

ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE

Sezione di Torino

INFN/TC-97/10
25 Marzo 1997

A. Staiano:

**APPLICAZIONI SCIENTIFICHE ED INDUSTRIALI DI ACCELERATORI DI
ELETTRONI E IONI: PROPOSTA PER LA REALIZZAZIONE DI UN CENTRO
INTERDISCIPLINARE DI IRRAGGIAMENTO A TORINO**

*SIS-Pubblicazioni
dei Laboratori Nazionali di Frascati*

Applicazioni scientifiche ed industriali di acceleratori di elettroni e ioni: proposta per la realizzazione di un centro interdisciplinare di irraggiamento a Torino.

Amedeo Staiano

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Torino

Lo sviluppo delle macchine acceleratrici di fasci di particelle, promosso a fini scientifici per lo studio della struttura della materia subnucleare, ha offerto, da trent'anni a questa parte, una ricchissima e sempre crescente varietà di applicazioni sia in altri ambiti di ricerca scientifica, quali ad esempio la radiobiologia e la scienza dei materiali, sia in ambiti tecnologico industriali.

In questa nota vengono discusse le applicazioni esistenti di acceleratori di elettroni e ioni a bassa energia ed alta potenza ed alcune potenzialità di queste macchine nel campo delle tecnologie avanzate, al fine di investigare la possibilità di realizzare in Piemonte un centro di irraggiamento per applicazioni sia nel settore della ricerca scientifica che nel campo della ricerca tecnico-applicativa e industriale.

1 Introduzione

Gli acceleratori di particelle rappresentano oggi uno dei migliori esempi di apparecchiature realizzate dai fisici per la ricerca delle proprietà fondamentali della materia, con ricadute in settori tecnologico-applicativi di grandissima varietà di indirizzo. Basti al riguardo ricordare, come esempio di applicazione su larga scala di queste tecnologie, l'utilizzo di acceleratori di elettroni (e più recentemente di protoni e ioni [1]) nel settore della radiobiologia e successivamente nel settore della radioterapia di un'ampia classe di tumori, l'utilizzo di acceleratori di ioni per l'impiantazione e la caratterizzazione di dispositivi a semiconduttore con la grandissima diffusione di elettronica integrata (VLSI) che ne è derivata ed infine, più recentemente, l'utilizzo della *luce di sincrotrone* nella realizzazione di maschere per la microelettronica con risoluzioni inferiori al μm e in applicazioni di microingegneria [2].

A tutt'oggi l'impiego di macchine acceleratrici ha raggiunto alti valori di standardizzazione, e acceleratori commerciali dedicati vengono prodotti da tempo da un ampio numero di aziende, come VARIAN (USA), Radiation Dynamics (USA), Philips/MEL (GB), SHIN/EMI (GB), IBA (Belgio), Mitsubishi (Giappone), Toshiba (Giappone), CGR-MeV (Francia), Siemens (Germania), Brown-Boveri (Svizzera), CGR/AECL (Canada), NIIEFA (Russia). Tali macchine sono tutte prodotte con finalità specifiche e con flessibilità di utilizzo limitate al campo di applicazione. D'altro canto, come vedremo, l'utilizzo di acceleratori copre molteplici settori di interesse, sia nel campo della ricerca scientifica e industriale che nel settore applicativo, e questa interdisciplinarietà richiede una struttura altamente flessibile ed ottimizzata all'uso simultaneo da parte di più utenti. La *versatilità* della macchina acceleratrice, ovvero la possibilità di variare, entro un'ampia dinamica i suoi parametri fondamentali quali l'intensità e l'energia, è l'aspetto cruciale nella valutazione delle sue potenzialità.

In questa nota verranno discusse brevemente molte delle applicazioni industriali correnti ed alcune delle potenzialità di queste macchine, con l'intento di presentare un punto di partenza per una discussione sulla fattibilità di un centro di irraggiamento in Piemonte che risponda a reali esigenze sia del settore industriale che del settore della ricerca tecnologico-applicativa individuate nel nostro territorio.

Gli argomenti trattati vengono presentati raggruppati per aree di interesse. Nel capitolo 2 e 3 sono presentate le applicazioni di irraggiamento di elettroni nel settore clinico e chimico industriale, mentre nei capitoli 4, 5 e 6 sono discusse le applicazioni dello stesso tipo di macchine rispettivamente nel settore biomedico, agricolo ed ecologico. Nel

capitolo 7 vengono discusse alcune delle applicazioni correnti di macchine acceleratrici di adroni (protoni e ioni), ed infine, nel capitolo 8, sono presentati alcuni esempi di centri attualmente esistenti in Europa che operano nei settori di attività discussi.

2 Processi chimici indotti da radiazioni ionizzanti

Quando una particella carica attraversa un mezzo, essa cede energia alle molecole circostanti causando eccitazione e ionizzazione. I frammenti delle molecole prodotte possono reagire chimicamente tra di loro e con le molecole del materiale. Nuove particelle create in queste reazioni (radicali liberi e ioni secondari) iniziano a loro volta a reagire generando una trasformazione della struttura molecolare del mezzo e dando origine ad una nuova sostanza che tipicamente possiede caratteristiche differenti dal materiale di partenza. In generale, l'alterazione strutturale di un mezzo per mezzo di esposizione alla radiazione offre alcuni vantaggi, rispetto all'attacco chimico, quali la capacità di effettuare l'alterazione alle basse temperature, l'esclusione di agenti catalizzatori che rendono fattibile la produzione di materiali con alto livello di purezza nonché la possibilità di operare in condizioni particolari in cui comunque l'azione chimica non sarebbe possibile. Infine alcuni processi radiochimici sono talvolta economicamente più vantaggiosi di altre tecniche più tradizionali e in alcuni casi rappresentano anche l'unico metodo noto per realizzare materiali con caratteristiche specifiche. L'argomento è estremamente vasto ed è lungi dagli intenti di questa nota coprirlo in maniera sistematica. Mi limiterò quindi ad elencare solo alcune delle applicazioni più note. Una trattazione sistematica dell'argomento è presentata in [3], [4].

2.1 Polimerizzazione

Le radiazioni ionizzanti sono in grado sia di stimolare il processo di trasformazione di molecole monomeriche in catene di polimeri [5], sia di trasformare catene unidimensionali di polimeri in reticoli tridimensionali (*cross linking*, vedi figura 2.1). La polimerizzazione può essere effettuata in materiali solidi, liquidi e gassosi, ed in soluzioni ed emulsioni. Essa può essere iniziata in taluni casi irradiando un monomero per un breve periodo di tempo al fine di produrre i radicali necessari per eliminare le sostanze inibitorie del processo. Le catene polimeriche continuano a crescere anche quando l'irraggiamento è terminato (processo di *postpolimerizzazione*). Si è osservato che ad alti livelli di irraggiamento è possibile controllare la crescita polimerica con la creazione di un'alta concentrazione di radicali primari formati dalla radiazione primaria. Ad alti livelli di intensità di radiazione la concentrazione di radicali primari può essere così elevata da compensare gli effetti di materiali inibitori della polimerizzazione, così che la polimerizzazione di alcuni materiali che tipicamente è realizzabile solo ad alte pressioni, può procedere a pressione atmosferica.

Tipiche applicazioni industriali di interesse sono la polimerizzazione di acrilamide,

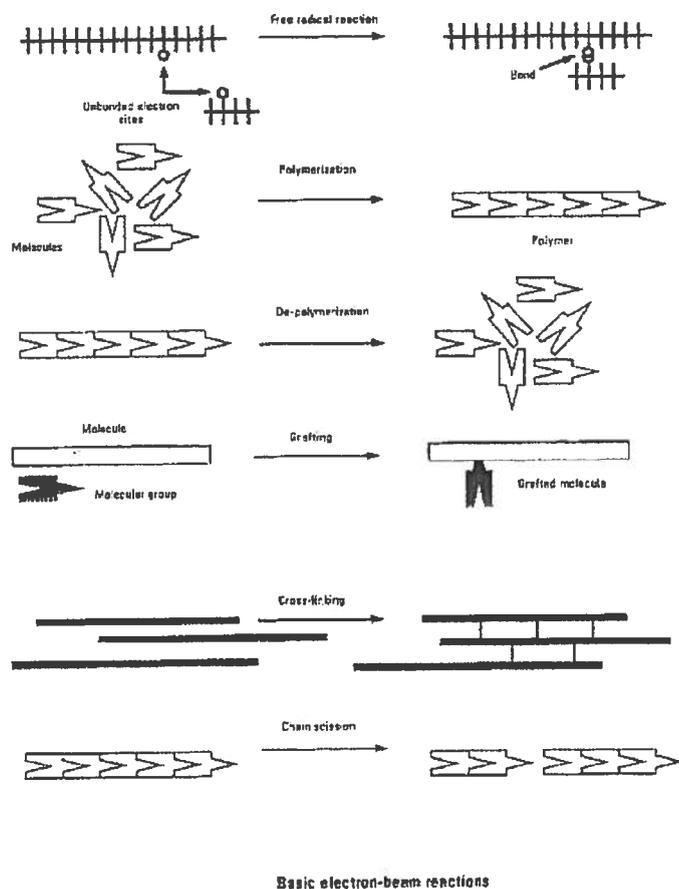


Figura 1: Sommario schematico delle reazioni primarie indotte da irraggiamento di elettroni.

trioxano e fluoro-olefins, insieme alla copolimerizzazione dell'etilene con il vinyl-cloride, il tetrafluoruro-etilene, l'acrinolitrile, il monossido di carbonio, il diossido di zolfo e alcune altre sostanze.

