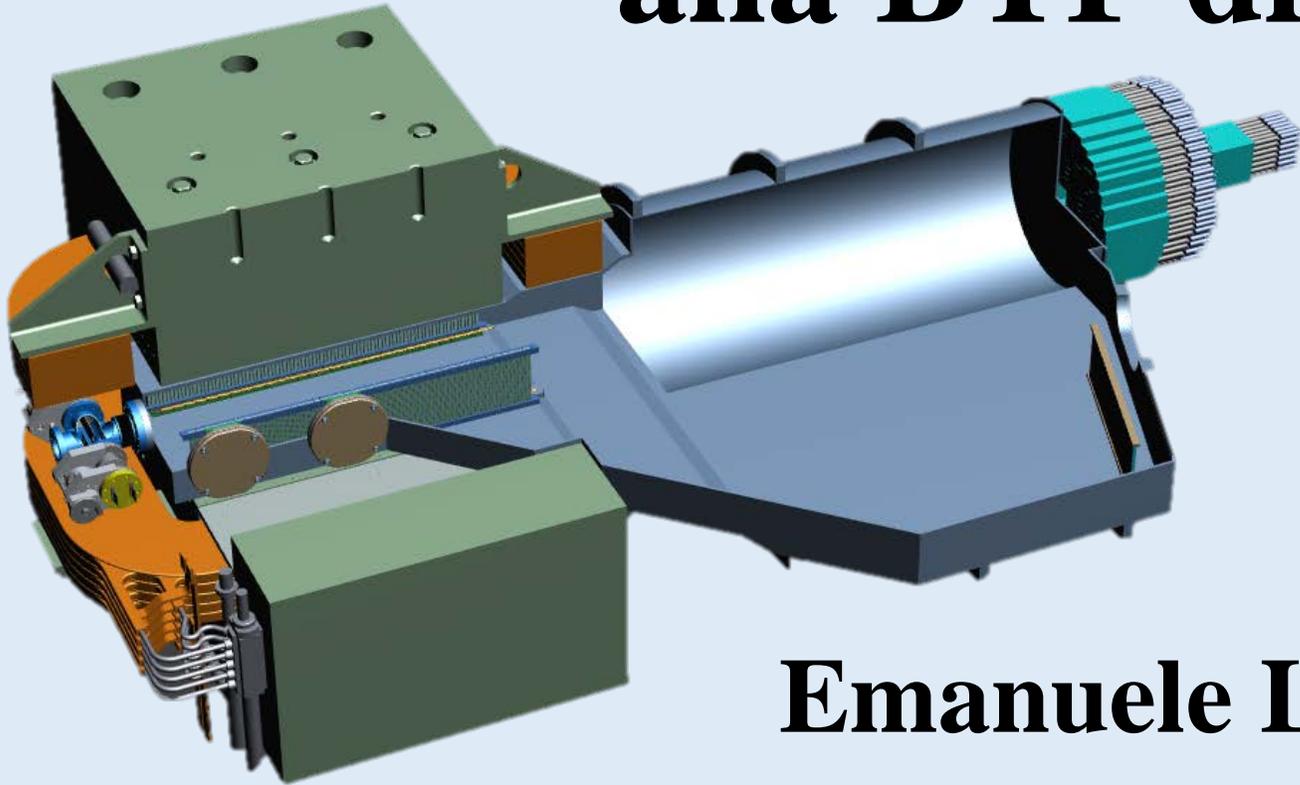




*Ministero degli Affari Esteri
e della Cooperazione Internazionale*
Supported by MAECI Progetto Grande
Rilevanza Italia-USA PGR226

Il modello di calcolo dell'esperimento PADME alla BTF di Frascati



Emanuele Leonardi

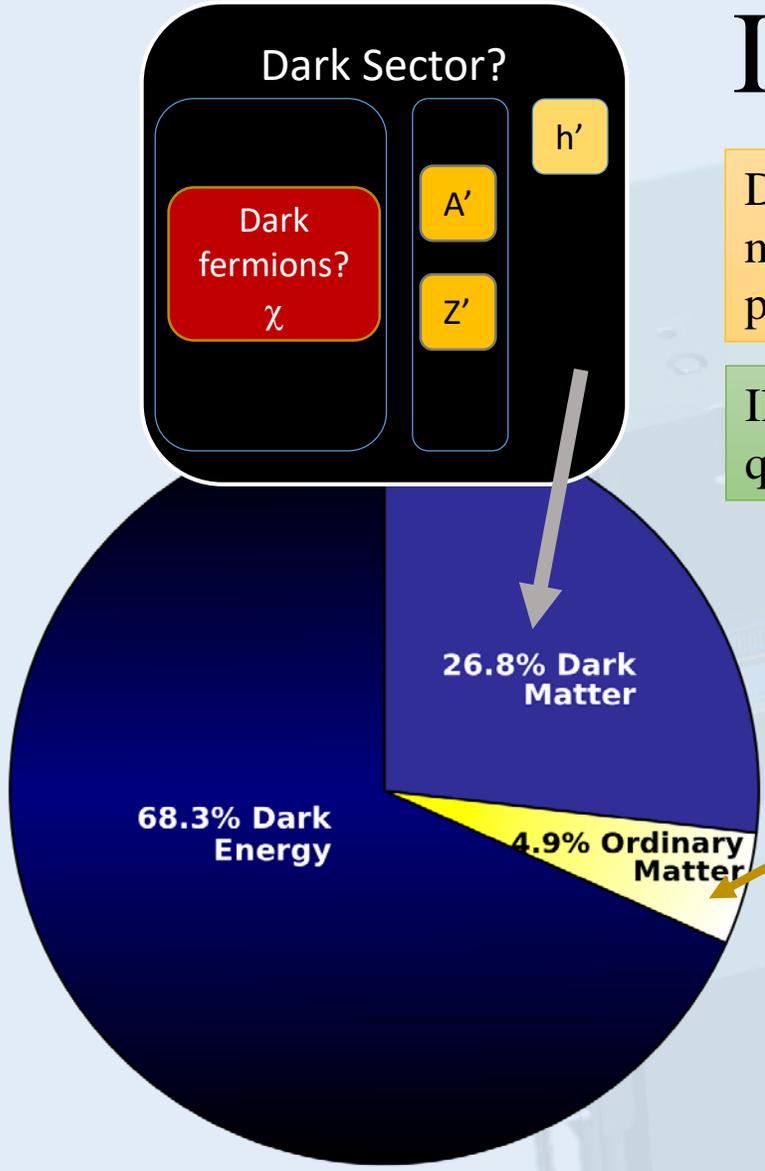
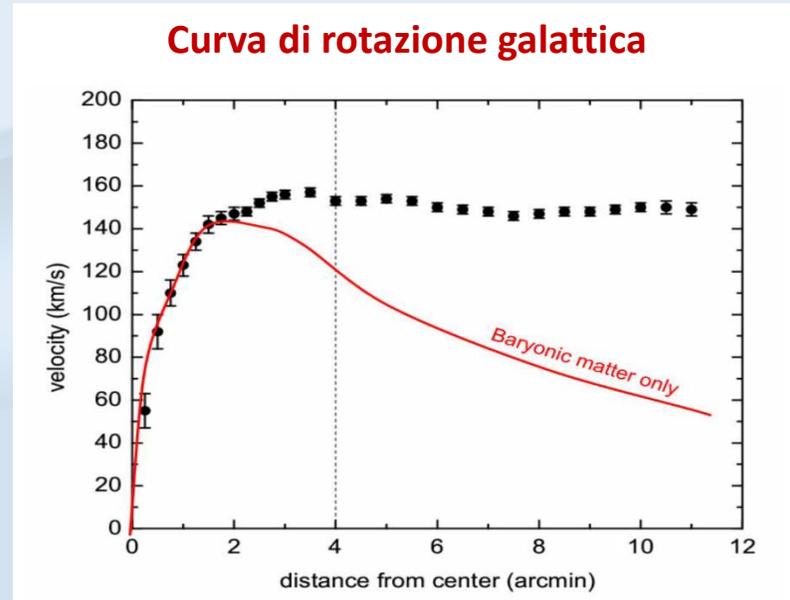
INFN Sezione di Roma

Workshop CCR – L.N.G.S. 22-26 Maggio 2017

Il problema della Materia Oscura

Da misure cosmologiche sappiamo che la materia visibile giustifica solo una piccola parte degli effetti gravitazionali osservati.

Il contributo mancante può provenire da qualche forma di "Materia Oscura"



Il Modello Standard descrive meno del 20% della materia dell'universo

mass →	≈2.3 MeV/c ²	≈1.275 GeV/c ²	≈173.07 GeV/c ²	0	≈126 GeV/c ²
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	91.2 GeV/c ²	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	80.4 GeV/c ²	
	0	0	0	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	

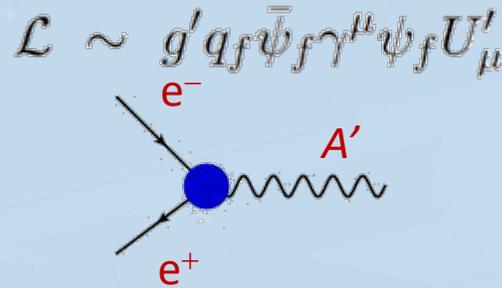
- Ci sono molte questioni aperte:
- Di cosa è fatta la Materia Oscura (MO)?
 - Come interagisce con le particelle del MS?
 - Esistono "Forze Oscure" associate alla MO?
 - Com'è fatto lo spettro di particelle di MO?
 - ...

Il Fotone Oscuro

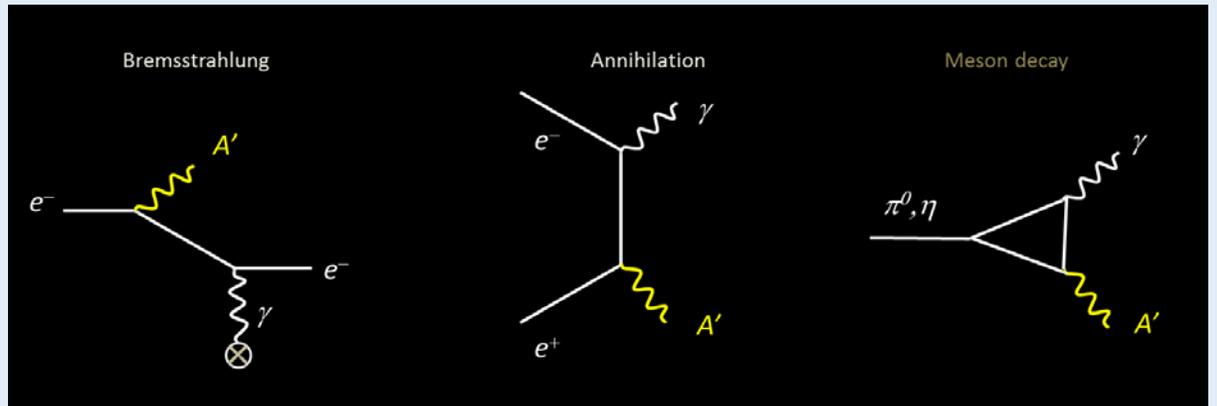
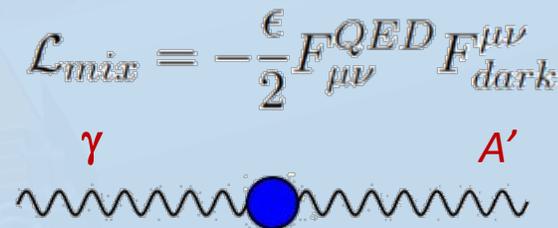
Il più semplice modello del Settore Oscuro introduce una sola simmetria di gauge U(1) aggiuntiva con il corrispondente bosone di gauge: il **“Fotone Oscuro”** o A'

Due possibili modi di interazione con il MS

Accoppiamento diretto coi fermioni



Mixing con il bosone di gauge della QED



Nelle collisioni e^+ su targhetta, A' può essere prodotto per:

- Bremsstrahlung
- Annichilazione
- Decadimento mesonico

Se non esistono particelle di MO più leggere di A' , A' può solo decadere in particelle del MS.

