

accatampato

www.accatagliato.org

Gli atomi che curano La fisica applicata alla medicina

*Dalle particelle subnucleari
al bisturi*

*I calorimetri di LHC
nella diagnostica medica*



La rivista è disponibile on-line e come app per iPad e iPhone, è navigabile sia da computer che da cellulare ed è scaricabile nei formati PDF ed ePUB.



<http://www.accastampato.it>



This magazine is also available in English. Ce magazine est également disponible en français. Esta publicación también está disponible en español.

I lettori possono esprimere commenti o fare domande agli autori on-line sulle pagine dedicate ai singoli articoli. I QR Code che corredano alcuni articoli codificano gli URL di pubblicazione on-line e sono generati mediante *invx.com*

Accastampato è realizzato con il patrocinio del Dipartimento di Fisica dell'Università Sapienza di Roma, del CNR Istituto dei Sistemi Complessi (ISC), Unità Sapienza di Roma, dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, del Dipartimento di Fisica dell'Università Roma Tre, dell'Associazione Romana per le Astro-particelle (ARAP) e la collaborazione della EPS Rome Young Minds Section.



Indice

num. 11, Settembre 2013

EDITORIALE

Quando l'unione fa la forza... 5

La stupefacente alleanza tra fisica e medicina nella lotta contro i tumori, in uno speciale di Accastampato dedicato alla Notte Europea dei Ricercatori 2013 e tradotto per la prima volta in ben quattro lingue.

IL RICERCATORE ROMANO

Dalle particelle subnucleari al bisturi 6

di *F. Collamati*

Una lotta che dura da secoli e che vede oggi l'alleanza tra fisica e chirurgia.

ENLIGHT: l'adroterapia europea 9

di *M. Dosanjh*

La rete ENLIGHT promuove l'adroterapia per il trattamento del cancro a livello pan-europeo.

A caccia della massima precisione 11

di *M. Cirilli*

Un ampio progetto europeo per soluzioni innovative nel controllo di qualità dell'adroterapia.

I calorimetri di LHC nella diagnostica medica 14

di *N. Di Vara*

Quando problemi simili in ambiti diversi portano a soluzioni ed esperienze interscambiabili.

Tomografia a singolo fotone 16

di *F. Roellinghoff*

Illuminare con una luce molto particolare.

Phantoms clinici 20

di *T. V.M. Lima*

Come si può sperimentare una nuova tecnica radiologica senza mettere in pericolo i pazienti?

Il Monte Carlo e l'adroterapia 22

di *P. G. Ortega, C. Mancini*

Simulazioni virtuali di radioterapia.

L'adroterapia oncologica in Italia 26

di *R. Orecchia, S. Rossi*

Il CNAO è ancora in fase di costruzione e consolidamento, ma è già all'avanguardia a livello europeo.

IL RESTO DEL NEUTRINO Come si misura un suono? 28

di *M. Pugliese*

Il decibel come unità di misura del volume del suono.

ESPERIMENTI Levitazione magnetica 30

di *P. Malacari*

Magneti sospesi e giradischi.

Origins 2013

27 September 2013

A European researchers' night event

At CERN, Globe of Science and Innovation and Microcosm

Scientific speed-dating

Live Webcast Show

with the researchers behind the latest scientific breakthroughs
from SPACE to the LHC !

The two infinities have never been so close

Reservations: www.origins2013.eu



Quando l'unione fa la forza... Fisica e medicina alleate contro il cancro

Ormai da anni una delle principali cause di morte in Europa è costituita dai *tumori*, una parola dalle mille forme che racchiude però un singolo concetto biologico: “massa anormale di tessuto che cresce in eccesso e in modo sordinato rispetto ai tessuti normali, e che persiste in questo stato dopo la cessazione degli stimoli che hanno indotto il processo” (R. A. Willis). L'enorme varietà di forme che un tumore può assumere porta a un'altrettanto vasta casistica di decorso della malattia: da un tumore si può guarire, con un tumore ci si può convivere, di un tumore si può morire. La branca della medicina che si occupa di tale patologia si chiama *oncologia* e affronta quotidianamente due grandi problemi: trovare e riconoscere un tumore (diagnosi) e curarlo (terapia).

Nel primo caso è necessario poterlo *vedere*, sia che si trovi in superficie, sia che si nasconda in profondità all'interno del corpo. Nel secondo caso, invece, la strategia più utilizzata ed efficace è quella della *rimozione*, perché in fondo si tratta di cellule con un'attività riproduttiva anomala che se uccise non possono più fare alcun danno. Come fare tutto questo? Sapendo che la più antica testimonianza che si conosca riguardo il cancro risale a più di 3 mila anni fa (appare nel *Papiro Edwin Smith*, scritto durante la XVI o XVII dinastia dell'Antico Egitto), non stupisce che negli anni si siano sviluppate moltissime tecniche per affrontare il problema. L'aspetto più sorprendente dell'ultimo periodo di lotta ai tumori, però, è che appare sempre più determinante l'apporto della fisica delle particelle allo sviluppo di nuove pratiche diagnostiche e terapeutiche e di innovativi apparati tecnologici: chiedete a Nicolas Di Vara come sono usati i *calorimetri di LHC nella diagnostica medica!*

Parole come *acceleratore di particelle*, *LHC*, *bosone di Higgs* sono ormai note anche al grande pubblico europeo e non solo, soprattutto per l'enorme lavoro di ricerca che si svolge in quella fucina di idee e tecnologie che è il CERN di Ginevra. È meno noto, invece, che oggetti apparentemente esotici come fasci di elettroni e protoni, radiazioni ad alta energia, decadimenti nucleari, antimateria hanno tutte le carte in regola per essere usati come armi nella battaglia contro i tumori. Vogliamo capire se e dove si trova un cancro nel corpo di un paziente? Sfruttiamo il suo bisogno di energia chimica e staniamolo con delle molecole traccianti radioattive. Vogliamo eliminarlo? Bombardiamo tutte le cellule malate con fasci di particelle!

L'alleanza tra fisica e medicina, come ci spiega Francesco Collamati nel suo viaggio *dalle particelle subnucleari al bisturi*, è un percorso lungo, ma promettente come pochi altri. Tanto che l'Europa sta puntando con decisione proprio su una strategia di trasferimento tecnologico dai laboratori di fisica delle particelle agli ambulatori, con una piattaforma continentale nota con il nome di ENLIGHT: ce la descrive Manjit Dosanjh, coordinatrice del progetto. A livello europeo e non solo molti progetti affrontano la questione da punti di vista diversi, ma complementari: Manuela Cirilli del CERN, ad esempio, ci parla delle tecniche di monitoraggio in tempo reale, Frauke Roellinghoff della *tomografia computerizzata a singolo fotone*, Thiago Lima dello sviluppo dei *phantoms clinici*, Garcia Ortega e Carlo Mancini del fondamentale ruolo delle simulazioni dei trattamenti terapeutici. Ma tutte queste meraviglie, dove sono? Uno dei centri di eccellenza europei è in Italia, a Pavia: *il centro italiano per l'adroterapia oncologica*, come ci raccontano Roberto Orecchia e Sandro Rossi, è in piena formazione e sta bruciando le tappe per quanto riguarda trial clinici e certificazioni di qualità. Non solo un centro di ricerca e di cura, dunque, ma un modello di collaborazione istituzionale e internazionale.

La fisica medica è dunque una disciplina trasversale, che travalica qualsiasi confine accademico o geografico. E questa volta accastampato non è da meno: in occasione della Notte Europea dei Ricercatori 2013 questo numero è pubblicato in ben quattro lingue (italiano, inglese, francese, spagnolo) sia on-line sul sito www.accastampato.it, sia sulla piattaforma AppStore per la lettura su iPad e iPhone, sia su carta, distribuito a Roma, Ginevra, Parigi, Barcellona, ...

Buona lettura, enjoy your reading, bonne lecture, feliz lectura!

La Redazione

REDAZIONE

redazione@accatagliato.org

Alessio Cimarelli

jenkin@accatagliato.org

Carlo Mancini

carlo@accatagliato.org

Leonardo Barcaroli

leov@accatagliato.org

Manuela Cirilli

manuela.cirilli@cern.ch

Roberto Garra

roberto@accatagliato.org

Kristian A. Gervasi Vidal

krisgerv@accatagliato.org

Niccolò Loret

niccolo@accatagliato.org

Isabella Malacari

isabella@accatagliato.org

Massimo Margotti

massimo@accatagliato.org

Silvia Mariani

shyka@accatagliato.org

Angela Mecca

lela@accatagliato.org

Martina Pugliese

m.letitbe@gmail.com

COMMISSIONE SCIENTIFICA

Giorgio Parisi

Giovanni Battimelli

Fabio Bellini

Lara Benfatto

Stefano Bianchi

Giulia De Bonis

Riccardo Faccini

Francesco Piacentini

Luciano Pietronero

Antonio Polimeni

Antonello Polosa

Maria Antonietta Ricci

HANNO CONTRIBUITO

M. Cirilli, F. Collamati, M. Dosanjh,

T. V.M. Lima, P. Malacari, P. G. Orte-

ga, C. Mancini, M. Pugliese, F. Roel-

linghoff, R. Orecchia, S. Rossi, N. Di

Vara.

CON LA COLLABORAZIONE DI

Commissione Europea

CERN

CON IL PATROCINIO DI

Dipartimento di Fisica dell'Univer-

sità Sapienza di Roma

Istituto dei Sistemi Complessi CNR-

ISC, Sezione Sapienza di Roma

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Dipartimento di Fisica dell'Univer-

sità Roma Tre

Associazione Romana per le Astro-

particelle

SI RINGRAZIANO ANCHE

Donald E. Knuth, Leslie Lamport, il

T_EX Users Group (www.tug.org)

e Gianluca Pignatelli

Dalle particelle subnucleari al bisturi

Conquiste e frontiere nella lotta ai tumori

Francesco Collamati
(Università Sapienza di Roma)

Nel significativo miglioramento del tasso di sopravvivenza a 5 anni dalla diagnosi dei tumori, che è salito dal 49% del 1975 al 68% del 2009 (dati relativi agli Stati Uniti [1]), sono racchiusi i variegati progressi che la scienza ha fatto negli ultimi decenni in ambito medico, ma non solo.

I tanti passi di una lotta che dura da secoli

Se da una parte infatti un ruolo fondamentale lo ha giocato la biologia molecolare che, consegnandoci un'immagine sempre più chiara dei tumori e del loro funzionamento, ci ha permesso di capirne i meccanismi regolatori e in alcuni casi addirittura la causa¹, dall'altra anche innovazioni che tendiamo a relegare ad altri ambiti hanno avuto invece il loro ruolo in questo miglioramento. È noto per esempio come la diffusione del frigorifero abbia contribuito a ridurre il numero di tumori allo stomaco [2].

Ai grandi passi avanti fatti dalle tecniche chirurgiche, che oggi consentono anche diagnosi molto accurate (si pensi alla biopsia) in grado di indirizzare il paziente verso i trattamenti più efficaci, si sono affiancati notevoli e fondamentali sforzi di prevenzione, sensibilizzazione e screening della popolazione. Se pensiamo alle tecniche di *imaging*, quelle cioè che ci permettono di *guardare dentro* il paziente *da fuori*, tramite l'uso ad esempio di radiazioni, è evidente che gli strumenti che abbiamo oggi nella lotta contro il cancro sono infinitamente più avanzati di quelli di appena qualche decennio fa. Eppure ancora molto c'è da fare, se consideriamo che ogni anno in Italia muoiono circa 150 mila persone a causa dei tumori [3]. Fortunatamente abbiamo ancora molte vie da esplorare! Biologi e immunologi sono oggi in grado di creare particolari anticorpi capaci di aggredire molto selettivamente le molecole bersaglio caratteristiche del tumore. La radioterapia con particelle pesanti (la cosiddetta *adroterapia*) ci permette di colpire le cellule malate poste in profondità lasciando praticamente illese quelle sane circostanti. Senza ovviamente dimenticare che un grosso e concretissimo miglioramento verrebbe da un profondo cambiamento dei nostri stili di vita...!

Tutte le scienze umane hanno molto da dire in questa battaglia, ma è quando queste si uniscono e si intersecano che si schiudono nuovi e impensati orizzonti di possibilità.

¹ Come nel caso del Papilloma Virus, responsabile praticamente di tutti i tumori alla cervice uterina e per il quale oggi possediamo già un vaccino.

L'unione fra la fisica e la chirurgia

Capita così che un notevole e inaspettato aiuto alla chirurgia venga dalla fisica delle particelle elementari. Proprio quella fisica che costruisce immensi acceleratori, giganteschi telescopi spaziali e curiosi osservatori sotto oceani e montagne. Secoli di scoperte, decenni e decenni di ricerca che diventano piccoli e grandi strumenti nelle mani del chirurgo. Nonostante i grandi progressi di radio- e chemioterapia, la chirurgia resta infatti la principale terapia nei pazienti malati di cancro, che subiscono intervento nel 90% dei casi. È evidente che l'obiettivo della chirurgia è l'asportazione delle cellule malate, e che quanto più questa asportazione è completa, tanto maggiore sarà la speranza di aver eradicato davvero il tumore. Le cellule tumorali, infatti, per loro natura tendono a riprodursi in maniera incontrollata e anche piccoli residui possono portare a nuove malattie, le cosiddette *recidive*, che diventano via via più difficili da trattare e diminuiscono significativamente le aspettative di vita del paziente.

Grazie alle attuali tecniche di imaging (TAC, Risonanza Magnetica e PET, cfr. Figura 1), siamo oggi generalmente in grado di sapere dove si trova il tumore con elevata precisione prima di operare il paziente. Il problema nasce però quando il chirurgo si trova a esplorare il campo operatorio alla ricerca di quello che aveva vi-

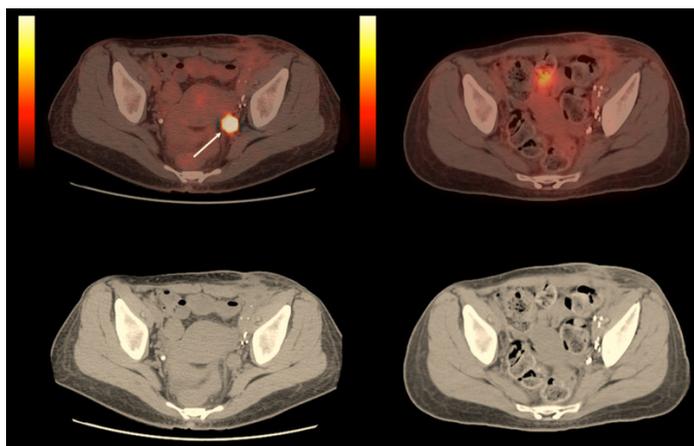


Figura 1 – Esempi di tecniche di *imaging*: in basso immagini della TAC, che forniscono informazioni sulla densità dei tessuti, mostrando quindi con grande dettaglio le ossa. In alto un'immagine PET, in cui abbiamo informazioni circa l'attività metabolica dei tessuti, cioè quanto zucchero essi consumano: in questa maniera siamo in grado di identificare zone di anomala attività, spesso tumori, come segnalato dalla freccia bianca.



