

Machine Learning e Polarimetria X:

un nuovo algoritmo per la ricostruzione delle tracce nei Gas Pixel Detector

Nicolò Cibrario

Università degli Studi di Torino

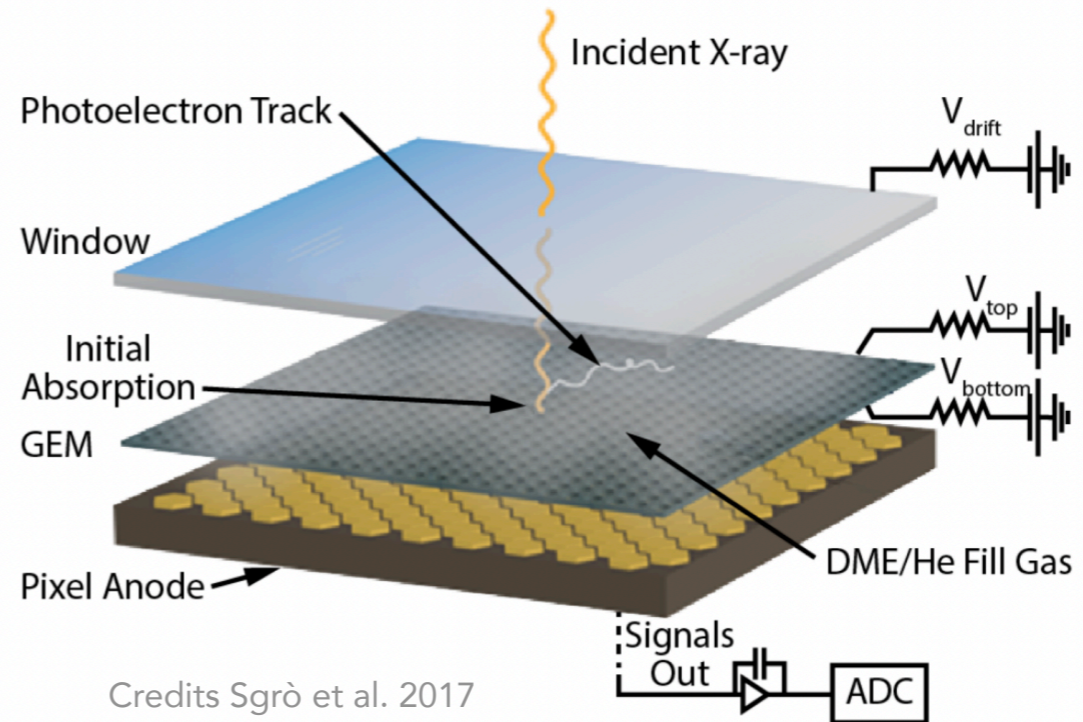
nicolo.cibrario@unito.it

Gas Pixel Detector

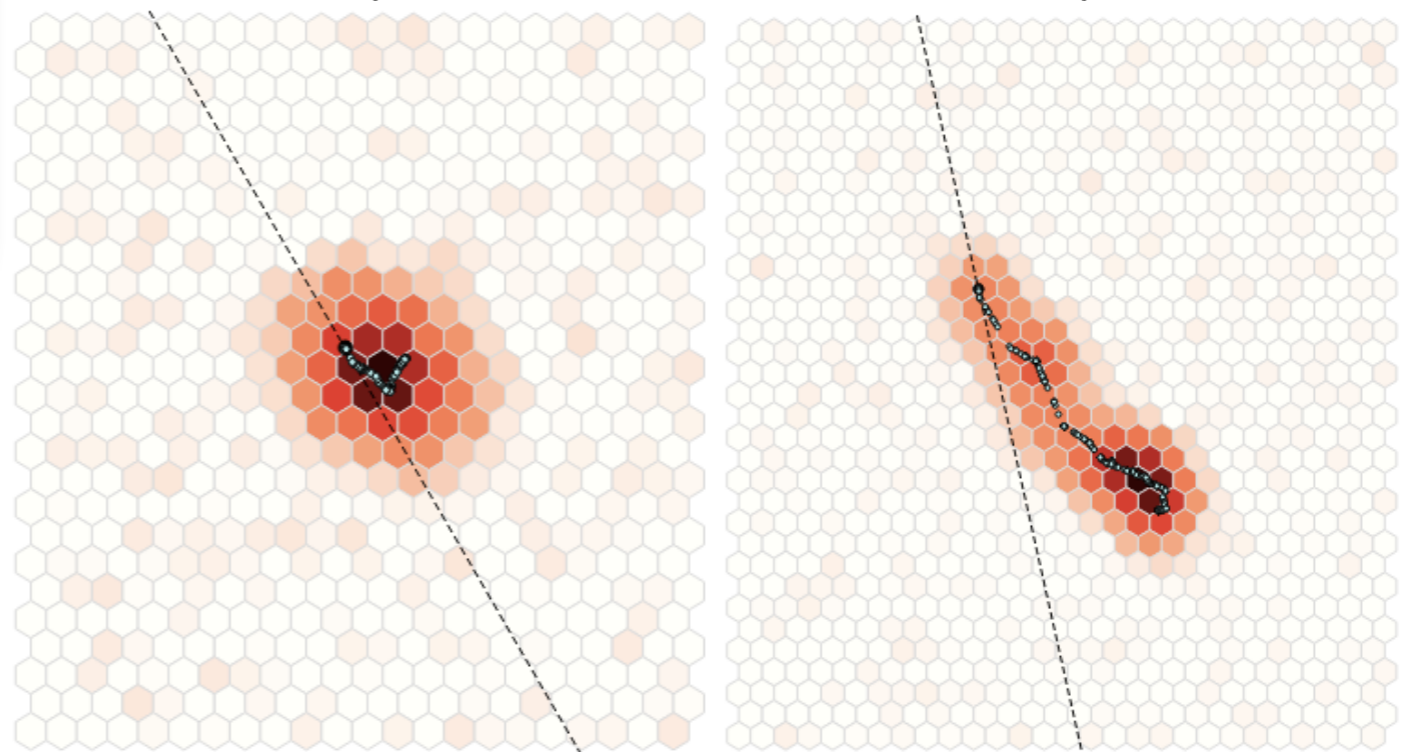
Detector a bordo dell'Imaging X-ray
Polarimetry Explorer (IXPE)

Testato sul CubeSat PolarLight e sarà a
bordo dell'enhanced X-ray Timing and
Polarimetry mission (eXTP)

Range di energia del GPD:
2-8 keV

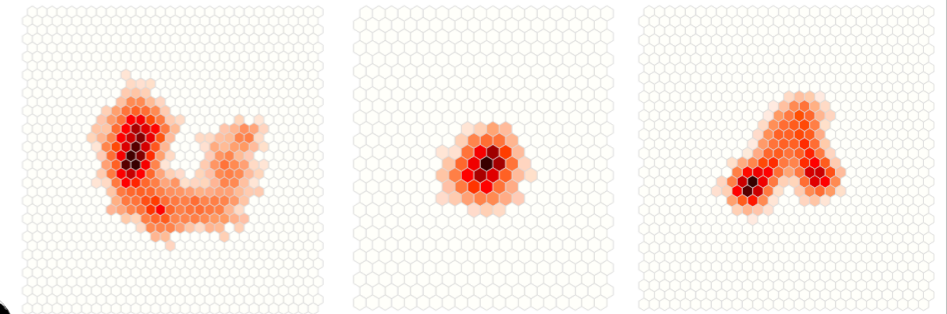
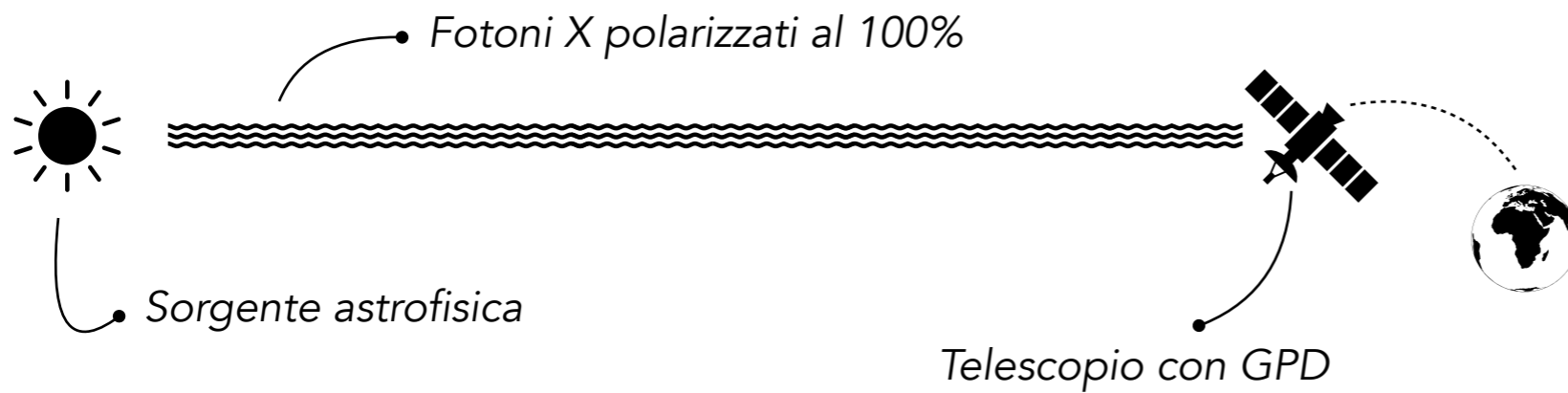


