

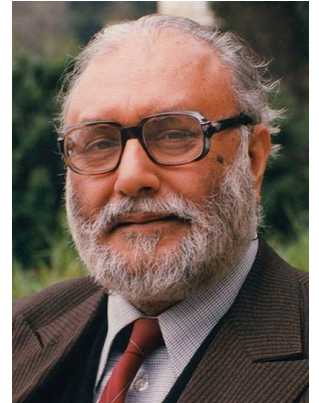
Ullah Sami, 5°E, 2019/2020

Elaborato di fisica-matematica

Parla del grande fisico punjabi Mohammad Abdus Salam e di come egli giunse all'unificazione elettrodebole

BIOGRAFIA DI ABDUS SALAM

Fisico teorico pakistano, ottenne il PhD nel 1952 all'Università di Cambridge. Dopo un triennio trascorso a Lahore, dal 1957 fu professore di fisica teorica all'Imperial College of Science and Technology di Londra. Nel 1964 fondò l'International Center for Theoretical Physics di Trieste, con l'intento prevalente di favorire la formazione di giovani ricercatori. Le sue ricerche si sono concentrate sulla descrizione del comportamento e delle proprietà delle particelle elementari. Per i suoi contributi fondamentali in questo settore ricevette il premio Nobel per la Fisica nel 1979, assieme a Sheldon Glashow e Steven Weinberg. E' stato molto sensibile ai problemi della diffusione della cultura scientifica a livello internazionale, operando intensamente per far avanzare la ricerca nei paesi in via di sviluppo.



IL CONCETTO DI UNIFICAZIONE IN FISICA

Inizierò dando un'idea della varietà di concetti unificanti che sono stati usati in fisica dall'inizio degli sforzi per determinare quali siano le entità elementari e il tentativo di unificare alcune delle forze della natura tra queste entità elementari.

Sappiamo che lo sviluppo storico della Fisica in genere è andato di pari passo con il tentativo di unificare ambiti molto diversi della scienza:

1) Unificazione della meccanica terrestre con la meccanica celeste.

In questo contesto il primo a esprimersi fu Al-Biruni, che visse in Afghanistan intorno al 973 d.C. Al-Biruni fu il primo a dirlo esplicitamente che i fenomeni fisici sul Sole, La Terra e la Luna obbediscono alle stesse leggi. Questa idea semplice è la base di tutta la scienza come la conosciamo oggi. Questo è stato indipendentemente dichiarato e dimostrato da Galileo seicento anni dopo. Galileo usò il suo telescopio per osservare le ombre proiettate da montagne sulla luna. Correlando la direzione delle ombre con la direzione del luce solare, è stato in grado di affermare che le leggi di creazione delle ombre era la stessa sulla Luna che

sulla terra. Questa è stata la prima dimostrazione del principio fondamentale - ora noto come "Simmetria galileiana" - che ha affermato l'universalità delle leggi fisiche. La prossima persona da menzionare in questo contesto è Isaac Newton, il quale intorno al 1680 affermò che la forza di gravità "terrestre" (che fa cadere le mele al terreno, e che secondo Newton era una forza universale) era la stessa della gravità "celeste" (la forza che mantiene i pianeti in movimento attorno al Sole). Tale forza è a lungo raggio, perciò i suoi effetti possono essere avvertiti a qualsiasi distanza, sebbene attenuata dalla distanza tra i due oggetti "gravitanti" coinvolti. Newton ha introdotto una nuova costante fondamentale della natura, G , che caratterizza la forza gravitazionale. La gravità è sempre attraente in contrasto con le altre forze fondamentali che, come vedremo, possono essere repulsive o attraenti. Questo dà alla gravità il vantaggio in quanto la forza si somma sempre.

