

*Il sottoscritto ai sensi degli artt. 46 e 47 del DPR 445/2000, consapevole delle conseguenze derivanti da dichiarazioni mendaci ai sensi dell'art. 76 del DPR 445/2000 dichiara:*

## FORMATO EUROPEO PER IL CURRICULUM VITAE



### INFORMAZIONI PERSONALI

Nome **[GROPPI FLAVIA ]**  
Indirizzo **[ 11,V.le Abruzzi, 20131, Milano, Italia ]**  
Telefono **0039 02 29405512**  
Fax **0039 02 29405512**  
E-mail **flavia.groppi@unimi.it**

Nazionalità italiana  
Data di nascita [ 11, marzo, 1958 ]

### ESPERIENZA LAVORATIVA

- Date (da – a) [ dal 1 novembre 2010 ]  
• Nome e indirizzo del datore di lavoro Università degli Studi di Milano, via Festa del Perdono, 7 – 20122 Milano, Italia  
Dipartimento di Fisica - Laboratorio Superconduttività Applicata – LASA, via F.lli Cervi, 201-20090 Segrate (MI), Italia.
- Tipo di azienda o settore Università  
• Tipo di impiego Attività di ricerca e didattica – **Professore Associato [FIS/07] – CONSEGUITA ABILITAZIONE A Professore Ordinario**  
• Principali mansioni e responsabilità Attività di ricerca e impegno didattico, responsabilità gestione laboratori di ricerca, Esperto Qualificato per la protezione dei lavoratori e delle persone del pubblico contro le radiazioni ionizzanti
- Date (da – a) [ dal 1 settembre 2002 al 31 ottobre 2010 ]  
• Nome e indirizzo del datore di lavoro Università degli Studi di Milano, via Festa del Perdono, 7 – 20122 Milano, Italia  
Dipartimento di Fisica - Laboratorio Superconduttività Applicata – LASA, via F.lli Cervi, 201-20090 Segrate (MI), Italia.
- Tipo di azienda o settore Università  
• Tipo di impiego Attività di ricerca e didattica – **Ricercatore Confermato [FIS/07]**  
• Principali mansioni e responsabilità Attività di ricerca e impegno didattico, responsabilità gestione laboratori di ricerca, Esperto Qualificato per la protezione dei lavoratori e delle persone del pubblico contro le radiazioni ionizzanti
- Date (da – a) [dal 16 novembre 1995 al 1 settembre 2002 ]  
• Nome e indirizzo del datore di lavoro Università degli Studi di Milano, via Festa del Perdono, 7 – 20122 Milano, Italia  
Dipartimento di Fisica - Laboratorio Superconduttività Applicata – LASA, via F.lli Cervi, 201-20090 Segrate (MI), Italia.
- Tipo di azienda o settore Università  
• Tipo di impiego Attività di ricerca e didattica – **Coordinatore Generale Tecnico (X livello) Seconda Qualifica del Ruolo Speciale dell'Area Funzionale Tecnico Scientifica e Socio Sanitaria** presso il Servizio di Fisica Sanitaria e di Radioprotezione del LASA - Dipartimento di Fisica - dell'Università

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Principali mansioni e responsabilità</li> </ul>	<p>degli Studi di Milano, convertito in un posto della <b>categoria EP, Area Funzionale Tecnico-Scientifica ed Elaborazione Dati, posizione economica EP5.</b></p> <p>Attività di ricerca e impegno didattico, responsabilità gestione laboratori di ricerca, Esperto Qualificato per la protezione dei lavoratori e delle persone del pubblico contro le radiazioni ionizzanti</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Date (da – a)</li> </ul>	<p>[ dal 1 febbraio 1994 al 16 novembre 1995 ]</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nome e indirizzo del datore di lavoro</li> </ul>	<p>Università degli Studi di Milano, via Festa del Perdono, 7 – 20122 Milano, Italia</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo di azienda o settore</li> <li>• Tipo di impiego</li> </ul>	<p>Dipartimento di Fisica - Laboratorio Superconduttività Applicata – LASA, via F.lli Cervi, 201-20090 Segrate (MI), Italia.</p> <p>Università</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Principali mansioni e responsabilità</li> </ul>	<p>Attività di ricerca e didattica – <b>Coordinatore Tecnico (IX livello) Prima Qualifica del Ruolo Speciale dell'Area Funzionale Tecnico Scientifica e Socio Sanitaria</b> presso il Laboratorio Ciclotrone LASA del Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Milano..</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Date (da – a)</li> </ul>	<p>Attività di ricerca e impegno didattico, responsabilità gestione laboratori di ricerca, Esperto Qualificato per la protezione dei lavoratori e delle persone del pubblico contro le radiazioni ionizzanti</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nome e indirizzo del datore di lavoro</li> </ul>	<p>[ dal 16 marzo 1985 al 1 febbraio 1994 ]</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo di azienda o settore</li> <li>• Tipo di impiego</li> </ul>	<p>Università degli Studi di Milano, via Festa del Perdono, 7 – 20122 Milano, Italia</p> <p>Dipartimento di Fisica - via Celoria 16, Milano, Italia.</p> <p>Università</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Principali mansioni e responsabilità</li> </ul>	<p>Attività di ricerca e didattica – <b>Tecnico Laureato equiparato a Funzionario Tecnico Area Funzionale Tecnico Scientifica e Socio Sanitaria</b> presso l'Università degli Studi di Milano.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Date (da – a)</li> <li>• Nome e indirizzo del datore di lavoro</li> <li>• Tipo di azienda o settore</li> <li>• Tipo di impiego</li> <li>• Principali mansioni e responsabilità</li> </ul>	<p>Sino al gennaio 1988 sono stata distaccata presso il Dipartimento di Scienze dell'Informazione, in qualità di responsabile del Centro di Calcolo con mansioni organizzative del sistema di informatizzazione delle attività del Laboratorio Didattico e gestione delle risorse del Dipartimento. Successivamente sono rientrata presso il Dipartimento di Fisica dove ho organizzato il lavoro per il Calcolo del Dipartimento in qualità di Responsabile della Rete di Calcolo del Dipartimento stesso. In tale periodo, oltre alla progettazione e realizzazione della rete di calcolo del palazzo LITA del Dipartimento di Fisica e dell'intero Dipartimento, ho sviluppato, sulla macchina Unisys, dotata di Sistema Operativo UNIX, il Sistema Informativo PRISMA.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Date (da – a)</li> </ul>	<p>[ dal 1985 al 1988 ]</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nome e indirizzo del datore di lavoro</li> </ul>	<p>JRC, Ispra (VA), Italia</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo di azienda o settore</li> <li>• Tipo di impiego</li> </ul>	<p>Divisione di Radiochimica</p> <p>Attività di consulenza</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Principali mansioni e responsabilità</li> </ul>	<p>Automatizzare e computerizzare i sistemi di acquisizione dati installati presso i laboratori, con particolare riferimento alla spettrometria gamma impiegata nell'analisi per attivazione neutronica e nella produzione di radiotraccianti con Ciclotrone</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Date (da – a)</li> </ul>	<p>[ giugno 1985 a giugno 1986 ]</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nome e indirizzo del datore di lavoro</li> </ul>	<p>Istituto Nazionale di Fisica Nucleare – INFN Sez. di Milano - via Celoria 16, Milano, Italia.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo di azienda o settore</li> <li>• Tipo di impiego</li> </ul>	<p>INFN</p> <p>Attività di ricerca presso il CERN di Ginevra</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Principali mansioni e responsabilità</li> </ul>	<p>Attività di ricerca con particolare riguardo alle prove sperimentali di un calorimetro elettromagnetico al silicio da applicarsi nell'esperimento ZEUS ad Amburgo.</p>

## ISTRUZIONE E FORMAZIONE

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Date (da – )</li> </ul>	<p>Settembre 1987 ho sostenuto e superato presso il Ministero del Lavoro - Direzione Generale Rapporti di Lavoro l'esame di abilitazione per l'iscrizione nell'elenco nominativo degli Esperti Qualificati per la Protezione dalle Radiazioni Ionizzanti.</p>
--	---

- Nome e tipo di istituto di istruzione o formazione
- Principali materie / abilità professionali oggetto dello studio
- Qualifica conseguita

- Livello nella classificazione nazionale (se pertinente)

- Date (da – a)
- Nome e tipo di istituto di istruzione o formazione
- Principali materie / abilità professionali oggetto dello studio
- Qualifica conseguita
- Livello nella classificazione nazionale (se pertinente)

- Date (da – a)
- Nome e tipo di istituto di istruzione o formazione
- Principali materie / abilità professionali oggetto dello studio
- Qualifica conseguita
- Livello nella classificazione nazionale (se pertinente)

- Date (da – a)
- Nome e tipo di istituto di istruzione o formazione
- Principali materie / abilità professionali oggetto dello studio
- Qualifica conseguita
- Livello nella classificazione nazionale (se pertinente)
- Date (da – a)
- Nome e tipo di istituto di istruzione o formazione
- Principali materie / abilità professionali oggetto dello studio
- Qualifica conseguita
- Livello nella classificazione nazionale (se pertinente)

#### Radioprotezione, Normativa Italiana di Radioprotezione

Da quella data sono Esperto Qualificato di II grado, iscritta nell'Elenco Nominativo con numero progressivo n. 1154. Nel 1992 sono stata sottoposta ad esame di verifica e confermata nel mio ruolo.

Esperto Qualificato di II grado, iscritta nell'Elenco Nominativo con numero progressivo n. 1154

Settembre 1987.

Centro Ettore Majorana, Erice, Trapani

Ho partecipato all'International School of Radiation Damage and Protection - Eighth course: "*Monte Carlo Transport of Electrons and Photons below 50 Mev*",

17 marzo 1987

Università degli Studi di Milano, presso la Sezione di Fisica Medica

Fisica applicata alla medicina. Il corso si è concluso con una Tesi di Specializzazione sul tema: "Misure di spettri RX prodotti con acceleratori medicali: analisi dettagliata di spettri continui rivelati con cristalli Ge(Li)"

Specializzata in "Fisica Sanitaria ed Ospedaliera" con una votazione di 70/70 e lode

Diploma della Scuola di Perfezionamento in "Fisica Sanitaria ed Ospedaliera"

21 novembre 1983

Università degli Studi di Milano, presso la Sezione di Fisica Medica

Fisica. Il corso di laurea si è concluso con una Tesi di Laurea sul tema: "Deconvoluzione di spettri gamma non monocromatici mediante le funzioni risposta del rivelatore"

Laureata in "Fisica" con una votazione di 110/110

Diploma di Laurea in "Fisica"

1977

Liceo Ghislanzoni, Milano

Cultura generale (italiano, latino, greco, storia, matematica, filosofia, fisica, scienze, storia dell'arte)

Maturità Classica

Diploma di Maturità Classica

## CAPACITÀ E COMPETENZE PERSONALI

Acquisite nel corso della vita e della carriera ma non necessariamente riconosciute da certificati e diplomi ufficiali.

### PRIMA LINGUA

### ALTRE LINGUE

- Capacità di lettura
- Capacità di scrittura
- Capacità di espressione orale

## CAPACITÀ E COMPETENZE RELAZIONALI

Vivere e lavorare con altre persone, in ambiente multiculturale, occupando posti in cui la comunicazione è importante e in situazioni in cui è essenziale lavorare in squadra (ad es. cultura e sport), ecc.

## CAPACITÀ E COMPETENZE ORGANIZZATIVE

Ad es. coordinamento e amministrazione di persone, progetti, bilanci; sul posto di lavoro, in attività di volontariato (ad es. cultura e sport), a casa, ecc.

[ italiano ]

[ inglese ]

[ eccellente ]

[ buono ]

[ buono ]

Nell'ambito della mia attività di ricerca in Fisica Nucleare Applicata, Fisica Sanitaria e Radiochimica, presso la sezione LASA di Segrate (Laboratorio di Radiochimica) dell'Università degli Studi di Milano e della Sezione INFN di Milano i vari tipi di esperimenti in cui sono coinvolta prevedono il lavoro in collaborazione con diversi Ricercatori con elevatissime competenze scientifiche e l'interazione con centri di ricerca a livello internazionale.

In particolare negli ultimi anni abbiamo strette collaborazioni con:

- JRC-Ispra
- INR, Russia
- GIP Arronax, Nantes, Francia
- Università Bengurion, Bershava, Israele
- Los Alamos National Laboratory, LANL, USA
- Aristotele University of Thessaloniki
- POLIMI

Ogni anno partecipo a numerosi Congressi Nazionali ed Internazionali con la presentazione di numerosi lavori che vengono pubblicati su riviste internazionali.

