

Non proporzionalità degli scintillatori e suo effetto nelle misure calorimetriche sui raggi cosmici

- Ho cercato in letteratura i modelli di non proporzionalità
- Ho costruito un modello da inserire nella simulazione
- I primi risultati mostrano dei sistematici: DOMANDA: i risultati sono ragionevoli ?
 - Ci sono errori concettuali?
 - Errori materiali?
 - Che test fare?
 - ...

L'effetto di non linearità dei cristalli è un fenomeno ancora non completamente chiarito nelle cause.

Negli anni '50 e '60: ci sono stati i primi studi: essenzialmente il problema era che un elettrone da 1 MeV produceva una luce diversa da una particella alfa. Gli studi erano fatti principalmente con CsI e NaI. Questi studi portarono alla conclusione che c'era una dipendenza dalla densità di ionizzazione dE/dx . La ragione fisica era individuata nella saturazione dei centri di luminescenza (formula di Birks).

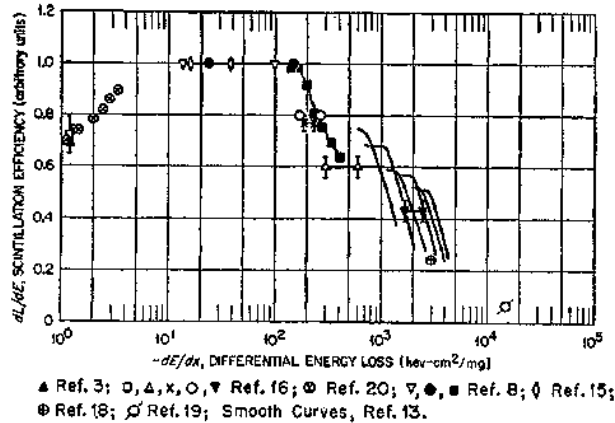


FIG. 2. Scintillation efficiency as a function of dE/dx for various particles in NaI(Tl).

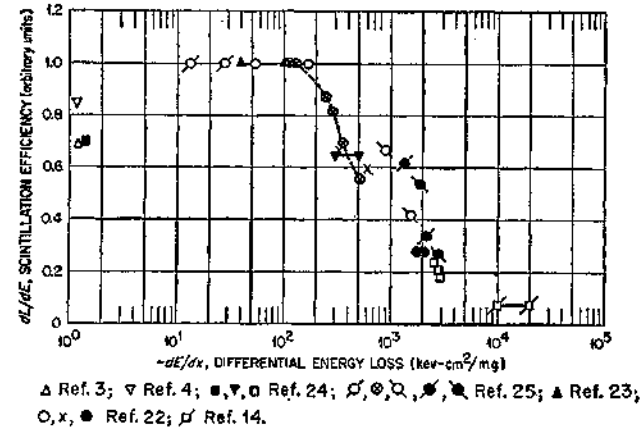
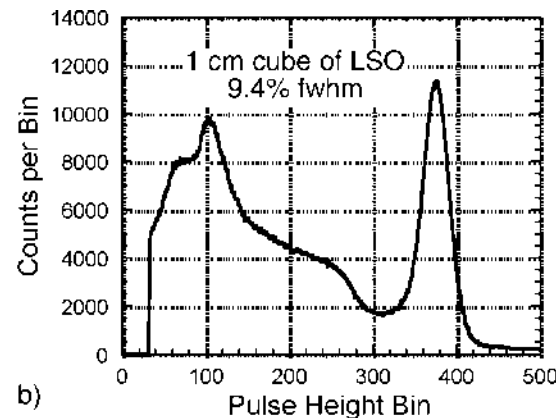
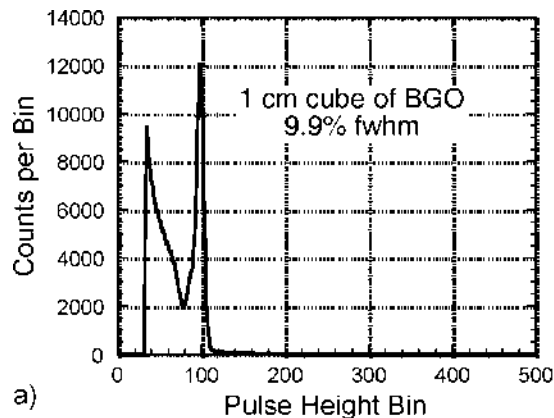


FIG. 3. Scintillation efficiency as a function of dE/dx for various particles in CsI(Tl).

Negli anni '90, 2000 : si sviluppò il materiale LSO che aveva 4-5 volte più luminosità del BGO ma la risoluzione energetica non era migliore (cioè la risoluzione non andava di pari passo con il conteggio dei fotoni). Si ipotizzò che la ragione fosse la non proporzionalità.



Le tracce ionizzanti sono create tramite processi a cascata

- Interazioni nucleari
- Creazioni di coppie
- Effetto Compton diretto e inverso
- Bremsstrahlung
- Effetto fotoelettrico
- Produzione di elettroni Auger
- Evaporazione di nuclei
- X-ray di fluorescenza
- ...
- Delta rays

FLUKA o GEANT

La perdita di energia delle tracce è caratterizzata da:

- 1) Dipendenza dall'energia della traccia secondo la Bethe-Block
- 2) Fluttuazioni di Landau: la perdita di energia avviene con un grande numero di piccole depositi di energia con grandi fluttuazioni di densità di ionizzazione.

come modellizzare la scintillazione?

anche nel caso più «semplice» di una m.i.p. che spesso viene usata per la calibrazione

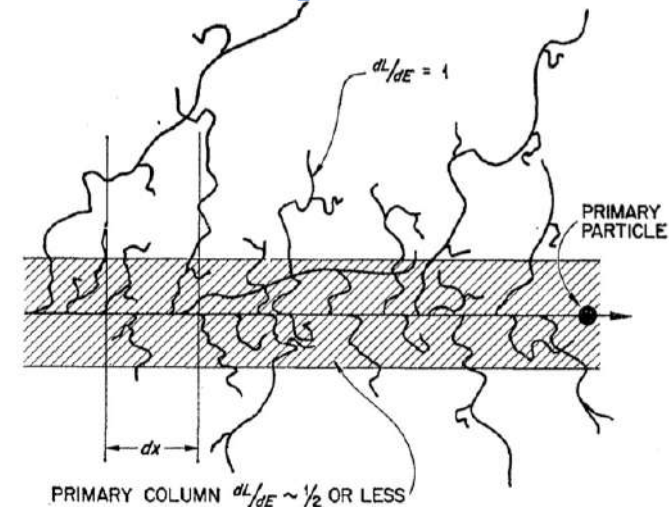


FIG. 2. Schematic diagram showing primary column and escaping delta rays.

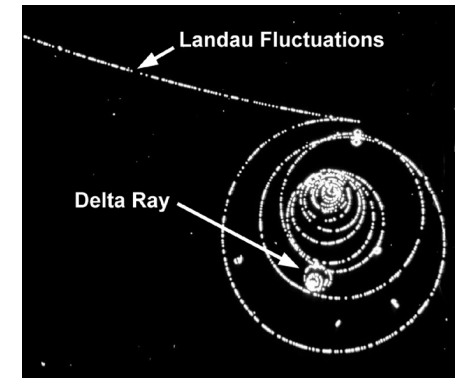


Fig. 7. Bubble chamber photograph of a gamma ray (entering from the middle right) forming an electron positron pair, and the subsequent tracks of the two charged particles. The intensity of the white regions is proportional to the ionization density. Several delta rays are produced, and Landau fluctuations (variations in the ionization density along the track) are easily observed.

SCHEMA GENERALE DEL PROCESSO DI SCINTILLAZIONE

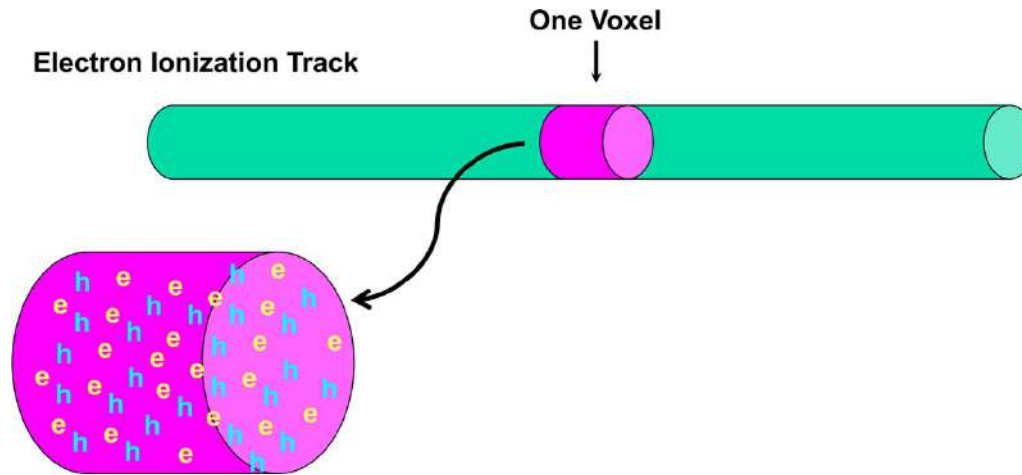


Fig. 2. Pictorial representation of how an electron track is modeled. It is usually assumed to be straight and about 3 nm in diameter, with each voxel containing a density of electrons and holes ρ .

Questo schema fu proposto nel 1961 ed è ancora accettato

- Lungo la traccia della particella ionizzante si formano i “portatori”, cioè elettroni, lacune e stati legati (eccitoni).
- Sono le coppie legate che si diseccitano (grazie ai centri diffusori principalmente dati del drogante) che generano i fotoni di scintillazione.
- La densità di formazione dipende dall’energia e dalla carica della particella ionizzante. La suddivisione fra elettroni, lacune e eccitoni dipende dal materiale e dalla densità di ionizzazione.
- Una volta formata la “nuvola” dei portatori essa evolve nel tempo; ci sono diversi processi fisici e alcuni di questi portano a scintillazione ed altri no (il così detto «quenching»). I due fenomeni sono in competizione e questa competizione dipende dalla densità di ionizzazione la quale dipende dall’energia della particella ionizzante da cui deriva la non-linearità perché la frazione di energia convertita in luce dipende in definitiva dall’energia della particella incidente.
- La difficoltà sta nel capire quali sono i processi dominanti e la loro dipendenza da dE/dx

Esistono attualmente tre diversi approcci:

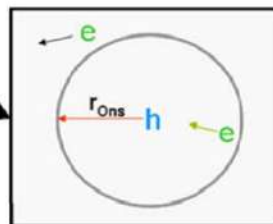
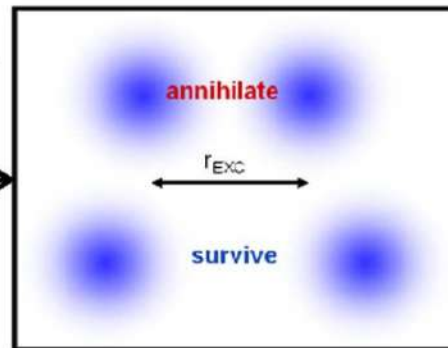
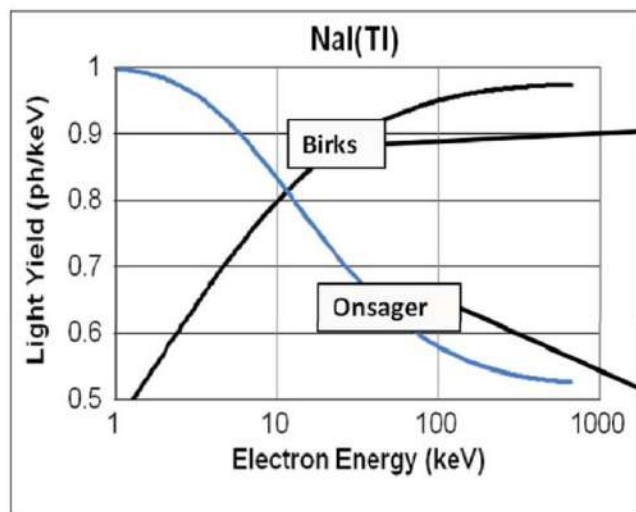
- 1) Approccio minimalista (più semplice e che io uso nelle simulazioni)
- 2) Modello cinetico (considera anche la dipendenza dal tempo)
- 3) Modello diffusivo (considera anche la diffusione dei portatori)

approccio minimalista (due fenomeni dominanti a energie diverse)

Gli eccitoni (stati legati h-e) sono neutri e si assume quindi molto più mobili di e ed h separati. Si assume che solo gli eccitoni producano scintillazione via ricombinazione. Gli elettroni e le lacune si ricombinano in maniera non radiativa.

1) Il meccanismo di *quenching* domina ad alta densità di eccitazione a causa di collisione di due eccitoni con un fenomeno *Auger-like* in cui un eccitone perde tutta la sua energia in maniera non radiativa (fononi). Il tasso di *quenching* è proporzionale al quadrato della densità di eccitoni.

2) A bassa densità di ionizzazione gli elettroni e lacune sono separati e la formazione di stati legati avviene quando la distanza fra loro è vicina alla al *raggio di Onsager* (cioè quando l'energia di legame è paragonabile all'energia termica).



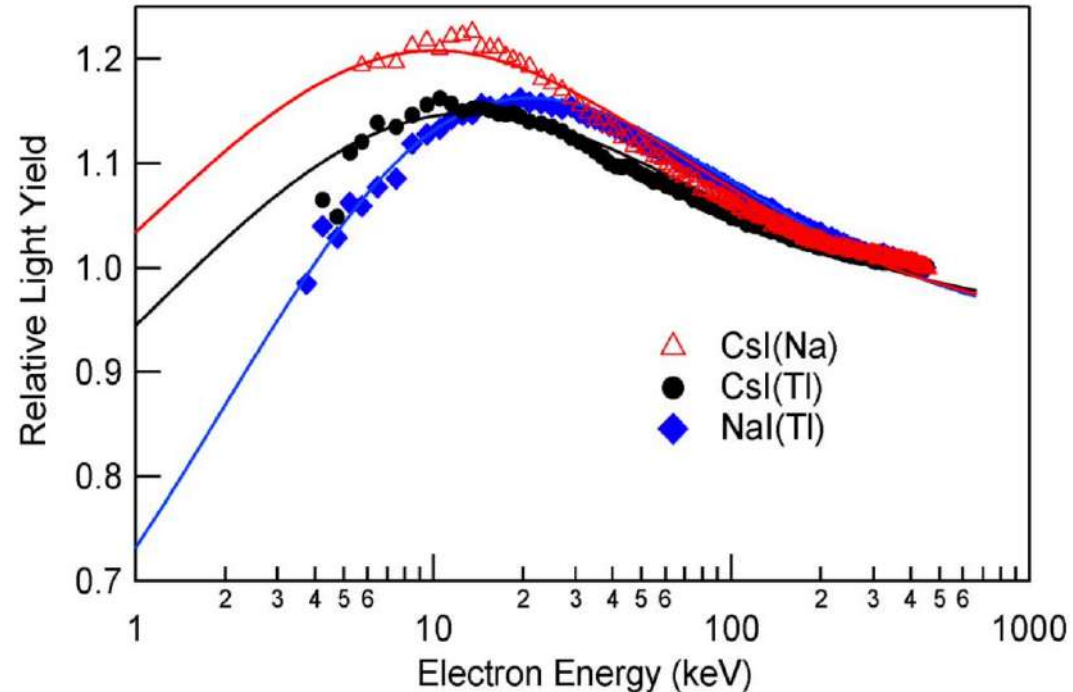
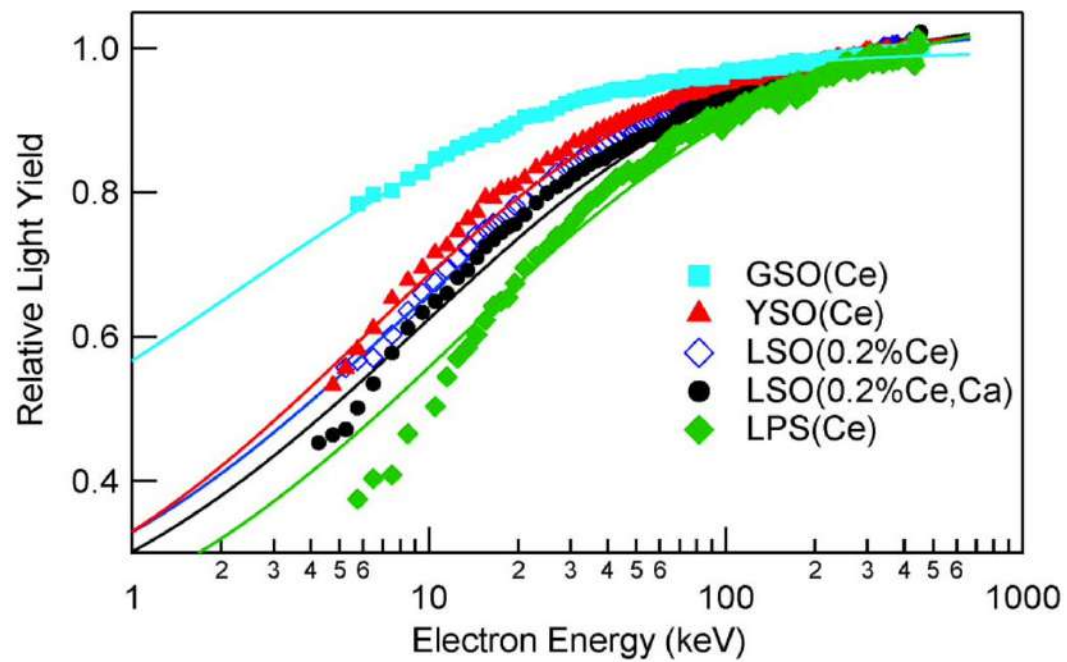
modello a tre parametri

