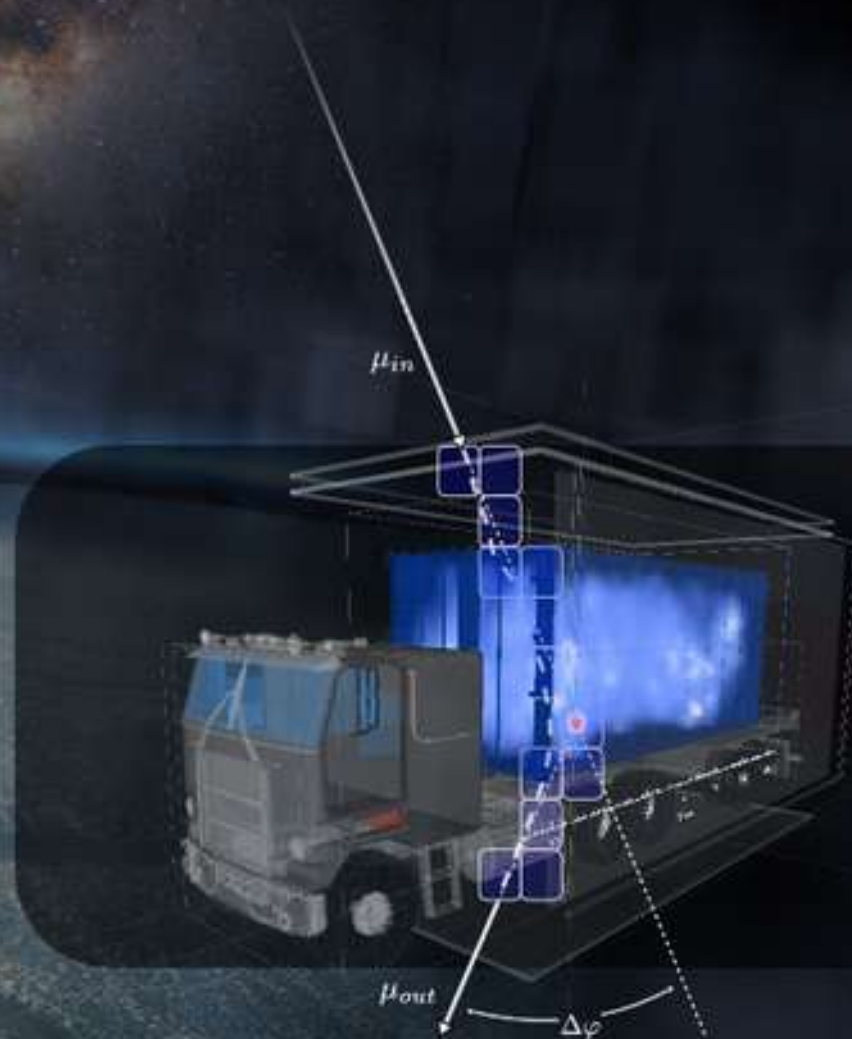




Tomografia muonica per l'individuazione di sorgenti radioattive in containers e rottami  
e per l'ispezione di silos di combustibile esaurito

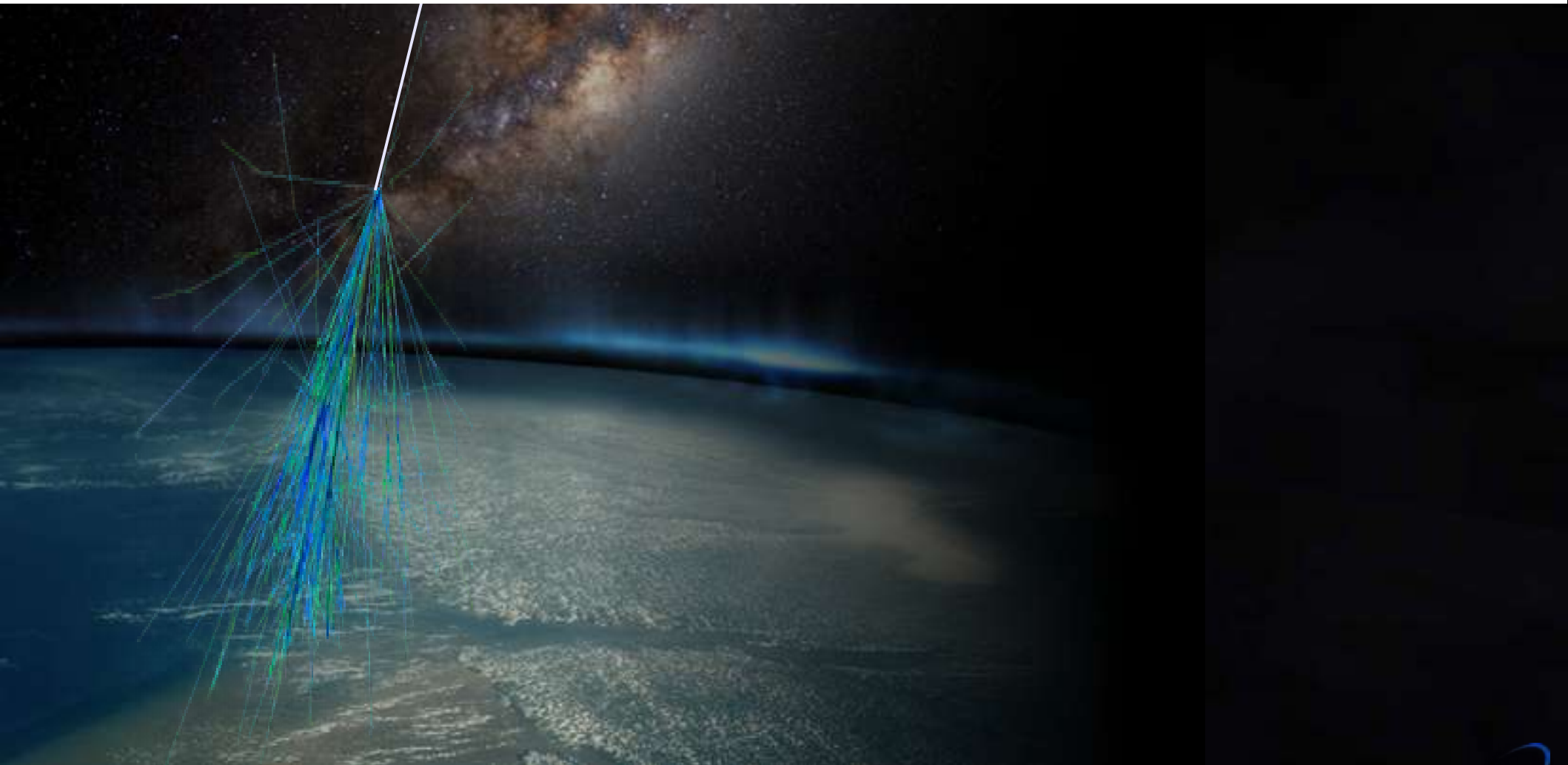


# OUTLINE



- **Principi della tomografia muonica**
- **MuSteel: un portale per la rilevazione di sorgenti orfane sigillate**
- **Altre applicazioni proposte:**
  - **Sorveglianza portuale per SNM**
  - **Controllo silos per SNF**
  - **Caratterizzazione di un altoforno**

# LA TOMOGRAFIA MUONICA



Tomografia muonica per l'individuazione di sorgenti radioattive in containers e rottami e per l'ispezione di silos di combustibile esaurito.

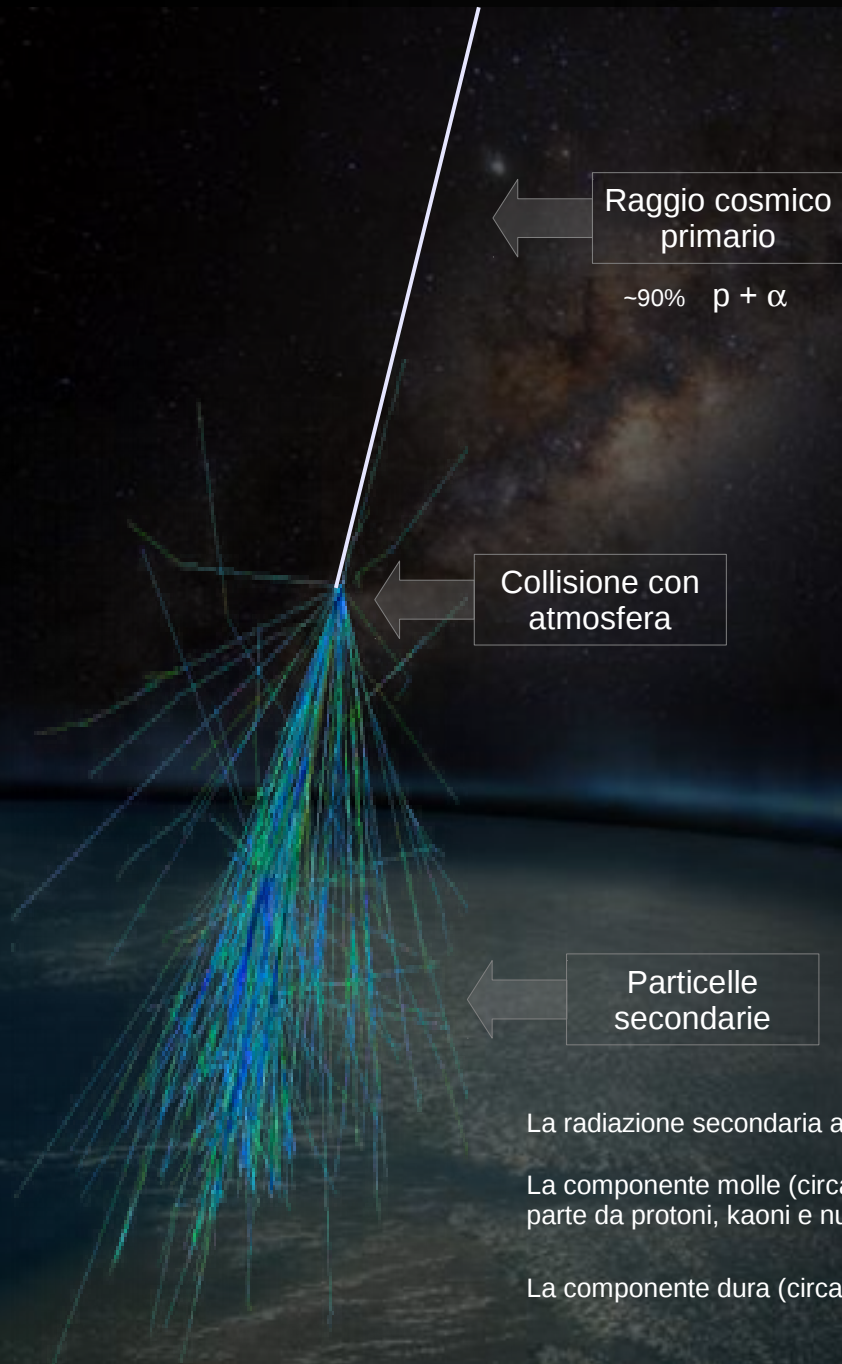
Genova 15-01-2014

Andrea Rigoni Garola  
[andrea.rigoni@pd.infn.it](mailto:andrea.rigoni@pd.infn.it)

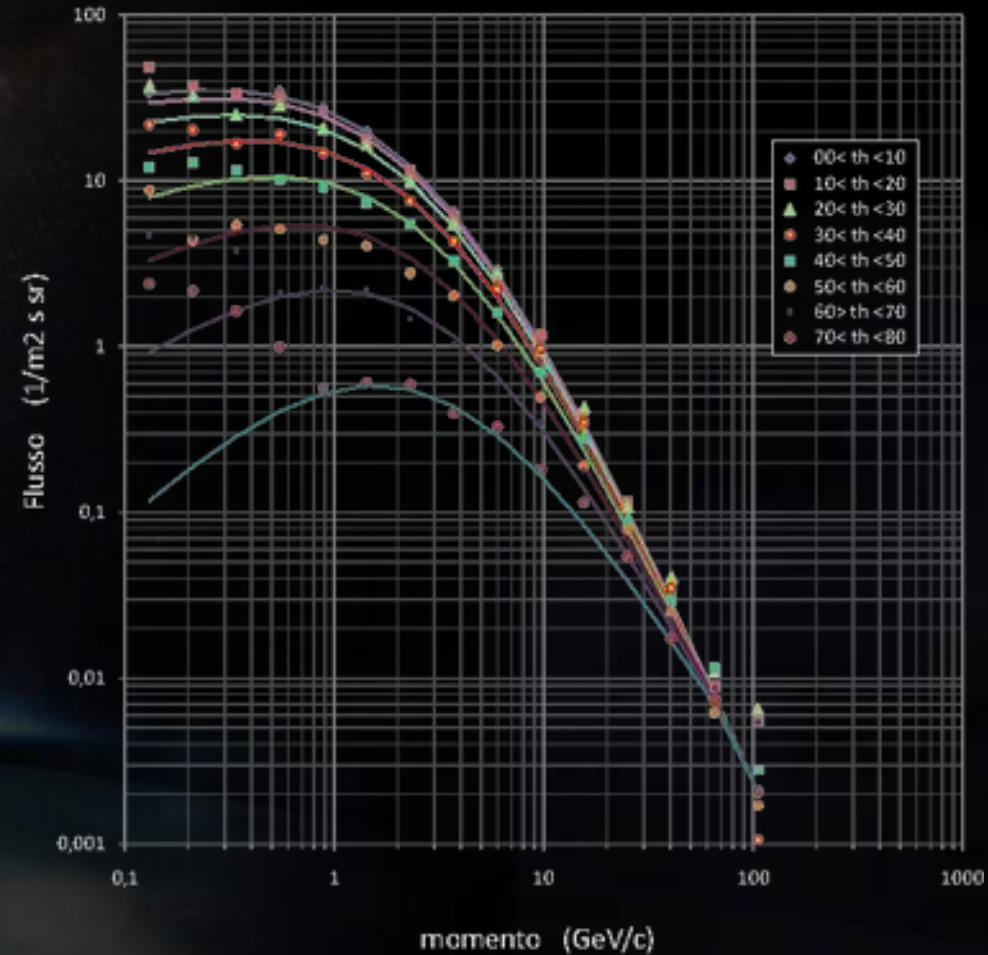




# Principi della tomografia muonica



Flusso vs p a vari angoli



La radiazione secondaria al livello del mare è costituita da due componenti: molle e **dura**

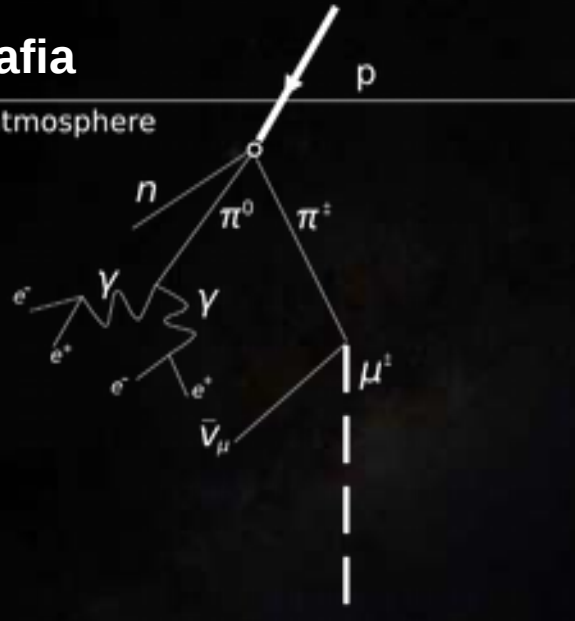
La componente molle (circa il 30% della radiazione secondaria), composta da elettroni e fotoni ed in minima parte da protoni, kaoni e nuclei, e' poco penetrante.

La componente dura (circa il 70%), composta da **muoni**, e' molto penetrante.