2) Unificazione dei fenomeni elettrici, magnetici e l'ottica

All'inizio del diciannovesimo secolo luce, elettricità e magnetismo erano considerati tre fenomeni indipendenti. L'interesse per l'ottica era giustificato dalla sua applicazione alla produzione di strumenti ottici, i fenomeni elettrici e magnetici potevano essere interessanti per gli scienziati ma non avevano applicazioni pratiche. L'unificazione dell'elettricità e il magnetismo inizia con Oersted, Ampère e Faraday, conclusasi con "La sintesi di Maxwell" di elettricità, magnetismo e luce. Questa "sintesi di Maxwell" è uno dei più grandi traguardi raggiunti in fisica, perché non solo unificò i fenomeni elettrici e magnetici, ma permise di sviluppare l'intera teoria delle onde elettromagnetiche, inclusa la luce. Inoltre Maxwell incluse, un campo finora indipendente della fisica, l'ottica nell'elettromagnetismo.

3) Unificazione della teoria gravitazionale con l'analisi della geometria dello spazio-tempo

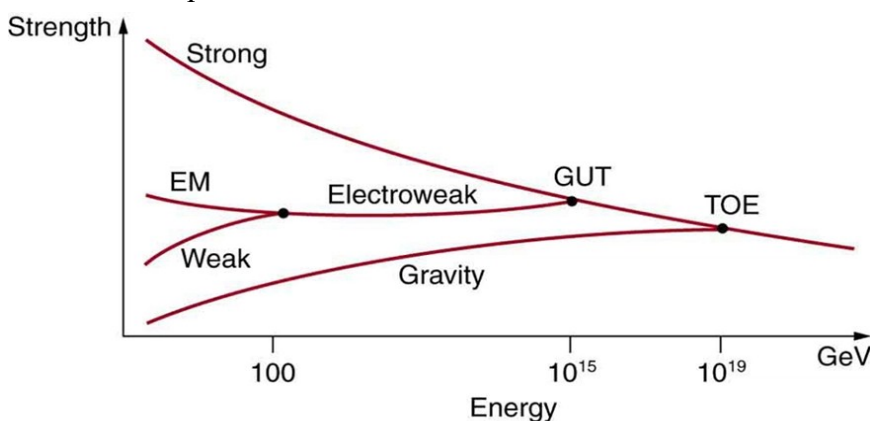
I pianeti sono in moto intorno al sole perché, nello spazio incurvato dalla fortissima gravità dell'astro, essi seguono le geodetiche della sua geometria non euclidea, che non sono linee rette. Einstein giunge a questa conclusione togliendo di mezzo qualunque interazione reciproca: il pianeta non segue una traiettoria ellittica perché è attratto dal Sole, ma perché quest'ultimo con la sua massa deforma la geometria dello spazio-tempo, e nella nuova geometria la geodetica non è più una linea retta. In assenza di forze, secondo il Principio di Inerzia, il pianeta continua a seguire una geodetica dello spazio-tempo, ma essa ora è curvilinea e non più rettilinea. Tutto questo si può sintetizzare efficacemente affermando che

Albert Einstein ha geometrizzato la gravitazione universale, trasformandola da una descrizione dinamica (cioè sotto forma di forza) ad una puramente geometrica.

Possiamo perciò affermare che anche la Fisica del XXI secolo ha come uno dei scopi principali la descrizione della varietà dei fenomeni in modo unificato, attraverso una chiave comune di interpretazione. Nel corso del XX secolo, il panorama delle forze conosciute era notevolmente mutato rispetto al secolo precedente, quando la coesione dei corpi, la gravità, la forza elettrica e la forza magnetica erano ritenute le quattro forze fondamentali della natura, con la scoperta della struttura interna dell'atomo e l'esplorazione sempre più profonda della struttura nucleare si arrivò alla formulazione di quattro forze fondamentali:

1. La **forza gravitazionale** è comune a tutta la materia : tutti i corpi materiali si attirano reciprocamente.
2. La **forza elettromagnetica** è prodotta dalle cariche elettriche : essa è sia attrattiva che repulsiva.
3. La **forza nucleare debole** agisce all'interno dei nuclei atomici : essa è responsabile della radioattività.
4. La **forza nucleare forte** agisce all'interno dei nuclei atomici : essa tiene assieme protoni e neutroni.

