



Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma

N 2S/2021

Quaderno

Le Applicazioni della Ricerca Nucleare in ambito civile e industriale



In copertina:
Immagine di archivio

Il saluto del Presidente

Dott. Ing. Carla Cappiello



L'energia nucleare

L'energia nucleare, che inizialmente era finalizzata alle sole applicazioni energetiche, ha trovato altri vitali campi di applicazione. Tramite il suo uso sono nate nuove discipline come risposta a problemi inediti di estrema complessità. Bisogna ricordare che questo settore è caratterizzato sia da una varietà di ambiti in stretta correlazione sia dagli aspetti di sicurezza che richiedono una considerazione equilibrata e integrata di tutte le problematiche in gioco. La cultura così ottenuta risulta efficace in numerosi settori dell'alta tecnologia, dalla medicina alle costruzioni, dall'industria di processo ai beni culturali, dal settore aereo-spaziale alla ricerca di base, dalla produzione di radiofarmaci alla dissalazione, dalle misure alla strumentazione biomedica.

Grazie alle tecnologie nucleari si è reso possibile il raggiungimento di traguardi fondamentali per la salvaguardia della salute umana e per l'innalzamento della qualità di vita, contribuendo così alla crescita e allo sviluppo del progresso scientifico e tecnologico. Mi soffermo, ad esempio, all'uso del nucleare in medicina. La medicina nucleare si occupa di diagnosticare e trattare le malattie, utilizzando piccole quantità di un materiale radioattivo detto radiofarmaco. Legandosi in modo specifico a organi o tessuti i radiofarmaci consentono di analizzarne sia la struttura sia la funzionalità. In questo modo è possibile anche risalire alla causa della patologia in modo non invasivo, indolore e sicuro, diagnosticando in modo rapido e accurato diversi tipi di patologie, da quelle che colpiscono il cuore ai tumori. Oppure, sempre come esempio, bisogna considerare l'uso delle tecnologie nucleari in agricoltura per combattere le malattie delle piante, aumentare la resa agricola, proteggere le risorse esistenti, oltre che per stabilire la tracciabilità dei prodotti per garantire la sicurezza di ciò che finisce sulle nostre tavole. Si sta sviluppando, infatti, attualmente un processo per la tracciabilità dei prodotti agricoli ed agroalimentari in base alla presenza di isotopi naturali al loro interno.

Pochi, inoltre, sono a conoscenza che le centrali nucleari producono circa un terzo dell'elettricità e un settimo di tutta l'energia consumata nell'Unione Europea. Il nucleare può essere

considerato un'alternativa low carbon rispetto agli altri combustibili fossili, sebbene considerato una "risorsa critica" negli stati europei, Italia inclusa.

L'Europa è il più grande importatore mondiale di energia. Si stima che la spesa complessiva sia di 400 miliardi di euro l'anno per l'acquisto di più della metà, il 53%, dell'energia consumata.

L'Europa dipende dal nucleare per oltre un quarto della propria energia elettrica e più della metà dell'elettricità che deriva da fonti a basso impatto ambientale proviene dalle 128 centrali atomiche installate in 14 dei 28 Stati europei.

Una nuova generazione di reattori, la quarta (GEN IV) è allo studio in tutto il mondo e si ritiene sarà pronta dopo il 2030-2040. Finalità di questi nuovi strumenti sarà il miglior rendimento degli impianti, sfruttando al massimo il combustibile fossile e riducendo il volume e il tempo di decadimento dei rifiuti radioattivi destinati al deposito finale.

La Francia, nei suoi progetti per il Recovery Fund, ha dedicato 470 milioni di euro per attività di ricerca e sviluppo nei reattori modulari di piccola taglia, gli SMR (small modular reactors) caratterizzati da alcune rivoluzionarie novità: la taglia, la modularità, flessibilità e compattezza e la sicurezza. L'Europa si muove ora tramite la Francia.

L'Italia, pioniera negli anni '60 e '70 dei primi reattori di limitata potenza e dimensione, non sarebbe una new entry del settore. Oggi l'Europa ha selezionato sei progetti strategici nei reattori nucleari del futuro. Tra questi l'italiano Alfred, reattore a piombo, studiato da Enea, Ansaldo Nucleare, Università e pmi tecnologiche, che guida il team internazionale di progetto.

Mi auguro che come italiani, e come ingegneri, possiamo essere i pionieri di una frontiera innovativa del futuro.

Ing. Carla Cappiello
Presidente

Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma



L'Editoriale

Ing. Francesco Marinuzzi Ph.D.



Il senso del nucleare e la dialettica fra fisici ed ingegneri

Il settore, dal punto di vista epistemologico ed applicativo, ha visto nel tempo una continua dialettica e sinergia fra fisici ed ingegneri e l'Italia ha storicamente rappresentato sempre una eccellenza dai tempi di Fermi fino a quelli attuali che, non a caso, vedono la fisica Fabiola Gianotti direttrice generale del CERN di Ginevra.

Ed è proprio al CERN che vengono attualmente effettuati gli esperimenti più avanzati sulla fisica delle particelle con la realizzazione di acceleratori che vedono l'impiego di centinaia di ingegneri provenienti da tutti i paesi. Alle equazioni matematiche astratte e alle congetture più audaci dei fisici si contrappongono le più sofisticate realizzazioni di sistemi, magneti e componenti progettate e realizzate dagli ingegneri per la conferma o confutazione delle suddette teorie.

Il tutto in una corsa verso gli estremi dell'infinitamente piccolo e del massimo della velocità ammissibile.

I livelli di complessità spaziale e temporale raggiunti sono ormai confrontabili con quelli dei sistemi biologici tanto che fra i due mondi si danno significative interferenze e/o interazioni.

La stessa tossicità delle radiazioni o pericolosità, infatti, è spesso identificata e determinata dal rapporto di scala e quantità spazio/tempo di interazione fra i due mondi.

Il recente danneggiamento di alcune barre di combustibile della centrale nucleare in Cina ha riproposto il dibattito del senso e valore del settore nucleare e delle sue applicazioni. Già altri incidenti quali quello di Chernobyl e più recentemente in Giappone avevano sollevato queste riflessioni considerando che oggi le problematiche di un luogo si ripercuotono velocemente e facilmente in tutto il resto del globo.

Il nucleare non è solo produzione di energia ma anche notevoli applicazioni nel mondo della medicina e della salute dove siamo già abituati ai notevoli valori aggiunti apportati dai raggi X e dalla risonanza magnetica nucleare, ed esistono anche tante altre applicazioni non così note che meritano una trattazione e divulgazione.

Questo Quaderno nasce proprio da una serie di eventi organizzati dalle commissioni del settore nucleare, che hanno come referente di area il valente collega Alberto Taglioni, sulle tante applicazioni in ambito civile del nucleare. In questo Quaderno Speciale vengono presentate le tante applicazioni e i tanti usi e modelli sostenibili delle radiazioni nucleari nei settori dell'industria, nell'aerospazio, nel sociale, nei beni culturali ed infine e soprattutto nella medicina; tutte applicazioni dove la figura dell'ingegnere svolge un ruolo primario e fondamentale di riferimento rispetto ai vari esperti di settore quali, ad esempio, i medici.

Francesco Marinuzzi, Ph.D.
Direttore Editoriale

Relazione Introduttiva

Ing. Alberto Taglioni



La Commissione Ricerca Nucleare e Reattori Innovativi, che unitamente alle Commissioni “Gestione Impianti Nucleari” e “Radioprotezione ed Emergenze” fa parte dell’Area Nucleare dell’Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma(*), ha proposto un ciclo seminariale di due webinar tecnico formativi sulle applicazioni della tecnologia nucleare non finalizzate alla produzione di energia elettrica, al fine di fornire una esauriente panoramica dei numerosi ed importanti ambiti nei quali il nucleare diffusamente opera nella nostra società, con indiscutibili benefici e ricadute.

I due seminari, svoltisi in data 30/09/2020 in diretta streaming, con interazione mediante piattaforma, hanno ottenuto un considerevole successo, considerando l’intero esaurimento dei posti disponibili, sia da parte dei Professionisti, iscritti all’Ordine, e che come tali avrebbero avuto il riconoscimento di Crediti Formativi, sia da parte di operatori ed esperti del settore.

In seguito a ciò, nel presente volume, l’Ordine degli Ingegneri ha voluto raccogliere i proceedings dei due eventi, stante l’interesse e la trasversalità degli argomenti trattati.

Le tecnologie nucleari trovano infatti applicazione in numerosi ambiti tecnico-scientifici e branche dell’ingegneria, dalla medicina alle costruzioni, dall’industria di processo ai beni culturali, dal settore aerospaziale alla ricerca di base, dalla produzione di radiofarmaci alla dissalazione dell’acqua marina, dalle misure alla strumentazione biomedica.

Esse hanno reso possibile il raggiungimento di traguardi fondamentali per la salvaguardia della salute umana e per l’innalzamento della qualità di vita e contribuito notevolmente alla crescita e allo sviluppo del progresso scientifico e tecnologico.

Nei due webinar è stata messa in luce la loro straordinaria potenzialità, e, con l’illustrazione dei relativi principi di funzionamento, è stata offerta a Ingegneri e Professionisti interessati, la possibilità di approfondire la materia ed ampliare le proprie conoscenze e competenze; ciò apporterà un contributo sempre più significativo nel campo della ricerca.

Attività che, non si esauriscono nella progettazione, realizzazione e gestione di impianti (drastica-

(*) Le tre Commissioni raccolgono colleghi che a vario titolo sono o sono stati coinvolti in attività nucleari.

mente ridotta dopo referendum e Fukushima), ma riguardano molti altri aspetti c.d. nucleari (dal decommissioning allo studio degli effetti delle radiazioni, alla ricerca innovativa) tuttora molto vivi.

Più in particolare:

- lo smantellamento degli impianti esistenti;
- trattamento e gestione dei rifiuti radioattivi da essi provenienti;
- raccolta di rifiuti nucleari di origine industriale e medica;
- il loro trasporto;
- localizzazione e realizzazione del deposito nazionale per il loro smaltimento;
- la ricerca su nuovi prototipi di Reattore;
- la fusione nucleare.

E, anche se non è prevista la costruzione di nuove centrali elettronucleari sul territorio nazionale, non si possono dimenticare tecnici e imprese che le Centrali Nucleari le costruiscono all'estero, o ne forniscono la componentistica.

Un cenno va fatto anche allo sviluppo dei progetti di dissalatori dell'acqua marina.

I compiti istituzionali delle Commissioni sono volti al sostegno dei professionisti impegnati nello specifico settore, attraverso:

- l'approfondimento di leggi e norme;
- la produzione di memorie e contributi tecnici;
- l'organizzazione di visite tecniche, seminari, convegni di aggiornamento professionale.

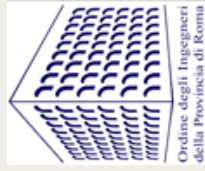
Quest'ultimo aspetto diviene ancor più importante, alla luce della necessità di accumulo di "crediti formativi" annuali.

Le commissioni si propongono inoltre di monitorare, oltre allo stato attuale delle attività:

- le possibili prospettive per il professionista,
- le criticità che possono limitarne la progettualità.

Ing. Alberto Taglioni
Referente Area Nucleare

WEBINAR



Area Nucleare
Commissione Nucleare Ricerca e Reattori Innovativi
dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
con il patrocinio di: AIFA



CONSIGLIO NAZIONALE DEGLI INGEGNERI

CICLO SEMINARIALE

Le Applicazioni della Ricerca Nucleare
in ambito civile e industriale

non finalizzate alla produzione di energia elettrica

WEBINARI

INDUSTRIA - CIVILE-TRASPORTO - SOCIALE
BENI CULTURALI - RICERCA MEDICA

Piattaforma Zoom Webinar

Mercoledì 30 settembre 2020,

dalle ore 9.00 alle ore 13.10

L'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma unitamente alla Fondazione dell'Ordine degli Ingegneri di Roma propone ai propri iscritti un seminario tecnico gratuito in webinar (diretta streaming con interazione mediante piattaforma) riservato unicamente agli iscritti all'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma in regola con le quote associative.

La partecipazione al seminario rilascia n. 4 CFP, ai fini dell'aggiornamento delle competenze professionali ex DPR 137/2012 e successivo regolamento approvato dal Ministero della Giustizia. La Frequenza è obbligatoria e i 4 CFP saranno riconosciuti unicamente con la partecipazione all'intera durata dell'evento formativo.

Per partecipare sarà sufficiente accedere alla piattaforma cliccando sul link personale di ricevuto a mezzo mail.

L'iscrizione è obbligatoria sul sito dell'Ordine alla pagina:
<https://www.ording.roma.it/formazione/index.aspx>

Prenotandosi al convegno si autorizza il trattamento dei dati personali (Nome, Cognome, Matricola, codice fiscale, e-mail), ai sensi dell'art. 13 del GDPR (Regolamento UE 2016/679), per le sole finalità connesse all'organizzazione ed erogazione dell'evento in modalità webinar.

La Commissione Ricerca e Reattori Innovativi dell'Area Nucleare dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma propone un ciclo seminariale di due webinar tecnico formativi in diretta streaming, con interazione mediante piattaforma, per gli Ingegneri, sulle attività di ricerca e sulle applicazioni della scienza e della tecnologia nucleare non finalizzate alla produzione di energia elettrica, per fornire una panoramica il più possibile completa dei numerosi ed importanti ambiti nei quali il nucleare diffusamente opera nella nostra società, con indiscutibili benefici e ricadute.

Le tecnologie nucleari applicate a numerosi settori, dalla medicina alle costruzioni, dall'industria di processo ai beni culturali, dal settore aero-spaziale alla ricerca di base, dalla produzione di radiofarmaci alla dissalazione, dalle misure alla strumentazione biomedica, hanno reso possibile il raggiungimento di traguardi fondamentali per la salvaguardia della salute umana e per l'innalzamento della qualità di vita e contributo notevole alla crescita e allo sviluppo del progresso scientifico e tecnologico.

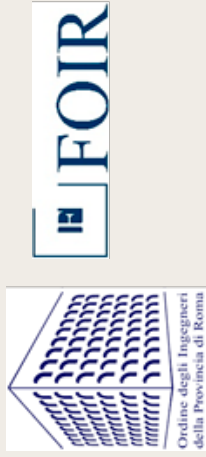
Scopo di questi webinar tecnico formativi è mettere in luce la loro straordinaria potenzialità e fornire i principi di funzionamento di tali tecnologie e della fisica nucleare alla base ed illustrare specifici casi di studio, offrendo a Ingegneri, Medici e Professionisti interessati, la possibilità di approfondire la materia ed ampliare le loro conoscenze e competenze allo scopo di apportare con il loro operato un contributo sempre più significativo nel campo della ricerca.

I due webinar si svolgeranno nella stessa giornata, uno la mattina ed uno il pomeriggio per offrire una maggiore continuità all'Evento e sarà possibile iscriversi ad entrambi o ad uno dei due. Ciascuno darà diritto a 4 crediti formativi.

Nel presente webinar del ciclo seminariale verranno trattate le applicazioni della scienza nucleare nei settori dell'industria, del trasporto, del sociale, dei beni culturali e della medicina (prima parte) e verranno esposti con esempi e casi pratici gli straordinari risultati che si ottengono con il loro utilizzo.

A conclusione delle numerose e approfondite relazioni previste nel ciclo seminariale, si terrà, al termine del secondo webinar, una tavola rotonda con Rappresentanti di Istituzioni e Associazioni, per trarre le conclusioni e discutere degli scenari futuri che attendono la scienza e la tecnologia nucleare, una risorsa imprescindibile per la società e dalle enormi potenzialità di sviluppo.

WEBINAR



Area Nucleare
Commissione Nucleare Ricerca e Reattori Innovativi
dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
con il patrocinio di: AIFA



L'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma unitamente alla Fondazione dell'Ordine degli Ingegneri di Roma propone ai propri iscritti un seminario tecnico gratuito in webinar (diretta streaming con interazione mediante piattaforma) riservato unicamente agli iscritti all'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma in regola con le quote associative.

La partecipazione al seminario rilascia n. 4 CFP, ai fini dell'aggiornamento delle competenze professionali ex DPR 13/7/2012 e successivo regolamento approvato dal Ministero della Giustizia. La Frequenza è obbligatoria e i 4 CFP saranno riconosciuti unicamente con la partecipazione all'intera durata dell'evento formativo.

Per partecipare sarà sufficiente accedere alla piattaforma cliccando sul link personale di ricevuto a mezzo mail.

L'iscrizione è obbligatoria sul sito dell'Ordine alla pagina: <https://www.ording.roma.it/formazione/index.aspx>

Prenotandosi al convegno si autorizza il trattamento dei dati personali (Nome, Cognome, Matricola, codice fiscale, e-mail), ai sensi dell'art. 13 del GDPR (Regolamento UE 2016/679), per le sole finalità connesse all'organizzazione ed erogazione dell'evento in modalità webinar.

Le Applicazioni della Ricerca Nucleare in ambito civile e industriale

non finalizzate alla produzione di energia elettrica

WEBINAR II

RICERCA MEDICA

Piattaforma Zoom Webinar

Mercoledì 30 settembre 2020,

dalle ore 14.00 alle ore 18.05

Le tecnologie nucleari applicate a numerosi settori, dalla medicina alle costruzioni, dall'industria di processo ai beni culturali, dal settore aero-spaziale alla ricerca di base, dalla produzione di radiofarmaci alla dissalazione, dalle misure alla strumentazione biomedica, hanno reso possibile il raggiungimento di traguardi fondamentali per la salvaguardia della salute umana e per l'innalzamento della qualità di vita e contribuito notevolmente alla crescita e allo sviluppo del progresso scientifico e tecnologico.

Scopo di questi webinar tecnico formativi è mettere in luce la loro straordinaria potenzialità e fornire i principi di funzionamento di tali tecnologie e della fisica nucleare alla base ed illustrare specifici casi di studio, offrendo a Ingegneri, Medici e Professionisti interessati, la possibilità di approfondire la materia ed ampliare le loro conoscenze e competenze allo scopo di apportare con il loro operato un contributo sempre più significativo nel campo della ricerca.

I due webinar si svolgeranno nella stessa giornata, uno la mattina ed uno il pomeriggio per offrire una maggiore continuità all'Evento e sarà possibile iscriversi ad entrambi o ad uno dei due. Ciascuno darà diritto a 4 crediti formativi.

In questo secondo ed ultimo webinar del ciclo seminariale, verranno trattate le applicazioni della scienza nucleare nel settore della medicina, focalizzando l'attenzione sugli importanti traguardi che la ricerca nucleare in questo ambito ha reso possibile nella diagnostica e nella cura di numerose patologie.

A conclusione delle numerose e approfondite relazioni previste nel ciclo seminariale, si terrà, al termine del presente Webinar, una tavola rotonda con Rappresentanti di Istituzioni e Associazioni, per trarre le conclusioni e discutere degli scenari futuri che attendono la scienza e la tecnologia nucleare, una risorsa imprescindibile per la società e dalle enormi potenzialità di sviluppo.



Direttore responsabile

Stefano Giovenali

Direttore editoriale

Francesco Marinuzzi

Comitato di redazione

Sezione A

Carla Cappiello

Gioacchino Giomi

Lucia Coticoni

Giuseppe Carluccio

Carlo Fascinelli

Lorenzo Quaresima

Manuel Casalboni

Filippo Cascone

Alessandro Caffarelli

Massimo Cerri

Francesco Fulvi

Tullio Russo

Sezione B

Giorgio Mancurti

Amministrazione e redazione

Piazza della Repubblica, 59 - 00185 Roma

Tel. 06 4879311 - Fax 06 487931223

Project Manager - Direttore creativo

Tiziana Primavera

Assistenza Editoriale

Chiara Notargiacomo

Flavio Cordari

Nicolò Notargiacomo

Stampa

Press Up

Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma

Piazza della Repubblica, 59 - 00185 Roma

www.ording.roma.it

segreteria@ording.roma.it

editoriale@ording.roma.it

Finito di stampare: luglio 2021

Il Quaderno IOROMA è una estensione alla rivista IOROMA

La Direzione rende noto che i contenuti, i pareri e le opinioni espresse negli articoli pubblicati rappresentano l'esclusivo pensiero degli autori, senza per questo aderire ad esse.

La Direzione declina ogni qualsiasi responsabilità derivante dalle affermazioni o dai contenuti forniti dagli autori, presenti nei suddetti articoli.



GLI EDITORIALI

Il saluto del Presidente <i>di Carla Capiello</i>	01
L'Editoriale <i>di Francesco Marinuzzi</i>	04
Relazione Introduttiva <i>di Alberto Taglioni</i>	06

CONTENUTI

Introduzione al Seminario <i>M. Sepielli, A. Di Pietro</i>	14
---	-----------

Le radiazioni nucleari <i>A. Naviglio, A. Di Pietro</i>	20
--	-----------

• INDUSTRIA

L'utilizzo delle radiazioni nucleari: tecniche nucleari di misure nelle applicazioni industriali <i>A. Di Pietro, A. Naviglio</i>	34
--	-----------

Tecniche nucleari avanzate per la sterilizzazione dei prodotti per usi civili <i>R. Di Marco, R. Remetti</i>	46
---	-----------

• CIVILE-TRASPORTO

Tecnologie nucleari innovative nelle applicazioni aerospaziali <i>A. De Blasiis, G. Cucinella</i>	74
--	-----------

• SOCIALE

La dissalazione e la climatizzazione con energia nucleare, un contributo della ricerca alla crescita nei Paesi poveri <i>M. Sepielli, A. Mathis</i>	91
--	-----------

- **BENI CULTURALI**

COBRA e ADAMO: Progetti per i beni culturali **101**
R. Fantoni

INFN-CHNet: la rete di ricerca e infrastruttura per
 la scienza e la tecnologia applicate ai beni culturali **108**
L. Giuntini, F. Taccetti

- **MEDICINA**

I reattori nucleari di ricerca: la produzione dei radioisotopi e il loro utilizzo in medicina **118**
C. Tricoli, G. Giorgiantoni

La strumentazione nucleare biomedica di nuova generazione **146**
M. Cappelli

Radiofarmaci: i fondamenti regolatori per il loro utilizzo clinico e nella ricerca in medicina **154**
R. Schiavo

Le ricerche e le tecnologie in campo medico del Polo nucleare del Cravino **162**
F. Panza

Il reattore di ricerca Triga L.E.N.A. di Pavia e le applicazioni di radiomedicina.
 La produzione di F18 da ciclotrone per la radiodiagnostica **166**
A. Salvini

Boron Neutron Capture Therapy (BNCT): un'opzione per il trattamento dei tumori diffusi **172**
S. Altieri

Attrezzature a pressione e impianti tecnologici: il caso della Risonanza Magnetica Nucleare **208**
A. Tonti, A. Ledda

Ricerca - Progetto Top-IMPLART. **216**
 La Protonterapia: radioterapia oncologica mediante protoni con sorgente impulsata
L. Picardi

Progetto di ricerca Sorgentina. L'utilizzo dei neutroni veloci generati dalla
 fusione nucleare di deuterio e trizio per la produzione di radioisotopi per radiofarmaci **224**
P. Agostini

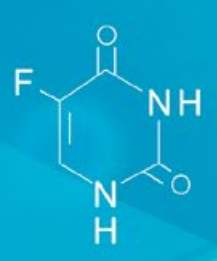
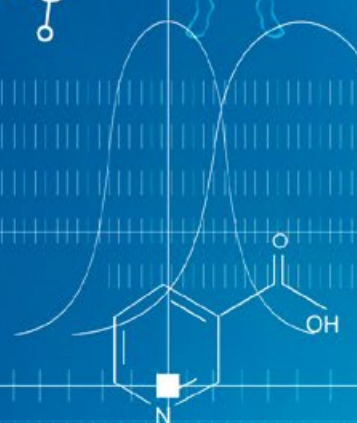
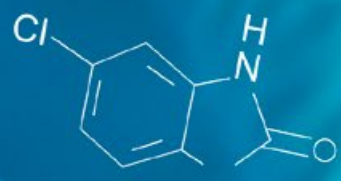
Nuova normativa e attività innovative per la gestione in sicurezza dei rifiuti radioattivi medicali **230**
G. Bava, F. Lo Giudice

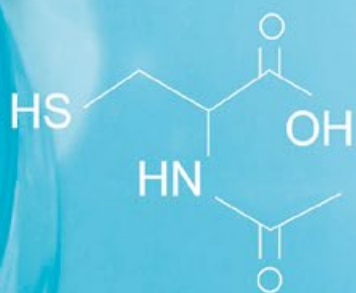
Conclusioni dalla tavola rotonda **244**
N. Cipriani

ASTRI: Associazione di Scienziati e Tecnologi per la Ricerca Italiana **250**
S. Bartalucci

L'AREA WEB DEL QUADERNO E DELLA RIVISTA **256**







INTRODUZIONE AL SEMINARIO

a cura di
Ing. Massimo Sepielli
Ing. Alessandra Di Pietro

Commissione:
Ricerca e Reattori Innovativi



Spesso in Italia, quando si parla di nucleare, si pensa subito o alla bomba atomica, o alle centrali nucleari che “scoppiano” o alle scorie radioattive che non si sa dove mettere e che nessuno vuole.

Aldilà di questa erronea impostazione di una tematica così importante a livello mondiale, e che merita un discorso a parte di verità, scienza, coscienza e conoscenza, esistono in Italia e nel mondo innumerevoli applicazioni della scienza nucleare, non strettamente legate alla produzione di energia elettrica, di cui nessuno parla e che si conoscono poco, e invece vengono giornalmente utilizzate in molti settori della vita sociale, dell'impresa, della medicina, dell'arte e cultura, e in molti altri campi, contribuendo notevolmente ad un innalzamento della qualità di vita.

Per tale ragione, come Commissione Ricerca e Reattori Innovativi dell'Area Nucleare dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma, abbiamo sentito l'esigenza e il dovere di formare ed informare su queste tematiche gli Ingegneri dell'Ordine e non solo, anche attraverso la collaborazione di Professionisti, Ricercatori e Docenti che se ne occupano quotidianamente, e che possono fornire elementi conoscitivi di queste applicazioni, utili ad integrare la preparazione degli Ingegneri e favorire la divulgazione di queste materie.

I settori che più si avvalgono delle applicazioni nucleari non legate alla produzione di energia elettrica, soprattutto attraverso l'uso delle radiazioni, naturali o indotte (alfa, beta, gamma, n, p, e, X, etc.), o anche delle proprietà nucleari della materia, sono quello in-



dustriale, per le misure, le calibrazioni e la sterilizzazione degli strumenti, etc.; quello medico, per la diagnostica precoce (RMN, MOC, Rx, TAC, traccianti, etc.), per la terapia di diverse patologie oncologiche specifiche (proton e adro-terapia) e per quelle diffuse (BNCT); quello dei beni culturali, per le analisi e la conservazione dei capolavori artistici; l'aerospazio, per i satelliti e la strumentazione di bordo per le spedizioni spaziali; quello per lo sviluppo ed il benessere sociale, con gli impianti di dissalazione e climatizzazione, soprattutto per le aree disagiate.

Il settore nucleare, inoltre, opera, nell'ambito dello smaltimento e della gestione dei rifiuti radioattivi, in tutte le attività correlate al suo utilizzo, gestendo giornalmente il ciclo di questi rifiuti, in particolare quelli medica-

li e della ricerca, attraverso il trattamento, il condizionamento e lo smaltimento in depositi autorizzati.

Questi temi sono stati trattati specificatamente nelle relazioni del ciclo di seminari tenutisi il 30 settembre 2020 in modalità webinar, e vengono ripresi e documentati negli articoli scientifici che seguono, raccolti in questa pubblicazione Quaderno 2S/2021 dell'Ordine di Roma collegato con il ciclo seminariale.

Si ringraziano ancora l'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma, tutti i Relatori e Autori, gli Ospiti della tavola rotonda, per le cui conclusioni abbiamo previsto un apposito spazio in fondo al Quaderno, gli Enti partecipanti e patrocinanti, e tutti coloro che hanno reso possibile l'organizzazione di questo Quaderno.







LE RADIAZIONI NUCLEARI

a cura di

Prof. Ing. Antonio Naviglio

Ing. Alessandra Di Pietro

Commissione:

Ricerca e Reattori Innovativi

Nelle trattazioni che seguiranno verranno presentate molteplici applicazioni dell'energia nucleare in vari settori, dall'industria, al trasporto, dal sociale ai beni culturali e alla medicina nucleare. È opportuno, dunque, per meglio comprendere le basi fenomenologiche su cui si fondano tali applicazioni, introdurre, in maniera sintetica e necessariamente semplificata, alcuni concetti propri della fisica nucleare e della scienza della radioprotezione per spiegare cosa siano la radioattività e le radiazioni nucleari, utilizzate in svariate tecniche di misura e in ambito sanitario per la diagnostica e la cura di patologie importanti.

La radioattività (o decadimento radioattivo) è un insieme di processi fisico-nucleari attraverso cui, in un dato tempo (definito "tempo di decadimento"), il nucleo atomico instabile (o radioattivo) di un isotopo di un elemento chimico (radionuclide) decade, emettendo una certa energia (radiazioni ionizzanti) e trasformandosi, in linea con i principi di conservazione della massa-energia e della quantità di moto, in un isotopo avente un nucleo di energia inferiore.

Il processo di decadimento radioattivo degli isotopi instabili continua producendo prodotti di decadimento radioattivi, fino al raggiungimento di una condizione di stabilità energetica in corrispondenza della quale i nuclei sono stabili. Sebbene





il tempo necessario affinché questa stabilità sia raggiunta possa variare dai pochi secondi ai milioni di anni, la certezza che ciò prima o poi accada è una verità scientifica.

La radioattività può essere naturale (quando i nuclei atomici instabili di un isotopo radioattivo sono presenti come conseguenza della radioattività della crosta terrestre, ovvero è dovuta a radiazioni provenienti dallo spazio (raggi cosmici)), o artificiale, quando gli isotopi che la generano sono prodotti direttamente o indirettamente (come conseguenza di decadimento di altri isotopi generati) da reazioni nucleari dovute ad interventi dell'uomo. Un esempio tipico di radioattività naturale è quello dovuto alla emissione di radiazioni da parte del radon, un gas nobile che si forma per decadimento alfa (vedi oltre) del radio, generato a sua volta dal decadimento alfa dell'uranio. Ogni essere vivente o oggetto inanimato è soggetto a radiazioni che provengono dall'esterno, ma anche a radiazioni

che provengono da radionuclidi presenti al proprio interno.

Le radiazioni ionizzanti emesse durante il decadimento radioattivo hanno una energia sufficiente per ionizzare gli atomi e/o le molecole della materia che attraversano, ossia per strappare elettroni dall'orbita esterna ad atomi (o molecole) e possono essere classificate in radiazioni corpuscolari (radiazioni alfa α , beta β (per semplicità espositiva, assimilati, in questa sede, ad elettroni), protoni, neutroni, etc.), che si muovono a velocità elevate, inferiori comunque a quelle della luce, ed in radiazioni elettromagnetiche (fotoni, raggi γ ed X), che si muovono, sempre per semplicità ed in prima approssimazione, alla velocità della luce.

L'energia necessaria per "strappare" un elettrone da un atomo viene definita energia di ionizzazione. Dal fenomeno della interazione fra una radiazione ionizzante ed un atomo che porti allo "strappamento" di un elettrone, si produce una coppia di ioni.

Figura 1

Radiazioni direttamente ionizzanti e radiazioni indirettamente ionizzanti

Una radiazione si definisce **direttamente ionizzante** quando la ionizzazione della materia avviene **per via diretta**.

Appartengono a questa categorie le particelle elettricamente cariche:

- **Elettroni**
- **Particelle beta**
- **Particelle alfa**
- etc.



Particelle dotate di massa e di carica elettrica

Una radiazione si definisce **indirettamente ionizzante** quando la ionizzazione della materia avviene **per via indiretta**.

Appartengono a questa categorie le particelle prive di carica:

- **Fotoni**
(raggi X e raggi gamma)



Particelle senza massa e carica elettrica

- **Neutroni**
- etc.



Particelle dotate di massa e non di carica elettrica

L'energia è una caratteristica molto importante di una determinata radiazione e si misura, nel Sistema Internazionale, in joule; più diffusamente, nell'ambito della fisica delle radiazioni, l'unità di misura utilizzata è l'elettronvolt (eV) (1 eV corrisponde a circa $1,6 \cdot 10^{-19}$ J). Un elettronvolt è l'energia che una carica elementare (di un elettrone o di un protone) acquista quando accelera sotto l'effetto di una differenza di potenziale di 1 volt.

I processi di ionizzazione necessitano di energie di soglia di alcuni eV.

Le radiazioni elettromagnetiche in grado di produrre ionizzazione sono i raggi ultravioletti con elevata energia, i raggi X e i raggi gamma. L'atomo, la più piccola parte di un elemento (chimico), di cui mantiene le caratteristiche chimiche e fisiche, quando le forze che agiscono all'interno del suo nucleo non sono bilanciate, è instabile e quindi soggetto a trasformazioni all'interno del suo stesso nucleo; esso rappresenta la principale sorgente di radiazioni sia elettromagnetiche che corpuscolari.

Nelle seguenti figure 4 e 5 rappresentanti la

Struttura dell'atomo

L'atomo è formato da un **nucleo**, dove si concentra la quasi totalità della massa-energia atomica, costituito da **protoni carichi positivamente** e da **neutroni che non hanno carica**.

Attorno al nucleo ruotano, su determinate orbite (orbitali energetici), ognuna con il suo livello di energia, gli **elettroni, carichi negativamente** e che per numero bilanciano quello dei protoni in condizioni di neutralità. In questa configurazione un atomo risulta essere elettricamente neutro.

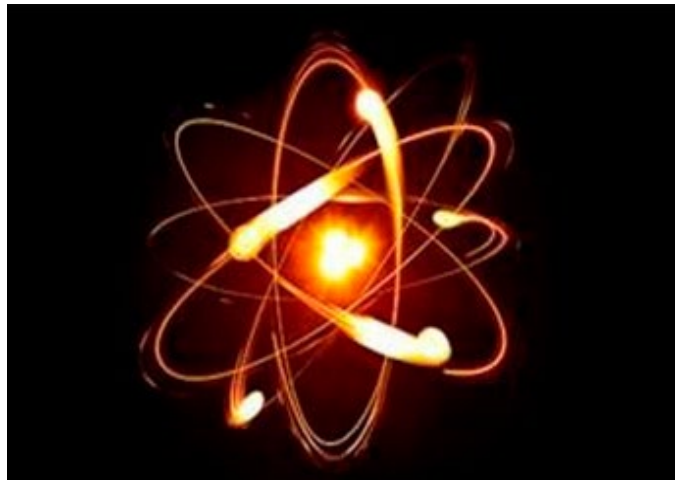


Figura 2

Gli atomi di uno stesso elemento possono avere un diverso numero di neutroni, dando origine a diversi **ISOTOPI** dello stesso elemento. **Se l'isotopo è radioattivo (non è stabile), si parla di radioisotopo o anche di radionuclide.**

Figura 3



Un isotopo con simbolo X è rappresentato da AXZ, dove **Z (numero atomico)** indica il numero dei **protoni** o degli **elettroni**, **A (numero di massa)** indica il **numero totale di particelle** presenti nel nucleo e **N = A-Z** indica il numero di **neutroni**.

Carta dei Nuclidi

I-127: ISOTOPO STABILE DELLO IODIO



Fonte IAEA - <https://nds.iaea.org/reinsd/vcharhtml/ChartHTML.html>

Figura 4 - Iodo-127:
isotopo stabile dello Iodio

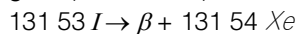
I-131: ISOTOPO INSTABILE DELLO IODIO



Fonte IAEA - <https://nds.iaea.org/reinsd/vcharhtml/ChartHTML.html>

Figura 5 - Iodio-131:
esempio di isotopo instabile dello Iodio

tavola dei nuclidi (che identifica tutti i possibili isotopi) è possibile, giusto per effettuare un esempio, osservare il comportamento di due isotopi dello Iodio, particolarmente importanti nell'ambito delle applicazioni delle radiazioni: lo Iodio 127 (Fig. 4), che è energeticamente stabile e lo Iodio 131 (Fig.5), che invece è energeticamente instabile e, per questo, è soggetto a modificarsi ("decade" emettendo sia radiazioni beta che radiazioni gamma diventando, al termine del decadimento (il tempo di dimezzamento (v. oltre) è di circa 8,02 giorni), Xenon 131)



Dall'analisi dei radioisotopi esistenti, alcuni presenti anche in natura, la maggior parte ottenuti come risultato di apposite reazioni indotte dall'uomo, si vede come gli isotopi i cui nuclei sono energeticamente instabili siano la stragrande maggioranza.

Il ritorno ad una stabilità, a cui tutti gli isotopi instabili tendono, come sopra indicato, avviene con emissione di radiazione corpuscolare (alfa o beta), spesso accompagnata da radiazione elettromagnetica (raggi gamma).

La legge che regola l'andamento temporale della radioattività (ovvero esprime il decadimento radioattivo di uno specifico isotopo) è una legge esponenziale, come sotto riporta-

to: N rappresenta il numero (o la densità) di isotopi presenti ad un certo istante, N_0 il numero degli isotopi nell'istante considerato come iniziale, λ la costante di decadimento caratteristica della modalità di decadimento dell'isotopo considerato (legata al suo tempo di dimezzamento), t l'istante temporale preso in esame ed e è il numero di Eulero (base della funzione esponenziale):

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

Ciascuna radiazione è caratterizzata da un preciso valore del tempo di dimezzamento, corrispondente al tempo necessario affinché il numero di nuclei radioattivi si dimezzi.

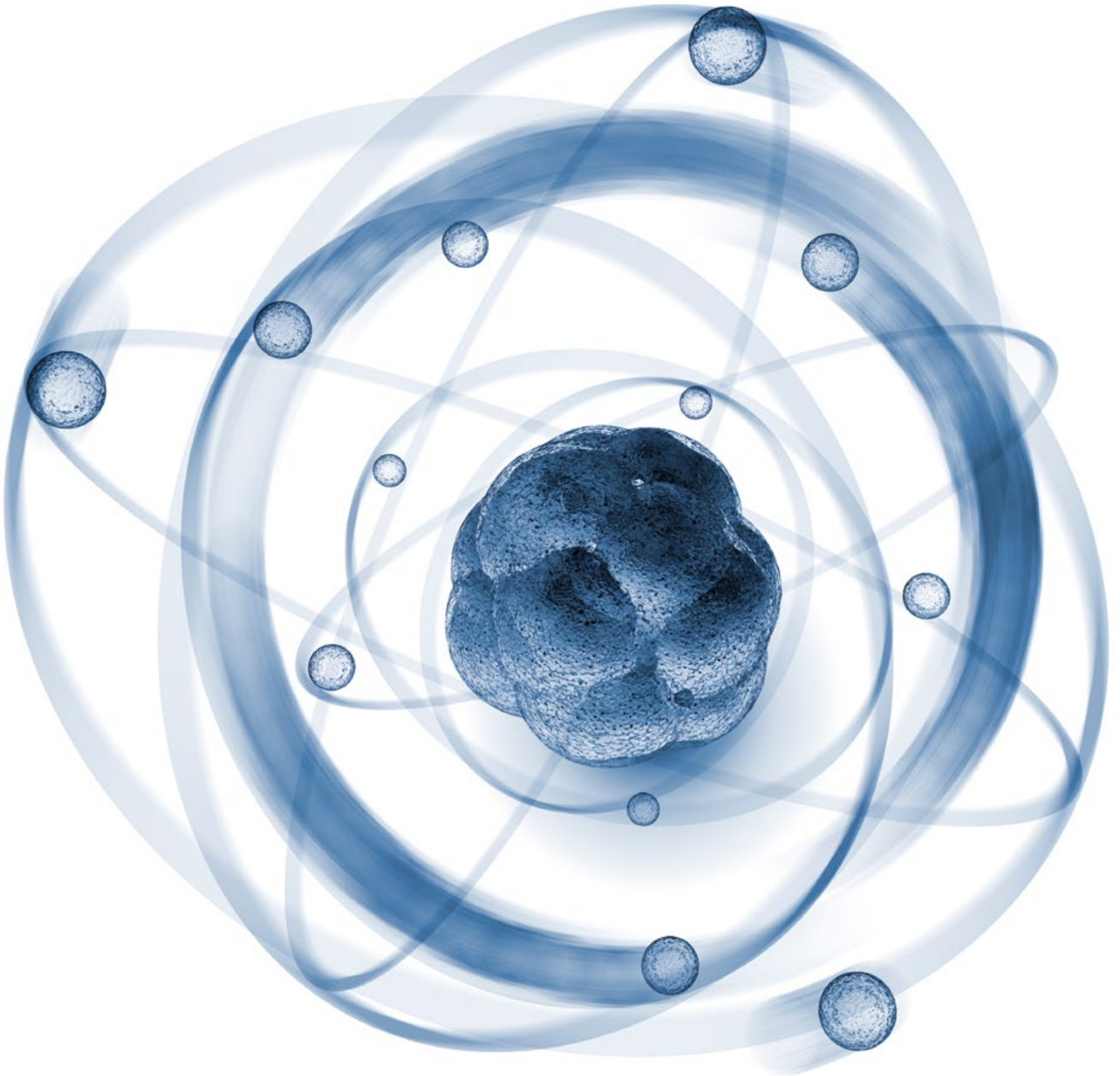
Le radiazioni ionizzanti, propagandosi nello spazio, possono incontrare materia vivente e non, ed interagire con essa. I meccanismi di interazione sono diversi a seconda della tipologia di radiazione, della sua energia e delle caratteristiche della materia con cui essa interagisce.

Da tali parametri scaturisce una diversa capacità di penetrazione dei vari tipi di radiazioni nei vari materiali. Nelle figure 7-8-9 vengono sommariamente rappresentati i tipici meccanismi di interazione delle radiazioni ionizzanti con la materia.

ATTIVITA'
 Numero di trasformazioni nucleari spontanee di un radionuclide che si producono nell'unità di tempo.
 Si esprime in Becquerel.

1 Bq = 1 disintegrazione al secondo
 1 Ci = 37GBq - unità di misura usata in passato

Figura 6



La penetrazione delle radiazioni nella materia

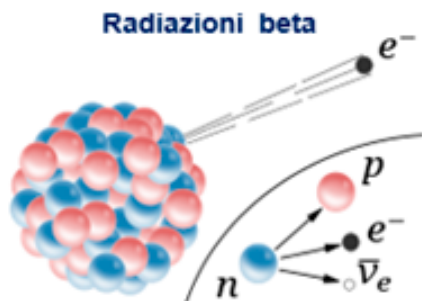
INTERAZIONE DELLE RADIAZIONI DIRETTAMENTE IONIZZANTI



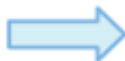
Radiazioni alfa



Vengono emesse nei decadimenti radioattivi e si compongono di **due neutroni e due protoni**; atomi di elio doppiamente ionizzati. Producono **elevata densità di ionizzazione** lungo il loro cammino che pertanto è assai modesto. **Possono essere arrestate in meno di 10 cm di aria o da un semplice foglio di carta.**



Radiazioni beta

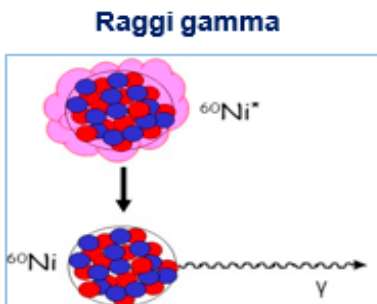


Vengono emesse nei decadimenti radioattivi e sono o **elettroni** (decadimenti β^-) o **positroni** (decadimenti β^+), quest'ultimi, elettroni con carica positiva. Nel processo di annichilazione del decadimento β^+ si producono anche raggi gamma da 0,5MeV. Possiedono una modesta capacità di penetrazione nella materia, ma **compiono percorsi maggiori di quelli delle particelle cariche pesanti (alfa).** **Elettroni da 1MeV sono arrestiti in 4 metri di aria o in 4 mm di acqua.**

Figura 7

La penetrazione delle radiazioni nella materia

INTERAZIONE DELLE RADIAZIONI INDIRETTAMENTE IONIZZANTI



Raggi gamma



I raggi gamma (fotoni) sono prodotti dal **decadimento radioattivo del nucleo**. I gamma sono più penetranti delle radiazioni prodotte dalle altre forme di decadimento radioattivo, poiché hanno una minore tendenza ad interagire con la materia. La radiazione gamma interagisce con la materia con tre fenomenologie principali: **l'effetto fotoelettrico**, **l'effetto Compton** e la **produzione di coppie elettrone-positrone**.

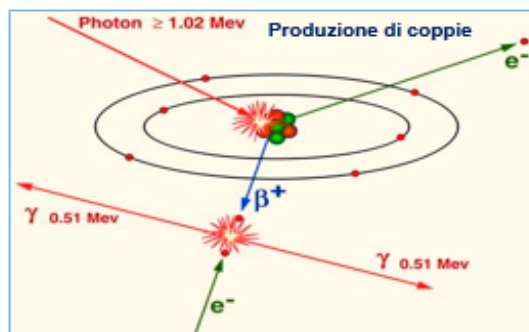
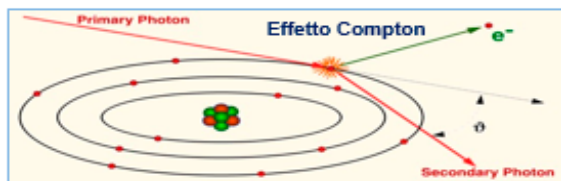
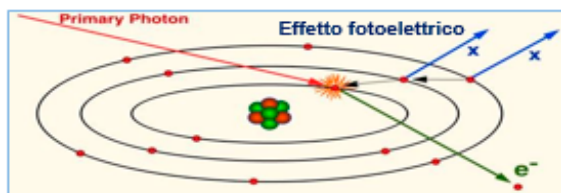


Figura 8

La penetrazione delle radiazioni nella materia

INTERAZIONE DELLE RADIAZIONI INDIRETTAMENTE IONIZZANTI

Raggi X

I raggi X sono radiazioni elettromagnetiche che si producono quando atomi pesanti vengono investiti da fasci di elettroni di elevata energia. Sono radiazioni molto penetranti che attraversano con piccola attenuazione i tessuti.

Neutroni

I neutroni sono emessi nella disintegrazione spontanea di elementi pesanti prodotti artificialmente (oltre che in reazioni nucleari qui non di interesse).

Nel caso delle principali radiazioni indirettamente ionizzanti, i **raggi X e gamma** e i **neutroni**, la cui penetrazione nella materia è maggiore delle particelle cariche, non si può parlare di percorso nella materia. Con i raggi X e gamma si fa riferimento agli spessori emivalenti (SEV), attraversando i quali il loro numero (intensità della radiazione) viene ridotto alla metà.

Per attenuare con efficacia le radiazioni X e gamma si devono usare materiali pesanti con elevato numero atomico Z, cioè ad alta densità elettronica: piombo, tungsteno, etc.

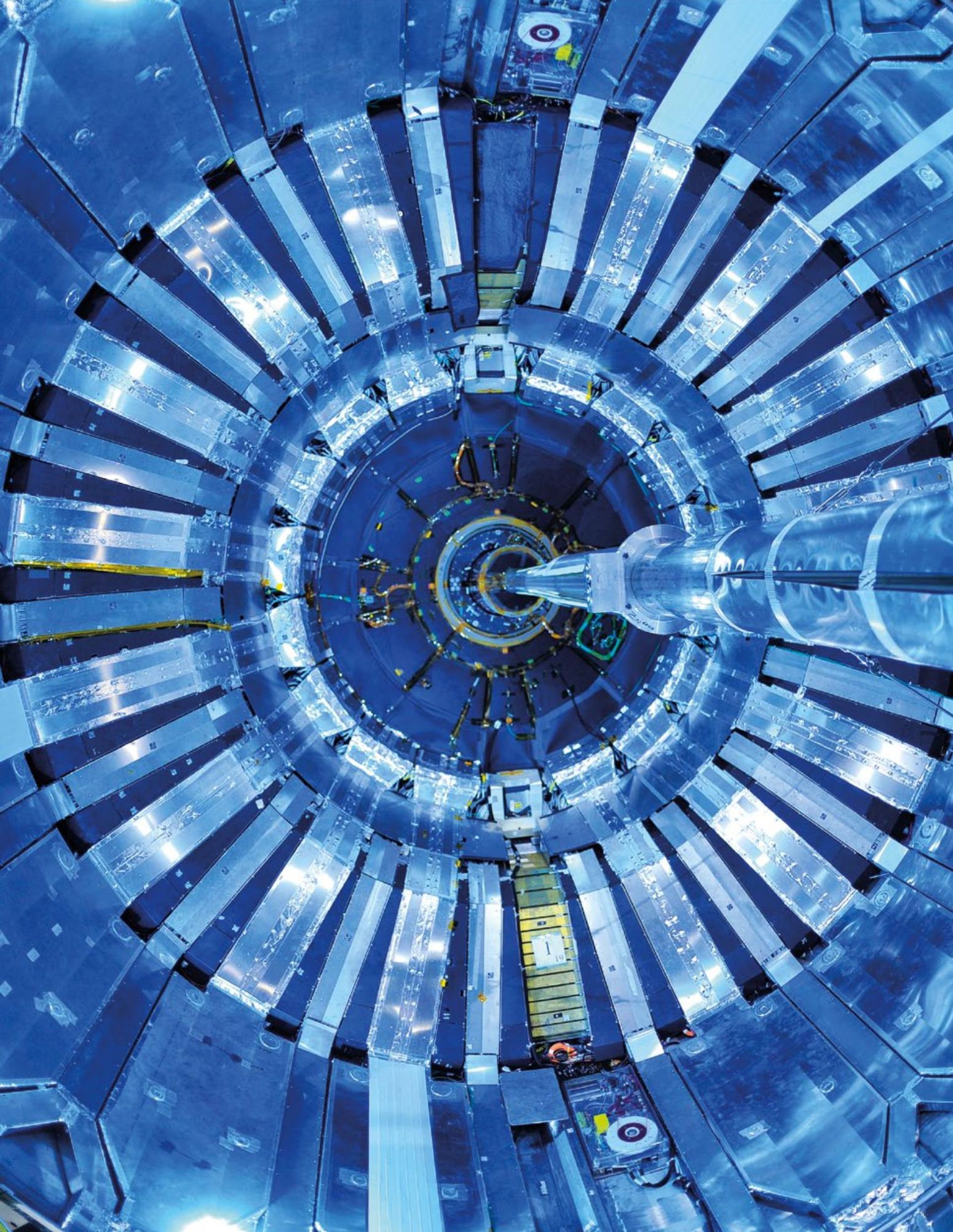
I neutroni perdono energia attraverso le interazioni con i nuclei degli atomi dei materiali che attraversano.

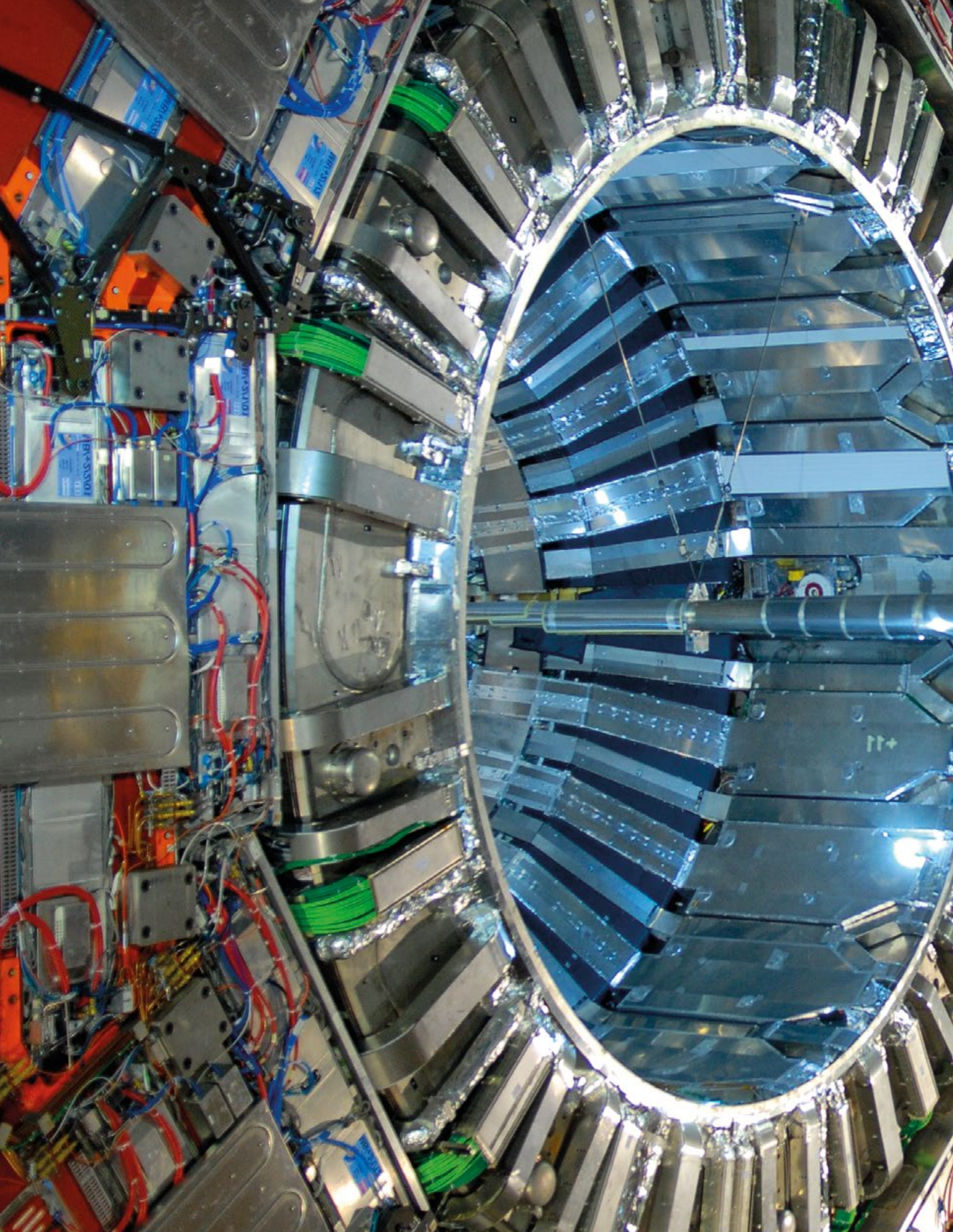
Per attenuare i fasci di neutroni i migliori materiali sono quelli con elevato contenuto di protoni e nuclei leggeri: acqua, paraffina, calcestruzzo, etc.

Figura 9

L'utilizzo delle radiazioni nucleari riguarda numerose applicazioni tecnologiche e scientifiche, quindi svariati settori, ed è strettamente correlato allo studio della loro interazione con la materia. Un aspetto di fondamentale importanza che fa parte del suddetto studio è relativo agli effetti di breve e lungo periodo che detta interazione comporta e che è oggetto della scienza della radioprotezione. Tale scienza ha l'obiettivo, come emerge dalla stessa definizione, di enucleare, dallo studio della interazione tra una determinata tipologia di radiazione ed una determinata matrice di materia, criteri che consentano di "proteggere" detta materia dalle radiazioni. Una conse-

guenza diretta è la definizione di regole e di norme, che sono tipicamente recepite a livello nazionale e internazionale, per regolamentare l'impiego della radioattività in sicurezza, a tutela della salute umana e dell'ambiente. Dalla interazione controllata e dosata delle radiazioni ionizzanti, dallo studio della loro attenuazione e dalle modalità ed entità del "rilascio" della loro energia è possibile, in ambiti industriali e civili, effettuare in sicurezza controlli, misure, sterilizzare con tecniche innovative, rapide e non intrusive e, in ambito medico, diagnosticare patologie e curare, con dedicati protocolli medici, specifiche patologie, in particolare nel settore oncologico.







HE+ BBX 02

WE+11104

HE+ BBX 05

WE+11105

HE+ BBX 01

WE+11138

HE+ BBX 18

WE+11134

HE+ BBX 11

WE+11133

INDUSTRIA





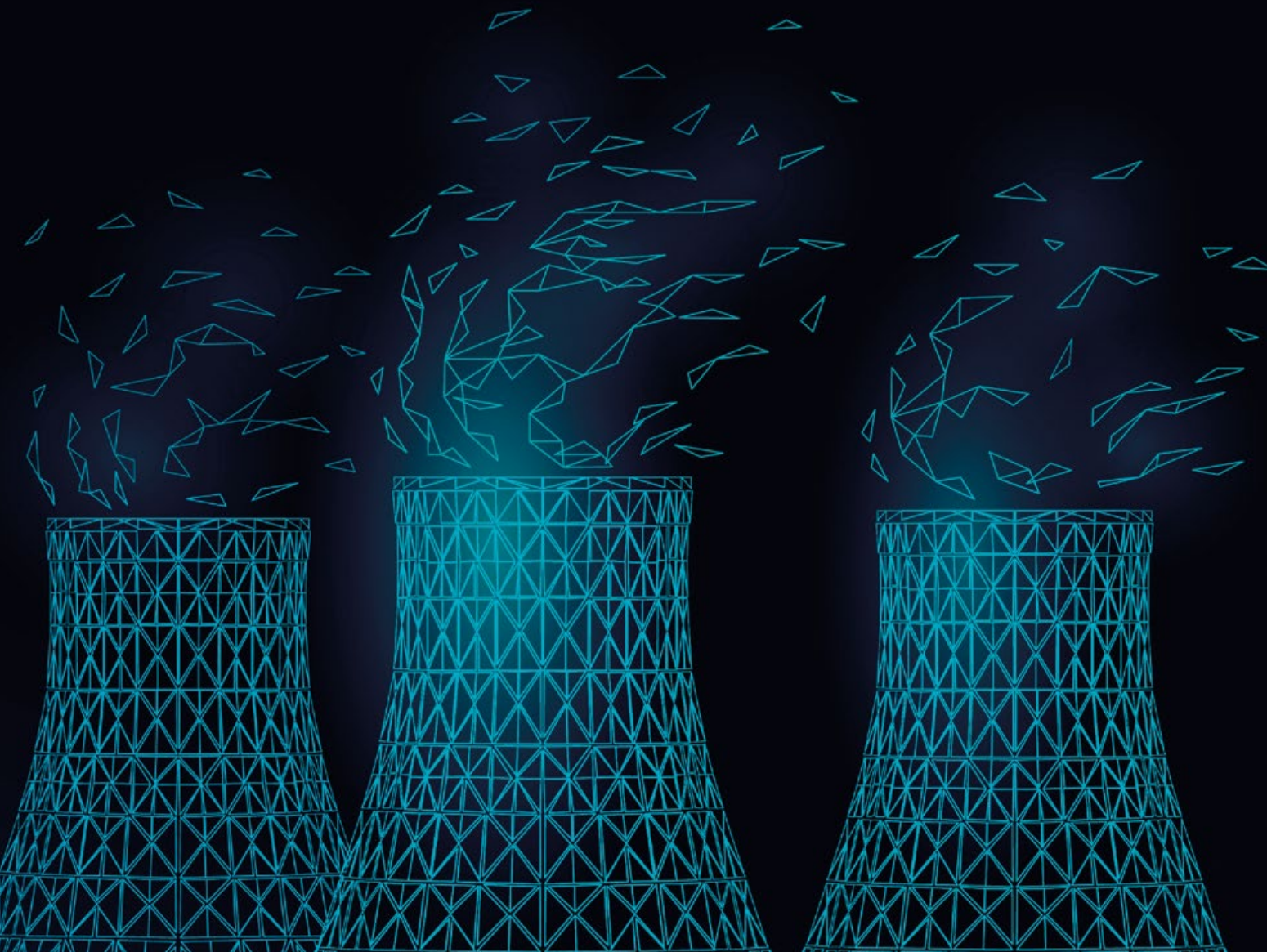


a cura di
Ing. Alessandra
Di Pietro
Prof. Ing. Antonio
Naviglio

*Con la
collaborazione di:*
Prof. Ing. Romolo
Remetti

L'utilizzo delle radiazioni nucleari:

TECNICHE NUCLEARI DI MISURE NELLE APPLICAZIONI INDUSTRIALI



Introduzione

Il concetto di misura è da sempre connesso con il vivere, ne è una prerogativa inalienabile e nulla può essere concepito senza che questo venga applicato ad ogni nostra azione e alla realizzazione di ogni impresa. Riuscire a misurare con precisione diventa, dunque, un modo per costruire, per progredire in ogni settore del vivere.

L'utilizzo delle radiazioni ionizzanti per effettuare misure selettive in molteplici ambiti risale già agli inizi del secolo scorso e negli ultimi decenni ha assunto un ruolo strategico e prestazionale nell'industria metallurgica, manifatturiera, chimica, mineraria, alimentare e farmaceutica, sia nel campo specifico dei sistemi di misura sia nelle applicazioni di controllo di processo, consentendo, oltre ad una rapidità di risposta, una riduzione dell'impiego di materie prime, un conseguente risparmio delle stesse e un abbattimento degli scarti delle

lavorazioni, massima affidabilità ed elevata produttività.

Da sempre conviviamo con la radioattività. Radiazioni ionizzanti sono dovunque e quindi, come visto, rappresentano un normale componente dell'ambiente. In qualche modo, la radioattività naturale può essere interpretata come una eredità della genesi dell'Universo.

La possibilità di gestire in sicurezza le potenzialità delle radiazioni ionizzanti, sia naturali che artificiali, anche generate da radioisotopi selezionati perché particolarmente idonei per la specifica applicazione, si fonda sulla possibilità di eseguire appropriate misure di radioprotezione, stabilite soprattutto dall'International Commission on Radiological Protection (ICRP) e basate sui principi di giustificazione della pratica, ottimizzazione della protezione e limitazione delle dosi individuali (Fig. 1).

I criteri di misura ed i limiti massimi ammissibili per le dosi associabili alla esposizione a radiazioni ionizzanti sono regolati dal recente D.Lgs. 101 del 31 luglio 2020 che recepisce la direttiva 2013/59/Euratom:

grazie ai continui progressi in questo settore è stato possibile lo studio e lo sviluppo di tecniche estremamente sofisticate, che hanno notevolmente inciso sulla qualità della nostra vita.

I requisiti di radioprotezione nelle misure industriali devono essere sempre soddisfatti; in genere, si ricorre all'impiego di sorgenti radioisotopiche estranee al corpo su cui è prevista l'indagine (sigillate), studiate in modo da permettere la schermatura della radiazione all'interno della strumentazione stessa, senza che vi sia rischio di contaminazione nell'ambiente. La radiazione emessa dalla sorgente sigillata, è, infatti, dosata per la sola misura da effettuare.

Le tecniche nucleari di misura

Le radiazioni ionizzanti in campo industriale (settore metallurgico, manifatturiero, chimico, minerario, alimentare e farmaceutico, etc.) possono essere utilizzate, fermi i principi della scienza della radioprotezione e della specifica normativa in materia, sfruttando le diverse caratteristiche che esse presentano nella interazione con la materia.

Figura 1

Principi di radioprotezione

Il sistema di protezione dalle radiazioni ionizzanti proposto dalla **International Commission on Radiological Protection (ICRP)** e accolto dalla maggior parte delle normative nazionali ed internazionali, si basa su **3 principi**:



In particolare, è possibile:

- Utilizzare l'attenuazione delle suddette radiazioni; è il caso in cui la particella rilevata ha le stesse caratteristiche di quella incidente, ovvero quando si verifica una sua semplice deviazione.
- Utilizzare la rilevazione di ulteriori radiazioni, generate nella interazione fra la radiazione incidente ed il materiale stesso di cui è costituito l'oggetto sottoposto ad analisi; in questo caso, si ha una interazione fra i nuclei «bersaglio» e le radiazioni incidenti, con generazione di ulteriori radiazioni, che saranno, poi, quelle rilevate.

Le tecniche nucleari di più largo impiego per le misure negli impianti industriali si basano su studi ben collaudati condotti dalla ingegneria e dalla fisica atomica e nucleare sulla penetrazione delle radiazioni nella materia e si dividono sostanzialmente in due categorie:

1. Tecniche che si basano sulla rivelazione della attenuazione di una radiazione emessa da una sorgente esterna, ovvero su radiazioni emesse dal materia-

le «colpito», senza che questo venga modificato.

2. Tecniche che si basano sull'eccitazione del materiale e sulla rivelazione della radiazione caratteristica emessa.

1) Tecniche che si basano sulla rivelazione della radiazione emessa da una sorgente esterna

Queste tecniche (Fig. 2) si basano su strumenti che utilizzano in prevalenza sorgenti radioisotopiche sigillate, un rivelatore, un'unità di controllo e registrazione dati e basano il loro funzionamento sulle seguenti applicazioni delle radiazioni: trasmissione di radiazione beta e gamma, retrodiffusione beta e gamma, diffusione gamma e diffusione neutronica.

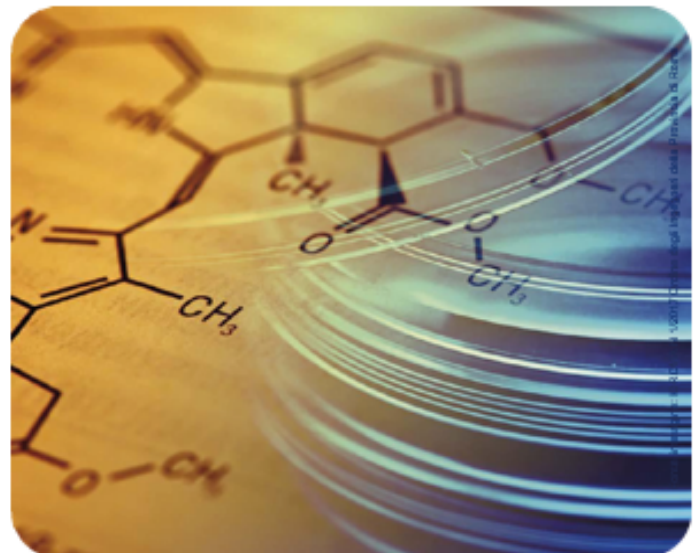
Rientrano in questa categoria anche l'utilizzo di traccianti radioattivi e le tecniche di trasmissione differenziale X, utilizzate per misurare la portata, la densità dei fluidi, la velocità di scorrimento delle fasi, i tempi di residenza e di mescolamento, nonché per misure qualitative e quantitative degli elementi.