- Responsabile Laboratorio di Fisica Applicata alla Salute e di Radiochimica, Laboratorio di Nanotossicologia, Laboratorio Radon, Laboratorio di calibrazione monitors con sorgenti di neutroni ad alta attività e del Laboratorio di Microscopia Ottica del Dipartimento di Fisica e dell'INFN Sez. di Milano, presso il Laboratorio Acceleratori e Superconduttività Applicata - LASA.
- Membro del Consiglio di Dipartimento di Fisica di UNIMI, precedentemente Dipartimento di Fisica della Facoltà di S.M.F.N., Università degli Studi di Milano.
- Membro del Consiglio di Coordinamento Didattico in Scienze e Tecnologie Fische, Dipartimento di Fisica di UNIMI, precedentemente della Facoltà di S.M.F.N., UNIMI.
- Membro del Collegio dei Docenti della Scuola di Specializzazione in Fisica Sanitaria, Facoltà di S.M.F.N. e dal 2009 della Facoltà di Medicina e Chirurgia, UNIMI, per la quale svolgo regolare attività didattica.
- Membro del Collegio dei Docenti della Scuola di Specializzazione in Medicina Nucleare, Facoltà di Medicina e Chirurgia, UNIMI, per la quale svolgo regolare attività didattica.
- Membro del del Consiglio di Coordinamento Didattico in Scienze e Tecnologie per la Conservazione e la Diagnostica dei Beni Culturali, UNIMI.
- Nominata dal 2004 Rappresentante dei Ricercatori e Tecnologi in seno al Consiglio di Laboratorio INFN del LASA.
- Da ottobre 2007 al 2010 eletta Membro di Giunta del Dipartimento di Fisica di UNIMI, riconfermata per i trienni 2011-2013, 2014-2017 e 2018-2020, in qualità di membro rappresentante del LASA in seno alla Giunta medesima.
- Da novembre 2012 nominata Responsabile del LASA per UNIMI.
- Da dicembre 2012 nominata con Decreto Rettorale "Responsabile dell'Unità Locale-UNIMI n. 5 – LASA, per le esigenze di gestione dei rifiuti speciali prodotti dal Dipartimento di Fisica e dalle strutture dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (I.N.F.N.).
- Sino al 2005, anno di cessazione del Centro, membro del Centro di Ricerca, per l'Ambiente e l'Impresa, CRAI, Dipartimento di Fisica (in precedenza Dipartimento di Chimica

Fisica ed Elettrochimica) UNIMI.

- Nell'ambito della mia attività di ricerca in Fisica Nucleare Applicata, Fisica Sanitaria e Radiochimica ho la responsabilità e la supervisione del lavoro di studenti, laureandi, borsisti, dottorandi che partecipano ai progetti di ricerca.
- A partire dal 2001 e sino al 2005 ho svolto attività di Coordinamento nei corsi F.S.E, finanziati dalla Regione Lombardia, presso l'UNIMI, Centro di Ricerche per l'Ambiente e l'Impresa.
- In qualità di Esperto Qualificato ho gestito sino al 2016 il servizio di Radioprotezione per il Laboratorio di Radiochimica presso il LASA, per conto di UNIMI.
- Dal 1 gennaio 1984 sono associata in modo continuativo alle attività di ricerca finanziate dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare con cui collaboro senza soluzione di continuità all'interno di diverse Linee Scientifiche.

In particolare:

nell'ambito della Commissione Scientifica Nazionale 5 – CSN5 – Ricerca di tipo interdisciplinare i progetti a cui ho partecipato negli anni più recenti sono:

RAME-64 (2000 - 2002), ASTATO (2003 - 2005), RENIO (2006 - 2008), LUTHETIUM (2009 - 2011),

rivestendo anche la figura di Responsabile Locale e Titolare di Fondi di ricerca per la Sezione INFN di Milano per gli esperimenti: DEUTERONS (2012), (APOTEMA (2013 - 2014) TECHN\_OSP (2015 - 2017), METRICS (2018 - )

Tutti questi progetti riguardano:

A..lo studio del processo di ottimizzazione della produzione ad alta radioattività specifica e a vita media breve, di radionuclidi prodotti con tecniche non convenzionali e non reperibili sul mercato, quali quelle nucleari e radiochimiche, selezionati sulla base delle caratteristiche fisiche idonee per il loro impiego di tipo biomedico (diagnostica e/o Radioterapia metabolica verso la nuova frontiera della Medicina Nucleare, la teranostica), tossicologico, nanotossicologico ed ambientale. La produzione di tali radionuclidi avviene per mezzo di L'obbiettivo è quello di ottenere i radionuclidi di interesse con radioattività specifica più elevata possibilmente tendente al valore di As Carrier Free. Si rende quindi necessario ottimizzare tutti i processi che portano ad ottenere un composto marcato ad alta radioattività specifica a partire dalla produzione per mezzo di irraggiamento di targhette metalliche con particelle cariche accelerate in Ciclotrone, LINAC; ottimizzazione di parametri fisici quali la conoscenza dettagliata dell'andamento delle funzioni di eccitazione delle reazioni nucleari coinvolte per il radionuclide in esame e di tutti gli interferenti che si co-producono in funzione dell'energia; la valutazione dei Thick Target Yields (irraggiamento dei targets a totale assorbimento del fascio) per arrivare a determinare la condizione ottimale di irraggiamento per ottenere operativamente la quantità massima del radionuclide con la più elevata purezza radionuclidica; la messa a punto di separazioni radiochimiche in modalità No Carrier Added e uno stringente protocollo per i controlli di qualità, atti alla determinazione sperimentale della purezza radionuclidica, radiochimica, chimica e biologica, parametri che vanno determinati e seguiti in funzione del tempo. Viene poi effettuata la valutazione teorica delle funzioni d'eccitazione mediante codici di calcolo quali EMPIRE 3.3.3 della IAEA-ENEA-NEA, TALYS, ALICE, TENDEL, ... e messe a confronto con i dati sperimentali.

L'utilizzo di radiotraccianti prodotti in modalità NCA ad alta As riveste inoltre un aspetto molto importante nella tossicologia ambientale per studiare l'impatto di contaminanti sulla salute dell'uomo a seguito dell'esposizione a concentrazioni estremamente basse, ma protratte per tempi di esposizione molto lunghi e in applicazioni di tipo industriale. Il vantaggio dell'utilizzo di tale metodica risiede nel fatto che permette di raggiungere una sensibilità elevatissima arrivando a determinare livelli di concentrazione dei contaminanti estremamente bassi (ppb-pppt), comparabili a quelli degli elementi da esaminare.

B. Analisi per Attivazione Neutronica Strumentale e radiochimica di elementi in traccia in matrici biologiche e per studi di nano tossicologia, per studiare gli eventuali effetti tossici delle nano particelle sulla salute dell'uomo e dell'ambiente. La difficoltà di rivelare la distribuzione delle particelle di dimensioni nano può essere superata utilizzando nano particelle radioattivate in qualità di traccianti o rendere radioattivi i campioni contenenti le nanoparticelle.

C. Determinazione di radionuclidi in campioni biologici ed ambientali, mediante tecniche nucleari di attivazione protonica e neutronica, e tecniche di spettrometria atomica di assorbimento.

HADROCOMBI (2017), HADROMAG (2018- ) progetto legato alla radioterapia con adroni e l'ipertermia magnetica per il trattamento del tumore al panceas, mediante l'impiego di nanoparticelle di ferro.

Responsabile Locale e Titolare di Fondi di ricerca per la Sezione INFN-MI per gli esperimenti: LABORAD, SPLASH, ENVIRAD-SPLASH (2004 - 2012), RADIOLAB (2014 - 2016) legati a misure di radioattività naturale in particolare del radon.222. Tali progetti prevedono anche una ricaduta di tipo culturale con il coinvolgimento degli studenti delle scuole medie superiori in attività di monitoraggio ambientale, con lo scopo di avvicinare i giovani a tematiche legate alla radioattività e di divulgazione della cultura scientifica.

SAFE (2006 - 2008), progetto riguardante la sonofusione.

Nell'ambito della Commissione Scientifica Nazionale 3 - CSN3 - collaboro con attività di ricerca in Fisica Nucleare legata allo studio di nuovi rivelatori da impiegarsi in campi misti gamma-neutroni con capacità di discriminazione tra i due tipi di radiazione.

Nell'ambito della Commissione di Terza Missione - CC3M sono Responsabile Locale e Titolare di Fondi di ricerca dell'INFN, Sezione di Milano l'esperimento:

RADIOLAB (2014 - ...) legato a misure di radioattività naturale in particolare del radon.222, progetto che prevede anche una ricaduta di tipo culturale con il coinvolgimento degli studenti delle scuole medie superiori in attività di monitoraggio ambientale, con lo scopo di avvicinare i giovani a tematiche legate alla radioattività e di divulgazione della cultura scientifica.

Dal 2019 Responsabile Nazionale del progetto RADIOLAB.

- Sono Responsabile e Titolare di Fondi di Ricerca del MIUR, su tematiche riguardanti la preparazione e l'impiego di radionuclidi prodotti con tecniche non convenzionali mediante acceleratori di particelle per impieghi in medicina (diagnostica e radioterapia metabolica nella direzione della teragnostica), ambientali, nanotossicologici e la Radioprotezione.
- Dal novembre 2000 sono stata nominata Liaison Officer garante per la NEA Data Bank (Francia) della distribuzione di software scientifico agli utenti del Dipartimento di Fisica e della Sezione INFN di Milano.
- Nel 2001 sono stata inserita nel gruppo di lavoro dell'ANPEQ-Lombardia per redigere la Guida alla stesura della relazione di cui all'art. 115 ter sulle esposizioni potenziali ed in particolare per mettere a punto i "protocolli per le valutazioni preventive nei casi di emergenza radiologica conseguenti ad incendio ed allagamento".
- Da febbraio 2001 membro eletto nell'ambito della Commissione Tecnica dell'UNI - UNICEN "ENERGIA NUCLEARE" sottocommissione N° 4: "RADIOECOLOGIA E RADIOISOTOPI" GdL 11 avente per oggetto di studio: "Determinazione del radon nell'ambiente" per quanto riguarda l'individuazione dei "Metodi di misura del Radon" che possano essere ripetuti seguendo le procedure riportate nelle norme per le valutazioni delle esposizioni ambientali a causa della radioattività naturale ed in particolare per quanto riguarda il radon.
- Dal 2004 membro eletto nell'ambito della Commissione Tecnica dell'UNI - UNICEN "ENERGIA NUCLEARE" sottocommissione N° 4: "RADIOECOLOGIA E RADIOISOTOPI" nel GdL 30 - avente per oggetto di studio: "Controlli analitici e radioanalitici di qualità su composti marcati e radiofarmaci". Il primo progetto di norma è: "Terminologia, quantità ed unità di misura nel settore della produzione ed applicazione di radionuclidi in chimica radiofarmaceutica e chimica radioanalitica".
- Dal 2004 sono membro della Commissione Orientamento del Dipartimento di Fisica nell'ambito del Progetto di Ateneo di UNIMI "Progetto Lauree Scientifiche - PLS1 (2005 - 2007) PLS2 (2008 - 2010). PLS3 (2011 - .... ), organizzando e gestendo il sottoprogetto "Laboratorio Radon" oltre alle visite guidate ai laboratori didattici e di ricerca aperte agli studenti delle scuole Medie Superiori con lo scopo di promuovere l'incontro di tali studenti con il mondo universitario e

di fornire loro un'opportunità di vedere e vivere da vicino l'attività di ricerca di ricercatori e studenti universitari. In particolare gestisco il progetto Laboratorio Radon che vede coinvolte ad oggi una ventina di scuole della regione Lombardia con un numero di studenti che supera le quattrocento unità, le visite guidate e gli stages organizzati presso il LASA e ho contribuito al Corso di Fisica Moderna con un modulo sulla Radioprotezione.