La teoria della gravitazione universale di Newton descriveva estremamente bene i moti dei pianeti attorno al sole e la teoria dell'elettromagnetismo di Maxwell spiegava con grande precisione tutti i fenomeni elettromagnetici noti, inoltre il concetto di campo introdotto da Faraday descriveva l'interazione tra i corpi in termine di perturbazione dello spazio, che può essere descritto in funzione di alcune grandezze. La teoria dei campi venne riformulata da Feynman in un contesto quantistico relativistico e l'interazione elettromagnetica venne spiegata attraverso lo scambio tra due corpi di una particella intermedia, chiamata mediatore di forza o quanto di forza o bosone vettore, la cui massa risulta inversamente proporzionale



alla distanza di interazione. Il successo della teoria dei campi nello spiegare i fenomeni osservati ha fatto sì che sia stata presa a prototipo per le altre interazioni tra particelle elementari e la

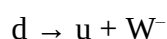
prima a essere spiegata in termini di quanto mediatore è stata la forza nucleare forte. Il bosone vettore della forza nucleare forte venne identificato con i pioni π^+ , π^- e π^0 , che presentano una massa considerevole rispetto al mediatore della forza elettromagnetica, in quanto la forza nucleare forte è a corto raggio.

TEORIA ELETTRODEBOLE

Nella seconda metà del novecento si iniziò a ipotizzare l'estensione della teoria quantistica dei campi anche alla forza nucleare debole e in quanto quest'ultima presenta un raggio ancora più piccolo il quanto mediatore dovrebbe avere una massa dell'ordine delle decine di GeV/c^2 . Queste ipotetiche particelle furono introdotte nel 1968, quando il pakistano Abdus Salam e gli americani Sheldon Lee Glashow e Steven Weinberg proposero la **teoria elettrodebole**, che vuole unificare la forza debole e quella elettromagnetica in un'unica interazione, detta forza elettrodebole: fu il primo riuscito tentativo di unificare tra di loro due delle quattro forze fondamentali della natura. Le cariche deboli sono strettamente collegate alle cariche elettromagnetiche, anche se sembrano tanto più piccole. In realtà non lo sono, se le confrontiamo con attenzione a piccolissima distanza (10^{18} metri) l'intensità dell'interazione debole è comparabile a quella dell'interazione elettromagnetica. Invece a una distanza 30 volte superiore l'intensità dell'interazione debole è molto minore dell'altra.

I bosoni vettori che mediano il decadimento beta vennero battezzati W^\pm (dall'inglese "Weak Interaction"), Inoltre i tre fisici suddetti postularono l'esistenza di un terzo bosone vettore, il bosone Z_0 , che era stato predetto fin dal 1958 dal fisico brasiliano José Leite Lopes (1918-2006). Queste tre particelle sono oggi conosciute complessivamente con il nome di astenoni (dal greco "asthenos", "debole").

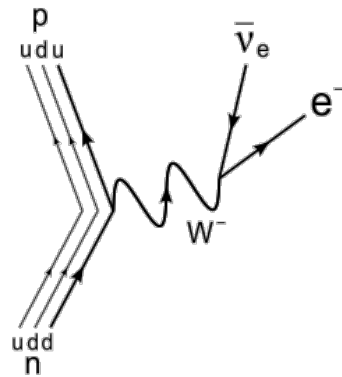
I processi mediati da W^+ e W^- si dicono processi di corrente di carica debole, in quanto gli astenoni possono aumentare o diminuire di un'unità la carica elettrica della particella generata dal processo rispetto a quella della particella iniziale; essi possono inoltre cambiare il sapore dei quark coinvolti. Invece i processi in cui interviene Z_0 sono detti processi di corrente debole neutra e non implicano né un cambiamento di carica elettrica né di sapore dei quark. Gli astenoni W rendono possibile il decadimento beta dei neutroni del nucleo atomico. Sappiamo che il neutrone è formato da due quark down e un quark up (d d u) e il protone da due quark up e un quark down (u u d). Un quark down cambia sapore e diventa un quark up con l'emissione di un astenone W^- :



la quale a sua volta decade immediatamente in un elettrone e un antineutrino elettronico:

$$W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$$

Ecco il diagramma di Feynman che descrive il decadimento beta:



