

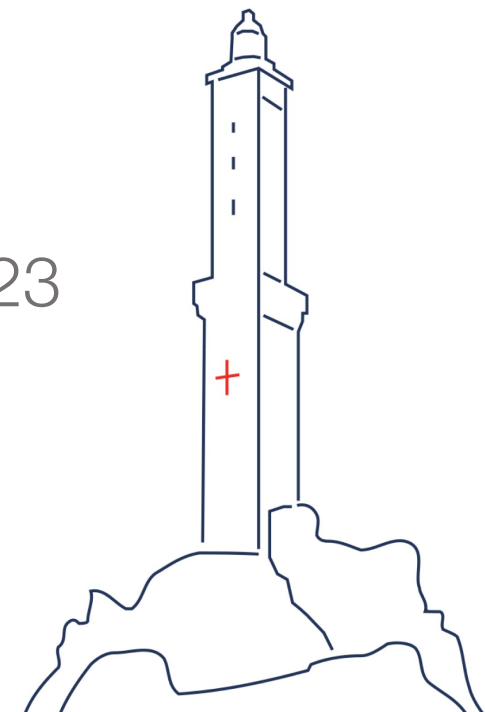
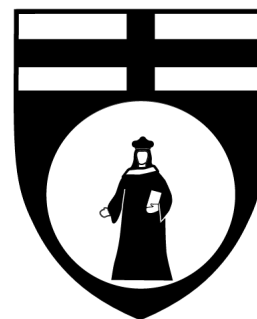
# Qualifica di moduli a pixel per ITk con chip di readout ITkPixV1 e primi sensori 3D di pre-produzione di FBK

Lapertosa<sup>1</sup>, S. Ravera<sup>2</sup>, M. Ressegotti<sup>2</sup>, Leonardo Vannoli<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(INFN Catania), <sup>2</sup>(INFN Genova e Università Genova)

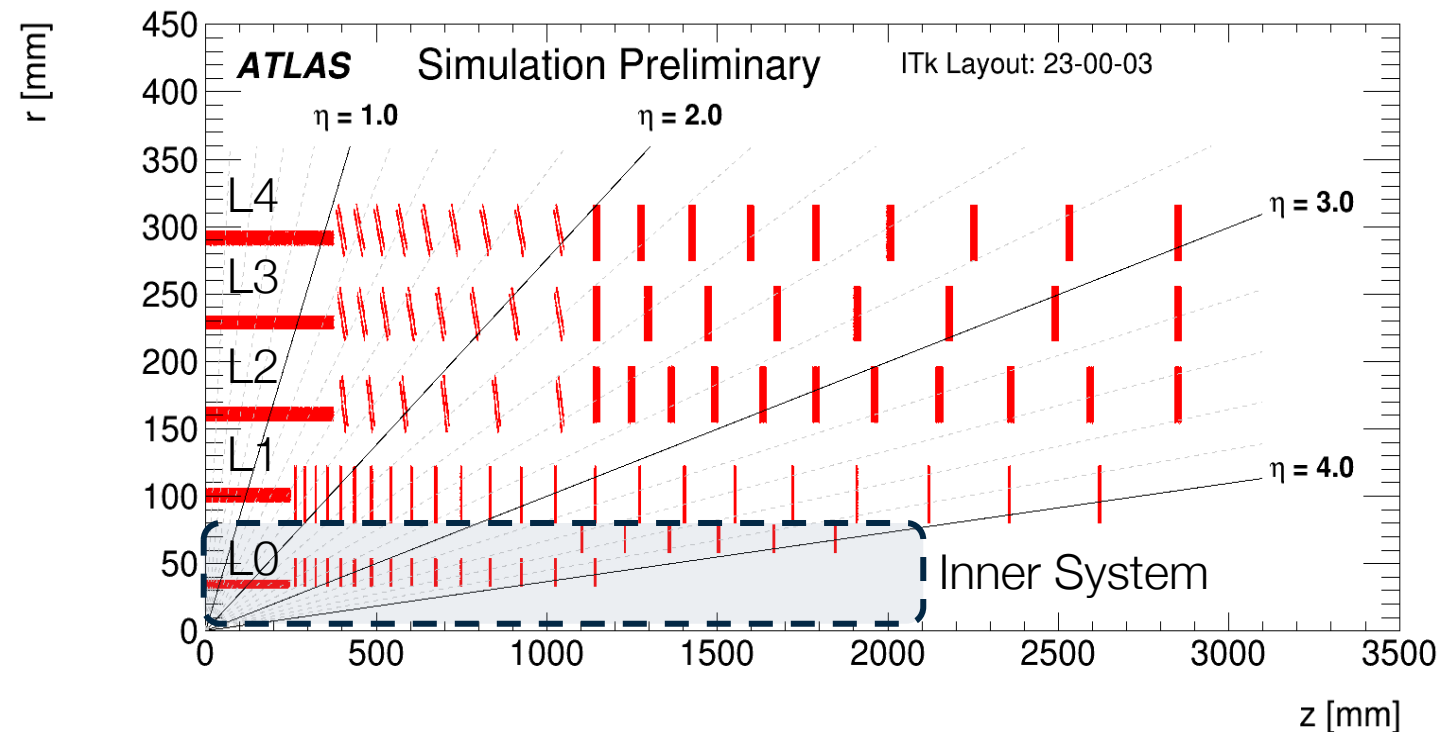
## IFAE 2023

Incontri di Fisica delle Alte Energie, Catania, 12-14 Aprile 2023



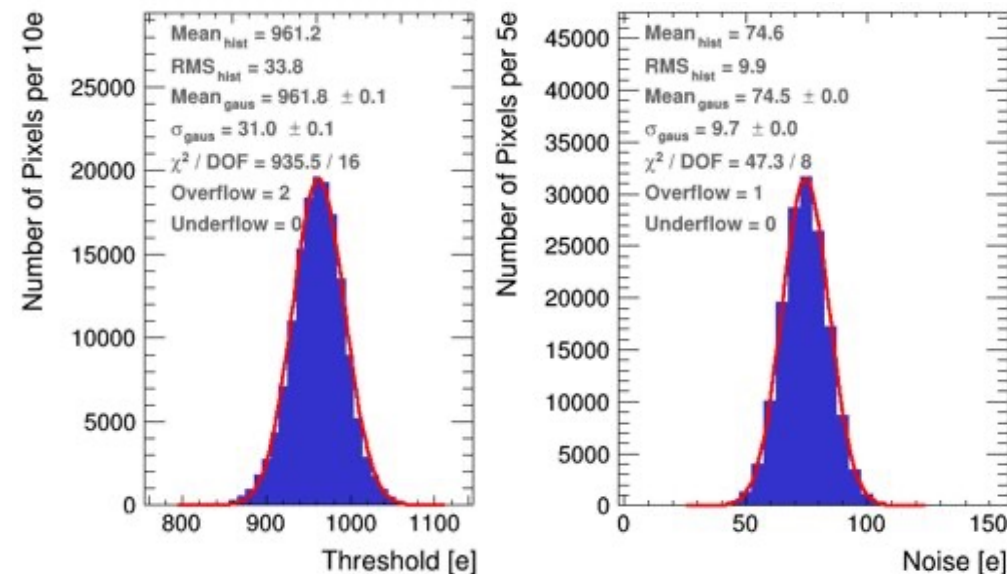
# ATLAS si prepara per HL-LHC

- HL-LHC partirà nel 2026: la luminosità istantanea  $5-7.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 
  - L'esperimento ATLAS rimpiazzerà l'inner detector con un tracking detector completamente in silicio (pixel + strip): **ITk Detector**
- Il pixel detector di ITk:
  - 5 strati di pixel ibridi
    - L2-L3-L4: sensori planari ( $150 \mu\text{m}$ )
    - L1: sensori planari ( $100 \mu\text{m}$ )
    - L0: sensori 3D
  - L'inner system è pensato per essere sostituito dopo  $2000 \text{ fb}^{-1}$ 
    - Una fluensa di  $2 \times 10^{16} n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$



# Il chip di Front End di ITk: ITkPix

- ITkPix sarà impiegato come FE di tutti i moduli ITk
  - Sviluppato dalla collaborazione RD53, questi chip sono in comune ad ATLAS e CMS
  - ITkPixV1.1: non consente l'utilizzo della Time Over Threshold (ToT)
  - ITkPixV2: finalizzato lo scorso 22 Marzo, sarà impiegato su moduli dal 2024
- Le principali caratteristiche di ITkPixV1:
  - 65 nm CMOS, area 2 x 2 cm<sup>2</sup>
  - 384 x 400 pixels (50 x 50 μm<sup>2</sup>)
  - Potenza: 0.56 W/cm<sup>2</sup>
  - Resistenza alla radiazione > 1 Grad
  - Soglia: 1000e (30e di dispersione)
  - Rumore: 40e (80e) solo FE (dopo il bump-bonding)

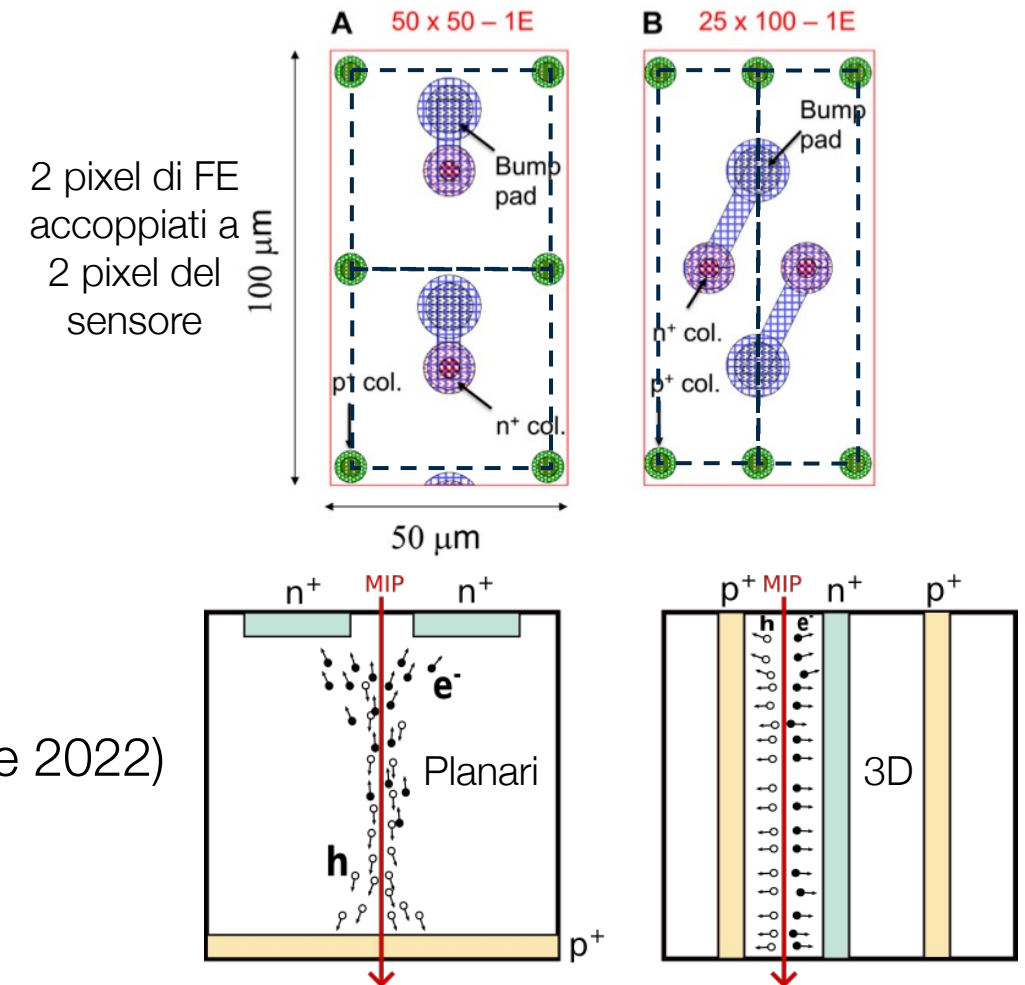


# Il sensore a pixel con tecnologia 3D

- ATLAS ITk adopererà pixel 3D con celle di due dimensioni nel L0:
  - 25 x 100  $\mu\text{m}^2$  nel barrel
  - 50 x 50  $\mu\text{m}^2$  nell'endcap