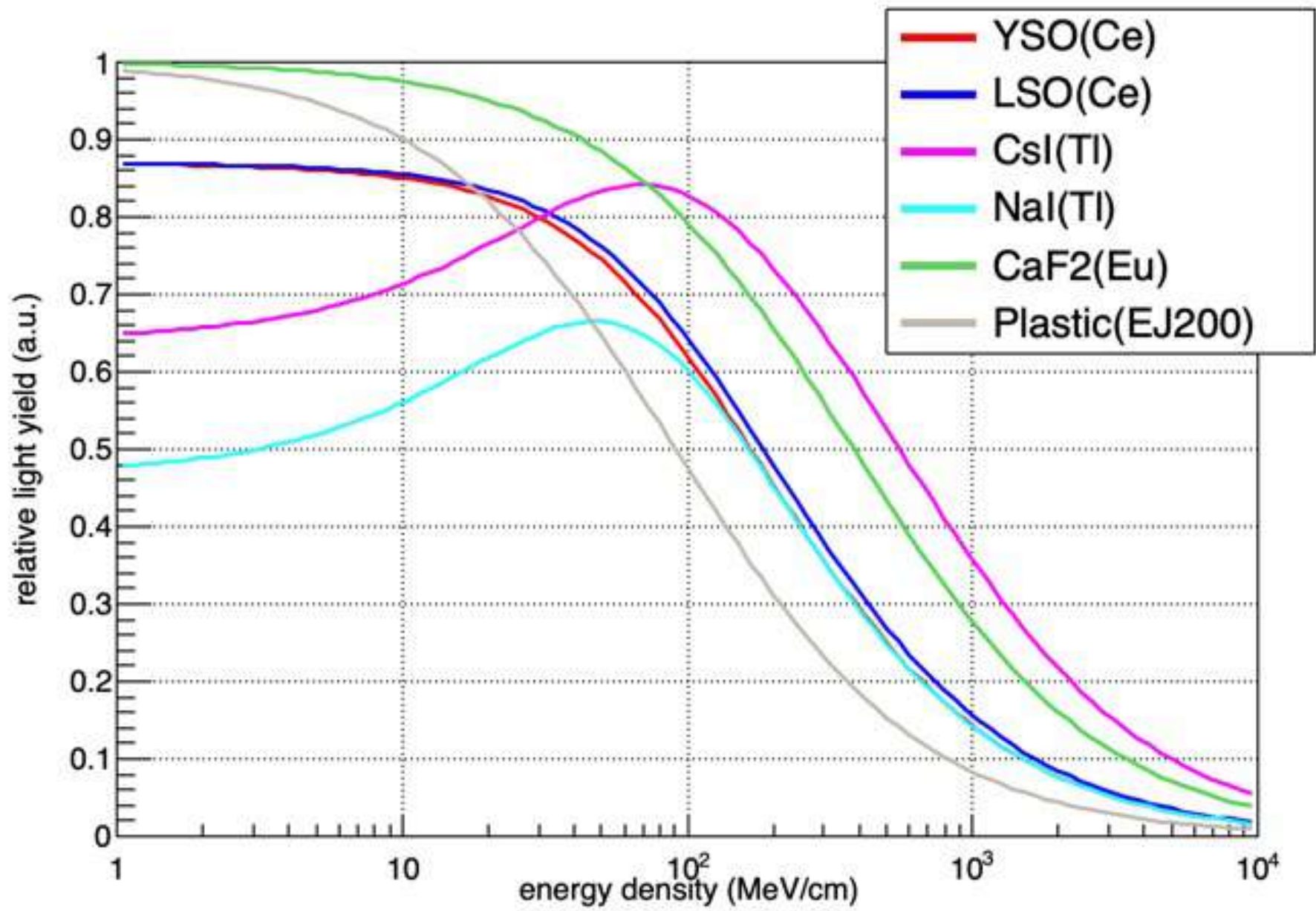
$$\eta_{CAP} (dE/dx) = \eta_{CAP}^0 \frac{1 - \eta_{e/h} \exp \left[\frac{-(dE/dx)}{(dE/dx)_{ONS}} \right]}{1 + \left[\frac{(dE/dx)}{(dE/dx)_{BIRKS}} \right]}$$

Per caratterizzare la risposta di scintillazione tipicamente si usa la «risposta agli elettroni» ottenuta per effetto Compton

TABLE III
SUMMARY OF FITTED PARAMETERS FOR ALL SCINTILLATORS

Scintillator	η_{eh} (%)	$(dE/dx)_{BIRKS}$ (MeV/cm)	Predicted R(%, 662 keV)
Alkali Halides			
CsI(Tl)	36	556	3.42
CsI(Na)	39.5	667	4.04
NaI(Tl)	53.4	166	5.04
Simple Oxides			
YAG(Ce)	10	526	2.44
YAP(Ce)	12	606	2.16
LuAG(Ce)	8.8	752	2.17
LuAG(Pr)	11	806	2.07
Silicates			
LSO(0.2% Ce)	13	185	5.16
LSO(1% Ce)	13	185	5.16
LSO(0.02% Ce)	13	133	6.19
LSO(0.2% Ce,Ca)	10	167	5.62
YSO(Ce)	13	167	4.42
LPS(Ce)	5	125	6.33
Fluorides			
CaF ₂ (Eu)	0	333	2.94
CeF ₃	0	313	3.98
Organics			
Plastic (EJ200)	0	91	3.46
PVK Polymer	0	91	3.46
Stilbene	0	80	3.57
Bibenzyl	0	83	3.57
Standard Liquid	0	111	2.82
Multivalent Halides			
SrI ₂ (Eu)	24	454	2.20
LaCl ₃ (Ce)	22	345	2.40
LaBr ₃ (5% Ce)	18	392	2.43
Gadolinium-based compounds			
GYGAG(Ce)	22	599	2.69
GSO(Ce)	7	556	2.61





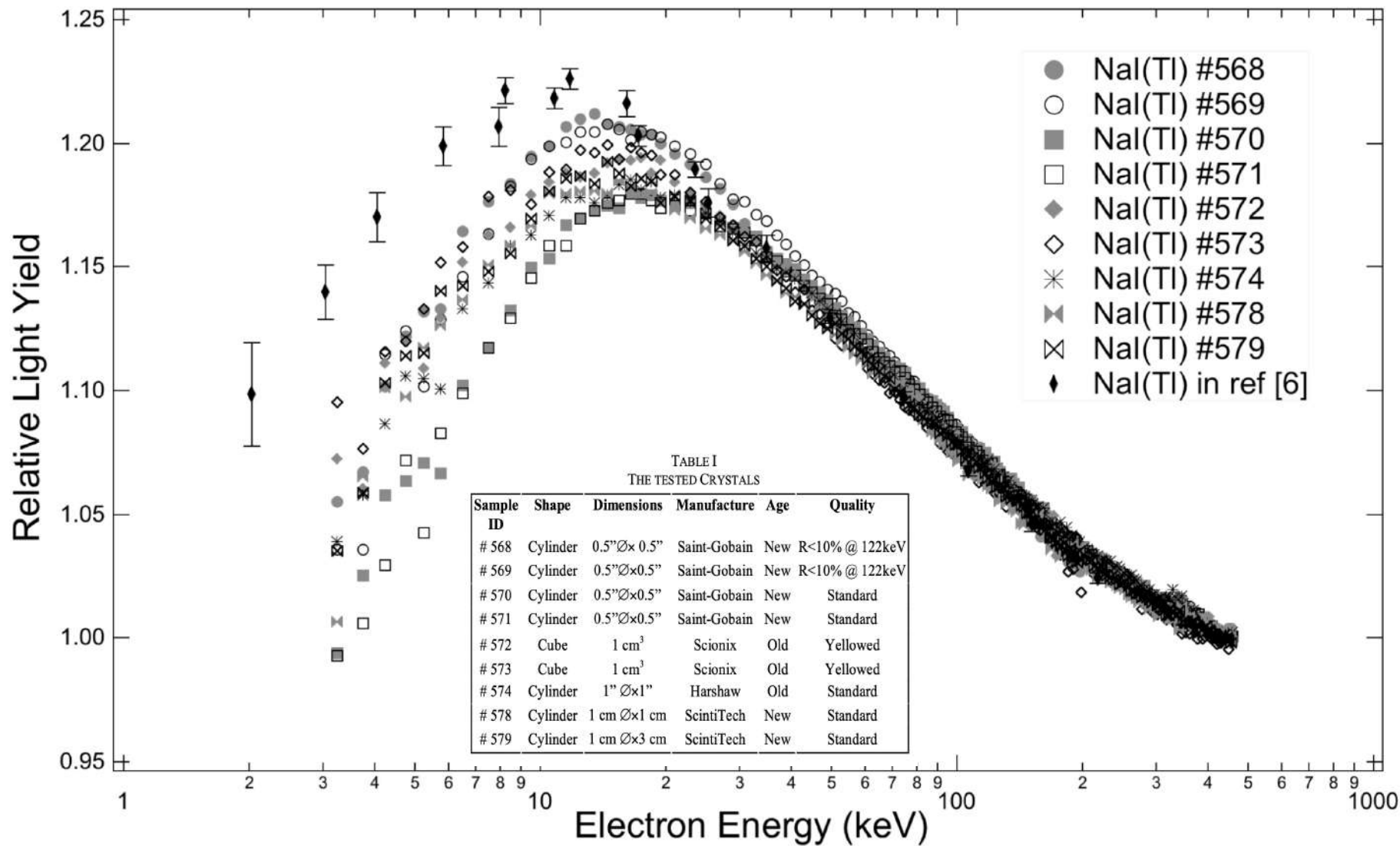


Fig. 1. Electron response, normalized at 450 keV, for the nine NaI(Tl) under study. The NaI(Tl) relative light yield measured by Rooney and Valentine [6] is reported also for comparison. For the entire energy range, the electron response is measured with accuracy better than 1%, [13].

Lavoro di simulazione

- Simulazione con FLUKA tracciando fino alla minima energia possibile, **100 eV**.
- Materiale: LYSO
- Risposta di scintillazione col modello minimale (YSO e non LYSO!)

Con 3 cm di LYSO:

- Studio delle m.i.p.
 - muoni a 10 GeV
 - protoni (alla stessa velocità)
 - nuclei di elio 4
 - nuclei di carbonio 12
 - nuclei di ferro 56

Con 1 m³ di LYSO

- Studio di elettroni a bassa energia (simil Compton)
- Studio degli sciami di elettroni a 1 GeV, 10 GeV, 1 TeV
- Studio degli sciami di protoni a 10 GeV, 1 TeV