I processi che coinvolgono Z₀, lasciando inalterata la carica e il sapore delle particelle, sono di più difficile osservazione e richiedono l'utilizzo di grandi acceleratori di particelle e sofisticati rivelatori. Tale astenone ha alcune caratteristiche analoghe a quelle del fotone, ed è per questo che ad alte energie, dell'ordine dei 100 GeV, le due forze si accoppiano diventando una sola.

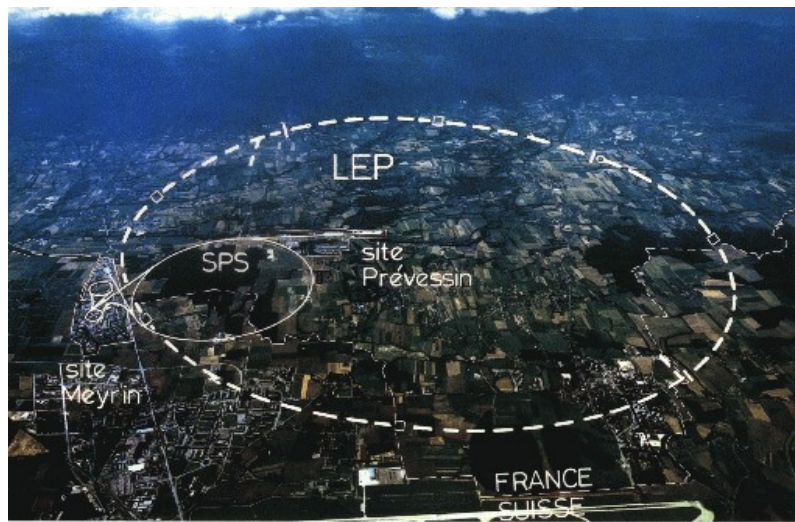
CONFERMA SPERIMENTALE

I risultati del rivelatore Gargamelle al CERN fornirono la prima valida conferma della teoria elettrodebole, e Glashow, Weinberg e Salam ricevettero il Premio Nobel per la Fisica nel 1979. Il fatto che gli astenoni W[±] e Z₀ siano molto massicci fu uno dei principali ostacoli alla loro osservazione diretta, che è stata possibile solo in seguito alla costruzione di acceleratori abbastanza potenti da raggiungere le energie necessarie alla loro produzione.

I W[±] furono scoperti nel gennaio del 1983 grazie all'utilizzo dell'acceleratore SPS (Super Proton Synchrotron) del CERN ad opera di Carlo Rubbia; pochi mesi più tardi avvenne l'osservazione di Z₀. Tali risultati furono possibili grazie all'introduzione da parte di Simon van der Meer della tecnica del raffreddamento stocastico, e la scoperta fu così sensazionale che Rubbia e van Der Meer furono insigniti del Premio Nobel per la Fisica già nel 1984.