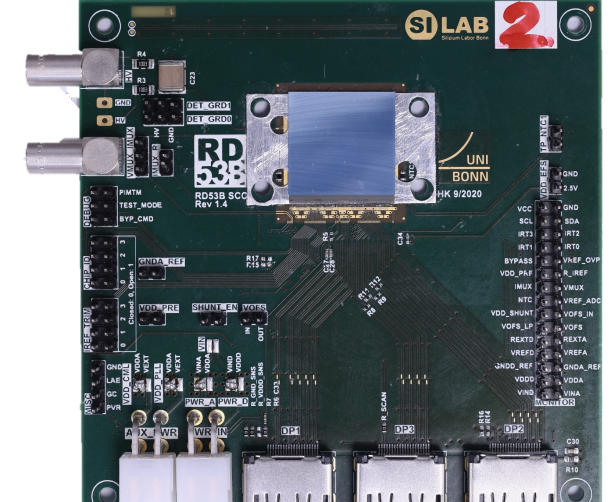
- La produzione dei sensori è affidata a
  - FBK e SINTEF (50 x 50  $\mu\text{m}^2$ )
  - CNM (25 x 100  $\mu\text{m}^2$ , FBK in caso di bisogno)

- La pre-produzione è quasi completa:
  - FBK: 50 x 50  $\mu\text{m}^2$  (estate 2021), 25 x 100  $\mu\text{m}^2$  (estate 2022)
  - SINTEF: 50 x 50  $\mu\text{m}^2$  (Febbraio 2022)
  - CNM: 25 x 100  $\mu\text{m}^2$  (Marzo 2023), in fase di test



# 3D FBK 50x50 + ITkPixV1.1 su SCC

- 8 Single Chip Card (SCC) sono state assemblate a Genova con moduli composti da sensori 3D FBK e ITkPixV1.1 chip
  - Il bump-bonding tra sensore e chip è stato effettuato presso IZM;
  - Le SCC sono quindi state qualificate in termini di resistenza alle radiazioni e performance.



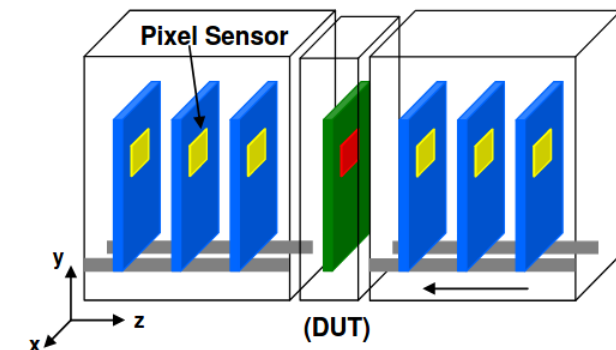
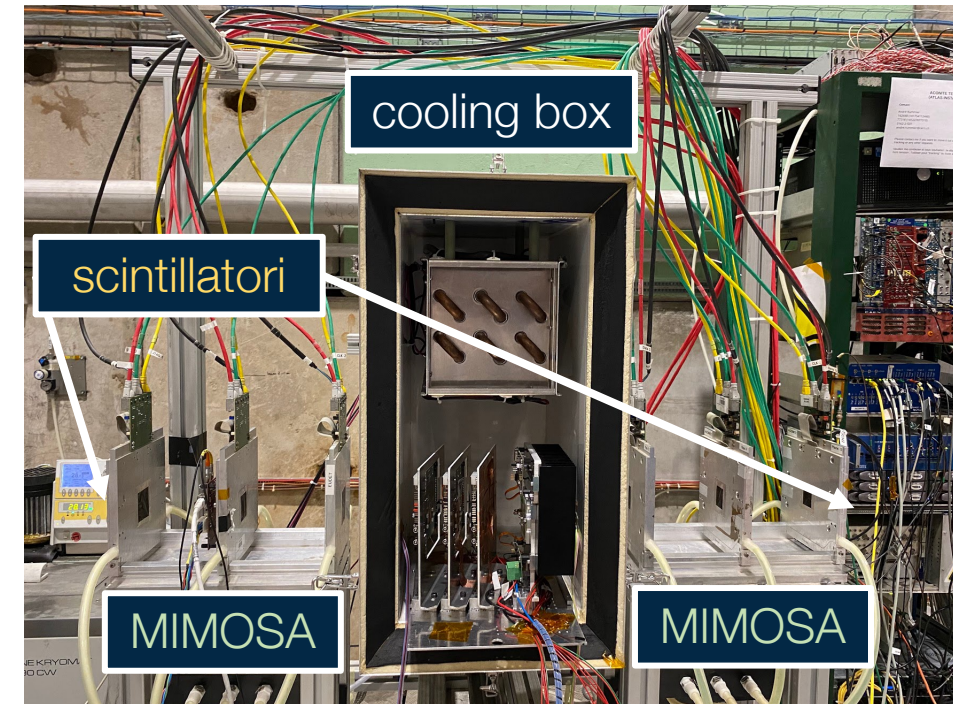
Sensor #	TB facility pre-irradiation	Irradiated at	Fluenza	TB facility Post-irradiation	Note
W12-G (SCC2)	CERN PS & SPS	IRRAD	up to $1.7 \times 10^{16} n_{eq}/cm^2$	-	FE damaged
W12-M (SCC3)		Bonn + IRRAD	up to $1.9 \times 10^{16} n_{eq}/cm^2$	SPS	
W12-N (SCC4)	CERN PS & SPS				Used as RF
W12-J (SCC5)		Bonn + IRRAD	up to $1.9 \times 10^{16} n_{eq}/cm^2$	SPS	

- Ulteriori 2 SCC irradiate a CYRIC a  $1.5 \times 10^{16} n_{eq}/cm^2$  (SCC6-10) da testare a Maggio presso SPS



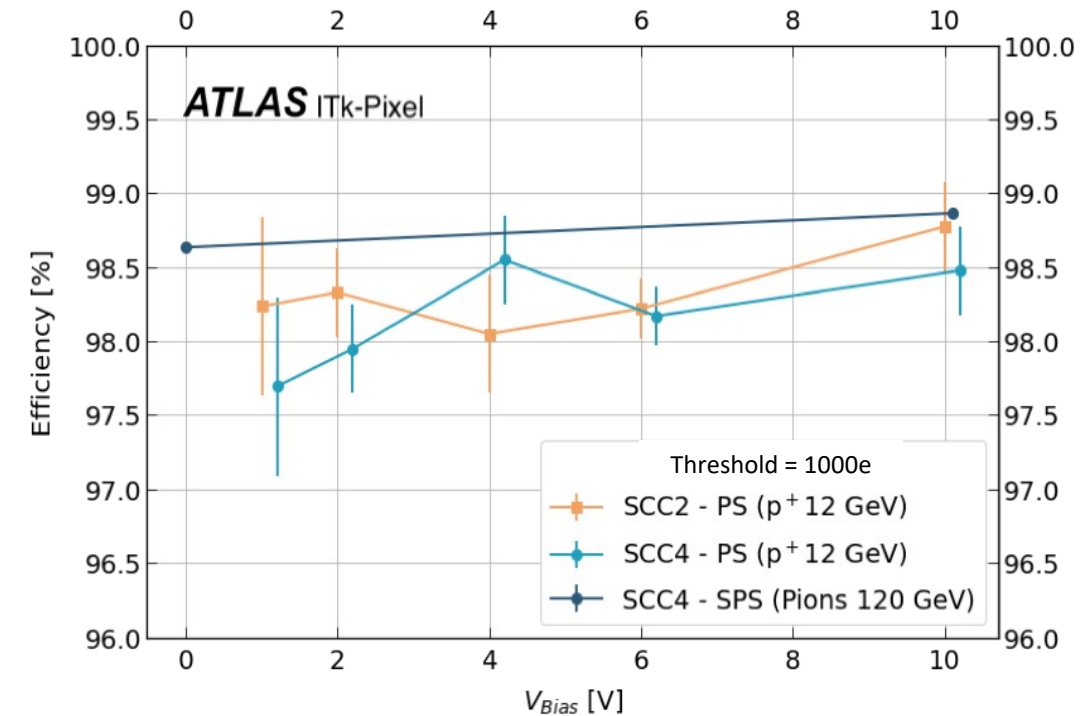
# Campagne di TB presso PS & SPS al CERN

- Sono state effettuate una serie di campagne di test su fascio nel 2022:
  - Proton Synchrotron (PS): Aprile 2022;
  - Super Proton Synchrotron (SPS): Maggio, Luglio, Novembre 2022;
  - Il setup è composto di un telescopio a 6 piani (Mimosa26) nel mezzo del quale viene posizionato il Detector Under Test (DUT)
  - L'analisi dei dati è stata condotta attraverso il framework Corryvreckan
- L'efficienza del sensore è stata calcolata come segue:
  - Le tracce sono ricostruite con il telescopio;
  - Il pixel è considerato efficiente se ha una hit in una finestra spaziale e temporale in coincidenza con la traccia nei piani;
  - Non considerati nel calcolo dell'efficienza i pixel rumorosi (occupazione di rumore  $> 10^{-6}$ ).



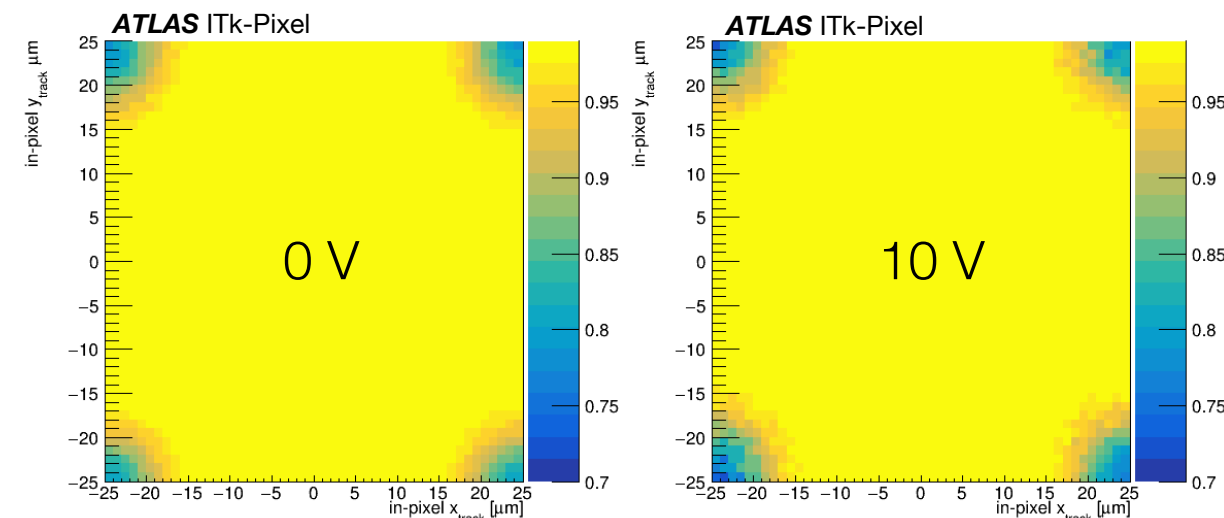
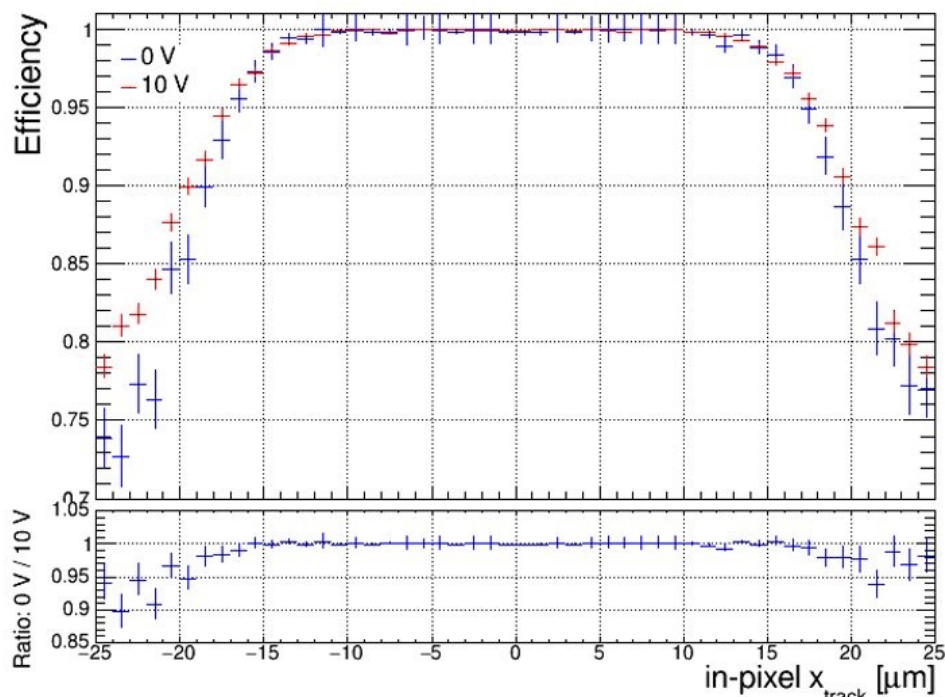
# Efficienza dei moduli 3D non irraggiati