Le tecniche di trasmissione beta e gamma (Fig. 2) si utilizzano per misurare spessori o

Figura 2

1.1 - Le radiazioni beta, gamma e i neutroni vengono utilizzate per misurare **spessori, spessori di rivestimento (carta, laminati, film plastici, impiallacciatore etc.)**, per determinare la **densità dei solidi, dei liquidi e delle miscele bifase**, per misurare, **alle alte temperature, il livello dei fluidi (ad es. corrosivi) e per controllare il livello di riempimento dei contenitori.**

1.2 - La trasmissione di radiazione X comprendente **diversi livelli di energia**, viene utilizzata per **misure qualitative e quantitative degli elementi presenti all'interno di un materiale da analizzare.** Dall'analisi dello spettro emesso dal campione è possibile individuare gli elementi in esso presenti.



1.3 - I traccianti radioattivi vengono usati per misure di **portata, densità media, tempi di residenza e mescolamento e velocità di scorrimento di singole fasi.**



La scelta del tipo e dell'energia della radiazione dipende dallo spessore da misurare e dalla densità del materiale.

- Per spessori da 10-500 mg/cm² vengono generalmente impiegate sorgenti beta.
- Per spessori >100 mg/cm² vengono generalmente impiegate sorgenti gamma.

Le sorgenti beta più usate sono: 85Kr (T_{1/2}=10.73 y, E_{max}=672 keV), 147Pm (T_{1/2}=2.62 y, E_{max}=225 keV), 14C (T_{1/2}= 5700 y, E_{max}= 156 keV)

Le sorgenti gamma più usate sono, 60Co, 137Cs, 241Am. Il range energetico usato è molto ampio e varia, a titolo esemplificativo, dai 59 keV dello 241Am ai 1330 keV del 60Co, passando per i 662 keV del 137Cs. Il tempo di dimezzamento varia dai circa 5 anni del 60Co ai 457 anni di 241Am, mentre per il 137Cs è di circa 30 anni.

Figura 3

masse specifiche, ovvero spessori di rivestimento (carta, laminati, film plastici), per determinare la densità dei solidi, dei liquidi e delle miscele bifase e per misurare, alle alte temperature, il livello di fluidi generalmente corrosivi o per controllare il livello di riempimento dei contenitori.

La tecnica di retrodiffusione beta e gamma viene, invece, utilizzata per misurare gli spessori di rivestimenti (impiallaccature, film plastici etc.) in corpi accessibili solo da un lato. La diffusione gamma e quella neutronica vengono, invece, utilizzate generalmente rispettivamente per misurare la densità del suolo nell'ambito di prospezioni geologiche, ovvero in edilizia per la verifica della stabilità delle fondazioni e per la misura dell'umidità del terreno.

Gli strumenti nucleari di misura per trasmissione, retrodiffusione beta e gamma, diffusione gamma e neutronica

Gli strumenti operativi che misurano radiazioni beta, gamma, neutroniche generate da sorgenti esterne sono i cosiddetti calibri di misura nucleari.

Questi strumenti utilizzano sorgenti primarie sigillate contenenti almeno un radioiso-

topo e comprendono un sistema di acquisizione del segnale rivelato composto, oltre alla sorgente, dalla seguente componentistica: un rivelatore, un amplificatore, un discriminatore integrale o monocanale, un timer, un rateometro, e un'unità di controllo per elaborare e registrare i dati.

La radiazione emessa dalla sorgente sigillata è dosata per la sola misura da effettuare e, ovviamente, l'apparato è concepito per non determinare rischi di contaminazione. Il principio che in generale è alla base del funzionamento di questi strumenti di misura è quello dell'attenuazione della radiazione emessa nell'attraversamento del materiale da analizzare. La misura, infatti, si ricava proprio misurando l'attenuazione della radiazione incidente.

In un calibro di misura nucleare ci possono essere anche più sorgenti di radiazioni, neutre o cariche, collocate spazialmente in modo da ottimizzare la risposta di uno o più rivelatori di radiazione. L'output è in tempo reale. Tali strumenti, negli impianti industriali, permettono il controllo in/on line e consentono misure molto precise e controlli rapidi non invasivi e non distruttivi.

Per misure di densità, è necessario che l'e-

nergia e l'intensità delle radiazioni (in generale, raggi gamma) siano ben calibrate e il fascio sia ben collimato.

Per misure di livello, le radiazioni (in generale, raggi gamma) devono poter avere una energia sufficiente per poter penetrare nelle pareti del contenitore e, al contempo, sufficientemente bassa, da aversi una attenuazione significativa del fascio.

Sistema di misura nucleare basato su trasmissione diretta beta e gamma

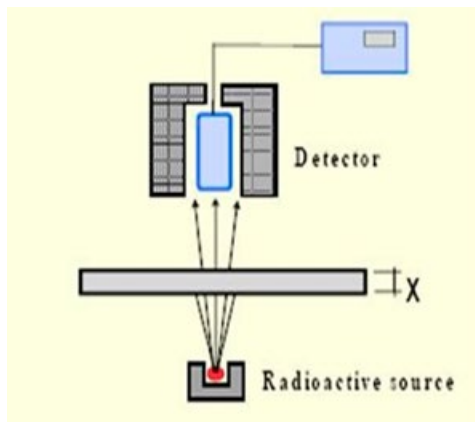
Il materiale, di cui si vuole misurare lo spessore, viene inserito tra la sorgente ed il rivelatore, che devono essere collimati (Fig. 4). Il fascio di radiazione (gamma o beta) viene trasmesso attraverso il mezzo e attenuato prima di raggiungere la parte sensibile del rivelatore. L'intensità misurata (la cui analisi fornirà la misura) sarà funzione dei parametri caratteristici del materiale.

Sistema di misura nucleare basato su retrodiffusione beta e gamma

Questa tecnica di misura viene utilizzata quando l'oggetto da analizzare è accessibile solo da un lato e trova un largo impiego per misurare spessori di materiali di rivestimento (impiallaccature, film plastici, etc.).

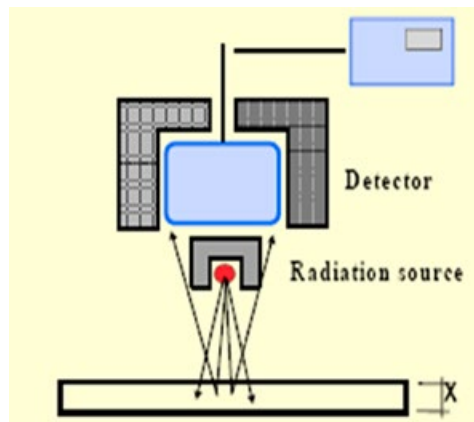
Il materiale da misurare viene colpito dalla radiazione e la sua attenuazione ci fornisce la misura attesa. L'attenuazione misurata è quella della radiazione retrodiffusa quando l'angolo di scattering è maggiore di 90° (Fig. 5). L'energia della radiazione retrodiffusa (effetto Compton) dipende quindi dall'angolo di scattering e dallo spessore del materiale e i dati registrati dal rivelatore cambiano con lo spessore.

Quando il materiale di rivestimento è collocato su un supporto, la risposta della misura è tanto più sensibile quanto più i numeri atomici del materiale del supporto sono diversi.



PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO:
TRASMISSIONE DIRETTA (SORGENTI BETA E GAMMA)
 MISURE: **SPessori, DENSITA' (SOLIDI-LIQUIDI), MISCELE BIFASE, MISURE DI LIVELLO (SOLIDI-LIQUIDI)**

Figura 4 - Schema di misura per trasmissione beta e gamma



PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO:
RETRODIFFUSIONE BETA E GAMMA
 MISURE: **SPessori IN COMPONENTI SPECIFICI**

Figura 5 - Schema di misura per retrodiffusione beta e gamma

Sistema di misura nucleare per materiali dispersi basato su trasmissione diretta gamma

Questa tecnica di misura, definita trasmissione di raggi gamma a doppia energia, viene usata per misurare il quantitativo di materiale disperso in ambito industriale; un'applicazione tipica riguarda la misura del quantitativo di cenere presente nel carbone su un nastro trasportatore.

Uno stretto fascio di raggi gamma ad alta e bassa energia colpisce il carbone. L'assorbimento dei gamma di bassa energia dipende dal contenuto di cenere, che presenta un numero atomico maggiore di quello del carbone e dalla massa per unità di area del carbone. L'assorbimento dei gamma di alta energia dipende, invece, dalla massa per unità di area del carbone. Il contenuto della cenere è determinato dalla combinazione delle misure della intensità attenuata dei due fasci di radiazione gamma.

zato per la misura di prospezioni geologiche o per la verifica di fondazioni, permettendo un'analisi strutturale non invasiva. Quando la densità del suolo aumenta, prevale l'effetto Compton e cresce la diffusione gamma misurata dal rivelatore. Per piccoli aumenti della densità la risposta è lineare. Al crescere della densità, per l'effetto fotoelettrico, aumenta l'assorbimento della radiazione.

La risposta al rivelatore tende asintoticamente a zero per forti aumenti della densità.

Sistema di misura nucleare basato su diffusione neutronica

Questo sistema di misura è costituito schematicamente da una sonda contenente una sorgente neutronica di neutroni veloci e da un rivelatore di neutroni termici (Fig. 7); viene impiegato nelle prospezioni geologiche per misurare l'umidità del terreno.

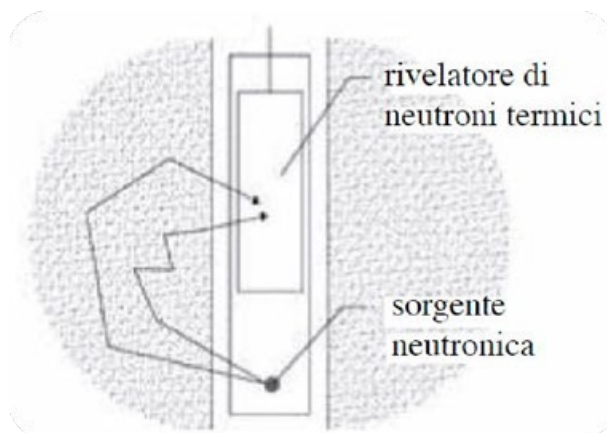
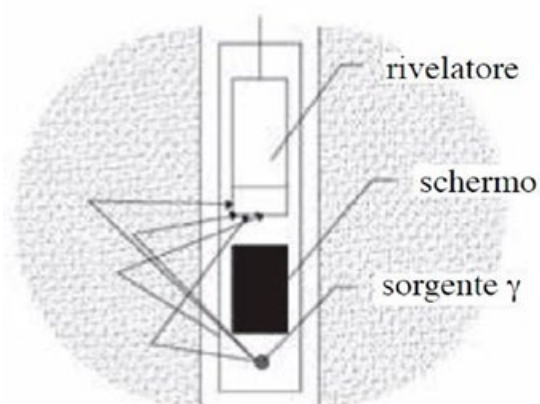
I neutroni vengono rallentati nel mezzo prevalentemente in funzione del quantitativo di idrogeno presente nel terreno, quindi se nel terreno non vi sono elementi con elevata sezione d'urto di assorbimento dei neutroni termici, la risposta al rivelatore è proporzionale alla quantità di acqua presente.

Figura 6
Schema di misura per diffusione gamma

Sistema di misura nucleare basato su diffusione gamma

Questo sistema di misura è costituito schematicamente da una sorgente gamma, uno schermo e un rivelatore (Fig. 6), e viene utiliz-

Figura 7
Schema di misura per diffusione neutronica

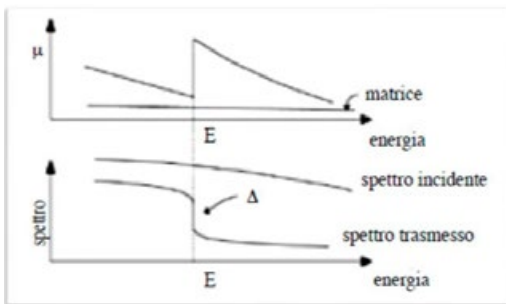


**PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO:
DIFFUSIONE GAMMA
MISURE FINALIZZATE AD ACQUISIRE
INFORMAZIONI SU OGGETTI NON
ACCESSIBILI**

**PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO:
DIFFUSIONE NEUTRONICA
MISURE SULLA COMPOSIZIONE DI
MATERIALI NON ACCESSIBILI**

Tecnica di misura con trasmissione di radiazioni X

La tecnica di misura basata sulla trasmissione di radiazioni X (1.2 - Fig. 2) con diversi livelli energetici, generate da sorgenti esterne, permette di eseguire rapidamente, attraverso un sistema di rivelatori ad alta risoluzione semplici e affidabili, valutazioni qualitative e quantitative di elementi con numero atomico medio e/o alto all'interno di un materiale costituito da una matrice leggera. L'attenuazione della radiazione X nel materiale da analizzare è determinata dal coefficiente di assorbimento che, per ogni elemento, presenta delle discontinuità a energie caratteristiche dell'elemento stesso.



Gli elementi presenti nel materiale sottoposto a misura con la tecnica della trasmissione X si individuano analizzando lo spettro emesso dal campione, ossia individuando le energie (E) caratteristiche dell'elemento assorbitore. È possibile risalire alla loro concentrazione tramite la quantità Δ.

Figura 8

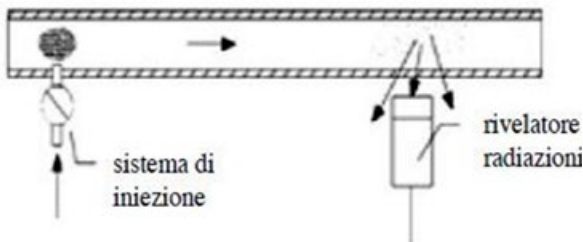


Figura 9 - Schema di misura con traccianti radioattivi

Tecnica di misura con traccianti radioattivi

La tecnica di misura basata sui traccianti radioattivi (1.3 - Fig. 2), applicata solo ove ne sia validato l'utilizzo in totale sicurezza, può essere usata per studiare le criticità presenti in un impianto industriale, ad esempio per verificare le perdite di efficienza, perdite nelle tubazioni, negli scambiatori di calore, in altri componenti, etc. Questa tecnica (Fig. 9) viene, quindi, utilizzata per misure di portata, densità media, velocità di scorrimento di singole fasi, tempi di residenza e mescolamento.

Una soluzione radioattiva viene iniettata nel fluido in esame in maniera da "tracciarne" una porzione rappresentativa dell'intero fluido. La determinazione dell'intervallo di tempo fra l'iniezione e la rivelazione della porzione tracciata, conoscendo la geometria iniettore - rivelatore, consente lo studio di fenomeni di trasferimento di massa.

2) Tecniche che si basano sull'eccitazione del materiale e sulla rivelazione della radiazione caratteristica emessa

Queste tecniche (Fig. 10) si basano su principi fisici più complessi ed utilizzano in genere i seguenti fenomeni: la fluorescenza X, l'attivazione neutronica e con particelle

□ **La fluorescenza X e l'attivazione neutronica** vengono usate per **misure qualitative e quantitative** e permettono di **riconoscere gli elementi** e di determinare la loro **concentrazione**.

□ **L'attivazione con particelle cariche** permette una **valutazione** precisa della **perdita di materiale per usura e fenomeni corrosivi**.

Queste tecniche vengono utilizzate per venire incontro alle esigenze di impianti industriali che necessitano di conoscere la composizione, la struttura e la compatibilità dei materiali. Permettono rapidi studi sugli elementi. Consentono di valutare con precisione l'usura di molti materiali.

Figura 9 - Schema di misura con traccianti radioattivi

cariche. Permettono, grazie a rivelatori ad alta risoluzione, di effettuare misure qualitative e quantitative degli elementi riuscendo a identificare ogni elemento e a misurarne la concentrazione in un materiale nonché a misurare la perdita di materiale per usura e per fenomeni corrosivi.

Tecnica di misura basata sulla fluorescenza X

Questa tecnica di misura viene utilizzata per analisi qualitative e quantitative di composizione, quindi per la caratterizzazione di un materiale.

Il campione da analizzare viene colpito da un fascio di raggi X o gamma (Fig. 11) che causa l'espulsione di elettroni interni per effetto fotoelettrico. Le vacanze formatesi vengono colmate dagli elettroni più esterni, che nella transizione dagli orbitali più esterni a quelli più interni emettono raggi X specifici per ogni elemento.

Essendo l'energia dei raggi X emessi minore di quella dei raggi incidenti provenienti dalla sorgente, si parla di fluorescenza X. L'energia delle radiazioni emesse permette di riconoscere qualitativamente gli elementi del campione irraggiato mentre l'intensità della radiazione permette di risalire alla loro concentrazione.

Tecnica di misura basata sull'attivazione neutronica

Questa tecnica utilizza i neutroni per attivare il materiale (fluido) che si vuole sottopor-

re ad analisi e la risposta è data dall'emissione della radiazione, che è caratteristica del materiale attivato (Fig. 12).

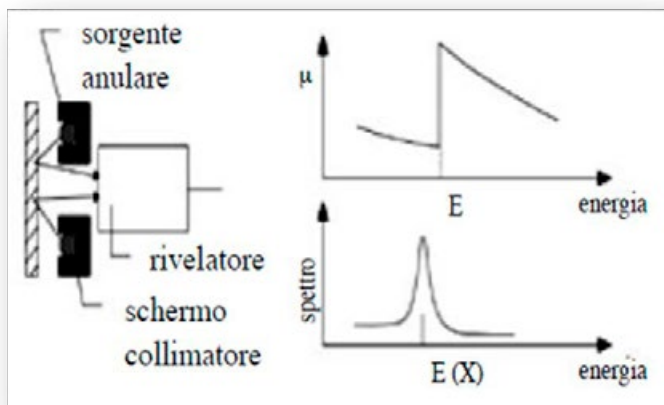
L'attivazione neutronica permette di effettuare un'analisi qualitativa e quantitativa di composizione del fluido soggetto ad attivazione. Il decadimento dei nuclei del campione attivato (tempo di dimezzamento, tipo di energia della radiazione emessa, etc.) fornisce indicazioni sugli elementi presenti all'origine nel campione.

Un'applicazione particolare di questa tecnica è quella dell'attivazione neutronica pulsata che consente misure di composizione, di portata, densità, velocità di scorrimento delle fasi, tempi di mescolamento e residenza. Una porzione di fluido da analizzare viene attivata con un flusso neutronico impulsivo e si comporta come un tracciante radioattivo. Questa tecnica di attivazione evita di dover gestire traccianti (radioisotopi) e il problema del mescolamento del tracciante.

Tecnica di misura basata sull'attivazione con particelle cariche

Questa tecnica viene usata per analizzare lo stato di usura per erosione e corrosione dei materiali (solidi).

L'attivazione avviene con particelle cariche a ridotta penetrazione, in grado di attivare uno strato sottile di spessore superficiale. La superficie viene marcata con fasci di ioni in grado di produrre radioisotopi. È im-



L'energia della radiazione di fluorescenza X è una caratteristica specifica di ogni elemento chimico e non dipende dal composto in cui l'elemento si trova. Per tale motivo, può essere utilizzata in maniera non distruttiva. Le minime concentrazioni rivelabili sono

II' II

Figura 11 - Schema di misura con fluorescenza X

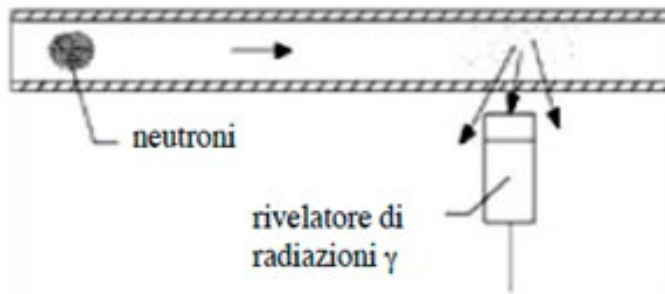


Figura 12 - Schema di misura con attivazione neutronica pulsata

portante che il tempo di dimezzamento dei radionuclidi generati sia tale da coprire il periodo di osservazione. In presenza di fenomeni di erosione e/o di corrosione, la perdita di materiale può essere misurata attraverso l'analisi della radioattività indotta.

Conclusioni

L'esigenza nell'industria di accelerare la produzione, soprattutto evitando arresti nei processi, assicurando una produzione affidabile e dagli alti standard qualitativi del prodotto, ha spinto sempre di più alla attenzione verso queste tecniche nucleari di

misura che hanno, inoltre, reso possibile una riduzione delle tolleranze e un controllo e una regolazione del processo di lavorazione on-line, non intrusivo e non distruttivo, a vantaggio di un bilancio costi-benefici ottimale. Rivolgendo la massima attenzione a tutte le fasi di validazione delle tecniche applicative in sede di progettazione, la scienza nucleare presta particolare cautela all'analisi di tutte le variabili esistenti nell'ambiente di utilizzo, effettuando analisi predittive delle stesse, per evitare l'insorgere di situazioni potenziali di pericolo in fase di applicazione, in modo da assicurare il corretto funzionamento della tecnologia.



Quale esempio, tale tecnica, in ambito industriale, permette di misurare l'usura delle palette delle turbine, di testare l'usura di alcuni componenti dei motori e l'efficacia di sistemi di lubrificazione.

Figura 13

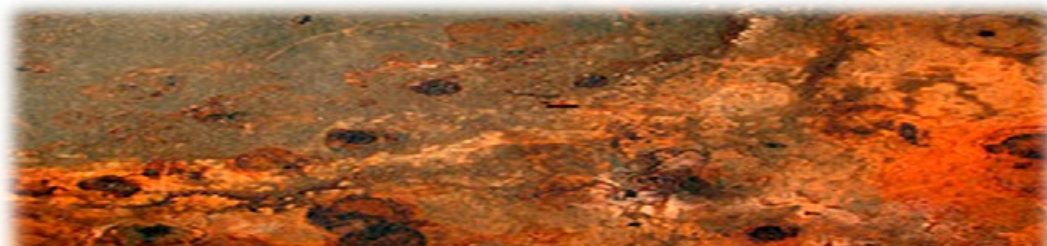


Figura 14

TABELLA 1 - I metodi nucleari di misura nell'industria. Per ogni settore industriale vengono riportate le grandezze misurate ed esempi applicativi

Industria alimentare	Spessore: Cibi prodotti in forma laminare (pasta sfoglia per biscotti e dolci, cioccolata, formaggio, chewing gum)
	Densità: Cibi liquidi che subiscono processi di concentrazione per evaporazione (pesce, carne, succhi di frutta, concentrato di pomodoro, latte condensato)
	Livello: Zucchero grezzo e raffinato contenuto in serbatoi
	Composizione: Contenuto in grasso negli alimenti per lattanti
	Portata: Contenuto di aria nei gelati
Industria del tabacco	Densità: Controllo del riempimento delle sigarette e di carta e fibra nei filtri
Industria tessile	Spessore: Controllo dei processi di rivestimento e impregnazione
	Densità: Produzione di fibre sintetiche
	Livello: Controllo di recipienti di processo
Legnami	Spessore: Controllo di lastre e impiallacciature
Industria della carta	Spessore: Controllo dello spessore nei processi produttivi
	Densità: Controllo dei processi di rivestimento (di gomma o polietilene) e impregnazione
	Livello: Controllo della pasta di cellulosa e dei coloranti
	Composizione: Controllo della pasta di cellulosa nei preriscaldatori e nelle torri di sbianca
Industria editoriale	Spessore: Spessore di rivestimento di caratteri bimetallici per stampa offset e di lastre stereolitiche; Spessore di inchiostro e di rivestimenti plastici
Industria della gomma	Spessore: Spessore di lastre, gomma espansa e materiali ricoperti o impregnati di gomma
	Densità: Soluzioni di lattice per gomma espansa
	Livello: Materiali di processo e prodotti finiti in serbatoi per lo stoccaggio, il trasporto e il processo
	Portata: Fluidi di processo
Industria chimica	Tempo di residenza: Serbatoi di processo
	Spessore: Controllo di pellicole plastiche, rivestimenti plastici, laminati plastici
	Densità: Spessore di pareti di tubi e bottiglie di plastica
	Composizione: Controllo dell'estrazione con solvente, della miscelazione, della distillazione e dei processi di disidratazione
	Portata: Serbatoi di processo e di stoccaggio contenenti ad esempio acidi, metanolo, ammoniaca, ecc.
	Livello: Fluidi di processo e prodotti finali quali liquidi organici, polveri, acidi, alcali
	Tempo di residenza: Controllo delle colonne di distillazione, del riempimento di contenitori di prodotti in polvere (cibi disidratati, cosmetici, medicinali)

Fonte Tabella: ICROMA N 1/2017 Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma

TABELLA 1 - I metodi nucleari di misura nell'industria. Per ogni settore industriale vengono riportate le grandezze misurate ed esempi applicativi

Industria degli idrocarburi	Spessore: Fogli catramali
	Densità: Determinazione dell'interfaccia per le operazioni di pompaggio negli oleodotti
	Livello: Densità del catalizzatore nelle unità di cracking
	Composizione: Densità del catalizzatore negli oli
Industria metallurgica	Spessore: Barre e tubi incandescenti, spessore di pareti di tubi e serbatoi, rivestimenti delle pareti delle fornaci
	Densità: Polveri e ganghe nella lavorazione dei minerali
	Livello: Controllo del riempimento nelle fornaci, metalli liquidi, polveri nei precipitatori elettrostatici
	Composizione: Composizione elementare di minerali metallici e metalli fusi, minerali per sintesi gas di scarico delle fornaci
	Corrosione: Studio materiali
Industria dei minerali non metallici	Tempo di residenza: Serbatoi di processo
	Spessore: Carta abrasiva, lastre di vetro, fibre di vetro
	Densità: Sabbie, cementi, mattoni refrattari
	Livello: Vetro fuso nelle fornaci, clinker di cemento
Settore industriale elettricità, gas, acqua	Composizione: Sabbie, argille e cementi nei recipienti di stoccaggio
	Spessore: Spessore di parete di tubi
	Densità: Frazione di vuoto acqua-vapore in caldaie e condensatori. Sedimenti sospesi nei fumi
	Composizione: Analisi carbone di alimentazione, cenere e fumi di carbone
Industria automobilistica	Portata: Fluidi dentro tubazioni
	Corrosione: Palette di turbine
	Spessore: Lastre metalliche, plastica, rivestimenti plastici
	Composizione: Determinazione di S e Pb nei carburanti
	Corrosione: Studio componenti meccanici
	Varie: Ricambio d'aria negli abitacoli, consumo di olio, usura dei componenti

Fonte Tabella: ICROMA N 1/2017 Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma




Bibliografia essenziale

- Pubblicazione IO-ROMA N. 1/2017 - Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
Autori: Prof. Ing. Romolo Remetti e Prof. Ing. Antonio Naviglio
- Fondamenti-dosimetria-radiazioni-ionizzanti-IV, di R. F. Laitano
- Radiation Detection and Measurement – G.F. Knoll
- D.Lgs. 101 del 31 luglio 2020
- Wikipedia: Enciclopedia libera web

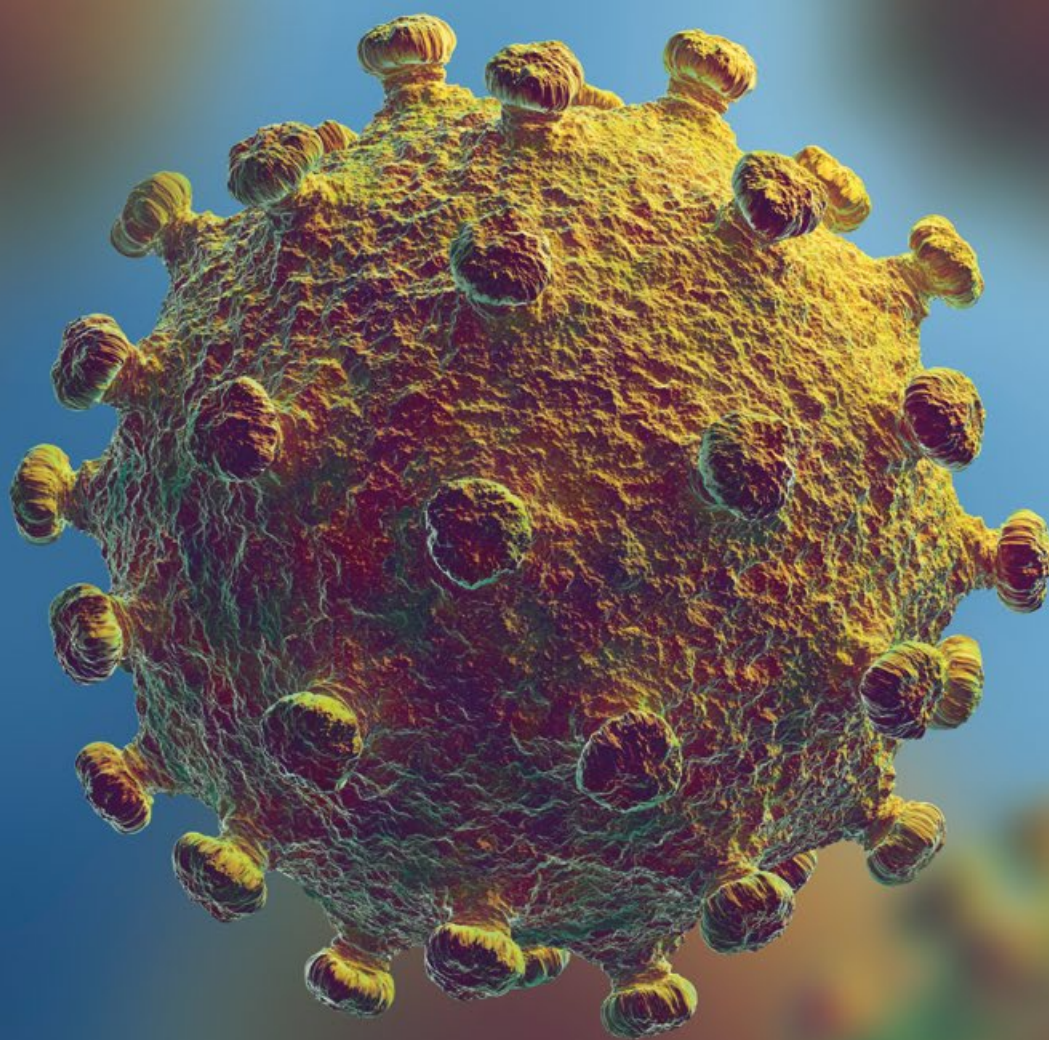
Iconografia

Le immagini sono prese da Internet (Wikipedia, siti, pubblicazioni) e si intendono qui utilizzate per puri fini personali e non commerciali.



Tecniche nucleari avanzate per la sterilizzazione dei prodotti per usi civili

a cura di Ing. Roberto Di Marco



**Tutela della salute al tempo del COVID – 19: tecniche
nucleari per il contrasto alla diffusione dei virus**

L'articolo riporta sinteticamente, e in un linguaggio accessibile, alcune considerazioni introduttive in merito ad un uso eticamente corretto dei risultati di studi e ricerche effettuate nel campo del "Nucleare". In particolare, viene ricordato l'uso di tali ricerche nel campo della salute e del benessere dell'uomo relativamente alla triste situazione dalla pandemia mondiale determinata dalla diffusione del Coronavirus Sars-CoV-2 nel 2020. Le tecniche qui richiamate fanno riferimento all'uso delle radiazioni nucleari, in particolare i raggi gamma, nella sterilizzazione di presidi medici, nella individuazione del virus analizzando i tamponi e nella previsione della diffusione del virus utilizzando, per analogia, codici di calcolo precedentemente utilizzati per il calcolo della diffusione dei neutroni nella reazione nucleare a catena in un nocciolo.

L'uomo ha da sempre convissuto con la radiazione nucleare¹ e, negli ultimi cinquant'anni, dopo un periodo di studi e ricerche iniziato alla fine del 1800 ed un uso improprio in ambito militare, sta imparando ad utilizzarla per migliorare la propria esistenza.

La scoperta delle reazioni nucleari, che forniscono energia, radiazioni e radioisotopi,

ha avuto un'importanza eccezionale come fonte di innovazione tecnologica e, nel campo delle "applicazioni non energetiche della Ricerca Nucleare in ambito civile e industriale con uso eticamente corretto", sta fornendo all'umanità una vasta quantità di benefici in moltissimi campi, soprattutto in quello della medicina, della salute e del benessere.

A tutto ciò hanno contribuito nomi illustri che hanno segnato la storia delle scienze e della tecnica e impresso una forte spinta all'innovazione tecnologica, come il fisico tedesco Wilhelm Conrad Röntgen, che nel 1895 scoprì i raggi X, il fisico francese Antoine Henri Becquerel (Premio Nobel per la Fisica), che nel 1896 scoprì la radioattività, il chimico/fisico neozelandese naturalizzato britannico, Ernest Rutherford (Premio Nobel per la chimica), considerato il padre della fisica nucleare, che scoprì la radiazione alfa e la radiazione beta, il fisico/chimico francese Paul Ulrich Villard, che nel 1900 scoprì i raggi gamma, i coniugi Marie Curie e Pierre Curie (premi Nobel), ed altri come Albert Einstein, Enrico Fermi e il gruppo di via Panisperna.

I tre tipi di radiazione nucleare, indicati con le

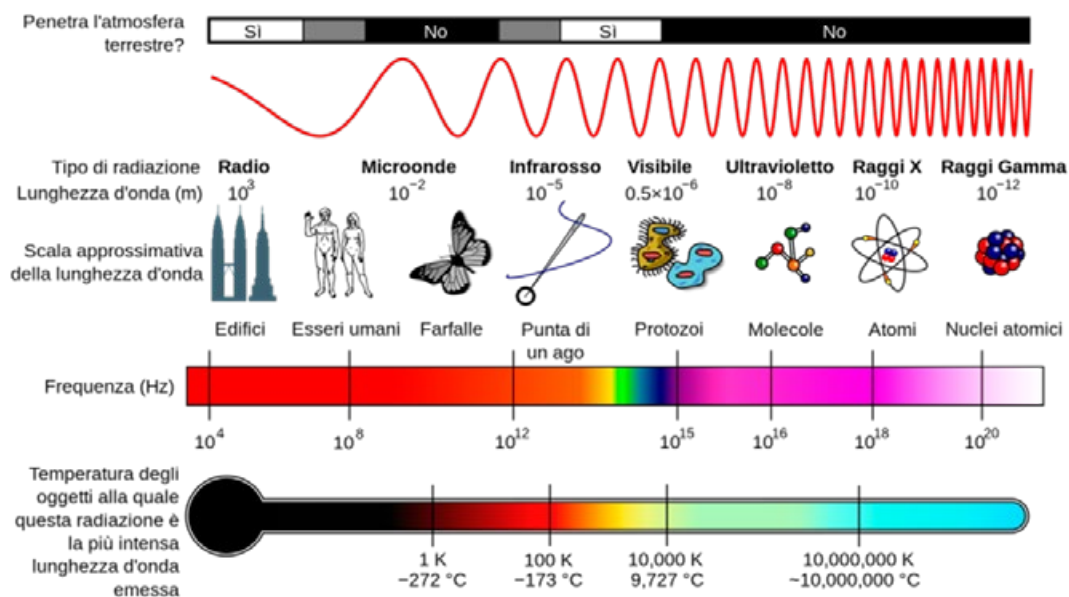


Figura 1
Schema che mostra lo spettro elettromagnetico con il tipo, la lunghezza d'onda (con esempi), la frequenza e la temperatura di emissione del corpo nero. (Immagine adattata da un documento della NASA).

prime tre lettere dell'alfabeto greco: α (alfa), β (beta) e γ (gamma), sono invisibili, ma si possono facilmente rilevare con un tubo *Geiger-Müller* collegato ad un contatore di particelle. Una caratteristica di queste tre forme di radiazione è quella che possono venire separate da un campo magnetico; infatti, le particelle alfa, che sono nuclei di elio composti da due protoni e due neutroni e hanno carica positiva, vengono deviate in una direzione, le particelle beta, che sono elettroni velocissimi ad alta energia e hanno carica negativa, vengono deviate nella direzione opposta, mentre i raggi gamma, costituiti da un fascio di fotoni, non sono influenzati dal campo magnetico (Figura 2).

Le particelle alfa possono essere fermate da un foglio di carta, le particelle beta dall'alluminio, i raggi gamma da un blocco di piombo; i raggi gamma, potendo penetrare all'interno di un materiale, hanno la capacità di rompere i legami chimici.

In ambito civile, tra le applicazioni non energetiche dei risultati degli studi e della ricerca effettuati in campo nucleare e, in particolare, nello studio del fenomeno della radioattività, un settore particolarmente interessante, anche perché attuale, è quello della "sterilizzazione dei prodotti" e il "contrasto alla diffusione dei virus".

Sia la sterilizzazione che il contrasto precoce alla diffusione delle epidemie sono infat-

ti settori balzati agli onori della cronaca con la pandemia del 2020 e hanno focalizzato l'attenzione e l'interesse della popolazione e degli operatori sanitari proprio perché percepiti, a ragione, come strumenti efficaci da utilizzare per contrastare e limitare la diffusione del Coronavirus Covid-19.

Nel processo di sterilizzazione, l'energia emessa dal decadimento del Cobalto 60^2 con l'emissione di raggi gamma viene, ad esempio, utilizzata per eliminare, attraverso alterazioni delle macromolecole del DNA e dell'RNA, tutti i microrganismi viventi, patogeni e no, rendendo "sterili" i prodotti medicali.

Nel contrasto alla diffusione dei virus, i risultati dello studio sul nucleare possono essere utilizzati sotto diversi aspetti. Uno è sicuramente quello dell'utilizzo di strumentazione medica di diagnosi come le semplici radiografie a Raggi X o la tomografia Assiale Computerizzata (TAC) per l'accertamento di focolai di polmonite attive presenti nei pazienti COVID.

Un altro è quello di avvalersi di esperienze e tecniche maturate applicando metodi e modelli matematici come quelli utilizzati nello studio della diffusione dei neutroni in un reattore nucleare in cui è stata attivata una reazione a catena. Tali metodi vengono utilizzati per effettuare analisi e previsioni statistiche della diffusione del Coronavirus (ipotizzando che il virus si diffonda come fanno i neutroni nel nocciolo di un reattore) per pianificare eventuali azioni (tipo *lock-down*) che ne possono prevenire la diffusione. Infatti, una procedura di *screening* di massa effettuata per esempio con l'utilizzo dei tamponi risulta vincente se si ottengono risultati certi ed immediati e se si isola immediatamente l'eventuale caso positivo per "gestire" l'evolversi dei contagi (in analogia, appunto, ai metodi e ai modelli matematici utilizzati nel controllo di una reazione a catena in un impianto nucleare!).

Un terzo fronte di applicazione è quello che utilizza uno dei metodi di rilevamento più veloci ed accurati, usato anche in questo periodo di pandemia per l'individuazione negli organismi del virus Sars-CoV-2: è una tecnica di derivazione nucleare chiamata

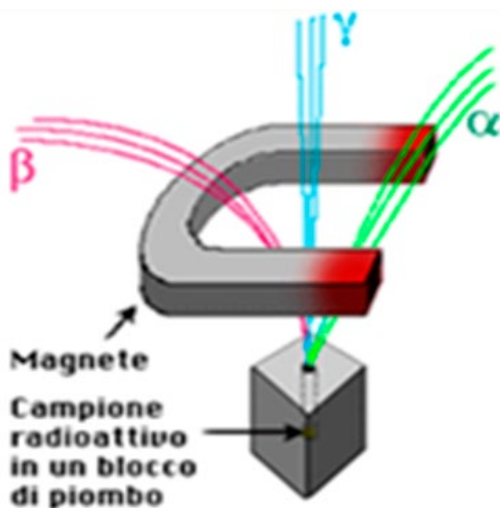


Figura 2 - Influenza del campo magnetico (Fonte INFN).



“trascrizione inversa in tempo reale - reazione a catena della polimerasi” comunemente indicata dalla sigla RT-PCR che è, in generale, applicabile all’individuazione di virus sia negli animali che nell’uomo.

Un **virus** è un pacchetto microscopico di materiale genetico composto di acido desossiribonucleico (il DNA) o di acido ribonucleico (l’RNA), circondato da un involucro molecolare.

Il **DNA** è una molecola a due filamenti che contiene il codice genetico (il modello) che

descrive come gli organismi sono fatti e si sviluppano: si trova in tutti gli organismi, come animali, piante e virus.

L’**RNA** è generalmente una molecola a un filamento che copia, trascrive e trasmette parti del codice genetico alle proteine in modo che possano sintetizzare e svolgere funzioni che mantengono gli organismi in vita e in “crescita”. Diverse variazioni di RNA sono responsabili della copia, trascrizione e trasmissione.

Nel caso del SARS-CoV-2 il virus contiene



ficato nel processo RT-PCR in tempo reale per rilevare i virus.

GENERALITÀ SUL PROCESSO DI STERILIZZAZIONE

Con il termine “sterilizzazione”, usato nel campo della tecnica, si intende la *“Eliminazione di tutti i microrganismi viventi, patogeni e no, e delle loro spore, attuata con mezzi diversi a seconda dei casi”*³. La sterilizzazione viene utilizzata su strumenti chirurgici, vetreria, tessuti etc. e su medicinali, alimenti da conservare, terreni di coltura per batteriologia, brodi nell’industria di fermentazione etc.

Come per molti processi tecnologici, anche per il processo di “sterilizzazione” sono state definite, dagli organismi competenti, delle specifiche norme. Tra queste, la norma tecnica UNI EN 556-1 stabilisce che: *“per definire sterile un prodotto si deve raggiungere un livello di sicurezza di sterilità SAL (Sterility Assurance Level) che sia pari o inferiore a $1:1.000.000 = 10^{-6}$, ovvero, “un prodotto viene definito sterile quando la probabilità di trovarvi un microorganismo è inferiore ad uno su un milione”*. Lo stesso vale per i dispositivi medici che *“si definiscono sterili quando, dopo essere stati sottoposti a sterilizzazione terminale mediante un processo convalidato, la probabilità di sopravvivenza dei microrganismi sul materiale trattato è minore o uguale a 1×10^{-6} ”*.

La “radio sterilizzazione” si basa sulla norma ISO 11137-1:2006 *“Sterilizzazione di prodotti sanitari (Radiazione - Parte 1)”* incentrata sui requisiti di sviluppo, convalida e controllo di routine di un processo di sterilizzazione per dispositivi medici e sulla norma ISO 11137-2:2006 *“Sterilizzazione di prodotti sanitari (Radiazione - Parte 2)”* incentrata sulla determinazione della dose di sterilizzazione.

Il processo di sterilizzazione di un “oggetto” elimina i microrganismi presenti provocando su di essi una *alterazione letale* di alcune delle loro componenti essenziali mediante la *denaturazione* delle proteine e degli acidi nucleici e la *degradazione* di componenti della membrana e della parte cellulare.

solo RNA che, per moltiplicarsi e sopravvivere, si “infiltra” in cellule sane. Una volta all’interno della cellula, il virus utilizza il proprio codice genetico - RNA nel caso del virus COVID-19 - per prendere il controllo e “riprogrammare” le cellule, trasformandole in fabbriche di virus.

Per rilevare il virus COVID-19 utilizzando RT-PCR in tempo reale, l’RNA deve essere prima convertito in DNA con un processo chiamato “trascrizione inversa”, perché solo il DNA può essere copiato e/o ampli-

Il processo di sterilizzazione prevede una serie di attività costituite da un numero ben identificato di azioni operative descritte in **procedure codificate** da cui dipende il risultato finale.

Tipicamente, i metodi di sterilizzazione utilizzati in ambito industriale e ospedaliero sono di due tipi:

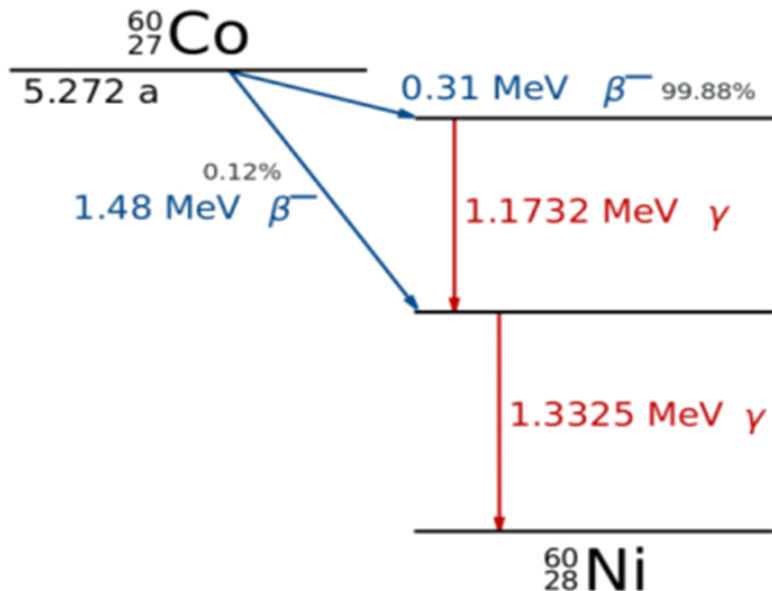
1. sterilizzazione chimica, quando vengono utilizzati il perossido d'idrogeno e l'ossido di etilene;
2. sterilizzazione fisica, quando vengono utilizzati le radiazioni o il calore umido sotto pressione o l'applicazione di pressioni elevate.

La sterilizzazione mediante l'uso di radiazioni è tipicamente utilizzata sia per prodotti alimentari o farmaceutici (che subirebbero alterazioni se sterilizzati con l'uso del calore!), sia per materiali di *impiego sanitario e chirurgico*.

Le dosi impiegate vanno dalle poche migliaia di *sievert* per il trattamento dei cibi, ai 25.000 – 45.000 *sievert* per la sterilizzazione dei prodotti medicali, ai milioni di *sievert* per la sintesi chimica.

La sterilizzazione mediante l'utilizzo di radiazioni è un metodo "a bassa temperatura", di solito utilizzato per prodotti termolabili che si decompongono o si alterano strutturalmente per effetto del calore. Gli impianti utilizzati per questo tipo di sterilizzazione sono relativamente complessi e pertanto risultano costosi.

Figura 3
Schema
di decadimento
del cobalto -60



In ambito industriale le sorgenti costituite da radioisotopi che emettono raggi gamma sono le più usate per la loro versatilità in quanto sono in grado di irraggiare ogni tipo di materiale⁴.

I raggi gamma sono radiazioni elettromagnetiche di origine nucleare con:

- lunghezze d'onda (λ) che vanno da 10^{-11} m a 10^{-12} m;
- energie corrispondenti che variano dai 40 keV ai 4 MeV.

Le radiazioni gamma vengono emesse dai radioisotopi nel corso del decadimento del nucleo, da uno stato eccitato, e quindi instabile, ad uno stato più stabile o fondamentale.

Il **cobalto 60** (${}_{60}\text{Co}$), isotopo radioattivo sintetico del metallo cobalto, è il radioisotopo più frequentemente utilizzato nella costruzione di irradiator, anche di grande potenza, per scopi applicativi.

A causa della sua corta emivita, pari a 5,27 anni, il cobalto-60 non si trova in natura; viene prodotto artificialmente per attivazione neutronica del ${}_{56}\text{Fe}$.

L'equazione nucleare complessiva della reazione è:



Il cobalto-60 decade per decadimento beta negativo nell'isotopo stabile nichel-60. Il nucleo di nichel-60, energizzato, emette due raggi gamma con energie di 1,17 MeV e di 1,33 MeV per diventare nichel-60 stabile. Il ${}_{60}\text{Co}$ si ottiene abbastanza facilmente bombardando il ${}_{59}\text{Co}$ in reattori nucleari: la cattura di neutroni termici da parte del ${}_{59}\text{Co}$ porta alla formazione di nuclei di ${}_{60}\text{Co}$ instabili che decadono con un tempo di dimezzamento pari a 5,27 anni, trasformandosi, per decadimento β^{-} , in ${}_{60}\text{Ni}$ ed emettendo due raggi γ di energie pari a 1,17 MeV e 1,33 MeV con un'efficienza pari a 100% per entrambi.

Le sorgenti a base di ${}_{60}\text{Co}$ presentano i seguenti vantaggi:

- l'emissione di una radiazione quasi monocromatica (γ_1 e γ_2 sono piuttosto uguali) poiché dal decadimento del ${}_{60}\text{Co}$ si ottiene una radiazione gamma monoenergetica di energia media pari a 1,25 MeV;

- $t_{1/2}$ uguale a 5,27 anni cioè un tempo abbastanza lungo affinché la sorgente non si spenga subito ma non troppo da generare inquinamento ambientale radioattivo;
- il suo decadimento porta alla formazione di un isotopo stabile ^{60}Ni cosa che non accade, ad esempio, con il ^{137}Cs che decadendo produce ^{137}Ba .

L'utilizzo negli impianti del ^{60}Co come sorgente gamma viene effettuato trasformando in pastiglie questo radioisotopo che viene poi incapsulato e chiuso ermeticamente in cilindri di acciaio inossidabile a tenuta stagna comunemente chiamati *matite*. Il numero dei contenitori assemblati dipende dalla potenza richiesta dall'impianto per la sorgente. Le matite di ^{60}Co sono inserite all'interno di rastrelliere che, quando non vengono utilizzate, sono confinate in un pozzo schermato pieno d'acqua e situato al centro di una stanza nella quale vengono posizionati i prodotti da sterilizzare. Quando la sorgente è posizionata in fondo al pozzo, essa si trova in "stato di riposo" completamente immersa nell'acqua (la piscina è profonda circa 10 metri) che, fungendo da schermo biologico, assorbe tutta l'energia sprigionata dalla radiazione.

In questa situazione nella camera d'irraggiamento sono assenti i raggi gamma e gli operatori possono tranquillamente disporre al suo interno il materiale da irradiare per la sterilizzazione.

I campioni sono introdotti mediante un dispositivo girevole schermato e il processo consiste nel far circolare il materiale da trattare (*generalmente disposto in scatole*) intorno alla sorgente che rimane fissa.

Quando tutto il materiale da irraggiare è stato posto nella camera, gli operatori escono, le porte vengono ermeticamente chiuse e bloccate. Successivamente, tramite una *consolle* di comando posizionata esternamente, la sorgente viene fatta risalire dal pozzo nella sala e a quel punto le radiazioni investono gli oggetti presenti nella camera e inizia il processo di sterilizzazione. Sempre dalla sala controllo, posta all'esterno, si determina il tempo di salita e di discesa della sorgente. Solo quando la

sorgente viene nuovamente depositata in fondo al pozzo in posizione di sicurezza, le porte della stanza si possono aprire.

Le caratteristiche fondamentali del processo con raggi gamma sono le seguenti:

- la sorgente radioattiva è sempre presente nel sistema e deve essere periodicamente sostituita perché si esaurisce;
- il sistema è tecnicamente molto semplice, fatta eccezione per il sistema di sicurezza che deve garantire la massima affidabilità;
- l'omogeneità e la ripetibilità delle dosi sono difficili da ottenere a causa della non uniforme distribuzione del materiale da sterilizzare all'interno delle scatole;
- la durata dell'irraggiamento è molto lunga per cui possono crearsi fenomeni ossidativi significativi rispetto ad un trattamento di più breve durata;
- la dose da utilizzare non è prevedibile a priori perché dipende dalla consistenza del carico presente nella cella; questo può implicare il fatto che per utilizzare con certezza una dose minima di radiazioni a volte si avranno sovradosaggi che possono danneggiare il materiale;
- l'elevata penetrazione dei raggi gamma permette il trattamento di spessori elevati di materiale.

Lo svantaggio del metodo consiste nello smaltimento dei rifiuti radioattivi e nella formazione di residui tossici.





Bibliografia essenziale

- Amaldi Ugo, *Fisica delle radiazioni*, Bollati Boringhieri, 1971;
- Edward E.N. Baker, *Visualizing an unseen enemy; mobilizing structural biology to counter COVID-19*, Acta Cryst, STRUCTURAL BIOLOGY, 2020;
- Mainardi E.; *Impieghi dell'energia nucleare*, Delfino Editore, 2008;
- Polvani Carlo, *Elementi di radioprotezione*, Roma, ENEA, 1993;
- *Reverse transcriptase-polymerase chain reaction*, Encyclopaedia Britannica, Inc.;
- <https://www.iaea.org/newscenter/news/how-is-the-covid-19-virus-detected-using-real-time-rt-pcr>;
- International Atomic Energy Agency (IAEA): website <http://www.iaea.org/>;
- <https://home.infn.it/it/comunicazione/comunicati-stampa/3909-i-geoneutrini-confermano-che-siamo-appoggiati-su-un-mantello-di-uranio-e-torio> (INFN);
- <https://www.sgsgroup.it/it-it/life-sciences/training/sterilization/iso-11137-1-2-sterilization-of-health-care-products-radiation>.



Note

1. La crosta terrestre contiene una considerevole quantità di uranio e radon. L'uranio è un metallo radioattivo, duro, piuttosto diffuso in natura. È presente nella crosta terrestre in una proporzione di circa 3 grammi di uranio per tonnellata di crosta terrestre: poiché la crosta terrestre è stimata in 3x10¹⁹ tonnellate si hanno a disposizione circa 1013 tonnellate di uranio (10.000 miliardi di tonnellate) quantità maggiore rispetto a quella dell'argento, dell'oro o del molibdeno (Fonte ENI). Il Radon è un gas derivante dal processo di decadimento dell'uranio che dalle profondità del pianeta raggiunge la superficie grazie a fenditure presenti nella roccia. Gli effetti del Radon sull'uomo sono deleteri e se respirato in quantità sufficienti e per tempi prolungati, possono provocare danni e cancro ai polmoni (Fonte Università di Padova). Recentemente, in uno studio dell'INFN (Istituto di Fisica Nucleare: <https://home.infn.it/comunicazione/comunicati-stampa/3909-i-geoneutrini-confermano-che-siamo-appoggiati-su-un-mantello-di-uranio-e-torio>) si dimostra che buona parte del calore sprigionato dalle viscere della Terra deriva dal decadimento radioattivo dell'uranio-238 e del torio-232 presenti nel mantello terrestre, spesso quasi 3.000 km, su cui poggia la sottile crosta che noi calpestiamo. Ogni secondo circa un milione di geoneutrini (particelle prodotte dalla radioattività naturale terrestre) attraversano un centimetro quadrato della superficie della Terra.
2. Il cobalto 60 è un isotopo radioattivo sintetico del metallo cobalto non presente in natura.
3. Da Enciclopedia Treccani
4. Tali radiazioni sono molto penetranti e sono bloccate solo dal piombo o dal cemento!



a cura di
Prof. Ing. Romolo
Remetti

commissione:
Radioprotezione ed
Emergenze

Tecniche di sterilizzazione



Le differenti tecniche utilizzate per la sterilizzazione dei prodotti per uso civile, possono essere distinte in base alla natura della radiazione ionizzante.

Tra le varie tecniche si evidenziano le seguenti:

Irraggiatori gamma:

- Impianti "automatic carrier";
- Impianti "tote box irradiator";
- Irraggiatori "Mini-cell";
- Irraggiatori "Micro-cell";
- "Gamma Cell";
- Irraggiatore Elan.

Irraggiatori a fasci di elettroni:

- Acceleratori ad azione diretta;
- Dynamitron;
- Acceleratori lineari;
- Rhodotron.

Irraggiatori a raggi X.



Introduzione

La sterilizzazione per esposizione a radiazione ionizzanti di prodotti per uso civile (biomedicali, alimentari, «consumers») è ottenuta irraggiando il materiale tramite:

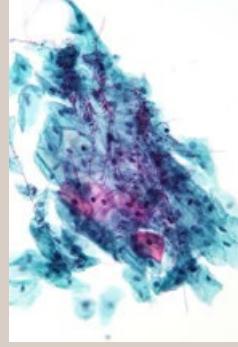
- fasci di elettroni ad alta energia
- radiazione elettromagnetica (nella forma di raggi X o gamma).

La sterilizzazione ha lo scopo di «inattivare» batteri, funghi, virus e i recentemente scoperti «prions - proteinaceous infectious particles».

Tutti questi microrganismi contengono acidi nucleici (DNA, RNA o entrambi).



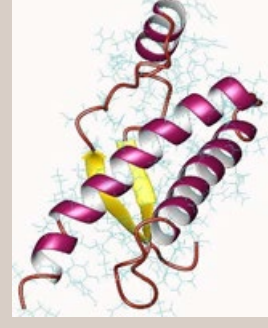
Escherichia coli



Candida



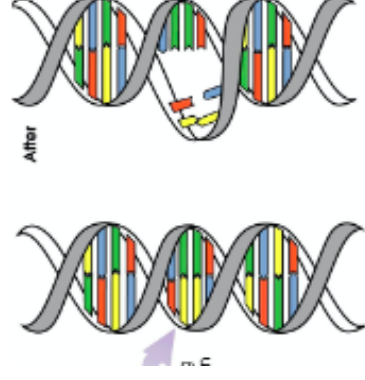
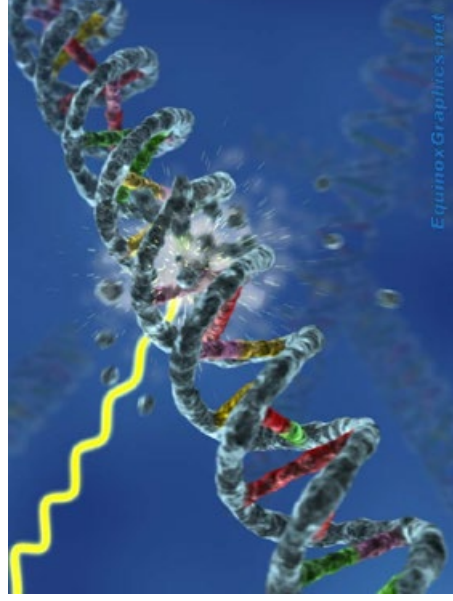
Rotavirus



Prione

Introduzione

L'irraggiamento ha lo scopo di depolimerizzare il DNA impedendo la riproduzione del microrganismo

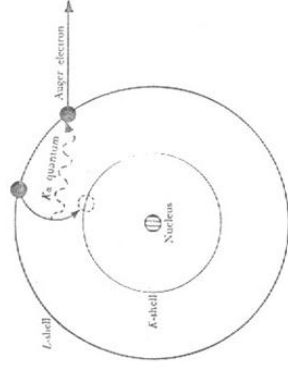


Ricordare che l'interazione della radiazione X, gamma e dei fotoni X di bremsstrahlung è un processo quantistico di tipo stocastico, di conseguenza anche il grado di sterilizzazione sarà governato da considerazioni probabilistiche.

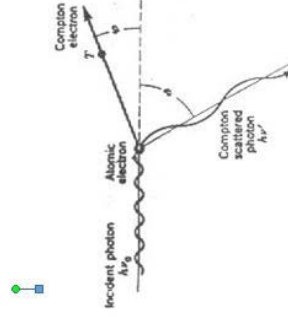


Introduzione

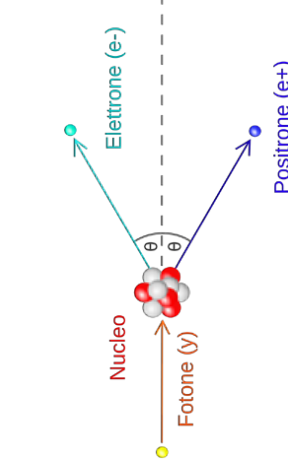
Richiami su interazione radiazione X, gamma



Effetto fotoelettrico



Effetto Compton

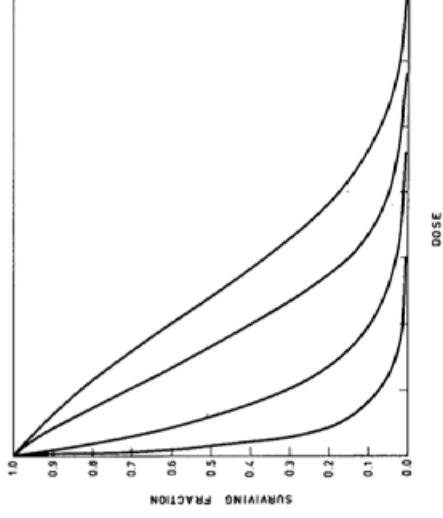


Creazione di coppie e⁻, e⁺

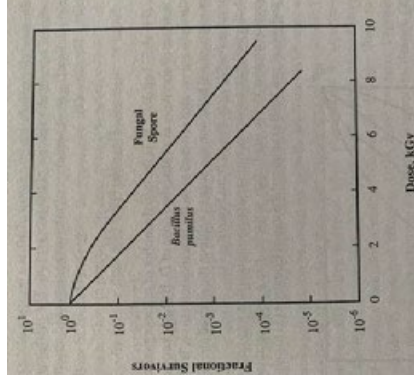
- Raggi X e gamma sono indirettamente ionizzanti
- Il conferimento di dose avviene tramite la particella carica liberata
- La radiazione X e gamma è caratterizzata da spiccate capacità di penetrazione nella materia (a maggior ragione per la radiazione gamma)
- Il prodotto da sterilizzare è contenuto in imballaggi di dimensione anche notevoli
- Maggiore è l'energia della radiazione maggiore è il volume dell'imballaggio

Considerazioni dosimetriche

In conseguenza della natura probabilistica dell'interazione delle radiazioni gamma anche la sterilizzazione ha un andamento asintotico nei confronti della dose assorbita. Oltre all'andamento teorico puramente esponenziale si possono avere altri andamenti in funzione delle diverse specie di microrganismi.



Andamento teorico



Caso specifico

SAL: Sterility Assurance Level

N_0 : numero microrganismi prima dell'irradiazione

N : numero di microrganismi dopo l'irradiazione

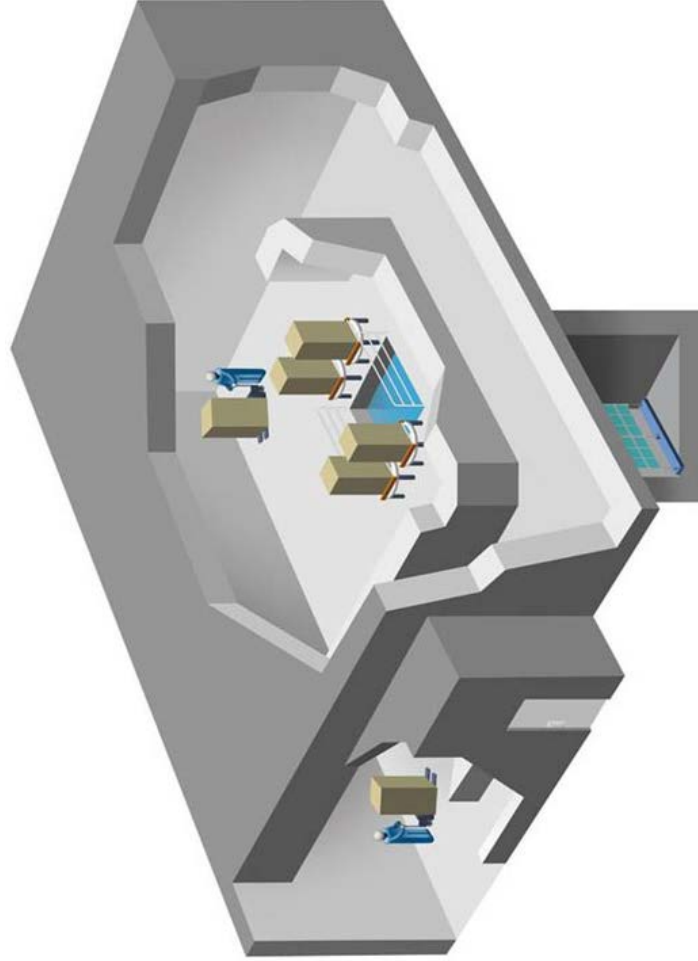
D_{10} : valore della curva "sopravvivenza vs. dose"

$$D = -D_{10} \log(N/N_0)$$

Es: per il bacillus pumilus, che ha un valore di D_{10} pari a 1,7 kGy, per raggiungere un SAL di 10^{-6} ho bisogno di 10,2 kGy



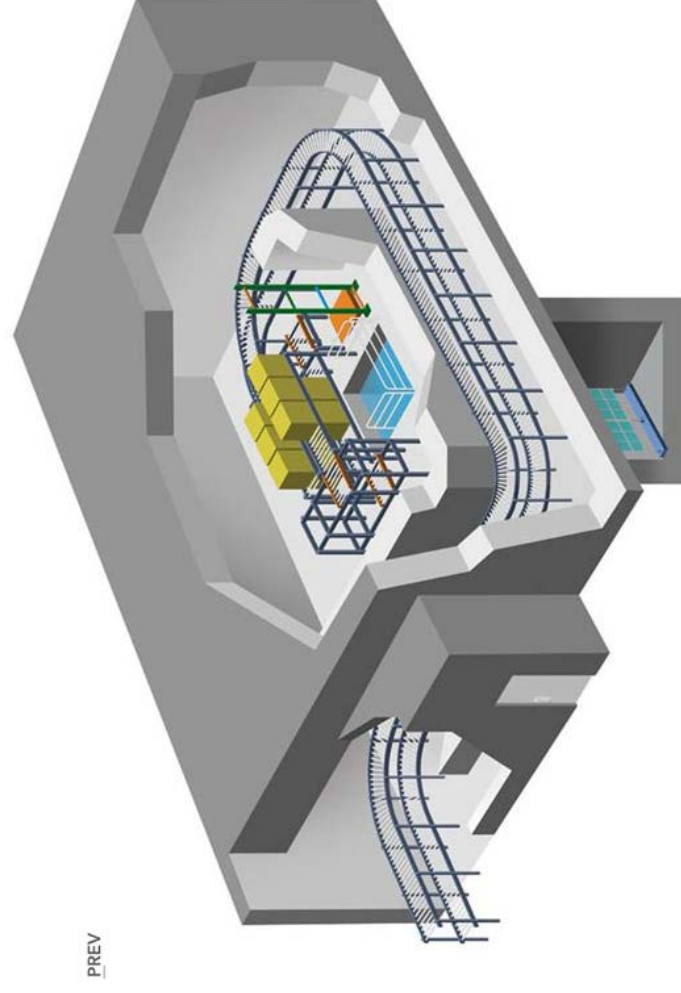
Irraggiatori gamma



GammaFIT Flexible Irradiator: R&D Small Scale
Image 1 of 9

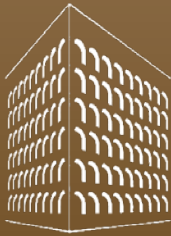
“Tote box”

Irraggiatori gamma

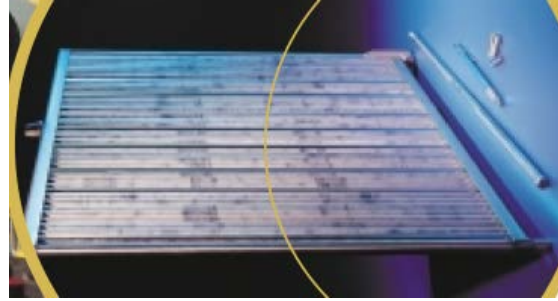


”Automatic carrier”

GammaFIT Flexible Irradiator: Two-Pass Automatic Tote
Image 3 of 9



Irraggiatori gamma



Il cobalto-60 ha un tempo di dimezzamento di 5,3 anni ed emette raggi gamma da 1,17 MeV e 1,33 MeV

C-188 Specs at a Glance

Standard Source Activity Range	Up to 14,250 Ci (527 TBq)
Dimensions	451.6 mm (17.78 inches) in length 11.1 mm (0.437 inches) in diameter
Weight	0.24 kg (0.53 pounds)
Source Rack Arrangement	Customized to individual requirements for optimum dose uniformity

Irraggiatori gamma

- Per i sistemi visti è fondamentale l'importanza del sistema di comando e controllo della movimentazione della sorgente.
 - Non è sufficiente segnalare la posizione di sorgente solo tramite segnalazione luminosa di regolare funzionamento.
 - È sempre necessario misurare anche il rateo di dose all'interno della cella di irraggiamento per essere sicuri dell'effettivo rientro della sorgente in posizione schermata.
-
- Kjeler, Norvegia – 1982 – ingresso di un tecnico in un bunker di irraggiamento - 2,4 PBq ⁶⁰Co – 20 Gy : morte dopo 13 giorni per sindrome renale acuta
 - Soreq, Israele – 1990 - ingresso di un tecnico in un bunker di irraggiamento 12,6 PBq ⁶⁰Co – da 10 a 20 Gy : morte dopo 36 giorni per sindrome intestinale e sindrome polmonare
 - Nesvizh, Belarus – 1991 - ingresso di un tecnico in un bunker di irraggiamento 28 PBq ⁶⁰Co, da 12 a 16 Gy : morte dopo 3 mesi per complicanze respiratorie



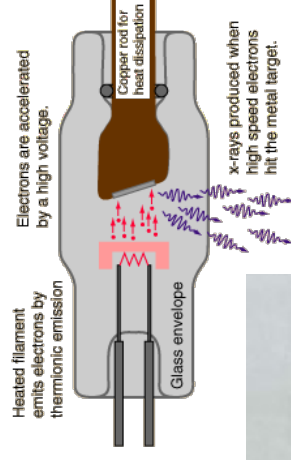
Irraggiatori gamma



“Gamma
cells”

Irraggiatori X

In maniera analoga possono essere impiegati irraggiatori X.



