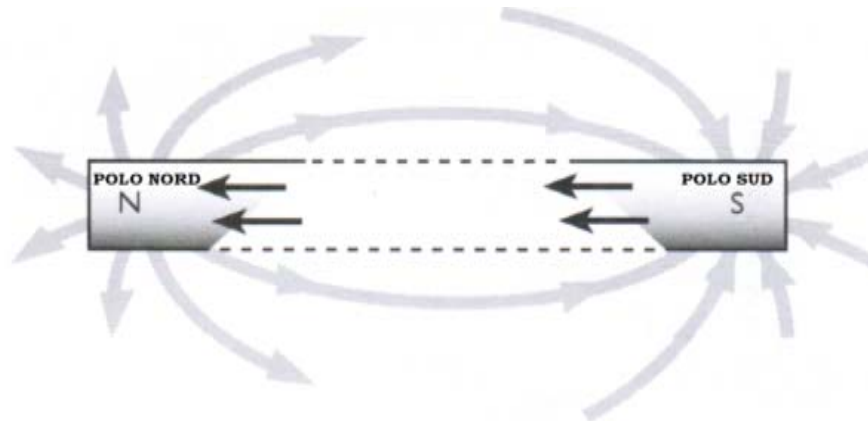


Fig. 2 - Linee di forza del campo magnetico generate da un magnete a barra. Il verso delle linee è dal polo N al polo S

I campi elettrico e magnetico possono pertanto essere pensati come una *modificazione dello spazio, in grado di influire a distanza sullo stato degli oggetti, rispettivamente, elettrici o magnetici*. Il **campo elettrico agisce** sulle cariche come il **campo gravitazionale** agisce sulle masse, cioè **come una forza** che determina il moto (cioè, influisce sullo stato) della carica. La massa, al contrario della carica, non ha due segni e *l'azione del campo gravitazionale* generato da una massa è *sempre attrattiva*, mentre quella del **campo elettrico** può essere **attrattiva** o **repulsiva**, a seconda che il segno delle cariche sia uguale (repulsiva) o opposto (attrattiva).

La **legge di Coulomb** $F = \epsilon \cdot Q_1 \cdot Q_2 / r^2$, dove r è la distanza tra le due cariche Q_1 e Q_2 , è uguale alla legge gravitazionale di Newton che si esercita tra due masse m_1, m_2 , dove, inoltre, al posto del parametro di accoppiamento ϵ , che misura l'intensità della forza elettrica, ci sia il parametro G che misura l'intensità della forza gravitazionale, che è *estremamente più debole di quella elettrica*. Charles Augustin de Coulomb, un fisico francese, la scrisse nel 1785, ed è la base della teoria dell'elettromagnetismo.

Se una delle due cariche, ad es. Q_2 , è unitaria, cioè uguale a 1, **la legge di Coulomb definisce il campo elettrico come la forza, generata da Q_1 , che agisce sull'unità di carica:**

$$E = \varepsilon Q_1/r^2$$

L'azione del *campo magnetico* ha l'effetto di *deviare il moto* di una carica; effetto utilizzato, ad es., nei vecchi televisori a raggi catodici per focalizzare sullo schermo il pennellino di elettroni che doveva attivare dall'interno le immagini sul video.

L'azione simultanea di un campo elettrico e di un campo magnetico su una carica Q è descritta dalla *forza di Lorentz*. L'espressione di tale forza è $F = Q \cdot (E + V \times H)$, dove V è la velocità della carica Q e il secondo termine tra parentesi è il "prodotto vettoriale" (vedere più avanti) tra la velocità e il campo magnetico H .

Esiste anche il *dipolo elettrico* (Fig. 3) che è dato da due cariche di segno opposto separate da una distanza d molto piccola. Si pensi, ad esempio, a una molecola come quella dell'acqua (H_2O), che è elettricamente neutra ma nella quale l'addensamento dei suoi elettroni, cariche negative, in una parte della molecola configura una carica positiva di uguale grandezza nella parte che hanno lasciato.

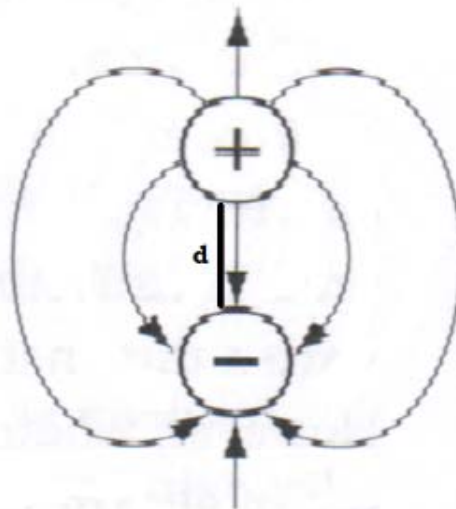


Fig. 3 - Dipolo elettrico con le linee di forza del campo da esso generato

Una *corrente elettrica* è un flusso di cariche che scorre in un corpo conduttore, ad esempio un filo di rame. La corrente fluisce perché ai capi del conduttore è stata applicata una *differenza di potenziale* (d.d.p.) o *tensione* V , ad es. tramite un generatore (una batteria). L'*intensità della corrente elettrica* i è il *flusso di cariche che attraversa nell'unità di tempo la sezione del conduttore*; sarà tanto più elevata quanto maggiore è la d.d.p. applicata

e tanto minore è la **resistenza** R che il materiale conduttore oppone al flusso delle cariche.

È la **legge di Ohm** (Fig. 4):

$$V = i R$$

L'unità di misura della tensione è il Volt (V), quella dell'intensità di corrente è l'ampere (A) e la resistenza si misura in ohm (Ω).

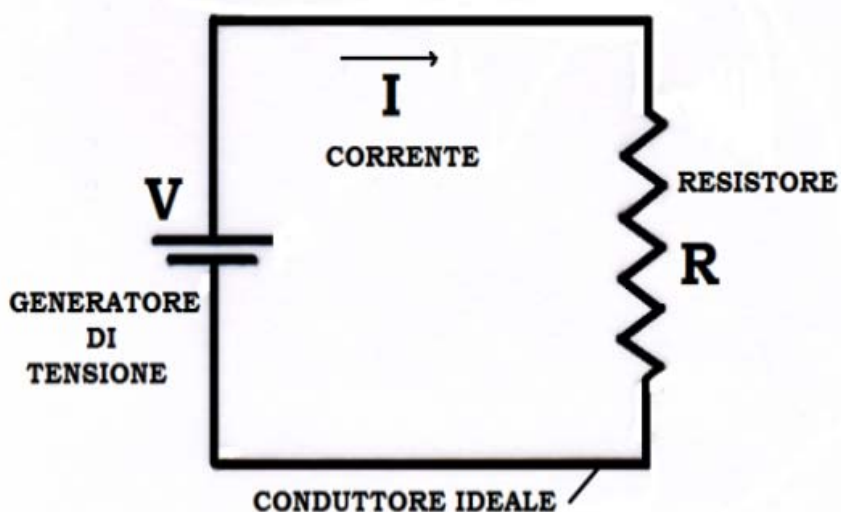


Fig. 4 - Circuito elettrico composto da generatore di tensione, resistore e conduttore ideale

Abbiamo riservato il *grassetto* alle lettere riferite a quelle grandezze fisiche che necessitano per la loro definizione di una *direzione* e di un *verso*, rispetto a un determinato **sistema di riferimento**, oltre che di un numero che ne esprime l'*intensità* o *grandezza* (si pensi, ad esempio, alla velocità: non basta sapere «a che velocità vado», ma anche la direzione del moto e, su quella direzione, qual è il verso di percorrenza). Queste grandezze sono i **vettori** o **grandezze vettoriali**, come la forza di Coulomb, quella di Lorentz, il campo elettrico e il campo magnetico; mentre gli enti che possono essere espressi da un solo numero, quello che misura in un dato sistema di riferimento la loro grandezza, sono gli **scalari** o **grandezze scalari**; tali sono l'intensità di corrente i e la tensione V . Poiché l'intensità di un vettore è uno scalare la indicheremo, come già in precedenza, senza grassetto, v ; così E e

H sono scalari e sono, rispettivamente, l'intensità di campo elettrico e l'intensità di campo magnetico.

Se il filo conduttore si richiude a formare **una spira percorsa da corrente** (Fig. 5), essa si comporta, a distanza sufficientemente grande (almeno dieci volte il diametro della spira), come **un dipolo magnetico**: vale a dire che genera un campo magnetico, che nel vuoto ha intensità proporzionale all'intensità della corrente che la percorre. È il **principio di equivalenza di Ampère** (1820):

$$(1) \quad M = (\mu_0/c) i \Sigma$$

dove M è l'intensità del momento magnetico \mathbf{M} generato dalla corrente i che circola nella spira, Σ è l'area della spira, μ_0 è la permeabilità magnetica del vuoto (pressoché uguale a quella dell'aria) e c è la velocità della luce.

André-Marie Ampère fu un fisico e matematico francese che, insieme al fisico e chimico danese Hans Christian Ørsted, suo contemporaneo, pose le basi del moderno elettromagnetismo. Entrambi cominciarono con indagare sull'influenza che le correnti elettriche passanti in un filo esercitano su un ago magnetico posto nelle vicinanze, e delle reciproche azioni tra due fili percorsi da corrente. Il filosofo e scienziato Giandomenico Romagnosi aveva svolto vent'anni prima (1800) considerazioni analoghe in esperimenti con la pila di Volta, ma, pubblicate su riviste italiane, furono ignorate dalla comunità scientifica. Georg S. Ohm fu un fisico e matematico tedesco, che, partendo dalla pila di Volta, compì delle ricerche e formulò una teoria dell'elettricità, in particolare, la sua legge (1827).

Proprio nello stesso anno (1820), Jean-Baptiste Biot e Felix Savart, due fisici e matematici francesi scoprirono la legge che porta il loro nome: *un filo percorso da corrente elettrica di intensità i genera un campo magnetico di intensità proporzionale a quella della corrente.*

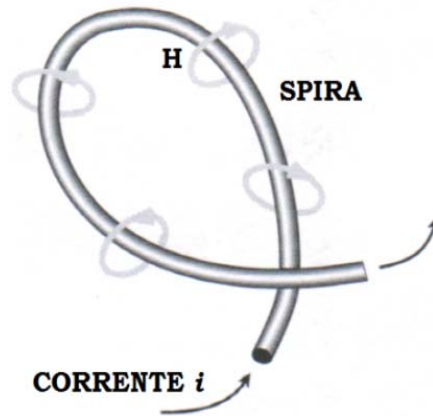


Fig. 5 - Spira percorsa dalla corrente i ; in ogni punto della spira si ha un campo magnetico H ad anello chiuso intorno al filo (vedi legge di Biot-Savart)

La corrente elettrica può circolare solo se il filo in cui scorre è chiuso; ricorrendo all'astrazione di un filo rettilineo indefinito, cioè una retta illimitata, la **legge di Biot-Savart** assume la sua forma matematica più semplice

$$H = (i/2\pi r)$$

dove H è l'intensità del campo magnetico e i l'intensità della corrente che l'ha generato. Con r si indica la distanza tra il punto dove la retta, il filo indefinito, interseca un piano ad essa ortogonale e il punto P , sul piano, dove si misura l'intensità del campo (Fig. 6). Il fatto che il campo magnetico H così generato debba giacere in un piano ortogonale al filo, come è messo in evidenza dalla nota esperienza della limatura di ferro che si dispone in quel piano secondo le linee di forza del campo, che sono circolari, è un dato sperimentale che la legge ben riproduce.

La legge vale anche per un circuito chiuso, ma in questo caso assume una forma matematica, meno semplice, come somma (integrale) di tanti contributi fisicamente elementari (matematicamente: infinitesimi): la formula di Laplace. In quest'ultima formula è essenziale *la natura lineare* del campo magnetico, che può essere ottenuto come somma di infiniti contributi elementari (*principio di sovrapposizione*).

Se i è costante lo è anche H e la legge di Biot-Savart è per la magnetostatica l'analogo della legge di Coulomb per l'elettrostatica.

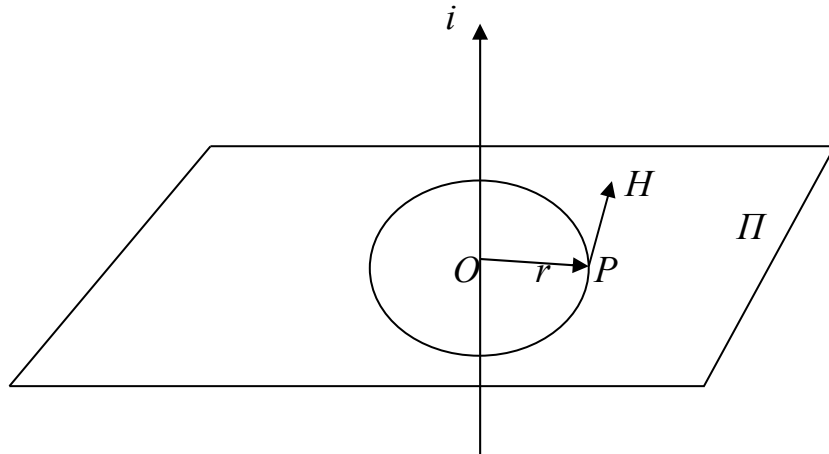


Fig. 6 - La legge Biot-Savart dà il valore di H in ogni punto P del piano Π . Il piano è ortogonale al filo percorso dalla corrente i ; la circonferenza è la linea di forza di H passante per P . H giace nel piano Π ed è ortogonale a r (il raggio che unisce P al punto d'intersezione del filo con il piano, O)

Nel corso della prima metà dell'Ottocento si vennero definendo altre leggi fisiche che, in qualche modo, invertono il punto di vista alla base del principio di Ampère e asseriscono: **una variazione nel tempo del flusso del campo magnetico che attraversa una spira genera in essa una corrente elettrica** (che si muove nel circuito nel verso antagonista alla variazione che l'ha generata). La **variazione di flusso di H** agisce come una vera e propria **forza elettromotrice (f.e.m.)** che, indotta dalla variazione, è responsabile del moto delle cariche nel circuito: **una f.e.m. indotta**. È la **legge di Faraday-Neumann-Lenz**.

Michael Faraday fu un eccezionale scienziato sperimentale inglese. Come Ampère non ebbe un'educazione "formale", ma, a dispetto di ciò, è una delle figure di più grande rilievo dell'Elettromagnetismo. Franz Neumann è il fisico tedesco che quantificò, *negli anni 1840*, gli esperimenti di Faraday nella legge che porta anche il suo nome. È il padre di Carl, il matematico noto per essere tra i fondatori del Calcolo Integrale e per lo studio delle equazioni a derivate parziali – in particolare le "condizioni al contorno" – che riguardano, e parecchio, alcuni dei problemi che dovremo affrontare. Heinrich F.E. Lenz, il più giovane dei tre, è un fisico, tedesco del Baltico, quindi, all'epoca, cittadino dell'Impero russo: il segno meno che compare nella legge, a lui dovuto, è l'esplicitazione del fatto che il principio di azione e reazione (3^a legge di Newton) vale anche per i circuiti elettrici – la corrente generata dalla f.e.m. indotta si oppone alla variazione di flusso che

l'ha generata – come anche il principio di conservazione dell'energia. Al nome di Lenz è legata la lettera L con la quale si indica l'*induttanza* di un circuito elettrico.

Si prenda una spira e si ponga, fissa, nel campo *magnetostatico* generato da due magneti di polarità opposte, N e S. La spira sarà attraversata da un *flusso di campo magnetico* in generale *diverso da zero* (si pensi alle linee di forza del campo attraverso la spira, tanto più fitte lì dove il campo magnetico è più intenso). Però, *se la spira sta ferma non c'è alcun passaggio di corrente*. Se invece *la spira si muove* rispetto ai due magneti, ad es. con un meccanismo a orologeria che la fa ruotare in mezzo a loro, allora *varia il flusso di campo magnetico* (il numero di linee di forza del campo) *che attraversa la spira* – nullo quando la spira è parallela, massimo quando la spira è ortogonale alle linee di flusso – e un amperometro potrà misurare il passaggio nella spira di una corrente elettrica (la cui intensità varierà nel tempo in sincronia col moto della spira).

Se si è capito il fenomeno alla base della legge, risulterà comprensibile che perché si generi una f.e.m. deve, in ogni caso, variare il flusso attraverso la sezione del circuito. E questo si può ottenere muovendo la spira nel campo magnetico (flusso «spazzato» dalla spira), come nell'esempio appena fatto, o deformandola o muovendo il magnete di Fig. 7 rispetto alla spira; l'importante, per registrare il passaggio di corrente, è che vari il numero di linee di forza di \mathbf{H} che passano attraverso la superficie da essa delimitata.

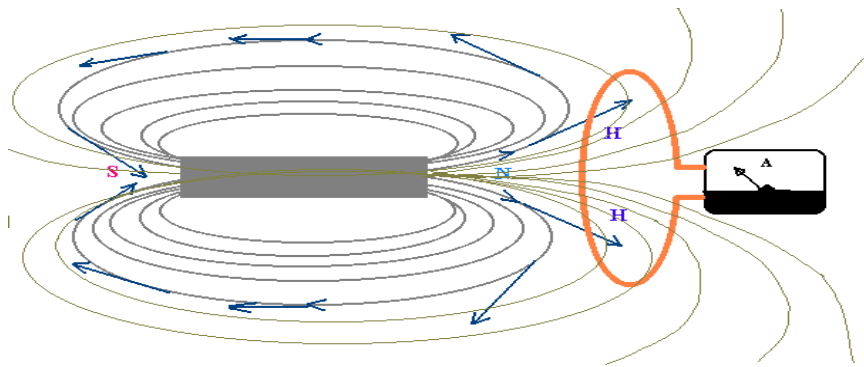


Fig. 7 Ciò che genera la forza e.m. indotta è il variare nel tempo del numero di linee di forza di \mathbf{H} (flusso di \mathbf{H}) attraverso la spira. Nella situazione in figura l'indice che nell'amperometro rileva un passaggio di corrente dovrebbe stare sullo zero: flusso costante, nessuna corrente. Se con un po' d'immaginazione si pensa che varii nel tempo il numero di linee di forza attraverso la spira, allora questa variazione di flusso di \mathbf{H} giustifica la posizione dell'indice (corrente diversa da zero). Immagine tratta da www.openfisica.com/

Le due leggi, il principio di equivalenza di Ampère e la legge di Faraday-Neumann-Lenz, sono in qualche modo complementari, e rimandano a *un aspetto unitario di fondo* che è *il moto delle cariche elettriche*, elettroni o ioni, in un conduttore. *È il moto delle cariche, cioè un campo elettrico che varia nel tempo, che genera un campo magnetico; a sua volta, il variare nel tempo di un flusso magnetico genera un moto di cariche.*

Si comincia così a capire meglio perché si parla di **campo elettromagnetico** come di un **unico ente**. E infatti, non appena i fenomeni in esame variano nel tempo, non si ha più solo un campo elettrico o solo un campo magnetico, ma le variazioni nel tempo dell'uno sono alla base dell'insorgere dell'altro, e viceversa. Il solo modo per avere una **separazione** dell'unico ente in due campi distinti è «**annullare il tempo**»; solo nel *caso statico* infatti – carica elettrica o dipolo magnetici fissi nello spazio e i cui valori non cambiano nel tempo – si avrà un **campo elettrostatico**, di cui abbiamo già dato l'espressione nel caso in cui sia una sola carica a generarlo, e un **campo magnetostatico**, vedi legge di Biot-Savart.

Insomma, anche il campo elettrostatico e il campo magnetostatico esistono, sono osservabili fisicamente, ma solo quando i fenomeni avvengono in modo del tutto indipendente dal tempo.

È opportuno rimarcare la differenza tra **statico** e **stazionario**, termine quest'ultimo che la fisica usa per fenomeni che pur *non dipendendo esplicitamente dal tempo non configurano però un'assenza di moto*. Ad esempio, l'acqua che scorre in un canale fornirà all'osservatore l'*identico* profilo e gli *identici* valori di velocità *nella sezione che sta osservando*; nulla cambia nel tempo per l'osservatore, ma la massa d'acqua è in movimento (non è statica). Analogamente, per la corrente che scorre in un circuito elettrico alimentato da un generatore. Se invece che a osservazioni fatte *in un posto fisso* si pensa a un osservatore che possa seguire un filetto fluido della corrente, come fosse “a cavallo” di esso, allora egli sperimenterà direttamente il moto, cioè qualcosa che cambia nel tempo.

La *natura unitaria* del campo elettromagnetico è ben rappresentata dalle **equazioni di Maxwell** (1865), che sono il compendio *matematico* della conoscenza di tutti le leggi formulate per la descrizione dei fenomeni elettromagnetici. Esse inoltre esplicitano il concetto *fisico* di “inseparabilità” dei due campi, in virtù della presenza nelle equazioni di un operatore matematico di variazione temporale, applicato sia ad ***E*** che a ***H***, che dà un risultato nullo *solo* quando i vettori non dipendono dal tempo; e solo in questo caso le equazioni di Maxwell danno per ***E*** ed ***H*** il loro *valore statico* già noto.

James Clerk Maxwell fu un fisico-matematico scozzese che, dopo anni di studio, scrisse la forma moderna delle sue equazioni in un trattato del 1873; e, ol-

tre alla teoria dell'unificazione del campo elettromagnetico, portò fondamentali contributi anche in altri comparti, dalla Teoria cinetica dei gas alla Teoria dei colori alla dimostrazione della natura, fluida, degli anelli di Saturno.

Maxwell aveva già messo in evidenza in precedenti lavori, *negli anni 1860*, l'esistenza di campi elettrici e magnetici oscillanti che viaggiano nello spazio; e dal confronto tra il valore teorico della loro velocità e i risultati sperimentali noti mostrò che **la luce non era altro che la propagazione di onde elettromagnetiche**.

3.2 Le onde elettromagnetiche

3.2.1 Fenomeni periodici e oscillatore armonico

Tra le soluzioni delle equazioni di Maxwell ci sono le **onde elettromagnetiche**; e, passando dalla matematica alla fisica, queste soluzioni rappresentano *fisicamente* la propagazione ondulatoria di **una perturbazione ir-radiata nello spazio**.

Si pensi, ad esempio, come *sorgente della perturbazione* in un certo posto e in un certo istante, a un'antenna emittente, cioè un conduttore cui è applicata una tensione che oscilla nel tempo con *frequenza* ν . La d.d.p. induce a sua volta nell'antenna un *moto di cariche elettriche*, che oscillano con la *stessa frequenza* ν ; e l'onda prodotta dal loro moto viaggerà nello spazio con la stessa frequenza ν delle oscillazioni cui sono soggette le cariche nell'antenna.

Nelle descrizioni fatte dalla Fisica *onde, vibrazioni e oscillazioni sono sostanzialmente sinonimi*; come minimo, sono moti caratterizzati dalle stesse grandezze fisiche, quali *frequenza, lunghezza d'onda* ecc. e dal fatto di avere un carattere *periodico*.

In termini matematici i moti periodici possono essere descritti mediante le funzioni sinusoidali e i grafici delle loro curve. *La più semplice dinamica periodica* è quella dell'**oscillatore armonico**; vale la pena allora definire una volta per tutte le grandezze fisiche tipiche dei moti periodici partendo dall'esempio più semplice.

L'*oscillatore armonico* è il moto su una retta di un *punto materiale* di massa m , sottoposto a una «forza di richiamo» – una molla di coefficiente elastico k – posta in un punto O della retta, assunto come origine del sistema di riferimento. La posizione del punto sulla retta è la distanza x del punto dall'origine O .

È noto dalla Scuola Media Superiore che *la legge* che descrive un moto periodico nella sua evoluzione temporale è una funzione, seno o coseno, del tempo (vedi Fig. 8):

$$(2) \quad \Phi(t) = A \sin(\omega t + \theta)$$

dove A è l'**ampiezza** del moto armonico, cioè il *valor massimo* assunto al variare nel tempo dalla grandezza fisica Φ (la lunghezza massima cui tende la molla, nel caso dell'oscillatore armonico); ω è detta **pulsazione** o **velocità angolare**, perché la (2) rappresenta anche la legge di un moto circolare uniforme, e si misura in radianti/secondo. Nel caso dell'oscillatore armonico la pulsazione è definita dalla geometria materiale del sistema, cioè da m e k : $\omega = \sqrt{k/m}$.

La funzione seno, che compare a secondo membro della (2) – andrebbe ugualmente bene la funzione coseno – è *una funzione periodica* del tempo; T è il **periodo**, cioè il numero positivo che dà l'intervallo di tempo necessario perché Φ riassuma lo stesso valore. In termini matematici, *qualunque* istante t_0 si fissi, dovrà essere:

$$\Phi(t_0) = \Phi(t_0 + T)$$

Del resto questo è il senso, anche colloquiale, che si attribuisce al *periodo* o all'aggettivo *periodico* quando si parla del moto della Terra, di eventi climatologici (stagioni, alisei, monsoni), di alcuni cicli metabolici della cellula o, più quotidianamente, dell'uscita di pubblicazioni (giornali, riviste ecc.). Per l'oscillatore armonico, in capo a T il punto materiale riassume sulla retta la stessa posizione che aveva all'istante iniziale. Il periodo si misura in *secondi* (s).

L'inverso del periodo è la **frequenza** $\nu = 1/T$, che dà il *numero di oscillazioni compiute nell'unità di tempo*; la sua unità di misura nel sistema MKSQ è lo *Hertz* (Hz), *un'oscillazione al secondo*, vale a dire s^{-1} . La forma *periodica* della legge del moto (2) fornisce subito (basta porre in essa $t = T$ e $\theta = 0$) la relazione tra *pulsazione, periodo e frequenza*: $\omega = 2\pi/T = 2\pi\nu$.

La **fase**, θ , misura l'intervallo di tempo tra $t = 0$ e l'istante iniziale t_0 , cioè quello in cui si inizia a osservare il moto, istanti che in generale non coincidono (vedi Fig. 8); nel caso dell'oscillatore armonico θ dà la posizione iniziale, cioè all'istante t_0 , del punto materiale sulla retta; che non coincide in generale con O . Non è male ricordare che solo se hanno *ugual fase* un gruppo d'onde può dar vita a fenomeni di **coerenza** quali quello utilizzato nei *laser*.

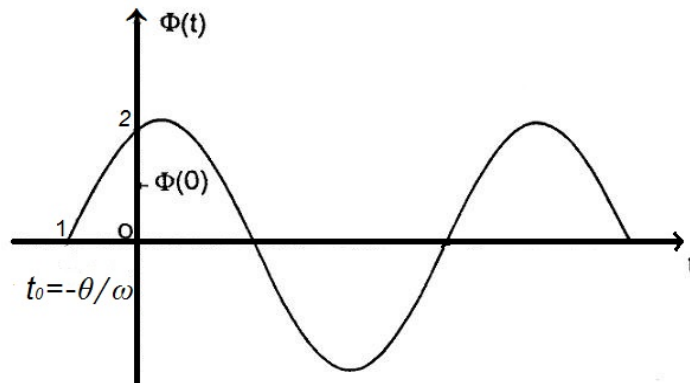


Fig. 8 - Oscillazione armonica di una grandezza $\Phi(t)$. Se si assume come stato iniziale la quiete, vorrà dire che per $t = t_0$ dovrà essere $\Phi(t_0) = 0$. Dalla legge del moto armonico è allora possibile calcolare il valore dell'istante iniziale dell'oscillazione: $\Phi(t_0) = A \sin(\omega t_0 + \theta) = 0$. Infatti, affinché $\sin(\omega t_0 + \theta)$ si annulli dovrà essere nullo l'argomento, cioè $\omega t_0 + \theta = 0$; da cui $t_0 = -\theta/\omega$ (punto 1). Il valore dell'oscillazione $\Phi(0)$ nell'istante $t = 0$ è $\Phi(0) = A \sin \theta$ (punto 2)

Molto importante è il parametro A , *ampiezza* dell'oscillazione, perché è legata all'**energia** E del punto durante il moto; più precisamente, per l'oscillatore armonico si può mostrare che $E = k A^2$.

Dalla legge di moto dell'oscillatore armonico di massa m : $x(t) = A \cdot \cos(\omega t + \theta)$ si può derivare la sua velocità: $v = -\omega \cdot A \cdot \sin(\omega t + \theta)$ e l'energia cinetica:

$$K = \left(\frac{1}{2}\right) m \cdot v^2 = \left(\frac{1}{2}\right) m \cdot \omega^2 \cdot A^2 \sin^2(\omega t + \theta)$$

La forza elastica di richiamo, proporzionale allo spostamento x dall'origine O : $f = -kx$, è derivabile da un'energia potenziale $U = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot k \cdot x^2$; pertanto l'energia meccanica totale è:

$$E = K + U = \left(\frac{1}{2}\right) m \cdot \omega^2 \cdot A^2 \cdot \sin^2(\omega t + \theta) + \left(\frac{1}{2}\right) k \cdot A^2 \cos^2(\omega t + \theta) = \left(\frac{1}{2}\right) A^2 \cdot [m \cdot \omega^2 + k] \cdot [\sin^2(\omega t + \theta) + \cos^2(\omega t + \theta)].$$

Poiché per definizione è $\omega = \sqrt{k/m}$, ne segue che $m \cdot \omega^2 + k = m \cdot (k/m) + k = 2k$.