# Principi della tomografia muonica

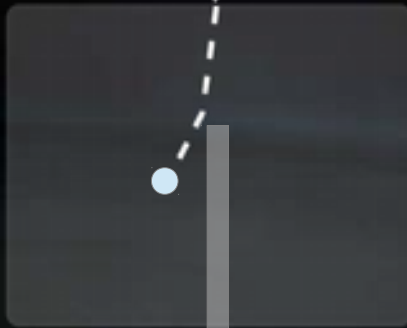
## Radiografia

Top of the atmosphere



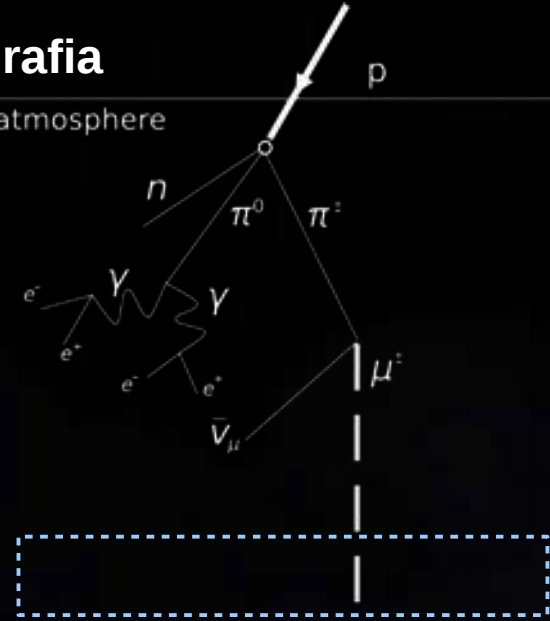
Multiple Coulomb scattering

$\mu_{in}$



## Tomografia

Top of the atmosphere

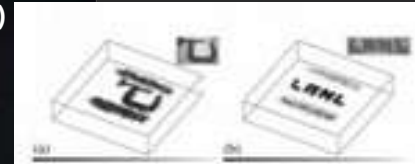
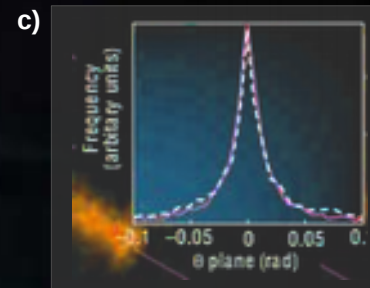
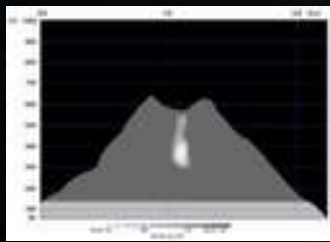
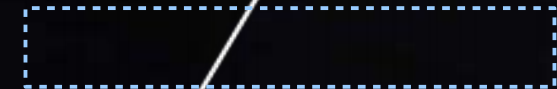


Multiple Coulomb scattering

$\mu_{in}$



$\mu_{out}$



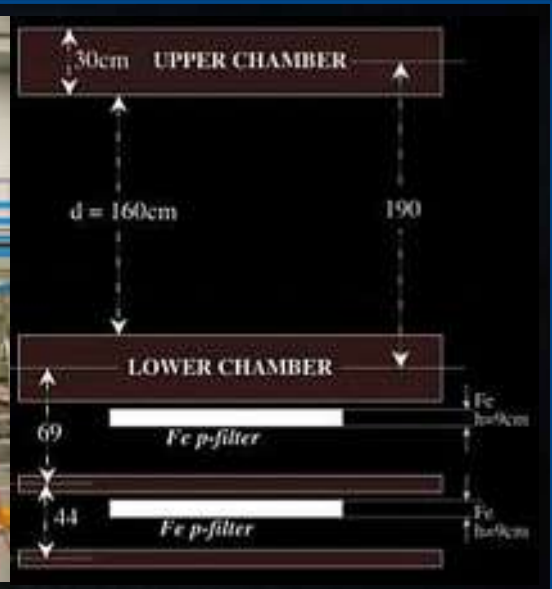
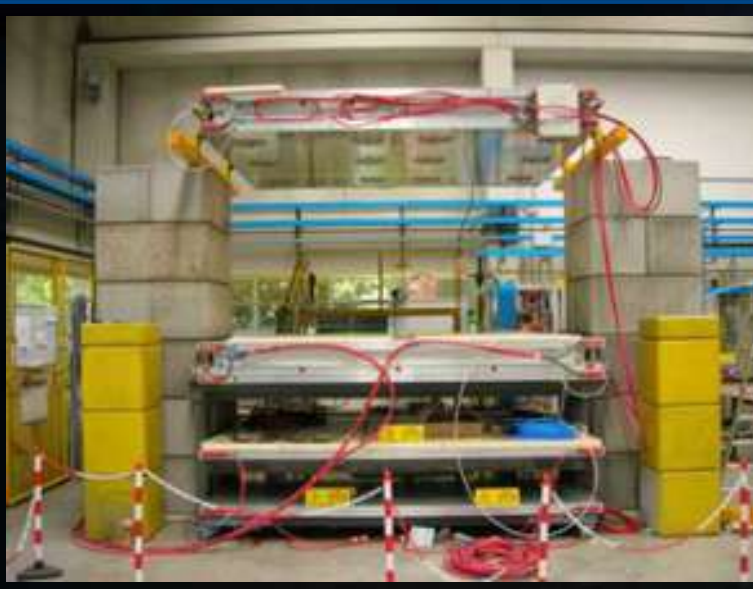
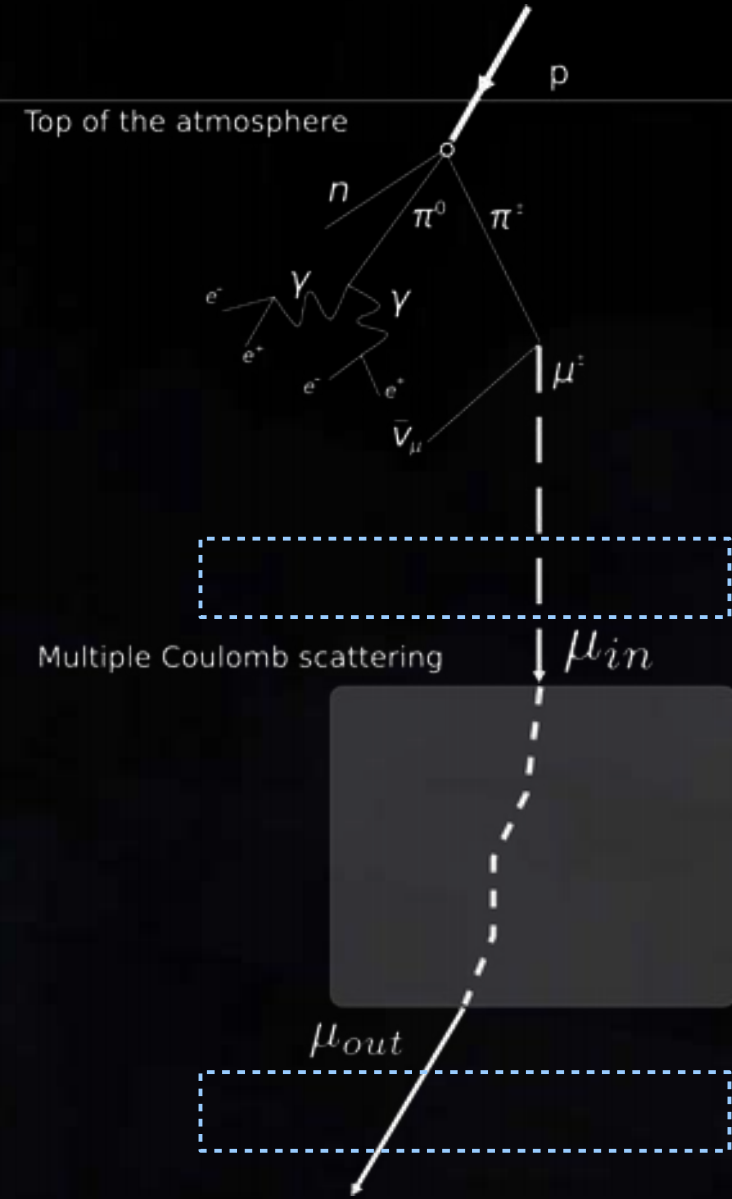
- a) L.W. Alvarez et al., "Search for hidden chambers in the pyramids using cosmic rays", Science 167 (1970) 832.
- b) K. Nagamine et al., "Method of probing inner-structure of geophysical substance with the horizontal cosmic ray muons and possible application to volcanic eruption prediction", Nucl. Inst. Meth. A 356 (1995), 585.
- c) K.R. Borozdin et al., "Radiographic imaging with cosmic ray muons", Nature 422 (2003) 277.
- d) L. J. Schultz, "Image reconstruction and material Z discrimination via cosmic ray muon radiography", NIM A 519 (2004) 687.

# Principi della tomografia muonica

## La Tomografia muonica

A Padova presso I Laboratori nazionali dell'INFN a Legnaro e' stato realizzato un apparato per la tomografia che utilizza le stesse camere a deriva costruite per l'esperimento CMS.

Un sistema di componenti hardware e software sono stati sviluppati dal team dell'universita' e dell'INFN per testare e perfezionare la tecnica.



Tomografia muonica per l'individuazione di sorgenti radioattive in containers e rottami e per l'ispezione di silos di combustibile esaurito.

Genova 15-01-2014

Andrea Rigoni Garola  
andrea.rigoni@pd.infn.it





# Principi della tomografia muonica

L'angolo proiettato su di un piano e' ben approssimato per **piccoli angoli** da una gaussiana:

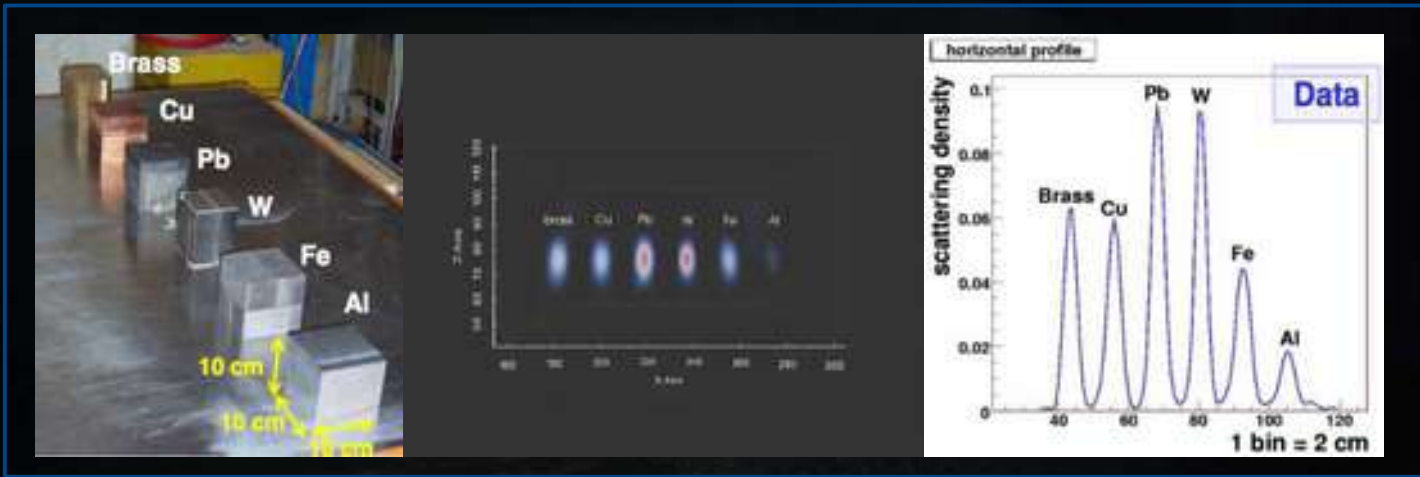
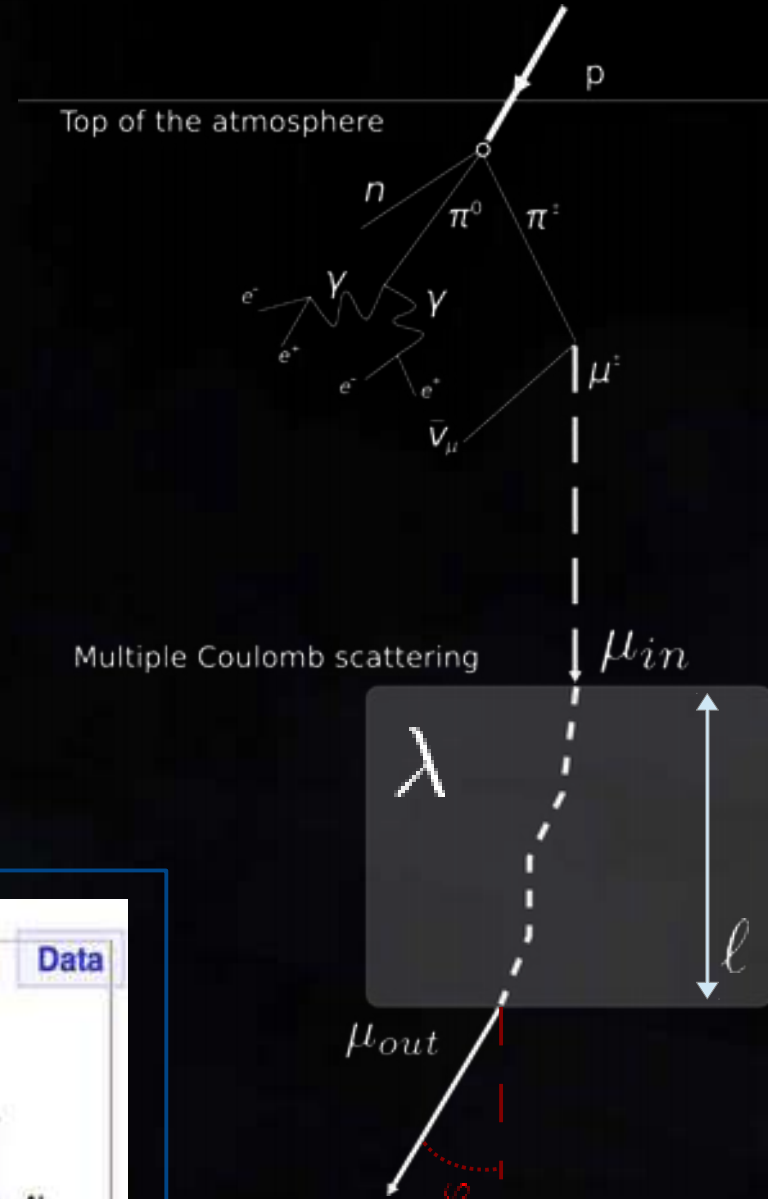
$$\Delta\varphi \simeq \mathcal{N}(0, \sigma_\varphi)$$

$$\sigma_\varphi = \frac{13.6 [MeV]}{\beta c p} \sqrt{\frac{\ell}{X_0}} \left[ 1 + 0.038 \ln \left( \frac{\ell}{X_0} \right) \right] \quad [rad] \quad (1)$$

La varianza della distribuzione e' quindi legata alla lunghezza di materiale attraversato e puo' ulteriormente essere approssimata come

$$\sigma_\varphi^2 \simeq \ell \cdot \frac{b^2}{p^2} \lambda \quad b \simeq 15 [MeV/c] \quad (2)$$

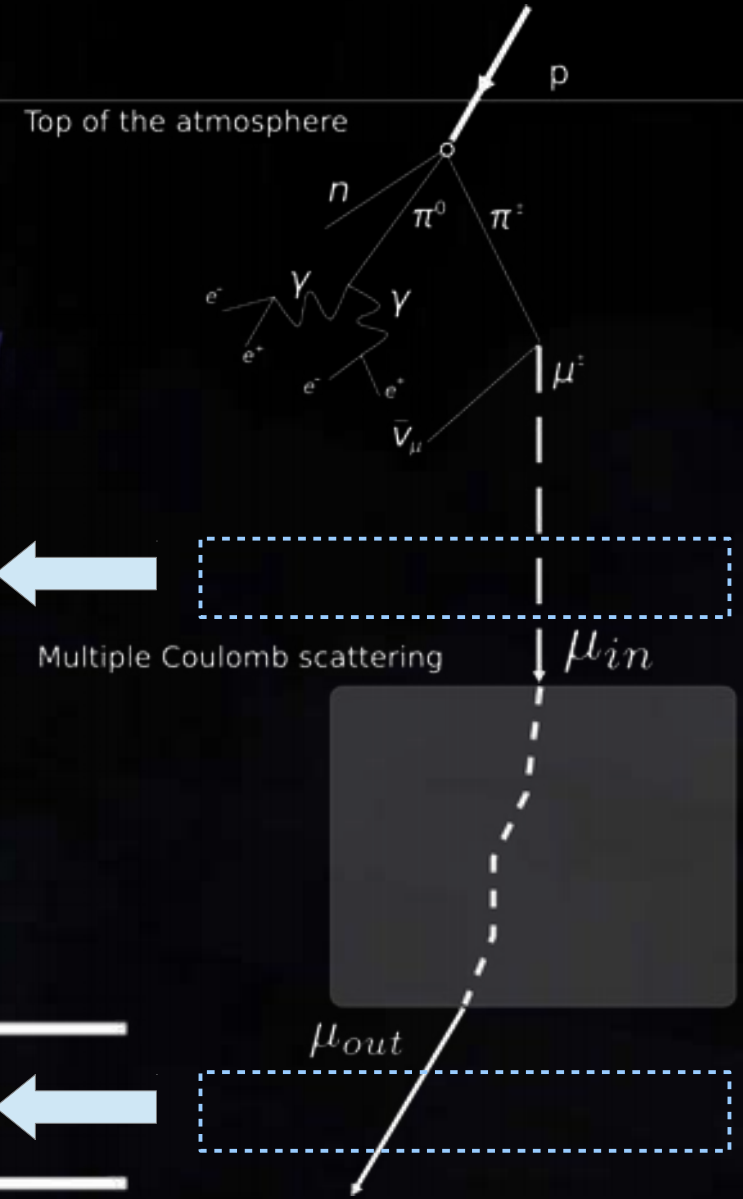
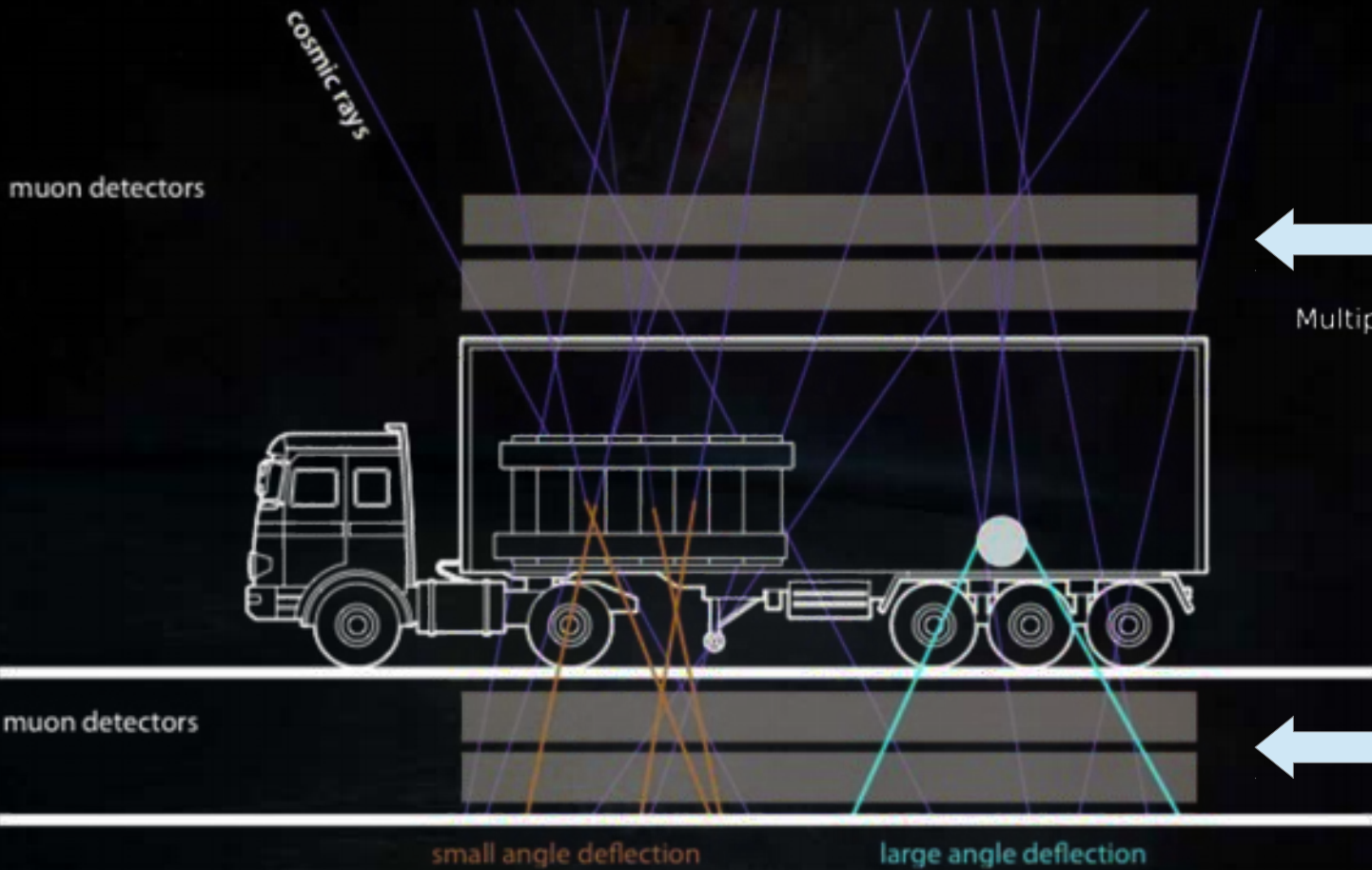
Definita  $\lambda = \frac{1}{X_0}$  [rad<sup>2</sup>/lunghezza] come **"Densita' lineare di scattering"**



