

POLITECNICO DI MILANO

Dipartimento di Ingegneria industriale e dell'informazione



Attivazione dell'aria in adroterapia
e dispersione dei radionuclidi nell'ambiente

Relatore: Prof. Stefano Luigi Maria Giulini Castiglioni Agosteo

Correlatore: Dott. Ing. Michele Ferrarini

Tesi di laurea di: Giorgio Garlaschelli

Matricola: 863654

Anno accademico 2018/2019

Riassunto

L'adroterapia è una tecnica di radioterapia che ha lo scopo di danneggiare le cellule tumorali usando un fascio di adroni. Rispetto alle tecniche di radioterapia con fotoni permette di ottenere distribuzioni di dose migliori, in quanto le particelle rilasciano gran parte della loro energia in una regione ristretta all'interno del tessuto, detto picco di Bragg. Inoltre, queste particelle presentano un maggiore RBE (Relative Biological Effectiveness) che comporta un'efficacia maggiore nel danneggiare cellule tumorali radioresistenti. Per posizionare il picco di Bragg alla profondità ideale nel tessuto le particelle vanno accelerate a energie di qualche centinaio di MeV/u. Per far ciò è necessario utilizzare ciclotroni e sincrotroni, in particolare questi ultimi sono usati nel caso si accelerino anche ioni, oltre a protoni.

L'uso di acceleratori per adroterapia, visti i meccanismi d'interazione tra le particelle del fascio primario con l'aria o con i target e le parti metalliche della macchina, comporta la produzione di radionuclidi in aria. In questo lavoro di tesi si è studiata l'attivazione dell'aria durante il funzionamento di una macchina di questo genere e la dispersione dei radionuclidi così prodotti in atmosfera.

Per la stima dell'attivazione si sono svolte simulazioni con il codice Monte Carlo FLUKA (Fassò A.). Si sono innanzitutto determinati i radionuclidi d'interesse prodotti: ^{15}O , ^{13}N , ^{11}C a cui si aggiunge l'analisi del ^{41}Ar , che è stato dimostrato non contribuire in maniera significativa alla dose rilasciata alle persone del pubblico.

Si è esaminato innanzitutto l'attivazione prodotta da un fascio di adroni in aria. Le particelle in esame sono state protoni e ioni di ^4He , ^7Li , ^{12}C e ^{16}O . Per esaminare tale situazione si è provveduto a compiere simulazioni per tutte le particelle ad alcune energie, in modo da coprire il range energetico tipicamente usato in adroterapia.

Dalle simulazioni è emerso che usando protoni si ha un picco nell'attivazione intorno ai 50 MeV, mentre con gli ioni carbonio si ha un andamento crescente dell'attivazione con l'energia. In generale le attivazioni sono dello stesso ordine di grandezza. Tuttavia, ci si aspetta un'attivazione maggiore durante i trattamenti con protoni in quanto sono solitamente impiegate correnti maggiori.

Si è cercato di convalidare i dati appena esposti attraverso un esperimento in cui si è irraggiato un cilindro in PVC, contenente aria e chiuso alle estremità con film di polietilene, con fasci di protoni e ioni carbonio a diverse energie. Le dimensioni del cilindro sono state scelte in modo che i fasci non interagiscano con le pareti interne e al contempo possano compiere un tratto d'aria significativo per la produzione dei radionuclidi in esame. Si è quindi provveduto a misurare l'attività con un rivelatore al germanio iperpuro, la cui efficienza di rivelazione dei fotoni gamma nella situazione in esame è stata stimata attraverso simulazioni Monte Carlo. Ci si è concentrati sul numero di

conteggi con energia di 511keV, infatti una parte significativa di tali conteggi corrisponde ai fotoni emessi per annichilazione dei positroni emessi dai radionuclidi in esame. Si sono confrontati i valori misurati con quelli ottenuti attraverso la simulazione dell'esperimento con il codice FLUKA, e quelli ottenuti a partire dal set di dati delle simulazioni precedenti. In questi due casi si sono considerati solo i radionuclidi emettitori β^+ (^{15}O , ^{13}N , ^{11}C). È emerso che vi è un'ottima corrispondenza tra i dati simulati e quelli calcolati per tutte le particelle a tutte le energie, mentre i dati ottenuti dagli esperimenti hanno un buon accordo nel caso si usi un fascio di protoni. Maggiori discrepanze sono state trovate invece con ioni carbonio. Questo potrebbe essere dovuto sia alle incertezze sperimentali, sia alle ipotesi fatte durante i calcoli e le simulazioni, sia al fatto che il codice Monte Carlo potrebbe presentare incertezze maggiori sulle sezioni d'urto dei processi nucleari che coinvolgono ioni pesanti come proiettili.

Si è poi proseguito compiendo simulazioni per fasci liberi in aria con gli altri ioni. Da tali simulazioni è emerso che l'attività dei radionuclidi prodotti dal fascio con ioni di ossigeno è dello stesso ordine di grandezza di quella con gli ioni carbonio, mentre quelle prodotte da ioni litio ed elio sono confrontabili tra di loro.

Successivamente si è studiata l'attivazione dovuta solo dalla radiazione secondaria prodotta dai fasci di particelle in esame. Per far ciò si è simulato un fascio di particelle che colpisce un target, di rame o polietilene, senza compiere alcun tratto in aria. Il target è posto al centro di una sala riempita d'aria. Si è anche studiata l'influenza delle dimensioni delle sale in cui si trova il target sull'attività prodotta. Dalle simulazioni fatte emerge che quando un fascio impatta su target di rame produce più attività rispetto al caso del target di polietilene, anche se con elementi più pesanti queste differenze tendono ad assottigliarsi. Inoltre, aumentando le dimensioni delle sale aumenta il volume d'aria con cui la radiazione secondaria può interagire, ciò porta ad avere un'attività maggiore per stanze più grandi.

I set di dati ottenuti da tutte le simulazioni precedenti possono essere usati per valutazioni preliminari riguardo all'attivazione prodotta da una macchina per adroterapia. Per studiare, l'impatto dell'utilizzo del modello semplificato in un caso reale è necessario avere a disposizione dati più realistici della situazione in cui la macchina debba essere installata e sulle modalità d'uso. Per questo si è considerato il caso studio del sincrotrone del CNAO e si è studiato quanto la geometria possa influire sui risultati dell'attivazione. Per far ciò si è usata una geometria completa del centro, fornita dal servizio di radioprotezione, e si è simulato l'irraggiamento sia con ioni carbonio che con protoni. Si sono considerati come punti di attivazione dell'aria il tratto che il fascio compie in sala trattamento prima di impattare sul target (o il paziente) e i punti di perdita del fascio tipici del sincrotrone del CNAO. Le percentuali di perdite di questi casi sono state fornite dagli esperti della macchina.

Complessivamente è risultato che le l'attività ottenuta da queste simulazioni risulta circa un terzo di

quella che ci si aspetterebbe con i calcoli basati sui set di dati.

Si è quindi provveduto a produrre un set di dati sull'attivazione di ogni stanza del Centro. Questi dati sono stati poi usati per stimare l'attività prodotta in un anno dal Centro a partire dagli spettri delle particelle accelerate dalla macchina. Tale attività è risultata essere quasi due ordini di grandezza minore di quella supposta come limite iniziale, ciò è dovuto all'uso di correnti minori rispetto a quelle considerate in precedenza.

Si sono infine studiati dei modelli per la dispersione in atmosfera dei contaminanti. Usando sempre come caso studio quello del CNAO, si è cercata una fonte di dati meteo idonea per essere utilizzati in seguito nei modelli di dispersione. Le fonti di dati in esame sono state tre centraline meteo: una interna al Centro, una esterna a qualche centinaio di metri, e una a circa due chilometri dal Centro. Le grandezze considerate sono state quelle richieste dai modelli usati, cioè velocità del vento, direzione del vento e radiazione solare, quest'ultima è stata usata per determinare le classi di stabilità atmosferica. È emerso che per quanto riguarda la direzione del vento e le classi di stabilità non vi sono differenze sostanziali tra le tre centraline, si ha solo una piccola differenza nel rilevare la velocità del vento. Si è quindi scelto di usare i dati forniti dalla centralina CML che si trova a qualche centinaio di metri, in quanto comprendono tutto il 2018.

Per il calcolo delle dispersioni dell'attività e delle dosi ricevute dalle persone del pubblico si è inizialmente fatto uso del software HotSpotHealthPhysicsCodes (Steven Homann, 2014) che usa il modello gaussiano di Pasquill per la dispersione dei contaminanti e il modello di nube semi-infinita per il calcolo delle dosi. Tuttavia, vista la mole di dati da elaborare, si è scelto di sviluppare un codice in MATLAB in grado di usare gli stessi modelli di HotSpot e di dare risultati del tutto analoghi. Con questo codice si sono calcolate le dosi a 150 m dal CNAO usando i dati meteo del 2018 della centralina CML per varie attività prodotte. Come prima ipotesi si è supposta la produzione di un'attività rilasciata costante di 1MBq ogni 5 minuti, si è calcolata la dispersione usando i dati meteo derivanti dalla centralina CML. Così facendo si ottiene una riduzione di dose che varia da un fattore 2 a un fattore 6 rispetto all'ipotesi di considerare sempre un'unica direzione del vento. Si è poi supposta un'attività complessiva pari a quella calcolata con gli spettri delle particelle accelerate nel 2018, in questo caso si ha una riduzione delle dosi anche di un fattore 20 rispetto al caso precedente dovuta alla diversa corrente utilizzata, ciò è coerente con la riduzione di attività data dal nuovo metodo.

Usando il set di dati di attivazione specifico per il sincrotrone del CNAO si è calcolata l'attivazione di ogni singolo spill accelerato nella macchina. Il software di controllo del Centro registra anche data e ora in cui tali spill sono stati accelerati, ciò ha permesso di associare a ciascuno di essi le condizioni meteo nel momento del loro rilascio in atmosfera, supponendo un rilascio immediato. Sono stati così elaborati i più di 250000 spill accelerati nel 2018 e si è stimata una dose annua inferiore al caso precedente di circa il 30%, dovuto al metodo diverso nel calcolo della dispersione.

Possibili sviluppi futuri di questo lavoro potrebbero essere la convalida sperimentale dei dati dell'attivazione in condizioni standard anche per altri fasci di particelle liberi in aria e per la radiazione secondaria. Inoltre, si potrebbero implementare modelli più accurati per la stima della dispersione dei contaminanti in aria e il calcolo delle dosi, soprattutto per somministrazione. In ultimo, il set di dati di attivazione specifico per una determinata geometria potrebbe essere usato per stimare la dose prodotta da ogni singolo spill nel momento in cui vengono accelerati, e, avendo a disposizione i dati meteo in tempo reale, anche la dose rilasciata alle persone del pubblico.

INDICE

| | |
|--|------------|
| Riassunto..... | II |
| Sommario | 11 |
| Abstract | 12 |
| Capitolo 1 | 13 |
| Introduzione..... | 13 |
| 1.1 Reazioni Nucleari e attivazione | 13 |
| 1.2 Attivazione in un acceleratore di particelle | 17 |
| 1.3 Dispersione dei contaminanti | 20 |
| 1.4 Considerazioni di radioprotezione..... | 26 |
| Capitolo 2 | 30 |
| 2.1 L' Adroterapia Oncologica | 30 |
| 2.3 Calcolo dell'attivazione dell'aria e della relativa dose..... | 33 |
| 2.4 Il caso CNAO | 36 |
| 2.5 Sistemi di monitoraggio dell'aria | 44 |
| Capitolo 3 | 47 |
| 3.1 FLUKA..... | 47 |
| 3.2 Simulazioni per fascio libero in aria | 48 |
| 3.3 Esperimenti per fascio libero in aria..... | 52 |
| 3.4 Fasci di ioni liberi in aria | 62 |
| Capitolo 4 | 67 |
| 4.1 Fascio di protoni | 68 |
| 4.2 Fascio di ioni carbonio | 75 |
| 4.3 Fascio di ioni di elio, litio o ossigeno che impatta su target..... | 82 |
| Capitolo 5 | 101 |
| 5.1 La rilevanza della geometria | 101 |

| | |
|--|------------|
| 5.2 Applicazione del set di dati a un caso reale..... | 107 |
| Capitolo 6 | 110 |
| 6.1 Fonte dei dati..... | 110 |
| 6.2 Dispersione dei radionuclidi e calcolo della dose | 114 |
| 6.3 Stima delle dosi in casi reali | 115 |
| Capitolo 7 | 124 |
| 7.1 Conclusioni | 124 |
| 7.2 Sviluppi Futuri..... | 125 |
| Appendice A..... | 126 |
| Appendice B..... | 132 |
| Appendice C..... | 137 |
| Bibliografia..... | 145 |

Indice delle figure

Capitolo 1

| | |
|--|----|
| Figura 1 Tipico andamento dell'attività di un radionuclide. L'irraggiamento inizia al tempo zero e termina al tempo t_{irr} , dopo l'andamento è determinato dal decadimento del radionuclide. | 16 |
| Figura 2 Spettro di neutroni, emessi tra gli 80 e 90 gradi, prodotti da un fascio di ioni carbonio da 400 MeV/u incidenti su target di rame e tungsteno cilindrici (raggio 2.5 cm) e piatti (20x20 cm) (A. Ferrari, 2011)..... | 18 |
| Figura 3 Forme del pennacchio di fumo (a sinistra) in funzione delle condizioni di stabilità atmosferica e del gradiente verticale di temperatura (a destra) (Polvani, 1993) | 22 |
| Figura 4 Concentrazioni di contaminante a 10 metri nel caso si usi il modello a pennacchio semplificato o semisferico. Attività iniziale 4 GBq, velocità del vento 1 m/s. (M. D'Arienzo, 2014) | 25 |

Capitolo 2

| | |
|--|----|
| Figura 1 Curva dose-profondità per un fantoccio d'acqua irraggiato con fasci di diverse particelle (Agosteo, 2018)..... | 30 |
| Figura 2 Sezioni d'urto per neutroni energetici su ossigeno-16 (NEA, 2019)..... | 34 |
| Figura 3 Sezioni d'urto per neutroni energetici su azoto-14 (NEA, 2019) | 34 |
| Figura 4 Sezione trasversale dell'edificio del CNAO in cui si vede chiaramente la netta separazione dell'area tecnica (in cui è posto il sincrotrone e le sale trattamento) e il resto del complesso. (Rossi, 2011)..... | 37 |
| Figura 5 Vista di Pavia dall'alto con il CNAO in evidenza. | 38 |
| Figura 6 L'edificio del CNAO e le altre costruzioni nelle vicinanze. | 38 |
| Figura 7 Schema del sincrotrone installato al CNAO, delle linee per le sale trattamento (in basso) e per la sala sperimentale (a sinistra) | 40 |

Capitolo 3

| | |
|---|----|
| Figura 1 Attività (Bq) dei radionuclidi in funzione dell'energia per una corrente di 10^8 ioni/s..... | 50 |
| Figura 2 Attività (Bq) dei radionuclidi in funzione dell'energia per una corrente di 10^{10} protoni/s. | 51 |
| Figura 3 Setup per l'irraggiamento di un tubo contenente aria e sigillato..... | 53 |
| Figura 4 Esempio Spettro: misura d'attività prodotta dal fascio di protoni a 62 MeV: il picco si trova a 511keV..... | 53 |
| Figura 5 Geometria della simulazione per stimare l'efficienza del rivelatore al germanio. In figura si mostra la sezione del rivelatore (regione verde) con pozzetto (regione grigia) e tubo in misura | 55 |
| Figura 6 Attivazione prodotta da un fascio di ioni carbonio a 115 MeV/u..... | 59 |
| Figura 7 Attivazione prodotta da un fascio di ioni carbonio a 203 MeV/u..... | 59 |
| Figura 8 Attivazione prodotta da un fascio di ioni carbonio a 398 MeV/u..... | 60 |
| Figura 9 Attivazione prodotta da un fascio di protoni a 62 MeV | 60 |
| Figura 10 Attivazione prodotta da un fascio di protoni a 89 MeV | 61 |

| | |
|---|----|
| Figura 11 Attivazione prodotta da un fascio di protoni a 226 MeV | 61 |
| Figura 12 Attività (Bq) dei radionuclidi in funzione dell'energia per una corrente di 10^8 ioni/s nel caso di un fascio di ossigeno-16..... | 63 |
| Figura 13 Attività (Bq) dei radionuclidi in funzione dell'energia per una corrente di 10^9 ioni/s nel caso di un fascio di litio-7..... | 65 |
| Figura 14 Attività prodotta da un fascio di 10^9 ioni/s di elio-4 libero in aria..... | 66 |

Capitolo 4

| | |
|--|----|
| Figura 1 Attività in funzione dell'energia per singoli radionuclidi prodotti da un fascio di protoni con corrente 10^{10} protoni/s incidente su target di rame in una stanza 6x6x6 m..... | 69 |
| Figura 2 Attività in funzione dell'energia prodotta da un fascio di protoni con una corrente di 10^{10} protoni/s su target di polietilene in una stanza 6x6x6 m. | 70 |
| Figura 3 Attività in funzione dell'energia prodotta da un fascio di protoni con corrente di 10^{10} protoni/s su target di rame in sala 20x20x10 m. | 71 |
| Figura 4 Attività in funzione dell'energia prodotta da un fascio di protoni con corrente di 10^{10} protoni/s su target di polietilene in sala 20x20x10 m. | 72 |
| Figura 5 Attività in funzione dell'energia prodotta da un fascio di protoni con corrente di 10^{10} protoni/s su target di rame in sala 40x40x10 m. | 73 |
| Figura 6 Attività in funzione dell'energia prodotta da un fascio di protoni con corrente di 10^{10} protoni/s su target di polietilene in sala 40x40x10 m. | 74 |
| Figura 7 Attività dei radionuclidi prodotti da un fascio di ioni carbonio con corrente 10^8 ioni/s incidente su target di rame in stanza 6x6x6 m. | 76 |
| Figura 8 Attività dei radionuclidi prodotti da un fascio di ioni carbonio con corrente 10^8 ioni/s incidente su target di polietilene in stanza 6x6x6 m. | 77 |
| Figura 9 Attività in funzione dell'energia dei radionuclidi prodotti da un fascio di carbonio con corrente 10^8 ioni/s su target di rame in una stanza di 20x20x10 m..... | 78 |
| Figura 10 Attività in funzione dell'energia dei radionuclidi prodotti da un fascio di carbonio a una corrente di 10^8 ioni/s su target di polietilene in una stanza di 20x20x10 m. | 79 |
| Figura 11 Attività in funzione dell'energia dei radionuclidi prodotti da un fascio di carbonio a una corrente di 10^8 ioni/s su target di rame in una stanza di 40x40x10 m..... | 80 |
| Figura 12 Attività in funzione dell'energia dei radionuclidi prodotti da un fascio di carbonio a una corrente di 10^8 ioni/s su target di polietilene in una stanza di 40x40x10 m. | 82 |
| Figura 13 Attività prodotta da un fascio di ossigeno-16 con corrente 10^8 ioni/s su target di rame in sala 6x6x6 m..... | 83 |
| Figura 14 Attività prodotta da un fascio di ossigeno-16 con corrente 10^8 ioni/s su target di polietilene in sala 6x6x6 m..... | 84 |
| Figura 15 Attività prodotta da un fascio di ossigeno-16 con corrente 10^8 ioni/s su target di rame in sala 20x20x10 m..... | 85 |
| Figura 16 Attività prodotta da un fascio di ossigeno-16 con corrente 10^8 ioni/s su target di polietilene in sala 20x20x10 m..... | 86 |

| | |
|--|-----|
| Figura 17 Attività prodotta da un fascio di ossigeno-16 con corrente 10^8 ioni/s su target di rame in sala 40x40x10 m..... | 87 |
| Figura 18 Attività prodotta da un fascio di ossigeno-16 con corrente 10^8 ioni/s su target di polietilene in sala 40x40x10 m..... | 88 |
| Figura 19 Attività prodotta da un fascio di litio-7 con corrente 10^9 ioni/s su target di rame in sala 6x6x6 m..... | 89 |
| Figura 20 Attività prodotta da un fascio di litio-7 con corrente 10^9 ioni/s che impatta su target di polietilene in stanza 6x6x6 m..... | 90 |
| Figura 21 Attività prodotta da un fascio di litio-7 con corrente 10^9 ioni/s che impatta su target di rame in stanza 20x20x10 m. | 91 |
| Figura 22 Attività prodotta da un fascio di litio-7 con corrente 10^9 ioni/s che impatta su target di polietilene in stanza 20x20x10 m. | 92 |
| Figura 23 Attività prodotta da un fascio di litio-7 con corrente 10^9 ioni/s che impatta su target di rame in stanza 40x40x10 m. | 93 |
| Figura 24 Attività prodotta da un fascio di litio-7 con corrente 10^9 ioni/s che impatta su target di polietilene in stanza 40x40x10 m. | 94 |
| Figura 25 Attività prodotta da un fascio di elio-4 con corrente 10^9 ioni/s su target di rame in sala 6x6x6 m..... | 95 |
| Figura 26 Attività prodotta da un fascio di elio-4 con corrente 10^9 ioni/s su target di polietilene in sala 6x6x6 m..... | 96 |
| Figura 27 Attività prodotta da un fascio di elio-4 con corrente 10^9 ioni/s su target di rame in sala 20x20x10 m..... | 97 |
| Figura 28 Attività prodotta da un fascio di elio-4 con corrente 10^9 ioni/s su target di polietilene in sala 20x20x10 m..... | 98 |
| Figura 29 Attività prodotta da un fascio di elio-4 con corrente 10^9 ioni/s su target di rame in sala 40x40x10 m..... | 99 |
| Figura 30 Attività prodotta da un fascio di elio-4 con corrente 10^9 ioni/s su target di polietilene in sala 40x40x10 m..... | 100 |

Capitolo 5

| | |
|---|-----|
| Figura 1 Una vista della geometria usata per simulare il CNAO. Le regioni in cui è stato fatto lo scoring dei radionuclidi in aria sono: voidtar3 e VOID1 (sala sincrotrone); Sala1, Sala2 e Sala3 (sale trattamento) | 103 |
| Figura 2 Numero di protoni in funzione dell'energia accelerati dal sincrotrone del CNAO nel 2018. | 107 |
| Figura 3 Numero di ioni carbonio in funzione dell'energia accelerati dal sincrotrone del CNAO nel 2018..... | 108 |

Capitolo 6

| | |
|---|-----|
| Figura 1 Disposizione delle centraline dei dati meteo nella città di Pavia. Blu: centralina CNAO; Rosso: centralina CML; Giallo: centralina ARPA. | 110 |
| Figura 2 Frequenze percentuali nelle direzioni dei venti dalle tre fonti di dati..... | 111 |
| Figura 3 Distribuzione delle velocità del vento..... | 112 |
| Figura 4 Distribuzioni delle classi di stabilità. | 113 |
| Figura 5 Rateo di dose calcolato con il metodo numerico di Thykier-Nielsen e con nube semi-infinita come funzione della distanza dalla sorgente (in unità μr) (Thykier-Nielsen, Deme, & Láng, 1995). | 115 |
| Figura 6 Dose calcolata con HotSpot e codice in MATLAB a diversi angoli rispetto la direzione del vento nel caso di rilascio di 1MBq di O-15 in atmosfera di classe D con vento 0.5 m/s. Alcuni punti risultano sovrapposti. | 116 |
| Figura 7 Dose a 150 metri dalla sorgente con attività di 1MBq ogni 5 minuti e dati meteo CMI 2018 a Pavia. | 117 |
| Figura 8 Dose a 150 m dovuta al solo contributo di Ar-41 calcolata partendo dagli spettri. Si suppone un rilascio costante dei radionuclidi nel tempo..... | 118 |
| Figura 9 Dose a 150 metri dalla sorgente con attività prodotta a partire dagli spettri di particelle accelerate al CNAO e dati meteo CMI 2018 a Pavia. | 119 |
| Figura 10 Dose dovuta al solo O-15 prodotto dai singoli spill accelerati al CNAO e rilasciati secondo le condizioni meteo della centralina CML nel 2018..... | 120 |
| Figura 11 Dose dovuta al solo N-13 prodotto dai singoli spill accelerati al CNAO e rilasciati secondo le condizioni meteo della centralina CML nel 2018..... | 121 |
| Figura 12 Dose dovuta al solo C-11 prodotto dai singoli spill accelerati al CNAO e rilasciati secondo le condizioni meteo della centralina CML nel 2018..... | 122 |
| Figura 13 Dose dovuta ai tre radionuclidi in esame prodotti dai singoli spill accelerati al CNAO e rilasciati secondo le condizioni meteo della centralina CML nel 2018..... | 123 |

Indice delle tabelle

Capitolo 1

| | |
|--|----|
| Tabella 1 Classi di stabilità in funzione dell'insolazione e della velocità del vento | 21 |
| Tabella 2 Equazioni per il calcolo dei Coefficienti di dispersione in funzione delle classi di stabilità in contesto urbano e in aperta campagna | 23 |

Capitolo 2

| | |
|--|----|
| Tabella 1 Rese delle particelle secondarie per un fascio di protoni da 250 MeV. | 32 |
| Tabella 2 Rese delle particelle secondarie per un fascio di ioni carbonio da 400 MeV/u..... | 32 |
| Tabella 3 Coefficienti per il calcolo della dose per sommersione e per inalazione. | 36 |
| Tabella 4 Contributi dei nuclidi con $T_{1/2} > 1.5$ minuti all'attività indotta al termine dell'irraggiamento ($t_{irr}=7355$ giorni)..... | 43 |

Capitolo 3

| | |
|---|----|
| Tabella 1 Specifiche delle simulazioni | 49 |
| Tabella 2 Attività (Bq) dei radionuclidi formati con una corrente di 5.5×10^8 ioni/s | 49 |
| Tabella 3 Attività (Bq) dei radionuclidi prodotti con una corrente di 10^8 ioni/s. | 49 |
| Tabella 4 Attività (Bq) per ogni radionuclide per una corrente di 1.375×10^{10} protoni/s. | 50 |
| Tabella 5 Attività (Bq) dei radionuclidi prodotti con una corrente di 10^{10} protoni/s..... | 51 |
| Tabella 6 Specifiche degli irraggiamenti..... | 52 |
| Tabella 7 Tempi di cooling e attività misurate per gamma da 511keVprodotti da un campione d'aria irraggiato con ioni carbonio | 54 |
| Tabella 8 Tempi di cooling e attività misurate per gamma da 511keV prodotti da un campione d'aria irraggiato con protoni..... | 54 |
| Tabella 9 Attività calcolate al termine dell'irraggiamento con ioni carbonio partendo dai dati di Tabella 2. | 56 |
| Tabella 10 Attività calcolate al termine dell'irraggiamento con protoni partendo dai dati di Tabella 4 | 57 |
| Tabella 11 Attività secondo le simulazioni con geometrie analoghe al setup sperimentale con un fascio di ioni carbonio..... | 58 |
| Tabella 12 Attività secondo le simulazioni con geometrie analoghe al setup sperimentale con un fascio di protoni..... | 58 |
| Tabella 13 Specifiche delle simulazioni per ogni ione in esame..... | 62 |
| Tabella 14 Attività (Bq) dei principali radionuclidi formati da un fascio di ioni ossigeno libero in aria con corrente 1.6×10^8 ioni/s | 63 |
| Tabella 15 Attività (Bq) dei principali radionuclidi formati da un fascio di ioni ossigeno libero in aria con corrente 10^8 ioni/s..... | 63 |
| Tabella 16 Attività (Bq) dei principali radionuclidi formati da un fascio di ioni litio libero in aria con corrente 1.11×10^9 ioni/s | 64 |
| Tabella 17 Attività (Bq) dei principali radionuclidi formati da un fascio di ioni litio libero in aria con corrente 10^9 ioni/s..... | 64 |
| Tabella 18 Attività (Bq) dei principali radionuclidi formati da un fascio di ioni elio libero in aria con corrente 2.5×10^9 ioni/s | 65 |
| Tabella 19 Attività (Bq) dei principali radionuclidi formati da un fascio di ioni elio libero in aria con corrente 10^9 ioni/s..... | 66 |

Capitolo 4

| | |
|--|----|
| Tabella 1 Variabili delle simulazioni | 67 |
| Tabella 2 Attività per singoli radionuclidi prodotti da un fascio di protoni con corrente 1.375×10^{10} protoni/s incidente su target di rame in una stanza 6x6x6 m..... | 68 |
| Tabella 3 Attività per singoli radionuclidi prodotti da un fascio di protoni con corrente 10^{10} protoni/s incidente su target di rame in una stanza 6x6x6 m..... | 68 |
| Tabella 4 Attività per singoli radionuclidi prodotti da un fascio di protoni con corrente 1.375×10^{10} protoni/s incidente su target di polietilene in una stanza 6x6x6 m..... | 69 |
| Tabella 5 Attività per singoli radionuclidi prodotti da un fascio di protoni con corrente 10^{10} protoni/s incidente su target di polietilene in una stanza 6x6x6 m..... | 69 |
| Tabella 6 Attività per singolo radionuclide prodotta da un fascio di protoni con corrente 1.375×10^{10} protoni/s su un target di rame in una stanza 20x20x10 m. | 70 |
| Tabella 7 Attività per singolo radionuclide prodotta da un fascio di 10^{10} protoni su un target di rame in una stanza 20x20x10 m..... | 71 |
| Tabella 8 Attività per singolo radionuclide prodotta da un fascio di protoni di corrente 1.375×10^{10} protoni/s su un target di polietilene in una stanza 20x20x10 m..... | 71 |
| Tabella 9 Attività per singolo radionuclide prodotta da un fascio di 10^{10} protoni su un target di polietilene in una stanza di dimensioni 20x20x10 m. | 72 |
| Tabella 10 Attività per singolo radionuclide prodotta da un fascio di 1.375×10^{10} protoni su un target di rame in una stanza di dimensioni 40x40x10 m. | 73 |
| Tabella 11 Attività per singolo radionuclide prodotta da un fascio di 10^{10} protoni su un target di rame in una stanza di dimensioni 40x40x10 m. | 73 |
| Tabella 12 Attività per singolo radionuclide prodotta da un fascio di 1.375×10^{10} protoni su un target di polietilene in una stanza di dimensioni 40x40x10 m. | 74 |
| Tabella 13 Attività per singolo radionuclide prodotta da un fascio di 10^{10} protoni su un target di polietilene in una stanza di dimensioni 40x40x10 m. | 74 |
| Tabella 14 Attività dei radionuclidi prodotti da un fascio di ioni carbonio a corrente $5.5 \cdot 10^8$ ioni/s su target di rame in una stanza di 6x6x6 m..... | 75 |
| Tabella 15 Attività dei radionuclidi prodotti da un fascio di ioni carbonio a corrente $5.5 \cdot 10^8$ ioni/s su target di polietilene in una stanza di 6x6x6 m. | 75 |
| Tabella 16 Attività dei radionuclidi prodotti da un fascio di ioni carbonio con corrente 10^8 ioni/s incidente su target di rame in stanza 6x6x6 m. | 75 |
| Tabella 17 Attività dei radionuclidi prodotti da un fascio di ioni carbonio con corrente 10^8 ioni/s incidente su target di polietilene in stanza 6x6x6 m. | 76 |
| Tabella 18 Attività dei radionuclidi prodotti da un fascio di ioni carbonio con corrente 5.5×10^8 ioni/s incidente su target di polietilene in stanza 20x20x10 m..... | 77 |
| Tabella 19 Attività dei radionuclidi prodotti da un fascio di ioni carbonio ad una corrente di 5.5×10^8 ioni/s su target di polietilene in una stanza 20x20x10 m..... | 78 |
| Tabella 20 Attività dei radionuclidi prodotti da un fascio di carbonio a una corrente di 10^8 ioni/s su target di rame in una stanza di 20x20x10 m..... | 78 |
| Tabella 21 Attività dei radionuclidi prodotti da un fascio di carbonio a una corrente di 10^8 ioni/s su target di polietilene in una stanza di 20x20x10 m. | 79 |
| Tabella 22 Attività per singolo radionuclide prodotta da un fascio di 5.5×10^8 ioni carbonio su un target di rame in una stanza di dimensioni 40x40x10 m. | 80 |
| Tabella 23 Attività dei radionuclidi prodotti da un fascio di carbonio a una corrente di 10^8 ioni/s su target di rame in una stanza di 40x40x10 m..... | 80 |
| Tabella 24 Attività per singolo radionuclide prodotta da un fascio di 5.5×10^8 ioni carbonio su un target di polietilene in una stanza di dimensioni 40x40x10 m. | 81 |

| | |
|---|----|
| Tabella 25 Attività dei radionuclidi prodotti da un fascio di carbonio a una corrente di 10^8 ioni/s su target di polietilene in una stanza di 40x40x10 m. | 81 |
| Tabella 26 Attività prodotta da un fascio di ossigeno-16 con corrente 10^8 ioni/s che impatta su target di rame in stanza 6x6x6 m. | 83 |
| Tabella 27 Attività prodotta da un fascio di ossigeno-16 con corrente 10^8 ioni/s che impatta su target di polietilene in stanza 6x6x6 metri. | 84 |
| Tabella 28 Attività prodotta da un fascio di ossigeno-16 con corrente 10^8 ioni/s che impatta su target di rame in stanza 20x20x10 m. | 85 |
| Tabella 29 Attività prodotta da un fascio di ossigeno-16 con corrente 10^8 ioni/s che impatta su target di polietilene in stanza 20x20x10 m. | 85 |
| Tabella 30 Attività prodotta da un fascio di ossigeno-16 con corrente 10^8 ioni/s che impatta su target di rame in stanza 40x40x10 m. | 86 |
| Tabella 31 Attività prodotta da un fascio di ossigeno-16 con corrente 10^8 ioni/s che impatta su target di polietilene in stanza 40x40x10 m. | 87 |
| Tabella 32 Attività prodotta da un fascio di litio-7 con corrente 10^9 ioni/s che impatta su target di rame in stanza 6x6x6 m. | 89 |
| Tabella 33 Attività prodotta da un fascio di litio-7 con corrente 10^9 ioni/s che impatta su target di polietilene in stanza 6x6x6 m. | 89 |
| Tabella 34 Attività prodotta da un fascio di litio-7 con corrente 10^9 ioni/s che impatta su target di rame in stanza 20x20x10 m. | 90 |
| Tabella 35 Attività prodotta da un fascio di litio-7 con corrente 10^9 ioni/s che impatta su target di polietilene in stanza 20x20x10 m. | 91 |
| Tabella 36 Attività prodotta da un fascio di litio-7 con corrente 10^9 ioni/s che impatta su target di rame in stanza 40x40x10 m. | 92 |
| Tabella 37 Attività prodotta da un fascio di litio-7 con corrente 10^9 ioni/s che impatta su target di polietilene in stanza 40x40x10 m. | 93 |
| Tabella 38 Attività prodotta da un fascio di elio-4 con corrente 10^9 ioni/s che impatta su target di rame in stanza 6x6x6 m. | 94 |
| Tabella 39 Attività prodotta da un fascio di elio-4 con corrente 10^9 ioni/s che impatta su target di polietilene in stanza 6x6x6 m. | 95 |
| Tabella 40 Attività prodotta da un fascio di elio-4 con corrente 10^9 ioni/s che impatta su target di rame in stanza 20x20x10 m. | 96 |
| Tabella 41 Attività prodotta da un fascio di elio-4 con corrente 10^9 ioni/s su target di polietilene in sala 20x20x10 m. | 97 |
| Tabella 42 Attività prodotta da un fascio di elio-4 con corrente 10^9 ioni/s su target di rame in sala 40x40x10 m. | 98 |
| Tabella 43 Attività prodotta da un fascio di elio-4 con corrente 10^9 ioni/s su target di polietilene in sala 40x40x10 m. | 99 |

Capitolo 5

| | |
|---|-----|
| Tabella 1 Punti di perdita nel sincrotrone del CNAO e percentuale di particelle circolanti nel sincrotrone perse in ogni punto. | 101 |
| Tabella 2 Dati per il calcolo dell'attivazione dell'aria nelle stanze del CNAO. | 102 |
| Tabella 3 Attivazione dell'aria nelle stanze del CNAO per un fascio di 1.375×10^{10} protoni/s a 250 MeV calcolato a partire dai dati esposti nel paragrafo precedente. | 102 |

| | |
|---|-----|
| Tabella 4 Attivazione dell'aria nelle stanze del CNAO per un fascio di 5.5×10^8 ioni carbonio/s a 400 MeV/u calcolato a partire dal set di dati esposto nel paragrafo precedente. | 102 |
| Tabella 5 Attività prodotta nelle sale del CNAO usando una geometria realistica per un fascio di 1.375×10^{10} protoni/s..... | 104 |
| Tabella 6 Attività prodotta nelle sale del CNAO usando una geometria realistica per un fascio di 5.5×10^8 ioni carbonio/s..... | 104 |
| Tabella 7 Attività in Bq per radionuclide per un fascio di protoni con corrente di 1.375×10^{10} protoni/s in sala sincrotrone | 105 |
| Tabella 8 Attività in Bq per radionuclide per un fascio di protoni con corrente di 1.375×10^{10} protoni/s in sala trattamento. | 105 |
| Tabella 9 Attività in Bq per radionuclide per un fascio di protoni con corrente di 1.375×10^{10} protoni/s in sala sperimentale. | 105 |
| Tabella 10 Attività in Bq per radionuclide per un fascio di ioni carbonio con corrente di 5.5×10^8 ioni/s in sala sincrotrone. | 106 |
| Tabella 11 Attività in Bq per radionuclide per un fascio di ioni carbonio con corrente di 5.5×10^8 ioni/s in sala trattamento | 106 |
| Tabella 12 Attività in Bq per radionuclide per un fascio di ioni carbonio con corrente di 5.5×10^8 ioni/s in sala sperimentale..... | 106 |
| Tabella 13 Attività prodotta in un anno dal sincrotrone del CNAO calcolata in base agli spettri e al metodo precedente. | 109 |

Capitolo 6

| | |
|--|-----|
| Tabella 1 Intervalli per il confronto delle velocità dei venti e valori di velocità minime e massime per ciascun intervallo..... | 112 |
| Tabella 2 Classi di stabilità in funzione dell'insolazione e della velocità del vento (EPA, 2000). | 113 |
| Tabella 3 Esempio di unione dei set di dati spill e dati meteo | 120 |

Sommario

L'aumento del numero di impianti che scelgono di installare macchine per l'adroterapia fa nascere l'esigenza di studiare più approfonditamente alcuni aspetti di radioprotezione legati all'uso di queste macchine. Oggetto di questo lavoro è lo studio dell'attivazione dell'aria indotta dall'uso di acceleratori di particelle per adroterapia, e la successiva dispersione dei radionuclidi prodotti nell'ambiente.

Si sono considerati fasci di particelle composti da protoni o ioni di elio, litio, carbonio o ossigeno, e si è stimata l'attività dei radionuclidi prodotti, in particolare di ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , e ^{41}Ar con energie di qualche centinaio di MeV/u, tipiche dell'uso in adroterapia. Per queste stime si è fatto uso del codice Monte Carlo FLUKA (Fassò A.).

Si è inizialmente simulata la situazione di un fascio di particelle libero in aria, e si è stimata l'attività dei radionuclidi prodotti per tutte le particelle. Si sono svolti esperimenti al fine di convalidare i dati ottenuti per irraggiamenti con protoni e ioni carbonio. Per far ciò si è usato un tubo di PVC chiuso alle estremità da film di polietilene, e si è fatto passare il fascio di particelle lungo l'asse del tubo, in modo da attivare l'aria al suo interno. È stata misurata l'attività prodotta usando un rivelatore al germanio iperpuro e ci si è concentrato sul picco dello spettro prodotto a 511 keV, poiché i radionuclidi in esame sono tutti emettitori β^+ .

Si sono prodotti anche set di dati per il caso di fasci di particelle che impattano direttamente su un target, di rame o polietilene. Queste simulazioni permettono di determinare l'attivazione dell'aria prodotta dalla radiazione secondaria, come accade concretamente quando il fascio primario impatta contro il target o contro le parti metalliche della macchina. Questi set di dati sono stati prodotti per tutte le particelle in esame, simulando l'impatto su target diversi e al centro di stanze di dimensioni differenti, in modo da studiare quanto queste variabili influiscano sull'attivazione dell'aria. Si è quindi studiata l'influenza della geometria della simulazione nella produzione di questi dati, confrontando questi dati con un set specificatamente adattato al caso del Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica (CNAO) con il quale si è calcolata l'attività prodotta in un anno a partire dagli spettri in energia delle particelle accelerate.

Si è studiata anche la dispersione in atmosfera dei radionuclidi prodotti. Per farlo si è usato il software HotSpot Health Physics Code (Steven Homann, 2014) che usa il modello di dispersione gaussiano e il modello della nube semi-infinita per il calcolo della dose da sommersione. Si sono inizialmente confrontati i dati di tre centraline meteo per determinare se la posizione può influenzare notevolmente i risultati. Si è quindi provveduto a valutare l'influenza delle varie ipotesi conservative fatte, calcolando le dosi nel caso di rilascio di attività pari al limite consentito e quello sotto varie ipotesi, arrivando al caso più dettagliato con il set di dati prodotto dalle simulazioni e gli spettri delle particelle accelerate. In ultimo si è calcolata l'attività di ogni singolo spill accelerato dalla macchina e si è associata ai dati meteo in tempo reale per determinarne la dispersione nell'ambiente e la relativa dose alle persone del pubblico.

Parole chiave: attivazione, adroterapia, dispersione, radioprotezione

Abstract

The increase hadrontherapy machines for provides the need to study more in depth some aspects of radiation protection linked to the use of these machines. The aims of this work is the study of activation induced in air by particle accelerators use for hadrontherapy, and the subsequent dispersion of radionuclides in the environment.

We considered particle beams composed of protons or helium, lithium, carbon or oxygen ions, and the activity of the radionuclides produced was estimated, in particular of ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , and ^{41}Ar with energies of a few hundred MeV /u, typically used in hadrotherapy. For these estimates the Monte Carlo code FLUKA (Fassò A.) was used.

The situation of a free particles beam in air was initially simulated, and the activity of the radionuclides produced for all the particles was estimated. Experiments were carried out in order to validate the data for irradiation with protons and carbon ions. APVC tube was closed at both ends by polyethylene films, and the air inside it was irradiated by the particle beam. The activity produced was measured with a hyperpure germanium detector and, in particular, the peak of the spectrum produced at 511 keV was considered, since the radionuclides under examination are all $\beta +$ emitters.

Data sets were also produced for the cases of particle beam that impact directly on a target made of copper or polyethylene. With these simulations it has been possible to determine the activation of the air produced by secondary radiation, as it takes place when the primary beam impacts against the target or against the metal parts of the machine. These datasets have been produced for all the particles under examination, simulating the impact on different targets placed in the center of rooms of different sizes, in order to study how these variables affect the activation of the air. The influence of the geometry of the simulation in the production of these data was studied, comparing these data with a set specifically adapted for the case of Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica (CNAO) with which the activity produced in a year was calculated also considering the energy spectra of accelerated particles.

The dispersion in the atmosphere of the induced activity has also been studied. To do this HotSpot Health Physics Code software was used (Steven Homann, 2014). This code uses the Gaussian dispersion model and the semi-infinite cloud model to calculate the submersion dose. The data from three weather stations were initially compared to determine if the location can affect the results. The influence of the various conservative hypotheses made was then assessed by calculating the doses in case of release of activity equal to the permitted limit and then under various hypotheses, coming to the most detailed case with the data set produced by simulations and accelerated particle spectra. Ultimately, the activity of each individual spill accelerated by the machine was calculated and it was associated with real-time weather data to determine its dispersion in the environment and the relative dose to the public.

Keywords: air activation, hadrontherapy, dispersion, radiation protection

Capitolo 1

Introduzione

La dispersione di radionuclidi nell'atmosfera è un problema legato all'impiego di qualunque tecnologia nucleare e coinvolge sia il personale della struttura, sia la popolazione limitrofa. Tali rilasci possono avvenire in maniera accidentale o cronica. La legislazione italiana fissa dei limiti riguardo la dose a cui è possibile esporre i lavoratori e il pubblico, e ne stabilisce i metodi di valutazione (Allegato IV D.Lgs. 241/00). Tra i casi considerati vi è anche quello di dose derivante da radionuclidi in aria.

L'uso di macchine radiogene non è esente da questo problema, perché particelle accelerate ad alte energie possono portare alla formazione di radionuclidi in aria direttamente o a seguito della produzione di radiazione secondaria.

Scopo di questo lavoro di tesi è stimare la quantità di attività prodotta in aria da un sincrotrone per adroterapia oncologica durante il suo normale utilizzo, e stabilire il contributo di quest'attività alla dose totale ricevuta dal pubblico per il funzionamento dell'impianto. In particolare, si sono svolte simulazioni per determinare quali radionuclidi vengono prodotti per attivazione dell'aria durante le normali operazioni di un sincrotrone e in che quantità. Ciò è stato fatto sotto ipotesi sempre meno generali fino ad arrivare all'attivazione dell'aria prodotta da ogni singolo spill accelerato dal sincrotrone. Dopo di che si sono associati i dati dell'attivazione con dati meteo sempre più puntuali e, attraverso l'uso di modelli matematici per la dispersione del contaminante, si è arrivati a stabilire l'attività, e la relativa dose, rilasciata in ogni punto intorno all'impianto.

Questo lavoro di tesi è stato svolto presso l'ufficio di radioprotezione del CNAO (Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica) e ha come base le considerazioni fatte dall'Esperto Qualificato durante la fase di commissioning del Centro. I dati dell'attivazione dell'aria si riferiscono al sincrotrone che il CNAO usa per curare pazienti oncologici e per ricerca. I dati meteo si riferiscono alle condizioni presenti a Pavia, dove il Centro è situato.

1.1 Reazioni Nucleari e attivazione

L'interazione tra particelle cariche ad alta energia e gli atomi del mezzo in cui esse si muovono è fortemente influenzata dal tipo di particella e dalla sua energia. Le interazioni possono coinvolgere la parte elettronica dell'atomo (ionizzazione), dare luogo a fenomeni di scattering, oppure coinvolgere il nucleo. Di seguito si tratterà approfonditamente quest'ultimo caso, considerando come particelle incidenti adroni carichi.

Quando un adrone interagisce con un target può dar vita a due tipi di interazione che fanno perdere energia: la ionizzazione del mezzo e l'interazione nucleare. La prima avviene solo in caso di particelle cariche e ne causa la perdita di energia con continuità, la seconda provoca l'emissione di nuove particelle dette secondarie.

Di seguito si discuterà di questo secondo caso e del fenomeno della cascata adronica, principale conseguenza delle interazioni tra le particelle adroniche incidente e i nuclei degli atomi bersaglio, nel caso di interazioni con energie inferiori a qualche GeV, poiché oltre questa soglia il nucleo e il proiettile non possono essere considerati entità singole ma diventa rilevante la struttura dei quark che li compongono. La cascata adronica è costituita da una serie di interazioni tra la particella primaria, i nuclei del bersaglio e una serie di particelle che scaturiscono dall'interazione di questi due. Alle energie considerate si può descrivere il nucleo come un gas di Fermi, ciò porta a reazioni dirette tra protoni, neutroni e adroni che hanno come conseguenza l'emissione di alcuni nucleoni con direzione privilegiata in avanti (si parla in questo caso di cascata intranucleare). Questi collideranno con altri nuclei, producendo nuove particelle, moltiplicando il numero di particelle in ogni generazione, si ha la formazione di una cascata extra-nucleare.

Riducendo ulteriormente l'energia del proiettile è necessario introdurre un modello di pre-equilibrio, poiché non tutta l'energia potrebbe trasferirsi al nucleone e le particelle secondarie emesse potrebbero interagire all'interno del nucleo stesso. In questo caso l'energia del proiettile è trasferita ai nucleoni vicini, dopo l'impatto, e alcuni di essi vengono emessi in avanti con energia paragonabile a quella del proiettile. Quando l'energia viene divisa tra tutti i nucleoni si ha uno stato di equilibrio; nel caso l'energia di eccitazione sia superiore a quella di legame, possono essere emessi nucleoni o frammenti nucleari in maniera isotropa. Questa componente ha energia di pochi MeV ed è la più abbondante del campo di secondari prodotti. In questo caso, e per nuclei con numero di massa sufficientemente alto (di solito si considera $A > 16$) l'emissione può essere descritta come il processo di evaporazione di un corpo caldo. Le particelle emesse avranno quindi uno spettro approssimato a una maxwelliana piccata attorno a una "temperatura", che dipende dall'energia di eccitazione, dell'ordine del MeV. Nel caso di nuclei leggeri questo modello non è più applicabile dato che i frammenti "evaporati" avrebbero una massa simile a quella del nucleo stesso, e perché l'energia di eccitazione è paragonabile a quella di legame dell'intero nucleo. In questi casi vi sono vari modelli (ad esempio il Fermi-break-up model) che descrivono le interazioni adrone-nucleone, il risultato netto di questi rimane un'emissione isotropa, principalmente di neutroni, che termina quando l'energia di eccitazione è inferiore a quella di legame. Nel caso al termine di questi processi il nucleo sia ancora eccitato, ma la sua energia è inferiore a quella di legame dei nucleoni, ritornerà a uno stato stabile emettendo fotoni gamma.

I tempi delle interazioni sono piuttosto differenti tra di loro, la cascata extra-nucleare e quella intranucleare si sviluppano in tempi dell'ordine di 10^{-23} secondi, mentre l'evaporazione è più lenta e dura circa 10^{-19} secondi.

Un caso interessante è rappresentato dall'uso di ioni pesanti ($A > 4$) come proiettile. In questi casi il modo più probabile che ha il nucleo per diseccitarsi a seguito dell'interazione è l'emissione di particelle. L'emissione di particelle cariche, e anche la fissione del nucleo composto, sono sfavorite dalla presenza di una barriera coulombiana, perciò si avrà maggiormente l'emissione di neutroni. Ciò rimane vero anche per nuclei composti con un eccesso di una decina di protoni. Tuttavia, con l'aumentare del numero di massa dell'atomo composto e l'energia del proiettile, la fissione diventa sempre più competitiva nei confronti dell'emissione di nucleoni.

Il tipo di nuclide e di particelle secondarie, che si ottengono dai processi illustrati precedentemente, dipendono dal tipo di atomo bersaglio, dal tipo di proiettile e dalla sua energia. È, tuttavia, possibile che il nuclide ottenuto sia instabile, anche se l'atomo bersaglio originale risultava un isotopo stabile, e quindi ci si aspetta che emetta radiazione. In questo caso si parlerà di *attivazione* del materiale (o di radioattività indotta).

L'attivazione è misurabile come la quantità di nuovi atomi instabili prodotti a seguito dell'irraggiamento del materiale. In funzione del tempo l'attivazione risponde a una legge di tipo esponenziale:

$$N = \frac{N_t \sigma_c \Phi_i}{\lambda_{eff}} (1 - e^{-\lambda_{eff} t_{irr}}) \quad (1.1)$$

Dove:

N è il numero di nuovi nuclidi prodotti per unità di volume;

N_t è il numero di atomi bersaglio per unità di volume ;

Φ_i è la corrente di proiettili incidenti nell'unità di tempo e volume;

t_{irr} è il tempo d'irraggiamento;

σ_c è la sezione d'urto di cattura che porta ad ottenere un nuclide nuovo;

λ_{eff} è la costante di decadimento effettiva:

$\lambda_{eff} = \lambda + \sigma_{ct} \Phi_i$ dove λ è la costante di decadimento del nuovo nuclide instabile e $\sigma_{ct} \Phi_i$

rappresenta la quantità di atomi instabili consumati a seguito dell'interazione con il flusso di proiettili incidenti.

L'attività ($A(t_{irr})$) prodotta da questi nuovi radionuclidi instabili sarà data da:

$$A(t_{irr}) = \lambda N(t_{irr}) \quad (1.2)$$

Per valori di t_{irr} alti rispetto a λ_{eff} l'esponenziale nell'equazione (1.1) tende a zero, si avrà quindi un valore costante nel tempo del numero di nuovi radionuclidi presenti. Mettendo tale valore nella (1.2) si ha l'attività a saturazione (A_{sat}).

Cessato l'irraggiamento, i nuovi radionuclidi decadranno secondo la legge esponenziale, perciò dopo un tempo t , detto cooling time, l'attività sarà:

$$A(t) = \lambda N(t_{irr}) e^{-\lambda t} \quad (1.3)$$

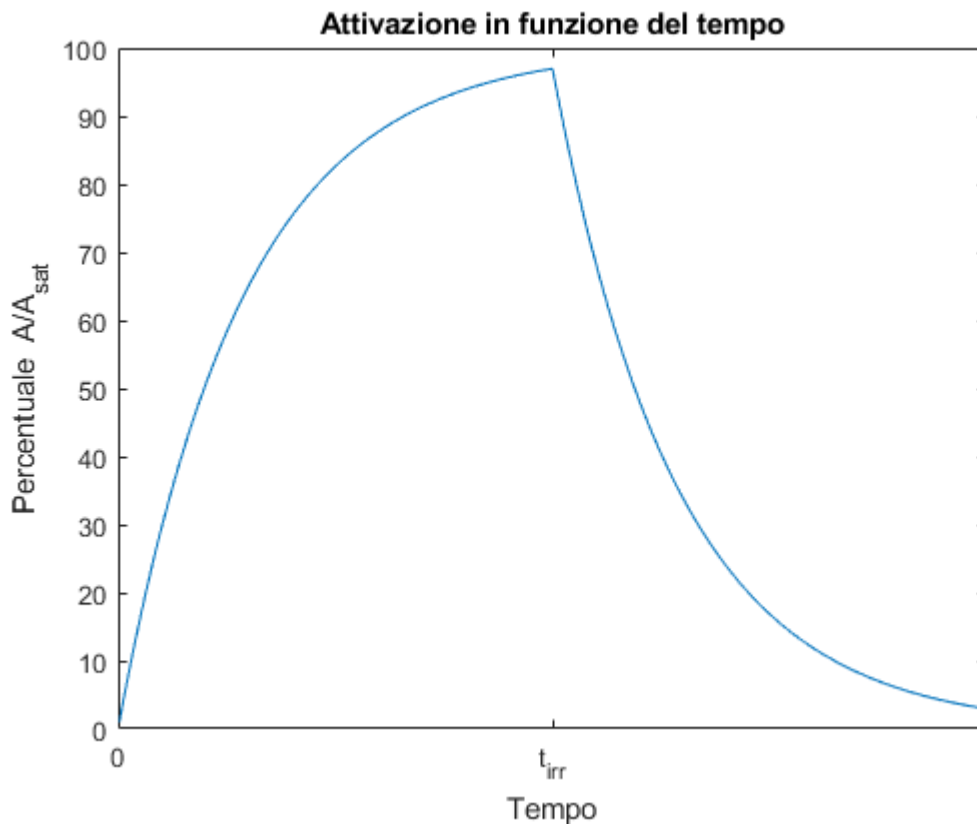


Figura 1 Tipico andamento dell'attività di un radionuclide. L'irraggiamento inizia al tempo zero e termina al tempo t_{irr} , dopo l'andamento è determinato dal decadimento del radionuclide.

Tra i fattori di maggior peso riguardo l'attivazione di un materiale vi è la sezione d'urto della reazione. Questa grandezza rappresenta la probabilità che la reazione di cattura del proiettile e la conseguente formazione del radionuclide avvenga. La sezione d'urto può variare di vari ordini di grandezza a seconda della reazione considerata e in base alla coppia proiettile-bersaglio scelta, inoltre è influenzata dall'energia del proiettile incidente. Per reazioni endotermiche che usano come proiettili particelle cariche si ha un'energia di soglia sotto la quale la reazione non avviene. Tale energia dipende dalla massa del proiettile e da quella del bersaglio secondo la relazione:

$$E_{soglia} = \frac{m + M}{M} Q \quad (1.4)$$

Dove m è la massa del proiettile, M la massa dell'atomo bersaglio e Q l'energia rilasciata dalla reazione.

Dall'equazione (1.4) si deduce come all'aumentare dell'energia del proiettile si superino soglie per nuove reazioni e, quindi, si ha la possibilità di formare nuovi nuclidi. Tuttavia, nel caso di interazioni di singoli adroni ad alta energia le sezioni d'urto hanno un andamento lentamente variabile, e cambiando adrone proiettile le differenze rimangono nello stesso ordine di grandezza, qualche decina di mb.

È doveroso sottolineare come la formazione di radionuclidi con bassa sezione d'urto possa diventare rilevante purché si sottoponga il materiale a una corrente Φ_i elevata.

1.2 Attivazione in un acceleratore di particelle

Un acceleratore di particelle è una macchina in grado di accelerare particelle cariche attraverso campi elettromagnetici allo scopo di produrre fasci di particelle con elevata energia cinetica. Negli anni hanno trovato spazio negli impieghi più vari. Anche l'energia e il tipo di particelle accelerate variano a seconda degli usi, in queste macchine si avranno perciò casi di attivazione sia che vengano accelerate particelle ad alte energie, sia a basse.

In un acceleratore si può avere attivazione delle componenti della macchina, ciò accade in quelle parti che entrano in contatto con il fascio di particelle accelerate. Quasi sempre si tratta di componenti metalliche e i prodotti dell'irraggiamento saranno per lo più elementi pesanti.

L'irraggiamento di questi componenti avviene con continuità quando la macchina è accesa, quindi, con riferimento all'equazione (1.1), si possono avere valori di t_{irr} anche molto lunghi, ad esempio nei grandi acceleratori di ricerca, che portano ad attivare le componenti in modo tutt'altro che trascurabile. Da un punto di vista della radioprotezione questo è un problema quando si effettua manutenzione della macchina, in questo caso sarà necessario fare le adeguate misurazioni e attendere un tempo di cooling opportuno affinché i radionuclidi, formati per attivazione, non decadano e sia possibile per i lavoratori operare in condizioni di sicurezza.

Il calcolo dell'attivazione di queste componenti metalliche, al fine di prendere le giuste precauzioni, è complesso a causa di molti parametri non noti a priori (impurità, esatto profilo d'irraggiamento...).

In letteratura è tuttavia facile trovare articoli riguardanti esperienze (Yashima, 2004) o simulazioni (Pelliccioni M., 2011) riguardanti target metallici con varie particelle in condizioni standard. L'uso di questi dati potrebbe risultare un'approssimazione nel caso essi non corrispondano alle reali condizioni di utilizzo, specialmente per quanto riguarda le energie delle particelle o l'effettiva composizione del target. Per quanto riguarda la corrente incidente, come si deduce dall'equazione (1.1), è invece possibile scalarla linearmente al valore desiderato purché il fascio sia

monoenergetico.

Un'altra fonte di attivazione nell'uso di acceleratori riguarda i target stessi che potranno andare in contro ad attivazione a seguito dell'irraggiamento e diventare addirittura sorgente di radiazione secondaria. Di conseguenza tali oggetti dovranno essere trattati adeguatamente dagli operatori e dai responsabili della radioprotezione.

Impattando su un target, il fascio primario può dar vita a una cascata adronica (illustrata nel paragrafo 1.1) in grado di produrre un campo di neutroni secondari. Lo spettro di tale campo è deducibile attraverso misure dirette o attraverso simulazioni Monte Carlo (A. Ferrari, 2011). Lo spettro in energia dei secondari è influenzato dall'energia della particella incidente ma anche dal tipo di materiale. A titolo d'esempio si riporta la Figura 2 (per quanto riguarda l'intensità del flusso, essa è influenzata anche dalla forma del target a causa dell'autoassorbimento al suo interno).

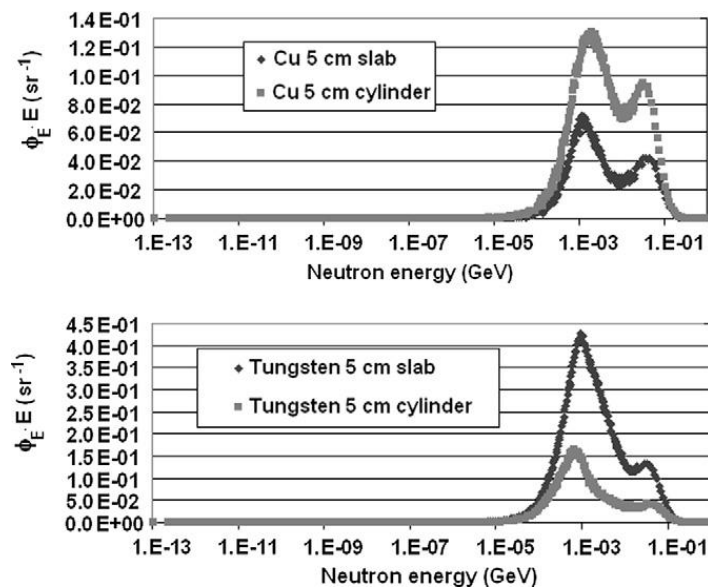


Figura 2 Spettro di neutroni, emessi tra gli 80 e 90 gradi, prodotti da un fascio di ioni carbonio da 400 Mev/u incidenti su target di rame e tungsteno cilindrici (raggio 2.5 cm) e piatti (20x20 cm) (A. Ferrari, 2011)

La dose all'esterno delle sale di irraggiamento in cui il fascio è presente è dovuta principalmente alla componente neutronica della radiazione secondaria. Inoltre, l'attivazione che essa può avere conseguenze su alcune scelte in fase di costruzione, ad esempio della scelta del materiale con cui costruire le sale e le relative schermature. Per esempio, si prende spesso in esame l'ipotesi di usare del calcestruzzo caricato con ferro, tuttavia l'interazione dei neutroni con gli inserti di ferro porterebbe alla formazione di ^{60}Co e all'attivazione del materiale. Un'alternativa potrebbe essere scegliere del calcestruzzo baritico, cioè contenente baritina un minerale ricco di bario, largamente usato nell'industria per schermare dalle radiazioni. Tuttavia, uno studio condotto da Porta *et al.* nel 2005 (Porta, 2005) ha dimostrato come tale materiale, soggetto a campi di neutroni secondari tipici in adroterapia, si attivi maggiormente (fino a un fattore 6) rispetto al calcestruzzo ordinario a causa della formazione di isotopi a vita lunga quali ^{127}Xe , ^{132}Cs e ^{133}Ba .

Un ulteriore elemento soggetto al fenomeno dell'attivazione è l'aria. Facendo riferimento all'equazione (1.1) si può notare come l'aria, essendo allo stato gassoso, presenti un valore di N_t piuttosto basso. Tuttavia, essa è composta da diversi elementi, ognuno dei quali dà luogo a diverse reazioni a seconda della particella con cui interagisce e della sua energia. In un acceleratore si ha attivazione dell'aria principalmente nel caso vi sia un tratto di fascio primario libero, oppure quando interagisce con il bersaglio o con le strutture della macchina. In questi casi i secondari prodotti possono causare attivazione dell'aria.