La successiva costruzione di collisori elettrone-positrone come il LEP del CERN alla fine degli anni ottanta del secolo scorso ha permesso una più elevata produzione degli astenoni W[±] e Z₀ e dunque uno studio più approfondito delle loro proprietà. Il LEP ha operato al CERN di Ginevra a partire dal 1989. Era un anello di accumulazione circolare, di 27 chilometri di circonferenza, costruito in un tunnel sotterraneo al confine tra Svizzera e Francia, presso Meyrin e Preveessin, che collideva elettroni e positroni. È stato disattivato nel

2000 e successivamente rimosso per fare posto al nuovo Large Hadron Collider (LHC). Il LEP si basava, come tutti i grandi acceleratori circolari del CERN, sulla tecnologia del sincrotrone, unita al principio dell'anello di collisione materia-antimateria proposto da Bruno Touschek nel 1960. Il progetto di base della gigantesca macchina era lo stesso del suo pionieristico anello AdA, costruito nel 1962, pur con le ovvie complicazioni dovute alla scala enormemente superiore. I risultati degli esperimenti di LEP hanno consentito di effettuare misure di precisione e di verificare con accuratezza molte delle previsioni del Modello Standard. Tra le misure più importanti, la massa del bosone Z e del bosone W, e la determinazione del numero di neutrini leggeri. Oggi infatti sappiamo che i W^\pm hanno una massa di circa $80,4 \text{ GeV}/c^2$, mentre Z_0 di $91,2 \text{ GeV}/c^2$; entrambi hanno spin 1, come il fotone, e una emivita molto breve, pari a circa $3 \times 10^{-25} \text{ s}$.



FUNZIONAMENTO DEL CICLOTRONE

Il ciclotrone è formato da due strutture cave a forma di D, e per questo dette in gergo "dees". Al centro di queste strutture vi è una sorgente di particelle elettricamente cariche, diciamo positivamente. All'inizio uno dei due dees è carico positivamente e l'altro negativamente, per cui la particella sarà attratta verso quest'ultimo. È presente un intenso campo magnetico B perpendicolare alla superficie dei due dees, per cui la particella carica q , in moto con velocità v , avverte una forza detta forza di Lorentz, pari a:

$$F_L = q v B$$

1 Schema che mostra l'area occupata dal LEP.
 fonte: <https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/history/lep-e.html>

La forza di Lorentz è perpendicolare sia al campo magnetico che alla velocità della particella, dunque anche l'accelerazione subita dalla particella lo è. Ma l'unico moto in cui l'accelerazione è perpendicolare alla velocità è il moto circolare uniforme. Di conseguenza, una volta entrata nel dee negativo, la particella è curvata lungo una semicirconferenza all'interno di esso, se il dee in questione restasse negativo, la particella non ne uscirebbe di certo. Ma, se nell'istante in cui esce il dee diventa positivo e l'altro si carica negativamente, la particella è espulsa dal primo dee ed attirata dentro il secondo; questa forza elettrica la fa accelerare. Ma se la velocità di ingresso nel secondo dee è aumentata, è aumentato anche il raggio della sua traiettoria circolare. Infatti, la forza centripeta F_C avvertita dalla particella è pari alla forza di Lorentz F_L sopra scritta, e quindi vale l'equazione:

$$m \frac{v^2}{R} = q v B$$

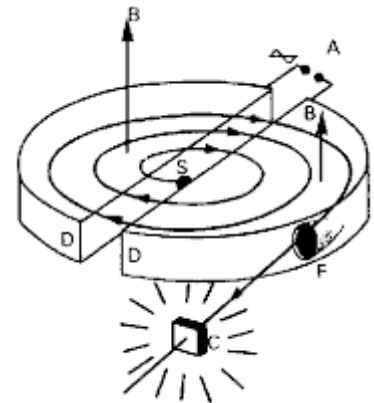
Da cui si ricava il raggio R della traiettoria:

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

Come si vede, tale raggio è direttamente proporzionale alla velocità; se dunque la velocità è aumentata del 10 %, anche il raggio dell'orbita aumenta del 10 %. Dopo una semicirconferenza, la particella arriva al bordo del dee, ed a questo punto la polarità dei due dees si inverte di nuovo. La particella è attratta nell'altro, aumenta di nuovo la sua velocità, di conseguenza aumenta anche il raggio dell'orbita, e così via. In conclusione la particella segue una traiettoria a spirale dall'interno verso l'esterno, fatta di semicirconferenze di raggi crescenti, e quando arriva alla periferia del dispositivo, una volta raggiunta la velocità richiesta, è espulsa ed inviata verso il bersaglio. In via teorica, usando magneti sempre più potenti e dees sempre più grandi, possiamo accelerare la particella fino a farle raggiungere velocità ed energie sempre maggiori. La velocità della particella di moto rettilineo uniforme è data da:

$$v = \frac{2 \pi R}{T}$$

Da qui se ne ricava il periodo T :



$$T = \frac{2 \pi R}{v}$$

Il reciproco del periodo fornisce la frequenza f del moto circolare. Sostituendo il raggio nella formula del periodo si trova facilmente:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{q B}{2 \pi m}$$

Essendo le grandezze a secondo membro della precedente tutte costanti, si direbbe costante anche la frequenza con cui deve cambiare il segno della carica sui dees. Ma se la particella si muove a velocità prossima a quella della luce, per le regole della Relatività Ristretta la massa aumenta con la velocità, e di conseguenza anche la frequenza aumenta. Viene così a mancare il sincronismo tra il moto della particella e l'inversione della polarità sui dees, per cui ad un certo punto la particella si fermerà. Per aggirare questo ostacolo occorre perciò fare ricorso ad un alternatore opportunamente progettato, che non genera corrente alternata con frequenza fissa, ma con frequenza crescente nel tempo: si parla in questo caso di stabilità di fase. Il nome di sincrotrone dato a queste macchine deriva proprio dalla necessità di sincronizzare perfettamente l'inversione della polarità degli elettrodi con il passaggio della particella da un elettrodo all'altro, mentre il nome di ciclotrone fa riferimento alla traiettoria circolare seguita in esso dalle particelle.

ESERCIZIO ILLUSTRATIVO SUL FUNZIONAMENTO DEL CICLOTRONE

Nel primo ciclotrone di Lawrence, che aveva un raggio di circa 10 cm, i protoni venivano iniettati alla velocità di $4,0 \cdot 10^5$ m/s in corrispondenza della separazione tra i due dees ed erano sottoposti ad un campo magnetico di intensità 1.5 T. La differenza di potenziale tra i due dees era di 1800 V.

Quali sono i raggi della prima e della seconda semicirconferenza percorsa dai protoni?

Qual è la frequenza del ciclotrone?

Dati

Raggio ciclotrone: 10 cm

Velocità protoni: $4,0 \cdot 10^5$ m/s

B : 1.5 T

ΔV : 1800 V

m_p : $1,67 \cdot 10^{-27}$ Kg

q: $1,6 \cdot 10^{-19}$ C

$$R = \frac{mv}{qB} = \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 4,0 \cdot 10^5}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,5} = 2,8 \cdot 10^{-3} m$$

$$f = \frac{qB}{2 \pi m} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,5}{2 \pi \cdot 1,67 \cdot 10^{-27}} = 2,3 \cdot 10^7 Hz$$

ACCELERAZIONE COME DERIVATA DELLA VELOCITA'

All'interno del ciclotrone il principio di accelerazione consiste nell'accelerare delle particelle in un piano ortogonale ad un campo magnetico uniforme ed indipendente dal tempo. La traiettoria risultante è una spirale il cui raggio aumenta con l'energia. Il fenomeno dell'accelerazione in matematica può essere visto all'interno del concetto di derivata

In matematica la derivata descrive come varia una funzione $f(x)$ quando varia il suo argomento x . Più in generale, la derivata esprime la variazione di una grandezza rispetto a un'altra. Una funzione di equazione $y=f(x)$, definita in un intorno di c , si dice derivabile in c se $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(c+h) - f(c)}{h}$ esiste ed è finito. Questo limite prende il nome di derivata prima di f in c .