# Principi della tomografia muonica

## L'idea della scansione di veicoli

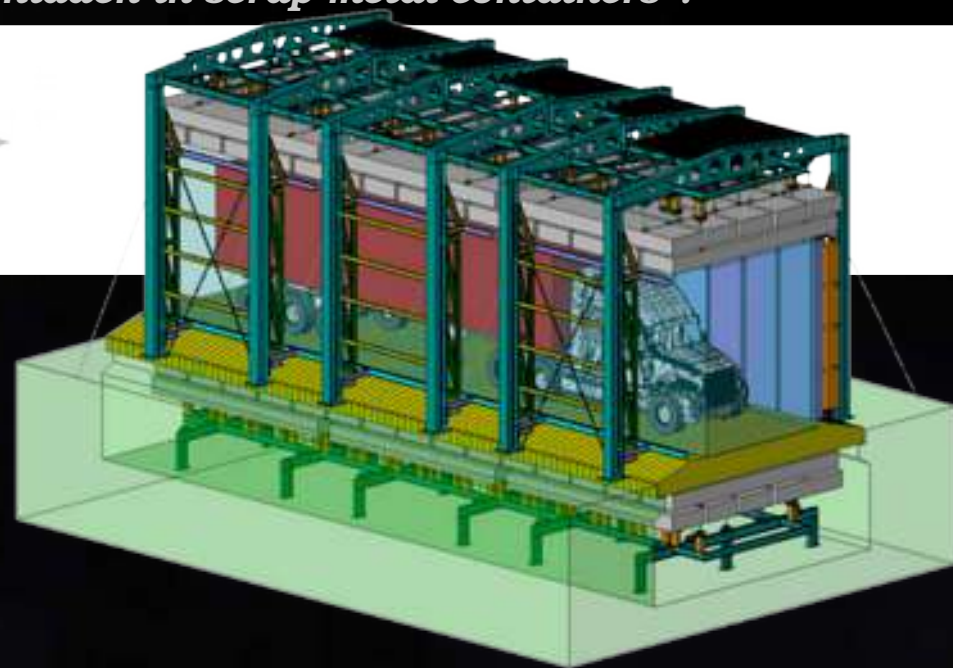
- L'energia media dei  $\mu$  al suolo e' tale da permettere l'attraversamento del mezzo carico.
- L'angolo di *scattering* di un  $\mu$  e' statisticamente piu' elevato per materiali ad alto Z usati come schermi di sorgenti radioattive.





*“Muon scanner to detect radioactive sources hidden in scrap metal containers”.*

MU-STEEL →



*Research Fund for Coal and Steel - GRANT AGREEMENT No RFSR-CT-2010-00033*

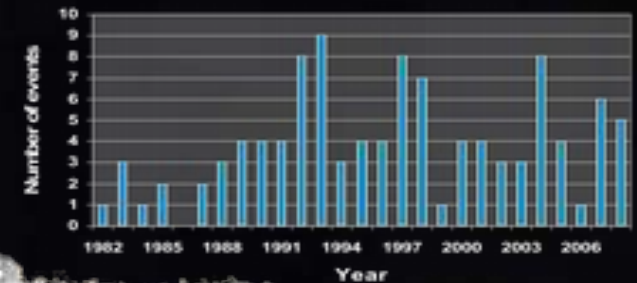
Studio di fattibilità per un portale di scansione dei veicoli per il trasporto di rottami ferrosi destinati alle fonderie.

# MuSteel – Le sorgenti orfane



Radionuclide	Attivita' (GBq)	Localizzazione
Americio 241	1.7	Scorie di fusione
Cesio 137	1000	Polveri volatili
Cobalto 60	15000	Metallo

Incidenti registrati nell'area Europea dal 1982 al 2008



Tomografia muonica per l'individuazione di sorgenti radioattive in containers e rottami e per l'ispezione di silos di combustibile esaurito.

Genova 15-01-2014

Andrea Rigoni Garola  
andrea.rigoni@pd.infn.it





# MuSteel – Le sorgenti orfane

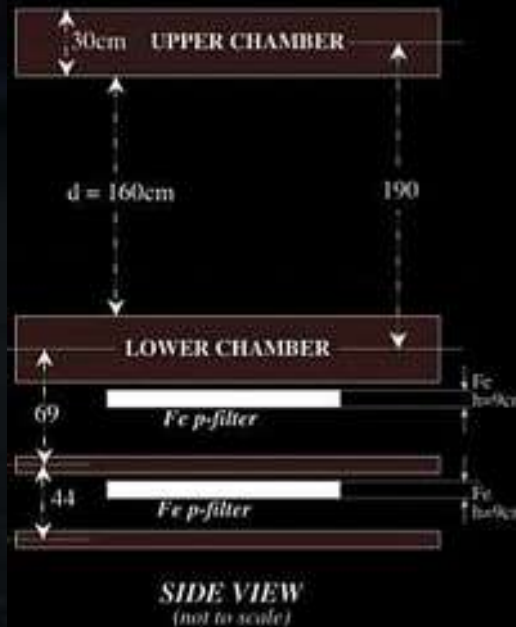
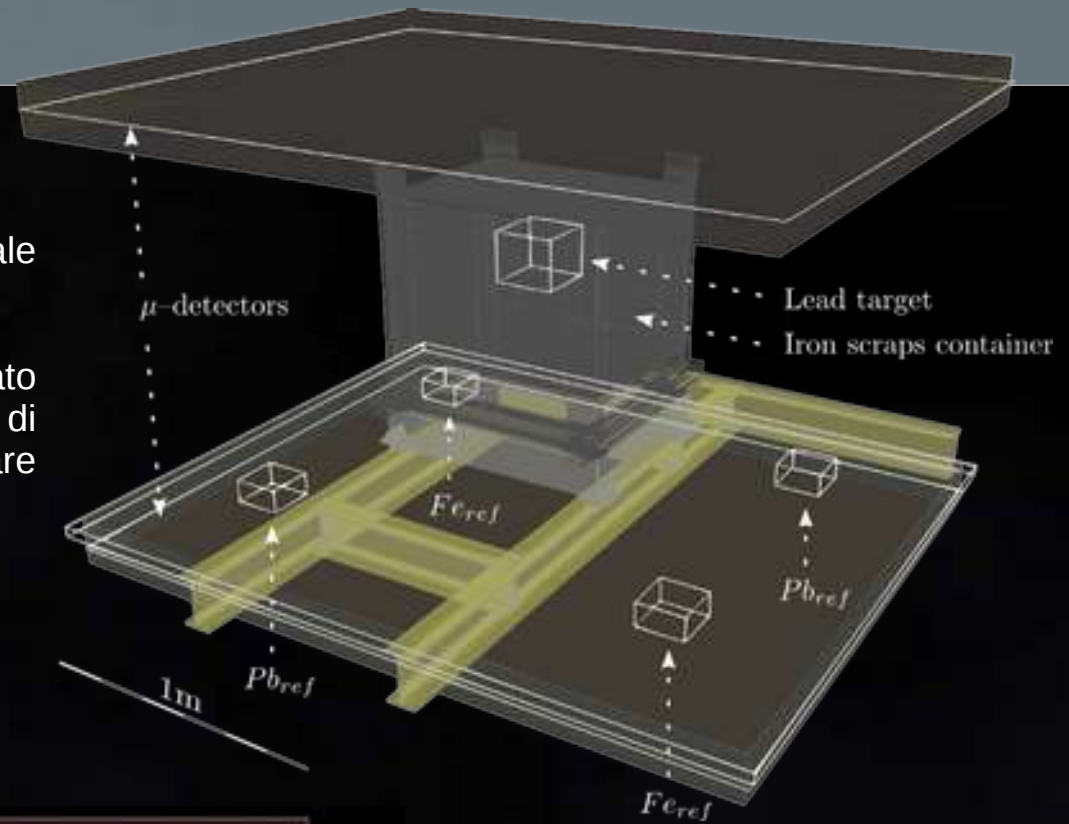
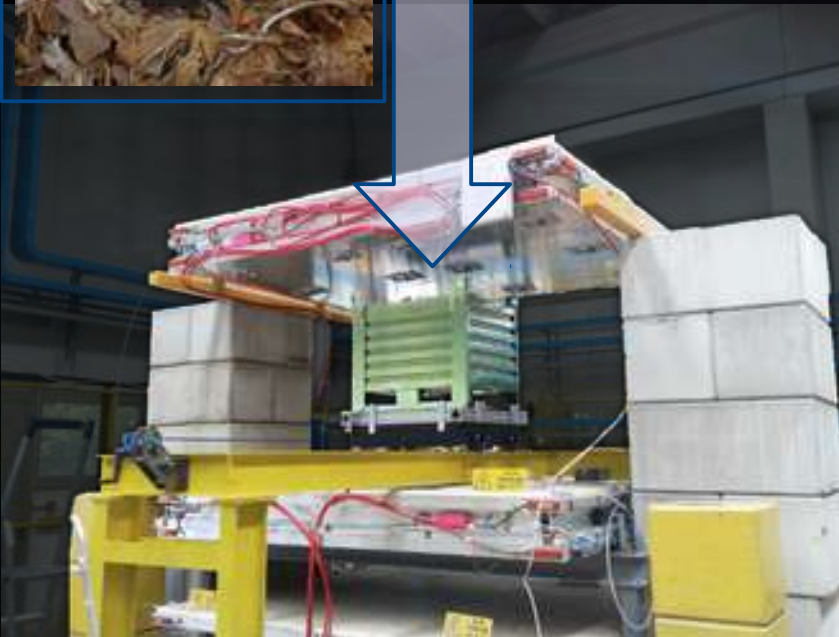
## Dimostratore LNL

Il progetto prevede lo studio di simulazione di un portale completo per la rilevazione di sorgenti orfane schermate.

Per la validazione del modello simulato e' stato utilizzato l'esperimento di Legnaro. Blocchi di varie dimensioni di Piombo sono stati nascosti in cesti di rottami per realizzare un modello della situazione di analisi.



12 liters lead test  
100x100x65 cm  
fine scraps metal container



## Specifiche progettuali

Detectors area: 2.5 x 3.0 m<sup>2</sup>  
Layers: 8 phi – 4 theta

Rec. volume: ~10 m<sup>3</sup>  
acquisition rate: ~350 Hz

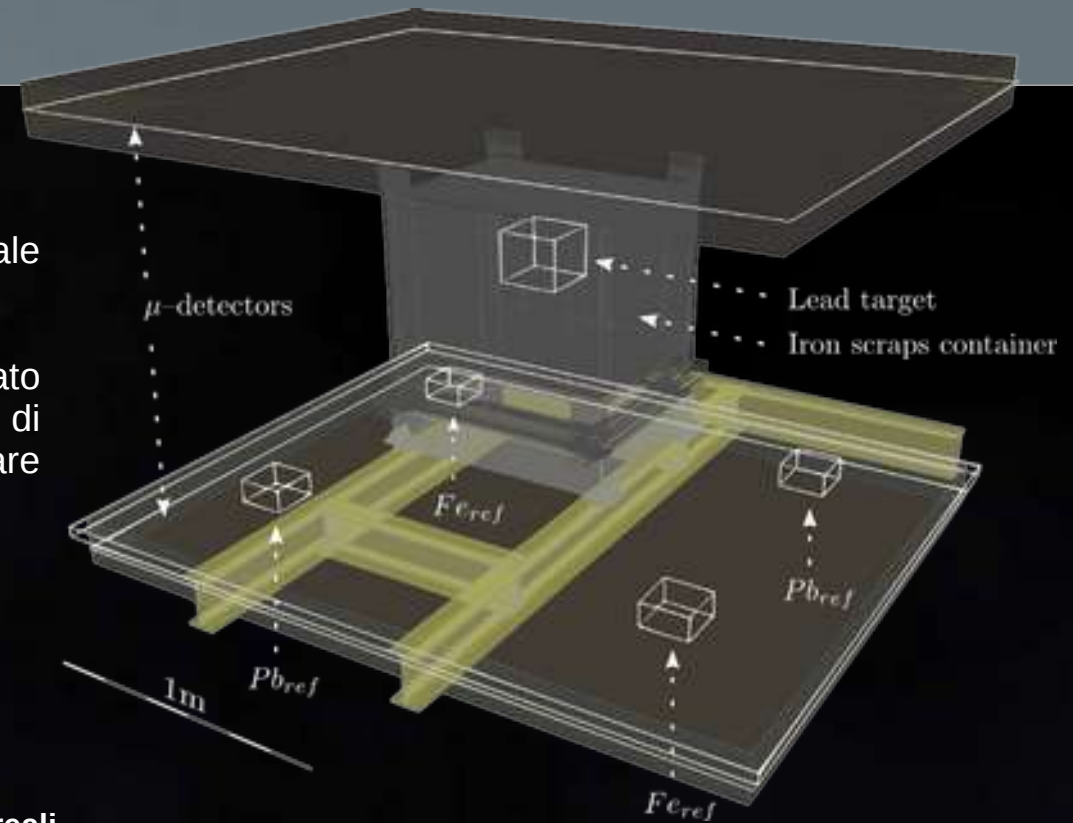


# MuSteel – Le sorgenti orfane

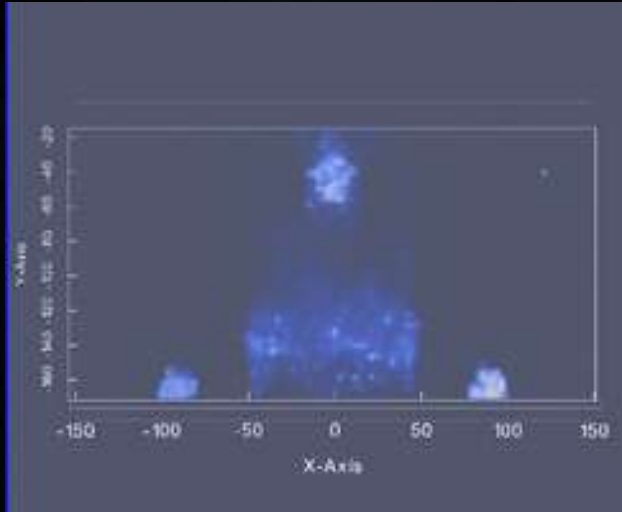
## Dimostratore LNL

Il progetto prevede lo studio di simulazione di un portale completo per la rilevazione di sorgenti orfane schermate.

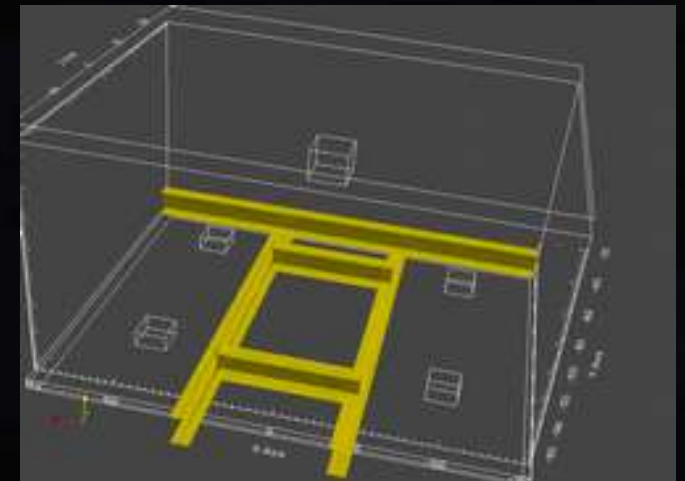
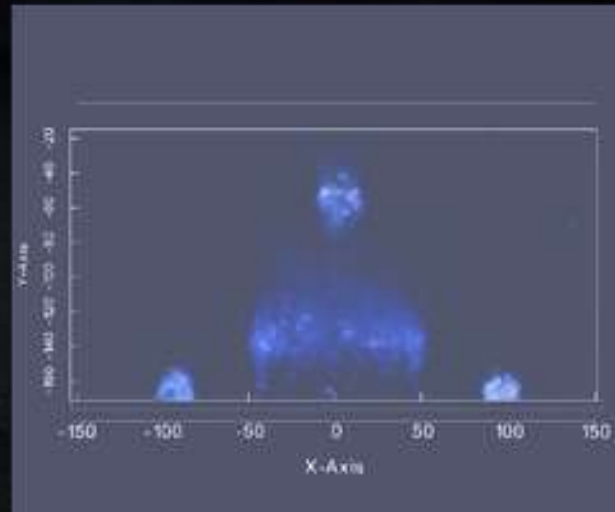
Per la validazione del modello simulato e' stato utilizzato l'esperimento di Legnaro. Blocchi di varie dimensioni di Piombo sono stati nascosti in cesti di rottami per realizzare un modello della situazione di analisi.



