

DOSIMETRIA NEUTRONICA

- ❖ Applicazioni mediche**
- ❖ Applicazioni ambientali**

A. Zanini: INFN sez. Torino

F. Fasolo, E. Durisi, L. Visca: Dip. Fis. Sper., Università degli Studi di Torino

C. Ongaro: OTTO s.r.l.

U. Nastasi: Ospedale S. Giovanni Vecchio A. S.

K.W. Burn: ENEA ERG- SIEC Bologna

M. Pelliccioni: INFN, LNF

L. Tommasino: APAT

Dosimetria neutronica:

I neutroni hanno un'elevata efficacia biologica relativa (RBE).

L'ICRP 60 (1991) e le successive raccomandazioni radioprotezionistiche (ICRP 74 (1995) direttiva Euratom 97) hanno stabilito che:

1. le sorgenti naturali (come i raggi cosmici) vanno inserite tra le esposizioni di tipo professionale (particolare attenzione per le basse dosi)
2. l'obbligo della protezione da esposizione indesiderata per il paziente durante trattamenti medici

Types of radiations and energy intervals	Weighting factors of radiation, W_R
Photons, all energies	1
Electrons, all energies	1
Muons, all energies	1
Neutrons energies	
< 10 keV	5
10 – 100 keV	10
100 keV – 2 MeV	20
2 – 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protons	5
Alphas, fission fragments, heavy nuclei	20

Raccomandazioni radio-protezionistiche

Soggetti	Esposizione ICRP60 (mSv/anno)	Vecchi limiti di esposizione	Valutazioni dosimetriche
Popolazione	<1	<5	Nessuna
Lavoratori esposti categoria A	<100 in 5 anni di cui al max. 50 in 1 anno	<250 in 5 anni	Valutazione sistematica della dose individuale
Lavoratori esposti di categoria B	<6		Sorveglianza fisica dell'ambiente di lavoro

Occupazione	Esposizione annua (mSv/anno)
Addetti centrali nucleari	4.76
Tecnici di radiografia industriale	3.34
Personale reparti medicina nucleare	1.22
Piloti e assistenti di volo	1-5

da Health Protection Branch., "1998 Report on Occupational Exposures in Canada", Environmental Health directorate

Art.42 Consiglio direttivo Euratom (13/05/1996):

Devono essere effettuate campagne di misura per gli equipaggi esposti a più di 1mSv/anno.

Grandezze fondamentali in dosimetria

Dose assorbita D (Gy= J/Kg)

$$D = \frac{d \overline{\varepsilon}}{dm}$$

Energia media depositata nel volume elementare di massa dm

Dose equivalente (Sv)

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

T = tessuto o organo

D_{T,R} = dose assorbita dall'organo

w_R = fattore di qualità della radiazione

R = tipo di radiazione

Dose efficace (Sv)

$$E = \sum_T w_T H_T$$

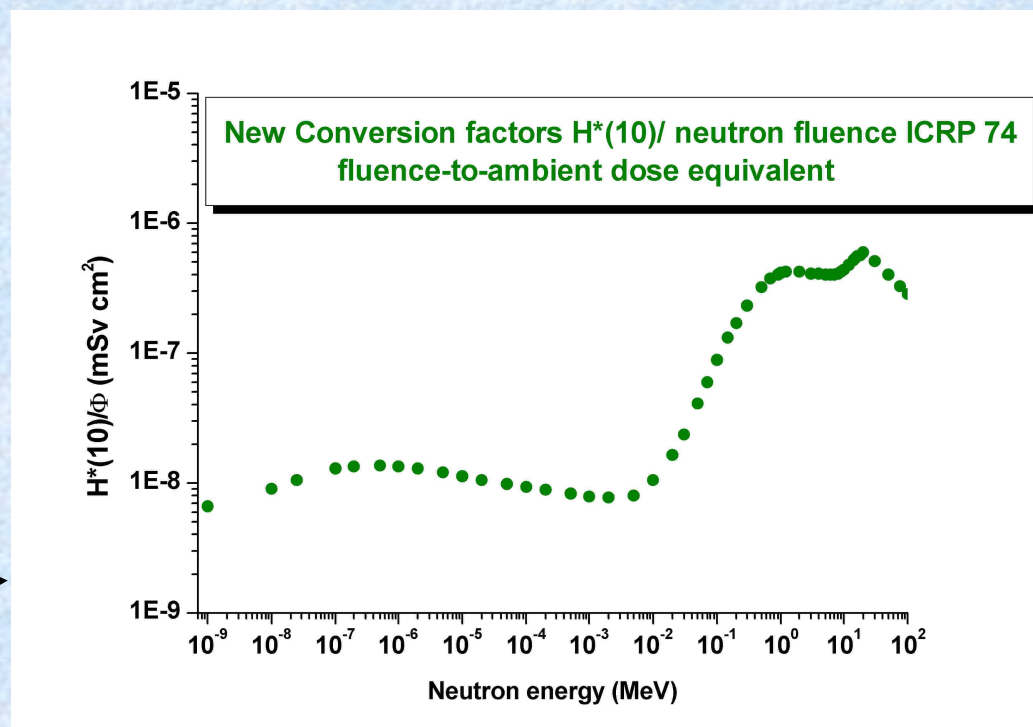
H_T = dose equivalente

w_T = peso per il tessuto o organo

Problemi della dosimetria neutronica

Misure sperimentali

- Necessità di misurare gli spettri energetici per applicare correttamente i fattori di conversione flusso -dose



- Elevato flusso gamma

- Elevati campi elettrici

- Ampio range energetico

Acceleratori per radioterapia

Esposizione a raggi cosmici

Dosimetria neutronica in campo medico

- **Dose neutronica indesiderata in trattamenti radioterapici con LINAC dovuta a fotoreazioni γ,n (GDR)**

Collaborazioni: **MaxLab** (Lund, Sweden), **University of Glasgow** (UK), **Karolinska Institute** (Sw), **Ospedale S. Giovanni Vecchio** (Torino), **IRCC** (Candiolo), **Ospedale di La Fe**, Valencia (Es), **Hopital La Pitie Salpetriere**, Parigi (Fr)

- **BNCT: spettrometria e dosimetria neutronica reattori TAPIRO (Casaccia) e TRIGA MARK (Pavia)**

Collaborazioni: **ENEA ERG-SIEC** Bologna, **INFN Milano**, **ENEA Casaccia**

- **BNCT: studio di nuove sorgenti neutroniche utilizzabili in ambito ospedaliero**

- **Sorgenti compatte (D-D e D-T)**

Collaborazioni:

- Lawrence Berkeley National Laboratory

- Ospedale S. Giovanni Vecchio A. S.(To)

- EUROSEA (To)

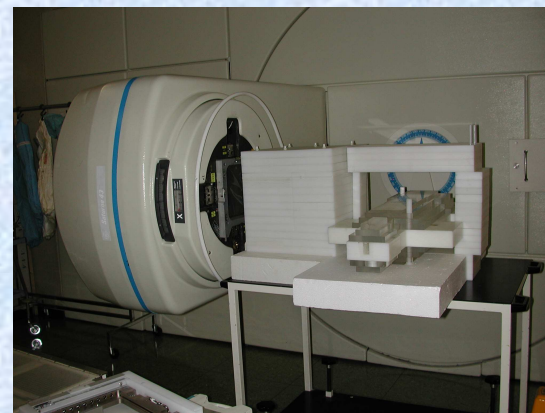


- **γ, n da LINAC con collimatori**

Collaborazioni:

- INFN-Trieste

- Ospedale Gemelli, Roma



Pubblicazioni in corso relative agli argomenti citati:

I. Akkurt, J.-O. Adler, J.R.M. Annand, K.W. Burn, F. Fasolo, K. Hansen, C. Ongaro, A. Reiter, G. Rosner and A. Zanini, **"Test of a bubble passive spectrometer for neutron detection in mixed radiation fields"**, accettato per la pubblicazione su Physics in Medicine and Biology.

A. Zanini, E. Durisi, F. Fasolo, C. Ongaro, L. Visca, U. Nastasi, K.W. Burn, G. Scielzo, J. O. Adler, J.R.M. Annand and G. Rosner, **"MC simulation of the photoneutron field in LINAC radiotherapy treatment with different collimation systems"**, accettato per la pubblicazione su Physics in Medicine and Biology.

A. Zanini, F. Fasolo, E. Durisi, L. Visca, C. Ongaro, U. Nastasi, K.W. Burn and J.R.M. Annand, **"Neutron spectra in a tissue equivalent phantom during photon radiotherapy treatment by LINACS "**, da pubblicare sugli atti del congresso NEUDOS, Delft, Ottobre 2003, Radiation Protection Dosimetry.

G. Rosi, G. Gambarini, V. Colli, L. scolari, O. Fiorani, A. Perrone, A. Zanini and P. Colautti, **" Dose measurement in the thermal column of TAPIRO reactor"** da pubblicare sugli atti del congresso NEUDOS, Delft, Ottobre 2003, Radiation Protection Dosimetry.

G. Gambarini, C. Colombi, V. Colli, L. Scolari, L. Pirola, A. Zanini, G. Rosi, K.W. Burn and C. Petrovich, **"In-phantom profiling of absorbed dose in bnct: intercomparison of different experimental methods and calculations"** da pubblicare sugli atti del congresso NEUDOS, Delft, Ottobre 2003, Radiation Protection Dosimetry.

A. Zanini, E. Durisi, F. Fasolo, C. Ongaro, U. Nastasi, K.W. Burn, G. Scielzo and M. Fabris, **" A dosimetric system for the evaluation of undesired neutron dose in radiotherapy treatments with photons: experimental method and MC simulation"**, proceeding del Workshop on Radiation Dosimetry: Basic Technologies, Medical Applications, Environmental Applicatons, su Frascati Physics Series Vol. XXIX (2003), pp.89-96.

Dosimetria neutronica in campo ambientale

- **Spettrometria neutronica presso laboratori di alta montagna:** Monte Cimone (IT), BEO (Moussala peak, Bulgaria), Testa Grigia (Cervino, Italia), Chacaltaya (Bolivia).

Collaborazioni:

APAT (ex ANPA),

IFSI (CNR),

ISAC (CNR),

INRNE (Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Sofia Bulgaria)

ARCS (Austrian Research Centre of Seisberdorf)

UMSA (Univesidad Major de San Andres, La Paz, Bolivia)

- **Spettrometria e dosimetria neutronica a bordo di voli intercontinentali:** Mi-L.A.-Mi, Roma-Tokyo-Mi, Roma-Bue-Mi.

Collaborazioni:

APAT (ex ANPA),

CCR (Ispra),

University of La Plata and Aerolinas Argentina.



- **Spettrometria neutronica a bordo di palloni stratosferici**
ASI: BIRBA, BIRBA 2, BIRBA reflight.

Collaborazioni:

ASI,

**Royal Military College of Canada,
CNR-IBAV, Roma**

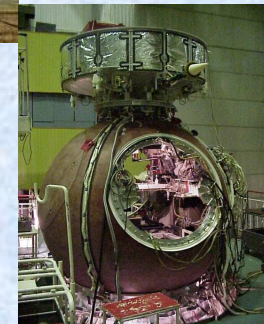


- **Spettrometria e dosimetria neutronica**
a bordo di satelliti ESA: PHOTO M1.

Collaborazioni:

CNR-IBAV, Roma,

**State Research Centre-Institute of Biomedical Problem- Russian Academy
of Science**



- **Progetto ATPROMO (presentato per l'FP-6 della comunità europea):** per un network europeo di laboratori di alta montagna per lo studio della correlazione tra la radiazione cosmica e i cambiamenti climatici. Il network comprendente **54 istituti, 12 laboratori di alta montagna europei e 6 laboratori non europei.**
- **Progetto BIDOSE (presentato per l'FP-6 della comunità europea):** per lo studio del rischio legato alla radiazione residua dopo l'incidente di Chernobyl con dosimetria fisica e biodosimetria.

Publicazioni recenti relative agli argomenti citati:

A.Zanini, M.Pelliccioni, F. Fasolo, L. Visca, E. Durisi, C. Ongaro, ***Neutron Spectra at Various Altitudes and Latitudes***, Poster presented at "18th ECRS, European Cosmic Rays Symposium", Moscow, Russia, 12-18 Luglio 2003.

O. Saavedra, A. Longhetto, A. Zanini, F. Fasolo, L. Visca, S. DeAgostini, ***Dosimetry of cosmic rays neutron component in a wide energy range***. Poster presented at the Workshop on Atmospheric Research in the Alps, Davos, Switzerland, 20th September 2002.

A. Zanini, C. Ongaro, E. Durisi., L. Visca, S. DeAgostini, F. Fasolo, M. Pelliccioni, O. Saavedra, ***Differential Neutron Flux in Atmosphere at Various Geophysical Conditions***, proceeding of The 28th International Cosmic Ray Conference, Tsukuba (Japan) July 31 - August 7, 2003.

A. Zanini, L. Visca, ***Neutron spectra in Atmosphere at various Altitudes and Latitudes***, proceeding of "HIMONTONET European workshop" published in multivolume series OM2 Observatoire de Montagne de Moussala, 9 (2003).

A. Zanini, E. Durisi F. Fasolo, C. Ongaro, P.P. Trapani, O. Saavedra, L. Visca, ***Neutron spectrometry at High Mountain Laboratory***, proceeding of the meeting Neutron Spectrometry and Dosimetry, Experimental Tecniques and MC Calculation, Stockholm- Sweden, to be published by Otto-srl,Torino (2003)

Proceedings

Neutron Spectrometry and Dosimetry, Experimental Tecniques and MC Calculation, Stockholm-Sweden, to be published by Otto-srl,Torino (2003) in stampa

Editor: A. Zanini, C. Ongaro

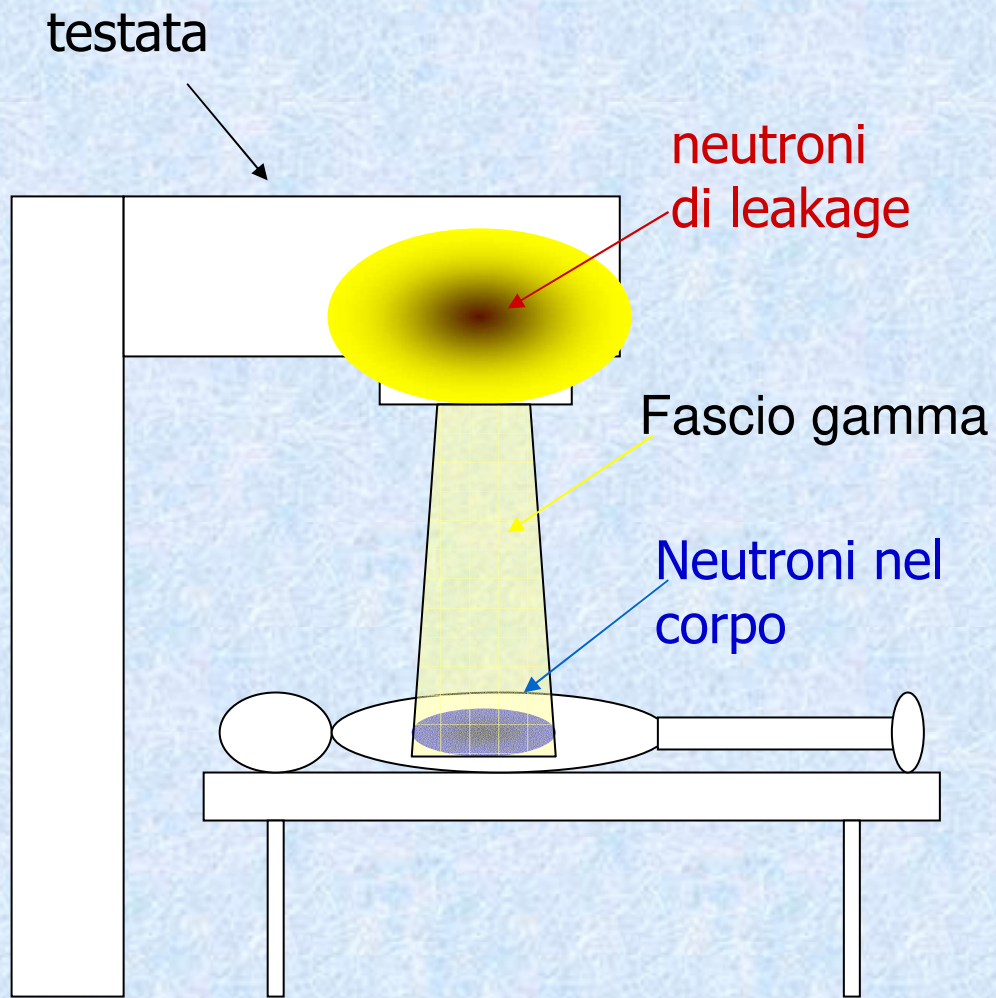
Workshop on Radiation Dosimetry:Basic Technologies, Medical Applications, Environmental Applicatons, su Frascati Physics Series Vol. XXIX (2003)

Editor: A. Zanini

Valutazione della dose neutronica indesiderata nella radioterapia con fotoni mediante LINAC

- Neutroni prodotti per fotoreazioni GDR sugli elementi pesanti costituenti la testata dei LINAC e i collimatori (W, Fe, Au, Pb) 90%
energia media 1 MeV
Distribuzione isotropa
- Neutroni prodotti sugli elementi leggeri (O, N, Ca, C,), direttamente nel corpo del paziente 10%
Distribuzione anisotropa
energia media 1 MeV
- Possibilità di tumori secondari radio-indotti

Produzione di fotoneutroni



Energie di soglia (γ, n):

Testata

W: 7.42 MeV

Fe: 10.9 MeV

Cu: 9 MeV

Pb: 7.41 MeV

corpo

C: 18.7 MeV

P: 12.3 MeV

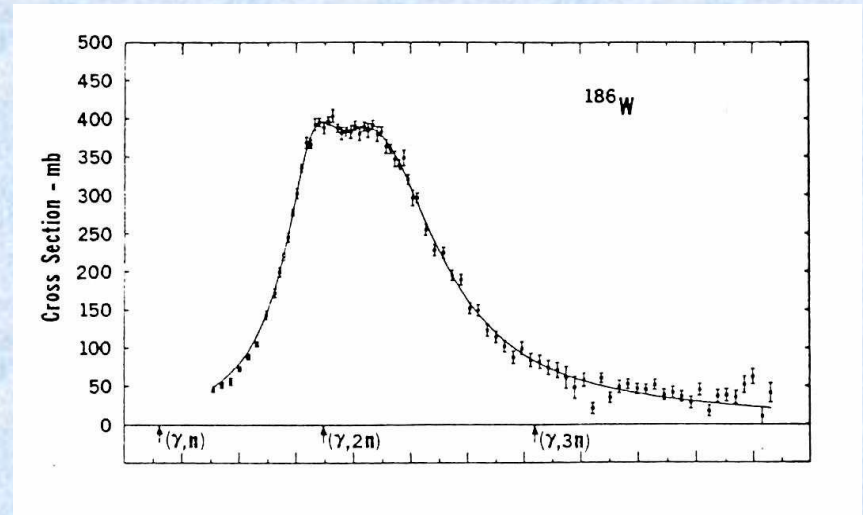
O: 15.7 MeV

Ca: 15.6 MeV

- Produzione di neutroni nella testata per reazioni (γ,n) con elementi ad alto Z :

$$E_{\gamma} > 7 \text{ MeV}$$

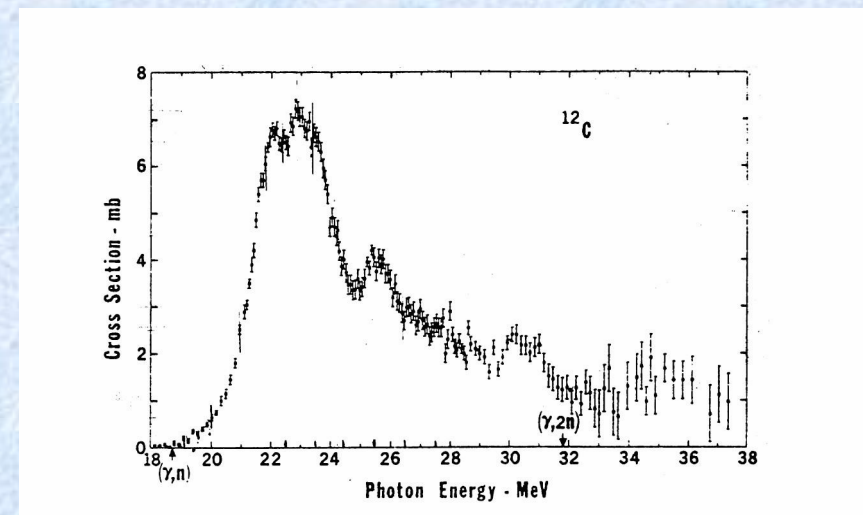
$$\sigma_{\text{max}} \sim 400 \text{ mbarn}$$



- Produzione di neutroni nel corpo del paziente, per reazioni (γ,n) con elementi a basso Z :

$$E_{\gamma} > 14 \text{ MeV}$$

$$\sigma_{\text{max}} \sim 20 \text{ mbarn}$$



INFN sezione di Torino

Codice di simulazione:

MCNP-GN

- Nuova routine GAMMAN per la fotoproduzione di neutroni implementata in MCNP-4B.

I codici Monte Carlo disponibili non trattano la (γ, n) poiché la sezione d'urto della reazione è cento volte inferiore rispetto a quelle per gli effetti fotoelettrico, Compton e annichilazione.

Misure sperimentali:

Spettrometro a bolle (BDS) rivelatori integrali BD-100R

- Valutazione degli spettri neutronici al piano del paziente.
- Valutazione degli spettri neutronici agli organi critici (ICRP 60).

Fantoccio

Fantoccio antropomorfo JIMMY

- Tessuto equivalente.
- Cavità in corrispondenza degli organi critici.
- **Conservativo rispetto ai fantocci standard** (intercalibrazione presso il JRC, Ispra).

Metodo sperimentale

Rivelatore integrale BD-100R

- Intervallo di dose rivelata: 1 mSv - 5 mSv
- Accuratezza: $\pm 20\%$
- Range energetico rivelato: 100 keV - 20 MeV
- Sensibilità: da 0.022 a 0.29 bolle/mSv

Misure spettrometriche con dosimetri passivi BDS
(BTI industries Chalk River, Ontario Canada),
insensibili ai fotoni

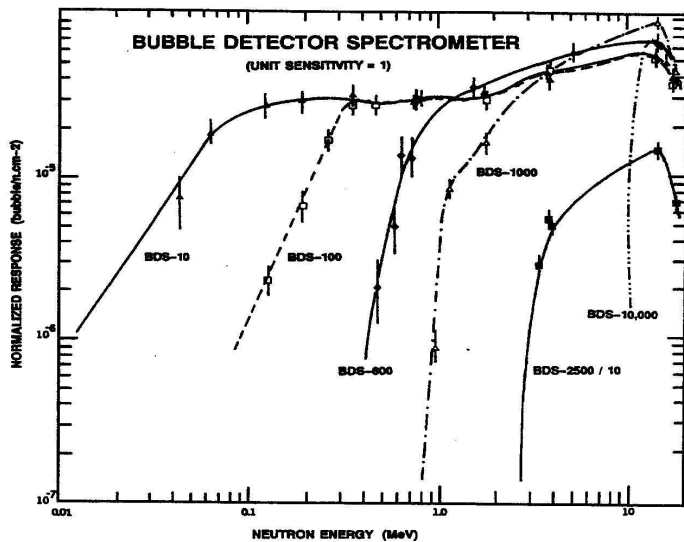


BUNTO: codice di deconvoluzione che trova la soluzione più appropriata del sistema mediante un metodo di minimizzazione degli errori.

Codice appositamente sviluppato dall'INFN di Torino

Spettrometro BDS

- Intervallo di dose rivelata:
da meno di 10 mSv a più di 1 mSv
- Accuratezza: $\pm 10\%$
- Range energetico rivelato:
10 keV - 20 MeV
- Sensibilità dipendente dal singolo dosimetro



Analisi dati tramite programma di deconvoluzione BUNTO

$$M_j = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} R_j(E) \Phi_E(E) dE \quad j=1..m$$

Fredholm equations

M_j : detector response

$R_j(E)$: response curve values

$\Phi_E(E)$: differential fluence distribution of neutron energy

m : number of energy thresholds

n : number of energy intervals

The system of integral equations using the BTI response matrix is transformed into a matrix system

$$M_j = \sum_{i=1}^n R_{ij} \Phi_i \quad i=1..N$$

Il codice Monte Carlo MCNP4B-GN

Permette di simulare la produzione di neutroni in seguito all'interazione di fotoni di energia < 30 MeV con la materia ed è stato sviluppato per simulare dei trattamenti radioterapici reali.

Proprietà delle subroutine inserite:

- Reazioni fotonucleari (γ, n) e ($\gamma, 2n$), la distribuzione dei fotoneutroni segue il modello di Weisskopf

$$n \cdot dE_n = CE_n e^{-\frac{E_n}{T}} dE_n$$

$$T = \sqrt{\frac{E - E_{1n} - E_{2n}}{a}}$$

$T =$ temperatura nucleare

$a =$ parametro semiempirico

- Valutazione delle coordinate esatte del punto di generazione del fotoneutrone
- Calcolo dello spettro energetico dei fotoneutroni
- Calcolo della distribuzione angolare dei fotoneutroni

Informazioni utilizzate dal programma:

- Sezioni d'urto da "Atlas of photoneutron cross section", Bernan; LA150 (Los Alamos)
- Modello fisico semplificato di reazione (γ, n):

canale evaporativo (componente principale), distribuzione isotropa

canale diretto (in percentuale minore, per energie maggiori di 3 MeV), distribuzione anisotropa:

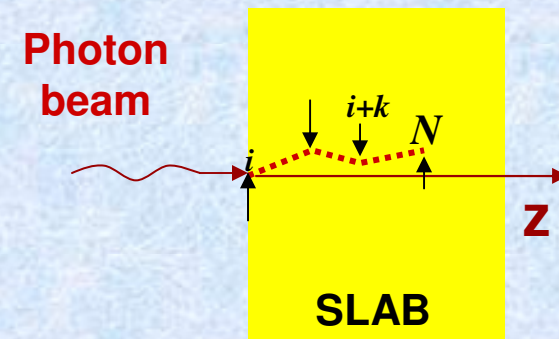
$$f(\theta) = a + b \sin^2 \theta$$

Monte Carlo code: MCNP-GN

- ❑ The method forces at least one neutron to be created in each history
- ❑ The neutron creation point i is chosen among all the N photon interaction points during the history
- ❑ Having forced the neutron production a compensating weight is attached to each source neutron to account for the real neutron creation probability



The weight is calculated employing the neutron production cross sections together with the total photon cross sections



Photoneutron production

$$F(i) = \sum_{j=1}^i \frac{\sigma_{(\gamma,n),j}(E_{\gamma,j})}{\sigma_{tot}}$$

$$\sigma_{tot} = \sum_{i=1}^N \sigma_{(\gamma,n),i}$$

$$F(i-1) < r < F(i)$$

Statistical weight

$$w = \sigma_{\gamma,n}(E_{\gamma}) / \sigma_{tot}(E_{\gamma})$$

Finalità del codice

E' così possibile con un unico codice trattare:

- Cascata elettromagnetica e trasporto di elettroni e fotoni nell'acceleratore
- Produzione di neutroni nella testata per reazioni (γ,n) con elementi ad alto Z :

$$E_{\gamma} > 7 \text{ MeV}$$
$$\sigma_{\text{max}} \sim 400 \text{ mbarn}$$

- Trasporto di neutroni nel corpo del paziente
- Produzione di neutroni nel corpo del paziente, per reazioni (γ,n) con elementi a basso Z :

$$E_{\gamma} > 14 \text{ MeV}$$
$$\sigma_{\text{max}} \sim 20 \text{ mbarn}$$

Il fantoccio antropomorfo Jimmy

Progettato presso l'INFN, sezione di Torino, in collaborazione con il JRC (Joint Research Center) di Ispra (Va); per la dosimetria neutronica.

Composizione:

8 lastre

7 plexiglas $\rho=1.190 \text{ g/cm}^3$
8% H, 60% C, 32% O

1 polietilene $\rho=0.920 \text{ g/cm}^3$
14.4% H, 85.6% C

polvere d'osso nella
colonna vertebrale

0.2% H; 41.4%
O;
18.4 %P; 39.9 Ca
 $\rho = 1.930 \text{ g/cm}^3$

Dimensioni:

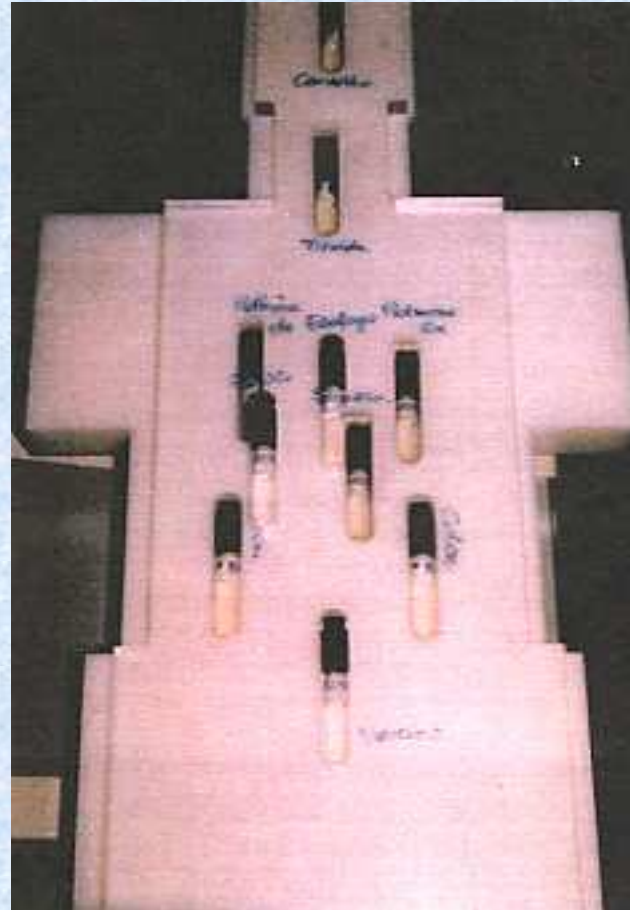
testa: $13.5 \times 15 \times 19 \text{ cm}^3$

collo: $11 \times 10 \times 13.5 \text{ cm}^3$

tronco: altezza 59 cm

larghezza variabile tra 30 cm e 36 cm

spessore 20 cm

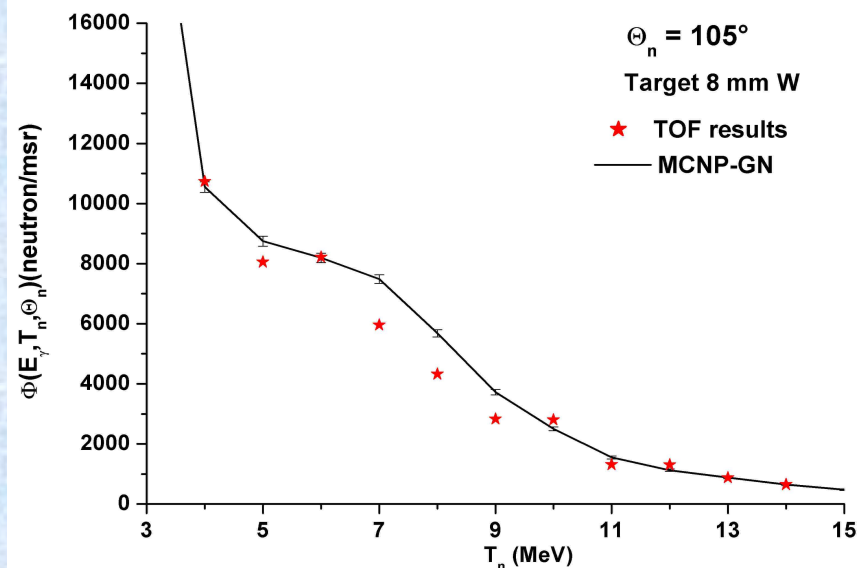
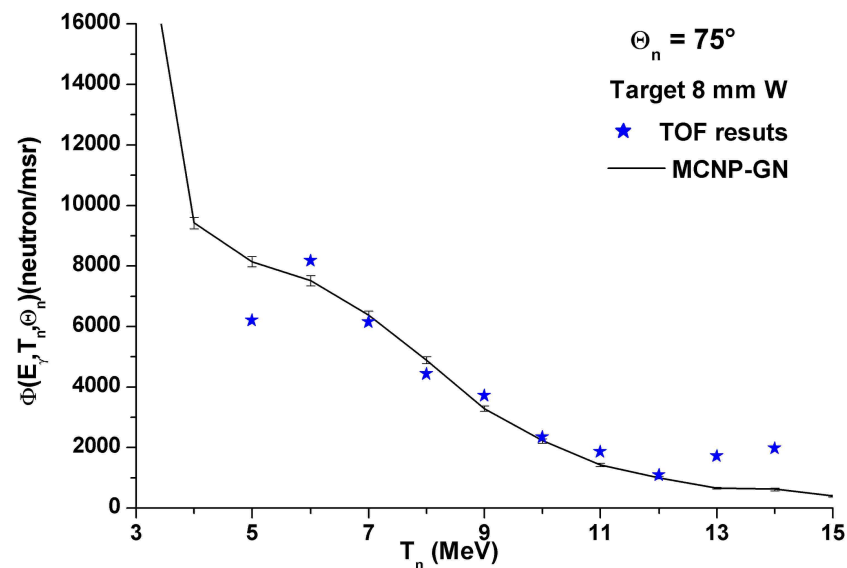


MCNP-GN TEST - Max Lab, Lund Sweden

MCNP-GN tested against a dedicated measurement of (γ,n) production yields for W, Pb, Fe, Au at MAX Lab (Lund Sweden):

Monochromatic tagged photons ($E_{\text{max}} 75 \text{ MeV}$) hitting 4-8mm thick sheet of W. Neutrons are detected in a TOF (Time Of Flight) spectrometer

Annand, Zanini et al. "Photoneutron Yields from Tungsten in the Energy range of the Giant Dipole Resonance", accepted for publication in "Physics in Medicine and Biology".