L'attivazione dell'aria in seguito all'uso di un acceleratore sarà l'aspetto centrale di questo lavoro di tesi e verrà trattato approfonditamente il caso specifico del sincrotrone per adroterapia installato al Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica.

Una formula generale per calcolare l'attivazione a saturazione del j-esimo radionuclide ($A_{j,sat}$), sia per il fascio primario sia per quello secondario è (Agosteo, 2009):

$$A_{j,sat} = N \sum_k \int_0^{E_{max}} \sigma_{j k} \Phi_E dE \quad (1.5)$$

In cui N è il numero di atomi bersaglio presenti, $\sigma_{j k}$ è la sezione d'urto che della k-esima reazione che produce il radionuclide considerato (j) e Φ_E è la corrente di proiettili in funzione dell'energia. Tale equazione può essere vista come una versione più generale della (1.1) e (1.2) in quanto contempla la possibilità che la corrente di proiettili incidenti non sia monoenergetica, situazione che si verifica nel caso di campi complessi (ad esempio a seguito della produzione di secondari) o anche nel caso si consideri il rallentamento del fascio primario.

Nelle stanze in cui avviene l'attivazione dell'aria è opportuno installare degli impianti di ventilazione che estraggano l'aria. Lo scopo primario di tali impianti è ridurre il tempo d'attesa affinché la radioattività scenda sotto un certo livello (o addirittura evitare che raggiunga tale livello).

Terminato l'irraggiamento, in assenza di ventilazione, l'attività in aria decresce secondo l'equazione (1.3). In presenza di un impianto di ventilazione che compie un numero di ricambi d'aria nell'unità di tempo pari a m , l'equazione (1.3) diventa:

$$A(t) = A(t_{irr}) e^{-(\lambda+m)t} \quad (1.6)$$

Se si considera che il sistema di ventilazione rimane acceso anche durante l'irraggiamento, l'apporto dato dall'impianto alla riduzione dell'attività, matematicamente si esprime nell'aggiungere il fattore m alla definizione della costante di tempo effettiva, che diventa $\lambda_{eff} = \lambda + \sigma_{ct} \Phi_i + m$.

Dalle considerazioni fatte fino ad ora è possibile dedurre che il tempo d'attesa (t_w) necessario affinché l'attività di un radionuclide scenda sotto una concentrazione limite (CL) è calcolabile come:

$$t_w = \frac{\ln(A(t_{irr}) / (V CL))}{\lambda + m} \quad (1.7)$$

In cui V è il volume della stanza e $A(t_{irr})$ è calcolata con l'equazione (1.2) usando la nuova definizione di costante di tempo effettiva.

A questo punto i radionuclidi verranno rilasciati nell'atmosfera e verranno diffusi all'esterno della struttura contribuendo ad aumentare la dose a cui il pubblico è esposto.

La dispersione dei radionuclidi nell'atmosfera e il calcolo della dose ad essi dovuta è il soggetto del paragrafo 1.3.

1.3 Dispersione dei contaminanti

Lo studio e l'analisi della dispersione dei contaminanti in aria è essenziale per valutare l'impatto di ogni attività sull'ambiente. I rilasci, controllati o accidentali, da impianti avvengono di norma nella parte bassa dell'atmosfera, a un'altezza che non supera le poche centinaia di metri dal suolo.

Il contaminante disperso in atmosfera verrà trasportato secondo il moto dell'aria nella zona interessata. A seconda della quantità di contaminante, e il tempo considerato, lo spazio percorso dal punto di rilascio può variare da pochi metri a chilometri, per questo si sono sviluppati differenti modelli per il calcolo della concentrazione di contaminante a seconda della distanza dalla sorgente.

Si hanno due tipi di rilasci: *accidentale*, se limitato nel tempo, oppure *cronico*, se continuativo. In questo lavoro di tesi verrà trattato principalmente un rilascio cronico di radionuclidi in atmosfera a seguito delle normali operazioni di un sincrotrone del tipo usato per adroterapia.

La dispersione in aria dei contaminanti è soggetta ai processi di diffusione legati allo stato di turbolenza atmosferica e quindi alle condizioni meteorologiche (Pelliccioni, 1993).

Le grandezze fisiche d'interesse per quanto riguarda la dispersione dei contaminanti in aria sono:

Velocità del vento (I.G. Lines, 1997)

Indice dello stato di turbolenza dell'aria, è la grandezza principale da considerare per la diffusione del contaminante lungo il piano orizzontale. Essa è influenzata dalla rugosità del terreno e dalla presenza di ostacoli lungo la traiettoria di diffusione. La velocità del vento può essere calcolata usando parametri come l'altezza dal suolo e le condizioni del terreno, tuttavia la semplicità nella strumentazione per la misura di questa grandezza la rende ideale per essere rilevata direttamente.

Un aumento della velocità del vento contribuirà a una dispersione del contaminante su un'area maggiore in minor tempo.

Stabilità atmosferica

Principale responsabile della diffusione verticale del contaminante, è influenzata dal gradiente verticale di temperatura dell'aria, dall'umidità e dalla presenza di vento. Tale gradiente è solitamente negativo, cioè aumentando l'altezza la temperatura si riduce, e ciò comporta movimenti verticali dell'aria piuttosto ampi, in questo caso si dice che l'atmosfera è *instabile*.

Tuttavia è possibile che il gradiente assuma valori nulli o negativi (*gradiente invertito*), in tal caso si avrà una ridotta mobilità verticale dell'aria e l'atmosfera è considerata *stabile*.

Uno dei metodi per quantificare la stabilità atmosferica è quello proposto da Pasquill (Pasquill, 1961) che suddivide le possibili condizioni di stabilità in 7 classi (denominate usando le lettere da A a F), da quelle estremamente instabili a quelle più stabili.

La misura del gradiente verticale di temperatura è tutt'altro che banale, per questo si è cercato di mettere in relazione le classi di stabilità con parametri di facile misurazione come la radiazione solare o la copertura nuvolosa. Un esempio è la Tabella 1 (M. D'Arienzo, 2014).

| Velocità del vento (m/s) | Insolazione (W/m ²) | | |
|-----------------------------|---------------------------------|---------|------|
| | > 700 | 350-700 | <350 |
| <2 | A | A-B | B |
| 2-3 | A-B | B | C |
| 3-5 | B | B-C | C |
| 5-6 | C | C-D | D |
| >6 | C | D | D |

Tabella 1 Classi di stabilità in funzione dell'insolazione e della velocità del vento.

Le condizioni di stabilità atmosferica possono cambiare anche in pochi metri d'altezza, ciò può portare a una situazione particolarmente critica nel caso della dispersione di un contaminante: la fumigazione. Tale condizione si ha quando appena sopra il punto di rilascio del contaminante si hanno strati di atmosfera stabile, mentre al di sotto si hanno strati instabili. Ciò comporta l'impossibilità per il contaminante di muoversi verso l'alto e disperdersi, mentre sarà favorita la dispersione verso gli strati bassi e il suolo.

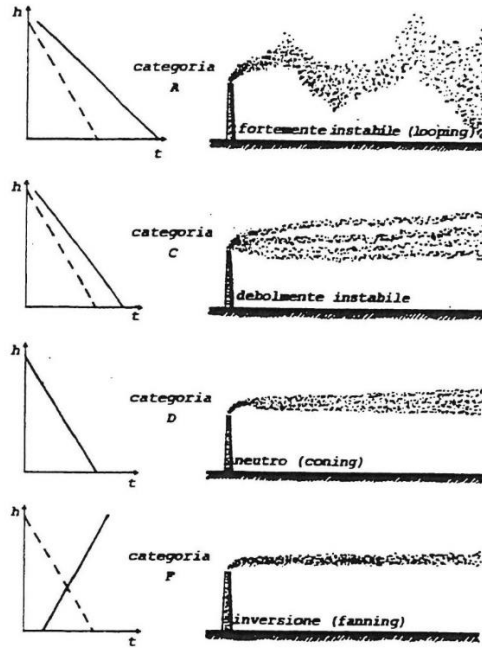


Figura 3 Forme del pennacchio di fumo (a sinistra) in funzione delle condizioni di stabilità atmosferica e del gradiente verticale di temperatura (a destra) (Polvani, 1993)

Modello Gaussiano di Trasporto

Tra i modelli di trasporto dei contaminanti in aria di seguito si farà riferimento al modello gaussiano.

Il modello gaussiano considera un rilascio cronico da una fonte puntiforme. Dopo un sufficiente lasso di tempo si considera che la forma della piuma di contaminante avrà forma gaussiana sia lungo l'asse verticale, sia lungo quello orizzontale. (Polvani, 1993)

Supponendo che il vento spiri lungo la direzione x di un sistema di riferimento cartesiano, la concentrazione (C) di contaminante nell'unità di tempo e di volume è data dall'equazione:

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_zv} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-H}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z+H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \quad (1.8)$$

Dove:

- Q è il termine sorgente della contaminazione;
- v è la velocità del vento all'altezza del rilascio;
- H è l'altezza di rilascio del contaminante;

σ_y e σ_z sono i coefficienti di dispersione atmosferica nelle direzioni indicate nei pedici.

Matematicamente sono legati alla varianza della distribuzione gaussiana lungo gli assi considerati, il significato fisico, invece, corrisponde a quanto si è allargata la piuma di contaminante nelle due direzioni. Il loro andamento sarà crescente con la distanza lungo la direzione del vento, in quanto aumentando la distanza dalla sorgente diventeranno sempre più rilevanti i fenomeni di dispersione. Tali coefficienti sono stimati empiricamente (Briggs, 1973) e dipendono dalla classe di stabilità atmosferica presente durante l'emissione del contaminante. Nella loro versione più semplice non considerano né l'altezza di rilascio né la ruvidità del terreno su cui viene disperso il contaminante. Tuttavia, Briggs considera diversamente il caso in cui l'impianto si trovi in un contesto urbano o in aperta campagna. Nelle Tabella 2 sono riportate le formule per il calcolo dei coefficienti di dispersione nei due casi.

| Aperta campagna | | |
|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Classe di Stabilità | σ_y (m) | σ_z (m) |
| A | $0.22x(1 + 0.0001x)^{-\frac{1}{2}}$ | $0.20x$ |
| B | $0.16x(1 + 0.0001x)^{-\frac{1}{2}}$ | $0.12x$ |
| C | $0.11x(1 + 0.0001x)^{-\frac{1}{2}}$ | $0.08x(1 + 0.0002x)^{-\frac{1}{2}}$ |
| D | $0.08x(1 + 0.0001x)^{-\frac{1}{2}}$ | $0.06x(1 + 0.0015x)^{-\frac{1}{2}}$ |
| E | $0.06x(1 + 0.0001x)^{-\frac{1}{2}}$ | $0.03x(1 + 0.0003x)^{-1}$ |
| F | $0.04x(1 + 0.0001x)^{-\frac{1}{2}}$ | $0.016x(1 + 0.0003x)^{-1}$ |
| Contesto Urbano | | |
| Classe di Stabilità | σ_y (m) | σ_z (m) |
| A-B | $0.32x(1 + 0.0004x)^{-\frac{1}{2}}$ | $0.24x(1 + 0.0001x)^{\frac{1}{2}}$ |
| C | $0.22x(1 + 0.0004x)^{-\frac{1}{2}}$ | $0.20x$ |
| D | $0.16x(1 + 0.0004x)^{-\frac{1}{2}}$ | $0.14x(1 + 0.0003x)^{-\frac{1}{2}}$ |
| E-F | $0.11x(1 + 0.0004x)^{-\frac{1}{2}}$ | $0.8x(1 + 0.00015x)^{-\frac{1}{2}}$ |

Tabella 2 Equazioni per il calcolo dei Coefficienti di dispersione in funzione delle classi di stabilità in contesto urbano e in aperta campagna

Si può notare dalla Tabella 2 che una situazione di terreno irregolare, come quella in città, causa un aumento della dispersione del contaminante e di conseguenza un allargamento maggiore della piuma a parità di tutte le altre condizioni meteo.

La formula per il modello gaussiano presentata nell'equazione (1.8) è la più semplice, ma può essere facilmente raffinata considerando effetti, qui ritenuti secondari, come la deposizione umida o considerando parametri più realistici come l'effettiva altezza di rilascio del contaminante.

Nel caso si consideri, come avverrà d'ora in poi, un radionuclide contaminante va aggiunto all'equazione (1.8) un fattore che tenga conto del decadimento radioattivo durante la diffusione. In questo caso l'equazione (1.8) diventa:

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_zv} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \exp\left[-\frac{\lambda x}{v}\right] \quad (1.9)$$

λ è la costante di decadimento del radionuclide;

Q è l'attività emessa dalla sorgente;

C avrà le dimensioni di un'attività per unità di tempo e volume.

Altri modelli di trasporto

Si è esposto, in precedenza, il modello gaussiano per la distribuzione del contaminante, si è scelto tale modello per la sua relativa semplicità, per la facilità nell'essere adattato e complicato a seconda delle necessità, e perché è il più comunemente usato per le situazioni trattate da questo lavoro.

È, tuttavia, possibile studiare la dispersione dei contaminanti usando un approccio numerico stocastico, da tale approccio sono nati i *modelli euleriani* e i *modelli lagrangiani*. I primi si riferiscono a un sistema di riferimento fisso in cui il contaminante si disperde secondo i meccanismi di avvezione e diffusione, in questi modelli la concentrazione del contaminante è determinata avvalendosi dell'equazione di conservazione della massa rilasciata. I modelli lagrangiani, invece, si avvalgono di un sistema di riferimento solidale al contaminante, il quale sarà soggetto agli stessi fenomeni di trasporto delle particelle d'aria.

Tali modelli risultano più complicati di quello gaussiano e richiedono software dedicati. Se, invece, si è interessati a modelli di dispersione più semplici, ma anche più approssimati, si possono usare il *modello semisferico* oppure il *modello a pennacchio semplificato*.

Il modello semisferico considera una sorgente puntiforme che rilascia il contaminante secondo una geometria sferica, la presenza del vento farà in modo che sia impossibile la dispersione nel verso opposto rispetto a dove spira, perciò verrà considerata solamente una semisfera.

La concentrazione di contaminante al tempo t ($C(t)$) sarà data da (M. D'Arienzo, 2014):

$$C(t) = \frac{3Q}{2\pi(vt)^3} \quad (1.10)$$

Con Q attività del rilascio e v velocità del vento. Tale modello può essere utilizzato per brevi distanze

Il modello a pennacchio semplificato suggerisce invece una forma iperbolica dell'andamento della concentrazione lungo la direzione verso cui soffia il vento. In tal caso la concentrazione di contaminante in un punto a una distanza x dalla sorgente sarà:

$$C(t) = \frac{B_0 Q(t)}{v x^2} \quad (1.11)$$

In cui B_0 è un valore adimensionale empirico con valori di 18 o 30 e $Q(t)$ il rateo di rilascio del contaminante. (M. D'Arienzo, 2014)

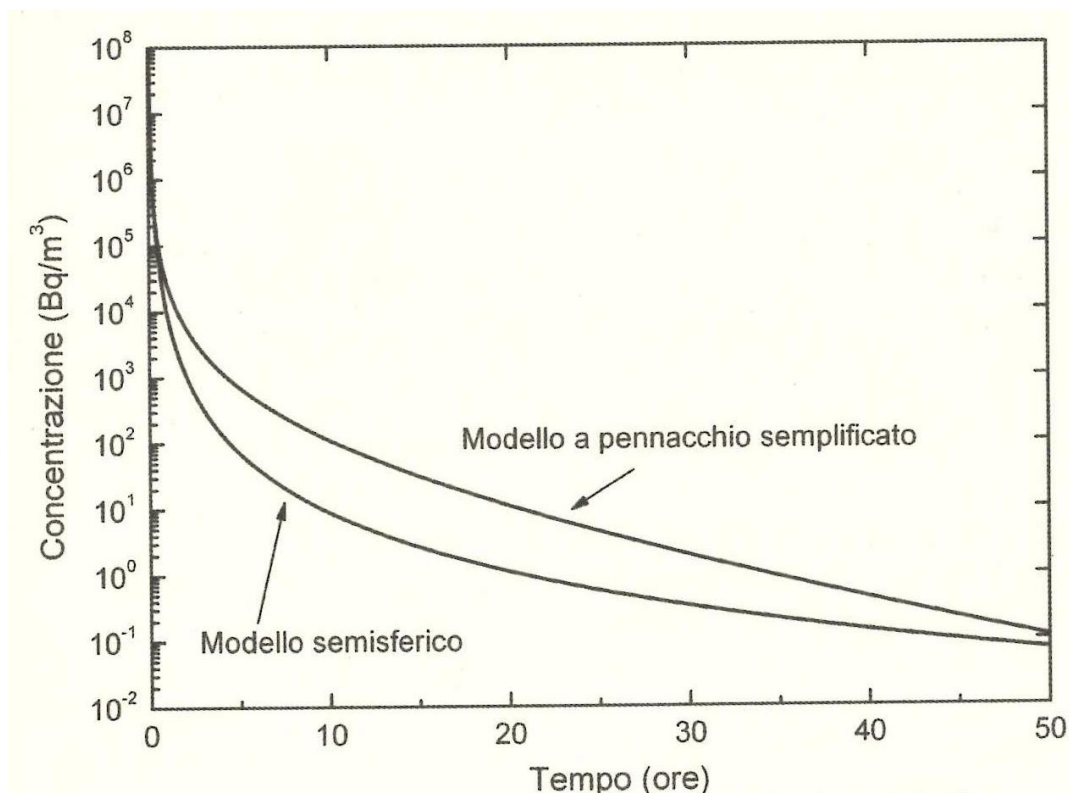


Figura 4 Concentrazioni di contaminante a 10 metri nel caso si usi il modello a pennacchio semplificato o semisferico. Attività iniziale 4 GBq, velocità del vento 1 m/s. (M. D'Arienzo, 2014)

Come si evince dalla Figura 4, a parità di condizioni atmosferiche e di rilascio del contaminante, il modello semisferico sottostima la concentrazione di contaminante rispetto al modello a pennacchio semplificato, che potrà essere usato se si vogliono stime più conservative.

1.4 Considerazioni di radioprotezione

Per valutare la dose a cui una popolazione è esposta a causa di una nube radioattiva vanno considerate i vari modi di esposizione a cui gli individui possono essere esposti, tra questi vi è l'esposizione esterna alla nube, l'inalazione diretta dei radionuclidi e le esposizioni indirette.

Esposizione esterna alla nube

Il calcolo della dose per esposizione esterna alla nube deve tener conto della geometria della nube stessa e la distribuzione dei contaminanti, per questo il metodo più semplice è quello della nube semi-infinita con distribuzione omogenea del radionuclide.

Per il calcolo della dose sarà necessario considerare anche il tipo di radiazione emessa dal contaminante, tenendo conto che generalmente un emettitore beta darà dose principalmente alla pelle in caso di sommersione, mentre un emettitore gamma darà dose in profondità e al corpo intero sia nel caso vi sia sommersione, sia nel caso il soggetto sia posizionato esternamente.

(Polvani, 1993)

Supponendo un rilascio cronico di radionuclidi e che il vento non soffi sempre nella stessa direzione, si divide l'angolo giro in cui si distribuisce l'attività in un certo numero di settori (di solito 8, 16 o 32). L'attività si distribuirà in questi settori a seconda della probabilità con cui il vento, nella zona in questione, soffierà verso il settore considerato.

Per gli emettitori beta si può stimare la dose annua assorbita (D_β) dalla pelle (0.07 mm) per sommersione nella generica direzione appartenente al settore p con (Pelliccioni M. , 1993):

$$D_\beta = A_0 f_p g_\beta \quad (1.12)$$

dove A_0 è l'attività annua rilasciata, f_p è il fattore di diffusione nella direzione p , cioè quanta dell'attività presente nella nube si sia diffusa verso p , mentre g_β è il fattore di dose per sommersione tipico per ogni radionuclide, tali valori sono reperibili in letteratura (EPA, U.S. Environmental Protection Agency, 1993).

Per un emettitore gamma si suppone una geometria semi-infinita della nube, con una distribuzione uniforme dei radionuclidi. Il rateo di dose assorbita in aria è dato da (Pelliccioni M. , 1993):

$$\dot{D}_a = \frac{1}{2} \frac{\overline{\chi_a}}{\rho} \sum_i F_i E_i \quad (1.13)$$

in cui $\overline{\chi_a}$ è la concentrazione media di attività nella nube, ρ la densità dell'aria e F_i la frazione di fotoni di energia E_i emessi dal radionuclide durante il decadimento. Si è aggiunto il fattore $\frac{1}{2}$

nell'equazione (1.13) per tener conto della geometria dell'irraggiamento, in particolare solo metà dei fotoni, emessi in modo isotropo, sono in direzione del suolo e quindi possono irraggiare di soggetti.

Inalazione diretta dei radionuclidi dalla nube

Nel caso di sommersione da parte della nube, i soggetti considerati inaleranno parte dei radionuclidi in proporzione alla concentrazione di questi ultimi e alla quantità d'aria respirata dai soggetti. (Pelliccioni, 1993)

Anche in questo caso va considerata la specie del radionuclide, in questo caso però sono di maggior rilievo le radiazioni poco penetranti, diventano quindi rilevanti i radionuclidi emettitori alfa. Una volta ispirati, i radionuclidi possono essere assimilati o meno a seconda delle proprietà chimico-fisiche del composto di cui fanno parte, ad esempio formando aggregati di diametro maggiore vengono fermati meno in profondità nell'apparato respiratorio. Sarà quindi necessario calcolare la dose depositata in ogni regione da ciascuna frazione di attività inalata. Per far ciò è innanzitutto necessario distinguere tra radionuclidi compresi in un aerosol e quelli che formano gas e vapori. I primi hanno dimensioni maggiori e molto varie, che ne influenzano la cinetica nell'organismo, a riguardo si è introdotto un fattore, *l'Activity Median Aerodynamic Diameter (AMAD)*, che ne approssima la forma e generalizza il loro comportamento. I valori di AMAD possono variare da 0.6 nm a 100µm, tuttavia per le situazioni più comuni il valore consigliato è di 5 µm. Particelle di aerosol con AMAD diverse si depositeranno nei tratti dell'apparato respiratorio in proporzioni differenti, e da essi saranno differentemente rimossi o assimilati. Un'altra caratteristica che differenzia i vari aerosol di radionuclidi è il modo in cui abbandonano l'apparato respiratorio per essere assorbiti nel sangue. Si distinguono tre tipi di assorbimento: F (fast) in cui tutto il materiale è assorbito con un tempo di dimezzamento di 10 minuti; M (medium) se il 10% del materiale è assorbito con un tempo di dimezzamento di 10 minuti e la restante parte con tempo di dimezzamento di 140 giorni; S (slow) in cui solo lo 0.1% del materiale è assorbito con un tempo di dimezzamento di 10 minuti mentre la gran parte si dimezza dopo 7000 giorni.

Nel caso i radionuclidi siano sotto forma di gas o vapori le caratteristiche da considerare sono la loro reattività e solubilità. Per ciò si distinguono tre categorie: (M. D'Arienzo, 2014)

- Classe SR-0: comprende i gas insolubili e non reattivi, non vi è assorbimento nei fluidi corporei ma il radionuclide rimane nell'organismo solo il tempo necessario a essere esalato;
- Classe SR-1: fanno parte di questa classe gas solubili e reattivi. Il radionuclide viene assorbito nel sangue, ma non completamente;
- Classe SR-2: formata da gas altamente reattivi e solubili. Il radionuclide inalato viene istantaneamente e completamente assorbito nel sangue e nei fluidi corporei.

In questo lavoro di tesi, come verrà approfondito in seguito, si farà riferimento a radionuclidi formanti gas e vapori in classe SR-0.

Per la modellizzazione della cinetica dei radionuclidi nel tratto respiratorio e il relativo calcolo di dose inalata (D_{in}) si può fare riferimento alla pubblicazione ICRP 66, tuttavia un metodo semplice è dato dalla formula:

$$D_{in} = \frac{A T_r N h(g)_{in}}{V} \quad (1.14)$$

Dove si è indicato con A l'attività presente in aria, T_r il tasso di respirazione (20 m³ al giorno per l'uomo standard), N il tempo di esposizione al radionuclide (tipicamente ore/anno), V il volume dell'ambiente. $h(g)_{in}$ rappresenta la dose efficace impegnata per unità d'introduzione del radionuclide in esame, di fatto si tratta di un fattore di conversione tra l'attività inalata e la dose ricevuta dall'individuo, i valori sono tabulati in letteratura (si faccia riferimento all'allegato IV del D.Lgs 230/95) per i radionuclidi più comuni suddivisi per classe di assorbimento e per gruppo di età (g) dei soggetti.

Esposizioni indirette

Per esposizione indiretta si definiscono tutte quelle vie non direttamente legate alla dispersione atmosferica. Il radionuclide disperso in atmosfera potrà, prima o poi, raggiungere il suolo, ciò dipende dalla velocità di deposizione e dalla specie chimica del radionuclide.

La deposizione al suolo del radionuclide può avvenire attraverso la *deposizione asciutta* o attraverso la *deposizione umida*. La prima è legata a diversi fenomeni quali la gravità, l'impatto con ostacoli e l'attrazione elettrostatica ed è caratterizzata da una grandezza nota come *velocità di deposizione* che dipende dalle condizioni meteo e dalle caratteristiche chimico-fisiche del particolato e dalla morfologia del suolo. Aerosol di qualche micron di diametro hanno velocità di deposizione dell'ordine del mm/s, mentre si riducono per gas e vapori fino ad annullarsi per i gas nobili.

La deposizione umida invece è causata dall'attraversamento della nube da parte della pioggia. La concentrazione di attività in questo caso si ridurrà nel tempo seguendo una legge esponenziale decrescente in cui la costante di tempo è data dal *coefficiente di dilavamento* che dipende dal rateo di pioggia. (Pelliccioni, 1993)

Una volta che il radionuclide è arrivato al suolo le principali vie di esposizione indiretta comprendono l'inalazione di attività risospesa, l'irradiazione esterna da attività depositata al suolo e l'ingestione dei radionuclidi.

L'inalazione di attività risospesa, si ha quando dei radionuclidi depositatisi al suolo vengono risospesi in aria a causa di meccanismi legati alla velocità del vento o alla conformazione del suolo. (Pelliccioni, 1993) Per tener conto di questo fenomeno si può introdurre un *fattore di*

risospensione che, moltiplicato per l'attività al suolo, fornisce l'attività in aria risospesa.

L'andamento del *fattore di risospensione* (R) in funzione del tempo è dato dalla formula:

$$R(t) = \left(R_{\infty} + \frac{R_0}{t} \right) e^{-\lambda t} \quad (1.15)$$

In cui λ è la costante di decadimento del radionuclide, mentre R_{∞} e R_0 sono i valori del fattore di risospensione rispettivamente dopo un tempo infinito e al tempo zero (i valori consigliati sono $R_0 = 1.2 \times 10^{-6}$ e $R_{\infty} = 10^{-9}$). (M. D'Arienzo, 2014)

L'irradiazione esterna da attività depositata al suolo, il radionuclide depositato al suolo rimane comunque una sorgente di attività in grado di fornire dose nelle vicinanze, questa via può diventare anche più importante di quella della nube nel caso di individui che permangono per lungo tempo su un suolo contaminato da radionuclidi a vita lunga. (Polvani, 1993) Per il calcolo della dose dovuta a questa via d'esposizione si può supporre il suolo come una sorgente di emissione piana.

Una volta depositati i radionuclidi possono, inoltre, entrare in vario modo nelle catene alimentari, gli individui possono cibarsi di vegetali direttamente contaminati, oppure bere acqua contaminata, o ancora mangiare carne e uova provenienti da animali che si sono nutriti di cibo contaminato, il risultato netto di questi processi è l'ingestione dei radionuclidi da parte degli individui.

Semplificando si possono distinguere due categorie di prodotti, quelli di origine vegetale e quelli di origine animale. I primi saranno contaminati in proporzione all'attività depositata sul terreno e alla percentuale del radionuclide d'interesse presente nel vegetale. Per i secondi la contaminazione avviene per due vie: la contaminazione dovuta all'inalazione del radionuclide da parte dell'animale, e quella dovuta all'ingestione e inalazione di attività risospesa.

In generale i radionuclidi, una volta immessi nell'ambiente, possono ritornare all'uomo attraverso vie indirette differenti a seconda che essi contaminino, per esempio, il suolo o acque superficiali.

Le numerose connessioni tra i vari elementi presenti nell'ambiente, i percorsi che il radionuclide può seguire e gli infiniti scenari a cui può andare incontro, rendono molto complicato, se non impossibile, determinare con certezza dove decadrà il radionuclide immesso nell'ambiente.

Tuttavia, per casi semplici vi sono modelli per stimare i livelli di contaminazione nei vari compartimenti ambientali. Aumentando tali compartimenti e le connessioni tra essi si ottiene un quadro sempre più realistico della situazione, di contro aumenta anche la complessità dei calcoli, diventa così opportuna avvalersi di specifici software di calcolo (ad esempio GENII).

Capitolo 2

Questo lavoro di tesi si concentrerà sullo studio dell'attivazione dell'aria dovuta alle operazioni di un sincrotrone per l'adroterapia oncologica. Si prenderà in esame, in particolare, il caso del Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica (CNAO).

2.1 L' Adroterapia Oncologica

L'adroterapia è una tecnica di radioterapia in cui si sottopone il paziente a un fascio esterno di adroni localizzato nella zona tumorale. I vantaggi di questa tecnica, rispetto ai trattamenti con fotoni o particelle leggere, sono legati al fatto che gli adroni tendono a rilasciare la propria energia in profondità, danneggiando meno i tessuti superficiali, e il rilascio risulta più concentrato. Tutto ciò è visivamente chiaro ponendo in un grafico la profondità nel mezzo irraggiato con la dose depositata (Figura 1).

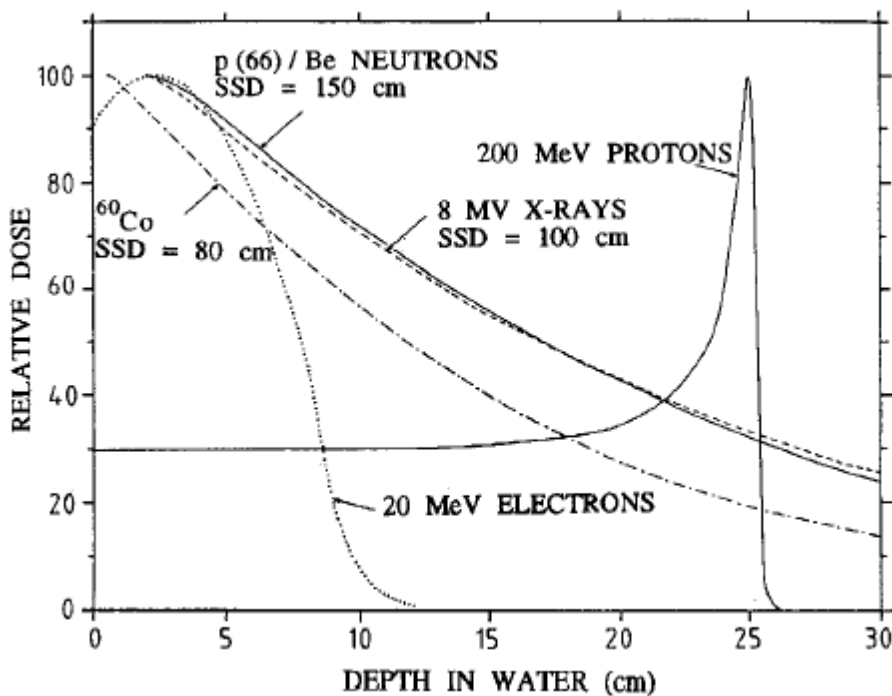


Figura 5 Curva dose-profondità per un fantoccio d'acqua irraggiato con fasci di diverse particelle (Agosteo, 2018)

Si nota come, per gli adroni (in Figura 1 si tratta di protoni), l'energia depositata si concentra in una regione in profondità, detta picco di Bragg. I trattamenti di adroterapia avvengono sempre modulando l'energia del fascio, cioè allargando il picco di Bragg. Rispetto alle altre tecniche, la terapia con adroni minimizza la dose ceduta ai tessuti sani che si trovano più in superficie e rende molto minore la dose impartita ai tessuti che si trovano più in profondità rispetto al tumore, rendendo l'adroterapia vantaggiosa nel trattare tumori collocati in prossimità di organi sensibili.

In aggiunta a ciò, l'uso di ioni leggeri tende ad avere un'efficacia maggiore nel danneggiare le cellule cancerogene (Relative Biological Effectiveness) a parità di dose somministrata al paziente. Questo perché gli ioni cedono più energia per unità di percorso, aumentando la probabilità di doppia rottura della catena del DNA e la conseguente morte della cellula tumorale. Alcuni centri di adroterapia si sono concentrati sul trattamento con ioni carbonio perché con queste particelle è possibile ridurre il numero di sessioni a cui sottoporre il paziente, in quanto l'efficacia del trattamento è quasi indipendente dal livello di ossigenazione dei tessuti, al contrario di quanto accade per la radioterapia convenzionale e la protonterapia. Per accelerare sia gli ioni che i protoni necessari all'adroterapia si usano prevalentemente sincrotroni.

Il sincrotrone è un acceleratore di particelle risonante circolare in cui l'intensità del campo magnetico di deflessione varia ciclicamente in modo da mantenere il raggio dell'orbita delle particelle costante durante l'accelerazione. L'anello del sincrotrone è costituito da una camera a vuoto interrotta occasionalmente da tratti rettilinei per l'iniezione o l'estrazione del fascio e il posizionamento di linee sperimentali. L'accelerazione avviene in cavità risonanti a frequenza regolabile, mentre la deflessione e la focalizzazione del fascio sono realizzate con campi magnetici. I magneti utilizzati per tale scopo possono distinguersi in: magneti di dipolo, che deflettono mantenendolo in un'orbita chiusa; magneti di quadrupolo che focalizzano il fascio; e magneti di sestupolo, che permettono di migliorare la focalizzazione al variare della distribuzione dell'energia del fascio.

Nei sincrotroni usati per adroterapia, i protoni e gli ioni sono accelerati in precedenza in un acceleratore lineare (linac) e diretti nel sincrotrone attraverso un foglio di stripping che rimuove gli elettroni, così vengono iniettati nel sincrotrone soltanto gli ioni con un adeguato valore della carica. Per quanto riguarda l'attivazione, le parti della macchina più soggette a questo fenomeno sono quelle che vengono a contatto con il fascio primario. Vi sono componenti, detti dump, inseriti appositamente per ridurre il numero di particelle del fascio a seconda degli usi, essi potranno quindi attivarsi, ma anche essere sorgenti di radiazione secondaria e sarà quest'ultima ad attivare l'aria o le componenti circostanti.

Altri punti della macchina soggetti ad attivazione potrebbero essere i dipoli, qui infatti il fascio viene curvato ed è possibile che alcune particelle escano dall'orbita andando a impattare contro le strutture metalliche. Si avrà anche in questi casi attivazione delle componenti e generazione di radiazione secondaria. Si parlerà in questi casi di punti di perdita di fascio e sarà necessario stimare la percentuale di particelle perse in ogni punto in modo da valutarne il contributo all'attivazione dell'aria. Per svolgere questi calcoli sarà necessario conoscere i carichi di lavoro, correnti e tempi d'irraggiamento, dei punti di perdita e i materiali contro cui impatteranno le particelle del fascio primario.

L'attivazione dell'aria durante l'uso di sincrotroni per adroterapia può avvenire anche in sala

trattamento. Qui il fascio primario compirà un tratto libero in aria causandone l'attivazione, in più il target potrà essere considerato sorgente di radiazione secondaria.

Da quanto detto finora risulta evidente che la radiazione secondaria ha un ruolo centrale nell'attivazione dell'aria durante le normali condizioni di lavoro del sincrotrone. Nel paragrafo successivo se ne discuterà in maniera più approfondita.

2.2 Produzione di neutroni secondari

La radiazione secondaria è composta da protoni, neutroni e frammenti nucleari. L'importanza della componente neutronica è legata sia all'attivazione che può provocare, sia, trattando il caso dell'adroterapia, della dose aggiuntiva che può ricevere il paziente sotto trattamento. Per questi motivi è stata studiata da Ferrari *et al.* (A. Ferrari, 2011). In questo lavoro gli autori hanno compiuto simulazioni, usando il codice Monte Carlo FLUKA (Fassò A.), considerando un fascio primario di protoni a 250 MeV e ioni carbonio a 400 MeV/u. I materiali dei target considerati sono stati tungsteno, rame e tessuto equivalente ICRU, nei primi due casi si sono considerate due forme differenti: piana e cilindrica. Le rese per neutroni, fotoni gamma e protoni sono riportate nella Tabella 1 e nella Tabella 2, tratte dall'articolo in questione.

| Target/angular bin | Neutrons | | | Photons | | | Protons | | |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0-10° | 40-50° | 90-180° | 0-10° | 40-50° | 90-180° | 0-10° | 40-50° | 90-180° |
| TE40 | 9.87E-02 | 1.71E-02 | 6.32E-03 | 1.59E-02 | 1.71E-02 | 1.80E-02 | 1.32E-03 | 1.25E-03 | 7.21E-05 |
| Cu 7 slab | 1.93E-01 | 1.06E-01 | 6.82E-02 | 9.02E-02 | 6.42E-02 | 5.44E-02 | 4.99E-04 | 1.44E-04 | 1.16E-04 |
| W 5 slab | 3.61E-01 | 2.38E-01 | 2.00E-01 | 4.36E-02 | 2.74E-02 | 3.72E-02 | 2.25E-04 | 6.91E-05 | 1.39E-04 |
| Cu 7 cyl | 1.34E-01 | 8.62E-02 | 6.11E-02 | 4.94E-02 | 6.05E-02 | 6.92E-02 | 4.21E-04 | 2.17E-03 | 1.39E-04 |
| W 5 cyl | 2.18E-01 | 1.72E-01 | 1.79E-01 | 2.32E-02 | 2.41E-02 | 4.15E-02 | 1.71E-04 | 1.39E-04 | 1.55E-04 |

Tabella 3 Rese delle particelle secondarie per un fascio di protoni da 250 MeV.

| Target/angular bin | Neutrons | | | Photons | | | Protons | | |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0-10° | 40-50° | 90-180° | 0-10° | 40-50° | 90-180° | 0-10° | 40-50° | 90-180° |
| TE30 | 5.41E+00 | 5.60E-01 | 9.00E-02 | 2.60E-01 | 2.10E-01 | 1.97E-01 | 4.77E+00 | 1.17E-01 | 1.59E-03 |
| Cu 5 slab | 4.62E+00 | 1.22E+00 | 4.70E-01 | 8.50E-01 | 6.30E-01 | 4.40E-01 | 2.32E+00 | 5.10E-01 | 1.66E-03 |
| W 5 slab | 5.10E+00 | 2.50E+00 | 1.64E+00 | 4.78E-01 | 3.23E-01 | 3.34E-01 | 5.07E-01 | 1.20E-02 | 2.51E-03 |
| Cu 5 cyl | 4.23E+00 | 9.99E-01 | 4.05E-01 | 4.68E-01 | 4.41E-01 | 4.52E-01 | 2.31E+00 | 7.36E-02 | 2.10E-03 |
| W 5 cyl | 3.59E+00 | 1.76E+00 | 1.32E+00 | 2.22E-01 | 2.44E-01 | 3.56E-01 | 5.03E-01 | 1.95E-01 | 2.76E-03 |

Tabella 4 Rese delle particelle secondarie per un fascio di ioni carbonio da 400 MeV/u.

Dai dati nella Tabella 1 e nella Tabella 2 si nota, innanzitutto, come la radiazione secondaria in generale sia piccata in avanti (angoli 0-10°), inoltre si deduce come la scelta di schermare i dump con il piombo sia del tutto legittima data la frazione di fotoni gamma che comunque viene prodotta nei target metallici, specialmente nel caso degli ioni carbonio. In fine si può notare come la componente neutronica sia tutt'altro che trascurabile. La componente di protoni in alcuni casi raggiunge valori di resa confrontabili con quella dei neutroni, ciò potrà essere rilevante dal punto di

vista dell'attivazione dell'aria, ma risulta piuttosto trascurabile per quanto riguarda le schermature e gli altri aspetti di radioprotezione.

Infatti, il comportamento dei protoni nella materia (picco di Bragg, paragrafo 2.1) assicura che essi vengano fermati da schermature molto più sottili rispetto a quelle necessarie per i neutroni.

2.3 Calcolo dell'attivazione dell'aria e della relativa dose

Dall'esperienza presso gli acceleratori di protoni e dagli studi in letteratura (NCRP, 2003) risulta che la principale conseguenza dell'interazione diretta tra il fascio e l'aria sia la formazione di radioisotopi a vita breve per reazioni di spallazione sugli atomi di azoto e ossigeno presenti in aria. La spallazione è il fenomeno alla base anche della formazione di radioisotopi conseguentemente all'interazione tra neutroni non termici e l'aria. Come detto precedentemente questi neutroni sono la componente primaria della radiazione secondaria.

È possibile calcolare l'attività (qui riportata a saturazione, per semplicità) di un radionuclide (A_{sat}) prodotto a seguito dell'interazione tra neutroni energetici e l'aria con l'equazione (2.1) (NCRP, 2003)

$$A_{sat} = Q_{NE} \frac{N_A}{A_i} f_i \rho \sigma_i \quad (2.1)$$

In cui:

Q_{NE} è il rate di neutroni ad una data energia;

N_A Numero di Avogadro; A_i peso atomico dell'elemento bersaglio i ; ρ la densità del mezzo;

f_i la frazione del bersaglio presente nel mezzo;

σ_i la sezione d'urto del bersaglio;

Per quanto riguarda i valori di f_i , va ricordato che i principali isotopi presenti in aria sono azoto-14 e ossigeno-16, le cui percentuali in volume in condizioni standard di pressione e temperatura sono rispettivamente del 78.08% e del 20.95%.

La Figura 2 e la Figura 3 riportano i dati di letteratura (NEA, 2019) riguardo alla formazione di alcuni radionuclidi considerati generalmente d'interesse con neutroni, come si vedrà in seguito i prodotti di queste interazioni saranno centrali anche per questo lavoro di tesi.

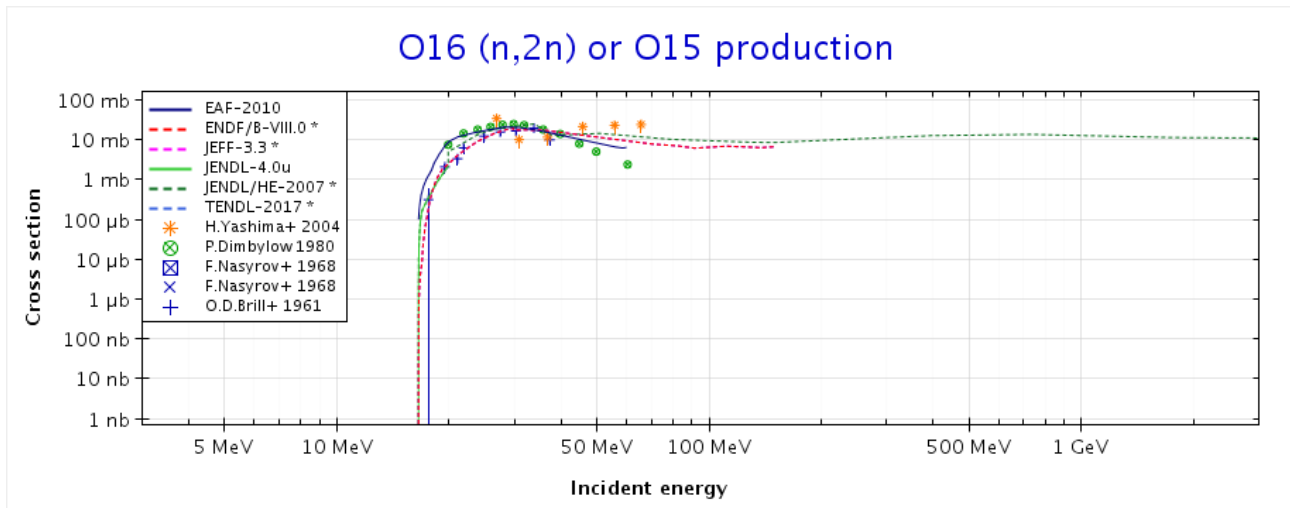


Figura 6 Sezioni d'urto per neutroni energetici su ossigeno-16 (NEA, 2019)

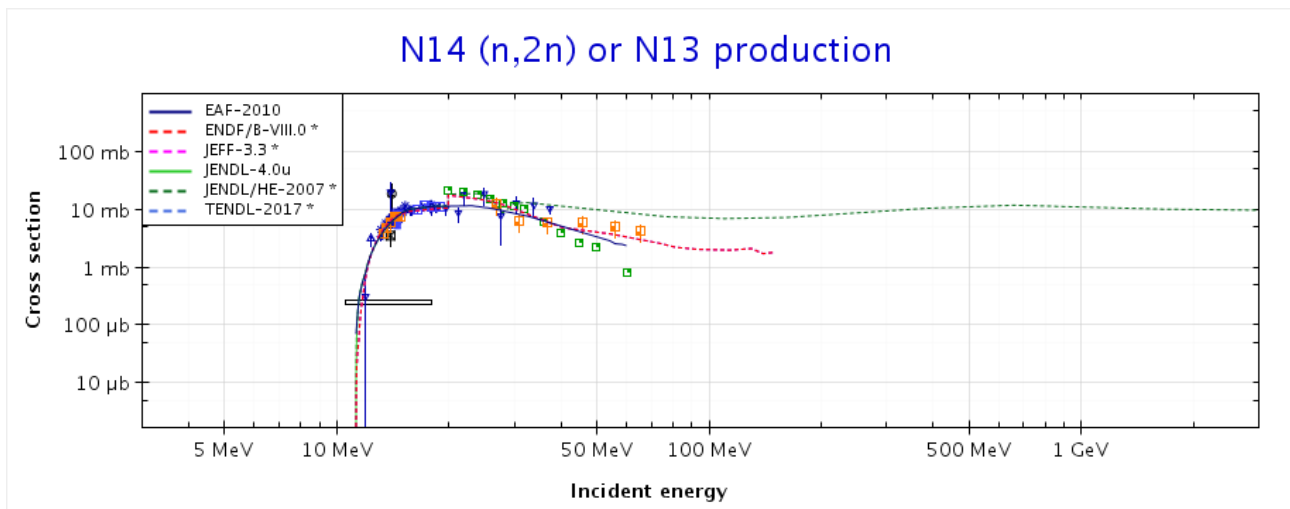


Figura 7 Sezioni d'urto per neutroni energetici su azoto-14 (NEA, 2019)

Un discorso analogo si può fare per lo spettro dei neutroni termici, sia direttamente emessi come secondari, sia formati dalla degradazione in energia dei neutroni energetici. All'equazione (2.1) va sostituito il flusso di neutroni termici (Φ_{th}) al posto del rate di neutroni energetici (Q_{NE}). In questo caso va posta molta attenzione sull'argon-41, prodotto per assorbimento di neutroni termici da parte dell'argon-40. Sebbene la quantità di atomi bersaglio in aria per questa reazione sia piuttosto bassa (0.93% del volume in condizioni standard), la sua sezione d'urto ha un valore piuttosto elevato (circa 610 mb (NCRP, 2003), lo si confronti con i dati delle figure 2 e 3), rendendo quindi la produzione del radionuclide potenzialmente un problema.

Per quanto riguarda i tratti in cui l'attivazione dell'aria è causata direttamente dal fascio primario si può fare direttamente alle formule (1.1) e (1.2) del capitolo 1.

Da quanto si apprende in letteratura (NCRP, 2003), i radionuclidi di particolare interesse nel caso in questione sono ^3H , ^7Be , ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O e ^{41}Ar . Tuttavia, ci si aspetta un minor contributo da parte del trizio e del berillio a causa della ridotta sezione d'urto dei processi di formazione.

I calcoli per l'attivazione dell'aria possono risultare piuttosto complessi, soprattutto qualora si volessero stime particolarmente accurate, a causa delle complicazioni che i vari processi fisici da considerare portano con sé. Inoltre, le sezioni d'urto non sono sempre presenti in letteratura per tutte le combinazioni di proiettili-bersagli e per tutte le energie. Per tutti questi motivi si sono sviluppati codici Monte Carlo per simulare l'interazione tra adroni e nuclei. Tra questi, in questo lavoro, si è scelto di usare il codice FLUKA che verrà illustrato in seguito.

Nota l'attività prodotta dalla macchina ed eventualmente dispersa nell'ambiente, è necessario quantificare la dose ad essa attribuita.

Come si è detto nel capitolo precedente, nel caso di radionuclidi dispersi in aria le vie principali per cui si riceve dose da essi sono la sommersione e l'inalazione.

Una volta nota l'attività dei singoli radionuclidi, è possibile fare valutazioni dosimetriche usando appositi coefficienti di conversione.

Nel caso di sommersione la normativa italiana non fornisce i valori di tali coefficienti per i radionuclidi d'interesse per questo lavoro, ci si può però avvalere dei valori presenti nella Federal Guidance Report No. 12 dell'EPA (USA) (EPA, U.S. Environmental Protection Agency, 1993), per il resto del lavoro di tesi si farà affidamento su tali coefficienti.

I coefficienti in parola sono espressi in termini di equivalente di dose efficace, tuttavia alle energie in esame, la differenza tra questa grandezza e la dose efficace è trascurabile.

Una volta noti questi coefficienti (h_t) è possibile calcolare il rateo di equivalente di dose efficace (*EDER, Effective Dose Equivalent Rate*) con la seguente equazione:

$$EDER = h_t a \quad (2.2)$$

In cui a è l'attività specifica, cioè la concentrazione di attività nel volume d'aria.

Per quanto riguarda l'inalazione, invece, si possono ottenere i coefficienti di dose dal D.Lgs 241/00 per alcuni radionuclidi, in particolare Ar-41 e C-11 tra quelli di maggior interesse, mentre per quelli non presenti si possono usare quelli presenti in letteratura, in particolare nella Pubblicazione 53 di ICRP. (ICRP, 1988)

È possibile calcolare la dose per inalazione in maniera del tutto analoga a quanto fatto per la sommersione, usando gli opportuni coefficienti al posto di h_t .

I coefficienti di dose per sommersione e inalazione dei principali radionuclidi in esame sono presentati nella Tabella 8, le fonti sono quelle citate in precedenza. Soprattutto per quanto riguarda l'inalazione, in letteratura i coefficienti vengono presentati con differenti unità di misura, qui vengono presentati in maniera omogenea, quando è stato necessario si è moltiplicato i coefficienti (spesso espressi in Sv/Bq o multipli) per la quantità di aria respirata dall'uomo standard (20 m³/giorno).

| Radionuclide | Coefficienti di conversione per sommersione (Sv/Bq s m ⁻³) | Coefficienti di conversione per inalazione (Sv/Bq s m ⁻³) |
|--------------|--|---|
| C-11 | 4.89E-14 | 7.40741E-16 |
| N-13 | 4.90E-14 | 8.56481E-17 |
| O-15 | 4.91E-14 | 9.02778E-17 |
| Ar-41 | 6.50E-14 | 1.41997E-17 |

Tabella 5 Coefficienti per il calcolo della dose per sommersione e per inalazione.

Come si evince dai dati della Tabella 8, la principale fonte di dose agli individui per i radionuclidi di maggior interesse risulta la sommersione.

2.4 Il caso CNAO

L'idea che porterà alla realizzazione del Centro si può far risalire ad una pubblicazione del 1991 da parte di Amaldi e Tosi (Amaldi U.), nel 1995 si inizia un progetto a livello europeo per un sincrotrone per ioni carbonio e protoni ottimizzato per la terapia (PIMMS). Nel 2001 viene creata la Fondazione CNAO e quattro anni dopo vengono poste le basi per la costruzione del Centro che durerà 5 anni. Nel 2011 il primo paziente completa con successo il primo ciclo di trattamento, mentre l'anno seguente si ha il primo paziente trattato con ioni carbonio. Ad oggi si lavora per l'evoluzione del Centro su numerosi fronti: l'istallazione di un'altra macchina per protonterapia, l'uso di particelle diverse da protoni e ioni carbonio e la possibilità di implementare terapie con neutroni (BNCT).

Il Centro è costituito da un edificio che si sviluppa su quattro livelli: il piano interrato, dove si trovano le sale trattamento, la sala sperimentale e il sincrotrone; il pian terreno che ospita l'area imaging (PET, TAC e MRI), il primo piano dove si trovano gli uffici tecnici e di radioprotezione; e il secondo piano in cui si trovano gli uffici amministrativi. La scelta di posizionare il sincrotrone in un piano interrato, e in una porzione dell'edificio chiaramente staccata dal resto (Figura 4), è stata fatta anche al fine di assicurare un'ulteriore schermatura dalle radiazioni.

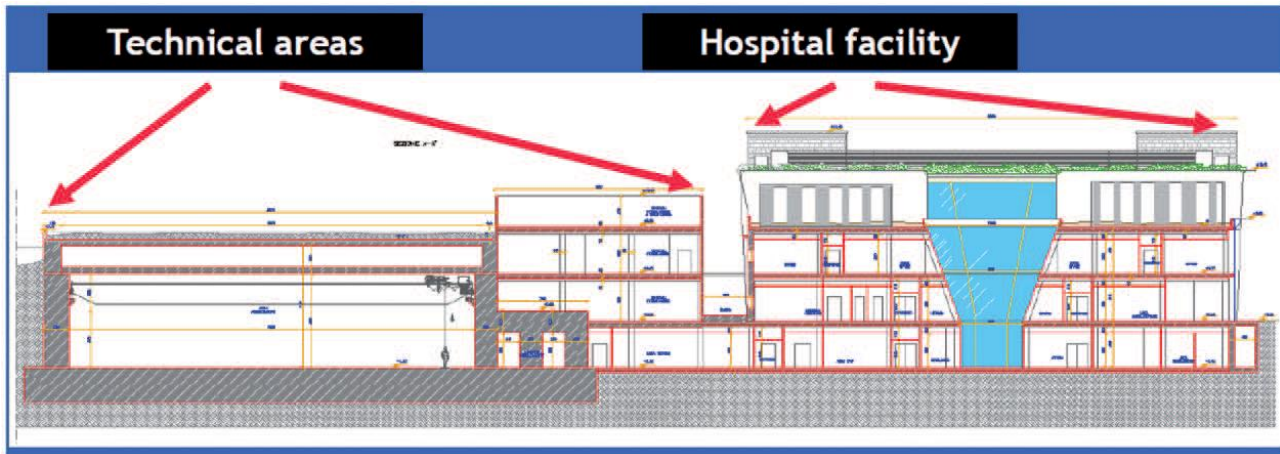


Figura 8 Sezione trasversale dell'edificio del CNAO in cui si vede chiaramente la netta separazione dell'area tecnica (in cui è posto il sincrotrone e le sale trattamento) e il resto del complesso. (Rossi, 2011)

Il CNAO è situato in Località Campeggi nella zona Nord-Ovest del comune di Pavia (PV) (Figura 5). La zona della città è scarsamente abitata, tuttavia presenta strutture di forte richiamo come l'Ospedale, cliniche mediche e varie sedi dell'Università di Pavia. A poche decine di metri dal confine sud-ovest del CNAO si trova l'edificio che ospita l'Istituto Zooprofilattico Sperimentale Della Lombardia e dell'Emilia-Romagna, dietro il quale è collocato un piccolo complesso residenziale. A sud-est e ad est si sviluppa il complesso del Policlinico San Matteo, il cui punto più vicino è il Reparto di Malattie Infettive e Tropicali, a meno di 100 metri a sud-est dai confini del CNAO. La zona a nord del Centro risulta più sgombra: a nord è presente un'area adibita a parcheggio, mentre a nord-ovest il Centro si trova a ridosso della Tangenziale Ovest di Pavia, oltre la quale, a qualche centinaio di metri, sono collocati la Clinica Maugeri e l'Istituto Mondino (entrambe strutture a mediche). (Figura 6)



Figura 9 Vista di Pavia dall'alto con il CNAO in evidenza.

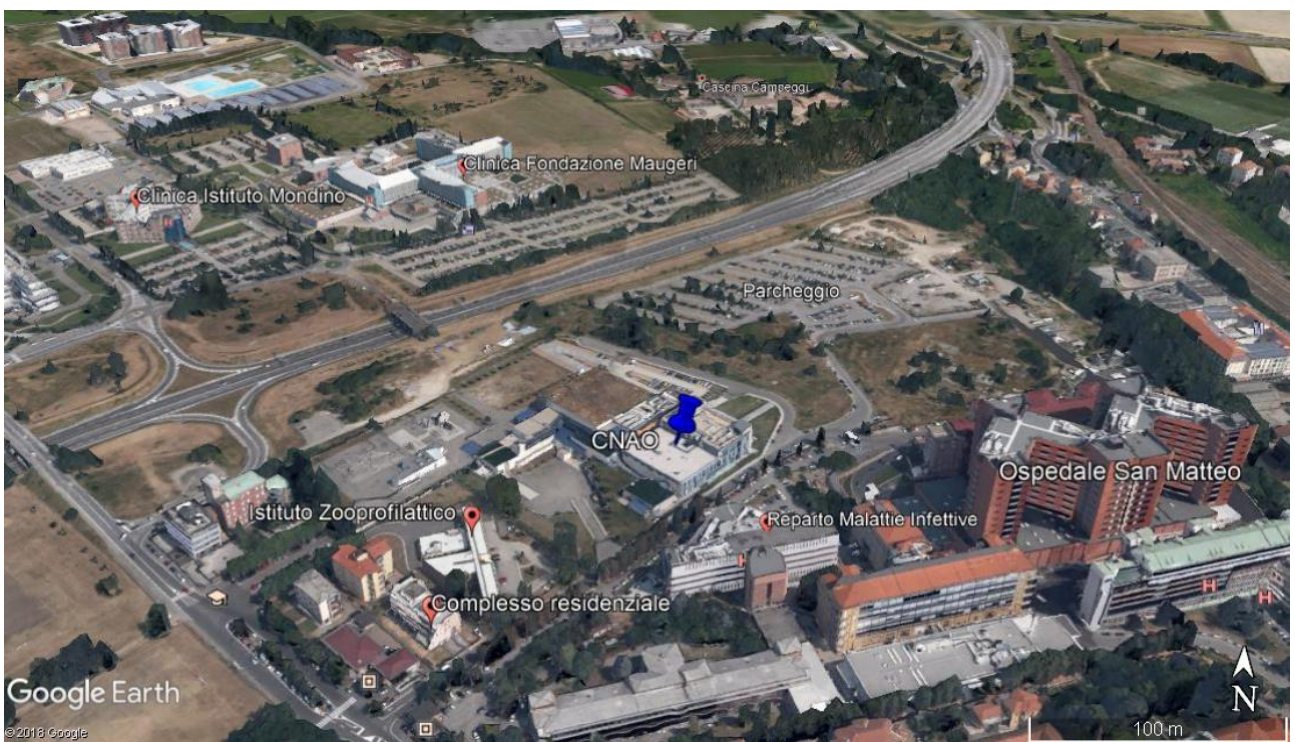


Figura 10 L'edificio del CNAO e le altre costruzioni nelle vicinanze.

Il sincrotrone del CNAO

Il CNAO tratta pazienti con protoni e ioni carbonio ($^{12}\text{C}^{6+}$) avvalendosi di un sincrotrone di circa 25 metri di diametro.

Due sorgenti producono le particelle necessarie ai trattamenti partendo da gas di CO_2 e H_2 . Queste sono collegate a un *Low-Energy Beam Transport* (LEBT) che le trasporta prima a un quadrupolo a radiofrequenza (RFQ) e, in seguito, a un acceleratore lineare a radiofrequenze (LINAC), questi passaggi permettono di ottenere gli ioni desiderati all'energia di 7 MeV/u, necessaria per iniettare le particelle nell'anello del sincrotrone.

Per iniettare il fascio nel sincrotrone si crea una distorsione locale dell'orbita che lo conduce in prossimità del setto elettrostatico, dopodiché la distorsione viene ridotta in modo tale da permettere al fascio di occupare la sezione trasversale del sincrotrone.

I magneti del sincrotrone formano due archi e due tratti rettilinei. All'interno dell'anello vi sono punti particolarmente interessanti per questo lavoro:

il dump orizzontale e il dump verticale, in entrambi i casi si tratta di inserti metallici su cui il fascio va a impattare, nel primo caso avviene con la parte di fascio non estratta, mentre il dump verticale provvede alle interruzioni in caso di emergenza;

il setto elettrostatico e il setto magnetico, entrambi con la funzione di deviare la traiettoria del fascio.

Quando raggiunge l'energia desiderata il fascio viene estratto dall'anello (la parte di fascio estratta è detta *spill*) e attraverso il sistema High Energy Beam Transport (HEBT) viene convogliato nella linea selezionata e mandato nella sala richiesta, il range di energie considerate va da un minimo di 60 MeV per i protoni a un massimo di 400 MeV/u per ioni carbonio. Nell'HEBT è presente un elemento fondamentale sotto vari aspetti: il chopper HEBT. Si tratta di una serie di quattro dipoli che, in condizioni normali sono spenti e lasciano che il fascio si scontri con un blocco metallico (dump) ed evitano che il fascio arrivi in sala, mentre quando sono accesi indirizzano le particelle in sala. Poiché il chopper è in grado di accendersi e spegnersi rapidamente, è anche utilizzato per ridurre il numero di particelle nello spill fino al valore richiesto per il trattamento o per interromperlo. Attualmente il CNAO è dotato di 4 linee per le sale di trattamento, di cui 3 orizzontali e una verticale (Rossi, 2011), e dal maggio 2019 è in fase di commissioning anche la linea per la sala sperimentale.

Una volta arrivato in sala il fascio è distribuito dal *dose delivery*, un sistema formato essenzialmente da camere a ionizzazione e magneti, con il metodo della scansione attiva. Con questa tecnica si suddivide idealmente il volume da irraggiare (nel caso dei pazienti la massa tumorale) in porzioni *iso-range*, cioè alla stessa profondità e quindi raggiungibili da particelle alla stessa energia, e l'energia del fascio è regolata perché il picco di Bragg si trovi sulla regione idonea. Il fascio viene deflesso dai magneti di scansione del dose delivery in modo da toccare tutti i punti della regione e da sostare in ciascuno di essi il tempo necessario per depositare la dose

prevista. Una volta completata la regione da irraggiare l'estrazione è interrotta e il fascio viene accelerato all'energia necessaria per la regione successiva. Dalla sorgente fino a qualche centimetro dal paziente, le particelle del fascio risiedono in una camera a vuoto di acciaio inossidabile le cui dimensioni sono variabili a seconda del tratto considerato, ma lo spessore è dell'ordine qualche centimetro, mentre l'area è di qualche decina di centimetri quadrati.