Tracce di foto-elettroni prodotti da fotoni di
3keV e 7keV

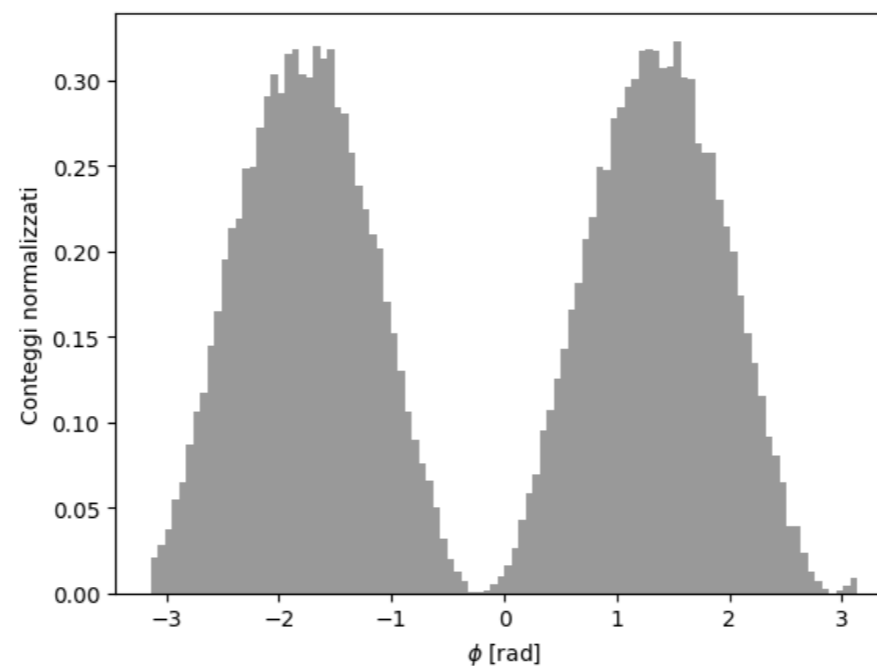


Dalla traccia alla polarizzazione

$$\frac{d\sigma_c^k}{d\Omega} \propto Z^5 E^{-\frac{7}{2}} \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \phi}{(1 + \beta \cos \theta)^4}$$

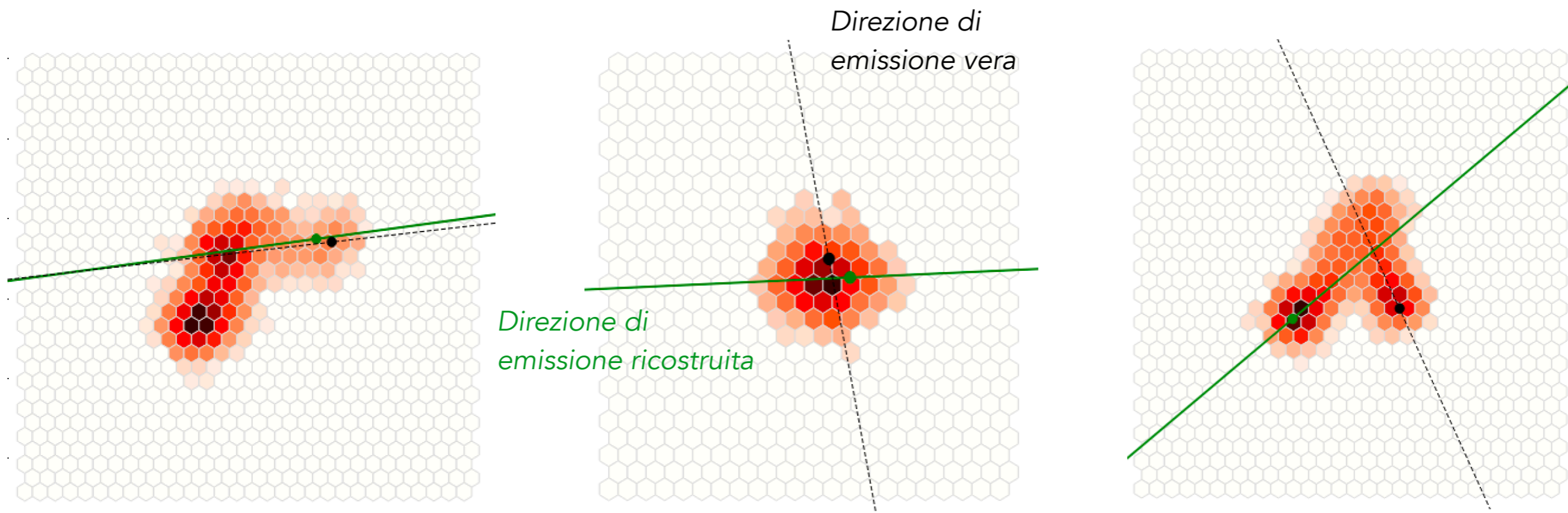


Distribuzione degli angoli di emissione dei foto-elettroni per un polarimetro ideale



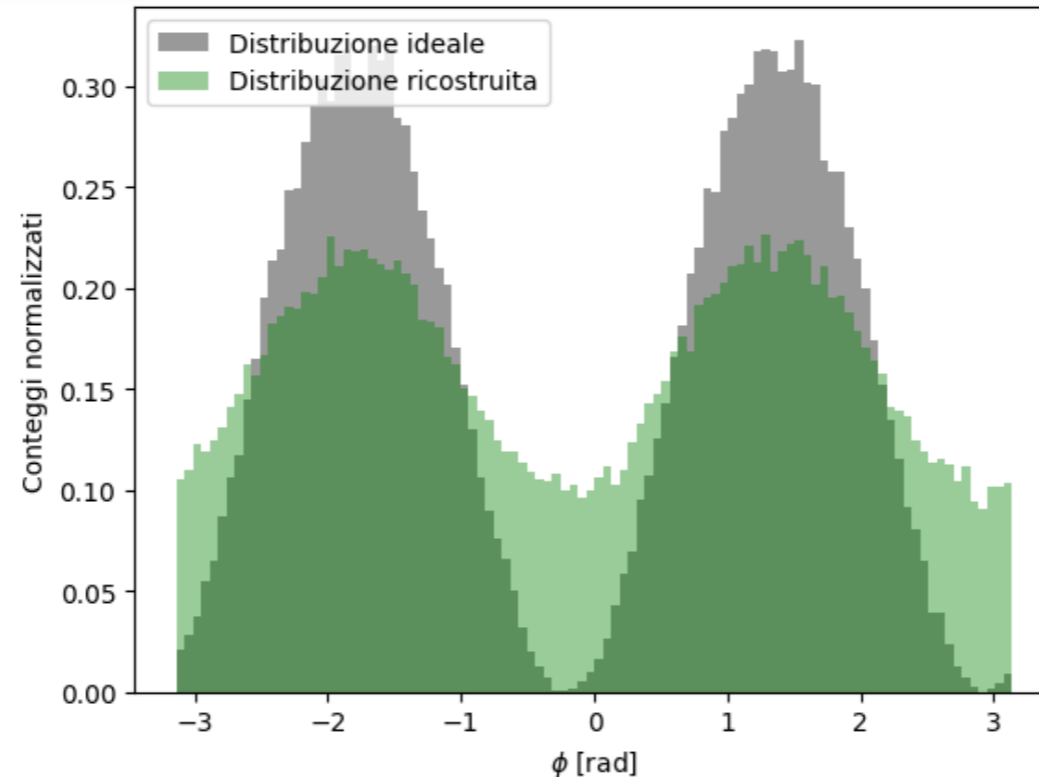
Ricostruzione della traccia

Algoritmo sviluppato dalla collaborazione IXPE: Analisi dei Momenti
Ricostruzione analitica dei parametri della traccia