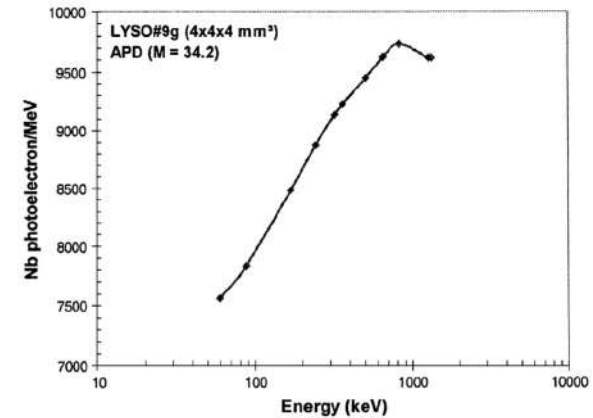
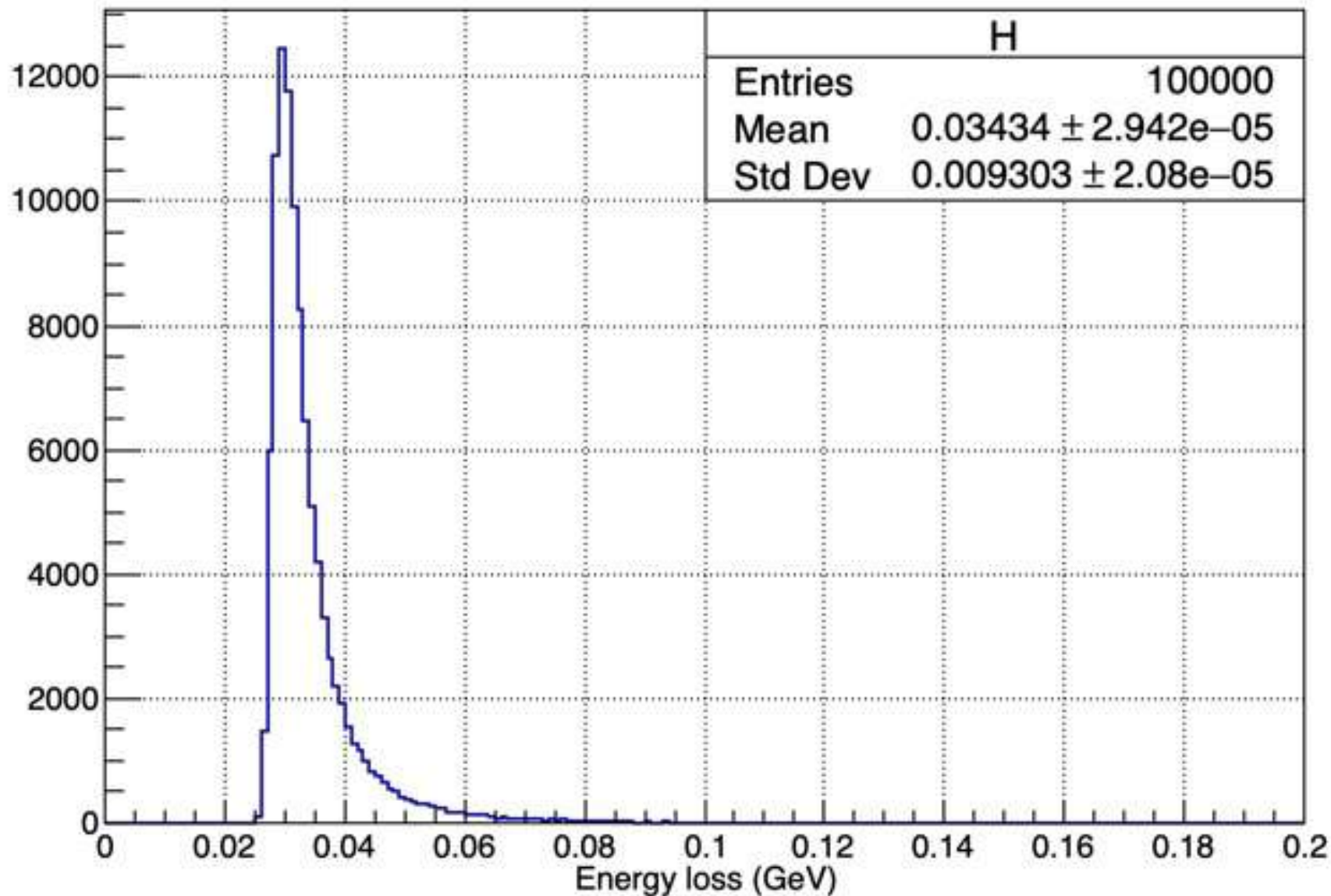
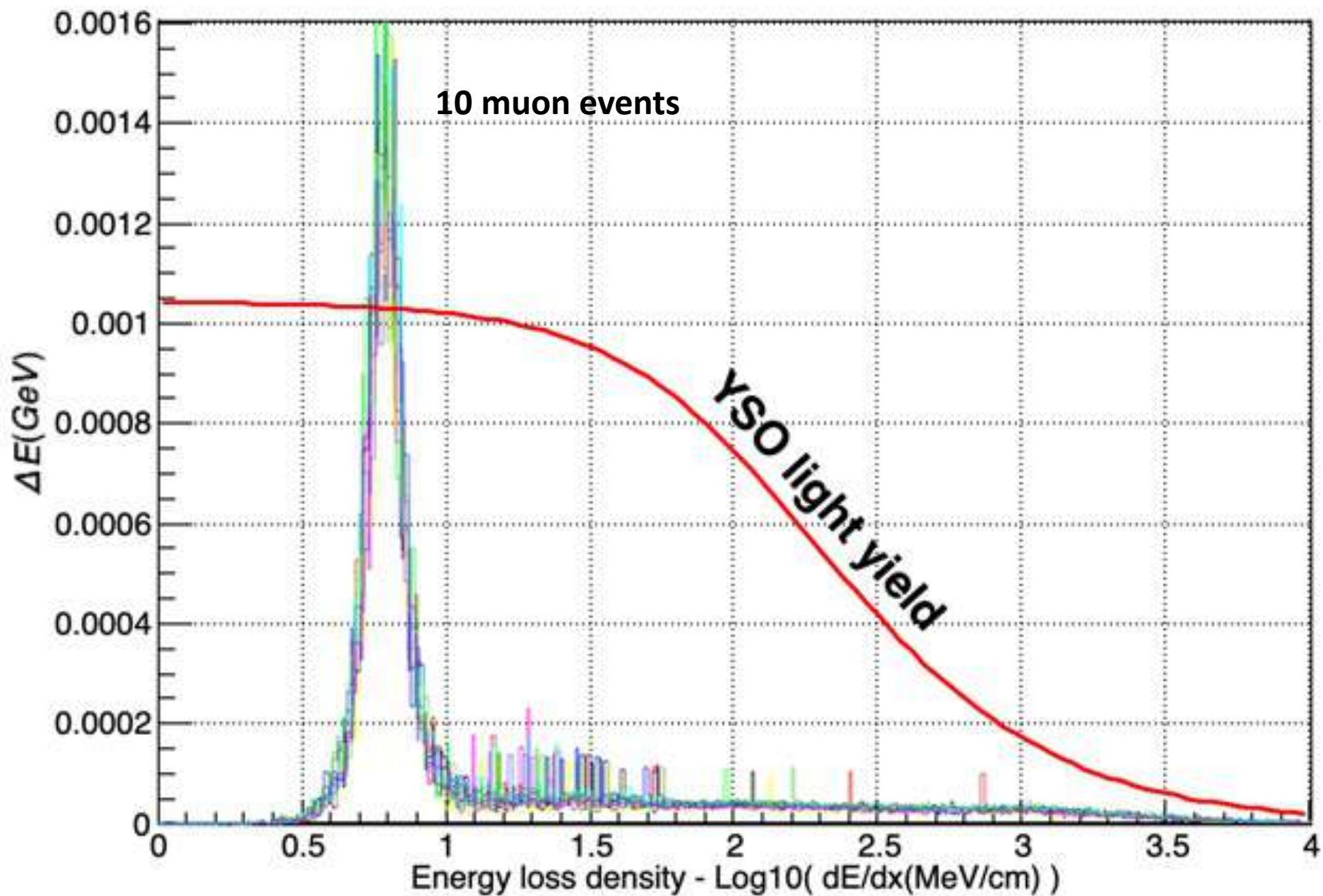


Fig. 11. Nonproportionality of LYSO light output as a function of incident γ -ray energy.