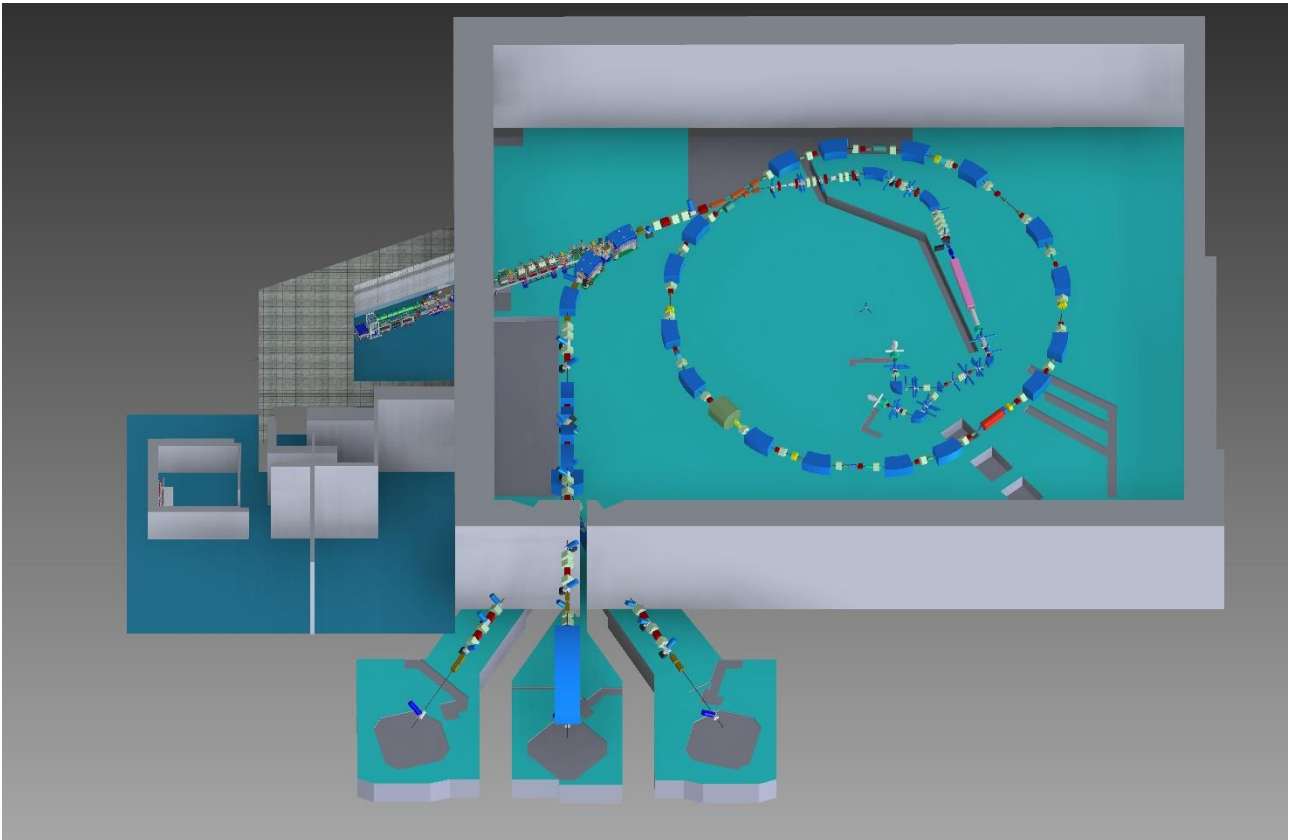


Figura 11 Schema del sincrotrone installato al CNAO, delle linee per le sale trattamento (in basso) e per la sala sperimentale (a sinistra)

Sorgenti di perdite di fascio

L'attivazione delle componenti del sincrotrone, come si è detto in precedenza, è dovuta principalmente all'interazione del fascio con parti metalliche della macchina, i punti in cui ciò avviene vengono detti punti di perdita. Sebbene il termine suggerisca un'accezione negativa, in alcuni casi parte del fascio viene perso volontariamente, come si è visto per il chopper HEBT. In questo paragrafo si descriveranno i principali punti di perdita del fascio che verranno considerati per le future simulazioni. Ad ogni sorgente di perdita è associata una percentuale del fascio circolante in macchina che viene perso in tal punto, questi valori derivano da simulazioni e calcoli teorici compiuti dai macchinisti in fase di commissioning della macchina.

La prima sorgente di perdite considerata si riferisce alle *perdite indesiderate lungo l'anello*. Il fascio può essere perso in qualunque punto dell'anello a causa di effetti indesiderati. La probabilità maggiore di perdita si ha nei punti in cui il fascio cambia direzione, quindi nei dipoli, tuttavia per

semplicità di calcolo, nelle successive simulazioni si è supposto una perdita uniformemente distribuita lungo tutta la circonferenza del sincrotrone. Per quanto riguarda la direzione di incidenza del fascio sul rivestimento del sincrotrone, si è supposto che essa sia tangenziale alla circonferenza, ci si aspetta che anche la radiazione prodotta abbia approssimativamente la stessa direzione. Per questa sorgente si è supposta una perdita del 4.7% delle particelle circolanti nel sincrotrone.

Il *dump orizzontale* è considerato un'altra sorgente di perdita di fascio. Si tratta di un blocco di tungsteno lungo 10 cm di forma superellittica. Il suo scopo è quello di eliminare volontariamente una porzione di fascio ad ogni passaggio. Il fascio che impatta sul dump innesca una cascata adronica che si sviluppa all'interno del blocco e induce una forte attività residua. Onde evitare che l'emissione di radiazione adronica secondaria emessa dal dump orizzontale causi l'attivazione anche delle componenti ad esso più vicine si è ritenuto opportuno porre uno schermo di ferro attorno ad esso. Per le simulazioni successive si è scelto, però un approccio più conservativo e tale schermo non è stato considerato, inoltre si è ritenuto che il dump orizzontale sia responsabile della perdita del 28% delle particelle circolanti nel sincrotrone.

Il *dump verticale* è pensato per arrestare il fascio completamente e istantaneamente in condizioni di emergenza. Come il dump orizzontale, è fatto di tungsteno e ha la forma del profilo della camera a vuoto. Siccome viene impiegato solo in casi di "emergenza", è soggetto a un flusso minore di particelle incidenti, tuttavia si è ritenuto opportuna schermarlo con uno strato di ferro di 15 cm per ragioni analoghe a quelle viste precedentemente. Si suppone che il dump verticale comporti una perdita del 2.8% delle particelle nel sincrotrone.

Il *setto elettrostatico e magnetico* rappresentano le componenti chiave dell'estrazione delle particelle. Il sincrotrone del CNAO usa un processo di estrazione lenta, cioè le particelle in macchina oscillano intorno all'orbita di riferimento, ad ogni giro queste oscillazioni vengono rese più ampie. Quando raggiungono il setto elettrostatico, le particelle più instabili sentono il campo elettrico da esso generato e ricevono un "kick" che le sposta su un'orbita diversa. Le particelle su questa nuova orbita hanno l'angolazione corretta per subire la deviazione dovuta al setto magnetico e andare nella linea di estrazione. Le perdite legate al setto elettrostatico sono dovute a un'esagerata deviazione delle particelle dovuta al "kick" che esso fornisce. Per il setto magnetico si tratta sostanzialmente di un dipolo che curva il fascio e, come visto in precedenza, è fonte di perdite.

Le percentuali di perdita di fascio circolante per i stetti sono 11.7% per quello elettrostatico e 4.7% per quello magnetico.

Il *chopper HEBT* nella pratica si trova all'esterno della camera a vuoto. Il suo compito è quello di intercettare il singolo spill. Il chopper si trova in una posizione critica poiché è vicino a strumentazione elettronica sensibile alle radiazioni. Per questo si è cercato di ridurre il più possibile

la radiazione adronica retrodiffusa. Una soluzione adottata a questo scopo è stata scegliere un chopper a due strati, uno esterno a basso numero atomico e media densità, e uno interno ad alto numero atomico e alta densità. Il fascio primario penetra facilmente il primo strato interagendo lievemente, e viene arrestato dal secondo strato. La radiazione secondaria, a questo punto, si formerà in profondità e, nel caso della componente retrodiffusa, verrà assorbita dal primo strato. Nonostante le accortezze prese nella realtà, nelle simulazioni si è supposta una situazione più semplice e più conservativa. Il valore di perdite associato al chopper HEBIT è pari al 9.4%.

Studio dell'attivazione dell'aria

Lo studio, svolto dall'Esperto Qualificato, dell'attivazione dell'aria è stato svolto in fase di commissioning e prevede alcune ipotesi semplificative ma conservative, che danno valori che possono essere considerati come valori limite rispetto a quelli che si possono avere nella realtà. Una prima ipotesi riguarda le correnti circolanti nel sincrotrone: si sono considerate le *correnti massime* per ogni particella, cioè nel caso di ioni carbonio 5.5×10^8 particelle/s e per i protoni 1.375×10^{10} particelle/s.

Un'ulteriore ipotesi riguarda le energie del fascio di particelle incidenti: si sono supposte le energie massime per gli ioni carbonio e per i protoni, pari rispettivamente a 400 MeV/u e 250 MeV.

Non disponendo dei file di input usati per le simulazioni in questione non si ha la certezza delle approssimazioni adottate riguardo alle *geometrie*, tuttavia si può supporre che quelle usate per aggiornare la relazione del commissioning non differiscano in maniera sostanziale dalla reale struttura delle sale, e in definitiva anche dalle geometrie usate nelle simulazioni di questo lavoro di tesi.

Anche i tempi d'irraggiamento sono stati scelti in modo conservativo, sebbene si tratti spesso dei valori medi per alcune operazioni, risultano eccessivi rispetto al reale funzionamento della macchina. Per l'attivazione in sala sincrotrone si è scelto un tempo d'irraggiamento di 14.5 ore consecutive per una tipica giornata di terapia e 24 ore consecutive per l'attività sperimentale. Mentre per le sale trattamento si considerano 132 secondi, cioè il tempo tipico di un trattamento, valore che si ottiene supponendo 60 estrazioni di fascio per ogni trattamento e 2.2 secondi per l'estrazione.

Sono state svolte simulazioni per determinare quali radionuclidi fossero prodotti dall'attivazione dell'aria e in quali percentuali. Si è ipotizzato un tempo d'irraggiamento in sala sincrotrone di un anno di lavoro della macchina (7355 giorni) con ioni carbonio e si sono supposti vari tempi di cooling.

Il tempo d'irraggiamento scelto per questa simulazione è stato tale da consentire la saturazione di eventuali radionuclidi a vita media che dovrebbero formarsi. Tuttavia, l'attività indotta si riduce del 33% dopo il primo minuto di tempo di cooling, ciò fa supporre la presenza di numerosi radionuclidi a vita media brevissima. Ai fini d'interesse di questo lavoro di tesi essi possono essere trascurati.

Perciò di tutti i radionuclidi formati si considereranno solo quelli il cui tempo di dimezzamento è maggiore di 1.5 minuti, e sono riportati in Tabella 4 insieme al loro peso percentuale su tutta l'attività indotta al termine dell'irraggiamento usando un fascio di ioni carbonio (seconda colonna) e di protoni (terza colonna).

| Radionuclide | % dell'attività indotta (ioni carbonio) | % dell'attività indotta (protoni) |
|--------------|---|-----------------------------------|
| H-3 | 1.11 | 0.42 |
| Be-7 | 5.72 | 5.35 |
| C-11 | 11.81 | 12.69 |
| N-13 | 47.58 | 48.81 |
| O-15 | 16.42 | 20.12 |
| Si-31 | 0.0182 | 0.00142 |
| P-32 | 0.11 | 0.0009 |
| P-33 | 0.0931 | 0.06 |
| S-35 | 0.18 | 0.09 |
| Cl-38 | 0.34 | 0.08 |
| Cl-39 | 0.56 | 0.13 |
| Ar-37 | 0.18 | 0.16 |
| Ar-41 | 0.00379 | 0.00305 |

Tabella 6 Contributi dei nuclidi con $T_{1/2} > 1.5$ minuti all'attività indotta al termine dell'irraggiamento ($t_{irr}=7355$ giorni).

Sommando le righe della seconda colonna della Tabella 4 si ottiene che questi radionuclidi contribuiscono all'84.1%, la parte mancante è data da quelli con tempo di dimezzamento inferiore a 1.5 minuti.

Dalla Tabella 4 si evince che la miscela di gas radioattivi prodotti nell'aria della sala sincrotrone durante il funzionamento con ioni carbonio è una miscela dominata in pratica da C-11, N-13 e O-15, i cui tempi di dimezzamento variano dai 2 ai 20 minuti, cui si aggiungono un certo numero di radionuclidi con tempi di dimezzamento dell'ordine dei giorni.

Per calcolare la concentrazione di attività diffusa al di fuori del CNAO si è usato il modello gaussiano, già discusso ampiamente nel capitolo precedente, di cui si riporta per comodità la formula:

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z v} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad (2.3)$$

I significati dei simboli sono gli stessi dell'equazione (1.8).

Si noti come la formula usata è quella priva del fattore esponenziale che tiene conto del decadimento del radionuclide durante il percorso, tale ipotesi è da considerarsi conservativa ma irrealistica.

Si è valutata la dose al suolo data a una distanza nella direzione del vento di 100 metri ($x=100$ m, $y=0$, $z=0$), ciò implica anche che si è supposto che il vento soffi sempre nella stessa direzione, altra ipotesi conservativa ma decisamente irrealistica.

Si sono considerate due condizioni meteorologiche: nel caso di atmosfera instabile e nel caso di atmosfera stabile.

Nel primo caso si è supposto di trovarsi in classi di stabilità A e B (da cui si ricavano i valori di σ_y e σ_z) e una velocità del vento (v) tra 0.5 e 1 m/s, in tali condizioni la dose annua a 100 metri sarebbe di 1 $\mu\text{Sv}/\text{anno}$.

Nel caso di atmosfera stabile si è supposto di avere condizioni che rientrino nelle classi di stabilità E ed F e la velocità del vento pari a 2 m/s, in questo caso le dosi al pubblico sono dell'ordine di 3 $\mu\text{Sv}/\text{anno}$.

Risulta evidente che le dosi in questione sono del tutto irrilevanti dal punto di vista radioprotezionistico, soprattutto per il fatto che, date le molte ipotesi fatte, esse rappresentano un limite superiore. Scopo di questo lavoro di tesi è quello di rimuovere il più possibile tali ipotesi per avere un modello più realistico per il calcolo della dose ricevuta dalle persone del pubblico. Si provvederà quindi a studiare l'attivazione dell'aria realmente prodotta da una macchina in operazione e a studiare la dispersione dei contaminanti in aria. Tutto ciò non è finalizzato a un semplice esercizio accademico, ma può avere dei risvolti pratici per il lavoro del Centro. Applicare ipotesi più realistiche, infatti, ci si aspetta che conduca a una riduzione del valore di dose stimato.

2.5 Sistemi di monitoraggio dell'aria

Per avere valori reali dell'attivazione dell'aria si potrebbe misurarne l'attività dopo l'estrazione dalla sala da parte del sistema di ventilazione e prima dell'emissione all'esterno.

Al fine di monitorare la presenza di radionuclidi in aria ed eventualmente attivare il blocco delle attività, qualora la concentrazione di attività in aria superi il valore di 1 Bq/g, al CNAO si è installato il sistema EGAM (Enhanced Gaseous Activity Monitor) della Technology Nuclear Electronics. Sono presenti tre sistemi EGAM identici, uno preleva campioni d'aria dalla sala sincrotrone, uno da tutte le sale trattamento e uno dalla sala sperimentale.

Il sistema EGAM permette il monitoraggio dei radionuclidi in aria che normalmente non vengono trattenuti dai filtri. Si tratta di un sistema di monitoraggio in continuo di un campione d'aria prelevato dalle condotte di scarico delle sale. La peculiarità del sistema consiste nel fatto che il campione viene posto sotto pressione prima di essere misurato, in modo tale da aumentare la quantità di aria misurata, senza incrementare le dimensioni della camera di misura, e ciò implica un aumento della sensibilità di misura.

Il sistema è costituito da un condotto d'aspirazione che preleva il campione d'aria dalla condotta di ventilazione, questo viene fatto passare in un filtro in modo tale da eliminare eventuali aerosol residui, e portato ai compressori che lo portano alla pressione desiderata, compresa tra i 3 e 4 bar. Dopo essere passato da un ulteriore filtro e da un essiccatore, il campione raggiunge la camera di misura. Si tratta di una camera a geometria "Marinelli" (che verrà dettagliata in seguito) con uno scintillatore di ioduro di sodio drogato con tallio (NaI(Tl)). Dopo esser stato sottoposto a misura il campione viene riportato alla pressione d'ingresso (tipicamente la pressione ambiente) e reintrodotta nel sistema di ventilazione sufficientemente a valle rispetto al punto d'ingresso in modo da evitare ricircoli.

Una camera Marinelli è formata da un cilindro di alluminio dal diametro di poco meno di 20 cm e altezza di poco inferiore con pareti spesse qualche millimetro. L'interno è cavo e ciò permette di farvi defluire l'aria all'interno, al centro della camera è posto un altro cilindro, di diametro e altezza minori della metà delle dimensioni della camera, in questo cilindro più piccolo è inserito il cristallo di NaI(Tl), a circa un millimetro dalla parete interna del cilindro, parete spessa pochi millimetri. Il volume complessivo d'aria presente nella camera è di circa 3500 cm³.

Il cristallo di NaI(Tl) posto all'interno del cilindro minore svolge la funzione di rivelatore di raggi gamma, i radionuclidi in esame (C-11, N-13 e O-15) sono emettitori β^+ , il che vuol dire che verranno rivelati i gamma da 511 keV dovuti all'annichilazione del positrone emesso, ed eventualmente potrebbe rivelare la presenza di gamma da 1.29 MeV emessi dal decadimento β^- dell'argon-41 in uno stato eccitato a eccitato (branching ratio: 99.16%).

La minima attività rilevabile (MDA) dal sistema è stata calcolata a partire da considerazione statistiche ed è associata ad ogni singola misura.

In precedenza, è stata fatta una misura accurata del fondo, che viene considerata il fondo standard presente (B_{std}).

Il rivelatore compie una misura dei conteggi (M_{cps}) e ne restituisce il valore, l'errore di tale misura (E_{cps}) viene calcolato come la radice quadrata della misura stessa:

$$E_{cps} = \sqrt{M_{cps}} \quad (2.4)$$

Alla misura viene poi sottratto il fondo standard, trovando il numero netto di conteggi (m_{cps}), per calcolare l'errore associato a tale numero (ϵ_{cps}) si fa la radice quadrata della somma dei due conteggi:

$$\epsilon_{cps} = \sqrt{M_{cps} + B_{std}} \quad (2.5)$$

A questo punto è necessario passare dai conteggi ai rispettivi valori di concentrazione di attività. Per far ciò è necessario conoscere l'efficienza del sistema. Sebbene il costruttore fornisca valori per questa grandezza, essi si riferiscono a una distribuzione uniforme dei gamma all'interno del

Marinelli. Questo può essere vero per radionuclidi gamma emettitori, ma nel caso di emettitori β^+ ciò potrebbe essere non vero. I positroni infatti potrebbero attraversare indenni il volume d'aria e annichilirsi sulle pareti, che a questo punto diventerebbero le principali sorgenti di radiazioni gamma. Per tener conto di questa situazione sono state fatte delle simulazioni per stimare la nuova efficienza del rivelatore.

Noto il valore di dell'efficienza del rivelatore nelle condizioni di operatività (e), è possibile introdurre un coefficiente di conversione (ce) per le misure di attività in modo da passare da grandezze in unità di conteggi (cps) a densità di attività (Bq/g):

$$ce = \rho V e \quad (2.6)$$

Con questo coefficiente è possibile trasformare le misure e i relativi errori nelle unità di misura più opportune. Infine, il valore di MDA viene imposto ponendo:

$$MDA = 4.36 \epsilon_{Bq/g} \quad (2.7)$$

Con $\epsilon_{Bq/g}$ è il valore dell'errore a seguito della conversione e 4.36 garantisce che la probabilità di falsi positivi non superi 1%.

Valori tipici per l'attività minima rilevabile in 10 minuti sono di 0.012 Bq/g nel caso dei gamma da 511 keV emessi a seguito dell'annichilazione dei positroni, e 0.018 Bq/g per i gamma emessi da Ar-41. Durante le normali condizioni di funzionamento del Centro non sono stati rilevate attività superiori a tali limiti, per questo una misura diretta dell'attività prodotta in aria dalla macchina non è fattibile. Anche se ciò avvenisse non sarebbe possibile discriminare il contributo dei vari radionuclidi emettitori β^+ .

Per tutti questi motivi, la stima dell'attività indotta verrà fatta in questo lavoro di tesi a seguito di simulazioni Monte Carlo.

Capitolo 3

In questo capitolo si studierà l'attivazione prodotta da un fascio di adroni libero in aria. Le particelle in esame sono protoni, ioni di carbonio-12, ossigeno-16, litio-7 ed elio-4. I valori di tali attività si sono ricavati utilizzando il codice Monte Carlo FLUKA, si è anche svolta attività sperimentale per confermare almeno i casi in cui si usano protoni o ioni carbonio. Nelle operazioni di adroterapia si ha fascio libero in aria nel momento in cui le particelle vengono somministrate al paziente, il quale non è a contatto con il dose delivery.

3.1 FLUKA

Le simulazioni riguardo all'attivazione presentate di seguito sono state fatte usando il codice Monte Carlo FLUKA (Fassò A.).

In FLUKA sono stati implementati algoritmi per modellizzare le interazioni adrone-nucleone e per le interazioni nucleo-nucleo (nel caso il proiettile sia uno ione), i modelli di evaporazione, in particolare, sono validi per nuclei con $A > 16$ mentre per nuclei più leggeri è implementato il modello Fermi Break-up, il che lo rende efficace nel simulare la produzione di radionuclidi a basso numero atomico. Inoltre, simula anche il trasporto di ioni e adroni, ad esempio neutroni fino alle energie termiche.

I modelli fisici sono completamente integrati in FLUKA e vengono usati dal codice a seconda delle energie in gioco nell'interazione, riuscendo quindi a simulare il più possibile la fisica dei processi, senza trascurare interazioni o particelle, a meno che non sia l'utente a chiederlo esplicitamente. Come si è detto in precedenza, in questo lavoro riveste un ruolo importante il comportamento dei neutroni, per questo di seguito verrà brevemente presentato il meccanismo adottato da FLUKA per il trasporto di neutroni a basse energie. Per energie inferiori ai 20 MeV il trasporto è simulato attraverso un algoritmo a multigruppo, cioè l'energia di ogni neutrone non è considerata continua ma viene discretizzata entro un range di energia che caratterizza il singolo gruppo. Attualmente FLUKA adotta una divisione logaritmica in 260 gruppi (31 dei quali nelle energie termiche) e le interazioni non sono simulate con modelli, come nei casi visti in precedenza, ma utilizzando le matrici di probabilità di trasferimento da gruppo a gruppo. (Fassò A.)

Scoring

Nell'uso di FLUKA è fondamentale scegliere la card di scoring adeguata. In questo lavoro il codice viene usato per lo studio dell'attivazione dell'aria, la scelta è quindi ricaduta sulla card RESNUCLEI. Questa card permette di quantificare l'attività dei singoli radionuclidi nella regione considerata. Se associata ad altre card quali DCYSCORE, DCYTIMES, IRRPROFILE e

RADDECAY, permette, inoltre, di avere l'attività prodotta dai radionuclidi d'interesse, a ciascuna delle quali è associata la relativa incertezza della simulazione.

La card RESNUCLEi permette di ridurre il numero di radionuclidi campionati e rendendo la simulazione più leggera dal punto di vista del tempo di computazione e della memoria occupata. In questo lavoro si è scelto di non usufruire di questa opzione qualora non fossero noti quali radionuclidi potessero essere i più interessanti. Una volta scelti i radionuclidi su cui concentrare l'attenzione, si è ridotto lo scoring a questi e a pochi altri.

Si è anche reso necessario l'uso della card di scoring DETECT che permette di quantificare l'energia depositata da ogni particella primaria, o secondaria, in una data regione. Ciò è risultato utile per quantificare l'efficienza del rivelatore al germanio nel rivelare i fotoni gamma da 511 keV emessi dai radionuclidi che decadono β^+ e che si sono formati nell'aria durante gli esperimenti di convalida delle simulazioni.

Source e Routine

Nella sua versione più semplice il codice FLUKA considera come sorgente della radiazione un fascio di particelle rettilineo. Questa configurazione è stata usata in questo lavoro per simulare il fascio primario nelle situazioni più semplici. Per geometrie più complicate, come ad esempio il calcolo dell'efficienza del rivelatore al germanio e le effettive perdite del sincrotrone (entrambe verranno approfondite in seguito), si è scelto di simularle usando delle routine che sostituiscono le geometrie standard in modo da avere risultati più realistici.

In Appendice A è riportata la routine per simulare le perdite di fascio nel sincrotrone con una geometria completa del CNAO. In Appendice B è riportata la routine usata per stimare l'efficienza del rivelatore al germanio usato per rilevare l'attività dei radionuclidi durante gli esperimenti di convalida delle simulazioni.

3.2 Simulazioni per fascio libero in aria

Nella prima serie di simulazioni si è considerato un fascio di adroni che percorre un tratto in aria di 1 m all'interno di un cilindro d'aria del volume complessivo di 1 m³. Si è impostato il tempo d'irraggiamento ad un secondo e la corrente tipica necessaria per i trattamenti di adroterapia, in particolare per i protoni è 1.375×10^{10} particelle/s e per il carbonio è 5.5×10^8 ioni/s.

Si è compiuto lo scoring dei radionuclidi formati al momento di fine irraggiamento ($t_{\text{cooling}}=0$ s), si sono considerati solo quelli con tempo di dimezzamento maggiore a 1.5 minuti e che si sono formati in quantità rilevanti, tali radionuclidi risultano essere, come visto in precedenza, ¹⁵O, ¹³N e ¹¹C.

Le simulazioni sono state compiute in un intervallo di energie (indicate in MeV su nucleone) tra quelle vicine a quelle minime di utilizzo, fino a quelle massime usate.

La Tabella 1 riporta le specifiche degli irraggiamenti.

| Particelle | Distanza (m) | Volume (m ³) | t _{irr} (s) | t _{cooling} (s) |
|------------|--------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|
| C12 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| Protoni | 1 | 1 | 1 | 0 |

Tabella 7 Specifiche delle simulazioni

La Tabella 2 riporta le attività (in Bq), e le relative incertezze percentuali, per i radionuclidi considerati alle relative energie per un fascio di ioni Carbonio con corrente di 5.5×10^8 ioni/s.

| | Energia (MeV/u) | | | |
|-----|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 120 | 200 | 300 | 400 |
| O15 | 1.76E+02 ± 2.3% | 2.31E+02 ± 1.5% | 2.15E+02 ± 2.7% | 2.20E+02 ± 2.5% |
| N13 | 6.81E+01 ± 1.6% | 8.44E+01 ± 1% | 8.01E+01 ± 1.5% | 7.67E+01 ± 1.7% |
| C11 | 3.72E+01 ± 1.3% | 3.15E+01 ± 1.1% | 2.81E+01 ± 1.9% | 2.71E+01 ± 1.7% |

Tabella 8 Attività (Bq) dei radionuclidi formati con una corrente di 5.5×10^8 ioni/s

La Tabella 3 e il relativo grafico (Figura 1) riportano i dati delle simulazioni della Tabella 1 normalizzati per una corrente di 10^8 ioni/s.

| | Energia (MeV/u) | | | |
|-----|-----------------|----------|----------|----------|
| | 120 | 200 | 300 | 400 |
| O15 | 3.20E+01 | 4.21E+01 | 3.90E+01 | 4.00E+01 |
| N13 | 1.24E+01 | 1.53E+01 | 1.46E+01 | 1.39E+01 |
| C11 | 6.76E+00 | 5.73E+00 | 5.12E+00 | 4.92E+00 |

Tabella 9 Attività (Bq) dei radionuclidi prodotti con una corrente di 10^8 ioni/s.

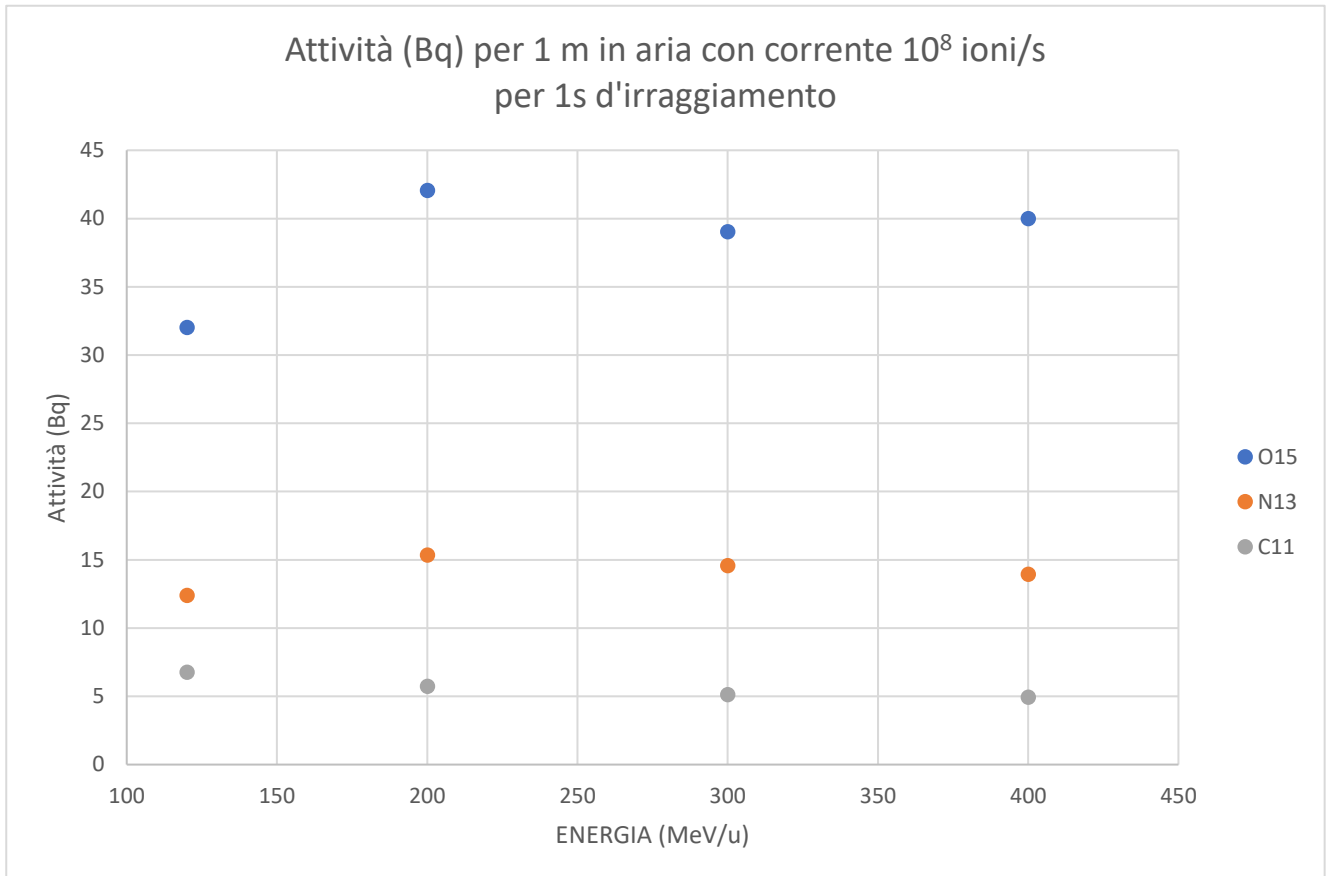


Figura 12 Attività (Bq) dei radionuclidi in funzione dell'energia per una corrente di 10^8 ioni/s.

Mantenendo la medesima geometria, si sono simulati irraggiamenti con un fascio di protoni e si è compiuto lo scoring dei radionuclidi formati e della loro attività.

La Tabella 4 riporta le attività (in Bq), e le relative incertezze percentuali, per ogni radionuclide alle relative energie per un fascio di protoni con corrente di 1.375×10^{10} particelle/s.

| | Energia (MeV/u) | | | | |
|-----|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 |
| O15 | 6.94E+03 ± 0.5% | 5.73E+03 ± 1% | 5.13E+03 ± 0.9% | 4.85E+03 ± 0.8% | 4.75E+03 ± 0.7% |
| N13 | 2.29E+03 ± 0.7% | 2.13E+03 ± 0.6% | 1.97E+03 ± 0.7% | 1.92E+03 ± 0.6% | 1.91E+03 ± 0.3% |
| C11 | 5.56E+02 ± 1.1% | 5.16E+02 ± 0.9% | 4.43E+02 ± 1.1% | 4.29E+02 ± 0.9% | 4.14E+02 ± 0.7% |

Tabella 10 Attività (Bq) per ogni radionuclide per una corrente di 1.375×10^{10} protoni/s.

La Tabella 5 e il relativo grafico (Figura 2) riportano i dati della Tabella 4 normalizzati per una corrente di 10^{10} protoni/s.

| | Energia (MeV/u) | | | | |
|-----|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 |
| O15 | 5.05E+03 | 4.17E+03 | 3.73E+03 | 3.53E+03 | 3.45E+03 |
| N13 | 1.67E+03 | 1.55E+03 | 1.43E+03 | 1.39E+03 | 1.39E+03 |
| C11 | 4.04E+02 | 3.75E+02 | 3.22E+02 | 3.12E+02 | 3.01E+02 |

Tabella 11 Attività (Bq) dei radionuclidi prodotti con una corrente di 10^{10} protoni/s.

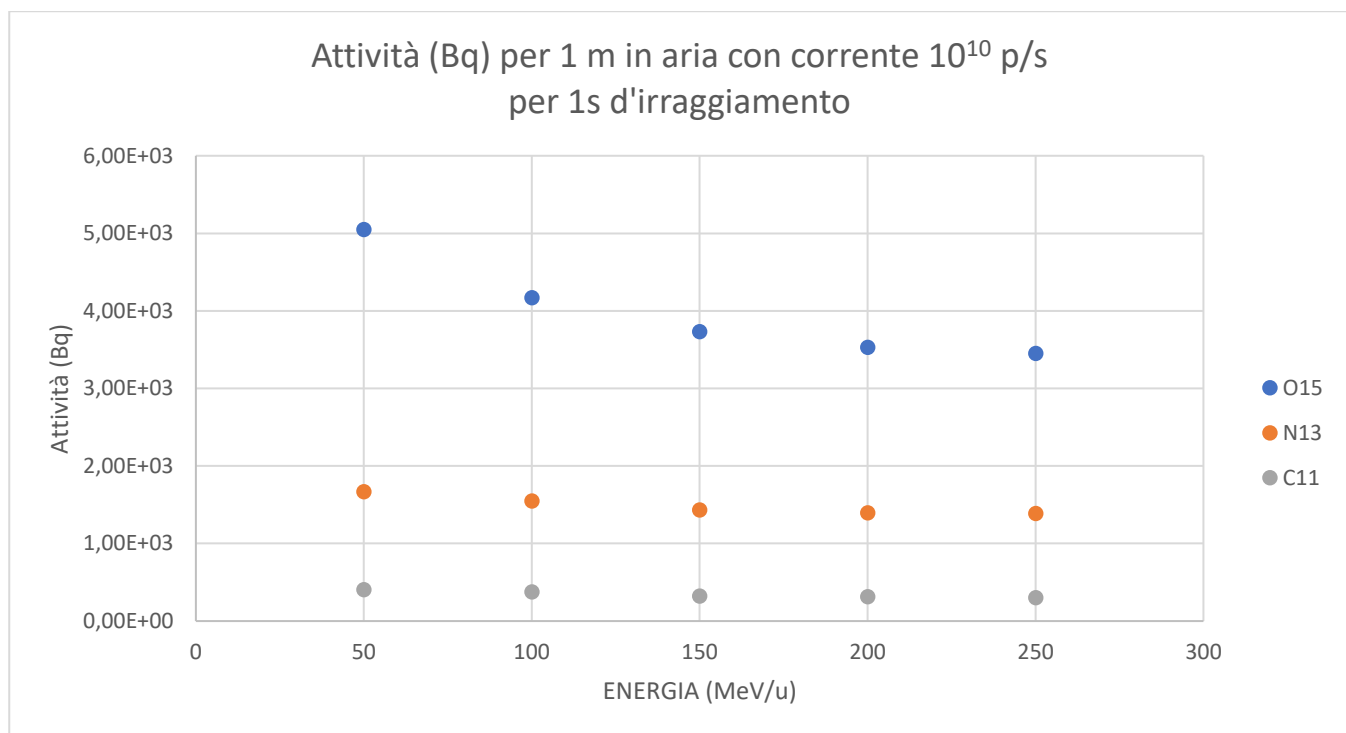


Figura 13 Attività (Bq) dei radionuclidi in funzione dell'energia per una corrente di 10^{10} protoni/s.

Dalle simulazioni effettuate si nota che nel caso di irraggiamento con ioni carbonio si ha una maggior produzione di radionuclidi aumentando l'energia del fascio, al contrario se si usano protoni si ha la massima produzione per energie vicine ai 50 MeV e all'aumentare dell'energia si riduce. Considerando i valori assoluti della produzione si può notare che i valori a parità di corrente possono essere dello stesso ordine di grandezza, tuttavia l'uso di protoni prevede correnti maggiori (per questo sono state normalizzate a valori differenti nelle analisi precedenti) e si ha conseguentemente una produzione maggiore di radionuclidi.

3.3 Esperimenti per fascio libero in aria

Si sono svolte attività sperimentali al fine di convalidare i dati riguardo all'attivazione ottenuti con le simulazioni. Per far ciò si è deciso di irraggiare un volume d'aria contenuto in un tubo con protoni e ioni carbonio, e di misurarne l'attività dopo differenti intervalli di tempo dal termine dell'irraggiamento.

Setup sperimentale

Per svolgere gli esperimenti si sono usati 6 tubi di PVC di diametro esterno 16 cm, spessore 0.5 cm e lunghezza 15 cm. Questi valori sono stati scelti perché il diametro garantisce che il fascio, che attraversa il tubo nella direzione dell'asse, non interagisce con le pareti, e la lunghezza è tale per cui possa essere facilmente inserito successivamente nello strumento di misura. Le estremità dei tubi sono state ermeticamente chiuse con film di materiale plastico di spessore di 27 μm .

Complessivamente il volume d'aria contenuto in ciascun cilindro è di circa 2650 cm^3 .

Gli irraggiamenti sono stati svolti in una sala trattamento del CNAO. Le particelle, le energie usate e i tempi d'irraggiamento sono riportati nella Tabella 6.

| Particella | Energia (MeV/u) | Particelle totali | Tempo Irraggiamento (s) |
|------------|-----------------|--------------------|-------------------------|
| Carbonio | 115 | 5×10^9 | 411 |
| Carbonio | 203 | 5×10^9 | 360 |
| Carbonio | 398 | 5×10^9 | 360 |
| Protoni | 62 | 1×10^{11} | 474 |
| Protoni | 89 | 2×10^{11} | 640 |
| Protoni | 226 | 2×10^{11} | 411 |

Tabella 12 Specifiche degli irraggiamenti

Le energie scelte sono quelle disponibili per la macchina in questione e vanno, per ogni particella, dalla minima erogabile alla massima. I tubi sono stati posizionati su un supporto di polistirolo, come mostrato in Figura 3, e irraggiati.

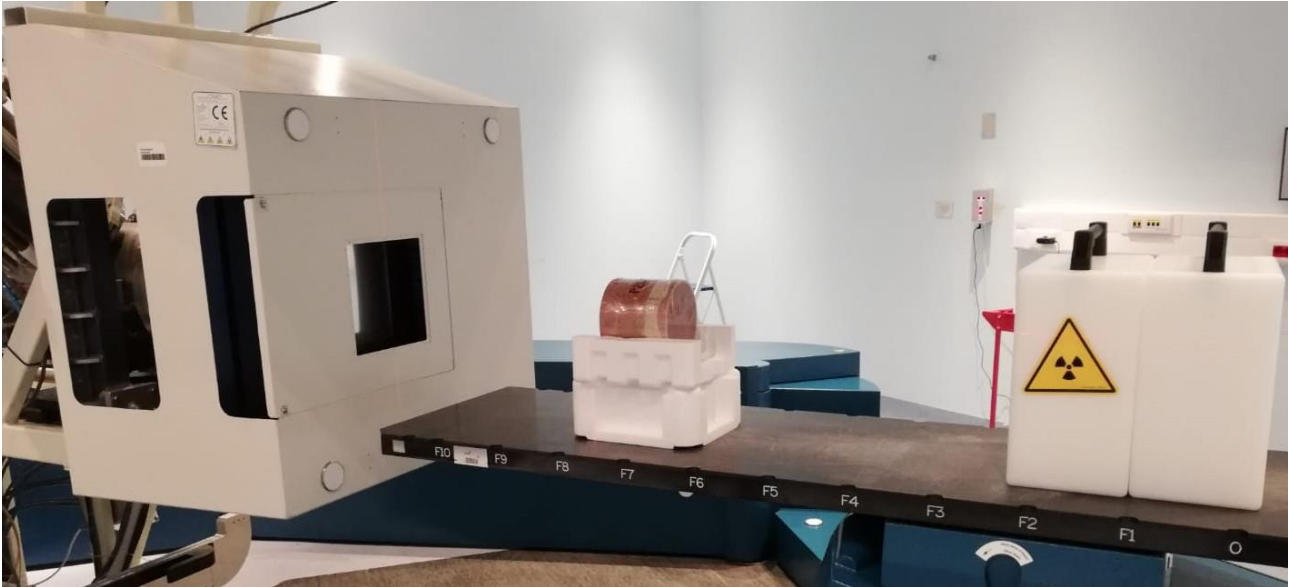


Figura 14 Setup per l'irraggiamento di un tubo contenente aria e sigillato

Terminato il tempo d'irraggiamento, è stata misurata l'attività di ogni tubo con un rivelatore al germanio iperpuro munito di pozzetto di piombo per schermare dalla radioattività di fondo. I tubi sono stati posizionati sul rivelatore al germanio appoggiandolo su un supporto di plexiglass di spessore 3 mm, una lastra identica è stata posizionata anche sulla base superiore del cilindro. Dello spettro gamma fornito dallo strumento si è interessati principalmente al picco con energia di 511 keV. Esso rappresenta l'annichilazione dei positroni prodotti per decadimento β^+ dai radionuclidi in esame. Un esempio di spettro ottenuto con queste misurazioni è riportato in Figura 4.

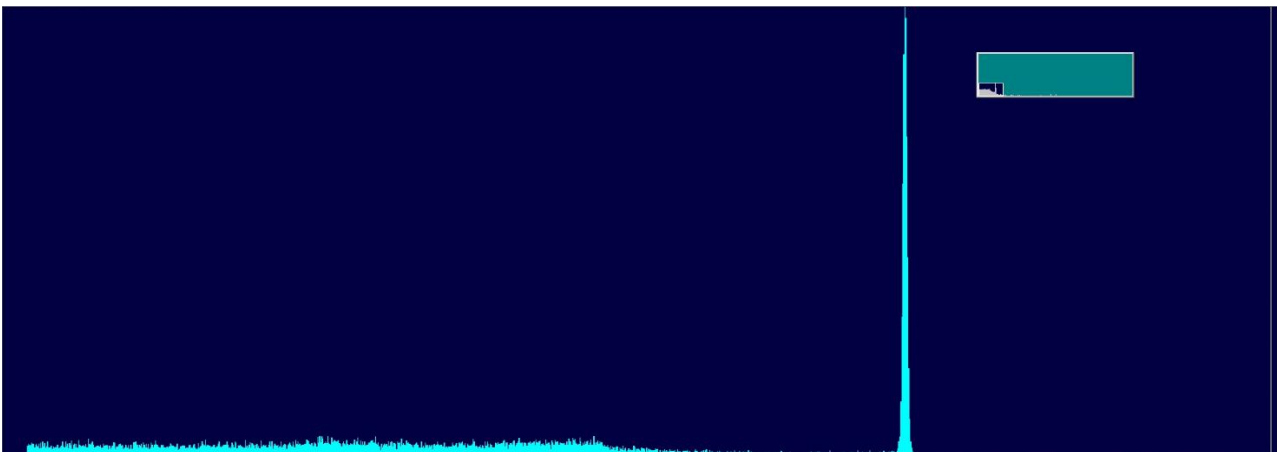


Figura 15 Esempio Spettro: misura d'attività prodotta dal fascio di protoni a 62 MeV: il picco si trova a 511keV

Le misurazioni sono state svolte a tempi differenti che vanno da qualche decina di secondi dalla fine dell'irraggiamento, a due ore dopo. I tempi d'irraggiamento e l'attività ottenuta per i campioni d'aria irraggiati con un fascio di ioni carbonio sono riportati nella Tabella 7. (Si ricorda che i tempi d'irraggiamento e le particelle sono riportate nella Tabella 6).

| Carbonio 115 MeV | | Carbonio 203 MeV | | Carbonio 398 MeV | |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Tcooling (s) | Attività (Bq) | Tcooling (s) | Attività (Bq) | Tcooling (s) | Attività (Bq) |
| 56 | 5.08E+02 ± 4.5% | 111 | 3.78E+02 ± 5.2% | 108 | 3.58E+02 ± 5.4% |
| 202 | 4.05E+02 ± 5.1% | 284 | 2.84E+02 ± 6.1% | 264 | 2.62E+02 ± 6.3% |
| 358 | 3.29E+02 ± 5.6% | 462 | 2.31E+02 ± 6.8% | 424 | 2.23E+02 ± 6.9% |
| 524 | 2.85E+02 ± 6.1% | 628 | 1.69E+02 ± 8.0% | 605 | 1.86E+02 ± 7.6% |
| 1077 | 2.00E+02 ± 7.3% | 989 | 1.19E+02 ± 9.7% | 918 | 1.48E+02 ± 8.6% |
| 1280 | 1.96E+02 ± 7.4% | 1169 | 1.14E+02 ± 10% | 1268 | 1.14E+02 ± 10% |
| 2495 | 7.04E+01 ± 13.2% | 1412 | 1.04E+02 ± 10.5% | 1601 | 8.94E+01 ± 11.5% |
| 2865 | 5.72E+01 ± 15.0% | 2450 | 5.37E+01 ± 15.6% | 2673 | 4.05E+01 ± 18.6% |
| 6374 | 5.96E+00 ± 79.2% | 7932 | 0.00E+00 | 9601 | 0.00E+00 |

Tabella 13 Tempi di cooling e attività misurate per gamma da 511keV prodotti da un campione d'aria irraggiato con ioni carbonio

Le stesse considerazioni valgono per i campioni irraggiati con un fascio di protoni. I risultati delle misurazioni sono riportati nella Tabella 8.

| Protoni 62 MeV | | Protoni 89 MeV | | Protoni 226 MeV | |
|----------------|------------------|----------------|------------------|-----------------|-----------------|
| Tcooling (s) | Attività (Bq) | Tcooling (s) | Attività (Bq) | Tcooling (s) | Attività (Bq) |
| 107 | 5.55E+03 ± 1.3% | 36 | 7.73E+03 ± 1.1% | 93 | 6.08E+03 ± 1.3% |
| 274 | 4.10E+03 ± 1.6% | 256 | 5.99E+03 ± 1.3% | 254 | 4.46E+03 ± 1.5% |
| 432 | 3.27E+03 ± 1.7% | 453 | 4.74E+03 ± 1.5% | 414 | 3.57E+03 ± 1.7% |
| 583 | 2.95E+03 ± 1.8% | 701 | 3.70E+03 ± 1.6% | 585 | 3.09E+03 ± 1.8% |
| 1101 | 1.74E+03 ± 2.4% | 1923 | 1.75E+03 ± 2.4% | 776 | 2.61E+03 ± 2.0% |
| 1435 | 1.31E+03 ± 2.8% | 2425 | 1.13E+03 ± 3.0% | 2576 | 7.58E+02 ± 3.7% |
| 2780 | 5.88E+02 ± 4.2% | 2782 | 9.43E+02 ± 3.3% | 2757 | 6.21E+02 ± 4.1% |
| 3160 | 5.15E+02 ± 4.5% | 3748 | 4.63E+02 ± 4.7% | 3751 | 2.92E+02 ± 6.0% |
| 3957 | 3.76E+02 ± 5.3% | 4147 | 4.72E+02 ± 4.7% | 5208 | 1.42E+02 ± 8.8% |
| 5630 | 1.19E+02 ± 9.7% | 6533 | 1.01E+02 ± 10.7% | 7550 | 3.1E+01 ± 22.2% |
| 8531 | 1.91E+01 ± 31.3% | | | | |

Tabella 14 Tempi di cooling e attività misurate per gamma da 511keV prodotti da un campione d'aria irraggiato con protoni.

Le incertezze percentuali della Tabella 7 e della Tabella 8 sono state calcolate a partire dalle misure fatte.

Noti il numero di eventi contati dal rivelatore (x_{misura}), la deviazione standard associata alla misura (σ_{misura}) risulta (Knoll):

$$\sigma_{misura} = \sqrt{x_{misura}} \quad (3.1)$$

Che si somma alla deviazione del fondo (σ_{fondo}), calcolata con l'equazione (3.1) sostituendo i conteggi del fondo, secondo la regola dei quadrati (Knoll):

$$\sigma_{tot} = \sqrt{\sigma_{misura}^2 + \sigma_{fondo}^2} \quad (3.2)$$

Per trovare l'attività equivalente basterà dividere tale valore per la durata della misura (120 secondi nel caso in parola) e dividere per l'efficienza trovata precedentemente.

L'efficienza del rivelatore al germanio è stata stimata a seguito di simulazioni svolte con il codice Monte Carlo FLUKA. Si è usata una geometria che rappresenta il rivelatore al germanio e il relativo pozzetto di piombo che lo scherma a cui si è aggiunto il tubo in misura (Figura 5).

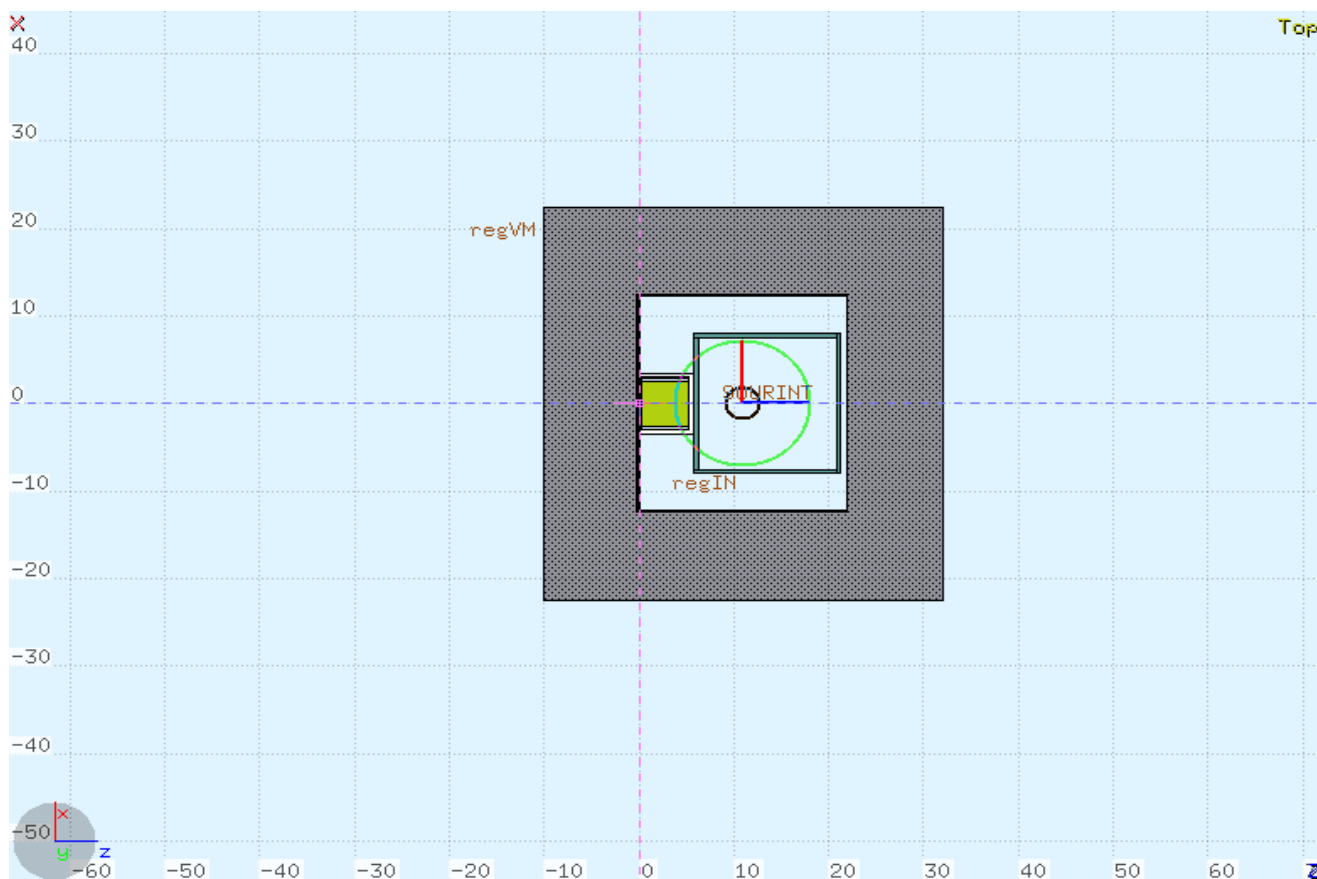


Figura 16 Geometria della simulazione per stimare l'efficienza del rivelatore al germanio. In figura si mostra la sezione del rivelatore (regione verde) con pozzetto (regione grigia) e tubo in misura

Si è supposto che nel tubo i positroni emessi per decadimento β^+ si annichilino una volta entrati a contatto con le pareti del tubo, e che la quantità che interagisce con l'aria sia del tutto trascurabile per via del loro range alle energie in esame. Per questo la sorgente di radiazioni nella simulazione è un cilindro cavo che corrisponde al tubo e alla base superiore e inferiore di questo, dove nella realtà sono posti i due supporti di plexiglass. Tale sorgente emette fotoni monoenergetici a 511 keV. Il codice in FORTRAN della routine source di tale sorgente è presente in Appendice B.

Si è quindi provveduto a compiere lo scoring degli eventi che depositano un'energia di 511 keV nel volume del germanio. Per far ciò si è usata la card DETECT. Il risultato è stato un valore di 0.839% eventi/primario che corrisponde all'efficienza del rivelatore al germanio per la situazione in esame.

Calcolo delle attività

Per confrontare i dati ottenuti dagli esperimenti con quelli delle simulazioni del paragrafo precedente si è calcolato quanta attività sarebbe prodotta utilizzando il set di dati precedenti. Per far ciò si è partiti dai dati della Tabella 2 e della Tabella 4. Si richiama di seguito l'equazione (1.1) per l'attivazione al termine dell'irraggiamento:

$$A(t_{irr}) = N_t \sigma_c \Phi_i (1 - e^{-\lambda t_{irr}}) \quad (3.3)$$

I dati nelle tabelle indicano quindi i vari $A(t_{irr})$ dei radionuclidi al variare delle energie per Φ_i fissato e t_{irr} pari a un secondo.

Per calcolare l'attività dovuto a un irraggiamento con una corrente differente si sono normalizzati i dati delle tabelle per la corrente usata, analogamente si è fatto per il fattore esponenziale crescente $(1 - e^{-\lambda t_{irr}})$ in cui si è considerata come costante di decadimento λ quella tipica di ciascun radionuclide. I dati delle tabelle, inoltre, si riferiscono a un tratto d'aria di un metro, vanno quindi riscaldati per la lunghezza dei tubi (15 cm) a cui va aggiunto un tratto d'aria che rappresenta l'equivalente dei film di polietilene alle estremità. Supponendo la densità del polietilene di 0.9 g/cm³. Considerando che hanno uno spessore di 27µm, essi sono equivalenti a circa 2 cm d'aria ciascuno. Si sono ottenuti così dei valori approssimati per l'attività a fine irraggiamento.

I dati nelle tabelle risultano anche differenti dagli irraggiamenti per quanto riguarda le energie considerate, ciò, nell'equazione (3.3), si traduce in un differente valore delle σ_c . Sebbene in alcuni casi le differenze si possono considerare trascurabili (ad esempio negli irraggiamenti con ioni carbonio), quando la differenza è risultata consistente, come nel caso degli irraggiamenti con protoni, si è considerato un andamento lineare dell'attivazione nell'intervallo energetico considerato.

Tali valori sono riportati nella Tabella 9 per gli irraggiamenti con ioni Carbonio e nella Tabella 10 per irraggiamenti con protoni.

| Radionuclide | Carbonio 115 MeV/u | | Carbonio 203 MeV/u | | Carbonio 398 MeV/u | |
|--------------|--------------------|--------------|--------------------|--------------|--------------------|--------------|
| | A (0) | Incertezza % | A (0) | Incertezza % | A (0) | Incertezza % |
| O15 | 1.18E+02 | 2.3 | 4.06E+02 | 5.0 | 1.62E+02 | 2.5 |
| N13 | 9.36E+01 | 1.6 | 1.48E+02 | 1.6 | 1.08E+02 | 1.6 |
| C11 | 5.73E+01 | 1.3 | 5.53E+01 | 1.0 | 4.23E+01 | 1.7 |
| O14 | 8.54E+00 | 6.9 | 3.30E+01 | 28.7 | 8.85E+00 | 10.0 |
| TOTALE | 2.77E+02 | 2.0 | 6.42E+02 | 3.8 | 3.22E+02 | 2.3 |

Tabella 15 Attività calcolate al termine dell'irraggiamento con ioni carbonio partendo dai dati di Tabella 2.

| | Protoni 62 MeV | | Protoni 89 MeV | | Protoni 226 MeV | |
|--------|----------------|--------------|----------------|--------------|-----------------|--------------|
| | A (0) | Incertezza % | A (0) | Incertezza % | A (0) | Incertezza % |
| O15 | 3.32E+03 | 0.72 | 3.55E+03 | 0.72 | 4.68E+03 | 0.73 |
| N13 | 2.44E+03 | 0.63 | 3.91E+03 | 0.63 | 4.12E+03 | 0.45 |
| C11 | 6.73E+02 | 1.01 | 1.12E+03 | 1.01 | 8.88E+02 | 0.80 |
| O14 | 8.91E+02 | 1.83 | 2.61E+02 | 1.83 | 5.20E+02 | 2.14 |
| TOTALE | 7.32E+03 | 0.85 | 8.84E+03 | 0.75 | 1.02E+04 | 0.70 |

Tabella 16 Attività calcolate al termine dell'irraggiamento con protoni partendo dai dati di Tabella 4

Le incertezze Presentate in Tabella 9 e Tabella 10 sono state calcolate partendo da quelle delle simulazioni di Tabella 2 e Tabella 4.

Una volta ottenuta l'attività di ciascun radionuclide, si è usata l'equazione (1.3) che viene riportata di seguito:

$$A(t) = A(0) e^{-\lambda t} \quad (3.4)$$

Dove, in questo caso, il tempo t è da considerarsi quello di cooling per ciascuna misura.

I valori così ottenuti sono stati posti in grafico in Figura 5, Figura 6, Figura 7, Figura 8, Figura 9 e Figura 10, in cui è possibile confrontarli con i dati misurati a seguito degli irraggiamenti.

Simulazioni degli irraggiamenti

Si è scelto anche di compiere delle simulazioni con il codice FLUKA cercando riprodurre la situazione degli esperimenti. Si è rappresentata quindi la geometria simile al setup sperimentale in cui si è posto un tubo di PVC delle dimensioni uguali a quelli reali, contenente aria e chiuso alle estremità da due film di polietilene dello spessore misurato. Si sono simulati gli irraggiamenti con un tempo uguale a quello usato durante gli esperimenti e con la medesima corrente.

Usando la card RESNUCLEi di FLUKA si è compiuto lo scoring delle attività dei radionuclidi nell'aria all'interno dei tubi, nel tubo di PVC e nei film di polietilene. Nell'aria interna al tubo si sono considerati ^{15}O , ^{13}N , ^{11}C e si è ritenuto opportuno includere anche ^{14}O , che fornisce un contributo apprezzabile, nei primissimi minuti dopo la fine dell'irraggiamento. Nei materiali plastici (tubo e film) si è scelto di considerare ^{15}O , ^{13}N , ^{11}C per gli irraggiamenti con ioni carbonio, mentre per quelli con protoni si è considerato ^{15}O e ^{11}C nel tubo e ^{11}C e ^{10}C nei film. Le scelte sono state fatte sempre per tenere in considerazione i radionuclidi che si formano con più probabilità e contribuiscono maggiormente all'attività. Come nel caso dell'ossigeno-14, ^{10}C è stato scelto solo per il suo contributo appena finito l'irraggiamento.

Si è compiuto lo scoring dei radionuclidi citati precedentemente a diversi tempi di cooling. FLUKA permette di far ciò direttamente dalla card RESNUCLEi, tuttavia il codice compie un semplice decadimento esponenziale come quello dell'equazione (3.4) per ciascun radionuclide, infatti

l'incertezza della simulazione non varia al variare del tempo di cooling. La Tabella 11 e la Tabella 12 riportano le attività totali di queste simulazioni. Le incertezze associate a questi dati sono state calcolate sommando e pesando le incertezze di simulazione relative a ciascun scoring di ciascun radionuclide.

| Tempo cooling (s) | Carbonio 115MeV/u | | Carbonio 203MeV/u | | Carbonio 398MeV/u | |
|-------------------|-------------------|--------------|-------------------|--------------|-------------------|--------------|
| | A (Bq) | Incertezza % | A (Bq) | Incertezza % | A (Bq) | Incertezza % |
| 0 | 2.74E+02 | 10.2 | 4.06E+02 | 6.9 | 3.17E+02 | 4.5 |
| 60 | 2.26E+02 | 10.1 | 3.35E+02 | 6.7 | 8.28E+03 | 4.4 |
| 120 | 1.90E+02 | 10.0 | 2.83E+02 | 6.5 | 2.67E+02 | 4.2 |
| 300 | 1.26E+02 | 10.1 | 1.92E+02 | 6.3 | 1.79E+02 | 4.0 |
| 600 | 8.22E+01 | 10.4 | 1.28E+02 | 6.1 | 1.19E+02 | 3.9 |
| 900 | 7.31E+01 | 10.4 | 9.74E+01 | 6.1 | 9.02E+01 | 3.9 |

Tabella 17 Attività secondo le simulazioni con geometrie analoghe al setup sperimentale con un fascio di ioni carbonio

| Tempo cooling (s) | Protoni 62 MeV | | Protoni 89 MeV | | Protoni 226 MeV | |
|-------------------|----------------|--------------|----------------|--------------|-----------------|--------------|
| | A (Bq) | Incertezza % | A (Bq) | Incertezza % | A (Bq) | Incertezza % |
| 0 | 7.74E+03 | 5.6 | 1.03E+04 | 2.1 | 1.03E+04 | 2.1 |
| 60 | 6.24E+03 | 5.5 | 8.41E+03 | 2.0 | 8.28E+03 | 1.9 |
| 120 | 5.21E+03 | 5.4 | 7.18E+03 | 1.9 | 6.95E+03 | 1.8 |
| 300 | 3.32E+03 | 5.5 | 5.03E+03 | 1.8 | 4.70E+03 | 1.7 |
| 600 | 2.30E+03 | 5.2 | 3.43E+03 | 1.8 | 3.11E+03 | 1.7 |
| 900 | 1.63E+03 | 5.2 | 2.25E+03 | 1.8 | 2.31E+03 | 1.8 |

Tabella 18 Attività secondo le simulazioni con geometrie analoghe al setup sperimentale con un fascio di protoni

I grafici delle figure sottostanti riportano i dati delle attività prodotte secondo le misurazioni fatte sui tubi irraggiati, calcolati come visto in precedenza, e simulati come appena discusso.