- Dal 2005 partecipo come rappresentante di UNIMI e INFN Sezione di Milano al Gruppo di Lavoro CYCLEUR che comprende 20 istituzioni coinvolte sull'impiego di ciclotroni per applicazioni di ricerca nel campo della produzione di radionuclidi di tipo non convenzionale da impiegarsi in medicina e/o in studi di tipo ambientale. In questo ambito nel febbraio 2008 è stato sottoposto il progetto EUCYNET al FP7 dell'EU.
- Maggio 2005 durante 1st International Nuclear Chemistry Congress (INCC), tenutosi a Kusadasi, Turchia, sono stata nominata membro del Presidential Board dell' "International Nuclear Chemistry Society (INCS)".
- Dal 2006 membro della Commissione Outreach del Dipartimento di Fisica.
- Novembre 2006 ho fatto parte del Comitato Organizzatore del Workshop "L' Energia per il futuro: Nucleare e Fonti Rinnovabili", organizzato presso il Dipartimento di Fisica di UNIMI e presso la Sezione INFN di Milano, con lo scopo di offrire a studenti, docenti e persone interessate un quadro sintetico, chiaro e scientificamente rigoroso dello "scenario energetico" al fine di contribuire ad una migliore comprensione di tale problematica.
- Maggio 2008 durante 2nd INCC, tenutosi a Cancun, Messico, sono stata riconfermata membro del Presidential Board della INCS. Durante tale Congresso sono stata selezionata e nominata per l'organizzazione del 3rd INCC in Italia nel 2011.
- Febbraio 2009 nell'ambito di un progetto di "Technical Cooperation" della IAEA ho partecipato al Workshop "Medical Physics In Israel 2009" and consultations on Medical Physics studies che aveva obiettivo "Establishment of a University Undergraduate Programme on Medical and Radiation Physics" presso l'Università Ben Gurion, in Israele. Sono stata chiamata in qualità di esperto per mettere a punto un programma con lo scopo di far partire una Scuola di Fisica Medica e per attezzare e stendere il programma dei corsi di Laboratorio per gli studenti di tale Università, sulla base dell'esperienza acquisita presso il mio Corso di Laurea - UNIMI. A tale scopo ho tenuto un invited talk dal titolo: "Specialization School in Milano, Italy".
- 2010 Docente presso il MASTER di II livello in SCIENZE E TECNOLOGIE DEGLI IMPIANTI NUCLEARI (NUCLEAR POWER PLANT SCIENCE AND TECHNOLOGY), organizzato dalla facoltà di Ingegneria e di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali dell'Università di Genova con la collaborazione dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), del Consorzio Interuniversitario per la Ricerca Tecnologica Nucleare (CIRTEN) e di Ansaldo Nucleare, Genova, per il modulo di 14 ore: "Radiation sources, protection strategies and the ALARA design approach".
- Settembre 2011 Chair del Congresso Internazionale "3rd International Nuclear Chemistry Congress - 3rd INCC", che si è tenuto a Città del Mare, Terrasini (PA), Italy che ha visto la partecipazione di 150 delegati provenienti da tutte le parti del mondo (<http://3rdINCC.mi.infn.it>).
- Settembre 2011 durante 3rd INCC sono stata riconfermata membro del Presidential Board della INCS.
- Ottobre 2011 nominata Consigliere Regionale di ANPEQ-Lombardia con il compito di coadiuvare il Coordinatore Regionale dell'Associazione nell'organizzazione di eventi, incontri, riunioni sui temi legati alla Radioprotezione nei tradizionali "Venerdì della Radioprotezione" con lo scopo di condividere problemi e soluzioni, finalizzate a migliorare la qualità del lavoro del Radioprotezionista.
- Agosto 2010 nominata membro nel Comitato Scientifico Locale della Conferenza Internazionale "8th Conference on Nuclear and Radiochemistry – NRC8" che si è svolta a

settembre 2012 a Como, Italy (<http://NRC8.mi.infn.it> ), con la partecipazione di 250 delegati provenienti da tutte le parti del mondo.

- Ottobre 2012 nominata membro dell'International Board dell'8th International Conference on Isotopes" che si è svolto a Chicago, USA, agosto 2014, con la responsabilità di organizzare due sessioni del convegno stesso: <http://www.8ici.org>.

- Anno 2013 membro del Comitato Scientifico Internazionale del "4th International Nuclear Chemistry Congress – 4rd-INCC", San Paolo, Brasil: <http://www.acquacon.com.br/4thincc/date.php>

- Da settembre 2014 nominata **Presidente** dell'Internazional Nuclear Chemisty Society – INCS.

- dal 2104 Membro di CHERNE - Cooperation for Higher Education on Radiological and Nuclear Engineering

- dal 2015 Rappresentante dell'Italia in seno al Divisione di Chimica Nucleare e Radiochimica – DNRC dell'European Chemical Society – EuChemS in qualità di Delegato e Rappresentante della Società di Chimica Italiana – SCI.

- dal 2015 Membro dell'European Network on Nuclear and Radiochemistry Education and Training (European NRC Network).

- Maggio 2018 Chair del 14<sup>th</sup> Workshop on European Collaboration for Higher Education and Research in Nuclear Engineering and Radiological Protection – CHERNE2018

- Settembre 2018: Organizzatrice della Prima Edizione della RADIOLAB-Summer School

- Organizzato numerosi Workshops che prevedono la partecipazione di relatori italiani e stranieri nell'ambito di progetti di internazionalizzazione sia per UNIMI sia per l'INFN su tematiche legate alla Fisica Sanitaria, Radiochimica, Radioprotezione, Nanotecnologie.

- Nel dicembre 1995 sono stata nominata, dal Rettore Paolo Mantegazza, membro di Commissione di Esperti, per la valutazione di attrezzature scientifico-didattiche di particolare complessità, esistenti presso il LASA del Dipartimento di Fisica di Milano.

- Nominata più volte membro di Commissione di Esperti per la valutazione di attrezzature scientifiche di particolare complessità, per l'INFN.

- Sono stata nominata Presidente di Commissione per 11 concorsi e Membro di Commissione per 9, per l'assunzione per UNIMI di personale tecnico con qualifica tecnico-scientifica per tutti i livelli e le differenti posizioni economiche.

- Svolgo attività di Commissario per:
  - le procedure concorsuali per l'assegnazione di Assegni di Ricerca UNIMI;
  - la selezione dell'ammissione alle borse di studio per la Scuola di Specializzazione in Fisica Sanitaria di UNIMI.
  - la selezione dell'ammissione alle borse di studio per la Scuola di Specializzazione in in Medicina Nucleare di UNIMI.

- Iscritta/Nominata in seno alle seguenti Associazioni:
  - INCS – International Nuclear Congress Society
  - ANPEQ – Associazione Nazionale Professionale Esperti Qualificati
  - AIFM – Associazione Italiana Fisica Medica
  - SCI – Società Chimica Italiana, Gruppo Interdivisionale di Radiochimica.
  - SIF– Società Italiana di Fisiica
  - ANFeA – Associazione Nazionale Fisica e Applicazioni
  - CHERNE– European Collaboration for Higher Education and Research in Nuclear Engineering and Radiological Protection
  - DNRC – Divisione di Chimica Nucleare e Radiochimica dell' EuChemS
  - NRC – European Network on Nuclear and Radiochemistry Education and Training



**CAPACITÀ E COMPETENZE  
TECNICHE**

*Con computer, attrezzature specifiche,  
macchinari, ecc.*

- Sono stata membro del Board del Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, JRNC, Kluwer.
- Sono chiamata con regolarità a svolgere attività di referaggio di articoli su riviste internazionali in qualità di esperto della materia.
- Chiamata in qualità di esperto della materia a tenere corsi per la NATO e per l'IAEA.

Gestisco tutti i Laboratori assegnati al Gruppo di Ricerca quali Laboratorio di Fisica Applicata alla Salute e di Radiochimica, Laboratorio di Nanotossicologia, Laboratorio Radon, Laboratorio di calibrazione monitors con sorgenti di neutroni ad alta attività e del Laboratorio di Microscopia Ottica per i quali gestisco tutte le apparecchiature in essi installate e le dotazioni di sicurezza presenti nei laboratori stessi.

In particolare il Laboratorio di Radiochimica di tipo B, come previsto dalle norme IAEA/62 ovvero di tipo 2 come indicato dalla norma UNI 7815: zona ad accesso regolamentato in cui vengono messe a punto metodiche di separazione radiochimica, con trattamento e manipolazione di campioni radioattivi prodotti con Ciclotrone e/o Reattore Nucleare.

Ho la responsabilità per quanto riguarda: spettrometria X e  $\gamma$  dei campioni con rivelatori a semiconduttori HPGe e Si(Li) ovvero a scintillazione NaI(Tl), utilizzo di tecniche di scintillazione liquida, di assorbimento atomico, di voltammetria.

Ho avuto l'incarico sino al 2016 di Esperto Qualificato per la Sorveglianza Fisica per quanto riguarda l'esposizione alle radiazioni ionizzanti per Laboratorio di Radiochimica del LASA, Dipartimento di Fisica di Milano.

Gestisco i diversi personal computers per quanto riguarda il s/w e l'h/w, utilizzati dal gruppo di ricerca, impiegati sia per l'attività di ricerca sia per la didattica.

Programmo in Fortran; ho tenuto corsi di "introduzione alla programmazione"; ho sviluppato programmi per l'analisi dati; utilizzo programmi per l'elaborazione, simulazione, presentazione dei dati sperimentali e/o teorici.

Sono garante per la NEA Data Bank della distribuzione di software scientifico agli utenti del mio Dipartimento e della Sezione INFN di Milano

Conoscenza dettagliata della Normativa di Radioprotezione, Normativa relativa alla Sicurezza.

**CAPACITÀ E COMPETENZE  
ARTISTICHE**

*Musica, scrittura, disegno ecc.*

[ Descrivere tali competenze e indicare dove sono state acquisite. ]

**ALTRE CAPACITÀ E COMPETENZE**

*Competenze non precedentemente indicate.*

[ Descrivere tali competenze e indicare dove sono state acquisite. ]

**PATENTE O PATENTI**

Da settembre 1987 sono Esperto Qualificato di II grado in materia di Protezione dalle Radiazioni Ionizzanti, iscritta nell'Elenco Nominativo con il n. 1154

**ULTERIORI INFORMAZIONI**

**Numero di Pubblicazioni e indici bibliometrici utili – aprile 2019:**

Papers > 180 su riviste nazionali e prevalentemente internazionali;

Citations: 1424; h-index: 17; i<sub>10</sub> index: 39

<https://scholar.google.com/citations?hl=en-US&user=bkKcCq8AAAAJ>

Presentazioni a Congressi Nazionali ed Internazionali molte delle quali in qualità di Invited: > 250

**ALLEGATI**

A) – ATTIVITÀ SCIENTIFICA

B) – QUADRO RIASSUNTIVO DELL'ATTIVITÀ DIDATTICA SVOLTA

**Dati Personali**

Autorizzo il trattamento dei miei dati personali ai sensi del Decreto Legislativo 30 giugno 2003, n. 196 (Codice in materia di protezione dei dati personali) e sue successive modifiche e integrazioni, nonché del Regolamento UE 679/2016 (Regolamento Generale sulla Protezione dei dati o, più brevemente, RGPD).

Milano, 25/04/2019

Viene presentata in modo succinto la mia attività scientifica che è sempre stata rivolta prevalentemente ad attività sperimentali nell'ambito della fisica applicata, come testimoniato dai lavori pubblicati, nelle seguenti principali aree tematiche:

1. **STUDIO COMPOSIZIONE SPETTRALE FASCI GAMMA AD ALTA INTENSITÀ PRODOTTI CON ACCELERATORI MEDICALI**
2. **CALORIMETRO ADRONICO**
3. **MESSA A PUNTO DI UN SISTEMA INFORMATICO**
4. **FISICA NUCLEARE DI BASE**
5. **OTTIMIZZAZIONE DELLA PRODUZIONE DI RADIONUCLIDI NON CONVENZIONALI PER MEZZO DI ACCELERATORI, A SCOPO BIOMEDICO**
6. **CONTROLLO DI QUALITÀ DI RADIOFARMACI E COMPOSTI MARCATI COMMERCIALI PER IMPIEGHI BIOMEDICI**
7. **STUDI DI TOSSICOLOGIA AMBIENTALE E MISURE DI RADIOATTIVITÀ AMBIENTALE**
8. **NANOTOSSICOLOGIA**
9. **FOTOCHIMICA APPLICATA A PROBLEMATICHE AMBIENTALI**
10. **STUDI PRELIMINARI RELATIVI ALLE PROPRIETÀ CHIMICO-FISICHE DELLA LEGA PIOMBO-BISMUTO PER IMPIEGHI NELLA TRASMUTAZIONE DELLE SCORIE NUCLEARI MEDIANTE ACCELERATORE DI PROTONI D'ALTA ENERGIA (TECNOLOGIA ADS)**
11. **DIVULGAZIONE CULTURA SCIENTIFICA**
12. **RADIOPROTEZIONE E FISICA SANITARIA**

#### 1. **STUDIO COMPOSIZIONE SPETTRALE FASCI GAMMA AD ALTA INTENSITÀ PRODOTTI CON ACCELERATORI MEDICALI**

Il lavoro svolto durante il periodo di tesi e proseguito negli anni seguenti riguarda la misura dettagliata della geometria e della composizione spettrale di fasci gamma di alta intensità, prodotti per Bremsstrahlung da acceleratori lineari, nel range di energia sino a 15 MeV.

Preliminarmente ho studiato un sistema di analisi dei dati, mediante un insieme di programmi Fortran IV plus da me elaborati su di un PDP 11/44, per la ricostruzione dello spettro emesso da sorgenti non monocromatiche e rivelato con un rivelatore Ge(Li). In generale lo spettro fornito da un rivelatore risulta deformato, rispetto allo spettro generato dalla radiazione incidente, a causa della funzione risposta caratteristica del rivelatore.

Sono risalita allo spettro incognito mediante l'applicazione di tecniche di deconvoluzione allo spettro rivelato, note le funzioni risposta del rivelatore.

