

**Scuola Nazionale Biennale**  
**"Rivelatori ed Elettronica**  
**per Fisica delle Alte Energie, Astrofisica,**  
**Applicazioni Spaziali e Fisica Medica"**

**IV Edizione**

**INFN Laboratori Nazionali di Legnaro**

**11-15 Aprile 2011**

**Descrizione delle lezioni**

**Lunedì 11 Aprile 2011 (pomeriggio)**  
**Radiazione e rivelatori a semiconduttore: introduzione**  
**Chairman: Dario Bisello**  
*(Dipartimento di Fisica, Università di Padova e INFN Sezione di Padova)*

---

**14.00-15.40 Introduzione al danno da radiazione: concetti base e quantità fisiche**  
Jeffery Wyss, *DIMSAT, Università di Cassino e INFN Sezione di Padova*

L'interazione fra radiazione e materia è alla base sia del funzionamento di rivelatori e di sistemi microelettronici per applicazioni scientifiche e tecnologiche sia, in alcuni casi, del loro malfunzionamento. L'importanza del concetto di radiazione e di danno da radiazione investe molti campi. È di notevole interesse per tutte le attività agli acceleratori di particelle e sui satelliti, dalle scienze di base (Fisica delle Alte Energie, Astrofisica, Scienze dei Materiali), alle attività commerciali nello spazio, per l'avionica, la medicina nucleare (diagnostica e terapia), e le applicazioni industriali. Garantire il corretto funzionamento dei rivelatori e dell'elettronica è importante soprattutto quando questi sistemi devono lavorare in ambienti ostili per la presenza di radiazione. Non è perciò sorprendente che lo studio del danno da radiazione costituisca un campo molto attivo nella ricerca applicata. In questa lezione illustrerò i concetti essenziali, le definizioni e le grandezze in gioco (dose, Linear Energy Transfer, Non-Ionizing Energy Loss, Single Event Effect, cross-section). L'approccio sarà elementare e di ampio respiro. Lo scopo è fornire ai novizi gli strumenti di base per la comprensione di articoli più tecnici.

**16.10-17.50 Dalla giunzione pn al rivelatore a semiconduttore**  
Gianluigi Casse, *Università di Liverpool, Regno Unito*

La lezione descriverà i principi di funzionamento dei rivelatori a semiconduttore partendo dalle proprietà fondamentali della giunzione pn. Nell'introduzione verranno descritte brevemente le principali proprietà dei semiconduttori e verranno introdotte le più importanti relazioni che governano il comportamento della giunzione pn. In seguito queste proprietà saranno poste in relazione con gli effetti del passaggio della radiazione ionizzante attraverso il rivelatore per arrivare a definire le caratteristiche dell'impulso elettrico indotto da una particella che incide su un rivelatore a semiconduttore. Verranno quindi illustrate le tecniche di caratterizzazione elettrica di tali dispositivi.

La seconda parte della lezione sarà dedicata ai rivelatori segmentati, cioè ai rivelatori a semiconduttore capaci di fornire alte risoluzioni spaziali, in particolare a microstrisce e a pixel. La naturale applicazione di questi dispositivi è nella costruzione di rivelatori complessi capaci di ricostruire tracce di particelle ionizzanti, in particolare per le applicazioni in Fisica delle Alte Energie. Verranno introdotti i concetti fondamentali di cui si tiene conto per progettare le geometrie dei sistemi di tracciamento: rapporto segnale/rumore, risoluzione di posizione, capacità di risposta agli alti ratei di impatto, etc. etc. Verrà infine presentato un esempio di applicazione nel campo della Fisica delle Alte Energie al Large Hadron Collider (LHC) del CERN.

**Martedì 12 Aprile 2011 (mattina)**  
**Rivelatori a semiconduttore: effetti delle radiazioni e stato dell'arte**  
**Chairman: Luigi Vannucci**  
**(Laboratori Nazionali di Legnaro dell'INFN)**

---

9.00-10.40    **Danno da radiazione macroscopico in rivelatori a semiconduttore**

Alberto Messineo, *Dipartimento di Fisica, Università di Pisa e INFN Sezione di Pisa*

I rivelatori a semiconduttore rappresentano oggi la soluzione adottata in molti esperimenti, ad esempio in Fisica delle Alte Energie o Astro-particellare, per la rivelazione di particelle cariche. Il loro uso in apparati operanti in condizioni di lavoro proibitive per i livelli di radiazione, obbliga la valutazione sperimentale del danno macroscopico subito, con lo scopo di ottimizzare le prestazioni di rivelazione in sistemi anche molto complessi.

Nella lezione sono individuate e studiate le cause che concorrono a determinare il danno da radiazione e sono valutati gli effetti sui rivelatori dal punto di vista macroscopico. Sono discussi i fenomeni di degradazione della funzionalità dei rivelatori, come: la variazione del punto di lavoro, la stabilità di operazione, la riduzione della raccolta di carica, l'efficienza di rivelazione e l'evoluzione nel tempo delle prestazioni.