- I moduli non irraggiati sono stati testati sia presso PS che SPS:
  - PS: fascio di protoni a 12 GeV
  - SPS: fascio di pioni a 120 GeV
  - I moduli erano posti perpendicolarmente alla direzione del fascio:
    - Efficienza media =  $98.7 \pm 0.1\%$  già a 0 V di voltaggio di bias
    - Efficienza media =  $98.9 \pm 0.1\%$  a 10 V di voltaggio di bias
  - I risultati sono compatibili con quelli ottenuti sui prototipi RD53A con sensori FBK  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$  precedentemente testati a DESY (elettroni a 6 GeV).



# Efficienza locale moduli 3D non irraggiati

- L'efficienza locale per la singola cella dei pixel (moduli perpendicolari al fascio):
  - Nell'area centrale: efficienza oltre il 99%
  - Le colonne n<sup>+</sup> sono ad una distanza di 25  $\mu\text{m}$  dal bordo
  - Efficienza  $\sim 99\%$  sulle colonne n<sup>+</sup>

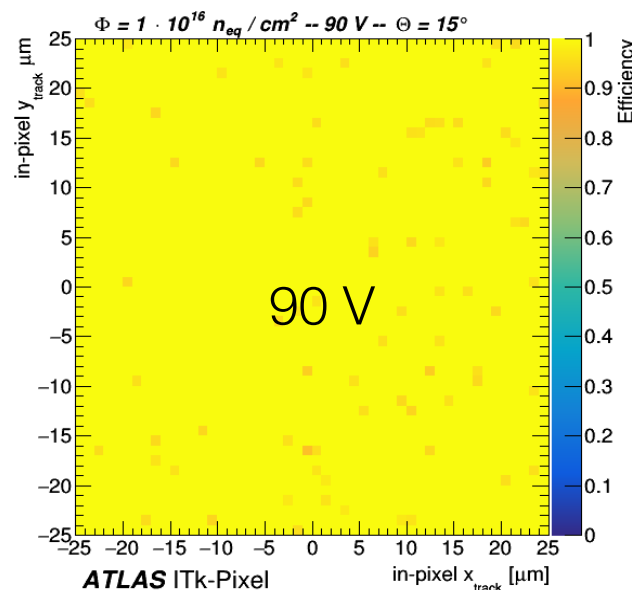
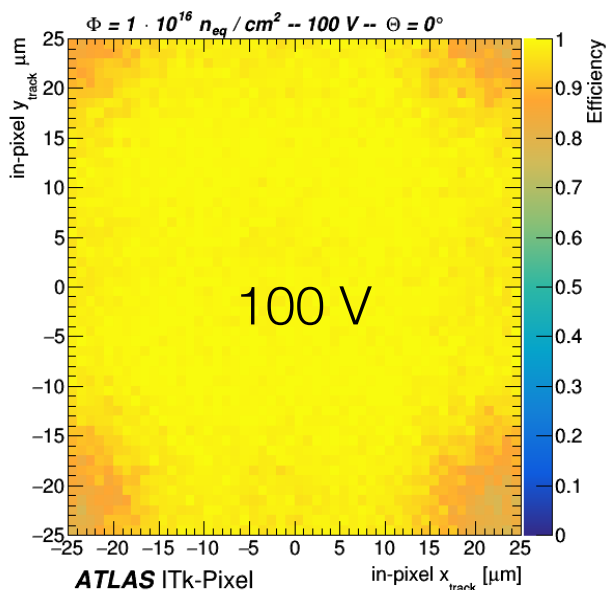
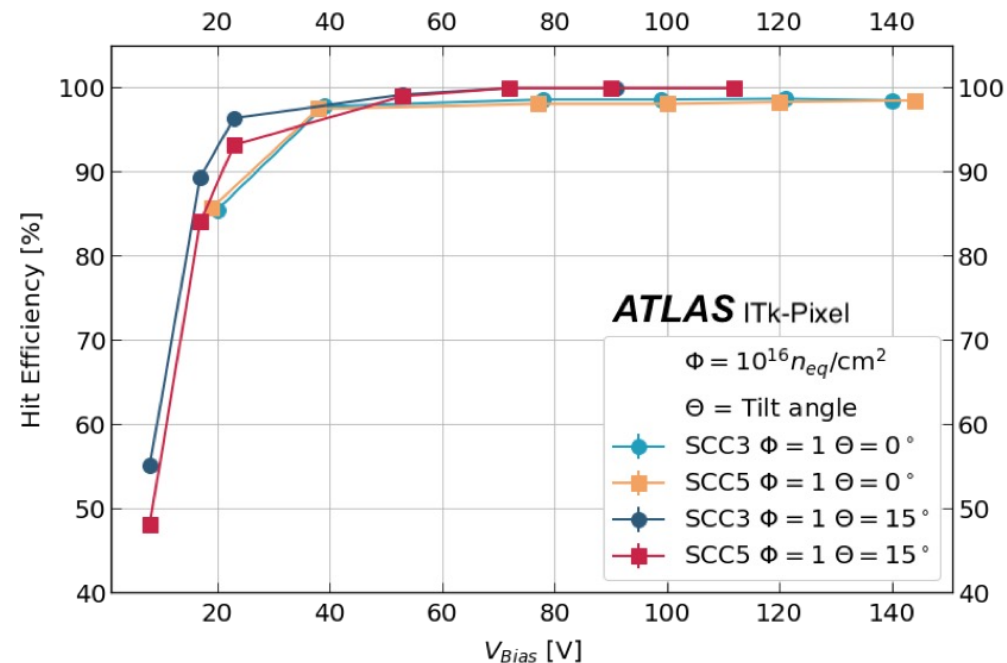


- Efficienza visibilmente più bassa negli angoli
  - Effetto decresce allontanandosi dal centro della colonna p<sup>+</sup>: efficienza 75-99% in un raggio di 10  $\mu\text{m}$
  - Le colonne p<sup>+</sup> hanno un raggio di 4  $\mu\text{m}$



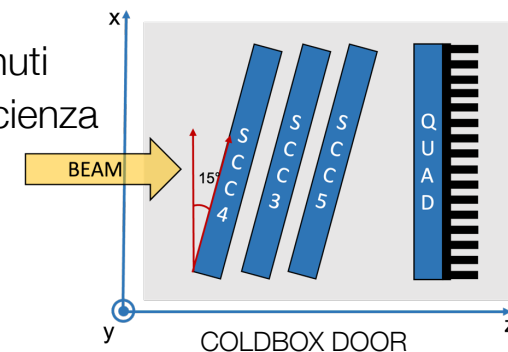
# Efficienza dei moduli 3D dopo primo irraggiamento

- Due moduli irraggiati a Bonn:
  - Fluenza uniforme  $\Phi = 1 \times 10^{16} n_{eq}/cm^2$
  - Testati sia perpendicolarmente ( $\theta = 0^\circ$ ) che ruotati ( $\theta = 15^\circ$ ) rispetto al fascio
  - Efficienza media  $> 97\%$  a 40 V di voltaggio di bias



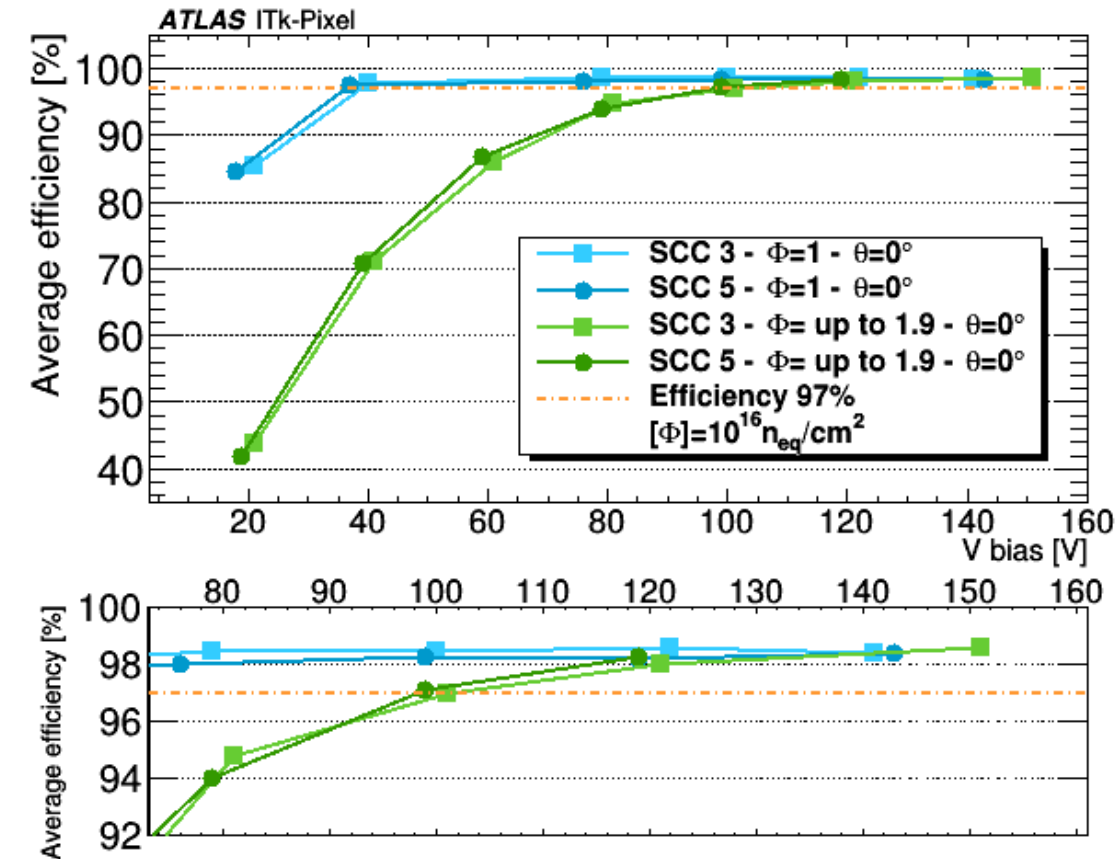
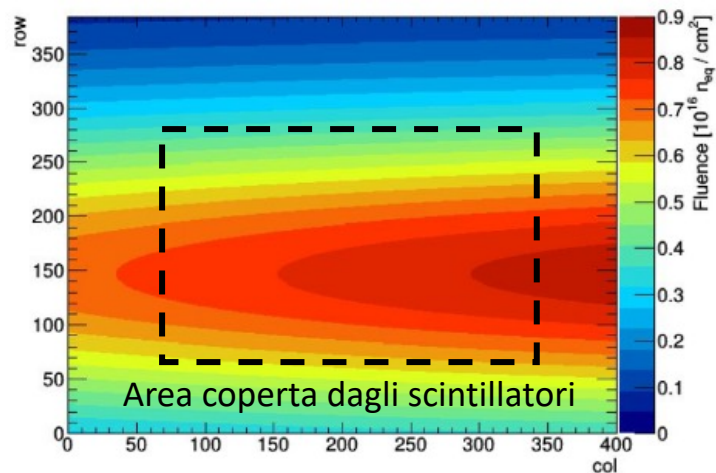
## Efficienza locale dei pixel

