

Elaborato

Dopo aver analizzato i modi per accelerare un elettrone, sia nel campo elettrico che in quello magnetico, soffermati a descrivere gli acceleratori di particelle e le loro applicazioni in campo medico.

Indice:

- Introduzione
- Dagli elementi alle particelle
- Particelle cariche nel campo elettrico
- Particelle cariche nel campo magnetico
- Acceleratori di particelle
- Acceleratori lineari e circolari
- Tumori: formazione e terapie
- Curare con le particelle
- Conclusioni
- Bibliografia e sitografia

Introduzione

La fisica delle particelle trova applicazioni negli ambiti più diversi, dallo studio dei reperti archeologici all'ingegneria dei materiali, dalla ricerca scientifica alla medicina; esistono diverse tipologie di particelle, ciascuna con particolari comportamenti e, a seconda del fine per cui si stanno utilizzando, vanno trattate in modo differente.

La fisica delle particelle si basa sullo studio della struttura della materia: le conoscenze attuali sono state raggiunte grazie ai microscopi ottici, ai microscopi elettronici, alle sorgenti di radiazioni e infine agli acceleratori di particelle.

Questi ultimi sono strumenti che permettono di aumentare l'energia dei più piccoli costituenti della materia e sono frutto degli studi avviati il secolo scorso da moltissimi scienziati di diverse nazionalità.

Tra le tante applicazioni che l'uso degli acceleratori ha consentito di sviluppare di sicuro interesse sono quelle in ambito oncologico.

I tumori, che fino a alcuni decenni fa erano difficilmente curabili, oggi si possono combattere anche con l'uso delle particelle: la radioterapia e l'adroterapia sono trattamenti medici che sfruttano le conoscenze della fisica delle particelle per sconfiggere queste patologie; usando elettroni o protoni con elevata energia si possono distruggere, o per quanto possibile ridurre, le masse tumorali.

In questo campo l'Italia risulta inoltre essere un paese all'avanguardia perché le ricerche condotte dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, affiancate agli studi del Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica, hanno permesso lo sviluppo di una tra le strutture più innovative del settore. In particolare nei laboratori di Pavia vengono impiegati gli acceleratori di protoni a supporto delle terapie contro il cancro.

Dagli elementi alle particelle

Immaginiamo di prendere un oggetto e iniziare a spezzarlo più e più volte: ad ogni taglio la sua dimensione si riduce e in breve tempo si arriva ad avere dei frammenti microscopici, difficili da vedersi ad occhio nudo.

Questo processo può continuare fino a giungere alle molecole, ovvero le più piccole quantità di una sostanza in grado di conservare le proprie caratteristiche chimiche e fisiche.

Queste, a loro volta, sono ulteriormente scindibili negli atomi che le compongono ovvero la più piccola particella di un elemento che mantiene le proprie caratteristiche chimiche ma non fisiche.

Anche l'atomo è costituito da un aggregato strutturato di particelle di dimensioni minori, ovvero protoni, neutroni, elettroni che costituiscono un primo livello delle particelle elementari.

I protoni sono particelle con carica positiva che, uniti ai neutroni, aventi carica neutra, formano il nucleo dell'atomo; attorno ad esso ruotano gli elettroni, particelle dotate di carica negativa.

L'unità di misura delle cariche è l'elettronvolt [eV]: il suo valore coincide all'energia che acquista un elettrone quando viene accelerato da una differenza di potenziale pari a un Volt.

Particelle cariche nel campo elettrico

Una particella elementare può trovarsi all'interno di uno spazio interessato da un campo elettrico, ovvero una regione dello spazio che diventa sede di forze elettriche generate dalla presenza di una o più cariche che prendono il nome di *sorgenti del campo*. Poiché la particella elementare non è elettricamente neutra, ne risulta influenzata.

Nel caso dei campi elettrici, le linee di forza sono uscenti dalle cariche positive ed entranti nelle cariche negative; il numero di linee è proporzionale all'intensità del campo.

Consideriamo ad esempio un elettrone che entra in un campo elettrico uniforme, ovvero con la stessa intensità in ogni punto, come potrebbe essere un condensatore a facce piane e parallele: l'elettrone sarà attratto dall'armatura positiva e respinto da quella negativa, subendo una forza e acquisendo così un'accelerazione.

La forza elettrostatica che agisce sulla particella si calcola con la seguente equazione:

$$F = q \cdot E$$

in cui:

F è la forza di elettrostatica

q è la carica della particella

E è il campo elettrico

La direzione della forza sarà la stessa del campo mentre il verso, nel caso dell'elettrone, sarà opposto a quello del campo.