Verranno inoltre valutate le soluzioni più promettenti, ottenute con le conoscenze sperimentali e tecnologiche oggi disponibili, per la realizzazione di rivelatori Ultra-Radiation-Hard con capacità di rivelazione ottimale.

11.10-12.50    **Microscopic radiation damage in semiconductor detectors**

Mara Bruzzi, *Dipartimento di Energetica, Università di Firenze*  
*e INFN Sezione di Firenze*

Microscopic defects in semiconductors have a strong influence on transport properties, directly influencing the performance of semiconductor-based devices. This is due to the fact that defects are usually related to localized energy levels placed within the forbidden gap, which are responsible of mechanisms such as doping, trapping and generation-recombination. In this lecture, a discussion on the principal kind of defects in semiconductor detectors is carried out, with particular focus on radiation induced ones. Recent techniques used to reveal defects in semiconductors are shown. The relationship between radiation induced microscopic defects and macroscopic changes in the electrical properties of the detectors, such as charge collection efficiency, full depletion voltage, leakage current, diffusion length, and so on, is discussed. Different operative environments, all involving special constraints in the radiation hardness of semiconductor detectors, are presented. A special regard is devoted to silicon detectors planned for forward trackers in future High Energy Physics (HEP) experiments, as in the upgrade of the Large Hadron Collider (LHC) at CERN, but other applications, as dosimetry for radio- and hadron-therapy and semiconductor devices used in space will be addressed as well.

**Martedì 12 Aprile 2011 (pomeriggio)**  
**Rivelatori a semiconduttore: effetti delle radiazioni e stato dell'arte**  
**Chairman: Gian Franco Dalla Betta**  
**(DISI, Università di Trento e INFN Sezione di Padova, Gruppo Collegato di Trento)**

---

**14.00-14.50 Rivelatori 3D**

Elisa Vianello, *Fondazione Bruno Kessler (Trento)*

Diversamente dai convenzionali rivelatori planari, nei quali la raccolta della carica generata dalla radiazione ha luogo sulla superficie del wafer, nei rivelatori 3D gli elettrodi sono perpendicolari alla superficie del wafer e si estendono parzialmente o completamente attraverso il volume della fetta. Grazie alla loro resistenza al danno da radiazione i rivelatori 3D sono tra i sensori candidati ad essere utilizzati negli acceleratori di prossima generazione.

La Fondazione Bruno Kessler (FBK) - attiva da più di 10 anni nel campo dei rivelatori in silicio per Fisica delle Alte Energie – ha al suo interno una camera pulita dedicata alla realizzazione di sensori in silicio, tra cui anche i rivelatori 3D. La lezione illustrerà sia il principio di funzionamento che la tecnologia di fabbricazione di tali dispositivi.

**14.50-15.40 Introduzione ai rivelatori fotomoltiplicatori al silicio**

Nicola Serra, *Fondazione Bruno Kessler (Trento)*

Il fotomoltiplicatore al silicio (SiPM) è uno dei sensori di luce più interessanti sviluppato negli ultimi anni. Dalla loro invenzione, negli ultimi anni 90, enormi progressi sono stati fatti sulle principali prestazioni rendendoli estremamente competitivi rispetto ai classici tubi fotomoltiplicatori. Numerosi esperimenti, nei campi della Fisica delle Alte Energie, Medicina Nucleare, analisi dei materiali e Biologia, sono in corso per valutarne le prestazioni. Le loro caratteristiche di compattezza, basse tensioni di lavoro e insensibilità ai campi magnetici li rendono particolarmente attraenti sia per una semplice sostituzione dei tubi fotomoltiplicatori in sistemi esistenti che per la concezione di nuovi sistemi innovativi. In questa lezione verranno presentati i principi di funzionamento dei fotomoltiplicatori al silicio, le principali caratteristiche di tali dispositivi, e il loro possibile utilizzo in alcune applicazioni specifiche nei predetti campi.

**16.10-17.50 Monolithic pixels for innovative silicon detectors**

Walter Snoeys, *CERN (Svizzera)*

Monolithic detectors integrating readout and detecting elements in the same piece of silicon offer significant advantages compared to hybrid solutions: detector assembly is facilitated and production cost reduced, charge collection electrodes can be realized with very small capacitance values (down to a few fF!) yielding extremely favourable power-signal-to-noise (power-S/N) performances.

Such monolithic detectors have been implemented integrating CMOS on very high resistivity substrates (doping concentration  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ), and more recently using standard CMOS imaging technologies. Both approaches have been successful and have demonstrated a good power-S/N performance. However, the former are difficult to produce in volume, and the latter have sequential readout schemes often not compatible with time-stamping requirements of High Energy Physics experiments and other applications, and are often very sensitive to radiation damage.