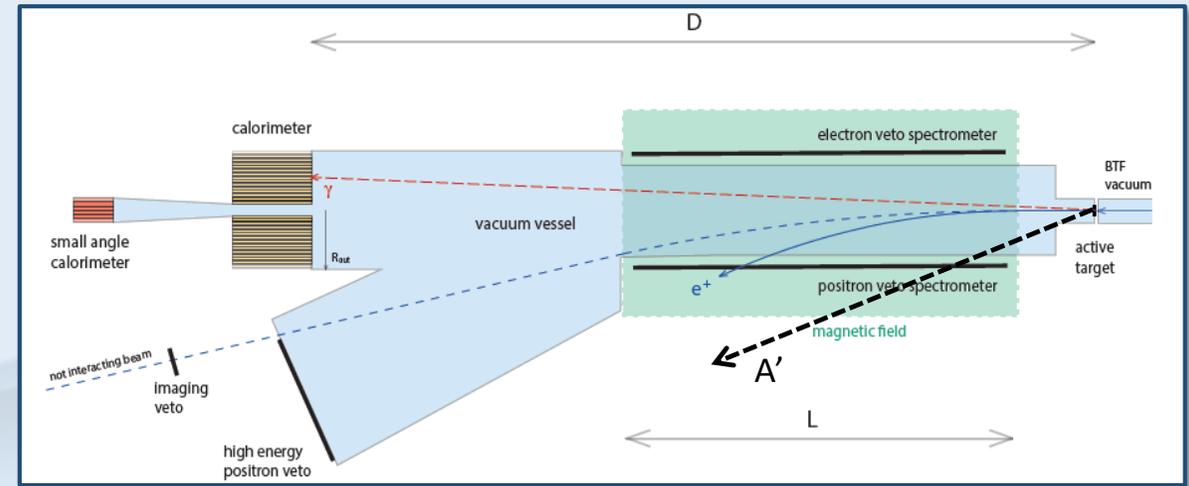
Il decadimento di A' è **visibile**

Se almeno una particella di MO χ ha $2M_\chi < M_{A'}$, i decadimenti nel MS sono fortemente soppressi.

Il decadimento di A' è **invisible**

L'esperimento PADME

- PADME (Positron Annihilation into Dark Matter Experiment) cercherà eventi di produzione invisibile di A' nel canale di annichilazione $e^+e^- \rightarrow A'\gamma$
- Un fascio di e^+ da 550 MeV dalla Beam Test Facility (BTF) di DAΦNE interagisce con gli e^- (a riposo) di un bersaglio di diamante sottile ($100\mu\text{m}$).
- Un calorimetro elettromagnetico misura l'energia E_γ e l'angolo θ_γ del fotone di rinculo.
- Si valuta la massa dell' A' (invisibile) da $M_{A'}^2 = (\underbrace{p_{e^-}}_{\text{a riposo}} + \underbrace{p_{\text{beam}}}_{550 \text{ MeV}} - \underbrace{p_\gamma}_{(E_\gamma, \theta_\gamma)})^2$
- Goal: raccogliere $O(10^{13})$ e^+ nel 2018-2019.



Il Team di PADME

William & Mary College (USA)

Bodgan Wojtsekhowski

Todd Averett

Cornell University (USA)

James Alexander

Carissa Cesarotti
Andre Frankenthal
Maxim Perelstein
David Rubin
Peter Wittich

Roma (I)

Paolo Valente

Fabrizio Ameli
Danilo D'Angelo
Fabio Ferrarotto
Salvatore Fiore
Emanuele Leonardi
Massimo Nucetelli
Giovanni Organtini
Mauro Raggi
Francesco Safai Tehrani

Roma2 (I)

Clara Taruggi

LNF (I)

Paola Gianotti

Pietro Albicocco
Roberto Bedogni
Fabio Bossi
Bruno Buonomo
Emilio Capitolo
Cesidio Capoccia
Gianni Corradi
Riccardo De Sangro
Claudio Di Giulio
Giuseppe Finocchiaro
Luca Foggetta
Andrea Ghigo
Matteo Palutan
Marcello Piccolo
Gabriele Piperno
Ivano Sarra
Barbara Sciascia
Tommaso Spadaro
Eleuterio Spiriti

Sofia Univeristy (BG)

Venelin Kozhuharov

Georgy Georgiev
Ludmil Tsankov

Debrecen, MTA Atomki (H)

Attila Krasznahorkay

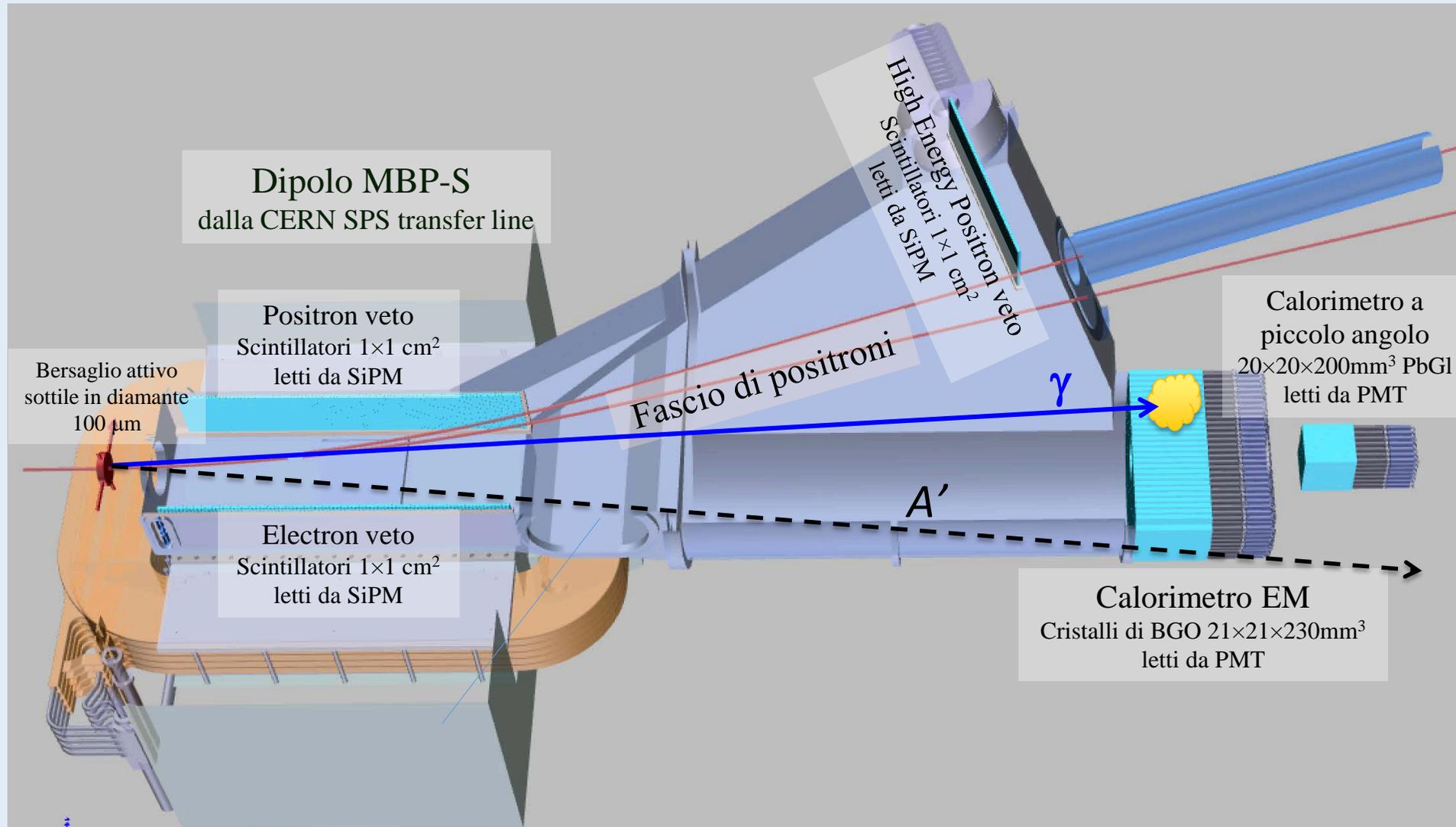
Matyas Hunyadi
Tamas Tornyai

Lecce (I)

Gabriele Chiodini

Anna Paola Caricato
Massimo Corrado
Pietro Creti
Giuseppe Fiore
Maurizio Martino
Giuseppe Maruccio
Anna Grazia Monteduro
Carlo Pinto
Viviana Scherini
Stefania Spagnolo

I rivelatori di PADME



Il bersaglio in diamante

- Il diamante ($Z=6$) è il materiale rigido con il miglior rapporto $e^e(\gamma\gamma)/\text{bremsstrahlung}$
- Misura la carica e la posizione del fascio
 - $O(10^4)$ e^+ /bunch @ 50 Hz
 - Risoluzione spaziale $<1\text{mm}$
 - Misura della carica con errore $<10\%$
- Diamante policristallino $20\times 20\text{mm}^2$ con spessore $50\text{-}100\mu\text{m}$.
- 19 strip di lettura per lato (X/Y) con passo 1mm.
- Le strip sono grafitate con laser per evitare la metallizzazione.
- I primi prototipi per PADME testati a Ottobre 2015 e Aprile 2016.