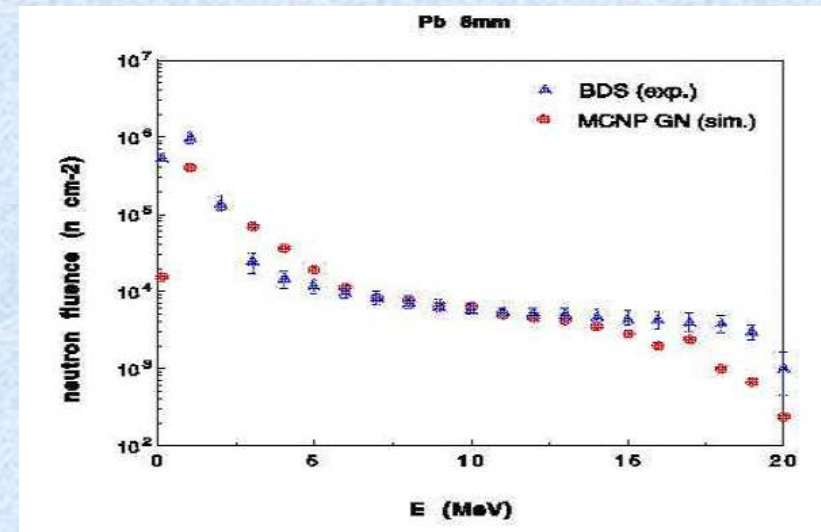
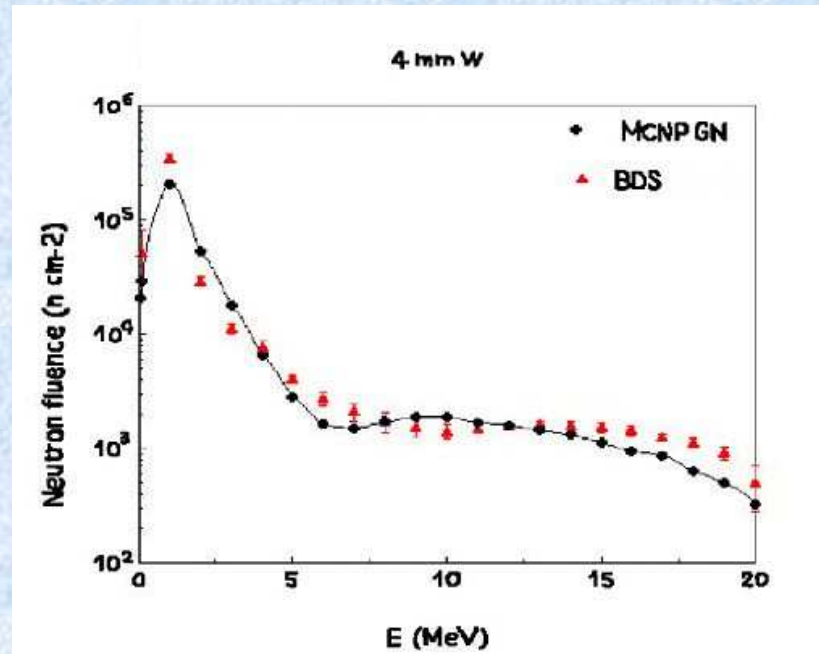
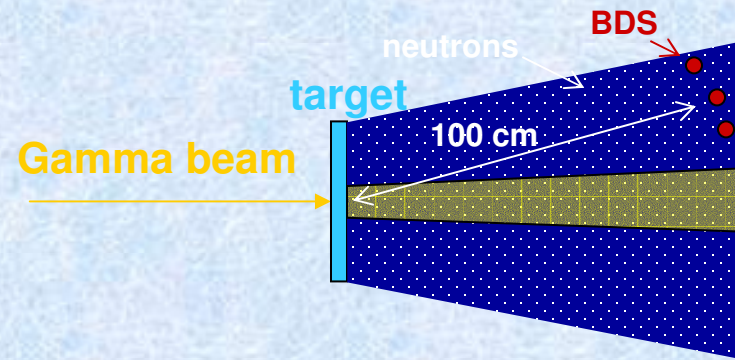


BDS TEST – Max Lab, Lund Sweden

Bremsstrahlung photon beam hits 4mm thick sheet of W and 8mm thick sheet of Pb.

Neutrons are detected with BDS spectrometer

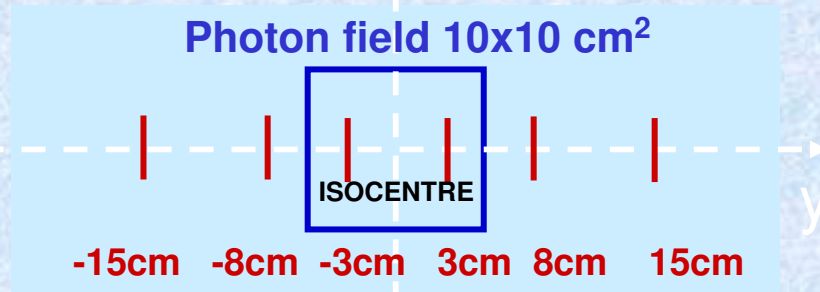
Measurement of (γ,n) yield, made at MAX Lab (Lund Sweden)



Spettri neutronici al piano del paziente

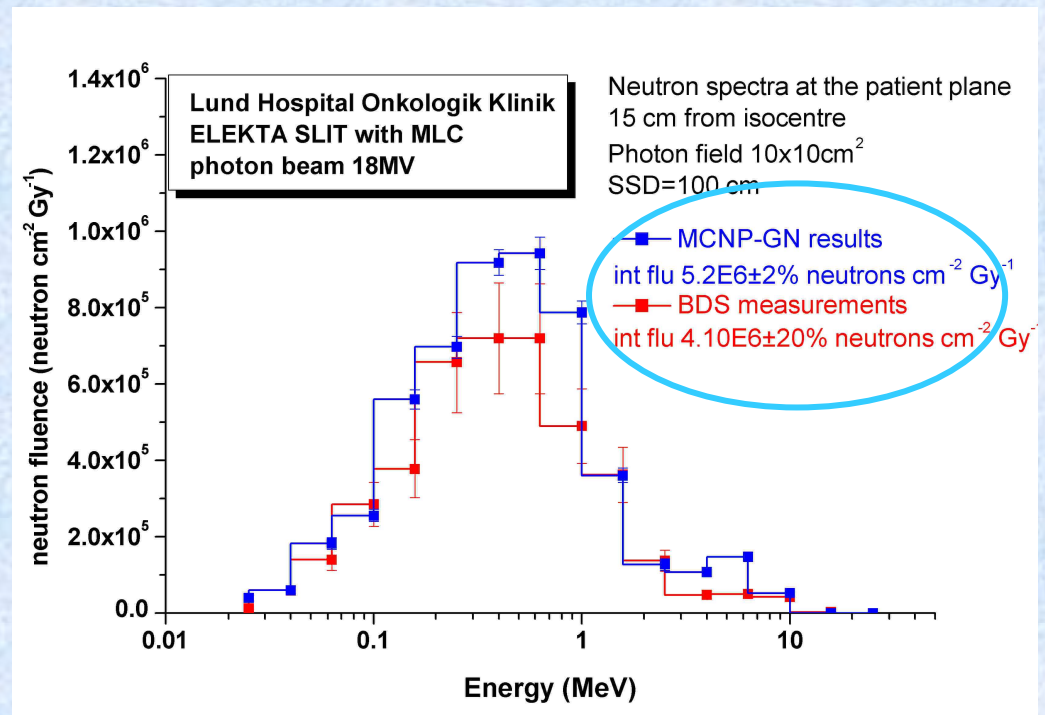
Piano del paziente

SSD = 100 cm Dose rate: 100UM/Gy



I dati sono normalizzati ad un 1 Gy di dose gamma. Tale valore è l'energia rilasciata al build up in un fantoccio ad acqua.

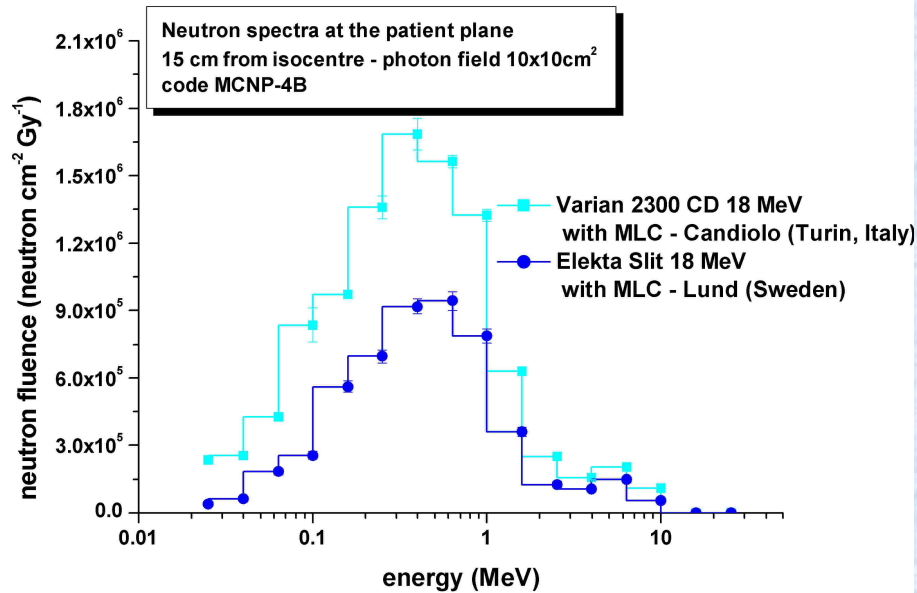
Confronto tra misure e simulazioni



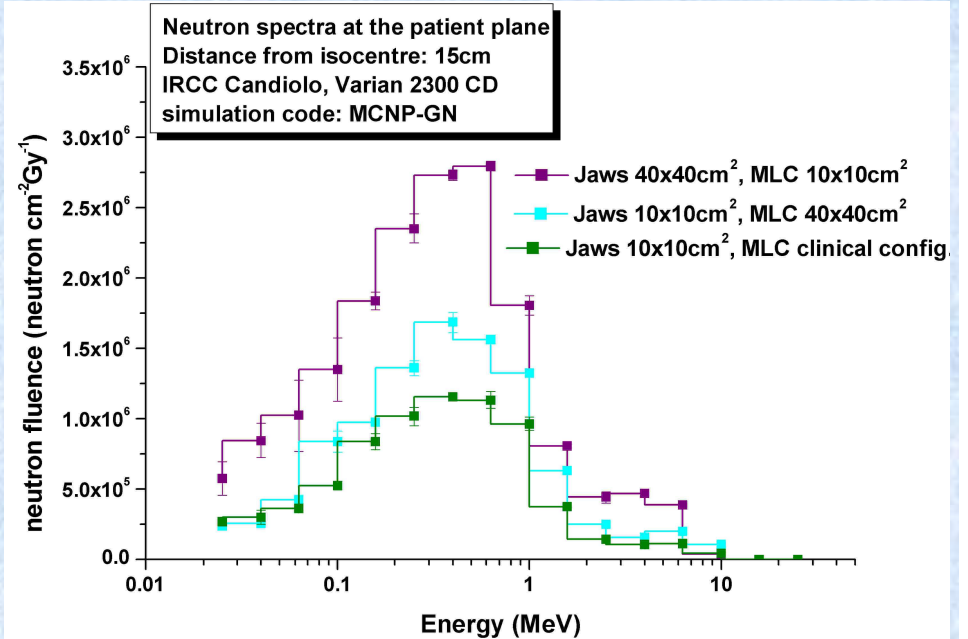
Il build up è a 3cm di profondità per un fascio gamma da 18 MeV

Spettri neutronici al piano del paziente (simulazioni)

Confronto tra differenti acceleratori



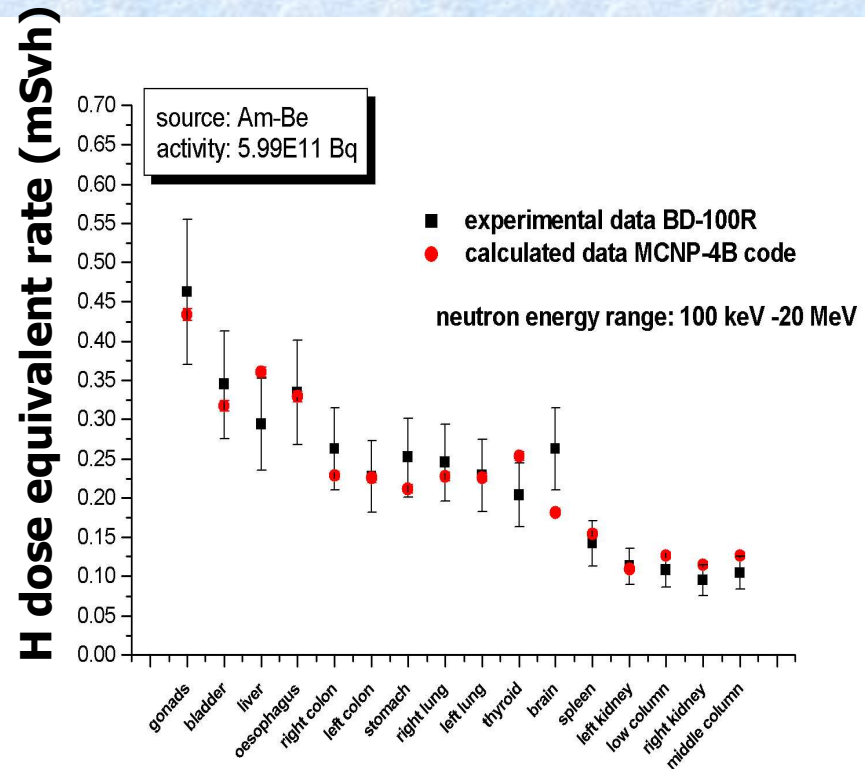
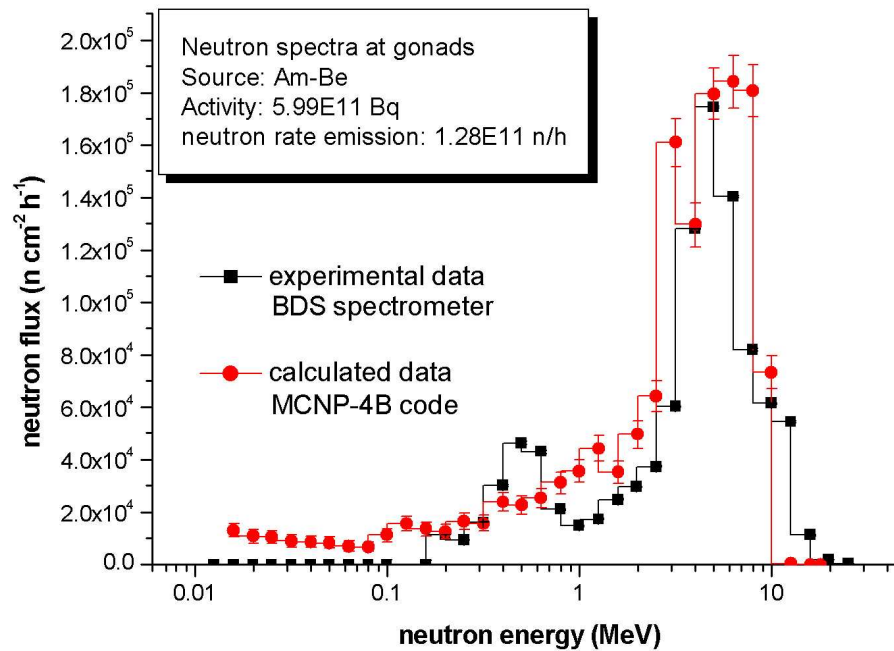
Spettri neutronici al piano del paziente, realizzati con differenti sistemi di collimazione



Misure in fantoccio

Esposizione preliminare AP del fantoccio ad una sorgente di Am/Be (CCR, Ispra (Va)):

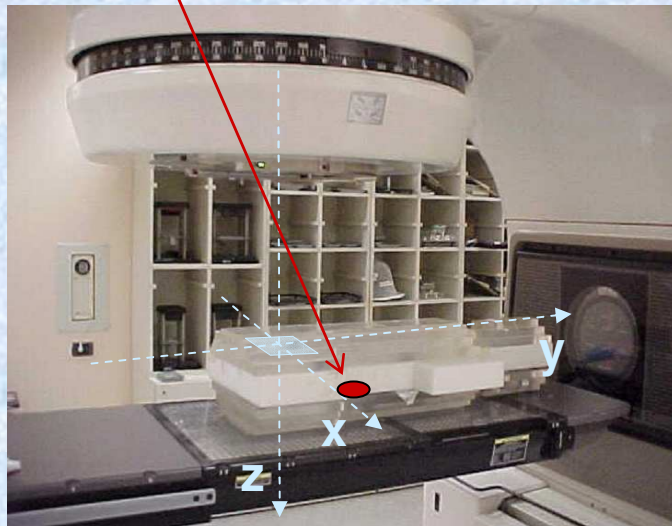
- misure di dose equivalente agli organi (BD-100R) e di uno spettro (BDS) in profondità
- confronto con la simulazione (MCNP-4B code).



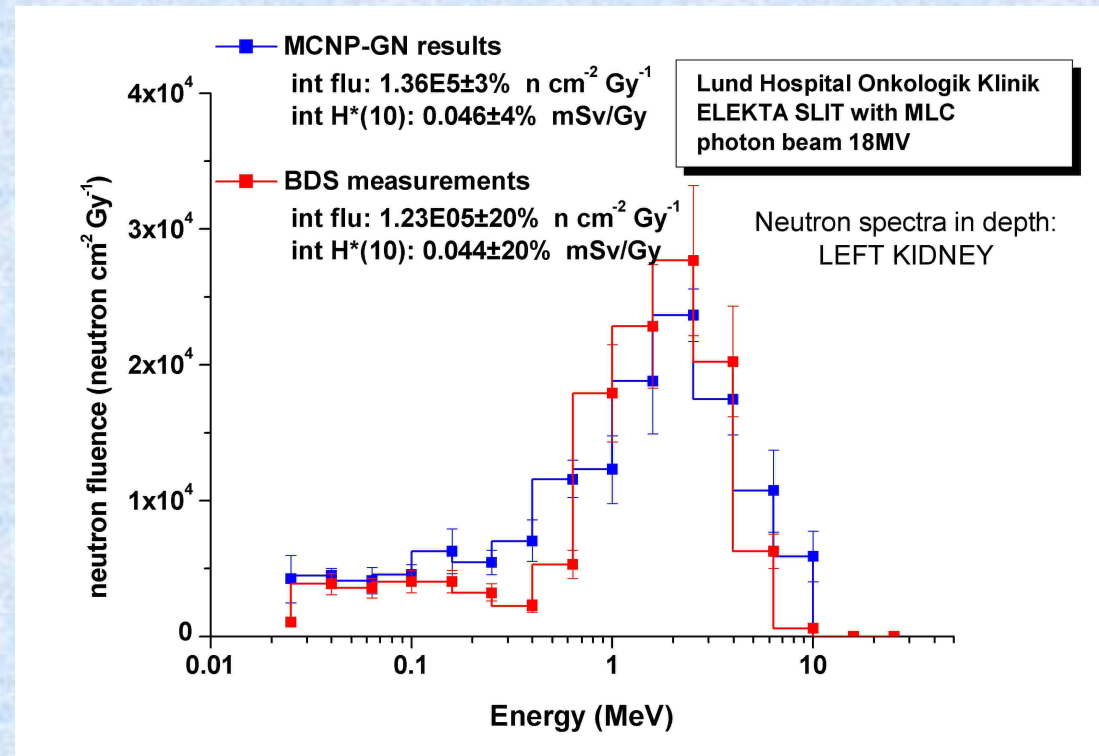
Spettro neutronico in profondità

Confronto tra risultati sperimentali e simulazione

Organ	x	y	z
Left kidney	4	17.8	16



Photon field at the patient plane 10x10 cm²



I dati sono normalizzati a 1 Gy di dose fotonica al build up in un fantoccio ad acqua.

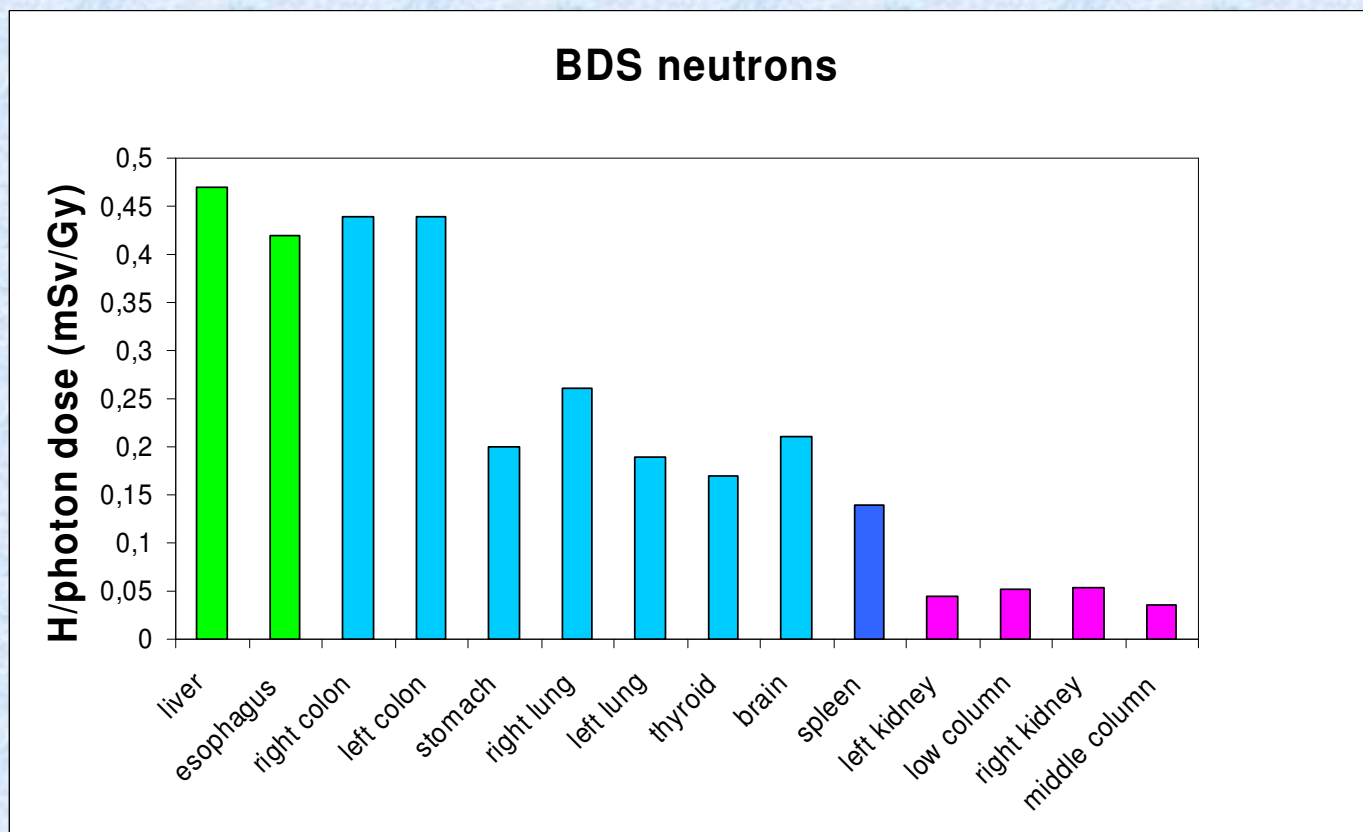
Misure a Lund

Onkologik Klinik

ELEKTA SLIT

18 MeV con MLC

- campo = $10 \times 10 \text{ cm}^2$
- dose rate = 100 UM/Gy
- SSD = 100 cm

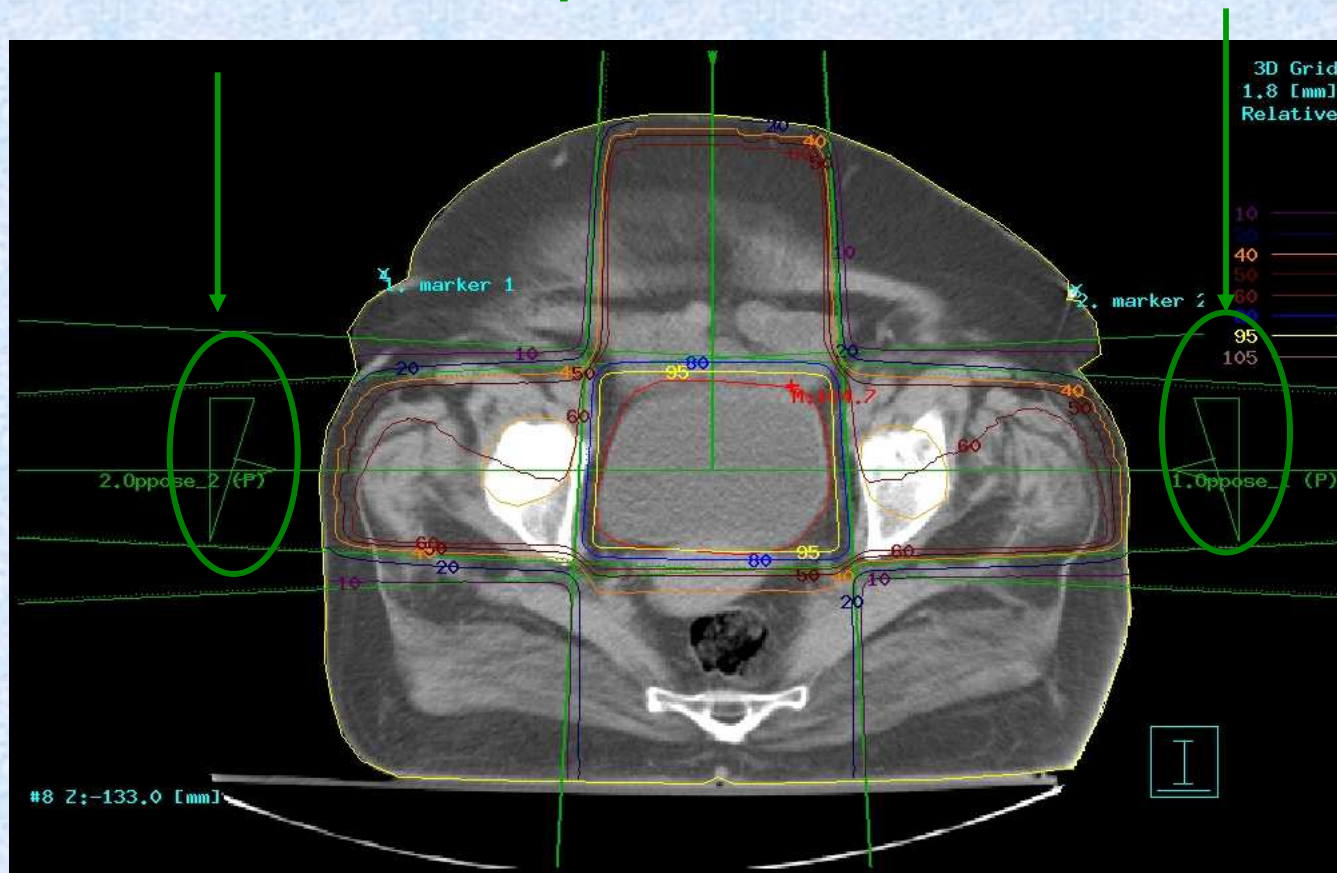


Crossed beams treatment to bladder

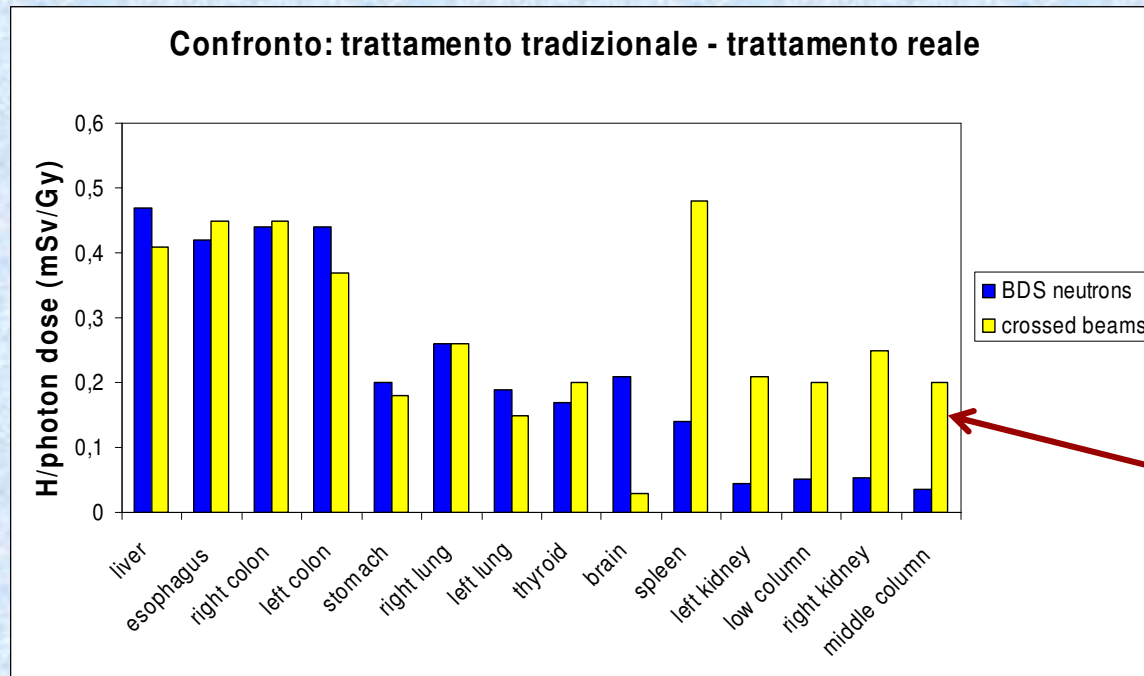
Three photon fields:
0° AP irradiation
90° lateral irradiation
270° lateral irradiation

treatment planning to bladder in a patient

Lead alloy wedges are used in lateral photon fields for a better dose distribution



Trattamento reale alla vescica con fasci incrociati



dose neutronica elevata agli organi in profondità

**Morti per
insuccesso della
radioterapia negli
USA '97
(60% dei pazienti
trattati)**

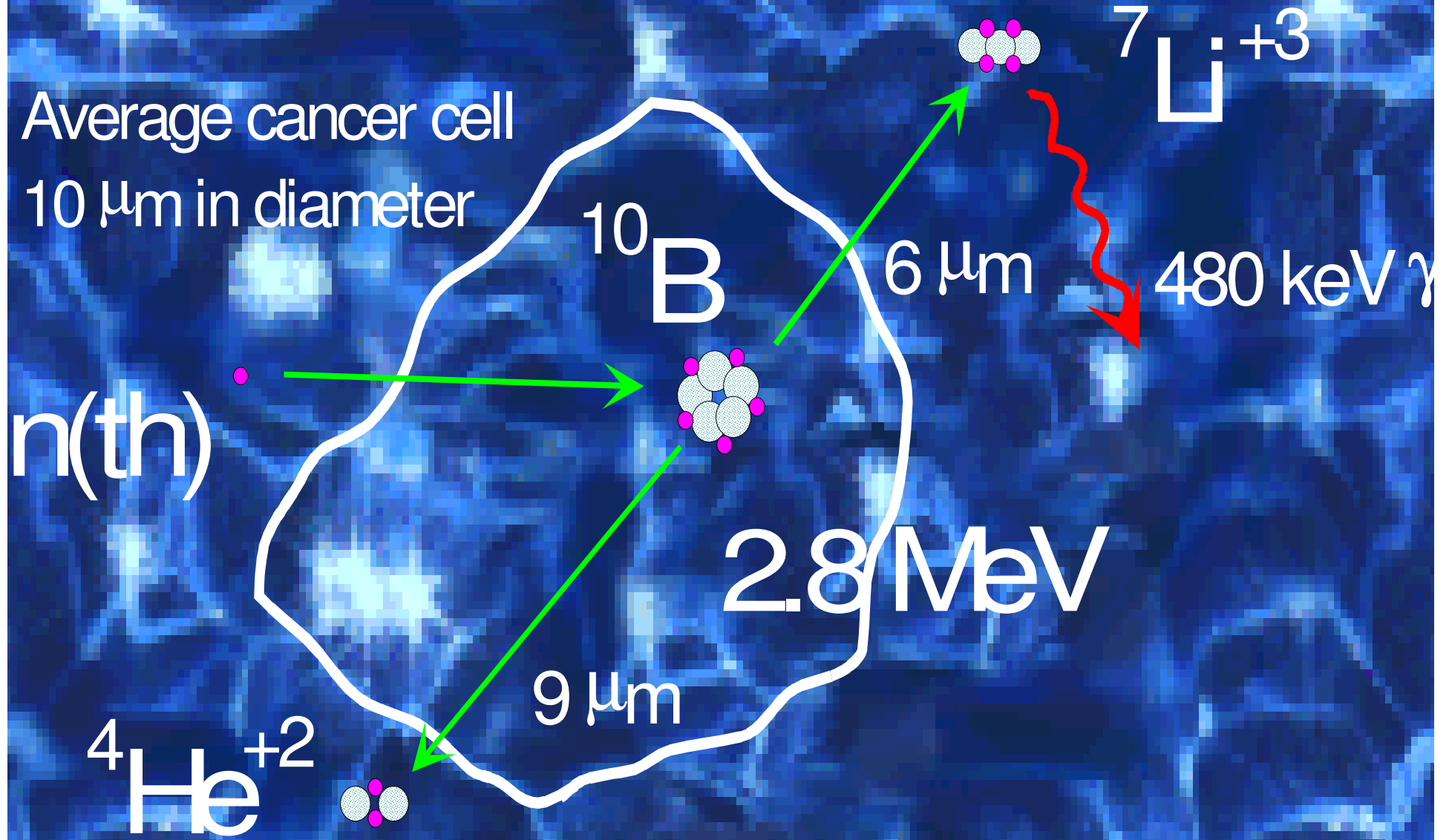
**30% mancato controllo locale
40% mancato controllo locale e
metastasi a distanza
30% per altri motivi**

Studio e dosimetria di sorgenti per BNCT

- Esperimento **NEPI, INFN** sez. Torino e Milano
 - Collaborazione **Ospedale San Giovanni, EUROSEA**, Torino
 - Collaborazione **ENEA "E. Clementel"** Bologna
 - Collaborazione **INFN Trieste, Ospedale Gemelli** Roma
proposta di Esperimento PhoNeR (Photon-Neutron radiotherapy)
 - Collaborazione **LBNL-Lawrence Berkeley National Laboratory, U.S.A.**
-
- **Dosimetria su reattore:** Tapiro ENEA, Casaccia
Triga, Pavia
 - **Dosimetria su sorgenti a fusione** D-D e D-T
 - **Dosimetria su neutroni da γ, n** da LINAC con collimatori

BNCT Process

Average cancer cell
10 μm in diameter



Sorgenti per BNCT

SORGENTE	FLUSSO (n cm ⁻² s ⁻¹)	APPLICAZIONI
Generatore a fusione D-T (Pisa)	1 E+10 flusso epitermico	ricerca
Generatore a fusione D-D (BERKELEY)	Neutron yield 1.2E+12 n/s Flusso epitermico all'uscita dal moderatore= 5 E7 n cm ⁻² s ⁻¹	Progetto per il trattamento di metastasi diffuse e melanoma
Generatore a fusione D-T (BERKELEY) Rotating target D-T	Neutron yield 1E+14 n/s Flusso stimato all'uscita dal moderatore= 1E+9 n cm ⁻² s ⁻¹	ricerca
(p,n) (BERKELEY) ⁷ Li(p,n) ⁷ Be	Neutron yield 7.69 E+11 n/mC	ricerca
(γ,n) LINACS per radioterapia 18 – 25 MV	Neutron fluence 1E+6 - 1E+7 n cm ⁻² s ⁻¹ (con 22 cm di Pb + 5 cm di polietilene) valore medio calcolato ad una distanza media di 5 cm dall'asse	Trattamento di metastasi diffuse e per melanoma diffuso dell'arto

Triga Mark Pavia

Neutron fluence 1E+9 n cm⁻² s⁻¹
flusso termico

trattamento di metastasi
diffuse al fegato

Tapiro Casaccia

Neutron fluence 8E+8 n cm⁻² s⁻¹
flusso epitermico

progetto per il
trattamento di glioblastomi

ENEA's FNG (Frascati Neutron Generator),

Berkeley University's RTNS (Rotating Target Neutron Source),

University of Illinois's IECF (Inertial Electrostatic Confinement Fusion device),

LBNL's ST (Sealed Tube).