- Tipicamente le capacità di penetrazione nella materia sono ridotte rispetto a quelle della radiazione gamma.
- A parità di dose conferita il tempo di esposizione sarà maggiore
- Il vantaggio è di tipo tecnologico in quanto si elimina la necessità della movimentazione di sorgente dalla posizione di schermaggio a quella di irraggiamento.

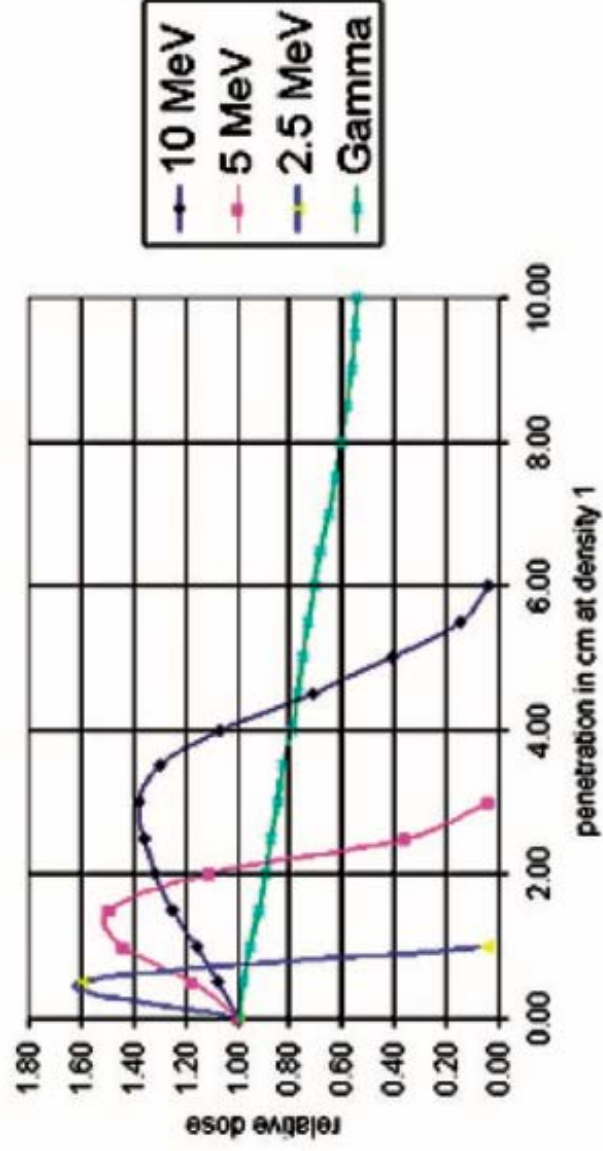


Impiego diretto di fasci di elettroni

- Gli elettroni interagiscono in maniera deterministica con la materia per ionizzazione, eccitazione e bremsstrahlung
- L'effetto voluto nella sterilizzazione è la ionizzazione, che tipicamente è l'effetto maggioritario.
- Il potere di penetrazione nella materia è molto più ridotto che nel caso della radiazione X e gamma
- A parità di tempo di esposizione si riescono a conferire dosi maggiori che nel caso della radiazione X e gamma.
- Anche in questo caso è eliminato il problema della movimentazione di sorgente: basta posizionare l'acceleratore da «on» a «off»

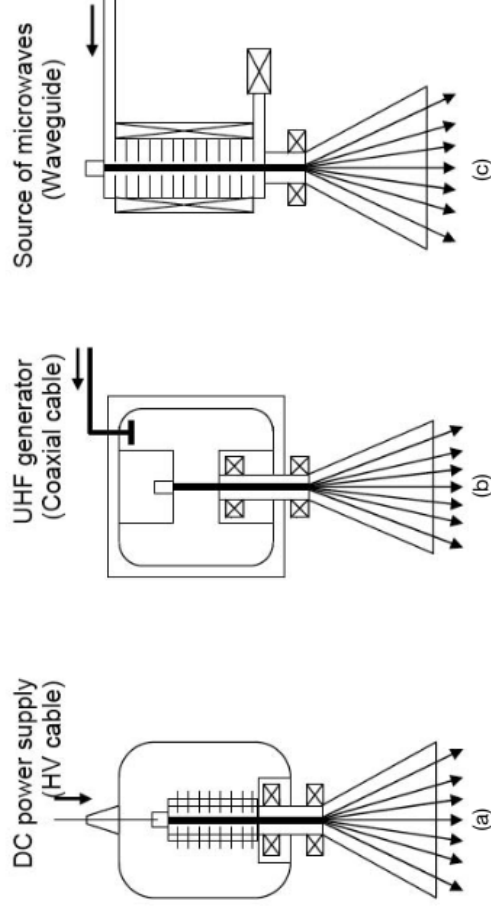
Impiego diretto di fasci di elettroni

Confronto con il caso della radiazione gamma





Impiego diretto di fasci di elettroni

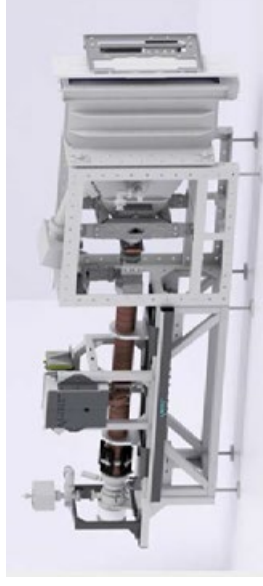


Diversi tipi di irraggiatori

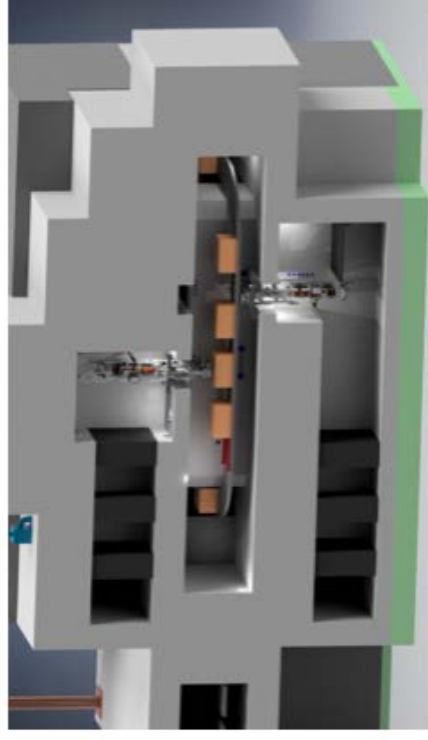
- Dynamitron
- Acceleratori lineari (LINAC)
- Rhodotron

Impiego diretto di fasci di elettroni

Esempio: Sistema "MEVEX"



LINAC



CIVILE - TRASPORTO





TECNOLOGIE NUCLEARI INNOVATIVE NELLE APPLICAZIONI AEROSPAZIALI

*Applicazione della radioattività in ambito
aerospaziale*



a cura di
Ing. Antonio
De Blasiis

Commissione:
Ricerca e reattori
innovativi

Abstract

La radioattività naturale è un fenomeno che si è rivelato nel tempo essere in grado di avere innumerevoli applicazioni tecnologiche; lo studio di tale insieme di applicazioni tecnologiche ha dato origine all'ingegneria nucleare. Ciò in perfetta analogia con tutti gli altri settori dell'ingegneria (ad esempio lo studio della statica e della dinamica dei corpi rigidi ha dato origine all'ingegneria strutturale) la quale infatti trova la sua definizione nell'utilizzo dei fenomeni fisici per

generare tecnologie in grado di promuovere lo sviluppo culturale, sociale, economico e tecnico della Società, rappresentando in tal modo uno dei motori dello sviluppo dell'Umanità.

In ambito aerospaziale l'energia nucleare è stata utilizzata come efficiente e in taluni casi unica fonte possibile di energia elettrica che permettesse il funzionamento di tutti gli apparati di bordo di una sonda spaziale. Ciò è vero in particolare per le sonde interplanetarie inviate ad esplorare la parte esterna del sistema solare, caso nel qua-



le alla sorgente di energia nucleare non c'è alternativa poiché già alla distanza di Giove il flusso di energia solare è 25 volte meno intenso che in prossimità della Terra, il che rende impossibile l'uso dei pannelli fotovoltaici, comunemente utilizzati per i satelliti in orbita terrestre.

Tuttavia, anche per questi ultimi, nel caso abbiano bisogno di consumare in modo continuativo quantità di energia superiori a 1 kWe, come avviene spesso per dispositivi militari, è indispensabile ricorrere all'energia nucleare. Pertanto, l'ingegneria nu-

cleare si pone come tecnologia abilitante allo sviluppo della tecnologia aerospaziale.

Sintesi storica

L'utilizzo della radioattività in ambito aerospaziale è stato sempre rivolto all'utilizzo dell'energia ottenibile dalla medesima radioattività, naturale o indotta. Le applicazioni della radioattività in tale ambito rientrano, quindi, nell'alveo più grande della produzione e utilizzo di energia da fonte nucleare.

Definito pertanto che gli utilizzi di cui si discute sono di tipo energetico è possibile effettuare una breve sintesi storica di tali utilizzi, che, tra l'altro, porta in modo del tutto naturale ad una loro schematizzazione, così come questi sono andati evolvendosi nel tempo.

Partendo proprio da tale schematizzazione, si osserva come le applicazioni sono tutte riconducibili ai seguenti ambiti:

- a) produzione di energia elettrica da radioattività naturale;
- b) produzione di energia elettrica da radioattività indotta;
- c) produzione di energia meccanica.

Produzione di energia elettrica da radioattività naturale

Questa avviene mediante i generatori termoelettrici a radioisotopi (RTG) il quale è un generatore di energia basato sulla conversione termoelettrica del calore prodotto dal decadimento di alcuni isotopi radioattivi.

Il 29 giugno 1961 la Marina Americana mandò in orbita il primo satellite alimentato da RTG. Il primo satellite civile con alimentazione nucleare fu invece il Nimbus 3 della

NASA, sempre con un RTG.

Produzione di energia elettrica da radioattività indotta

In questo caso la radioattività indotta è costituita dai neutroni generati dai frammenti di fissione prodotti in una reazione nucleare a catena di un sistema critico (reattore nucleare). La radioattività naturale di elementi quali l'Uranio o il Plutonio è pertanto convertita mediante sistemi normalmente supercritici ($K_{eff} > 1$), resi critici ($K_{eff} = 1$) mediante assorbitori neutronici, nella radioattività indotta dai frammenti di fissione, i quali sono frenati nel moderatore generando energia termica convertita in energia elettrica utilizzata per alimentare la strumentazione di bordo. In taluni casi l'energia elettrica prodotta è stata a sua volta convertita in energia meccanica per consentire piccoli movimenti del veicolo spaziale.

Il primo reattore nucleare, (SNAP), da 500 W, fu posto in orbita, (1.400 km), dagli USA il 3 aprile 1965, mentre l'URSS mise in orbita i reattori della serie Topaz a partire dal 1987.

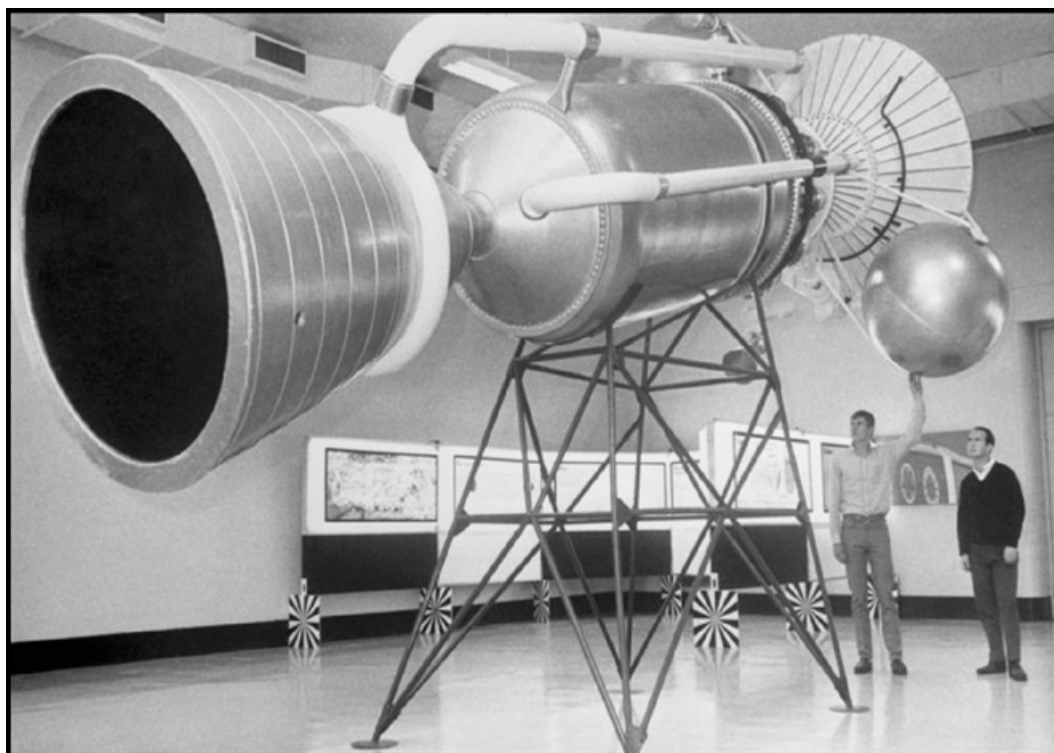


Figura 1
Un prototipo di un motore nucleare a grandezza naturale per applicazione di veicoli a razzo (progetto NERVA, 1967).

Nel maggio 2018 la NASA e il Los Alamos National Laboratory hanno annunciato i risultati positivi dei test effettuati sul reattore Kilopower, piccolo reattore nucleare portatile, in grado di offrire una potenza variabile tra 1 kW e 10 kW, al fine di fornire energia in maniera stabile e continuativa in applicazioni aerospaziali. Il dispositivo è pensato per essere facilmente trasportabile e si stima che 4-5 unità siano sufficienti ad alimentare anche un piccolo insediamento.

Produzione di energia meccanica (propulsione nucleare)

In caso di applicazioni aeronautiche e aerospaziali la riduzione di masse e ingombri relativi agli impianti e alle riserve di propellente che è necessario trasportare a bordo, risulta essenziale, per cui le reazioni nucleari che liberano un'energia milioni di volte superiore a quella chimica, si presentano come la migliore soluzione sia per la produzione di potenza a bordo (una delle soluzioni allo studio prevede reattori a gas ad alta temperatura e accoppiamento a un impianto di turbina a gas in ciclo chiuso) sia nella propulsione missilistica e ancora di più in quella astronautica.

La ricerca statunitense sulla propulsione nucleare iniziò con il progetto Rover cui seguì il progetto NERVA (Nuclear Engine for Rocket Vehicle Application) con reattore ad alta temperatura (2.000 °C).

Nella corsa per sbarcare uomini su Marte, la NASA starebbe riconsiderando i progetti sviluppati negli anni '70 per astronavi a propulsione nucleare che ridurrebbe il tempo di viaggio verso il Pianeta Rosso a poco più di tre mesi e permetterebbe di risolvere il problema della propulsione per il viaggio di ritorno.

Nel 2019 la NASA ha collaborato con BWXT Nuclear Energy Inc. per un contratto da 18,8 milioni di dollari per progettare un reattore e sviluppare combustibile da utilizzare in un motore a propulsione nucleare-termica per i viaggi nello spazio profondo. Il contratto con BWXT Nuclear Energy Inc segna il ritorno degli Stati Uniti a un'idea tuttora perseguita anche da Russia e Cina:

la russa Rosatom Corp. che finora ha guidato la ricerca sul campo, ha annunciato che nel 2020 prevede di testare un prototipo di motore nucleare per un veicolo spaziale in grado di arrivare su Marte, la Cina intende utilizzare navette a propulsione atomica come parte dei suoi piani di esplorazione spaziale fino al 2045.

Nel piano di esplorazione umana della NASA per Marte, sviluppato nel 2009, la propulsione termica nucleare è l'opzione preferita anche perché un tale sistema nucleare fornirebbe la flessibilità di abortire e rientrare sulla Terra anche nel corso della missione, sarebbe possibile riavviare quel motore più volte e sono allo studio progetti di reattore che limitano la quantità di combustibile nucleare necessaria per la propulsione.

Riepilogo e classificazione dell'utilizzo in base alla potenza

Per le applicazioni spaziali si possono individuare differenti livelli di potenza, richiesti in base alle tipologie di impiego e alle missioni. Livelli di potenza tra i 100 e i 500 W sono richiesti per piccoli satelliti; la presenza umana nello spazio e satelliti più grandi richiedono invece tra i 10 e i 40 kWe; ben più elevata la richiesta per basi sulla Luna o su Marte: tra 1 e 2 MWe.

Per potenze elettriche sotto i 10 kWe si utilizzano celle a combustibile, pannelli fotovoltaici e generatori a radioisotopi in base al tipo e durata di missione. Per le sonde interplanetarie che sono inviate ad esplorare la parte esterna del sistema solare si impiegano essenzialmente sorgenti di energia nucleare a radioisotopi; già alla distanza di Giove il flusso di energia solare è 25 volte meno intenso che vicino alla Terra, rendendo i pannelli fotovoltaici inutilizzabili. I satelliti terrestri, invece, impiegano normalmente energia solare raccolta da opportuni pannelli che la convertono in energia elettrica con un'efficienza intorno al 10 per cento. In passato, alcune tipologie di satelliti terrestri che richiedevano in modo continuo forti quantità di energia hanno comunque impiegato sistemi nucleari.

Per applicazioni spaziali che richiedono

potenze oltre i 10 kWe e tempi di utilizzo oltre il mese, l'utilizzo di un reattore nucleare è l'unico modo per generare elettricità.

Il reattore nucleare può essere utilizzato, come sopra brevemente descritto, anche per produrre calore e per alimentare sistemi propulsivi a ioni. Un reattore nucleare spaziale potrebbe fornire una fonte di elevata potenza, costante, affidabile e di lunga durata. Inoltre, l'assenza di luce solare, ambienti ad elevata radioattività, spazi, pesi e costi possono favorire l'impiego dell'energia nucleare nello spazio.

Tecnologie adottate e proposte

a) RTG

Un generatore Termoelettrico a Radioisotopi (RTG) è composto da due parti: una fonte di calore e un sistema per la conversione del calore in elettricità. La fonte di calore, il modulo *General Purpose Heat Source* (GPHS), contiene un radioisotopo, spesso il plutonio 238, che si riscalda a causa del proprio decadimento radioattivo. Il calore è trasformato in elettricità da un convertitore termoelettrico che sfrutta l'effetto Seebeck: una forza elettromotrice è prodotta dalla diffusione di elettroni attraverso l'unione di due differenti materiali (metalli o semiconduttori) che formano un circuito quando i capi del converti-

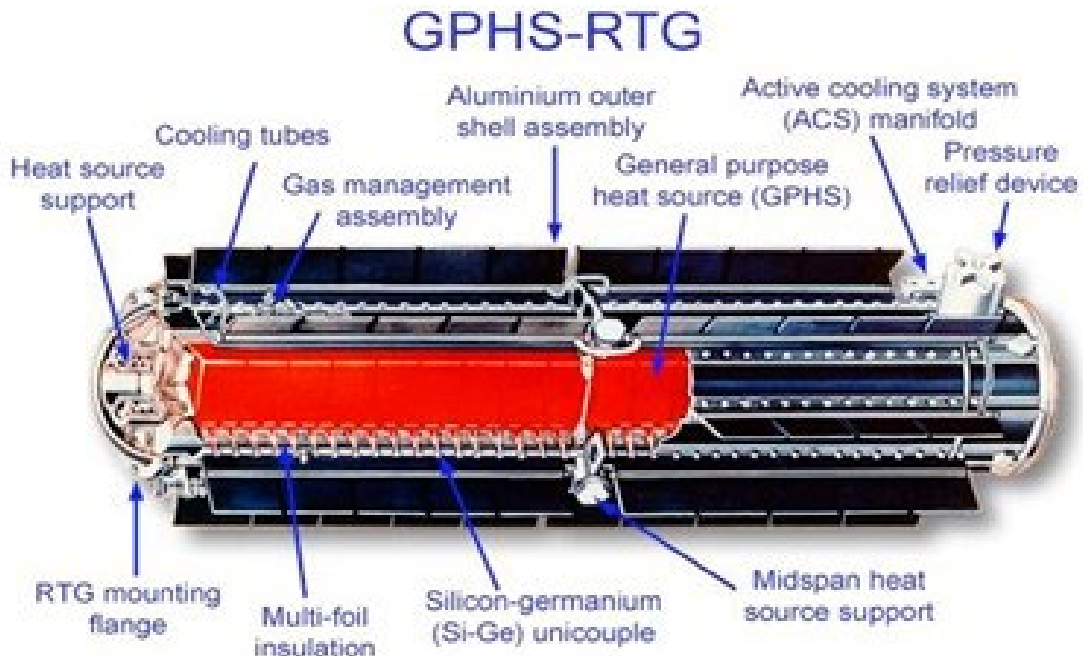
tore si trovano a temperature differenti.

I moduli sono progettati per resistere ad ogni possibile eventualità: esplosione o incendio del veicolo di lancio, rientro in atmosfera seguito da impatto sul terreno o in acqua e situazioni seguenti all'impatto. Uno schermo esterno in grafite provvede alla protezione contro i danni strutturali, termici e corrosivi di un potenziale rientro; inoltre, il combustibile è in forma di diossido di plutonio 238, un materiale ceramico resistente alla rottura.

b) Reattori

I primi reattori veloci prodotti per applicazioni spaziali furono i reattori sviluppati in URSS della serie ROMANSKA, reattori veloci con nocciolo omogeneo ceramico (UC2 con temperatura di fusione di 2475 °C) e combustibile U²³⁵ con massa critica pari a 45 kg; il reattore era in grado di erogare 40 kW t e 1 kWe con una temperatura massima di 2173 K. Tali reattori si evolsero nei reattori RORSAT, utilizzati nel programma militare di sorveglianza oceanica, che si rivelarono però ampiamente insoddisfacenti e furono sostituiti dai reattori della serie TOPAZ-1, di potenza pari a 10 kWt testati con successo nelle missioni Kosmos 1818 (01.02.87) e Kosmos 1867 (10.07.87). Il TOPAZ-1 sarebbe dovuto evolvere nel TOPAZ-II, più potente e sicuro, ma il programma fu annullato nel 1988.

Figura 2
Schema di GPHS-RTG



Tutti i reattori sopra menzionati erano a conversione diretta termoionica, quindi all'interno del nocciolo del reattore erano integrati degli elementi di combustibile nucleare termoionico che consentiva la conversione diretta dell'energia nucleare in energia elettrica grazie alla temperatura particolarmente elevata del nocciolo, che rendeva gli elementi termoionici elettrodi emettitori da cui gli elettroni erano vaporizzati verso un elettrodo collettore più freddo in cui condensavano dopo conduzione attraverso un plasma.

La corrente risultante, tipicamente alcuni Ampere per centimetro quadrato di superficie dell'emettitore, fornisce potenza elettrica ad un carico ad una differenza di potenziale tipicamente di 0.5 – 1 Volt con efficienza termica del 5 – 20% a seconda della temperatura dell'emettitore (1500 – 2000 K) e della modalità di funzionamento. Le proprietà del plasma, normalmente costituito da vapori di Cesio in quanto elemento stabile e facilmente ionizzabile, determinano il trasporto della corrente di elettroni dall'emettitore al collettore.

Le proprietà delle superfici degli elementi di combustibile termoionici determinano il lavoro di estrazione degli elettroni che rappresenta la barriera di potenziale che limita la corrente emessa dalla superficie dell'elettrodo, calcolabile anche come Entalpia di vaporizzazione degli elettroni dalla superficie stessa. Tale lavoro di estrazione genera quindi il potenziale elettrico in corrispondenza della superficie dell'elettrodo emettitore determinando il valore di emissione della corrente di elettroni.

Di recente la NASA ha sviluppato un reattore nucleare per scopi spaziali di nuova concezione destinato a sostituire la tecnologia RTG prevalentemente utilizzata dagli Stati Uniti (missioni Curiosity, i vari Mars lander, le navicelle Voyager e la sonda Cassini verso Saturno) denominato Kilopower (o KRUSTY, Kilopower Reactor Using Stirling Technology). Si tratta di un progetto sperimentale iniziato nell'ottobre del 2015, sotto la guida della NASA e del NNSA (National Nuclear Security Administration) del dipartimento per l'energia. I reattori Kilopower

saranno disponibili in 4 taglie in grado di produrre da 1 a 10 kW di potenza elettrica, in maniera continua per 12-15 anni.

Il reattore è un SMR veloce con raffreddamento passivo a sodio con nocciolo costituito da uranio 235 in lega di molibdeno con nucleo circondato da un riflettore di ossido di berillio che ha anche lo scopo di minimizzare le radiazioni gamma che potrebbero compromettere l'elettronica di bordo.

Il prototipo del reattore KRUSTY da 1 kWe pesa 134 kg e contiene 28 kg di U^{235} . Il Kilopower da 10 kWe dovrebbe avere una massa di 226 kg e contenere 43,7 kg di U^{235} .

Il controllo della reazione nucleare è fornito da una singola asta di carburo di boro. Tubi riempiti con sodio liquido che attraversano il nocciolo trasferiscono il calore del nucleo del reattore a uno o più motori Stirling, che convertono il calore in un movimento rotatorio che aziona un generatore elettrico convenzionale.

È stato costruito un reattore di prova progettato per produrre fino a 1 kW di energia elettrica (l'altezza dell'intero sistema è pari a circa 2 metri). L'obiettivo specifico dell'esperimento è stato quello di simulare i parametri operativi delle missioni nello spazio profondo. I test sono iniziati a novembre 2017 e sono proseguiti nel 2018 condotti presso il sito nazionale di sicurezza del Nevada e includevano la validazione di materiali e componenti termici, test a piena potenza e test di recupero da guasti simulati. Il reattore KRUSTY è stato utilizzato a pieno regime il 20 marzo 2018 durante un test di 28 ore. È stata raggiunta una temperatura di 850 °C, producendo circa 5,5 kWt. Il test ha valutato gli scenari di guasto incluso lo spegnimento dei motori Stirling, la mancata regolazione dell'asta di controllo, anomalie del ciclo termico e la perdita del sistema di rimozione del calore. Un test SCRAM ha completato l'esperimento che è stato considerato concluso con successo.

La compattezza e la modularità del reattore lo rendono estremamente versatile e potenzialmente in grado di coprire un ampio spettro di utilizzi, oltre quello dedicato all'alimentazione elettrica di sonde spaziali.



Figura 3

Le applicazioni sulla Terra di un impianto nucleare costituito da più unità Kilowatt potrebbero comprendere il sostenere le attività di un remoto avamposto militare o scientifico come per esempio nell'Artico o in Antartide e nell'appoggiare missioni di salvataggio in località colpite da disastri ambientali dove l'allaccio alla corrente elettrica è reso impossibile.

Nello spazio un analogo impianto nucleare costituirebbe l'unica possibilità in grado di produrre sufficienti quantità di energia in modo costante sulla Luna o su Marte. Il sistema progettato per la prevista base lunare dovrebbe generare almeno 40 kW di energia elettrica.

c) Propulsione nucleare

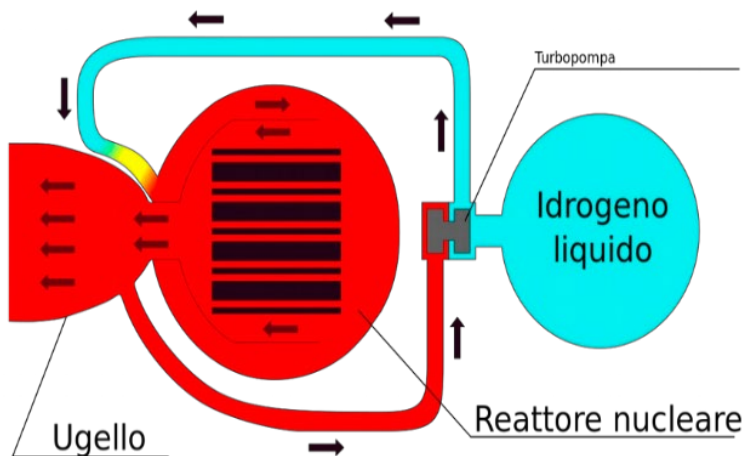
I sistemi a propulsione nucleare possono essere di tipo termico o elettrico.

I sistemi di tipo elettrico prevedono motori a plasma, in cui un ciclo di conversione di energia nucleare in energia elettrica (tradizionale o diretto) genera la potenza impiegata per ottenere un plasma ad alta energia che viene accelerato producendo la spinta propulsiva. I sistemi di tipo diretto sono evidentemente una derivazione dei sistemi, di taglia inferiore, concepiti per alimentare la strumentazione di bordo di cui al § b) precedente.

Nei sistemi a propulsione nucleare termica, il propellente/refrigerante preventivamente compresso (aria in caso di missili atmosferici), viene riscaldato direttamente in un reattore nucleare (che sostituisce la camera di combustione di un razzo chimico) e quindi espulso dopo essersi espanso in un ugello, fornendo la spinta propulsiva.

A tale categoria sono ancora riconducibili i

Figura 4 reattori del progetto NERVA, il cui modello



più avanzato prevede un reattore termico il cui combustibile è costituito da carburo di Uranio e Zirconio, moderato a grafite e refrigerato a Idrogeno. Gli elementi di combustibile sono di forma esagonale costituiti da una dispersione solida di carburi in grafite, forati longitudinalmente da canali cilindrici per il passaggio del refrigerante. Gli elementi e i canali sono rivestiti di Carburo di Zirconio per prevenire gli effetti corrosivi dell'H.

Il nocciolo attraverso il quale fluisce il refrigerante è sottoposto a condizioni termiche estremamente critiche: all'estremità di ingresso del refrigerante si trova alla temperatura criogenica alla quale è conservato l'Idrogeno nel serbatoio, all'estremità di uscita supera i 2800 K, con una temperatura massima del combustibile nucleare pari a 2880 K.

L'Idrogeno ad alta Entalpia in uscita dal nocciolo espande in un ugello fornendo la spinta motrice.

Il sistema di controllo è costituito da cavi flessibili contenenti carburo di boro che si inseriscono nei canali di refrigerazione. Incidenti credibili sono considerati l'allagamento del nocciolo con idrogeno liquido o acqua e compattazione del nocciolo in seguito a caduta o esplosione. Il reattore è schermato per ridurre l'effetto delle radiazioni sui componenti esterni del motore.

Il rinnovato interesse, a partire dalla fine degli anni '90, per questa tecnologia ha ancora riguardato, per la maggior parte, i reattori di tipo termico, e tra questi i può ricordare il "Progetto 242", proposto dal Prof. Rubbia nel 1998 e studiato dall'Agenzia Spaziale Italiana fino al 2001.

Tale progetto prevede un reattore termico con combustibile Am242, moderato a Li e refrigerato parzialmente a Li e parzialmente a H che fluendo nel nocciolo acquisisce Entalpia e costituisce il fluido propulsore. Il nocciolo del reattore è costituito da tubazioni di fissioni realizzate in materiale riflettore ai neutroni, tipicamente del diametro dell'ordine di 40 cm e di lunghezza di 2,5 m per una potenza termica di circa 6 MW ciascuna, sulle quali è depositato internamente un film sottile critico di materiale fissile dello spessore di alcuni micron, in

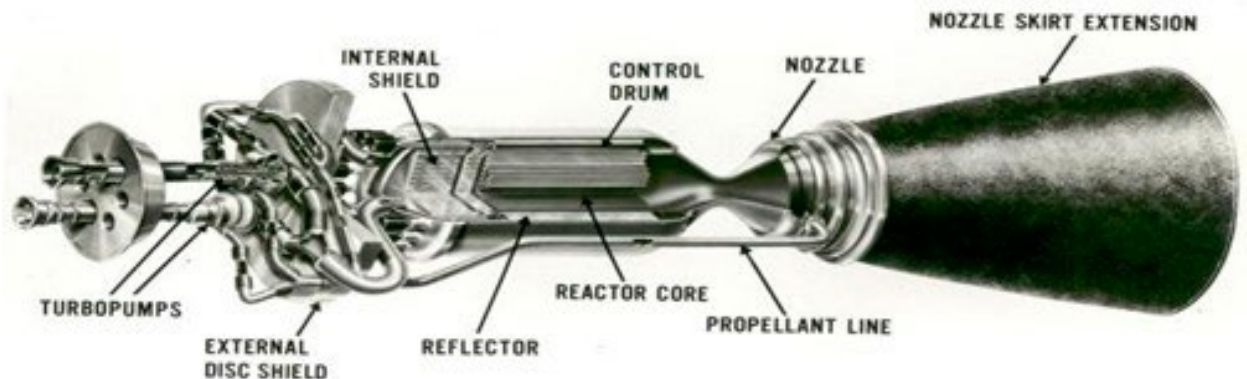
modo che i frammenti di fissione sfuggano dissipando la loro energia nel propellente, Idrogeno, che attraversa le tubazioni alla pressione di circa 6 bar prima di essere accelerato negli ugelli di propulsione, ottenendo in uscita dal nocciolo temperature dell'ordine di 9.000 °C. Le tubazioni sono immerse in un bagno di litio liquido circolante che alimenta termicamente schermi di dissipazione del calore nello spazio. Il progetto del reattore prevede un sistema controllo della reattività a barre ed è circondato da un mantello riflettore.

La scelta di utilizzare Am^{242} quale combustibili è data dalla geometria del nocciolo che prevede l'utilizzo di piccole quantità di fissile disposte in strati di pochi micron, il che comporta, al fine di realizzare un sistema critico, la necessità di adottare un elemento con altissima sezione d'urto ai neutroni termici, che per l' Am^{242} risulta essere pari a 5800 barns; lo spettro dei neutroni di fissione presenta inoltre una frazione di neutroni ritardati superiore al 3 % il che rende lo spettro "morbido" con buone caratteristiche di controllo del Keff.

Un problema legato a tale concezione è dato dalla natura del combustibile in quan-

to l'Americio è un elemento transuranico metallico radioattivo sintetico della famiglia degli attinidi, ottenuto bombardando il plutonio con neutroni. Non esiste pertanto in natura ma viene prodotto per irraggiamento nei reattori nucleari di potenza o in impianti dedicati per lo più nella forma isotopica Am^{241} . Se si vuole disporre di quantità significative dell'isotopo 242, dunque, occorre sottoporre a ulteriore irraggiamento il 241 al quale seguirà una separazione isotopica. Il processo di produzione dell'isotopo Am^{242} è quindi complesso e costoso e infatti il suo costo è particolarmente alto. Considerate comunque le caratteristiche particolarmente interessanti di tale concetto di reattori, anche per usi non astronautici, sono allo studio processi industriali che consentano la produzione dell'isotopo 242 dell'Americio mediante una tecnologia che lo renda disponibile a costi più contenuti. Si possono, infine, citare gli studi concettuali relativi a sistemi propulsivi che impiegano reattori nucleari a fusione in cui lo stesso plasma che costituisce il combustibile del reattore è utilizzato quale propellente, nonché l'utilizzo della propulsione nucleare in campo aeronautico.

Figura 5



Bibliografia e sitografia

- M. Cumo, impianti nucleari, ed. Utet
- L. Sani, centrali elettronucleari, ed. Sistema
- M. Pelliccioni, Fondamenti fisici della radioprotezione, ed. Pitagora
 - www.nasa.gov
 - www.esa.int
 - www.asi.it
 - [It.qwe.wiki/wiki/](http://it.qwe.wiki/wiki/)
 - aerospacecue.it



a cura di
Dott. Giovanni
Cucinella



**L'EFFETTO DELLE
RADIAZIONI SPAZIALI
SU COMPONENTI EEE
(ELETTRONICI,
ELETTROMECCANICI,
ELETTRICI)**

L'effetto delle radiazioni spaziali (ionizzanti e non ionizzanti) è uno dei principali fattori che influenzano l'affidabilità delle apparecchiature e dei sistemi che operano nello spazio. Tuttavia, vi è anche un crescente interesse per questo in altri campi tecnologici come l'avionica, la fisica delle alte energie, l'industria automobilistica, l'industria nucleare, etc.

Le radiazioni degradano i componenti EEE e generano perturbazioni del dispositivo che potrebbero causare malfunzionamenti o distruzione. Questi effetti dipendono fortemente dal tipo di radiazione: radiazione gamma, ioni pesanti, protoni, etc., Ma anche dalla tecnologia del dispositivo, dal lotto di produzione e dalle condizioni di lavoro.

I sistemi elettronici spaziali possono avere requisiti molto variabili in termini di disponibilità operativa e affidabilità per la garanzia della resistenza alle radiazioni (Radiation Hardening).

L'intero processo di garanzia della resistenza alle radiazioni è iterativo; inizia prima con stime di alto livello dell'ambiente di radiazione, vengono calcolati i livelli di radiazione a livello di componente e infine i progetti elettronici vengono analizzati al fine di valutare l'effetto su parti critiche o sensibili.

Le tre principali fonti di radiazione che devono essere considerate sono:

- gli elettroni e i protoni intrappolati nelle cinture di radiazione della Terra;
- i protoni e gli ioni pesanti prodotti da Solar Particle Events (SPE);
- i protoni dei Galactic Cosmic Rays (GCR) e gli ioni pesanti.

In Low Earth Orbit (LEO), quindi bene all'interno della magnetosfera, spesso in Orbite Polari con durata normalmente 2-5 anni, le dosi cumulate sono piuttosto basse - 1-5 krad/anno e dovute principalmente ai protoni nelle fasce di Van-Allen interne (Anomalia Sud-atlantica).

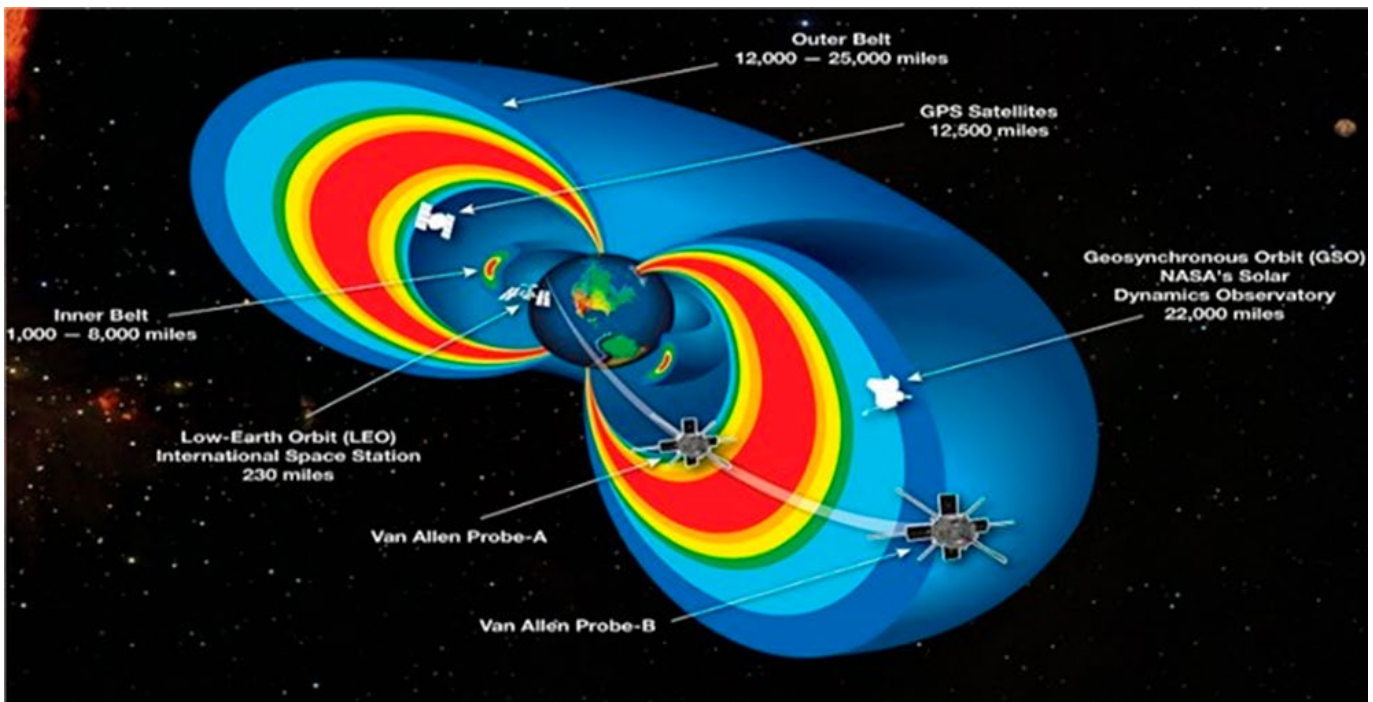
Gli effetti dei GCR nelle zone polari non sono trascurabili e, nella storia recente, molti i guasti in volo sono stati generati dai SEE (Single Event Effect).

Al contrario, i satelliti per telecomunicazioni sono geostazionari e costruiti per un funzionamento continuo di oltre 15 anni. L'orbita geostazionaria attraversa le fasce di radiazione esterne e la dose accumulata è nell'ordine di 5-10 krad/anno. Le radiazioni prevalenti sono elettroni (e il loro Bremsstrahlung dovuto alla schermatura locale di componenti sensibili).

In orbita Gioviniana, la dose accumulata si prevede che sia centinaia di krad/anno, ma con grande incertezza dovuta a un ambiente meno noto.

L'evoluzione della tecnologia elettronica sta

Figura 1



aprendo un'incredibile quantità di possibilità per avionica dei veicoli spaziali, con riduzioni di massa e potenza e aumentano la funzionalità e le prestazioni di elaborazione:

- implementazione di architetture di processori ad alte prestazioni
- integrazione di diverse funzionalità, fino ad ora implementate su più schede, in un singolo chip (SoC – System on Chip)
- introduzione di bus di sensori digitali.

Inoltre, i programmi futuri per Science, Exploration, Earth Observation, Telecom e Launcher hanno originato requisiti elevati e impegnativi per la prossima generazione di computer di bordo (OBC) e gestione dei dati: aumento della potenza di elaborazione, riduzione di budget di massa, volume e potenza con notevoli riduzioni delle geometrie dei componenti e conseguente maggiore sensibilità alle radiazioni.

Diventa, pertanto, fondamentale conoscere il comportamento dei dispositivi utilizzati

nelle missioni spaziali.

Gli effetti delle radiazioni possono essere suddivisi in due parti:

- 1) effetti di ionizzazione;
- 2) effetti di dislocazione atomica.

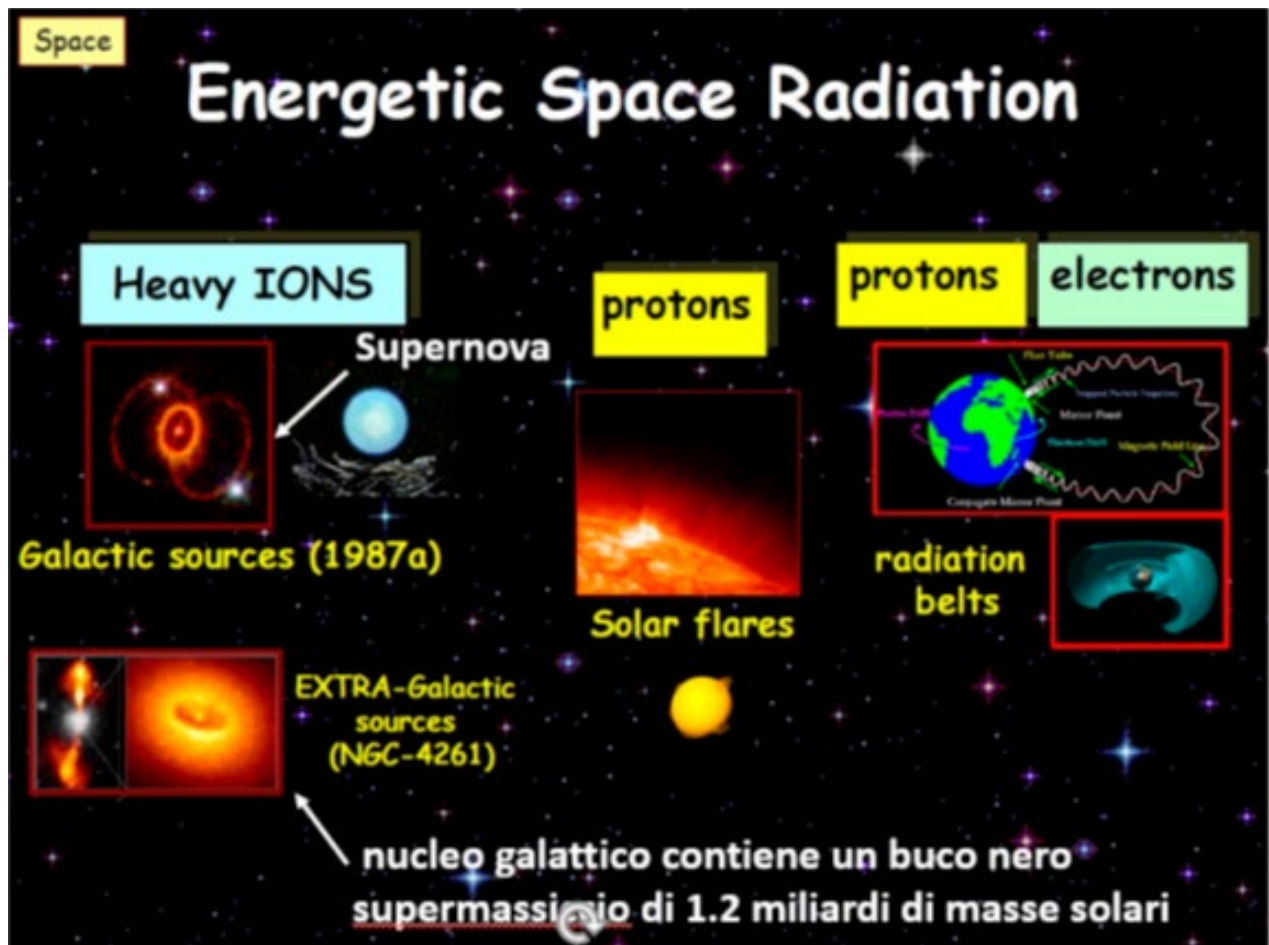
I componenti elettronici, a causa del sottile strato sensibile (poco profondo), tendono ad essere più sensibili alla ionizzazione e all'associato accumulo di carica nel materiale.

Rivelatori e sensori sono sensibili a entrambi gli effetti, con il deterioramento più importante delle caratteristiche spesso derivante dal danneggiamento del reticolo cristallino (Displacement).

Possiamo distinguere inoltre:

- Effetti cumulativi (dose totale)
- Effetti che cambiano con continuità (gradualmente) con l'aumento dell'esposizione alle radiazioni.
- Single Event Effect
- Effetti che si verificano all'improvviso, non prevedibili da evento a evento (stocastici).

Figura 2



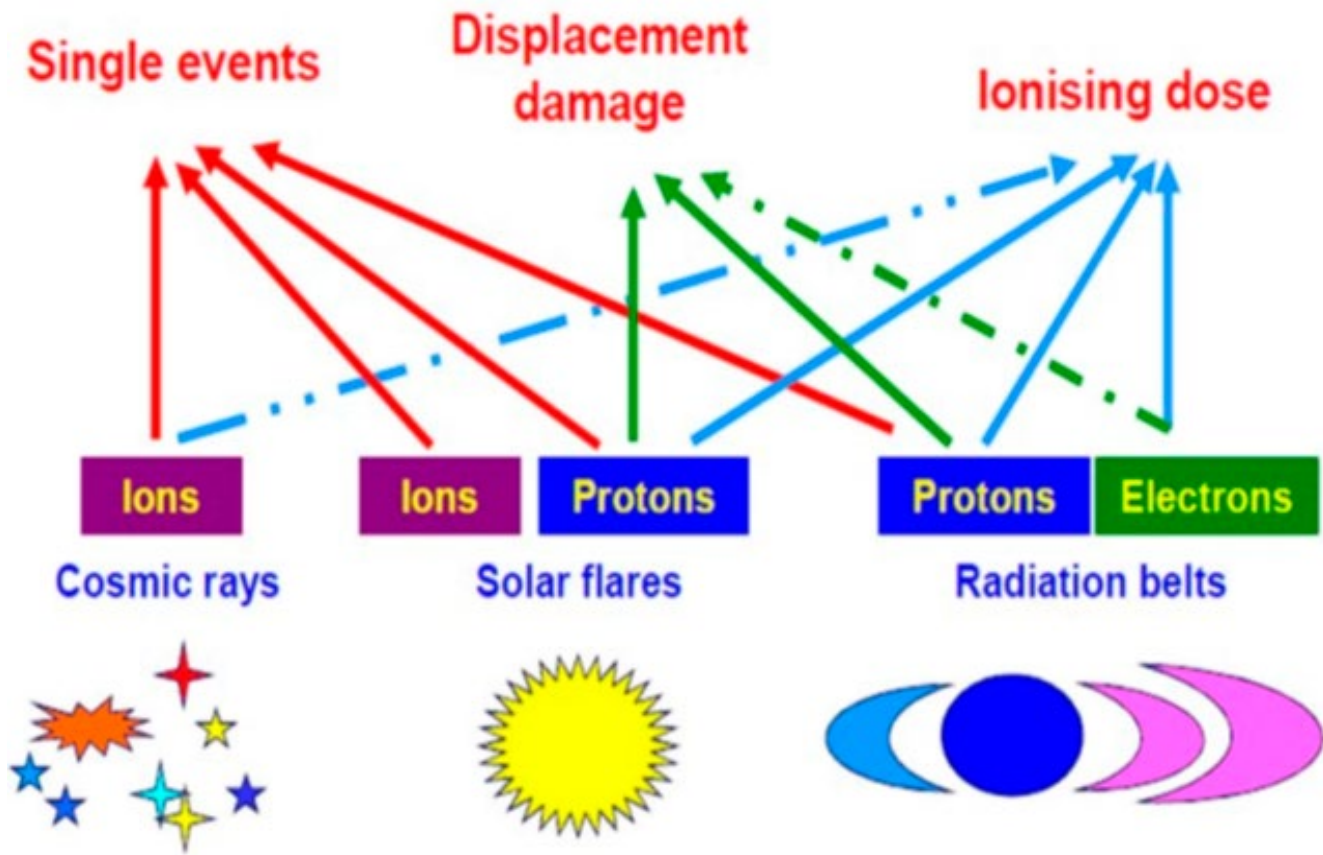


Figura 3

La quantificazione degli effetti da radiazione è definita da:

- Dose Ionizzante assorbita (rads, o gray; 1 gray=100 rads);
- Spettro dell'energia trasferita dagli ioni nel componente (LET);
- Spettro dell'energia dei protoni (MeV);
- Dose Non Ionizzante trasferita nel componente (NIEL, Non Ionizing Energy Loss).

Gli effetti possono essere accumulati nella vita o transistori.

La dose ionizzante accumulata è rappresentata dalla Dose Depth Curve. Essa fornisce la dose totale in funzione dello spessore dello schermo normalmente rapportato alla densità dell'alluminio.

Buona parte delle radiazioni presenti nell'ambiente spaziale viene assorbita dagli schermi interposti tra lo spazio ed i componenti.

Pertanto, per valutare l'effettiva dose di radiazioni che incide sui componenti occorre esaminare gli effetti dello schermo.

Tutte le masse che circondano il componente possono essere una protezione.

Lo schermo ha un'efficacia che dipende dalla densità del materiale che lo costituisce, tanto più il materiale è denso, tanto più lo schermo è efficiente.

L'interazione degli ioni e/o dei protoni energetici con i componenti sensibili può causare diversi tipi di fenomeni. I principali sono:
SEU= Disturbo che impatta una cella logica, la risposta può essere un soft error, cioè un cambiamento di un bit ⇒**effetto transitorio non distruttivo**

SEL= fenomeno che avviene nei componenti CMOS BULK o EPI (correnti elevate al di sopra della tolleranza del dispositivo) ⇒**effetto distruttivo**

SEB= fenomeno che avviene nei transistori Power MOSFET a canale N. Il transistor bipolare parassita NPN viene acceso inducendo un cortocircuito tra drain e source ⇒**effetto distruttivo**

SEGR= fenomeno che avviene nei transistori Power MOSFET quando $V_{GS} < 0 V$ per quelli a canale N e $V_{GS} > 0 V$ per quelli a canale P in condizione OFF. ⇒**effetto distruttivo**

SET= fenomeno che avviene nei circuiti integrati bipolari lineari \Rightarrow **effetto transitorio non distruttivo**

Per simulare l'effetto delle radiazioni spaziali (ionizzanti e non ionizzanti) sui componenti EEE si utilizzano varie tipologie di particelle che consentono l'effettuazione di prove accelerate da comparare con la vita prevista in orbita.

- Fotoni Elettroni a Bassa Energia, per simulare effetti di Ionizzazione che può causare Effetti cumulativi (dose totale)
- Protoni a bassa energia e Neutroni, per simulare effetti di Displacement
- Elettroni/Protoni ad alta energia e Ioni per simulare Single Event Effect

Le prove di Radiazione debbono essere svolte seguendo normative internazionali riconosciute:

- ESCC Basic Specification No. 22900 - TOTAL DOSE STEADY-STATE IRRADIATION TEST METHOD
- MIL-STD-883F - METHOD 1019.6 - IONIZING RADIATION (TOTAL DOSE)

TEST PROCEDURE

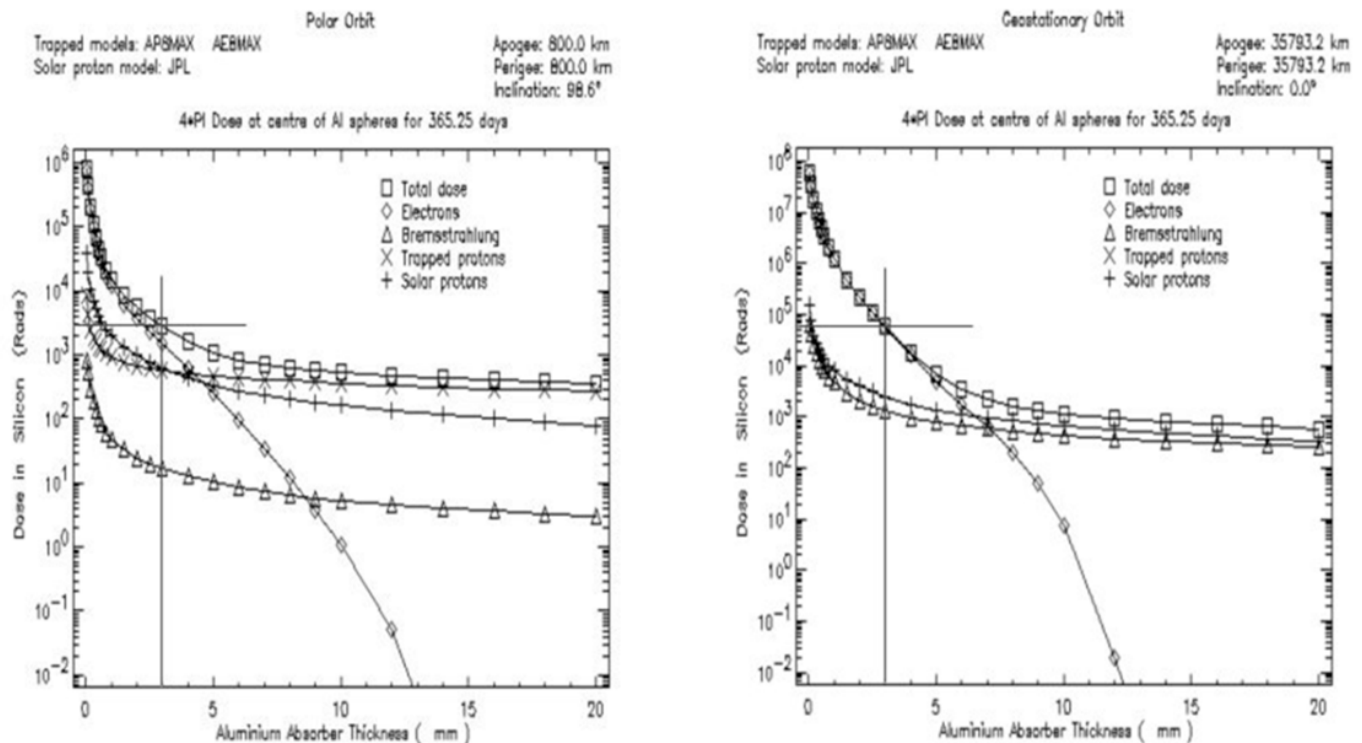
- ESCC Basic Specification No. 25100 - SINGLE EVENT EFFECTS TEST METHOD AND GUIDELINES
- ESCC Basic Specification No. 22500 -
- MIL-STD-883F - METHOD 1017.2 - NEUTRON IRRADIATION

CONCLUSIONE

I sistemi elettronici spaziali possono avere requisiti molto variabili in termini di disponibilità operativa e affidabilità per la garanzia della resistenza alle radiazioni (Radiation Hardening).

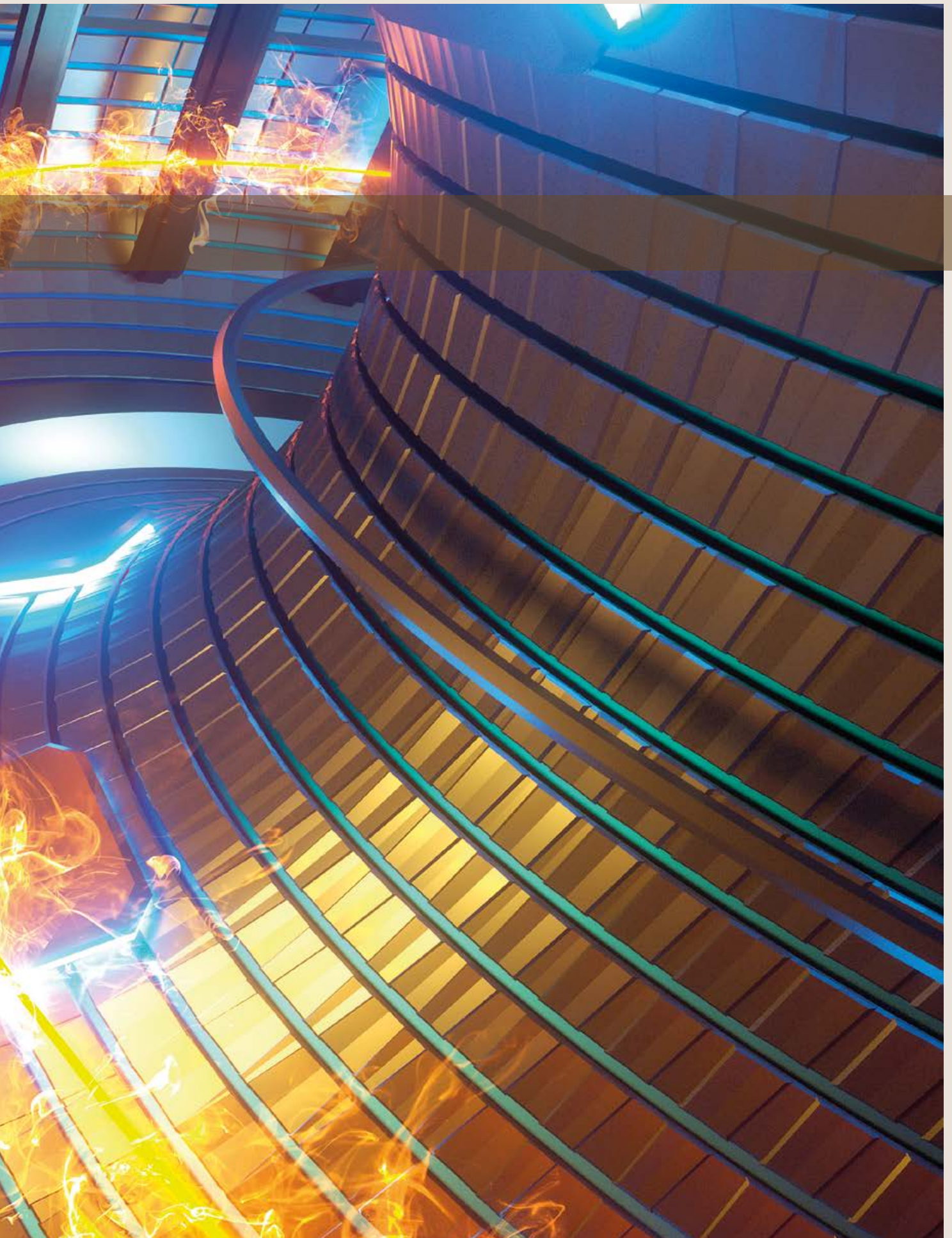
L'intero processo di garanzia della resistenza alle radiazioni è iterativo; inizia prima con stime di alto livello dell'ambiente di radiazione, vengono calcolati i livelli di radiazione a livello di componente e infine i progetti elettronici vengono analizzati al fine di valutare l'effetto su parti critiche o sensibili e definire le azioni correttive necessarie.

Figura 4



SOCIALE









LA DISSALAZIONE E LA CLIMATIZZAZIONE CON ENERGIA NUCLEARE, UN CONTRIBUTO DELLA RICERCA ALLA CRESCITA NEI PAESI POVERI

*Tecnologie nucleari per il benessere della società:
applicazioni per la dissalazione dell'acqua,
la climatizzazione, la produzione.
Cenni ai reattori integrati e modulari
di piccola taglia (SMR)*

a cura di
Ing. Massimo Sepielli
Prof. Ing. Agostino Mathis

Abstract

In questo articolo viene effettuata una panoramica sulle applicazioni dell'energia nucleare non finalizzata alla produzione elettrica. Dalla dissalazione, alla climatizzazione (in teleriscaldamento), alla produzione di idrogeno ed altro. Verrà fornito un quadro delle tecnologie innovative più promettenti per questi usi cogenerativi, in particolare i reattori SMR, piccoli e modulari, ad alta sicurezza intrinseca.

La scienza e la tecnologia nucleare mettono a disposizione dell'umanità una fonte energetica di grande intensità e totalmente decarbonizzata che può essere trasformata in elettricità, ma anche in potenza termica disponibile per applicazioni con forte impatto sociale, sia per i Paesi avanzati, sia per i Paesi in via di sviluppo. Infatti, il nucleare pacifico per usi civili è, come diceva Felice Ippolito, una energia democratica che arriva a tutti.

Figura 1a: Processi di dissalazione e distillazione multi-effetto

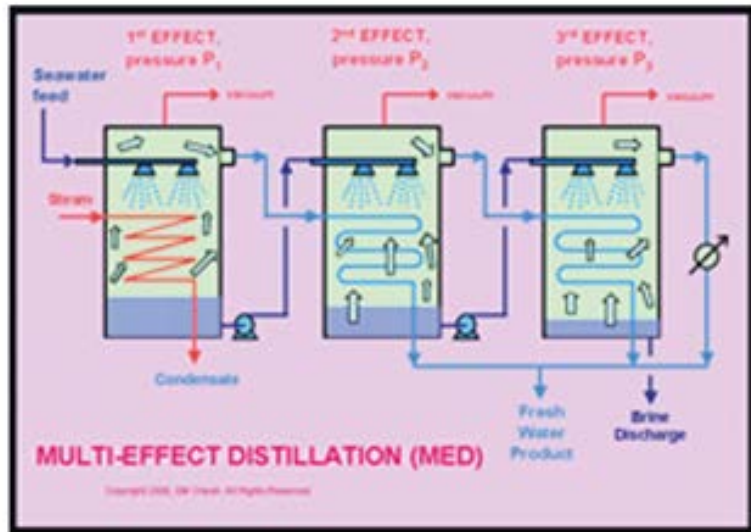
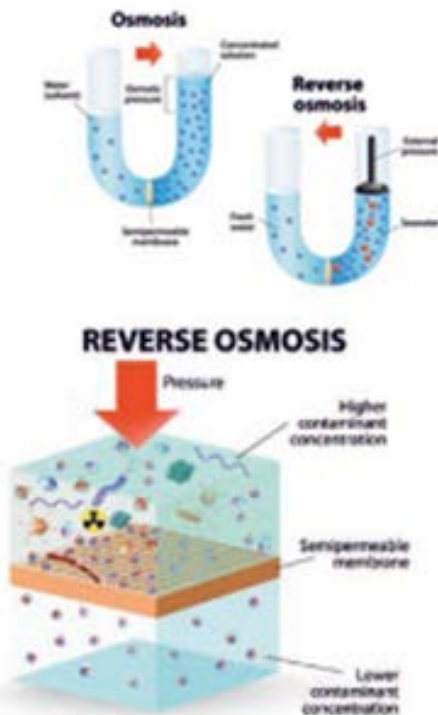
I reattori nucleari di piccola e media dimensione sono particolarmente adatti ad essere utilizzati per applicazioni non elettriche come la climatizzazione dei centri abitati (teleriscaldamento

invernale e raffreddamento estivo), come pure permettere la dissalazione dell'acqua marina con produzione di acqua dolce, laddove la disponibilità di acqua potabile rappresenta un problema grave ed atavico.

