

PROGETTO DI RICERCA - MODELLO A
Anno 2007 - prot. 20072CMYJH

1 - Titolo del Progetto di Ricerca

Testo italiano

Sviluppo di tecniche innovative per la rivelazione di materiale radioattivo, fissile e nucleare in container

Testo inglese

Innovative techniques for the detection of radioactive and nuclear materials in cargo containers

2 - Durata del Progetto di Ricerca

24 Mesi

3 - Area Scientifico-disciplinare

02: Scienze fisiche 100%

4 - Settori scientifico-disciplinari interessati dal Progetto di Ricerca

FIS/01 - Fisica sperimentale

FIS/04 - Fisica nucleare e subnucleare

5 - Coordinatore Scientifico

BONOMI

GERMANO

Ricercatore non confermato

28/05/1969

BNMGMN69E28D940V

Università degli Studi di BRESCIA

Facoltà di INGEGNERIA

Dipartimento di INGEGNERIA MECCANICA E INDUSTRIALE

0303715803

(Prefisso e telefono)

(Numero fax)

germano.bonomi@ing.unibs.it

* il progetto partecipa alla riserva del 10% di cui al punto 7 dell'art. 3

6 - Curriculum scientifico

Testo italiano

Curriculum scientifico

Brescia 2006-oggi: nell'aprile 2006 ho preso servizio come ricercatore presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale essendo risultato vincitore di un concorso pubblico dell'Università di Brescia. Ho continuato l'analisi dei dati dell'esperimento FINUDA in particolare sulla produzione di ipernuclei di Li-7. Tale analisi si è concretizzata con una presentazione alla IX International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (Mainz, 10-14 ottobre 2006) e con la pubblicazione di un articolo su European Physical Journal A. Durante i primi 6 mesi del 2007 ho anche partecipato alla nuova presa dati dell'esperimento FINUDA presso i Laboratori Nazionali di Frascati. Ho presentato lo stato dell'esperimento con una relazione ad invito alla "The 20th European Conference on Few-Body Problems in Physics", Pisa, 10-14 Settembre 2007.

Nell'ambito delle attività di didattica della Facoltà di Ingegneria mi sono occupato di sviluppare un sistema di simulazione per un sistema innovativo di monitoraggio di presse meccaniche mediante l'uso di raggi cosmici. Tale attività è stata finalizzata con una tesi di Laurea dal titolo "Disegno di strumenti di misura innovativi basati sulla rivelazione di raggi cosmici" e con la pubblicazione di un articolo dal titolo "Cosmic ray detection based measurement systems: a preliminary study" sulla rivista internazionale Measurement Science and Technology.

L'aver sviluppato il sistema di simulazione mediante il pacchetto GEANT4 mi ha anche permesso di collaborare su un nuovo progetto dell'Università di Padova per lo sviluppo di un prototipo che utilizzi i raggi cosmici per la rivelazione di materiale nucleare all'interno di container.

Brescia 2004-2006: dal 1° settembre 2004 ho iniziato un nuovo rapporto di lavoro con l'Università di Brescia grazie ad un Assegno di Ricerca nell'ambito del gruppo

di Fisica nucleare fondamentale e applicata del Dipartimento di Meccanica della Facoltà di Ingegneria. In tale mi sono occupato dell'esperimento FINUDA, un esperimento di fisica ipernucleare che ha sede presso i Laboratori Nazionali di Frascati. In particolare ho contribuito al perfezionamento del codice di ricostruzione "offline" e all'analisi dei dati per lo studio di spettroscopia dei nuclei ipernucleari. Mi sono inoltre occupato dello sviluppo di un sistema interattivo (basato sul linguaggio php e quindi usufruibile via web) per l'accesso alle statistiche relative alle carriere degli studenti iscritti ai Corsi di Laurea della Facoltà di Ingegneria.

Ginevra (CERN) 2002-2004: nella primavera del 2002 il laboratorio per le ricerche nucleari europeo (CERN) presso Ginevra mi ha offerto una posizione di "Fellow di ricerca" per un periodo di due anni (poi esteso a 26 mesi). In questo periodo, dal luglio 2002 sino all'agosto 2004, ho partecipato ai turni di presa dati dell'esperimento ATHENA e contribuito all'analisi dei dati che ha portato la collaborazione ATHENA alla pubblicazione su Nature di un importante risultato riguardante la prima produzione di atomi di anti-idrogeno freddi.

In particolare ho ricoperto il ruolo di responsabile del software di controllo di presa dati (on-line) e di co-responsabile di quello per la ricostruzione degli eventi di annichilazione dell'anti-idrogeno (off-line). Ho sviluppato un sistema per l'analisi dei dati definendo gli "standard" per il formato dei dati (basato sul pacchetto di analisi ROOT).

Durante la presa dati ho ricoperto il ruolo di "run coordinator" in due occasioni per un totale di 8 settimane.

Per quanto riguarda l'analisi dei dati ho concentrato la mia attenzione ai meccanismi di produzione dell'anti-idrogeno studiando la relazione tra la temperatura del plasma di positroni e la produzione stessa. Ho presentato i risultati alla conferenza internazionale Low Energy Antiproton Physics (LEAP2003), Tokyo, Febbraio 2003, risultati poi pubblicati su Physics Letter B.

Ho inoltre rappresentato l'esperimento ATHENA alla conferenza International Nuclear Physics Conference (INPC04), Göteborg, Giugno 2004 e, con due relazioni ad invito, alle conferenze Conference on Fundamental Symmetries and Fundamental Constants, Trieste, Settembre 2004 e International Conference on Exotic Atoms, Vienna, Febbraio 2005.

Pavia 2002: Dal 20 dicembre 2001 sono stato assunto dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, presso la sede di Pavia, con un contratto da ricercatore a tempo determinato, nell'ambito dell'esperimento FINUDA. Si tratta di un esperimento di fisica ipernucleare che ha sede presso i Laboratori Nazionali di Frascati, vicino a Roma. Nei primi sei mesi dell'anno mi sono occupato di sviluppare il software per il controllo delle tensioni di alcuni rivelatori dell'apparato sperimentale. Tale pacchetto è stato realizzato utilizzando il sistema LabVIEW ed è già stato utilizzato dall'esperimento nelle fasi di preparazione per la presa dati. Mediante tale software è possibile controllare le tensioni dei rivelatori dei tempi di volo (sistemi di scintillatori chiamati Tofino e Tofone) e delle camere proporzionali a filo.

Brescia 2000/2001: Nel dicembre 1999 ho vinto un concorso per un Assegno di Ricerca per lo studio dell'antiidrogeno nell'esperimento ATHENA; tale Assegno, della durata di due anni, ha avuto inizio nel febbraio 2000. Dopo tale data mi sono occupato, in qualità di co-responsabile, dello sviluppo della struttura del database per il salvataggio dei dati e del software di controllo in tempo reale (On Line) dell'apparato sperimentale. Ho inoltre partecipato ai periodi di presa dati dell'estate e dell'autunno 2000, nonché della primavera/estate 2001.

Contemporaneamente nella prima parte del 2000 mi sono occupato dell'analisi dei dati dell'esperimento OBELIX, misurando i tempi di cascata degli antiprotoni in idrogeno molecolare ed in elio e studiando il comportamento della cattura degli antiprotoni in elio a bassa densità. Ho presentato tali analisi alla conferenza Low Energy Antiproton Physics (LEAP2000), Venezia, Agosto 2000.

Brescia 1998/1999: A partire dal maggio 1998 mi sono trasferito dalla Università di Pavia a quella di Brescia (Dipartimento di Chimica e Fisica per l'Ingegneria e per i Materiali) in quanto vincitore, mediante concorso pubblico bandito dall'Ente Universitario Lombardia Orientale (EULO), di una Borsa di Studio e di Ricerca a tempo pieno triennale.

Durante la seconda parte del 1998 ho contribuito allo sviluppo del software di ricostruzione e di simulazione dell'esperimento FINUDA.

Ho iniziato inoltre l'analisi dei dati raccolti nel 1996 dall'esperimento OBELIX presso il laboratorio CERN di Ginevra. In particolare mi sono occupato dello studio delle annichilazioni antiprotone-protone e antiprotone-nuclei (idrogeno ed elio). Durante la seconda metà del 1998 e la prima metà del 1999 sono state misurate le sezioni d'urto di annichilazione per le reazioni sopracitate. I risultati sono stati presentati personalmente al LXXXV Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica (Pavia, 20-24 settembre 1999). Tale presentazione è stata premiata come migliore presentazione nella sezione "Fisica nucleare e subnucleare".

Durante la seconda parte del 1999 mi sono inoltre occupato di sviluppare presso il laboratorio CERN di Ginevra il software per il trigger e per l'acquisizione dati del rivelatore di vertice dell'esperimento ATHENA; tale esperimento ha come obiettivo la produzione di atomi di antiidrogeno per una misura diretta di CPT.

Pavia 1997/1998: Durante l'ultimo anno del Dottorato ho proseguito l'analisi del canale $\Sigma^+ K^- \Pi^+$. All'insieme iniziale di circa 30 eventi è stato aggiunto quello degli eventi provenienti dal decadimento

$\Sigma^+ K^- \Pi^+$ con $\Sigma^+ \rightarrow p \Pi^0$. (studiato da un collaboratore di E687) e l'insieme $\Sigma^+ K^- \Pi^+$ (già precedentemente pubblicato dalla collaborazione di E687). L'insieme totale di circa 70 eventi è stato utilizzato per la misura della vita media e della massa della particella $\Sigma^+ K^- \Pi^+$. I risultati sono stati presentati personalmente alla conferenza della Società Americana di Fisica 1998 Joint APS/AAPT Meeting, 18-21 aprile 1998, Columbus (Ohio). Il valore stimato per la vita media ha un errore totale minore dell'errore sulla media di tutte le precedenti misurazioni.

Durante tale anno ho inoltre partecipato alla presa dati dell'esperimento E831-FOCUS presso il laboratorio Fermilab, controllando in particolare il funzionamento del calorimetro adronico ed effettuando turni di monitoraggio e presa dati.

Contemporaneamente ho sviluppato e completato un algoritmo per il riconoscimento di sciami adronici neutri mediante l'utilizzo del calorimetro adronico e di quello elettromagnetico. Tale algoritmo ha permesso lo studio di nuovi canali di decadimento di particelle "charmte" contenenti nello stato finale un adrone neutro.

Nel novembre 1997 ho effettuato un intervento alla VII International Conference on Calorimetry in High Energy Physics tenutasi a Tucson in Arizona presentando il calorimetro adronico di E831-FOCUS e le sue prestazioni.

Pavia 1996: Durante il secondo anno di Dottorato ho concluso il progetto di simulazione del calorimetro adronico di E687, presentando i risultati alla VI International Conference on Calorimetry in High-Energy Physics (Frascati 8-14 giugno 1996).

Durante l'anno si sono resi necessari periodi di permanenza presso il laboratorio Fermilab per il completamento del software di controllo (On Line) del calorimetro adronico dell'esperimento E831-FOCUS.

Contemporaneamente ho analizzato i dati dell'esperimento E687 per lo studio del canale $\Sigma^+ K^- \Pi^+$

con $\Sigma^+ \rightarrow n \Pi^+$. Un segnale di circa 30 eventi è stato selezionato per ulteriori studi quali la misura della vita media e della massa.

Pavia 1995: Sospeso il Dottorato di Ricerca per obblighi militari (interrottosi dopo solo tre mesi) ho seguito il corso di Perfezionamento in Fisica presso l'Università degli Studi di Pavia. Durante tale periodo mi sono interessato allo sviluppo di un metodo innovativo per la simulazione del calorimetro adronico dell'esperimento E687 di Fermilab.

Nella seconda parte dell'anno ho fatto parte del Comitato Organizzatore del III International Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors.

Durante l'anno mi sono inoltre recato presso il laboratorio Fermilab per il completamento della installazione del calorimetro adronico dell'esperimento E831-FOCUS e per lo sviluppo del software di controllo (On Line) in vista del periodo di presa dati iniziato successivamente nel luglio 1996.

Pavia 1994: Durante il mio primo anno di Dottorato di Ricerca in Fisica ho perfezionato il lavoro condotto durante la tesi. Tale ricerca è stata presentata personalmente al LXXX Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica (Lecce 26 Sett.-1 Ott. 1994).