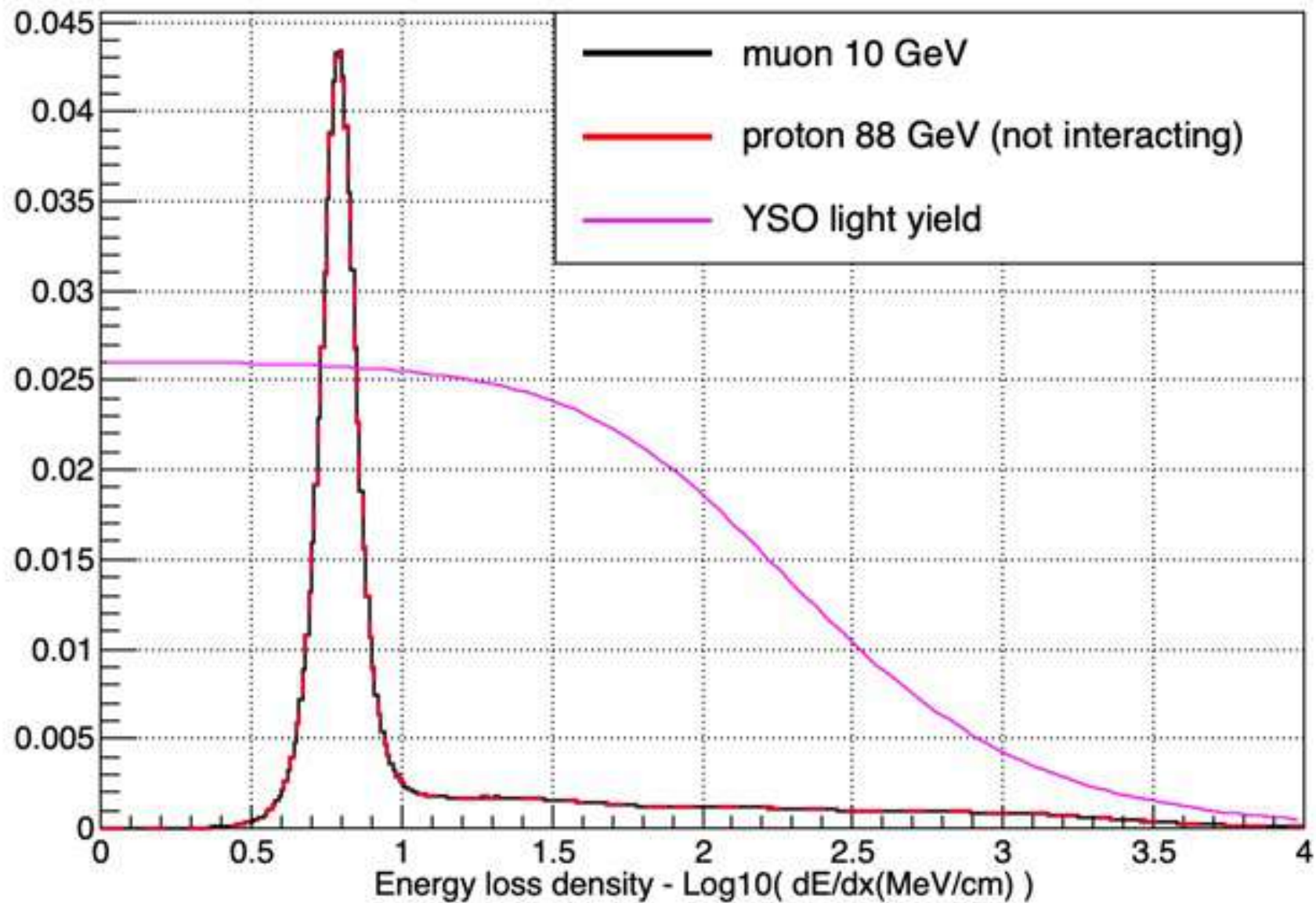
10 GeV muons, 3 cm LYSO



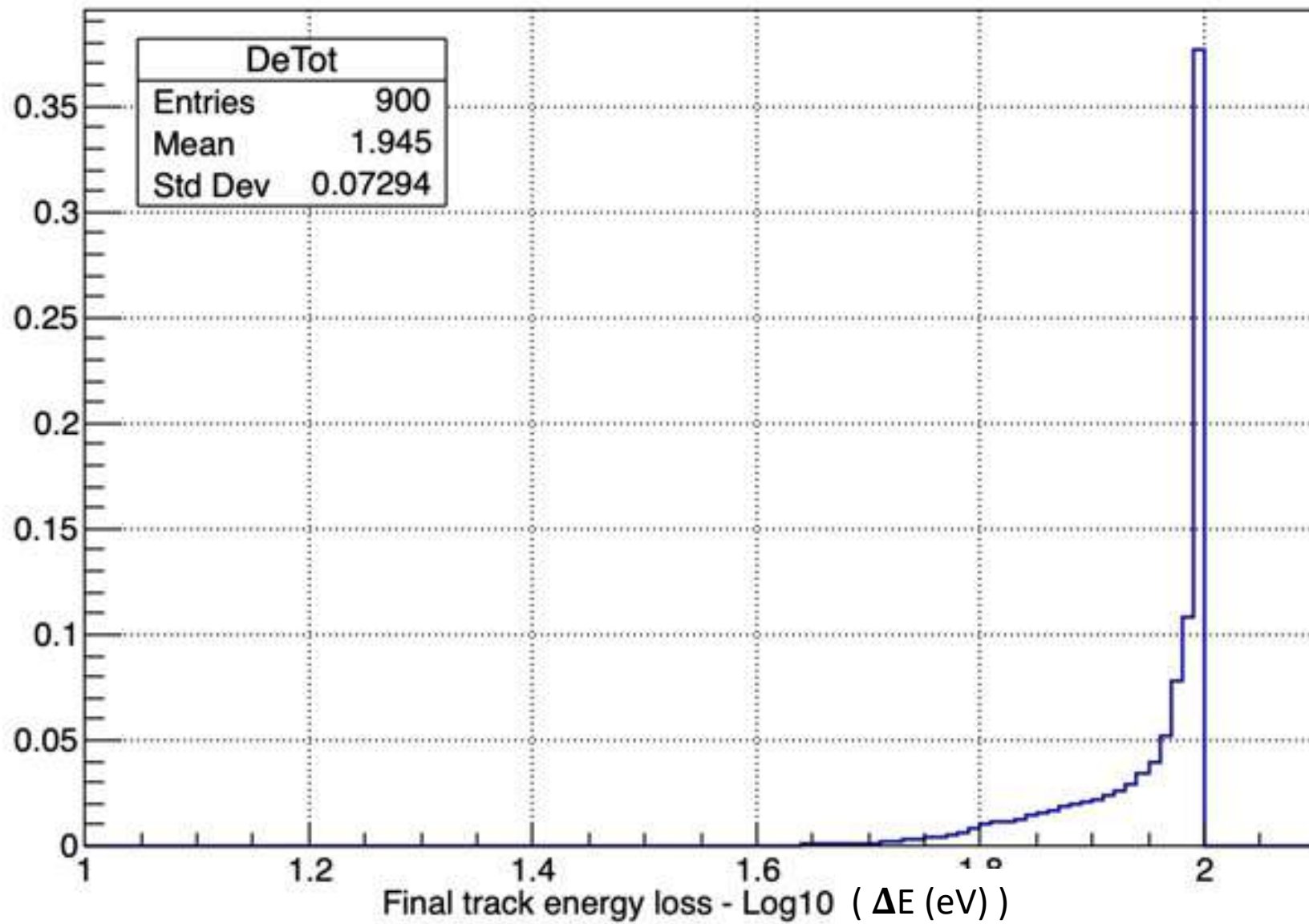
muon 10 GeV - 3 cm LYSO



3 cm LYSO



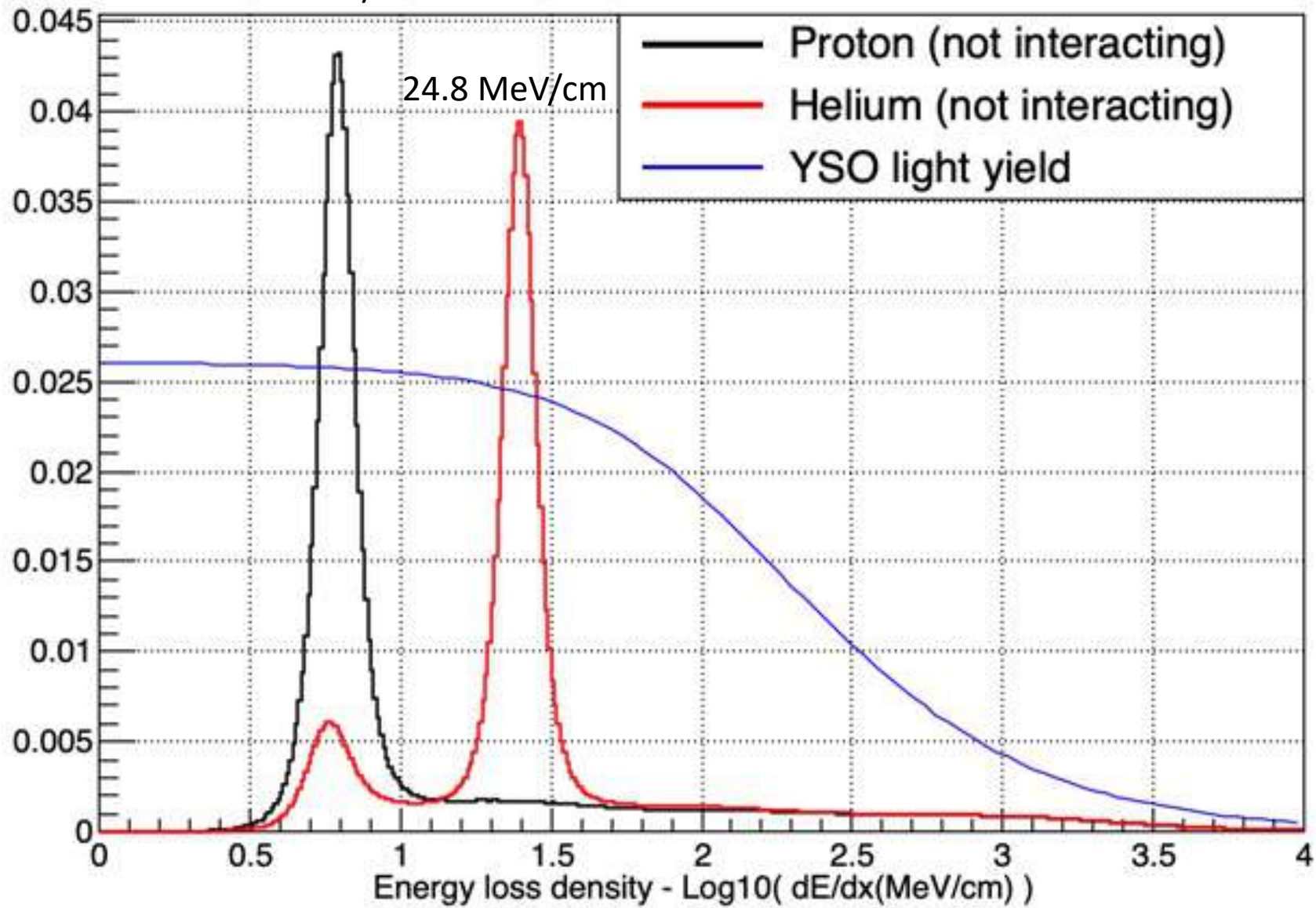
7.1% of the total released energy

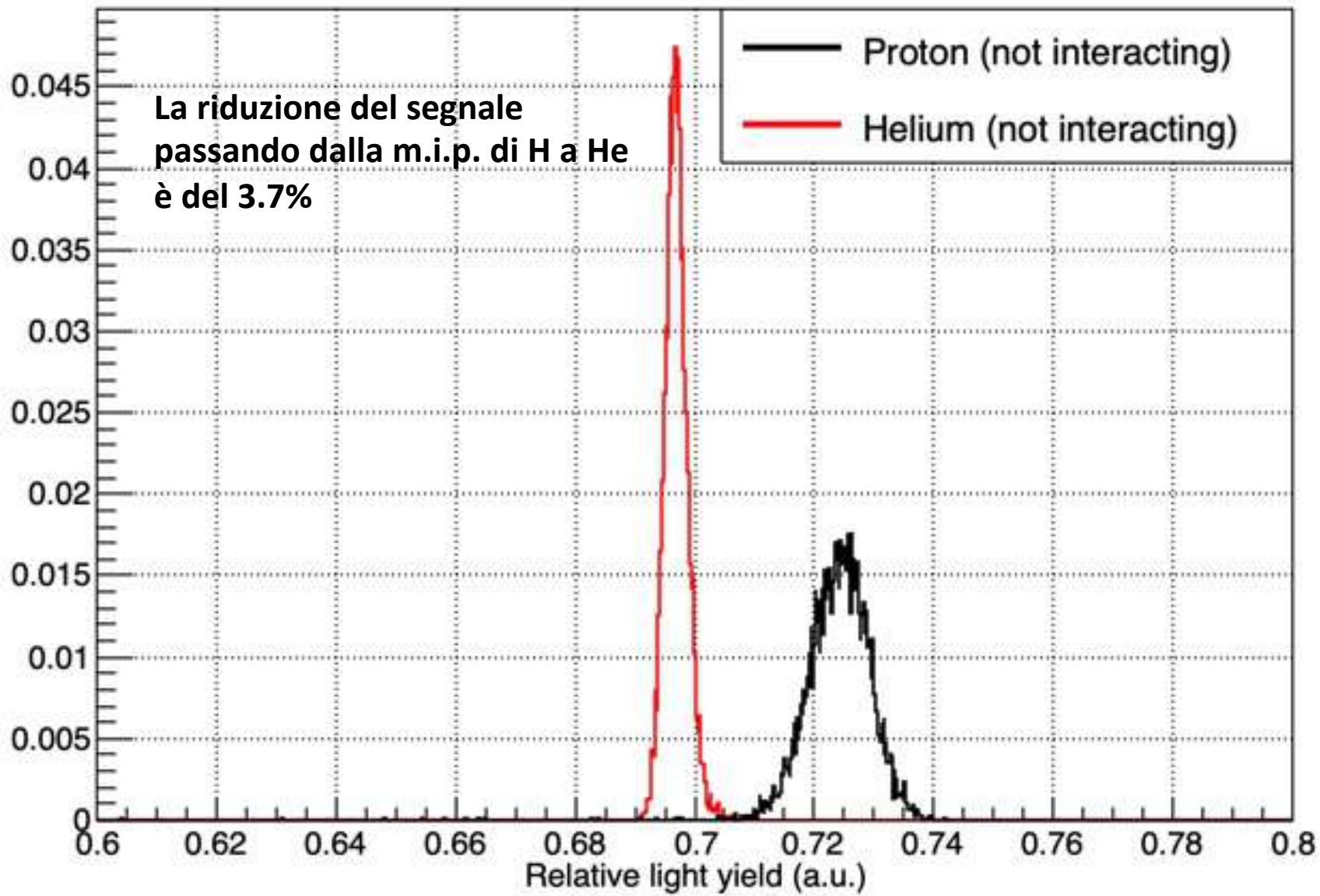


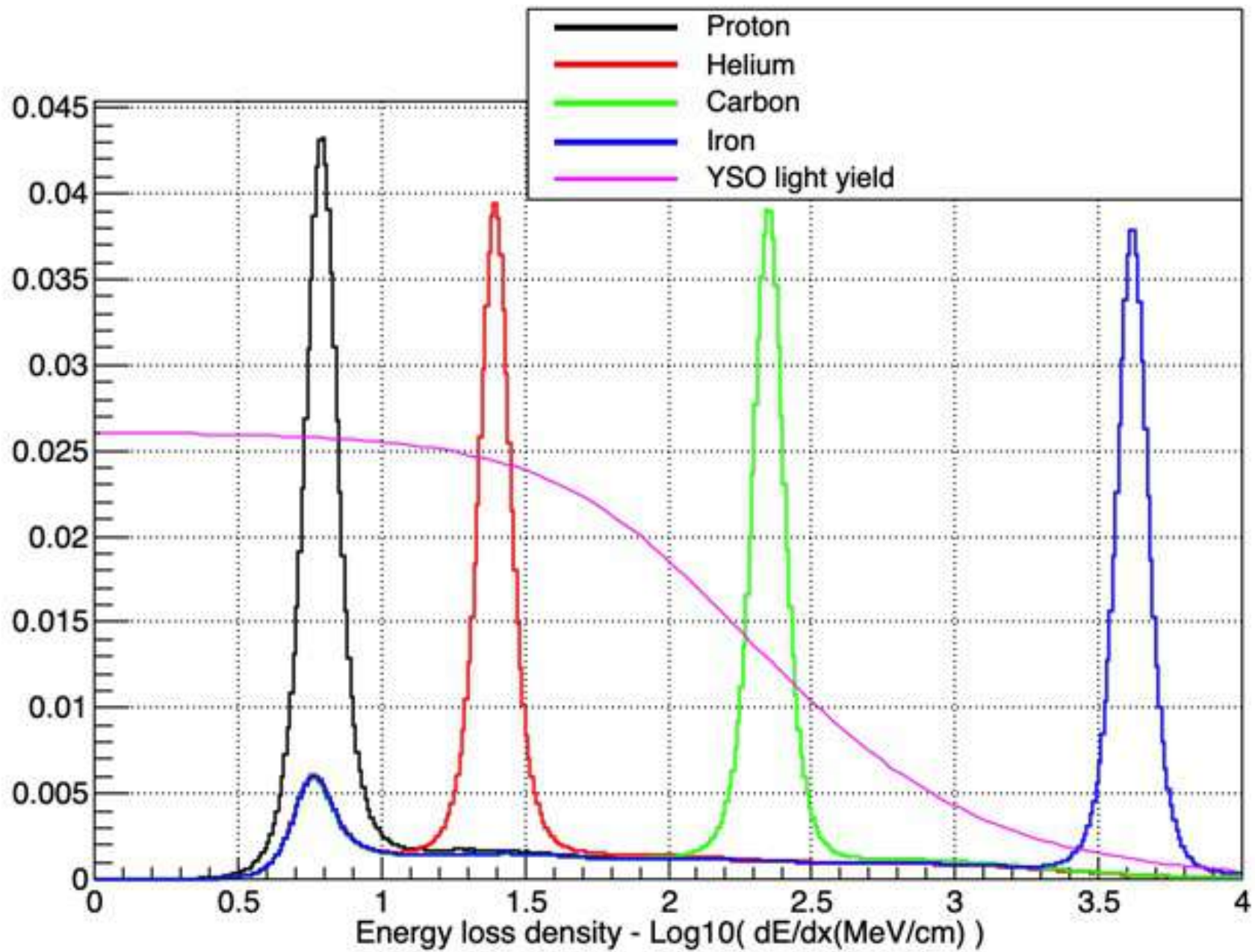
3 cm LYSO

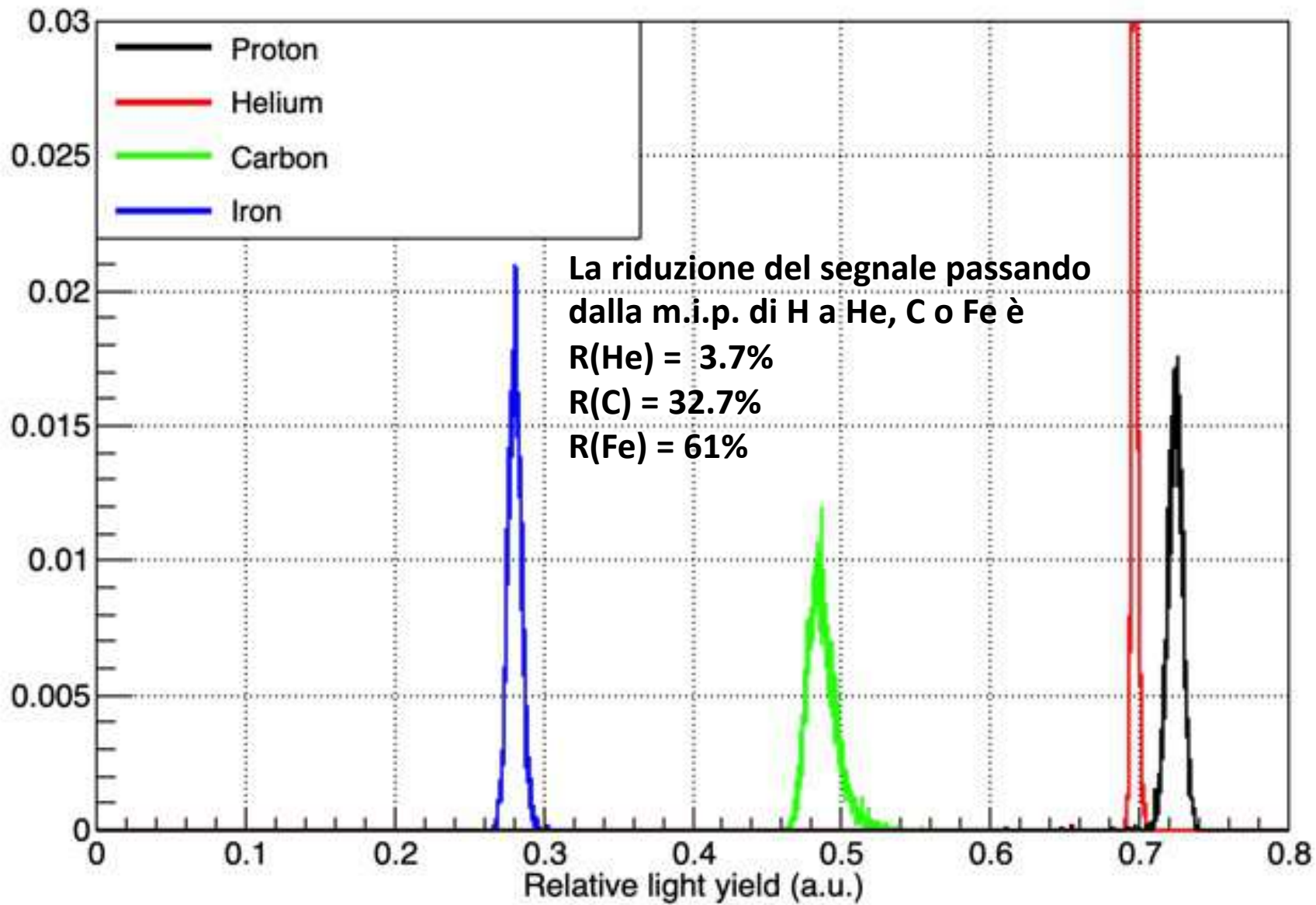
6.2 MeV/cm

24.8 MeV/cm

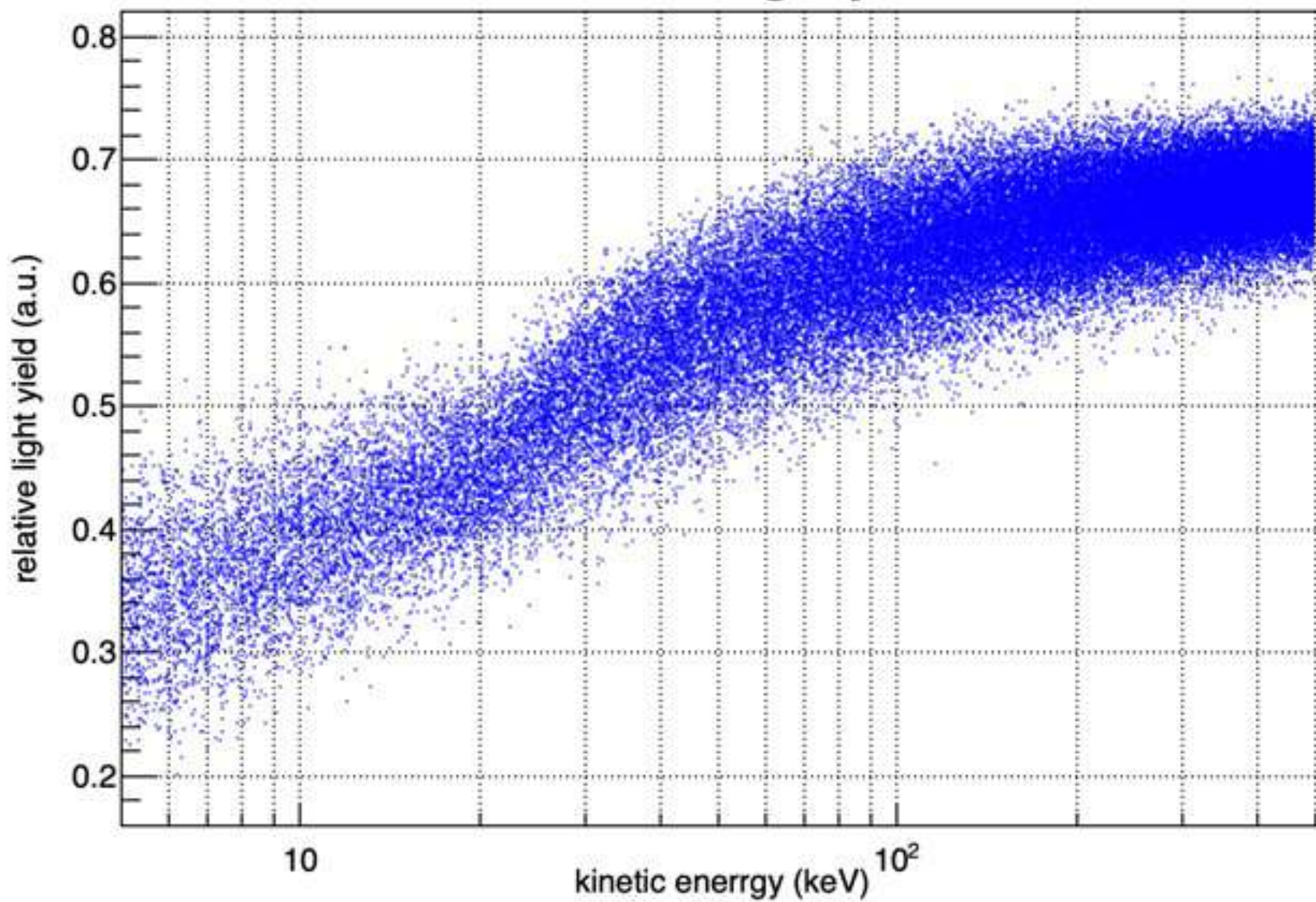


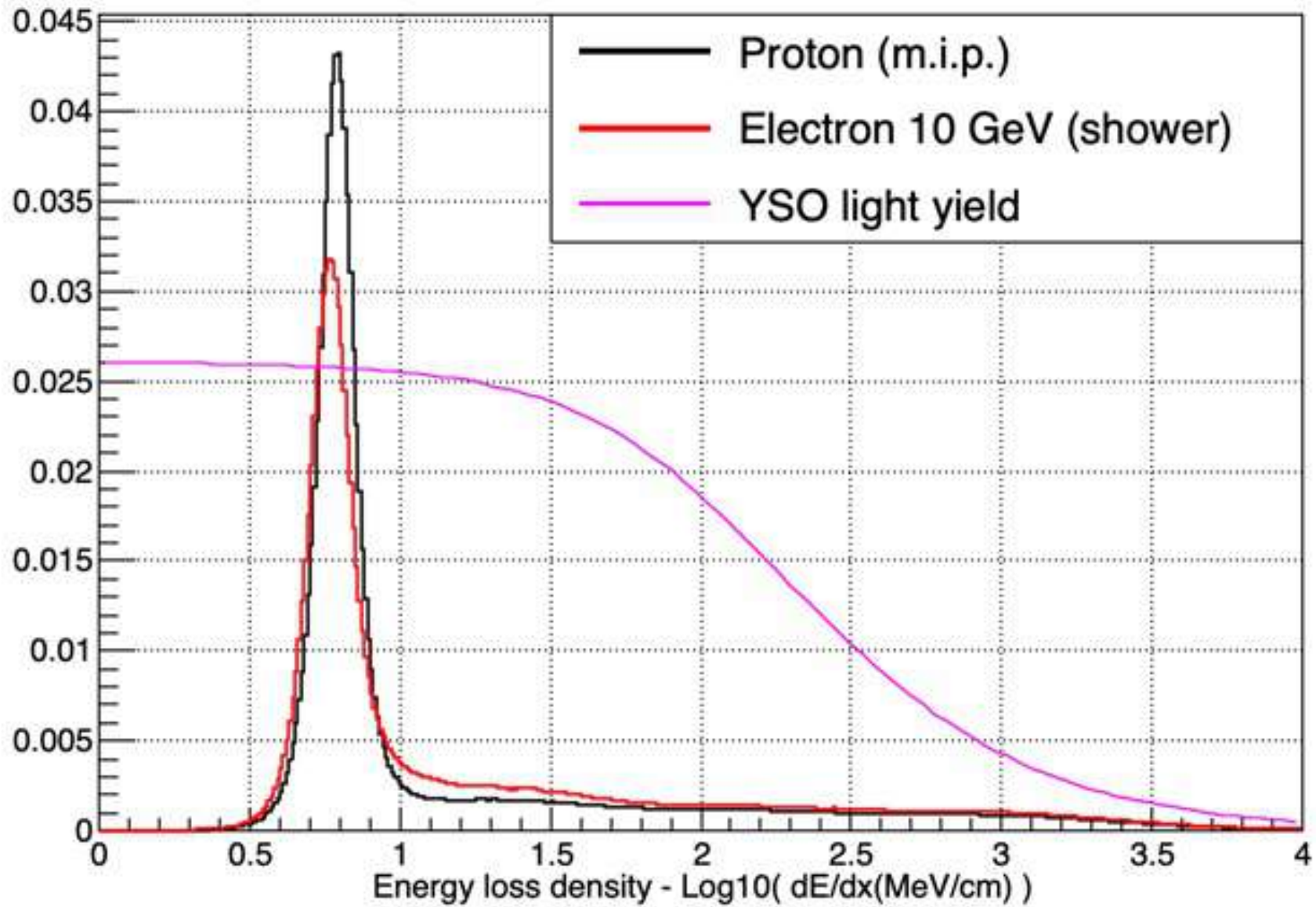


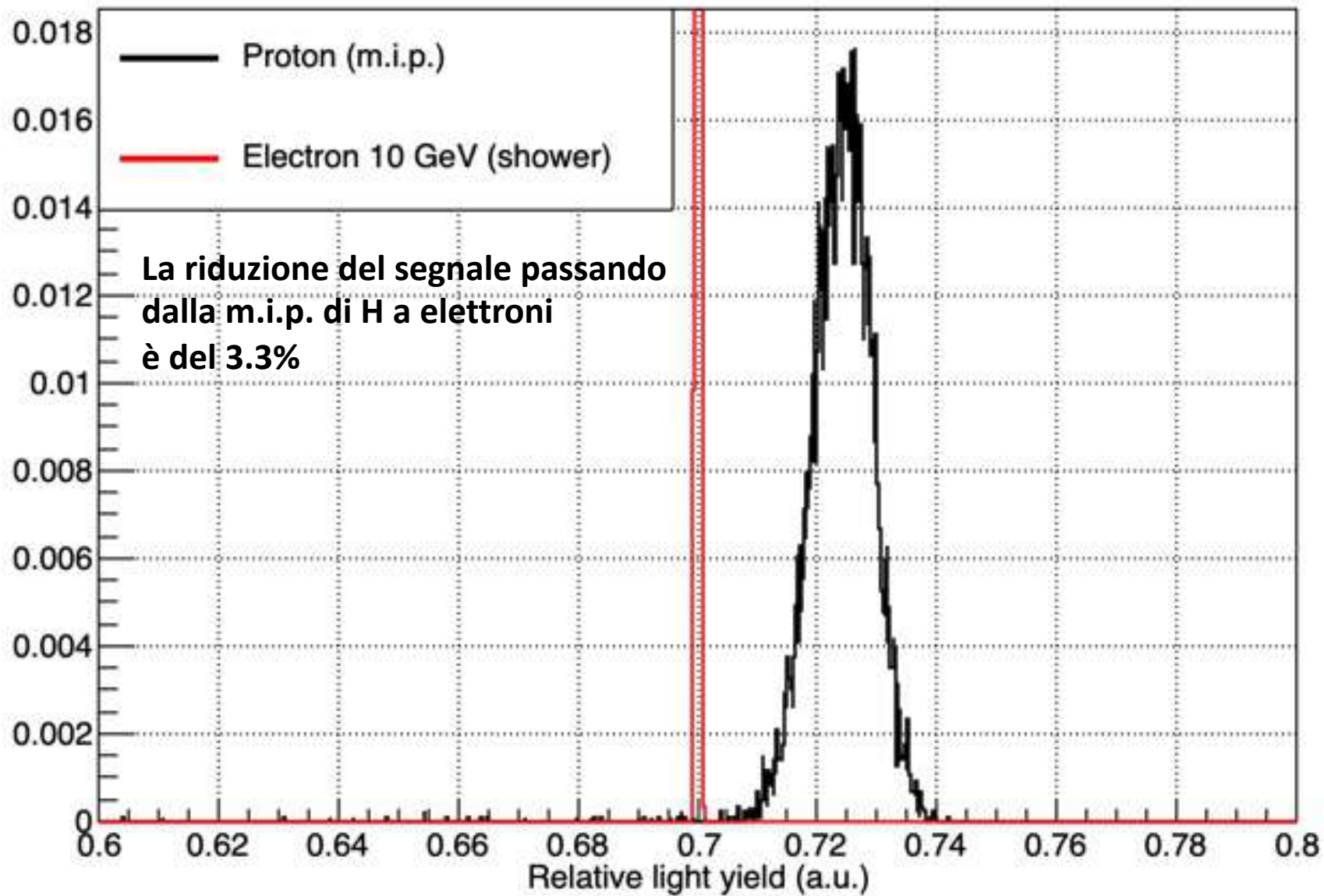


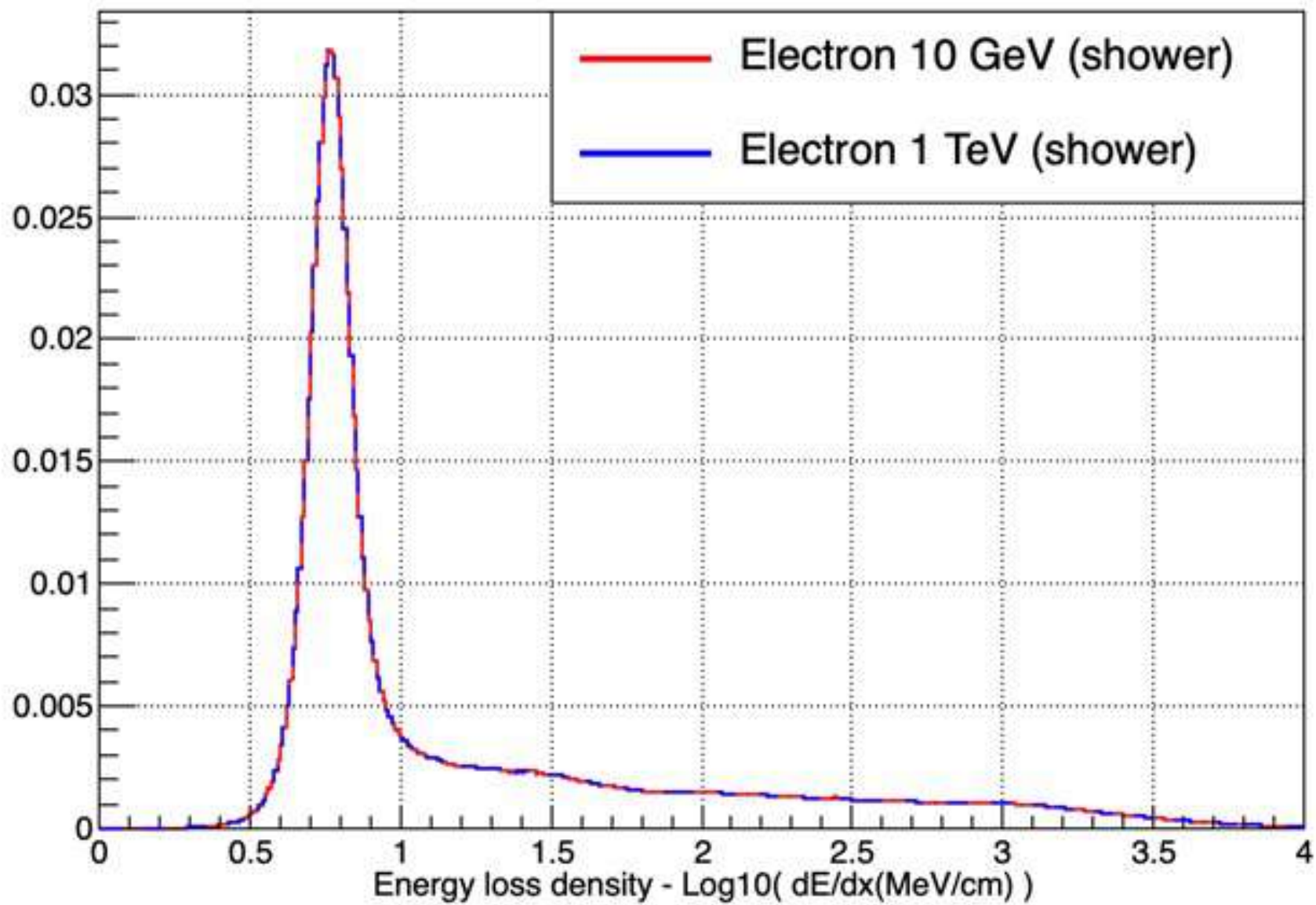


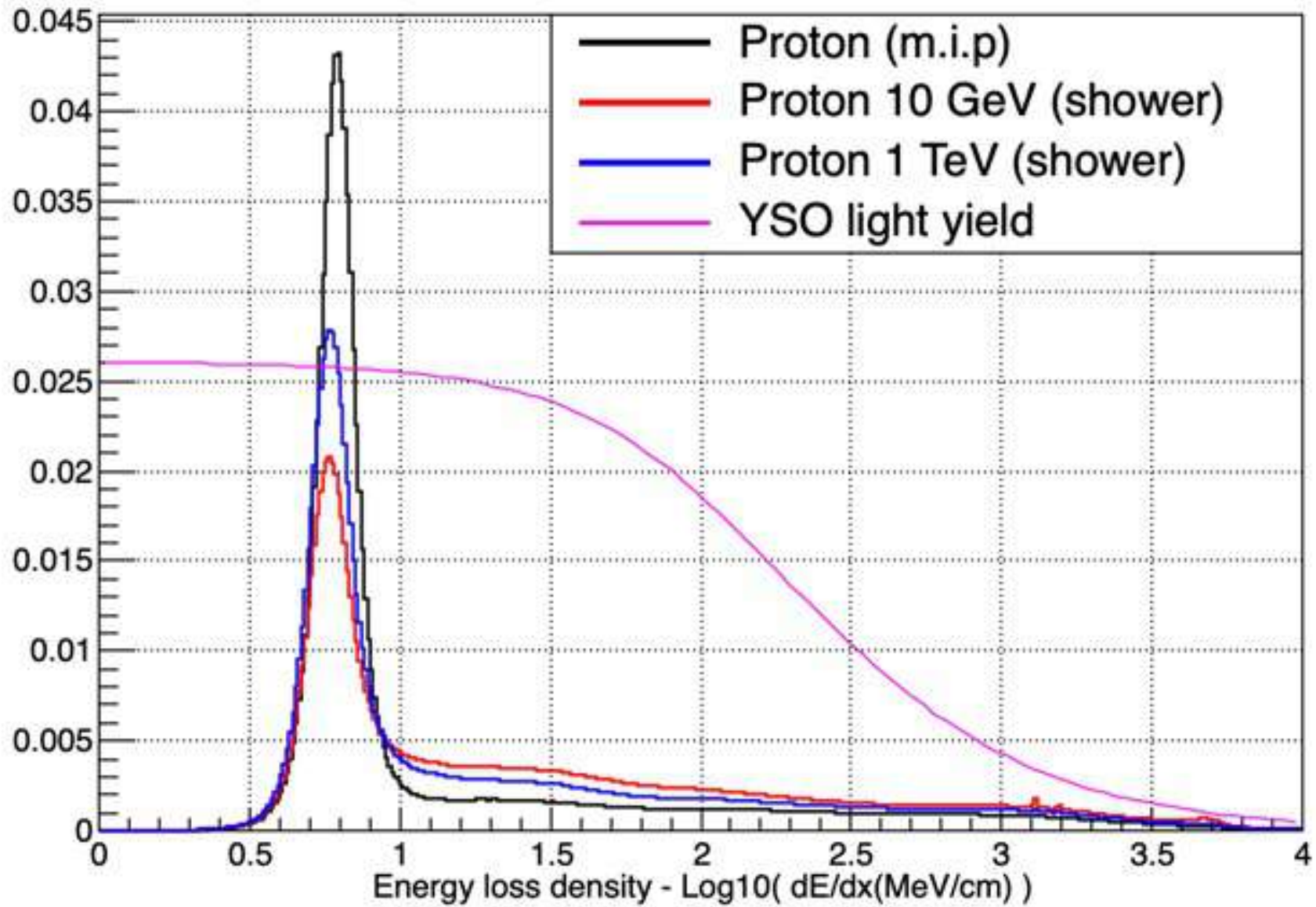