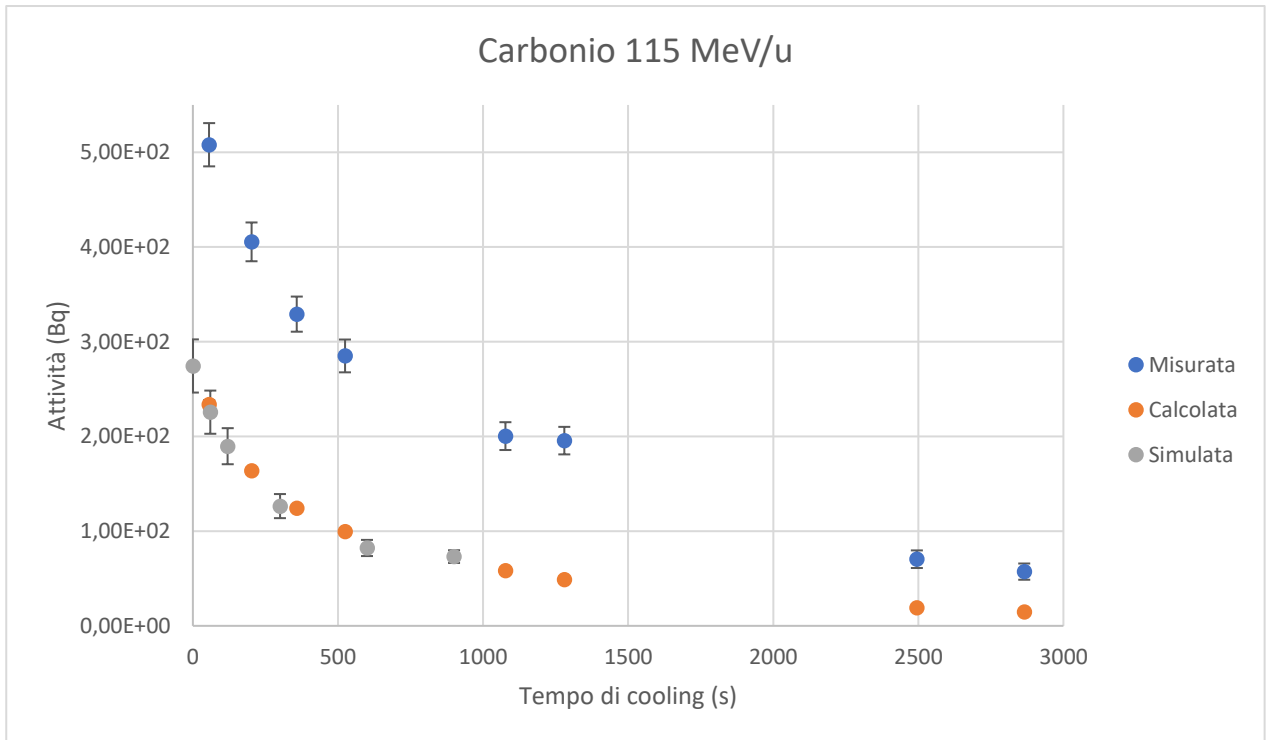


Figura 17 Attivazione prodotta da un fascio di ioni carbonio a 115 MeV/u

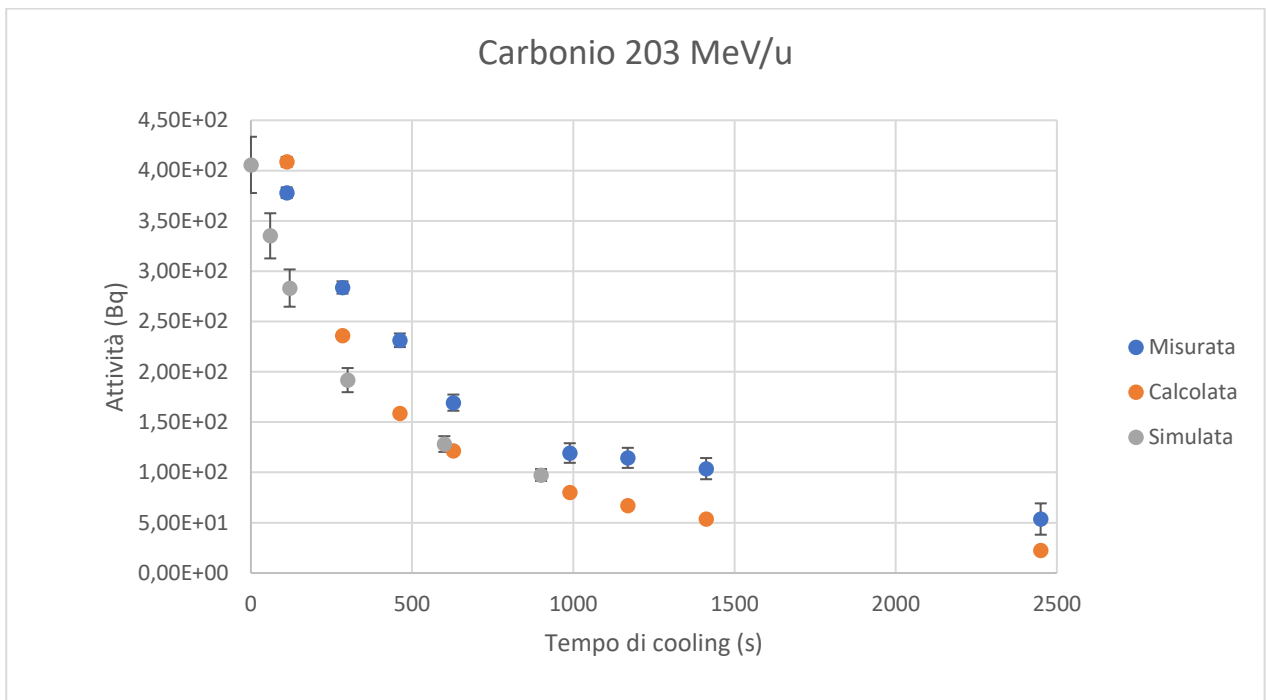


Figura 18 Attivazione prodotta da un fascio di ioni carbonio a 203 MeV/u

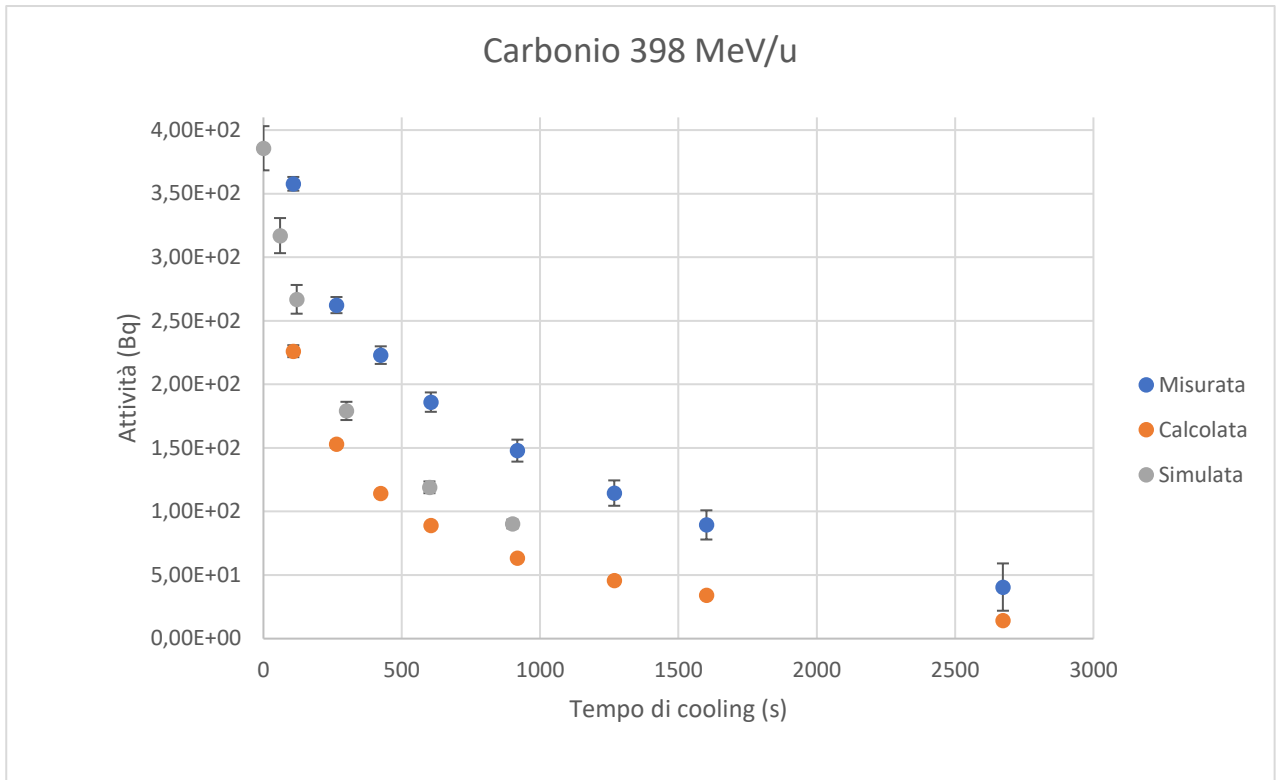


Figura 19 Attivazione prodotta da un fascio di ioni carbonio a 398 MeV/u

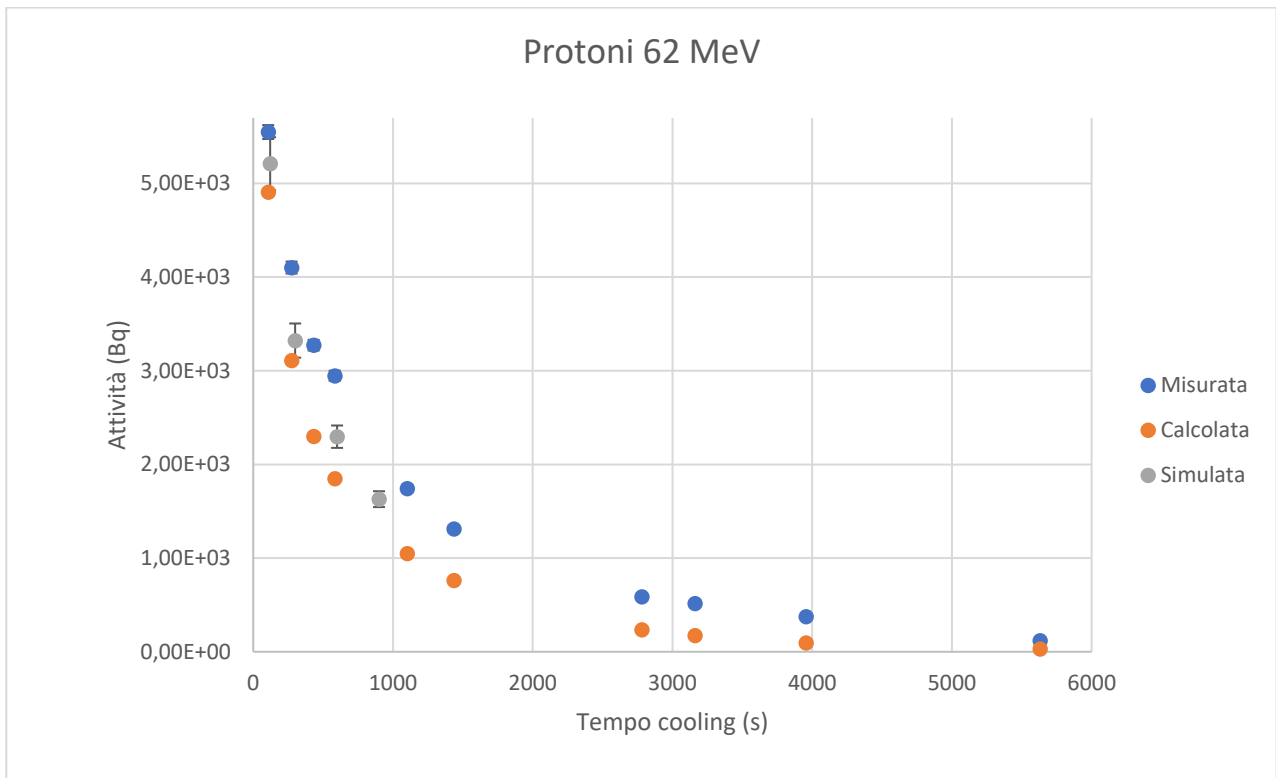


Figura 20 Attivazione prodotta da un fascio di protoni a 62 MeV

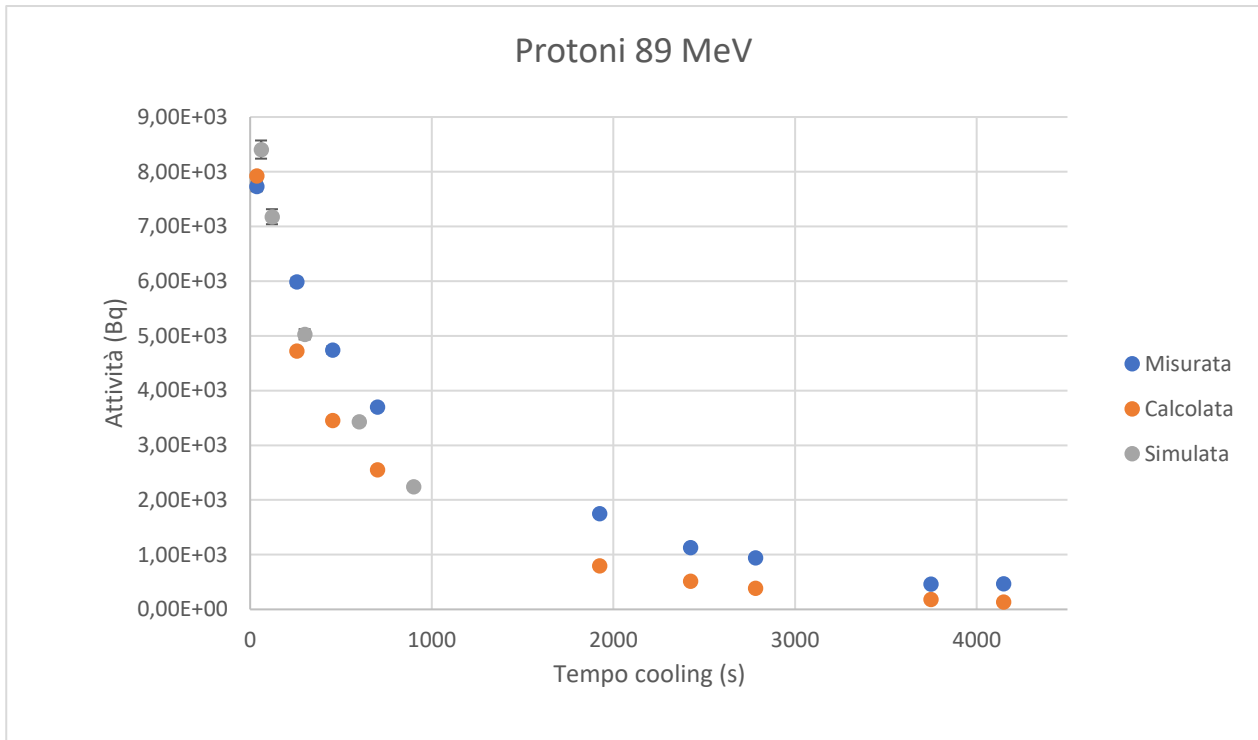


Figura 21 Attivazione prodotta da un fascio di protoni a 89 MeV

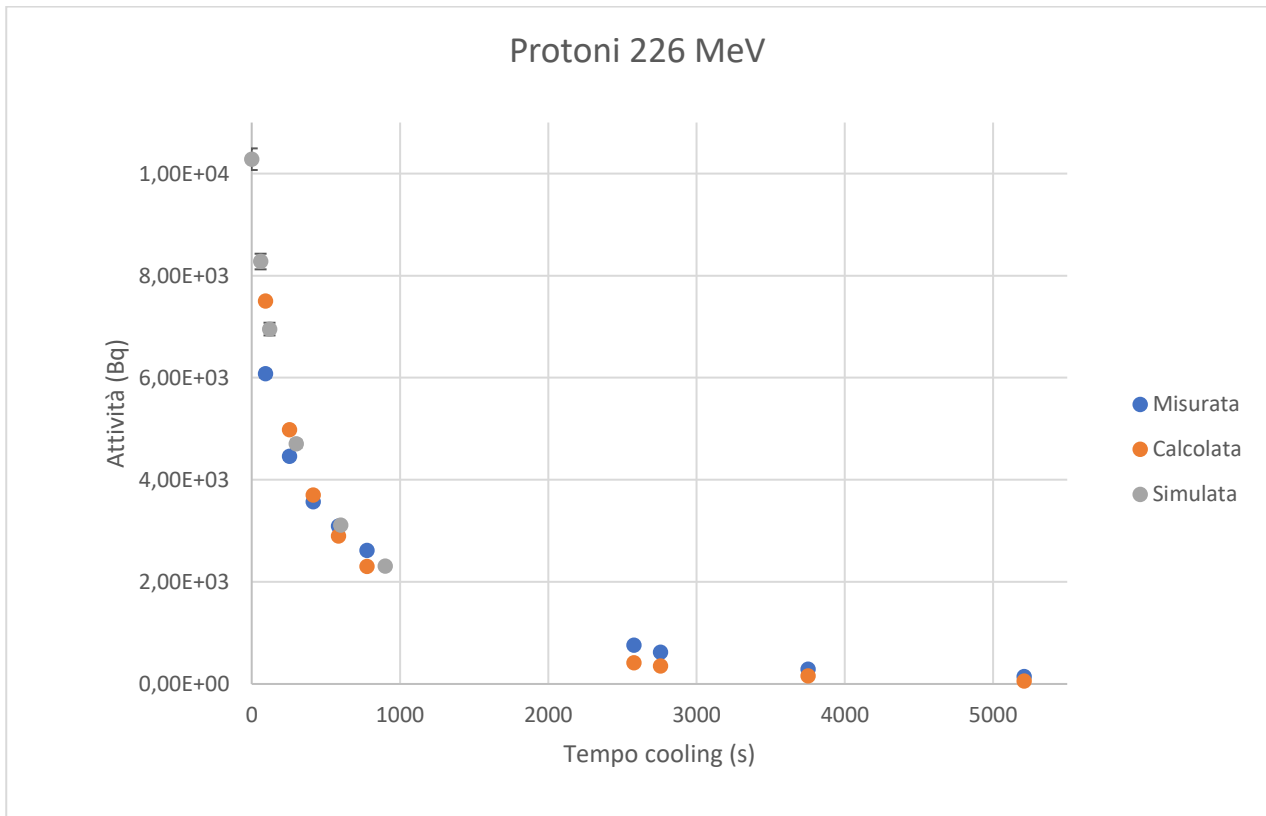


Figura 22 Attivazione prodotta da un fascio di protoni a 226 MeV

Si può notare come vi sia un discreto accordo tra i valori di attività simulata e calcolata. Le differenze possono essere ricondotte al peso delle differenti ipotesi fatte nei due casi.

Per quanto riguarda i dati sperimentali, invece si ha un buon accordo nel caso degli irraggiamenti

con i protoni e una differenza maggiore con gli ioni carbonio. Ciò potrebbe essere dovuto al fatto che il codice Monte Carlo potrebbe presentare incertezze maggiori sulle sezioni d'urto per questi processi, oltre alle incertezze già esposte in precedenza. Inoltre, il fatto di aver scelto per le simulazioni di considerare l'attività solo di alcuni radionuclidi giustifica il fatto di misurare un'attività maggiore rispetto a quella simulata, soprattutto a tempi di cooling ridotti.

3.4 Fasci di ioni liberi in aria

Si è poi considerata la possibilità di usare fasci di ioni diversi dal carbonio, e si sono compiute simulazioni per stimarne l'attivazione in aria. Dei radionuclidi che si possono formare, si sono considerati sempre ^{15}O , ^{13}N e ^{11}C . Con questi ioni non è stato possibile svolgere esperimenti per convalidare i dati delle simulazioni.

Il tempo d'irraggiamento è stato considerato in tutti i casi di un secondo e si sono considerate le correnti massime previste, come riportato in letteratura (Pullia, 2014). Anche le energie in esame, espresse in MeV su nucleone, sono entro quelle indicate in letteratura (Pullia, 2014). Tali valori si riferiscono a un possibile uso di questi ioni, accelerandoli con il sincrotrone attualmente presente al CNAO, per fini adroterapici e di ricerca.

Si è compiuto lo scoring di ogni radionuclide dopo un tempo di cooling nullo. La Tabella 13 riassume le specifiche delle simulazioni per ogni ione in esame.

| Particelle | Distanza (m) | Volume (m ³) | t _{irr} (s) | t _{cooling} (s) | Corrente (ioni/s) | Energia massima (MeV/u) |
|------------|--------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|
| O-16 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1.6 x10 ⁸ | 400 |
| Li-7 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1.11 x10 ⁹ | 400 |
| He-4 | 1 | 1 | 1 | 0 | 2.5 x10 ⁹ | 400 |

Tabella 19 Specifiche delle simulazioni per ogni ione in esame.

Ossigeno-16 libero in aria

Nel caso di un fascio di ossigeno-16 libero in aria si è considerata una corrente di 1.6×10^8 ioni/s per un tempo d'irraggiamento di un secondo e un tempo di cooling nullo. Le energie in esame vanno da un minimo di 120 MeV/u e 400 MeV/u.

La Tabella 14 riporta le attività (in Becquerel) dei radionuclidi prodotti in questi casi e le relative incertezze percentuali.

| | Energia (MeV/u) | | | |
|-----|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 120 | 200 | 300 | 400 |
| O15 | 5.92E+01 ± 1.8% | 6.90E+01 ± 1.8% | 6.57E+01 ± 1.9% | 6.80E+01 ± 2.2% |
| N13 | 2.13E+01 ± 1.4% | 2.63E+01 ± 1.3% | 2.50E+01 ± 1.5% | 2.39E+01 ± 1.6% |
| C11 | 1.14E+01 ± 1.4% | 9.76E+00 ± 1.6% | 8.96E+01 ± 2.1% | 8.41E+00 ± 2.3% |

Tabella 20 Attività (Bq) dei principali radionuclidi formati da un fascio di ioni ossigeno libero in aria con corrente 1.6×10^8 ioni/s

Tali valori possono essere normalizzati per una corrente di 10^8 , in modo da confrontarli con altri ioni. La Tabella 15 e il relativo grafico (Figura 12) riportano questi dati.

| | Energia (MeV/u) | | | |
|-----|-----------------|----------|----------|----------|
| | 120 | 200 | 300 | 400 |
| O15 | 3.70E+01 | 4.31E+01 | 4.11E+01 | 4.25E+01 |
| N13 | 1.33E+01 | 1.65E+01 | 1.56E+01 | 1.49E+01 |
| C11 | 7.15E+00 | 6.10E+00 | 5.60E+00 | 5.26E+00 |

Tabella 21 Attività (Bq) dei principali radionuclidi formati da un fascio di ioni ossigeno libero in aria con corrente 10^8 ioni/s

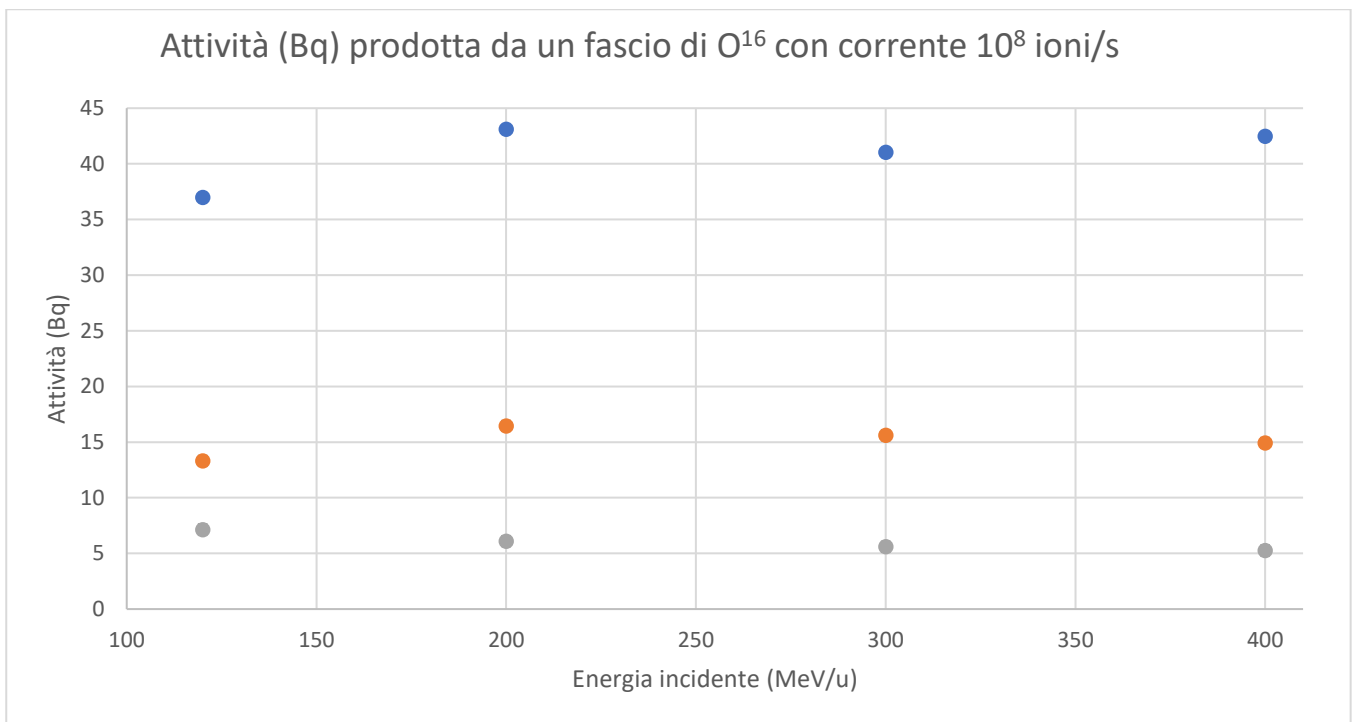


Figura 23 Attività (Bq) dei radionuclidi in funzione dell'energia per una corrente di 10^8 ioni/s nel caso di un fascio di ossigeno-16

Litio-7 libero in aria

Si è poi considerato un fascio di ioni di litio-7 libero in aria con energie comprese tra 50 MeV/u e 400 MeV/u. Si è supposta una corrente costante di 1.11×10^9 ioni/s per un tempo d'irraggiamento di un secondo. Lo scoring dei radionuclidi è stato compiuto dopo un tempo di cooling nullo.

La Tabella 16 riporta le attività (in Bq) dei radionuclidi prodotti in questo caso e le relative incertezze percentuali.

| | Energia (MeV/u) | | | | |
|-----|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 50 | 100 | 200 | 300 | 400 |
| O15 | 1.85E+02 ± 0.5% | 2.33E+02 ± 0.4% | 4.05E+02 ± 0.4% | 3.88E+02 ± 0.8% | 3.87E+02 ± 0.9% |
| N13 | 4.93E+01 ± 0.4% | 3.70E+01 ± 0.6% | 1.52E+02 ± 0.2% | 1.43E+02 ± 0.8% | 1.43E+02 ± 0.5% |
| C11 | 1.26E+02 ± 0.2% | 7.02E+01 ± 0.2% | 5.62E+01 ± 0.3% | 5.05E+01 ± 1.0% | 5.01E+01 ± 0.8% |

Tabella 22 Attività (Bq) dei principali radionuclidi formati da un fascio di ioni litio libero in aria con corrente 1.11×10^9 ioni/s

Come in precedenza, i dati si possono normalizzare per una corrente di 10^9 ioni/s.

La Tabella 17 e il relativo grafico (Figura 13) riportano i dati a seguito della normalizzazione.

| | Energia (MeV/u) | | | | |
|-----|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| | 50 | 100 | 200 | 300 | 400 |
| O15 | 1.68E+02 | 2.12E+02 | 3.68E+02 | 3.53E+02 | 3.52E+02 |
| N13 | 4.48E+01 | 3.37E+01 | 1.38E+02 | 1.30E+02 | 1.30E+02 |
| C11 | 1.14E+02 | 6.38E+01 | 5.11E+01 | 4.59E+01 | 4.56E+01 |

Tabella 23 Attività (Bq) dei principali radionuclidi formati da un fascio di ioni litio libero in aria con corrente 10^9 ioni/s.

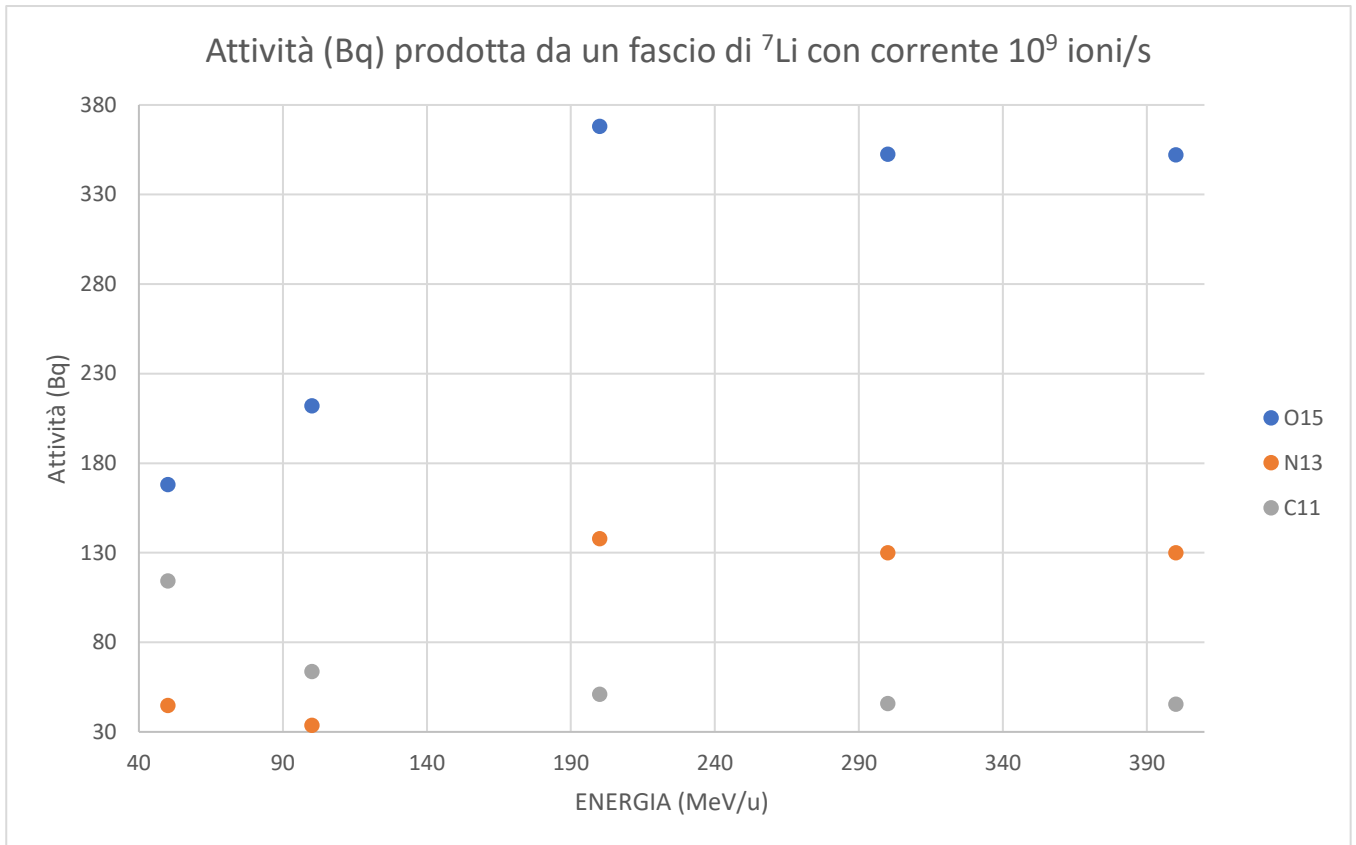


Figura 24 Attività (Bq) dei radionuclidi in funzione dell'energia per una corrente di 10^9 ioni/s nel caso di un fascio di litio-7

Elio-4 libero in aria

In ultimo, si è considerato un fascio di elio-4 che attraversa un metro d'aria. Le energie da considerare sono in un intervallo compreso tra i 60 MeV/u e 400 MeV/u.

Ci si aspetta di usare una corrente massima di 2.5×10^9 ioni/s, nelle simulazioni si è quindi usato questo valore. Il tempo d'irraggiamento e di cooling rimangono invariati rispetto alle precedenti simulazioni.

La Tabella 18 riporta le attività dei singoli radionuclidi prodotti e le relative incertezze percentuali.

| | Energia (MeV/u) | | | | |
|-----|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 60 | 100 | 200 | 300 | 400 |
| O15 | 2.32E+01 ± 1.9% | 3.44E+02 ± 0.7% | 6.77E+02 ± 0.5% | 6.24E+02 ± 0.3% | 6.31E+02 ± 0.3% |
| N13 | 6.74E+01 ± 0.5% | 2.49E+02 ± 0.4% | 2.38E+02 ± 0.4% | 2.22E+02 ± 0.2% | 2.27E+02 ± 0.3% |
| C11 | 1.91E+02 ± 0.3% | 7.92E+01 ± 0.5% | 9.31E+01 ± 0.4% | 8.27E+01 ± 0.2% | 8.31E+01 ± 0.3% |

Tabella 24 Attività (Bq) dei principali radionuclidi formati da un fascio di ioni elio libero in aria con corrente 2.5×10^9 ioni/s

Per un confronto con gli ioni precedenti, si sono normalizzati i dati precedenti per una corrente di 10^9 ioni/s. Tali valori sono riportati nella Tabella 19 e nella Figura 14 che ne rappresenta il grafico.

| | Energia (MeV/u) | | | | |
|-----|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| | 60 | 100 | 200 | 300 | 400 |
| O15 | 9.26E+00 | 1.37E+02 | 2.71E+02 | 2.50E+02 | 2.52E+02 |
| N13 | 2.70E+01 | 9.97E+01 | 9.53E+01 | 8.88E+01 | 9.07E+01 |
| C11 | 7.66E+01 | 3.17E+01 | 3.72E+01 | 3.31E+01 | 3.32E+01 |

Tabella 25 Attività (Bq) dei principali radionuclidi formati da un fascio di ioni elio libero in aria con corrente 10^9 ioni/s

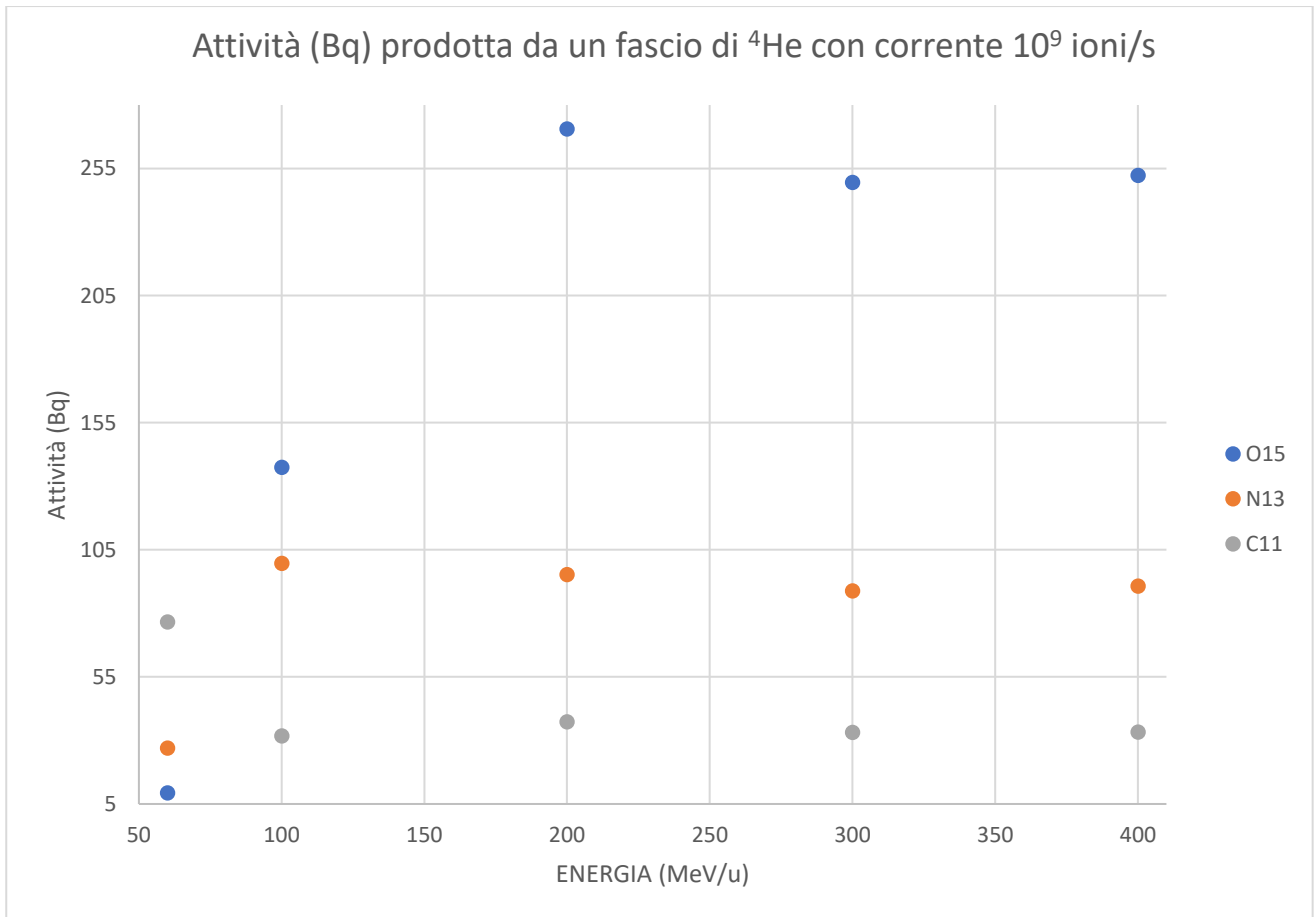


Figura 25 Attività prodotta da un fascio di 10^9 ioni/s di elio-4 libero in aria

Si può notare che nel caso di un fascio di ioni di ossigeno, l'attività dei radionuclidi prodotti è del tutto simile a quella che si avrebbe nel caso di un fascio di carbonio-12 alle stesse energie con la stessa corrente. Per quanto riguarda gli ioni di litio ed elio, invece, i valori sono piuttosto diversi dai precedenti ma tra di loro presentano valori dello stesso ordine di grandezza alle medesime energie.

Capitolo 4

Le simulazioni presentate nel capitolo precedente considerano il caso di fascio primario che compie un tratto libero in aria. Tuttavia, nell'uso di macchine acceleratrici è possibile che il fascio primario vada a impattare contro parti metalliche della macchina o contro il target, in questo caso è possibile si formino particelle secondarie che possono attivare l'aria circostante. Per simulare queste situazioni si è considerato il fascio primario che impatta contro un target senza compiere alcun tratto in aria. Il target si trova a sua volta al centro di una stanza piena d'aria e con le pareti di calcestruzzo spesse 50 cm. Si sono considerate tre possibili dimensioni delle stanze: una più piccola di dimensioni 6x6x6 m (216 m³), una di dimensioni intermedie 20x20x10 m (400 m³) e una di dimensioni maggiori 40x40x10 m, i lati di 10 m sono perpendicolari alla direzione di propagazione del fascio. Si è scelto di considerare dimensioni differenti della stanza perché ciò può influenzare la produzione di radionuclidi. Infatti, una volta che il fascio primario impatta sul target, la radiazione secondaria è dominata dalla componente neutronica (come si è visto nel capitolo precedente). Quando i neutroni entrano a contatto con la parete possono essere assorbiti dagli atomi di quest'ultima, ma possono anche compiere scattering diverse volte, termalizzare e interagire con gli atomi dell'aria, formando radionuclidi d'interesse per questo lavoro. Proprio per questo motivo nello scoring dei radionuclidi prodotti, nei casi successivi, oltre a considerare quelli già presi in esame precedentemente, si considererà anche argon-41 che, come già detto, si forma principalmente per interazione tra argon-40 dell'aria e neutroni termici. Nel caso di fascio libero in aria non si è considerato questo radionuclide perché la formazione di neutroni secondari in quel caso risultava del tutto trascurabile.

Sono stati considerati due tipo di target: uno in rame che simula le interazioni del fascio con parti metalliche della macchina o di eventuali esperimenti; e uno in polietilene tale da simulare le interazioni del fascio primario con eventuali materiali plastici o organici. Le dimensioni dei target sono state scelte usando il codice SRIM in modo tale da essere di poco superiori al range delle particelle alle massime energie considerate in tali materiali, ma non abbastanza grandi da assorbire in maniera rilevante i secondari prodotti dentro i target stessi.

La Tabella 1 riassume le possibili opzioni delle variabili considerate.

| Dimensioni Sale (m) | Volumi (m ³) | Materiali Target | t _{irr} (s) | t _{cooling} (s) |
|---------------------|--------------------------|------------------|----------------------|--------------------------|
| 6x6x6 | 216 | Rame | 1 | 0 |
| 20x20x10 | 4000 | Polietilene | | |
| 40x40x10 | 16000 | | | |

Tabella 26 Variabili delle simulazioni

4.1 Fascio di protoni

In base a queste considerazioni si è scelto come target di rame un cubo di lato 7 cm e per il polietilene uno di 20 cm di lato. Le correnti e i tempi di irraggiamento e di cooling sono gli stessi delle simulazioni fatte in precedenza.

Fascio di protoni in stanza 6x6x6m

Nella Tabella 2 sono riportate le attività (in Bq) per ogni radionuclide considerato per un fascio di protoni, con corrente di 1.375×10^{10} protoni/s, in funzione dell'energia (MeV/u), che impatta su un target di rame in una stanza di dimensioni 6x6x6 m. Sono riportate le relative incertezze percentuali.

| | Energia (MeV/u) | | | |
|------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | 60 | 100 | 200 | 250 |
| Ar41 | 2.18E+00 ± 15.7% | 5.08E+00 ± 20.5% | 2.09E+01 ± 10.1% | 3.25E+01 ± 6.7% |
| O15 | 1.39E+01 ± 44.1% | 9.07E+01 ± 26.3% | 4.98E+02 ± 17.9% | 1.01E+03 ± 8.3% |
| N13 | 1.08E+01 ± 22.9% | 3.45E+01 ± 45.3% | 3.38E+02 ± 8.2% | 4.82E+02 ± 6.3% |
| C11 | 1.95E+00 ± 37.0% | 7.79E+00 ± 25.9% | 3.74E+01 ± 19.8% | 7.79E+01 ± 13.2% |

Tabella 27 Attività per singoli radionuclidi prodotti da un fascio di protoni con corrente 1.375×10^{10} protoni/s incidente su target di rame in una stanza 6x6x6 m.

I dati della Tabella 2 sono stati normalizzati per una corrente di 10^{10} protoni/s e sono riportati nella Tabella 3 e nel relativo grafico (Figura 1).

| | Energia (MeV/u) | | | |
|------|-----------------|----------|----------|----------|
| | 60 | 100 | 200 | 250 |
| Ar41 | 1.58E+00 | 3.70E+00 | 1.52E+01 | 2.37E+01 |
| O15 | 1.01E+01 | 6.60E+01 | 3.62E+02 | 7.32E+02 |
| N13 | 7.86E+00 | 2.51E+01 | 2.46E+02 | 3.51E+02 |
| C11 | 1.42E+00 | 5.66E+00 | 2.72E+01 | 5.66E+01 |

Tabella 28 Attività per singoli radionuclidi prodotti da un fascio di protoni con corrente 10^{10} protoni/s incidente su target di rame in una stanza 6x6x6 m.

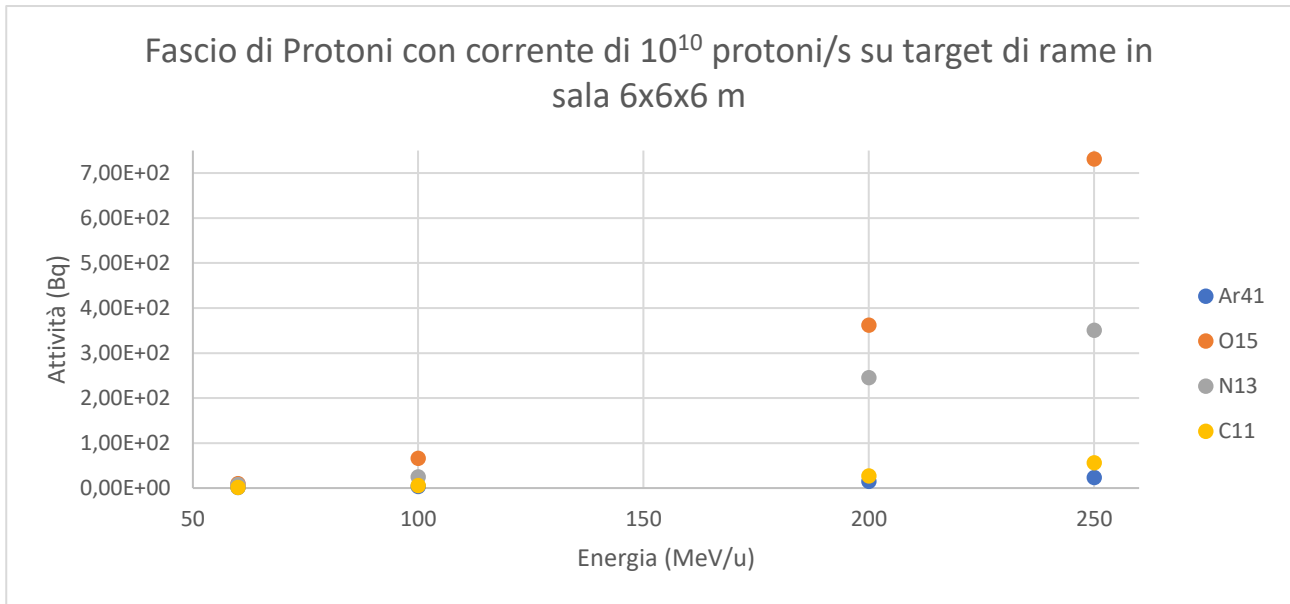


Figura 26 Attività in funzione dell'energia per singoli radionuclidi prodotti da un fascio di protoni con corrente 10^{10} protoni/s incidente su target di rame in una stanza 6x6x6 m.

Si sono svolte simulazioni analoghe per un fascio di protoni incidente su un target di polietilene. I dati in Tabella 4 si riferiscono a tale situazione con un fascio di 1.375×10^{10} protoni/s. Sono riportate anche le incertezze percentuali.

| | Energia (MeV/u) | | | |
|------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | 60 | 100 | 200 | 250 |
| Ar41 | 7.92E-01 ± 9.1% | 1.83E+00 ± 12.7% | 2.32E+00 ± 42.4% | 7.90E+00 ± 6.7% |
| O15 | 4.28E+00 ±26.5% | 3.11E+01 ± 13.7% | 4.04E+02 ± 9.4% | 7.09E+02 ± 7.1% |
| N13 | 1.99E+00 ±15.5% | 1.59E+01 ±16.1% | 1.56E+02 ± 13.5% | 3.40E+02 ± 3.0% |
| C11 | 6.23E-01 ± 36.2% | 2.18E+00 ± 41.3% | 2.49E+01 ± 25.0% | 5.79E+01 ± 14.6% |

Tabella 29 Attività per singoli radionuclidi prodotti da un fascio di protoni con corrente 1.375×10^{10} protoni/s incidente su target di polietilene in una stanza 6x6x6 m.

I dati della Tabella 4 sono stati normalizzati per una corrente di 10^{10} protoni/s. I risultati sono riportati in Tabella 5 e nel grafico di Figura 2.

| | Energia (MeV/u) | | | |
|------|-----------------|----------|----------|----------|
| | 60 | 100 | 200 | 250 |
| Ar41 | 5.76E-01 | 1.33E+00 | 1.69E+00 | 5.75E+00 |
| O15 | 3.11E+00 | 2.26E+01 | 2.94E+02 | 5.16E+02 |
| N13 | 1.45E+00 | 1.16E+01 | 1.14E+02 | 2.47E+02 |
| C11 | 4.53E-01 | 1.59E+00 | 1.81E+01 | 4.21E+01 |

Tabella 30 Attività per singoli radionuclidi prodotti da un fascio di protoni con corrente 10^{10} protoni/s incidente su target di polietilene in una stanza 6x6x6 m.

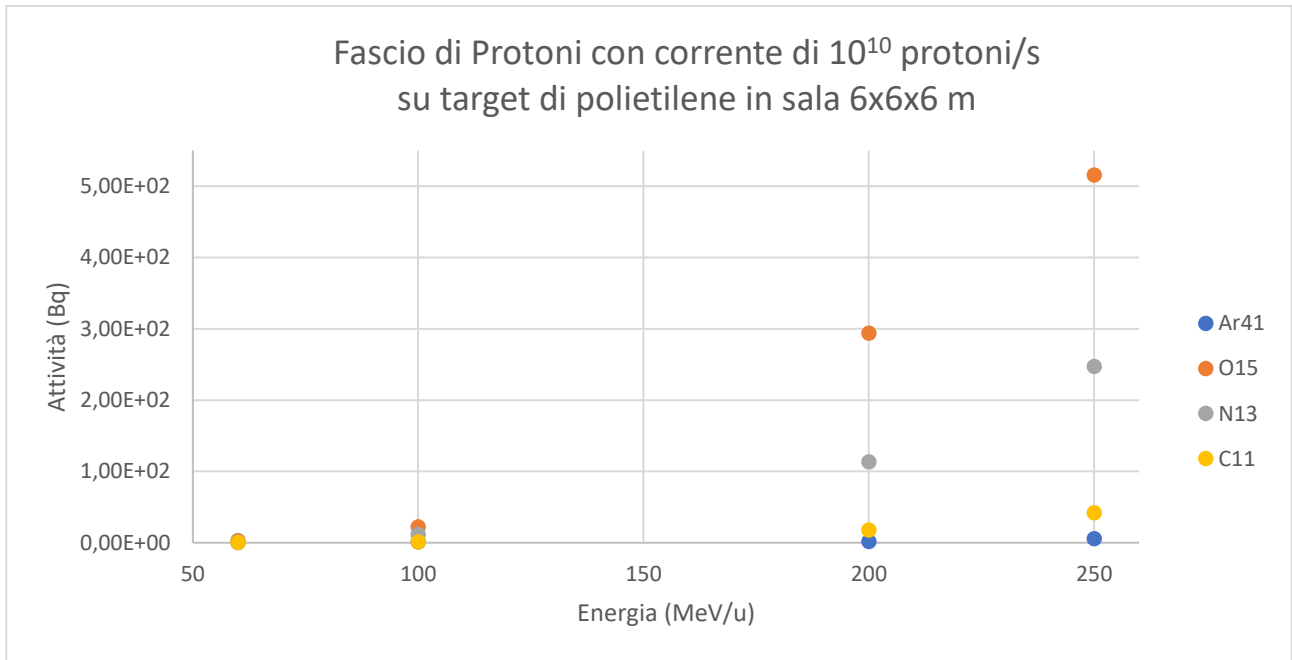


Figura 27 Attività in funzione dell'energia prodotta da un fascio di protoni con una corrente di 10^{10} protoni/s su target di polietilene in una stanza 6x6x6 m.

Fascio di protoni in stanza 20x20x10 m

In condizioni del tutto analoghe alle precedenti, si è simulato un fascio di protoni che impatta su due target di rame e polietilene ma in una stanza di medie dimensioni: 20x20x10 m.

I dati della Tabella 6 riguardano un fascio di protoni con corrente 1.375×10^{10} protoni/s che incide su un target di rame in una stanza di medie dimensioni. I dati sono accompagnati dalle relative incertezze percentuali.

| | Energia (MeV/u) | | | |
|------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| | 60 | 100 | 200 | 250 |
| Ar41 | 6.36E+00 ±12.6% | 1.65E+01 ±6.3% | 5.21E+01 ±3.1% | 9.30E+01 ±9.9% |
| O15 | 5.55E+01 ±35.4% | 2.59E+02 ±10.4% | 1.80E+03 ±5.8% | 2.33E+03 ±14.9% |
| N13 | 2.85E+01 ±22.9% | 1.50E+02 ±11.5% | 8.27E+02 ±5.0% | 1.55E+03 ±16.8% |
| C11 | 2.78E+00 ±43.9% | 1.45E+01 ±16.4% | 1.36E+02 ±6.8% | 1.79E+02 ±20.6% |

Tabella 31 Attività per singolo radionuclide prodotta da un fascio di protoni con corrente 1.375×10^{10} protoni/s su un target di rame in una stanza 20x20x10 m.

I dati in Tabella 6 sono stati normalizzati per una corrente di 10^{10} protoni/s, i risultati sono riportati in Tabella 7 e nel relativo grafico (Figura 3).

| | Energia (MeV/u) | | | |
|------|-----------------|----------|----------|----------|
| | 60 | 100 | 200 | 250 |
| Ar41 | 4.62E+00 | 1.20E+01 | 3.79E+01 | 6.76E+01 |
| O15 | 4.04E+01 | 1.89E+02 | 1.31E+03 | 1.70E+03 |
| N13 | 2.07E+01 | 1.09E+02 | 6.01E+02 | 1.12E+03 |
| C11 | 2.02E+00 | 1.06E+01 | 9.88E+01 | 1.30E+02 |

Tabella 32 Attività per singolo radionuclide prodotta da un fascio di 10^{10} protoni su un target di rame in una stanza 20x20x10 m

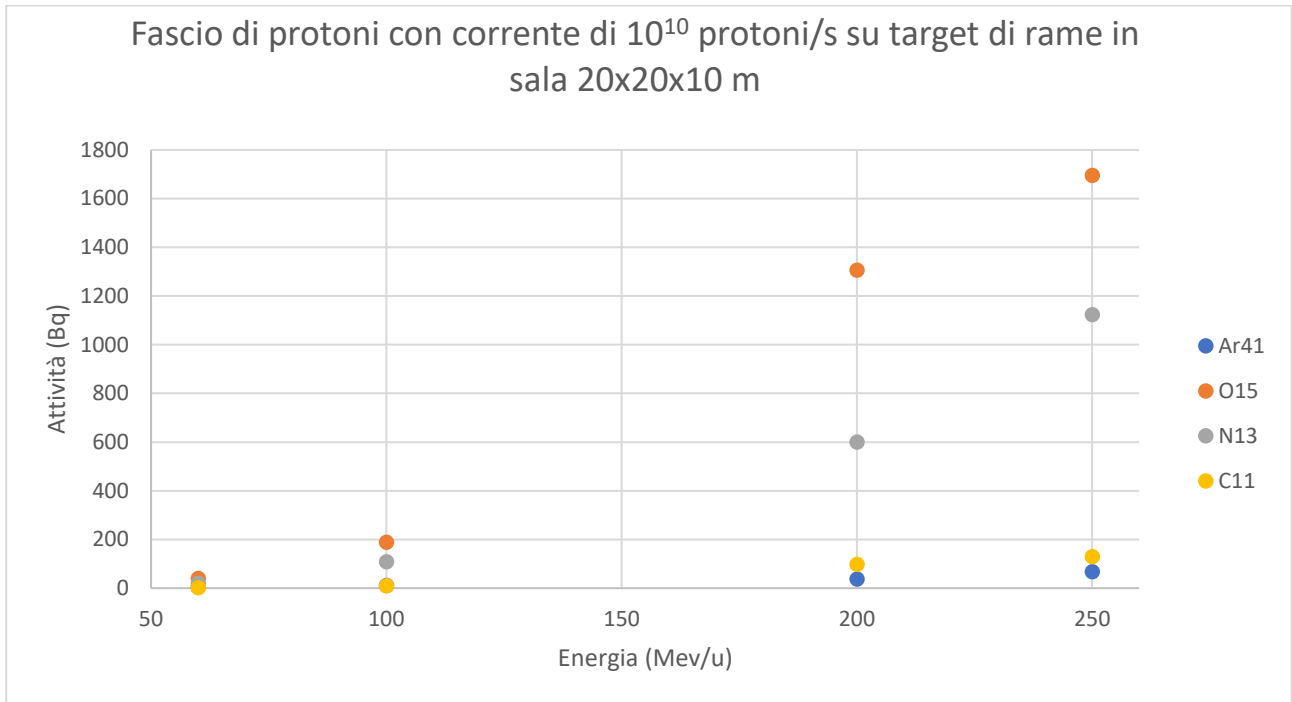


Figura 28 Attività in funzione dell'energia prodotta da un fascio di protoni con corrente di 10^{10} protoni/s su target di rame in sala 20x20x10 m.

Si è considerato, in seguito, la situazione di un fascio di protoni che incide su un target di polietilene in una stanza di medie dimensioni, il fascio ha una corrente di 1.375×10^{10} protoni/s. Le attività prodotte sono riportate nella Tabella 8 con le relative incertezze percentuali.

| | Energia (MeV/u) | | | |
|------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| | 60 | 100 | 200 | 250 |
| Ar41 | 1.81E+00 ± 2.9% | 4.36E+00 ± 7.5% | 1.28E+01 ± 3.3% | 1.97E+01 ± 6.4% |
| O15 | 3.50E+00 ± 20.8% | 1.10E+02 ± 9.3% | 1.18E+03 ± 3.1% | 2.42E+03 ± 5.7% |
| N13 | 4.38E+00 ± 11.5% | 5.86E+01 ± 5.1% | 5.23E+02 ± 2.6% | 9.52E+02 ± 1.2% |
| C11 | 1.09E+00 ± 12.1% | 5.14E+00 ± 19.5% | 9.03E+01 ± 4.9% | 1.95E+02 ± 1.3% |

Tabella 33 Attività per singolo radionuclide prodotta da un fascio di protoni di corrente 1.375×10^{10} protoni/s su un target di polietilene in una stanza 20x20x10 m.

I dati della Tabella 8 sono stati normalizzati per una corrente di 10^{10} protoni/s, i risultati sono riportati nella Tabella 9 e nel relativo grafico di Figura 4.

| | Energia (MeV/u) | | | |
|------|-----------------|----------|----------|----------|
| | 60 | 100 | 200 | 250 |
| Ar41 | 1.32E+00 | 3.17E+00 | 9.29E+00 | 1.43E+01 |
| O15 | 2.54E+00 | 8.03E+01 | 8.58E+02 | 1.76E+03 |
| N13 | 3.19E+00 | 4.26E+01 | 3.80E+02 | 6.92E+02 |
| C11 | 7.93E-01 | 3.74E+00 | 6.57E+01 | 1.42E+02 |

Tabella 34 Attività per singolo radionuclide prodotta da un fascio di 10^{10} protoni su un target di polietilene in una stanza di dimensioni 20x20x10 m.

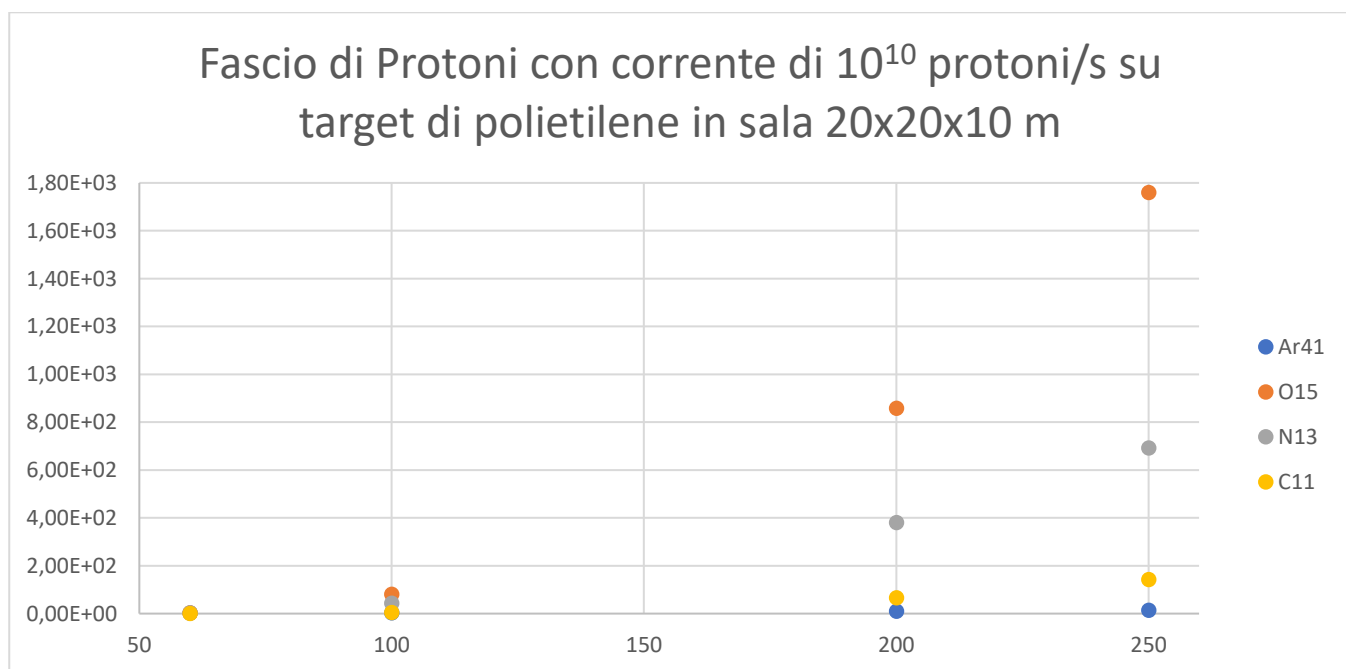


Figura 29 Attività in funzione dell'energia prodotta da un fascio di protoni con corrente di 10^{10} protoni/s su target di polietilene in sala 20x20x10 m.