In definitiva:

$$E = k A^2$$

in quanto la relazione trigonometrica $\sin^2(\theta) + \cos^2(\theta) = 1$ vale anche come valor medio sulle oscillazioni di pulsazione ω e argomento $\theta = \omega t$.

L'insistenza su questi aspetti è motivata dal fatto che *un'onda, non solo elettromagnetica, può essere pensata come fatta da infiniti oscillatori armonici*, che, collegati tra di loro, vibrano ortogonalmente alla direzione di propagazione (vedi più avanti Fig. 10); ognuno di essi, con la sua ampiezza e frequenza, è detto **modo di vibrazione**. A questa concettualizzazione corrisponde nel caso di un sistema materiale unidimensionale – le vibrazioni di una corda – una dimostrazione matematica.

La *distanza spaziale* tra due punti nei quali l'oscillazione assume lo stesso valore, ad esempio tra due creste o due ventri di un'onda, si chiama **lunghezza d'onda** λ , e si misura in multipli o sottomultipli del metro.

È anche opportuno evidenziare che *l'onda si propaga con velocità V mantenendo invariata la sua forma*, nello schema adottato per la descrizione del fenomeno, rispetto al sistema di riferimento scelto (invarianza per traslazioni). *Questo vale per ogni fenomeno ondulatorio*: meccanico, elastico, sonoro, termico ed elettromagnetico; questa caratteristica si traduce, matematicamente, nel fatto che le *funzioni* che rappresentano le onde *dipendono dalla traslazione, $x - Vt$* , e non, separatamente, da x e t .

Certo, le onde elettromagnetiche non si vedono e solo poche persone particolarmente sensibili percepiscono i loro effetti attraverso particolari reazioni del sistema nervoso. I *fenomeni ondulatori* hanno però, si è già detto, molte cose in comune, a partire dalle grandezze – frequenza e lunghezza d'onda – che li caratterizzano; e perciò per avere un modello visivo della propagazione ondosa di una perturbazione nelle varie dimensioni spaziali in cui si manifesta si potrà pensare: alle *vibrazioni* di una corda di uno strumento musicale, «pizzicata» perché suoni (caso unidimensionale); ai profili circolari dei fronti d'onda generati da un sasso che cade in uno stagno (caso bidimensionale), o alle onde elastiche rese visibili dalle compressioni/espansioni di un corpo pulsante (caso tridimensionale).

La trattazione matematica dei problemi ondulatori si basa su questa comunanza di aspetti fisici; la relazione (2), la Fig. 8 e le definizioni che sono state date saranno di riferimento per la matematica di questi problemi.

Una caratteristica fondamentale comune ai moti ondosi è che soddisfano una relazione tanto semplice quanto *importante*:

$$(3) \quad \lambda \cdot \nu = V$$

dove V è la grandezza della *velocità di propagazione dell'onda nel mezzo, che è il materiale dove l'onda si propaga*; questa velocità dipende dalle caratteristiche fisiche del mezzo in cui si propaga la perturbazione. Nel caso degli strumenti a corda la *velocità di propagazione* della perturbazione, il

pizzico, lungo la corda è tanto maggiore quanto più la corda è tesa, *tensione*, e tanto minore quanto più la corda è spessa, *densità*. Nel caso delle *onde elettromagnetiche* la *velocità di propagazione* V dipende dalla **permittività relativa** ϵ_r e dalla **permeabilità relativa** μ_r del mezzo, che sono entrambi numeri puri:

$$(4) \quad V = c/\sqrt{(\epsilon_r \cdot \mu_r)}$$

dove c è la *velocità della luce nel vuoto*. Quando il mezzo è il vuoto $\epsilon_r = \mu_r = 1$, che vale anche con ottima approssimazione per l'aria. Perciò troviamo che tutte le *onde elettromagnetiche*, non solo la luce, viaggiano con la *velocità della luce* nella maggior parte dei casi che ci troveremo a trattare quando si cerca di determinare il valore dei campi incidenti sul corpo, su un suo distretto o sui sistemi biologici.

Su direzione e verso ci torneremo con l'esempio di Fig. 10. La presenza in (4) di ϵ_r e μ_r , che sintetizzano *rispettivamente le proprietà elettriche e magnetiche del mezzo* con valori in generale diversi da 1, consente di osservare che, soprattutto dal punto di vista sperimentale, hanno rilievo *l'induzione elettrica* \mathbf{D} e *l'induzione magnetica* \mathbf{B} . Esse sono legate ai rispettivi campi da semplici relazioni lineari, *tranne che per i materiali ferromagnetici*:

$$(5) \quad \mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \qquad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

dove $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$, $\mu = \mu_0 \mu_r$; ϵ_0 , μ_0 sono i valori nel vuoto $\mu_0 = 1/\epsilon_0 c^2$, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m (dove (F) è il Farad, unità di misura nel sistema MKS della capacità di un conduttore).

Nel caso in cui il mezzo sia *omogeneo* – stessa densità di materia in ogni punto – e *isotropo*, cioè abbia le stesse proprietà fisiche in ogni direzione (non è questo il caso, ad esempio, dei cristalli che si sviluppano preferenzialmente lungo una direzione), ϵ e μ sono *costanti*. In generale la materia non consente queste semplificazioni descrittive, che sono però utilizzabili sicuramente come prima approssimazione per gran parte dei fenomeni che si vogliono descrivere con il ricorso alla matematica.

3.2.2 Lo spettro elettromagnetico

Come aveva già capito Leonardo dall'osservazione delle messi battute dal vento, una caratteristica comune al *fenomeno di propagazione della perturbazione* è che esso avviene **senza trasporto di materia**. Le spighe in-

fatti restano ferme, e le onde del mare, lontano dalla risacca, non ci spostano e ci fanno andare su e giù come turaccioli, rispetto al livello di superficie, ma sempre *in loco*. La proprietà dell'onda di *trasportare energia* dalla sorgente nello spazio circostante, *senza alcun trasporto di materia*, è generalmente definita **radiazione**. Si può quindi parlare indifferentemente di onda elettromagnetica o *radiazione elettromagnetica*.

La frequenza dei diversi tipi di onde elettromagnetiche si estende su una gamma impressionante di valori, che consente la classificazione delle onde: tali valori costituiscono lo **spettro delle frequenze**. La (3) afferma che se l'onda si propaga in un mezzo che con buona approssimazione si può considerare *omogeneo e isotropo* la frequenza è inversamente proporzionale alla lunghezza dell'onda: *più elevata è la frequenza, più corta è l'onda e viceversa*.

L'insieme dei valori delle lunghezze d'onda costituisce lo **spettro delle lunghezze d'onda**, e la lunghezza d'onda, lo ricordiamo, è la distanza tra due massimi (o due minimi) che l'ampiezza dell'onda raggiunge.

Con il termine **spettro elettromagnetico** si definisce *l'insieme delle oscillazioni elettromagnetiche, che include sia lo spettro delle frequenze che quello delle lunghezze d'onda*. Nella Tab. 1 lo spettro delle onde elettromagnetiche è illustrato sinteticamente in funzione della frequenza e della lunghezza d'onda.

Ispezioniamo ora lo spettro delle frequenze elettromagnetiche, dalle più basse alle più alte, in rapporto ai diversi dispositivi di utilizzo o di emissione. Ci sono onde con frequenza bassissima, che vengono denominate ELF (*Extremely Low Frequency*), come quelle emesse dai cavi ad alta tensione (50 Hz), lunghe fino centomila chilometri. Più elevate delle ELF si trovano le SLF (*Super Low Frequency*), con lunghezze d'onda fino a diecimila chilometri, e le ULF (*Ultra Low Frequency*), le cui lunghezze d'onda arrivano fino a 1000 chilometri. Nella "regione hertziana" si trovano le "radiofrequenze" della radiofonia e della televisione e quelle dei cellulari: da qualche migliaio di Hertz e lunghezze d'onda di decine di chilometri a centinaia di milioni di Hertz (1 milione di Hertz = 1 MHz, MHz = MegaHertz) e lunghezza d'onda di decine di metri. Le onde radar sono microonde, come quelle del forno, dei ponti radio e dei collegamenti satellitari: miliardi di Hertz (1 miliardo di Hertz = 1 GHz, GHz = GigaHertz) e pochi centimetri di lunghezza.

La suddivisione dello spettro in «bande» di frequenza (o di lunghezze d'onda), come riportata nella tabella 1, è fondata sui diversi dispositivi in grado di produrre o trasmettere le onde elettromagnetiche, rispetto ai quali esistono ovviamente delle sovrapposizioni ai bordi degli estremi di ogni banda.

Tab. 1 - Spettro elettromagnetico

	Denominazione	Frequenza	Lunghezza d'onda
	Raggi γ	$> 3 \cdot 10^{10}$ GHz	0,01 nm <
	Raggi X	$3 \cdot 10^{10} - 7,5 \cdot 10^7$ GHz	4 - 0,01 nm
Regione ottica	Ultravioletti	$7,5 \cdot 10^7 - 7,9 \cdot 10^5$ GHz	380 - 4 nm
	Visibile	$7,9 \cdot 10^5 - 3,8 \cdot 10^5$ GHz	0,78 - 0,38 μ m
	Infrarosso	$3,8 \cdot 10^5 - 300$ GHz	1 mm - 0,78 μ m
Regione hertziana	Microonde	300 - 0,3 GHz	1 m - 0,1 cm
	Radiofrequenze	300 MHz - 3 kHz	100 km - 1 m
	ULF	3 kHz - 300 Hz	1.000 - 100 km
	SLF	300 - 30 Hz	$10^3 - 10^4$ km
	ELF	30 - 3 Hz	$10^4 - 10^5$ km

3.2.3 Onde piane e campo lontano

A una distanza dalla sorgente distanza sufficientemente grande, tale che essa possa essere considerata puntiforme (a 500 m. e oltre, anche un'antenna lunga 5 m. può essere considerata puntiforme), e se l'irraggiamento dalla sorgente avviene in modo isotropo (non è questo il caso di un'antenna che emette su una direzione preferenziale), il **fronte d'onda** irraggiato dalla sorgente è *sferico*; il *fronte d'onda*, che è il luogo geometrico nello spazio che collega tutti i punti dell'onda che hanno *ugual fase*, può non essere sferico. Un *fronte d'onda sferico* che investe, a grande distanza, l'osservatore o lo strumento di misura è così grande da essere rilevato, *invece che convesso, come piano*; è il piano tangente al fronte d'onda nel punto di osservazione (Fig. 9).

In questo senso si parla di **onda piana**, che si può rappresentare come una componente del campo elettrico che vibra in un piano ortogonale al piano in cui vibra la componente di campo magnetico, mentre si propaga nella direzione ortogonale a tutti e due i piani (vedi Fig. 10).

Onda piana è quindi sinonimo di campo lontano, se ci si riferisce alla distanza della sorgente emittente.

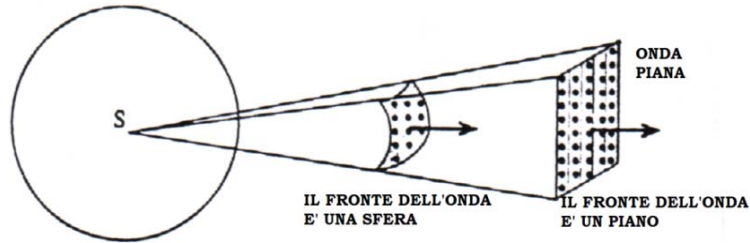


Fig. 9 - Onda sferica

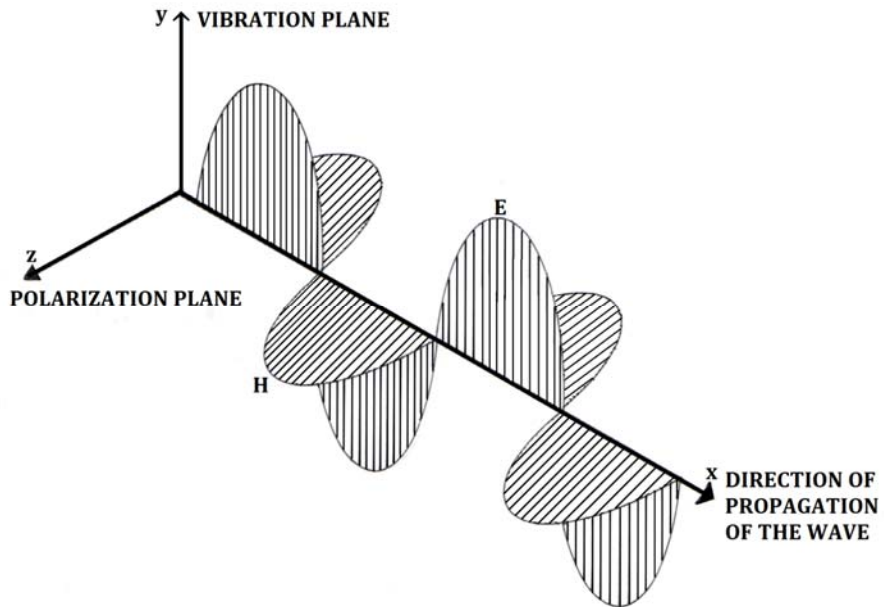


Fig. 10 - Un caso particolare di campo elettromagnetico è l'onda elettromagnetica piana. Il piano xy , dove oscilla il campo elettrico è detto piano di vibrazione; il piano xz dove oscilla il campo magnetico è detto di piano di polarizzazione

È convenzione, la più usata, associare alla *direzione di propagazione* dell'onda – che unisce la sorgente all'osservatore – l'asse x ; gli altri due assi del sistema di riferimento restano determinati dalla richiesta che costituiscano una *terna di assi coordinati levogira* (l'asse z deve «vedere» l'asse x

sovrapporsi all'asse y con una rotazione in senso antiorario). Pertanto, tenendo conto delle semplificazioni che l'ipotesi "onda piana" comporta per le equazioni di Maxwell, la direzione del campo elettrico \mathbf{E} coincide con l'asse y e quella del campo magnetico \mathbf{H} con l'asse z (Fig. 10).

La figura 10 è così diffusa da indurre talvolta nell'errore che tutte le onde, se non addirittura tutti i campi elettromagnetici, siano rappresentabili in quel modo. È inoltre valida solo per le *onde piane* e raffigura solo una parte delle componenti elettromagnetiche. Le equazioni di Maxwell forniscono infatti nel caso di onda piana due relazioni: $E_y = (\sqrt{\mu/\epsilon}) \cdot H_z$, quella rappresentata in Fig. 10, e quella "simmetrica" $H_y = -(\sqrt{\epsilon/\mu}) \cdot E_z$, rappresentabile in ugual modo. Con gli indici in basso si denominano le componenti del campo elettrico e magnetico omonime agli assi coordinati del sistema di riferimento. La precisazione fatta nulla toglie alla "visibilità" che la Fig. 10 consente, né, ovviamente, al rigore e alla validità della sua determinazione.

Se l'oggetto irradiato si trova *vicino* alla sorgente, il campo elettromagnetico assume una configurazione più complessa e non si può usare un'onda piana per rappresentarlo. Si può ricorrere allo schema di *onda piana* tutte le volte che si vogliono affrontare problemi di *campo lontano* dalla sorgente. *In questo caso, le equazioni di Maxwell ci dicono che l'intensità del campo elettrico è proporzionale a quella del campo magnetico e che pertanto è:*

$$(6) \quad \eta = E/H$$

che viene detta **impedenza d'onda** e rappresenta la resistenza che il mezzo oppone alla trasmissione dell'onda elettromagnetica. L'impedenza d'onda si misura in ohm (Ω).

Nelle applicazioni, in particolare nella valutazione dell'impatto delle onde elettromagnetiche sui sistemi biologici, si usa fare riferimento ai **valori efficaci** per tenere conto delle variazioni casuali cui sono soggette sia la generazione che la conduzione dei campi elettromagnetici; se G è l'intensità della grandezza elettromagnetica, l'intensità efficace G_{eff} è definita come:

$$G_{eff} = G/\sqrt{2} = 0,707 G$$

Nel caso della (6), poiché le grandezze efficaci entrano in essa come rapporto e riferendoci a una propagazione nel vuoto o nell'aria, si ha:

$$(6') \quad \eta_0 = E_{eff}/H_{eff} = E/H = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} \approx 377 \Omega$$

3.2.4 Intensità di radiazione

Nell'interazione di un sistema biologico con la radiazione elettromagnetica, esso viene esposto all'energia trasportata dall'onda. Per valutarne l'impatto, la grandezza idonea è la densità di potenza, cioè l'energia che in ogni secondo viene trasportata nell'unità di volume. È evidente infatti che a parità d'energia trasportata dall'onda l'impatto sarà tanto più significativo quanto più esso è concentrato nel tempo, ma anche tanto più la potenza è concentrata nello spazio. Per un'analisi di maggior dettaglio, si considera infine quanto di quella densità incide per unità di superficie; pensando infatti a un corpo, o a un distretto corporeo, quanta radiazione lo investe dipenderà dall'estensione delle diverse aree di esposizione.

In definitiva, nell'analisi teorica e pratica dell'esposizione di un sistema biologico ai campi elettromagnetici si è interessati a conoscere la *densità di potenza per unità di superficie* del campo, che viene anche chiamata **intensità della radiazione** e indicata con S . L'unità di misura è il W/m^2 o, eminentemente per gli aspetti sanitari, suoi sottomultipli.

Per rappresentarla in modo sintetico ed efficace si suole introdurre il **vettore di Poynting**

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$$

che è il prodotto vettoriale di \mathbf{E} e \mathbf{H} , le componenti del campo elettromagnetico cui è esposto il sistema biologico. La direzione e il verso del vettore \mathbf{S} sono quelli di propagazione dell'onda; S , *grandezza del vettore \mathbf{S}* , è proprio l'intensità di radiazione.

Mentre per gli scalari, che sono matematicamente numeri – quelli della loro misura effettuata in un dato sistema di riferimento – vale per la moltiplicazione la regola dei numeri reali, per i vettori possono essere definiti due tipi di “moltiplicazione”: il *prodotto scalare*, un'operazione che corrisponde al proiettare un vettore sulla direzione dell'altro, e un'altra, dal significato geometrico meno evidente, che è il *prodotto vettoriale*. Si può dire che il prodotto vettoriale ha in generale a che vedere con le rotazioni del sistema, come appare in Meccanica quando si introducono, ad esempio, il momento delle forze e quello della quantità di moto – il *momento angolare* – proprio per completare la descrizione e le previsioni sul moto del sistema con gli aspetti rotazionali.

L'operazione del prodotto vettoriale tra due vettori \mathbf{v} e \mathbf{w} è il vettore $\mathbf{v} \times \mathbf{w}$, la cui grandezza è data da $v w \sin \varphi$, dove v e w sono le grandezze dei due vettori e φ è l'angolo compreso tra di loro; la direzione è quella ortogonale al piano determinato dalle rette di applicazione dei due vettori e il verso segue la convenzione levogira, vale a dire che il vettore prodotto deve vedere il primo entrante nel prodotto, nell'esempio è \mathbf{v} , sovrapporsi a \mathbf{w} ruotando in senso an-

tiorario. Per l'intensità di radiazione, nel caso dell'onda piana si ha $\varphi = \pi/2$ (vedi Fig. 10). Dalla definizione stessa risulta poi evidente che, al contrario del prodotto scalare che gode della proprietà commutativa – come l'ordinario prodotto tra numeri –, per il prodotto vettoriale conta chi è il primo entrante nel prodotto, non è quindi commutativo. È facile verificare, sulla base della definizione, che

$$\mathbf{v} \times \mathbf{w} = - \mathbf{w} \times \mathbf{v}$$

Nel caso che valga per l'onda incidente l'approssimazione di onda piana (“campo lontano”) e se la propagazione avviene nel vuoto o nell'aria, l'intensità di radiazione efficace è, in virtù di (6') e dell'essere \mathbf{E} e \mathbf{H} ortogonali tra di loro:

$$(7) \quad S_{eff} = (E_{eff})^2/377$$

dove E_{eff} è il valore efficace del campo elettrico E , e si è di nuovo utilizzata la relazione tra E e H fornita dalle equazioni di Maxwell nel caso di onda piana.

Una parte della radiazione elettromagnetica cui è stato esposto un sistema biologico o un distretto corporeo penetra al suo interno; il campo elettromagnetico incidente genera un campo elettrico \mathbf{E}_{in} e un campo magnetico \mathbf{H}_{in} interni.

*È opportuno tenere presente questa circostanza perché il cuore di questa relazione è dedicato alla discussione su questi **campi interni** o, meglio ancora, sui loro valori, come vedremo più avanti.*

4. Campi naturali e campi artificiali. Epidemiologie

4.1 Fondo naturale e fondo artificiale

La domanda che incombe su convegni di questo tipo o nelle riunioni di comitati, di associazioni, di cittadini preoccupati è, in sintesi: «I campi elettromagnetici fanno *male* alla salute?». La domanda può essere meglio articolata riferendosi alla distanza dalla sorgente dei campi, alla loro frequenza, all'intensità, alla durata della esposizione e definendo meglio quel «*male*». Al tentativo di formulare una risposta va però anteposta una riflessione fondamentale riguardo all'evoluzione che l'ambiente naturale ha subito a causa dei campi elettromagnetici prodotti artificialmente dai dispositivi elettronici, la cui diffusione è proceduta in progressione geometrica a partire dal Secondo Dopoguerra.

Sull'arco di milioni di anni, e per quel che riguarda noi – *homo sapiens* – gli ultimi duecentomila, i mammiferi hanno stabilito un equilibrio con l'ambiente elettromagnetico naturale, i cui valori riportiamo in Tab. 1a. La Terra, come si sa, è dotata di un suo campo *elettrostatico* e di un suo campo *magnetostatico* e poi di *campi variabili* nel tempo su un'ampia banda di frequenze, dovuti a fenomeni naturali.

La caratteristica di questa *attività elettromagnetica naturale* è di essere in generale prodotta, per quel che riguarda la variabilità nel tempo, cioè la frequenza, nella forma di *spike*, di *impulsi distribuiti nel tempo in modo casuale e non continuo*.

La rappresentazione grafica in funzione della frequenza di questa situazione, che è il *fondo naturale elettromagnetico*, corrisponderebbe a brevi tratti di curve che descrivono *oscillazioni irregolari, casualmente presenti nelle diverse regioni di frequenza*. Insomma, lo spettro sarebbe essenzialmente “vuoto” se non per alcune bande; un modello possibile è quello rappresentato in Fig. 10a nella banda attorno ai 10 MHz.

Tab. 1a - Fondo naturale

Fondo naturale (valore efficace)			
Sorgente	Induzione magnetica	Campo elettrico	Frequenza
Campo elettrico atmosferico		80-150 V/m	0 Hz
Campo imperturbato*		<0,5 V/m	0 Hz
Campo geomagnetico	Equatore ~ 20 μ T Poli ~ 70 μ T Italia ~ 40 μ T		0 Hz
Risonanze di Schumann	3 pT		8 Hz
Attività temporalesca	< 0,1 nT	max 0,5 V/m	5 Hz - 1 kHz
Attività temporalesca	0,05 nT	0,01 V/m	50 Hz
Attività temporalesca	Max 50 nT	max 50 μ V/m	1 kHz - 10 MHz
Fondo naturale (cosmic noise)	0,5 μ T	194 μ V/m	10 MHz – 30 GHz

* È il “fondo”, cioè il campo elettrico naturale presente negli ambienti schermati dal campo elettrico atmosferico come sotto gli alberi, all’interno di una grotta o negli edifici in generale

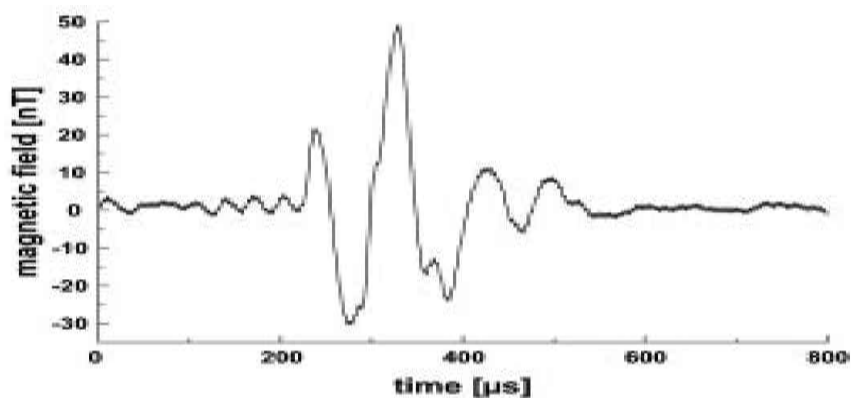


Fig. 10a - Nella figura si vede l'andamento tipico della componente magnetica di un campo elettromagnetico dovuto all'attività temporalesca. L'intervallo di tempo nel quale il campo magnetico si mantiene apprezzabilmente diverso da zero è di soli 0,3 ms circa, il valore di picco è di 50 nanoTesla

Al contrario, la presenza dei ***campi artificiali*** ha progressivamente invaso ***con continuità*** tutto lo spettro elettromagnetico, almeno fino ai 3 GHz, giustificando il concetto di ***inquinamento elettromagnetico***, o ***elettrosmog***, e producendo una situazione come quelle rappresentata nelle figure 10b e 10c.

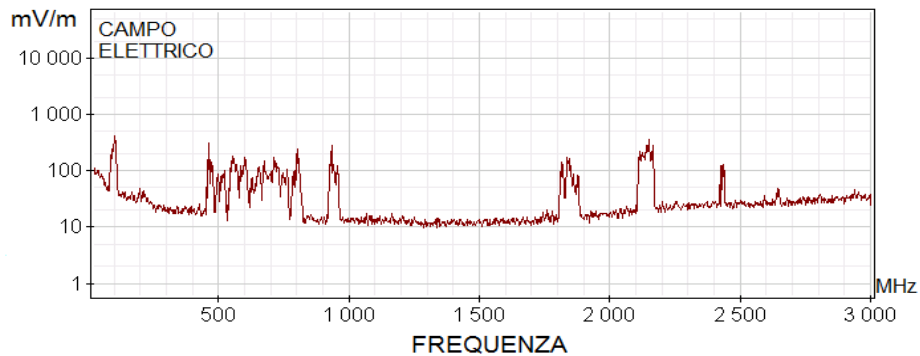


Fig. 10b - Lo spettro, misurato in ambiente ad aria non confinata in un'area di Roma (Cinecittà Est), si estende da 26 MHz 3 GHz. Il primo picco a sinistra indica le trasmissioni radio in FM. Subito dopo la frequenza di 400 MHz iniziano le trasmissioni della TV digitale. Intorno a 900 MHz c'è la telefonia GSM e i due picchi centrati a 1,9 GHz e 2,2 GHz sono le emissioni del sistema UMTS

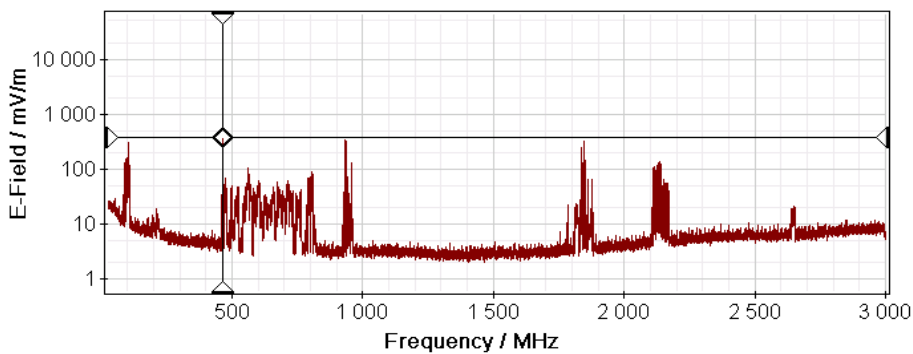


Fig. 10c - Lo spettro nell'intervallo di frequenza della Fig. 10b, registrato al chiuso nei locali dell'Università di Tor Vergata a Roma, mostra gli stessi picchi nelle stesse bande, ma il fondo è circa la metà (10 mV/m). Vale in generale per le abitazioni

Tab. 1b - Fondo artificiale bassa frequenza

Fondo artificiale bassa frequenza (valore efficace)			
Sorgente	Induzione magnetica [μT]	Campo elettrico [V/m]	Ffrequenza [Hz]
Linee Ferroviarie*		1000	0
Linee ad alta tensione**	13-20	4000-5000	50
380·10 ³ V (1500 A)	5-7	2000	“
220·10 ³ V (550 A)	~ 4	1000	“
132·10 ³ V (375 A)			
Impianto domestico 220 V	0,1-100	1-15	50

* Al di sotto del cavo

** Al suolo a 10 m di distanza dall'asse (centro) della linea

Per quel che riguarda il fondo artificiale di bassa frequenza la Tab. 1b fornisce i valori di riferimento

Il confronto tra le due situazioni, *fondo naturale/fondo artificiale*, richiederebbe un'analisi dello spettro analoga a quella di Fig.10b in *un ambiente però incontaminato*. Non disponendo al momento di un'indagine così completa si può far riferimento al *valore efficace di picco del fondo naturale*, che nella regione delle alte frequenze ([10 MHz, 3000 MHz]) è pari a 194 $\mu\text{V/m}$ (0,2 mV/m) (vedi Tab. 1a); assumendolo come valor medio si sopravvaluta fortemente l'entità del campo naturale, ma ciò nonostante il valore medio del *fondo artificiale*, pari a circa 20 mV/m come si può agevolmente desumere da Fig. 10b, risulta almeno *cento volte superiore a quello naturale*, come lo abbiamo approssimato per eccesso. Se poi si guarda a misure di campo eseguite immediatamente fuori o anche dentro abitazioni e scuole, da 2 V/m a 20 V/m, in aree esposte ad antenne a radiofrequenza, in questi *hot spots* (punti caldi) *il valore medio di campo è superiore dalle diecimila alle centomila volte a quello del fondo naturale nella stessa regione di frequenza*.

