

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria Elettrica

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Elettrotecnica

TESI DI LAUREA

Le Piattaforme del Progetto SPES - Criticità
dovute alle Alte Tensioni in un Ambiente
Fortemente Ionizzato

Relatore: Prof. Ing. Giancarlo Pesavento
Dipartimento di Ingegneria elettrica

Correlatore: Dott. Ing. M.Francesca Moisio
Laboratori Nazionali di Legnaro - INFN

Laureando: Massimo Bonaconsa

ANNO ACCADEMICO 2010-2011

“...coloro che ti amano non dubiteranno mai di te...

ed a loro va la mia totale gratitudine

per la possibilità che mi hanno

regalato e la forza che mi

hanno trasmesso

nel realizzare

un sogno”

...A mio nonno

...Ai miei genitori

...A Ilenia

INDICE

INTRODUZIONE	1
---------------------------	----------

CAPITOLO 1- Il progetto SPES ai Laboratori Nazionali di Legnaro

<i>1.1</i> Introduzione.....	<i>3</i>
<i>1.2</i> La produzione di fasci radioattivi.....	<i>5</i>
<i>1.3</i> Il progetto SPES e le sue applicazioni	<i>10</i>
<i>1.3.1</i> Applicazioni dei fasci di ioni esotici.....	<i>10</i>
<i>1.3.1.1</i> Applicazioni in fisica nucleare.....	<i>10</i>
<i>1.3.1.2</i> Applicazioni in fisica dello stato solido.....	<i>12</i>
<i>1.3.1.3</i> Applicazioni mediche: la Tomografia ad emissione Positronica	<i>13</i>
<i>1.3.1.4</i> Applicazioni in astrofisica	<i>15</i>
<i>Bibliografia capitolo 1</i>	<i>17</i>

CAPITOLO 2: Le piattaforme in alta tensione del progetto SPES

<i>2.1</i> Introduzione.....	<i>18</i>
<i>2.2</i> Livelli di tensione e la necessità di piattaforme in alta tensione.....	<i>18</i>
<i>2.2.1</i> Struttura di una piattaforma in alta tensione.....	<i>20</i>
<i>2.3</i> Piattaforme in uso nel mondo.....	<i>23</i>
<i>2.3.1</i> Piattaforma di Oak Ridge progetto RIBS.....	<i>23</i>
<i>2.3.2</i> Piattaforma ISOLDE al CERN.....	<i>25</i>
<i>Bibliografia capitolo 2</i>	<i>26</i>

CAPITOLO 3: Le piattaforme di produzione del progetto SPES

<i>3.1</i> Introduzione.....	<i>27</i>
<i>3.2</i> I carichi in alta tensione delle piattaforme	<i>27</i>

3.2.1 Carichi in alta tensione delle piattaforme di produzione	27
3.2.2 Problemi dovuti alle radiazioni indirettamente ionizzanti.....	29
3.2.2.1 I raggi gamma.....	29
3.2.2.2 La dose neutronica	32
3.2.2.3 La dose ionizzante in SPES.....	34
3.2.2.4 Parametri parassiti	37
3.3 Il circuito equivalente in alta tensione.....	39
3.4 Necessità della stabilità in tensione.....	42
3.4.1 L'effetto del carico sull'alimentazione	42
3.5 Conclusioni.....	45
Bibliografia capitolo 3.....	46

CAPITOLO 4: Le correnti di ionizzazione in aria

4.1 Introduzione.....	47
4.2 Il problema della corrente di dispersione	47
4.2.1 L'analogia con i rivelatori a gas.....	48
4.3 Il funzionamento in zona di saturazione.....	50
4.4 La dose e le zone critiche	54
4.5 La dipendenza dai parametri.....	56
4.5.1 La dipendenza dalla pressione	57
4.5.2 La dipendenza dalla distanza degli elettrodi	60
4.5.3 La dipendenza dalla dose e dal tipo di gas.....	62
4.5.4 La variazione della tensione di scarica con la radiazione	65
4.6 La corrente di ionizzazione al livello 200kV.....	67
4.7 La corrente di ionizzazione al livello 60kV.....	70
4.8 Conclusioni.....	74
Bibliografia capitolo 4.....	75

CAPITOLO 5: I tubi di Boris: condotti in HVDC

<i>5.1 I tubi di Boris: modello CERN, modello Oak Ridge, il modello EXCYT</i>	76
<i>5.2 Condotti di polietilene sottoposti ad alta tensione continua</i>	80
<i>5.2.1 La corrente di carica dei condotti in alta tensione</i>	82
<i>5.3 Il polietilene sotto radiazioni ionizzanti</i>	88
<i>5.3.1 Variazione della conduttività del polietilene irradiato</i>	88
<i>5.3.1.1 Fase transitoria di carica</i>	90
<i>5.3.1.2 Fase stazionaria</i>	94
<i>5.3.1.3 Fase transitoria di scarica</i>	96
<i>5.3.1.4 La variazione dei parametri elettrici nel tempo</i>	97
<i>5.4 Conclusioni</i>	99
<i>Bibliografia capitolo 5</i>	101
<i>Conclusioni</i>	102
<i>Appendice A</i>	106
<i>Appendice B</i>	107

Introduzione

Il lavoro presentato in questa tesi riguarda lo studio dei sistemi di alta tensione impiegati nel progetto SPES (*Selective Production of Exotic Species*) dell' Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. SPES è un progetto multidisciplinare e multiutente che sarà realizzato ai Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL) dell'INFN; produrrà fasci di ioni ricchi di neutroni e fasci di protoni e neutroni per le attività di ricerca di fisica nucleare e per applicazioni in campo medico, astrofisico, dei materiali e lo studio dei futuri reattori nucleari di quarta generazione. Questi reattori produrranno scorie con vita media molto più breve e sono concepiti per minimizzare i rifiuti ed ottimizzare l'utilizzo del combustibile nucleare; per la loro realizzazione è però necessario conoscere sezioni d'urto nucleari e caratteristiche dei materiali ancora in fase di studio.

SPES produrrà fasci di ioni non stabili (detti esotici) utilizzando la tecnica ISOL (*Isotope Separation On Line*) che consiste nella produzione di nuclei radioattivi attraverso reazioni nucleari indotte da un fascio primario (nel caso di SPES un fascio di protoni da 40 MeV 0.2 mA) in un bersaglio spesso da cui sono estratti per effetto termico, ionizzati e riaccelerati. Un post-acceleratore fornisce loro l'energia necessaria per condurre gli esperimenti di Fisica Nucleare e indagare una zona oggi ancora inesplorata della carta dei nuclidi.

Lo studio condotto in questa tesi riguarda le piattaforme di alta tensione che costituiscono il primo elemento di accelerazione del fascio esotico estratto dal bersaglio.

Nel Capitolo 1 sono descritte le finalità del progetto SPES con alcuni dettagli sulla produzione di fasci radioattivi, sugli aspetti tecnologici del progetto e sulle potenzialità scientifiche e applicative.

Nel Capitolo 2 viene fornita una descrizione dei livelli di tensioni presenti nell'esperimento nonché della struttura di una piattaforma in alta tensione.

Nel Capitolo 3 si analizzano le problematiche di carattere tecnico riguardanti la piattaforma del target (piattaforma di produzione), calcolando i livelli di ionizzazione per raggi gamma e neutroni. Si è inoltre elaborata una sintesi del circuito equivalente in alta tensione individuando i parametri

più sensibili del problema, spiegando la fondamentale importanza per l'esperimento della stabilità in tensione e le difficoltà in ambiente fortemente ionizzato.

Nel Capitolo 4 si analizzano gli effetti delle radiazioni indirettamente ionizzanti in aria spiegando dapprima la dipendenza delle correnti di dispersione dai vari parametri fisici e geometrici e poi calcolandone i valori per la configurazione di progetto.

Nel Capitolo 5 verrà trattata l'influenza delle radiazioni ionizzanti sui condotti in alta tensione (tubi di Boris) di polietilene al fine di valutarne la variazione dei parametri elettrici

Capitolo 1

Il progetto SPES ai Laboratori Nazionali di Legnaro

1.1 Introduzione

La Fisica Nucleare studia le proprietà dei nuclei atomici.

Il nucleo è composto da protoni (con carica positiva) e neutroni (senza carica elettrica), concentra più del 99,9% della massa dell'atomo, lega gli elettroni e occupa una parte trascurabile del volume atomico che è invece occupato nella sua quasi totalità dagli orbitali elettronici [1]. Queste caratteristiche dimensionali si riflettono nella densità nucleare e atomica, rispettivamente pari a 10^{11} gr cm^{-3} e $2 \cdot 10^1$ gr cm^{-3} .

Il nucleo è mantenuto coeso dalla presenza della forza Forte che agisce a piccola distanza e lega i nucleoni con intensità superiore alla forza di repulsione coulombiana tra le cariche dei protoni.

I nuclei stabili possiedono, approssimativamente, ugual numero di neutroni e protoni [2], e si dispongono lungo la cosiddetta “valle di stabilità” nella carta dei nuclidi.

I nuclei fuori della valle di instabilità sono radioattivi e decadono con emissione di particelle (alfa, beta, neutrini, ...) e raggi γ . Tali nuclei instabili vengono comunemente chiamati “esotici” e circa 2000 di essi sono stati prodotti e caratterizzati in laboratori di ricerca di tutto il mondo. Calcoli teorici prevedono tuttavia l'esistenza di un numero di nuclei esotici molto più elevato (più di 6000), cosicché è possibile che un gran numero di essi sia presente nella cosiddetta “terra incognita”, che comprende la regione ricca di neutroni e quella dei nuclei *superpesanti* (SHE, *Super Heavy Elements*).

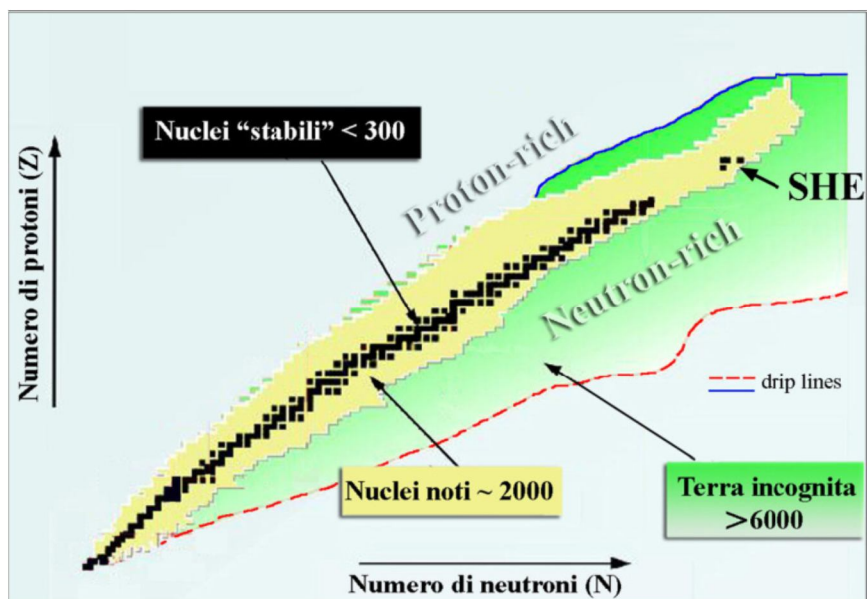


Figura 1.1 – Carta dei nuclidi (con SHE sono indicati i nuclei superpesanti)

La carta dei nuclidi individua e classifica i nuclei in base al numero di protoni (Z) e al numero di neutroni (N). I nuclei definiti “stabili” sono quelli non decadono oppure aventi tempo di decadimento comparabile all'età della terra. In fig.1.1 la regione di colore giallo rappresenta quella dei nuclei artificiali conosciuti, che possono avere vita più o meno breve a seconda dei casi; aggiungendo neutroni o protoni ad un nucleo ci si allontana dalla valle di stabilità fino a raggiungerne i limiti, detti *drip lines*, caratterizzati da una diminuzione della forza di attrazione tra neutroni e protoni tale da non garantire più la stabilità del nucleo. Calcoli teorici prevedono che al di fuori delle *drip lines* i nuclei non possono essere formati perchè la forza Forte non è più sufficiente a mantenere legati i nucleoni. La regione indicata in verde, ancora inesplorata, è caratterizzata dalla presenza di nuclei radioattivi con rapporti N/Z molto piccoli o molto grandi. L'area *proton-rich* è relativamente ben definita teoricamente e indagata dal punto di vista sperimentale, mentre quella *neutron-rich* è molto più vasta ed indefinita.

Per lo studio delle caratteristiche fisiche dei nuclei instabili abbiamo bisogno di produrli, accumularli, accelerarli e portarli a collidere con altri nuclei per studiare sia i frammenti prodotti sia i loro stati eccitati. Per la produzione di ioni radioattivi di questo tipo e quindi per il loro utilizzo pratico, è necessaria la costruzione di sistemi acceleratori ed attrezzature capaci di produrre fasci ionici (RIB, *Radioactive Ion Beams*) di elevata purezza, intensità ed energia.

1.2. La produzione di fasci radioattivi

Lo schema di principio del metodo ISOL¹ (*Isotope Separation On-Line*), su cui è basato il progetto SPES, è riportato in figura 1.2. Vale la pena quindi vedere rapidamente quali sono i componenti principali di tale struttura:

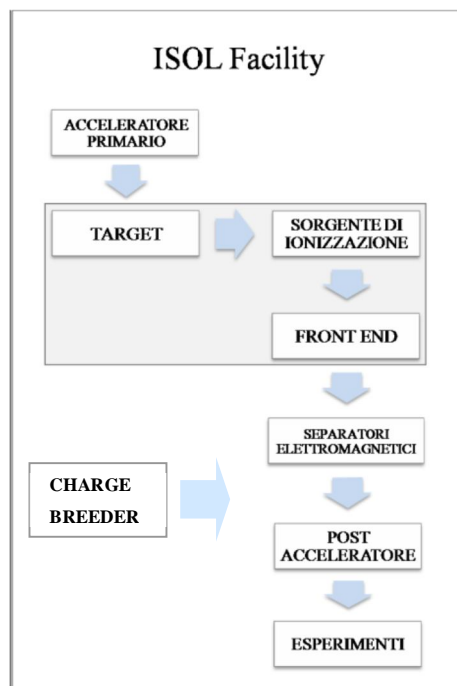


Figura 1.2 – Schema di una facility tipo ISOL

I principali costituenti di una *facility* di tipo ISOL, sono :

1. L'acceleratore primario (*driver*)
2. Il complesso *target* – sistema di estrazione ed ionizzazione
3. Il complesso di separazione e *charge breeder* (*beam manipulation*)
4. Post accelerazione

E' possibile individuare tali elementi nel layout di fig. 1.3 rappresentante la facility in costruzione presso i Laboratori Nazionali di Legnaro:

¹ Vedi Appendice A

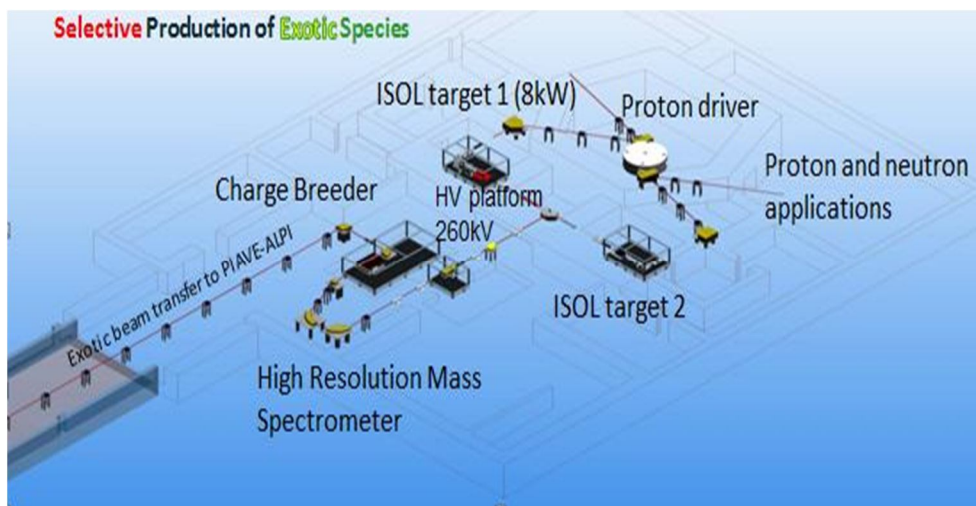


Figura 1.3 – Rappresentazione schematica della facility SPES

In figura si individuano:

1. Acceleratore primario : L'acceleratore primario ha la funzione di produrre il fascio primario di protoni, il quale deve essere diretto verso il bersaglio nel quale hanno luogo le reazioni nucleari. In particolare, SPES utilizzerà come acceleratore primario un ciclotrone, il quale è in grado di garantire le caratteristiche di fascio richieste per la produzione di fasci di ioni esotici ed offre la possibilità di utilizzare una seconda linea di fascio in modo completamente indipendente.

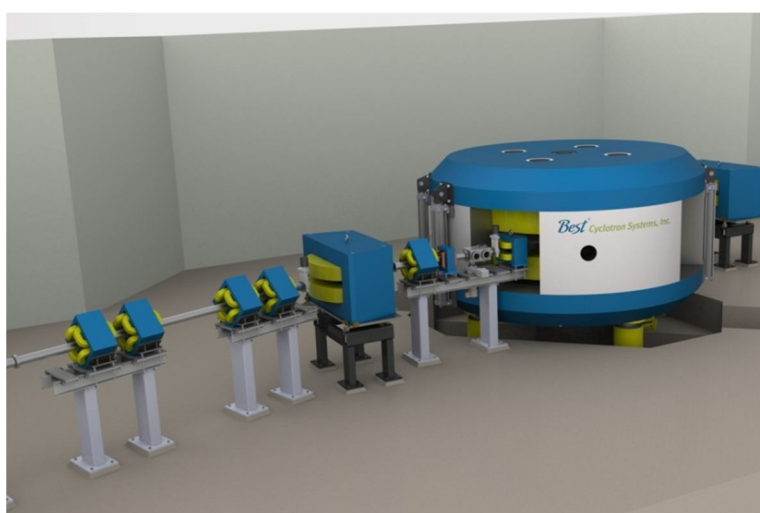


Figura 1.4 – Il ciclotrone (per gentile concessione della Best Company)

Il mercato offre oggi la possibilità di produrre, con la tecnologia del ciclotrone, fasci di intensità ed energia richiesta dal progetto SPES. L'acceleratore scelto

(figura 1.4) è in grado di fornire due fasci di protoni indipendenti fino a 70 MeV di energia ed aventi una corrente massima complessiva di $750 \mu\text{A}$.

2. ISOL TIS1 e ISOL TIS2 : Il fascio secondario (cioè in uscita) di ioni instabili è prodotto in un apparato chiamato “Bersaglio-Sorgente” che contiene un bersaglio (fig.1.5) , dove vengono “sparati” i protoni del fascio primario (in ingresso), e una sorgente di ionizzazione, dalla quale, con tecniche descritte in seguito, vengono estratti gli ioni instabili che formeranno il fascio proiettile per la sperimentazione.

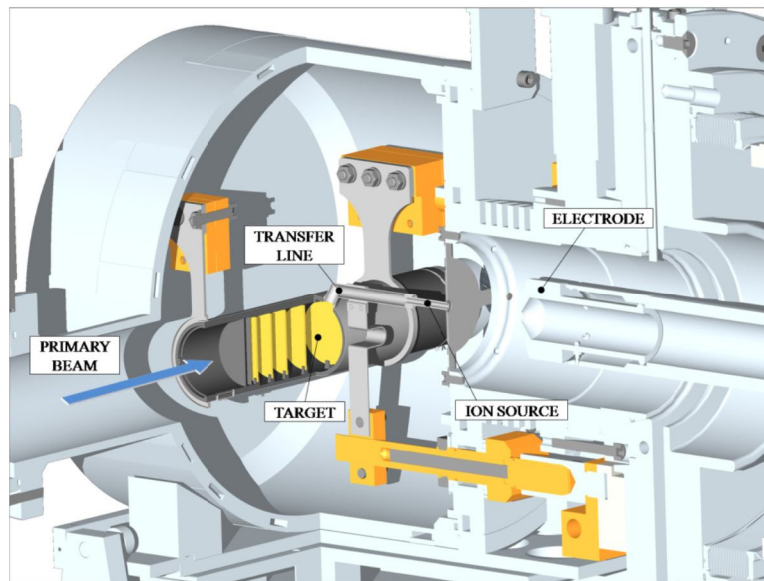


Figura 1.5 – Rappresentazione del sistema target di estrazione e ionizzazione del progetto SPES

La prima fase di accelerazione è ottenuta già con l'estrazione del fascio dalla sorgente e avviene per mezzo di un potenziale di 60 kV (potenziale di estrazione) fornito al sistema ponendo la camera del bersaglio (*target chamber*) su una piattaforma di alta tensione collegata al primo sistema di guida del fascio (*front end*) con un adeguato isolatore elettrico (fig.1.6). Per impedire la frenatura degli ioni prodotti, all'interno dei tubi è mantenuto un vuoto di 10^{-6} mbar , mentre all'esterno si opera in aria. Sotto vuoto si trova quindi l'elettrodo estrattore, collegato al *front end*, mentre la camera-bersaglio è montata su una piattaforma a $+60 \text{ kV}$.

La differenza di potenziale presente tra sorgente ed elettrodo estrattore accelera gli ioni radioattivi, prodotti nella sorgente con carica $1+$, ad una energia di 60 keV . In questo modo si forma il fascio di ioni radioattivi che verrà, dopo il passaggio attraverso i separatori elettromagnetici inviato al post acceleratore e alle sale sperimentali.

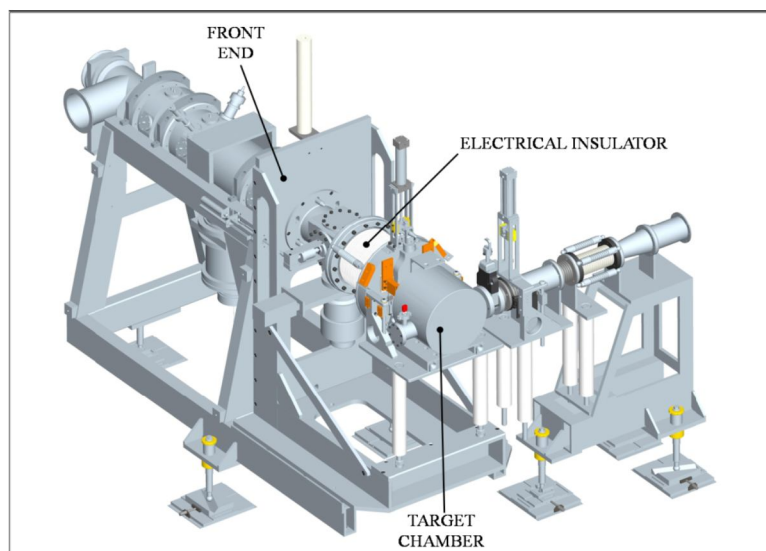


Figura 1.6 – Rappresentazione del front end in ISOL bunker

3. Piattaforma di produzione (200 kV): il progetto SPES prevede l'utilizzo di una seconda accelerazione prodotta con potenziali elettrostatici che porta il fascio ad una energia di 260 keV. Questo viene ottenuto installando tutto il sistema di bersaglio e front end su una piattaforma a 200 kV in modo che, sommandosi al potenziale di estrazione di 60 keV, fornisca l'energia richiesta. In questo modo si ottengono vari vantaggi:

- si migliorano le risoluzioni dei sistemi magnetici di selezione del fascio
- si fornisce al fascio l'energia necessaria per essere direttamente iniettato nel post-acceleratore PIAVE-ALPI che è già disponibile ai Laboratori Nazionali di Legnaro e sarà utilizzato come post-acceleratore di SPES.
- Si può utilizzare il fascio senza riaccelerazione ad una energia più elevata.

Questo lavoro di Tesi si occupa dello studio delle piattaforme del sistema Bersaglio-Front end indagando in modo particolare i problemi di funzionamento delle piattaforme in un ambiente con aria fortemente ionizzata a causa della radiazione prodotta dall'interazione del fascio primario del ciclotrone con il bersaglio di produzione dei fasci radioattivi.

4. Beam Cooler: questo strumento permette di migliorare le caratteristiche di emittanza del fascio ed è utilizzato per migliorare le capacità di selezione del fascio nello spettrometro ad alta risoluzione. Avere un fascio "pulito" è di estrema importanza per gli studi di fisica nucleare, in quanto permette di realizzare

esperimenti di seconda generazione rispetto a quanto possibile oggi nelle facility ISOL operative nel mondo. Questo è quindi un obiettivo del progetto SPES.

Il Beam Cooler agisce come una trappola per il fascio di ioni in ingresso. Al suo interno gli ioni vengono fermati e, con un sistema di quadrupoli a radio frequenza, il fascio viene focalizzato, estratto e trasmesso al separatore di massa ad alta risoluzione. Per frenare il fascio è necessario che anche il Beam Cooler sia installato su una piattaforma a 260 kV, che si trova però in un'area a bassa radioattività e non presenta gli stessi problemi di operazione della piattaforma di produzione.

5. HRMS (High Resolution Mass Spectrometer): i separatori elettromagnetici hanno il compito di “purificare” il fascio permettendo la raccolta selettiva degli ioni desiderati in uscita. In una prima fase di purificazione, attraverso un separatore di massa di risoluzione 1/100, viene intrappolata la maggior parte dei contaminanti prodotti nel bersaglio-sorgente. Per avere un fascio “pulito” è però necessario arrivare a risoluzioni migliori di 1/15000, infatti solo in questo modo si possono separare gli isotopi con stesso numero di massa (isobari) come ad esempio il ^{132}Cs e lo ^{132}Sn . Per migliorare la capacità di selezione dei separatori isobarici è necessario operare con un'energia in ingresso dell'ordine dei 200 keV . Come accennato in precedenza, SPES prevede di ottenere questo risultato montando su una piattaforma a 200 kV sia il target che il primo separatore.
6. Prima dell'iniezione del fascio nel post acceleratore PIAVE-ALPI è necessario passare ad un più elevato stato di carica rispetto all' $1+$ ottenuto dalla sorgente: questo perchè PIAVE-ALPI accetta un fascio con rapporto Massa/Carica tra 5 e 7 per accelerare gli ioni alle energie di interesse per la fisica nucleare (5-10 MeV/nucleone). L'incremento dello stato di carica è ottenuto con un *Charge Breeder*, un dispositivo in grado di incrementare la carica degli ioni con un processo di ionizzazione indotta in un plasma con Radio Frequenza. Anche questo strumento deve essere installato su una piattaforma da 260 kV. Come il Beam Cooler non ha problemi di operazione in ambiente ad alta radioattività.
7. Post accelerazione : come detto, dopo l'accelerazione ottenuta con le piattaforme di alta tensione, il fascio viene indirizzato verso l'acceleratore PIAVE-ALPI (acceleratore LINAC superconduttore). Il complesso PIAVE-ALPI è da molti anni in funzione ai Laboratori Nazionali di Legnaro, recentemente è stato sottoposto ad

un numero significativo di miglioramenti, ed ora può essere impiegato come acceleratore di RIB.

1.3 Il progetto SPES e le sue applicazioni

L'obiettivo del progetto SPES è la costruzione di un acceleratore che permetta di svolgere ricerca in fisica nucleare attraverso lo studio di nuclei così detti esotici, cioè lontani dalla valle di stabilità.

Il progetto è basato sulla produzione di nuclei radioattivi *neutron-rich* attraverso la fissione nucleare (con una resa massima di 10^{13} fissioni/s) indotta bombardando un bersaglio, realizzato in carburo di uranio mantenuto ad una temperatura di 2000°C e pressione dell'ordine dei 10^{-5} mbar, con un fascio di protoni di intensità pari a $200\ \mu\text{A}$ ed energia $40\ \text{MeV}$ (per una potenza totale di $8\ \text{kW}$) [5].

Essendo il livello di radioattività stimato nel punto di produzione molto elevato, è necessaria la progettazione di speciali infrastrutture in modo da garantire la sicurezza in termini di radio protezione. Devono essere inoltre valutate le conseguenze della radiazione sui materiali utilizzati e sull'operazione della strumentazione.

SPES prevede inoltre la realizzazione di una struttura per la produzione di neutroni attraverso l'impiego di un secondo fascio di protoni ad alta intensità. La *Neutron Facility* è un obiettivo secondario del progetto SPES, ma permette comunque importanti ricadute in ambito medico ed interdisciplinare.

1.3.1 Applicazioni dei fasci di ioni esotici

1.3.1.1 Applicazioni in fisica nucleare

Miglioramento e verifica del Modello Standard

Il modello standard della fisica delle particelle è una teoria che descrive insieme tre delle quattro forze fondamentali, cioè l'interazione nucleare forte, l'elettromagnetismo e

l'interazione nucleare debole (queste ultime due unificate nell'interazione elettrodebole), nonché la funzione e le proprietà di tutte le particelle (note ed osservate) che costituiscono la materia. Nonostante il suo successo, tale modello non è del tutto soddisfacente, poiché dipende in modo sostanziale da alcune assunzioni fatte *ad hoc*. Sono in corso di realizzazione esperimenti di fisica nucleare per chiarire l'origine di queste assunzioni e pervenire così all'unificazione delle interazioni fondamentali. Tali esperimenti prevedono precise misure delle proprietà di decadimento di alcuni nuclei, che possono essere effettuate proprio utilizzando come sorgente pura di ioni, i fasci di ioni radioattivi prodotti dalle *facilities* prima descritte.

Studio della struttura di nuclei complessi

I nucleoni (protoni e neutroni) sono costituiti da sub-particelle chiamate quark che esercitano un effetto fisico anche al di fuori dei nucleoni nei quali sono confinati: in particolare le interazioni tra i nucleoni all'interno del nucleo sono diverse da quelle esistenti tra due nucleoni liberi, in quanto dipendono anche dalla densità di protoni e neutroni associata al particolare tipo di nucleo. Al momento, non esiste una formula generale che consenta di quantificare l'entità delle interazioni nucleari per tutti i nuclei rappresentati nella figura 1.1, in quanto i calcoli quantomeccanici sono applicabili unicamente ai nuclei più leggeri. L'obiettivo della fisica nucleare è di ottenere una trattazione unitaria che:

- permetta di derivare l'effettiva interazione tra le particelle nucleari;
- elimini le incongruenze dei modelli correnti;
- sia applicabile anche ai nuclei aventi rapporto protoni/neutroni estremo (nuclei esotici).

Si ritiene che lo studio dei fasci di ioni radioattivi possa fornire un prezioso contributo alla comprensione di questi problemi.

Misura della dimensione del nucleo: i nuclei "halo"

La dimensione del nucleo è legata al numero totale A di nucleoni che lo costituiscono dalla semplice relazione $R = R_0 A^{1/3}$, dove R è il raggio nucleare ed R_0 una costante pari a 1.2 fermi (1 fermi 10^{-15} m). Tuttavia, allontanandosi dalla valle di stabilità, si possono incontrare notevoli deviazioni da tale legge, in quanto le energie di legame tra le particelle di uno stesso nucleo possono diventare così piccole da causare la formazione di nuclei particolari, chiamati "con alone" (nuclei "halo"). I nuclei "halo" sono caratterizzati da una

diversa collocazione dei neutroni; tali nuclei possiedono molti più neutroni dei rispettivi isotopi stabili, inoltre i neutroni più esterni, essendo debolmente legati, orbitano attorno ad un nucleo centrale (core) e sono detti neutroni di valenza.

Un esempio di nucleo “*halo*” è il ^{11}Li , il suo isotopo stabile è il ^7Li che ha le dimensioni normali previste per un nucleo con 7 nucleoni. Il ^{11}Li ha invece un core (^9Li) con dimensione paragonabile a quella del ^{48}Ca se poi si considerano gli ultimi due neutroni si osserva che questi fanno aumentare la dimensione totale ad un valore paragonabile a quella del ^{208}Pb producendo un alone molto distribuito e poco denso.

Produzione di elementi superpesanti

Gli elementi naturali sono circa 90 e vanno dall’Idrogeno all’Uranio; negli ultimi anni l’utilizzo di reazioni di fusione nucleare ha permesso la sintesi di nuovi elementi di elevato peso atomico, estendendo il numero dei costituenti della Tavola Periodica sino all’elemento avente numero atomico 112 e prospettando un’ulteriore estensione a 116. In particolare questi elementi, chiamati superpesanti (nei quali si ha una fortissima repulsione coulombiana), sembra riescano a formarsi attorno alla cosiddetta “Isola di Stabilità” (una combinazione di 114 protoni e 184 neutroni che sembra garantire la stabilità del nucleo). La recente disponibilità di fasci intensi, costituiti da nuclei instabili ricchi di neutroni (*n-rich*), accoppiati a target stabili, anch’essi ricchi di neutroni, potrebbe aprire definitivamente la strada ad uno studio e ad una indagine accurata di tale fenomeno.

1.3.1.2 Applicazioni in fisica dello stato solido

Radio Tracer Diffusion

La tecnica *Radio Tracer Diffusion*, nata nel 1920, consiste nell’impiantare all’interno di un sistema solido dei nuclei radioattivi e di studiarne il decadimento, rilevando le particelle o la radiazione gamma da essi emessa. Tale tecnica permette di captare segnali anche da pochissimi atomi e rappresenta uno dei metodi più comuni per studiare i processi di diffusione atomica nei solidi [3].

L’utilizzo della tecnica *Radio Tracer Diffusion* consente di:

- ottenere informazioni riguardanti il campo elettrico e magnetico all’interno del cristallo;
- studiare i processi diffusivi e le interazioni tra gli atomi sonda;

- osservare, tramite i prodotti di decadimento, l'interazione tra l'atomo sonda e l'intorno reticolare che lo circonda;
- indagare i tipi di difetti presenti nel cristallo.

Drogaggio dei semiconduttori

Lo sviluppo di semiconduttori di piccole dimensioni aventi caratteristiche ottiche ed elettriche ottimali richiede un controllo completo dei difetti che governano tali proprietà, sia intrinseci (come le vacanze interstiziali) che estrinseci (come i droganti e le impurità atomiche): per tale motivo sia la ricerca di base che quella applicata stanno concentrando notevoli sforzi nello studio dei difetti e dell'attivazione elettrica dei droganti in diversi semiconduttori.