Fascio di protoni in stanza 40x40x10 m

Si considera ora un fascio di protoni incidente su target di rame e di polietilene in una stanza di dimensioni 40x40x10 m.

La Tabella 10 riporta i dati e le relative incertezze riguardanti l'attivazione dell'aria a causa dell'irraggiamento di un target di rame in una stanza di 40x40x10 m con un fascio di 1.375×10^{10} protoni/s.

| | Energia (MeV/u) | | | |
|------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 60 | 100 | 200 | 250 |
| Ar41 | 6.79E+00 ± 1.5 % | 1.95E+01 ± 1.0% | 7.29E+01 ± 1.1% | 1.02E+02 ± 2.6% |
| O15 | 4.28E+01 ± 7.2% | 3.26E+02 ± 5.5% | 2.64E+03 ± 1.4% | 4.65E+03 ± 1.7% |
| N13 | 3.62E+01 ± 1.7% | 1.98E+02 ± 1.9% | 1.28E+03 ± 1.9% | 2.16E+03 ± 0.6% |
| C11 | 3.42E+00 ± 8.1% | 2.00E+01 ± 5.7% | 1.85E+02 ± 2.1% | 3.49E+02 ± 2.0% |

Tabella 35 Attività per singolo radionuclide prodotta da un fascio di 1.375×10^{10} protoni su un target di rame in una stanza di dimensioni 40x40x10 m.

I dati della Tabella 10 sono normalizzati per una corrente di 10^{10} protoni/s. I risultati sono riportati nella Tabella 11 e nel relativo grafico (Figura 5).

| | Energia (MeV/u) | | | |
|------|-----------------|----------|----------|----------|
| | 60 | 100 | 200 | 250 |
| Ar41 | 4.94E+00 | 1.42E+01 | 5.30E+01 | 7.43E+01 |
| O15 | 3.11E+01 | 2.37E+02 | 1.92E+03 | 3.38E+03 |
| N13 | 2.63E+01 | 1.44E+02 | 9.31E+02 | 1.57E+03 |
| C11 | 2.49E+00 | 1.46E+01 | 1.35E+02 | 2.54E+02 |

Tabella 36 Attività per singolo radionuclide prodotta da un fascio di 10^{10} protoni su un target di rame in una stanza di dimensioni 40x40x10 m.

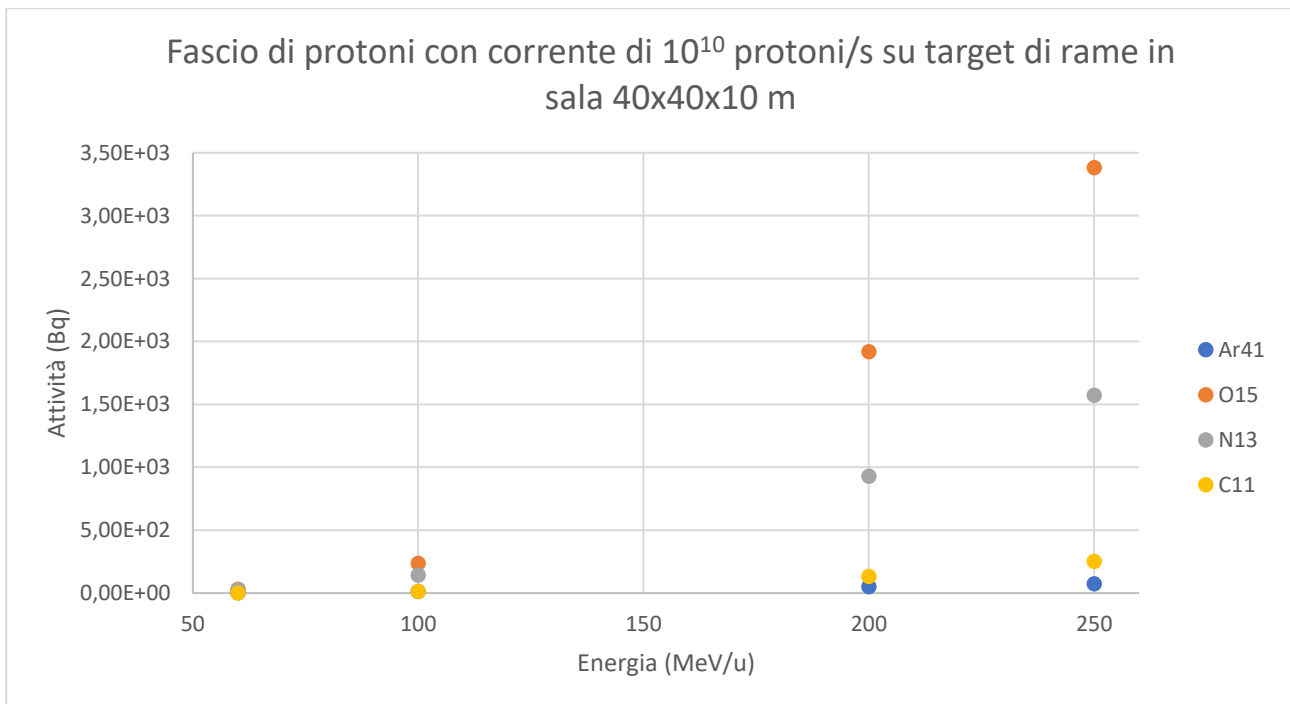


Figura 30 Attività in funzione dell'energia prodotta da un fascio di protoni con corrente di 10^{10} protoni/s su target di rame in sala 40x40x10 m.

Sono state compiute, in seguito, simulazioni usando un fascio di protoni con una corrente di 1.375×10^{10} protoni/s impattante su un target di polietilene in una stanza di 40x40x10 m.

I risultati di tali simulazioni sono riportati nella Tabella 12 con le relative incertezze.

| | Energia (Mev/u) | | | |
|------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 60 | 100 | 200 | 250 |
| Ar41 | 2.66E+00 ± 1.6% | 6.06E+00 ± 4.0% | 1.69E+01 ± 3.1% | 2.96E+01 ± 5.2% |
| O15 | 9.08E+00 ± 12.9% | 1.59E+02 ± 2.9% | 1.84E+03 ± 1.8% | 3.64E+03 ± 2.1% |
| N13 | 6.00E+00 ± 3.4% | 7.97E+01 ± 3.2% | 8.20E+02 ± 1.2% | 1.52E+03 ± 2.2% |
| C11 | 1.31E+00 ± 5.6% | 9.52E+00 ± 6.1% | 1.45E+02 ± 2.0% | 3.05E+02 ± 2.9% |

Tabella 37 Attività per singolo radionuclide prodotta da un fascio di 1.375×10^{10} protoni su un target di polietilene in una stanza di dimensioni 40x40x10 m.

I risultati della Tabella 12 sono stati normalizzati per una corrente di 10^{10} protoni, e i risultati sono riportati nella Tabella 13 e nel relativo grafico (Figura 6).

| | Energia (Mev/u) | | | |
|------|-----------------|----------|----------|----------|
| | 60 | 100 | 200 | 250 |
| Ar41 | 1.94E+00 | 4.41E+00 | 1.23E+01 | 2.15E+01 |
| O15 | 6.61E+00 | 1.16E+02 | 1.34E+03 | 2.64E+03 |
| N13 | 4.36E+00 | 5.80E+01 | 5.96E+02 | 1.10E+03 |
| C11 | 9.49E-01 | 6.92E+00 | 1.05E+02 | 2.22E+02 |

Tabella 38 Attività per singolo radionuclide prodotta da un fascio di 10^{10} protoni su un target di polietilene in una stanza di dimensioni 40x40x10 m.

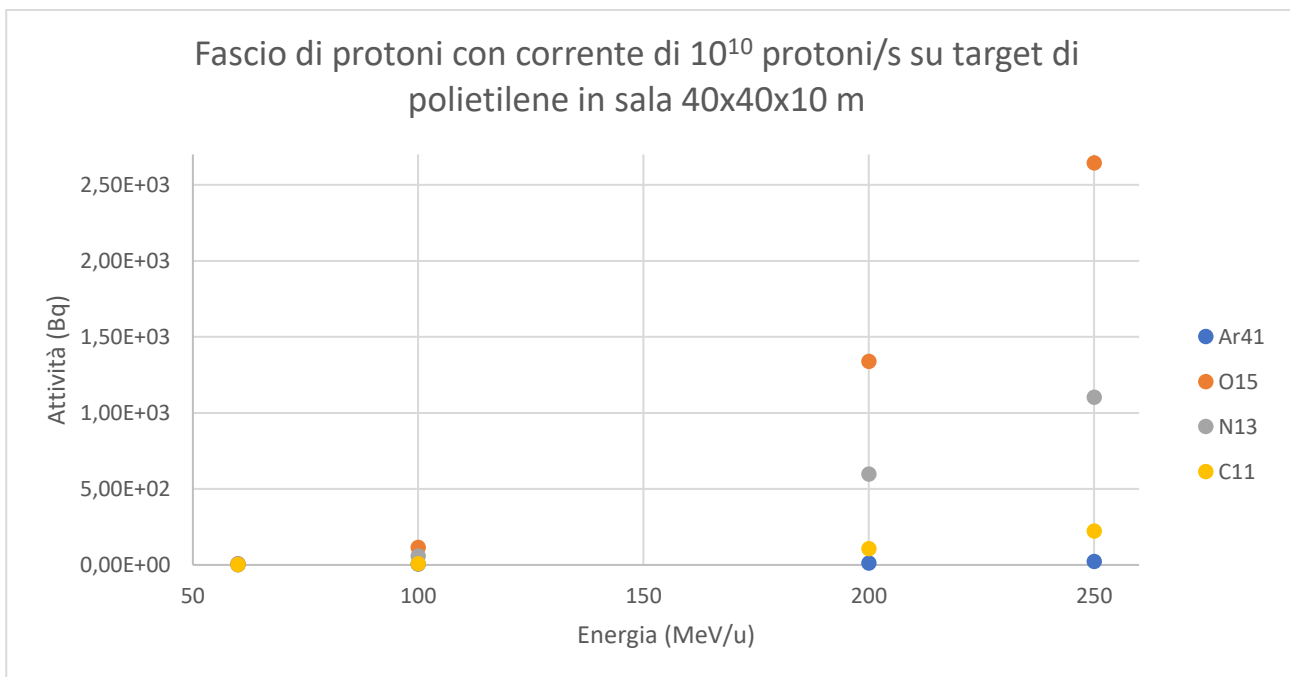


Figura 31 Attività in funzione dell'energia prodotta da un fascio di protoni con corrente di 10^{10} protoni/s su target di polietilene in sala 40x40x10 m.

4.2 Fascio di ioni carbonio

Si considera ora un fascio di ioni carbonio che incide su target di rame e di polietilene in stanze delle stesse dimensioni considerate nei casi precedenti. Per le simulazioni si è considerata una corrente di 5.5×10^8 ioni/s, i tempi di irraggiamento di 1 s e il tempo di cooling nullo.

Fascio di ioni carbonio in stanza di 6x6x6m

La Tabella 14 e la Tabella 15 riportano i dati (e le relative incertezze) che riguardano un irraggiamento con ioni carbonio con corrente 5.5×10^8 ioni/s in una stanza di 6x6x6 m su target di rame e polietilene.

| | Energia (MeV/u) | | | |
|------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| | 120 | 200 | 300 | 400 |
| Ar41 | 0.8426 ± 19.5% | 2.169 ± 22.7% | 5.617 ± 20.5% | 11.62 ± 6.5% |
| O15 | 1.87E+01 ± 24.2% | 1.66E+02 ± 14.9% | 7.15E+02 ± 11.0% | 1.55E+03 ± 6.0% |
| N13 | 1.53E+01 ± 20.1% | 8.41E+01 ± 11.3% | 3.23E+02 ± 8.6% | 6.73E+02 ± 2.3% |
| C11 | 2.03E+00 ± 23.1% | 1.41E+01 ± 12.5% | 6.02E+01 ± 14.3% | 1.45E+02 ± 4.2% |

Tabella 39 Attività dei radionuclidi prodotti da un fascio di ioni carbonio a corrente $5.5 \cdot 10^8$ ioni/s su target di rame in una stanza di 6x6x6 m.

| | Energia (MeV/u) | | | |
|------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| | 120 | 200 | 300 | 400 |
| Ar41 | 4.07E-01 ± 14.3% | 1.42E+00 ± 9.8% | 2.98E+00 ± 10.2% | 5.81E+00 ± 8.9% |
| O15 | 2.80E+01 ± 12.7% | 1.88E+02 ± 7.6% | 7.40E+02 ± 3.4% | 1.90E+03 ± 3.6% |
| N13 | 1.31E+01 ± 14.0% | 8.67E+01 ± 1.3% | 3.25E+02 ± 3.0% | 8.17E+02 ± 2.6% |
| C11 | 2.43E+00 ± 23.4% | 1.66E+01 ± 2.5% | 8.00E+01 ± 2.0% | 1.84E+02 ± 4.9% |

Tabella 40 Attività dei radionuclidi prodotti da un fascio di ioni carbonio a corrente $5.5 \cdot 10^8$ ioni/s su target di polietilene in una stanza di 6x6x6 m.

Si sono normalizzati i dati delle tabelle precedenti per una corrente di 10^8 ioni/s.

I dati della Tabella 16, e del relativo grafico, (Figura 7) si riferiscono a una corrente di 10^8 ioni/s incidenti su un target di rame in una stanza di 6x6x6 m.

| | Energia (MeV/u) | | | |
|------|-----------------|----------|----------|----------|
| | 120 | 200 | 300 | 400 |
| Ar41 | 1.53E-01 | 3.94E-01 | 1.02E+00 | 2.11E+00 |
| O15 | 3.39E+00 | 3.02E+01 | 1.30E+02 | 2.82E+02 |
| N13 | 2.78E+00 | 1.53E+01 | 5.87E+01 | 1.22E+02 |
| C11 | 3.68E-01 | 2.57E+00 | 1.10E+01 | 2.64E+01 |

Tabella 41 Attività dei radionuclidi prodotti da un fascio di ioni carbonio con corrente 10^8 ioni/s incidente su target di rame in stanza 6x6x6 m.

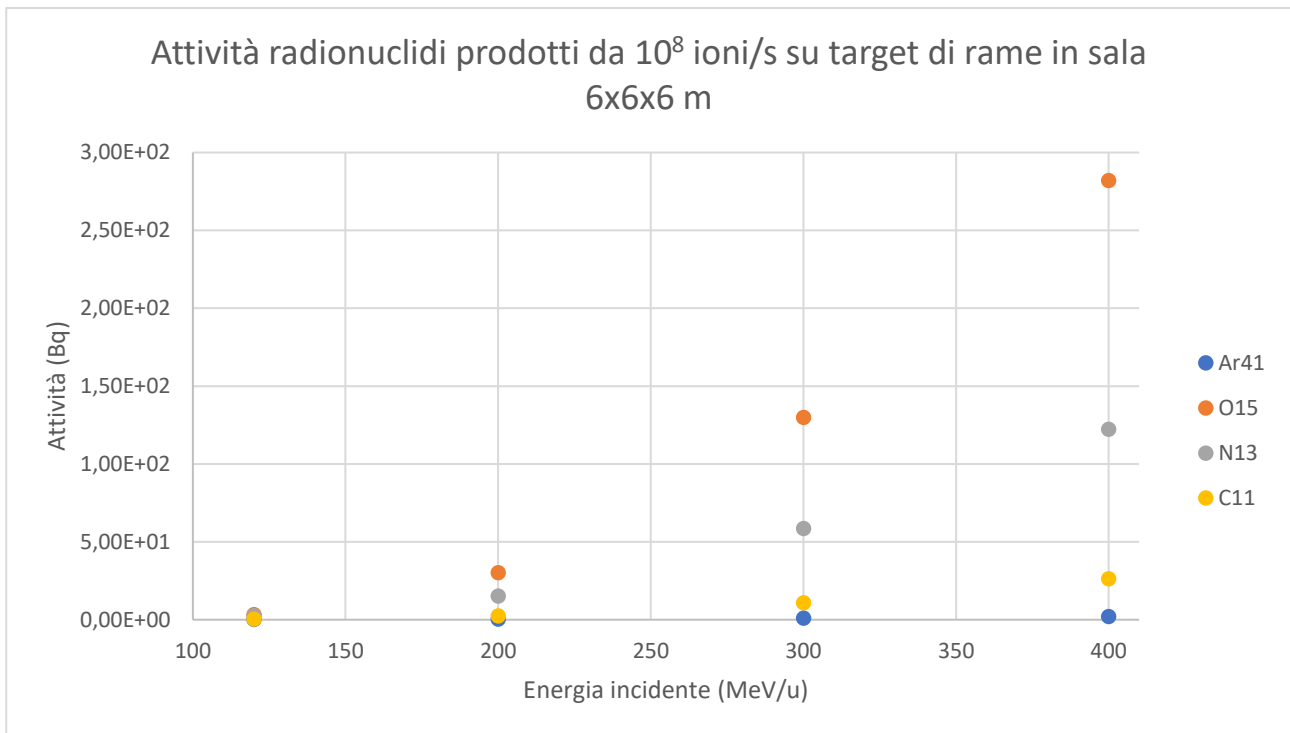


Figura 32 Attività dei radionuclidi prodotti da un fascio di ioni carbonio con corrente 10^8 ioni/s incidente su target di rame in stanza $6 \times 6 \times 6$ m.

Analogamente si sono trovati i dati per le stesse condizioni ma con target di polietilene, tali dati sono riportati nella Tabella 17 e nel rispettivo grafico (Figura 8).

| | Attività (Bq) | | | |
|------|-----------------|----------|----------|----------|
| | Energia (MeV/u) | | | |
| | 120 | 200 | 300 | 400 |
| Ar41 | 7.40E-02 | 2.58E-01 | 5.41E-01 | 1.06E+00 |
| O15 | 5.09E+00 | 3.41E+01 | 1.35E+02 | 3.46E+02 |
| N13 | 2.39E+00 | 1.58E+01 | 5.90E+01 | 1.49E+02 |
| C11 | 4.42E-01 | 3.03E+00 | 1.45E+01 | 3.34E+01 |

Tabella 42 Attività dei radionuclidi prodotti da un fascio di ioni carbonio con corrente 10^8 ioni/s incidente su target di polietilene in stanza $6 \times 6 \times 6$ m.

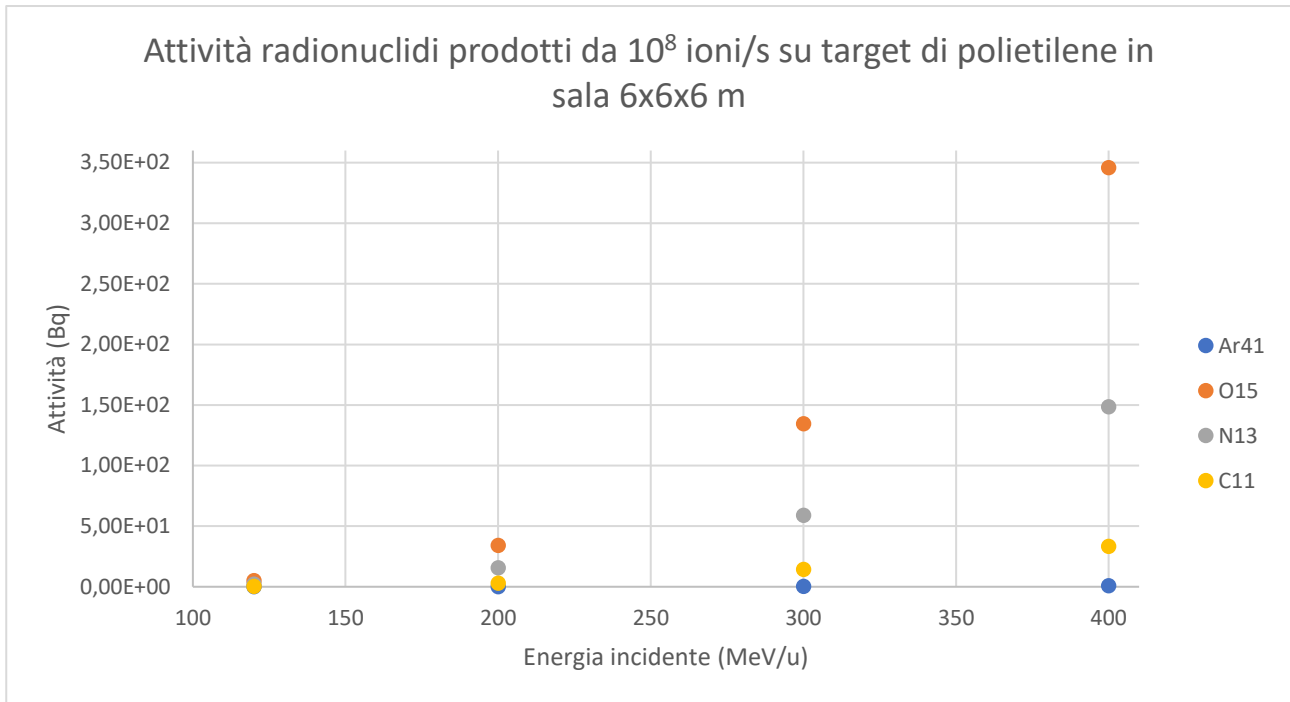


Figura 33 Attività dei radionuclidi prodotti da un fascio di ioni carbonio con corrente 10^8 ioni/s incidente su target di polietilene in stanza 6x6x6 m.

Fascio di ioni carbonio su target in stanza 20x20x10 m

Simulazioni del tutto analoghe alle precedenti sono state compiute per un fascio di ioni carbonio incidente su target di rame e di polietilene in una stanza di dimensioni intermedie (20x20x10 m). La Tabella 18 riporta, con le relative incertezze percentuali, le attività prodotte da un fascio di ioni carbonio a una corrente di 5.5×10^8 ioni/s che interagisce con un target di rame in una stanza 20x20x10 m.

| | Energia (MeV/u) | | | |
|------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 120 | 200 | 300 | 400 |
| Ar41 | 1.60E+00 ± 12.0% | 7.28E+00 ± 8.3% | 1.64E+01 ± 2.2 | 5.45E+00 ± 5.5% |
| O15 | 7.40E+01 ± 9.7% | 5.98E+02 ± 9.6% | 2.03E+03 ± 1.3% | 4.87E+03 ± 1.3% |
| N13 | 3.67E+01 ± 7.3% | 2.47E+02 ± 5.4% | 8.93E+02 ± 1.7% | 2.09E+03 ± 0.8% |
| C11 | 5.73E+00 ± 11.0% | 5.05E+01 ± 7.0% | 1.75E+02 ± 1.3% | 4.42E+02 ± 1.4% |

Tabella 43 Attività dei radionuclidi prodotti da un fascio di ioni carbonio con corrente 5.5×10^8 ioni/s incidente su target di polietilene in stanza 20x20x10 m.

Nella Tabella 19 sono riportate le attività prodotte da un fascio di ioni carbonio a una corrente di 5.5×10^8 ioni/s che interagisce con un target di polietilene in una stanza 20x20x10 m.

| | Energia (MeV/u) | | | |
|------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| | 120 | 200 | 300 | 400 |
| Ar41 | 7.67E-01 ± 5.0% | 2.72E+00 ± 12.1% | 7.44E+00 ± 4.9% | 1.42E+01 ± 8.1% |
| O15 | 8.65E+01 ± 7.9% | 5.64E+02 ± 10.0% | 2.60E+03 ± 1.5% | 6.53E+03 ± 3.7% |
| N13 | 3.73E+01 ± 7.6% | 2.59E+02 ± 2.3% | 1.04E+03 ± 0.7% | 2.72E+03 ± 1.0% |
| C11 | 6.98E+00 ± 7.2% | 5.07E+01 ± 5.9% | 2.59E+02 ± 1.2% | 6.82E+02 ± 2.6% |

Tabella 44 Attività dei radionuclidi prodotti da un fascio di ioni carbonio ad una corrente di 5.5×10^8 ioni/s su target di polietilene in una stanza $20 \times 20 \times 10$ m.

I dati della Tabella 20 e della Tabella 21 sono normalizzati per una corrente di 10^8 ioni/s incidenti su un target di rame e di polietilene in una stanza di dimensioni $20 \times 20 \times 10$ m, la Figura 9 e la Figura 10 ne rappresentano i grafici.

| | Energia (MeV/u) | | | |
|------|-----------------|----------|----------|----------|
| | 120 | 200 | 300 | 400 |
| Ar41 | 2.92E-01 | 1.32E+00 | 2.98E+00 | 9.91E-01 |
| O15 | 1.35E+01 | 1.09E+02 | 3.68E+02 | 8.86E+02 |
| N13 | 6.68E+00 | 4.49E+01 | 1.62E+02 | 3.80E+02 |
| C11 | 1.04E+00 | 9.18E+00 | 3.18E+01 | 8.04E+01 |

Tabella 45 Attività dei radionuclidi prodotti da un fascio di carbonio a una corrente di 10^8 ioni/s su target di rame in una stanza di $20 \times 20 \times 10$ m.

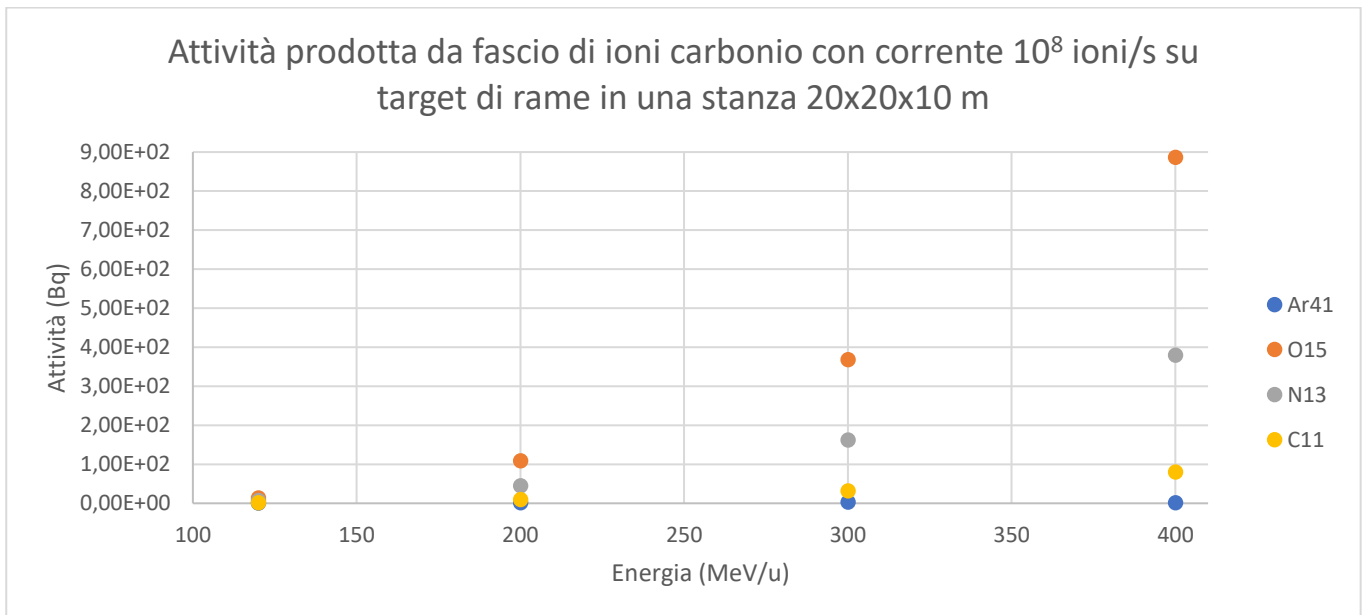


Figura 34 Attività in funzione dell'energia dei radionuclidi prodotti da un fascio di carbonio con corrente 10^8 ioni/s su target di rame in una stanza di $20 \times 20 \times 10$ m.

| | Energia incidente (MeV/u) | | | |
|------|---------------------------|----------|----------|----------|
| | 120 | 200 | 300 | 400 |
| Ar41 | 1.39E-01 | 4.94E-01 | 1.35E+00 | 2.58E+00 |
| O15 | 1.57E+01 | 1.02E+02 | 4.73E+02 | 1.19E+03 |
| N13 | 6.79E+00 | 4.71E+01 | 1.88E+02 | 4.94E+02 |
| C11 | 1.27E+00 | 9.22E+00 | 4.70E+01 | 1.24E+02 |

Tabella 46 Attività dei radionuclidi prodotti da un fascio di carbonio a una corrente di 10^8 ioni/s su target di polietilene in una stanza di 20x20x10 m.

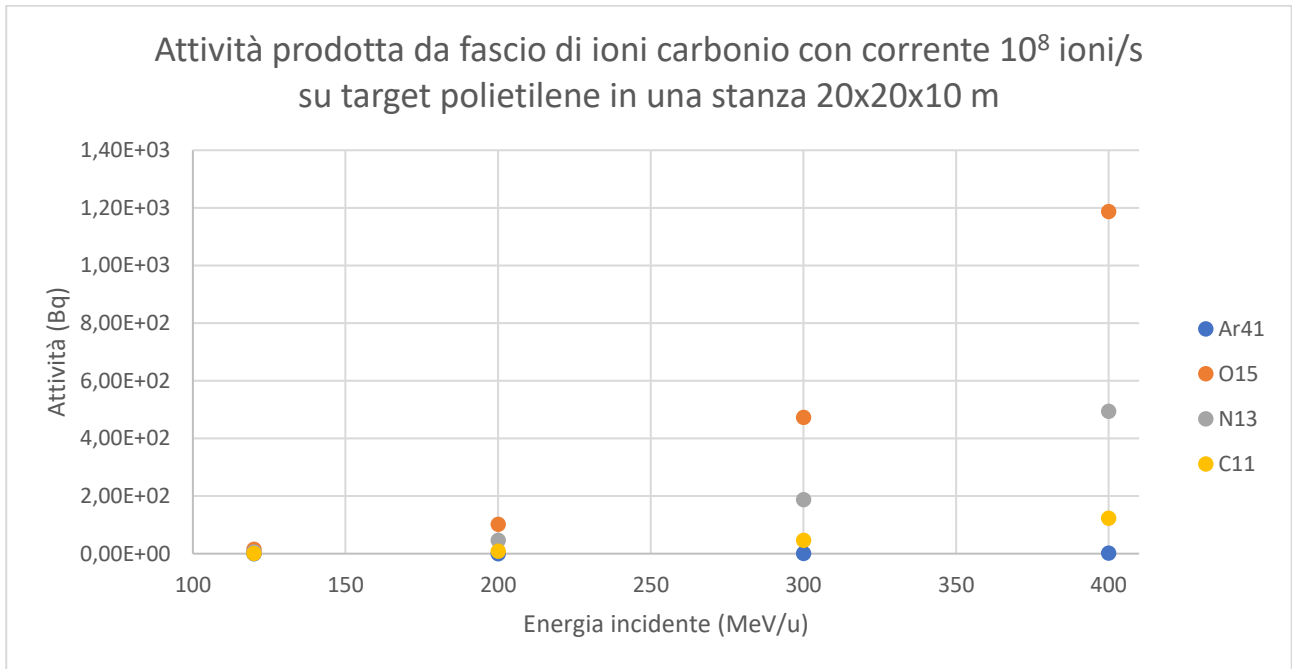


Figura 35 Attività in funzione dell'energia dei radionuclidi prodotti da un fascio di carbonio a una corrente di 10^8 ioni/s su target di polietilene in una stanza di 20x20x10 m.

Fascio di ioni carbonio su target in stanza di dimensioni 40x40x10 m

Analogamente con quanto fatto in precedenza per il fascio di protoni, si analizza ora il caso di un fascio di ioni carbonio incidenti su target di rame e polietilene in una stanza di 40x40x10 m.

I dati, e le relative incertezze, della Tabella 22 si riferiscono a un fascio di ioni carbonio di corrente 5.5×10^8 ioni/s impattanti contro un target di rame in una stanza di 40x40x10 m.

| | Energia (MeV/u) | | | |
|------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 120 | 200 | 300 | 400 |
| Ar41 | 2.49E+00 ± 3.0% | 8.81E+00 ± 2.8% | 2.13E+01 ± 2.0% | 4.01E+01 ± 2.8% |
| O15 | 1.31E+02 ± 5.3% | 9.27E+02 ± 2.3% | 3.33E+03 ± 1.1% | 7.97E+03 ± 0.8% |
| N13 | 6.30E+01 ± 1.1% | 3.97E+02 ± 0.9% | 1.41E+03 ± 0.5% | 3.29E+03 ± 1.6% |
| C11 | 9.21E+00 ± 2.5% | 7.35E+01 ± 1.0% | 2.95E+02 ± 0.7% | 7.29E+02 ± 0.4% |

Tabella 47 Attività per singolo radionuclide prodotta da un fascio di 5.5×10^8 ioni carbonio su un target di rame in una stanza di dimensioni $40 \times 40 \times 10$ m.

I dati della tabella 22 sono stati normalizzati per una corrente di 10^8 ioni/s. I risultati sono riportati nella Tabella 23 e nel relativo grafico (Figura 11)

| | Energia (MeV/u) | | | |
|------|-----------------|----------|----------|----------|
| | 120 | 200 | 300 | 400 |
| Ar41 | 4.52E-01 | 1.60E+00 | 3.88E+00 | 7.28E+00 |
| O15 | 2.37E+01 | 1.69E+02 | 6.05E+02 | 1.45E+03 |
| N13 | 1.15E+01 | 7.22E+01 | 2.56E+02 | 5.98E+02 |
| C11 | 1.68E+00 | 1.34E+01 | 5.36E+01 | 1.33E+02 |

Tabella 48 Attività dei radionuclidi prodotti da un fascio di carbonio a una corrente di 10^8 ioni/s su target di rame in una stanza di $40 \times 40 \times 10$ m

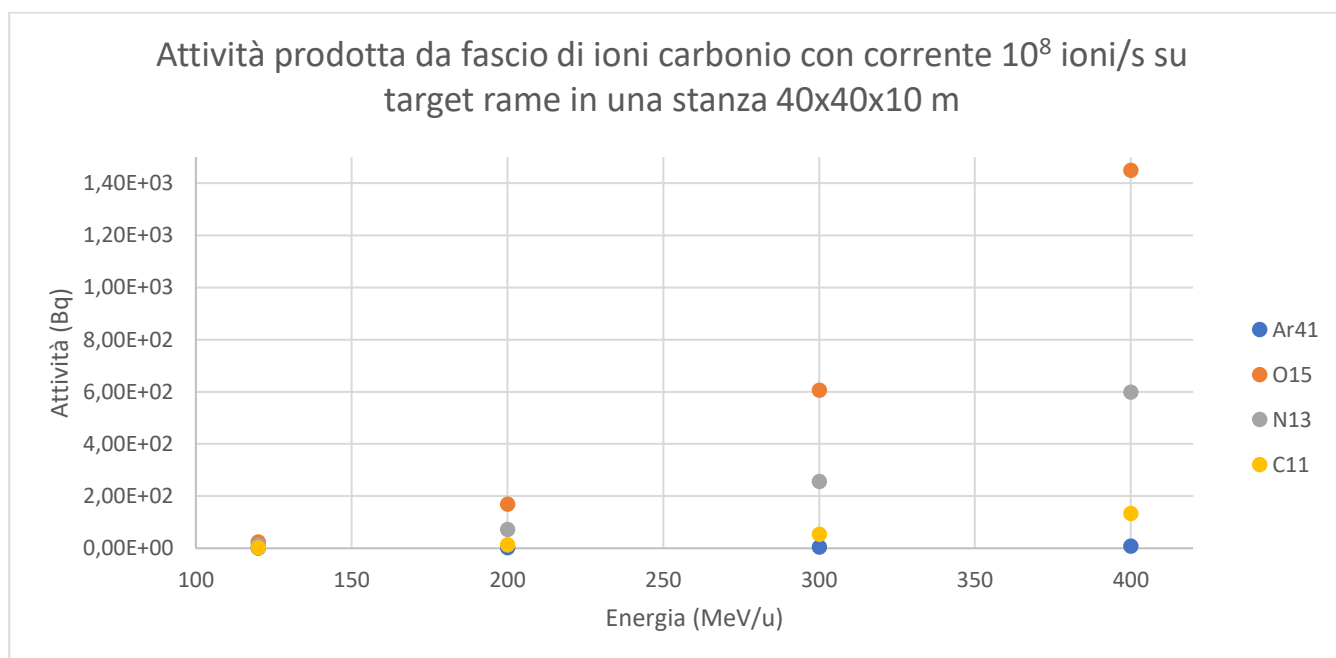


Figura 36 Attività in funzione dell'energia dei radionuclidi prodotti da un fascio di carbonio a una corrente di 10^8 ioni/s su target di rame in una stanza di $40 \times 40 \times 10$ m.

Per concludere, si sono compiute simulazioni per un fascio di ioni carbonio di corrente 5.5×10^8 che colpisce un target di polietilene in una stanza di $40 \times 40 \times 10$ m.

I risultati sono riportati nella Tabella 24 con le relative incertezze.

| | ENERGIA (MeV/u) | | | |
|------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| | 120 | 200 | 300 | 400 |
| Ar41 | 9.61E-01 ± 3.5% | 4.37E+00 ± 5.9% | 1.01E+01 ± 3.3% | 2.06E+01 ± 4.1% |
| O15 | 1.41E+02 ± 4.7% | 1.03E+03 ± 0.7% | 4.43E+03 ± 1.09% | 1.16E+04 ± 1.34% |
| N13 | 6.28E+01 ± 2.8% | 4.17E+02 ± 0.9% | 1.80E+03 ± 1.0% | 4.71E+01 ± 0.7% |
| C11 | 1.18E+01 ± 2.6% | 8.62E+01 ± 0.9% | 4.51E+02 ± 1.1% | 1.22E+03 ± 1.3% |

Tabella 49 Attività per singolo radionuclide prodotta da un fascio di 5.5×10^8 ioni carbonio su un target di polietilene in una stanza di dimensioni $40 \times 40 \times 10$ m.

I dati della Tabella 24 sono stati normalizzati per una corrente di 10^8 ioni/s. I risultati sono riportati nella Tabella 25 e nel relativo grafico (Figura 12)

| | Energia (MeV/u) | | | |
|------|-----------------|----------|----------|----------|
| | 120 | 200 | 300 | 400 |
| Ar41 | 1.75E-01 | 7.94E-01 | 1.83E+00 | 3.74E+00 |
| O15 | 2.56E+01 | 1.88E+02 | 8.05E+02 | 2.10E+03 |
| N13 | 1.14E+01 | 7.59E+01 | 3.27E+02 | 8.56E+00 |
| C11 | 2.14E+00 | 1.57E+01 | 8.21E+01 | 2.21E+02 |

Tabella 50 Attività dei radionuclidi prodotti da un fascio di carbonio a una corrente di 10^8 ioni/s su target di polietilene in una stanza di $40 \times 40 \times 10$ m.

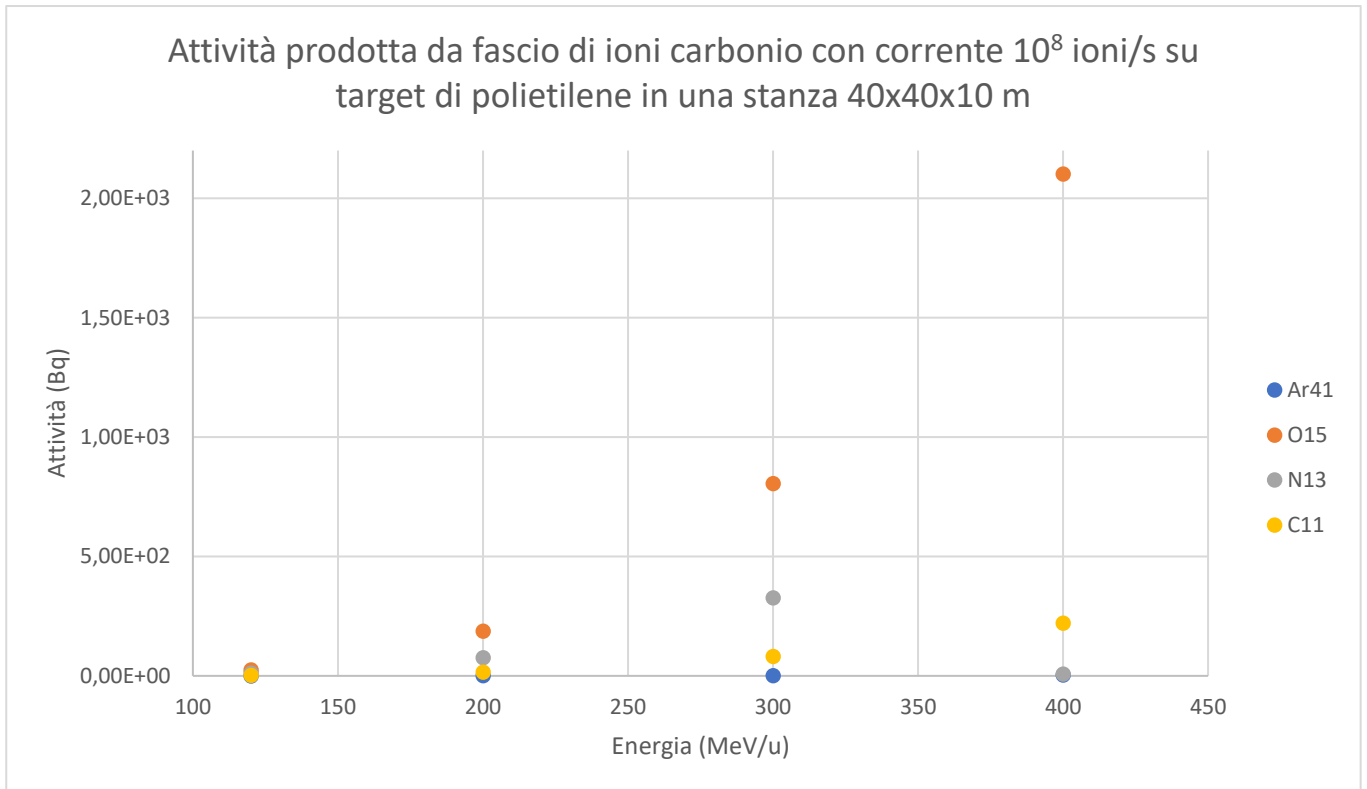


Figura 37 Attività in funzione dell'energia dei radionuclidi prodotti da un fascio di carbonio a una corrente di 10^8 ioni/s su target di polietilene in una stanza di 40x40x10 m.

4.3 Fascio di ioni di elio, litio o ossigeno che impatta su target

Come nel caso dei protoni e degli ioni carbonio si è considerata l'attività prodotta da diversi altri ioni che impattano su target di rame e polietilene. Le considerazioni fatte precedentemente sono valide anche in questi casi. Le dimensioni delle stanze sono le medesime delle precedenti: 6x6x6 m, 20x20x10 m e 40x40x10 m. Le dimensioni dei target invece sono state scelte di volta in volta per coerenza con la scelta fatta precedentemente di far annullare il fascio primario all'interno del target e ridurre i secondari assorbiti da esso. I tempi d'irraggiamento sono stati sempre di un secondo e il tempo di cooling è da considerarsi nullo. Per quanto riguarda le correnti, durante le simulazioni si sono usate quelle precedenti e riportate in letteratura (Pullia, 2014), tuttavia i dati sono qui riportati normalizzati per facilitare il confronto tra di essi e con quelli precedenti.

Ossigeno-16 su target di rame e polietilene in stanza 6x6x6 m

Si è considerato un fascio di ioni di ossigeno che impatta su un target di rame o polietilene in una stanza di dimensioni 6x6x6 m.

Il target di rame è un cubo di 3.5 cm di lato.

La Tabella 26 riporta le attività dei radionuclidi in questo caso, per una corrente di 10^8 ioni/s. La Figura 13 è il corrispondente grafico.

| | Energia (MeV/u) | | | |
|------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | 120 | 200 | 300 | 400 |
| Ar41 | 9.39E-02 ± 29.3% | 4.51E-01 ± 22.4% | 1.27E+00 ± 12.1% | 1.43E+00 ± 23.0% |
| O15 | 6.59E+00 ± 29.5% | 5.20E+01 ± 10.1% | 1.80E+02 ± 8.4% | 3.82E+02 ± 8.1% |
| N13 | 2.32E+00 ± 20.4% | 2.43E+01 ± 8.1% | 8.06E+01 ± 6.8% | 1.83E+02 ± 5.8% |
| C11 | 3.78E-01 ± 28.0% | 4.53E+00 ± 14.8% | 1.54E+01 ± 11.7% | 6.46E+01 ± 6.2% |

Tabella 51 Attività prodotta da un fascio di ossigeno-16 con corrente 10^8 ioni/s che impatta su target di rame in stanza 6x6x6 m.

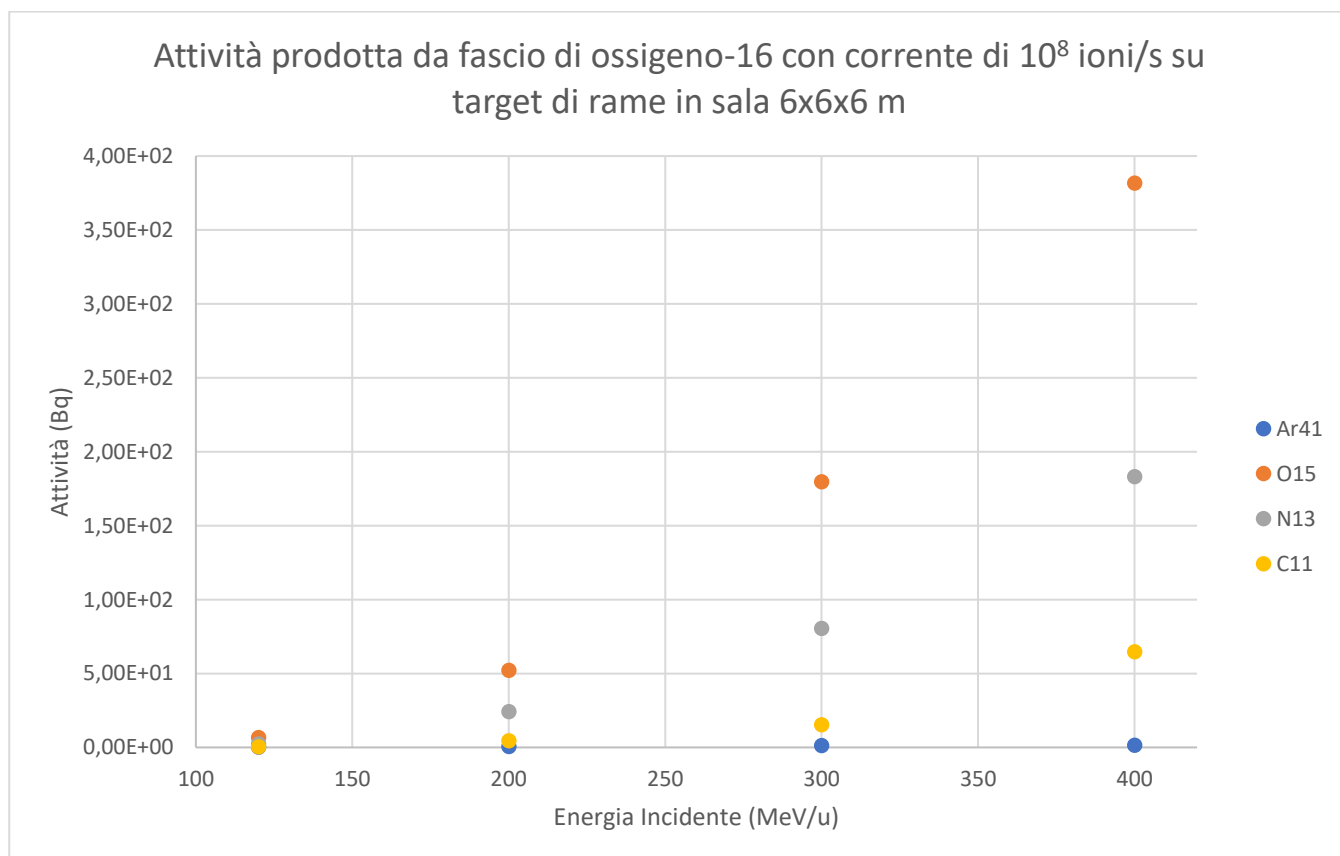


Figura 38 Attività prodotta da un fascio di ossigeno-16 con corrente 10^8 ioni/s su target di rame in sala 6x6x6 m.

Analogamente si è posto un target di polietilene rappresentato da un cubo di 21 cm di lato. Le correnti, i tempi d'irraggiamento e di cooling, e le energie considerate sono uguali al caso precedente.

La Tabella 27 riporta le attività per una corrente di 10^8 ioni/s e la Figura 14 rappresenta il relativo grafico.

| | Energia (MeV/u) | | | |
|------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | 120 | 200 | 300 | 400 |
| Ar41 | 1.64E-01 ± 23.4% | 3.08E-01 ± 19.7% | 5.50E-01 ± 15.5% | 1.32E+00 ± 21.7% |
| O15 | 3.95E+01 ± 13.4% | 5.36E+01 ± 10.4% | 2.16E+02 ± 6.5% | 4.74E+02 ± 6.7% |
| N13 | 2.44E+01 ± 8.4% | 2.15E+01 ± 7.9% | 9.22E+01 ± 3.9% | 2.42E+02 ± 4.5% |
| C11 | 1.13E+01 ± 7.9% | 4.78E+00 ± 9.1% | 2.43E+01 ± 5.5% | 1.07E+02 ± 5.8% |

Tabella 52 Attività prodotta da un fascio di ossigeno-16 con corrente 10^8 ioni/s che impatta su target di polietilene in stanza 6x6x6 metri.

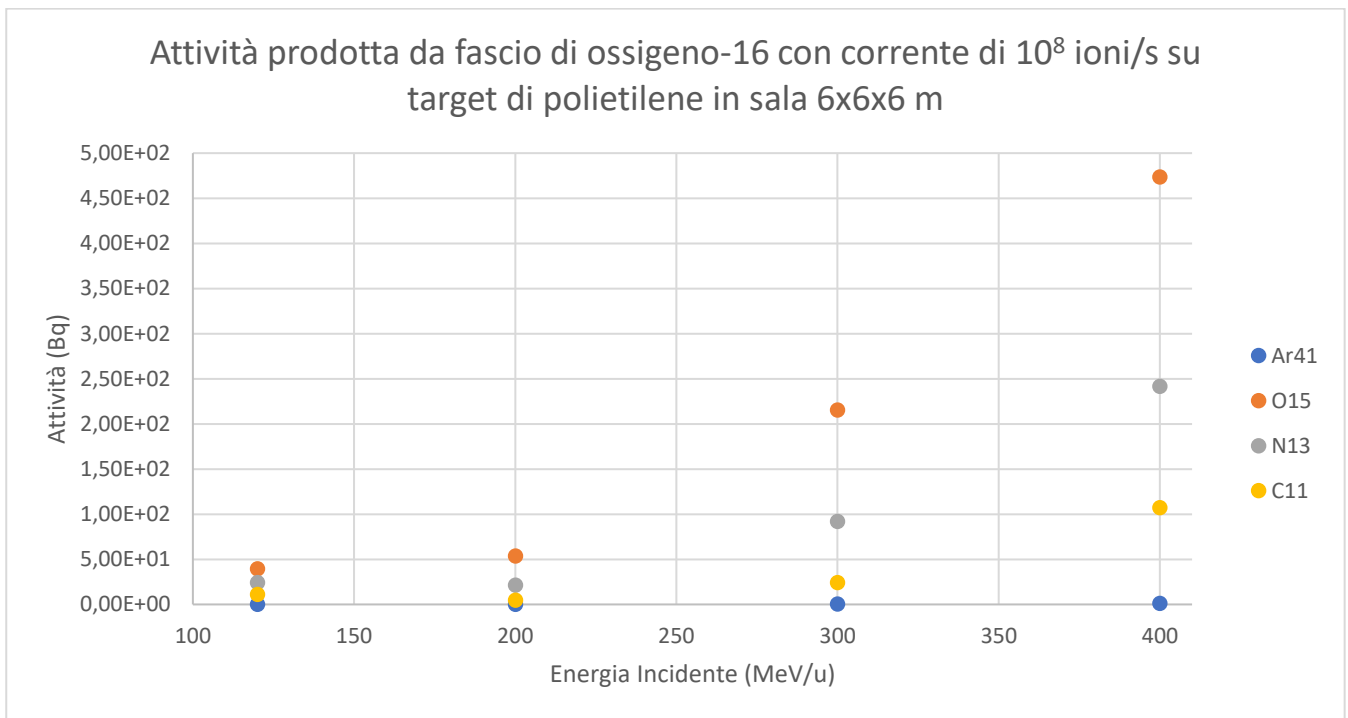


Figura 39 Attività prodotta da un fascio di ossigeno-16 con corrente 10^8 ioni/s su target di polietilene in sala 6x6x6 m.

Ossigeno-16 su target di rame e polietilene in stanza 20x20x10 m

Simulazioni del tutto analoghe sono state fatte con un fascio di ioni di ossigeno-16 nelle stesse condizioni di irraggiamento e con gli stessi target ma in una stanza di dimensioni 20x20x10 m. La Tabella 28 riporta le attività dei radionuclidi, e le relative incertezze, prodotti da un fascio di ioni ossigeno con corrente 10^8 ioni/s che impatta su un target di rame. La Figura 15 ne è il relativo grafico.

| | Energie (MeV/u) | | | |
|------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| | 120 | 200 | 300 | 400 |
| Ar41 | 1.92E-01 ± 16.4% | 8.73E-01 ± 12.7% | 2.46E+00 ± 12.1% | 3.83E+00 ± 9.9% |
| O15 | 1.89E+01 ± 9.2% | 1.44E+02 ± 6.9% | 5.54E+02 ± 6.3% | 1.27E+03 ± 3.7% |
| N13 | 1.03E+01 ± 7.7% | 6.16E+01 ± 4.1% | 2.55E+02 ± 4.7% | 5.88E+02 ± 3.3 |
| C11 | 1.40E+00 ± 8.6% | 1.30E+01 ± 9.4% | 6.15E+01 ± 5.6% | 2.04E+02 ± 3.7% |

Tabella 53 Attività prodotta da un fascio di ossigeno-16 con corrente 10^8 ioni/s che impatta su target di rame in stanza $20 \times 20 \times 10$ m.

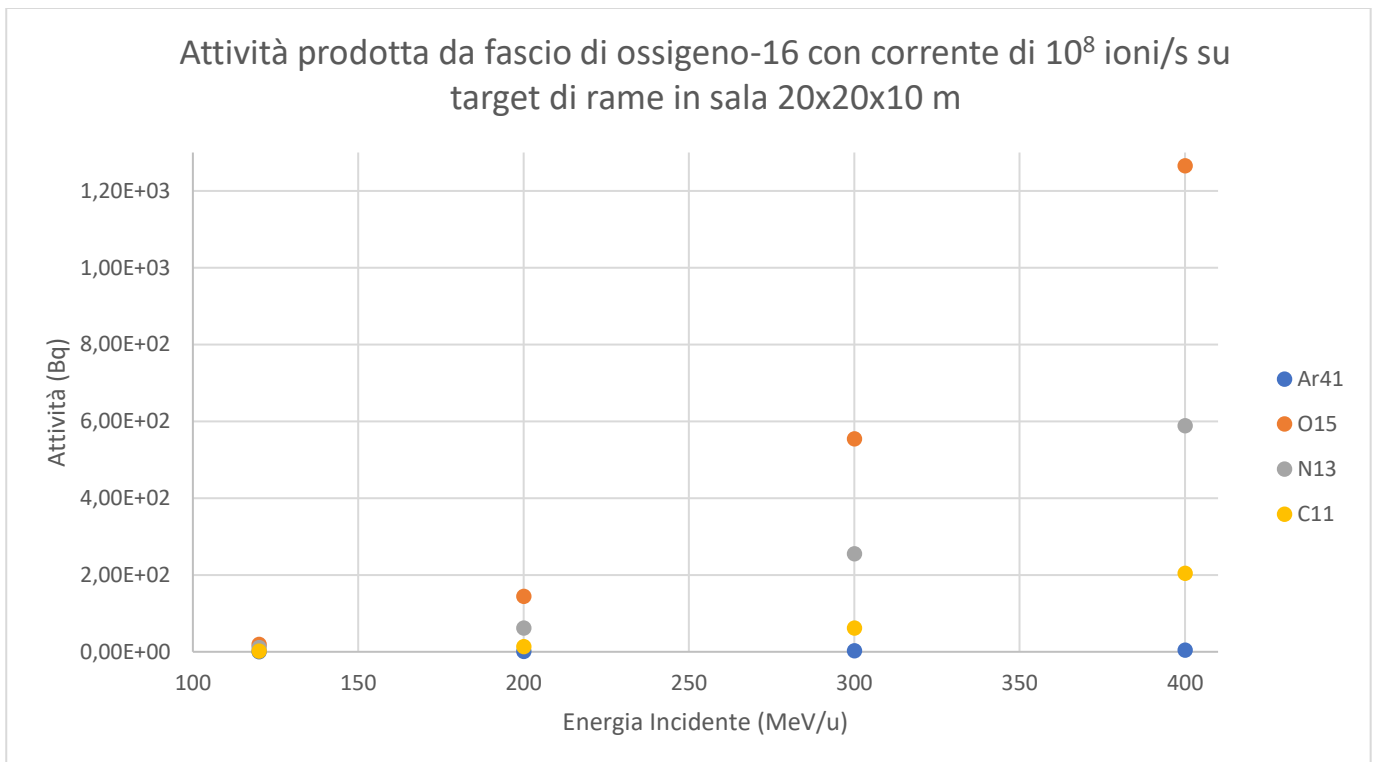


Figura 40 Attività prodotta da un fascio di ossigeno-16 con corrente 10^8 ioni/s su target di rame in sala $20 \times 20 \times 10$ m.

Analogamente sono state fatte simulazioni nel caso il target sia fatto di polietilene e il fascio di ioni ossigeno abbia una corrente di 10^8 ioni/s. I risultati di tali simulazioni sono riportati nella Tabella 29, con le relative incertezze, e nella Figura 16 che ne rappresenta il grafico.

| | Energia (MeV/u) | | | |
|------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| | 120 | 200 | 300 | 400 |
| Ar41 | 1.65E-01 ± 12.6% | 4.43E-01 ± 30.0% | 1.65E+00 ± 9.3% | 3.35E+00 ± 35.0% |
| O15 | 1.76E+01 ± 24.9% | 2.10E+02 ± 14.9% | 7.11E+00 ± 3.1% | 1.71E+03 ± 6.3% |
| N13 | 8.81E+00 ± 5.8% | 6.09E+01 ± 3.9% | 3.07E+02 ± 1.8% | 6.78E+02 ± 5.0% |
| C11 | 1.30E+00 ± 13.4% | 1.54E+01 ± 11.9% | 8.40E+01 ± 2.8% | 3.54E+02 ± 4.9% |

Tabella 54 Attività prodotta da un fascio di ossigeno-16 con corrente 10^8 ioni/s che impatta su target di polietilene in stanza $20 \times 20 \times 10$ m.

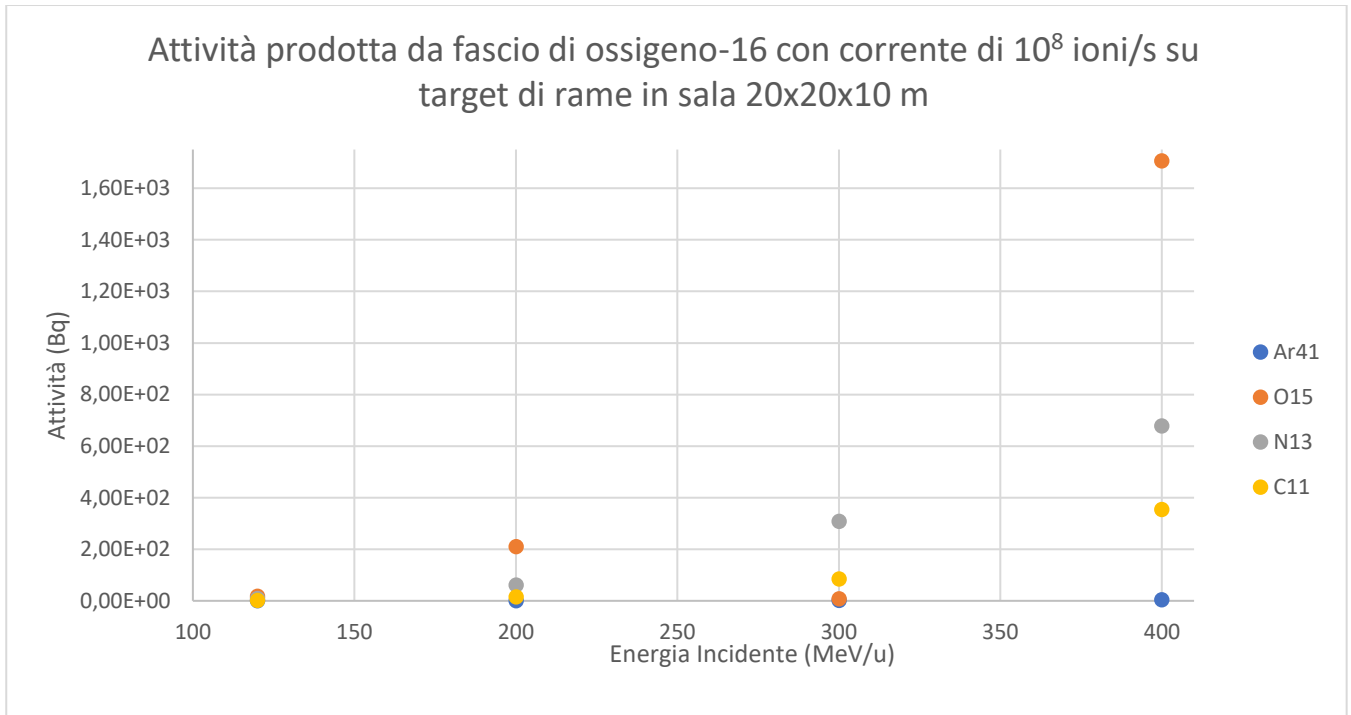


Figura 41 Attività prodotta da un fascio di ossigeno-16 con corrente 10^8 ioni/s su target di polietilene in sala 20x20x10 m.