Figura 2 – Prototipo della sonda che, avvolta in una copertura sterile, dovrebbe utilizzare il chirurgo durante l'operazione per verificare la completezza dell'asportazione.

sto nero su bianco (a essere precisi di solito *bianco su nero!*) su un'immagine. Solitamente la cosiddetta *massa principale* del tumore è ben identificabile anche a occhio nudo: si tratta infatti di tessuto particolare, caratterizzato da uno sviluppo maggiore e più disordinato del tessuto normale. Purtroppo però questa massa non sempre è caratterizzata da bordi ben definiti e separati dal tessuto sano circostante. Molto spesso dopo l'asportazione del tumore il chirurgo si trova nella condizione di dover scandagliare centimetro per centimetro il bordo della zona da cui lo ha rimosso, cercando di individuare eventuali residui di cellule tumorali. Ad oggi, l'efficacia di questa *scansione* è strettamente legata alla bravura e all'esperienza del chirurgo, che tuttavia, essendo in fin dei conti un essere umano, ha elevate probabilità di sbagliare (anche del 30%).

Basta un poco di zucchero...

In questo contesto di sale operatorie e bisturi, che contributo può dare la fisica nucleare? Bene, a essere sinceri una sua (fondamentale) parte la gioca anche la chimica (insieme alla biologia). Esistono infatti particolari molecole che hanno elevata affinità con le cellule tumorali. Esempio semplice, lo *zucchero*: è abbastanza comprensibile che più compiamo lavoro e fatica, più consumiamo zucchero. E così funziona anche per le nostre cellule: le cellule con metabolismo particolarmente elevato consumano più zucchero di quelle a metabolismo minore. Le cellule del tumore, a differenza di quelle sane, passano il loro tempo a riprodursi a ritmi forzati, con un gran dispendio di energia: ecco allora che i tumori capteranno molto più zucchero dei tessuti sani! Purtroppo però, *bombardare* di zucchero i tumori difficilmente potrebbe aiutare il nostro chirurgo. Manca infatti un passaggio fondamentale.

Ora che abbiamo stabilito che i tumori sono molto più avidi di glucosio dei tessuti sani, perché non pensiamo di dar loro in pasto, invece di una normale molecola di zucchero, una molecola di zucchero *radio-marcata*? Si tratta sostanzialmente di prendere la molecola di glucosio e sostituire a uno dei suoi atomi un atomo

radioattivo, che prima o poi decadrà emettendo una particella, ad esempio un elettrone. In questa maniera, quando vedremo comparire questa particella sapremo che lì è finita una molecola di questo zucchero radioattivo: se vedremo molte particelle, sapremo che molto zucchero è finito in quel punto e che probabilmente si tratta quindi di una zona malata!

Tutto questo gioco di molecole e atomi radioattivi, che sembra un processo quasi fantascientifico, è invece oggi ampiamente diffuso a livello industriale e ci sono numerosissimi centri nel mondo che ogni giorno producono il ^{18}F -FDG (nome *in codice* di questo *glucosio radioattivo*) anche per essere esportato (ogni giorno dal policlinico di Tor Vergata parte un aereo che trasporta un po' di questo glucosio nell'isola di Malta!). Il ^{18}F -FDG è oggi fondamentale in moltissimi campi della medicina nucleare, a partire proprio dalla PET [4], e contribuisce ogni anno a salvare milioni di vite umane, talmente tante che sono difficili da quantificare! Ora, oltre allo zucchero si può pensare a molte altre sostanze che svolgano questo compito, come pure si può pensare a vari isotopi radioattivi da usare come *spia* della presenza della molecola radiomarcata. Quello che conta è che iniettando al paziente una piccola dose di questo materiale prima dell'operazione, il chirurgo con una piccola sonda (delle dimensioni di una penna a sfera, cfr. Figura 2) può, già durante l'operazione stessa, scansionare la zona del tumore per capire se il tessuto che vede è un tessuto malato, e quindi da togliere, o se è invece sano e va quindi lasciato. Ci sono casi, come ad esempio i tumori al cervello, in cui un'asportazione completa e precisa del tumore può cambiare l'aspettativa di vita del paziente anche di anni. È su questo progetto che insieme ad un gruppo del dipartimento di Fisica dell'Università Sapienza stiamo lavorando, avvalendoci di varie collaborazioni mediche (Ospedale Pediatrico Bambin Gesù di Roma, Istituto Neurologico Carlo Besta di Milano), che sono assolutamente necessarie nell'ottica di questa feconda intersezione fra saperi.



Figura 3 – L'attrice Julie Andrews in un fotogramma del film *Mary Poppins* del 1964.

Forse sarebbe un po' eccessivo concludere che “basta un poco di zucchero...”! Eppure, non dobbiamo far l'errore di pensare che per migliorare la nostra vita e la nostra condizione abbiamo bisogno di scoprire sempre nuove cose. Ci sono infinite possibilità che nascono dalla sapiente e coraggiosa unione di competenze, idee e tecnologie che già abbiamo. Come diceva Marcel Proust: “le véritable voyage de découverte ne consiste pas à chercher de nouveaux paysages, mais à avoir de nouveaux yeux”.

Bibliografia

- [1] Howlader N., Noone A., Krapcho M. *et al.* *SEER Cancer Statistics Review 1975-2009*. National Cancer Institute (2010)
- [2] La Vecchia C., Negri E., D'Avanzo B. e Franceschi S. *Electric refrigerator use and gastric cancer risk*. In *British Journal of Cancer*, vol. 62(1):136-137 (lug. 1990). URL <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1971721/pdf/brjcancer00215-0144.pdf>
- [3] AAVV. *I numeri del cancro in Italia* URL <http://www.registri-tumori.it>
- [4] AAVV. *Positron emission tomography*. In *Wikipedia*. URL http://en.wikipedia.org/wiki/Positron_emission_tomography

Commenti on-line: <http://www.accastampato.it/2013/09/particelle-elementari-e-chirurgia/>

Sull'autore

Francesco Collamati (francesco.collamati@roma1.infn.it) si è laureato nel 2011 in Fisica presso l'Università Sapienza di Roma. Già dalla dissertazione di laurea triennale si occupa di fisica medica e adroterapia. È attualmente studente al secondo anno di dottorato sempre presso il dipartimento di Fisica della Sapienza, dove lavora in un gruppo di fisici delle particelle elementari *prestiti* al campo delle applicazioni mediche.



ENLIGHT: l'adroterapia europea

La rete ENLIGHT nasce per riunire le eccellenze nella terapia adronica in Europa

Manjit Dosanjh
(CERN, Ginevra)

Lil cancro è un significativo problema per la salute della società e ogni anno più di 3 milioni di europei sviluppano tumori maligni, di cui circa il 50% sono curati. La tradizionale radioterapia a raggi X copre il 40 ÷ 50% di questa percentuale di casi trattati, sia quando usata come unica terapia sia in combinazione con altri trattamenti. La radioterapia gioca un ruolo importante anche nel controllo dei sintomi e nelle terapie del dolore per pazienti incurabili. È decisamente il tipo di trattamento contro il cancro più efficace e ha il vantaggio di mantenere la normale funzionalità dei tessuti. Più di 10 mila acceleratori lineari d'elettroni (linas) sono usati in tutto il mondo dai radioterapisti e dagli oncologi per curare i pazienti.

Ad ogni modo, la radioterapia a raggi X convenzionale è caratterizzata da un'attenuazione e un assorbimento quasi esponenziali, dunque il massimo d'energia viene erogato presso il punto di *entrata* del fascio, che continua a depositare però un'energia significativa anche oltre il tessuto canceroso. Il massimo, per fasci di raggi X con un'energia di circa 8 MeV, si raggiunge una profondità di 2 ÷ 3 cm nel tessuto molle. Per compensare questi svantaggi dei raggi X e per meglio distribuire la dose di radiazioni sulla zona tumorale, i radioterapisti usano varie tecniche dette *conformazionali* e di *modulazione d'intensità*. Questo coinvolge l'uso di strumenti computerizzati di ottimizzazione del piano di trattamento che raggiungano un miglior rilascio del dosaggio e una minimizzazione del deposito dell'energia sui tessuti sani.

Il fisico visionario fondatore del Fermilab, Robert Wilson, ha proposto nel 1946 l'uso dell'effetto del picco di Bragg degli adroni per il trattamento del cancro. Per i protoni, le particelle alfa e altri ioni il picco di perdita d'energia ha luogo immediatamente prima che le particelle si fermino. Questo è ciò che si definisce picco di Bragg. L'utilizzo di tale picco fu applicato per la prima volta presso il Lawrence Berkeley Laboratory (LBL).

Oltre i raggi X: la terapia con particelle

La Terapia con Particelle (TP) è una precisa forma di radioterapia che sfrutta particelle cariche al posto dei raggi X per somministrare il corretto dosaggio di radiazioni ai pazienti. In particolare la radioterapia con adroni o particelle come protoni o altri ioni leggeri offre numerosi vantaggi. Può superare i limiti dei raggi X dal momento che adroni e particelle depositano la maggior parte della propria energia alla fine del loro percorso e possono essere focalizzate con grande precisione. Ciò consente di offrire un trattamento del tumore più accurato, che distrugge le cellule can-

cerose con maggior precisione e procura danni minimi ai tessuti circostanti, salvaguardandone l'integrità.

Sempre più spesso si ricorre alla terapia con particelle, con cui sono trattati circa 100 mila pazienti in tutto il mondo. Numerosi centri dedicati, con ampia capacità di trattamento dei pazienti, stanno rimpiazzando la prima generazione di impianti sperimentali, ospitati dapprima nei laboratori di ricerca di fisica. Solo una piccola percentuale di questi pazienti è stata però irradiata con tecniche di *scanning attivo* più avanzate, un contributo esclusivamente europeo sviluppato al PSI (Villigen) per i protoni e al GSI (Darmstadt) per gli ioni carbonio.

Trattamenti con ioni carbonio

Gli ioni carbonio depositano in una cellula una quantità d'energia 20 volte superiore ai protoni, ma con lo stesso percorso e la medesima precisione. D'altra parte, il Trasferimento Lineare d'Energia alla fine del cammino del carbonio è maggiore di quello dei raggi X e dei protoni (radiazioni low-LET). I danni al DNA risultanti includono rotture più complesse del doppio filamento e altri danni letali, che non possono essere riparati dai normali meccanismi cellulari. Gli effetti prodotti alla fine del cammino di particelle come il carbonio sono qualitativamente differenti da quelli prodotti da altre classi di radiazioni, e aprono la strada a una strategia di superamento della resistenza alla radioterapia, spesso dovuta all'ipossia delle cellule tumorali. Per queste ragioni il carbonio e altri ioni pesanti con la loro corrispondente efficacia biologica relativa (EBR) alla fine del loro cammino possono controllare tumori tipicamente resistenti ai raggi X e forse ai protoni. Tali ioni possono portare a trattamenti migliori e più efficaci e a una riduzione dei tempi e del numero di sedute della terapia.

Queste considerazioni sono conseguenza dell'uso del carbonio negli ultimi dieci anni per il trattamento dei primi 10 mila pazienti presso HIMAC (Giappone), GSI (Darmstadt) e HIT (Heidelberg) in Germania e recentemente presso il CNAO a Pavia in Italia. Ad ogni modo gli ioni carbonio sono ancora ad uno stadio sperimentale e sono necessari ulteriori studi clinici.

Attualmente il Giappone è leader nel trattamento con gli ioni carbonio, ma anche l'Europa sta giocando un ruolo chiave nello sviluppo della terapia ionica. Nel 1997 hanno avuto luogo i primi trattamenti con ioni carbonio a scansione attiva presso il centro GSI (Gesellschaft für Schwerionenforschung), in Germania. Centri polivalenti per la terapia a ioni leggeri (ioni carbonio e protoni)

sono al momento in costruzione ad Heidelberg (Germania) e Pavia (Italia). In Svizzera, Francia e Svezia sono in funzione centri per la terapia con protoni dei tumori radicati e di malformazioni, mentre nuovi centri diventeranno presto operativi. Analoghi centri di adroterapia sono stati approvati in Austria, Francia, Germania e numerosi paesi europei sono interessati a realizzare più centri per la terapia ionica e a protoni, come il Belgio, la Repubblica Ceca, la Danimarca, la Grecia, l'Olanda, la Spagna, la Svezia e il Regno Unito.

Il Network Europeo per la Ricerca nella Terapia Adronica con Ioni Leggeri (ENLIGHT)¹, il cui meeting inaugurale si è tenuto al CERN nel Febbraio 2002, è stato istituito per coordinare gli sforzi europei nell'utilizzo di fasci a ioni leggeri per la terapia radiativa. Finanziato dalla Commissione Europea per tre anni, ENLIGHT ha creato una piattaforma multidisciplinare unendo comunità tradizionalmente separate come medici, fisici, biologi ed ingegneri in modo da poter lavorare insieme per un obiettivo comune.

La rete europea per la ricerca nella terapia adronica con ioni leggeri

Nel 2006 si è tenuto presso il CERN un brainstorming tra medici, oncologi, fisici, radiobiologi, esperti in tecnologie di informazione e comunicazione e ingegneri, provenienti da circa 20 paesi europei. La comunità ha ritenuto che ENLIGHT fosse l'ingrediente chiave per un progresso futuro, valutando che il progetto dovesse essere mantenuto e ampliato, chiamandolo ENLIGHT++. Lo scopo del nuovo network è duplice: rinforzare la rete europea degli istituti e degli specialisti che lavorano nel campo della terapia a ioni leggeri e sponsorizzare la ricerca nei campi di comune interesse per lo sviluppo di dispositivi clinicamente all'avanguardia e tecnicamente avanzati.

È necessaria una piattaforma europea comune per alimentare e coordinare le collaborazioni tra attività di ricerca nazionale relative all'adroterapia, includendo ambiti così vari come gli acceleratori di protoni e ioni leggeri, i rilevatori, la ricostruzione e il processamento di immagini, la radiobiologia, l'oncologia e la ricerca clinica. ENLIGHT dà vita a una massa critica di fisici, radiobiologi, fisici medici e ingegneri biomedici, da differenti paesi europei, tutti coinvolti nello sviluppo dell'adroterapia. Sotto la cupola di ENLIGHT ci sono attualmente quattro progetti attivi: PARTicle Training Network for European Radiotherapy (PARTNER), Union of Light Ion Center in Europe (ULICE, 2009), European NoVel Imaging System for ION therapy (ENVISION) e Research Training in 3D Digital Imaging for Cancer Radiation Therapy (ENTERVISION). Tutti questi progetti sono diretti ai diversi aspetti dello sviluppo, dell'istituzione e dell'ottimizzazione dell'adroterapia. Le iniziative coinvolgono conoscenze cliniche integrate, biologiche e tecniche così come la formazione di una

futura generazione a livello europeo, così che l'adroterapia diventi ampiamente disponibile per il beneficio di tutti i cittadini europei. In particolar modo i suoi scopi sono:

- identificare i punti critici e concentrare la ricerca su aree chiave per definire e sviluppare la terapia con particelle, per estendere i suoi benefici attraverso l'Europa e possibilmente in tutto il mondo, in maniera complementare alle altre terapie;
- sviluppare una piattaforma europea comune per validare l'efficacia dell'adroterapia, cominciando inizialmente con i dispositivi più avanzati di Heidelberg e Pavia;
- sviluppare la perizia tecnica e una conoscenza molto estesa per un uso terapeutico della terapia con particelle e creare il know-how professionale appropriato, necessario per un'espansione su scala europea;
- aumentare l'efficacia dei costi dell'adroterapia, migliorando la qualità della vita e riducendo il costo complessivo del trattamento;
- integrare l'adroterapia all'interno della miglior gestione multidisciplinare disponibile per il trattamento del cancro;
- formare i futuri scienziati necessari per questo campo emergente.