Particelle cariche nel campo magnetico

Consideriamo ora un elettrone in moto in un campo magnetico, la cui velocità ha una componente perpendicolare alla direzione del campo magnetico stesso: la particella subirà una variazione nella propria traiettoria ma non nella velocità.

Questo fenomeno è da ricondursi alla forza di Lorentz, forza che interviene sull'elettrone solo quando questo è in moto e non è parallelo al campo magnetico; così non fosse non si verificherebbero interazioni di alcun genere.

Questo comportamento della particella è definito dalla forza di Lorentz:

$$F = q \cdot v \times B$$

in cui:

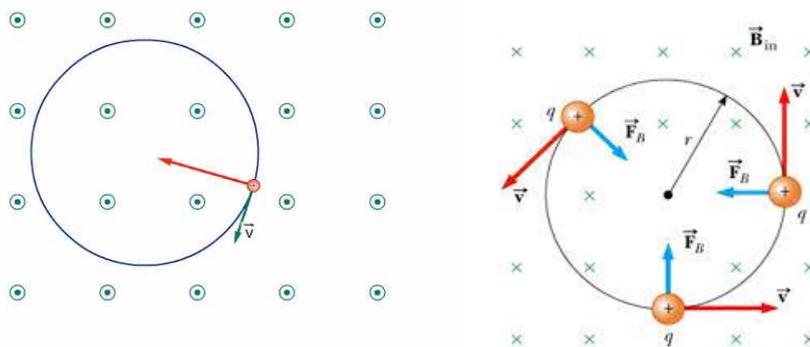
F è la forza di Lorentz

q è la carica della particella

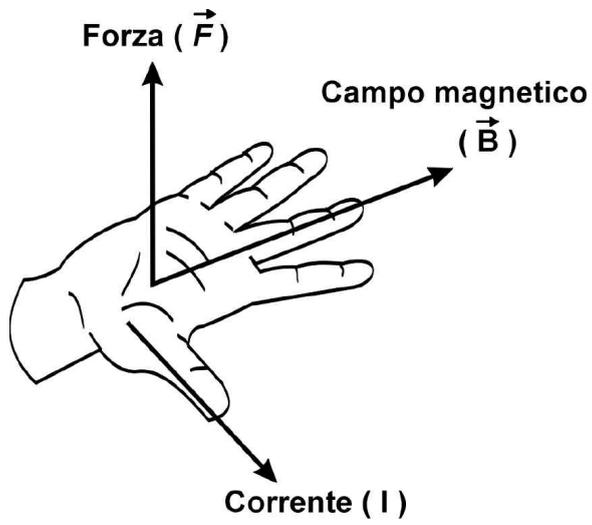
v è il vettore velocità della particella

B è il vettore campo magnetico

Da notare che si tratta di un prodotto vettoriale: la forza sarà perpendicolare al piano su cui giacciono il campo magnetico e la velocità.



La forza di Lorentz non compie lavoro, pertanto non cambia l'energia cinetica delle particelle; è però utilissima per incurvarle, modificando la loro traiettoria.



Per facilitare la comprensione del modo in cui agisce la forza, si usa la cosiddetta *regola della mano destra*: se il pollice è il vettore v e le altre dita B , la forza di Lorentz sarà perpendicolare al palmo della mano.

Acceleratori di particelle

Sfruttando gli effetti su una particella della presenza contemporanea di un campo elettrico e di un campo magnetico, è possibile accelerare in maniera controllata queste particelle: così facendo si incrementa la loro velocità e ne consegue l'aumento di energia totale.

Gli acceleratori, per funzionare, necessitano tre importanti elementi: una fonte di particelle cariche, un campo elettrico per accelerarle e un campo magnetico per impostare la traiettoria desiderata.

La **sorgente di particelle** genera un flusso di elettroni o protoni, a seconda delle necessità della particella da accelerare.

Si può sfruttare l'effetto termoionico che, tramite il riscaldamento di un filamento di metallo, come potrebbe essere quello di una lampadina, estrae elettroni.

I protoni, particelle atomiche particolarmente pesanti, si possono invece ricavare da un atomo di idrogeno sottraendogli l'elettrone che possiede: questo processo è detto ionizzazione e si verifica quando l'idrogeno in forma gassosa è colpito da una scarica elettrica.

Il **campo elettrico**, necessario all'accelerazione delle particelle, è sfruttabile in due differenti modi: possono essere usati campi elettrostatici oppure a radiofrequenza; ciascuno ha propri pregi e difetti.