4.2 Equilibrio evolutivo con i CEM

Queste considerazioni fanno ben comprendere, innanzi tutto, che il *confronto* tra campi artificiali e campi naturali va fatto con i valori delle *diverse bande di frequenza*, che sono assai diversi, *e non con il caso statico*. E come siano del tutto fuorvianti certe affermazioni pubbliche, penso a quelle

fatte da Umberto Veronesi nella sua duplice veste di scienziato e Ministro della Sanità ai tempi della questione di Radio Vaticana nella primavera del 2001: «... siamo dunque adatti, evolutivamente parlando, al campo elettromagnetico terrestre, come dire che le nostre cellule sono naturalmente compatibili con questo genere di radiazioni.» (Corriere della Sera, 10 aprile 2001). Certo che si è stabilito un **equilibrio evolutivo** delle nostre cellule e del nostro organismo con i campi elettromagnetici presenti sulla terra, *ma sull'arco di duecentomila anni e con i valori naturali dei campi!*

È più che comprensibile allora che non solo l'uomo della strada si ponga l'interrogativo di che cosa succeda a un equilibrio perturbato da un così forte scossone: l'aumento esponenziale dei valori dei campi conseguito negli ultimi sessant'anni, cioè in un tempo assai piccolo, meno di un millesimo, rispetto alla durata temporale su cui si è dispiegata la storia evolutiva di homo sapiens.

Questa considerazione ha poi un carattere più generale, perché *la contrazione temporale di processi naturali indotta dalle attività dell'uomo ha in generale creato profondi squilibri.* Basti pensare all'immissione di decine di migliaia di nuove specie chimiche introdotte nell'ultimo secolo in un ambiente naturale rimasto chimicamente costante per intere ere geologiche. O all'analogia coi cambiamenti climatici, dove l'aumento di concentrazione della CO₂ in atmosfera negli ultimi 50 anni, dovuto eminentemente ai consumi dei combustibili fossili impiegati nelle attività umane, è stato pari a quello che in altre epoche della storia del clima ha richiesto 5000 anni; ed è proprio questa contrazione temporale di un fattore cento che misura *l'azione forzante*, com'è definita in climatologia, che ha prodotto *il passaggio dalla stabilità all'instabilità dei grandi cicli periodici del clima.*

Insomma, per tornare all'interrogativo iniziale, anche nel caso dell'inquinamento elettromagnetico è senz'altro giustificata un'allerta sulla sua nocività; ma si tratta ora di andare a un'analisi più approfondita.

La nocività dell'esposizione ai campi come diretto rapporto di causa/effetto, quale talvolta si pretende, non è provata, ma è anche una questione mal posta.

È vero che siamo abituati nelle nostre vicende quotidiane ad attribuire un rapporto di causa/effetto a due eventi, uno successivo all'altro, che sperimentiamo ripetutamente. È questa, innanzi tutto, un'esigenza logica della nostra mente, una "categoria a priori" di kantiana memoria, e che l'effetto succeda nel tempo alla causa è certamente una condizione necessaria; ma non vuol dire che il nesso causale esista poi per davvero, come ci ricorda l'ironia dei giuristi: «*Post hoc ergo propter hoc*». Tanto meno che esista in modo scientificamente inoppugnabile.

Giusto Isaac Newton, infatti, riuscì a fondare un tal tipo di *determinismo* – la *forza* è la *causa* e la variazione del moto, l'accelerazione, ne è l'*effetto* – il cui successo è legato alla «semplicità» del mondo degli oggetti cui si può applicare. In campo strettamente scientifico la relazione causa/effetto può essere predicata con assoluta certezza in pochi territori: non ovunque per la Fisica e la Chimica, ancor meno per la Biologia e le altre scienze. Al di fuori di questi comparti, e del regno astratto della logica – matematica, filosofica –, il rapporto di causa/effetto viene spesso preteso o predicato come verosimile o ragionevole, ma non provato.

4.3 Epidemiologie

La questione, soprattutto nella valutazione dei rischi sanitari collegati alle modifiche dell'ambiente dovute ad artefatti dell'uomo, non si riduce a un pronunciamento secco di causa/effetto, ma consiste nel saper *correlare* gli effetti riscontrati nell'organismo e nel suo funzionamento con gli agenti che si ritengono poter essere alla base di quelle modifiche.

Si tratta di procedere a un'*indagine epidemiologica*, e i criteri che consentono di fornire adeguata evidenza per una relazione causale tra due eventi rilevati li ha forniti cinquant'anni fa un epidemiologo inglese, Sir Austin Bradford Hill. In virtù della loro chiarezza e sostanziale esaustività sono a tutt'oggi ampiamente accettati, anche se, ovviamente, esistono proposte aggiuntive o di modifica per i singoli punti.

Senza elencare tutto il decalogo di Hill, che indica una metodologia generale, qui di seguito esaminiamo i punti più significativi, declinati rispetto al nostro problema, soddisfatti i quali sarà accettabile come nesso causale, e *con un livello stimabile di probabilità, l'evidenza di un'associazione tra un fattore e un effetto fornita da un'indagine epidemiologica:*

- i) censire i casi di una o più patologie riscontrati in una determinata area e istituire un'associazione tra essi e il possibile fattore patogeno; tanto più ampia sarà l'associazione, tanto più verosimile sarà il nesso causale, anche se associazioni fatte su un minor numero di casi possono avere una loro significatività.
- ii) Se un'associazione riscontrata in numero consistente di casi viene fatta da persone diverse in luoghi diversi e con campioni diversi, si rafforza la probabilità che l'effetto sia dovuto all'agente patogeno ipotizzato.
- iii) Quanto più specifica è l'associazione tra fattore ed effetto, quanto più cioè è ristretta a un determinato gruppo di popolazione in un'area

specifica e in assenza di altre ipotesi verosimili, tanto maggiore è la probabilità che l'associazione configuri un rapporto di causa/effetto.

La teoria statistica infine fornisce al risultato di un'epidemiologia condotta secondo questi criteri lo strumento per eseguire un test sulla validità dell'ipotesi di associazione che è stata fatta. E il test di ipotesi sarà ulteriormente rafforzato se esiste un'interpretazione plausibile nel senso di un rapporto di causa/effetto.

Talvolta si richiede invece, *in contrasto col suo significato stesso*, che l'indagine epidemiologica fornisca *un rapporto certo di causa/effetto*. La richiesta, comprensibile da parte dell'uomo della strada, è invece avanzata talvolta da «esperti» che, se per davvero tali, stanno ciurlando nel manico: ***nessuna correlazione statistica può essere così stringente da configurare un preciso nesso causa/effetto, essa potrà invece offrire una valutazione sulla probabilità che quel nesso esista.***

Ma allora, si dirà, proprio pensando agli aspetti sanitari espliciti nella domanda di partenza, non è la diagnosi effettuata dal medico un preciso nesso causale tra malattia e fattore scatenante? Quando i medici formulano una diagnosi – ci si sta muovendo sul terreno assai complesso degli organismi viventi – stanno in realtà praticando *una sorta di epidemiologia*, che si fonda su un'esperienza acquisita sulla base di moltissimi casi, reali e di letteratura; ma senza quell'*eidòs* ippocrateo, cioè le condizioni del paziente come “intuite” dal medico, che distingue i bravi clinici e che oggi forse affideremo all'empatia dei «neuroni specchio», non si andrebbe molto lontano.

Insomma, la diagnosi è un processo più complicato dello stabilire un rapporto causa/effetto, con un forte elemento soggettivo in più. Ed è esperienza comune quella di diagnosi sbagliate.

Se è chiaro quanto è stato fin qui detto, allora è anche chiaro che l'angosciata domanda sulla nocività dei campi elettromagnetici va posta **non** nella aspettativa della *certezza* del nesso causale, in generale inattuabile, ma della risposta: *possibile*, oppure *probabile*. Parole, si dirà. No, non sono solo parole, perché a quelle parole può corrispondere una previsione normativa di carattere sanitario. Se il danno è *possibile*, ciò implica solo un'allerta e un prosieguo di studi e di ricerche; se il danno è *probabile* questo obbliga i responsabili della salute pubblica ad allestire adeguate misure di protezione sanitaria.

Il riconoscimento della nocività dei campi elettromagnetici, a parte l'effetto termico, è stato sbarrato dall'atteggiamento assunto dagli organi tecnici internazionali, del quale abbiamo già detto in premessa. E, a proposito del peso delle parole, l'indagine conoscitiva richiesta alla fine del 1989 dal

Congresso degli Stati Uniti all'*Environmental Protection Agency* (EPA) fu oggetto di tali pressioni da parte dell'industria elettrica, dell'Aeronautica, della Casa Bianca e della «Physics Brigade» – un gruppo di esperti capitanato dai Fisici di Yale e di Harvard (vedi [1b]) –, che la *cancerogenicità* attribuita ai *campi elettromagnetici generati dalle linee elettriche* di frequenza estremamente bassa (ELF) venne ridotta da *probabile*, come era nella prima bozza del rapporto EPA, a *possibile* per poi scomparire definitivamente nella stesura finale. A quanto pare gli interessi consolidati e fortemente rappresentati ci stanno ben attenti alle parole.

Quel *possibile* riemerge però nella monografia (vol. 80, 2002) dell'*International Agency for Research on Cancer* (IARC), dove le evidenze per i campi elettrici e magnetici ELF generati dagli elettrodotti sono considerate separatamente: una «*limited evidence*» per i campi magnetici in relazione alla leucemia infantile, con «*inadequate evidence*» per tutti gli altri tipi di cancro; «*inadequate evidence*» per la carcinogenicità dei campi elettrici negli umani e dei campi magnetici in esperimenti coinvolgenti animali. Sulla scorta di queste valutazioni lo IARC ha classificato come *possibili cancerogeni*, gruppo B2, *i campi magnetici ELF* mentre i campi elettrici, statici o ELF, e i campi magnetici statici sono stati collocati nel gruppo 3, cioè «*not classifiable as to their carcinogenicity to humans*».

Pochi anni prima, nel 1999, il *National Institute of Environmental Health Sciences* (NIEHS) degli Stati Uniti aveva parlato di un «rischio debole» per l'esposizione ai campi elettromagnetici di ogni frequenza, affermando però che ciò era sufficiente a giustificare una preoccupazione seppur limitata («... *warrant limited concern*»).

In una recente monografia (vol. 102, 2013) lo IARC ha valutato che vi fossero evidenze sufficienti per classificare nel gruppo B2, cioè come *possibili cancerogeni*, *i campi elettromagnetici alle frequenze radio*; evidenze «*limited*» tra gli utenti della telefonia mobile in rapporto all'insorgenza di gliomi e di neuromi acustici, «*inadequate*» invece per trarre conclusioni su altri tipi di cancro.

Nel comunicato stampa di presentazione della monografia il gruppo di lavoro dello IARC ricordava che sull'arco degli ultimi dieci anni, dal 2004, è stato registrato un incremento del 40% del rischio di glioma nella categoria di utenti che usa di più il telefono cellulare (30 minuti al giorno per un periodo di 10 anni).

Ne capiremo meglio il perché quando più avanti vedremo, nel capitolo in cui verranno confrontate le stime sui valori che il campo elettrico irraggiato da un telefono cellulare assume penetrando nella testa, come tali stime siano ben diverse a seconda che si usi il modello su cui si basano gli standard internazionali per i limiti alle esposizioni (ANSI, IEEE, WHO,

ICNIRP) o, invece, modelli più realistici e al tempo stesso più rigorosi dal punto di vista fisico-matematico.

In realtà, una monografia come quella dell'IARC o di tante altre Istituzioni che si occupano di fissare i limiti di esposizione, come quelle appena citate, è una *meta-epidemiologia* fondata su una *meta-analisi*, quest'ultima essendo quella branca dell'epidemiologia che mette insieme le ricerche e gli studi più rilevanti per cercare di pervenire a un accordo su una determinata questione. Per questo le meta-analisi sono considerate come la più alta forma di evidenza, in quanto raccolgono tutte le evidenze disponibili per dare una risposta. Le critiche a questa metodologia sono di segno diametralmente opposto, perché le meta-analisi vengono accusate di pesare troppo o, al contrario, troppo poco gli studi a favore di un'evidenza.

In conclusione, è assai opportuno sottolineare che evidenza non vuol dire per forza evidenza di cancro e leucemie. L'impostazione «negazionista» di WHO e ICNIRP ha generato una reazione, uguale e contraria potremmo dire, per la quale si è innestata la gara sulla «cadaverologia», la conta dei morti rivendicata da comitati, associazioni o enti locali come prova dell'insostenibilità sanitaria della loro situazione. E in questa gara il protagonista è ovviamente il cancro, facendo passare in secondo ordine altre patologie, del sistema nervoso come di altre funzioni fisiologiche, che anche se non portano alla morte non sono certo da sottovalutare.

Infine, dovrebbe risultare evidente che la risposta all'interrogativo di fondo è lontana da quella certezza che si pretenderebbe, e alla quale non è poi necessario attingere. La certezza è sostituita dalla probabilità, sufficiente a promuovere azioni di tutela sanitaria.

Ma quando si parla solo di possibilità? Quell'allerta, associato alla dichiarazione di essere possibile agente patogeno, reclama ulteriori studi, che se ben eseguiti e mirati possono trasformare quella possibilità in probabilità. È questo il percorso lungo il quale si muove questa relazione.

5. I campi ad alta frequenza entrano dentro la testa?

5.1 Il «proiettile» quantistico e un fenomeno epigenetico

Il corpo umano è una struttura complessa che a *livello macroscopico* risulta costituita da parti eterogenee; tali sono pelle, grasso, ossa, spina dorsale, muscoli, sangue e fibre nervose. A *livello microscopico* i tessuti sono composti da differenti tipi di cellule; e ogni cellula è a sua volta costituita da strutture specializzate – membrane, nuclei, mitocondri – e da una miriade di macromolecole biologiche.

Come investigare i meccanismi di interazione tra la radiazione elettromagnetica e il materiale biologico?

Un *primo modo* è studiare l'azione che i CEM associati a un'onda esercitano sulle cariche elettriche presenti negli organismi viventi.

In questa descrizione, che diremo classica, i sistemi viventi sono considerati, in prima approssimazione, come consistenti soprattutto di acqua – che per l'uomo rappresenta oltre i due terzi della materia di cui è fatto – insieme a sostanze diluite in essa per riprodurre la conduttività fisiologica. Note le caratteristiche della sorgente emittente, la durata dell'esposizione e i valori dei parametri elettromagnetici dei diversi livelli di organizzazione degli organismi multicellulari, l'applicazione delle leggi dell'elettromagnetismo, vale a dire delle equazioni di Maxwell, consente in linea di principio di descrivere il meccanismo biofisico dell'interazione. Il problema è quindi determinare quali modificazioni abbiano subito i parametri elettromagnetici delle strutture biologiche e come questo possa riflettersi sul funzionamento dell'organismo irradiato.

Da un punto di vista teorico sembrerebbe più appropriato un secondo modo di procedere, che considera la radiazione elettromagnetica incidente come *quanta* di energia, i fotoni. Ma un trattamento quantistico della radiazione, che suggerisce a livello microscopico una descrizione quantistica an-

che del materiale biologico irradiato dalla sorgente, risulterebbe *inutilmente complesso* e, in ogni caso, al di là di queste note.

Ricordando quanto si è detto nel precedente capitolo a proposito della «gara dei cancri», vale forse qui la pena di lanciare un sommesso monito per evitare «semplificazioni quantistiche». Nel descrivere l'origine di una mutagenesi – e non tutte le mutagenesi generano tumori – si potrebbe essere tentati di pensare a un **quanto di energia** elettromagnetica, $h\nu$, dove h è la costante di Planck e ν è la frequenza dell'onda elettromagnetica incidente, come a un proiettile – più alta è la frequenza maggiore è la sua energia – che perfora la doppia elica del DNA *alterandone la sequenza*; e se i meccanismi di riparazione naturale, controllati da certi enzimi, non ristabiliscono la configurazione corretta ecco allora la mutagenesi, innescata da **radicali liberi** quali, ad esempio il metile (CH_3).

Il **quanto di azione**, noto anche come costante di Planck, $h = 6,627 \cdot 10^{-34}$ ($\text{m}^2 \text{kg/s}$), ha le dimensioni fisiche di un'energia per un tempo; che sono le dimensioni di una grandezza che in fisica è detta "azione". Il valore di h può essere assunto come una sorta di "spartiacque" fra la meccanica classica e quella quantistica: quando le energie e i tempi coinvolti sono comparabili col valore di h , allora il fenomeno osservato non può più essere trattato con le leggi della fisica classica.

I **radicali liberi** sono atomi o molecole che hanno un elettrone «spaiato». La tendenza di atomi o molecole di una specie a legarsi con quelli di un'altra specie dipende dalla *configurazione elettronica*; quest'ultima può essere modellizzata come uno o più "strati" – dipende dal numero di elettroni intorno al nucleo (numero atomico). Uno strato è detto anche «orbitale» (o *shell*). I **radicali liberi** sono *chimicamente altamente reattivi nei confronti delle altre sostanze*, o con loro stessi, *perché in un orbitale esterno c'è un solo elettrone* («unpaired»), *mentre il principio di esclusione di Pauli consente la presenza di due elettroni* (l'elettrone è una particella di spin $\frac{1}{2}$), e perciò c'è posto per un altro elettrone: il posto libero può essere occupato dall'elettrone di un'altra specie chimica, che si lega in questo modo al radicale libero.

I radicali liberi sono anche alla base di una teoria dell'invecchiamento (Free Radicals Theory of Aging), proposta negli anni '50, che identifica la causa dell'invecchiamento con i danni operati dai radicali liberi, cumulati a livello cellulare nel corso del tempo.

Sarebbe un modo di vedere semplicistico e scorretto. Si può procedere, secondo i passi e i ragionamenti che verranno qui abbozzati, ricorrendo a uno dei processi fondamentali per tutti gli esseri viventi, e in particolare per i mammiferi: la **metilazione del DNA**, cioè *l'aggiunta di un metile (CH_3) a una delle basi azotate del DNA – adenina (A), timina (T), citosina (C), guanina (G).*

La metilazione del DNA, essenziale per un normale sviluppo, è associata ad alcuni processi chiave quali l'imprinting genomico, l'inattivazione del cromosoma X, la soppressione delle ripetizioni, *ma anche con la carcinogenesi. La metilazione del DNA può modificare stabilmente l'espressione dei geni* nella cellula quando questa si differenzia da quella embrionica staminale; il cambiamento risultante è, normalmente, permanente e unidirezionale in modo da prevenire un ritorno alla cellula staminale o la conversione in un'altra cellula differente.

Tutte queste funzioni, secondo il punto di vista scientificamente più condiviso, collegano la metilazione del DNA con la *repressione della trascrizione*. In particolare, la *metilazione di un «promotore» a monte del gene potrebbe causare la soppressione del gene che dovrebbe essere trascritto*.

Se il gene cancellato è un onco-soppressore, ecco l'inizio di una possibile oncogenesi, alla cui base potrebbe esserci il trasferimento d'energia del nostro *h_v*.

È opportuno osservare che *la metilazione del DNA produce una modificazione epigenetica*, cioè una modificazione *ereditaria che altera l'espressione del gene* – un processo, questo, attraverso il quale l'informazione genetica viene convertita in proteina – *senza cambiare la sequenza del DNA*.

Il **DNA** (*Deoxyribonucleic acid*), un acido nucleico, è una *macromolecola che incorpora le istruzioni genetiche necessarie alla crescita, allo sviluppo, al funzionamento e alla riproduzione di tutti gli organismi viventi noti, inclusi anche molti virus*. Le molecole di DNA consistono, in generale, di due filamenti separati, ma avvolti a spirale l'uno con l'altro a formare una *doppia elica*. I due filamenti sono composti da **nucleotidi**, ognuno dei quali è una delle basi sopra menzionate legata a uno zucchero (deoxyribose) e a un gruppo fosfato. I nucleotidi sono congiunti l'uno all'altro in una catena tra lo zucchero di uno con il gruppo fosfato del successivo: un'alternanza che dà luogo a una *«colonna vertebrale» zucchero-fosfato (Phosphate-deoxyribose backbone)*, vedi Fig. 11a. *Le basi azotate dei due filamenti separati sono tra loro legate secondo precise regole di accoppiamento: A con T, C con G*, vedi Fig. 11b.

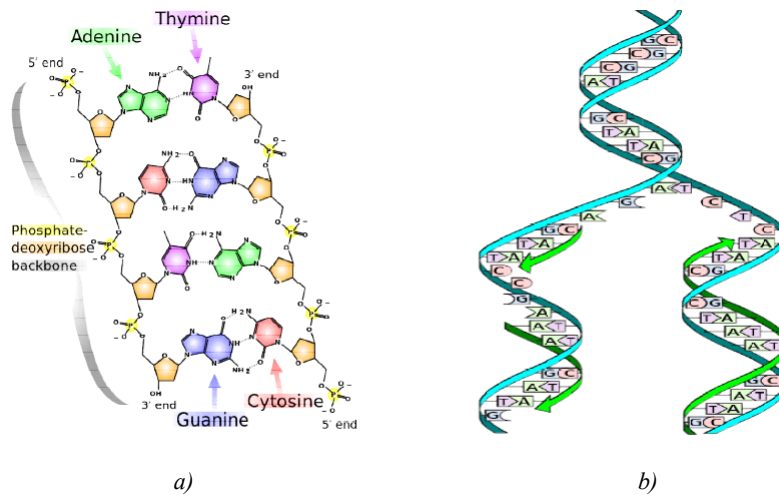


Fig. 11a - Fonte: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1848174>; b - Fonte: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2497221>

Un'immagine semplice ma efficace di una porzione della doppia elica può essere, rettificandola tratto per tratto, quella di una scala a pioli dove i due lati sono i due filamenti e ogni piolo è il legame tra una coppia AT o CG (vedi tratti lineari di Fig. 11b). Gli organismi *eucariotici* (animali, piante, funghi e protisti) **immagazzinano la maggior parte del loro DNA all'interno del nucleo della cellula** e un po' anche nei suoi organelli, quali i mitocondri o i cloroplasti (piante), mentre i *procarioti*, gli organismi evolutivamente più antichi (*batteri e archaea*), lo conservano solo nel citoplasma.

Un **gene** è un pezzo di DNA – fatto da migliaia di coppie di basi, fino a un milione – *in grado di trasmettere i tratti biologici, funziona cioè come unità molecolare di «ereditarietà»*: infatti i geni vengono copiati, tramite il processo chiamato *replicazione del DNA* (vedi in seguito **trascrizione**), ogni volta che una cellula si divide in due nuove cellule; ed è attraverso la replicazione che la cellula figlia eredita i geni dai suoi genitori, quando una copia proveniente dal padre si meschia con una copia proveniente dalla madre. La trasmissione di geni da un organismo alla sua prole è alla base dell'ereditarietà dei tratti *fenotipici*: in un organismo il *fenotipo* è costituito dai suoi tratti visibili, mentre il *genotipo* è il suo materiale genetico.

Un ruolo fondamentale nella riproduzione cellulare è svolto dai **cromosomi**, strutture compatte nelle quali sono organizzati i geni, fino a migliaia come nel caso umano (e da 50 a 300 milioni di coppie di basi). Nel nucleo di una cellula eucariota sono contenute **23 coppie di cromosomi**, cioè 46

cromosomi: *rappresentano la quasi totalità del DNA di una cellula* in quanto una piccola parte del DNA può essere immagazzinata, come si è già detto, nei mitocondri. Questo vale per le *cellule somatiche*, quelle cioè che in un organismo multicellulare formano il corpo (*soma*, in greco) di quell'organismo, mentre le *cellule germinali* – i gameti, uovo (femmina) e sperma (maschio) – addette alla riproduzione e le cellule staminali hanno un corredo costituito dalla metà di cromosomi, cioè 23. L'insieme completo del DNA presente in una cellula, nucleo più mitocondri (e cloroplasti per le piante), è detto *genoma* e ha un'enorme variabilità a seconda degli organismi; infatti il numero di coppie di nucleotidi del DNA contenute in una cellula somatica va dalle 600.000 di un batterio ai sei miliardi e mezzo per i topi e gli uomini.

Il gene ha il compito di produrre le proteine per il mantenimento e la riproduzione della cellula: il gene dà istruzioni e le proteine le realizzano, che si tratti di riparare un danno o di costruire una copia della cellula stessa quando la cellula si divide. Le proteine sono molecole di ammino-acidi, una ventina di tipi, ognuna specializzata in un solo compito; il gene controlla il tipo, la quantità e la velocità di utilizzo delle proteine necessarie al funzionamento della cellula. Il processo attraverso il quale l'informazione del gene è usata per sintetizzare un prodotto funzionale del gene, quale è una proteina, è detto espressione del gene.

La *trascrizione* è il primo passo dell'espressione del gene; in essa un particolare segmento del DNA è copiato nel RNA (soprattutto nel mRNA) dall'enzima RNA polimerasi. Anche l'RNA è un acido nucleico, che usa le coppie di basi dei nucleotidi come linguaggio complementare: durante la trascrizione una sequenza del DNA viene letta dall'enzima RNA polimerasi, che produce un filamento di RNA, complementare e antiparallelo o del DNA, che viene detto trascritto primario.

Nella *metilazione del DNA* l'aggiunta di un metile (CH₃) a una delle quattro basi del DNA è realizzata da un enzima specifico, una DNA metiltransferasi. *Nelle cellule eucariotiche viene metilata quasi esclusivamente la citosina collocata in un sito CpG*; quest'ultimo è una sequenza lineare: citosina – gruppo fosfato – guanina. La metilazione avviene con maggior probabilità nelle cosiddette «*isole CpG*», cioè i luoghi dove i siti CpG sono particolarmente densi e vanno dalle centinaia di coppie di basi a circa 3000. Le isole CpG sono collocate normalmente *all'inizio del processo di trascrizione di un gene*, cioè vicino a quelle sequenze del DNA cui ci si riferisce come *promotori* della trascrizione. In molti processi patologici, come il cancro, il promotore acquisisce una *ipermetilazione*, che può provocare provoca il silenziamento di un gene.

Vediamo in che consiste l'*ipermetilazione* e come lavora.

Nei mammiferi la forma dominante di metilazione è quella di citosina in 5-metilcitosina, una macromolecola più instabile e che ha maggiori difficoltà della citosina a espellere un gruppo amminico (deaminazione). Nella *deaminazione spontanea* della citosina si forma, a seguito della deaminazione, l'uracile, riconosciuto come "oggetto estraneo" dall'enzima di controllo, la glicosilasi, che si occupa di rimpiazzarlo di nuovo con la citosina. Nella deaminazione della 5-metilcitosina si forma invece una base, la timina, e la mancata corrispondenza viene riconosciuta con maggior difficoltà e non per tutte le molecole in quanto la timina è «una di famiglia»; perciò rimane nel sito CpG un certo livello, maggiore, di 5-metilcitosina, una **ipermetilazione**. *I geni che nella regione promotrice hanno un più alto livello di 5-metilcitosina vengono trascritti come fossero silenziati.* Il silenziamento nella trascrizione di un gene onco-soppressore può essere importante nella progressione del cancro perché la DNA metiltransferasi tende a conservare questo modello di metilazione a ogni replicazione; se l'errore non viene riparato, *viene inserito nei processi del DNA una mutazione che non può più essere cancellata.*

In conclusione, come avevamo anticipato, la **metilazione del DNA altera l'espressione dei geni senza alterare la sottostante sequenza del DNA: è una modifica epigenetica.**

Un fotone da 3 GHz, una *frequenza delle microonde*, trasporta un'energia *circa cento volte più grande* di quella associata alle vibrazioni di un cromosoma umano, il quale è tuttavia in grado di controllare il processo di *mitosi* della cellula. In un'interazione fotone/cromosoma questa grande differenza d'energia può portare a due risultati completamente diversi: l'energia vibrazionale del cromosoma è distrutta dal fotone o, più probabilmente, il fotone «passa sopra», cioè non «vede» il cromosoma e viene assorbito da altre componenti biologiche; quindi, il cromosoma non percepisce l'energia elettromagnetica del fotone.

