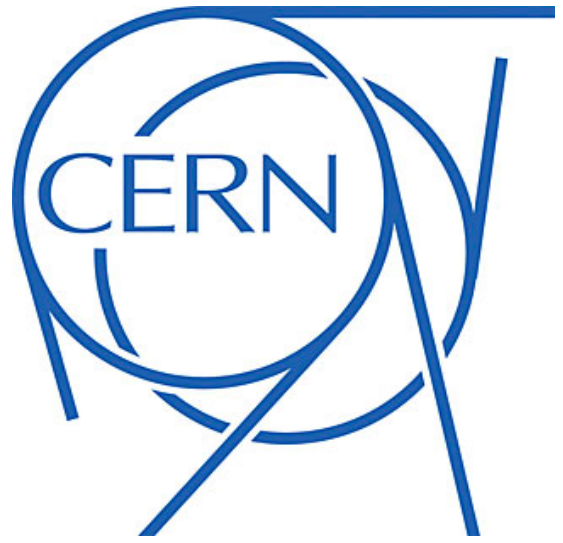




# FCC-hh Dedektörü için Radyasyona Dayanıklı CMOS Piksel Sensör Geliştirme Çalışmaları



Kaan Yüksel Oyulmaz  
FCC İş Birliği Çerçevesinde Ulusal Bilgi Paylaşımı Çalıştayı  
2 Nisan 2022



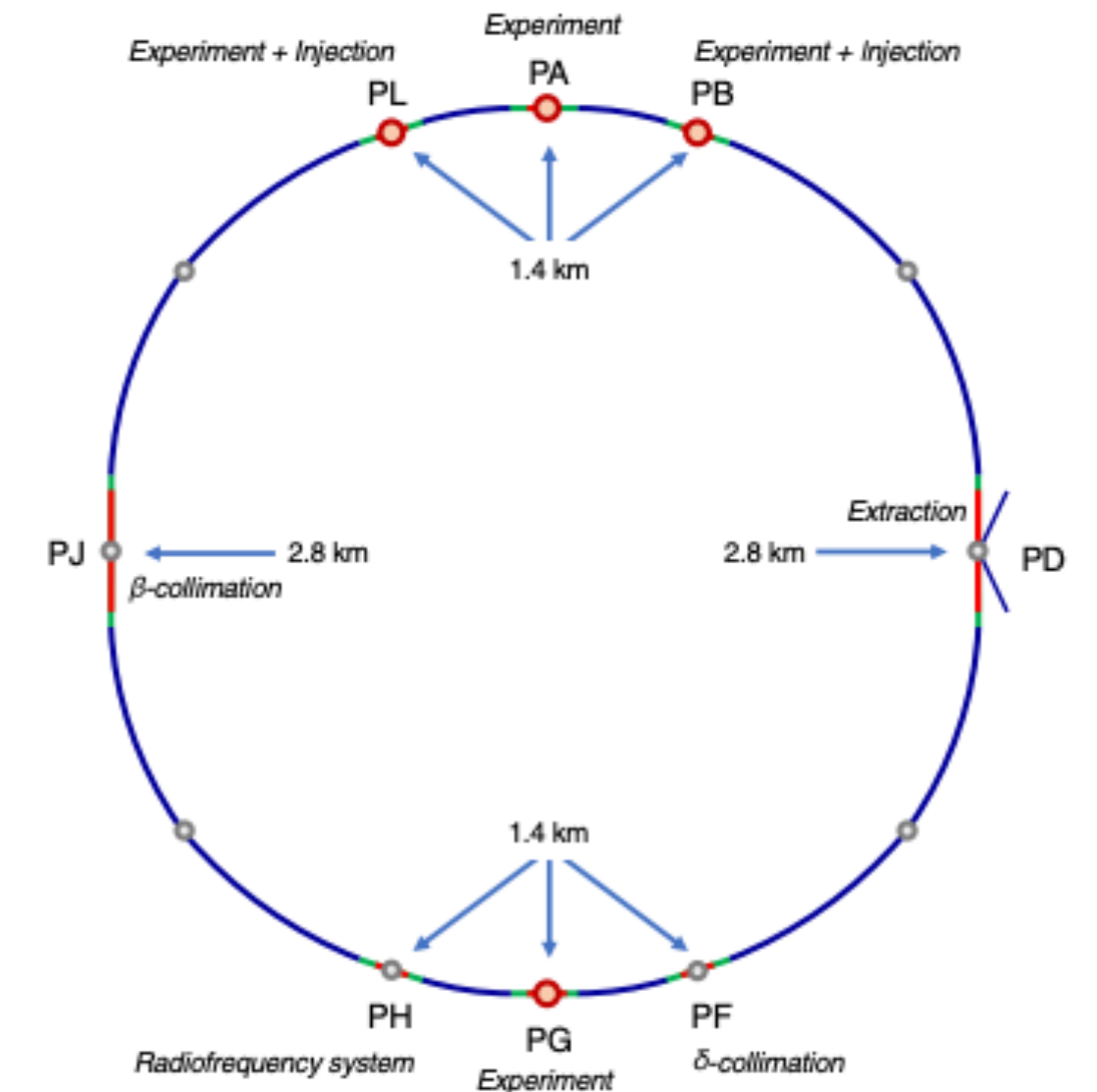
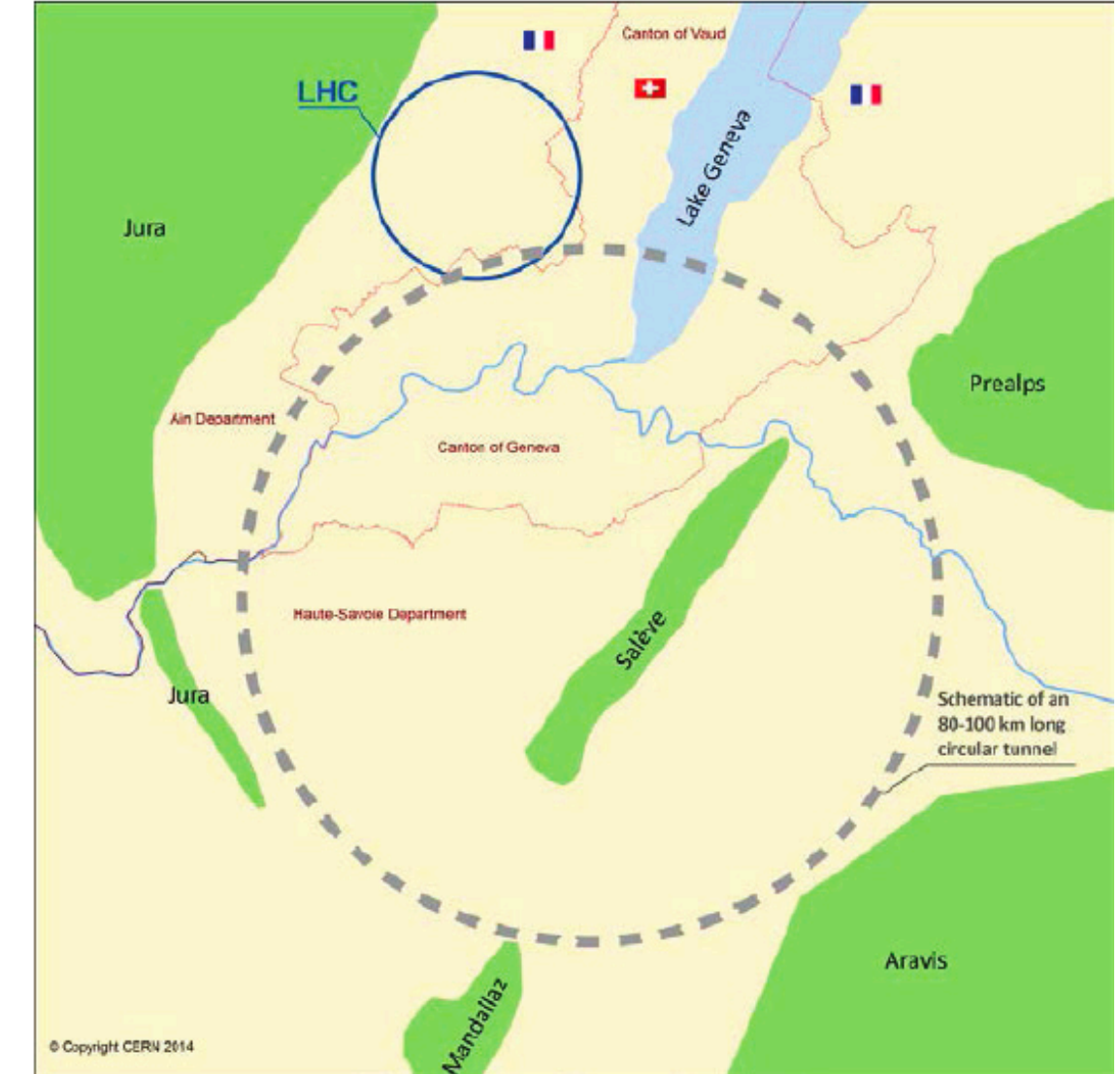
# FCC-hh Dedektörü için Radyasyona Dayanıklı CMOS Piksel Sensör Geliştirme Çalışmaları



- Giriş
  - FCC Projesi
  - FCC-hh Detektörü
- Radyasyona Dayanıklı CMOS Piksel Sensör: MALTA
  - Silikon Piksel Sensörler
  - Geliştirme Süreci
- Sonuç

# Giriş: FCC Projesi

- FCC yakın gelecekte Fransa-İsviçre sınırında yapılması planlanan ~100 km çapında dairesel hızlandırıcı projesidir.
- Proje iki etapta oluşup ilk etapta elektron-elektron (FCC-ee) çarpışmaları ve ikinci etapta proton-proton (FCC-hh) çarpışmaları yapacak şekilde tasarlanma sürecindedir.
- Projenin ikinci etabında, 100 TeV enerjide yüksek ışınılık ile proton-proton çarpışmaları yapılarak parçacıkların özelliklerinin ve etkileşimlerinin daha hassas belirlenmesi, Standart Model Ötesi (BSM) gibi teorilerin, yanında karanlık madde gibi bilim dünyasını meşgul eden konuların araştırılması hedeflenmektedir.
- Böylesine büyük bir çarpıştırıcının 4 farklı deney ile hizmet vermesi hedeflenmektedir. Bunlardan iki tanesi (PA ve PG) ATLAS ve CMS gibi yüksek ışınılık deneyleri olması amaçlanırken, diğer ikisi (PL ve PB) ALICE ve LHC-b gibi düşük ışınılık deneyleri olması amaçlanmıştır.
- Projenin kapsamlı Kavramsal Tasarım Raporu (CDR) 2019 yılında yayınlanmıştır.