Le chiavi di volta della prospettiva di ENLIGHT sono in breve la promozione e l'ottimizzazione dell'adroterapia per il trattamento del cancro ad un livello pan-europeo.

Commenti on-line: <http://www.accastampato.it/2013/09/adroterapia-ed-enlight/>

Sull'autore

Manjit Dosanjh (manjit.dosanjh@cern.ch) è consigliere per le scienze biologiche al CERN di Ginevra dal 2000. È arrivata al CERN dopo anni di ricerca nel campo della biologia molecolare, attualmente è coordinatrice del network ENLIGHT e di vari progetti europei nel campo dell'adroterapia.



¹ Pagina ufficiale: www.cern.ch/ENLIGHT.

Alla ricerca della massima precisione

Monitoraggio e terapia nel progetto ENVISION

Manuela Cirilli
(CERN, Ginevra)

L'adroterapia permette un trattamento estremamente preciso dei tumori, grazie al modo in cui gli adroni depositano la loro energia (ovvero la dose di radiazioni) mentre attraversano il corpo umano. Infatti, mentre i raggi X usati nella radioterapia classica perdono energia lungo tutto il loro tragitto all'interno dei tessuti, gli adroni si fermano a una profondità che dipende dalla loro energia iniziale e depositano la maggior parte della loro energia proprio attorno alla fine del loro cammino.

Rivelare il cancro

Il deposito di energia degli adroni ha una caratteristica forma a picco, denominato *picco di Bragg*. Sfruttando il picco di Bragg si può bersagliare una ben definita regione di tessuto canceroso, riducendo drasticamente il danno ai tessuti sani circostanti. La dose viene depositata in una zona talmente piccola che è stato necessario sviluppare nuove tecniche per riuscire a coprire l'intero tumore. Queste tecnologie vanno dalla diffusione passiva (*passive scattering*), in cui il fascio di protoni passa attraverso strutture geometriche che lo allargano in modo da irradiare una zona più ampia, alla scansione per punti (*spot scanning*). In quest'ultimo caso un fascio sottile di protoni effettua vari passaggi allo scopo di ricoprire tutto il volume tumorale nelle tre dimensioni, grazie a regolazioni dell'energia del fascio (che ne determina la profondità) e di magneti che possono guidarlo a destra e a sinistra, in alto e in basso. L'ultima generazione di trattamenti di adroterapia mira a raggiungere il livello di sofisticazione e precisione di quella che si chiama *radioterapia (convenzionale) modulata in intensità*: l'IMPT (*Intensity Modulated Particle Therapy*) permetterebbe di variare non solo i fattori geometrici, ma anche la dose in funzione

del bisogno dei vari tessuti, per un trattamento ancora più preciso e personalizzato.

Tutti questi metodi richiedono l'uso di diagnostica per immagini (*medical imaging*) al massimo grado di sviluppo tecnologico. In adroterapia la diagnostica per immagini non è usata soltanto per sapere dove si trova il tumore prima di iniziare il trattamento, ma anche durante la terapia stessa: date le dosi elevate dei fasci adronici, occorre controllare in tempo reale la dose depositata nei vari tessuti e fornire, se necessario, le informazioni adeguate per ricalibrare il piano di trattamento. Infatti la precisione intrinseca dell'adroterapia può essere ridotta dalla precisione con cui siamo in grado di determinare dove effettivamente si arresta il fascio all'interno del corpo del paziente, nonché da fattori relativi al posizionamento del paziente o al calcolo della dose da fornire. Non solo: tecnologie avanzate di diagnostica per immagini potrebbero permettere di tenere conto del movimento degli organi durante il trattamento, come nel caso di tumori ai polmoni, e di ridefinire il volume da trattare man mano che il tumore si riduce durante le sessioni di adroterapia.

Il progetto ENVISION

Il cosiddetto *controllo di qualità* durante la terapia adronica dei tumori è una sfida cruciale per sfruttare al massimo le potenzialità di questa metodologia. Il progetto ENVISION¹, finanziato dalla Commissione Europea e supportato dalla rete ENLIGHT, nasce proprio per sviluppare soluzioni innovative in questo ambito e riunisce sedici centri di ricerca e un partner industriale sotto il coordinamento del CERN di Ginevra. ENVISION si propone di implementare tecniche per il monitoraggio non invasivo e in tempo reale degli organi in movimento, per una precisa determinazione della dose depositata e per una rapida integrazione di queste informazioni nel sistema di pianificazione del trattamento (*Treatment Planning System*, TPS). La strategia di ENVISION è basata sullo sviluppo di rivelatori innovativi, sistemi inediti per il controllo del movimento e tecniche avanzate di simulazione, con lo scopo di integrare tutti questi strumenti nel TPS.

Sistemi di monitoraggio non invasivi

Una prima sfida è quella di controllare accuratamente durante l'irradiazione (in gergo: *in-beam*) la dose che viene realmente fornita



Figura 1 – Logo ufficiale del progetto ENVISION.

¹ Pagina ufficiale: envision.web.cern.ch.

al paziente. Un metodo che sfrutta la Tomografia per Emissione di Positroni (*Positron Emission Tomography*, PET) è stato inizialmente tentato a LBNL (Berkeley, USA) e finalmente implementato clinicamente a GSI (Darmstadt, Germany). La PET viene usata comunemente negli ospedali per ottenere immagini in 3D dei processi funzionali che avvengono all'interno del corpo. In questo caso un radiofarmaco viene iniettato nel paziente, si concentra nei tessuti da analizzare e decade emettendo un positrone: questa forma di decadimento si chiama β^+ (beta positivo). Il positrone è una particella di antimateria e dunque non può esistere a lungo a contatto con la materia ordinaria: dopo un brevissimo percorso, il positrone si annichila quindi con un elettrone e dà origine a due fotoni. Il tomografo per la PET è costituito da un anello di rivelatori posizionato intorno al corpo che registrano il passaggio dei due fotoni e ricostruiscono il punto (o vertice) da cui essi hanno avuto origine. La distribuzione dei vertici fornisce un'immagine della distribuzione del radiofarmaco nel tessuto. In adroterapia si può sfruttare l'attività β^+ indotta proprio dall'irraggiamento con adroni senza bisogno di iniettare alcun farmaco. Rispetto alla PET convenzionale, però, la qualità dell'immagine è deteriorata a causa del minor numero di fotoni emessi e dal fatto che i rivelatori non possono essere disposti in un anello chiuso, in quanto occorre lasciare lo spazio necessario al passaggio del fascio di adroni: la struttura obbligatoriamente aperta dei rivelatori introduce così delle *zone morte* in cui il sistema non può vedere nulla e quindi può produrre artefatti nell'immagine ricostruita.

ENVISION studia come migliorare la qualità dell'immagine utilizzando la tecnologia cosiddetta *del tempo di volo* (*Time of Flight*, TOF), che aiuta a selezionare le coppie corrette di fotoni. Il miglioramento possibile dipende dall'accuratezza con cui si misura il tempo di volo. ENVISION studia il comportamento di rivelatori differenti: le camere a elettrodi piani resistivi (*Resistive Plate Chambers*, RPC) e i cristalli scintillatori. Entrambe le tecnologie sono comunemente usati nei rivelatori usati dai fisici delle particelle, inclusi quelli a LHC. ENVISION sta costruendo prototipi di sistemi PET basati su questa tecnologia, completi di elettronica di lettura e sistema di acquisizione dati, e sta sviluppando algoritmi di ricostruzione veloce per analizzare i dati raccolti da questi sistemi.

Recentemente, è stato proposto un nuovo approccio al monitoraggio in tempo reale della dose, basato sulla rivelazione della radiazione emessa immediatamente dopo l'inizio delle reazioni nucleari causate dal fascio terapeutico di adroni. Tale radiazione viene detta *prompt*, cioè immediata. ENVISION propone uno studio completo della fattibilità di questo metodo innovativo, denominato tomografia a particella singola (*single particle tomography*, SPAT), in particolare usando i singoli fotoni o protoni *prompt*. Il metodo SPAT ha il vantaggio di non essere influenzato dai processi metabolici, come avviene per la PET, e quindi in linea di principio è ideale per fornire un'informazione precisa sulla distribuzione della dose depositata. Analogamente alla PET, la

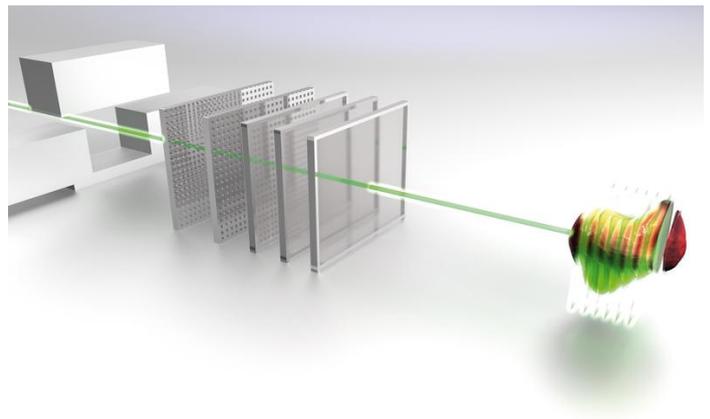


Figura 2 – Irradiazione ad alta precisione di un tumore con fasci di adroni mediante la tecnica detta di *raster scanning*. Credit: GSI/HIT/Siemens.

rivelazione di fotoni singoli (*single photon emission tomography*, SPECT) è ampiamente usata in medicina nucleare per ottenere immagini in 3D in seguito all'iniezione di un radio-isotopo emettitore di fotoni. Nel caso dell'adroterapia, se si guarda la distribuzione dei fotoni singoli in direzione perpendicolare al fascio terapeutico, si trova un picco correlato con il picco di Bragg, e quindi con il deposito di dose. La difficoltà per il progetto ENVISION è di progettare un sistema con i requisiti adatti a un'applicazione in-beam per adroterapia: infatti i rivelatori che si usano in medicina nucleare, le cosiddette *camere a fotoni*, non sono adatti all'energia dei fotoni emessi durante la terapia adronica, tipicamente tra 0 e 7 MeV. Il progetto ENVISION mette quindi a confronto diverse tecnologie di rivelazione, cercando di costruire un prototipo ottimale. ENVISION studia anche la fattibilità del controllo della dose attraverso lo studio di particelle cariche *prompt*, in particolare fotoni, un metodo mai testato finora in ambiente clinico e che si basa sulla rivelazione dei protoni emessi nella direzione del fascio.

Terapia adronica in quattro dimensioni

Un'altra sfida essenziale per l'adroterapia moderna è il trattamento efficace e sicuro dei tumori soggetti a moto fisiologico. Dato che la dose depositata intorno al picco di Bragg è molto elevata, la terapia adronica è estremamente sensibile a movimenti e cambiamenti nell'anatomia, che potrebbero comportare un'irradiazione accidentale al di fuori del bersaglio tumorale con conseguenze molto serie, particolarmente nel caso in cui il tumore è vicino ad organi vitali che devono invece essere preservati. Quando si impiega il metodo della scansione per punti c'è la difficoltà addizionale di sincronizzare i movimenti del fascio con quelli anatomici. ENVISION esplora soluzioni sia software che hardware per migliorare la qualità e l'affidabilità dell'adroterapia nel caso

di tumori in movimento. Questo implica prima di tutto passare dal monitoraggio in 3D a quello in 4D, includendo la dimensione temporale in aggiunta alle tre dimensioni spaziali. Gli studi effettuati da ENVISION mettono a confronto per la prima volta varie implementazioni di PET in-beam per determinare potenzialità e limiti di questa tecnica per un irraggiamento sincronizzato con il movimento. Inoltre ENVISION si adopera per stabilire i requisiti ideali per una futura PET in 4D per applicazioni in tempo reale in adroterapia. La PET in-beam non è comunque ancora diffusa in tutti i centri europei di terapia adronica, che sono per la maggior parte equipaggiati dei normali scanner PET e CT usati dalla medicina nucleare. ENVISION investiga quindi la fattibilità di una diagnostica per immagini PET/CT in 4D immediatamente successiva all'irraggiamento, invece che in tempo reale.

In parallelo, ENVISION esplora anche tecniche non invasive di controllo del movimento in 4D, come ad esempio le sonde ad ultrasuoni, che potrebbero essere integrate alle varie tecnologie (PET, SPAT) sviluppate dal progetto, o a quelle generalmente disponibili in ambiente clinico. Tutti questi sviluppi tecnologici avranno un vero impatto sull'adroterapia solo se potranno essere integrati nella pratica clinica. Per questo motivo ENVISION sviluppa e affina gli strumenti necessari a integrare automaticamente le misure di dose fatte tramite PET e SPAT nel sistema di pianificazione del trattamento. Questi strumenti saranno essenziali per individuare rapidamente eventuali errori nel posizionamento del fascio e permetteranno un'adroterapia *adattabile*: renderanno cioè possibile modificare il piano di trattamento in funzione di cambiamenti nell'anatomia del paziente e dei dati sulla dosimetria. Ad esempio, quando si usa la PET per verificare la dose da depositare, si effettua un confronto fra una distribuzione misurata e una simulata: tale confronto viene abitualmente effettuato in maniera manuale da un esperto. Si tratta quindi di una procedura lunga e costosa, che, se effettuata in maniera automatica, permetterebbe un trattamento più efficiente ed economico.

In tutte queste attività, è essenziale avere a disposizione degli stru-

menti di simulazione che permettano di predire in maniera attendibile tutti gli effetti che possono essere rilevanti per il controllo della terapia. I modelli di calcolo più affidabili si basano sulle simulazioni Monte Carlo, che permettono di descrivere le interazioni del fascio di adroni con la materia. Tuttavia, al momento, le interazioni nucleari possono essere descritte solo attraverso modelli fenomenologici che dipendono da vari parametri tratti da dati sperimentali. ENVISION effettua un lavoro di revisione dei dati esistenti e un'accurata comparazione dei vari modelli fenomenologici fra loro e con i dati sperimentali. Inoltre, ENVISION sta implementando una descrizione accurata del processo di rivelazione delle particelle emesse durante l'adroterapia e dell'intera procedura di trattamento dei pazienti.

Tutti gli strumenti sviluppati da ENVISION sono volti all'applicazione in ambiente clinico, per fornire soluzioni ad alcuni dei problemi cruciali per un'adroterapia più efficace e sicura. Il progetto è entrato nel suo ultimo anno e i risultati ottenuti saranno importanti per il futuro di questo tipo di trattamento dei tumori.