Simulazione Montecarlo



Dati reali



## Algoritmo di ricostruzione

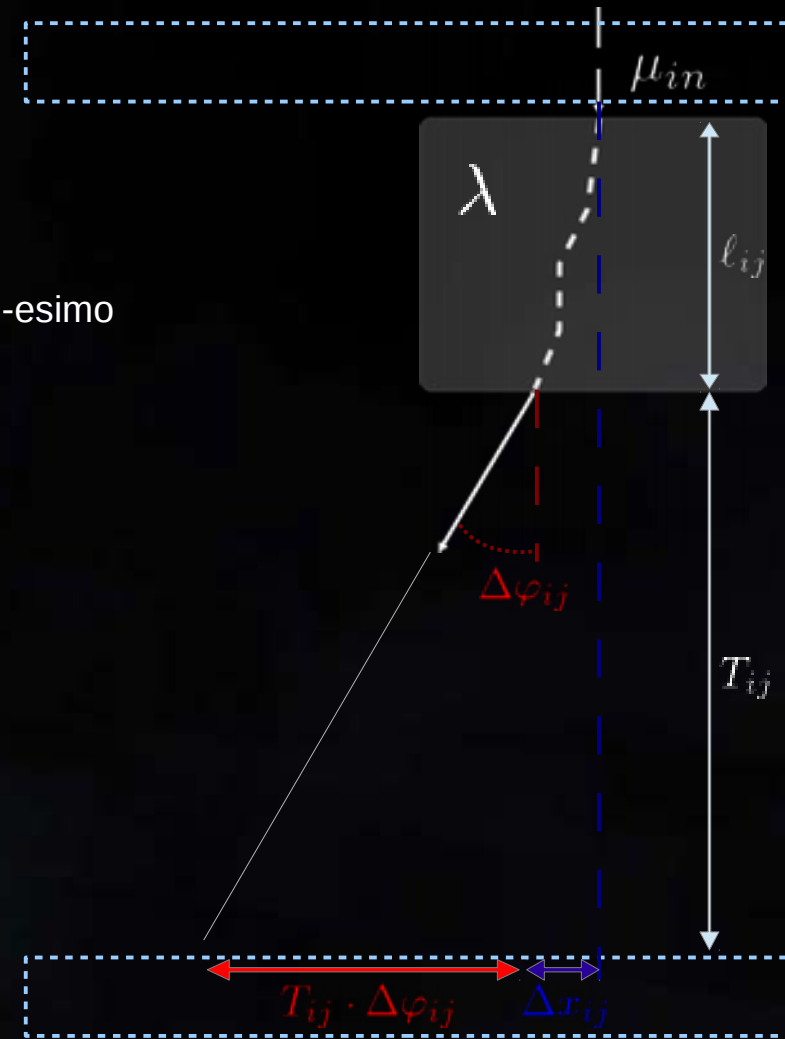
### OBIETTIVO:

Ricostruire una mappa 3D della "densità di scattering"  $\lambda = \frac{1}{X_0}$

### MODELLO:

Per ogni j-esimo voxel si considera il valore delle variabili di scattering del i-esimo  $\mu$  che lo attraversa:

$$H_{ij} = (\varphi_{ij}, x_{ij})^T$$



## Algoritmo di ricostruzione

### OBIETTIVO:

Ricostruire una mappa 3D della "densità di scattering"  $\lambda = \frac{1}{X_0}$

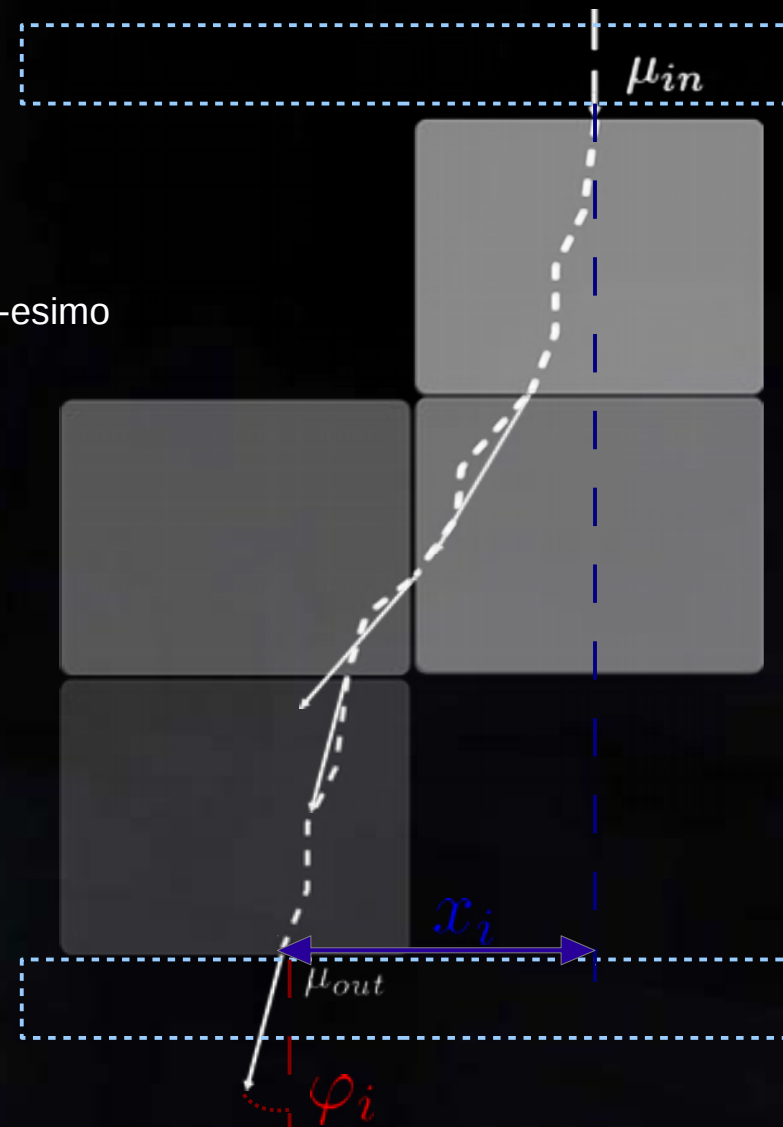
### MODELLO:

Per ogni j-esimo voxel si considera il valore delle variabili di scattering del i-esimo  $\mu$  che lo attraversa:

$$H_{ij} = (\varphi_{ij}, x_{ij})^T$$

### PROBLEMA:

Per ogni  $\mu$  una sola misura accessibile:  $D_i = (\varphi_i, x_i)^T$





## Algoritmo di ricostruzione

**E Step:**

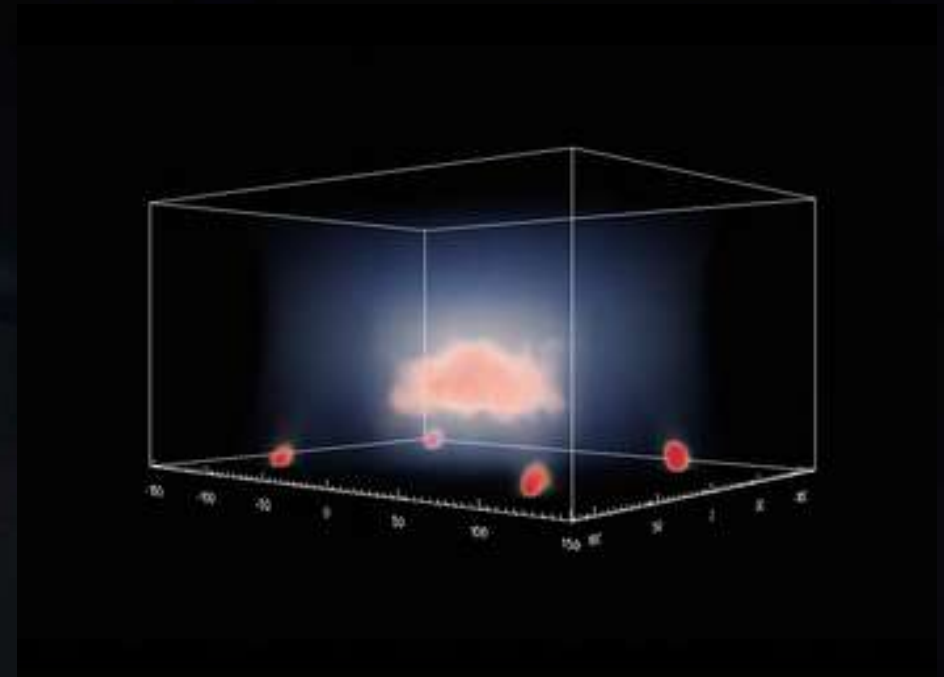
$$Q(\lambda; \lambda^{(n)}) = \mathbb{E}_{H|D, \lambda^{(n)}} [\log(P(D, H|\lambda^{(n)}))]$$

**M Step:**

$$\lambda^{(n+1)} = \arg \max_{\lambda} Q(\lambda; \lambda^{(n)})$$

**Processo iterativo:**

$$\lambda_j^{(n+1)} = \lambda_j^{(n)} + \Delta \lambda_j^{(n)}$$



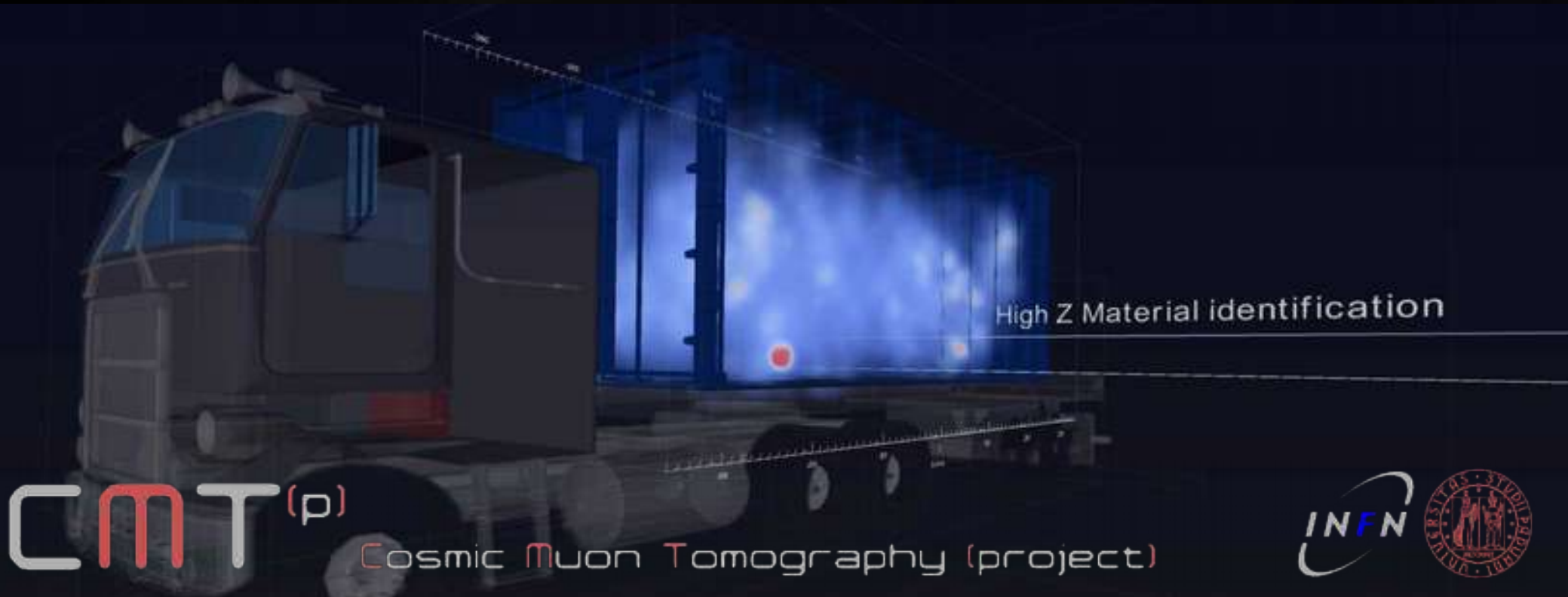
## OpenCMT: Un nuovo framework per l'indagine delle sorgenti

- Libreria completa per l'*imaging* ( **EIGEN**, **boost**, **openMP**, **vtk** ).
- Algoritmi ottimizzati di ricostruzione per CMT
- Analisi *batch* (ROC, TPN *sampling*)

Img: **1** min, 5 cm, 100 it

LNL **1.72s**

MSP **18s** ( Intel i7-3930K 3.2GHz )



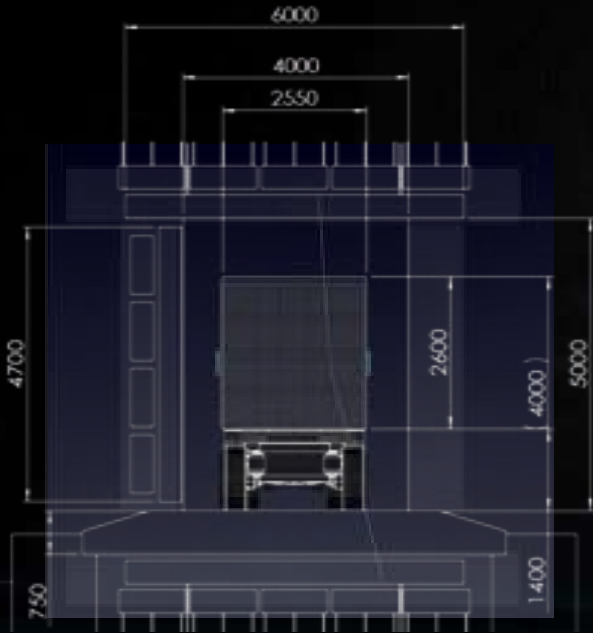
High Z Material identification

**CMT**<sup>(p)</sup>

Cosmic Muon Tomography (project)



## Funzionamento:

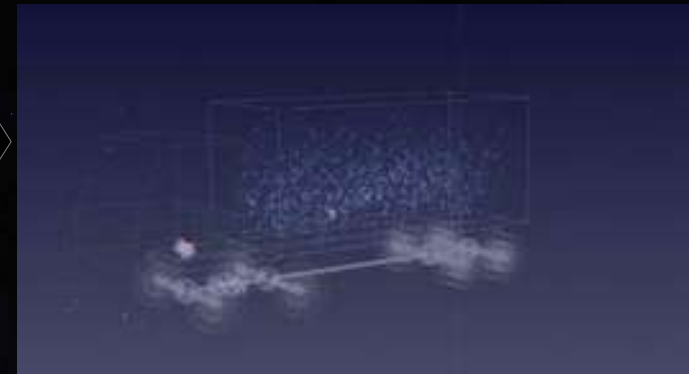


### 1) Inizializzazione



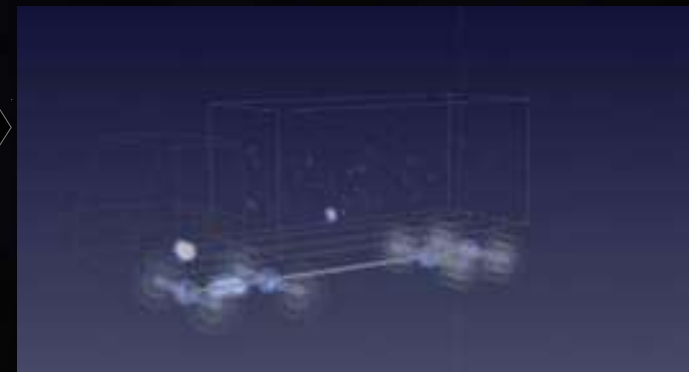
### 2) Elaborazione statistica

Maximum Likelihood Expectation Maximization



### 3) Riduzione rumore statistico

Alpha-trimmed mean filter





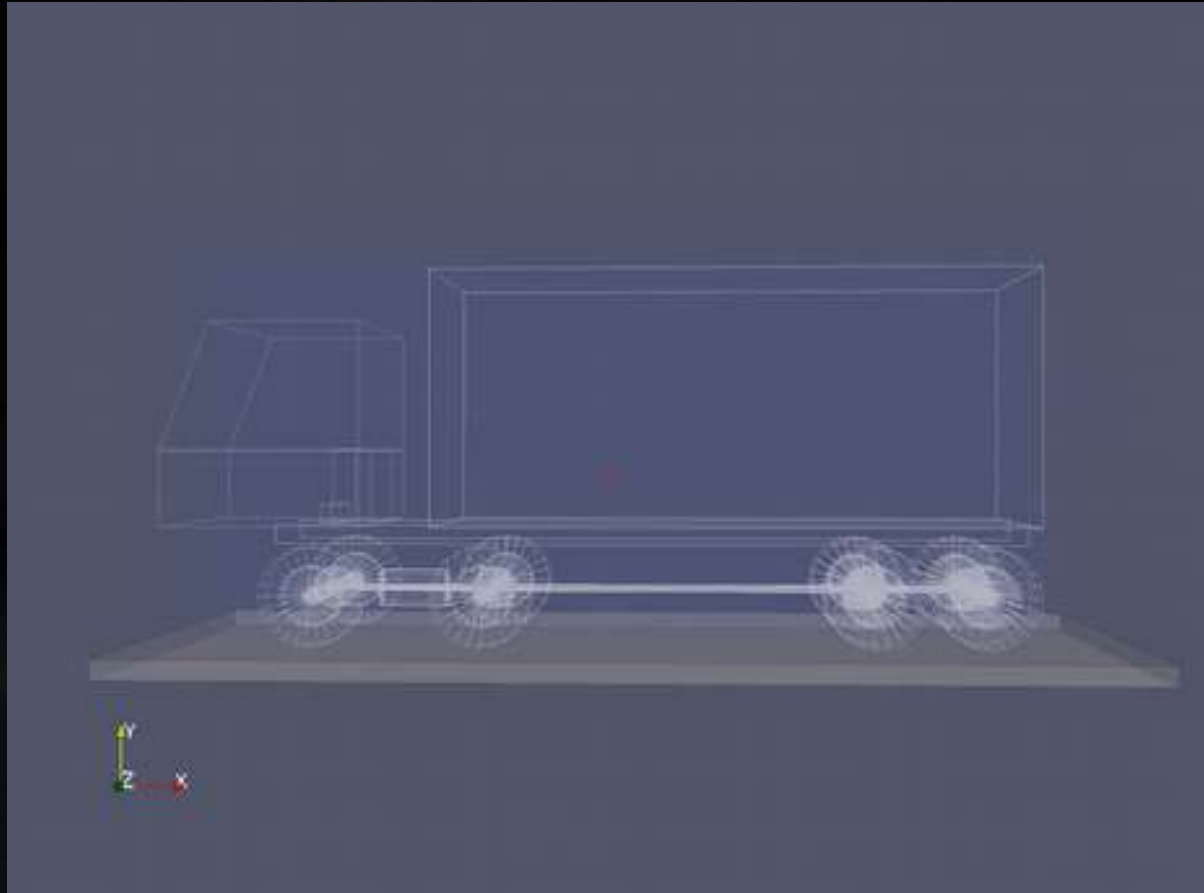
## Obiettivo finale:

Trovare schermi di sorgenti **piccole**  
in **75m<sup>3</sup>** di materiale ferroso  
Entro **5 minuti** di esposizione

**2-5 litri !**

**250k-610k voxel !**

**1.2M muoni !**



**CMT<sup>(p)</sup>** Cosmic Muon Tomography (project)



# MuSteel - Efficienza del metodo

Il sistema di identificazione dello schermo viene tarato per classificare materiali al di sopra di una soglia di densita' di scattering. L'efficienza del classificatore e' usualmente proposta mediante il grafico della ROC (Receiver Operating Characteristic), tuttavia questo perde informazione se l'identificazione e' molto accurata.