Un altro processo possibile è quello detto di *graft copolymerization*, per mezzo del quale vengono trattate proprietà superficiali di un materiale, quali l'adesività, la colorabilità, la resistenza cromatica alla luce ed altro, tramite la fissione di un monomero sulla superficie del polimero. Variando la dose rilasciata al campione si può controllare lo spessore della superficie trattata.

Caratteristiche di Caratteristiche diresistenza	Quercia naturale	Betulla naturale	Betulla modificata	Tremula naturale	Tremula modificata
Resistenza di rottura (MPa)	100-300	100-110	fino a 250	70-75	fino a 150
Compressione longitudinale	50-52	40-45	100-125	35	100
Logorio	0.66	0.70	0.23	1.15	0.55

Tabella 1: Proprietà meccaniche di alcuni tipi di legno prima e dopo il radiotrattamento con polimetilmetacrilato.

Proprietà	Cemento	Cemento polimerizzato
Compressione (Mpa)	30-50	100-200
Ditensione	2-3	10-14
Resistenza di rottura	5-6	20-30
Modulo di compressione (10^4 MPa)	2.5-3.5	4.5-5.0
Adesione all'armatura	1-2	10-18
Coefficiente di assorbimento dell'umidità (% della massa)	14.1	0
Resistenza a 500 cicli congelamento-decongelamento	20	6
Resistenza a 5000 cicli	rottura	8.5

Tabella 2: Proprietà del cemento arricchito con polimeri.

La polimerizzazione può essere realizzata anche in sistemi eterogenei quali il legno ed il cemento [6]. Nel caso del legno, il processo consiste nell'impregnare a vuoto articoli in legno con monomeri in percentuali fino al 50-70% della massa del campione. Il campione viene quindi irradiato con dosi che variano tra i 10 e i 15 kGy. Questo processo può venire utilizzato per ottenere nuovi materiali da campioni in legno di bassa qualità, da utilizzare al posto di quercia, faggio, carpino ecc., con ottime qualità di resistenza al fuoco e ad aggressori di tipo biologico in generale. Una tipica applicazione di questo processo è la produzione di parquet. Il processo si può applicare in modo simile anche a campioni in cemento, ma con una percentuale di monomero inferiore rispetto al legno (4-7% della massa del campione). Un sommario delle proprietà specifiche di materiali eterogenei drogati con polimeri è presentata nelle tabelle 1, 2.

2.2 Cross-linking

Durante l'irraggiamento di polimeri avvengono due fenomeni concorrenti:

- creazione di legami incrociati (*cross-links*) tra molecole lineari con produzione di polimeri a struttura spaziale tridimensionale con aumento della massa molecolare (fenomeno per l'appunto detto di *cross-linking*, vedi figura 2.1);
- terminazione delle catene polimeriche e diminuzione della massa molecolare (processo detto di *distruzione*).

Cross-linking e distruzione avvengono simultaneamente. Tuttavia il rapporto tra i due cambia in funzione del polimero, delle condizioni di radiazione e della presenza di vari tipi di impurità. Il rapporto distruzione/cross-linking è minore di 1 per il polietilene (1:3), il polipropilene, il polivinil cloride, il poliacrilamide, il polistirene ed alcuni tipi di gomme, poliamide e polietero. Questo rapporto diventa invece maggiore di 1 per il polisobutilene, il polimetilmetacrilato, il politetrafluoroetilene e la cellulosa.

I legami incrociati nel processo di cross-linking possono avvenire sia tra molecole contigue, che all'interno di una stessa molecola. Arrivati ad una certa densità di legami molecolari, si crea un singolo reticolo spaziale (*space-network*). Il materiale acquisisce così proprietà particolari, quali l'insolubilità del campione in solventi organici, la resistenza alle alte temperature e alle sollecitazioni meccaniche.

Le caratteristiche fondamentali del processo sono le seguenti:

- l'entità della formazione dei cross-link dipende solo dalla dose assorbita, e non dal tempo di esposizione alla radiazione. Qualora però l'irraggiamento sia effettuato in aria, si ottengono risultati migliori effettuando l'irraggiamento in tempi brevi, così da ridurre al minimo gli effetti di ossidazione sui polimeri;
- l'entità della formazione di cross-links non dipende dal tipo di radiazione utilizzata (elettroni, fotoni o adroni);
- il processo dipende dalla presenza di piccole miscele di sostanze quali l'acetilene e l'ossigeno.

Il processo più estensivamente utilizzato nell'industria è la radioproduzione di cross-linking in polietilene. Vi è un ampio numero di applicazioni del polietilene irradiato: guaine e isolanti di fili e cavi che operano in situazioni estreme (alte temperature (fino a 300°C), agenti chimici corrosivi, radioattività); fogli porosi di polietilene usati sia per isolamento da rumore, calore e conduzione elettrica, sia come elementi per la protezione dagli urti nei sistemi da imballo [7]; articoli dotati di *memory effect* per la protezione di

cavi (guaine termorestringenti [8]) e per gli imballi. I dosaggi tipicamente richiesti per la produzione di questi tipi di articoli variano tra i 50 e i 300 kGy.

Un altro processo intensivamente utilizzato nell'industria è quello della radiovulcanizzazione della gomma. I cross-link prodotti nel processo di vulcanizzazione sono molto più stabili dei lunghi legami di zolfo creati nel processo di vulcanizzazione a caldo. La gomma con cross-link prodotti per irraggiamento possiede una più elevata resistenza al calore, resistenza all'invecchiamento e alla deformazione alle alte temperature ed in generale una migliore resistenza all'uso. I dosaggi richiesti sono dell'ordine di $5 \div 10 \cdot 10^4$ Gy, e l'energia utilizzata è di molto inferiore a quella necessaria utilizzando il processo di vulcanizzazione termochimico. Le applicazioni più correnti si hanno nell'industria dei pneumatici e dei cavi. Nella vulcanizzazione dei pneumatici è necessario irradiare la gomma per alcune decine di millimetri, il che richiede acceleratori di energie superiori ai 10 MeV. Mentre fino ad alcuni anni fa il costo di questa tecnologia non era economicamente vantaggioso, oggi, con la diffusione a livello commerciale delle macchine acceleratrici di elettroni, questa tecnologia può essere competitiva.

2.3 Radiodistruzione di polimeri

Come osservato nel capitolo 2.2, l'irraggiamento di un polimero può causare scissioni molecolari e formazione di polimeri con ridotta massa molecolare. La distruzione va quindi distinta dalla depolimerizzazione, dove il polimero viene interamente convertito in monomero per mezzo di processi termici. Gli effetti macroscopici della radiodistruzione sono l'aumento della solubilità e la diminuzione della viscosità. Per questo motivo le applicazioni correnti di questo processo avvengono nel settore della produzione di elementi spray dal politetrafluoroetilene e di lubrificanti dalla gomma.

Una delle applicazioni più promettenti del processo di radiodistruzione riguarda la produzione di detergenti altamente stabili per lo smaltimento dei rifiuti, come verrà descritto nel capitolo 6.2.

2.4 Processi combinati

Sotto questa categoria si raggruppano quei processi in cui è l'effetto combinato dei processi precedenti a dar luogo a delle caratterizzazioni particolari del materiale trattato. Una delle più diffuse tecnologie di questo tipo è il radiotrattamento di vernici e lacche. Nei metodi tradizionali l'essiccamento della vernice avviene in forni, con temperature tipiche di 60-

70°C, dalle dimensioni che possono raggiungere alcune decine di metri, e con tempi di essiccamento che sono di alcune ore. Con la radiopolimerizzazione i tempi di trattamento si riducono a circa 1 sec., e non è richiesto un intervento di politura dopo l'irraggiamento. I processi che hanno luogo, simultaneamente, in questo tipo di applicazione sono tre:

- polimerizzazione dei monomeri;
- cross-linking;
- sviluppo di legami chimici tra il polimero e le molecole del substrato.