La prima categoria sfrutta una differenza di potenziale tra due elettrodi, tuttavia non è sempre agevole procedere con questo metodo: con le alte tensioni subentrano importanti problematiche legate all'isolamento dell'acceleratore stesso, pertanto si preferisce l'utilizzo di più circuiti a minor tensione.

L'energia conferita alla particella dipende dalla differenza di potenziale del campo elettrico e dalla carica della particella stessa.

Gli acceleratori a radiofrequenza, invece, si compongono di una serie di cilindri cavi (*tubi di drift*), disposti su uno stesso asse, collegati a un generatore di corrente alternata a frequenza molto alta.

Le particelle entrando nel del tubo di drift non subiscono accelerazione, poiché questa avviene solo tra un cilindro e l'altro.

Questa tecnica, tuttavia, mostra dei limiti quando si vuole accelerare una particella a un'elevata energia, ovvero a una velocità prossima alla velocità della luce.

Sono state inventate, pertanto, le cavità a radiofrequenza: si sfrutta un volume metallico chiuso, in cui è confinato il campo elettromagnetico prodotto da un generatore a radiofrequenza; le onde elettromagnetiche si accumulano al suo interno.

Quando le particelle cariche attraversano la cavità, il campo elettromagnetico imprime loro una accelerazione lungo la direzione del moto della particella.

Il **campo magnetico**, il cui scopo è deviare le particelle per portarle sul percorso desiderato, è ottenuto tramite elettromagneti posti intorno al flusso di elettroni o protoni; questi apparecchi sfruttano la tecnologia dei superconduttori, materiali la cui resistenza è pressoché nulla quando sono portati a bassissime temperature.

Ciò avviene grazie al raffreddamento a elio liquido che circonda gli acceleratori.

Acceleratori lineari e circolari

Acceleratori lineari

Un acceleratore lineare si compone di una serie di cilindri cavi conduttori, collegati a un generatore di corrente alternata ad alta frequenza.

I cablaggi elettrodo-generatore sono alternati: si collegano il primo, il terzo, il quinto elettrodo, ecc.. a un polo di un alternatore, e il secondo, il quarto, il sesto elettrodo, ecc..., all'altro polo, così da cambiare alternativamente il segno della loro carica.

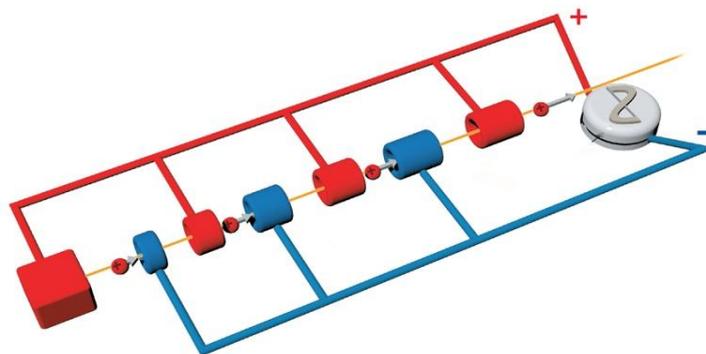
Se posizioniamo un elettrone (quindi con carica negativa) in prossimità di un elettrodo carico positivamente, la particella viene attratta nella cavità del cilindro; si ha così una prima accelerazione della particella.

Quando poi l'elettrone si trova all'interno del cilindro, quest'ultimo cambia la polarità e diviene negativo; allo stesso modo anche la polarità del cilindro successivo si inverte e diventa positiva.

L'elettrone, quindi, viene espulso dal primo cilindro ed è attratto nel secondo, acquisendo perciò maggiore velocità.

Una volta raggiunto il secondo cilindro si ha nuovamente l'inversione di polarità e si verifica ancora l'espulsione con la successiva attrazione; questo processo, che deve avvenire in modo perfetto e con grande sincronismo, permette alla carica di acquisire sempre maggiore velocità e quindi energia.

Un dettaglio tecnico: la lunghezza dei cilindri deve aumentare con l'aumentare della velocità dell'elettrone in quanto nel periodo dell'alternatore, che resta costante, la particella percorre una maggiore distanza.



↑ Immagine dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Acceleratori circolari - Ciclotroni

Gli acceleratori lineari hanno il difetto di avere grandi dimensioni: con questo metodo, per accelerare le particelle alla velocità della luce, servirebbero apparecchiature lunghe anche decine di chilometri; questo si traduce in una maggiore complessità strutturale e tecnica e soprattutto costi di gestione incredibilmente elevati.