Il processo di dissalazione o *desalination* (fig.1a) permette di produrre acqua dolce a partire da acqua salata salmastra o marina attraverso l'apporto di potenza termica generata dal reattore in forma di vapore a media entalpia, per il processo di evaporazione o distillazione, solitamente multi-effetto; ovvero potenza elettromeccanica per fornire la pressione necessaria al processo di osmosi inversa che permette alle molecole dell'acqua del soluto (a maggiore pressione osmotica e concentrazione salina) di penetrare nella soluzione a minore concentrazione, normalmente con processo a multi-stadi, lasciando un residuo molto salino (rigetto).

Sono già diversi gli impianti di dissalazione nel mondo alimentati da reattori nucleari (Fig.1b), come pure gli impianti cogenerativi che insieme all'elettricità forniscono calore per uso industriale e abitativo. Quest'ultimo si serve di reti di teleriscaldamento (*district heating*), utilizzabili anche per il raffreddamento estivo con macchine ad assorbimento (*chillers*), alimentate dal vapore prodotto nel reattore nucleare attraverso un sistema di pompe e scambiatori di calore, e distribuito in rete fino alle singole utenze abitative (Fig. 1b).

Distillazione e Osmosi inversa



Osmosi inversa:
Distillazione:

Pressione meccanica 4 KWh / m3
Calore > 100 KWh / m3

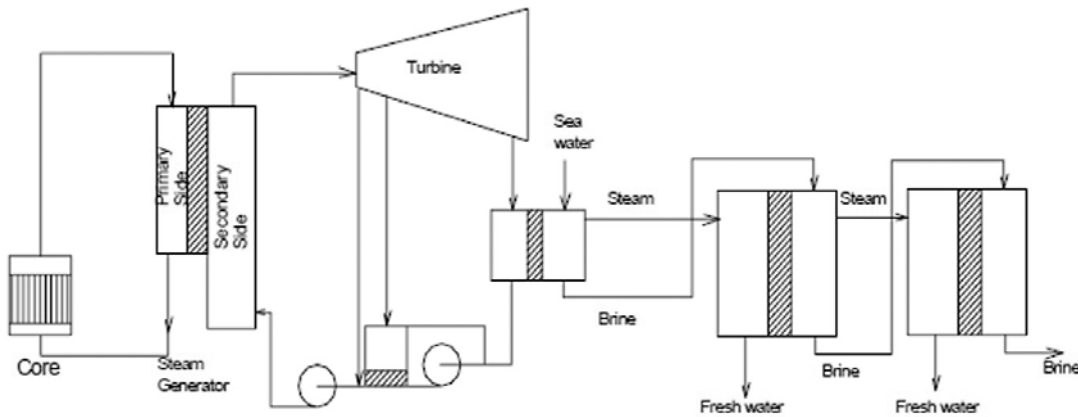


Figura 1b: Dissalazione e distillazione multi-effetto con reattore nucleare

Di seguito sono descritti in modo generale i processi della dissalazione, teleriscaldamento/climatizzazione, ed i reattori nucleari SMR (Small Modular Reactors) di taglia medio-piccola, modulari, economici e sicuri, di facile conduzione e gestione, che si presentano particolarmente adatti a queste applicazioni "sociali", e si integrano bene nelle reti energetiche già esistenti, fornendo alte prestazioni e conferendo stabilità alle reti stesse, una tematica già affrontata in un precedente Quaderno dell'Ordine dedicato

all'energia nucleare (Fig.2).

È da rilevare come sfortunatamente il nuovo *European Green Deal* dell'Unione Europea, così come il Piano Energia e Clima proposto dall'Italia, sembrano sottostimare la de-carbonizzazione delle componenti energetiche "non elettriche", tuttora nettamente preponderanti nelle attuali economie avanzate. Le rinnovabili elettriche (fotovoltaica, eolica), infatti, producono essenzialmente energia elettrica e in modo non programmabile. Il reattore nucleare invece pro-

Figura 2: Rete energetica integrata sostenibile con reattore nucleare modulare

Rete energetica integrata sostenibile

Commissione Ricerca e Sviluppo Sostenibile
TECNOLOGIE PER IL CLIMA E PER IL TERRITORIO
FORNIRE ENERGIA
PROGETTARE E COSTRUIRE

Studio elaborato, insieme al Gruppo, in collaborazione del Prof. Giancarlo Invernizzi, Università Bicocca, con la collaborazione tecnica ingegneristica del Prof. Ag. Agostino Bellini

Quaderno dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma

Reattore nucleare in cogenerazione

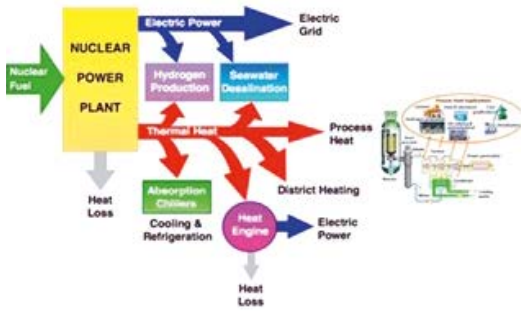


Figura 3: Reattore nucleare in cogenerazione e per teleriscaldamento

Esempi di teleriscaldamento da fonte nucleare



Characteristics of nuclear district heating units of the steam extraction type

Unit type	Number of units in the unit and # of reactors	Quantity of heating capacity of extraction steam (MWth)	Temperature range to heating water (°C)
4-1000-MW	2 + 1000-MW	10 x 2	160/70
4-1000-MW/2	2 + 1000-MW	10 x 2	160/70
4-1000-MW	2 + 1000-MW	10 x 2	160/70
4-1000-MW/2	2 + 1000-MW	10	160/70
4-1000-MW/2	2 + 1000-MW	10	160/70
4-1000-MW/2	2 + 1000-MW	10	160/70

duce all'origine tutta energia termica, utilizzabile poi in quanto tale, o trasformabile in energia elettrica o chimica o anche motrice (nei reattori navali), come illustrato in Fig.3.

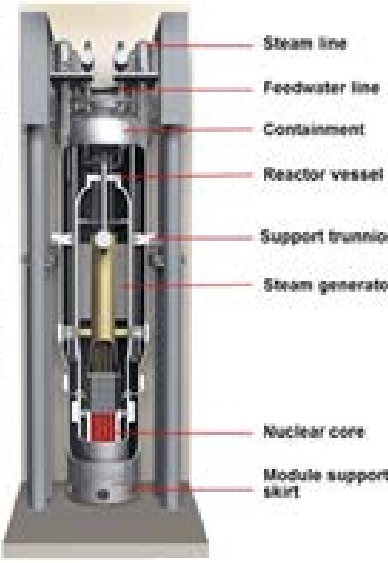
Ad esempio, il teleriscaldamento di vaste aree urbane mediante il sottoprodotto termico di grandi centrali elettronucleari; o sempre più oggi con Small Modular Reactors (SMR) per riscaldamento e calore di processo; gli Advanced Modular Reactors (AMR) per termochimica ad alta temperatura (produzione diretta dell'idroge-

no, etc.); ed infine, very Small Modular Reactors (vSMR), anche trasportabili, per la produzione di calore ed elettricità in aree prive di rete elettrica ed in condizioni climatiche estreme (Fig.4). Per restare in Europa, comunque, in questo settore è all'avanguardia il Regno Unito, che intanto sta costruendo, con la Electricité de France, la nuova, grande centrale di Hinkley Point C, con due reattori EPR da 1650 MWe ciascuno; è poi prevista la costruzione di un'altra centrale gemella, della stessa potenza, a Sizewell C, che

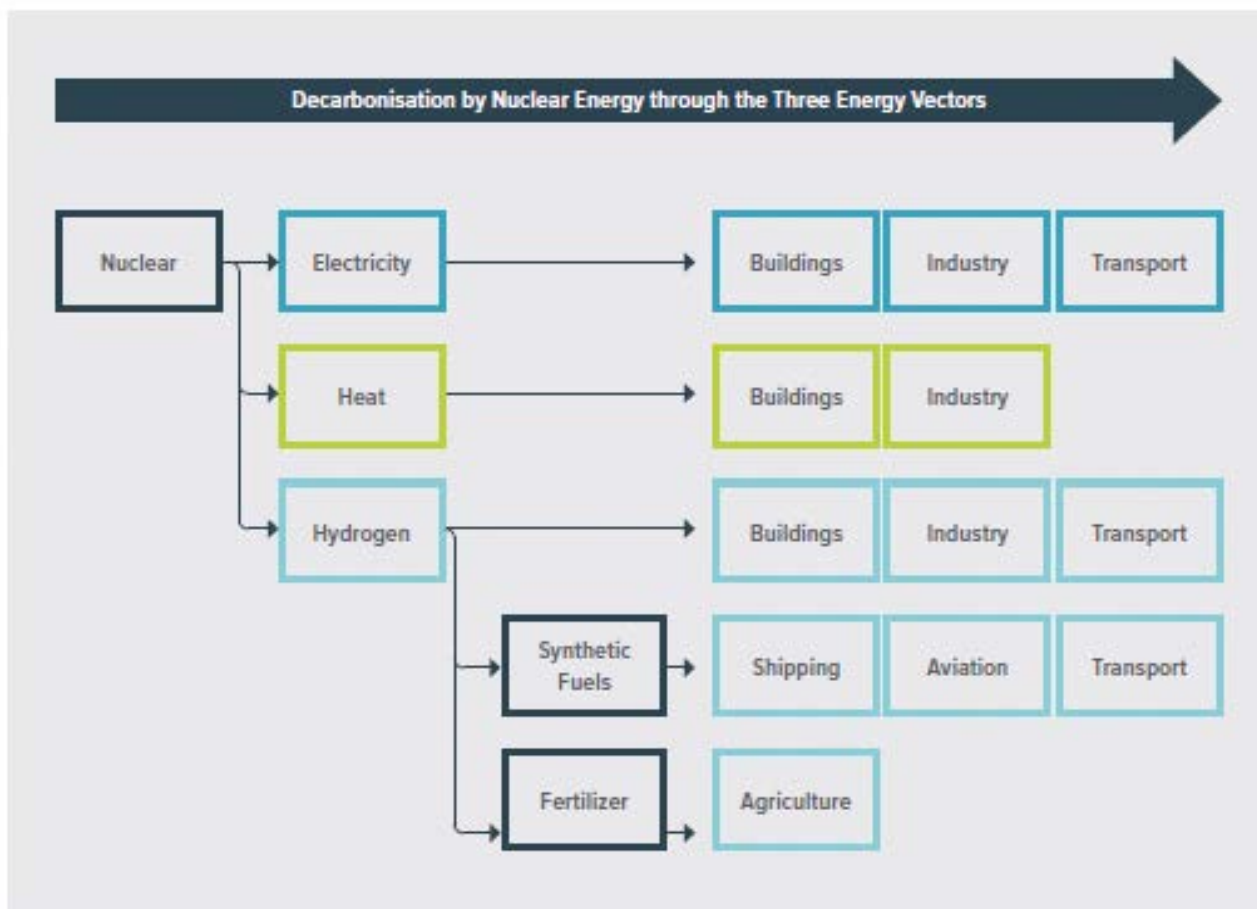
Figura 4: Esempi di nuovi reattori nucleari SMR

LIGHT WATER REACTORS

- CARRAN (CONEL, ARGENTINA)
- CNP-NR (CNPIC, CHINA)
- EBR-II (WESTINGHOUSE INDUSTRIES, USA)
- KAHR (Korea Atomic Energy Research Institute, REPUBLIC OF KOREA)
- AVY-4M (ORION AFBELAYOV, BULGARIAN FEDERATION)
- BISTM-200 (ORION AFBELAYOV, BULGARIAN FEDERATION)
- VE-1M (ROSPEN, BULGARIAN FEDERATION)
- VVER-1M (ORION AFBELAYOV, BULGARIAN FEDERATION)
- VVER-1M (ORION AFBELAYOV, BULGARIAN FEDERATION)
- VVER-1M (ORION AFBELAYOV, BULGARIAN FEDERATION)
- KLT-40S (ORION AFBELAYOV, BULGARIAN FEDERATION)
- UNTERBISM (ROSPEN, BULGARIAN FEDERATION)
- IAEA (IAEA INTERNATIONAL COOPERATION)
- MPOWER (GENERAL ATOMIC, USA)
- NUKOLA (GENERAL ATOMIC, USA)
- WESTINGHOUSE SMR (WESTINGHOUSE, USA)
- FINEP (FLORIANOPOLIS, BRAZIL)
- FLOKLEIT (DCAE, FRANCE)



Potenza termica	160 MWt
Potenza elettrica	45 MWe
Dimensioni del vessel	2,7 (D) x 13,7 (H) m
Pressione del primario	127 bar
Portata di refrigerante	0,6 m³ / s
Pressione del vapore	31 bar
Portata di vapore	70 kg/s
T _{in} acqua di alimento	150 °C
cluster	17 x 17 fuel pin array
Anticipoamento in U ₃₀₈	4,95 %
Pompe di alimento primario	Assenti (circolazione naturale)
ECCS (DHRB e CHRS)	2 sistemi passivi a circolazione naturale
refuelling	Ogni 2 anni
Contenimento secondario	Sottoragno immerso in piscina



potrà anche alimentare reti di teleriscaldamento e produrre idrogeno per via elettrolitica.

Ma è di particolare interesse l'impegno del Regno Unito nello sviluppo in ambito nazionale di reattori SMR e AMR. Un ottimo riferimento può essere un documento dal titolo *"Achieving Net Zero: The role of Nuclear Energy in Decarbonisation"*, redatto dal Nuclear Innovation and Research Advisory Board (NIRAB) per conto del Department for Business, Energy and Industrial Strategy (BEIS) del Governo inglese. Da questo documento è tratto lo schema di Fig. 5, che sintetizza i tre ruoli fondamentali con cui i reattori nucleari possono contribuire efficacemente alla decarbonizzazione di tutti i settori dell'energia, e non solo di quella elettrica.

Per quanto riguarda gli SMR, il Regno Unito ha già avviato, con finanziamento anche pubblico, un importante programma nazionale con un consorzio industriale guidato dalla Rolls Royce (la quale ha sempre continuato a lavorare ai reattori navali per la Marina Militare): si tratterà perciò di reattori ad acqua, estrapolati da quelli navali, ed adatti sia a produrre energia elettrica per aree lontane dalle grandi centrali, sia anche ad alimentare impianti di teleriscaldamento per le grandi aree urbane.

NIRAB ritiene poi molto significativa l'introduzione dei già citati Advanced Modular Reactors (AMR), in grado di soddisfare un obiettivo

ritenuto essenziale da conseguire entro il 2050: produrre idrogeno "carbon-free" in quantità tali da contribuire in misura rilevante alla decarbonizzazione degli usi domestici (che nel Regno Unito, come in Italia, sono oggi basati principalmente sul gas naturale), dei processi industriali e dei trasporti (anche con carburanti liquidi di sintesi).

L'obiettivo principale dell'AMR è quello di raggiungere temperature in grado di ottenere la scissione termochimica dell'acqua, in modo da produrre idrogeno senza passare attraverso l'elettricità. Si tenga presente che in questo modo, per produrre idrogeno, un reattore ad alta temperatura può fare a meno del "balance of plant" (generatore di vapore e turboalternatore), e funzionare a piena potenza 24/7, riducendo quindi drasticamente il costo dell'idrogeno prodotto, si stima, fino a soli 2,5 \$/kg.

Per ottenere queste temperature (> 900 °C), il refrigerante del reattore deve essere un metallo liquido (sodio, piombo) o un gas. Il NIRAB si orienta verso i reattori a gas ad alta temperatura (High Temperature Gas Reactors: HTGR), su cui il Regno Unito dispone di una lunga e valida tradizione (a partire dal reattore DRAGON degli anni '60, a cui lavorarono anche Italiani in ruoli di vertice). In questo campo, tuttavia, il Giappone

Figura 5: I ruoli del nucleare nella decarbonizzazione di elettricità, calore e idrogeno



Figura 6:
Il nuovo rompighiaccio
russo LK-120,
in grado di superare
ghiaccio spesso 4,5 m



era all'avanguardia già oltre dieci anni or sono, ed ora sta riattivando la filiera degli HTGR, riavviando un suo prototipo di questo tipo, lo HTTR, che già a suo tempo aveva prodotto idrogeno per via termochimica. Molti altri Paesi ne sono interessati, come la Polonia, che, oltre ad annunciare un classico programma nucleare fino ai 9 GWe al 2040, intende usare gli HTGR per produrre idrogeno.

Alla classe degli Small Modular Reactors (SMR) si possono anche assegnare i reattori per la propulsione navale. Come noto, fin dagli anni 1950, USA, UK, Francia, Russia, e poi Cina, adottano reattori nucleari per la Marina Militare, quasi sempre con reattori ad acqua in pressione (PWR). Nel 1989, alla fine della "guerra fredda", vi erano nel mondo oltre 400 reattori per sottomarini, oltre a decine per portaerei ed incrociatori. La sola US Navy ha utilizzato 500 "noccioli" di reattore, ed ha accumulato 5500 anni x reattore e 128 milioni di miglia senza alcun incidente nucleare. Attualmente, vi è un crescente interesse ad utilizzare reattori nucleari tipo SMR anche per l'immensa flotta mondiale di navi mercantili,

Figura 7:
Il nuovo impianto
nucleare galleggiante
russo,
l'Akademik Lomonosov

in gran parte alimentate da oli pesanti, e che come tali costituiscono una preoccupante fonte di inquinamento atmosferico.

La Russia ha costruito, e continua a costruire, numerosi rompighiaccio a propulsione nucleare. È in corso il potenziamento della flotta dei rompighiaccio nucleari, con reattori in grado di spingerli anche a 10-12 nodi in ghiaccio spesso due metri. Questi rompighiaccio saranno destinati a mantenere per quanto possibile libera la rotta orientale a nord della Siberia, per portare fino a 70 milioni di tonnellate all'anno il trasporto di merci verso l'Asia orientale, evitando il Canale di Suez. Un nuovo rompighiaccio russo, lo LK-120, ancora più potente, avrà l'aspetto di Fig.6. Recentemente, poi, è stato varato il nuovo impianto nucleare galleggiante, l'Akademik Lomonosov, destinato ad aziende e basi isolate nel Grande Nord (Fig. 7).

Nella prospettiva poi di reti elettriche comprendenti contributi crescenti da parte di fonti rinnovabili intermittenti e non programmabili, è importante poi citare il nuovo progetto recentemente annunciato dall'azienda TerraPower, a



suo tempo fondata da Bill Gates, e dalla GE Hitachi: si tratta del generatore e accumulatore di calore NATRIUM, che è progettato per costituire un efficace polo di integrazione e stabilizzazione delle future reti elettriche comprendenti grandi contributi da fonti come la eolica e la solare. È un reattore a neutroni veloci (che quindi può consumare le grandi riserve di energia ancora presenti nel combustibile irraggiato degli attuali reattori ad acqua: Plutonio e Uranio 238), refrigerato a sodio liquido, che si accumula in grandi serbatoi. Ha una potenza di 345 MWe, che però può salire rapidamente anche oltre i 500 MWe per alcune ore, sfruttando il calore accumulato nel sodio, e permettendo così di far fronte a improvvise carenze di potenza delle fonti intermittenti.

Infine, si vuole citare un esempio di very Small Modular Reactors (vSMR), anche trasportabile, destinato alla produzione di calore ed elettricità in aree prive di rete elettrica ed in condizioni climatiche estreme: si tratta dell'eVinci, progettato dalla Westinghouse, e costruito con il contributo della italiana Mangiarotti di Monfalcone (ora facente parte della Westinghouse). In Fig. 8 sono forniti uno schema di una sua installazione fissa, che richiede meno di mezzo ettaro di terreno, ed un confronto di queste dimensioni con gli spazi che sarebbe necessario occupare se si volesse ottenere la stessa quantità di energia con l'eolico o il fotovoltaico.



Site plan for single eVinci in a fixed installation—planned for 0.6 acres.

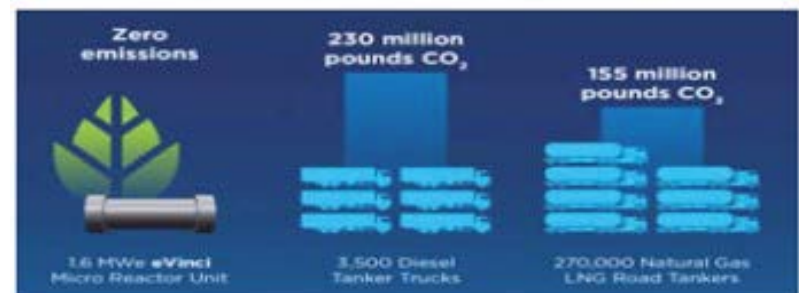
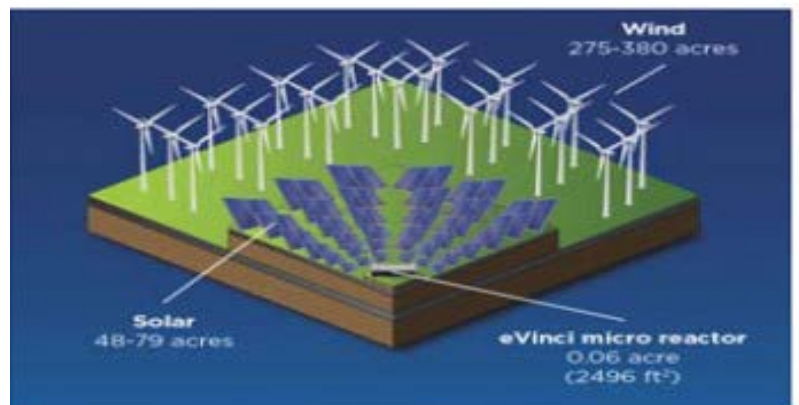


Figura 8: Schema di una installazione fissa per il microreattore eVinci; confronto di ingombro tra un reattore eVinci e le fonti eolica e fotovoltaica

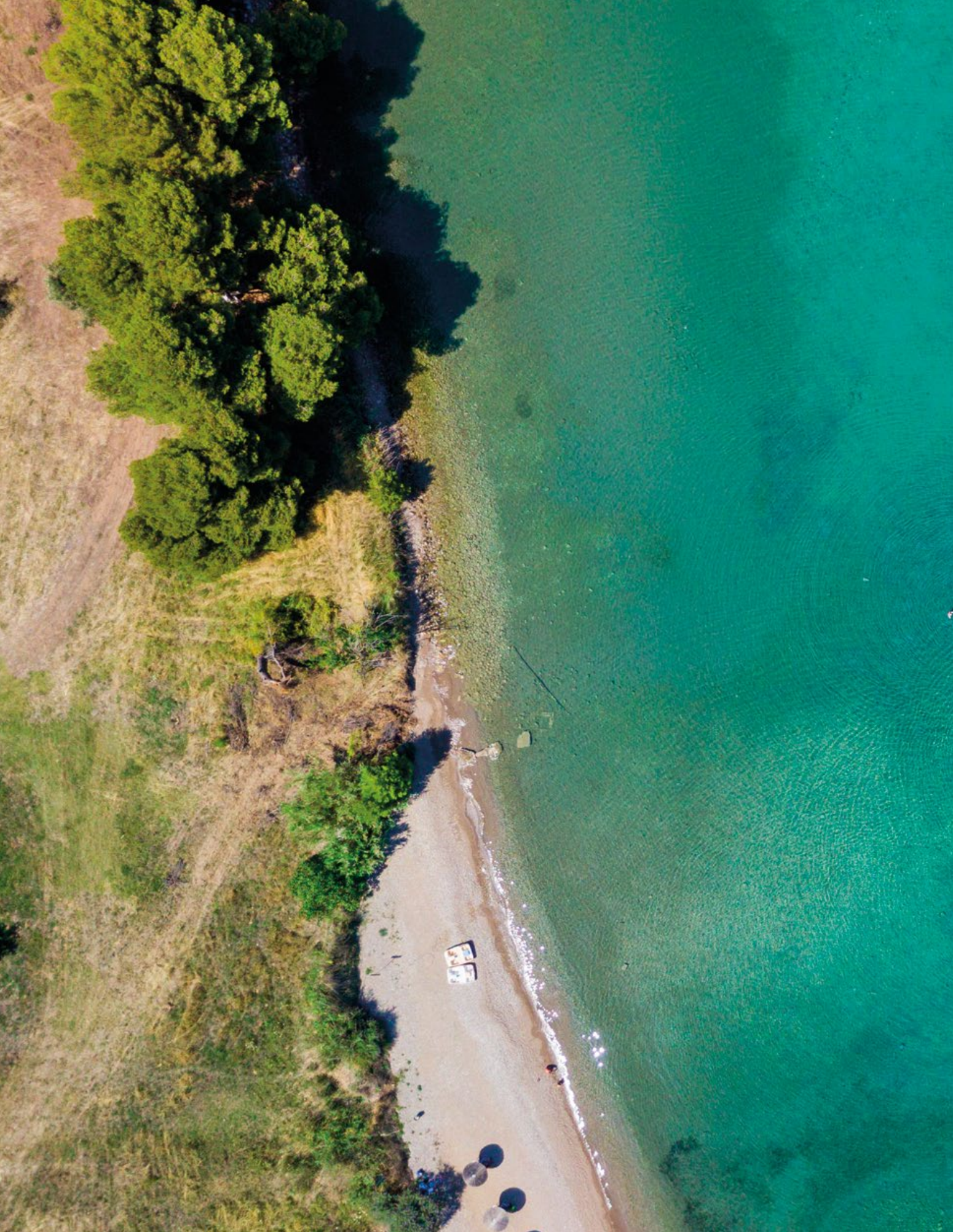
Bibliografia

1. "Achieving Net Zero: The role of Nuclear Energy in Decarbonisation", April 2020, documento redatto dal Nuclear Innovation and Research Advisory Board (NIRAB) per conto del Department for Business, Energy and Industrial Strategy (BEIS) del Governo inglese
2. Rompighiaccio russo LK-120 <<https://lazerone.files.wordpress.com/2017/05/project-10510-sybir-a.png>>
3. Centrale galleggiante russa Akademik Lomonosov <<https://spectrum.ieee.org/energywise/energy/nuclear/is-the-world-ready-for-floating-nuclear-power-stations>>
4. HTTR in Japan <<https://htr.jaea.go.jp/eng/index.html>>
5. TerraPower Nuclear Reactor <<https://neutronbytes.com/2020/06/07/japans-htgr-gets-green-light-for-restart/>>
6. eVinci very Small Modular Reactor <<https://energypost.eu/next-generation-nuclear-25mw-smaller-safer-can-be-sited-anywhere/>>

BENI CULTURALI







Cobra e Adamo: Progetti per i beni culturali

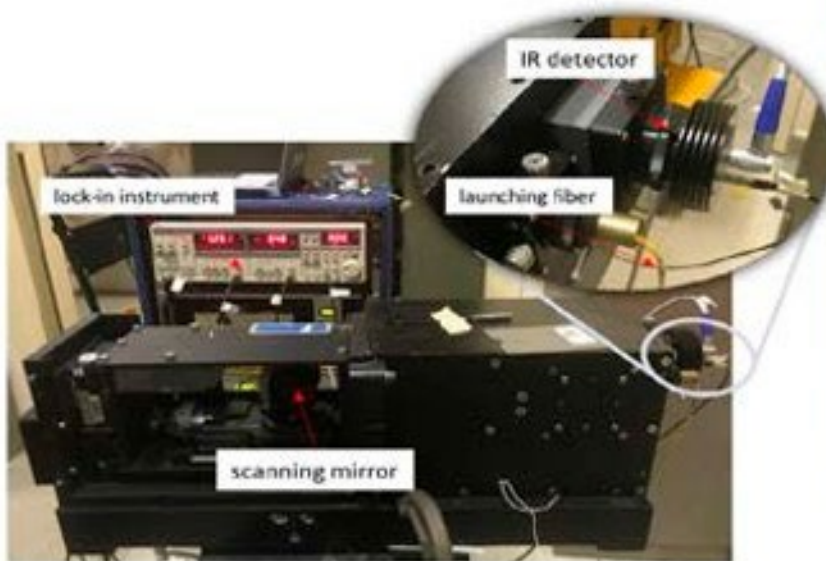
*Diagnostiche laser in situ e remote
sviluppate per il nucleare e
applicate alla caratterizzazione
di superfici in Beni Culturali*



a cura di:
Dott.ssa Roberta
Fantoni

Le diagnostiche ottiche e spettroscopiche offrono possibilità uniche di caratterizzazione di superfici in modalità non distruttiva o micro-distruttiva con molteplici applicazioni industriali. Un gruppo significativo di queste è relativo alla caratterizza-

zione di materiali per uso in ambiente nucleare in presenza di radiazioni, sia in reattori di fissione che di fusione. Tecnologie e metodologie originariamente sviluppate in tale ambito possono essere facilmente adattate a problematiche analoghe in



diversi settori dall'aerospaziale ai beni culturali, in quest'ultimo caso sono privilegiate le funzioni di utilizzo in-situ e remoto finalizzate alla conservazione preventiva e al restauro di superfici. Lo sviluppo di laser scanner veloci, iniziato in

ENEA con il sistema IVVS (in-vessel viewing systems) per il monitoraggio delle superfici interne di reattori di fusione [1], assieme alla disponibilità di CCD sempre più sensibili, ha dato un impulso alla progettazione ed operazione di

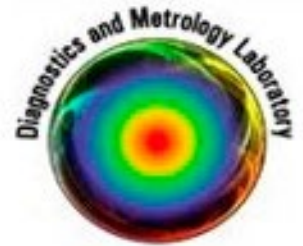


Figura 1:
Prototipo di laser scanner ENEA utilizzati in-situ su BC

sistemi portatili per imaging ottico e spettroscopico su superfici monumentali di BC [2].
In particolare, ad ENEA-FSN Frascati sono stati

sviluppati sistemi operanti fino ad oltre 30 metri in aria e acqua con scanner ottici a modulazione di ampiezza ad alta risoluzione, imaging spet-

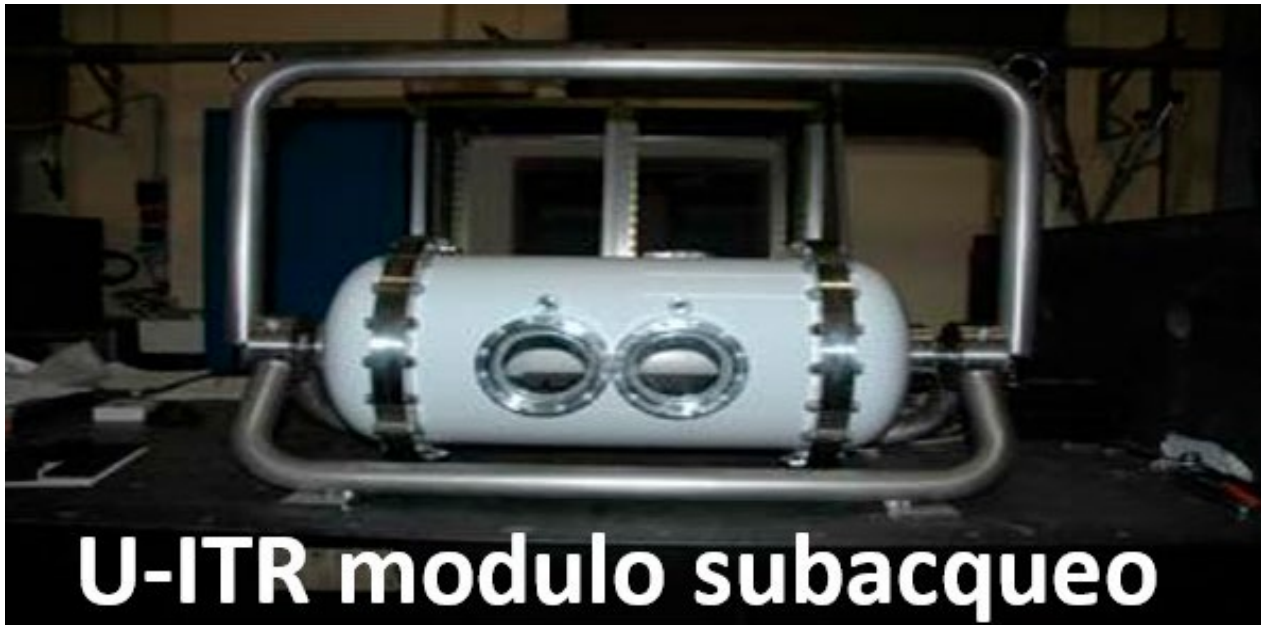


Figura 2



Figura 3
"Modello 3D delle barre
acquisito all'interno della
piscina del reattore"



Installazione sul Triga

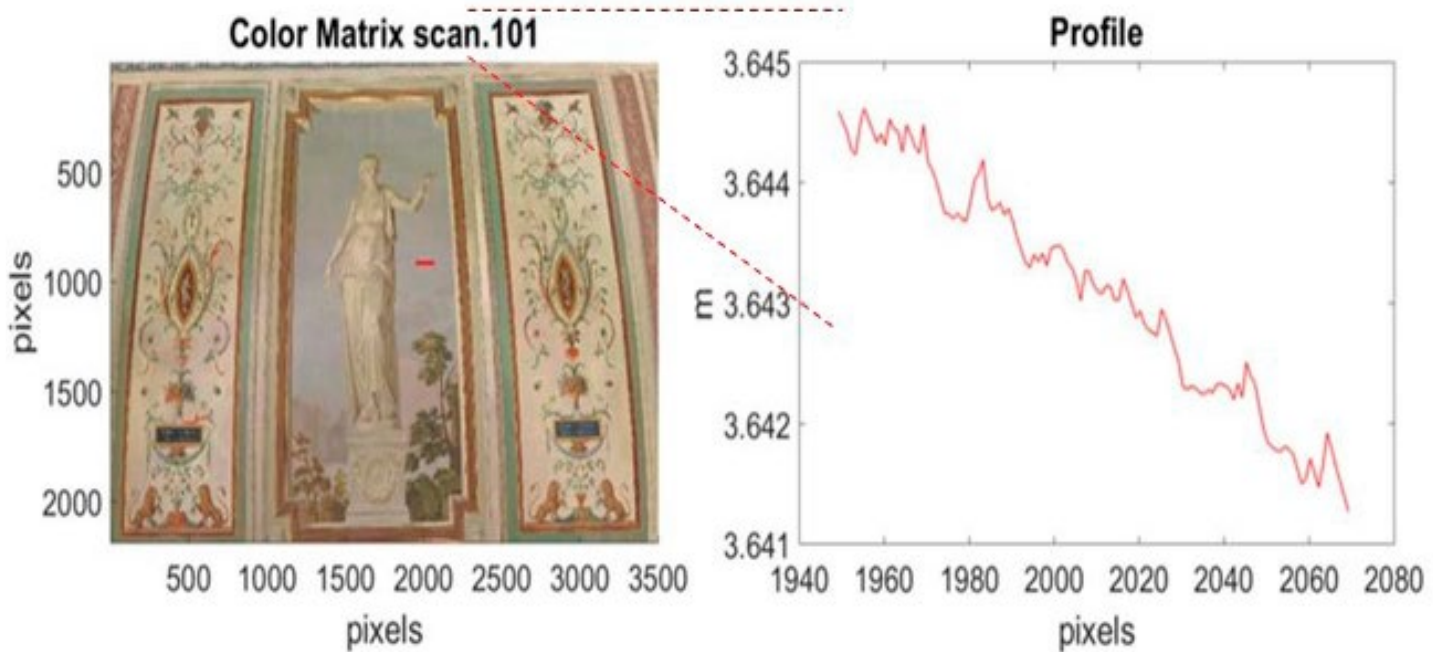


troscopico di tipo LIF e Raman, anche integrato, e stratigrafia remota e in situ mediante tecnica LIBS applicata alle pareti interne di reattori di fu-

sione [3]. I risultati ottenuti sul campo mediante gli ultimi prototipi sono presentati evidenziandone l'importanza per le applicazioni specifiche.



Figura 4



Sistemi LIBS - Rama

Underwater ITR - Prototipi ENEA per applicazioni nucleari e non

Nell'ambito del progetto MIUR IT@CHA è stato sviluppato un payload subacqueo U- ITR, operabile da ROV, da utilizzare come ausilio ad alta risoluzione ai SONAR in archeologia sottomarina [4]. La testa ottica può operare fino a 100 metri di profondità ed è connessa al sistema di alimentazione e controllo da un cavo ombelicale di 300 metri. Il sistema opera con laser verde a 532 nm, per ottimizzare la trasmissione in acqua.

Applicazione su TRIGA RC1 – ENEA Casaccia

Nell'ambito del progetto europeo di security EDEN è stato sviluppato un U-ITR HardRad utilizzabile all'interno di un reattore nucleare di fissione per applicazioni di sicurezza.

Applicazioni ai BC dei Prototipi ENEA nel palazzo Vescovile di Frascati

Il prototipo ENEA RGB-ITR è stato utilizzato per raccogliere un modello ad alta risoluzione della sala dei paesaggi, ottenendo informazioni sulle macchie di umidità del soffitto e sullo stato di conservazione della tela da parati dipinta che ne ricopre le pareti.

In particolare, l'alta risoluzione disponibile ha permesso di evidenziare il danneggiamento della trama del tessuto da parati, come si osser-

va nel dettaglio in figura 4.

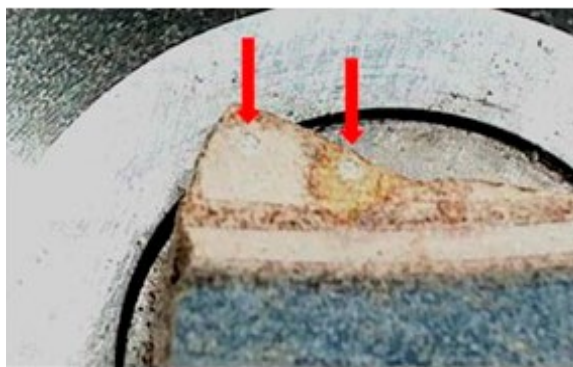
Applicazioni del sistema LIBS remoto su ceramiche

Analisi semi-quantitativa e stratigrafia di frammenti [5] da un «butto» vicino Tarquinia (XIII-XIX secolo)

L'interesse per LIBS remoto sulle ceramiche è legato all'uso diffuso del materiale come copertura di pareti in edifici monumentali dell'area mediterranea. Il pigmento blu è risultato uno smalto a base di cobalto, probabilmente "safre". Il lustro dorato è dovuto alla presenza di nanoparticelle di rame e argenti (fig. 5).

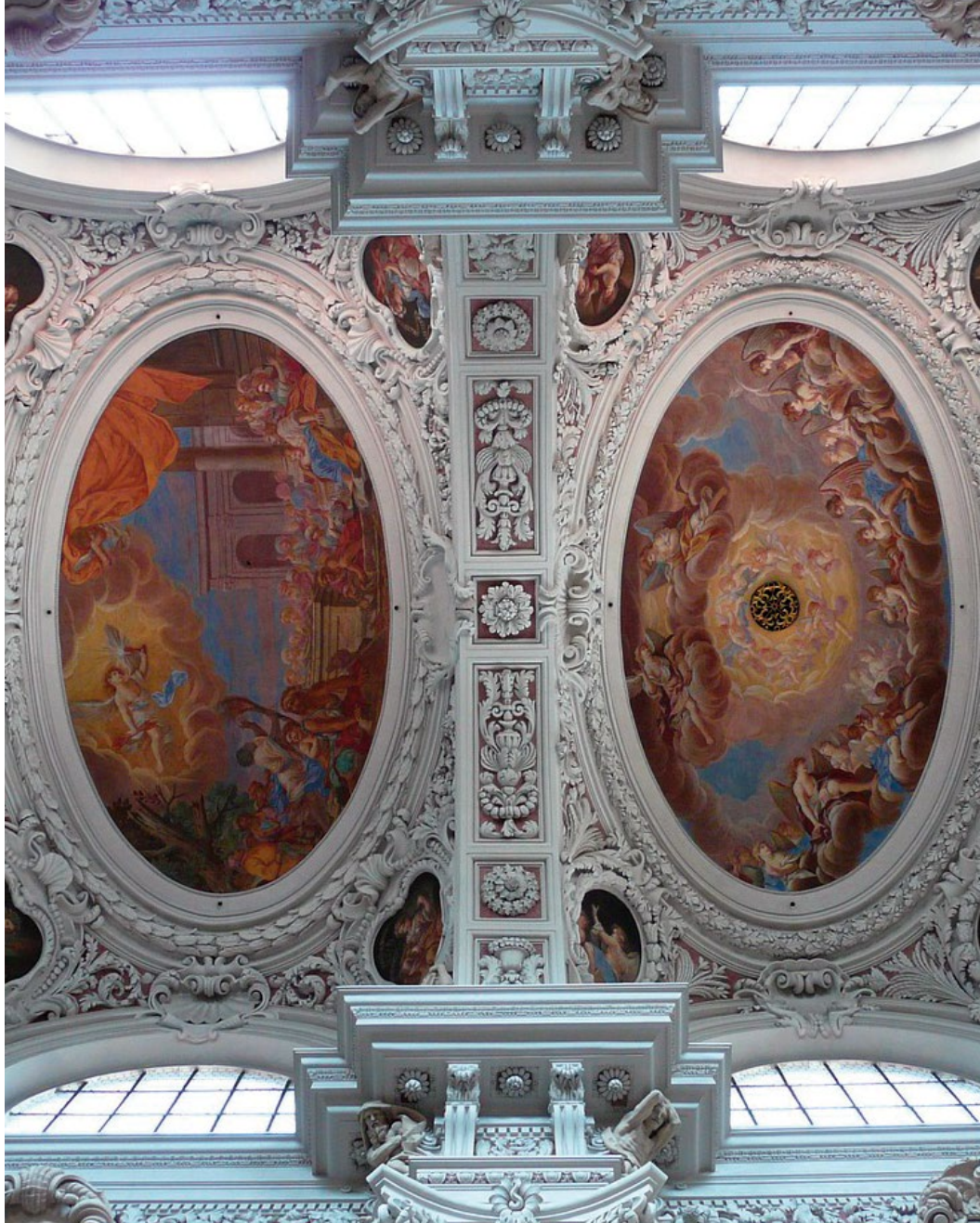
Collaboratori e ringraziamenti

Hanno collaborato allo sviluppo e alle applicazioni degli strumenti descritti Salvatore Almaviva, Luisa Caneve, Francesco Colao, Rosaria D'Amato, Luigi De Dominicis, Massimo Francucci, Massimiliano Guarneri, Violeta Lazić, Antonio Palucci, Adriana Puiu, Valeria Spizzichino. Il supporto tecnico è stato fornito da Massimiliano Ciaffi, Ivano Menicucci, Marcello Nuvoli e Marco Pistilli. Si ringrazia il supporto economico dei progetti IT@CHA, EDEN, Fusion for Energy e Eurofusion MST2 allo sviluppo degli strumenti e dei progetti della regione Lazio COBRA e DTC-ADAMO che ne hanno promosso l'utilizzo per le diagnostiche sui Beni culturali.



Rivestimento	Bianco	Blu	Giallo	Marrone chiaro
Cu, Ag, Al, Ca, Mg, Mn, Fe, Sr, Na, Li, K	Cu, Ag, Pb, Sn	Co, Pb, Si, Al, Mg, Fe	Cu, Ag, Mg, Mn, Li, K, Rb	Cu, Ag

Figura 5
Foto di frammento preso con la telecamera integrata, i crateri LIBS sono indicati dalle frecce



Bibliografia

1. L. Bartolini, A. Bordone, A. Coletti, M. Ferri De Collibus, G.G. Fornetti, S. Lupini, C. Neri, M. Riva, L. Semeraro, C. Talarico 1998 "Amplitude modulated laser in vessel viewing system (LIVVS) for ITER/JET," *Fusion Technology*, 1, 685-688.
2. Fantoni R., Almagiva S., Caneve L., Caponero M., Colao F., De Collibus M.F., Fiorani L., Fornetti G., Francucci M., Guarneri M., Lazić V., Palucci A., Spizzichino V. 2017. "Laser scanners for remote diagnostic and virtual fruition of cultural heritage". *Optical and Quantum Electronics* 49, Article 120.
3. G. Maddaluno, S. Almagiva, L. Caneve, F. Colao, V. Lazić, L. Laguardia, P. Gasior, M. Kubkowska, and the FTU team. Detection by LIBS of the deuterium retained in the FTU toroidal limiter. *Nucl. Mater En.* 18 (2019) 208–211.
4. L. De Dominicis "Underwater Three-dimensional Laser Imaging" Chapter in the *SAS Encyclopedia of Archaeological Sciences*, Wiley, 2018 – ISBN: 978-0-480-67461-1.
5. V. Lazić, M. Vadrucci, R. Fantoni, M. Chiari, A. Mazzinghi, A. Gorghinian, 2018 "Applications of laser induced break-down spectroscopy for cultural heritage: A comparison with XRF and PIXE techniques" *Spectrochim. Acta Part B* 149, 1–14.



a cura di:

Prof. Dott. Lorenzo Giuntini
Dott. Francesco Taccetti

Con la collaborazione di:

Dott. L. Castelli, Dott. F. Benetti, Dott. G. Calzolari, Dott. M. Chiari, Dott. C. Czelusniak, Dott. M.E. Fedi, Prof. P. A. Mandò, Sig. M. Manetti, Dott. M. Massi, Dott. C. Matakotta, Dott. L. Palla, Prof. E. Previtali, Dott. C. Ruberto, Dott. G. Anelli, Dott. S. Atieh, Dott. V. Bencini, Dott. A. Bilton, Dott. A. Grudiev, Dott. A. Lombardi, Dott. E. Montesinos, Dott. H. Pommerenke, Dott. M. Timmins, Dott. M. Vretenar, Dott. S. Mathot

INFN-CHNET: LA RETE DI RICERCA E INFRASTRUTTURA PER LA SCIENZA E LA TECNOLOGIA APPLICATE AI BENI CULTURALI

ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI ROMA



Introduzione

INFN-CHNet (Cultural Heritage Network) è la rete di competenza per i beni culturali dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) [1]. INFN-CHNet nasce nel 2017 per armonizzare e valorizzare le competenze che l'Istituto ha nello sviluppo e nell'applicazione di tecniche analitiche per lo studio e la diagnostica dei materiali costituenti i beni culturali. Tali competenze sono distribuite in molte delle Strutture INFN sparse sul territorio nazionale, numerose delle quali operano in stretta collaborazione con le Università. La sua struttura di riferimento è il LABEC, presso la Sezione INFN di Firenze. INFN-CHNet è sia una rete di ricerca che una infrastruttura

distribuita di servizio dedicata alla scienza e alle tecnologie applicate ai beni culturali.

Da decenni i laboratori dell'INFN non solo utilizzano le più moderne tecnologie in questo ambito, ma, grazie a progetti di ricerca, ne sviluppano di nuove, cercando soluzioni alle problematiche poste dagli operatori del settore quali, a titolo di esempio, archeologi, storici, restauratori e conservatori.

Le diverse tecniche scientifiche di diagnostica sui beni culturali forniscono informazioni complementari, utili per pianificare interventi di restauro e conservazione, studiare i materiali impiegati e le tecniche di realizzazione, ricostruire il luogo di provenienza dei materiali grezzi impiegati per la realizzazione di manufatti (così

da poter ricostruire le rotte commerciali), datare opere o siti archeologici, contribuire all'autenticazione delle opere.

INFN-CHNet è sia una rete di ricerca che una infrastruttura distribuita di servizio per la comunità multidisciplinare di pubblici e privati che svolgono la propria attività nell'ambito dello studio del patrimonio culturale. La rete è nata dalle Strutture INFN con competenze nel settore della diagnostica e nel tempo si è arricchita con l'adesione di partner esterni. La rete è così composta da partner di tre livelli, due per la rete nazionale e uno per quella internazionale, come riportato nella figura 1.

Livello 1. Rete interna all'INFN, costituita da nodi basati su personale dipendente o associato e strumentazione operante in Strutture INFN.

Livello 2. Soggetti che afferiscono a INFN-CHNet attraverso accordi specifici su attività di interesse comune, ad esempio Università, Enti di Ricerca, Centri di Restauro e Consorzi anche con competenze esclusivamente di tipo umanistico.

Livello 3. Rete internazionale, composta da soggetti esteri (tipicamente università e centri di ricerca) che vogliono partecipare ad attività comuni di ricerca, formazione e trasferimento tecnologico e aderiscono alla rete attraverso convenzioni. Ciascun soggetto costituisce un nodo della rete di livello 3. Ciascun nodo di livello 3 può agire anche come hub per la creazione di una rete locale, aggregando nel proprio Paese organismi con competenze scientifiche e umanistiche nel settore. Il nodo di livello 3 ne sarà il coordinatore e il referente verso INFN-CHNet.

Ogni nodo di livello 3 è agganciato ad una struttura di livello 1.

La struttura della rete INFN-CHNet

Le attività della rete, come schematizzato nella figura 2, possono essere suddivise in tre grandi linee: Ricerca, a cui è dedicata la frazione maggiore delle attività della rete, il 50%, Training e Terza missione.

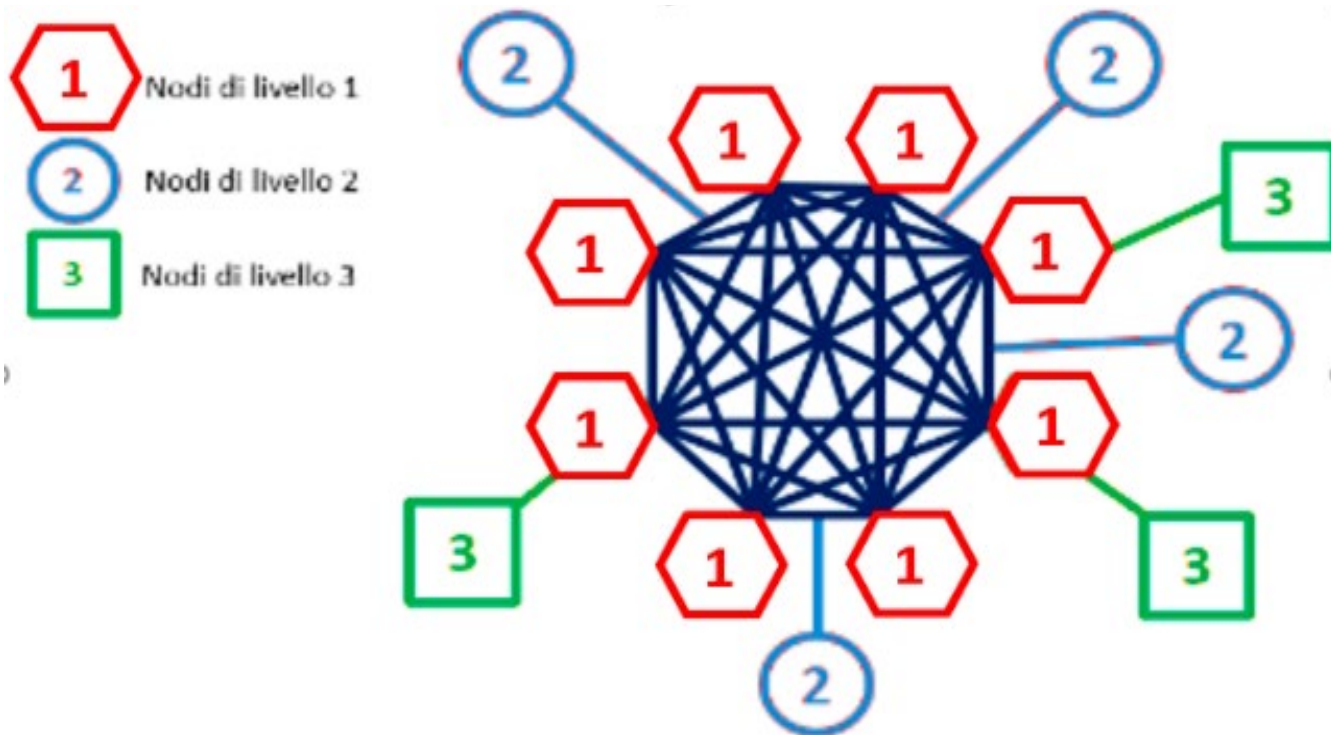
Ricerca

Le attività di ricerca rappresentano circa il 50% delle attività complessive della rete e sono portate avanti sia attraverso esperimenti interni all'INFN, sia attraverso progetti specifici in risposta a bandi (regionali, nazionali, internazionali o di fondazioni pubbliche e private). Le attività di ricerca sono svolte congiuntamente dai nodi della rete seguendo le linee guida di sviluppo concordate. Le attività di ricerca possono essere svolte anche in collaborazione con soggetti esterni per sviluppare nuovi prodotti e servizi o ottimizzarli per rispondere al meglio alle necessità di studio, conservazione e restauro.

Formazione

INFN-CHNet interviene nell'attività di formazione - lauree, dottorati e attività post dottorato - per le tematiche attinenti al settore dei beni culturali, anche tramite percorsi in co-tutela con soggetti esterni, come organizzazioni pubbliche (es. centri di restauro) e imprese private ad alto contenuto tecnologico. INFN-CHNet organizza anche Training Camp e Scuole rivolti a laureati/dottoran-

Figura 1
Struttura di
INFN-CHNet.
Evidenziati i nodi di
primo (rosso),
secondo (blu) e
terzo (verde) livello.



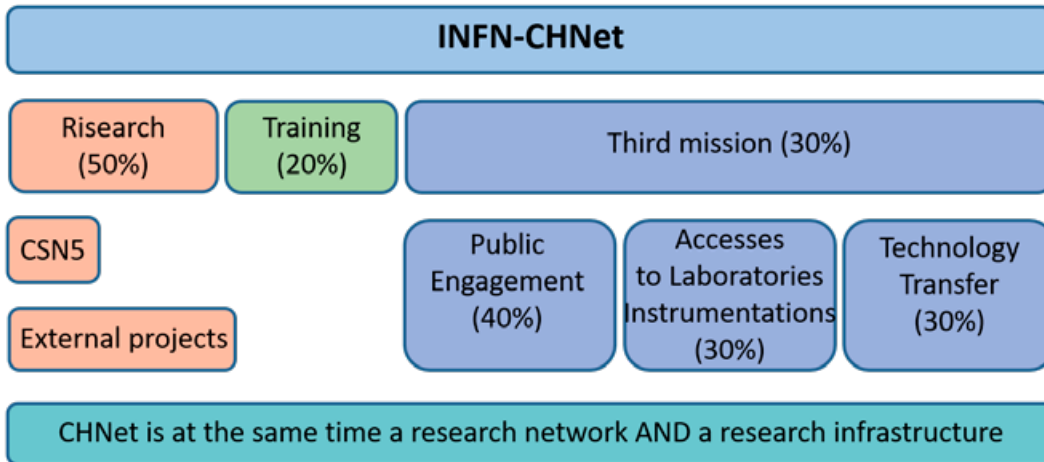


Figura 2

di in discipline umanistiche e scientifiche e a professionisti (es. restauratori, conservatori).

Terza missione

La terza missione di INFN-CHNet si articola in Public Engagement e servizi di accesso e trasferimento tecnologico verso soggetti privati e pubblici.

In questo lavoro, dati i limiti di spazio, ci concentreremo essenzialmente sull'attività di ricerca, portando l'esempio del progetto MACHINA.

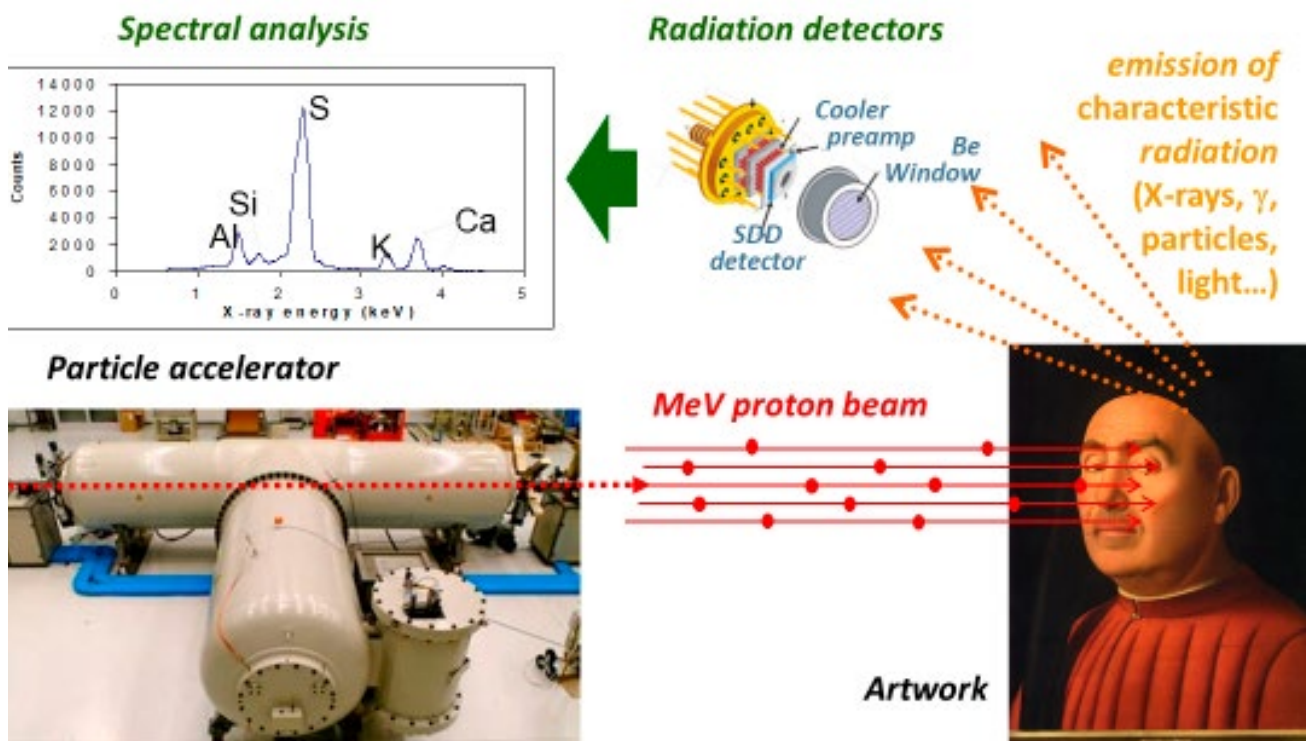
Un esempio di attività di ricerca nell'ambito di INFN-CHNet: il progetto MACHINA

Negli ultimi anni, le tecniche diagnostiche per lo

studio dei beni culturali hanno avuto un notevole sviluppo tecnologico, come conseguenza di una crescente domanda di supporto scientifico per la conoscenza e la conservazione da parte di studiosi e operatori di settore, quali storici dell'arte, archeologi, restauratori, curatori [2].

Fra le tecniche diagnostiche, quelle che usano fasci di particelle prodotti da acceleratori (IBA, Ion Beam Analysis) continuano a rivestire un ruolo di primo piano nelle analisi dei materiali costituenti reperti archeologici, oggetti di interesse storico-artistico e opere d'arte. L'importanza delle IBA è indiscussa, anche e soprattutto perché consentono misure assolutamente non invasive e non distruttive, quindi particolar-

Figura 3
Schema di funzionamento delle tecniche di Ion Beam Analysis (IBA)



mente adatte ai beni culturali. Inoltre, c'è ancora spazio per migliorare le tecniche disponibili e aprire la strada a nuove prospettive applicative. In una misura di IBA il materiale da analizzare è investito con fasci di particelle – tipicamente protoni o alfa di qualche MeV di energia prodotti da un acceleratore [3]. Per capirne la composizione, si analizza la radiazione emessa dal materiale sotto fascio, radiazione che ha energie caratteristiche degli atomi (raggi X e luce visibile) o dei nuclei (raggi gamma e particelle) coinvolti nell'interazione con le particelle incidenti, come schematizzato in figura 3.

Per le applicazioni ai beni culturali, le tecniche IBA più usate sono PIXE (Particle Induced X-ray Emission) e PIGE (Particle Induced Gamma-ray Emission). Il limite principale delle analisi IBA è che il loro uso richiede il trasporto dell'opera d'arte al laboratorio dell'acceleratore, dato che non esistono al momento acceleratori trasportabili che consentano di fare analisi IBA in situ. MACHINA è un progetto congiunto INFN-CERN, finanziato per la parte italiana tramite il fondo integrativo speciale per la ricerca (FISR 2017, n. 17/2018/G), con la collaborazione e il supporto dell'Opificio delle Pietre Dure (OPD), per lo sviluppo di un acceleratore trasportabile [4], [5]. Il progetto è diviso in due settori: il primo, di cui si occupa il CERN, è dedicato allo sviluppo delle cavità risonanti HF-RFQ (High Frequency-Radio Frequency Quadrupole, ossia l'acceleratore). Il suo sviluppo si basa su quello di LINAC4 (l'iniettore di bassa energia del booster di LHC al CERN), modificato per contenere al massimo

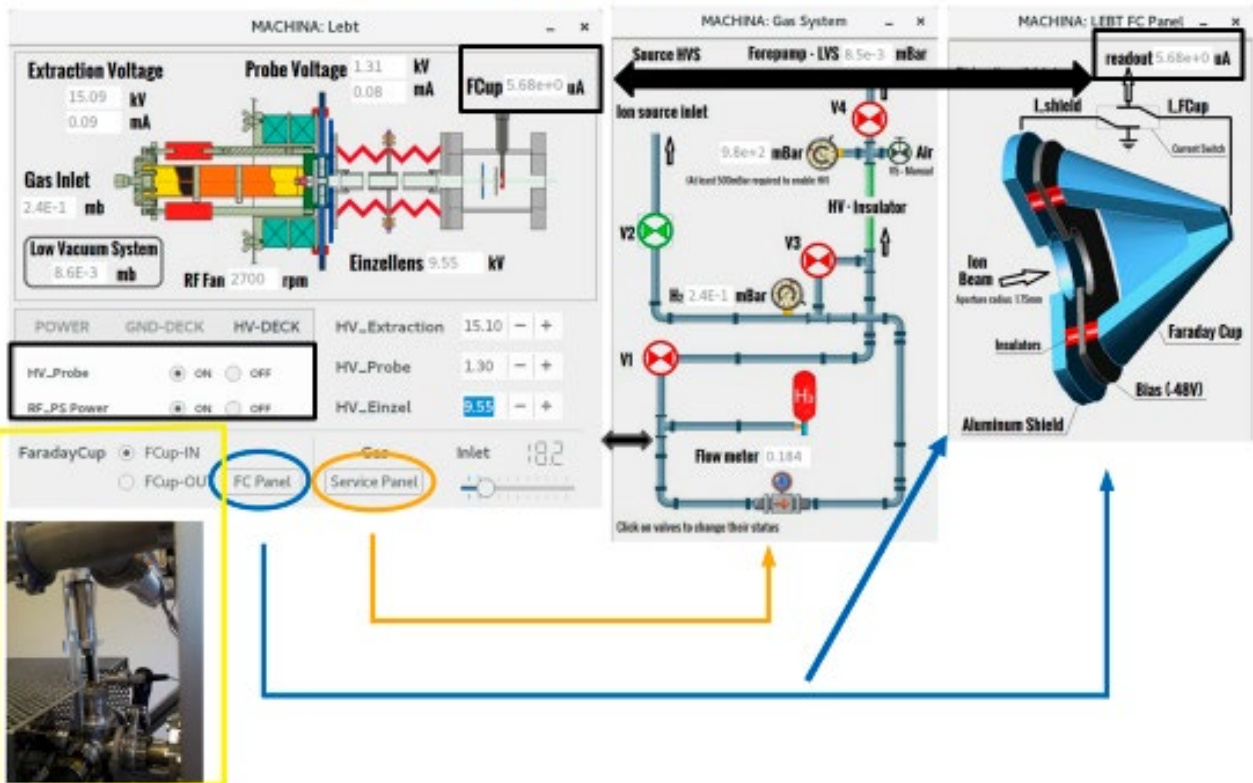
consumi, peso della macchina e dei sistemi ancillari, quali quelli di potenza, raffreddamento e di alto vuoto [6]. Il secondo settore, in carico a INFN, verte sullo sviluppo di tutte altre parti, ossia sorgente, trasporto a bassa e alta energia (Low Energy Beam Transfer (LEBT) e High Energy Beam Transfer (HEBT), estrazione del fascio in aria, sistema di rivelazione e sistema di controllo. Il sistema di controllo di MACHINA è stato completamente sviluppato da INFN, sia per la parte software che hardware. La parte dedicata a sorgente, LEBT e HEBT e sistema di rivelazione è nella configurazione finale. Nella figura 4 è mostrata una schermata del programma mentre la sorgente è accesa e la corrente prodotta dalla sorgente è misurata alla fine della LEBT.

L'allestimento del sistema MACHINA è ormai quasi ultimato, come si può vedere in figura 5. L'unica parte ancora mancante, ma attesa entro la fine del 2020, è il sistema di power supply delle cavità acceleranti. Non è stato possibile completare il sistema di alimentazione a causa dell'emergenza Covid.

Per dare un'idea della differenza tra MACHINA e un sistema convenzionale, riportiamo nella figura 6 il confronto tra MACHINA e il tandem del laboratorio INFN-Labec, usato normalmente per misure IBA nel campo dei beni culturali.

MACHINA verrà concluso all'inizio del 2021; entro giugno verranno prodotti i primi fasci accelerati, prima al CERN e poi all'INFN-Labec di Firenze. Per fine 2021 MACHINA sarà portato all'OPD e inizierà l'applicazione di MACHINA da parte del team congiunto di fisici, storici dell'ar-

Figura 4
La schermata del pannello di controllo dedicata alla sorgente. In alto a destra, viene mostrato il valore della corrente misurata (5.68 uA) prima dell'iniezione nell'acceleratore



te e restauratori su opere d'arte.

Conclusioni

La rete INFN-CHNet dei laboratori dedicati alla ricerca, sviluppo e applicazioni nel campo dei beni culturali è ormai una realtà ben consolidata. La sua attività verte su ricerca, training e terza missione. Un progetto di ricerca, altamente innovativo e di grande fascino, portato avanti da INFN-CHNet, congiuntamente con CERN e col

supporto dell'OPD, è MACHINA, dedicato allo sviluppo del primo acceleratore trasportabile al mondo per applicazioni sui beni culturali.