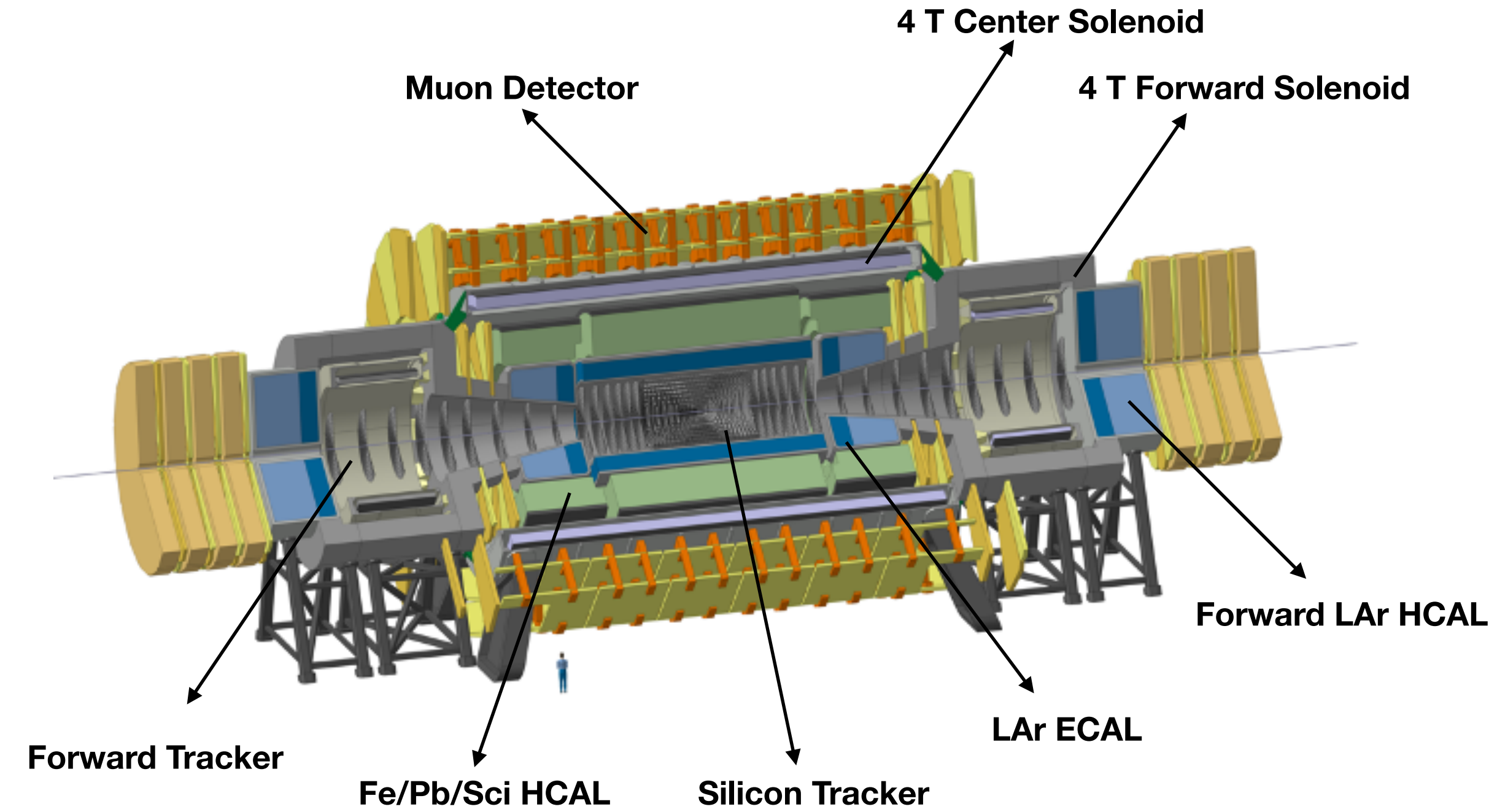
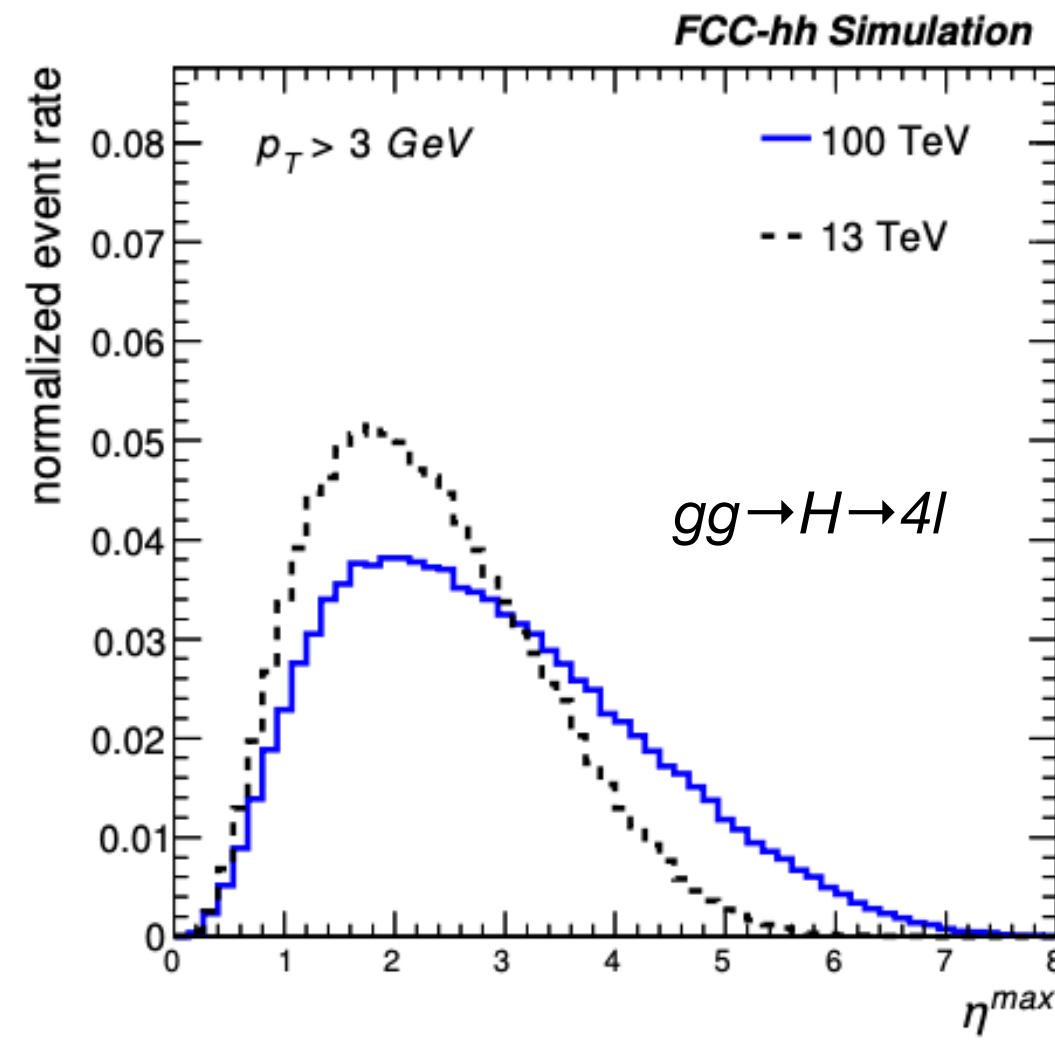
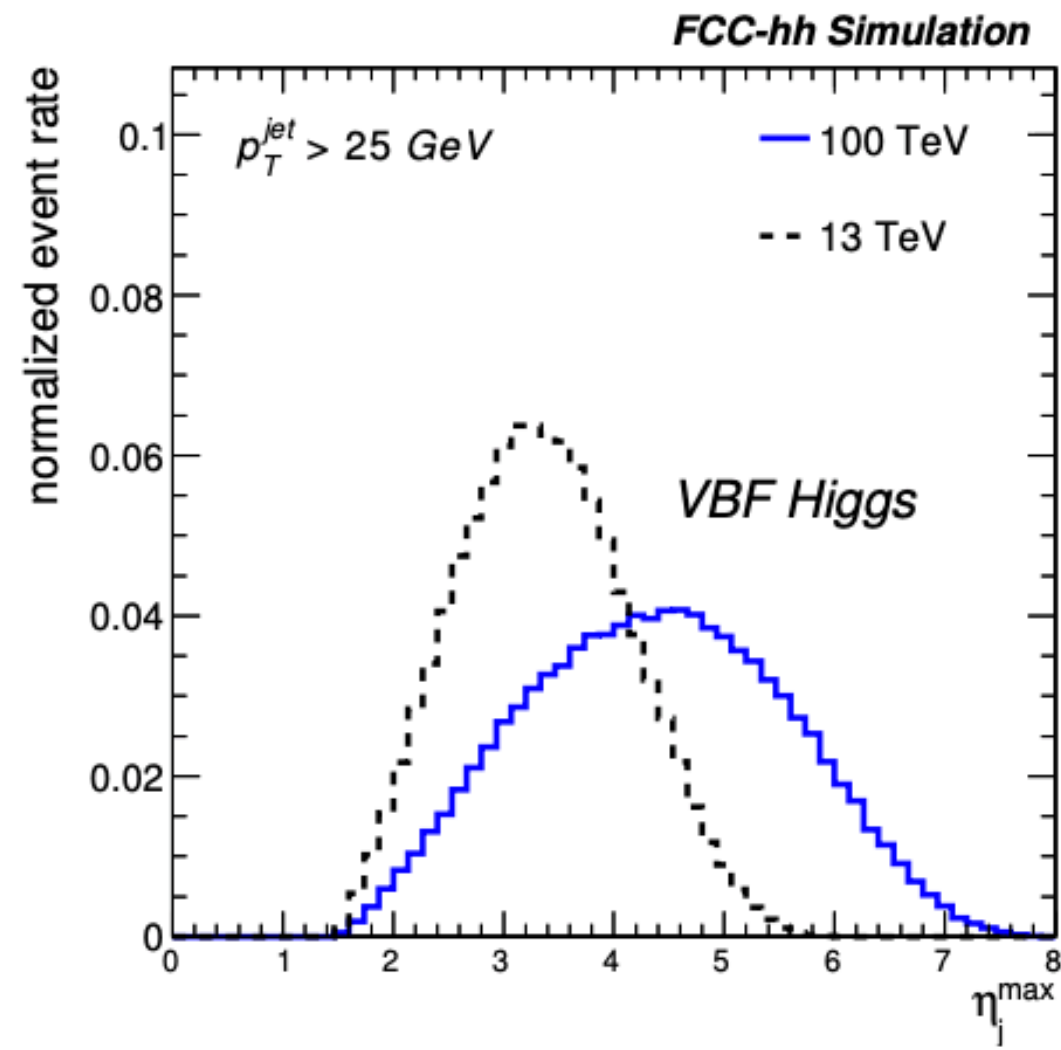
Parameter	LHC and HL-LHC	FCC-hh
Energy (TeV)	14	100
Circumference (km)	26.7	97.75
Dipole field (T)	8.33	<16
Injection energy (TeV)	0.45	3.3
Peak luminosity ( $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )	1.0 (LHC) and 5.0 (HL-LHC)	5.0 (initial) and 30.0 (nominal)
Number of bunches $n$	2808	10 400
Bunch spacing (ns)	25	25
Bunch population $N$ ( $10^{11}$ )	1.15 (LHC) and 2.2 (HL-LHC)	1.0

\*Figürler ve tablodaki veriler "FCC-hh: The Hadron Collider" adlı kavramsal tasarım raporundan (<https://doi.org/10.1140/epjst/e2019-900087-0>) alınmıştır.



# Giriş: FCC-hh Detektörü

- Kavramsal FCC-hh detektörü, ATLAS ve CMS deneylerinde kazanılan tecrübelerle dayanarak tasarlanmıştır ve iddialı bir detektör tasarımı üzerinde durulmuştur.
- Yapılan simülasyonlar, detektörün ileri kısımlarında (Forward Tracker ve Forward Calorimeter) en az merkezi kadar hassas ölçüm yapabilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Örneğin;



\*Detektör, FCC-hh: The Hadron Collider adlı "FCC-hh: The Hadron Collider" adlı kavramsal tasarım raporundan (<https://doi.org/10.1140/epjst/e2019-900087-0>) alınmıştır.  
\*Grafik "Physics Requirements for the FCC-hh Calorimeter System" adlı konferans makalesinden (<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1162/1/012010>) alınmıştır.



# Giriş: FCC-hh Detektörü

- Bu kadar yüksek enerjilere çıktıkça, "pile-up" olarak bilinen birden fazla parçacığın etkileşmesiyle oluşan olaylar gözlemlenmektedir. Gözlemlenen bu olay, hızlandırıcının parametrelerine bağlı olarak değişmektedir ve kabaca;

$$\sigma_{inel} = 108mb @ 100TeV$$

$$n_b = 10400$$

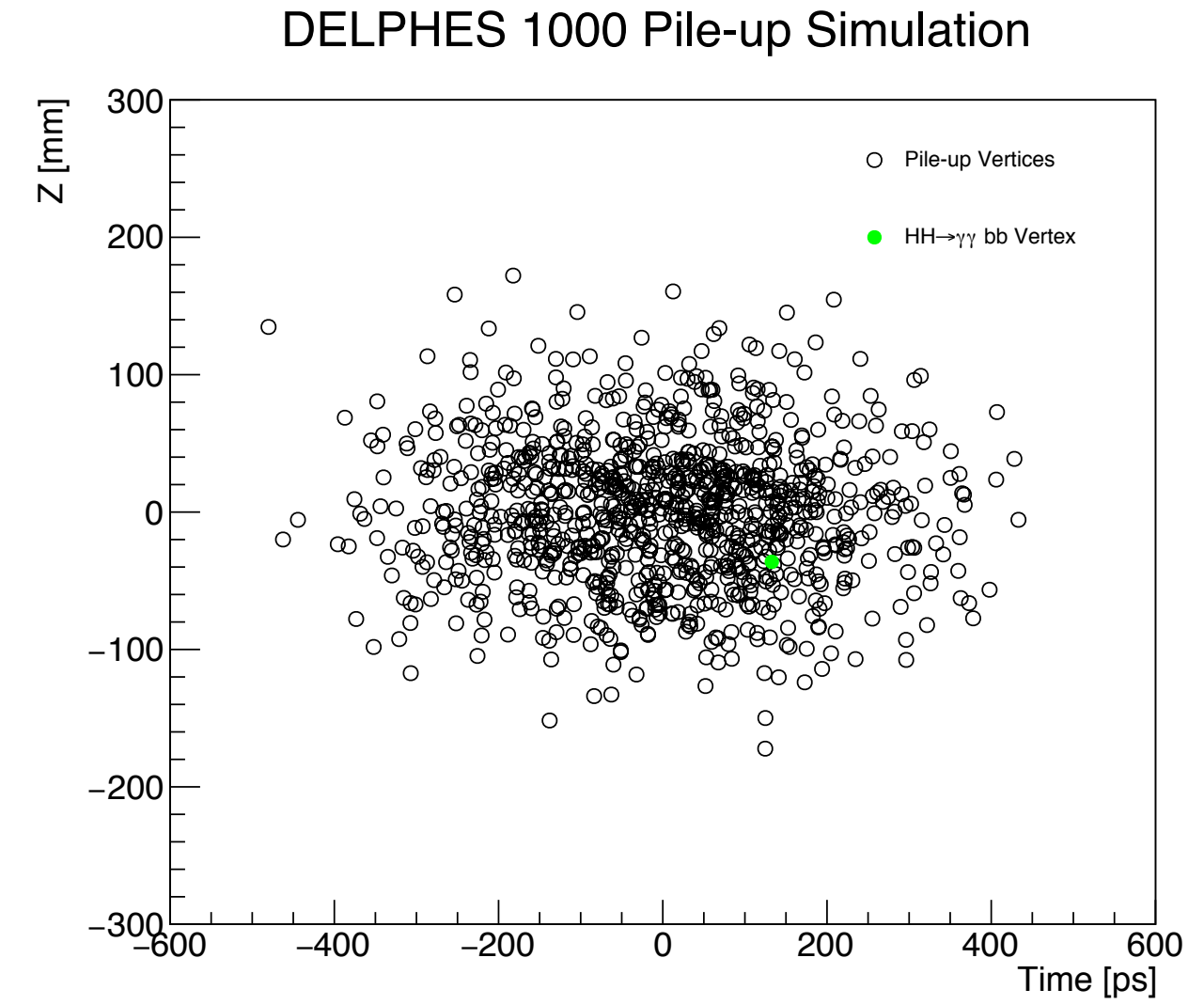
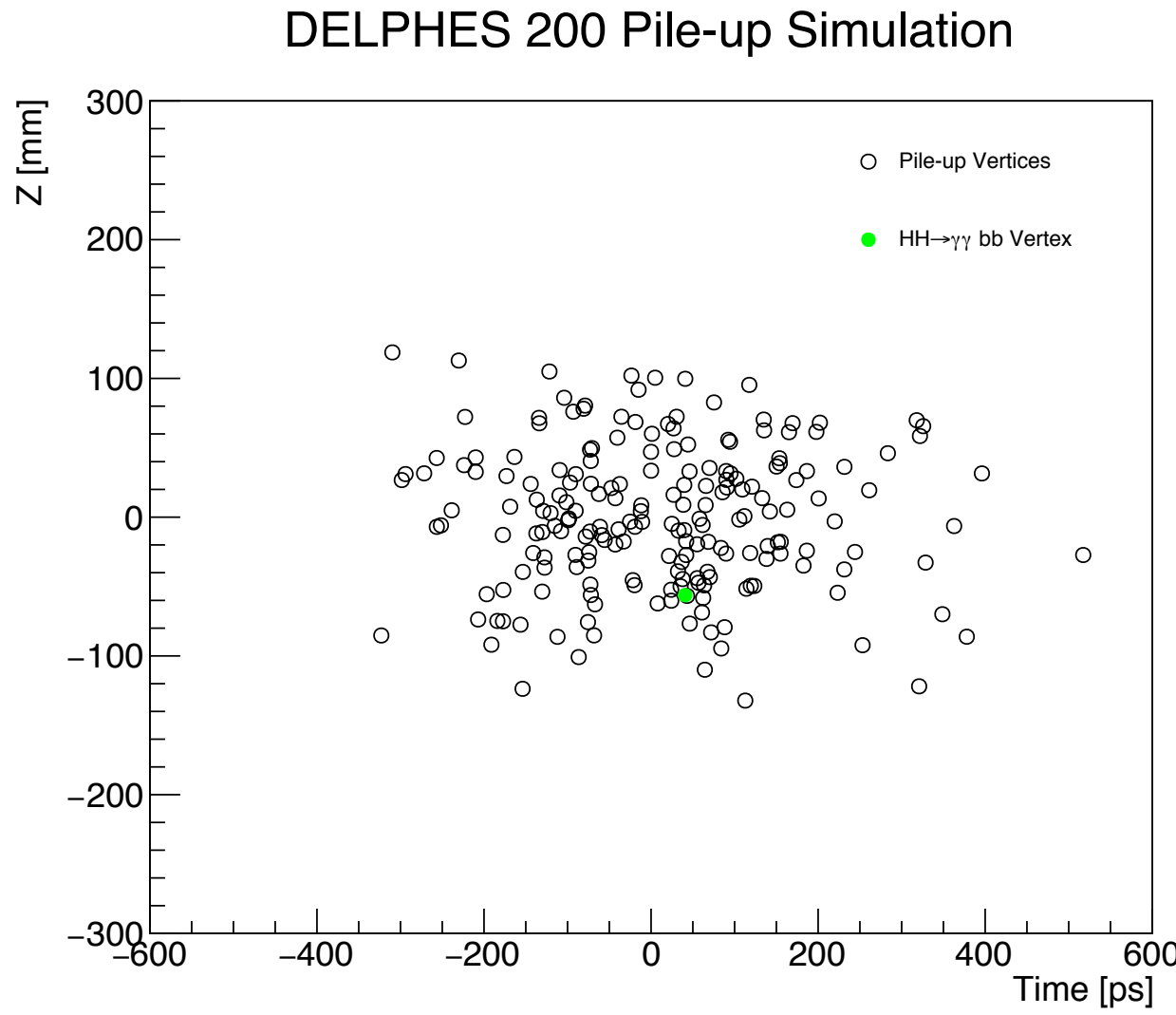
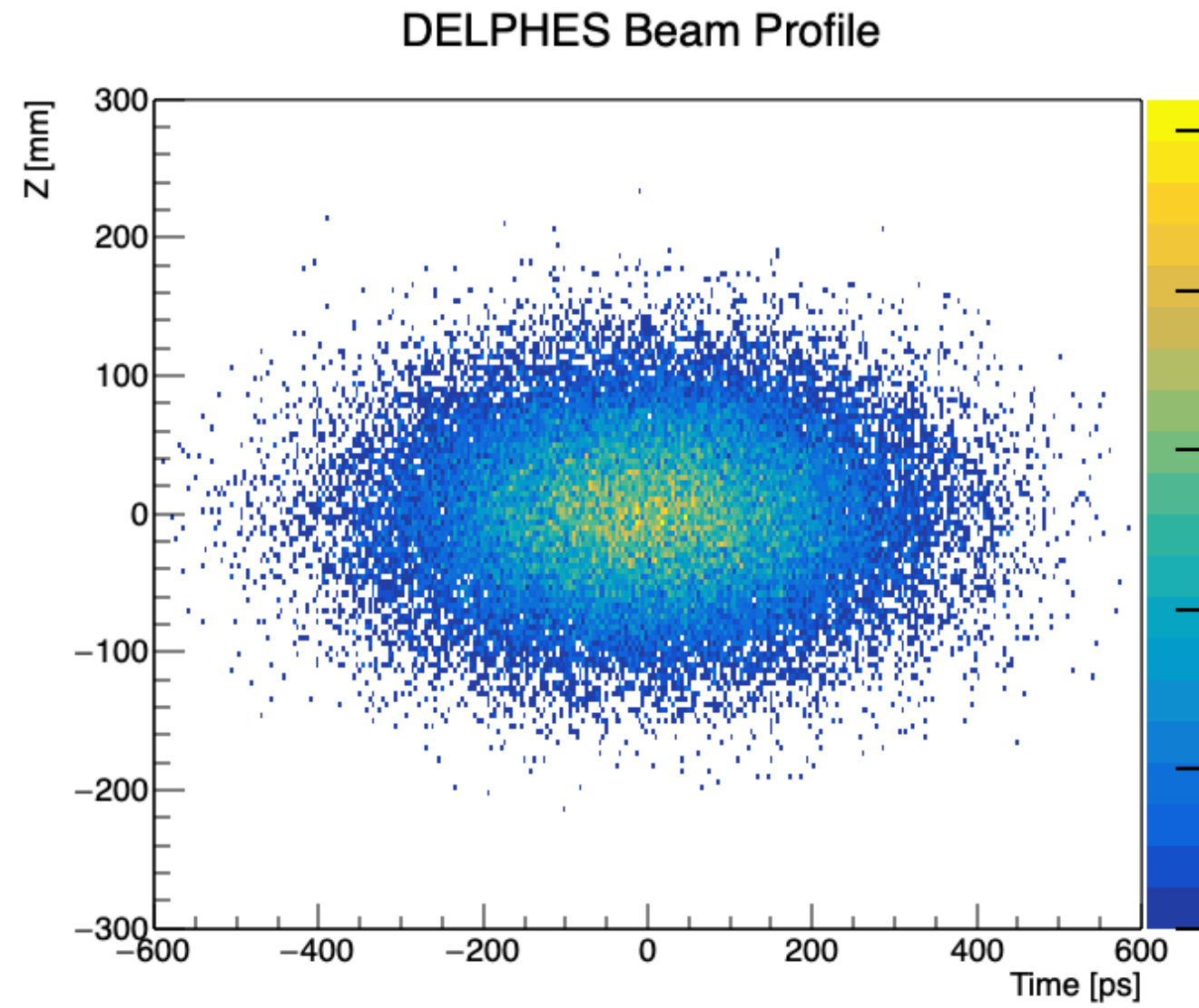
$$\langle \mu \rangle = \frac{\sigma_{inel} \cdot L}{n_b \cdot f_r}$$