- Con  $\theta = 0^\circ$  i risultati a quelli ottenuti con i moduli non irraggiati e l'efficienza è minore nella regione delle colonne p<sup>+</sup>
- Con  $\theta = 15^\circ$  l'efficienza del pixel diventa omogenea



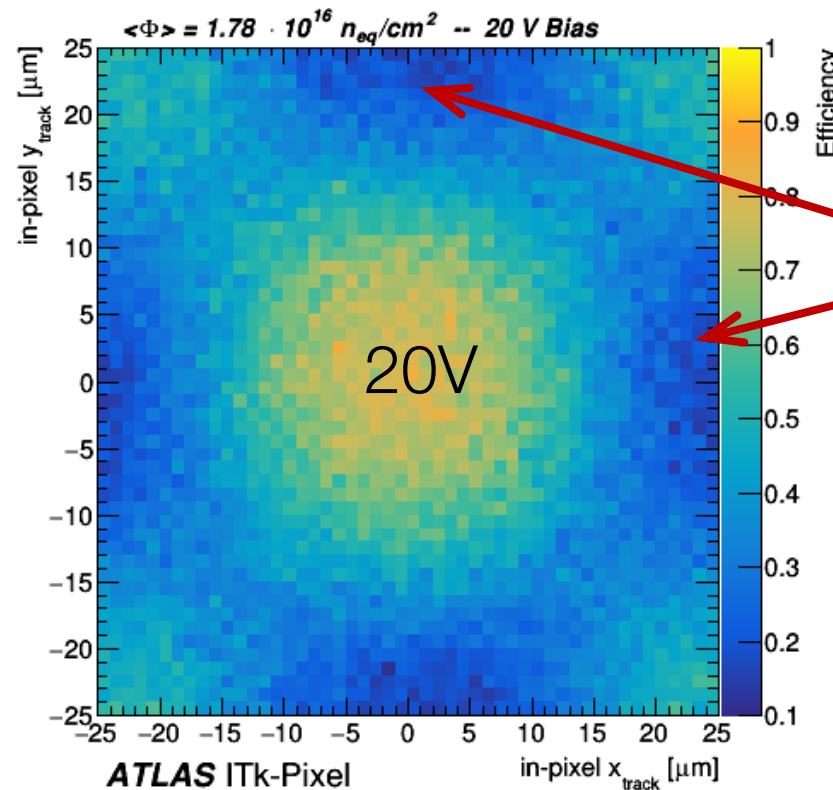
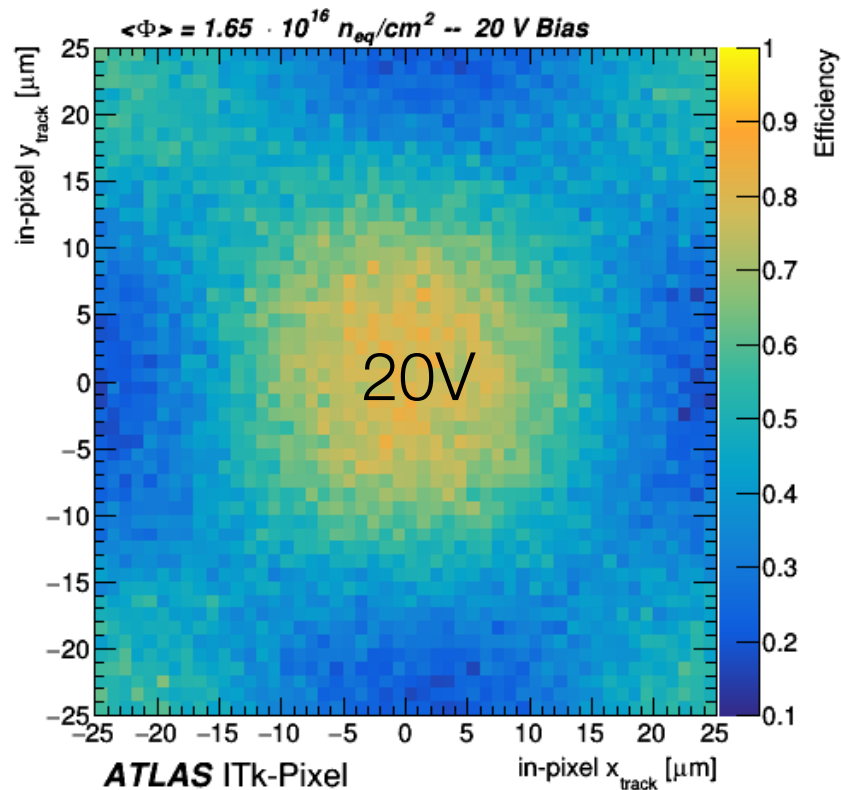
# Efficienza dopo il secondo irraggiamento

- Il secondo irraggiamento è stato effettuato presso il CERN ad IRRAD.
  - I moduli irraggiati erano precedentemente stati irraggiati a Bonn
  - La fluenza non risulta uniforme ed ha un valore massimo di  $1.9 \times 10^{16} n_{eq}/cm^2$ 
    - Nella zona coperta dagli scintillatori i moduli hanno una fluenza media di  $1.7 \times 10^{16} n_{eq}/cm^2$
  - I moduli sono stati testati perpendicolarmente al fascio ( $\theta = 0^\circ$ )
  - L'efficienza media è di  $\sim 97\%$  a 100 V di voltaggio di bias



# Efficienza locale dopo il secondo irraggiamento

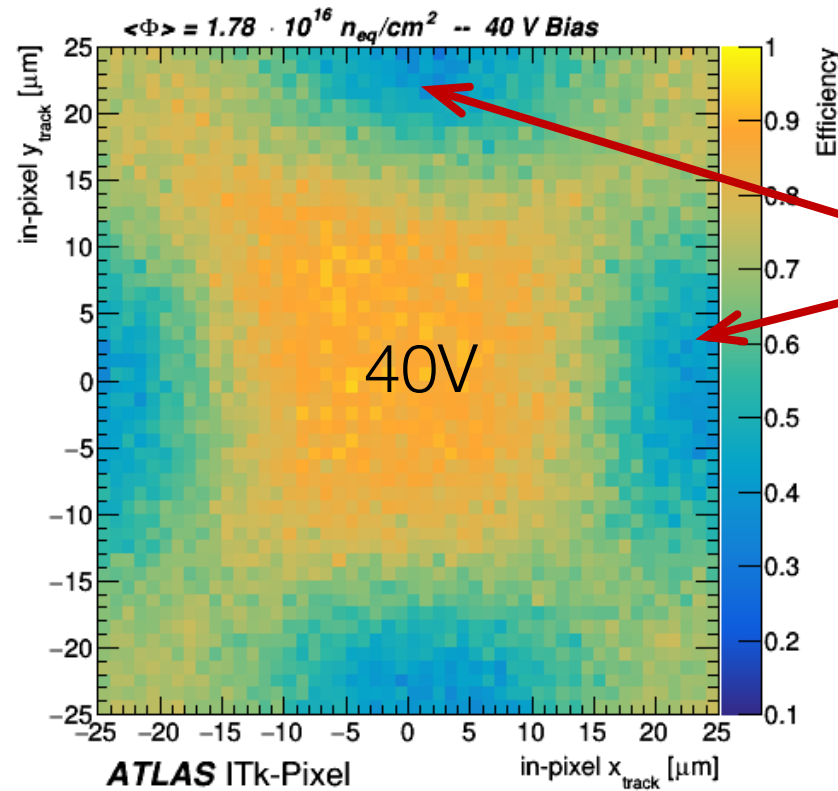
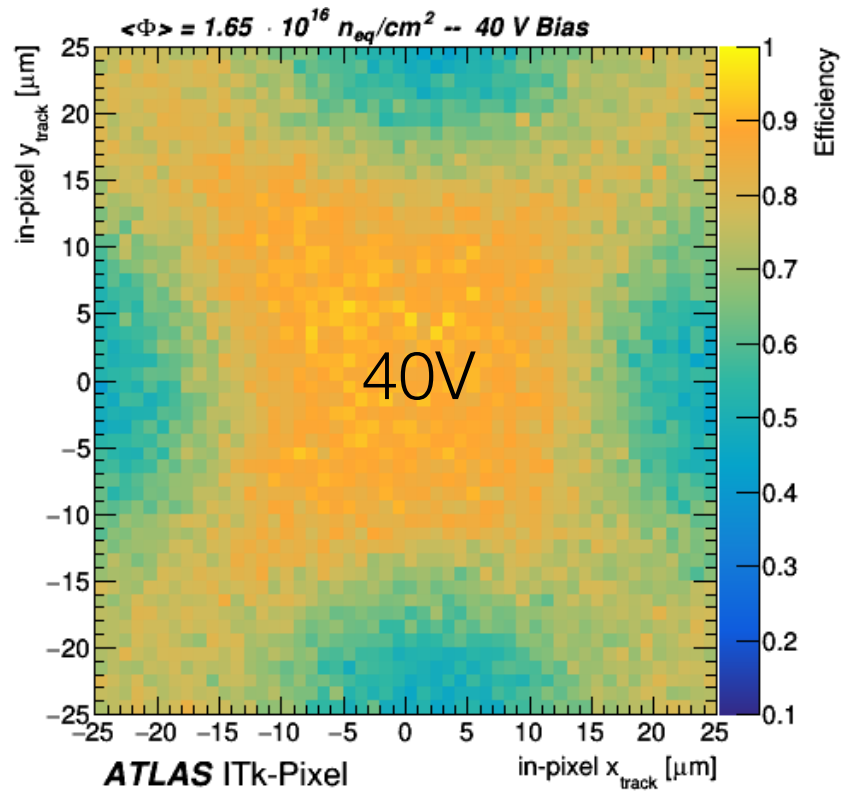
- I pixel sono stati raggruppati in due intervalli di fluensa ricevuta:
  - Primo range di fluensa  $1.50 < \phi < 1.75 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  - fluensa media =  $1.65 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2 \pm 3 \%$
  - Secondo range di fluensa  $1.75 < \phi < 1.90 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  - fluensa media =  $1.78 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2 \pm 3 \%$