Contemporaneamente, mi sono occupato di portare avanti degli studi sugli RPC (Resistive Plate Chambers) per una loro successiva applicazione negli esperimenti E831-FOCUS (al Fermilab) e CMS (al CERN di Ginevra). Tali occupazioni hanno richiesto la mia presenza presso i laboratori Fermilab e CERN.

Pavia 1992-1993: Durante il lavoro di tesi di Laurea presso il Dipartimento di Fisica Nucleare dell'Università di Pavia mi sono interessato allo studio della produzione degli stati mesonici contenenti il quark c nell'esperimento E771 di adroproduzione presso il laboratorio Fermilab di Chicago. In particolare il lavoro si è concentrato sulle particelle J/ψ e ψ' ; rivelate mediante il loro decadimento in due muoni. Scopo principale della ricerca era quello di fare luce, attraverso lo studio delle sezioni d'urto totali e differenziali, sui meccanismi di produzione.

Tale lavoro ha richiesto la mia presenza presso il laboratorio Fermilab e presso l'Università della Virginia.

Partecipazione a scuole e presentazioni a conferenze

Presentazioni a conferenze:

- *Relazione ad invito alla "The 20th European Conference on Few-Body Problems in Physics", Pisa, 10-14 Settembre 2007.*
- *Contributo personale alla "IX International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics", Mainz, 10-14 Ottobre 2006.*
- *Relazione ad invito alla "International Conference on Exotic Atoms", Vienna, 21-25 Febbraio 2005*
- *Relazione ad invito alla "Conference on Fundamental Symmetries and Fundamental Constants", Trieste, 15-18 Settembre 2004*
- *Contributo personale alla "International Nuclear Physics Conference" (INPC04), Gothenburg, 27 Giugno - 2 Luglio 2004*
- *Contributo personale alla "Low Energy Antiprotons Physics 2003" (LEAP03), Tokyo, 3-7 Marzo 2003*
- *Contributo personale al "Workshop on Hypernuclear Physics at Daphne", Iseo 20-22 Marzo 2002*
- *Due contributi personali alla "Low Energy Antiprotons Physics 2000" (LEAP00), Venezia, 20-26 Agosto 2000*
- *Contributo al "LXXXV Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica", Pavia, 20-24 settembre 1999 (Presentazione premiata come Migliore Presentazione nell'ambito della sezione Fisica Nucleare e delle Particelle Elementari)*
- *Poster alla "XVIII Physics in Collision", Frascati 17-19 giugno, 1998*
- *Contributo personale al "1998 Joint APS/AAPT Meeting", Columbus (Ohio), USA 18-21 aprile 1998*
- *Contributo personale alla "VII International Conference on Calorimetry in High energy Physics", 9-14 novembre 1997, Tucson, Arizona (U.S.A.)*
- *Contributo personale alla "VI International Conference on Calorimetry in High energy Physics", Frascati, 8-14 giugno 1996*
- *Contributo personale al "LXXX Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica", Lecce, 29 settembre-1 ottobre 1994*

Seminari ad invito:

- *Serie di 3 seminari presso il Liceo Scientifico "E. Fermi", Salò (2006/07):
L'antimateria, Gli acceleratori di particelle, L'energia nucleare*
- *"La radioprotezione", Seminario presso "Exposicuramente", Expo sulla Cultura e Formazione sulla sicurezza nel mondo del lavoro". Edizioni 2006 e 2007.*
- *"Materia ed antimateria: il mondo simmetrico" nell'ambito dell'iniziativa "Dialoghi di scienza e filosofia - Autunno in Franciacorta" - Coccaglio (BS), 9 ottobre 2003.*
- *"Antihydrogen production in the ATHENA experiment" - Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Physique des Particules (LAPP), Annecy-le-Vieux, 23 maggio 2003*
- *"Antihydrogen production in the ATHENA experiment" - CERN EP Seminar, 24 febbraio 2003*
- *"Antihydrogen production in the ATHENA experiment" - Centre de physique des particules de Marseille, Marsiglia, 16 dicembre 2002*

Scuole:

- *Techniques and Concepts of High Energy Physics: A NATO Advanced Study Institute, St. Croix, Virgin Islands 11-22 luglio 1996.*
- *VII Seminario Nazionale di Fisica Nucleare e Subnucleare, Otranto, 19-24 settembre 1994.*

Testo inglese

Scientific curriculum

Brescia 2004-today: from 1° september 2004 I have begun a new relationship with the University of Brescia. within the group of fundamental and applied Nuclear physics of the Department of Mechanics of the Faculty of Engineering. In the first period I was involved in the development and improvement of the reconstruction code of the experiment FINUDA and in the data analysis of the data collected by the FINUDA experiment during 2003/04 data taking. In april 2006 I took service as a researcher of the Department of Mechanical and Industrial Engineering of the University of Brescia. In the new position I have continued the analysis of the data of the experiment FINUDA, in particular on the production of Li-7 hypernuclei. Such analysis has been finalized with a presentation to IX the International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (Mainz, 10-14 October 2006) and with the publication of an article on European Physical Journal A. During the first 6 months of 2007 I also participated to the new data taking of the experiment FINUDA at the INFN National Laboratory in Frascati. I have presented the experiment with an invited talk to the "The 20th European Conference on Few-Body Problems in Physics", Pisa, 10-14 September 2007.

In line with the activities of the Faculty I also developed a system for the simulation of an innovative system of monitoring of mechanical press by using of cosmic rays. Such activity has been finalized with a thesis of Bachelor and with the publication of the article "Cosmic ray detection based measurement systems: to preliminary matter study" in Measurement Science and Technology. In line with having developed such simulation tool by means of package GEANT4 I also collaborated to a project of the University of Padova for the development of a prototype that uses cosmic rays for the detection of nuclear material inside containers.

CERN 2002-2004: in July 2002 I began the research fellow at CERN deciding to continue the participation to the ATHENA experiment. In this period I was the main responsible for the Online and Offline software; I covered all aspects over the full range from data acquisition to final analysis, defining the software architecture, the data flow from RDT to ntuples, the algorithms, the data structures, quality controls and data integrity. I also acted as "run coordinator" during 2002 and 2003 data taking for a total of 8 weeks. For what concern data analysis I worked on understanding the systematics of the numerous ATHENA data. The analysis that led to the accepted publication on PLB is based on the study of the antihydrogen production dependence on the positron plasma temperature. The results were also presented at the international conference Low Energy Antiproton Physics (LEAP2003), Tokyo, February 2003.

Pavia 2002: from December 2001 until June I worked for the INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) in Pavia contributing to the FINUDA experiment. It is an hyper-nuclear physics experiment at National Laboratory in Frascati. In these 6 months I developed the control software for the high voltage of few detectors such as wire chambers and photomultipliers. This software package was written using LabVIEW and it is routinely used in the experiment.

Brescia 2000/2001: in January 2000 I started a post-doc position at the University of Brescia, working for the experiment Athena at CERN. In this period (2000/2001) I've been co-responsible for the data writing and for the Online software of the Athena experiment. I also participated to the data taking period in 2000 and 2001. In the same period I analysed other OBELIX data measuring the cascade times of antiprotons in hydrogen and helium studying the behaviour of the antiprotons when captured by hydrogen and helium atoms in gaseous targets at very low pressure. I presented these analyses with 2 talks at the conference Low Energy Antiproton Physics (LEAP2000), Venice, August 2000.

Brescia 1998/1999: from May 1998 I moved to the University of Brescia with a Fellow by Ente Universitario Lombardia Orientale (EULO). In this period I contributed to the development of the reconstruction and simulation programs of the experiment FINUDA (Frascati). I also started the analysis of a sample of data collected in 1996 by the experiment OBELIX (CERN). In particular I studied the annihilations antiprotons-protons and antiprotons-nuclei (hydrogen and helium). Annihilation cross sections for these processes were measured. I presented the results to the LXXXV Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica - Annual Italian Physical Society Meeting - (Pavia, 20-24 settembre 1999). For this talk I received the Prize for the Best Presentation in the "Nuclear and Particle Physics" section.

During last part of 1999 I also developed the software for the trigger of the experiment Athena (CERN).

Pavia 1997/1998: during the last year of the Ph.D. I completed the measurement of the mass and lifetime of the $\Sigma^+ K^- \pi^+$. New events, for a total of about 70 events, were added to the decay $\Sigma^+ K^- \pi^+ \rightarrow \Sigma^+ K^- \pi^+$. To the previous sample other 40 events were reconstructed in the channels $\Sigma^+ K^- \pi^+$ with $\Sigma^+ \rightarrow p \pi^0$ and $\Sigma^+ K^- \pi^+ \rightarrow \Sigma^+ K^- \pi^+$.

I presented the results of the analysis at the American Physical Society 1998 Joint APS/AAPT Meeting, April 18-21 1998, Columbus (USA). The value measured for the lifetime has a total error that is smaller than the average error of the other previous measurements.

During the same period I participated to the run data taking of the experiment E831-FOCUS at Fermilab.

I also developed a new algorithm for the identification of hadronic showers generated by neutral particles, using the information of the electromagnetic and hadronic calorimeters.

In November 1997 I presented the performances of the E831 hadronic calorimeter to the VII International Conference on Calorimetry in High Energy Physics (Tucson, USA).

Pavia 1996: during the second year of the Ph.D. I completed the project of the simulation of the hadronic calorimeter of E687 (Fermilab) and presented the results to the VI International Conference on Calorimetry in High-Energy Physics (Frascati June 8-14 1996). In this period I continued the development of the Online software of the E831 experiment (Fermilab).

I also started the analysis of the decay channel $\Sigma^+ K^- \pi^+$ with $\Sigma^+ \rightarrow n \pi^+$, reconstructing a sample of about 30 events.

Pavia 1995: I interrupted the Ph.D. for the military service that lasted only 2 months. Thus I joined the "Scuola di Perfezionamento in Fisica" of the University of Pavia. During this period I developed a new method for the simulation of the hadronic calorimeter of the experiment E687 (Fermilab).

During the second part of the year I acted as a member of the Organizing Committee of the III International Workshop on Resistive Plate Chambers and Related Detectors.

During this period I also participated to the completion of the installation of the hadronic calorimeter of the experiment E831 (Fermilab) and to the development of the Online software of the same experiment in view of the 1996 data taking.

Pavia 1994: during my first year of the Ph.D. I completed the work started with the Degree Thesis and I presented the results of the analysis to the LXXX Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica (Annual Italian Physical Society Meeting). In the same period I participated to the R&D of the detectors RPC (Resistive Plate Chambers) for the experiments E831-FOCUS (Fermilab) and CMS (CERN). This work required travels to Fermilab, Chicago (USA) and to CERN, Geneva (Switzerland).

Pavia 1992-1993: during the preparation of my Diploma Thesis I participated to the experiment E771 (Fermilab) and studied the decay of the J/ψ and ψ' into 2 muons. In particular I measured the total and differential cross sections. This work required travels to Fermilab, Chicago (USA) and to the University of Virginia, Charlottesville (USA).

Schools and conferences

Schools:

° VII Seminario Nazionale di Fisica Nucleare e Subnucleare, Otranto, September 19-24 1994.

° Techniques and Concepts of High Energy Physics: A NATO Advanced Study Institute, St. Croix, Virgin Islands, July 11-22 1996.

Talks:

° Invited talk "The 20th European Conference on Few-Body Problems in Physics", Pisa, 10-14 September 2007.

° Contributed talk "IX International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics", Mainz, 10-14 October 2006.

° Invited talk "International Conference on Exotic Atoms", Vienna, 21-25 Febbraio 2005

° Invited talk "Conference on Fundamental Symmetries and Fundamental Constants", Trieste, 15-18 September 2004

° Contributed talk "International Nuclear Physics Conference" (INPC04), Gothenburg, 27 June - 2 July 2004

° Low Energy Antiprotons Physics 2003, Tokyo, August 2003.

° Low Energy Antiprotons Physics 2000, Venice, August 2000 (2 talks).

° LXXXV Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica, Pavia, September 20-24 1999

° 1998 Joint APS/AAPT Meeting, Columbus (Ohio), USA, April 18-21 1998

° VII International Conference on Calorimetry in High energy Physics, November 9-14 1997, Tucson, Arizona (U.S.A.).