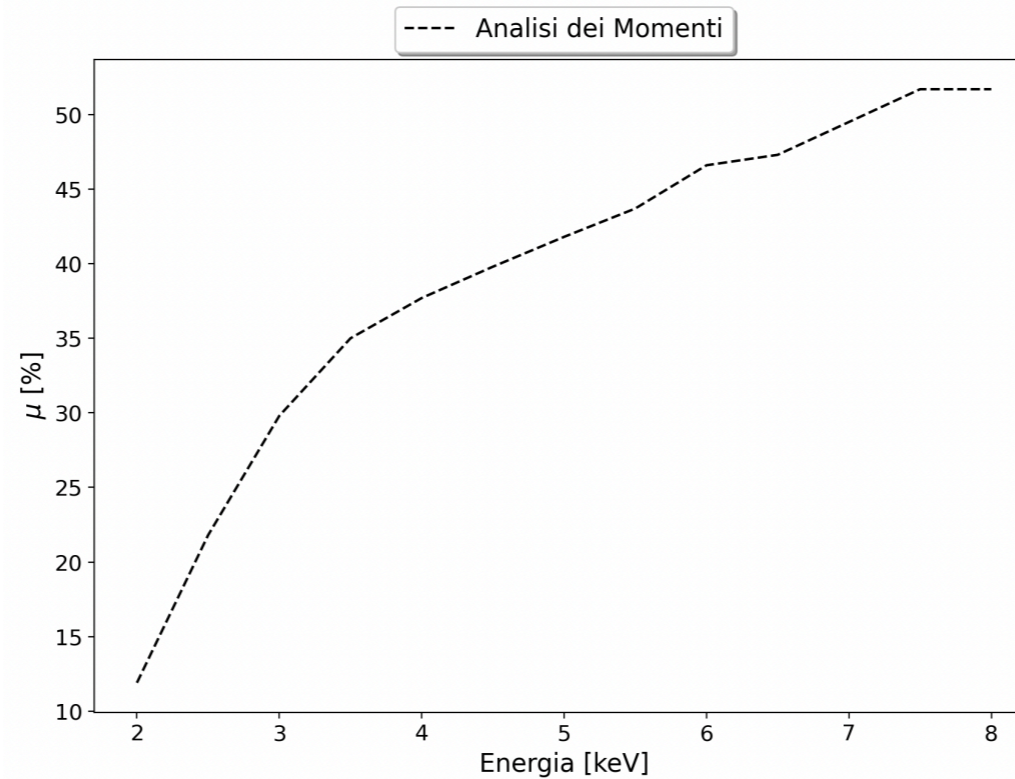


La ricostruzione dell'angolo di emissione ϕ è dipendente dalla qualità della ricostruzione del punto di impatto

Ricostruzione imperfetta: conseguenza 1

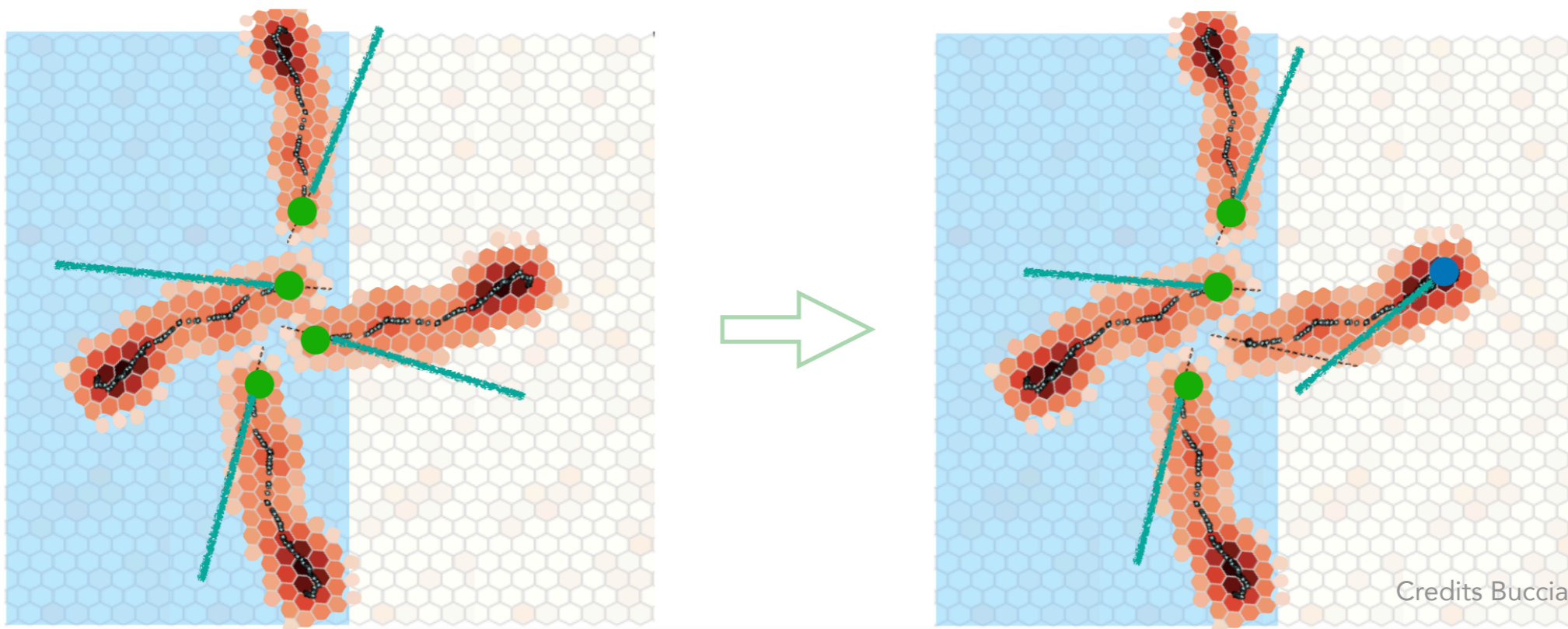


Fattore di modulazione: frazione di polarizzazione ricostruita per un fascio polarizzato al 100%