Analogamente agli isotopi stabili, gli isotopi radioattivi influenzano le proprietà elettroniche ed ottiche dei semiconduttori in base alla loro natura chimica ed alla loro posizione all'interno del reticolo cristallino: in particolare, poiché le proprietà elettroniche ed ottiche dei semiconduttori dipendono oltre che dal tipo di semiconduttore anche dalle sue dimensioni, si è dimostrato che in semiconduttori molto piccoli tali proprietà possono essere sensibilmente alterate da un difetto presente con concentrazione minore di 10^{12} atomi/cm³; per controllare in maniera affidabile le prestazioni dei semiconduttori sono quindi necessarie tecniche sperimentali che combinino un'alta sensibilità chimica con un'alta sensibilità per la determinazione di basse concentrazioni di difetti.

1.3.1.3 Applicazioni mediche: la Tomografia ad Emissione Positronica

La Tomografia ad Emissione Positronica (PET, *Positron Emission Tomography*) è una tecnica di medicina nucleare e diagnostica medica che utilizza l'emissione di positroni per realizzare immagini tridimensionali o mappe ad alta risoluzione degli organi interni dei pazienti.

La procedura PET inizia con l'iniezione (generalmente per via endovenosa) nel soggetto da esaminare di un isotopo tracciante di breve vita media, legato chimicamente ad una molecola attiva a livello metabolico. Dopo un tempo di attesa durante il quale la molecola metabolicamente attiva (spesso uno zucchero), raggiunge una determinata concentrazione

all'interno dei tessuti organici da analizzare, il soggetto viene posizionato nello scanner (mostrato in figura 1.7).



Figura 1.7 – Scanner impiegato nella tecnica di rilevazione PET.

L'isotopo di breve vita media decade, emettendo un positrone. Dopo un percorso che può raggiungere al massimo pochi millimetri, il positrone si annichila con un elettrone, producendo una coppia di fotoni (di energia paragonabile a quella dei raggi gamma) emessi in direzioni opposte fra loro (sfasate di 180° lungo una stessa retta); questi fotoni sono successivamente rilevati dal dispositivo di scansione grazie anche all'impiego di speciali tubi fotomoltiplicatori. Punto cruciale della tecnica è la rilevazione simultanea di coppie di fotoni: i fotoni che non raggiungono il rilevatore in coppia, cioè entro un intervallo di tempo di pochi nanosecondi, non sono presi in considerazione; dalla misurazione della posizione in cui i fotoni colpiscono il rilevatore (ogni coppia di fotoni individua una retta), si può ricostruire la posizione del corpo da cui sono stati emessi (teoricamente con due coppie di fotoni, e dunque con due rette, è possibile individuare il punto di emissione dei fotoni), permettendo la determinazione dell'attività o dell'utilizzo chimico all'interno delle parti del corpo investigate.

Lo scanner utilizza la rilevazione delle coppie di fotoni per mappare la densità dell'isotopo nel corpo; la mappa risultante rappresenta i tessuti in cui la molecola campione si è maggiormente concentrata e viene letta e interpretata da uno specialista in medicina nucleare o in radiologia al fine di determinare una diagnosi ed il conseguente trattamento. Spesso, e sempre più frequentemente, le scansioni della Tomografia a Emissione di Positroni sono raffrontate con le scansioni a Risonanza Magnetica Nucleare, fornendo informazioni sia anatomiche e morfologiche, sia metaboliche (in sostanza, su come il tessuto o l'organo siano conformati e su cosa stiano facendo). La PET è usata

estensivamente in oncologia clinica (per avere rappresentazioni dei tumori e per la ricerca di metastasi) e nelle ricerche cardiologiche e neurologiche.

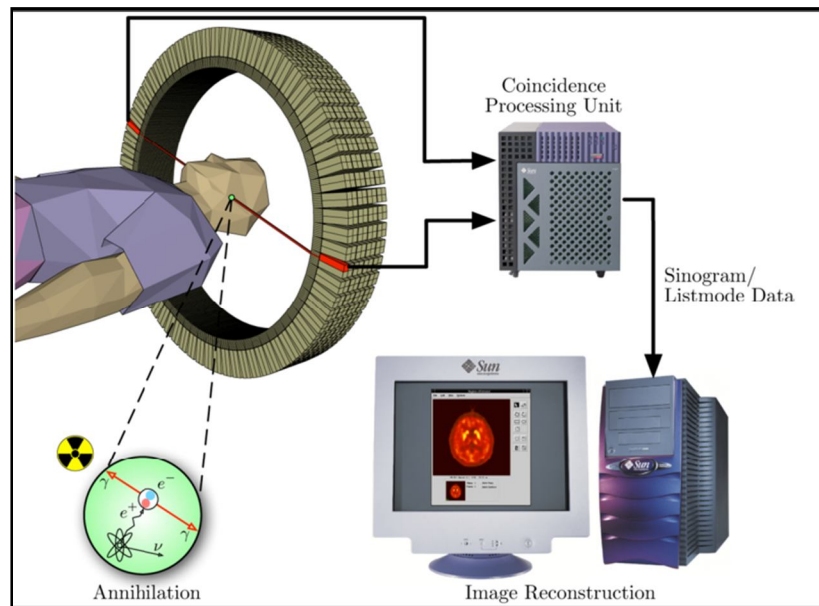


Figura 1.8 – Schema riassuntivo della tecnica di analisi PET.

Rispetto ad altri metodi di scansione, come la TAC e la RMN, le quali permettono di identificare alterazioni organiche e anatomiche nel corpo umano, le scansioni PET sono in grado di rilevare alterazioni a livello biologico molecolare che spesso precedono l'alterazione anatomica, attraverso l'uso di marcatori molecolari che presentano un diverso ritmo di assorbimento a seconda del tessuto interessato.

1.3.1.4 Applicazioni in astrofisica

L'astrofisica nucleare gioca un ruolo fondamentale nella comprensione della struttura, evoluzione e composizione dell'Universo e dei suoi costituenti.

Le stelle generano energia attraverso reazioni nucleari coinvolgenti sia nuclei stabili che radioattivi. A volte, il consumo del carburante nucleare procede stabilmente e dura miliardi di anni, altre volte è esplosivo e dura pochi minuti o pochi secondi. Nelle differenti fasi della consunzione delle stelle vengono sintetizzati nuovi elementi chimici, sia tramite processi di nucleosintesi che seguono strettamente la valle di stabilità, sia attraverso processi che si svolgono in un territorio sconosciuto.

Per sviluppare un modello che descriva il meccanismo di nucleosintesi, è necessario misurare le rese delle reazioni nucleari relative ai principali cicli astrofisici e le caratteristiche di decadimento di molti nuclei tuttora sconosciuti. Queste informazioni essenziali includono i tempi di vita, le masse ed i principali canali di decadimento di un numero di nuclei chiave lontani dalla stabilità. Le reazioni nucleari coinvolgenti nuclei instabili possono essere misurate unicamente con un fascio radioattivo: per tale motivo si prevede che la nuova generazione di facilities per la produzione di fasci radioattivi risulterà di fondamentale importanza per la comprensione della sintesi elementare nell'Universo.

Bibliografia capitolo 1

- [1] M. Libralato, *Studio elettro-termo-strutturale del sistema di estrazione e ionizzazione del progetto SPES*, Tesi di Laurea Specialistica a. a. 2008-09, Università degli studi di Padova.
- [2] M. Manzolaro, *Analisi termica e strutturale del bersaglio diretto per la produzione di fasci radioattivi per il progetto SPES*, Tesi di Laurea Specialistica a. a. 2006-2007, Università degli Studi di Padova.
- [3] M. Deicher, *Radioactive isotopes in solid state physics*, Vol. 33 No 3, Europhysics News, 2002.
- [4] <http://www.ganil.fr/eurisol/EURISOLlinks.htm>
- [5] A. Andrichetto et al., *The SPES Project At LNL*, AIP (American Institute of Physics), 2009.

Capitolo 2

Le piattaforme in alta tensione del progetto SPES

2.1. Introduzione

Nelle facility ISOL un aspetto rilevante è rappresentato dal “maneggiamento” (handling) del fascio esotico dalla sua produzione alla sua utilizzazione con o senza riaccelerazione. L’obiettivo è quello di ottenere fasci sempre più puri (senza isobari contaminanti) di dimensioni sempre più piccole ed energie controllate. Il progetto SPES, nello stato attuale di progetto, prevede l’uso di piattaforme di alta tensione per la pre-accellerazione fino a 260 keV e una serie di strumenti per la selezione in massa con risoluzioni di 1/15000 e l’aumento di carica degli ioni per una corretta riaccelerazione. Nel capitolo che seguirà verrà fatta una panoramica sulla funzione delle piattaforme in alta tensione previste per il progetto SPES, verrà analizzato lo scopo per cui tali piattaforme vengono utilizzate descrivendone la struttura ed il diverso contesto in cui si trovano ad operare.

2.2. Livelli di tensione e la necessità di piattaforme in alta tensione

Il fascio esotico estratto dalla sorgente si trova ad assumere energie variabili lungo il percorso verso il riacceleratore. Se si utilizzano potenziali elettrostatici per l’accelerazione preliminare e il trasporto del fascio esotico, si dovranno installare varie piattaforme di alta tensione come illustrato in fig.2.1 e 2.2.

Volendo entrare nello spettrometro ad alta risoluzione (HRMS) con energia di 260 keV è necessario che la sorgente che genera gli ioni esotici con carica $1+$ sia su una piattaforma

da 200 kV, che sommati al potenziale di estrazione di 60 kV, porta il fascio in uscita ad avere l'energia desiderata.

Per ottenere le risoluzioni in massa adeguate ($1/15000$ o migliori) è necessario utilizzare un Beam Cooler che garantisca una emittanza del fascio di $2-3 \pi$ mm mrad. Questa operazione richiede di fermare il fascio nel Beam Cooler che dovrà quindi essere montato su una piattaforma da 260 kV. Dopo la selezione dello spettrometro e' necessaria una seconda "trappola" che fermi il fascio e aumenti il suo stato di carica prima di iniettarlo nel riacceleratore PIAVE-ALPI. Questo si ottiene con il Charge Breeder anche lui installato su una piattaforma da 260 kV.

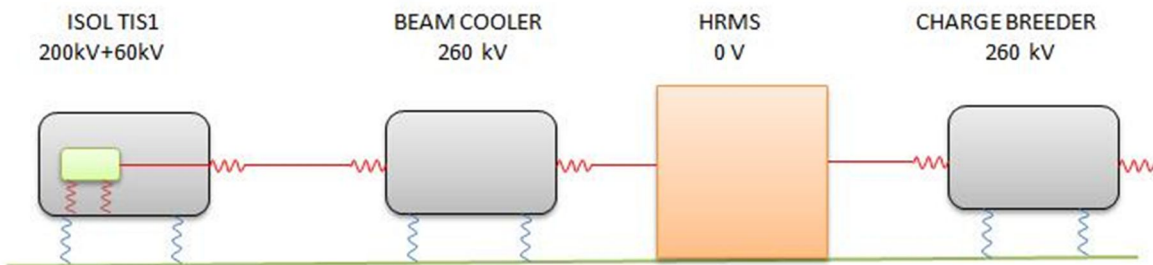


Fig.2.1: Schema dei livelli di tensione progetto SPES, vista laterale

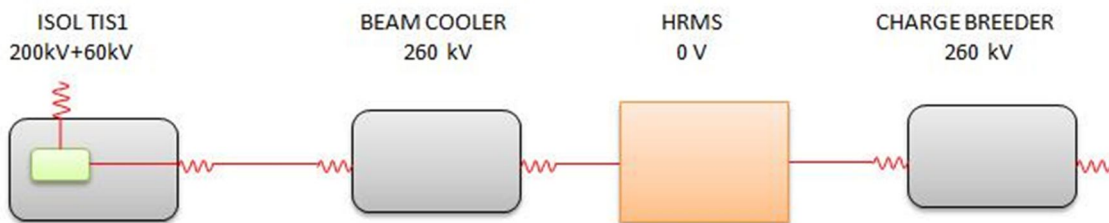


Fig.2.2: Schema dei livelli di tensione progetto SPES, vista in pianta

Nello schema di fig.2.1 la linea continua verde rappresenta il potenziale di terra, rispetto ad esso le varie sezioni devono assumere potenziali diversi per i motivi precedentemente esplicitati, di conseguenza è necessario porre tali strutture su piani equipotenziali isolati da terra per mezzo di isolatori portanti (linee ondulate verticali blu e arancio). Tali piani isolati prendono il nome di piattaforme in alta tensione.

In linea di principio le piattaforme in alta tensione sono piani equipotenziali opportunamente dimensionati, anche dal punto di vista meccanico, al fine di sostenere la struttura che vi sarà posta di sopra, e sostenuti da isolatori portanti.

E' possibile notare in fig. 2.2 l'ingresso del fascio di protoni all'interno del target (blocco verde) posto a 60 kV rispetto alla piattaforma a 200kV. L'accoppiamento è ottenuto attraverso un isolatore. Il fascio di protoni viene decelerato di 260 keV all'ingresso nel bersaglio ISOL (questa decelerazione è insignificante rispetto all'energia dei protoni di 20-70 MeV).

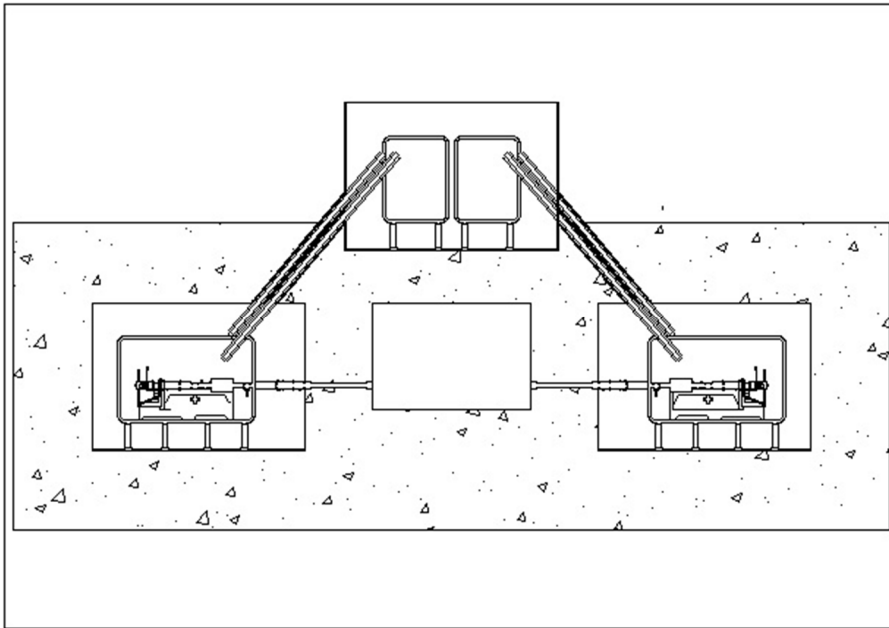


Fig.2.3: Vista in sezione delle piattaforme ISOL TSI1 e ISOL TSI2 (livello inferiore) e delle due piattaforme di servizio (livello superiore)

Si deve inoltre considerare che SPES prevede l'uso di due bersagli di produzione: ISOL TIS1 e ISOL TIS2 e che le piattaforme di produzione sono in un ambiente ad alta radioattività che non consente l'installazione di apparecchiature elettroniche per cui sono necessarie altre due piattaforme di "servizio" poste allo stesso potenziale della piattaforma di produzione, che alloggino l'elettronica, alimentatori e tutta la strumentazione che altrimenti nella sala del bersaglio subirebbe danneggiamenti.

2.2.1. Struttura di una piattaforma in alta tensione

Si prenda in considerazione la piattaforma di produzione del progetto SPES. Essa presenta tutte le problematiche tipiche delle piattaforme in alta tensione, oltre a problematiche costruttive particolari dovute alle condizioni di operazione.

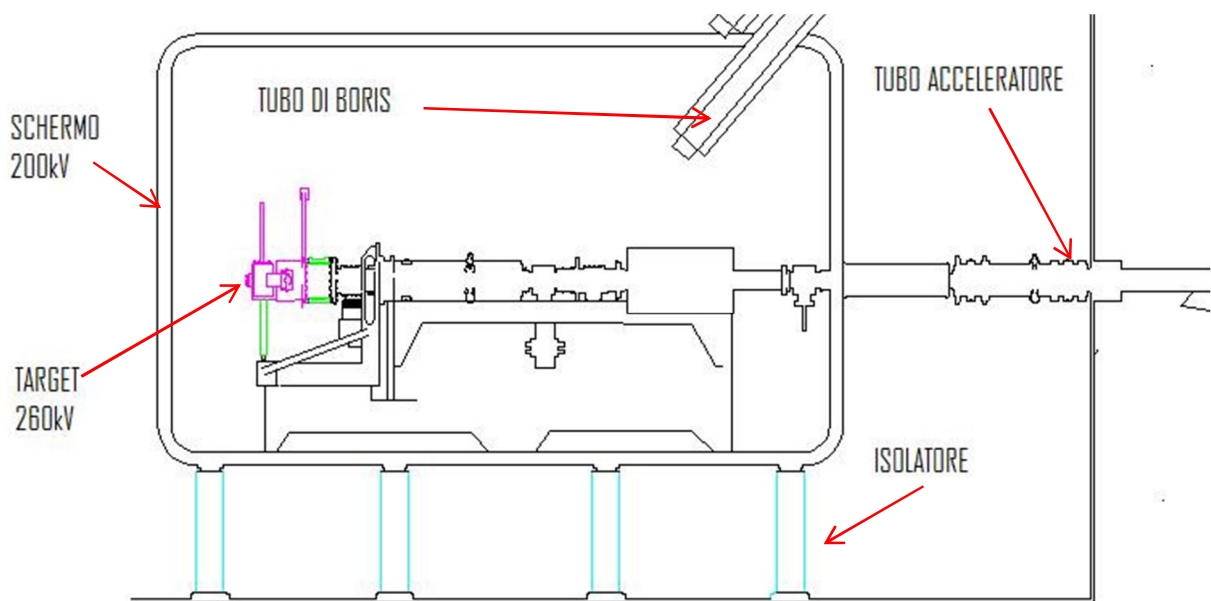


Fig.2.4: Esempio di piattaforma in alta tensione, in questo caso la ISOL TSI 1.

Osservando quindi la figura 2.4 si nota che la piattaforma è composta da più parti:

- *Isolatori portanti:* Generalmente sono di porcellana, fungono anche da sostegno meccanico, devono quindi mantenere nel tempo le loro caratteristiche elettriche e meccaniche in qualsiasi condizione di lavoro e in qualsiasi tipologia di atmosfera.
- *Schermo 200 kV:* La struttura alloggiata sopra la piattaforma ha forma geometrica molto irregolare, ed assumerà lo stesso potenziale della piattaforma. La presenza di irregolarità o di spigoli che potrebbero portare a intensificazioni localizzate dei campi o addirittura a fenomeni corona pone l'esigenza di schermare tutta la struttura posta sopra la piattaforma con uno schermo allo stesso potenziale (gabbia di Faraday) avendo cura di arrotondare ogni spigolo per evitare anche in questo caso intensificazioni localizzate di campo.
- *Tubo acceleratore/deceleratore:* Sono dei partitori resistivi che vengono usati come interfaccia tra parti a diversa tensione, disposti in ingresso ed in uscita dalle piattaforme stesse al fine di permettere un graduale passaggio da parte del fascio in zone a diverso potenziale.



Fig2.5: Esempio di tubo acceleratore piattaforma ECR LNL-INFN

- *Target 260 kV*: È presente solo nella piattaforma ISOL TSI1/2, è posto alla tensione di 260 kV (parte magenta fig. 2.4) ed isolato rispetto al resto della piattaforma attraverso degli isolatori (parte verde fig. 2.4). In (figura 2.4) l'irregolarità della superficie a 260 kV pone i presupposti per l'utilizzo anche attorno al target di uno schermo simile a quello visto per i 200 kV. Nel target a 260 kV avverrà l'impatto tra il raggio protonico ed il bersaglio. Il prodotto di tale impatto saranno raggi gamma e neutroni cioè di particelle indirettamente ionizzanti che renderanno l'ambiente in cui sarà situata tale piattaforma fortemente radioattivo
- *Tubi di Boris*: Sono dei condotti isolanti in alta tensione, ve ne possono essere di diverse tipologie, ma sostanzialmente la struttura è quella di un tubo metallico che verrà posto in tensione (generalmente al potenziale della piattaforma) ed esternamente isolato con abbondante quantitativo di isolante. I cavi di segnale e potenza posti sopra la piattaforma avranno come riferimento, non la messa a terra, ma i 200 kV. Grazie a questo condotto si potranno trasferire i cavi da una piattaforma all'altra passando, attraverso il muro (al potenziale di terra), all'interno dei condotti utilizzando per i cavi un isolamento per bassa tensione.

Nei capitoli che seguiranno si analizzerà solamente la piattaforma del target ISOL TSI1/2, in quanto la presenza di neutroni e raggi gamma la pone in condizioni critiche di esercizio

sotto il punto di vista dell'effetto che le radiazioni indirettamente ionizzanti possono avere sulla conduttività dei materiali, ma in particolar modo su quella dell'aria.

Per definizione la ionizzazione di un gas varia le sue proprietà di isolante elettrico in quanto aumenta il quantitativo di cariche libere e quindi la conduttività, avendo quindi un effetto sulla stabilità di tensione necessaria ai capi dei tubi acceleratori e deceleratori. In tale piattaforma inoltre sarà importante investigare quale sia l'effetto delle radiazioni ionizzanti sulla conducibilità dei materiali.

2.3 Piattaforme in uso nel mondo

Le piattaforme che operano con un elevato grado di ionizzazione sono:

- Oak Ridge (progetto RIBS),
- CERN (progetto ISOLDE),
- INFN-LNS (progetto EXCYT),
- INFN-LNL (progetto SPES).

Tra queste il progetto SPES opererà al livello di ionizzazione più elevato rispetto alle altre installazioni di almeno un ordine di grandezza.

Dato lo sviluppo recente di tali installazioni, non esiste in letteratura una linea guida per poter affrontare in maniera univoca le varie problematiche che si presentano e questo è dovuto anche alle differenti condizioni di esercizio in cui le piattaforme si trovano ad operare.

2.3.1. Piattaforma di Oak Ridge progetto RIBS

Le piattaforme target in questo esperimento sono sostanzialmente due, ciascuna con annessa piattaforma servizi. Tale piattaforma IRIS1 opera ad un livello di tensione negativo (-300 kV). Dal punto di vista delle alte tensioni (figura 2.6), tale scelta si traduce in una maggior tenuta dell'isolamento in aria rispetto la polarità positiva a parità di distanza tra gli elettrodi (la figura è valida per la configurazione punta piano, occorrerà tener conto del fattore di forma). Tale effetto

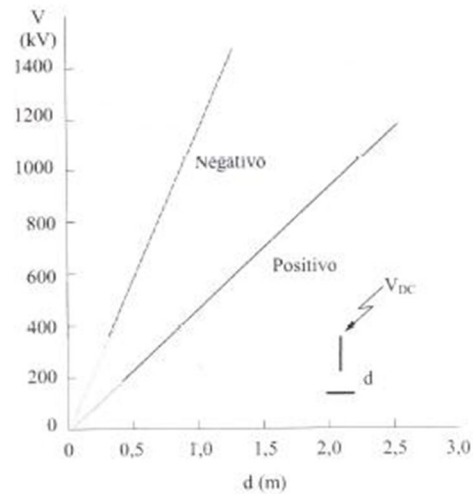


Fig. 2.6 :Tensione di scarica in DC con polarità negativa e positiva per configurazione punta piano[1]

è interessante per quanto riguarda la conseguente riduzione delle distanze tra parte attiva e terra che, dal punto di vista delle correnti di dispersione, è un fattore positivo.

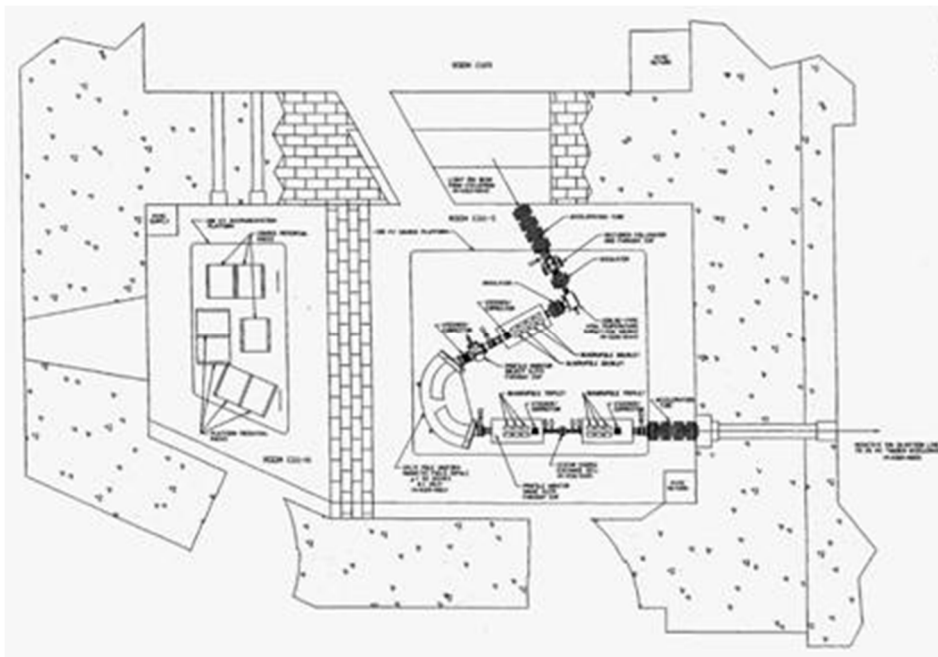


Fig. 2.7 – Struttura piattaforma in alta tensione IRIS1 Oak Ridge [2]

Dai dati in nostro possesso sappiamo che la struttura ad Oak Ridge ha avuto, tra i pannelli scorrevoli laterali e muro dei fenomeni di scarica, problema che è stato risolto con del nastro adesivo metallico [4] probabilmente per evitare ionizzazione ulteriore dovuta ad effetti punta degli spigoli vivi delle rotaie.

2.3.2. Piattaforma ISOLDE al CERN

In questo caso specifico la piattaforma di ISOLDE ha presentato due criticità dal punto di vista elettrico, una riguardante i tubi di Boris ed un'altra riguardante l'elevato livello di ionizzazione dovuto al fascio protonico che in questo caso viaggia per un tratto (circa un metro) in aria [3] prima di raggiungere il target.

Il target viene riscaldato e gli ioni vengono rilasciati ad una certa "velocità termica" all'interno della sorgente ionica; tra il target e la sorgente di ioni deve esistere una differenza di potenziale ben definita per poter accelerare gli ioni ad una velocità prefissata. Tale accelerazione serve per poter raggiungere una velocità tale da consentire di separare agevolmente le specie desiderate dal resto degli ioni. Tra le due placche la ddp è di 60 kV ed è importante che rimanga rigorosamente costante. Il problema nasce dal fatto che il fascio protonico viaggiando in aria provoca ionizzazione e quindi cariche libere che creano una corrente di dispersione tra gli elettrodi a 60 kV rappresentando così un carico aggiuntivo per l'alimentazione [3]. Nel caso di ISOLDE il fascio protonico, a differenza di SPES, risulta essere pulsato e da esperimenti effettuati appositamente per valutare tale aspetto si è visto che durante il periodo di irradiazione si raggiungeva una corrente di dispersione tra i 20 ed i 50 A [3] e quindi una resistenza equivalente compresa tra 1 e 2 k Ω , senza che si verificasse la scarica completa tra gli elettrodi. In questo caso si è posto rimedio al problema approfittando del fatto che il fascio fosse impulsato disattivando l'alimentatore di alta tensione durante l'impatto del fascio protonico e riattivandola subito dopo accelerando gli elementi prodotti; in questo modo si dà il tempo alle particelle cariche di ricombinarsi, ripristinando così l'isolamento in aria.

Differente è il discorso dei tubi di Boris, cioè due tubi di alluminio a diverso potenziale mantenuti separati tra di loro da due dischi di resina epossidica (Araldite®) in corrispondenza delle testate. Nel caso specifico costituiscono un condotto di circa 7 metri di lunghezza e vengono utilizzati per far passare i cavi in tensione attraverso il muro tra la piattaforma di servizio e quella del target. Tali tubi, nel 2006 dopo 14 anni dalla messa in opera, hanno presentato fenomeni di scarica superficiale (tracking) nel materiale polimerico dal lato target.

Bibliografia capitolo 2

- [1] Giorgio Baldo, Giancarlo Pesavento, Tecnica delle alte tensioni, ed. Cleup
- [2] Status report on the Holifield Radioactive ion beam project Oak Ridge National Laboratory, 2008.
- [3] D.C. Fiander, A. Fowler, CERN/PS, A 60 kV modulator for the target voltage of an online isotope separator.
- [4] Oak Ridge, private communications.

Capitolo 3

Le piattaforme di produzione del progetto SPES

3.1. Introduzione

La piattaforma di produzione del progetto SPES presenta tutte le problematiche tipiche delle piattaforme in alta tensione, oltre a problematiche costruttive particolari dovute alle condizioni di operazione. Con condizioni si intendono sia quelle ambientali (si opera a circa 7 metri sotto il livello del terreno), che risultano di particolare rilievo dal punto di vista elettrico, come pressione, temperatura e umidità, sia le condizioni che si riferiscono al livello di ionizzazione che nel caso in esame risulta essere superiore a quello delle piattaforme già esistenti. In questo capitolo si individueranno le parti sensibili, da un punto di vista elettrico, della piattaforma al fine di capire come queste possano interagire con le necessità tecnologiche per le quali la piattaforma è richiesta.

3.2. I carichi in alta tensione delle piattaforme

3.2.1. Carichi in alta tensione delle piattaforme di produzione

Per poter scegliere l'alimentatore di tensione è fondamentale individuare il valore delle correnti in gioco per un determinato livello di tensione e quindi determinare di conseguenza la corrente massima e la relativa potenza che deve essere fornita, considerando tutti i carichi conosciuti ed altri eventuali che possono aggiungersi, data la particolarità della modalità di funzionamento della piattaforma target.

Il cuore di tale piattaforma in alta tensione, dal punto di vista elettrotecnico, è costituito dai tubi acceleratori e deceleratori. Questi rappresenteranno i carichi veri e propri, sono cioè quei dispositivi sulla base dei quali, in condizioni ideali, si effettua la scelta della potenza dell'alimentatore in alta tensione. In realtà però esistono anche altri carichi, indesiderati ma inevitabilmente presenti, che incideranno sulla scelta finale di tale alimentatore che prendono il nome di carichi parassiti. Questi ultimi saranno quindi da individuare al fine di fare il possibile perché non incidano eccessivamente sulla scelta della potenza dell'alimentatore, ma soprattutto sulla stabilità di tensione.

I tubi acceleratori deceleratori (fig. 3.1) sono dispositivi al cui interno viene fatto il vuoto, atti ad accelerare o decelerare il fascio; sono realizzati da una serie di anelli metallici intercalati da anelli isolanti e collegati tramite resistenze di valore elevato secondo lo schema di un partitore resistivo.



Fig.3.1 - Tubo acceleratore [7]

Per un primo studio di fattibilità si sono presi come riferimento dei tubi acceleratori/deceleratori i cui valori sono stati riportati in tab.3.1.

Tab. 3.1: Caratteristiche tubi acceleratori e deceleratori. [6]

<i>TUBO</i>	<i>Tensione tot.</i>	<i>N° Sez.</i>	<i>kV/Sez.</i>	<i>N° gap/ Sez.</i>	<i>Ω/gap</i>	<i>Rtot.</i>	<i>Itubo</i>
Acceler.	200 kV	4	75	10	150 MΩ	6 GΩ	33 μA
Deceler.	200 kV	3	90	12	150 MΩ	5,4 GΩ	37 μA

3.2.2. Problemi dovuti alle radiazioni indirettamente ionizzanti

Dall'impatto del fascio protonico con le particelle del carburo di uranio vengono liberate fondamentalmente due tipologie di radiazioni: raggi gamma e neutroni.

Tali tipologie di radiazioni vengono definite indirettamente ionizzanti in quanto non avendo carica elettrica non hanno interazioni coulombiane con atomi o molecole.

3.2.2.1. I raggi gamma

Per quanto riguarda i Raggi gamma, essendo fotoni ad elevata energia, possono essere diffusi dagli elettroni o assorbiti da atomi e molecole del mezzo attraversato ionizzandolo e liberando elettroni e positroni detti secondari. Anche i raggi gamma possono produrre delle coppie elettrone-ione, ma generalmente il fotone non è altro che l'incipit a tali fenomeni di ionizzazione secondaria ed il suo contributo diretto risulta essere irrisorio rispetto quello dei secondari.

I raggi gamma inoltre, per la loro natura, non possono avere delle collisioni anelastiche con elettroni atomici e nessuno scattering di tipo coulombiano.

Le principali interazioni con la materia avvengono (fig. 3.2) tramite:

- a. Effetto fotoelettrico: Valido per energie fino a 500 keV; in questo caso se il fotone ha energia sufficiente a rompere l'energia di legame dell'elettrone atomico ionizzerà l'atomo, dando all'elettrone un'energia cinetica pari alla differenza tra quella di legame e quella del fotone. Per tale tipo di ionizzazione risulta fondamentale la massa atomica (Z) della materia che attraverserà il raggio gamma, come si può vedere dalla seguente relazione:

$$\sigma_{ph} \approx kZ^n$$

(ove σ_{ph} è la sezione d'urto per effetto fotoelettrico) ed il suo ruolo quindi è tanto più importante quanto maggiore è il numero atomico del materiale. Per elementi pesanti il suo contributo risulta essere predominante fino ad energie di 4-5 MeV.

- b. Effetto Compton: E' un effetto di scattering tra il fotone ed un elettrone debolmente legato al suo atomo; in questo processo l'elettrone riceverà una certa quantità di energia e di conseguenza il raggio gamma ne perderà un po' della sua. Nella materia in genere non ci

sono elettroni liberi quindi l'interazione avviene con gli elettroni legati agli atomi. Poiché ogni atomo ha Z elettroni, la sezione d'urto per atomo sarà data dalla sezione d'urto per l'elettrone moltiplicata per Z .

- c. Produzione di coppie elettrone-positrone: In questo caso un fotone che passa vicino ad un nucleo si annichilisce dando vita ad una coppia positrone elettrone con una certa energia cinetica; tale reazione può avere luogo se il fotone ha un'energia di almeno 1,022 MeV.

Da questo risulta chiaro come la sezione d'urto totale per un atomo risulta essere data dalla somma dei tre diversi contributi:

$$\sigma = \sigma_{ph} + Z\sigma_c + \sigma_{cop}$$

e moltiplicando tale valore per il numero di atomi per unità di volume si ottiene la probabilità di interazione che nel caso della piattaforma in esame indica la possibilità di ionizzazione. In radioprotezione tale fattore si chiama coefficiente di assorbimento totale μ :

$$\mu = \frac{\rho N_A}{A} \sigma$$

dove N_A è il numero di Avogadro, ρ è la densità del materiale, A è il peso molecolare.