$$L_{nominal} = 5ab^{-1}$$

$$L_{ultimate} = 30ab^{-1}$$

$$f_r = \frac{\beta \cdot c}{2\pi R}$$

- Düşük ışıklılıkta ortalama 200 ve maksimum ışıklılıkta ortalama 1000 pile-up olayı gözlenmesi beklenmektedir.



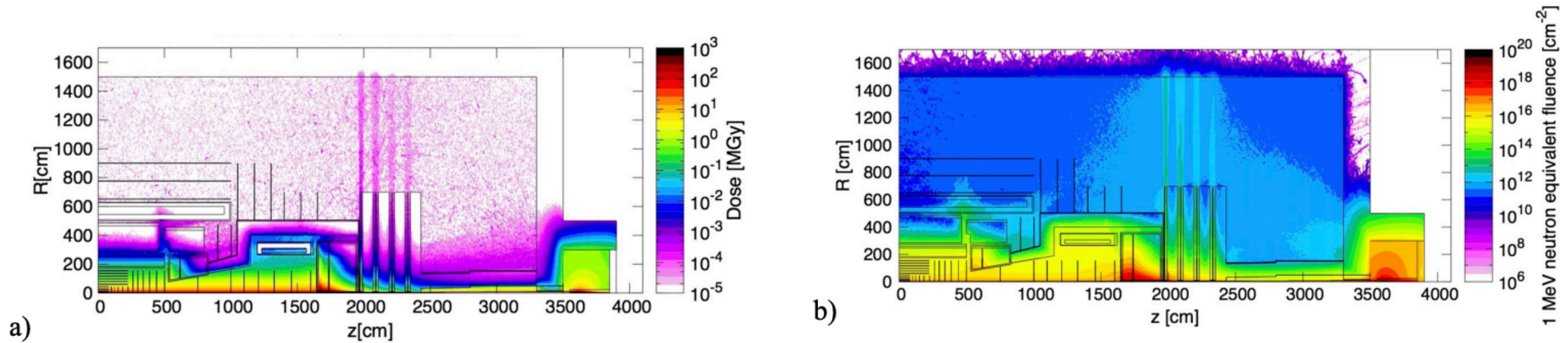
- Bu durum iki temel olaya sebep olmaktadır;
  - Hassas ölçüm için yüksek çözünürlükte parçacık izleme
  - Detektör içerisine yüksek parçacık akışı ve dolayısıyla yüksek radyasyon seviyesi

# Giriş: FCC-hh Detektörü

- Yapılan simülasyon ( $r < 2.5$  cm) çalışmaları ortamdaki radyasyon seviyesinin günümüz teknolojilerinin performans aralıklarının üstünde olduğunu göstermektedir.

Radiation Dose	LHC	HL-LHC	FCC-hh
1 MeV neutron equivalent [ $10^{16}/\text{cm}^2$ ]	0.4	3.9	60
Total ionising dose [MGy]	1.3	13	300

- Simülasyonlarda görüldüğü üzere radyasyon seviyeleri beam doğrultusuna yakın ( $R < 100$  cm) ve detektörün uç kısımlarında ( $1500 \text{ cm} < z < 2000 \text{ cm}$ ) en yüksek seviyelere ulaşmaktadır.

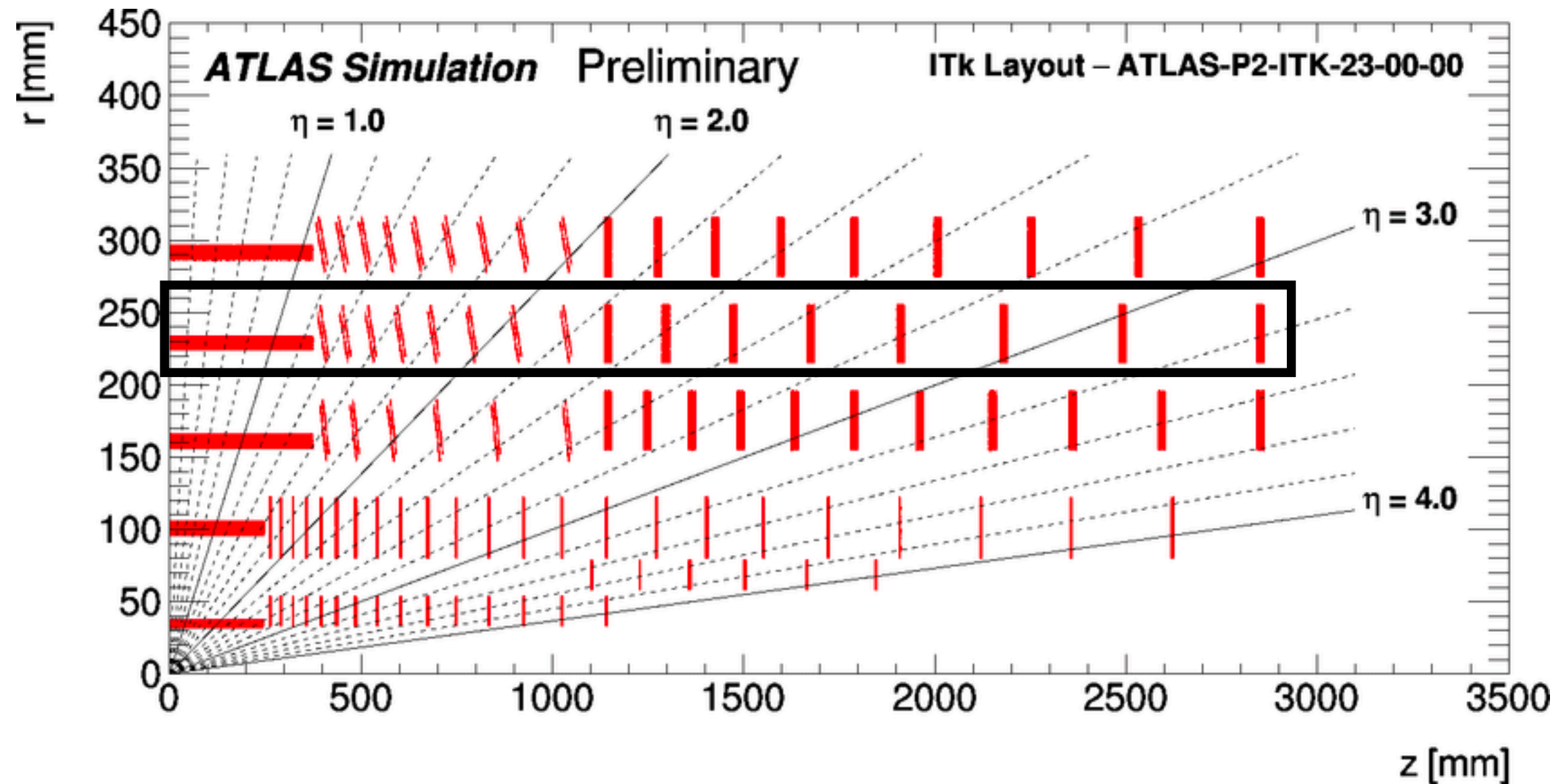


- (a) İyonize edici radyasyon (TID) detektör parçalarının okuma devrelerinde hasar (SEU, SEL vb.) yada gürültü oluşumuna sebep (RTS) olurken (b) iyonize edici olmayan (NIEL) radyasyon detektörün duyarlı bölgesindeki yapıyı bozarak detektörün daha az duyarlı hale gelmesine yol açar.
- Bu da detektörün “**Tracker**” ve “Forward Calorimeter” bölgeleri için radyasyona dayanıklı teknolojilere ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

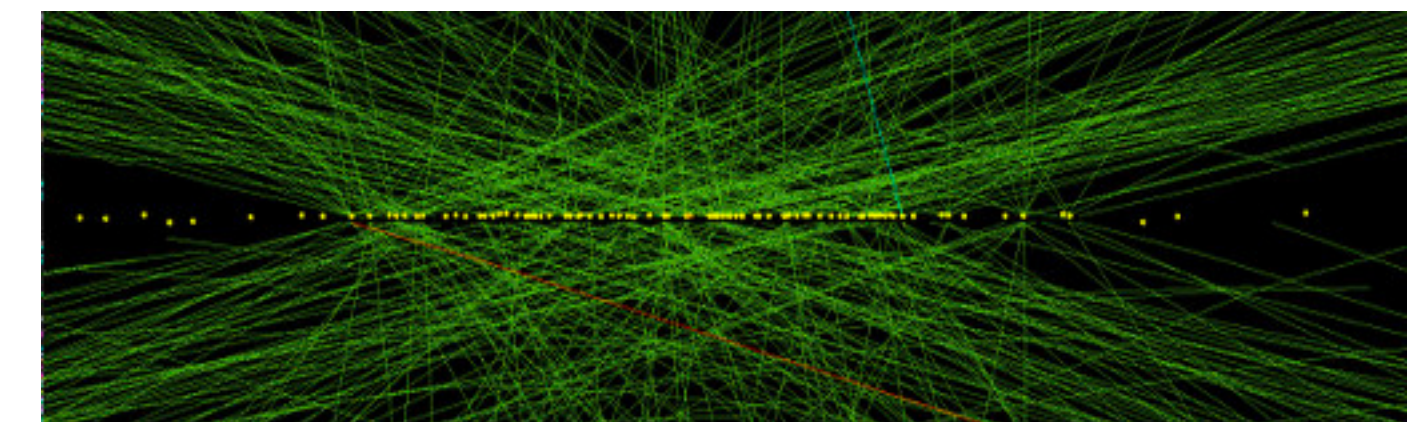


# Radyasyona Dayanıklı CMOS Piksel Sensör: MALTA

- MALTA (Monolithic from ALICE to ATLAS) sensörü ALICE deneyinin ITS için 2014 yılında geliştirilmeye başlayan ALPIDE sensöründen elde edilen tecrübelerle ATLAS deneyinin HL-LHC piksel güncellemesinde (2024-2026) kullanılmak üzere 2017 yılında geliştirilmeye başlanmıştır.
- ATLAS dedektörünün ITk sisteminin 4. katmanında kullanılması hedeflenmektedir.
- Bulduğu katman itibariyle sensör  $10^{15}$  1 MeV  $n_{eq}/cm^2$  NIEL ve 60 MRad TID radyasyon dozlarına karşı dayanıklı olacak şekilde tasarlanmalıdır.
- Ayrıca bulunduğu katman itibariyle 100-200 MHz/cm<sup>2</sup> isabet oranına (hit rate) sahip bir read-out sistemine ihtiyaç duyulmaktadır.
- Bir diğer unsur ise 25 ns'nin altında bir zaman çözünürlüğü sahip olması gerekmektedir.