Perciò l'accelerazione è definita dalla relazione: $a = \frac{v(t + \Delta t) - v(t)}{\Delta t}$ che rappresenta il rapporto incrementale della funzione velocità e il limite di questo rapporto quando Δt tende a 0 rappresenta l'accelerazione istantanea .

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{v(t + \Delta t) - v(t)}{\Delta t}$$

APPLICAZIONE TECNOLOGICA

Dopo essersi affermati come strumenti fondamentali per la ricerca di base, da più di vent'anni i ciclotroni hanno assunto un ruolo chiave anche nell'ambito della medicina nucleare. La produzione di radioisotopi per la diagnostica PET tramite target convenzionali e non, è uno dei settori che hanno tratto maggior beneficio dall'introduzione dei ciclotroni, offrendo interessanti prospettive per il futuro. I radiofarmaci vengono prodotti artificialmente in reattori nucleari e acceleratori di particelle. I primi, però, sono sempre meno sfruttabili poiché localizzati in poche aree geografiche ed inoltre, datati e spesso fermi per manutenzione. Diventa sempre più importante disporre di ciclotroni nelle vicinanze delle strutture ospedaliere.

Produzione di radionuclidi emettitori di fotoni singoli

Per la produzione con ciclotrone di radionuclidi che decadono con l'emissione di singoli fotoni sono necessarie macchine a media energia, che permettono di accelerare particelle fino a 35-40 MeV. Data la loro emivita di alcune ore tali radionuclidi possono essere trasportati in una sede d'uso distante dal luogo di produzione. I principali isotopi emittenti fotoni singoli

prodotti con il ciclotrone e utilizzati a scopo diagnostico sono: il Gallio-67 (T_{1/2}= 78ore); il Krypton-81 metastabile (T_{1/2}= 13secondi); l'Indio-111 (T_{1/2}= 67ore); lo Iodio-123 (T_{1/2}= 13ore); lo Xenon-127 (T_{1/2}= 36giorni); il Tallio-201 (T_{1/2}= 73ore).

Questi radionuclidi sono utilizzati come tali o per la marcatura di radiofarmaci impiegati nella rivelazione di processi neoplastici e infezioni, nell'esame della ventilazione polmonare e della perfusione cardiaca.

Produzione di radionuclidi emettitori di positroni

Per la produzione dei radionuclidi emittenti positroni sono sufficienti ciclotroni a bassa energia che permettono di accelerare particelle a 11-17 MeV. Questi radionuclidi, a causa della loro breve emivita, devono essere prodotti nell'ambito della stessa sede d'uso o nelle sue vicinanze, con una parziale eccezione per il Fluoro-18 che con circa due ore di emivita può essere trasportato ed usato anche ad una certa distanza dalla sede di produzione.

I principali radionuclidi emittenti positroni prodotti dal ciclotrone a scopo medico per la diagnostica in vivo sono: Ossigeno-15 (T_{1/2}= 2minuti), Azoto-13 (T_{1/2}= 10minuti); Carbonio-11 (T_{1/2}= 20minuti); Fluoro-18 (T_{1/2}= 110minuti). Questi sono isotopi radioattivi di elementi fondamentali costituenti la materia biologica (ossigeno, carbonio, azoto), mentre il fluoro può sostituire in molte molecole l'idrogeno e i gruppi ossidrilici. Sono usati per la marcatura di radiofarmaci quali aminoacidi (metionina, leucina), enzimi, substrati energetici (glucosio e suoi analoghi), molecole contenenti ossigeno (acqua, monossido di carbonio, anidride carbonica) e impiegati per l'esame di processi biochimici.

Sitografia

<https://www.lnf.infn.it/edu/slides/murtas.pdf>

http://www.fmboschetto.it/didattica/pdf/quattro_forze_fondamentali.pdf

<http://infermieristica.polodidatticopanico.com/wp-content/uploads/sites/2/2016/04Ciclotrone-e-applicazioni.pdf>

<http://www-3.unipv.it/cylena/Tesi/Gabusi.pdf>