electron YSO light yield

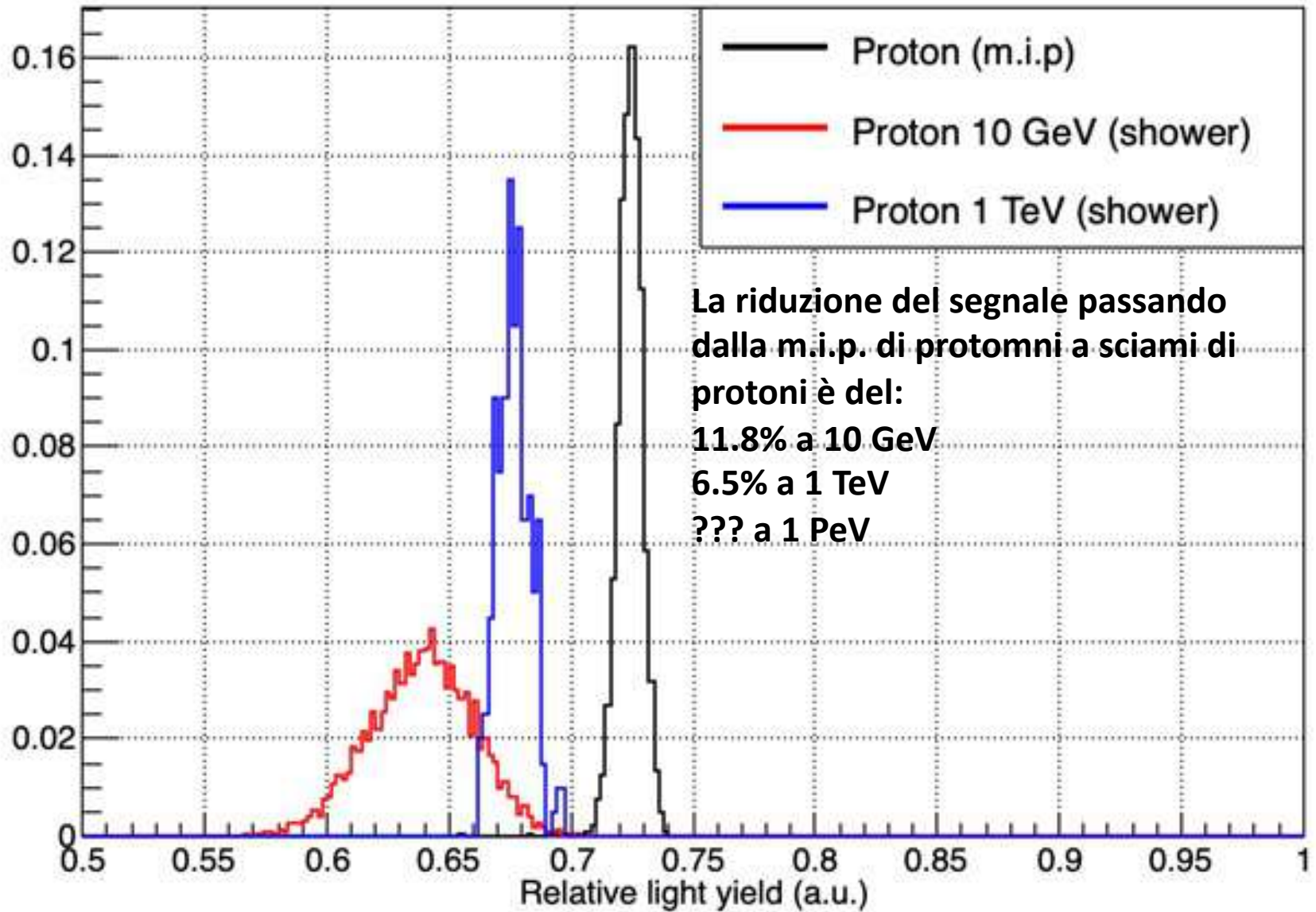












Cose da capire e/o fare...

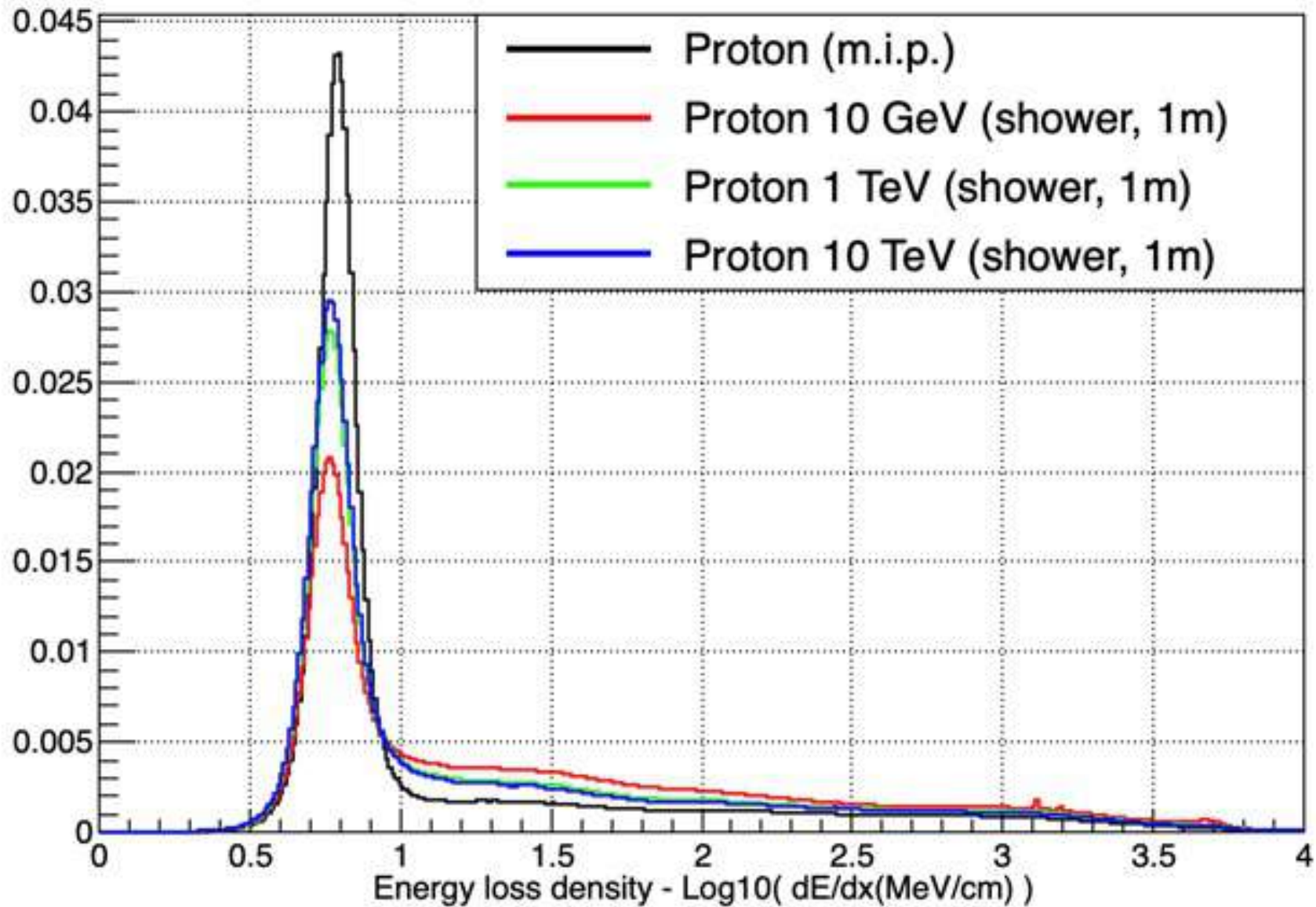
- Ci sono errori concettuali?
- Ci sono errori materiali?
- È tutto questo ragionevole e/o sensato?
- In questo lavoro c'è una approssimazione: non sono considerate in maniera «precisa» le energie rilasciate da tracce sotto soglia (elettroni sotto 100 eV).
 - $\Delta E(\text{sotto soglia}) / \Delta E(\text{totale}) \approx 7.1\%$ protoni m.i.p.
 - $\Delta E(\text{sotto soglia}) / \Delta E(\text{totale}) \approx 0.9\%$ sciame elettroni 10 GeV