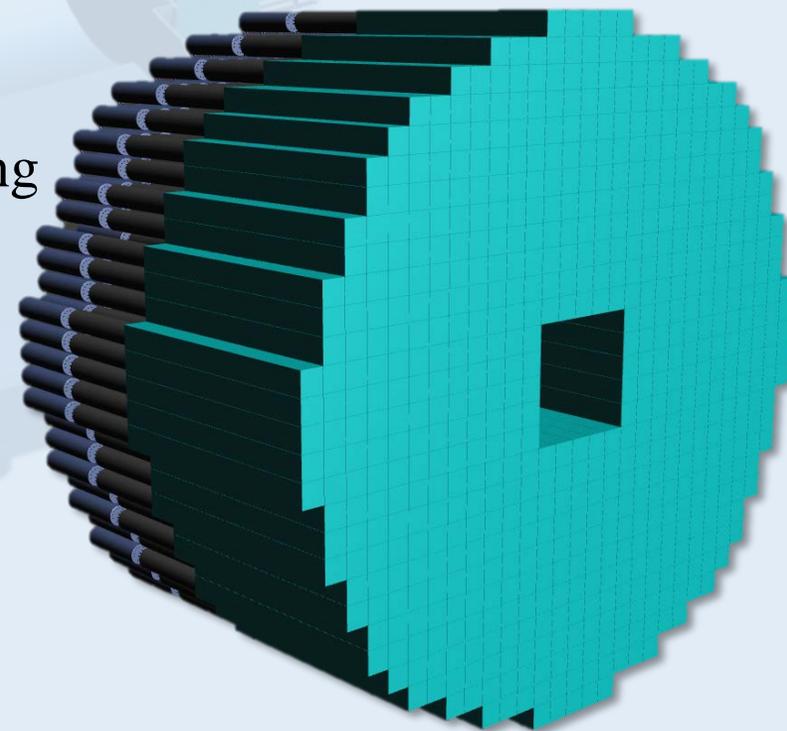


Il calorimetro elettromagnetico

- 616 cristalli di BGO
 - Recuperati da un end-cap EM dell'esperimento L3 (LEP)
 - Tagliati a misura $21 \times 21 \times 230 \text{mm}^3$
- BGO: alto LY, alta ρ , piccoli X_0 e MR, lungo τ_{decay}
- Calorimetro di forma cilindrica (R~300mm)
 - Buco centrale ($\sim 10 \times 10 \text{cm}^2$) per evitare pile-up di bremsstrahlung
 - Accettanza angolare: 20-75 mrad
 - Lettura con PMT da $\varnothing 19 \text{mm}$
- Performance attese:
 - $\sigma(E)/E < 2\%/\sqrt{E}$
 - $\sigma(\theta) < 2 \text{ mrad}$

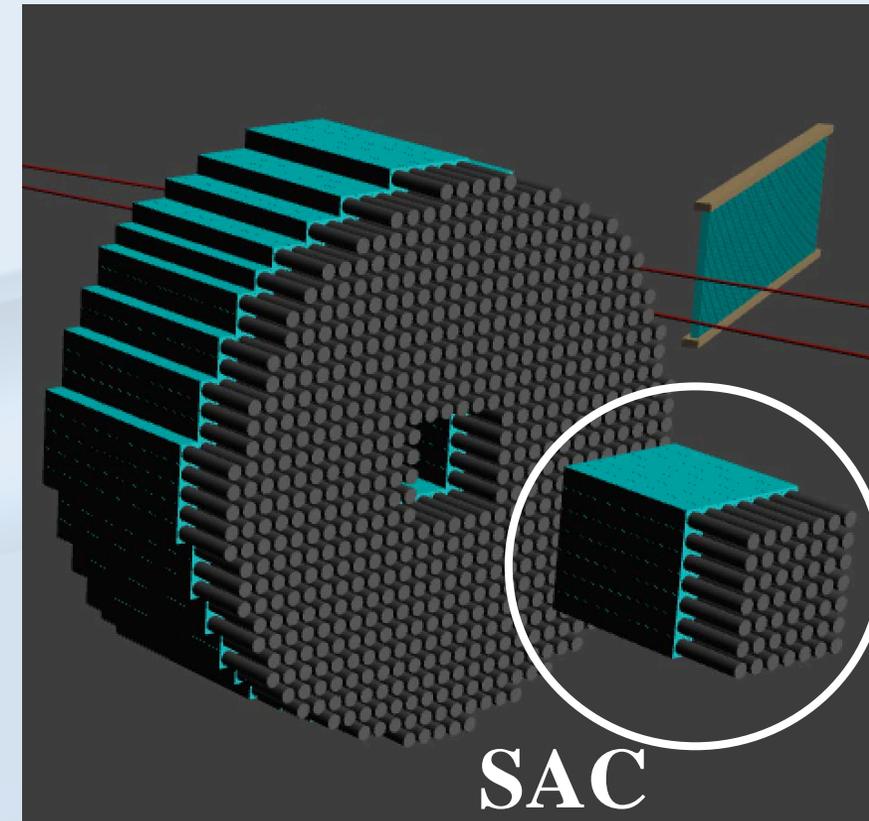


Vari prototipi testati alla BTF tra il 2015 e il 2017



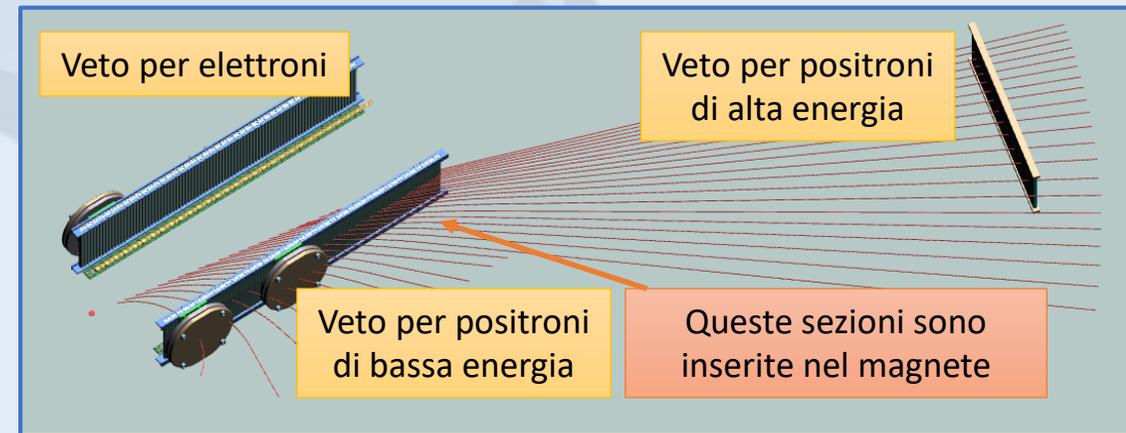
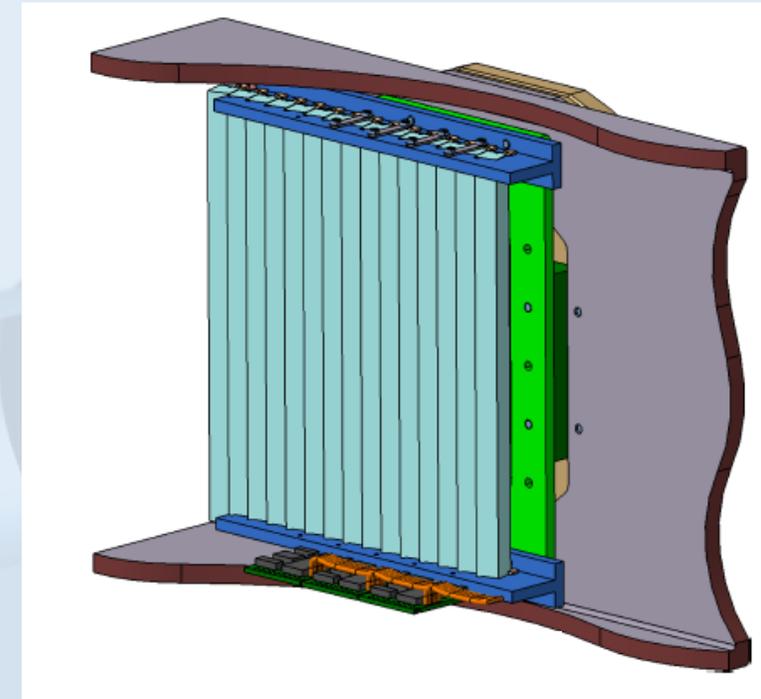
Il SAC (Small Angle Calorimeter)

- La rate di bremsstrahlung lungo l'asse del fascio è troppo alta per il BGO.
 - Tagliato un buco $\sim 10 \times 10 \text{cm}^2$ nel calorimetro EM.
 - Aggiunto un calorimetro veloce di piccolo angolo.
 - Tolleranza: ~ 10 cluster e.m. in 40ns.
- Realizzato con un radiatore Cherenkov letto da PMT ad alta velocità.
- 49 blocchi di vetro a piombo da $20 \times 20 \times 200 \text{mm}^3$
 - Recuperati dal calorimetro EM di Opal, cortesia di NA62.
- 25 blocchi di PbF_2 da $30 \times 30 \times 150 \text{mm}^3$



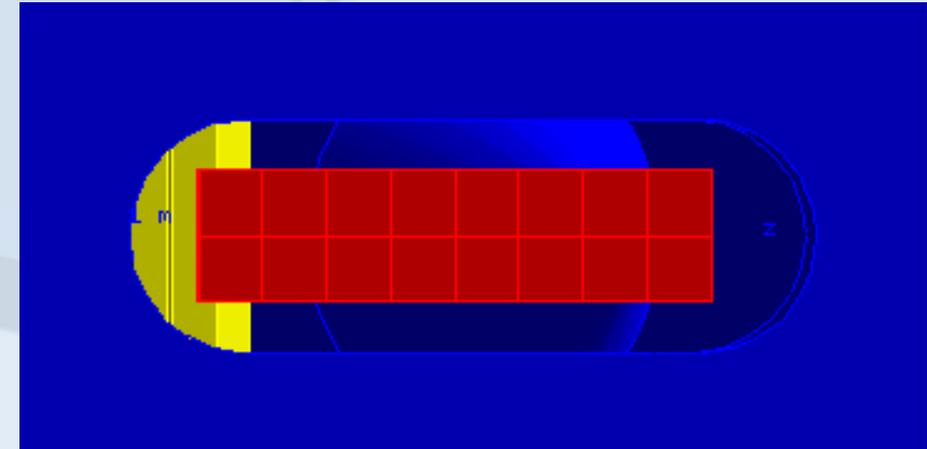
Sistema di veti per particelle cariche

- Il sistema di veti di PADME individua particelle cariche per ridurre i background dovuti a bremsstrahlung e scattering Bhabha.
- 3 rivelatori: elettroni, positroni a bassa energia, positroni ad alta energia.
- Barrette di scintillatore plastico
 - $10 \times 10 \times 184 \text{ mm}^3$
 - Lettura con SiPM
 - Risoluzione temporale $< 300 \text{ ps}$.
 - Misura dell'impulso basata sulla posizione di impatto lungo Z.
 - Efficienza $> 99.5\%$ per le MIP.