MACHINA è iniziato nel 2018 ed è adesso nella sua fase conclusiva. Entro giugno 2021 verranno prodotti i primi fasci accelerati, prima al CERN e poi presso INFN-Labec a Firenze. Per la fine del 2021, MACHINA sarà installato all'OPD, dove inizierà ad essere usato per le prime applicazioni in problemi reali sui beni culturali.

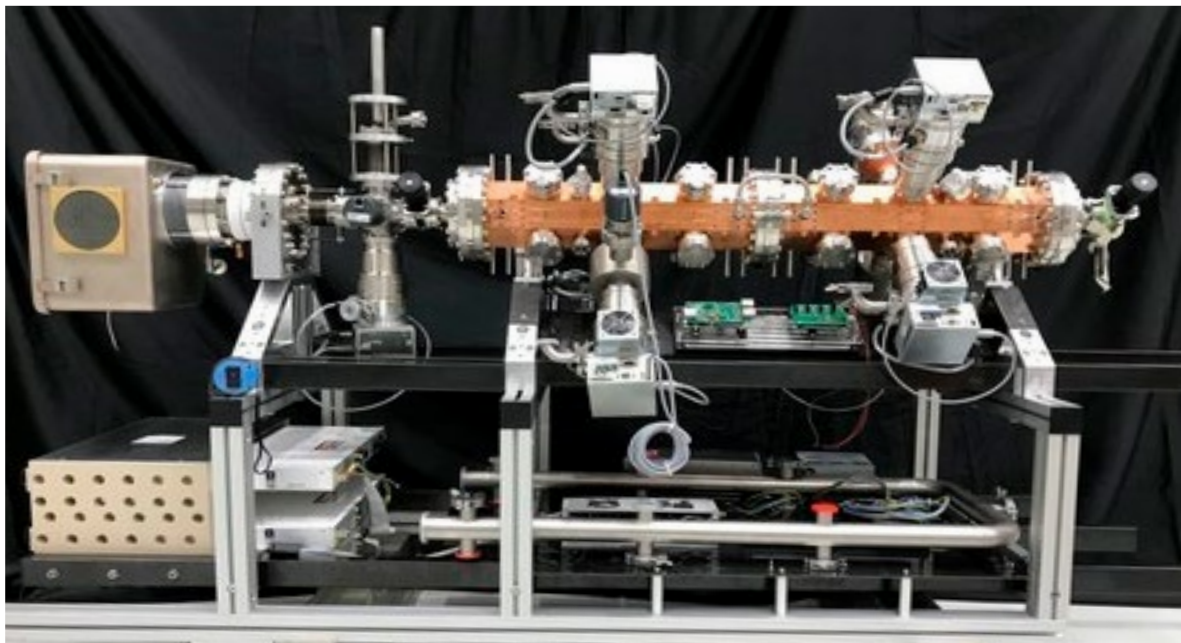
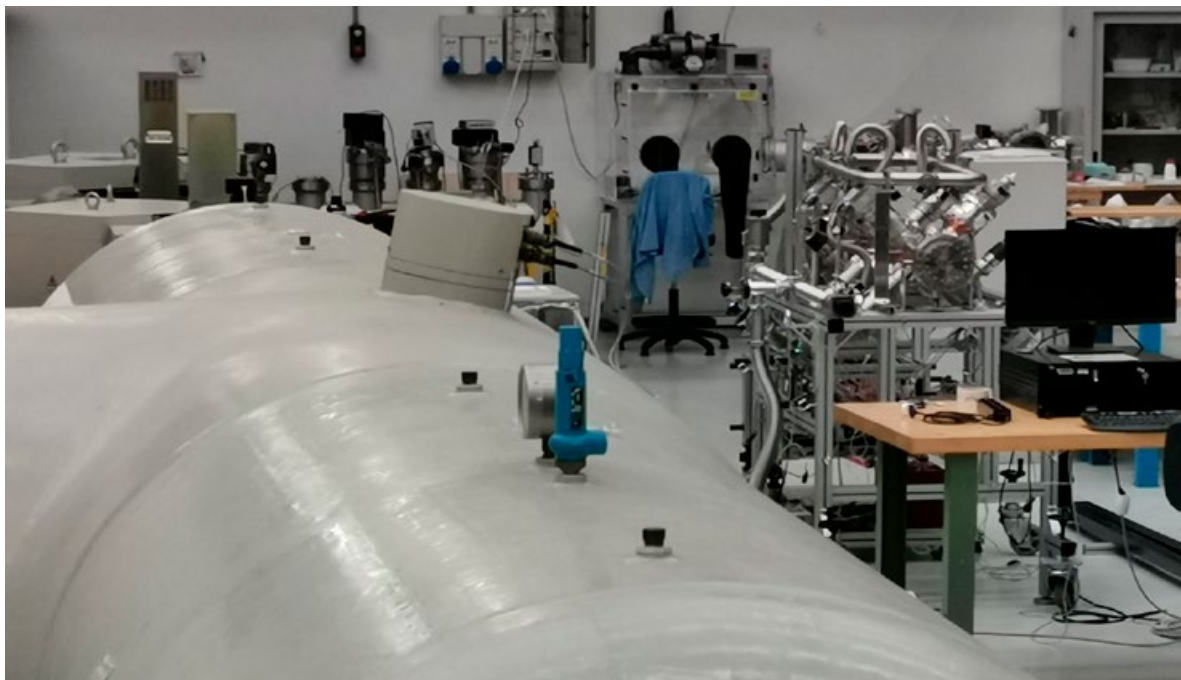


Figura 5 - novembre 2020 INFN-Firenze: MACHINA nelle fasi di assemblaggio sul supporto definitivo. Da sinistra a destra: sorgente (parte sospesa all'estrema sinistra), LEBT (tra il primo e il secondo supporto), acceleratore (in rame)

Figura 6 - Il confronto tra l'acceleratore tandem, in primo piano, e il sistema completo di MACHINA sullo sfondo a destra







Bibliografia

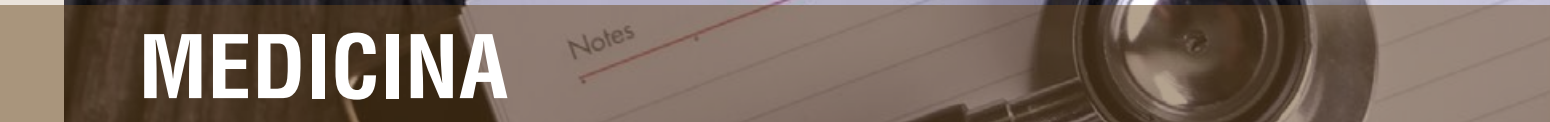
- [1] <https://chnet.infn.it/it/home-2/>
- [2] Pier Andrea Mandò, La fisica nucleare applicata negli ultimi anni ad Arcetri e la nascita di nuove attività al LABEC del Polo Scientifico a Sesto Fiorentino; <https://core.ac.uk/download/pdf/228583577.pdf>
- [3] Fulvio Mercuri, Folco Scudieri SCIENZA E DIAGNOSTICA DEI BENI CULTURALI, (2010) https://www.treccani.it/enciclopedia/scienza-e-diagnostica-dei-beni-culturali_%28XXI-Secolo%29/
- [4] <https://home.infn.it/it/comunicazione/comunicati-stampa/2690-piccolo-preciso-e-potente-arriva-machina-l-acceleratore-per-i-beni-culturali>
- [5] <https://www.lubec.it/wp-content/uploads/2018/09/Lubec-2018-giuntini.pdf>
- [6] S. Mathot, et al, The CERN PIXE-RFQ, a transportable proton accelerator for the MACHINA project, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms Volume 459, 15 November 2019, Pages 153-15

MEDICINA

Notes

Date

nuclear
medicine



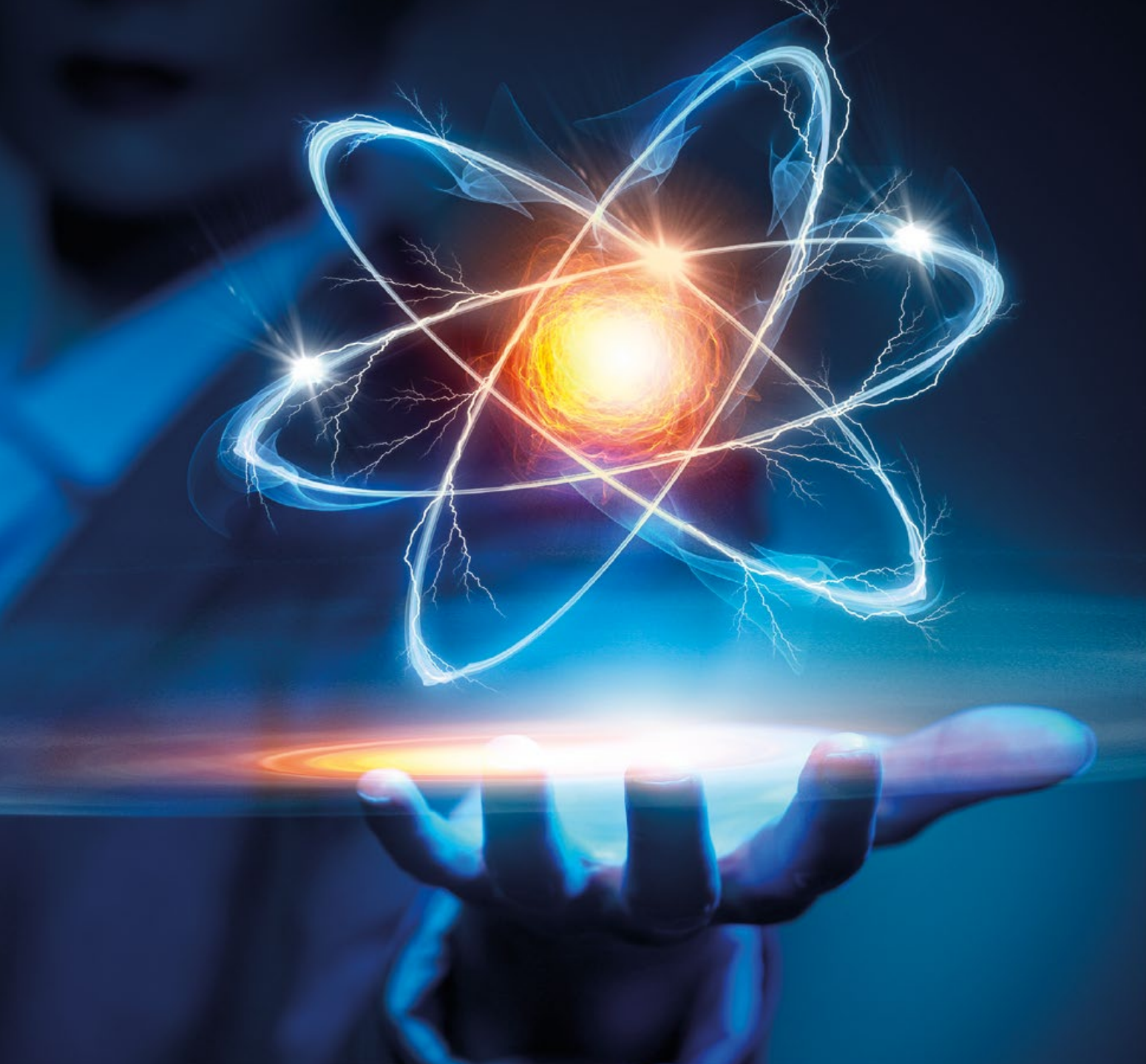




a cura di
Ing. Carlo Tricoli

Commissione:
Ricerca e Reattori
Innovativi

I REATTORI NUCLEARI DI RICERCA: LA PRODUZIONE DEI RADIOISOTOPI E IL LORO UTILIZZO IN MEDICINA



Il tema presentato è quello relativo alla produzione di radio-farmaci che hanno un ruolo fondamentale, in larga parte, per la diagnostica in medicina nucleare. La loro produzione presenta alcuni elementi di complessità sia dal punto di vista tecnico sia da quello della gestione e della distribuzione.

Si riporta una descrizione del contesto internazionale e nazionale con particolare riferimento al problema della carenza sul mercato che si è generata nella catena di produzione Mo-99/ Tc-99m.



Indice degli argomenti

- Cosa sono i radio farmaci, come funzionano e possibili impieghi
- Tecnologie. Il tecnecio, come si ottiene
- La filiera Industriale, aspetti economici e barriere
- Scenari



L'argomento presentato in questa prima parte della lezione è relativo alla produzione di radiofarmaci che hanno un ruolo fondamentale per la maggior parte, nella diagnostica medica ma anche a scopo terapeutico.

Alcuni aspetti ne rendono complessa la produzione sia dal punto di vista tecnico che da quello della gestione e della distribuzione.

COSA SONO I RADIOFARMACI ?



**I RADIOFARMACI SONO FARMACI CLASSIFICATI COME MEDICINALI DAL
D.Lgs. 29 maggio 1991, n. 178 art. 21 (*)**

All'art. 21, comma 2 lettera a) il decreto definisce **radiofarmaco**
*«qualsiasi medicinale che, quando e' pronto per l'uso, include uno o più
radionuclidi (isotopi radioattivi) incorporati a scopo sanitario»*

(*) La classificazione è poi ripresa anche nel Decreto Legislativo 24 aprile 2006, n. 219

"Attuazione della direttiva 2001/83/CE (e successive direttive di modifica) relativa ad un codice comunitario concernente i medicinali per uso umano, nonché della direttiva 2003/94/CE"

COME FUNZIONA UN RADIOFARMACO

- Il radiofarmaco è costituito da un vettore (molecola fisiologica) che «trasporta» un radionuclide verso un organo o un apparato target.
- Il radionuclide consente, grazie all'uso di una particolare strumentazione, di seguirne la distribuzione nel corpo umano o la sua diffusione nell'organo e di valutare la diversità delle funzioni biologiche e cellulari nella parte in esame.
- In questo modo si può capire dove è localizzata una certa patologia, come si comporta e dare un supporto decisivo per la scelta di un trattamento terapeutico.



UTILIZZO DI RADIOFARMACI PER APPLICAZIONI MEDICHE

Oltre 10.000 ospedali in tutto il mondo utilizzano radioisotopi in circa 100 diverse procedure di medicina nucleare per un totale di quasi 40 milioni di esami medici ogni anno.

Nella sola Ue più di 1500 centri di medicina nucleare forniscono circa 10 milioni di trattamenti ai pazienti ogni anno.

La medicina nucleare è uno strumento importante per la gestione del cancro: il 60% di tutte le procedure di medicina nucleare vengono eseguite in oncologia.

TECNOLOGIE PER LA PRODUZIONE DI RADIOISOTOPI PER APPLICAZIONI MEDICHE

Possono essere individuati tre processi diretti o indiretti per la produzione di radioisotopi:

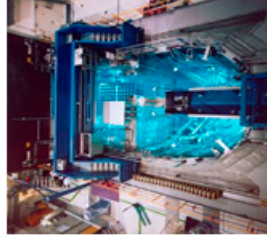
- 1. Reazioni nucleari in acceleratori di particelle, in particolare ciclotroni**
- 2. Reazioni nucleari in reattori nucleari a fissione**
- 3. Generatori**



TECNOLOGIE PER LA PRODUZIONE DI RADIOISOTOPI PER APPLICAZIONI MEDICHE

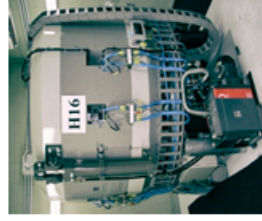
1. Reattori nucleari a fissione

Con la fissione dell'Uranio-235 si ottengono radioisotopi (tra cui il Mo99) prodotti dalla fissione per cattura neutronica di bersagli di Uranio 235



2. Ciclotroni

Particelle proiettili cariche, accelerate che impattando su un supporto contenente il materiale bersaglio (gas, liquido o solido) rallentano la velocità con produzione di ioni radioattivi come ad esempio il Fluoro 18 usato nel radiofarmaco 18FDG (fluorodesossiglucosio) usato per la PET



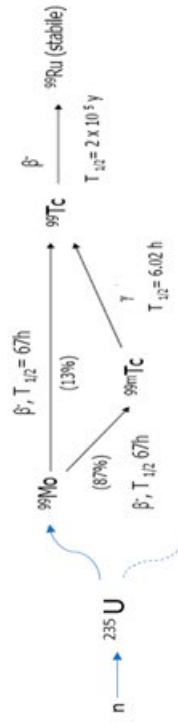
3. Generatori

Consentono la separazione e l'estrazione del radioisotopo di breve durata (chiamato figlio) da un radioisotopo lungo (chiamato genitore), dove il primo è ottenuto dal decadimento del secondo, attraverso un processo di eluizione



IL TECNEZIO 99m (99mTc)

- Il Tecnezio-99m è un isomero nucleare metastabile del tecnezio-99
- Si può ottenere dal decadimento del molibdeno (99Mo), uno dei prodotti di fissione dell'Uranio-235 (Approccio standard)



LA FILIERA INDUSTRIALE DALLA PRODUZIONE ALL'UTILIZZO



Source materials → Fuel & target fabrication → Reactor facility → Mo-99 processing facility → Mo-99/Tc-99m generator producer → Pharmacies/hospitals



Nome	Paese	% Mercato
HFR	Olanda	27
Safari-1	Sud Africa	13
BR-2	Belgio	28
LVR-15	Rep. Ceca	13
Maria	Polonia	19
Opal	Australia	9

RESEARCH REACTOR
LEU Conversion status
NTP: LEU converted
IRE: beginning of 2019
ANSTO: beginning of 2019

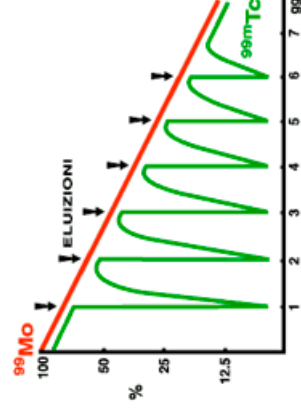
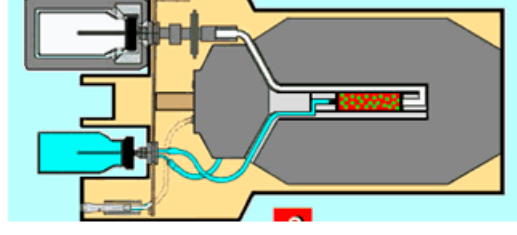
PROCESSOR



CARATTERISTICHE DEL TECNEZIO

IL TECNEZIO E' IL RADIOISOTOPO MAGGIORMENTE USATO IN MEDICINA PER LE INDAGINI DIAGNOSTICHE PER LE SUE **CARATTERISTICHE FAVOREVOLI**

- Breve tempo di dimezzamento ($T_{1/2} = 6,01 \text{ h}$, $E_{\text{max}} = 0,141 \text{ MeV}$);
- Semplicità di utilizzo in kit commerciali per la marcatura (chelazione);
- Flessibilità di utilizzo in molte indagini diagnostiche;
- Praticità di utilizzo poiché si ottiene da generatori Molibdeno-99 / Tecnezio-99m^{99m};
- Il Molibdeno, a vita relativamente lunga, decade in Tecnezio il quale è estratto semplicemente per eluizione come ^{99m}Tc pertecnetato.





ASPETTI ECONOMICI

- Le proprietà del Tc-99m complicano la sua catena di approvvigionamento
- A causa della emivita breve, la sua fornitura è un'attività **just-in-time** che combina un mix di soggetti governativi, industriali e commerciali e richiede una capacità sufficiente di produzione continua di Mo-99
- La **fornitura** di Mo-99 / Tc-99m agli operatori sanitari è stata spesso inaffidabile negli ultimi dieci anni a causa di arresti imprevisti e periodi di manutenzione prolungati in alcune delle strutture che producono Mo-99
- In particolare nel 2009-10 una serie di interruzioni impreviste dei reattori di ricerca nucleare produttori di Mo-99 ha portato a una **crisi di approvvigionamento** globale e una grave carenza di Tc-99m.

[01101>



[01101>

[01101>

[0

01>



1,8
1,2

2,10
84

15,3
5,18

21,8
39

25
28

11
6





LINEE DI POLICY

IL Rapporto annuale 2019 dell'EURATOM Supply Agency (ESA) della Commissione Europea evidenzia che L'Europa svolge un ruolo centrale nel campo della medicina nucleare con una rete unica di filiera completa:

- Fabbricazione del combustibile di uranio e produzione dei bersagli: Framatome-CERCA in Francia;
- Quattro reattori di ricerca che irradiano target di uranio: BR2 in Belgio, HFR nei Paesi Bassi, MARIA in Polonia e LVR-15 in Repubblica Ceca;
- Due strutture di trattamento dell'uranio: Curium nei Paesi Bassi e IRE in Belgio;
- Principali siti di produzione di generatori Tc-99m localizzati in Olanda, Francia e Polonia.

Il gruppo di lavoro sulla sicurezza dell'approvvigionamento NMEU dell'ESA coordina i programmi di manutenzione dei reattori di produzione per evitare e mitigare le interruzioni nella fornitura di Mo-99.

Nel 2019, la Direzione Generale dell'Energia della Commissione Europea ha proseguito i lavori preparatori verso un'agenda strategica per le applicazioni mediche, industriali e di ricerca della tecnologia nucleare e delle radiazioni (Samira) per identificare opportunità e sfide per l'uso e lo sviluppo delle radiazioni ionizzanti.

La fornitura di radioisotopi medicali è una delle aree chiave identificate per le sfide future.

LINEE DI POLICY

- Il Gruppo ad alto livello sulla sicurezza dell'approvvigionamento di radioisotopi medici (HLG-MR) è stato costituito dall'Agenzia per l'energia nucleare dell'OCSE (NEA) per garantire una fornitura stabile ed economicamente sostenibile a breve e lungo termine
- Secondo la NEA è necessaria una politica pubblica dei prezzi che sia coordinata tra i Governi per garantire una redistribuzione dei flussi finanziari tra i diversi attori della catena di approvvigionamento di radio farmaci
- Per nuovi reattori di potenza maggiore, gli investimenti pubblici e privati possono essere fatti solo partendo dall'idea che il costo totale dell'operazione sia coperto dal prezzo del Mo-99.



LE BARRIERE

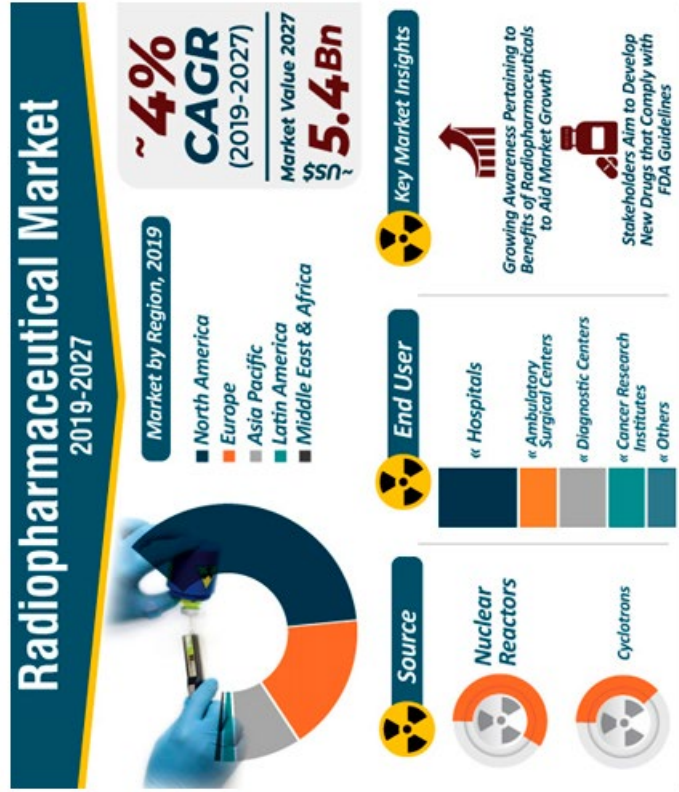
Sebbene siano stati compiuti progressi dalle passate crisi di approvvigionamento, l'incapacità dei gestori di impianti di ricerca di aumentare i prezzi in misura sufficiente e la conseguente mancanza di capacità di riserva nelle varie fasi della catena di approvvigionamento lascia l'offerta vulnerabile e il mercato economicamente insostenibile. La fragilità dell'offerta è stata dimostrata tra la fine del 2017 e l'inizio 2019, con carenze croniche che si verificano regolarmente a causa di interruzioni non pianificate.

L'esercizio dei reattori di ricerca per la produzione di Mo-99 è attività ad alta intensità di capitale e costi fissi elevati mentre i servizi di irraggiamento hanno bassi costi marginali. Il principale ostacolo al Ritorno dell'Investimento si trova nell'attuale struttura della catena di approvvigionamento, in particolare gli investimenti pubblici e privati in nuovi reattori di potenza maggiore, potrebbero essere facilitati se il costo totale dell'operazione venisse coperto dal prezzo del Mo-99.

**CIÒ COMPORTERÀ VALLE DELLA CATENA, UN AUMENTO DEI COSTI, IN QUESTO CASO DEI GENERATORI DI
TECNEZIO**

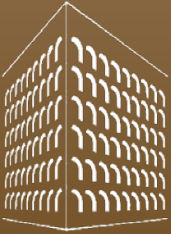
SCENARI

PROSPETTIVE PER LA CRESCITA DI INVESTIMENTI PRIVATI



ALCUNE RECENTI INIZIATIVE


- **Reattori in Europa per colmare la carenza dovuta alla chiusura del reattore NRU (Canada)**
 - Incremento della produzione degli esistenti
 - Nuovi reattori FRMIII della Germania (2020) e JHR francese (2023). Altri in Belgio e Olanda sono in corso di verifica circa la loro sostenibilità economica
- **Nuovi reattori in Brasile, Argentina, Cina, Corea, Romania per il mercato domestico**
- **Altri metodi alternativi per la produzione di Tc**
 - Progetti finanziati dal Dipartimento dell'Energia (DOE) degli Stati Uniti
 - Il Progetto MOLY dell'ENEA per l'irraggiamento neutronico nel reattore di ricerca TRIGA RC-1 Casaccia, di Mo bersaglio (accordo ENEA-perma FIX)
 - Il progetto LARAMED dell'INFN per la produzione di ciclotrone T
- **Il reattore giordano per Ricerca e la Formazione (JRTR)** su licenza coreana produce tra l'altro radioisotopi per la medicina nucleare



Bibliografia

- NEA High-Level Group on the Security of Supply of Medical Radioisotopes - *The Supply of Medical Radioisotopes: Review of Potential Molybdenum-99/Technetium-99m Production Technologies*, 2010
- NEA High-Level Group on the Security of Supply of Medical Radioisotopes - *The Supply of Medical Radioisotopes 2019 Medical Isotope Demand and Capacity Projection for the 2019-2024 Period*
- NEA High-Level Group on the Security of Supply of Medical Radioisotopes - *The Supply of Medical Radioisotopes Results from the Third Self-assessment of the Global Mo-99/Tc-99m Supply Chain*, 2017
- NEA Nuclear Development Committee (NDC) - *The Supply of Medical Radioisotopes An Economic Study of the Molybdenum-99 Supply Chain*, 2010
- European Association of Nuclear Medicine (EANM) *Radiopharmacy: An Update – Technologist's Guide*
- EURATOM Supply Agency (ESA) *ANNUAL REPORT 2019 – Chapter 3 section 3.3.1 Supply of medical radioisotopes*
- OCSE – NEA - *The Supply of Medical Isotopes An economic diagnosis and possible solutions 2019*
- European Association of Nuclear Medicine (EANM): *The Radiopharmacy A Technologist's Guide*
- European Association of Nuclear Medicine (EANM): *The Radiopharmacy: An Update A Technologist's Guide*
- EURATOM Supply Agency (ESA) *ANNUAL REPORT 2019 – Chapter 3 section 3.3.2 SAMIRA*
- Varie Università – *Funzionamento del generatore ⁹⁹Mo-^{99m}Tc*
- Università di Pavia - *Produzione di radioisotopi mediante ciclotrone presso il laboratorio energia nucleare applicata (L.E.N.A.) dell'Università degli Studi di Pavia*
- Oswaldo Aronica, Mario Carta, Mauro Olivetti, Fabrizio Pisacane, Emilio Santoro, ENEA - *Il Progetto MOLY: una via italiana per la produzione del radiofarmaco 99mTc, Energia e Innovazione 2017*





LA PRODUZIONE DI RADIOFARMACI, $^{98}\text{MO}(n,\gamma) ^{99}\text{MO}$, IN REATTORI NUCLEARI DI RICERCA ENEA

Introduzione

I radiofarmaci rappresentano una moderna applicazione della medicina nucleare che è ormai diffusa nella pratica medica quotidiana in unità di cura ed ospedaliere dotate di questi reparti. Possiamo suddividere queste pratiche mediche essenzialmente in due grandi filoni: la diagnostica e la cura vera e propria. Per quanto riguarda il primo aspetto, la IAEA (International Atomic Energy Agency) stima in 80-90 milioni di esami l'anno l'ammontare delle pratiche diagnostiche mondiali, di esse, l'80% riguarda esami in cui l'agente di contrasto è il $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (tecnezio 99 metastabile). Il progenitore di tale radionuclide è il ^{99}Mo , da cui si produce il tecnezio.

Come tutti i radiofarmaci costituiti da radionuclidi, anche questa accoppiata $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$, possiede una emivita piuttosto limitata (66/6 ore), diventano quindi critici aspetti che coinvolgono non solo la radiochimica, ma anche tutta la filiera che dalla sua produzione arriva infine alla somministrazione al paziente. Stime NEA indicano in 335 TBq a 6 giorni ^{99}Mo EOP (End of Processing) alla settimana, la domanda mondiale, con una crescita dello 0,5% annuo nei mercati maturi e del 5% annuo nei mercati emergenti.

A questo si aggiunga una riscontrata carenza di produzione per l'uscita dal circuito produttivo in anni recenti di consolidate unità produttive (reattore NRU, CNL, Canadian Nuclear Labo-

a cura di
Ing. Giorgio Giorgiantonì

Commissione:
Ricerca e reattori Innovativi

ratories, NORDION processing capacity, l'abbandono del progetto MAPLES per carenze progettuali), questo ha portato ad una certa sottoproduzione nel decennio scorso. Il mercato ha reagito diminuendo la richiesta e assestandosi sui valori di cui sopra.

I metodi di produzione di questi radionuclidi sono essenzialmente due: per irraggiamento con reazione n, γ in reattori dai quali si estraggono come prodotti di fissione oppure da ciclotroni, ma a rese molto più basse. Gli esperti dell'ENEA, sensibili alla realtà italiana, hanno investigato soprattutto la possibilità di una produzione locale. L'Agenzia infatti, nel suo Centro della Casaccia è dotata di infrastrutture di ricerca uniche nel campo in Italia, risultando attivi due reattori nucleari di ricerca (TRIGA, TAPIRO rispettivamente termico e veloce). In particolare, TRIGA è un reattore termico a circolazione naturale, di potenza di 1 MW_{th} , dotato di numerosi canali che attraversano il nocciolo, il cui profilo neutronico presenta

un flusso di $2,7 \cdot 10^{13} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ nel canale centrale. In tali canali sono possibili irraggiamenti a flussi diversi di materie varie, processi impossibili in reattori di potenza. Precisiamo che un reattore di ricerca ha delle caratteristiche profondamente diverse da un reattore di potenza, di quelli per intenderci che producono energia elettrica. Infatti, il primo presenta accessi al nocciolo in diversi canali in modo da portare a termine processi di irraggiamento per le più disparate esigenze, nonché una flessibilità di funzionamento e refrigerazione non previste in un reattore commerciale.

IL REATTORE TRIGA

Il TRIGA (Training Research Isotopes General Atomics - Reattore Casaccia 1) è un reattore termico a circolazione naturale, con acqua leggera come refrigerante primario, di potenza di 1 MW_{th} costruito nel 1960 nella sua prima versione a 100 kW di potenza nell'ambito dell'iniziativa USA Atoms for Pe-

Figura 1:
Prospettiva
dell'impianto
TRIGA RC-1



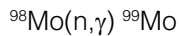
Core	Cylindrical diameter	535mm
	Height	670mm
Fuel	Type	Uranium – ZrH alloy (8.5% Wt U)
	Enrichment	20 % ²³⁵ U
	Moderator	H ₂ O, ZrH
	Coolant	Demineralized water in natural convection
Control Rods	Type	n°3 B ₄ C Fuel Follower n°1 B ₄ C Regulating Rod
Reflector	Cylindrical Inner Reflector diameter	543 mm
	Outer Reflector Diameter	1098.5 mm
	Overall Height	733.4 mm
	Radial thickness	214mm
	Material	Graphite

Tabella 1:
Parametri costruttivi
del nocciolo

ace e successivamente, nel 1967, è stato portato alla potenza di 1 MWth su progetto ENEA. Esso è dotato di numerosi canali che attraversano il nocciolo, il cui profilo neutronico presenta un flusso di $2,7 \cdot 10^{13}$ n/(cm²*s) nel canale centrale. In tali canali sono possibili irraggiamenti a flussi diversi, processi non previsti in reattori di potenza.

IL METODO DI INDAGINE E VALUTAZIONE

Gli esperti dell'ENEA hanno individuato come processo più adatto alle caratteristiche impiantistiche e di successiva manipolazione dei prodotti quello per attivazione neutronica secondo la reazione:



In cui, l'atomo di ⁹⁸Mo assorbe un neutrone in base al valore della sezione d'urto nella regione in cui le sue caratteristiche energetiche lo collocano. La resa è pruden-

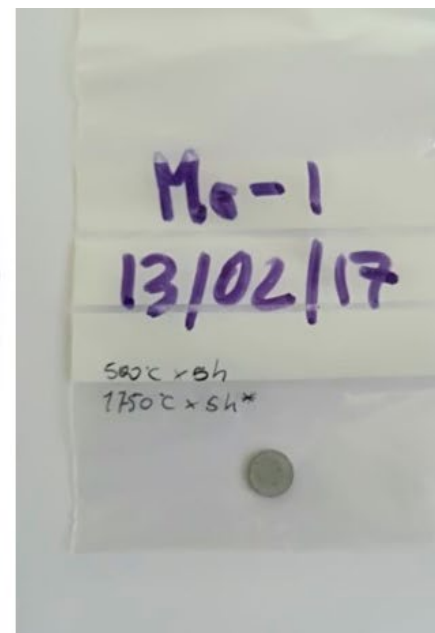
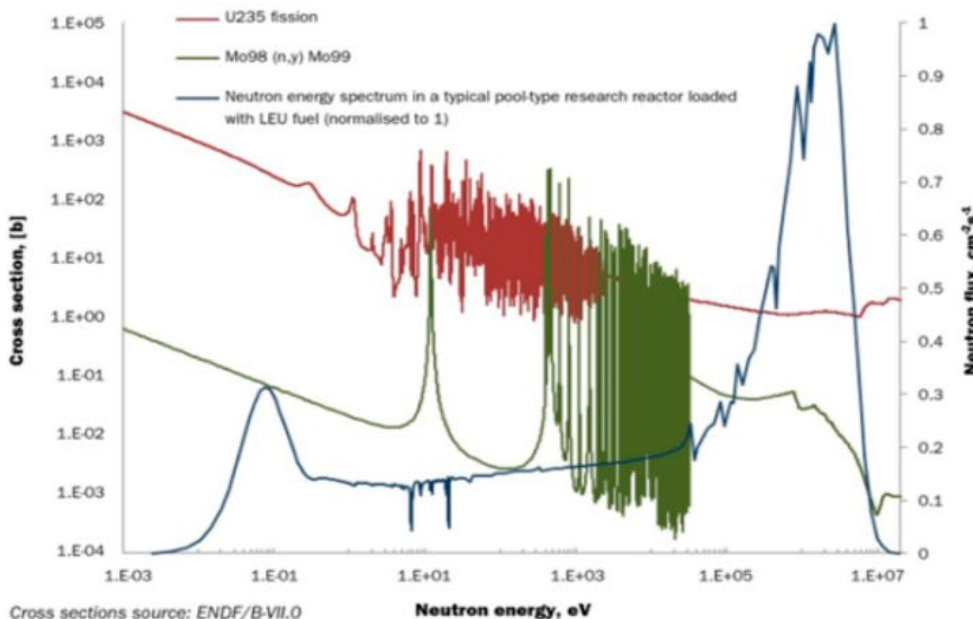
zialmente più prevedibile nella regione dei neutroni termici, questo giustifica la scelta del TRIGA in quanto reattore termico.

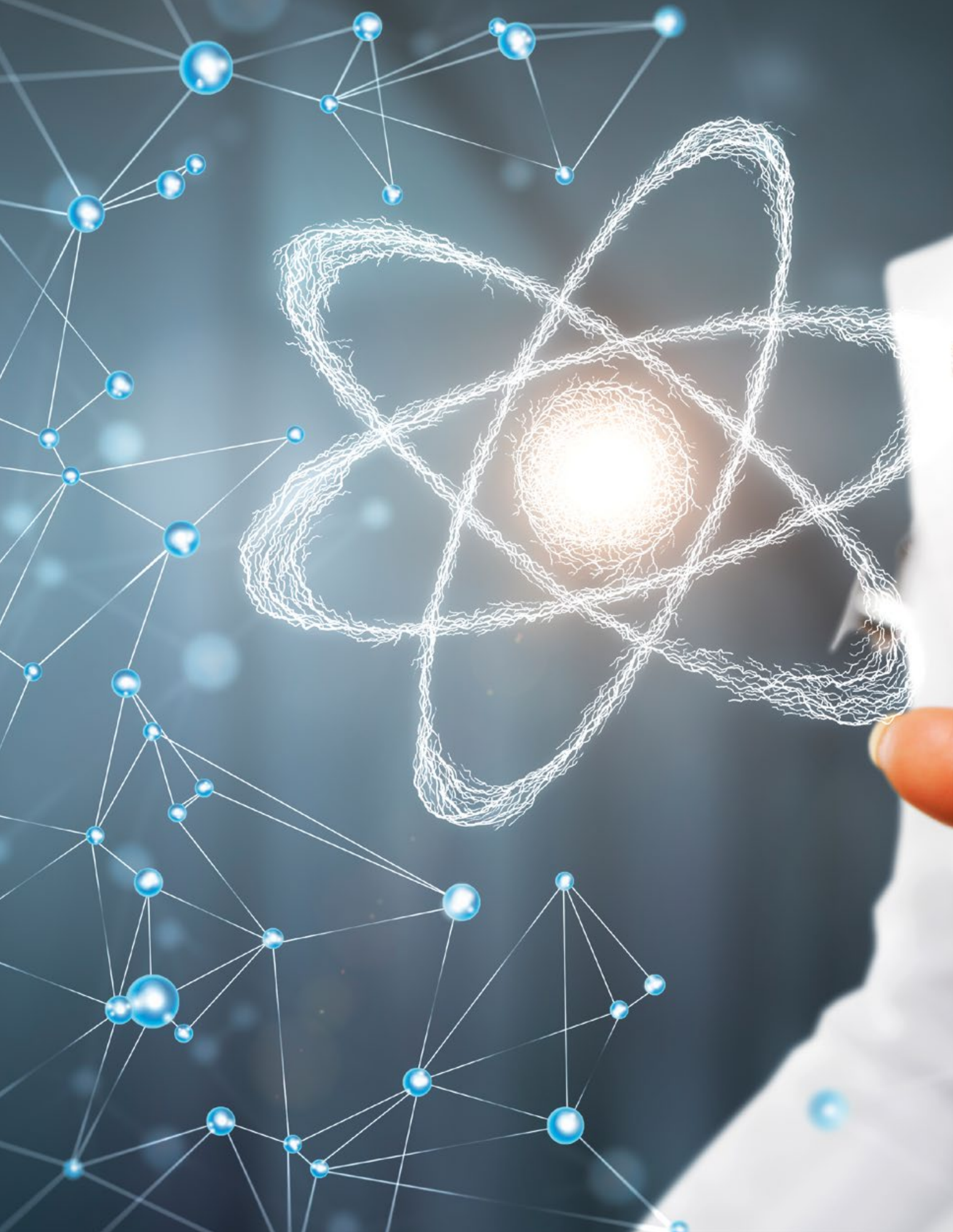
Il profilo neutronico di TRIGA RC-1 presenta un flusso di $2,7 \cdot 10^{13}$ n/(cm²*s) (neutroni per centimetro quadrato al secondo) nel canale centrale che è quello scelto per queste valutazioni, giacché assialmente è la regione di flusso massimo che va a declinare a mano a mano che ci si allontana radialmente dal centro del nocciolo, con un andamento a parabola con la concavità rivolta verso il basso.

LA MESSA A PUNTO DELLA GEOMETRIA DELLA MASSA DEL MOLIBDENO

La ricerca di mercato dell'isotopo ⁹⁸Mo con un grado di purezza accettabile (98,4-98.6%) ha condotto alla sua reperibilità in piccola quantità ed in forma di polvere.

Figura 2:
Sezioni d'urto
di U235 e Mo98,
provino di Mo98







Questo approvvigionamento ha richiesto la gestione della richiesta d'offerta con l'agente in Olanda del fornitore americano-russo di questo isotopo. Così come fornito, il metallo non poteva essere immesso nel reattore; parte dello studio era rivolto ad evitare qualsiasi tipo di sporcamento del nocciolo, con tutto quello che ne sarebbe conseguito. Una eventuale operazione di pulizia del nocciolo avrebbe comportato costi considerevoli di fermata dell'impianto e successiva bonifica del reattore. Tenendo conto delle dimensioni del canale centrale e del materiale del contenitore da calare nel canale (l'intenso flusso neutronico può creare fenomeni di infragilimento), ci si è orientati verso una forma a pasticca ($\phi = 8,66$ mm, $h = 1,6$ mm 1 g, $\rho = 10,3$ g/cm³). Tale forma, partendo dalla polvere, si è raggiunta attraverso la sinterizzazione della massa cilindrica, cioè dapprima con l'applicazione di una pressione monoassiale a 10 MPa con una pressa meccanica, avendo cura di evitare la frattura del campione, poi con una pressurizzazione idrostatica a 200 MPa in una pressa idraulica. A queste lavorazioni meccaniche è seguita la cottura per due giorni in un forno sottovuoto a 1760 °C. Il tutto per conferire al campione una consistenza spugnosa meccanicamente resistente ma maggiormente permeabile al flusso neutronico. Queste lavorazioni si sono effettuate nel centro materiali ENEA di Faenza. In previsione di una maggiore quantità elaborabile di sostanza è stato approvvigionato un forno sottovuoto di capacità di 18 kg che si trova nel centro ENEA di Brindisi, precedentemente di proprietà di altro consorzio di ricerca e il cui acquisto è risultato economicamente vantaggioso per l'Agenzia ENEA.

CONCLUSIONI

Sulla base dei dati riportati nel Rapporto di Sicurezza del reattore e di recenti studi disponibili nella letteratura scientifica specifica del settore, è stata dapprima effettuata una valutazione teorica delle potenzialità di

produzione ipotizzando l'irraggiamento di un target di molibdeno metallico arricchito al 98,4% in ⁹⁸Mo nel canale centrale del nocciolo: le concentrazioni di attività ottenibili in modalità di irraggiamento continua (120 ore consecutive) e discontinua (6 ore al giorno 5 giorni a settimana) sono risultate pari rispettivamente a 30 GBq/g e 9 GBq/g. Si tenga conto che una unità di medicina nucleare ha bisogno di 20-30 GB/settimana.

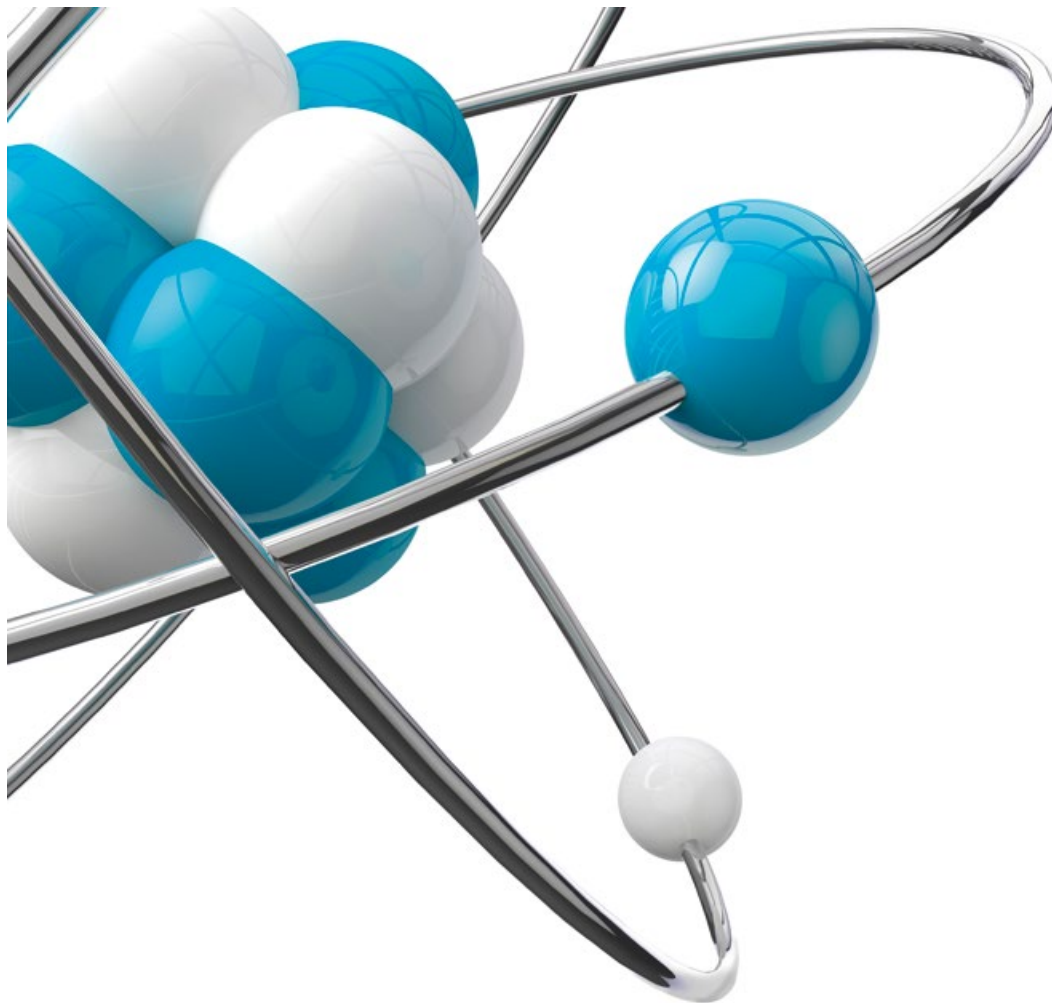
Tali valori sono stati confermati dalle risultanze sperimentali scalando i risultati ottenuti su campioni reali con tempi di irraggiamento minori. Infatti, le prime evidenze sperimentali, con molibdeno arricchito al grado di purezza di cui sopra, portano ad una producibilità di 33 GBq/g EOI (End of Irradiation) per 120 ore di irraggiamento continuo e mostrano una confortante sezione d'urto $\sigma = 0,4$ mb (millibarn), per via dell'apporto dei neutroni nella regione delle risonanze e nella regione veloce.

L'effetto quindi di una produzione limitata ad esigenze diagnostiche e terapeutiche ancorché locali potrebbe portare a sensibili risparmi per il trasporto di tali materie, che è sempre molto costoso. In particolare, la Regione Lazio conta su circa 45 Centri di medicina nucleare distribuiti principalmente vicino Roma e, in numero ridotto, negli altri capoluoghi di provincia.

Si realizzerebbe una serie di benefici che vanno ben al di là della mera produzione del radiofarmaco stesso. Si migliorerebbe l'accettabilità sociale dei sistemi nucleari, si realizzerebbe una sinergia tra vari centri dell'Agenzia ENEA e si migliorerebbe il carico di lavoro di tali impianti. Si formerebbe e si qualificerebbe un gruppo di esperti che maturerebbero una serie di preziose competenze per il Paese, viste le strutture accessorie che dovrebbero essere implementate. In prospettiva infine appare interessante la possibilità di aumentare la potenza del reattore a 3 MW, con interventi fattibili e limitati, ripotenziamento effettuato in altre unità TRIGA nel mondo.

RICONOSCIMENTI

Queste considerazioni sono state l'esito di valutazioni e studi del gruppo di Direzione del Progetto Molibdeno, composto da: O. Aronica, F. Bonfà, G.Giorgiantoni, M. Olivetti e F. Pisacane.



Bibliografia

1. Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD 2010 AEN/NEA: The Supply of Medical Radioisotopes, Review of Potential Molybdenum-99/Technetium-99m Production Technologies
2. Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD 2010 NEA No. 6967: The Supply of Medical Radioisotopes – An Economic Study of the Molybdenum-99 Supply Chain.
3. ENEA Reports: A. Grossi, M.G. Iorio, Risultanze sperimentali irraggiamento fogliolina di Molibdeno, FSN FISS RNR (16) 05



Quaderno



a cura di
Ing. Mauro Cappelli

Commissione
Ricerca e Reattori
Innovativi

LA STRUMENTAZIONE NUCLEARE BIOMEDICA DI NUOVA GENERAZIONE



Abstract

A seguito della diffusa disponibilità commerciale di tecniche di imaging ibrido SPECT/TC e PET/TC, durante l'ultimo decennio l'impiego della medicina nucleare è uscita dal suo ambito di nicchia. Ciò ha portato a un'intensificazione degli sforzi per il miglioramento di tali tecniche e per la

ricerca di tecnologie di imaging più avanzate e integrate in grado di fornire una risposta sempre più accurata e affidabile. In questo contributo, dopo aver ricordato i principi della fisica su cui si fondano, saranno brevemente illustrati i più recenti progressi e le possibili direzioni future di tali tecnologie di strumentazione e diagnostica nelle applicazioni della medicina nucleare.

Introduzione

Durante gli ultimi anni l'impiego della medicina nucleare è uscito dal suo ambito di nicchia, grazie principalmente alla diffusa disponibilità commerciale di tecniche di imaging ibrido SPECT/TC e PET/TC. Come sempre accade con l'introduzione di tecniche rivoluzionarie, il mercato ha a sua volta contribuito a tale successo, intensificando gli sforzi per il miglioramento delle metodiche e investendo sulla ricerca di tecnologie di imaging più avanzate e integrate in grado di fornire una risposta sempre più accurata e affidabile.

Sin dalla sua prima introduzione, sia la SPECT/TC sia la PET/TC si sono affermate come le principali modalità di imaging a permettere la valutazione quantitativa di bersagli molecolari in vivo. Esse consentono, secondo principi fisici e modalità tecnologiche differenti, di stabilire un legame quantitativo tra la concentrazione di attività variabile nel tempo in organi e tessuti di rilievo fisiologico o patologico e i parametri fondamentali che caratterizzano i processi biologici a livello cellulare. Gli sforzi recenti sono incentrati non solo sullo sviluppo di nuove metriche convenzionali di maggiore precisione, ma anche sul progetto di nuovi protocolli e tecniche di elaborazione dei dati che consentono la generazione di immagini parametriche di tutto il corpo umano.

In questo articolo di breve rassegna, verranno esaminati i principi fisici, gli sviluppi nella strumentazione e le tecniche di ricostruzione delle immagini che hanno consentito l'emergere di nuove applicazioni cliniche basate sulle tecnologie SPECT/CT e PET/TC, con uno sguardo alle tendenze attuali e alle sfide future della ricerca nel campo della strumentazione nucleare biomedica.

Nuclear medical imaging

La medicina nucleare utilizza sostanze radioattive, dette radiofarmaci, a scopo diagnostico, terapeutico e di ricerca biomedica. Essa è stata sviluppata nel corso del Novecento sulla base delle conoscenze via

via acquisite sulle proprietà della radiazione ionizzante, la quale rappresenta quella zona dello spettro elettromagnetico cui corrispondono particelle in grado di ionizzare la materia. Ciò può accadere in due modi: direttamente, attraverso particelle cariche veloci che depositano la loro energia nella materia attraverso numerose piccole interazioni coulombiane (elettrostatiche) con elettroni orbitali; indirettamente, per mezzo di raggi X, fotoni gamma o neutroni che trasferiscono la loro energia a particelle cariche veloci rilasciate in un numero limitato di interazioni, le quali depositano a loro volta la loro energia nella materia [1].

Sfruttando tali proprietà, sono state sviluppate negli anni diverse metodiche diagnostiche [2] basate sullo studio della fissazione di un radionuclide (un nuclide instabile che decade emettendo energia sotto forma di radiazioni), legato a una molecola vettore che mima l'attività metabolica di un tessuto o si fissa a quest'ultimo mediante l'interazione con opportuni recettori.

Dalla prospettiva terapeutica, dei radionuclidi possono essere impiegati per legarsi ai tessuti patologici similmente ai farmaci diagnostici, così da colpirli selettivamente con un'alta dose di radiazioni ad alto trasferimento energetico (p.e. β^- o α), salvaguardando al contempo, con un certo margine di sicurezza, i tessuti sani vicini (terapia radiometabolica).

Negli ultimi anni, si è assistito a una crescente integrazione delle informazioni provenienti dall'*imaging* radiologico con le conoscenze del medico nucleare, andando così a sviluppare sempre più una multidisciplinarietà che coinvolge diversi settori della scienza e della tecnologia (Medicina, Fisica, Ingegneria, Biologia, Chimica, Matematica e Informatica).

Cosa rappresenta oggi l'imaging? Un'immagine medica è una rappresentazione pittorica relativa alla misurazione di un oggetto o di una funzione del corpo, impiegata in modo non invasivo per diagnosticare problemi strutturali e biologici. Esistono modi diversi per acquisire dati di immagini mediche: radiografia, Magnetic Resonance

Imaging (MRI), ultrasuoni, nuclear imaging. Le informazioni possono essere acquisite in una o tre dimensioni spaziali, in modalità statica o dinamica. La conoscenza della qualità dell'immagine consente il confronto tra i diversi sistemi di imaging. Tra le tecniche diagnostiche di medicina nucleare utilizzate per la produzione di bioimmagini, di particolare rilievo è la tomografia a emissione (*emission tomography*) utilizzata per studiare le funzioni biologiche (diagnostica funzionale) e fornire un complemento d'indagine rispetto alla diagnostica morfologica, attraverso l'impiego di traccianti radioattivi somministrati al paziente. Due particolari tecnologie basate sulla tomografia a emissione sono di particolare interesse: la *Single Photon Emission Computed Tomography* (SPECT), che impiega

isotopi emittenti raggi gamma, e la *Positron Emission Tomography* (PET), che impiega isotopi emittenti positroni (un positrone è una particella con circa la stessa massa dell'elettrone ma con carica opposta). A differenza della più nota tomografia computerizzata (TC) e della risonanza magnetica nucleare (RMN), che forniscono informazioni di tipo morfologico, la tomografia a emissione dà informazioni di tipo fisiologico permettendo di ottenere mappe dei processi funzionali all'interno del corpo. Infatti, la SPECT o la PET forniscono rappresentazioni tomografiche statiche e dinamiche degli organi o delle loro funzioni acquisendo una serie di immagini bidimensionali attorno al paziente (vedi Fig. 1). È pertanto evidente che, se nel caso di imaging radiografico si ha una sovrapposizione di tutte le informa-

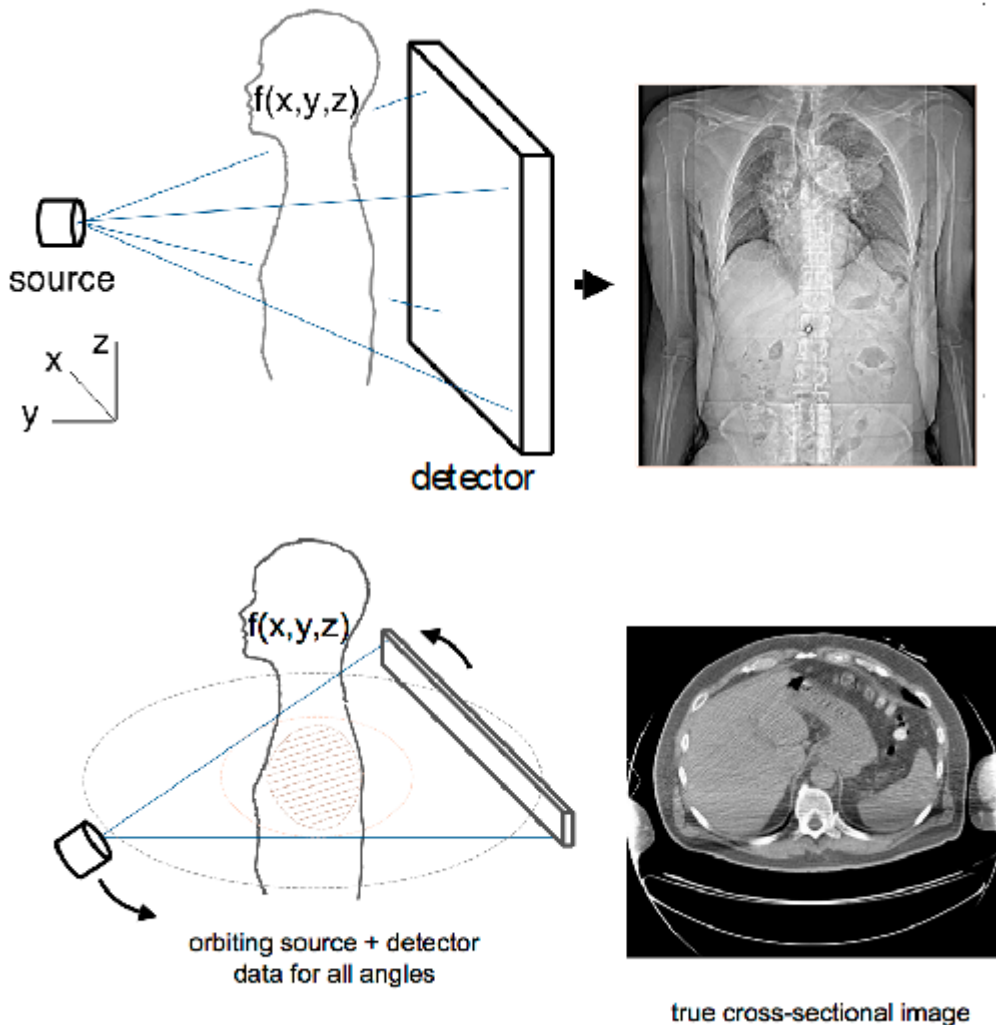


Figura 1:
 Comparazione tra X-Ray
 Projection Imaging (sopra)
 e X-Ray Tomographic
 Imaging (sotto)

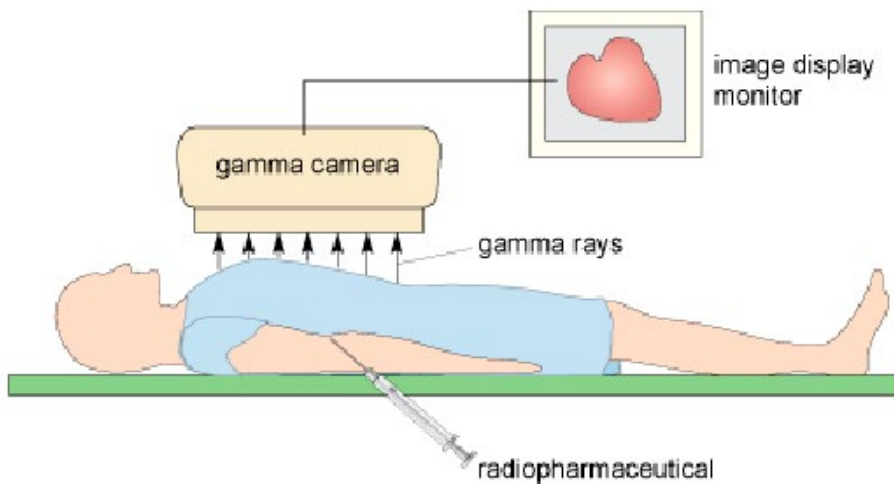


Figura 2: Schema di funzionamento della SPECT: al paziente è iniettato il radiofarmaco, che si accumula nell'organo di interesse, portando all'emissione di raggi gamma poi rilevati dalla gamma camera

zioni (risultato non quantitativo), nel caso di imaging tomografico la sovrapposizione delle varie fette (dal greco tomos) produce risultati quantitativamente più realistici.

Le apparecchiature per la produzione di immagini (gamma camera e tomografo) impiegano dei cristalli a scintillazione disposti attorno al paziente che consentono la visualizzazione delle zone di fissazione del radionuclide all'interno dell'organismo. Tali cristalli emettono luce se colpiti dalla radiazione gamma, emessa direttamente dal radiofarmaco iniettato al paziente o generata per annichilazione dei positroni. La luce così rilevata è poi convertita in un segnale elettrico (digitale) per l'analisi computerizzata.

I principali cristalli impiegati nella pratica sono: ioduro di sodio (il primo a essere usato), germanato di bismuto (il più usato oggi), ossiortosilicato di lutezio (il più promettente nel futuro).

Vi è un buon numero di radionuclidi impiegati a seconda dell'applicazione specifica. Il Tecnezio-99m è il radionuclide più utilizzato, emette radiazioni gamma con energia di 140 keV (ottimali per la gamma camera) e ha un'emivita di circa 6 ore, compatibile con la durata degli esami (e abbastanza breve da consentire una limitata irradiazione del paziente e della popolazione). È prodotto tramite un generatore ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$ che ne garantisce un'ottima disponibilità. L'Indio-111 è usato per la diagnosi di tumori neuroendocrini, mentre lo Iodio-123 e lo Iodio-131 sono usati principalmente nelle terapie radiometaboliche per la tiroide, il Samario-153 e il Radio-223 per la terapia delle metastasi ossee, Renio-186, Ittrio-90, Lutezio-177 ed Erblio-169 per varie terapie radiometaboliche. Infine, il Fluoro-18 è usato per

la PET ed è prodotto con un acceleratore di particelle detto ciclotrone (molto costoso!).

Le tecnologie della tomografia a emissione SPECT e PET

La principale differenza tra SPECT e PET è dunque nella tipologia di traccianti radioattivi usati: la SPECT misura raggi gamma, mentre la PET misura positroni.

Lo schema di funzionamento della SPECT è riportato in Fig. 2. Il sistema di rilevazione si basa su una tecnologia sviluppata negli anni '50 e basata su un collimatore necessario per definire la direzione dei raggi gamma, che sono rilevati dal rilevatore con scintillatore, mentre i segnali sono amplificati da array di tubi fotomoltiplicatori verso la circuiteria elettronica. La luce prodotta dal cristallo è convertita in segnali elettrici tramite fotomoltiplicatori. I fototubi (di norma circa 60), del diametro di qualche cm, sono accoppiati otticamente al cristallo, coprendo interamente il campo di vista e formando una griglia regolare nello spazio. Le coordinate dell'evento vengono determinate tramite una media pesata con il segnale fornito da ciascun fototubo.

La SPECT è impiegata particolarmente per valutare la malattia coronarica e il danno muscolare cardiaco a seguito di un attacco, ma i radiotraccianti mostrano accumulo anche nelle cellule cancerose (torace, addome o cervello), aiutando così il rilevamento e la localizzazione del tumore in un contesto complesso. È anche utilizzata nell'imaging di infezioni e infiammazioni e misurazione della funzionalità epatica e renale.

È utile ricordare che la tecnica della SPECT può essere impiegata per tracciare la distribuzione dei radioisotopi nel combustibile

nucleare precedentemente irraggiato. A seguito dell'irraggiamento da parte dei neutroni in un reattore nucleare, una vasta gamma di radionuclidi gamma-emittenti è prodotta all'interno del combustibile, sia come prodotti di fissione (cesio-137, bario-140 ed europio-154) sia come prodotti d'attivazione (cromo-51 e cobalto-58). La SPECT consente di verificarne la presenza nelle barre di combustibile conservate nei depositi nucleari (per i controlli di sicurezza), validare i risultati di codici di simulazione del nocciolo, studiare il comportamento del combustibile nucleare in condizioni normali o d'incidente. La PET invece sfrutta l'imaging nucleare per studiare le funzioni biologiche del corpo umano iniettando un composto biologico radioattivo al paziente, tipicamente ^{18}F -FDG (Fluorodeossiglucosio). Il composto viaggia verso l'organo d'interesse (per es., cellule tumorali), mentre il positrone emesso si annichilisce nel corpo. Due raggi gamma sono emessi a seguito dell'annichilazione, mentre i raggi gamma sono rilevati all'esterno del corpo lungo la linea di risposta (LOR), il cui valore consente di rilevare la posizione della radiazione (Fig. 3).

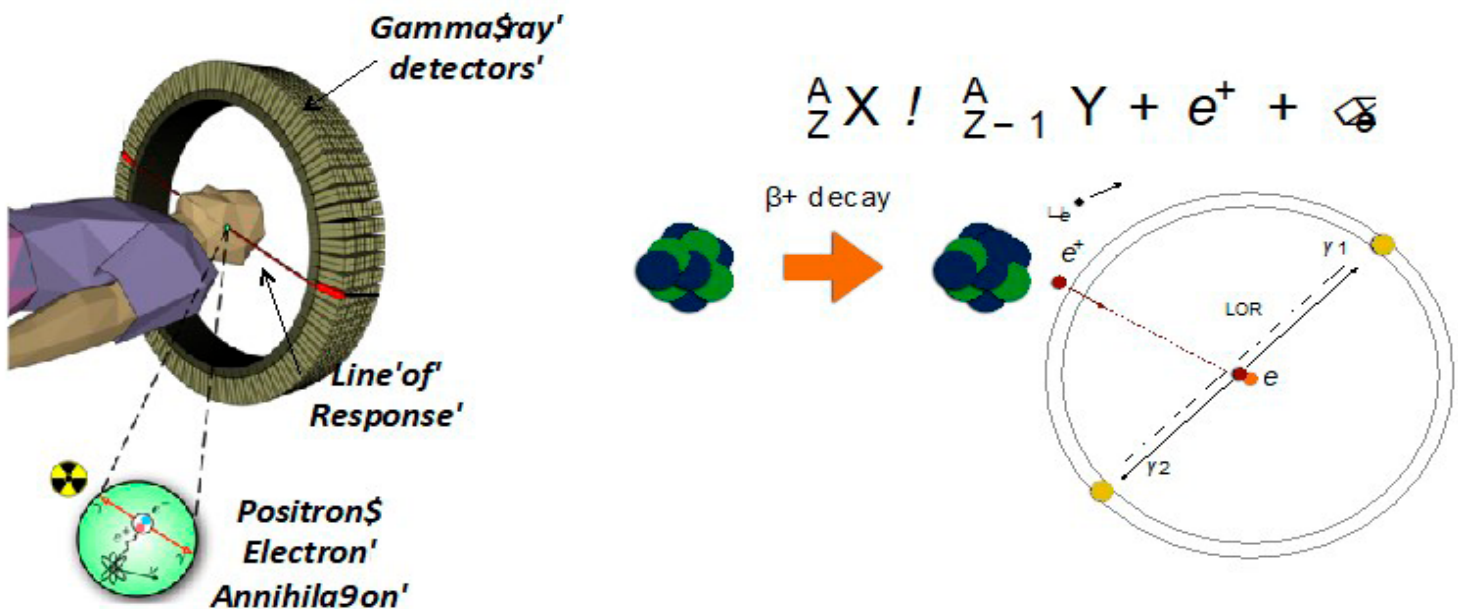
I radiofarmaci come il ^{18}F -FDG includono zucchero (glucosio), il cui assorbimento avverrà in aree ad alto tasso metabolico (p.e. cellule cancerose). I rivelatori PET in un array rilevano l'emissione back-to-back ($\pm 180^\circ$), mentre

l'immagine è formata osservando eventi di coincidenza da diverse angolazioni. La PET produce sia immagini planari che tomografiche. I rivelatori sono scintillatori ad alto Z come BGO (Germanato di bismuto) o LSO (Ossiortosilicato di lutezio). In particolare, la PET-CT permette la fusione delle immagini morfologiche e funzionali fornendo immagini diagnostiche di elevata significatività.