Poiché la risoluzione con cui viene rivelato lo spettro da deconvolvere è  $\Delta E \cong 2.5$  keV/canale, si deve avere a disposizione un numero di funzioni risposta  $N$  in genere elevato (si consideri che  $N$  è dato dal rapporto tra il valore di energia massimo dello spettro e  $\Delta E$ ). Ad ogni canale deve essere infatti associata una funzione risposta, data la notevole dipendenza di queste dall'energia della radiazione incidente. Ho quindi utilizzato un programma di tipo Monte-Carlo, implementato su di un VAX/VMS

780 della Digital Equipment Corporation, per costruire diverse funzioni risposta, per diverse energie dello spettro che si deve analizzare. Le funzioni calcolate sono state confrontate con quelle misurate sperimentalmente ottenute con sorgenti monocromatiche. Dato il costo e la lentezza di elaborazione del programma Monte-Carlo, ho costruito le funzioni risposta solo per alcune energie, ed ho ottenuto le rimanenti mediante interpolazione: funzioni risposta corrispondenti ad energie non troppo diverse presentano un andamento simile. Data quindi una coppia di funzioni è possibile costruire in modo approssimato una funzione intermedia a partire dalla forma delle prime due per mezzo di un'interpolazione tra le due funzioni opportunamente "stirate" e normalizzate.

Ho inoltre constatato che, per ottenere una corretta valutazione delle funzioni risposta si devono avere a disposizione in modo preciso le dimensioni e la forma del volume sensibile del rivelatore. Esse sono state ricavate, per il rivelatore Ge(Li), successivamente utilizzato per le misure sperimentali, mediante il metodo della scansione sia frontale sia laterale del rivelatore con una opportuna sorgente radioattiva.

I risultati di questo lavoro sono stati oggetto di pubblicazioni e presentati in vari convegni.

## **2. CALORIMETRO ADRONICO**

Parallelamente ho collaborato, nell'esperimento HERA, alla preparazione e alle prove sperimentali effettuate presso il CERN di Ginevra, riguardanti un calorimetro adronico Si/U da utilizzarsi presso l'esperimento ZEUS ad Amburgo. La proposta di anteporre in ZEUS una sezione elettromagnetica con readout al silicio doveva essere sostenuta dalla prova sperimentale che le caratteristiche della sezione adronica non vengano modificate. Si è potuto dimostrare che il calorimetro al Si/U è particolarmente adatto per ZEUS in quanto sono rispettati i valori attesi per quanto riguarda la risoluzione energetica e che la stabilità della calibrazione assoluta di energia è migliore dell'1%. Inoltre il sistema è in grado di avere tempi di raccolta più veloci di 20 ns, tempi richiesti dall'alta intensità e dai tempi molto brevi di interbunch. Dato poi che i calorimetri, che utilizzano l'uranio come assorbitore, possono presentare problemi per quanto riguarda i neutroni e i fotoni dei prodotti di fissione nell'uranio per i fasci adronici e per la radioattività naturale, si è condotto uno studio dettagliato del comportamento del materiale attivo dei rivelatori alle radiazioni. I risultati mostrano che la corrente di carico per un rivelatore al silicio è sensibile al gradiente dell'irradiazione cui è stato sottoposto. In conclusione si è potuto affermare che le prestazioni dei rivelatori in studio hanno una stretta dipendenza dalla dose di radiazione; tuttavia l'uso di rivelatori con resistività inferiore a  $4k\Omega\text{cm}$  permette al calorimetro di non essere danneggiato nelle sue caratteristiche per vari anni.

Nell'ambito di questa ricerca ho messo a punto ed ho utilizzato programmi da me elaborati in Fortran V e Fortran 77 implementati sull'IBM 3081 di Ginevra per analisi dati. In seguito alla grande quantità di dati raccolti ho scritto programmi che permettevano un buon grado di automazione sia per quanto riguarda la loro raccolta sia per quanto riguarda la loro analisi.

## **3. MESSA A PUNTO DI UN SISTEMA INFORMATICO**

Durante il periodo trascorso presso il Dipartimento di Scienze dell'Informazione mi sono occupata dell'organizzazione del sistema di informatizzazione delle attività del Laboratorio Didattico e della gestione delle risorse del Dipartimento stesso. A tale fine ho messo a punto un sistema informatico, sviluppato su un elaboratore HP9000 del Hewlett Packard dotato di sistema operativo Unix. È stato adottato un approccio di base di dati per permettere un coerente sviluppo del sistema in fasi successive. I principali vantaggi forniti da tale approccio sono una riduzione delle ridondanze, il controllo della consistenza sui dati, una facile crescita dell'applicazione sia rispetto alle strutture dei dati sia rispetto ai programmi applicativi. Per l'implementazione dell'applicazione della base di dati è stato utilizzato il DBMS relazionale Informix in ambiente Unix. Dopo aver identificato le funzioni e gli utenti di ogni ambiente, si è passati alla progettazione concettuale all'interno della quale sono stati

tradotti i requisiti degli utenti. Si è riuscito a formulare la descrizione dei concetti rilevanti per il sistema in oggetto si è riusciti a formularla in modo completo, formale ed indipendente dal DBMS. Infine è stata implementata la base di dati. A livello fisico si sono creati i files e si sono sviluppate le procedure di interazione con la base di dati, utilizzando sia moduli messi a disposizione dal pacchetto Informix stesso, sia in molti casi scrivendo applicazioni direttamente in linguaggio C. L'impiego di diversi menù ha reso l'interfaccia utente molto semplice in modo che tale DBMS potesse essere utilizzato anche da utenti non necessariamente esperti in tale campo.

#### 4. FISICA NUCLEARE DI BASE

Nell'ambito della collaborazione intrapresa con un gruppo di ricerca afferente al Gruppo III INFN, ho partecipato allo studio sistematico delle reazioni indotte dalle interazioni tra ioni pesanti ad energie comprese tra la barriera Coulombiana e 8.5 MeV/nucleone, al fine di ottenere informazioni sui meccanismi delle reazioni nucleari coinvolte tramite la misura delle sezioni d'urto. In particolare gli esperimenti condotti al NAC (Sud Africa) e ai LNS (Catania) prevedono la misura delle funzioni d'eccitazione delle reazioni indotte da  $^{12}\text{C}$  e  $^{16}\text{O}$  su targhette di  $^{103}\text{Rh}$ .

#### 5. OTTIMIZZAZIONE DELLA PRODUZIONE DI RADIONUCLIDI NON CONVENZIONALI PER MEZZO DI ACCELERATORI, A SCOPO BIOMEDICO

L'attività di ricerca, a carattere interdisciplinare nell'ambito sia del Dipartimento di Fisica sia del Gruppo V INFN, che ho svolto da quando mi sono perfezionata e che è tuttora il mio campo d'interesse, riguarda lo studio dell'ottimizzazione della produzione di radionuclidi ad *alta attività specifica e vita media breve, prodotti con tecniche non convenzionali e non reperibili sul mercato*, per mezzo di irraggiamento di opportuni bersagli in Ciclotrone, LINAC e Reattore Nucleare a scopo biomedico, tossicologico ed ambientale.

Inizialmente ho messo a punto di tecniche di calcolo che permettono la separazione selettiva di un dato radionuclide eliminando i radionuclidi interferenti. È il caso in cui i nuclidi prodotti si formano sia nello stato fondamentale sia in quello metastabile con vite medie paragonabili tra loro. È necessario, per ottenere una corretta forma delle funzioni di eccitazione dei livelli fondamentali, apportare delle correzioni, nel calcolo degli yields, che tengano conto del caricamento di tale stato da parte del livello metastabile durante l'irraggiamento, durante il tempo che intercorre dalla fine dell'irraggiamento al momento della misura e durante la misura stessa.

Un esempio tipico è fornito dalla produzione, particolarmente interessante nell'ambito medico, dei radioisomeri  $^{195m}, ^{195}\text{Hg}$  mediante reazioni nucleari  $\text{Au}(p,3n)$ . Tests preliminari suggeriscono l'impiego come bersaglio di un pacchetto costituito da una successione di lamine di oro. La separazione in linea dei radioisotopi dalla matrice può essere ottenuta sfruttando l'innalzamento di temperatura nei bersagli dovuta alla potenza termica ceduta dal fascio. Essa richiede però l'ottimizzazione dei parametri d'irraggiamento, della struttura e delle dimensioni della targhetta. A tale fine ho messo a punto dei modelli numerici e di calcolo di tipo Monte Carlo per la determinazione dei profili di fascio e di temperatura su ogni lamina della multitarghetta. I dati teorici di resa di separazione ottimale sono stati oggetto di comunicazione in vari congressi.

Questo tipo di ricerca è un aspetto di un'attività di ricerca più ampia che riguarda gli studi di ottimizzazione della produzione di radionuclidi a vita media breve ad Alta Attività Specifica, per mezzo di Acceleratori di Particelle, generalmente Ciclotroni, per usi biomedici sia per diagnostica sia per radioterapia, che viene svolta presso il Laboratorio di Radiochimica del LASA dell'Università degli Studi e dell'INFN di Milano in stretta collaborazione con i principali centri di ricerca ed Università Internazionali e Nazionali presso i quali vengono svolte attività di eccellenza nel settore considerato

ed in particolare con l'Institute for Health and Consumer Protection, IHCP del JRC di Ispra e il Centro di Radiochimica ed Analisi per Attivazione del CNR e il LENA dell'Università degli Studi di Pavia.

Tale attività si articola su tre tematiche principali: "Ottimizzazione delle Condizioni di Irraggiamento" per ottenere i radionuclidi in oggetto nelle migliori condizioni di purezza radionuclidica, indispensabili per gli impieghi biomedici di tipo radiodiagnostico e/o radioterapeutico; "Messa a punto di Metodiche di Processamento Radiochimico" per separare i nuclidi prodotti dalle targhette irraggiate, nelle condizioni di massima resa, rapidità e riproducibilità, data la breve vita media di molti dei radionuclidi in oggetto; "Messa a punto di Metodiche di Controllo di qualità Chimica, Radiochimica, Radionuclidica e Biologica", affinché i radionuclidi prodotti possano essere impiegati in condizioni di massima sicurezza nei pazienti.

### 5.1. "Ottimizzazione delle Condizioni di Irraggiamento"

per ottenere i radionuclidi in oggetto nelle migliori condizioni di purezza radionuclidica, indispensabili per impieghi biomedici di composti marcati a scopo radiodiagnostico e radioterapico. A tale scopo vengono misurate sperimentalmente le funzioni d'eccitazione (i.e. sezioni d'urto) delle reazioni nucleari d'interesse in funzione dell'energia delle particelle incidenti, utilizzando di volta in volta il Ciclotrone AVF ad energia variabile fino a 45 MeV del Dipartimento di Fisica dell'Università di Milano (fino al 1987), il Ciclotrone Scanditronix MC40 ad energia variabile fino a 38 MeV del JRC-Ispra della CE (dal 1983 alla data odierna), ed il LINAC da 160 MeV del Institute of Nuclear Research della Russian Academy of Sciences, Troitsk, Mosca (Russia). In prospettiva utilizzeremo anche il Ciclotrone della Best Corporation da 70 MeV che verrà installato presso i Laboratori Nazionali di Legnaro (PD). Nel frattempo abbiamo una collaborazione con Arronax, Nantes, France dove è installato un ciclotrone da 70 MeV della IBA.

I dati ottenuti, di estrema rilevanza nonché accuratezza e precisione, sono stati in gran parte valutati da un Gruppo di Lavoro Internazionale (Co-ordinated Research Project della IAEA) e successivamente "raccomandati" dalla pubblicazione dell'International Atomic Energy Agency, **IAEA TECDOC-2011, "Charged Particle Cross-Section database for medical radioisotope production: diagnostic radioisotopes and monitor reactions"**, IAEA, Vienna, Austria, May 2001, ISSN 1011-4289. Tali dati costituiscono attualmente uno *standard internazionale*, utilizzato per l'ottimizzazione delle condizioni d'irraggiamento per la produzione di un numero rilevante di radionuclidi di recente acquisizione nella pratica clinica e nella ricerca biomedica.

Lo studio delle funzioni d'eccitazione di targhetta sottile e la determinazione degli Yields di targhetta spessa (a totale assorbimento di energia) per le reazioni nucleari indotte costituisce la fase preliminare ed indispensabile per le successive fasi della ricerca.

La metodica da utilizzare per l'irraggiamento deve considerare non solo la resa di produzione, ma anche la possibilità pratica, e il rendimento, della separazione radiochimica prevista, al fine di ottenere un composto No Carrier Added, ad alta Attività Specifica.