LHC ~20 PU

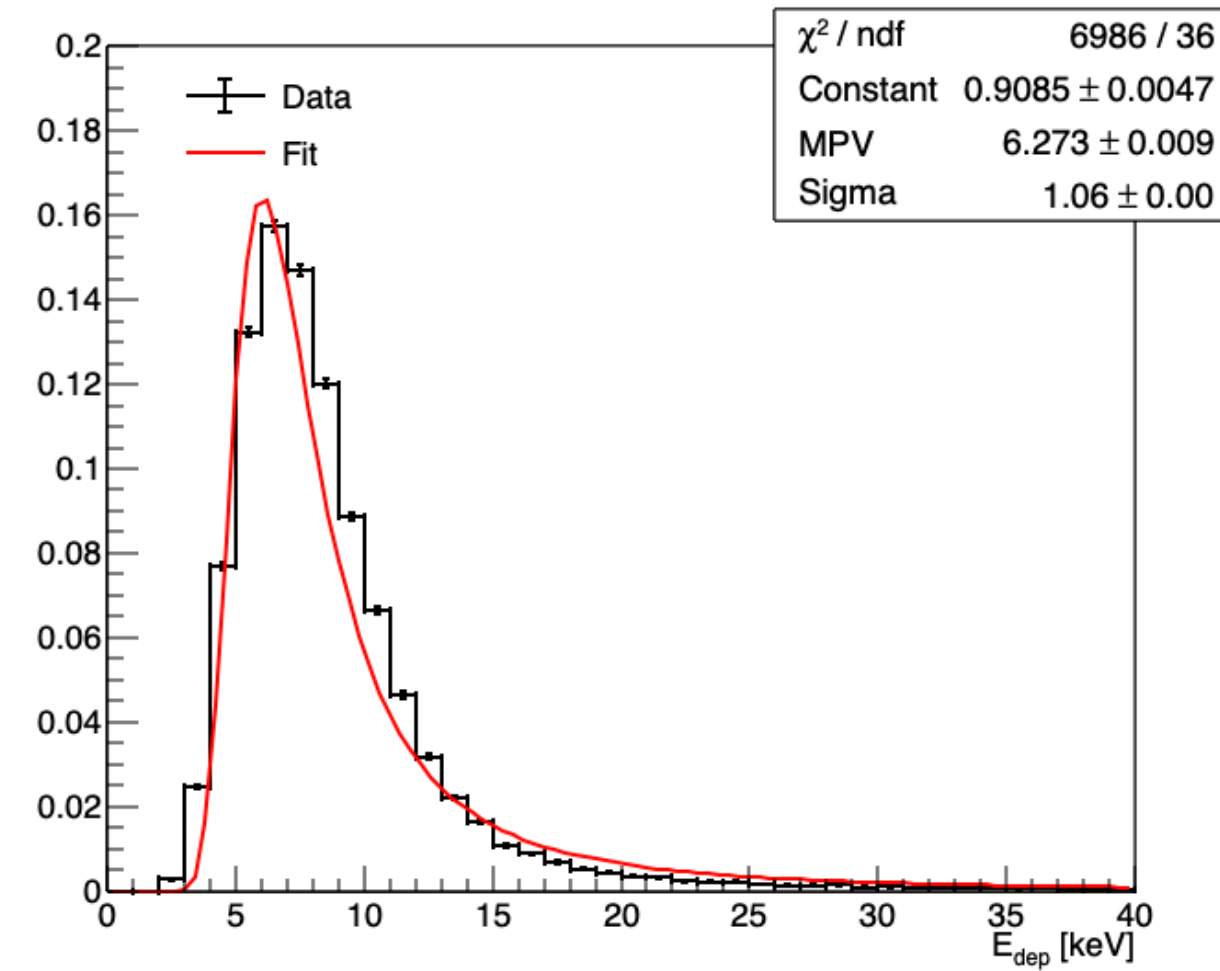
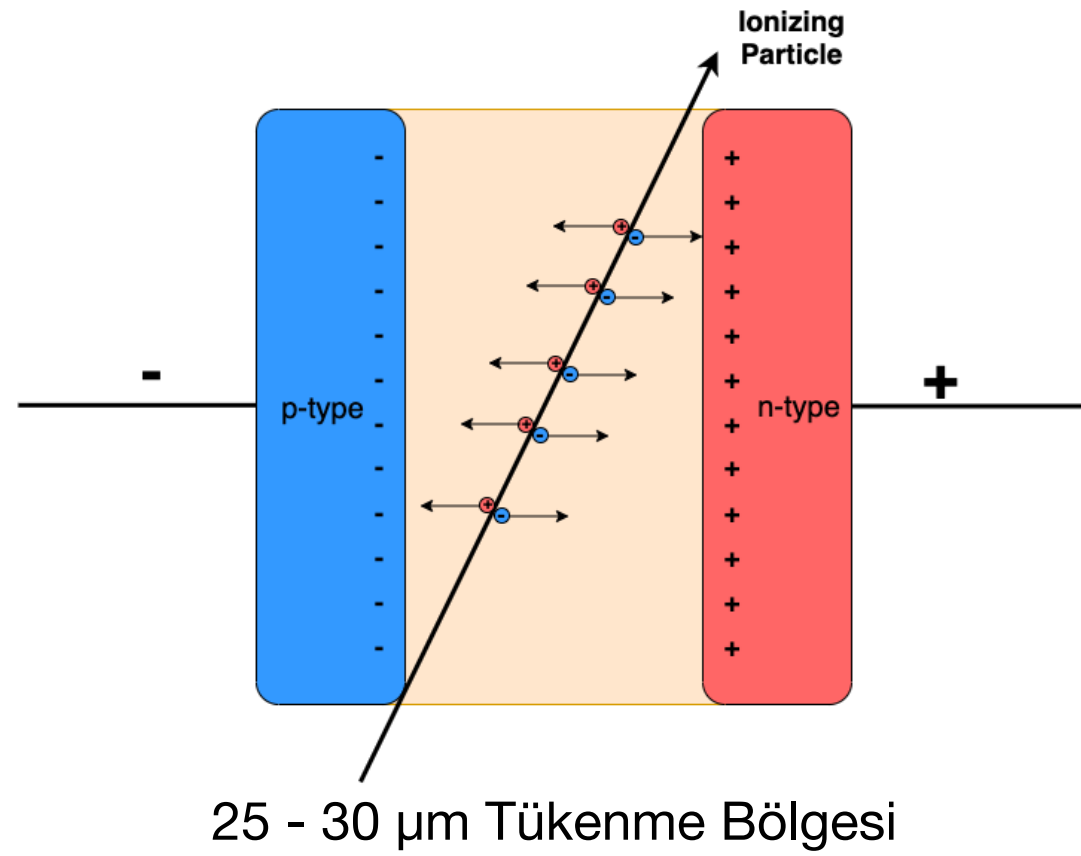


HL-LHC ~200 PU

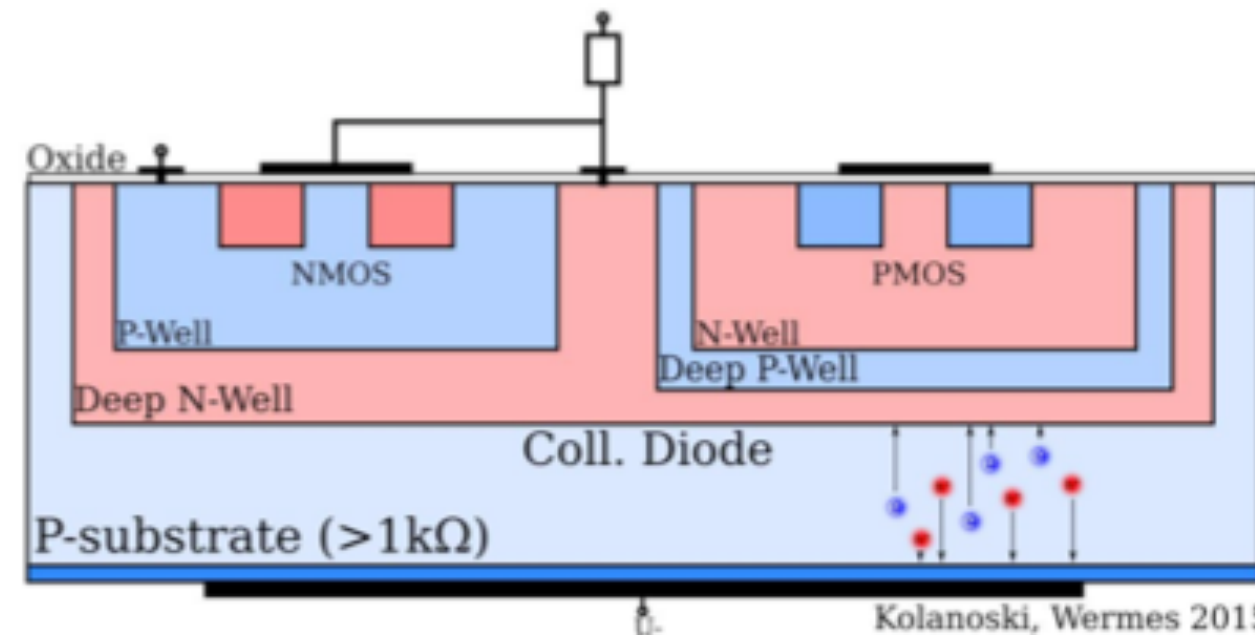
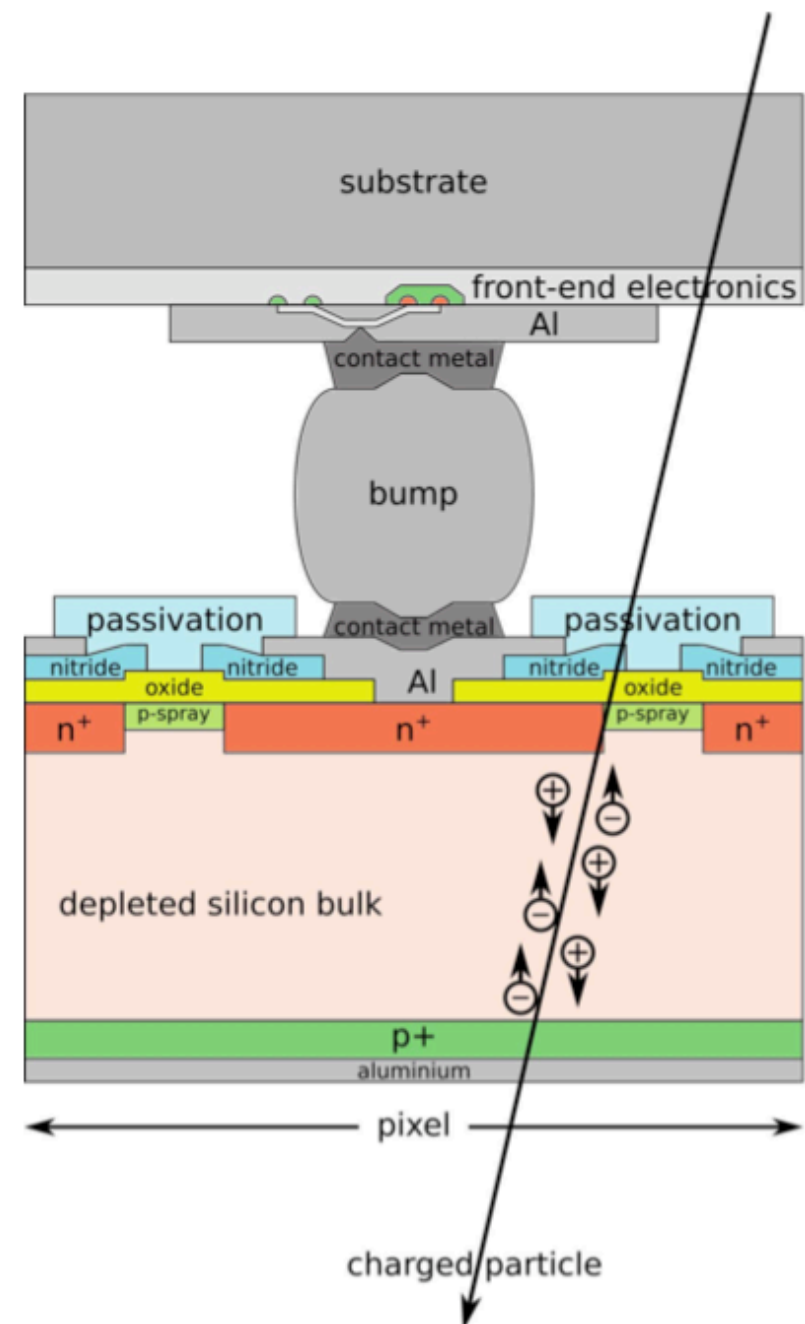


# Silikon Piksel Sensörler

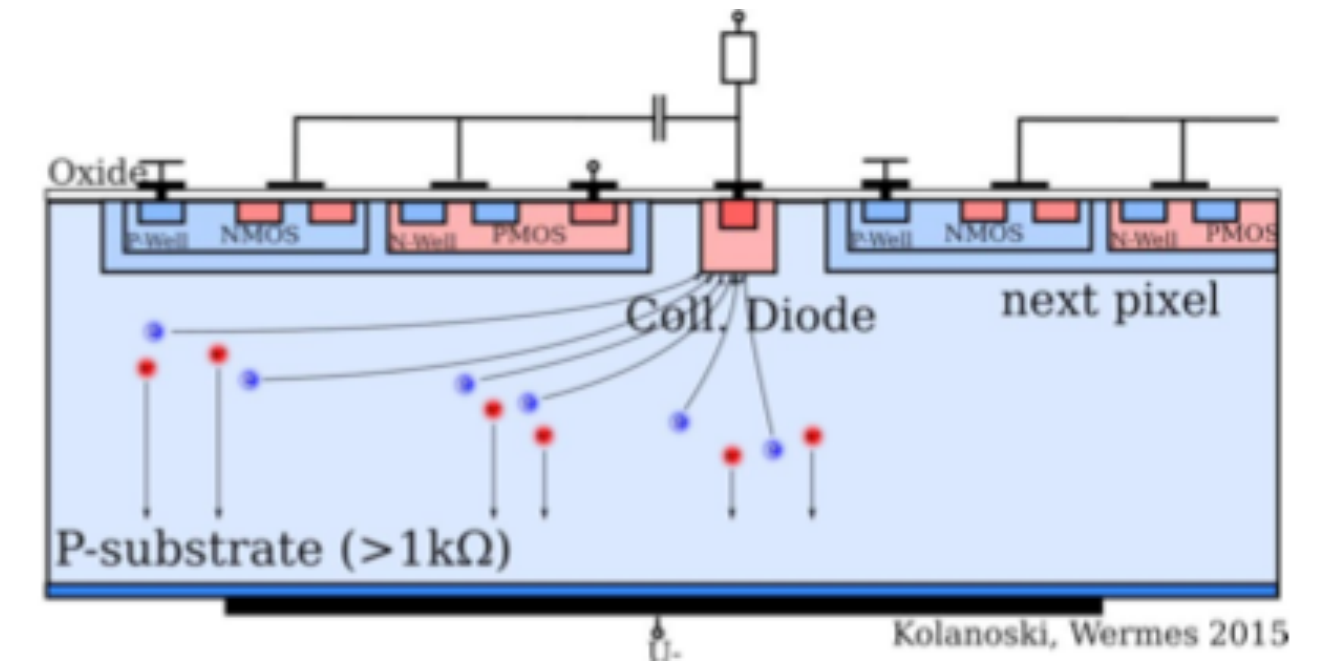
## 3 GeV Elektronun 25 µm Silikon İçerisindeki Enerji Birikimi (Geant4 Simülasyonu)



- Elektron-Hole Çifti oluşması için 3.6 eV enerji gerekmektedir.
- 25 µm Silikon içerisinde 3 GeV Elektron Işınına 6.27 keV (MPV) enerji biriktirir.
- Bu yaklaşık olarak 1740 Elektron-Hole çifti oluşması anlamına gelmektedir.
- Oluşan yük miktarı az olduğu için yükseltilmesi gerekmektedir.
- Pahalı ve zorlu lehimleme sürecine sahip hybrid tasarımlar yerine, yükseltici devreleri piksellerin içine nanometre boyutunda MOSFET transistörle gerçekleştirilebilir.