	FNG (ENEA)	RTNS (LBNL)	IECF (UoI)	SEALED TUBE (LBNL)
Beam energy (keV)	260	400	≈75	120
Beam target current (mA)	1	5	25	1000*
Tritium target inventory (beginning of life) (Bq)	$3.7 \cdot 10^{11}$	$4 \cdot 10^{12}$	0	0
Neutron source yield (n/s)	$1.2 \cdot 10^{11}$	$6 \cdot 10^{12}$	≈ $1 \cdot 10^7$	≈ $1 \cdot 10^{14}$

Reattori nucleari per BNCT con flusso epitermico e termico

Studsvik (Sweden) (6/2001):

Reactor Power:	1 MW
$\Phi_{n \text{ epith}}$:	$18 \times 10^8 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Fast Neutron dose in water / $\Phi_{n \text{ epith}}$:	$0.76 \times 10^{-13} \text{ Gy cm}^2$
γ whole body dose / $\Phi_{n \text{ epith}}$:	$5.2 \times 10^{-13} \text{ Gy cm}^2$
Applicazioni:	glioblastoma

Espoo, Helsinki (9/1998):

Reactor Power:	250 kW
$\Phi_{n \text{ epith}} (0.4 \text{ eV} - 10 \text{ keV})$:	$11 \times 10^8 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Fast neutron dose in water / $\Phi_{n \text{ epith}}$:	$2.4 \times 10^{-13} \text{ Gy cm}^2$
γ whole body dose / $\Phi_{n \text{ epith}}$:	$0.5 \times 10^{-13} \text{ Gy cm}^2$
$J_{n \text{ epith}} (0.4 \text{ eV} - 10 \text{ keV}) / \Phi_{n \text{ epith}}$:	0.77

HFR Petten, Holland (6/2002):

Reactor Power:	45 MW
$\Phi_{n \text{ epith}} (0.4 \text{ eV} - 10 \text{ keV})$:	$3.3 \times 10^8 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Fast neutron dose in water / $\Phi_{n \text{ epith}}$:	$8.6 \times 10^{-13} \text{ Gy cm}^2$
γ whole body dose / $\Phi_{n \text{ epith}}$:	$10.3 \times 10^{-13} \text{ Gy cm}^2$
$J_{n \text{ epith}} (0.4 \text{ eV} - 10 \text{ keV}) / \Phi_{n \text{ epith}}$:	0.95

TAPIRO (3/2003):

Reactor Power:	5 kW
$\Phi_{n \text{ epith}} (0.4 \text{ eV} - 10 \text{ keV})$:	$8.0 \times 10^8 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Fast neutron dose in water / $\Phi_{n \text{ epith}}$:	$4.1 \times 10^{-13} \text{ Gy cm}^2$
γ whole body dose / $\Phi_{n \text{ epith}}$:	$3.5 \times 10^{-13} \text{ Gy cm}^2$
$J_{n \text{ epith}} (0.4 \text{ eV} - 10 \text{ keV}) / \Phi_{n \text{ epith}}$:	0.72
Applicazioni:	progetto per trattamento del glioblastoma

Brookhaven (1997):

Reactor Power:	3 MW
$\Phi_{n \text{ epith}} (0.4 \text{ eV} - 10 \text{ keV})$:	$18 \times 10^8 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Fast neutron dose in water / $\Phi_{n \text{ epith}}$:	$4.3 \times 10^{-13} \text{ Gy cm}^2$
γ whole body dose / $\Phi_{n \text{ epith}}$:	$1.3 \times 10^{-13} \text{ Gy cm}^2$
$J_{n \text{ epith}} (0.4 \text{ eV} - 10 \text{ keV}) / \Phi_{n \text{ epith}}$:	0.67

MIT (1999):

Reactor Power:	5 MW
$\Phi_{n \text{ epith}} (0.4 \text{ eV} - 10 \text{ keV})$:	$2.1 \times 10^8 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Fast neutron dose in water / $\Phi_{n \text{ epith}}$:	$8.6 \times 10^{-13} \text{ Gy cm}^2$
γ whole body dose / $\Phi_{n \text{ epith}}$:	$13.0 \times 10^{-13} \text{ Gy cm}^2$
$J_{n \text{ epith}} (0.4 \text{ eV} - 10 \text{ keV}) / \Phi_{n \text{ epith}}$:	0.55

MIT (proposta):

Reactor Power:	5 MW + fission plate
$\Phi_{n \text{ epith}} (0.4 \text{ eV} - 10 \text{ keV})$:	$180 \times 10^8 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Fast neutron dose in water / $\Phi_{n \text{ epith}}$:	$1.3 \times 10^{-13} \text{ Gy cm}^2$
γ whole body dose / $\Phi_{n \text{ epith}}$:	$1.0 \times 10^{-13} \text{ Gy cm}^2$

TRIGA MARK II:

Reactor Power:	250kW
$\Phi_{n \text{ term}}$:	$6.0-7.0 \times 10^9 \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Applicazioni:	tumori epatici multifocali

Trattamento BNCT mediante reattori nucleari

- **TAOrMINA** Reattore termico Triga (Pavia).

T. Pinelli –INFN e Ospedale di Pavia Autotrapianto di fegato con metastasi diffuse, primo trattamento nel 2002.

Flusso neutronico: 10^9 n/cm²/s per circa 15 min (10^{12} n/cm²)

- **Reattore: Tapiro – ENEA Casaccia.** Flusso epitermico: $8 \cdot 10^8$ n/cm²/s

Modifica della colonna epitermica per trattamento di glioblastomi.

Sono reattori per ricerca

Non sono all'interno di strutture ospedaliere

Difficoltà per il trattamento del paziente



Calcolo della dose (Gy-eq)

La valutazione dell'efficacia clinica di un fascio per BNCT richiede il calcolo della dose sia nel tessuto sano sia in quello tumorale.

Il calcolo risulta complesso in quanto i differenti contributi alla dose totale hanno diversi valori di RBE (Efficacia Biologica Relativa)

Inoltre l'efficacia biologica della dose fisica D , dovuta alla cattura neutronica da parte dei nuclei di ^{10}B dipende dal tipo di composto usato per introdurre il Boro nel corpo del paziente.

La dose complessiva D_{tot} viene calcolata in termini di Gy-eq (gray-equivalent)

$$D_{\text{tot}} = CF \cdot D_B + RBE_N \cdot D_N + RBE_h \cdot D_h + RBE_\gamma \cdot D_\gamma$$

$$D_{\text{tot}} = CF D_B + RBE_N D_N + RBE_h D_h + RBE_\gamma D_\gamma$$

CF o CBE= compound factor (1.3 tessuto sano; 3.8 tessuto tumorale)

D_B = dose fisica dovuta al boro

D_N = dose fisica dovuta all'azoto $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$

RBE_N = efficacia biologica relativa per l'azoto (3.2)

D_h = hydrogen dose o "dose veloce" (dovuta a p di rinculo prodotti dall'interazione di neutroni con energia > 1 keV con il tessuto)

RBE_h = efficacia biologica relativa per la "dose veloce" (3.2)

D_γ = dose gamma $\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$

RBE_γ = efficacia biologica relativa per i fotoni (1)

A Compact Neutron Generator Based on D-D or D-T Fusion Reaction for BNCT

-INFN sez. Torino

- Lawrence Berkeley National Laboratory

**- Ospedale S. Giovanni
Vecchio A. S.(To)**

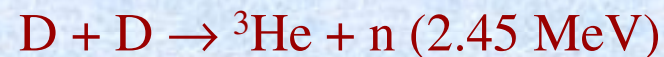
-Politecnico di Torino

-EUROSEA (To)



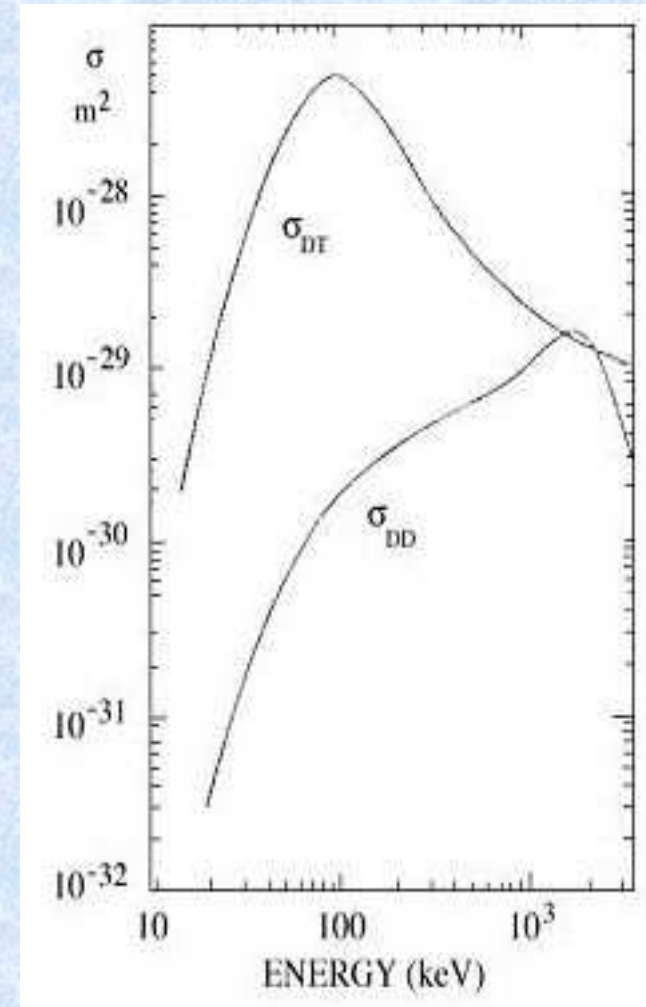
D-D OR D-T FUSION BASED NEUTRON GENERATOR

- A 2 MHz or a 13.56 MHz radio frequency (RF) discharge is used to produce deuterium or 50 %deuterium + 50% tritium plasma.
- High power RF-discharge has the advantage of yielding high fraction of monoatomic ion species (D⁺ or T⁺ ions) in the beam.
- The ion beam is accelerated to energy of 100 keV or higher to impinge the beam on a titanium coated copper or aluminum target where neutrons are generated through D-D or D-T fusion reaction:



Fusion Reactions DD & DT: Neutron Production Cross Section

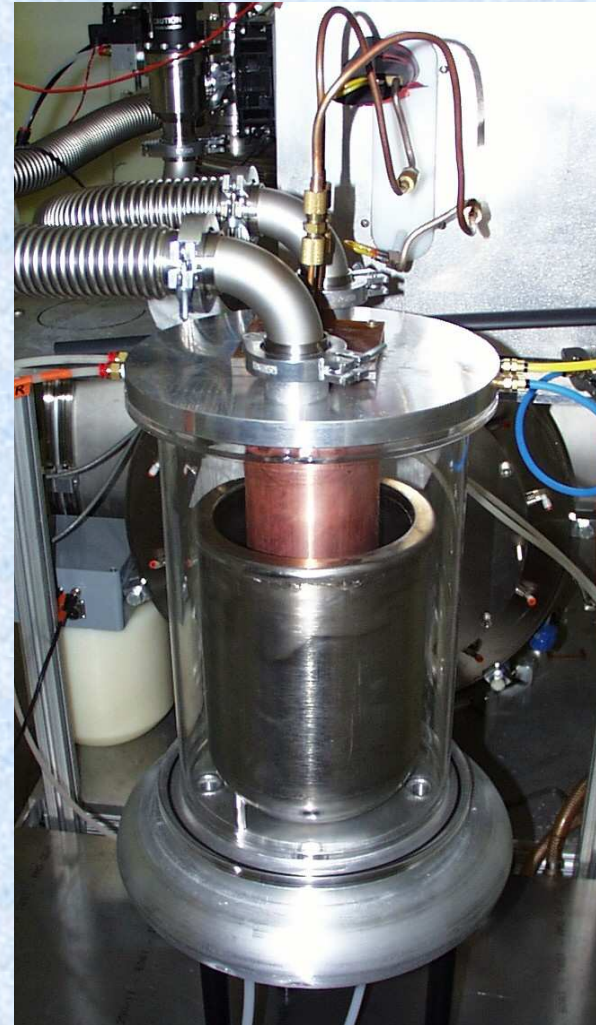
- The cross-section of the D-T reaction is higher than that of D-D reaction, giving approximately two orders of magnitude higher neutron yield.



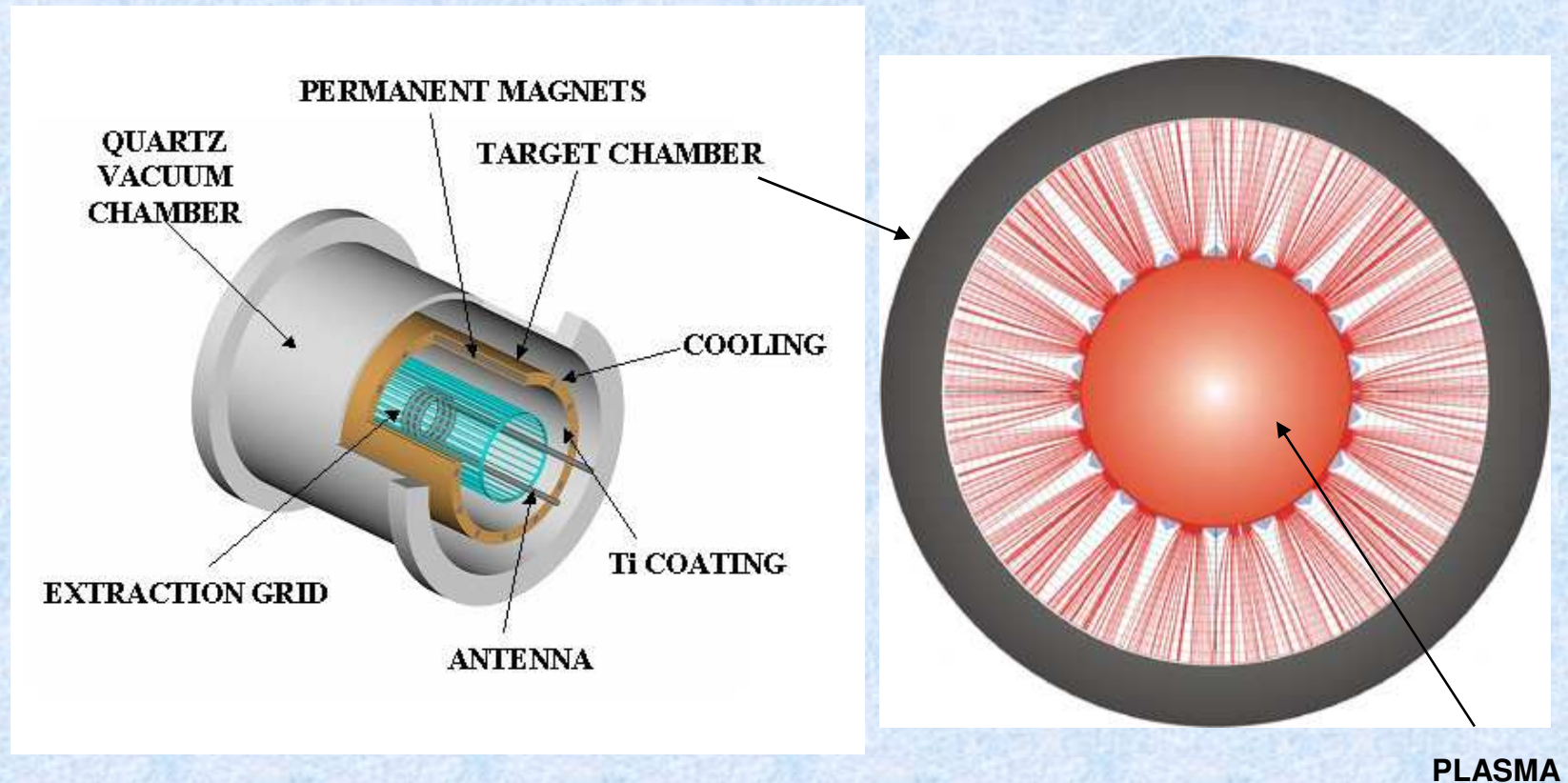
The Second Generation Compact Neutron Tube

Advantage of co-axial neutron generator with cylindrical ion source and target geometry:

- The cylindrical shape allows a larger target area with compact overall dimensions.
- Dimensions are ~ 25 cm in diameter and 40 cm in height.

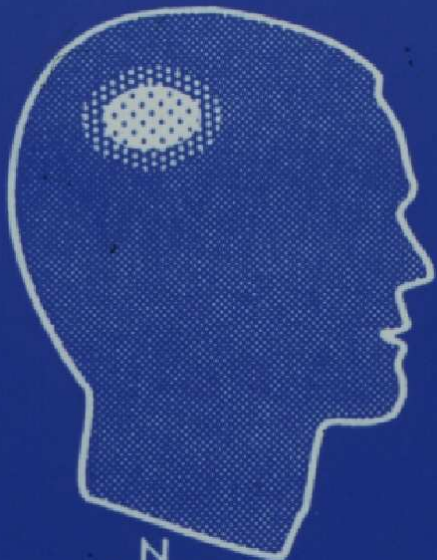


Coaxial Neutron Generator



BNCT = BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY

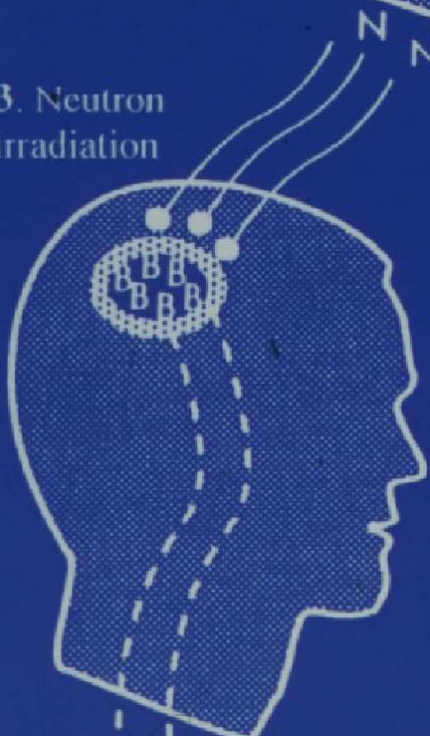
1. MRI-scan of tumour



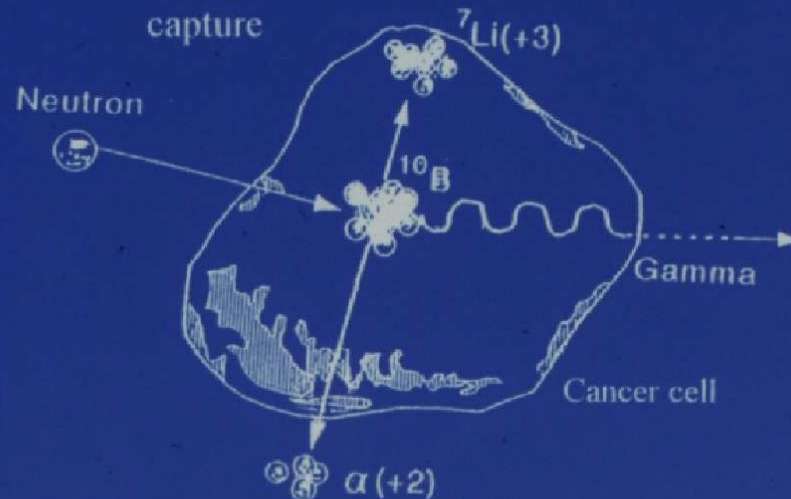
2. Introduction of boron intravenously



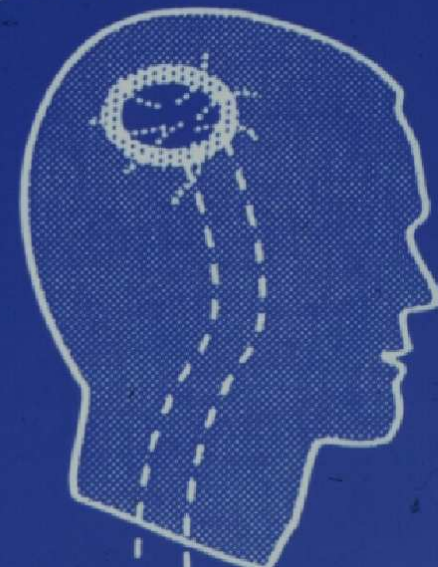
3. Neutron irradiation



4. Boron neutron capture



5. Released radiation destroys cancer cell



BNCT Application

- The neutron yield needed for intracranial BNCT is $\sim 10^{14}$ n/s source neutrons
- After moderation an ideal neutron energy is from 2 to 20 keV
- The sealed-tube D-T neutron generator is ideal for hospital use, because of its compact dimensions.
- The projected neutron yield of order 10^{14} n/s can be obtained with a D-T neutron generator together with a 120 kV, 1.5 A dc power supply. Respectively D-D neutron yield of order 10^{12} n/s can be attained.

Moderation of the 14 MeV D-T Neutrons

Bismuth

- Generates more neutrons of lower energy (~2 MeV) through $(n, 2n)$ reaction with 14 MeV neutrons

Iron

- Has high inelastic scattering cross section above 860 keV and a window at 20 keV → decreases the fast neutron flux in the range of 1 to 14MeV

${}^6\text{LiF}$

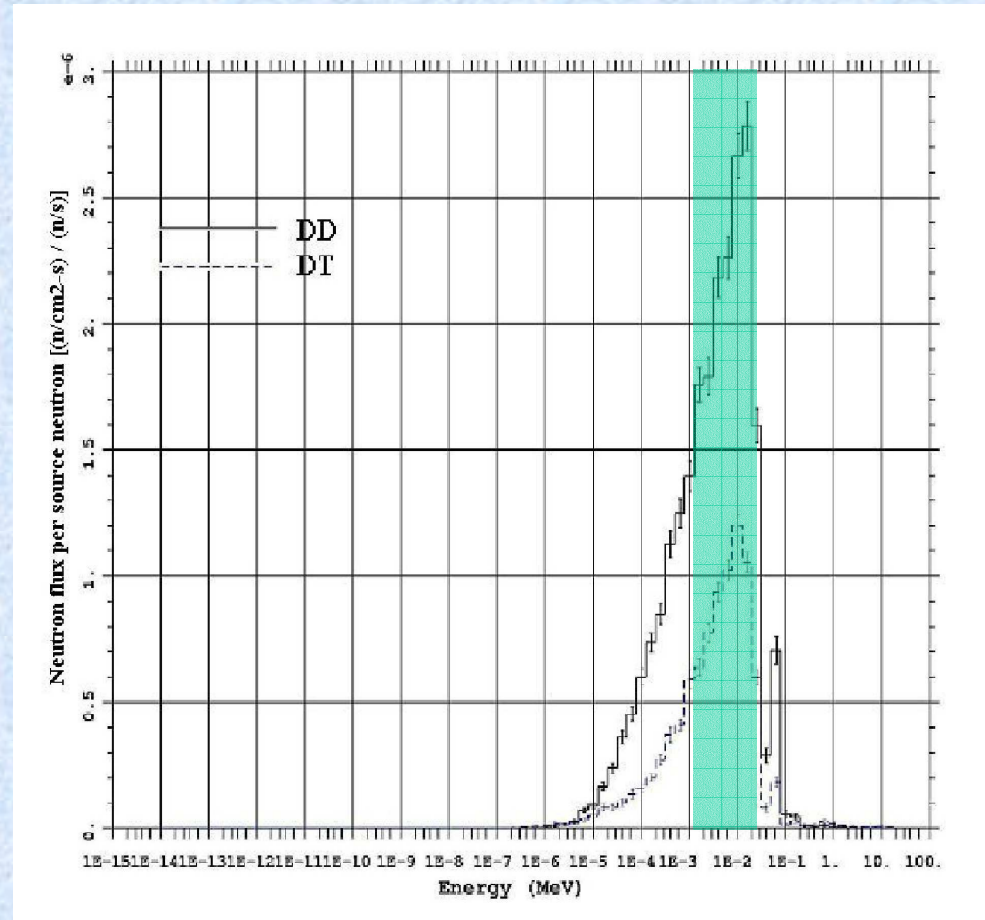
- Reduces the thermal component of the neutron flux.

FluentalTM (Al/AlF₃/ ${}^7\text{LiF}$)

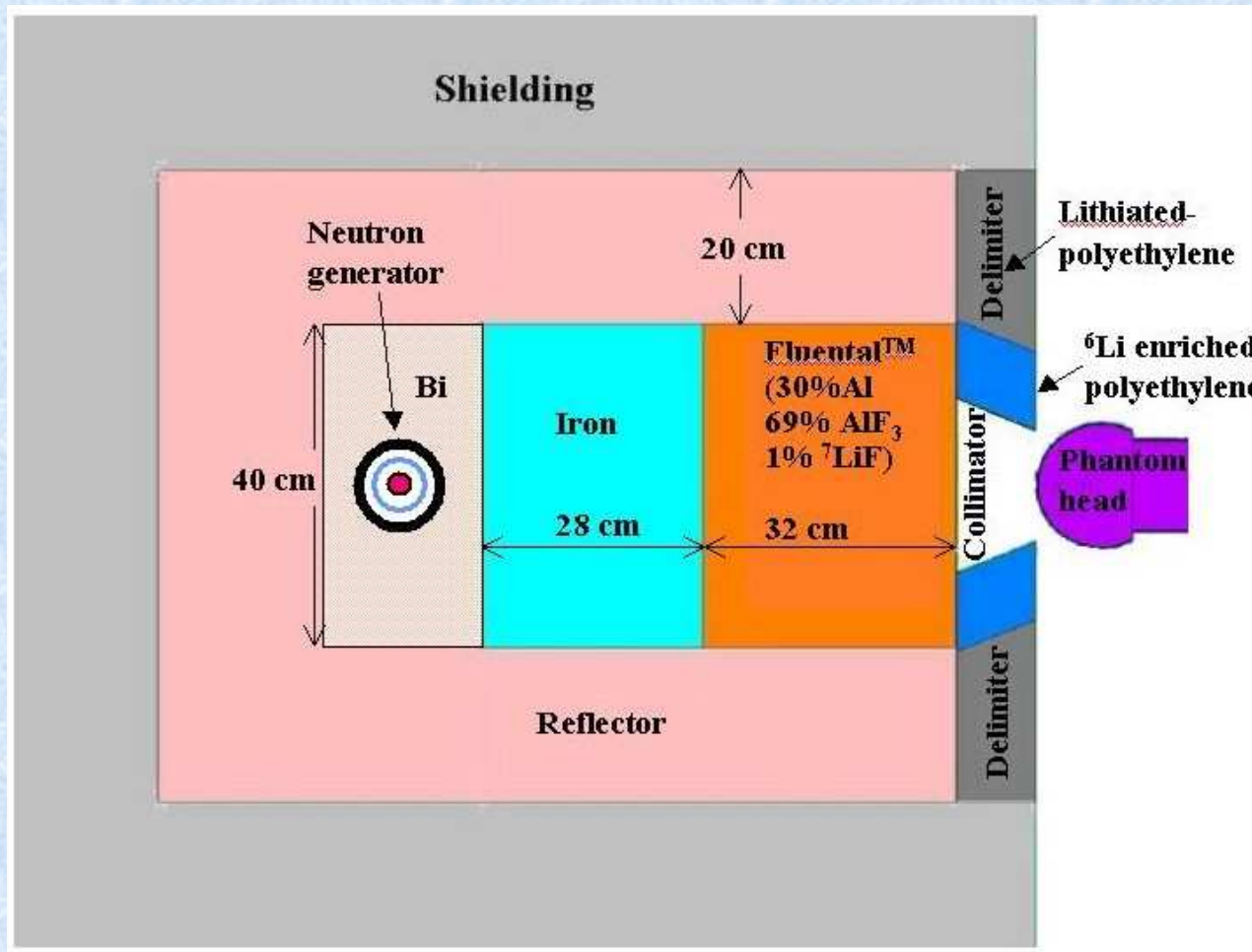
- Decreases the high neutron flux in the range ~100 keV and higher.

Neutron Moderation for BNCT

- Ideal epithermal neutron spectrum in the range of about 2keV to 20 keV peaking at around 10 keV.