Le lacche, polimerizzate a temperature ambiente, possono essere applicate a legno, carta, stoffa, ecc.. Per queste applicazioni si richiedono generalmente acceleratori di energia 150-300 keV, con dosaggi di 20-200 kGy. La tecnologia trova applicazioni anche nel settore del deposito di pellicole su nastro magnetico e nell'industria poligrafica, dove si è dimostrata potenzialmente molto interessante per l'alta qualità del deposito di inchiostro sulla carta moneta, con conseguente aumento del tempo di circolazione [9].

Un'altra applicazione di questo tipo di processi riguarda l'industria tessile. Il processo viene impiegato per realizzare fibre ignifughe, idrofile e idrofobe con elevate caratteristiche di robustezza, resistenza all'accumulo di cariche statiche ed altro. La realizzazione di fibre autostiranti viene effettuata utilizzando cross-link tra gruppi idrossili in fibre di cotone o viscosa. La radiopolimerizzazione di fibre ignifughe consente inoltre di ottenere campioni incombustibili, mentre acrilati di fluoro e siloxani possono essere usati, per mezzo del processo di *graft-polymerization*, per ottenere fibre idrofile.

Va menzionato infine l'impiego di acceleratori di elettroni per trattare campioni in fibra di vetro [10], ove le caratteristiche finali del campione dipendono sia dal materiale iniziale, sia dal tipo di polimero usato. Le caratteristiche tipiche del nuovo materiale ottenuto riguardano una migliorata resistenza agli urti, un'alta stabilità chimica e una più bassa densità.

3 Applicazioni nell'industria metallurgica

3.1 Effetti termici

Un frazione importante dell'energia rilasciata dalla particella che attraversa il campione irradiato viene convertita in calore. Modulando la potenza rilasciata sul campione da trattare, tipicamente un metallo, è possibile effettuare saldature, lavorazioni di superficie ed altro.

Per mezzo di *Electron Beam Melting* è possibile effettuare fusioni di metallo di alta purezza, tipicamente per materiali come il niobio, il tantalio ed altri metalli con alte temperature di fusione. La purezza è garantita dal fatto che essendo possibile lavorare a bassa pressione, viene minimizzato l'assorbimento di impurità gassose durante il processo di fusione. I parametri dei fasci di elettroni tipicamente utilizzati per queste applicazioni sono una energia bassa ($15\div 40$ keV) e potenze specifiche dell'ordine di $10^3\div 10^4$ W/cm² e con intensità di fascio di $50\div 1000$ kW.

Un'altra applicazione possibile è data dal *Electron Beam Welding*, ovvero la radio-saldatura dei metalli. Il vantaggi di questo tipo di saldatura consiste nella possibilità di limitare l'aumento di temperatura alla sola zona di saldatura, e consente saldature di materiali refrattari. Un'applicazione tipica di questa tecnologia è la saldatura di oggetti in titanio o leghe di titanio, variamente utilizzate nell'industria aerospaziale. Le caratteristiche richieste per effettuare questo tipi di applicazione sono energie di fascio di $30\div 150$ keV e intensità di ~ 150 kW. Questa applicazione viene solitamente eseguita in camere a vuoto [11].

Per mezzo di illuminazione impulsata del campione è possibile effettuare trattamenti dimensionali quali ad esempio forature di varie forme. Il fascio viene impulsato in questo caso al fine di consentire il degassamento del campione tra un impulso e l'altro così da minimizzare perdite di potenza del fascio sui gas emessi dall'evaporazione del metallo. In questo modo si possono effettuare modellazioni già a potenze di 15 kW ed energie di $150\div 200$ keV.

Vi è infine una serie di applicazioni nel settore del trattamento delle superfici, quali rivestimenti, indurimenti, e diffusione di metalli differenti. L'utilizzo di fasci di elettroni è particolarmente vantaggioso per effettuare indurimento di superfici poichè raggiunge livelli di durezza molto superiori a quelli ottenuti con altri metodi (la durezza di Brinell per alcuni acciai risulta essere $100\div 200$ unità superiori rispetto al caso di indurimento per induzione). Inoltre nell'indurimento indotto da irraggiamento solo un sottile strato

del materiale viene riscaldato e di conseguenza vengono ridotti i margini di deformazione del materiale processato. Le installazioni industriali esistenti che utilizzano questo metodo impiegano acceleratori con energie di $150\div 200$ keV e potenze di $50\div 60$ kW.

3.2 Imaging

Fasci di elettroni possono essere utilizzati, in sostituzione di sorgenti radioattive, per effettuare tomografie di componenti meccaniche e saldature. Il vantaggio di un fascio rispetto ad una sorgente, in questo tipo di applicazione, è dovuto alla possibilità che si ha con un fascio di modularne l'energia e quindi la capacità di penetrazione nel materiale, e l'intensità, ovvero l'esposizione della lastra e quindi la risoluzione. Ad esempio, la ricostruzione di immagini tomografiche per la rivelazione di difetti in materiali plastici e in altri materiali leggeri, o in lastre sottili di acciaio di $120\div 150$ mm si può effettuare con radiazione di qualche centinaio di keV; per lastre di acciaio di $500\div 600$ mm di spessore invece è richiesta una radiazione di circa 10 MeV di energia.

Con fasci di elettroni è anche possibile effettuare difettoscopie di superfici, misurando le correnti di *riflessione* degli elettroni sulla superficie colpita. Il metodo è particolarmente efficiente quando si riduce l'angolo di incidenza del fascio di elettroni sulla superficie, poichè in questo caso la corrente di riflessione aumenta considerevolmente.

4 Applicazioni in biomedicina

Il 50% dei circa 10000 acceleratori operanti nel mondo sono dedicati ad attività nel settore biomedico [12]. Gli acceleratori lineari di elettroni sono la più diffusa sorgente di raggi X utilizzata per la radioterapia dei tumori, e per le loro caratteristiche sono oggi da preferire alla più convenzionale tecnica che utilizza sorgenti di Co^{60} . L'escursione in energia richiesta per queste applicazioni è di $5\div 25$ MeV. Le macchine dedicate alla radioterapia sono solitamente installate negli ospedali e la descrizione del loro utilizzo esula dagli intenti di questa nota dal momento che per l'esclusività del loro esercizio non è possibile considerare il loro utilizzo come una parte di un'applicazione interdisciplinare. Vi sono tuttavia altre applicazioni specifiche che meritano di essere menzionate come possibili settori di attività di un centro interdisciplinare di irraggiamento.

4.1 Ricerca nel settore dei biomateriali

In medicina vi è un bisogno costante di elaborare materiali che siano compatibili con tessuti vivi e non creino crisi di rigetto nel paziente. Tipicamente si tratta di materiali per la costruzione di organi o altri elementi artificiali. I biomateriali sono realizzati di solito con polimeri che hanno la proprietà di non causare effetti indesiderati quando messi a contatto con tessuti vivi. I migliori materiali da impiantazione biologica sono gli idrogel, che sono in grado di assorbire e preservare una considerevole quantità di acqua (tipicamente più del 10%), oltre a possedere delle proprietà di interfaccia con le soluzioni acquose che minimizzano le interazioni con le proteine e quindi il pericolo di trombocitosi e altri meccanismi di incompatibilità fisiologica. Al fine di ottenere la forma desiderata di solito gli idrogel vengono combinati con delle sostanze con buone caratteristiche di compostezza meccanica (tipicamente un polimero idrofobo). Il processo di combinazione avviene tramite radiografting (vedi capitolo 2.1). Modificando il rapporto di sostanze idrofile e idrofobe è possibile cambiare notevolmente le proprietà del biomateriale.

In generale i biomateriali vengono ottenuti tramite graft-polimerization di monomeri e polimeri, o tramite cross-linking. Tra i vantaggi di queste tecniche su altre vi è anche l'automatica sterilizzazione del campione durante il processo (vedi il capitolo 4.2). I materiali impiegati sono tipicamente il teflon, l'afflon con acido dimetilacrilato graft-polimerizzato sulla superficie. La graft-polimerization migliora anche la compatibilità di questi polimeri con il sangue [13].

4.2 Sterilizzazione

La sterilizzazione di presidi medico-chirurgici è stata una delle prime applicazioni su scala industriale degli acceleratori di elettroni, ed è tuttora l'applicazione radiobiologica di queste macchine più diffusa. Questa tecnologia offre i seguenti vantaggi rispetto ad altri sistemi quali la bollitura, il riscaldamento a secco o l'ETO gas (ossido di etilene):

- la dose necessaria per eliminare tutti i microorganismi (tipicamente ~ 25 kGy) non causa alcun tipo di danneggiamento all'apparecchio medico (fili e strumentazione chirurgica, siringhe ed altri materiali contenenti gomma, metalli, plastica ed altro);
- altri sistemi di sterilizzazione, come la bollitura non sono sempre possibili, o peggiorano le proprietà dell'oggetto. La resistenza di un filo di sutura radiosterilizzato è dieci volte superiore a quella di un filo sterilizzato mediante bollitura;
- gli oggetti possono essere sterilizzati anche dopo essere stati confezionati;
- il processo ha un elevato coefficiente di affidabilità;
- il processo ha una maggiore efficienza di produzione.