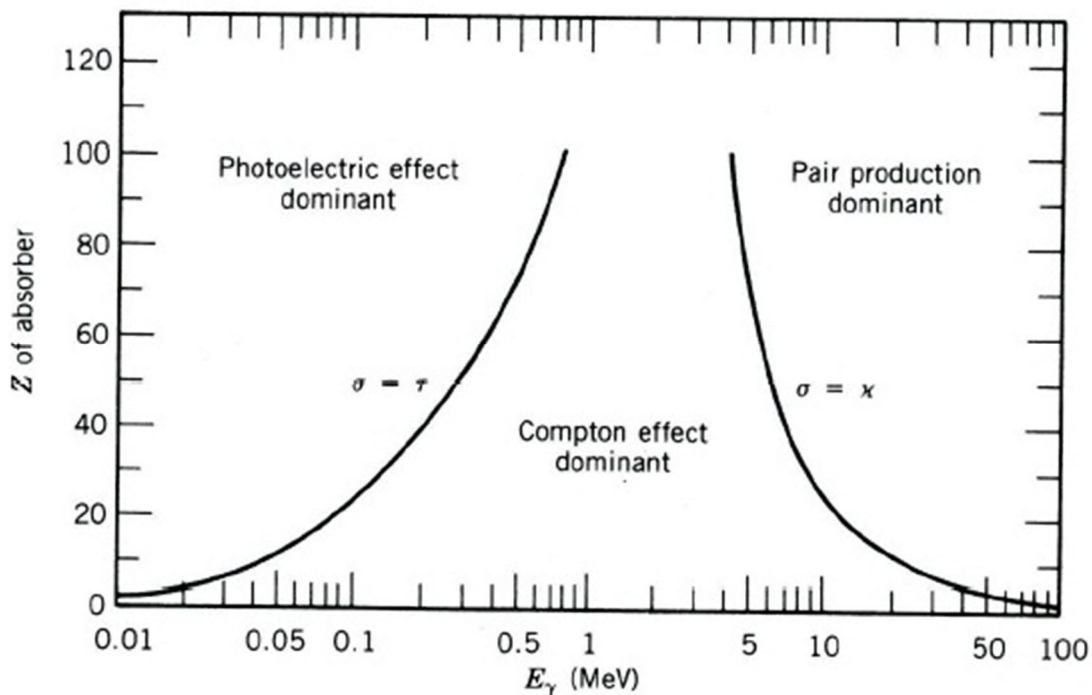


Fig. 3.2: Interazioni dei gamma con materia in funzione dell'energia e di Z

Tali ragionamenti potrebbero servire successivamente quando si andrà ad analizzare la profondità di penetrazione nello strato di polietilene dei tubi di Boris per capire se tutto l'isolante è sottoposto a degradazione o solo la parte superficiale. Però non tutta l'energia incidente viene depositata nel materiale [1] e per tener conto di questo si considera un coefficiente detto di assorbimento (linea più bassa fig.3.3 per l'aria).

Questo può essere fatto conoscendo μ (coefficiente di attenuazione lineare) per i vari materiali e poi considerando che la quantità di fotoni che passa indisturbata attraverso uno spessore x di materiale è data da:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu x}$$

Esiste una formula più generale che esprime lo stesso concetto sulla base di un altro coefficiente μ_m (coefficiente totale di attenuazione di massa, cioè μ/ρ , dove ρ è la densità di massa del materiale assorbente) ovvero:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu_m d_m}$$

dove d_m esprime lo spessore di massa cioè ρd , con d spessore del materiale (fig. 3.3).

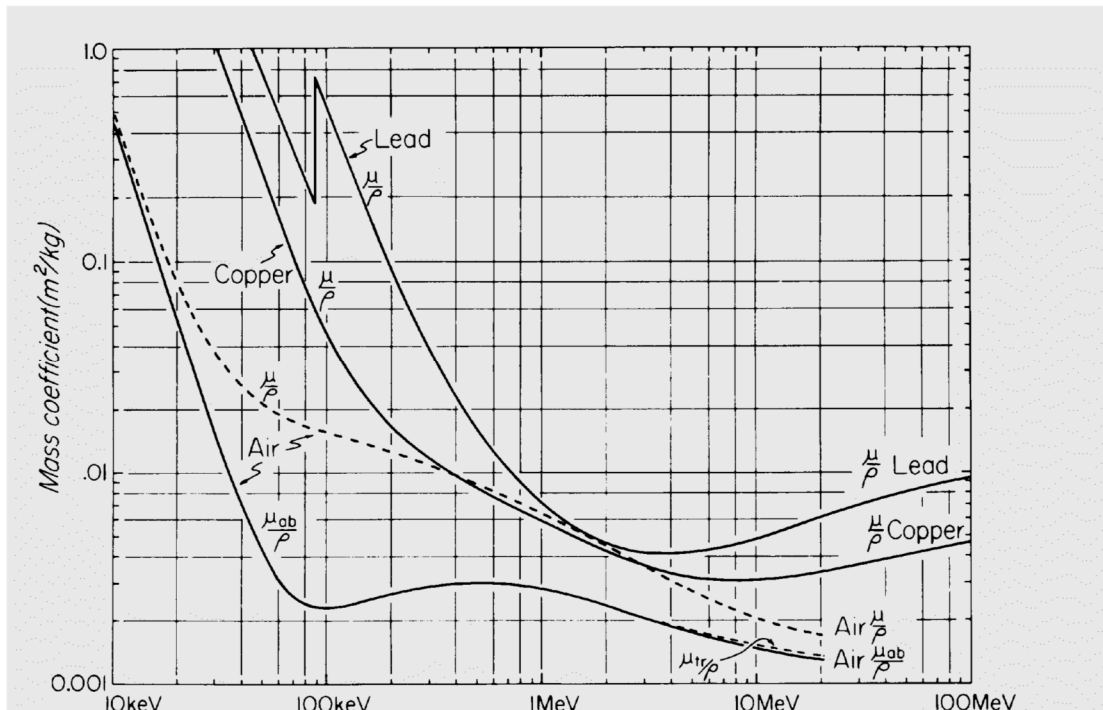


Fig. 3.3 : Coefficiente di attenuazione totale di massa in funzione dell'energia dei gamma

3.2.2.2. La dose neutronica

A causa dell'assenza di carica, i neutroni non interagiscono con gli elettroni che stanno sulle orbite, ma solamente coi i nuclei.

Le possibili reazioni a cui i nuclei possono portare dipendono dall'energia incidente:

- a) Scattering elastico: E' il solo meccanismo possibile per la perdita di energia di neutroni dell'ordine del MeV;
- b) Scattering Anelastico: Il neutrone deve avere energia sufficiente per eccitare il nucleo, di solito circa 1 MeV;
- c) Cattura Radiativa: Grazie alla cattura da parte dell'atomo si ha il rilascio di un gamma ma la sezione d'urto in questo caso è inversamente proporzionale alla velocità della particella quindi è efficiente a basse energie.

I neutroni sono le particelle che costituiscono il maggior problema dovuto alla ionizzazione dell'aria ed è chiaro quindi che l'utilizzo di schermi neutronici è utile dal punto di vista elettrico. I materiali possibili al fine di creare tali schermi possono essere paraffina, idrogeno o materiali ricchi di idrogeno, acqua. Il loro impiego non è esente da problemi: ad esempio la paraffina è un materiale infiammabile e l'acqua irradiata si scalda. L'utilizzo di metalli come il ferro e il tungsteno fornisce una schermatura anche per i raggi gamma; il piombo ed il ferro, ad esempio, riescono a catturare gamma da 7.4 e 7.6 MeV con il rischio, basso ma pur sempre presente, grazie alle iterazioni (n, γ) con ^{58}Fe di produzione di ^{59}Fe radioattivo e di produzione di ulteriori gamma a 1,1 e 1,29 MeV, [4]. E' necessario quindi capire come viene rilasciata l'energia una volta assorbiti i neutroni: per esempio, dal punto di vista della cattura di gamma il tungsteno è efficace quanto il piombo, e, dal punto di vista della cattura neutronica, è migliore del piombo, ma la reazione di cattura dei neutroni provoca il rilascio di gamma che provocheranno ancora ionizzazione. Un elemento molto efficace è il boro che possiamo usare in varie forme come il sodio borato (borex) che è un materiale a polvere cristallina facilmente modellabile, l'acqua borata oppure il carburo di boro B_4C . Commercialmente si trova un sandwich chiamato "Boral" costituito da una miscela di $Al - B_4C$, rivestito da un foglio di alluminio che tornerebbe utile nel caso in esame come schermatura, elettrica e neutronica nello stesso tempo, nella zona target. Altro materiale molto interessante è il polietilene che contiene, per unità di volume, il 18% in più di idrogeno rispetto all'acqua; ne esistono di svariate tipologie, ma quello a più alta densità con $\rho = 0,96$ ha una diminuita capacità di assorbire neutroni, anche se c'è sempre la possibilità di mescolare al polietilene il boro.

Esiste un'altra possibilità chiamata WEP (Water extended polyethylene) che è una particolare formulazione di polietilene con particolari capacità di schermatura di neutroni. Resta sempre il problema dello studio dei gamma emessi da materiali contenenti idrogeno usati come assorbitori di neutroni.

La legge di attenuazione dei neutroni è simile a quella vista per i gamma ed anch'essa si basa sulla sezione d'urto di rimozione neutronica Σ_{nr} (cm^{-1}) (Tab3.2) :

$$I(x) = I_0 e^{-\Sigma_{nr} x}$$

dove la dose neutronica viene espressa in $\frac{\text{neutroni}}{cm^2 s}$ e x rappresenta lo spessore dello schermo. Possiamo genericamente dire che:

$$\frac{\Sigma_{nr}}{\rho} (cm^2/g) = 0,206 A^{-1/3} Z^{-0.294}$$

dove A è il numero di massa atomica e Z è il numero atomico.

Mentre per i gamma i coefficienti di attenuazione ed assorbimento variano in modo regolare al variare del numero atomico, per i neutroni questo non avviene ed i coefficienti di attenuazione possono variare in modo irregolare da elemento ad elemento; l'andamento di tali coefficienti è inoltre complicato dal grado di presenza dell'idrogeno all'interno del materiale e pertanto il coefficiente Σ_{nr} è determinato sperimentalmente.

Medium	Σ_{nr} (cm^{-1})
Sodium	0.032
Graphite	0.078
Carbon	0.084
Concrete (6% H ₂ O)	0.089
D ₂ O	0.092
Zirconium	0.101
H ₂ O	0.103
Paraffin	0.106
Polyethylene	0.111
Lead	0.118
Beryllium	0.132
Iron	0.156
Copper	0.167
Uranium	0.182
Tungsten	0.212

Tab.3.2: Coeff di rimozione neutronica in materiali con sufficiente quantitativo di idrogeno[4]

Per materiali senza un considerevole quantitativo di idrogeno si considera la sezione d'urto macroscopica Σ dove:

$$\Sigma = N_i \sigma_i$$

dove $N = N_A/\rho$ atomi per grammo e σ_i è la sezione d'urto microscopica (barns, $1 \text{ barns} = 10^{-24} \text{ cm}^2$) ottenuta da grafici tipo quello di fig.3.4.

Anche in questo caso la comprensione del comportamento di tali particelle nei vari materiali risulta fondamentale ai fini della ionizzazione in quanto come si vedrà successivamente ci saranno zone a densità di ionizzazione più elevata rispetto alla media e quindi di conducibilità maggiore che necessiteranno probabilmente di un moderatore neutronico al fine di abbassare il livello di ionizzazione fino ad avere una corrente accettabile secondo le nostre esigenze.

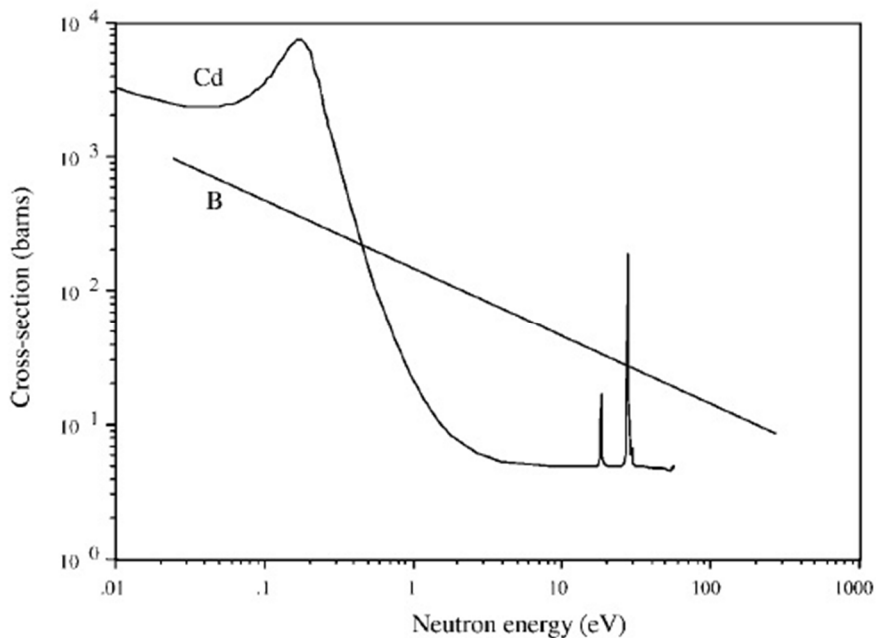


Fig.3.4: Sezione d'urto di assorbimento in funzione dell'energia per boro e cadmio[4]

Sarà quindi eventualmente possibile sfruttare le proprietà assorbitive di alcuni materiali, come ad esempio acqua, polietilene, boro al fine di aumentare localmente la resistività elettrica dell'aria diminuendo il fattore ionizzante.

3.2.2.3. La dose ionizzante in SPES

Da simulazioni fatte, l'effetto predominante per la ionizzazione da gamma è l'effetto Compton considerando che Z per l'aria secca è $\cong 14,4$ e che le energie sono dell'ordine del MeV.

Alla luce di questo, la dose attesa, cioè l'energia depositata per unità di massa, è pari a:

Tab. 3.3 Dose attesa nel target SPES

	Subito fuori dal target	Ad un metro dal target
Raggi γ	$10^4 \frac{Sv}{h}$	$50 \frac{Sv}{h}$
Neutroni	$10^6 \frac{Sv}{h}$	$5 \times 10^3 \frac{Sv}{h}$

Per vedere quelli che sono i contributi alla ionizzazione dei due diversi tipi di radiazioni è stato considerata dapprima la produzione di coppie di ioni all'interno della stanza (fig. 3.5)

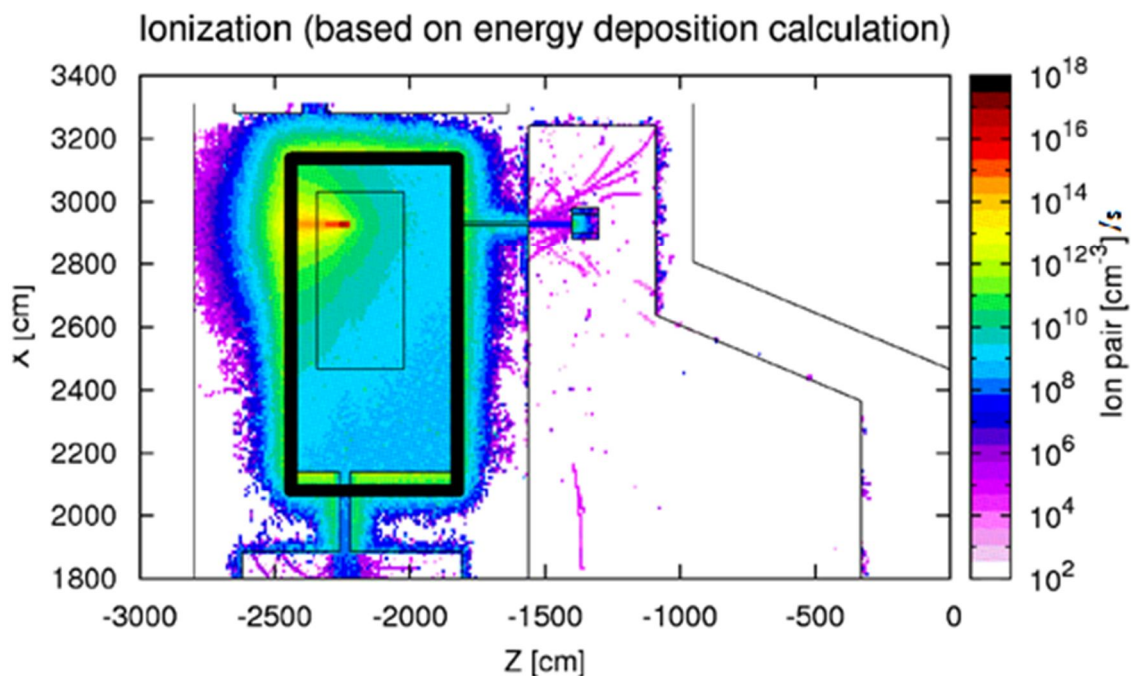


Fig.3.5: Simulazione zona target vista dall'alto, ingresso fascio in alto a destra, rettangolo nero sottile piattaforma 200 kV, nero più marcato muro 0V .

Di seguito sono elencati i passi fatti per capire l'entità della dose in Gray (J/Kg) da utilizzare nel calcolo della corrente di ionizzazione e quindi la diversa influenza di neutroni e gamma ai fini della ionizzazione.

La conversione da Sievert a Gray è diversa a seconda della radiazione considerata ovvero:

$$Sievert [Sv] = Q \times Gray [Gy]$$

dove Q è il quality factor dipendente dal tipo di radiazione:

Tab.3.4 Fattore di qualità per gamma e neutroni [4]

Quality Factor [Q]	
Neutroni	2 ÷ 10
Raggi γ	1

Per i raggi gamma il fattore di conversione è pari a 1 e quindi subito fuori dal target avremo

$$10^4 \frac{Gy}{h} = 2.78 \frac{Gy}{s}.$$

Per quanto riguarda i neutroni si ipotizza un Q = 2, in tal caso la quantità di Gray dovuta ai neutroni subito al di fuori del target è:

$$\frac{Gy}{h} = \frac{Sv}{h Q} = \frac{10^6}{2} = 5 \times 10^5 \rightarrow 138.89 \frac{Gy}{s}$$

ma per definizione il Gray è un'energia depositata per unità di massa quindi J/Kg perciò considerando che ($1 J = 6,24 \times 10^{18} eV$) si può affermare che:

$$En. neutroni_{Kg h} = 5 \times 10^5 \frac{Gy}{h} = 5 \times 10^5 \frac{J}{h Kg} = 31,2 \times 10^{23} \frac{eV}{h Kg}$$

Considerando l'aria in condizioni standard ed ad una temperatura di 30°C la densità della stessa sarà all'incirca $\rho_{Aria} = 1,165 \frac{Kg}{m^3} = 1,165 \times 10^{-6} \frac{Kg}{cm^3}$ l'energia per unità di volume è:

$$En. neut. cm^3 h = En. neutroni_{Kg h} \times \rho_{Aria} \times \frac{1}{3600} = 1 \times 10^{15} \frac{eV}{s cm^3}$$

Per produrre una coppia di ioni in aria sono necessari circa 34 eV [4], perciò le coppie di ioni stimate subito fuori dal target sono:

$$Coppie di ioni_{s cm^3} = \frac{En. neut. cm^3 h}{34} = 2,9 \times 10^{13} \frac{ioni}{s cm^3}$$

Il valore ottenuto è concorde con quello di fig. 3.5 nella zona considerata, quindi il fattore di qualità scelto è effettivamente intorno a 2 e quindi i Gray dovuti al flusso neutronico sono nettamente maggiori rispetto a quelli dovuti ai gamma, di conseguenza questi ultimi risultano essere poco rilevanti ai fini della ionizzazione rispetto ai neutroni da essere trascurabili.

Se il fattore di qualità fosse stato pari a 10, per esempio, si sarebbero avuti circa 27 Gy/s dovuto ai neutroni. L'influenza quindi dei $2,78 \text{ Gy/s}$ dovuti ai gamma sulla totale ionizzazione sarebbe passata da dell' 1,9% al 9% della totale ionizzazione che comunque è ancora parecchio bassa.

Una zona critica che potrebbe vanificare tutto l'isolamento tra 260 kV e 200 kV è la zona lungo la direzione di ingresso del fascio subito dopo il target, in quanto si ha una intensa ionizzazione in una zona esattamente parallela al campo elettrico (tratto orizzontale arancio vedi fig. 3.5.); è proprio in questo punto che è ipotizzabile l'utilizzo di un assorbitore per attenuare la ionizzazione tra 260 kV e 200 kV ed inoltre tra 200 kV e 0V

3.2.2.4. Parametri parassiti

I tubi acceleratori e deceleratori sono la parte più importante di tutto sistema anche se non sono però gli unici elementi da prendere in considerazione.

La ionizzazione dell'aria ad opera delle radiazioni provoca la nascita di molti elettroni liberi che variano la conducibilità dell'aria stessa creando un ulteriore carico. Data la natura stocastica dei fenomeni di ionizzazione, la produzione di coppie di ioni può essere stimata solo in modo sommario, inoltre può variare anche localmente, come si può osservare da figura 3.6, dove la corrente misurata ad una tensione costante di -250 V presenta una notevole variabilità.

Se si considerano le misure fatte in termini percentuali rispetto alla media si noterà che (figura 3.7) la variazione relativa con ionizzazione è più contenuta ma comunque apprezzabile.

E' presente inoltre il problema riguardante la variazione della corrente stessa in funzione della dose assorbita ed inoltre il suo comportamento al variare di parametri fisici, come pressione temperatura, umidità, e geometrici come la dimensione degli elettrodi e della distanza degli stessi cioè del volume considerato, come si vedrà più avanti.

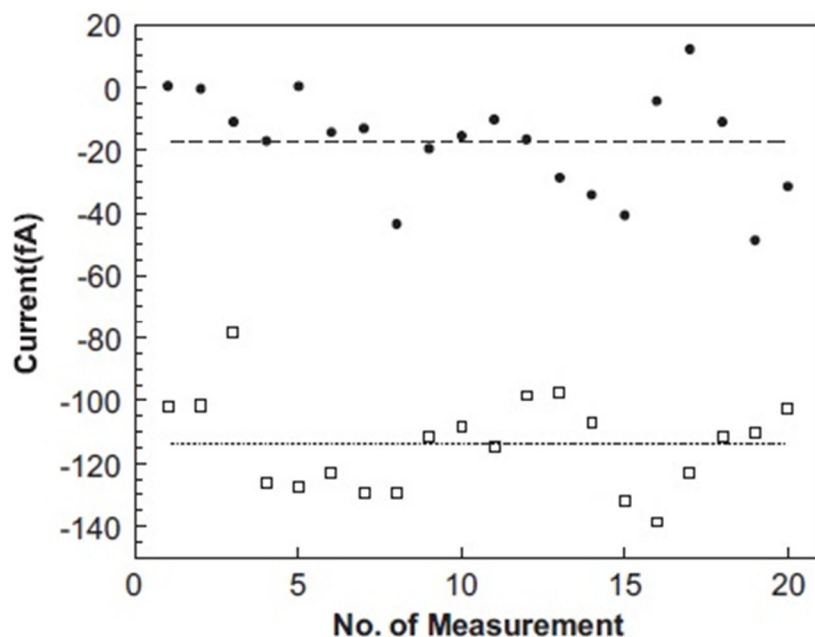


Fig. 3.6: Corrente rilevata attraverso un gap sottoposto ad una $V = -250$ V senza irraggiamento (pallini pieni) e con irraggiamento (con quadratini vuoti). [3]

Un altro elemento parassita che bisognerà considerare sarà costituito dal circuito di raffreddamento dell'acqua, che da potenziale di terra andrà a raffreddare elementi posti a 260 kV e che quindi costituisce un carico ulteriore per il nostro alimentatore che bisognerà opportunamente dimensionare tenendo conto della variazione della resistività dell'acqua

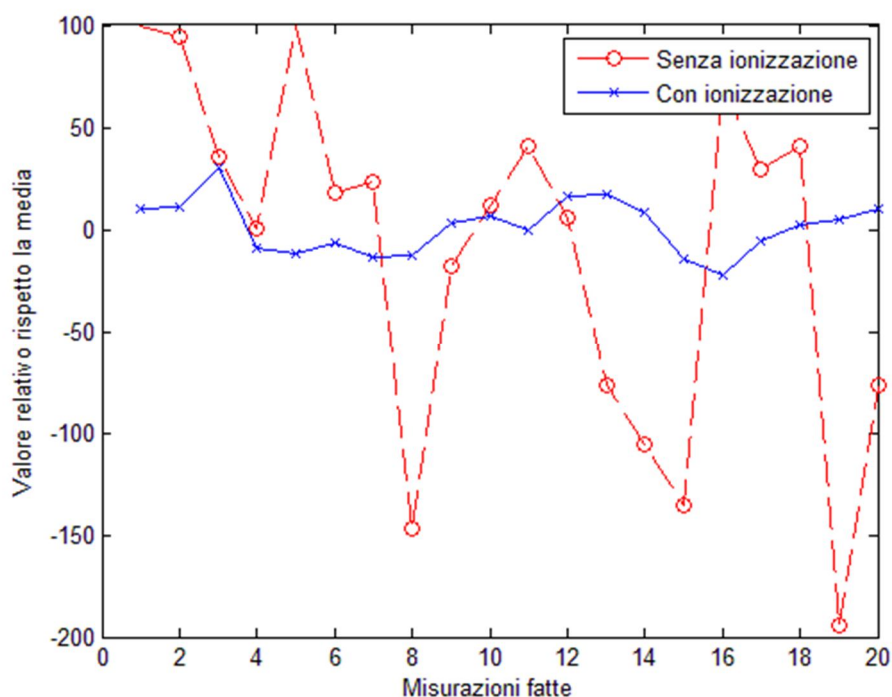


Fig.3.7: Esempio di variazione relativa della corrente con e senza ionizzazione a -250 V

che varierà con la sezione e con la lunghezza del tubo (oltre che con il grado di sali disciolti); bisognerà considerare anche che l'acqua è sottoposta anch'essa a radiazioni variando così le sue proprietà. La possibilità però di variare sia la sezione che la lunghezza del condotto permette di avere una certa libertà sulla variazione della resistenza risultante e per tale motivo, in questo studio di fattibilità, tale aspetto verrà per il momento accantonato. Vale la pena inoltre analizzare eventuali correnti parassite che si potrebbero presentare come correnti superficiali o volumiche all'interno del polietilene irradiato. Altro aspetto interessante da analizzare, sarà il comportamento degli isolatori portanti sia dal punto di vista elettrico che dal punto di vista meccanico quando irradiati con una certa dose di radiazioni.

3.3. Il circuito equivalente in alta tensione

Le notevoli dimensioni di tutto il sistema, le distanze ridotte tra le varie parti in tensione e l'area delle superfici a diverso potenziale, costituiscono un condensatore che subentrerebbe nella fase transitoria di inserzione dell'alimentatore di tensione o durante eventuali transitori di tensione (come ad esempio ripple). Se si considera la piattaforma stessa come un'armatura a 200 kV, e, come la seconda armatura, la stanza, che avrà le pareti ricoperte di alluminio poste al potenziale di terra, si può fare una stima della capacità stessa del sistema. In prima approssimazione è possibile stimare la dimensione delle due piattaforme pari a $3\text{ m} \times 4,5\text{ m} \times 2,3\text{ m}$, (fig 3.8). Supponendo che il muro sia posto ad una distanza di 1 m

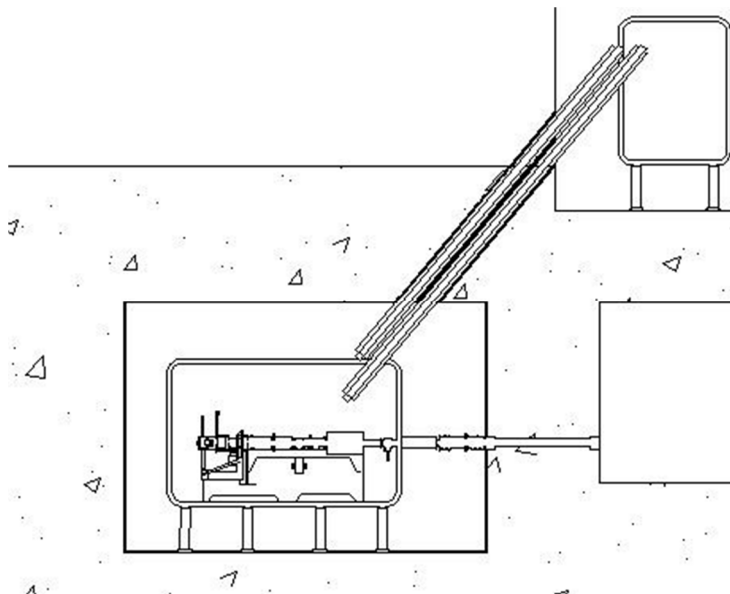


Fig3.8: Layout piattaforma target (basso a sinistra) e servizi (in alto a destra)

dalla piattaforma, il campo elettrico tra le due armature è piuttosto uniforme, fatto salvo per gli spigoli della piattaforma che però costituiscono una piccola parte rispetto alla dimensione totale delle piastre. È possibile valutare quindi la capacità complessiva equivalente come la somma delle capacità di ogni singola faccia del parallelepipedo considerando tale faccia come un condensatore piano di area pari alla minore delle due. È chiaro che tale calcolo dà solo un'idea di quello che è l'ordine di grandezza della capacità della piattaforma, perciò:

$$C = \varepsilon_0 \frac{S}{L} \quad [F]$$

Capacità $C1_{Piatt}$:

$$C1_{Piatt} = \varepsilon_0 \frac{2,3 \times 4,5}{1} = 9,16 \times 10^{-11} \text{ F}$$

ma considerando anche la piattaforma servizi le capacità C1 sono 4 quindi:

$$C1_{Piatt.Tot.} = C1 \times 4 = 3,6 \times 10^{-10} \text{ F}$$

Facendo lo stesso per gli altri piani:

$$C2_{Piatt.} = \varepsilon_0 \frac{3 \times 2,3}{1} = 6,10 \times 10^{-11} \text{ F}$$

$$C2_{Piatt.Tot.} = C2 \times 4 = 2,4 \times 10^{-10} \text{ F}$$

$$C3_{Piatt.} = \varepsilon_0 \frac{3 \times 4,5}{1} = 1,19 \times 10^{-10} \text{ F}$$

$$C3_{Piatt.Tot.} = C3 \times 4 = 4,7 \times 10^{-10} \text{ F}$$

$$C_{Piatt.} = C1_{Piatt.Tot.} + C2_{Piatt.Tot.} + C3_{Piatt.Tot.} = 1 \text{ nF}$$

A questa capacità andrà a sommarsi la capacità dovuta al dielettrico del trasformatore e quella dei tubi di Boris che sono costituiti da polietilene e quindi si tratta comunque di un valore stimato per difetto.

SCHEMA DEL CIRCUITO EQUIVALENTE IN ALTA TENSIONE

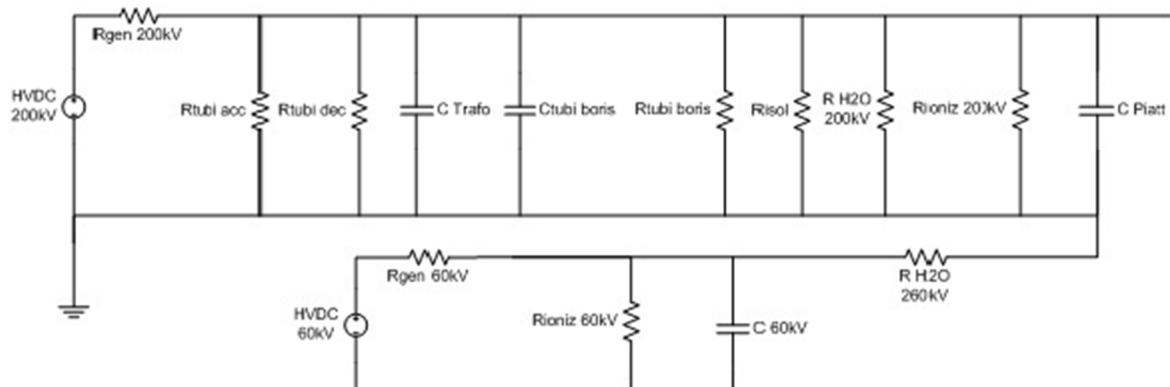


Fig. 3.9: Circuito equivalente di Alta Tensione

- $R_{gen\ 200\ kV}$ = Resistenza interna del generatore a 200kV (circa 10 M Ω)
- $R_{gen\ 60\ kV}$ = Resistenza interna del generatore a 60kV (circa 3 M Ω)
- $R_{tubi\ acc}$ = Resistenza dei tubi acceleratori (stima da tab.3.1)
- $R_{tubi\ dec}$ = Resistenza dei tubi deceleratori (stima da tab.3.1)
- $R_{tubi\ boris}$ = Resistenza equivalente che tiene conto delle correnti di dispersione
- $R_{H2O\ 200\ kV}$ = Resistenza dell'acqua del circuito di raffreddamento circuito 200Kv
- $R_{H2O\ 260\ kV}$ = Resistenza dell'acqua del circuito di raffreddamento circuito 260 kV
- $R_{ioniz\ 200\ kV}$ = Resistenza equivalente dovuta alle correnti di dispersione tra piattaforma 200kV e terra (cioè tra piattaforma e muro)
- R_{isol} = Resistenza isolatori sotto radiazioni
- $R_{ioniz\ 60\ kV}$ = Resistenza equivalente dovuta alle correnti di dispersione tra la parte a 260kV e 200kV
- C_{Trafo} = Capacità dovuta all'isolamento del trafo che viene caricato
- $C_{tubi\ boris}$ = Capacità rappresentativa dei tubi di Boris in polietilene
- C_{Piatt} = Capacità esistente tra piattaforma e muro
- $C_{60\ kV}$ = Capacità tra la parte a 260 kV e 200 kV

Ovviamente se si considera il funzionamento in regime stazionario tali capacità non entrano in gioco se non nella fase transitoria, come la fase di inserzione dell'alimentatore, fase che

come verrà analizzato nello specifico può richiedere svariati minuti durante i quali non si avrà di certo la stabilità in tensione ai capi dei tubi acceleratori e deceleratori.