### 5.2. "Messa a punto di Metodiche di Processamento Radiochimico"

per separare i radionuclidi prodotti dai bersagli irraggiati e da radionuclidi interferenti provenienti da reazioni nucleari collaterali, nelle condizioni di massima resa, rapidità e riproducibilità, data la breve emivita di molti dei radionuclidi in oggetto. Risulta di estrema rilevanza ricordare che la quasi totalità di radionuclidi utilizzati nel settore biomedico devono essere caratterizzati da un elevato valore *dell'attività specifica* (attività del radionuclide / massa di carrier isotopico). L'attività specifica risulta tanto più elevata tanto più breve è il tempo di dimezzamento del radionuclide, tuttavia tale proprietà fisica sarebbe vanificata se il radionuclide stesso fosse diluito in una quantità considerevole di carrier isotopico.

I motivi per cui si richiede l'elevata attività specifica per le applicazioni biomediche sono molteplici e sono riassumibili in alcune categorie principali:

- Alcuni degli elementi radioattivi considerati sono caratterizzati da un'elevata tossicità chimica che ne precluderebbe l'impiego qualora venissero somministrati al paziente in concentrazioni elevate. L'elevata attività specifica, spesso prossima ai valori *carrier-free*, garantisce un'elevata attività sufficiente per la visualizzazione dei composti marcati (radiofarmaci) dall'esterno del corpo del paziente mediante apparecchiature cliniche di *imaging* (gamma camera, tomografi SPECT e PET), comportando al contempo la somministrazione al paziente di quantità di sostanza marcata trascurabili dal punto di vista tossicologico (i.e. ng, µg, µmoli).
- Molti dei radionuclidi considerati vengono utilizzati per la marcatura di *radiofarmaci a recettore specifico*, cioè composti idonei ad essere captati in maniera specifica e selettiva in *siti recettoriali* presenti in vari compartimenti corporei del paziente (cervello, fegato, tratto gastrointestinale), o in *tessuti tumorali*, nei quali la concentrazione di recettori è estremamente bassa e nel range del ng, pg per grammo di organo. Radiofarmaci a bassa attività specifica comporterebbero una saturazione dell'organo bersaglio, precludendo *a priori* l'esecuzione dell'indagine radiodiagnostica.
- Alcuni dei radionuclidi considerati formano composti estremamente insolubili nei vari compartimenti corporei e nel sangue in particolare. In questo caso, l'elevata attività specifica garantisce che la quantità di composti marcati somministrata al paziente sia sufficientemente bassa da impedire il raggiungimento del prodotto di solubilità del composto in questione e quindi la sua indesiderata precipitazione dopo la somministrazione.

Vengono quindi compiuti sforzi enormi da parte dei Radiochimici per ottenere tali radionuclidi mediante processamento radiochimico dei bersagli irraggiati *senza aggiunta volontaria* di *carrier isotopico* (o di altri tipi di carrier) ed i radionuclidi e composti marcati ottenuti in questo modo vengono denominati *no-carrier-added* (NCA).

### **5.3. "Messa a punto di Metodiche Radioanalitiche di Controllo di Qualità Chimica, Radiochimica, Radionuclidica e Biologica"**

affinché i radionuclidi prodotti possano essere impiegati per la marcatura di radiofarmaci in condizioni di massima sicurezza per i pazienti ed il personale medico e paramedico.

Tale attività, di tipo prevalentemente sperimentale e strettamente legata alla precedente viene svolta presso il Laboratorio di Radiochimica (di Classe II) installato presso il LASA dell'INFN c/o Dipartimento di Fisica di UNIMI, che possiede le autorizzazioni e la strumentazione necessaria per la manipolazione di radionuclidi emettitori alfa, beta e gamma.

Presso tale Laboratorio è possibile compiere le più svariate operazioni di manipolazione radiochimica di sorgenti radioattive non sigillate in fase solida, liquida od aeriforme, di Controllo di Qualità chimica, radiochimica e radionuclidica, impiegando tecniche che prevedono la radiocromatografia su carta e/o su strato sottile, radiocromatografia liquida ionica, spettrometria di assorbimento atomico, spettrometria X e gamma con rivelatori a semiconduttore HPGe e Si(Li), ovvero a scintillazione NaI(Tl), spettrometria alfa ad alta risoluzione con rivelatori al Si a barriera di superficie e di tipo PIPS (Ion Implanted), nonché metodiche di spettrometria beta mediante scintillazione liquida e mediante scintillazione liquida con discriminazione alpha/beta mediante analisi temporale dell'impulso (PSA).

Riporto a titolo d'esempio gli studi effettuati negli ultimi anni dal gruppo di ricerca in cui sono inserita e che riguardano in particolare lo studio della produzione dell'emettitore beta  $^{64}\text{Cu}$ , dell'emettitore alfa  $^{211}\text{At}$  e dell'emettitore beta  $^{186\text{g}}\text{Re}$ .

Il radioisotopo  $^{64}\text{Cu}$  grazie alle sue caratteristiche fisiche ( $t_{1/2} = 12.70$  h,  $\beta^-$  578 keV EP, 38 %,  $\beta^+$ , 653 keV EP, 18 %;  $\gamma$  a 1345.84 keV, 0.473 %) risulta particolarmente adatto per marcare un ampio

range di radiofarmaci da impiegarsi sia per indagine diagnostica PET (massimo range dei  $\beta^+$  in tessuto molle  $\approx 2.7$  mm, con un range "medio"  $\approx 1$  mm), sia per la radioterapia metabolica di diversi tipi di tumori. Tra i diversi metodi a disposizione per ottenere il  $^{64}\text{Cu}$  (e  $^{61}\text{Cu}$  come impurezza radionuclidica a breve emivita) in forma NCA, si è scelto di indagare e di mettere a punto la produzione attraverso reazioni nucleari ( $d,\alpha xn$ ) e ( $d,2pxn$ ) indotte da deuteroni su bersagli di zinco di composizione isotopica naturale. Si sono misurate le funzioni d'eccitazione di targhetta sottile, determinate sperimentalmente in seguito ad irraggiamenti di targhette di zinco naturale e/o arricchito in  $^{64}\text{Zn}$  per energie dei deuteroni incidenti sino a 19 MeV (energia massima disponibile per i deuteroni presso il Ciclotrone Scanditronix MC40 del JRC, Ispra) per i radionuclidi  $^{61}\text{Cu}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{66}\text{Ga}$ ,  $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{65}\text{Zn}$  and  $^{69m}\text{Zn}$ . Gli yields di targhetta sottile sono stati opportunamente fittati al fine di ottenere una funzione analitica che è stata integrata per ottenere le curve di yield di targhetta spessa per diverse energie incidenti e per diverse perdite di energia nei bersagli stessi. I valori calcolati di yield, corrispondenti alla massima energia e perdita di energia a disposizione, sono stati confrontati e sono in ottimo accordo con i valori di yield di targhetta spessa misurati sperimentalmente. I valori di sezione d'urto sperimentalmente ottenuti sono stati confrontati con quelli calcolati tramite il codice numerico EMPIRE 2.18 in collaborazione con l'ENEA di Bologna. È stata messa a punto una metodica di separazione radiochimica rapida e selettiva dei radionuclidi di Cu da quelli di Ga e Zn in forma NCA ad alta attività specifica. Sono stati inoltre compiuti irraggiamenti di target di zinco mediante proton-LINAC da 160 MeV con fasci di elevata intensità (fino a 140  $\mu\text{A}$ ), in collaborazione col Institute of Nuclear Research della Russian Academy of Sciences di Troitsk, Russia. La metodica di irraggiamento e di separazione radiochimica messa a punto ha permesso di ottenere rame-64 con alta resa di produzione e con la produzione collaterale di numerosi prodotti radioattivi di spallazione dotati di interesse biomedico ed industriale quali:  $^{52g,54}\text{Mn}$ ,  $^{67,61}\text{Cu}$ ,  $^{56,57,58}\text{Co}$ ,  $^{56,57}\text{Ni}$  e numerosi altri.

A partire dal 2003 sino alla fine del 2005 si è portato avanti lo studio legato all'ottimizzazione della produzione dell'isotopo radioattivo  $^{211}\text{At}$  da impiegarsi in radioterapia metabolica. Tale tecnica, attraverso l'impiego di composti marcati con opportuni radionuclidi, rappresenta una metodica efficace per trattare metastasi generate da differenti tumori primari. Al fine di distruggere selettivamente le cellule tumorali colpite è necessario che le particelle cariche emesse rilascino la loro energia prevalentemente in prossimità del punto nel quale sono stati depositati i composti marcati (radiofarmaci) con il radionuclide utilizzato. Per trattare micrometastasi o minuscoli agglomerati di cellule neoplastiche che permangono nella regione tumorale a seguito del trattamento chirurgico o chemioterapico è preferibile utilizzare radiazioni di alto LET (Linear Energy Transfer). A tale scopo sono in fase di studio e sperimentazione diversi emettitori  $\alpha$  i quali permettono di rilasciare una quantità di energia sufficiente alla rottura della doppia elica di DNA, lungo una distanza pari a pochi diametri cellulari; ciò fa sì che cellule tumorali poste lungo la traccia della particella possano essere uccise senza necessariamente internalizzare l'emettitore  $\alpha$  nelle cellule malate e consentendo nel frattempo di ridurre la dose al tessuto sano circostante.

Tra gli emettitori  $\alpha$ , l'astato-211, per l'impiego in radioterapia metabolica, è uno dei più promettenti per: a) il suo tempo di dimezzamento di 7.214 h lo rende favorevole per la marcatura di composti organici e per le applicazioni mediche, permettendo nel contempo di minimizzare i problemi di smaltimento dei rifiuti radioattivi in sede ospedaliera, b) la sua modalità di decadimento e c) il range delle particelle alfa che vengono emesse. Per la produzione del sistema  $^{211}\text{At}/^{211g}\text{Po}$  emettitore  $\alpha$  si sfrutta la reazione  $^{209}\text{Bi}(\alpha,2n)$ , irraggiando in ciclotrone bersagli di Bi naturale ( $^{209}\text{Bi}$ ) con particelle  $\alpha$  di energia superiore all'energia di soglia della reazione stessa pari a 20.72 MeV. Poiché il sistema  $^{211}\text{At}/^{211g}\text{Po}$  presenta un'emissione di raggi X non adatta per spettrometria gamma ad alta risoluzione (HPGe) ed emissioni  $\gamma$  poco abbondanti ne risulta difficile la visualizzazione. Per questo motivo l'irraggiamento dei bersagli di Bi viene eseguito utilizzando particelle  $\alpha$  di energia superiore a 28.61 MeV in modo tale da produrre, tramite la reazione  $^{209}\text{Bi}(\alpha,3n)$ , anche piccole quantità dell'emettitore  $\gamma$  At-210 che funge da *spike* interno: in questo modo è possibile visualizzare la distribuzione di

radioattività facilitando non solo il processamento radiochimico del bersaglio ma anche la procedura di marcatura. La scelta delle condizioni di irraggiamento deve però essere fatta cercando di ridurre la contaminazione isotopica dovuta ad  $^{210}\text{At}$  ad un livello inferiore all'1% poiché esso decade sull'emettitore  $\alpha$  puro  $^{210}\text{Po}$  ( $t_{1/2}=138$  d), che depositandosi selettivamente nel corpo può portare ad effetti indesiderati.

Sono stati compiuti irraggiamenti presso il Laboratorio Ciclotrone del JRC di Ispra di targhette spesse di Bi-209 con particelle alfa di diverse energie per determinare gli yields di targhetta spessa. È stata messa a punto un'opportuna separazione radiochimica ad "umido" senza aggiunta di carrier isomorfo che ha permesso di separare quantitativamente l'astato sia dalla matrice di Bi sia dalle impurezze di  $^{210}\text{Po}$ . È stata inoltre determinata la purezza radionuclidica della soluzione finale e delle differenti frazioni prodotte durante la separazione radiochimica.

Al fine di evitare l'impiego di solventi organici, che risultano essere difficilmente eliminabili nella fase finale della separazione radiochimica ad umido, è stata messa a punto, per la prima volta in Italia, una metodologia di separazione basata sui principi termocromatografici. Tale tecnica utilizza una distillazione a secco ad alta temperatura tra 400 e 800 °C per separare i radionuclidi di astato dalla targhetta fusa di Bi, utilizzando opportunamente un gas di trasporto e un filtro chimico per la purificazione dei radionuclidi di interesse dal target e dalle impurezze di polonio.

Tra le tecniche utilizzate nella terapia palliativa del dolore da metastasi ossee, rivestono un interesse particolare le applicazioni di composti marcati con radionuclidi (i.e. radioterapia metabolica); l'introduzione di tali composti marcati nell'organismo sotto forma di soluzioni (i.e. radiofarmaci) consente di irraggiare il tumore in maniera selettiva e specifica, risparmiando i tessuti sani circostanti. I radionuclidi tradizionali impiegati in forma inorganica in radioterapia metabolica sono  $^{32}\text{P}$  ( $t_{1/2} = 14.26$  d) come ortofosfato e  $^{89}\text{Sr}$  ( $t_{1/2} = 50.5$  d) come catione, i quali sono emettitori  $\beta^-$  duri con una naturale affinità per il tessuto osseo (i.e. osteotropi), ma presentano emivite eccessivamente lunghe. Per questo motivo, anche se ancora solo in via di sperimentazione preclinica, si stanno studiando anche in Italia nuovi radiofarmaci marcati con radionuclidi  $\beta^-$  emittenti quali  $^{153}\text{Sm}$ ,  $^{177}\text{Lu}$ ,  $^{186}\text{Re}$  e  $^{188}\text{Re}$ , coordinati a bis- e tetrakis-fosfonati che agiscono da vettori dotati di un'elevata selettività e specificità per le metastasi ossee.