In ragione di questi vantaggi, la produzione attuale di articoli sterilizzati con fasci di particelle ionizzanti corrisponde oggi al 80% della produzione totale [14], ed il numero di impianti dedicati realizzati a questo scopo è in continua crescita [15], [16], [17]. Un esempio di un impianto di questo tipo, realizzato dalla IMPELA, è rappresentato in figura 4.2. Di regola un irraggiamento di 25 kGy consente di ottenere purezze di sterilizzazione di 1 campione non sterile su 100 milioni trattati. Le radiazioni ionizzanti vengono impiegate anche nella preparazione di vaccini. In questo caso la dose impiegata è inferiore al caso della sterilizzazione, così che i microorganismi vengono solo indeboliti per essere utilizzati come vaccinatori.

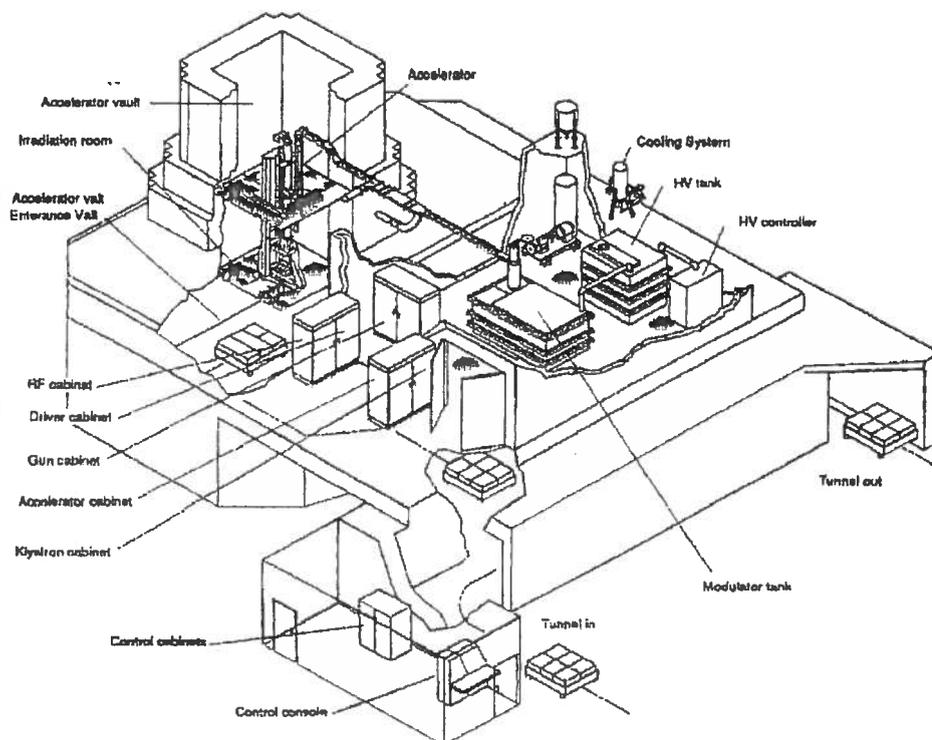


Figura 2: Schema di un impianto per la sterilizzazione con fascio di elettroni.

5 Applicazioni in agricoltura

La sterilizzazione di materiale alimentare sta acquisendo importanza in applicazioni industriali negli ultimi anni, anche a causa del bando di alcuni trattamenti chimici usati in passato che si sono rivelati altamente inquinanti, come ad esempio l'etilene dibromide (EDB), utilizzato fino al 1984, per la disinfestazione di frutta e verdura. Inoltre le leggi internazionali sui quantitativi massimi di metil bromidi residui, utilizzati per la conservazione di frutta secca, mele ed alcuni tipi di verdura, differiscono e non consentono il commercio internazionale. È inoltre probabile che con il tempo l'uso di queste sostanze venga fortemente limitato. Il congresso americano ha finanziato numerose attività che operano nel settore della ricerca di tecnologie di irraggiamento di alimenti, e ne ha regolamentato l'attività attraverso il *US Food and Drug Administration, FDA*, che consente l'utilizzo di irraggiamento di alimenti per dosi che non eccedono i 100 krad [18], regolamentando

anche il tipo di particelle utilizzate nell'irraggiamento e l'energie massime consentite. In Europa la materia non è ancora regolamentata in modo organico e diversi paesi hanno regolamentazioni differenti. La materia è quindi a tutt'oggi al centro di un'intensa attività di studio.

5.1 Disinfestazione di cereali

Un problema importante in agricoltura è la conservazione e la preservazione del raccolto. Gli insetti presenti nei cereali sono responsabili, nel periodo di stoccaggio, della distruzione di circa il 5÷10% del raccolto mondiale e di circa il 50% del raccolto nei paesi tropicali. Il metodo principale utilizzato per l'eliminazione degli insetti nocivi è l'attacco chimico, utilizzato sia in fase di stoccaggio che in fase di trasporto. Questo sistema ha il duplice svantaggio di un costo elevato e della potenziale tossicità dei prodotti utilizzati. Ricerche in questo campo hanno dimostrato che irraggiamenti con dosi di 100-200 Gy consentono la sterilizzazione di tutti gli insetti presenti e la loro completa eliminazione in tempi di 2-3 settimane. Questo trattamento è noto con il nome di *radiodeinsettizzazione*. La radiodeinsettizzazione consente una protezione parziale del cereale raccolto per un certo periodo di tempo, poichè la fertilità degli insetti che si aggiungono al campione raccolto viene diminuita in conseguenza dell'accoppiamento dei nuovi insetti con insetti sterili. Un metodo simile viene utilizzato in ambiente naturale disseminando insetti sterili in campo.

5.2 Conservazione del legno

Anche in questo caso l'irraggiamento con elettroni viene utilizzato per eliminare dal legname insetti nocivi (in particolare nematodi). Questa azione è molto importante per l'esportazione del legname dal momento che le leggi che ne regolano il transito da un paese all'altro contengono norme che riguardano l'infestazione del materiale. Vanno inoltre qui ricordate le applicazioni su legno di polimeri come descritto nel capitolo 2.

5.3 Degermogliazione

Il problema della germogliazione, che avviene quando il periodo di stoccaggio di un prodotto si prolunga, può essere risolto con l'irraggiamento. Per esempio l'irraggiamento di patate con dosi di 50÷150 Gy previene la formazione di germogli per 5÷10 mesi in stoccaggio a temperatura ambiente. L'irraggiamento viene effettuato poche settimane

dopo il raccolto. Va osservato che le patate non possono essere irradiate direttamente nei container e che i germogli profondi del tubero non possono essere trattati ai livelli di dose descritti. Anche le cipolle possono essere degermogliate con dosi di circa 100 Gy rilasciate immediatamente dopo il raccolto.

5.4 Selezione genetica

Le radiazioni ionizzanti rappresentano un importante strumento per ottenere mutagenesi di un'ampia varietà di piante. La mutagenesi ottenuta per irraggiamento è un processo casuale e solo una piccola frazione delle mutazioni ottenute può considerarsi potenzialmente utile. Tuttavia con questo metodo, i tempi del miglioramento genetico possono essere fortemente ridotti e nuovi prodotti altamente performanti possono essere ottenuti. Tipicamente si preferisce irradiare il seme, con dosi dell'ordine del centinaio di Gy. È con questi metodi di mutagenesi che sono stati ottenute alcune varietà di grano, con alti livelli di produttività. A tutt'oggi più di 500 varietà di colture ottenute per radiomutagenesi sono state diffuse nel mondo.

6 Protezione ambientale

Gli acceleratori di particelle hanno trovato recentemente applicazioni nel settore ecologico, per la riduzione o l'eliminazione di sostanze inquinanti di vario tipo [27]. In particolare possono essere trattati due tipi fondamentali di agenti inquinanti:

- sostanze in atmosfera (gas prodotti da combustione in ciminiera, aerosol, solventi evaporati);
- sostanze in acqua, nel suolo e in fognatura.