Altro motivo per cui è stato importante avere una stima di tale parametro è dovuto all'importanza della conoscenza delle capacità in gioco al fine di stimare i tempi di attesa (e quindi di scarica di tali capacità) prima dell'accesso in sicurezza alla piattaforma servizi del personale addetto. A tal proposito una volta interrotta l'alimentazione verranno meno le resistenze di ionizzazione e le capacità costituite dalla piattaforma carica e dell'isolamento del trasformatore di isolamento si scaricheranno prevalentemente sulla resistenza dei tubi acceleratori e deceleratori e su quella dell'acqua di raffreddamento. Una volta a regime le resistenze, parassite e non, considerate fino ad ora, si possono considerare, fatta eccezione per le resistenze proprie dei generatori, come un insieme di resistori in parallelo tra di loro ed il circuito generale che ne risulterà sarà quello di fig.3.9. E' chiaro quindi che svolgono un ruolo chiave i valori dei parametri parassiti sul valore della tensione a valle della Rgen.

3.4. Necessità della stabilità in tensione

3.4.1. L'effetto del carico sull'alimentazione

Si cercherà ora di capire meglio il perché dello studio dei parametri parassiti e quanto questi influiscano sulla stabilità in tensione.

Nel caso in esame le esigenze di progetto impongono valori di oscillazione massima ammessa di circa 1 V, per cui risulta chiaro come la scelta dell'alimentatore sia importantissima al fine di soddisfare tale scelta.

La scelta dell'alimentatore però, è vincolata non solo dalla tensione di esercizio, ma anche dalla potenza necessaria, e quindi dai carichi ad esso connessi. Il problema quindi non è quello di quantificare il carico utile, ma di quantificare carichi parassiti e di capirne il loro comportamento in un ambiente così particolare come può essere quello della piattaforma di produzione, essendo un ambiente soggetto ad elevate dosi di radiazioni ionizzanti, al fine di minimizzarli o renderli irrilevanti per l'alimentatore stesso. Si consideri l'ipotesi di avere il circuito di fig 3.10, di essere a regime, e di considerare l'alimentatore a 200 kV con una

Circuito equivalente carico reale e parassita

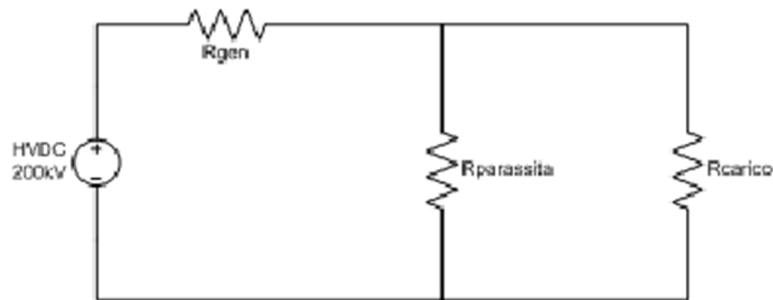


Fig. 3.10 Schema carico reale e parassita

resistenza di uscita di circa $R_{gen} = 10 \text{ M}\Omega$, che fungerà anche da protezione qualora si dovessero presentare fenomeni di scarica. In parallelo a tale generatore normale di tensione si avrà un resistore che rappresenterà il parallelo dei tubi acceleratori e deceleratori (R_{carico}), che da tabella è possibile realisticamente pensare che sia dell'ordine di $R_{carico} = 2,8 \text{ G}\Omega$, ed in parallelo il carico parassita ($R_{parassita}$), visto come resistore equivalente dato dal parallelo di tutte le resistenze indesiderate.

A questo punto si chiami V' la tensione a valle di R_{gen} e la si osservi al variare della $R_{parassita}$. E' possibile notare dal grafico di fig. 3.11 che tale tensione risulterà più stabile per valori di $R_{parassita}$ di almeno un ordine di grandezza superiore a quella del carico; se questa condizione è soddisfatta, verrà garantita una ulteriore stabilità oltre a quella che già l'alimentatore potrà fornire.

Se però si osserva quella che è la potenza assorbita dalle varie parti si noterà come al variare delle resistenze parassite questa si distribuisca sul circuito come mostrato in fig. 3.12 e in dettaglio 3.13. Si nota immediatamente come all'aumentare della resistenza parassita totale ci sia una inversione della distribuzione della potenza assorbita nei carichi. In particolar modo in corrispondenza di un valore di $R_{parassita} = 2,739 \times 10^9 \Omega$ non si avrà più un assorbimento di potenza prevalentemente da parte dei carichi indesiderati, ma la potenza spesa dall'alimentatore sarà dovuta prevalentemente all'assorbimento dei carichi veri e propri agli effetti della stabilità della tensione è esattamente ciò che si vorrà in quanto per tale valore l'alimentatore lavora in una zona di tensione stabile (fig 3.11).

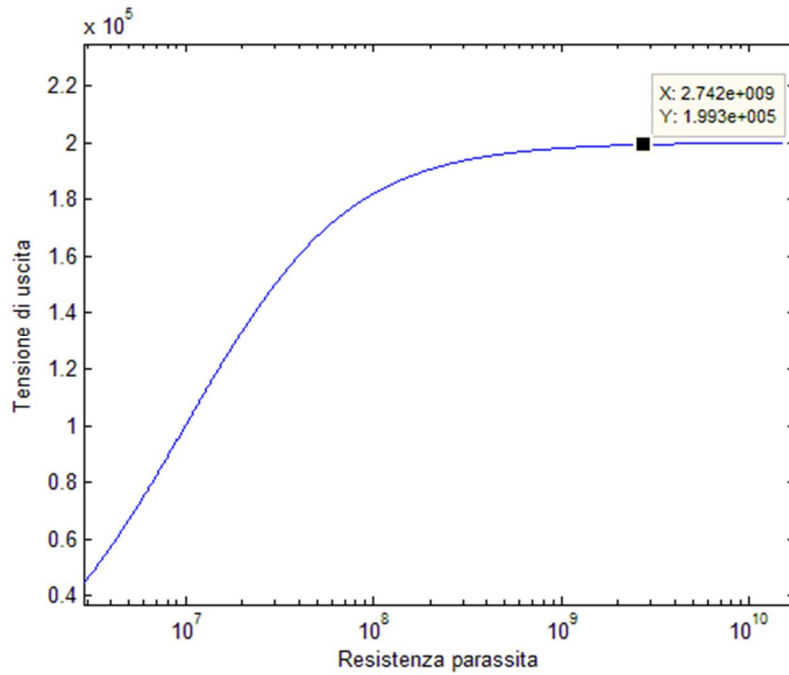


Fig.3.11: Variazione della tensione di uscita al variare della resistenza parassita equivalente (tensione in volt e resistenza in ohm)

Tale concetto risulterà tanto più vero quanto più elevata sarà la $R_{parassita}$. Ragionando in termini relativi può essere interessante innalzare ulteriormente il carico utile qualora non riuscissimo ad abbassare la resistenza parassita, andando però a incidere su quella che è la potenza richiesta all'alimentatore.

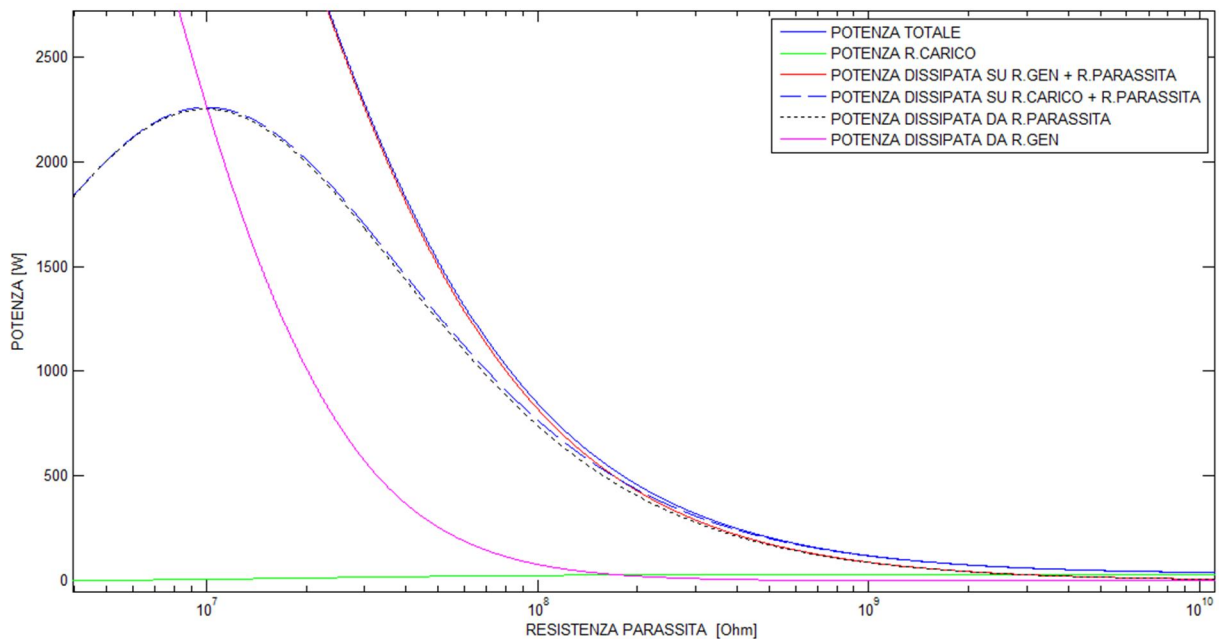


Fig.3.12: Variazione della potenza delle varie parti al variare delle resistenze parassite

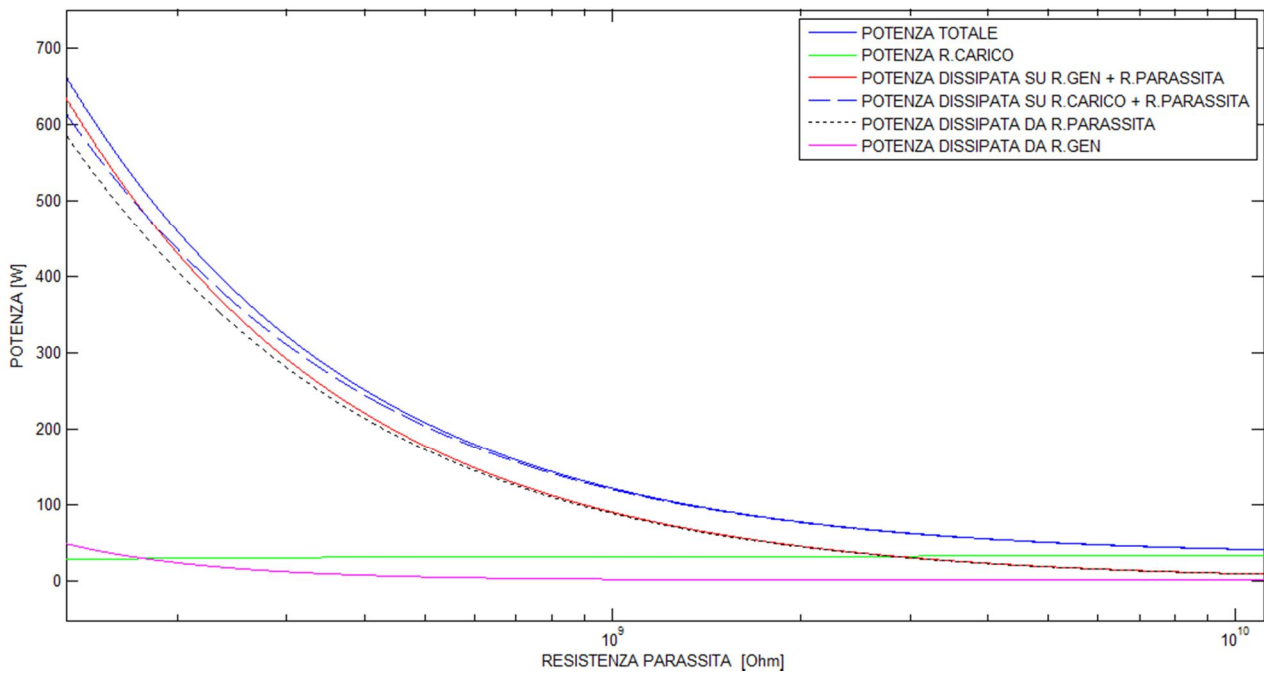


Fig.3.13: Dettaglio distribuzione della potenza al variare della resistenza parassita

3.5. Conclusioni

La presenza di radiazioni ionizzanti all'interno della stanza del bersaglio di produzione complica la scelta dell'alimentatore di tensione in quanto, in tali condizioni di esercizio, nascono dei carichi parassiti che provocano un duplice effetto: da un lato assorbono, inutilmente, ulteriore potenza dall'alimentatore e dall'altro, qualora il loro valore di resistenza equivalente non sia di almeno un ordine di grandezza superiore a quello dei tubi acceleratori/deceleratori, costringono il generatore a lavorare in una zona nella quale una piccola variabilità della resistenza parassita porta ad una elevata variazione della tensione di uscita dell'alimentatore. Ormai la maggior parte dei generatori in alta tensione è di tipo ultra stabilizzato ma l'elevata precisione del livello di tensione richiesto per tale applicazione induce a pensare come una miglior azione di controllo da parte dell'alimentatore stesso si possa effettuare se si opera oltre il ginocchio di fig. 3.11.

Bibliografia capitolo 3

- [1] Prof.Ing. Domiziano Mostacci – Appunti di protezione dalle radiazioni.
- [2] R.D. Evans: “The atomic nucleus”, Mc Graw Hill, 1955
- [3] Saturation characteristics of the ionization chamber at low dose rate, Park, H.S.Kim, Kang, Y.K.Kim, J.C.Kim, J.K.Kim, 2005
- [4] Physics for radiation protection: a handbook, James E. Martin, Wiley, Second edition, 2006
- [5] Fonte: CERN accelerator school
- [6] Progetto EXCYT LNS INFN
- [7] NEC (National Electrostatic Company) Website

Capitolo 4

Le correnti di ionizzazione in aria

4.1. Introduzione

Nel circuito equivalente preso in considerazione sono state introdotte due resistenze che rappresentano il carico costituito dall'aria ionizzata per effetto della radiazione. Nel capitolo che segue verrà analizzata l'influenza della ionizzazione sulla stabilità della tensione, cercando di quantificare la corrente assorbita nelle condizioni prossime a quelle di servizio. Verranno evidenziati inoltre i parametri da cui questa dipende cercando di individuare le zone più critiche delle piattaforme, al fine di capire il comportamento della corrente in un gas ionizzato da raggi gamma e neutroni. E' già stato fatto notare che nel circuito equivalente esistono due parti sensibili, rappresentate ognuna da due resistenze di ionizzazione: verranno analizzate quindi separatamente la parte a 60 kV e quella a 200 kV.

4.2. Il problema della corrente di dispersione

L'unicità dei livelli di ionizzazione raggiungibili con questa tipologia di esperimento, coniugata con l'assenza di una procedura standard per il dimensionamento di piattaforme in alta tensione in tali condizioni operative, rende difficile la previsione del comportamento di parametri come la conduttività dell'aria che in condizioni standard, a parità di tensione applicata, non rappresenterebbe un problema.

La presenza di neutroni, ed in misura minore di raggi γ , incide sul numero di elettroni liberi che si vengono a formare a causa di fenomeni di ionizzazione secondaria. Le cariche libere che così vengono a formarsi, sotto l'azione di un campo elettrico, creano la corrente di dispersione cui si è fatto riferimento nei paragrafi precedenti. Ovviamente questo non è l'unico problema in quanto, data l'entità della carica libera che si viene a formare e

l'eventuale presenza di asperità sull'involucro esterno della piattaforma, si potrebbero creare intensificazioni locali di campo elettrico, permettendo agli elettroni liberi di acquisire in un libero cammino medio sufficiente energia per ionizzare ulteriormente l'aria creando quindi i presupposti di una scarica, a patto che fenomeni di ricombinazione ed attaccamento non siano prevalenti.

4.2.1. L'analogia con i rivelatori a gas

Ciò che interessa calcolare, come già detto, è l'ordine di grandezza della corrente di dispersione ed inoltre valutarne il comportamento. Si può ritenere che una struttura come quella della piattaforma possa avere un comportamento analogo a quello di un rivelatore a gas utilizzato in fisica nucleare per la misura del livello di radiazioni presenti in un ambiente radioattivo. Nel caso della piattaforma però sarà impossibile applicare direttamente la teoria di tali dispositivi alla configurazione in esame, in quanto la sorgente ionizzante non è disposta internamente, ma esternamente; inoltre il volume attivo del "rivelatore" è costituito dallo spazio tra la piattaforma e la parete della stanza. La completa mancanza di simmetria e la presenza di volumi considerevoli che portano ad una ionizzazione non uniforme del volume attivo complicano l'approccio analitico del problema.

Nei rivelatori in genere, la radiazione incidente genera coppie di ioni che sotto l'azione di un campo elettrico si muoveranno in direzioni opposte, inducendo così una corrente nel circuito esterno e quindi una variazione sulla tensione di alimentazione, la cui entità dipende da diversi fattori, tra cui la capacità costituita dal carico, l'impedenza di uscita del generatore e la sua capacità di regolazione. Con riferimento ad un rivelatore tipico, considerando una ionizzazione di 10^{11} coppie di ioni prodotte ed una capacità di 1 nF come quella della piattaforma si avrà che, nell'ipotesi in cui tutta la carica venga raccolta e l'alimentatore si possa considerare disaccoppiato, una variazione di tensione pari a:

$$\Delta V = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{10^{11} \times 1,6 \times 10^{-19}}{1 \times 10^{-9}} = 16 V$$

La stima di 10^{11} coppie di ioni prodotte nel caso reale è un valore medio stimato per la zona compresa tra la piattaforma ed il muro; inoltre tale valore rappresenta la produzione

nell'unità di tempo (fig 3.4) ed il risultato evidenziato sopra risulta quindi inaccettabile tenendo conto delle esigenze di stabilità.

Nei normali rivelatori esistono zone di funzionamento diverse a seconda della tensione di applicata fig 4.1:

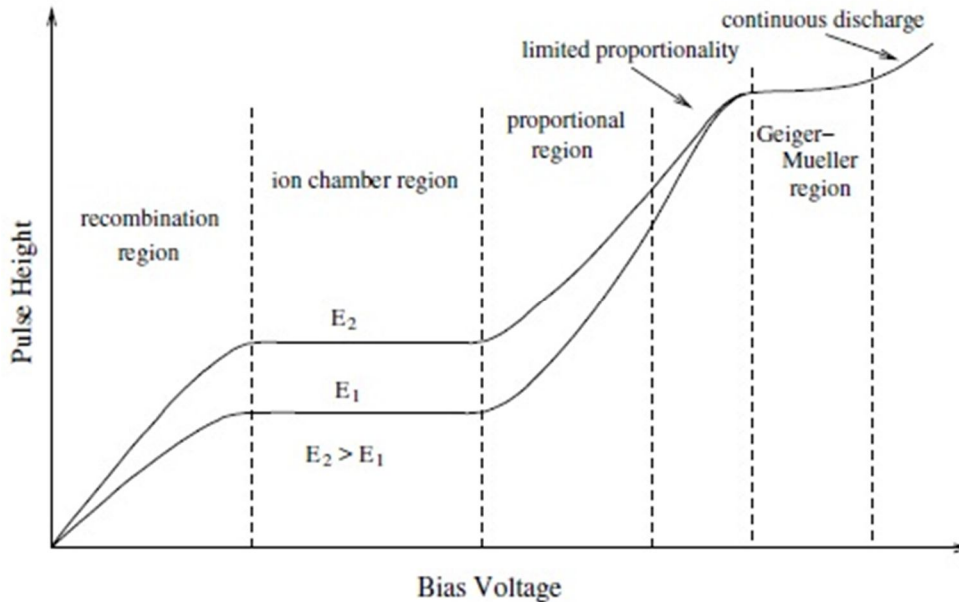


Fig 4.1: Zone di funzionamento delle varie tipologie di rivelatori con pulse height (se integrata nel tempo è una corrente) in funzione della tensione

Come si può osservare dalla figura distinguiamo cinque regioni di funzionamento:

- 1) *Regione di ricombinazione*: in questa zona il campo elettrico è molto basso per cui elettroni e ioni si muovono lentamente favorendo la ricombinazione che in questa zona assume valori considerevoli e sicuramente superiori a quelli di produzione delle cariche per ionizzazione
- 2) *Regione di camera a ionizzazione (o di saturazione)*: in questa zona c'è un perfetto equilibrio tra la carica che viene a formarsi per ionizzazione e la carica che viene raccolta agli elettrodi
- 3) *Regione proporzionale*: la corrente raccolta aumenta perché gli elettroni cominciano a produrre ionizzazioni secondarie grazie all'aumento di campo limitato ad una zona ristretta del rivelatore. In questo caso si sfruttano le proprietà del gas per produrre questa ionizzazione e così moltiplicare il segnale mantenendo però una certa proporzionalità con il segnale di ingresso.
- 4) *Regione di Geiger Müller*: il campo elettrico è sufficientemente elevato, tanto che la ionizzazione prodotta da un singolo evento provoca una valanga di coppie di ioni.

- 5) *Regione di scarica continua*: è una zona non utilizzabile in quanto il campo elettrico è talmente elevato che un singolo evento ionizzante provocherebbe una scarica continua, che viene interrotta solo togliendo l'alimentazione.

Alla luce di questo si capisce come la zona limite nella quale sarebbe opportuno che la piattaforma andasse a funzionare sia quella di saturazione (o di camera a ionizzazione), per due motivi precisi:

- I. in questa zona variazioni eventuali di tensione non provocano variazioni elevate di corrente a parità di ionizzazione
- II. non devono verificarsi ionizzazioni secondarie che, a differenza di quanto avviene per i rivelatori, rappresenterebbero un ulteriore carico ed aumenterebbero la probabilità di scarica. E' ragionevole ritenere che i parametri che caratterizzano il funzionamento delle camere a ionizzazione restino validi anche per la piattaforma sotto tensione: la corrente di dispersione sarà pertanto influenzata dalla dose incidente, dalla pressione, dalla tensione applicata e dai parametri geometrici.

Gli effetti attesi sono ad un livello decisamente più marcato rispetto a quelli delle camere per i valori delle grandezze di influenza che si collocano a livelli superiori di diversi ordini di grandezza.

4.3. Il funzionamento in zona di saturazione

Per essere sicuri che non avvenga ulteriore ionizzazione e quindi avere le condizioni necessarie al funzionamento in zona di saturazione bisognerà verificare che il campo elettrico sia di valore tale da non provocare ulteriore ionizzazione facendo assumere alle cariche durante un libero cammino medio sufficiente energia per poter indurre altra ionizzazione. Assumendo una energia di ionizzazione di 18 eV ed un cammino libero medio in aria a 760 Torr pari a $\lambda = 4,2 \times 10^{-5} \text{ cm}$ dovovrà essere:

$$q \lambda E < 18 \text{ eV}$$

dove q rappresenta la carica di un elettrone ed E il campo elettrico espresso in V/cm. Supponendo un campo uniforme sia nella zona a 200 kV sia in quella a 60 kV si avrebbero rispettivamente campi di circa 2 kV/cm e di $3,65 \text{ kV/cm}$ quindi considerando che:

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

e che quindi:

$$18eV = 2,88 \times 10^{-18}J$$

si otterrebbe per la parte a 200 kV :

$$q \lambda E = 1,602 \times 10^{-19} \times 4,2 \times 10^{-5} \times 2000 = 1,344 \times 10^{-20} J < 2,88 \times 10^{-18}J$$

per la parte a 60 kV invece:

$$q \lambda E = 1,602 \times 10^{-19} \times 4,2 \times 10^{-5} \times 3650 = 2,456 \times 10^{-20} J < 2,88 \times 10^{-18}J$$

Con le ipotesi fatte non ci sarebbero pertanto le condizioni per avere ionizzazione per effetto del campo elettrico; in realtà il campo non potrà essere uniforme tenendo conto della struttura della piattaforma, anche se l'intensificazione sugli spigoli o su altre parti in tensione potrebbe essere controllata agevolmente con adeguate schermature da definire in una fase successiva del progetto.

La stima che verrà fatta è pertanto ottimistica ed i risultati ottenuti sono stimati in difetto.

La già difficile configurazione asimmetrica e la totale anisotropia della fonte radiante sono solamente due dei molteplici aspetti che bisognerà considerare nella trattazione delle correnti di dispersione in ambiente fortemente ionizzato.

Solo recentemente si sono effettuati studi supportati da attività sperimentali per arrivare a ricavare una relazione che renda conto della dipendenza del fenomeno dai diversi parametri.

I risultati possono essere riassunti come segue:

indicando con τ il tempo di vita medio di una coppia elettrone ione, la probabilità che questi si ricombinino in un tempo "dt", cui corrisponderà anche un certo spazio percorso , è data da:

$$p = \frac{dt}{\tau}$$

Se si indicano con N il numero totale di coppie totali generate, la variazione di N dovuta alla ricombinazione sarà pari a:

$$dN = -N \frac{dt}{\tau}$$

che integrata fornisce la seguente espressione:

$$N(t) = N(0)e^{(-\frac{t}{\tau})}$$

Se t indica il tempo necessario agli ioni per attraversare lo spazio tra gli elettrodi, N(t) rappresenta il numero di particelle che raggiungono l'elettrodo opposto, dando un effettivo contributo alla corrente. Indicando con "x" questa distanza e con "v" la velocità di drift degli ioni si ottiene:

$$v = \frac{x}{t} = \frac{E\mu}{p}$$

dove “p” è la pressione, “μ” la mobilità ed E il campo elettrico.

Sostituendo nella relazione per N(t) si ottiene:

$$N(t) = N_0 e^{-\frac{xp}{E\mu\tau}} = \frac{N_0}{e^{\frac{xp}{E\mu\tau}}}$$

Si vede pertanto che valori elevati di campo elettrico, di mobilità e di durata di vita contribuiscono a ridurre il valore dell'esponente del termine a denominatore, con ciò indicando che il numero di cariche N(t) è ridotto di poco rispetto al dato di origine. Si ottiene un effetto opposto con la diminuzione del libero cammino medio collegato ad un aumento della pressione che favorisce la ricombinazione a causa dei più frequenti fenomeni di scattering. N(t) dipende ovviamente dalla posizione in cui la particella ionizzante ha creato la coppia di ioni e quindi dal tratto “x” che rimane alla particella per raggiungere l'elettrodo. In sostanza quindi $e^{\frac{xp}{E\mu\tau}}$ rappresenta la probabilità di raggiungimento dell'elettrodo opposto da parte delle cariche.

Poiché la generazione di cariche per effetto delle radiazioni è distribuita nell'intero volume, i tempi di transito saranno diversi. Il valore della corrente può essere calcolato a partire dal contributo del volume elementare “dV=Adx” dove la misura di x è in direzione del campo e A è l'area considerata. E' stato osservato sperimentalmente [2] che:

$$dI = (nZ_m\Phi\sigma)A dx e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)}$$

dove

- “n” rappresenta il numero di molecole del gas per unità di volume (numero di Loschmidt)
- “Z_m” è il numero atomico o molecolare
- “Φ” è il tasso di dose espresso in $\frac{Gy}{s}$,
- “σ” è la sezione d'urto per la ionizzazione.

L'equazione andrà integrata sulla totale distanza tra gli elettrodi “L”. Supponendo quindi un campo uniforme E=V/L, e prendendo in considerazione i parametri da cui dipende “t” si ottiene:

$$I = \frac{nZ_m\Phi\sigma\tau VA\mu}{pL} \left[1 - e^{-\frac{L^2 p}{\tau\mu V}} \right]$$

All'equilibrio è ragionevole ritenere che la durata di vita τ sia inversamente proporzionale alla densità di coppie di ioni (più alta la densità, maggiore la probabilità di ricombinazione),

ossia $\tau \propto \frac{1}{N}$. Il numero di coppie è funzione della pressione “p”, in quanto da questa dipende il numero di particelle per unità di volume e della dose assorbita “Φ”. Di conseguenza si può scrivere che il tasso effettivo di produzione delle cariche è dato da:

$$\frac{dN}{dt} = a\Phi p - bN_{ion}N_e$$

dove “a” e “b” sono delle costanti. All’equilibrio, N è costante e assumendo $N_{ion} \approx N_e \approx N$, si ottiene dall’equazione precedente

$$N^2 \propto \phi p \text{ e quindi } N \propto (\phi p)^{0,5}.$$

Considerando la relazione che sussiste tra τ ed N, possiamo concludere che $\tau \propto \frac{1}{(\phi p)^{0,5}}$ [2]. Se si assume per τ una dipendenza del tipo

$$\tau = \frac{\tau_0}{(\phi p)^{0,5}}$$

e si sostituisce questa relazione in quella della corrente otteniamo l’andamento generale della corrente di ionizzazione in funzione dei diversi parametri:

$$I = \frac{nZ_m \Phi^{0,5} \sigma \tau_0 V A \mu}{p^{1,5} L} \left[1 - e^{-\frac{L^2 p^{1,5} \Phi^{0,5}}{\tau_0 \mu V}} \right]$$

Interpolando i dati sperimentali ottenuti per l’aria sulla base di questa formula è stato possibile ricavare la dipendenza della costante di tempo dalla dose come mostrato nel

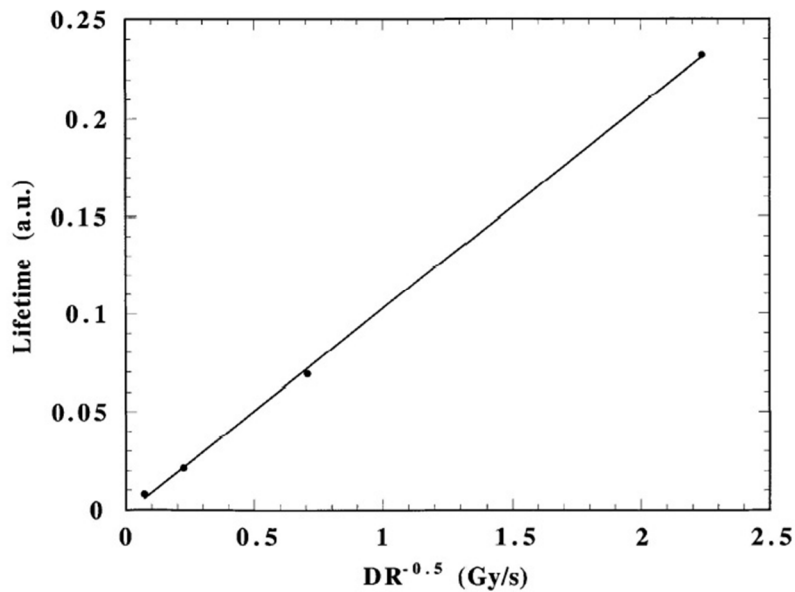


Fig. 4.2: Tempo di vita medio τ in funzione del tasso di dose assorbita per l’aria

grafico di figura 4.2 il quale dimostra come l'ipotesi sul legame tra τ , dose e pressione sia sostanzialmente corretta.

Nel caso di elevati volumi quali possono essere quelli della piattaforma di produzione di SPES, si potrebbe considerare in prima approssimazione $L \gg (\tau\mu)E/p$. In tale condizione l'ultima equazione vista si semplifica come segue:

$$I \propto \frac{Z_m A \phi^{0.5} \sigma \tau_0 \mu V}{p^{0.5} L}$$

evidenziando come in questo caso la corrente dipenda direttamente dalla radice quadrata della dose, il che può essere visto come un fattore positivo nel caso in esame. La relazione indica anche che tra corrente e tensione c'è un legame analogo a quello della resistenza nei solidi.

Se analogamente si considerano elevati campi elettrici, condizione che porta a $L \ll (\tau\mu)E/p$, si otterrà che:

$$I \propto p Z_m \phi \sigma A L$$

Tale equazione caratterizza il funzionamento in zona di saturazione, dove si nota una indipendenza della corrente dal valore di tensione; in tale condizione inoltre un aumento della pressione o della distanza tra elettrodi porta ad un aumento proporzionale della corrente di dispersione.

Bisogna notare però che nonostante la semplicità dei principi sulla cui base la formula finale è derivata, diventa estremamente complesso stabilire la dipendenza della corrente di dispersione da parametri ingegneristici fondamentali quali volume interessato, dose, pressione, peso molecolare del gas e campo elettrico.

4.4. La dose e le zone critiche

Le problematiche della piattaforma nascono da due tipologie di problemi: la prima è connessa al valore delle tensioni applicate (200 kV e 60 kV), la seconda alla dose massiccia di radiazioni presenti. Quest'ultimo aspetto può anche avere come conseguenza il fatto che le zone maggiormente critiche dal punto di vista della tenuta dielettrica non siano necessariamente quelle a campo più alto.

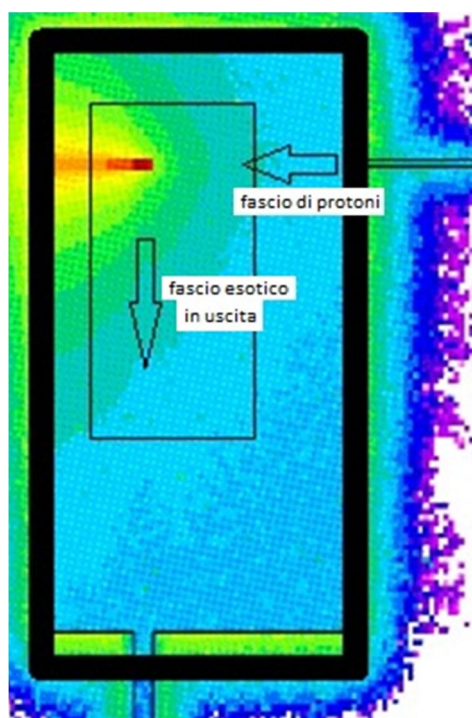


Fig.4.3: Ionizzazione sulla piattaforma 200kV (rettangolo interno).

La struttura ha forti caratteri di anisotropia per quanto riguarda la ionizzazione in aria. Nella Fig. 4.3 viene riportato il risultato delle valutazioni relative al livello di ionizzazione nell'ambiente della piattaforma.

Le due frecce indicano una il percorso del fascio di protoni in ingresso al bersaglio e l'altra la direzione di uscita del fascio esotico prodotto.

