

LICEO SCIENTIFICO STATALE
"LEONARDO DA VINCI"
Treviso

Gli acceleratori di particelle

*L'elettromagnetismo: dall'interpretazione
hegeliana all'applicazione nel TANDEM*

INDICE

Motivazioni	2
Mapa concettuale	3
1. L'elettromagnetismo	4
1.1 Le quattro equazioni di Maxwell	6
2. il riduzionismo di Lucrezio	7
3. il magnetismo e l'elettricità secondo i filosofi	12
4. La metamorfosi di Kafka	18
5. Come l'elettromagnetismo influenzò William Turner	21
5.1 Le opere	23
6. Alla base dell'acceleratore	27
6.1 La distinzione degli acceleratori per energie	31
6.2 La distinzione degli acceleratori per la traiettoria delle particelle	40
7. All'interno dell'acceleratore	41
7.1 La sorgente	45
7.2 Gli elementi acceleranti	46
7.3 Gli elementi ottici	52
7.4 Gli elementi di diagnostica	57
8. L'esperimento	58
8.1 accelerazione di un fascio di ioni di ³² S	60
9. Le prime e le ultime applicazioni degli acceleratori di particelle	63
9.1 Il radar	63
9.2 Il fascio di particelle e i tumori	65
Appendice	68
Bibliografia	78
Sitografia	79
Indice delle figure	80

Ludovica Crosato

Classe VD

MOTIVAZIONI

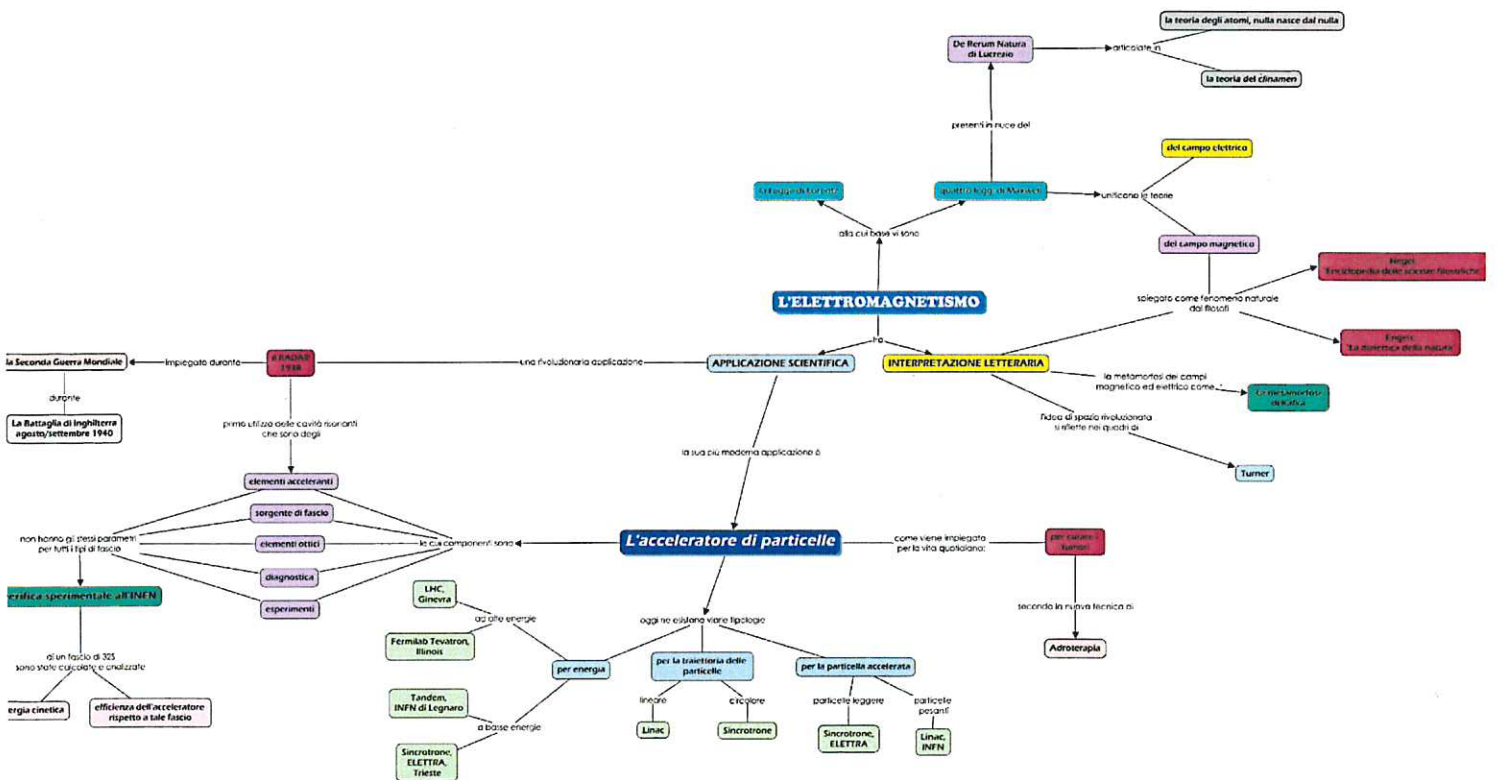
Avevo dodici anni quando la mia professoressa di matematica decise di introdurre alla classe i principi della dinamica e della termodinamica. Questo mi avrebbe permesso di scoprire il potere insito nella fisica; capii, infatti, che essa mi avrebbe permesso di ricondurre i fenomeni naturali, anche quelli più casuali, quelli che i lettori di Lucrezio avrebbero attribuito agli dei e che ancora oggi generano dubbi e stupore, a leggi matematiche chiare e semplici. Così, a dodici anni, ebbi per la prima volta tra le mani lo strumento che mi avrebbe dato la possibilità di controllare gli eventi naturali, di comprendere la loro origine profonda e fui affascinata da tale forza.

Decisi, quindi, di approfondire i miei studi. Il mio interesse per l'estremamente piccolo, però, è aumentato particolarmente negli ultimi anni grazie, anche, alla visibilità che hanno avuto studi come quello sui neutrini e, soprattutto, la scoperta del bosone di Higgs; questi hanno catturato la mia attenzione e aumentato la mia curiosità per le fondamenta della realtà.

I nomi "neutrini" e "bosone di Higgs" appaiono sempre legati al termine "acceleratore", per questo, conoscendo la loro rilevanza scientifica, ma non il metodo attraverso il quale si producono tali particelle, ho accolto la proposta dell'anno scorso di partecipare a uno stage all'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) di Legnaro dedicato proprio a: "gli acceleratori di particelle". Frequentandolo ho potuto osservare le tecnologie che sono alla base delle scoperte, del funzionamento del CERN e del sincrotrone di Trieste, nonché comprendere le leggi elettromagnetiche che le governano.

Non mi sono, però, voluta fermare alla lezione teorica e alle simulazioni dello stage e per questo motivo a gennaio ho incontrato nuovamente il mio tutor, il dottor Carlo Roncolato, che mi ha dato la possibilità di studiare il funzionamento delle diverse componenti dello strumento accelerando un fascio di atomi pesanti di ^{32}S . Questo mi ha permesso di analizzare le modificazioni che il fascio subisce nel tragitto dalla sorgente alle uscite e di capire come intervenire affinché il fascio in uscita risponda alle necessità degli esperimenti.

Ho deciso, quindi, di proporre in questa sede l'esperimento che ho svolto e le osservazioni che ne sono conseguite. Il mio proposito, però, è stato quello di ampliare il mio approfondimento andando oltre l'ambito scientifico e collegando l'elettromagnetismo con le sue interpretazioni e le influenze che ha avuto in ambito filosofico, letterario e artistico.



1. L'ELETTROMAGNETISMO

Le interazioni elettromagnetiche e le quattro equazioni di Maxwell

Il termine *elettromagnetismo* indica il complesso di fenomeni elettrici e magnetici, nonché le loro interazioni, che, per la prima volta, nel 1864 sono state riassunte matematicamente in quattro equazioni dal fisico scozzese James Clerk Maxwell il quale ha raggruppato, così, in un'unica teoria tutte le osservazioni, gli esperimenti e le equazioni precedenti formulando la prima teoria moderna dell'elettromagnetismo.

Prima dell'unificazione formale proposta da Maxwell, l'elettricità e il magnetismo avevano avuto una storia del tutto indipendente.

Le più antiche informazioni sulle forze elettriche ci giungono dall'Antica Grecia e le possiamo far risalire al VI secolo a.C. a Talete di Mileto il quale osservò che l'ambra (in greco *ήλεκτρον, elektron*), se strofinata con un panno di lana, acquista la capacità di attrarre oggetti leggeri come pezzi di paglia.

Inoltre, sembra fosse noto anche a Socrate che il pesce "Torpedine" fosse in grado di produrre delle scariche elettriche.

Nonostante ciò, però, i fenomeni elettrici vennero completamente trascurati sino al XVI secolo d.C. quando William Gilbert (1544-1603), scienziato inglese alla corte della regina Elisabetta, scrisse l'opera "De Magnete" nella quale riportò i suoi studi sui fenomeni elettrici e magnetici. Qui coniò il termine "elettricità" con riferimento al nome greco con cui si designava l'ambra, il primo minerale del quale si notarono le proprietà elettriche. Gilbert, inoltre, affermò di aver riconosciuto la medesima capacità di attrarre piccoli corpi anche in altri materiali come il vetro e lo zolfo e ricondusse tale caratteristica a un ipotetico liquido contenuto in essi: l'"*effluvium*".

Da allora furono molteplici le applicazioni dei fenomeni elettrici, esempi ne sono la macchina elettrostatica di Otto von Guericke¹, risalente al 1660, e la bottiglia di Leida. A queste si devono aggiungere gli studi di Benjamin Franklin il quale, intorno al 1750, suppose l'esistenza di un liquido presente nella materia tale da renderla neutra; l'eccesso dello stesso, però, secondo Franklin, rendeva un corpo carico positivamente, mentre il suo difetto carico negativamente.

Gli studi vennero, poi, proseguiti da Charles Augustine de Coulomb che, tra il 1785 e il 1787, costruì una "bilancia di torsione" che gli permise di dimostrare come non esistesse alcun fluido nella materia, ma che un oggetto carico modificava lo spazio intorno a sé. Anticipò, così, il concetto di campo elettrico. Ciò lo portò, successivamente, a formulare la legge, che da lui prende il nome, secondo la quale la forza esercitata tra due cariche elettriche è proporzionale all'inverso del quadrato della loro distanza.

$$F = \frac{q_1 * q_2}{r^2}$$

Coulomb era ancora fermamente convinto che forza elettrica e forza magnetica non potessero coesistere e fossero nettamente distinte.

¹ Si tratta di una macchina elettrostatica a strofinio. Era costituita una sfera di zolfo che veniva fatta girare intorno a un'asta di ferro passante per il suo centro ed elettrizzata dal semplice strofinio di una foglia di palma.

Successivamente Alessandro Volta mise in atto le conoscenze sulle proprietà elettriche di alcuni materiali giungendo, così, nel 1801 a proporre a Napoleone la sua pila (inventata nel 1799).

Infine, nel 1831, il tedesco Carl Friedrich Gauss formulò una definizione matematica del campo elettrico.

Questo è l'ultimo passo prima dell'esperienza di Oersted che evidenziò l'interconnessione tra il campo elettrico e il campo magnetico.

La storia della scoperta dei fenomeni magnetici ha un percorso parallelo a quello dell'elettricità, infatti Plinio il Vecchio (23-79 D.C.), nel Libro di Storia Naturale, narra che il termine "magnete" provenisse dal nome *Magnes* del pastore cretese che, adoperando il suo bastone con la punta di ferro, scoprì la proprietà di attrazione e repulsione di alcune pietre che furono chiamate magnetiche e che per molto tempo vennero considerate "pietre viventi" dotate di capacità curative. Oggi sappiamo che tali pietre contengono la magnetite, un composto di ossido di ferro (FeO-Fe₂O₃).

Sembra, inoltre, che sia nella Magna Grecia sia in Cina e in India si conoscessero le proprietà di *induzione magnetica*² che si ottiene per contatto tra un magnete naturale e un pezzo di ferro, poiché questo assume temporaneamente le proprietà magnetiche. Archimede Pitagorico (287-212 a.C.) pare abbia cercato di magnetizzare le spade dei soldati di Siracusa, grazie all'induzione magnetica, per disarmare più facilmente i nemici.

L'interpretazione del magnetismo per millenni è rimasta circoscritta da riferimenti metafisici e vitalistici, nella Cina di circa 4500 anni fa, ad esempio, esso venne correlato al dinamismo universale delle forze vitali descritte dalla dicotomia Yin e Yang e le relazioni di attrazione e repulsione vennero considerate come le relazioni tra la materia animata e quella inanimata. Tali esegesi non sono circoscrivibili solamente ad epoche lontane, ma, come sarà analizzato successivamente, ricorrono anche in filosofi contemporanei come Hegel³.

Successivamente, agli inizi del Rinascimento, il frate italiano Petrus Peregrinus scrisse (nel 1269) una Epistola sulle proprietà dei dipoli magnetici che voleva utilizzare per attuare il "moto perpetuo".

Solamente nel 1600 William Gilbert, come espose nel suo libro "De Magnete", intuì la correlazione tra forze magnetiche e forze elettriche. Egli costruì, inoltre, una sfera di magnetite, chiamata "terrella", ad immagine del globo terrestre, che utilizzò per delinearne le linee di forza del campo magnetico terrestre. Ciò permise ai naviganti di riconoscere la direzione del polo nord anche quando il cielo era coperto dalle nubi.

Gauss, poi, calcolò, oltre al flusso del campo elettrico, anche quello del campo magnetico. Fu, quindi, il fisico e chimico danese Hans Christian Ørsted (1777-1851) che nel 1820 scoprì come un ago della bussola, se avvicinato a un cavo in cui passa della corrente elettrica, devia dal suo orientamento verso il Polo Nord. È proprio da questo esperimento che parte il percorso verso la formulazione delle quattro leggi di Maxwell.

² Induzione magnetica: fenomeno per cui un corpo vicino a un altro ne modifica alcune caratteristiche o ne determina alcune proprietà

³ Enciclopedia, *Filosofia della Natura*

1.1 Le quattro equazioni di Maxwell

Nel 1864 Maxwell presentò alla Royal Society il suo *Traitato di Eletticità e Magnetismo* nel quale, per la prima volta nella storia, vennero unite le quattro equazioni che, insieme alla Forza di Lorentz, governano le interazioni elettromagnetiche esprimendo l'evoluzione temporale a cui è soggetto il campo elettromagnetico in relazione alla distribuzione di carica e di corrente da cui è generato.

LEGGE	EQUAZIONE
1 Legge di Gauss relativa al flusso del campo elettrico attraverso una superficie chiusa	$\oint E = \frac{Q}{\epsilon_0}$
2 Legge di Gauss relativa al flusso del campo magnetico attraverso una superficie chiusa	$\oint B = 0$
3 Legge di Faraday-Neumann-Lenz sull'induzione elettromagnetica. Circuitazione del campo elettrico indotto lungo una linea chiusa	$\oint E \cdot dl = - \frac{d\phi_B}{dt}$
4 Legge di Ampère generalizzata relativa alla circuitazione del campo magnetico lungo una linea chiusa	$\oint B \cdot dl = \mu_0(Ic + \frac{\epsilon_0 \cdot d\phi_E}{dt})$

Le quattro equazioni, in particolare le ultime due, mostrano la relazione che sussiste tra il campo magnetico e il campo elettrico, nonché la possibilità che dai variare di uno si generi l'altro. Ricordando, poi, che il loro flusso varia come il coseno⁴, Maxwell intuì il carattere ondulatorio della loro propagazione. Ciò lo portò a scoprire le onde elettromagnetiche.

2. IL RIDUZIONISMO DI LUCREZIO

Quando il funzionamento del macrocosmo fu ridotto al comportamento del microcosmo

Per capire l'infinitamente grande bisogna prima conoscere l'infinitamente piccolo, arrivare sino alle fondamenta, ai costituenti principali della materia che costituisce l'universo. È questo il primo obiettivo che ci si è posti nella costruzione degli acceleratori. Oggi gli scopi per cui si utilizzano questi strumenti sono i più vari: il LHC ha la capacità di accelerare protoni e ioni pesanti fino al 99,999% della velocità della luce e farei successivamente scontrare, raggiungendo, così, un calore immenso, circa, 100.000 volte maggiore di quello esistente al centro del Sole; il Sincrotrone di Trieste accelera fotoni per poterli sfruttare in oltre 30 stazioni sperimentali al fine di studiare le proprietà dei materiali e la loro funzionalità, con sensibilità fino al livello molecolare ed atomico; le sperimentazioni dei laboratori di Legnaro si accelerano a basse tensioni e basse energie atomi e subparticelle utili per diversi esperimenti, ad esempio per creare e bloccare atomi di niobio.

Questi tre diversi acceleratori hanno come base comune la particella: che sia un atomo, un protone o un fotone, essa rappresenta il costituente di tutte le componenti del nostro universo.

La teoria che riduce ogni sistema complesso alla somma e alle interazioni dei suoi componenti viene chiamata *riduzionismo*, o *atomismo*, essa, infatti, spiega ogni realtà esistente secondo due soli principi: gli atomi – i *principordia rerum* di Lucrezio – e il vuoto. Con l'aggregazione delle minuscole particelle e la loro separazione, quindi, si dimostra sia la nascita che la morte.

La prima teoria atomica fu quella democritea che nella Roma repubblicana del I sec. a.C., venne proposta da Lucrezio nel *De Rerum Natura*, in forma poetica più nuova e accattivante. L'obiettivo del suo scritto, in realtà, non è scientifico, bensì morale: il suo è un procedimento di critica corrosiva, ai valori nei quali l'aristocrazia si era sempre riconosciuta, quali la *religio*, utilizzata come strumento di controllo, l'agonismo politico e il prestigio.

Lucrezio vuole spogliare il lettore da ogni falsa credenza, da ogni ambizione illusoria, lo vuole liberare dalle tre principali fonti di sofferenza: la superstizione, la paura degli dei e quella della morte. Pone, quindi, l'uomo di fronte allo spettacolo terribile e rasserenante della verità ultima della Natura: essa è caratterizzata dal gioco eterno degli atomi, dal loro infinito (ri)combinarsi che garantisce il libero arbitrio, ma altresì mostra quanto futuri siano le aspirazioni degli uomini, la loro avidità e il loro estremo individualismo. Tutto dimostra Lucrezio, è destinato a dissolversi per dar vita a nuovi corpi e anche se, per caso fortuito, le combinazioni degli atomi dessero nuovamente origine alla medesima entità, allo stesso uomo di un tempo, egli non potrebbe ricordarsi nulla della precedente vita, poiché la dissoluzione, coinvolgendo anche l'anima⁵, interromperebbe la passata coscienza e darebbe luogo, perciò, a un altro individuo.

⁴ $\phi(B) = B \cdot S \cdot \cos \alpha$ con $\alpha = ut$

⁵ Lucrezio, *De Rerum Natura*, III, 830-869

L'opera si compone di sei libri, per un totale di 7420 esametri, che si dividono in tre diadi: nei primi due viene esposta la dottrina atomistica della fisica epicurea, nei libri III e IV la dottrina fisica è posta a fondamento dei fenomeni del mondo umano, ovvero dell'antropologia e gli ultimi due propongono la cosmologia. In tutte le coppie si può osservare come i libri dispari foriscano le premesse concettuali generali atte a comprendere i fenomeni analizzati più specificatamente nei libri pari.

Dal punto di vista stilistico, una costante del poema è l'utilizzo dell'analogia, uno strumento che permette non solo di saldare poesia e filosofia, ma soprattutto di accostare concetti astratti a realtà quotidiane che permettano al lettore di comprendere più facilmente le teorie esposte, come quella atomica presentata nella prima diade.

<i>Nam tibi de summa caeli ratione deumque Disserere incipiam et rerum primordia pandam, unde omnis natura creet res auctet alataque quove eadem rursum natura perempta resolutat</i> (vv.55-57)	<i>E infatti per te inizierò a trattare la struttura fondamentale Di cielo e di dèi, disvelerò i principi delle cose, donde Natura crea tutte le cose, le accresce e [alimenta]: e, in essi, nuovamente, Natura risolve ciò ch'è [stato disfatto]</i>
---	---

Traduzione a cura di Guido Milanese, *De Rerum Natura*, Oscar Mondadori

Subito dopo l'enunciazione del suo proposito, Lucrezio procede a esporre i tre principi che sono alla base della fisica lucreziana (ed epicurea):

1. <i>nullam rem e nihilo gigni divinitus umquam.</i> (vv.149-150)	<i>Nessun oggetto nasce, mai, per azione divina, [dal nulla]</i>
2. <i>Huc accedit uti quicque in sua corpora rursus dissoluat natura neque ad nihilum interemat res.</i> (vv.215-216)	<i>A ciò s'aggiunge che ogni cosa nei suoi elementi di [nuovo] Risolve Natura, ma fino al nulla non disfa le cose</i>
3. <i>haud igitur redit ad nihilum res ulla, sed omnes discidia redeunt in corpora materiai.</i> (vv.248-255)	<i>E così non al nulla ritornano tutte le cose, ma ognuna Per dissolvimento torna ai corpi della materia</i>

Traduzione a cura di Guido Milanese, *De Rerum Natura*, Oscar Mondadori

Con il primo principio Lucrezio si propone di dimostrare che anche i fenomeni apparentemente inspiegabili, la cui causa è attribuita a entità divine in realtà non possono derivare dal nulla, ma hanno bisogno di una causa materiale, di un seme. Infatti, spiega Lucrezio, se le cose venissero create dal nulla, allora qualsiasi cosa potrebbe nascere da qualunque altra; ciò significa, però, che il generato sarebbe indipendente dal generante. Al contrario, in natura, si è sempre osservato come tutti gli esseri nascano da un proprio seme.

Se i corpi si annullassero spontaneamente e improvvisamente, non sarebbero necessarie delle forze disgregatrici, ma ciò non spiegherebbe il permanere degli esseri in una sola entità per l'intera loro vita. Inoltre, dovendo creare sempre corpi nuovi, la Natura avrebbe dovuto, e dovrebbe tutt'ora, procurarsi incessantemente nuova materia che, nell'infinità del tempo, si sarebbe esaurita. Da ciò Lucrezio deduce che debbano esistere delle entità eterne e indistruttibili che compongono e ricompongono i corpi senza svanire nel nulla⁶. Questa è l'idea cardine del riduzionismo.

Tutto, quindi, si trasforma⁷ secondo un ciclo vitale in cui la morte di un'entità è necessaria per la vita di un'altra, perché la disgregazione dei composti rende disponibili gli atomi per una nuova aggregazione. A questo Lucrezio invita a credere anche se si tratta di un fenomeno non osservabile, come i molti avvenimenti che gli uomini ritengono veritieri anche se non riescono a vederli, come gli odori, i suoni e il vento che agita cielo, mare e terra.

Grazie ai tre principi, Lucrezio giunge a un'importante conclusione, ovvero che la Natura è composta unicamente dalla materia eterna, di cui sono costituiti i corpi, e il vuoto⁸. La presenza della prima è confermata dall'esperienza e dalle percezioni sensoriali, mentre quella del vuoto viene dimostrata per assurdo: se non ci fosse i corpi non potrebbero muoversi, infatti essi si opporrebbero resistenza l'un l'altro e le "cose", probabilmente, non sarebbero neanche venute al mondo, in quanto non ci sarebbe stato posto per loro. Inoltre, osserva Lucrezio, tutti i corpi devono avere in se stessi il vuoto, la maggiore o minore quantità di esso, infatti, spiega il diverso peso tra oggetti dello stesso volume, nonché la capacità dell'acqua, per esempio, di penetrare tra le rocce o quella della linfa di diffondersi dalle radici al tronco, ai rami.