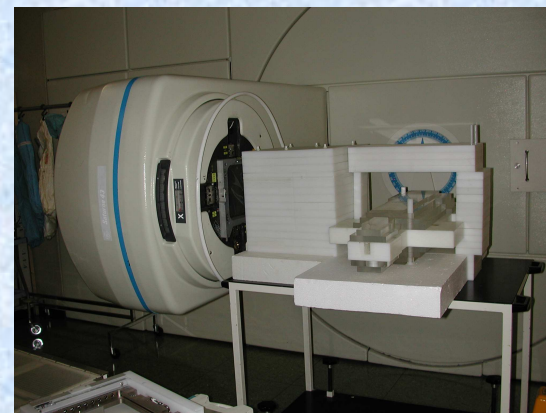
Beam-shaping assembly for BNCT

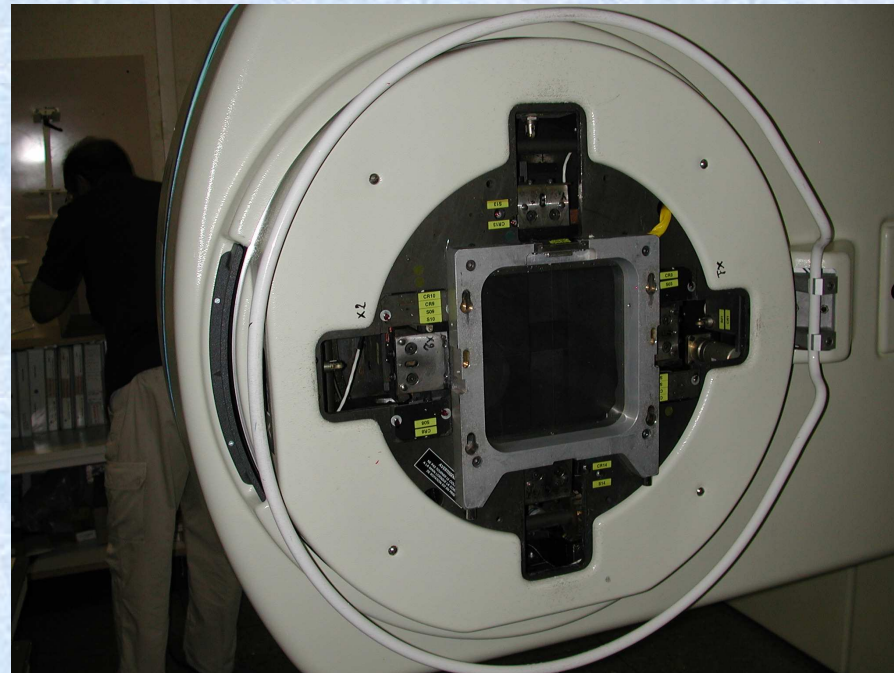


PhoNeR Radioterapia schermata ospedaliera BNCT (Boron Neutron Capture therapy) per trattamento di tumori con metastasi diffuse

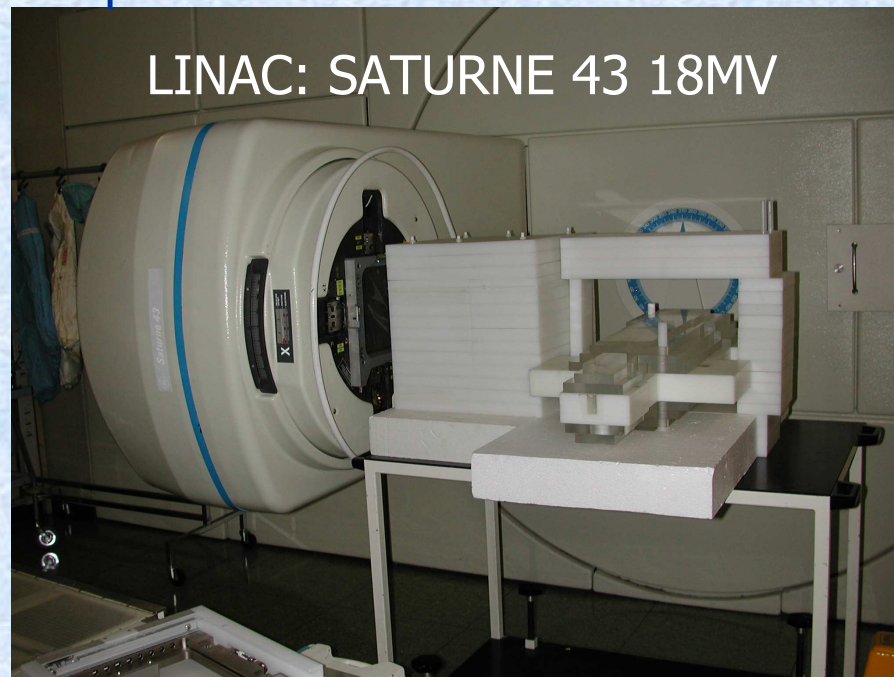
-INFN-Trieste

-Ospedale Gemelli, Roma



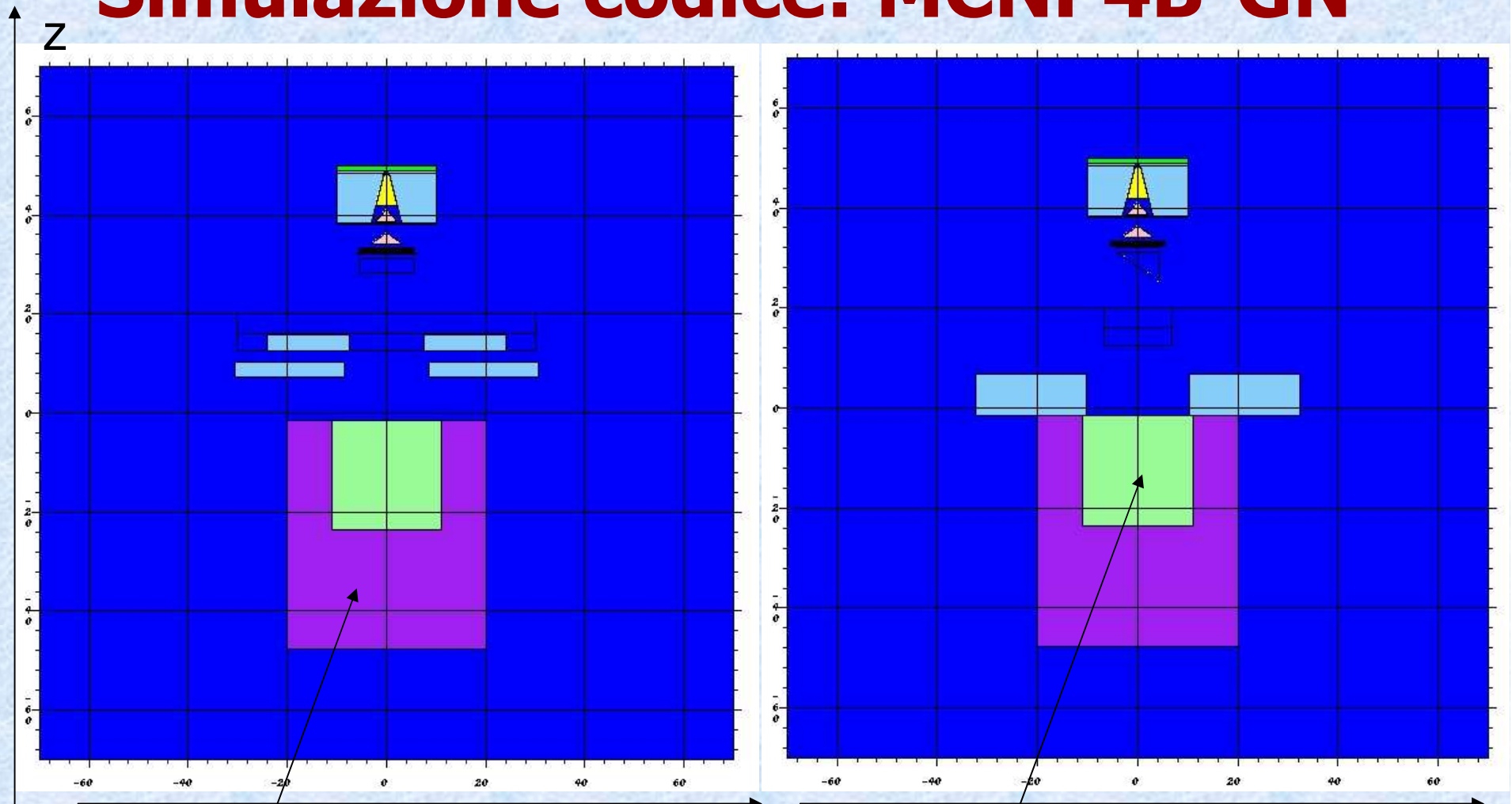


Installazione del collimatore presso l'ospedale Gemelli di Roma



LINAC: SATURNE 43 18MV

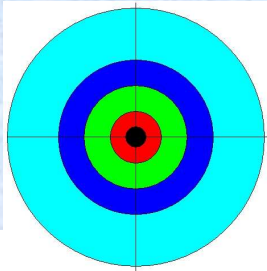
Simulazione codice: MCNP4B-GN



Blocco di polietilene
40x40x44 cm³

Blocco di piombo
20x20x22 cm³

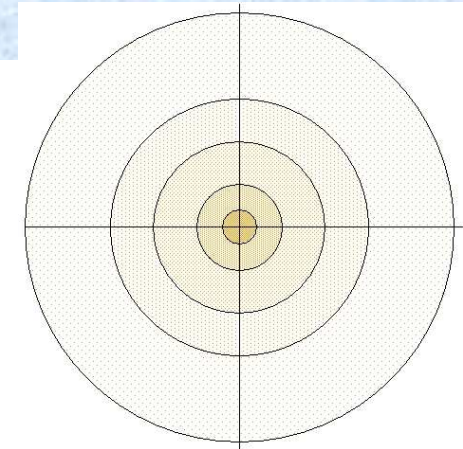
Spettro neutronico all'uscita del Pb



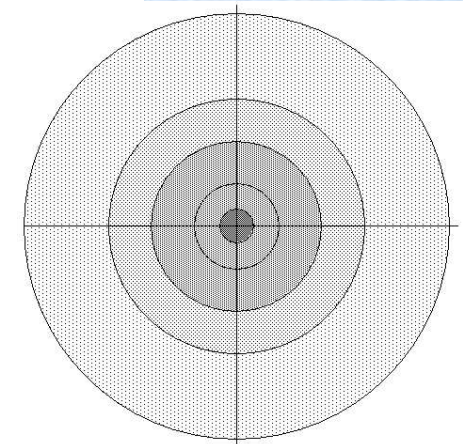
Tally di tipo 2

codice: MCNP4B-GN

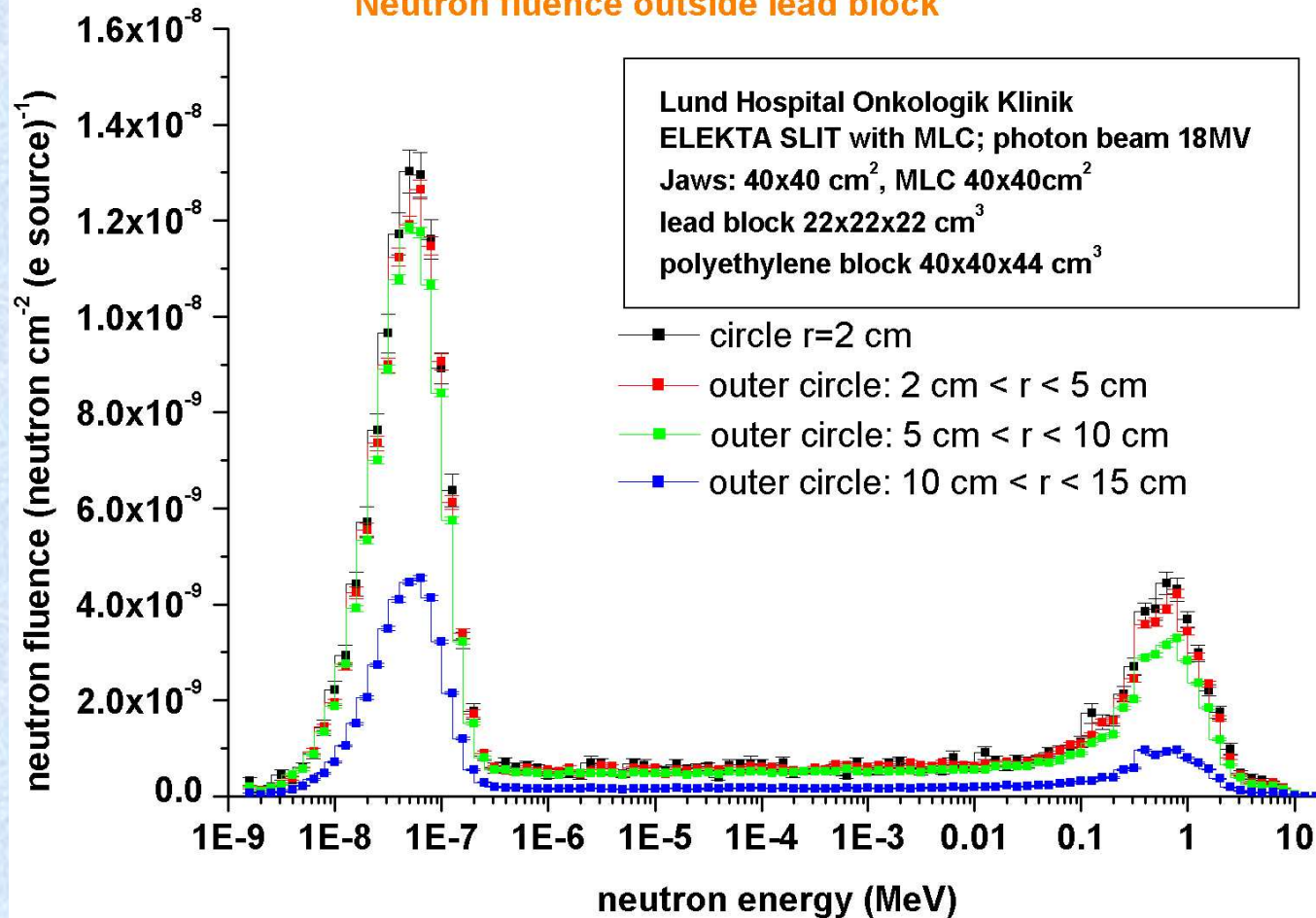
Flusso totale



flusso termico

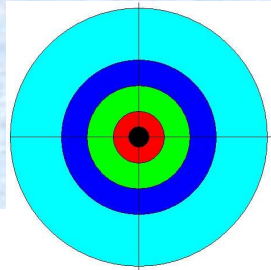


Neutron fluence outside lead block



Spettro neutronico all'uscita del Polietilene

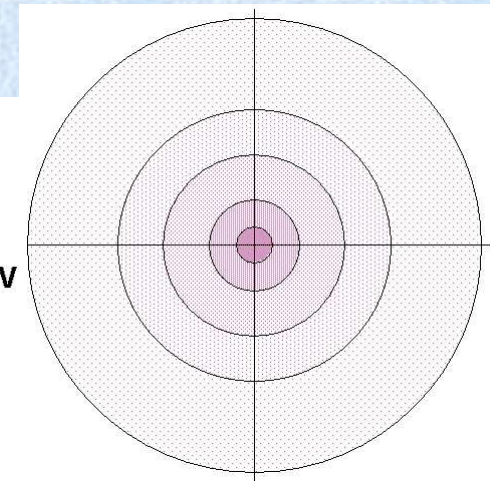
(40x40x27 cm³)



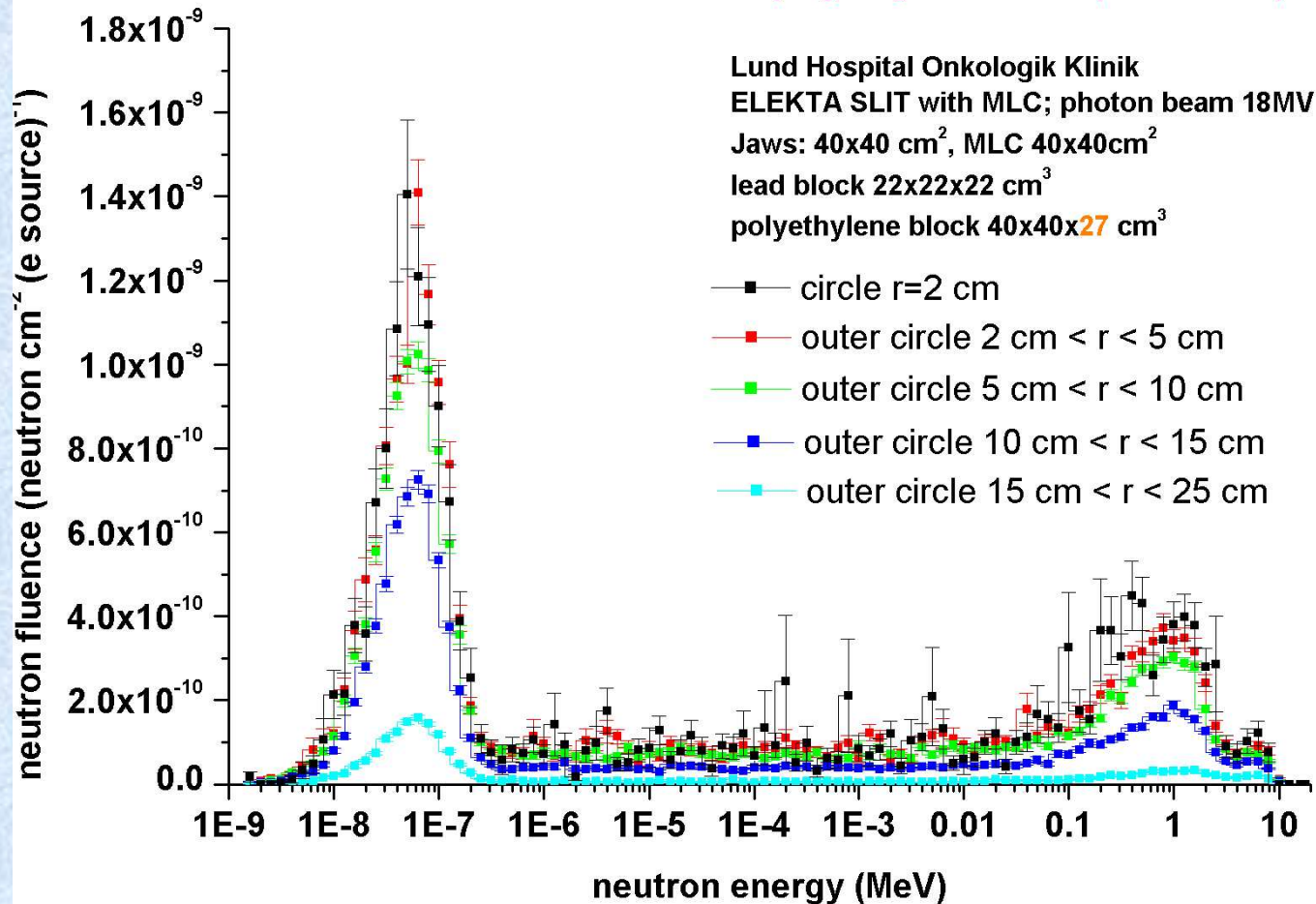
Tally di tipo 2

codice: MCNP4B-GN

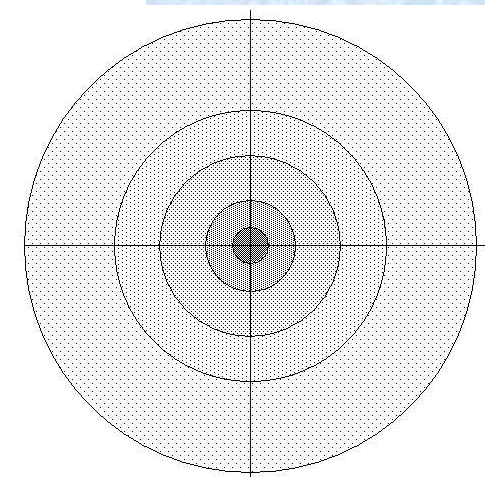
Flusso totale



Neutron fluence outside polyethylene block (5 cm thick)



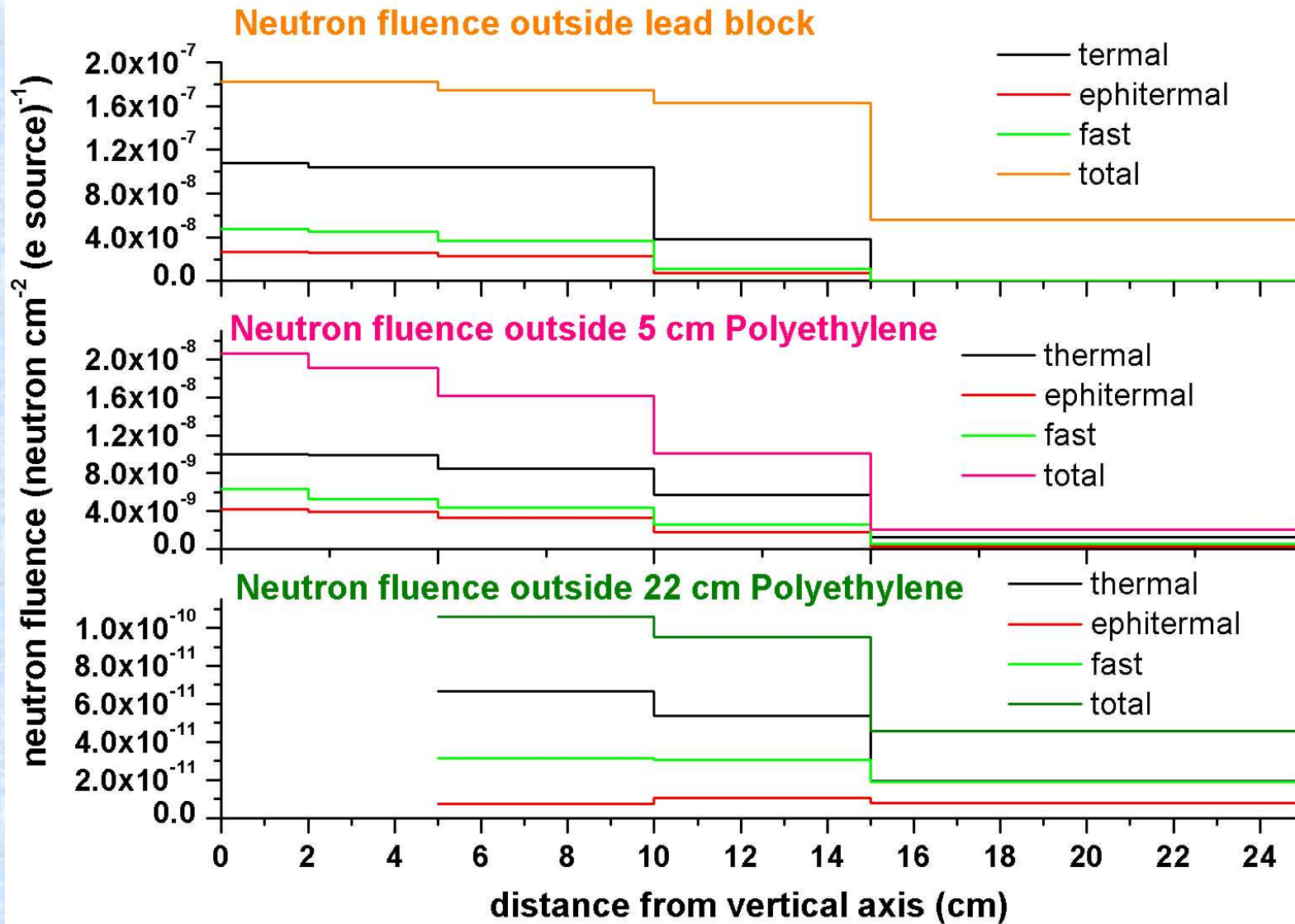
flusso termico



Flusso neutronico

Distanza	n	n	n	tot	
cm	termici	epiterm	veloci		
	n/cm ² /e ⁻	n/cm ² /e ⁻	n/cm ² /e ⁻	n/cm ² /e ⁻	
2	1.08E-7	2.63E-8	4.78E-8	1.82E-7	Piombo 20x20x22 cm ³
5	1.04E-7	2.59E-8	4.49E-8	1.75E-7	
10	1.04E-7	2.25E-8	3.67E-8	1.63E-7	
15	3.79E-8	7.31E-9	1.12E-8	5.64E-8	
25	6.57E-11	1.35E-11	1.62E-11	9.53E-11	
2	1E-8	4.18E-9	6.36E-9	2.06E-8	Polietilene 40x40x27 cm ³
5	9.89E-9	3.92E-9	5.3E-9	1.91E-8	
10	8.51E-9	3.28E-9	4.4E-9	1.62E-8	
15	5.74E-9	1.77E-9	2.58E-9	1.01E-8	
25	1.23E-9	2.88E-10	5.19E-10	2.04E-9	
10	6.68E-11	7.43E-12	3.16E-11	1.06E-10	Polietilene 40x40x44 cm ³
15	5.38E-11	1.07E-11	3.07E-11	9.51E-11	
25	1.93E-11	7.63E-12	1.9E-11	4.59E-11	

Flusso neutronico



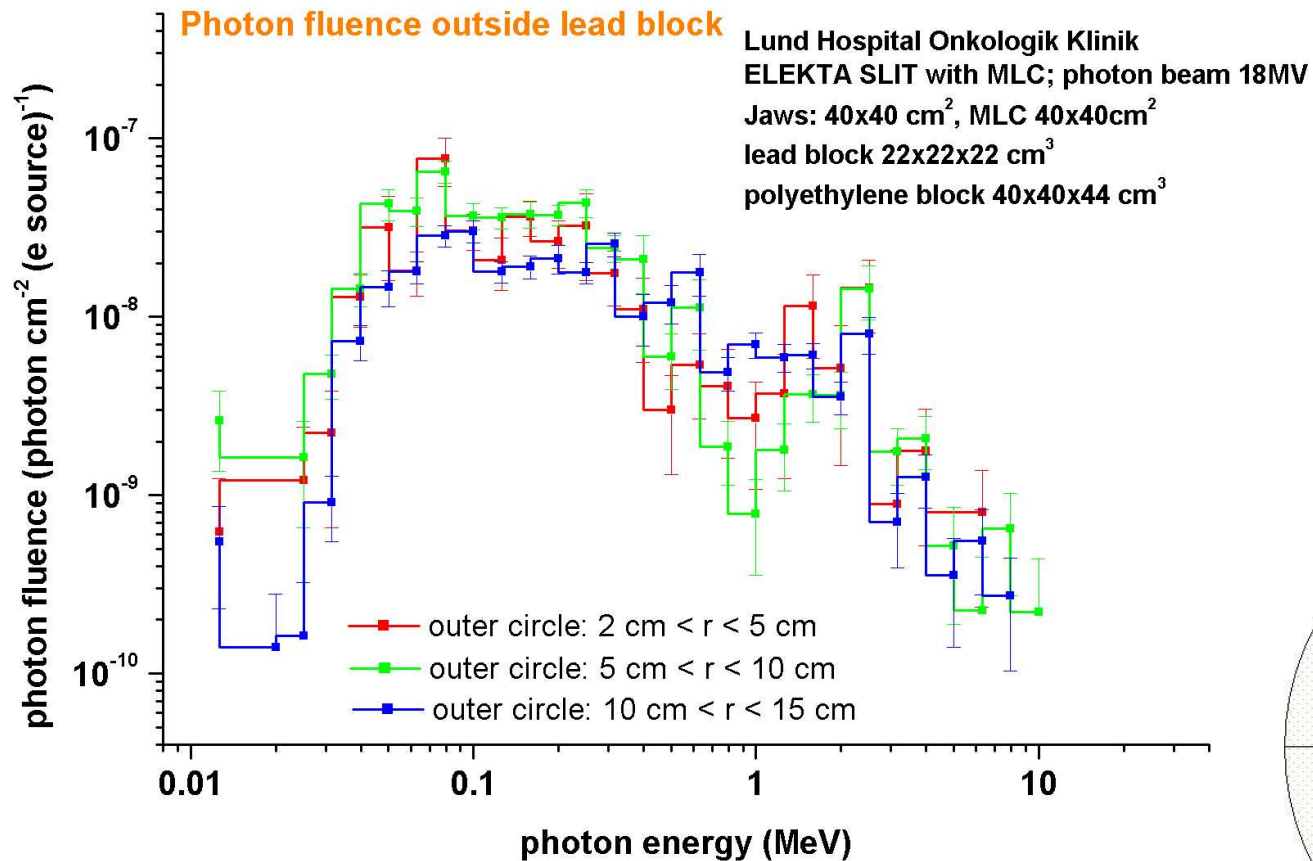
Fattore di conversione

- I risultati sono espressi in termini di $n/cm^2/e^-$ sorgente
- Per ottenere 1 Gy di dose gamma, in assenza del blocco di Pb sono necessari circa $1E15 e^-$
- Per erogare 1 Gy sono necessari circa 20 s

$1 n/cm^2/e^- = 5E13 n/cm^2/s$

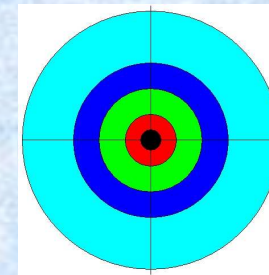
Distanza cm	tot $n/cm^2/e^-$	tot $n/cm^2/Gy$	tot $n/cm^2/s$
2	1.82E-7	1.82E8	9.1E6
5	1.75E-7	1.75E8	8.75E6
10	1.63E-7	1.63E8	8.15E6
15	5.64E-8	5.64E7	2.82E6
25	9.53E-11	9.53E4	4.76E3
2	2.06E-8	2.06E7	1.03E6
5	1.91E-8	1.91E7	9.55E5
10	1.62E-8	1.62E7	8.10E5
15	1.01E-8	1.01E7	5.05E5
25	2.04E-9	2.04E6	1.02E5
10	1.06E-10	1.06E5	5.3E3
15	9.51E-11	9.51E4	4.76E3
25	4.59E-11	4.59E4	2.26E3

Spettro fotonico all'uscita del Pb

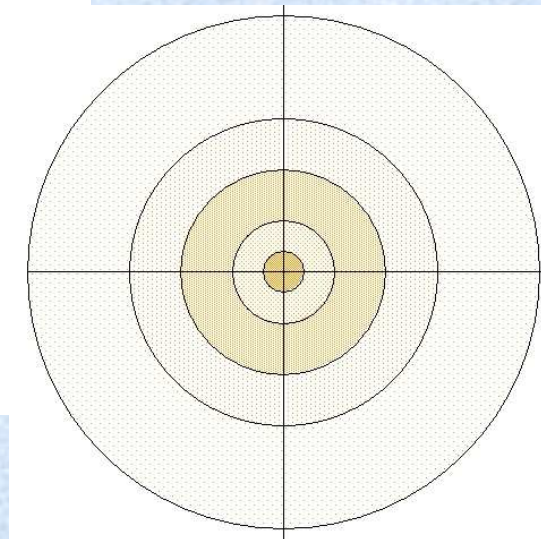


Tally di tipo 2

codice: MCNP4B-GN



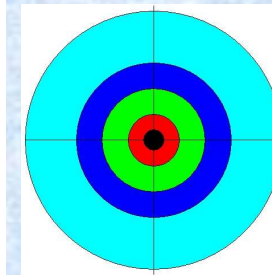
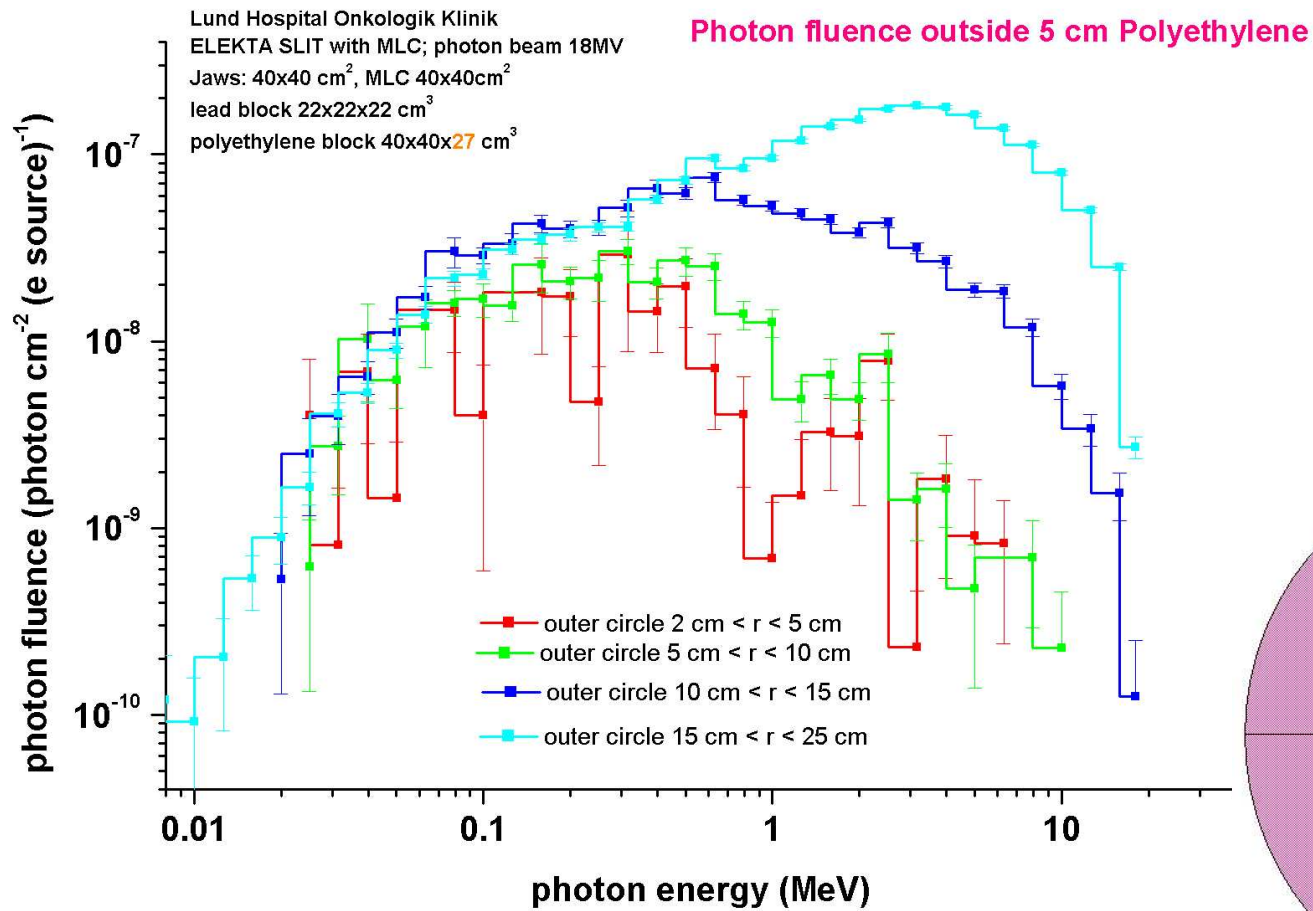
Flusso totale



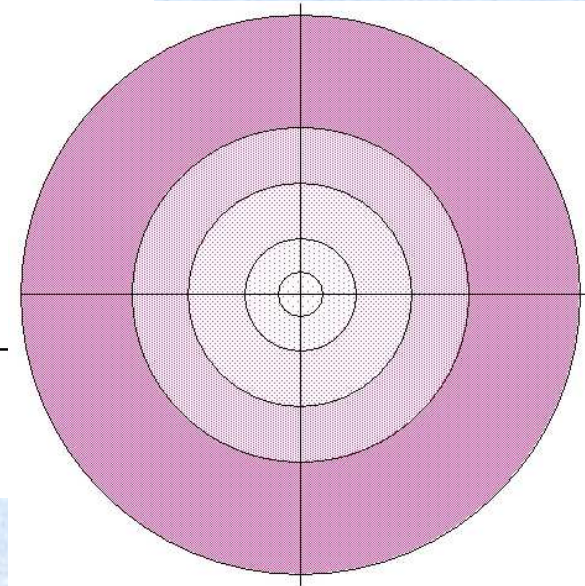
Spettro fotonico all'uscita del Polietilene (40x40x27 cm³)

Tally di tipo 2

codice: MCNP4B-GN



Flusso totale



Flusso neutronico vs fotonico

Distanza neutroni fotoni

cm n/cm²/e⁻ p/cm²/e

2 1.82E-7 5.23E-7

5 1.75E-7 3.73E-7

10 1.63E-7 4.57E-7

15 5.64E-8 2.8E-7

25 9.53E-11 1.24E-9

2 2.06E-8 1.07E-7

5 1.91E-8 1.67E-7

10 1.62E-8 3.08E-7

15 1.01E-8 9.16E-7

25 2.04E-9 2.19E-6

10 1.06E-10 3.06E-7

15 9.51E-11 3.77E-7

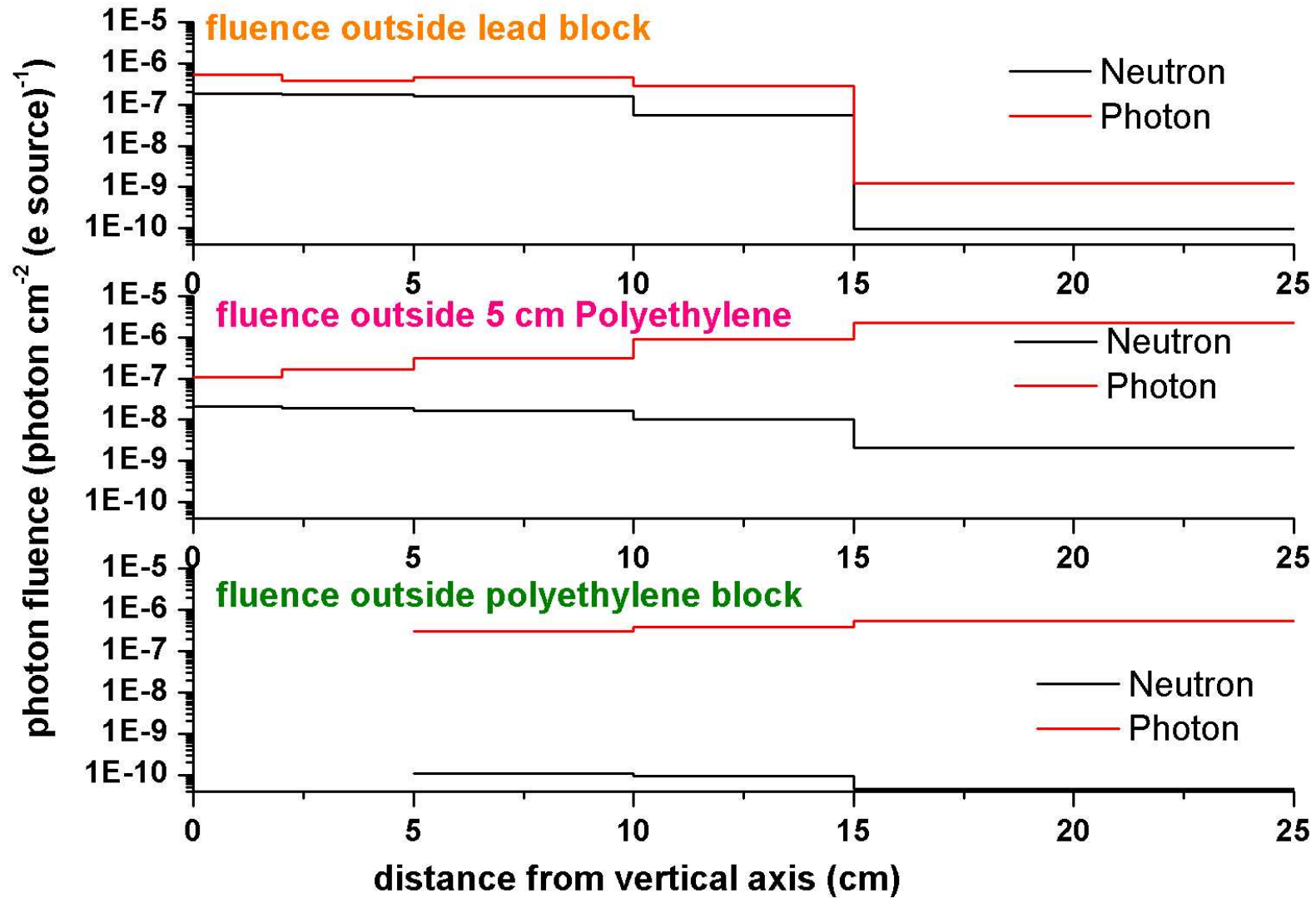
25 4.59E-11 5.29E-7

Piombo 20x20x22 cm³

Polietilene 40x40x27 cm³
flusso calcolato dopo 5 cm
di polietilene

Polietilene 40x40x44 cm³
flusso calcolato dopo 22
cm di polietilene

Flusso fotonico vs neutronico



Distanza	neutroni	neutroni H*(10)	fotoni	fotoni H*(10)
cm	n/cm²/Gy	mSv/Gy	p/cm²/Gy	mSv/Gy
2	1.82E8	10.600	5.23E8	0.512
5	1.75E8	9.220	3.73E8	0.367
10	1.63E8	7.800	4.57E8	0.387
15	5.64E7	2.409	2.8E8	0.385
25	9.53E4	0.003	1.24E6	0.002
2	2.06E7	1.022	1.07E8	0.160
5	1.91E7	1.310	1.67E8	0.377
10	1.62E7	0.950	3.08E8	0.481
15	1.01E7	0.614	9.16E8	3.510
25	2.04E6	0.131	2.19E9	18.100
10	1.06E5	0.015	3.06E8	0.580
15	9.51E4	0.003	3.77E8	0.972
25	4.59E4	0.005	5.29E8	4.600

PROSPETTIVE

- Possibilità di installazione delle facilities: sorgenti compatte e LINAC per (γ, n) nei reparti di radioterapia degli ospedali
- Case costruttrici di LINAC interessate per la costruzione di acceleratori specifici per (γ, n)
- Possibilità del frazionamento della dose in più sedute
- Trattamento di tumori con metastasi diffuse (altrimenti incurabili): tumore al fegato, tumore alla pleura da asbestosi, melanoma diffuso dell'arto



Interazione tra neutroni e tessuto:

i neutroni interagiscono con i nuclei atomici.