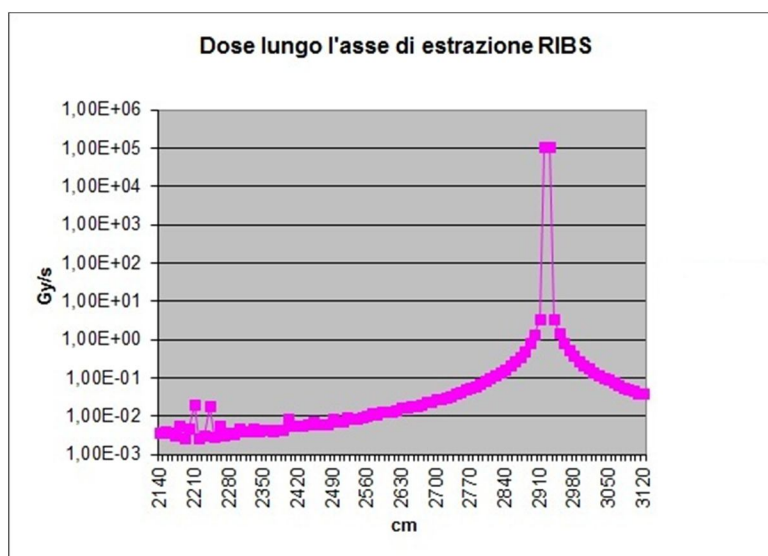


Fig.4.4: Dose parallela al fascio di uscita a cavallo del target (il picco è il target)

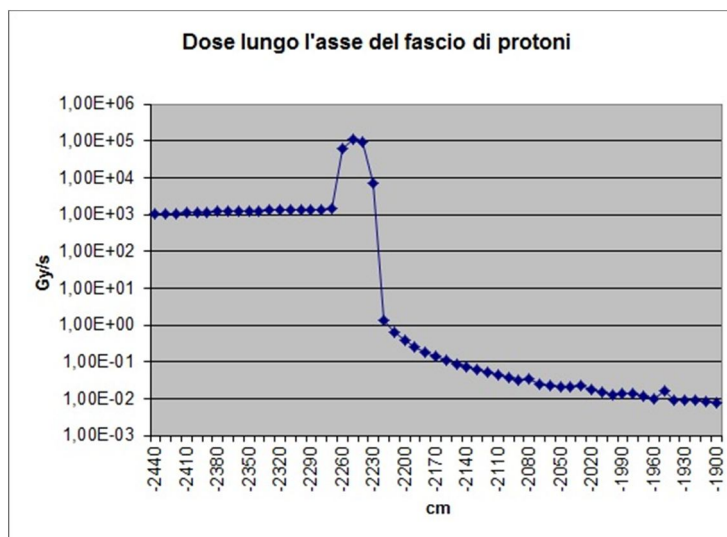


Fig.4.5: Dose parallela al fascio di ingresso a cavallo del target (il picco è il target)

Si osserva una forte anisotropia legata alla direzione di incidenza dei protoni.

Poichè, come descritto nel cap.3, la ionizzazione prodotta è dipendente dalla dose di radiazione si è fatta una valutazione quantitativa della dose intorno al target come riportato nelle figure 4.4 e 4.5. Si osserva come ci sia un decadimento molto marcato perpendicolarmente all'asse del fascio di ingresso in corrispondenza del target pur mantenendosi tassi dell'ordine di mGy/s anche a 7 metri di distanza.

Lungo la direzione del fascio di ingresso si hanno invece dosi molto elevate mantenendo un valore dell'ordine di $3000 \frac{Gy}{s}$ subito dopo il bersaglio e per una lunghezza di almeno due metri in direzione del muro, attraversando quindi tutta l'area a 60 kV (cioè tra target e piattaforma) e quella a 200 kV (tra piattaforma e muro).

Le zone critiche per il livello di ionizzazione raggiunta sono ovviamente localizzate nelle immediate vicinanze del fascio; in altre, come quelle degli isolatori sulla piattaforma che dividono la parte a 260 kV da quella a 200 kV la ionizzazione è nettamente minore ma non è escluso che ci possano essere comunque elevate correnti di ionizzazione.

4.5. La dipendenza dai parametri

La corrente indotta da radiazioni ionizzanti ed in particolare quella di saturazione dipende dai parametri fisici dello spazio tra gli elettrodi; la relazione spesso è non lineare con

l'insorgenza di fenomeni anomali, diversi da quelli attesi nel caso in cui ci sia solo la tensione applicata.

4.5.1. La dipendenza dalla pressione

La pressione utilizzata all'interno della stanza del target è di circa 755 Torr; il motivo di tale scelta operativa è legato al fatto che operando con materiale radioattivo l'aria presente nella stanza diventa essa stessa radioattiva per cui è necessario creare una leggera depressione all'interno per evitare la fuga di gas pericolosi verso l'ambiente esterno.

L'idea di creare nell'ambiente un vuoto spinto per eliminare la ionizzazione risulta impensabile a causa degli elevati volumi in gioco e dei problemi delle tenute che non permetterebbero di raggiungere valori di vuoto significativi.

Alla luce di questo, sono state analizzate delle prove effettuate [3] con valori di campo elettrico circa uguali a quelli prevedibili per l'esperimento in esame ($100 \frac{kV}{m}$ in condizioni di campo uniforme) ma con differenti valori di dose, osservando come la corrente di dispersione cambia per due diversi valori di pressione (fig. 4.6, fig.4.7):

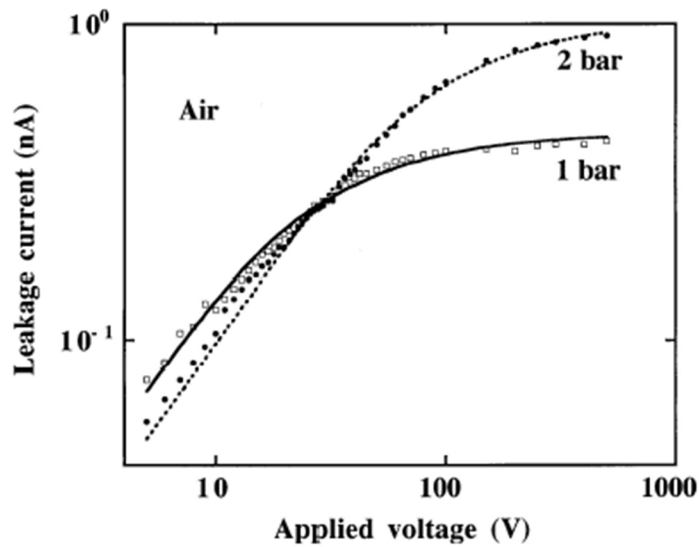


Fig.4.6: Correnti di saturazione per una dose di $0,02 \frac{Gy}{s}$ a due diversi tipi di pressione

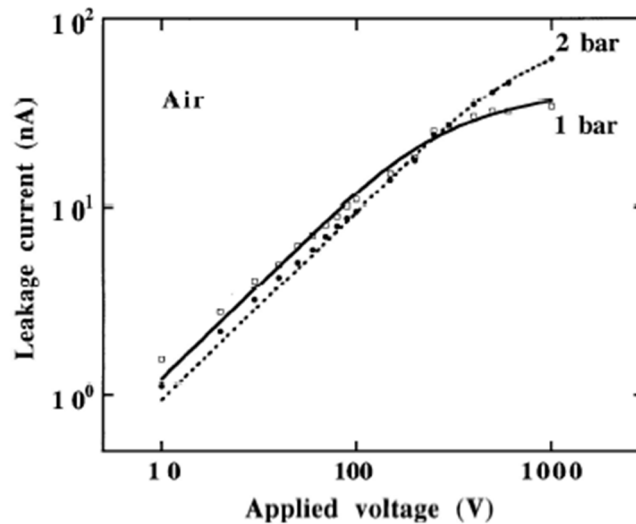


Fig.4.7: Correnti di saturazione per una dose di $2 \frac{Gy}{s}$ a due diversi tipi di pressione

E' da notare come per bassi valori di tensione in entrambi i casi la corrente (e quindi in qualche modo la conduttività) sia minore nel caso a 2 bar a causa della diminuzione del tempo di vita medio delle coppie elettroni ioni, in accordo con le considerazioni svolte precedentemente secondo cui una pressione più elevata aumenta la probabilità di ricombinazione a causa dell'aumento di particelle per unità di volume. A parità di dose e di pressione la corrente aumenta con il campo E fino ad una situazione di equilibrio (saturazione). La pendenza con cui cresce la corrente rimane pressoché la stessa per i due diversi valori di dose il che significa che, almeno per bassi valori del campo elettrico, la velocità di cattura rispetto quella di produzione delle cariche rimane sostanzialmente sempre la stessa. Ovviamente però i valori di saturazione sono diversi perché la corrente è direttamente proporzionale alla dose e alla pressione, parametri che definiscono anche l'andamento dell'esponenziale. In entrambi i casi si nota che nel passaggio da 1bar a 2 bar le caratteristiche si incrociano per valori di tensione che cambiano con la dose. Tale variazione sembra essere abbastanza lineare, in quanto un aumento di due ordini di grandezza sulla dose ha portato allo spostamento di due ordini di grandezza sulla corrente e sulla tensione nel punto di incrocio. Lo stesso tipo di analisi è stato condotta per l'SF₆ ed i risultati sono presentati di seguito solo come elementi di paragone, perché è escluso che questo gas possa essere utilizzato per l'impianto in considerazione.

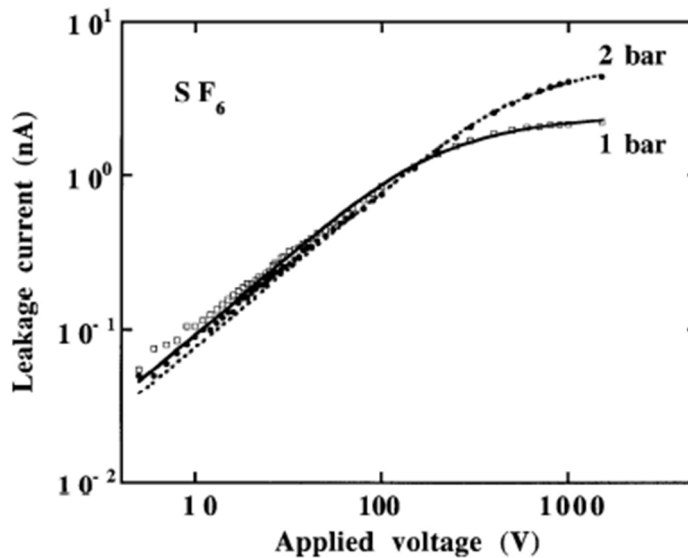


Fig.4.8: Corrente di dispersione nell'SF6 con 0,02 Gy/s

E' comunque interessante l'analisi del suo comportamento in quanto esiste una tipologia di condotti in alta tensione che lo utilizza come mezzo isolante.

Tab.4.1: Correnti di dispersione nella parte iniziale della caratteristica (bassi campi)

Gas	Dose rate(Gy/s)	Corr. a 1 bar (nA)	Andamento al variare di p	Corr. a 2 bar (nA)
Air	0,02	0,07	↓	0,05
Air	2	1,5	↓	1
SF6	0,02	0,08	↓	0,06
SF6	2	1	↓	0,7

Dalle fig. 4.8 e 4.9 si può notare come per gli stessi valori di dose e di campo le correnti di saturazione siano più elevate rispetto a quelle in aria, non solo, ma presentino anche qui uno slittamento in avanti del punto di incrocio delle caratteristiche quando viene aumentata la dose. L'aumento del numero atomico molecolare del gas utilizzato fa sì che non si abbia più intersezione tra le caratteristiche a pressione diversa.

Dalla tabella 4.1 elaborata per bassi campi si evidenzia come la corrente drenata sarà maggiore nell'SF₆ se la dose assorbita è bassa, mentre se viene aumentata la dose la situazione si inverte. Per campi elevati, quali quelli di impiego prevedibili, la situazione è riassunta nella tabella 4.2.

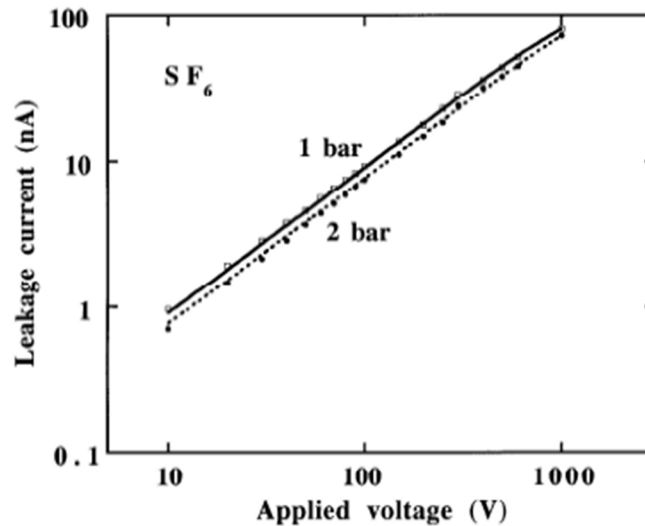


Fig.4.9: Corrente di dispersione nell'SF₆ irradiato con 2 Gy/s

La forbice tra la corrente in aria e in SF₆, a parità di dose e di pressione, si allarga notevolmente; con 2 bar e 2Gy/s il rapporto sale a 4. Le dosi prevedibili per l'impianto sono molto più elevate e lo stesso vale per i campi elettrici: questo farebbe slittare il punto di intersezione sempre più a destra portando probabilmente correnti leggermente più elevate per condizioni di pressione minore.

Tab4.2: Valori orientativi delle correnti ad elevati campi

Gas	Dose rate(Gy/s)	Corr. a 1 bar (nA)	Andamento al variare di p	Corr. a 2 bar (nA)
Air	0,02	0,7	↑↑	0,8
Air	2	20	↑↑	50
SF6	0,02	1,5	↑↑	3
SF6	2	80	↓	75

In linea di principio quindi la pressione ottimale da utilizzare verrebbe a dipendere dal campo a cui si andrà a lavorare, anche se da un punto di vista pratico la scelta è vincolata.

4.5.2. La dipendenza dalla distanza degli elettrodi

Altro parametro fondamentale che gioca un ruolo importante è la distanza; infatti dalle prove effettuate [4] si evidenzia un comportamento anomalo nell'andamento delle correnti di saturazione al variare della distanza, come mostrato in fig. 4.10. Entrambe le curve

presentano un massimo per campi elevati ed il picco dell'SF₆ è più elevato di quello dell'aria; solo per campi bassi la situazione si inverte.

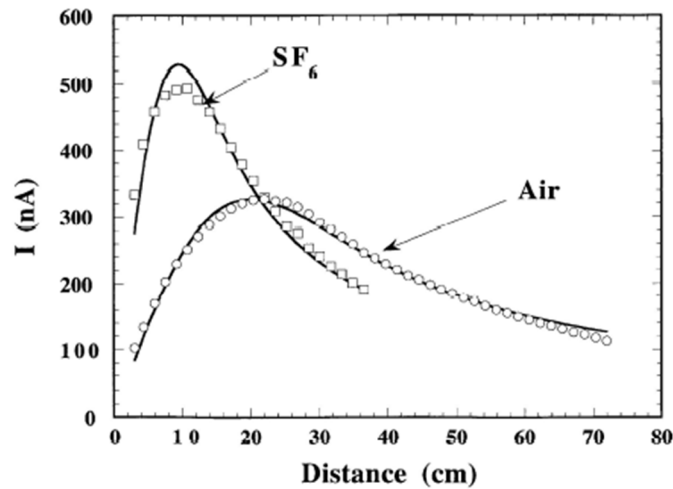


Fig.4.10: Andamento delle correnti di saturazione al variare della distanza per aria e SF₆ con una tensione di 3 kV con dose di 1Gy/s

E' ovvio che se si dovessero prendere in considerazione condotti isolati in SF₆ i campi elettrici sarebbero piuttosto elevati per utilizzare al meglio le caratteristiche dielettriche del gas ($\approx 2 \frac{MV}{m}$), andando quindi incontro a possibili problemi di corrente di dispersione: questa infatti è dipendente dalla distanza tra gli elettrodi e quindi dal volume considerato. Compatibilmente con quella che è la rigidità dielettrica del gas utilizzato, e quindi delle distanze che saranno prese in considerazione, è possibile avere a parità di corrente drenata elevati campi in aria oppure in alternativa bassi campi in SF₆: queste considerazioni sono solo a livello teorico, in quanto nel nostro caso non è possibile usare SF₆.

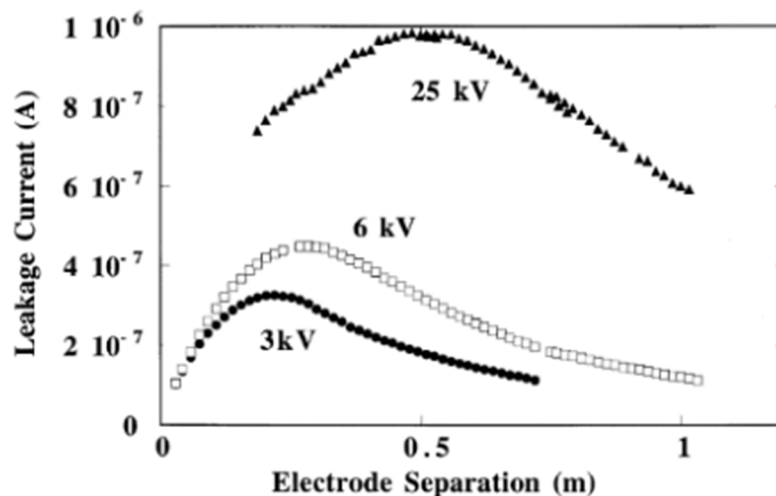


Fig. 4.11: Andamento delle correnti di saturazione in funzione della distanza e della tensione per una dose di 1Gy/s

Nella zona a 60 kV sulla piattaforma supponendo di riuscire a fare un campo piuttosto uniforme su una distanza di 16 cm i campi prevedibili saranno dell'ordine di 375 kV/m con dosi inferiori al Gy/s quindi l'aria per i nostri scopi è decisamente l'isolante migliore anche per la parte a 200 kV.

Ovviamente dalla fig.4.11 si vede come all'aumento della tensione corrisponda un proporzionale aumento della corrente di saturazione con uno spostamento del picco di massimo.

4.5.3. La dipendenza dalla dose e dal tipo di gas

Nel caso della piattaforma in esame non è possibile assumere un valore di dose costante per le varie parti, essendo la sorgente localizzata. Ci sarà quindi un decremento esponenziale a partire dalla zona del target sia nella zona perpendicolare al fascio di ingresso (zona 60 kV) che esternamente alla piattaforma (zona 200 kV). Per questo motivo anche i valori di dose che verranno presi in considerazione per queste due parti saranno necessariamente valori medi. L'andamento della corrente di ionizzazione con la dose assorbita si può dedurre dalla fig. 4.12 [2]; nelle condizioni di prova - $d = 1,5$ cm - l'aumento della corrente di saturazione con la dose è abbastanza lineare. Si verifica infatti che l'aumento di un ordine di grandezza della dose comporta un aumento analogo per la corrente. All'aumentare della dose la corrente di saturazione viene ottenuta con valori più elevati di tensione.

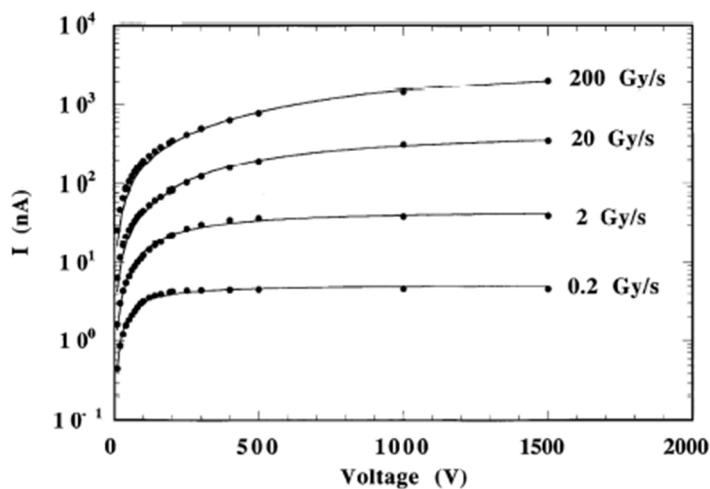


Fig.4.12: Andamento delle correnti in aria a pressione atmosferica per una distanza elettroica di 1,5 cm

Il progetto preliminare della piattaforma prevede come elemento vincolante la soluzione in aria in condizioni controllate. Ciò nonostante è possibile vedere come ci sia una dipendenza lineare della corrente di dispersione dal peso atomico molecolare - fig. 3.13 - e questo ci fa intuire quindi come ci possa essere un contributo positivo dell'umidità dell'aria nei confronti della corrente di ionizzazione. Ricordiamo infatti che nelle prove si è utilizzata aria secca e quindi si è considerato una miscela di 80% di Azoto ed un 20% di Ossigeno quindi con un Z_m (numero atomico molecolare):

$$Z_m = 0,8 \times 14 + 0,2 \times 16 = 14,4$$

Tuttavia se si pensa di poter operare con umidità relative basse (intorno al 10%) il contributo non può essere molto elevato. tutto Ragionando a pressione costante, come effettivamente è, considerando un 10% di umidità relativa avremo:

$$Z_m = (0,75 \times 14) + (0,15 \times 16) + (0,1 \times 10) = 13,9$$

Quindi ci si può aspettare un leggero miglioramento sulla corrente a causa di una leggera diminuzione del numero atomico; inoltre il vapore acqueo ha proprietà elettronegative favorendo ulteriormente la diminuzione della corrente di saturazione.

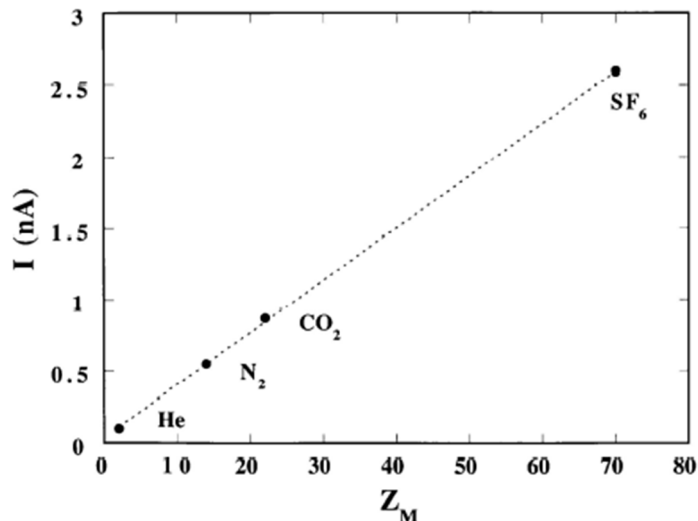


Fig.4.13: Correnti di saturazione per gas con diverso numero atomico molecolare Z_m ed una dose di 0,02Gy/s a1500V su 1,5 cm

Tale aspetto è molto importante nel nostro caso in quanto operiamo a sette metri sotto il livello del suolo ma, come visto, la presenza di vapore acqueo può risultare favorevole a

patto, ovviamente, che non ci sia formazione di condensa che potrebbe portare a deformazioni localizzate del campo ed aumento della dispersione superficiale.

Per provare a giustificare la dipendenza della corrente da Z_m consideriamo una dose di 2500 Gy/s:

$$2500 \frac{\text{Gy}}{\text{s}} = 2500 \frac{\text{J}}{\text{Kg s}} = 1,56 \times 10^{22} \frac{\text{eV}}{\text{Kg s}}$$

per l'aria secca l'energia di ionizzazione abbiamo detto essere di 34 eV ed un peso specifico di $\rho_{\text{Aria}} = 1,165 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 1,165 \times 10^{-6} \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^3}$ per cui gli ioni prodotti sarebbero:

$$\text{Coppie ioni prodotte} \frac{1}{\text{Kg s}} = \frac{1,56 \times 10^{22}}{34} = 4,5 \times 10^{20} \frac{\text{coppie ioni}}{\text{Kg s}}$$

Considerando l' unità di volume:

$$\text{Coppie ioni prodotte} \frac{1}{\text{cm}^3 \text{s}} = 4,5 \times 10^{20} \times 1,165 \times 10^{-6} = 5,24 \times 10^{14} \frac{\text{coppie ioni}}{\text{cm}^3 \text{s}}$$

Per l'SF₆ invece, considerando la stessa dose, avremo una energia di ionizzazione di circa 35,45 eV [6] e una densità a pressione atmosferica e 15°C di $\rho_{\text{SF}_6} = 6,7 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} = 6,7 \times 10^{-6} \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^3}$ perciò:

$$\text{Coppie ioni prodotte} \frac{1}{\text{Kg s}} = \frac{1,56 \times 10^{22}}{35,45} = 4,4 \times 10^{20} \frac{\text{coppie ioni}}{\text{Kg s}}$$

e per unità di volume di SF₆:

$$\text{Coppie ioni prodotte} \frac{1}{\text{cm}^3 \text{s}} = 4,4 \times 10^{20} \times 6,7 \times 10^{-6} = 2,94 \times 10^{15} \frac{\text{coppie ioni}}{\text{cm}^3 \text{s}}$$

Di conseguenza le coppie prodotte, e quindi le cariche libere, per unità di volume sono maggiori nell'SF₆ e questo spiegherebbe il motivo del perché gas con numero atomico più elevato abbiano maggiore corrente di dispersione in presenza di radiazioni ionizzanti. Tale

ragionamento prescinde dal comportamento elettronegativo dei gas considerati in quanto sia l'SF₆ che l'aria secca considerata in tali prove (80% Azoto e 20% O₂) sono gas con comportamento elettronegativo.

4.5.4. La variazione della tensione di scarica con la radiazione

Dalle considerazioni precedenti è evidente che la distanza gioca un ruolo fondamentale per la corrente di ionizzazione; abbiamo visto inoltre come l'aumento della distanza e quindi del volume vada bene da una certa distanza in poi, distanza che dipende fondamentalmente da dove è localizzato il picco di corrente di saturazione, e come visto dai paragrafi precedenti tale picco si presenti per distanze sempre più elevate mano a mano che viene aumentata la tensione di alimentazione. Dal grafico 4.11 si nota che per una tensione di 35 kV il massimo si presenta a 0,5 m, quindi nel nostro caso per i 200 kV dovremo mantenerci o a distanze molto elevate, situazione che si tradurrebbe in un onere economico per le infrastrutture, oppure a distanze molto brevi. In questo secondo caso però si pone il problema di come vari la rigidità dielettrica dell'aria con la dose assorbita. I risultati sperimentali disponibili sono riportati in figura 4.14.

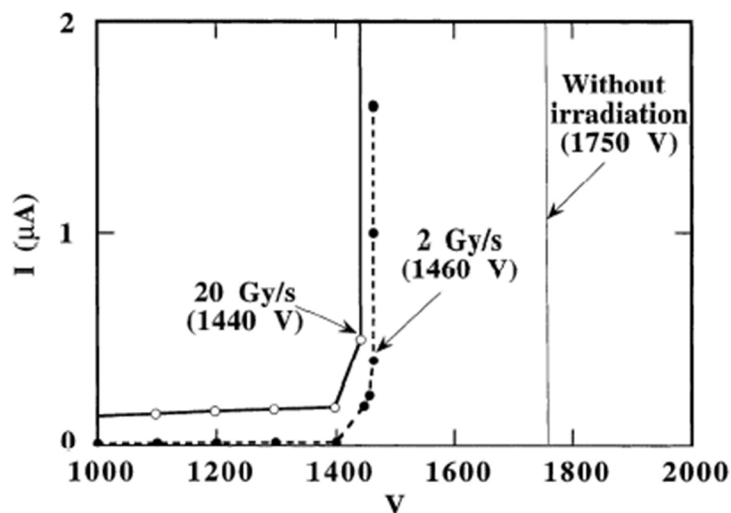


Fig. 4.14: Curva di scarica per aria secca in configurazione filo-sfera con gap di 0,4 mm a P.atm. e 20°C

La caratteristica in tali esperimenti [5] è stata limitata ad una corrente massima di 10^{-5} A, consideriamo quindi “breakdown” il passaggio repentino da una condizione di saturazione a tale valore.

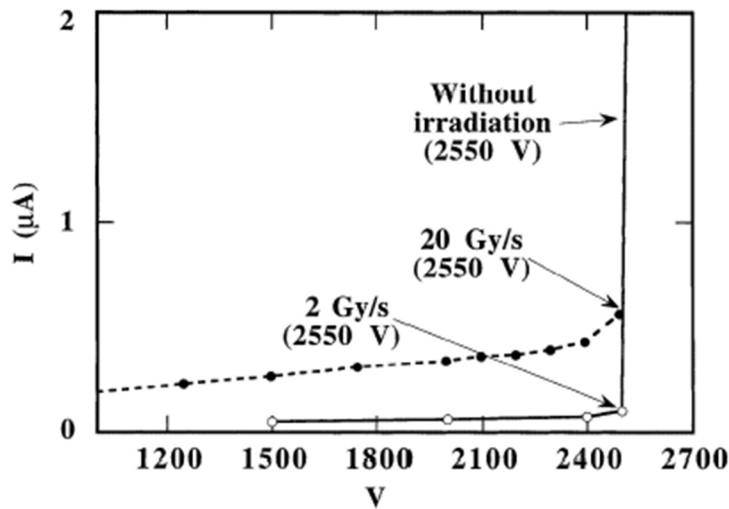


Fig. 4.15: Curva di scarica per SF₆ in configurazione filo-sfera con gap di 0,4 mm a P.atm. e 20°C

Per la configurazione adottata si è visto che la rigidità dielettrica dell'aria secca era intorno a 1750 V ma l'assorbimento di una dose pari a 2 Gy/s fa diminuire tale valore a 1460 V; aumentando ulteriormente la dose assorbita di dieci volte però si vede che la diminuzione è più contenuta, arrivando a 1440 V. Per avere un confronto, vediamo come si comporta l'SF₆ sottoposto ad eguali dosi assorbite. Notiamo da fig. 4.15 che in questo caso, a differenza dell'aria, l'SF₆ mantiene le ottime proprietà isolanti non subendo nessuna variazione per quanto riguarda la rigidità dielettrica ma variando, al massimo, quella che è l'intensità della corrente di saturazione. Da qui si capisce subito come l'SF₆ rimanga anche sotto radiazioni ionizzanti il miglior gas dal punto di vista della tenuta dielettrica ma il peggiore per quanto riguarda la corrente di ionizzazione a campi elevati. E' chiaro quindi come la rigidità dielettrica sia tanto più insensibile alle radiazioni ionizzanti quanto più il gas presenti un alto numero atomico molecolare.

Cercando di dare una giustificazione al degrado delle caratteristiche di rigidità dell'aria secca, peraltro abbastanza contenute, andiamo a considerare il comportamento dell'azoto puro con radiazioni ionizzanti (fig4.16). Tale confronto torna utile considerando che l'aria secca considerata è costituita da una miscela di 80% Azoto e 20% Ossigeno. Notiamo come senza radiazioni la rigidità della miscela sia superiore a quella dell'azoto per le elevate proprietà elettronegative dell'ossigeno. La presenza delle radiazioni però crea un deterioramento della rigidità molto più marcato nell'aria secca rispetto all'azoto puro

portando alla conclusione che radiazioni abbiano influito sulla capacità di elettronegatività dell'ossigeno stesso [5].

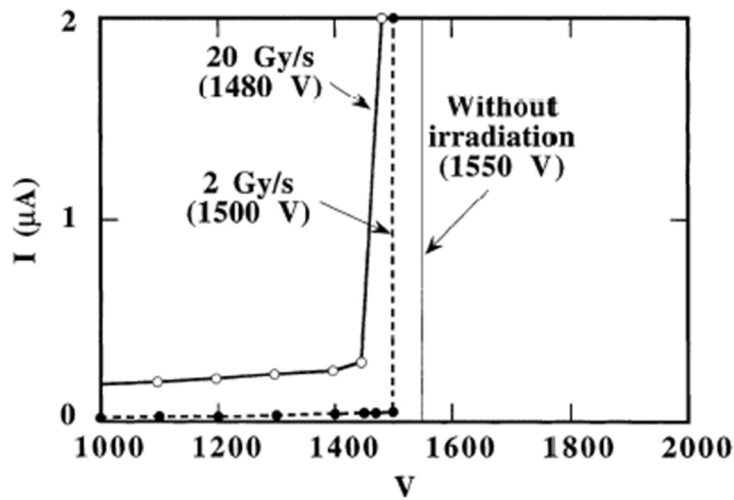


Fig. 4.16: Curva di scarica per N_2 in configurazione filo-sfera con gap di 0,4 mm a P.atm. e 20°C

Alla luce dei risultati presentati si può concludere che l'aria subisce una riduzione significativa della sua rigidità dielettrica già con dosi basse (con 2 Gy/s c'è variazione percentuale del 17%); l'effetto non aumenta però in proporzione perché se la dose aumenta di un fattore 10 la variazione misurata è stata solo del 18%. E' tuttavia difficile estrapolare da questi dati il comportamento della stessa rigidità nelle condizioni in cui dovrebbe operare la piattaforma dove la dose arriverebbe a 1 kGy/s (fig.4.5).

4.6. La corrente di ionizzazione al livello 200 kV

Dai molteplici parametri osservati si può dedurre che la ionizzazione dell'aria rappresenta l'aspetto più complesso e critico sotto il profilo della stabilità in tensione. L'anisotropia della ionizzazione all'interno della stanza non rende possibile la considerazione di un valore univoco di dose. Tuttavia in questa fase del progetto è importante arrivare a definire almeno un ordine di grandezza per comprendere quale strada sia opportuno intraprendere alla luce di risultati ottenuti anche sulla base di da considerazioni semplificate. Dal circuito di fig 3.7 notiamo che tra i resistori rappresentanti le perdite ne esistono due per la ionizzazione di cui la la Rion200kV costituisce la parte di corrente dispersa tra la

piattaforma ed il muro. Considerando quindi la piattaforma di dimensioni $3m \times 4,5m \times 2,8m$ avremo una superficie totale di:

$$Sup.piatt_{tot} = 69 m^2$$

Come si può vedere dalla fig. 3.4 esisterà una parte tra la piattaforma ed il muro fortemente ionizzata; infatti notiamo che al di fuori di questa zona fortemente ionizzata il gradiente di ionizzazione è meno elevato e quindi è più semplice definire un valore medio. Limitiamo quindi la zona a maggiore ionizzazione (zona arancio/gialla di fig. 3.4) ad un'area di circa un metro quadrato. L'area a 200 kV a debole ionizzazione quindi avrà una superficie (Sup_{200di}) di $68m^2$.