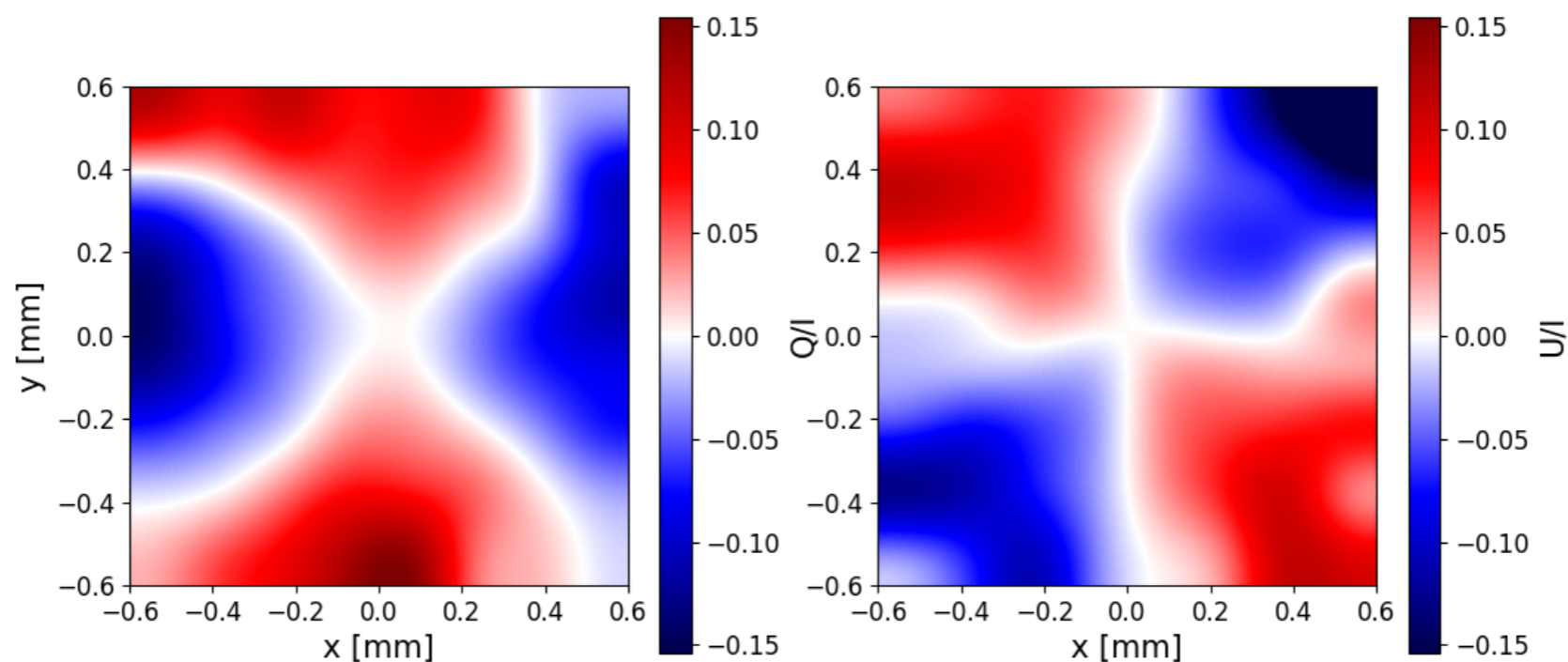


Ricostruzione imperfetta: conseguenza 2

Polarization Leakage: effetto causato dall'errata ricostruzione del punto di impatto

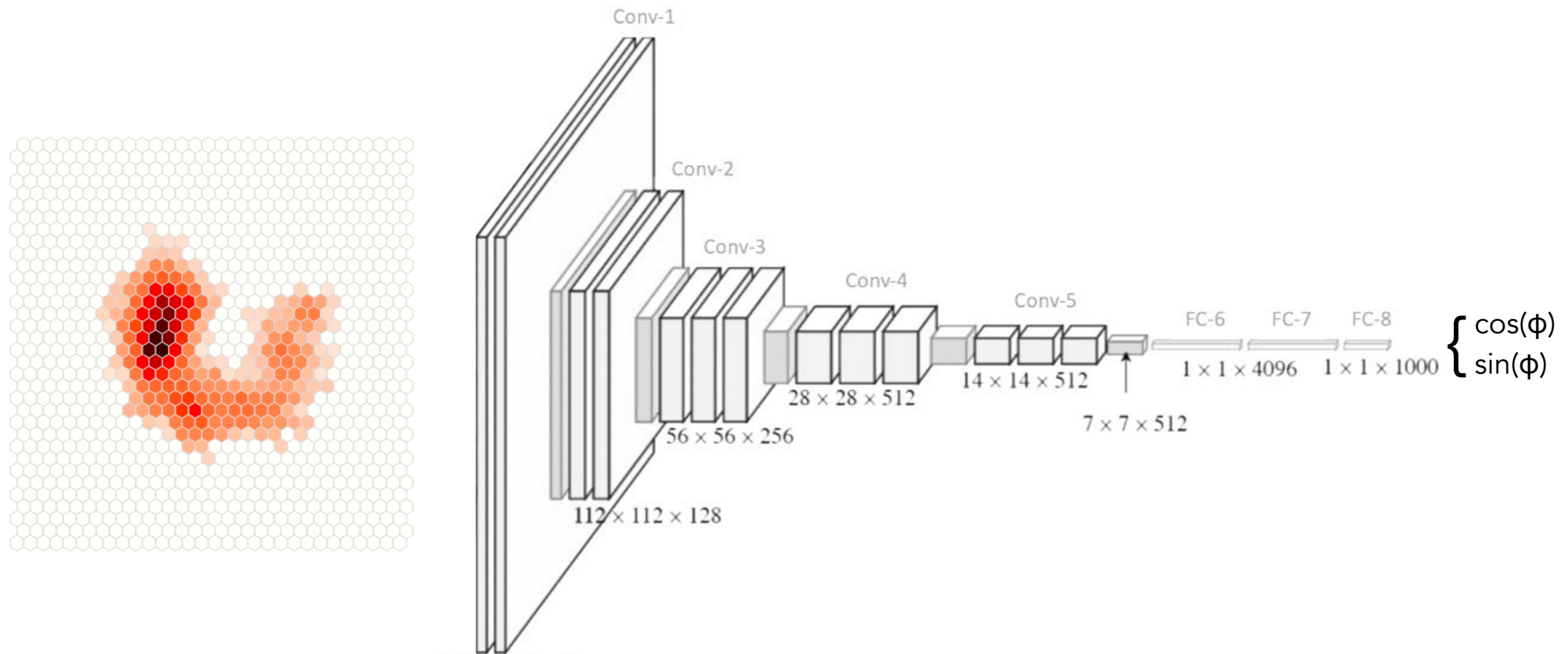


Sorgenti puntiformi: si genera un pattern di polarizzazione radiale



Convolutional Neural Networks (CNN)

Sviluppo di algoritmi di Machine Learning allenati a riconoscere l'angolo di emissione a partire dalle immagini delle tracce



Kitaguchi et al. 2019
<https://arxiv.org/abs/1907.06442>

Moriakov et al. 2020
<https://arxiv.org/abs/2005.08126>

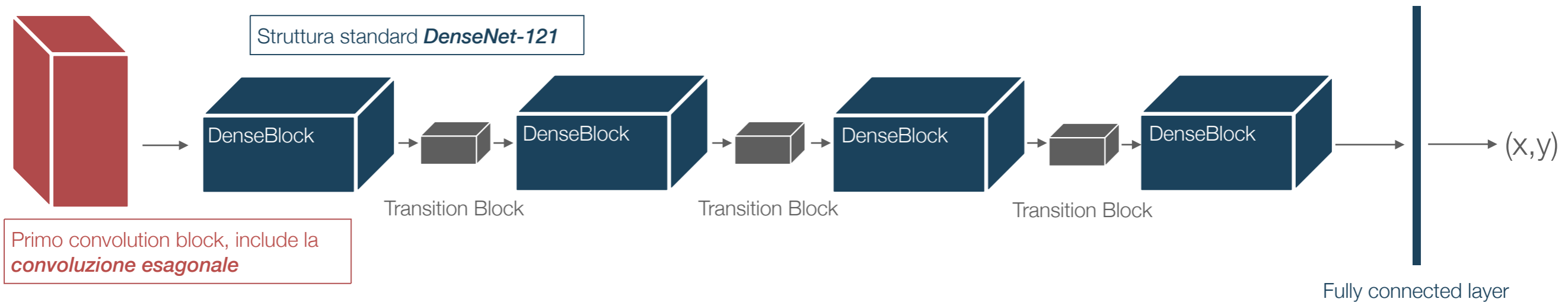
Peirson et al. 2021
<https://arxiv.org/abs/2007.03828>

Problematiche

Difficile gestione della struttura esagonale dei pixel
Possibili sistematiche aggiuntive rispetto all'analisi dei momenti