• cattura neutronica: H, N

• urto elastico: H, C, N, O

• urto anelastico: C, N, O

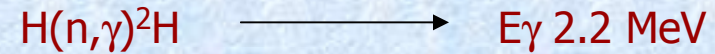
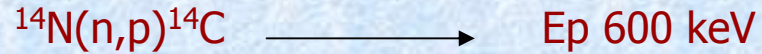
• reazioni nucleari

Tessuto	Composizione elementare (percentuale di massa)					ρ (Kg m ⁻³)
	H	C	N	O	altro	
Tessuto adiposo	11.4	59.8	0.7	27.8	0.1 Na, 0.1 S, 0.1 Cl	950
Sangue (eritrocito/plasma 44:56 di massa)	10.2	11.0	3.3	74.5	0.1 Na, 0.1 P, 0.2 S, 0.3 Cl, 0.2 K, 0.1 Fe	1060
Cervello (materia grigia/ materia bianca 50:50 di massa)	10.7	14.5	2.2	71.2	0.2 Na, 0.4 P, 0.2 S, 0.3 Cl, 0.3 K	1040
Seno	10.6	33.2	3.0	52.7	0.1 Na, 0.1 P, 0.2 S, 0.1 Cl	1020
Nuclei cellula	10.6	9.0	3.2	74.2	2.6 P, 0.4 S	1000
Occhio	9.6	19.5	5.7	64.6	0.1 Na, 0.1 P, 0.3 S, 0.1 Cl	1070
Tratto intestinale	10.6	11.5	2.2	75.1	0.1 Na, 0.1 P, 0.1 S, 0.2 Cl, 0.1 K	1030
Cuore	10.3	12.1	3.2	73.4	0.1 Na, 0.1 P, 0.2 S, 0.3 Cl, 0.2 K, 0.1 Fe	1060
Rene	10.3	13.2	3.0	72.4	0.2 Na, 0.2 P, 0.2 S, 0.2 Cl, 0.2 K, 0.1 Ca	1050
Fegato	10.2	13.9	3.0	71.6	0.2 Na, 0.3 P, 0.3 S, 0.2 Cl, 0.3 K	1060
Polmone	10.3	10.5	3.1	74.9	0.2 Na, 0.2 P, 0.3 S, 0.3 Cl, 0.2 K	1050 (sgonfio) 260 (gonfio)
Lymph	10.8	4.1	1.1	83.2	0.3 Na, 0.1 S, 0.4 Cl	1030
Muscolo	10.2	14.3	3.4	71.0	0.1 Na, 0.2 P, 0.3 S, 0.1 Cl, 0.4 K	1050
Ovaie	10.5	9.3	2.4	76.8	0.2 Na, 0.2 P, 0.2 S, 0.2 Cl, 0.2 K	1050
Pancreas	10.6	16.9	2.2	69.4	0.2 Na, 0.2 P, 0.1 S, 0.2 Cl, 0.2 K	1040
Scheletro-cartilagine	9.6	9.9	2.2	74.4	0.5 Na, 2.2 P, 0.9 S, 0.3 Cl	1100
Scheletro-osso corticale	3.4	15.5	4.2	43.5	0.1 Na, 0.2 Mg, 10.3 P, 0.3 S, 22.5 Ca	1920
Scheletro-midollo rosso	10.5	41.4	3.4	43.9	0.1 P, 0.2 S, 0.2 Cl, 0.2 K, 0.1 Fe	1030
Scheletro-spugnosa	8.5	40.4	2.8	36.7	0.1 Na, 0.1 Mg, 3.4 P, 0.2 S, 0.2 Cl, 0.1 K, 7.4 Ca, 0.1 Fe	1180
Scheletro-midollo giallo	11.5	64.4	0.7	23.1	0.1 Na, 0.1 S, 0.1 Cl	980
Pelle	10.0	20.4	4.2	64.5	0.2 Na, 0.1 P, 0.2 S, 0.3 Cl, 0.1 K	1090
Milza	10.3	11.3	3.2	74.1	0.1 Na, 0.3 P, 0.2 S, 0.2 Cl, 0.3 K	1060
Testicoli	10.6	9.9	2.0	76.6	0.2 Na, 0.1 P, 0.2 S, 0.2 Cl, 0.2 K	1040
Tiroide	10.4	11.9	2.4	74.5	0.2 Na, 0.1 P, 0.1 S, 0.2 Cl, 0.1 K, 0.1 I	1050

Tab.5. Il Composizione elementare e densità dei tessuti del corpo (ICRU 44)

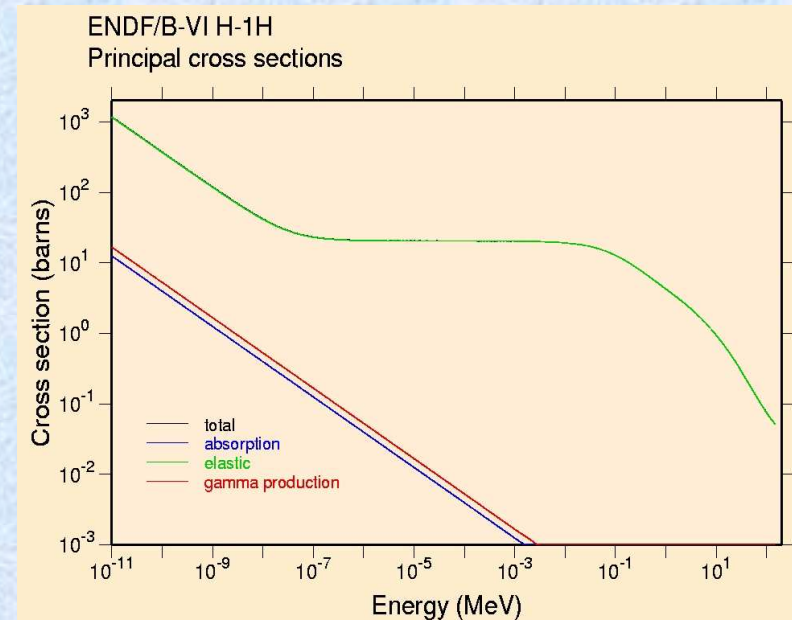
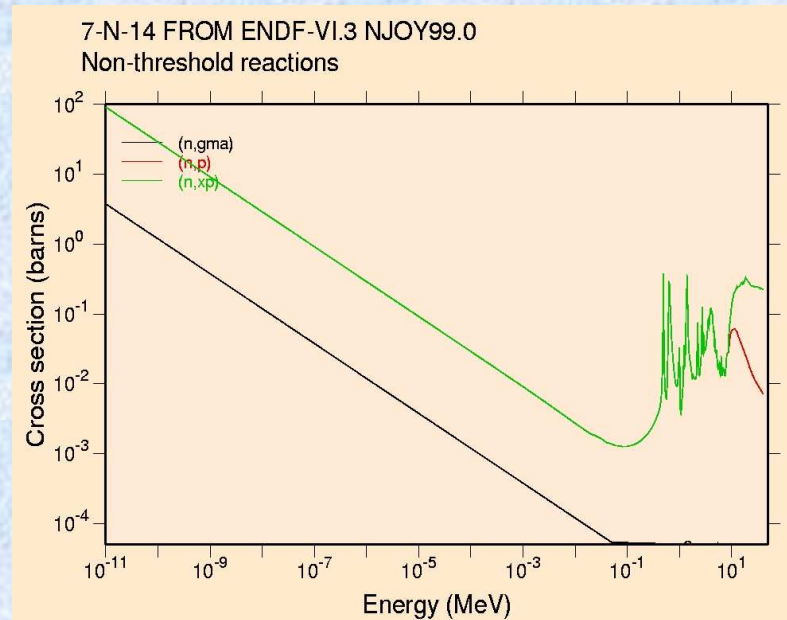
Cattura neutronica

Questo tipo di interazione domina per energie termiche (25 meV)



I protoni sono particelle ad alto LET e dissipano tutta la loro energia entro 10 mm dal punto di produzione

Come conseguenza della diffusione Compton, sono prodotti altri fotoni di circa 1 MeV



Ipotizziamo di irradiare con neutroni termici un volume di tessuto di diametro < 1 cm. L' 80% della dose assorbita è dovuta alla reazione ${}^{14}\text{N}(n,p){}^{14}\text{C}$.

Se il volume irradiato è di dimensioni maggiori (torso): $D_{(\text{H}(n,\gamma){}^2\text{H})}/D_{({}^{14}\text{N}(n,p){}^{14}\text{C})} = 100$

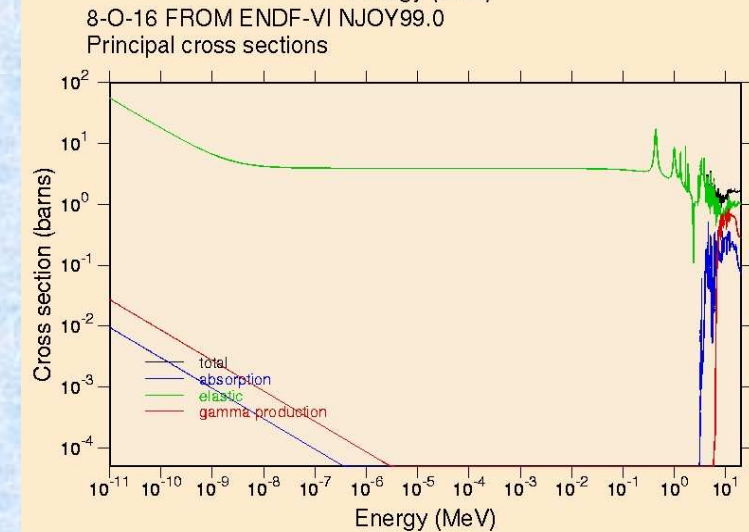
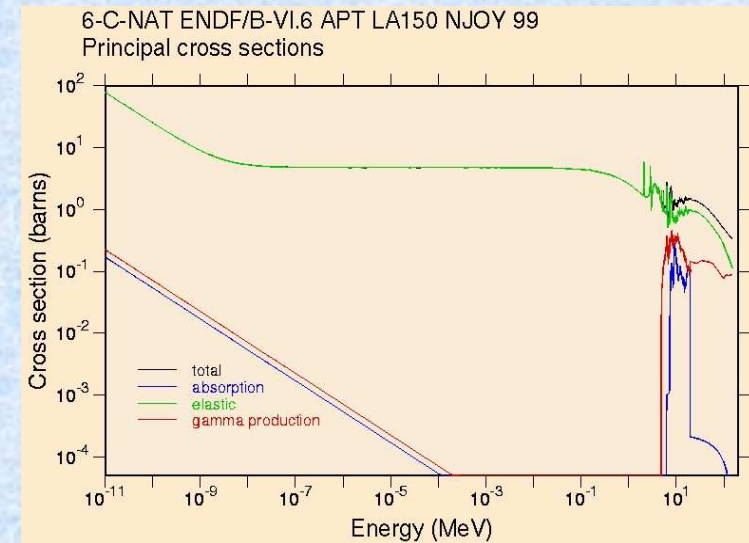
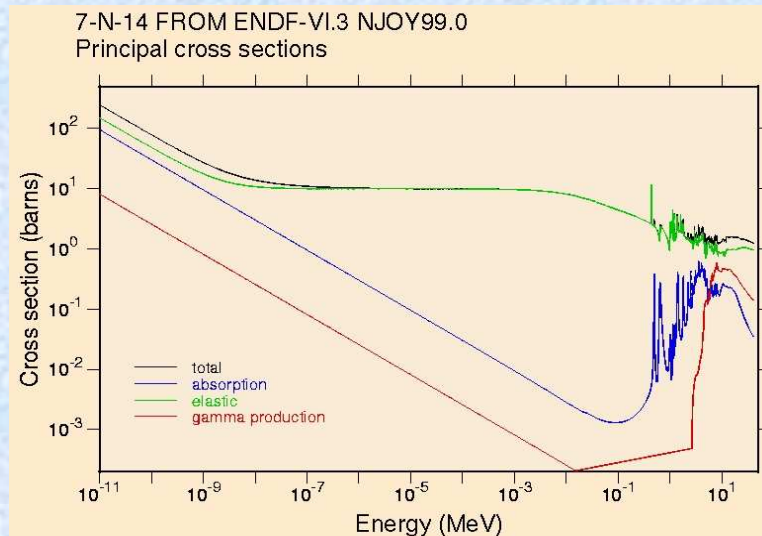
Urto elastico

E' una interazione senza un'energia di soglia.

Tra **10 keV e 18 MeV** prevale l'urto elastico con nuclei di idrogeno → tale effetto contribuisce per 97%-69% alla dose assorbita totale.

Neutroni di circa 100 eV, urtano elasticamente con C, N, O generando:

1. protoni di rinculo che rilasciano energia in pochi mm (probabilità 50%).
2. nuclei di rinculo (probabilità 10% - 15%)



Urto anelastico

E' una interazione con un'energia di soglia.

Il neutrone perde energia eccitando un nucleo che ritorna allo stato fondamentale attraverso l'emissione di un fotone.

L'energia di soglia di tale reazione per nuclei di O, N, C è compresa tra 0.5 – 13 MeV

Tale effetto contribuisce solo per 1% - 2 % alla dose assorbita totale.

Reazioni nucleari

E' una interazione con un'energia di soglia.

Il neutrone perde energia eccitando un nucleo che ritorna allo stato fondamentale attraverso l'emissione di una particella carica (protone, deuterio, trizio o alfa) e di un fotone.

L'energia di soglia di tale reazione per nuclei di O, N, C è compresa tra 5 – 12 MeV

FANTOCCI per dosimetria neutronica

I neutroni interagiscono con i nuclei atomici pertanto, nella scelta del tessuto sostitutivo, per la realizzazione di un fantoccio, bisogna verificare che la frazione in massa di H, C, N ed O sia uguale a quella del tessuto reale.

Alcuni tessuti sostitutivi (percentuale in massa e densità) [1]:

	Water	Polyethylene	PMMA	TE-liquid	Muscle	Brain
H	11.2	14.4	8	10.2	10.2	10.7
C		85.6	60	12	14.3	14.5
O	88.8		32	74.2	71	71.2
N				3.6	3.4	2.2
ρ (kg m⁻³)	1000	920	1170	1070	1050	1040

[1] ICRU report 44 (1989)

FANTOCCI usati per BNCT

fascio di neutroni epitermici (reattore HFR, Petten, Olanda)

Dose a due cm di profondità relativa a quella dell'acqua

- Il fantoccio è stato esposto a 30 cm di distanza dall'uscita del fascio.
- L'asse centrale del fascio coincide con l'asse del fantoccio
- Il fantoccio è stato irradiato usando un fascio di 12 cm di diametro

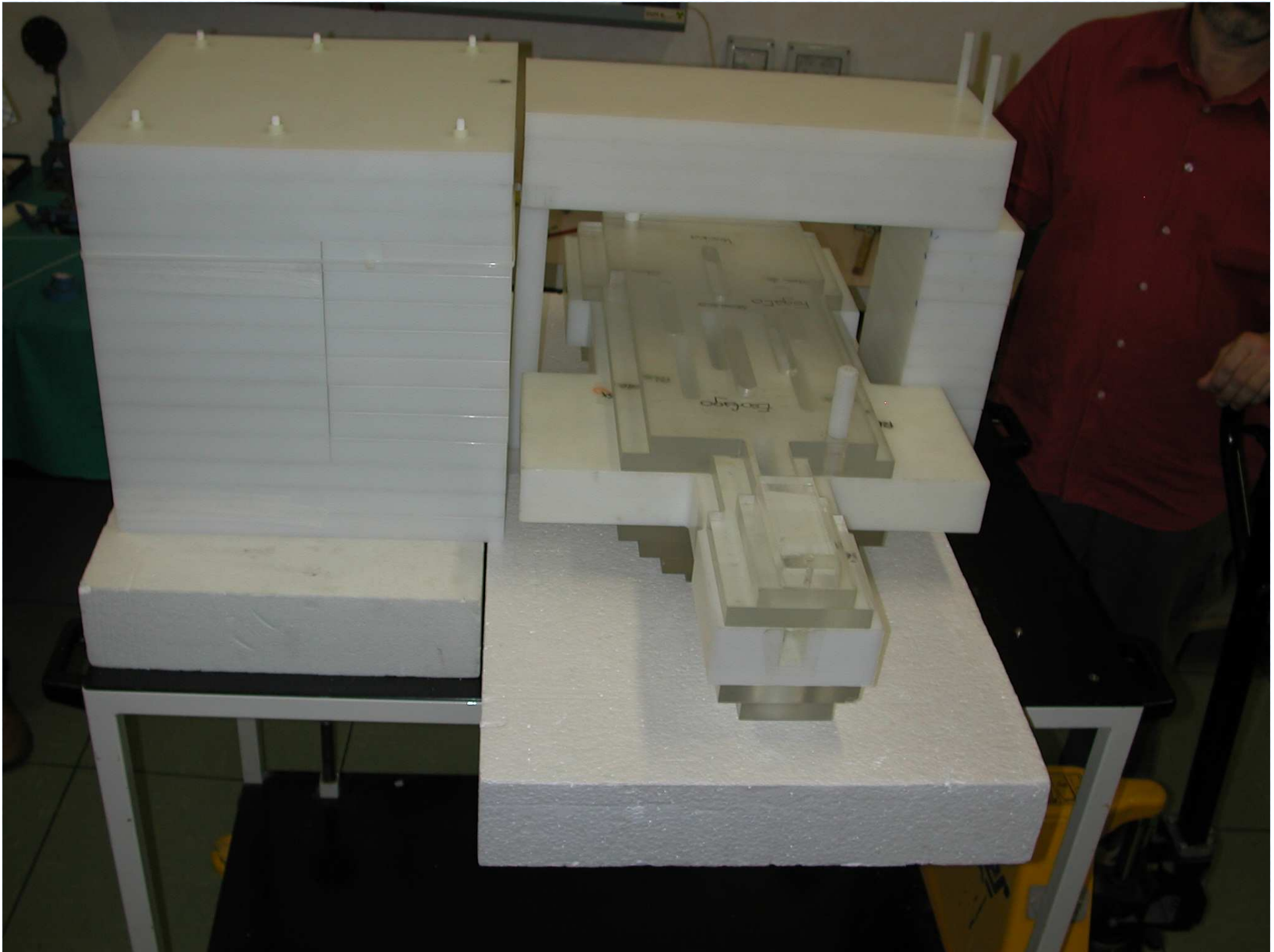
	Polyethylene	PMMA	Water	TE-liquid	Jimmy
Thermal neutron fluence	117	99	100	98	104
Gamma-ray dose	134	88	100	96	101.8
Fast neutron dose	77	97	100	100	91

Per dosimetria si usano: acqua e TE liquido

Per ragioni pratiche l'acqua è usata come fantoccio di riferimento

Per misure che richiedono un fantoccio di materiale solido si usa PMMA

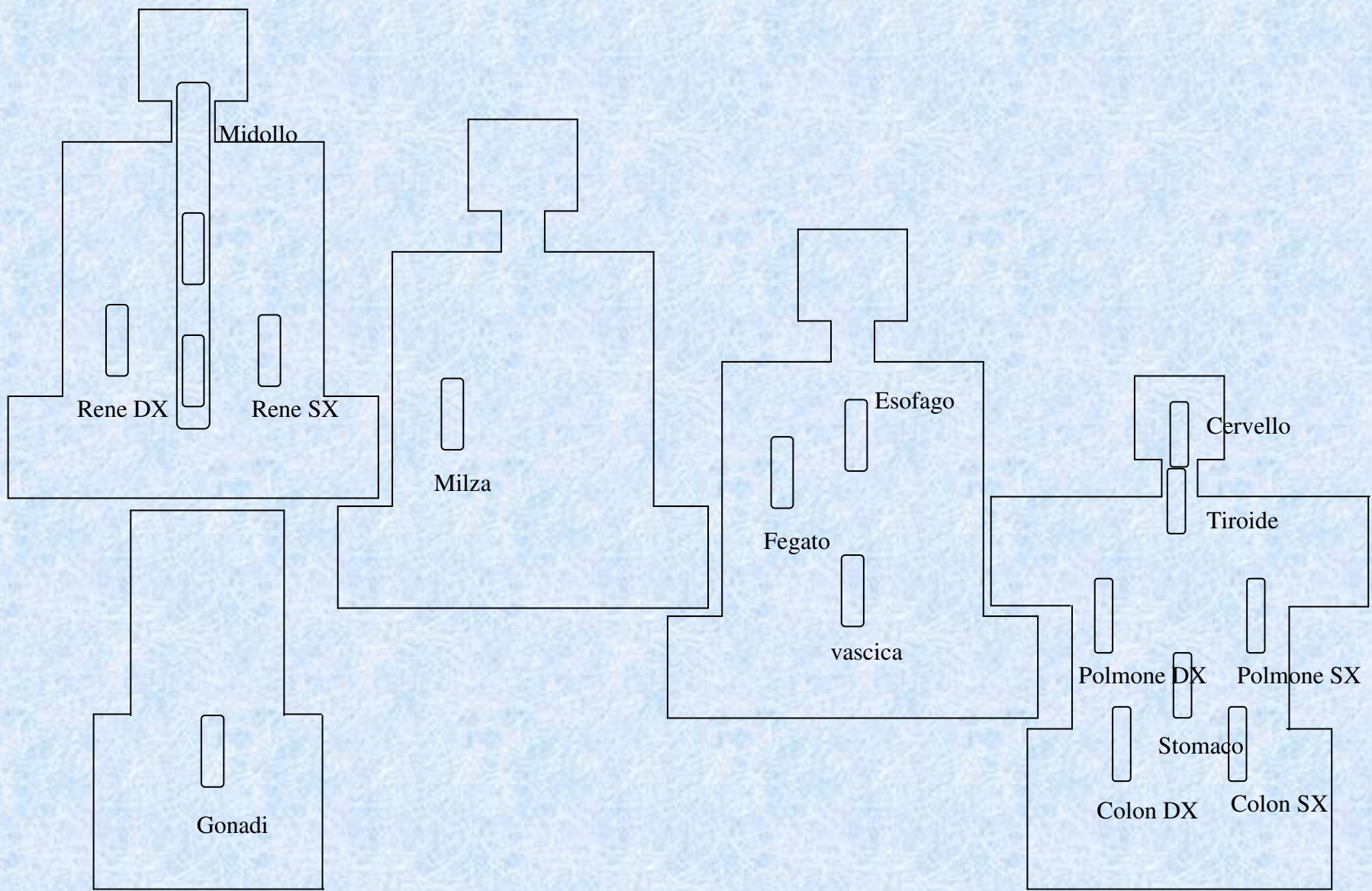




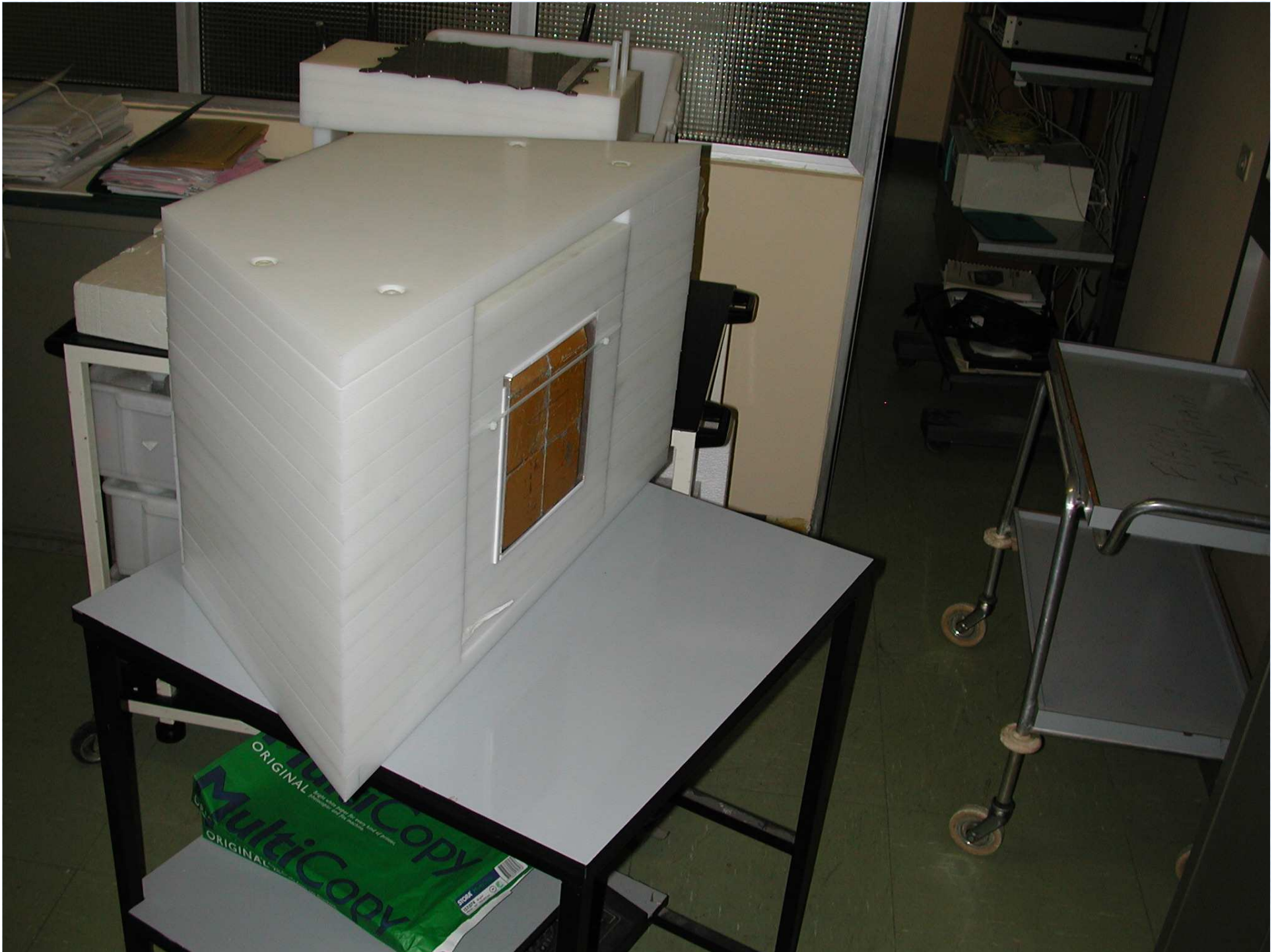


Fegato Stoma

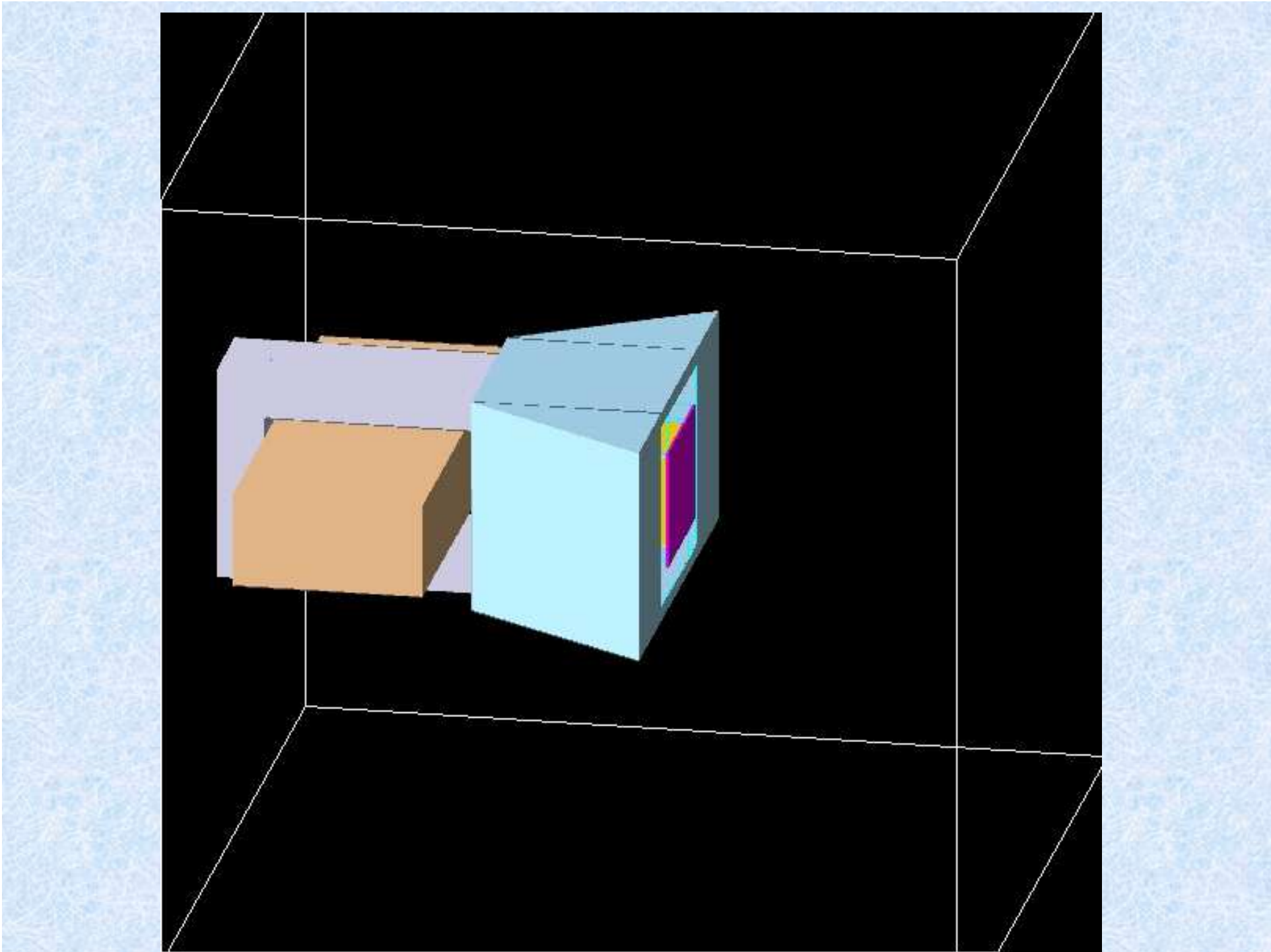


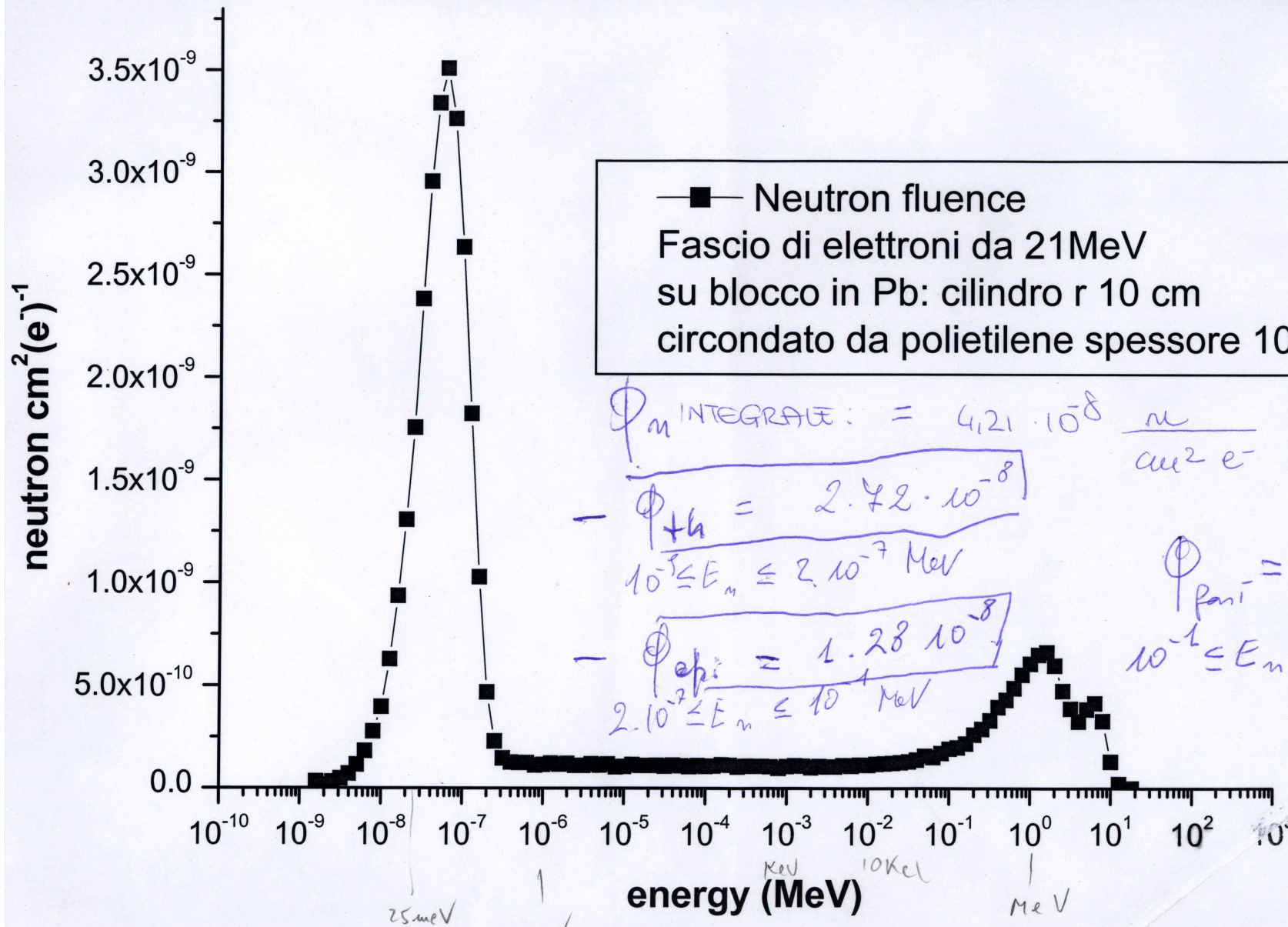


	Cervello 55 B.(0.89)	
	Tiroide	
	Esofago	
Polmone Dx 11 B.(0.91)	Midollo Alto	Polmone Sx 4 B.(0.80)
Fegato 14 B.(2.3)	Stomaco 8 B.(1.7)	Milza 17 B.(0.92)
Rene Dx	Midollo Basso, Pancreas	Rene Sx 6 B.(1.8)
Colon Dx	Gonadi 27 B.(1.8)	Colon Sx
	Vescica	









