

*Single chip module :*  
Simulazione e  
caratterizzazione con raggi X

Beatrice Cervato

# Perché è importante...

## ... Lo scan con i raggi X

- Gli scan con i raggi X permettono di individuare problemi legati al *bump bonding* ⇒ importante per market survey dei prototipi.
- Misura della tensione di svuotamento: *Full Depletion Voltage*.

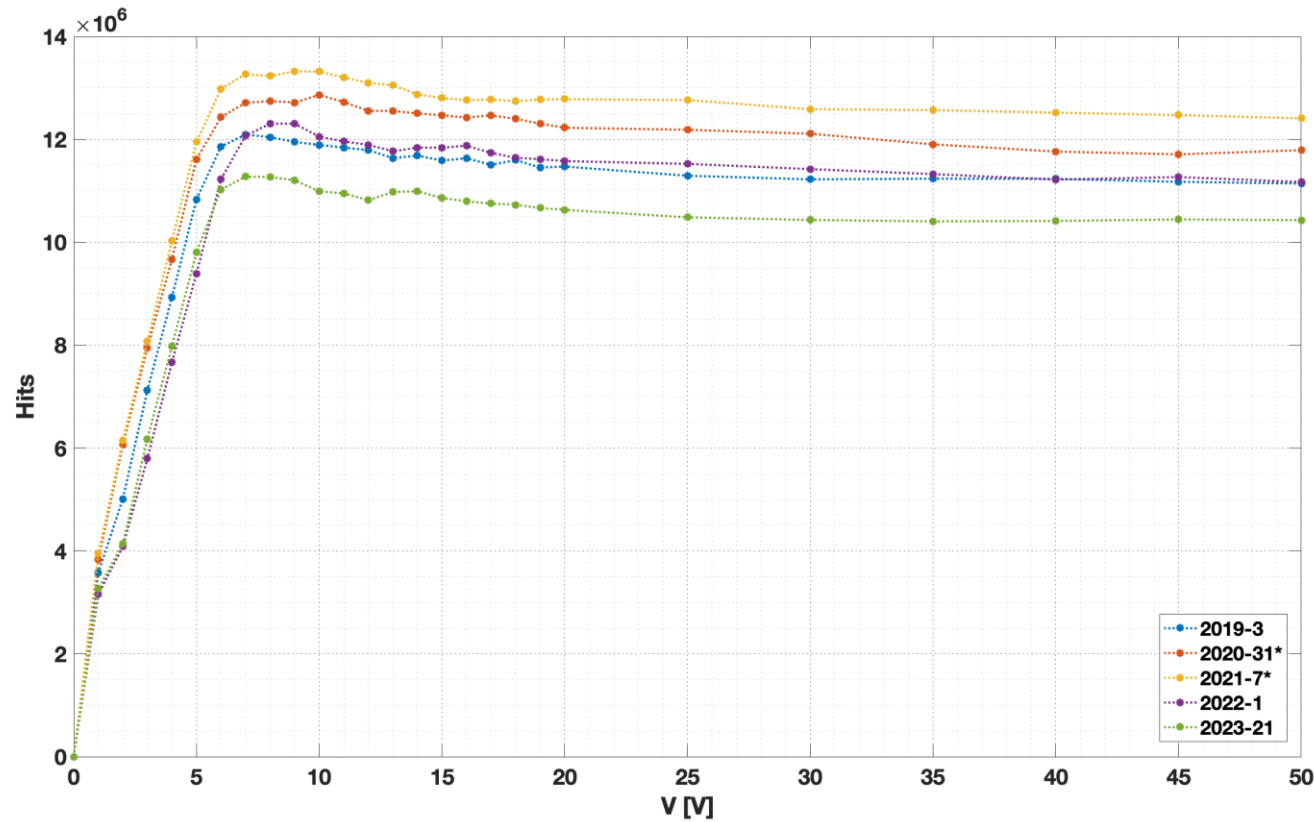
## ... La simulazione

Il confronto con i dati raccolti permette:

- di comprendere l'evoluzione dello spessore della zona di svuotamento;
- di studiare l'effetto di soglia e rumore elettronico
- di stimare il contributo della diffusione nel processo di raccolta della carica