Ossigeno-16 su target di rame e polietilene in stanza 40x40x10 m

In ultimo, si è considerato un fascio di ioni ossigeno che impattano su target di rame e polietilene in una sala di dimensioni 40x40x10 m.

Le correnti e le energie sono analoghe alle precedenti, così come le dimensioni dei target.

La Tabella 30 riporta le attività dei radionuclidi prodotti da un fascio di ioni ossigeno con corrente 10^8 ioni/s incidenti su un target di rame, con le relative incertezze percentuali. La Figura 17 ne rappresenta il relativo grafico.

| | Energia (MeV/u) | | | |
|------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| | 120 | 200 | 300 | 400 |
| Ar41 | 3.43E-01 ± 8.2% | 1.19E+00 ± 8.1% | 3.33E+00 ± 7.9% | 5.17E+00 ± 11.9% |
| O15 | 2.88E+01 ± 5.8% | 2.44E+02 ± 4.0% | 9.05E+02 ± 4.3% | 2.14E+03 ± 4.4% |
| N13 | 1.51E+01 ± 4.8% | 9.84E+01 ± 3.9% | 4.14E+02 ± 2.5% | 9.36E+02 ± 2.5% |
| C11 | 2.28E+00 ± 11.4% | 2.08E+01 ± 4.9% | 9.34E+01 ± 3.8% | 3.56E+02 ± 3.2% |

Tabella 55 Attività prodotta da un fascio di ossigeno-16 con corrente 10^8 ioni/s che impatta su target di rame in stanza 40x40x10 m.

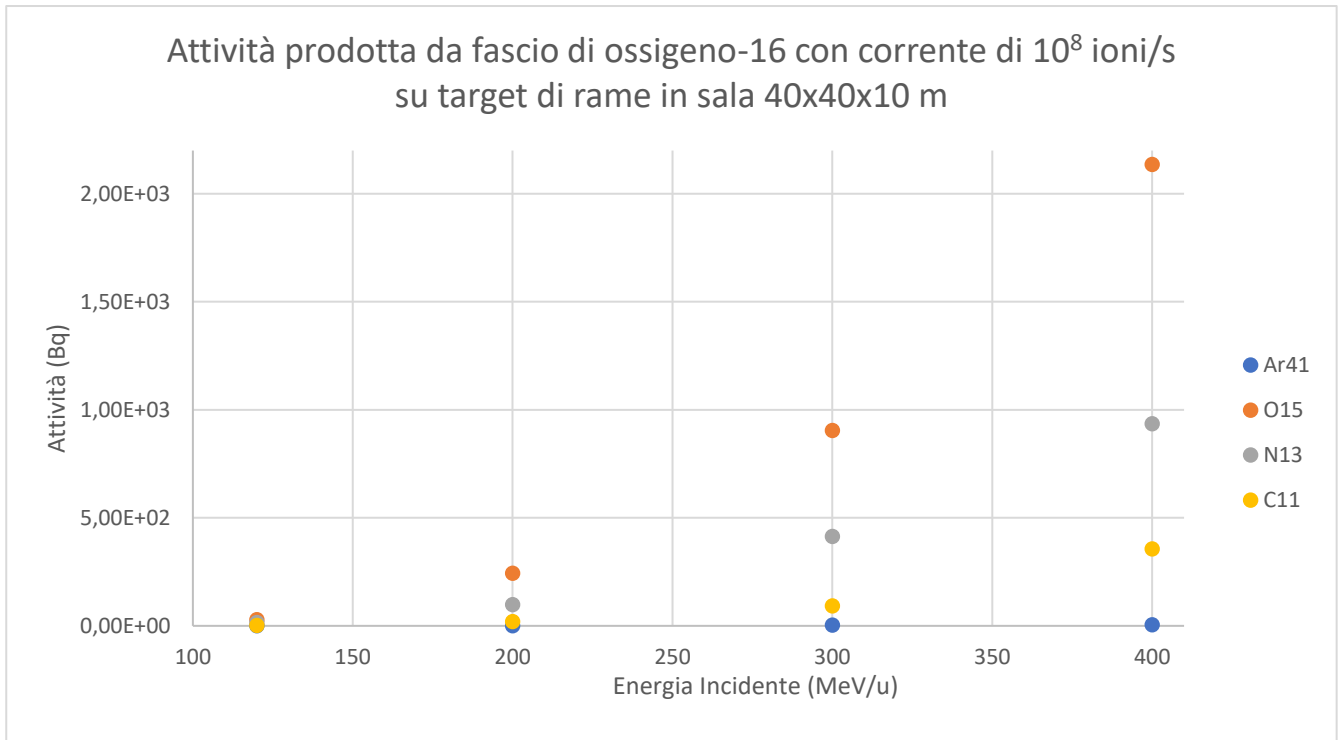


Figura 42 Attività prodotta da un fascio di ossigeno-16 con corrente 10^8 ioni/s su target di rame in sala 40x40x10 m.

La Tabella 31 e la Figura 18, invece, si riferiscono alle attività prodotte da un fascio di ioni ossigeno che impatta su un target di polietilene in una stanza di dimensioni 40x40x10 m.

| | Energia (MeV/u) | | | |
|------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| | 120 | 200 | 300 | 400 |
| Ar41 | 2.19E-01 ± 10.8% | 1.01E+00 ± 6.4% | 2.43E+00 ± 10.5% | 3.79E+00 ± 6.3% |
| O15 | 3.29E+01 ± 7.1% | 2.79E+02 ± 3.0% | 1.28E+03 ± 2.8% | 3.04E+03 ± 1.6% |
| N13 | 1.57E+01 ± 3.9% | 1.16E+02 ± 2.1% | 5.33E+02 ± 2.5% | 1.25E+03 ± 1.3% |
| C11 | 2.65E+00 ± 8.1% | 3.08E+01 ± 3.8% | 1.49E+02 ± 2.6% | 6.79E+02 ± 1.4% |

Tabella 56 Attività prodotta da un fascio di ossigeno-16 con corrente 10^8 ioni/s che impatta su target di polietilene in stanza 40x40x10 m.

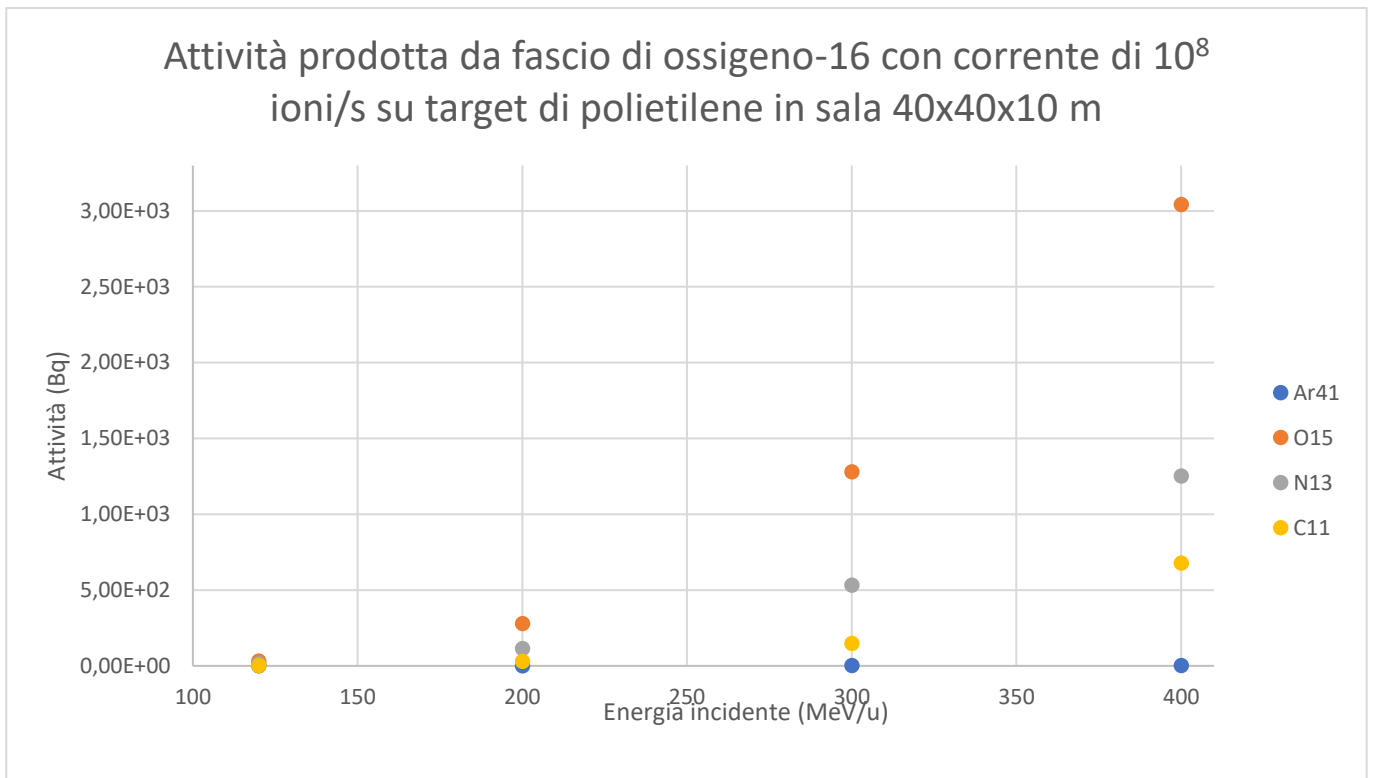


Figura 43 Attività prodotta da un fascio di ossigeno-16 con corrente 10^8 ioni/s su target di polietilene in sala 40x40x10 m.

Litio-7 su target di rame e polietilene in stanza 6x6x6 m

In accordo con quanto fatto per l'ossigeno-16, si studia ora l'attivazione dell'aria prodotta da un fascio di litio-7 su target di rame e polietilene. Al fine di garantire la completa attenuazione del fascio primario nei target, e il non eccessivo assorbimento della radiazione secondaria, si è scelto come target di rame un cubo di lato 11 cm, e come target di polietilene un cubo da 64 cm di lato. Le energie, e le correnti sono le stesse usate per le simulazioni nel caso di fascio libero in aria, tuttavia di seguito vengono riportati i dati dell'attivazione prodotta con una corrente normalizzata a 10^9 ioni/s.

La Tabella 32 e il relativo grafico di Figura 19 riportano le attività dei radionuclidi prodotti da un fascio di ioni di litio-7, con corrente normalizzata a 10^9 ioni/s, che incide su un target di rame in una stanza di dimensioni 6x6x6 m.

| | Energia (MeV/u) | | | | |
|------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 50 | 100 | 200 | 300 | 400 |
| Ar41 | 1.29E+00 ± 4.2% | 4.70E+00 ± 1.8% | 2.19E+01 ± 2.4% | 4.82E+01 ± 3.7% | 8.39E+00 ± 1.3% |
| O15 | 1.11E+01 ± 11.1% | 1.16E+02 ± 2.2% | 1.34E+03 ± 2.3% | 4.01E+03 ± 1.9% | 2.76E+03 ± 0.6% |
| N13 | 8.13E+00 ± 4.0% | 5.87E+01 ± 1.6% | 6.09E+02 ± 1.5% | 1.72E+03 1.7% | 1.07E+03 ± 0.4% |
| C11 | 8.04E-01 ± 10.9% | 7.70E+00 ± 3.4% | 9.99E+01 ± 2.4% | 3.30E+02 ± 2.0% | 3.11E+02 ± 0.6% |

Tabella 57 Attività prodotta da un fascio di litio-7 con corrente 10^9 ioni/s che impatta su target di rame in stanza 6x6x6 m.

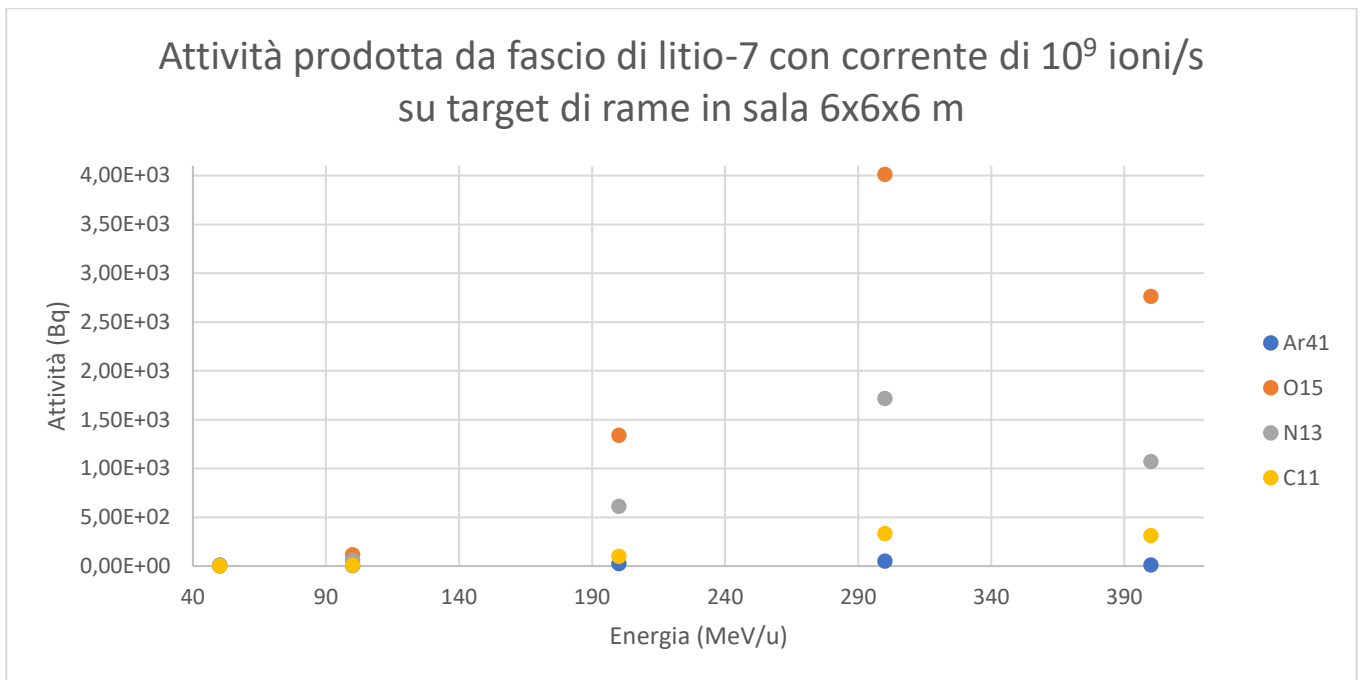


Figura 44 Attività prodotta da un fascio di litio-7 con corrente 10^9 ioni/s su target di rame in sala 6x6x6 m.

La Tabella 33, e il relativo grafico (Figura 20) riportano le attività (e le relative incertezze percentuali) dei radionuclidi prodotti da un fascio di ioni di litio-7 con corrente 10^9 ioni/s che incide su un target di polietilene.

| | Energia (MeV/u) | | | | |
|------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 50 | 100 | 200 | 300 | 400 |
| Ar41 | 2.22E-01 ± 7.2% | 5.87E-01 ± 8.7% | 2.33E+00 ± 3.8% | 5.13E+00 ± 3.7% | 8.39E+00 ± 1.3% |
| O15 | 4.45E+00 ± 11.5% | 4.20E+01 ± 6.9% | 3.98E+02 ± 2.1% | 1.17E+03 ± 1.9% | 2.76E+03 ± 0.6% |
| N13 | 3.08E+00 ± 6.2% | 1.83E+01 ± 5.1% | 1.65E+02 ± 1.3% | 4.75E+02 ± 1.7% | 1.07E+03 ± 0.4% |
| C11 | 4.81E-01 ± 11.1% | 3.90E+00 ± 8.2% | 3.46E+01 ± 2.0% | 1.13E+02 ± 2.0% | 3.11E+02 ± 0.6% |

Tabella 58 Attività prodotta da un fascio di litio-7 con corrente 10^9 ioni/s che impatta su target di polietilene in stanza 6x6x6 m.

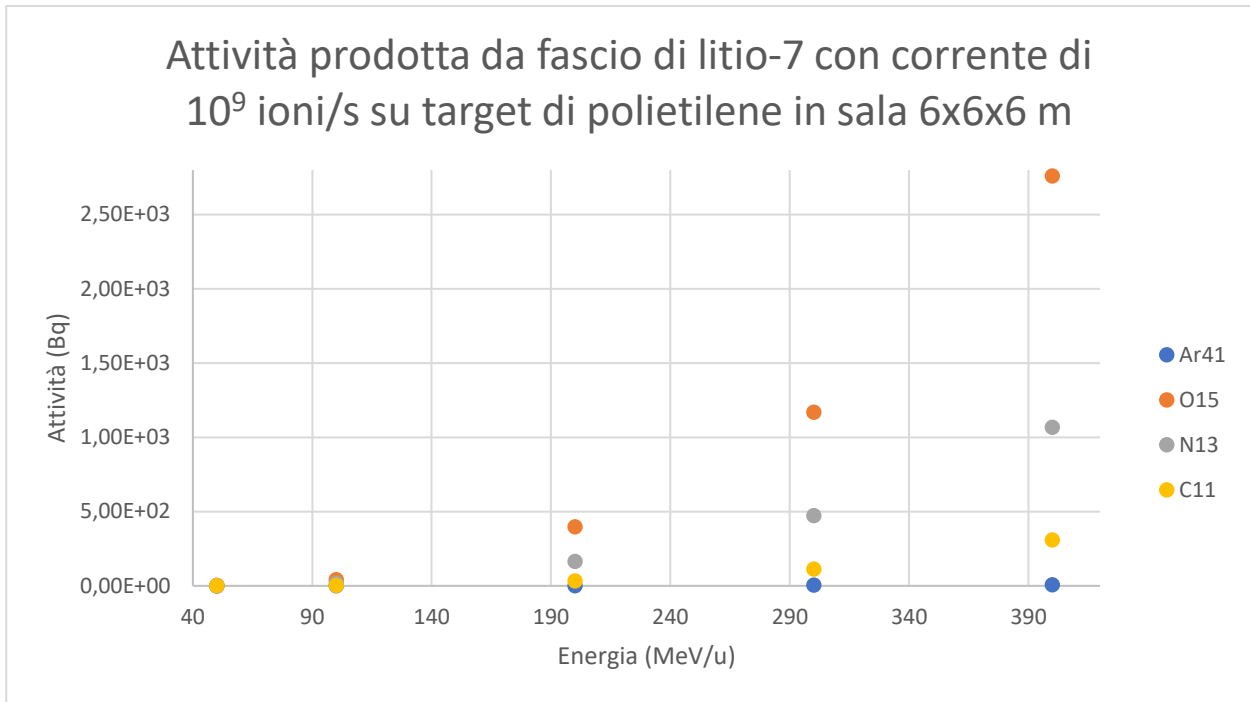


Figura 45 Attività prodotta da un fascio di litio-7 con corrente 10^9 ioni/s che impatta su target di polietilene in stanza 6x6x6 m.

Litio-7 su target di rame e polietilene in stanza 20x20x10 m

Si sono poi svolte le simulazioni per una situazione del tutto analoga alla precedente, ma il target posizionato in una sala di dimensioni 20x20x10 m.

La Tabella 34 e la Tabella 35 riportano le attività dei radionuclidi prodotti da un fascio di ioni di litio-7 che impattano su, rispettivamente, un target di rame e uno di polietilene. La Figura 21 e la Figura 22 ne rappresentano i rispettivi grafici. In entrambi i casi le correnti usate sono state 10^9 ioni/s.

| | Energia (MeV/u) | | | | |
|------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 50 | 100 | 200 | 300 | 400 |
| Ar41 | 1.29E+00 ± 4.2% | 4.70E+00 ± 1.8% | 2.19E+01 ± 2.4% | 4.82E+01 ± 3.7% | 8.39E+00 ± 1.3% |
| O15 | 1.11E+01 ± 11.1% | 1.16E+02 ± 2.2% | 1.34E+03 ± 2.3% | 4.01E+03 ± 1.9% | 2.76E+03 ± 0.6% |
| N13 | 8.13E+00 ± 4.0% | 5.87E+01 ± 1.6% | 6.09E+02 ± 1.5% | 1.72E+03 1.7% | 1.07E+03 ± 0.4% |
| C11 | 8.04E-01 ± 10.9% | 7.70E+00 ± 3.4% | 9.99E+01 ± 2.4% | 3.30E+02 ± 2.0% | 3.11E+02 ± 0.6% |

Tabella 59 Attività prodotta da un fascio di litio-7 con corrente 10^9 ioni/s che impatta su target di rame in stanza 20x20x10 m.

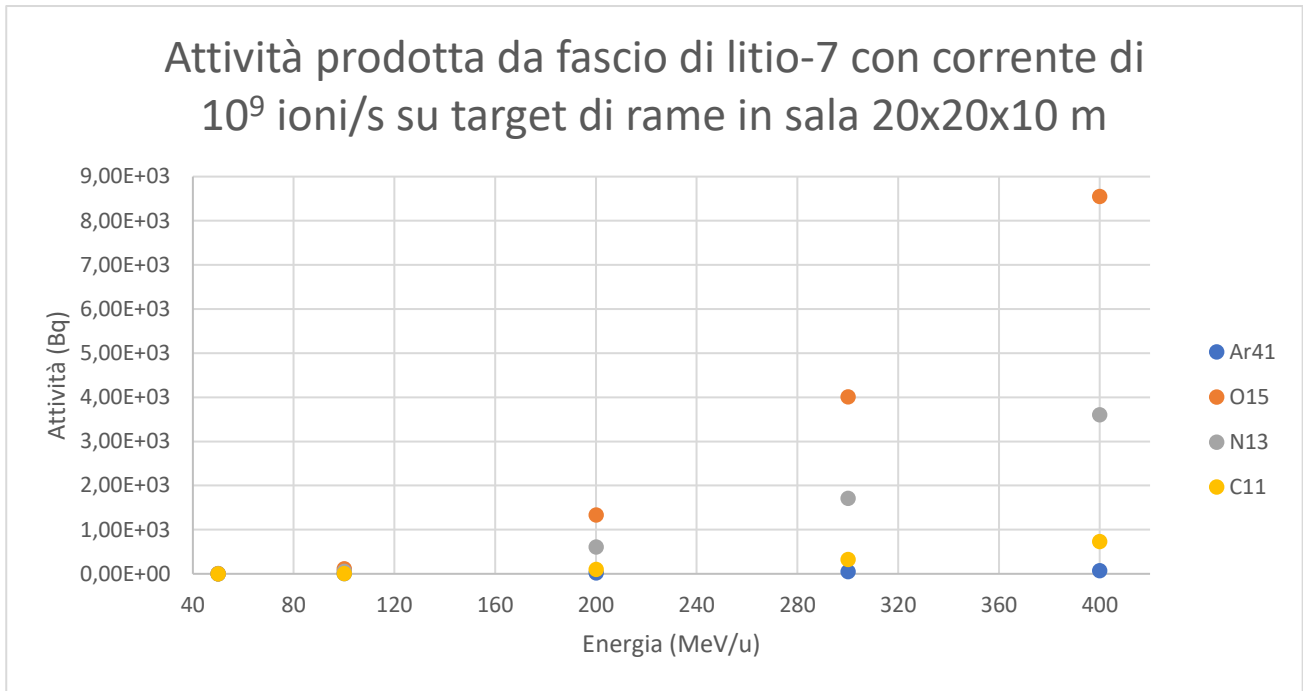


Figura 46 Attività prodotta da un fascio di litio-7 con corrente 10^9 ioni/s che impatta su target di rame in stanza 20x20x10 m.

| | Energia (MeV/u) | | | | |
|------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 50 | 100 | 200 | 300 | 400 |
| Ar41 | 5.33E-01 ± 5.2% | 1.55E+00 ± 6.5% | 6.02E+00 ± 4.8% | 1.35E+01 ± 3.7% | 2.23E+01 ± 3.5% |
| O15 | 1.69E+01 ± 6.7% | 1.74E+02 ± 5.7% | 1.31E+03 ± 2.3% | 4.25E+03 ± 1.3% | 1.01E+04 ± 1.0% |
| N13 | 8.42E+00 ± 3.9% | 6.68E+01 ± 4.1% | 5.60E+02 ± 1.5% | 1.74E+03 ± 1.0% | 4.09E+03 ± 0.8% |
| C11 | 9.36E-01 ± 9.0% | 1.31E+01 ± 6.9% | 1.18E+02 ± 2.3% | 3.74E+02 ± 1.4% | 1.05E+03 ± 1.1% |

Tabella 60 Attività prodotta da un fascio di litio-7 con corrente 10^9 ioni/s che impatta su target di polietilene in stanza 20x20x10 m.

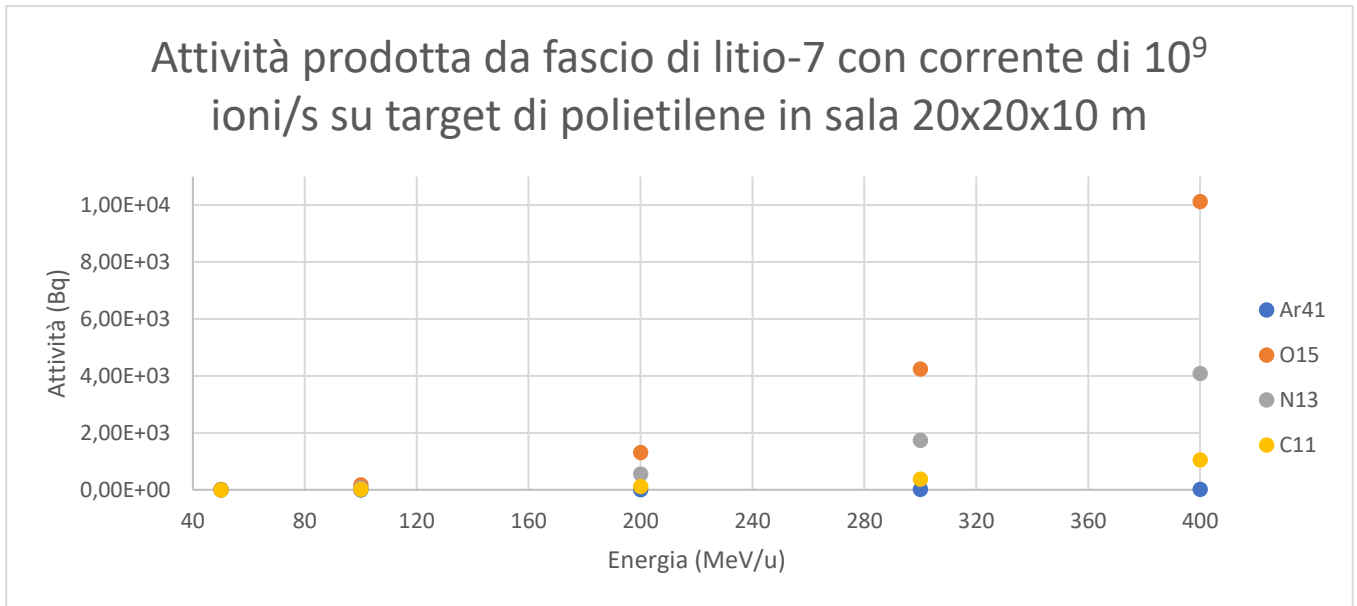


Figura 47 Attività prodotta da un fascio di litio-7 con corrente 10^9 ioni/s che impatta su target di polietilene in stanza 20x20x10 m.

Litio-7 su target di rame e polietilene in stanza 40x40x10 m

Si è, infine, simulato un fascio di ioni di litio-7 incidenti su target di rame e polietilene in una stanza 40x40x10 m. Le correnti, le energie e i tempi di irraggiamento sono le stesse usate per questi ioni nelle simulazioni precedenti.

La Tabella 36 riporta le attività dei radionuclidi prodotti da un fascio di ioni di litio-7 con corrente 10^9 ioni/s che incide su un target di rame.

| | Energia (MeV/u) | | | | |
|------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 50 | 100 | 200 | 300 | 400 |
| Ar41 | 1.67E+00 ± 2.2% | 6.09E+00 ± 2.6% | 2.96E+01 ± 1.5% | 6.37E+01 ± 1.3% | 1.02E+02 ± 1.2% |
| O15 | 1.83E+01 ± 4.5% | 1.83E+02 ± 3.2% | 2.06E+03 ± 1.4% | 6.41E+03 ± 0.7% | 1.36E+04 ± 0.8% |
| N13 | 1.29E+01 ± 2.4% | 9.24E+01 ± 2.2% | 9.24E+02 ± 0.8% | 2.79E+03 ± 0.7% | 5.87E+03 ± 0.6% |
| C11 | 8.89E-01 ± 7.2% | 1.21E+01 ± 4.2% | 1.59E+02 ± 1.6% | 5.19E+02 ± 1.0% | 1.25E+03 ± 0.8% |

Tabella 61 Attività prodotta da un fascio di litio-7 con corrente 10^9 ioni/s che impatta su target di rame in stanza 40x40x10 m.

Attività prodotta da fascio di litio-7 con corrente di 10^9 ioni/s su target di rame in sala 40x40x10 m

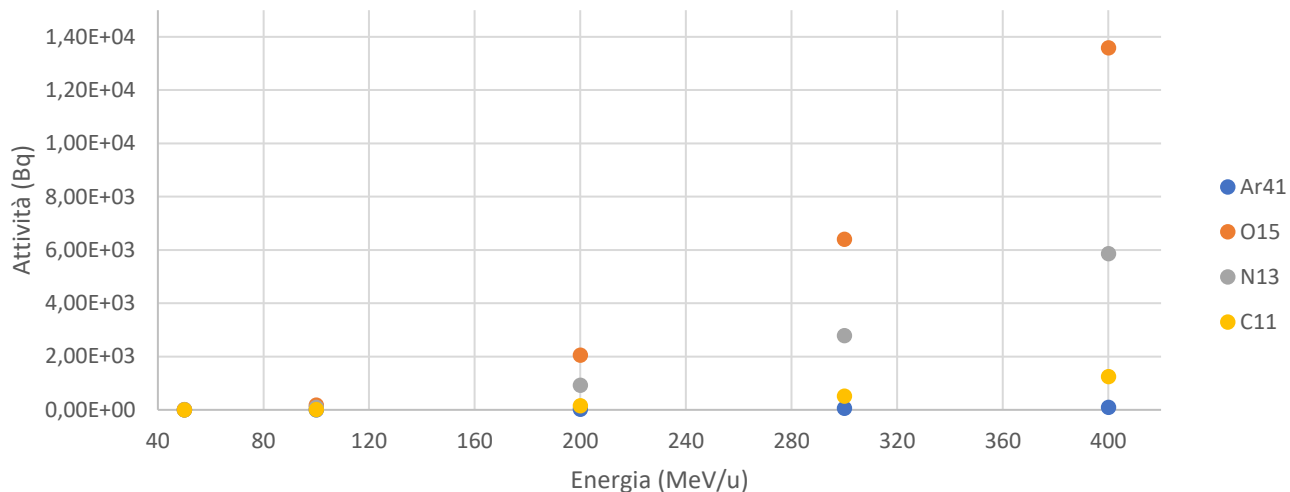


Figura 48 Attività prodotta da un fascio di litio-7 con corrente 10^9 ioni/s che impatta su target di rame in stanza 40x40x10 m.

La Tabella 37 e il relativo grafico di Figura 24 riporta l'attività prodotta da un fascio di litio-7 con corrente 10^9 ioni/s che impatta su target di polietilene in stanza 40x40x10 m.

| | Energia (MeV/u) | | | | |
|------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | 50 | 100 | 200 | 300 | 400 |
| Ar41 | 7.64E-01 4.6% | 2.16E+00 3.1% | 8.73E+00 4.4% | 1.95E+01 3.2% | 3.31E+01 1.1% |
| O15 | 2.86E+01 6.0% | 2.48E+02 2.0% | 2.32E+03 2.1% | 7.30E+03 1.1% | 1.77E+04 0.4% |
| N13 | 1.47E+01 3.2% | 1.05E+02 1.5% | 9.60E+02 1.3% | 3.00E+03 0.9% | 7.06E+03 0.3% |
| C11 | 1.60E+00 6.9% | 1.95E+01 2.1% | 1.96E+02 2.4% | 6.69E+02 1.3% | 1.82E+03 0.3% |

Tabella 62 Attività prodotta da un fascio di litio-7 con corrente 10^9 ioni/s che impatta su target di polietilene in stanza 40x40x10 m.

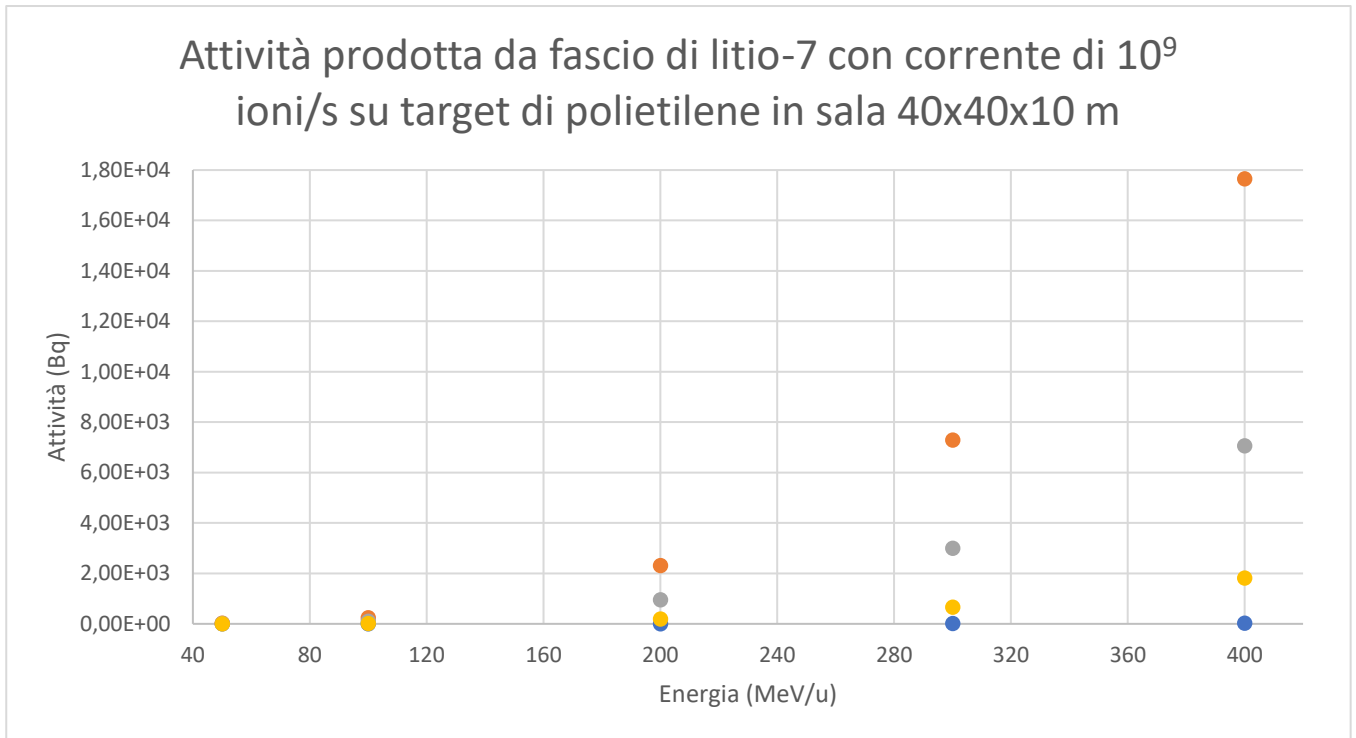


Figura 49 Attività prodotta da un fascio di litio-7 con corrente 10^9 ioni/s che impatta su target di polietilene in stanza 40x40x10 m.

Elio-4 su target di rame e polietilene in stanza 6x6x6 m

Si considera un fascio di ioni di ossigeno che colpisce su un target di rame o polietilene in una stanza di dimensioni 6x6x6 m. Il target di rame è un cubo di 14 cm di lato.

La Tabella 38 riporta le attività dei radionuclidi in questo caso, per una corrente di 10^9 ioni/s. La Figura 25 è il corrispondente grafico.

| | Energia (MeV/u) | | | | |
|------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| | 60 | 100 | 200 | 300 | 400 |
| Ar41 | 5.36E-01 ± 5.1% | 1.48E+00 ± 7.5% | 6.51E+00 ± 7.5% | 1.31E+01 ± 7.4% | 2.00E+01 ± 6.7% |
| O15 | 1.09E+00 ± 29.3% | 8.14E+00 ± 24.6% | 1.82E+02 ± 11.3% | 6.82E+02 ± 7.1% | 1.51E+03 ± 6.2% |
| N13 | 1.28E+00 ± 11.8% | 6.40E+00 ± 12.6% | 1.11E+02 ± 6.0% | 3.14E+02 ± 4.2% | 6.11E+02 ± 3.9% |
| C11 | 2.03E-01 ± 18.6% | 4.98E-01 ± 31.7% | 1.99E+01 ± 10.5% | 5.26E+01 ± 7.0% | 1.08E+02 ± 7.4% |

Tabella 63 Attività prodotta da un fascio di elio-4 con corrente 10^9 ioni/s che impatta su target di rame in stanza 6x6x6 m.

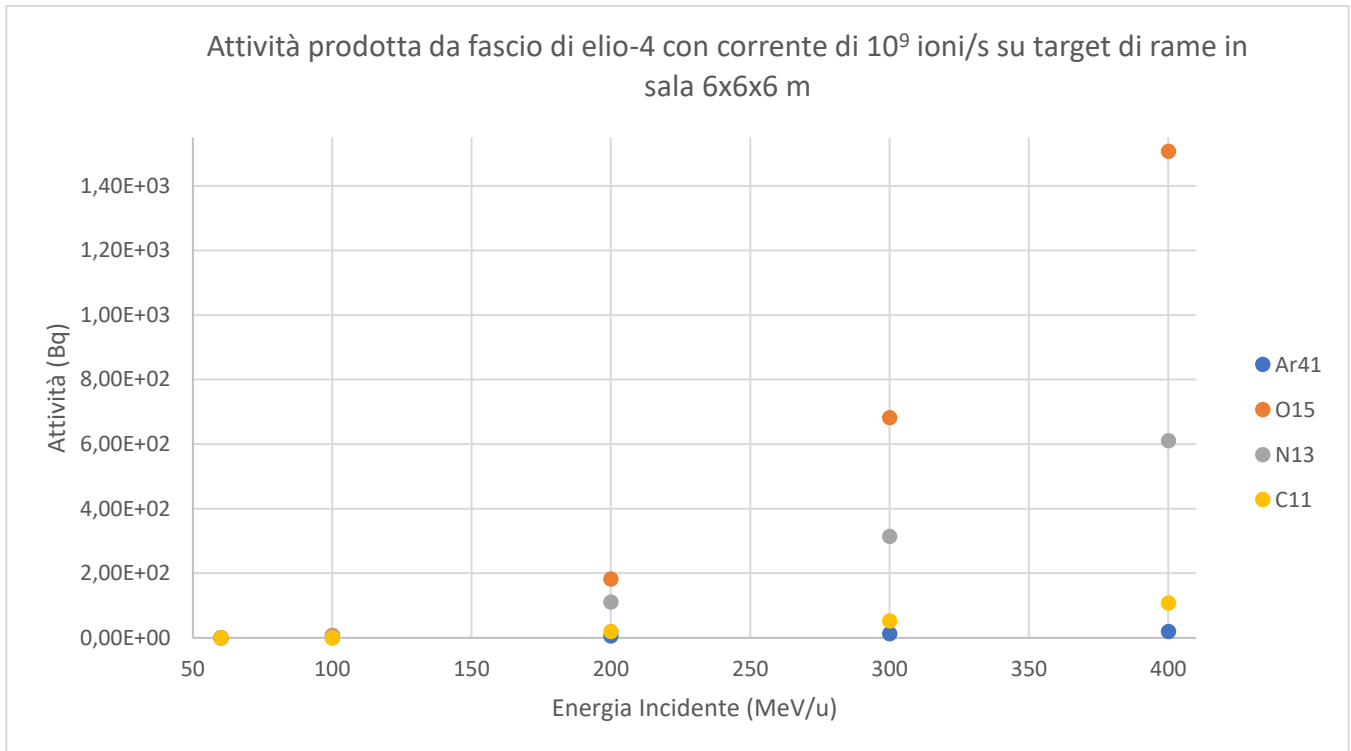


Figura 50 Attività prodotta da un fascio di elio-4 con corrente 10^9 ioni/s su target di rame in sala 6x6x6 m.

Il target di rame è stato poi sostituito con un cubo di polietilene di lato 82 cm, si sono quindi svolte le simulazioni per le stesse energie alla stessa corrente e tempo d'irraggiamento. Le attività prodotte sono riportate, con le incertezze percentuali, nella Tabella 39 e nel relativo grafico (Figura 26).

| | Energia (MeV/u) | | | | |
|------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 60 | 100 | 200 | 300 | 400 |
| Ar41 | 4.29E-01 ± 8.4% | 8.29E-01 ± 10.2% | 2.40E+00 ± 5.1% | 6.18E+00 ± 3.4% | 1.08E+01 ± 4.0% |
| O15 | 5.01E+00 ± 17.6% | 3.17E+01 ± 11.7% | 3.42E+02 ± 3.5% | 1.29E+03 ± 1.7% | 3.00E+03 ± 2.3% |
| N13 | 2.85E+00 ± 10.7% | 1.59E+01 ± 7.9% | 1.57E+02 ± 1.9% | 5.04E+02 ± 1.3% | 1.21E+03 ± 1.2% |
| C11 | 3.63E-01 ± 19.9% | 3.13E+00 ± 12.1% | 3.03E+01 ± 3.6% | 1.03E+02 ± 2.0% | 3.83E+02 ± 1.7% |

Tabella 64 Attività prodotta da un fascio di elio-4 con corrente 10^9 ioni/s che impatta su target di polietilene in stanza 6x6x6 m.

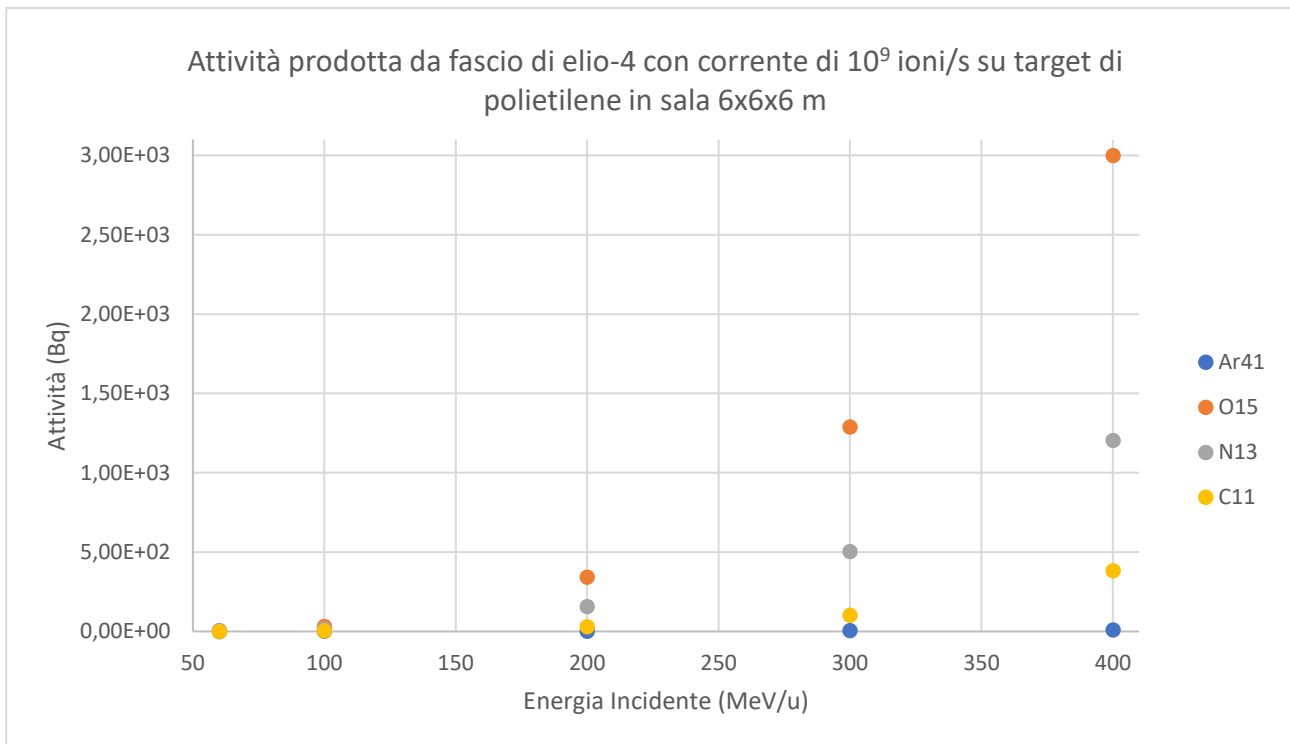


Figura 51 Attività prodotta da un fascio di elio-4 con corrente 10^9 ioni/s su target di polietilene in sala 6x6x6 m.

Elio-4 su target di rame e polietilene in stanza 20x20x10 m

Si è poi considerata la situazione in cui i target sono posizionati in una stanza dalle dimensioni di 20x20x10 m. Tutti gli altri parametri delle simulazioni sono rimasti inalterati rispetto al caso precedente.

La Tabella 40 e il relativo grafico (Figura 27) riporta i dati, e le relative incertezze, riguardo l'attività prodotta da un fascio di elio-4 con corrente 10^9 ioni/s incidente su un target di rame in una stanza di 20x20x10 m.

| | Energia (MeV/u) | | | | |
|------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 60 | 100 | 200 | 300 | 400 |
| Ar41 | 1.45E+00 ± 2.7% | 3.84E+00 ± 1.8% | 1.59E+01 ± 0.7% | 3.36E+01 ± 0.9% | 5.23E+01 ± 0.7% |
| O15 | 4.06E+00 ± 11.0% | 2.66E+01 ± 4.9% | 6.27E+02 ± 1.0% | 1.96E+03 ± 0.7% | 4.05E+03 ± 0.6% |
| N13 | 3.78E+00 ± 5.4% | 1.82E+01 ± 2.5% | 2.91E+02 ± 0.7% | 8.72E+02 ± 0.5% | 1.77E+03 ± 0.5% |
| C11 | 2.68E-01 ± 14.4% | 1.64E+00 ± 6.9% | 4.49E+01 ± 1.3% | 1.49E+02 ± 0.9% | 3.32E+02 ± 0.8% |

Tabella 65 Attività prodotta da un fascio di elio-4 con corrente 10^9 ioni/s che impatta su target di rame in stanza 20x20x10 m.

Attività prodotta da fascio di elio-4 con corrente di 10^9 ioni/s su target di rame in sala 20x20x10 m

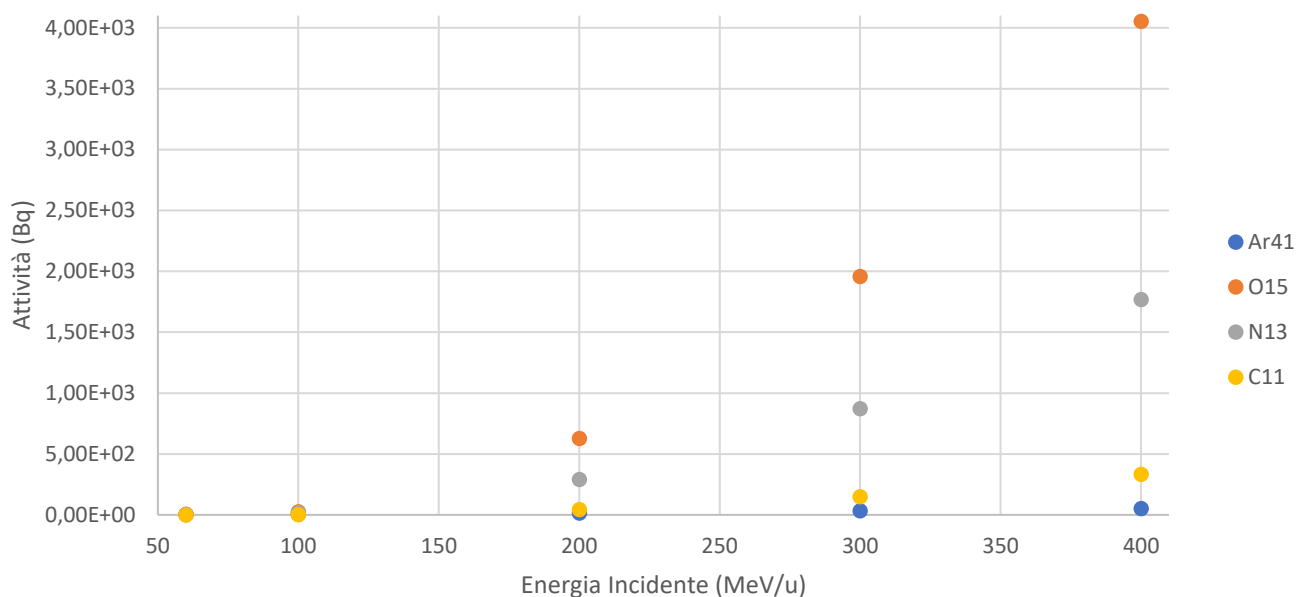


Figura 52 Attività prodotta da un fascio di elio-4 con corrente 10^9 ioni/s su target di rame in sala 20x20x10 m.

Analogamente si è considerato un target di polietilene in condizioni del tutto simili alle precedenti. La Tabella 41 e il relativo grafico in Figura 28 riportano le attività per un fascio di elio-4 che impatta su target di polietilene in una stanza di 20x20x10m.

| | Energia (MeV/u) | | | | |
|------|---------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|
| | 60 | 100 | 200 | 300 | 400 |
| Ar41 | 4.04E-01 ± 4.3% | 8.37E-01 ± 4.9% | 2.69E+00 ± 3.9% | 6.03E+00 2.3% | 1.12E+01 2.6% |
| O15 | 5.89E+00 ± 7.9% | 3.67E+01 ± 5.7% | 4.73E+02 ± 2.0% | 1.66E+03 1.0% | 4.65E+03 0.9% |
| N13 | 2.75E+00 ± 5.6% | 2.04E+01 ± 3.0% | 2.06E+02 ± 1.2% | 6.90E+02 0.9% | 1.73E+03 0.7% |
| C11 | 4.38E-01 ± 10.0% | 3.50E+00 ± 4.7% | 4.07E+01 ± 2.0% | 1.46E+02 1.4% | 5.46E+02 0.8% |

Tabella 66 Attività prodotta da un fascio di elio-4 con corrente 10^9 ioni/s su target di polietilene in sala 20x20x10 m.

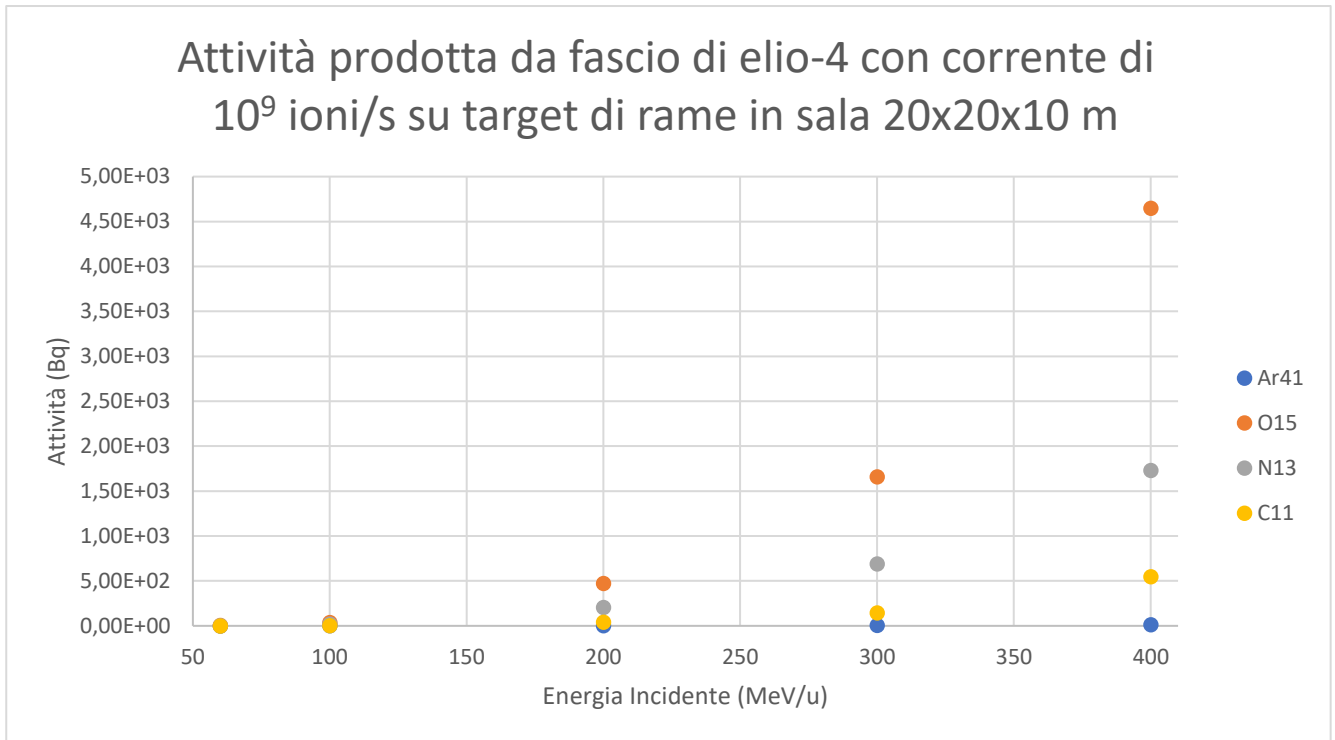


Figura 53 Attività prodotta da un fascio di elio-4 con corrente 10^9 ioni/s su target di polietilene in sala 20x20x10 m.

Elio-4 su target di rame e polietilene in stanza 40x40x10 m

Si considera ora un fascio di ioni elio che incide sui target in una stanza di dimensioni 40x40x10 m. Ancora una volta, tutti i parametri delle simulazioni sono identici al caso precedente.

La Tabella 42 e il relativo grafico (Figura 29) riportano dati nel caso di un fascio di ioni elio di corrente 10^9 che impatta su un target di rame.

| | Energia (MeV/u) | | | | |
|------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | 60 | 100 | 200 | 300 | 400 |
| Ar41 | 1.87E+00 1.3% | 4.90E+00 2.0% | 2.10E+01 1.2% | 4.49E+01 1.5% | 7.04E+01 1.1% |
| O15 | 6.25E+00 5.3% | 4.76E+01 4.7% | 9.94E+02 1.3% | 2.96E+03 1.1% | 6.59E+03 0.7% |
| N13 | 4.93E+00 2.5% | 2.78E+01 2.5% | 4.37E+02 1.0% | 1.34E+03 0.8% | 2.80E+03 0.5% |
| C11 | 3.67E-01 6.5% | 2.65E+00 5.7% | 7.14E+01 1.3% | 2.45E+02 1.4% | 5.40E+02 1.0% |

Tabella 67 Attività prodotta da un fascio di elio-4 con corrente 10^9 ioni/s su target di rame in sala 40x40x10 m.

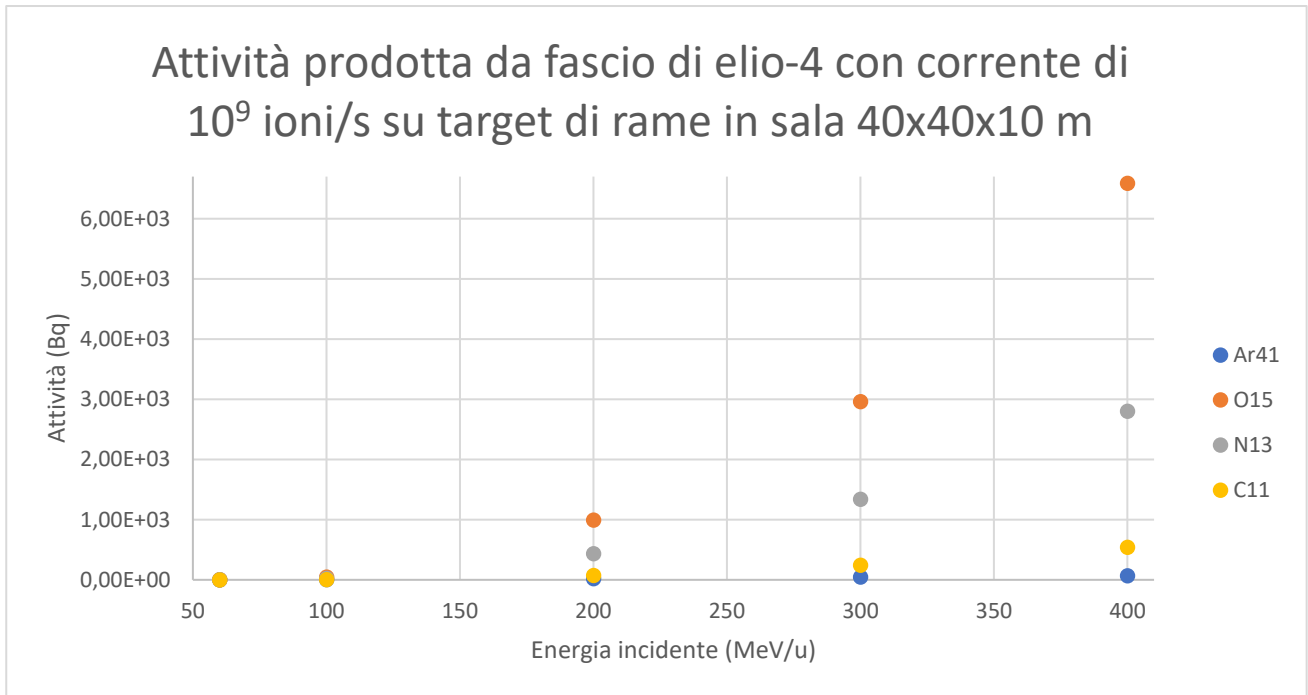


Figura 54 Attività prodotta da un fascio di elio-4 con corrente 10^9 ioni/s su target di rame in sala 40x40x10 m

Nella Tabella 43 e nel relativo grafico (Figura 30) sono riportate le attività prodotte da un fascio di ioni elio con corrente 10^9 ioni/s incidente su un target di polietilene in una stanza 40x40x10 m.

| | Energia (MeV/u) | | | | |
|------|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | 60 | 100 | 200 | 300 | 400 |
| Ar41 | 4.80E-01 5.3% | 1.05E+00 2.7% | 3.54E+00 4.0% | 8.77E+00 1.7% | 1.58E+01 1.2% |
| O15 | 9.22E+00 9.5% | 6.06E+01 2.7% | 8.01E+02 1.8% | 2.82E+03 0.7% | 7.89E+03 0.4% |
| N13 | 4.70E+00 7.0% | 2.94E+01 1.7% | 3.44E+02 1.4% | 1.18E+03 0.4% | 2.99E+03 0.3% |
| C11 | 6.01E-01 12.5% | 5.16E+00 1.8% | 6.94E+01 1.7% | 2.53E+02 0.7% | 8.47E+02 0.4% |

Tabella 68 Attività prodotta da un fascio di elio-4 con corrente 10^9 ioni/s su target di polietilene in sala 40x40x10 m

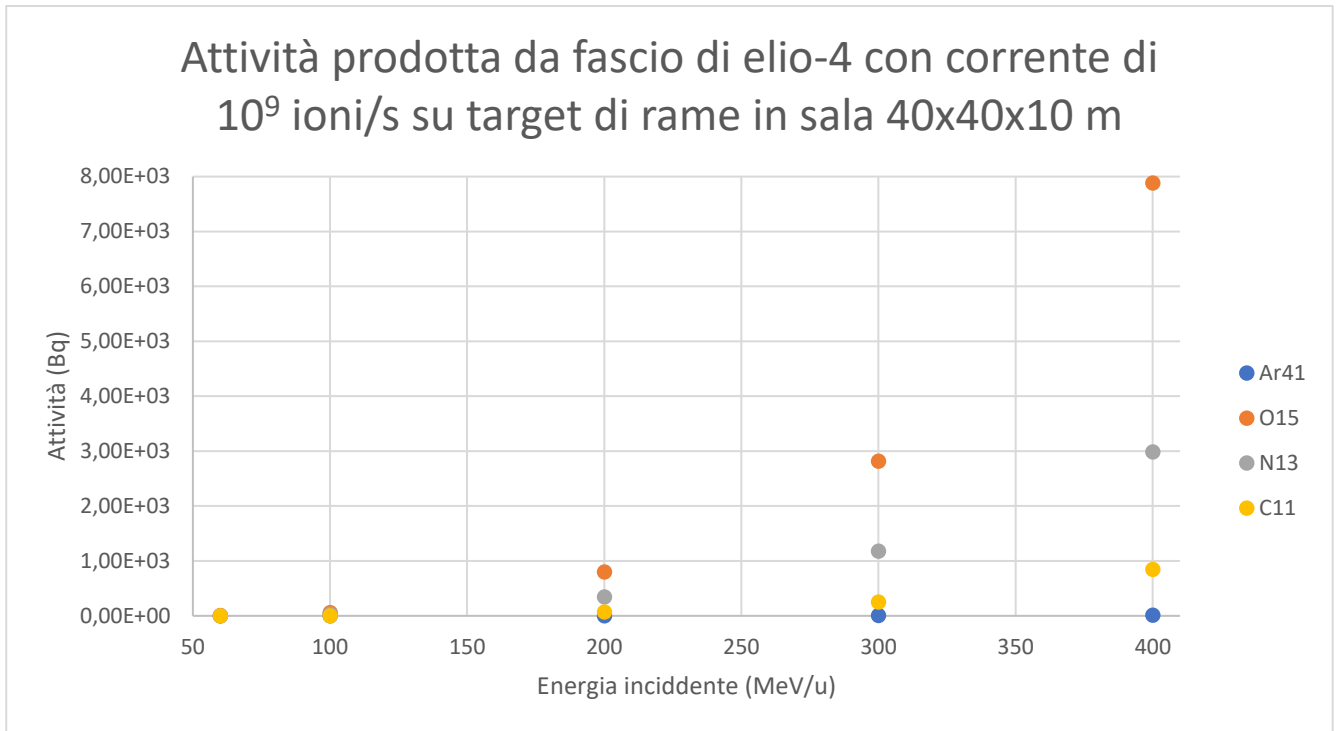


Figura 55 Attività prodotta da un fascio di elio-4 con corrente 10^9 ioni/s su target di polietilene in sala 40x40x10 m

In conclusione, dalle simulazioni effettuate emerge che, utilizzando dei target così fatti, quando un fascio incide su un target di rame si produce generalmente più attività, anche se nel caso di ioni più pesanti, come carbonio e ossigeno, le differenze sono generalmente modeste. Un'eccezione a quanto detto potrebbe essere rappresentata dalla produzione di ^{11}C a seguito dell'impatto di ioni litio. Tuttavia, queste considerazioni sono limitate dalle incertezze di simulazione che in alcuni casi non permettono di confermare o smentire tale andamento.