Per risolvere questi problemi il fisico americano Ernest Orlando Lawrence, nel 1930, inventò e realizzò il primo ciclotrone: le particelle vengono accelerate percorrendo più volte una traiettoria circolare, permettendo dimensioni contenute e spese ridotte.

Il ciclotrone si presenta come una struttura circolare, composta da due mezzi cilindri conduttori, detti *dees*, con cariche opposte; tra i due è presente un'intercapedine in cui si crea un campo elettrico che accelera le particelle.

I *dees* sono posti tra due magneti permanenti o elettromagneti che generano un campo magnetico.

Al centro dei *dees*, nell'intercapedine, sono poste le particelle da accelerare; nel caso di un elettrone (carica negativa) l'attrazione sarà verso il *dee* con carica positiva.

Le particelle, con velocità v , sono in un campo magnetico perpendicolare alla direzione dello spostamento e subiscono quindi la forza di Lorentz.

Ne risulta una deviazione della traiettoria, che diventa perciò circolare e riporta la particella nello spazio tra i *dees*, dove verrà accelerata ancora.

Mentre la particella si trova all'interno del *dee*, avviene l'inversione di polarità quindi, come avviene negli acceleratori lineari, si ha l'espulsione della particella e la successiva attrazione da parte del *dee* opposto.

Ciò si verifica ad ogni giro quindi le particelle, grazie al campo elettrico accelerante, aumentano velocità: questo si traduce in un aumento del raggio della curva interna ai *dees* per via della forza centripeta.

Il raggio della curva percorsa varia secondo la seguente formula:

$$R = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}$$

in cui:

R è il raggio della curva

m è la massa della particella

v è la velocità della particella

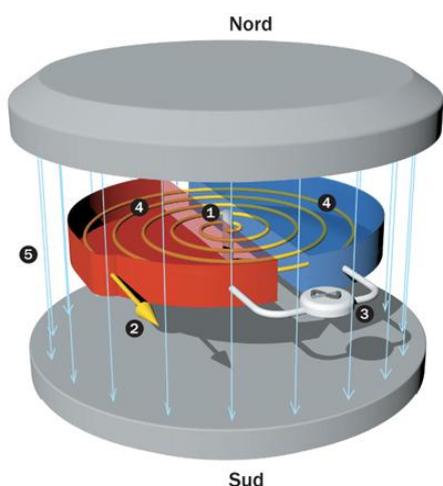
q è la carica della particella

B è il campo magnetico

Quando la traiettoria della particella avrà il raggio di ampiezza prossima al raggio dei dees, la carica sarà massima.

Il ciclotrone ha permesso un notevole miglioramento delle esperienze con le particelle, tuttavia la struttura stessa del dispositivo ne limita la convenienza economica per potenze elevate: occorrerebbe aumentare ancora il diametro dell'acceleratore, l'intensità del campo magnetico e del campo elettrico.

Un dettaglio tecnico: è importante che l'intero ciclotrone sia nel vuoto: se ci fosse l'aria si perderebbe energia a causa degli urti tra le particelle e le molecole di gas.



Nell'immagine:

- 1) Centro del ciclotrone
- 2) Moto delle particelle
- 3) Generatore di corrente alternata
- 4) Dees
- 5) Campo magnetico

↳ Immagine dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

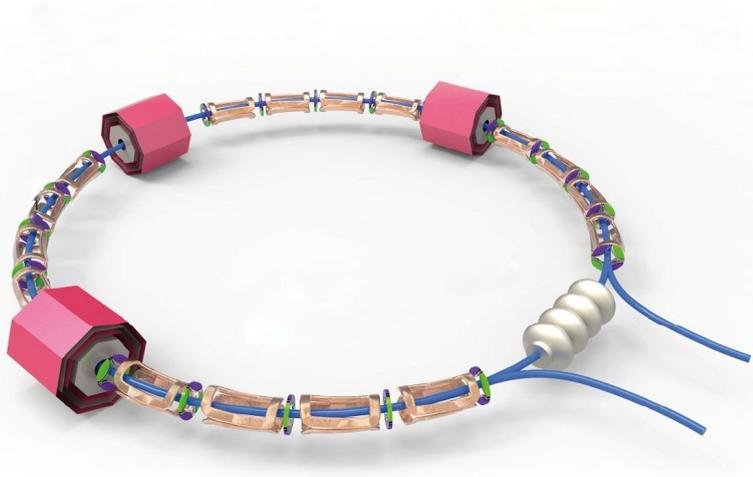
Acceleratori circolari - Sincrotroni

Il sincrotrone è un'altra tipologia di acceleratore di particelle circolare; si differenzia dal ciclotrone per le traiettorie seguite dalle particelle in quanto in questo caso sono orbite chiuse.