- Regioni a bassa efficienza:
  - Basso campo elettrico

# Efficienza locale dopo il secondo irraggiamento

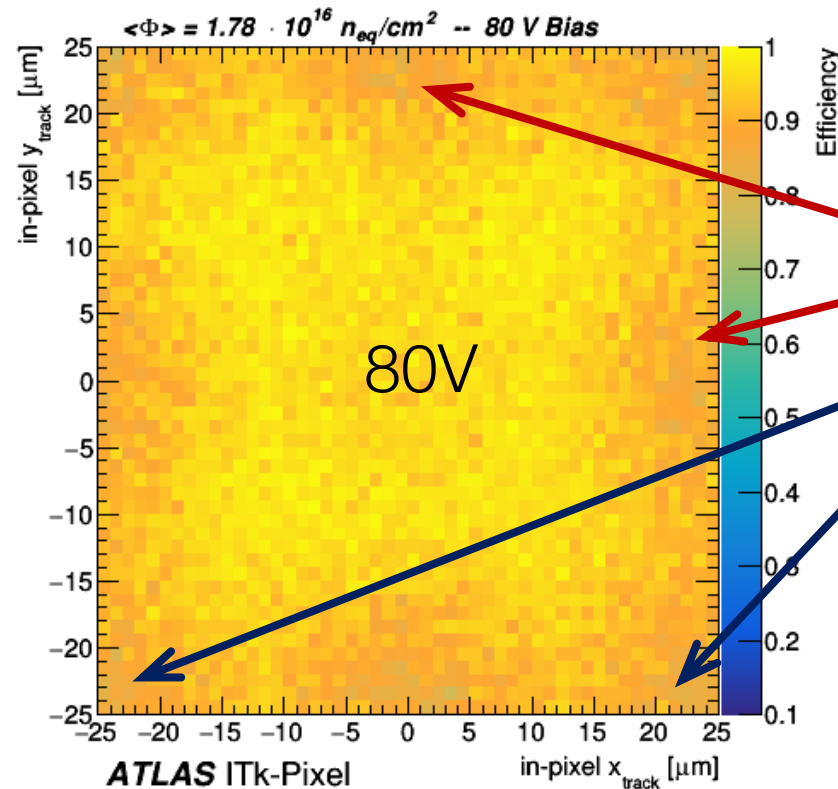
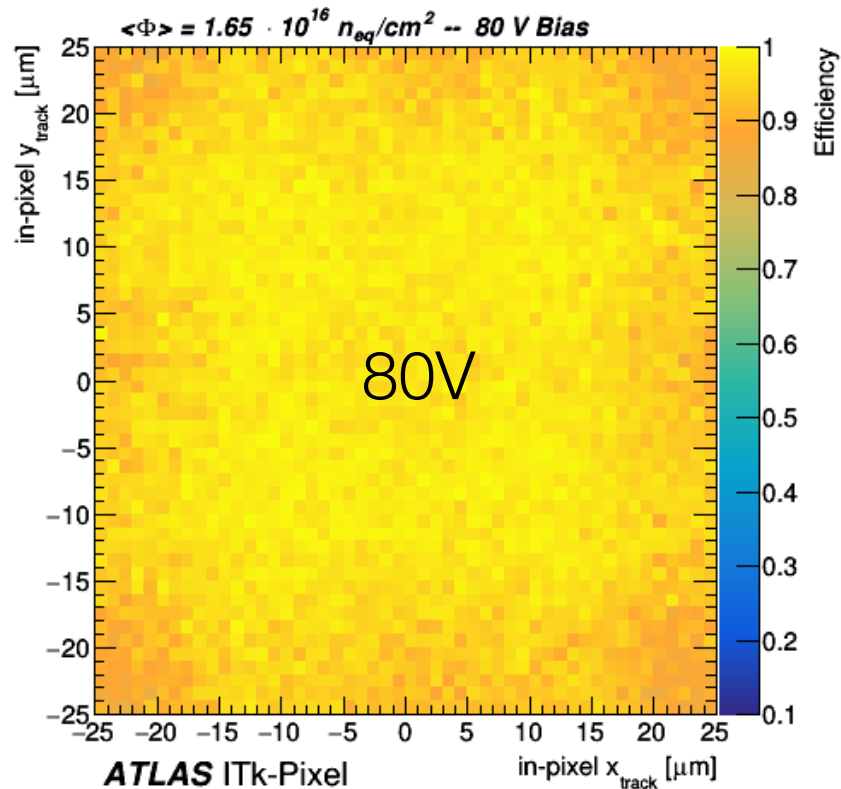
- I pixel sono stati raggruppati in due intervalli di fluensa ricevuta:
  - Primo range di fluensa  $1.50 < \phi < 1.75 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  - fluensa media =  $1.65 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2 \pm 3 \%$
  - Secondo range di fluensa  $1.75 < \phi < 1.90 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  - fluensa media =  $1.78 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2 \pm 3 \%$



- Regioni a bassa efficienza:
  - Basso campo elettrico

# Efficienza locale dopo il secondo irraggiamento

- I pixel sono stati raggruppati in due intervalli di fluensa ricevuta:
  - Primo range di fluensa  $1.50 < \Phi < 1.75 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  - fluensa media =  $1.65 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2 \pm 3 \%$
  - Secondo range di fluensa  $1.75 < \Phi < 1.90 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  - fluensa media =  $1.78 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2 \pm 3 \%$

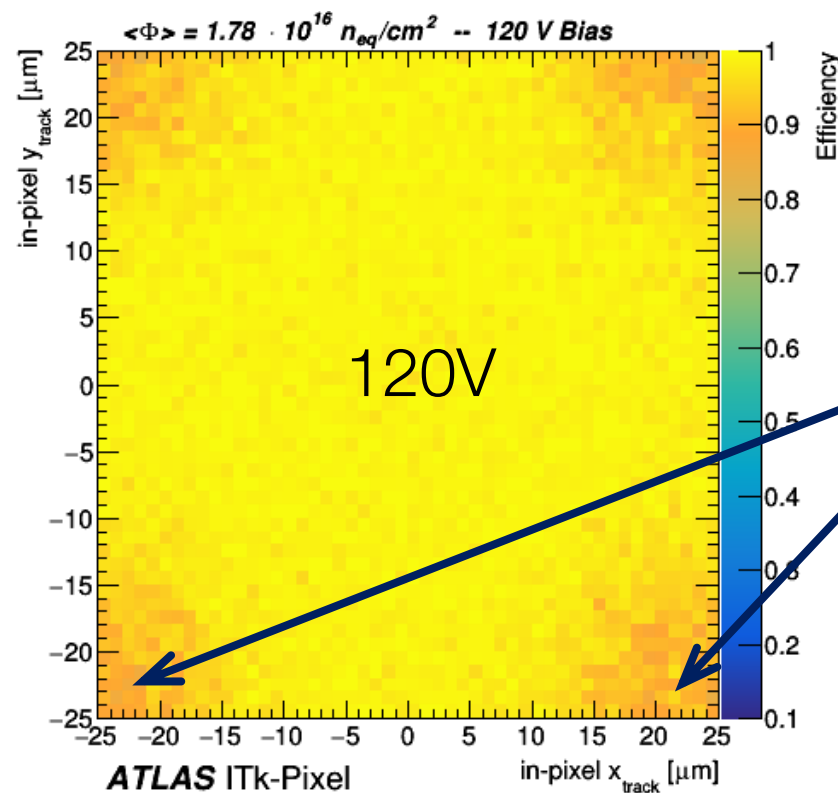
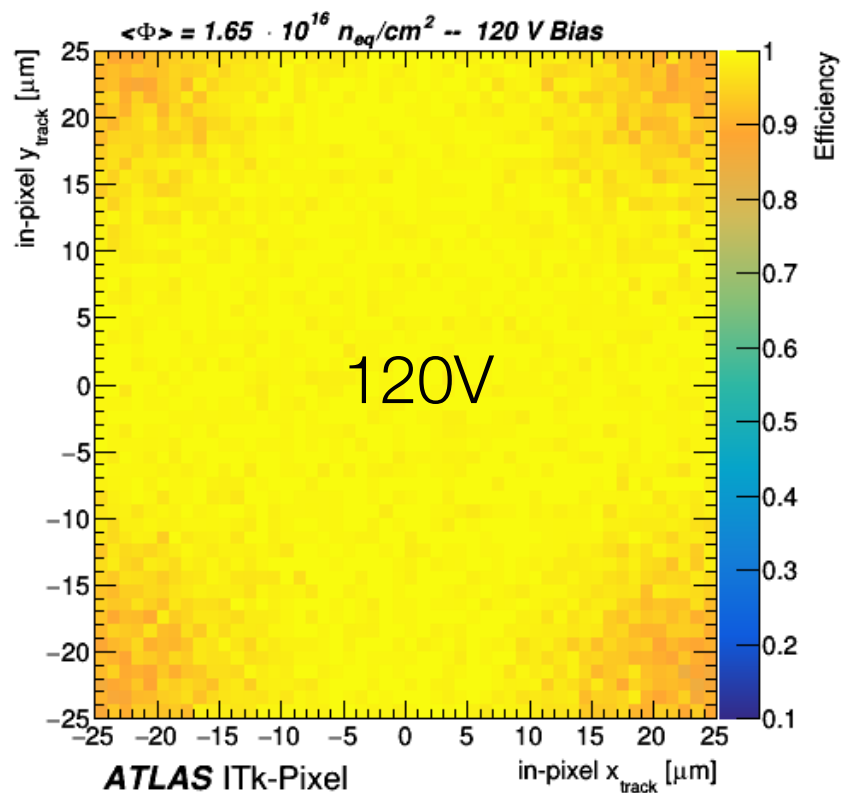


- Regioni a bassa efficienza:
  - Basso campo elettrico
  - Regioni dove sono stati impiantati gli elettrodi (sensore  $\perp$  al fascio)



# Efficienza locale dopo il secondo irraggiamento

- I pixel sono stati raggruppati in due intervalli di fluensa ricevuta:
  - Primo range di fluensa  $1.50 < \Phi < 1.75 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  - fluensa media =  $1.65 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2 \pm 3 \%$
  - Secondo range di fluensa  $1.75 < \Phi < 1.90 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  - fluensa media =  $1.78 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2 \pm 3 \%$

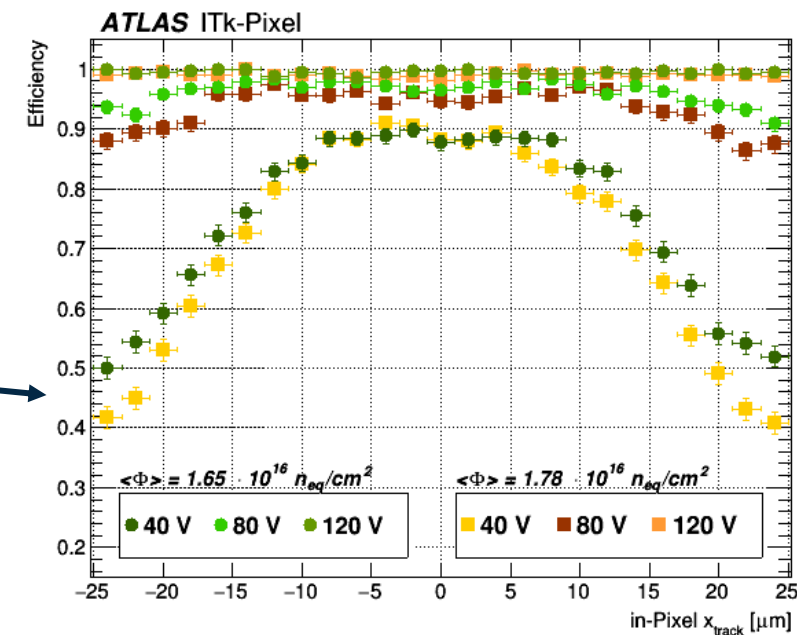
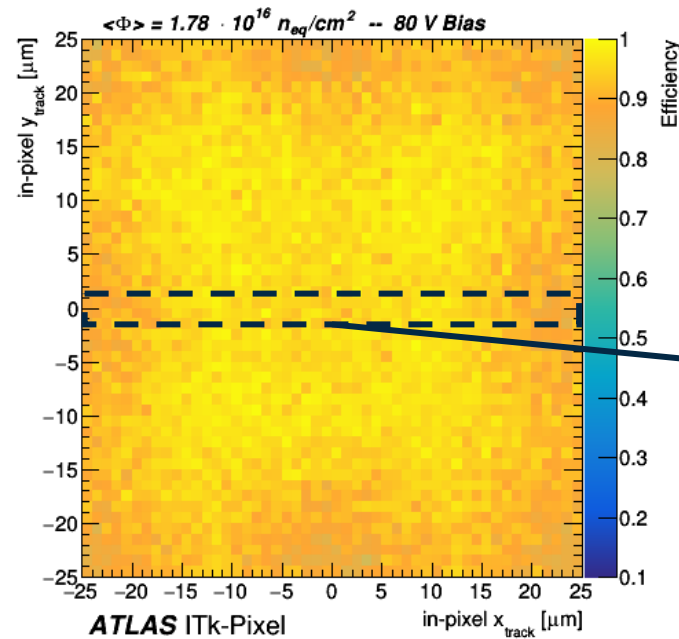