° VI International Conference on Calorimetry in High energy Physics, Frascati, June 8-14 1996

° LXXX Congresso Nazionale della Società Italiana di Fisica, Lecce, September 29 -October 1 1994

7 - Pubblicazioni scientifiche più significative del Coordinatore Scientifico

1. I. BODINI, BONOMI G., D. CAMBIAGHI, A. MAGALINI, A. ZENONI. (2007). Cosmic ray detection based measurement systems: a preliminary study. *MEASUREMENT SCIENCE & TECHNOLOGY*. vol. 18, pp. 3537 ISSN: 0957-0233.
2. BONOMI G., ED ALTRI AUTORI. (2006). Search for Λ^0 and Λ^0 with the $K^+ \pi^-$ reaction. *PHYSICS LETTERS. SECTION B*. vol. 640, pp. 145 ISSN: 0370-2693.
3. BONOMI G., ET AL. (2006). A study of the proton spectra following the capture of K^+ in ${}^6\text{Li}$ and ${}^{12}\text{C}$ with FINUDA. *NUCLEAR PHYSICS. A*. vol. 775, pp. 35 ISSN: 0375-9474.
4. BONOMI G., ET AL. (2006). Evidence for the production of slow antiprotonic hydrogen in vacuum. *PHYSICAL REVIEW LETTERS*. vol. 97, pp. 153401 ISSN: 0031-9007.
5. BONOMI G., ET AL. (2006). Search for laser-induced formation of antihydrogen atoms. *PHYSICAL REVIEW LETTERS*. vol. 97, pp. 213401 ISSN: 0031-9007.
6. BONOMI G., ET AL. (2005). Antihydrogen production mechanisms in ATHENA. *NUCLEAR PHYSICS. A*. vol. 752, pp. 97 ISSN: 0375-9474.
7. BONOMI G., ET AL. (2004). Antihydrogen production temperature dependence. *PHYSICS LETTERS. SECTION B*. vol. 583, pp. 59 ISSN: 0370-2693.
8. BONOMI G., ET AL. (2004). Three-dimensional annihilation imaging of trapped antiprotons. *PHYSICAL REVIEW LETTERS*. vol. 92, pp. 065005 ISSN: 0031-9007.
9. BONOMI G., ET AL. (2002). La fabbrica degli antiatomi. *LE SCIENZE*. vol. 411, pp. 56 ISSN: 0036-8083.
10. BONOMI G., ET AL. (2002). Production and detection of cold anti-hydrogen atoms. *NATURE*. vol. 419, pp. 456 ISSN: 0028-0836.

8 - Elenco delle Unità operative

Unità	Responsabile dell'Unità di Ricerca	Qualifica	Ente	Impegno
I	BONOMI Germano	Ricercatore non confermato	Università degli Studi di BRESCIA	26
II	ZUMERLE Gianni	Professore Ordinario	Università degli Studi di PADOVA	96
III	MARGAGLIOTTI Giacomo Vito	Ricercatore confermato	Università degli Studi di TRIESTE	114

9 - Abstract del Progetto di Ricerca

Testo italiano

Uno degli obiettivi della sicurezza internazionale è il contrasto del traffico illecito di materiale fissile, radioattivo e nucleare all'interno di container marittimi. La nuova normativa approvata di recente negli Stati Uniti (H.R.I, la "Implementing the 9/11 Commission Recommendation") imporrà dal luglio 2012 il controllo per tali sostanze di tutti i container imbarcati su navi verso i porti americani. I sistemi attualmente utilizzati offrono poche garanzie di rivelazione specie ove tale materiale sia schermato o trasportato all'interno di un container caricato con materiale che agisca da schermo. Il presente progetto si pone come obiettivo lo sviluppo di sistemi di rivelazione innovativi in grado di garantire un miglioramento sostanziale della capacità di rivelazione. In particolare si propone la progettazione, la realizzazione e il collaudo di prototipi relativi a due nuove tecniche: 1) la tomografia muonica per la rivelazione di materiale ad alto Z e 2) lo sviluppo di sistemi sensibili alla posizione per identificare la presenza di una debole sorgente di radiazione localizzata all'interno di un container. Lo sviluppo dei prototipi è il primo passo per la definizione di un progetto di un portale innovativo, suscettibile di produzione industriale, per l'ispezione di container nella fase di stoccaggio nei porti o al momento dell'ingresso o dell'uscita dalla zona portuale.

1) Tomografia muonica

Un apparato per la tomografia muonica consiste essenzialmente di due rivelatori di grande area capaci di misurare punto di passaggio e direzione dei muoni cosmici che li attraversano. Un rivelatore viene posizionato sopra il volume da analizzare, l'altro sotto, in modo da misurare il cambiamento di direzione del muone, che è funzione della natura e dello spessore dei materiali attraversati. Un dimostratore di tale apparato, è stato realizzato dalla Sezione INFN e dell'Università di Padova ed è operativo presso i Laboratori Nazionali di Legnaro. Nella versione attuale, il dimostratore utilizza come rivelatori di traccia due camere a deriva costruite per l'esperimento CMS del CERN. Tali strumenti presentano le caratteristiche di dimensione e precisione richieste dalla tecnica, e stanno fornendo importanti informazioni sulla potenzialità della tomografia muonica. Tuttavia si tratta di rivelatori sviluppati e creati per essere utilizzati in ambiente di ricerca, e non sono quindi ottimizzati né per una costruzione industriale, né per un utilizzo in un ambiente non protetto quale quello di porti o dogane. Il presente progetto si propone lo sviluppo e la costruzione di prototipi di rivelatori di traccia ottimizzati per la tomografia muonica, e successivamente la definizione di un portale completo mediante l'uso di un completo sistema di simulazione basato sul pacchetto GEANT4 e sulla base dei dati sperimentali raccolti con il dimostratore.

2) Rivelatori sensibili alla posizione

La rivelazione di raggi gamma e di neutroni provenienti da sorgenti di radiazione (materiale radioattivo, fissile o nucleare) contrabbandati all'interno di container è stata finora realizzata utilizzando appositi portali posti in ingresso/uscita delle zone portuali e basati su una tecnologia consolidata che impiega scintillatori plastici e contatori proporzionali. Se il materiale radioattivo, fissile e nucleare è appropriatamente schermato la rivelazione diventa però estremamente difficile in quanto il segnale è dominato dalla radiazione di fondo. Una possibile soluzione a questo problema è nell'uso di rivelatori a grande area sensibili alla posizione in grado di discriminare gamma da neutroni. Tramite l'informazione di posizione è possibile separare l'emissione proveniente da una sorgente localizzata da quella del fondo individuando la sorgente nascosta. Il progetto si propone di sviluppare dei prototipi di rivelatori innovativi caratterizzati da grande area attiva e costi limitati che possano coprire superfici estese (qualche metro quadrato o più), in grado di discriminare neutroni da gamma e di ricostruire la posizione di una sorgente localizzata all'interno del container. A tale scopo ci si prefigge di studiare due tipi di prototipo: il primo basato su mosaici di celle fotovoltaiche, il secondo basato su un utilizzo innovativo di barre di scintillatori plastici. Per quanto riguarda il primo prototipo, si valuterà l'utilizzo di celle fotovoltaiche, che sono prodotte dall'industria dell'energia solare, come rivelatori attivi di raggi gamma e di neutroni. Nel secondo caso (scintillatori plastici) verrà sviluppata, mediante appropriate simulazioni e prove sperimentali, una configurazione di rivelatore, abbinata ad un sistema di lettura e decodifica dei dati basato su algoritmi di reti neurali, in grado di distinguere tra gamma e neutroni e di identificare la posizione della sorgente che emette la radiazione. I risultati ottenuti con i due tipi di rivelatori saranno valutati in vista di una loro integrazione nel progetto finale.

Testo inglese

One of the main goals of today international security is the prevention of illicit traffic of radioactive, fissile and special nuclear material inside cargo containers. New USA rules

(H.R.I, "Implementing the 9/11 Commission Recommendation"), which will enter into force on 2012, will require the scanning of 100% of the cargo containers shipped to US against radioactive and special nuclear material. Today detection systems (radiation portals) offer few guaranties to detect such materials, in particular when accurately shielded or transported inside a container whose load can act as a radiation shield.

This project aims at developing new detection systems to effectively improve the detection capabilities. In detail the project will design, realize and test specific detector prototypes for two new techniques: 1) muon tomography for the detection of high-Z material and 2) the development of large area detection systems to localize the presence of a weak radioactive source inside the container. The development of the prototypes is the first step toward the design of an innovative portal for commercial use, to control containers in the dwell times of cargos in the ports or when entering/exiting.

1) Muon tomography

A muon tomography setup consists of two large area detectors able to measure the direction and the impact point of the cosmic ray muons crossing them. The first detector is placed above the volume to be analyzed, the second one below. In this way the change of direction of the muon, which is function of the material inside the volume between the detectors, can be measured. A demonstrator of such setup has been realized by the University and INFN of Padova and is now operational at the INFN "Laboratori Nazionali di Legnaro". This demonstrator uses two spare drift chambers of the CMS experiment at CERN. These detectors have performance needed for the technique and are delivering important information about the potentiality of the muon tomography. However these detector have been designed to be used in high energy physics experiments and are not optimized for industrial construction and utilization in non protected environment such as ports or customs. The project aims at developing and constructing tracking detectors optimized for muon tomography. By means of a complete simulation system based on GEANT4 and of experimental data collected with the demonstrator a complete portal design will also be proposed.

2) Position sensitive detectors

The detection of gamma rays and neutrons from a radioactive source (radioactive, fissile or special nuclear material) hidden inside a container is at the moment performed by specific radiation portals in entering/exiting ports. These portals utilize a well known technology based on plastic scintillators and proportional counters. When the counting rate exceeds the typical level of the environment background, an alarm is generated. This causes the problem of "false alarms", due to cargos with materials that have a higher activity (NORM). Moreover if the radioactive, fissile and nuclear material is appropriately shielded the detection is extremely difficult, since the signal is undistinguishable from the background radiation. A possible solution to this problem is the use of large area position sensitive detectors, able to discriminate between gammas and neutrons. Through the information of the position of the source it is possible to distinguish between a localized source and the background (environment or container load). The project aims at developing innovative detector prototypes with the following characteristics: large active surface, low costs so to be used for large areas (few square meters or more), possibility to discriminate neutrons from gamma, possibility to localize the position of a source inside the container. Two detector prototypes will be studied: the first one based on photovoltaic cells arrays, the second one based on an innovative use of plastic scintillators bars. For what concerns the first type of prototype, the photovoltaic cells, produced by the solar energy industry, will be tested as active detectors for gamma rays and neutrons. In the second case (plastic scintillators), a new configuration of detector, able to distinguish between gammas and neutrons, will be designed, based on experimental test and appropriate simulations. Also a new read-out and analysis system will be developed based on neural network algorithms. The results obtained with the two prototypes will be analyzed and compared, in order to integrate them in the final design of a new radiation portal.

10 - Parole chiave

n°	Parola chiave (in italiano)	Parola chiave (in inglese)
1.	RIVELAZIONE MATERIALE RADIOATTIVO E NUCLEARE	RADIOACTIVE AND NUCLEAR MATERIAL DETECTION
2.	TOMOGRAFIA MUONICA	MUON TOMOGRAPHY
3.	SICUREZZA AEROPORTUALE	CUSTOMS SECURITY

11 - Obiettivi finali che il Progetto si propone di raggiungere

Testo italiano

Il presente progetto si pone come obiettivo lo sviluppo di rivelatori per l'individuazione di materiale radioattivo, fissile e nucleare all'interno di container. In particolare si propone la messa a punto, mediante la progettazione, la realizzazione e il collaudo di prototipi, di due nuove tecniche: 1) la tomografia muonica come strumento per la rivelazione di materiale ad alto Z efficace quindi anche in caso di sorgenti schermate e 2) lo sviluppo di sistemi sensibili alla posizione per identificare la presenza di una debole sorgente di radiazione all'interno dei container. Utilizzando i risultati ottenuti dallo studio dei prototipi, ci si prefigge di giungere alla definizione di un progetto per un sistema di scanning che integri i rivelatori sviluppati in una piattaforma industriale. Alla luce della nuova normativa approvata di recente negli Stati Uniti che imporrà dal luglio 2012 il controllo per tali sostanze di tutti i container imbarcati su navi verso i porti americani, lo sviluppo di tecnologie in grado di garantire tali controlli risulta un obiettivo primario per assicurare e migliorare le attività delle strutture aeroportuali italiane. E' chiaro che le attività di ricerca qui proposte potranno contribuire al possibile sviluppo di attività in questo settore da parte dell'industria nazionale.