Si, ma che dire quando, scendendo di un fattore cento fino a una *radiofrequenza* di 30 MHz, il fotone ha lo stesso livello d'energia che compete alle vibrazioni del cromosoma? Una tentazione è quella di descrivere l'interazione in termini di **risonanza**; lo vedremo dopo, quando parleremo di *modelli di interazione*.

5.2 Campi elettromagnetici incidenti, campi elettromagnetici interni

Quando la materia biologica è sottoposta a *campi elettrici o magnetici esterni*, una parte di essi viene trasmessa al suo interno: sono i *campi interni*, quelli che a fine del terzo capitolo abbiamo indicato con \mathbf{E}_{in} e \mathbf{H}_{in} . Sotto l'azione di \mathbf{E}_{in} i dipoli elettrici permanenti eventualmente presenti nel sistema biologico tendono ad allinearsi secondo la direzione e il verso del campo elettrico; atomi e molecole neutre possono essere distorti nella loro configurazione in quanto il campo provoca l'addensarsi di cariche di un segno in una loro parte, e il difetto di cariche di quel segno nella regione abbandonata è "visto" dal campo come una carica di segno opposto. Infine, le cariche libere di muoversi possono accumularsi sulle due pareti di un "ostacolo" (membrane, barriere di potenziale ecc.) formando due zone, spazialmente separate, di cariche di segno opposto (carica spaziale).

L'insieme di questi fenomeni indotti da \mathbf{E}_{in} è detto **polarizzazione**; i dipoli elettrici generati dal campo sono chiamati **dipoli indotti**, che scompaiono in assenza del campo esterno.

I parametri che si usano per caratterizzare le *proprietà elettromagnetiche* dei sistemi biologici sono definiti nello stesso modo che per i materiali inorganici: **conducibilità** (σ), è l'inverso della resistività e dipende dalla densità di cariche libere presenti nel sistema biologico, maggiore è la conducibilità minore è la resistenza opposta al moto delle cariche; **permittività relativa** (ϵ_r), è un numero che quantifica la proprietà di essere polarizzate, cioè orientate da un campo elettrico, delle distribuzioni di carica (dipoli) localizzate nelle strutture biologiche e **permeabilità magnetica** (μ_r), che è il grado di magnetizzazione osservabile in un sistema biologico sottoposto all'azione di un campo magnetico.

I parametri σ , ϵ_r dipendono dalla frequenza dei campi interni indotti dal campo incidente.

Questi parametri possono essere definiti anche per la cellula e per la membrana, che, pur appartenendo al mondo microscopico (letteralmente, se si pensa allo strumento per poterle vedere), sono però costituite da un numero di molecole così elevato da poter eseguire per esse le medie statistiche che definiscono i valori dei parametri.

L'unità di misura della conducibilità è il Siemens/metro (S/m), dove S è l'inverso di Ω , $S = \Omega^{-1}$; per questo per S si usa spesso anche la vecchia notazione (mho). Ricordiamo che la costante ϵ_r è un numero puro, il cui prodotto con la costante dielettrica del vuoto ϵ_0 è la costante dielettrica del materiale: $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$. La permeabilità magnetica μ è il prodotto della permeabilità magnetica nel vuoto μ_0 per la permeabilità magnetica relativa

μ_r , un numero puro, costante tranne che per i materiali ferromagnetici: $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$. Nel vuoto, e nell'aria, $\varepsilon_r = \mu_r = 1$.

Il campo H_{in} ha effetti diretti solo per il materiale biologico che contiene elementi ferromagnetici, come ad es. la magnetite che orienta gli uccelli in volo.

Sotto l'azione di E_{in} gli elettroni e gli ioni liberi di muoversi generano correnti rilevabili sia a livello macroscopico, **corrente di conduzione** e **corrente di polarizzazione**, che a livello microscopico, le **microcorrenti di conduzione**.

Per studiare l'interazione tra campi elettromagnetici e sistemi biologici è fondamentale correlare al **campo esterno incidente** (o applicato o imperturbato) il **campo interno**, le correnti e l'energia dissipata nel sistema biologico.

Il campo incidente è il campo misurato nel volume di interesse in assenza del corpo (corpo umano, distretto corporeo, tessuto, cellula).

Il campo interno è quello calcolato all'interno del corpo che occupa il volume di interesse; è la somma di quanto del campo incidente viene trasmesso all'interno del corpo e del campo dovuto all'insieme delle correnti e alla redistribuzione di cariche elettriche prodotte dal campo incidente sulla superficie del corpo e al suo interno.

Le leggi fondamentali che legano tali grandezze (campo esterno, campo interno, correnti ed energia dissipata), ovvero che definiscono le caratteristiche fisiche ed il comportamento dei campi elettromagnetici nei mezzi materiali, anche in quelli biologici, sono completamente contenute nelle equazioni di Maxwell, che, lo ripetiamo, costituiscono la *teoria classica dell'elettromagnetismo*. Note le caratteristiche della sorgente del campo, dell'esposizione e i valori dei parametri elettromagnetici degli organismi cellulari o dei tessuti, le leggi dell'elettromagnetismo, permettono *in linea di principio* di descrivere il meccanismo biofisico dell'interazione.

La determinazione dei parametri elettromagnetici del materiale biologico avviene attraverso misure dirette o stime sui valori che essi possono assumere sulla base di modelli che li rappresentano. Spesso, nella descrizione di modello i sistemi viventi sono considerati, in prima approssimazione, come principalmente costituiti da acqua – essa rappresenta gran parte della materia vivente, circa i due terzi per l'uomo – con disciolte in essa sostanze che la rendono conduttiva. Il problema consiste poi nel determinare quali modificazioni dei parametri elettromagnetici subiscano le strutture biologiche investite dai campi.

Per poter accertare se ci sono possibili effetti dannosi per la salute umana dovuti all'esposizione ai campi elettromagnetici occorre dunque:

- *calcolare* accuratamente il campo elettromagnetico generato dalla sorgente *in assenza dell'oggetto biologico esposto*: il **campo esterno incidente**;
- assumere come **forma geometrica** per il corpo umano o il distretto corporeo (testa, arti ecc.) esposti al campo incidente quella il più possibile *realistica*;
- *correlare* il campo incidente con i **campi** e le **correnti indotte** nell'oggetto biologico, in particolare il corpo umano: **campi e correnti interni**;
- *confrontare* i campi interni, *indotti dalla radiazione incidente*, con i risultati degli studi in laboratorio, negli esperimenti con i tessuti biologici.

In realtà la determinazione di E_{in} e H_{in} non è quasi mai semplice, ancor meno se la si voglia conseguire come soluzione analitica delle equazioni di Maxwell con le corrette “condizioni al contorno”, cioè dei valori assegnati sulla superficie che separa il campo incidente da quello interno (vedi più avanti 5.6). *Il calcolo corretto, o una stima ben fatta, sono alla base di una valutazione attendibile degli effetti biologici e sanitari della radiazione incidente.*

Nel caso di *campo vicino* è difficile anche il calcolo dei *campi esterni incidenti* (vedi 5.5 e 5.6); la quantità più facilmente determinabile, se sono accessibili i dati, è **la potenza emessa dalla sorgente**, almeno in tutti i casi in cui la sorgente possa essere pensata come un'**antenna** percorsa da cariche elettriche che oscillano con una data **frequenza ν** .

Il modello “antenna” si applica a casi assai più estesi e diversi da quelli della teoria delle telecomunicazioni, nella quale riveste ovviamente un ruolo fondamentale. Ad esempio, *si comportano come antenne emittenti proprio un'ampia gamma di oggetti biologici*, in particolare i componenti cellulari dalle proteine di membrana alla membrana stessa, dai mitocondri a microtubuli. Queste emissioni sono una modalità di genesi dei cosiddetti **campi endogeni**, diventati oggetto di modelli e misure solo in tempi assai recenti.

La potenza P emessa da un'“antenna” è data dalla formula di Larmor:

$$P = p (q^2 a^2)/c^3$$

dove q è la carica elettrica oscillante nell'antenna, a l'accelerazione della carica, c la velocità della luce e p è un numero legato a ϵ_0 . La dipendenza dalla frequenza di oscillazione ν sta nell'espressione dell'accelerazione a , che è quella dell'oscillatore armonico.

Sir Joseph Larmor, vissuto a cavallo fra il 19esimo e il 20esimo secolo è stato un fisico-matematico inglese che ha introdotto nuovi punti di vista nella comprensione dei fenomeni elettrici, termodinamici e ha anticipato quelle che poi sono state chiamate trasformazioni di Lorentz (Relatività ristretta).

Se consideriamo la *testa* di un essere umano occorre trovare quella soluzione delle equazioni di Maxwell che sia in grado soddisfare le “condizioni al contorno”; e queste, come suggerisce la parola, dipendono dalla forma che ha il «contorno», cioè la superficie di separazione all’interfaccia aria-testa (Fig. 12).

La *soluzione*, cioè il valore dei campi nell’ambiente esterno, in generale l’aria, e in quello interno, dentro la testa, *dipende quindi dal modello geometrico scelto per rappresentare il cranio*.

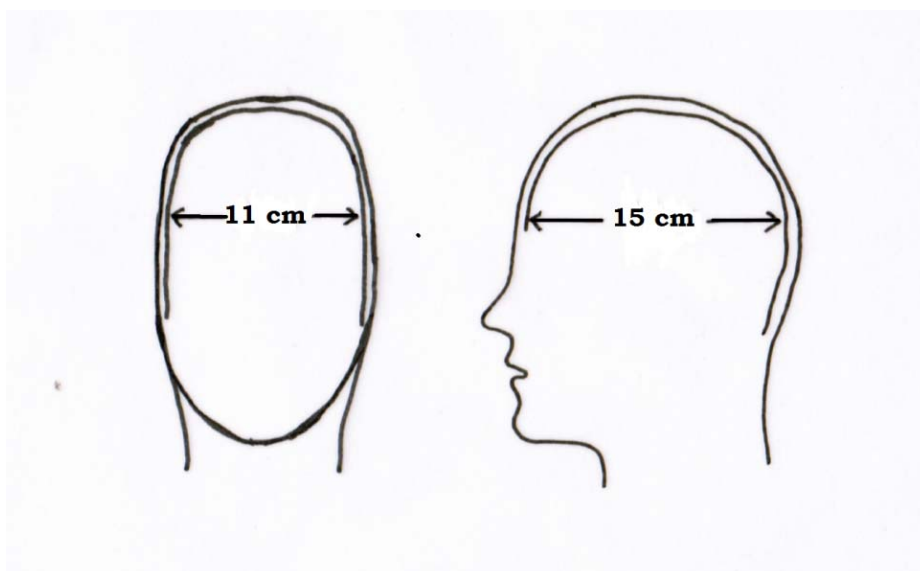


Fig. 12 - Rappresentazione schematica della testa umana

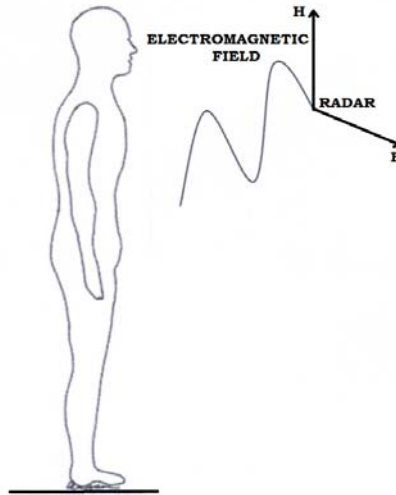


Fig. 13 - Un'importante sorgente artificiale di campi elettromagnetici, all'interno della regione delle microonde, è il radar (acronimo di radio detecting and ranging, ovvero «apparecchio radio che scopre e localizza»), impiegato per la prima volta nella Seconda Guerra Mondiale. Solamente alla fine degli anni '40, dopo i primi rapporti su cataratte in animali e tecnici esposti a livelli relativamente bassi di microonde, si discusse al riguardo della sicurezza dei soggetti esposti. (Tratto da [1b])

Poiché la forma del capo non permette di scrivere analiticamente in modo semplice le condizioni al contorno, essa va semplificata secondo il criterio dato sopra al terzo punto. Lo stesso discorso vale nello studio dell'interazione della radiazione elettromagnetica con il corpo umano (Fig. 13).

5.3 Il limite di esposizione di 10 mW/cm^2 per le microonde. Una breve storia

La storia dei modelli, degli standard di sicurezza adottati sulla base dei modelli e delle stime da essi desunte per i limiti d'esposizione è corposamente intrecciata con l'evoluzione tecnologica da un lato e, dall'altro, con gli interessi dei produttori e degli utilizzatori dei dispositivi che generano campi elettromagnetici. La vicenda di questi limiti nel caso del *radar*, acronimo di *radio detecting and ranging* («apparecchio radio che scopre e localizza»), ne è un'esemplificazione significativa fin dagli albori della sua introduzione, come riporteremo sinteticamente qui di seguito, rimandando più avanti a una specifica voce per la descrizione di alcune caratteristiche tecniche del suo funzionamento.

Fin dalle prime battute di questa storia campeggia la figura del biofisico tedesco **Herman P. Schwan** (1915-2005), «importato» dagli Stati Uniti nell'immediato Dopoguerra e riconosciuto poi come il «padre dell'ingegneria biomedica», *che propose nel 1953 il primo limite d'esposizione per radiofrequenze e microonde.*

L'uso del radar era stato determinante in molte situazioni nella 2^a guerra mondiale e la sua diffusione era arrivata a tal punto che già nel 1946 veniva stimato che nei soli Stati Uniti fossero presenti 1.200.000 radar e apparati a microonde.

Erano state anche registrate negli operatori addetti patologie specifiche connesse all'esposizione alle microonde – cataratte, danneggiamento ai testicoli – e alcune indagini erano state condotte durante la guerra, nel 1942 e nel 1945, dai laboratori della Marina e dell'Aeronautica americane. Queste ricerche, insieme ad un'altra finanziata nel 1946 da un servizio tecnico sempre dell'Aeronautica USA ed eseguita su delle cavie, concludevano sulla sostanziale non nocività dell'esposizione alle microonde. Nonostante i limiti e le carenze di quelle ricerche, e nonostante le argomentate critiche avanzate già nei primi anni '50 ai metodi seguiti e ai risultati ottenuti, quegli studi hanno avuto una vita lunga e sono stati più volte riesumati come evidenza scientifica di assenza di effetti biologici associati all'esposizione alle microonde.

Per i medici poi continuava a valere la posizione dell'*American Medical Association* (AMA) del 1935, secondo cui l'unico effetto dei campi elettromagnetici era quello termico e l'applicazione terapeutica del calore (radarterapia), se ben dosata, era un ottimo mezzo terapeutico. In una lettera inviata nel 1952, in cui si chiedeva se la cataratta diagnosticata ad un radioriparatore potesse essere stata causata dall'esposizione alle microonde, l'AMA rispondeva in modo categorico «... *Le onde radar sono completamente assorbite dalla cornea e non sono state segnalate come causa della cataratta...*» («Journal of AMA», p. 528, 1952).

Ciò nonostante, le preoccupazioni dei comandi militari americani per il personale esposto avevano dato vita a due conferenze, una promossa dall'Aeronautica e l'altra dalla Marina, svoltesi a due giorni di distanza a fine aprile del 1953. Nella conferenza della Marina furono delineate delle vere e proprie linee guide e si discusse dei limiti d'esposizione; la proposta di Kenneth S. Cole, uno dei massimi esperti del settore e all'epoca direttore del *Naval Medical Research Institute*, fu di fissare per l'intensità della radiazione incidente una soglia di $0,1 \text{ W/cm}^2$ ($E_{\text{eff}} = 614,003 \text{ V/m}$). Tale valore teneva conto anche di un fattore di sicurezza, pari alla riduzione per un fattore 10 di 1 W/cm^2 , che veniva ritenuta la massima potenza dissipabile prima dell'alterazione delle normali funzioni corporee. Quel limite rappre-

sentava una prima ragionevole approssimazione per tracciare una linea di confine tra esposizione sicura, o dannosa, alle microonde: questa linea guida *informale* fu adottata, nonostante alcuni dissensi tra i presenti.

Alla conferenza della Marina aveva partecipato anche Herman P. Schwan, il quale, in una comunicazione interna inviata al *Office of Naval Research*, osservava che, secondo le sue stime, $0,1 \text{ W/cm}^2$ rappresentava una potenza “termica” venti volte superiore a quella che il corpo umano è in grado di dissipare in condizioni fisiologiche normali; e quindi, non sembrandogli adeguato quel livello di sicurezza, suggeriva un limite di $0,01 \text{ W/cm}^2$, pari a 10 mW/cm^2 .

Il valore di soglia di $0,1 \text{ W/cm}^2$ fu rapidamente abbandonato e sostituito in tutte le comunicazioni ufficiali delle autorità militari con quello di **10 mW/cm^2** , per l’intervallo di frequenza tra 10 MHz e 300 GHz, come *limite di sicurezza occupazionale*.

Esistevano però altri attori preoccupati degli effetti sanitari e delle conseguenti cause di lavoro che il personale addetto avrebbe potuto intentare: le grandi compagnie produttrici e utilizzatrici di apparati ad alte frequenze e microonde, che, come *Bell Telephone Laboratories* e *General Electric*, erano anche legate da contratti con il complesso militare. Poiché uno studio della *Sandia Corporation* aveva evidenziato la comparsa di opacità lenticolari (cataratte) in un tecnico di laboratorio cronicamente esposto ad una radiazione a microonde di intensità $S = 100 \text{ mW/cm}^2$, i ricercatori della *General Electric Company* deliberarono, il 1 giugno 1954, che per essere sicuri di evitare effetti sanitari era necessario adottare **un fattore di sicurezza 100**; e pertanto fissarono il limite per l’esposizione a 1 mW/cm^2 ($E_{\text{eff}} = 61,4 \text{ V/m}$). Il *Central Safety Committee* della *Bell Telephone Laboratories* adottò uno standard ancora più cautelativo, stabilendo un valore di $0,1 \text{ mW/cm}^2$ ($E_{\text{eff}} = 19,416 \text{ V/m}$), basato su **un fattore di sicurezza pari a 1.000**. La discussione si svolgeva insomma sul fattore di sicurezza da adottare per evitare danni sanitari.

Il contrasto tra il limite fissato dai militari e quelli più restrittivi proposti dalle industrie venne superato a favore di un maggior lassismo. Le pressioni esercitate dai militari trovarono terreno fertile nella constatazione che alla *General Electric*, nelle prove di sistemi radar con potenze dell’ordine del megawatt, il valore di 1 mW/cm^2 diveniva difficile da mantenere e in alcuni casi durante la fase di collaudo si dovevano evacuare interi reparti, con conseguente rallentamento dei tempi di produzione ed aumento dei costi.

A seguito dell’azione del colonnello George M. Knauf, un medico responsabile per l’Aeronautica del programma di ricerca *Tri-Service*, si affermò la filosofia che si poteva pur togliere qualcosa alla sicurezza purché non si arrivasse al danno.

Insomma, **il limite d'esposizione di 10 mW/cm²**, proposto nel '53 da Herman P. Schwan come più restrittivo di quello adottato in un primo momento dai militari, divenne **un punto di compromesso** con la grande industria del settore elettronico; e quest'ultima era ben consapevole che quel limite non avrebbe potuto garantire da possibili effetti non termici e cumulativi. «... *If and when it has been proved that some important part of that energy is absorbed by susceptible tissues in the form of nonthermal energy having a cumulative effect...*», dichiarava Benjamin Vosburgh, responsabile degli standard per la *General Electric*, alla II^a Conferenza del *Tri-Service Program* del 1958.

Da parte loro, anche i militari avevano riscontrato evidenze di effetti sul tessuto dei testicoli per un'esposizione a una radiazione incidente inferiore ai 10 mW/cm² (per una durata superiore agli 8 minuti), come veniva illustrato in un diagramma di sintesi prodotto nel 1955 dalla *School of Aviation Medicine, U.S.A.F* (vedi N.H. Stenek, *The microwave debate*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, p.54,1984); tali effetti vennero però giudicati trascurabili.

D'altro canto, lo stesso Schwan aveva confermato, in un più approfondito studio sui meccanismi di assorbimento dell'energia elettromagnetica da parte dei vari tessuti biologici in un ampio intervallo di alte frequenze (da 150 a 10.000 MHz), il valore dei 10 milliwatts/cm² come una quantità tollerabile («*tolerance dosage*») che non doveva essere superata nell'ipotesi di un irraggiamento a tutto il corpo («*total body irradiation*»), fissando inoltre *un'ora come durata massima dell'esposizione in queste condizioni* [2a].

Si era in definitiva affermato il punto di vista della preminenza totale degli effetti acuti, quelli cioè che possono sparire rimuovendo l'irradiazione.

Si consolidò quindi, alla fine degli anni '50, un postulato, che attualmente gode ancora di vasto credito nell'ambiente scientifico, secondo cui l'unica influenza biologica dell'energia elettromagnetica su un organismo vivente avviene mediante il sovraccarico del suo sistema di termoregolazione. Il riscaldamento del corpo umano entro certi limiti non veniva considerato di per sé dannoso, l'importante era la compatibilità con il sistema di termoregolazione del corpo e delle sue parti, e quindi il mantenersi parecchio al di sotto dei 100 mW/cm² per evitare le cataratte.

Queste prime linee guida consacrarono i 10 mW/cm² come baluardo della protezione sanitaria per gli addetti ai lavori; e **nonostante non contemplassero assolutamente la protezione della popolazione esposta**, divennero anche il limite nel primo standard pubblicato dall'*American National Standards Institute* (ANSI) nel 1966, che venne poi aggiornato, a

cadenza quinquennale, ma senza sostanziali modifiche dal successivo del 1970.

A un'intensità di radiazione del campo esterno di 10 mW/cm^2 , pari a 100 W/m^2 , corrisponde un campo elettrico esterno di intensità massima $E = 194,165 \text{ V/m}$ e $E_{\text{eff}} = 163,260 \text{ V/m}$.

Quel limite resta ancora in vigore nello standard IEEE C95.1 (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) del 2005, seppure nella banda di frequenza superiore ai 2 GHz e in aree controllate; *al disotto di 1 GHz esso viene ridotto di un fattore 10 per le aree controllate e di un fattore 50 per i gruppi critici.*

5.4 Il modello di Kritikos-Schwan

Dopo gli studi pionieristici che Schwan e i suoi collaboratori avevano svolto negli anni '50 sulle proprietà elettriche dei tessuti e del corpo esposti ad *alte frequenze fino a quelle radar*, e sul loro riscaldamento [2b, 2c, 2d], Haralambos Kritikos e Schwan stesero un articolo sulle implicazioni biologiche dell'esposizione alle onde elettromagnetiche [3], che proponeva a tal fine un modello semplificato e recuperava alcuni risultati pubblicati l'anno prima da Schwan [2e].

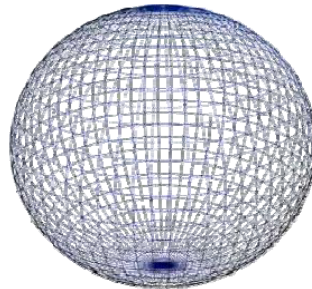


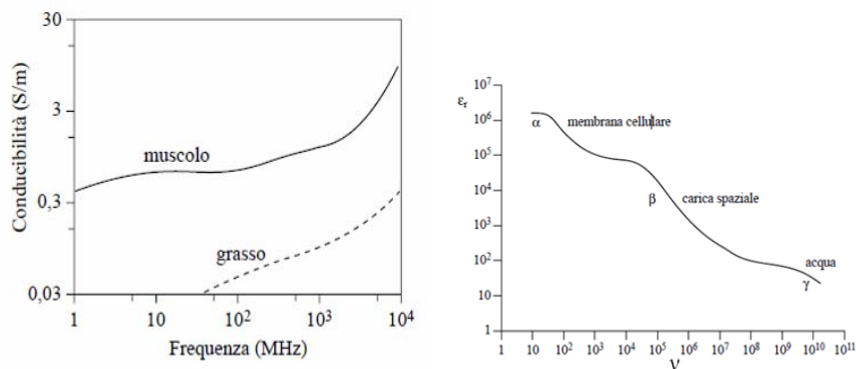
Fig. 14 - Nel modello di Kritikos e Schwan la testa è complessivamente una sfera, $r = 10 \text{ cm}$., e il materiale biologico è considerato, in prima approssimazione, come costituito fondamentalmente da acqua con disciolte sostanze (elettroliti) che la rendono conduttiva, in modo da riprodurre le proprietà elettriche del tessuto cerebrale.

Siamo nel 1972 e nel loro lavoro l'intenzione dichiarata è quella di affrontare lo studio del riscaldamento dei tessuti dovuto all'irraggiamento elettromagnetico in virtù dell'importanza crescente che il problema ha «... *in assessing potential electromagnetic health hazards...*» [3]. Lo studio è mirato a valutare quel che succede nel capo di un uomo esposto ad alte frequenze, nell'intervallo tra 250 e 2800 MHz.

Nel modello *la testa di un adulto* è rappresentata come una sfera conduttrice e isolata di raggio $r = 10$ cm. (vedi Fig. 14), riempita di liquidi la cui miscela ne riproduce le proprietà elettriche, e *immersa in un'onda elettromagnetica piana* (vedi Fig. 10) [3]. Questa approssimazione è applicabile solo quando ricorrono le condizioni di *campo lontano*, e per forme geometriche tali che il loro raggio di curvatura sia maggiore della lunghezza d'onda. Nel caso del modello, per le microonde al di sopra del GHz (vedi Tab. 1).

Se si guarda alla variazione del campo E_{in} in funzione del tempo, essa si traduce nell'oscillazione delle cariche libere e dei dipoli.

I parametri σ , ϵ_r si è già detto che dipendono dalla frequenza del campo interno che penetra nel sistema biologico: *la conducibilità σ cresce con la frequenza del campo interno*, mentre *la costante dielettrica relativa ϵ_r , che è maggiore per i tessuti e gli organi con elevato contenuto di acqua, diminuisce al crescere della frequenza del campo interno*. Dei comportamenti tipo sono illustrati nelle figure qui sotto.



La conducibilità e la costante dielettrica dei tessuti cancerosi sono maggiori di quelle dei tessuti normali. La *permeabilità magnetica* nei sistemi viventi è uguale alla permeabilità magnetica nel vuoto μ_0 , tranne che per alcune strutture biologiche contenenti magnetite (elemento sensoriale necessario per l'orientamento e la navigazione di alcuni animali).

La *profondità di penetrazione* dell'onda elettromagnetica dipende dalla conducibilità σ e dalla costante dielettrica ϵ_r del tessuto.

L'attenzione di Kritikos e Schwan è focalizzata sul *potenziale di riscaldamento*. Secondo studi precedenti, infatti, gli effetti non termici nel corpo umano possono presentarsi solo a livelli d'intensità dei campi incidenti che costituiscano un rischio di danni termici; mentre, al disotto di questa soglia

«... *It is not possible to directly stimulate nerve membranes by microwaves fields...*» [2e].

Secondo le stime del loro modello ***non si hanno punti caldi (hot spot) all'interno della sfera***: per le frequenze fino a 1000 MHz (1 GHz) vi è infatti all'interno un riscaldamento sostanzialmente uniforme, e quello massimo ha luogo sempre sulla superficie; anche per frequenze maggiori di 1 GHz non vi sono picchi di riscaldamento all'interno ma solo sulla superficie della sfera, cioè sulla cute.

Gli *hot spot* si presentano invece ***all'interno della sfera*** in tutta la regione $250 \text{ MHz} < \nu < 2800 \text{ MHz}$ quando si assumono *valori della conducibilità diversi da quelli dei tessuti biologici o quando si riduce il raggio della sfera*. Infatti, mantenendo $r = 10 \text{ cm}$ ma assumendo $\sigma = 1 \text{ S/m}$, per $\nu > 1000 \text{ MHz}$ un intenso *hot spot* si presenta all'interno della sfera, *al contrario che nel caso precedente*; ripristinando il valore di σ ma per $r = 5 \text{ cm}$, la testa di un bambino o di un animale di piccola taglia, le stime del modello comportano la presenza di *hot spot all'interno della sfera* anche nella banda $250 \text{ MHz} < \nu < 1000 \text{ MHz}$, dove per $r = 10 \text{ cm}$ non c'erano. In questo caso, in corrispondenza alla frequenza $\nu = 900 \text{ MHz}$ il picco della densità di potenza *all'interno della sfera* ha il valore di $0,143 \mu\text{W}/\text{cm}^3$, da confrontare col valore $0,026 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ che si ha nel caso della sfera $r = 10 \text{ cm}$, a parità di potenza del campo esterno incidente [3].