—■— Neutron fluence
 Fascio di elettroni da 21MeV
 su blocco in Pb: cilindro r 10 cm
 circondato da polietilene spessore 10 cm

$\Phi_n^{\text{INTEGRATE}} = 4.21 \cdot 10^8 \frac{n}{\text{cm}^2 \text{e}^-}$

$\Phi_{th} = 2.72 \cdot 10^{-8}$
 $10^{-5} \leq E_n \leq 2 \cdot 10^{-7} \text{ MeV}$

$\Phi_{epi} = 1.28 \cdot 10^{-8}$
 $2 \cdot 10^{-2} \leq E_n \leq 10^1 \text{ MeV}$

$\Phi_{fast} = 8.17 \cdot 10^{-9}$
 $10^{-1} \leq E_n \leq 20 \text{ MeV}$

DOSIMETRIA NEUTRONICA APPLICAZIONI AMBIENTALI

**Spettrometria e Dosimetria
di neutroni in atmosfera**

Cosmic rays

GCR (Galactic cosmic Rays): galactic origin, generated outside the solar system.

ACR (Anomalous Cosmic Rays): galactic origin, generated in the
interplanetary space.

SCR (Solar Cosmic Rays): events following the 11 year cycles.

Primary radiation: 87% protons, 12% α particles, 1% HZE (High Z Elements).

Secondary radiation: it is produced by interaction of primary cosmic rays with
atmospheric nuclei (O and N);

The atmospheric cascade is characterized by:

- 1. N component (nucleonic component)** → particles subjected to strong interaction
- 2. Soft component (electromagnetic component)** → electrons, positrons and
electromagnetic quanta
- 3. Hard component (muon component).**

Fondo Ambientale

Radiazione di origine cosmica

Radioattività presente nelle rocce (Radon)

Valore medio :	2.4 mSv/anno
radiazione di origine cosmica	0.4mSv/anno
radioattività nelle rocce (Radon)	2.0 mSv/anno

Il fondo dovuto alla radiazione cosmica (GCR) varia con

- Latitudine
Campo magnetico terrestre
maggiore ai poli
minore all'equatore
- Altitudine
maggiore in alta quota
- Attività solare (Cicli di 11 anni)
minore con attività max
maggiore con attività minima

Dosimetria ad alta quota: perchè?

Sono in continuo aumento le attività umane che espongono gli individui alla radiazione cosmica

- aumentano i tempi di volo, il numero dei passeggeri, le quote di volo**
- la nuova generazione di aerei militari raggiunge i 20-30 km (Tornado)**
- aumentano i viaggi nello spazio e le lunghe permanenze sui moduli abitativi**

Sono stati recentemente abbassati dalle commissioni internazionali

i limiti annuali d'esposizione massimi consentiti:

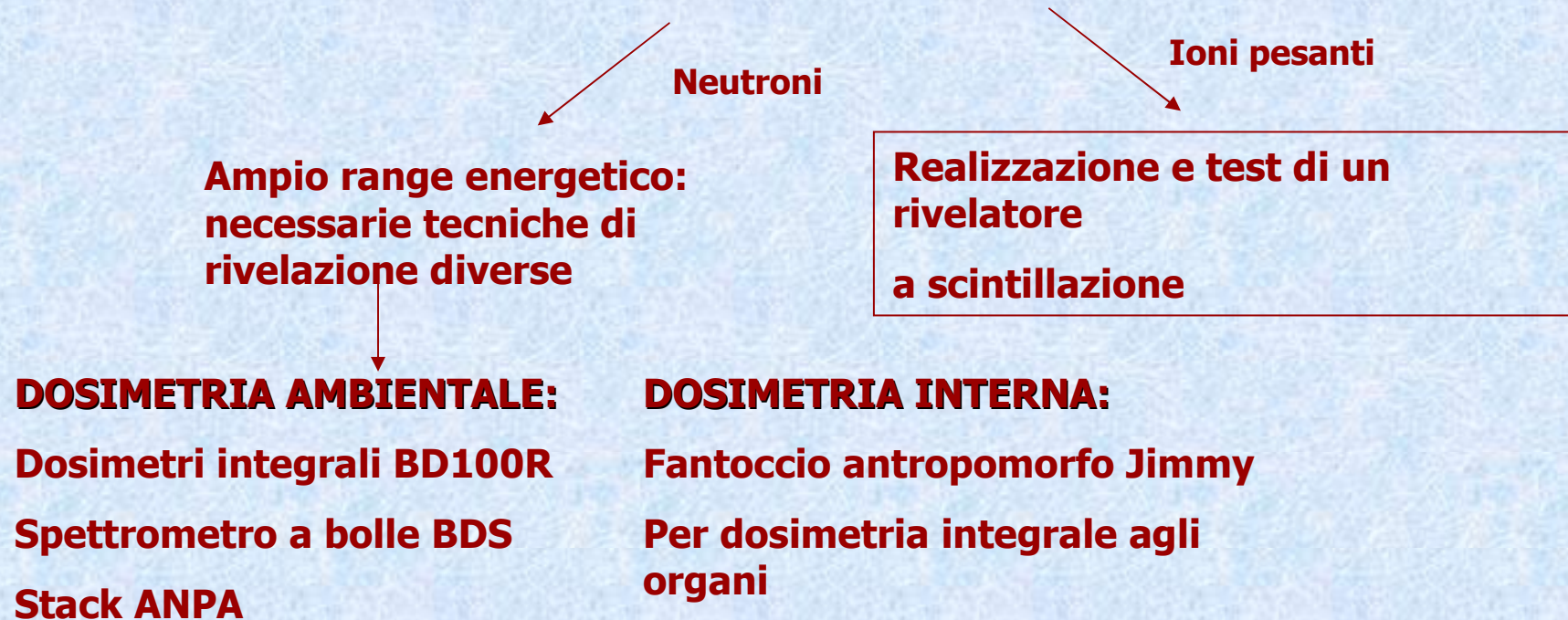
Da 50 mSv a 20 mSv per i lavoratori esposti

Da 5 mSv a 1 mSv per la popolazione

E' stata inoltre sottolineata la necessità di considerare gli effetti dovuti alle basse dosi

Tecniche di misura e simulazione

Per poter realizzare dosimetria di routine è necessario focalizzarsi sulla dosimetria passiva, i cui vantaggi, oltre a non richiedere assistenza, sono l'assenza di elettronica, la maneggevolezza, le dimensioni ridotte.

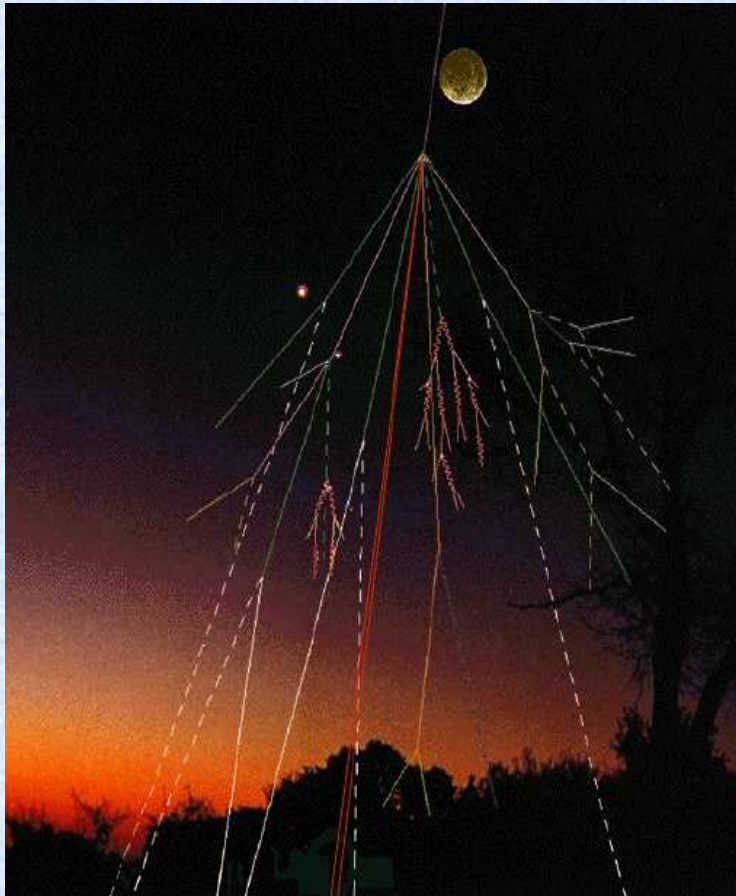


- Codice di simulazione GEANT3, per la valutazione degli spettri energetici della radiazione secondaria prodotta in atmosfera dai raggi cosmici primari (in primo luogo protoni). Il range energetico considerato dal codice è 10KeV-10TeV.

Neutron from cosmic rays

Neutrons in atmosphere arise from: 1. the interaction of primary cosmic rays with O and N atmosphere nuclei;

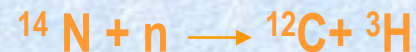
2. Nuclear decays like:



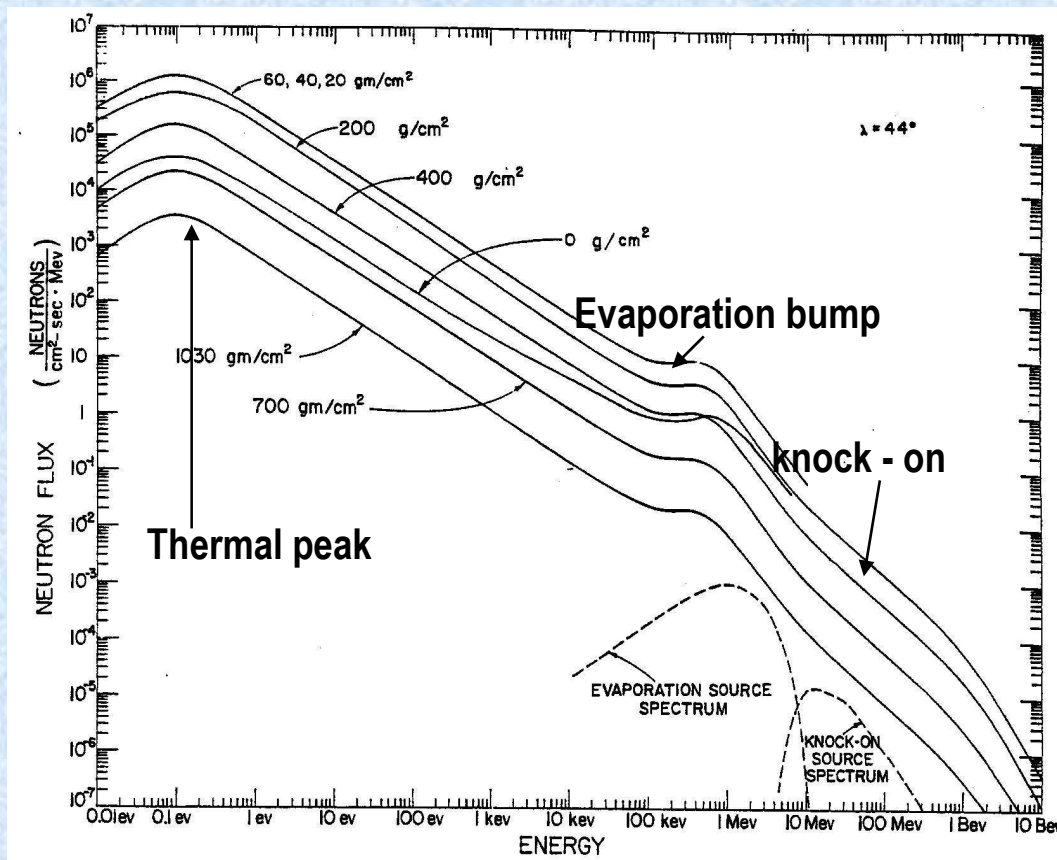
Most of the thermal neutron in atmosphere are absorbed in such processes as:



5% of neutron having energies greater than 4 MeV take part in the reaction:



Characteristics of the neutron spectra in atmosphere



- **Low energy peak at about 0.1 eV** (the energy shift depends on the capture processes of thermal neutron with formation of radioactive nuclei).
- **Intermediate energy bump at about 1 MeV** arising from the evaporation process of the excited nucleus.

- **High energy peak at about 100 MeV.** These neutrons derive from the direct interaction of the high energy incident particle with the nucleus.

Influence factors on air shower cascade characteristics: 1. Solar activity

Solar surface is periodically characterized by outstanding events (*solar flares, Coronal Mass Ejections, Filament Disruptions*).

The solar activity is described by sunspot numbers, characterized by an 11-year cycle.

The sunspot number unit is the Wolf number:

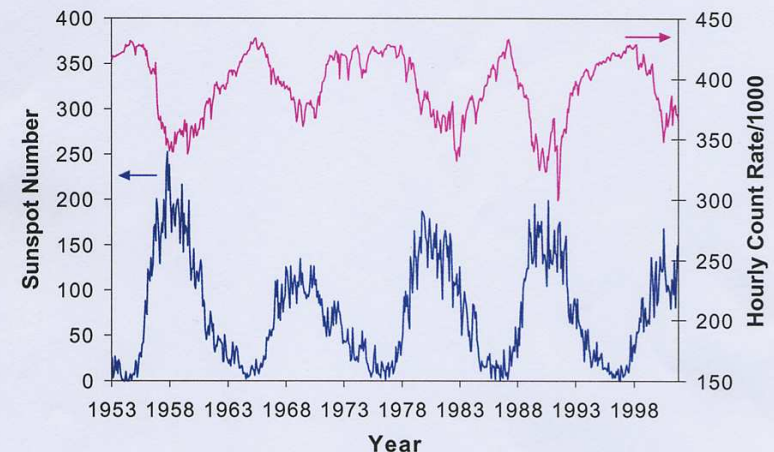
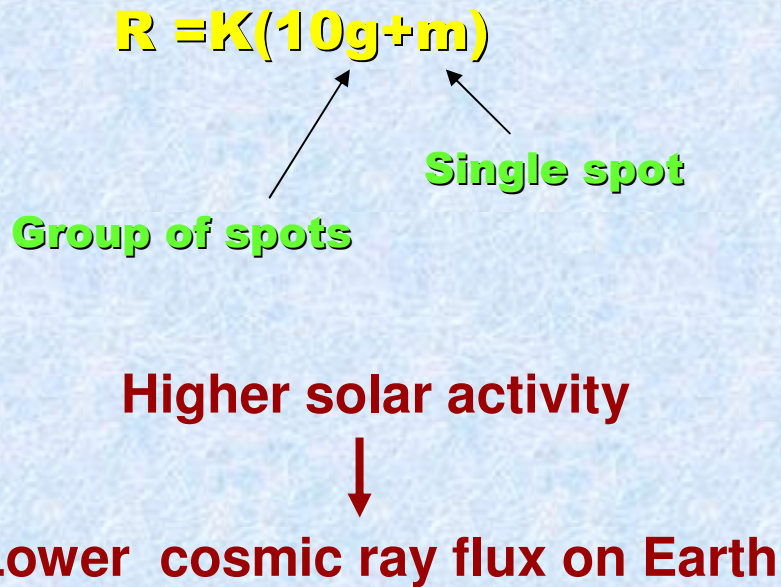


Figure 1.1 Plot of sunspot number and neutron count rate versus date. (—) Sunspot number per month (which is an indication of the activity of the sun),³ (—) Monthly average of the hourly neutron count from the Climax, Colorado ground-based neutron monitor (which detects variations in the intensity of the cosmic ray neutrons which penetrate the Earth's atmosphere).⁴

Influence factors on air shower cascade characteristics:

2. Geomagnetic field

Ionized particles of primary cosmic rays are subjected to the Earth magnetic field. The shielding effect of the geomagnetic field is a reduction in the particles intensity when moving from the pole toward the equator.

3. Altitude

The build-up of the secondary particles competes with their reduction by the attenuation in the atmosphere. A maximum in the intensity of ionized particles is reached at about 20 km, known as Pfozter maximum.

Dosimetry of cosmic rays

Component	60 000 ft	70 000 ft	80 000 ft	100 000 ft
\dot{D} , $\mu\text{Gy}\cdot\text{hr}^{-1}$	5.9-7.8	6.9-9.1	7.4-9.7	7.4-9.8
$(\bar{Q}_i - 1)\dot{D}_i$:				
Subnuclear, $\mu\text{Sv}\cdot\text{hr}^{-1}$	≈ 0.01	≈ 0.01	≈ 0.01	
Neutrons, $\mu\text{Sv}\cdot\text{hr}^{-1}$	4.5-18.0	5.0-20.0	5.1-20.2	2.1-8.4
$Z = 1$, $\mu\text{Sv}\cdot\text{hr}^{-1}$	≈ 1.5	≈ 1.8	≈ 2.0	≈ 2.5
$Z = 2$, $\mu\text{Sv}\cdot\text{hr}^{-1}$	≈ 2.4	≈ 2.6	≈ 2.8	≈ 3.1
$Z > 2$, $\mu\text{Sv}\cdot\text{hr}^{-1}$	0.2-0.6	0.6-1.7	1.3-3.8	9.6-12.7
H^+ , $\mu\text{Sv}\cdot\text{hr}^{-1}$	14.5-30.3	16.9-35.2	18.6-38.5	24.7-36.5

Tabella tratta dal rapporto della NASA: “Radiation Safety Aspects of Commercial High-Speed Flight Transportation”, J.Wilson, F.Cucinotta et. al., 1995

Requirement for the accurate dosimetry:

1. The aircraft technology allows the increasing of the operating altitudes a thinner protective cover is in fact provided by Earth's atmosphere from extraterrestrial radiations.
2. Increased passenger number on high altitude flights.
3. Long distance manned space mission and permanence on ISS.

High altitude neutron dosimetry

High altitude flights

The neutron contribution to the dose in exposures to cosmic rays lies between 40% and 60% at the altitudes of interest. From the measured neutron spectrum it is possible to evaluate the neutron dose at various altitudes using ICRP conversion coefficients .

Space missions

Secondary neutrons arise from the interaction of primary cosmic radiation with the shielding of the space vehicles (p,n) (γ ,n) and nuclear fragmentation from HZE particles.

Neutron spectrometry using passive detectors

An accurate evaluation of the neutron energy spectra in atmosphere requires:

- a wide energy range detection system;
- reduced size and no electronic supply in such experimental set-up like intercontinental flights.

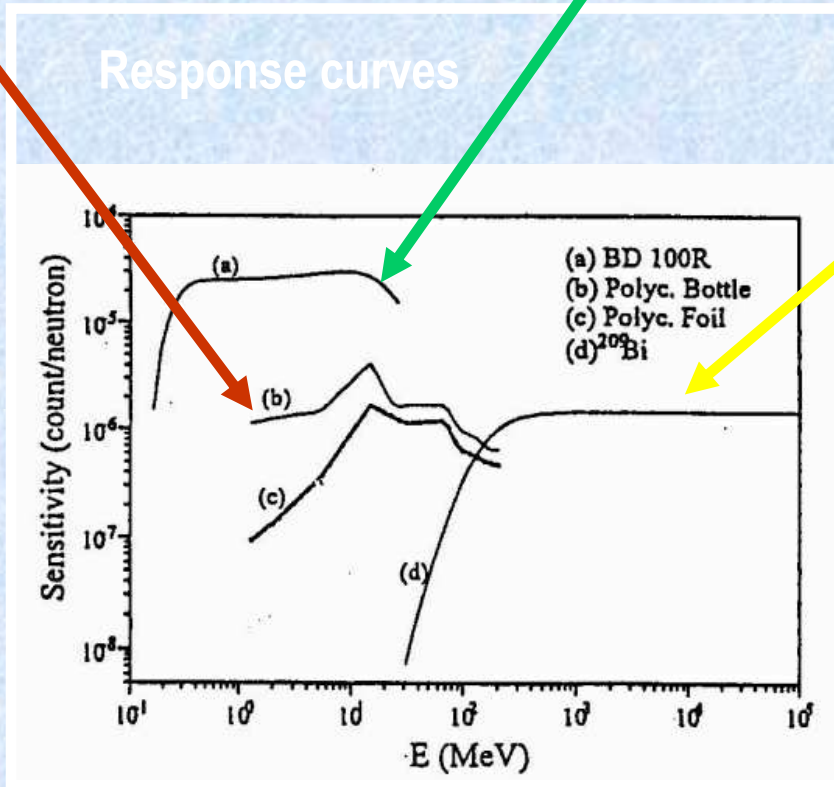
1. The extended energy range system (100 keV - 100 GeV)

1. Bubble dosimeter BD100R	100 keV- 20MeV	Polycarbonate vials filled by tissue equivalent gel, in which microdroplets of superheated freon are spread. Charged recoil particles, produced by the interaction of neutron with gel, give raise to visible bubbles.
2. Polycarbonate detectors foil	1 MeV- 100 MeV	Track are left by recoil products, generated by neutron interaction and revealed by etching techniques.
3. Polycarbonate detector bottles		
4. Fission detector ^{209}Bi	100 MeV- 100 GeV	Stack of ^{209}Bi layers, deposited on mylar films (100 μm). Fission fragments generated from n- ^{209}Bi interaction generated holes in mylar detected by means of a spark counter

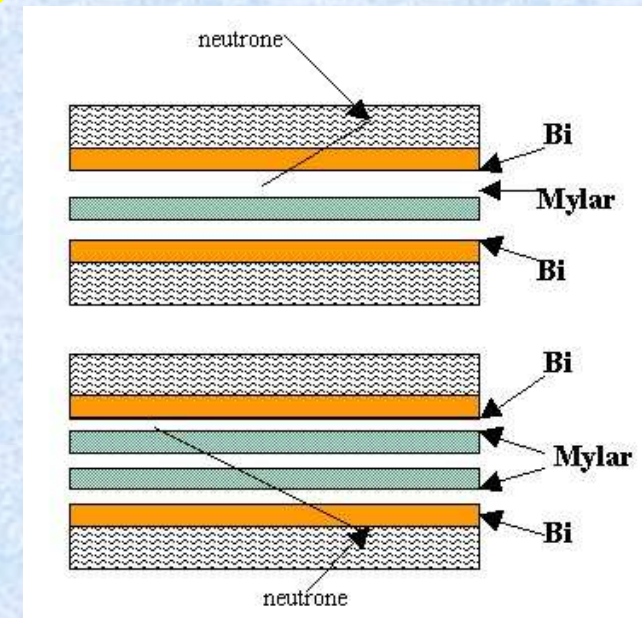
Bubble dosimeter
BD100R 100keV - 20 MeV



Polycarbonate detectors
1MeV-100MeV



Fission detector ^{209}Bi
100MeV - 100GeV



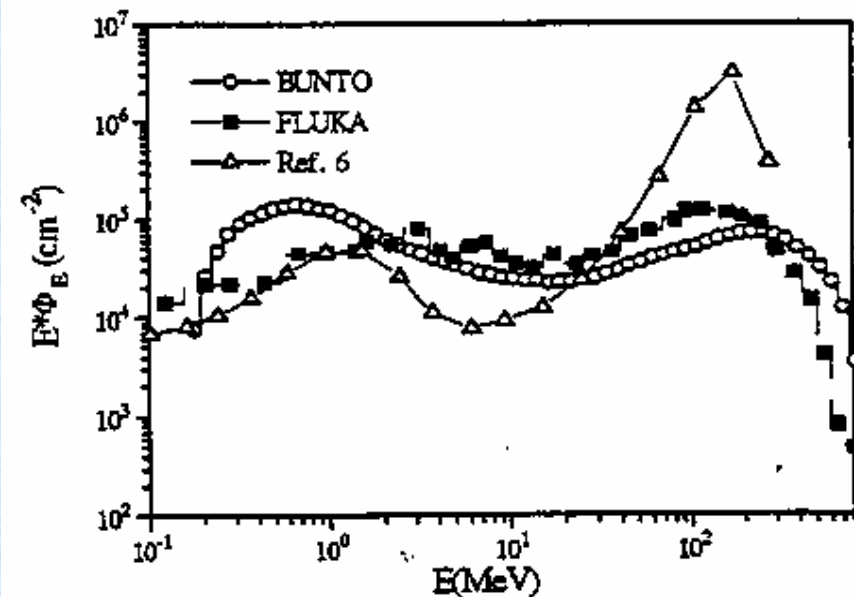
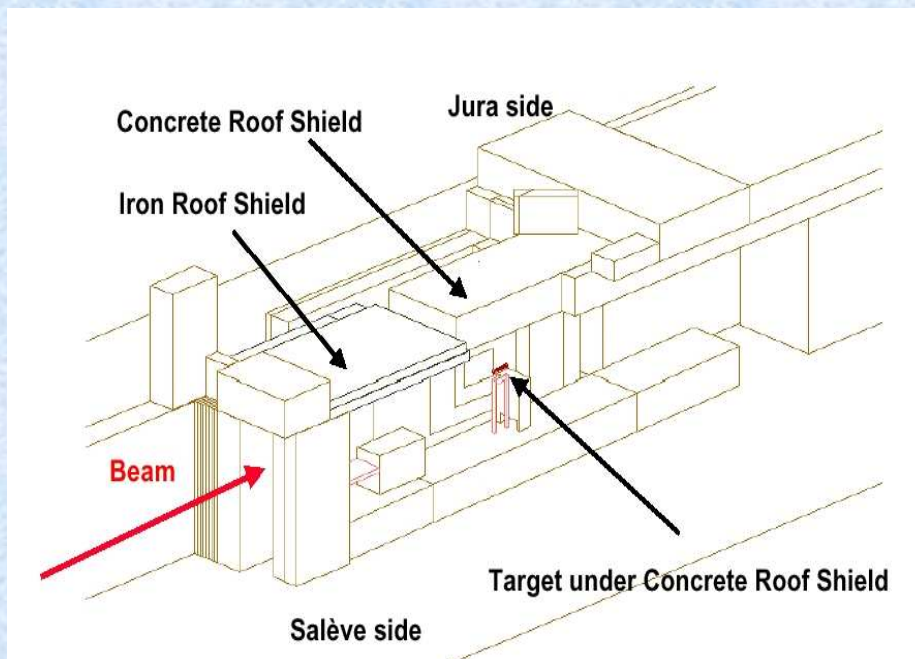
BUNTO

is the unfolding code developed in Torino to find a solution to the system of Fredholm equations.

- It is based on BUNKI's algorithm (SPUNIT), which finds the non negative solution through a iterative perturbation procedure.
- It can find a solution using a starting information on the spectrum shape, but it can also work in lack of information on the initial spectrum.
- The solution $\Phi_E(E)$ is the calculated mean from a number of spectra obtained by a random generation of M_j sampled on a normal distribution, whose parameters μ and σ are the experimental reading and the associated uncertainty of the j^{th} detector.
- It can be used with different spectrometry systems (like the extended energy and the BDS), if the response matrix of the detectors is known.

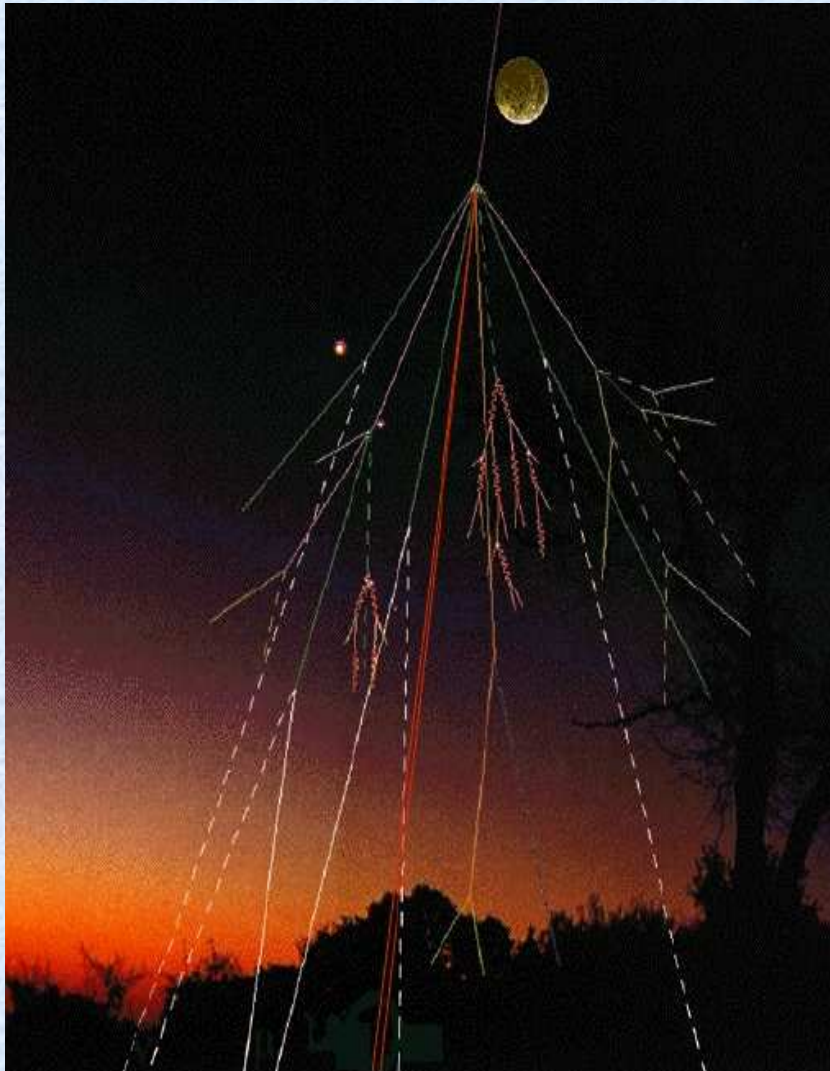
Calibration at CERF - Cern European Reference Field

- The calibration of the passive detector system has been performed at CERN (T14 position, H-6SPS beam): this facility is a reference field for the calibration of neutron detection systems to be used in the cosmic ray field.
- The passive detector results, unfolded with the BUNTO code, are compared with the MC simulation of the experimental setup; the results are consistent.