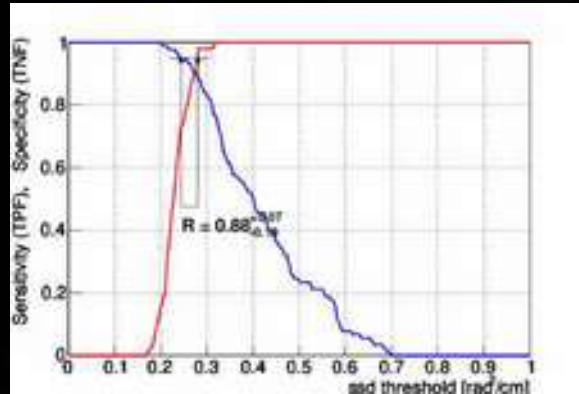
Utilizziamo per questo la sovrapposizione delle curve di **Sensibilita'** e **Specificita'**.

$$\text{Sensitivity} = \frac{TP}{TP + FN}$$

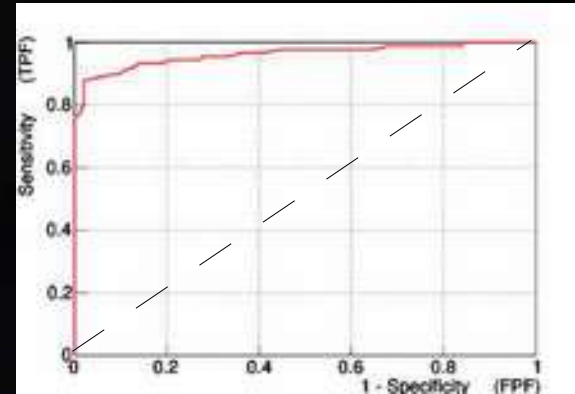
$$\text{Specificity} = \frac{TN}{TN + FP}$$

		Predicted Class	
		Yes	No
Actual Class	Yes	TP	FN
	No	FP	TN

## Caso inefficiente:



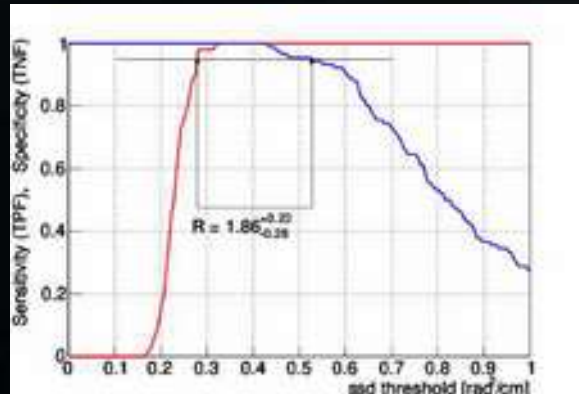
TPN



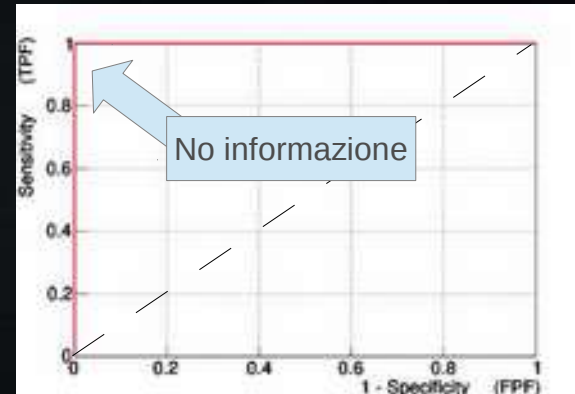
ROC

2 litri  
5 min

## Caso efficiente:



TPN



ROC

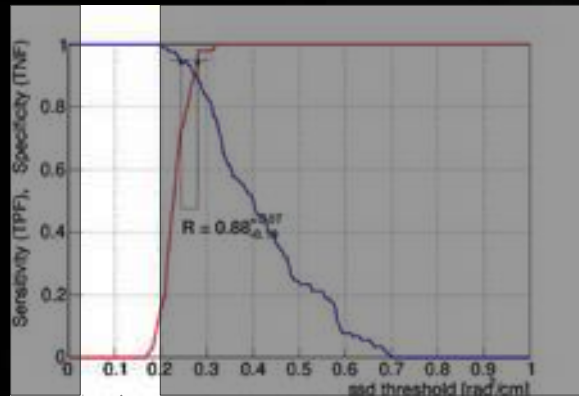
5 litri  
5 min

# MuSteel - Efficienza del metodo

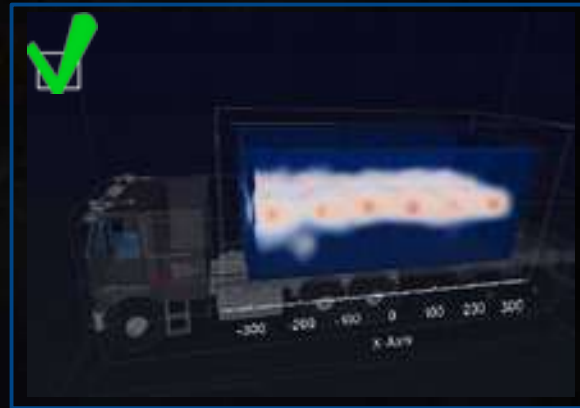
Il sistema di identificazione dello schermo viene tarato per classificare materiali al di sopra di una soglia di densita' di scattering. L'efficienza del classificatore e' usualmente proposta mediante il grafico della ROC (Receiver Operating Characteristic), tuttavia questo perde informazione se l'identificazione e' molto accurata.

Utilizziamo per questo la sovrapposizione delle curve di **Sensibilita'** e **Specificita'**.

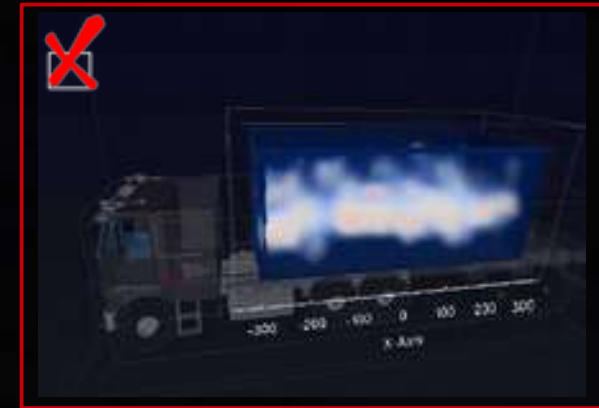
## Caso inefficiente:



Container **CON** sorgente (TP)

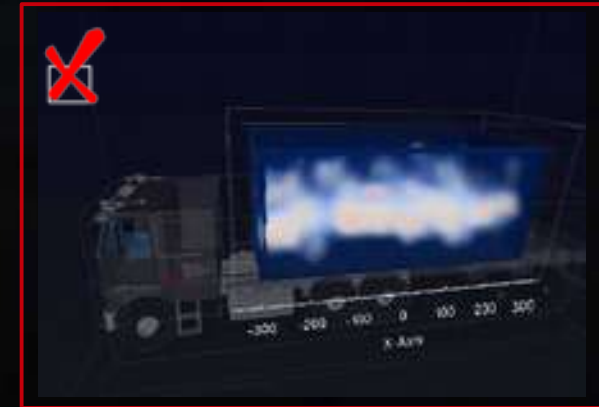
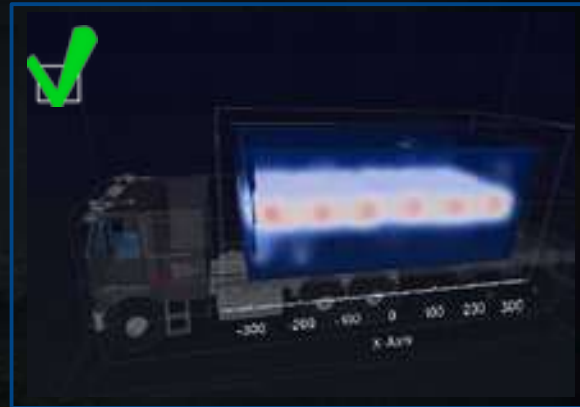
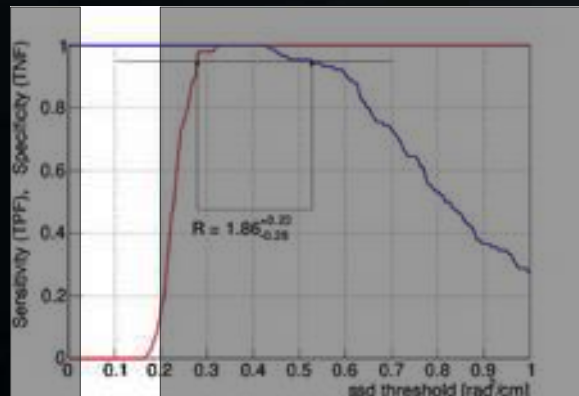


Container **SENZA** sorgente (TN)



Curva TPN per bersagli da 2 litri per 5 min di acquisizione

## Caso efficiente:



Curva TPN per bersagli da 5 litri per 5 min di acquisizione

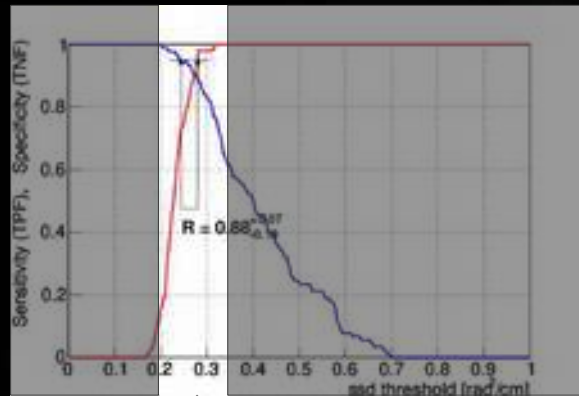


# MuSteel - Efficienza del metodo

Il sistema di identificazione dello schermo viene tarato per classificare materiali al di sopra di una soglia di densita' di scattering. L'efficienza del classificatore e' usualmente proposta mediante il grafico della ROC (Receiver Operating Characteristic), tuttavia questo perde informazione se l'identificazione e' molto accurata.

Utilizziamo per questo la sovrapposizione delle curve di **Sensibilita'** e **Specificita'**.

## Caso inefficiente:



Container **CON** sorgente (TP)

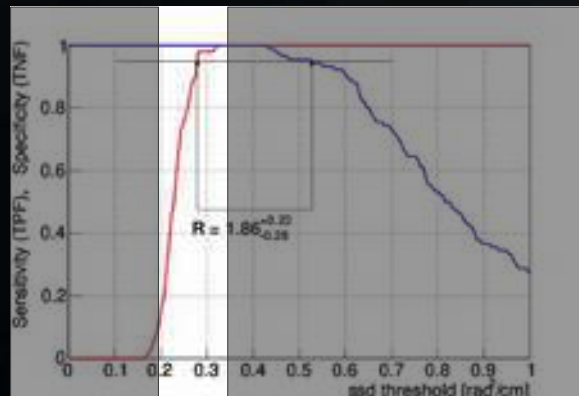


Container **SENZA** sorgente (TN)



Curva TPN per bersagli da 2 litri per 5 min di acquisizione

## Caso efficiente:



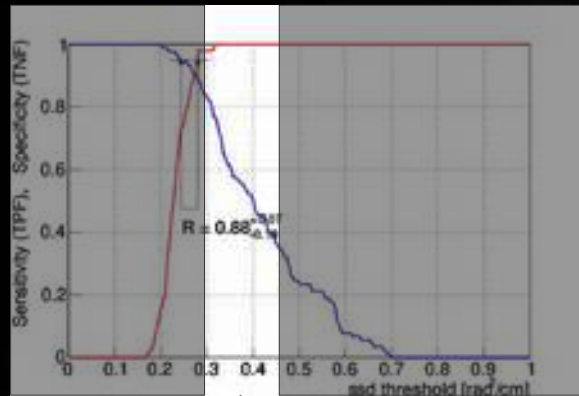
Curva TPN per bersagli da 5 litri per 5 min di acquisizione

# MuSteel - Efficienza del metodo

Il sistema di identificazione dello schermo viene tarato per classificare materiali al di sopra di una soglia di densita' di scattering. L'efficienza del classificatore e' usualmente proposta mediante il grafico della ROC (Receiver Operating Characteristic), tuttavia questo perde informazione se l'identificazione e' molto accurata.

Utilizziamo per questo la sovrapposizione delle curve di **Sensibilita'** e **Specificita'**.

## Caso inefficiente:



Container **CON** sorgente (TP)

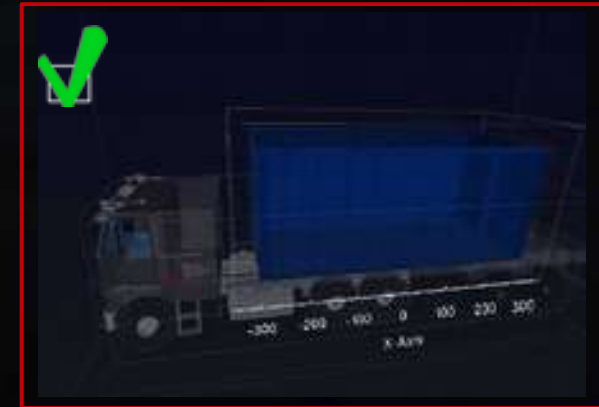
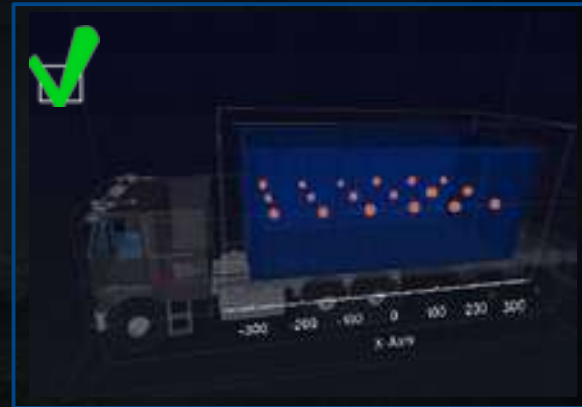
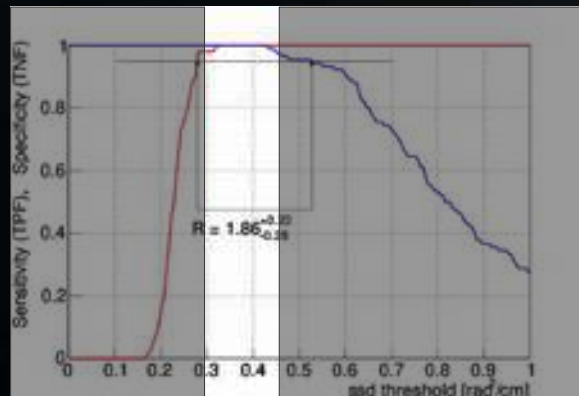


Container **SENZA** sorgente (TN)



Curva TPN per bersagli da 2 litri per 5 min di acquisizione

## Caso efficiente:



Curva TPN per bersagli da 5 litri per 5 min di acquisizione

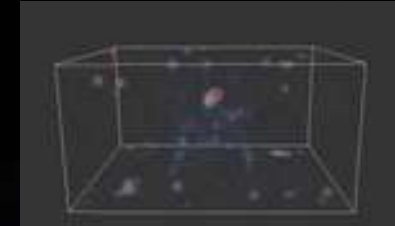
# MuSteel - Efficienza del metodo

## Noise reduction

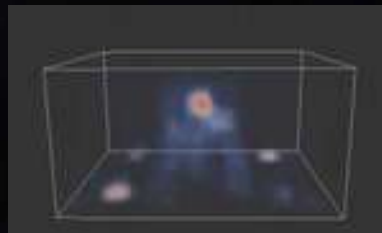
Il test di efficienza e' stato applicato a misure reali nel setup allestito a legnaro. suddividendo I dati acquisiti dall'esperimento in 400+400 campioni indipendenti da 1min.