All'atto pratico sono macchinari di forma poligonale (ma si tratta di un numero così elevato di sezioni rettilinee che è considerabile come circonferenza), con spigoli arrotondati dove è presente un dipolo magnetico necessario a curvare la traiettoria. L'accelerazione avviene all'interno di una cavità a radiofrequenza attraversata un altissimo numero di volte nel percorso delle particelle; il campo elettrico è sincronizzato con le particelle in modo tale da aumentare la loro velocità (e quindi energia) ad ogni loro passaggio.

Il campo magnetico aumenta gradualmente in modo da tenere il raggio dell'orbita costante.

L'energia massima che si può ottenere è limitata dall'intensità dei campi magnetici dei dipoli e dal raggio massimo dell'orbita delle particelle: aumentando la velocità della particella si rende necessario un campo magnetico più intenso per poterla deviare. Per essere in grado di aumentare il più possibile l'energia delle particelle è necessario avere i magneti quanto più potenti possibile, sfruttando la tecnologia dei superconduttori, oppure aumentare la dimensione del sincrotrone per avere curvatura minore, riducendo perciò la forza centripeta necessaria.



↑ Immagine dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Tumore e cancro: formazione e terapie

Nell'ultimo secolo, grazie alle migliorate condizioni di vita e della minore incidenza di altre malattie infettive, si è rilevata una crescita delle malattie tumorali.

Un cancro si origina da una cellula sana che, a seguito di una mutazione del proprio DNA, si trasforma in cellula tumorale: perde le proprie funzionalità e cresce più in fretta del normale; le cellule malate sono molto simili a quelle sane, pertanto la distinzione e la cura di quelle tumorali è particolarmente difficile.

I termini tumore e cancro sono spesso usati come sinonimi, anche se esiste una differenza tra le due patologie: il tumore può essere sia *benigno*, localizzato in un solo punto, che *maligno*, cioè che forma metastasi, masse tumorali diffuse nel corpo; il cancro è invece solo maligno.

Vi sono diverse tipologie di tumore e, nell'ordine, i più frequenti sono:

- *carcinomi*: originati dai tessuti epiteliali (come mammella o colon)
- *tumori ematopoietici*: originati da cellule del sangue (leucemia)
- *sarcomi*: originati dai tessuti muscolari e connettivi
- *gliomi*: originati dal tessuto nervoso

La probabilità di sviluppare un tumore è una probabilità composta, che dipende perciò da diversi elementi, come:

-fattori casuali: errori nella duplicazione del DNA;

-fattori ereditari: mutazioni di geni trasmesse dai genitori;

-fattori esterni o ambientali: composti chimici, raggi ultravioletti, radiazioni ionizzanti e infezioni virali.

È importante ricordare come lo stile di vita influisca sull'eventuale insorgenza di tumori: una vita condotta in modo sano riduce fortemente le probabilità di sviluppare queste patologie.

Attualmente esistono differenti terapie per la cura dei tumori, ciascuna con specifiche applicazioni e determinati vantaggi.

La terapia chirurgica è la rimozione fisica delle masse tumorali, che devono essere circoscritte e localizzate; è abbastanza invasiva e non è sempre applicabile in tutto il corpo.

Le terapie farmacologiche, come la chemioterapia, prevedono l'assunzione di specifici farmaci che colpiscono le cellule con alta velocità di riproduzione, come i tumori; ciò comporta però un rischio per le cellule sane con la stessa caratteristica, come ad esempio le cellule sanguigne o epiteliali.

Vi sono poi le terapie ormonali: queste prevedono l'assunzione di farmaci che vanno a bloccare i recettori degli stessi ormoni che stimolano la crescita tumorale.

Curare con le particelle

Le particelle, una volta che sono state accelerate, sono utilizzabili per cure antitumorali più avanzate e con alcuni vantaggi rispetto alle terapie chirurgiche o farmacologiche.

Radioterapia: molto diffusa e relativamente economica, utilizza la tecnologia degli acceleratori lineari per sparare particelle ad alta energia contro l'area da trattare. Il DNA delle cellule tumorali è danneggiato e distrutto con l'uso di radiazioni ionizzanti, come i raggi X; le cellule malate non sono più in grado di riprodursi e la crescita del tumore è interrotta.

La radiazione, però, colpisce anche cellule sane che in un secondo momento possono portare alla formazione di nuovi tumori, detti secondari.

Per questa ragione, nel caso di tumori superficiali come quelli della pelle, si sfruttano fasci di elettroni accelerati che non sono in grado di penetrare in profondità.