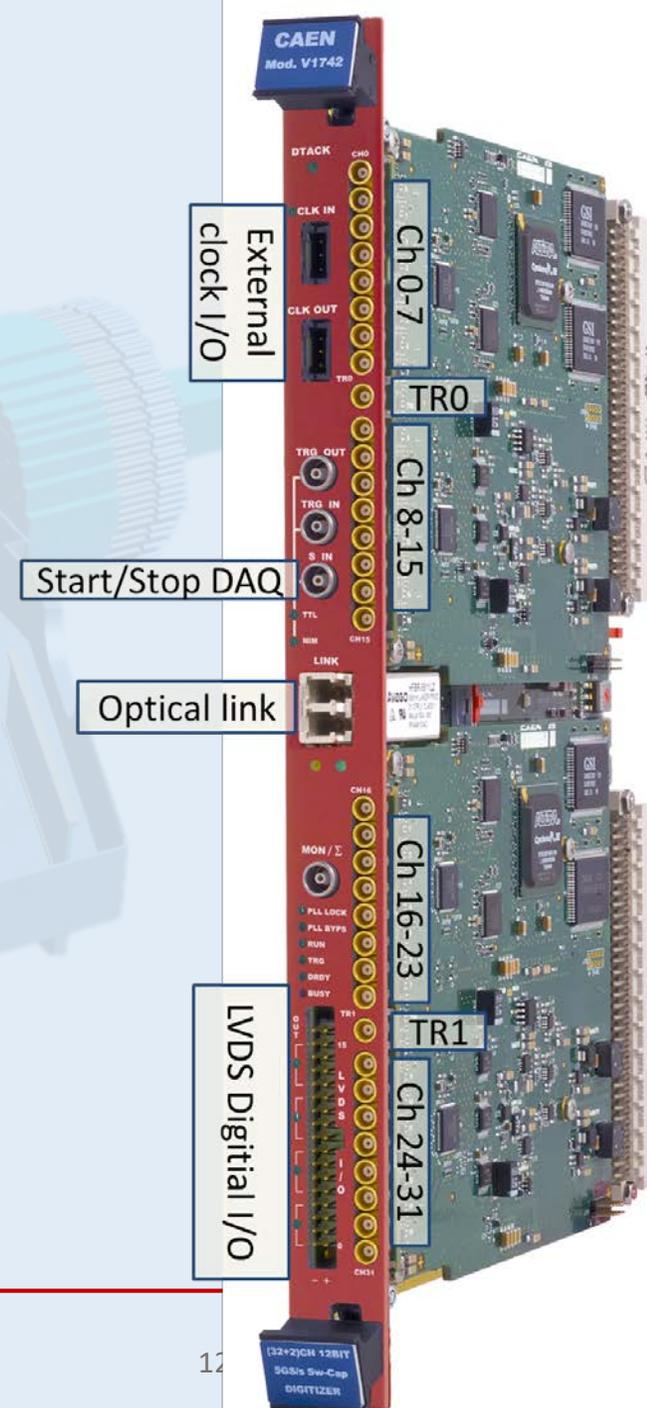
Il TimePix

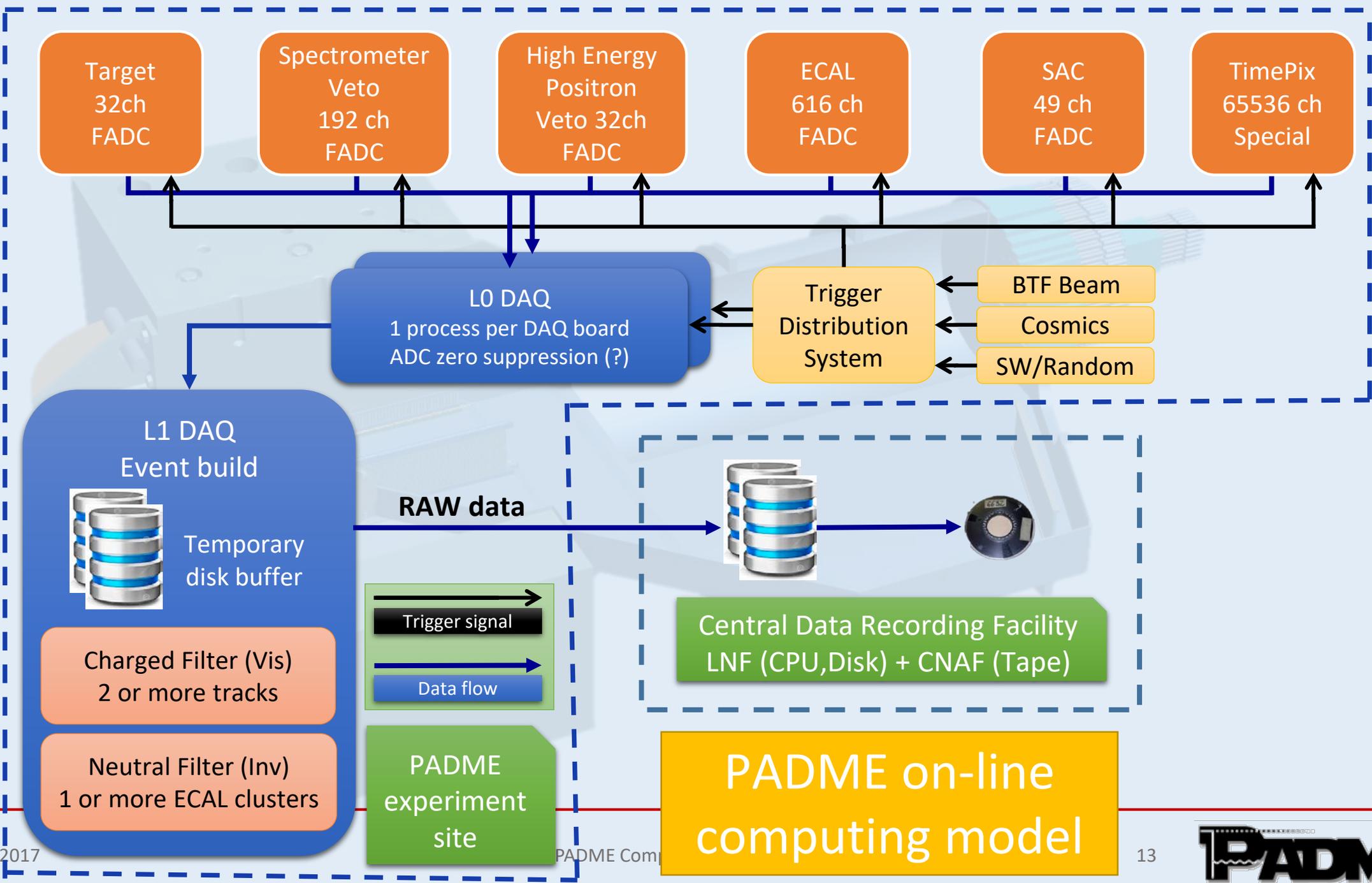
- TimePix3: chip in Si da $14.1 \times 14.1 \text{ mm}^2$
- 256×256 pixels da $55 \times 55 \mu\text{m}^2$
- 8×2 chips di fronte al foro di uscita del fascio primario
- Caratterizzazione del fascio in uscita da PADME.
- Studio di eventi di bremsstrahlung a bassissima energia.



La scheda CAEN V1742

- Scheda ADC “switched capacitor” basata sul chip DRS4
- 32 canali (+ 2×2 trigger)
- Dinamica: 1 Vpp su 12 bit
- 1024 sample @ 5, 2.5 o 1 GHz
- Dead-time: 181 μ s
- Lettura via fibra ottica con controller PCI A2818/A3818
 - Fino a 4 canali ottici, 8 schede per canale, 80 MB/s per canale
- Usata per acquisire dati da tutti i detector (escluso il TimePix)





Target
32ch
FADC

Spectrometer
Veto
192 ch
FADC

High Energy
Positron
Veto 32ch
FADC

ECAL
616 ch
FADC

SAC
49 ch
FADC

TimePix
65536 ch
Special

LO DAQ
1 process per DAQ board
ADC zero suppression (?)

Trigger
Distribution
System

BTF Beam
Cosmics
SW/Random

L1 DAQ
Event build

Temporary
disk buffer

Charged Filter (Vis)
2 or more tracks

Neutral Filter (Inv)
1 or more ECAL clusters

RAW data

Central Data Recording Facility
LNFS (CPU, Disk) + CNAF (Tape)

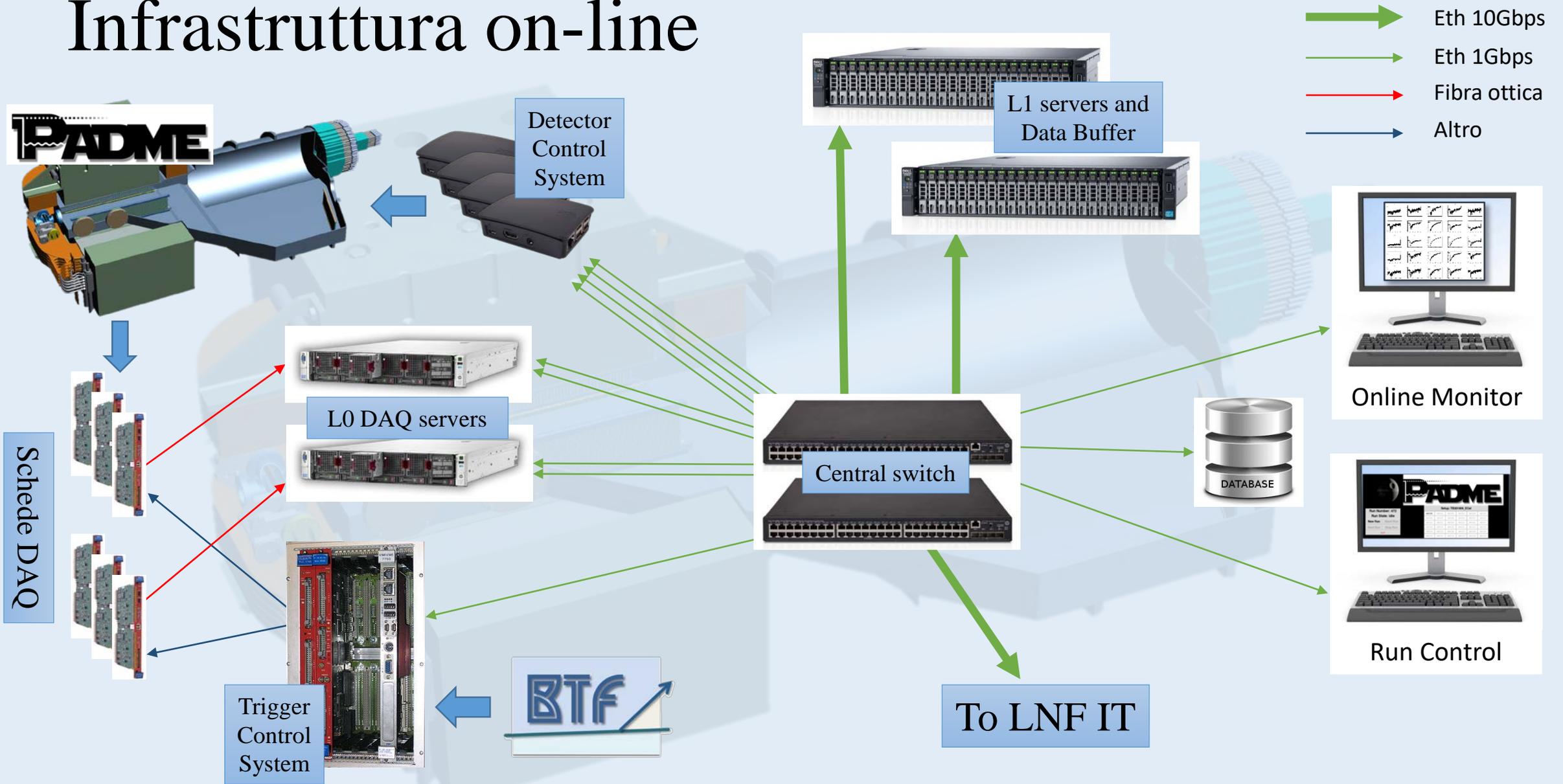
Trigger signal

Data flow

PADME
experiment
site

PADME on-line
computing model

Infrastruttura on-line



Il DAQ

- L0: raccolta dati
 - Un processo di acquisizione per singola scheda ADC/chip TimePix
 - Frequenza di trigger @ 50Hz (più cosmici)
 - Time tag di evento (utilizzato per l'event build)
 - Correzioni del DRS4
 - Possibile zero suppression (se compatibile coi limiti di tempo)
 - Ogni processo scrive un file di dati indipendente sul disco di buffer
- L1: event build
 - Merge dei dati di tutte le schede
 - Applicazione della zero suppression (se non fatta dal L0)
 - Aggiunta delle informazioni di trigger e di fascio
 - Algoritmi di filtering (in tagging mode)
 - Scrittura dei dati RAW su disco di buffer
- Database
 - Server MySQL locale per run configuration e logging, job e slow control e file tracking