La conclusione cui gli autori pervengono è che è un bene che la conducibilità dei tessuti sia sufficientemente elevata dal prevenire *hot spot* nelle sfere di raggio grande e, verosimilmente, nella testa dell'uomo. Il fatto che i picchi si possono invece presentare per animali di piccola taglia indica che i risultati sperimentali condotti sugli animali per valutare i rischi biologici delle microonde non necessariamente si applicano all'uomo¹.

Queste conclusioni erano decisamente ottimistiche: le approssimazioni del modello affidavano un ruolo troppo forte alla conducibilità, mentre sottovalutavano di molto le correzioni che si sarebbero dovute apportare quando lo schema di onda piana non fosse stato più valido e quando si fosse adottato un modello più aderente alla situazione reale, sia per la forma geometrica che per le condizioni da porre al contorno.

Un altro aspetto insoddisfacente era l'adozione di *modello a strato singolo* – la superficie della sfera che coincide con la cute, lo strato grasso e l'osso della scatola cranica – quando lo stesso Schwan aveva condotto in

¹ It appears fortunate that the conductivity of tissues is large enough to prevent hot spots in large spheres and probably in the head of the man. However, hot spots may occur in animal of smaller size. Thus experimental results obtained with animals and conducted to learn about the biological hazards of microwaves do not necessarily pertain to man. [3]

precedenza una significativa analisi dei livelli d'assorbimento del campo, diversi a seconda del materiale biologico attraversato [2a].

Infine, l'insorgenza di *hot spot* a seguito della riduzione del diametro della sfera – il raggio di curvatura può divenire addirittura più piccolo della lunghezza d'onda del campo incidente e l'ipotesi di onda piana comporta cospicui errori nelle stime – non poteva essere davvero liquidata con una battuta, visto che di bambini esposti a radiofrequenze e microonde ce ne erano allora e ce ne sarebbero stati sempre di più.

Va rilevato, anche in vista dei successivi confronti, che per un'intensità del campo elettrico incidente $E_{air} = 200$ V/m, sempre di 900 MHz, la massima densità di potenza *all'interno della sfera* riportata in [3] comporta un valore del campo elettrico interno, E_{in} , di *meno di 1 V/m*, duecento volte più piccolo di quello di E_{air} ma più elevato di quelli naturali registrati in un EEG.

Il campo magnetico incidente B_{air} passando attraverso l'interfaccia diventa il campo interno B_{in} che orienta i momenti magnetici dei dipoli biologici. Questa azione, “ordinante” rispetto all'agitazione termica, dà luogo a un momento magnetico risultante, M , somma vettoriale dei momenti magnetici dei dipoli allineati da B_{in} ; e, ricordando la (1), sarà $i = (c/\mu\Sigma) M$, dove μ è la permeabilità magnetica e Σ è la sezione (assai piccola) della porzione di tessuto o della cellula attraversata da B_{in} . Da questa osservazione e dalla legge di Faraday-Neumann si può stimare, atteso il valore assai piccolo di μ per i tessuti del corpo umano e per le cellule, che le intensità di corrente dovute a B_{in} sono decisamente meno rilevanti di quelle indotte da E_{in} .

5.5 Il modello di Kuster-Balzano. Che cos'è il SAR?

Vent'anni dopo l'oggetto d'attenzione diventa il telefono cellulare – un piccolo radar a portata della testa – con l'enorme diffusione che si sta profilando, quale l'elettronica di consumo comporta per i suoi prodotti più appetibili.

Gli evidenti limiti dell'analisi di Kritikos e Schwan, peraltro non celati dagli autori, rendevano del tutto inadeguato il modello per valutare gli effetti dei cellulari; in questo caso infatti la sorgente del campo è a pochi centimetri dalla testa, e nel *campo vicino l'onda si guarda bene dal poter essere considerata piana*. Una maggior aderenza del modello alla situazione reale comportava poi di tener conto del fatto che in realtà il capo non è una sfera, in quanto è significativamente appiattito ai lati (vedi Fig. 12), ed è attaccato al corpo e non isolato.

Niels Kuster e Quirino Balzano [4], proprio al fine di studiare *l'effetto dell'uso del telefono cellulare*, assunsero per il capo la forma geometrica di un parallelepipedo, più realistica (vedi Fig. 12a), e costruirono un modello *multistrato* che distingueva una *regione esterna*, l'aria dove avviene la propagazione dell'onda generata dalla sorgente, da due *regioni interne*, una costituita dalla cute-tessuto osseo e quella ancora più interna del tessuto cerebrale: le regioni 1 e 2 di Fig. 15.

Dovendo rinunciare all'approssimazione «onda piana», il calcolo del campo imperturbato, con le corrette condizioni al contorno, si presenta matematicamente elaborato e difficile; Kuster e Balzano per meglio approssimare gli effetti di *campo vicino* calcolarono, per mezzo di un software sofisticato, il *tasso di assorbimento specifico medio, SAR (Specific Absorption Rate)*.

Il SAR si riferisce alla *potenza elettromagnetica media assorbita* dalla massa corporea e viene espresso in W/kg. È una grandezza tipica dell'*approccio dosimetrico*, in analogia con i criteri e i metodi sviluppati per lo studio delle *radiazioni ionizzanti (IR)*.

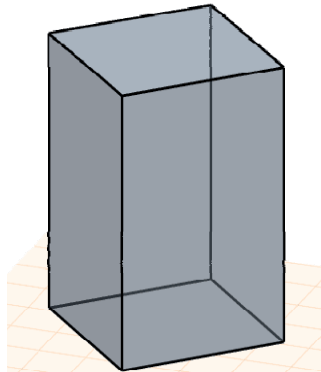


Fig. 12a - Nello studio di Kuster e Balzano il capo era assimilato ad un parallelepipedo di dimensioni 50 x 30 x 15 cm, costituito da sottili pareti di plexiglas dello spessore di 1 cm riempite con un materiale ($\sigma_1 = 0,15 \text{ S/m}$ e $\epsilon_{r1} = 5$) che simulava l'osso. All'interno del recipiente era simulato il tessuto cerebrale ($\sigma_2 = 0,75 \text{ S/m}$ e $\epsilon_{r2} = 42$). Questo "fantoccio" era immerso nella regione di "campo vicino", a distanza 1,5 cm da un'antenna a dipolo eccitata con una corrente di 0,1 A: il campo elettromagnetico emesso era di frequenza 0,84 GHz. Le componenti \mathbf{E} ed \mathbf{H} del campo elettromagnetico erano misurate sperimentalmente ed il SAR era calcolato come integrale sui valori locali eseguito tramite il software 3DMMP (Three-Dimensional Multiple Multiple Software Package)

Nel concetto di *dose* definito per le IR ci si rifà però non alla potenza ma all'*energia assorbita*; questa differenza può avere varie motivazioni,

non ultima quella di mettere in rilievo, per le radiazioni *non* ionizzanti (NIR), gli effetti di picco, mentre non sono riconosciuti gli effetti cumulativi (come accade invece per le IR). Per la valutazione del SAR è richiesta, in ogni caso, la conoscenza dell'*intensità di radiazione S* cui viene esposto il sistema biologico.

La prima applicazione del SAR per valutazioni protezionistiche era avvenuta dieci anni prima con lo standard ANSI C95.1-1982.

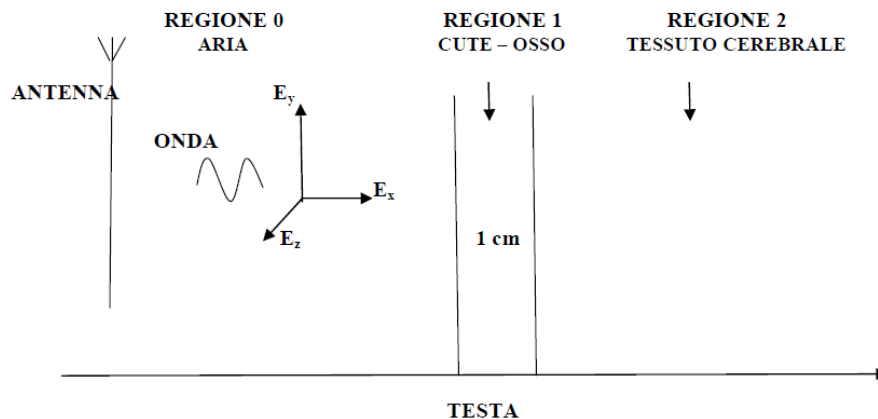


Fig. 15 - Schema delle regioni di penetrazione del campo elettrico incidente. Il campo elettrico è rappresentato con tutte le sue tre componenti (E_x , E_y , E_z) in quanto non sono applicabili le semplificazioni consentite dalle equazioni di Maxwell per un'onda piana; lo studio infatti riguarda l'analisi degli effetti di campo vicino. Per il significato di θ vedi più avanti Fig. 12b)

L'approccio dosimetrico, fondato su esperimenti di laboratorio, sulla modellistica e sulle simulazioni al computer cui abbiamo accennato, si ferma, nel caso delle radiazioni non ionizzanti, alla considerazione dei soli effetti termici.

Per il SAR è stato adottato un valore di 0,4 W/kg (pari a 30 W a tutto il corpo per un peso di 75 kg), che include anche un fattore di sicurezza, come *limite di base per i lavoratori professionalmente esposti; per la popolazione*, con l'ulteriore riduzione per un fattore di sicurezza pari a 5, il valore limite del SAR viene fissato in **0,08 W/kg**.

Con la metodologia e gli argomenti cui abbiamo accennato si è pensato di *mettere i soggetti esposti al riparo da effetti biologici indesiderati di tipo termico*.

Per quanto riguarda gli ambiti di validità, la dosimetria si applica con discreta approssimazione nella regione dello spettro elettromagnetico corri-

spondente alle *radiofrequenze* e alle *microonde*, se il sistema biologico investito dalla radiazione si trova nella regione di *campo lontano dalla sorgente*: in queste condizioni le caratteristiche della sorgente non sono importanti e ciò che è rilevante è quanta energia è assorbita dal corpo.

Si introduce, caratterizzato dal *SAR*, il concetto di **soglia termica**. Ad es., per l'esposizione ai telefoni cellulari il limite per il *SAR*, fissato dalla FCC/IEEE (*Federal Communications Commission/Institute of Electrical and Electronic Engineers*) nel 1996 è di 1,6 W/kg. Ovviamente, *si dovrebbe tenere conto dell'altro parametro fondamentale: la durata temporale dell'esposizione*, che però non è presente nella definizione della soglia termica. Secondo l'approccio dosimetrico al di sotto della soglia termica non c'è danno, e quindi *può essere tollerata un'esposizione indefinita nel tempo*.

Già si erano sviluppati, soprattutto in Russia, modelli e interpretazioni alternativi all'approccio dosimetrico; per questo *il modello di Kuster e Balzano è particolarmente significativo, perché, pur lavorando all'interno di quell'approccio, i risultati contraddicono il punto di vista dominante: il campo elettrico dell'onda generata da un'antenna penetra nel cervello con valori di potenziale rilevanza sanitaria*.

Nella Tab. 2 sono riportati il valore dell'intensità del campo elettrico *E* e della densità di potenza *S* calcolati da Kuster e Balzano in funzione della profondità di penetrazione *x*. L'onda elettromagnetica incidente, emessa dall'antenna del cellulare, aveva una frequenza di 0,84 GHz.

La densità di potenza *S* necessaria per il calcolo del SAR era ottenuta fenomenologicamente tramite misure del campo elettrico sulla superficie della cute.

Tab. 2 - I dati in tabella illustrano come varia la grandezza del campo elettrico e la densità di potenza al variare della profondità di penetrazione secondo il modello di Kuster e Balzano

<i>x</i> [cm]	<i>E</i> [V/m]	<i>S</i> [mW/cm ³]
Regione 1 (osso)		
0	112,5	1,9
1	62,7	0,59
Regione 2 (cervello)		
1	62,7	2,95
2	46,2	1,6
5	20,6	0,32

Gli autori, procedendo secondo l'approccio dosimetrico, presero in considerazione solo l'effetto termico: l'aumento di temperatura nel cervello

è determinato dalla potenza elettromagnetica dissipata in calore. Infatti E_{in} fa oscillare le cariche elettriche libere e i dipoli; queste oscillazioni sono ostacolate dagli urti con le particelle costituenti il sistema biologico e, pertanto, *una parte dell'energia delle onde trasferita al sistema si trasforma in calore*. L'azione di E_{in} si esplicita anche nella formazione, oltre che di microcorrenti, di *correnti di conduzione e di polarizzazione* localizzate, la cui densità, J , è descrivibile in termini ancora macroscopici: $J_{cond} = \sigma E_{in}$ e $J_{polar} = \omega \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot E_{in}$, con ε_r relativa al tessuto investito da E_{in} e $\omega = 2\pi\nu$, dove ν è la frequenza di E_{in} .

La densità di potenza incidente S è data da

$$S = \sigma_{eff} \cdot E^2$$

dove E è il campo elettrico e $\sigma_{eff} = \sigma_0 + \omega \cdot \varepsilon$ è la conducibilità effettiva. Poiché quando il materiale presenta la densità dell'acqua, come nel caso dei tessuti viventi, S è numericamente uguale al SAR in W/kg, gli autori rilevarono che il SAR *era essenzialmente proporzionale, oltre che alla conducibilità σ e alla costante dielettrica relativa ε_r del tessuto, al quadrato del campo elettrico incidente* (o alla corrente nell'antenna).

Il campo elettrico che raggiunge la superficie della cute, E_{air} , ha un'intensità di 112 V/m, abbondantemente inferiore ai 200 V/m al di sotto dei quali in [3] non venivano previsti *hot spot* termici. **Il campo elettrico penetra nel cervello e produce valori di E_{in} che hanno rilevanza sanitaria (20 V/m), anche secondo i criteri della normativa attualmente vigente, ancora a 5 cm dentro il tessuto cerebrale.**

Per questi motivi Kuster e Balzano proposero la revisione dello standard ANSI del 1982 (1,6 W/kg), ma il loro suggerimento venne ignorato e pertanto lo stesso valore limite fu riproposto nel 1996 dalla FCC/IEEE (Federal Communications Commission /Institute of Electrical and Electronic Engineers).

5.6 Un arzilla vegliardo: Ronold King e i modelli fisico-matematici rigorosi

A partire dagli anni '90 un arzilla vegliardo, Ronold W.P. King (1905-2006), sviluppa un'ampia critica ai modelli e ai calcoli in uso corrente, in particolare al modello dominante, quello «termico».

King è un Fisico americano noto per i suoi studi sulle elettrocomunicazioni, che negli anni '40 – '50 portarono lui e il suo gruppo di ricerca ad

Harvard a formulare la *teoria dell'antenna* per le emissioni nella regione radio e delle micro-onde (vedi, ad es., [5a]). Come risultato dell'applicazione di questa teoria King aveva, tra l'altro, eseguito *nel caso dell'onda piana il calcolo completo e rigoroso della trasmissione del campo elettromagnetico in una regione a tre strati, composti da pelle, grasso e muscolo, fornendo le espressioni teoriche delle componenti del campo; e aveva tabellato i valori della permittività ϵ_r e della conducibilità σ nell'intervallo $100 \text{ MHz} < \nu < 1000 \text{ MHz}$ [5b].*

Nei lavori degli anni '90 dedicati all'esposizione a un telefono cellulare, King esegue il *calcolo analitico*, cioè teorico e non simulato al computer, *nel caso in cui il campo incidente sia vicino e la testa sia una regione multistrato*, non lo spessore nullo della sfera di Fig.14; afferma che nel modello *si deve tener conto della forma dell'oggetto investito oltre che delle sue proprietà elettriche* e quindi assume la forma geometrica di parallelepipedo (vedi Fig. 12a), semplice ma più realistica per rappresentare un uomo o la sua testa. Se poi *si pongono le corrette condizioni al contorno* per le equazioni di Maxwell *sull'interfaccia dei vari strati*, cioè sulle superficie che li separano, l'insieme di tutti questi criteri porta dei *contributi decisamente significativi* sia per il campo elettrico interno che per le densità di corrente.

L'attenzione ai soli effetti termici aveva portato a sottovalutare questi contributi non solo nel modello di Kritikos e Schwan, ma anche nelle linee guida che fissavano i valori limite nei già ricordati standard ANSI e FCC/IEEE.

King schematizza la testa come si è detto, collocata in una prima zona di aria (regione 0 di Fig.14) nella quale si trova *un'antenna parallela alla testa e molto vicina ad essa.*

L'aspetto nuovo del lavoro di King ([6a, 6b]) è proprio il calcolo analitico del valore del campo elettromagnetico in assenza dell'oggetto biologico esposto, il campo esterno incidente o imperturbato, quando la sorgente è vicina, che era assente nel modello di Kritikos e Schwan (corpo immerso in onde elettromagnetiche piane) e che nella sperimentazione di Kuster e Balzano era stato surrogato dalla misura diretta dei valori di campo in alcuni punti e dal ricorso a modelli numerici di calcolo per il SAR.

Nel 1995 King confronta i dati ottenuti da Kuster e Balzano con i propri calcoli per un'antenna a dipolo, $\nu = 900 \text{ MHz}$, posta a distanza $d = 2 \text{ cm}$ dalla testa e in cui scorre la stessa corrente (vedi Tab. 3) [7].

I risultati differiscono, non di molto, a causa di leggere differenze tra i parametri assunti nei due studi. Per la scelta delle coordinate il riferimento è alla successiva Fig. 12b).

Il campo di un dipolo elettrico orizzontale in presenza di una regione costituita da 3 strati – aria, dielettrico (cute, grasso, osso), dielettrico o conduttore (materia cerebrale) – è stato accuratamente calcolato da R.W.P. King ([6a,6b]). In questi lavori si forniscono formule algebriche per le 6 componenti del campo elettromagnetico *vicino* in tutti i punti della regione 0.

Tab. 3 - Campo elettrico e densità di potenza calcolati da R.W.P. King [7]. Si considera che il lato della testa esposto è approssimativamente piano e non sferico: il capo è così simulato mediante un parallelepipedo rettangolare di 15 x 11 cm e di lunghezza infinita. La testa, inoltre, è immaginata costituita da uno strato di cute, grasso e osso che ricopre il cervello. Per le proprietà di questo strato dielettrico (regione 1), dello spessore di 1 cm si assume ($\sigma_1 = 0,1 \text{ S/m}$ e $\epsilon_{r1} = 6$). All'interno di questo strato vi è il tessuto cerebrale (regione 2), per il quale si assumono come proprietà elettriche ($\sigma_2 = 1,35 \text{ S/m}$ e $\epsilon_{r2} = 51$). King si serve della conducibilità e della costante dielettrica relativa effettivi a 0,9 GHz, usando dati proveniente dalla letteratura

z [cm]	E_z [V/m]	S [mW/cm ³]
Regione 1 (calotta cranica)		
0	130,7	1,71
1	67,8	0,46
Regione 2 (cervello)		
1	67,8	6,21
2	48,0	3,1
5	17,2	0,40
7	8,6	0,100
12	2,64	0,009

King ha criticato in molti articoli le analisi “ufficiali” dell’interazione tra campi e sistemi viventi, ritenendole non corrette e proponendo soluzioni alternative, che non hanno però avuto ascolto da parte dell’ICNIRP o della WHO.

In un successivo lavoro del 2000, sempre sul telefono cellulare [8], King parte da un campo incidente E con componente E_z di intensità 50 V/m e frequenza ν compresa tra 0,8-0,9 GHz, e calcola il campo elettrico indotto nella *calotta cranica* e nel *tessuto cerebrale*. Nel cervello, inoltre, determina il valore del **campo elettrico sulla membrana** (Fig. 16a) e **nell’interno delle cellule sferiche** (Fig. 16b); ed il campo **interno nelle cellule allungate** (Fig. 16c) parallele al campo presente nel cervello. Alle cellule allungate appartengono le cellule muscolari, da 1 a 10 cm di lunghezza, e le cellule nervose (neuroni), che arrivano fino a 2 m di lunghezza.

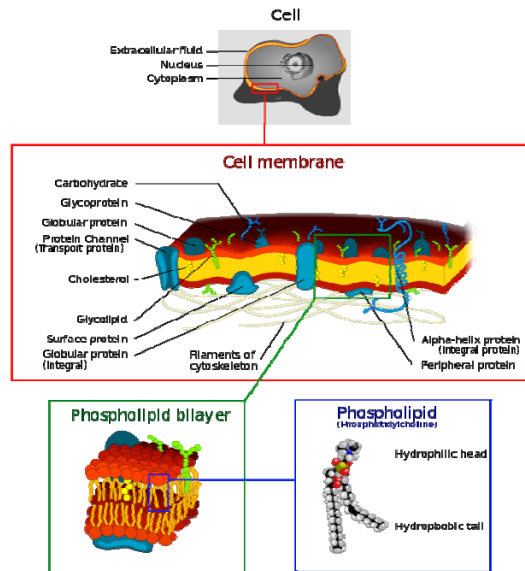


Fig. 16a

Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/Cell_membrane#mediaviewer/File:Cell_membrane_detailed_diagram_4.svg

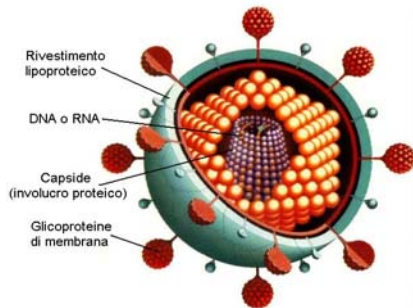


Fig. 16b

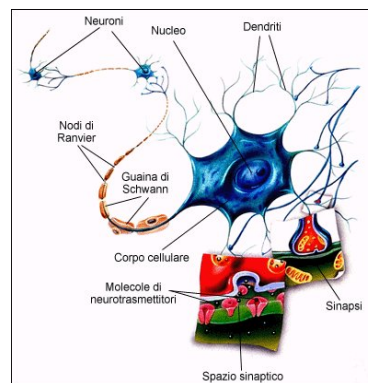


Fig. 16c

King assume per le cellule sferiche e i neuroni un raggio $r = 10^{-6}$ m; per la membrana uno spessore $\delta = 7,5 \cdot 10^{-9}$; i parametri elettrici sono $\sigma_m \approx 10^{-6}$ S/m $\epsilon_{rm} \approx 8$. A frequenze intorno al GHz la membrana si comporta come un perfetto dielettrico, mentre a basse frequenze, per esempio da qualche Hz fino al MHz, la membrana è assimilabile ad un conduttore. Per l'interno delle cellule i parametri elettrici sono sempre ($\sigma_2 = 1,35$ S/m e $\epsilon_{r2} = 51$), dove l'indice 2 si riferisce alla regione 2 di Tab. 4

I risultati di questo studio sono sintetizzati nella Tab. 4. La testa è stata assimilata un parallelepipedo, il cellulare giace in un piano parallelo alla faccia scura in figura (a 3 cm dalla testa) e l'antenna emittente è un dipolo oscillante secondo una direzione x ; z è la direzione ortogonale a quella di oscillazione del dipolo. Un qualunque punto della testa è definito dalle coordinate cilindriche (r, θ, z) (vedi Fig. 12 b), con θ che partendo dall'asse x ruota in senso orario); le componenti dei campi \mathbf{E} e \mathbf{H} rispetto a questo sistema di riferimento saranno $E_r, E_\theta, E_z; H_r, H_\theta$ e H_z .

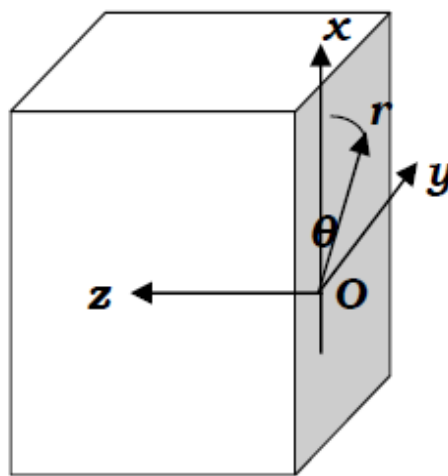


Fig. 12b - La testa è un parallelepipedo, con il cellulare a 3 cm di distanza in un piano parallelo alla faccia xy ; l'antenna è un dipolo oscillante secondo l'asse x . In figura si illustra solo la scelta delle coordinate e non è rappresentato lo spessore cute-tessuto osseo (1 cm.)

Quando un campo elettromagnetico esterno, la cui componente E_z è circa 50 V/m e ha frequenza $\nu = 0,83$ GHz, irradia la testa di un essere umano, dopo aver attraversato la scatola cranica (cute, grasso e osso), esso arriva a raggiungere, attenuato, le cellule immerse nel tessuto cerebrale, che è il fluido salino che permea il corpo umano. L'andamento dell'intensità del campo man mano che esso penetra nel cervello si può vedere esaminando la seconda colonna della tabella 4.

Il valore del campo all'interno delle **cellule sferiche** (terza colonna della Tab. 4) del tessuto cerebrale è lo stesso di quello esterno E_z . La componente radiale del campo interno E_{mr} sulla **membrana delle cellule sferiche** si ricava con la seguente formula: $E_{mr} = 7,35 \cdot E_z$. E_{mr} , i valori di E_{mr} sono riportati nella quarta colonna.

La componente assiale del campo interno sulla membrana $E_{m\theta}$ è data da:
 $E_{m\theta} = E_z \sin\theta$.

Infine il campo elettrico E_z **all'interno delle cellule allungate** è uguale a quello assiale $E_{m\theta}$ sulla loro membrana (vedi relazione sopra) ed è uguale a quello presente nello spazio extracellulare (quinta colonna).

Ai capi della membrana delle cellule sferiche del tessuto cerebrale il potenziale naturale è di 0,09 V (90 mV); noto lo spessore $\delta = 7,5 \cdot 10^{-9}$, possiamo calcolare il campo elettrico: $E_m = 0,09/7,5 \cdot 10^{-9} = 12 \cdot 10^6$ V/m.

Questo elevato campo elettrico **a frequenza $\nu = 0$** è quello presente *naturalmente* nella membrana della cellula.

Tab. 4 - Campo elettrico indotto nella calotta cranica (Regione 1), nel cervello, sulla membrana e all'interno delle cellule sferiche e lunghe (Regione 2)

<i>Profondità z [cm]</i>	<i>Intensità del campo elettrico E [V/m]</i>			
Regione 1 (calotta cranica)				
0	50			
1	27			
Regione 2 (cervello)				
<i>Profondità</i>	<i>Campo elettrico nel cervello</i>	<i>Cellule sferiche: campo elettrico nelle cellule (3^{col.}) e sulla membrana (4^{col.})</i>		<i>Cellule lunghe, parallele al campo elettrico: valore del campo elettrico</i>
<i>z [cm]</i>	<i>E_z [V/m]</i>	<i>E_z [V/m]</i>	<i>E_{mr} [V/m]</i>	<i>E_z [V/m]</i>
1	27,0	27,0	198·cosθ	27,0
2	19,0	19,0	140·cosθ	19,0
3	13,5	13,5	99,2·cosθ	13,5
5	6,8	6,8	50·cosθ	6,8
7	3,5	3,5	25,7·cosθ	3,5

5.7 I limiti di esposizione non garantiscono la protezione della salute

Oltre al sostanziale accordo tra i dati riportati nelle tabelle 2, 3 e 4 c'è un'osservazione che non può essere tralasciata: *l'aumento del valore della densità di potenza e conseguentemente del campo elettrico nel passaggio*

attraverso un'interfaccia interno, dalla regione 1 alla 2 sia in Kuster e Balzano che in King (3^ colonna delle tabelle 2 e 3), o, in King, attraverso la superficie che delimita la membrana (4^ colonna di Tab. 4). Questo incremento è possibile solo se si adotta un modello multistrato, in virtù delle "risonanze" che si possono innescare tra le superficie che delimitano uno strato; eventualità impossibile nel caso del modello a un solo strato come quello di Kritikos e Schwan.

Quando incontra una superficie un'onda elettromagnetica viene riflessa, assorbita, trasmessa in parti diverse a seconda dei valori dei parametri elettrici caratteristici del materiale della superficie, e sempre in modo tale che l'energia complessiva si conservi (la somma delle energie associate alle tre componenti deve essere uguale a quella trasportata dall'onda prima dell'impatto sulla superficie). In un modello multistrato per la valutazione degli effetti biologici, come quelli appena esaminati, può pertanto accadere che le onde elettromagnetiche restino intrappolate, in virtù di successive riflessioni tra le due superficie che delimitano uno strato, dando vita a delle onde stazionarie che oscillano al suo interno. A questa situazione può corrispondere in certe condizioni, in analogia a una «cavità risonante», un aumento dell'energia a disposizione delle onde quando abbandonano lo strato per proseguire nel loro percorso verso l'interno.