Si riporta a titolo d'esempio lo studio portato avanti solo per il  $^{186}\text{Re}$ . Il dettaglio delle metodiche e delle considerazioni per lo studio approfondito della messa a punto della produzione di  $^{177}\text{Lu}$  è riportato nelle rispettive pubblicazioni.

Radionuclidi come  $^{186}\text{Re}$  ( $t_{1/2} = 90.64$  h) e  $^{153}\text{Sm}$  ( $t_{1/2} = 46.27$  h) sono preferibili a quelli tradizionali per alcune loro importanti peculiarità: essi sono simultaneamente emettitori gamma nel range utile per la radiodiagnostica (90-200 keV) e quindi consentono di visualizzare la biocinetica del radiofarmaco mediante i comuni strumenti radiodiagnostici quali gamma-camera e SPECT, ed inoltre sono dotati di emivite molto più brevi dei precedenti e adatte per gli scopi radioterapici. Entrambi hanno emissioni  $\beta^-$  di abbondanza elevata (i.e. 93.1% per  $^{186}\text{Re}$  e 100% per  $^{153}\text{Sm}$ ) e tempi di dimezzamento adatti alla pratica ospedaliera. Le energie delle emissioni  $\beta^-$  garantiscono un range medio nel tessuto di qualche mm e rendono questi radionuclidi adatti a trattare tumori di piccole-medie dimensioni. Inoltre, i prodotti finali dei decadimenti sono nuclidi stabili; infatti, anche  $^{186}\text{Os}$  ( $t_{1/2} = 2 \times 10^{15}$  a) prodotto dal decadimento  $\beta^-$  di  $^{186}\text{Re}$  può essere ritenuto stabile. Ciò costituisce indubbiamente un vantaggio in quanto l'instabilità del nucleo figlio potrebbe influire in modo non trascurabile sulla dose fornita al paziente.

Il  $^{186}\text{Re}$  può essere prodotto con reattore termico per cattura radiativa di neutroni ( $n,\gamma$ ), su bersagli di renio metallico arricchito in  $^{185}\text{Re}$  (sezione d'urto  $\sim 114$  b). Il  $^{186}\text{Re}$  così prodotto è in forma carrier added (CA), in quanto il carrier isotopico è già presente nel bersaglio irraggiato; pertanto il radionuclide prodotto non può essere separato chimicamente dal bersaglio stesso.

Si sta quindi studiando un metodo alternativo, ancora poco utilizzato e comunque non utilizzato commercialmente, per produrre il  $^{186}\text{Re}$  ad alta attività specifica, sfruttando l'irraggiamento in



ciclotrone mediante reazioni  $^{186}\text{W}(p,n)$  e  $(d,2n)$  indotte da fasci di protoni o deuteroni su bersagli di tungsteno (in pratica il triossido  $\text{WO}_3$ ) arricchito isotopicamente in  $^{186}\text{W}$ . In questo caso il renio-186 è prodotto in forma no-carrier-added (NCA) e può raggiungere valori di attività specifica molto più elevati rispetto all'irraggiamento neutronico e presumibilmente prossimi ai valori teorici carrier free. Oltre alla determinazione sperimentale accurata e precisa delle funzioni d'eccitazione delle reazioni nucleari d'interesse e di quelle che portano ad impurezze radionuclidiche indesiderate, è auspicabile la valutazione teorica delle stesse funzioni mediante codici di calcolo quali EMPIRE II della IAEA-ENEA-NEA o versioni avanzate dell'ormai datato codice ALICE. In tal senso, sono in corso collaborazioni con LLNL (USA), BNL (USA), Debrecen (Ungheria), i-Themba (SA) e INR (Moscow, Russia) per calcoli e valutazioni di sezioni d'urto, nell'ambito di un Coordinated Research Project (CRP) dell'IAEA sui dati nucleari per la produzione di radionuclidi terapeutici.

L'ottimizzazione delle condizioni nucleari d'irraggiamento, mediante la conoscenza accurata e precisa dell'andamento delle sezioni d'urto di produzione in funzione dell'energia, non è sufficiente per l'impiego di tali radionuclidi sull'uomo. Dopo l'irraggiamento ed il processamento radiochimico del bersaglio, i radionuclidi prodotti devono essere sottoposti a stringenti controlli analitici e radioanalitici di qualità. Per ogni processo di produzione dei diversi radionuclidi viene quindi di volta in volta messo a punto anche uno specifico programma di QA.

Infine a valle degli studi condotti presso il nostro Laboratorio, si innesta un campo estremamente ampio relativo alla realizzazione del radio farmaco vero e proprio che riguarda la parte di marcatura delle molecole più idonee a fungere da vettori, con tutte le problematiche che tali processi implicano.

#### **5.4 Calcolo dose interna**

Messa a punto la produzione dei radionuclidi è necessario calcolare la dose interna impartita ai pazienti a seguito della somministrazione dei radiotraccianti e/o radiofarmaci. Poiché tale dose non può essere misurata direttamente, si rende necessario sviluppare particolari modelli biocinetici che siano in grado di descrivere i processi di assorbimento di sostanze radioattive nei fluidi umani e di prevederne la distribuzione e la ritenzione nell'intero organismo e/o in particolari organi critici e la loro escrezione.

### **6. CONTROLLO DI QUALITÀ DI RADIOFARMACI E COMPOSTI MARCATI COMMERCIALI PER IMPIEGHI BIOMEDICI.**

Sono state messe a punto delle metodiche di controllo di qualità di radiofarmaci di tipo commerciale impiegati in ambito ospedaliero al fine di determinarne la purezza chimica, radiochimica e radionuclidica. A tale fine si sono impiegate tecniche analitiche e radioanalitiche quali: spettrometria ad assorbimento atomico, analisi per attivazione neutronica con spettrometria gamma ad alta risoluzione fuori linea, spettrometria beta mediante scintillazione liquida, tecniche TLC e HPLC.

In particolare, negli ultimi anni, si sono studiati radiofarmaci marcati con samario-153, renio-186g, lutezio-177.

Tale ricerca è rientrata in un progetto finanziato dalla Regione Lombardia che ha visto coinvolti 7 grandi ospedali della Lombardia con lo scopo di valutare le purezze di questi radiofarmaci impiegati per la radioterapia metabolica del dolore da metastasi ossee. Sono state messe a punto delle tecniche radiocromatografiche al fine di valutare la stabilità e la distribuzione *in vivo* dei radiocomplessi elaborando un'opportuna tecnica di cromatografia TLC, la cui validità è stata dapprima studiata sulla soluzione radiofarmaceutica utilizzata prima della somministrazione. I dati ottenuti sono stati impiegati nell'elaborazione di un modello biocinetico per poter discriminare la quantità di radiofarmaco che viene veicolata alla metastasi e la quantità viceversa che va ad interessare l'osso sano.

## 7. STUDI DI TOSSICOLOGIA AMBIENTALE E MISURE DI RADIOATTIVITA' AMBIENTALE

Si rende sempre più necessario andare a studiare negli organismi viventi le esposizioni protratte nel tempo (al limite sull'arco dell'intera vita) ma a concentrazioni bassissime di un numero sempre crescente di elementi in traccia per valutarne le possibili intossicazioni croniche, i cui effetti nella maggior parte dei casi sono del tutto sconosciuti, sebbene dipendano sia dalla quantità degli elementi in traccia sia dalla particolare forma chimica. Per realizzare esperimenti che siano rappresentativi del reale comportamento ambientale delle specie chimiche in studio, simulando l'assorbimento delle diverse forme chimiche degli elementi in ultra-tracce, tra le metodiche analitiche risulta particolarmente vantaggiosa la tecnica che si basa sull'utilizzo di radionuclidi a vita breve e ad alta attività specifica: essa offre un metodo quasi unico che permette di effettuare studi metallo-tossicologici sia su colture cellulari sia su animali da laboratorio e di ottenere informazioni molto accurate e rappresentative, in quanto presenta una sensibilità tale da raggiungere livelli di concentrazione estremamente bassi (ppb-ppt), comparabili e caratteristici degli elementi da esaminare. Si rende quindi necessario avere a disposizione radio-traccianti prodotti in forma NCA. Con tecniche procedurali analoghe a quelle in precedenza descritte per la produzione di radionuclidi per scopi medici, si studia e si mette a punto la produzione di radionuclidi ad elevata Attività Specifica mediante produzione in ciclotrone e/o in reattore nucleare. Anche in questo caso vengono messe a punto separazioni radiochimiche per separare il radioisotopo di interesse dalla targhetta irraggiata e dai nuclidi interferenti. Vengono inoltre effettuati i controlli di purezza chimica, radiochimica, radionuclidica.

Un'ulteriore fonte di informazioni sul trasferimento degli inquinanti all'uomo con particolare riguardo alla contaminazione interna dell'apparato respiratorio è ottenibile prelevando il pulviscolo atmosferico nelle sue diverse componenti granulometriche mediante un impattatore multistadio che seleziona tale pulviscolo in frazioni comprese fra 0 e 12 micron. L'apparato respiratorio è esso stesso un separatore granulometrico che fissa il pulviscolo, a seconda della granulometria, nei diversi componenti (bronchi, bronchioli, alveoli, etc.). Questa separazione granulometrica causa processi di assorbimento diversi implicando processi metabolici diversi. La conoscenza del tipo di particella in funzione della granulometria permette una modellizzazione dei processi assorbitivi più precisa. La tecnica da noi impiegata per la determinazione qualitativa e quantitativa degli elementi costituenti il particolato consiste nell'irraggiare i campioni in reattore nucleare con campi di neutroni termici e sottoporli a conteggio fuori linea con tecniche di spettrometria gamma ad alta risoluzione. Con questa tecnica possono essere determinati contemporaneamente numerose decine di elementi chimici (analisi multielementale) presenti in traccia in matrici svariate, sfruttando opportunamente le diverse emissioni gamma caratteristiche dei radionuclidi attivati e i diversi tempi di dimezzamento. Al fine di eliminare l'effetto matrice ed aumentare ulteriormente la sensibilità del metodo, può rendersi necessario sottoporre i campioni ad una fase di preconcentrazione e successivo irraggiamento neutronico oppure una volta irraggiati, sottoporli a procedure di mineralizzazione e separazione chimica selettiva, arrivando in ogni modo ad un'analisi quantitativa degli elementi presenti attraverso la misura dell'attività indotta. Gli elementi per i quali l'analisi per attivazione neutronica presenta una sensibilità troppo bassa, sono stati determinati mediante la tecnica dell'Analisi per Assorbimento Atomico.

Un'altra metodologia per la caratterizzazione della contaminazione ambientale è l'uso di aerosols radioattivo come indice dell'inquinamento ambientale, mediante la determinazione dell'Activity Median Aerodynamic Diameter – AMAD che è correlabile alla differente composizione degli inquinanti presenti nell'aria. La misura viene effettuata utilizzando l'impattore multistadio e la determinazione di Be-7, radionuclide di natura cosmogenica, che si attacca al pulviscolo atmosferico e quindi può essere utilizzato come tracciante radioattivo.

In questo contesto in occasione dell'incidente al Reattore Nucleare di Fukushima nel marzo 2011, è partita una campagna di misura per la determinazione del fallout in Italia a seguito di tale

incidente. Sono stati analizzati campioni di diversa natura per la determinazione di I-131 e Cs137,134, che costituiscono i principali radionuclidi legati al rilascio a seguito di un incidente nucleare. In particolare sono stati analizzati filtri utilizzati per la raccolta del particolato atmosferico e campioni di latte di mucca e capra, terra e erba, acqua piovana al fine di arrivare ad una stima anche dell'impatto sulla salute dell'uomo con valutazioni dosimetriche per la popolazione esposta. Tale attività ha avuto come ricaduta positiva l'inizio di una fattiva collaborazione con l'Università di Salonicco. E' stato possibile effettuare le misure in due contesti differenti con metodologie analoghe: i risultati ottenuti hanno contribuito a livello mondiale ad arricchire le informazioni dei vari paesi e a mettere a punto un interconfronto tra laboratori di misura e tra le tecniche di misura utilizzate.