1) L'obiettivo degli studi per la tomografia muonica è il progetto, la costruzione e la caratterizzazione di prototipi di rivelatori di traccia ottimizzati a questo scopo. L'ottimizzazione deve considerare, oltre al raggiungimento delle prestazioni necessarie, la semplicità costruttiva, la facilità di manutenzione, la possibilità di utilizzo in un ambiente non protetto. Il disegno dei prototipi dovrà inoltre essere compatibile con l'utilizzo in un portale di ispezione adatto all'utilizzo in ambiente aeroportuale. Strumenti importanti per il raggiungimento degli obiettivi saranno il dimostratore realizzato dalla Sezione INFN e dall'Università di Padova ed ospitato presso i Laboratori Nazionali di Legnaro dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), che sarà utilizzato per la caratterizzazione del comportamento dei prototipi in condizioni realistiche, e la disponibilità di un software di simulazione adeguato, per estrapolare il comportamento di un portale completo a partire dalle caratteristiche dei prototipi.

2) Per quanto riguarda lo sviluppo di sistemi sensibili alla posizione per la rivelazione diretta di sorgenti di radiazione ionizzante all'interno di container, l'obiettivo del progetto è quello di sviluppare dei prototipi di rivelatori caratterizzati da costi contenuti, grande area attiva, capacità di coprire superfici estese (qualche metro quadrato o più), possibilità di discriminare neutroni da gamma e possibilità di ricostruire la posizione di una sorgente localizzata all'interno del container. In tal senso due sono i tipi di prototipo che ci si prefigge di realizzare: il primo (a) basato su celle fotovoltaiche, il secondo (b) basato su un utilizzo innovativo di barre di scintillatori.

(a) Recentemente sono stati pubblicati esempi di applicazioni di celle fotovoltaiche di superficie limitata (sino a 2 x 2.5 cm²) come rivelatori di particelle alfa e di frammenti di fissione. Il prototipo che ci si prefigge di realizzare ed utilizzare è una unità base delle dimensioni di circa 20 x 20 cm² ottenibile come mosaico di un numero ridotto di celle PV. Su tale prototipo verranno effettuate prove sperimentali in laboratorio per studiarne la risposta, per ottimizzare gli spessori dei convertitori plastici (per neutroni veloci) e al boro (per neutroni termici), per definire l'efficienza e per valutare la capacità del sistema di evidenziare la presenza di sorgenti radioattive in container sia durante il periodo di stoccaggio nei porti (dwell time, pari a 3-4 giorni in Europa e a 6-7 giorni negli Stati Uniti) che in tunnel di ispezione. Un sistema costituito da una matrice (array) di unità base di celle fotovoltaiche garantirebbe la sensibilità alla posizione, ovvero permetterebbe di discriminare la radiazione che ha avuto origine in una particolare regione del container da quella emessa dal materiale trasportato e dal fondo naturale.

(b) L'utilizzo di scintillatori per la rivelazione di sorgenti radioattive, è una tecnica ben consolidata. Sistemi di questo tipo che forniscono solo come informazione la frequenza di conteggio sono attualmente utilizzati nei "radiation portals" disponibili in commercio. Proponiamo di progettare e realizzare una configurazione in grado di discriminare neutroni e raggi gamma, mediante l'uso di opportuni convertitori e/o l'analisi del segnale, e di individuare la posizione della sorgente che emette la radiazione. In tale configurazione entrambe le estremità degli scintillatori saranno accoppiate tramite fibre ottiche a fototubi multianodo o in alternativa, a "silicon-photomultipliers". Contemporaneamente ci si prefigge di sviluppare un sistema di lettura e interpretazione dei dati basato su tecniche di reti neurali in grado di massimizzare la capacità del sistema di rivelare deboli segnali di radioattività.

Le prestazioni ottenibili con i due sistemi studiati nel presente progetto verranno valutate anche tenendo in conto dei costi relativi ad una possibile futura applicazione industriale, in modo da progettare moduli di rivelazione a grande area che integrando le due tecnologie possano essere utilizzati nelle diverse fasi di ispezione attualmente in uso in ambiente aeroportuale: i tunnel di ispezione per oggetti in movimento (ad esempio container in ingresso/uscita da un porto) o stazionari (container in giacenza nei piazzali).

Testo inglese

This project aims at developing new detection systems to detect radioactive, fissile and special nuclear material inside a cargo container. In details the project will design, realize and test specific detector prototypes for two new techniques: 1) muon tomography for the detection of high-Z material even when shielded and 2) the development of large area detection systems to localize the presence of a weak radioactive source inside the container. The development of the prototypes is the first step toward the design of an innovative portal for commercial use, to control containers in the dwell times of cargos in the ports or when entering/exiting. In light of the new USA rules that will require by July 2012 the scanning against such materials of 100% of the cargo containers shipped to US, the development of technologies that guarantee the controls is a primary goal to secure and improve the activities of the Italian customs. Also this research could potentially contribute to the development of the Italian industry in the security business.

1) For what concerns the muon tomography the goal of the project is the design, construction and test of tracking detector prototypes optimized for such use. The detector will have to deliver the required performances, but also meet specific requirements such as simplicity of construction, ease of maintenance, possibility of utilization in non protected environment. The detector will also have to be compatible with the installation in a customs facility. The general scheme of a new portal is thus necessary for the project of the detector prototypes. Important tools for the achievement of the goals will be the demonstrator of the Padova University and INFN (hosted in the INFN Laboratori Nazionali di Legnaro), that will be used with the prototypes in realistic conditions and the availability of a proper simulation software to preview the behavior in a complete control system.

2) For what concerns the development of position sensitive detection systems the goal of the project is the design and construction of detector prototype with the following characteristics: large active surface, low costs so to be used for large areas (few square meters or more), possibility to discriminate neutrons from gamma, possibility to localize the position of a source inside the container. Two detector prototypes will be studied: the first one (a) based on photovoltaic cells arrays, the second one (b) based on an innovative use of plastic scintillators bars.

(a) Recently examples of application of small area PV cells (up to 2 x 2.5 cm² area) as alpha particles and fission fragments detectors have been published. The aim of the project is to obtain a base unit of about 20 x 20 cm², by the usage of a limited number of photovoltaic cells. Experimental tests in laboratory will be performed to study the signal response, to optimize the thickness of the plastic (for fast neutrons) and boron (for thermal neutrons) converters, to measure the efficiency and to evaluate the capabilities of the system to detect radioactive source during the dwell time (3-4 days in Europe, 6-7 days in the States) or in entrance/exit inspection tunnels. A system with an array of photovoltaic base units will provide the required position sensitivity, that is it will allow the discrimination between the radiation from a particular region of the container and the background radiation from the environment of the container load.

(b) The use of plastic scintillators for the detection of radioactive sources, is a well-know technique. These kind of systems provide only the counting rate and are used in the radiation portals now on the market. The goal of the project is to realize a specific configuration that would be able to discriminate between gamma rays and neutrons, by the analysis of the signal and/or the usage of specific converters, and to localize the position of a radioactive source. In such configuration the two extremes of the scintillators will be coupled through optical fibers to multi-anode phototubes or to silicon-photomultipliers. Simultaneously a new read-out and analysis software will be developed based on neural network algorithms, to maximize the capability of the system to detect also weak radioactivity signals.

The performance of the prototypes will be studied and compared also taking into account costs and ease of industrial production. In this way the two technologies could be integrated in a design of a large area detection system to be used in ports and customs: inspection tunnel for cargo containers in movements (entrance/exit from a port) or standing (dwell time in ports).

12 - Stato dell'arte

Testo italiano

I controlli doganali dei container

La quasi totalità del trasporto del commercio mondiale, il 95%, avviene via nave. Si tratta di 200 milioni di container ogni anno. Di tutti i container che passano dai porti italiani solo l'1% viene controllato (dati 2005) per verificare che i beni trasportati corrispondano al contenuto dichiarato. Questa situazione aumenta il rischio che i container possano essere usati da gruppi terroristici. La Cargo Security Initiative (CSI) lanciata dall'Agenzia delle Dogane degli Stati Uniti ha determinato la nascita di programmi bilaterali con altri governi tesi a identificare container ad alto rischio, con l'obiettivo di effettuare controlli preventivi prima che essi siano caricati su navi dirette verso gli Stati Uniti. La CSI è oggi operativa nei maggiori porti italiani: Genova, La Spezia, Napoli, Gioia Tauro e Livorno. Il governo degli Stati Uniti è particolarmente preoccupato della possibilità di un attacco terroristico che utilizzi un ordigno nucleare o un'arma radiologica (ovvero in grado di disperdere radioattività nell'ambiente). L'obiettivo dell'amministrazione statunitense (H.R.I., "Implementing the 9/11 Commission Recommendation") è ora quello di estendere il controllo per la ricerca di materiale radioattivo e nucleare sul 100% dei container entro il 2012, mediante l'utilizzo di sistemi di misura sia passivi che attivi. Tali controlli dovrebbero essere effettuati nei porti di partenza, nell'ambito degli accordi bilaterali della CSI, prima di inoltrare tali container via mare verso il suolo americano.

Le tecnologie oggi in uso offrono poche garanzie di rivelazione del materiale radioattivo o nucleare specie ove esso sia schermato direttamente o trasportato all'interno di un container caricato con materiale che agisca da schermo. In questo scenario, lo sviluppo di nuovi sistemi per l'ispezione di container rappresenta un passo importante per assicurare l'export italiano verso gli Stati Uniti senza dover ricorrere in maniera massiccia a tecnologia sviluppata in USA o in altri paesi.

Rivelazione di un ordigno nucleare in un container

Tipici ordigni nucleari sono costituiti da un nucleo che contiene uranio (U) o plutonio (Pu) con una certa composizione isotopica (detta "weapon-grade"). In particolare possono contenere 12 kg di WgU (weapon-grade U), con un raggio esterno di 7 cm, o 4 kg di WgPu, con un raggio esterno di 5 cm, un riflettore di berillio spesso 2 cm, del materiale moderatore spesso 3 cm (U oppure tungsteno), uno strato di esplosivo di 10 cm e un involucro esterno di 1 cm di alluminio. La presenza di un ordigno di questo tipo in un container può essere scoperta mediante un'immagine a raggi X e rivelazione di neutroni e/o raggi gamma. La possibilità di scoprire tale ordigno o una sorgente radioattiva opportunamente schermata in un container è legata alla capacità di penetrazione dei raggi X, che a sua volta dipende dall'energia della sorgente nello scanner a raggi X. La maggior parte degli scanner utilizzati nei porti italiani usano sorgenti di bassa energia, tipicamente 300 keV, che sono in grado di penetrare fino a 6 cm di acciaio. Maggiori penetrazioni vengono raggiunte da macchine a più elevata energia, fino a 35 cm per sorgenti a 9MV. Anche in questi casi però sarebbe praticamente impossibile rivelare un oggetto metallico pesante (un ordigno nucleare o una sorgente radioattiva schermata) in un container che trasporta macchinari pesanti o rottame ferroso. In questo caso, quando gli scanner a raggi X non sono sufficienti per ispezionare il carico del container, la tomografia muonica offre la possibilità di scoprire tali oggetti nascosti.