- Regioni a bassa efficienza:

- Regioni dove sono stati impiantati gli elettrodi (sensore  $\perp$  al fascio)

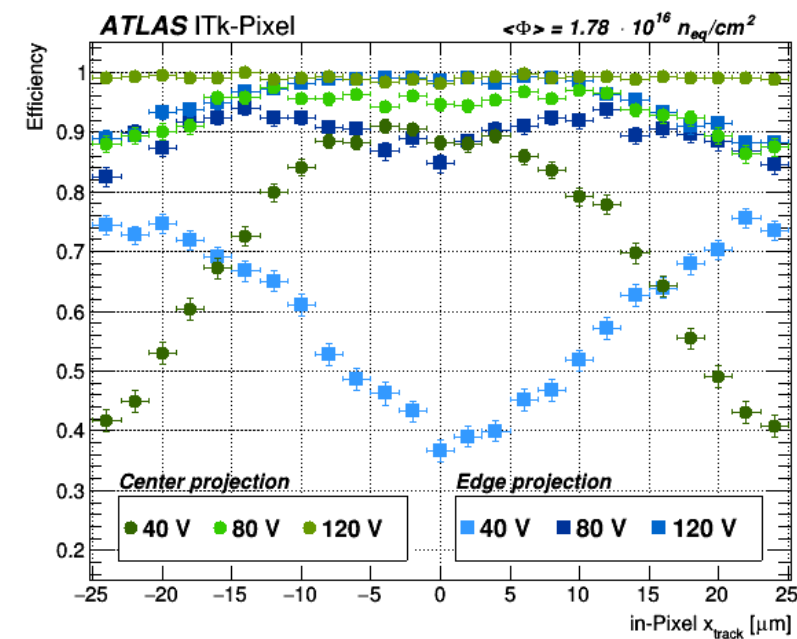
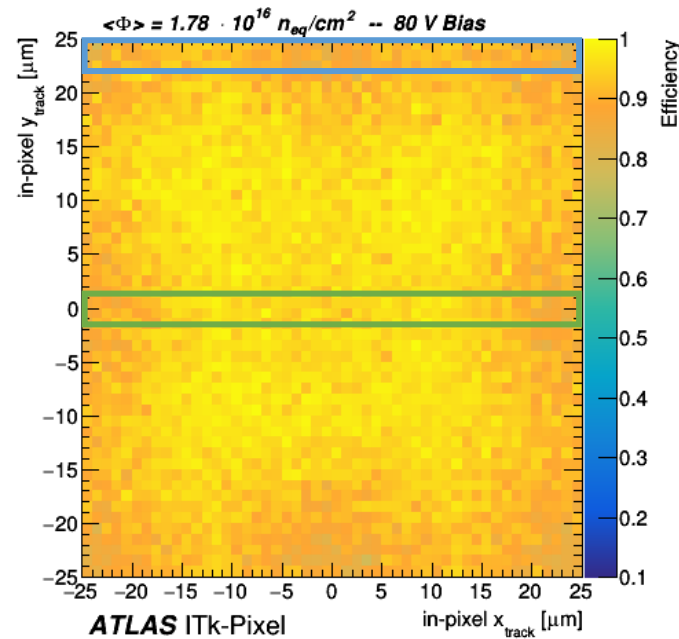
# Proiezione dell'efficienza della cella del 3D pixel

- La proiezione della riga centrale della mappa di efficienza locale per i diversi voltaggi di bias e fluenze.
  - L'efficienza è minore nei pixel che hanno ricevuto una maggior fluenza
  - A 120 V di voltaggio di bias la differenza diventa non significativa tra i diversi range di fluenza
  - A bias bassi (< 120 V) si nota una parziale inefficienza nella zona centrale della cella (colonna n<sup>+</sup>)



# Proiezione dell'efficienza della cella del 3D pixel

- La proiezione della riga centrale e della riga superiore della mappa di efficienza locale per i diversi voltaggi di bias.
  - Nella proiezione della riga superiore si notano le aree a minor efficienza dovute alle colonne p<sup>+</sup> anche a 120 V
  - A 120 V di voltaggio di bias la zona centrale della cella è totalmente svuotata
  - La minore efficienza nella zona centrale del bordo è dovuta al minore campo elettrico in quella regione



# Conclusioni

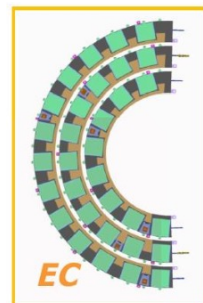
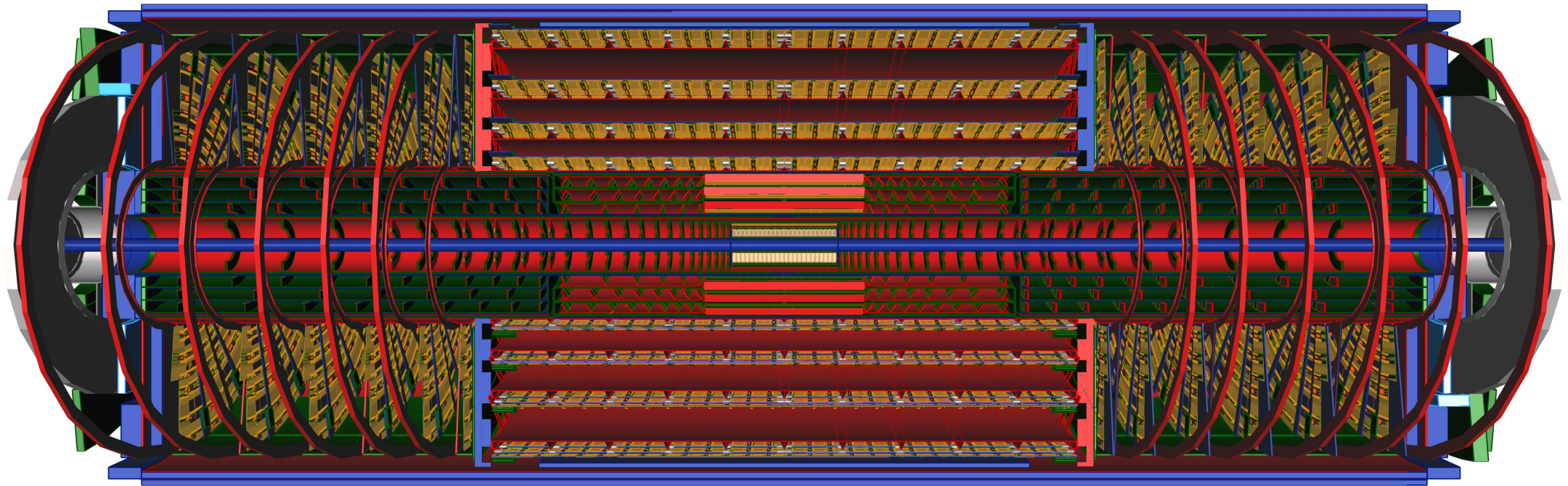
- Il rivelatore ATLAS ITk sarà equipaggiato di moduli a pixel con sensori 3D nel suo strato più interno.
- I moduli 3D assemblati presso Genova (ITkPixV1.1 + 3D FBK 50x50  $\mu\text{m}^2$ ):
  - Sono stati testati prima dell'irraggiamento presso PS e SPS al CERN
    - Efficienza > 98% già a 0 V di voltaggio di bias.
    - Efficienza locale > 99% nella regione centrale.
    - Efficienza più bassa nelle regioni dei corner.
  - Successivamente irradiati fino a  $1.9 \times 10^{16} n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  (non uniformemente) presso Bonn e IRRAD e testati presso SPS al CERN
    - Efficienza media > 97% raggiunta a ~110 V con una *fluenza media* di  $\sim 1.78 \times 10^{16} n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$
    - Effetti visibili nelle regioni delle colonne  $p^+$ , ma l'effetto è stato rimosso inclinando i DUT di  $15^\circ$  rispetto alla linea del fascio
    - La cella del pixel è completamente svuotata ad un voltaggio di bias > 120 V
- Questi risultati hanno validato la pre-produzione e permesso l'inizio della produzione.
- Siamo pronti per una nuova campagna di test presso SPS che inizierà alla fine di Aprile con altri moduli 50x50  $\mu\text{m}^2$  irraggiati e i nuovi moduli 25x100  $\mu\text{m}^2$ !

GRAZIE PER L'ATTENZIONE

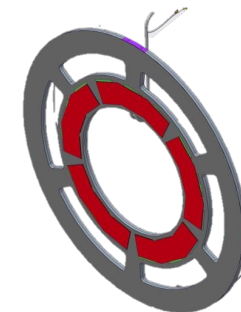
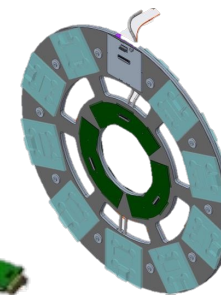
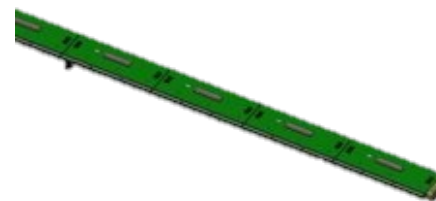


# Backup slides

# ITk Pixel layout

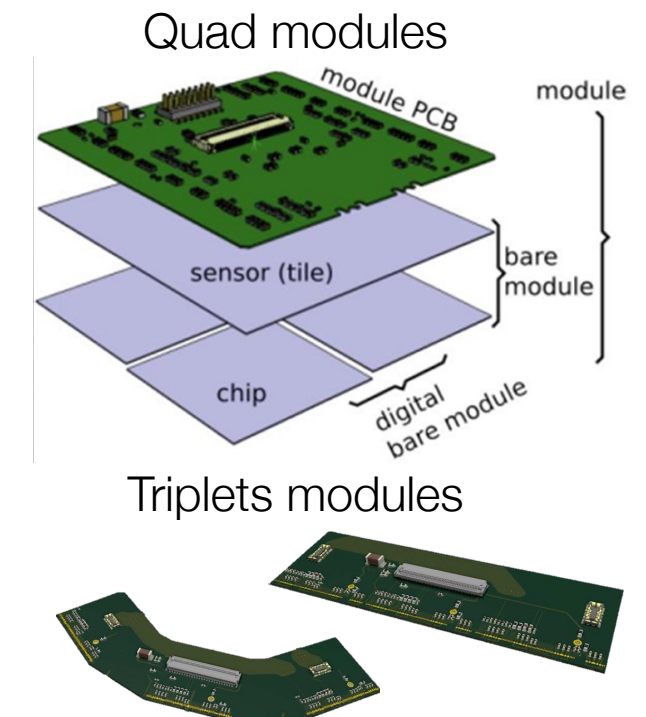
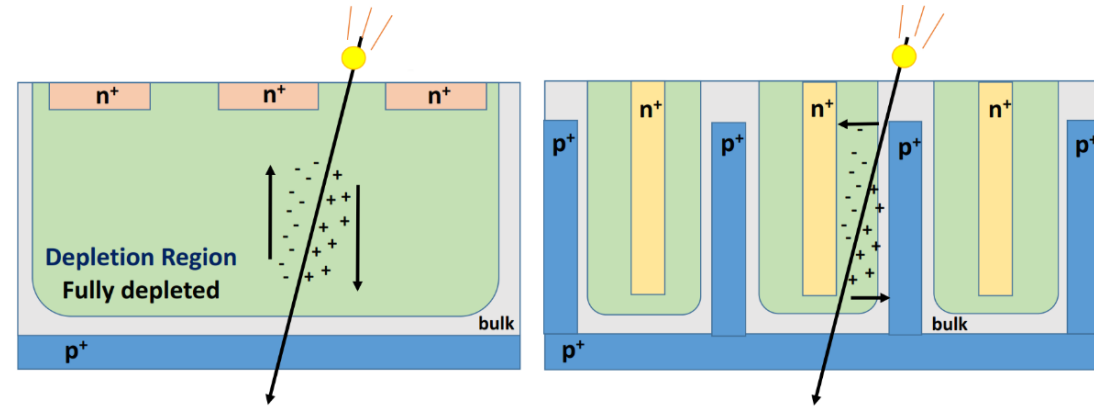