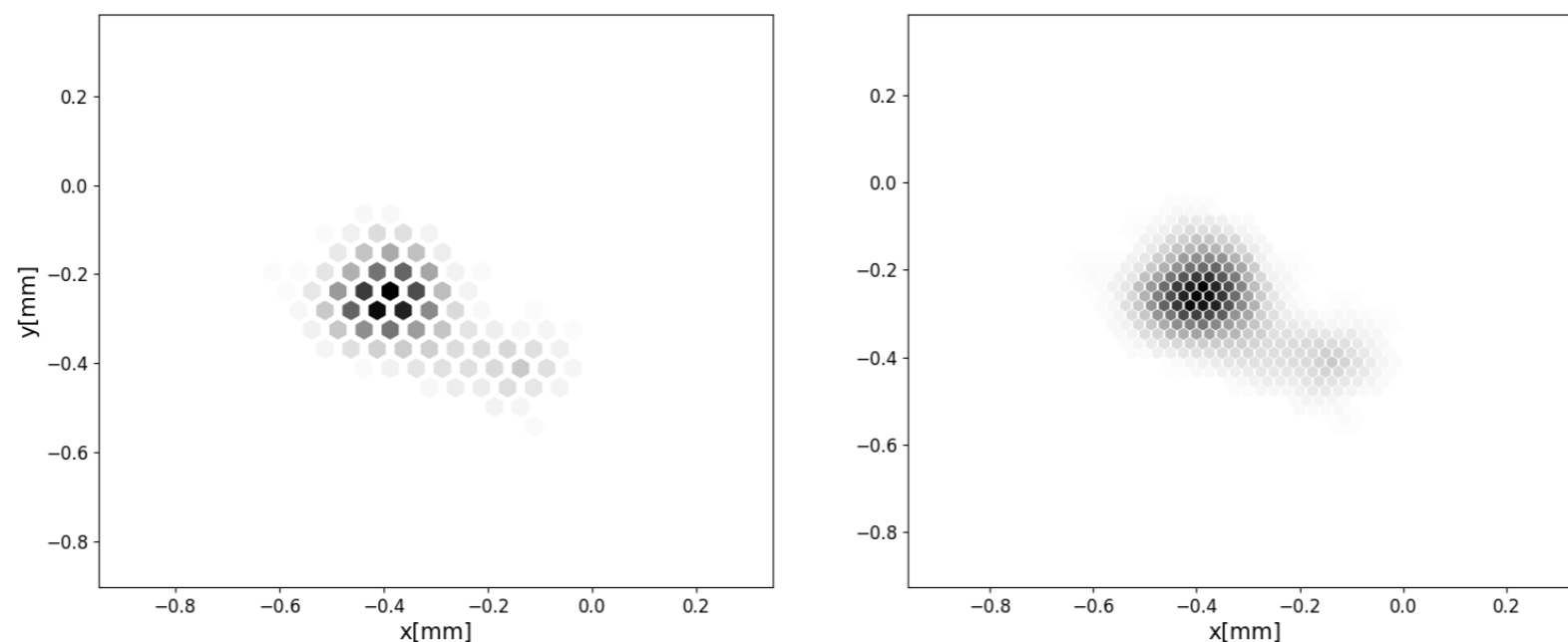
Algoritmo Ibrido: combinare CNN ed analisi dei momenti

Sviluppo di una rete dedicata alla sola ricostruzione del punto di impatto.

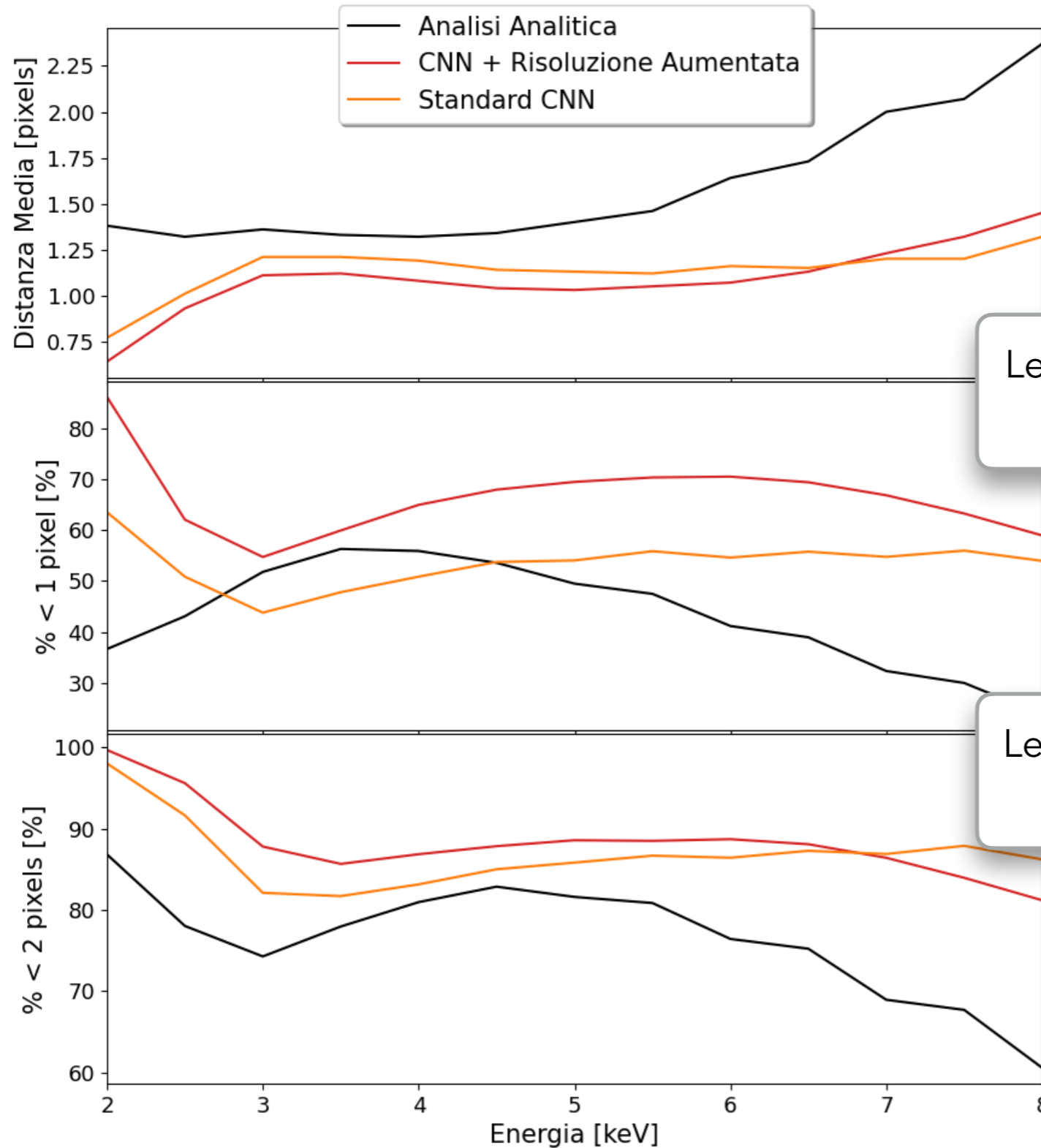


Il punto di impatto predetto dalla CNN verrà sostituito a quello predetto dall'analisi dei momenti

Aumento artificiale della risoluzione, mantenendo la simmetria esagonale



Punto di impatto: Risultati

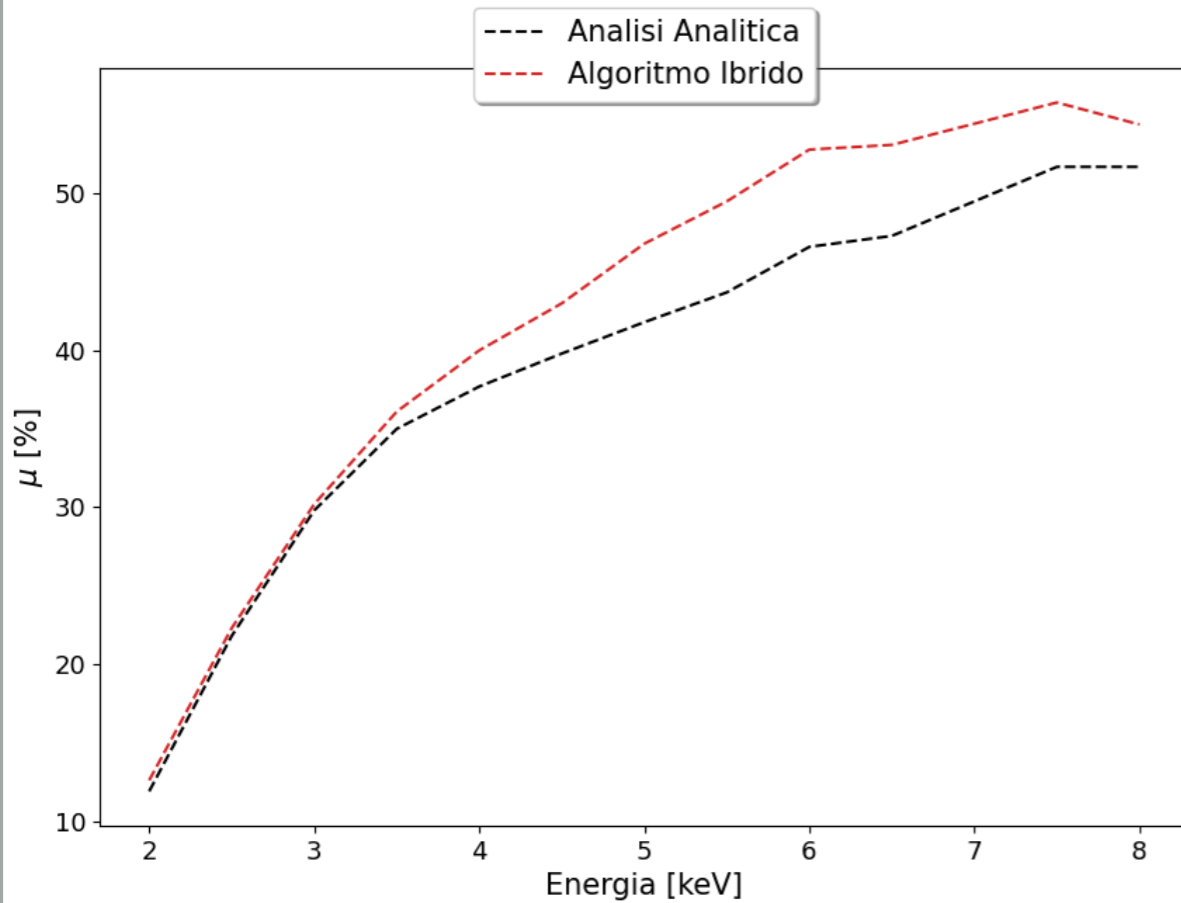


Le performance della **CNN + Risoluzione aumentata** sono migliori rispetto alla **Standard CNN**