6.1 Trattamento di gas combusti in ciminiera

Prodotti quali SO_2 e NO_x , prodotti dalla combustione ed emessi in atmosfera sono noti per essere altamente inquinanti. La quantità di anidride solforica e ossido di azoto emessi in atmosfera nel nostro pianeta sono dell'ordine di milioni di tonnellate, responsabili della formazione di piogge acide ed altri danni ambientali rilevanti. I sistemi attualmente utilizzati sono il *Wet Scrubber* per l'eliminazione del SO_2 e *Selectic Catalytic Reaction* per l'eliminazione del NO_x . Lo smaltimento delle scorie di tali trattamenti rimane però difficoltoso. L'uso di acceleratori di elettroni in questo settore è in via di sperimentazione in alcuni paesi, quali la Germania, gli Stati Uniti, il Giappone [28] e la Polonia [27]. La ionizzazione prodotta sui fumi di molecole di N_2 , H_2O , CO_2 e O_2 produce radicali liberi che si possono combinare con le molecole di SO_2 e NO_x per formare i rispettivi acidi. Poichè il trattamento avviene in ammoniacale, gli acidi prodotti vengono a loro volta convertiti in solfati di ammonio e nitrosolfati di ammonio, ovvero in prodotti che possono essere riutilizzati a loro volta come fertilizzanti in agricoltura e per altri prodotti di utilizzo corrente. L'efficienza di trasformazione è stata stimata essere il 95% per SO_2 e 80% per NO_x . Le potenze attualmente richieste per tali macchine acceleratrici sono dell'ordine di 50-100 kW con energie dell'ordine di 1 MeV. Analisi economiche effettuate su questa tecnologia dimostrano che è economicamente vantaggiosa per volumi di gas di scarico minori di 120000 Nm^3/h , ma il costante sviluppo di macchine acceleratrici e il conseguente abbattimento dei loro costi potrà presto modificare sostanzialmente questi risultati.

6.2 Trattamento di acque e fognature

Nei trattamenti convenzionali di depurazione delle acque per ogni tonnellata di acqua depurata diversi chili di sostanze inquinanti vengono raccolti. Inoltre i metodi biologi-

ci sono lenti, costosi e soprattutto sensibili alle sostanze chimiche presenti nell'acqua, e non è sempre possibile garantire un alto livello di sterilizzazione dell'acqua di defluvio dall'impianto. I metodi termici per altro sono costosi e non possono essere utilizzati su scala industriale. Studi sull'utilizzo di radiosterilizzazione dell'acqua hanno dimostrato che l'irraggiamento non modifica la struttura chimica dell'acqua e non ne altera le proprietà biologiche. Inquinanti quali il percloroetilene e il tricloroetilene vengono efficacemente decomposti a dosi di 100-500 Gy [27]. Il trattamento è molto efficace quando combinato con processi di ozonizzazione. Le energie richieste per questo tipo di applicazione sono tipicamente di $4\div 10$ MeV, con potenze di 50-200 kW. È stato dimostrato [29] che questo trattamento è estremamente potente anche per eliminare la contaminazione di falde acquifere con pesticidi e erbicidi filtrati dal terreno, con applicazioni di irraggiamenti di 0.5-1 Mrad. Ricerche sperimentali in questo settore vengono correntemente svolte in molti laboratori. In Italia, presso l'ENEA di Frascati, è stato effettuato uno studio per eliminare polifenoli dalle acque di scarico dei frantoi [30]. I risultati, ottenuti con un acceleratore da 5 MeV si sono rivelati estremamente promettenti. È forse inutile sottolineare come sia estremamente importante estendere le analisi a vari tipi di processi per caratterizzare al meglio le potenzialità di questa metodologia.

Un'altra applicazione possibile riguarda la sterilizzazione delle acque fognarie. È noto che il composto ottenuto trattando i liquami provenienti dalle fognature municipali costituisce potenzialmente un ottimo additivo ai fertilizzanti utilizzati in agricoltura. Il riciclo delle acque di scarico è limitato principalmente da due fattori:

- presenza di sostanze tossiche, organiche ed inorganiche;
- esistenza di organismi patogeni, potenziali veicoli di malattia per animali e piante.

Diverse stazioni di test sono state costruite per sperimentare l'impatto di un trattamento ad irraggiamento su acque di fognatura. I risultati sono anche in questo campo molto promettenti e garantiscono, con l'utilizzo di acceleratori adeguati, la depurazione di grosse portate d'acqua. Le energie utilizzate sono di $2\div 10$ MeV, con potenze di irraggiamento di 50-200 kW.

Recentemente vengono effettuati test che riguardano anche lo smaltimento di rifiuti solidi organici, un aspetto che per dimensioni, milioni di tonnellate in paesi mediamente popolati, rappresenta una delle principali sfide al problema globale della protezione dell'ambiente. Va aggiunto qui che esistono alcuni programmi di finanziamento dell'CEE per la creazione di strutture adibite alla ricerca e alla realizzazione di impianti dedicati alla protezione dell'ambiente. Si veda ad esempio il progetto LIFE [31].

Una tavola sinottica delle applicazioni industriali di fasci di elettroni discusse nei paragrafi precedenti è riportata in tabella 3.

Prodotto	Risultato e vantaggi	Processo
Isolanti per fili e cavi, isolanti plastici, imballaggi plastici, film;	Materiali termorestringenti, resistenza all'usura, al calore, migliore omogeneità dielettrica.	cross-linking, vulcanizzazione
polietilene in schiuma;	Compressione, resistenza alla tensione	cross-linking, vulcanizzazione
gomma naturale e sintetica;	stabilità alle alte temperature, resistenza alle abrasioni; vulcanizzazione a freddo; eliminazione di agenti chimici per la vulcanizzazione	
funi da inceneritori;	Precipitazione di SO ₂ e NO _x	reazione chimica
semiconduttori a stato solido;	riduzione dello <i>switching time</i> , aumento dell'efficienza di resa, stabilizzazione del guadagno, riduzione del rumore nei diodi zener, alterazione dei livelli beta	alterazione cristallina
pietre preziose, cristalli e vetri;	colorazione permanente	
materiali adesivi;	aumento della forza di incollaggio; migliore resistenza chimica, alle abrasioni, alle condizioni atmosferiche; eliminazione dei solventi, trattamento rapido, trattamento a basse temperature, no limitazioni sui colori	Curing, polimerizzazione
rivestimenti, vernici e inchiostri su legno, metallo e plastica		
legno e cemento;	resistenza al danneggiamento, righe, abrasioni, torsioni; stabilità dimensionale; uniformità superficiali; miglioramento di legni di bassa qualità (parquet)	polimerizzazione
cellulosa;	aumento dei legami chimici	depolimerizzazione
fibre in tessuto;	stirabilità, resistenza al lavaggio, resistenza all'usura, migliore colorabilità, migliore dissipazione statica, stabilità termica	grafting
film e carta	adesività, resistenza all'umidità	
patate, grano, riso, cipolle, pesce, pollo, fragole;	aumento del tempo di conservazione	pastorizzazione, disinfestazione
acque di scarico;	trattamento dei rifiuti solidi, riutilizzo in agricoltura dei derivati del trattamento	
presidi medici e contenitori sterilizzati;	processo di materiali non resistenti al calore, alta velocità di lavorazione, bassi consumi di lavorazione	sterilizzazione

Tabella 3: Tavola sinottica delle applicazioni industriali di acceleratori di elettroni.

7 Applicazioni di acceleratori di protoni e ioni

Fasci di ioni sono utilizzati in molte applicazioni complementari per determinare la composizione atomica di un materiale. Le tecniche maggiormente note sono [19], [20]:

- *Rutherford Backscattering* (RBS)
- *Proton Induced X-ray Emission* (PIXE)
- *Charged Particle Activation Analysis (CPAA) o Nuclear Reaction Analysis* (NRA)
- *Secondary Ionization Mass Spectrometry* (SIMS)
- *Particle Desorption Mass Spectrometry*

Le tecniche RBS e PIXE sono note oramai da alcuni anni, mentre CPAA e NRA sono più recenti. Mentre RBS è molto adatto allo studio di elementi pesanti in substrati leggeri (viene ad esempio impiegata nella ricerca nel campo dei semiconduttori), l'NRA può essere utilizzata nello studio di elementi leggeri in substrati spessi (metalli) e trova applicazioni in metallurgia. In particolare è stata utilizzata per comprendere la struttura e il comportamento di superconduttori caldi.

La CPAA viene utilizzata in due ambiti: lo studio di concentrazioni di bassissima densità e studi di difetti (erosione e corrosione). Nel primo caso è possibile ricostruire abbondanze di elementi presenti in un campione con risoluzioni dell'ordine del ppb (una parte per miliardo i.e. 10^{-9}). Si possono così determinare impurità di C, N o O ed altri eventuali contaminanti in campioni di metallo. Le energie di fascio per queste applicazioni stanno, a seconda della profondità di analisi richiesta ($\mu\text{m} \div \text{mm}$), nell'intervallo 1÷45 MeV. La seconda applicazione richiede l'attivazione di una sottile pellicola di materiale, e nel monitoraggio della radiazione emessa, una variazione negativa di radiazione emessa corrisponde ad un deficit di massa.

L'utilizzo di fasci di piccole dimensioni, detti anche *microsonde nucleari*, ha consentito la trasformazione della tecnica di PIXE da uno strumento di tipo analitico ad uno atto alla ricostruzione di immagini (*imaging*). Consente di ottenere una mappa dei materiali presenti nel campione, ed in questo senso questa applicazione può essere considerata un tipo di microscopia nucleare. Si tenga presente che è tecnologicamente possibile arrivare a risoluzioni spaziali eccellenti con dimensioni del fascio di 1 μm . Applicazioni di questa tecnologia includono la mappatura di strutture a multistrato nei semiconduttori, lo studio di superconduttori caldi, l'analisi di difetti nelle saldature ed altro.