La PET in oncologia ha molteplici indicazioni: stadiazione e ristadiatione a fine terapia; monitoraggio delle terapie antineoplastiche; diagnosi differenziale fra benignità o malignità delle lesioni (p.e. tessuto cicatriziale radioterapia); ricerca di tumori primitivi occulti; ricerca del miglior punto di una lesione da cui effettuare una biopsia; caratterizzazione metabolica delle lesioni neoplastiche; pianificazione di trattamenti radioterapici. Ulteriori applicazioni sono la diagnosi della malattia Alzheimer, del morbo di Parkinson, dell'epilessia e di altre condizioni neurologiche, in quanto è in grado di mostrare le aree in cui l'attività cerebrale differisce dalla norma). In cardiologia, la PET è usata per studi di perfusione e di metabolismo.

Volendo confrontare le due tecniche (Fig. 4), possiamo dire che la SPECT impiega radio traccianti meno costosi e più abbondanti, usa radionuclidi che hanno generalmente un tempo di dimezzamento più lungo (quindi possono essere più facilmente trasportati dal

Figura 3: Schema di funzionamento della PET: i radionuclidi PET decadono per emissione di positroni (β^+), emessi con una data energia cinetica iniziale; quando il positrone, rallentato dal mezzo, entra in stretto contatto con un elettrone libero o debolmente legato, si ha annichilazione. L'energia di ciascuna particella rilasciata nel processo avviene sotto forma di due fotoni da 511 keV collineari per conservare la quantità di moto. La rivelazione in coincidenza dei due fotoni permette di identificare la retta su cui giace l'evento (LOR)



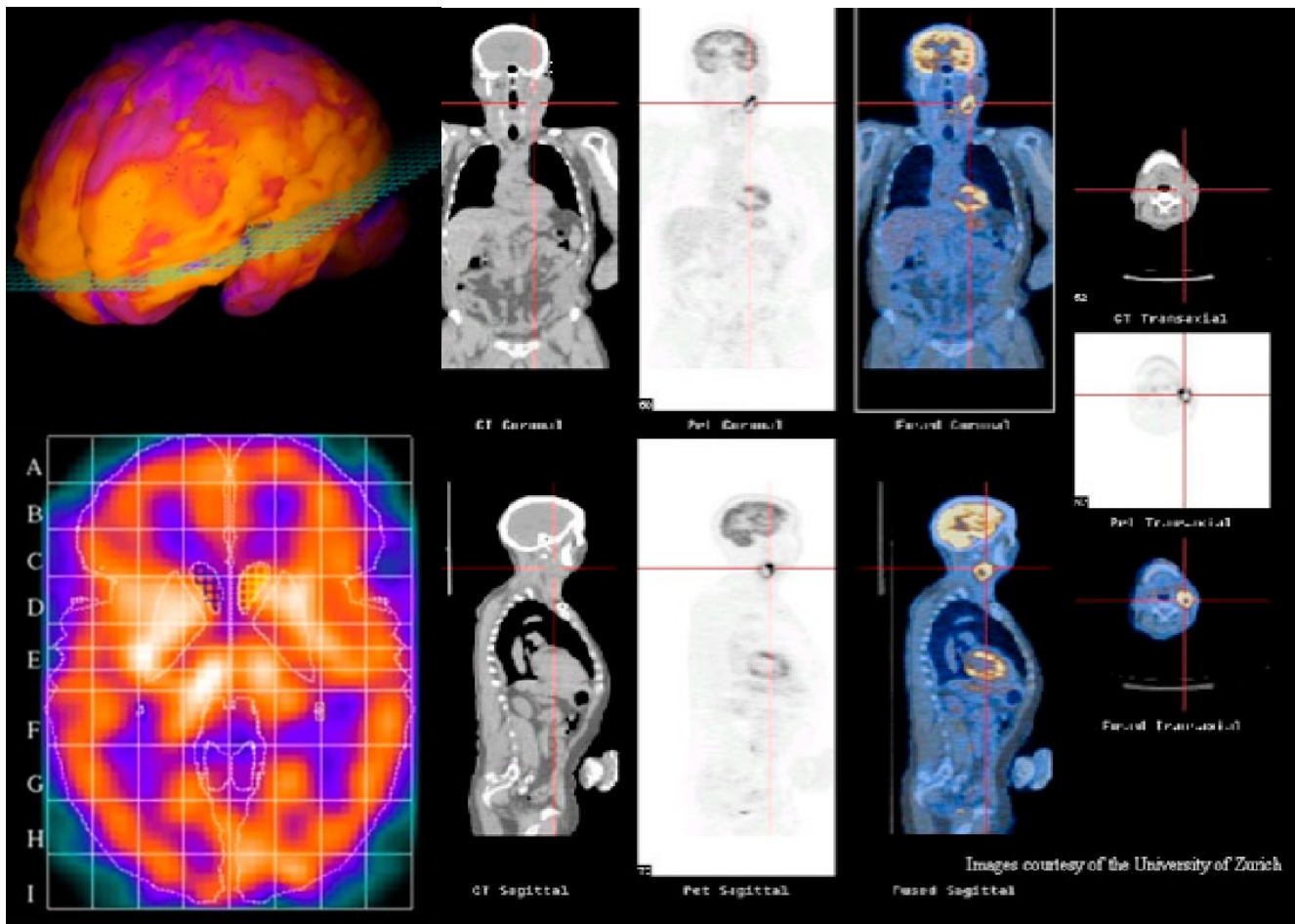


Figura 4: Esempi di immagini SPECT (sinistra) e PET (destra)

luogo di generazione all'ospedale), può impiegare due diversi traccianti contemporaneamente per studiare più funzioni biologiche. In generale, la SPECT non è tuttavia adatta per misurazioni quantitative accurate. Viceversa, la PET dà una più accurata correzione dell'attenuazione dei fotoni, ha una risoluzione spaziale superiore e indipendente dalla profondità (20 mm per SPECT contro 10 mm per PET), ha un migliore contrasto dell'immagine e un tasso di conteggio più elevato. L'ulteriore integrazione su cui si sta lavorando è quella tra PET e MRI, oggi più accurata grazie all'introduzione dei fotodiodi allo stato solido, come i fotodiodi a valanga (APD) e i fotomoltiplicatori al silicio (SiPM). Tuttavia, la tecnologia è ancora in uno stato embrionale e il suo ruolo clinico

deve ancora essere stabilito considerando il rapporto costi/benefici.

Conclusioni

L'imaging medico è un settore in costante progresso che sta trasformando la biomedicina. Tuttavia, molte delle tecnologie hanno ormai diversi decenni e la ricerca biomedica nucleare si sta muovendo verso l'indagine di nuove tecniche e lo sviluppo di rilevatori più avanzati e di nuovi radiotraccianti (alcuni stanno diventando sempre più carenti), i quali unitamente all'applicazione dei più recenti metodi di elaborazione delle immagini, all'impiego del calcolo ad alte prestazioni e all'introduzione della robotica e dell'intelligenza artificiale, possono portare a una seconda rivoluzione in questo settore. In particolare, nei prossimi anni le sfide



riguarderanno il miglioramento della qualità dell'immagine diagnostica (soprattutto in versione dinamica o con l'Imaging 3D in tempo reale durante l'intervento chirurgico), l'ottimizzazione degli algoritmi di quan-

tificazione e la ricerca di metodiche per la riduzione della dose ai pazienti. Un punto critico, comune a tutta la ricerca biomedica sarà il problema dei big data, con risvolti non trascurabili nella privacy dei pazienti.

Bibliografia

- [1] D. L. Bailey, J. L. Humm, A. Todd-Pokropek, A. van Aswegen (eds), Nuclear medicine physics, International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 2014.
- [2] K. Bethge, G. Kraft, P. Kreisler, G. Walter, Medical Applications of Nuclear Physics, Springer, Berlin-Heidelberg-New York, 2004.
- [3] P. F. Sharp, H. G. Gemmell and A. D. Murray (Eds), Practical Nuclear Medicine, 3° Ed., Springer, London, 2005.

Iconografia

Le immagini sono prese da vari siti Internet e s'intendono qui utilizzate per puri fini personali e non commerciali.



a cura di
Dott. Riccardo Schiavo





**RADIOFARMACI:
I FONDAMENTI REGOLATORI
PER IL LORO UTILIZZO CLINICO
E NELLA RICERCA IN MEDICINA**

Abstract

L'esercizio delle attività di Medicina Nucleare, siano esse di tipo clinico o scopo di ricerca è normato da un doppio apparato regolatorio, che si fa carico di garantire efficacia e sicurezza delle procedure sia dal punto di vista fisico che chimico-farmaceutico. Nel testo che segue vengono ripercorse le tappe che hanno condotto alla normativa attualmente in uso.

Testo

Le potenziali applicazioni della radioattività in Medicina sono state evidenti sin dall'inizio dell'era "atomica"; in poco tempo, negli anni '50, l'uso di traccianti radioattivi, in forma di sorgenti non-sigillate, a scopo diagnostico o terapeutico è transitato, dai laboratori di ricerca alla pratica clinica, sulla spinta del Progetto "Atoms for peace" presentato all'ONU dal Presidente degli USA Dwight Eisenhower. In quegli anni la comunità scientifica "nucleare" era molto impegnata in quanto, da un lato pervenivano da Hiroshima e Nagasaki i dati sugli effetti biologici delle radiazioni ionizzanti e quindi sulla loro pericolosità, dall'altro emergevano evidenze scientifiche importanti sull'efficacia di alcuni radionuclidi nella diagnosi e nel trattamento delle patologie tiroidee più importanti.

Riporto le parole utilizzate da Enrico Fermi in una breve intervista radiofonica rilasciata nel 1953, a Ispra, nell'ambito di un meeting di formazione:

"Lo sviluppo dell'energia atomica ha già avuto ed è destinato ad avere sempre più usi costruttivi e non distruttivi. Notevolissime sono tra queste le applicazioni nel campo della medicina: queste applicazioni sono rese possibili dal fatto che nei reattori atomici vengono prodotte un gran numero di sostanze dotate della proprietà della radioattività, offrendo così un mezzo assai efficace per scoprire disfunzioni o malattie. Dosi più elevate di queste sostanze possono anche contribuire a distruggere tessuti maligni".

Si è data pertanto, prioritariamente, la necessità di tradurre le crescenti conoscenze di radiobiologia in norme a salvaguardia

dei pazienti che eseguivano esami diagnostici (le prime scintigrafie) con traccianti radioattivi o trattamenti radiometabolici con radionuclidi beta-emittenti, nonché in regole di radioprotezione per i lavoratori esposti alle radiazioni ionizzanti.

La normativa che ne è derivata è stata il fondamento della legislazione dei singoli stati per la radioprotezione dei pazienti e dei lavoratori. L'ONU ha creato un'agenzia (IAEA) e una commissione (ICRP – International Committee on Radiological Protection) ad "hoc", le cui Pubblicazioni, periodicamente aggiornate, costituiscono il riferimento "tecnico" per la radioprotezione. Negli anni '50, la appena nata Comunità Europea (CEE) si è dotata di una struttura dedicata al "nucleare" pacifico, l'Euratom, che ha curato la redazione delle Direttive e dei Regolamenti. Queste quindi le fonti del "regolatorio" per la radioprotezione, che in Italia ha avuto con il DPR 185 del 1964, il primo atto legislativo. A questo hanno fatto seguito nel tempo il D. Lgs. 230/1995, il D.Lgs. 187/2000, sino all'ultimo nato il D.Lgs. 101/2020, entrato in vigore da pochi mesi, un testo di oltre 130 pagine, in cui il Legislatore ha voluto riepilogare più di 50 anni di leggi e decreti.

La Medicina Nucleare "normata" dal DPR 185/64 è assai diversa da quella del D.Lgs. 230/95: diverse le macchine, diversi i radionuclidi disponibili, diverse le conoscenze radiobiologiche; negli anni '60 la Medicina Nucleare decolla, fornendo ai centri di cura strumenti diagnostici e terapeutici importanti, a fronte di un apparato regolatorio limitato agli aspetti "fisici" dei traccianti radioattivi somministrati ai pazienti, per cui molti medici nucleari si sentivano autorizzati a far tutto, a iniettare qualsiasi radionuclide, purché fosse salvaguardata la radioprotezione. Ma un tracciante radioattivo non si definisce solo per le proprietà fisiche e il tipo di emissione, ma anche per le proprietà chimiche che permettono a queste molecole, una volta introdotte nel sistema biologico, di simulare nella loro distribuzione, il comportamento dei componenti corporei "stabili". Di questo tipo di valutazioni si avvale la farmacologia, quando studia l'azione di

un farmaco sul sistema biologico (farmacodinamica) o l'azione del sistema biologico sul farmaco introdotto (farmacocinetica). Si è fatta strada così l'idea che i traccianti radioattivi possano essere considerati a tutti gli effetti "farmaci", in cui principio attivo è certamente la molecola "carrier" stabile, ma anche l'atomo marcatore, ha in sé le caratteristiche del principio attivo anzi "radio-attivo", perché è proprio la radioattività che permette di ottenere informazioni diagnostiche (gamma emittenti) o effetti terapeutici (alfa e beta emittenti). Senza addentrarci nella definizione di "radiofarmaco", sia esso di uso diagnostico o terapeutico, va detto che l'equiparazione Tracciante radioattivo = Radiofarmaco (RF) è avvenuta per legge con il D.Lgs 178/91 art.21 (in recepimento della Direttiva CEE 343/89) "Disposizioni particolari per i radiofarmaci" che definisce le diverse modalità con cui si presenta un Radiofarmaco (generatore, pronto per l'uso, kit da ricostituire o precursore).

L'apparato regolatorio dei farmaci è assai più complesso di quello per la radioprotezione per cui all'inizio degli anni '90 erano pochi i traccianti, di comune e diffuso uso clinico, autorizzati come farmaci: molti di questi venivano commercializzati come "diagnostici", al pari dei reattivi chimici dei laboratori, senza tenere in conto che tali molecole, prodotte dall'industria, pronte per l'uso o da ricostituire con una soluzione di ^{99m}Tc -pertechnetato, venivano somministrate ai pazienti. Si apre così alla fine del 1991 un periodo "finestra" per permettere alle case farmaceutiche di presentare nei singoli stati il dossier per l'Autorizzazione all'Immissione in Commercio (AIC) e, nelle more (DM 13 dicembre 1991) consentirne comunque l'uso. Per l'Italia questo tempo finestra si è chiuso solo di recente e per 30 anni i reparti di Medicina Nucleare hanno potuto lavorare grazie a questa norma transitoria. Tutti questi radiofarmaci chiamati "pre-92" hanno poi ottenuto l'AIC o sono usciti di scena perché non più attuali nell'uso clinico.

In questo processo di avvicinamento e condivisione di responsabilità i medici nucleari

e i farmacisti sono poco alla volta divenuti consapevoli della necessità, da un lato di garantire efficacia e sicurezza dei radiofarmaci utilizzati e dall'altro, tenuto conto del basso rischio clinico connesso all'uso dei radiofarmaci, per lo più diagnostico, con bassi livelli di radioesposizione, di consentire alle radiofarmacie "in house" degli ospedali, sino ad allora chiamate "camere calde", di avere un regolatorio più snello rispetto a quello applicato dall'industria.

Quest'ultima infatti applica un regolatorio molto rigoroso fondato sulle **GMP (Good Manufacturing Practices)**. Trattasi di Linee Guida raccolte nel compendio "The rules governing medicinal products in the European Union – Volume 4" che fissano i riferimenti tecnici per la produzione farmaceutica e prevedono una Qualified Person (QP) che si assume la responsabilità del rilascio di ciascun lotto di farmaci prodotti.

Difatti, per la maggior parte dei radiofarmaci gamma-emittenti usati nella diagnostica scintigrafica, oggi più spesso chiamata SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography), la radiomarcatura si completa in ospedale, con la ricostituzione di un kit che contiene il principio attivo liofilizzato che si discioglie in una soluzione di ^{99m}Tc -pertechnetato. Trattasi in realtà di una reazione di ossidoriduzione in cui la molecola di Tc (pertechnetato sodico) viene ridotta e acquista la capacità di legare a sé i carrier più opportuni. Un'operazione comunque semplice, come avviene per la preparazione di farmaci di uso comune, non paragonabile per rischio e complessità alla produzione industriale di radionuclidi come radiofarmaci pronti per l'uso.

Il punto di equilibrio tra GMP e la deregulation pre-92 si è trovato con il DM 30 marzo 2005 (NBP-MN - **Norme di Buona Preparazione dei Radiofarmaci per Medicina Nucleare**), supplemento alla XI Edizione della Farmacopea Ufficiale Nazionale. Tale documento normativo è assai più leggero delle GMP e non prevede la QP, ma contiene tutti gli elementi necessari a garantire la "safety" dei radiofarmaci e crea i presupposti per l'allestimento di radiofarmacie ospedalie-



re “in house”. Doveva entrare in vigore nel 2008 ma la maggior parte degli ospedali non erano pronti, per cui si è data per 3 anni una proroga con slittamento della sua applicazione al 31 luglio 2011. Gli effetti delle Norme nella pratica medico nucleare sono stati soprattutto culturali, in quanto hanno costretto i medici nucleari a far propria e ad applicare una cultura “gestionale” a cui molti non erano abituati (requisiti strutturali, procedure standardizzate, assicurazione di qualità etc.) e hanno preparato il campo al vero fondamento giuridico- regolatorio per la produzione e l’uso clinico dei radiofarmaci, il **Codice Comunitario per i medicinali a uso umano (D.Lgs. 219/2006)**.

Cuore di questo Codice è la definizione dell’AIC-Autorizzazione all’Immissione in Commercio per cui “Nessun medicinale può essere immesso in commercio in Italia senza l’autorizzazione dell’AIFA (D.L.vo 219/2006) o un’ autorizzazione comunitaria (Regolamento CE 726/2004)”, ma non meno importante è la definizione del suo campo di applicazione, in cui ricadono pienamente i radiofarmaci, pur prevedendo alcune importanti esenzioni (p.e. formule magistrali, formule officinali, sorgenti radioattive sigillate).

Possiamo considerare il **DM 30 marzo 2005 (le Norme)** e il **D.Lgs. 219/2006 (il Codice)** le due colonne regolatorie che garantiscono efficacia e sicurezza dell’uso clinico dei radiofarmaci diagnostici e terapeutici.

Per quanto riguarda *l’impiego di radiofarmaci* nella ricerca i paletti sono fissati dal *D.Lgs. 211/2003* e dal *D.Lgs. 200/2007*, con le modifiche della Legge Balduzzi (Legge 189/2012) che recepiscono le Dir. Eu 2002/20 e 2005/28 e definiscono le GCP (*Good Clinical Practices*), cioè l’insieme di requisiti etici e scientifici, riconosciuti a livello internazionale, che devono essere osservati ai fini del disegno, della conduzione, della registrazione, della comunicazione degli esiti, della sperimentazione clinica con la partecipazione di esseri umani. Di particolare rilevanza per i Medici Nucleari che fanno attività di ricerca è l’art. 16 del D.Lgs. 200/2007 che, limitatamente agli studi “no profit”, esonera la produzione di Radiofarmaci dall’osservanza delle GMP: con l’inserimento di tale articolo, il legislatore ha inteso consentire, in ambito ospedaliero e solo per sperimentazioni “no profit,” la preparazione di RF sperimentali, siano essi per uso diagnostico o terapeuti-



co, purché effettuata all'interno dei reparti di MN in conformità alle NBP-MN già citate. Tale situazione è purtroppo provvisoria ed è destinata a decadere con l'applicazione del nuovo *Regolamento 536/2014* che prevede anch'esso un parziale esonero dei RF sperimentali dalla produzione in GMP, ma questo vale solo per i radiofarmaci sperimentali diagnostici, siano essi impiegati in studi "profit" o "no profit". Pur essendo un regolamento, il 536/2014 non è ancora entrato in vigore perché richiede la piena operatività di un "Portale della Ricerca", che non è ancora disponibile e si prevede venga collaudato nei prossimi mesi. Da allora in poi non sarà più possibile eseguire studi con radiofarmaci terapeutici in esonero dalla produzione in GMP e questo penalizzerà i centri non dotati di radiofarmacie GMP-compliant, confinando la ricerca con RF terapeutici nei pochi centri abilitati, a meno che la politica dell'UE non si faccia carico della programmazione e della costruzione di tali radiofarmacie.

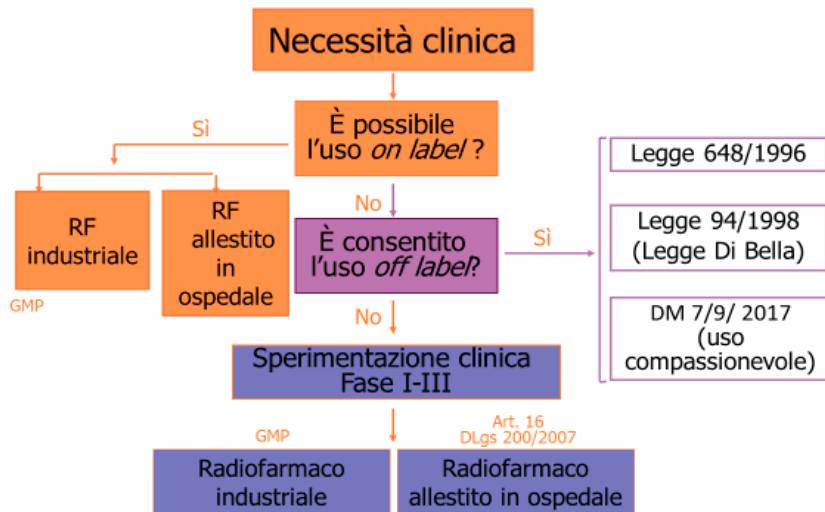
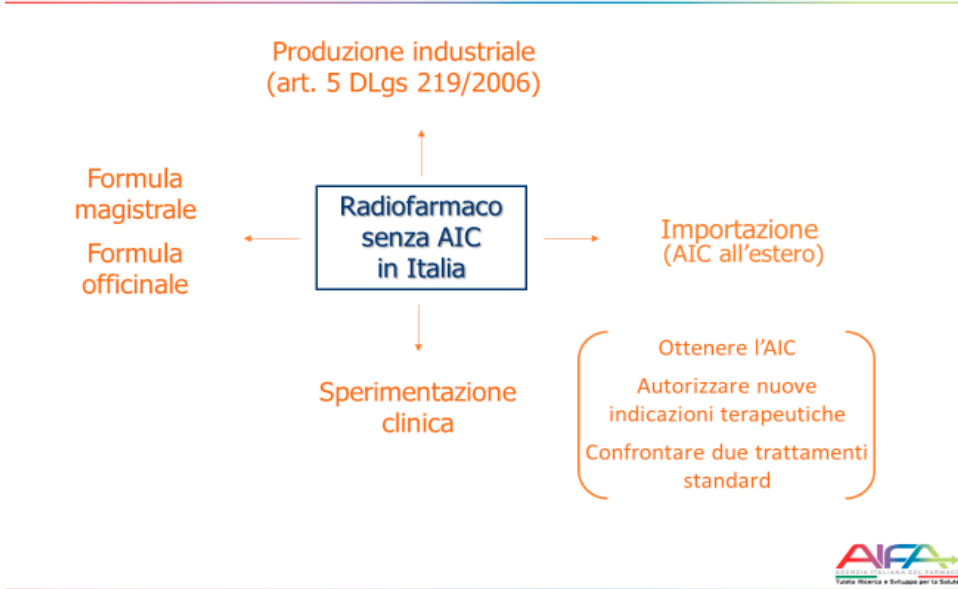
Un ultimo aspetto regolatorio da considerare riguarda l'eventuale **uso clinico "off label"** di un radiofarmaco, laddove con questo termine si rappresentano diverse situazioni

in cui si vuole utilizzare il radiofarmaco al di fuori di quanto previsto dall'AIC (diverse indicazioni, posologia, modalità di somministrazione). Di recente si è dato un uso "off label" diffuso di un radiofarmaco non autorizzato, ma che già era considerato appropriato dalle Linee Guida cliniche prodotte dalle Società scientifiche. Questo avviene perché la ricerca scientifica va più veloce del diritto, ma i pazienti hanno a loro volta il diritto di essere curati secondo lo standard più appropriato.

Gli strumenti giuridici che possono, in determinate condizioni, giustificare l'uso "off label" di radiofarmaci che non hanno ancora ottenuto l'AIC o per i quali si prevede che non verrà mai richiesta l'AIC o un'estensione dell'AIC già concessa sono la **Legge 648/1996** che comporta l'autorizzazione da parte dell'AIFA, in assenza di alternative terapeutiche, e l'iscrizione in un apposito registro, la **Legge 94/1998 (Di Bella)** che comporta una prescrizione del radiofarmaco personalizzata, anche di tipo magistrale, con una specifica assunzione di responsabilità da parte del medico, e il **DM 7 settembre 2017**, che regola l'uso compassionevole del farmaco.

Le disposizioni sin qui riassunte consentono di monitorare, a vantaggio della popolazione, dei pazienti e dei lavoratori esposti tutta la filiera che, a partire dalla prescrizione di un medico, procede alla produzione di un radiofarmaco, al controllo di qualità e alla sua somministrazione a un paziente, per la rilevazione con apparecchiature dedicate o per il trattamento radiometabolico di patologie radiosensibili. L'ultima tappa, di scarso peso da un punto di vista farmaceutico, consiste nel *trattamento dei rifiuti*

contaminati (aghi, siringhe, tamponi, assorbenti) e, se richiesto dal fisico, delle deiezioni urinarie e fecali in vasche collegate a stanze di "degenza protetta". La maggior parte delle strutture di Medicina Nucleare lavorano trattando i rifiuti radioattivi "in esenzione", stoccandoli in appositi depositi, in attesa del naturale decadimento radioattivo, sino al raggiungimento del limite di **1 Bq/g** o in attesa di conferimento a ditte autorizzate alla conservazione e smaltimento dei rifiuti radioattivi.



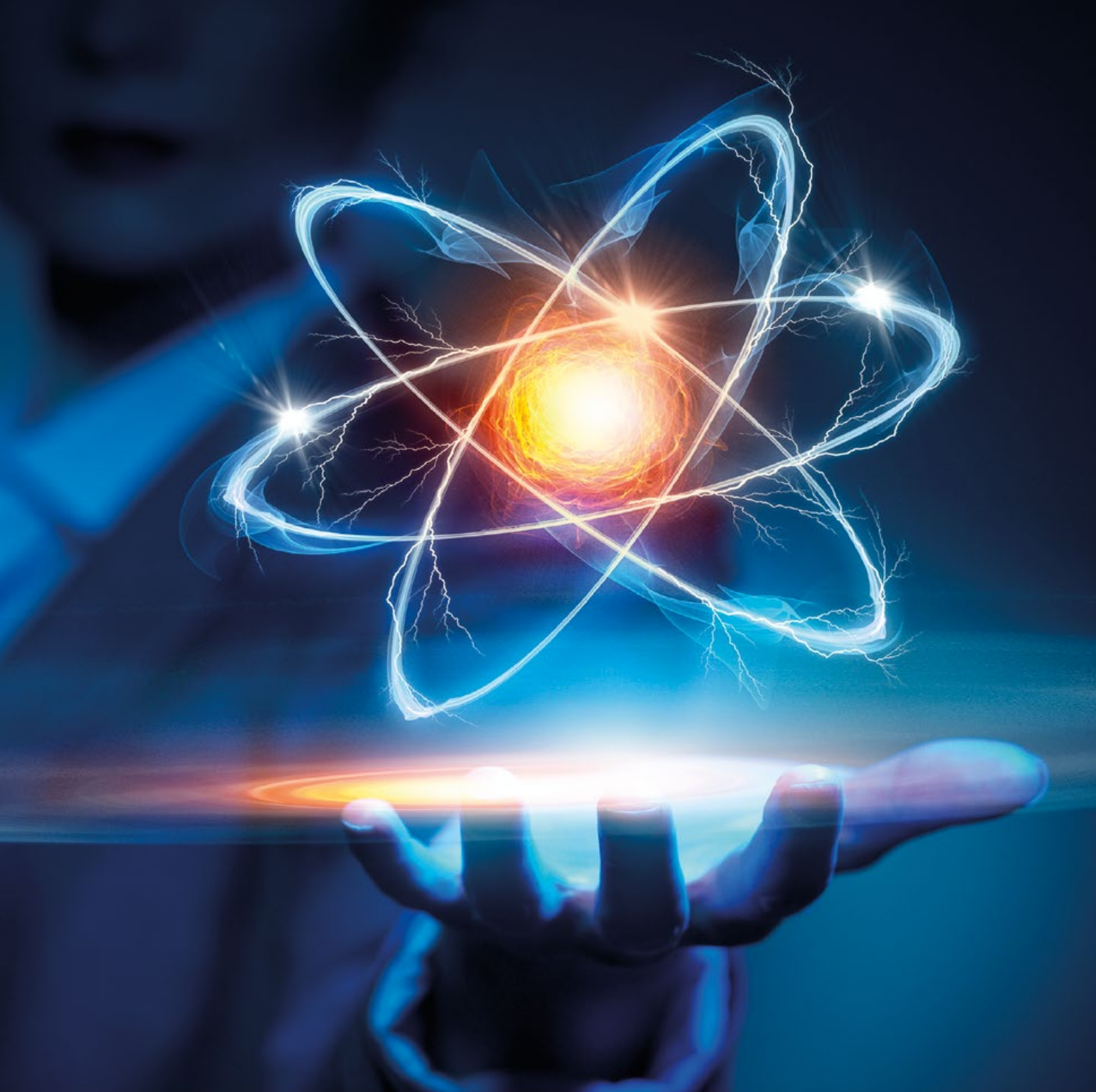


Bibliografia

- <https://www.aifa.gov.it/web/guest/normativa>
- G.LUCIGNANI. La qualità nella preparazione dei Radiofarmaci. Indicazioni per la pratica clinica. Springer -Verlag Italia , Milano 2011
- G.LUCIGNANI. Sperimentazione e registrazione dei Radiofarmaci. Normative e procedure. Springer -Verlag Italia, Milano 2013
- G.BORMANS, A.BUCK, A.CHITI et al., Position statement on radiopharmaceutical production for clinical trials. EJNMMI Radiopharmacy and Chemistry 2017,2:12
- DECRETO LEGISLATIVO 31 luglio 2020, n. 101 - Attuazione della direttiva 2013/59/Euratom, che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti, e che abroga le direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom e 2003/122/Euratom e riordino della normativa di settore in attuazione dell'articolo 20, comma 1, lettera a), della legge 4 ottobre 2019, n. 117. (20G00121) (GU Serie Generale n.201 del 12-08-2020 - Suppl. Ordinario n. 29



**LE RICERCHE E LE TECNOLOGIE
IN CAMPO MEDICO DEL POLO
NUCLEARE DEL CRAVINO**



a cura di
Dott. Fabio Panza



Figura 1:
Visuale dal top del
reattore del nocciolo
con la caratteristica
radiazione Cerenkov

La ricerca nell'ambito nucleare coinvolge numerosi settori di ricerca, sia per quanto riguarda la produzione di energia, che per quanto riguardano le applicazioni in campo medico. È proprio su quest'ultimo aspetto che si concentrano gli interventi dei colleghi Salvini e Altieri.

Pavia rappresenta un centro importante per la ricerca nucleare in campo medico. In particolare, il polo nucleare del Cravino raggruppa principalmente due strutture: il Laboratorio di Energia Nucleare Applicata (LENA) ed il laboratorio di radiochimica dell'Università degli studi di Pavia.

Il LENA ospita un reattore nucleare di ricerca (TRIGA MARK II) dove possono essere eseguite diverse tipologie di esperimento in campo sanitario. Il reattore è di tipo termico a piscina con potenza massima in regime di criticità di 250 kW. Ospita numerosi canali e regioni di irraggiamento.

Inoltre, il LENA ospita anche un Ciclotrone che accelera protoni all'energia di 18 MeV e deutoni all'energia di 9 MeV, per la produzione di radioisotopi per uso medico (^{18}F e $^{13}\text{NH}_3$).

Il laboratorio di radiochimica invece ospita un complesso nucleare sottocritico termico

(SM1) a potenza zero, con combustibile composto da pellet metallici di Uranio naturale. Lo stesso laboratorio include anche numerosi strumenti a "basso fondo" per spettroscopie gamma ed alfa.

Tutti queste facility sperimentali e strumentazioni ben si adattano alle differenti tipologie di utilizzo in ambito medico.

In particolare, a Pavia, si sviluppa da parecchi anni la terapia per la cura dei tumori detta Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) basata su reazioni nucleari indotte sul boro somministrato al paziente mediante molecole che si accumulano in particolare nelle cellule cancerose. Uno dei principali esperimenti condotto in questo ambito è rappresentato dal "Progetto TAORMINA" basato sull'irraggiamento neutronico di organi espianati, in particolare utilizzato sperimentalmente per tumori al fegato.

A Pavia si trova anche il Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica (CNAO) dove è presente un sincrotrone che accelera protoni e ioni carbonio per il trattamento di alcuni tipi di tumori. Al CNAO si stanno studiando anche soluzioni per la BNCT al fine di avere lo spettro più ampio possibile dei tumori trattati dalla struttura.

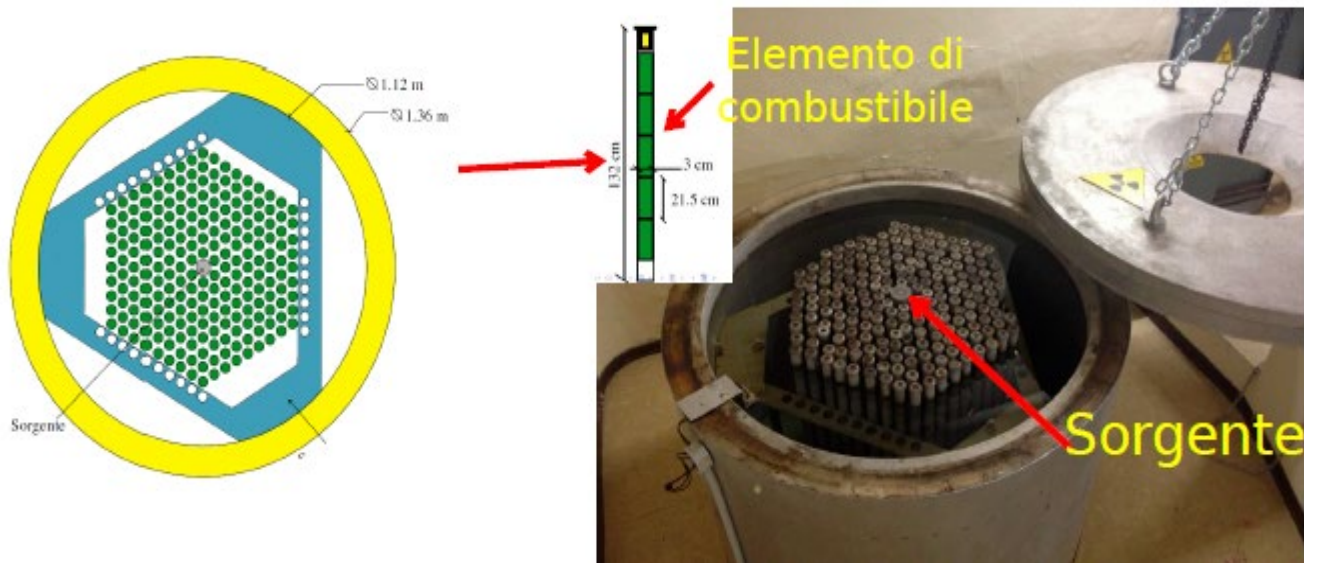


Figura 2: Visione del complesso moltiplicante sottocritico SM1

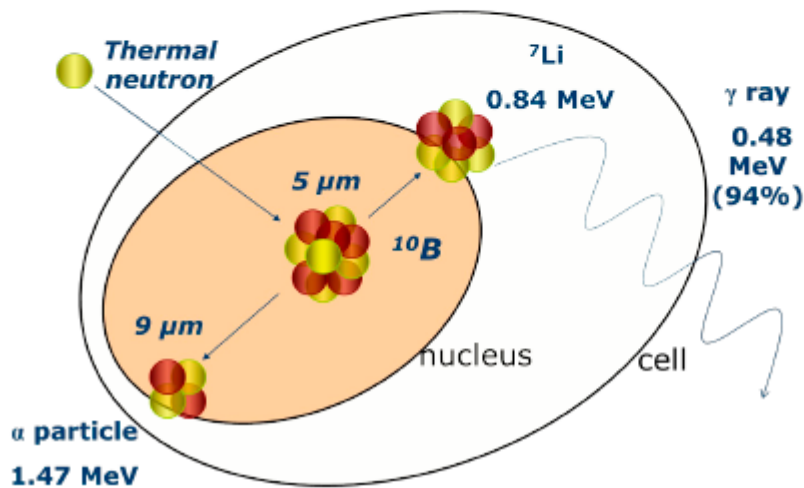
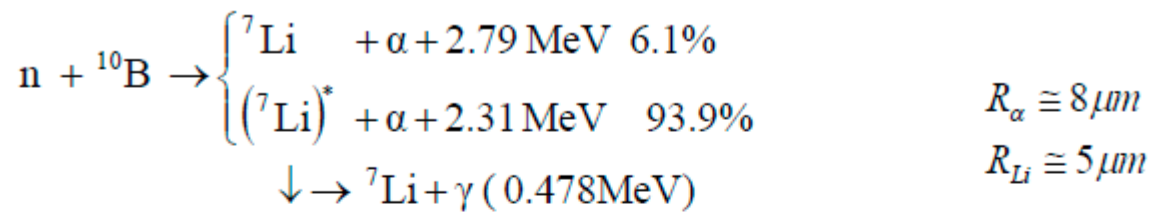


Figura 3:
Schema delle reazioni nucleari indotte sul Boro utilizzate per la BNCT



IL REATTORE DI RICERCA TRIGA L.E.N.A. DI PAVIA E LE APPLICAZIONI DI RADIOMEDICINA

LA PRODUZIONE DI F18 DA CICLOTRONE PER LA RADIODIAGNOSTICA

a cura di
Prof. Andrea Salvini





Abstract

Il Laboratorio di Energia Nucleare Applicata (LENA) dell'Università di Pavia gestisce dal 1965 un Reattore di ricerca della filiera TRIGA con 250KW di potenza termica. L'impianto è utilizzato per supportare programmi di istruzione e formazione, attività di analisi per attivazione neutronica, ricerca medica, applicazioni industriali ed in generale è dedicato alla scienza nucleare applicata in generale. Fra i principali campi di ricerca, nei quali è coinvolto il reattore, è da menzionare lo sviluppo di metodiche relative alla produzione, separazione e purificazione di radioisotopi per le applicazioni sperimentali nell'ambito della medicina nucleare e le applicazioni in ambito forense delle tecniche di analisi nucleari. Unitamente all'esercizio del reattore nucleare di ricerca, il LENA esercisce un ciclotrone con protoni da 18MeV per la produzione di isotopi ad uso medicale.

Introduzione

Il centro LENA è parte del Polo Nucleare (Figura 1) dell'Università di Pavia, il quale include anche l'area di Radiochimica del Dipartimento di Chimica e il Laboratorio di Monitoraggio Ambientale. Il principale dispositivo che il LENA gestisce è il reattore per la ricerca TRIGA MARK II [1] che ha una potenza nominale in regime stazionario di 250 kW e un flusso totale massimo di circa 2×10^{13} neutroni $\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$. Oltre a questo, il LENA gestisce il complesso nucleare sottocritico SM1 (ubicato al Dipartimento di chimica) e principalmente utilizzato per la didattica; un ciclotrone IBA modello 18/9 per la produzione di Fluoro-18; un Generatore RX Gilardoni modello MT 350 / 6-12 ed una sorgente di Cobalto-60 di attività 2.91 TBq. Questi dispositivi, oltre che essere principalmente impiegati nella Ricerca scientifica vengono inoltre utilizzati per supportare programmi di istruzione e formazione e applicazioni industriali.

Il Reattore TRIGA MARK II

Il reattore in esercizio presso il LENA (Figura 2) ha una potenza nominale in regime stazionario di 250 kW e un flusso totale massimo di circa 2×10^{13} $\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ [2]. Dal punto di vista della sicurezza nucleare, i reattori TRIGA possiedono un'importante peculiarità legata al particolare tipo di combustibile nucleare impiegato che è costituito da una lega metallica di uranio (arricchi-

to al 19.95 % in ^{235}U) e idruro di zirconio all'interno della quale viene fatto diffondere dell'idrogeno [2].

Per questo motivo il reattore è considerato intrinsecamente sicuro relativamente agli incidenti di inserzione incontrollata di reattività, ad esempio un errore di manovra combinato ad un contemporaneo guasto del sistema di controllo.

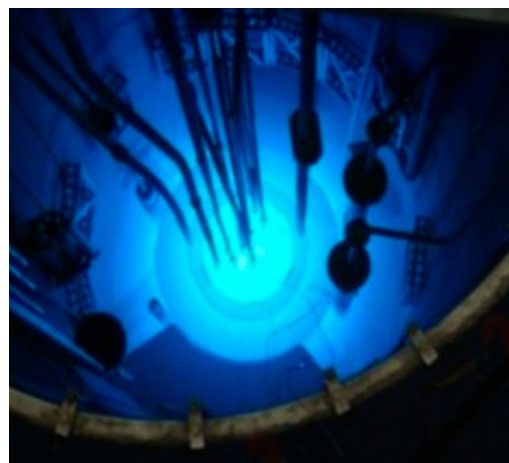
Altre caratteristiche costruttive lo rendono intrinsecamente sicuro anche rispetto alle altre tipologie di incidenti nucleari quali la perdita di refrigerante (LOCA—Loss Of Coolant Accident) e il mancato raffreddamento. Per questi elevati gradi di sicurezza i reattori nucleari di ricerca TRIGA sono impianti "urbani", spesso costruiti nel centro delle città (come a Pavia, Vienna, Hannover e Mainz) o nelle immediate periferie (come a Lubiana e a Pitesti). Le principali caratteristiche tec-



Figura 1:
Vista aerea del Polo nucleare Cravino dell'Università di Pavia e ubicazione delle principali aree di ricerca



Figura 2:
Il reattore TRIGA Mark II del LENA (sinistra) e il nocciolo del reattore in funzione (destra)



niche del reattore sono riportate in Tabella 1. Il reattore è dotato di diversi canali di irraggiamento sperimentali in-core e out-core. Ognuno di essi è caratterizzato diversamente in termini di flusso e spettro neutronico in modo da garantire versatilità nella scelta del tipo di irraggiamento.

Il ciclotrone per la produzione di Fluoro-18

Il ciclotrone installato è il modello IBA CYCLONE® 18/9 che accelera protoni con energia finale di 18 MeV ed un'intensità di corrente di fascio massima di 40 microA [3]. La macchina è equipaggiata con tre bersagli, due dei quali per la produzione di Fluoro-18 (^{18}F) ed uno per la produzione di Azoto-13 (^{13}N) nella forma chimica di Ammoniaca, con la possibilità di estendere ad otto il numero totale di bersagli.

Il centro di produzione comprende un labo-

ratorio di radiochimica dotato di una cella di manipolazione per il confezionamento della quantità richiesta di radioisotopo. Dal 2016, il ciclotrone produce Fluoro 18 nell'ambito di un accordo di collaborazione scientifica con l'Istituto Nazionale dei Tumori di Milano principalmente per esami diagnostici PET.

L'installazione del ciclotrone in un laboratorio universitario consente inoltre il suo impiego in lezioni pratiche nell'ambito dei corsi di fisica degli acceleratori e master universitari.

Principali aree di interesse del Centro LENA

Le principali aree di interesse in ambito scientifico e industriale in cui il LENA e il Polo operano sono:

- o Produzione di radioisotopi con il Reattore ed il ciclotrone per uso medico

Potenza nominale (stato stazionario)	250 kW
Flusso massimo (Canale Centrale)	$1.8 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Massa Critica	2.2 Kg di ^{235}U , 62 elementi di combustibile freschi
Coefficiente di temperatura del combustibile-moderatore (negativo)	$-1.2 \cdot 10^{-4} \Delta\text{K}/\text{K}$ C° a 50° C
Moderatore	HZr, H ₂ O
Riflettore	Grafite
Termovettore	H ₂ O
N° di barre di controllo	3
Temperatura combustibile a potenza nominale	230° C
Temperatura termovettore a potenza nominale	35-40° C

Tabella 1
Principali caratteristiche
del TRIGA del LENA

- o Analisi per Attivazione Neutronica
 - o Ricerca in ambito Forense, dei Beni Culturali, Archeometria, Medicina e Radiobiologia, Scienza dei Materiali e danni da radiazioni
 - o Training e Formazione: Laboratori (Facoltà di Fisica, Chimica ed Ingegneria) e fisica del reattore [4]
 - o Consulenza nell'ambito della Gestione della Qualità e della gestione di impianti nucleari
- Il centro ospita e promuove direttamente delle attività di ricerca cofinanziate da Enti di Ricerca nazionali quali INFN, CNR, INRIM, etc. nei vari campi di seguito elencati:
- Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) (INFN e Dip di Fisica)
 - Scienze Forensi (Direzione Nazionale dei Servizi Antidroga)
 - Sviluppo e implementazione del metodo k0 (INRIM)
 - Facility Prompt Gamma (INFN): esperimento INFNCHNET_NICHE
 - Fisica del reattore e ingegneria nucleare (INFN-E)
 - Studies on radiation damage on perovskite (University of Pavia)
 - Esperimento METRICS INFN: Studio delle reazioni nucleari $^{52}\text{Cr}(p,n)^{52}\text{g}/\text{mMn}$, $^{53}\text{Cr}(p,2n)^{52}\text{g}/\text{mMn}$, $^{54}\text{Cr}(p,3n)$, $^{52}\text{g}/\text{mMn}$ e dei principali canali di reazione che producono contaminanti del Mn; Studio delle reazioni nucleari alternative che possono produrre $^{52}\text{m}/\text{gMn}$, impiegando sia fasci di protoni, sia deutoni
 - Caratterizzazione Gamma canali di irraggiamento (INFN)
 - Produzione di ^{161}Tb (Progetto AIRC con INT)
 - Produzione di ^{166}Ho (Applicazioni di Brachiterapia ed attività con ENEA)
 - Produzione di ^{111}Ag (progetto INFN ISOPHARM)

Bibliografia

- [1] D. Alloni*, M. Prata, G. Magrotti, A. Salvini, Mezzo secolo di vita del Reattore Triga Mark II e di attività scientifica e didattica del Laboratorio Energia Nucleare Applicata (Lena) dell'Università degli Studi di Pavia – Rivista SIRR – Agosto 2014.
- [2] M. Prata, D. Alloni, P. De Felice, M. Palomba, A. Pietropaolo, M. Pillon, L. Quintieri, A. Santagata and P. Valente, Italian neutron sources, Eur. Phys. J. Plus (2014) 129: 255
- [3] D. Alloni, M. Prata, B. Smilgys, Caratterizzazione del campo neutronico prodotto da ciclotroni medicali. Radiazioni - Ricerca e applicazioni, vol. XX n.ro 3, Dicembre 2017.
- [4] Alloni D. Magrotti G., Oddone M., Salvini A. Nuclear Education & Training activity experience at the University of Pavia, November 201. Conference: IGORR (International Group on Research Reactor) Conference 17th to 21st November 2014 in Bariloche, Argentina



The background of the image is a dense field of blue, semi-transparent spheres of varying sizes, creating a textured, 3D effect. Overlaid on this field are several glowing, blue, elliptical orbits that resemble the paths of electrons in an atom, with bright points of light at their intersections. The overall color palette is a range of blues, from deep navy to bright cyan.

Boron Neutron Capture Therapy (BNCT):

un'opzione per il trattamento dei tumori diffusi



a cura di
Prof. Saverio Altieri

La Terapia per Cattura Neutronica (o Boron Neutron Capture Therapy – BNCT) è una forma innovativa di radioterapia sperimentale a due fasi: nella prima fase, mediante opportuni veicolanti, le cellule tumorali vengono arricchite selettivamente con ^{10}B mediante concentrazioni dell'ordine delle decine di $\mu\text{g/g}$; nella seconda fase la zona interessata dal tumore viene sottoposta ad irraggiamento con neutroni epitermici con energie dell'ordine dei keV. I neutroni, rapidamente termalizzati mediante urti elastici con l'H dei tessuti biologici, vengono catturati dal ^{10}B mediante la reazione $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ che ha una sezione d'urto termica di 3840 barn e un Q-valore positivo di 2.79 MeV. Le particelle α e gli ioni ^7Li liberati nella reazione dissipano la loro energia cinetica in percorsi inferiori a $10\ \mu\text{m}$, ossia in distanze paragonabile col diametro cellulare. Per questo motivo la BNCT, grazie

all'arricchimento selettivo delle cellule tumorali rispetto a quelle sane, può essere considerata una forma di adroterapia (ioni He e Li) a selettività cellulare e può risultare un'arma particolarmente efficace contro tumori diffusi ed infiltranti.

Per la prima volta al mondo la BNCT è stata applicata al trattamento di metastasi epatiche diffuse con la tecnica del progetto TAORMINA (Trattamento Avanzato Organi Mediante Irraggiamento Neutronico ed Autotrapianto), sviluppato e realizzato presso l'Università di Pavia, che prevede l'irraggiamento dell'organo espantato nella colonna termica del reattore nucleare di Ricerca da 250 kW del LENA.

Nel corso del seminario sono stati illustrati il principio di base della BNCT, la sua applicazione ai tumori diffusi (progetto TAORMINA) e lo stato attuale della tecnica come applicata a livello mondiale.



Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) un'opzione per il trattamento dei tumori diffusi

CICLO SEMINARIALE

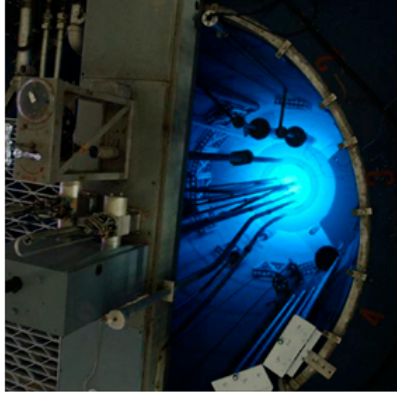
Le Applicazioni della Ricerca Nucleare
in ambito civile e industriale
non finalizzate alla produzione di energia elettrica

WEBINAR II

RICERCA MEDICA

Piattaforma Zoom Webinar

*Mercoledì 30 settembre 2020,
dalle ore 14.00 alle ore 18.05*

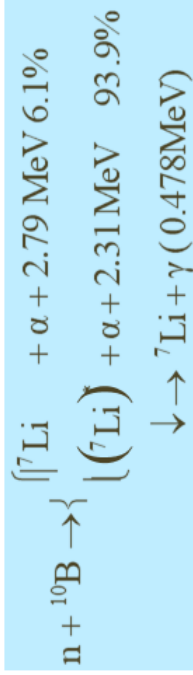


Saverio Altieri

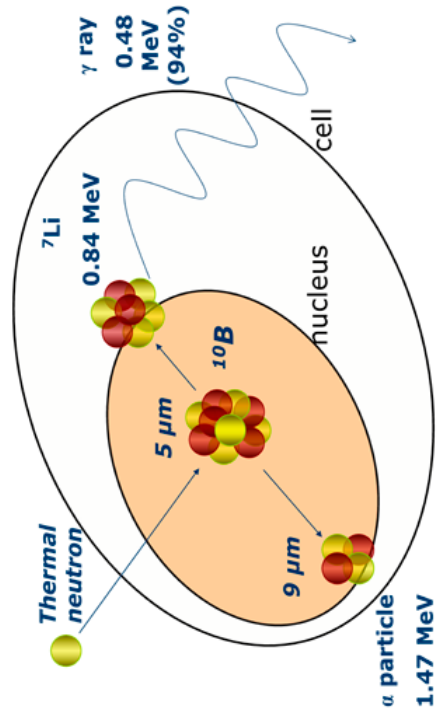
Dipartimento di Fisica Università di Pavia Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) Pavia



BNCT principle

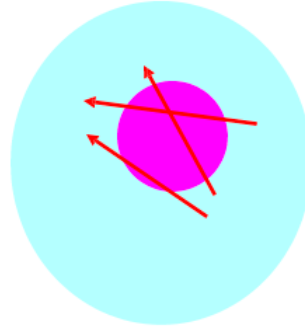


$R_\alpha \cong 8 \mu\text{m}$
 $R_{\text{Li}} \cong 5 \mu\text{m}$





Boron concentration



from 2 to 6
tracks
in the nucleus



a lethal lesion
in the cell

Tumour cells with boron

10^9 atoms of ^{10}B
 $30 \mu g \text{ } ^{10}B / g \text{ of tissue}$

$$[\Psi_n]_{th} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$$

2 - 3 (n, α) reactions
in the cell with ^{10}B

Boron concentration and radiation dose

$$[\Psi]_{th} = 10^{12} \text{ cm}^{-2}$$

Cellule tumorali con boro

$$30 \text{ ppm } {}^{10}\text{B}$$



$$\frac{D_{\text{tumore}} \simeq 4}{D_{\text{sano}}}$$



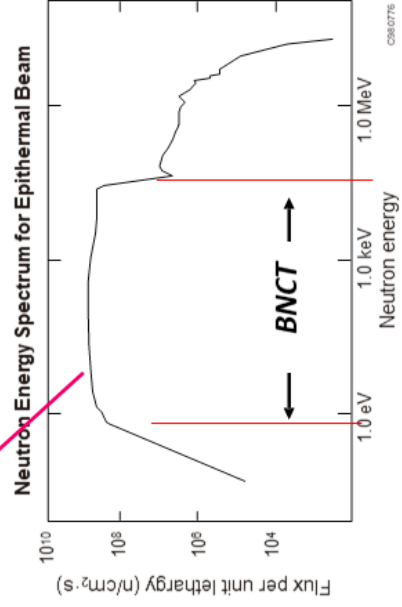
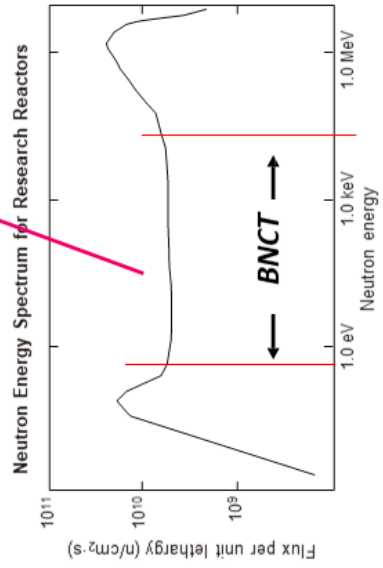
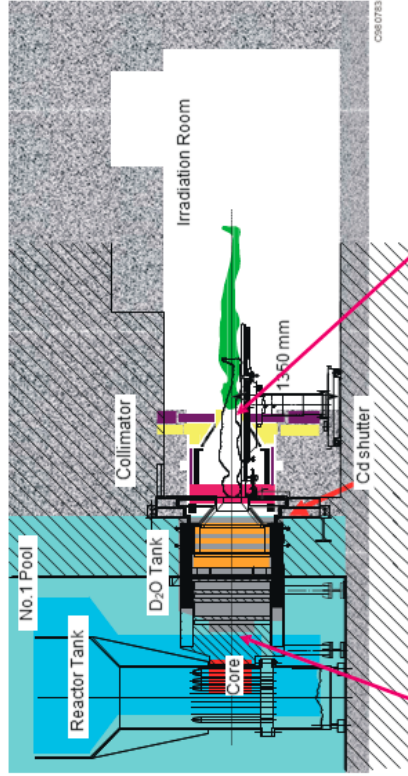
Cellule sane senza boro

Ma il boro entra anche nelle cellule sane

$$\left. \begin{array}{l} C_T = 60 \text{ ppm} \\ C_S = 10 \text{ ppm} \end{array} \right\} R_D = 3.4$$

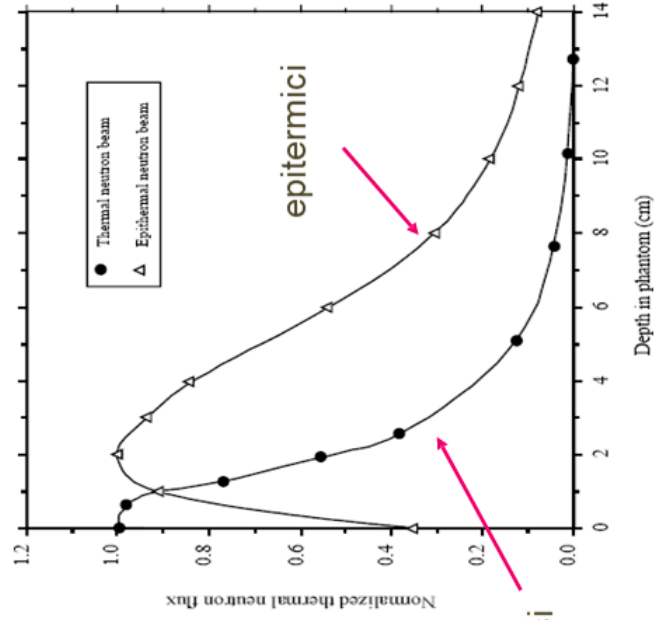
Neutron sources for BNCT: Beam Shaping Assembly

Cross-Sectional View of Neutron Beam facility, JRR4



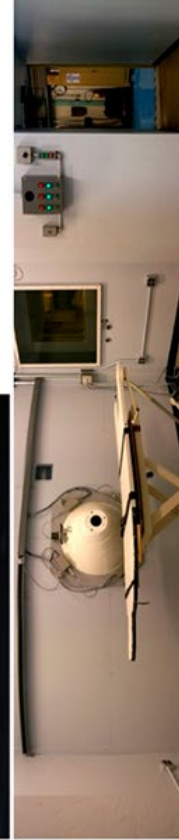
Neutron sources: thermal or epithermal

neutroni





Harvard MIT reactor USA



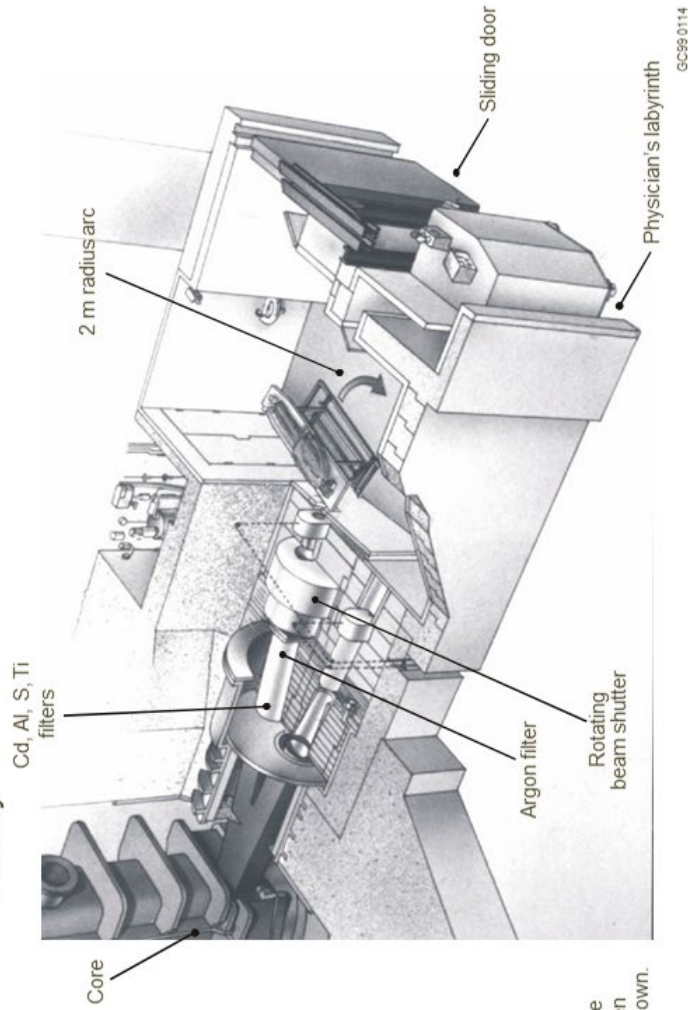
30/09/20 Saverio Altieri



Le Applicazioni della Ricerca Nucleare in ambito civile e industriale

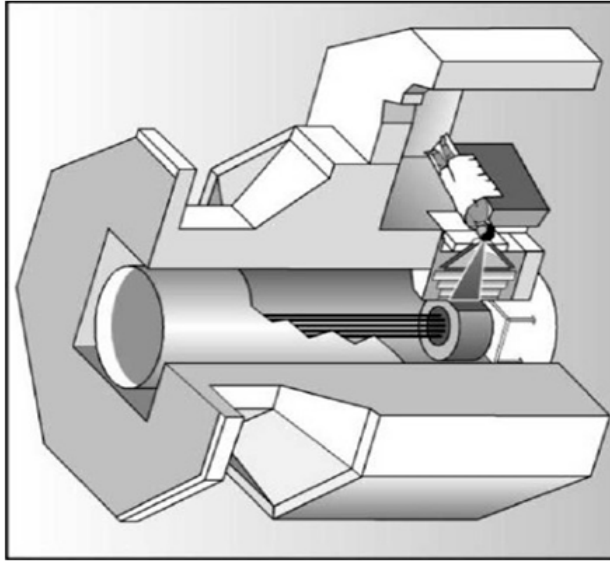
HFR Petten

Overall view of the Petten BNCT Therapy Facility



Note:
As an aid to clarity, all but four of the bottom layer of 100 mm square steel, roof shielding bars have been omitted. Polybor linings are not shown.

FiR 1 reactor Helsinki Finland



use. The measured thermal (<0.5 eV), epithermal (0.5 eV–10 keV), and fast neutron (>10 keV) fluence rates are 8.1×10^7 , 1.1×10^9 , and 3.4×10^7 neutrons/cm²/s, respectively, at the exit plane using a 14 cm diameter collimator at 250 kW power [8]. The undesired fast neutron dose per epithermal fluence is $2 \text{ Gy}/10^{13} \text{ cm}^{-2}$ and the corresponding gamma contamination $0.5 \text{ Gy}/10^{13} \text{ cm}^{-2}$ [2]. The in-depth dose

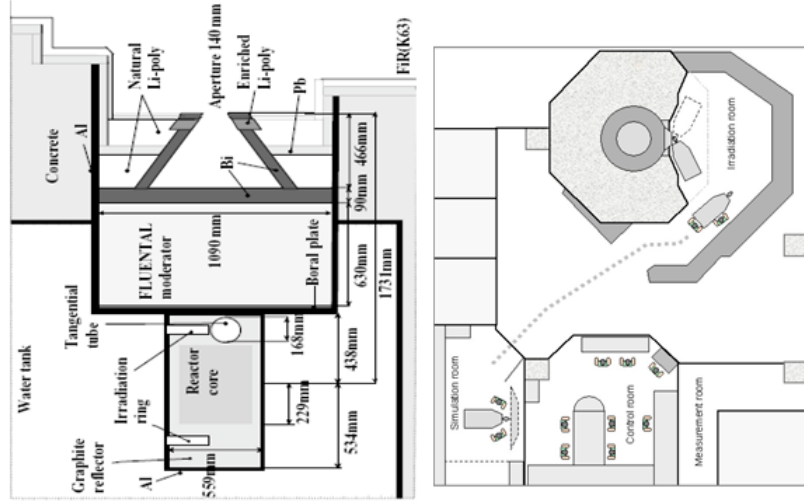


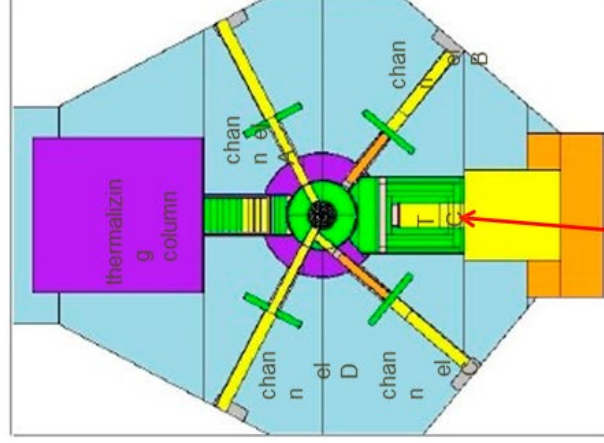
Figure 25. The floor plan showing the irradiation room and the simulation room of the Finnish BNCT facility.