## **8. NANOTOSSICOLOGIA**

Le nanotecnologie e le nanoscienze sono state definite le tecnologie chiave del 21° secolo. Il progresso tecnologico consente oggi di manipolare materiali in modo mirato su scala nanometrica (1nm= un miliardesimo di metro), prossima a quella atomica, aprendo prospettive inimmaginabili nello sviluppo di materiali innovativi intesi a facilitare la nostra vita. A queste dimensioni, le proprietà chimico-fisiche dei materiali possono cambiare radicalmente ed in modo imprevedibile, a causa dell'insorgenza di fenomeni intrinseci alla nanoscala, come gli effetti quantistici. Tuttavia, mentre inizialmente l'attenzione per le nanotecnologie era rivolta quasi esclusivamente al loro enorme potenziale innovativo, negli ultimi anni sono aumentate sempre più le voci che mettono in guardia sui possibili loro rischi sanitari ed ambientali. Purtroppo, le proprietà tossicologiche dei nanomateriali dipendono da fattori di norma non rilevanti nella tossicologia dei corrispondenti macromateriali, quali ad esempio la dimensione fisica "nano" delle particelle che le rende molto insidiose e capaci di penetrare all'interno dell'organismo e l'elevata area superficiale responsabile di una non comune reattività biologica. È sorta proprio per questo una nuova disciplina, la nanotossicologia, indispensabile nell'ambito di una strategia relativa alla manipolazione sicura di nanomateriali e allo sfruttamento sostenibile dei loro potenziali benefici. Tuttavia, a tutt'oggi un'affidabile valutazione dei rischi sanitari ed ambientali dovuti all'esposizione a nanomateriali non è al presente realistica, essendo forti le lacune scientifiche circa il loro movimento ed i potenziali effetti nel corpo umano.

Nel nostro gruppo di ricerca gli studi in questo campo sono effettuati mediante la tecnica dell'Analisi per Attivazione Neutronica, altamente sensibile per l'analisi multielementare di microcampioni biologici, e dei radiotraccianti ad alta attività specifica.

## **9. FOTOCHIMICA APPLICATA ALLE PROBLEMATICHE AMBIENTALI**

Vengono impiegate *tecniche fotochimiche* per la realizzazione di processi di degradazione ossidativa a temperatura ambiente di inquinanti mediante impiego di semiconduttori a base di biossido di titanio di granulometria opportuna, supportato su resine polimeriche ottenute mediante fotopolimerizzazione. La mia collaborazione scientifica sugli argomenti inerenti la fotocatalisi, le membrane fotocatalitiche e reattive e le loro applicazioni riguarda soprattutto la modellazione fisico-matematica dei processi coinvolti in questo tipo di problematiche.

## **10. STUDI PRELIMINARI RELATIVI ALLE PROPRIETÀ CHIMICO-FISICHE DELLA LEGA PIOMBO-BISMUTO PER IMPIEGHI NELLA TRAS MUTAZIONE DELLE SCORIE NUCLEARI MEDIANTE ACCELERATORE DI PROTONI DI ALTA ENERGIA (TECNOLOGIA ADS)**

Sono stati compiuti degli studi preliminari mediante tecniche di spettrometria atomica per lo

studio delle proprietà chimico-fisiche della lega Pb-Bi di composizione eutettica (denominata LBE), che è candidata come metallo liquido di raffreddamento per reattori nucleari e trasmutatori di attinoidi e prodotti di fissione. Tali studi sono proseguiti e hanno previsto l'irraggiamento di campioni di Pb, Bi e LBE in Ciclotrone e in Reattore Nucleare, al fine di studiare in modo particolare la volatilità dei prodotti di spallazione che verrebbero prodotti irraggiando tali materiali con protoni di alta energia. Tra i prodotti volatili che si producono ci sono radionuclidi di polonio e di mercurio.

Per questi due radioisotopi le misure di tipo gravimetrico hanno evidenziato in prima analisi un comportamento nettamente differente: il mercurio si è dimostrato a tutti gli effetti come un vapore non condensabile ed è stato interamente separato dai campioni di prova, mentre le esperienze condotte per il polonio hanno mostrato come circa solo 1% della radioattività presente nel campione sia stata raccolta all'asintoto. Queste considerazioni dovranno poi essere applicate alla cinetica delle concentrazioni dei differenti radionuclidi presenti nel target in varie condizioni di funzionamento, che dipenderanno dalle intensità dei fasci incidenti e dei risultanti flussi neutronici.

## 11. DIVULGAZIONE CULTURA SCIENTIFICA

L'importanza della diffusione della Cultura Scientifica e dei metodi da utilizzare per questa attività sono temi di grande attualità come dimostrato dal numero sempre crescente di iniziative che vengono promulgate a tutti i livelli sia dai Dipartimenti di Fisica sia dall'INFN. La mia attività vuole essere un contributo per questo impegno rivolto soprattutto agli studenti delle Scuole Superiori che coinvolga direttamente però anche le rispettive famiglie in attività di interesse per la società. In tale ambito si inserisce la mia collaborazione con la Commissione Orientamento del Dipartimento di Fisica nel progetto "Lauree Scientifiche", che prevede l'organizzazione e la gestione di visite guidate ai laboratori didattici e di ricerca aperte agli studenti delle scuole Medie Superiori con lo scopo di promuovere l'incontro degli studenti con il mondo universitario e un'opportunità di vedere da vicino l'attività di ricercatori e studenti universitari. In dettaglio gestisco le visite guidate e gli stages organizzati presso il LASA e contribuisco al Corso di Fisica Moderna con un modulo sulla Radioprotezione. Sempre nell'ambito del Progetto Lauree Scientifiche e in ambito INFN sono responsabile di un progetto che riguarda la "Misura della Radioattività Ambientale" con particolare riferimento alle concentrazioni di gas radon 222, con lo scopo di dimostrare che la radioattività è un fenomeno naturale riscontrabile ovunque: una corretta conoscenza consente di discutere in modo più oggettivo di tutti i problemi legati alla radioattività che allarmano la popolazione. Il progetto prevede come principali attori gli studenti e i Docenti che vengono coinvolti direttamente negli esperimenti di Fisica proposti e guidati da Ricercatori Universitari e di Enti di Ricerca. Agli studenti coinvolti in questa iniziativa vengono proposte le attività tipiche di un ricercatore che parte dalla idea del tipo di fenomeno da studiare, progetta e costruisce lo strumento, acquisisce i dati, li elabora e infine deduce la legge fisica che sta alla base del fenomeno studiato. A tale fine alla scuola viene fornito uno scatolone contenente gli strumenti necessari affinché gli studenti possano costruire un "laboratorio di misure di radioattività ambientale" presso la propria scuola. Questo approccio consente di formare nello studente la convinzione che il Ricercatore può costruire da sé lo strumento a partire da oggetti di facile reperibilità e di conseguenza di costo estremamente contenuto. Gli strumenti di misura proposti possono sfruttare la misura di tipo passivo tramite i rivelatori a CR39 che consentono di mettere in atto una serie di esperienze semplici ma efficaci come la autoradiografia di campioni di roccia o la misura della concentrazione di Radon, o rivelatori per la spettrometria alfa o gamma, assemblati utilizzando i vari componenti forniti dal kit.

Tutta questa attività è stata presentata alle varie edizioni di "Comunicare Fisica 2005 e 2007" organizzate dall'INFN, presso i Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN nell'ottobre 2005 e alla Sezione di Trieste nel 2007.

È stata presentata inoltre durante la manifestazione di "Bergamoscienza" a partire dal 2007 sino al 2011 per la quale ho organizzato e gestito un laboratorio interattivo della durata di tre settimane che

ha visto la partecipazione di un numero elevato di studentesche e di persone che si sono dimostrate interessate all'argomento oltre a numerose presentazioni a livello di divulgazione per la popolazione presso diversi Comuni della Regione Lombardia.

Sempre in questo campo si inserisce l'organizzazione del Workshop "L' Energia per il futuro: Nucleare e Fonti Rinnovabili", organizzato presso il Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Milano e presso la Sezione INFN di Milano, con l'intento di contribuire ad una migliore e ragionata comprensione dei problemi connessi all'uso delle attuali fonti di energia e a nuovi o rinnovati metodi di produzione; problemi che toccano profondamente a tutti i livelli lo sviluppo futuro dell'intera comunità umana e per i quali spesso non si conoscono o si tralasciano gli aspetti tecnici e scientifici essenziali.

In questo contesto, in occasione dell'incidente al Reattore Nucleare di Fukushima nel marzo 2011, sono stati coinvolti gli studenti delle Scuole Medie Superiori nella parte di discussione dei risultati ottenuti da noi ricercatori a seguito della campagna di misura del fallout in Italia e in Europa. Ciò ha stimolato l'inizio di un dibattito e riflessioni sui temi legati all'energia nucleare.

## 12. RADIOPROTEZIONE E FISICA SANITARIA

Nell'ambito della mia attività di radioprotezione ho seguito tutte le fasi per l'ottenimento del Nulla Osta Prefettizio per il Laboratorio di Radiochimica presso il Laboratorio Acceleratori e Superconduttività Applicata (LASA) dell'Università degli Studi di Milano. Dal giugno 1990, data in cui è stato rilasciato tale Nulla Osta, il laboratorio è diventato operativo per quanto riguarda la manipolazione ed il controllo di qualità di medie attività di radionuclidi e composti marcati da impiegarsi quali radiotraccianti in campo biomedico e per studi di tipo metallo-biochimico ed ambientale. I laboratori coinvolti sono i laboratori di Misure Fisiche Nucleari, di Radiochimica e Chimica Analitica/Radioanalitica, presso i quali sono installate apparecchiature sofisticate, dotazioni di sicurezza che rispondono alla normativa di radioprotezione. Da quando il Laboratorio è diventato operativo svolgo con regolarità e secondo una periodicità stabilita misure di esposizione e contaminazione nei locali del Laboratorio stesso e le relative valutazioni dosimetriche per il personale ad esso afferente. La rigorosità delle procedure impiegate durante le operazioni che si svolgono nel Laboratorio hanno permesso di avere presenza di radioattività non superiore al fondo naturale.

L'entrata in vigore della nuova normativa (D.L. 230/95 – 241/00 e 257/01) ha richiesto uno studio ed un approfondimento delle procedure delle metodologie delle norme interne da seguire all'interno del Laboratorio stesso. Tutto ciò comporta un continuo aggiornamento, un notevole lavoro di studio e di interconfronto per poter interpretare e tradurre correttamente la normativa nelle diverse procedure. Collaboro nel Gruppo di lavoro dell'ANPEQ-Lombardia per la definizione dei "protocolli per le valutazioni preventive nei casi di emergenza radiologica conseguenti a incendio e allagamento". Il risultati di questo lavoro sono stati presentati al Convegno Nazionale dell'ANPEQ a Firenze ad ottobre 2001.

In questo contesto ho completato la procedura per l'ottenimento della Convalida del precedente Nulla Osta Prefettizio, resasi necessaria per le modifiche introdotte dalla nuova normativa.

Tutti questi tipi di ricerca, escluso il punto 3 richiedono particolari competenze scientifiche e tecniche sia in Fisica Nucleare sia in Fisica Sanitaria, Dosimetria e Radioprotezione in generale, che vengono rispecchiate nei corsi di Fisica Sanitaria e di Laboratorio di Fisica Sanitaria, che tengo nell'ambito della Laurea Magistrale in Fisica, percorso di Fisica Sanitaria.

In particolare le mie competenze scientifiche e tecniche sono relative alle tecniche di spettrometria  $\alpha$ ,  $\beta$ , X,  $\gamma$  ad alta risoluzione, con rivelatori a semiconduttori HPGe, Si(Li), a scintillazione Na(I), a scintillazione liquida con e senza discriminazione  $\alpha/\beta$  (mediante analisi temporale dell'impulso), alle

tecniche di analisi elementare quali la spettrometria di assorbimento atomico (ET-AAS), tecniche elettrochimiche quali la polarografia e voltamperometria di strippaggio anodico e catodico e tecniche radioanalitiche di tipo nucleare quali l'analisi per attivazione neutronica e protonica strumentale (INAA e IPAA) PIXE ed XRF.

Oltre a ciò ho sempre messo a punto procedure di misura e programmi di calcolo per l'analisi qualitativa e quantitativa degli spettri dei radioisotopi prodotti per attivazione neutronica e/o con particelle cariche, mediante anche la scrittura di parti di codici di calcolo per l'analisi dei dati e di tipo grafico necessari per una opportuna visualizzazione e presentazione dei risultati.

Come si evince dal mio curriculum ho anche sviluppato codici di tipo Monte Carlo per la simulazione di diversi processi fisici e ho acquisito le necessarie competenze per l'utilizzo di codici Monte Carlo di tipo commerciale quale Empire, Talys, Alice che si basano su diversi modelli teorici per la simulazione e la modellizzazione completa delle reazioni nucleari di nostro interesse, che utilizziamo al fine di valutarne la bontà e l'affidabilità di predizione..