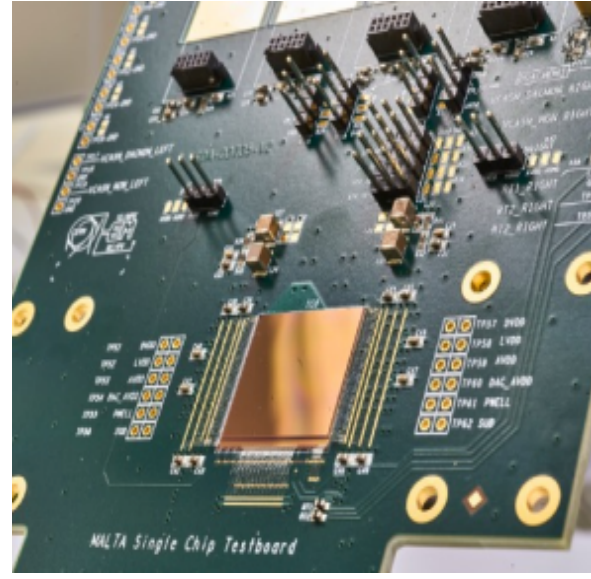
- CMOS devreleri, toplama elektrodun içerisine yerleştirilmiştir.
- Geniş tükenme bölgesi dolayısıyla yüksek yük toplanması
- Yüksek kapasitans (>100fF), yüksek gürültü oranı ve yüksek güç tüketimi



- CMOS devreleri, toplama elektrodundan bağımsız korunaklı p-duvarları içerisine yerleştirilmiştir.
- Dar tükenme bölgesi (köşelerde kayıp) dolayısıyla düşük yük toplanması
- Düşük kapasitans (<5fF), düşük gürültü oranı ve düşük güç tüketimi

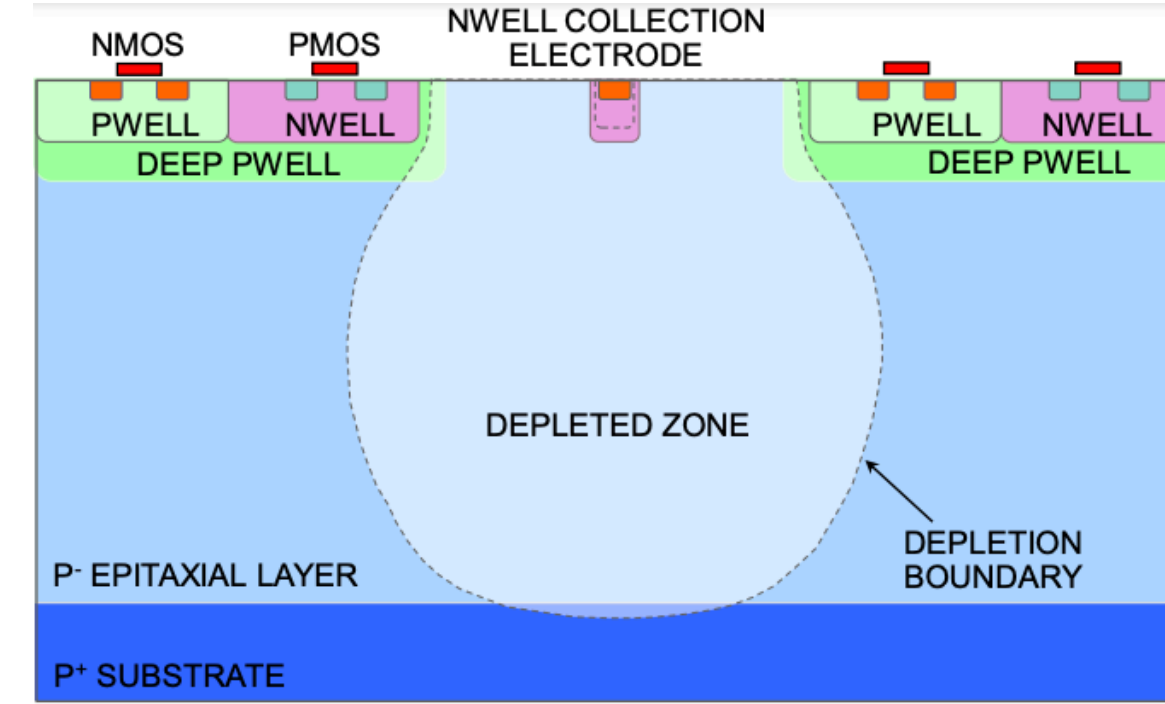
# Geliştirme Süreci: MALTA

2018 Ocak

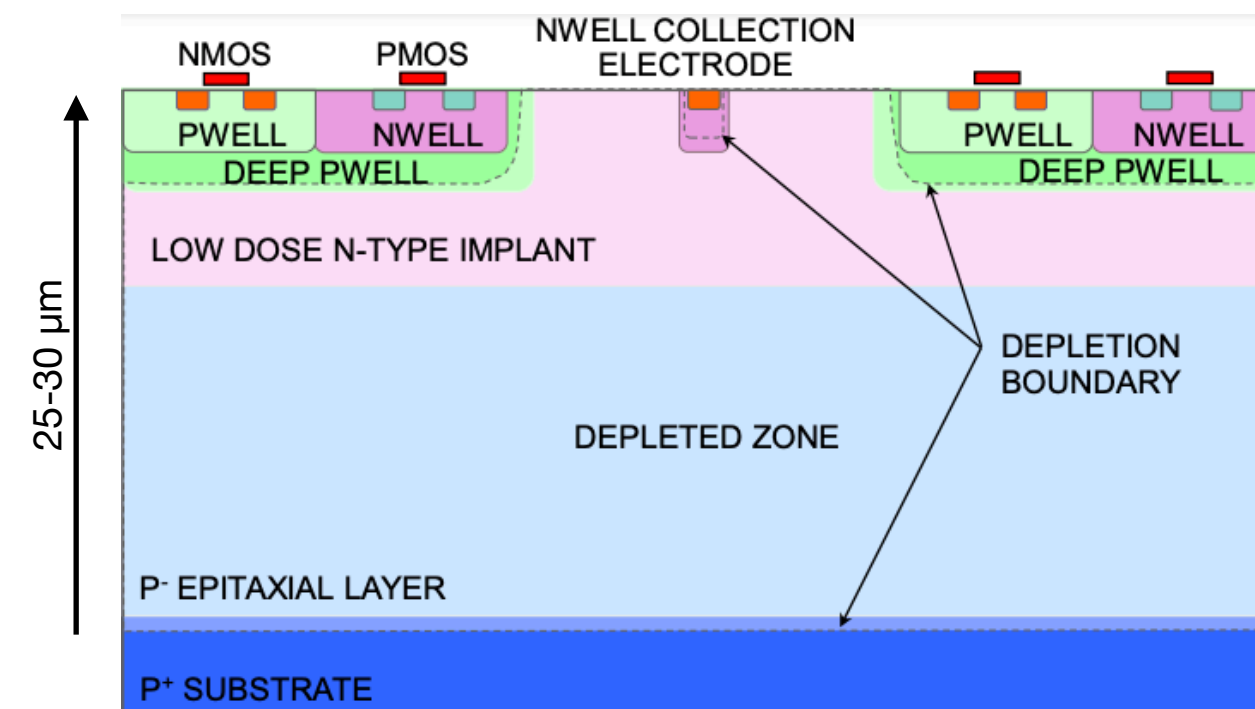


## MALTA

- ALPIDE sensörünün piksel tasarımına “düşük dozda n-tipi” eklenerek daha geniş bir tükenme bölgesi elde edilmeye çalışılmıştır.
- 180 nm TowerJazz CMOS teknolojisiyle yüksek dirençli epitaxial (EPI) silikon (1 k $\Omega$ -cm) üzerine üzerine üretilmiştir.
- Böylelikle 25-30  $\mu$ m bir duyarlı bölge oluşturulmuştur.
- Pikseller 36.4  $\mu$ m kenar uzunluğu olan kare şeklinde tasarlanmıştır.
- MALTA sensörünün toplam kalınlığı 300  $\mu$ m'dir.
- Küçük toplama elektrodu tasarımından dolayı piksel başına 1  $\mu$ W gibi çok küçük bir güç tüketimi ile çalışmaktadır.
- MALTA sensöründe kullanılan analog ön yüz (front-end) toplanan elektronların oluşturduğu sinyali güçlendirerek ayırıcı (discriminator) ile dijital bir çıktı (1 veya 0) olarak okuma elektroniğine aktarır.