BNCT neutron source: the LENA Triga Mark II reactor



Steady-state power: 250 kW
 Our research is funded mainly by the National Institute for Nuclear Physics (INFN) and by the Ministry of University and Research (MIUR)



$$\phi \approx 10^{10} - 10^9 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

thermal neutron field

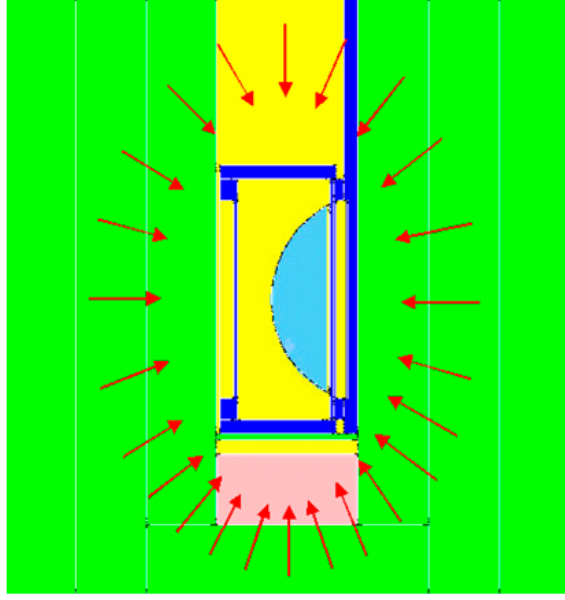


Extra-corporeal liver BNCT for diffused metastases

TAOrMINA project

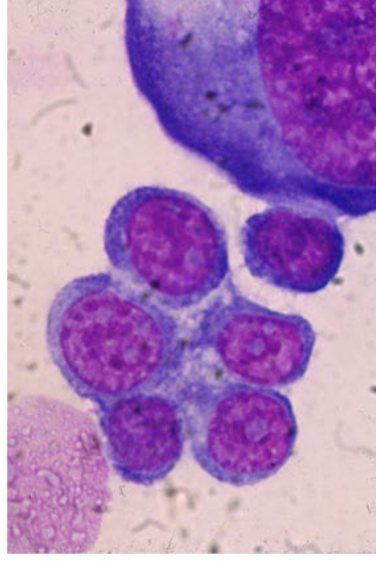
Trattamento Avanzato Organi Mediante Irraggiamento Neutronico e Autotrapianto Advanced Treatment of Organs by Neutron Irradiation and Auto-graft

The treatment is based on the irradiation of the isolated organ in a neutron field where neutrons coming from all directions can irradiate the whole liver

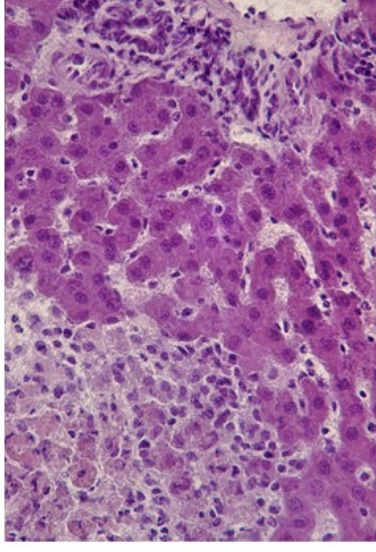


Animal model of liver metastases from colorectal cancer

- Rats: BD-IX (syngeneic) 250 gr
- Colon carcinoma cell line: DHD/K12/TRb
- Injected cells: $20 \cdot 10^6$
- Site of injection: spleen
- Technical aspects: right portal branch clamping during injection; splenectomy at the end of injection



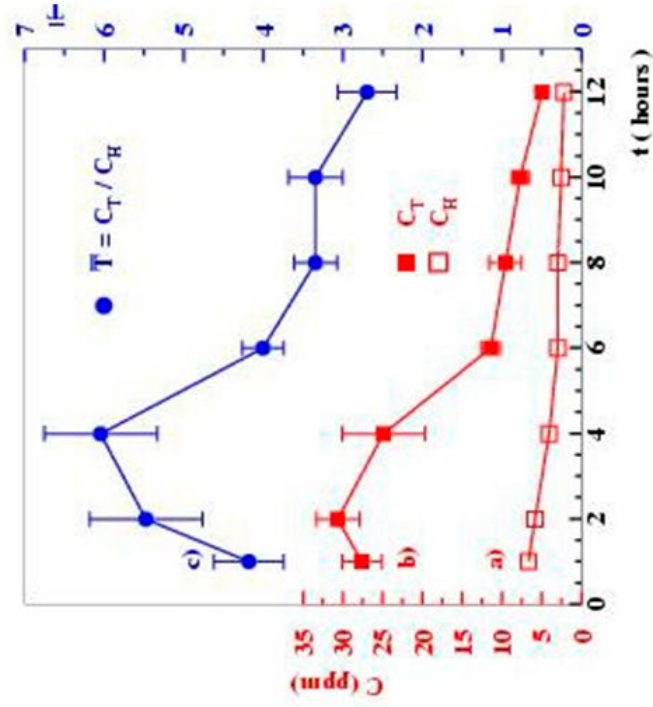
DHD/K12/TRb



Rat liver with metastases

Selective absorption of Boron in the tumor

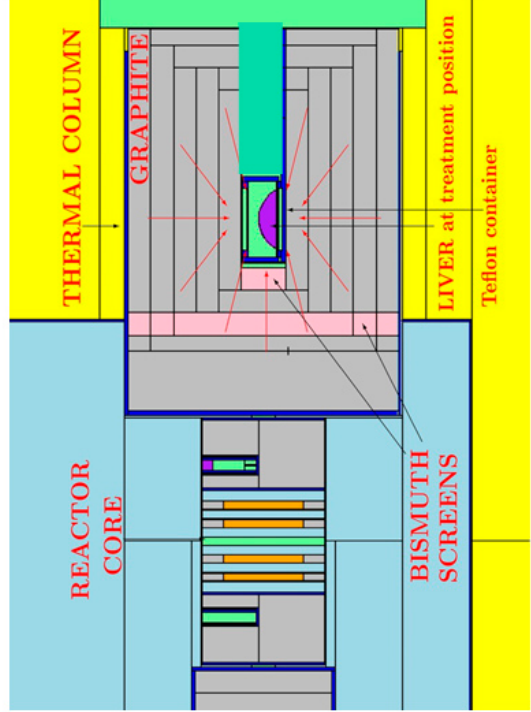
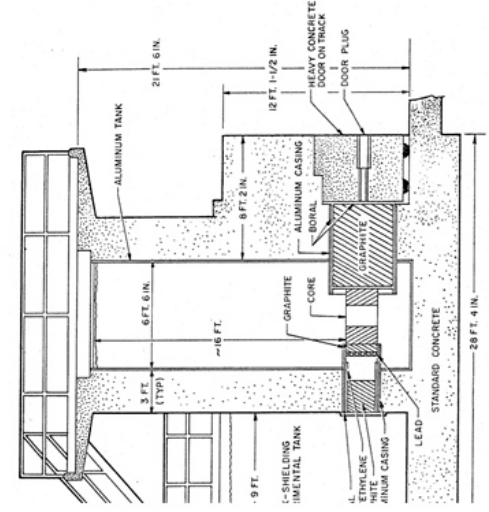
Borophenylalanine (BPA) was used as a Boron carrier at 300 mg/kg



In the time interval from 2 to 4 hours after BPA perfusion the boron concentration in tumour (CT) presents the highest values and the ratio of boron concentration in tumor over normal tissue (T) is at the maximum value of 6

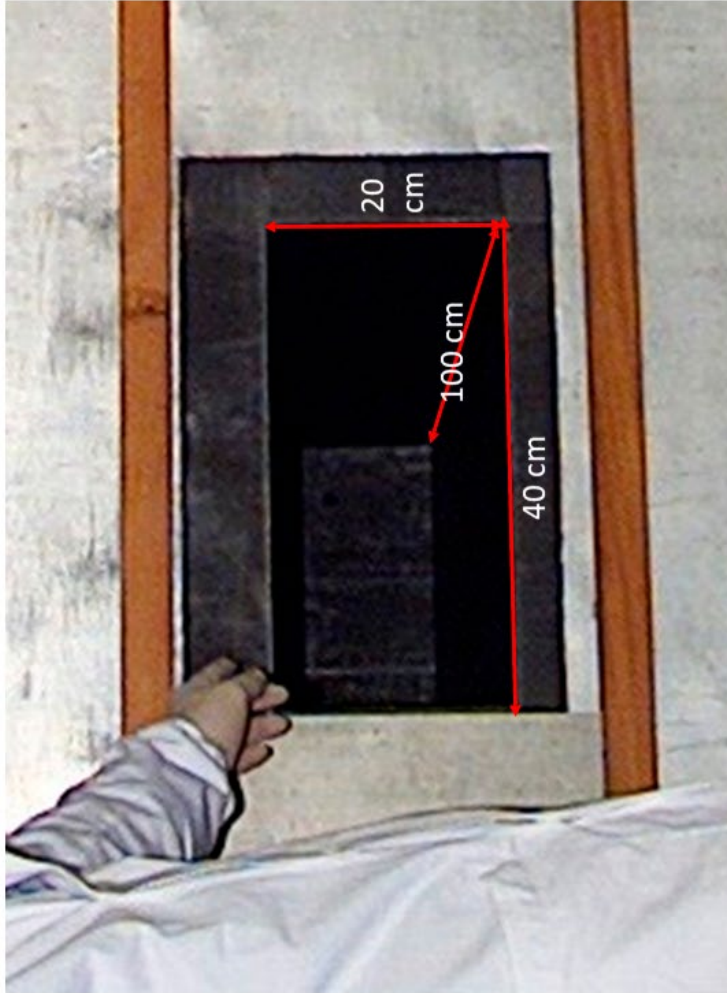


Thermal column modification



The γ background coming from the core was reduced by inserting two 10 cm Bi shields

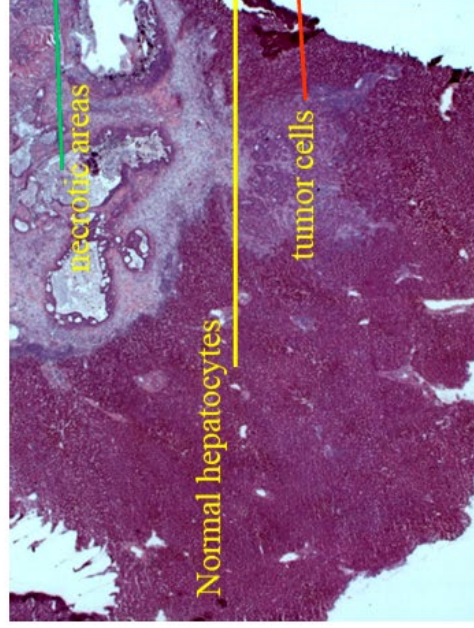
The irradiation channel



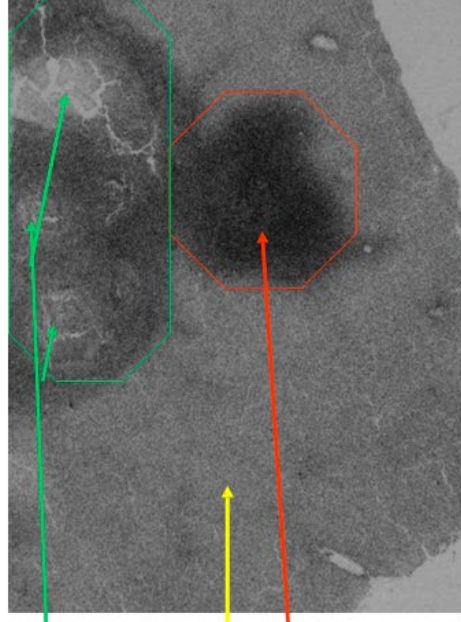
BPA infusion and boron imaging

BPA was administered at a dose of 300 mg/Kg body weight during surgery, through a colic vein; the infusion was 2 hours long.

To measure Boron concentration some biopsies were taken both from healthy and tumour tissues 1 and 2 hours from the beginning of BPA administration. Samples were frozen inside liquid nitrogen. Neutron radiography shows how boron concentration changes depending on the tissue type.



histological image



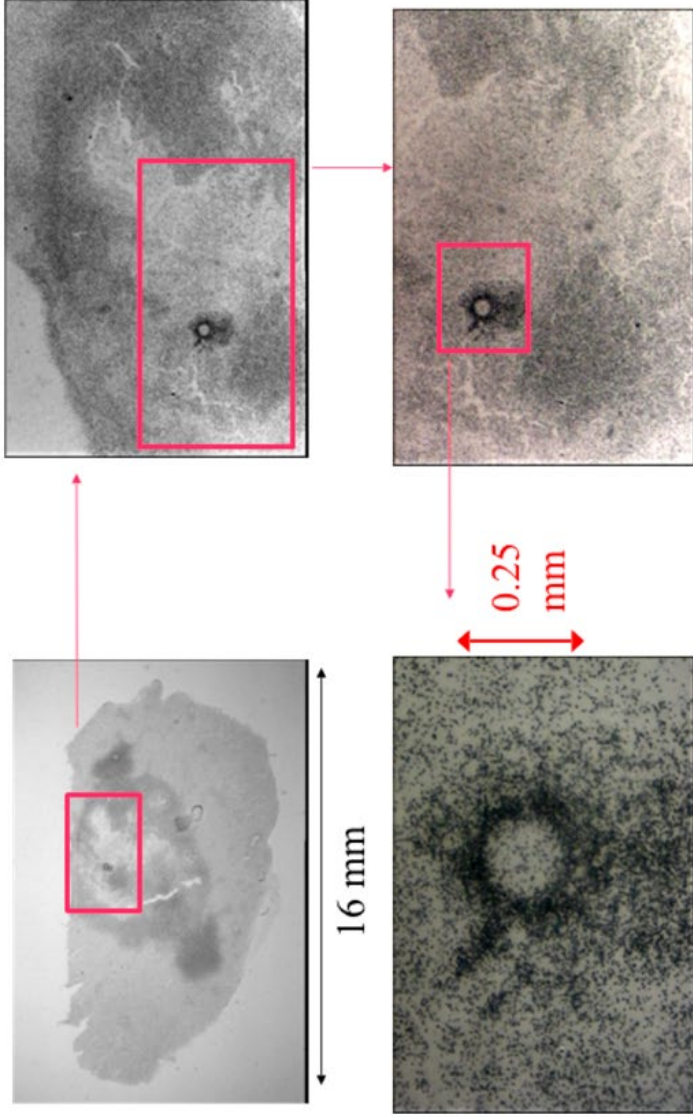
neutron autoradiography image



BPA infusion and boron imaging

Neutron autoradiography

For macroscopic spatial boron distribution



Dose calculation

$$\Psi = 4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$$

0.64 Gy γ from reactor
 2.0 Gy γ from (n,H)
 0.16 Gy γ from (n,³⁵Cl)
 0,8 Gy protons from (n,¹⁴N)
 3,6 Gy non boron
 0.32 Gy/ppm ¹⁰B(n, α)⁷Li

$$D_H = 3.6 + 0.32 \times C_H$$

$$D_T = 3.6 + 0.32 \times C_T$$

	FIRST PATIENT	SECOND PATIENT
TUMOR dose (Gy)	18 ± 0.7	18 ± 0.7
LIVER dose (Gy)	6 ± 0.3	6 ± 0.3
TUMOR/ LIVER	3	3

Irradiation time: 10 minutes



Liver coming out from the patient's body



Liver washing and refrigeration



Teflon bag





Refrigerated teflon container



At the reactor thermal column



Pushing the liver into
the reactor

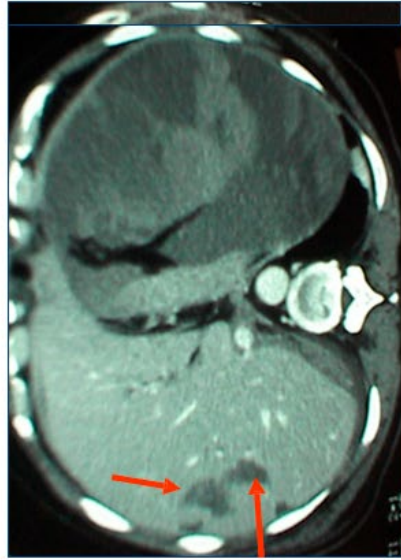
Back to the surgery room





CT scan after BNCT

7 days after treatment the CT scanning evidenced the liver in normal condition while the metastases appeared in a necrotic state



Arrows indicate the necrotic zones detected after the neutron irradiation

The outcome of the treatment

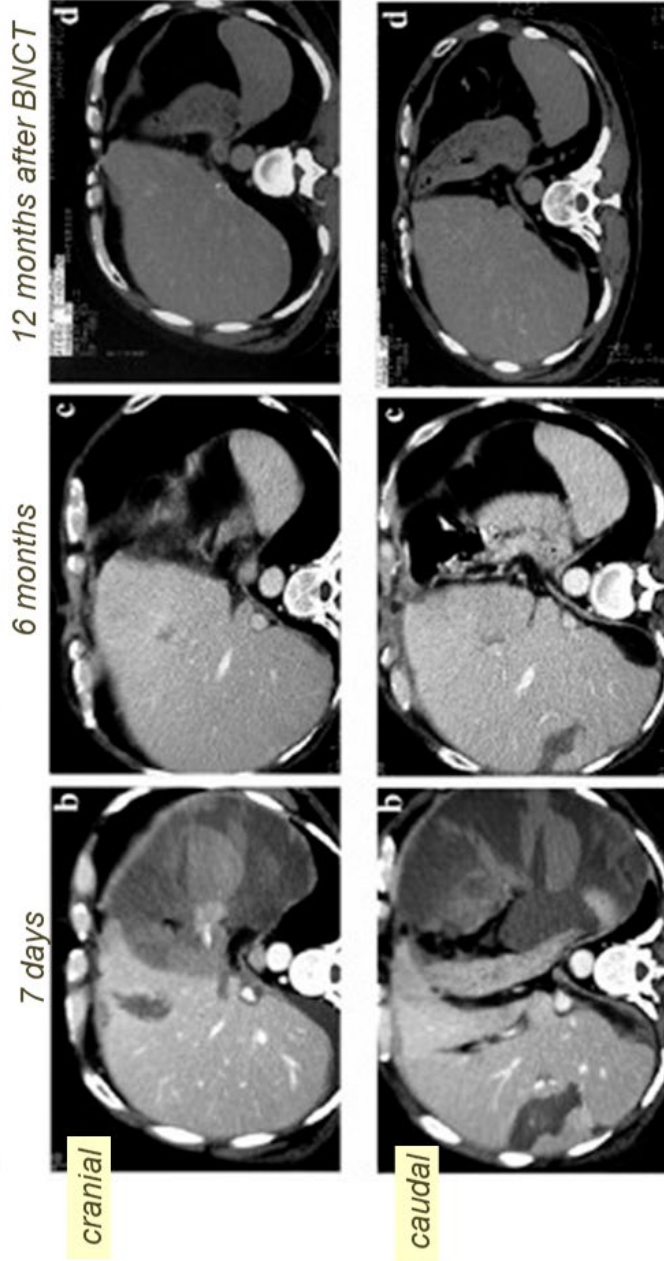
In the patient all clinical anomalies and biochemical alterations disappeared within some weeks. And the patient was discharged in the 40th p.o. day.

Before leaving the Polyclinic he recovered all of his functions and his general condition was good.





The outcome in the first patient



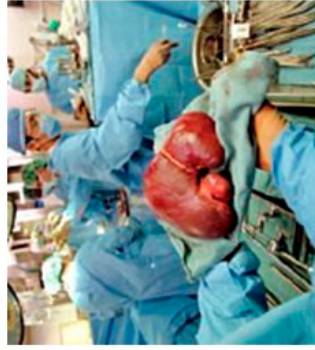
Sequence of CT images of liver in the first patient subject to BNCT.
Evolution at different times of the metastases towards necrosis with final substitution by normal tissues

NewScientist.com

PPA Interactive Magazine of the Year

Out-of-body operation banishes tumours 19:00 18 December 02 Exclusive from New Scientist Print Edition

For the first time, cancer has been treated by removing an organ from the body, giving it radiotherapy and then re-implanting it...



Doctors in Italy used the technique to treat a 48-year-old man with multiple tumours in his liver. One year after the operation, which took 21 hours, the man is alive and well. His liver is functioning normally and the latest scans have not revealed any signs of tumours...



"It was a bold stroke and has stirred the interest of many in the field," says Paul Busse, a neutron radiology expert at Harvard Medical School in Boston.

30/09/20 Saverio Altieri

Le Applicazioni della Ricerca Nucleare in ambito civile e industriale



On Top of the reactor on April 2005

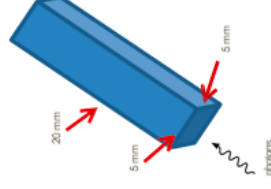
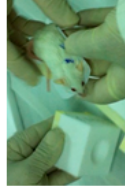
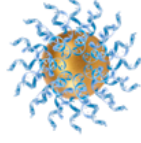
The control on April 2005 showed some recurrences inside and outside of liver. He died on August 2005

He survived 44 months with a good quality of life; he died because of diffuse recurrences of his intestinal tumour



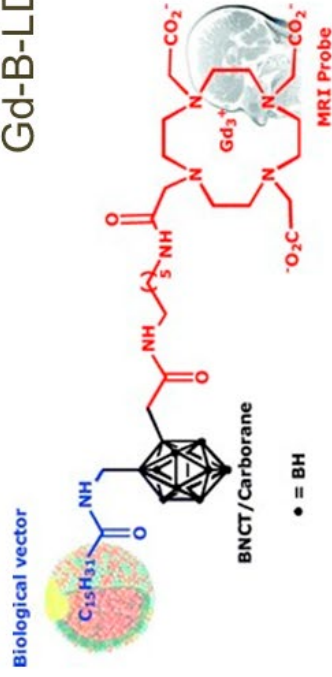
BNCT @ Pavia University and INFN

- Disseminated liver metastases: TAOOrMINA project
- Research on new boron carriers: boron up-take measurements in vitro and vivo in animal models
- ↑
- Tests of toxicity and effectiveness of BNCT by irradiating cell cultures and animal models treated with new boron compounds
- ↑
- Disseminated lung metastases
- ↑
- Mesothelioma
- Limb osteosarcoma
- In vivo boron dose imaging system based on Zinc Cadmium Telluride detector (SPECT)
- Installation of an accelerator based BNCT system in the Italian Hadron Therapy Center in Pavia

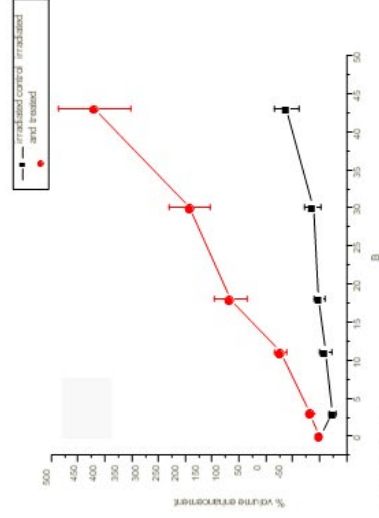
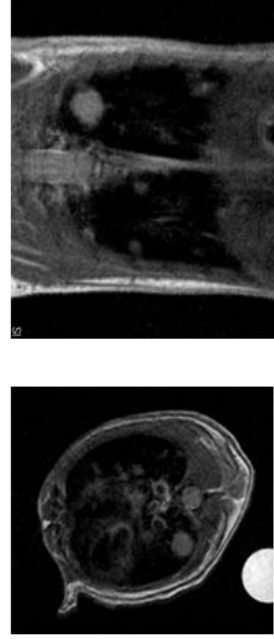


Boron/Gd/LDL adduct: breast cancer lung metastases BALB/C mice

Gd-B-LDL



lung adenocarcinoma in EML4-ALK transgenic mice

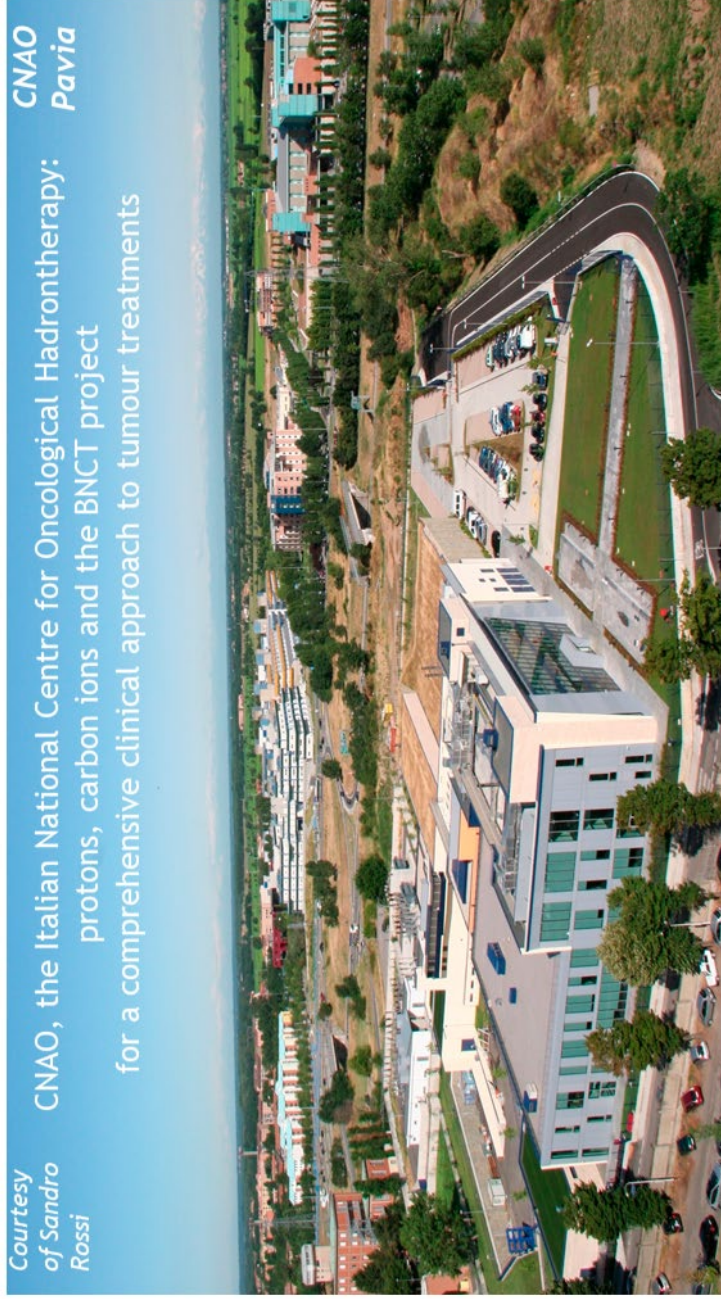


D. Alberti et al / Nanomedicine: Nanotechnology, Biology, and Medicine 11 (2015) 741–750

AB-BNCT at CNAO

*Courtesy
of Sandro
Rossi*

CNAO, the Italian National Centre for Oncological Hadrontherapy: protons, carbon ions and the BNCT project for a comprehensive clinical approach to tumour treatments



fondazione **CNAO**
Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica

Sistema sanitario
Regione
Lombardia

AB-BNCT in the World



治疗室
Treatment Room



原子加速器置区
Proton Accelerator Region



- Kyoto University
- Southern Tohoku Hospital
- Teikyo University
- National Cancer Center
- Kansai BNCT Medical Center
- Edogawa Hospital BNCT Center
- Nagoya University

Japan



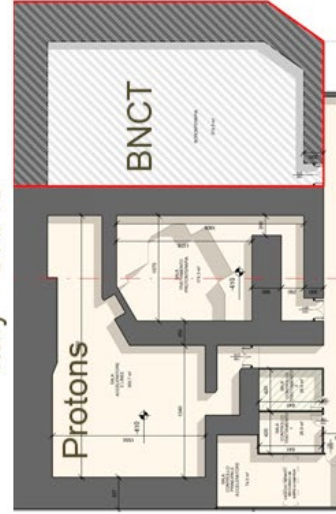
准备室
Preparation Room



Finland




China



Italy - CNAO



The background features a complex network of red lines and white nodes on the left, transitioning into a blue and yellow glowing structure on the right. The blue structure includes two prominent spheres and a swirling, energy-like form. The overall aesthetic is futuristic and technological.

**Attrezzature a pressione e
impianti tecnologici:
il caso della Risonanza
Magnetica Nucleare**

a cura di
Ing. Andrea Tonti
Ing. Alessandro Ledda



Dipartimento Innovazioni Tecnologiche

- Piano Triennale delle Attività di Ricerca:
 - Ricerca Istituzionale: 10 Laboratori, 6 Sezioni
 - Le attività di ricerca istituzionale della Sezione VI, coordinamento tecnico-scientifico U.O.T.
 - 11 obiettivi di ricerca, connesse con le attività di verifica sul territorio
 - 3 obiettivi di ricerca nel settore nucleare: impianti innovativi, decommissioning e deposito, ITER
 - Impianti innovativi: decontaminazione liquidi, impianti RNM
 - Ricerca Scientifica
 - Sezione VI: contenitori per rifiuti a media attività
 - La Terza Missione: formazione, attività di consulenza, assistenza specialistica e normazione, brevettazione, start-up innovative, competence center

Ricerca Istituzionale - obiettivo 1: Evoluzione delle modalità di verifica delle attrezzature a pressione impiegate negli impianti sperimentali e che utilizzano processi innovativi

- La finalità istituzionale perseguita con questa attività di ricerca è connessa strettamente con la sicurezza degli operatori impegnati nelle attività di decontaminazione. In particolare, l'attività sarà utile per determinare le condizioni di sicurezza in caso di trattamento di reflui contaminati da sostanze che emettono radiazioni ionizzanti.



Attività di sperimentazione – pozzetto “R”

- Eseguito un intero ciclo di pulizia (riempimento, spazzolamento, svuotamento e risciacquo)
- Le tabelle seguenti riportano i risultati delle analisi svolte, ad integrazione di quanto riportato nel documento di avanzamento lavori al 20/07

Analisi liquidi di lavaggio

B100 Buca R dopo 2 min (soluzione con acqua e “0 pigreco”)	¹³⁷ Cs Bq/l	10600
B100 Buca R dopo 24 ore (soluzione con acqua e “0 pigreco”)	¹³⁷ Cs Bq/l	310000

¹³⁷ Cs Bq/l	alfa totale Bq/l	beta totale Bq/l
pulito fusto 6 terzo giorno	24.7	< MDC
		20.8





L'apparecchiatura di Risonanza Magnetica Nucleare: rischi connessi all'apparecchiatura a pressione superconduttiva

La presenza di una RMN implica diversi rischi:

1. Presenza di campo magnetico intenso
2. Presenza di gas in pressione (asfissianti)
3. Presenza di liquidi criogenici ($4^{\circ}\text{K} = -269^{\circ}\text{C}$)
4. Presenza di un campo elettromagnetico a RF

-269 °C



700 lt



0,7 mc

25°C

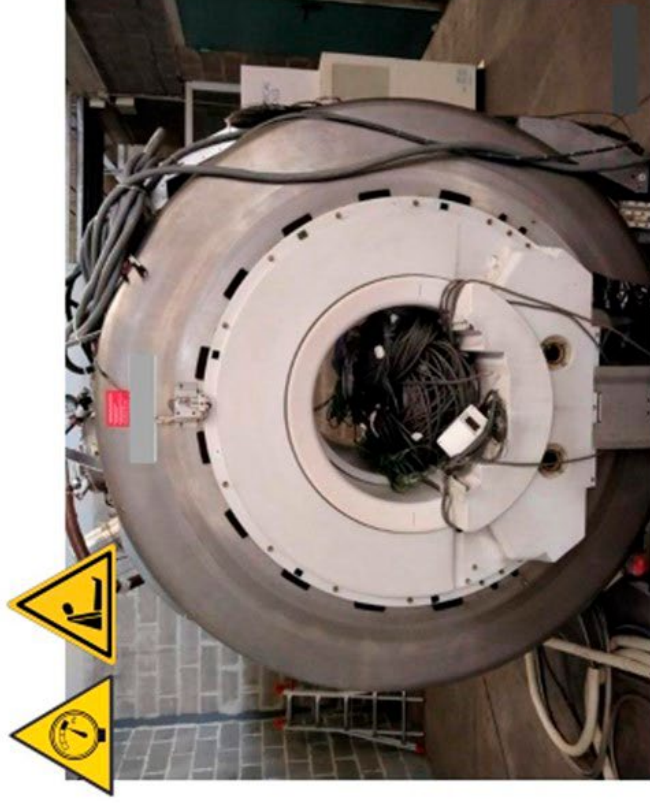


525.000 lt



525 mc

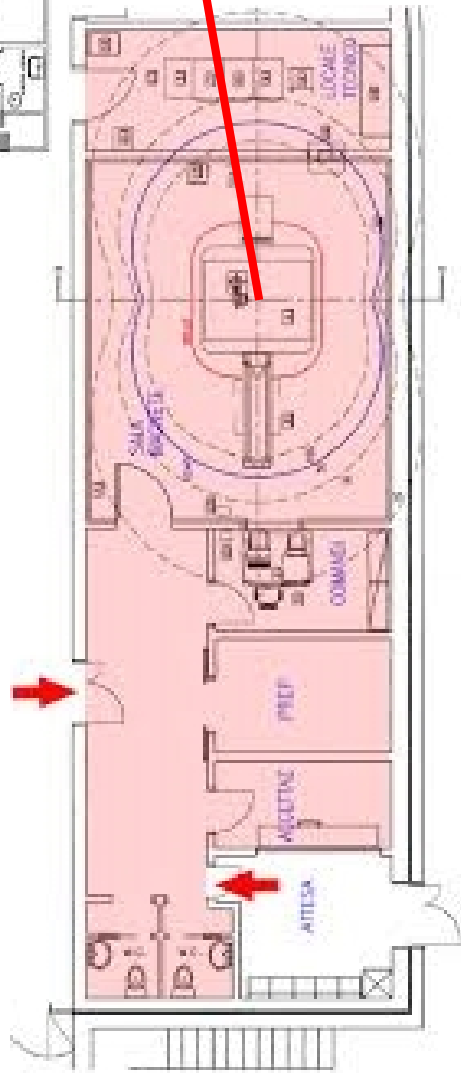
Una sala magnetite di 5x7 mt (h=4 mt) ha una volumetria di 140 mc!



L'apparecchiatura di Risonanza Magnetica Nucleare: morfologia dei locali

Il sito di Risonanza Magnetica Nucleare è composto da numerosi locali:

1. Sala attesa,
2. Accettazione
3. Anamnesi
4. Visita/em.za
5. Comandi
6. Sala magnetete
7. Locale tecnico



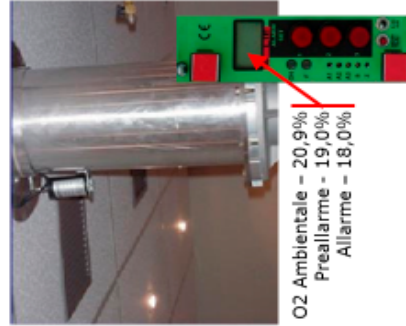
Apparecchiatura diagnostica
in pressione



Principali sistemi di sicurezza

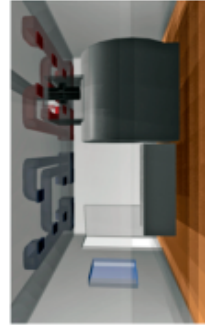
Un **sensores O_2** che rilevi tempestivamente eventuali fughe di Elio. Componenti:

1. Cella elettrochimica;
2. sistema di allarme (19% e 18% O_2)

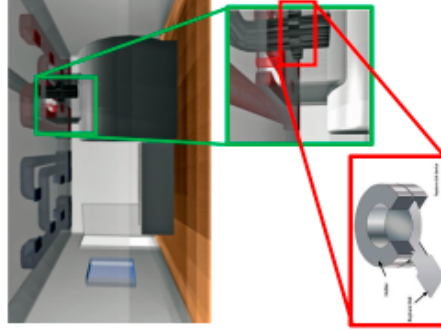


Un **impianto di ventilazione**, a servizio della sala in cui è il tomografo, che garantisce tramite portate e ΔP :

1. Adeguati ricambi d'aria;
2. parametri micro-climatici confortevoli;
3. condizioni adeguate per l'esame;
4. la sicurezza dei presenti nel locale.



un **diaframma rigido a «rottura programmata»** che rilasci l'Elio prima che questo porti a dei collassi strutturali «Contentitore».



Una **canalizzazione per la fuoriuscita del gas** che lo convogli all'esterno senza permettere perdite all'interno di ambienti frequentati da persone



il cui **terminale di uscita** consideri problematiche di asfissia e temperatura dovute al gas in uscita.



Bibliografia

- A. Reolon, A. Perrone, G. Poggialini, *Gestione della sicurezza di un sito di diagnostica con Risonanza Magnetica*, XVI CONVEGNO NAZIONALE Associazione Italiana Ingegneri Clinici AIIC, Bari, 2016;
- F. Campanella, M. Mattozzi, *Realizzazione alla regola dell'arte degli impianti di ventilazione nelle sale di Risonanza Magnetica. Indicazioni operative, esperienze, criticità*, Ed. Inail, Milano, 2012
- F. Campanella, M. Mattozzi, *Installazione di dispositivi medici dotati d'impianti a pressione: aspetti normativi, tecnici e procedurali correlati alla verifica della conformità di fabbricazione e d'installazione secondo la "regola d'arte" per le apparecchiature a Risonanza Magnetica che utilizzano magneti superconduttori*, online 30 settembre 2020 https://www.inail.it/cs/internet/docs/all_rit_installazione_dispositivi_medici.pdf?section=attivita
- UNI, *PRASSI DI RIFERIMENTO UNI/PdR 55:2019 «Linee guida per l'applicazione delle raccolte ISPESL VSR-VSG-M-S nell'ambito della Direttiva 2014/68/UE»*, Milano, 2019



a cura di
Dott. Luigi Picardi

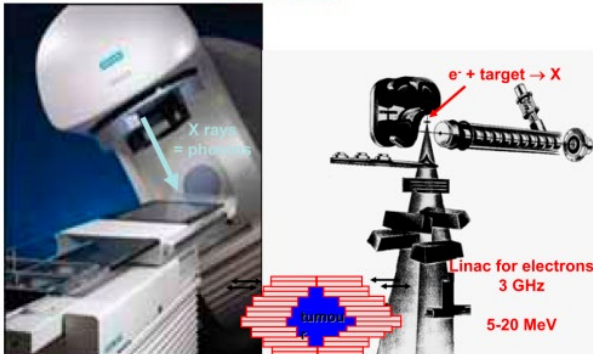


RICERCA-PROGETTO TOP-IMPLART
**La Protonterapia: radioterapia
oncologica mediante protoni con
sorgente impulsata**



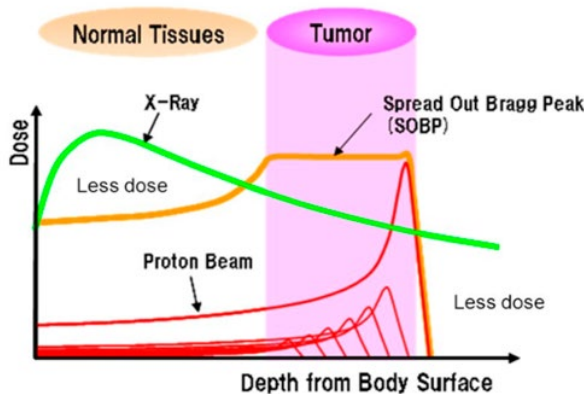
Figura 2

Conventional radiotherapy uses electron linear accelerators



In the world radiation oncologists use 10 000 electron linacs
40% of all the existing accelerators

Figura 1



Abstract

Il Laboratorio acceleratori dell'ENEA è da decenni impegnato nella realizzazione di acceleratori per applicazioni in campo prettamente civile ed in particolare medicale. L'expertise del laboratorio (derivante da quella del gruppo macchina dell'eletrosincrotrone di Frascati degli anni '60) comprende tutte le tecnologie necessarie, dalla progettazione e realizzazione delle complesse strutture acceleranti a radiofrequenza, agli impianti RF di potenza, alle tecnologie del vuoto, alla diagnostica, alla dosimetria, etc. Tutte queste attività sono sempre state svolte con stretti contatti e collaborazioni con altri dipartimenti dell'Ente, con enti di ricerca come INFN, CERN, ISS, Università e con aziende, soprattutto del territorio laziale alle quali è stato trasferito molto know-how che è risultato importante per il loro stesso sviluppo e che ora sono dei punti di riferimento per le avanzate tecnologie in questo campo. Il progetto principale, TOP IMPLART (Terapia Oncologica con Protoni, Intensity Modulated Proton Linear Accelerator for RadioTherapy) è un programma per la realizzazione di un prototipo di impianto innovativo per protonterapia, condotto in ENEA

con il finanziamento della Regione Lazio, in collaborazione con Istituto Superiore di Sanità e Istituti Fisioterapici Ospedalieri.

Il progetto è basato su un acceleratore lineare di protoni basato su un brevetto ENEA. Al momento è prevista la prima fase di realizzazione con una energia massima del fascio di protoni pari a 150 MeV, corrispondenti a 15 cm di profondità in tessuto. La macchina è ospitata in un bunker lungo 27 metri nel Centro di Ricerche ENEA a Frascati. Attualmente la macchina è sviluppata fino a 55 MeV e si stanno progettando e realizzando i successivi moduli acceleranti. Poiché il sistema è modulare e si accresce durante il periodo di realizzazione, il sistema viene utilizzato, ad energie intermedie, per la caratterizzazione dosimetrica per molti studi di radiobiologia, e di irraggiamento di campioni biologici e non, anche per applicazioni spaziali. Nell'intervento verranno descritti i concetti di base del progetto, inquadrati nello sviluppo acceleratori in generale e le prospettive future.

La **radioterapia** è uno dei trattamenti principali in oncologia. Viene effettuata da molti decenni mediante acceleratori lineari (LINAC) che generano un fascio di elettroni ad alta energia (6-15 MeV) il quale, indirizzato da alcuni magneti su un bersaglio di metallo, genera i raggi X che investono il paziente nella zona tumorale. Talora, per applicazioni superficiali gli elettroni vengono utilizzati direttamente sul paziente.

La storia degli acceleratori in Italia inizia proprio a Frascati, dove fu in esercizio l'elettrosincrotrone, un acceleratore circolare di elettroni da 1000 MeV, poi smantellato negli anni '70. Il **Laboratorio Acceleratori dell'ENEA (FSN-TECFIS-APAM)** è sito nel Centro Ricerche ENEA di Frascati, proprio nell'edificio dell'elettrosincrotrone, che fu riorganizzato in vari bunker per alloggiare acceleratori più piccoli, prototipi per acceleratori di uso medicale o industriale.

Negli anni '90 infatti ENEA iniziò un trasferimento del know-how della tecnologia degli acceleratori lineari ad una industria di Aprilia. Dopo ormai quasi 30 anni, la SIT è leader mondiale in una nicchia della radio-

terapia che è la IORT cioè la radioterapia Intraoperatoria. Ha prodotto più di 100 dispositivi basati su linac ad elettroni da 10-12 MeV che sono operativi in Italia e all'estero. La radioterapia convenzionale, più presente nelle strutture ospedaliere, è invece ancora oggi nelle mani di multinazionali straniere (Electa, Varian, Toshiba etc.)

Negli anni '90 grande attenzione fu data in campo mondiale alla possibilità di utilizzare acceleratori di **protoni in radioterapia**. Infatti, un limite intrinseco della radioterapia con gamma risiede nel fatto che i raggi X attraversano completamente il corpo umano rilasciando una dose che decresce in modo esponenziale in profondità.

Per ottenere l'irraggiamento più conforme al tumore bersaglio, durante un trattamento il fascio gamma viene indirizzato da più parti mediante la testata rotante che contiene l'acceleratore, in modo da sommare la dose ove voluto e disperdere la dose nei tessuti sani. I protoni accelerati invece, come tutte le particelle pesanti, rilasciano il massimo della loro energia al termine del loro percorso nel tessuto umano. Essi infatti si fermano nel corpo ed hanno la maggiore efficacia proprio in prossimità della zona terminale (Bragg peak al range), che è determinata dall'energia che avevano inizialmente: maggiore l'energia, maggiore la profondità. Il chiaro primo vantaggio della protonterapia quindi consiste nella assenza di irraggiamento dei tessuti più profondi del range delle particelle.

Questa proprietà è fondamentale per risparmiare organi critici situati a valle del-

Figura 3

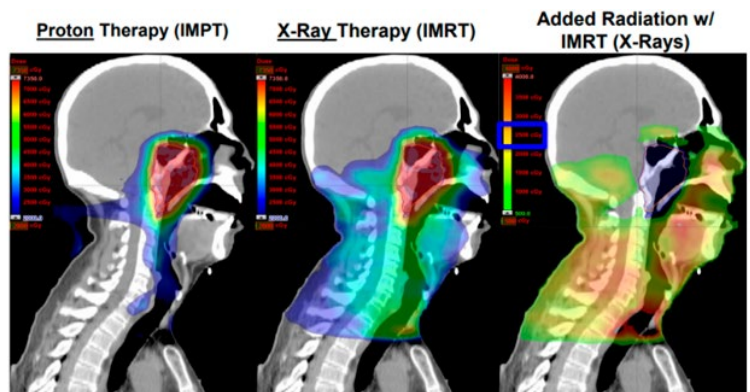
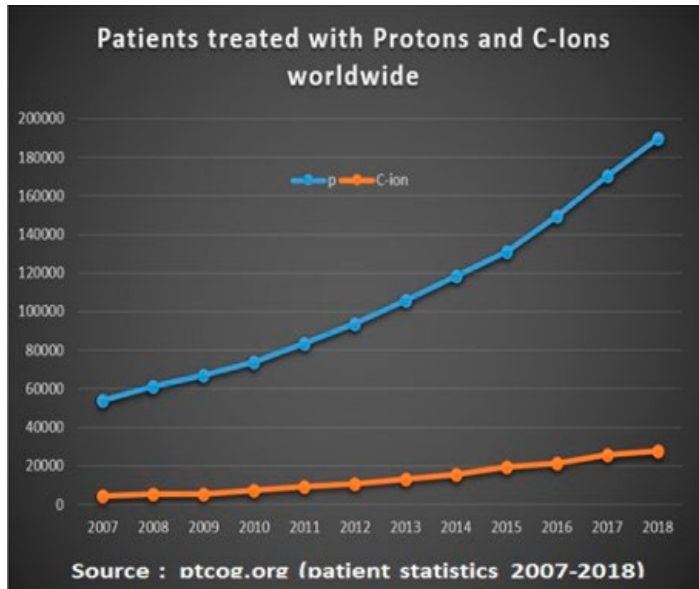


Figura 4 la massima profondità di penetrazione, che, invece, vengono comunque irraggiati da un trattamento con raggi X.

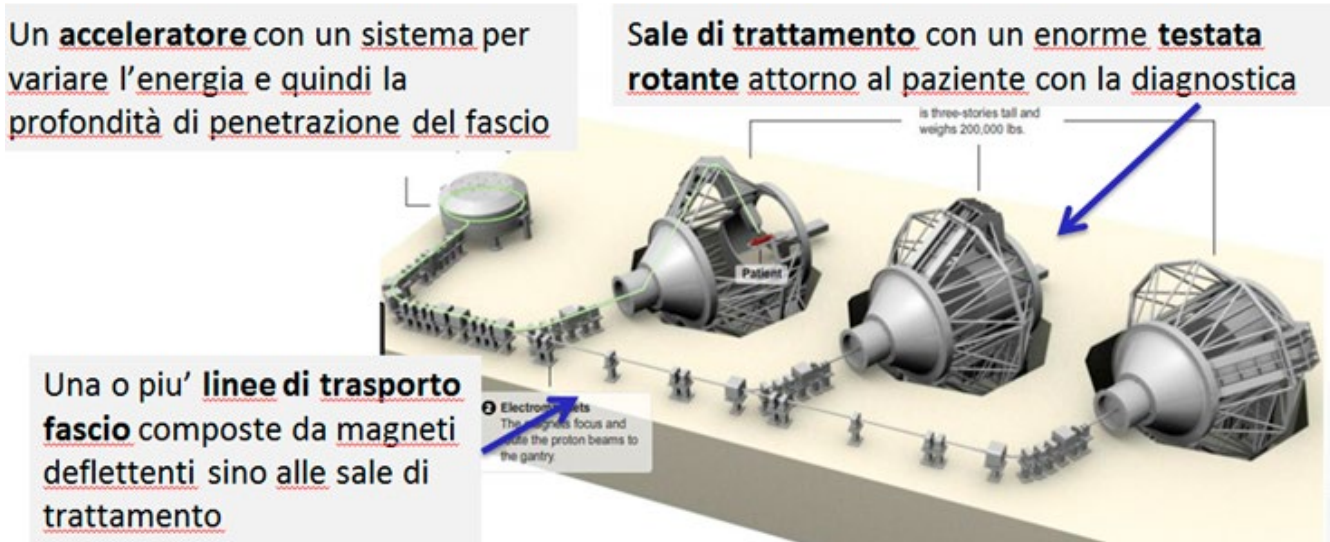
Inoltre, poiché la profondità del picco, e quindi del maggior danno, è dipendente dall'energia dei protoni in ingresso è possibile effettuare uno «scanning attivo 3D» di un volume tumorale di forma qualsiasi modulando intensità ed energia cinetica del pennello di protoni (Spread Out Bragg Peak) e variandone la direzione.

La **diffusione della protonterapia** è però ostacolata dalla complessità molto maggiore del macchinario e dell'acceleratore delle particelle. Essendo i protoni di massa circa 2000 volte maggiore di quella degli elettroni, ma di carica uguale seppure di segno opposto, la loro accelerazione deve essere più alta (tra un minimo di 50 MeV, corrispondenti a 3 cm di penetrazione e un massimo di 230 MeV corrispondenti a 32 cm di penetrazione) richiede macchine di dimensione molto maggiore, più complesse, pesanti, ingombranti e costose sia in se' sia per la relativa installazione in sede ospedaliera. Così, al tempo attuale, sebbene il numero di macchinari



prattutto nel mondo occidentale, il numero di essi è circa 1/100 dei quelli di radioterapia convenzionale (circa 120 contro 12000). I più diffusi **acceleratori per protonterapia** sono ciclotroni e sincrotroni (questi ultimi impiegati anche per accelerare ioni leggeri). L'impianto è composto da un acceleratore come detto, complesso e pesante, dal quale si diparte una linea di fascio che può essere divisa in più rami mediante magneti, per servire contemporaneamente differenti sale di trattamento. Il controllo del sistema è complesso. L'impianto si sviluppa su una superficie di qualche migliaio di metri quadri. Il costo di questi impianti varia tra 60 e 200 ML

Figura 5 per protonterapia sia in rapida crescita so-





costi di funzionamento. È praticamente concepito per essere situato all'inizio della linea di trasporto del fascio nelle sale di trattamento di un sistema standard.

Le perdite di fascio durante l'accelerazione sono contenute e limitate ad energie minori di 7 MeV, cosicché la radiazione ambientale spuria è molto minore di quella di ciclotroni e sincrotroni. È un impianto modulare: la massima energia disponibile può variare da installazione a installazione. Le caratteristiche

di euro, mentre quello di un impianto di RT convenzionale è dell'ordine di 1-2 ML di euro.

L'acceleratore TOP-IMPLART

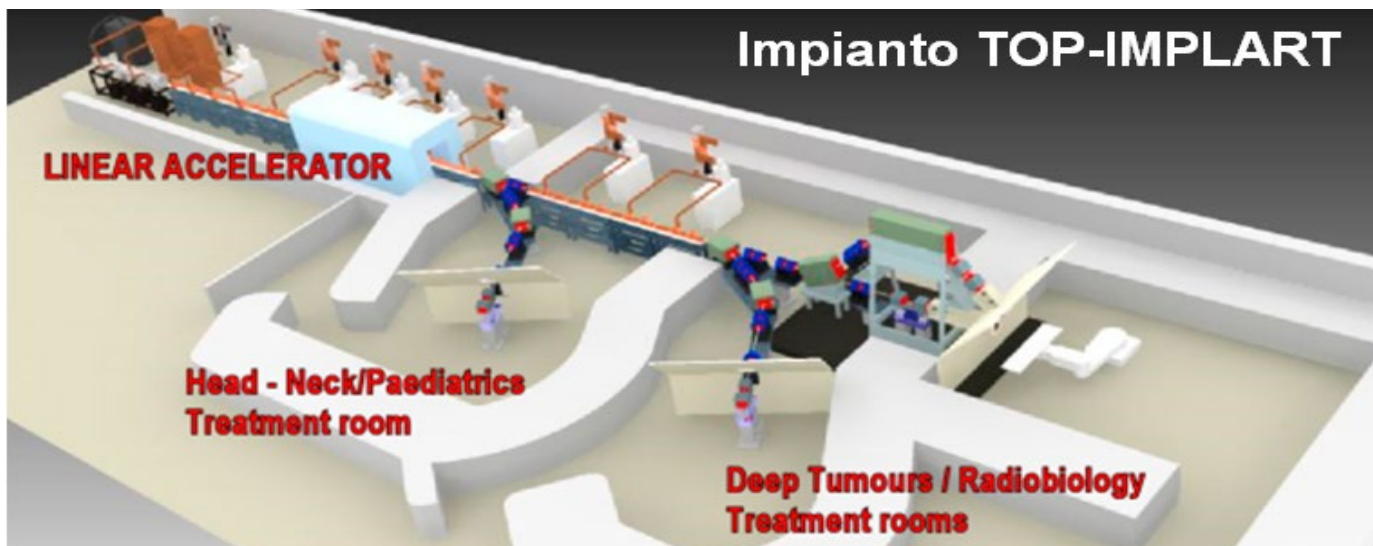
Sin dalla metà degli anni '90 ENEA ha sviluppato un concetto di acceleratore per protonterapia ad alte performances e con minimo impatto e costo. Esso è basato su un acceleratore completamente lineare. È denominato TOP IMPLART: TOP = Terapia Oncologica con Protoni; IMPLART = Intensity Modulated.

Proton Linear Accelerator for RadioTherapy è concepito per essere più compatto e leggero di ciclotroni e sincrotroni, con minori

fisiche (energia, intensità, direzione, etc.) del fascio possono essere variate rapidamente e attivamente offrendo precisione e flessibilità nella delivery della dose. È organizzato per avere una uscita supplementare ad energia intermedia (110-150 MeV) per il trattamento di tumori meno profondi.

Un prototipo fino ad una energia massima di 150 MeV (fase 1) è stato finanziato dalla Regione Lazio nel 2013 con 11 M€ (IVA inclusa) con lo scopo di realizzare e testare l'apparato presso il CR ENEA a Frascati ed eventualmente, con altri fondi, ingegnerizzarlo e trasferirlo in un ospedale laziale.

Il progetto è condotto da ENEA (accelera- Figura 6



L'acceleratore TOP-IMPLART: Layout a Frascati

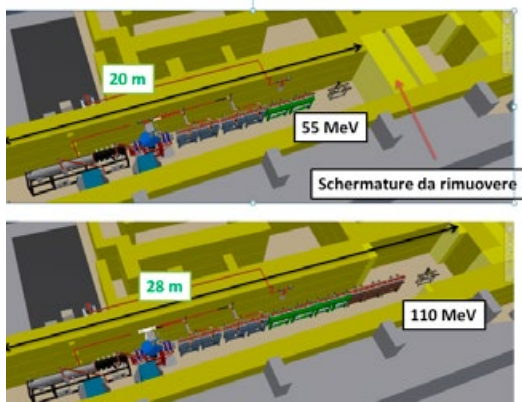


Figura 7



Figura 8



Figura 9

tore, radiobiologia cellulare e animale, radioprotezione), in collaborazione con ISS (Istituto Superiore di Sanità) (dosimetria, monitoraggio del fascio, radiobiologia) e IFO-IRE (requisiti clinici, test preclinici, treatment planning, radioprotezione). La Regione Lazio e Lazio Innova erogano il finanziamento ed effettuano il controllo finanziario. C'è il massimo possibile coinvolgimento di aziende italiane soprattutto nel Lazio.

Lo sviluppo a Frascati del prototipo è comunque complesso. Nel bunker attuale la macchina è capace di produrre un fascio

di 55 MeV. È prevista per il 2021 una nuova disposizione dei blocchi di calcestruzzo in modo da alloggiare l'estensione della macchina a 110 MeV.

L'acceleratore è composto da un iniettore, lungo 4 metri, acquistato da una ditta americana nel 2000 seguito da una sequenza di strutture acceleranti a radiofrequenza denominate SCDTL e sviluppate secondo un brevetto ENEA del 1995.

Esse garantiscono, rispetto ad altre strutture acceleranti per protoni, una maggiore compattezza sia nelle dimensioni trasversali che in quelle longitudinali a parità di energia, e un minor peso al fine di compatte al massimo l'acceleratore.

Tali strutture acceleranti sono progettate in ENEA e realizzate totalmente in rame puro da ditte laziali specializzate in meccanica di alto livello e tecnologie da ultra-alto vuoto (TSC e CECOM), mediante vari processi di lavorazioni di precisione, brasature in vuoto e saldature speciali intervallati da speciali accordature (tuning) effettuate da ENEA in itinere per ottenere la frequenza di risonanza di progetto. Esse vengono alimentate da più impianti di radiofrequenza acquistati presso una ditta svedese leader nella realizzazione di tali impianti.

Durante la realizzazione del prototipo, a mano a mano che vengono realizzate e messe in operazione le strutture acceleranti, il fascio di uscita viene caratterizzato, in un opportuno spazio di misura di circa 2 metri, per verificare la correttezza del complesso progettazione-realizzazione e la qualità dell'output.

A tale scopo vengono utilizzate, soprattutto da colleghi ISS e IFO le pratiche e la strumentazione della dosimetria standard per radioterapia (camere a ionizzazione, dosimetri al diamante, al silicio, MOSFET, alanina).

Vengono altresì realizzati sistemi dosimetrici innovativi come camere a ionizzazione 2D in tempo reale (ISS) e dosimetri con cristalli di LiF (Fluoruro di litio, ENEA) che consentono di visualizzare eccellentemente (anche visivamente) la distribuzione in profondità del fascio. Una accurata analisi con precisione micrometrica della risposta in radiofotolumi-

nescenza poi consente di ricostruire la curva di Bragg a dosi cliniche e definire caratteristiche specifiche del fascio (energy spread). Vengono anche effettuati esperimenti di irradiazione di campioni biologici in vitro (cellule tumorali). Questi irraggiamenti vengono poi confrontati con analoghi in letteratura o altri effettuati con le stesse cellule ma con raggi X e desunta l'efficacia radiobiologica del fascio accelerato.

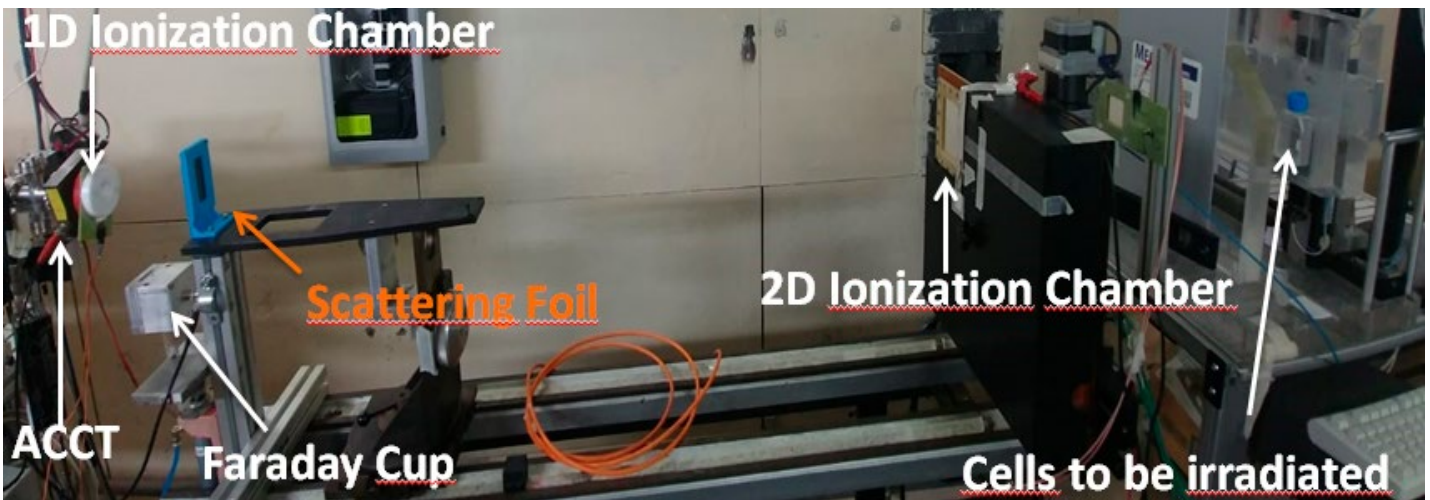
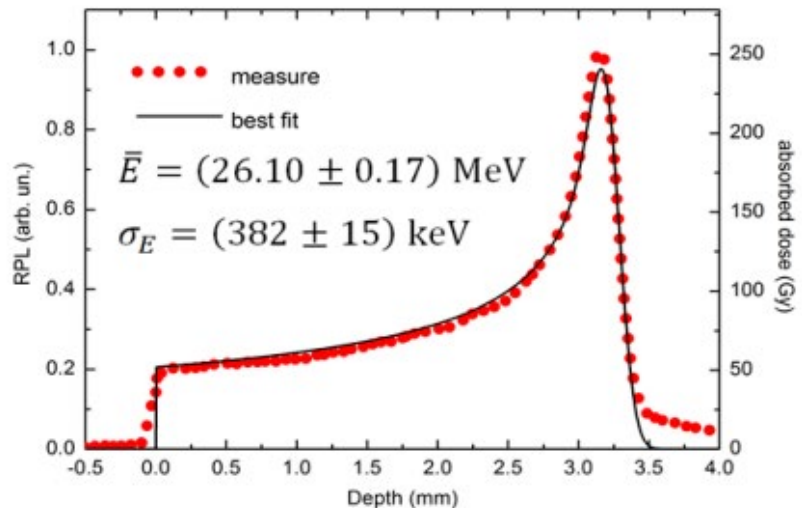
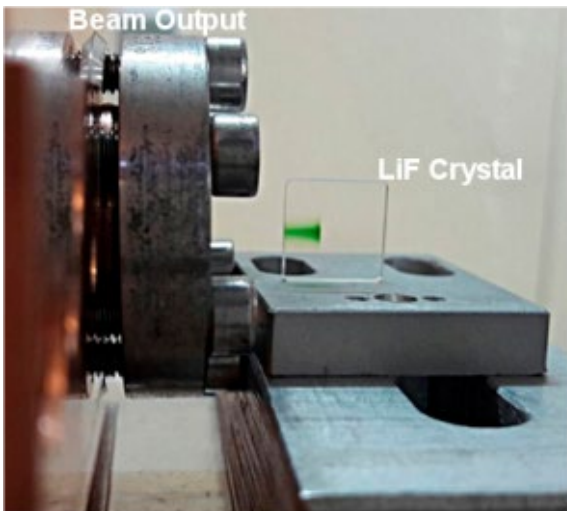
Va infine menzionato che in questi ultimi anni sono derivati dal TOP IMPLART due **progetti industriali** di realizzazione di impianti commerciali.

Il PROGETTO ERHA, portato avanti dalla società ITEL - LINEARBEAM di Ruvo di Puglia (Ba) ed il progetto LIGHT portato avanti dalla società ADAM - AVO-Oncotherapy

(Gran Bretagna). Entrambi si propongono di realizzare un linac per protonterapia e hanno fruito e/o fruiscono di collaborazioni con ENEA ove risiede l'effettivo know-how.

In conclusione, TOP IMPLART è un progetto indirizzato alla realizzazione di un prototipo innovativo per protonterapia condotto da ENEA in collaborazione con Istituti pubblici di rilievo e aziende private. La collaborazione dei vari soggetti è necessaria ed indispensabile in un progetto multidisciplinare. ENEA è aperto a ogni collaborazione soprattutto con altre istituzioni o aziende italiane con lo scopo di terminare con successo l'impresa e diffondere la protonterapia con i suoi vantaggi sanitari, e, allo stesso tempo, trasferire la tecnologia di realizzazione al tessuto industriale italiano.

Figura 10 - 11



**PROGETTO DI RICERCA
SORGENTINA
L'UTILIZZO DEI
NEUTRONI VELOCI
GENERATI DALLA FUSIONE
NUCLEARE DI DEUTERIO E
TRIZIO PER LA PRODUZIONE
DI RADIOISOTOPI PER
RADIOFARMACI**



Sorgentina è un progetto nato in ENEA negli anni '90 da un'idea del professor Martone come evoluzione della macchina FNG di Frascati che Martone stesso aveva realizzato al centro di Frascati.

Il generatore di neutroni da 14 MeV FNG (Frascati Neutron Generator), progettato e costruito all'ENEA di Frascati, si basa sulla reazione di fusione $T(d,n)\alpha$, produce fino a $1 \cdot 10^{11}$ n/s in modo continuo o impulsato.

È nato come sorgente di neutroni per prova materiali ma successivamente, grazie all'intuizione di tre colleghi dell'ENEA Capogni, Quinteri e Pietropaolo, l'idea è stata adattata ad un sistema per produzione di radiofarmaci. La nuova finalità è scaturita dalla carenza mondiale di produzione di molibdeno 99 metastabile, precursore del Tecnezio 99 a causa della sistematica chiusura di alcuni importanti reattori nucleari di ricerca.

Allo scopo di verificare la fattibilità del processo produttivo, è stato irraggiato, tramite FNG, un modesto quantitativo di polvere di molibdeno naturale e nelle celle calde del centro di Casaccia è stato verificato che la purezza chimica e radiochimica del materiale ottenuto fossero rispondenti ai limiti imposti dalla farmacopea europea. I risultati hanno pertanto confermato la fattibilità del processo produttivo basato su neutroni da 14 MeV e quindi l'appetibilità commerciale del prodotto finale.