Per quanto riguarda la rivelazione diretta della radiazione emessa da un ipotetico ordigno nucleare si deve tenere in conto che il flusso di neutroni derivanti dalla fissione spontanea degli isotopi dell'uranio è molto basso, circa 1,6 neutroni per secondo per kg, mentre gli isotopi del plutonio rilasciano circa 56000 neutroni per secondo per kg. Prendiamo in considerazione il rateo di emissione di neutroni alla superficie di quattro ipotetici ordigni: due tipi di materiale fissile (WgU oppure WgPu) e due tipi di moderatore (tungsteno o uranio impoverito). Nel caso di WgU il rateo di emissione è di 30 neutroni/s con tungsteno e di 1400 neutroni/s con uranio impoverito. Nel caso di WgPu invece in entrambi i casi (con tungsteno o uranio impoverito) il numero di neutroni emesso è molto maggiore (circa 400000 neutroni/s). Questi flussi sono maggiori di quelli per fissione spontanea a causa di effetti di moltiplicazione. D'altra parte, il rateo di raggi gamma è molto maggiore per l'uranio rispetto al plutonio, con un rateo di emissione di circa 100000 raggi gamma con una energia di 1,001 MeV. La radiazione complessiva viene comunemente attenuata all'interno del container in relazione alla natura e alla quantità dei beni trasportati. Uno scenario generalmente accettato per il traffico di materiale nucleare è infatti quello che prevede di schermare con metalli pesanti la sorgente o di contrabbandare tale materiale in un carico di materiale ferroso. In tali condizioni l'attenuazione della radiazione ionizzante potrebbe ridurre il segnale della sorgente a livelli comparabili con quelli della radioattività ambientale o del materiale definito NORM (Normally Occurring Radioactive Material) responsabile dei falsi allarmi nei portali attualmente in uso, riducendo la possibilità di rivelare il materiale illecito. Di conseguenza il segnale dall'ordigno o dalla sorgente radioattiva schermata deve essere confrontato con quello della radioattività naturale. E' chiaro che ove si realizzino sistemi atti ad identificare la radiazione ionizzante proveniente da un ordigno nucleare schermato, tali sistemi automaticamente sarebbero capaci di identificare il materiale radioattivo da utilizzarsi in una "bomba sporca", cioè un sistema a dispersione del materiale radioattivo, anche in presenza di schermature.

Una possibilità di discriminare la radiazione proveniente da un eventuale materiale illecito da quella dovuta alla radioattività ambientale (o ad un eventuale carico NORM) è data dalla ricostruzione della posizione della sorgente tramite rivelatori a grande area che possano discriminare gamma da neutroni. In questo senso la rivelazione dei neutroni rappresenta un segnale più chiaro della presenza di materiale illecito, a causa del basso livello di fondo. In ogni caso è necessario lo sviluppo di nuovi sistemi che siano in grado di separare la radiazione emessa da una debole sorgente all'interno del grande volume del container dal fondo rappresentato dalla radioattività naturale. Una linea di ricerca e sviluppo portata avanti negli Stati Uniti è la realizzazione di un "portale spettroscopico" basato su scintillatori al NaI(Tl) o su rivelatori al germanio HPGGe. I costi attuali di tali sistemi sono tali da precluderne un utilizzo massiccio tale da rimpiazzare gli attuali radiation portals. Una seconda possibilità di rivelare sorgenti nascoste è l'uso di rivelatori di grande area, sensibili alla posizione. Dalla distribuzione spaziale degli hit, questi sistemi permettono di discriminare la radiazione che ha avuto origine in una particolare regione del container da quella emessa dal materiale trasportato dal fondo naturale. In questo caso la discriminazione neutroni/gamma sarebbe di grande aiuto. In conclusione, ci sono due nuove tecniche che appaiono promettenti per lo sviluppo di nuovi sistemi di controllo per container per la rivelazione di materiale radioattivo e nucleare: la tomografia muonica e i rivelatori di grande area sensibili alla posizione.

Stato dell'arte della tomografia muonica

Ogni minuto circa 10.000 raggi cosmici (muoni) raggiungono ciascun metro quadro di superficie terrestre a livello del mare. La tomografia muonica si propone di usare queste particelle come sonde per ispezionare oggetti di grande volume, sfruttando il loro elevato potere di penetrazione. Il fenomeno fisico utilizzato è la diffusione multipla subita dalle particelle cariche nell'attraversare un materiale, che è funzione sia dello spessore attraversato, sia della sua natura, in particolare del suo numero atomico Z. Il fenomeno è descritto quantitativamente dalla cosiddetta formula di Molière [G.Z. Molière, "Theorie der Streuung schneller geladener Teilchen." Z. Naturforsch 2a 133 - 145 (1947) e Z. Naturforsch 3a 78 - 97 (1948), H.A. Bethe, "Molière's theory of multiple scattering," Phys. Rev. 89 1256 - 1266 (1953)]. In un piano che contiene la direzione della particella incidente, lo scarto quadratico medio dell'angolo di deflessione dei muoni che attraversano un dato materiale, dipende fortemente dal numero atomico del materiale. Per un muone con energia di 1 GeV che attraversa 10 cm di materiale, lo scarto quadratico medio è di 15 mrad se il materiale è alluminio, 33 mrad per il ferro, 59 mrad per il piombo e 78 mrad per l'uranio. E proprio questa dipendenza dal numero atomico che permette di identificare la presenza di materiale nucleare pericoloso, o di materiale usato per schermare le radiazioni, a partire dalla misura dell'angolo di deflessione di un campione di raggi cosmici che attraversano il container sospetto. Grazie all'alto potere di penetrazione dei muoni, questa tecnica può effettivamente essere affiancata ad altre tecniche oggi in corso di sviluppo, come le tecniche di ispezione attiva che usano fotoni di alta energia o neutroni veloci, nei casi in cui queste tecniche più convenzionali non garantiscano risultati affidabili, come per esempio nei casi di container con densità media elevata del carico trasportato. La tomografia muonica potrebbe quindi rappresentare lo strumento adeguato, oggi mancante, per l'individuazione di traffici illegali di materiale nucleare in tutti quei casi in cui le attuali tecniche di ispezione risultino non efficaci. La prova di principio della tecnica della tomografia muonica è stata pubblicata nel 2003 [K. R. Borozdin et al., "Radiographic imaging with cosmic ray muons", Nature 422 (2003) 277]. Il gruppo di Los Alamos firmatario dell'articolo ha proseguito gli studi e pubblicato i risultati in almeno due lavori successivi [W. C. Priedhorsky et al. "Detection of high-Z objects using multiple scattering of cosmic ray muons" Rev. Scient. Instr. 74 (2003) 4294, L. J. Schultz et al. "Image reconstruction and material Z discrimination via cosmic ray muon radiography" Nucl. Instr. and Meth. A 519 (2004) 687]. Il risultato principale di questi ricercatori è quello di aver realizzato un prototipo in scala (delle dimensioni di poche decine di cm) della tomografia muonica e di aver dimostrato la possibilità di utilizzare tale metodo per "radiografare" grossi volumi. Possibilità sondata anche da un altro ricercatore, per il controllo di strutture ingegneristiche [P. M. Jenneson, "Large vessel imaging using cosmic-ray muons" Nucl. Instr. and Meth. 525 (2004) 346]. In linea con tale studio nel 2005 l'Università di Uppsala ha valutato con una tesi di Laurea la possibilità di "radiografare" contenitori di materiale nucleare "spento" con i raggi cosmici (J. Gustafsson, "Tomography of canisters for spent nuclear fuel using cosmic-ray muons" (2005) UU-NF 05#08, ISSN 1401-6269). Anche uno dei gruppi proponenti ha valutato la possibilità di utilizzare i raggi cosmici per effettuare monitoraggi di strutture meccaniche di grosse dimensioni quali presse meccaniche [I. Bodini, G. Bonomi, D. Cambiaghi, A. Magalini, A. Zenoni, "Cosmic ray detection based measurement systems: a preliminary study", Meas. Scien. and Techn. 18 (2007) 3537]. Ad oggi però nessun gruppo di ricerca ha verificato sperimentalmente le potenzialità di questa nuova tecnica per strutture di dimensioni superiori a qualche decina di centimetri. In questo senso significativi progressi nella comprensione delle potenzialità e dei limiti di questa tecnica sono stati effettuati con la realizzazione, da parte dei gruppi proponenti, di un dimostratore di dimensioni reali ora installato presso i Laboratori Nazionali di Legnaro.

Stato dell'arte di innovativi sensori di radiazione

La rivelazione di raggi gamma e di neutroni è una tecnologia ben consolidata ed è realizzata in portali convenzionali usando scintillatori plastici e contatori proporzionali.

Gli attuali radiation portals che vengono utilizzati in ingresso/uscita alle strutture aeroportuali o ai valichi doganali forniscono solo una informazione molto rozza (la frequenza di conteggio) e quindi l'identificazione del materiale/persona sospetta è associato ad un aumento della frequenza di conteggio. È noto, a seguito di numerose campagne di test promosse dalla IAEA che tali sistemi soffrono del problema dei falsi allarmi dovuti ad eventuale presenza di materiale NORM nel carico. Tali sistemi potrebbero inoltre non rivelare il contrabbando di materiale radioattivo/nucleare nel caso esso fosse fortemente schermato.

In generale nei sistemi di controllo i neutroni sono convertiti da specifici materiali in particelle cariche che a loro volta sono rivelate da un sensore attivo. La natura del convertitore dipende dall'energia dei neutroni attesi. Generalmente materiali ricchi in idrogeno vengono usati per convertire neutroni veloci mediante la reazione (n,p), mentre materiali come ¹⁰B, ⁷Li, Gd vengono utilizzati per neutroni di bassa energia e neutroni termici. Tra essi il ¹⁰B offre un'alta efficienza per la conversione (n, alfa) permettendo un buon rapporto segnale/rumore anche in presenza di una alta intensità di raggi gamma. Il gruppo di Padova che partecipa al progetto ha sviluppato in passato un sistema basato su un convertitore al boro e rivelatori a gas per la rivelazione di neutroni di bassa energia all'interno del progetto DIAMINE. I rivelatori a gas non sono però indicati per le presenti applicazioni a causa della loro difficile operabilità in ambiente aeroportuale.

Proponiamo quindi di utilizzare celle fotovoltaiche prodotte dall'industria dell'energia solare come parte attiva del sistema di rivelatori. Il vantaggio di tali sistemi rispetto ai tradizionali rivelatori allo stato solido è il loro costo estremamente basso. Recentemente sono stati pubblicati esempi di applicazioni di gruppi di celle fotovoltaiche per piccole aree (fino a 2 x 2.5 cm²) [per esempio T. Ethvignon et al., "A fission-fragment-sensitive target for X-ray spectroscopy in neutron-induced fission", Nucl. Instr. and Meth. 490 (2002) 559] come rivelatori di particelle alfa e di frammenti di fissione. L'obiettivo del progetto è quello di valutare l'utilizzo di celle fotovoltaiche come rivelatori attivi di raggi gamma e di neutroni, mediante l'uso di convertitori plastici (per neutroni veloci) e al boro (per neutroni termici).

Accanto a tale tipo di prototipo se ne svilupperà anche uno basato su barre di scintillatori, lette a entrambi gli estremi e accoppiate ad un sistema di lettura innovativo che a costi contenuti, renda il rivelatore sensibile alla posizione. Questa tecnica è già stata implementata con successo in altre applicazioni del mondo della fisica nucleare e delle particelle. Raccogliendo la luce di scintillazione ai due estremi di ogni barra, si può ricavare la coordinata longitudinale d'impatto della particella rivelata dal confronto dei tempi d'arrivo dei due segnali di luce, con un'incertezza dell'ordine del centimetro. Tale obiettivo può essere conseguito utilizzando sistemi di lettura a fotomoltiplicatore multianodo che tramite fibre ottiche, possono servire simultaneamente più barre di scintillatore. Abbinando tale rivelatore ad un sistema on-line di analisi dati basato su opportuni algoritmi di reti neurali, si accresce la capacità del sistema di rivelare in modo non ambiguo anche le sorgenti più deboli, distinguendole efficientemente dai vari tipi di fondo presenti. Un approccio di questo tipo, mediante l'utilizzo di reti neurali, non è mai stato proposto o realizzato precedentemente.

Testo inglese

Customs controls of containers

Today, the global commerce moves by ship (approximately 95% of the world's cargo, about 200 million cargo containers per year). Only about 1% of all containers passing through the Italian seaport are checked (2005 data) to verify that transported goods correspond to the declared content. This situation increases the risk that containers be used by a terrorist group. After 9/11 2001, the Cargo Security Initiative (CSI) was launched by U.S. Customs and Border Protection (CBP). Under CSI, CBP has entered into bi-lateral partnership with other governments to identify high-risk cargo containers and to pre-screen them before they are loaded on vessels destined to the United States. CSI is now operational in the major Italian ports: Genova, La Spezia, Napoli, Gioia Tauro, and Livorno. The US Government is strongly concerned about the possibility of a terrorist attack in which a nuclear or a radioactive dispersing device would be used. In this respect the Homeland Security Department has implemented the Domestic Nuclear Detection Office (DNDO) which is in charge of setting all countermeasures inside the US territory against Nuclear and Radiological threat. The goal of the US administration (H.R.I., "Implementing the 9/11 Commission Recommendation") is to reach the screening of 100% of all incoming cargo containers for such threat within 2012, using passive measurements as well as active interrogation performed also outside the US border within the CSI agreement. In this scenario, the development of new tools for cargo container inspection will represent an important step to secure the Italian export towards US. Usual detection systems are based on X-ray scanners (similar to the ones used in airports to check hand baggage) or radiation portals to detect possible radiation coming from the container load. Such technologies offer few guaranties to detect radioactive material or special nuclear materials, in particular when accurately shielded or transported inside a container which load can act as a radiation shield. In this scenario, the development of new container inspection systems will represent an important step to secure and improve Italian export towards the USA, without having to buy and import technology developed in other countries.