Adroterapia: è una delle ultime frontiere della medicina in ambito oncologico; differisce da tutte le terapie antitumorali precedentemente sviluppate per la sua alta precisione ed affidabilità; è al momento poco diffusa per via degli alti costi di gestione degli impianti e per le tecnologie molto avanzate che richiede; si contano attualmente solo 6 strutture del genere in tutto il mondo e una di queste si trova a Pavia.

Il nome adroterapia significa letteralmente *terapia dura* e rimanda agli adroni, che sono le particelle più pesanti, come i protoni.

A differenza della radioterapia, che utilizza i raggi X o gli elettroni, questa terapia impiega protoni e ioni carbonio, particelle più pesanti e con maggiore energia; queste caratteristiche la rendono ancora più efficiente nel trattamento di specifiche tipologie di tumore.

Si possono trattare, ad esempio, i tumori radio-resistenti, ovvero non trattabili con i raggi X, e tumori localizzati in aree difficilmente raggiungibili o operabili; presenta poi il vantaggio, non indifferente, del basso rischio di tumori secondari grazie alla sua elevata precisione.

Le particelle, per essere efficienti sul paziente, devono subire una potente accelerazione; questo avviene grazie al *sincrotrone* che regola l'energia in base alla profondità della massa tumorale.

La realizzazione, il montaggio e l'avviamento del sincrotrone in dotazione al CNAO di Pavia sono stati effettuati dal personale del centro che ha lavorato con la collaborazione dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, del Politecnico di Milano, dell'Università di Pavia e del CERN.

L'apparecchio ha un raggio di 25 metri per 80 di circonferenza e vi sono collegate le sale per le terapie.

Le particelle percorrono al suo interno, nell'arco di mezzo secondo, un milione di giri per una distanza complessiva di circa 30.000 chilometri; in questo modo la particella raggiunge l'energia richiesta dalla terapia e viene successivamente indirizzata verso il tumore. La sua traiettoria è regolata da intensi campi magnetici che la dirigono esattamente sull'obiettivo; la posizione di quest'ultimo è monitorata costantemente per avere la massima precisione.



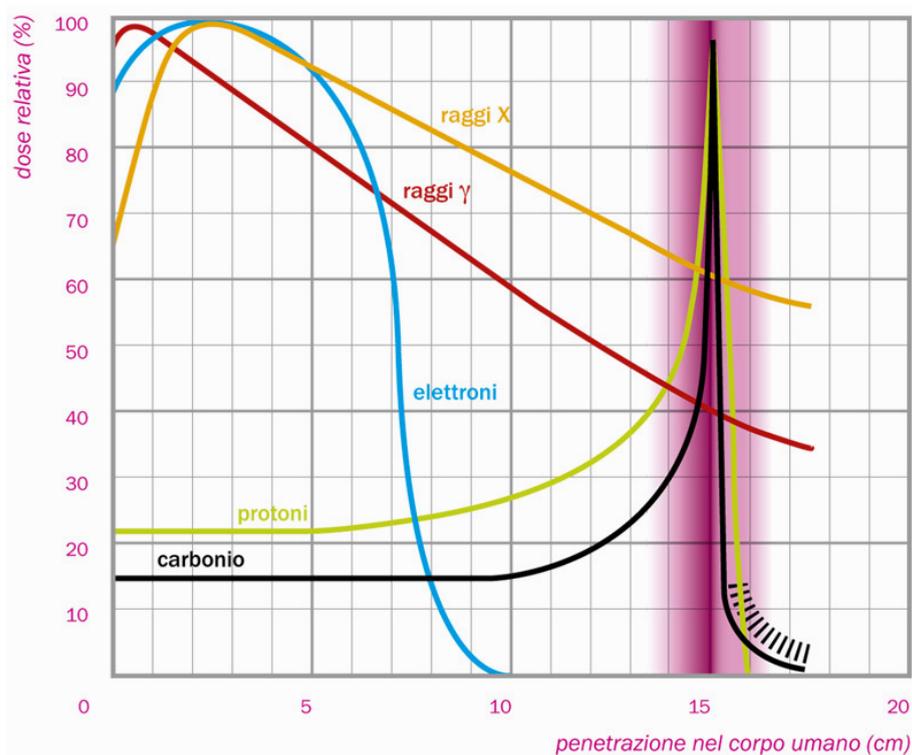
↑ L'interno del CNAO di Pavia, immagine dal sito della Fondazione

Azione delle particelle

Le particelle, quando sono dirette contro la materia e la attraversano, a seconda della loro tipologia, hanno diversi comportamenti: tutte, però, procedendo e penetrando verso il bersaglio, perdono energia e in corrispondenza del massimo rilascio si verificano i danni maggiori al DNA cellulare; bisogna fare in modo che questi picchi energetici, detti *picchi di Bragg*, siano in corrispondenza delle masse tumorali da trattare.