Il vuoto è la seconda componente fondamentale del funzionamento degli acceleratori, infatti senza di esso -- come pensava proprio Lucrezio -- le particelle del fascio urterebbero quelle dell'aria impedendo un'accelerazione ottimale e, di conseguenza, delle osservazioni precise.

Per Lucrezio, dunque, gli atomi sono minimi indifferenziati, costituiscono la materia eterna dei corpi e hanno alcune proprietà particolari, infatti sono:

- Indivisibili, quindi non possono essere disgregati, né distrutti;
- Eterni, perciò indistruttibili e immortali e se non fossero tali, infatti, tutto tornerebbe al nulla;
- Semplici: solo le loro combinazioni danno vita a forme, colori, alle proprietà di un corpo;
- Pieni, quindi non hanno vuoto;
- Duri, altrimenti non potrebbero aggregarsi a formare corpi solidi e densi come le pietre o il ferro che si distinguono da quelli "mollì" per una diversa quantità di vuoto.

⁶ *De Rerum Natura*, libro I, vv. 225-237

⁷ *Ivi*, vv.250- 264

⁸ *Ivi*, vv. 329-397

Nella teoria lucreziana è fondamentale la dualità materia-vuoto, in quanto la Natura limita la prima con il secondo e il secondo con la prima, altrimenti, se ciò non avvenisse, nulla potrebbe esistere stabilmente a lungo, infatti la disgregazione prevarrebbe sull'aggregazione o viceversa⁹. Per questo Lucrezio ha stabilito che gli atomi fossero infiniti – oggi sappiamo che gli atomi nell'universo sono circa 10⁸¹.

La descrizione degli atomi viene ripresa da Lucrezio nel libro II, a partire dal verso 62, con un'immagine del *del pulviscolo atmosferico*.

<i>Multaque preeterea magnum per inane vagantur, conciliis rerum quae sunt reiecta nec usquam consociare etiam motus potuerit recepta. Cuius, ut memoro, rei simulacrum et imago Ante oculos semper nobis versatur et instat. Contemplator enim, cum solis lumine cunquam Inserti fundunt radii per opaca domorum: multa minuto modis multis per inane videbis corpora miser radiorum lumine in ipsoet velut aeterno certamine proelia pugnas edere turmalin certantia nec dare pulsam, conciliis et discidiis exercita crebris; conicere ut possis ex hac, primordia rerum quale sit in magno lactari semper inani.</i>	<i>oltre a ciò, molti errano nel grande vuoto, che, respinti dall'aggregarsi delle cose, in alcun luogo sion riuscite, trovando accoglienza, a trovare un armonico moto: e di questo, ricordo, un esempio è un'immagine dinanzi agli occhi sempre sfuggita ed è a noi presente. Guardo bene, infatti: ogni volta che i raggi che filtrano diffondono la luce del sole attraverso domestiche ombre, molti piccoli corpi in molti modi vedrai che nel vuoto proprio nella luce dei raggi, si mescolano tra loro, e, come in lotta eterna, intrecciano zuffe battaglie in gruppi scontrandosi, né conoscono pausa, agitati da fitte aggregazioni e separazioni; e da qui puoi indurre di qual tipo sia l'agitarsi nel grande vuoto, per sempre, dei principi delle cose</i>
--	--

Traduzione a cura di Guido Milanese, *De Rerum Natura*, Oscar Mondadori

Gli atomi si muovono incessantemente nello spazio vuoto e illimitato ricevendo il moto in parte dal proprio peso e, soprattutto, dagli urti con altre particelle senza, però, appropindare mai in un luogo preciso poiché l'universo non ha un centro dove possano convergere.

Molti atomi, quindi, rimangono solitari nell'immensità e la loro situazione è ben evidenziata dal pulviscolo atmosferico in cui gli atomi trasmettono ai piccoli aggregati il loro moto che diventa, così, percepibile ai nostri sensi.

Gli scontri tra gli atomi spiegano, poi, la solidità e la volatilità dei corpi, infatti se essi rimbalzano molto lontano allora andranno a formare il secondo tipo di oggetti, mentre se non si allontanano molto, danno vita a cose rigide.

E, inoltre, interessante osservare che Lucrezio propone la velocità del movimento degli atomi maggiore di quella della luce, in quanto i raggi solari essendo anch'essi composti da atomi, sono necessariamente rallentati dai loro urti.

Un altro aspetto rilevante della fisica di Lucrezio è l'importanza attribuita al caso, infatti la *teoria del clinamen* afferma che gli atomi, cadendo verticalmente a causa del loro peso, possono casualmente deviare la propria direzione dando luogo a scontri che permettono la creazione degli enti.

Questo aspetto per Lucrezio è fondamentale in quanto garantisce agli uomini il libero arbitrio poiché al clinamen sarebbero soggetti anche gli atomi che compongono l'*anima* e l'*animus*.

Il poeta osserva, inoltre, che gli atomi devono avere delle forme diverse tra loro: possono essere piccoli o grossi e li si distingue in base alla loro capacità penetrativa, infatti più piccoli sono più sono penetranti (come nel caso del fuoco); si dividono, poi, in lisci, ruvidi e frusti (e irregolari) a seconda che accarezzino i sensi, è il caso di sostanze dolci quali il latte e il miele, o che lacerino il corpo generando una sensazione sgradevole, come l'assenzio. Ancora possono essere rotondi, spigolosi oppure uncinati. Tutte queste caratteristiche permettono di distinguere le cose dure e solide (atomi uncinati e ramificati), quelle molli e fluide (atomi lisci e rotondi) e le cose che svaniscono immediatamente come il fumo e le fiamme (atomi ruvidi e spigolosi).

Nel libro II, inoltre, Lucrezio attribuisce altre tre caratteristiche agli atomi:

- Essi sono,
- **Incolore**, ciò è dimostrato dal fatto che più gli oggetti si suddividono, più il loro colore sbiadisce;
 - **Impercettibili**, ovvero non hanno qualità percepibili in quanto non devono interferire con quelle del corpo che compongono;
 - **Insenzienti**, infatti se fossero esseri senzienti si tornerrebbe al preformazionismo (la teoria per cui un'entità è formata da tante subunità uguali se stessa) per cui gli atomi si configurerebbero come "minieseri" soggetti a morte e dissoluzione il che contraddice la loro caratteristica di immortalità.

Le proprietà degli atomi, riscontrate da Lucrezio, lo portano a concludere che debba esistere un numero finito di tipi atomici, ma un numero infinito di atomi simili tra loro.

Le diverse combinazioni atomiche danno vita, quindi, agli essere viventi, ognuno con caratteristiche proprie. Non tutte le possibili unioni, però, sono realizzabili in quanto le cose generate sono della stessa specie di chi le genera.

Il *De Rerum Natura* prometteva di liberare gli uomini dal giogo della "religione", che li opprimeva creando in loro timori e distruggendo ogni gioia, attraverso la conoscenza della dottrina che rivelando la natura materiale del mondo, dell'uomo e della sua stessa anima, garantisce la libertà dalla superstizione. Nonostante ciò esso rappresenta il primo scritto occidentale che enuncia in forma completa e dettagliata la teoria riduzionista che è alla base della conoscenza scientifica odierna.

⁹ *Ivi*, vv.551-634

3. IL MAGNETISMO E L'ELETTRICITÀ SECONDO I FILOSOFI

I fenomeni magnetici ed elettrici interpretati da Hegel ed Engels

Nell'Enciclopedia delle Scienze Filosofiche in compendio" – la cui terza e ultima pubblicazione risale al 1830 –, in particolare nella sezione dedicata alla "Filosofia della Natura", nel capitolo riguardante l'individualità totale, Hegel spiega il motivo per cui crede che il magnetismo sia stato "una delle determinazioni che dovettero offrirsi in primo luogo alle menti"¹⁰, quando essi iniziarono a sospettare che alla base dello sviluppo della natura ci fosse il concetto, "lo spirito vivente della realtà"¹¹, ovvero l'essere legato alla sua essenza da una processualità dialettica che, dopo essersi autoriflesso in essa (nell'essenza), si riconosce come unità di soggetto e oggetto ponendosi come spirito.

Prima di approfondire la questione del magnetismo secondo Hegel, ricordiamo che i capisaldi dell'idealismo¹² hegeliano sono l'identità tra ragione e realtà, tra pensiero ed essere, per cui tutto ciò che è razionale è reale e viceversa (la realtà è il dispiegarsi di una struttura razionale) e, soprattutto, il rapporto dialettico tra finito e infinito, per cui l'Assoluto è divenire, è il continuo risolversi del finito nell'infinito secondo un processo mediante il quale le molteplici determinazioni perdono la loro rigidità riconoscendosi parte di un'unica realtà di cui sono manifestazioni.



Figura 1. - Georg Wilhelm Friedrich Hegel

La dialettica hegeliana, quindi, rappresenta il farsi stesso della realtà, la legge ontologica del suo sviluppo e quella logica della sua comprensione che permette di cogliere l'unità degli opposti grazie alla ragione che li tiene insieme facendo vivere la totalità.

Il processo dialettico coinvolge, innanzitutto, l'idea, ovvero l'Assoluto, che deve riconoscersi "in sé", quindi a prescindere dalla sua realizzazione nel mondo, "per sé", cioè nel momento della negazione, quando si ritrova nel suo essere altro estrinsecandosi nella natura e identificandosi organismo unitario dei fenomeni e, infine, "in sé e per sé", tornando in sé consapevole di essere la totalità.

Nel secondo momento – che noi prendiamo in considerazione parlando di magnetismo ed elettricità - Hegel considera la natura come l'idea nel momento della sua estraneazione (negazione). Questo momento è fondamentale per l'affermazione e il riconoscimento della razionalità della realtà ed è necessario per l'idea (lo Spirito) che si deve sapere come totalità (come Sapere Assoluto). Esso, però, è anche un momento negativo in quanto accoglie le accidentalità che la ragione non può spiegare. La natura, perciò, è inadeguata non essendo in grado di spiegarsi; essa rappresenta solamente un momento dialettico del conoscersi

¹⁰ Enciclopedia delle scienze filosofiche in compendio, §312

¹¹ Ibidem, §162

¹² Idealismo: l'idealismo hegeliano è assoluto, infatti afferma la completa risoluzione del finito nell'infinito dove quest'ultimo rappresenta la stessa realtà organica di cui il finito è manifestazione parziale.

dell'idea come realtà totale, per questo non ha in sé il movimento e viene ricompreso nella struttura razionale dell'idea di cui rappresenta la sua forma dell'esteriorità.

Ciò spiega il motivo per cui la concezione hegeliana della natura non sia evoluzionistica e realistica, ma dialettico-idealistica, infatti non è la natura, come realtà in sé, che si sviluppa, ma è la struttura razionale dell'idea che la fa essere. La natura, quindi, procede per gradi intesi come successive determinazioni che non ricomprendono, ciascuna, il grado precedente, in quanto la natura non ha una propria e autonoma evoluzione poiché è incapace di movimento e autocoscienza. Per questo motivo la concezione hegeliana della natura non è evoluzionistica e la natura esiste solo come un momento dialettico fondamentale per l'idea affinché si riconosca come totalità.

Hegel, se nella sezione della meccanica considera l'esteriorità, ovvero l'essenza stessa della natura, nella sezione successiva, dedicata alla fisica, analizza l'organizzazione dei corpi in quanto singoli elementi della materia¹³ caratterizzati da fondamentali proprietà¹⁴ e come individualità totali che "diventano totalità esistenti dell'essere per sé materiale, che sono poi in sé vita, e, nel concetto, trapassano alla vita"¹⁵.

Nell'individualità Totale Hegel osserva come le caratteristiche (proprietà) dei corpi siano inseparabilmente legate alle loro relazioni con altri corpi grazie alle proprietà magnetiche, elettriche e chimiche.

"Con il processo chimico si ha l'unità del magnetismo e dell'elettricità; la distinzione di termini opposti che nel magnetismo si manifestano all'interno di un solo e medesimo corpo e nell'elettricità si suddividono in corpi diversi, è qui unificata in un processo unitario e totalizzante di composizione e scomposizione, per cui i corpi indifferenti si neutralizzano o i composti si risolvono nuovamente in corpi indifferenti"¹⁶.

Tali relazioni locali sono determinate, nella sfera della figura, dall'attività immanente del libero meccanismo e sono soggette a cambiamenti che hanno luogo nei rapporti della spazialità materiale. L'antitesi della forma nelle materie individuali procede anche a determinarsi come antitesi reale, ovvero elettricità. A tutte le forme particolari sta, in fondo, l'unica e medesima attività universale della forma, ovvero quella di "differenziare l'identico e d'identificare il differente" che, nella sfera della spazialità, consiste nell'allontanare l'identico nello spazio e nell'avvicinare il differente". Questa attività è quella tipica del magnetismo. Siccome, però, l'elettricità è l'attività dell'antitesi più reale e fisicamente più determinata e provoca modificazioni, essa si configura come determinazione meccanizzante, ovvero attività magnetica. Il riconoscimento dell'identità tra elettricità e magnetismo (che poi Hegel allarga anche al chimismo) è, secondo il filosofo, fondamentale per il progresso nella scienza empirica.

¹³ Enciclopedia delle scienze filosofiche in compendio, Fisica dell'individualità universale §274

¹⁴ Enciclopedia delle scienze filosofiche in compendio, Fisica dell'individualità particolare §290

¹⁵ Enciclopedia delle scienze filosofiche in compendio, Fisica dell'individualità totale §308

¹⁶ V. Varrà, "Introduzione a Hegel", Roma-Bari, Laterza 1988, pag.117

È compito dei filosofi distinguere le forme particolari dalle loro apparizioni particolari: il nome di magnetismo, infatti, è da riservare per la forma così definita e per la sua apparizione che ha luogo solo nella sfera della figura in quanto tale e si riferisce solamente alla determinazione dello spazio. Il nome di elettricità, invece, si utilizza per le determinazioni fenomeniche che sono in tal modo designate. Ciò spiega l'identità tra elettricità e magnetismo, ma anche la loro distinzione¹⁷.

Il corpo, come individualità totale, è *totalità in riposo, quindi, forma della connessione spaziale della materia*¹⁸. Questa totalità, l'unità dialettica di due opposti o semplicemente di due entità distinti che non potrebbero sussistere da sole, secondo Hegel, è ben rappresentata dal magnetismo. Il magnete, infatti, rappresenta in modo semplice e ingenuo la natura del concetto¹⁹; i suoi poli non hanno realtà "sensibile e meccanica", ma solamente ideale, essendo inseparabili. Essi trovano, quindi, ragion d'essere nell'unità che li vede come determinazioni del concetto e la loro polarità è semplicemente la loro relazione. Quest'unità dialettica, secondo Hegel, è di tutte le forme che si manifestano: basti pensare al punto che prima trapassa nella linea mentre la forma si contrappone nella linea in estremi i quali, come momenti singoli, non hanno sussistenza propria, ma sono mantenuti per mezzo della loro relazione²⁰.

Possiamo notare, quindi, come Hegel non interpreti i fenomeni naturali meccanicamente, per lui alla base delle relazioni tra i corpi non vi sono forze nel senso del principio newtoniano di azione e reazione, ma stati del farsi dello Spirito che, nel suo estrinsecarsi, si riconosce come totalità, proprio come il magnete che nella sua unità fa essere i due poli. Hegel pubblicò questo volume nel 1830, quando gli studi sui fenomeni magnetici erano già avanzati, ma la fortuna che ebbe la sua filosofia ci dimostra quanto poco la società – anche gli intellettuali – fosse propensa ad accettare le scoperte che si stavano susseguendo in questo campo. Probabilmente le persone erano restie per la difficoltà di comprendere fenomeni, interazioni tra corpi, che non si potevano vedere, come le linee di campo magnetico che non sono fatte di "materia". Ecco, quindi, che Hegel interpreta questi fenomeni come normale conseguenza della dialettica insita allo sviluppo della realtà e al conoscersi dello Spirito.

L'idea ricomprende tali fenomeni e li concettualizza affermandosi come totalità. Ciò spiega perché Hegel definisca il magnete come sillogismo²¹: esso connette fisicamente i poli come il sillogismo connette i concetti e li tiene insieme con legami logici.

La natura, quindi, è "l'idea nel momento del frazionamento", per il quale l'intelletto mantiene dispersi i momenti concettuali e tali li presenta nella realtà, in essa, però, si deve

¹⁷ *Enciclopedia delle scienze filosofiche in compendio*, Fisica dell'individualità totale §313

¹⁸ *Ibidem*, §310

¹⁹ *Ibidem*, §312

²⁰ *Ibidem*, §312

²¹ *Ibidem*, §312

anche riconoscere un'importante unificazione dei momenti concettuali "nelle cose più alte"²².

Tale unificazione trova l'espressione più esplicita nella legge del magnetismo che viene espressa "col dire che i poli dello stesso nome si respingono, e quelli di nome diverso si attraggono". Il magnetismo, quindi, mostra il trapassare dell'attività della forma nel suo prodotto che è la figura e, in modo determinato, la figura come *crystallo*. In questa totalità i poli magnetici sono ridotti alla neutralità, la linearità astratta dell'attività determinatrice del luogo è realizzata come superficie del corpo intero, così la puntualità del rapporto tra i poli si amplia in una forma sviluppata. Un'unica forma, quindi, cristallizza il corpo dall'esterno e, dando forma alla puntualità, cristallizza in ogni parte la sua continuità interna²³.

Nella corporeità la prima determinazione è il suo se stesso identico con sé, l'astratta automanifestazione della sua individualità semplice e indeterminata, e tale è la luce. La figura, però, non riluce come tale, ma tale proprietà (del rilucere) è data da una relazione con la luce. La figura, infatti, non ha ancora particolarizzato la sua omogeneità fisica, svolgendo e distinguendo le sue determinazioni. La relazione della figura con la luce è esemplificata dal corpo cristallino che è trasparente nella perfetta omogeneità della sua individualizzazione interna, esistente neutralmente, e risulta essere medio (mezzo) per la luce.

Due corpi, quindi, in quanto individualità fisiche, entrano in relazione tra loro e il loro contatto meccanico pone la differenza fisica di un corpo nell'altro che prende il nome di "tensione fisica": essi si congiungono (si toccano), ma restano meccanicamente indipendenti. In questo modo non appare la natura fisica del corpo nella sua determinatezza concreta, ma l'individualità si manifesta, ed entra nel processo, solo come realtà del suo astratto se stesso, ovvero come luce, in particolare come luce contrapposta. La scissione della luce contrapposta dei due corpi viene, poi, soppressa dando come risultato una luce indifferenziata che sparisce all'istante e il cui effetto è quello meccanico della scossa²⁴.

Hegel riconosce la prima difficoltà nel concetto dell'elettricità nel fatto che in questo processo il corpo resta inerte sia fisicamente sia meccanicamente. Perciò la tensione elettrica è attribuita a un'altra causa, ovvero a una materia alla quale la luce (della scossa) apparirebbe che si presenterebbe, quindi, astrattamente per sé, diversa dalla realtà concreta del corpo. Un'ulteriore difficoltà è "quella generale che si ha sempre per il concetto"²⁵, cioè quella di comprendere la luce nella sua connessione in quanto momento della totalità, quindi non più come libera luce solare, ma come momento del corpo particolare dalla cui immanenza viene prodotta.

²² *Ibidem*, §312

²³ *Ibidem*, §315

²⁴ *Ibidem*, §324

²⁵ *Ibidem*, §324

Il filosofo, poi, analizza il carattere dell'elettricità che, da sempre, è stata distinta concettualmente in positiva e negativa. La negatività è la soppressione dell'opposta tensione tra due corpi che dà origine alla scossa²⁶, mentre la positività è la tensione stessa. Osservato questo, Hegel, nota come, anche nel caso dell'elettricità, si riproponga la soluzione del magnetismo, infatti, *il sé stesso che, partendo dalla sua dualità (elettricità positiva e negativa), si pone come identico con sé, resta, anche in siffatta totalizzazione, nella sfera esterna del meccanicismo*²⁷. Questo significa che le due elettricità vengono tenute separate tra loro nei diversi corpi, per cui, come nel magnetismo, si ha la determinazione del concetto, ovvero il porre l'opposto come identico e l'identico come opposto.



Figura 2 - Friedrich Engels

Il processo dialettico hegeliano, per quanto riguarda lo studio della natura, viene, poi, ripreso da Friedrich Engels in senso materialistico. Egli, infatti, applica la dialettica allo studio e allo sviluppo della natura per contrastare il meccanicismo positivista.

Le leggi che stanno alla base del procedimento dialettico, a suo parere, vengono ricavate per astrazione sia dalla storia della natura sia da quella della società umana e rappresentano leggi più generali di entrambe queste fasi dell'evoluzione reale e del pensiero stesso. Queste si possono ridurre a tre:

- La legge della *conversione della quantità in qualità e viceversa*;
- La legge della *compenetrazione degli opposti*;
- La legge della *negazione della negazione*.

Queste erano già state sviluppate sul piano idealista da Hegel, però Engels gli imputa un errore, ovvero quello di non averle ricavate dalla natura, ma di averle "elargite ad essa dall'alto come leggi del pensiero"²⁸. Il suo obiettivo, quindi, è quello di dimostrare come queste leggi, nella filosofia idealista tanto misteriose, se ricavate dall'esperienza si rivelino semplici e chiare.

Per quanto riguarda la prima legge, egli osserva che essa può essere espressa nel fatto che nella natura variazioni qualitative possono aver luogo solo aggiungendo o togliendo della materia o del movimento (l'energia).

Engels spiega che tutte le differenze qualitative della natura risiedono su una diversa composizione chimica, oppure su diverse quantità o forme di movimento, per cui è impossibile cambiare la qualità senza mutare la materia o il movimento. Un esempio eloquente di ciò è dato dagli stati che si presentano nella meccanica: l'equilibrio, il movimento, l'energia potenziale dipendono tutti da trasmissioni di moto suscettibili di

²⁶ Ibidem, §324

²⁷ Ibidem, §324

²⁸ *Dialettica della Natura*, "Natura generale della dialettica come scienza"

misura e, quindi, esprimibili quantitativamente. Perciò variazioni qualitative (gli stati) dipendono da corrispondenti variazioni quantitative.

Per quanto riguarda, invece, la compenetrazione degli opposti (il loro essere insieme nell'unità, espresso da Hegel) Engels la spiega partendo dal principio di azione e reazione newtoniano. Secondo Engels, infatti, se due corpi esercitano l'uno sull'altro un'azione che abbia per conseguenza lo spostamento di uno dei due corpi, o di entrambi, questo può consistere solo nell'avvicinamento o nell'allontanamento. I corpi, quindi, possono solo attrarsi o respingersi (come due cariche di segno opposto). Le forze che agiscono su questi corpi, quindi, devono essere centrali e agire nella direzione della congiungente dei centri dei due corpi; infatti, secondo il filosofo, sarebbe assurdo che due corpi, non condizionati da un terzo, non agissero l'uno sull'altro secondo la via più breve.

Ogni movimento consiste, quindi, nell'eterno gioco di attrazione e repulsione, senza che una delle due prevalga, altrimenti una avrebbe il sopravvento e il moto cesserebbe.

Per quanto le sue osservazioni siano parzialmente empiriche, si nota il modello dialettico che vi sottostà; infatti, Engels spiega che la dialettica ha dimostrato che tutte le opposizioni polari – come quelle magnetiche ed elettriche – sono condizionate dal gioco di due poli opposti, la cui separazione e opposizione sussiste solo nella loro unione.