Commenti on-line: http://www.accastampato.it/2013/09/envision_it/

Sull'autore

Manuela Cirilli (Manuela.Cirilli@cern.ch) è fisico e comunicatore scientifico. Ha lavorato per quindici anni in fisica delle particelle, negli esperimenti NA48 e ATLAS al CERN di Ginevra, prima di entrare a far parte del gruppo Knowledge Transfer del CERN nel 2010. Si occupa di applicazioni della fisica alla medicina, e svolge varie attività di comunicazione e divulgazione. Dal 2010 collabora regolarmente alla didattica per il master in Comunicazione e Giornalismo Scientifico dell'Università di Ferrara.



I calorimetri di LHC nella diagnostica medica

Gli strumenti degli acceleratori di particelle applicati alla PET

Nicolas Di Vara
(Università di Milano-Bicocca)

Il giorno in cui Sir Joseph Johnson identificò per primo l'elettrone, nel 1897, con ogni probabilità non pensò all'elettronica. E non poteva immaginare l'impatto che questa scoperta avrebbe avuto sui destini del mondo nei decenni successivi. Il rapporto tra lo studio della regolarità della natura e le applicazioni che ne derivano resta l'interfaccia più naturale tra la nostra curiosità e il tentativo di migliorare le condizioni materiali delle nostre vite attraverso la tecnologia. Questo rapporto tra ricerca di base e soluzioni tecnologiche si palesa in un classico dominio applicativo della fisica: la medicina. È utile a questo proposito riportare l'esperienza del più grande laboratorio di ricerca europeo, il CERN di Ginevra, e l'attenzione dedicata al cosiddetto *technology transfer*, dalla fisica delle particelle elementari alle applicazioni della medicina nucleare.

Da simili problemi derivano le stesse soluzioni

I grandi esperimenti di fisica delle particelle richiedono parametri, strumenti e accuratèzze non molto dissimili da quelli richiesti da un'installazione di fisica medica. In particolare necessitano di fasci di particelle accelerate, metodi per controllare e gestire gli impatti, sistemi di rivelatori ed elettronica per misurare i parametri delle particelle risultanti dalle collisioni, sistemi di software per analizzare i dati ottenuti. Anche nella medicina nucleare intervengono questi elementi, tanto nella diagnostica quanto nella terapia. Ad esempio i misuratori di energia di particelle elettromagnetiche, detti *calorimetri elettromagnetici*, hanno caratteristiche simili a quelle di un sistema di rivelatori montati su una TAC (Tomografia Assiale Computerizzata): in entrambi i casi è necessario risolvere l'energia delle particelle incidenti con buona efficacia, eventualmente con un'alta precisione temporale. La struttura dei rivelatori è analoga: materiali in grado di trasformare l'energia incidente in modo che sia facilmente misurabile. Ad esempio un materiale che emetta luce quando la radiazione interagisce con la sua struttura cristallina.

Dunque la ricerca nell'ambito della fisica medica nucleare è strettamente legata alla ricerca in fisica delle particelle: del resto la prima beneficia in modo determinante della messe di innovazioni garantita dalla seconda. A richieste di frontiera corrispondono innovazioni di frontiera, con risultati a cascata sui settori contigui o derivati. È interessante quindi scendere maggiormente nel dettaglio, e dire qualcosa di più sui principali contributi della fisica, in questo caso nucleare e subnucleare, al mondo della medicina.

Medicina nucleare diagnostica

Quello che si può considerare come il trionfo più longevo e utilizzato della fisica applicata alla medicina è senza dubbio il concetto di esame radiografico, la possibilità di effettuare diagnostica per immagini. Dai più banali esami radiografici, ai più complessi concetti tomografici, lo sfruttamento delle radiazioni ionizzanti per ottenere immagini di strati o sezioni corporee del paziente è ormai una pratica di routine nelle strutture ospedaliere. Il principio si basa sul comportamento dei fotoni (nel nostro caso fotoni energetici, detti anche raggi X) che attraversano la materia. Essi sono attenuati in misura esponenzialmente decrescente, in dipendenza dal tipo di materiale attraversato. Di conseguenza sono il tipo e lo spessore di materiale attraversato a influire sulla quantità di fotoni raccolti dai rivelatori. Nel caso di una TAC acquisendo immagini da posizioni diverse è possibile ricostruire i profili di densità all'interno del corpo, ovvero visualizzare le strutture corporee. Questo tipo di esame è spesso affiancato o utilizzato in alternativa ad altre metodologie diagnostiche, come la *risonanza magnetica* o la *tomografia a emissione di positroni*. La PET (*Positron Emission Tomography*) è una tecnica di medicina nucleare di ambito diagnostico. Ormai largamente utilizzata nella diagnosi oncologica, permette, grazie alla peculiare caratteristica di alcuni decadimenti radioattivi, di mappare l'attività metabolica delle cellule e individuare con maggiore facilità i tumori. In particolare al paziente viene fornito un farmaco al quale è agganciato un radio isotopo, il *Fluoro-18*. Una volta ingerito, questo farmaco, chimicamente analogo a uno zucchero, viene recepito da cellule con alto utilizzo di glucosio, in particolare da quelle tumorali. Una volta raggiunte in modo parzialmente selettivo le cellule tumorali, è necessario definire una modalità per poterle individuare con uno scanner all'esterno del corpo. In quest'ottica siamo aiutati dalle caratteristiche di un particolare tipo di decadimento: il β^+ . Questo tipo di fenomeno, che caratterizza un radioisotopo come il *Fluoro-18*, determina la produzione di una particella subatomica, il positrone, anti-particella dell'elettrone. Quest'ultimo, incontrando uno degli elettroni nella materia circostante, reagisce mediante il meccanismo dell'annichilazione. Per ragioni cinematiche¹, il risultato di tale processo è una coppia di fotoni emessi in direzioni opposte. Siamo in grado di rivelare questi fotoni con rivelatori simili a quelli utilizzati nei grandi esperimenti di fisica delle particelle. Grazie alla rivelazione di questi due fotoni è possibile risalire alla linea lungo la quale sono stati emessi

¹ Per la conservazione dell'impulso.



Figura 1 – I cristalli scintillatori per rivelatori di particelle (in questo caso, per l'esperimento CMS presso LHC) sono usati anche negli scanner PET. Foto di Peter Ginter (2004). Credit: CERN (cds.cern.ch/record/808282).

e dove quindi si trovava lo zucchero che ha emesso il positrone. Accumulando misure simili possiamo ricostruire una serie di linee realizzando una mappa della concentrazione dello zucchero radioattivo nel paziente. A questo punto zone che rivelano una più alta concentrazione di questo zucchero segnalano un metabolismo anomalo, e di conseguenza possono segnalare la presenza dei tumori.

Uno dei campi più promettenti nell'ambito della *PET* è la cosiddetta *time of flight PET*. Per migliorare il rapporto tra i fotoni interessanti rivelati e quelli che invece provengono da altre sorgenti, è possibile sfruttare l'informazione temporale che trasportano. Grazie a elettroniche particolarmente veloci e a cristalli altrettanto rapidi si aggiunge alla linea di risposta individuata dai due rivelatori, una seconda informazione, il tempo di arrivo dei singoli fotoni². Questo permette di restringere, lungo la linea, la posizione della sorgente dell'evento particolare. I vantaggi generati da quest'approccio si riversano sull'intera catena diagnostica: migliorando la qualità dell'immagine è possibile ridurre i tempi di esposizione, in modo da effettuare esami più rapidi e di fornire al paziente una dose di farmaco radioattivo inferiore.

A questo proposito sono molteplici le linee di ricerca seguite in un congiunto sforzo di progetti europei coinvolgenti le più importanti istituzioni di ricerca. A partire dall'ingegneria dei materiali destinati a costituire il cuore dei rivelatori. Ovvero il reticolo dove le particelle interagiscono dando luogo a produzione di luce misurabile. Questa produzione è determinata dalle proprietà specifico del cristallo considerato, dalla sua composizione, dal-

² La difficoltà della misura sta nel fatto che ovviamente i fotoni si muovono alla velocità della luce e la distanza degli strumenti di rivelazione dal paziente non può essere troppo grande. Si tratta quindi di misure ad altissima risoluzione temporale.

la sua densità, dalle proprietà ottiche. A questo si affianca, nella ricerca estrema di precisione temporale, l'approfondimento delle tecnologie elettroniche, tanto analogiche quanto digitali, che consentono di trasferire l'informazione di luce prodotta in segnale elettrico misurabile. Gli obiettivi sono particolarmente ambiziosi, mirando a migliorare fino a cinque volte i parametri operativi delle macchine oggi disponibili in commercio.

Terapie a base di radiazioni

Anche nell'ambito della terapia dei tumori la fisica è stata in grado di modificare profondamente gli approcci della medicina. La possibilità di utilizzare radiazioni ionizzanti per colpire i tumori si è affermata con varie finalità, tanto curative quanto palliative. Ancora una volta il principio di funzionamento deriva direttamente dalle peculiarità dell'interazione delle particelle con la materia. Le radiazioni, un fascio più o meno energetico di particelle, elementari (fotoni, elettroni) o non elementari (protoni, neutroni), sono in grado di danneggiare il DNA del tessuto bersaglio. Un certo numero di cellule danneggiate non è in grado di riparare il danno, e muore. Naturalmente i parametri rilevanti in questa circostanza sono due: il numero di cellule malate distrutte con successo e il numero di cellule sane danneggiate a causa della radiazione. Il primo influenza soprattutto le probabilità del paziente di guarire dal tumore in questione, mentre il secondo è il responsabile di effetti collaterali, come l'insorgere di un nuovo tumore, a medio-lungo termine. Le terapie maggiormente utilizzate in ambito medico sono basate su fotoni ed elettroni, e sono ormai considerati approcci standard alla cura dei tumori. Grazie allo sviluppo di tecnologie di accelerazione non dissimili da quelle che fanno correre i protoni nel cuore di LHC si sono aperte nuove frontiere, come la *terapia adronica*, che utilizza fasci di protoni, neutroni o atomi più pesanti (come l'ossigeno). Il vantaggio risiede soprattutto nel fornire trattamenti conformi, cioè di garantire l'adesione del profilo di dose di radiazione fornita al volume del tumore, con un minore irraggiamento delle zone sane circostanti.

Commenti on-line: <http://www.accastampato.it/2013/09/calorimetri-lhc-e-pet/>

Sull'autore

Nicolas Di Vara (nicolas.di.vara@cern.ch) è laureato in Fisica all'Università di Milano-Bicocca ed è dottorando nella stessa Università. Si occupa delle problematiche legate alla rivelazione di particelle in fisica medica e delle alte energie, con particolare riferimento all'utilizzo di cristalli scintillanti. Dal 2011 lavora al CERN di Ginevra come Marie Curie fellow nell'ambito del progetto ENTREVISION.



Tomografia computerizzata a singolo fotone

La sfida di inviare e raccogliere la luce attraverso un corpo umano

Frauke Roellinghoff

(Università Claude Bernard Lyon e Ion Beam Applications S.A.)

Una delle principali sfide della medicina moderna consiste nella capacità di guardare dentro al corpo umano. Per millenni l'unica tecnica che permettesse di farlo era piuttosto drastica: si doveva tagliare, aprire e guardare. Solo in seguito si scoprirono i raggi X e da allora sono stati sviluppati numerosi modi per fotografare e rappresentare il corpo umano. Dal punto di vista del paziente, una simile abbondanza di tecniche può confondere e disorientare. Permettete, allora, di svelarvi una parte del mistero. Stiamo parlando di una tecnica radiologica denominata SPECT.

La S.P.E.C.T.

L'acronimo (i fisici che si occupano di medicina fanno spesso uso di acronimi!) significa *Tomografia Computerizzata ad Emissione di Singolo Fotone*. Per spiegarne il significato partiamo dall'ultima lettera. La parola *tomografia* raccoglie tutte le tecniche radiografiche, ovvero quelle tecniche che fanno uso di una qualche radiazione penetrante, incluso ogni tipo di particella dato che la fisica moderna permette di considerare queste ultime come un'onda, allo scopo di riprodurre un'immagine di una fetta o di una sezione di un oggetto o di una persona. La parola *computerizzata* indica che la ricostruzione dell'immagine richiede un processo di calcolo piuttosto complicato. Le parole *emissione di fotoni* indicano che stiamo parlando di onde elettromagnetiche ad alta energia¹ che sono emesse dal paziente stesso. Infine, la parola *singolo* serve unicamente a distinguere questo tipo di tecnica radiologica dalla PET che si basa sulla rivelazione di coppie di fotoni. Se si analizza la tecnica da un punto di vista fisico, ci sono due domande a cui rispondere: come faccio a far emettere fotoni da rilevare al corpo del paziente? E come faccio a trasformare le informazioni dei fotoni in un'immagine più precisa possibile, insieme a una somministrazione di dose ridotta di radiazioni?

Alla domanda su come produrre fotoni all'interno di un corpo si risponde facilmente: si utilizzano, di solito, radioisotopi che il paziente assume per ingestione o per iniezione. Si utilizzano radioisotopi di molecole biologiche il cui percorso all'interno dell'anatomia umana può essere tracciato. Il percorso fatto dalle molecole all'interno del corpo può fornire informazioni sulla funzione e sul

metabolismo del tessuto che è sotto esame. Ad esempio gli isotopi dello Iodio si accumulano nella tiroide e la loro distribuzione all'interno della ghiandola mostra se la ghiandola funziona correttamente o se, per esempio, vi sia una crescita tumorale all'interno. Questa è quella che si chiama *radiografia a emissione*. Spesso a questa tecnica di emissione se ne accoppia una *a trasmissione*: in questo caso la sorgente, con caratteristiche note, è posizionata all'esterno del corpo e lo irraggia, e si misura l'attenuazione dei fotoni in relazione al tipo di tessuto, permettendo di correggere le immagini ottenute per emissione.

Isotopo	Energia (keV)	Tempo di dimezzamento
Tecnezio-99m	140	6 ore
Iodio-123	159	13 ore
Iodio-131	159	8 giorni
Indio-111	171	67 ore
Tallio-201	167	3 giorni
Gallium-67	93 ÷ 393	3.3 ore

Dato che i fotoni utilizzati dalla tomografia ad emissione sono molto più energetici dei fotoni della luce visibile, ottenere un'immagine è molto più complesso. Le stesse proprietà fisiche che permettono ai fotoni energetici di attraversare il corpo umano e di mostrarci l'immagine degli organi interni rendono difficile fermarli e raccogliere l'immagine. Per prima cosa non è possibile utilizzare delle lenti di vetro per metterli a fuoco e una semplice



Figura 1 – Esempio di uno scanner SPECT. Credit: Wikimedia.