Se ora supponiamo di mantenere una distanza di 1,5 m tra il muro e la piattaforma in ogni direzione e di considerare quindi una ionizzazione media di $10^{10} \frac{coppie\ ioni}{scm^3}$ (valore stimato in difetto) corrispondenti a circa 0,033 Gy/s a pressione atmosferica, otterremo per la corrente l'andamento di figura 4.18:

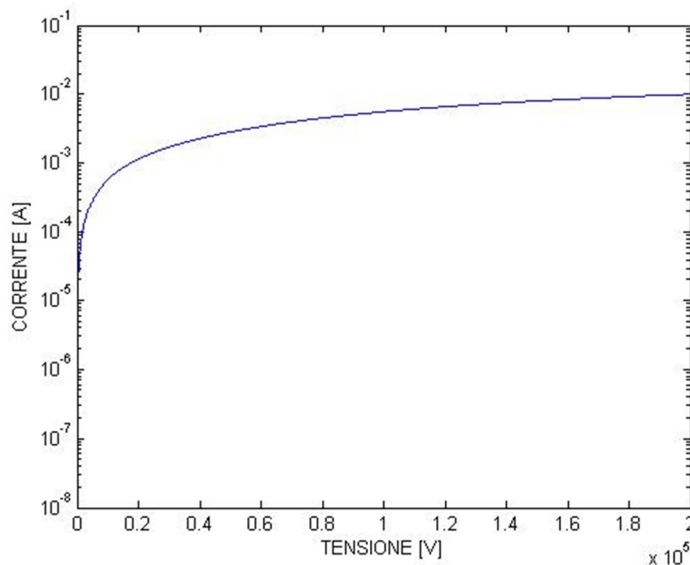


Fig.4.17: Corrente di dispersione in aria - zona 200 kV tra piattaforma a bassa ionizzazione (0,033Gy/s), superficie considerata $68 m^2$

Passando a considerare la zona a ionizzazione più intensa stimata intorno ad un metro quadrato, divideremo tale superficie in due quadrati contenuti uno all'interno dell'altro. Consideriamo quello più interno come la superficie ad altissima ionizzazione (Sup_{200ai}) stimata intorno a:

$$Sup_{200ai} = 1600cm^2$$

con una dose di circa 10^3 Gy/s.

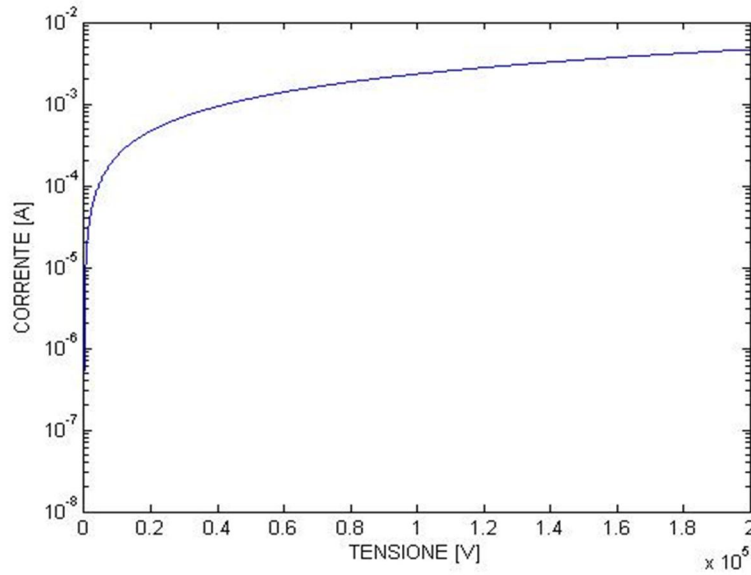


Fig.4.18: Corrente di dispersione in aria zona 200 kV tra piattaforma ad alta ionizzazione (1000Gy/s), superficie considerata 1600 cm²

Il valore di corrente che otteniamo da tale superficie sarà quello di figura 4.18.

La rimanente parte di area sarà una superficie a media ionizzazione, l'area stimata sarà di:

$$Sup_{200mi} = 8400cm^2$$

con una dose di circa 98,9 Gy/s per la quale la corrente di saturazione sarà di:

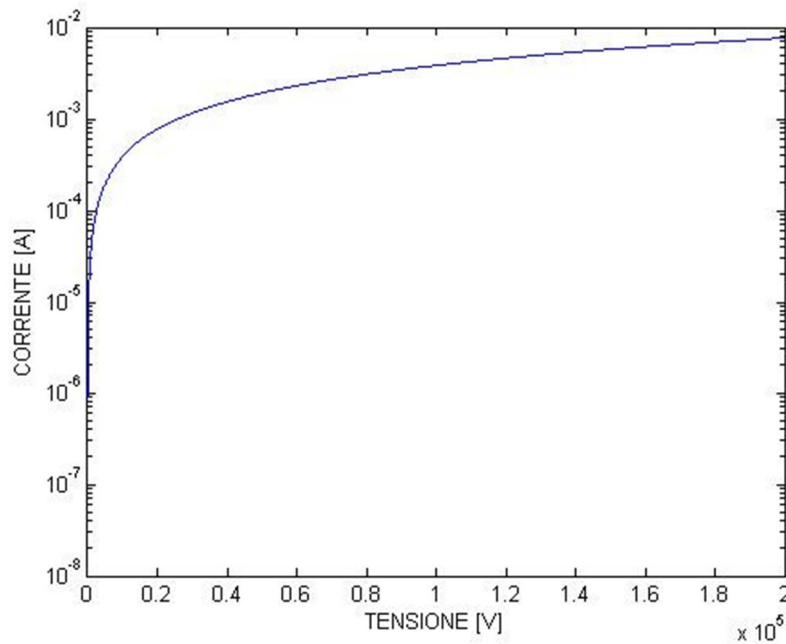


Fig.4.19: Corrente di dispersione in aria zona 200 kV tra piattaforma a media ionizzazione (98,9Gy/s), superficie considerata 8400 cm²

La suddivisione in zone ad alta, media e bassa ionizzazione è stata fatta in quanto la demarcazione tra tali zone esternamente alla piattaforma è abbastanza distinta e quindi il resistore rappresentato dal circuito equivalente può essere assimilato a tre resistori in parallelo il cui valore equivalente assorbirà la somma delle tre correnti. Altra ipotesi considerata è quella del controllo del campo elettrico negli angoli della piattaforma, aspetto che, se non fosse soddisfatto, complicherebbe il tutto e porterebbe ad una amplificazione dei valori di corrente stimati. E' chiaro però che se già nelle condizioni semplificate, si ottiene un ordine di grandezza preoccupante, il caso reale con gli spigoli darà correnti sicuramente più elevate rispetto a quelle indicate.

Tali risultati sono molto interessanti in quanto si può vedere come l'effetto di una più accentuata ionizzazione locale provoca livelli di correnti di dispersione paragonabili a quelle di tutta la piattaforma, quindi densità di corrente molto elevate, portando ad una corrente totale dispersa di circa $2,3 \times 10^{-2} A$, corrente superiore di tre ordini di grandezza rispetto a quella dei carichi. Di conseguenza la potenza richiesta all'alimentatore risulterebbe dell'ordine dei 4,5 kW come visto dal capitolo 2 ed inoltre si andrebbe a lavorare in una zona della caratteristica vista in fig. 4.9 dove è necessaria una stabilità di tensione del generatore molto spinta, considerando i problemi che tali correnti possono portare.

4.7. La corrente di ionizzazione al livello 60 kV

Determinare in questo caso la corrente dispersa tra la parte a 60 kV interna alla piattaforma e la parte a 200 kV, corrente che sarebbe fornita dal solo alimentatore a 60 kV come si può vedere in fig. 3.7, non è cosa semplice. Per capire meglio in fig. 4.11 è stato rappresentato l'interno della piattaforma indicando con il color magenta la parte a 260 kV, in verde gli isolatori, in nero tutta la parte a 200 kV. Sappiamo sicuramente che la parte a 260 kV dovrà essere racchiusa all'interno di una struttura metallica profilata in modo opportuno, al fine di evitare intensificazioni di campo che possano causare effluvi con conseguente iniezione di corrente.

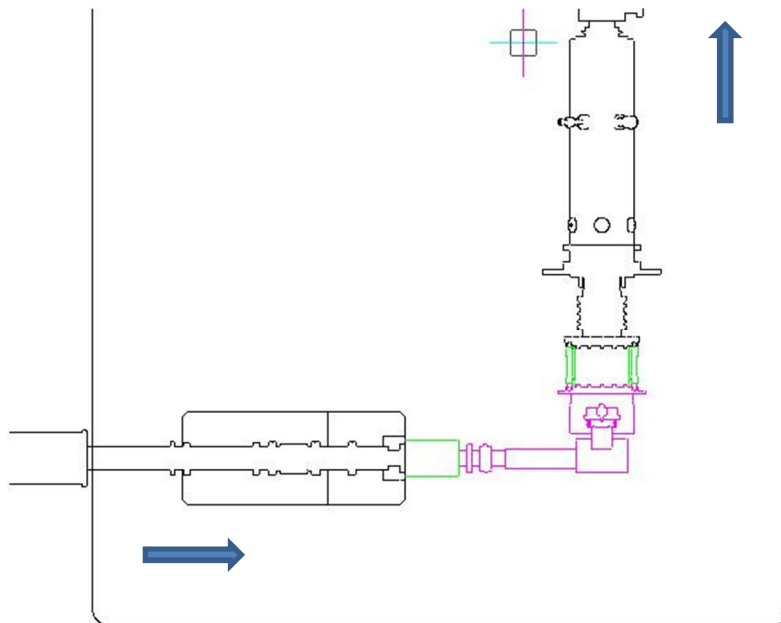


Fig.4.20: Rappresentazione semplificata in pianta dell'interno della piattaforma le frecce indicano l'ingresso e l'uscita del fascio.

Consideriamo quindi di racchiudere tale parte all'interno di un parallelepipedo metallico di $0,612m \times 1,10m \times 1m$, indicando in sequenza rispettivamente la dimensione perpendicolare alla sezione di ingresso, quella perpendicolare alla sezione di uscita e l'altezza. Se osserviamo la parte a 260 kV direttamente affacciata alla piattaforma (angolo in basso a destra della piattaforma di fig. 4.20) si nota che per la parte superiore ed inferiore di tale parallelepipedo è possibile definire un volume attivo abbastanza ben definito, mentre per la parte che guarda internamente alla piattaforma definire una distanza tra gli elettrodi è più complicato; sicuramente anche tale lato darà un apporto ulteriore di corrente e verrà quindi a determinare una condizione peggiorativa. Vediamo quindi per la parte direttamente affacciata con la piattaforma quanto vale la corrente di dispersione, escludendo dal conteggio le facce ortogonali al fascio di ingresso e di uscita. Consideriamo quindi una distanza di 1m tra la parte a 260 kV e quella a 200 kV, nelle direzioni che prenderemo in considerazione, escludendo le facce magenta di fig. 4.21. Anche in questo caso però esiste una faccia del parallelepipedo che vedrà una ionizzazione più elevata delle altre; però in questo caso la superficie ad alta ionizzazione si riduce perché è più vicina alla sorgente della radiazione ionizzante e tale aspetto è dovuto alla diffusione del fascio all'aumentare della distanza.

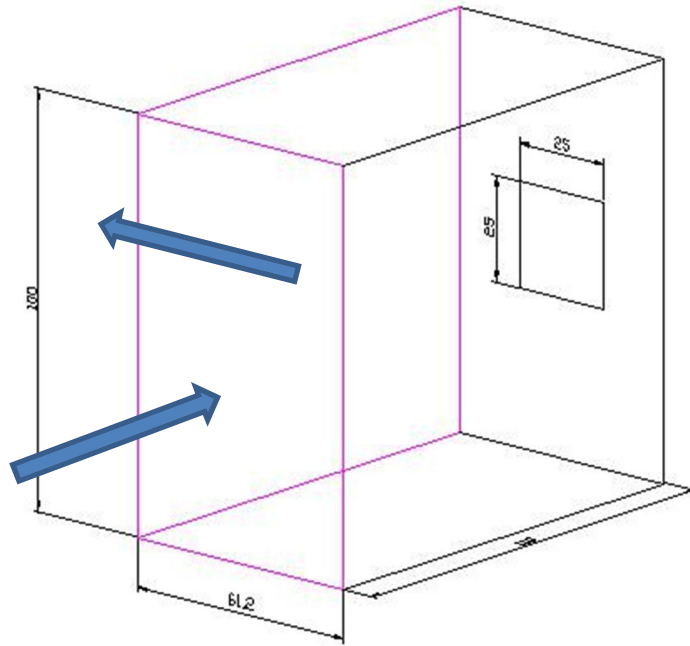


Fig.4.21: Schema di principio del volume a 260kV considerato, le aree contornate di magenta sono quelle non considerate in prima approssimazione, il rettangolo piccolo è la zona ad alta ionizzazione e quella più esterna quella a media

Definendo quindi anche qui con Sup_{60ai} la superficie quadrata ad alta ionizzazione di 25 cm di lato per corrispondente ad un'area di:

$$Sup_{60ai} = 625cm^2$$

si avrà con una dose di circa $1,2 \times 10^3 \frac{Gy}{s}$ ed una corrente di dispersione il cui andamento è riportato in fig. 4.13.

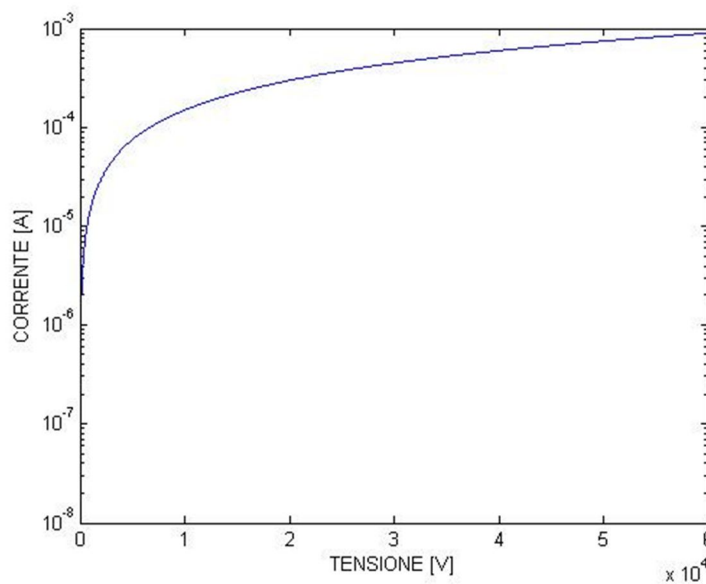


Fig. 4.22: Corrente zona alta ionizzazione a 60 kV con dose di $1,2 \times 10^3 \frac{Gy}{s}$ e superficie di $625cm^2$

Se ora si considera la zona a media ionizzazione, l'area sarà pari a:

$$Sup_{60mi} = 5495cm^2$$

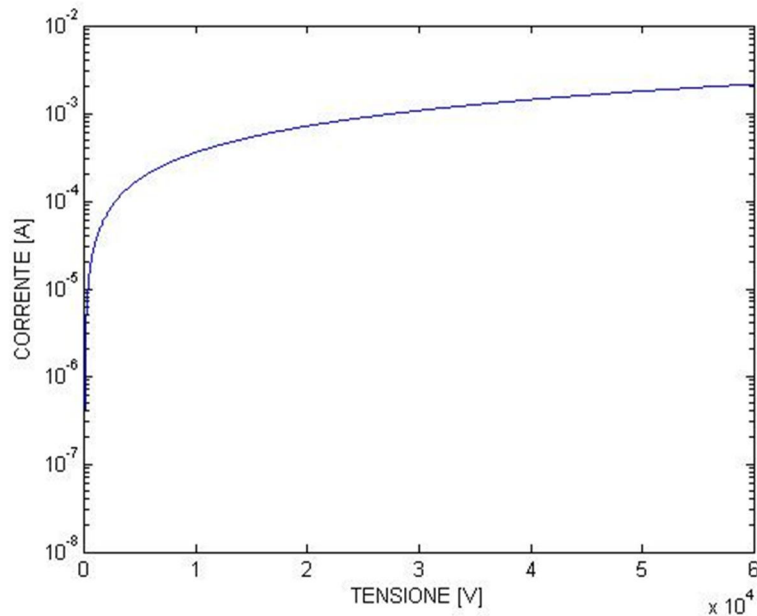


Fig. 4.23: Corrente zona media ionizzazione a 60kV con dose di $89,5 \frac{Gy}{s}$ e superficie di $5495cm^2$

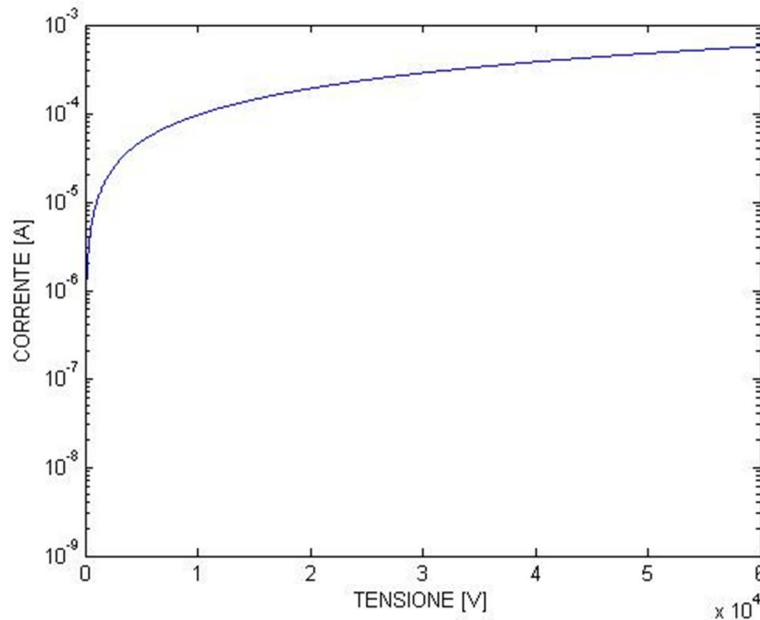
Per una dose di $89,5 \frac{Gy}{s}$ la corrente risulterà essere quella di fig. 4.23.

Rimangono quindi tre superfici da considerare: la superiore, l'inferiore e la laterale del parallelepipedo direttamente affacciate con la piattaforma. Dal grafico della distribuzione della ionizzazione può essere facilmente definito un livello medio di ionizzazione in quanto anche in questa zona le variazioni non sono molto elevate. Definiamo quindi una superficie totale di bassa ionizzazione pari a:

$$Sup_{60bi} = 24464cm^2$$

che, con una dose stimata intorno a $0,32 \frac{Gy}{s}$, porta ai valori della corrente di ionizzazione indicati in fig. 4.24. Considerando solamente la parte direttamente affacciata alla piattaforma si può concludere che la corrente totale che il generatore a 60 kV dovrebbe fornire risulta essere pari a $3,5 \times 10^{-3}A$. Non c'è da stupirsi che in queste condizioni le correnti siano circa le stesse di quelle calcolate per la piattaforma alimentata a 200 kV. I motivi vanno ricercati nel fatto che in quest'ultimo caso le distanze tra le parti in tensione

sono ridotte di 50 cm e che la ionizzazione è decisamente più elevata; tutto questo compensa il contributo della tensione che è ridotta, rispetto al caso precedente.



**Fig. 4.24: Corrente zona bassa ionizzazione a 60 kV con
dose di $0,32 \frac{Gy}{s}$ e superficie di $24464cm^2$**

Tuttavia il problema dell'assorbimento di potenza da parte di carichi parassiti rimane ed inoltre il calcolo non tiene conto della corrente di fuga sulle superfici di ingresso e uscita del fascio che, ovviamente, tenderebbero a far aumentare tale corrente ma il cui calcolo sarebbe stato troppo approssimativo non apportando nessuna informazione aggiuntiva a ciò che abbiamo osservato.

4.8. Conclusioni

Alla luce dei risultati emersi in questo capitolo si può notare la concreta impossibilità di ottenere bassi valori della corrente di dispersione con i valori di dose considerati. Emerge inoltre come l'utilizzo di schermi assorbitori localizzati possano servire a poco considerando che la corrente nella zona ad alta ionizzazione è la stessa di quella "drenata" dalle rimanenti superfici considerate nei rispettivi livelli di tensione. I valori di potenza richiesti per sostenere anche queste correnti di dispersione richiederebbero la costruzione di alimentatori ad hoc, specialmente per la parte a 200 kV. Sia per questo livello di tensione che per quello a 60 kV, il valore di resistenza parassita, secondo quanto visto nel paragrafo 3.4.1, è troppo basso al punto di non poter garantire la stabilità della tensione stessa.

Bibliografia capitolo 4

- [1] G.F.Knoll, Radiation Detection and Measurement, Wiley, New York, 1979
- [2] E.R.Hodgson, A.Moroño, A model for radiation induced conductivity in neutral beam injector insulator gases, Journal of Nuclear Materials 307-311 (2002), 1660-1663
- [3] E.R.Hodgson, A.Moroño, Effect of pressure on the radiation induced electrical conductivity of NBI insulator gases, Fusion Engineering and Design 66-68 (2003)
- [4] E.R.Hodgson, A.Moroño, Radiation effect on insulating gases for the ITER NBI system, Journal of Nuclear Materials 258-263 (1998) 1827-1830
- [5] E.R.Hodgson, A.Moroño, Radiation enhanced dielectric breakdown in insulating gases for NBI systems, Fusion Engineering and Design 56-67 (2001) 545-549
- [6] Y.H.Hilal, L.G.Christophorou, The energy to produce an electron-ion pair in SF₆ and SF₆/N₂ gas mixtures, J. Phys. D: Appl. Phys. 20 (1987) 975-976.

Capitolo 5

I tubi di Boris: condotti in HVDC

5.1. I tubi di Boris: modello CERN, modello Oak Ridge il modello EXCYT

Come anticipato nel capitolo introduttivo, la necessità di interfacciare la piattaforma del target e quella dei servizi garantendo un isolamento elettrico per i 260 kV richiede l'utilizzo di condotti opportunamente studiati e dimensionati che garantiscano allo stesso tempo la tenuta della tensione e la sicurezza per quanto riguarda la fuga attraverso gli stessi di raggi gamma e neutroni. Questo richiede di dover considerare problemi insoliti dal punto di vista elettrico, come ad esempio il comportamento degli isolanti solidi quando sottoposti a radiazioni ionizzanti, problema particolarmente critico dal lato target.

Fino ad ora i modelli utilizzati dai vari laboratori sono stati tre. Il primo modello di "tubi di Boris" è stato concepito presso il CERN (fig. 5.1); tale condotto era lungo circa 7 metri e costituito da due tubi di alluminio, uno interno in tensione ed un altro esterno posto al potenziale di terra, le cui estremità venivano mantenute isolate e coassiali grazie a due di distanziatori di resina epossidica.[1] Nel 2006, dopo 14 anni di servizio, a causa della elevata esposizione a radiazioni, dal lato target ci sono state delle scariche superficiali dovute al degrado dell'isolamento polimerico (fig.4.1); tale difetto, ovviamente, non si è presentato all'estremità opposta. Dalla figura si nota come il setto utilizzato per allungare la linea di fuga, a lungo andare non sia servito a garantire l'isolamento e facendo dedurre che le radiazioni nel tempo aumentino la conducibilità superficiale dei materiali polimerici. E' possibile individuare infatti nella parte interna del setto in materiale isolante la presenza di una zona più opaca (marroncina) dovuta probabilmente alle correnti superficiali prima della scarica completa. Si notano anche delle decolorazioni tendenti al bianco in prossimità dell'elettrodo centrale, là dove il campo elettrico ha un'intensità maggiore probabilmente

dovute alle correnti di fuga, che in prossimità dell'elettrodo centrale tenderanno ad assumere densità di corrente più elevate. Sono visibili inoltre i canali superficiali di scarica carboniosi che hanno portato al collasso del sistema isolante. Come si vede i canali "preferenziali", per le correnti superficiali, prima della scarica erano tre, risulta chiaro che il collasso vero e proprio è stato provocato solo da uno di essi e da ciò che possiamo vedere in figura sembrerebbe essere il "canale" centrale.



Fig.5.1:Scariche superficiali su condotto il alta tensione modello CERN

Nei laboratori di Oak Ridge sono stati modificati radicalmente il disegno ed i materiali, cercando però di aumentare la linea di fuga sulla base dell'esperienza svizzera.

In tali laboratori i tubi utilizzati, (figura 5.2) sono 4 ciascuno costituito da un condotto cavo cilindrico di polietilene con un diametro interno di circa 21,6 cm ed uno esterno di 47 cm, per una lunghezza totale di circa 4,88 m.

Internamente, coassiale con tale tubo, si avrà il condotto posto in tensione di alluminio. Tali tubi internamente non sono a diretto contatto con il polietilene, ma all'interfaccia tra polietilene e alluminio è stato inserito un materiale siliconico vulcanizzante a temperatura ambiente (RTV: Room Temperature Vulcanizing) pomandolo nel gioco esistente tra i due tubi dal basso verso l'alto.[2]

Di tale materiale siliconico vulcanizzante a temperatura ambiente ne esistono due tipologie: uno monocomponente che vulcanizza grazie all'umidità atmosferica presentando ottime caratteristiche dal punto di vista dell'elasticità e di adesione ai materiali, ed un altro invece che risulta preferibile per le piattaforme in oggetto. Questo si presenta sotto forma di materiale bicomponente che presenta ottime proprietà dielettriche, tanto da essere sfruttato come isolante, e soddisfacenti proprietà meccaniche. Successivamente, prima di essere disposti nel muro di circa 2,89 m di spessore, le pareti del foro rettangolare che mette in comunicazione la sala del target con quella di servizio, vengono ricoperte con una lastra di polietilene di qualche centimetro come ulteriore schermo isolante e poi verranno riempite tutte le intercapedini con materiale riempitivo, per esempio altro polietilene. La struttura di fondo è quella di un conduttore isolato, senza schermo esterno metallico, con il riferimento di massa allontanato il più possibile.

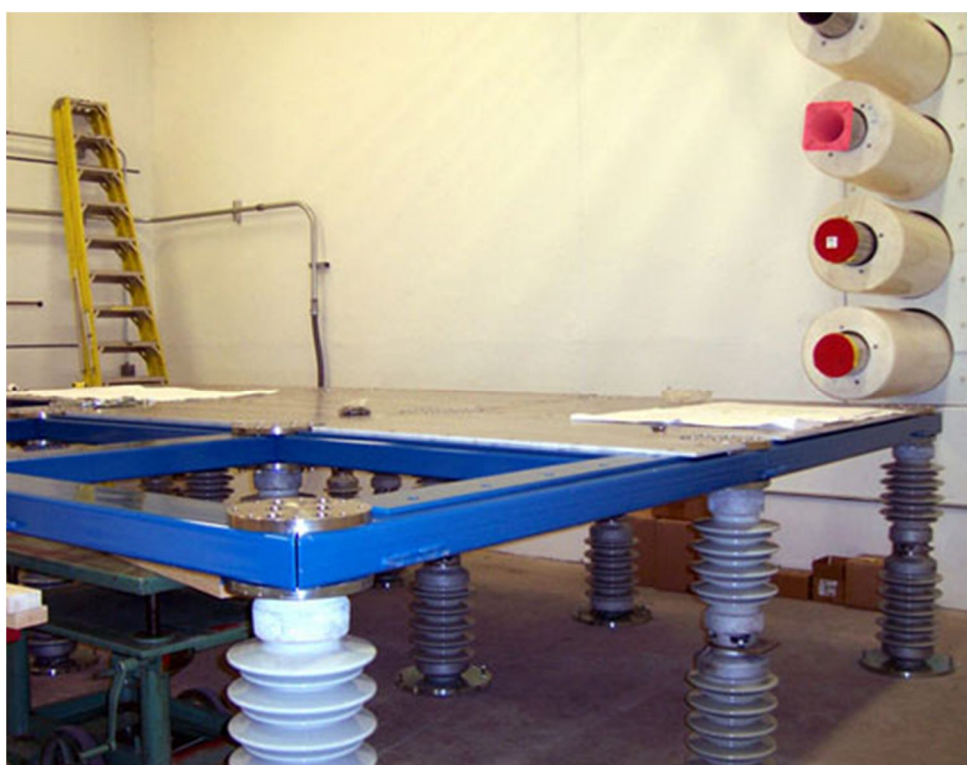


Fig. 5.2: Condotti in alta tensione secondo il modello di Oak Ridge[3]

Esiste un terzo tipo di condotto in alta tensione di concezione diversa utilizzato presso i Laboratori Nazionali del Sud di Catania per il progetto EXCYT. Tale condotto (fig. 5.3) utilizza l'SF6 come isolante nell'intercapedine tra l'elettrodo interno posto in tensione e quello al potenziale di terra che nella fig 5.3 costituisce la parte metallica esterna.

Esternamente i due condotti vengono mantenuti a distanza da un tratto isolante di polietilene.



Fig.5.3: Condotto in alta tensione in SF6 modello EXCYT, INFN-LNS

In tale configurazione il fascio passa attraverso il tubo stesso così come i cavi di segnale e potenza. Si capisce quindi come tale configurazione sia stata adattata ed ottimizzata alle esigenze di progetto permettendo nel contempo una soluzione compatta.

Nel caso del progetto SPES c'è la necessità di dividere i vari cavi in più condotti (quattro) in alta tensione, di conseguenza tale configurazione risulterebbe parecchio costosa. Un altro aspetto è quello del rischio legato alla fuga accidentale di SF6 all'interno della stanza del target che a causa delle radiazioni ionizzanti potrebbe dissociarsi in zolfo e fluoro, sostanza che potrebbe intaccare e rovinare le apparecchiature interne alla stanza. Per questi motivi si ritiene che per il progetto SPES la configurazione migliore di tali tubi sia quella simile a quella adottata presso i laboratori di Oak Ridge. La mancanza in letteratura di documentazione riguardante il comportamento elettrico dei vari materiali in configurazioni così particolari impongono uno studio sui materiali che costituiscono tali tubi, al fine di capirne il comportamento elettrico sotto radiazioni ionizzanti e così poter dire se incidente ed in che quantità sull'assorbimento di potenza dagli alta tensione. Qualora tale potenza fosse molto piccola si potrà considerare irrilevante al fine del calcolo della potenza dell'alimentatore. Gli aspetti che più interessano sono fondamentalmente il comportamento del polietilene sottoposto ad alta tensione continua, l'effetto della variazione della corrente di carica sotto radiazioni, l'effetto delle radiazioni sulla conduttività volumica e superficiale del polietilene irradiato e la stima della capacità dei tubi di boris secondo i dati di progetto.

5.2. Condotti di polietilene sottoposti ad alta tensione continua

La scelta di adottare condotti come quelli utilizzati presso i laboratori di Oak Ridge non può prescindere da considerazioni approfondite riguardanti il polietilene sottoposto ad alta tensione continua.

Ciò che interessa è la stabilità della tensione ai capi dei tubi acceleratori e deceleratori. Gli alimentatori sono in grado di compensare, entro certi limiti, variazioni di carico, ma sarebbe preferibile che questo fosse costante. Per il polietilene, come per altri materiali polimerici, quando è sottoposto ad alta tensione continua ed a regime ciò che ha effetto preponderante è la sola conducibilità del materiale, perciò lo spessore del materiale regola l'eventuale corrente di fuga. Il problema quindi nasce dal transitorio iniziale cioè nell'istante in cui si darà tensione alla piattaforma.

Si consideri quindi il condotto in alta tensione come una capacità per quanto riguarda la parte interna al muro. Un condensatore reale sottoposto ad un gradino di tensione presenta tre tipologie di correnti rappresentate in fig. 5.4, dove la " i_c " è la corrente di carica della capacità che generalmente comporterà costanti di tempo molto brevi, " i_γ " corrente di conduzione attraverso il dielettrico che è costante nel tempo e la " i_i " la corrente di carica dovuta alla polarizzazione interfacciale.

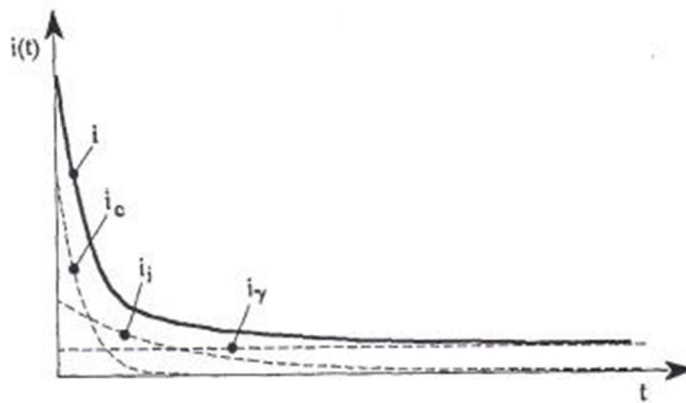


Fig.5.4: Rappresentazione qualitativa delle componenti della corrente di carica di un condensatore reale

Nelle normali applicazioni di potenza per frequenze superiori ai 10 Hz il contributo della polarizzazione interfacciale sparisce; quindi in continua non avviene, anzi questa corrente rappresenterà un valore piccolo, ma nel nostro caso le correnti dei carichi saranno dell'ordine dei μA . E' quindi opportuno stimare dei valori della corrente di carica,

soprattutto in previsione di come questa cambierà in presenza di radiazioni ionizzanti, in quanto dato le costanti di tempo della stessa sarebbe un problema per la stabilità se assumesse valori “troppo elevati” o paragonabili (paragonata ovviamente a quella dei carichi), contrariamente alla corrente di carica della capacità che si estingue in tempi molto, ma molto più brevi.