Nella separazione dei poli e la loro contemporanea esistenza nell'unità spiega anche l'ultima legge, quella della negazione della negazione, infatti un polo nega l'altro e il secondo nega il primo in un gioco eterno di opposizioni.

Tali fenomeni di attrazione e repulsione Engels li osserva nell'elettrostatica e nel magnetismo dove vi è una suddivisione polare di attrazione e repulsione che si possono dispiegare liberamente e si compensano in modo completo l'un l'altra. Questo, quindi, crea un movimento universale e autoalimentato che si svolge grazie all'opposizione delle due forme fondamentali: la carica positiva e quella negativa, il polo nord e il sud.

L'ultima analisi ci riporta direttamente alle onde elettromagnetiche che, generate dalla continua variazione di campo elettrico e di campo magnetico, si possono propagare all'infinito su piani tra loro perpendicolari in un continuo "mutamento" dell'una nell'altra.

4. LA METAMORFOSI DI KAFKA

La metamorfosi del campo magnetico diventa la metamorfosi dell'uomo nella società

La terza e la quarta legge di Maxwell descrivono l'interazione tra campo elettrico e campo magnetico e il loro generarsi vicendevole, infatti un campo magnetico variabile nel tempo modifica la distribuzione spaziale del campo elettrico e un campo elettrico variabile modifica la distribuzione spaziale del campo magnetico. Sembra quasi che un campo, per un istante, venga meno inducendo l'altro che, a sua volta, regredisce dando origine al primo in un gioco continuo di metamorfosi.

La metamorfosi, però, può essere anche quella dell'uomo alienato dalla società che viene narrata da Franz Kafka nel breve racconto omonimo pubblicato nel 1915.

Questa è la storia di Gregor Samsa, un ragazzo che vive con i genitori e le due sorelle, Rita e Anna, che lavora come commesso viaggiatore e che, durante una notte, subisce una metamorfosi che segnerà per sempre la sua esistenza.

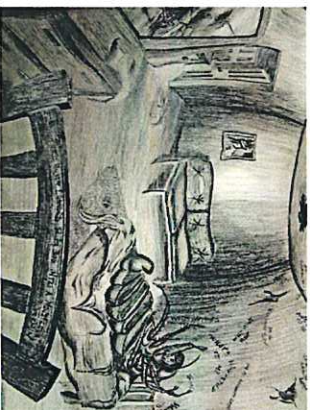


Figura 3 - Il risveglio di Gregor

Gregor, infatti, si sveglia in una mattina uggiosa, deve prendere il treno delle cinque per consegnare ad un fattorino che lo attende un campionario di tessuti, egli, però, è indolenzito, non riesce a girarsi nel letto e nel provarci nota qualcosa di strano sul suo corpo: la presenza di tante zampe. Gli sembra di aver sognato. La sua voce è diversa, cambiata, è la sua, ma "vi si mischiava, quasi salisse dal basso, un pigolio incontentabile, doloroso, che lasciava comprendere le parole solo in un primo momento, ma le confondeva poi talmente nell'eco da far dubitare di averle intese". Gregor si accorge, quindi, del suo cambiamento, della sua metamorfosi.

Questa, però, non è l'unica metamorfosi del racconto, infatti Kafka ne presenta una seconda associata al senso di colpa e alla problematicità, nonché alla mutevolezza del rapporto genitori-figli, che è paradigmatica di un'alienazione umana nella società. Quest'ultima è la metamorfosi su cui si focalizza Kafka, infatti la prima non viene rappresentata, bensì ne viene evidenziato solamente il risultato, ovvero l'insetto Gregor, mentre la seconda viene condotta con naturalezza, come se non ci fosse nulla di strano nella trasformazione di Gregor, una volta superato il senso di orrore provato, a prima vista, dai genitori.

La normalità di una situazione così anormale dà adito a diverse interpretazioni: probabilmente Gregor non è particolarmente stupido o impaurito del proprio cambiamento, perché si sentiva già così, infatti per lui le sensazioni di disagio, imbarazzo, incommunicabilità con gli altri non erano nuove.

Gregor era già emarginato nell'alienata società moderna, perciò la sua nuova forma di insetto non è altro che la rappresentazione del suo stato.

Gregor non è un animale come quelli che da sempre popolano i racconti per bambini, che parlano e che pensano come accade nelle fiabe di Esopo. In queste ultime, infatti, i protagonisti subiscono un processo di antropomorfizzazione in modo tale da poter diventare la metafora di vizi e virtù umane. In Kafka, invece, avviene esattamente il contrario: un uomo è trasformato in animale, in un insetto, quasi come fosse una punizione per delle colpe di cui non si è ancora reso conto.

Sono queste colpe il *Lietmotiv* del racconto, quelle che causano la seconda metamorfosi, ovvero il progressivo modificarsi dei comportamenti del mondo familiare ed esterno che rivelano la natura persecutoria di chi vive intorno al protagonista. Gli scontri con il padre e con la sorella o la morte stessa di Gregor appaiono impliciti sin dal suo risveglio che già si configura come un'esclusione dal contesto umano. Emerge, infatti, dalle prime riflessioni del protagonista, la sua incapacità di inserirsi nella macchina del mondo moderno caratterizzata dalla frenesia - simboleggiata dallo scorrere delle lancette della sua sveglia che sembrano volerlo rincorrere- dagli impegni, dagli orari fissati che impongono un ritmo non più confacente alla dimensione biologica, poiché è quello della funzionalità economica. Ecco, quindi, come il senso di colpa innescato dal ritardo al lavoro dimostra la perdita inequivocabile di una temporalità "naturale". Il racconto, infatti, procede sulla scansione ossessiva degli orari. Il ticchettio della sveglia diviene il pendolo dell'inquietudine fra la volontà di rispettare le regole dei superiori e il desiderio di svicolarsene per recuperare la dimensione soggettiva, la libertà. Eppure il tempo scorre con il crescere parallelo del rimorso: le sei e mezzo, le sette meno un quarto, le sette, le sette e cinque, le sette e un quarto.

Per Gregor il ritmo a cui procede la società è inspiegabile: cerca, o si vede costretto, a dare un senso al mondo che si rivela, però, esplicitamente oppressivo e assurdo. Egli è schiacciato da un lavoro che non ha scelto, fa il conto alla rovescia per lasciarlo, ma si sente anche in obbligo di continuare a mantenere la famiglia. Questa, però, non gli riconosce i sacrifici che fa, anzi lo rimprovera per ciò che è. Lo si può notare soprattutto dopo la sua metamorfosi: egli sembra sempre alla ricerca di affetto eppure si ritrova solo, chiuso tra le mura della sua stanza, con l'unica possibilità, la sera, di guardare attraverso una fessura della porta la famiglia in salotto. Tranne la sorella nessuno ha il coraggio di affrontarlo, di affrontare la sua diversità.

Tale diversità rappresenta la manifestazione fisica della regressione a uno stato animale che cancella la percezione umana e la sottomette ai ciechi meccanismi della produzione che non vengono meno neanche nell'ambiente domestico. Ciò è evidenziato attraverso il legame debiti-lavoro-denaro che rappresenta la catena di dipendenza all'interno della famiglia (che si collega al mondo esterno) e l'impossibilità per Gregor di evadere.

Così quella dimensione soggettiva che da commesso viaggiatore non riusciva a trovare la conquista da insetto nella sua stanza che è, in realtà, il suo rifugio, l'unico luogo dove l'esterno non ha accesso e che può ancora difendere come residuo di libertà.

Gregor, allora, è l'emblema dell'uomo schiacciato, escluso, oppresso da una società, rappresentata dalla famiglia, che lo accetta finché egli si sforza di rientrare nei suoi canoni, ma che non lo riconosce più nel momento in cui la sua diversità esplose. Egli diventa insicuro, incerto, cerca affetto nelle persone che crede gli siano più vicine, ma trova solo cattiveria (come il papà che gli tira le mele) e una maggiore solitudine.

Questa è la situazione alienata e alienante dell'uomo moderno che Kafka vuole analizzare, una condizione esistenziale causata dal rifiuto della persona da parte della società, dall'incomprensione dell'altro. Gregor è il simbolo di coloro che non riescono ad esprimere le loro idee al mondo, ad affermarsi, a dimostrare che la diversità non è una condanna, ma un regalo, un pregio e che la propria realizzazione non consiste nel conformismo, ma nella (ri)conquista del proprio tempo naturale.

Tutti questi aspetti paradossali e al limite dell'inverosimile sono convogliati in una presentazione lineare e limpida che imposta i nodi problematici senza risolverli. Per raffigurare l'inferno esistenziale Kafka lo esalta in un'apparenza di normalità; ecco, allora, che il risveglio di Gregor è racchiuso nel senso di colpa del ritardo e il motivo problematico della trasformazione, all'inizio, viene accennato solo di sfuggita. È proprio la naturalezza della mostruosa trasformazione, però, che coglie nel vivo lo straniamento di un vissuto quotidiano ormai, anche per noi, spaventosamente normale. La metamorfosi di Gregor, quindi, è stata unica e irreversibile, al contrario di quella quella dei campi elettrico e magnetico è continua.

5. COME L'ELETTROMAGNETISMO INFLUENZÒ WILLIAM TURNER

Le energie segrete e recondite dell'elettromagnetismo si manifestano sulla tela di uno dei più famosi pittori romantici

La spiegazione che sta alla base del collegamento tra l'elettromagnetismo e il pittore inglese William Turner si trova nel metodo che prende il nome di "materialismo storico culturale"²⁹ e che consiste nella ricerca di una tecnologia dominante in un particolare periodo e segue l'ipotesi che attorno ad essa si costituisca un sistema organico e correlato di soluzioni che lo riflettono in ogni ambito della cultura di quel tempo.

Alla fine del Settecento la teoria elettromagnetica non era ancora sviluppata - infatti avrebbe visto la sua luce solamente un secolo dopo -, essa, però, si stava formando grazie alla crescente curiosità che portava scienziati quali Gauss, Ampère, Oersted, forse ancora inconsapevoli degli sviluppi che avrebbero avuto i loro esperimenti, a svelarne i primi segreti. Se, però, si deve attribuire importanza scientifica solamente alle ipotesi che trovano un loro riscontro e una loro applicazione materiale, bisogna, allora, riflettere sullo stravolgimento della visione del mondo apportato dal barlume dell'elettromagnetismo. Nelle opere di autori a cavallo tra il Settecento e l'Ottocento, infatti, è individuabile un grado di *elettriformismo* che, per quanto debole, incerto, aurorale, non è assolutamente riscontrabile nelle arti visibili precedenti.

L'elettromagnetismo descrive un'energia sfuggibile, totalmente renitente alle misure tradizionali di punto, linea e superficie, ovvero ai parametri della geometria analitica cartesiana. Per quanto, infatti, si possa tentare di rappresentare, a fini di studio, l'onda elettromagnetica sugli assi x,y,z, essa li sfugge in quanto, in realtà, si sviluppa su infiniti piani tra loro perpendicolari, occupando la totalità dello spazio. Così le regole di misurazione vengono completamente destituite e rimpiazzate dalle nuove grandezze quali il campo, la corrente, il flusso.

Come si è già osservato, alla fine del Settecento queste conoscenze non erano ancora complete, ma gli artisti avevano compreso la direzione in cui si stava muovendo la scienza e con essa la storia: si stava andando verso la sempre maggior irrilevanza e trascurabilità della misurazione che avrebbe lasciato lo spazio all'incessante susseguirsi di libere sensazioni.

L'autore nelle cui opere è chiaramente riscontrabile lo zampillo incessante di energie segrete e recondite che diventano, perfino, "motivi strutturali capaci di influenzare l'intero dipinto"³⁰, è William Turner.

²⁹ Renato Barilli, p.8

³⁰ Cfr.29

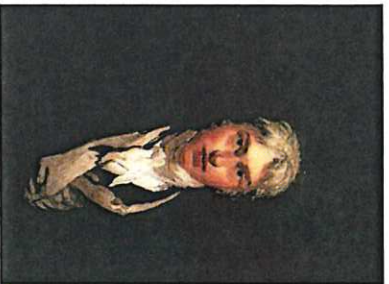


Figura 4 - William Turner, Autentico 1799

Joseph Mallord William Turner nasce a Londra il 23 aprile 1775. Suo padre è un barbiere capace, però, di esercitare sul figlio un forte influsso, tanto che William gli sarà sempre molto legato. Grazie a uno zio, il giovane talentuoso ha un'educazione regolare che gli permette di emergere alla scuola d'arte della Royal Academy nella quale viene accettato all'età di ventiquattro anni.

William Turner è il pittore che meglio incarna la personalità artistica dell'epoca e che, sempre più, si trova divisa in un Dottor Jeekyll e in un Mr. Hyde che convivono fianco a fianco e confluiscono continuamente l'uno nell'altro. Turner, infatti, ribolle di pulsioni esplosive, del bisogno di mostrare l'entropia che vede nel mondo e sente in se stesso, ma, allo stesso tempo, cerca ossessivamente l'ordine, un punto fermo, una simmetria.

Questa dualità è la stessa che si riscontra nei fenomeni elettromagnetici, a seconda che se ne colga l'aspetto elettrostatico o quello elettrodinamico, se si pone l'attenzione sull'equilibrio delle cariche oppure sulle correnti generate dalla differenza di potenziale.

Sin dall'esperienza alla Royal Academy, Turner mostra il suo interesse per il vedutismo che gli offre un'apertura infinita verso la natura. Questa è un'apertura nella quale egli cerca l'ordine, la simmetria, le regole della tradizione, ma che, inevitabilmente, lo portano a oltrepassarle per attingere intuitivamente ai segreti del mondo, della materia, dell'astrofisica. È questa la massima rappresentazione dell'ambivalenza di Turner che oscilla tra Dr. Jeekyll e Mr. Hyde secondo una metamorfosi continua.

Tutto ciò emerge chiaramente nei dipinti:

1. *Barche olandesi durante una tempesta;*
2. *Il molo di Calais;*
3. *Pioggia, vapore e velocità*

5.1 Le opere

Barche olandesi durante una tempesta



Figura 5 - Barche olandesi durante una tempesta, 1801, Collezione privata

Il tema indicato dal titolo del dipinto permette a Turner di impegnarsi su due elementi prediletti: il mare e il cielo, entrambi fluidi ed entrambi soggetti a un infinito moto vorticoso.

Il moto ondosso è talmente forte da obbligarne la nave rappresentata a inclinarsi, infrangendo, così, una delle regole ferree dello spazio moderno secondo la quale i corpi devono rispettare un asse verticale, cadere a piombo rispetto alla base del dipinto e introdurre, così, la "normalità" degli assi cartesiani.

Per poter meglio analizzare questo dipinto, si deve ricordare che i ritmi ondulatori sono di due tipi: trasversali e longitudinali. Il primo è rappresentato dall'oscillare dell'albero della nave a destra e a sinistra, mentre il secondo è mostrato dall'orbita che la nave descrive.

Il violento dondolio della scialuppa, inoltre, si può ricondurre al fatto che essa non ha ammainato le vele, sottoponendosi, così, agli impetuosi soffi del vento. Al contrario, l'imbarcazione in lontananza, che ha gli alberi spogli, è immobile nella zona franca dell'orizzonte; questa, però, è anche una zona mortuaria, non vivificata dalla furia dell'energia che muove l'oceano. Quindi, forse, secondo Turner, è meglio essere travolti dall'uragano, ma sentirsi vivi, piuttosto che approdare alla calma distesa marina dell'orizzonte.

Il conflitto che lacererà il mare non si ferma alla superficie terrestre, ma si riflette in cielo, in cui si allargano nubi tenebrose provenienti da angoli remoti del mondo, totalmente "fuori dal quadro". Quella dipinta non è una semplice formazione temporalesca, bensì prefigura, agli occhi di Turner, una catastrofe imminente, *incendi immani, roghi malefici*³¹.

³¹ Renato Barilli, *L'alba del contemporaneo*, pag. 201

Il molo di Calais



Figura 6 - Il molo di Calais, 1803, Londra, National Gallery

Questo quadro si può considerare l'esito più ricco e complesso del ciclo turneriano delle marine³².

Il mare, questa volta, descrive un gorgo intero, portando, così, a compimento l'unione tra il carattere longitudinale e quello trasversale del moto ondulatorio che, subito, si propaga nel cielo plumbeo nel quale le nubi che lo solcano si chiudono sempre di più formando il cosiddetto "occhio del tifone", al cui centro sopravvive il cielo limpido e immoto.

Entrambi i gorgi appaiono decentrati rompendo, così, una simmetria che viene negata anche dal molo sulla destra. Quest'ultimo, infatti, oltre ad essere spostato, si conforma a una curvatura pretendendosi verso il moto ondoso del mare dal quale sembra essere emerso. Esso, quindi, non si scontrerà mai con la linea dell'orizzonte, ma la raggiungerà, prima o poi, in un inevitabile, ma inimmaginabile, punto di fuga secondo un avvicinamento illimitato, mai conseguito appieno, che in geometria verrebbe definito "asintotico".

La simmetria non può più sussistere perché questo quadro rappresenta il moto puro, l'energia pura che non può essere trattenuta entro i confini limitati della cornice.

Il mare, il cielo, perfino l'elemento solido del molo, mostrano l'intuizione del nostro Mr. Hyde: lo spazio è curvo, non inquadrabile negli assi cartesiani. Questo accade sia perché esso è percorso da fenomeni ondulatori, sia perché questi non smettono mai di subire un'attrazione gravitazionale da parte di altri campi energetici, come accade alle barche che si inclinano pericolosamente verso il mare.

³² Renato Barilli, *L'alba del contemporaneo*, pag. 201

Pioggia, vapore e velocità



Figura 7 - Pioggia, vapore e velocità, 1844, Londra, National Gallery

Nel 1830 si riconosce il passaggio da un primo a un secondo Turner. Negli ultimi vent'anni di vita, infatti, egli sposta gli equilibri del suo mondo e della sua arte che erano sempre stati basati sull'intuizione della piena reversibilità che sussiste tra materia ed energia, nonché della loro completa compenetrazione in un'unica sostanza primigenia³³. Per lungo tempo questi due momenti si erano mantenuti in equilibrio, ma, a partire dal 1830 circa, l'energia prende il predominio scatenandosi sulla materia.

Questo porta Turner a definirsi come l'artista della *Indistinctness*, ovvero del non-finito, dell'informe. Ormai Mr. Hyde ha prevalso completamente su Dr. Jekyll e ciò comporta anche dei rischi: la totale trasformazione della materia in energia, infatti, può risolversi in perdita, se l'energia si trova in uno stato entropico, di bassa concentrazione, e non è più in grado di riconvertirsi in massa, comportando la distruzione di ogni realtà.

Pioggia, vapore e velocità esemplifica questo stato, il dipinto, infatti, si configura come un incontro-scontro tra i principi della modernità: il ponte converge, secondo la prospettiva tradizionale, verso un punto di fuga che, però, sfugge, si immerge nella nebbia rimanendo sfuggibile all'osservatore; così il treno e il ponte vengono da, o vanno verso, nessun luogo. L'energia ha annullato ogni coordinata spazio-temporale.

Riprendendo il titolo del quadro si può osservare come la velocità del treno, mosso dall'energia termica del vapore acqueo, rappresenti il più alto traguardo raggiungibile nell'universo moderno e tecnologico, anche se sembra poca cosa paragonato alla velocità della luce su cui è fondato il nostro mondo postmoderno. Ecco, allora, che se il treno

³³ Renato Barilli, *L'alba del contemporaneo*

andasse alla velocità della luce sarebbe lecito che sfuggisse al nostro sguardo lasciando solo un senso di *Indistinctness*.

Al termine di questo percorso si può osservare come Turner, in accordo con le tradizionali regole della pittura, tenda a mantenere, in parte, gli schemi classici che gli garantiscono dei punti fermi, di approdo, nel quadro; dall'altro lato, però, Turner è un grande eversore, infatti, i moduli, i canoni a cui si rifà vengono stravolti completamente e trascritti in sistemi e strutture completamente mutate.

Per questo motivo Turner si configura come i proverbiai Dr. Jekyll e Mr. Hyde creati dalla fantasia di Stevenson, presentandosi come un facile talento, onorabile e onorato, destinato a ottenere consensi, ma mostrando anche il suo lato oscuro, diabolico, capace di intuire e prefigurare i segreti reconditi del cosmo, della materia, dell'energia.

6. ALLA BASE DELL'ACCELERAZIONE

Una delle più moderne applicazioni del campo elettromagnetico negli acceleratori di particelle

Gli acceleratori di particelle fanno, ormai, parte del corredo usuale dei laboratori di fisica, in dimensioni più o meno grandi a seconda delle necessità. Le più grandi installazioni si trovano in laboratori attorno ai quali ferve l'attività avanzata di ricerca nel campo della "fisica nucleare delle alte energie", come nel caso del CERN di Ginevra e del Fermilab nell'Illinois. Nonostante ciò, oggi, anche le cliniche e i laboratori di ricerca biologica, clinica e industriale si avvalgono delle radiazioni che queste macchine producono.



Figura 8 - Fermilab, Illinois



Figura 9 - LHC, CERN, Ginevra

I primi acceleratori di particelle furono costruiti al fine di indagare i costituenti più piccoli della materia e oggi gli sviluppi tecnologici permettono agli acceleratori più grandi di ricreare le condizioni originarie del Big Bang consentendoci, così, di conoscere la situazione in cui ha avuto origine il nostro universo, di studiarne lo sviluppo, nonché le leggi che lo sovrintendono.

Gli acceleratori di particelle, infatti, sono strumenti scientifici che producono un fascio direzionale di particelle cariche elettricamente, quali ioni e particelle subatomiche come elettroni, positroni, protoni, antiprotoni, ad elevatissima energia cinetica che vanno a colpire il bersaglio che si vuole studiare o dalla cui collisione, per reazioni come la fusione nucleare, la fissione nucleare e l'annichilazione, si ricavano nuovi elementi.



Figura 10 - proiezione grafica dello scontro tra due fasci all'interno del LHC

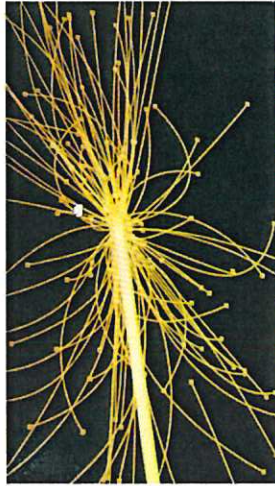


Figura 11 - proiezione grafica dello scontro tra due fasci all'interno del LHC

Studiare i minimi costituenti della materia è molto complesso, in particolare per il *principio di indeterminazione di Heisenberg*, il quale stabilisce i limiti nella conoscenza (e della determinazione) dei valori che grandezze fisiche *coniugate* assumono contemporaneamente in un sistema fisico, affermando che la quantità di moto e la posizione non possono essere misurate con precisione allo stesso tempo; o meglio, gli errori nella misura della posizione Δx e della quantità di moto Δp , soddisfano la seguente relazione:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{2\pi}$$

Con $h = \text{costante di Planck}^{34} = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} = 4.135 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}^{35}$

Questa relazione indica che il prodotto dei due errori è sempre maggiore, o al più uguale, ad un valore minimo. Con ciò il principio di indeterminazione implica che ad una particella non è possibile assegnare un definito valore della posizione e della quantità di moto *nello stesso istante temporale* con precisione assoluta, ovvero con incertezza nulla, poiché

³⁴ La costante di Planck è una costante che ha le dimensioni di un'energia per un tempo e in meccanica quantistica la sua esistenza nella materia determina la prima quantizzazione (o assegnazione di valori) a grandezze come l'energia, la quantità di moto e il momento angolare di una particella.