The presentation will concentrate on the design of the device and the readout circuitry of monolithic detectors, and on the perspectives of realizing such detectors in modern commercial CMOS technologies for use in future High Energy Physics tracking detectors. Charge collection, electric field and breakdown, the interaction between power and signal-to-noise in the analog part of the readout and some issues with the digital circuitry, as well as the radiation tolerance will be covered.

**Mercoledì 13 Aprile 2011 (mattina)**  
**Elettronica per Fisica delle Alte Energie: analogica, digitale e power supply**  
**Chairman: Flavio Dal Corso**  
*(INFN Sezione di Padova)*

---

**9.00-10.40 Elettronica di front-end per tracciatori in silicio**

Valerio Re, *Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Bergamo*  
*e INFN Sezione di Pavia*

In questa lezione vengono discussi i principi generali e le tecnologie di realizzazione dell'elettronica di lettura per i tracciatori in silicio a pixel e a microstrip che vengono utilizzati nei moderni esperimenti di Fisica delle Alte Energie. L'elevatissima granularità di questi rivelatori richiede di utilizzare circuiti di front-end a segnali misti fabbricati in tecnologie ad altissima densità di integrazione. Vengono analizzati i criteri di progetto che portano tali circuiti a soddisfare severi requisiti fra cui basso rumore, elevata velocità, bassa dissipazione di potenza ed elevata resistenza alle radiazioni. Vengono discussi i problemi fondamentali che devono essere affrontati nella realizzazione di un circuito microelettronico integrato di front-end, dal progetto dei blocchi analogici alla definizione dell'architettura digitale di lettura del chip. Infine la lezione esaminerà alcune delle soluzioni che sono state adottate in chip di lettura utilizzati nelle applicazioni sperimentali.

**11.10-12.50 Danno da radiazione ionizzante in dispositivi e circuiti elettronici**

Lodovico Ratti, *Dipartimento di Elettronica, Università di Pavia*  
*e INFN Sezione di Pavia*

Circuiti ed apparati elettronici sono utilizzati in svariati settori che richiedono un grado più o meno elevato di resistenza alle radiazioni: dalla ricerca fondamentale (Fisica delle Alte Energie, Scienza dei Materiali, Scienze della Vita, satelliti per Astronomia e sonde per l'esplorazione spaziale) alle applicazioni spaziali commerciali (satelliti per telecomunicazioni, meteorologici, per navigazione e per telerilevamento), dall'avionica alla terapia (acceleratori per radioterapia oncologica) e diagnostica medica (equipaggiamento per imaging radiografico) per arrivare ad ambiti più tipicamente civili ed industriali (produzione di energia da combustibile nucleare, produzione di circuiti integrati). Quando i dispositivi e i circuiti elettronici sono impiegati in questi ambienti, possono interagire direttamente con fotoni, elettroni, protoni e altre particelle, con una possibile alterazione delle loro caratteristiche elettriche. Tale alterazione può produrre in un sistema elettronico uno spettro molto ampio di conseguenze, che va da un'accettabile degradazione delle prestazioni a un guasto grave e irreversibile. L'effetto della radiazione dipende da un lato dalle caratteristiche tecnologiche del sistema considerato e, dall'altro, dal tipo e dalla quantità di radiazione (dose) cui il sistema viene esposto.

In questa lezione, dopo l'introduzione di alcuni concetti fondamentali riguardanti l'interazione radiazione-materia, verranno discussi i meccanismi fondamentali del danno da radiazione ionizzante (total ionizing dose, TID) nei dispositivi elettronici, in particolare nei transistori MOSFET e nei transistori bipolari a giunzione. Particolare enfasi sarà posta sul deterioramento delle caratteristiche statiche e di rumore in dispositivi singoli e sulla degradazione delle prestazioni in circuiti di front-end per rivelatori di radiazione.

**Mercoledì 13 Aprile 2011 (pomeriggio)**  
**Elettronica per Fisica delle Alte Energie: analogica, digitale e power supply**  
**Chairman: Matteo Pegoraro**  
**(INFN Sezione di Padova)**

---

**14.00-14.50 Digital systems and FPGAs in Experimental Particle Physics**  
Tullio Grassi, *Università del Maryland, USA*

There is an increasing interest in FPGA devices for Particle Physics experiments, including electronics exposed to moderate radiation levels. This presentation will compare FPGAs and ASICs for these applications, and then the lesson will be focused on the activities at the CERN LHC experiments, related to commercial-grade FPGAs and on techniques for evaluating and mitigating the non-functionalities both at the FPGA level and at the system level.