Monte Carlo simulations

Air shower cascade



- Spectra of secondary particles calculated using the Monte Carlo transport code FLUKA and GEANT 3.
- Simulations carried out at solar minimum and solar maximum activity for several geomagnetic cut off.

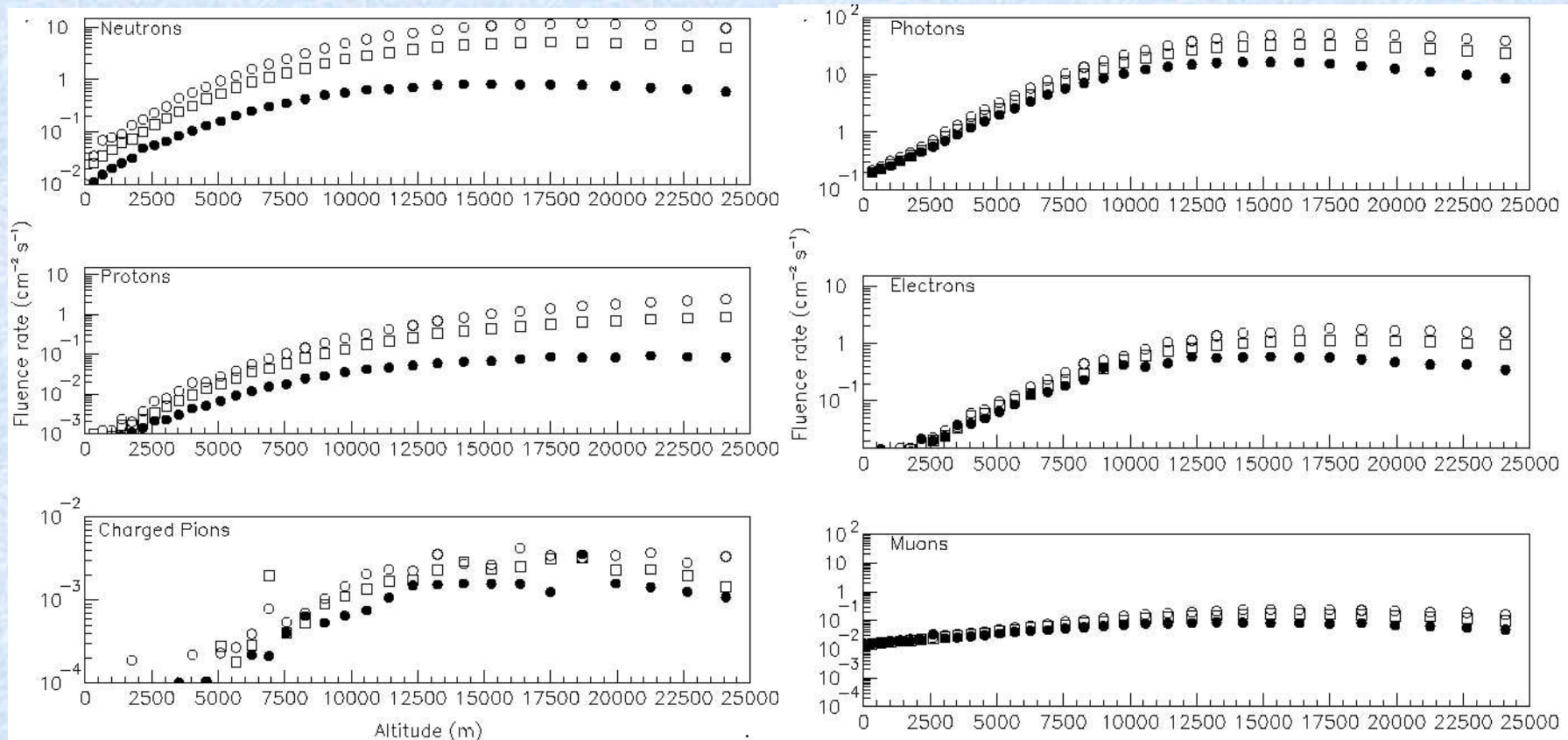
FLUKA code

is the reference code for high energy nuclear physics

GEANT 3, GEANT 4

have been chosen by ESA as reference code for space environment simulations.

FLUKA simulations

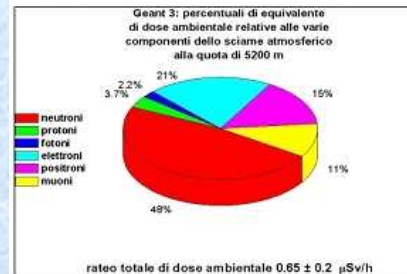
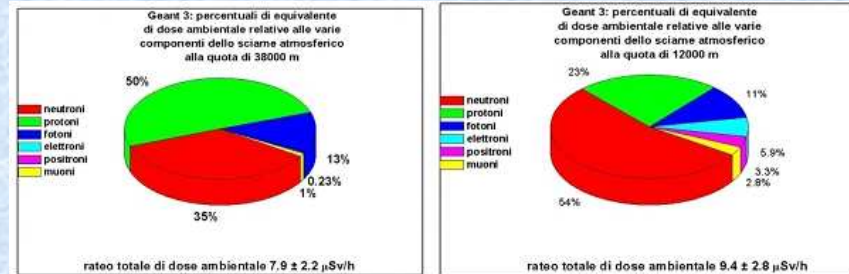
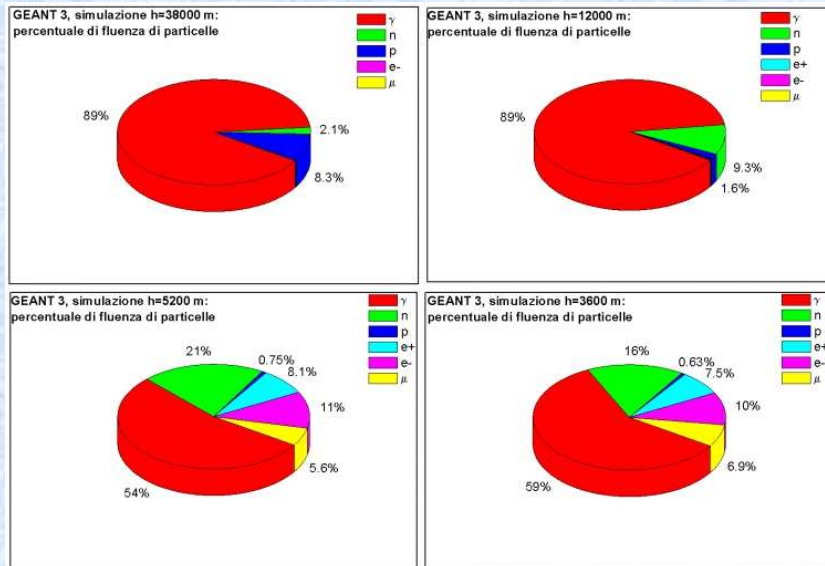


Calculated hadron fluence rates as a function of altitude for different input conditions (○) high latitude, solar minimum activity; (◻) high latitude solar maximum activity, (●) low latitude solar minimum activity.

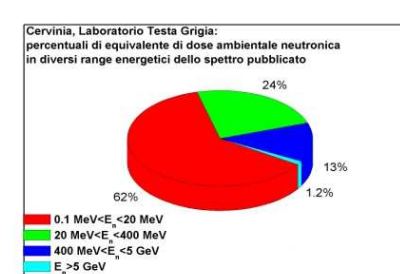
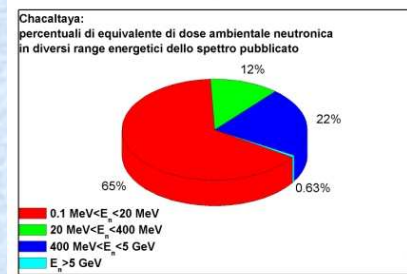
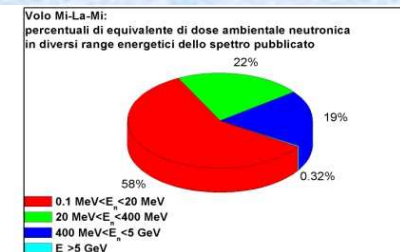
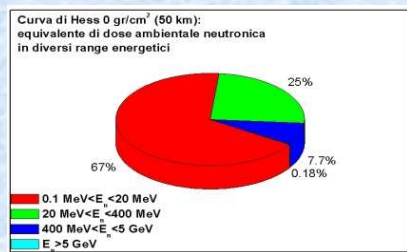
A.Ferrari, M.Pelliccioni, T.Rancati, "Calculation of the Radiation Environment Caused by Galactic Cosmic Rays for Determining Air Crew Exposure", *Rad. Prot. Dos.* 93, 2, 101-114 *Nucl. Tech. Pub.* (2001).

GEANT3 simulations

Percentages of flux and ambient dose equivalent rate at different altitudes



Percentages of neutron ambient dose equivalent rate calculated in different energy ranges at different altitudes



Experimental measurements (INFN - ALITALIA - ASI - ESA projects)

1. High mountain laboratories

Plateau Rosa, Testa Grigia Laboratory
h=3480 m,
45° 56' 03" N, 7° 42' 28" E
Chacaltaya, La Paz (Bolivia)
h=5400m, 16°S



2. Alitalia flights AZ784/11, AZ784/12

Roma-Tokyo-Roma
h=11500m,
35° 45' 9" N, 14° 23' 2" E
68° 30' 5" N, 7° 33' 4" E



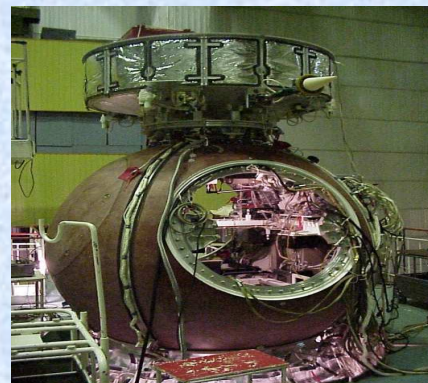
3. ASI balloon flights

Base Trapani Milo, Trapani-Siviglia
h=38000m,
36° N

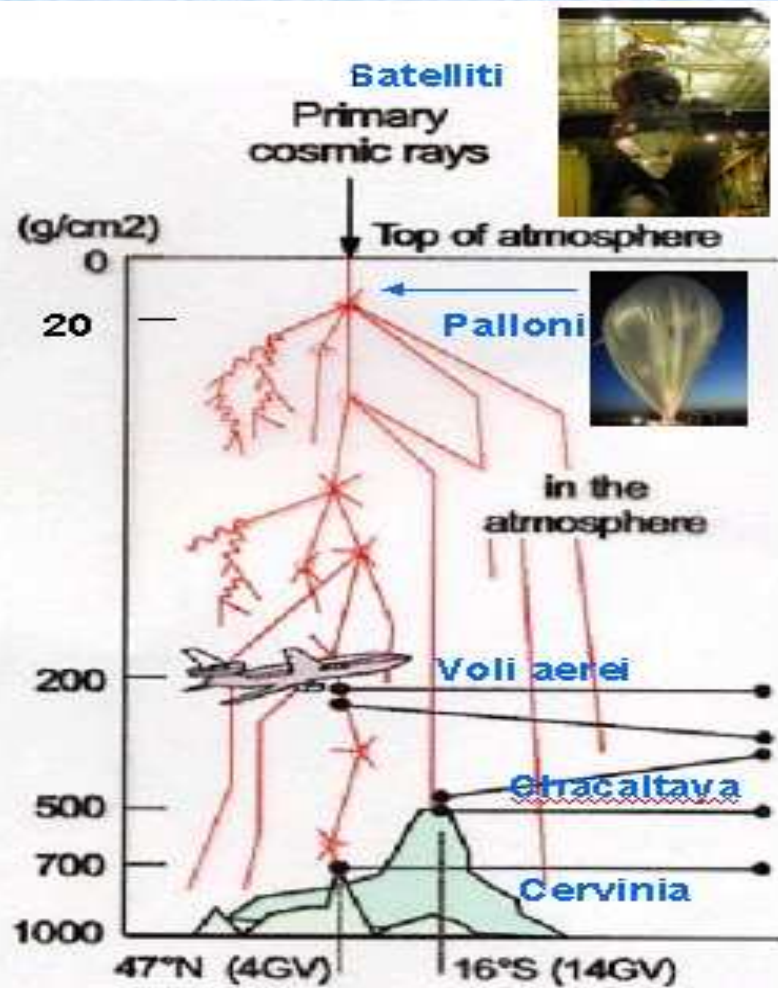


4. ESA project

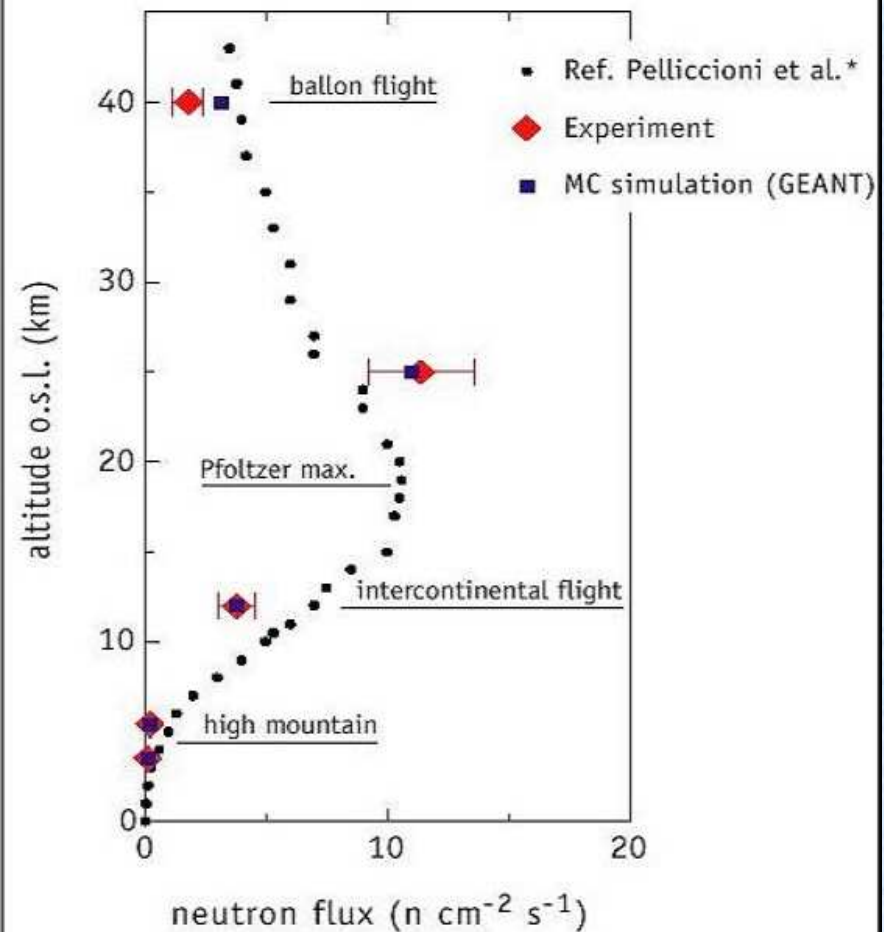
BIOPAN on Foton M1
satellite



Experimental measurements

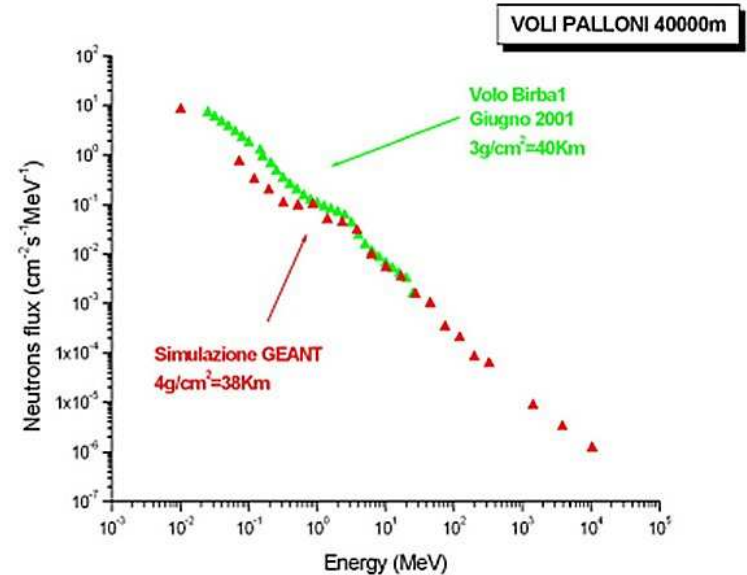
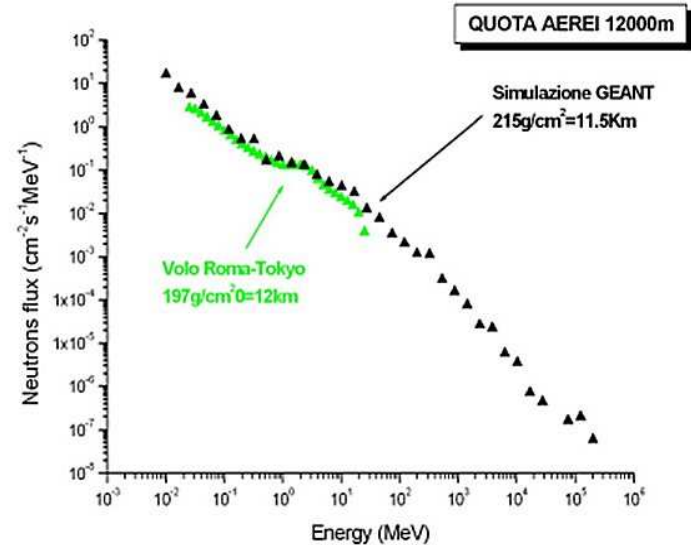
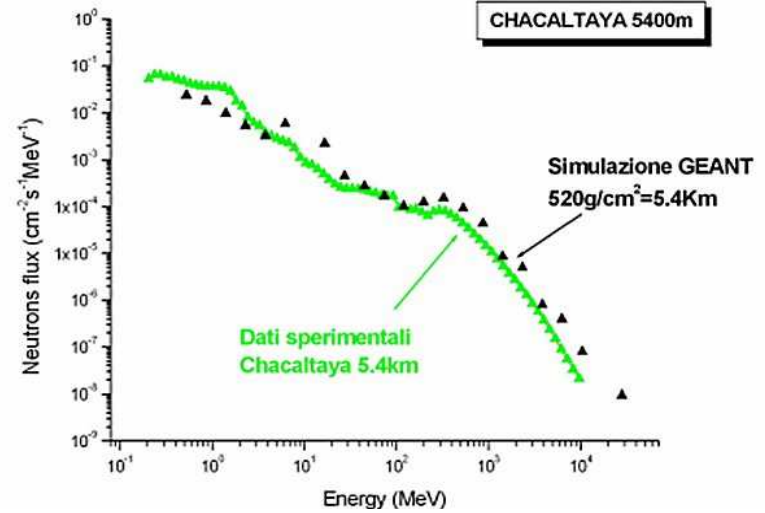
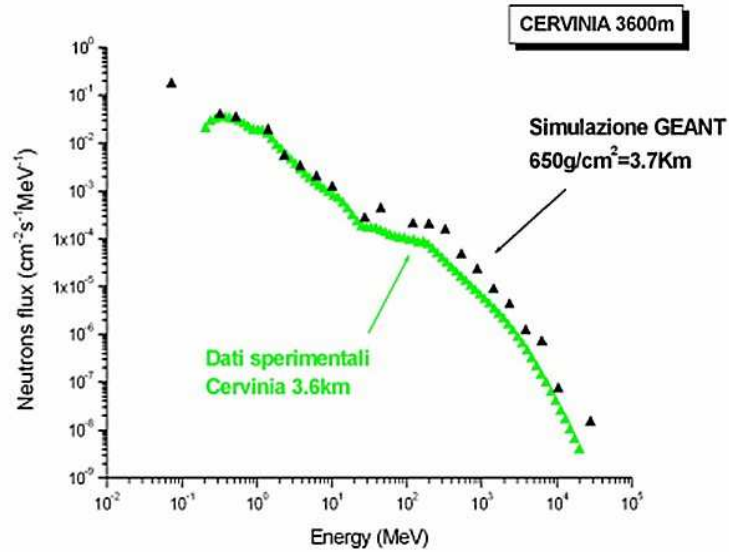


Disponibilità di dati a diverse quote

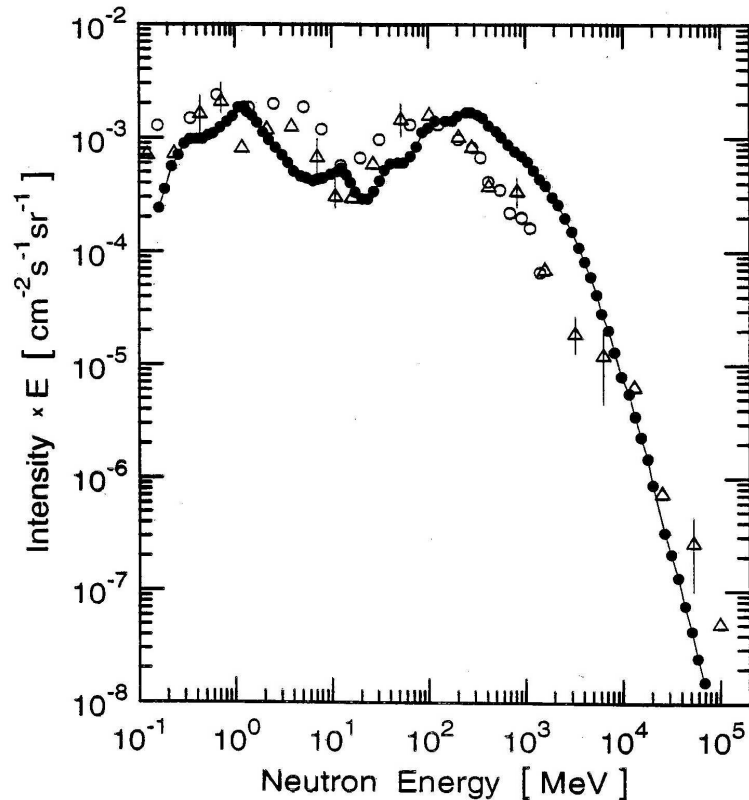


*min. solar activity, max. latitude

Neutron spectra at various altitudes and latitudes

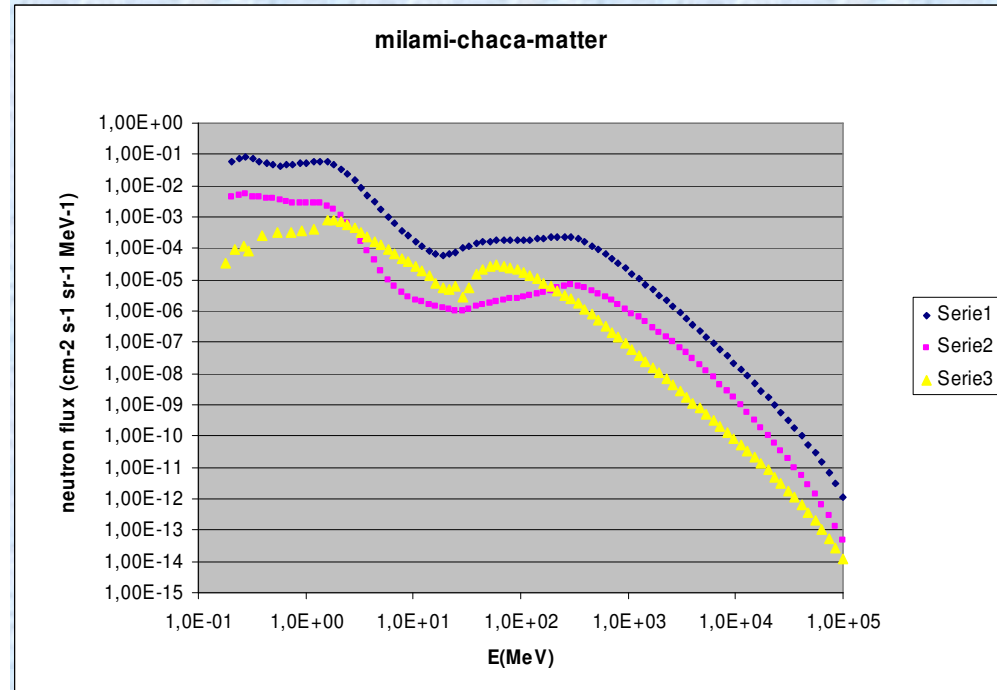


Experimental neutron spectra INFN Torino Italy, ANPA Roma Italy



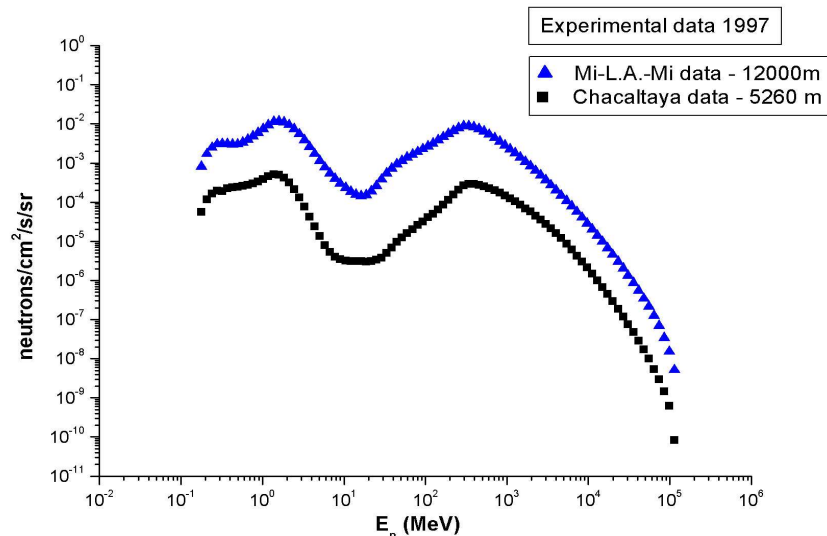
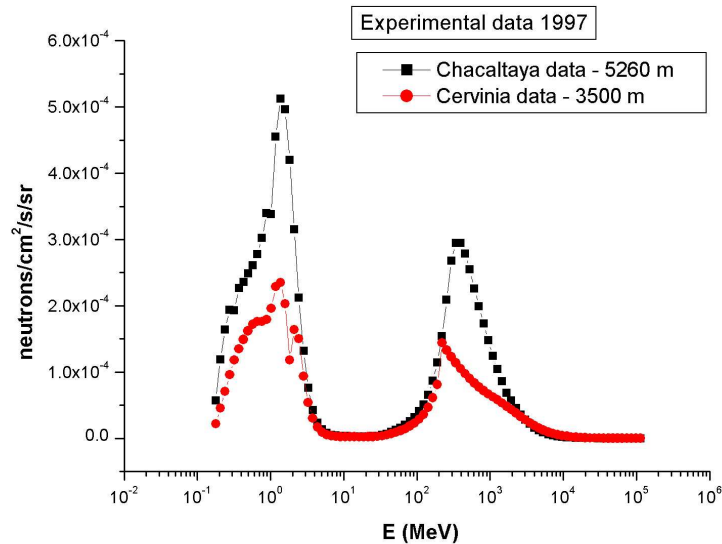
- Manfredotti et al. (1997), 3500 m (650 g/cm²)
- Merker (1973) 700 g/cm² (~3200 m)
- △ Schraube et al. (1996), Zugspitze 2963 m

“COSMIC RAYS AT EARTH - Researcher's Reference Manual and Data Book” ELSEVIER SCIENCE (2001) pp.109-110.



Comparison between Matterhorn (3600 m 46°N) neutron spectrum (experimental) and Chacaltaya (5400m 16°S) neutron spectrum (experimental) and cosmic neutron spectrum on the flight path Milano- Los Angeles-Milano (12km).

Experimental results using the extended energy range system



EXPERIMENT

Testa Grigia lab.,
Plateau Rosa,
Matterhorn, Italy

Chacaltaya lab.,
Chacaltaya,
La Paz, Bolivia

Flight Mi-L.A.-Mi

GEOGRAPHIC DATA

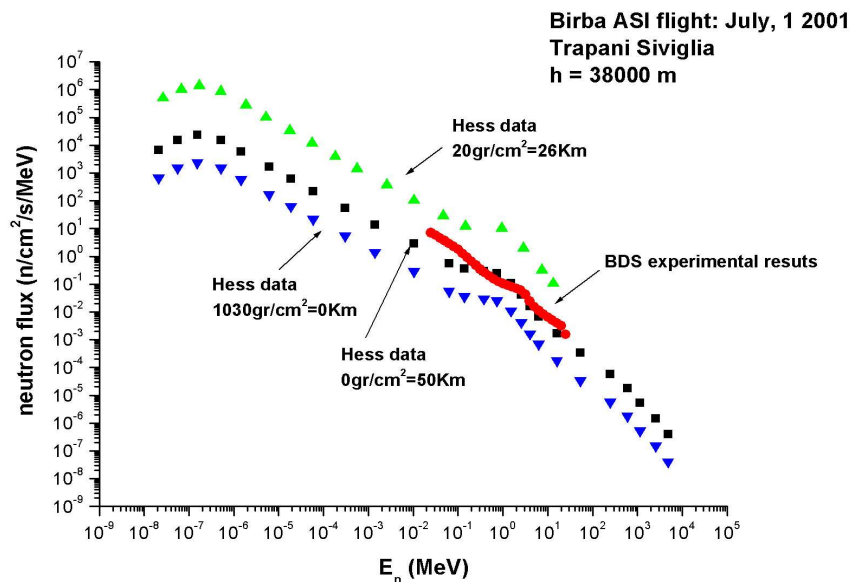
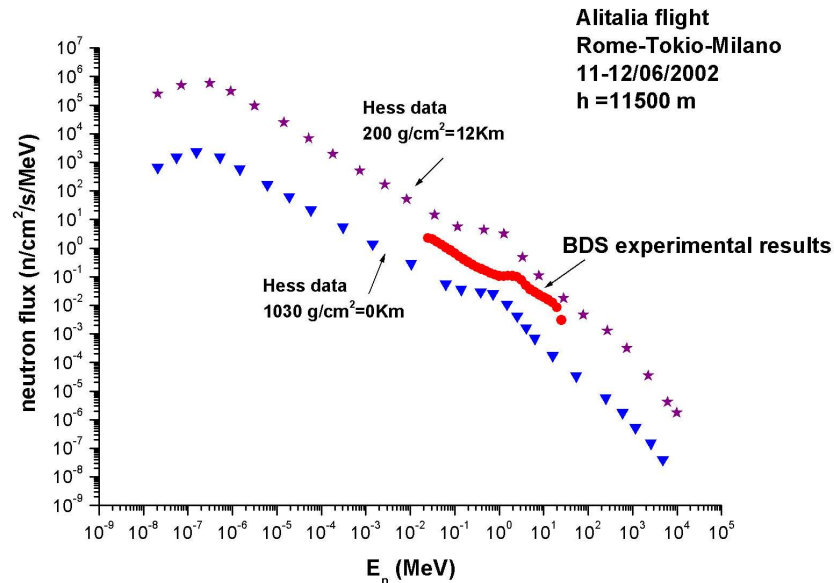
3480 m, 45°N

5260 m, 16°S

12000 m

altitude m	latitude	integr. flux n/cm ² /s	dose rates H*(10) (μSv/h)
3480	45° N	0.09	0.12
5260	16° S	0.12	0.15
12000		2.98	1.8

Experimental results using BDS spectrometer



EXPERIMENT

GEOGRAPHICS
DATA

Flight Ro-Tokio-Mi

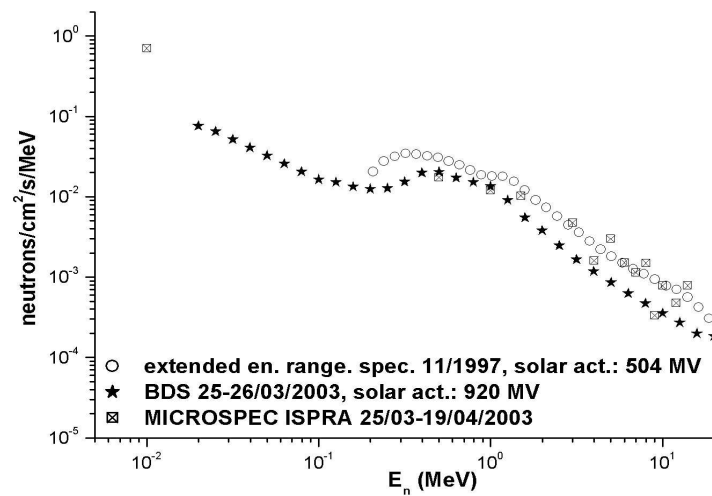
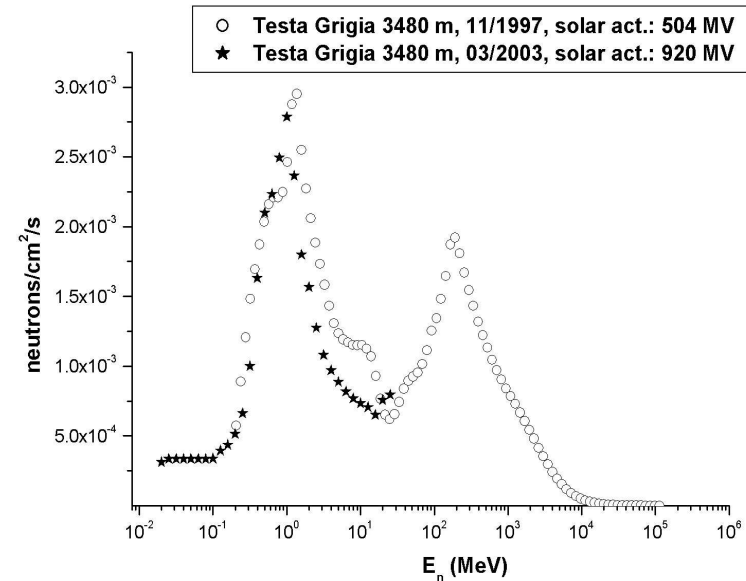
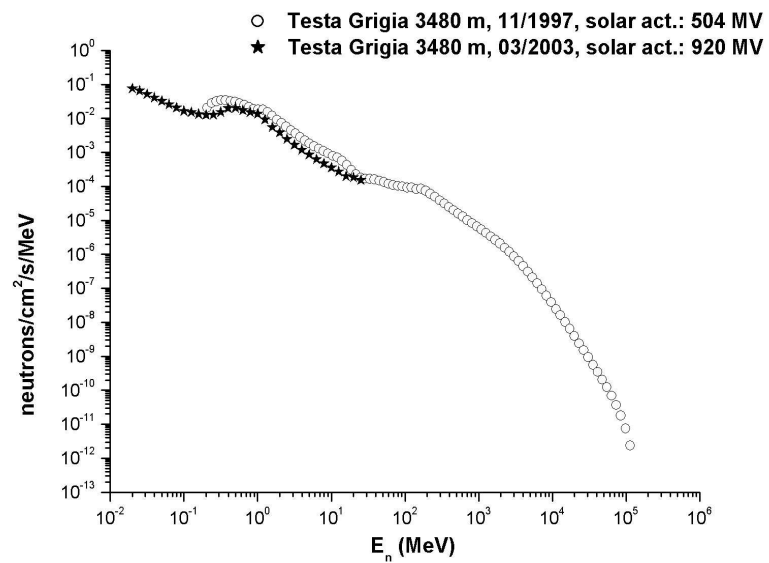
12000 m