³⁵ $1\text{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

quanto più si tenta di ridurre l'incertezza su una variabile, tanto più aumenta l'incertezza sull'altra per la relazione di proporzionalità inversa che le lega.

Il principio di Heisenberg, quindi, dimostra che per studiare, ad esempio, nuclei dal raggio $\Delta x = 10^{-14} \text{ m}$, la quantità di moto dovrebbe essere $\Delta p > 10 \text{ MeV}/c$. Ciò significa che, per poter indagare la struttura fine di una particella, è necessario fornire una quantità di moto molto elevata alle particelle del fascio che colpisce il bersaglio.

I primi acceleratori di particelle furono messi a punto negli anni Trenta, motivati dagli studi di fisica nucleare; questi, infatti, sfruttavano campi elettrostatici che caricavano le particelle a un'energia maggiore rispetto alla tradizionale tensione che le fonti convenzionali potevano fornire e le acceleravano facendo passare il fascio attraverso differenze di potenziale di 10/20 MV. Si trattava, quindi, di acceleratori lineari, conosciuti anche con il nome di *Van Der Graaf*, dal nome del fisico che per primo ne costruì uno nel 1931.

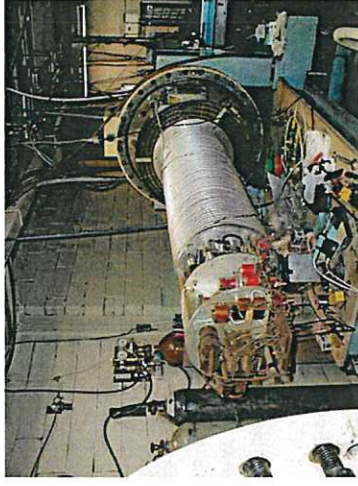


Figura 12 - Acceleratore lineare Van de Graaf a stadio singolo da 2 MeV, aperto per la manutenzione, (1960)

Questo nuovo strumento era la realizzazione di studi risalenti al 1920 condotti dall'ingegnere norvegese Rolf Wideroe che, successivamente, interessarono anche un giovane scienziato dell'università di Barkley: Ernest Lawrence. Nel 1930, Lawrence fu il primo ad applicare il progetto a un acceleratore circolare inventando il ciclotrone.

Il ciclotrone aprì la strada verso nuove scoperte nella fisica nucleare, compresa la produzione di nuclei instabili e elementi non naturali. Con questo, poi, si riuscirono anche a creare fasci con cui oggi si curano i tumori – si avrà modo di approfondire in seguito l'argomento.

Nel 1932, poi, venne realizzato un altro acceleratore lineare da Cockroft e Walton per i primi studi sulla fissione nucleare in laboratorio.

Infine, una versione più efficiente dell'acceleratore di Van de Graaff (l'acceleratore Tandem) permette l'accelerazione tra differenze di potenziale doppie rispetto al suo predecessore.

La necessità di accelerare particelle ad energie sempre crescenti portò alla costruzione di acceleratori lineari conosciuti come LINAC (Linear Accelerators) che utilizzano campi elettrici alternati.

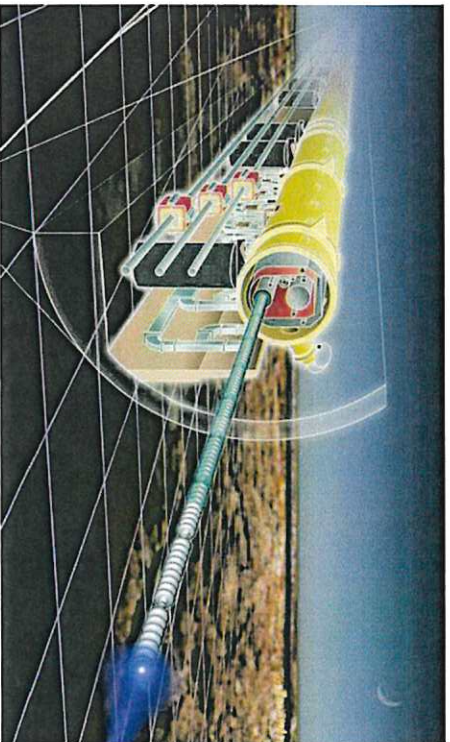


Figura 13 - Ricostruzione computerizzata di un acceleratore lineare

Con queste macchine si risolveva il problema di disporre di un'unica differenza di potenziale disponendo in linea retta una serie di elettrodi cilindrici a cui era applicata una differenza di potenziale pulsata tale che nello spazio tra due cilindri contigui ci fosse sempre un campo elettrico accelerante in una direzione e in fase con il passaggio della particella da accelerare. Dato, però, che in questo modo venivano accelerate solo le particelle in fase con il campo elettrico, non si poteva accelerare un fascio continuo, ma si dovevano creare dei pacchetti chiamati *bunch*.

Lo sviluppo di queste macchine è proseguito, poi, esponenzialmente raggiungendo energie sempre più elevate.

Oggi possiamo distinguere gli acceleratori di particelle in diverse famiglie in base a:

- > L'energia generata;
- > La traiettoria seguita dalle particelle;
- > Le particelle accelerate.

6.1 La distinzione degli acceleratori per energie

A seconda dell'energia generata e della tensione utilizzata per creare i campi elettrici necessari all'accelerazione delle particelle, gli acceleratori si dividono, a loro volta, in:

ACCELERATORI AD ALTE ENERGIE:

Questi sono tutti quegli acceleratori utilizzati per investigare la struttura della materia su scala subnucleare, come l'LHC di Ginevra e il Fermilab Tevatron in Illinois, negli Stati Uniti.

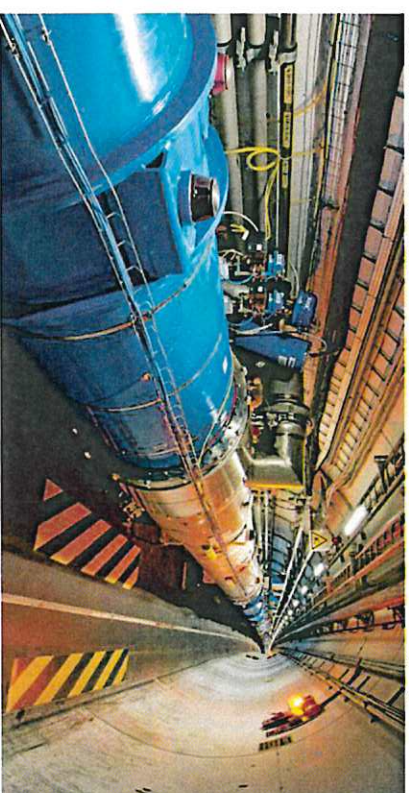


Figura 14 - The Large Hadron Collider (image: CERN)

Per quanto riguarda il LHC (Large Hadron Collider), esso è un collisore protone-protone ed è, ad oggi, l'acceleratore di particelle ad energia più alta nel mondo, infatti il 21 maggio scorso ha raggiunto i 13TeV.

Questo strumento ha la capacità di accelerare protoni e ioni pesanti fino al 99,999% della velocità della luce e fari successivamente scontrare, raggiungendo, in quel punto, un calore quasi 100.000 volte maggiore di quello esistente al centro del Sole.

L'LHC ha iniziato a lavorare il 10 settembre 2008 e consta di un anello di 27 chilometri di circonferenza fatto di oltre 1600 magneti superconduttori, raffreddati ad elio liquido superfluido ad una temperatura di 1.9 K (-271.25°C) - una temperatura di 0.82K inferiore rispetto a quella dell'universo. Questi magneti includono 1232 dipoli di 15 metri di

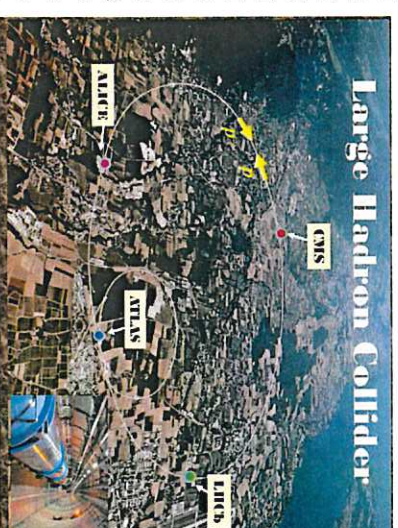


Figura 15 - schema dell'LHC

lunghezza che servono a far curvare i fasci e 392 quadrupoli (ognuno di 5/7 metri) che focalizzano i fasci; inoltre vi sono diverse strutture acceleranti, nonché degli altri magneti, molto particolari, che servono ad assottigliare il fascio.

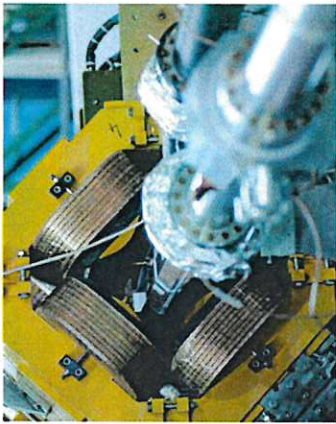


Figura 16 - quadrupolo, INFN

Nell'anello vengono fatti collidere due fasci che viaggiano in tubi, nei quali il vuoto è molto spinto, e vengono mantenuti nella corretta curvatura grazie ai campi magnetici creati dai superconduttori.

Tra gli obiettivi che ci si è posti nell'utilizzo del LHC, oltre a voler comprendere la struttura dell'universo, emerge quello di verificare la legge di Einstein $E=mc^2$, ovvero si sta tentando di creare particelle più pesanti rispetto a quelle del fascio, o nuove particelle, grazie all'impiego di energie sempre maggiori. Questo processo permette, quindi, di scoprire nuove particelle elementari. Oggi ne conosciamo circa trenta tra particelle e antiparticelle.

		Tre generazioni della materia (fermioni)			Bosoni di gauge		
		I	II	III			
massa	carica	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0	0
nome	spin	u	c	t	γ	g	Z
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	1	1
0.51 MeV	-1/2	e	μ	τ	0	0	W^\pm
105.7 MeV	-1/2				0	0	forza debole
~0.17 MeV	1/2	ν_e	ν_μ	ν_τ	0	0	
~15.5 MeV	1/2				0	0	
4.2 GeV	-1/2	d	s	b	0	0	
171.3 GeV	-1/2	u	c <td>t</td> <td>0</td> <td>0</td> <td></td>	t	0	0	
171.3 GeV	1/2				0	0	
2.4 MeV	1/2				0	0	

Figura 17

Tra i traguardi più importanti raggiunti da questo acceleratore vi è certamente la scoperta del 2012 della famosa "particella di Dio", ovvero il *Bosone di Higgs*: una particella – la cui

esistenza era già stata ipotizzata dal fisico britannico Peter Higgs - legata al campo di Higgs che dovrebbe permeare l'universo conferendo massa alle particelle elementari. Questo è stato il risultato della capacità del LHC di tornare indietro nel tempo ricreando condizioni simili a quelle di 10^{-10} secondi dopo il Big Bang.

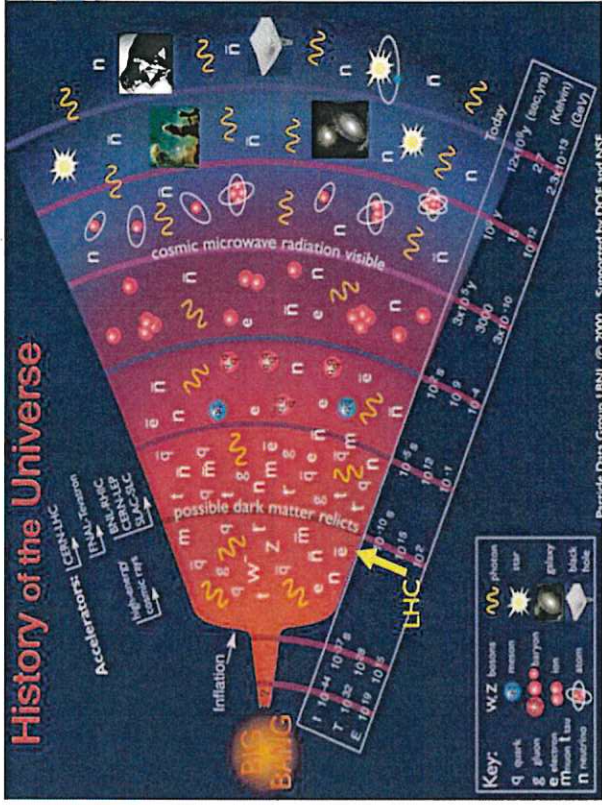


Figura 18 - nascita dell'universo dal Big Bang, si può osservare dove lavora il LHC

Un altro acceleratore di questo tipo è il Fermilab Tevatron dell'Illinois che è stato chiuso nel 2011. Questo faceva collidere protoni e antiprotoni così da produrre top quark (vedi fig.17), la particella elementare conosciuta con più massa, raggiungendo 1TeV di energia e utilizzando più di 1000 magneti superconduttori.

In acceleratori come questi la prima accelerazione delle particelle viene ottenuta grazie a un generatore di Cockroft-Walton in cui una sorgente di ioni riceve dell'idrogeno che ionizza così da poter essere accelerato per mezzo di un potenziale elettrico sottoforma di ioni negativi.

L'uso di ioni negativi ha dei vantaggi in termini di intensità del fascio di particelle generabile dalla macchina. Tali ioni attraversano, in seguito, un acceleratore lineare (*linac*), quindi vengono spinti da campi elettromagnetici.

Questo generatore permette di convertire la corrente elettrica alternata a bassa tensione in corrente continua ad alta tensione. Per tale motivo acceleratori con il LHC e il Fermilab vengono detti, oltre che ad alta energia, anche ad alta tensione.

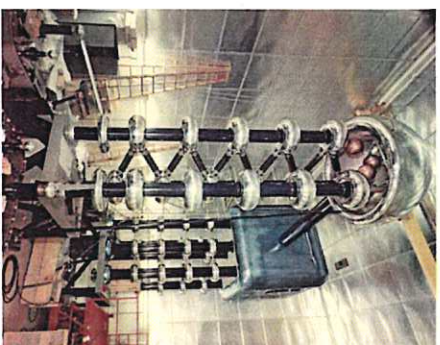


Figura 19 - generatore Cockroft-Walton

ACCELERATORI A BASSE ENERGIE:
Sono gli acceleratori come quello dell'INFN di Legnaro che ho utilizzato per il mio esperimento.



Figura 20 - TANDEM, Laboratori di Legnaro

Il TANDEM è un acceleratore elettrostatico di ioni che utilizza una differenza di potenziale di alcuni milioni di volt per accelerare ioni positivi estratti da una sorgente posta grazie a un "terminale" ad alta tensione. Questi acceleratori vengono anche chiamati Van de Graff in ricordo del fisico che ne costruì il primo prototipo. La versione TANDEM sfrutta in maniera più efficiente la differenza di potenziale tra il terminale e il riferimento di "massa",

ovvero tra la regione ad alta tensione che si trova al centro dell'acceleratore e i due tubi acceleratori che dipartono dal centro in direzioni opposte.

La sorgente è esterna e produce ioni negativi che vengono iniettati nell'acceleratore: questi vengono accelerati dalla tensione positiva nel primo tubo acceleratore fino al terminale, dove interagiscono con un gas o un foglio sottile producendo lo "stripping" (l'allontanamento) di alcuni elettroni dallo ione negativo, che diviene, in tal modo, carico positivamente così da poter essere accelerato ulteriormente per la repulsione causata dalla carica positiva del terminale.

Il TANDEM di Legnaro lavora con energie fino a 15 MeV, grazie a un terminale ad alta tensione che, nel caso del LNL, supera i 14,5MV di tensione elettrostatica massima.

Il terminale è posizionato al centro e sull'asse di una tank orizzontale (come si può osservare nell'immagine) a sua volta riempita di gas di isolamento (SF_6 = esafluoruro di zolfo) a una pressione di 7atm.



Figura 21 - Foto dell'interno della tank del tandem: si notano il terminale ad alta tensione e la colonna

Con questa macchina si accelerano ioni di varie dimensioni, per esempio, per il mio esperimento sono stati accelerati ioni di ^{32}S . L'energia massima erogabile dall'acceleratore è strettamente legata alla dimensione delle particelle, per questo, spesso, si indica l'energia per nucleone MeV/u per gli ioni pesanti, infatti, più grandi (e quindi pesanti) sono i nuclei, meno efficace è il TANDEM.

A livello di energie intermedio si ricordano i ciclotroni che erogano energie dell'ordine di 100MeV per accelerare protoni.

I ciclotroni nacquero dalla necessità di raggiungere energie sempre maggiori e il primo venne realizzato da Lawrence nel 1930.



Figura 26 - modello computerizzato di sincrotrone

Elettra è l'unica sorgente al mondo che opera regolarmente a due diverse energie degli elettroni, ossia a 2,0 GeV per accrescere le prestazioni delle spettroscopie che fanno uso di radiazione ultravioletta e di raggi x soffici, e a 2,4 GeV per migliorare l'emissione di raggi x duri, utilizzati negli esperimenti di diffrazione.

La radiazione di sincrotrone è prodotta quando gli elettroni che viaggiano a velocità relativistiche vengono deviate in campi magnetici. L'anello di accumulazione è composto da quattro tipi di magneti:

1. I dipoli che deviano il fascio di elettroni;
2. I quadrupoli che focalizzano il fascio;
3. I sestupoli che compensano effetti cromatici e non lineari;
4. I magneti a stelo in che eseguono piccoli aggiustamenti alla traiettoria circolare.



Figura 27 - struttura di quadrupoli e sestupoli

La disposizione dei magneti forma un reticolo di elementi di confinamento magnetico. L'anello è composto da dodici gruppi identici di magneti che formano un anello circa 260 m di circonferenza.

Una caratteristica dei sincrotroni come l'Elettra è lo spazio che viene reso disponibile nel reticolo, nei lunghi tratti rettilinei, per installare dispositivi di introduzione di lunghezze fino a 4,5 m. Queste sono le principali fonti di fotoni ad alta luminosità e sono costituiti da insiemi di poli magnetici che costringono gli elettroni circolanti lungo traiettorie serpentine. La lunghezza d'onda della luce prodotta è modificabile cambiando il campo magnetico che agisce sul fascio di elettroni. Per gli elettromagneti questo avviene modificando la corrente che scorre nelle bobine, mentre per i magneti permanenti il campo viene modificato variando la distanza tra le matrici magnetiche superiore e inferiore.

L'Elettra fornisce fasci di fotoni per molte ricerche come quelle di litografia, dell'analisi della fluorescenza a raggi X - che permette di comprendere la composizione chimica di un materiale -, di nanotecnologia. Il raggio di luce prodotto viene anche impiegato per scopi

medici, in particolare per le mammografie in casi di sospette masse tumorali difficilmente osservabili.



Figura 28 - interno dell'Elettra

Per quanto riguarda, invece, i sincrotroni a protoni ricordo quello del CNAO (Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica) di Pavia, un acceleratore a protoni e a carbonio che eroga energie massime di 250 MeV per i primi, mentre accelera gli atomi di carbonio a 480 MeV/u.



Figura 29 - sincrotrone del CNAO

Il funzionamento di questo acceleratore sarà oggetto di una successiva analisi in merito all'utilizzo degli acceleratori in campo medico.

6.2 La distinzione degli acceleratori per la traiettoria delle particelle

Come si è già potuto osservare, gli acceleratori possono dividersi a seconda della traiettoria seguita dalle particelle: lineare o circolare.

Questa caratteristica distingue gli acceleratori lineari, chiamati LINAC, e il TANDEM di Legnaro, dal sincrotrone di Trieste, nonché dal LHC di Ginevra.

Negli acceleratori lineari il fascio passa una sola volta attraverso i campi elettrici acceleranti e quelli magnetici focalizzanti che convogliano il fascio verso un bersaglio fisso di qualsiasi tipo: una massa tumorale, un atomo, una lastra.



Figura 30 - un esperimento al LNL

I ciclotroni e i sincrotroni, invece, hanno dei campi magnetici che piegano la traiettoria del fascio cosicché questo passi più volte attraverso le componenti acceleranti e i magneti focalizzatori.

Essi possono produrre fasci di elettroni e protoni che vengono resi disponibili in diverse uscite per più scopi, come nel caso del sincrotrone di Trieste, o generano fasci di collisione in cui le particelle si scontrano ad alte energie.

Infine gli acceleratori di particelle si possono distinguere in base alle particelle che accelerano, se esse sono protoni, elettroni, ioni leggeri piuttosto che pesanti, infatti, la macchina deve adattarsi con diverse condizioni di energia, di tensione e ovviamente si avranno differenti scopi.

7. ALL'INTERNO DELL'ACCELERATORE

Analisi delle componenti principali dell'acceleratore facendo riferimento al TANDEM dell'INFN di Legnaro

In tutte le tipologie di acceleratore possiamo distinguere cinque principali categorie di componenti che sono indispensabili per il funzionamento della macchina.

Queste sono:

- La sorgente di fascio;
- Gli elementi acceleranti;
- Gli elementi ottici;
- Gli elementi di diagnostica;
- Gli esperimenti.

Ho deciso di analizzare le parti dell'acceleratore facendo direttamente riferimento al XTU TANDEM del LNL di Legnaro, così da poter, poi, introdurre il mio esperimento.

Come è già stato premesso nel capitolo precedente il TANDEM è un caso particolare del più generale acceleratore elettrostatico Van De Graaff.

L'acceleratore elettrostatico accelera le particelle cariche facendo loro attraversare un campo elettrico costante, ovvero una zona agli estremi della quale esiste una differenza di potenziale, infatti si definisce l'energia acquistata da una particella come:

$$Ek = q \cdot d \cdot p$$

dove q =carica della particella e $d \cdot p$ = differenza di potenziale

Queste macchine richiedono un generatore di tensione continua e un tubo nel quale vengono accelerate le particelle. La differenza di potenziale, quindi, può essere determinata solamente dagli estremi del tubo generando una tensione che può raggiungere le decine di Kilo Volt³⁷, oppure essa può essere generata da vari elettrodi consecutivi permettendo, così, il raggiungimento di tensioni più elevate fino ad alcuni MeV. Nel Van De Graaff il potenziale dell'elettrodo, isolato rispetto alla massa, può essere variato accumulando cariche elettriche, in quanto il potenziale elettrico di un condensatore si definisce come:

$$V = \frac{Q}{C} \text{ dove } \begin{cases} Q = \text{carica accumulata} \\ C = \text{capacità} \end{cases}$$

Le cariche vengono trasportate al terminale attraverso una cinghia di materiale isolante.

Ci si può chiedere, quindi, quale sia il limite massimo di tensione raggiungibile al crescere della carica depositata sull'elettrodo: supponendo che esso sia sferico, in aria libera, e che il suo supporto sia molto grande, si trova che il suo limite si dovrebbe avere per quella tensione per la quale il campo elettrico della superficie del terminale sferico raggiungesse il valore corrispondente alla rigidità dielettrica dell'aria, ovvero di 30kV/cm. Dato che il

³⁷ electron volt= energia acquistata da una particella di carica unitaria quando attraversa una d.d.p. di 1V.

campo elettrico sulla superficie di una sfera isolata è dato dalla tensione della sfera/raggio, allora un terminale sferico di raggio 1m dovrebbe poter essere portato a 3MV prima di scaricare. Ciò significa che il sostegno del terminale altera il campo elettrico sulla sua superficie, provocando degli addensamenti in alcune zone. Inoltre la microstruttura della superficie provoca disuniformità del campo.