**14.50-15.40 Power Supply per Fisica delle Alte Energie:  
problematiche e soluzioni innovative**  
Giorgio Spiazzi, *Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Università di Padova  
e INFN Sezione di Padova*

Il previsto upgrade ad una maggiore luminosità negli esperimenti basati sull'acceleratore LHC, ha condotto alla necessità di rivedere le architetture dei sistemi di alimentazione dei rivelatori e dell'elettronica di front-end e readout. In particolare, il sistema attuale che prevede la distribuzione di tensioni anche di basso valore (pochi volt) mediante lunghi cavi di alimentazione con regolazioni a bordo scheda (LDO), dovrà essere sostituito da alimentatori locali in grado di provvedere alla generazione, in modo efficiente, delle tensioni necessarie a partire da tensioni d'ingresso molto più elevate, così da ridurre le correnti nei cavi di distribuzione. Nella lezione verranno illustrate le problematiche relative all'adozione di alimentatori a commutazione che devono operare in ambiente ostile, con particolare riferimento alla presenza di elevati campi magnetici e verranno presentate le soluzioni topologiche più promettenti.

**Mercoledì 13 Aprile 2011 (pomeriggio)**  
**Rivelatori ed elettronica per Fisica delle Alte Energie: casi di studio**  
**Chairman: Matteo Pegoraro**  
**(INFN Sezione di Padova)**

---

**16.10-17.00 Caso di studio: "Danno da radiazione in rivelatori a semiconduttore: il Silicon Vertex Detector di CDF"**

Benedetto Di Ruzza, *Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL), USA*

Il Silicon Vertex Detector è la componente più interna del rivelatore CDF (Collider Detector at Fermilab). CDF è uno dei due apparati di rivelazione *general purpose* dell'acceleratore Tevatron al Fermilab (Batavia, USA). Sin dal 2001 questo rivelatore raccoglie i dati delle collisioni protone-antiprotone che avvengono al suo interno a un'energia di 1.96 TeV nel centro di massa. CDF ha una simmetria approssimativamente cilindrica attorno alla linea di fascio e la parte più interna è il tracciatore al silicio, composto da 9 strati cilindrici di rivelatori al silicio a microstrisce di diverso tipo, posti ad una distanza tra 1.5 cm e 30 cm dalla linea di fascio. Il Silicon Vertex Detector di CDF era stato costruito per un periodo di presa dati pari a  $3-5 \text{ fb}^{-1}$ , e oggi è ancora in funzione dopo che il Tevatron ha prodotto una luminosità integrata di circa  $10 \text{ fb}^{-1}$ . La robustezza e la precisione del Silicon Vertex Detector di CDF sono state cruciali in alcune delle più importanti misure di Fisica delle Alte Energie realizzate a CDF, come la prima misura del tempo di oscillazione del mesone B-sub-s e la scoperta del barione Omega-sub-b.

In questa lezione verranno illustrate le componenti del Silicon Vertex Detector di CDF, verranno descritti i principali problemi operativi affrontati e risolti in 10 anni di presa dati, verranno illustrati i metodi per monitorare l'effetto della radiazione sui rivelatori a microstrisce, con particolare accento sul metodo del *noise-versus-bias scan* e del *signal-versus-bias scan*. Verranno infine presentati e discussi i risultati di queste analisi per le varie tipologie di sensori a microstrip usati nel tracciatore di CDF.

**17.00-17.50 Caso di studio: "Le sfide del Tracciante di CMS: dalla sua concezione alla presa dati"**

Gian Mario Bilei, *INFN Sezione di Perugia*

Il rivelatore tracciante di CMS a LHC è il più grande e innovativo rivelatore a stato solido mai realizzato per un esperimento di Fisica e non solo delle Alte Energie. Il tracciante dell'esperimento CMS è costituito da 3 strati di rivelatori a pixel e 10 strati di rivelatori a microstrisce, per un totale di circa 25.000 rivelatori individuali assemblati in circa 15.000 moduli e  $210 \text{ m}^2$  di sensori al silicio. L'informazione è raccolta da 10 milioni di canali di elettronica gestiti da 75.000 chip di lettura con 25 milioni di connessioni da realizzare mediante microsaldature. Il test dei componenti e l'assemblaggio dei moduli è stato organizzato fra 18 laboratori e centri di ricerca internazionali distribuiti in 8 paesi (Italia, Germania, Svizzera, Francia, Belgio, Austria, Stati Uniti, Finlandia). La lezione si propone di ripercorrere e analizzare le grandi sfide tecnologiche, logistico-organizzative, i problemi e le soluzioni adottate nelle varie fasi che vanno dal "Technical Design Report" realizzato nel 2000, alla costruzione, integrazione, commissioning e presa dati. La descrizione delle operazioni del Tracciante di CMS a LHC e delle sue eccellenti prestazioni concluderanno la lezione.