Variando le dimensioni delle stanze, invece, si può notare che generalmente si produce più attività. Ciò potrebbe essere dovuto al fatto che le particelle secondarie prodotte hanno un volume d'aria maggiore con cui interagire prima di arrivare alla parete e, in parte, essere assorbita dagli atomi che la costituiscono.

Capitolo 5

I set di dati prodotti in precedenza possono essere usati per fare stime dell'attività dell'aria prodotta da una macchina acceleratrice. Tuttavia, essi rappresentano dei casi standardizzati sia per la geometria che per energia e correnti usate. Per questi ultimi due i set di dati possono essere riscaldati linearmente per qualunque corrente, ed estrapolare i valori delle attività anche per energie intermedie rispetto a quelle considerate.

Per quanto riguarda la geometria delle simulazioni, invece, in questo capitolo si faranno considerazioni in merito al peso che essa può avere sulle simulazioni.

5.1 La rilevanza della geometria

Sono stati usati i dati precedentemente ottenuti per stimare l'attivazione dell'aria a seguito del funzionamento del sincrotrone del CNAO di Pavia.

Si è supposto un irraggiamento monoenergetico di $t_{irr}=1$ s alle correnti nominali e alle energie massime per protoni e ioni carbonio. Le stanze considerate sono la sala sincrotrone, una sala trattamento e la sala sperimentale.

L'aria in sala sincrotrone si attiva perché le particelle del fascio, mentre si muovono all'interno della macchina, urtano contro le pareti della stessa o contro componenti meccanici. Tali urti possono essere non desiderati oppure indotti al fine di ridurre il numero di particelle che impattano sul target. Le particelle perse interagendo con parti metalliche della macchina formeranno particelle secondarie, quest'ultime interagendo con l'aria formano i radionuclidi in esame. I punti di perdita nel caso del sincrotrone del CNAO sono stati esaminati nel capitolo 2, la Tabella 1 riporta tali punti e le percentuali di particelle circolanti nel sincrotrone perse in ogni punto. Nei calcoli seguenti si è quindi supposta una sala di 40x40x10 m con un target di rame, e non si è previsto alcun tratto di fascio libero in aria.

| Punto di perdita | Percentuale di perdita |
|---------------------------|------------------------|
| Circonferenza dell'anello | 4.7% |
| Dump orizzontale | 28% |
| Dump verticale | 2.8% |
| Setto elettrostatico | 11.7% |
| Setto magnetico | 4.7% |
| Chopper HEBT | 9.4% |

Tabella 69 Punti di perdita nel sincrotrone del CNAO e percentuale di particelle circolanti nel sincrotrone perse in ogni punto

Nelle sale trattamento e nella sala sperimentale l'aria è attivata direttamente dal fascio che compie

un tratto libero in aria, e dalle particelle secondarie che si formano a seguito dell'interazione del fascio con i target.

Per entrambe le sale si è supposta una dimensione di 6x6x6 m, per il caso della sala trattamento è considerato un target di polietilene mentre per la sala sperimentale uno di rame.

I dati per ogni stanza sono riportati nella Tabella 2.

| Sala | Dimensioni (m) | Target | Tratto in aria (m) | t _{irr} (s) | % fascio in sala | t _{cooling} (s) |
|--------------|----------------|-------------|--------------------|----------------------|------------------|--------------------------|
| Sincrotrone | 40x40x10 | Rame | 0 | 1 | 54.6 | 0 |
| Trattamento | 6x6x6 | Polietilene | 1.1 | 1 | 5.4 | 0 |
| Sperimentale | 6x6x6 | Rame | 0.15 | 1 | 29.2 | 0 |

Tabella 70 Dati per il calcolo dell'attivazione dell'aria nelle stanze del CNAO.

Si è considerato per primo un fascio di protoni con corrente 1.375×10^{10} protoni/s all'energia di 250 MeV. I risultati per queste condizioni sono riportati nella Tabella 3 per ogni radionuclide in ogni stanza.

| | Attività (Bq) | | |
|------|---------------|-------------|--------------|
| | Sincrotrone | Trattamento | Sperimentale |
| Ar41 | 5.58E+01 | 4.27E-01 | 2.31E+00 |
| O15 | 2.54E+03 | 3.20E+02 | 3.57E+02 |
| N13 | 1.18E+03 | 1.32E+02 | 1.59E+02 |
| C11 | 1.90E+02 | 2.77E+01 | 3.00E+01 |

Tabella 71 Attivazione dell'aria nelle stanze del CNAO per un fascio di 1.375×10^{10} protoni/s a 250 MeV calcolato a partire dai dati esposti nel paragrafo precedente.

Analogamente si è calcolata l'attivazione dell'aria nel caso di un fascio di ioni carbonio con corrente 5.5×10^8 ioni/s ad un'energia di 400 MeV/u.

I risultati per queste condizioni sono riportati nella Tabella 4 per ogni radionuclide in ogni stanza.

| | Attività (Bq) | | |
|------|---------------|-------------|--------------|
| | Sincrotrone | Trattamento | Sperimentale |
| Ar41 | 2.19E+01 | 3.14E-01 | 1.70E+00 |
| O15 | 4.35E+03 | 1.16E+02 | 5.63E+02 |
| N13 | 1.80E+03 | 4.87E+01 | 2.41E+02 |
| C11 | 3.98E+02 | 1.15E+01 | 5.45E+01 |

Tabella 72 Attivazione dell'aria nelle stanze del CNAO per un fascio di 5.5×10^8 ioni carbonio/s a 400 MeV/u calcolato a partire dai dati esposti nel paragrafo precedente.

Tali risultati sono stati confrontati con quelli ottenuti compiendo una simulazione che usa una geometria più realistica (Figura 1) della struttura del CNAO fornita dal Servizio di Radioprotezione.

Tutti gli altri parametri non sono stati variati.

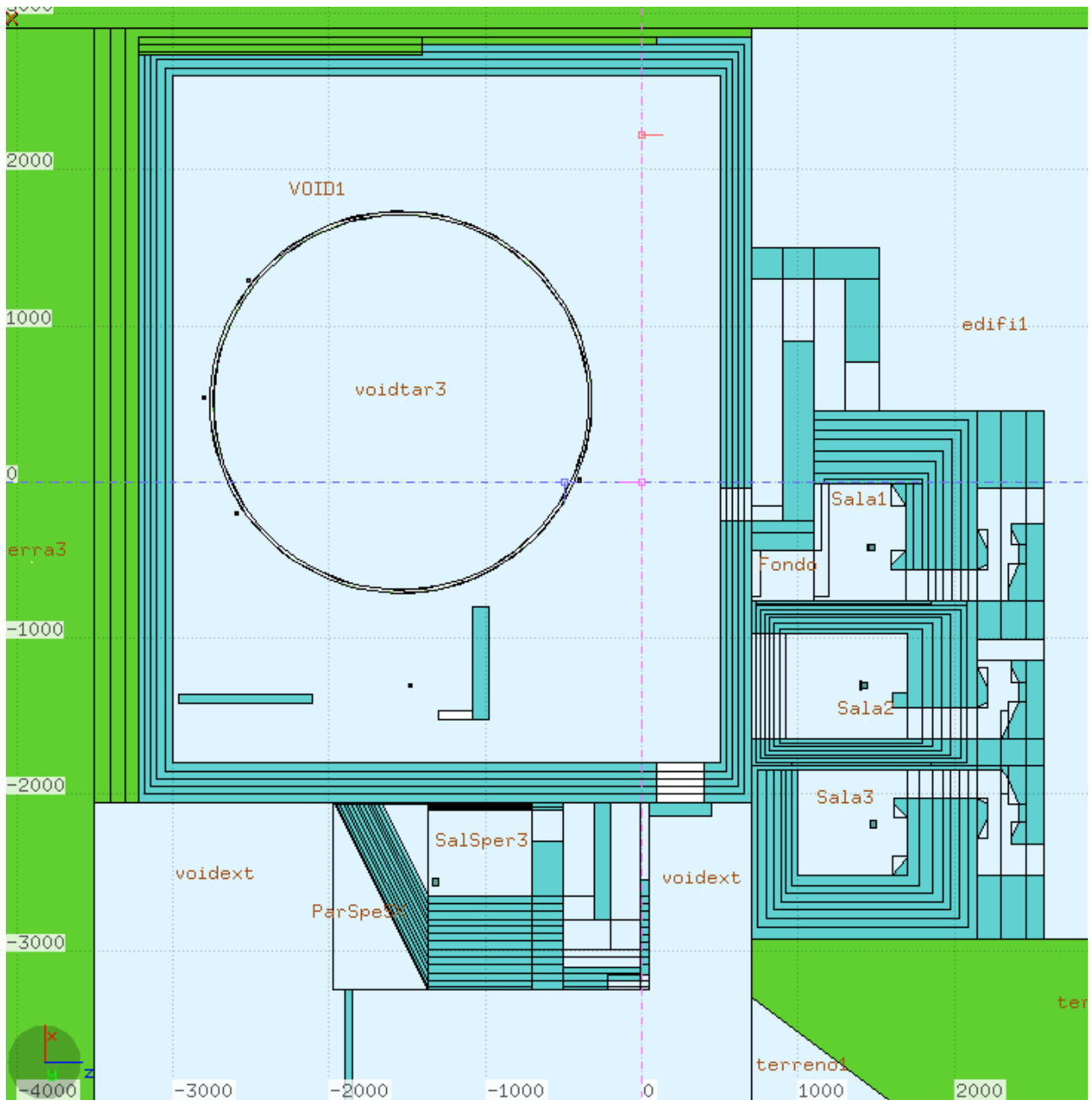


Figura 56 Una vista della geometria usata per simulare il CNAO. Le regioni in cui è stato fatto lo scoring dei radionuclidi in aria sono: voidtar3 e VOID1 (sala sincrotrone); Sala1, Sala2 e Sala3 (sale trattamento)

I risultati ottenuti sono riportati nella Tabella 5 per il fascio di protoni e nella Tabella 6 per il fascio di ioni carbonio.

| Attività (Bq) | | | |
|---------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| | Sincrotrone | Trattamento | Sperimentale |
| Ar41 | 6.22E+01 ± 2.5% | 2.91E-01 ± 39.8% | 1.60E+00 ± 16.2% |
| O15 | 9.20E+02 ± 5.5% | 3.27E+02 ± 8.9% | 2.04E+02 ± 11.7% |
| N13 | 4.61E+02 ± 3.1% | 1.23E+02 ± 7.4% | 8.75E+01 ± 8.2% |
| C11 | 6.44E+01 ± 5.7% | 2.80E+01 ± 10.8% | 1.56E+01 ± 12.5% |

Tabella 73 Attività prodotta nelle sale del CNAO usando una geometria realistica per un fascio di 1.375×10^{10} protoni/s

| Attività (Bq) | | | |
|---------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| | Sincrotrone | Trattamento | Sperimentale |
| Ar41 | 3.06E+01 ± 2.1% | 4.73E-01 ± 22.5% | 1.22E+00 ± 6.2% |
| O15 | 1.18E+03 ± 12.4% | 1.07E+02 ± 10.5% | 1.97E+02 ± 5.0% |
| N13 | 5.44E+02 ± 1.9% | 4.20E+01 ± 7.0% | 8.29E+01 ± 4.2% |
| C11 | 1.07E+02 ± 2.7% | 1.35E+01 ± 7.0% | 2.00E+01 ± 8.9% |

Tabella 74 Attività prodotta nelle sale del CNAO usando una geometria realistica per un fascio di 5.5×10^8 ioni carbonio/s.

Le differenze tra i risultati ottenuti attraverso simulazioni con geometria realistica e quelli calcolati usando il set di dati standard sono tutte entro un fattore 3, e sono dovute principalmente all'impatto che la geometria ha sui risultati. Nei due casi, infatti, la geometria delle stanze e la disposizione dei target possono essere anche molto diverse, come nel caso della Sala Sincrotrone. In questa sala il sincrotrone occupa molto spazio i punti di impatto delle particelle con la macchina sono a distanze diverse dalle pareti, si tratta di una situazione molto differente rispetto a quella considerata per ottenere il set di dati, cioè un target di rame al centro di una stanza. Anche per quanto riguarda le sale trattamento e sperimentale le geometrie differiscono: le sale trattamento hanno dimensioni leggermente maggiori rispetto a quelle considerate, mentre la sala sperimentale risulta a pianta trapezoidale anziché quadrata.

Per questo si ha la necessità di creare un nuovo set di dati alle stesse condizioni di corrente ed energie, ma sfruttando geometrie più aderenti alla realtà.

Il set di dati precedente, tuttavia, può essere particolarmente utile in casi in cui le geometrie dell'ambiente non sono ancora definite ma si vuole compiere valutazioni preliminari dell'attività prodotta in aria. Per i motivi esposti in precedenza si rende necessario avere un set di dati riguardati geometrie più aderenti alla realtà della struttura.

Per ottenere i dati che seguono sono state fatte simulazioni usando una geometria completa della struttura del CNAO, le caratteristiche delle sale solo riportate di seguito.

Per quanto riguarda le caratteristiche d'irraggiamento, invece si sono considerati fasci di protoni e ioni carbonio alle correnti nominali. Tali correnti, tuttavia, sono scalabili linearmente, e quindi i dati

di attivazione ottenuti possono esser usati per qualunque corrente.

L'intervallo di energie considerate è lo stesso degli esempi precedenti. Sono state considerate più energie intermedie in modo che, in presenza di un valore di energia non presente, sarà possibile ricavare il corrispondente valore di attivazione dell'aria nell'ipotesi che questo vari linearmente da un valore noto all'altro.

I dati, e le relative incertezze, per un fascio di protoni con corrente di 1.375×10^{10} protoni/s, tempo di irraggiamento di 1 secondo e senza tempo di cooling sono riportati per ogni stanza nelle Tabella 7, Tabella 8 e Tabella 9.

| Attività (Bq) Sala Sincrotrone | | | | | |
|--------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | Energia (MeV/u) | | | | |
| | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 |
| Ar41 | 2.43E+00 ± 6.2% | 1.12E+01 ± 6.4% | 2.57E+01 ± 14.1% | 3.94E+01 ± 14.2% | 5.81E+01 ± 9.6% |
| O15 | 2.21E+00 ± 70.5% | 3.44E+01 ± 37.1% | 1.52E+02 ± 14.1% | 3.48E+02 ± 26.2% | 5.41E+02 ± 31.9% |
| N13 | 3.97E+00 ± 20.4% | 4.12E+01 ± 13.6% | 5.87E+01 ± 14.1% | 2.60E+02 ± 15.8% | 5.34E+02 ± 22.7% |
| C11 | 4.45E-01 ± 49.5% | 2.16E+00 ± 36.9% | 7.63E+00 ± 14.1% | 2.72E+01 ± 25.9% | 6.49E+01 ± 20.0% |

Tabella 75 Attività in Bq per radionuclide per un fascio di protoni con corrente di 1.375×10^{10} protoni/s in sala sincrotrone

| Attività (Bq) Sala Trattamento | | | | | |
|--------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| | Energia (MeV/u) | | | | |
| | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 |
| Ar41 | 5.17E-01 ± 0.5% | 2.87E+00 ± 52.8% | 3.17E+00 ± 2.2% | 8.00E+00 10.1% | 1.22E+01 ± 13.6% |
| O15 | 1.75E+04 ± 0.3% | 5.68E+03 ± 5.2% | 5.14E+03 ± 0.8% | 6.11E+03 ± 7.1% | 6.03E+03 ± 6.4% |
| N13 | 4.52E+03 ± 0.04% | 2.00E+03 ± 8.2% | 2.03E+03 ± 16.0% | 2.07E+03 ± 4.8% | 2.28E+03 ± 7.1% |
| C11 | 1.80E+03 ± 0.7% | 6.25E+02 ± 4.4% | 5.10E+02 ± 5.3% | 5.22E+02 ± 9.4% | 5.02E+02 ± 6.8% |

Tabella 76 Attività in Bq per radionuclide per un fascio di protoni con corrente di 1.375×10^{10} protoni/s in sala trattamento.

| Attività (Bq) Sala Sperimentale | | | | | |
|---------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | Energia (MeV/u) | | | | |
| | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 |
| Ar41 | 3.55E-01 ± 47.9% | 1.54E+00 ± 29.9% | 3.45E+00 ± 20.2% | 3.68E+00 ± 33.9% | 4.71E+00 ± 23.5% |
| O15 | 5.47E+02 ± 1.8% | 4.64E+02 ± 9.6% | 4.45E+02 ± 25.0% | 3.87E+02 ± 20.0% | 6.70E+02 ± 17.4% |
| N13 | 1.33E+02 ± 3.5% | 1.11E+02 ± 42.9% | 2.07E+02 ± 8.3% | 2.84E+02 ± 22.3% | 3.07E+02 ± 10.8% |
| C11 | 4.94E+01 ± 13.3% | 5.45E+01 ± 28.6% | 4.28E+01 ± 24.1% | 4.67E+01 ± 30.9% | 7.52E+01 ± 24.9% |

Tabella 77 Attività in Bq per radionuclide per un fascio di protoni con corrente di 1.375×10^{10} protoni/s in sala sperimentale.

I dati, e le relative incertezze, per un fascio di ioni carbonio con corrente 5.5×10^8 ioni/s tempo di irraggiamento di 1 secondo e senza tempo di cooling sono riportati per ogni stanza nelle Tabella 10, Tabella 11, Tabella 12.

| Attività (Bq) Sala Sincrotrone | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | Energia (MeV/u) | | | | | |
| | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |
| Ar41 | 2.39E+00 ± 9.0% | 6.07E+00 ± 4.3% | 1.07E+01 ± 8.8% | 1.58E+01 ± 6.6% | 2.41E+01 ± 10.0% | 3.69E+01 ± 6.5% |
| O15 | 4.45E+01 ± 24.2% | 1.61E+02 ± 16.9% | 3.56E+02 ± 14.6% | 5.64E+02 ± 7.3% | 9.96E+02 ± 11.6% | 9.69E+02 ± 9.7% |
| N13 | 2.59E+01 ± 19.3% | 7.40E+01 ± 9.8% | 1.21E+02 ± 16.4% | 2.27E+02 ± 8.8% | 3.43E+02 ± 7.0% | 5.16E+02 ± 3.9% |
| C11 | 3.74E+00 ± 14.9% | 1.09E+01 ± 9.8% | 2.18E+01 ± 19.1% | 3.74E+01 ± 17.0% | 6.29E+01 ± 9.2% | 9.63E+01 ± 15.3% |

Tabella 78 Attività in Bq per radionuclide per un fascio di ioni carbonio con corrente di 5.5×10^8 ioni/s in sala sincrotrone.

| Attività (Bq) Sala Trattamento | | | | | | |
|--------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | Energia (MeV/u) | | | | | |
| | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |
| Ar41 | 6.26E-01 ± 12.5% | 1.82E+00 ± 24.2% | 2.69E+00 ± 9.6% | 5.18E+00 ± 11.9% | 6.55E+00 ± 10.4% | 7.04E+00 ± 4.0% |
| O15 | 3.32E+02 ± 15.3% | 3.22E+02 ± 10.6% | 6.12E+02 ± 3.2% | 9.11E+02 ± 6.7% | 1.45E+03 ± 3.8% | 1.97E+03 ± 12.4% |
| N13 | 1.25E+02 ± 8.0% | 1.76E+02 ± 6.1% | 2.46E+02 ± 4.2% | 4.09E+02 ± 6.2% | 5.94E+02 ± 3.9% | 7.87E+02 ± 2.8% |
| C11 | 4.76E+01 ± 7.1% | 5.07E+01 ± 14.2% | 6.03E+01 ± 4.6% | 1.06E+02 ± 7.2% | 1.54E+02 ± 2.5% | 2.26E+02 ± 6.1% |

Tabella 79 Attività in Bq per radionuclide per un fascio di ioni carbonio con corrente di 5.5×10^8 ioni/s in sala trattamento

| Attività (Bq) Sala Sperimentale | | | | | | |
|---------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | Energia (MeV/u) | | | | | |
| | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |
| Ar41 | 4.18E-01 ± 16.7% | 5.97E-01 ± 20.4% | 1.68E+00 ± 9.1% | 2.45E+00 ± 14.3% | 3.61E+00 ± 10.4% | 3.32E+00 ± 11.5% |
| O15 | 4.35E+01 ± 29.3% | 1.12E+02 ± 19.4% | 2.01E+02 ± 7.3% | 2.40E+02 ± 15.6% | 4.74E+02 ± 11.0% | 7.05E+02 ± 3.5% |
| N13 | 1.91E+01 ± 8.8% | 4.24E+01 ± 19.0% | 7.56E+01 ± 9.2% | 1.10E+02 ± 7.4% | 1.91E+02 ± 3.8% | 2.67E+02 ± 3.6% |
| C11 | 5.54E+00 ± 33.2% | 6.99E+00 ± 10.1% | 1.25E+01 ± 14.3% | 2.24E+01 ± 12.4% | 5.34E+01 ± 11.3% | 7.44E+01 ± 4.4% |

Tabella 80 Attività in Bq per radionuclide per un fascio di ioni carbonio con corrente di 5.5×10^8 ioni/s in sala sperimentale.

Questi dati presentano delle incertezze maggiori rispetto ai precedenti, ciò è dovuto all'aumento di complessità della simulazione a causa della geometria più complessa e accurata.

5.2 Applicazione del set di dati a un caso reale

Il set di dati appena presentato è stato utilizzato per calcolare l'attivazione dell'aria nelle sale usando come dati, per il numero di particelle e per le energie, quelli forniti dagli spettri di ioni carbonio e protoni accelerati nell'anno 2018. Tali spettri derivano dai dati macchina a disposizione del CNAO e sono riportati in Figura 2 e Figura 3.

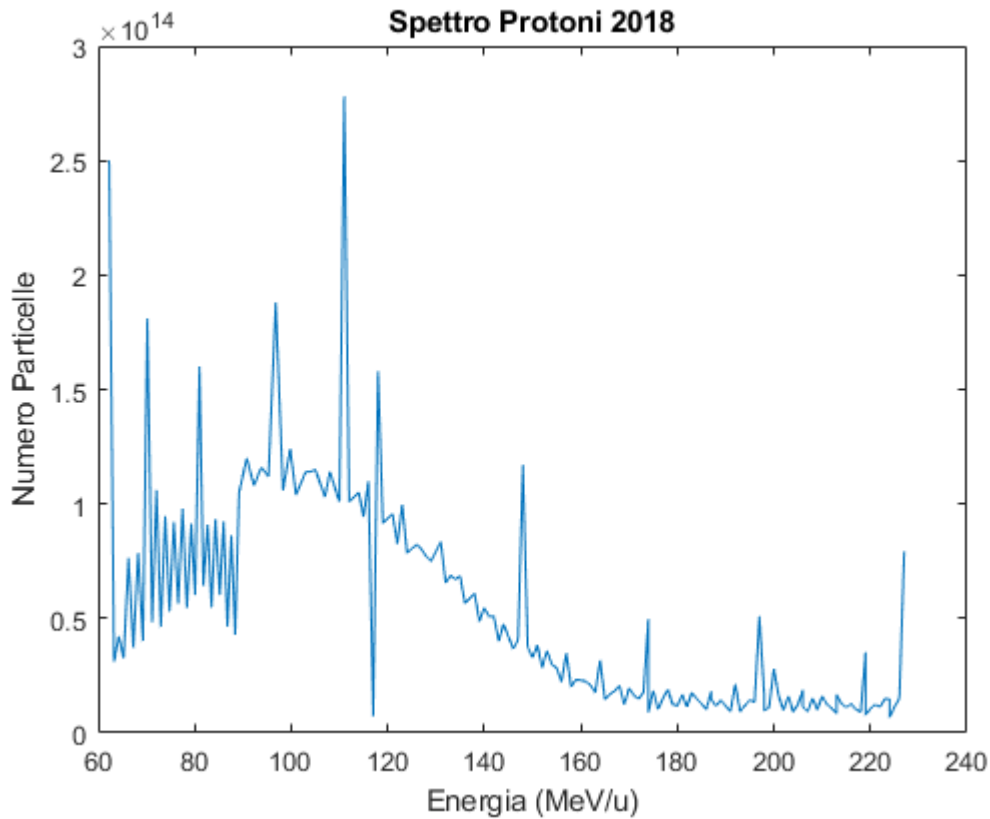


Figura 57 Numero di protoni in funzione dell'energia accelerati dal sincrotrone del CNAO nel 2018.

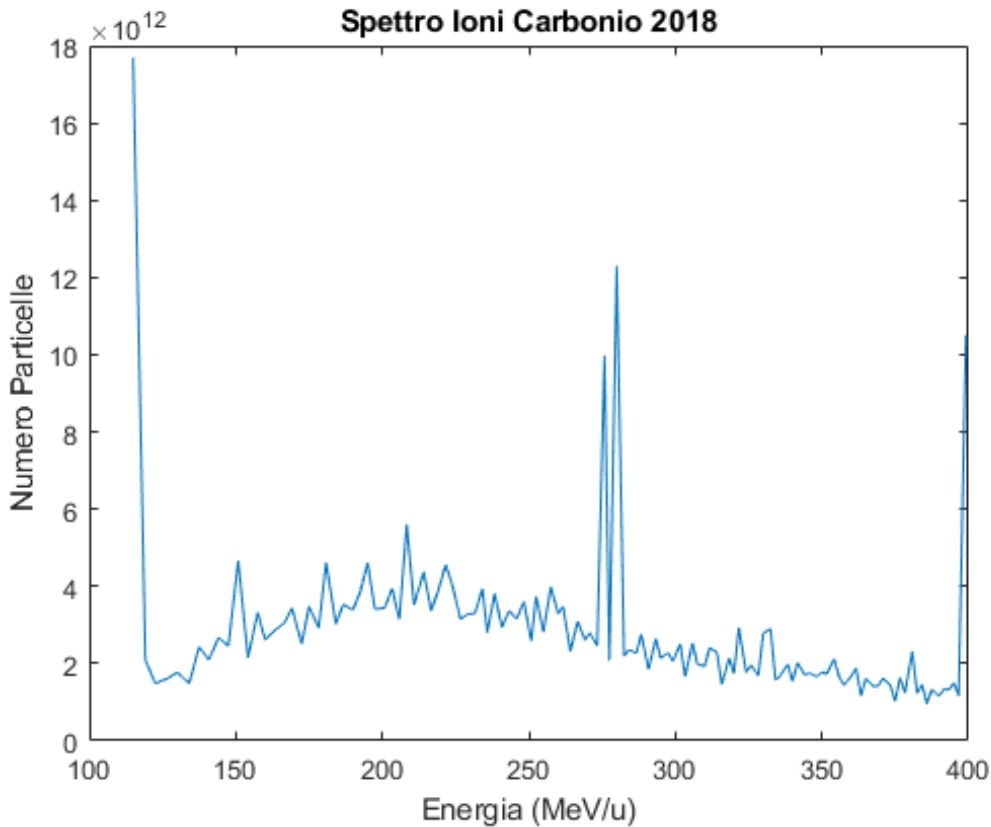


Figura 58 Numero di ioni carbonio in funzione dell'energia accelerati dal sincrotrone del CNAO nel 2018.

Per calcolare l'attivazione dell'aria si è supposto un tempo di cooling nullo, che in sala sincrotrone si perda il 54.6% del fascio, e che in una sala trattamento arrivi il 5.4% delle particelle accelerate in macchina, secondo i dati relativi alle perdite forniti in precedenza. Per trovare l'attività ad energie diverse da quelle simulate si è supposto che essa vari linearmente nell'intervallo considerato. Di conseguenza l'attività di un'energia E_2 che si trova tra le energie simulate E_1 ed E_3 , si è calcolata come:

$$A(E_2) = A(E_1) + E_2 \frac{A(E_3) - A(E_1)}{E_3 - E_1} \quad (5.1)$$

Infine, il numero totale di particelle usato per ogni energia è quello riportato dagli spettri. Questo procedimento è stato applicato a tutte le energie, e le relative correnti, presenti negli spettri. I risultati così ottenuti rappresentano una situazione in cui tutte le particelle usate in un anno vengono ad una data energia vengono usate in un fascio della durata di un secondo. Questa è una situazione irrealistica ma l'attività così prodotta rappresenta una stima per eccesso di quella prodotta in un anno.

I risultati per lo spettro di protoni e di ioni carbonio sono riportati nella Tabella 13.

| | Attività annuale (Bq) | |
|----------------------------------|-----------------------|----------|
| | Protoni | Carbonio |
| Ossigeno - 15 | 1.06E+08 | 5.28E+08 |
| Azoto - 13 | 7.69E+07 | 2.45E+09 |
| Carbonio-11 | 9.06E+06 | 4.83E+07 |
| Totale | | |
| | 1.91E+08 | 3.03E+09 |
| Emissione costante ogni 5 minuti | 1.82E+03 | 2.88E+04 |

Tabella 81 Attività prodotta in un anno dal sincrotrone del CNAO calcolata in base agli spettri e al metodo precedente.

Per fare un confronto dei dati della Tabella 13, se si suppone il limite di concentrazione fissato dalla normativa di 1 Bq/g, e un ricambio costante d'aria complessivo di 10000 m³/ora, sia avrebbe un rilascio costante di circa 10⁶ Bq emessi ogni 5 minuti. Come si evince dai dati di Tabella 75, pur facendo ipotesi conservative, l'attività emessa risulta inferiore anche di due ordini di grandezza.

Un ulteriore approfondimento riguardo all'attività prodotta durante le operazioni al CNAO è possibile considerando ogni singolo spill accelerato dalla macchina e mandato in sala. Ciascuno spill risulta monoenergetico e con un valore differente di corrente, inoltre varia leggermente anche il tempo di estrazione, soprattutto variando l'energia delle particelle. Tuttavia, in questo lavoro non si considereranno le differenze nei tempi di estrazione degli spill dato che risultano poco rilevanti.

L'attività totale prodotta in un anno in questo modo risulta, ovviamente, uguale a quella considerando gli spettri, tuttavia avere a disposizione i dati di ciascuno spill e indicazioni del giorno e l'ora che è stato accelerato permette di combinare l'attività prodotta (e smaltita in atmosfera) con i dati meteo. Tutto ciò verrà trattato nel capitolo successivo.

Capitolo 6

Nei capitoli precedenti sono esposti dei modelli per il calcolo dell'attivazione prodotta da una macchina acceleratrice per uso di adroterapia. Nel presente si studieranno dei modelli per la diffusione di questi radionuclidi nell'atmosfera. Si farà riferimento al caso studio del CNAO.

6.1 Fonte dei dati

Innanzitutto, è doveroso procurarsi dati delle condizioni meteorologiche del luogo in esame. Si è cercato di determinare quanto possa influenzare la distanza del punto di rilevazione dei dati meteo dal punto di emissione dei radionuclidi sull'efficacia del modello.

Per far ciò, nel caso del CNAO, si sono considerati tre possibili fonti di dati meteo: la centralina CNAO montata dentro il perimetro del Centro, la centralina CML montata a circa 700 metri a ovest del Centro, e la centralina ARPA a circa 2.5 Km a sud del CNAO.

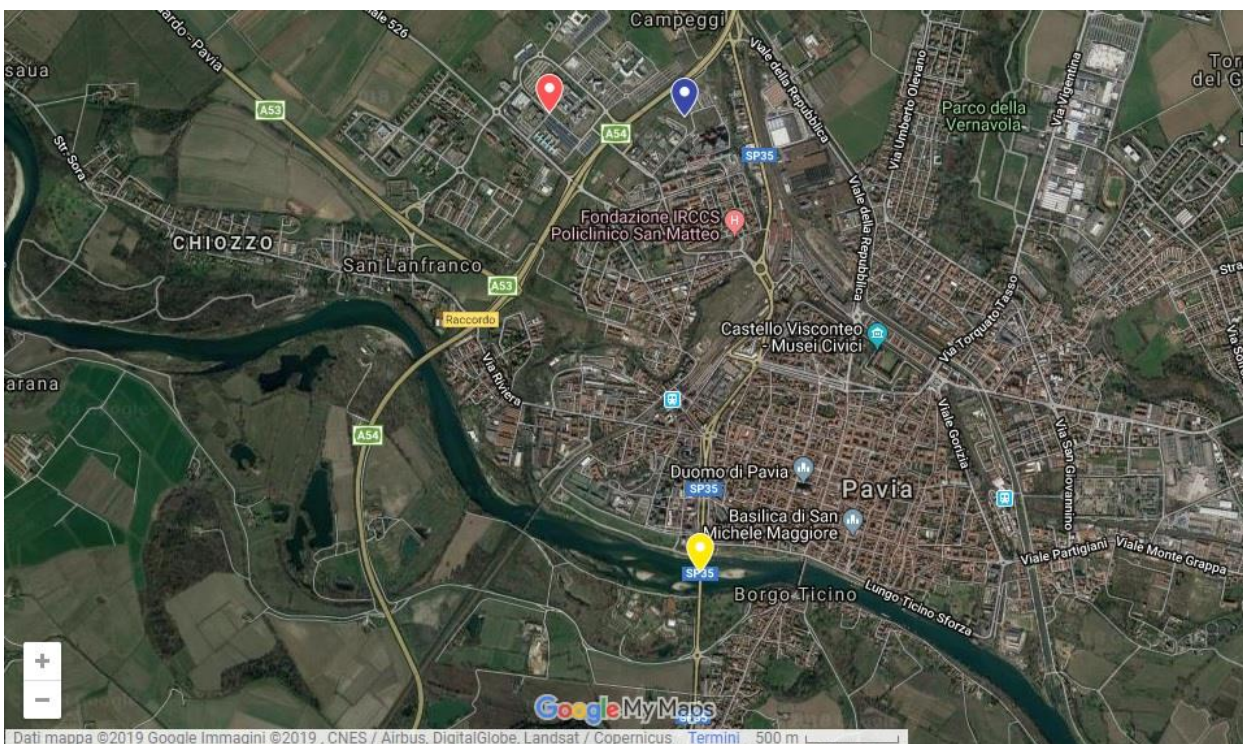


Figura 59 Disposizione delle centraline dei dati meteo nella città di Pavia. Blu: centralina CNAO; Rosso: centralina CML; Giallo: centralina ARPA.

Dai modelli presentati nei capitoli precedenti e dalle analisi che verranno svolte in seguito, si deduce che le grandezze di maggior interesse sono direzione e velocità del vento, e la radiazione solare. Quest'ultima sarà usata per determinare le classi di stabilità atmosferica. Dalle tre centraline si hanno a disposizione dati di periodi di tempo diversi: la centralina CNAO è entrata in funzione nel giugno 2018 e rileva i dati con una frequenza di 5 minuti; della centralina CML si

hanno a disposizione tutti i dati per il 2018 campionati con la stessa frequenza della precedente. La centralina ARPA si hanno dati a partire da ottobre 2018 e campiona i dati ogni ora. Per compiere un confronto tra le grandezze fornite in questi punti si è scelto quindi un intervallo di tempo comune a tutti e tre, e di considerare per ogni grandezza la media nell'intervallo di tempo di campionamento.

Per confrontare le direzioni dei venti si sono suddivisi i dati in 16 settori, ognuno di 22.5° dell'angolo giro, dopodiché si è calcolato con quale frequenza si ha vento in ciascun settore. I risultati sono riportati in Figura 2.

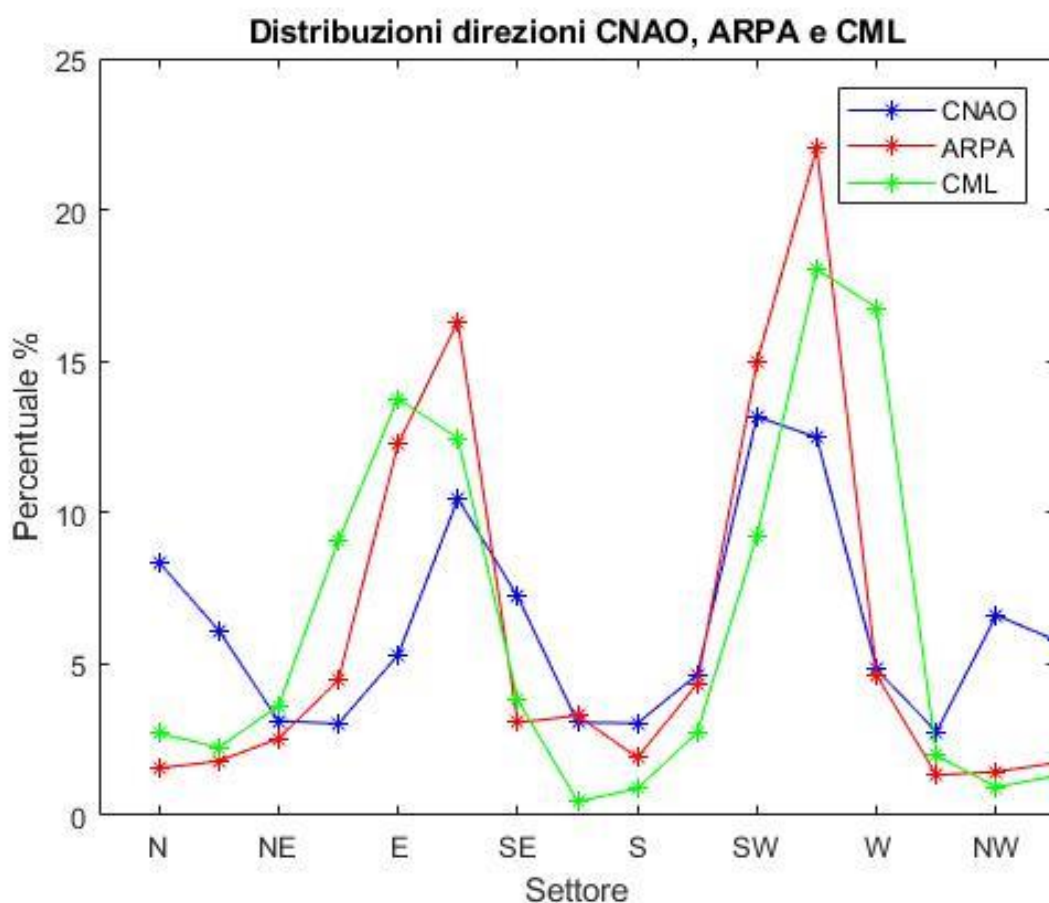


Figura 60 Frequenze percentuali nelle direzioni dei venti dalle tre fonti di dati

Sebbene non vi sia accordo tra i valori percentuali delle frequenze, si può notare come in tutti e tre i casi le direzioni dominanti siano le stesse intorno alla direzione Sud-Ovest e Nord-Est.

Per confrontare le velocità, invece si sono divisi i dati in intervalli di velocità come riportato nella Tabella 1 e si è considerata la frequenza percentuale con cui la velocità media nell'intervallo di campionamento rientrava in un dato intervallo.

| Intervallo | Velocità minima (m/s) | Velocità massima (m/s) |
|------------|-----------------------|------------------------|
| 1 | 0.0 | 1.0 |
| 2 | 1.0 | 2.0 |
| 3 | 2.0 | 3.0 |
| 4 | 3.0 | 4.0 |
| 5 | 4.0 | 5.0 |
| 6 | 5.0 | 6.0 |
| 7 | 6.0 | 7.0 |
| 8 | 7.0 | 8.0 |
| 9 | 8.0 | 9.0 |
| 10 | 9.0 | Fondo scala |

Tabella 82 Intervalli per il confronto delle velocità dei venti e valori di velocità minime e massime per ciascun intervallo.

I risultati dell'analisi sono riportati nel grafico di Figura 3.

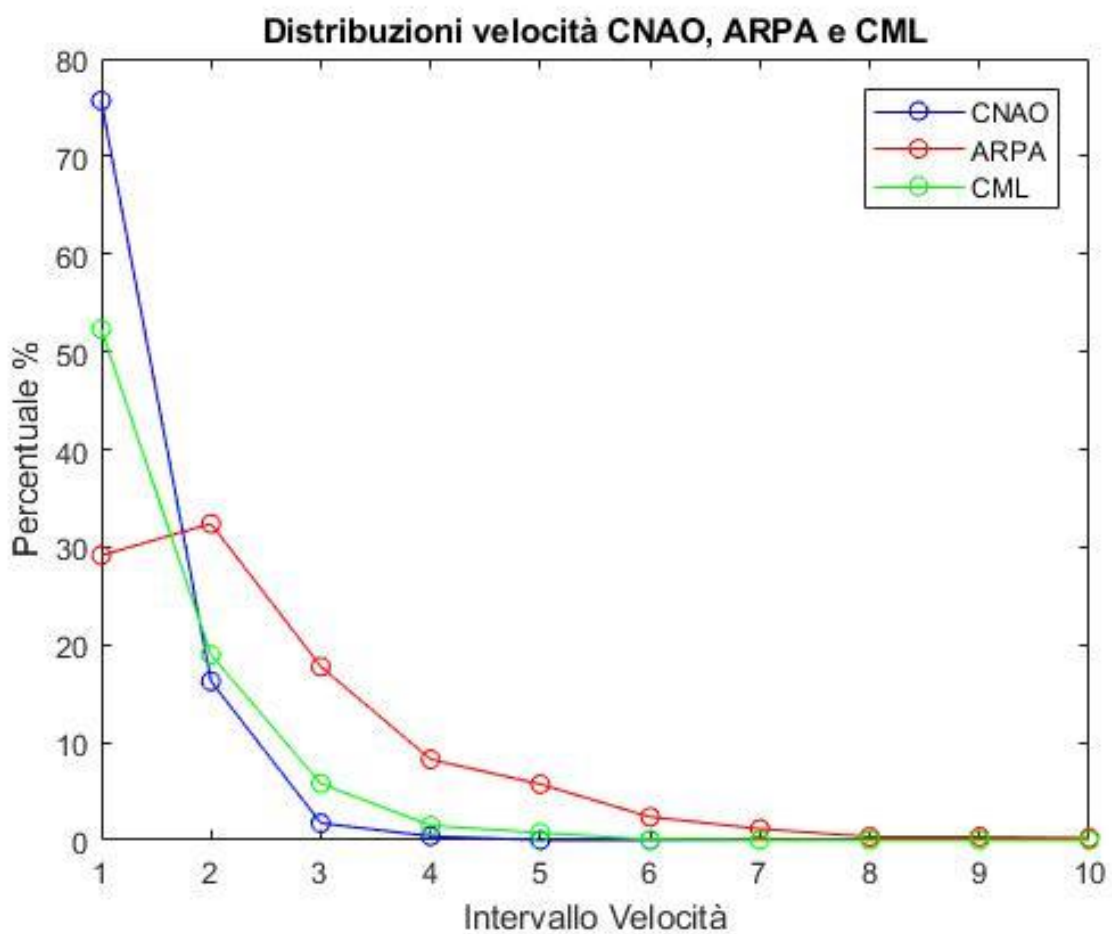


Figura 61 Distribuzione delle velocità del vento

Anche in questo caso si nota una leggera discrepanza nei valori percentuali di tutte e tre le centraline, mentre gli andamenti sono piuttosto simili per CML e CNAO, mentre la centralina ARPA sembra mostrare un andamento differente. Ciò potrebbe essere dovuto al fatto che la centralina ARPA si trova piuttosto distante dalle altre, ma anche il fatto che le altre due centraline siano dello stesso modello fa supporre a una differenza nel metodo di campionamento dei dati.

Per determinare la classe di stabilità atmosferica, per i confronti e per il resto del lavoro, si è fatto riferimento ai dati di letteratura (EPA, 2000), tali dati risultano più particolareggiati rispetto a quelli della Tabella 1 del Capitolo 1.

| Velocità del vento (m/s) | Radiazione Solare (W/m ²) | | | |
|-----------------------------|---------------------------------------|---------|---------|------|
| | > 925 | 925-675 | 675-175 | <175 |
| <2 | A | A | B | D |
| 2-3 | A | B | C | D |
| 3-5 | B | B | C | D |
| 5-6 | C | C | D | D |
| >6 | C | D | D | D |

Tabella 83 Classi di stabilità in funzione dell'insolazione e della velocità del vento (EPA, 2000).

Si sono così ottenuti i risultati del grafico di Figura 4.

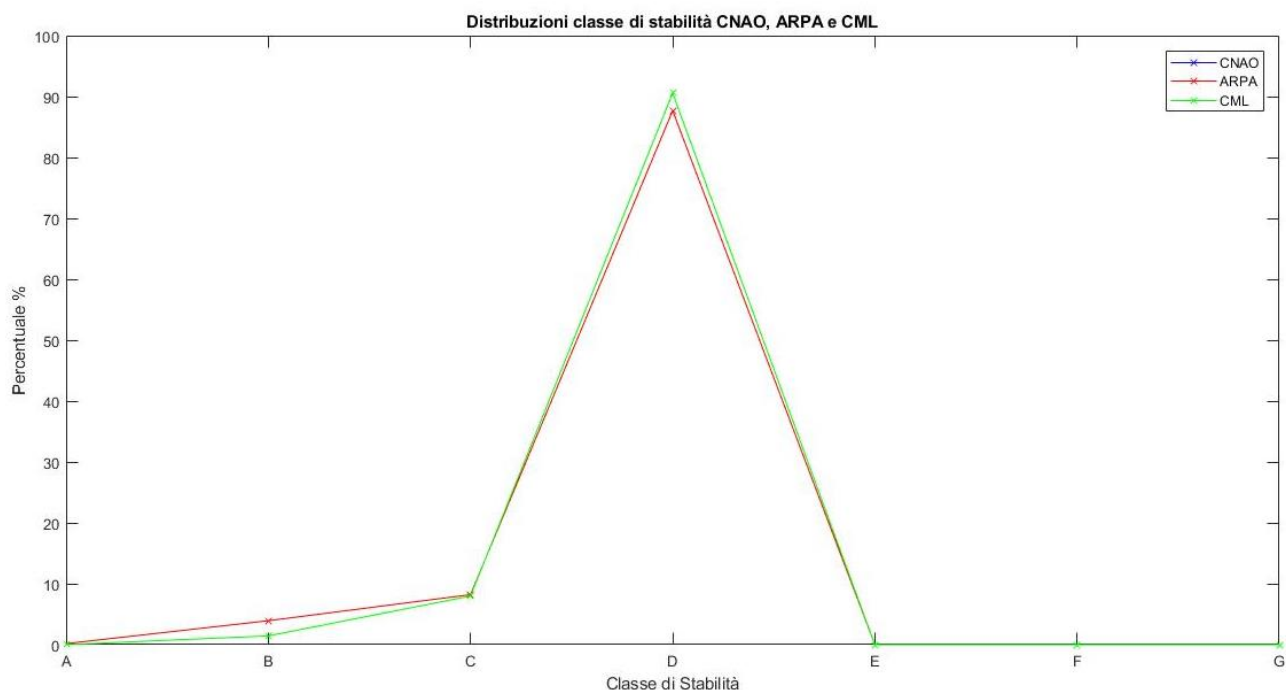


Figura 62 Distribuzioni delle classi di stabilità.

Si può notare come per le classi di stabilità non vi sia praticamente differenza tra scegliere qualunque centralina. Inoltre, il fatto che la classe più frequente sia la D è dovuto all'alta frequenza di vento debole e al maggior numero di ore con bassa radiazione solare.

Per il resto di questo lavoro si è quindi scelto di usare, a meno di altra indicazione, i dati forniti da CML per il fatto che coprono interamente l'anno solare 2018.

6.2 Dispersione dei radionuclidi e calcolo della dose

Per simulare la dispersione dei radionuclidi nell'atmosfera, e calcolare la dose così rilasciata alle persone del pubblico, si è fatto uso del software HotSpot Health Physics Codes (Steven Homann, 2014). HotSpot è un software pensato appositamente per lo studio dei rilasci di radionuclidi in atmosfera sotto diversi scenari, sia sporadici (incidenti o esplosioni) sia cronici, come nel caso in esame.

Per calcolare la concentrazione dispersa in atmosfera HotSpot fa uso del modello di trasporto gaussiano di Pasquill con il decadimento dei radionuclidi durante la diffusione, come già illustrato nel Capitolo 1 (si veda equazione (1.9)). Inoltre, si è sempre considerato di trovarsi in uno scenario urbano, e quindi si sono scelti i coefficienti di Briggs idonei (si veda Tabella 2 del Capitolo 1). La centralina meteo utilizzata ha una velocità del vento minima rilevabile di 0.5 m/s, quindi al di sotto di questo valore i dati forniti risultano di 0 m/s. L'equazione del modello di trasporto gaussiano, tuttavia per valori nulli della velocità diverge. Per ovviare a questo problema ai dati con velocità nulla è stato dato il valore arbitrario di 0.1 m/s e la direzione è stata scelta casualmente campionando nella distribuzione delle direzioni mostrata nel paragrafo precedente. Per quanto riguarda il calcolo dell'attività, invece, HotSpot usa il modello di nube semi-infinita, come indicato dal Report No.12 dell'EPA (EPA, U.S. Environmental Protection Agency, 1993) a cui fa riferimento anche per i coefficienti di dose per somministrazione e inalazione dei radionuclidi. L'uso e le considerazioni su tali coefficienti sono stati discussi nel Capitolo 2. La scelta del modello di nube semi-infinita costituisce un'approssimazione per eccesso nel calcolo della dose per somministrazione, soprattutto a poca distanza dalla sorgente dei radionuclidi e nel caso di dose dovuta a raggi gamma. Tuttavia, tale modello, e di conseguenza il software che lo usa, ha il vantaggio di ridurre notevolmente i tempi di computazione e rimane un'ipotesi conservativa.

Per stimare le approssimazioni introdotte si è fatto riferimento a lavori trovati in letteratura che impiegano metodi di calcolo meno generali per la stima delle dosi.

Ad esempio, Thykier-Nielsen et al. (Thykier-Nielsen, Deme, & Láng, 1995) forniscono il grafico di Figura 5 per stimare le differenze tra il loro modello di integrazione numerica e il modello di nube semi-infinita.

Usando i coefficienti di Briggs per un ambiente urbano, si può stimare che la nube di radionuclidi a 100 m dalla sorgente si allarghi, nel peggiore dei casi (classe di stabilità A-B), di circa 30 m.

Considerando che i radionuclidi in esame sono per lo più emettitori β^+ , e che quindi la radiazione gamma emessa è principalmente di 511 keV, dato il coefficiente di assorbimento dell'aria (μ), dal grafico di Figura 5 si stima che la dose gamma con il modello della nube semi-infinita è sovrastimata di un fattore circa 3.

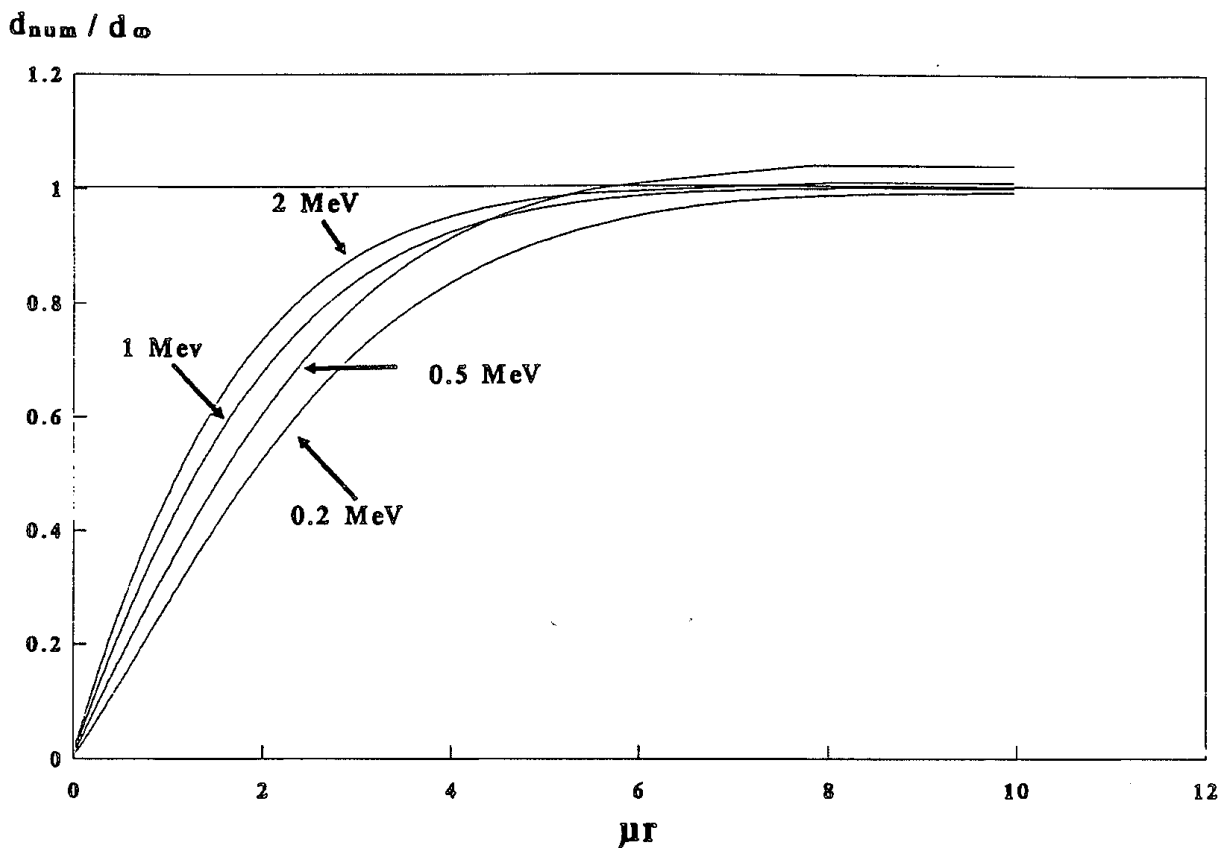


Figura 63 Rateo di dose calcolato con il metodo numerico di Thykier-Nielsen e con nube semi-infinita come funzione della distanza dalla sorgente (in unità μr) (Thykier-Nielsen, Deme, & Láng, 1995).

6.3 Stima delle dosi in casi reali

In questo paragrafo si stimeranno le dosi disperse in base a diverse ipotesi, sempre meno restrittive. Quando necessario si farà riferimento al caso del CNAO già preso in esame durante questo lavoro.

Vista la mole di dati da esaminare è risultato opportuno avere un codice più dinamico e flessibile di HotSpot. Dato che i modelli usati sono ben conosciuti si è potuto creare un codice in MATLAB che riproducesse i calcoli compiuti da HotSpot. Si è quindi provveduto a implementare il modello di trasporto gaussiano di Pasquill e il calcolo delle dosi per sommersione per una nube semi-infinita. Le funzioni che compongono il codice in MATLAB sono riportati in Appendice C.

Si riporta di seguito un confronto tra i risultati ottenuti da HotSpot e quelli del programma in

MATLAB. Il caso in esame è quello della dispersione di 1MBq di ^{15}O quando il vento spira in una singola direzione con una velocità di 0.5 m/s e l'atmosfera si trova in classe di stabilità D. Dal paragrafo precedente si può notare che questa è la situazione più frequente. Si è quindi provveduto a calcolare, con entrambi i codici, a 100 m e ad angolazioni differenti rispetto alla direzione del vento. I risultati sono riportati in Figura 6.

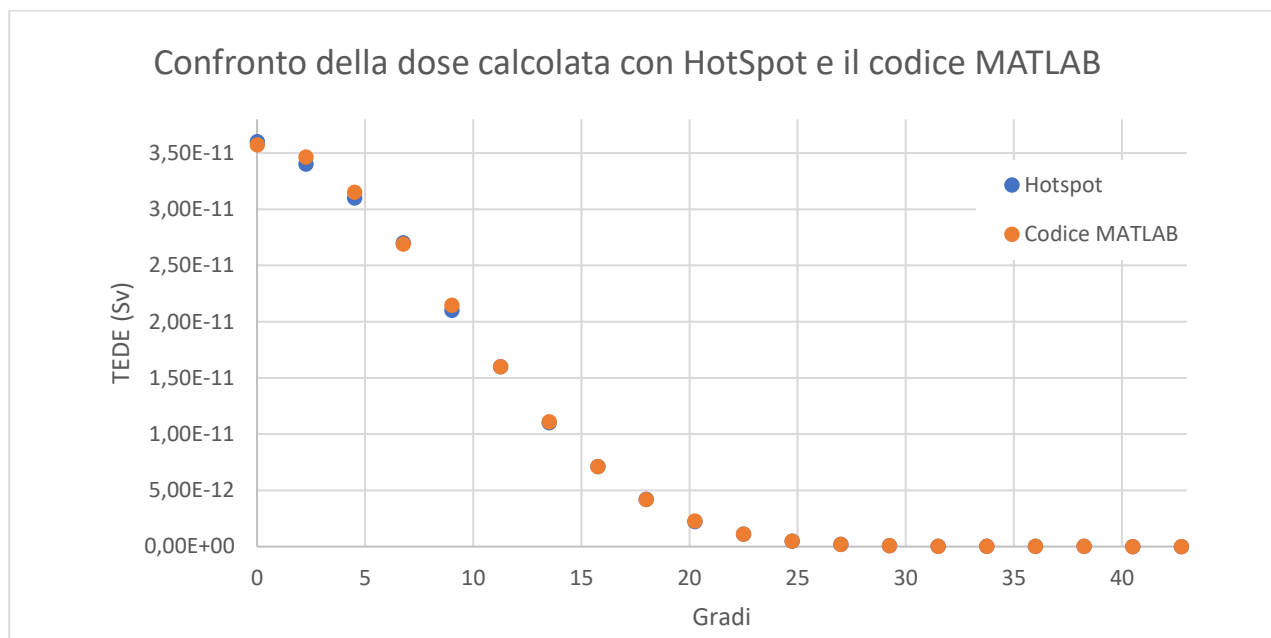


Figura 64 Dose calcolata con HotSpot e codice in MATLAB a diversi angoli rispetto la direzione del vento nel caso di rilascio di 1MBq di O-15 in atmosfera di classe D con vento 0.5 m/s. Alcuni punti risultano sovrapposti.

Si può notare la notevole concordanza dei dati.

Il vantaggio del codice in MATLAB è che permette di sommare agevolmente i contributi dovuti a pennacchi con differenti parametri ma che contribuiscono alla dose nello stesso punto. Così facendo è stato possibile costruire diagrammi polari per rilasci cronici costanti nel tempo, e ogni rilascio contribuisce alla dose in punti che si trovano entro una distanza angolare di circa 25° rispetto alla direzione del vento al momento del rilascio.

Inizialmente si è supposto un rilascio costante di 1 MBq ogni 5 minuti. Tale valore è coerente con le considerazioni sull'attività svolte al termine del paragrafo 5.2, supponendo una concentrazione limite di 1 Bq/g. Si suppone un mix di radionuclidi composto all' 23.4% da ^{15}O , 61.1% da ^{13}N e 15.5% da ^{11}C , coerentemente con i valori esposti nel Capitolo 2. Si è ignorata la dose dovuta a ^{41}Ar vista la percentuale ridotta con cui è presente.

Con tali valori d'attività, usando i dati meteo del 2018 forniti da CML, si ottengono i valori di dose del grafico di Figura 7.

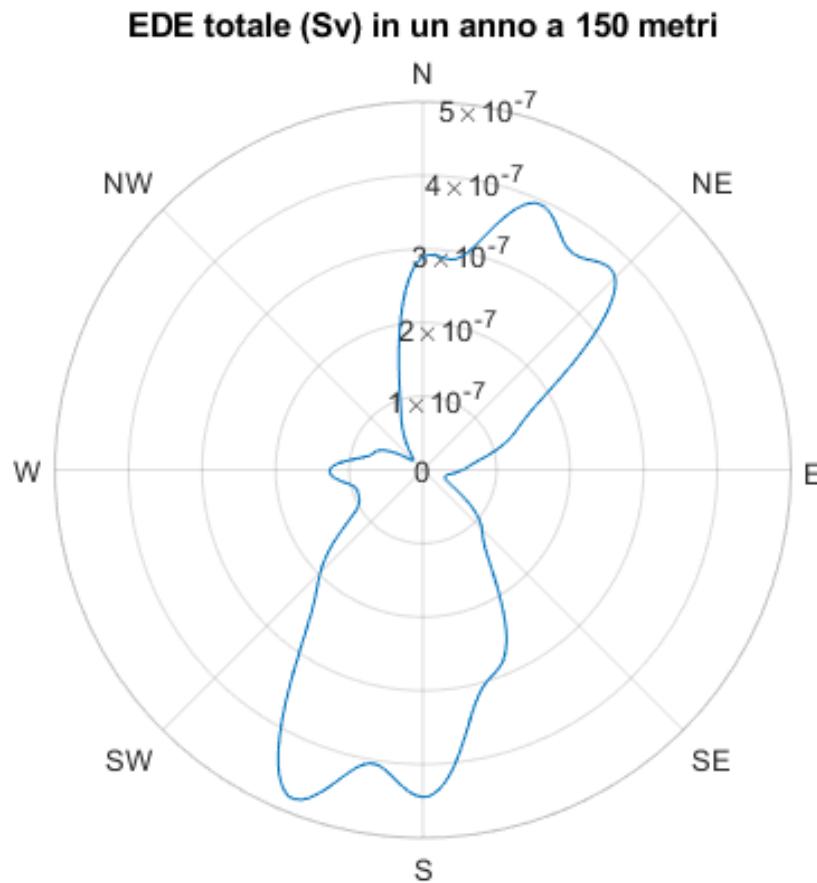


Figura 65 Dose a 150 metri dalla sorgente con attività di 1MBq ogni 5 minuti e dati meteo CMI 2018 a Pavia.

Dai dati si vede che la direzione predominante dei venti nel 2018 è stata tra Sud e Sud-Ovest, coerentemente con i dati esposti nel paragrafo 6.1 e che in tale direzione si ha un picco di dose di circa $0.45 \mu\text{Sv}/\text{anno}$. Si ricorda che le considerazioni fatte nel Capitolo 2, in cui si supposeva un solo valore di velocità del vento e una sola direzione, portavano a un valore compreso da 1 e 3 $\mu\text{Sv}/\text{anno}$.