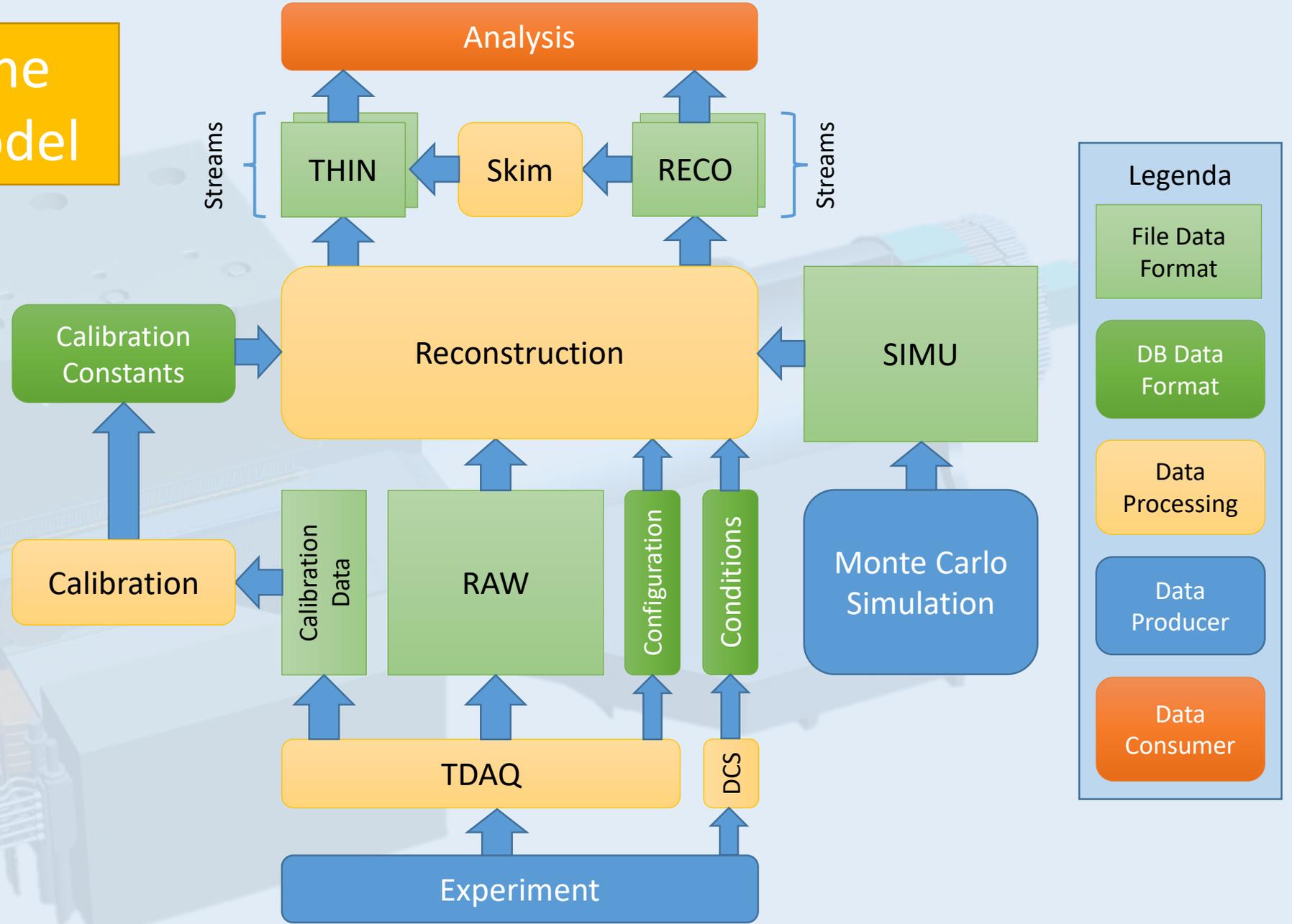
Rate di acquisizione dati

Detector	DAQ in MiB/s	DAQ out MB/s	RAW data GB/d	RAW data TB/365d	RAW event KB/event
Target	2.6	1.3	112	40	24.6
Calorimeter	52.8	2.7	233	85	52.8
SAC	5.3	1.1	95	34	21.1
E veto	7.9	0.6	52	19	11.6
P veto	7.9	1.3	112	41	25.6
HEP veto	2.6	1.2	104	36	22.5
TimePix	1.4	1.5	130	47	29.3
Total	80.6	9.7	838	303	187.5

Incluso: zero-suppression (-90%), sample ADC dei trigger (+25%) e flusso autopass per l'1% degli eventi (+10%).

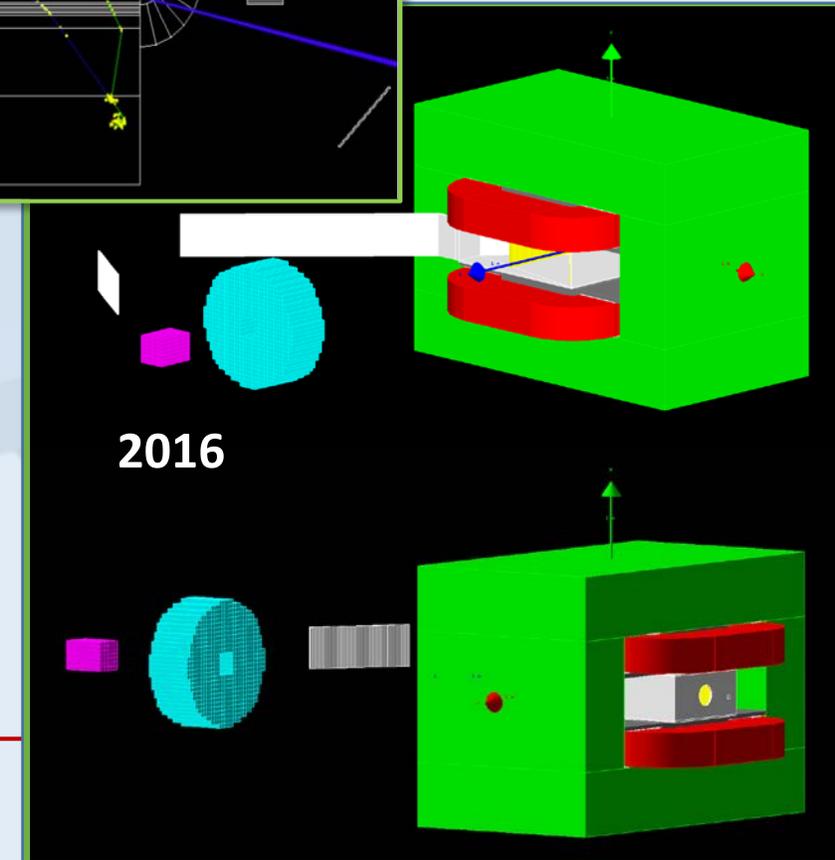
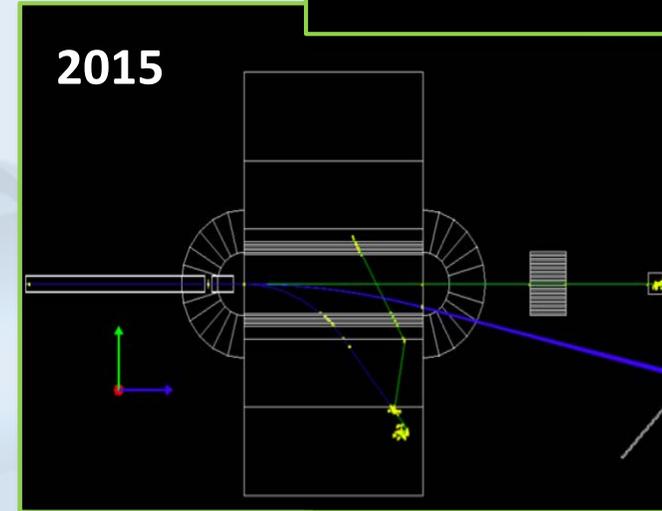
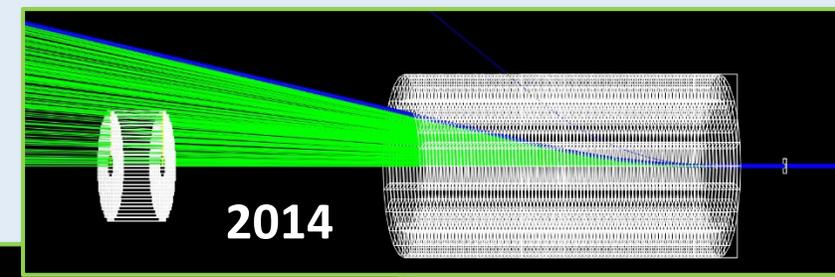
Non incluso: compressione applicata da ROOT (al testbeam \approx -50%)