I valori di campo stimati da questi studi (Kuster e Balzano, King) smentiscono l'idea, ancora oggi accettata da una parte rilevante della comunità scientifica, che le microonde penetrino pochissimo nei tessuti e determinino solamente un riscaldamento cutaneo.

Le considerazioni che si ricavano dai lavori di King e di Kuster e Balzano è che i modelli e l'approccio dosimetrico assunti negli standard ANSI, FCC e IEEE per le radiofrequenze e le microonde – ma è vero anche, come si potrebbe mostrare, per i limiti proposti dalla WHO e dall'ICNIRP per le frequenze ELF – indicano valori limite per l'esposizione non adeguati a un'efficace protezione sanitaria. Tali limiti, lungi dal prendere in considerazione effetti di lungo termine e patologie non legate all'effetto termico, possono non rappresentare una difesa anche per i soli effetti acuti.

Nella normativa italiana, ad esempio, 6 V/m è un valore d'attenzione, ma misurato in aria come campo esterno; le tabelle 2, 3 e 4 mostrano invece per i campi interni valori superiori al valore d'attenzione ancora 5 cm dentro la testa, sia per la materia cerebrale che, Tab. 4, per le sue cellule.

I lavori che abbiamo esposto e commentato con qualche dettaglio offrono una base di partenza per poter studiare in modo quantitativo gli effetti biologici di macroscala e di microscala segnalati da molti ricercatori.

6. Gli effetti biologici

6.1 La pompa ionica $\text{Na}^+/\text{Ca}^{+2}$

I possibili effetti specifici dei campi *interni*, indotti dai campi elettromagnetici esterni, sono esclusi dalla normativa tecnica protezionistica emanata in questi decenni nonostante i rilevanti valori delle stime riportate nelle tabelle 2, 3 e 4.

È naturale allora porsi la domanda se il dogma dell'esistenza di soli effetti termici non sia mal fondato e quali studi ed esperimenti abbiano invece dalla loro i sostenitori di effetti biologici specifici; effetti specifici, e quindi non riducibili al solo riscaldamento di tessuti, colture o sistemi biologici esposti.

Ci limiteremo a riportare qui di seguito uno dei capisaldi di queste sperimentazioni e di queste interpretazioni: *l'influenza dei campi elettromagnetici interni, indotti dall'esposizione a un campo esterno, sul meccanismo della pompa ionica Sodio-Calcio, $\text{Na}^+/\text{Ca}^{+2}$, cioè sul trasporto di ioni attraverso la membrana cellulare effettuato da alcune proteine*, rimandando per l'esame di altri studi alla letteratura, in particolare al testo già segnalato in premessa se non altro per il suo carattere divulgativo [1b].

Una *pompa ionica* è una *proteina della membrana* cellulare capace di trasportare due (o più) specie ioniche attraverso la membrana, una dall'esterno all'interno della cellula, l'altra dall'interno all'esterno. Se il *trasporto* di una delle due specie avviene a spese dell'energia metabolica della cellula esso viene definito *primario*.

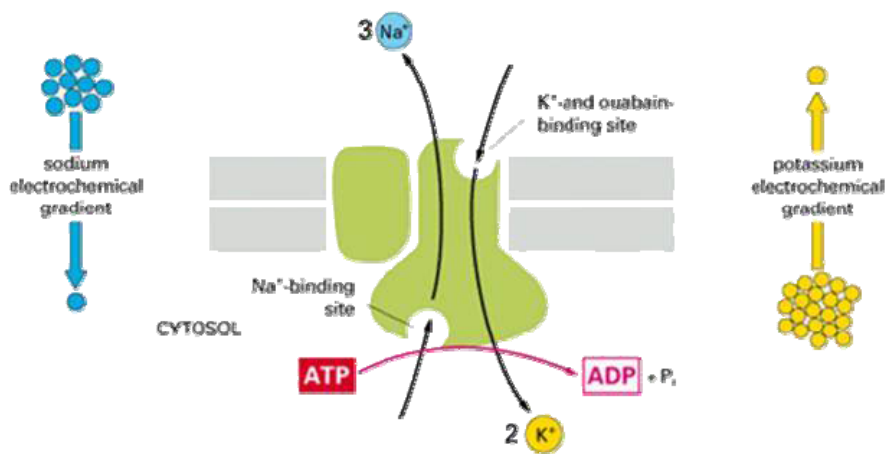


Fig. 17 - Trasporto primario. La pompa ionica Na^+/K^+ trasporta attraverso la membrana le due specie ioniche, nel verso rispettivamente opposto al loro gradiente di concentrazione; l'energia per far defluire dalla cellula lo ione Na^+ è l'energia metabolica della cellula, quale ad esempio quella rilasciata dalla trasformazione di ATP in ADP (vedi figura). L'ATP (Adenosintrifosfato) è un enzima (co-enzima) che supporta l'attività metabolica delle cellule, e quindi di ogni forma di vita. È detto "moneta energetica universale" delle cellule in virtù della sua azione di trasferimento d'energia tra le diverse reazioni chimiche che avvengono nella cellula. L'ATP viene generato nelle reazioni cataboliche, quelle che portano alla rottura delle molecole, per essere utilizzato in quelle anaboliche, che invece mettono insieme le molecole

Il trasporto attraverso la membrana cellulare può essere effettuato dalla proteina **senza richiedere energia alla cellula**, ma utilizzando il **gradiente di concentrazione** di uno ione. Questo tipo di trasporto è detto **secondario** e la proteina che lo realizza è **ion exchanger** (NCX) o anti o co-transportatrice. Due (o più) specie ioniche attraversano la membrana, in senso opposto; una specie ionica migra spontaneamente **dall'alta alla bassa concentrazione**, e l'energia che così si libera può "pompare" l'altra specie **dalla bassa all'alta concentrazione**.

È questo il caso della **proteina scambiatrice Sodio-Calcio, $\text{Na}^+/\text{Ca}^{+2}$** , il cui compito è **rimuovere il Calcio dalla cellula** a spese dell'energia accumulata nel gradiente elettrochimico del Sodio; per ogni ione Ca^{+2} che viene rimosso dalla cellula la proteina importa tre Na^+ all'interno della cellula.

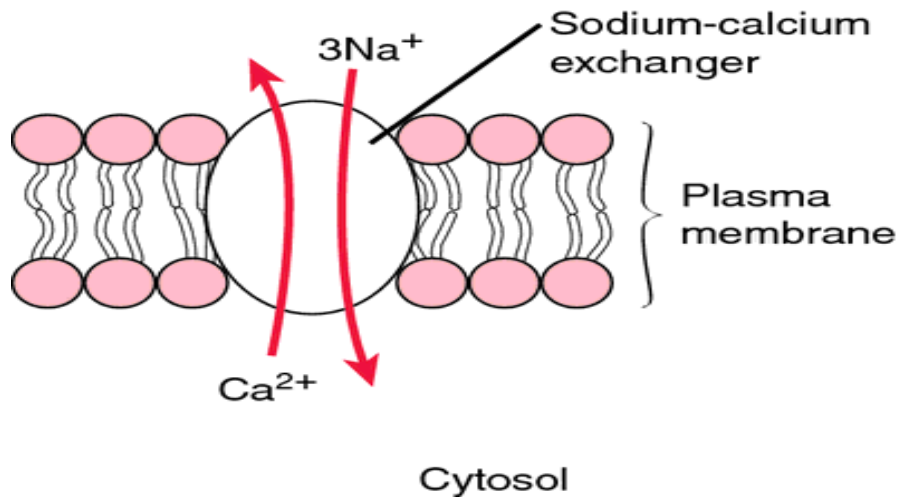


Fig. 18 - Trasporto secondario. L'azione della proteina scambiatrice, NCX, permette il deflusso di uno ione Ca^{+2} a spese dell'energia accumulata nel gradiente elettrochimico del Sodio; tre ioni Na^+ vengono pompati dall'esterno all'interno della cellula per ogni ione Ca^{+2} che defluisce all'esterno

In estrema sintesi, la proteina NCX pompa Na^+ all'interno della cellula e l'azione di trasporto avviene in virtù della maggiore concentrazione di ione Sodio che c'è all'esterno (vedi Fig.19). La differenza tra le concentrazioni esterno/interno di Na^+ è tale da fornire energia sufficiente non solo a trasportare all'interno lo ione Sodio ma anche per consentire l'efflusso dalla cellula degli ioni Ca^{+2} , presenti *abitualmente* con una concentrazione non elevata.

Questo scambio operato dalla NCX è un processo puramente elettrochimico che non richiede direttamente energia metabolica della cellula.

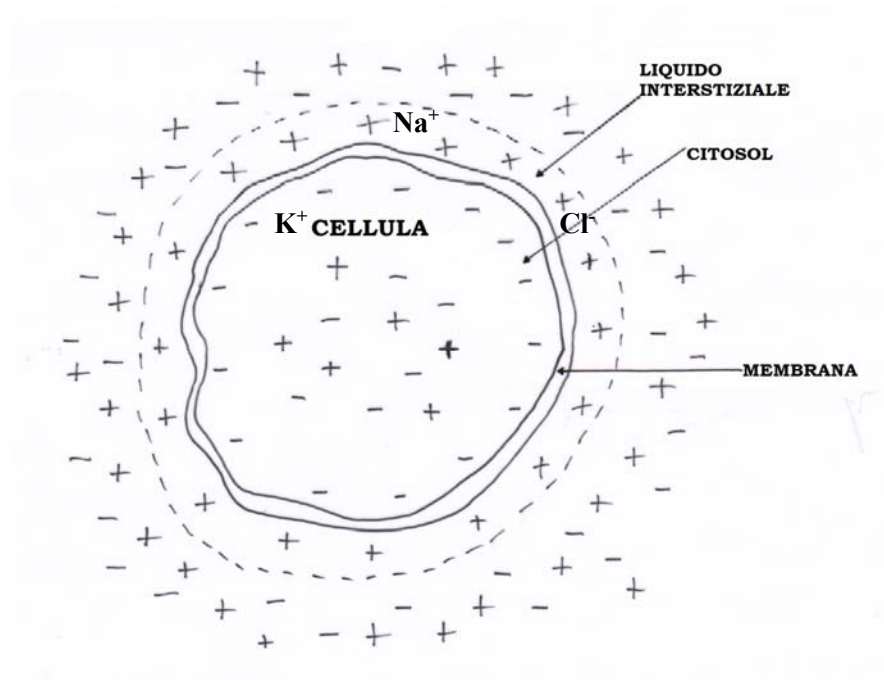


Fig. 19 - La cellula e le concentrazioni ioniche al suo interno (K^+) e al suo esterno (Na^+ , Cl^-)

C'è un'altra pompa ionica che si accolla l'onere di tenere basso il livello di Calcio; è la *proteina di membrana PMCA*, che ha una più bassa capacità di trasporto della NCX e svolge un lavoro ad essa complementare. La PMCA consuma energia metabolica.

La *proteina NCX* ha un'elevata capacità di trasporto, fino a 5000 ioni Calcio al secondo, e quindi la sua azione regolatrice si esplica quando si determina un'elevata concentrazione di Ca^{+2} . Sbarazzarsi in poco tempo di grandi quantità di ioni Calcio è, ad esempio, quel che è necessario al *neurone* dopo che ha generato un *potenziale d'azione*. Non si tratta poi solo dei neuroni; l'azione di scambio della proteina NCX è fondamentale in generale per la regolazione dei quantitativi di Calcio all'interno della cellula, dal reticolo endoplasmico delle cellule sia *eccitabili* che *non eccitabili*, all'attività delle cellule fotoricettrici, al mantenimento di un basso livello di Calcio nei mitocondri, al rilassamento del muscolo cardiaco.

Qui di seguito alcune brevissime note sui concetti appena sopra utilizzati.

La *membrana cellulare*, composta da *proteine* ($\approx 55\%$), lipidi ($\approx 35\%$) e polisaccaridi ($\approx 10\%$), si è costituita nell'evoluzione della vita come uno spessore biologico con il compito di separare uno spazio *interno*, contenen-

te le diverse strutture intracellulari, da quello *esterno*. I due ambienti sono essenzialmente due soluzioni, in contatto con la membrana, che contengono cariche mobili sotto forma di ioni: quello esterno è il *liquido interstiziale*, con un'elevata concentrazione di **ioni sodio** (Na^+) e *cloro* (Cl^-), quello interno è il *liquido intracellulare* o *citoflasma*, con un'elevata concentrazione di **ioni potassio** (K^+) (vedi Fig. 19). I due liquidi, di composizione chimica ovviamente diversa, sono *conduttori*.

Le *proteine* possono essere legate alla superficie della membrana, oppure penetrare più o meno internamente nel doppio strato lipidico (vedi Fig. 16a). Alcune *proteine*, dette *pompe*, e altre, dette *canali ionici*, hanno il compito di mantenere una *diversa concentrazione di ioni tra esterno ed interno della cellula*, con la membrana che separa le cariche positive da quelle negative; si genera quindi tra le due facce della membrana una differenza di potenziale ΔV , il **potenziale di elettrico membrana**. Per misurare questa differenza di potenziale che si stabilisce, in condizioni di equilibrio, tra il liquido intracellulare e il liquido interstiziale *all'esterno della cellula* si assume convenzionalmente uguale a zero il potenziale di quest'ultimo. Per le cellule sferiche del cervello ΔV è circa -90 mV, ma il valore medio per i vari tipi di cellula può essere assunto pari a circa 70 mV; la corrispondente intensità del campo elettrico E è dell'ordine di 10^7 V/m. L'elevato valore di campo elettrico all'interno della membrana cellulare ha il compito di mantenere le proteine «allineate» contro l'agitazione termica della cellula e dei suoi componenti che tende a disaggregarle; *in assenza di questo campo non si avrebbe lo scambio elettrochimico di sostanze fra interno ed esterno della cellula*.

Lo *scambio elettrochimico* tra l'esterno e l'interno della cellula è reso possibile dalla diversa **concentrazione** che le varie specie ioniche hanno all'interno della cellula; la variazione della concentrazione può essere descritta tramite il suo **gradiente**.

Il *gradiente* di una grandezza F misura la sua variazione lungo una direzione x come rapporto tra la variazione della grandezza, ΔF , e l'ampiezza del tratto, Δx , nel quale è avvenuta: $\Delta F / \Delta x$. Il verso del gradiente è concorde con quello che si sceglie per la direzione x ; a valori crescenti di x corrispondono valori crescenti di F .

Se F è l'**energia potenziale** – elettrica, meccanica, termica – di un sistema, l'**evoluzione spontanea** del sistema va *dagli stati di maggiore a quelli di minore energia potenziale, cioè nel verso opposto a quello del gradiente di F* . L'energia richiesta per il passaggio tra questi due tipi di stato è quella ricavata dalla diminuzione dell'energia potenziale; ad essa si dà talvolta il nome di *energia entropica* perché, come conseguenza del 2°

principio della termodinamica, ogni trasformazione spontanea procede nel senso della crescita (o non decrescita) d'entropia.

All'interno della cellula gli ioni fluiscono *spontaneamente* dai luoghi di maggiore a quelli di minore concentrazione, proprio come un flusso termico si muove spontaneamente da temperatura più alta a temperatura più bassa. Il maggior accumulo di una specie ionica in un volume della cellula, cioè una sua maggiore *concentrazione*, costituisce un'*energia potenziale elettrochimica* che viene liberata nella trasformazione verso uno stato di minore concentrazione; analogamente a quel che succede per l'energia liberata dalla caduta dell'acqua da una diga, al cui bacino spetta un'energia potenziale, meccanica, tanto più grande quanto più grande è la massa d'acqua e quanto più elevata è la quota. Nell'analogia con il trasporto di una specie ionica hanno ruolo sia la carica complessiva (la massa d'acqua nella diga) che la concentrazione (la quota del bacino). «*Spontaneamente*», è bene ribadirlo, non vuole affatto dire: «senza richiesta d'energia».

In una pompa ionica come la NCX la maggior concentrazione di ioni Na^+ all'esterno della cellula (Fig. 19) fornisce l'energia potenziale a spese della quale può avvenire la migrazione *spontanea* dello ione Sodio verso l'interno della cellula; la differenza di energia potenziale è, anzi, quantitativamente tale da fornire anche l'energia per il trasporto di Ca^{+2} all'esterno della cellula senza che si debba ricorrere all'energia tratta dalla sua attività metabolica.

Durante l'evoluzione i sistemi biologici hanno selezionato dei gruppi di cellule particolari, quelle nervose e muscolari (come quelle cardiache), che sono in grado di produrre *variazioni del potenziale di membrana*, dette *depolarizzazioni*. Queste cellule sono *eccitabili* e le *variazioni del potenziale di membrana* sono dette anche *potenziali d'azione*. Poiché le variazioni avvengono in un intervallo molto breve, dell'ordine del microsecondo, i *potenziali d'azione* sono anche detti *impulsi elettrici* e si propagano lungo i nervi ed i muscoli.

Questa «*corrente elettrica*» non è dovuta a movimento di elettroni o di ioni, come accade nei metalli o nelle soluzioni elettrolitiche o come all'interno della cellula. Gli impulsi elettrici infatti raggiungono i diversi distretti corporei *senza trasporto di materia* (elettroni o ioni), ma tramite la propagazione della depolarizzazione della membrana cellulare. Insomma, gli impulsi elettrici (potenziali d'azione) si propagano nel corpo proprio come onde in un mezzo: la perturbazione è la variazione del potenziale di membrana, generata ad esempio in una cellula del sistema nervoso centrale, che viaggia lungo il sistema nervoso con una velocità V che dipende dalle caratteristiche materiali del mezzo – i nervi – in cui si propaga. Attenzione,

il carattere elettrico dell'impulso non ha a che vedere con quello della sua propagazione; quella che viaggia non è un'onda elettromagnetica.

L'attenzione a questi aspetti biologici fondamentali è motivata dal fatto che mantenere al di sotto di un certo livello la concentrazione di Calcio nel citosol di ogni cellula è di grande importanza per il buon funzionamento del complesso sistema di comunicazione che regola le attività basilari delle cellule e il loro coordinamento. Infatti, errori nel trattamento dell'informazione cellulare sono responsabili di cancro, diabete e autoimmunità. Una migliore comprensione del sistema di comunicazione cellulare favorisce un più efficace trattamento delle malattie.

Si può capire allora perché l'attenzione di molti ricercatori in questi ultimi quarant'anni sia stata polarizzata proprio da quell'effetto specifico del campo elettromagnetico che è la *variazione dell'efflusso di ioni di calcio dal tessuto cerebrale esposto a un campo elettromagnetico.*

6.2 L'effetto finestra

Negli anni '70 il dott. William Ross Adey fu il primo a segnalare con degli esperimenti un importante effetto dei campi elettromagnetici: il rilascio di una notevole quantità di calcio (20% in più) e di un'equivalente quantità di acido γ -aminobutirrico (GABA), quando la corteccia cerebrale veniva stimolata elettricamente *in vivo* – si trattava di gatti coscienti – con circa 200 impulsi al secondo (200 Hz, durata 1 ms). Negli esperimenti si registrava un campo elettrico all'interno del tessuto di 5 V/m (circa la grandezza dell'EEG).

Tale scoperta confutò l'idea che deboli campi extracellulari, del medesimo ordine di grandezza dell'EEG, quindi *estremamente più deboli del campo elettrico di membrana*, non siano in grado di influenzare l'attività del neurone.

In successivi esperimenti effettuati da Bawin e Adey, il tessuto cerebrale di pulcini e di gatti veniva esposto per la durata di venti minuti a vari campi elettrici alternati, di frequenze 1, 6, 16, 32 Hz e di intensità comprese nell'intervallo tra 5 V/m e 100 V/m. I risultati degli esperimenti evidenziavano un decremento significativo (15-20%), rispetto ai controlli, dell'efflusso di ioni calcio dal tessuto cerebrale, in corrispondenza ad alcune delle frequenze scelte (6 e 16 Hz), *ma solo per campi elettrici di intensità interna ai valori dell'intervallo, mentre in corrispondenza agli estremi dell'intervallo, rispettivamente 5V/m e 100V/m, il decremento dell'efflusso di ioni non era significativo.*

Quando un effetto biologico, causato dall'esposizione a campi elettromagnetici, si verifica per valori dell'intensità del campo interni a un intervallo, ma non ai suoi estremi, è uso definirlo come *fenomeno* o *effetto finestra*. L'*effetto finestra*, nel caso degli esperimenti condotti da Adey e il suo gruppo, era duplice: rispetto all'intervallo di variazione delle intensità dei campi e rispetto all'intervallo di variazione delle frequenze [1 – 32]Hz, l'effetto biologico essendo rilevabile solo in corrispondenza ad alcune frequenze interne a quell'intervallo.

I resoconti degli anni '70 del gruppo di Adey indicavano come i ricercatori si trovassero di fronte ad uno strano fenomeno: l'interazione si presentava come una risposta biologica (bioeffetto) all'azione del campo; una risposta non lineare, funzione della frequenza e dell'ampiezza del campo, con un massimo della curva di risposta in corrispondenza alla frequenza di 16 Hz e all'intensità di campo di 56 V/m. Gli effetti che si manifestavano erano di tipo non termico (gli sperimentatori avevano avuto cura che la densità di potenza del campo elettromagnetico non superasse i $10 \text{ W/m}^2 = 1 \text{ mW/cm}^2$) e riguardavano il funzionamento del sistema nervoso.

Negli anni '80 il gruppo Adey condusse altri esperimenti con campi modulati in ampiezza a 16 Hz, associati a una portante di alta frequenza, 450 MHz, che esibirono un incremento dell'efflusso cerebrale di ioni calcio sia in gatti che in ratti (+ 38%); mentre in assenza di modulazione o con modulazione a 60 Hz non si rilevò nessun effetto.

L'EPA (*Environmental Protection Agency*, ovvero l'Agenzia per la Difesa Ambientale degli Usa), alcuni anni dopo i primi esperimenti del gruppo di Adey, allestì un proprio laboratorio (*Health Effects Research Laboratory*) per verificare indipendentemente l'effetto finestra. Il laboratorio, diretto dal dott. Carl F. Blackman e dal dott. J.A. Elder, seguendo le medesime procedure descritte dai protocolli del gruppo Adey, confermò con vari esperimenti l'esistenza delle finestre sia per le intensità di campo che per i valori della frequenza.

C'era però un disaccordo tra i due gruppi di ricerca sulla variazione dell'efflusso di ioni: Adey e colleghi ne avevano rilevato una riduzione, Blackman e colleghi un incremento. Blackman e colleghi si chiesero allora se la differenza fosse dovuta alla componente magnetica del campo modulato di 16 Hz, presente nei loro esperimenti ma non in quelli del gruppo di Adey. L'ipotesi si rivelò giusta, poiché, eliminando la presenza della componente magnetica del campo oscillante a 16 Hz, non si rilevava il fenomeno dell'incremento nell'efflusso di ioni di calcio.

Successivamente fu scoperta da Blackman (1988) l'importanza del campo magnetico locale come parametro sperimentale: la finestra in frequenza dipende dal valore della *componente statica del campo magnetico*

terrestre presente nella camera di esposizione (il valor medio del campo magnetico terrestre è di circa 40 μT , μT = micro Tesla). Un campo elettrico di valore 40 V/m e frequenza di 16 Hz era efficace nel determinare un aumento dell'efflusso di ioni calcio, se l'intensità del campo geomagnetico era di 38 μT , ma inefficace se il campo geomagnetico era ridotto a 19 μT . Il medesimo campo elettrico, ma di frequenza 30 Hz, era inefficace con un campo magnetico statico di 38 μT e diveniva «attivo biologicamente» per induzioni magnetiche di $\pm 25,3 \mu\text{T}$ e $\pm 76 \mu\text{T}$.

Alla fine degli anni '80 le due *sorprendenti* scoperte del gruppo di ricerca dell'EPA possono così sintetizzarsi:

- i) nel rilascio degli ioni calcio del tessuto cerebrale dei pulcini è implicata la componente magnetica del *debolissimo* campo elettrico applicato nell'intervallo di frequenza ELF;
- ii) le finestre in frequenza che determinano la risposta biologica dipendono dall'intensità del campo geomagnetico locale statico.

Replicato con successo l'effetto finestra, l'attenzione dei ricercatori fu rivolta verso la formulazione di un meccanismo biofisico atto a spiegarla.

Per quello che riguarda invece la «verità sperimentale», non esito ad assumere la perentoria conclusione che, dieci anni dopo, Carl F. Blackman propose allo *Scientific Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Radiation* (Università di Vienna, 25-28 ottobre 1998) dopo aver riassunto i risultati di 30 anni di ricerche sull'efflusso degli ioni calcio: l'analisi sugli studi pubblicati in letteratura indicava in modo «*schiacciante*» che «*.. i campi elettrici e magnetici di bassa intensità possono alterare la normale omeostasi degli ioni calcio ed alterare le risposte che gli organismi viventi presentano verso il proprio ambiente*».

Altri studi furono condotti da S.K. Dutta che, in colture di cellule nervose (neuroblasti) di origine umana, esposte ad un campo di 915 MHz modulato in ampiezza a 16 Hz, evidenziò un incremento dell'efflusso di ioni calcio per valori del SAR di 0,05 e 1 W/kg – corrispondenti a densità di potenza dell'ordine dei 10 mW/cm² per campi di quella frequenza –, ma non per SAR di valore minore, intermedio o maggiore.

È opportuno concludere queste note sugli effetti biologici dei campi elettromagnetici ritornando in patria. A partire dal 2004 un ricercatore italiano, il prof. Mario Barteri, ordinario di Chimica alla «Sapienza» e qui presente, ha condotto esperimenti e ricerche eseguite con i suoi collaboratori, che hanno dimostrato gli effetti biologici indotti da campi di alte frequenze, [0,8 – 1,9] MHz, su vari tipi di enzimi. In particolare, il cambiamento di stato, a idrogel!, di un enzima importante per la trasmissione dei segnali neuronali, l'acetilcolinesterasi, esposto per un periodo di 20' alle

radiazioni di un comune cellulare posto a 5 cm. dall'orecchio. Il percorso per pubblicare i risultati di questo lavoro su una rivista scientifica è stato una via crucis, con dei respingimenti mai motivati con obiezioni di merito, a proposito della *doxa* dominante, ma alla fine coronato da successo [9].

7. I campi elettromagnetici di Niscemi

7.1 Niscemi

A Niscemi ci sono campi elettromagnetici appartenenti a diverse regioni dello spettro elettromagnetico:

- nel territorio di Niscemi è presente l'impianto militare indicato come *Naval Radio Transmitter Facility* (acronimo NRTF);
- nella stessa area è prevista la costruzione di un secondo impianto militare, il MUOS (*Mobile User Objective System*).

Naval Radio Transmitter Facility (NRTF):

- di 45 antenne verticali, di cui solo 27 operative, nella banda HF (*High Frequency* - Frequenze Alte, intervallo di frequenza $\nu = 3-30$ MHz, lunghezza d'onda $\lambda = 100-10$ m), usate come sistema di telecomunicazioni nelle operazioni navale e aeronautiche; pertanto ***non sempre in funzione***.
- Di ***un'antenna verticale, sempre in funzione***, operante in banda LF (*Low Frequency* – Frequenze Basse $\nu = 30-300$ KHz, lunghezza d'onda $\lambda = 10-1$ Km); in particolare la ***frequenza di trasmissione è $\nu = 46$ KHz***, e viene usata come sistema di comunicazione sotto la superficie del mare.

MUOS (Mobile User Objective System):

- da tre antenne paraboliche operanti nella regione delle microonde, in banda Ka (intervallo di frequenza $\nu = 27-40$ GHz), in particolare in trasmissione viene impiegato l'intervallo di frequenza $\nu = 30-31$ GHz e in ricezione l'intervallo $\nu = 20-21,2$ GHz; la potenza di trasmissione $P = 1600$ W.
- Da un'antenna elicoidale operante nella banda UHF (*Ultra High Frequency* - Frequenze Ultra Elevate, intervallo di frequenza $\nu = 300$ MHz-3 GHz, lunghezza d'onda $\lambda = 1$ m-10 cm), in particolare

in trasmissione e ricezione viene impiegato lo stesso intervallo di frequenza $\nu = 240\text{-}315$ MHz; la potenza di trasmissione $P = 105$ W.