**Giovedì 14 Aprile 2011 (mattina)**  
**Effetti da Evento Singolo sull'elettronica per lo spazio e per l'avionica**  
**Chairman: Alessandro Paccagnella**  
**(DEI, Università di Padova e INFN Sezione di Padova)**

---

**9.00-9.50      Introduzione agli Effetti da Evento Singolo (SEE) indotti da protoni e ioni nei componenti elettronici**

Andrea Candelori, *INFN Sezione di Padova*

In questa lezione introduttiva verranno presi in considerazione gli Effetti da Evento Singolo (SEE) indotti da protoni e ioni sui componenti elettronici, particolarmente rilevanti per le applicazioni spaziali, dove anche un solo SEE distruttivo può portare alla perdita di un satellite. Dopo un breve excursus storico, a partire dalla loro scoperta nel 1975, verranno descritte le principali categorie di SEE osservabili nei componenti elettronici. Infine verranno analizzati alcuni aspetti microscopici collegati ai SEE, quali il *funneling* per una giunzione p-n e l' *ion-triggered channeling* per i MOSFET, e macroscopici, quali la curva "Sezione d'urto-Energia" per i protoni e la curva "sezione d'urto-LET" per gli ioni, punto di partenza per la valutazione del possibile utilizzo di un componente elettronico per applicazioni spaziali. Infine verranno analizzate alcune tecniche a livello di struttura e di layout per mitigare i SEE distruttivi nei componenti elettronici non di potenza.

**9.50-10.40      Effetti da Evento Singolo in componenti elettronici di potenza**

Giovanni Busatto, *DAEIMI, Università di Cassino e INFN Sezione di Pisa*

I componenti elettronici di potenza (Diodi, MOSFET, IGBT, etc. etc.) sono largamente usati nei sistemi di alimentazione di tutti gli apparati elettronici e microelettronici. In essi tali componenti svolgono prevalentemente il ruolo di interruttori a commutazione rapida e sono chiamati ad operare ad elevata frequenza di commutazione alternandosi tra lo stato di conduzione e di interdizione. In questo secondo stato tali componenti devono sostenere tensioni elevate e, pertanto, sono esposti al rischio di essere seriamente danneggiati quando vengono colpiti da particelle energetiche così come avviene nelle applicazioni spaziali o negli esperimenti di Fisica delle Alte Energie. Infatti, il transito di una particella in regioni del dispositivo dove sono presenti elevati campi elettrici favorisce l'instaurarsi di fenomeni di brevissima durata a causa dei quali il componente viene stressato elettricamente e/o termicamente al punto di subire danni irreversibili e, in molti casi, la rottura. Il fallimento del dispositivo può interessare sia il corpo del componente originando il cosiddetto Single Event Burn-out (SEB) sia l'ossido di gate del MOSFET presente nella struttura del dispositivo per permettere il controllo dello stato di conduzione o interdizione. Il fenomeno che si manifesta in questo secondo caso viene detto Single Event Gate Rupture (SEGR).

Le lezione approfondirà, con il supporto di risultati sperimentali e di simulazioni, i principali fenomeni fisici che si manifestano durante tali fenomeni di rottura. La trattazione sarà elementare e di ampio respiro e avrà l'obiettivo di fornire agli studenti gli strumenti utili per comprendere i reali limiti operativi dei componenti di potenza da impiegare nei convertitori a commutazione destinati in particolare alle applicazioni spaziali.



**Giovedì 14 Aprile 2011 (mattina)**  
**Effetti da Evento Singolo sull'elettronica per lo spazio e per l'avionica**  
**Chairman: Alessandro Paccagnella**  
**(DEI, Università di Padova e INFN Sezione di Padova)**

---

**11.10-12.00 A Geant4 based framework for SEE prediction in electronic components**

Patrícia Gonçalves

*Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas, Portugal*

This lesson will cover the different aspects that have to be taken into account in the development of a framework for simulating SEE in electronic components, to be used in space applications.

Modern microelectronic devices are particularly sensitive to interference caused by high-energy charged and neutral particles. The free charge associated with ionization tracks caused by penetrating radiation disrupts the operation of component circuits. Single Event Effects (SEEs) may be induced by direct ionization caused by heavy ions and indirect ionization caused by protons and neutrons with energies ranging from a few MeV to some GeV. Undesirable radiation effects are very variable for different components and technologies, which together with the layout complexities on integrated circuits, makes it impossible to use theory alone to predict the effects on devices exposed to radiation.

Computational tools, developed over the past two decades in order to enable the analysis of radiation effects on memory devices, typically employ considerable simplification and approximations of the phenomena. Therefore radiation testing and simplified simulations are an integral parts for the evaluation of device and system radiation hardness. The *COmponent DEgradation Simulation tool* (CODES) was designed as a general framework in order to predict radiation degradation on electronic components when submitted to different radiation environments. CODES achieves the goal of generality because it interfaces information on the device with Geant4 based Monte Carlo application for tracking primary and secondary particles at component level. Detailed simulations are also possible by using a developed interactive tool to fit the device sensitive volume based on ground level irradiation tests: the Sensitive Volume interactive Fit Tool (SV-FIT).