¹ In fisica l'energia di radiazioni e particelle è spesso misurata in elettronvolt (eV): si tratta dell'energia acquisita (o persa) da un elettrone immerso in una differenza di potenziale di un Volt (nel vuoto). I multipli più usati sono i keV (10^3 eV) e i MeV (10^6 eV).

lastra non è sufficiente per rivelarli. Per focalizzare i fotoni ad alta energia sono disponibili innumerevoli tecniche. L'approccio più semplice consiste in quella denominata *Anger camera*, nata da un'idea sviluppata da Hal Anger nel 1958 [5]. Sostanzialmente l'idea consiste nell'utilizzare un materiale denso capace di assorbire radiazioni (quali, ad esempio, il Piombo o il Tungsteno) che viene posizionato come un schermo davanti al rivelatore e che può essere attraversato solo da fotoni che viaggiano in una certa direzione. Ad esempio se consideriamo un *pinhole*, ovvero una fenditura circolare sul foglio di metallo, tutti i fotoni che riusciranno ad attraversare il foglio saranno quelli che convergeranno verso la fenditura. Possiamo approssimare questa ultima come un singolo punto da cui i fotoni usciranno formando una immagine capovolta. Un'altra soluzione consiste nel collimatore detto *parallel hole* che permette il passaggio solo dei fotoni che viaggiano perpendicolari (formano un angolo di 90°) al foglio e quindi proietta un'immagine non capovolta. Per ognuno di questi collimatori esiste un valore di *trade-off*: se il collimatore è troppo selettivo riusciranno a passare solo pochi fotoni che formeranno un'immagine molto debole. Se invece dovesse essere poco selettivo si otterranno immagini con una bassa risoluzione. La maggior parte della fatica spesa nello sviluppare questa tecnologia consiste nel trovare un equilibrio corretto tra precisione e risoluzione. Per rivelare i fotoni è necessario contare le interazioni che i fotoni effettuano con il rivelatore. Le interazioni che avvengono tra fotoni di questa energia e materia sono principalmente la *diffusione Compton*, l'*effetto fotoelettrico* e la *diffusione coerente*. Ciascuna di queste interazioni lascia sul rivelatore dell'energia depositata che viene convertita in un segnale elettronico. Dal momento che si conosce l'energia del fotone interagente è possibile selezionare solo quei segnali che corrispondono a tale energia. In questo modo possiamo ridurre il rumore casuale ed eliminare la maggior parte dei fotoni che hanno già diffuso nel paziente o all'interno del collimatore.

Fino ad ora abbiamo parlato solo di immagini piatte o 2D del paziente che mostrano la somma di tutti i fotoni emessi lungo la direzione di osservazione dell'apparato. Una implementazione possibile consiste nel prendere molte immagini da angolature differenti, operazione che può essere effettuata utilizzando diversi rivelatori disposti intorno al paziente oppure, in modo più economico, facendo ruotare uno o due rivelatori attorno al paziente. In questo modo si può ricostruire l'intensità di emissione per ogni unità di volume detta *voxel* (si immagini il voxel come un pixel tridimensionale) riuscendo a ottenere una fotografia tridimensionale del paziente.

Non solo fotoni

La SPECT è una tecnica ben consolidata, ma questo non significa che non si possa fare ricerca. Ad esempio io seguo un progetto che, sebbene non riguardi direttamente la SPECT, persegue l'o-

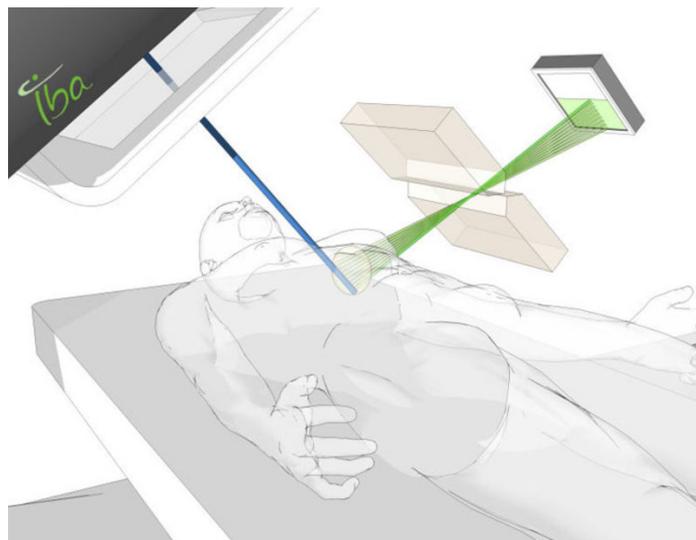


Figura 2 – Schema di funzionamento dell'imaging mediante prompt gamma. Credit: medicalphysicsweb.org.

biiettivo di trasferire i principi di funzionamento di questa ultima a un'applicazione leggermente differente [6]. Il mio campo di ricerca è individuato col termine *adroterapia* e consiste nell'irraggiare le cellule tumorali con particelle adroniche (tipicamente protoni o ioni leggeri) [7].

Questo tipo di terapia permette di irraggiare solo la zona colpita da tumore con alta precisione non toccando il tessuto sano attorno alla massa tumorale. Ha tuttavia un difetto, ovvero non è possibile sapere se le radiazioni siano rilasciate esattamente dove si vorrebbe. Tale difetto non è da attribuire alla *mira* della macchina che è molto precisa, ma alla possibilità che possa avvenire un piccolo disallineamento o un cambiamento nella posizione anatomica del paziente: questi errori possono sommarsi fino a raggiungere l'ordine del centimetro. Per affrontare questo problema i fisici aggiungono un margine attorno al volume del tumore per garantire che la neoplasia venga completamente irradiata. Fortunatamente esiste un fenomeno da cui possiamo trarre vantaggio: le particelle che interagiscono con i tessuti del paziente lasciano dei nuclei eccitati che possono emettere fotoni. Alcuni di questi fotoni sono detti *prompt gamma* e sono emessi molto velocemente, in tempi dell'ordine del nanosecondo, e permettono di vedere l'immagine tridimensionale in tempo reale mentre si interviene sul paziente, come schematizzato in Figura 2. Questi fotoni possono essere rivelati nella stessa maniera con cui funziona la SPECT di cui abbiamo parlato.

Ci sono delle differenze che rendono questa applicazione molto più impegnativa. La prima, la più importante, è il tempo limitato a disposizione per l'acquisizione delle immagini. Dato che lo scopo principale è quello terapeutico e non radiografico, è naturale che l'irraggiamento venga fermato non appena la dose necessaria alla funzione curativa sia raggiunta; in questo caso il numero

di fotoni che sono stati raccolti potrebbe essere basso. Un'altra differenza importante è legata allo spettro di emissione continuo che non permette di selezionare un'energia definita come invece accade nell'utilizzo dei radioisotopi. Inoltre lo spettro di energia raggiunge valori piuttosto alti (sopra i 10 MeV) e ottimizzare il collimatore può essere complicato. Ci sono, al momento, diversi progetti che riguardano questo argomento, la maggior parte ancora in fase di sviluppo o di realizzazione di prototipi. Ci auguriamo che presto questo trattamento sia disponibile in ogni centro di cura e il sistema diventi più preciso in modo da ridurre i margini di intervento e ridurre al minimo gli effetti collaterali.

Bibliografia

[5] Anger H. *Scintillation Camera with Multichannel*. In , pp. 515–531 (1964)

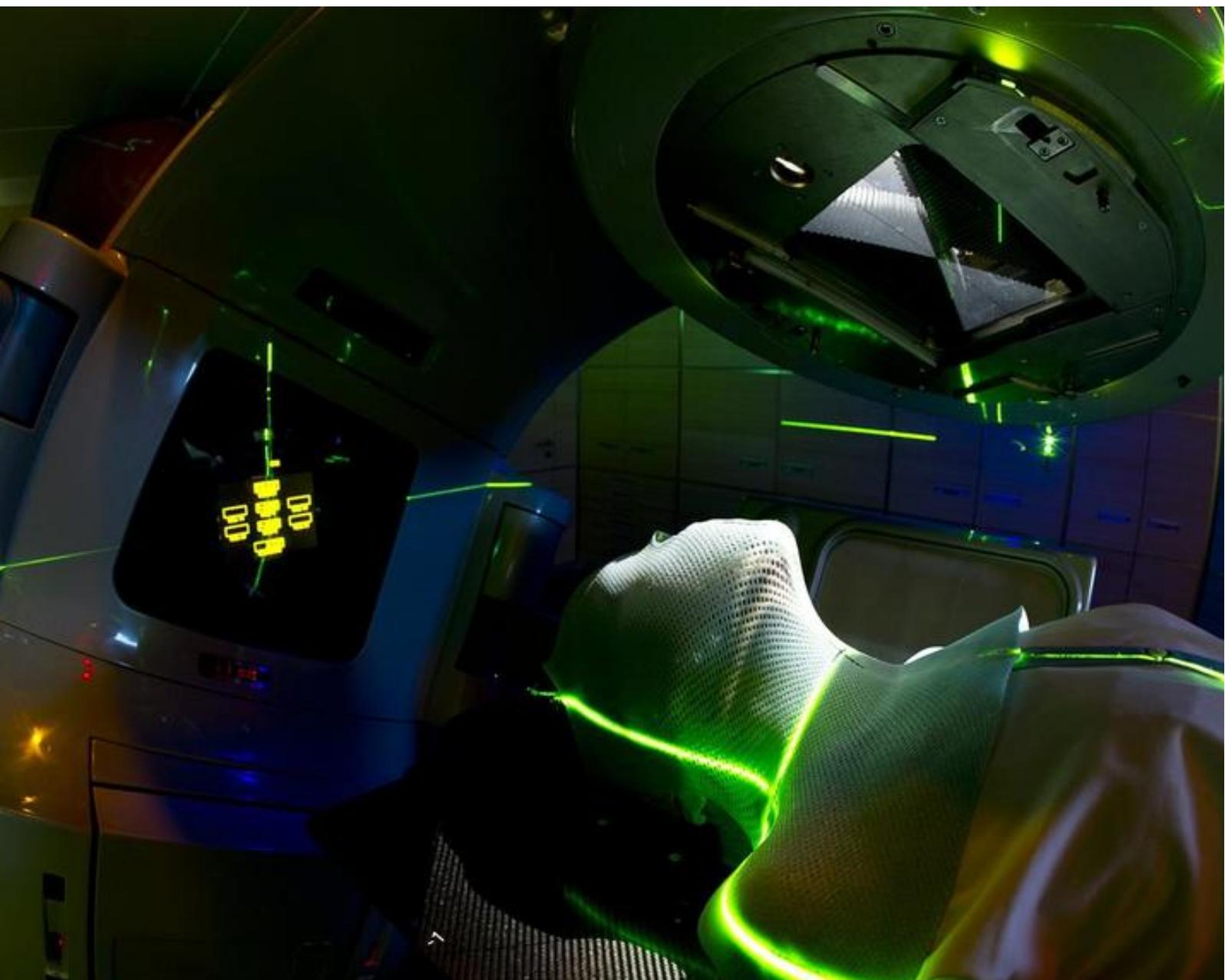
[6] Freeman T. *Can prompt gammas monitor in real time?* In *Medical Physics web*. URL <http://medicalphysicsweb.org/cws/article/research/49909>

[7] Wernick M. e Aarsvold J. *Emission tomography: the fundamentals of PET and SPECT*. cap. 7: Single photon emission computed tomography, pp. 127–151 (2004)

Commenti on-line: <http://www.accastampato.it/2013/09/tomografia-a-singolo-fotone/>

Sull'autore

Frauke Roellinghoff (frauke.roellinghof@iba-group.com) è titolare di una borsa di ricerca Marie Curie nell'ambito del progetto europeo ENTERVISION. Al momento è impegnata con il suo dottorato in fisica medica sullo sviluppo e il confronto di due camere collimate per la dosimetria nella radioterapia con protoni insieme alla UCBL (Università Claude Bernard Lyon) e l'IBA (Ion Beam Applications S.A.).



NOTTE EUROPEA DEI RICERCATORI
27 SETTEMBRE 2013
SETTIMANA DELLA SCIENZA
21-27 SETTEMBRE 2013



www.frascatiscienza.it

[WANTED]

**I ricercatori sono tra noi,
vieni a scovarli.**

Phantoms clinici

Tradurre la ricerca in pratiche cliniche:
i test su organi sintetici

Thiago V.M. Lima
(CERN, Ginevra)

Negli ospedali, i fisici servono a verificare come i diversi trattamenti radiografici e radioterapici possano tradursi in un miglioramento dei risultati per il paziente. La complessità di tali trattamenti innovativi si manifesta in diverse forme come ad esempio l'utilizzo di diverse particelle (carbonio, protoni e altri ioni che si usano nella terapia ad adroni) per trattare i pazienti o nel modo in cui tali particelle vengono utilizzate. La condizione principale per adottare tali trattamenti si basa sul non procurare alcun danno al paziente stesso, ed è qui che vengono in aiuto i cosiddetti *medical phantoms*. Si tratta di oggetti specificamente designati per valutare la prestazione dell'equipaggiatura e si usano per testare sia l'imaging che i metodi di trattamento terapeutico. Ci sono differenti tipi di phantoms usati per scopi clinici: alcuni rappresentano fedelmente l'anatomia umana mentre altri verificano riproducibilità e affidabilità del trattamento.

Quello che fanno i diversi phantoms è provare a emulare i possibili scenari clinici da valutare, come ad esempio materiali a diversa densità che servono per studiare gli effetti delle inhomogeneità (il petto umano contiene materiali ad alta densità come le ossa, i polmoni sono invece a bassa densità perchè pieni d'aria e ci sono anche materiali a densità intermedia come altri tessuti e organi). Altri phantoms sono relativi allo studio della fisiologia di strutture specifiche, come ad esempio il ciclo cardiaco (contrazione cardiaca, cfr. Figura 1).

Sperimentare su pazienti *fantasma*

Nel caso della radioterapia e dell'adroterapia, si mira a uccidere le cellule cancerose danneggiandone il DNA. Quando tale danneggiamento si verifica, la cellula riesce a ripararlo, ma ciò dipende dall'entità del danno. L'adroterapia usa il principio secondo cui una particella più grossa e pesante (la massa del carbonio 12 moltiplicata per la massa del protone è 10 mila volte quella dell'elettrone) ha maggiore possibilità di interagire durante il suo tragitto attraverso la materia (ha densità ionizzante più elevata e quindi provoca maggiore danneggiamento, cfr. Figura 2). Queste interazioni sono responsabili per dose fornita e danno creato.

La terapia ad adroni usa i principi della conformità alla migliore dose e degli effetti biologici, rispetto invece ai convenzionali trattamenti a raggi X. Ci sono numerose forme di trattamento che usano raggi X e sono presenti nella maggior parte degli ospedali del mondo, essi hanno assunto diversi nomi come radioterapia, braquiterapia, teleterapia, tomoterapia, etc. Attualmente l'insie-

me di conoscenze in questo campo riguardo a come la dose utilizzata influisca sul risultato clinico (ossia come i diversi tipi di cancro reagiscano alla dose usata) riguarda soprattutto la terapia a raggi X, quindi si effettua la conversione di tale conoscenza all'adroterapia. A tale scopo una quantità chiamata *efficienza biologica* (*relative biological effectiveness*, RBE) è stata introdotta per misurare l'efficienza dei diversi tipi di radiazione. Tale RBE varia a seconda di diversi fattori, quali il tipo di particella, la particolare cellula, ecc. Sebbene complicato da calcolare clinicamente, esso rappresenta l'unica maniera di tradurre l'esperienza clinica ottenuta coi raggi X in altri tipi di radiazione. Nella pratica clinica servono però complicate estrapolazioni dei fattori coinvolti per il calcolo dell'adatta dose terapeutica.