*MUOS è, secondo il progetto, un sistema di **comunicazione satellitare globale** ad uso esclusivamente militare, con una tecnologia simile a quella della telefonia 3G; il MUOS non è in esercizio mentre sono in funzione, come è stato appena rilevato, diverse sorgenti. Condividendo molti rilievi di merito su vari aspetti, quali sono stati mossi nella relazione finale di verifica disposta dal TAR Sicilia e presentata il 24 giugno 2013 [10], è opportuno notare che **manca un presupposto essenziale per ogni considerazione ambientale e sanitaria: una caratterizzazione elettromagnetica dell'ambiente investito dalle radiazioni emesse dagli impianti militari, cioè una mappatura che fornisca per ogni area indagata i valori medi di campo, non solo i valori spot.***

È quello che, insieme ad altri relatori qui presenti, abbiamo realizzato per alcune aree della Provincia di Roma, tramite la convenzione tra il Cirps - La Sapienza, Università di Roma e l'Arpa Lazio, e presentato a maggio 2013 nella sede del Cirps [11]. Va rilevato che la campagna prevedeva esperimenti per controllare l'impatto su colture cellulari umane dell'esposizione al livello di campo registrato in sito.

*Il calcolo rigoroso dei valori di campo elettromagnetico irradiato dalle sorgenti esistenti può essere fatto solo **disponendo dei dati** che definiscono in modo completo le sorgenti. Poiché **non siamo in queste condizioni** quel che viene di seguito presentato sono solo delle considerazioni sugli apparati presenti nell'impianto militare di Niscemi, in particolare l'antenna della NRTF, sempre operativa come sorgente di onde di frequenza $\nu = 46$ KHz, e sui possibili impatti biologici conseguenti alla loro attività.*

7.2 Naval Radio Transmitter Facility (NRTF): un «esercizio»

Sottolineiamo subito che l'azione dell'antenna si esercita su oggetti biologici lontani dalla sorgente, non è cioè la situazione cui ci siamo riferiti nelle tabelle precedenti dove si riportavano i calcoli per cellulari posti a distanza di pochi centimetri dall'oggetto (la testa). *Inoltre, mentre lì si consideravano frequenze dell'ordine del GHz, qui si ha a che fare con una frequenza di 46 kHz.*

Continua a valere invece lo schema: regione 0, l'aria in cui si propaga l'onda elettromagnetica fino alla porzione di spazio occupata dall'oggetto biologico (testa o corpo); regione 1, lo spessore occupato dalla cute e dal tessuto osseo della testa; regione 2, occupata dal cervello (non considerata nel modello termico).

Tab. 5 - Valori del campo esterno incidente (regione 0) in funzione della distanza dalla sorgente ($\nu = 46$ KHz, per E_{z0} vedi Fig. 15, qui si è in più esplicitata con l'indice 0 la regione del campo)

Distanza antenna [m]	E_{z0} [V/m]
500	90,00
1000	10,26
2000	1,80

Nella situazione di campo lontano l'onda elettromagnetica emessa dall'antenna si può considerare piana, e i valori del campo esterno incidente (regione 0) sono uguali qualunque sia il modello che si adotta per lo studio dell'interazione.

I valori del campo elettrico in funzione della distanza riportati in Tab. 5 sono stati desunti in letteratura per una situazione analoga per l'intensità di campo elettrico in funzione della distanza e per la frequenza (circa 30 kHz) [12]. E_z è la direzione del campo incidente, coerente con il sistema di riferimento scelto in Fig. 12b, E_{z0} è il valore della componente dell'onda piana incidente nella regione 0, cioè in assenza dell'oggetto biologico; E_{z1} è il valore del campo interno della regione cute-osso; E_{z2} è il valore del campo interno della membrana e con E_{z3} si indica il valore del campo interno della cellula sferica.

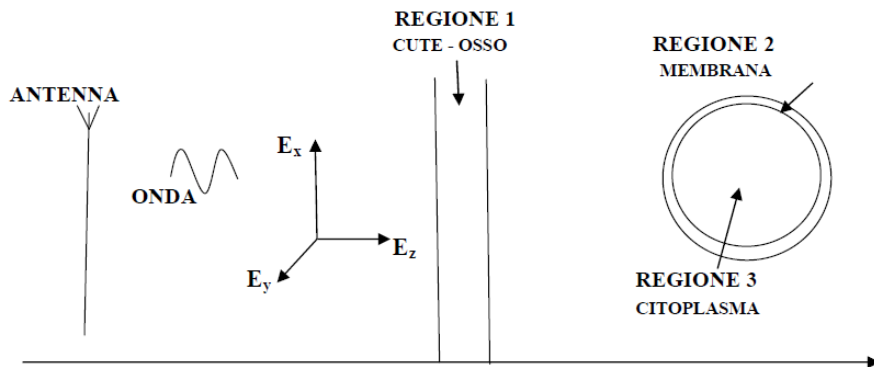


Fig. 20 - Il modello a due strati adottato da King per la descrizione dell'interazione elettromagnetica dell'onda incidente con il corpo, o distretti corporei, diventa necessariamente a tre strati se si vuole valutare il campo elettrico all'interno di una cellula

I campi interni delle regioni 1, 2 e 3 riportati in Tab. 6 sono stati calcolati secondo le formule e i valori dei parametri elettrici delle diverse sostanze utilizzati da King [13]. Lo schema assunto per il calcolo è esemplificato in Fig. 20.

Tab. 6 - Valori dei campi interni E_{z1} , E_{z2} ed E_{z3} in corrispondenza ai valori del campo esterno incidente E_{z0}

Distanza antenna [m]	E_{z0} aria [V/m]	E_{z1} cute - tessuto [V/m]	E_{z2} membrana [V/m]	E_{z3} Citoplasma [V/m]
500	90,00	12,60	252,00	$5,04 \cdot 10^{-3}$
1000	10,26	1,44	28,80	$0,58 \cdot 10^{-3}$
2000	1,80	0,252	5,04	$5,10 \cdot 10^{-3}$

Nel passaggio attraverso la membrana il fatto che il campo aumenti per un fattore ≈ 20 dipende da fenomeni di risonanza, come già evidenziato a proposito delle tabelle 2, 3 e 4.

*Quali sono i possibili **effetti biologici** di un'esposizione a campi elettromagnetici caratterizzati dai valori alla base della tabella 6? Tali effetti sono principalmente dovuti all'esistenza di **campi endogeni** generati per mezzo dell'attività metabolica dai diversi componenti della cellula, la rilevazione sperimentale dei quali è un fatto scientifico recente [14a, 14b].*

Il campo interno indotto da una radiazione incidente può interferire con tutti i CEM endogeni associati ai movimenti, ai processi metabolici e di trasmissione dell'informazione che avvengono nella cellula. In particolare, il **campo interno indotto dalle emissioni dell'antenna NRTF può interferire con:**

i) microtubuli (kHz – GHz)

I microtubuli sono le “ossa” della cellula, in quanto sono la struttura fondamentale del **citoscheletro** all'interno del citosol (Fig. 21a); il citoscheletro fornisce alla cellula un riferimento interno e le consente di muoversi e cambiare forma. Sono dei sottili filamenti (Fig. 21 b) caratterizzati da un'elevata instabilità dinamica ai loro estremi, che permette di alternare in quelle regioni fasi di crescita o di riduzione.

Dal punto di vista biochimico i microtubuli sono complessi macromolecolari costituiti da due proteine globulari, cioè di forma sferica, della famiglia delle tubuline; una delle tre classi, insieme a quelle fibrose e a quelle di membrana, delle proteine cellulari. Al contrario degli altri due tipi le proteine sferiche hanno una qualche solubilità nell'acqua, formando colloidi.

I microtubuli sono lunghi fino a $50\ \mu\text{m}$ e hanno diametro esterno di 24 nm e interno di 12 nm (Fig. 21a); hanno una vita media di 5-10 minuti, che in alcuni casi si estende fino ad alcune ore.

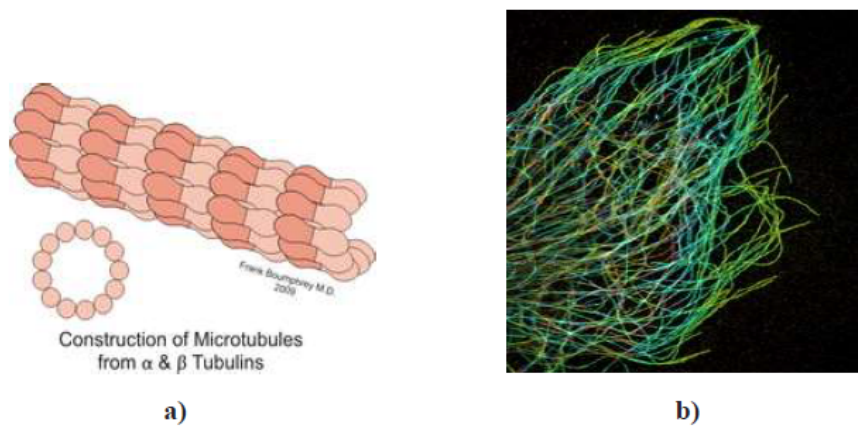


Fig. 21a - Struttura di un microtubulo. L'anello rappresenta la sezione di un microtubulo e mostra i 13 protofilamenti attorno alla cavità tubolare; b - I microtubuli sono dei sottili filamenti

I microtubuli sono importanti per l'organizzazione e lo spostamento non solo della cellula ma dei costituenti intracellulari; sono essenziali per il processo morfogenetico dello sviluppo di un organismo; costituiscono la parte fondamentale del "fuso mitotico", utilizzato dalle cellule eucariotiche per segregare i cromosomi durante la divisione cellulare.

ii) correnti ioniche (Hz – MHz)

Si è già detto della rilevanza della modifica delle correnti ioniche, cioè i flussi di ioni, attraverso la membrana e si sono già esaminati i meccanismi base: la pompa ionica, che determina il gradiente di concentrazione attraverso la membrana, attivata dall'energia metabolica della cellula e il canale ionico che consente agli ioni di attraversare la membrana utilizzando il gradiente di concentrazione (Fig. 17, 18).

iii) vibrazioni di dipoli elettrici della membrana (MHz – THz) (per il radar)

I dipoli elettrici presenti all'interno del materiale biologico sono in permanente vibrazione dovuta all'agitazione termica della materia. Alle oscillazioni di ogni carica la teoria classica dell'elettromagnetismo associa l'emissione di un campo elettromagnetico, la cui potenza è proporzionale al quadrato della carica e alla quarta potenza della frequenza di oscillazione.

7.3 RADAR e effetti specifici

Il MUOS è allo stato di progetto; in carenza dei dati che soli possono dar senso a stime sulle emissioni e gli eventuali impatti ambientali e sanitari può essere utile richiamare alcuni aspetti e osservazioni generali, prope-deutici però allo studio del caso di Niscemi.

Guglielmo Marconi (1874-1937), nel 1922, aveva sottolineato che inviando da una nave un fascio di onde elettromagnetiche esse, raggiungendo un corpo metallico come un'altra nave sarebbero rimandate indietro rivelandone così la presenza. Negli anni '30 fu realizzato un dispositivo adatto a tale scopo, cui fu attribuito il nome di **RADAR**. Questo termine fu coniato negli Stati Uniti ed indica tutte le apparecchiature impiegate per ricercare ed identificare la posizione di corpi distanti nello spazio: è l'acronimo di *Radio Detecting And Ranging*, ovvero «apparecchio radio che scopre e localizza». Il suo utilizzo iniziò durante la Seconda guerra mondiale e in molte circostanze fece la differenza tra gli apparati militari che erano riusciti a dotarsene e quelli che non ce l'avevano.

Il radar è un dispositivo elettronico in grado di estendere la capacità dell'occhio umano di vedere a distanza ed in condizioni sfavorevoli, quali il buio o durante le perturbazioni meteorologiche. Il principio di funzionamento del radar è basato sulla riflessione delle onde elettromagnetiche quando queste incontrano un ostacolo: in relazione al tipo di segnale generato si distinguono in *radar a impulsi* e *radar a onda continua o Doppler*.

Il primo tipo, che è quello di cui ci occuperemo perché è il MUOS, è costituito da un trasmettitore che emette per mezzo di un'antenna parabolica onde elettromagnetiche di brevissima durata – impulsi dell'ordine del microsecondo – ma di elevata potenza (fino al megawatt); quando il fronte dell'onda, che si propaga con la velocità c della luce, incontra un ostacolo (bersaglio), si produce un'onda riflessa, o re-irradiata, che ritorna alla sorgente (eco). Il tempo t impiegato dall'impulso per essere captato dalla sorgente permette di calcolare la distanza d fra radar e oggetto:

$$d = \frac{c \cdot t}{2} \quad [\text{m}]$$

Il fattore 2 a denominatore indica il doppio percorso dell'onda elettromagnetica.

Quasi tutti i radar utilizzano un'unica antenna, molto direzionale, che opera in trasmissione, per un brevissimo tempo, e in ricezione per il tempo rimanente. I dati sono elaborati dal ricevitore e presentati, di solito, su uno schermo luminoso per la lettura rapida dei valori di posizione e di velocità. Per il controllo del traffico aereo si riescono a controllare distanze fino a 300 km.

I radar sono sorgenti molto direzionali: le antenne sono realizzate in modo da avere il massimo dell'irraggiamento nella direzione di alcuni gradi sopra l'orizzonte e il minimo verso il suolo. L'antenna viene ruotata per esplorare lo spazio circostante e in questo modo attua la funzione di radiolocalizzazione e di radiogoniometro.

Nel radar a impulsi, il fascio elettromagnetico emesso all'interno dell'intervallo di frequenza delle microonde, [0,3 - 300] GHz, è caratterizzato da una distribuzione di esplosioni di potenza, gli impulsi, separati da intervalli nei quali la potenza emessa dall'antenna è nulla (Fig. 22). Ogni impulso (area rossa) possiede una potenza di picco W_p e un'ampiezza, la durata temporale τ , di solito brevissima (dell'ordine dei microsecondi).

La frequenza di ripetizione degli impulsi è data dalla relazione $\nu_p = 1/T$ con un periodo di ripetizione $T \gg \tau$, mentre la potenza media W_m è data dalla relazione

$$W_m = \frac{W_p \cdot \tau}{T} = W_p \cdot \tau \cdot \nu_p = W_p \cdot \delta \quad [\text{W}]$$

in cui $\delta = W_m/W_p = \tau/T$ è il *duty cycle* (fattore di utilizzo), cioè la frazione di tempo in cui il radar trasmette.

Una situazione tipo può essere: frequenza di ripetizione degli impulsi $\nu_p = 1000$, $\tau = 10^{-6}$ (1 microsecondo); di conseguenza $\delta = 10^{-3}$, cioè *il picco di potenza è presente per un millesimo del tempo di ripetizione del segnale* e $T = 10^{-3}$ s. La potenza di picco può essere dell'ordine del megawatt (MW), diversamente la potenza media che, in questo caso, è dell'ordine del kilowatt (kW); e quest'ultima è un millesimo di quella di picco come ovvia

conseguenza del fatto che è la media tra valori di potenza nulli per la quasi totalità del periodo di ripetizione T e valore di picco che dura un millesimo di T .

La gran parte delle radiofrequenze (RF), sia che l'emissione dall'antenna avvenga con continuità, come per un oscillatore, o sia modulata in ampiezza, in frequenza o in fase, sono considerate continue perché la radiofrequenza è sempre presente (vedi anche Fig. 22a).

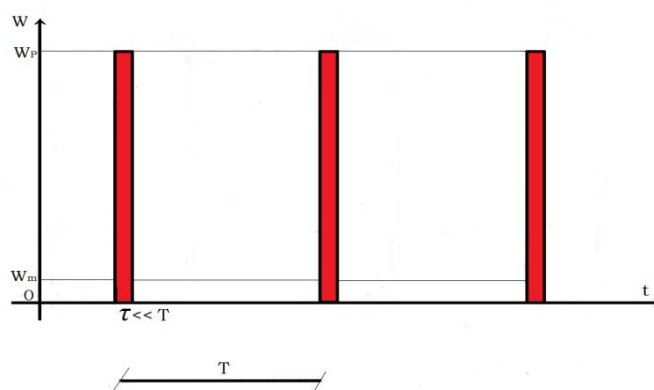


Fig. 22 - Treno di impulsi del radar. Nelle applicazioni si suppone che gli impulsi siano generati tutti con la stessa ampiezza τ . Le rappresentazioni dei valori di W e di τ sono infedeli, per necessità di disegno, perché sia W_m che τ sono almeno mille volte più piccoli, rispettivamente, di W_p e di T

Si tenga presente che spesso, soprattutto per i radar militari, dati tecnici precisi non sono disponibili in quanto segreti. Dal punto di vista protezionistico è invece importante conoscere il valore della densità di potenza S o del campo elettrico dell'onda elettromagnetica emessa in funzione della distanza r dal radar.

Un effetto specifico delle radiazioni radar è la **percezione sonora delle microonde**, legato all'interazione tra radiazione elettromagnetica ed organismi superiori. Oggetto di una lunga diatriba scientifica, la sua rilevazione, risalente ai sintomi dichiarati dal personale militare addetto ai radar già nella seconda guerra mondiale, fu alla fine di fatto accettata negli anni Settanta. Le prime testimonianze riguardanti la percezione sonora delle microonde furono riportate dagli addetti ai radar ad impulsi durante la Seconda Guerra Mondiale: essi riferirono di avere udito un **suono secco metallico**, oppure un **ronzio**, con la medesima cadenza di ripetizione dell'impulso di energia emesso dal radar mentre si trovavano in piedi e di fronte all'antenna. Queste testimonianze furono reputate come frutto della fantasia o della suggestione.

Negli anni '60, l'eminente biologo Allan H. Frey controllò la veridicità dei racconti e scoprì che «sentire il radar» era un fenomeno reale. Negli anni '70 la comunità scientifica, dopo ben 10 anni di ostracismo, riconobbe l'esistenza del fenomeno che negli anni '80 fu ampiamente studiato.

I risultati della ricerca indicano che è sufficiente irradiare la testa di un essere umano con impulsi di microonde (Fig. 22) nell'intervallo di frequenza ν compreso tra 200 e 3.000 MHz (microonde), densità di potenza di picco $S_p = 300$ mW/cm², densità di potenza media dell'ordine di $S_m = 0,1$ mW/cm² (cui corrisponde il valore $E_{eff} = 19,4$ V/m) e durata temporale τ dell'impulso compresa tra 1 e 100 μ s, per ottenere l'effetto biologico, cioè la percezione acustica delle microonde.

Il **meccanismo biofisico di interazione** più probabile per questo effetto biologico sembra essere quello **dell'espansione termo-elastica** dei tessuti. In base a questa interpretazione l'impulso a microonde che penetra nel capo viene assorbito e l'energia elettromagnetica convertita in calore; il minuscolo ($\approx 10^{-6}$ °C) e rapidissimo (10 μ s) aumento di temperatura nella testa determinerebbe un'espansione termoelastica dei tessuti cerebrali. L'onda di pressione acustica generata dalla tensione termoelastica raggiungerebbe dal cervello la coclea, un organo a forma di conchiglia che si trova nell'orecchio interno, ove sarebbe rilevata come onda sonora dai recettori dell'orecchio. L'effetto ora descritto è indicato in letteratura come **effetto microtermico** (*micro thermal effect*); negli anni '70 furono scoperti altri fenomeni di questo tipo, meno noti, quali l'azione dei campi a radiofrequenza e microonde sull'apparato vestibolo-cocleare, responsabile dell'equilibrio e dell'orientamento corporeo. L'interazione è legata al gradiente di temperatura provocato da un ineguale assorbimento della radiazione nel capo.

La risposta ufficiale che fu data agli interrogativi sugli eventuali effetti sanitari connessi alla percezione sonora delle microonde era che l'unico elemento emerso negli studi comportamentali era stato il senso di fastidio verso i campi a microonde manifestato dagli animali: si può pertanto ipotizzare che i ratti di laboratorio percepiscono le microonde con fastidio, allo stesso modo in cui gli esseri umani sono infastiditi dal rumore. In definitiva, **non vi è da preoccuparsi**.

Di diversa opinione erano Frey e altri ricercatori, che non si riconoscevano in questo ragionamento e che inaugurarono a suo tempo il meritato appellativo di **ricercatori indipendenti**. Essi proponevano la spiegazione che le onde di pressione acustica, che deformano il tessuto cerebrale, *possono danneggiare il cervello a seguito di un'esposizione prolungata ad un campo a microonde (effetto cronico)*.

Dal punto di vista sanitario la patologia insorgente, denominata **sindrome da scuotimento violento**, è caratterizzata da marcati cambiamenti comportamentali: ridotta capacità di attenzione e di trattare informazioni complesse, disturbi della memoria e mutamenti della personalità, aumento della

labilità emotiva, instabilità e depressione. In questi soggetti, il danno neurologico è caratterizzato da microscopiche lesioni nella sostanza bianca, ed in particolare nel midollo allungato e nel «ponte di Varolio».

Nella membrana cellulare sono presenti campi elettrici endogeni di varie frequenze; uno di questi è centrato sulla frequenza di circa 1 GHz, e la sua intensità è molto minore di 1 mV/m [14b].

Il radar ad impulsi induce campi elettrici impulsivi nella membrana cellulare. Per un campo esterno E_{air} di 50 V/m, a 5 cm dentro il cervello si hanno campi indotti (della durata del μs) che sulle membrane delle cellule sferiche (c.s.) possono arrivare a un valore massimo pari a quello di E_{air} , e per le cellule allungate (c.a.) al valore di circa 7 V/m (vedi Tab. 4): da 10.000 a 100.000 volte il valore dei campi endogeni presenti nella membrana (Tab. 7).

Tab. 7 - Confronto tra i valori del campo endogeno della membrana e del campo indotto dalle microonde

CAMPO ENDOGENO NELLA MEMBRANA		CAMPO INDOTTO NELLA MEMBRANA DA $E_{air} = 50$ V/m	
v	V/m	v	V/m
0 Hz	$12 \cdot 10^6$		
1 GHz	$\ll 10^{-3}$	800-900 kHz	6,8 (c.a.) – 50 (c.s.)

Studi e sperimentazioni hanno mostrato con molta evidenza e sull'arco di oltre mezzo secolo che rilevanti effetti biologici si manifestano come *effetti finestra* sia per l'intensità che per la frequenza del campo incidente, ma è stata avanzata anche l'ipotesi che *effetti biologici specifici dei radar* siano legati al *carattere pulsato* delle loro emissioni. Anche se l'ipotesi non trova conferma nella pur vasta letteratura scientifica sviluppata nei settant'anni di operatività del radar, vale la pena soffermarci.

Forse ha influito la convinzione che il fondo elettromagnetico naturale si distribuisca come uno spettro "continuo" su tutte le frequenze e che gli impulsi radar costituiscano invece una perturbazione distribuita in modo discreto, rispetto a quel continuo, e di molto maggiore intensità; insomma, delle "percosse" molto intense che avvengono in un nanosecondo, se la frequenza del radar è dell'ordine del GHz. E questo è proprio l'ordine di grandezza, il nanosecondo, dei tempi impiegati in molte attività enzimatiche.

Una prima questione è, se l'ipotesi guarda non tanto all'intensità quanto alla natura discreta dell'impulso, che non è vero che il fondo elettromagnetico naturale dia luogo a uno spettro continuo; al contrario, il vivente ha stabilito il suo equilibrio evolutivo proprio con campi pulsati, del tipo di quelli mostrati in Fig. 10a e iterati in modo casuale in tutta la banda delle

alte frequenze. Uno spettro discreto, quindi, quello del fondo naturale, per la natura stessa dei fenomeni che lo originano (vedi Tab. 1a); al contrario, sono proprio i campi artificiali ad avere una distribuzione regolare. In secondo luogo l'impulso del radar, al di là del nome che gli viene dato e della rappresentazione grafica (le colonnine di Fig. 22), lungi dall'essere un'onda «a scalino» è un'oscillazione regolare che si ripete moltissime volte nella durata τ dell'impulso, e quindi, stando ai valori numerici che abbiamo finora assunto, alla frequenza di 1GHz, un'oscillazione ogni nanosecondo; per avere un'idea vedi Fig. 22a).

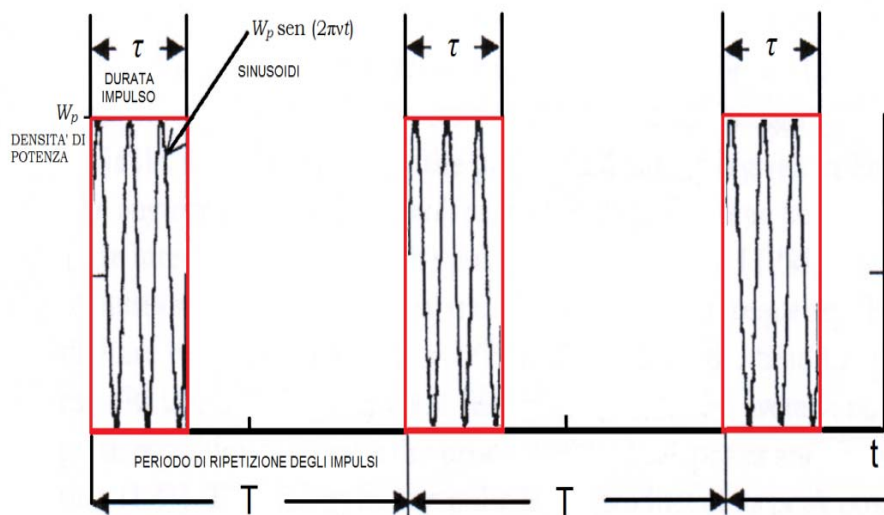


Fig. 22a - Ogni impulso della Fig. 20 non è un rettangolino, ma, per una frequenza di emissione del radar dell'ordine del gigahertz (GHz), cioè un miliardo di oscillazioni al secondo, è composto da 1000 oscillazioni di ampiezza W_p , che si succedono nella durata, $\tau = 1 \mu s$, dell'impulso e che non possono essere rappresentate fedelmente, almeno con questa grafica. W_p può andare dal centinaio di kW al MW

Ciò comporta, tornando all'enzima ed esemplificando, che se è sottoposto al campo indotto dall'impulso del radar da 1 GHz, l'enzima verrà polarizzato dall'oscillazione elettromagnetica prima in un senso poi in quello opposto nel nanosecondo in cui svolge la sua attività. Poiché l'impulso è in realtà un treno di mille onde che si susseguono nella sua durata τ ($1 \mu s$), l'enzima in questo intervallo di tempo subirà mille polarizzazioni alternate, poi potrà rilassarsi per il tempo T di ripetizione del segnale, pari a circa mille volte, 999 per la precisione, quello in cui è stato strapazzato. Se invece fosse sottoposto a un irraggiamento continuo alla frequenza di 1 GHz, non

avrebbe il tempo di rilassarsi né sulla durata T né su ogni altro intervallo temporale fino a quando non cessasse l'esposizione. E quest'ultima situazione sembra costituire un maggior impatto sull'attività enzimatica; *a fortiori* su quelle attività, esistenti, che hanno durate del picosecondo (10^{-12} s) o ancora minori. In questi casi infatti il mondo delle attività che stiamo considerando vedrebbe come un tempo biblico lo stesso nanosecondo della singola oscillazione da 1 GHz; e in questa durata, il nanosecondo, le migliaia, o anche più, di dinamiche di alcuni componenti cellulari che potrebbero aver luogo in successione temporale, si esplicherebbero sempre sotto la spada di Damocle dell'impulso per loro "continuo".

In definitiva, ci vorranno argomenti e sperimentazioni davvero convincenti, da parte della Biochimica o della Biofisica, *per poter dare corpo all'ipotesi di un'azione specifica dovuta al carattere pulsato dei radar.*

Per lo studio dell'interazione tra i campi endogeni e la radiazione incidente, pulsata o no, abbiamo già segnalato le frequenze di vibrazione proprie di alcune strutture cellulari, che si estendono su un amplissimo spettro – dagli Hertz ai TeraHertz – e che sono divenute negli ultimi anni oggetto di elaborazioni e di sperimentazioni particolarmente interessanti, nelle quali intendiamo impegnarci.

8. Modelli di interazione

8.1 Cercando di spiegare gli effetti specifici: la «coerenza»

Nei precedenti capitoli abbiamo visto gli intervalli di frequenza nei quali possono aver luogo interazioni tra oggetti biologici e radiazione RF o MW. Ma *quali sono i meccanismi di una tale interazione?* È bene ripetere che non abbiamo a tutt'oggi una teoria generale per questo tipo di interazioni; e gli elementi fondanti questa possibile teoria, come pure i più promettenti modelli, sono oggetto di un dibattito scientifico che è ben lungi dalla conclusione con un punto di vista largamente condiviso. In ogni caso ogni teoria o modello si trova di fronte di un'ampia raccolta di dati sperimentali che richiedono una spiegazione.

L'evidenza sperimentale cumulata per molti decenni consente di andare oltre la già citata affermazione di Carl F. Blackman, che tuttavia ci piace ripetere: «... *campi elettrici e magnetici di bassa intensità possono alterare l'omeostasi degli ioni di Calcio, come anche le risposte che gli organismi viventi danno all'ambiente...*»¹. Di fatto, esperimenti *in vitro* e *in vivo* e analisi epidemiologiche mostrano, in generale, la capacità di CEM anche assai deboli – molto al di sotto dei limiti di esposizione – di produrre effetti e di modificare normali funzioni biologiche, ogni effetto in corrispondenza a una ben determinata banda di frequenza.