**12.00-12.50 Radiation issues for interplanetary space missions and the Mars radiation environment**

Patrícia Gonçalves

*Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas, Portugal*

This lesson will cover the problem of radiation threat for interplanetary and planetary space missions and will focus on the Mars case. The threat of occurrence of a hard spectrum SEP during Cruise-Phase transfers to Mars over 400 days, combined with the associated cumulative effect of prolonged GCR exposure, poses an as yet unsolved hazard to perspective onboard personnel. On Mars particle radiation environment can vary according to the epoch concerned and the landing site selected. The "Mars Energetic Radiation Environment Models" (dMEREM and eMEREM) recently developed for the European Space Agency are being used to estimate the background Galactic Cosmic Ray (GCR) radiation and flare related solar energetic particle (SEP) events at Martian landing sites.

Particle estimations obtained using MEREM are in reasonable agreement, given the inherent differences pertaining, with complementary estimations made by using the (Langley) Heavy Ion-Nucleon Transport Code for Space Radiation/HZETRN. Both sets of results indicate that for short stays the atmosphere of Mars provides sufficient shielding at its surface to maintain annual skin and blood forming organ/BFO dose levels below currently accepted ionizing radiation exposure limits.

**Giovedì 14 Aprile 2011 (pomeriggio)**  
**Effetti da Evento Singolo sull'elettronica per lo spazio e per l'avionica**  
**Chairman: Fabio Montecassiano**  
**(INFN Sezione di Padova)**

---

**14.00-14.50 SEE induced by neutrons in electronic components: an introduction**  
Simon Platt, *University of Central Lancashire (Regno Unito)*

Single Event Effects caused by neutrons are a significant failure mechanism in electronic devices in many applications. Neutrons caused by cosmic rays are ever present in the terrestrial environment; man-made radiation fields caused by nuclear reactor and accelerator environments can also provide a threat to reliable electronics operation. This lecture will describe these environments and the indirect mechanisms by which neutron interactions can cause charge generation in a device, leading to the disruption of the device operation. Examples of some neutron SEEs observed in service will be presented.

Techniques for classifying SEE types and for quantifying SEE rates will be introduced, as well as approaches to designing systems for robustness against SEE. Some of the latest phenomena of interest will be described, including the increasing significance of multi-node effects as electronic device dimensions continue to shrink. Neutron SEE testing facilities and techniques will be described briefly, as well as standards for testing and for accommodating the consequences of neutron induced SEEs in system designs.

**14.50-15.40 Neutron SEE irradiation facilities and irradiation tests at TSL**  
**(The Svedberg Laboratory)**  
Simon Platt, *University of Central Lancashire (Regno Unito)*

This lecture will describe neutron SEE radiation test facilities at The Svedberg Laboratory (TSL) in Uppsala (Sweden) from a users' perspective.

The key characteristics of the atmospheric-like neutron beam, ANITA, will be presented, as well as those of alternative quasi-monoenergetic neutron (QMN) fields. These characteristics include neutron energy spectra, gamma and thermal neutron backgrounds, fluence rates, time structure and collimation. The beam monitoring and fluence measurement systems will be also considered. The infrastructure in the irradiation area ("Blue Hall") will be illustrated, as well as the facilities for users' control of the beam and operation of their experiments. Logistical and user support issues will be discussed, including the shipping of equipment and the control of irradiated samples, as well as travel to Uppsala and accommodation there.

Comparison will be performed among the TSL beams and neutron test facilities elsewhere, including an analysis of their fidelity to the energy spectrum of the natural neutron field due to cosmic rays. Key publications on the facilities will be identified, and example results, from measurements performed there, will be presented.

Finally, the lecture will discuss the collocated proton beam "PAULA" and will describe the developments towards a heavy ion test facility at TSL.

**Giovedì 14 Aprile 2011 (pomeriggio)**  
**Effetti da Evento Singolo sull'elettronica per lo spazio e per l'avionica**  
**Chairman: Fabio Montecassiano**  
**(INFN Sezione di Padova)**

---

**16.10-17.00 Soft-errors induced by natural radiation at ground level:  
altitude versus underground real-time testing and modeling**  
Jean-Luc Autran, *Università di Aix-Marseille (Francia)*

Soft-errors induced by natural radiation at ground level are considered as one of the most important primary limits for modern digital electronics reliability. Natural radiation includes not only elementary particles induced by cosmic rays and produced in atmospheric nuclear cascade showers (neutrons, protons, muons and pions) but also alpha particle emitters, generated from traces of radioactive contaminants present in CMOS process or packaging materials.