Durante la fase transitoria quindi tutte le capacità presenti raffigurate in fig. 3.9 si caricheranno fino a quando la tensione non sarà costante. andiamo allora a vedere a quanto ammonta la capacità di tali condotti che nella realtà saranno costituiti da due materiali cioè polietilene ed RTV, ma essendo quest’ultimo di spessore esiguo consideriamo in prima approssimazione un isolamento uniforme di polietilene. La capacità del tubo può essere calcolata, considerando la sola parte interna al muro, come un condensatore con raggio interno di $R_i=10$ cm, esterno di $R_e=23,5$ cm per una lunghezza di $L= 2,89$ m (lunghezza simile a quella adottata per il progetto SPES), pari allo spessore del muro, ed una $\epsilon_r = 2,5$ (LDPE) avremmo:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0 L}{\ln\left(\frac{R_e}{R_i}\right)} = 4,704 \times 10^{-10} F$$

Anche ipotizzando che i tubi fossero 4 in una configurazione geometrica tale da non influire l’uno sull’altro la capacità totale risulterebbe essere dell’ordine dei nF. Considerando il circuito equivalente, tale condensatore andrà a caricarsi praticamente attraverso la resistenza dell’alimentatore in alta tensione di $10 M\Omega$, in quanto la resistenza equivalente che consideriamo per il calcolo della costante di tempo “RC” sarà data dal parallelo tra quella dell’ alimentatore e tutte le altre resistenze, portando a tempi di carica e quindi ad una costante di tempo per “ i_c ” irrisoria. Nel caso in esame però lavoreremo in continua e la tipologia di polarizzazione con tempi di carica maggiori sarà quella interfacciale perciò la normale presenza di giunti di grano, vacanze interstiziali o altri difetti all’interno del materiale comportano tempi di polarizzazione interfacciale che sono estremamente lunghi perché dipendenti dalla mobilità dei portatori di carica nel materiale[11]. Per esempio considerando:

Tab.5.1: Parametri elettrici e costanti di tempo di polarizzazione per LDPE e HDPE

	ρ [Ω m]	ϵ_r [a.u.]	$\tau = \epsilon \rho$ [h]
LDPE	$\approx 10^{15}$	2.3	5
HDPE	10^{18}	2.5	$6,1 \times 10^3$

i tempi di polarizzazione del materiale non solo sono piuttosto elevati, ma qualora il dielettrico fosse costituito da due materiali con parametri elettrici diversi, all'interfaccia, si depositerà una carica "k" superficiale, sulla base dello stesso principio della polarizzazione interfacciale² nei difetti di un materiale omogeneo. Avremo modo di vedere, che questa dipendente dall' andamento del potenziale elettrico nel tempo, ma soprattutto dipendente dai parametri elettrici dei due materiali. Contrariamente sempre nel caso di due materiali la costante di tempo in cui tutto questo avviene, dipende dai soli parametri elettrici e non da quelli geometrici e considerando che la costante dielettrica è simile per materiali polimerici, ciò che giocherà un ruolo fondamentale sarà la resistività che varia anche di ordini di grandezza tra un materiale e l'altro.

5.2.1. La corrente di carica dei condotti in alta tensione

Idealmente in un isolante l'accumulo di carica, avviene solo sulle superfici di separazione, ma in continua c'è un effetto macroscopico che oltre a verificarsi in presenza dei difetti intrinseci del materiale si presenta in prossimità degli elettrodi come l'accumulo di carica spaziale. Dalle equazioni di Maxwell posso dire :

$$\begin{aligned}
 D &= \varepsilon E = \varepsilon \sigma J \\
 \nabla D &= \rho_{lib} \\
 \nabla(\sigma \varepsilon J) &= \rho_{lib} \\
 \nabla \times H &= J + \frac{\partial D}{\partial t} \\
 \nabla(\nabla \times H) &= \nabla J + \nabla \frac{\partial D}{\partial t}
 \end{aligned}$$

ma la divergenza del rotore è identicamente nulla quindi:

$$\begin{aligned}
 0 &= \nabla J + \nabla \frac{\partial D}{\partial t} \\
 \nabla J &= - \frac{\partial D}{\partial t}
 \end{aligned}$$

² Appendice B

ma essendo in regime stazionario:

$$\nabla J = 0$$

dalla terza equazione sviluppando il prodotto ottengo:

$$J \nabla(\sigma \varepsilon) + (\varepsilon \sigma) \nabla J = \rho_{lib}$$

ma $\nabla J=0$ quindi:

$$J \nabla(\sigma \varepsilon) = \rho_{lib}$$

Vedo quindi come la presenza di carica spaziale è possibile se la conducibilità dell'isolante è diversa da punto a punto, condizione sempre vera se considero che essa dipende dalla temperatura e dal campo elettrico [6]. Questo probabilmente significa che l'effetto della carica spaziale sarebbe "maggiormente" sentito nei tubi di boris dove avremo un campo elettrico tutt'altro che uniforme, dovuto alla struttura cilindrica dello stesso, rispetto alla parte a 60kV, dove sarà possibile rendere il campo elettrico maggiormente uniforme con opportuni accorgimenti geometrici. Avremo inoltre nei tubi un gradiente di temperatura dovuto ai cavi della piattaforma servizi che riscalderanno il condotto in modo non regolare, contrariamente alla parte all'interno della piattaforma dove esiste una differenza di potenziale di 60 kV con una temperatura è pressoché uniforme. L'importanza della carica spaziale, assume negli isolamenti in polietilene un'importanza rilevante, a causa della distorsione del campo elettrico con il rischio di intensificazioni locali dello stesso riducendo considerevolmente la vita dell'isolante, specialmente in prossimità di difetti del materiale.

Le cariche possono derivare:

- a) dall'iniezione di elettroni attraverso l'interfaccia elettrodo polimero, in questo caso la tipologia dell'elettrodo svolge un ruolo chiave.
- b) oppure attraverso la formazione di carica spaziale dovuta alla ionizzazione, magari da radiazioni ionizzanti come nel caso in esame.

Da prove sperimentali è risultato che l'accumulo di carica spaziale può essere diminuito in due modi:

- I. Evitando l'iniezione di elettroni da parte del catodo
- II. Neutralizzando quelli eventualmente iniettati

Per fare questo si può operare sul materiale di contatto tra elettrodo ed isolante oppure utilizzando additivi all'interno del polimero.

Affinchè ci sia accumulo di carica spaziale bisognerà che le cariche intrappolate rimangano all'interno del materiale, perciò tale fenomeno dipende dalla disponibilità e dalla tipologia delle trappole (cioè barriere di potenziale in corrispondenza di difetti o vacanze reticolari); inoltre il tempo di permanenza della carica all'interno della trappola dipende dalla "profondità" di questa e quindi da una serie di fattori come dall'energia richiesta per estrarre la carica, dalla temperatura e dal campo applicato.

A seconda quindi che la carica sia iniettata agli elettrodi o dovuta alla ionizzazione interna del materiale, si possono avere due tipi diversi di distribuzione di carica spaziale chiamati rispettivamente "distribuzione omocarica", se la carica accumulata vicino agli elettrodi è dello stesso segno dell'elettrodo vicino, e nel caso opposto la "distribuzione eterocarica" fig.5.5, fig.5.6. [6]

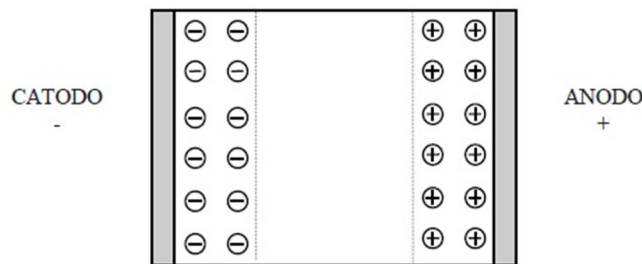


Fig.5.5: Distribuzione omocarica dovuta all'iniezione di cariche agli elettrodi

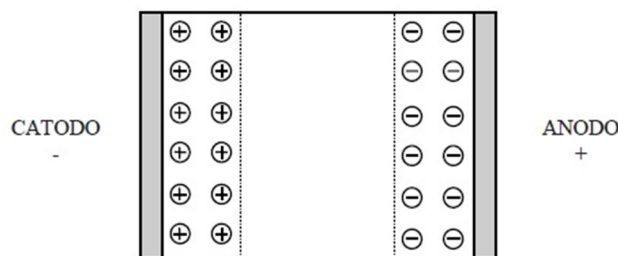


Fig.5.6: Distribuzione eterocarica dovuta alla ionizzazione interna del materiale

Sulla base di questi concetti, recenti studi hanno individuato una teoria chiamata SCLC (Space Charge Limited Current) che spiega come durante la fase transitoria di carica del dielettrico, nel caso di elevati campi elettrici, vicino al dielettrico, nasca una distribuzione omocarica. Questa si oppone all'iniezione di portatori all'elettrodo limitando la corrente di iniezione fino a quando la carica non raggiunge l'anodo, a questo punto l'alterazione del

campo porta ad una relazione tra corrente e tensione non lineare passando da un modello ohmico lineare ad un modello regolato dalla seguente relazione:

$$J = \frac{9}{8d^3} \varepsilon \mu V^2 \theta$$

dove θ rappresenta il rapporto tra la carica intrappolata e quella libera nel materiale e d rappresenta lo spessore del provino. Da prove sperimentali [7] sul comportamento dei portatori a differenti valori di campo elettrico,

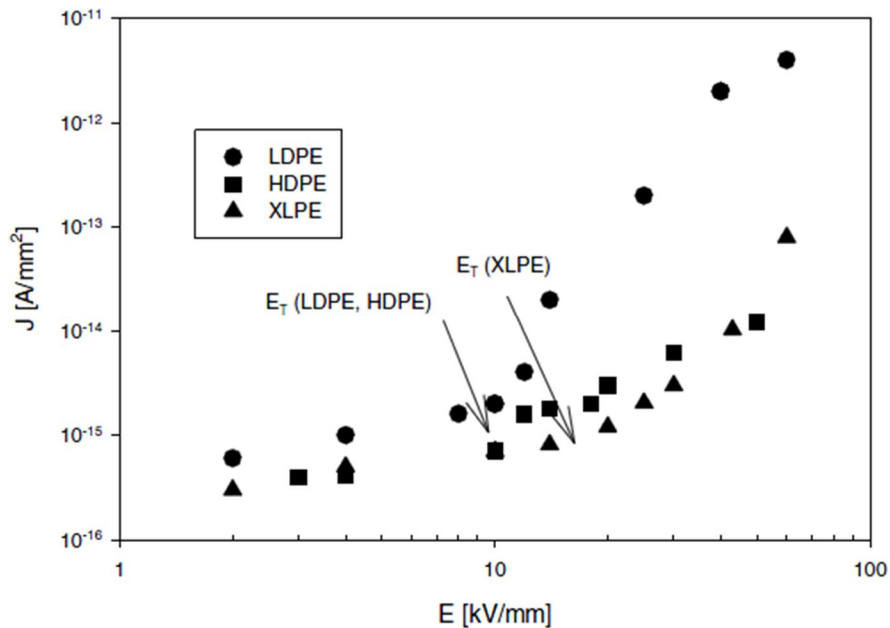


Fig.5.7:Densità di corrente di carica in funzione del campo elettrico applicato[7]

si nota la netta demarcazione tra comportamento ohmico lineare del materiale e quello definito dalla relazione sopra citata oltre il quale si sviluppa un accumulo di omocarica spaziale presso gli elettrodi del mio materiale presentandosi sotto forma di carica libera o intrappolata[6]. Se fosse intrappolata la corrente di carica ovviamente sarebbe minore rispetto al caso di carica libera ma a causa del verificarsi del fenomeno di de-trappolamento dovuto ai campi elettrici sufficientemente elevati (Poole-Frenkel), che provoca un abbassamento della barriera di potenziale, la densità di corrente aumenta. Difatti per un campo intorno a $10 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$ si nota tale transizione, campi che sia nel caso dei condotti (fig.5.8) in alta tensione sia nella parte a 60 kV non verranno raggiunti, determinando nel nostro caso ($2 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$ e $0,37 \frac{\text{kV}}{\text{mm}}$ rispettivamente) un comportamento ohmico della corrente di carica del materiale.

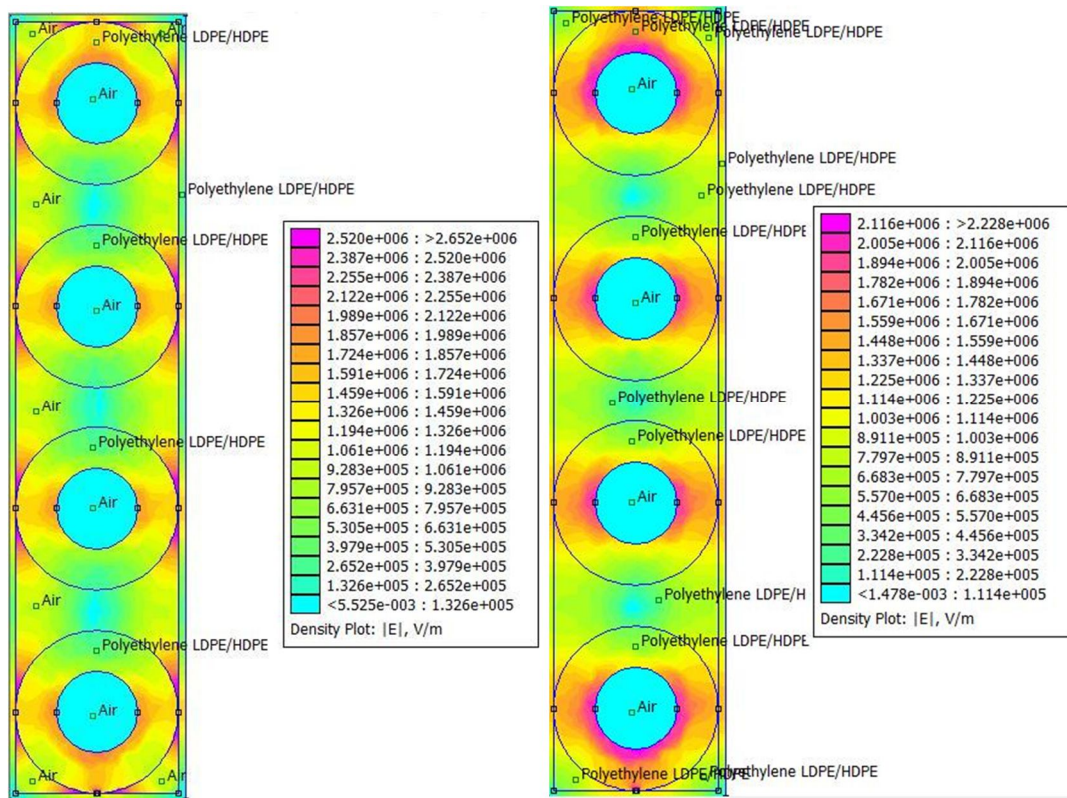


Fig.5.8: Simulazione del campo elettrico nei condotti secondo la configurazione di Oak Ridge, con riempitivo tra condotti aria (sx) e polietilene(dx)

Si può quindi affermare che, per i campi elettrici in gioco, la corrente di carica nei diversi materiali non differisce molto da materiale a materiale per bassi valori di campo elettrico, e che quindi la scelta di utilizzare un materiale rispetto ad un altro sotto il punto di vista prettamente elettrico è indifferente. Contrariamente per valori di 60 kV/mm (fig.5.8)

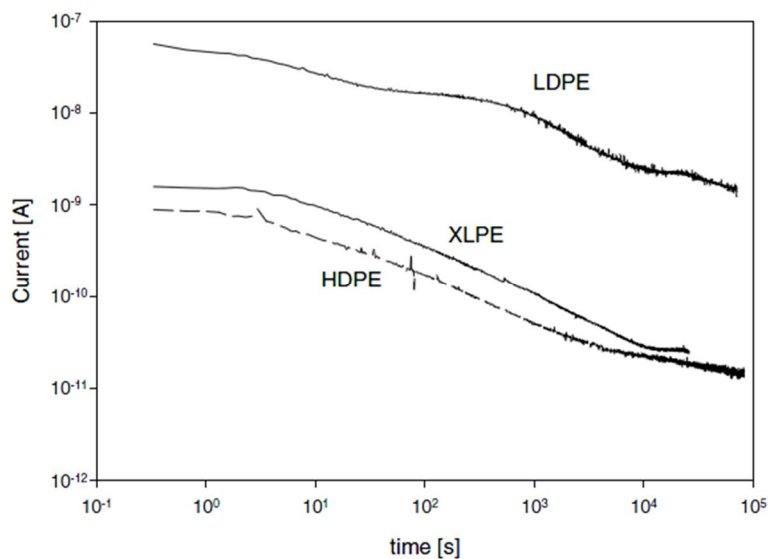


Fig. 5.9: Corrente di carica per un campo di 60 kV/mm[7]

vediamo come tale valore sia differente tra LDPE rispetto HDPE e XLPE, e che quindi, considerando un condotto di polietilene, di 20 cm di diametro per una lunghezza di 4 metri la corrente di carica che si presenta sia dell'ordine di 10^{-10} A (fig.5.7), corrente che può

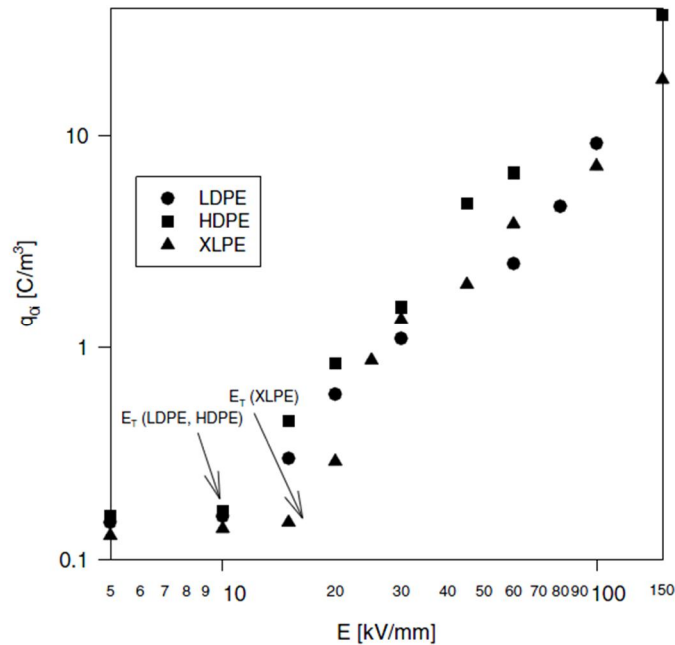


Fig.5.10: Carica spaziale per unità di volume in funzione del campo elettrico[7]

essere trascurata ai fini del circuito equivalente perlomeno nel caso di assenza di radiazioni ionizzanti, difatti sarà interessante vedere come varia tale corrente di carica a seguito di raggi gamma e neutroni.

Altra cosa molto interessante è l'accumulo di carica spaziale per unità di volume a seconda della tipologia di isolante e del campo elettrico (fig.5.10).

L'influenza della carica spaziale risulta essere di fondamentale per campi considerevoli ed assume notevole importanza se si pensa che tale fenomeno può incrementare dal 10% al 30% [8] l'intensità del campo elettrico della geometria originale, non solo ma considerando i tempi per la polarizzazione del materiale non basterà un semplice corto circuito al fine di scaricarlo da tutta la carica accumulata, in quanto essendo un dielettrico reale tale carica è distribuita anche internamente.

5.3. Il polietilene sotto radiazioni ionizzanti

5.3.1. Variazione della conduttività del polietilene irradiato

Per le ottime proprietà di assorbitore di neutroni termici il polietilene a bassa densità è un materiale molto utilizzato nel campo della fisica nucleare perché contiene una percentuale considerevolmente più alta di idrogeno rispetto all'acqua. Il problema nasce quando tale materiale nelle applicazioni di tipo nucleare viene utilizzato come isolante elettrico, come si verifica nel caso dei condotti in alta tensione e per l'isolamento dentro la piattaforma del target. Diventa allora necessario capire quale possa essere il degrado in termini di aumento della conducibilità a causa dei radiazioni gamma e neutroni. Nel caso in esame, oltre ai condotti, l'analisi degli effetti delle radiazioni ionizzanti sul polietilene è interessante in quanto l'isolamento interno alla piattaforma tra la parte a 260 kV e 200 kV è costituita di polietilene. Andando a fare una stima per vedere a quanto ammonta la dose assorbita nelle zone di nostro interesse, si nota che nella zona di ingresso dei condotti per i primi 15 cm di muro la ionizzazione è di circa $10^{13} \frac{\text{coppie ioni}}{\text{s cm}^3}$, quindi l'energia depositata per unità di volume considerando che per creare una coppia di ioni nel calcestruzzo baritico che verrà utilizzato mediamente sono necessari 3 eV:

$$10^{13} \times 3 \text{ eV} = 3 \times 10^{13} \frac{\text{eV}}{\text{s cm}^3} = 4,8 \times 10^{-6} \frac{\text{J}}{\text{s cm}^3}$$

assumendo una densità del calcestruzzo baritico di $\rho = 3,3 \times 10^{-3} \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^3}$ si avrà:

$$\frac{4,8 \times 10^{-6} \frac{\text{J}}{\text{s cm}^3}}{3,3 \times 10^{-3} \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^3}} = 1,4 \times 10^{-3} \frac{\text{Gy}}{\text{s}}$$

Tale valore rappresenta la dose di radiazioni che arriva nei dintorni dei tubi. Tale valore però è un tasso di dose cioè una energia depositata per unità di massa al secondo (Gy/s), quindi se si considera un funzionamento continuativo di tre settimane prima delle sospensioni ordinarie di manutenzione, la dose effettivamente assorbita sarà di 2540 Gy, molti di più se consideriamo che a differenza di altri componenti i condotti in alta tensione difficilmente verranno sostituiti. I tubi di Boris però non sono gli unici elementi isolanti in

polietilene, difatti dello stesso materiale sono anche gli isolatori tra la parte a 260kV e quella a 200kV. Quindi, analogamente al calcolo fatto per i tubi di Boris, si è cercato di calcolare la dose di radiazioni ionizzanti che arrivano a tali isolatori, provando a graficare l'andamento del tasso di dose ortogonale al fascio di ingresso in prossimità del target (fig. 5.11). Si nota che la zona dell'isolatore posta a circa 48 cm dall'asse del fascio avrà una dose di $5,08 \times 10^{-1} \text{ Gy/s}$.

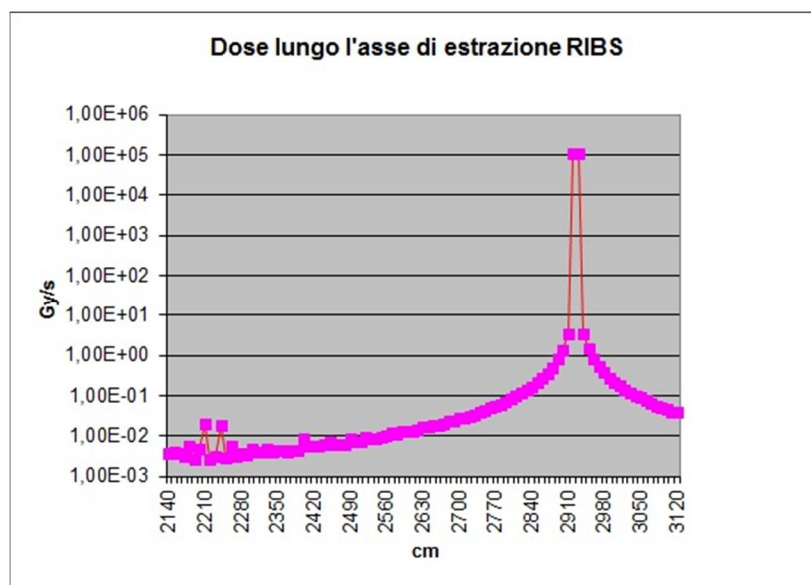


Fig. 5.11: Dose in corrispondenza del bersaglio perpendicolarmente al fascio di ingresso (il riferimento per le ascisse è la parete di un'altra sala)

Per una trattazione analitica dell'aumento della conduttività nel materiale si può immaginare che un materiale come il polietilene (o altri materiali polimerici come il polipropilene), una volta sottoposto ad un gradino di dose, come in figura 5.12, irradiato attraverso raggi gamma, passi attraverso tre fasi:

1. Fase transitoria di carica: Caratterizzata da un transitorio tra il valore di conduttività del provino pre-irradiato e quello durante l'irraggiamento.
2. Fase stazionaria: Costituita dal valore a regime della conduttività del provino irradiato.
3. Fase transitoria di scarica: Tendenza del materiale ad assumere il valore di conduttività iniziale

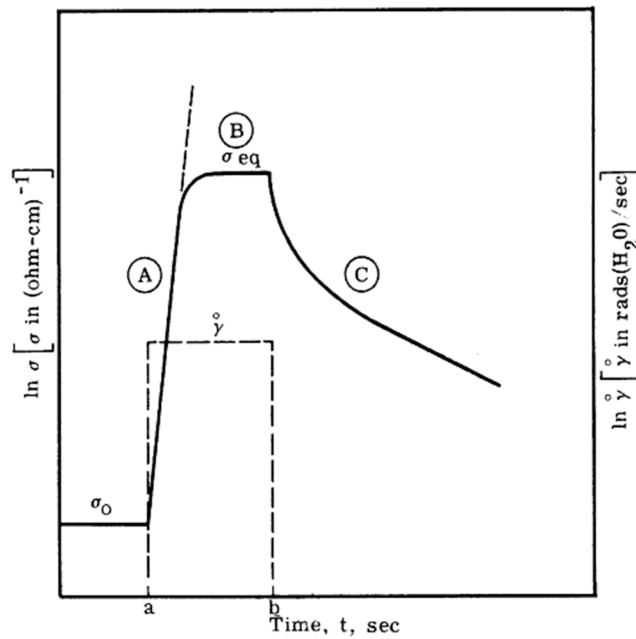


Fig5.12: Caratteristica di aumento della conduttività in un materiale polimerico sottoposto a gamma[5]

5.3.1.1. Fase transitoria di carica

La fase A costituisce la risposta transitoria ad una sollecitazione a gradino di raggi gamma erogata al materiale e può essere descritta dalla espressione seguente :

$$(\sigma - \sigma_0) = A(1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}})$$

dove τ_0 rappresenta la costante di tempo caratteristica prima del raggiungimento dell'equilibrio. E' stato dimostrato che detta costante di tempo diminuisce all'aumentare della dose γ assorbita, secondo la seguente relazione empirica[5]:

$$\tau_0 = k_0 \gamma^{-\mu}$$

Per il polietilene per esempio possiamo considerare $k_0 = 45$ ed $\mu=0,5$ ottenendo quindi (considerando che 1 Gy = 100 rads) il grafico di figura 5.13.

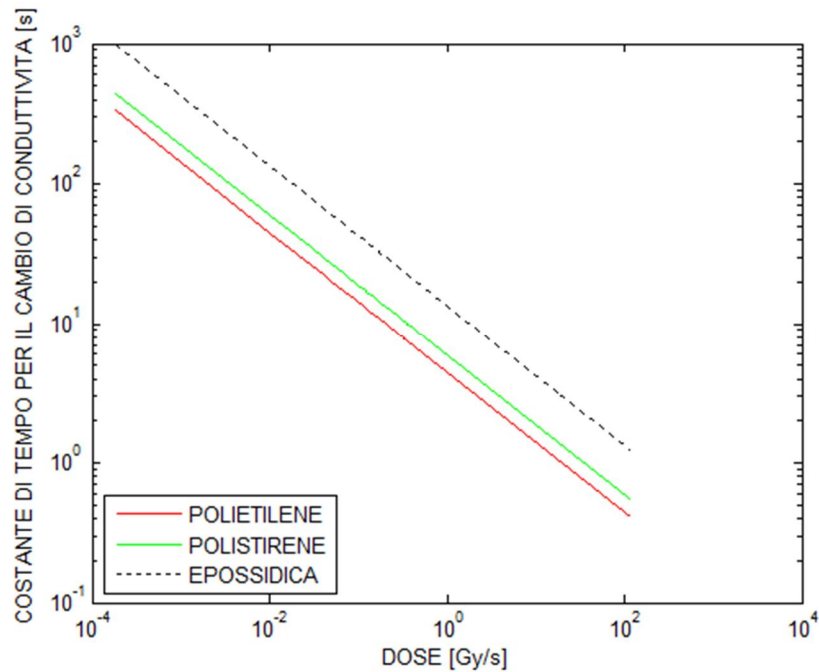


Fig5.13: Costante di tempo prima dell'equilibrio della conducibilità in funzione della dose assorbita

Dai valori di dose assorbita calcolati nella zona di nostro interesse vediamo che nella zona a 60 kV le costanti di tempo sono dell'ordine della decina di secondi, mentre per la prima parte dei condotti essendo i valori di dose più bassi le costanti arrivano ad essere dell'ordine del centinaio di secondi.

Questa riguarda la conducibilità a livello macroscopico, andiamo invece, in questa fase transitoria, ad osservare la corrente di carica vista nel paragrafo precedente nel caso di provino "sano" per vedere se le radiazioni le fanno assumere valori degni di nota, considerando che, come visto, dipende molto dai difetti intrinseci del materiale infatti da prove fatte[12] su provini di LDPE:

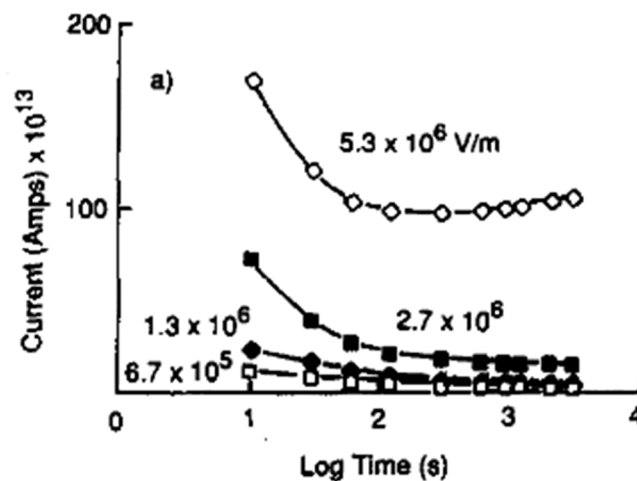


Fig5.14: Corrente transitoria di carica di un provino sano di LDPE al variare del campo elettrico

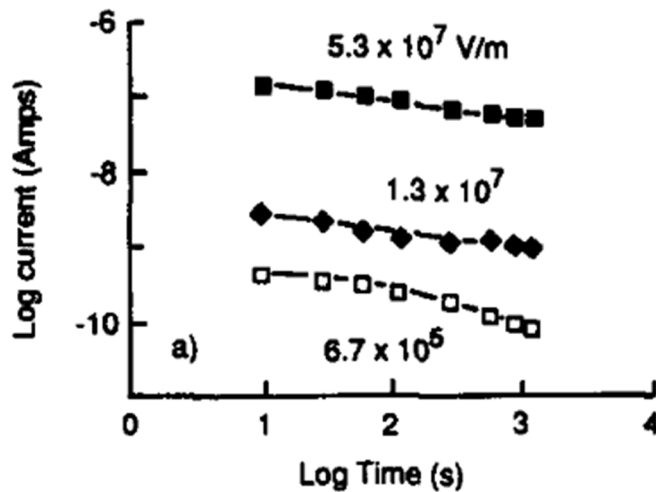


Fig 5.15: Corrente transitoria di carica di un provino di LDPE sottoposto a una dose pari a $0,69 \frac{Gy}{s}$ di soli raggi gamma

si può vedere come, considerando una dose di $0,69 \frac{Gy}{s}$ fornita da soli raggi gamma, se questa fosse l'effettiva dose assorbita, considerando che il campo dei condotti in AT è di $\approx 1,5 \times 10^6 \frac{V}{m}$ nella parte adiacente al condotto in tensione di 200 kV, noteremo che la corrente varierebbe di circa due ordini di grandezza rimanendo comunque inferiore a quella assorbita dai carichi di nostro interesse non prendendo così parte nella fase transitoria di carica. Essendo però la dose effettiva che arriva sui primi 20 cm di condotto nel muro pari a $1,4 \times 10^{-3} \frac{Gy}{s}$ il problema diventa trascurabile.

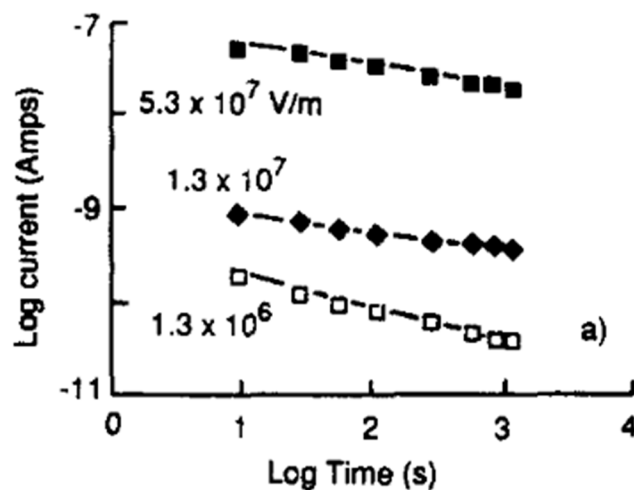


Fig. 5.16: Corrente transitoria di carica di un provino di LDPE sottoposto a una dose pari a $0,69 \frac{Gy}{s}$ di soli neutroni

E' interessante vedere anche come per una stessa dose fornita però da soli neutroni in aria (Reactor fig. 5.17) il contributo di corrente di carica sia leggermente inferiore anche se per fare una tale affermazione, come vedremo nel paragrafo successivo bisognerà specificare il tempo di esposizione considerato.

La risposta del materiale è regolata dalle variazioni fisiche e chimiche che intervengono dovute soprattutto all'ossidazione, data la naturale presenza di aria, che crea ulteriori "trappole all'interno del materiale"[12] con conseguente nascita di carica spaziale che influisce sulla barriera di potenziale all'interfaccia tra elettrodo e materiale. E' interessante notare come il meccanismo SCLC descritto per il polietilene vari a seconda che il materiale venga irradiato con raggi gamma in aria o azoto.

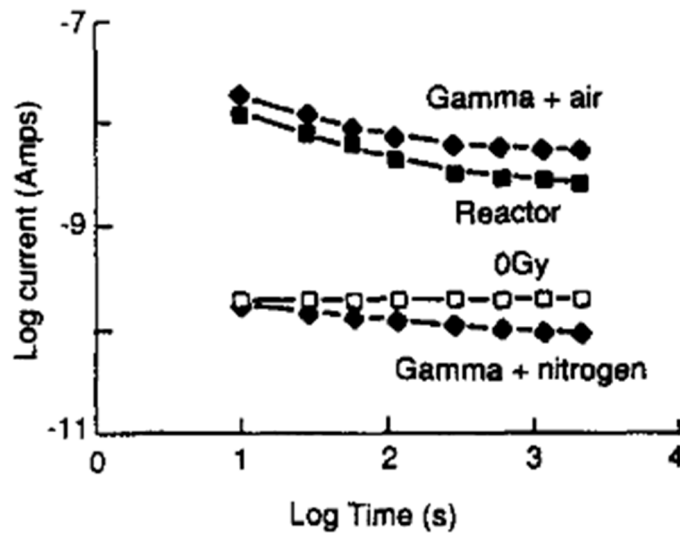


Fig 5.17: Corrente transitoria di carica nella zona SCLC per un provino di LDPE irradiato

Dalla fig. 5.18 si nota come i raggi gamma nel caso di atmosfera con azoto riducano addirittura la corrente assorbita, ma solo per valori di campo sufficientemente elevati. Contrariamente dalla fig.5.17, il cui grafico rappresenta la parte a dx di V_α di fig. 5.18, si nota come per l'aria la corrente sia nettamente superiore.