Gli elettroni, i raggi X e i raggi gamma hanno una perdita energetica graduale e quasi immediata, sono perciò poco penetranti; sono utilizzabili per tumori superficiali o comunque non situati in aree del corpo poco accessibili.

I protoni e gli ioni del carbonio, invece, mostrano una perdita di energia concentrata in pochissimo spazio e, a differenza degli elettroni, sono in grado di arrivare a profondità maggiori nel corpo del paziente; la dose in superficie è bassa rispetto a quella assorbita nella regione del picco.



Il grafico mostra il picco di energia di diversi tipi di radiazione in relazione alla profondità raggiunta dalle particelle.

Quando le cellule tumorali vengono colpite, il DNA dei loro nuclei viene profondamente danneggiato; le cellule perdono la capacità di moltiplicarsi e il tumore interrompe la sua crescita.

Quando poi le cellule muoiono, verranno eliminate dal sistema immunitario.

Il grande vantaggio dell'adroterapia è che questo meccanismo di distruzione cellulare è estremamente preciso: colpisce solo la massa tumorale e preserva i tessuti sani, a differenza dei raggi X che ad esempio sono molto più diffusi e meno precisi.

Conclusioni

La medicina oncologica, grazie ai progressi fatti in fisica delle particelle, ha trovato nuove terapie per curare i propri pazienti; alcune patologie, localizzate in zone del corpo difficilmente accessibili, sono oggi curabili senza operazioni invasive ai danni del malato.

La radioterapia, applicazione all'avanguardia, se confrontata con i risultati ottenibili attraverso l'adroterapia, sembra poco sicura e con minor efficienza. Tuttavia tale trattamento resta comunque una cura estremamente valida e affidabile.

L'uso dei protoni, procedura che ha da poco visto la luce, sembra essere il futuro dell'oncologia: permette la cura di tumori resistenti alla radioterapia, garantisce precisione nell'operare anche in zone particolarmente sensibili e presenta un basso rischio di tumori secondari.

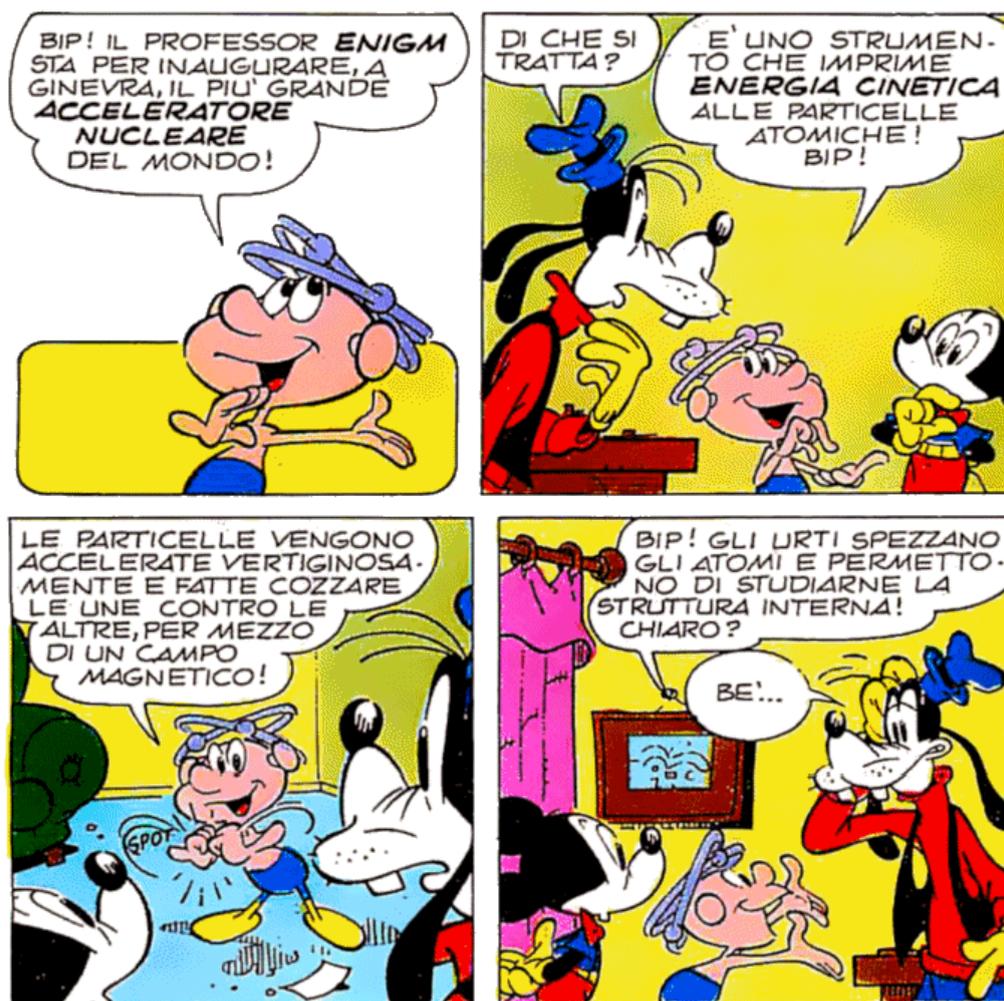
L'unico apparente svantaggio che sembra mostrare sono gli elevati costi di costruzione e gestione delle strutture dedicate; tuttavia si può auspicare che con il miglioramento delle tecnologie produttive un'apparecchiatura del genere possa essere impiegata su scala ancora più ampia.