Inner System



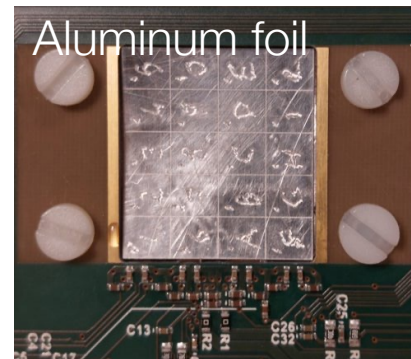
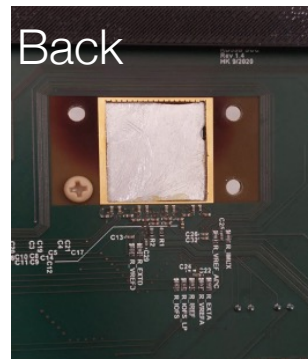
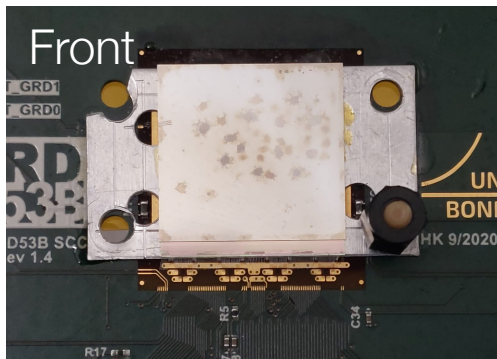
# Moduli ITk Pixel

- Sensori Planari:
  - Tecnologia n<sup>+</sup>-in-p
- Sensori 3D:
  - Colonne n<sup>+</sup> and p<sup>+</sup> impiantate verticalmente in un substrato attivo drogato p
    - Minore è la distanza tra gli elettrodi, minore è la distanza che le cariche/holes devono percorrere
    - Minore probabilità di intrappolamento della carica
    - Aumentata la resistenza alle radiazioni: i sensori possono operare anche dopo  $1 \times 10^{16}$  n<sub>eq</sub>/cm<sup>2</sup>
    - Minore voltaggio di deplezione
- I sensori planari sono montati su quad-modules: 1 bare module (4 chip + 1 sensore planare) + un PCB flessibile
- I sensori 3D sono montati su tripletti: 3 bare modules (1 chip+ 3 sensori) + un PCB flessibile

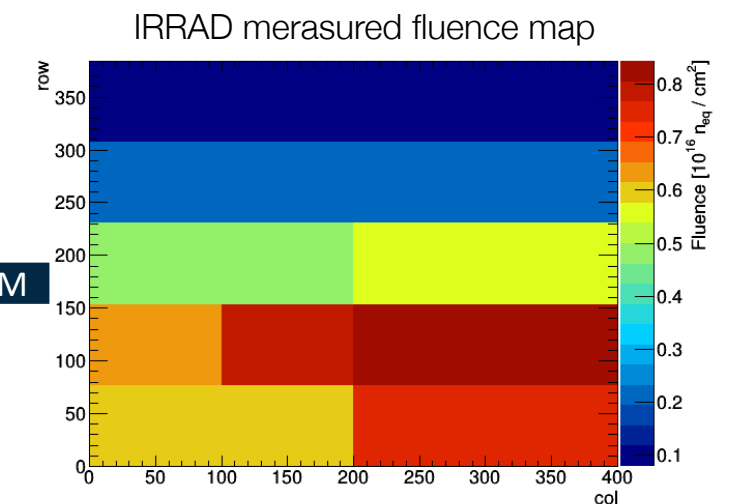
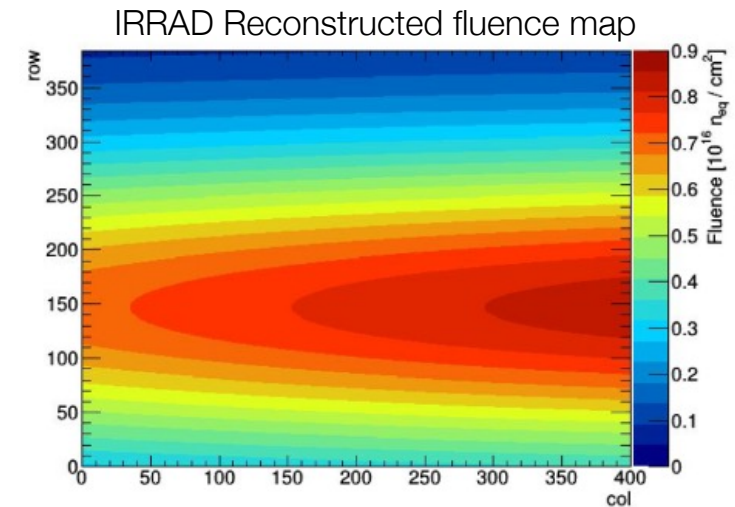


# Secondo irraggiamento presso IRRAD

- A IRRAD sono stati irraggiati non uniformemente fino a  $0.9 \times 10^{16} n_{eq}/cm^2$  con un valore medio di  $0.5 \times 10^{16} n_{eq}/cm^2$
- I moduli sono stati posti inclinati così da massimizzare l'area esposta al fascio che è stato deliverato sul sensore con uno scan orizzontale.
- La fluenza ricevuta è stata misurata dall'attivazione del foglio di alluminio con un dosimetro



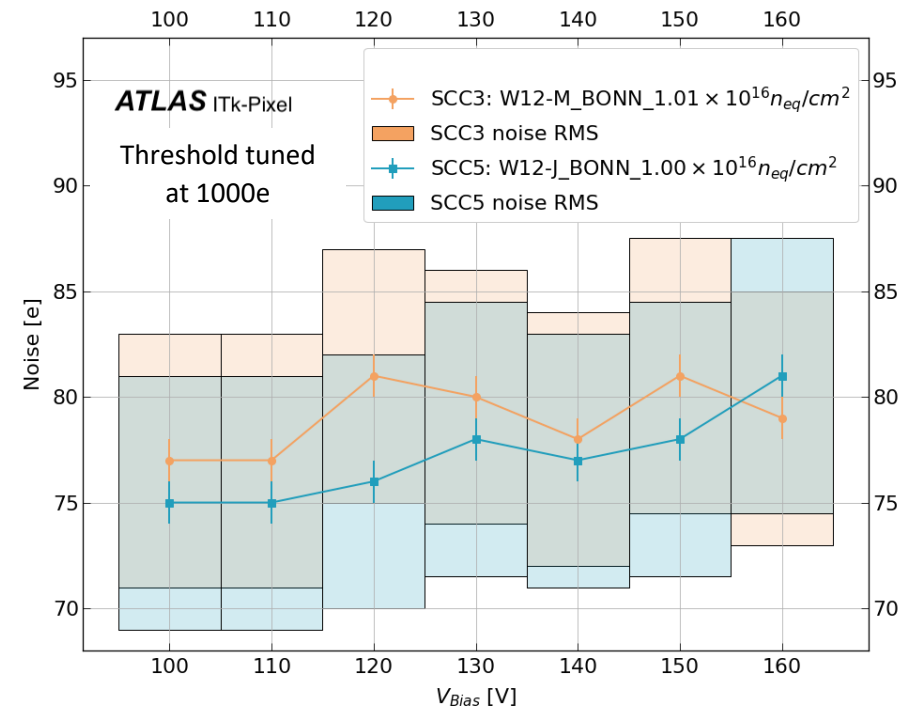
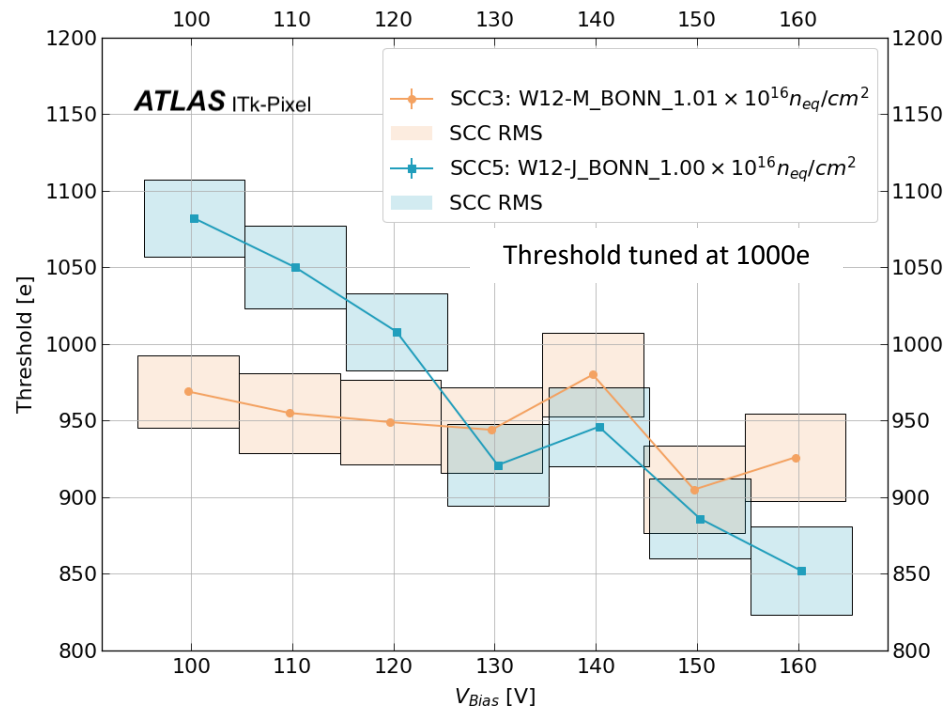
- Fluenza integrata totale:
  - $1.9 \times 10^{16} n_{eq}/cm^2$  nel picco
  - $1.5 \times 10^{16} n_{eq}/cm^2$  di media
- La fluenza è stata mappata misurando i diversi valori di fluenza