Tale comportamento può essere giustificato pensando che l'esposizione del materiale a raggi gamma in aria crea dei gruppi carbonilici con conseguente formazione di ulteriori trappole, tali "trappole" però sono relativamente profonde quindi le cariche migranti le occupano per più tempo, in questo modo la mobilità diminuisce, in questo modo si spiegherebbe la differente mobilità in aria e azoto. Probabilmente quindi la formazione di queste trappole per bassi campi (sx di V_α) intrappola molte più cariche in aria rispetto

l'azoto per cui nell'istante del de-trappolamento la carica rilasciata per il materiale in aria è molta di più comportando correnti più elevate.

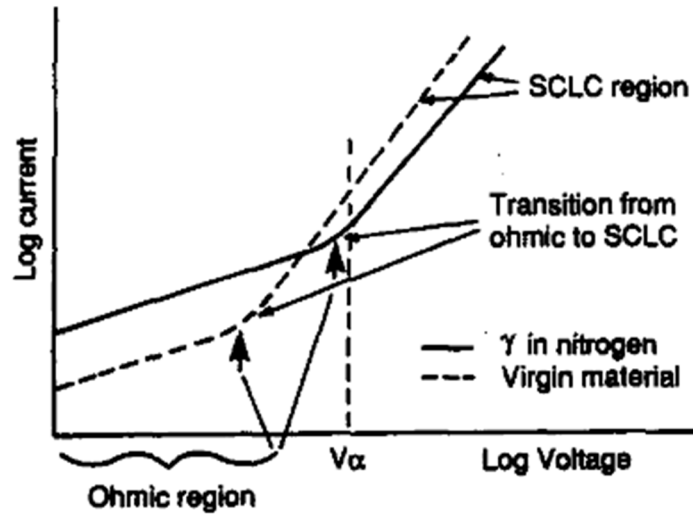


Fig. 5.18: Variazione della soglia tra comportamento ohmico e SCLC per LDPE

5.3.1.2. Fase stazionaria

Nell'intervallo B la stabilità sul valore della variazione della conducibilità è raggiunta a causa di una situazione di equilibrio tra due condizioni, la prima è di equilibrio tra gli elettroni prodotti grazie alla ionizzazione e quelli ricombinati e l'altra è dovuto all'equilibrio tra la cattura, delle cariche libere prodotte, in stati metastabili (trappole) e il tasso di diminuzione delle particelle intrappolate in tali stati.

Possiamo però affermare che l'equilibrio sulla conduttività è indotto da due fattori: uno è dovuto alla formazione diretta di cariche libere a causa delle radiazioni, l'altro è dovuto all'agitazione "termica" (che vediamo in termini termici) delle cariche intrappolate da bande di valenza a bande di conduzione.

Secondo dati sperimentali quindi possiamo dire che la variazione della conduttività sarà pari a:

$$(\sigma - \sigma_0) = A_\gamma \gamma^\delta$$

E che quindi σ_{eq} è pari a

$$\sigma_{eq} = \sigma_0 + A_\gamma \gamma^\delta$$

dove γ è la dose espressa in rads/s e A_γ e δ sono costanti ottenute sperimentalmente e per il polietilene possiamo assumere pari a:

Tab.5.2: Valori sperimentalmente per il calcolo di conducibilità [5]

Materiale	Temperatura (°C)	δ	A_γ	Campo di validità(rads/s)
Polistirene	38	0.97	4×10^{-17}	da 1.7×10^{-2} a 5×10^3
	49	0.97	4×10^{-17}	da 1.7×10^{-2} a 5×10^3
	60	0.97	4×10^{-17}	da 1.7×10^{-2} a 5×10^3
Polietilene	38	0.74	5.2×10^{-16}	da 8.3×10^{-2} a 1.7×10^3
	49	0.74	6.3×10^{-16}	da 8.3×10^{-2} a 1.7×10^3
	60	0.74	1.6×10^{-15}	da 8.3×10^{-2} a 1.7×10^3

Le particelle intrappolate quindi svolgono un ruolo chiave sull'aumento della conducibilità.

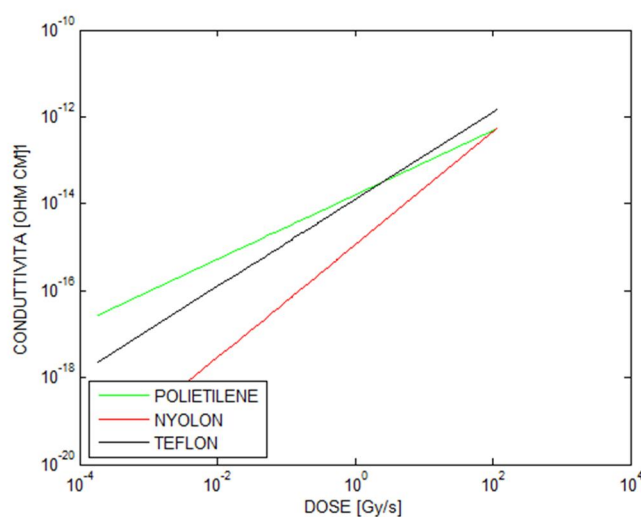


Fig.5.19: Variazione della conducibilità indotta in differenti materiali al variare della dose di gamma con la $T=38^\circ\text{C}$

Da notare come per le zone di interesse la variazione della conducibilità sia irrilevante.

5.3.1.3. Fase transitoria di scarica

La zona C invece, rappresenta il ristabilirsi della conduttività una volta che il materiale viene isolato dall'ambiente contenente radiazioni, ciò che regolerà tale tempo è la carica accumulata, tale ristabilirsi però, avviene attraverso costanti di tempo differenti, tant'è vero che è possibile esprimere analiticamente tale formula come segue:

$$\sigma = \sigma_{eq} \sum_{i=1}^n k_i e^{-\frac{t}{\tau_i}}$$

dove, come visto, la σ_{eq} è il valore di equilibrio della conduttività, n rappresenta le costanti di tempo di decadimento che sperimentalmente si possono individuare per diverse tipologie di materiali, k_i è un coefficiente "peso" associato alla i-esima costante di tempo τ_i . Per il polietilene:

Tab.5.3:Tempi per il ripristino della conduttività [5]

Materiale	Temp	n	τ_i (s)		
	°C		τ_1	τ_2	τ_3
Polietilene	65	3	2,3	15.5	175

E' chiaro però che nel caso in esame ci aspetteremo una dose più elevata di neutroni rispetto i gamma, di conseguenza, è importante analizzare anche quali sono gli effetti di questi sulla conduttività. Indicando con R la dose combinata di gamma e neutroni da prove sperimentali[5] possiamo affermare che analogamente come per i raggi gamma:

$$(\sigma - \sigma_0) = A_{n\gamma} R^\delta$$

Dove però in questo caso $A_{n\gamma}$ risulta minore di A_γ a causa della diversa efficacia nell'aumento della conduttività mentre δ rimane sempre lo stesso, difatti, a tale scopo, se si considera il rapporto tra l'efficacia nel produrre conduttività da parte dei neutroni (RICE_n) e l'efficacia dei raggi gamma (RICE_γ) si può osservare che

$$\frac{RICE_n}{RICE_\gamma} = 0,044 \quad \text{per polisobutene}$$

$$\frac{RICE_n}{RICE_\gamma} = 0,23 \quad \text{per polistirene}$$

difatti quest'ultimo possiamo considerarlo simile al polietilene di nostro interesse, ciò nonostante osserviamo come il contributo dei gamma sia nettamente superiore ai fini della conduttività indotta da radiazioni indirettamente ionizzanti perlomeno nei materiali come polietilene e similari. Questo comportamento però è tanto più marcato e veritiero quanto più elevata è la dose assorbita (figura 4.20), dove si evidenzia la differenza della differenza di generazione di gruppi carbonilici e quindi di carica a seconda della dose assorbita dei due diversi tipi di radiazione.

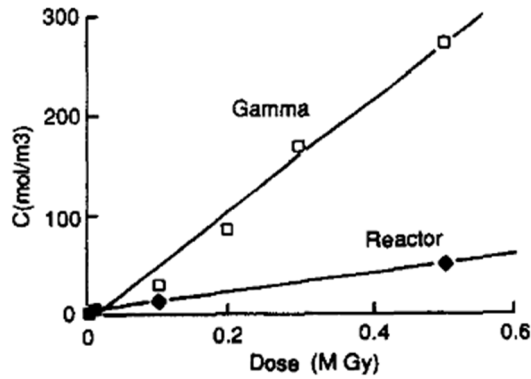


Fig. 5.20: Effetto per gamma e neutroni sulla generazione di gruppi carbonilici per LDPE in aria

5.3.1.4. La variazione dei parametri elettrici nel tempo

E' importante considerare la possibilità di una eventuale diminuzione nel tempo delle caratteristiche elettriche del polietilene sottoposto a radiazioni in termini di conduttività superficiale e di conduttività volumica. Analizzando i grafici di figura 5.21 e 5.22 [9]

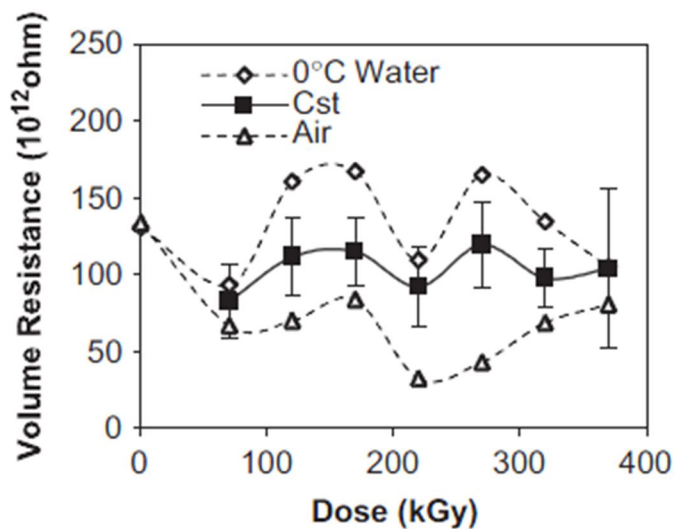


Fig5.21: Resistenza volumica di campioni di 2 mm di spessore di LDPE in funzione della dose assorbita [9]

relativi a campioni preparati con il metodo della pressatura a caldo e raffreddati in tre diversi modi (acqua a 0°C, raffreddamento veloce in cassetta ed in aria a temperatura ambiente ottenendo un grado di cristallizzazione percentualmente basso medio ed alto).

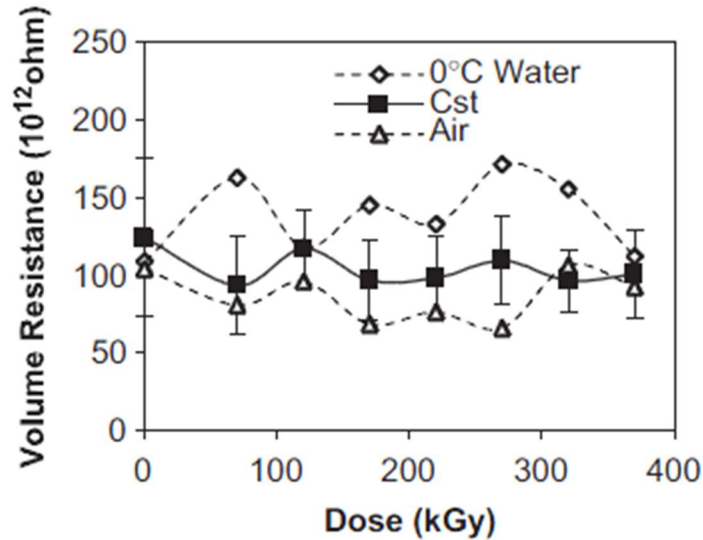


Fig5.22: Resistenza volumica di campioni di 2 mm di spessore di HDPE in funzione della dose assorbita [9]

Si nota come la resistività volumica non subisca apprezzabili variazioni con la dose assorbita. Anche la resistività superficiale come si può vedere da Fig. 5.23 e 5.24 [9]

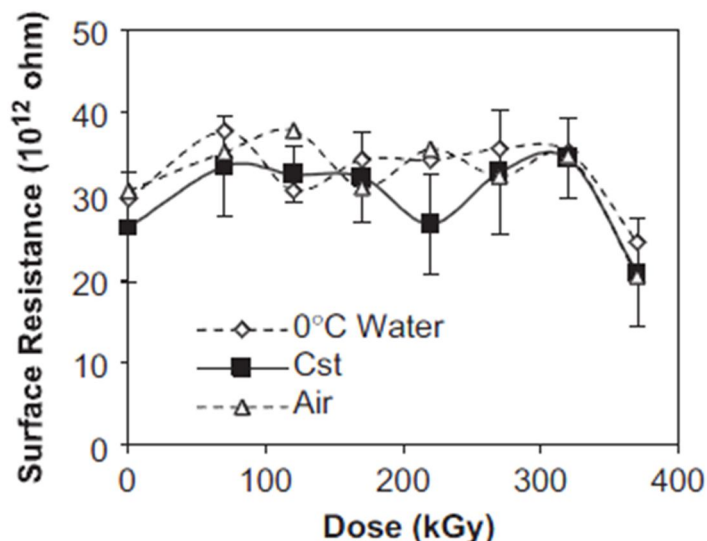


Fig5.23: Resistività superficiale del LDPE in funzione della dose assorbita [9]

rimane praticamente costante anche se non è molto chiaro quanto sia significativo il brusco abbassamento intorno ai 380 kGy di fig.5.23. Per l'applicazione prevista sarebbe opportuna una più estesa analisi sperimentale considerando che in SPES dopo circa 3 settimane

continue di servizio l'energia depositata sui condotti considerando una dose di 0,466 Gy/s, ammonterebbe a circa 1815 kGy.

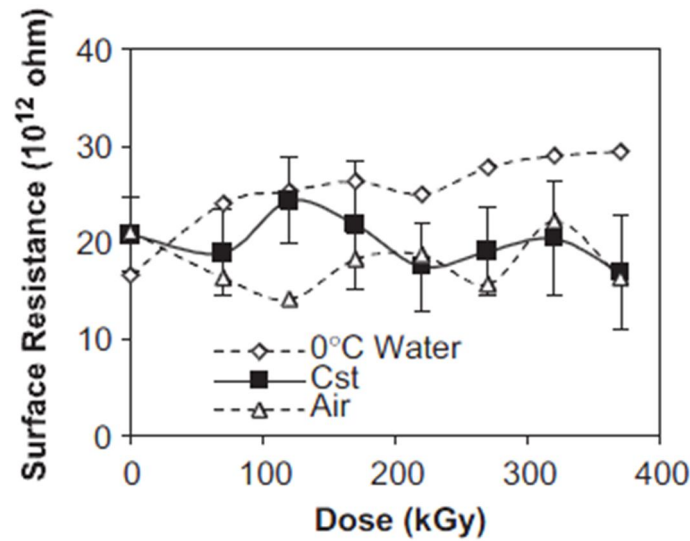


Fig5.24: Resistività superficiale del HDPE in funzione della dose assorbita [9]

La conduttività, indotta nel polietilene a causa delle radiazioni ionizzanti, anche a livello macroscopico, è influenzata marcatamente dal tipo di atmosfera in cui tale irradiazione avviene.

5.4. Conclusioni

Si è avuto modo di vedere come la corrente di carica, che in condizioni normali non assume valori preoccupanti, anche in presenza di dosi simili a quelle che si avranno sulla piattaforma nella zona di interesse, risulta essere di circa due ordini di grandezza inferiore a quella dei carichi. Per quanto riguarda il comportamento del materiale con i campi considerati si può affermare che il materiale opera in zona ohmica, caratterizzata da bassi valori di corrente di carica, in tale zona inoltre la tipologia di materiale è di relativa importanza. Dalle prove di stabilità della conduttività volumica e superficiale con la dose assorbita si può stimare che il materiale mantenga tale comportamento anche a dosi più elevate anche se il brusco calo evidenziato in figura 5.23 desta delle preoccupazioni. A seconda del grado di cristallizzazione si è visto che per materiali creati con pressatura a caldo e raffreddati con acqua a 0°C la resistività del materiale è maggiore, presentando anche un leggero incremento di resistività con la dose assorbita per provini di HDPE. Tuttavia un aumento del grado di cristallizzazione porta ad decremento della resistività superficiale e di volume. In conclusione, la corrente di carica aumenta con la dose assorbita

ma non così tanto da presentare un problema per i carichi, in tal senso è importante il fatto che il campo elettrico è tale da avere un comportamento ohmico del materiale stesso.

Bibliografia capitolo 5

- [1] Jacques Lettry, Richard Catherall, Target electrostatic accelerators and target area issue related to proton beam intensity upgrade of the ISOLDE facility
- [2] B.A. Taum, HRIBF NEWSLETTERS, Ed. 15 n°1 feb 2007, Ed. 16 n°1 jan 2008
- [3] RIB experiment, Oak Ridge website, <http://www.phy.ornl.gov/hribf/news/aug-07/fig-4-4.jpg>
- [4] Excyt experiment LNL INFN
- [5] S.H.Harrison, F.N.Coppage, A.W.Snyder, Gamma ray and neutron induced conductivity in insulating materials, Albuquerque New Mexico, IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, November 1963
- [6] Dott. Ing. Ghinello Ilihc Tesi di dottorato, Metodologie per la caratterizzazione di materiali polimerici per applicazioni HVDC, 1997/98, Coordinatore dottorato: Prof. Ing. F. Negrini, Tutore Dottorato: Prof. Ing. G. C. Montanari
- [7] C. Montanari, G.Mazzanti, F. Palmieri, A. Motori, G. Perego, S. Serra, Space charge trapping and conduction in LDPE, HDPE and XLPE, J.Phys, D: Appl. Phys. 34 (2001) 2902-2911
- [8] Industrial high DC voltage, F.H.Kreuger, Delft University Press 1991
- [9] F. Ziaie, M. Borhani, G. Mirjalili, M.A. Bolourizadeh, Effect of crystallinity on electrical properties of electron beam irradiated LDPE and HDPE, Radiation Physics and Chemistry 76 (2007) 1684-1687
- [10] A.H. Ashour, H.M. Saad, M.N.Ibrahim, Electrical conductivity for irradiated, grafted polyethylene and grafted polyethylene with metal complex, Egypt. J. Solids, Vol.(29), No(2), (2006)
- [11] Gabriele Marchesi, Lezioni di Materiali per l'Ingegneria Elettrica, Libreria Progetto
- [12] H.M. Branford, R.A.Fouracre, G.Chen, D.J.Tedford, Electrical conduction in irradiated low-density polyethylene, Radiation physics chemistry vol. 40 n°5 pp. 401-410, 1992

Conclusioni

Questo lavoro di tesi ha evidenziato dal punto di vista teorico la complessità della realizzazione di piattaforme di alta tensione aventi una struttura simile a quelle già presenti in alcuni Laboratori di Fisica Nucleare nel mondo.

Le piattaforme necessarie per il progetto SPES che sono state analizzate devono soddisfare stringenti parametri in stabilità di tensione, essere alimentate con alimentatori di alta tensione di affidabilità elevata, devono avere la capacità di operare in assenza di scariche elettriche nell'ambiente circostante con un impatto contenuto sulla potenza assorbita dall'alimentatore stesso.

La necessità di stabilità di tensione impone che le impedenze relative ai carichi parassiti (aria irradiata, polietilene irradiato, acqua irradiata, ecc...) debbano essere almeno di un ordine di grandezza maggiori di quelle relative ai tubi acceleranti e deceleranti.

Tale condizione porta anche un sostanziale risparmio in termini di potenza richiesta all'alimentatore di alta tensione.

L'oggetto del presente studio, quindi, è l'effetto delle radiazioni ionizzanti sull'aria che circonda le piattaforme e sui materiali dei condotti in alta tensione, che, in presenza di ionizzazione importante, risultano essere le parti più sensibili nello studio del comportamento delle piattaforme di produzione, sia in condizioni di funzionamento continuo che nei transitori di accensione e spegnimento.

Le piattaforme sono state analizzate attraverso l'utilizzo di circuiti equivalenti che includono molteplici parametri che tengono conto di tutte le correnti parassite che devono essere sostenute dal generatore di alta tensione. Come ribadito in precedenza di questi parametri solo due si sono dimostrati essere particolarmente significativi quali:

- La conducibilità del dielettrico dei Tubi di Boris
- La ionizzazione dell'aria intorno alla piattaforma

L'analisi critica del collasso del dielettrico nei condotti in alta tensione (tubi di Boris) verificatosi in passato in altre installazioni sperimentali, ha stimolato uno studio più approfondito sugli effetti delle radiazioni sui materiali usati. Il polietilene si è rivelato un

ottimo materiale. Le sue caratteristiche elettriche, quali resistività superficiale e volumica, restano adeguatamente stabili anche quando irradiato con dosi elevate (centinaia di kGy). L'accumulo di carica spaziale provocato dall'esposizione a radiazioni si è rivelato essere dipendente dalla tipologia di radiazione solo per lunghi tempi di esposizione.

Nel caso specifico dell'ambiente intorno al target SPES la prevalenza della dose neutronica sulla dose di raggi gamma permette di affermare che il polietilene che costituisce i tubi di Boris e quello costituente gli isolatori tra la parte a 260 kV e quella a 200 kV non subirà particolari variazioni sotto il punto di vista della carica accumulata che per i dielettrici è una causa importante della disuniformità del campo elettrico; a tal riguardo sarà di fondamentale importanza curare il più possibile l'uniformità del campo elettrico in particolar modo nella parte 200 kV-260 kV, considerato che le ipotesi dell'analisi erano di campo uniforme. L'utilizzazione del polietilene all'esternodei tubi permetterà dunque di lavorare in una condizione di campi elettrici relativamente modesti che collocano il punto di lavoro del materiale in una zona del diagramma corrente-tensione di tipo ohmico con basse correnti di polarizzazione.

Nel caso di utilizzo di una configurazione dei tubi simile a quella di Oak Ridge la disposizione degli stessi all'interno del muro risulta determinante per l'uniformità del campo elettrico descritto. La presenza di vacuoli o comunque di intercapedini di aria fa nascere una intensificazione locale del campo elettrico con rischio di scariche parziali.

Tali scariche, per quanto piccole e con bassa probabilità di comparsa e di ripetizione, rappresentano comunque una condizione indesiderata che determina una instabilità di tensione per la piattaforma.

L'insorgenza delle scariche risulta essere più probabile nella porzione iniziale del tubo inserito nel muro, in quanto la presenza di radiazioni ionizzanti potrebbe far diminuire, anche se di poco, la rigidità dielettrica dell'aria anche alle basse dosi di radiazioni presenti in quella zona (ordine di grandezza mGy). Lo studio di quest'aspetto ha evidenziato come nel punto di contatto tra il condotto ed il rettangolo esterno di polietilene, la presenza di aria favorisca intensificazioni di campo elettrico locale al limite della rigidità dielettrica dell'aria stessa.

Il secondo parametro significativo emerso da questo studio di tesi è la ionizzazione dell'aria in ambienti con alte dosi di radiazioni ionizzanti come quelle intorno al bersaglio di produzione di fasci esotici di SPES.

Questo aspetto dello studio è risultato essere il più delicato in quanto, partendo dall'ipotesi che il campo elettrico sia tale da non provocare ulteriori ionizzazioni, si è visto come la

presenza di radiazioni ionizzanti in aria provochi un aumento della conduttività dovuto alla presenza di cariche libere.

Le cariche libere si distribuiscono nello spazio tra gli apparati a diverso potenziale e quindi possono drenare correnti parassite nello spazio tra superfici metalliche a potenziali di 260, 200 e 0 kV. Le correnti parassite non dipendono solo dal numero di cariche libere presenti, ma anche dall'area delle superfici metalliche affacciate ed a potenziale diverso.

Se si considera la zona 260 kV-200 kV si nota come la corrente nella zona fortemente ionizzata sia dello stesso ordine di grandezza di quella drenata dalla rimanente superficie della gabbia fittizia all'interno della quale è racchiusa la parte a 260 kV. Tale risultato evidenzia come sia la ionizzazione che la superficie degli elettrodi siano parametri importanti per l'ottimizzazione del progetto e come l'utilizzo di uno schermo assorbitore nella zona di maggiore ionizzazione non risulta efficace per la diminuzione delle correnti parassite. La corrente di esercizio richiesta al generatore da 60 kV (stimata in difetto) è di circa $3,5 \times 10^{-3}$ A con una potenza utile assorbita sull'ordine dei 500 W.

Anche nella zona 200 kV- 0 V uno schermo assorbitore si rivelerebbe inutile, per gli stessi motivi citati per la zona dentro la piattaforma. A differenza di questa la corrente drenata è dell'ordine $2,3 \times 10^{-2}$ A con una potenza dell'alimentatore di almeno 4,5 kW.

Ci si rende conto quindi come l'operare in presenza di correnti di dispersione richieda l'utilizzo di un alimentatore ad hoc in termini di potenza fornita e comunque non si avrebbe ancora la sicurezza della stabilità in tensione. L' ampliamento della stanza contenente la piattaforma, potrebbe ridurre la corrente, ma comporterebbe un dispendio economico in termini di aumento di dimensioni delle infrastrutture e l'acquisizione di un alimentatore appositamente progettato e costruito (c'è comunque il dubbio sulla sua effettiva realizzabilità) senza portare sensibili migliorie al risultato finale.

Si può quindi concludere, come risultato del presente studio e per i motivi precedentemente esposti, che l'operazione della piattaforma di produzione alla tensione nominale (200 kV) risulta essere difficile, se non impossibile. Dato l'alto valore di tensione e l'elevato livello di ionizzazione in cui si opera, anche una campagna di esperimenti mirati porterebbe ad una conoscenza più approfondita delle problematiche, ma non alla risoluzione delle stesse.

La verifica della possibilità di funzionamento a 200 kV potrebbe essere effettuata solo durante il collaudo della piattaforma, ovvero dopo la sua installazione e dopo aver speso ingenti quantità di denaro in R&D e costruzione.

Onde evitare il rischio di dover operare a tensioni minori rispetto a quelle di progetto, come lo studio in oggetto fa presupporre, sarebbe auspicabile studiare eventuali soluzioni

alternative che evitino la presenza delle piattaforme ad alta tensione nell'area ad alta ionizzazione del progetto SPES.

Appendice A

Dettagli sul metodo ISOL

La tecnica ISOL, sviluppata al CERN di Ginevra, viene tradizionalmente associata all'utilizzo di target spessi, nei quali i prodotti di reazione sono portati a temperatura molto elevata all'interno del target, da questo diffusi in una sorgente di ioni, e poi, in uno stadio successivo, possono essere opportunamente accelerati e separati. Il termine *on-line* indica che il materiale analizzato proviene direttamente dal bombardamento nucleare di un bersaglio, i cui prodotti sono, trasferiti all'esterno del sistema per diffusione termica [1].

In un sistema di tipo ISOL un fascio di particelle con energia prefissata, proveniente dall'acceleratore primario, viene fatto collidere con un bersaglio (*target*) generalmente costituito da materiale fissile; in questo modo si ottiene la produzione degli isotopi radioattivi tramite reazioni nucleari di vario tipo.

Attraverso un opportuno sistema i radioisotopi prodotti vengono poi estratti e ionizzati; per poi essere accelerati per differenza di potenziale. Il primo stadio di accelerazione avviene nel *front end* che raccoglie gli ioni e li invia verso dei separatori isobari all'interno dei quali il fascio viene opportunamente selezionato e purificato. Successivamente, gli ioni vengono post accelerati all'energia richiesta dal particolare esperimento.

In ambito europeo, le opportunità scientifiche offerte dai RIB ed i notevoli problemi tecnologici ad essi associati, hanno portato la comunità scientifica a proporre la costruzione di una rete di strutture complementari, definite di "generazione intermedia", fondamentali per arrivare alla costruzione di un'unica grande *facility* europea di tipo ISOL, chiamata EURISOL: tale progetto rappresenta un'iniziativa che vede coinvolti i principali laboratori nucleari europei (e non solo), ed è dedicato allo studio ed alla progettazione di una struttura per la produzione di fasci radioattivi di qualità significativamente superiore a quella attualmente disponibile. In tale direzione sono orientati anche i Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL), nei quali è prevista la costruzione di una *facility* ISOL per la produzione di fasci di ioni esotici: il progetto SPES (*Selective Production of Exotic Species*).

Bibliografia

[1]L. Piga, *Studio di carburi metallici per la realizzazione di bersagli per la produzione di fasci radioattivi con tecnica ISOL*, Tesi di Laurea Specialistica, a. a. 2005-06, Università degli Studi di Padova.

Appendice B

Teoria dell'accumulo di carica

Per spiegare il funzionamento dell'accumulo di carica e della tempistica entro cui tale fenomeno avviene si consideri il condensatore di Maxwell, ovvero un condensatore con in serie due dielettrici di diverse caratteristiche. Si consideri al tempo $t=0$ un gradino di tensione

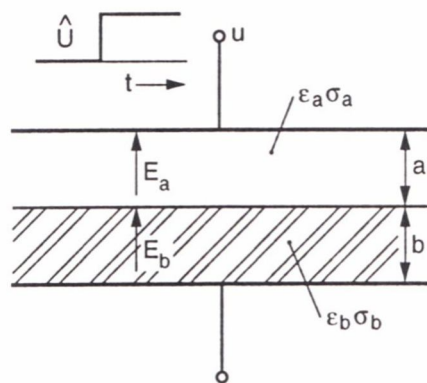


Fig.6.3: Condensatore di Maxwell

dalle equazioni di Maxwell si ottiene:

$$\begin{aligned}\nabla D &= \rho = \nabla \epsilon E \\ j &= \sigma E\end{aligned}$$

Inserendo queste equazioni nell'equazione di continuità:

$$\nabla j + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

ottenendo:

$$\nabla \sigma E + \frac{d}{dx} \nabla \epsilon E = 0$$

Nell'ipotesi che il campo sia omogeneo ed applicando il teorema della divergenza tra i punti a e b si arriva alla seguente formula:

$$(\sigma_a E_a - \sigma_b E_b) + \frac{d}{dt}(\varepsilon_a E_a - \varepsilon_b E_b) = 0$$

È Essendo il campo uniforme è possibile scrivere il valore della tensione applicata come:

$$aE_a + bE_b = u$$

e se si sostituisce nell'equazione differenziale eliminando E_b :

$$(b\varepsilon_b + a\varepsilon_b)\frac{dE_a}{dt} + (b\sigma_a + a\sigma_b)E_b = \sigma_b U + \varepsilon_b \frac{du}{dt}$$

Per $\frac{du}{dt} = 0$ per $t > 0$ e $u = U$ la soluzione sarà:

$$E_a = \frac{\sigma_b U}{b\sigma_a + a\sigma_b} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + \frac{\varepsilon_b U}{b\varepsilon_a + a\varepsilon_b} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

dove:

$$\tau = \frac{b\varepsilon_a + a\varepsilon_b}{b\sigma_a + a\sigma_b}$$

Tale termine rappresenta la costante di tempo affinché i due materiali si “assestino” al valore di campo elettrico finale.

Si instaurerà quindi un passaggio da una condizione capacitiva ($t = 0$) ad una distribuzione di tipo resistivo ($t = \infty$). Inserendo questi due valori all'interno della formula otterremo il valore di E_b in quanto

$$E_b = \frac{U}{b} - \frac{a}{b} E_a$$

L'incremento della carica superficiale all'interfaccia può essere calcolata con l'equazione di Maxwell

$$\nabla \varepsilon E = \rho$$

la quale, applicando il teorema della divergenza diventerà:

$$\varepsilon_a E_a - \varepsilon_b E_b = k$$

da cui segue che:

$$k = \frac{\sigma_b \varepsilon_a - \sigma_a \varepsilon_b}{b\sigma_a + a\sigma_b} U \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = k_s \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

Tale formula rappresenta l'incremento graduale della carica k all'interfaccia tra i due dielettrici. Si è visto analiticamente da cosa dipende la costante " τ " ma ciò che interessa è quantificarla. Generalmente la permittività ε varia di poco tra materiali diversi e quindi si può assumere in prima approssimazione che

$$\varepsilon_a \approx \varepsilon_b \approx \varepsilon$$

La conducibilità invece può variare anche di un ordine di grandezza per le diverse tipologie di isolanti utilizzati nelle comuni applicazioni. Si assuma quindi come seconda ipotesi (per avere un ordine di grandezza)

$$\sigma_a > 10\sigma_b \approx \sigma$$

Non resta che definire la parte riguardante le dimensioni del campione che, come terza ipotesi, si assumerà

$$a \approx b$$

Risulterà quindi che:

$$\tau \approx \frac{b\varepsilon + b\varepsilon}{b\sigma} \approx 2\frac{\varepsilon}{\sigma} \approx 2\varepsilon\rho_s = 2\varepsilon_0\varepsilon_r\rho_s$$

dove ρ_s è la resistività specifica del più conduttivo tra i due materiali, anzi tali approssimazioni sono tanto più vere quanto più la parte più isolante tra le due è spessa rispetto l'altra.

Se si considerasse olio isolante ($\rho_s = 2 \cdot 10^{11} \div 2 \cdot 10^{13} [\Omega m]$) con una $\varepsilon_r = 3$ si otterrebbe $\tau = 10 \div 10^3$ sec mentre se avessi un polimero ($\rho_s = 10^{15} [\Omega m]$) otterrei una $\tau = 10$ ore.

Si stima quindi che la carica che si instaura alla fine del transitorio all'interfaccia sarà:

$$k_s = \frac{\sigma_b \varepsilon_a - \sigma_a \varepsilon_b}{b\sigma_a + a\sigma_b} U$$

perciò la carica è tanto più piccola quanto più è verificata la seguente equazione

$$\frac{\sigma_b}{\varepsilon_b} = \frac{\sigma_a}{\varepsilon_a}$$

ipotizzando la $\sigma_a > 10\sigma_b$ e inoltre $a \approx b$ la carica accumulata risulterà:

$$k_s \approx -\frac{\sigma_a \varepsilon_b}{b \sigma_a} U \approx -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r b}{b} U$$

corrispondente alla massima carica interfacciale che si instaurerà alla fine del transitorio di carica e dipendente dallo spessore del meno conduttivo dei due materiali.

Bibliografia

[1] F.H. Kreuger, Industrial high dc voltage, Delft University Press / 1995

Ringraziamenti

Si ringraziano i Laboratori Nazionali di Legnaro per l'opportunità offerta nello svolgere tale attività di tesi, si ringrazia il Prof. Ing. Giancarlo Pesavento ed il Dott. Ing. M.Francesca Moisio per il prezioso supporto tecnico fornito durante le attività di tesi, il Dott. Gianfranco Prete per la parte fisica dello studio e la costante disponibilità dimostrata, il Dott. E.R. Hodgson ed A. Moróño per la consulenza riguardante la parte delle correnti di ionizzazione in aria, la Prof.ssa Carmen Vasquez per i preziosi consigli e l'Ing. Felibert Draspa per le immagini CAD.