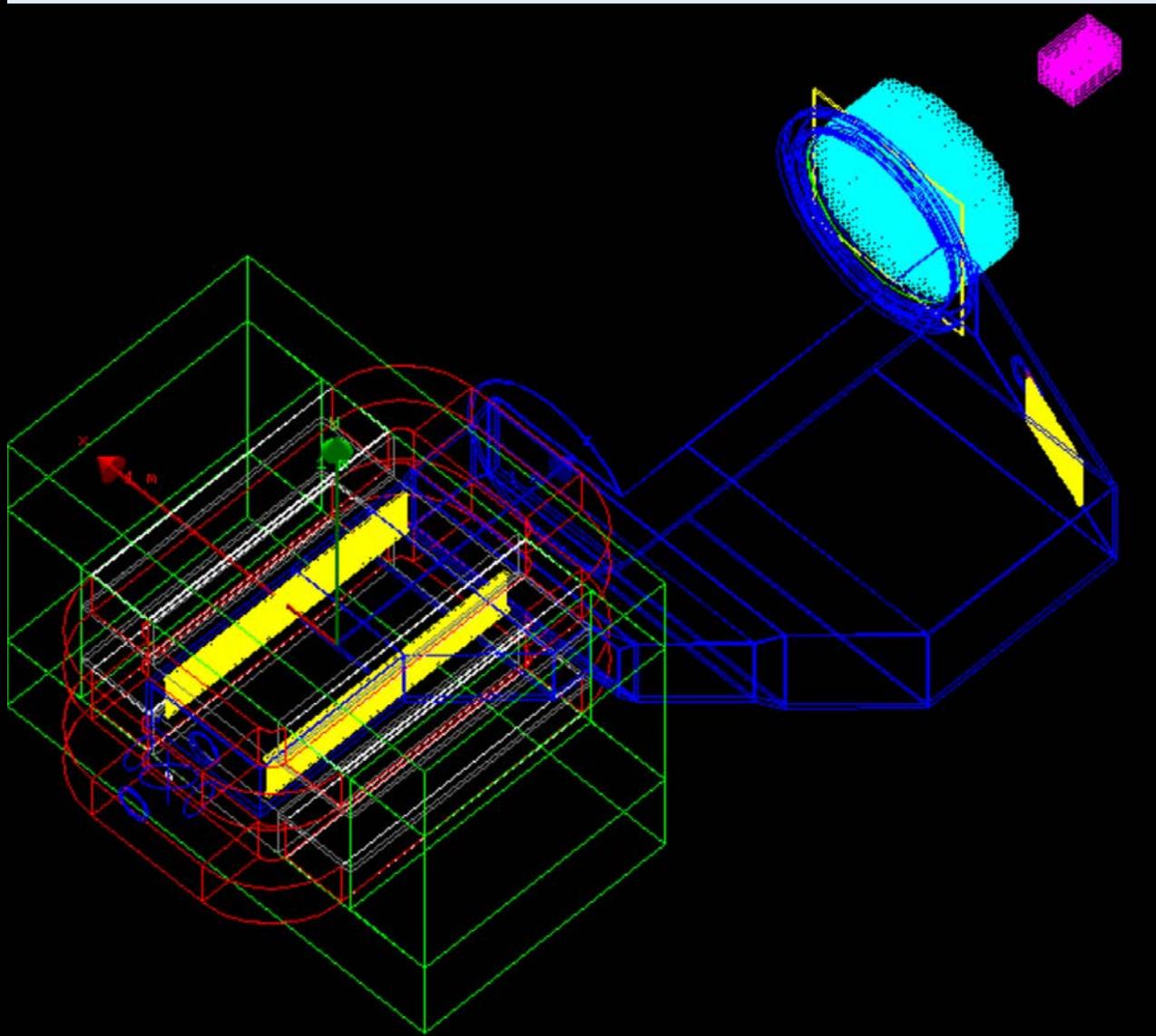
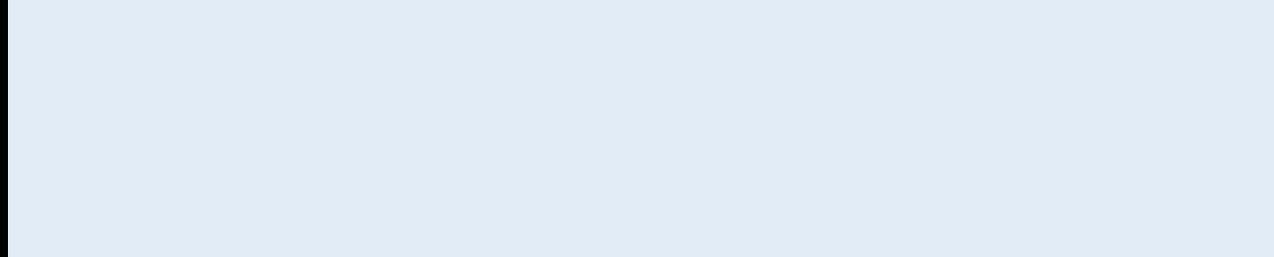
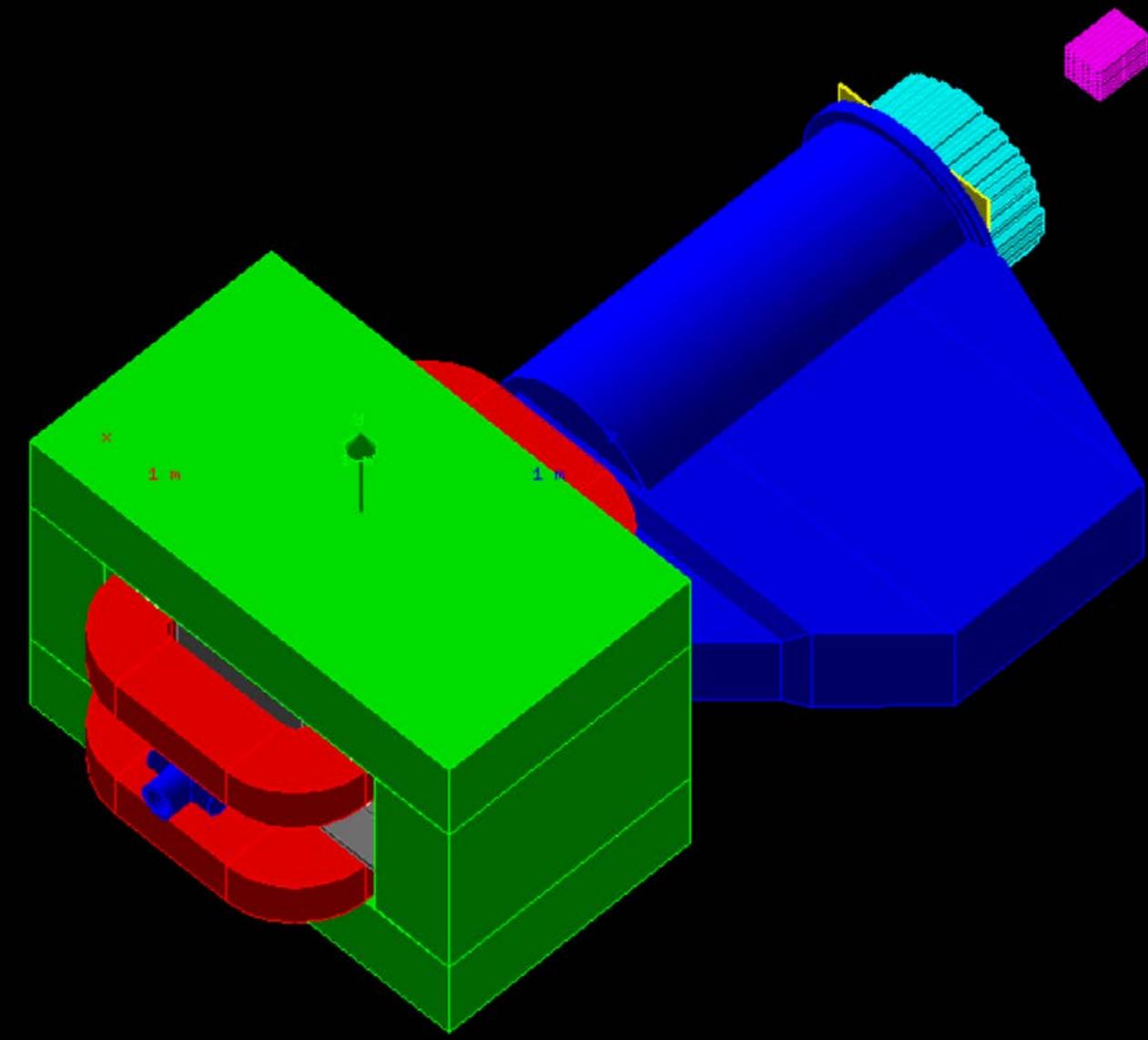
PADME off-line computing model

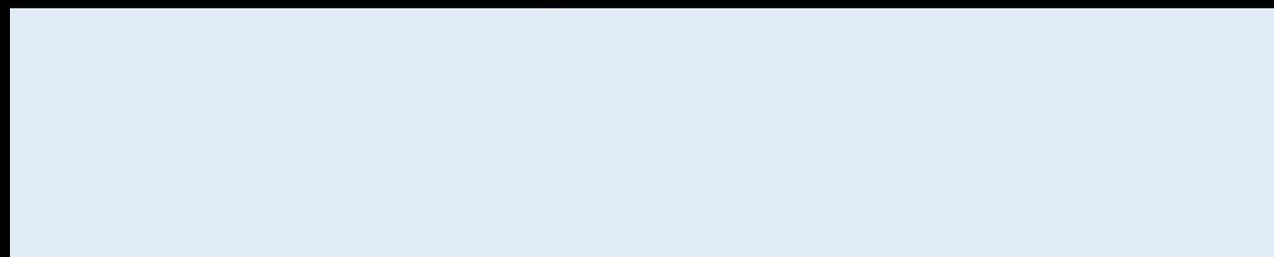
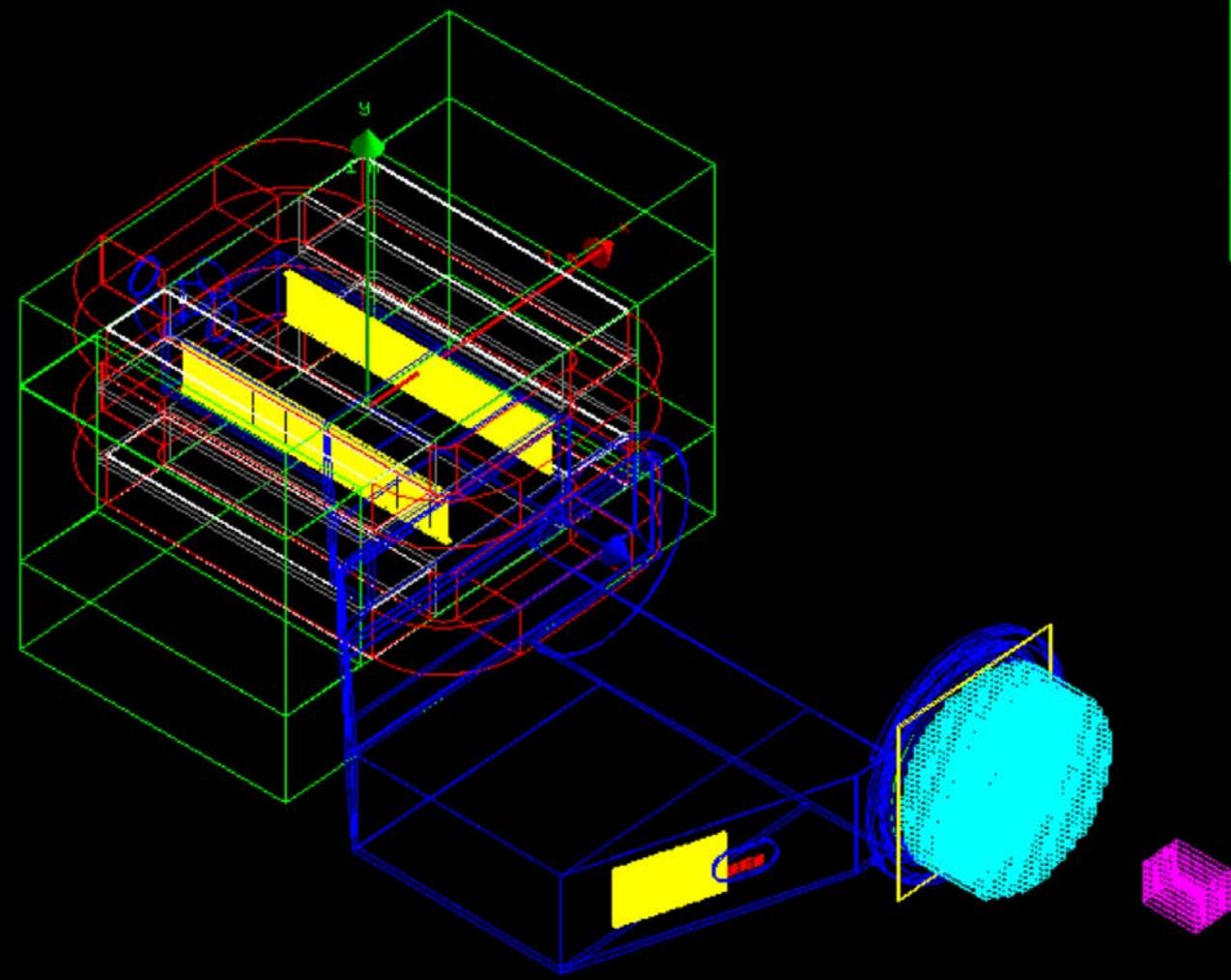
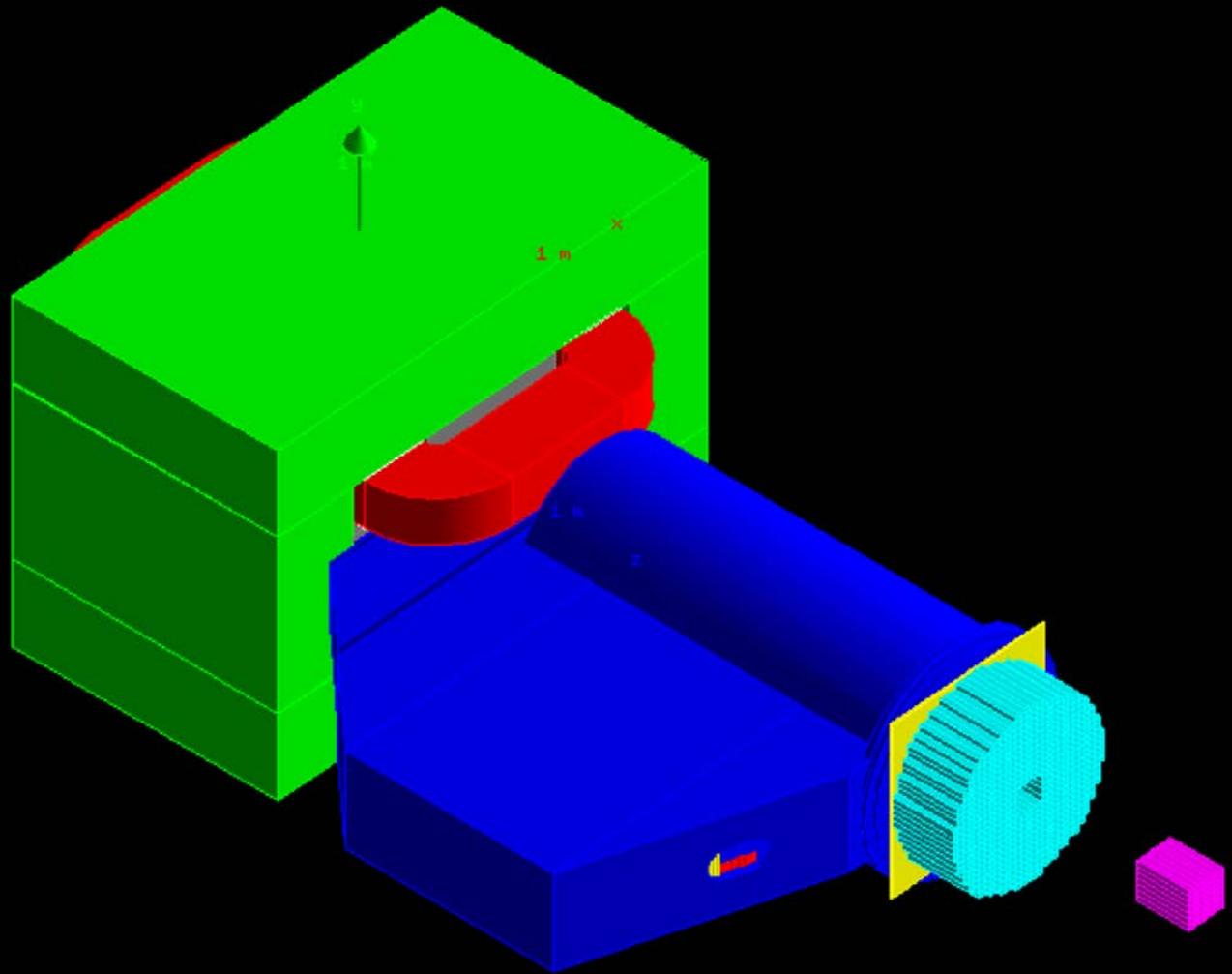