La soluzione per ovviare a questo problema venne proposta nel 1935 indipendentemente da due gruppi di sperimentatori: Barton, Muller e Van Atta a Princeton e Herb, Parkinson e Kerst a Wisconsin. Questi fisici, infatti, pensarono di aumentare la rigidità dielettrica del mezzo circostante il terminale chiudendolo in un recipiente pieno di gas compresso (nel TANDEM dell'INFN si tratta di SF₆, esaffluoruro di zolfo). In questo modo a parità di dimensioni le tensioni risultano da 5 a 10 volte maggiori rispetto a quelle nell'aria.

Se, però, la tensione del terminale risulta molto elevata, ovvero superiore alle centinaia di KV, si riscontrano delle difficoltà nell'isolamento anche del sostegno. Infatti sia la rigidità dell'isolante, sia la tensione di scarica superficiale dipendono dalle dimensioni assolute dell'isolante stesso. Poiché, quindi, il campo elettrico nell'isolante non si distribuisce uniformemente possono esserci punti di addensamento nei quali E supera il limite di rigidità dielettrica dando vita a scariche.

Bisogna, perciò, far sì che sul sostegno isolante di terminali ad altissime tensioni il campo elettrico sia distribuito uniformemente. Questo lo si può ottenere materializzando piani equipotenziali, ovvero utilizzando degli anelli, detti "gradient rings", a distanza l'uno dall'altro di alcuni centimetri, tra i quali vi sono degli isolanti ceramici che vengono portati a tensioni corrispondenti ad una distribuzione uniforme del campo elettrico. Tensioni, queste, che vengono prelevate da un partitore resistivo connesso con il terminale.

Tra gli anelli, poi, sempre isolato da materiale ceramico, si trova un tubo formato da piatti nel quale si alternano parti di materiale ceramico (solitamente vetronite) e parti di materiale metallico (alluminio). I piatti che formano il tubo sono collegati all'anello esterno elettricamente.

Questo è il medesimo funzionamento su cui si basa il TANDEM XTU dell'INFN di Legnaro.

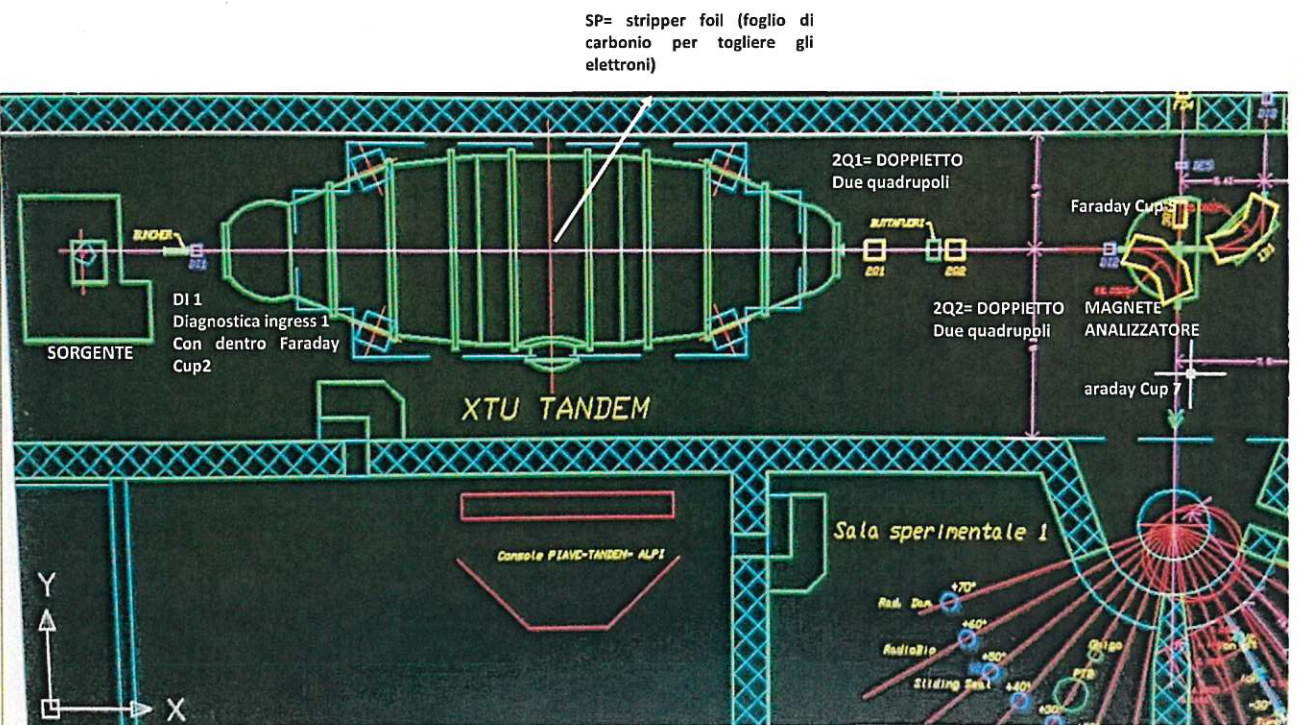


Figura 31 - XTU TANDEM, LNL

7.1 La sorgente

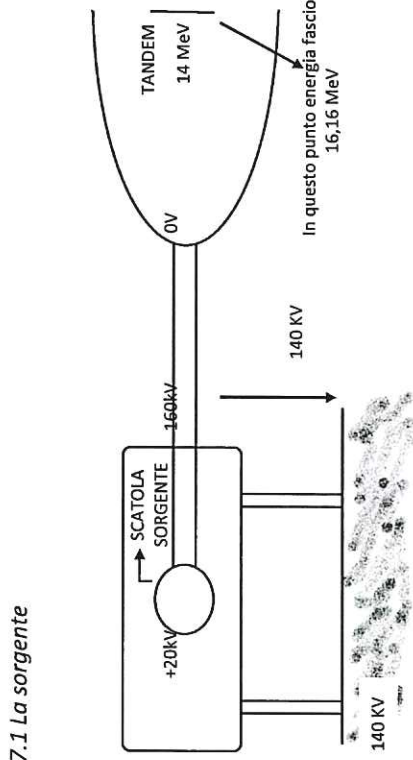


Figura 34 - schema della sorgente di ioni

Negli acceleratori di elettroni la sorgente è essenzialmente un filamento che opportunamente riscaldato, emette elettroni per effetto termoionico. La sorgente, negli acceleratori di protoni o in generale di ioni, invece, è normalmente costituita da una cella contenente l'elemento che si vuole accelerare in forma gassosa. Esso viene colpito da un fascio di elettroni di energia cinetica almeno uguale all'energia di ionizzazione del gas.

Gli ioni prodotti devono, poi, essere estratti per essere poi accelerati. Come si può osservare nella fig.34, si crea una differenza di potenziale da terra a cui si aggiunge quella della scatola della sorgente dove si trova il gas che assume carica negativa grazie alla presenza di un tubo che contiene cesio (Cs) il quale, essendo poco elettronegativo, tende a cedere un elettrone. Le particelle cariche, quindi, vengono richiamate dalla carica positiva del Terminal Voltage.

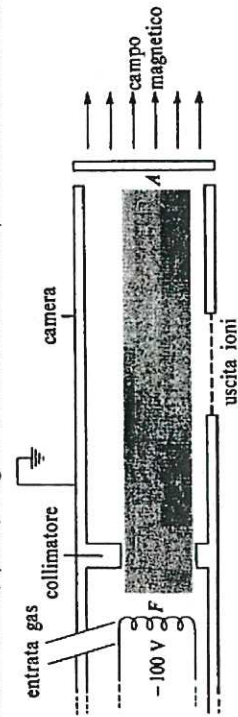
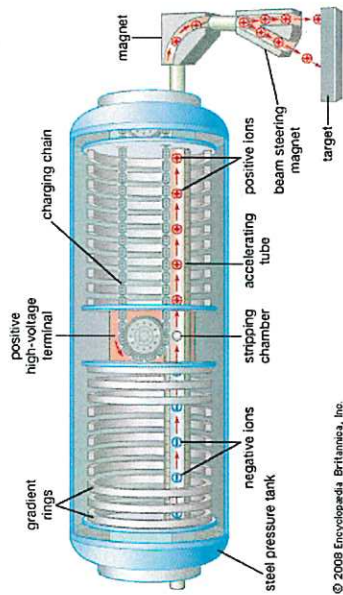


Figura 35 - funzionamento di una sorgente

Gli elettroni, emessi dal filamento F accelerano verso l'anodo A spiralizzando attorno alle linee di forza del campo magnetico. Gli elettroni formano ioni positivi per urti nel gas presente nella camera. Il miscuglio di ioni positivi ed elettroni, chiamato plasma, riempie la regione ombreggiata. Quindi, gli ioni positivi sono estratti dal plasma attraverso l'apertura da opportuni campi elettrici.

Nel caso particolare del TANDEM, gli ioni vengono generati in una sorgente esterna all'acceleratore ed estratti con carica debolmente positiva ($q=+1$). Prima di entrare



© 2008 Encyclopædia Britannica, Inc. Figura 32 - struttura del TANDEM

Nella figura 32 si possono osservare i "gradient rings" e la collocazione del tubo interno nel quale passano gli ioni negativi che vengono attratti dal terminale positivo. A questo punto è bene, prima di spiegare il funzionamento della sorgente di ioni - che è il primo elemento dell'acceleratore -, osservare lo schema delle strutture acceleranti dell'INFN di Legnaro.

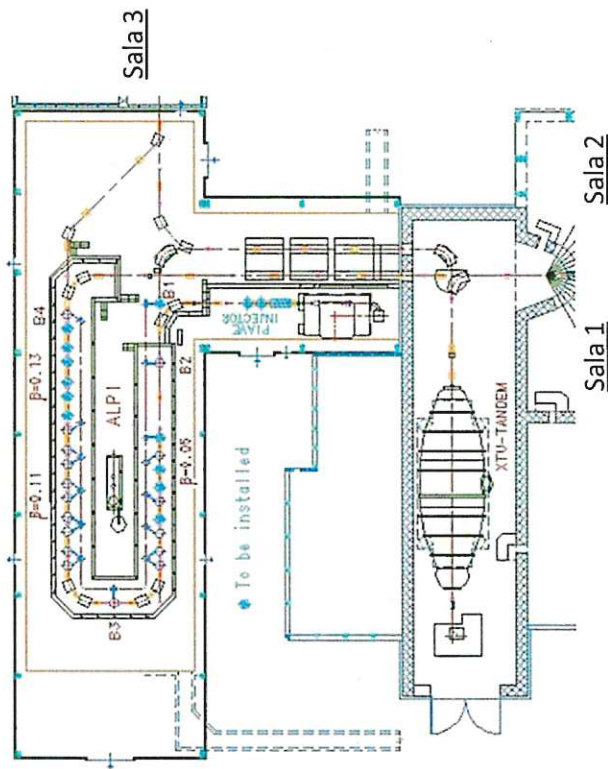


Figura 33 - Schema del percorso del fascio dal Tandem ad ALPI e alle sale sperimentali; nella figura è indicato anche l'iniettore superconduttivo di ALPI, denominato PIAVE

nell'acceleratore, le particelle attraversano una regione di carica nella quale, per l'affinità elettronica relativa, ricevono due elettroni dal gas con il quale interagiscono – si tratta di cesio, Cs-. Quindi, la sorgente anziché togliere elettroni al fascio – come nel caso del Van Der Graaf – li cede. Il primo elettrone rende l'atomo neutro, mentre il secondo gli dà una carica debolmente negativa ($q=-1$). In questo stato gli ioni si affacciano al lato di bassa energia del TANDEM venendo attratti (cioè accelerati) dal terminale a circa $V_f = +14,5$ MeV.

7.2 Gli elementi acceleranti

La seconda componente fondamentale dell'acceleratore sono gli elementi acceleranti, quali il TANDEM lineare e le cavità risonanti.

Il TANDEM accelera gli ioni in quanto essi, partendo con una netta carica negativa, vengono attratti dalla carica positiva del terminale.

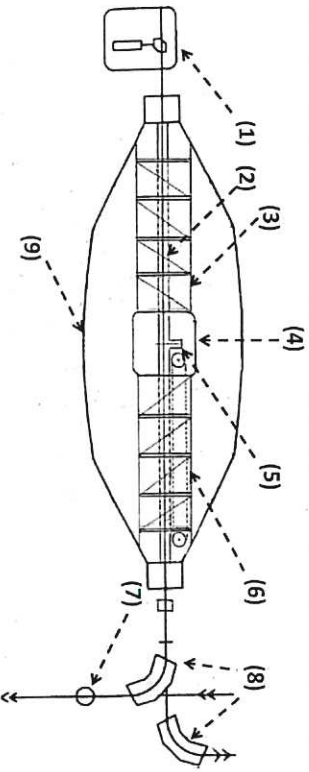


Figura 36 - Schema di funzionamento del tandem. Sono individuabili: Particella che si muove (1); tubo accelerante (2); colonna (3) che sostiene il terminale ad alta tensione (4); all'interno del quale è situata la stazione di "stripping" del fascio (5); cinghia di carica "induttori" (6); stazione di diagnostica del fascio (7); magneti deflettori (8); tank che contiene gas SFG a 7 atm (9).

Il terminale metallico consiste in una gabbia di Faraday³⁸ che non risente di campi elettrici esterni. Questo viene portato a una tensione positiva da una cinghia di materiale isolante che scorre su due pulegge una delle quali si trova sul terminale.

Quando un materiale isolante viene fatto passare sotto un conduttore portato a una tensione sufficiente perché si abbia un effetto corona³⁹, la superficie resta carica positivamente (o negativamente se il conduttore è negativo). Questo principio viene utilizzato per spruzzare sulla cinghia, in prossimità della puleggia a massa, le cariche che, poi, questa porta al terminale. Un pettine metallico costituito da aghi simili a quelli del grammofono è, poi, posto a distanza di 2/3 mm dalla superficie della cinghia, in corrispondenza della puleggia e portato a una tensione di qualche decina del KeV dello stesso segno di quello della tensione che si vuole ottenere. L'effetto corona garantisce il

³⁸ La gabbia di Faraday è sistema costituito da un contenitore in materiale elettricamente conduttore (o cavo conduttore) in grado di isolare l'ambiente interno da un qualunque campo elettrostatico presente al suo esterno

³⁹ L'effetto corona è un fenomeno per cui una corrente elettrica fluisce tra un conduttore a potenziale elettrico elevato ed un fluido neutro circostante.

deposito delle cariche sulla cinghia al suo passaggio che, successivamente, giungono al terminale dove si trova un secondo pettine le cui punte generano un forte campo elettrico. Qui, sempre per effetto corona, le cariche passano dalla superficie della cinghia al pettine e da questo al terminale cui è direttamente connesso.

Quindi, la cinghia permette l'afflusso al terminale di una certa corrente il cui valore massimo è limitato, però, dalla densità di carica superficiale ammissibile sulla cinghia e dalla velocità della cinghia stessa.

La cinghia, dunque, può essere considerata come uno strato piano di cariche con densità σ (coulomb/m²) che genera perpendicolarmente, in entrambe le direzioni, un campo elettrico $K = \sigma/2\epsilon_0$ ⁴⁰.

In funzione della densità di carica e della velocità della cinghia si può ricavare la corrente erogabile al terminale per unità di larghezza della cinghia; essa è data, in Ampère/metro, dalla relazione: $I = \sigma \cdot v$ ($v = \text{vel. cinghia in m/s}$).

La corrente trasportata dalla cinghia corrisponde a quella erogata dal pettine, per questo il controllo della corrente di carica viene fatto sul pettine.

Il materiale di cui è composta la cinghia è molto importante per il buon funzionamento del generatore: la resistenza elettrica deve essere molto elevata perché altrimenti le cariche accumulate su di essa, sottoposte al forte campo elettrico diretto in senso opposto al moto della cinghia stessa e dovuto alla tensione del terminale, si disperderebbero poco dopo essere state deposte sulla cinghia. Questa è uno dei motivi che rendono difficile il funzionamento della macchina in aria libera se l'ambiente è umido: infatti in questo caso la resistività della cinghia diminuisce e quando la tensione del terminale sale oltre un certo valore, la corrente fluente longitudinalmente lungo la cinghia, in senso opposto al suo moto, verso la puleggia di massa, risulta uguale alla corrente depositata sulla cinghia stessa, e quindi al terminale non giungono più cariche. Perciò si raggiunge al terminale una situazione di equilibrio.

Per questo motivo i generatori vengono inseriti in un gas compresso.

Se al terminale giungesse solo un continuo flusso di corrente, la sua tensione, data dalla carica accumulata su di esso fratto la capacità rispetto a massa ($V = \frac{Q}{C}$), continuerebbe a crescere sino al raggiungimento delle condizioni di scarica.

Per questo motivo, soprattutto nei generatori ad alta tensione, c'è sempre un carico resistivo che provvede a produrre tensioni intermedie necessarie per una buona ripartizione dei potenziali. Se si vuole mantenere costante la tensione del terminale, la corrente di carica deve essere uguale a quella che fluisce nel partitore sommato ad altri carichi eventualmente connessi al terminale (ad esempio quello del fascio di particelle accelerate).

All'interno del terminale, quindi, gli ioni attraversano un sottilissimo foglio di carbonio – di spessore pari a 1 μ m-, detto "stripper" (fig.36) che, pur assorbendo una piccola parte del fascio, è in grado di spogliare gli ioni rimanenti di un elevato numero di elettroni (fino a $q=10-20$, ciò dipende dal tipo e dall'energia sin allora acquisita dallo ione accelerato) e di far proseguire la corsa degli ioni, ora carichi positivamente, fino ad farli uscire dall'altra

⁴⁰ $E = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Farad/m = permeabilità del vuoto.

parte del terminale di alta tensione (sempre a carica positiva) per una forza, a questo punto, repulsiva tra ioni e terminale. Le particelle, perciò, subiscono una seconda accelerazione (da cui il nome "Tandem") nella seconda metà dell'acceleratore. In ragione dell'alto stato di carica, l'energia $E = q \cdot V$, acquistata nella seconda parte del tandem è di gran lunga superiore a quella acquistata nella prima metà.

In particolare, se gli elettroni persi nella interazione con lo stripper sono ϕ , l'energia cinetica finale degli ioni del fascio sarà: $T_{fin} = eV + \phi eV = (\phi + 1)eV$.

LA CAVITÀ RISONANTE

Se il fascio deve essere ulteriormente accelerato viene condotto, con gli elementi ottici - che tratteremo più avanti -, all'acceleratore ALPI (Acceleratore Lineare Per Ioni) che è composto da cavità acceleranti che operano in regime di superconduttività.

Il regime di superconduttività si riferisce alla capacità di alcuni metalli che, al di sotto una certa temperatura (T_c , temperatura critica) molto prossima allo zero assoluto ($T_0 = -273^\circ\text{C}$), sono in grado di offrire una resistenza praticamente nulla alle correnti continue e una resistenza bassissima alle correnti alternate, come quelle delle cavità acceleranti. Inoltre, il regime di superconduttività permette di ottenere campi elettromagnetici massimi all'interno delle cavità acceleranti molto più elevati rispetto a quelli di una cavità in regime di conduzione normale.

In ALPI le cavità sono realizzate (ovvero ricoperte internamente) in materiale Niobio (Nb), un metallo superconduttivo sotto la temperatura di $T_c = 9,2\text{ K}$ (ovvero $T_c = -264^\circ\text{C}$) e sono a contatto con un bagno di elio (He) liquido.

Le cavità acceleranti di ALPI sono del tipo QWR (Quarter Wave Resonator), di cui uno schema è mostrato in Fig. 11, dalla forma di un tratto di cavo coassiale, cortocircuitato ad un estremo (lato di massimo valore di campo magnetico) e aperto dall'altro (lato di massimo valore di campo elettrico): i pacchetti di ioni attraversano le cavità QWR trasversalmente, nella zona di alto campo elettrico. La frequenza di risonanza di un primo gruppo di cavità è 80 MHz, quella del secondo gruppo 160 MHz.

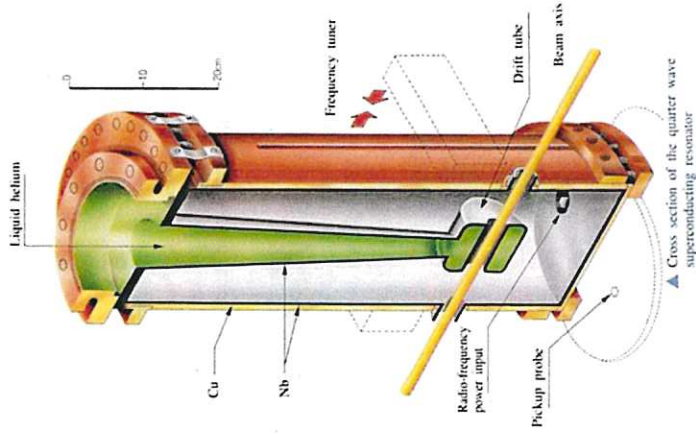


Figura 37 - Spaccato di una cavità risonante del tipo QWR. E' indicato l'asse del fascio (Beam), che attraversa la cavità nei pressi dell'estremità aperta (massimo valore della componente elettrica del campo) del tratto di cavo coassiale che costituisce la cavità

Le cavità di ALPI sono raggruppate a gruppi di 4 in appositi contenitori detti criostatati (Fig. 10, a destra) i quali, tramite il vuoto spinto (che inibisce il trasporto di calore per convezione) e opportuni schermi a temperature intermedia (che scaricano su di essi - raffreddati con l'economico azoto liquido - la maggior parte del trasporto del calore per irraggiamento), riescono ad "isolare" le cavità superfredde dall'esterno a temperatura ambiente. Le cavità, che ricevono He liquido per gravità da un contenitore comune sovrapposto ad esse dentro il criostato, sono sospese alla flangia superiore dello stesso tramite sottili aste in acciaio (un metallo che conduce relativamente male il calore), a loro volta opportunamente intercettate dallo schermo intermedio a temperature di azoto liquido, in modo da ridurre al minimo il trasporto del calore per conduzione.

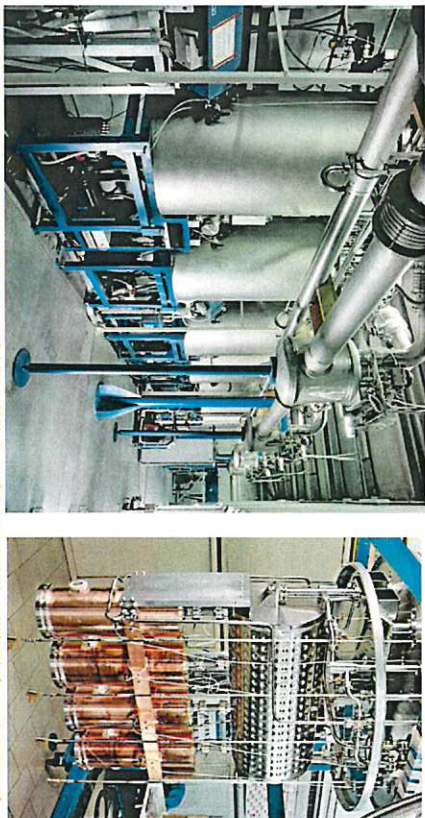


Figura 38 - A sinistra è rappresentato un tratto del lineac ALPI. In evidenza i criostati, recipienti che contengono ed isolano termicamente dall'ambiente circostante le cavità superconduttive (a T=2.69° C). L'interno di un criostato, con 4 cavità acceleranti su base di rame, è mostrato a destra.

Le cavità risonanti sono dispositivi che incrementano l'energia cinetica del fascio sfruttando campi elettrici variabili.

Il loro funzionamento varia come fosse un "ritmo" composto da quattro fasi.