Balloon flight
Trapani-Siviglia

38000 m

altitude m	latitude	integr. flux n/cm ² /s	dose rate H*(10) (μSv/h)
12000		0.9	0.88
38000	36°N	1.2	0.93

Recent results at Testa Grigia laboratory (March 2003)

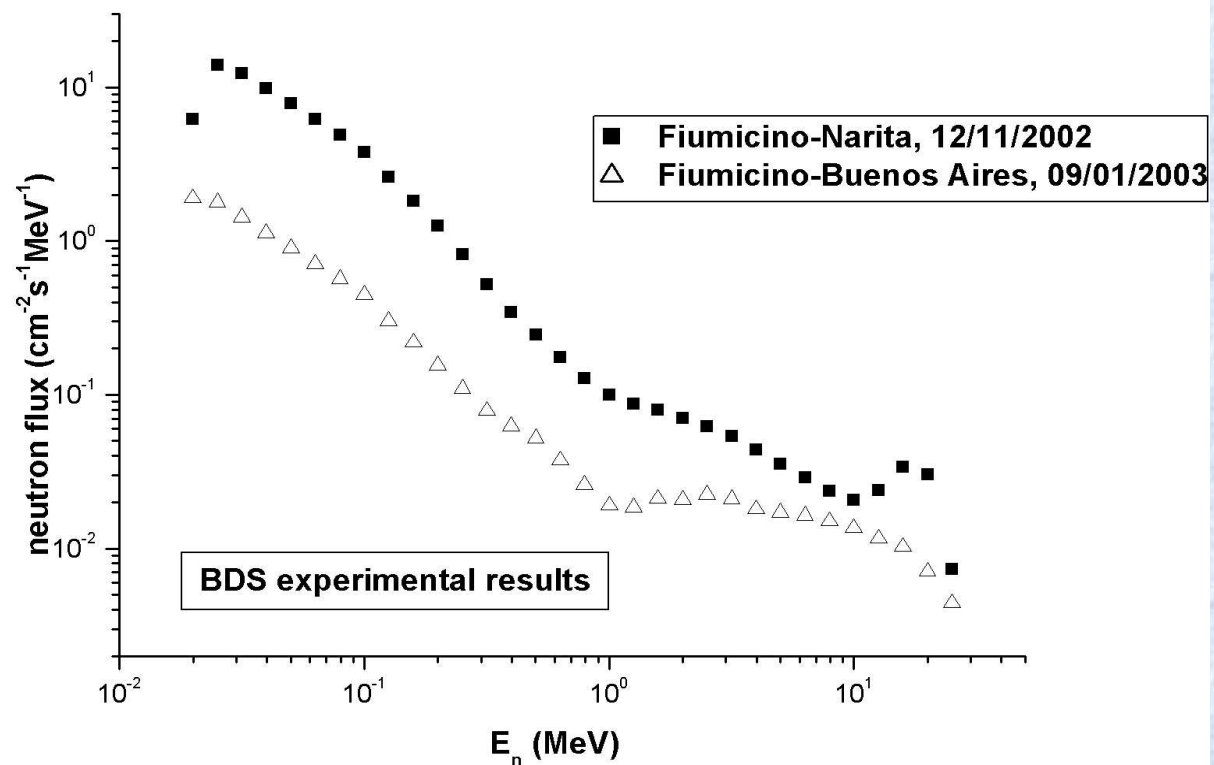


Intercontinental Flights

Alitalia: Roma-Tokyo

Roma – Buenos Aires

NEUTRON SPECTRA ON BOARD OF ALITALIA INTERCONTINENTAL FLIGHTS



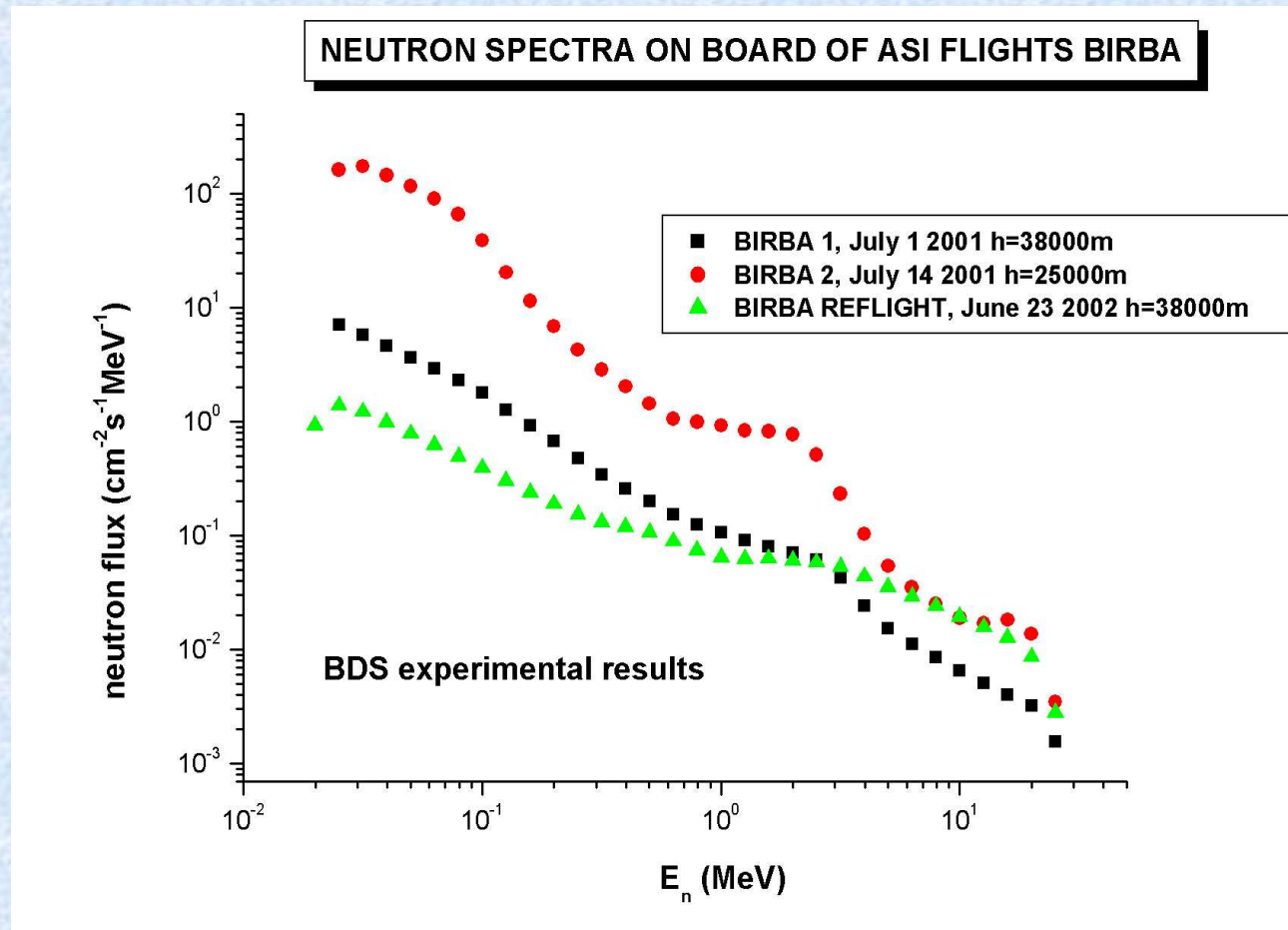
VOLI AZ 746/11 AZ 746/12

Voli Alitalia AZ784/11, AZ784/11
Roma-Tokyo-Roma
h=11500m,
35° 45' 9" N, 14° 23' 2" E
68° 30' 5" N, 7° 33' 4" E



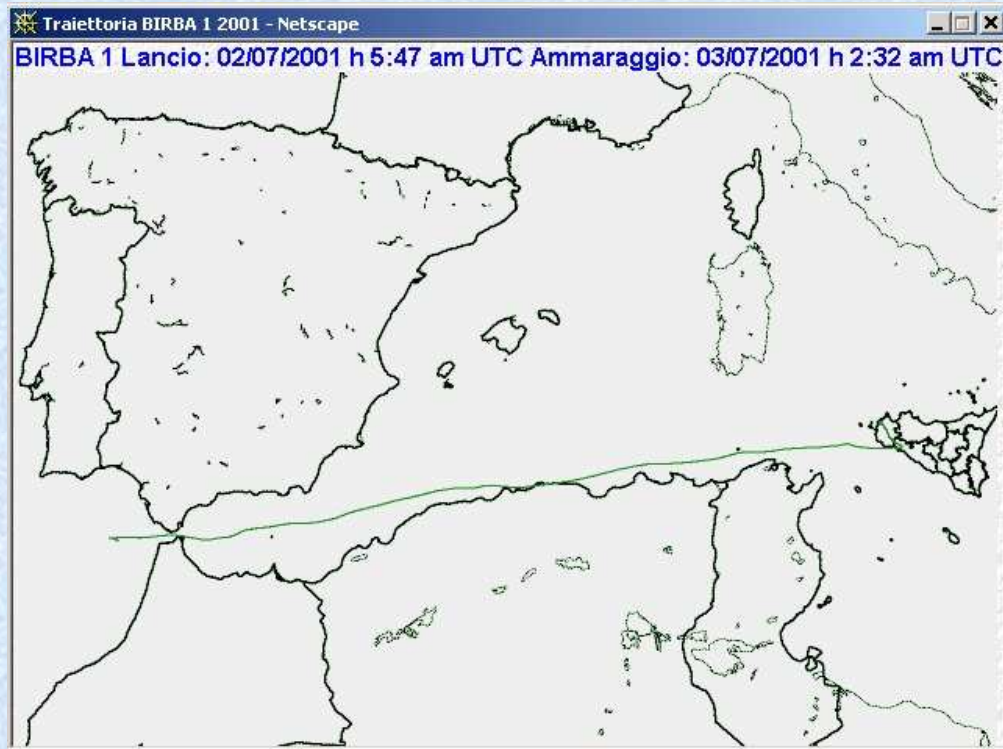
Balloon flights

ASI: Trapani-Siviglia



VOLO ASI BIRBA1

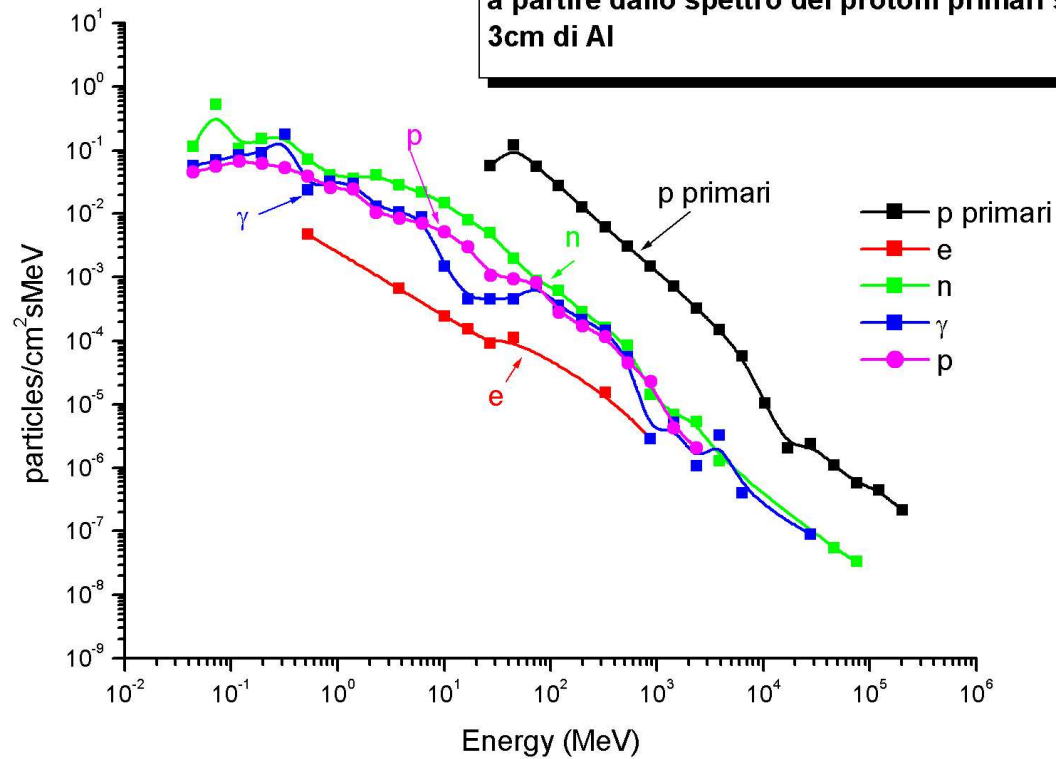
Progetto IORD,
h=38000m,
36° N



Satellite

ESA: FOTON M 1

Esempio di produzione di particelle secondarie a partire dallo spettro dei protoni primari su 3cm di Al



Incident - October 2002 - Reflight- March 2005

Summary

Extended range

100 keV 100 GeV

Short range (BDS spectrometer)

10 keV 20 MeV

The passive neutron spectrometry system developed by INFN (Torino) and ANPA (Roma) presents some important characteristics:

- a wide energy range suitable for cosmic neutron spectrometry;**
- reduced size and no electronic supply required (useful in such experimental set-up like high mountain laboratories, aircrafts, stratospheric balloons, satellites and space vehicles);**
- calibration performed at CERF (reference field for cosmic neutron detectors, for energies from thermal to 800 MeV);**
- field tests in different experiments at different altitude and latitude with good results;**
- a specific unfolding code (BUNTO) based on a iterative perturbation procedure has been especially developed for this application.**

Present activities at Testa Grigia laboratory

Dosimetry

- **TEPC Tissue Equivalent Proportional Counter** (Collaboration with ARCS)
- **Rem counter ALNOR** (0.025 eV - 17 MeV) (Collaboration with LNF)
- **Rem Counter Linus** (0.025 eV – 400 MeV) (Collaboration with LNF)
- **BD100R (bubble detector** 100 keV-20 MeV)

Neutron spectrometry

- **BDS spectrometer** (10 keV- 20 MeV)
- **BTI MICROSPEC 2N** using a 50x50 mm NE213 scintillator from 800keV to 18 MeV and a ^3He chamber from thermal energy region- 800keV. (Collaboration with JRC)

Confronto con i dati pubblicati

	3.6 km	5.2 km	12 km		38 km
Neutroni ($\mu\text{Sv/h}$)	0.16	0.31	5.1	4.2*	2.8
Protoni ($\mu\text{Sv/h}$)	0.014	0.024	2.2	2.8*	4.0
Fotoni ($\mu\text{Sv/h}$)	0.010	0.014	1.0	0.84*	1.0
Altro ($\mu\text{Sv/h}$)	0.21	0.30	1.10		0.27

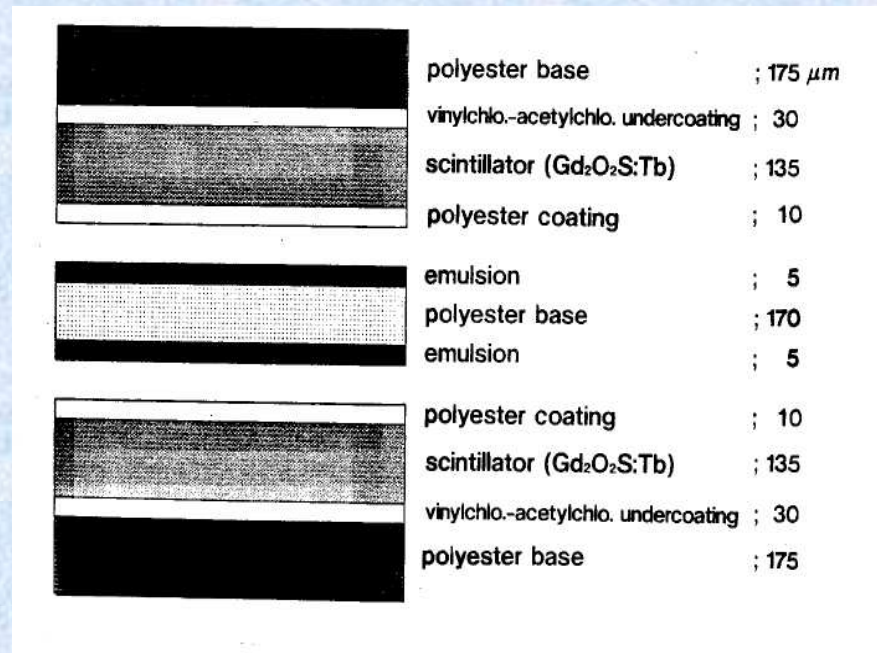
* A. Ferrari, M. Pelliccioni, T. Rancati,
 “Calculation of the Radiation Environment caused by Galactic Cosmic Rays
 for determining Air Crew Exposures”, Rad.Prot.Dos., 93-2 (2001)

Component	60 000 ft	70 000 ft	80 000 ft	100 000 ft
\dot{D} , $\mu\text{Gy}\cdot\text{hr}^{-1}$	5.9-7.8	6.9-9.1	7.4-9.7	7.4-9.8
$(\dot{Q}_i - 1)\dot{D}_i$:				
Subnuclear, $\mu\text{Sv}\cdot\text{hr}^{-1}$	≈ 0.01	≈ 0.01	≈ 0.01	
Neutrons, $\mu\text{Sv}\cdot\text{hr}^{-1}$	4.5-18.0	5.0-20.0	5.1-20.2	2.1-8.4
$Z = 1$, $\mu\text{Sv}\cdot\text{hr}^{-1}$	≈ 1.5	≈ 1.8	≈ 2.0	≈ 2.5
$Z = 2$, $\mu\text{Sv}\cdot\text{hr}^{-1}$	≈ 2.4	≈ 2.6	≈ 2.8	≈ 3.1
$Z > 2$, $\mu\text{Sv}\cdot\text{hr}^{-1}$	0.2-0.6	0.6-1.7	1.3-3.8	9.6-12.7
H , $\mu\text{Sv}\cdot\text{hr}^{-1}$	14.5-30.3	16.9-35.2	18.6-38.5	24.7-36.5

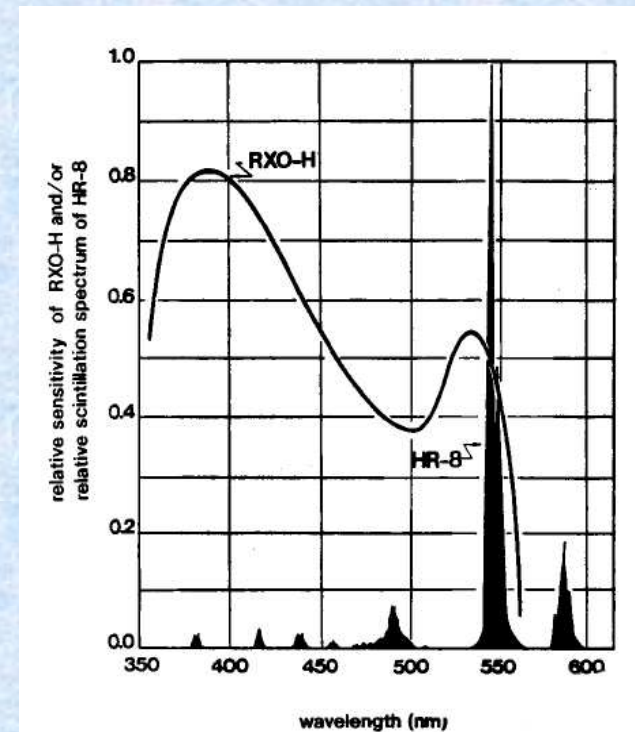
Tabella tratta dal rapporto della NASA: “Radiation Safety Aspects of Commercial High-Speed Flight Transportation”, J. Wilson, F. Cucinotta et. al., 1995

Rivelatore a scintillazione

Per la realizzazione del rivelatore di ioni pesanti abbiamo fatto riferimento alla linea di sviluppo di un rivelatore simile da parte di un gruppo di ricerca giapponese (M.Ichimura et. al.)



Composizione dell'SXF: screen type X-Ray film

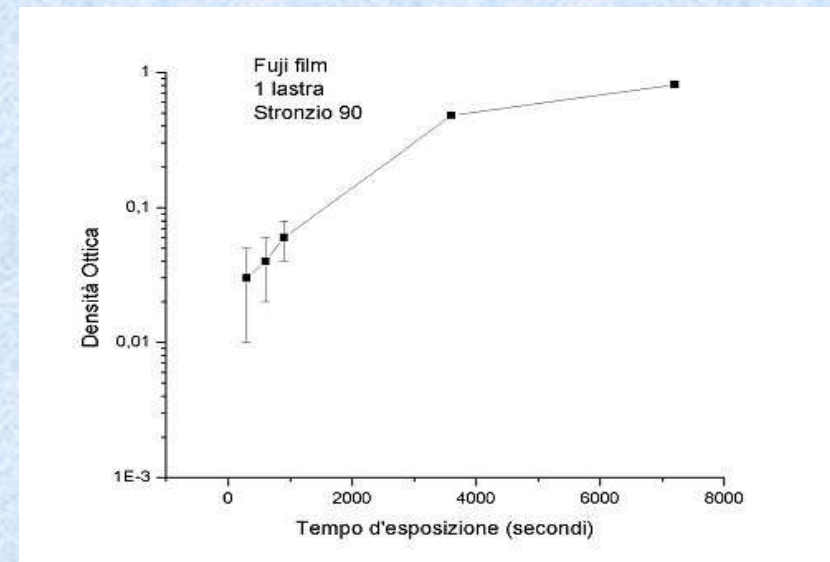
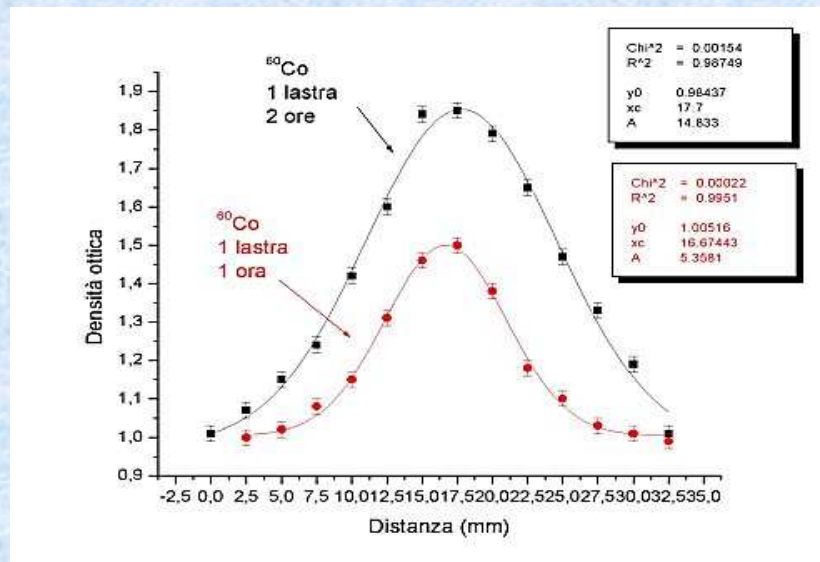


Sensibilità spettrale dell'RXO film e spettro di scintillazione dello schermo intensificante.

Fasi di realizzazione

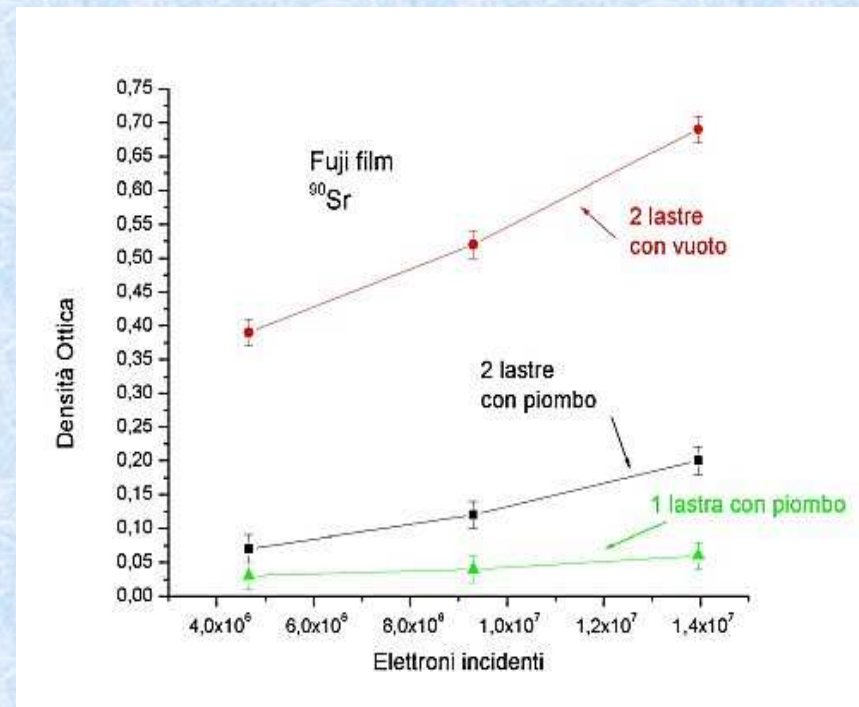
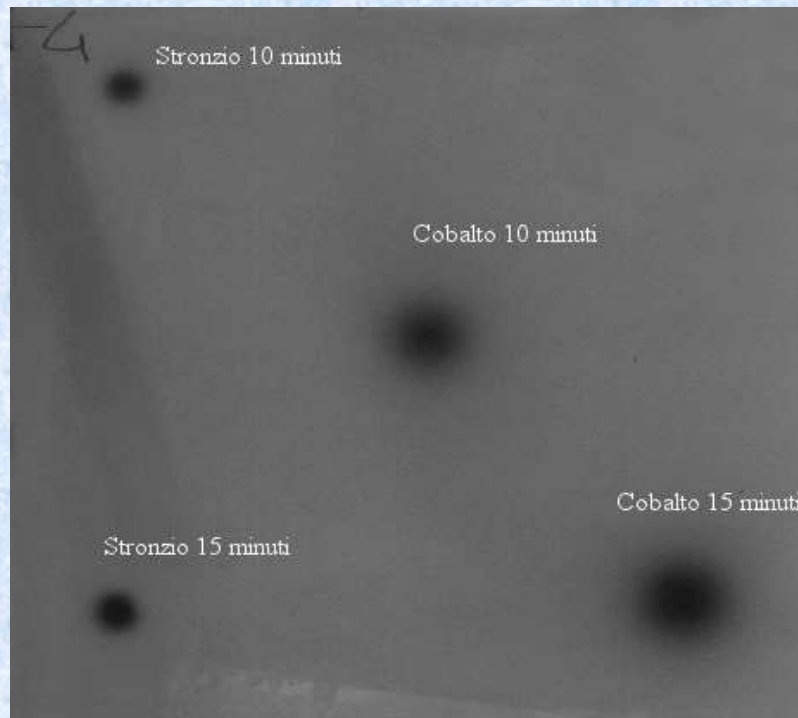
Sono state eseguite in laboratorio una serie di prove d'impressionamento con una sorgente di Cobalto60 e una di Stronzio 90. Gli spot ottenuti sulle lastre sviluppate sono stati analizzati con un densitometro di apertura focale di 2mm

1. Scelta del film migliore da utilizzare. 5 minuti d'esposizione. È stato scelto il "Fuji film"
2. Rivelatore composto da una lastra e da un a pellicola: esposto alle sorgenti per 5,10,15 minuti, 1 ora e 2 ore. Le macchie ottenute sono state analizzate tramite scansione con il densitometro.



3. Utilizzo di due lastre scintillanti al posto di una sola. Miglioramento nella densità ottica.

4. Oltre a due lastre scintillanti, il rivelatore è stato posto sotto vuoto. Curva densitometrica più elevata e spot sulla pellicola più focalizzati: scelta come configurazione definitiva.



Interazione raggi cosmici atmosfera

- Progetto ATPROMO INFN
- Progetto ATPROMO Network of excellence FP6

Studio della correlazione tra variazione di intensità dei raggi cosmici e parametri atmosferici, mediante raccolta dati in laboratori di alta montagna: **influenza dei raggi cosmici sui cambiamenti climatici a breve e lungo termine.**

Biodosimetria

Studio del comportamento di organismi vegetali complessi in risposta alla radiazione ionizzante per applicazioni spaziali.

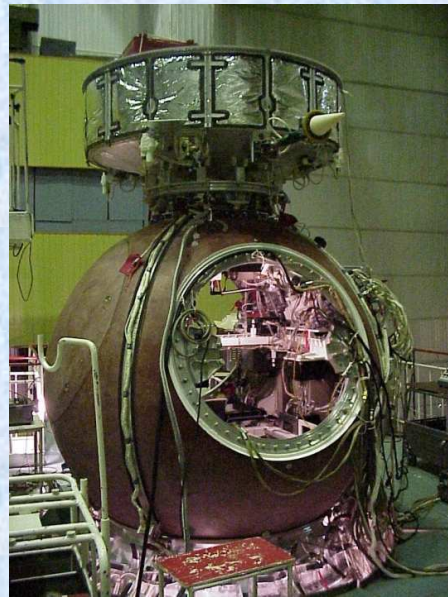
Collaborazione IBEV - CNR Roma

VALUTAZIONE DI DOSE SU FOTON M1

BIOPAN



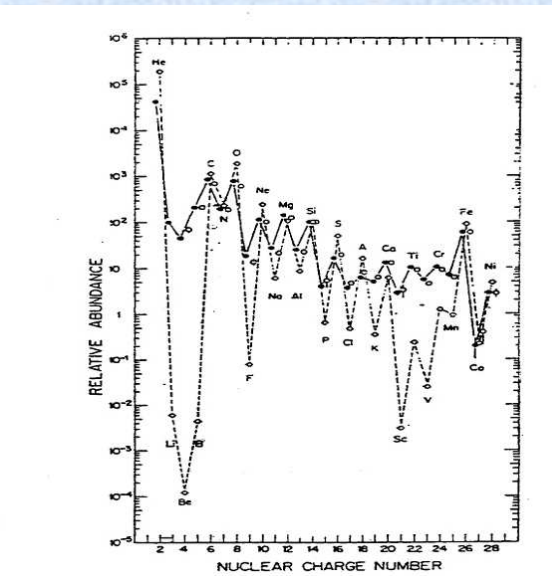
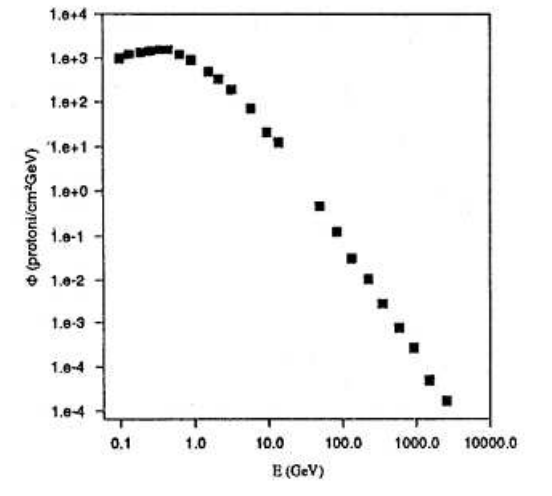
FOTON



**S
p
e
t
t
r
i
p
r
i
m
a
r
i**

p

HZE



VALUTAZIONE DI DOSE SU FOTON M1

I risultati sono riportati in percentuale rispetto ai valori di flusso e dose dello spettro protonico incidente

Primari	spessore	protoni	neutroni	fotoni	elettroni
		Flusso relativo (#/cm ² /s)	Flusso relativo (#/cm ² /s)	Flusso relativo (#/cm ² /s)	Flusso relativo (#/cm ² /s)
p	0 cm	100			
p	3 cm	2.38	5.8	2.38	0.13

Primari	spessore	protoni	neutroni	fotoni	elettroni
		Dose rate relativo (μ Sv/h)	Dose rate relativo (μ Sv/h)	Dose rate relativo (μ Sv/h)	Dose rate relativo (μ Sv/h)
p	0 cm	100			
p	3 cm	1.12	1.29	0.01	0.02

VALUTAZIONE DI DOSE SU FOTON M1 (dati preliminari)

Ipotizzando che la dose totale sia **0.51 Gy per day** (da **BIOPAN, Experiment Design Requirements, second edition, European Space Agency, April 2002**)

BIOPAN

protoni	HZE	fotoni	elettroni
Dose rate relativo (Gy/d)	Dose rate relativo (Gy/d)	Dose rate relativo (Gy/d)	Dose rate relativo (Gy/d)
0.19	0.2	0.01	0.11

FOTON

(contributo di particelle secondarie dovute ai protoni primari)

Primari	spessore	protoni	neutroni	fotoni	elettroni
		Dose rate relativo (Gy/d)	Dose rate relativo (Gy/d)	Dose rate relativo (Gy/d)	Dose rate relativo (Gy/d)
p	0 cm	0.19			
p	3 cm	2.13E-3	2.45E-3	1.9E-5	3.8E-5