Simulazione con GEANT4

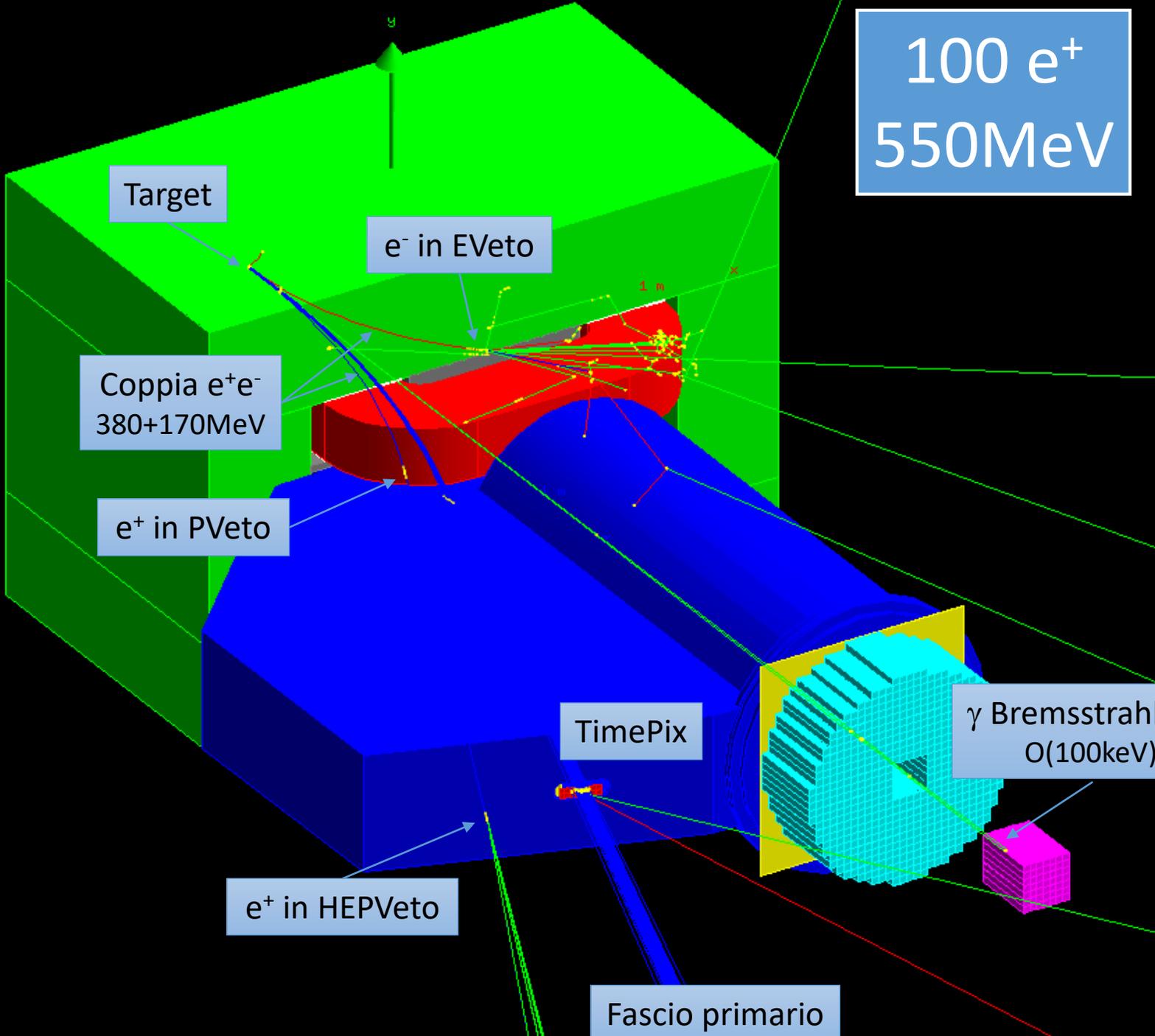
- Sin dalle prime fasi del progetto è stata disponibile una simulazione dell'intero setup sperimentale basata su GEANT4.
- Da allora ha seguito da vicino l'evoluzione del disegno e le scelte tecniche della collaborazione.
- Questa simulazione è stata usata per verificare gli effetti delle soluzioni proposte sulla risoluzione della misura della massa mancante e per ottimizzare i parametri costruttivi







100 e⁺
550MeV



Target

e⁻ in EVeto

Coppia e⁺e⁻
380+170MeV

e⁺ in PVeto

TimePix

γ Bremsstrahlung
O(100keV)

e⁺ in HEPVeto

Fascio primario

PADME MonteCarlo

- Simulazione realistica del fascio BTF

- Durata del bunch, spread di energia, emittanza, beam spot, micro-bunching
- Tutti i parametri del fascio sono controllati da datacard

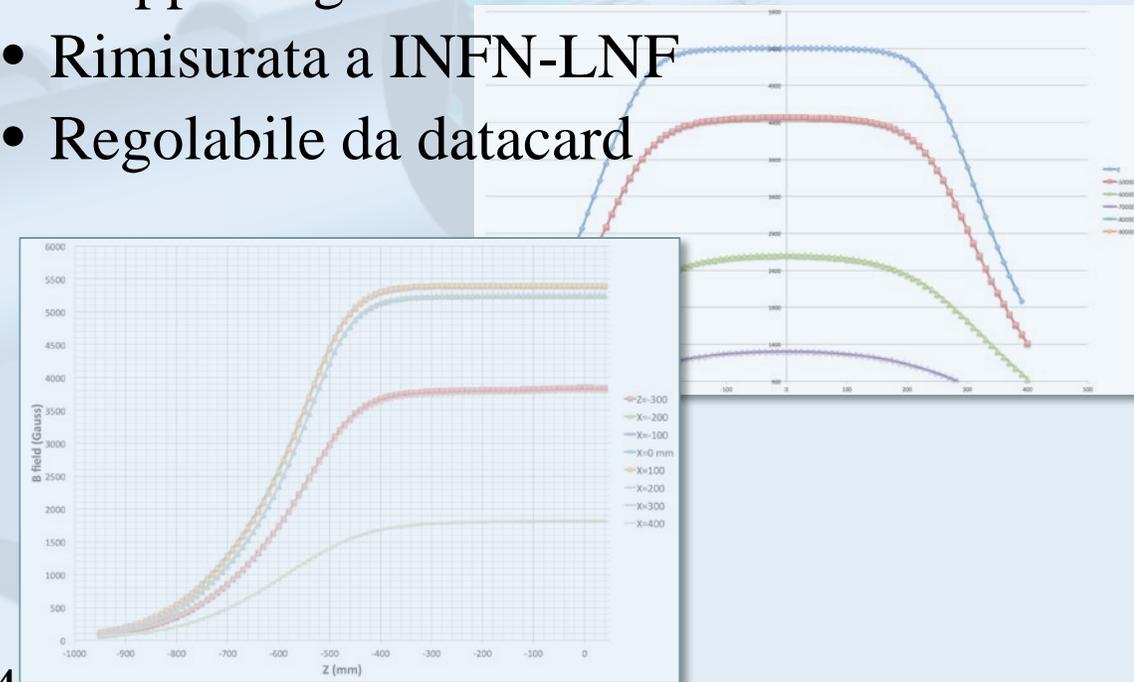
```
/beam/momentum 550. MeV
/beam/n_e+_per_bunch 5000
/beam/bunch_time_length 40. ns
/beam/position_x 0. cm
/beam/position_y 0. cm
/beam/position_x_spread 1. mm
/beam/position_y_spread 1. mm
/beam/direction 0. 0. 1.
...
```

- Cinematica

- Eventi di e^+ su bersaglio simulati da GEANT4
- Generatore dedicato per eventi di annichilazione con produzione di A'
- CalcHEP per i processi di background $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma(\gamma)$