In questo ambito si inserisce la mia collaborazione con la Divisione Radiochimica del JRC di Ispra, presso la quale sviluppai, su di un microcomputer PDP 11/23 della Digital, un programma di calcolo in grado di compiere l'analisi qualitativa e quantitativa automatica di spettri gamma di radioisotopi prodotti per attivazione, prima che, come oggi, si potessero utilizzare programmi di calcolo di tipo commerciale.

## **ALLEGATO B) QUADRO RIASSUNTIVO DELL'ATTIVITA' DIDATTICA SVOLTA**

Ho svolto attività didattica nei seguenti corsi di Laurea dell'**Università degli Studi di Milano**:

### **Corso di Laurea in Scienze dell'Informazione - Facoltà SS. MM. FF. NN.:**

Dall' a.a. 1985/86 all' a.a. 1988/89 esercitazioni per il corso di Fisica I

Ho partecipato alle Commissioni d'esame per lo stesso corso in qualità di Cultore della Materia.

### **Scuola diretta a fini speciali "Tecnici di Istituto Medico Biologici" - Facoltà di Medicina e Chirurgia:**

Dall' a.a. 1985/86 all' a.a. 1991/92 cicli seminariali per il corso di Istituzioni di Matematica e Fisica.

Ho partecipato alle Commissioni d'esame per lo stesso corso in qualità di Cultore della Materia.

### **Corso di Laurea in SPA e DU - Facoltà di Medicina e Veterinaria:**

Dall' a.a. 1993/94 all' a.a. 1999/00 cicli seminariali per il corso di Fisica I

Ho partecipato alle Commissioni d'esame per lo stesso corso in qualità di Cultore della Materia.

### **Corso di Laurea in Fisica - Facoltà SS. MM. FF. NN.:**

Dall' a.a. 1994/95 all' a.a. 2001/02 Laboratorio di Fisica Biologica e Fisica Sanitaria, IV anno, indirizzo: "Fisica dei Biosistemi".

Ho partecipato alle Commissioni d'esame per lo stesso corso in qualità di Cultore della Materia.

a.a. 2002/03 Compito Didattico corso di Laboratorio di Fisica Sanitaria (116 ore) del Corso di Laurea Quadriennale in Fisica presso la Facoltà di SS. MM. FF. NN.

a.a. 2003/04 Affidamento a titolo gratuito corso di Laboratorio di Fisica Sanitaria (116 ore) del Corso di Laurea Quadriennale in Fisica presso la Facoltà di SS. MM. FF. NN.

Faccio parte della commissione d'esame per il Corso di Laboratorio di Fisica Sanitaria in qualità di Cultore della Materia.

In particolare dalla data del 15 giugno 2004 sono stata nominata presidente di commissione per il medesimo corso.

Dall' a.a. 1995/96 faccio parte della commissione d'esame per il Corso di Fisica Sanitaria (IV anno Laurea in Fisica).

In particolare dalla data del 15 giugno 2004 sono stata nominata presidente di commissione per il medesimo corso.

### **Corso di Laurea Magistrale in Fisica - UNIMI**

a.a. 2004/05 – 2009/10 Affidamento a titolo gratuito corso di Fisica Sanitaria –I modulo (48 ore) con titolo di Professore Aggregato.

a.a. 2004/05 – 2009/10 Affidamento a titolo gratuito corso di Fisica Sanitaria –II modulo (48 ore) con titolo di Professore Aggregato.

a.a. 2004/05 – 2009/10 Affidamento a titolo gratuito corso di Laboratorio di Fisica Sanitaria (66 ore) con titolo di Professore Aggregato.





**Corsi F.S.E. presso l'Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Chimica Fisica ed Elettrochimica**

- a.a. 1999/00 attività di docenza nel Corso F.S.E. "Manager di Marketing Ambientale" – 169 ore.  
a.a. 1999/00 attività di docenza nel Corso F.S.E. "Responsabile di Controllo di Qualità relativamente a processi e/o impianti chimici e/o ambientali nell'ambito di complessi ed industrie" – 32 ore.

**Corsi F.S.E. presso l'Università degli Studi di Milano, Centro di Ricerca per l'Ambiente e l'Impresa - CRAI**

- a.a. 2000/01 attività di docenza nel Corso F.S.E. "Responsabile di Controllo di Qualità relativamente a processi e/o impianti chimici e/o ambientali nell'ambito di complessi ed industrie" nella disciplina di "Tutela Ambientale" in particolare per quanto riguarda la **Radioprotezione** – 10 ore.  
a.a. 2002/03 attività di docenza nel Corso F.S.E. per Master Universitario "Sistema di Gestione per la Prevenzione Integrata (Sicurezza, Ambiente, Salute sul Lavoro) e le Relazioni/Sinergie con il Sistema di Gestione della Qualità in Ambito Sanitario" nell'ambito del modulo "Sicurezza Salute sul Lavoro" in particolare per quanto riguarda la **Radioprotezione** – 16 ore.  
a.a. 2002/03 attività di docenza nel Corso F.S.E. per Master Universitario "Sistema di Gestione per la Prevenzione Integrata (Sicurezza, Ambiente, Salute sul Lavoro) e le Relazioni/Sinergie con il Sistema di Gestione della Qualità" nell'ambito del modulo "Sicurezza Salute sul Lavoro" in particolare per quanto riguarda la **Radioprotezione** – 16 ore

**Corsi F.S.E. presso l'Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Medicina del Lavoro "Clinica del Lavoro Luigi Devoto"**

- Dall' a.a. 2003/04 – 2004/05 attività di docenza nel Corso F.S.E. per il Master "Sistema di gestione integrata per la qualità, l'ambiente, la sicurezza e la salute in ambito sanitario" nella disciplina Sicurezza Sul Lavoro (SSL) – **Radioprotezione** – 5 ore.

**Corso di Dottorato di Ricerca in "Chimica del Farmaco", Istituto di Chimica Farmaceutica dell'Università degli Studi di Milano,**

- a.a. 2003/04 corso "Principi di Radioprotezione nel Laboratorio di Radiochimica".

**Progetto Interuniversitario del MIUR: Piano Lauree Scientifiche**

- Dall a.s. 2002/03 ad ora faccio parte del gruppo di docenti che svolgono attività rivolte all'incentivazione della didattica e all'orientamento studenti scuole medie superiori, Partecipo al Progetto Interuniversitario MIUR: "Progetto Lauree Scientifiche".

Maggio 2008 in qualità di esperto della materia, ho tenuto per "NATO Advanced Course - New Techniques for the detection of Nuclear and Radioactive Agents" un seminario dal titolo "**Preparation of radionuclides and their measure by high resolution  $\gamma$ -spectrometry,  $\beta$ -spectrometry and high resolution  $\alpha$ -spectrometry**" <http://nato.atc.mu.edu.tr>.

Febbraio 2009 in qualità di esperto, ho tenuto nell'ambito del Workshop "Medical Physics In Israel 2009" organizzato nell'ambito di un Technical Cooperation Programm della IAEA, un invited talk dal titolo: "***Specialization School in Milano, Italy***".

a.a. 2009/2010 Nell'ambito del Master di II Livello in Scienze e Tecnologie degli impianti nucleari ho tenuto il corso "***Radiation sources, protection strategies and the ALARA design approach***" (14 ore) per l'indirizzo disciplinare Reactor Core and Radiation Protection, presso l'Università degli Studi di Genova.

a.s. 2013/2014 – marzo 2014 Nell'ambito della e-learning week dal titolo "La radioattività: teoria e pratica" finanziata dalla Unione Europea tramite la Regione Lombardia e rivolta agli studenti delle scuole medie superiori ho tenuto serie di lezioni e seminari.

Ho seguito le seguenti tesi di laurea in Fisica in qualità di correlatore/relatore:

1. Uno studio di un fascio di radiazione elettromagnetica prodotto da un betatrone per uso terapeutico (a.a. laurea 87/88) – Laurea in Fisica.
2. Emulazione software di fenomeni di scattering multiplo e dissipazione termica di fasci di particelle accelerate in bersagli metallici multipli (a.a. laurea 87/88) – Laurea in Fisica.
3. Simulazione e misure spettrometriche di fasci RX terapeutici (a.a. laurea 90/91) – Laurea in Fisica.
4. La scintillazione liquida: quench ed efficienza nelle misure dell'attività del trizio. Oro-199: produzione e separazione dal platino-198 (a.a. laurea 91/92) – Laurea in Fisica.
5. Produzione di radiotraccianti di metalli nobili per lo studio dell'impatto ambientale e sanitario (a.a. laurea 94/95) – Laurea in Fisica.
6. Produzione mediante Ciclotrone del Radionuclide Rame-64 per Radioterapia Metabolica e PET, mediante reazioni indotte da deuteroni su bersagli di zinco naturale (a.a. laurea 2000/01) – Laurea in Fisica.
7. Ottimizzazione delle condizioni di irraggiamento per la produzione in ciclotrone di media energia di rame-64 ad alta attività specifica (a.a. laurea 2003/04) – Laurea in Fisica.
8. Ottimizzazione delle condizioni di irraggiamento per la produzione mediante ciclotrone del radionuclide astato-211; prospettive di impiego in radioterapia metabolica (a.a. laurea 2004/05) – Laurea in Fisica.
9. Messa a punto di metodiche di controllo di qualità di radiofarmaci marcati con radionuclidi di renio e samario di impiego in radioterapia metabolica del dolore da metastasi (a.a. laurea 2004/05) - Laurea in Fisica.
10. Caratterizzazione di un collimatore multilamellare (MLC) nell'impiego di raggi X con tecnica IMRT (Intensità modulated radiation therapy) (a.a. laurea 2004/05) - Laurea in Fisica.
11. Radionuclidi emettitori beta utilizzati in radioterapia metabolica: studio della purezza radionuclidica di radiofarmaci marcati con lutezio-177 (a.a. laurea 2004/05) – Laurea Triennale in Fisica.
12. Metodiche di separazione radiochimica di radionuclidi artificiali di astato prodotti in ciclotrone da target di Bismuto e impurezze di polonio (a.a. laurea 2004/05) - Laurea triennale in Chimica.
13. Metodi radiocromatografici e termocromatografici per la separazione e il controllo di qualità di radionuclidi per utilizzi in radioterapia metabolica, (a.a. laurea 2005/06) - Laurea Specialistica in Scienze Chimiche.
14. Studio della purezza chimica di soluzioni radioattive di <sup>177</sup>Lu da impiegarsi nella marcatura di farmaci utilizzati nella radioterapia metabolica, (a.a. laurea 2006/07) - Laurea Magistrale in Fisica.
15. Studio cinetico e modellizzazione fisico/matematica del processo di fotomineralizzazione di soluzioni acquose con microinquinanti organici in impianto pilota utilizzando membrane fotocatalitiche, (a.a. laurea 2006/07) – Laurea in Fisica.
16. Effetti tardivi di un fascio terapeutico di ioni carbonio, (a.a. laurea 2006/07) – Laurea Magistrale in Fisica.
17. Determinazione delle funzioni d'eccitazione per la produzione ad uso medico di renio-186 mediante reazioni nucleari indotte da deuteroni in ciclotrone, (a.a. laurea 2007/08) – Laurea in Fisica.
18. Studio delle funzioni d'eccitazione per la produzione, mediante reazioni indotte da neutroni in ciclotrone, di lutezio-177g da impiegarsi in radioterapia metabolica (a.a. laurea 2007/08) – Laurea in Fisica..
19. Produzione e controllo di qualità di radionuclidi per applicazioni biomediche mediante impiego di ciclotrone di media energia (a.a. laurea 2007/08) – Laurea in Fisica.
20. High Specific Activity Radionuclides for Metabolic Radiotherapy: non conventional routes for cyclotron production and quality control of Re-186g and other radio-metals, Tesi di Dottorato nel Settore di “Radionuclides for Nuclear Medicine”.
21. Experimental validation of Monte Carlo simulation of stereotactic LEXSELL GAMMAKNIFE PERFEXION radiosurgery system, (a.a. laurea 2008/09) – Laurea in Fisica
22. Implementation of Monte Carlo simulation for the GAMMA KNIFE PERFEXION SYSTEM, (a.a. laurea 2008/09) – Laurea in Fisica.
23. Validazione di un sistema di registrazione delle immagini nella tomografia computerizzata con tecnica CONE BEAM, (a.a. laurea 2008/09) – Laurea Triennale in Fisica
24. Studio della produzione, mediante ciclotrone, del radionuclide iodio-124 per teragnostica PET; (a.a. laurea 2009/10) – Laurea Magistrale in Fisica
25. Uso di tecniche nucleari e radiochimiche per l'analisi di campioni biologici, (a.a. laurea 2010/11) – Laurea Triennale in Fisica.
26. Studio dell'ottimizzazione della produzione mediante ciclotrone del radionuclide <sup>52</sup>Mn per imaging PET, (a.a. laurea 2018/19) – Laurea Magistrale in Fisica.