# Dati sperimentali

## Numero di hit in funzione del *Bias Voltage*



$$\sigma_D = \sqrt{2Dt}$$

$$dt = -\frac{dx}{v} = -\frac{dx}{\mu E(x)}$$

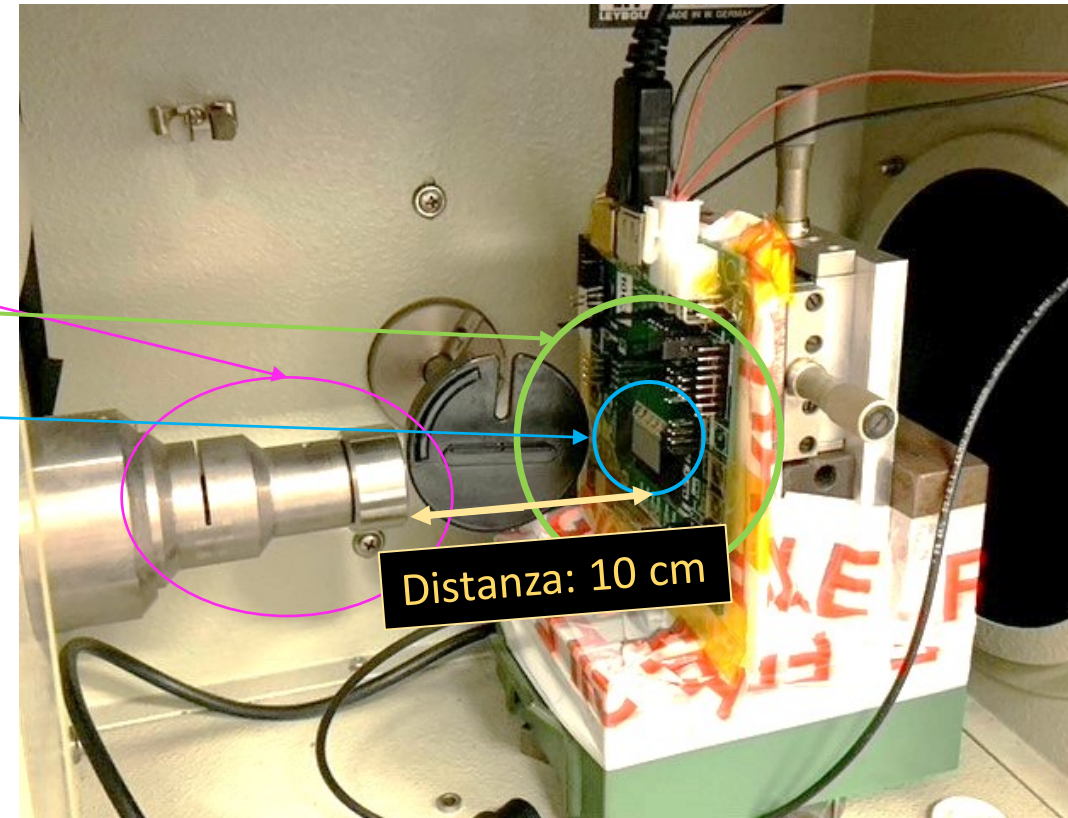
$$t(x, x_0) = -\int_{x_0}^x \frac{dx'}{\mu E(x')}$$

I dati raccolti in laboratorio con misure di 30 secondi, riguardano sensori della Micron Technology 3073\_10 da 100 um, due dei quali sono dotati di punch-through bias grid (e sono indicati con l'asterisco).

# Cosa viene simulato

Apparato sperimentale presente in laboratorio di Facoltà:

- Tubo a raggi X con anodo in Mo
- Prototipo chip di lettura: RD53A
- Sensore planare «Micron Technology»:
  - Densità Si:  $2.33 \text{ g/cm}^3$
  - Dimensione totale:  
13.5 mm x 9.6 mm x **100 um**
  - Dimensione di un pixel:  
50 um x 50 um