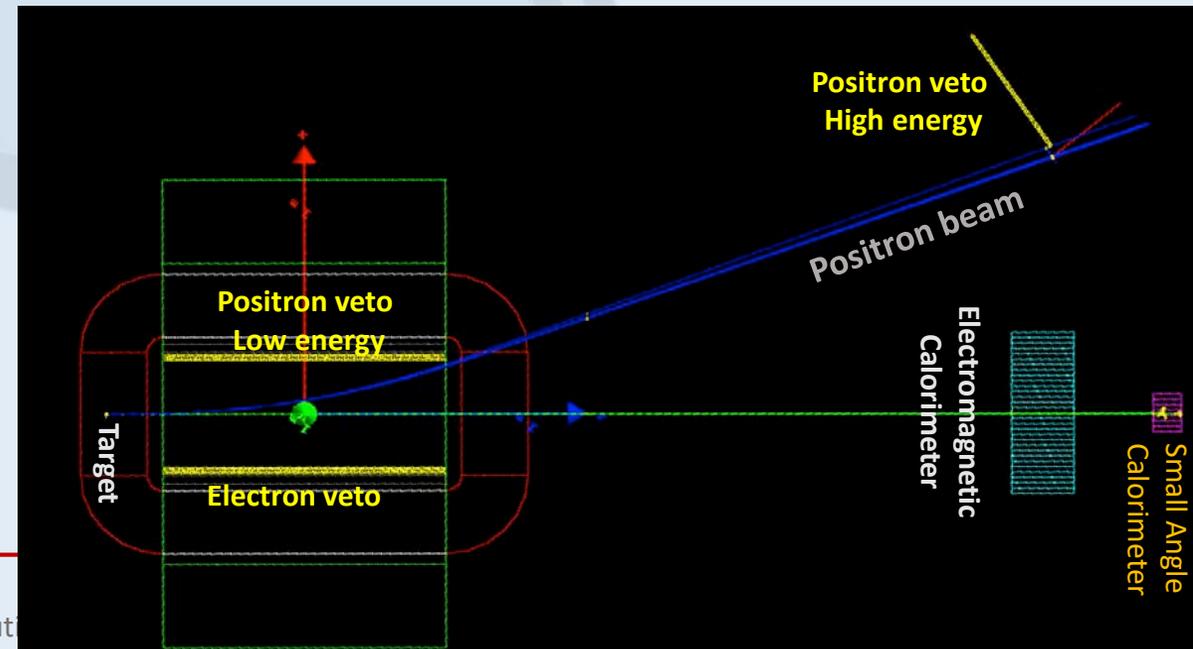
- Mappa realistica del campo magnetico

- Mappa originale dal CERN
- Rimisurata a INFN-LNF
- Regolabile da datacard



Simulazione del rivelatore

- Tutte le parti attive dell'esperimento sono completamente modellate e simulate
 - Bersaglio in diamante
 - Barrette di scintillatore dei veti
 - Cristalli di BGO del calorimetro EM
 - Radiatori Cherenkov del SAC
 - Chip di Si del TimePix3
- Tutti i parametri costruttivi rilevanti sono modificabili da datacard
 - Posizioni relative dei rivelatori
 - Dimensioni del bersaglio, dei cristalli di BGO, delle barrette dei veti
 - Spessore della vernice sui cristalli di BGO
 - ...
- Le strutture passive sono quasi complete
 - Giogo e bobine del magnete
 - Camera di vuoto
 - Strutture di supporto dei veti, del bersaglio e del TimePix3



Parametri di simulazione

- L'evento di PADME consiste in un bunch di $O(5000)$ e^+ da 550MeV distribuiti su 40ns.
- Il tempo di simulazione di 1 evento è attualmente di 2.9s con un core non recentissimo (Xeon E5-4610 a 2.3GHz)
 - Forte impatto (1.2s) dall'interazione tra tracking in campo magnetico e geometria complicata della camera di vuoto
- Gli hit prodotti sono dominati da Bersaglio (155KB/evt), SAC (160KB/evt) e TimePix (190KB/evt)
- Salvando solo il risultato della digitizzazione: 10KB/evt
 - ...o “2 byte per evento di fisica” come ama dire il nostro spokesman

Ricostruzione

- La ricostruzione di PADME consiste attualmente in vari pacchetti privati che studiano determinate caratteristiche sperimentali a partire dal MC o dai dati raccolti nei testbeam.
- Esiste un framework di ricostruzione che stiamo (lentamente) popolando con i vari algoritmi esistenti.
 - P.es. gli algoritmi di clustering nel calorimetro EM presentati a CHEP
- L'output della ricostruzione (RECO) non includerà le waveform ADC
 - dimensione dell'evento sostanzialmente inferiore ai dati RAW (<10KB/evt)
- Il formato RECO è basato su ROOT ed è direttamente accessibile per l'analisi

Off-line Computing (1)

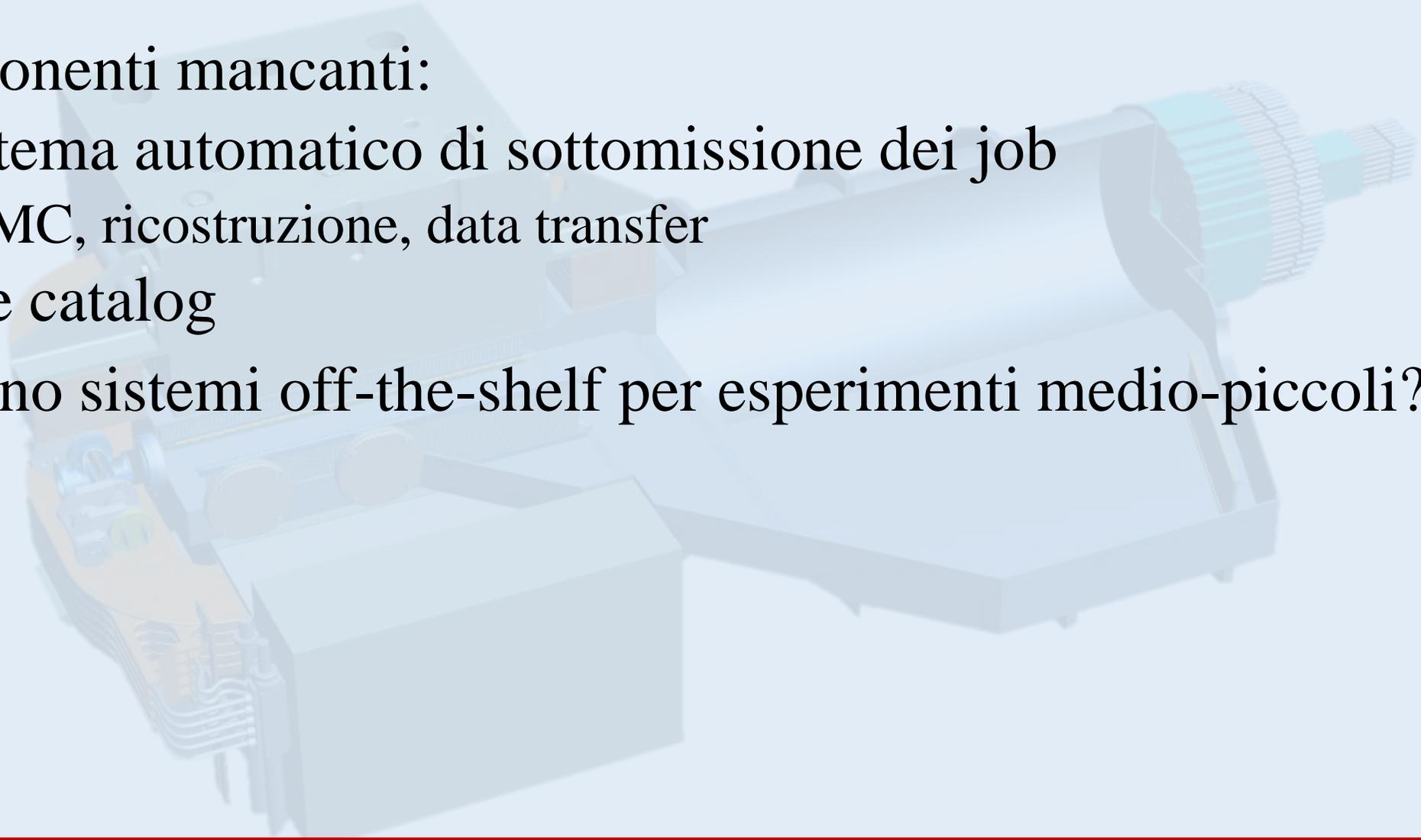
- Le risorse di calcolo e di storage off-line di PADME sono integrate nella GRID
- La VO “vo.padme.org” è stata creata sul VOMS del CNAF e registrata su EDG
- Area CVMFS /cvmfs/padme.infn.it creata al CNAF
- Il software di PADME è stato compilato in versione “GRID” utilizzando le librerie GEANT4 e ROOT disponibili sotto CVMFS
 - In corso la validazione del MC
- Risorse di calcolo off-line attuali:
 - a) Tier2 di LNF: 1000 HEPSpec, 60TB disco
 - b) CNAF: 100 TB nella tape library

Off-line Computing (2)

- Central Data Recording
 - Pull dei dati RAW dal buffer di disco on-line
 - Scrittura sul sistema di storage a dischi del Tier2 a LNF
 - Copia immediata sulla tape library al CNAF
 - Prototipo funzionante, usato per trasferire i dati dei testbeam
- Ricostruzione
 - Eseguita sulla farm del Tier2 a LNF
 - Lettura dati RAW e scrittura dati RECO sul disk storage a LNF
 - Copia dati RECO sulla tape library al CNAF
- Analisi
 - Dimensione dati RECO molto ridotta (<10KB/evt)
 - Possibile analisi sia sulla farm del Tier2, sia su postazioni individuali
- Database
 - Server MySQL dei servizi IT di LNF disponibile
 - Schema e software in via di sviluppo

Off-line Computing (3)

- Componenti mancanti:
 - Sistema automatico di sottomissione dei job
 - MC, ricostruzione, data transfer
 - File catalog
- Esistono sistemi off-the-shelf per esperimenti medio-piccoli?

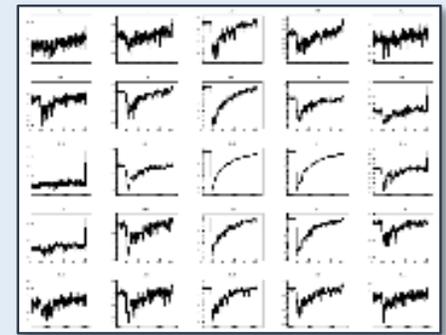


Conclusioni

- PADME cercherà il Fotone Oscuro con masse fino a 24 MeV nel canale di annichilazione $e^+e^- \rightarrow A'\gamma$ usando la Beam Test Facility di Frascati.
- La presa dati inizierà nel 2018 col goal di raccogliere 10^{13} e^+ su bersaglio in 2 anni, per un totale di circa 300TB di dati RAW.
- Il computing model dell'esperimento prevede l'utilizzo di risorse e servizi
 - alla BTF - DAQ (L0+L1) e buffer di disco
 - al Tier2 LNF - farm computing e disco
 - al CNAF - nastri e servizi GRID
- Ottimo supporto da parte di Elisabetta Vilucchi (Tier2 LNF), dello staff IT di LNF e del team del CNAF
- Inestimabili le chiacchierate con Alessandro De Salvo



GRAZIE



PADME

Run Number: 472
Run State: idle

New Run Abort Run
Start Run Stop Run

Setup: TB201606_ECal

ADC00	ADC01	ADC02	ADC03	ADC04	ADC05
ADC06	ADC07	ADC08	ADC09	ADC10	ADC11
ADC12	ADC13	ADC14	ADC15	ADC16	ADC17
ADC18	ADC19	ADC20	ADC21	ADC22	ADC23
ADC24	ADC25	ADC26	ADC27	ADC28	ADC29
ADC30	ADC31	ADC32	ADC33	ADC34	ADC35