# Strategia di tuning della threshold

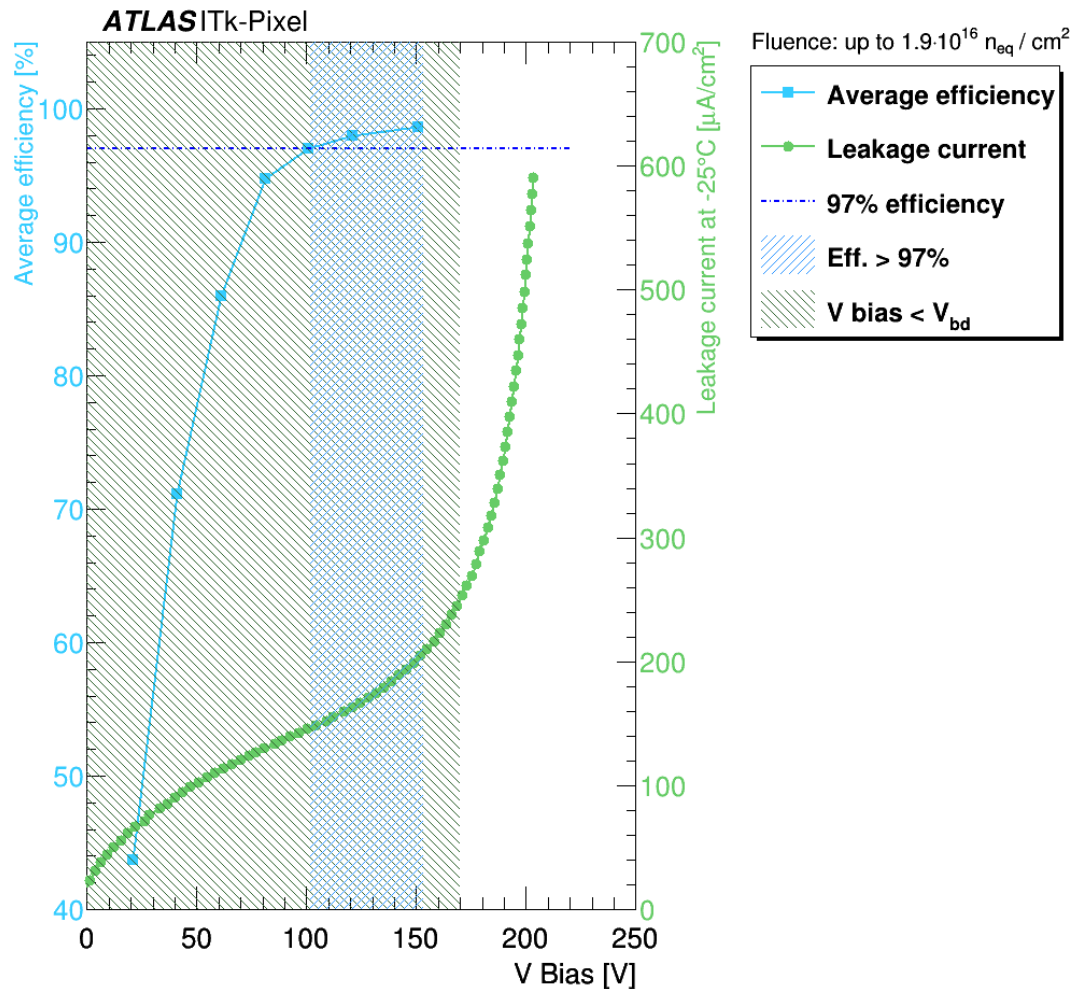
- Le SCC testate durante il testbeam sono state tunate ad un valore target di 1000e a 100 V di voltaggio di bias e lo stesso tuning è stato usato per tutti i voltaggi.
- La distribuzione della threshold e del noise in funzione della tensione è risultata accettabilmente stabile su tutto il range di voltaggi



- Le barre di errore sono l'errore del valore medio della distribuzione, mentre le colonne corrispondono alla deviazione standard della distribuzione.



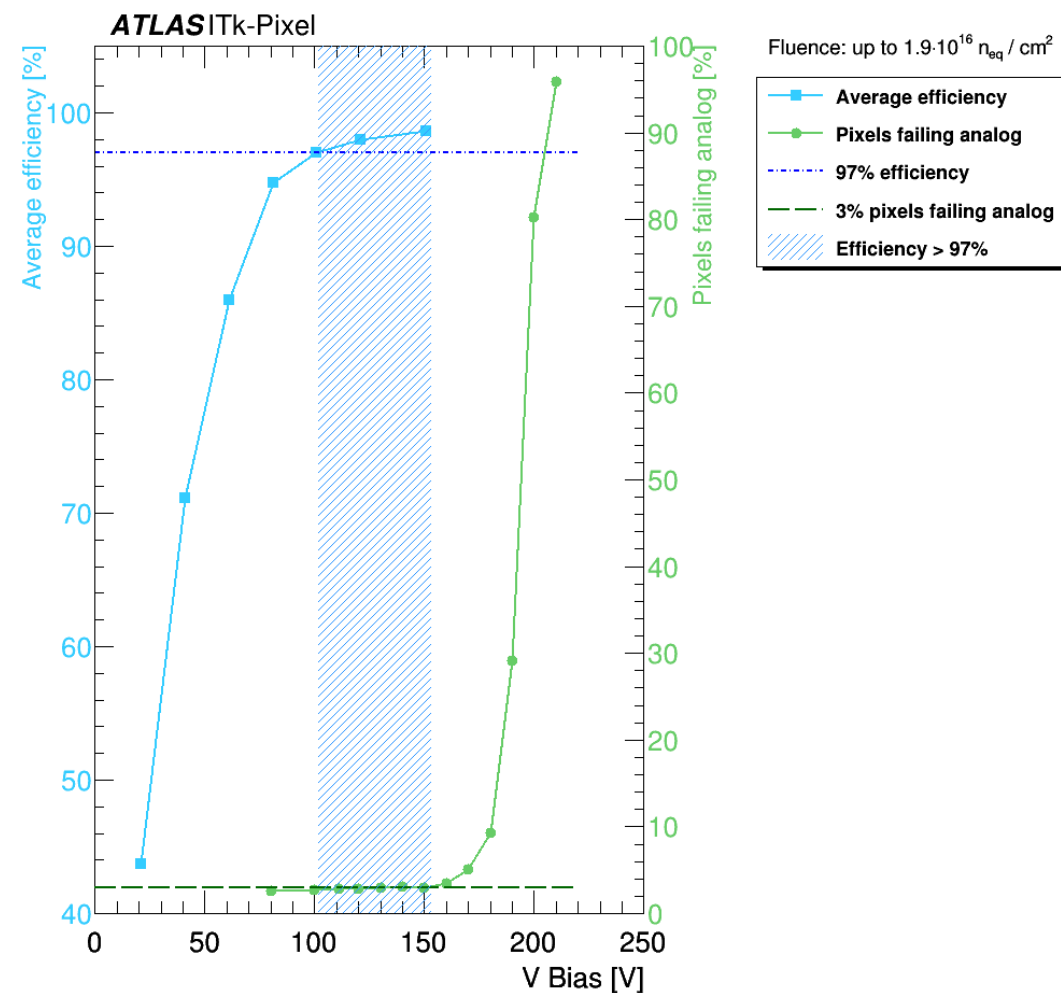
# Finestra di operabilità



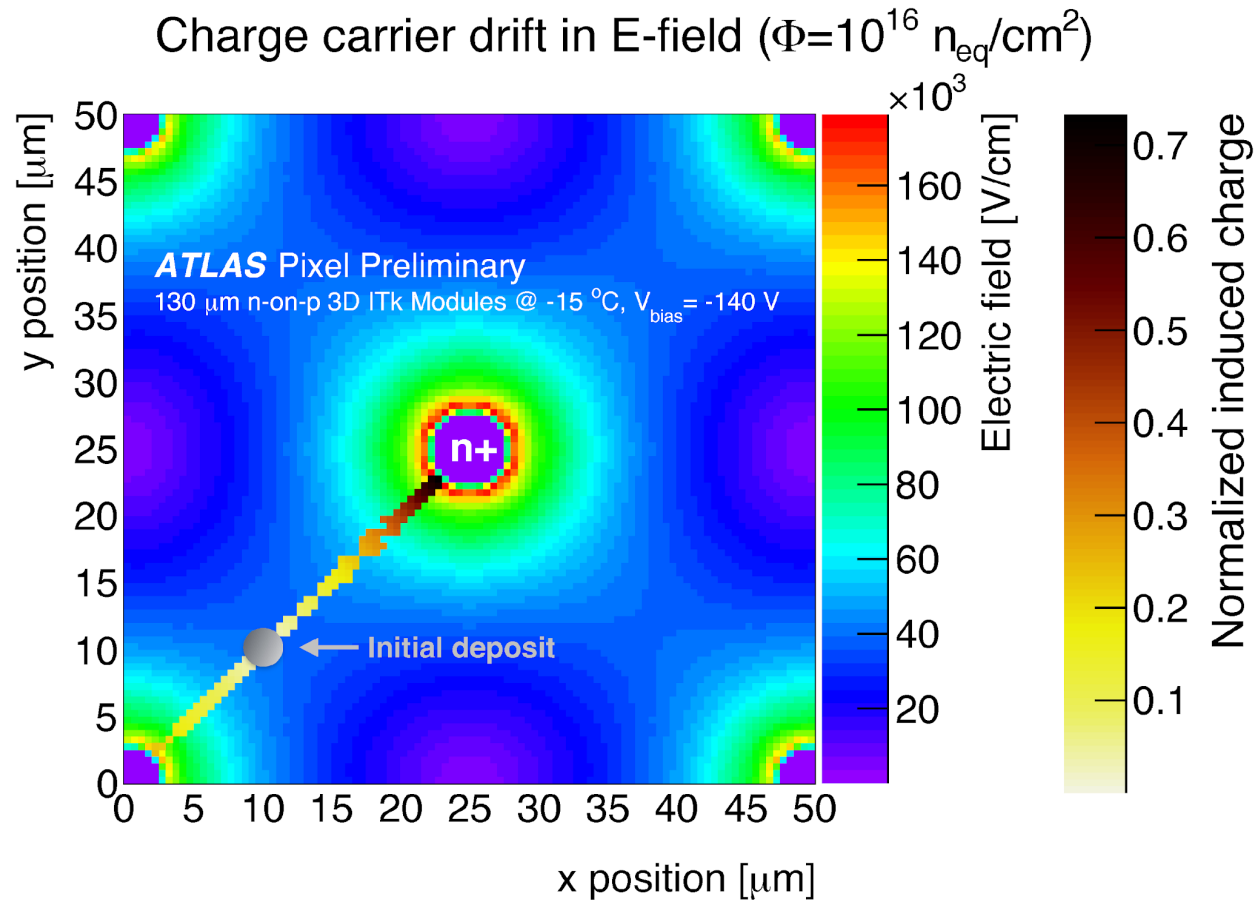
- La finestra di operabilità è definita come range di voltaggi nel quale si ha contemporaneamente il valore di efficienza superiore al 97% mentre si è sotto alla tensione di breakdown: ~100 V - ~150 V di voltaggio di bias
- La corrente di leakage  $I \sim 150 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  e la potenza dissipata  $15 \text{ mW}/\text{cm}^2$  a 100 V bias (riscalata a  $-25^\circ\text{C}$ ) per SCC3

# Finestra di operabilità

- È stato osservato che il numero di pixel noisy/disabilitati cresce con il voltaggio.
  - Lo stesso tuning (threshold target 1000e a 100 V bias) è stato usato per tutti i valori di tensione. Si potrebbe forse ridurre questo fenomeno ri-tunando il modulo ad ogni voltaggio.
- È stato studiato il numero di pixel disabilitati tramite analog-scan a diversi valori di voltaggio di bias:
  - C'è una crescita lenta di circa il 3% di pixel che vengono mascherati fino a ~150 V
  - Dopo di che il numero di pixel mascherati aumenta velocemente quando si entra nella regione di breakdown
- La finestra di operabilità in questo caso corrisponde al voltaggio in cui contemporaneamente l'efficienza del modulo è superiore al 97% e la frazione di failing pixel è bassa: ~100 V - ~160 V bias.



# Simulazione del campo elettrico



- È stato simulato il campo elettrico dopo l'irraggiamento (più informazioni in [ITk\\_Public\\_Plots](#))
- In questo plot viene rappresentato il campo a  $V = -140\text{V}$  dopo l'irraggiamento a  $1.0 \times 10^{16} n_{eq}/\text{cm}^2$
- Il campo elettrico minore potrebbe essere associato con una bassa efficienza, almeno quando siamo a bassa tensione