Oggi ci sono due diversi approcci al calcolo della dose RBE clinica: uno è usato allo HIMAC in Giappone [8] e l'altro è adottato in Europa, essendo stato sviluppato dal Gesellschaft für Schwerio-



Figura 1 – Diversi tipi di phantoms, ciascuno relativo al petto umano. Quello in alto rappresenta la struttura anatomica del petto con le ossa, i polmoni e altri tessuti molli. Credit: www.kyotokagaku.com. Quello in basso è un phantom dinamico cardiaco e rappresenta la fisiologia del cuore umano. Da www.ptw.de.

nenforschung (GSI) [9]. Allo HIMAC, la dose RBE è calcolata attraverso un'equivalenza stabilita empiricamente tra l'esperienza del NIRS sia con carbonio che con elettroni. Il GSI ha invece sviluppato il proprio modello biofisico chiamato *local effect model* (LEM). La sua principale assunzione è che il danno biologico è determinato dalla dose locale, da cui il nome. Ma per beneficiare pienamente dei vantaggi dell'adroterapia, sono senz'altro necessarie ulteriori ricerche.

Il progetto europeo ENTERVISION

ENTERVISION è un progetto europeo strutturato per trattare questi temi. ENTERVISION¹ si divide in quattro pacchetti di lavori (WP), dallo studio di nuove idee e materiali per gli strumenti di imaging che servano a monitorare meglio la localizzazione dei tumori e per il loro trattamento (WP1 e WP2), al calcolo della dose di utilizzo e dei processi fisici allo scopo di verificarne gli effetti biologici (WP3 e WP4). Come parte del WP4, sono coinvolto nello sviluppo di un phantom biologico dosimetrico che serva per lo studio di tali effetti biologici e che possa quindi produrre migliori trattamenti. Durante lo sviluppo di un phantom, molto lavoro serve nella fase di design, in quanto diversi scenari vanno considerati, come ad esempio il materiale usato, il tipo di detector e la quantità, la forma finale, la mobilità, i costi, ecc. Per esempio, il materiale selezionato sarà in grado di rappresentare fedelmente ciò che vogliamo misurare? Quali detectors possiamo usare e come si devono organizzare? Per il WP4 in ENTERVISION alcune delle risposte sono state chiarificate meglio di altre, per esempio l'uso delle camere a ionizzazione come detectors. Questi sono i detectors più facilmente reperibili e meglio studiati per l'adroterapia in quanto sono usati nell'ordinaria assicurazione di qualità. Per quanto riguarda il materiale scelto, per l'adroterapia l'equivalenza di impatto con l'acqua è molto importante allo scopo di ottenere la corretta profondità nel calcolo della dose. Ciò si misura come la lunghezza di cammino equivalente dell'acqua, o WEPL, ossia quanto spesso un blocco d'acqua deve essere per fornire la stessa attenuazione data dalla profondità del materiale selezionato. Sebbene nello scenario ideale il WEPL del materiale dovrebbe essere il più possibile vicino a 1, il suo costo e la sua difficoltà di manipolazione (taglio, perforazione, etc.) vanno presi in considerazione.

Non esiste un accordo universale circa il metodo di calcolo della dose biologica e molti studi hanno mostrato che si possono ottenere risultati equivalenti a meno di un fattore [10] e ciò mostra la necessità di ulteriore ricerca. Queste sono alcune delle domande a cui speriamo di rispondere una volta che il prototipo finale sarà pronto, in quanto saremo in grado di testare diversi tipi di radiazione e tutte le variabili della cellula (il suo tipo, il livello

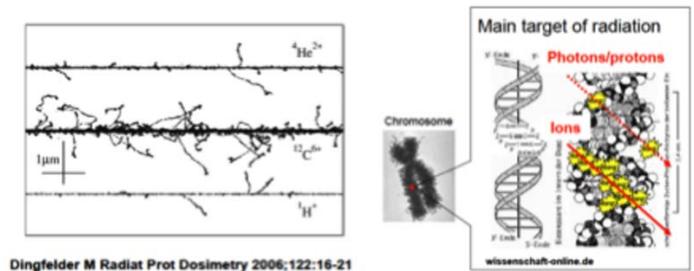


Figura 2 – Effetti delle differenti densità di ionizzazione nel DNA.

di ossigeno, la temperatura, ecc.) che contribuiscono al calcolo della dose biologica.

Bibliografia

- [8] Kanai T. *et al.* *Biophysical characteristics of HIMAC clinical irradiation system for heavy-ion radiation therapy.* In *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, vol. 44:201–210 (1999)
- [9] Scholz M. *et al.* *Computation of cell survival in heavy ion beams for therapy. The model and its approximation.* In *Radiat Environ Biophys*, vol. 36:59–66 (1997)
- [10] Uzawa A. *et al.* *Comparison of biological effectiveness of carbon-ion beams in Japan and Germany.* In *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, vol. 73:1545–1551 (2009)

Commenti on-line: <http://www.accastampato.it/2013/09/phantoms-clinici/>

Sull'autore

Thiago Viana Miranda Lima (thiago.vmlima@cern.ch) è entrato nel Gruppo di Trasferimento Tecnologico del CERN nel Febbraio 2012 in qualità di Marie Curie Experienced Research Fellow nell'ambito del progetto ENTERVISION. Prima di giungere al CERN, Thiago ha lavorato presso il Dipartimenti di Fisica Medica dell'Ospedale Universitario di Oxford, dove ha avuto modo di lavorare nella sezione di Medicina Nucleare ed è stato coinvolto in attività di controllo della qualità di varie apparecchiature di imaging (PET, TAC, SPECT) e di protezione dalle radiazioni (soprattutto radioterapia molecolare).



¹ Pagina ufficiale: entervision.web.cern.ch.

Il Monte Carlo e l'adroterapia

Simulare la realtà per controllare al meglio un'esperimento reale

Pablo Garcia Ortega, Carlo Mancini
(CERN, Ginevra)

No, non si tratta di un errore, il riferimento non è alla città del principato monegasco, ma a una tecnica usata per simulare processi complessi, che proprio a Montecarlo – città famosa per i suoi casinò – deve il nome.

Il metodo Monte Carlo consiste in un algoritmo che riproduce una serie di realizzazioni possibili del fenomeno che si intende studiare, in cui ogni evenienza compare con la probabilità che la stessa ha nella realtà¹.

Immaginiamo di voler calcolare la probabilità che la pallina di un flipper cada direttamente in mezzo alle due alette senza che il giocatore possa intervenire, come in Figura 1. La dinamica di un tale sistema è troppo complicata per essere analizzata dal punto di vista matematico (analitico), dato che piccole variazioni nel lancio iniziale potrebbero far cadere la pallina in punti completamente diversi. Per affrontare il problema dovremmo quindi realizzare un esperimento, lanciando tante palline con un flipper vero. Ovviamente il nostro esperimento richiederebbe molto tempo e non sapremmo dire se posizionare un elemento in più sulla tavola aumenti o meno la probabilità di osservare l'evento a cui siamo interessati. L'alternativa è quella di fare un esperimento *virtuale*, un Monte Carlo! Dovremmo quindi realizzare un programma che simuli il nostro esperimento, riproducendo l'interazione della pallina con tutti gli elementi presenti sul piano e poi lanciare virtualmente tante palline con energie diverse. Ma non è detto che tutte le energie di lancio siano equiprobabili, quindi dovremo simulare anche la distribuzione di probabilità delle energie iniziali della pallina. Il risultato (il numero di volte che la pallina passa in mezzo alle alette, in modo che il giocatore non possa giocare, diviso il numero di lanci fatti fino a quel momento) sarà sempre più accurato all'aumentare del numero di lanci virtuali fatti. Una volta prodotto un numero abbastanza grande di *eventi* si possono eseguire delle *misure*, procedimento che consiste nel simulare la risposta degli strumenti di misura sulla serie delle evenienze generate. Per esempio potremmo misurare il numero medio di urti con un elemento della tavola, o anche misurare (sempre virtualmente) l'energia dissipata in media dalla pallina nell'urto con un elemento, misura questa che sarebbe molto difficile da realizzare in un esperimento reale.

Il metodo Monte Carlo permette quindi non solo di stimare quale sarà il risultato di un esperimento prima (o *invece*) di realizzarlo, ma anche di interpretarne i dati e ottimizzarlo. Del resto la realtà virtuale ormai è parte delle nostre vite, i videogame sono in grado

¹ Ma le si può assegnare anche un peso statistico ad-hoc.



Figura 1 – Un flipper del 1995: “Theatre of magic”. Credit: Wikipedia.

di simulare la realtà in modo stupefacente e le console di gioco integrano quasi tutte dei processori dedicati alla simulazione dei processi fisici, non dovrebbe sorprendere che le simulazioni giochino un ruolo cruciale negli esperimenti di Fisica!

Le origini del metodo Monte Carlo risalgono alla prima metà degli anni '40, quando nell'ambito del Progetto Manhattan Enrico Fermi, John von Neumann e Stanislaw Marcin Ulam lo formalizzarono. Il nome Monte Carlo gli fu attribuito in seguito da Nicholas Constantine Metropolis in riferimento alla nota tradizione nei giochi d'azzardo dell'omonimo principato. La diffusione delle tecniche di simulazione ha seguito ovviamente la diffusione dei computer e, grazie alla grande capacità di calcolo di oggi, è praticamente onnipresente negli esperimenti di Fisica.

La progettazione di un esperimento

Come nel nostro esperimento del flipper, anche negli esperimenti veri le simulazioni Monte Carlo sono usate in modo intensivo fin dalla progettazione di un esperimento, per valutare quali saranno le caratteristiche che l'esperimento dovrà avere per poter misurare le quantità desiderate. Vengono poi usate per progettare e ottimizzare i detector e successivamente per interpretarne i segnali. Ad

esempio nella Figura 2 sono riportati i dati sperimentali misurati dall'esperimento ATLAS e le previsioni della simulazione Monte Carlo. È ovviamente cruciale che la simulazione riproduca il più possibile i dati che verranno prodotti nel momento in cui l'esperimento acquisirà dati, altrimenti sarebbe quasi impossibile risalire dai segnali prodotti dai detector ai processi che li hanno generati: lo sviluppo del software che ricostruisce l'evento che ha generato i segnali si basa proprio su processi di simulazione.

Il Monte Carlo in Fisica

Sono stati sviluppati molti programmi nel corso degli anni per ottenere delle simulazioni realistiche: quando si parla di simulazioni dedicate agli esperimenti di Fisica delle particelle si parla di simulare milioni di interazioni in cui, a seconda dell'energia in gioco, le particelle possono essere annichilite e altre create, le nuove particelle possono decadere e quando attraversano un materiale interagire con i suoi atomi, producendo a volte una corrente elettrica, altre volte lampi di luce, altre ancora un innalzamento di temperatura.

Tecniche Monte Carlo sono utilizzate anche per stimare la quantità di radiazione prodotta, non solo in esperimenti, ma anche in qualunque tipo di struttura faccia uso di sorgenti radioattive per progettare gli schermi e le procedure di sicurezza.

Le applicazioni mediche del Monte Carlo

Oltre che nella ricerca di base, si usano le simulazioni in un'enorme varietà di campi diversi, dalla biologia alle telecomunicazioni, dalla matematica alla fisica medica. In quest'ultimo caso, per esempio, la simulazione dei processi di trasporto è cruciale in ogni fase dei trattamenti anti-tumorali di radioterapia. L'idea alla base della radioterapia prevede l'uccisione delle cellule tumorali mediante danni irreparabili al loro DNA causati da particelle o radiazioni ionizzanti. A prescindere dalla particella specifica usata durante il trattamento, il principio fisico di base è sempre lo stesso: depositare una dose sufficiente di radiazioni (misurata come energia per unità di massa) nella zona di tessuto interessata per garantire la distruzione di tutte le cellule tumorali. Lo scopo fondamentale è trovare un modo per conoscere in anticipo dove queste particelle rilasceranno la propria energia, in modo da focalizzare i fasci proprio sull'area del tumore, limitando il più possibile un'irradiazione accidentale dei tessuti sani circostanti. Quello del trasporto di particelle nei tessuti biologici è un problema complesso, non solo a causa della difficoltà di descriverlo matematicamente attraverso la risoluzione dell'equazione del trasporto di Boltzmann², ma anche per via dell'intrinseca eterogeneità del corpo umano. Tradizionalmente in fisica medica si usa il cosiddetto Sistema di Pianificazione del Trattamento (*Treatment Plan Systems, TPS*), un software specializzato che sfrutta modelli analitici per simulare la distribuzione tridimensionale della dose da somministrare al paziente a partire dai suoi bisogni definiti in sede diagnostica. L'uso di soluzioni analitiche approssimate è utile in molti casi, per esempio ci sono metodi sufficientemente veloci e accurati nel caso della radioterapia a raggi X e a elettroni. Negli ultimi decenni, però, protoni e vari tipo di ioni sono diventati un'alternativa molto valida e diffusa alle particelle appena menzionate. In particolare, se si analizza il rilascio della dose lungo la direzione del fascio all'interno di un materiale si vede che la distribuzione differisce notevolmente in base al tipo di particella utilizzata. Per gli elettroni e i raggi X il massimo della dose è depositata proprio nel punto di ingresso del fascio nel materiale. Per protoni e ioni, invece, questo massimo è localizzato vicino al termine del loro percorso, poco prima dell'ostacolo che blocca del tutto le particelle. In questo punto la distribuzione della dose segue un profilo con una struttura a picco chiamata *picco di Bragg*, in onore di William Henry Bragg che per primo lo descrisse nel 1903. Questo peculiare rilascio di dose, che avviene in un punto specifico all'interno del materiale in esame, è estremamente interessante nel caso di un tumore localizzato in profondità e circondato interamente da tessuto sano (e potenzialmente vitale). È

² È un'equazione che descrive la distribuzione statistica delle particelle in un fluido e nell'ambito della meccanica statistica di non equilibrio si usa per studiare come un fluido trasporta quantità fisiche quali ad esempio il calore, la carica o, appunto, particelle di vario genere.