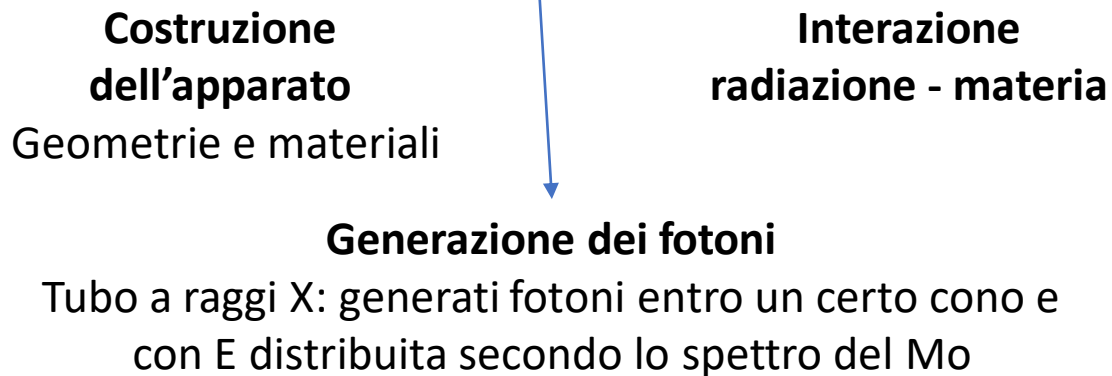


# Come viene implementata la simulazione

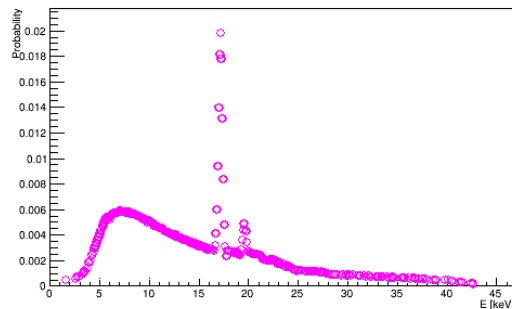
- Geant4 versione «geant4-09-04-patch-04»
- Physics List : vedi backup
- Soglie: 1000 e<sup>-</sup>
- Rumore: 70 e<sup>-</sup>
- Rivelatore  $\perp$  sorgente
- Dimensioni trasversali della sorgente: 0.2 cm x 0.04 cm
- Temperatura: 300 K
- Numero di eventi simulati: 100 000

# Struttura della simulazione

SIMULAZIONE:



( $k_{\alpha} = 17.4 \text{ keV}$ ,  $k_{\beta} = 19.6 \text{ keV}$   
 $E_{e-h, 300 \text{ K, Si}} = 3.6 \text{ eV} \Rightarrow$  circa  
 $5000 e^{-} \Rightarrow$  accende sicuramente il pixel se la soglia è impostata a  $1000 e^{-}$ )

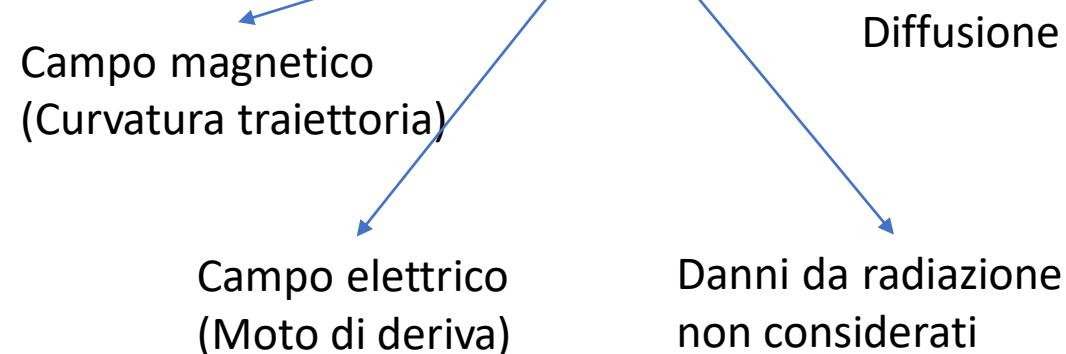


OUTPUT

File con posizione ed entità dei depositi di energia

DIGITALIZZAZIONE:

Deposito di energia convertito in coppie e-h  
Viene calcolato su quale pixel i portatori inducono il segnale tenendo conto di:



OUTPUT

File con pixel accesi e corrispondente quantità di carica raccolta

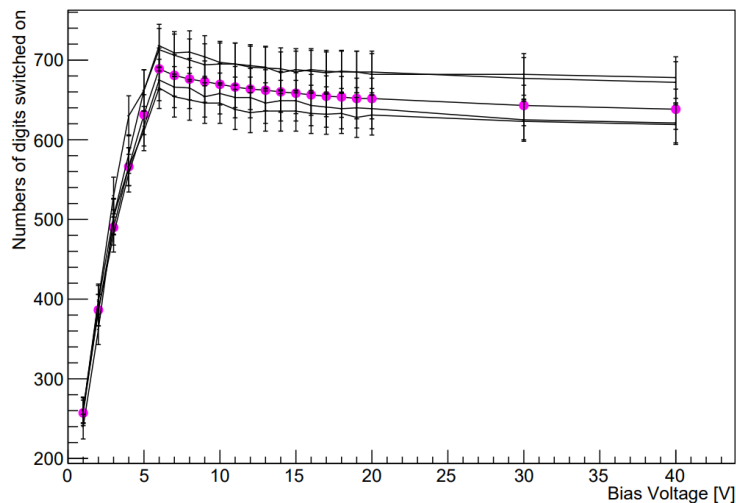
# Analisi

Andamento del numero di hit in funzione del Bias Voltage (B.V.)

Stima degli errori statistici:

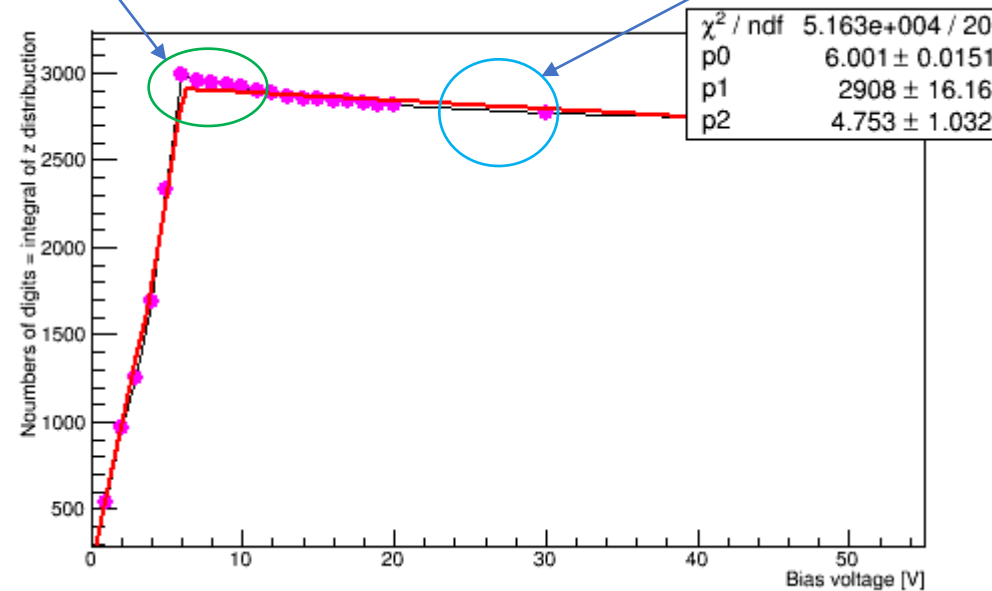
30 simulazioni (30 run)

Per ogni simulazione, 30 digitalizzazioni con 23 diversi valori di B.V.



Individuazione Full Depletion Voltage

Contributo della diffusione



$$\sigma_D = \sqrt{2Dt}$$

$$dt = -\frac{dx}{v} = -\frac{dx}{\mu E(x)}$$

$$t(x, x_0) = -\int_{x_0}^x \frac{dx'}{\mu E(x')}$$

# Risultati

Confronto con dati sperimentali su:

- Crescita lineare nella fase di svuotamento della giunzione
- Andamento decrescente nella regione di svuotamento totale
- Pendenza della decrescita del numero di hit  $\left( \frac{N_{max} - N_{50V}}{N_{50V}} \cdot 100 \right)$

Miglior accordo con dati sperimentali se:

Alla relazione di Einstein viene aggiunto un fattore moltiplicativo pari a 0.4:

$$D = \frac{kT\mu}{e} \cdot 0.4$$

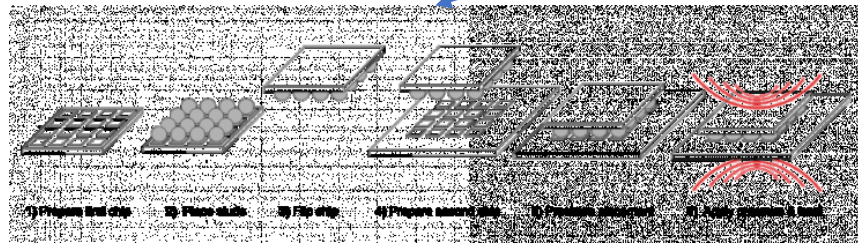
Spettro del molibdeno è tagliato per energie minori di 12 keV  
(la sorgente X ha una protezione in vetro che non viene simulata  $\Rightarrow$  essa potrebbe schermare la componente bassa dello spettro)

Posizionamento spaziale e dimensione delle componenti sono coerenti con il setup sperimentale reale



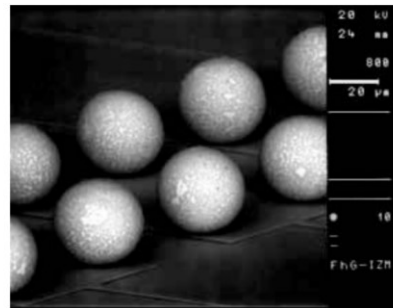
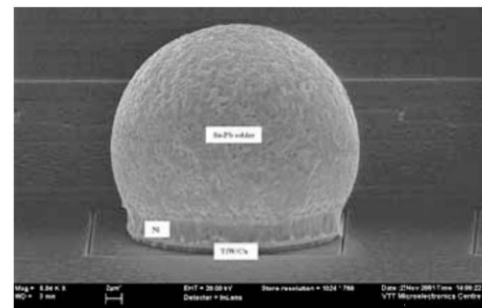
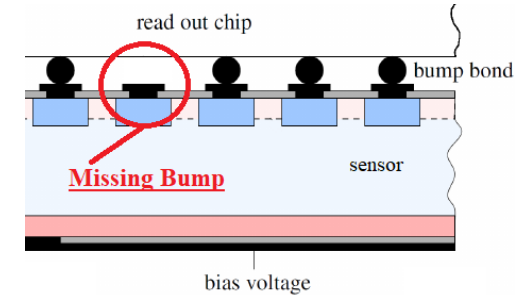
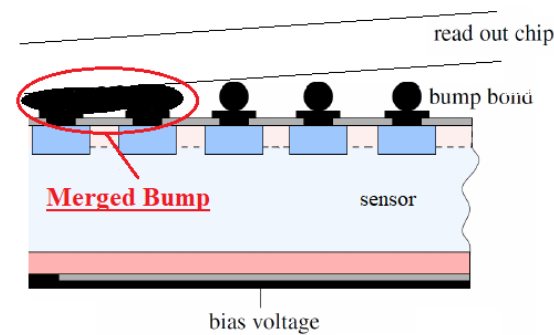
# Stato attuale: qualifica del bump-bonding

- Market survey: qualificare i venditori di processi di flip-chip bump bonding (Leonardo) ⇒ individuare eventuali difetti legati al *bump bonding*.



Merged Bumps  
Due o più collegamenti fusi insieme

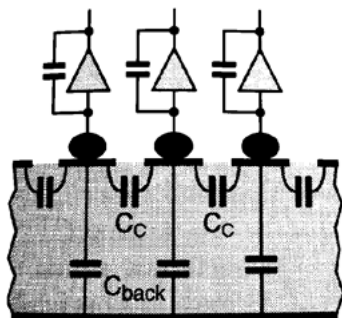
Missing Bumps  
Collegamento assente o scarso



# Individuare pixel problematici

## Scan di «Cross Talk»

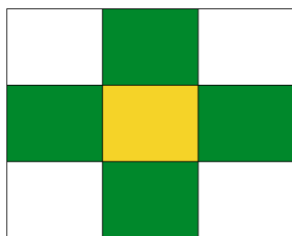
La carica raccolta da un pixel può indurre un segnale parassita nei pixel vicini per accoppiamento capacitivo