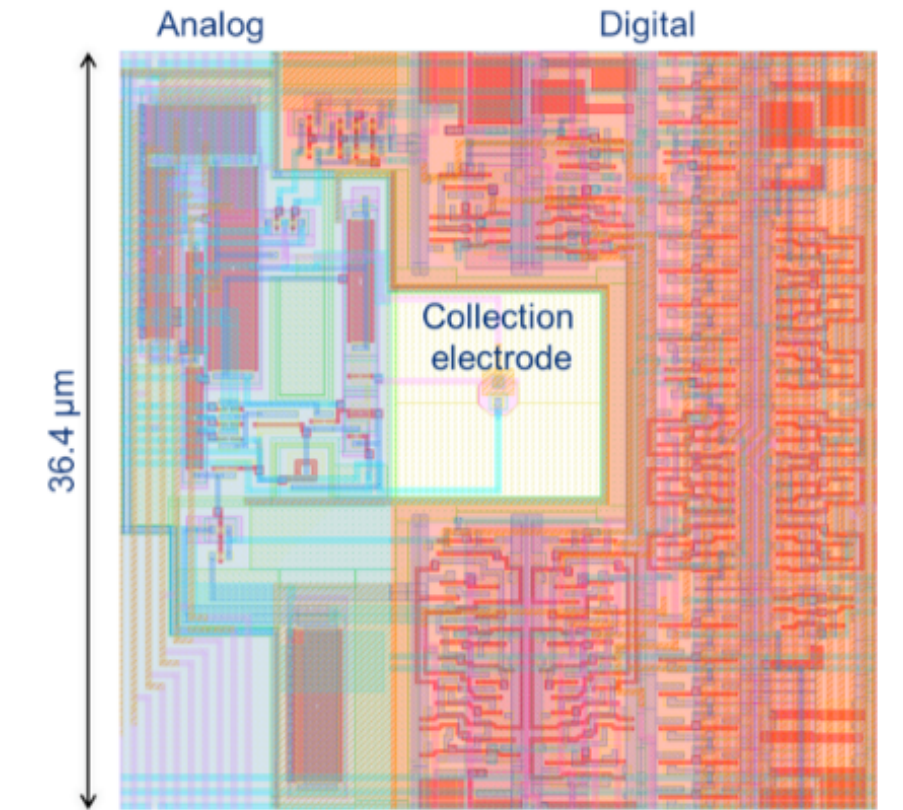


ALPIDE Piksel Tasarımı

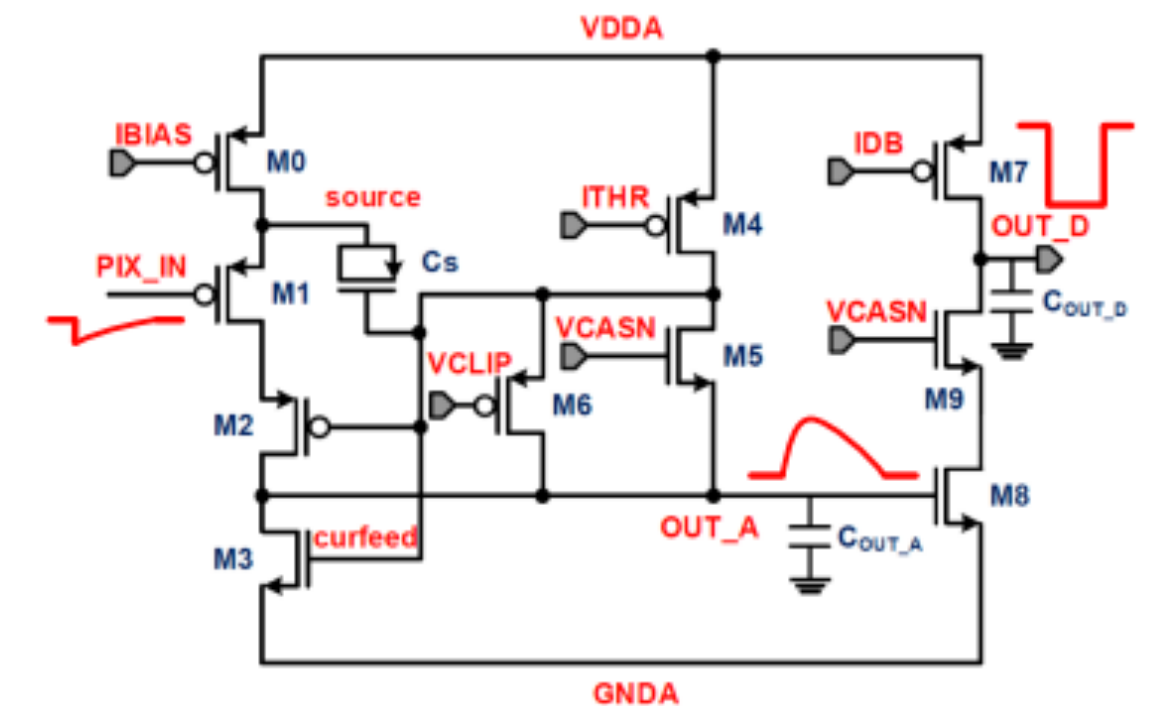


MALTA Piksel Tasarımı

## MALTA Piksel Tasarımı



## MALTA Analog Ön Yüzü (Front-end)





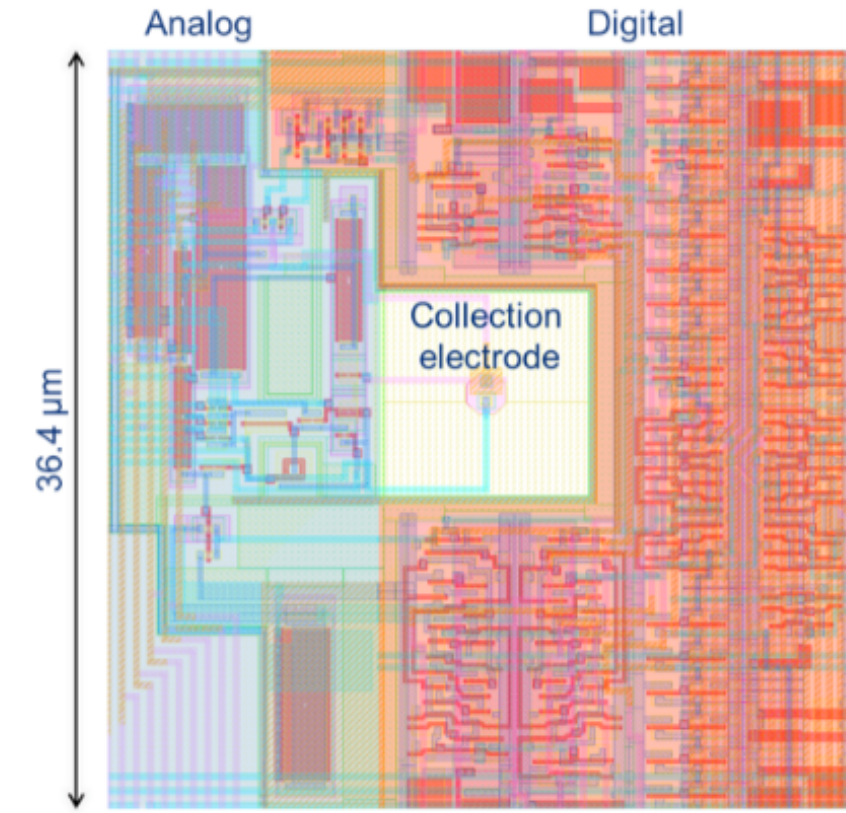
# Geliştirme Süreci: MALTA

## Piksel Matrisi :

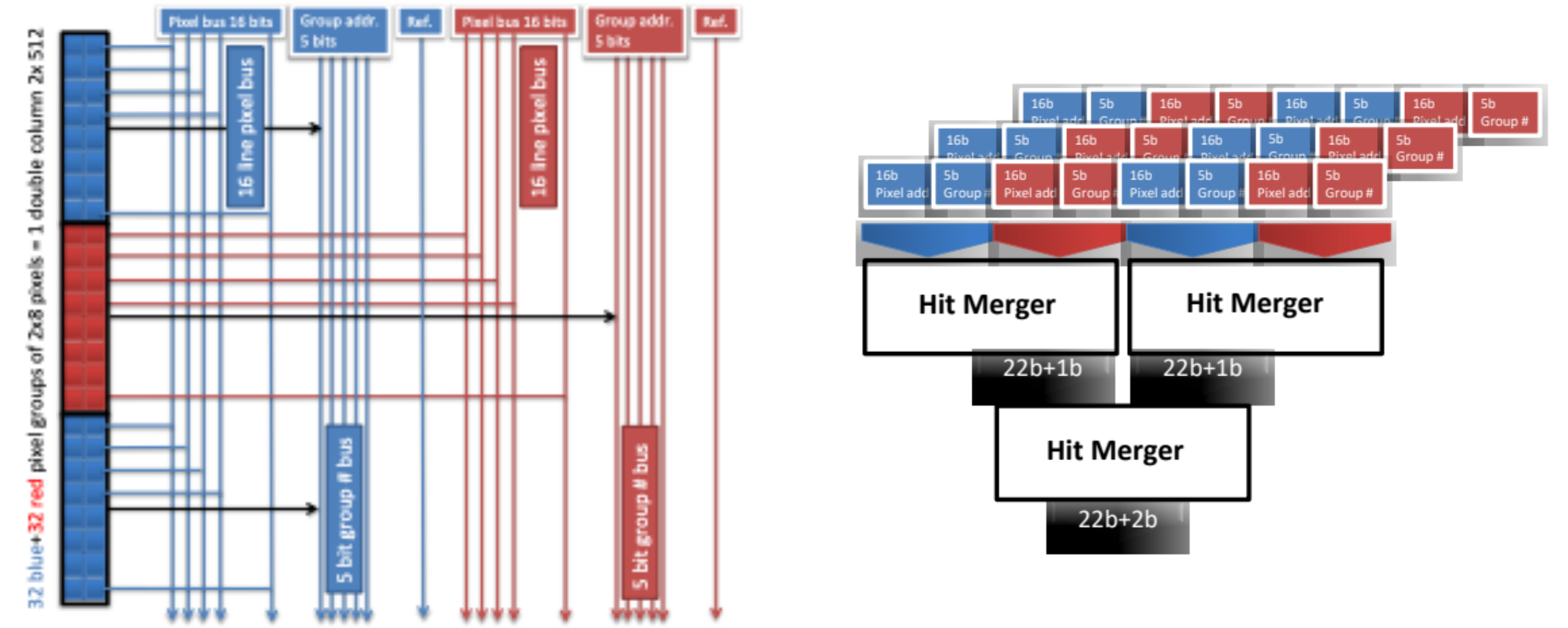
Piksel Matrisi

S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
diode reset	diode reset	diode reset	diode reset	PMOS reset	PMOS reset	PMOS reset	PMOS reset
2 $\mu\text{m}$ el. size	2 $\mu\text{m}$ el. size	3 $\mu\text{m}$ el. size	3 $\mu\text{m}$ el. size	3 $\mu\text{m}$ el. size	3 $\mu\text{m}$ el. size	2 $\mu\text{m}$ el. size	2 $\mu\text{m}$ el. size
4 $\mu\text{m}$ spacing	4 $\mu\text{m}$ spacing	3.5 $\mu\text{m}$ spacing	3.5 $\mu\text{m}$ spacing	3.5 $\mu\text{m}$ spacing	3.5 $\mu\text{m}$ spacing	4 $\mu\text{m}$ spacing	4 $\mu\text{m}$ spacing
med. deep p-well	max. deep p-well	max. deep p-well	med. deep p-well	med. deep p-well	max. deep p-well	max. deep p-well	med. deep p-well

8 Farklı Piksel Tasarımı Tasarımı



## Asenkron Okuma Mimarisi :



- Piksel matrisi 512 x 512 pikselden oluşmaktadır.
- Matrisin toplam boyutu 22 x 22 mm<sup>2</sup>.
- Aynı anda farklı pixel tasarımlarını denemek için matrix 8 bölgeye ayrılmıştır;
  - Toplama elektrodu 2 veya 3  $\mu\text{m}$  boyutunda
  - Okuma devreleriyle arasında 3.5 veya 4  $\mu\text{m}$  boşluk
- Bu bölgeler 64 x 512 pikselden oluşmaktadır.

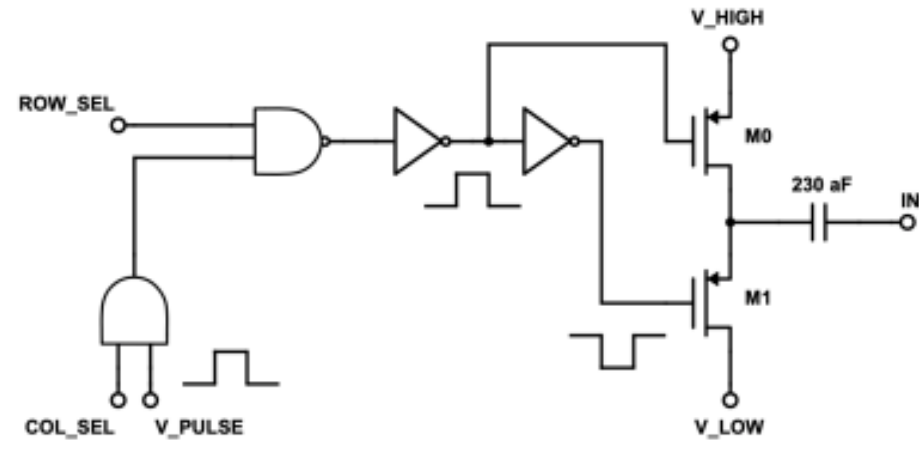
- Düşük güç tüketimi için sürekli pikselleri gezen bir sayaç yerine senkron olmayan bir yapıda tasarlanmıştır.
- Pikseller 2 x 8'lik gruplara ayrılmıştır ve herhangi bir parçacık o piksellerden geçtiğinde sinyali piksel matrisin altına iletmektedir.
- İletilen dijital sinyal pikselin adresini, grubunu ve grup rengini içermektedir.
- Sinyal hat boyunca kolonun sonuna ulaştığında BCID ve zaman bilgisi eklenerek FIFO belleğine 38 bitlik bir data olarak kaydedilir.
- Bu data 5 Gbps LVDS sürücüsüyle okunur.