This lecture will review our life (i.e., real-time) testing experiments conducted since 2005 in altitude on the Altitude Single-event effect Test European Platform (ASTEP) and underground at the Underground Laboratory of Modane (LSM) to determine the natural radiation-induced Soft-Error Rate (SER) of advanced static memory (SRAM) technologies. The lecture will give an in-depth description of these two test platforms and will survey our characterization results obtained for three deca-nanometer SRAM technology nodes (130, 65 and 40 nm). Complementary results concerning the metrology of the natural radiation environment and illustrating our multi-scale/multi-physics modeling and simulation approach will be finally presented.

**17.00-17.50 Apparatı di irraggiamento per SEE indotti da neutroni a ISIS e  
misure del campo neutronico**  
Enrico Perelli Cippo  
*Dipartimento di Fisica "Giuseppe Occhialini", Università di Milano-Bicocca  
e INFN Sezione di Milano*

La sorgente di neutroni ISIS del Rutherford Appleton Laboratory (RAL) fornisce neutroni mediante un processo di spallazione, che permette di ottenere una energia massima al target di circa 800 MeV. ChipIr, una linea di fascio specifica per l'irraggiamento di componenti elettronici e studio di Effetti da Evento Singolo (SEE) nei componenti elettronici è in corso di realizzazione sulla *Second Target Station* di ISIS. Questa linea di fascio potrà operare in due modi:

- 1) un fascio collimato (*pencil beam*) di neutroni per irraggiamento selettivo di singoli componenti elettronici;
- 2) un flusso diffuso quasi-isotropico (*flood beam*) per l'irraggiamento di oggetti molto grandi o di più sistemi simultaneamente.

Verranno presentate alcune caratteristiche della linea di fascio, in particolare il sistema studiato per simulare le caratteristiche dello spettro neutronico atmosferico. Inoltre, verranno mostrate alcune misure preliminari per la misura e la caratterizzazione del fascio di neutroni di ISIS, effettuate sulla beamline VESUVIO, scelta come *testbed* data la similarità del fascio di neutroni con quello previsto di ChipIr.

**Venerdì 15 Aprile 2011 (mattina)**  
**Il progetto SPES a LNL e la radioattività ambientale**  
**Chairman: Pier Luigi Zotto**  
**(Dipartimento di Fisica, Università di Padova e INFN Sezione di Padova)**

---

**9.00-9.50 The SPES project at the INFN National Laboratories of Legnaro**  
Gianfranco Prete, *Laboratori Nazionali di Legnaro dell'INFN*

SPES (Selective Production of Exotic Species) is an INFN project to develop a Radioactive Ion Beam (RIB) facility as an intermediate step toward the future generation European ISOL facility EURISOL.

The aim of the SPES project is to provide high intensity and high-quality beams of neutron-rich nuclei to perform forefront research in nuclear structure, reaction dynamics and interdisciplinary fields like medical, biological and material sciences. The SPES project is part of the INFN Road Map for the Nuclear Physics: it is supported by the Italian National Laboratories LNL (Legnaro) and LNS (Catania). It is based on the ISOL method with an UCx Direct Target able to sustain a power of 10 kW. The primary proton beam is delivered by a Cyclotron accelerator with energy of more than 40 MeV and a beam current of 200  $\mu$ A. Neutron-rich radioactive ions will be produced by Uranium fission at an expected fission rate in the target of the order of  $10^{13}$  fissions per second. The exotic isotopes will be re-accelerated by the ALPI superconducting LINAC at energies of 10 A $\times$ MeV and higher, for masses in the region of A=130 amu, with an expected rate on the secondary target of  $10^7$  -  $10^9$  pps.

The status of the project will be reported, pointing to the development of the target design and to the facility perspectives.

**9.50-10.40 Applicazioni interdisciplinari dei neutroni nell'ambito del progetto SPES**  
Juan Esposito, *Laboratori Nazionali di Legnaro dell'INFN*

Presso i Laboratori Nazionali di Legnaro (LNL) dell'INFN sarà operativo nei prossimi anni, nell'ambito del progetto SPES sui fasci radioattivi, il ciclotrone che permetterà di accelerare protoni con energie variabili da 35 a 70 MeV e correnti di fascio fino a 700  $\mu$ A.