Per misurarne l'entità



Scan dedicato della YARR



Viene iniettata della carica nei **pixel vicini** e misurata la soglia del **pixel centrale**

Carica t.c. se iniettata nei vicini, il 50% degli hit viene visto anche dal pixel centrale

## Differenza di rumore

Il rumore elettronico visto da un preamplificatore, dipende dalla capacità con cui viene caricato

Confronto tra rumore quando il B.V. è pari a

0 V

Sensore non  
svuotato

Alta capacità

50 V

Sensore  
svuotato

Bassa capacità

Avere rumore a 0 V  
equivalente a 50 V

(differenza nulla) è sintomo di anomalia: la misura del rumore non dipende dallo svuotamento

## Scan con raggi X

Il chip viene irraggiato per 3 minuti con raggi X



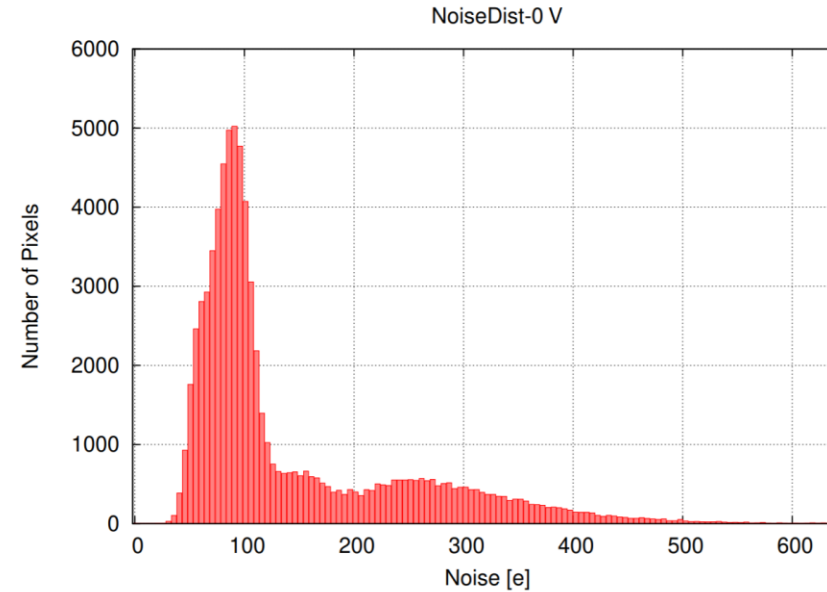
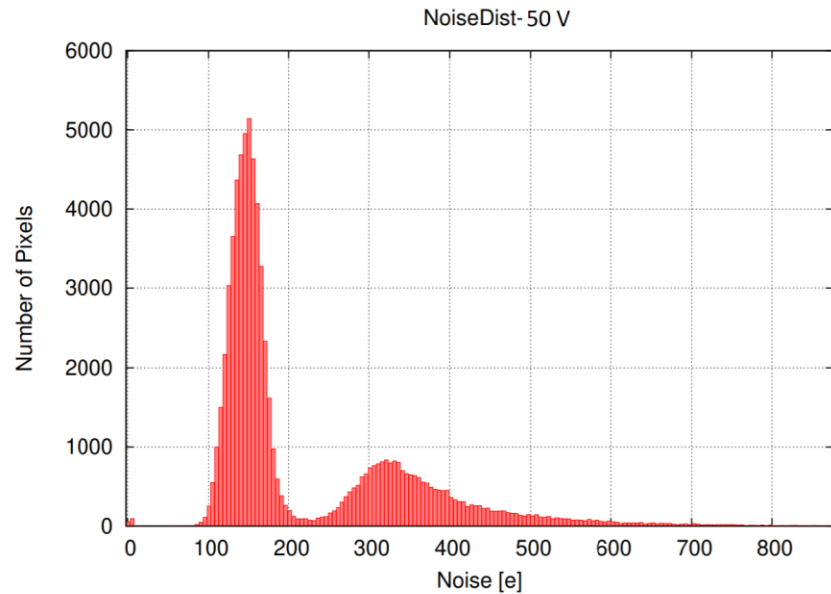
Dopo, i pixel che risultano spenti sono candidati missing bumps