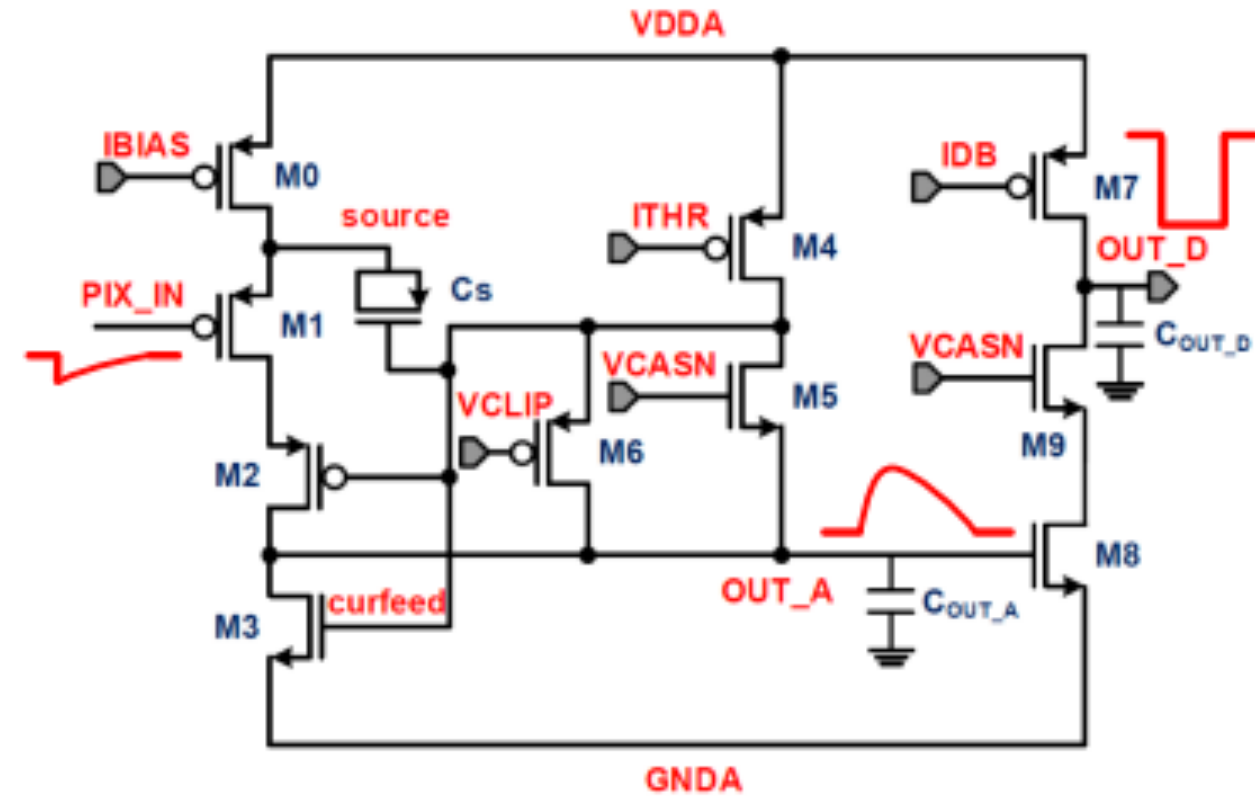
# Geliştirme Süreci: MALTA

## Laboratuvar Ölçümleri :

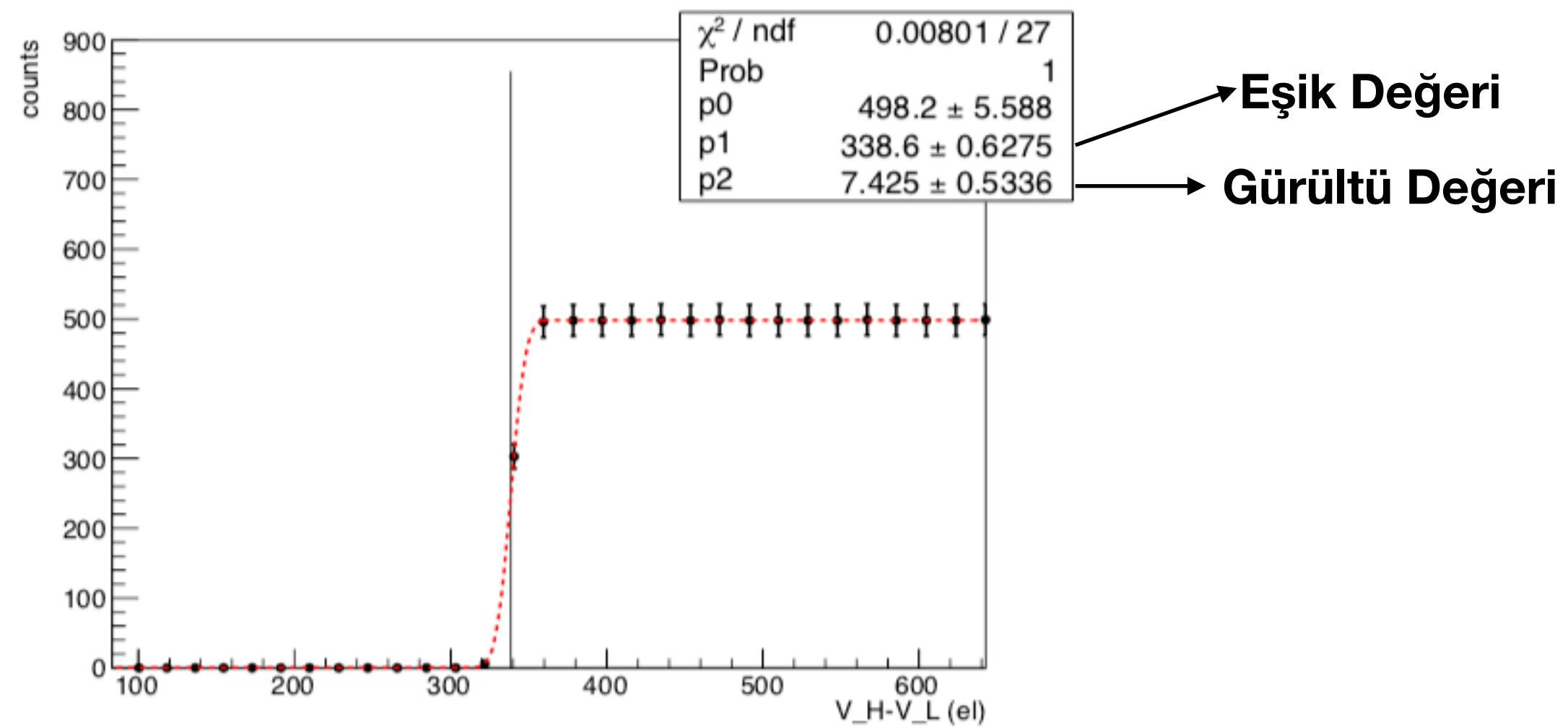
### Kontrollü Yük Gönderme Devresi



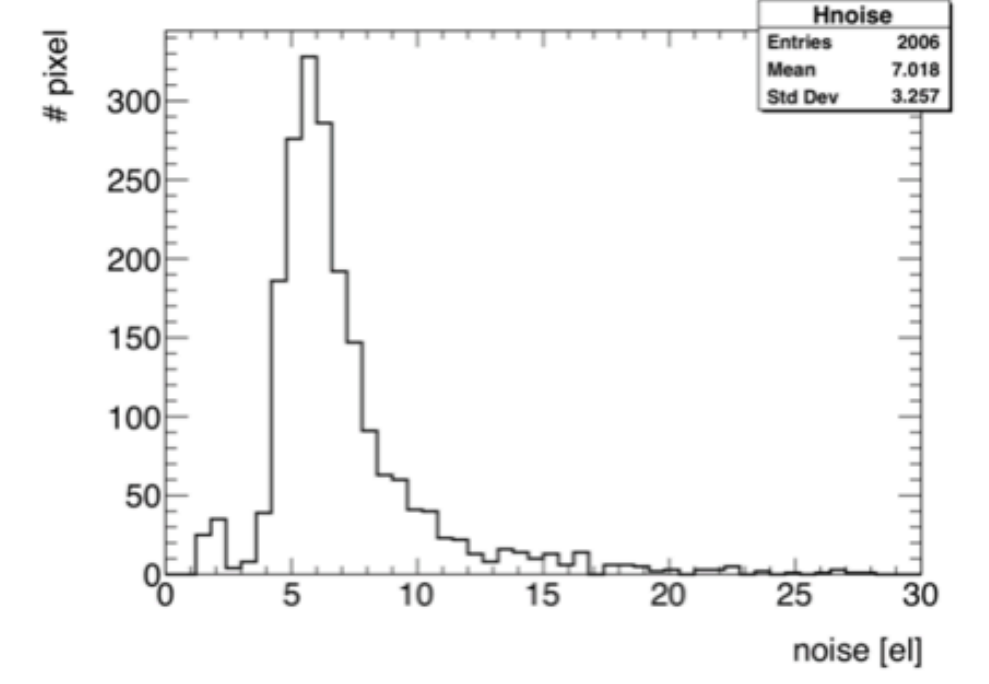
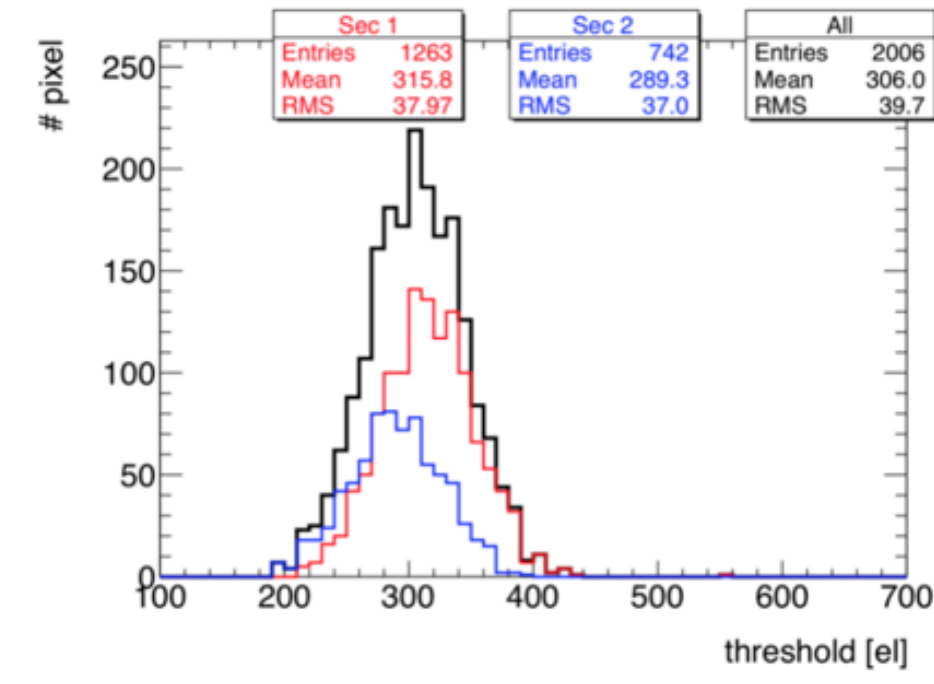
### Analog Ön Yüz



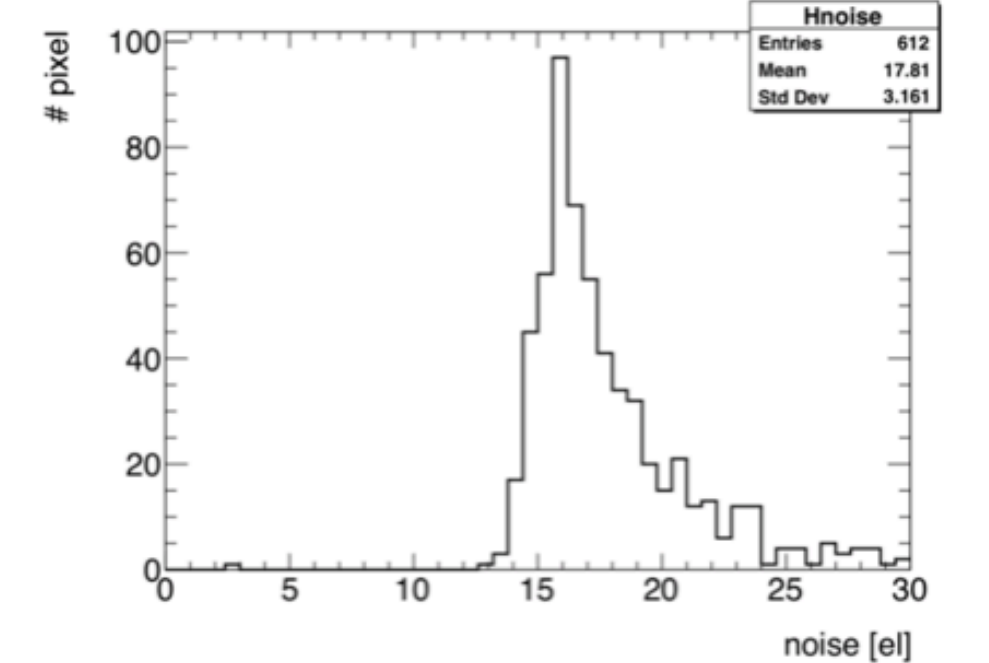
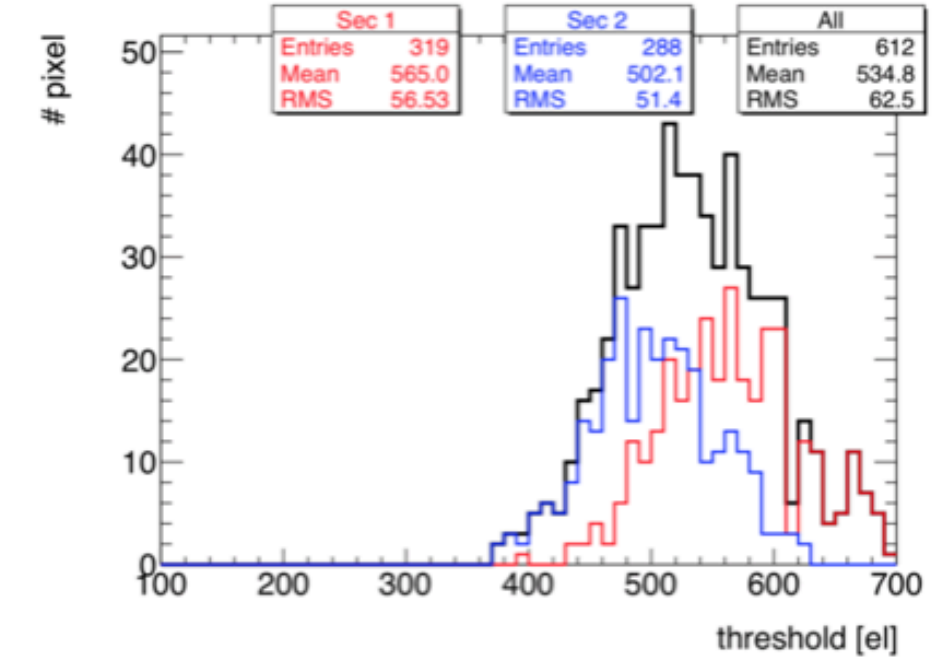
Kontrollü yük devresi yardımıyla belli ölçüde yük ön yüz devreye gönderilerek sensörün eşik değeri bulunur.



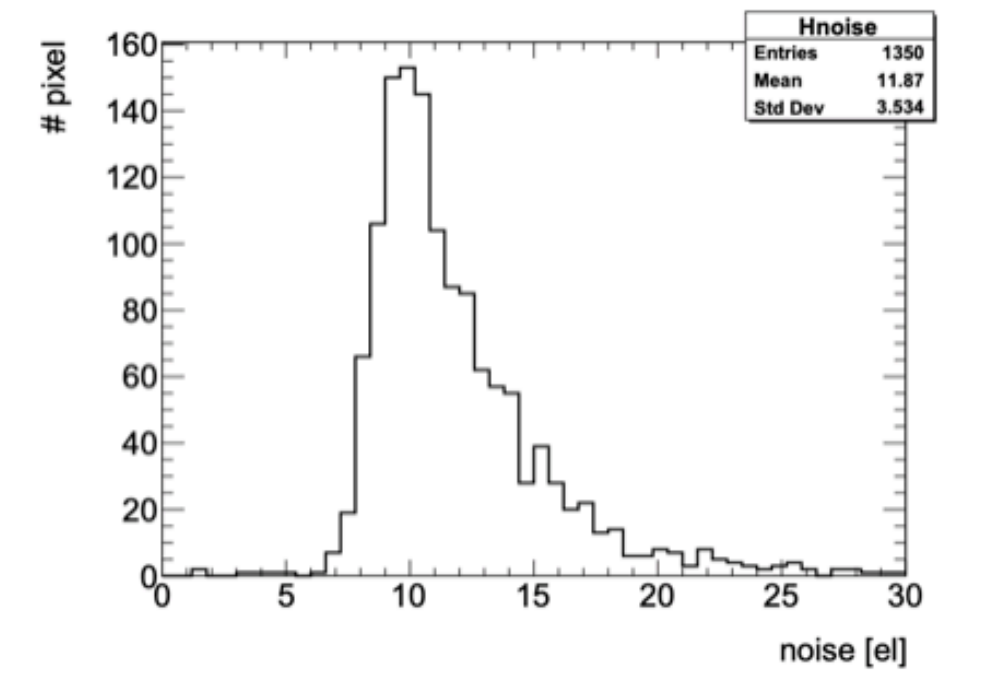
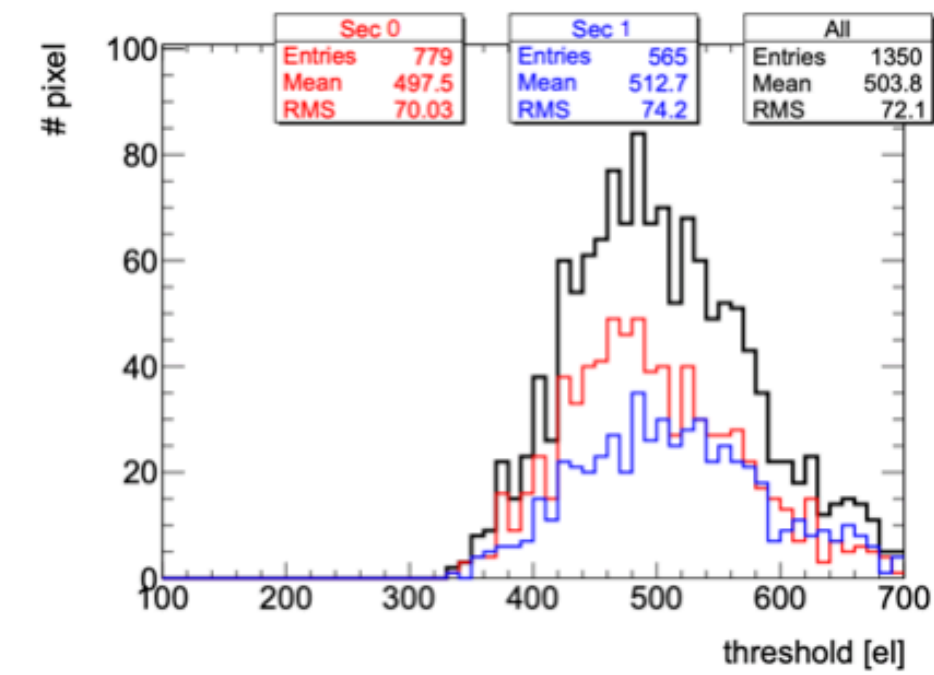
### Işınlanmamış MALTA