No Filter

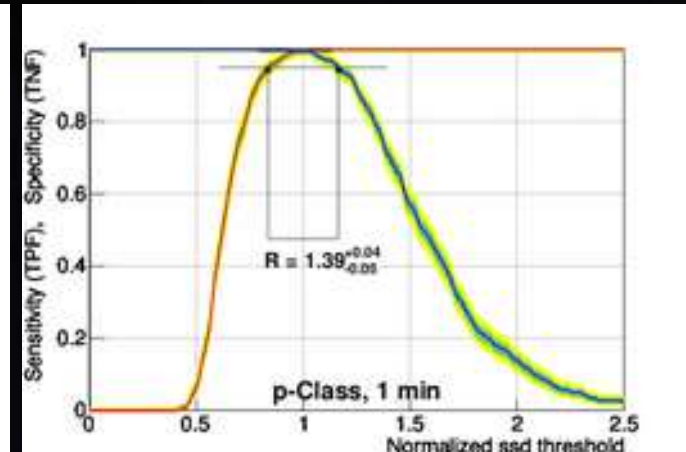
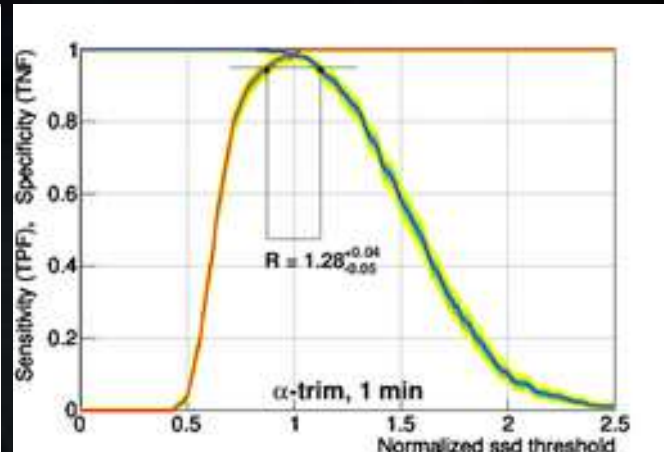
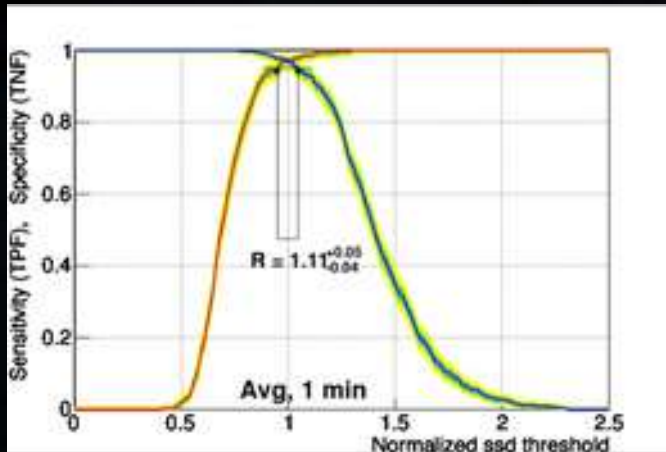
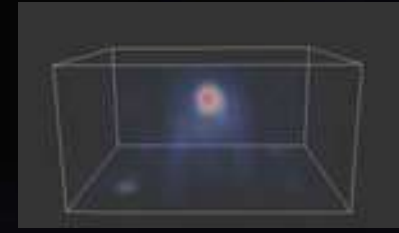


Simple Avg



$\alpha$ -trimmed

Internal guess  
+  
 $\alpha$ -trimmed



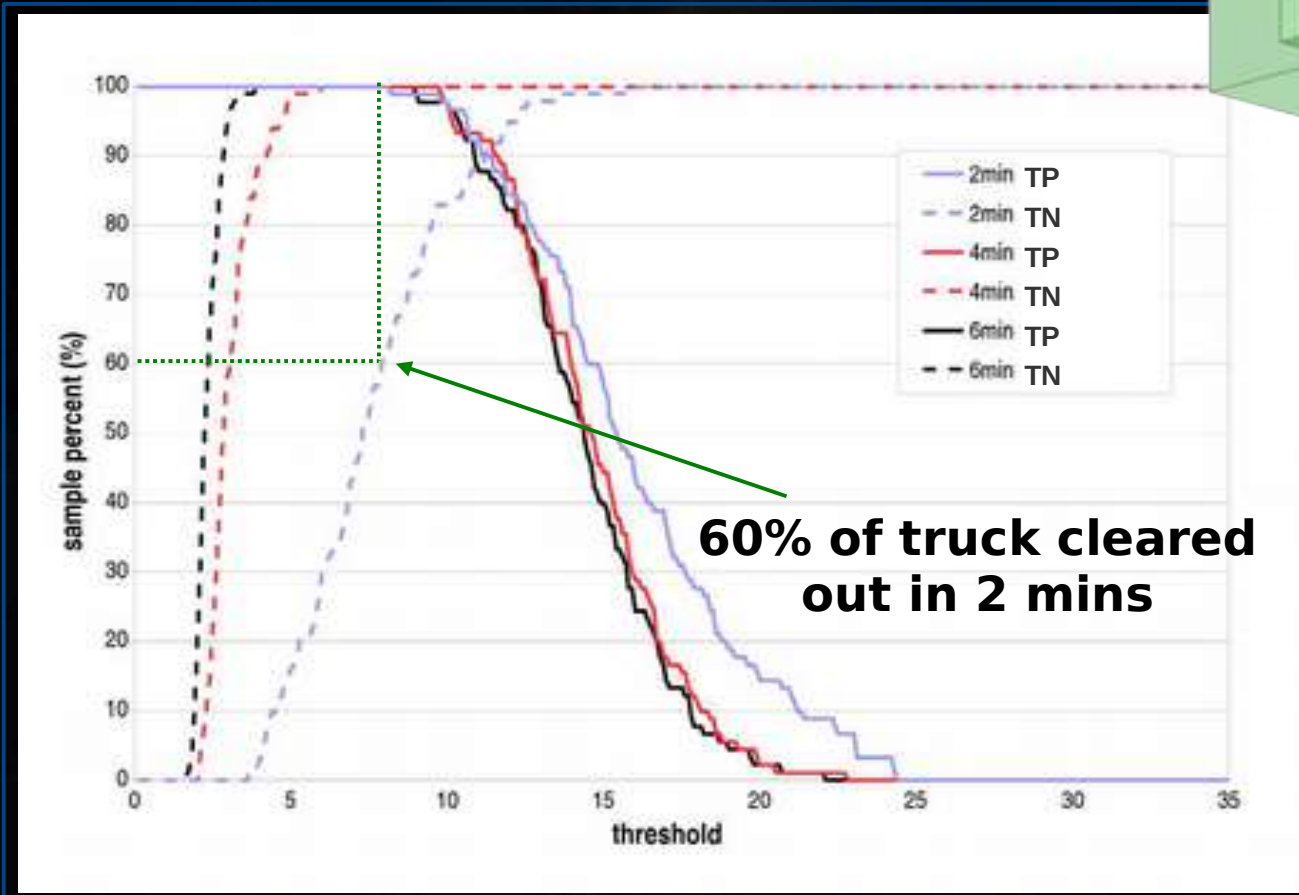
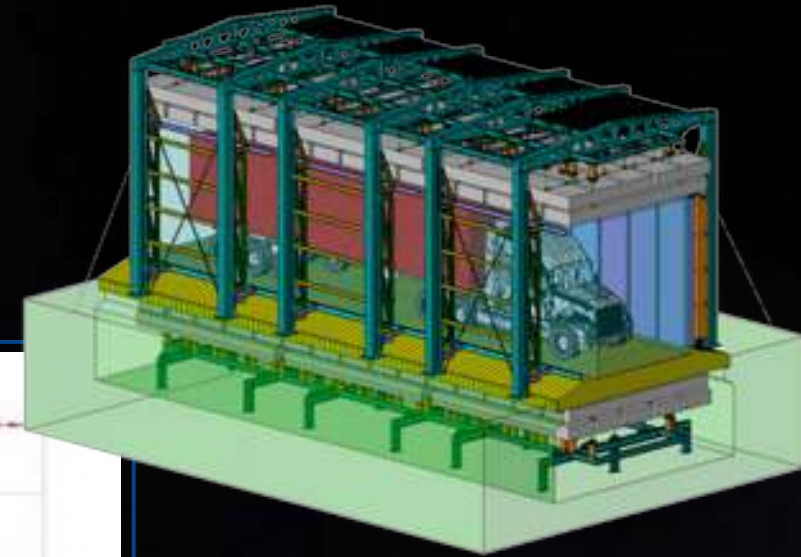
M. Benettoni et al., "Noise reduction in muon tomography for detecting high density objects" JINST 8 2013 - P12007.



# MuSteel - Efficienza del metodo

## Curve TPN: schermo 5 litri

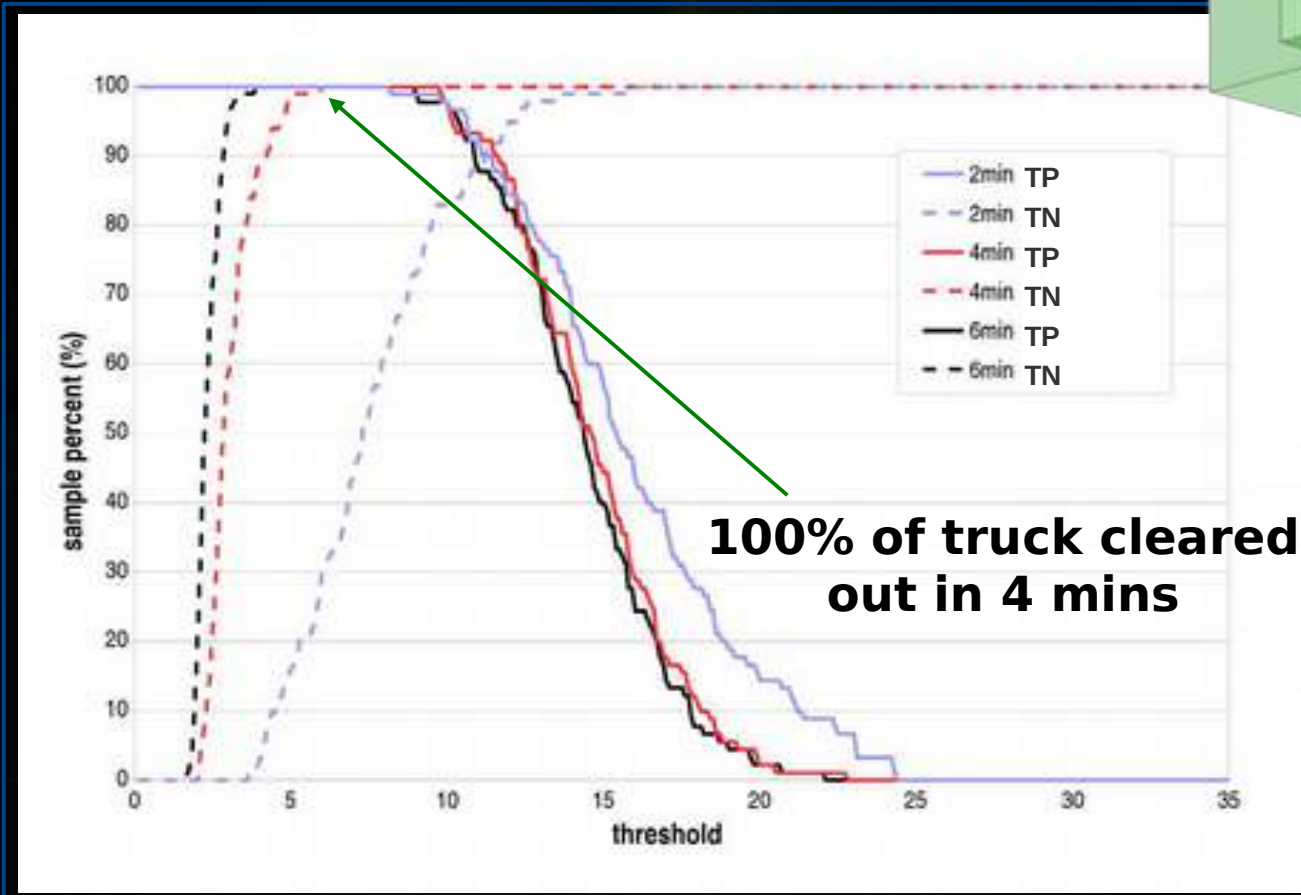
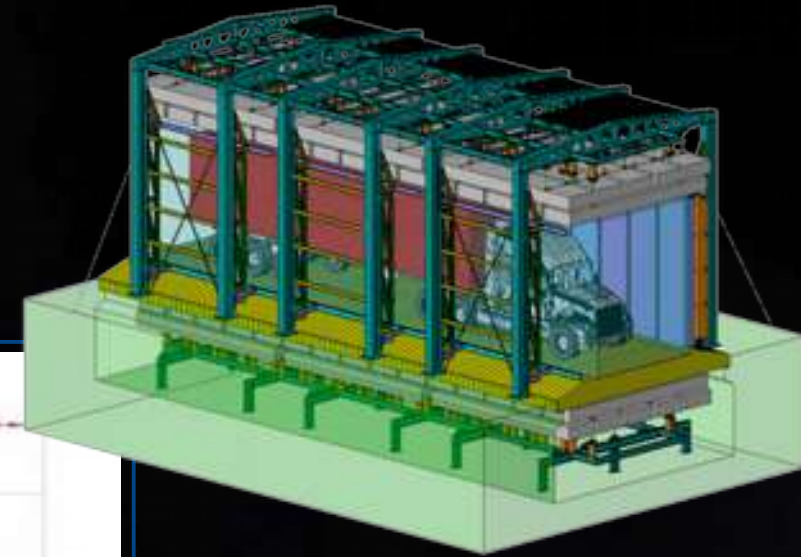
Test di efficienza per l'esperimento MuSteel con un Container completo da 6 x 3 x 2.5 m riempito di rottami e con schermo pieno di piombo. Classificazione localizzata attorno alla sorgente per la curva di sensibilita' e 100 campioni completi per la specificita'



# MuSteel - Efficienza del metodo

## Curve TPN: schermo 5 litri

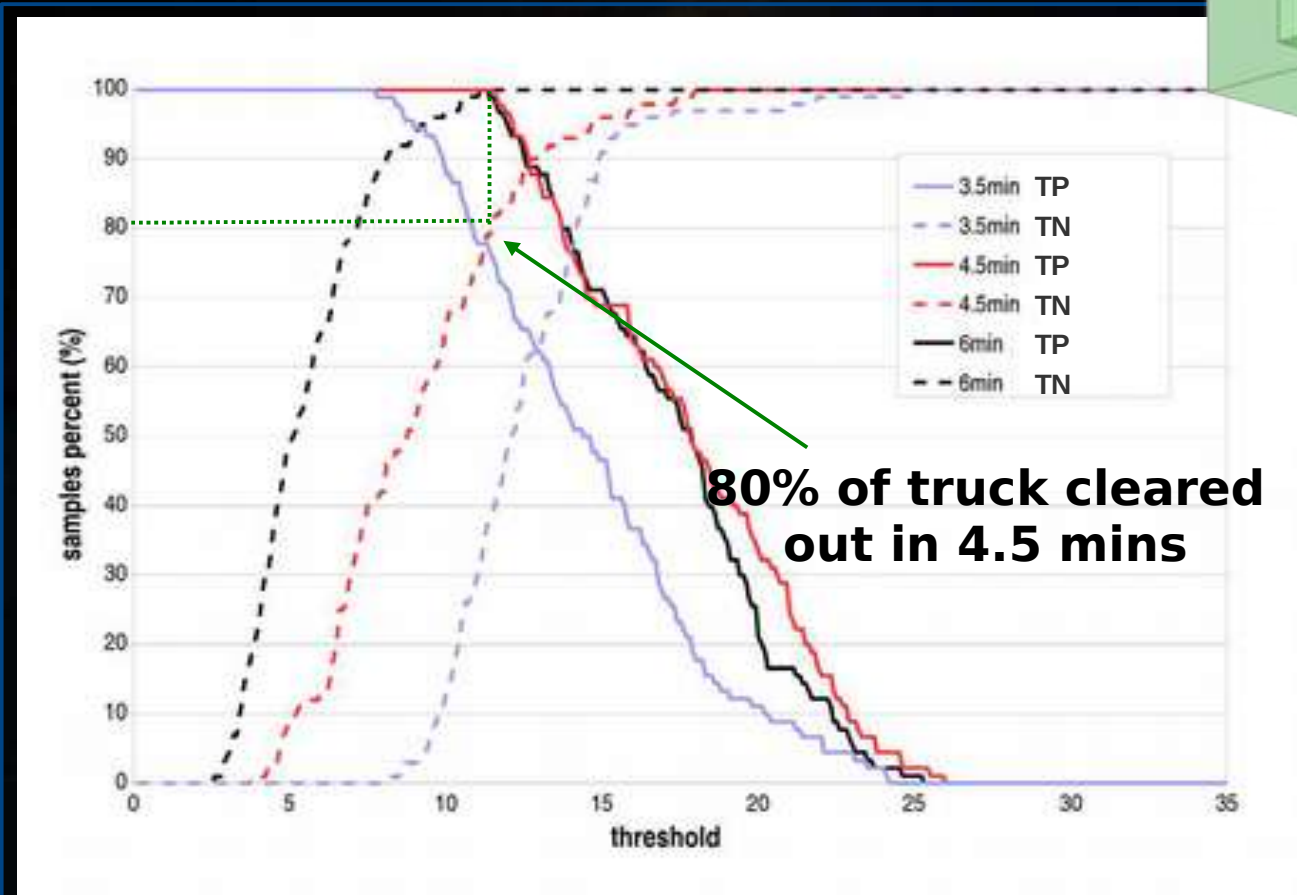
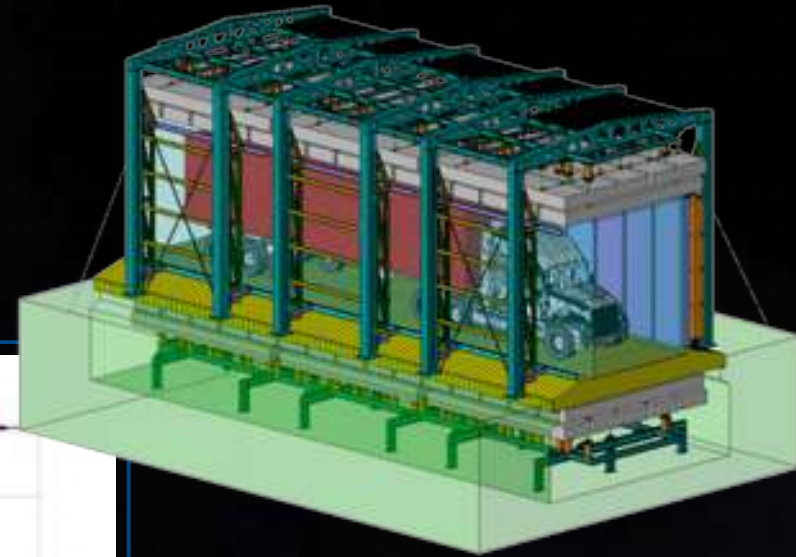
Test di efficienza per l'esperimento MuSteel con un Container completo da 6 x 3 x 2.5 m riempito di rottami e con schermo pieno di piombo. Classificazione localizzata attorno alla sorgente per la curva di sensibilita' e 100 campioni completi per la specificita'