MA

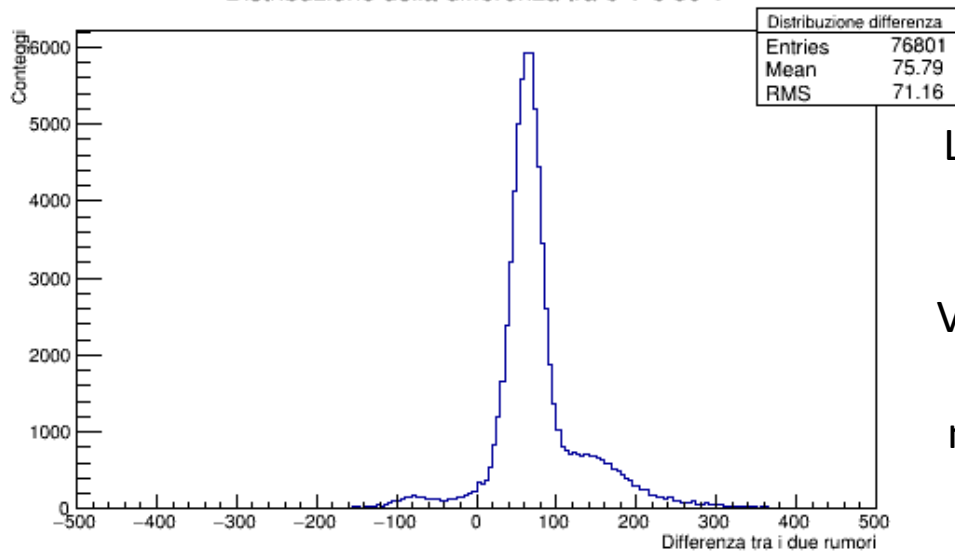
Potrebbero essere **falsi positivi**: risultare spenti perché mascherati in stadi di tuning precedenti  
Confronto tra maschera di abilitazione dei pixel e mappa dei conteggi dopo i raggi X

(Le *merged bump* spesso hanno conteggi o distribuzioni di soglia anomali  $\Rightarrow$  già mascherati  $\Rightarrow$  Questo scan identifica principalmente le *missing bump*)

# Differenza di rumore (3073\_10\_40)



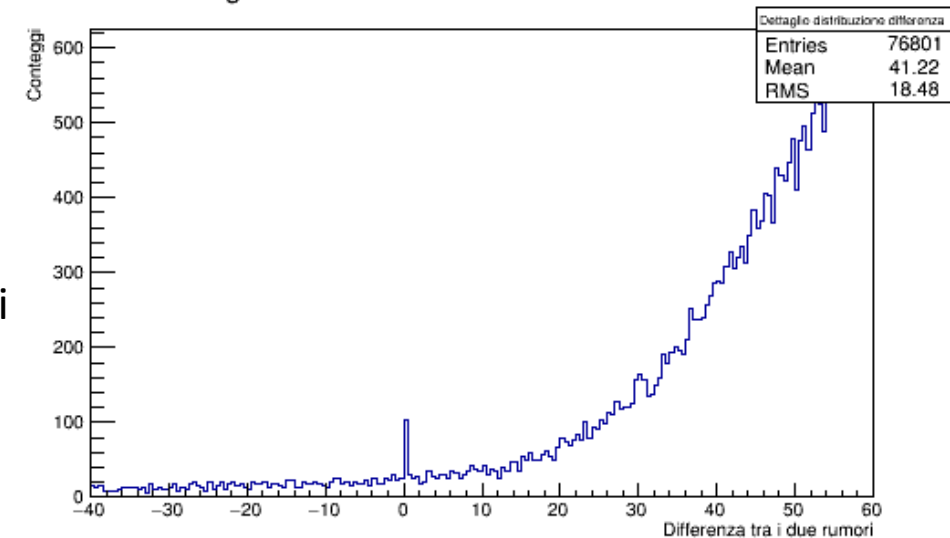
Distribuzione della differenza tra 0 V e 50 V