Gli *effetti specifici della radiazione elettromagnetica esistono*, e per una rassegna dei tanti risultati e dell'ampio dibattito scientifico che è andato avanti da più di un secolo si può far riferimento a un testo già ricordato [1b].

Qui di seguito proponiamo un breve elenco di teorie o modelli proposti nel tentativo di spiegare i fenomeni registrati e i risultati ottenuti dagli esperimenti.

¹ «... *electric and magnetic fields of low intensities can modify the normal homeostasis of the Calcium ions and alter the answers given to environments by the living organisms*».

Cominciamo col ricordare la *coerenza quanto-elettrodinamica* della materia, anche biologica, proposta da Giuliano Preparata nei primi anni Novanta [15 a], [15b], e il lavoro e i modelli elaborati da lui insieme ai suoi colleghi, soprattutto Emilio Del Giudice [16]. Emilio si era interessato, già a partire dagli anni Ottanta, allo studio dei comportamenti collettivi e coerenti dei sistemi biologici, seguendo la strada indicata da **Herbert Frölich** (1905-1991), le cui ricerche sono state e restano una pietra miliare del Bioelettromagnetismo.

I sistemi biologici, come anche la materia inorganica, sono composti da elementi che sono in perenne vibrazione a causa dell'agitazione termica. Nonostante questi elementi siano in generale elettricamente neutri, si comportano di fatto come dipoli elettrici in virtù dei continui spostamenti delle cariche elettriche. Infatti gli elettroni, ad esempio, creano col loro movimento una regione positiva, quella che abbandonano, e una negativa, quella in cui si spostano. Il dipolo che si viene così a creare ha un suo *modo di vibrazione proprio*, modellizzabile come un oscillatore armonico, al quale corrisponde un'emissione elettromagnetica, secondo quanto previsto dalla *formula di Larmor* (vedi 5.2). Lo stesso vale per tutti gli elementi biologici che abbiamo detto essere organizzati come dipoli permanenti.

Così un sistema biologico, una cellula o anche tutti i suoi componenti, dalle proteine di membrana ai mitocondri ai tubuli, si possono pensare come un sistema di dipoli oscillanti. Tutte queste oscillazioni, e le corrispondenti emissioni elettromagnetiche, sono caotiche, a meno che non si realizzino particolari condizioni per le quali una parte di esse si comporta come fosse un coro, sintonizzate sulla stessa *fase* e sulla stessa frequenza (vedi cap. 1): un insieme di *oscillazioni coerenti*.

Frölich, uno dei pionieri della fisica dello stato solido, fu tra i primi a ipotizzare che nei *sistemi biologici* potesse aver luogo, sotto certe condizioni, una sorta di «*condensazione*» dei *modi di vibrazione* dei dipoli in un unico modo collettivo – *un dipolo gigante* – in modo del tutto analogo a quello che nel 1925 Albert Einstein e Satyendra N. Bose avevano teorizzato per la materia inorganica.

In breve, Frölich era convinto che diversi sistemi biologici dovessero vibrare longitudinalmente, cioè secondo la direzione del dipolo, in una regione di frequenza corrispondente alle MW ($[10^{11} - 10^{12}] \text{ s}^{-1}$). Se questo gruppo di oscillazioni venisse alimentato da un'energia a un tasso medio superiore a una certa soglia, allora l'energia così fornita al sistema non si degraderebbe tutta nella forma disordinata del calore ma potrebbe essere immagazzinata nella forma assai ordinata di *eccitazioni coerenti*.

Queste eccitazioni sono stati stazionari di vita brevissima, ma esistenti come vibrazioni elettromagnetiche coerenti nella regione delle MW e dota-

te di un alto momento di dipolo; sono questi stati che *possono condensare in un dipolo gigante* [17]².

Era un punto di vista completamente innovativo attribuire ai sistemi biologici comportamenti coerenti, quali quelli noti per i laser o la superconduttività o la superfluidità; una strada assai importante, non certo facile ma aperta a molti studiosi e ricercatori del bioelettromagnetismo.

8.2 Cercando di spiegare gli aspetti specifici: la «risonanza»

Vi è un *principio comune* che sottosta all'idea che un sistema biologico, così come la materia inorganica, possa mostrare un livello di ordine maggiore di quello che le vien abitualmente attribuito e che, sotto certe condizioni, possa produrre emissioni di CEM o comportarsi come un superconduttore anche a temperatura ambiente: la *risonanza*.

Alcuni autori hanno intitolato delle loro ricerche proprio a quel principio, che riportiamo qui in un breve elenco: *risonanza di ciclotrone*, proposta da A.R. Liboff (1985) e in Italia da A. Chiabrera and B. Bianco; *risonanza parametrica* di V.V. Lednev (1991) e sviluppata inseguito da J.P. Blanchard and C.F. Blackman; *risonanza di precessione*, proposta da M.N. Zhadin (1998) e della quale parleremo tra poco.

Per amore della verità *la questione della risonanza è alla ribalta da 90 anni*, almeno da quando Antonin Gosset e George Lakhovsy, un versatile ingegnere proveniente dalla Russia, *condussero nel 1924 un esperimento* presso l'Ospedale della *Salpêtrière a Parigi*. Si trattava del *primo esperimento* nel quale sistemi biologici venivano sottoposti a campi elettromagnetici generati da *un apparato a valvola elettronica*. Grazie a questo dispositivo, inventato da poco, gli ingegneri avevano iniziato a realizzare generatori di corrente a frequenze molto più elevate di quelle rese disponibili in precedenza, e l'industria aveva rapidamente prodotto generatori che si estendevano fino alle onde ultra-corte, usati inizialmente nel campo delle telecomunicazioni e immediatamente dopo in medicina.

Alla Salpêtrière onde ultra-corte vennero irradiate su piante di geranio che erano state inoculate in precedenza con l'*Agrobacterium tumefaciens* per indurre in esse un tumore.

Era la prima volta che veniva usata in una ricerca una frequenza da 150 MHz. I tumori nelle piante esposte andarono in necrosi e vennero age-

² Vale la pena notare che la *condensazione* di *Bose-Einstein* ha dovuto aspettare settant'anni prima di essere confermata sperimentalmente, fruttando qualche anno dopo il Nobel ai due scopritori, mentre l'ipotesi di Frölich non ha dovuto aspettare così tanto per una sua conferma.

volmente staccati con un reale beneficio, visibile nella maggior produzione di fiori rispetto a quella dei controlli, i quali, dopo la crescita dei tumori, morirono in pochi mesi [1b].

Quegli esperimenti non furono un caso, ma erano intenzionalmente mirati a verificare un'ipotesi avanzata nel 1923 da Lakhovsky, secondo la quale la cellula può comportarsi come un *oscillatore elettromagnetico*, cioè *un sistema che in corrispondenza a certe (alte) frequenze può oscillare*, come vedremo, *con un'ampiezza maggiore*. E pensare che qualcuno professa la «bio-risonanza» come una novità degli ultimi 30 anni! Al contrario, il tempo trascorso da allora senza che un'interpretazione chiara e inequivocabile degli effetti biologici si sia affermata fa capire l'attenzione con la quale si deve procedere su questo terreno per evitare il rischio che la risonanza, magari con l'aggiunta di «bio» – bio-risonanza, appunto – diventi un mantra o una non risposta a un problema complesso.

Guardiamo allora un po' più a fondo nel *fenomeno della risonanza*, che si può incontrare in quasi tutti i domini della scienza, dalla meccanica celeste alla meccanica delle costruzioni, dalla teoria degli strumenti musicali allo studio degli effetti sonori, all'ottica, all'elettronica, alla chimica, allo studio dei sistemi biologici e così via.

Possiamo partire dalla ben nota storia del ponte che crolla sotto il passo cadenzato di una compagnia militare. Non è certamente il peso e la battuta dei piedi, il ponte è stato progettato rispetto a ben altre sollecitazioni, che fa cadere il ponte, ma la cadenza del passo dei militari. La cadenza è infatti una frequenza, che può essere molto vicina a una frequenza *propria* di vibrazione di una delle strutture portanti del ponte; in questo caso allora una quantità d'energia relativamente piccola ceduta al ponte col ritmo di battuta del passo può essere amplificata a un livello tale che l'assorbimento di questa energia da parte della struttura del ponte ne determina il crollo (come l'effetto di una esplosione).

In generale si può dire che ogni sistema, microscopico o macroscopico, è capace di oscillare su delle sue frequenze caratteristiche: le ***frequenze proprie di vibrazione*** (oscillazione e vibrazione sono sinonimi).

La risonanza è allora la capacità di un sistema materiale di aumentare significativamente l'ampiezza di oscillazione in corrispondenza a certe frequenze, quelle che abbiamo chiamato frequenze proprie di vibrazione.

Se una sollecitazione esterna ha una frequenza vicina a quella propria di vibrazione di un sistema, l'energia trasferita dalla perturbazione al sistema viene amplificata; e poiché l'energia di vibrazione è proporzionale al quadrato dell'ampiezza (vedi 3.2.1), l'energia assorbita dal sistema crescerà secondo una legge quadratica, vale a dire che a un raddoppio dell'ampiezza corrisponde una quadruplicazione dell'energia; mentre l'ampiezza in fun-

zione della frequenza avrà, in un intorno della frequenza propria, l'andamento illustrato in Fig. 23.

Con il meccanismo della *risonanza parametrica* Carl Blackman ha cercato di spiegare la significativa quantità di dati sperimentali cumulati in trent'anni di ricerche, quelli cui si riferiva nel già citato Workshop di Vienna (1998) sulla variazione del flusso degli ioni Ca^{++} dalla cellula, quando un campo magnetico interagisce con la «pompa» Sodio/Calcio che regola quel flusso.

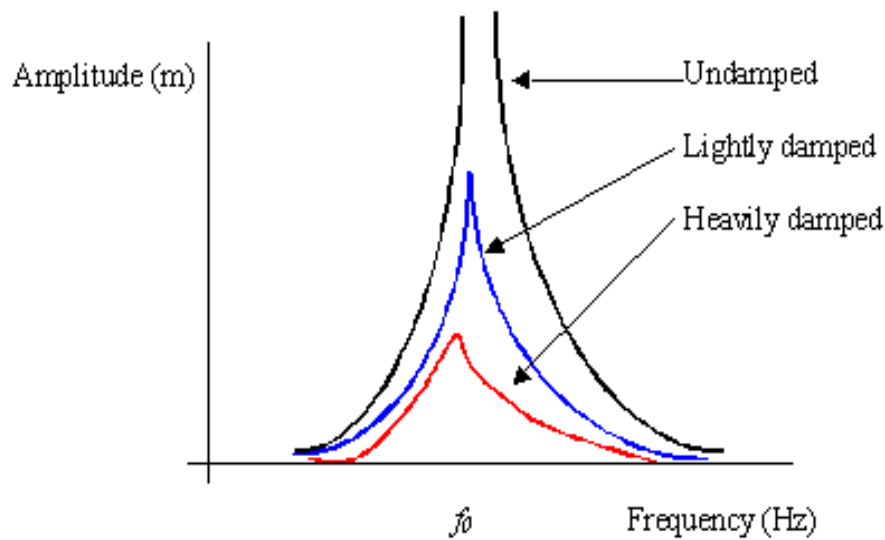


Fig. 23 - Il modello rappresentato ha un carattere universale, che non dipende cioè dal particolare campo scientifico di applicazione. In ordinate, l'ampiezza di oscillazione. La frequenza di vibrazione propria è f_0 ($= \nu_0$); l'andamento delle curve dipende dallo smorzamento cui è sottoposta la vibrazione, che si ripercuote a sua volta sul trasferimento d'energia. In assenza di smorzamento, la curva più alta, si ha la «catastrofe»: il ponte crolla (tratto da: myweb.fcu.edu.tw)

8.3 Campi estremamente deboli; il «paradosso kT» e l'«effetto Zhadin»

E se i CEM interni che interagiscono con il sistema biologico sono deboli, come li chiama la «scuola russa», o addirittura estremamente deboli?

Uno dei problemi chiave del bioelettromagnetismo è proprio la spiegazione del meccanismo tramite il quale i campi elettromagnetici deboli possono agire sugli oggetti biologici; questo meccanismo non è ancora chiaro

nonostante i numerosi dati sperimentali disponibili. In particolare non è chiaro *quando* e *come* campi magnetici o elettrici, statici o di bassissima frequenza, possano portare le reazioni biochimiche alla risonanza, soprattutto se l'energia trasportata da questi campi è molto piccola rispetto all'energia del «fondo», $k_B T$, dove k_B è la costante di Boltzmann, d'ora in avanti k , e T è la temperatura in gradi Kelvin.

Abbiamo già detto dell'*agitazione termica*, delle vibrazioni che agitano ogni oggetto presente in natura come asseriva l'antica filosofia atomista di Democrito e Epicuro e ha mirabilmente cantato il grande poeta latino Lucrezio. È la meccanica statistica che assegna a questo insieme di vibrazioni caotiche, che appena sopra abbiamo chiamato *fondo* e che usualmente viene detto *rumore termico*, un livello d'energia uguale a kT , il cui valore a temperatura ambiente ($T = 293$ °C) è $4,11 \cdot 10^{-21}$ J o 0,026 eV.

C'è una corrente scientifica, ad oggi dominante, che afferma che il rumore termico maschera ogni effetto biologico dei campi deboli perché il valore di kT è troppo più grande dell'energia trasportata dal campo debole incidente, quale ad esempio quello generato da un elettrodo. La mancanza di una spiegazione teorica, soddisfacente o almeno condivisa tra i ricercatori, della possibile azione di un campo debole a dispetto della "barriera" rappresentata dall'energia del rumore termico è oggi chiamato «*problema kT* » o «*paradosso kT* » [18].

In questo contesto un ricercatore russo, Michael Zhadin, e i suoi collaboratori hanno affrontato la questione su un terreno sperimentale, realizzando negli anni Novanta un esperimento che consisteva nell'irraggiare con *un campo magnetico alternato, di bassissime frequenza e intensità*, un oggetto *organico ma non biologico*: l'acido glutammico. L'intento dei ricercatori russi era infatti mirato non tanto a fornire una risposta al problema kT , come inseguito è stato chiamato, quanto a *sperimentare l'azione di campi estremamente deboli su un materiale organico*, evitando così di addentrarsi nella complessità di quel che accade per un sistema biologico.

L'acido glutammico era contenuto come soluzione elettrolitica in un reattore; dobbiamo premettere che uno ione della soluzione, sottoposto a un campo *magnetico statico* B_0 , si muove di moto circolare uniforme, una precessione, nel piano ortogonale a B_0 con una frequenza ν_c , detta *frequenza di ciclotrone*, caratteristica di ogni sostanza e così definita:

$$\nu_c = \frac{q B_0}{2\pi m}$$

dove m , q sono, rispettivamente, massa e carica dello ione, e ν_c il numero di rivoluzioni per secondo dello ione.

Qui di seguito una sintesi delle condizioni sperimentali.

Nell'esperimento veniva applicata una tensione di 80 mV alla cella del reattore riempito di acido glutammico in soluzione, generando così una *corrente elettrolitica*. La cella era posta all'interno di due solenoidi in grado di assicurare la presenza di **due campi magnetici paralleli**: uno *statico* ($B_0 = 20-40 \mu T$), la cui intensità era dell'ordine di grandezza del campo geomagnetico ($B_T \approx 40 \mu T$); l'altro, *un campo alternato di bassissima intensità* ($B_{ac} = 20-80 nT$) e di frequenza che variava nell'intervallo [2,4] Hz. I due campi magnetici erano applicati ortogonalmente alla direzione della corrente elettrolitica. Tutto l'apparato sperimentale era posto all'interno di un contenitore di una lega in grado di schermare dai campi esterni (permalloy).

Questi furono i risultati [19]:

i. quando la frequenza del campo alternato, B_{ac} , era uguale a quella di ciclotrone per l'acido glutammico, l'intensità della corrente elettrolitica della cella aveva un picco, la cui massima altezza iniziale era l'80% più grande del valore stazionario e la cui durata era dell'ordine di 15-20 secondi.

ii. l'effetto appena descritto spariva quando l'intensità del campo alternato superava una soglia, di valore molto basso. In altre parole, l'effetto si manifestava solo come sottile influenza e spariva quando il campo alternato faceva la «voce grossa».

In sintesi, la soluzione elettrolitica di acido glutammico veniva influenzata dall'azione di un campo estremamente debole: l'effetto era un impulso di corrente rivelato da un oscilloscopio. Le **frequenze finestra** trovate da Zhadin nei suoi esperimenti si trovavano a 4 Hz per $B_0 = 40 \mu T$ e $B_{ac} = 10, 20, 30 nT$; e nell'intervallo [2,4] Hz, con un passo di 0,5 Hz, in corrispondenza a $B_0 = 20, 25, 30, 40 \mu T$ e $B_{ac} = 25 nT$.

Il risultato di questi esperimenti fornisce, al di là del diretto intento della ricerca, un'eccellente risposta alla domanda: «Possono i segnali deboli superare il rumore termico e produrre, quindi, un effetto?». In certe condizioni, quelle dell'effetto finestra, *un segnale estremamente debole quale quello associato a un campo magnetico alternato di poche decine di nanoTesla, pur avendo un'energia incomparabilmente più piccola di quella del rumore termico, riesce a superare la «barriera» kT e a produrre un effetto registrato come impulso su un oscilloscopio.*

Molti autori si riferiscono a questo risultato come all'«effetto Zhadin»; lo stesso esperimento è stato replicato in Germania (2004, Pazur) e in Italia: 2002 Del Giudice et al., 2006 Comisso et al., 2008 Giuliani et al.; a quest'ultimo ha preso parte anche Zhadin [20].

Un esito dell'esperimento di Zhadin è quello di indicare come *infondata la pretesa irrilevanza dell'azione di campi estremamente deboli sui sistemi*

biologici; e apre una più generale questione teorica per l'interpretazione da dare a un tale risultato, alla quale a tutt'oggi non è stata data una risposta accettata e condivisa dai ricercatori del settore. Lo stesso Zhadin cercò di dare una spiegazione del fenomeno proprio in termini di risonanza, in un articolo scritto nel 2005; vediamo le conclusioni tratte dall'autore a questo proposito: «... Sfortunatamente, per gli ioni liberi un tal tipo di effetti (la risonanza, NdA) è assolutamente impossibile a causa delle dimensioni del raggio di rotazione, che dovrebbe valere metri alla temperatura ambiente e per le bassissime intensità dei campi magnetici statici usati in tutti gli esperimenti citati. Anche per gli ioni legati questi effetti sono impossibili secondo la fisica classica a causa dell'elevata viscosità dei liquidi biologici...»³ [21].

In conclusione, la risonanza non può aver luogo, dal punto di vista della fisica classica, a causa dell'alta viscosità dei liquidi biologici; d'altro canto, non può essere invocato un meccanismo di risonanza quando ci si muove in un dominio di tipo quantistico perché la risonanza è un fenomeno classico (infatti il raggio di rotazione viene stimato di vari ordini di grandezza più grande di quello dello ione di acido glutammico).

È ragionevole arguire che se ciò vale per una sostanza «semplice», l'acido glutammico, *a fortiori* dovrà valere per una sostanza più complessa come quella di un sistema biologico.

L'energia E_B associata al campo estremamente debole, B_{ac} , è dell'ordine di grandezza di quella di un salto quantico tra due livelli esterni dell'atomo di Idrogeno. Infatti, nell'esperimento di Zhadin le frequenze di ciclotrone sono tutte inferiori a 10 Hz, perciò $EB < h \cdot 10 = 6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 10 = 6,626 \cdot 10^{-33}$ J; in eV, $EB < 6,626 \cdot 10^{-33} \cdot 6,2421 \cdot 10^{18} = 0,041 \cdot 10^{-12}$ eV, cioè alcune centinaia di miliardi di volte più piccola di kT (0,026 eV).

Per queste ragioni il tentativo di interpretare i risultati del suo esperimento con la risonanza di ciclotrone è stato abbandonato dallo stesso Zhadin; e l'insistenza sui risultati dell'esperimento e i tentativi di interpretarlo servono qui a sottolineare la complessità del problema e a scoraggiare una diffusa tendenza a interpretare un'ampia varietà di fenomeni in termini di «bio-risonanza»; se stiamo parlando di effetti macroscopici generati però a livello microscopico, guardiamo prima al valore dell'«azione» – proprio nel senso delle dimensioni fisiche (energia per tempo) – che possiamo loro associare per compararlo con il valore della costante di Planck h .

³ «... Unfortunately, experiments for free ions such sort of effects are absolutely impossible because dimensions of an ion rotation radius should be measured by meters at room temperature and at very low static magnetic fields used in all the before experiments. Even for bound ions these effects should be absolutely impossible for the positions of classic physics because of rather high viscosity of biological liquid media».

In questo contesto di *incertezze teoriche*, ma di fronte a un'intrigante prova sperimentale quale l'«effetto Zhadin», è un po' stupefacente il tono apodittico con il quale alcuni scienziati continuano a sostenere l'effetto di mascheramento operato dal rumore termico nei confronti dei campi estremamente deboli. Non a caso sono gli stessi che hanno fornito il background teorico alle analoghe certezze di WHO e ICNIRP riguardo all' assenza di effetti specifici dovuti ai CEM. Svetta, tra tutti loro, un fisico di Harvard, Robert K. Adair, i cui articoli, *quelli che negano ogni possibile effetto biologico derivante dall'esposizione agli elettrodotti*, costituiscono fin dai primi anni '90 una pietra miliare, lo «*Adair's constraint*», citato a tutt'oggi da vari ricercatori nonostante l'«effetto Zhadin» indichi sperimentalmente il contrario.

È una modesta ma sincera soddisfazione la dimostrazione che il calcolo fatto da Adair, sul quale si fonda il mitico *vincolo* del preteso mascheramento degli effetti, è basato su un errore concettuale e una conseguente stima teorica sbagliata per un fattore diecimila [22].

9. Bibliografia di riferimento

- [1a] Scalia M., Sperini M. et al. (2013), *Il fascino discreto dell'elettromagnetismo*, Andromeda, Roma; [1b] Scalia M., Sperini M. (2015), *Campi elettromagnetici e sistemi viventi*, Andromeda, Roma.
- [2a] Schwan H., Li K. (1956), *The Mechanism of Absorption of Ultrahigh Frequency Electromagnetic Energy in Tissues, as Related to the Problem of Tolerance Dosage*, «IRE Transactions – Medical Electronics», 4, pp. 45-9; [2b] Schwan H., Li K. (1954), *Capacity and conductivity of the tissues at ultrahigh frequencies*, «Proc.IRE», 4, 12, pp.1735-40; [2c] Schwan H., Li K. (1956), *Hazards due to total body irradiation by radar*, «Proc. IRE», 11, 11, pp. 1572-81; [2d] Schwan H. (1957), *Electrical properties of tissue and cell suspension*, «Advances in Biological and Medical Physics», 5, pp. 147-209, Academic Press; [2e] Schwan H. (1971), *Interaction of Microwave and Radio Frequency Radiation with Biological Systems*, «IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques», 19, 2, pp. 146-152.
- [3] Kritikos H.N., Schwan H. (1972), *Hot Spots Generated in Conducting Spheres by Electromagnetic Waves and Biological Implications*, «IEEE Transactions on Biomedical Engineering», 19, 1, pp. 53-8.
- [4] Kuster N., Balzano Q. (1992), *Energy absorption mechanism by biological bodies in the near field of dipole antennas above 300 MHz*, «IEEE Transaction on Vehicular Technology», 41, 2, pp. 17-23.
- [5a] King R.W.P., Harrison C.W. Jr. (1969), *Antennas and Waves*, M.I.T. Press, Cambridge, MA; [5b] King R.W.P., Smith G.S. (1981), *Antennas in Matter: Fundamentals, Theory, and Applications*, MIT Press, Cambridge, MA.
- [6a] King R.W.P. (1991), *The electromagnetic field of a horizontal electric dipole in the presence of a three-layered region*, «Journal of Applied Physics», 69, 12, pp. 7987-95; [6b] King R.W.P. (1993), *The electromagnetic field of a horizontal electric dipole in the presence of a three-layered region: supplement*, «Journal of Applied Physics», 74, 8, pp. 4845-48.
- [7] King R.W.P. (1995), *Electromagnetic field generated in model of human head by simplified telephone transceiver*, «Radio Science», 30, 1, pp. 267-281.
- [8] King R.W.P. (2000), *Electric currents and fields induced in cells in the human brain by radiation from hand-held cellular telephones*, «Journal of Applied Physics», 87, 2, pp. 893-900.
- [9] Barteri M., Pala A., Rotella S. (2005), *Structural and kinetic effects of mobile phone microwaves on acetylcholinesterase activity*, «Biophys. Chem.», 113, 3, pp. 245-253.

- [10] D'Amore M. (24 giugno 2013), *Relazione finale di verificaione: Progetto 002-06/1035-Installazione sistema di comunicazione per utenti mobili (MUOS)*, sito radio U.S. Navy 41° Stormo-Sigonella, in R.N.O. Sughereta di Niscemi.
- [11] Scalia M. (5 maggio 2013), *Relazione finale: Campagna di monitoraggio dell'ambiente elettromagnetico in Provincia di Roma, CIRPS - La Sapienza*, (on line, www.arpa.lazio.it).
- [12] King R.W.P., Harrison C.W. (1995), *Electromagnetic field in human body due to VLF transmitter*, «Proc. of the IEEE 21st Annual Northeast Bioengineering Conference», pp. 121-3.
- [13] King R.W.P. (1999), *Electric field induced in a spherical cell in the human body when exposed to a 50- to a 60-Hz electromagnetic field*, «Radio Science», 34, 2, pp. 539-47.
- [14a] Cifra M. (2012), *Electrodynamic eigenmodes in cellular morphology*, «Bio-Systems», 109, 3, pp. 356-66; [14b] Cifra M., Havelka D., Deriu M.A. (2011), *Electric Field Generated by Longitudinal Axial Microtubule Vibration Modes with High Spatial Resolution Microtubule Model*, «Electrodynamic Activity of Living Cells. Journal of Physics: Conference Series», 329, 1, [p. 012012](#).
- [15a] Preparata G. (1989), *Quantum field theory of 'superradiance'*, «Proc. of the 4th Winter School on Hadronic Physics, Folgaria (Trento), Italy, 6-11 February 1989», 1; [15b] Preparata G. (1995), *Quantum Electrodynamical Coherence in Matter*, World Scientific Publishing Co., Singapore.
- [16] Del Giudice E., Preparata G., Fleischmann M. (2000), *QED coherence and electrolyte solutions*, «Journal of Electroanalytical Chemistry», 482, 2, pp. 110-6.
- [17] Fröhlich H. (1968), *Long-range coherence and energy storage in biological systems*, «Int. J. Quantum chem.», 2, pp. 641-49.
- [18] Binhi V.N., Rubin A.B. (2007), «*Magnetobiology: the kT paradox and possible solutions*», *Electromagnetic Biology and Medicine*, 26, no. 1, pp. 45-62.
- [19] Zhadin M.N., Novikov V.V., Barnes F.S., Pergola N.F. (1998), *Combined action of static and alternating magnetic fields on ionic current in aqueous glutamic acid solution*, «Bioelectromagnetics», 19, 1, pp. 41-45.
- [20] Giuliani L., Grimaldi S., Lisi A., D'Emilia E., Bobkova N., Zhadin M. (2008), *Action of combined magnetic fields on aqueous solution of glutamic acid: the further development of investigations*, «BioMagnetic Research and Technology», 6, 1.
- [21] Zhadin M., Barnes F. (2005), *Frequency and amplitude windows in the combined action of DC and low frequency AC magnetic fields on ion thermal motion in a macromolecule: theoretical analysis*, «Bioelectromagnetics», 26, 4, pp. 323-30.
- [22] Scalia M., Sperini M., Guidi F. (2012), *The Johnson Noise in Biological Matter*, «Mathematical Problems in Engineering», p. 11 (Article ID 582126).

Sitografia

<http://legambientesicilia.it/portfolio/muos-niscemi/>
<http://nomuos.org/it/>

<http://nomuosniscemi.it/>.
www.agoravox.it/WikiLeaks-Ignazio-La-Russa-l-amico.html.
www.arpa.sicilia.it/temi-ambientali/monitoraggi-ambientali/.
www.camera.it/_bicamerali/leg16/rifiuti/missioni/03Sicilia_Occidentale/M_Rif_B_20_090915%2003%20Procuratori%20PA.pdf.
www.facebook.com/CoordinamentoNoMuos/.
www.facebook.com/mammenomuosniscemi/.
www.penalecontemporaneo.it/upload/Inquinamento%20elettromagnetico.pdf.
www.sicilia5stelle.it/tag/muos/.