Tale acceleratore apre la prospettiva di poter realizzare sorgenti neutroniche con diverse caratteristiche spettrali per svolgere varie attività di ricerca. Due sono in particolare le aree di ricerca sulle quali si stanno concentrando gli studi preliminari, che trarrebbero vantaggio da tale acceleratore. Il primo, progetto FARETRA, è mirato alla realizzazione di un dispositivo in grado di riprodurre uno spettro neutronico tipico di un reattore a fissione veloce (di un sistema ADS o dei futuri reattori veloci GenIV). Tale sistema permetterebbe di eseguire misure integrali di sezioni d'urto di fissione e di cattura, sia su attinidi minori (MA), sia su frammenti di fissione (FF) a breve vita media, che sarebbe difficile condurre alle attuali facilities come n\_TOF al CERN. Il secondo, progetto LIFAN, mirato allo studio di una sorgente neutronica che riproduca sia lo spettro atmosferico continuo, sia monoenergetico (fino al limite superiore di energia fornito dal ciclotrone), per l'irraggiamento di nuovi dispositivi elettronici interessanti per lo studio dei cosiddetti Effetti da Singolo Evento (SEE). Altre possibili applicazioni sono in fase di studio.

**Venerdì 15 Aprile 2011 (mattina)**  
**Il progetto SPES a LNL e la radioattività ambientale**  
**Chairman: Pier Luigi Zotto**  
*(Dipartimento di Fisica, Università di Padova e INFN Sezione di Padova)*

---

**11.10-12.00 Produzione di radioisotopi per applicazioni mediche: aspetti generali e nell'ambito del progetto SPES**

Angelo Taibi, *Dipartimento di Fisica, Università di Ferrara*  
*e INFN Sezione di Ferrara*

Accanto alle ricerche di Fisica fondamentale, il progetto SPES prevede l'impiego del nuovo ciclotrone per la produzione di radionuclidi per la diagnostica e la terapia in medicina. Un gruppo interdisciplinare (fisici, radiochimici e medici nucleari) di varie Università ed Enti di Ricerca, ha infatti avviato un progetto di sviluppo di un Laboratorio di RADionuclidi per la MEDicina (LARAMED), mirato verso radiofarmaci di tipo innovativo e sperimentale.

I radiofarmaci sono composti chimici, contenenti uno o più nuclidi radioattivi, utilizzati dalla medicina nucleare per ottenere, in modo non invasivo, informazioni diagnostiche sui tessuti interni dell'organismo oppure per indurre un effetto terapeutico sui tessuti malati. La Tomografia ad Emissione di Positroni (PET) ad esempio, utilizza radionuclidi che decadono attraverso l'emissione di positroni da cui, in seguito ad annichilazione, si generano due fotoni che si rivelano in coincidenza per mappare la densità dell'isotopo radioattivo nell'organo. Il radionuclide più diffuso nella PET è F18 ma a causa del breve tempo di vita media (meno di due ore), per analizzare importanti processi biologici che avvengono su scale temporali più lunghe, la comunità scientifica sta studiando nuovi radionuclidi di interesse clinico.

In questa lezione verranno discussi gli aspetti fondamentali dell'utilizzo di radiofarmaci in medicina nucleare e la possibilità di ottenere radionuclidi non-standard per mezzo di ciclotroni ad alta energia (70 MeV) come quello che sta per essere installato nei Laboratori Nazionali di Legnaro dell'INFN.

**12.00-12.50 Il monitoraggio della radioattività terrestre**

Fabio Mantovani, *Dipartimento di Fisica, Università di Ferrara*  
*e INFN Sezione di Ferrara*

L'Italia è tenuta a rispettare la raccomandazione della Commissione Europea dell'8 giugno 2000 sull'applicazione dell'articolo 36 del trattato Euratom riguardante il controllo del grado di radioattività ambientale, allo scopo di determinare l'esposizione dell'insieme della popolazione. Gli elementi radioattivi che si incontrano usualmente nei terreni e nelle rocce appartengono alle catene di decadimento dell'uranio ( $^{238}\text{U}$  e  $^{235}\text{U}$ ) e del torio ( $^{232}\text{Th}$ ) e a un isotopo del potassio ( $^{40}\text{K}$ ).

Con l'obiettivo di misurare la radioattività naturale in campioni di suolo e roccia in situ e airborne sono stati sviluppati spettrometri gamma e metodologie d'indagine specificatamente dedicate alla realizzazione di carte del potenziale contenuto di radioattività. Seguendo le linee guida dell'IAEA e facendo tesoro delle esperienze pregresse di altri paesi come Stati Uniti, Svizzera, Canada ed Australia, che hanno già realizzato un monitoraggio della radioattività naturale del loro territorio, è stato possibile realizzare la prima carta della radioattività della Regione Toscana. Ciò è stato possibile implementando misure di spettroscopia gamma realizzate su migliaia di campioni di rocce e suoli con decine di migliaia di spettri gamma raccolti attraverso una campagna airborne di quasi 100 ore di volo.

Nell'ambito della stessa ricerca si è avviato il monitoraggio della Regione Veneto, co-finanziato dalla Fondazione della Cassa di Risparmio di Padova e Rovigo, e un'intensa collaborazione con geofisici nucleari interessati al contenuto di radioattività della Terra e alla stima del flusso di geo-neutrini misurati attraverso gli esperimenti Borexino e KamLAND.