 - $\Delta E(\text{sotto soglia}) / \Delta E(\text{totale}) \approx 11\%$ sciame protoni 10 GeV
 - $\Delta E(\text{sotto soglia}) / \Delta E(\text{totale}) \approx 9.5\%$ sciame protoni 1 TeV
- Studiare la densità di energia in funzione del tipo di particella

Cose interessanti da fare:

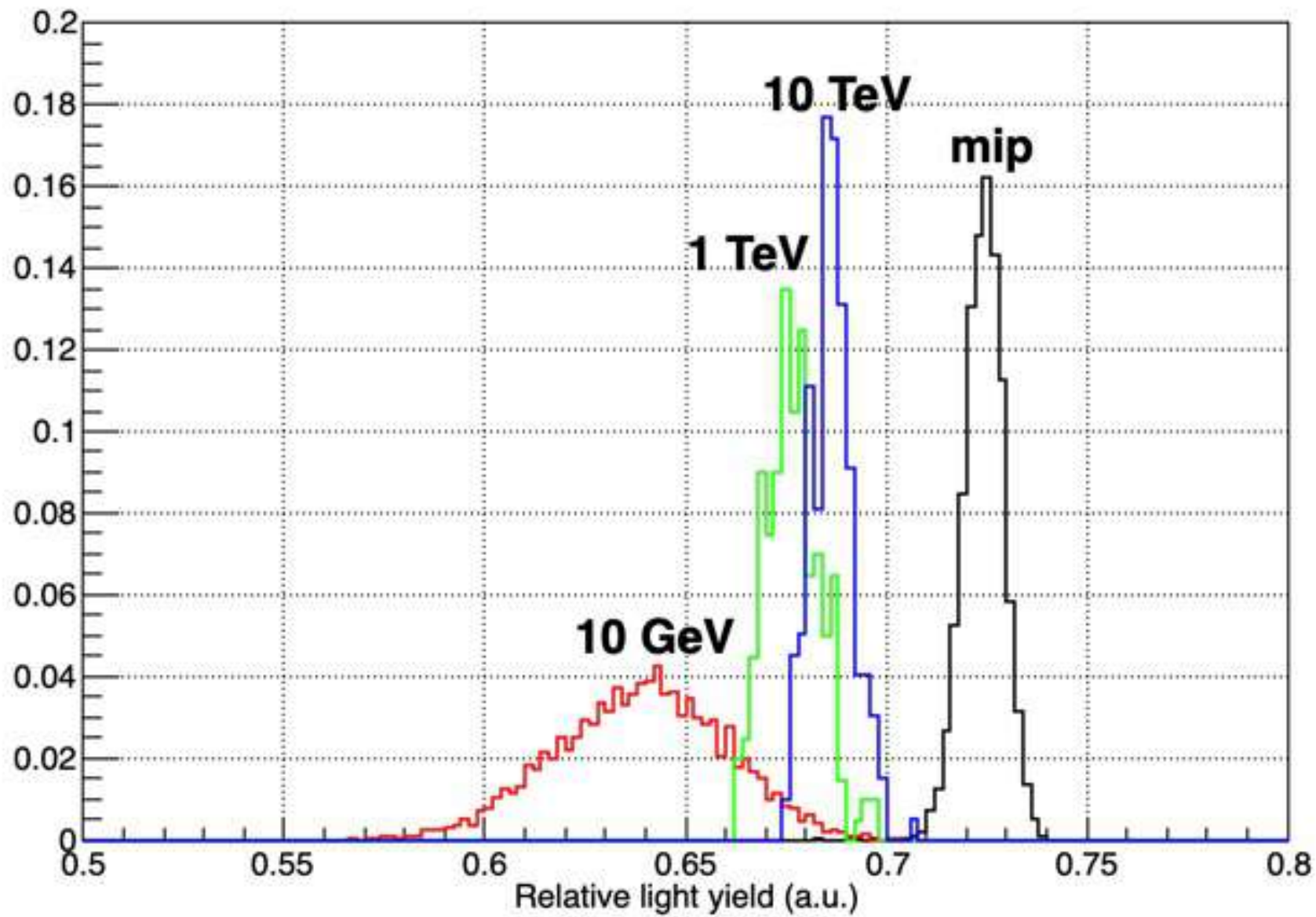
- **Fare confronto con dati test beam a disposizione**
- **Come implementare nella simulazione il processo di scintillazione non-proporzionale al PeV?**
- **Fare la caratterizzazione dei cristalli di LYSO di volo di HERD**
 - **Con elettroni Compton**
 - **Con nuclei non interagenti**