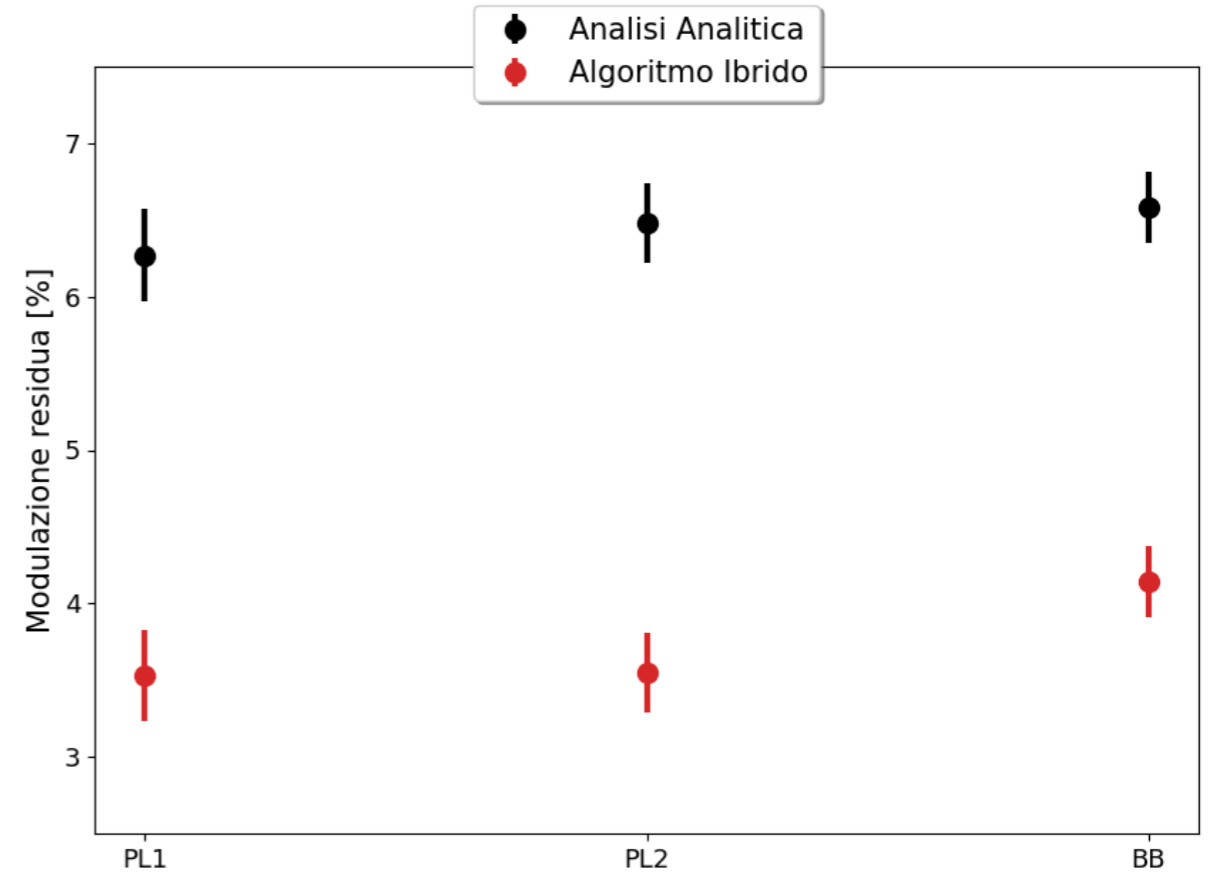
Le performance della **CNN + Risoluzione aumentata** sono migliori rispetto all'analisi analitica

Polarizzazione: Risultati

Fattore di Modulazione



Polarization Leakage



Miglioramento marginale del fattore di modulazione (1% a 3keV; 6% a 6 keV)

Riduzione significativa della polarization leakage (di circa un fattore 2)

Conclusioni e prospettive future

Sviluppato un algoritmo *ibrido* per misure di polarizzazione ricostruendo le tracce dei GPD

Introdotta un veloce algoritmo per la convoluzione esagonale e un aumento artificiale della risoluzione delle immagini

Migliorata la ricostruzione del punto di impatto

Migliorato marginalmente il fattore di modulazione e ridotto significativamente l'effetto di polarization leakage

Articolo sottomesso ad *Astronomy & Astrophysics*

In corso...

Fase di validazione dell'algoritmo con dati di laboratorio

Maggiori informazioni sul poster di S. Tugliani
"Caratterizzazione dei Gas Pixel Detector della missione IXPE tramite l'X-ray Calibration Facility"



Slide di Backup

Analisi dei Momenti

1. Calcolo del baricentro e del secondo momento della distribuzione di carica

$$x_b = \frac{\sum_i q_i x_i}{\sum_i q_i} \quad y_b = \frac{\sum_i q_i y_i}{\sum_i q_i}$$

$$M_2(\phi) = \frac{\sum_i q_i [(x_i - x_b)\cos(\phi) + (y_i - y_b)\sin(\phi)]^2}{\sum_i q_i}$$

2. Calcolo del terzo momento della distribuzione di carica per determinare la parte iniziale della traccia

$$M_3(\phi) = \frac{\sum_i q_i [(x_i - x_b)\cos(\phi) + (y_i - y_b)\sin(\phi)]^3}{\sum_i q_i}$$