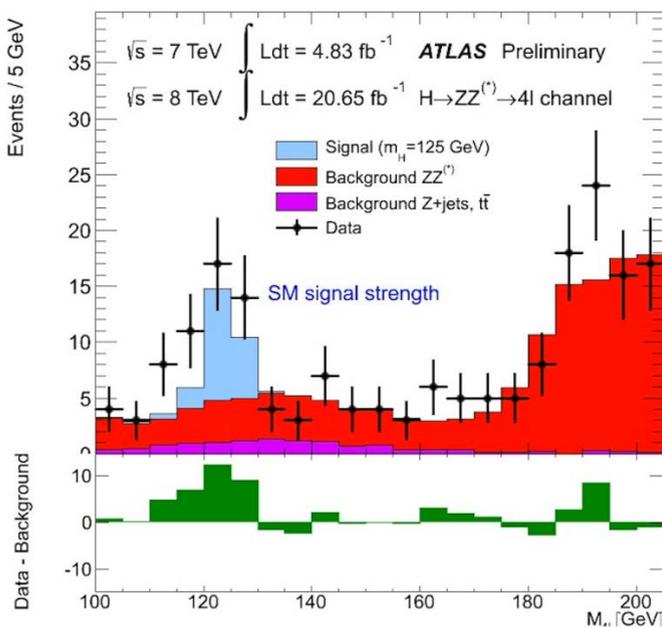


Figura 2 – I punti neri sono riportati i dati misurati dall'esperimento ATLAS, in rosso e in viola le previsioni della simulazione Monte Carlo di eventi dovuti ad altri processi già noti, la differenza fra la previsione della simulazione e i dati effettivamente misurati è riportata sotto in verde. L'eccesso è compatibile con il segnale che si otterrebbe se fosse generato dal bosone di Higgs e se questo pesasse 125 GeV, come si vede nella simulazione in azzurro.

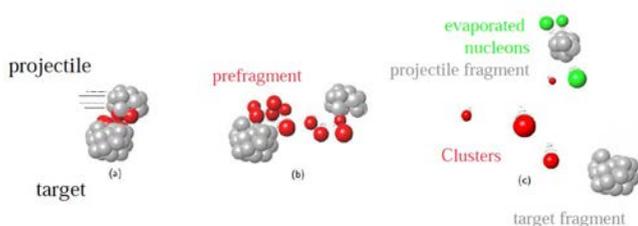


Figura 3 – Schema della frammentazione del carbonio.

evidente che la profondità di penetrazione del fascio di particelle dipende dall'energia del fascio stesso: ecco quindi che variando l'energia iniziale si può rilasciare la dose richiesta in qualsiasi punto all'interno del corpo del paziente da trattare.

Ovviamente la precisa collocazione di dove la dose viene rilasciata è cruciale per questo tipo di trattamenti e una simulazione Monte Carlo è lo strumento ideale per fare questo tipo di predizioni, soprattutto per quello che riguarda gli ioni pesanti, come il carbonio, che oltre a interagire con il mezzo possono frammentarsi.

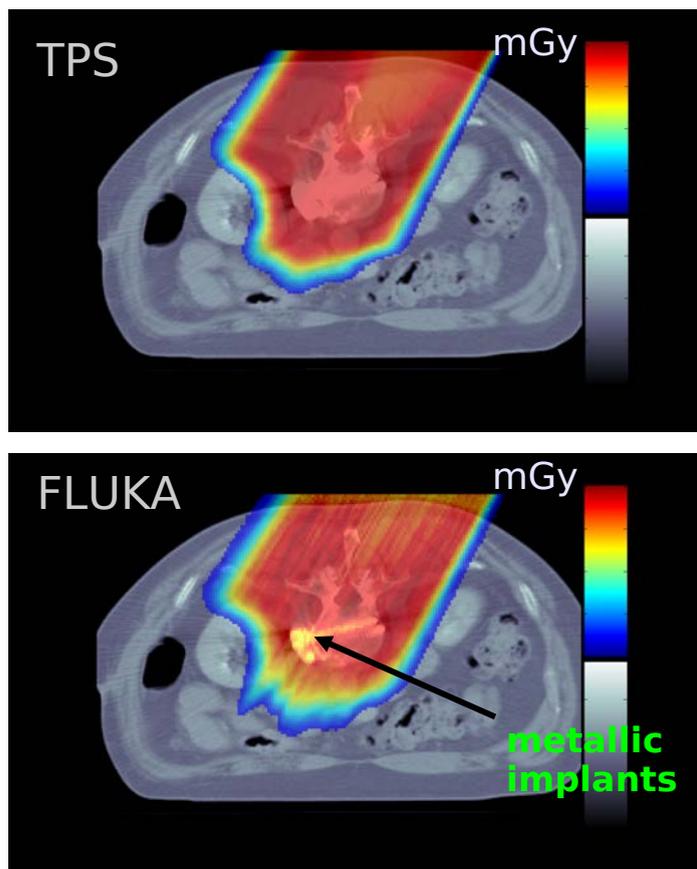


Figura 4 – Confronto fra la dose prevista da un software numerico e uno Monte Carlo (FLUKA) nel caso in cui siano presenti degli impianti metallici. Credit: K. Parodi et al, IJROBP 2007.

Ad oggi le simulazioni Monte Carlo sono usate per controllare i piani di trattamento fatti con algoritmi numerici, simili a quelli usati per i trattamenti con raggi X ed elettroni, dal momento che richiederebbe troppo tempo ottimizzare il piano di trattamento direttamente con una simulazione completa.

La previsione della frammentazione del carbonio è proprio uno dei temi su cui si focalizza la ricerca e anche il nostro lavoro. Studiare questo fenomeno è importante perché la diffusione dei frammenti all'interno del corpo distorce la distribuzione della dose rilasciata (cfr. Figura 3). Inoltre si sta cercando un modo di sfruttare questi frammenti per poter ricavare delle immagini in tempo reale della zona su cui si sta operando, così da permettere un controllo diretto del posizionamento e della quantità di dose rilasciata nel paziente. L'uso di una simulazione Monte Carlo per verificare la dose depositata nel paziente è particolarmente importante quando ci sono bruschi cambi di densità, come ad esempio nelle vicinanze dei polmoni o nel caso in cui ci siano degli impianti metallici, come si vede in Figura 4.

Una storia infinita...

In conclusione possiamo riassumere che il Monte Carlo è una tecnica per simulare processi complicati, troppo per essere trattati in modo analitico. Nel caso dell'adroterapia, simulazioni Monte Carlo vengono usate sia in ricerca che nelle cliniche per la progettazione, sia degli esperimenti che degli schermi e delle procedure di sicurezza, per verificare i piani di trattamento e per studiare nuove tecniche di verifica dei trattamenti.

Commenti on-line: <http://www.accastampato.it/2013/09/montecarlo-e-adroterapia/>

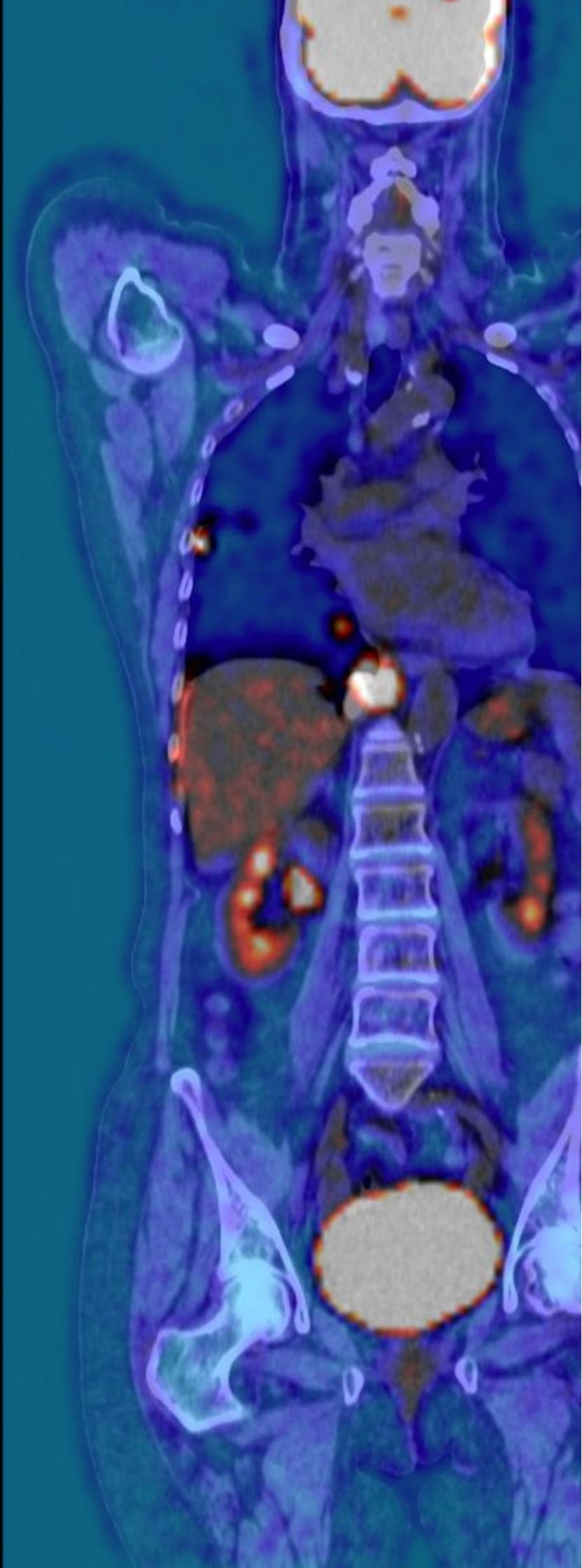
Sull'autore

Pablo Garcia Ortega (pgarciao@cern.ch) ha conseguito il dottorato in Fisica presso l'Università di Salamanca (Spagna). Attualmente lavora al CERN con una borsa Marie Curie e si occupa di simulazioni a LHC e adroterapia usando software Monte Carlo (FLUKA) per il calcolo delle proprietà di trasporto.



Carlo Mancini Terracciano (carlo@accatagliato.org), laureato in Fisica all'Università Sapienza di Roma è attualmente dottorando presso Roma Tre e sta lavorando presso il CERN come Marie Curie Fellow per il progetto ENTERVISION sullo sviluppo di software Monte Carlo (FLUKA) per l'adroterapia. È fra i fondatori dell'associazione ONLUS Accatagliato e redattore della rivista Accastampato.





Il centro italiano per l'adroterapia oncologica

Un centro di eccellenza internazionale per le terapie adroniche del cancro

Roberto Orecchia, Sandro Rossi
(CERN, Ginevra)

Il Centro Nazionale per l'Adroterapia Oncologica (*National Centre for Oncological Hadrontherapy*, CNAO) ha iniziato la sua attività nel Settembre 2011 con un primo trattamento sperimentale basato su fasci di protoni, mentre è del Novembre 2012 il primo paziente sottoposto a terapia con ioni carbonio. Entrambi gli eventi hanno rappresentato delle novità assolute nello scenario sanitario italiano.



Figura 1 – Vista dall'alto dell'area occupata dal CNAO. Di fronte all'ingresso principale sorge l'edificio dell'ospedale, mentre sul retro c'è la centrale elettrica e la copertura del sincrotrone usato per l'accelerazione dei fasci terapeutici. Credit: ENLIGHT.

La fondazione

La fine della fase di costruzione del Centro è stata celebrata con l'inaugurazione ufficiale il 15 Febbraio 2010, mentre la seconda fase di *trials* clinici è iniziata subito dopo. È durata ben tre anni, dal 2010 al 2013, e ha permesso di convalidare scientificamente le tecniche adroterapiche per il trattamento dei tumori secondo un'ampia varietà di protocolli sperimentali e clinici. È stata anche la base della successiva fase di ottimizzazione del numero di pazienti ambulatoriali trattati, qualche migliaio l'anno, che ha permesso a sua volta di espandere gradualmente gli indicatori clinici e di introdurre un'attività di ricerca clinica, radiobiologica e traslazionale¹.

Il trattamento dei pazienti mediante ioni carbonio è stato approvato nel Luglio 2012 dal Ministero della Sanità, in seguito a un dettagliato rapporto compilato dal CNAO riguardo la dosimetria

¹ In campo oncologico, la *ricerca traslazionale* verifica la possibilità di trasformare le scoperte scientifiche che arrivano dal laboratorio in applicazioni cliniche per ridurre l'incidenza e la mortalità per cancro.

e la radiobiologia con ioni carbonio, sia *in vitro* che *in vivo*. Questa attività sperimentale era stata portata avanti nella prima parte del 2012 anche grazie alla collaborazione con l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) e l'Istituto Nazionale per le Scienze Radiologiche giapponese (NIRS). I dati presentati nel rapporto hanno confermato le specifiche attese dei parametri dei fasci terapeutici e ha anche dimostrato gli altissimi standard di sicurezza e qualità offerti dal CNAO.

I primi mesi del 2012 sono stati importanti anche per quanto riguarda la gestione della qualità del centro, che nel luglio dello stesso anno ha ottenuto le certificazioni ISO 9001 e ISO 13485². Entrambe hanno rappresentato un passo fondamentale nella strada di ottenimento del marchio CE da parte del CNAO, necessario per mettere in pratica i trattamenti di adroterapia su larga scala.

I numeri

La fine di Aprile 2013 ha visto 89 pazienti completare il proprio ciclo di trattamenti, di cui 75 all'interno di trials clinici e 14 nell'ambito di un programma di *terapia solidale* in cui i singoli casi vengono approvati uno a uno da un Comitato Etico e dal Ministero. In tutto 59 pazienti sono stati trattati con protoni e 30 con ioni carbonio. I pazienti sono giunti al CNAO da trenta diversi ospedali di tutto il Paese, il che dimostra come stia nascendo una vera e propria rete oncologica per la gestione dei pazienti e il loro *smistamento* nelle strutture più adeguate per loro. Questo aspetto è cruciale e mostra come il CNAO sia una struttura nazionale: è proprio questo che assicura un'accoglienza efficiente dei pazienti che hanno necessità di terapie di questo tipo.

Nel Febbraio 2013 sono stati inviati al Consiglio Superiore di Sanità i risultati clinici di un primo protocollo (il CNAO 01/2011 v2.0) riguardante il trattamento con protoni di 30 pazienti affetti da cordoma e condrosarcoma alla base del cranio³. I risultati, molto positivi, hanno dimostrato il pieno raggiungimento

² Si tratta di norme e linee guida sviluppate Organizzazione internazionale per la normazione. La 9001 definisce i requisiti di un sistema di gestione per la qualità per una organizzazione: sono requisiti di carattere generale e possono essere implementati da ogni tipologia di organizzazione. La 13485 si riferisce invece esplicitamente alle apparecchiature mediche.

³ Sono entrambe rare forme di tumore osseo maligno: il cordoma deriva dalle cellule dei residui embrionali della notocorda, il condrosarcoma origina dal tessuto cartilagineo.



Figura 2 – Camera di trattamento, con i sistemi usati per il posizionamento del paziente e la verifica del corretto allineamento con il fascio. Credit: ENLIGHT.

degli obiettivi del protocollo. Una commissione di tipo *peer-review* sta ora esaminando il rapporto e deciderà se concedere il marchio CE al CNAO come centro medico per la somministrazione di tale protocollo. Questa procedura sarà necessaria per ogni protocollo sviluppato in futuro, in quanto il marchio CE richiede un'autorizzazione rilasciata individualmente dalle autorità sanitarie.