<p>1. $t=0$</p> <p>Si genera un dipolo</p>	<p>2. $t=1/4$</p> <p>Considerando le cariche positive come portatrici di carica: si genera una corrente sulle pareti e, di conseguenza, si crea un campo B.</p>
<p>3. $t=3/4$</p> <p>si comporta come fosse un'energia potenziale: $E \rightarrow EK \rightarrow B \rightarrow EK \rightarrow E$</p>	<p>1. $t=1/4$</p> <p>Si torna alla situazione di partenza</p>

Il tempo che trascorre dal momento 1 al momento 4 prende il nome di: "frequenza di oscillazione". Dove la frequenza del risonatore è definita come:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

dove L è l'induttanza e C è la capacità

f è determinata da fattori geometrici quali l'area, la distanza e il materiale dielettrico se fosse presente, quindi, in questo caso, non se ne deve tener conto in quanto all'interno della cavità vi è il vuoto.

Le cavità possono essere costruite con qualsiasi materiale conduttore, ma, poiché, all'interno di un acceleratore i campi elettrici richiesti sono elevati, esse vengono assemblate con materiali superconduttori raffreddati ad Elio liquido.

Quando il fascio entra in fase con il campo elettrico nelle cavità risonanti viene fortemente accelerato.

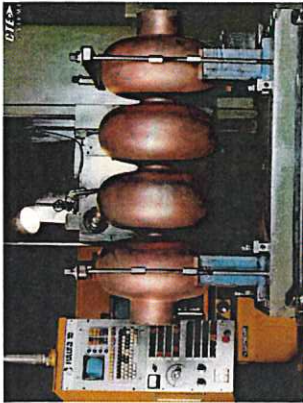


Figura 39 - cavità risonanti

7.3 Gli elementi ottici

All'uscita del TANDEM il fascio viene condotto verso il bersaglio selezionato: un punto di misura, ovvero a un esperimento che si trova in una delle due sale, oppure all'ingresso dell'acceleratore ALPI per essere accelerato ulteriormente.

La traiettoria è garantita dall'utilizzo di magneti ottici, soprattutto dipoli e quadrupoli che, con il loro campo magnetico, permettono di far deviare e curvare il fascio (i dipoli), oppure di mantenerlo collimato, evitando che le particelle, rimbalzando sulle pareti del tubo in cui viaggiano, vengano perse.

IL DIPOLO

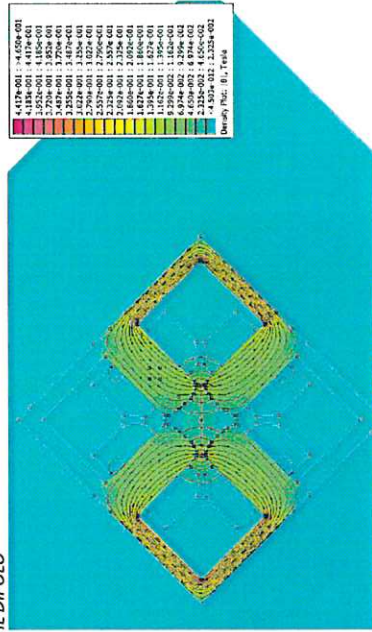


Figura 40 - schema del campo magnetico di un dipolo

Il DIPOLO è un magnete costituito da due bobine in filo di rame cavo entro cui passa dell'acqua per il raffreddamento. Esso è contenuto in un giogo di ferro che permette di mantenere il campo magnetico uniforme e di non disperderlo.

Il dipolo serve a far curvare il fascio, infatti, a seconda del verso il cui scorre la corrente, si genera un campo magnetico che, grazie alla forza di Lorentz (una forza centripeta), fa deviare di un certo angolo il fascio. Si parla, in questo caso, di raggio di curvatura ρ , di questo, però, tratteremo nell'analisi dell'esperimento.

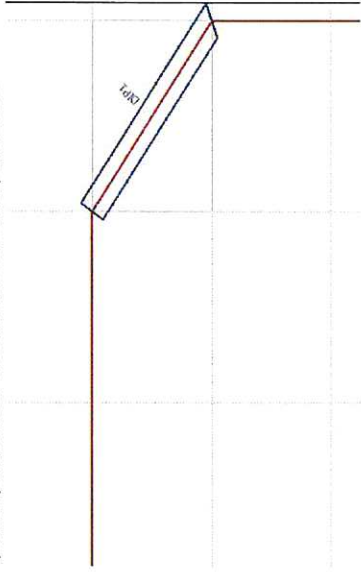


Figura 41 - simulazione dell'utilizzo di un dipolo

Il MAGNETE ANALIZZATORE, invece, è un dipolo che seleziona il fascio, dando un particolare impulso che fa deviare dell'angolo desiderato solo le particelle con la carica desiderata.

Il QUADRUPOLO mantiene le oscillazioni di tutte le particelle intorno alla traiettoria di riferimento, infatti si tratta di un magnete contenuto in un giogo di ferro e costituito da quattro bobine che, generano delle particolari linee di campo magnetico, permettono di focalizzare il fascio sul piano X o sul piano Y.

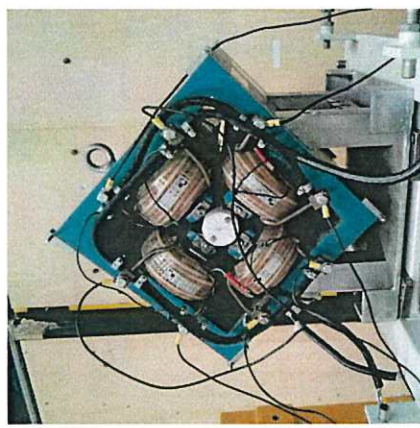


Figura 42 - quadrupolo, INFN, LNL

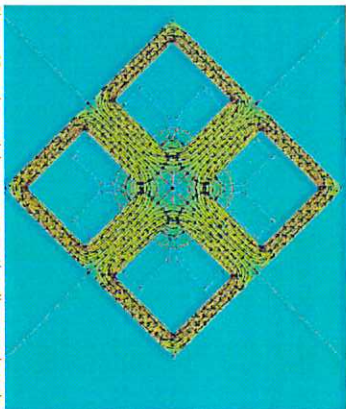


Figura 43 - schema del campo magnetico di un quadrupolo

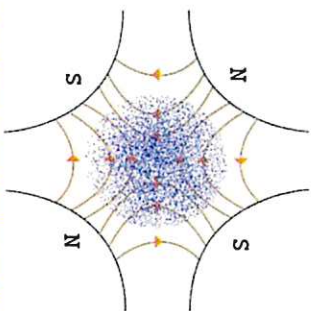


Figura 44 - schema del campo magnetico di un quadrupolo

Il fascio, se ad esso non vengono applicate forze, tende ad aumentare le proprie dimensioni, ovvero le particelle, per repulsione, si allontanano.

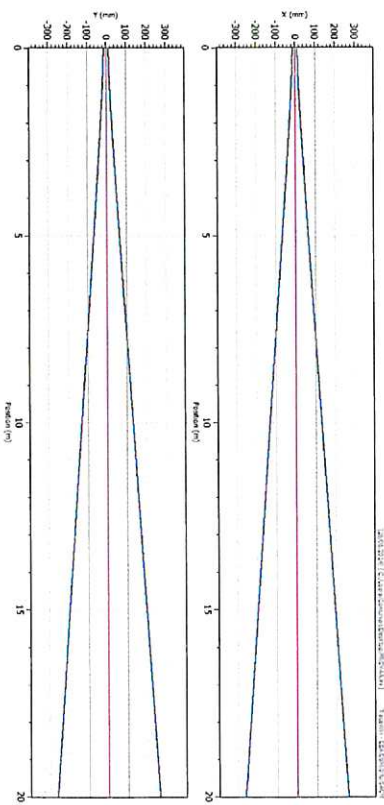


Figura 45 - simulazione del comportamento di un fascio che non subisce focalizzazione

Il fascio, infatti, si caratterizza per:

- **EMITTANZA**, l'area dell'ellisse che racchiude le particelle nei tre piani.
- **ACCETTANZA**, la massima emittanza sostenibile dal tubo, senza perdita di particelle.

Ma la qualità del fascio è inversamente proporzionale all'emittanza, in quanto deve essere il più possibile collimato.

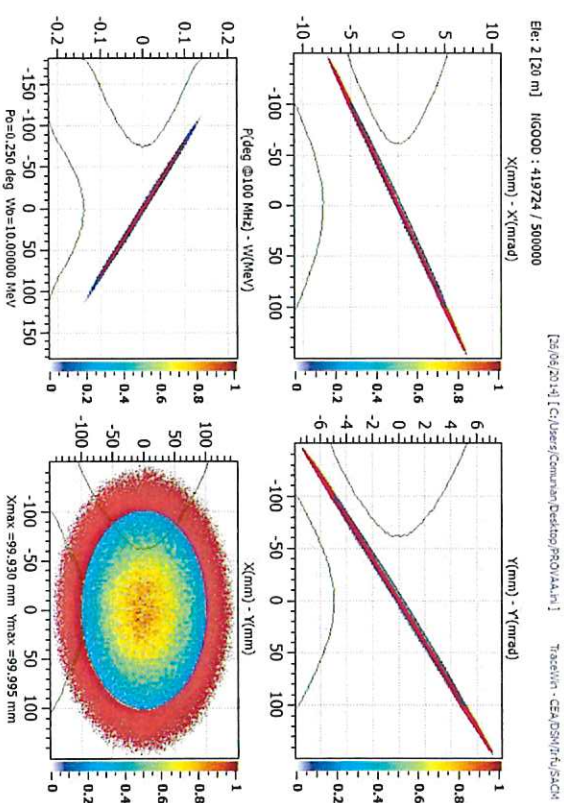


Figura 46 - analisi di emittanza e accettazione di un fascio all'interno di un quadrupolo

Il campo magnetico del quadrupolo interviene per correggere l'aumento dell'emittanza.

Per la forza di Lorentz segue che:

$$F_x = -e \cdot v \cdot B_y$$

$$F_y = -e \cdot v \cdot B_x$$

Con e e v carica e velocità dello ione

La differenza di segno nelle equazioni mostra che un quadrupolo, mentre focalizza nel piano xz , defocalizza in quello yz e viceversa. In questo caso, nel piano yz il quadrupolo agisce come una lente divergente. Spesso, quindi, vengono combinati due o più quadrupoli in modo tale da ottenere un fuoco reale in ambedue le direzioni, orizzontale e verticale. Il campo magnetico è, infatti, nullo al centro e massimo ai poli.

Fondamentale è, perciò, conoscere il **gradiente** del quadrupolo, ovvero la variazione del campo in funzione dello spazio.

$$G = \frac{\partial B_x}{\partial y} = \frac{\partial B_y}{\partial x}$$

Il gradiente è il parametro caratterizzante la forza di focalizzazione o defocalizzazione del quadrupolo.

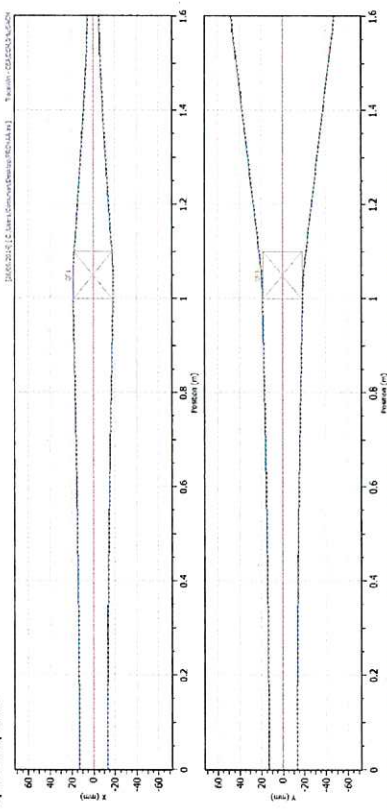


Figura 47 - effetto del campo magnetico di un solo quadrupolo su un fascio. Visione piani x,y

Un altro parametro fondamentale del quadrupolo è la lunghezza efficace, ovvero la distanza lungo l'asse z entro cui il fascio risente, anche prima di entrare materialmente nei magneti, della presenza di B. Si parla, in tal caso, degli effetti di bordo.

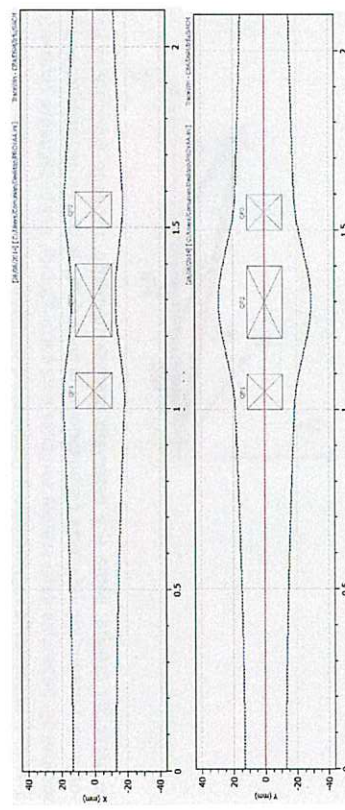


Figura 48 - visione dell'effetto di un tripletto di quadrupoli sui piani x e y

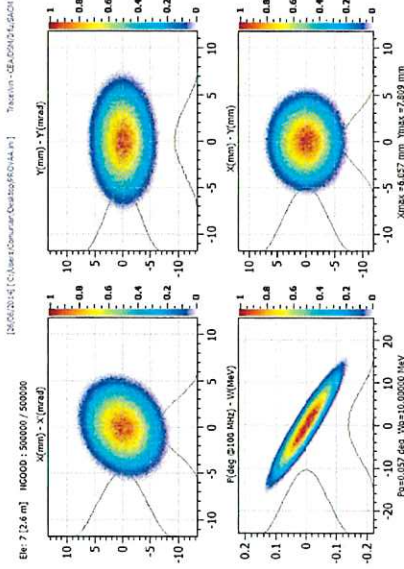


Figura 49 - visione di un fascio mantenuto focalizzato su entrambi i piani x,y

7.4 Gli elementi di diagnostica

In diversi punti dell'acceleratore si trovano delle Faraday Cup (fig.50) che sono inserite per analizzare e bloccare il fascio, dopodiché vengono sollevate per far continuare alle particelle la loro corsa.

Le Faraday Cup sono i principali elementi di diagnostica e consistono in camere in acciaio in cui sono alloggiati dei sensori che misurano la posizione, la larghezza e il profilo del fascio, le particelle perse, ma soprattutto la corrente. Il fascio entra nella Faraday Cup e viene bloccato dal materiale isolante di cui è composta, quindi gli ioni si scaricano e la corrente passa in un condensatore dove delle resistenze ne misurano l'intensità.

Misurando la corrente si può conoscere il numero di ioni o elettroni che sono andati sul rivelatore. Per un fascio ionico continuo, in cui ogni ione ha una carica singola:

$$N = \frac{I}{e}$$

Dove N è il numero di ioni osservati in un tempo t, I è la corrente misurata ed e è la carica elementare.

Nelle Faraday Cup sorge, però, un problema legato al fatto che gli elettroni tendono ad uscire, per questo si è avviato inserendo un secondo schermo che li riflette, altrimenti, se questo non ci fosse, la corrente misurata risulterebbe maggiore.

Infine il fascio viene indirizzato verso l'esperimento, oppure verso ALPI per essere ulteriormente accelerato.



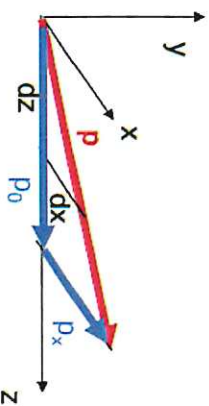
Figura 50 - Faraday Cup per la diagnostica

8. L'ESPERIMENTO

Analisi dell'esperimento di diagnostica effettuato all'INFN di Legnaro

Prima di procedere all'analisi e alla descrizione dell'esperimento, è bene anticipare dei concetti fondamentali per la comprensione dello stesso.

Un fascio consiste in un insieme di particelle cariche che hanno un moto coerente, ovvero tutte con un momento non molto diverso da p_0 e che di muovono lungo l'asse z.



Le particelle cariche, come si è osservato precedentemente, vengono generate in una sorgente a potenziale V da terra e giungono nella linea di fascio con un potenziale pari alla somma dei potenziali della scatola sorgente e da terra. Quindi, per la seguente relazione: $E = q \cdot V$ le particelle raggiungono il Terminal Voltage con un'energia cinetica non nulla.

Definiamo, quindi, un'energia γ ed una velocità β adimensionali come:

$$\gamma = 1 + \frac{E_{cin}}{E_0}$$

γ rappresenta, quindi, il rapporto tra l'energia e l'energia a riposo delle particelle.

Se $\gamma=1$, quindi se il rapporto tra le energie è molto piccolo, si rientra nel caso classico.

$$\text{Con } \begin{cases} E^2 = p^2 c^2 + E_0^2 \\ p = mv \\ E = m_0 \cdot c^2 \cdot \gamma \end{cases}$$

con $p =$ quantità di moto

La velocità β viene definita come:

$$\beta = \frac{p \cdot c}{E} = \frac{v}{c}$$

Quindi, possiamo anche scrivere:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

Se $E_{cin} \gg E_0$ allora E_0 si può trascurare

$$\text{Quindi } E_{cin} = p \cdot c$$

A questo punto si può riscrivere la Forza di Lorentz come:

$$F_L = q \cdot v \cdot B = p \cdot \frac{v}{r}$$

Per le seguenti relazioni:

$$\frac{dp}{dt} = e(\vec{v} \times \vec{B})$$

$$m\gamma \frac{v^2}{r} = evB$$

Forza centrifuga
Forza di Lorentz

$$eBp = mc\gamma\beta = p$$

Rigidità magnetica "Massa" velocità

Definendo $p \cdot \frac{v}{r}$ come impulso.

Quindi: $qB = \frac{p}{r}$, ovvero, $\frac{p}{q} = Br = Bp$ definendo p come la rigidità magnetica del fascio.

Quest'ultimo dato è fondamentale per studiare il raggio di curvatura dei magneti. Infatti la dimensione di Bp è $[\frac{T}{m}]$.

L'ultima predisazione, prima di descrivere l'esperimento, riguarda l'unità di misura del campo magnetico, infatti nella prima parte dell'elaborazione dati viene indicato in Hertz. Infatti, partendo dalla considerazione che la forza di Lorentz è una forza centripeta è, per i ricercatori, utile conoscere il raggio di ciclotrone, ovvero il raggio di curvatura determinato dal magnete. Per calcolarlo si procede nel modo seguente:

$$F = e \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{r} \quad m \cdot v = e \cdot B \cdot r \quad r = \frac{mv}{e \cdot B}$$

Quindi $t = \frac{\pi r}{v} = \frac{\pi m}{eB}$ e t risulta indipendente dalla velocità (e quindi dall'energia) e dal raggio dell'orbita della particella.

Il periodo di rivoluzione $T = 2t$ è dato da:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{eB}$$

Da cui si ricava la frequenza del ciclotrone $f: f = \frac{eB}{2\pi m}$ che è dell'ordine di qualche decina di MHz.

Per questo motivo il campo magnetico viene misurato con un "teslametro", ovvero una sonda che misura la frequenza di Larmor dello spin magnetico di un nucleo di idrogeno, ovvero la frequenza della rotazione della particella quando si trova immersa in un campo magnetico statico esterno.

La frequenza di Larmor dipende da:

- Il rapporto giromagnetico γ , tipico di ogni particella;
- L'intensità del campo magnetico statico.

Quindi, indicando con V la frequenza di Larmor, questa la si può definire come:

$$V = \frac{\gamma B}{2\pi}$$

8.1 accelerazione di un fascio di ioni di azoto

L'esperimento che ho effettuato all'INFN di Legnaro è stato un esperimento di diagnostica, ovvero atto a verificare le variazioni del fascio in accordo con le modifiche apportate ad alcuni parametri delle macchine - come il campo magnetico del dipolo di analisi. Per fare questo ho lavorato nella prima parte dell'acceleratore, ovvero dalla sorgente, al dipolo di analisi, attraverso, quindi, l'acceleratore TANDEM.



Figura 51 - sezione del TANDEM, autocad

Partendo da alcuni valori fissati, quali:

- La tensione del terminale: 141MV;
- La corrente iniziale, quindi precedente all'accelerazione fornita dal TANDEM, nella Faraday Cup 2: 48nA;
- L'energia acquistata dal fascio prima dell'accelerazione: 140,160MeV.

Si lasciava passare il fascio attraverso l'acceleratore facendolo arrivare sino alla Faraday Cup 5 posizionata all'altezza del magnete di analisi, quindi, dalle informazioni ottenute da essa si tarava la frequenza in base a quella che sarebbe potuta essere la richiesta, per un esperimento, di un fascio con una particolare energia o carica.

Per fare questo e verificare quale carica fosse più probabilmente ottenibile variando la corrente del magnete di analisi, e di conseguenza la frequenza del campo magnetico, è stato utilizzato un prospetto fornito da un software creato appositamente per tali pronostici (fig.53).

La probabilità calcolata dal computer è legata al numero di particelle che vengono "strippate": infatti,

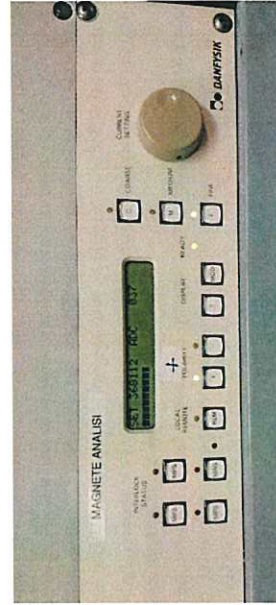


Figura 52 - controller del magnete di analisi

in base all'energia, attraverso lo stripper passa solo una certa quantità di fascio, in quanto alcune particelle vengono perse per gli urti con gli atomi di carbonio.

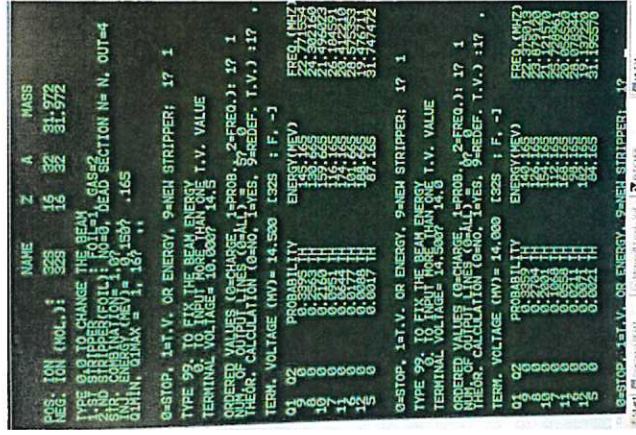


Figura 53 - programma utilizzato per i pronostici

Il risultato ottenuto in seguito alla modifica del campo magnetico del dipolo di analisi veniva verificato nella Faraday Cup 7 che si trova subito dopo il dipolo di analisi. Qui, infatti, si osserva se la carica della maggior parte delle particelle è quella richiesta.

Accade, però, spesso negli esperimenti di diagnostica, che il fascio non arrivi alla Faraday Cup 7, questo può essere dovuto al fatto che il fascio, dopo l'uscita dal TANDEM, non sia ben stabilizzato sbattendo, perciò, sulle "slit", ovvero su delle fenditure la cui larghezza deve essere regolata retroattivamente.

Un altro parametro da regolare attentamente per produrre un fascio corretto è la focalizzazione, infatti, dopo lo Faraday Cup 5 le particelle, che giungono al dipolo con cariche differenti in numero proporzionale alla probabilità di avere ciascuna carica (vedi fig.53 ed elaborazione dati in appendice), vengono curvate in modo diverso perché l'effetto della Forza di Lorentz varia al variare della carica. Per questo motivo si devono allentare le lenti del dipolo.