La combinazione di RBS (per l'analisi in profondità) e PIXE consente la ricostruzione di immagini e mappature atomiche tridimensionali.

Mentre in tutte queste applicazioni, dette di *Ion Beam Analysis*, l'acceleratore viene utilizzato per bombardare il campione da analizzare, nella *Accelerator Mass Spectroscopy* sono gli ioni stessi del campione che vengono accelerati al fine di identificarne la struttura in massa, come descritto nel capitolo 7.1.

7.1 Applicazioni AMS

AMS sta per *Accelerator Mass Spectrometry* ed identifica una tecnologia che sfrutta l'accelerazione di ioni estratti da un campione per identificarne la struttura di massa e misurarne l'abbondanza. Questa tecnologia, che è stata sviluppata circa 15 anni or sono [21], è in rapido sviluppo e trova applicazioni in diverse aree di ricerca (vedi [22]), mentre si moltiplicano in tutto il mondo i laboratori che praticano questa metodologia.

7.1.1 Applicazioni biomediche

L'elevata sensibilità dell'AMS consente di effettuare misure accurate di dosimetria di tossine, mutageni e carcinogeni a livelli di dose corrispondenti alla esposizione naturale dell'ambiente. La sensibilità di questa tecnologia consente l'analisi di isotopi presenti in percentuali di una parte per miliardo ($1:10^9$) in campioni di qualche milligrammo di peso. In realtà è stato dimostrato che la sensibilità dell'AMS in queste applicazioni raggiunge livelli di *zeptomole* (zinole = 10^{-21} mole), e possiede un'ampia dinamica (fino a livelli di 100 femtomole) [23] per la rivelazione di isotopi ^3He , ^{14}C , ^{27}Al e ^{41}Ca . È da osservare che molte applicazioni in questo settore si possono ottenere con piccole macchine ottimizzate per ^{14}C ed ^3H , poichè con questi traccianti si possono probabilmente effettuare la maggior parte delle analisi nel settore biomedico. Un esempio di una potenziale macchina di questo tipo, proposta da Purser [24] è mostrata in 7.1.1.

7.1.2 Applicazioni in archeologia

La possibilità di fornire, tramite AMS, datazioni accurate da campioni di un milligrammo o meno di carbonio, ha generato un notevole interesse nel settore archeologico, ed ha prodotto negli ultimi anni una notevole messe di analisi in questo settore. Un esempio rilevante è la datazione dell'uomo di Hauslabjoch, ritrovato nel 1991 nel massiccio di Similaun in sud Tirolo (Italia) (un reperto noto anche col nome di *uomo di ghiaccio*).

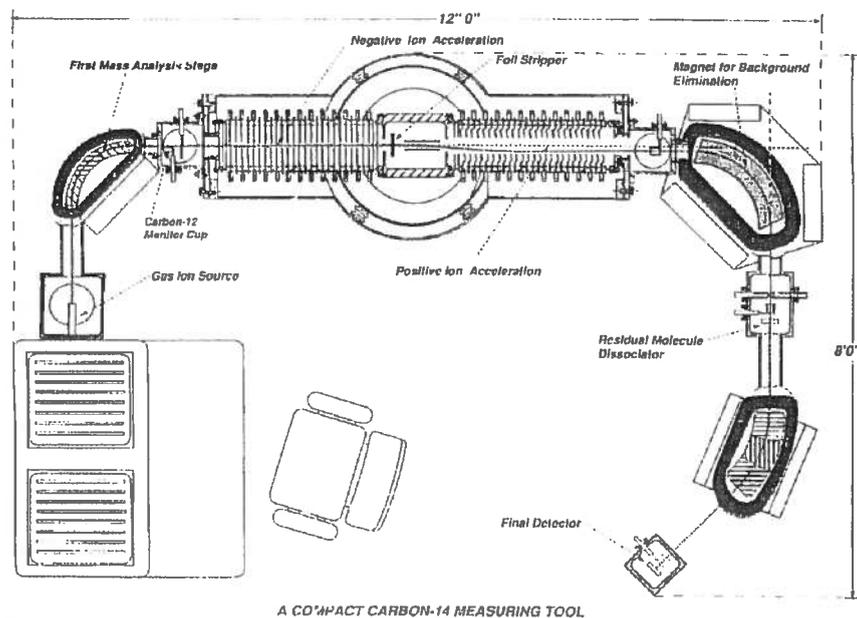


Figura 3: Schema di uno spettrometro per applicazioni cliniche o biomediche.

L'utilizzo di tecniche AMS per la radiodatazione al carbonio ha consentito di situare l'età dell'uomo di ghiaccio in un periodo di tempo compreso tra il 3350 e il 3100 AC [25], fornendo quindi un tassello importantissimo nella ricostruzione storica del periodo dell'età del bronzo nel nord Italia.

7.1.3 Applicazioni in geologia ed ecologia

Una grande quantità di dati è oggi necessaria nel settore delle geoscienze, al fine di verificare la descrizione con sistemi di simulazione di grandi sistemi biogeochimici. Molti dei parametri necessari, nei differenti campi di interesse geofisico quali la paleoclimatologia, la chimica e la dinamica dell'atmosfera, l'oceanografia, lo studio di processi di erosione e delle glaciazioni, possono essere misurati con tecnologie AMS che utilizzano isotopi traccianti e cronometrici per lo studio del geociclo del carbonio.

La possibilità di effettuare misure accurate di piccole concentrazioni di isotopi radioattivi di lunga vita media, consente inoltre di svolgere valutazioni di dosimetria atmosferica. Una misura effettuata su campioni prelevati a Hiroshima e Nagasaki [26] con

l'ausilio di tecnologia AMS sull'isotopo ^{36}Cl , ha consentito la misura della concentrazione di quest'isotopo in funzione della distanza dall'esplosione, ed ha fornito importanti risultati, in concomitanza con l'analisi epidemiologica dei sopravvissuti, sulla comprensione degli effetti di danneggiamento biologico da neutroni e sui meccanismi di trasporto conseguenti allo scoppio. Misure con ^{129}I per la caratterizzazione di contaminazioni dovute alla presenza di scorie nucleari sovietiche nell'Artico, e al disastro di Chernobil, sono attualmente effettuate presso molti laboratori AMS.

7.2 Produzione di isotopi per *Positron Emission Tomography*

Acceleratori di protoni vengono utilizzati da tempo per la creazione di isotopi per uso biomedico, quali ad esempio ^{201}Tl , ^{123}I , ^{67}Ga utilizzati nelle tomografie SPECT (*Single Photon Emission Computed Tomography*). Questi isotopi hanno vite medie relativamente lunghe e possono essere acquistati in vari laboratori nel mondo. Diversa è invece la situazione per gli isotopi che vengono utilizzati nella tomografia PET, ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , ^{18}F . Questi isotopi infatti hanno vite medie che vanno dai 2.1 ai 110 minuti ed devono quindi essere prodotti *in situ* per poter essere utilizzati. La macchina necessaria allo scopo può essere un ciclotrone [32] o un linac [33] di protoni con energie che vanno dai 10 ai 18 MeV, con correnti dell'ordine di $10\div 50\ \mu\text{A}$. La sala di trattamento del paziente, per la realizzazione della tomografia, andrebbe posta in questo caso il più possibile in prossimità dell'acceleratore, al fine di minimizzare i tempi richiesti per il trasporto.

7.3 Impiantazione Ionica

Questa è una della più diffuse applicazioni industriali di fasci di ioni esistenti oggi. L'impiantazione ionica è una tecnica che consente di drogare un semiconduttore con tipi specifici di ioni, che accelerati ad una determinata energia, vengono impiantati nel semiconduttore ad una data profondità. Questa tecnologia ha rimpiazzato le tecniche di impiantazione per diffusione consentendo la rapidissima evoluzione tecnologica che si è verificata negli ultimi anni nel settore della microelettronica.

Gli impianti attualmente più diffusi sono acceleratori di bassa energia (pochi keV) con correnti dell'ordine del mA. L'impiantazione ionica consente anche di modulare altre proprietà dei materiali quali la conduttività elettrica, la durezza superficiale, la resistenza alla corrosione, il coefficiente di attrito, le proprietà adesive e catalitiche. Vi sono applicazioni nel settore ferroviario dell'alta velocità, per il miglioramento dei componenti ad

alto stress quali cuscinetti, rotori, alberi ed altre parti meccaniche soggette a rapida usura, e nel settore medico, nel campo degli arti artificiali, soprattutto per la realizzazione di articolazioni e protesi d'anca.