Detection of a nuclear weapon inside a container

Typical nuclear weapons consist of a core of uranium (U) or plutonium (Pu), with a given isotopic composition (weapon-grade). In particular they can contain a core with weapon grade U or Pu (12 kg WgU (7 cm outside radius) or 4 kg WgPu (5 cm outside radius)), 2 cm thick Be reflector, 3 cm thick tamper material (either U or W), 10 cm thick high explosive and 1 cm thick Al case. The presence of a nuclear device in a cargo container could be evidenced in a X-ray image and/or by detection of neutrons and/or gamma rays.

As far as the recognition of a nuclear device or a shielded radioactive source inside a cargo container, it has to be noted that the penetration capability of the X-rays depends on the energy of the source used in the X-ray scanner. Most of the scanners deployed at the Italian port-of-entry use low energy sources (typically 300 keV) which are able to detect heavy metals up to about 10 cm of stainless steel. Large penetration are reached by using higher energy machines, up to about 45 cm for 9 MV sources. Even in case of those scanners, it will be practically impossible to detect an hidden heavy metal object (nuclear weapons or shielded source) in a container transporting heavy machinery or scrap metals.

In this case, when the standard X-ray scanners are not enough to inspect the cargo, the Muon Tomography is effective in detecting such hidden objects (see below for the state of the art of Muon Tomography). As far as the detection of the radiation emitted by an hypothetical nuclear weapon, it has to be noted that spontaneous fission of U isotopes releases only few neutrons (about 1.6 neutrons/s per kg), while Pu isotopes release about 56,000 neutrons/s per kg. We consider the rate of neutron emission at the surface of four hypothetical weapon designs (two fissile materials: WgU and WgPu with either W or depleted U as tamper material). In the case of the WgU core, the rate of neutron emission at the surface is about 30 n/s with W tamper and about 1,400 n/s with depleted U; while for WgPu with W or depleted W tamper this number is much higher (about 400,000 n/s). Note that the calculated neutron emission rates are greater than the yield from spontaneous fission due to multiplication effects. On the other side, the rate of the gamma-ray emissions is the strongest for uranium with an emission rate of some 100,000 gamma rays/s with energy of 1.001 MeV. The emitted radiation from the nuclear device will be attenuated inside the cargo container, depending on the transported goods. Consequently the signal from the device has to be compared with the background due to the natural radioactivity. In this respect the detection of neutrons represents a much clearer signature of an illicit trafficking, because of the lowest level of background compared to the gamma rays. A generally accepted scenario for the illicit trafficking of nuclear material is the one in which the source is heavily shielded by high Z metal or to contraband such material in a cargo transporting metals as iron. In such conditions, the attenuation of the ionizing radiation might reduce the signal from the source to a level comparable with natural radiation level or to the one corresponding to the NORM (Normally Occurring Radioactive Material) materials, which are responsible of the false alarms in the radiation portal currently used, reducing the possibility of detecting the illicit material. As a consequence the signal of the shielded radioactive source must be compared with the natural background radioactivity. It is clear that a system able to detect radioactive signals from a shielded nuclear weapon, will also be able to detect the signals from a shielded radioactive dispersing device.

A possibility of discriminating the radiation from a possible illicit material from the one corresponding to the natural radiation (or to a NORM cargo) is associated to the reconstruction of the position of the source by using large area detectors capable to discriminate gammas from neutrons. In this respect the detection of neutrons represents a much clearer signature of an illicit trafficking, because of the lowest level of background compared to the gamma rays.

In summary, it is mandatory to develop new systems that are capable of separating the radiation emitted from a weak source inside the large volume of the cargo container from the background represented by the natural radioactivity. One R&D line currently pursued in US is the development of the so called "spectroscopic portals" based on NaI(Tl) scintillators or even on HPGe detectors. Such system perform a detailed spectral analysis of the gamma ray radiation to detect and identify hidden material. At the moment the costs of such systems prevent them to be used to replace today radiation portals. A second possibility to detect an hidden source is the use of large area position-sensitive detectors. Such systems allows to discriminate radiation that is originating in a given voxel of the container from the one that might be emitted by the transported material and from the natural background. In this case, neutron-gamma discrimination will certainly help in discriminate the different types of hidden objects.

Summarising, two novel techniques appears to be suitable for the development of a new scanning system for cargo containers to detect radioactive and nuclear materials: muon tomography and large area position-sensitive detectors.

State of the art of muon tomography

Each minute, about 10000 muons rain down on every square meter of earth. The idea of Muon Tomography is to use this particle source as a probe to inspect large volume tomografobjects. The underlying physics phenomenon is the multiple scattering that particles experience in crossing matter; the effect is a function both of the thickness and of the material composition, in particular of the atomic number Z. The occurrence is described quantitatively by the Molière formula [G.Z. Molière, "Theorie der Streuung schneller geladener Teilchen." Z. Naturforsch 2a 133 - 145 (1947) e Z. Naturforsch 3a 78 - 97 (1948), H.A. Bethe, "Molière's theory of multiple scattering," Phys. Rev. 89 1256 - 1266 (1953)]. The root mean square of the projection on a plane of the deflection angle for muons traversing a given

material depends heavily on the atomic number of the material. For a muon of 1 GeV/c momentum traversing 10 cm of the material, the angle r.m.s. is 15 mrad if the material is aluminium, 33 mrad for iron, 59 mrad for lead, 78 mrad for uranium. Due to this sensitivity to atomic number, the Muon Tomography is suggested as a technique that can allow the inspection of suspicious cargo container looking to shielded radioactive material or Special Nuclear Material that can be used in Weapons of Mass Destruction and, more generally, for Nuclear Safeguard applications. Due to the high penetration power of muons, this technique can effectively complement other techniques nowadays under development, like the active inspection techniques using high energy photons or fast neutrons, in cases where those more conventional inspections cannot give reliable results, for instance due to the high average density of the material transported in the cargo. Once integrated with those complementary technologies, the Muon Tomography systems will provide the missing instrument for the efficient contrast of the illicit trafficking of nuclear material, to be used in all cases in which current inspection techniques are supposed to be ineffective.

The proof of principle of Muon Tomography technique has been published in 2003 by a Los Alamos research group [K. R. Borozdin et al., "Radiographic imaging with cosmic ray muons", *Nature* 422 (2003) 277]. The group published new results in two other papers [W. C. Priedhorsky et al. "Detection of high-Z objects using multiple scattering of cosmic ray muons" *Rev. Scient. Instr.* 74 (2003) 4294, L. J. Schultz et al. "Image reconstruction and material Z discrimination via cosmic ray muon radiography" *Nucl. Instr. and Meth. A* 519 (2004) 687]. They realized a working prototype of the dimensions of some tens of centimeters that proved that in principle such technique can be used to scan large volumes. The usage of Muon Tomography for large vessel imaging of engineering structures has also been proposed by another researcher [P. M. Jenneson, "Large vessel imaging using cosmic-ray muons" *Nucl. Instr. and Meth.* 525 (2004) 346]. Also correlated with muon tomography, a Diploma Thesis of the University of Uppsala proposed the "Tomography of canisters for spent nuclear fuel using cosmic-ray muons" (J. Gustafsson, UU-NF 05#08, ISSN 1401-6269). Also one of the group of the project has studied the possibility of using cosmic ray muons to monitor large mechanical structures, such as presses [I. Bodini, G. Bonomi, D. Cambiagli, A. Magalini, A. Zenoni, "Cosmic ray detection based measurement systems: a preliminary study", *Meas. Scien. and Techn.* 18 (2007) 3537]. Nevertheless, to our knowledge, no research group are at present working to a real scale prototype and proved the feasibility of systems greater than few tens of centimeters. Important progresses on the other hand have been achieved by the proponent groups with the demonstrator installed in INFN Laboratori Nazionali di Legnaro.

State of the art of innovative detection sensors

Detection of gamma-ray and neutrons is a well established technology and it is realized in conventional radiation portals by using plastic scintillators and proportional counters.

Today radiation portals used in customs facilities gives only a rough response (counting rate), thus the identification of the suspect material is associated to an increase of such counting rate. It is well known, from IAEA tests, that these systems suffer from false alarms problem, due to the presence of NORM material (Normal Occurring Radioactivity Material) in the container. Moreover these system cannot detect radioactive or nuclear material when it is strongly shielded.

Generally neutrons are converted first in charged particles by a suitable material and then the charged particles are detected by an active sensor. The nature of the converter depends on the energy of the expected neutrons. Generally hydrogen-rich materials are used to convert fast neutrons via (n,p) reactions, whereas very high reaction cross section materials (as ^{10}B , ^7Li , Gd , ...) are selected for low energy and thermal neutrons. Among them, ^{10}B offers a very high (n, α) cross section that allows to have a very good signal/background ratio even in presence of a large amount of gamma rays. B-based detectors have been extensively used in the past. In particular, the Padova group participating to the project, developed a system based on boron converter and gaseous detectors for the detection of low energy neutrons within the DIAMINE project.

On the other hand, gaseous detectors (MWPC) are also used as counters for energetic X-rays (up to 2.5 MeV) in conventional X-ray scanners by using a suitable Ta converter. Gaseous detectors are not well suited for the present application due to the difficulties of operating such systems in a seaport as mobile tools. Consequently the proposal of the project is to use low cost silicon diodes as active part of the detector system. In details, we would like to use photovoltaic (PV) cells, that are produced by solar energy industry, as radiation detectors. The advantage of such systems compared to traditional solid state detectors is their extremely low cost. Recent examples of application of small area PV cells (up to $2 \times 2.5 \text{ cm}^2$ area) [T. Ethvignot et al., "A fission-fragment-sensitive target for X-ray spectroscopy in neutron-induced fission", *Nucl. Instr. and Meth.* 490 (2002) 559] as alpha particles and fission fragments detectors have been published. The aim of the project is to explore the use of PV cells as neutron detectors by using plastic (fast neutron) and borate (thermal neutrons) converters and gamma rays by using in case heavy metal foils.

Along with this prototype, another one will be developed. It will be based on scintillator bars read from both ends and coupled to a novel read-out system that, at reduced costs, will make the detector sensitive to the position. This technique has already been used with success in other applications in nuclear and particle physics. Collecting the scintillation light from both ends of each bar and calculating the difference of the time of arrival of the light, the longitudinal coordinate of the particle impact point can be measured with a centimetre resolution. This goal can be achieved using a read-out system with multianode photomultipliers that through optical fibers can serve more than one bar.

Coupling the detector to an on-line analysis system developed with neural network algorithms, the capability of the detectors to identify and localise a weak or shielded source, discriminating it efficiently from background radiation, can be greatly improved. To our knowledge this scheme, with the use of neural network, has never been proposed or realized before.

13 - Articolazione del Progetto e tempi di realizzazione

Testo italiano

Il progetto proposto viene schematicamente articolato in quattro fasi successive, temporalmente definite:

Mesi 1-6, FASE 1 (preparazione): in questa fase verranno effettuati tutti gli studi preliminari (analisi di mercato, simulazioni, progettazioni, ecc.) per poter realizzare i prototipi e i sistemi su cui effettuare le prove sperimentali.

Mesi 7-14, FASE 2 (costruzione): in questa fase verranno costruiti e realizzati i prototipi e i sistemi utilizzando le informazioni, le simulazioni e i risultati della fase preparatoria. Contemporaneamente verranno sviluppati gli strumenti software necessari per la lettura e l'analisi dei dati che verranno raccolti nella fase 3.