# MuSteel - Efficienza del metodo

## Curve TPN: schermo 2 litri

Test di efficienza per l'esperimento MuSteel con un Container completo da 6 x 3 x 2.5 m riempito di rottami e con schermo pieno di piombo. Classificazione localizzata attorno alla sorgente per la curva di sensibilita' e 100 campioni completi per la specificita'

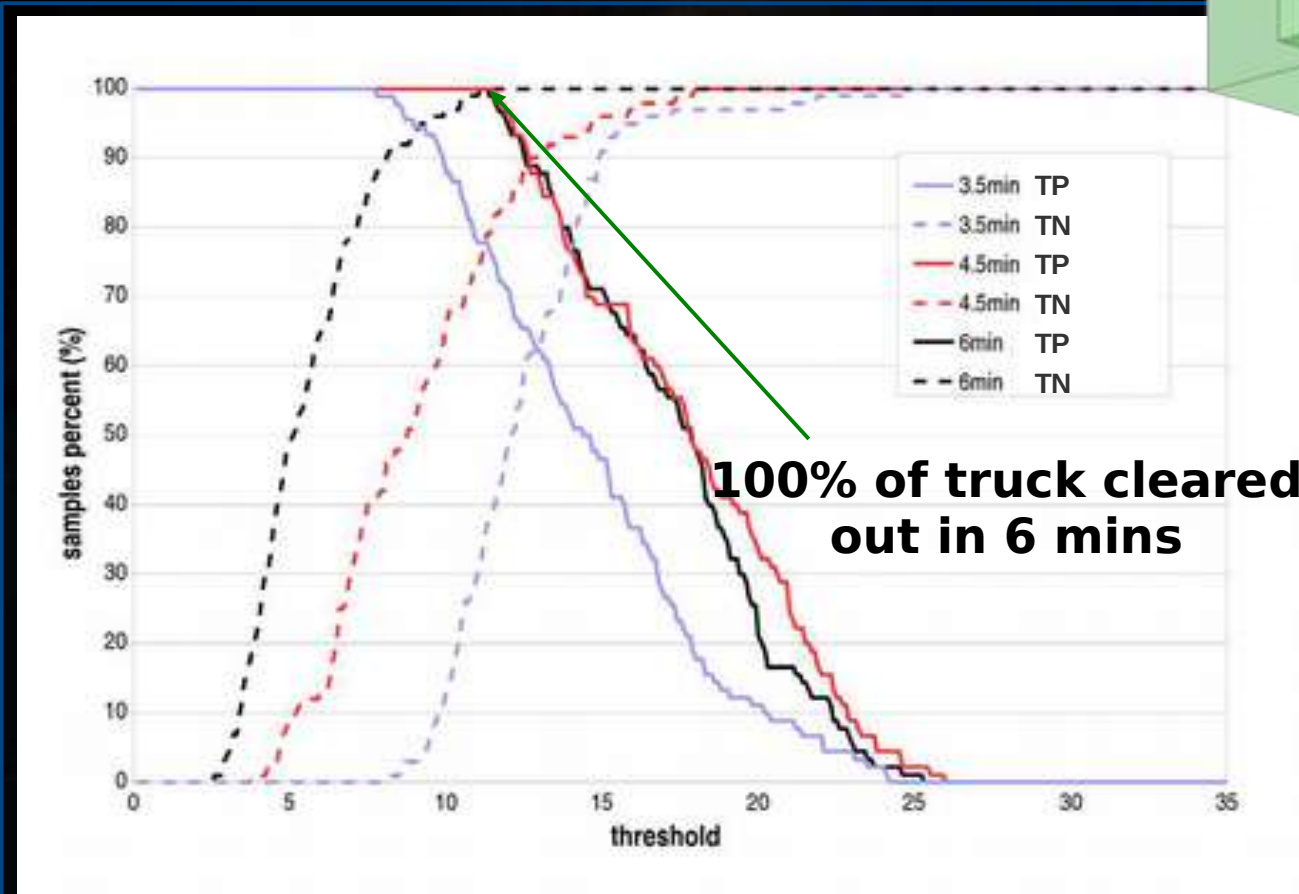
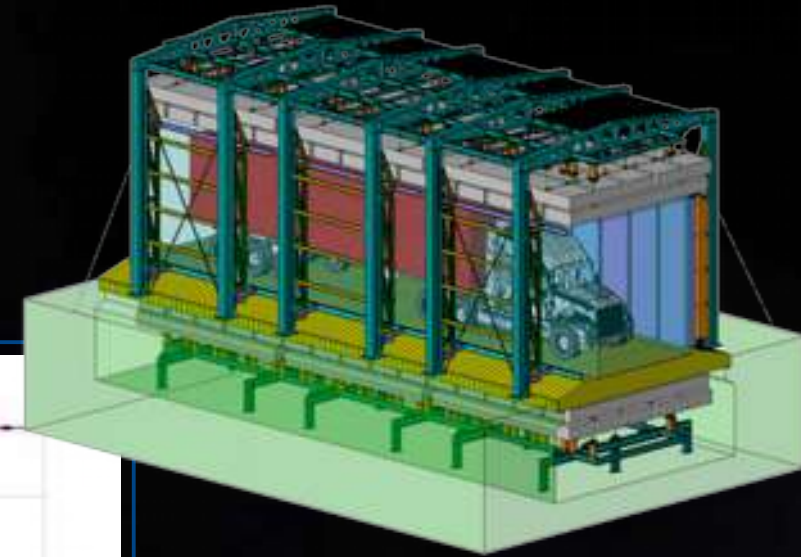




# MuSteel - Efficienza del metodo

## Curve TPN: schermo 2 litri

Test di efficienza per l'esperimento MuSteel con un Container completo da 6 x 3 x 2.5 m riempito di rottami e con schermo pieno di piombo. Classificazione localizzata attorno alla sorgente per la curva di sensibilita' e 100 campioni completi per la specificita'

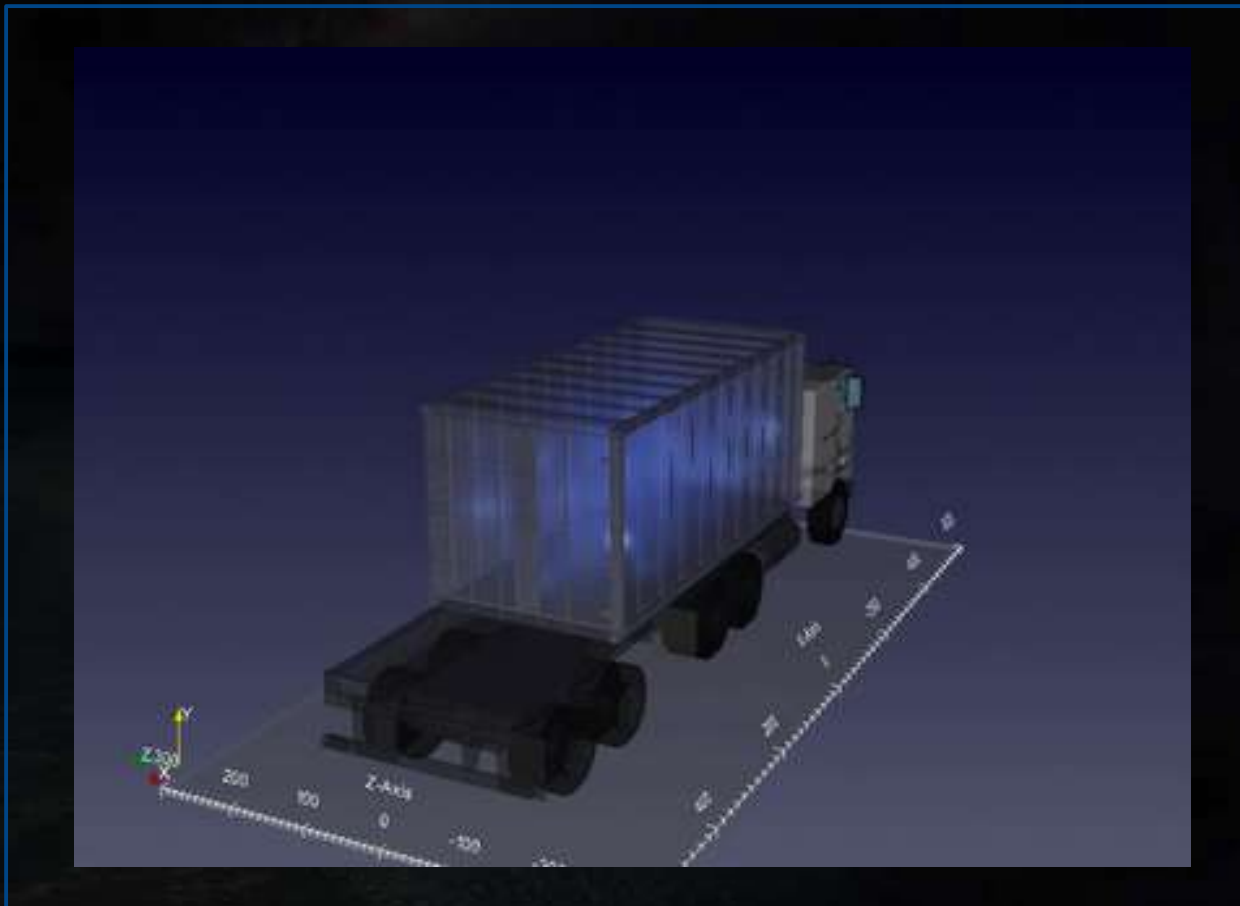


# MuSteel - Efficienza del metodo

La tomografia muonica appare un metodo efficace per l'individuazione degli schermi di sorgenti orfane situate all'interno di trasporti di materiale ferroso da riciclo.

Schermi di 2 o più litri possono essere individuati in un tempo medio inferiore a 5 minuti.

L'identificazione può essere compiuta con un minimo impatto sui tempi di attesa imposti dagli standard industriali



# ALTRE APPLICAZIONI



# Altre applicazioni:

## ***SNM traffic control***

Ogni anno negli Stati Uniti entrano circa **20M container** e **100M veicoli**. Il controllo portuale e' per il sistema americano un obiettivo di primaria importanza.

In Europa nel 1995 la IAEA ha iniziato un programma di intervento contro il traffico illecito di sorgenti radioattive con la pubblicazione di un Database dei casi rivelati (ITDB).

Nei soli 6 anni successivi si contano gia' 400 casi confermati il 90% dei quali riguardano sorgenti schermate o uranio a basso arricchimento. Il 10% coinvolge la presenza di Plutonio o Uranio arricchito.

Negli Stati uniti sono attivi vari progetti e si sta' sperimentando un portale completo per l'identificazione di possibili materiali pericolosi ai porti.

Per il progetto MuSteel si e' realizzato un primo modulo delle camere del portale per verificarne il funzionamento. Una stima di costo per un prototipo funzionante prevede un impegno di circa 2M di euro.

Prototipo di portale per controllo portuale in USA

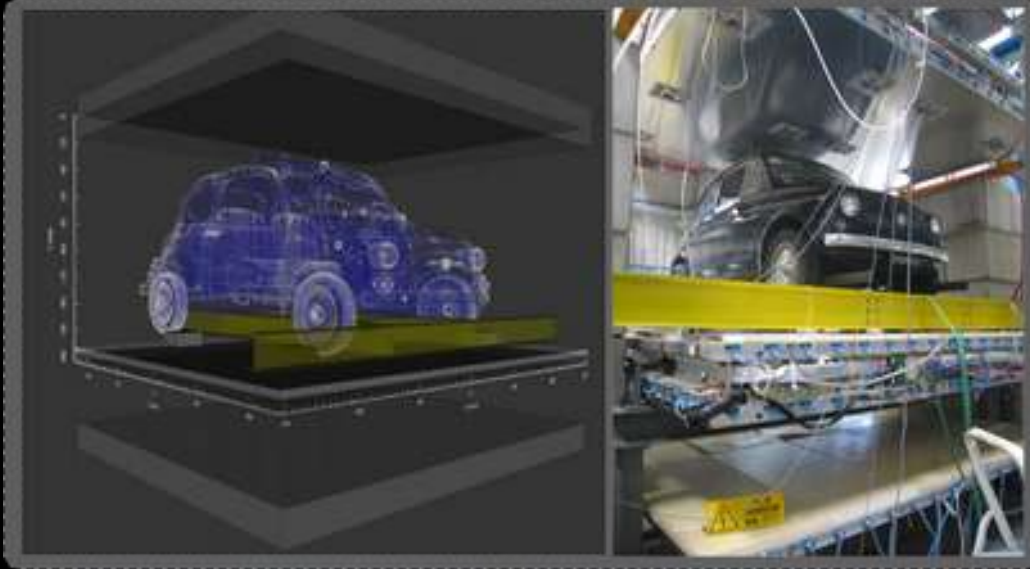


Primo modulo per un portale fullscale di INFN



# Altre applicazioni:

## *SNM traffic control*



Utilizzando l'esperimento già funzionante abbiamo testato il funzionamento del nostro algoritmo per l'uso nella scansione dei veicoli "leggeri".

Il sistema si è dimostrato efficace non solo nella identificazione del possibile schermo per la sorgente nascosta ma anche nella effettiva ricostruzione delle parti pesanti del veicolo.



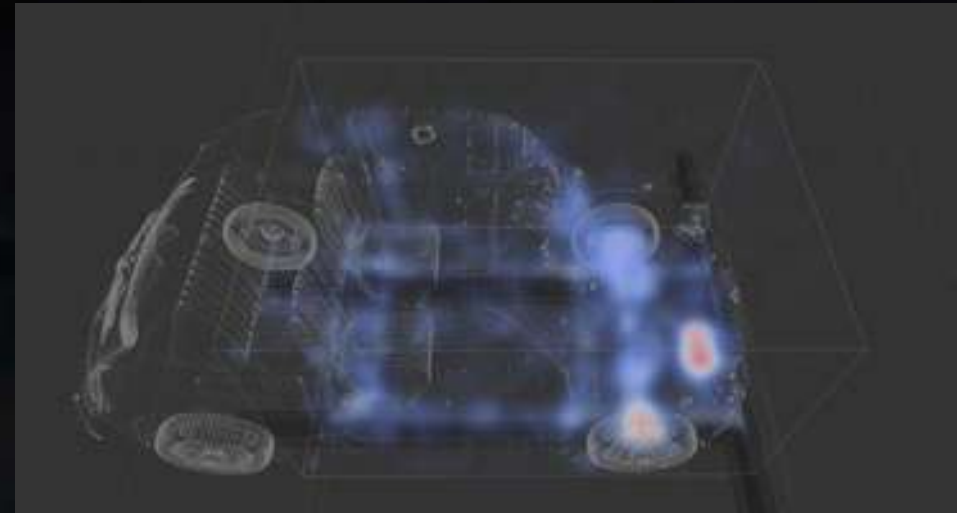
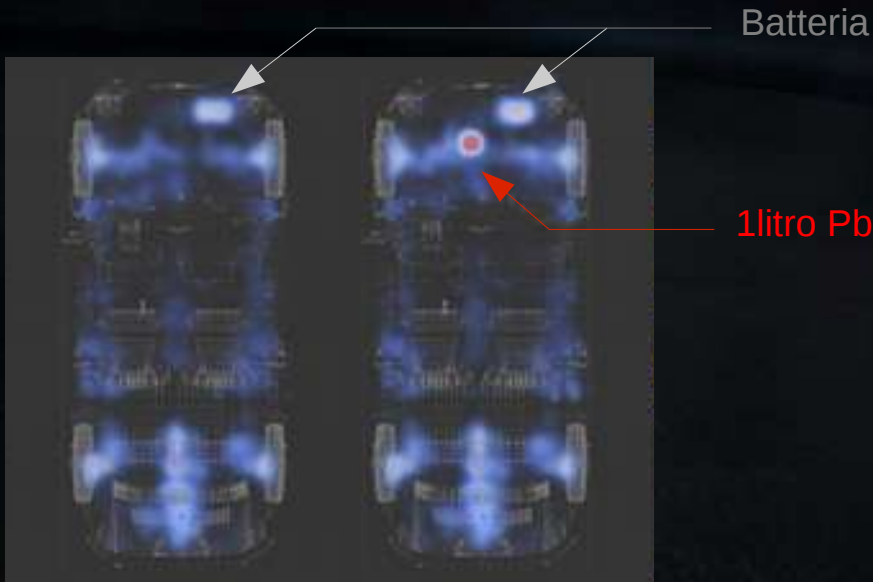
# Altre applicazioni:

## *SNM traffic control*



Utilizzando l'esperimento già funzionante abbiamo testato il funzionamento del nostro algoritmo per l'uso nella scansione dei veicoli "leggeri".

Il sistema si è dimostrato efficace non solo nella identificazione del possibile schermo per la sorgente nascosta ma anche nella effettiva ricostruzione delle parti pesanti del veicolo.