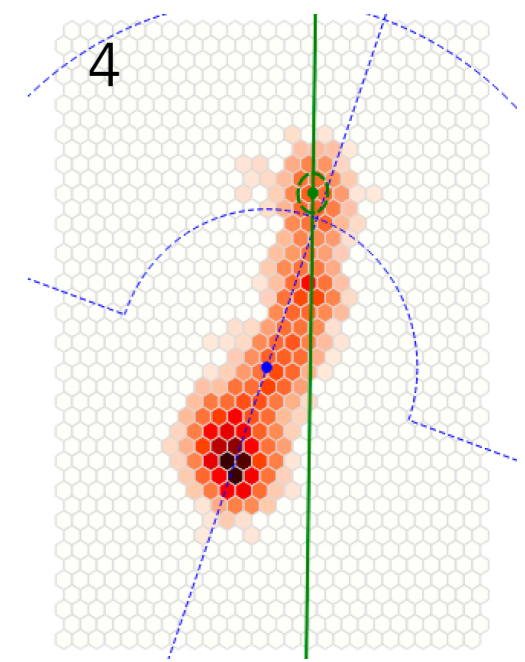
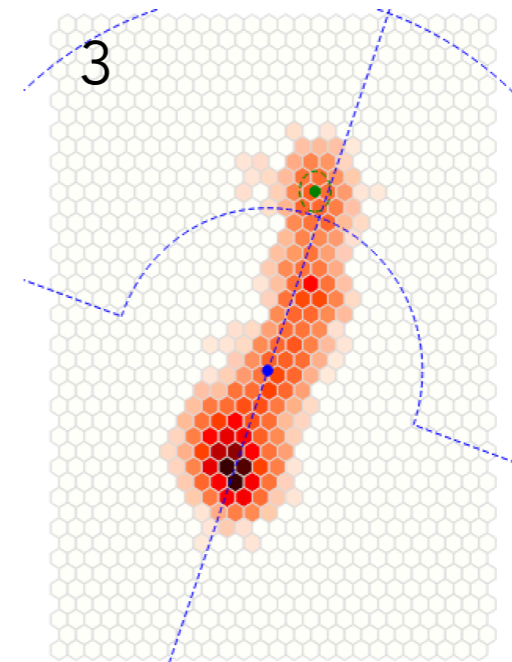
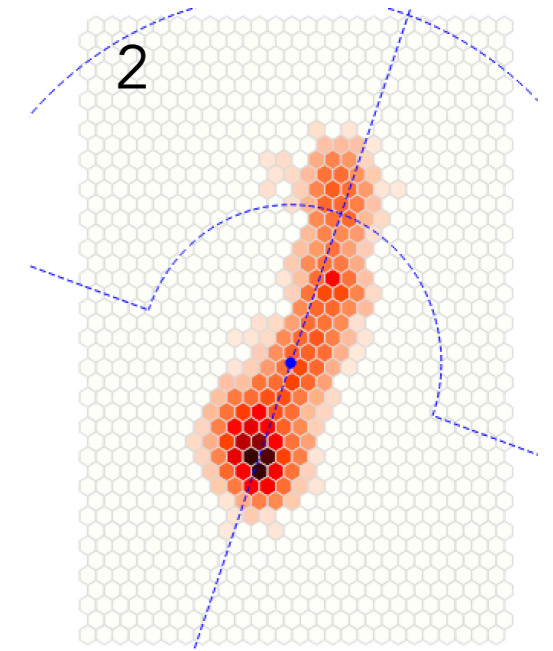
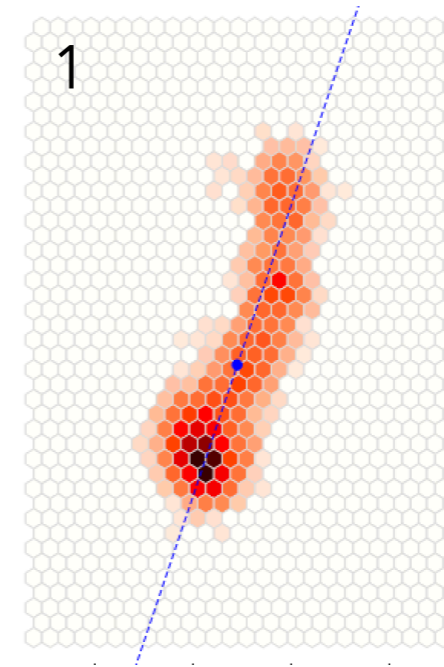
3. Calcolo dei pesi rispetto alla parte iniziale della traccia, e conseguente determinazione del punto di impatto

$$w_i = e^{-\frac{d_{b,i}}{d_s}}$$

$$x_{IP} = \frac{\sum_i w_i x_i}{\sum_i w_i} \quad y_{IP} = \frac{\sum_i w_i y_i}{\sum_i w_i}$$

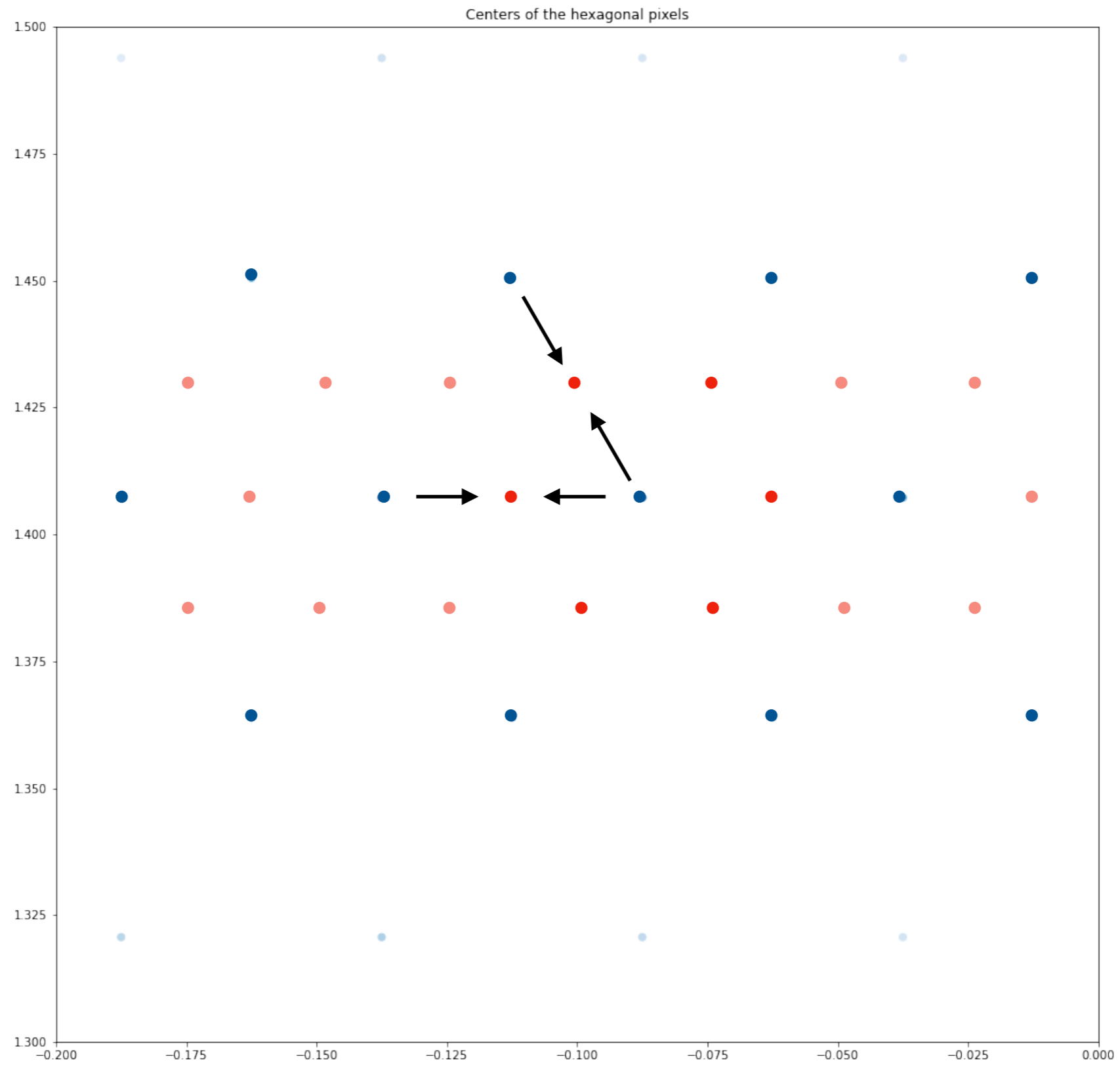
4. Ricalcolo del secondo momento della distribuzione, questa volta rispetto al punto di impatto predetto*

$$M'_2(\phi) = \frac{\sum_i w_i [(x_i - x_{IP})\cos(\phi) + (y_i - y_{IP})\sin(\phi)]^2}{\sum_i w_i}$$

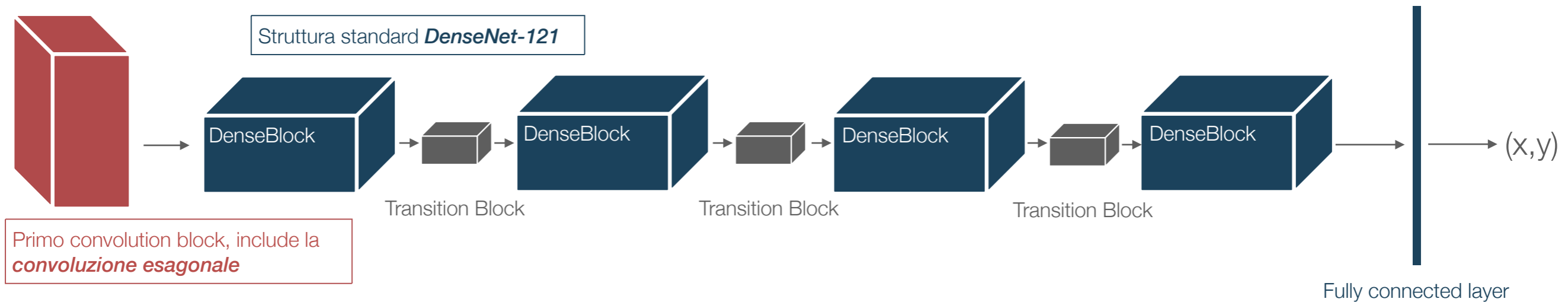


* E' qui che sostituiamo il punto di impatto predetto dalla CNN!