Aggiornamento 2/7/2021

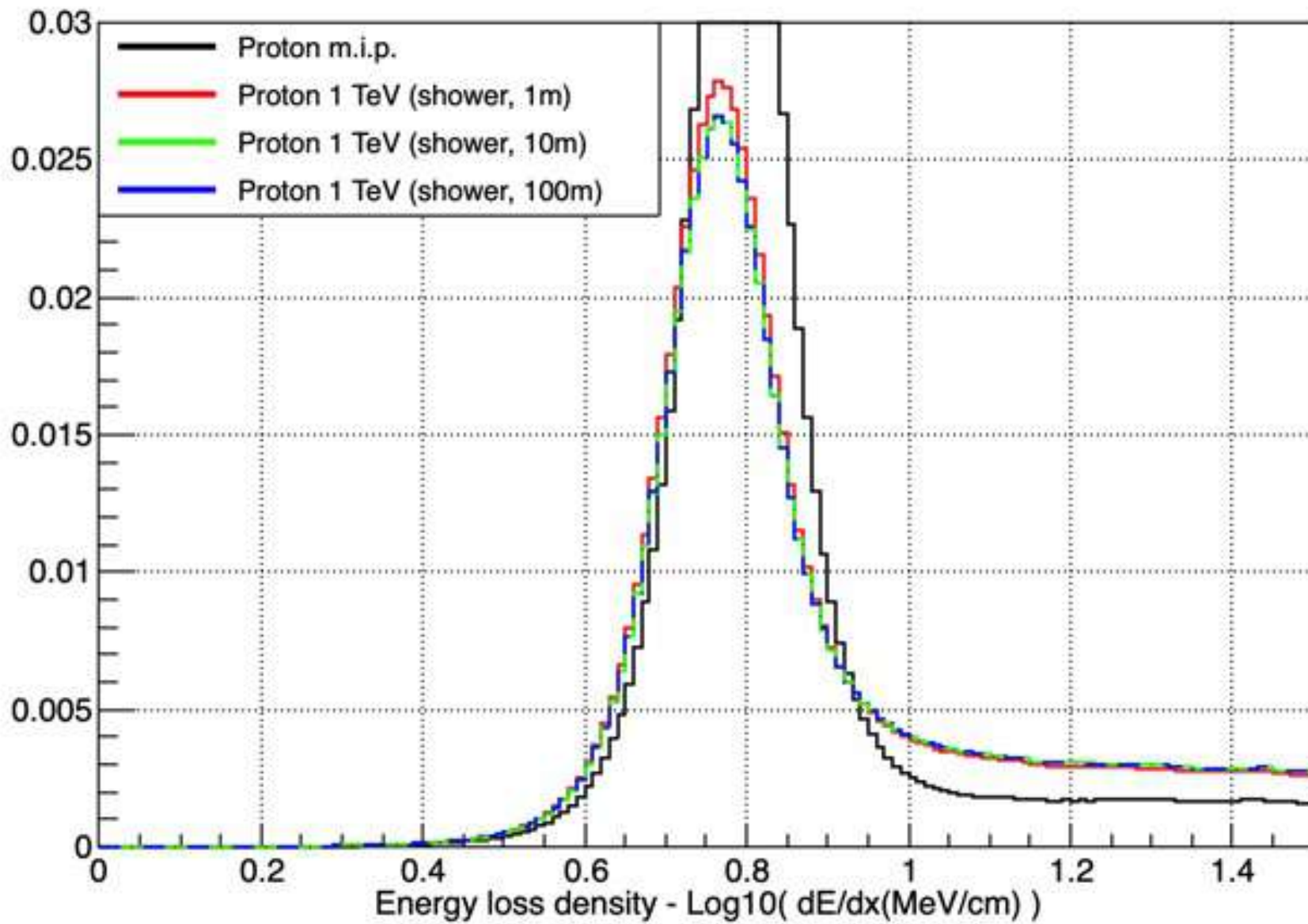
Protons in LYSO



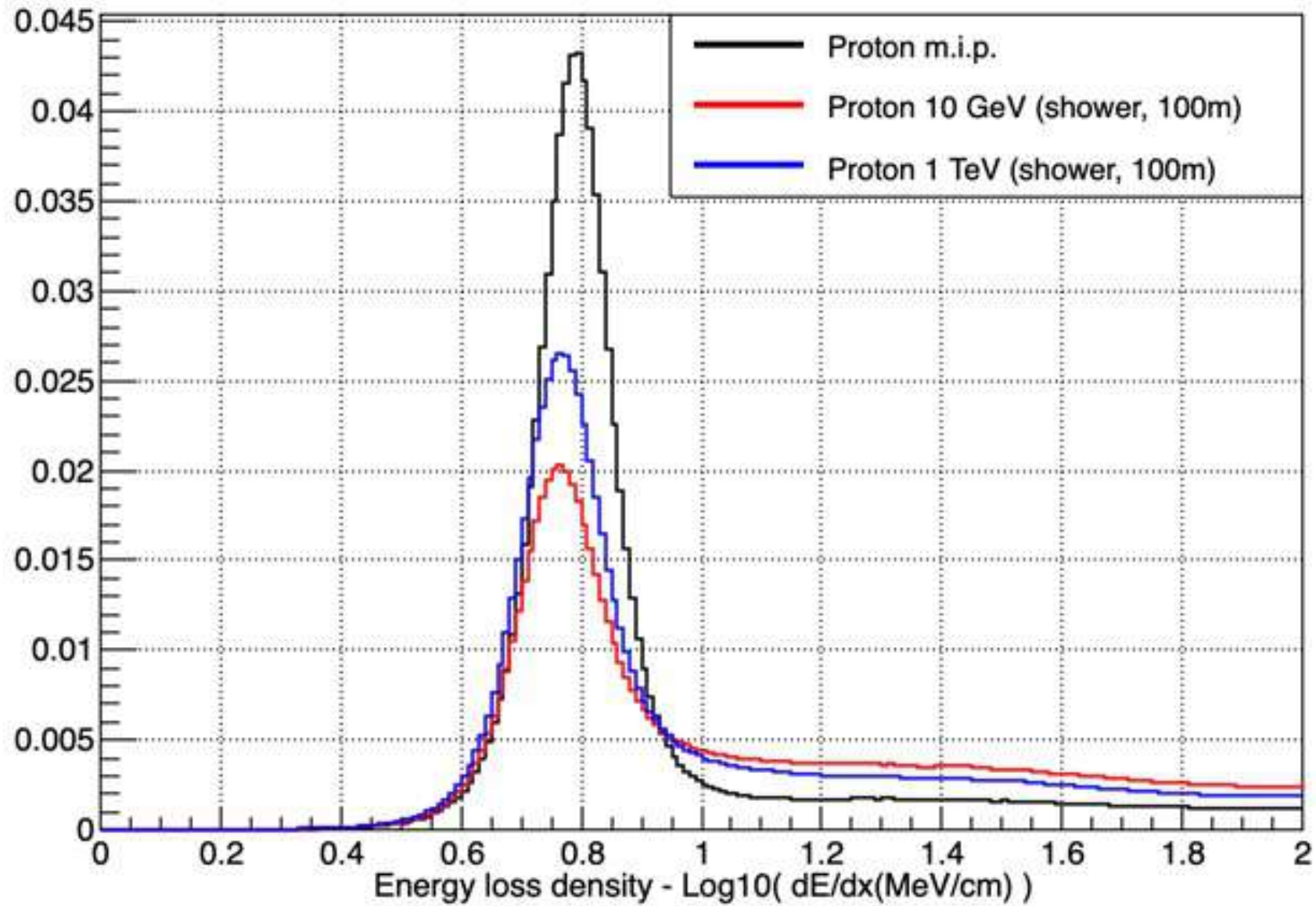
Protons in LYSO



Protons in LYSO

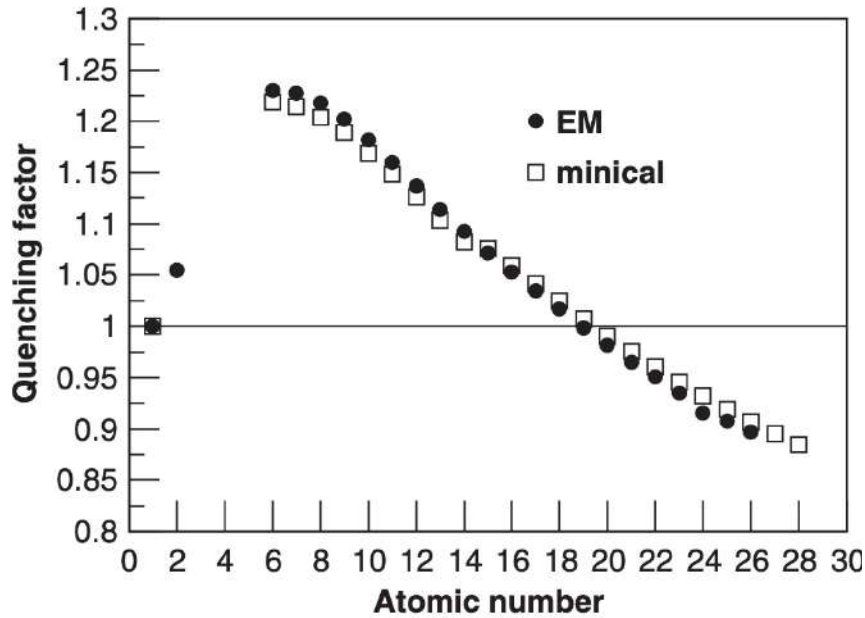


Protons in LYSO



CsI(Tl)

FERMI/GLAST



CaloCube

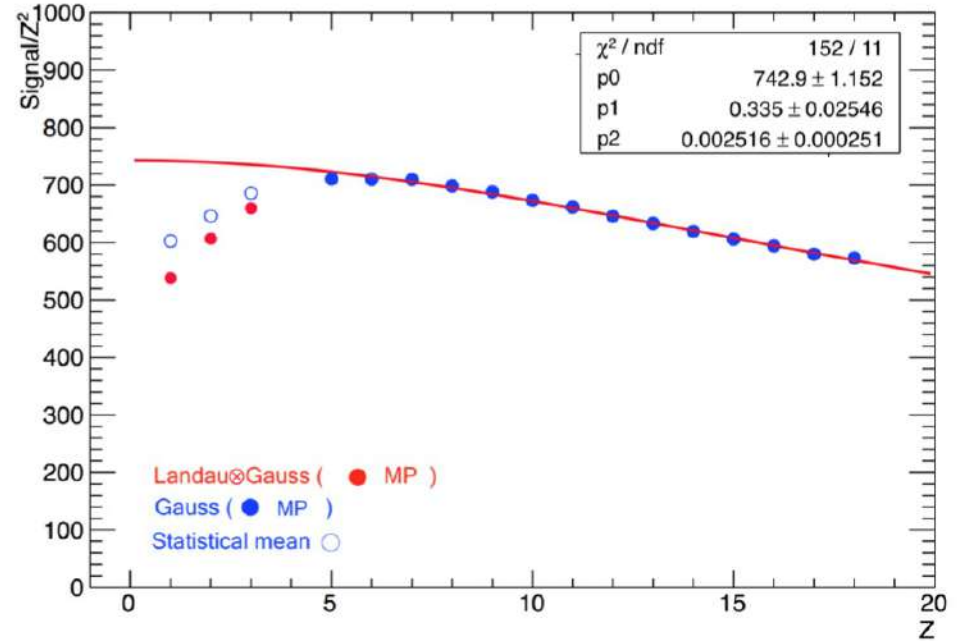


Fig. 8. Measured quenching factors as a function of the particle atomic number. The solid dots (open squares) correspond the EM (Minical) data. The statistical errors are negligible, the systematic uncertainties are estimated to be 3%. The beam energy is 1.7 GeV/nucleon.

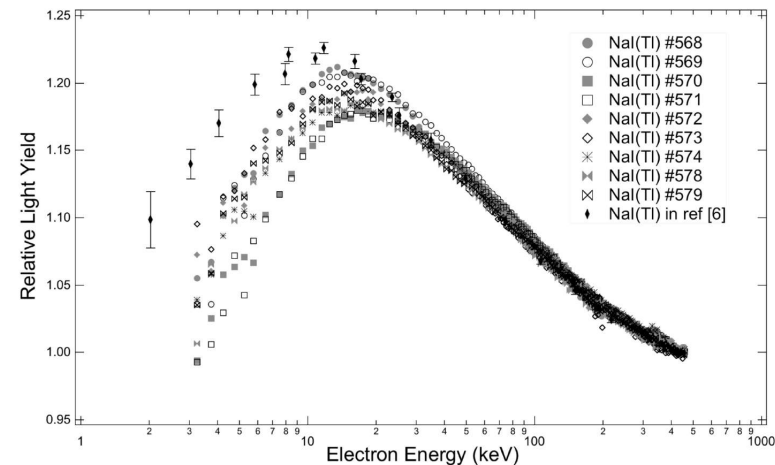
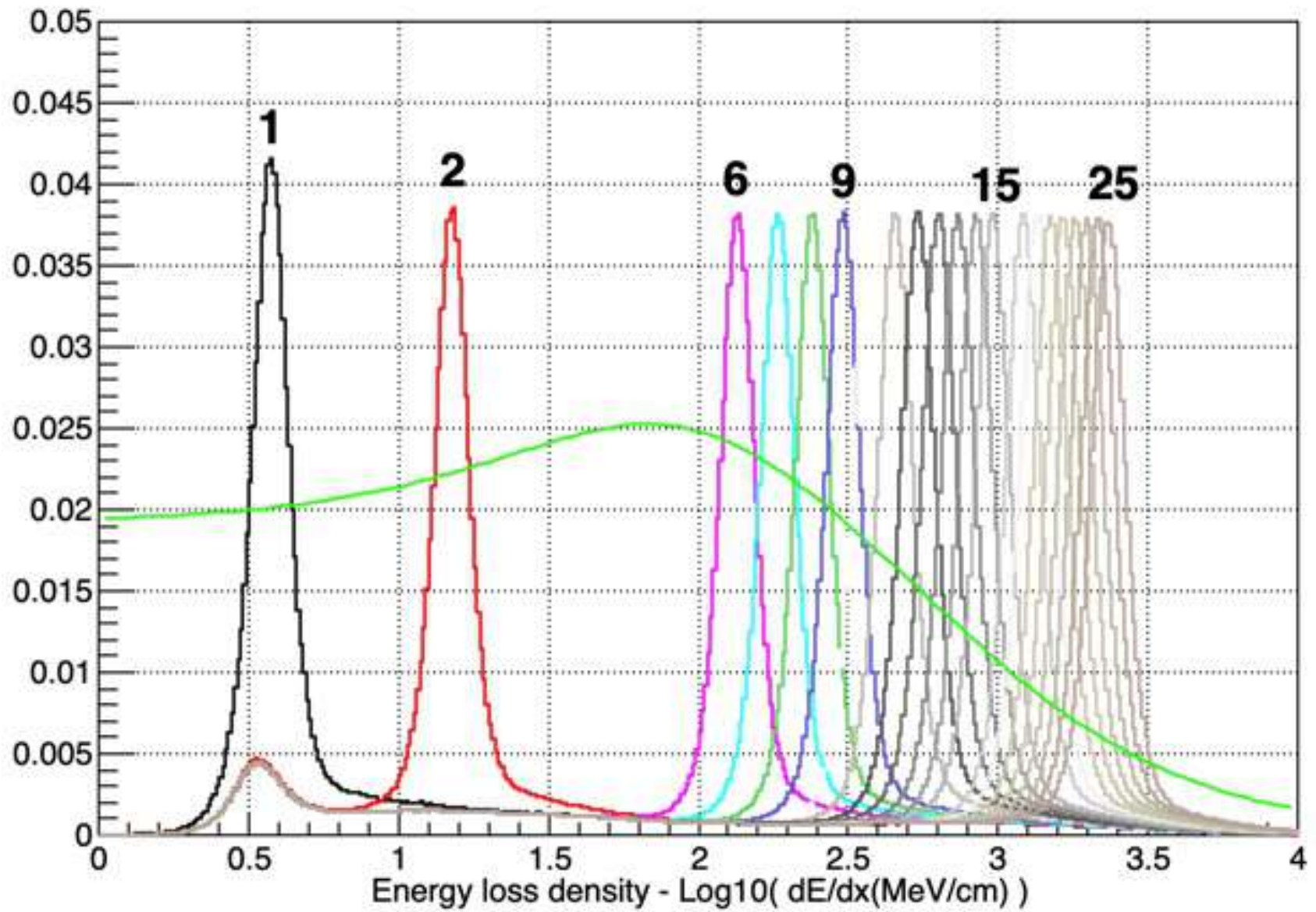


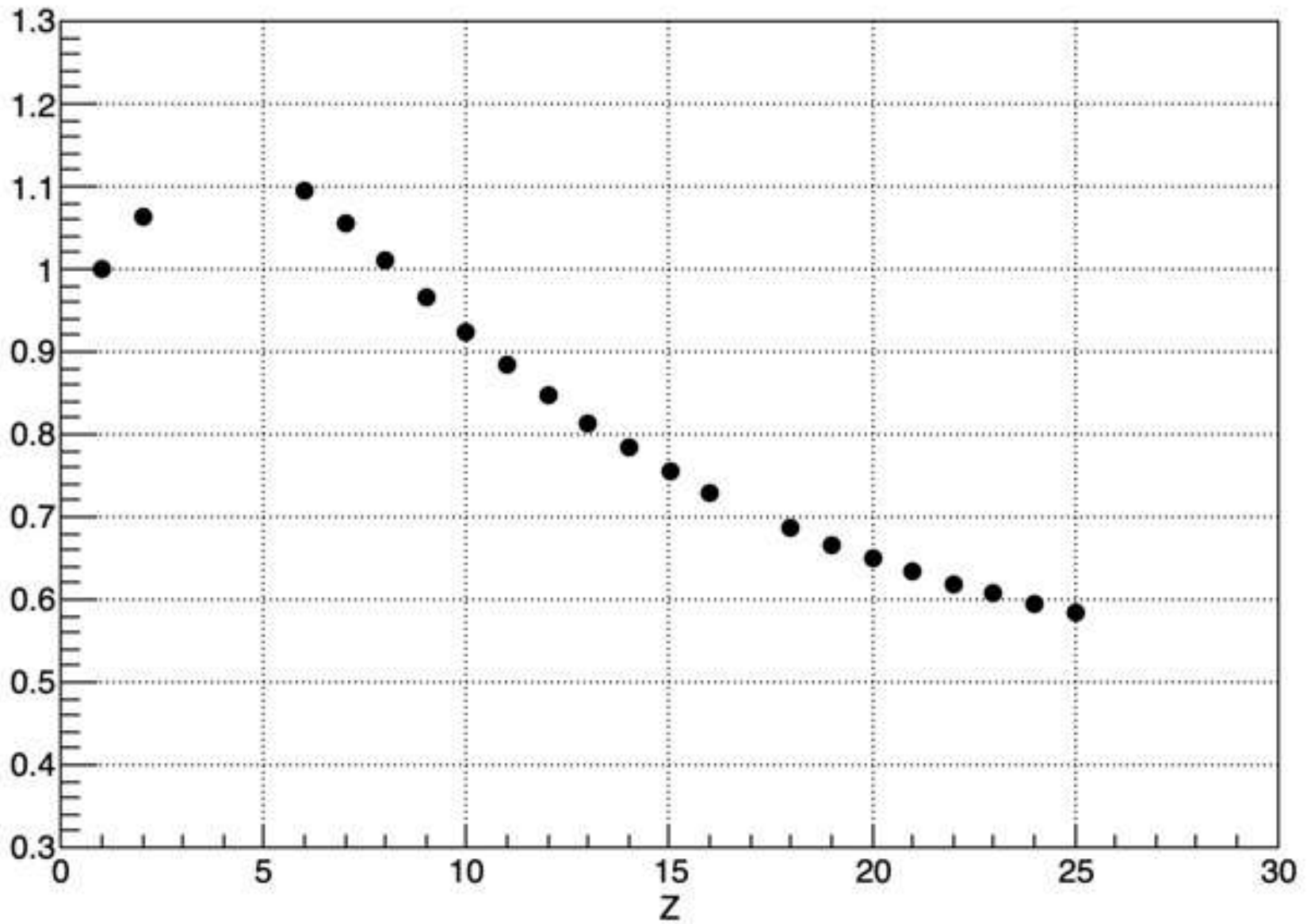
Fig. 1. Electron response, normalized at 450 keV, for the nine NaI(Tl) under study. The NaI(Tl) relative light yield measured by Rooney and Valentine [6] is reported also for comparison. For the entire energy range, the electron response is measured with accuracy better than 1%, [13].