Si è poi considerata come attività annua da smaltire in atmosfera quella emersa nel Paragrafo 5.2, prodotta utilizzando il set di simulazioni di attività e gli spettri delle particelle accelerate al CNAO nel 2018. Anche in questo caso, e per il resto del lavoro, si è ignorata l'attività del ^{41}Ar . Calcolando l'attività dell'argon come esposto per il resto dei radionuclidi, si ottiene un'attività di $1.09 \times 10^7 \text{ Bq}$ per i protoni e $1.54 \times 10^7 \text{ Bq}$ per gli ioni carbonio. Questi valori risultano tra 1 e 2 ordini di grandezza minori dell'attività totale prodotta dagli altri tre radionuclidi. Se si disperde quest'attività con le condizioni meteo del 2018, a 150 m dalla sorgente si ottiene il grafico di dose della Figura 8.

EDE totale (Sv) in un anno a 150 metri dovuto a Ar-41

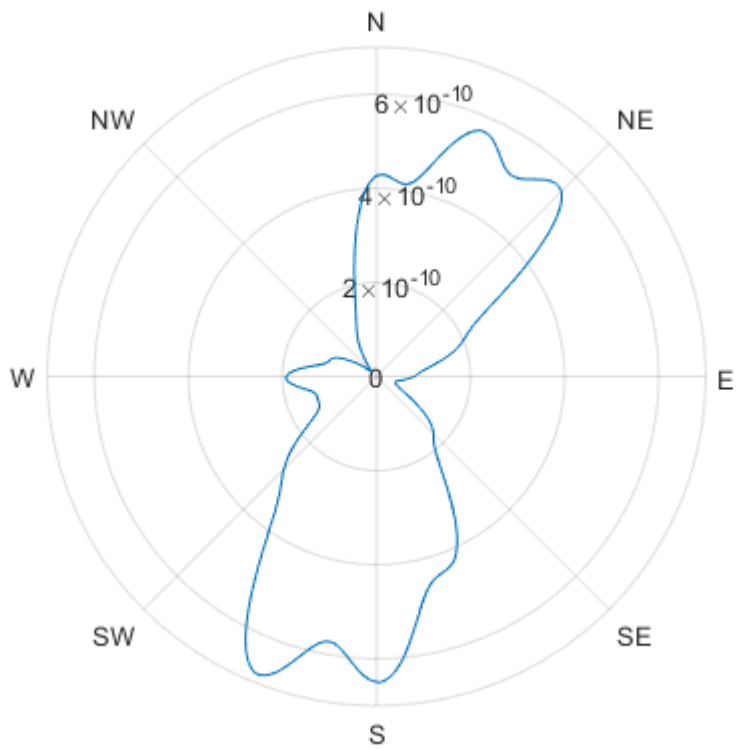


Figura 66 Dose a 150 m dovuta al solo contributo di Ar-41 calcolata partendo dagli spettri. Si suppone un rilascio costante dei radionuclidi nel tempo

Sotto queste condizioni di produzione, e supponendo un rilascio costante nel tempo, si sono trovati i valori di dose esposti in Figura 9 per gli altri radionuclidi considerati.

EDE totale (Sv) in un anno a 150 metri

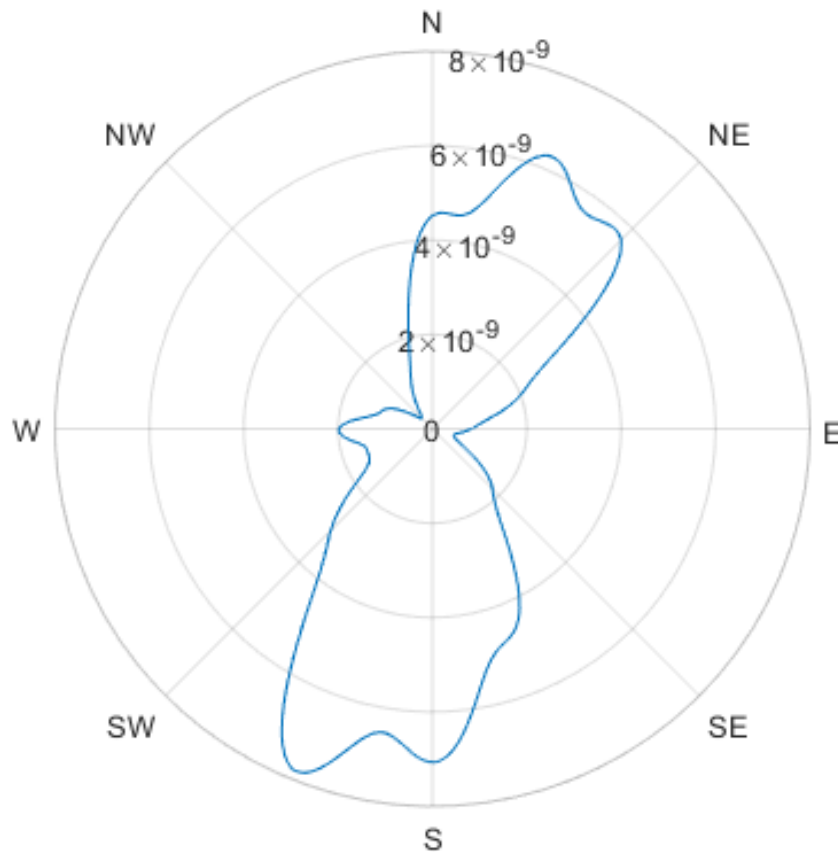


Figura 67 Dose a 150 metri dalla sorgente con attività prodotta a partire dagli spettri di particelle accelerate al CNAO e dati meteo CMI 2018 a Pavia.

Si può notare una riduzione delle dosi di circa due ordini di grandezza, coerentemente con quanto trovato per l'attività al termine del Paragrafo 5.2.

Infine, si è voluta stimare l'attività prodotta da ogni singolo spill accelerato dal sincrotrone del CNAO nel 2018. Il Centro, infatti, registra energia e tipo e numero di particelle di ogni spill accelerato dalla macchina, e anche data e ora in cui è stato estratto. Ciò ha permesso, utilizzando i set di simulazioni del Capitolo 5, di stimare quanti radionuclidi sono stati prodotti da ciascuno spill, supponendo le percentuali di perdite esposte in precedenza. Dopodiché si è supposto che tutta l'attività prodotta venga immediatamente rilasciata nell'ambiente. Tale ipotesi risulta poco realistica ma conservativa, in quanto non si considera la possibilità che i radionuclidi possano decadere prima di essere emessi nell'ambiente, ipotesi molto conservativa ad esempio per ^{15}O ($T_{1/2} = 122 \text{ s}$). Si è quindi associato all'attività di ciascuno spill le condizioni meteo a cui è stato rilasciato in base ai dati meteo della centralina di CML che, si ricorda, raccoglie dati ogni 5 minuti. Si riporta in Tabella 3 un esempio dell'unione dei due set di dati. Complessivamente si sono elaborate in questo modo più di 250000 spill sia di ioni carbonio che protoni.

| Data | Ora Spill | Velocità (m/s) | Direzione Vento | Radiazione solare (W/m2) | Particelle | Energia (MeV/u) |
|------------|-----------|----------------|-----------------|--------------------------|------------|-----------------|
| 09/03/2018 | 15.07.48 | 1.33 | S | 201 | 3.04E+08 | 268.86 |
| 09/03/2018 | 15.07.49 | 1.33 | S | 201 | 3.15E+08 | 271.11 |
| 09/03/2018 | 15.07.51 | 1.33 | S | 201 | 2.95E+08 | 275.56 |
| 09/03/2018 | 15.25.58 | 1.78 | SE | 451 | 1.81E+08 | 122.87 |
| 09/03/2018 | 15.26.00 | 1.78 | SE | 451 | 2.46E+08 | 126.58 |
| 09/03/2018 | 15.26.02 | 1.78 | SE | 451 | 2.43E+08 | 130.21 |

Tabella 84 Esempio di unione dei set di dati spill e dati meteo

Così facendo si sono trovati i valori di dose esposti nei grafici seguenti.

Il grafico di Figura 10 mostra la dose dovuta al solo ^{15}O prodotto da ogni singolo spill accelerato dal CNAO e disperso secondo i dati meteo CML 2018.

EDE totale (Sv) in un anno a 150 metri dovuto al solo O-15

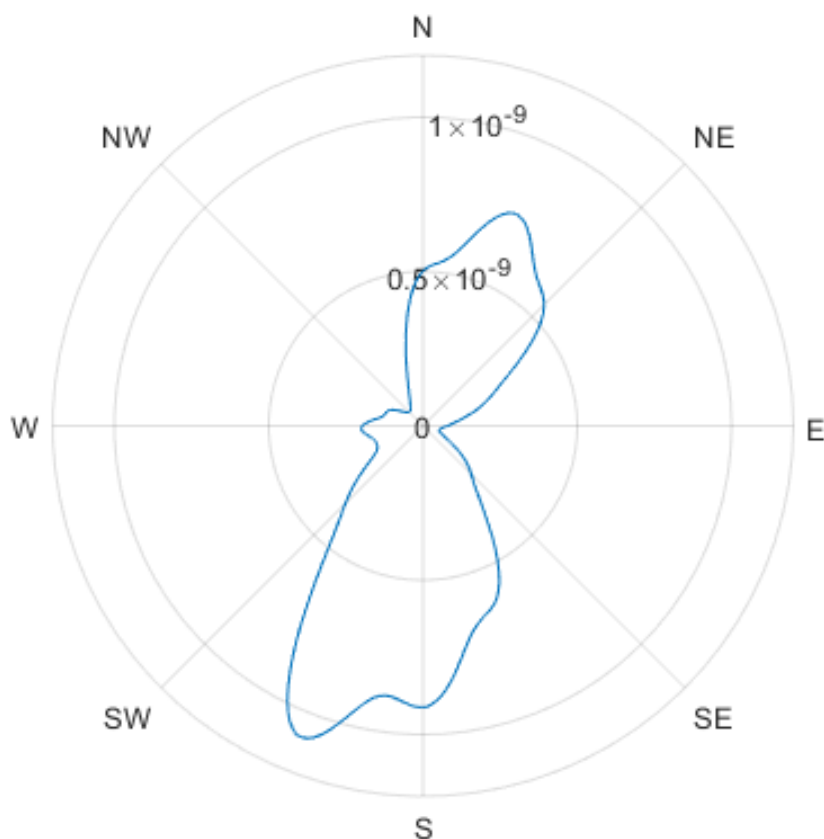


Figura 68 Dose dovuta al solo O-15 prodotto dai singoli spill accelerati al CNAO e rilasciati secondo le condizioni meteo della centralina CML nel 2018

Il grafico di Figura 11 mostra, invece la dose dovuta al solo ^{13}N prodotto dai singoli spill accelerati nel 2018.

EDE totale (Sv) in un anno a 150 metri dovuto al solo N-13

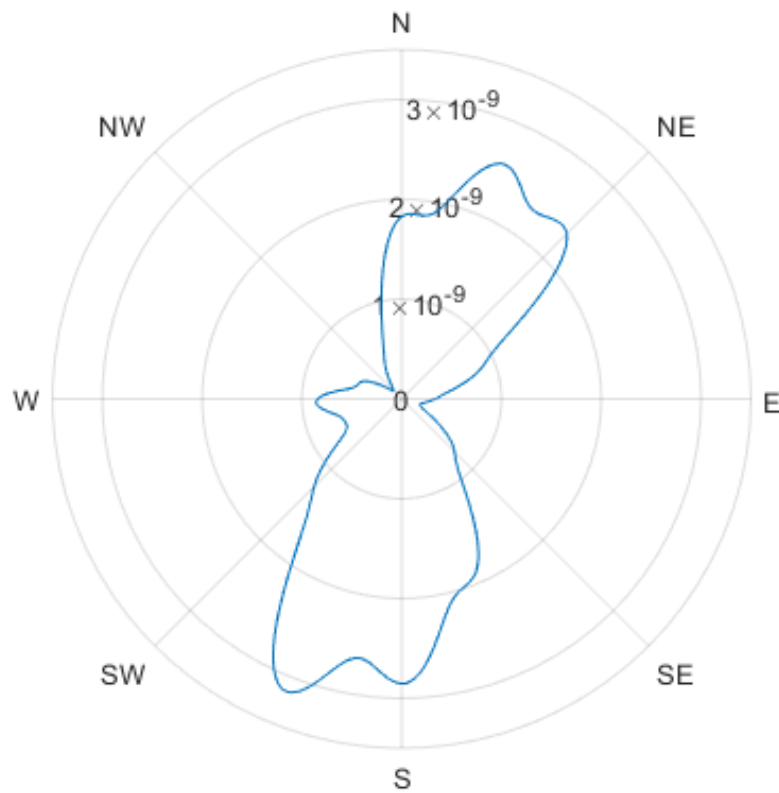


Figura 69 Dose dovuta al solo N-13 prodotto dai singoli spill accelerati al CNAO e rilasciati secondo le condizioni meteo della centralina CML nel 2018

Il grafico di Figura 12 mostra, invece la dose dovuta al solo ^{11}C prodotto dai singoli spill accelerati nel 2018.

EDE totale (Sv) in un anno a 150 metri dovuto al solo C-11

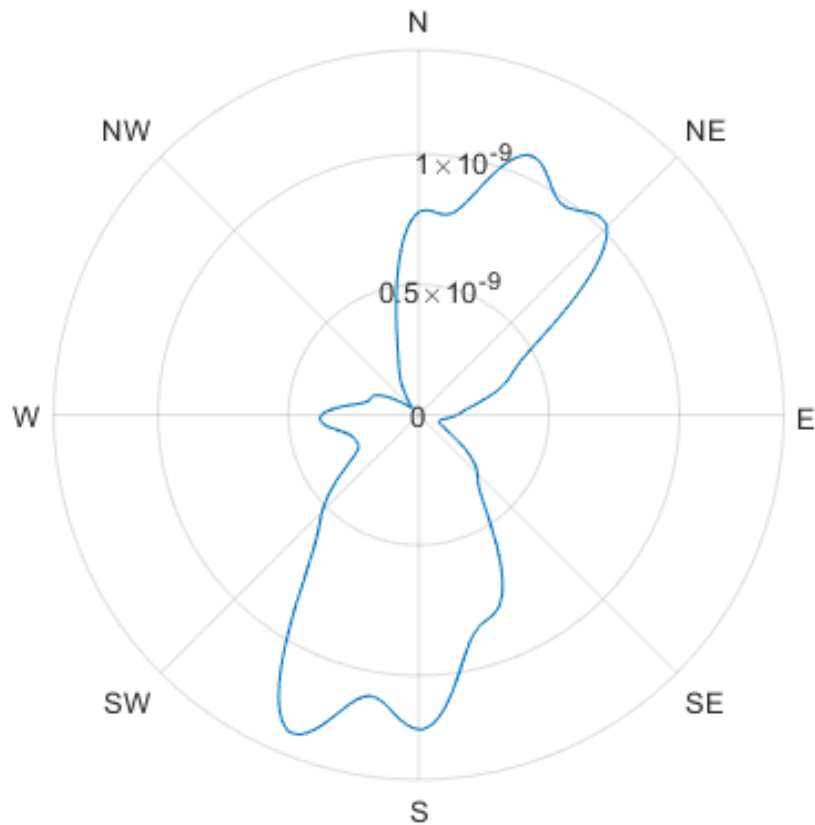


Figura 70 Dose dovuta al solo C-11 prodotto dai singoli spill accelerati al CNAO e rilasciati secondo le condizioni meteo della centralina CML nel 2018.

Dai grafici appena esposti si deduce che la dose principale a 150 m è dovuta al contributo di ^{13}N , questo perché ha un rate di formazione piuttosto alto, al contrario del ^{11}C , e non decade velocemente durante la diffusione come il ^{15}O , infatti il suo tempo di dimezzamento è circa 5 volte maggiore.

Una volta ottenuti i grafici precedenti si è stimata la dose annuale dovuta a tutti e tre i radionuclidi in esame. Questi valori sono stati esposti nel grafico di Figura 13.

EDE totale (Sv) in un anno a 150 metri dovuto al mix di radionuclidi

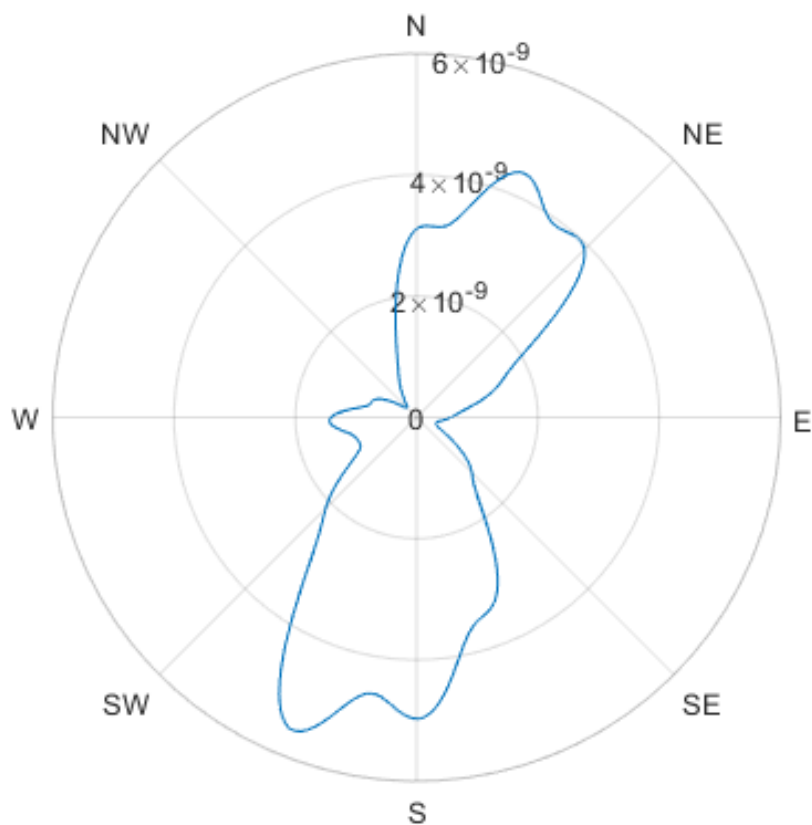


Figura 71 Dose dovuta ai tre radionuclidi in esame prodotti dai singoli spill accelerati al CNAO e rilasciati secondo le condizioni meteo della centralina CML nel 2018.

I valori di dose così ottenuti differiscono di un fattore di circa 1.5 rispetto a quelli ottenuti con gli spettri ed esposti in Figura 9, mentre sono ordini di grandezza minori di quelli ottenuti con rilascio costante di 1 MBq o senza considerare le differenti direzioni dei venti.

Capitolo 7

Di seguito si esporranno le conclusioni di questo lavoro di tesi e si proporranno possibili sviluppi futuri ad esso legati.

7.1 Conclusioni

In questo lavoro di tesi si è studiata l'attivazione dell'aria durante il funzionamento di una macchina acceleratrice per adroterapia e la dispersione dei radionuclidi così prodotti in atmosfera.

Si sono svolte simulazioni con il codice Monte Carlo FLUKA (Fassò A.) per comporre set di dati d'attivazioni per casi di irraggiamenti con protoni e ioni di ^4He , ^7Li , ^{12}C e ^{16}O . I radionuclidi prodotti esaminati sono stati ^{15}O , ^{13}N , ^{11}C a cui si aggiunge l'analisi del ^{41}Ar . Si sono simulate situazioni di fascio libero in aria e di fascio impattante su diversi target. I dati per fasci di protoni e ioni carbonio liberi in aria sono stati convalidati in parte da esperimenti.

Sempre attraverso simulazioni è emersa la necessità di usare geometrie più realistiche per avere stime di attività meno distanti dalla situazione reale. Si è visto che, nel caso specifico della geometria del sincrotrone del Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica (CNAO), l'uso di geometrie più simili alla situazione reale porta a una riduzione dell'attività prodotta fino a un fattore 3.

Si è quindi provveduto a produrre dei set di dati di attivazione specifici per la geometria del Centro. Questi dati sono stati usati per il calcolo dell'attivazione prodotta in un anno a partire dagli spettri in energia delle particelle accelerate dal sincrotrone. Usando queste ipotesi si ha una riduzione dell'attività prodotta annualmente di un fattore 20 rispetto all'ipotesi di rilasciare la massima attività consentita.

Infine, si sono studiati dei modelli per la dispersione in atmosfera dei contaminanti. Si sono presi in considerazione i dati meteo di tre centraline di rilevamento al fine di usarli nei modelli. Due centraline distano qualche centinaio di metri tra loro, mentre la terza si trova a circa due chilometri dalle precedenti. È emerso che per quanto riguarda la direzione del vento e le classi di stabilità non vi sono differenze sostanziali tra le tre centraline, si ha solo una piccola differenza nel rilevare la velocità del vento.

Per il calcolo delle dispersioni dell'attività e delle dosi ricevute dalle persone del pubblico si è inizialmente fatto uso del software HotSpot Health Physics Codes (Steven Homann, 2014) che usa il modello gaussiano di Pasquill per la dispersione dei contaminanti e il modello di nube semi-infinita per il calcolo delle dosi. Tuttavia, vista la mole di dati da elaborare, si è scelto di sviluppare un codice in MATLAB in grado di usare gli stessi modelli di HotSpot e di dare risultati del tutto analoghi, e con questo codice si sono calcolate le dosi rilasciate alle persone del pubblico.

Come prima ipotesi si è supposta un'attività rilasciata costante che rappresenta l'attività massima rilasciabile, si è poi passati al caso specifico del CNAO supponendo un'attività complessiva pari a quella calcolata con gli spettri delle particelle accelerate. In fine, si è calcolata l'attivazione di ogni singolo spill accelerato nella macchina. Si è associato a ciascuno di essi le condizioni meteo nel momento del loro rilascio in atmosfera, supponendo un rilascio immediato. Sono stati così elaborati i più di 250000 spill accelerati in un anno. Se si considera una stima iniziale della dose fatta nell'ipotesi di attività massima prodotta e dispersa sempre in un'unica direzione, con il metodo appena esposto si può avere una riduzione di dose fino a un fattore 500. Di questi, un fattore compreso tra 2 e 6 è dato solo dall'utilizzo di dati meteo, mentre il resto è dato dalle ipotesi meno conservative riguardo all'attivazione prodotta.

7.2 Sviluppi Futuri

Durante questo lavoro di tesi si sono fatte ipotesi riguardo a vari aspetti, perciò i suoi possibili sviluppi potrebbero essere finalizzati alla rimozione di tali ipotesi.

In particolare, si potrebbero creare geometrie e condizioni sempre più realistiche per il funzionamento dell'acceleratore, in modo da avere stime più attendibili riguardo l'attività prodotta. Sarebbe anche possibile una campagna di misure per determinare la reale localizzazione ed entità delle perdite di fascio in sala sincrotrone, sempre per ridurre le ipotesi conservative riguardo l'attivazione dell'aria.

Durante questo lavoro si sono compiuti esperimenti per convalidare le simulazioni dell'attivazione prodotta da un fascio di protoni e ioni carbonio in aria, si rendono necessari quindi anche esperimenti analoghi con le altre particelle in esame.

Per stimare la concentrazione dei radionuclidi dispersi in aria si sono utilizzati modelli approssimati che potrebbero essere sostituiti da modelli più accurati. Analogamente, si potrebbero usare modelli per il calcolo della dose per sommersione più accurati del modello di nube semi-infinita, che, come si è visto durante il lavoro, sovrastima, anche di un fattore 3, la dose data alle persone del pubblico. Questo studio è stato fatto conoscendo a posteriori i dati meteo e i dati degli spill accelerati nella macchina. Sarebbe tuttavia possibile conoscere l'attivazione e la dispersione dei radionuclidi in tempo reale integrando tale metodo nel sistema di controllo di un Centro e conoscendo le condizioni meteo al momento della produzione dei radionuclidi.

Appendice A

Di seguito è riportata la routine di FLUKA usata per simulare le perdite di fascio in sala sincrotrone e i fasci primari nelle sale trattamento e sperimentale

```
*$ CREATE SOURCE.FOR
*COPY SOURCE
*
*==== source =====*
*
  SUBROUTINE SOURCE ( NOMORE )

  INCLUDE ' (DBLPRC) '
  INCLUDE ' (DIMPAR) '
  INCLUDE ' (IOUNIT) '
*
*-----*
*
* Copyright (C) 1990-2010      by      Alfredo Ferrari & Paola Sala *
* All Rights Reserved.                                             *
*
*
* New source for FLUKA9x-FLUKA20xy:                                *
*
* Created on 07 January 1990  by      Alfredo Ferrari & Paola Sala *
*                                     Infn - Milan                    *
*
* Last change on 17-Oct-10   by      Alfredo Ferrari                *
*
* This is just an example of a possible user written source routine. *
* note that the beam card still has some meaning - in the scoring the *
* maximum momentum used in deciding the binning is taken from the    *
* beam momentum. Other beam card parameters are obsolete.           *
*
* Output variables:                                               *
*
*       Nomore = if > 0 the run will be terminated                *
*-----*
*
  INCLUDE ' (BEAMCM) '
  INCLUDE ' (FHEAVY) '
  INCLUDE ' (FLKSTK) '
  INCLUDE ' (IOIOCM) '
  INCLUDE ' (LTCLCM) '
  INCLUDE ' (PAPROP) '
  INCLUDE ' (SOURCM) '
  INCLUDE ' (SUMCOU) '
*
  LOGICAL LFIRST
*
  SAVE LFIRST
  DATA LFIRST / .TRUE. /
```

```

*=====*
*
*          BASIC VERSION
*
*=====*
      NOMORE = 0
* +-----*
* | First call initializations:
* | IF ( LFIRST ) THEN
* | *** The following 3 cards are mandatory ***
* |     TKESUM = ZERZER
* |     LFIRST = .FALSE.
* |     LUSSRC = .TRUE.
* | *** User initialization ***
* |     WRITE(LUNOUT,*) 'Routine 3sorgenti.f called'
* |     END IF
* |
* +-----*
* | Push one source particle to the stack. Note that you could as well
* | push many but this way we reserve a maximum amount of space in the
* | stack for the secondaries to be generated
* | Npflka is the stack counter: of course any time source is called it
* | must be =0
* |     NPFLKA = NPFLKA + 1
* | Wt is the weight of the particle
* |     WTFLK (NPFLKA) = ONEONE
* |     WEIPRI = WEIPRI + WTFLK (NPFLKA)
* | Particle type (1=proton.....). Ijbeam is the type set by the BEAM
* | card
* +-----*
* | (Radioactive) isotope:
* | IF ( IJBEAM .EQ. -2 .AND. LRDBEA ) THEN
* |     IARES = IPROA
* |     IZRES = IPROZ
* |     IISRES = IPROM
* |     CALL STISBM ( IARES, IZRES, IISRES )
* |     IJHION = IPROZ * 1000 + IPROA
* |     IJHION = IJHION * 100 + KXHEAV
* |     IONID = IJHION
* |     CALL DCDION ( IONID )
* |     CALL SETION ( IONID )
* |
* +-----*
* | Heavy ion:
* | ELSE IF ( IJBEAM .EQ. -2 ) THEN
* |     IJHION = IPROZ * 1000 + IPROA
* |     IJHION = IJHION * 100 + KXHEAV
* |     IONID = IJHION
* |     CALL DCDION ( IONID )
* |     CALL SETION ( IONID )
* |     ILOFLK (NPFLKA) = IJHION
* | Flag this is prompt radiation
* |     LRADDC (NPFLKA) = .FALSE.
* | Group number for "low" energy neutrons, set to 0 anyway
* |     IGROUP (NPFLKA) = 0
* |

```

```

* +-----*
* | Normal hadron:
*   ELSE
*     IONID = IJBEAM
*     ILOFLK (NPFLKA) = IJBEAM
* | Flag this is prompt radiation
*   LRADD (NPFLKA) = .FALSE.
* | Group number for "low" energy neutrons, set to 0 anyway
*   IGROUP (NPFLKA) = 0
*   END IF
* |
* +-----*
* From this point .....
* Particle generation (1 for primaries)
*   LOFLK (NPFLKA) = 1
* User dependent flag:
*   LOUSE (NPFLKA) = 0
* No channeling:
*   LCHFLK (NPFLKA) = .FALSE.
*   DCHFLK (NPFLKA) = ZERZER
* User dependent spare variables:
*   DO 100 ISPR = 1, MKBMX1
*     SPAREK (ISPR,NPFLKA) = ZERZER
100 CONTINUE
* User dependent spare flags:
*   DO 200 ISPR = 1, MKBMX2
*     ISPARK (ISPR,NPFLKA) = 0
200 CONTINUE
* Save the track number of the stack particle:
*   WRITE(99,*) RNNUM
*   ISPARK (MKBMX2,NPFLKA) = NPFLKA
*   NPARMA = NPARMA + 1
*   NUNPAR (NPFLKA) = NPARMA
*   NEVENT (NPFLKA) = 0
*   DFNEAR (NPFLKA) = +ZERZER
* ... to this point: don't change anything
* Particle age (s)
*   AGESTK (NPFLKA) = +ZERZER
*   AKNSHR (NPFLKA) = -TWOTWO
* Kinetic energy of the particle (GeV)
*   TKEFLK (NPFLKA) = SQRT ( PBEAM**2 + AM (IONID)**2 ) - AM (IONID)
* Particle momentum
*   PMOFLK (NPFLKA) = PBEAM
*   PMOFLK (NPFLKA) = SQRT ( TKEFLK (NPFLKA) * ( TKEFLK (NPFLKA)
* & + TWOTWO * AM (IONID) ) )
* Cosines (tx,ty,tz)
*   RNNUM = FLRNDM(RNNUM)
*   call SFECFE(SINT,COST)
* *****
*   WRITE(89,*) RNNUM
*   WRITE(88,*) TXFLK (NPFLKA), TYFLK (NPFLKA), TZFLK (NPFLKA)
*   WRITE(87,*) XFLK (NPFLKA), YFLK (NPFLKA), ZFLK (NPFLKA)
* *****
* perdita circonferenza sincro
* IF(RNNUM.GE.0.0D+00.AND.RNNUM.LT.4.7D-02) THEN
C SINT COST generano seni e coseni uniformemente distribuiti

```

```

TXFLK (NPFLKA) = SINT
TYFLK (NPFLKA) = 0.0D+00
TZFLK (NPFLKA) = -COST
* WRITE(99,*) '1' , RNNUM
* perdita dump chopper HEBT
ELSE IF(RNNUM.GE.4.7D-02.AND.RNNUM.LT.0.141D+00) THEN
TXFLK (NPFLKA) = -0.38D+00
TYFLK (NPFLKA) = 0.0D+00
TZFLK (NPFLKA) = +0.92D+00
* WRITE(99,*) '2' , RNNUM
* perdita setto magnetico
ELSE IF(RNNUM.GE.0.141D+00.AND.RNNUM.LT.0.188D+00) THEN
TXFLK (NPFLKA) = -0.707D+00
TYFLK (NPFLKA) = 0.0D+00
TZFLK (NPFLKA) = +0.707D+00
* WRITE(99,*) '3' , RNNUM
* perdita setto elettrostatitco
ELSE IF (RNNUM.GE.0.188D+00.AND.RNNUM.LT.0.235D+00) THEN
TXFLK (NPFLKA) = -1.0D+00
TYFLK (NPFLKA) = 0.0D+00
TZFLK (NPFLKA) = 0.0D+00
* WRITE(99,*) '4' , RNNUM
* perdita dump orizzontale
ELSE IF (RNNUM.GE.0.235D+00.AND.RNNUM.LT.0.518D+00) THEN
TXFLK (NPFLKA) = -0.707D+00
TYFLK (NPFLKA) = 0.0D+00
TZFLK (NPFLKA) = -0.707D+00
* WRITE(99,*) '5' , RNNUM
* perdita dump verticale
ELSE IF (RNNUM.GE.0.518D+00.AND.RNNUM.LT.0.546D+00) THEN
TXFLK (NPFLKA) = 0.92D+00
TYFLK (NPFLKA) = 0.0D+00
TZFLK (NPFLKA) = 0.38D+00
* WRITE(99,*) '6' , RNNUM
* perdita isocentro xpr
ELSE IF (RNNUM.GE.0.546D+00.AND.RNNUM.LT.0.838D+00) THEN
TXFLK (NPFLKA) = -0.92D+00
TYFLK (NPFLKA) = 0.0D+00
TZFLK (NPFLKA) = 0.38D+00
* WRITE(99,*) '7' , RNNUM
* perdita isocentro ST1
ELSE IF (RNNUM.GE.0.838D+00.AND.RNNUM.LT.0.892D+00) THEN
TXFLK (NPFLKA) = 0.38D+00
TYFLK (NPFLKA) = 0.0D+00
TZFLK (NPFLKA) = 0.92D+00
* WRITE(99,*) '8' , RNNUM
* perdita isocentro ST2
ELSE IF (RNNUM.GE.0.892D+00.AND.RNNUM.LT.0.946D+00) THEN
TXFLK (NPFLKA) = 0.0D+00
TYFLK (NPFLKA) = 0.0D+00
TZFLK (NPFLKA) = 1.0D+00
* WRITE(99,*) '9' , RNNUM
* perdita isocentro ST3
ELSE IF (RNNUM.GT.0.946D+00.AND.RNNUM.LT.1.0D+00) THEN
TXFLK (NPFLKA) = -0.38D+00
TYFLK (NPFLKA) = 0.0D+00

```

```

      TZFLK (NPFLKA) = 0.92D+00
*      WRITE(99,*) '10' , RNNUM
      END IF
* Polarization cosines:
      TXPOL (NPFLKA) = -TWOTWO
      TYPOL (NPFLKA) = +ZERZER
      TZPOL (NPFLKA) = +ZERZER
* Particle coordinates
* perdita sincro
      IF(RNNUM.GE.0.0.AND.RNNUM.LT.0.47D-01) THEN
      XFLK (NPFLKA) = 510+(1210*COST)
      YFLK (NPFLKA) = -200D+00
      ZFLK (NPFLKA) = -1540+(1210*SINT)
*      WRITE(87,*) XFLK (NPFLKA), YFLK (NPFLKA), ZFLK (NPFLKA)
* perdita dump chopper HEBT
      ELSE IF(RNNUM.GE.0.47D-01.AND.RNNUM.LT.0.141D+00) THEN
      XFLK (NPFLKA) = -1.295D+03
      YFLK (NPFLKA) = -2.0D+02
      ZFLK (NPFLKA) = -1.491D+03
* perdita setto magnetico
      ELSE IF(RNNUM.GE.0.141D+00.AND.RNNUM.LT.0.188D+00) THEN
      XFLK (NPFLKA) = -1.93D+02
      YFLK (NPFLKA) = -2.00D+02
      ZFLK (NPFLKA) = -2.598D+03
* perdita setto elettrostatico
      ELSE IF (RNNUM.GE.0.188D+00.AND.RNNUM.LT.0.235D+00) THEN
      XFLK (NPFLKA) = 5.51D+02
      YFLK (NPFLKA) = -2.00D+02
      ZFLK (NPFLKA) = -2.80D+03
** perdita dump orizzontale
      ELSE IF (RNNUM.GE.0.235D+00.AND.RNNUM.LT.0.518D+00) THEN
      XFLK (NPFLKA) = 1.298D+03
      YFLK (NPFLKA) = -2.00D+02
      ZFLK (NPFLKA) = -2.510D+03
* perdita dump verticale
      ELSE IF (RNNUM.GE.0.518D+00.AND.RNNUM.LT.0.546D+00) THEN
      XFLK (NPFLKA) = 2.0D+00
      YFLK (NPFLKA) = -2.0D+02
      ZFLK (NPFLKA) = -4.03D+02
* perdita isocentro xpr
      ELSE IF (RNNUM.GE.0.546D+00.AND.RNNUM.LT.0.838D+00) THEN
      XFLK (NPFLKA) = -2.53D+03
      YFLK (NPFLKA) = -200D+00
      ZFLK (NPFLKA) = -1.34D+03
* perdita isocentro ST1
      ELSE IF (RNNUM.GE.0.838D+00.AND.RNNUM.LT.0.892D+00) THEN
      XFLK (NPFLKA) = -4.53D+02
      YFLK (NPFLKA) = -2D+02
      ZFLK (NPFLKA) = 1.354D+03
* perdita isocentro ST2
      ELSE IF (RNNUM.GE.0.892D+00.AND.RNNUM.LT.0.946D+00) THEN
      XFLK (NPFLKA) = -1.3D+03
      YFLK (NPFLKA) = -2.0D+02
      ZFLK (NPFLKA) = 1.290D+03
* perdita isocentro ST3
      ELSE IF (RNNUM.GE.0.946D+00.AND.RNNUM.LT.1.0D+00) THEN

```

```

XFLK (NPFLKA) = -2.137D+03
YFLK (NPFLKA) = -2.0D+02
ZFLK (NPFLKA) = 1.357D+03
END IF
* *****
* WRITE(87,*) RNNUM
* WRITE(88,*) TXFLK (NPFLKA), TYFLK (NPFLKA), TZFLK (NPFLKA)
* WRITE(89,*) XFLK (NPFLKA), YFLK (NPFLKA), ZFLK (NPFLKA)
* CLOSE (30)
* *****
* Calculate the total kinetic energy of the primaries: don't change
IF ( ILOFLK (NPFLKA) .EQ. -2 .OR. ILOFLK (NPFLKA) .GT. 100000 )
& THEN
TKESUM = TKESUM + TKEFLK (NPFLKA) * WTFLK (NPFLKA)
ELSE IF ( ILOFLK (NPFLKA) .NE. 0 ) THEN
TKESUM = TKESUM + ( TKEFLK (NPFLKA) + AMDISC (ILOFLK(NPFLKA)) )
& * WTFLK (NPFLKA)
ELSE
TKESUM = TKESUM + TKEFLK (NPFLKA) * WTFLK (NPFLKA)
END IF
RADDLY (NPFLKA) = ZERZER
* Here we ask for the region number of the hitting point.
* NREG (NPFLKA) = ...
* The following line makes the starting region search much more
* robust if particles are starting very close to a boundary:
CALL GEOCRS ( TXFLK (NPFLKA), TYFLK (NPFLKA), TZFLK (NPFLKA) )
CALL GEOREG ( XFLK (NPFLKA), YFLK (NPFLKA), ZFLK (NPFLKA),
& NRGFLK(NPFLKA), IDISC )
* Do not change these cards:
CALL GEOHSM ( NHSPNT (NPFLKA), 1, -11, MLATTC )
NLATTC (NPFLKA) = MLATTC
CMPATH (NPFLKA) = ZERZER
CALL SOEVSU
RETURN
*=== End of subroutine Source =====*
END

```

Appendice B

Viene riportata di seguito la routine di FLUKA per la sorgente cilindrica di raggi gamma a 511keV. Questa routine è stata usata come sorgente per determinare l'efficienza del rivelatore al germanio. Le dimensioni geometriche sono quelle dei tubi usati nella fase sperimentale.

```
*$ CREATE SOURCE.FOR
*COPY SOURCE
*
*=== source =====*
*
  SUBROUTINE SOURCE ( NOMORE )

  INCLUDE ' (DBLPRC) '
  INCLUDE ' (DIMPAR) '
  INCLUDE ' (IOUNIT) '
*
*-----*
*
* Copyright (C) 1990-2010      by      Alfredo Ferrari & Paola Sala *
* All Rights Reserved.      *
*
*
* New source for FLUKA9x-FLUKA20xy: *
*
* Created on 07 January 1990   by      Alfredo Ferrari & Paola Sala *
*                               Infn - Milan *
*
* Last change on 17-Oct-10    by      Alfredo Ferrari *
*
* This is just an example of a possible user written source routine. *
* note that the beam card still has some meaning - in the scoring the *
* maximum momentum used in deciding the binning is taken from the *
* beam momentum. Other beam card parameters are obsolete. *
*
* Output variables: *
*
*       Nomore = if > 0 the run will be terminated *
*
*-----*
*
  INCLUDE ' (BEAMCM) '
  INCLUDE ' (FHEAVY) '
  INCLUDE ' (FLKSTK) '
  INCLUDE ' (IOIOCM) '
  INCLUDE ' (LTCLCM) '
  INCLUDE ' (PAPROP) '
  INCLUDE ' (SOURCM) '
  INCLUDE ' (SUMCOU) '
*
  LOGICAL LFIRST
*
```

```

SAVE LFIRST
DATA LFIRST / .TRUE. /

```

```

*=====
*
*          BASIC VERSION
*
*=====
      NOMORE = 0
* +-----*
* | First call initializations:
* |   IF ( LFIRST ) THEN
* |   *** The following 3 cards are mandatory ***
* |       TKESUM = ZERZER
* |       LFIRST = .FALSE.
* |       LUSSRC = .TRUE.
* |   *** User initialization ***
* |       WRITE(LUNOUT,*) 'Routine 3sorgenti.f called'
* |       END IF
* |
* +-----*
* Push one source particle to the stack. Note that you could as well
* push many but this way we reserve a maximum amount of space in the
* stack for the secondaries to be generated
* Npflka is the stack counter: of course any time source is called it
* must be =0
*       NPFLKA = NPFLKA + 1
* Wt is the weight of the particle
*       WTFLK (NPFLKA) = ONEONE
*       WEIPRI = WEIPRI + WTFLK (NPFLKA)
* Particle type (1=proton.....). Ijbeam is the type set by the BEAM
* card
* +-----*
* | (Radioactive) isotope:
* |   IF ( IJBEAM .EQ. -2 .AND. LRDBEA ) THEN
* |       IARES = IPROA
* |       IZRES = IPROZ
* |       IISRES = IPROM
* |       CALL STISBM ( IARES, IZRES, IISRES )
* |       IJHION = IPROZ * 1000 + IPROA
* |       IJHION = IJHION * 100 + KXHEAV
* |       IONID = IJHION
* |       CALL DCDION ( IONID )
* |       CALL SETION ( IONID )
* |
* +-----*
* | Heavy ion:
* |   ELSE IF ( IJBEAM .EQ. -2 ) THEN
* |       IJHION = IPROZ * 1000 + IPROA
* |       IJHION = IJHION * 100 + KXHEAV
* |       IONID = IJHION
* |       CALL DCDION ( IONID )
* |       CALL SETION ( IONID )
* |       ILOFLK (NPFLKA) = IJHION
* | Flag this is prompt radiation
* |       LRADDC (NPFLKA) = .FALSE.

```

```

* | Group number for "low" energy neutrons, set to 0 anyway
  IGROUP (NPFLKA) = 0
* |
* +-----*
* | Normal hadron:
  ELSE
    IONID = IJBEAM
    ILOFLK (NPFLKA) = IJBEAM
* | Flag this is prompt radiation
  LRADDC (NPFLKA) = .FALSE.
* | Group number for "low" energy neutrons, set to 0 anyway
  IGROUP (NPFLKA) = 0
  END IF
* |
* +-----*
* From this point .....
* Particle generation (1 for primaries)
  LOFLK (NPFLKA) = 1
* User dependent flag:
  LOUSE (NPFLKA) = 0
* No channeling:
  LCHFLK (NPFLKA) = .FALSE.
  DCHFLK (NPFLKA) = ZERZER
* User dependent spare variables:
  DO 100 ISPR = 1, MKBMX1
    SPAREK (ISPR,NPFLKA) = ZERZER
100 CONTINUE
* User dependent spare flags:
  DO 200 ISPR = 1, MKBMX2
    ISPARK (ISPR,NPFLKA) = 0
200 CONTINUE
* Save the track number of the stack particle:
* WRITE(99,*) RNNUM
  ISPARK (MKBMX2,NPFLKA) = NPFLKA
  NPARMA = NPARMA + 1
  NUNPAR (NPFLKA) = NPARMA
  NEVENT (NPFLKA) = 0
  DFNEAR (NPFLKA) = +ZERZER
* ... to this point: don't change anything
* Particle age (s)
  AGESTK (NPFLKA) = +ZERZER
  AKNSHR (NPFLKA) = -TWOTWO
* Kinetic energy of the particle (GeV)
  TKEFLK (NPFLKA) = SQRT ( PBEAM**2 + AM (IONID)**2 ) - AM (IONID)
* Particle momentum
  PMOFLK (NPFLKA) = PBEAM
* PMOFLK (NPFLKA) = SQRT ( TKEFLK (NPFLKA) * ( TKEFLK (NPFLKA)
* & + TWOTWO * AM (IONID) ) )
* Cosines (tx,ty,tz)
  call RACO (TXX,TYY,TZZ)
  call SFECFE (SINT,COST)
* *****
* WRITE(89,*) RNNUM
* WRITE(88,*) TXFLK (NPFLKA), TYFLK (NPFLKA), TZFLK (NPFLKA)
* WRITE(87,*) XFLK (NPFLKA), YFLK (NPFLKA), ZFLK (NPFLKA)
* *****

```

```

*
C   SINT COST generano seni e coseni uniformemente distribuiti

      TXFLK (NPFLKA) = TXX
      TYFLK (NPFLKA) = TYY
      TZFLK (NPFLKA) = TZZ
*
      WRITE(99,*) '1' , TXX, TYY, TZZ
*
Polarization cosines:
      TXPOL (NPFLKA) = -TWOTWO
      TYPOL (NPFLKA) = +ZERZER
      TZPOL (NPFLKA) = +ZERZER
*
Particle coordinate

      ZFLK (NPFLKA) = 5.8D+00+ FLRNDM(XDUMMY)*1.55D+01
      IF (ZFLK(NPFLKA) .GE. 5.8D+00 .AND. ZFLK(NPFLKA)
&      .LT. 6.3D+00) THEN
90   RNNUMX = FLRNDM(RNNUM)
      XFLK (NPFLKA) = (RNNUMX*(16D+00))-8D+00
      RNNUMY = FLRNDM(RNNUM)
      YFLK (NPFLKA) = (RNNUMY*(16D+00))-8D+00
      Q= SQRT ((XFLK (NPFLKA)**2)+(YFLK (NPFLKA)**2))
      IF (Q .GT. 8D+00) THEN
      GO TO 90
      END IF
      WRITE(97,*) XFLK (NPFLKA), YFLK (NPFLKA), ZFLK (NPFLKA), RNNUM
      ELSE IF (ZFLK(NPFLKA) .GE. 2.08D+01 .AND. ZFLK(NPFLKA)
&      .LT. 21.3D+00) THEN
80   RNNUM = FLRNDM(RNNUM)
      RNNUMX = FLRNDM(RNNUM)
      XFLK (NPFLKA) = (RNNUMX*(16D+00))-8D+00
      RNNUMY = FLRNDM(RNNUM)
      YFLK (NPFLKA) = (RNNUMY*(16D+00))-8D+00
      Q= SQRT ((XFLK (NPFLKA)**2)+(YFLK (NPFLKA)**2))
      IF (Q .GT. 8D+00) THEN
      GO TO 80
      END IF
      ELSE
      XFLK (NPFLKA) = (+7.5D+00 + RNNUM*0.5)*COST
      YFLK (NPFLKA) = (+7.5D+00 + RNNUM*0.5)*SINT
      END IF

*
*****
*
      WRITE(87,*) RNNUM
*
      WRITE(88,*) TXFLK (NPFLKA), TYFLK (NPFLKA), TZFLK (NPFLKA)
*
      WRITE(89,*) XFLK (NPFLKA), YFLK (NPFLKA), ZFLK (NPFLKA)
*
      CLOSE (30)
*
*****
*
Calculate the total kinetic energy of the primaries: don't change
      IF ( ILOFLK (NPFLKA) .EQ. -2 .OR. ILOFLK (NPFLKA) .GT. 100000 )
&      THEN
      TKESUM = TKESUM + TKEFLK (NPFLKA) * WTFLK (NPFLKA)
      ELSE IF ( ILOFLK (NPFLKA) .NE. 0 ) THEN
      TKESUM = TKESUM + ( TKEFLK (NPFLKA) + AMDISC (ILOFLK(NPFLKA)))
&      * WTFLK (NPFLKA)
      ELSE

```

```

        TKESUM = TKESUM + TKEFLK (NPFLKA) * WTFLK (NPFLKA)
    END IF
    RADDLY (NPFLKA) = ZERZER
* Here we ask for the region number of the hitting point.
*   NREG (NPFLKA) = ...
* The following line makes the starting region search much more
* robust if particles are starting very close to a boundary:
    CALL GEOCRS ( TXFLK (NPFLKA), TYFLK (NPFLKA), TZFLK (NPFLKA) )
    CALL GEOREG ( XFLK  (NPFLKA), YFLK  (NPFLKA), ZFLK  (NPFLKA),
&                NRGFLK(NPFLKA), IDISC )
* Do not change these cards:
    CALL GEOHSM ( NHSPNT (NPFLKA), 1, -11, MLATTC )
    NLATTC (NPFLKA) = MLATTC
    CMPATH (NPFLKA) = ZERZER
    CALL SOEVSU
    RETURN
*=== End of subroutine Source =====*
    END

```

Appendice C

Di seguito vengono riportate le funzioni di MATLAB usate per il calcolo dell'attività prodotta e per la concentrazione dei contaminanti in aria, nel primo caso si tratterà della funzione attivita.m e nel secondo la funzione pasquill.m.

```
function [QO15,QN13,QC11]=attivita(par,tcool,Ene,sala,tipo)

% Qi= attività del radioisotopo i (Bq)
% par= particelle (p)
% tcool= tempo cooling (s)
% Ene= energia (MeV/u)
% sala= tipo di sala ('s'---> sincrotrone; 't'--->trattamento; 'x'--->
% sperimentale)
% tipo= tipo di particella ('p'---> protoni; 'c'---> carbonio)
% Attività normalizzata sulla corrente
% Colonne: 1-->O15 2-->N13 3-->C11
TmezziC11=20.39*60;          lambdaC11=log(2)/TmezziC11;
TmezziN13=9.965*60;         lambdaN13=log(2)/TmezziN13;
TmezziO15=122.24;          lambdaO15=log(2)/TmezziO15;

Q=zeros(1,3);

if strcmp (tipo,'c')

qsincro=[8.10E-8 4.72E-8 6.79E-9; %energia= 150MeV/u
          2.92E-7 1.35E-7 1.98E-8; %energia= 200MeV/u
          6.47E-7 2.21E-7 3.96E-8; %energia= 250Mev/u
          1.03E-6 4.12E-7 6.79E-8; %energia= 300Mev/u
          1.81E-6 6.23E-7 1.14E-7; %energia= 350MeV/u
          1.76E-6 9.37E-7 1.75E-7]; %energia= 400Mev/u

qtrat= [6.03E-7 2.27E-7 8.66E-8; %energia= 150MeV/u
        5.86E-7 3.21E-7 9.21E-8; %energia= 200MeV/u
        1.11E-6 4.48E-7 1.10E-7; %energia= 250Mev/u
        1.66E-6 7.43E-7 1.93E-7; %energia= 300Mev/u
        2.64E-6 1.08E-6 2.79E-7; %energia= 350MeV/u
        3.58E-6 1.43E-6 4.11E-7];%energia= 400Mev/u

qxpr= [7.91E-8 3.47E-8 1.01E-8; %energia= 150MeV/u
        2.04E-7 7.71E-8 1.27E-8; %energia= 200MeV/u
        3.65E-7 1.37E-7 2.26E-8; %energia= 250Mev/u
        4.37E-7 2.00E-7 4.07E-8; %energia= 300Mev/u
        8.62E-7 3.47E-7 9.71E-8; %energia= 350MeV/u
        1.28E-6 4.86E-7 1.35E-7];%energia= 400Mev/u

if strcmp(sala,'s')

    if Ene<=150
        DEne=150;

        for i=1:3
            Q(1,i)= ((qsincro(1,i)/DEne)*Ene)* par;
```

```

end

else if Ene>150 && Ene<=200
    DEne=50;
    for i=1:3
        Q(1,i)=(qsincro(1,i)+(((qsincro(2,i)-
qsincro(1,i))/DEne)*Ene))*par;
    end

    else if Ene>200 && Ene<=250

        DEne=50;
        for i=1:3
            Q(1,i)=(qsincro(2,i)+(((qsincro(3,i)-
qsincro(2,i))/DEne)*Ene))*par;
        end

        else if Ene>250 && Ene<=300

            DEne=50;
            for i=1:3
                Q(1,i)=(qsincro(3,i)+(((qsincro(4,i)-
qsincro(3,i))/DEne)*Ene))*par;
            end

            else if Ene>300 && Ene<=350

                DEne=50;
                for i=1:3
                    Q(1,i)=(qsincro(4,i)+(((qsincro(5,i)-
qsincro(4,i))/DEne)*Ene))*par;
                end

                else if Ene>350 && Ene<=400

                    DEne=50;
                    for i=1:3
                        Q(1,i)=(qsincro(5,i)+(((qsincro(6,i)-
qsincro(5,i))/DEne)*Ene))*par;
                    end

                    else if Ene>400
                        DEne=400;
                        for i=1:3
                            Q(1,i)=(qsincro(6,i)+((qsincro(6,i)/DEne)*Ene))*
par;
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end

end

else if strcmp(sala,'t')

```

```

if Ene<=150
    DEne=150;

    for i=1:3
        Q(1,i)= ((qtrrat(1,i)/DEne)*Ene)* par;
    end

else if Ene>150 && Ene<=200
    DEne=50;
    for i=1:3
        Q(1,i)=(qtrrat(1,i)+(((qtrrat(2,i)-qtrrat(1,i))/DEne)*Ene))*par;
    end

else if Ene>200 && Ene<=250

    DEne=50;
    for i=1:3
        Q(1,i)=(qtrrat(2,i)+(((qtrrat(3,i)-qtrrat(2,i))/DEne)*Ene))*par;
    end

    else if Ene>250 && Ene<=300

    DEne=50;
    for i=1:3
        Q(1,i)=(qtrrat(3,i)+(((qtrrat(4,i)-qtrrat(3,i))/DEne)*Ene))*par;
    end

    else if Ene>300 && Ene<=350

    DEne=50;
    for i=1:3
        Q(1,i)=(qtrrat(4,i)+(((qtrrat(5,i)-qtrrat(4,i))/DEne)*Ene))*par;
    end

        else if Ene>350 && Ene<=400

            DEne=50;
            for i=1:3
                Q(1,i)=(qtrrat(5,i)+(((qtrrat(6,i)-qtrrat(5,i))/DEne)*Ene))*par;
            end

                else if Ene>400
                    DEne=400;
                    for i=1:3
                        Q(1,i)=(qtrrat(6,i)+((qtrrat(6,i)/DEne)*Ene))*
par;
                    end
                end
            end
        end
    end
end
end
else if strcmp(sala,'x')

```



```

end
else if strcmp(tipo,'p')

    qtrat= [1.27E-06 3.28E-07 1.31E-07; %energia= 50MeV/u
            4.13E-07 1.45E-07 4.54E-08; %energia= 100MeV/u
            3.74E-07 1.47E-07 3.71E-08; %energia= 150Mev/u
            4.44E-07 1.51E-07 3.79E-08; %energia= 200Mev/u
            4.39E-07 1.66E-07 3.65E-08;];%energia= 250Mev/u

    qxpr=   [3.97E-08 9.69E-09 3.59E-09; %energia= 50MeV/u
            3.37E-08 8.10E-09 3.96E-09; %energia= 100MeV/u
            3.23E-08 1.50E-08 3.11E-09; %energia= 150Mev/u
            2.81E-08 2.07E-08 3.40E-09; %energia= 200Mev/u
            4.87E-08 2.23E-08 5.47E-09;];%energia= 250Mev/u

    qsincro=[1.61E-10 2.89E-10 3.23E-11; %energia= 50MeV/u
            2.50E-09 2.99E-09 1.57E-10; %energia= 100MeV/u
            1.10E-08 4.27E-09 5.55E-10; %energia= 150Mev/u
            2.53E-08 1.89E-08 1.98E-09; %energia= 200Mev/u
            3.93E-08 3.89E-08 4.72E-09;];%energia=250MeV/u

    if strcmp(sala,'s')

        if Ene<=50
            DEne=50;

            for i=1:3
                Q(1,i)= ((qsincro(1,i)/DEne)*Ene)* par;
            end

        else if Ene>50 && Ene<=100
            DEne=50;
            for i=1:3
                Q(1,i)=(qsincro(1,i)+(((qsincro(2,i)-
qsincro(1,i))/DEne)*Ene))*par;
            end

        else if Ene>100 && Ene<=150

            DEne=50;
            for i=1:3
                Q(1,i)=(qsincro(2,i)+(((qsincro(3,i)-
qsincro(2,i))/DEne)*Ene))*par;
            end

        else if Ene>150 && Ene<=200
            DEne=50;
            for i=1:3
                Q(1,i)=(qsincro(3,i)+(((qsincro(4,i)-
qsincro(3,i))/DEne)*Ene))*par;
            end

        else if Ene>200 && Ene<=250

```

```

        DEne=50;
        for i=1:3
            Q(1,i)=(qsincro(4,i)+(((qsincro(5,i)-
qsincro(4,i))/DEne)*Ene))*par;
        end

        else if Ene>250
            DEne=250;
            for i=1:3
                Q(1,i)=(qsincro(5,i)+((qsincro(5,i)/DEne)*Ene))*
par;
            end
        end
    end
end
end
end
end

    end
end

else if strcmp(sala,'t')

if Ene<=50
    DEne=50;

    for i=1:3
        Q(1,i)= ((qtrrat(1,i)/DEne)*Ene)* par;
    end

else if Ene>50 && Ene<=100
    DEne=50;
    for i=1:3
        Q(1,i)=(qtrrat(1,i)+(((qtrrat(2,i)-qtrrat(1,i))/DEne)*Ene))*par;
    end

    else if Ene>100 && Ene<=150

        DEne=50;
        for i=1:3
            Q(1,i)=(qtrrat(2,i)+(((qtrrat(3,i)-qtrrat(2,i))/DEne)*Ene))*par;
        end

        else if Ene>150 && Ene<=200

            DEne=50;
            for i=1:3
                Q(1,i)=(qtrrat(3,i)+(((qtrrat(4,i)-qtrrat(3,i))/DEne)*Ene))*par;
            end

            else if Ene>200 && Ene<=250

                DEne=50;
                for i=1:3
                    Q(1,i)=(qtrrat(4,i)+(((qtrrat(5,i)-qtrrat(4,i))/DEne)*Ene))*par;
                end

                else if Ene>250

```

```

                                DEne=250;
                                for i=1:3
                                    Q(1,i)=(qtrat(5,i)+((qtrat(5,i)/DEne)*Ene))*
par;
                                end
                                end
                                end
                                end
                                end
                                end
                                end
                                end

                                else if strcmp(sala,'x')

if Ene<=50
    DEne=50;

    for i=1:3
        Q(1,i) = ((qxpr(1,i)/DEne)*Ene)* par;
    end

else if Ene>50 && Ene<=100
    DEne=50;
    for i=1:3
        Q(1,i)=(qxpr(1,i)+(((qxpr(2,i)-qxpr(1,i))/DEne)*Ene))*par;
    end

else if Ene>100 && Ene<=150

    DEne=50;
    for i=1:3
        Q(1,i)=(qxpr(2,i)+(((qxpr(3,i)-qxpr(2,i))/DEne)*Ene))*par;
    end

    else if Ene>150 && Ene<=200

    DEne=50;
    for i=1:3
        Q(1,i)=(qxpr(3,i)+(((qxpr(4,i)-qxpr(3,i))/DEne)*Ene))*par;
    end

    else if Ene>200 && Ene<=250

    DEne=50;
    for i=1:3
        Q(1,i)=(qxpr(4,i)+(((qxpr(5,i)-qxpr(4,i))/DEne)*Ene))*par;
    end

        else if Ene>250
            DEne=250;
            for i=1:3
                Q(1,i)=(qxpr(5,i)+((qxpr(5,i)/DEne)*Ene))* par;
            end
        end
    end
end

```


$$C = \left(\frac{Q}{2\pi v \sigma_y \sigma_z} \right) \cdot \left(\exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right) \right) \cdot \left(\exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right) \right) \cdot \exp\left(-1 \cdot \left(\frac{\lambda x}{v}\right)\right);$$

Bibliografia

- A. Ferrari, M. F. (2011). Secondary particle yields from 400 MeV/u carbon ion and 250 MeV proton beams. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 1474-1481.
- A. Ferrari, M. F. (2011). Secondary particle yields from 400 MeV/u carbon ion and 250 MeV proton beams incident on thick targets. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 1474-1481.
- Agosteo, S. (2009). RADIATION PROTECTION CONSTRAINTS FOR USE OF PROTON. *Radiation Protection Dosimetry*, 167-186.
- Agosteo, S. (2018). *Appunti del corso di Medical Applications of radiation fields*.
- Amaldi U., T. G. (s.d.). *Per un centro di teleterapia con adroni*.
- Briggs, G. (1973). Diffusion estimation for small emissions. *JAPCA*(15), 433-438.
- EPA, U. E. (2000). *Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications*. Research Triangle Park, NC: Office of Air and Radiation.
- EPA, U.S. Environmental Protection Agency. (1993). *External Exposure to radionuclides in Air, Water, and Soil, Federal Guidance Report No. 12*.
- Fassò A., F. A. (s.d.). FLUKA: a multi-particle transport code.
- I.G. Lines, D. D. (1997). Practical modelling of gas dispersion in low wind speed conditions, for application in risk assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 201-226.
- ICRP, I. C. (1988). *Radiation dose to Patients from Radiopharmaceuticals*.
- Knoll. (s.d.). *Radiation Detection and Measurement*.
- Krane, K. (1988). *Introductory Nuclear Physics*. Jhon Wiley & Son.
- M. D'Arienzo, S. S. (2014). *Radioprotezione Avanzata*. Roma: CISU Centro d'Informazione e Stampa Universitaria.
- NCRP. (2003). *Report No. 144- Radiation Protection For Particle Accelerator Facilities*.
- NEA, N. E. (2019). *JANIS*. Tratto da <https://www.oecd-nea.org/janis/>
- Pasquill, F. (1961). The estimation of the dispersion of windborne material. *Meteorological Magazine*(90), 33-49.
- Pelliccioni, M. (1993). *Fondamenti fisici della radioprotezione*. Bologna: Pitagora Editrice.
- Pelliccioni, M. (2011). RADIATION PROTECTION AT HADRON THERAPY FACILITIES. *Radiation Protection Dosimetry*, 407-413.
- Polvani, C. (1993). *Elementi di radioprotezione*. Roma: ENEA.
- Porta, A. C. (2005). Monte Carlo simulations for the design of the treatment rooms and synchrotron access mazes in the CNAO hadrontherapy facility. *Radiation Protection Dosimetry*, 113(3), 266-274.

Pullia. (2014). *Progetto della nuova facility di irraggiamento al CNAO*.

Rossi, S. (2011). The status of CNAO. *European Physical Journal Plus*.

Steven Homann, F. A. (2014). *HotSpot Health Physics Codes Version 3.0*. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory.

Thykier-Nielsen, S., Deme, S., & Láng, E. (1995). Calculation method for gamma dose rates from Gaussian puffs. *Roskilde: Risø National Laboratory*.

Yashima, H. U. (2004). Induced radioactivity in Cu targets produced by high-energy heavy ions and the corresponding estimated photon dose rates. *Radiation Protection Dosimetry*, 193-208.