8 Centri di irraggiamento in Europa: alcuni esempi

L'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare [34] è uno dei più importanti istituti di ricerca in Italia. È organizzato in 19 sezioni, 4 laboratori nazionali e collabora con istituti di ricerca di tutto il mondo in progetti di ricerca sperimentale e teorica nel settore della Fisica nucleare e subnucleare. Uno dei quattro laboratori nazionali, il laboratorio di Legnaro (Padova), in collaborazione con la PROEL Tecnologie S.p.A. e LABEN S.p.A. (gruppo IRI-FINMECCANICA) e con l'Istituto di Fisica Nucleare di Novosibirsk (Russia) ha installato e reso operativo un acceleratore di elettroni (modello ILU6) con lo scopo di promuovere e attivare la ricerca e lo sviluppo di nuovi processi quali alcuni di quelli descritti nelle sezioni precedenti [35]. L'impianto è entrato in servizio nel 1994 ed ha permesso di ottenere importanti risultati nella ricerca di nuovi materiali utilizzati prevalentemente a scopo scientifico, medico-ambientale ed aerospaziale. ILU6 è un acceleratore lineare a singola cavità risonante che raggiunge un'energia massima di 2.5 MeV e una potenza di 20 kW. anche se, per ragioni logistiche e di radioprotezione l'apparecchiatura è stata utilizzata fino a potenze massime di 1 kW.

Un centro che per le sue caratteristiche rappresenta un ottimo esempio delle potenzialità discusse in questa nota è situato presso l'Università di Gent in Belgio. Questo istituto [36] è equipaggiato con un acceleratore lineare di elettroni di 15 MeV di energia e può raggiungere potenze massime di 20 kW. È stato inizialmente concepito per ricerche fondamentali nel campo della fisica nucleare e durante gli ultimi anni è stato potenziato per affrontare un intenso programma di ricerca nei settori della ricerca di biomateriali, chimica dei polimeri, tecnologie alimentari, radiologia e dosimetria. L'intensità del fascio prodotto dall'acceleratore copre 16 ordini di grandezza: da un'intensità dell'ordine di pochi elettroni al secondo, fino a correnti medie di 2 mA, mentre l'energia del fascio può essere modulata da 1.75 a 15 MeV. Il centro è organizzato con una linea di fascio primario che serve 7 linee di fascio secondarie che vengono dirette ad altrettante sale sperimentali (vedi in Figura 8). Alla fine della prima sezione di accelerazione, elettroni da 1.75 MeV possono essere deflessi nella linea C0, utilizzata per irraggiamenti di bassa energia (trattamenti superficiali). Le linee C1, C2 e C5 sono state concepite per l'utilizzo di fasci di fotoni mentre nelle rimanenti 3 linee (C3, C4 e C6) vengono utilizzati gli elettroni. Ogni linea è equipaggiata per trattare i fasci fino alle loro intensità massime (2 mA), con risoluzioni in energia dell'ordine del 1%. A seconda delle sezioni di fascio utilizzate, si possono raggiungere densità di potenza fino a 100 kW/cm². La zona C2 in particolare è stata disegnata per produrre un intenso fascio di fotoni di ampia sezione (25 cm) ma uniforme, con ratei di γ -dose fino a un massimo di 10 kGy/h in aria e con un'omogeneità

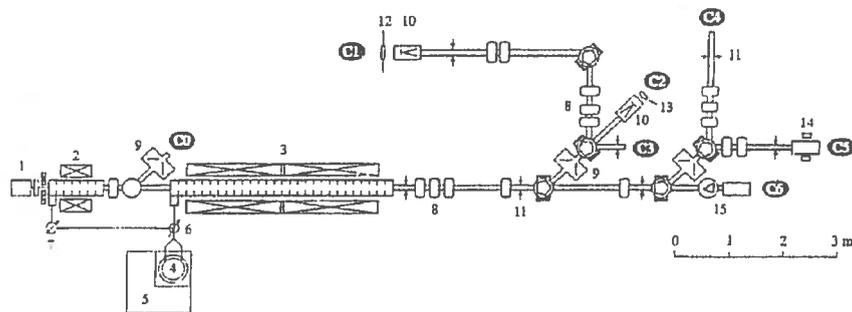


Figura 4: Schema del sistema di distribuzione dei fasci dell'acceleratore lineare di Gent.

migliore del 5%. Su questa linea vengono eseguite ricerche su effetti della radiosterilizzazione di polimeri biocompatibili, radiografting su polimeri, sterilizzazione del legno e di derrate alimentari. La linea C3 è di media potenza (≤ 1 kW) e fornisce un fascio di piccole dimensioni (≤ 1 cm) utilizzato prevalentemente per effettuare studi di invecchiamento da radiazione dei materiali, eseguiti a diverse temperature. La linea C4, di bassa potenza, è utilizzata per lo sviluppo, il test e la calibrazione di rivelatori di particelle.

Gli esperimenti di fluorescenza e risonanza nucleare vengono realizzati sulla linea C5, utilizzando un fascio di fotoni polarizzato, ove si ottengono polarizzazioni medie del 18% con valori di picco del 30% a energie di 5 MeV. La linea C6 infine viene utilizzata per il trasporto del fascio di elettroni dotato di un sistema di *scanning* per l'irraggiamento ad alta potenza. Anche questa linea è stata disegnata per effettuare ricerche su irraggiamento di derrate alimentari e studio di produzione di biomateriali, con enfasi sul confronto di irraggiamento a elettroni e fotoni.

Il centro è estremamente interessante perchè combina caratteristiche tipiche di acceleratori utilizzati nella ricerca di base, (risoluzione in energia, qualità di fascio, versatilità) con le proprietà di macchine disegnate più specificatamente per applicazioni industriali, quali la potenza di fascio e l'intervallo di variabilità in energia.

Un altro centro che è stato creato per applicazioni di questo tipo è l'*Institute of Nuclear Chemistry and technology* di Varsavia. Il centro [37], diversamente da quanto è stato realizzato in quello di Gent, possiede diversi piccoli acceleratori di elettroni con caratteristiche diverse, prodotti per le specifiche applicazioni richieste. Le attività del centro con la descrizione delle macchine utilizzate è riassunta nella tabella 4.

Tipo di acceleratore	Caratteristiche di fascio	Anno di installazione	Applicazioni
Linear accelerator (LAE 13/9)	5-13 MeV, 9kW	1971	radiochimica
Acceleratore risonante ILU-6	0.7-2 MeV, 20 kW	1988	Impianto pilota
Acceleratore elettrostatico AS-2000	0.2-2 MeV, 0.2 keV	1988	Radiofisica
Acceleratore lineare PILOT	10 MeV, 1 kW	1990	Irraggiamento di alimenti
Acceleratore ELV 3A	800 keV, 2x50 kW	1991	Irraggiamento di fumi
Acceleratore lineare U-003	10 MeV, 10 kW	1992	Irraggiamento di alimenti
Acceleratore lineare U-003	10 MeV, 15 kW	1992	Sterilizzazione
Acceleratore lineare LAE 10	10 MeV, 0.5 kW	1993	Radiochimica

Tabella 4: Attività realizzate presso il *ICHTJ*.

9 Conclusioni

L'importanza dell'aspetto interdisciplinare nelle potenzialità di utilizzo delle macchine acceleratrici, è l'elemento chiave nella valutazione dell'interesse che può avere in Piemonte la realizzazione di un centro di irraggiamento. È stato visto infatti come sia ampio il numero di applicazioni degli acceleratori di particelle in vari settori della ricerca tecnologica ed industriale, e come siano eterogenei e diversi tra loro i campi di interesse discussi. Questa interdisciplinarietà giustifica l'ambizione di realizzare un centro che posseda il massimo di versatilità, qualificandolo quindi come progetto pilota per realizzazioni specifiche nei diversi campi di applicazione, e non come centro con caratterizzazioni predeterminate e modellate su scopi specifici. Solo in questo modo infatti è possibile convogliare in un unico centro di studio interessi disparati e diversificati, ma con ampi margini di sovrapposizione, e quindi, con buone opportunità di scambio di informazioni e competenze. Si tenga presente inoltre che una frazione consistente dei fondi di finanziamento richiesti per un progetto di questo tipo deve essere riservata alle infrastrutture (realizzazione del bunker che ospita l'acceleratore e delle sale di trattamento, che a seconda delle potenze impiegate sono soggette a precise definizioni legislative) e ai sistemi di sicurezza e radioprotezione. Poiché questa è una frazione consistente della spesa, la possibilità di convogliare interessi provenienti da diversi tipi di utenze, scientifiche ed industriali, giustifica a livello economico l'interesse per un tipo di impresa di ricerca di tipo sinergico ed interdisciplinare. Inoltre la costruzione delle infrastrutture, se realizzata con buoni margini di versatilità, può garantire la presenza di un centro di accoglienza per sviluppi futuri conseguenti e non alle attività del centro (migliorie della macchina, aggiunta di macchine secondarie per applicazioni complementari e così via).