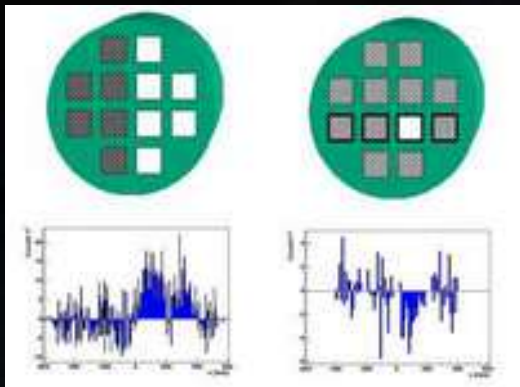
# Altre applicazioni:

## SNF Dry Canister Survey

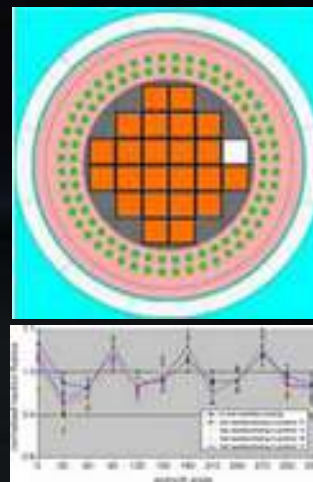
Il combustibile nucleare esausto (SNF) contenuto in cask di metallo e cemento viene trasferito nei siti di stoccaggio. Esiste il concreto rischio di furto di materiale nucleare esausto che potrebbe essere usato per la produzione di ordigni.



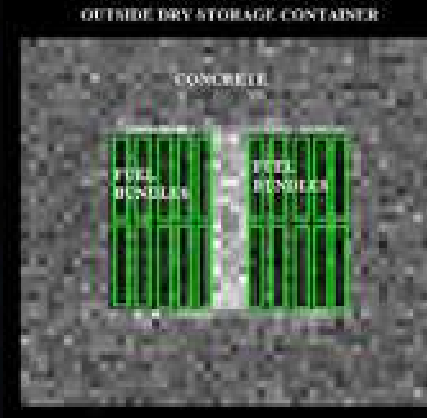
a)



b)



c)



a) Joel Gustafsson, "Tomography of canisters for spent nuclear fuel using cosmic-ray muons"  
Uppsala University Neutron Physics Report UU-NF 05#08 – 2005

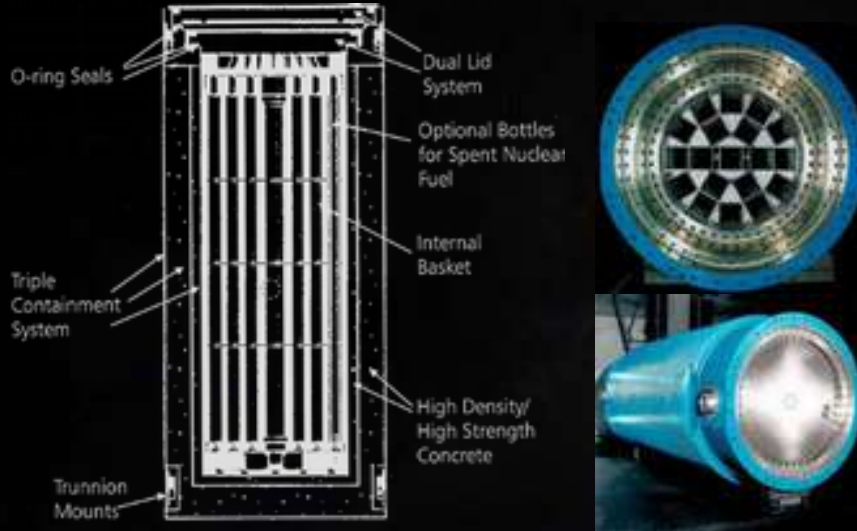
b) P.Peerani, M.Galletta, "Re-establishment of the continuity of knowledge in the safeguards of interim storages using NDA techniques"  
Nuclear Engineering and Design 237 (2007) 94-99

c) G. Jonkmans, V. Anghel, C. Jewett, M. Thompson "Muon tomography for imaging nuclear waste and spent fuel verification"  
Annals of Nuclear Energy - 2012



# Altre applicazioni:

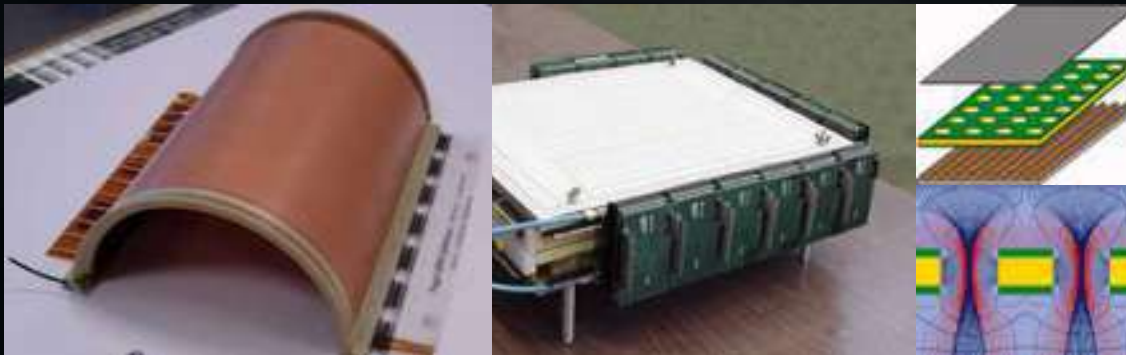
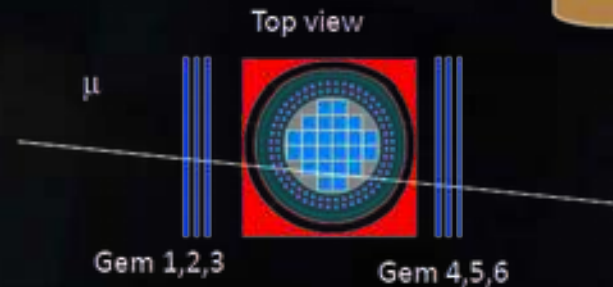
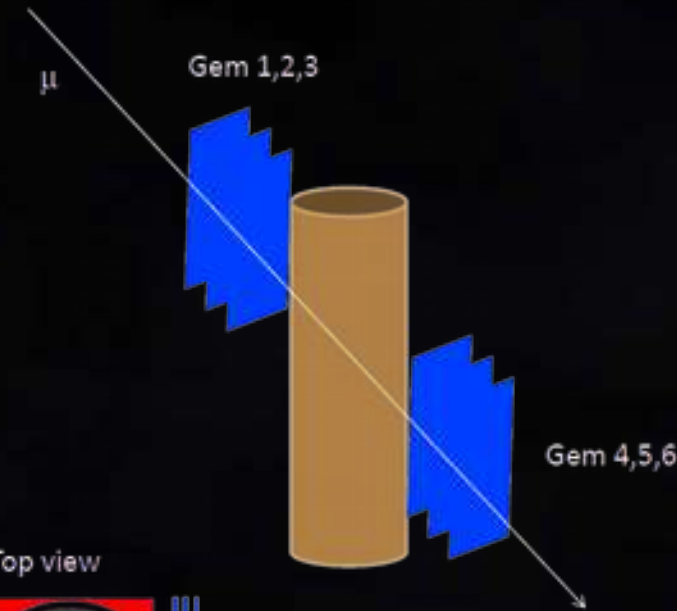
## SNF Dry Canister Survey



NUREG, 2001. Dry cask storage characterization project—phase 1: CASTOR V/21 cask opening and examination. U.S. Nuclear Regulatory Commission Report, NUREG/CR-6745.

La Tomografia muonica puo' verificare la presenza e corretta collocazione del materiale esausto contenuto senza aprire i castor.

L'applicazione di rivelatori GEM, grazie al piccolo ingombro e alla grande precisione, permetterebbe l'ingagine in loco nei siti di stoccaggio

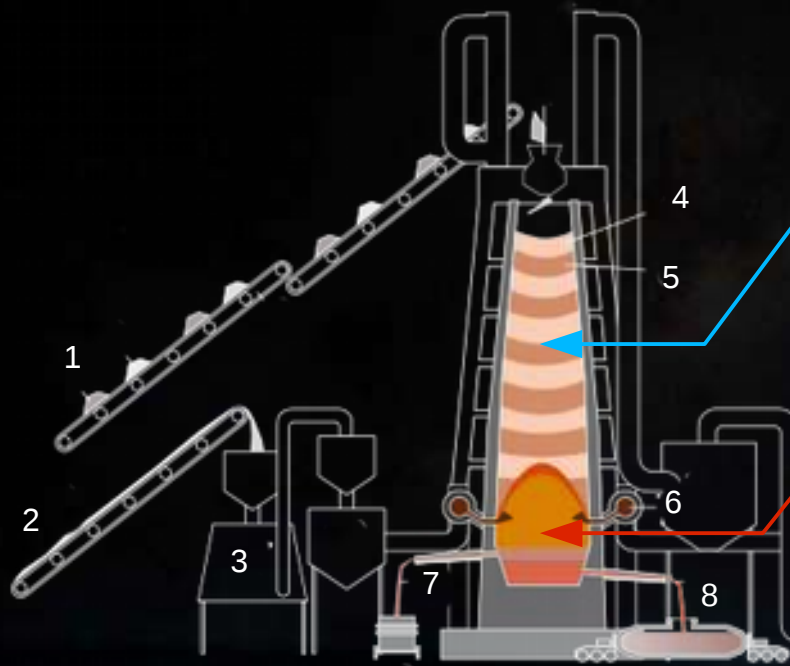


GEM Detectors (Gas Electron Multiplier)

# Altre applicazioni:

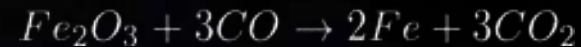
## Blast furnace imaging

Un altoforno e' uno strumento per la produzione di ghisa da materiale ferroso, attraverso un processo di combustione di coke, di riduzione di ossidi metallici e infine di ricombinazione con carbonio puro.



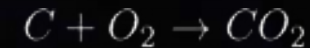
### ZONA DI RIDUZIONE:

Le reazioni di riduzione con ossidi ferrosi e' diretta e la indiretta:



### ZONA DI FUSIONE:

L'ossido di carbonio deriva dalla combustione in difetto di ossigeno del coke



Infine si ottiene la carburazione attraverso il legame del ferro puro con il carbonio del mantello del forno.

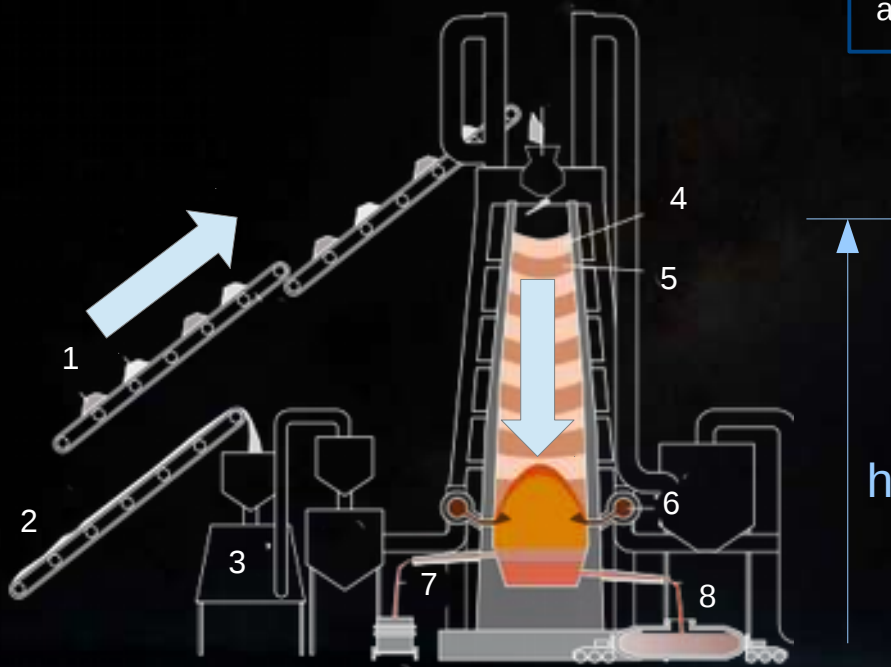


La carburazione e' necessaria per ottenere una lega a basso punto di fusione (1300~1500 °C).

1. minerale di ferro e fondente
2. Carbone in polvere
3. Produzione del Coke
4. Strato di Coke e fondente
5. Strato di minerale e fondente
6. Flusso aria 1200°
7. Rimozione scorie
8. Colata Ghisa

# Altre applicazioni:

## Blast furnace imaging



1. minerale di ferro e fondente
2. Carbone in polvere
3. Produzione del Coke
4. Strato di Coke e fondente
5. Strato di minerale e fondente
6. Flusso aria 1200°
7. Rimozione scorie
8. Colata Ghisa

**Mu-Blast:** un progetto di ricerca per la caratterizzazione non invasiva della situazione interna all'altoforno.



### Situazione sperimentale:

Mantello di acciaio e materiale refrattario.  
Circa **20~30 m** di altezza.

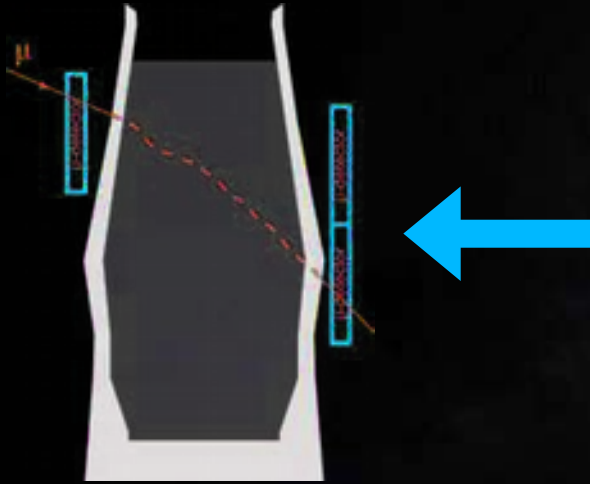
Ciclo continuo con tempo di attraversamento di **~10h**.  
Vengono processate **~40Kt** di materiale al giorno.



# Altre applicazioni:

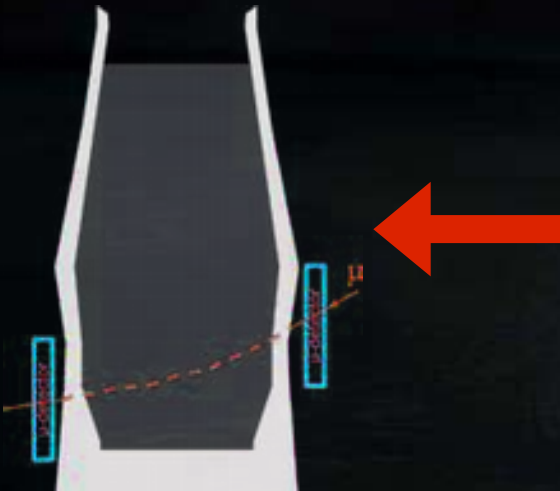
## Blast furnace imaging

**Mu-Blast:** un progetto di ricerca per la caratterizzazione non invasiva della situazione interna all'altoforno.



Monitoraggio del profilo di densità per il controllo della miscela. La distribuzione spaziale dei tre principali materiali costituenti la carica (minerale, coke e metallo ridotto) hanno infatti densità diverse. Zone di materiale più denso diminuiscono la permeabilità e comportano una minore efficienza nella ossidoriduzione.

Controllo continuativo



Controllo dello spessore dello strato di carbonio della carburazione nella zona di fusione. Permette di avere una indicazione sullo stato di usura dell'altoforno.

Controllo saltuario



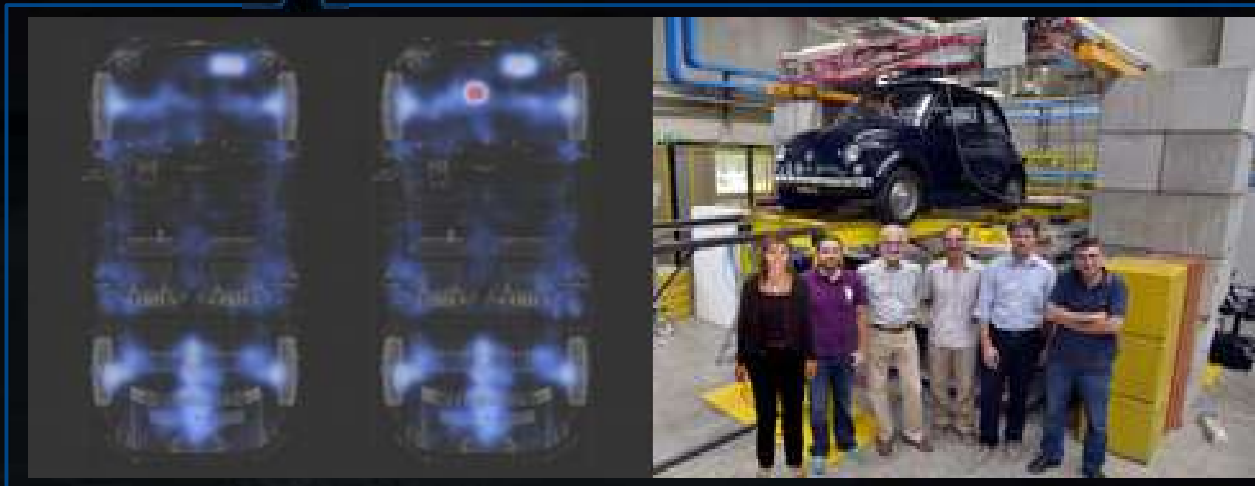


## Il Team

Un ringraziamento dovuto a tutti i componenti del team:

M. Benettoni, G. Bettella, G. Bonomi, G. Calvagno, P. Calvini, P. Checchia, A. Colombo, G. Cortelazzo, L. Cossutta, A. Donzella, M. Furlan, F. Gonella, L. Barcellan, M. Pegoraro, A. Rigoni Garola, P. Ronchese, S. Squarcia, M. Subieta, S. Vanini, G. Viesti, P. Zanuttigh, A. Zenoni, G. Zumerle

**Grazie per la vostra attenzione !**



**CMT<sup>(p)</sup>** Cosmic Muon Tomography (project)