In figura 2 viene mostrato l'irraggiamento delle polveri presso Frascati ed in figura 3 è mostrato l'esito dell'analisi radiochimica effettuato presso l'istituto INMRI in Casaccia. La macchina Sorgentina è concepita per produrre su un substrato di titanio singole reazioni di fusione D-T tramite l'accelerazione di ioni deuterio e ioni trizio. Il neutro-

Figura 1: Generatore di Neutroni Frascati (FNG) Figura 2: Irraggiamento MO

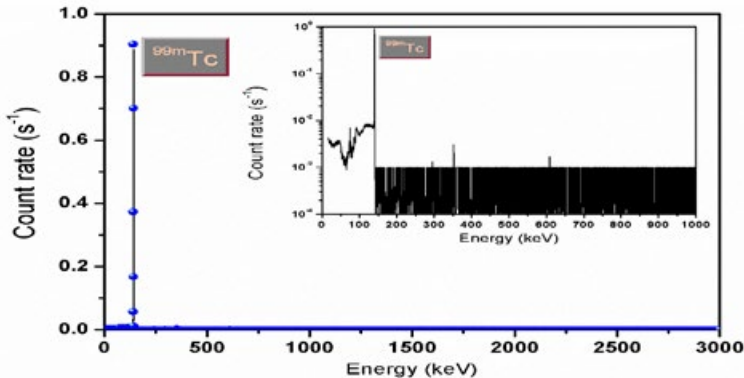
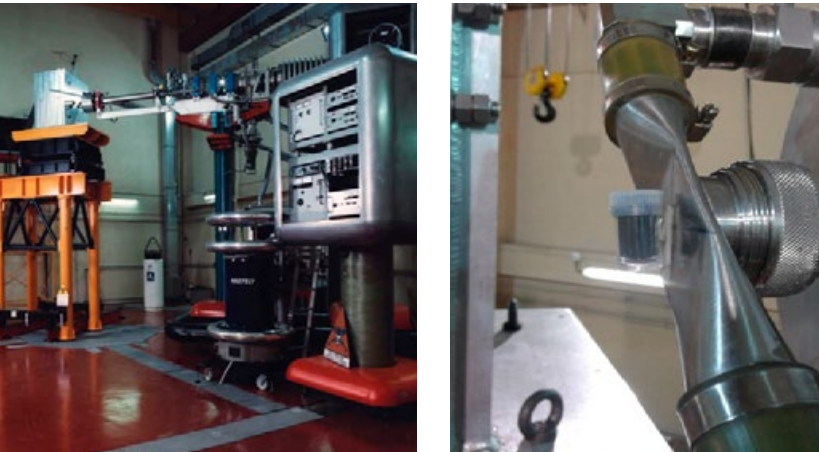


Figura 3: Analisi Radio-chimica MO

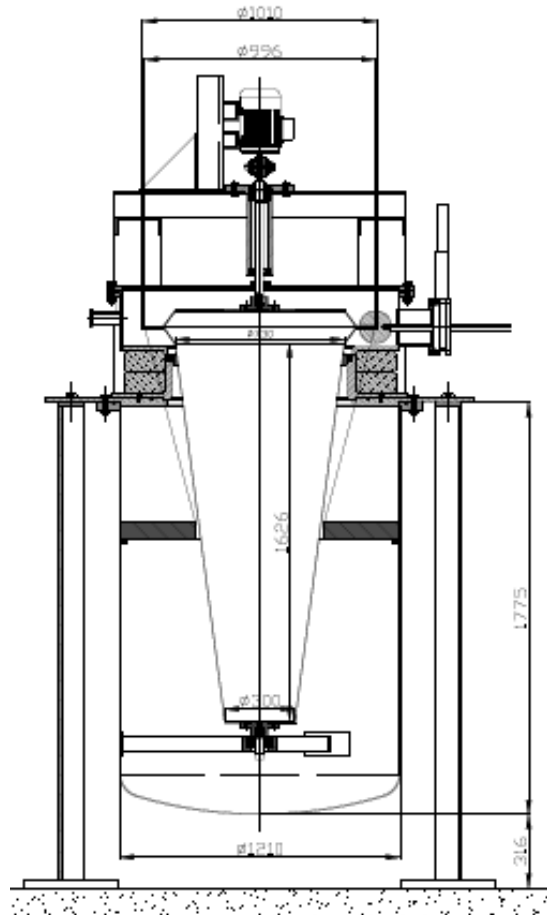


Figura 4: Bersaglio rotante

ne prodotto da ogni singola reazione è molto energetico e quando incontra un nucleo di Mo100 lo trasforma in Mo99 tramite una reazione n-2n.

I problemi tecnologici sono molteplici:

- la ricostituzione del substrato di titanio che viene continuamente eroso dal processo,
- la corretta accelerazione e proporzione di ioni trizio e ioni deuterio,
- l'efficacia di esposizione del molibdeno ai neutroni prodotti,
- la trasformazione del molibdeno irraggiato in soluzione acquosa di molibdato di sodio,
- la rimozione del calore prodotto,
- il rispetto della normativa di sicurezza.

Per la rimozione del calore è in via di progettazione un dispositivo rotante che con-

sente di ridurre il flusso termico sulla superficie di titanio e che si basa su un ciclo chiuso acqua-vapore completamente sigillato. Il dispositivo, come altre parti del sistema è coperto da brevetto ENEA.

Grazie ad un contributo della regione Emilia-Romagna un prototipo di Sorgentina RF da 250 KW è in corso di progettazione per successiva costruzione presso il centro Brasimone (fig.4 e fig.5).

La realizzazione della apparecchiatura ha come scopo principale la dimostrazione della fattibilità tecnologica del dispositivo e la sua concorrenzialità con i sistemi di produzione attualmente esistenti che si basano sulla fissione dell'Uranio 235. Due importanti sottosistemi di Sorgentina, la radiochimica ed il ripristino del substrato di titanio, sono illustrati dagli schemi di figura 6 e figura 7.

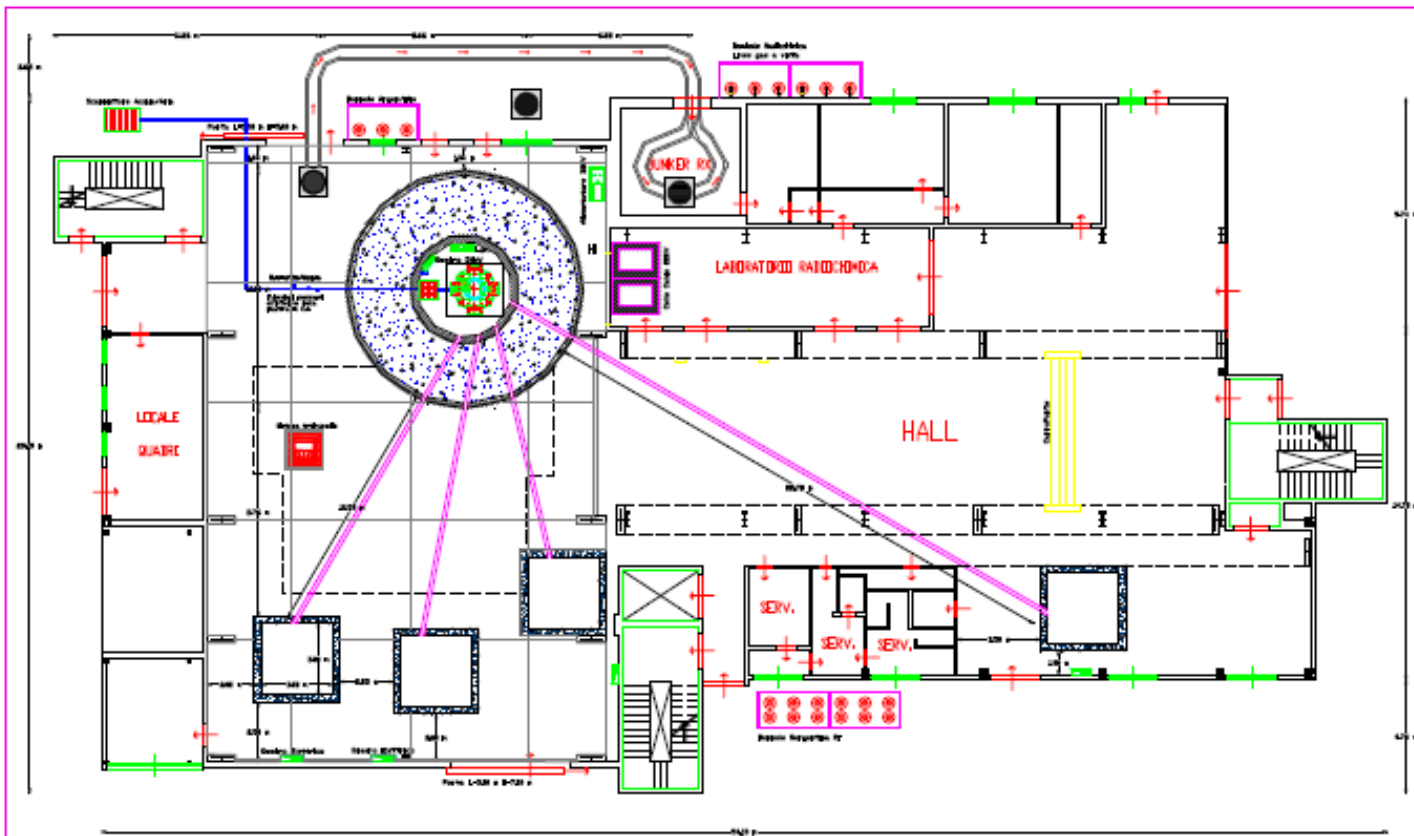


Figura 5: Layout di Sorgentina

Schematic representation of hot cells and components for the standard process

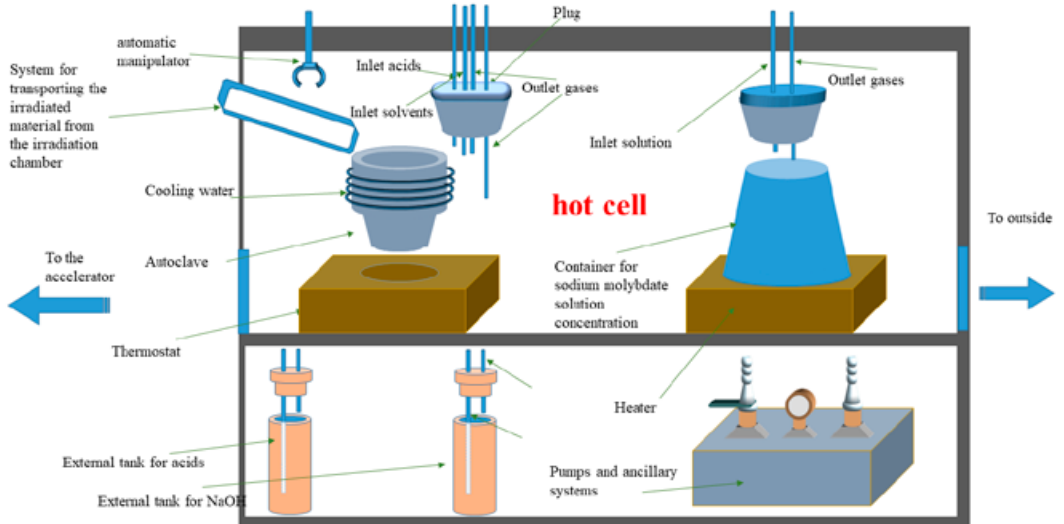


Figura 6:
Schema delle
celle calde per
processi radiochimici



**Model of Ti Sputtering
yield and experimental
test**

Layout of Sorgentina's wheel

- D (50%)/T(50%)
- $E_b=300$ keV

• Deuterium Tritium ion beam composition

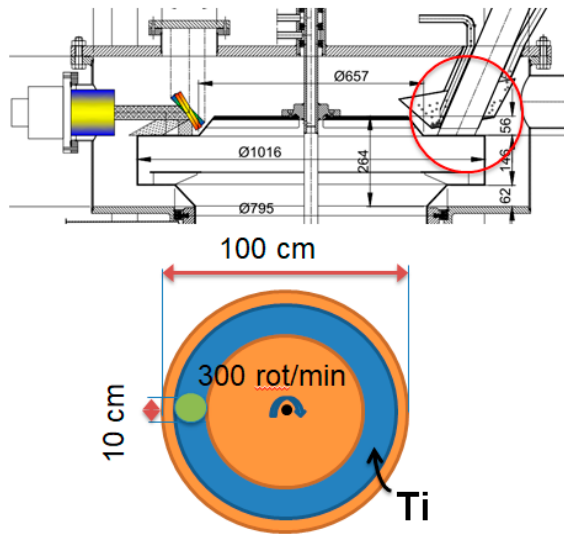
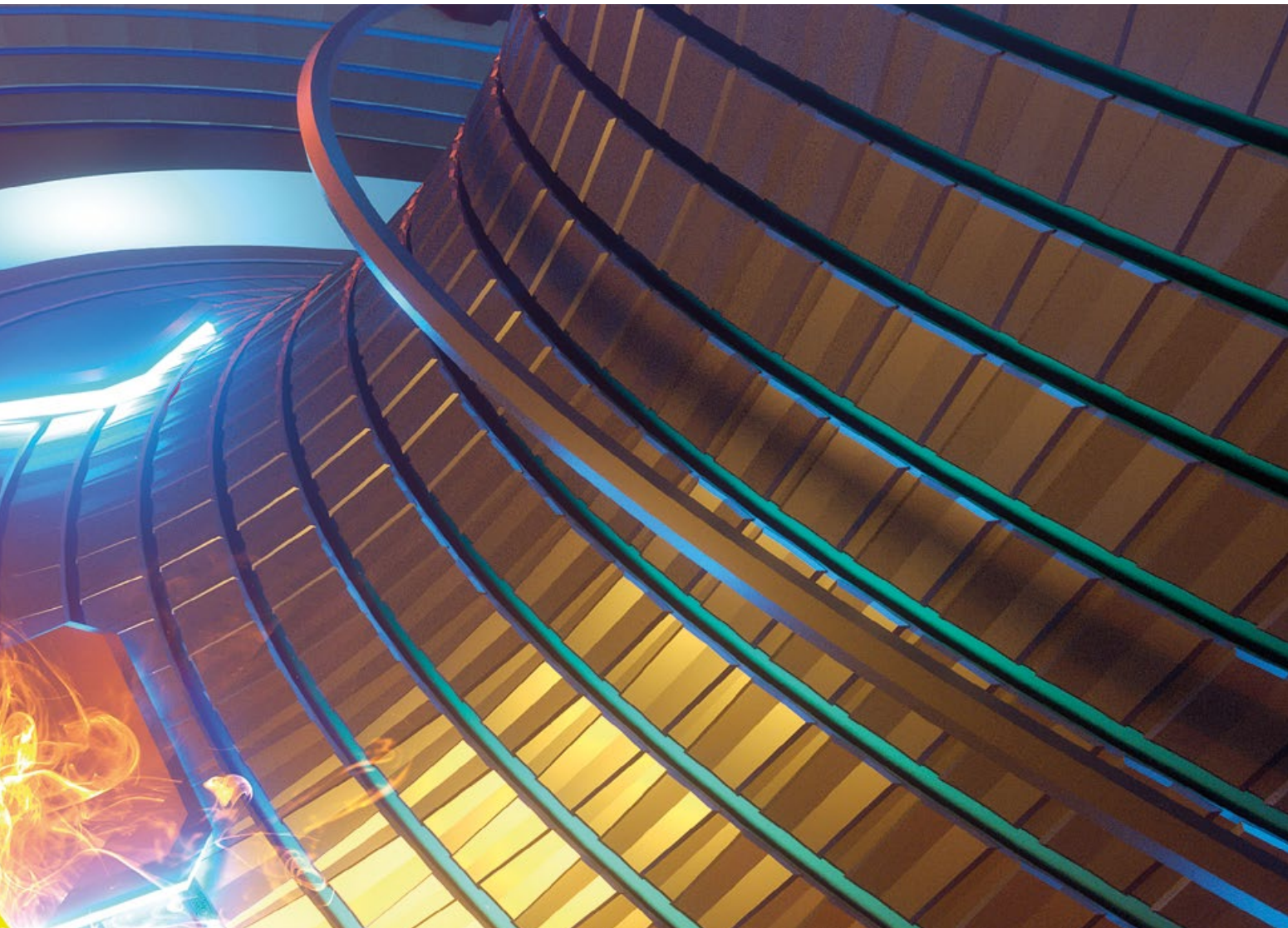


Figura 7:
Sistema di
ripristino del titanio





a cura di
Ing. Giovanni Bava

Commissione:
Gestione Impianti
Nucleari

Nuova normativa e attività innovative per la gestione in sicurezza dei rifiuti radioattivi medicali

Nuova normativa per la gestione in sicurezza delle attività



Abstract

Il breve contributo è finalizzato a fornire elementi del nuovo quadro normativo/istituzionale relativo alle applicazioni nell'ambito oggetto del seminario. Il recepimento della Direttiva 2013/59 Euratom ha portato all'introduzione di modifiche sulle quali si è ritenuto opportuno fornire un breve cenno.

Gli aspetti di particolare interesse riguardano il quadro istituzionale, i processi autorizzativi, le figure professionali chiamate a operare, alcune novità rilevanti (registri e banche dati, gestione residui da attività con materiale naturalmente radioattivo, esposizioni al radon, esenzione e allontanamenti etc.), nonché l'ulteriore lavoro normativo che è necessario programmare.

Le attività che comportano una esposizione a radiazioni ionizzanti (praticamente tutte quelle illustrate nella presente raccolta), sono soggette a norme nazionali che, in gran parte, fanno proprie raccomandazioni e requisiti sviluppati a livello internazionale e, in particolare, recepiscono Direttive prodotte nell'ambito del trattato Euratom tra i paesi della Comunità Europea. Con l'evoluzione delle conoscenze e delle esperienze, la normativa viene aggiornata periodicamente. Proprio nell'estate di quest'anno è stato pubblicato un nuovo Decreto Legislativo (n. 101), in recepimento della direttiva 2013/59/Euratom, che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti. Detto Decreto legislativo, ha un ruolo centrale nell'ambito della vasta regolamentazione della materia.

Illustrare puntualmente i contenuti del nuovo Decreto non rientra tra gli obiettivi di questo contesto ma, dal momento che molti lettori interessati alle applicazioni nucleari presumibilmente sono già addentro nella materia, può essere utile segnalare alcune novità che emergono dalla lettura della nuova norma, nonché alcune considerazioni di merito.

Innanzitutto, si deve segnalare che sono variati alcuni limiti, essenzialmente nel verso conservativo, legati a nuove evidenze e nuove valutazioni (es.: limiti di dose equivalente al cristallino per i lavoratori, livelli di concentrazione media annua di attività di radon in aria).

Le attività regolamentate sono molteplici e vanno dagli impianti nucleari alle pratiche svolte in ambito industriale, medico e di ricerca, al trasporto, alla gestione dei rifiuti. Tra



l'altro, le nuove regolamentazioni relative alle esposizioni mediche, che in precedenza erano trattate da una diversa norma, sono state inserite nel medesimo contesto ove sono trattate altre tipologie di esposizione.

Particolare rilievo ha la trattazione più ampia della sezione dedicata alle sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti per l'incremento delle tipologie di attività lavorative oggetto di attenzione (es. centrali elettriche a carbone, personale navigante nei veicoli spaziali) e delle disposizioni connesse alle potenziali esposizioni da radon e da materiali da costruzione, ma soprattutto per l'inserimento di specifiche indicazioni per la gestione dei residui da attività lavorative con materiale naturalmente radioattivo, per le quali sussisteva un vero e proprio vuoto normativo.

Maggiore impulso è stato dato alla prevenzione di situazioni di esposizione ed alla

valutazione complessiva delle stesse, attraverso la predisposizione di:

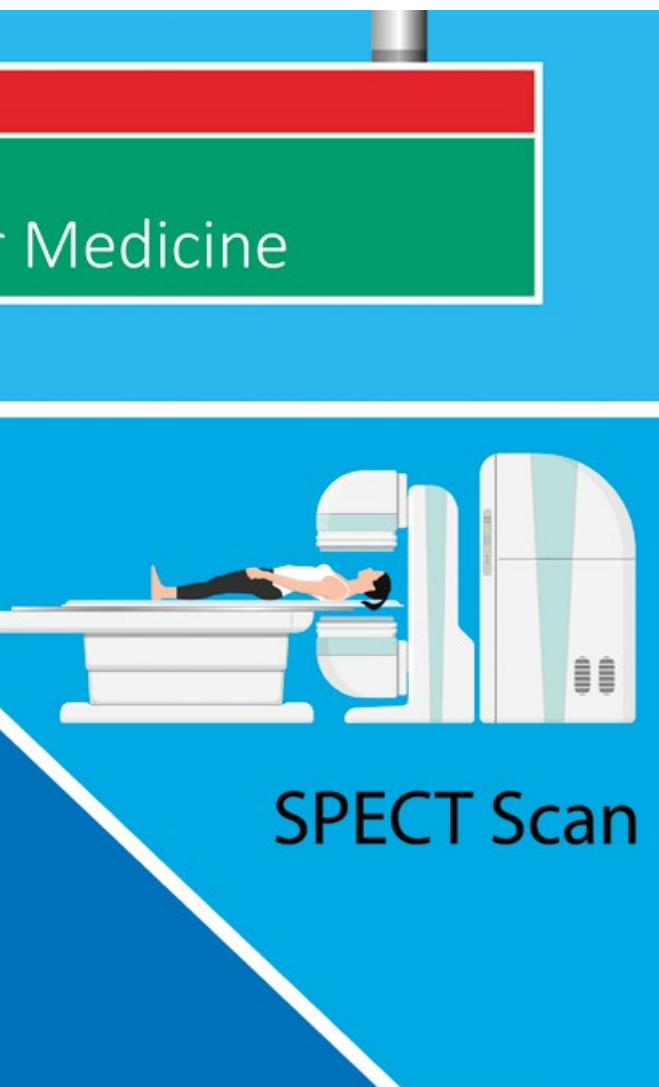
- una campagna di individuazione e valutazione delle situazioni di esposizione esistenti (art. 200),
- una campagna di recupero delle sorgenti orfane (art. 73).

Si devono registrare variazioni nelle designazioni delle figure professionali chiamate ad operare (es.: da esperti qualificati ad esperti di radioprotezione), nonché l'inserimento di nuove figure professionali, tra cui:

- esperti in interventi di risanamento radon (art. 15 e allegato 2),
- esperti di radioprotezione di terzo grado sanitario (artt. 128 ÷ 130).

La sorveglianza sanitaria dei lavoratori esposti è affidata ad un'unica tipologia di professionisti: i medici autorizzati, indipendentemente dal livello di rischio di esposizione, diversamente dal passato (art. 134). Per gli specialisti di fisica medica è richiesta la laurea in fisica mentre, opportunamente, il CNI aveva auspicato che potesse essere considerata adeguata anche la laurea in ingegneria biomedica, dal momento che detti specialisti sono chiamati, tra l'altro, ad operare con apparecchiature medico radiologiche, per le quali devono assicurare la qualità ed il mantenimento di elevati standard di sicurezza per il paziente.

Il quadro istituzionale, nell'ambito del quale viene esercitato il controllo, prevede un "sistema di autorità competenti", costituito da vari Ministeri, Regioni e Province autonome, Dipartimento per la Protezione Civile. La ripartizione delle competenze di dette autorità è molto articolata e presenta qualche variazione rispetto alla precedente normativa, così come l'assegnazione delle funzioni ispettive. Permangono, tuttavia, situazioni in cui è necessario che le autorità competenti agiscano di concerto o che gli organi di vigilanza intervengano sulla medesima attività, peraltro in assenza di evidenti meccanismi che ne sostengano l'azione coordinata. È stata opportunamente sottolineata la necessità che le autorità competenti assicurino separazioni funzionali e assenza di conflit-



ti di interessi nell'ambito dei propri uffici e che la vigilanza non possa essere effettuata dallo stesso soggetto che svolge l'attività vigilata o dall'esercente titolare della pratica oggetto della vigilanza.

Si deve registrare un rilevante passo avanti nella direzione di una maggiore omogeneità degli interventi autorizzativi delle pratiche sia attraverso l'identificazione dei contenuti della documentazione tecnica da presentare (allegato XIV), sia attraverso l'indicazione degli organi tecnici territorialmente competenti che devono essere consultati ai fini del rilascio dei nulla osta a livello locale (art. 52).

Viene stabilito che la gestione dei rifiuti radioattivi generati nell'ambito delle attività dell'Amministrazione della Difesa dovrà essere effettuata nell'ottica del relativo conferimento al deposito nazionale e dovrà essere, pertanto, regolata e sorvegliata dall'ISIN (art. 242).

Sono istituiti nuovi archivi o ampliati i contenuti di archivi centralizzati già esistenti, sono inseriti precisi obblighi di trasmissione di dati, al fine della registrazione dettagliata di informazioni rilevanti relative a varie aree di interesse quali le concentrazioni di radon nelle abitazioni e nei luoghi di lavoro, le sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti, i rifiuti radioattivi, gli allontanamenti di materiali dalle pratiche. In particolare, risultano particolarmente ampliati:

- la banca dati della rete nazionale della radioattività ambientale,
- il registro telematico delle sorgenti di radiazioni ionizzanti, dei rifiuti¹ e dei trasporti, gestiti dall'ISIN. Altre banche dati sono gestite dall'ISS e dal MLPS.

Un'enfasi particolare pare opportunamente attribuita ai processi di giustificazione e di ottimizzazione. Nell'ambito delle esposizioni mediche viene richiesta una più sistematica applicazione del requisito di trasparenza nei confronti del paziente, con particolare riguardo all'informazione preventiva su rischi e benefici delle esposizioni per accertamenti medici ed alla registrazione delle dosi.

Una modifica rilevante ha riguardato i valori

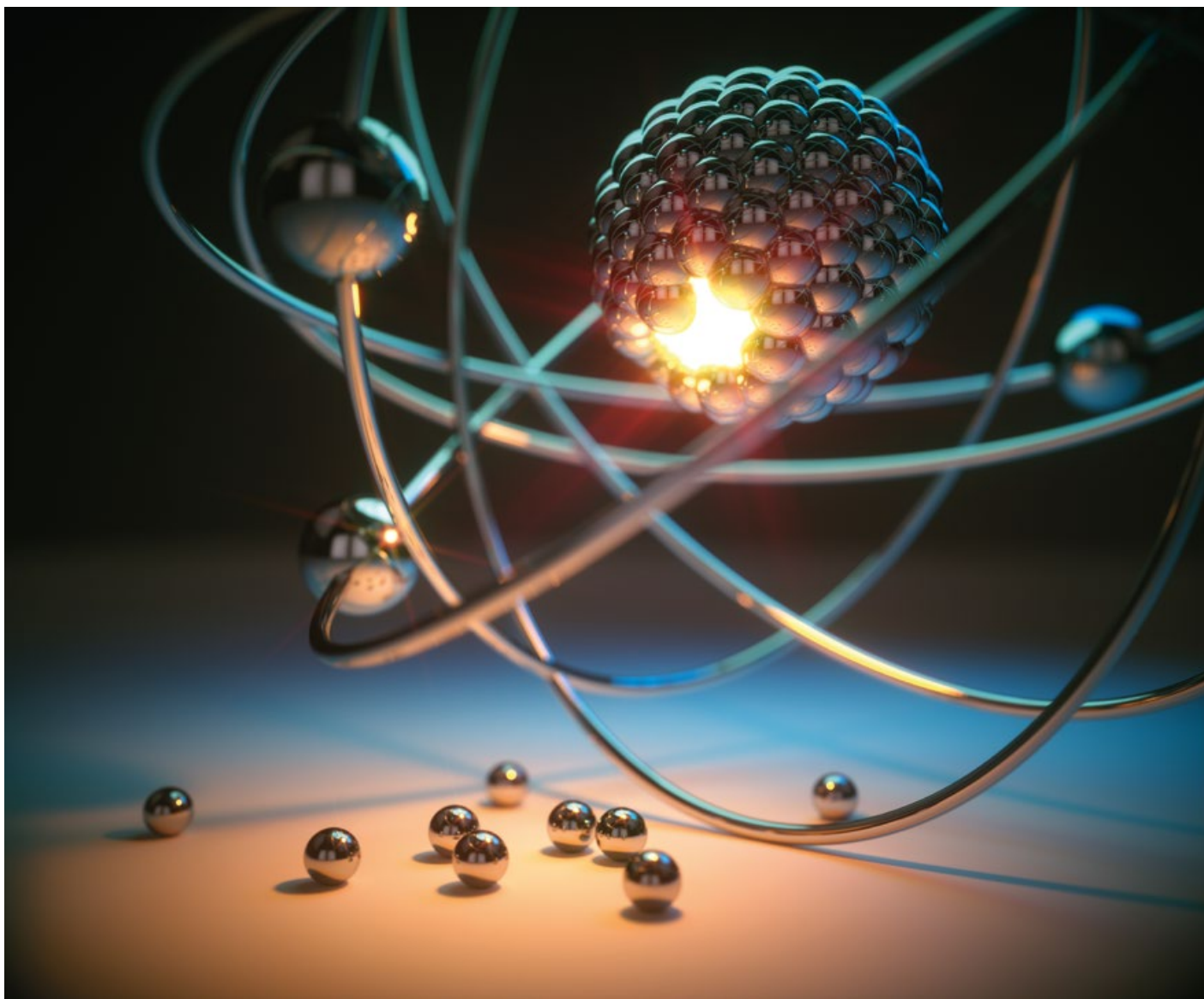
di concentrazione (riferiti al kg di sostanza, non più al grammo), nonché di attività totali dei vari radioisotopi, da utilizzarsi per l'esenzione da obblighi o per l'identificazione del procedimento da seguire (allegato I tabella 1-1.A). Tali valori sono stati uniformati agli standard internazionali, secondo le indicazioni della Direttiva, restando invariato il criterio di assicurare la non rilevanza radiologica in caso di esenzione. I valori di concentrazione da utilizzarsi per gli allontanamenti (allegato I tabella 1-1.B), sono invece stati mantenuti a livelli più bassi rispetto a quelli indicati dalla Direttiva, essenzialmente riprendendo i valori della normativa abrogata. Quest'ultimo aspetto merita approfondimenti e confronti adeguati per verificare in quale misura la scelta si possa considerare adeguata, tenendo conto degli aspetti di radioprotezione, ma anche delle implicazioni sulle quantità di rifiuti, sugli oneri della relativa gestione e sugli scambi internazionali. Si deve, tuttavia, rilevare che le autorità competenti, in casi particolari, possono stabilire per i livelli di allontanamento in concentrazione di massa, per materiali specifici o per destinazioni specifiche, valori superiori, fermo restando il criterio della non rilevanza radiologica. Particolare impatto sulle attività di medicina nucleare potrà essere determinato dall'aver rimosso l'esclusione dei radionuclidi con tempi di dimezzamento inferiori a 75 giorni dall'applicazione del decreto (art.154 del DLgs 230/1995), in particolare per quanto attiene agli allontanamenti legati allo scarico degli effluenti nel sistema fognario ed alla conseguente necessità di effettuare una valutazione della relativa non rilevanza radiologica (allegato XIV del DLgs 101/2020).

È opportuno sottolineare, con soddisfazione, che alcune disposizioni, che nella normativa abrogata erano rinviate all'elaborazione di norme applicative, in molti casi mai emanate, sono state riportate nel testo del Decreto legislativo o nelle appendici. Tuttavia, ancora numerose sono i rinvii a norme da elaborare, essenzialmente a livello ministeriale.

Purtroppo, come già rilevato da esperti

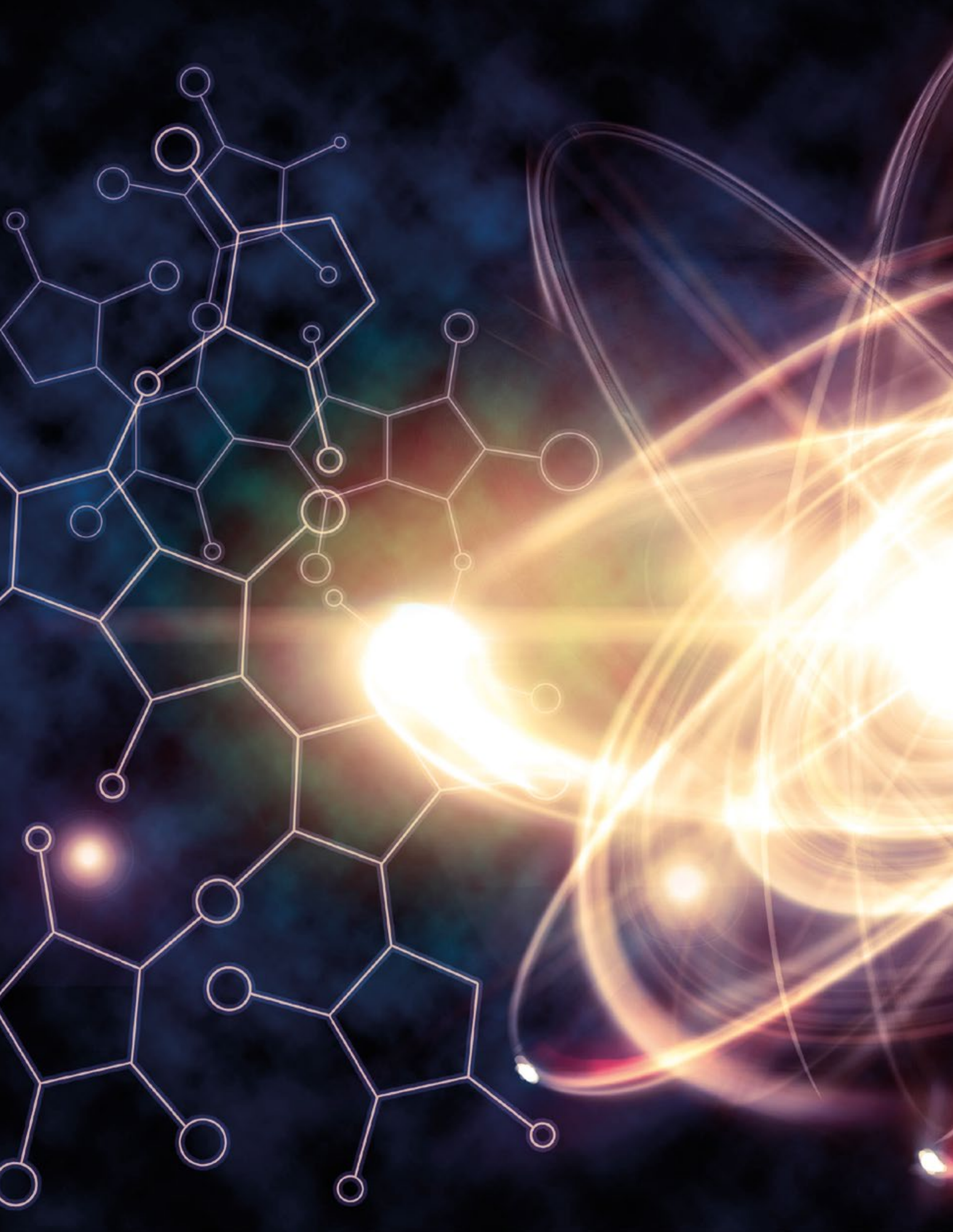
ed associazioni professionali, il testo del nuovo decreto presenta alcuni errori ed imprecisioni, nonché alcune disposizioni che possono creare rilevanti problemi di transizione dal vecchio al nuovo regime; si auspica, pertanto, che in tempi relativa-

mente brevi siano apportate appropriate correzioni. Vi sono, inoltre, ulteriori norme che dovranno essere emanate nel prossimo futuro, per realizzare aggiornamenti di norme non abrogate, integrazioni, adeguamenti alla nuova normativa.




Note

1. In particolare, è prevista la predisposizione presso l'ISIN, entro i primi mesi del 2021, del sistema STRIMS per il tracciamento delle sorgenti, dei rifiuti e dei materiali radioattivi mediante registrazione on line (fonte: Rapporto Italiano per la convenzione internazionale sulla sicurezza del combustibile irraggiato e dei rifiuti radioattivi).









Tendenze normative e attività innovative per la gestione in sicurezza dei rifiuti radioattivi

Abstract

Il contributo è finalizzato a fornire elementi tecnico-normativi che consentano di evidenziare come dalle normative di riferimento in ambito internazionale si arrivi alla ratifica di direttive comunitarie e alla emanazione dei decreti nazionali di recepimento.

In particolare, la disamina è dedicata alla trattazione dei rifiuti radioattivi, illustrando come i Principi stabiliti nelle Safety Series della IAEA sull'argomento si traducano in Requisiti che, a loro volta, originano le disposizioni vigenti a livello nazionale per la classificazione e la gestione in senso lato dei rifiuti radioattivi, a maggior ragione adesso con la recentissima entrata in vigore del Decreto Legislativo n. 101/2020.

a cura di
Ing. Francesco Lo Giudice

INDICE DEI CONTENUTI

- ✓ Rifiuti radioattivi nella normativa internazionale
 - ✓ Definizioni
 - ✓ Gestione dei rifiuti radioattivi
- ✓ Principi fondamentali per la gestione
- ✓ Requisiti normativi e tecnico-organizzativi
- ✓ Classificazione

BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE E FONTI GIURIDICHE PRIMARIE



Nel 1995 la IAEA ha pubblicato i nove principi fondamentali per il Radwaste Management

Nel 2006 la IAEA ha revisionato e pubblicato, in modo più estensivo, i dieci principi fondamentali di sicurezza (safety) applicabili anche al Radwaste Management.

IAEA Safety Standards
for protecting people and the environment

Predisposal Management of Radioactive Waste

General Safety Requirements Part 5
No. GSR Part 5

Nel 2009 la IAEA ha emesso un nuovo Safety Standard, dedicato proprio al Radwaste Management. In questa pubblicazione sono stati stabiliti ventidue requisiti che ciascuno Stato membro è tenuto a rispettare allo scopo di assicurare un appropriato Radwaste Management in conformità ai principi di sicurezza (safety) fondamentali.

PRINCIPI >>>> REQUISITI

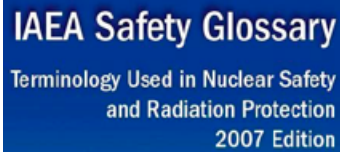


TABLE XIV. TYPICAL CHARACTERISTICS OF WASTE CLASSES

Waste class	Typical characteristics	Disposal options
1. Exempt waste (EW)	Activity levels at or below the clearance levels given in Ref. [13], which are based on an annual dose to members of the public of less than 0.01 mSv	No radiological restrictions
2. Low and intermediate level waste (LILW)	Activity levels above the clearance levels given in Ref. [13] and thermal power below about 2 kW/m ³	Near surface or geological disposal facilities
2.1. Short lived waste (LILW-SL)	Restricted long lived radionuclide concentrations (limitation of long lived alpha emitting radionuclides to 4000 Bq/g in individual waste packages and to an overall average of 400 Bq/g per waste package)	Near surface or geological disposal facilities
2.2. Long lived waste (LILW-LL)	Long lived radionuclide concentrations exceeding the limitations for short lived waste	Geological disposal facilities
3. High level waste (HLW)	Thermal power above about 2 kW/m ³ and long lived radionuclide concentrations exceeding the limitations for short lived waste	Geological disposal facilities

[very low level waste (VLLW)]. [Radioactive waste considered suitable by the regulatory body for authorized disposal, subject to specified conditions, with ordinary waste in facilities not specifically designed for radioactive waste disposal.]

- ① This is a category used in some Member States; in others there is no such category, as no radioactive waste at all may be disposed of in this way, however low level it is.
exempt waste. Waste that is released from regulatory control in accordance with exemption principles.

short lived waste. Radioactive waste that does not contain significant levels of radionuclides with a half-life greater than 30 years.

- ① Typical characteristics are restricted long lived radionuclide concentrations (limitation of long lived radionuclides to 4000 Bq/g in individual waste packages and to an overall average of 400 Bq/g per waste package); see paras 324 and 325 of Ref. [45].

low and intermediate level waste (LILW). Radioactive waste with radiological characteristics between those of exempt waste and high level waste. This may be long lived waste (LILW-LL) or short lived waste (LILW-SL).

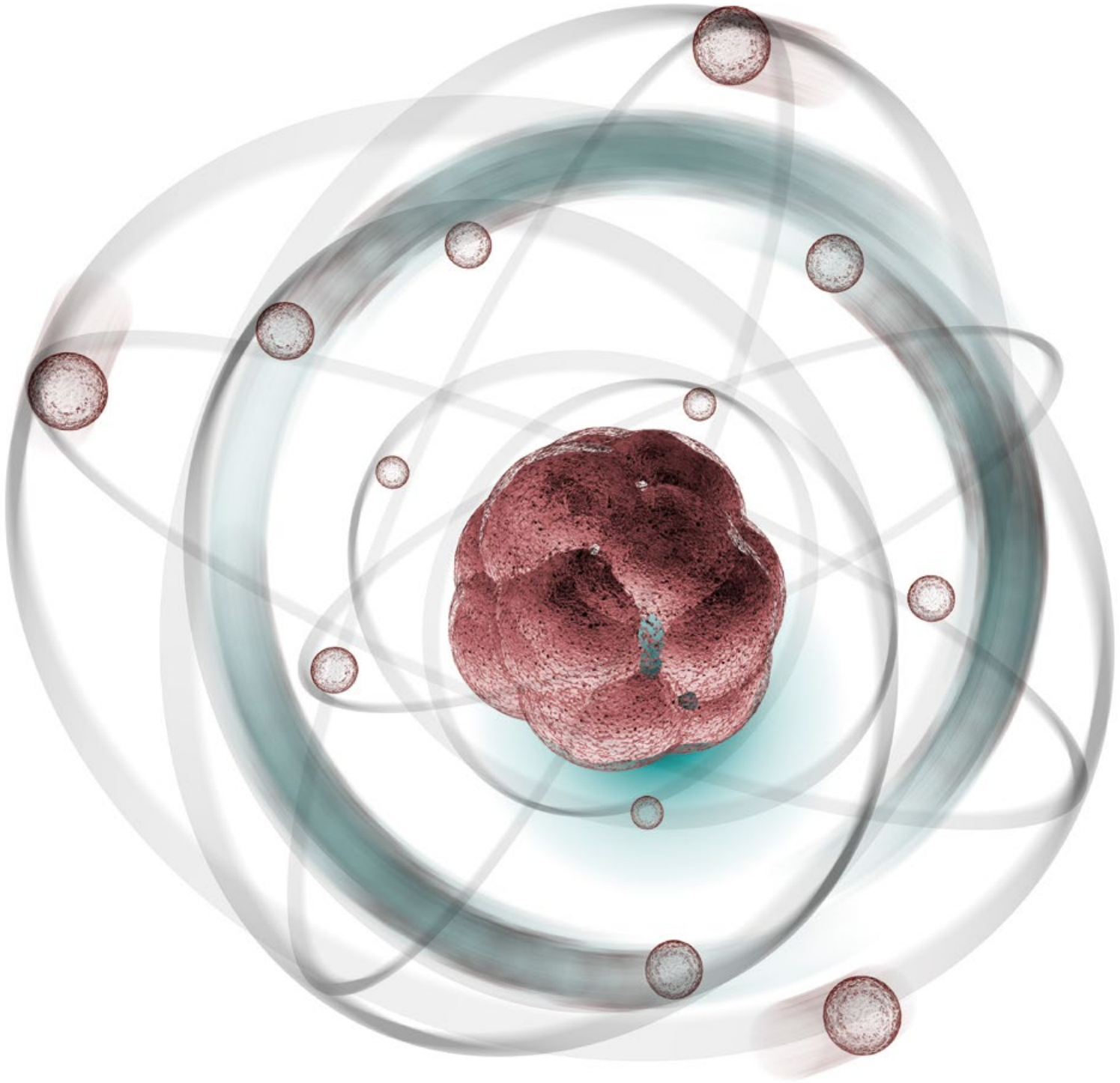
- ① Typical characteristics of low and intermediate level waste are activity levels above clearance levels and thermal power below about 2 kW/m³ [45].
- ① Many States subdivide this class in other ways, for example into low level waste (LLW) and intermediate level waste (ILW) or medium level waste (MLW), often on the basis of waste acceptance requirements for near surface repositories. These terms should not be used in IAEA publications unless explicit definitions are given for the purposes of the publication in question.

long lived waste. Radioactive waste that contains significant levels of radionuclides with a half-life greater than 30 years.

- ① Typical characteristics are long lived radionuclide concentrations exceeding the limitations for short lived waste [45].

high level waste (HLW). The radioactive liquid containing most of the fission products and actinides present in spent fuel — which forms the residue from the first solvent extraction cycle in reprocessing — and some of the associated waste streams; this material following solidification; spent fuel (if it is declared a waste); or any other waste with similar radiological characteristics.

- ① Typical characteristics of high level waste are thermal power above about 2 kW/m³ and long lived radionuclide concentrations exceeding the limitations for short lived waste [45].



Conclusioni dalla Tavola Rotonda



Ispettorato nazionale per la sicurezza nucleare e la radioprotezione

a cura di:
Ing. Nadia Cipriani

L'organizzazione del seminario di oggi, volto ad approfondire e far conoscere a un pubblico più ampio le applicazioni della ricerca nucleare in ambito civile ed industriale, non finalizzate alla produzione di energia, è importante al fine di dimostrare quanto la ricerca in campo nucleare abbia innumerevoli ed importanti applicazioni in molteplici settori della vita quotidiana di ognuno di noi, come ci hanno illustrato i relatori della giornata odierna.

Questi momenti di riflessione sono preziosi nel nostro Paese per poter costruire una diversa cultura ed alimentare un sentire comune sul ruolo della ricerca nucleare.

Consapevole quindi dell'importanza di tale seminario, mi corre l'obbligo innanzitutto, anche a nome del Direttore dell'ISIN - Avv. Maurizio Pernice - che oggi sostituisco in questa tavola rotonda, di porgere i sinceri ringraziamenti all'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma ed in particolare alla Commissione Nucleare "Ricerca e Reattori





Innovativi” per aver organizzato questo momento di incontro e di approfondimento.

L’Ispettorato per la Sicurezza Nucleare e la Radioprotezione (ISIN), come è a Voi noto, è stato istituito dal D. Lgs. n. 45/2017, quale “autorità di regolazione competente designata a svolgere le funzioni e i compiti di autorità nazionale, indipendente ai sensi delle Direttive 2009/71/Euratom e 2011/70/Euratom, in materia di sicurezza nucleare e radioprotezione stabiliti nella legislazione vigente”.

Come già illustrato dai relatori che mi hanno preceduto, le applicazioni della ricerca nucleare sono molteplici in campo medico, industriale, della ricerca scientifica, aerospaziale, dei beni culturali, etc. Al riguardo, mi preme evidenziare che tali applicazioni sono autorizzate ed oggetto di controlli ed ispezioni secondo quanto previsto dalla normativa vigente in materia, ora costituita dal recente D. Lgs. 101 del 31 luglio 2020. Infatti, le norme per la sicurezza nucleare e per la protezione sanitaria dei lavoratori

e della popolazione contro i rischi delle radiazioni ionizzanti, ai sensi dell’art. 50 del D. Lgs. n. 101/2020, prevedono l’obbligo di nulla osta preventivo per gli impianti e le strutture che intendono utilizzare sorgenti di radiazioni ionizzanti.

Al fine di avere maggiori informazioni sulle attività svolte dall’ISIN in tale ambito vi consiglio di leggere anche due recenti pubblicazioni dell’Ispettorato: “Relazione annuale del Direttore dell’ISIN al Governo e al Parlamento sulle attività svolte dall’ISIN e sullo stato della sicurezza nucleare nel territorio nazionale, ai sensi dell’art. 6, comma 4 lettera h) del D. Lgs. n. 45/2014 (luglio 2020)” e “Attività nucleari e radioattività ambientale – Rapporto ISIN sugli indicatori. Edizione 2020”, entrambi scaricabili dal nostro sito istituzionale (www.isinucleare.it).

Riguardo alla domanda che mi è stata posta su quale sia il futuro delle attività nucleari di cui oggi parliamo, è evidente come tutte le applicazioni della ricerca nucleare



descritte in questo seminario continueranno ad essere utilizzate in ogni settore in quanto rivestono un ruolo fondamentale al quale non si può rinunciare.

Parlare del futuro però significa anche – permettetemi di sottolinearlo - interrogarsi sui rifiuti radioattivi che tali attività producono, sulla loro gestione e smaltimento, a tutela anche delle generazioni future.

Quindi, mi auguro che a breve venga autorizzata dai Ministeri Competenti la pubblicazione della Carta Nazionale delle Aree Potenzialmente Idonee (la cosiddetta CNAPI) per la localizzazione del Deposito nazionale per lo smaltimento superficiale dei rifiuti radioattivi a bassa e media attività, secondo quanto previsto dal D. Lgs. n. 31/2010, tenuto conto dei criteri di localizzazione dalla Guida Tecnica n. 29 dell'ISIN (allora ISPRA). L'importanza del Deposito nazionale, l'attuale stato della procedura autorizzativa e la descrizione delle fasi successive alla pubblicazione della CNAPI sono stati oggetto di

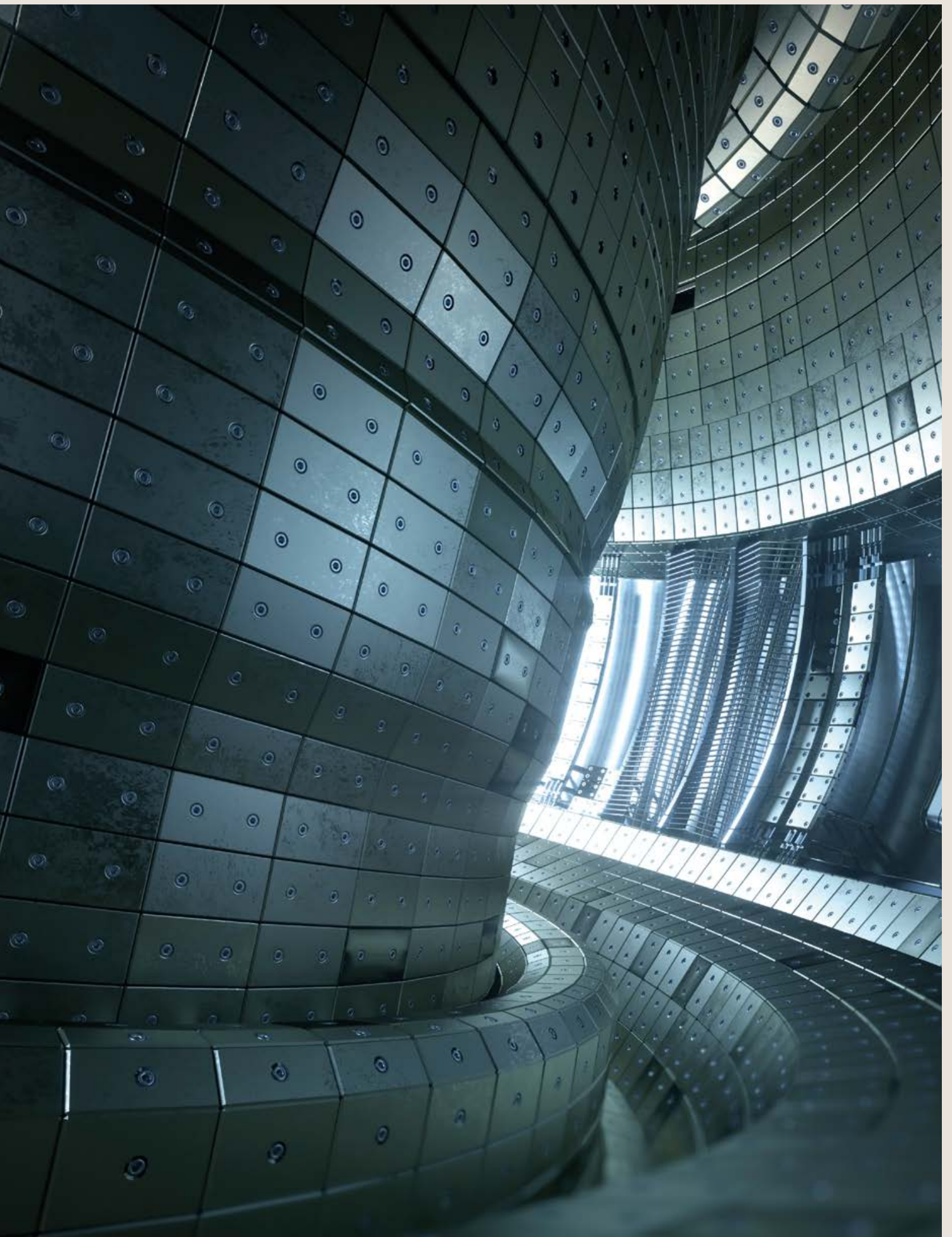
approfondimento da parte dell'Ispettorato in numerosi convegni e seminari organizzati dall'Ordine degli Ingegneri di Roma e lo saranno anche nel prossimo futuro.

Concludo questo mio intervento ringraziando tutti i relatori della giornata odierna e gli altri partecipanti a questa tavola rotonda finale, augurandomi di aver trasmesso la mia convinzione che:

- non si può rinunciare alla ricerca nucleare nelle applicazioni quotidiane che essa ha in moltissimi settori e che tale utilizzo è autorizzato e controllato, a tutela della popolazione, dei lavoratori e dell'ambiente, secondo quanto previsto dalla normativa vigente in materia di sicurezza nucleare e radioprotezione;
- tali attività producono anch'esse rifiuti radioattivi e che risulta necessaria e non ulteriormente rinviabile la realizzazione del Deposito nazionale per una gestione sicura e responsabile dei rifiuti radioattivi presenti e futuri.







The background is a vibrant blue with a sense of motion and depth. It features numerous light trails, some straight and some curved, that create a tunnel-like effect. There are also various data-like elements, such as small squares and lines, scattered throughout. The overall aesthetic is futuristic and technological.

a cura di
Dr. Sergio Bartalucci

The background of the image is a vibrant, blue-toned digital landscape. It features a perspective view of a tunnel or corridor formed by glowing lines and planes. The walls and floor are covered in streams of binary code (0s and 1s) and other alphanumeric characters, some of which are blurred to suggest motion. Bright, ethereal light beams emanate from the left side, creating a sense of depth and direction. The overall aesthetic is clean, modern, and high-tech, evoking themes of data, artificial intelligence, and digital connectivity.

**ASTRI: ASSOCIAZIONE DI
SCIENZIATI E TECNOLOGI
PER LA RICERCA ITALIANA**

ASTRI, la neocostituita "Associazione di Scienziati e Tecnologi per la Ricerca Italiana" mira, come recita lo Statuto, a rappresentare "un punto d'incontro, di discussione e di unione tra quanti – enti, istituzioni, imprese e persone fisiche – sono interessati allo sviluppo della ricerca scientifica e tecnologica e al trasferimento della conoscenza che ne deriva alla società civile in favore del progresso industriale, economico e sociale della Nazione italiana".

ASTRI si propone di promuovere studi, convegni, e altri contributi utili alla legislazione e alla regolamentazione d'interesse per la scienza, la ricerca e lo sviluppo tecnologico e di fornire al sistema politico-parlamentare ogni supporto utile ad orientare correttamente le politiche scientifiche del Paese, ma si propone anche come struttura in grado di svolgere in proprio attività di ricerca e formazione nel quadro dei programmi finanziati dal Governo Italiano, dagli Enti locali e dall'Unione Europea. In tale contesto l'associazione ha già ottenuto l'iscrizione all'Anagrafe Nazionale delle

Ricerche presso il MIUR, requisito indispensabile per accedere ai finanziamenti pubblici, una delle finalità di ASTRI è fornire ai mass media e agli operatori professionali dell'informazione ogni supporto documentale utile all'approfondimento dei temi inerenti alla conoscenza scientifica e tecnologica, e favorirne la diffusione anche mediante la pubblicazione di monografie e periodici. Tra gli obiettivi di ASTRI ci sono anche la lotta alle *fake news* (ad es. che un Paese manifatturiero come l'Italia possa funzionare solo con le energie rinnovabili), alla *sindrome del NIMBY*, che, se colpisse tutti gli abitanti di un paese, renderebbe di fatto impossibile la costruzione di un qualunque impianto benché ne fosse riconosciuta la validità (es. i termovalorizzatori), all'*uso distorto del principio di precauzione* che, nell'incertezza scientifica, vorrebbe impedire qualsiasi tipo di progresso, invece di adottare delle corrette misure di precauzione, al pregiudizio antiscientifico, alla disinformazione dilagante negli organi di stampa e nei *social media* che tende ad



alimentare una pseudocultura catastrofista su alcune tematiche attuali e future (energia nucleare, vaccini, robotizzazione, intelligenza artificiale).

Da tenere presente che il raggio d'azione di ASTRI non è limitato alle Scienze Naturali, ma si estende alle Scienze Umanistiche (letteratura, storia, economia, sociologia, psicologia etc.). Si tratta quindi di una struttura ad ampio spettro d'interessi, dal carattere duale, tecnico e politico, in cui possono trovare risposta le esigenze più diverse, e disponibile a operare in una molteplicità di direzioni.

La dimensione "nazionale" della Ricerca scientifica e tecnologica su cui insiste la definizione di ASTRI suscita una domanda naturale: c'è un rapporto speciale tra la Scienza e l'idea di Nazione? Forse la Cultura scientifica non è per sua natura Internazionale o meglio Sovranazionale? Ovviamente sì, non esiste una Scienza Italiana, o Germanica o Britannica, esistono solo scienziati appartenenti a queste nazioni. Però, l'impatto sociale della Scienza è stato enorme e ha modificato profondamente la vita dell'uomo, in misura diversa e con modalità diverse nelle diverse Nazioni. Fino a 3-4 secoli fa le maggiori potenze europee, la Francia, la Spagna, l'Austria, l'Inghilterra, non godevano certo di una netta superiorità politico-militare nei confronti delle altre potenze non europee con cui si trovavano in conflitto. Eppure, la loro superiorità in termini di potenzialità di espansione e di conquista, grazie soprattutto all'impressionante sviluppo del pensiero filosofico e scientifico europeo, cioè ai vari Galileo, Bacon, Cartesio etc., e alla tecnologia che ne derivava, era già evidente e col passare del tempo sarebbe divenuta schiacciante. Non ci sarebbe voluto più molto tempo perché la Scienza si radicasse nella società e diventasse l'asse portante della Civiltà moderna marcando così le differenze tra le Nazioni. La Scienza divenne così un'enorme opportunità per ogni nazione, purché ne sapesse cogliere gli aspetti funzionali al proprio sviluppo e affermazione attraverso una politica scientifica attenta agli interessi e alle potenzialità che le erano proprie.

ASTRI pretende quindi di dare un contributo alla rinascita della Scienza italiana, all'interno, però, di una logica primaria di difesa degli interessi nazionali, non condizionata da pregiudizi ideologici di stampo mondialista, né da vincoli europeistici, che stanno penalizzando pesantemente il nostro sistema di ricerca, soprattutto in termini di mancato ritorno di fondi europei, pur finanziati dall'Italia (mediamente nella misura del 30-40% nell'ultimo decennio). A questo tema il Presidente di ASTRI ha dedicato un saggio, "Scienza e Tecnologia: che cosa ha fatto l'Europa?" (Aracne, 2017), dove il sostanziale fallimento, anche nei suoi obiettivi politici, della Ricerca promossa e finanziata dall'Unione Europea viene evidenziato, con le cifre e con i fatti.

ASTRI è libera, apartitica e aconfessionale, aperta a qualunque contributo da qualunque parte provenga, purché formulato con proprietà e positività d'intenti.

Presentazione del Progetto CleanHME, approvato e finanziato dalla Commissione Europea

Proposta riferita al bando FETPRO-ACT-EIC-05-2019 Boosting emerging technologies

c. Breakthrough zero-emissions energy generation for full decarbonization

- **Titolo della proposta:** Clean Power from Hydrogen-Metal Systems – CleanHME (website <http://www.cleanhme.eu/>)
- **Progetto:** ID 951974
- **Durata del progetto:** Agosto 2020 – Luglio 2024
- Approvato il 17 marzo 2020 con un finanziamento di 5.5 milioni di euro

L'obiettivo principale della proposta è sviluppare una nuova fonte di energia pulita, sicura, compatta e molto efficiente basata su sistemi Idrogeno-Metallo, che potrebbe costituire una svolta sia per uso privato che per applicazioni industriali.

La nuova fonte di energia potrebbe essere impiegata sia come piccolo sistema mobile o in alternativa come generatore autonomo di calore ed elettricità per uso individuale,

ad es. in case unifamiliari. All'interno del progetto vorremmo anche ottimizzare i progetti tecnici corrispondenti realizzati per le applicazioni finali. Le soluzioni proposte hanno il potenziale per essere una svolta per il settore dell'alimentazione elettrica e presentano una soluzione per una tecnologia senza emissioni di carbonio che contribuisce alla protezione del clima e dell'ambiente naturale - senza l'uso di materiali rari o tossici - ed è prevista solo una piccola quantità di scorie non pericolose per l'ambiente. Pertanto, potrebbe essere estremamente importante per l'economia e le società europee dare l'opportunità all'Europa di muovere la "prima mossa" nell'utilizzo della nuova tecnologia energetica. Per garantirlo, abbiamo costruito un ampio consorzio europeo multidisciplinare di istituzioni scientifiche, start-up e società commerciali sparse in nove paesi europei, collaborando con i principali scienziati negli Stati Uniti e in Canada, che potrebbe diventare un lea-

der in questa nuova tecnologia energetica sia a livello europeo che globale.

In sostanza, l'obiettivo principale del progetto CleanHME è quello di sviluppare un progresso rivoluzionario nello sviluppo di una nuova generazione di generatori di energia termica innovativi ed estremamente potenti. L'energia viene rilasciata quando l'idrogeno reagisce con alcuni metalli in condizioni particolari. Questa energia è chiamata qui Hydrogen-Metal Energy o HME.

La corsa per la padronanza tecnologica di HME sta attualmente interessando attivamente USA, Giappone e Cina. È ormai accertato che la quantità di energia rilasciata supera ampiamente qualsiasi reazione chimica nota. Il TRL attuale è 3. Il progetto mira a raggiungere il TRL 4-5.

Sul piano più propriamente scientifico, basandosi su esperimenti precedenti, si suppone che l'HME derivi da reazioni nucleari senza emissione di radiazioni fortemente potenziate in ambienti metallici a causa

Tabella 1:
Partecipanti al consorzio

Participant No.	Participant organization name	Participant short name	Country
1 (Coordinator)	University of Szczecin	USZ	Poland
2	Institute for Solid-State Nuclear Physics	IFK	Germany
3	Institut Josef Stefan	JSI	Slovenia
4	Maritime University of Szczecin	AM	Poland
5	FUTUREON	FUT	Italy
6	Uppsala Universitet	UU	Sweden
7	BroadBit Energy Technologies	BET	Slovakia
8	Istituto Nazionale di Fisica Nucleare	INFN	Italy
9	Politecnico di Torino	POLITO	Italy
10	Universita Degli Studi di Siena	UNISI	Italy
11	VEGATEC	VEGA	France
12	Centre National de la Recherche Scientifique	CNRS	France
13	SART von Rohr	SART	France
14	LIFCO Industrie	LIFCO	France
15	LAKOCO	LAKOCO	Belgium
16	Massachusetts Institute of Technology	MIT	USA
17	Lakehead University	LU	Canada

dell'effetto di schermatura degli elettroni (*electron screening*). La modifica della struttura elettronica dei metalli attivi mediante nano strutturazione e sfruttamento di specifici difetti del reticolo cristallino può aumentare le velocità di reazione di molti ordini di grandezza. Altri effetti come le transizioni di risonanza, la creazione di stati correlati quantistici e l'accoppiamento alle eccitazioni multi-fotoniche nei processi di cavitazione possono contribuire alla produzione di energia osservata. Pertanto, sono previsti specifici esperimenti di laboratorio per testare le teorie e verificare le loro previsioni e questo si realizzerà combinando esperimenti con acceleratori ed esperimenti di caricamento di gas condotti in speciali reattori a temperatura ambiente ed oltre.

La densità di produzione di energia insolitamente alta osservata negli esperimenti di *gas loading* suggerisce che solo alcune reazioni nucleari prive di radiazioni potenziate in ambienti metallici possono essere responsabili della produzione anomala di calore. Una chiara indicazione del ruolo delle reazioni nucleari è l'osservazione sperimentale che le sezioni d'urto per le reazioni nucleari tra particelle cariche a energie molto basse sono enormemente accresciute in ambienti metallici rispetto ai nuclei "nudi" o agli atomi liberi. Si presume che questo fenomeno, chiamato *enhanced electron screening* sia dovuto a elettroni metallici quasi liberi che schermano la barriera di Coulomb tra i nuclei reagenti e portano a una maggiore probabilità di *tunneling* attraverso la barriera. Poiché le sezioni d'urto di reazione dipendono esponenzialmente dall'altezza della barriera di Coulomb, l'effetto di schermatura degli elettroni diventa molto importante a basse energie del proiettile. Pertanto, è di particolare rilevanza per l'astrofisica nucleare e la modellizzazione delle reazioni nucleari in plasmi stellari densi. Le reazioni di fusione D-D che avvengono in ambienti metallici o reazioni indotte da protoni su bersagli di Litio metallico rappresentano un sistema modello unico per lo studio di tali effetti nei laboratori terrestri.

La conseguenza più importante della scoperta dell'effetto di screening potenziato è che le reazioni nucleari possono avvenire anche a temperatura ambiente. Pertanto, l'osservazione della produzione di un eccesso di energia relativamente grande durante elettrolisi o esperimenti di caricamento del gas come risultato di reazioni nucleari negli ambienti metallici, potrebbe essere parzialmente spiegata poiché le velocità di reazione nucleare possono aumentare di 40 ordini di grandezza o più rispetto alle reazioni su nuclei nudi.

Saranno effettuati test sperimentali su altri concetti teorici che possono determinare ulteriori innalzamenti strepitosi delle sezioni d'urto di reazione. Uno di questi è la ricerca di stati quantici correlati che possano aumentare fortemente l'indeterminazione quantica e per conseguenza il fattore di penetrazione attraverso la barriera di Coulomb. I corrispondenti esperimenti con l'acceleratore sono pianificati su bersagli di Li a cristallo singolo.

Il fatto più significativo è che oggi esiste comunque uno schema teorico generale in cui possono rientrare e trovare un comune denominatore fenomeni che avvengono a temperatura ambiente (la cosiddetta fusione "fredda") e fenomeni finora osservati ad energie ben più alte, confrontabili con quelle del nucleo delle stelle, dove avviene la fusione "calda".





ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI ROMA

Piazza della Repubblica, 59 - 00185 - Roma

Tel. 06.487.93.11 - Fax: 06.487.931.223

Cod.Fisc. 80201950583

Orari di apertura al pubblico degli uffici

Lunedì 09:30-12:30 14:30-17:30

Martedì 09:30-12:30 14:30-17:30

Mercoledì 09:30-12:30 14:30-17:30

Giovedì 09:30-12:30 14:30-17:30

Venerdì 09:30-12:30 chiuso

Sabato chiuso

La Segreteria dell'Ordine chiude alle 16.00

AREE DEL SITO WEB DEL QUADERNO



AREA CIVILE AMBIENTALE

<https://rivista.ording.roma.it/civile/>



AREA INDUSTRIALE

<https://rivista.ording.roma.it/industriale/>



AREA DELL'INFORMAZIONE

<https://rivista.ording.roma.it/informazione/>



AREA INTERSETTORIALE

<https://rivista.ording.roma.it/intersectoriale/>

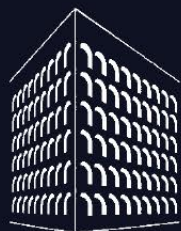


È possibile consultare tutti i numeri
all'indirizzo Internet
ioroma.info



Quaderno Speciale

Le Applicazioni della Ricerca Nucleare in ambito civile e industriale



Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
Piazza della Repubblica, 59 - 00185 Roma
www.ording.roma.it