Mesi 15-19, FASE 3 (utilizzo): in questa fase verranno messi a punto i rivelatori, le configurazioni, gli strumenti di lettura e analisi. Verranno inoltre condotti tutti i test necessari per la caratterizzazione e la validazione dei prototipi dei nuovi sistemi di controllo.

Mesi 20-24, FASE 4 (analisi): in questa fase verranno analizzati i dati raccolti e verranno sintetizzati i risultati ottenuti. Verranno inoltre definiti i disegni e i progetti per i nuovi sistemi di controllo nella versione industriale e commerciale.

Ecco in dettaglio i tempi e i modi delle 4 fasi per le tecnologie oggetto di questo progetto, ovvero 1) la tomografia muonica e 2) lo sviluppo di sistemi sensibili alla posizione per identificare la presenza di una debole sorgente di radiazione all'interno dei container.

1) Tomografia muonica

FASE 1 (preparazione, mesi 1-6): nella prima fase da una parte verrà sviluppato e messo a punto il software di simulazione basato sul pacchetto GEANT4, già utilizzato da un gruppo proponente per la simulazione di un sistema di allineamento per presse meccaniche [I. Bodini, G. Bonomi et al. "Cosmic ray detection based measurement systems: a preliminary study", *Meas. Scien. and Techn.* 18 (2007) 3537]. Tale strumento verrà utilizzato per l'individuazione e la progettazione di prototipi di rivelatori per raggi cosmici, ottimizzati per l'uso industriale e commerciale della tomografia muonica.

FASE 2 (costruzione, mesi 7-14): nella seconda fase i progetti sviluppati nella prima fase verranno realizzati e corredati della necessaria elettronica di lettura. Contemporaneamente verrà sviluppato il software necessario per la lettura e per l'analisi dei dati.

FASE 3 (utilizzo, mesi 15-19): durante questi 4 mesi verranno utilizzati e testati i prototipi nella configurazione finale del dimostratore, ovvero un rivelatore sopra ed uno sotto il container già presente presso i Laboratori Nazionali di Legnaro. Anche la catena di lettura e scrittura dei dati ed il software di analisi verranno messi a punto e finalizzati.

FASE 4 (analisi, mesi 20-24): in questa ultima fase verranno analizzati i dati sperimentali per caratterizzare e validare i prototipi utilizzati.

2) Sviluppo di sistemi sensibili alla posizione

Per quanto riguarda questa tecnica, in parallelo verranno portati avanti gli studi relativi al sistema che utilizza le celle fotovoltaiche e quelli relativi al sistema che utilizza le barre di scintillatore.

FASE 1 (preparazione, mesi 1-6): nella prima fase verranno effettuate le analisi delle celle fotovoltaiche disponibili sul mercato, verranno acquistati alcuni campioni, verranno definiti i test e la catena di lettura dati, che utilizzerà elettronica standard.

Contemporaneamente verranno effettuate simulazioni atte a definire la migliore combinazione dimensioni-topologia per il sistema di rivelatori a scintillazione: analisi di fototubi a multianodo, silicon-photomultipliers e scintillatori plastici disponibili sul mercato; acquisizione di campioni, di sbarre di scintillatore plastico e test di laboratorio.

FASE 2 (costruzione, mesi 7-14): in questa seconda fase si procederà all'ottimizzazione dei convertitori per la rivelazione dei diversi tipi di radiazione (neutroni

veloci, neutroni lenti, gamma) e verranno effettuati i primi test di laboratorio per definire e realizzare un modulo (unità base) di rivelazione, avente area circa 20 x 20 cm², con un mosaico di celle fotovoltaiche minimizzando il numero delle celle necessarie. Contemporaneamente per il sistema a barre di scintillatori verranno sviluppati e provati gli algoritmi neurali per la lettura dei dati. Verranno quindi realizzati i rivelatori e la catena di acquisizione dei dati.

FASE 3 (utilizzo, mesi 15-19): in questa fase l'unità base di celle fotovoltaiche verrà intensamente sottoposta a prove sperimentali atte a comprenderne le potenzialità per la misurazione di neutroni e gamma.

In parallelo ed utilizzando le stesse sorgenti radioattive, verranno provate in laboratorio le barre di scintillatore, lette da entrambe le estremità e si ottimizzerà la rivelazione dei diversi tipi di radiazione (neutroni, gamma).

FASE 4 (analisi, mesi 20-24): in questa fase i dati verranno analizzati, si confronteranno i dati provenienti dall'unità base delle celle fotovoltaiche con quelli provenienti dal sistema a barre di scintillatori e si giungerà alla progettazione del sistema di misura che, integrando i due tipi di rivelatori, potrebbe essere utilizzato sia per la costruzione di tunnel di ispezione all'ingresso-uscita della zona portuale, sia per misure di lunga durata nei periodi di stoccaggio dei container nei porti (dwell time). Contemporaneamente si analizzeranno i dati ottenuti con gli algoritmi di reti neurali per sondare le capacità di migliorare la sensibilità di rivelazione del sistema.

Testo inglese

The project will be schematically divided in four phases:

Months 1-6, Phase 1 (preparation): in this phase all the preliminary tasks will be completed (simulations, designs, market analysis, etc. etc.) for all the prototypes and the systems for performing the experimental tests.

Months 7-14, Phase 2 (construction): in this phase all the prototypes and systems will be realized. Simultaneously the software tools needed for the read-out and the analysis of the data will be prepared.

Months 15-19, Phase 3 (testing): in this phase all the detectors, configurations, read-out and analysis tools will be setup. The experimental tests with the detector prototype will be performed.

Months 20-24, Phase 4 (analysis): in this phase the data collected in Phase 3 will be analyzed and the results obtained. A schematic design of a new commercial control system based on the prototypes under study will be prepared.

Here's in detail the four phases for the development of the technologies of the project:

1) Muon tomography

Phase 1 (preparation, months 1-6): in the first phase the tomography simulation software will be developed and tested. It will be based on the GEANT4 package. The tools will be used to identify and design the prototypes of the tracking detectors, optimized for commercial systems.

Phase 2 (construction, months 7-14): in this second phase, the design of the prototypes will be constructed, along with the necessary electronics. At the same time the read-out and analysis software will be prepared.

Phase 3 (testing, months 15-19): in this phase the prototypes realized in Phase 2 will be used and tested in the final configuration of the demonstrator, that is one detector above and another below the container already present at the INF Laboratori Nazionali di Legnaro. The read-out and writing of the data, along with the data analysis software will be completed and used.

Phase 4 (analysis, months 20-24): in this last phase the experimental data will be analyzed to validate and characterize the detector prototype.

2) Position sensitive detector systems

Phase 1 (preparation, months 1 - 6): in the first phase preliminary tasks will be performed, that is choice of geometry and of the basic structure of detection module, analysis of the commercially available PV cells, procurement of samples and read-out tests; definition of the read-out chain using standard electronics; optimization of converters for the detection of the different type of radiation (fast n, slow n, gamma).

Simulations in order to define the best dimensional-topological choice for the system of scintillation detectors; analysis of multi-anode phototubes, silicon-photomultipliers and plastic scintillators available on the market; acquisition of samples, slabs of plastic scintillators and lab-tests.

Phase 2 (construction, months 7-14): in this phase the choice and thickness of the converters will be optimized for the different kind of radiation (fast neutrons, thermal neutrons, gammas). The first tests to define the photovoltaic cell detector base unit, with an area of about 20 x 20 cm², will be performed.

Simultaneously the Trieste unit will develop and test of the neural-networks based on-line analysis algorithms, will perform lab-tests in order to optimize the detection of various kind of radiation (neutrons, gamma-rays) and will construct the plastic-scintillator detection system.

Phase 3 (testing, months 15-19): in this phase the photovoltaic cells base unit will be extensively tested to study all the potentiality for the detection of neutrons and gammas. In parallel and using the same radioactive sources, also the scintillator bars will be tested, reading them from both ends, to optimize the detection neutrons and gammas.

Phase 4 (analysis, months 20-24): in this phase the data will be analyzed. The results of the photovoltaic cells base unit and of the scintillator bars system will be compared. The two kind of detectors will thus be considered for the schematic design of a new control system, such as an inspection tunnel for entrance/exit of containers in the ports, or for long period controls, such as during long stays in the ports (dwell times). Also the data from the neural network algorithms will be analyzed to study the capabilities of improving the sensitivity of the detection system.

14 - Ruolo di ciascuna unità operativa in funzione degli obiettivi previsti e relative modalità di integrazione e collaborazione

Testo italiano

Sottolineiamo come le Unità di Ricerca interessate al presente progetto abbiano in passato collaborato tra loro sia in programmi di ricerca di fisica fondamentale che applicata.

Ruolo dell'unità di Brescia

L'unità di Brescia, in stretta collaborazione con l'unità di Padova, sarà coinvolta nello sviluppo e nello studio del sistema di tomografia muonica. In particolare si occuperà del pacchetto di simulazione e degli strumenti di acquisizione e di analisi dei dati. In altre parole si farà carico degli aspetti software del sistema. Per quanto riguarda la simulazione verrà utilizzato il pacchetto GEANT4, sviluppato presso il CERN di Ginevra. Si tratta di un complesso sistema di strumenti di simulazione che permettono di riprodurre dettagliatamente le interazioni delle particelle (come i raggi cosmici) con la materia, ovvero, una volta definita la geometria del sistema da simulare, con i rivelatori, con il container e con il carico del container del sistema per la tomografia muonica. I componenti del gruppo hanno già sviluppato strumenti di questo genere sia nell'ambito degli esperimenti di fisica sperimentale e fondamentale (vedi esperimenti ATHENA, FINUDA, OBELIX, E831-FOCUS, ecc.) che nell'ambito di ulteriori applicazioni dei raggi cosmici [vedi I. Bodini, G. Bonomi et al. "Cosmic ray detection based measurement systems: a preliminary study", Meas. Scien. and Techn. 18 (2007) 3537]. L'unità collaborerà inoltre con l'unità di Padova per lo sviluppo del sistema di acquisizione e di analisi dei dati provenienti dai prototipi dei rivelatori realizzati per la tomografia muonica. Contribuiranno quindi all'analisi dei dati per il raggiungimento degli obiettivi previsti e alla definizione del progetto per la realizzazione di un sistema industriale commerciale.

Ruolo dell'unità di Padova

L'unità di Padova sarà impegnata sia nello sviluppo della tomografia muonica, in collaborazione con l'unità di Brescia, sia nello sviluppo di sistemi di rivelatori sensibili alla posizione, in collaborazione con l'unità di Trieste. In particolare per quanto riguarda a tomografia muonica, si occuperà di individuazione, progettare e realizzare i rivelatori prototipali di raggi cosmici, ottimizzati per l'uso industriale e commerciale della tomografia muonica. Dopo aver costruito tali rivelatori, si occuperà di utilizzarli nel dimostratore in funzione presso i Laboratori Nazionali di Legnaro per poi analizzare i dati e provvedere alla definizione del progetto per la realizzazione di un sistema industriale e commerciale.

Per quanto riguarda i rivelatori sensibili alla posizione effettuerà le necessarie analisi di mercato per l'acquisto delle celle fotovoltaiche. Una volta acquistate tali campioni, verranno definiti dei test di lettura e verrà definita la catena di lettura mediante l'uso di elettronica standard. Mediante simulazioni e test in laboratorio si occuperà quindi dell'ottimizzazione dei convertitori per la rivelazione dei diversi tipi di radiazione (neutroni veloci, neutroni lenti, gamma). Terminata la fase di preparazione e verifica si occuperà quindi di realizzare un modulo (unità base) consistente in un mosaico di celle fotovoltaiche delle dimensioni complessive di circa

20 x 20 cm². Si farà quindi carico di sottoporre tale modulo alle necessarie prove sperimentali e di misurare l'efficienza per neutroni e gamma. In questa fase l'unità collaborerà strettamente con l'unità di Trieste, che in contemporanea avrà realizzato un sistema di rivelazione che utilizza barre di scintillatore, per analizzare i risultati ottenuti, anche confrontando i due sistemi, ed arrivare alla definizione di un progetto per un sistema di scanning da utilizzare nei porti.