In tutti i test di diagnostica bisogna essere molto attenti, precisi e veloci, non solo per testare fattori fondamentali per fornire il corretto fascio ai ricercatori che lo richiedono, ma soprattutto perché se le Faraday Cup rimangono abbassate troppo a lungo, lo stripper di carbonio si consuma.

Durante il test da me effettuato è stata regolata la corrente circolante nelle bobine del dipolo di analisi fino ad ottenerne uno la cui frequenza corrispondeva, per le prime tre cifre decimali, a quella dichiarata necessaria dal software di cui sopra per avere un fascio con una determinata carica. Lavorando, quindi, per ottenere delle particolari cariche non si modificava la tensione del terminale – che si sarebbe dovuta variare se si fossero cercate delle energie-, ma sul campo magnetico del dipolo di analisi.

Si impostava anche, di volta in volta, ovvero a seconda delle caratteristiche del fascio che si voleva ottenere, la corrente massima⁴¹ ottenibile nel TANDEM muovendone alcune lenti⁴². Questo passaggio è molto importante, anche perché permette di verificare l'attendibilità – in parte – dei pronostici effettuati dal software in quanto a probabilità maggiore (di avere una carica) dovrebbe corrispondere una maggiore tensione ottenibile dal TANDEM in quanto le condizioni in cui si sta lavorando rendono più facile l'accelerazione di alcuni ioni rispetto ad altri.

Quindi, dopo aver trasformato il campo magnetico del dipolo da Hertz in Tesla, conoscendo il raggio di curvatura del dipolo, è stata calcolata la rigidità magnetica di ogni fascio, Bρ, (a seconda della carica) al fine di sapere come modificare la lente magnetica per la focalizzazione del fascio.

Nella seconda parte dell'esperimento è stata anche calcolata l'efficienza, ovvero la qualità, della trasmissione che consiste nel calcolare quanta corrente viene misurata nella Faraday Cup 7, ovvero nel punto conclusivo del viaggio del fascio, rispetto a quella erogata.

Può essere, poi, interessante calcolare la media delle efficienze per i vari tipi di fascio al fine di conoscere l'andamento della macchina.

Ancora è stata trovata la velocità β del fascio, sapendo che $\beta = \frac{v_{fascio}}{c_{(vel.luce)}}$ e potendo ricavare la velocità del fascio dall'equazione dell'energia cinetica.

In conclusione del lavoro ho costruito un grafico che rappresenta sull'asse delle x la carica delle particelle ottenuta e sull'asse y la corrispondente *energia*, ricavando, quindi, la costante che lega le due grandezze sapendo che il funzionamento dell'acceleratore si basa sull'equazione: $\Delta E = q \cdot v$. Questa costante può essere la misura sperimentale del Terminal Voltage, ovvero, del campo elettrico.

Il secondo grafico costruito riporta sull'asse x la carica e sull'asse y l'efficienza. Ciò che si ottiene potrebbe rappresentare un parametro dell'acceleratore, infatti esso è tarato per un certo tipo di fascio, quindi non può accelerarli tutti in quanto alcuni risulterebbero troppo veloci o, al contrario, troppo lenti.

Ciò significa che l'acceleratore ha efficienza maggiore quando il fascio entra con una determinata velocità nell'acceleratore.

Quest'ultimo grafico può essere sovrapposto a quello rappresentante l'efficienza teorica per osservarne le divergenze.

N.B. Per l'elaborazione dati consultare l'appendice.

⁴¹ Corrente misurata in parti per milione Percentuali

⁴² Nel TANDEM sono presenti due tipi di correttori di traiettoria elettrostatici: gli anelli elettrostatici, inclinati rispetto alla direzione del fascio e gli steerer elettrostatici che sono piani trasversali

9. LE PRIME E LE ULTIME APPLICAZIONI DEGLI ACCELERATORI DI PARTICELLE

Dal radar al fascio di carbonio per curare i tumori, due importanti applicazioni dell'acceleratore di particelle

Come è stato accennato precedentemente, gli acceleratori di particelle sono nati per gli studi sulla materia che compone i corpi e sulla sua origine, ma, grazie al loro sviluppo, sono stati scoperti numerosi altri metodi di applicazione degli stessi, dall'aeronautica, alla sicurezza, alla medicina. Questo ha permesso all'uomo di affinare le proprie tecniche di indagine, la precisione nelle misurazioni (il radar), nonché di predisporre terapie più mirate e precise nella cura di malattie in molti casi difficili da debellare, come il cancro.

9.1 Il radar

La tecnologia che è alla base del funzionamento dell'acceleratore, in particolare delle cavità risonanti, trova una sua prima applicazione nei radar.

Il primo sistema radar vero e proprio fu realizzato nel 1935 dal fisico britannico Robert Watson-Watt, dal Dipartimento Radio del National Physical Laboratory. Questo doveva localizzare gli aerei nemici.

Il termine RADAR, venne coniato nel 1940 dalla marina americana degli USA come acronimo dell'inglese "Radio Detection And Ranging" (individuazione e misurazione di distanza via radio).

Il radar è un sistema che utilizza onde elettromagnetiche appartenenti allo spettro delle onde radio o delle microonde per il rilevamento e la determinazione della posizione e della velocità di oggetti sia fissi sia mobili.

Il funzionamento del radar si fonda sulla riflessione della radiazione elettromagnetica quando questa colpisce un oggetto di dimensioni maggiori della lunghezza d'onda della radiazione incidente. La radiazione di ritorno può essere, quindi, rilevata dall'antenna ricevente dopo un certo tempo t pari al doppio del tempo di propagazione antenna-oggetto. Conoscendo, perciò, la velocità di propagazione dell'onda nel mezzo considerato si può risalire alla distanza e alla posizione del bersaglio.

La dispersione delle onde elettromagnetiche è alla base del funzionamento delle cavità risonanti, per cui si possono considerare i primi radar come i precursori di queste.

Il radar si compone di:

- Un trasmettitore di onde radio;
- Un'antenna che funziona sia da trasmettitore sia da ricevente;
- Duplexer, dispositivo elettronico per disaccoppiare i segnali nella trasmissione e nella ricezione;
- Apparat elettronici di ricezione e rielaborazione del segnale;
- Una base dei tempi, ovvero un dispositivo in grado di misurare intervalli di tempo molto brevi.

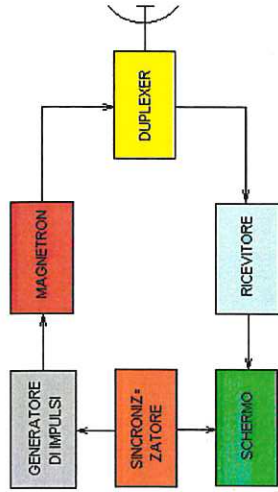


Figura 54 - schema del funzionamento del radar

Un particolare tipo di trasmettitore è il *magnetron*: un classico oscillatore per microonde. Può generare impulsi di onde elettromagnetiche della potenza di alcuni megawatt nel campo di frequenza dei gigahertz. Esso è costituito da un grosso cilindro in metallo forato con un catodo al centro e un anodo che comprende tutta la struttura esterna. Tra anodo e catodo si applicano impulsi di alta tensione che determinano l'emissione di elettroni che dal catodo tendono ad avvicinarsi all'anodo e che la presenza di un intenso campo magnetico assiale costringe a percorrere traiettorie circolari all'interno dei numerosi fori cilindrici della struttura i quali sono opportunamente predisposti in modo da costituire dei risonatori per microonde.

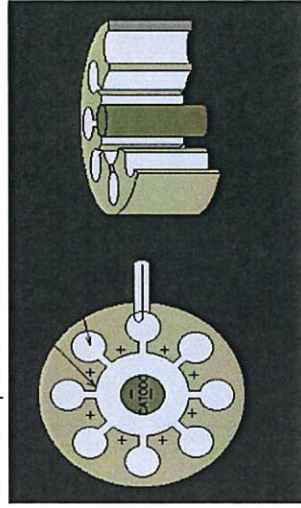


Figura 55 - schema di un magnetron

Gli studi, specialmente britannici, finalizzati al perfezionamento di questo strumento risultarono fondamentali nella Seconda Guerra Mondiale, in particolare durante la Battaglia di Inghilterra del 1940.

9.2 il fascio di particelle e i tumori

In medicina vengono utilizzati ciclotroni che producono delle radiazioni per curare il cancro colpendo direttamente le cellule malate con elevata precisione, infatti la collimazione del fascio rende possibile evitare il danneggiamento dei tessuti sani che circondano quelli malati.

Risultati notevoli sono stati raggiunti dal CNAO (Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica per il trattamento di tumori) di Pavia che dal 2011 utilizza protoni e nuclei atomici (chiamati ioni) soggetti alla forza detta 'nucleare forte' (per questo motivo chiamati adroni, dal greco *adros*, forte) per curare tumori.

Il CNAO nasce dalla pubblicazione, risalente al 1991, del rapporto: "Per un centro di *teleterapia con adroni*" di Ugo Amaldi⁴³ e Giampiero Tosi⁴⁴ nel quale proponevano la costruzione di un nuovo acceleratore che fosse in grado di accelerare sia protoni che ioni leggeri da utilizzare nella nuova terapia dei tumori profondi. Questo studio venne sostenuto e finanziato dall'INFN e, dal 2000, dal Ministro della Salute Umberto Veronesi. La costruzione, iniziata nel 2005, si è completata nel 2010 grazie anche a una collaborazione nazionale e internazionale. A questa prima fase, poi, ne è seguita una di sperimentazioni che ha portato il centro ad essere in grado di curare con successo, già dal settembre del 2011, più di 42 pazienti.

Il 13 novembre del 2012, poi, sono state bombardate, per la prima volta, con ioni di carbonio, le cellule malate di un paziente affetto da un tumore alle ghiandole salivari.

I fasci di ioni di carbonio⁴⁵ e protoni permettono di bruciare con estrema precisione ed efficacia i tumori solidi e radioresistenti, vicini a organi vitali, che non rispondono alle tecniche convenzionali. Questo consente non solo un maggior controllo della malattia, ma soprattutto, un tasso di sopravvivenza maggiore rispetto alle tecniche convenzionali.

Le particelle subatomiche in questione liberano la maggior parte della loro energia solo all'interno della massa del tumore, recando, così, un danno più intenso al bersaglio tumorale senza danneggiare (se non in minima parte) gli organi e i tessuti circostanti.

Gli ioni di carbonio, poi, sono più precisi ed efficaci dei protoni stessi, quindi riescono a trattare efficacemente i tumori radioresistenti con due o tre minuti di irradiazione e, in media, una decina di sedute dalla durata di 30 minuti ciascuna.

I vantaggi dell'adroterapia sono diversi:

1. Innanzitutto il rilascio selettivo di energia;
2. L'elevata collimazione del fascio di particelle adroniche, anche mentre entra nel materiale biologico. Ciò garantisce un'ulteriore minimizzazione del danno ai tessuti sani.
3. Il fatto che il meccanismo di rilascio dell'energia per gli adroni causa una grande quantità di rotture nei legami chimici presenti nelle macromolecole biologiche, in

⁴³ Ugo Amaldi, fisico delle particelle

⁴⁴ Giampiero Tosi, laureato in fisica medica

⁴⁵ Gli ioni di carbonio sono più potenti dei protoni, per questo si utilizzano per i tumori resistenti ai protoni stessi

particolare nel DNA. Quest'ultimo ha la proprietà di autoripararsi, ma se il numero di legami rotti è eccessivo perde la sua funzione di auto replicarsi e la cellula si inattiva e muore.

Per eseguire l'adroterapia è necessario, innanzitutto, un acceleratore di protoni e/o di ioni che produca dei fasci di queste particelle.



Figura 56 - sincrotrone CNAO

Questo consiste in un sincrotrone⁴⁶ lungo 80 metri e di diametro pari a 25 metri. Nella sua sorgente si trova del plasma formato dagli atomi dei gas, che hanno perso gli elettroni, e che, grazie ai campi magnetici e alle cavità acceleranti, vengono estratti così da poter selezionare i protoni e gli ioni di carbonio. I pacchetti che vengono formati, dopo essere stati preaccelerati attraverso una differenza di potenziale, sono inviati al sincrotrone dove, viaggiando a 30000Km/s vengono accelerati sino a 250MeV (se sono protoni) o a 4800 MeV (in caso di ioni di carbonio).

Quindi, con l'utilizzo di un magnete, nelle sale di trattamento, il fascio viene fatto curvare e diretto dall'alto sulla persona da curare.

Il fascio agisce sulle cellule tumorali con una precisione di 200 micrometri che è resa tale da:

- una sorveglianza continua del paziente per seguire eventuali movimenti del corpo (il respiro, ad esempio) che possono cambiare la posizione del tumore, impiegando telecamere a infrarossi che misurano gli spostamenti tridimensionali;

- due magneti di scansione che, sulla base delle indicazioni del sistema di monitoraggio dei fasci, muovono il "pennello" lungo la sagoma del tumore.

In questo modo sezione per sezione il tumore viene distrutto: il passaggio da una sezione all'altra (più profonda) si ottiene aumentando l'energia del fascio.

Questa terapia, per quanti efficace, non può essere una completa sostituzione della radioterapia convenzionale, *"ma è un'arma in più a disposizione di medici e pazienti che può essere utilizzata in aggiunta o in sostituzione dei trattamenti più tradizionali, siano essi radioterapici, farmacologici o chirurgici: degli oltre 120.000 pazienti che ogni anno vengono sottoposti a radioterapia, si stima che circa il 5 per cento dei casi possa essere curato con i fasci di adroni. L'adroterapia può essere impiegata nella cura dei sarcomi, dei tumori pediatrici e dei tumori al polmone, al pancreas, al fegato, alla prostata, oculari, alle ghiandole salivari, al cervello, al midollo spinale e per alcuni tumori della testa e della zona pelvica"*⁴⁷.

L'adroterapia può essere utilizzata solamente, al momento, per i tumori solidi, non infiltranti e fissi e a tumori rari che non rispondono alla radioterapia convenzionale, quali: infiltranti e fissi e a tumori rari scarsamente responsivi alle tecniche di radioterapia convenzionale. Tra questi: i melanomi dell'uvea, i tumori della base del cranio e della colonna.

Oggi il centro Nazionale di Adroterapia Oncologica (CNAO), sito in Pavia è l'unico centro di adroterapia in Italia che utilizza protoni o ioni carbonio per il trattamento di tumori radioresistenti e tra i primi al mondo insieme a quelli sorti in Giappone e Germania.

⁴⁶ Il sincrotrone del CNAO è un prototipo frutto della ricerca nella fisica delle alte energie, realizzato grazie alla collaborazione dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), del CERN (Svizzera), del GSI (Germania), di IPSC (Francia) e dell'Università di Pavia.

⁴⁷ Sandro Rossi, Segretario Generale e Direttore Tecnico della Fondazione CNAO

APPENDICE

Parte prima – elaborazione dati

FASCIO S²⁻

- Corrente I in Faraday Cup 2= **48nA** (la sorgente è su una piattaforma di 140KV+20KV all'estrazione, per un totale di 160KV)
- Tensione terminale = **14MV**
- Energia = **140,160 MeV**

Dalle informazioni della Faraday Cup 5, si tara una frequenza in base alla richiesta dell'utente di un'energia o di una carica particolare, quindi si focalizza. Il fascio viene focalizzato dai magneti di analisi (DO) – Il campo magnetico è misurato in MHz e per la conversione si utilizza il coefficiente $\gamma = 42.58 \text{MHz/T}$

EFFICIENZA = QUALITÀ DELLA TRASMISSIONE = quanta corrente arriva rispetto a quella erogata

$$\% = \frac{I_{fc7}}{I_{fc7} * Q * \% \text{prob}}$$

Q	PROBABILITÀ (TH)	B(MHz)	I (nA)	B(T)	TRASMISSIONE
6	0.0211	28.078	1.9		
7	0.1068	25.727	12.6		
8	0.2704	23.879	37		
9	0.3359	22.379	50		
10	0.2001	21.121	32		
11	0.0558	20.054	8.5		
12	0.0071	19.136	0.8		

CALCOLO DI $B\rho$

La rigidità magnetica del fascio e si ricava nel modo seguente:

$$F = qv \times B = qvB \text{ (seno}=1) = p(\text{impulso})/r \rightarrow q^*B = p/r \rightarrow p/q = B^*r = B\rho$$

Quindi: calcolare Bp conoscendo:

- La massa della molecola in questione;
- La carica;
- L'Energia cinetica.

$$E_k = \frac{1}{2} mv^2 \quad p = mv \quad \rightarrow \rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2E}{m}}$$

$$B\rho = \frac{p}{q} = \frac{mv \cdot v}{q} = \frac{m \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E}{m}}}{q} = \frac{\sqrt{2 \cdot E \cdot m}}{q}$$

UNITÀ DI MISURA

$$B\rho = \left[\frac{\text{MeV}}{c} \right] * \left[\frac{1}{c} \right] = \left[\frac{\text{MeV}}{c} \right] * \left[\frac{1}{c} \right] = \left[\frac{10^6 \text{ V} \cdot \text{s}}{3 \cdot 10^8 \text{ m}} \right] = \left[\frac{1}{300} * \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{m}} \right]$$

$$[1T] = \left[\frac{N}{A \cdot m} \right] \text{ (da forza di Laplace)} = \left[\frac{Kg}{C \cdot m \cdot s^2} \right] = \left[\frac{Kg}{A \cdot s^2} \right]$$

$$\frac{1 \text{ MeV}}{1e}$$

$$\left[\frac{c}{1e} \right] = 3.336 \cdot 10^{-3} T \cdot m$$

$$B\rho(\text{Larmor}) = 19.153 \text{MHz}$$

ESEMPIO:

CARICA: 8*

Ek = 82 MeV

MASSA: per la massa di ³²S abbiamo la massa in UMA, con Δ= difetto di massa (l'energia di legame dei nucleoni)

$$m = 31,972 \text{ UMA (1UMA} = 931,5 \text{ MeV}/c^2) \rightarrow m \text{ Zolfo} = 31.972 * 931.5 \text{ MeV}/c^2 = 29781.918 \text{ MeV}/c^2$$

$$B\rho = \frac{\sqrt{2 \cdot E \cdot m}}{q} = \frac{\sqrt{2 \cdot 82 \cdot 31.972 \cdot 931.5 \frac{\text{MeV}}{c^2}}}{8 \cdot 1.602 \cdot 10^{-19} C} = 2210.030 \text{ MeV}/c$$

Q	PROBABILITÀ (TH)	B(MHz)	I (nA)	B(T)	TRASMISSIONE
6	0.0211	28.078	1.9		
7	0.1068	25.727	12.6		
8	0.2704	23.879	37		
9	0.3359	22.379	50		
10	0.2001	21.121	32		
11	0.0558	20.054	8.5		
12	0.0071	19.136	0.8		

Una volta calcolato Bp = [T*m], si calcola il B del quadrupolo sapendo il raggio di curvatura, nel nostro caso, è $\rho = 2.05 \text{m}$

Dividendo, perciò, Bp per il raggio di curvatura, ottengo il campo magnetico effettivo in Tesla, ma avendolo sperimentalmente in MHz utilizzo per la conversione γ di Larmor.

Nella seconda parte dell'elaborazione dati si è trovata l'efficienza della trasmissione del fascio.

La formula per calcolarla è la seguente:

$$\eta = \% = \frac{I_{fc7}}{I_{fc2+Q+\%prob}}$$

In questa formula al posto di Q inserisco semplicemente il numero di carica, cioè 8, 9, 10 ecc. perché $8 e \pi^2 \text{ particelle out}$

$$\eta = \% = \frac{1 e \pi^2 \text{ particelle in}}{s} = \frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{I_{fc7}}{I_{fc2}}$$

CALCOLO ENERGIE ED EFFICIENZA TRASMISSIONE

Ricordando che gli errori sono inferiori, in tutti i casi, all'1%, per cui possono essere trascurati.

CALCOLO di B in T data una frequenza
 Con $p = \text{raggio di curvatura} = 2,05 \text{ m}$ e $\gamma = 42,58 \text{ MHz/T}$

Q	PROBABILITÀ (TH)	B (MHz)	I (nA)	B (T)	TRASMISSIONE
8	0,2704	23,879	37	0,5608T	

$$B = \frac{23,879}{42,58} T = 0,5608T$$

$$Bp = \frac{p}{q} = 0,5608 * 2,05 = 1,1496 T * m$$

$$p = Bp * q = 8 * 1,1496 = 9,1968 T * m$$

$$\frac{1 \text{ MeV}}{c} = 3,336 * 10^{-3} T * m \rightarrow 1T * m = \frac{1 \text{ MeV}}{3,336 * 10^{-3} e} \rightarrow p = \frac{Bp * q}{3,336 * 10^{-3} e} * \frac{\text{MeV}}{c} * e = 2,7568 * 10^3 \frac{\text{MeV}}{c}$$

$$p = \sqrt{2 * E * m} \rightarrow E = \frac{p^2}{2m} = \frac{\left(\frac{\text{MeV}}{c}\right)^2}{2m} \rightarrow E = \frac{2,7568^2 * 10^6}{2 * 31,972 * 931,5} = 1,2759 * 10^2 \text{ MeV} = 127,59 \text{ MeV (energia che ha il fascio quando colpisce la Cup?)}$$

EFFICIENZA DELLA TRASMISSIONE

$$\% = \frac{I_{fc7}}{I_{fc2 * Q * \%prob}}$$

$$\eta = \frac{I_{fc7}}{I_{fc2 * Q * \%prob}} = \frac{37}{48 * 8 * 0,2704} = 0,3563 = 35,63\%$$

Q	PROBABILITÀ (TH)	B (MHz)	I (nA)	B (T)	TRASMISSIONE
9	0,3359	22,379	50	0,5255	

$$B = \frac{22,379}{42,58} T = 0,5255T$$

$$Bp = \frac{p}{q} = 0,5255 * 2,05 = 1,0774 T * m$$

$$p = Bp * q = 9 * 1,077 = 9,6966 T * m$$

$$\frac{1 \text{ MeV}}{c} = 3,336 * 10^{-3} T * m \rightarrow 1T * m = \frac{1 \text{ MeV}}{3,336 * 10^{-3} e} \rightarrow p = \frac{Bp * q}{3,336 * 10^{-3} e} * \frac{\text{MeV}}{c} * e = 2,9066 * 10^3 \frac{\text{MeV}}{c}$$

$$p = \sqrt{2 * E * m} \rightarrow E = \frac{p^2}{2m} = \frac{\left(\frac{\text{MeV}}{c}\right)^2}{2m} \rightarrow E = \frac{2,9066^2 * 10^6}{2 * 31,972 * 931,5} = 1,4183 * 10^2 \text{ MeV} = 141,83 \text{ MeV (energia che ha il fascio quando colpisce la Cup?)}$$

EFFICIENZA DELLA TRASMISSIONE

$$\% = \frac{I_{fc7}}{I_{fc2 * Q * \%prob}}$$

$$\eta = \frac{I_{fc7}}{I_{fc2 * Q * \%prob}} = \frac{50}{48 * 9 * 0,3359} = 0,3445 = 34,45\%$$