La distribuzione della differenza di rumore non è centrata su 0

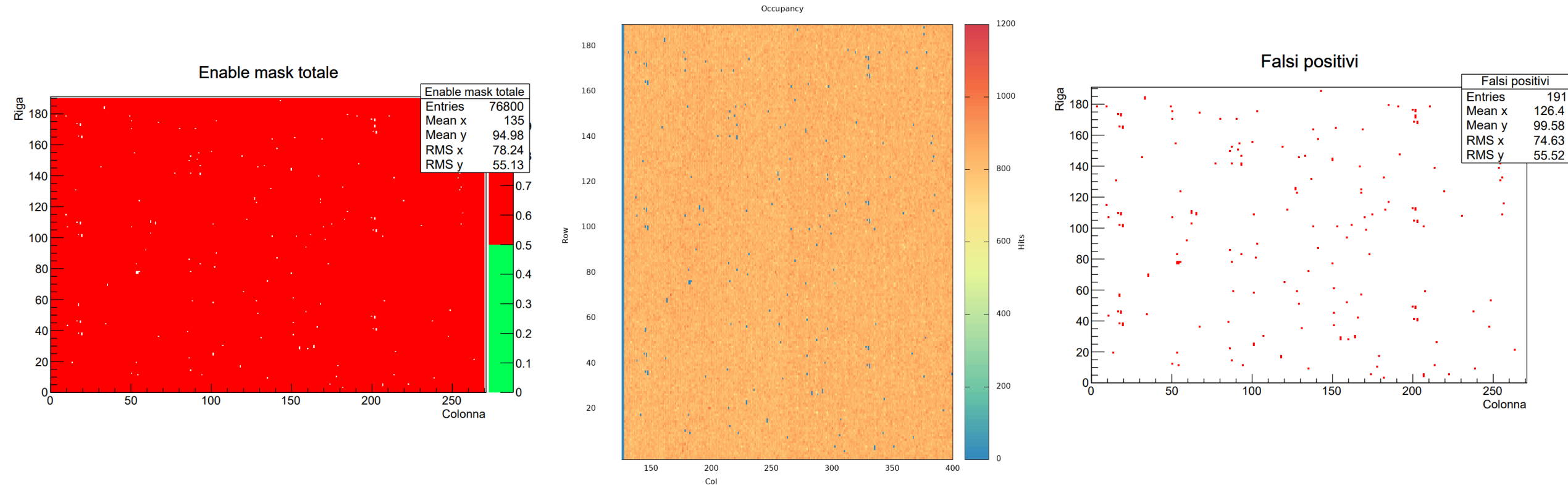
Vengono considerati disconnessi quei pixel con differenza circa minore o uguale alla precisione della misura (10 – 20 e- )

dettaglio distribuzione della differenza tra 0 V e 50 V



# Scan con raggi X

Esempio di un chip in cui tutti i pixel che non hanno rilevato conteggi dopo lo scan con raggi X sono stati disabilitati in scan precedenti



Tutti i chip con sensore planare: *0 missing bump / 418000 pixel*  
 I due chip con sensore 3D: *una missing bump / 104000 pixel*

# Sommario

- Confronti dati scan X con simulazione
  - Rate di hit vs. bias voltage in 100 um thin sensor (Micron Technology)
  - Full depletion at 6 V
  - To describe the collection at high depletion, diffusion must be reduced by a factor 0.4 with respect to Einstein's relation
- Analisi di qualifica della tecnologia di bump-bonding della Leonardo
  - 8 dispositivi planari (FBK e Micron Technology) e 2 3D (FBK)
  - Misure con raggi X danno rate di difetti  $\sim 10^{-6}$  (richiesta  $10^{-4}$ )

# Backup

# Physics List

Viene utilizzato il default di Geant4, in cui vengono accesi i seguenti processi di fisica:

- Fotoni
  - Scattering Compton
  - Effetto fotoelettrico
  - Produzione di coppie
- Elettroni e positroni
  - Scattering multiplo
  - Ionizzazione
  - Bremsstrahlung
  - Annichilazione
- Muoni
  - Scattering multiplo
  - Ionizzazione
  - Bremsstrahlung