Risoluzione aumentata



Iper-parametri CNN



Numero di epoche: 60

Introduzione del processo OHEM dalla 30esima epoca

Dimensioni immagine: 72x72 Pixel

Ottimizzatore Adam, con *lr* decrescente

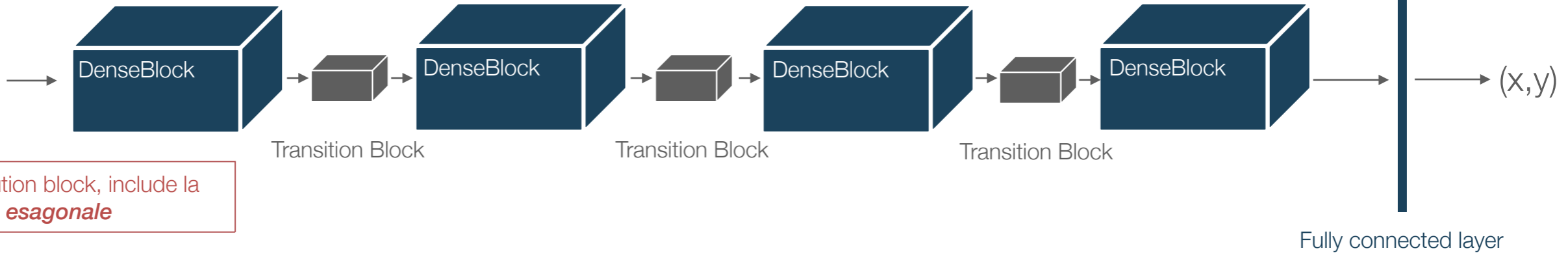
Loss function:

$$L(x_{\text{true}}, y_{\text{true}} | x_{\text{pred}}, y_{\text{pred}}) = |(x_{\text{true}}, y_{\text{true}}) - (x_{\text{pred}}, y_{\text{pred}})|$$

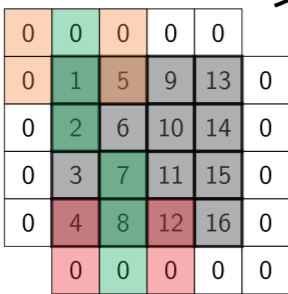
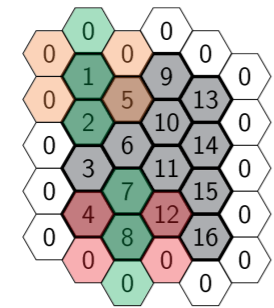
Convoluzione esagonale



Struttura standard *DenseNet-121*

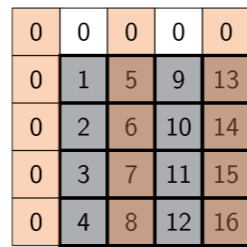


Padded Hexagonal Input

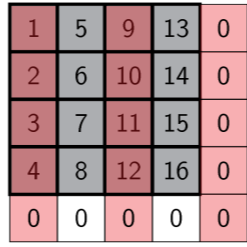


Input squeezed into square array

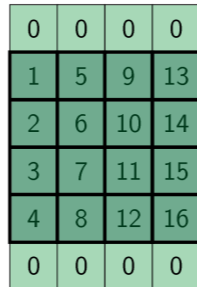
+ Padding 1, stride (2,1)
+ Kernel 1



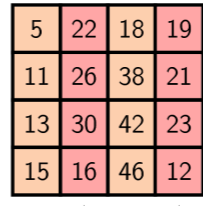
+ Padding 2, stride (2,1)
+ Kernel 1



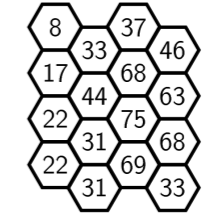
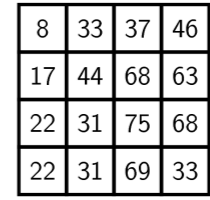
+ Padding 3, stride (1,1)
+ Kernel 2



Merge



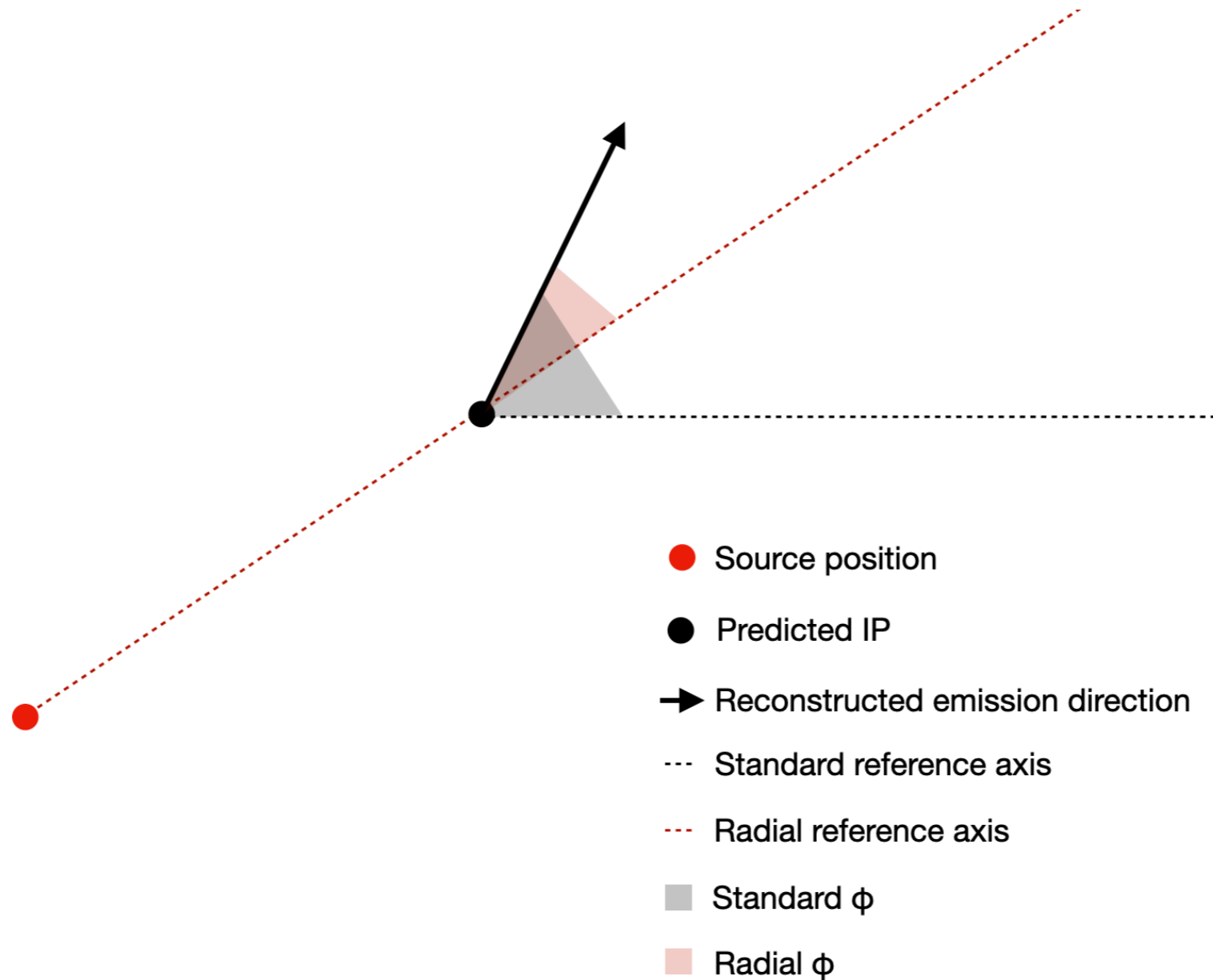
Add



Hexagonal Output of equal dimension

Modulazione Radiale

Processo di allineamento dell'asse di riferimento alla direzione radiale: permette di determinare un'eventuale polarizzazione radiale della sorgente



Baricentro come PI per analisi analitica

Sostituendo a basse energie il baricentro al punto di impatto predetto dall'analisi analitica standard si ottengono dei miglioramenti: non viene applicato però nella pipeline di IXPE perché non è immediato scegliere l'energia a cui effettuare la sostituzione. La CNN sembra seguire in automatico l'andamento del baricentro a basse energie.