Q	PROBABILITÀ (TH)	B (MHz)	I (nA)	B (T)	TRASMISSIONE
10	0,2001	21,121	32	0,4960T	

$$B = \frac{21,121}{42,58} T = 0,4960T$$

$$Bp = \frac{p}{q} = 0,4960 * 2,05 = 1,0168 T * m$$

$$p = Bp * q = 10 * 1,0168 = 10,1686 T * m$$

$$\frac{1 \text{ MeV}}{c} = 3,336 * 10^{-3} T * m \rightarrow 1T * m = \frac{1 \text{ MeV}}{3,336 * 10^{-3} e} \rightarrow p = \frac{Bp * q}{3,336 * 10^{-3} e} * \frac{\text{MeV}}{c} * e = 3,0481 * 10^3 \frac{\text{MeV}}{c}$$

$$p = \sqrt{2 * E * m} \rightarrow E = \frac{p^2}{2m} = \frac{\left(\frac{\text{MeV}}{c}\right)^2}{2m} \rightarrow E = \frac{3,0481^2 * 10^6}{2 * 31,972 * 931,5} = 1,5598 * 10^2 \text{ MeV} = 155,98 \text{ MeV (energia che ha il fascio quando colpisce la Cup?)}$$

EFFICIENZA DELLA TRASMISSIONE

$$\% = \frac{I_{fc7}}{I_{fc2 * Q * \%prob}}$$

$$\eta = \frac{Ifc7}{Ifc2 \cdot Q \cdot \%prob} = \frac{32}{48 \cdot 10 \cdot 0.2001} = 0.3331 = 33.32\%$$

Q	PROBABILITÀ (TH)	B(MHz)	I (nA)	B(T)	TRASMISSIONE
7	0.1068	25.727	12.6	0.6042 T	

$$B = \frac{25.727}{42.58} T = 0.6042 T$$

$$B\rho = \frac{p}{q} = 0.6042 \cdot 2.05 = 1.3861 T^*m$$

$$p = B\rho \cdot q = 7 \cdot 1.3861 = 8.6703 T^*m$$

$$\frac{1MeV}{c} = 3.336 \cdot 10^{-3} T^*m \rightarrow 1T^*m = \frac{1MeV}{c} \cdot \frac{3.336 \cdot 10^{-3} e}{e} \rightarrow p = \frac{B\rho \cdot q}{3.336 \cdot 10^{-3} e} \cdot \frac{MeV}{c} = 2.5990 \cdot 10^3 \frac{MeV}{c}$$

$$p = \sqrt{2 \cdot E \cdot m} \rightarrow E = \frac{p^2}{2m} = \frac{(2.5990 \cdot 10^3)^2}{2 \cdot 31.972 \cdot 931.5} \rightarrow E = 1.1340 \cdot 10^2 MeV = 113.40 MeV \text{ (energia che ha il fascio quando colpisce la Cup7)}$$

EFFICIENZA DELLA TRASMISSIONE

$$\% = \frac{Ifc7}{Ifc2 \cdot Q \cdot \%prob}$$

$$\eta = \frac{Ifc7}{Ifc2 \cdot Q \cdot \%prob} = \frac{12.6}{48 \cdot 7 \cdot 0.1068} = 0.3511 = 35.11\%$$

Q	PROBABILITÀ (TH)	B(MHz)	I (nA)	B(T)	TRASMISSIONE
11	0.0558	20.054	8.5	0.4709 T	

$$B = \frac{20.054}{42.58} T = 0.4709 T$$

$$B\rho = \frac{p}{q} = 0.4709 \cdot 2.05 = 0.9654 T^*m$$

$$p = B\rho \cdot q = 11 \cdot 0.9654 = 10.6204 T^*m$$

$$\frac{1MeV}{c} = 3.336 \cdot 10^{-3} T^*m \rightarrow 1T^*m = \frac{1MeV}{c} \cdot \frac{3.336 \cdot 10^{-3} e}{e} \rightarrow p = \frac{B\rho \cdot q}{3.336 \cdot 10^{-3} e} \cdot \frac{MeV}{c} = 3.1835 \cdot 10^3 \frac{MeV}{c}$$

$$p = \sqrt{2 \cdot E \cdot m} \rightarrow E = \frac{p^2}{2m} = \frac{(3.1835 \cdot 10^3)^2}{2 \cdot 31.972 \cdot 931.5} \rightarrow E = 1.7015 \cdot 10^2 MeV = 170.15 MeV \text{ (energia che ha il fascio quando colpisce la Cup7)}$$

EFFICIENZA DELLA TRASMISSIONE

$$\% = \frac{Ifc7}{Ifc2 \cdot Q \cdot \%prob}$$

$$\eta = \frac{Ifc7}{Ifc2 \cdot Q \cdot \%prob} = \frac{8.5}{48 \cdot 11 \cdot 0.0558} = 0.2885 = 28.85\%$$

Q	PROBABILITÀ (TH)	B(MHz)	I (nA)	B(T)	TRASMISSIONE
6	0.0211	28.078	1.9	0.6594 T	

$$B = \frac{28.078}{42.58} T = 0.6594 T$$

$$B\rho = \frac{p}{q} = 0.6594 \cdot 2.05 = 1.3518 T^*m$$

$$p = B\rho \cdot q = 6 \cdot 1.3518 = 8.1108 T^*m$$

$$\frac{1MeV}{c} = 3.336 \cdot 10^{-3} T^*m \rightarrow 1T^*m = \frac{1MeV}{c} \cdot \frac{3.336 \cdot 10^{-3} e}{e} \rightarrow p = \frac{B\rho \cdot q}{3.336 \cdot 10^{-3} e} \cdot \frac{MeV}{c} = 2.4313 \cdot 10^3 \frac{MeV}{c}$$

$$p = \sqrt{2 \cdot E \cdot m} \rightarrow E = \frac{p^2}{2m} = \frac{(2.4313 \cdot 10^3)^2}{2 \cdot 31.972 \cdot 931.5} \rightarrow E = 99.185 MeV \text{ (energia che ha il fascio quando colpisce la Cup7)}$$

EFFICIENZA DELLA TRASMISSIONE

$$\% = \frac{Ifc7}{Ifc2 \cdot Q \cdot \%prob}$$

$$\eta = \frac{Ifc7}{Ifc2 \cdot Q \cdot \%prob} = \frac{1.9}{48 \cdot 6 \cdot 0.0211} = 0.3126 = 31.27\%$$

Q	PROBABILITÀ (TH)	B(MHz)	I (nA)	B(T)	TRASMISSIONE
12	0.0071	19.136	0.8	0.4494 T	

$$B = \frac{19.136}{42.58} T = 0.4494 T$$

$$B\rho = \frac{p}{q} = 0.4494 \cdot 2.05 = 0.9212 T^*m$$

$$p = Bp^*q = 12 * 0.9212 = 11.0555 T^*m$$

$$\frac{1MeV}{e} = 3.336 * 10^{-3} T^*m \rightarrow IT^*m = \frac{1MeV}{c} \rightarrow p = \frac{Bp^*q}{c} * \frac{MeV}{e} = \frac{e}{c} * 3.3139 * 10^{\frac{MeV}{e}}$$

$$p = \sqrt{2 * e * E * \pi} \rightarrow E = \frac{p^2}{2m} = \left(\frac{MeV}{c}\right)^2 \rightarrow E = \frac{3.3139^2 * 10^4}{2 * 31.972 * 9315} = 194.38 \text{ MeV (energia che ha il fascio quando colpisce la Cup7)}$$

EFFICIENZA DELLA TRASMISSIONE

$$\% = \frac{I f c^7}{I f c^2 * Q * \%prob}$$

$$\eta = \frac{I f c^7}{I f c^2 * Q * \%prob} = \frac{0.8}{48 * 12 * 0.0071} = 0.1956 = 19.56\%$$

È INTERESSANTE CALCOLARE LA MEDIA DELLE EFFICIENZE:

$$\eta = \frac{0.3563 + 0.3445 + 0.3331 + 0.3511 + 0.2885 + 0.3126 + 0.1956}{6} = 0.3042 = 30.42\%$$

Si può anche calcolare la **velocità β del fascio**, sapendo che $\beta = \frac{v \text{ fascio}}{c \text{ (velocità)}}$.
Per ricavare la velocità del fascio, in questo caso, si deve ricorrere all'energia cinetica:
 $\Delta E = v f^2 - v i^2$

e, conoscendo la massa del fascio, posso ricavarli v_i .

CARICA	Ek in (MeV)	Massa fascio (MeV/c^2)	v (iniziale)	Ek fascio (MeV)	V fascio (m/s)	Velocità fascio β
6	140.160	29781.918	0,0970	99,24	0,081636	2,72E-10
7	140.160	29781.918	0,0970	113,41	0,08727	2,91E-10
8	140.160	29781.918	0,0970	127,59	0,092565	3,09E-10
9	140.160	29781.918	0,0970	141,85	0,097601	3,25E-10
10	140.160	29781.918	0,0970	155,99	0,10235	3,41E-10
11	140.160	29781.918	0,0970	170,16	0,106897	3,56E-10
12	140.160	29781.918	0,0970	184,39	0,111277	3,71E-10

Parte seconda – calcoli e grafici

1. Fare un grafico con $\ln x$ la carica e in y l'energia, quindi trovare la costante che le lega, sapendo che la macchina usa l'equazione: $\Delta E = qV$. La costante può essere la misura sperimentale del TERMINAL VOLTAGE, ovvero, di fatto, del campo elettrico.

CARICA Q	ENERGIA (MeV)
6	99,24
7	113,41
8	127,59
9	141,85
10	155,99
11	170,16
12	184,39

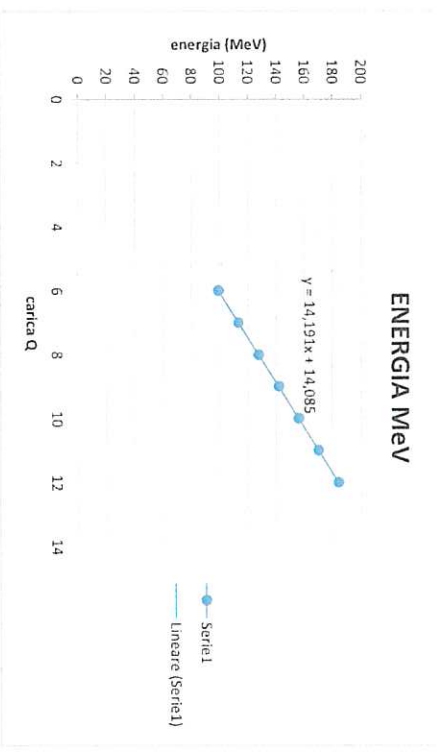


GRAFICO 1 – l'energia in funzione della carica

2. Fare un grafico con in x la carica e in y l'efficienza. Ciò che ottengo potrebbe essere un parametro dell'acceleratore. Infatti l'acceleratore è tarato per un certo tipo di fascio, quindi non può accelerarli tutti, in quanto risulterebbero o troppo lenti o troppo veloci.
L'acceleratore ha efficienza maggiore quando il fascio entra con una certa velocità, questo si lega con il discorso della specificità dell'acceleratore (non può accelerare tutti i tipi di fascio).
Successivamente, quindi, sovrapporre al grafico 2 il grafico dell'efficienza teorica.

CARICA Q	η	Probabilità Teorica (TH)
6	0,3127	0,0211
7	0,3511	0,1068
8	0,3563	0,2704
9	0,3446	0,3359
10	0,3332	0,2001
11	0,2885	0,0558
12	0,1956	0,0071

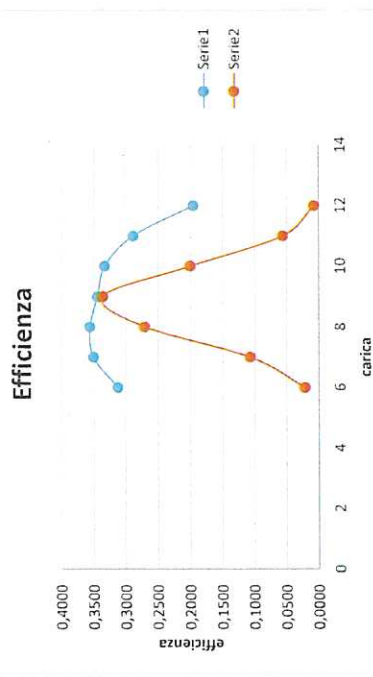
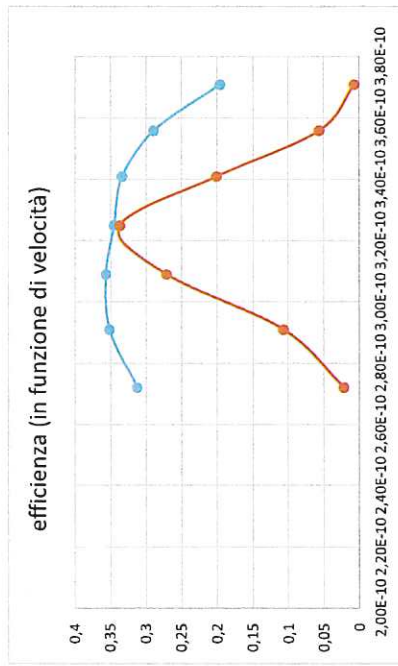


GRAFICO 2 – sovrapposizione grafico efficienza risultante dai dati con quello dell'efficienza teorica

GRAFICO 3 l'efficienza in funzione della velocità

VELOCITÀ β	η	prob. Teorica (TH)
2,72E-10	0,3127	0,0211
2,91E-10	0,3511	0,1068
3,09E-10	0,3563	0,2704
3,25E-10	0,3446	0,3359
3,41E-10	0,3332	0,2001
3,56E-10	0,2885	0,0558
3,71E-10	0,1956	0,0071



Il picco sarebbe stato più stretto se l'efficienza fosse stata maggiore. Confrontando le ordinate di cariche corrispondenti osservo che, nel mio caso, sembra che tutti i punti - tranne uno che coincide quasi con il dato teorico - indichino una maggiore efficienza dell'acceleratore rispetto alle supposizioni teoriche. Si può notare, inoltre, che per certe velocità β l'acceleratore è più efficiente. La macchina accelerante, infatti, è costituita da piatti di condensatore equidistanti, aventi, però, ampiezze diverse, che si succedono, normalmente, allargandosi per seguire l'accelerazione del fascio; ma queste distanze sono scelte dal costruttore, per questo l'acceleratore non accelera efficientemente tutti i tipi di fascio: se l'energia del fascio è troppo alta o troppo bassa rispetto alle caratteristiche della macchina si perde in un gap e, perciò, non viene accelerata in modo favorevole.

BIBLIOGRAFIA

- "Accelerators AND Beams: TOOLS of Discovery and Innovation". Presentazione della American Physical Society
- ALLEGORIA, rivista quadrimestrale. Palermo, G. B. Palumbo Editore. Anno IX, n°25, gennaio-aprile 1997. "Franz Kafka, Il risveglio di Gregor", PLANIGIANI G., pagg. 120-140
- BARRILI R., *L'alba del contemporaneo. L'arte europeo da Füssli a Delacroix. Milano, Feltrinelli*, quarta edizione 2013, *Introduzione e pagg. 194-224*
- ENGELS F., *Dietetica della Natura*, a cura di Togliatti P., et alii, I classici del marxismo, Roma, Edizione Rinascita, 1950, pp.32-55
- HEGEL G. W. F., *Enciclopedia delle scienze filosofiche in compendio*. Bari, Editori Laterza, 1994. Sezione "Filosofia della Natura", capp. 308-309- 312- 313 – 314 – 315 – 317- 323- 324 – 325
- KAFKA F., *La Metamorfosi e altri racconti*. Milano, Oscar Mondadori, 2011. Traduzione a cura di Ervino Pocar
- LUCREZIO, *De Rerum Natura*, a cura di MILANESE G., introduzione di Emanuele Narducci, Oscar Mondadori, 1992. Introduzione
- MALAMUD E., *Fermilab and University of Nevada*, Reno. *Accelerators AND Beams: TOOLS of Discovery and Innovation*. 2013
- MAXWELL J. C., a cura di Evandro Egazzi, *Trattato di elettricità e magnetismo*, vol I-II, Torino, Unione tipografico-editrice torinese, 1973. *Introduzione*
- PESCE G., *Guerra attraverso l'etere*. Modena, S.T.E.M. MUCCHI, 1978. *Introduzione*
- PURCELL E. M., traduzione di D. Candini, P. Cecchi, F. Mazzetti, T. Montanari, *La fisica di Berkeley. Elettricità e magnetismo*, Bologna, Zanichelli, 1971
- QUERCIA I. F., et alii, *Gli acceleratori di particelle*, Rocca San Casciano, Universale Cappelli, 1962, *capp: Introduzione- acceleratori elettrostatici – acceleratori TANDEM*
- Libro richiuto
- VARRA V., "Introduzione a Hege", Roma-Bari, Laterza 1988, pag.117

SITOGRAFIA

- http://archiviositorio.corriere.it/1996/giugno/14/QUANDO_ARTE_PRESSE_SCOSSA_co_0_96061413631.shtml.....consultato a gennaio 2015
- <http://www.edscuola.it/archivio/re/stmael.html>.....consultato a gennaio 2015
- <http://www.isifloriani.it/documenti/docnews/storia%20Elett.%20Verbana.pdf>.....consultato a gennaio 2015
- <http://users.ilibero.it/31tr/prova/fisica.htm>.....consultato a febbraio 2015
- http://www.ba.infn.it/~depalma/lezioni/faraday_induttanza.pdf.....consultato a febbraio 2015
- <http://www.pd.infn.it/~carlini/rv/Slides/Acc1.pdf>.....consultato a febbraio 2015
- http://www.ge.infn.it/~convl/doc/didattica/radioattivita/lezioni/lez11_acceleratori.pdf.....consultato a febbraio 2015
- http://www.lafisica.info/hc_lacceleratore_di_particelle.html.....consultato ad a marzo 2015
- http://www.infn.it/edu/stageinf/2013/acceleratore2013_1.pdf.....consultato a marzo 2015
- <http://www.inl.infn.it/>.....consultato a marzo 2015
- <http://www.cnao.it/>.....consultato ad aprile 2015
- <https://statomentale.wordpress.com/2012/05/29/la-metamorfosi-lincubo-nella-vita-quotidiana-di-kafka-il-rifiuto-del-se-nascosto/>.....consultato ad aprile 2015
- <http://adlibitum.oats.inaf.it/maio/metamorfosi.pdf>.....consultato ad aprile 2015
- http://www.scritturalimnante.it/kafka/racconti/meta_int.htm.....consultato ad aprile 2015
- <https://statomentale.wordpress.com/2012/05/29/la-metamorfosi-lincubo-nella-vita-quotidiana-di-kafka-il-rifiuto-del-se-nascosto/>.....consultato ad aprile 2015
- <http://adlibitum.oats.inaf.it/maio/metamorfosi.pdf>.....consultato ad aprile 2015
- <http://defaste.alkervista.org/lucrezio/1.htm>.....consultato ad aprile 2015
- <https://www.elettra.trieste.it>.....consultato ad aprile 2015
- <http://home.web.cern.ch/topics/large-hadron-collider>.....consultato ad aprile 2015
- http://www.enau.it/portal/page/portal/PortaleENAV/Home/ChiSiamo?CurrentPath=enav/it/chiSiamo/organizzazione_territoriale/funzionamento_radar.....consultato a maggio 2015

REFERENZE FOTOGRAFICHE

Figura 1 - Georg Wilhelm Friedrich Hegel. www.sqpp.com	12
Figura 2 - Friedrich Engels. www.plamarta-bs.it	16
Figura 3 - il risveglio di Gregor. www.rodani.ch	18
Figura 4 - William Turner, Autoritratto 1799. www.william-turner.org	22
Figura 5 - Barche olandesi durante una tempesta. www.palazzospinelli.com	23
Figura 6 - Il molo di Calais. www.australia.lireporter.com	24
Figura 7 - Pioggia, vapore e velocità. www.bramarte.it	25
Figura 8 - Fermilab, Illinois. American Physical Society publication	27
Figura 9 - LHC, CERN, Ginevra. American Physical Society publication	27
Figura 10 - proiezione grafica dello scontro tra due fasci all'interno del LHC. Archivio personale	28
Figura 11 - proiezione grafica dello scontro tra due fasci all'interno del LHC. Archivio personale	28
Figura 12 - Acceleratore lineare Van de Graaf a stadio singolo da 2 MeV, aperto per la manutenzione. (1960). www.wikipedia.it	29
Figura 13 - ricostruzione computerizzata di un acceleratore lineare. www.archivio-panorama.it	30
Figura 14 - The Large Hadron Collider. CERN.....	31
Figura 15 - schema dell'LHC. www.ee.washington.edu	31
Figura 16 - quadrupolo, INFN. Foto personale	32
Figura 17 - tabella particelle elementari. Archivio personale	32
Figura 18 - nascita dell'universo dal Big Bang, si può osservare dove lavora il LHC. www.lnf.infn.it	33
Figura 19 - generatore Cockcroft-Walton. www.thesaltedslug.blogspot.com	34
Figura 20 - TANDEM, Laboratori di Legnaro. www.lnf.infn.it	34
Figura 21 - Tank. www.lnf.infn.it	35
Figura 22 - Ciclotrone di Lawrence. www.mineman.org	37
Figura 23 - schema del ciclotrone. Archivio personale	36
Figura 24 - Elettra, Trieste. www.elettra.trieste.it	37
Figura 25 - linee di luce dell'Elettra. www.elettra.trieste.it	37
Figura 26 - modello computerizzato di sincrotrone. www.wikipedia.it	38
Figura 27 - struttura di quadrupoli e sestupoli. www.danfysik.com	38
Figura 28 - interno dell'Elettra. www.elettra.trieste.it	39
Figura 29 - sincrotrone del CNAO. www.lnf.infn.it	39
Figura 30 - un esperimento al LNL. www.lnf.infn.it	40
Figura 31 - XTU TANDEM, LNL. Foto personale	43
Figura 32 - struttura del TANDEM. Enciclopedia Britannica	44
Figura 33 - Schema del percorso del fascio dal Tandem ad ALPI e alle sale sperimentali. www.lnf.infn.it	44
Figura 34 - schema della sorgente di ioni. Archivio personale	45
Figura 35 - funzionamento di una sorgente. Archivio personale	45
Figura 36 - Schema di funzionamento del tandem. www.lnf.infn.it	46
Figura 37 - Spaccato di una cavità risonante del tipo QWR. www.lnf.infn.it	49
Figura 38 - A sinistra è rappresentato un tratto del linac ALPI, L'interno di un criostato, con 4 cavità acceleranti su base di rame, è mostrato a destra. www.lnf.infn.it	50
Figura 39 - cavità risonanti. www.cristisemi.com	52
Figura 40 - schema del campo magnetico di un dipolo. Archivio personale	52
Figura 41 - simulazione dell'utilizzo di un dipolo. Archivio personale	53
Figura 42 - quadrupolo, INFN, LNL. Archivio personale	53
Figura 43 - schema del campo magnetico di un quadrupolo. Archivio personale	54
Figura 44 - schema del campo magnetico di un quadrupolo. Archivio personale	54
Figura 45 - simulazione del comportamento di un fascio che non subisce focalizzazione. Archivio personale	54
Figura 46 - analisi di emittanza e accettazione di un fascio all'interno di un quadrupolo. Archivio personale	55

Figura 47 - effetto del campo magnetico di un solo quadrupolo su un fascio. Visione piani x,y. Archivio personale	56
Figura 48 - visione dell'effetto di un tripletto di quadrupoli sui piani x e y. Archivio personale	56
Figura 49 - visione di un fascio mantenuto focalizzato su entrambi i piani x,y. Archivio personale	57
Figura 50 - Faraday Cup per la diagnostica. www.beamimaging.com	60
Figura 51 - sezione del TANDEM, autocad. Archivio personale	60
Figura 52 - controller del magnete di analisi. Archivio personale	61
Figura 53 - programma utilizzato per i pronostici. Archivio personale	61
Figura 54 - schema del funzionamento di un radar.....	64
Figura 55 - schema di un magnetron.....	64
Figura 56 - sincrotrone CNAO. www.cnao.it	66