CsI(Tl)

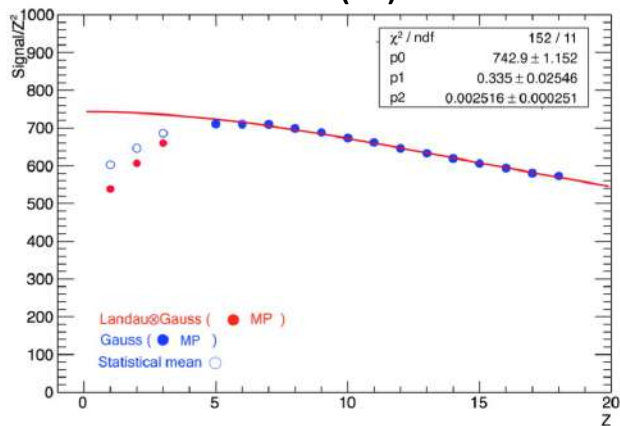


CsI(Tl)

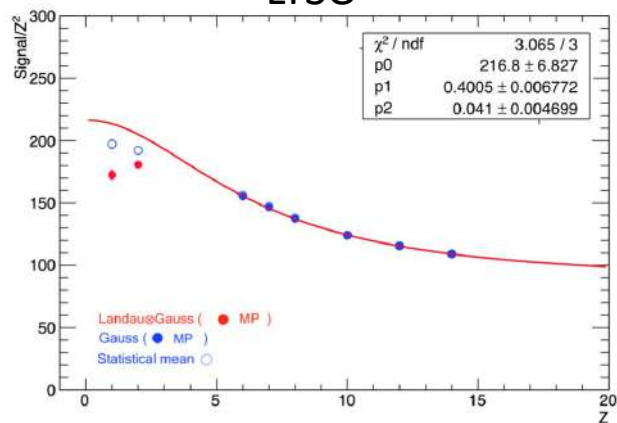
Quenching factor



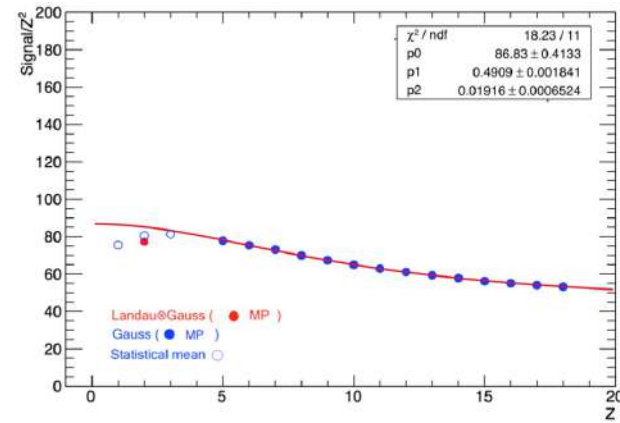
CsI(Tl)



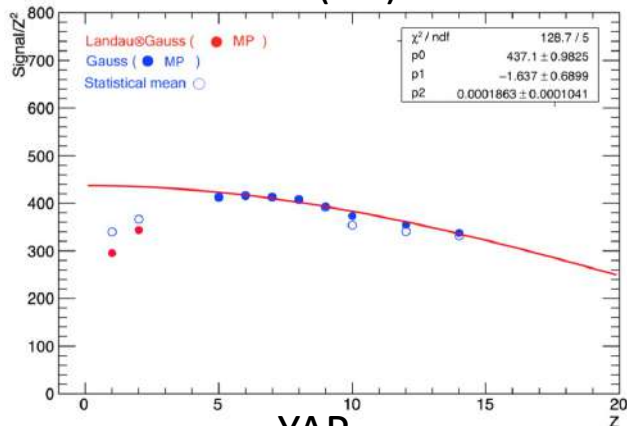
LYSO



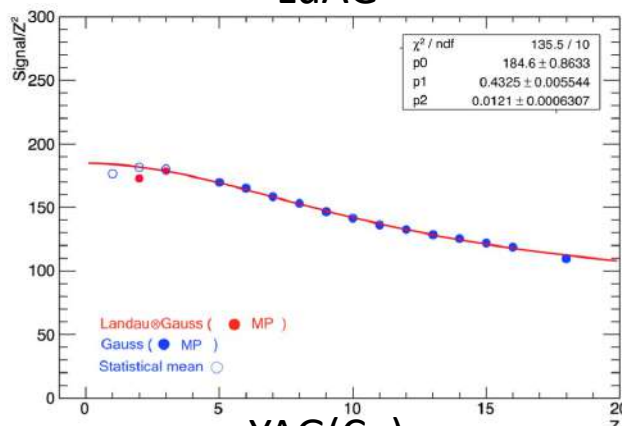
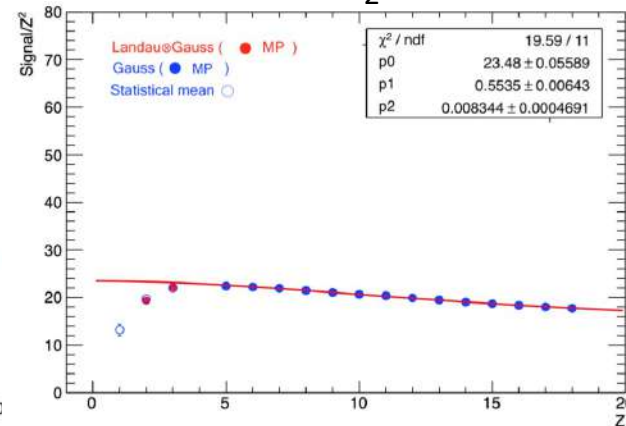
BGO



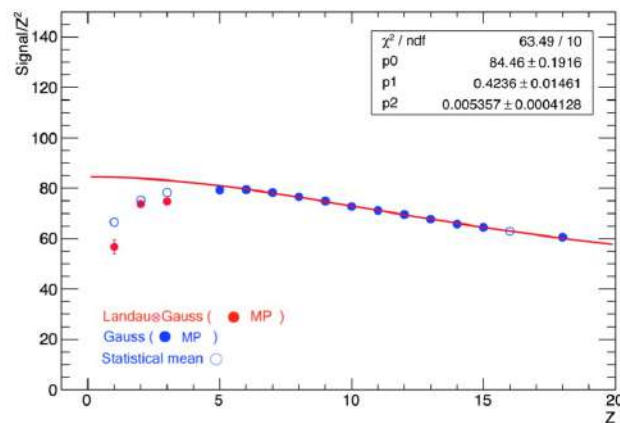
CsI(Na)



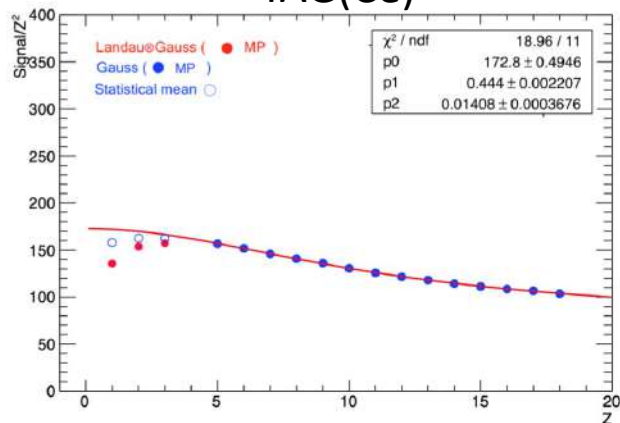
LuAG

BaF₂

YAP



YAG(Ce)

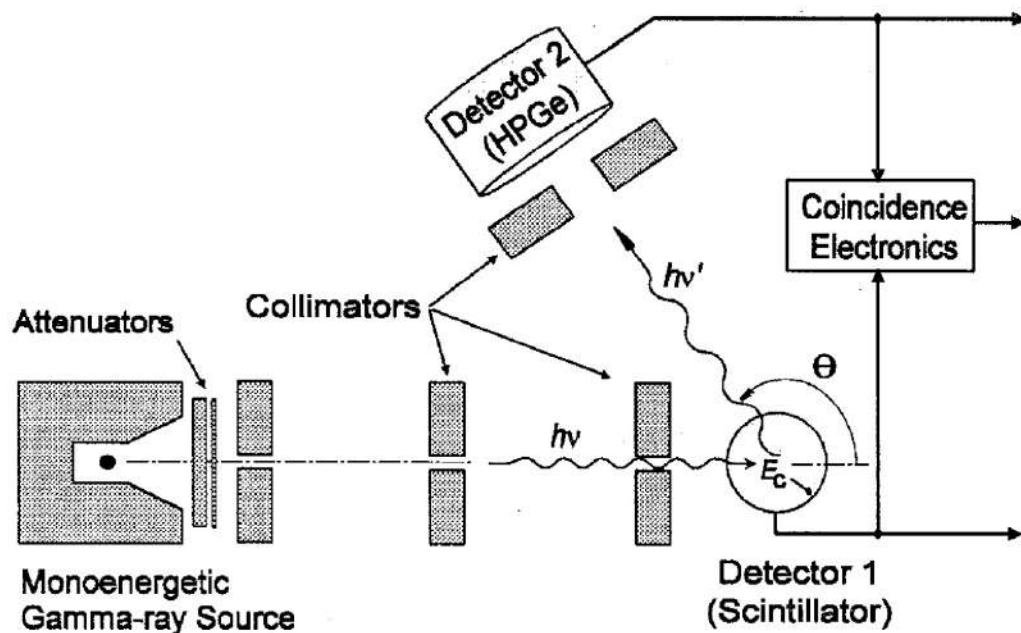


CaloCube
data

Benchmarking the Compton Coincidence Technique for Measuring Electron Response Non-Proportionality in Inorganic Scintillators

Brian D. Rooney and John D. Valentine

Department of Mechanical, Industrial, and Nuclear Engineering
University of Cincinnati, Cincinnati, Ohio 45221-0072



$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + (h\nu/m_0c^2)(1 - \cos\theta)}$$

Fig. 1. Block diagram of Compton Coincidence Technique (CCT).

Design of a Facility for Measuring Scintillator Non-Proportionality

W.-S. Choong, *Member, IEEE*, K. M. Vetter, W. W. Moses, *Fellow, IEEE*, G. Hull, S. A. Payne, N. J. Cherepy, and J. D. Valentine, *Senior Member, IEEE*

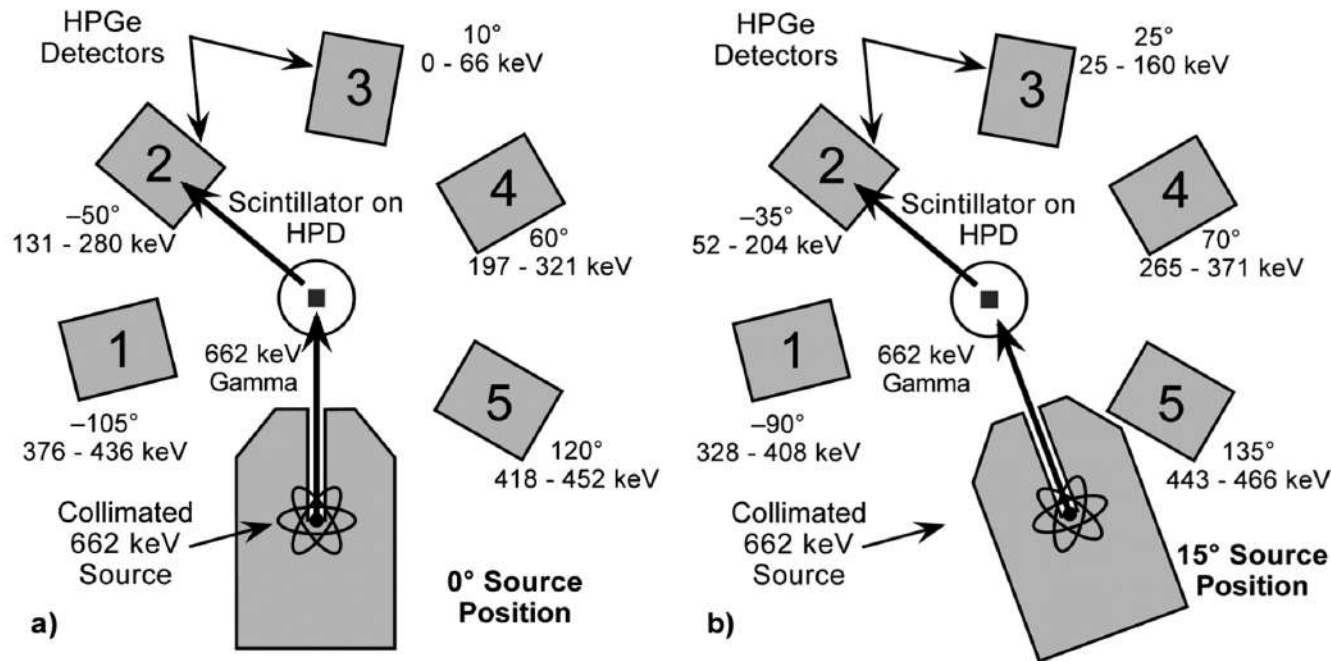


Fig. 3. (a) Diagram of SLYNCI, the proposed Compton Coincidence system, in the “0°” configuration. A collimated 1 mCi ^{137}Cs source shines on a scintillator sample that is coupled to a HPD, and the Compton scattered gamma rays are detected by five HPGe detectors placed 10 cm from the scintillator. No mechanical collimation is used for the scattered gamma ray. The numbers on each HPGe detector indicate their “detector number” as listed in Table I, and the number next to each HPGe detector indicate their central scattering angle (with respect to the collimated beam) and the range of electron energies that they detect. (b) Diagram in the “15°” configuration. The source and collimator are rotated about the scintillator and HPD by 15° and the rest of the apparatus remains fixed. This alters the scattering angles that the HPGe detectors cover, and hence electron energies measured.

The facility will be located at Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) and is intended to be made available to the community at large.



SCIENCE & TECHNOLOGY ON A MISSION

Lawrence Livermore National Laboratory
7000 East Avenue • Livermore, CA 94550
Operated by the Lawrence Livermore National Security, LLC for the Department of Energy's National Nuclear Security Administration

<https://www.llnl.gov>



Biosecurity

Detection, characterization and mitigation



Defense

Precision effects, situational awareness



Intelligence

Analysis, policy and operational support



Science

Science, Technology, and Engineering



Counterterrorism

Preventing and mitigating catastrophe



Energy

Energy and environmental security



Nonproliferation

Technical solutions to evolving challenges



Weapons

Stewards of the nuclear deterrent