Ruolo dell'unità di Trieste

L'unità operativa di Trieste si dedicherà allo studio, sviluppo e test di un sistema di rivelazione di materiale radioattivo in container, basato sull'uso di scintillatori plastici e abbinato ad un sistema di lettura e interpretazione dei dati che utilizzerà tecniche di reti neurali. Si inizierà con uno studio di simulazione, allo scopo di definire al meglio i parametri dimensionali, topologici e di efficienza di ogni singola parte costitutiva della struttura di rivelazione, per garantire un'ottimale efficienza globale nella rivelazione di materiali radioattivi celati in container, tramite misurazioni prolungate, in grado di identificare separatamente neutroni e gamma. Unitamente a ciò si realizzerà un prototipo di sistema di rivelazione, costituito da sbarre di scintillatore plastico accoppiate otticamente ad entrambe le estremità a fototubi multianodo e in alternativa, a silicon-photomultipliers. Parallelamente si svilupperanno gli algoritmi neurali che dovranno correlare e interpretare i dati. I test applicativi in laboratorio verranno effettuati anche assieme all'unità di Padova che svilupperà i rivelatori basati su celle fotovoltaiche, onde verificare la complementarità delle due tecnologie.

Testo inglese

We would like to stress that the Research Units of the present project have already collaborated both in research and applied physics programs.

Brescia research unit

The research unit of Brescia, in collaboration with the unit of Padova, will study and develop the muon tomography technique. In particular it will be in charge of the software aspects of the project, such as the simulation, the data acquisition and the data analysis packages. For what concerns the simulation software it will be developed using the GEANT4 toolkit, delivered by the CERN laboratory in Geneva. It is a complete system of tools that reproduces the interaction of particles (such as cosmic-ray muons) with matter. It also allows the definition of the detailed geometry of the system (material dimensions and composition). Given a cosmic-ray muons generator that reproduce the real world muons flow, the interactions of muons with the detectors and the container (including its load) can be studied in great details. The components of the group have great experience with such tools both in experimental and nuclear physics experiments (such as ATHENA, FINUDA, OBELIX, E831-FOCUS, etc. etc.) and in other applications of cosmic-rays [I. Bodini, G. Bonomi et al. "Cosmic ray detection based measurement systems: a preliminary study", Meas. Scien. and Techn. 18 (2007) 3537]. The research unit will also collaborate with the unit of Padova to develop the data acquisition and data analysis system for the detector prototypes of the muon tomography. It will finally contribute to the data analysis to meet the objectives of the project, that is the design of a muon tomography system for industrial and commercial use.

Padova research unit

The Research Unit in Padova will work both on the Muon Tomography, in collaboration with the Brescia Unit, and on the Innovative Radiation Sensors, in collaboration with the Trieste Unit. In the Muon Tomography activity the Research Unit will be responsible for the design of the track detector prototypes optimized for this application and for their test in laboratory and by means of the Muon Tomography Demonstrator. After the construction of the prototypes, it will be in charge of testing them with the demonstrator of the Laboratori Nazionali di Legnaro. The results of the tests will be analyzed and a schematic design for a commercial system will be prepared.

For what concern the position sensitive detectors, it will investigate the market to buy the most appropriate photovoltaic cells. Then the read-out chain will be implemented and tested using standard electronics. Thanks to simulations and experimental tests in laboratory the converters for the detection of the different types of radiation (fast and thermal neutrons, gammas) will be optimized. Once the preliminary phase will be completed a base unit, composed of an array of few photovoltaic cells for a total area of about 20 x 20 cm², will be constructed. This base unit will be extensively tested to evaluate the efficiency for the detection of neutrons and gammas. In this phase it will collaborate strongly with the Trieste unit, than in parallel will have realized the prototype with scintillator bars. The results will be compared and the two technologies possibly integrated in a new scanning system for ports.

Trieste research unit

The operating unit of Trieste will design, develop and test a detection system for radioactive materials hidden in containers. This system will use plastic scintillators and will take advantage, for the treatment and interpretation of the data, of the neural networks techniques. As a first step simulations will be performed in order to define the best dimensional-topological and the efficiency requirement for each part of the detector system, to allow the best overall detection efficiency for radioactive materials inside cargo containers. The results will be used to build a prototype with scintillator bars, which ends are coupled optically to multianode phototubes or to silicon-photomultipliers.

In parallel the neural network algorithms will be developed. Common tests in laboratory with the operating unit of Padova, that will develop the detectors based on photovoltaic cells, will be carried out, in order to verify the complementarity of the two technologies.

15 - Risultati attesi dalla ricerca, il loro interesse per l'avanzamento della conoscenza e le eventuali potenzialità applicative

Testo italiano

I risultati attesi dalla ricerca coincidono con il raggiungimento degli obiettivi previsti e potranno rappresentare un anello importante in un processo di trasferimento tecnologico.. In particolare ci si attende di definire un progetto per un sistema di rivelatori in grado di individuare materiali radioattivi, fissili e nucleari all'interno di container. Mediante opportune simulazioni e lo sviluppo, la realizzazione e il collaudo dei prototipi di rivelatori ci si aspetta di poter definire importanti parametri di tale progetto, quali la configurazione geometrica, la struttura meccanica, la disposizione e integrazione dei vari rivelatori, le condizioni e i luoghi di utilizzo (tunnel di ispezione all'ingresso-uscita della zona portuale e/o sistema per misure di lunga durata nei periodi di stoccaggio dei container nei porti), i costi, le procedure di manutenzione ecc. ecc. Il progetto intende a tal fine utilizzare tecniche e metodologie ben note nel campo della fisica nucleare sperimentale per ottenere un obiettivo la cui importanza risiede completamente nell'applicazione finale. Ci si propone quindi di approfondire dal punto di vista tecnologico-applicativo tecniche già utilizzate in campo scientifico ponendo così le premesse per il trasferimento delle conoscenze al mondo produttivo.

Per quanto riguarda le potenzialità applicative, esse sono insite nella natura stessa del progetto. Un risultato positivo della ricerca porterebbe alla definizione di un progetto per un sistema da utilizzarsi in porti o in dogane ed aprirebbe la via per la ricerca di un soggetto industriale interessato. Il raggiungimento degli obiettivi prefissi è di notevole importanza alla luce della nuova normativa approvata di recente negli Stati Uniti che imporrà dal luglio 2012 il controllo per sostanze radioattive e nucleari di tutti i container imbarcati su navi verso i porti americani. E chiaro che la ricerca proposta potrà contribuire al possibile sviluppo di attività in questo settore da parte dell'industria nazionale.

Testo inglese

The expected results match with the attainment of the goals of the projects. They will represent an important step for a process of technology transfer. The main expected result of the project is the design of a system of detectors able to uncover radioactive, fissile and nuclear materials inside a container. By means of specific simulations and the development and test of detector prototypes the projects aims at defining important parameters of the design such as geometrical configuration, mechanical structure, integration of the detectors, conditions and places of use (inspection tunnel for entrance/exit from ports and/or long period controls during dwell times), costs and maintenance procedures, etc. etc. The project aims at utilizing techniques and methodologies well known in experimental nuclear physics to meet the goals, which importance is in the definition of the application for the commercial world. For what concerns the application potentialities, they coincide with the nature of the project. A positive result of the research will define the design of a system to be used in ports or customs and will open the door for industries interested in the business.

The attainment of the goals is of great importance since a new USA rule which will enter into force on 2012, will require the scanning of 100% of the cargo containers shipped to US against radioactive and special nuclear material. It is clear that the proposed research will contribute to the development of these activities by the national industry.

16 - Elementi e criteri proposti per la verifica dei risultati raggiunti

Testo italiano

I test sperimentali che il progetto intende effettuare sui prototipi di rivelatori permetteranno di verificare in maniera chiara e inequivocabile l'effettivo raggiungimento degli obiettivi.

Per quanto riguarda la tomografia muonica due saranno gli elementi di verifica. Da un lato la definizione di procedure costruttive dei prototipi di rivelatori per raggi cosmici compatibili con una produzione commerciale ripetitiva, dall'altro la capacità dei prototipi progettati e costruiti con questo criterio di fornire le prestazioni tipiche dei rivelatori a deriva utilizzati per attività di ricerca di base. Tali prestazioni saranno verificate in condizioni reali utilizzando il dimostratore esistente presso i Laboratori di Legnaro.

Allo stesso modo per quanto riguarda lo sviluppo di sistemi sensibili alla posizione, sia per quelli dotati di celle fotovoltaiche che quelli a barre di scintillatori, l'elemento di verifica sarà la capacità dei prototipi realizzati di evidenziare la posizione di una debole sorgente radioattiva, di intensità comparabile con il fondo ambiente, posta in laboratorio fino ad una distanza di circa 2 metri e di valutare i tempi di misura necessari e la precisione raggiungibile. Sulla base di tali dati sarà possibile definire, anche utilizzando simulazioni e test sperimentali, una curva di sensibilità per il materiale radioattivo/nucleare nascosto all'interno di container caricati con i tipici materiali trasportati (sostanze alimentari, ferrose, ecc. ecc.).

Testo inglese

The experimental tests that the project will perform with the detector prototypes will allow a clear verification of the achievement of the results.

For what concerns muon tomography two elements of validation will be available: first, the compatibility of the design and construction procedure of the detector prototypes with a commercial production and second, the capability of the prototypes built with such constraints to meet the requirement of the technique. The performances will be verified in realistic conditions using the demonstrator at Laboratori Nazionali di Legnaro.

For what concerns position sensitive detector systems, both with photovoltaic cells and with scintillator bars, the element of validation will be the ability of the prototypes to identify the position of a weak radioactive source, of intensity comparable with the natural background, at a distance of 2 meters. In this way the needed time intervals and the achievable precision will be measured. From such results and from simulations, it will be possible to define the detector sensitivity for radioactive and nuclear material in container hidden inside typical load (food, iron, etc. etc.).

17 - Mesi persona complessivi dedicati al Progetto di Ricerca

		Numero	Impegno 1° anno	Impegno 2° anno	Totale mesi persona
Componenti della sede dell'Unità di Ricerca		8	53	53	106
Componenti di altre Università /Enti vigilati		7	46	46	92
Titolari di assegni di ricerca		2	13	13	26
Titolari di borse	Dottorato	1	6	6	12
	Post-dottorato	0			
	Scuola di Specializzazione	0			
Personale a contratto	Assegnisti	1	6	10	16
	Borsisti	0			
	Altre tipologie	2	14	22	36
Dottorati a carico del PRIN da destinare a questo specifico progetto		0	0	0	0
Altro personale		2	13	15	28
TOTALE		23	151	165	316

18 - Costo complessivo del Progetto articolato per voci

Voce di spesa	Unità I	Unità II	Unità III	TOTALE
Materiale inventariabile	3.000	0	0	3.000
Grandi Attrezzature	0	0	0	0
Materiale di consumo e funzionamento	6.500	30.000	53.000	89.500
Spese per calcolo ed elaborazione dati	0	0	0	0
Personale a contratto	45.000	45.000	45.000	135.000
Dottorati a carico del PRIN da destinare a questo specifico progetto	0	0	0	0
Servizi esterni	0	0	0	0
Missioni	4.500	5.000	15.000	24.500
Pubblicazioni	0	0	0	0
Partecipazione / Organizzazione convegni	2.000	0	0	2.000
Altro	0	0	0	0
TOTALE	61.000	80.000	113.000	254.000

19 - Prospetto finanziario suddiviso per Unità di Ricerca

	Unità I	Unità II	Unità III	TOTALE
a.1) finanziamenti diretti, disponibili da parte di Università/Enti vigilati di appartenenza dei ricercatori dell'unità operativa	0	0	0	0
a.2) finanziamenti diretti acquisibili con certezza da parte di Università/Enti vigilati di appartenenza dei ricercatori dell'unità operativa	18.500	24.000	34.000	76.500
b.1) finanziamenti diretti disponibili messi a disposizione da parte di soggetti esterni	0	0	0	0
b.2) finanziamenti diretti acquisibili con certezza, messi a disposizione da parte di soggetti esterni	0	0	0	0
c) cofinanziamento richiesto al MUR	42.500	56.000	79.000	177.500
TOTALE	61.000	80.000	113.000	254.000

(per la copia da depositare presso l'Ateneo e per l'assenso alla diffusione via Internet delle informazioni riguardanti i programmi finanziati e la loro elaborazione necessaria alle valutazioni; D. Lgs, 196 del 30.6.2003 sulla "Tutela dei dati personali")

Firma _____

Data 30/10/2007 ore 15:49