Gli studi in quest'ambito proseguono con lo scopo di ampliare il numero di patologie curabili con le particelle e sviluppare terapie meno invasive per i pazienti, così da poter trattare quanti più casi senza arrecare potenziali danni.

Nelle varie ricerche ho trovato anche la prima pagina di una vecchia storia di Topolino, dimostrazione che la fisica delle particelle si può trovare anche in insospettabili elementi della vita quotidiana.

WALT DISNEY

TOPOLINO E L'ACCELERATORE NUCLEARE



↑ Estratto da una storia di Topolino del 1985

Bibliografia e sitografia

I problemi della fisica 2 - Cutnell, Johnson, Young, Stadler

I problemi della fisica 3 - Cutnell, Johnson, Young, Stadler

Manuale di Fisica adottato dalla classe.

Il nuovo Invito alla biologia.blu - Curtis, Barnes, Schnek, Massarini

Manuale di Biologia adottato dalla classe.

Fondazione CNAO - Centro Nazionale Adroterapia Oncologica

<https://fondazionecnao.it>

Sito del Centro di Adroterapia Oncologica di Pavia

Particelle per la medicina

<https://scienzapertutti.infn.it/1-particelle-per-la-medicina>

Istituto Nazionale Fisica Nucleare – pagina divulgativa del sito

La radioterapia

<https://www.airc.it/cancro/affronta-la-malattia/guida-alle-terapie/radioterapia>

Sezione informativa del sito di AIRC

Particle accelerators take up the fight against cancer

<https://cerncourier.com/a/particle-accelerators-take-up-the-fight-against-cancer/>

CERN Courier – periodico scientifico a cura del CERN

Adroterapia, una nuova energia contro i tumori | Sandro Rossi | TEDxUNIPV

<https://youtu.be/ucoxzOSoNRE>

Intervento TEDx Talks del Direttore Generale del CNAO Sandro Rossi

L'ingegno - REPORT

<https://www.rai.it/programmi/report/inchieste/Lingegno-5d14041c-4082-4d0a-9aad-1727e05c6654.html>

Puntata di REPORT (RAI) del 1/11/2015 su adroterapia oncologica in Italia

Acceleratori

http://www2.fisica.unimi.it/andreazz/Istituzioni_1617/15-Acceleratori.pdf

Lezione a cura del Prof. Attilio Andreazza, Dipartimento di Fisica Nucleare e Subnucleare dell'Università degli Studi di Milano

Gli acceleratori di particelle: da microscopi subatomici a strumenti per la medicina

http://edu.lnf.infn.it/wp-content/uploads/2016/06/Stages_2016_final.pdf

Presentazione a cura di David Alesini, Laboratori Nazionali di Frascati (INFN)

Lezione sugli acceleratori

<http://www.fisica.unipg.it/valdata/rivelatori/Lezioni/lezione2.pdf>

Presentazione a cura dell'Università degli Studi di Perugia

Acceleratori e Rivelatori

<https://www2.pd.infn.it/masterclasses/2005/acceleratori&rivelatori.pdf>

Presentazione a cura dell'Università degli Studi di Padova

Acceleratori di Particelle

<http://www.fmboschetto.it/tde4/acceleratori.htm>

Sezione divulgativa del sito di Franco Maria Boschetto, Ingegnere Nucleare e Insegnante presso il Liceo Scientifico *Leonardo da Vinci* di Gallarate