Mi auguro che il materiale raccolto in questa nota possa trovare attenzione per l'avvio di uno studio di interesse ed utilità territoriale di questo progetto. Il profilo della macchina da realizzare potrà essere definito solo dagli utilizzatori, e la definizione tecnica del progetto potrà quindi procedere solo di pari passo con la definizione delle finalità richieste dai medesimi.

10 Ringraziamenti

Ringrazio i prof. Pachan e Plawski, del *Soltan Institute for Nuclear Research* di Varsavia per le informazioni riguardanti le applicazioni industriali di acceleratori di elettroni correntemente utilizzate in Polonia, ed il dott. Tecchio dell'*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare* per la documentazione ricevuta sulle ricerche effettuate presso i laboratori di Legnaro con l'acceleratore ILU6.

Vorrei ringraziare la dott.ssa Elisa Sacchi per avermi fornito informazioni sull'acceleratore del centro ANSTO in Australia e sulle applicazioni in generale della spettrometria AMS in geologia, ed il dott. Quirico Migheli per i suggerimenti sui possibili utilizzi di fasci di elettroni nei settori dell'agricoltura e dell'alimentazione.

Un ringraziamento infine alla Prof.ssa Carla Lombardi, del Politecnico di Torino per avermi aiutato nella ricerca di soggetti industriali potenzialmente interessati al tipo di applicazioni discusse nella presente nota.

Riferimenti bibliografici

- [1] U.Amaldi, *The RITA network and the design of compact proton accelerators*, TERA report 1996.
- [2] The Elettra Center of Trieste, <http://www.elettra.trieste.it>.
- [3] E.A.Abramyan, *Industrial Electron Accelerators and their applications*, Springer-Verlag, 1984.
- [4] W.Scharf, *Particle accelerators and their uses*, Harwood Academic Publishers, 1986.
- [5] A.Charlesby, *Atomic Radiation and Polymers*, Pergamon Press, Oxford 1960.
- [6] E.A.Borizov, F.Z.Raichuk, G.V.Shiryaeva, *Technology of Radiochemical Production of Concrete-Polymer and Wood-Plastic Materials*, Moscow, Energoizdat, *Secr. Radiat. Khim. Tech.* Vol 12, 1982.
- [7] N.Sagane, H.Narayana, *Plastic Foam*, *3rd Int. Meet. Radiat. Proc.*, Tokyo, 1980.
- [8] K.Veno, K.Kojima, N.Clear, *Flame Retardant, Radiation Cross-linked Polyolefine Heat-Shrinkable Tubing*, *Radiat. Phys. Chem.* Vol.25, no.4-6, pp. 867-877, 1985.
- [9] T.F.O'Brien, *Electron Beam Curing of Intaglio Inks*, *Radiat. Phys. Chem.*, vol 25, no.4-6, pp.609-616, 1985.
- [10] G.N.Piyankov, V.V.Chlapatskaya, Y.F.Gologniy et al., *Technology Parameters and Strength Properties of Wound, Fiber Glass Materials, Cured by Radiation Method*, *Techn. Sudostroen.*, no. 1, pp. 609-616, 1985.
- [11] A.I.Chvertkoet al., *Equipment for Electron Beam Welding*, Naukova Dumka, Kiev, 1973.
- [12] U.Amaldi, *Accelerators for Medical Applications*, TERA 96/6 TRA 26 (1996).
- [13] K.Otsuhata, M.T.Razzak, R.L.Castanares, Y.Tabata, *Effect of Surface Texture of Grafted Films on Antithrombogenicity*, *Trans. 5th Int. Meet. Radiat. Proc.* San Diego, Calif. 1984, *Radiat. Phys. Chem.* vol 25, 4-6, pp. 537-548, 1985.
- [14] J.S.Sivinski and D.P.Sloan, *The role of linear accelerators in Industry*, *Nucl. Inst. and Meth.* **10/11** 981-986 (1985).

- [15] Y.Hoshi et al., X-ray irradiation system for a sterilization application, *Nucl.Instr. and Meth.* **A353** 6-9 (1994).
- [16] J.T.Allen et al., A fully integrated 10 MeV electron beam sterilization system, *Radiat. Phys. Chem.* Vol. 46, No 4-6, pp 457-460 (1995).
- [17] http://www.titan.com/documents/corp/ann_rpt/steril.html
- [18] US Food and Drug Administration, *Federal Register*, Vol.49, No 31, (Febbraio 1984) 5714.
- [19] Application of electrostatic accelerators. a new dimension in material science, *Nucl. Instr. and Meth.* A287 (1990). pp.210-215.
- [20] J.Böttiger *Nucl. Phys. Meth. in Materials Research*, Vieweg, Wiesbaden, (1980) pp.101.
- [21] J.Keilson and C.Waterhouse, *Proc. 1st Conf. on Radiocarbon Dating with Accelerators*, ed. H.E.Gove, (University of Rochester Press, 1978) p.391.
- [22] J.C.Davis, AMS Beyond 2000, *Nucl. Instr. and Meth.* B92 (1994) 1-6.
- [23] J.S.Vogel and K.W.Turteltaub, Accelerator Mass Spectrometry in biomedical research, *Nucl. Instr. and Meth.* B92 (1994) 445-453.
- [24] K.W.Purser, A future AMS/chromatography instrument for biochemical and environmental measurements, *Nucl. Instr. and Meth.* B92 (1994) 201-206.
- [25] R.Prinoth-Fornwagner and T.R.Niklaus, The man in the ice: results from radiocarbon dating, *Nucl. Instr. and Meth.* B92 (1994) 282-290.
- [26] T.Straume et al., *Health Phys.* 63 (1992) 421.
- [27] M.Pachan, Use of accelerators for environmental protection, Soltan Institute for Nuclear Studies, Swierk, Poland (1996).
- [28] <http://www.jaeri.go.jp/INTRO/RESEARCH/RADIATION/pilot.html>.
- [29] N.Getoff, Decomposition of biological resistant pollutants in water by irradiation.
- [30] U.Bizzarri et al., Electron accelerators at the EIGNE Center at Frascati, *Nucl. Instr. and Meth.* B50, 1990.

- [31] http://europa.en.it/en/comm/dg11/env_proj/env/info/index-en.htm
- [32] E.M.Conard, High intensity accelerator for a wide range of applications, Nucl. Instr. and Meth. A353 (1994) pp.1-5.
- [33] <http://www.linac.com/>
- [34] <http://www.infn.it>
- [35] L.Tecchio, Fasci di elettroni per ricerca e sviluppo presso i laboratori nazionali di Legnaro.
- [36] W.Mondelaers et al., The Gent University 15 MeV high current linear electron accelerator facility. Nucl. Instr. and Meth. A368 (1996) pp.278-282.
- [37] High Technologies Advanced Materials Diagnostics. ICHTJ, Warsaw, Poland.

Indice

1	Introduzione	1
2	Processi chimici indotti da radiazioni ionizzanti	3
2.1	Polimerizzazione	3
2.2	Cross-linking	5
2.3	Radiodistruzione di polimeri	7
2.4	Processi combinati	7
3	Applicazioni nell'industria metallurgica	9
3.1	Effetti termici	9
3.2	Imaging	10
4	Applicazioni in biomedicina	11
4.1	Ricerca nel settore dei biomateriali	11
4.2	Sterilizzazione	12
5	Applicazioni in agricoltura	13
5.1	Disinfestazione di cereali	14
5.2	Conservazione del legno	14
5.3	Degermogliazione	14
5.4	Selezione genetica	15
6	Protezione ambientale	16
6.1	Trattamento di gas combustibili in ciminiera	16
6.2	Trattamento di acque e fognature	16
7	Applicazioni di acceleratori di protoni e ioni	20
7.1	Applicazioni AMS	21
7.1.1	Applicazioni biomediche	21
7.1.2	Applicazioni in archeologia	21

7.1.3	Applicazioni in geologia ed ecologia	22
7.2	Produzione di isotopi per <i>Positron Emission Tomography</i>	23
7.3	Impiantazione Ionica	23
8	Centri di irraggiamento in Europa: alcuni esempi	25
9	Conclusioni	28
10	Ringraziamenti	29

Elenco delle figure

1	Sommario schematico delle reazioni primarie indotte da irraggiamento di elettroni.	4
2	Schema di un impianto per la sterilizzazione con fascio di elettroni.	13
3	Schema di uno spettrometro per applicazioni cliniche o biomediche.	22
4	Schema del sistema di distribuzione dei fasci dell'acceleratore lineare di Gent.	26

Elenco delle tabelle

1	Proprietà meccaniche di alcuni tipi di legno prima e dopo il radiotrattamento con polimetilmetacrilato.	5
2	Proprietà del cemento arricchito con polimeri.	5
3	Tavola sinottica delle applicazioni industriali di acceleratori di elettroni.	19
4	Attività realizzate presso il <i>ICHTJ</i>	27