Il luogo

Il Centro sorge in un'area del comune di Pavia che ospita anche altri ospedali e un campus universitario (cfr. Figura 1). La realizzazione del CNAO è basata su una rete di collaborazione molto stretta, che lo collega alle più importanti istituzioni italiane e in-

ternazionali. In particolare, per quanto riguarda l'uso di tecnologie all'avanguardia, un contributo fondamentale viene dall'INFN, che ha condiviso la gestione della realizzazione della struttura, e anche dal CERN e dal GSI. Questa rete ha assicurato una stretta collaborazione tra esperti all'interno del CNAO e continuerà a farlo anche nel futuro.

Nel 2013 è stato lanciato anche un programma di studio per lo sviluppo di una linea sperimentale di produzione di fasci terapeutici. Nel giro di tre anni si assisterà alla messa in opera di una sezione di ricerca dedicata alla radiobiologia, allo sviluppo dei rilevatori, oltre che alla ricerca clinica e traslazionale. Il principale obiettivo del CNAO per quest'anno è l'aumento dell'efficienza nella gestione dei pazienti e l'approvazione della maggior parte dei trials clinici in corso. All'inizio dell'anno è diventata operativa anche la terza camera di trattamento, che ha aggiunto due linee di fascio (una orizzontale e una verticale) a quelle, entrambe orizzontali, già attive nelle altre camere (cfr. Figura 2).

Ristampa dell'articolo "The Status of CNAO at the beginning of 2013" pubblicato su ENLIGHT HIGHLIGHTS del Giugno 2013: enlight.web.cern.ch/media/highlights.

Commenti on-line: http://www.accastampato.it/2013/09/cnao_it/

Sull'autore

Roberto Orecchia è il direttore della divisione di radioterapia dell'Istituto Europeo di Oncologia (IEO) di Milano e il direttore scientifico della Fondazione CNAO.

Sandro Rossi è il direttore tecnico e segretario generale del CNAO.



Come si misura un suono?

Intensità, pressione e unità di misura relative

Martina Pugliese

(Dipartimento di Fisica, Università Sapienza di Roma)

Tipicamente identifichiamo uno stimolo sonoro che udiamo (anche) attraverso il suo *volume*. Ma cosa rappresenta questo esattamente e come lo si misura? L'unità di misura adottata per identificare il volume è il *decibel*, abbreviato come *dB*, per cui il valore in decibel del volume di un suono è definito, in termini di *intensity level* (IL) come

$$\text{Volume in numero di decibel}_{IL} = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right),$$

dove I è l'*intensità del suono* e rappresenta la potenza (energia dell'onda sonora trasferita nell'unità di tempo) divisa per la superficie attraversata dall'onda stessa. Si tratta cioè dell'energia trasferita da un'onda sonora per unità di tempo e di superficie. I_0 è un valore di intensità sonora adottato universalmente come punto di riferimento, pari a $I_0 = 10^{-12} \text{W/m}^2$. Tale valore si riferisce alla minima intensità percepibile, mediamente, da un orecchio umano ed è determinato dal più basso valore di pressione dell'aria necessario per mettere in vibrazione il timpano.

Ciò significa che il valore in decibel è proporzionale al logaritmo in base 10 del rapporto tra l'intensità del suono che ci interessa e quella di un suono preso come livello standard di riferimento. Se chiamiamo u una generica onda acustica che si propaga nel tempo e ne rappresentiamo l'andamento temporale come in Figura 1, possiamo definire il suo *periodo* come l'intervallo tra due picchi (o, analogamente, tra due valli), e cioè il tempo che occorre per avere un'oscillazione completa. L'*ampiezza* dell'onda, direttamente collegata all'intensità del suono, è invece l'escursione massima che essa compie.

L'intensità sonora è anche collegata alla pressione p dell'onda che, attraversando il mezzo, lo perturba e trasmette lo stimolo, attraverso una relazione di dipendenza quadratica:

$$I \propto p^2.$$

Questo significa che, data la proprietà dei logaritmi per cui $\log(x^2) = 2\log(x)$, possiamo anche scrivere il valore in decibel in termini di *sound pressure level* (SPL):

$$\text{Volume in numero di decibel}_{SPL} = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right).$$

Qui si usa come riferimento una pressione $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ ($20 \mu\text{Pa}$, pari a $20 \cdot 10^{-6} \text{Pa}$).

Risulta dunque chiaro che il valore in decibel di un suono può essere anche negativo: se ad esempio un suono ha un volume di -40dB , significa che

$$-40 \text{dB}_{SPL} = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right) \Rightarrow p = \frac{p_0}{10^2},$$

e cioè che la sua pressione è di 100 volte inferiore a quella usata come standard.

Riportiamo qui una scala di valori tipici, in termini di decibel, dei suoni che comunemente ascoltiamo (i valori sono approssimativi).

Suono	dB_{SPL}
Bisbiglio	30
Conversazione ordinaria	65
Squillo di telefono	80
Motocicletta	100
Decollo di un razzo	180

Attorno ai 135dB_{SPL} si ha la cosiddetta *soglia del dolore*: l'orecchio umano, a causa dell'eccessiva pressione, prova autentico dolore (non è raccomandabile sottoporlo a una tale sollecitazione!). Naturalmente questo valore è soggettivo, e inoltre dipende dalla storia del singolo paio di orecchie (per quanto tempo e quanto spesso hanno ricevuto stimoli sonori di intensità *forte*) e dalla loro età.

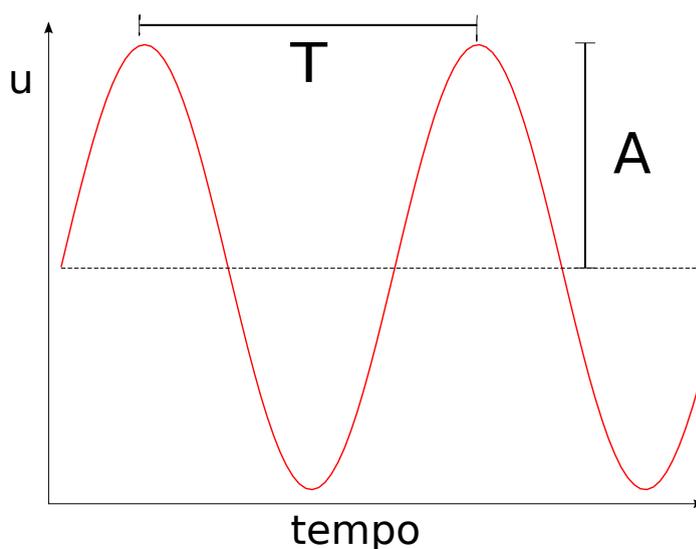


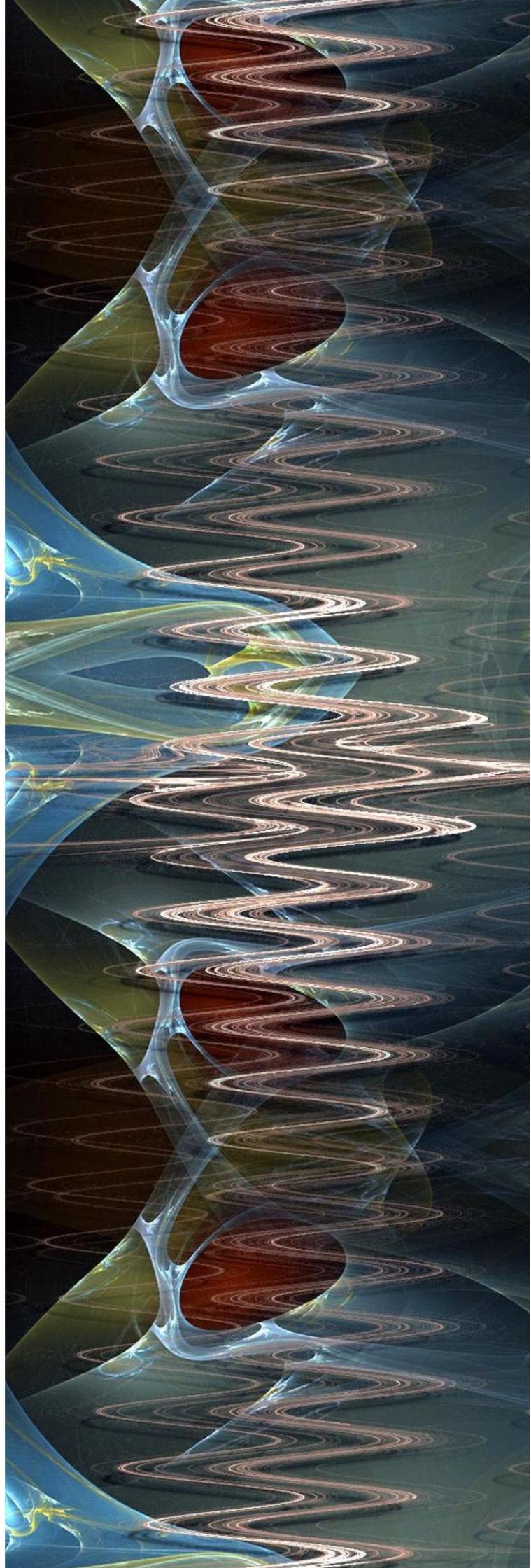
Figura 1 – Una rappresentazione esemplificativa di un'onda acustica: T è il suo *periodo* e A la sua *ampiezza*.



Figura 2 – Durante un concerto rock si raggiungono (e superano) facilmente i 100 dB.

Bibliografia

- [11] Frova A. *Armonia celeste e dodecafonìa*. BUR (2006)
[12] Wolfe J. URL <http://www.animations.physics.unsw.edu.au/jw/dB.htm>
Commenti on-line: <http://www.accastampato.it/2013/09/misura-del-suono/>



Sull'autore

Martina Pugliese (m.letitbe@gmail.com), laureata in Fisica presso l'Università Sapienza di Roma, è attualmente dottoranda in Fisica presso lo stesso ateneo. Si occupa principalmente di modellizzazione di dinamiche di linguaggio, ma suonando da anni il pianoforte, è anche molto interessata al profondo rapporto tra musica e scienza.



Levitazione magnetica La tecnologia dei treni superelevati con un giradischi

di Paola Malacari

Si sente spesso parlare di *levitazione magnetica* tramite l'utilizzo di superconduttori. Ma se a casa non abbiamo un superconduttore, possiamo ricreare lo stesso fenomeno? Se avete un giradischi il gioco è fatto! Attacciamo il magnete a un'estremità della strisciolina di carta e posizioniamo il disco di alluminio sul giradischi. Accendiamolo in modo da far ruotare il disco di alluminio posto al di sopra e avviciniamo la strisciolina di carta con il magnete al disco. Vedremo che la rotazione del disco provocherà la levitazione del magnete sopra di esso!

Cosa succede?

La rotazione del disco vicino al magnete fa sì che esso sia soggetto a un campo magnetico variabile, dovuto al suo moto relativo rispetto al magnete stesso posto al di sopra. La variazione del campo magnetico genera all'interno del disco delle correnti indotte, chiamate *Correnti di Foucault*, che, secondo la *Legge di Lenz*, danno origine a una forza magnetica di repulsione nei confronti del magnete.



Cosa è l'induzione elettromagnetica? Immaginiamo di avere un circuito elettrico immerso in un campo magnetico: ogni volta che esso viene sollecitato da una variazione di tale campo, al suo interno si genera una circolazione di corrente. Tale fenomeno è noto come *induzione elettromagnetica*. Questa corrente indotta permane finché esiste la variazione di campo magnetico. Inoltre, per far sì che venga rispettato il principio di conservazione dell'energia, bisogna sottolineare che il verso della corrente indotta è tale da generare un campo magnetico che si oppone alla variazione del flusso che l'ha generata (Legge di Lenz). La legge che descrive l'intero fenomeno è nota come Legge di Faraday-Neumann-Lenz:

$$\Delta V = -\Delta\Phi/\Delta t, \quad (1)$$

dove $\Delta\Phi$ rappresenta la variazione del flusso del campo magnetico attraverso il circuito nell'intervallo di tempo Δt , e ΔV rappresenta la forza elettromotrice indotta dovuta, appunto, all'induzione elettromagnetica.



Cosa sono le correnti di Foucault? Le correnti indotte si generano anche all'interno di corpi metallici massicci, come nel caso del nostro esperimento. In questa circostanza prendono il nome di Correnti di Foucault. Secondo la Legge di Lenz, anche in questo caso le correnti indotte danno origine a una forza magnetica di repulsione nei confronti del magnete, forza che fa sì che il magnete leviti sopra il disco di alluminio.

Applicazioni

L'induzione elettromagnetica e la conseguente levitazione magnetica possono essere una grande risorsa. In particolar modo, possiamo vedere una delle applicazioni principali nel campo ferroviario. Le ferrovie a levitazione sono quei sistemi ferroviari in cui viene eliminato il contatto tra binari e treno e, di conseguenza, l'attrito e la resistenza all'avanzamento. Una delle tecniche per realizzare questi sistemi sfrutta proprio l'induzione elettromagnetica, si parla in questo caso di ferrovie a Sospensione Elettrodinamica (EDS). Questo sistema sfrutta le forze opposte tra i magneti installati sul veicolo e gli avvolgimenti conduttivi posti sul binario. La levitazione è quindi la conseguenza diretta del movimento del veicolo. Per avere maggiore stabilità, però, i treni EDS utilizzano magneti superconduttori estremamente potenti e leggeri, più costosi dei magneti convenzionali e che richiedono un sistema di refrigerazione installato sul treno che li mantenga a bassa temperatura.

SCHEMA



MATERIALE

- 1 giradischi
- 1 disco di alluminio
- 1 forte magnete di piccola massa
- 1 sottile striscia di carta

ARGOMENTI

- Levitazione magnetica
- Corrente elettrica
- Induzione elettromagnetica

Accastampato non è un periodico, pertanto non è registrato e non ha un direttore responsabile. È un esperimento di comunicazione realizzato dall'associazione Accatagliato degli studenti di fisica dell'Università Sapienza di Roma con il duplice obiettivo di mostrare al pubblico non specialistico e agli studenti delle scuole superiori le ricerche portate avanti nell'area romana e di fornire l'occasione agli studenti universitari e ai giovani ricercatori di raccontare il proprio lavoro quotidiano e di confrontarsi con la comunicazione scientifica non specialistica.

La rivista è prodotta dal motore di composizione tipografica \LaTeX . I sorgenti sono sviluppati e mantenuti da Alessio Cimarelli e sono disponibili richiedendoli alla Redazione.

Impaginazione: Alessio Cimarelli

Copertina: Silvia Mariani

Per la traduzione in italiano si ringraziano Laura Caccianini, Massimo Margotti, Martina Pugliese, Alessio Cimarelli.

Gli articoli contenuti in questo numero sono protetti con marca digitale grazie a patamu.com



Quest'opera è rilasciata sotto la licenza Creative Commons Attribuzione-Non commerciale-Condividi allo stesso modo 3.0 Unported. Se non specificato altrimenti, tutti gli articoli in essa contenuti sono rilasciati dai rispettivi autori sotto la medesima licenza. Per leggere una copia della licenza visita il sito web <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/> o spedisci una lettera a Creative Commons, 171 Second Street, Suite 300, San Francisco, California, 94105, USA.