### 70 MRad TID



### 10<sup>14</sup> 1 MeV n<sub>eq</sub>/cm<sup>2</sup> NIEL

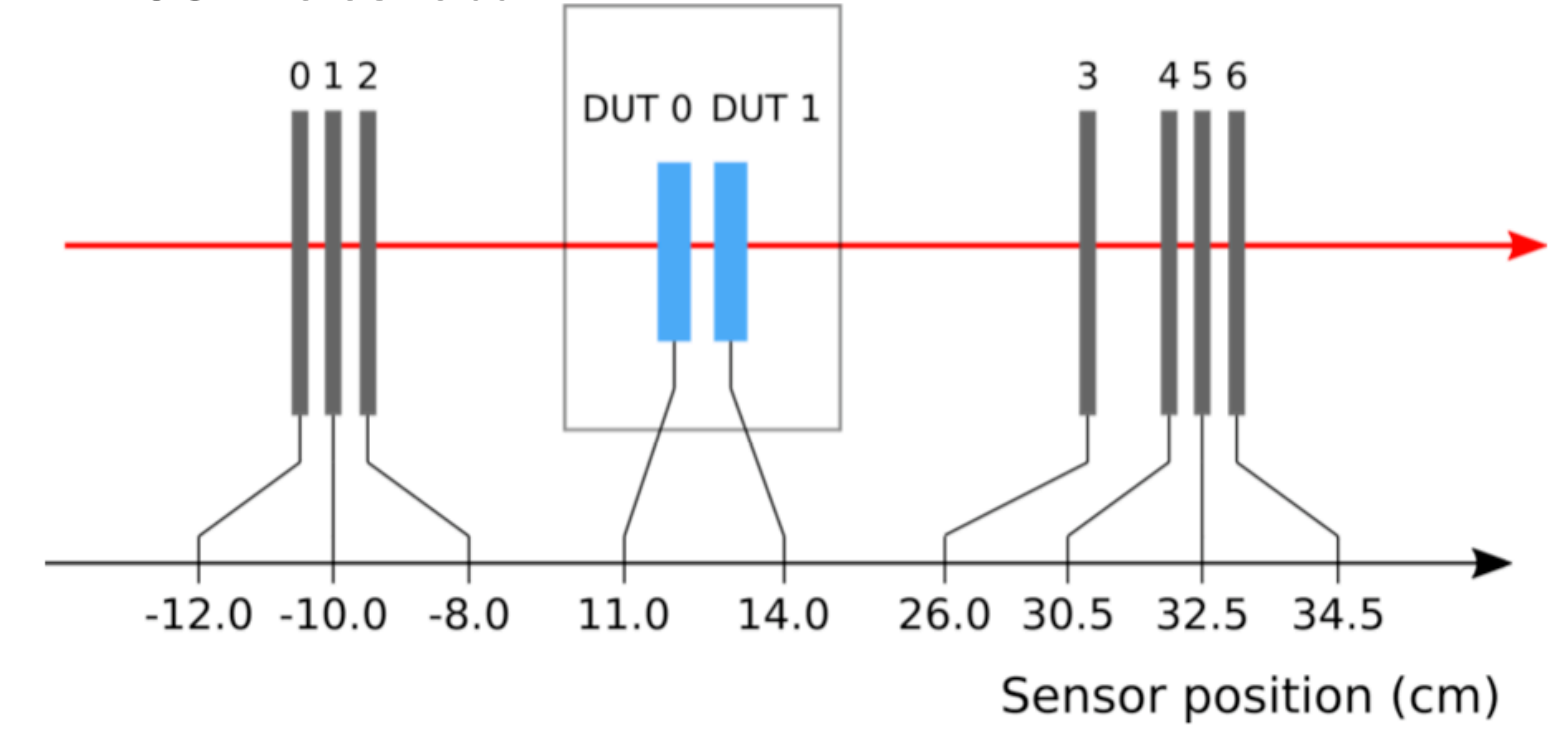


# Geliştirme Süreci: MALTA

## Test Işını Ölçümleri :

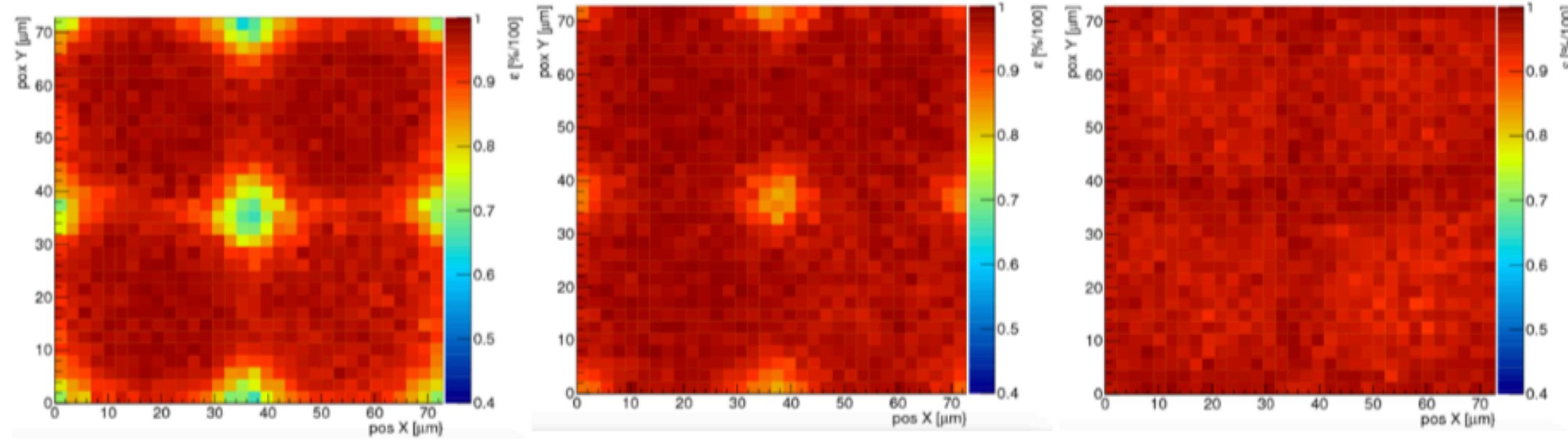
- Test Işını 2018 Yılında CERN'de bulunan SPS tesisinde gerçekleştirilmiştir.
- MALTA örnekleri 180 GeV pion demeti altında test edilmiştir.
- Örnekler MIMOSA teleskobuna yerleştirilmiş ve radyasyonun sebep olduğu termal gürültüyü önlemek için ölçümler  $-20^{\circ}\text{C}$  gerçekleştirilmiştir.

MIMOSA Teleskobu:



Piksel Parçacık İzleme Verimlilikleri

İşinlanmamış MALTA

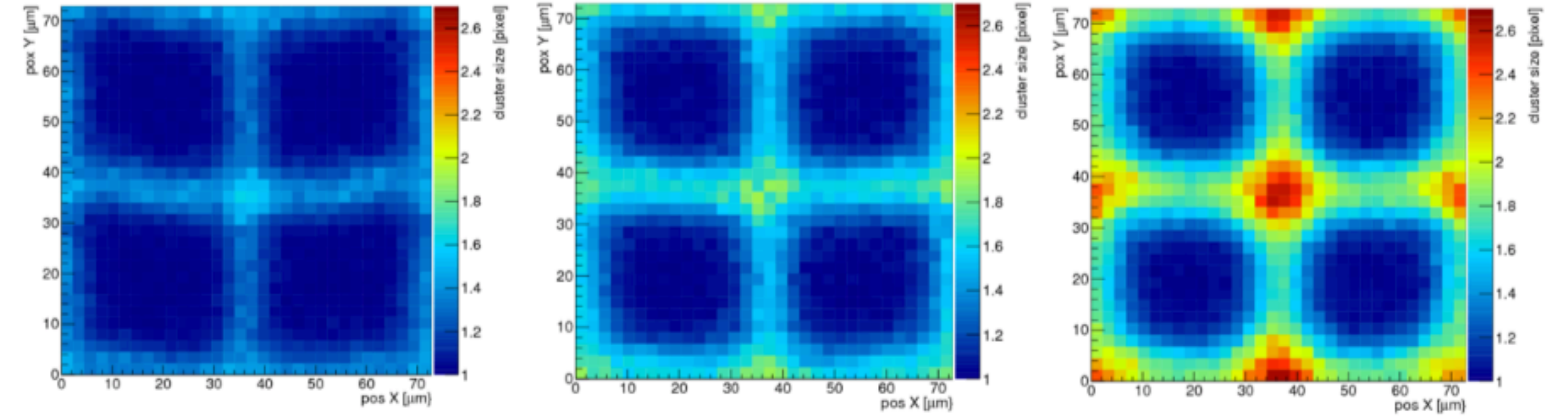


Th: 470 e-

Th: 400 e-

Th: 210 e-

Piksel Kümelendirme Sayıları

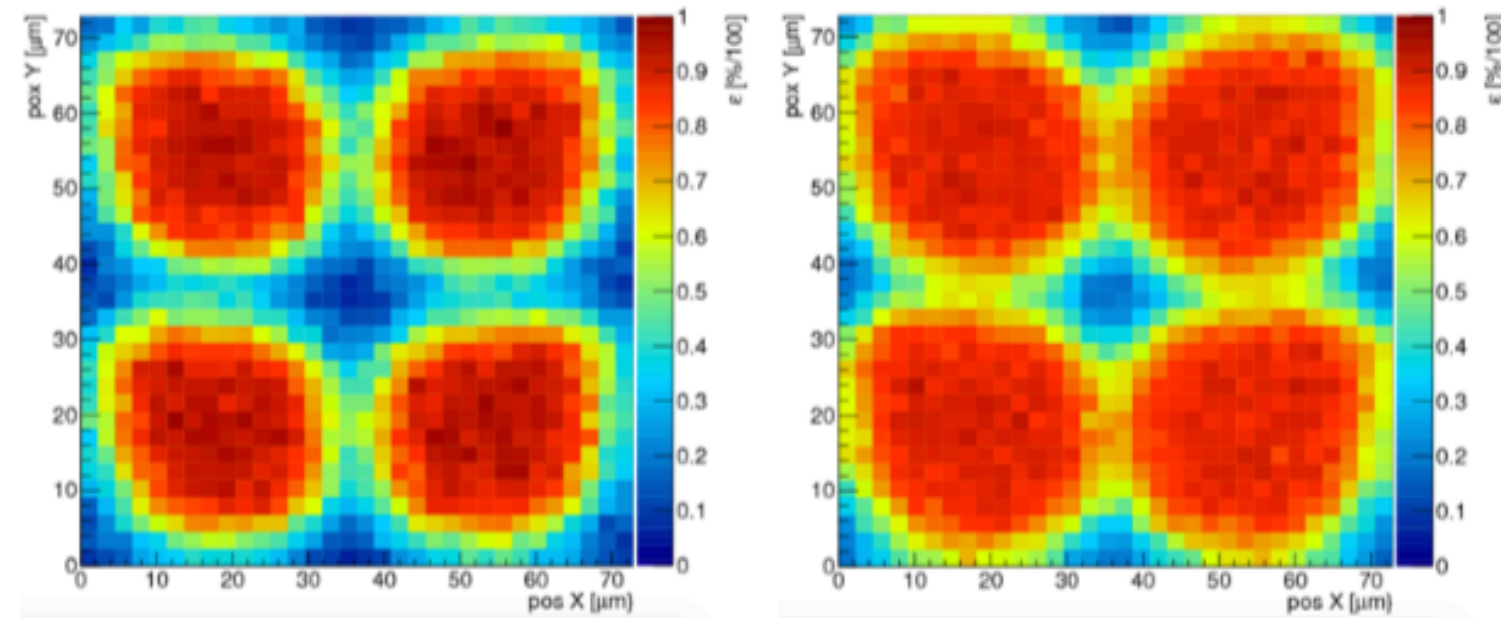


Th: 470 e-

Th: 400 e-

Th: 210 e-

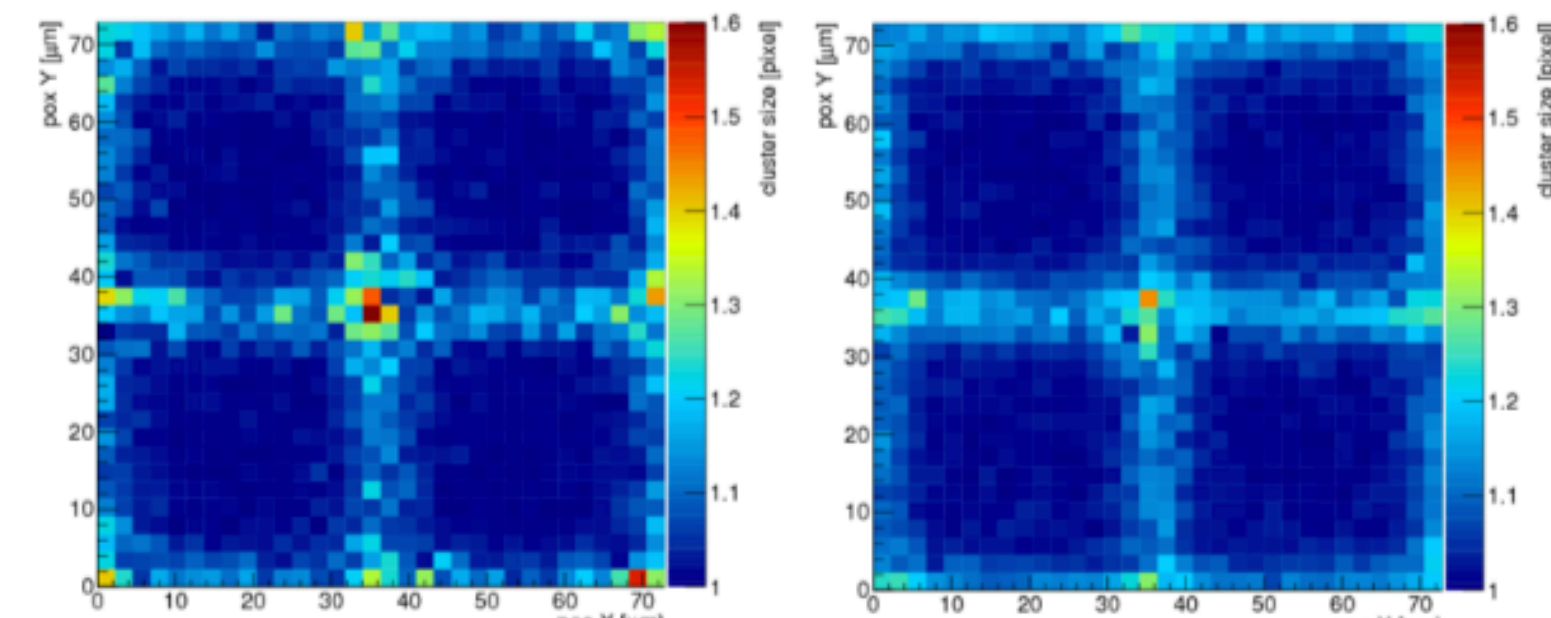
$5 \times 10^{14} \text{ 1 MeV } n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$



Th: 600 e-

Th: 400 e-

**Daha Düşük Eşik Değerine Ulaşamamıştır!**



Th: 600 e-

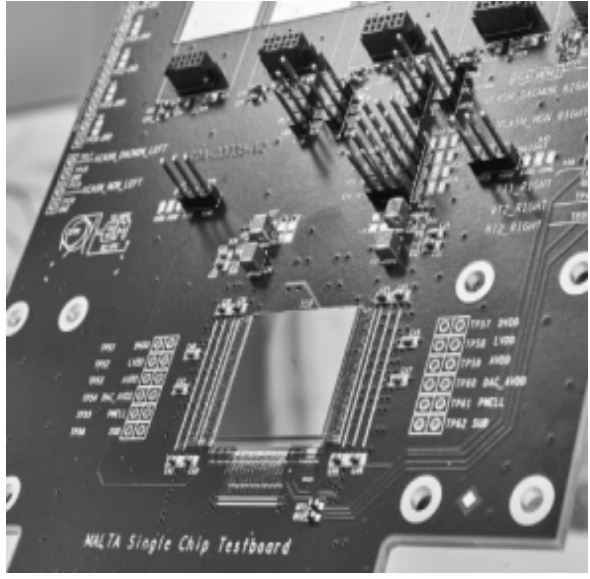
Th: 400 e-

**Daha Düşük Eşik Değerine Ulaşamamıştır!**



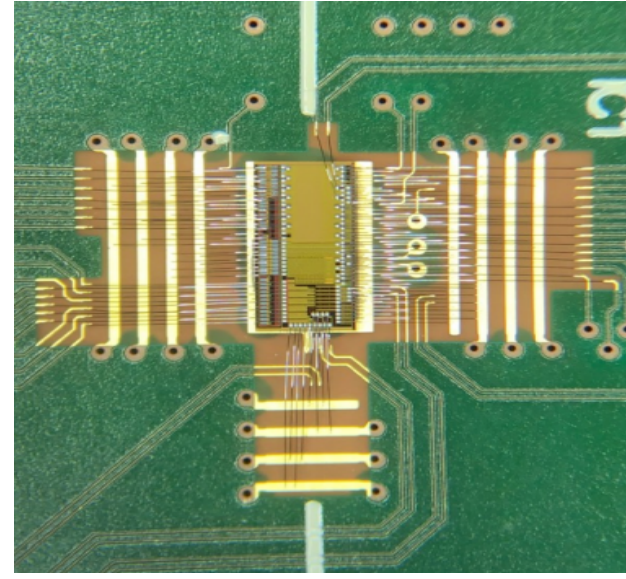
# Geliştirme Süreci: mini-MALTA

2018 Ocak



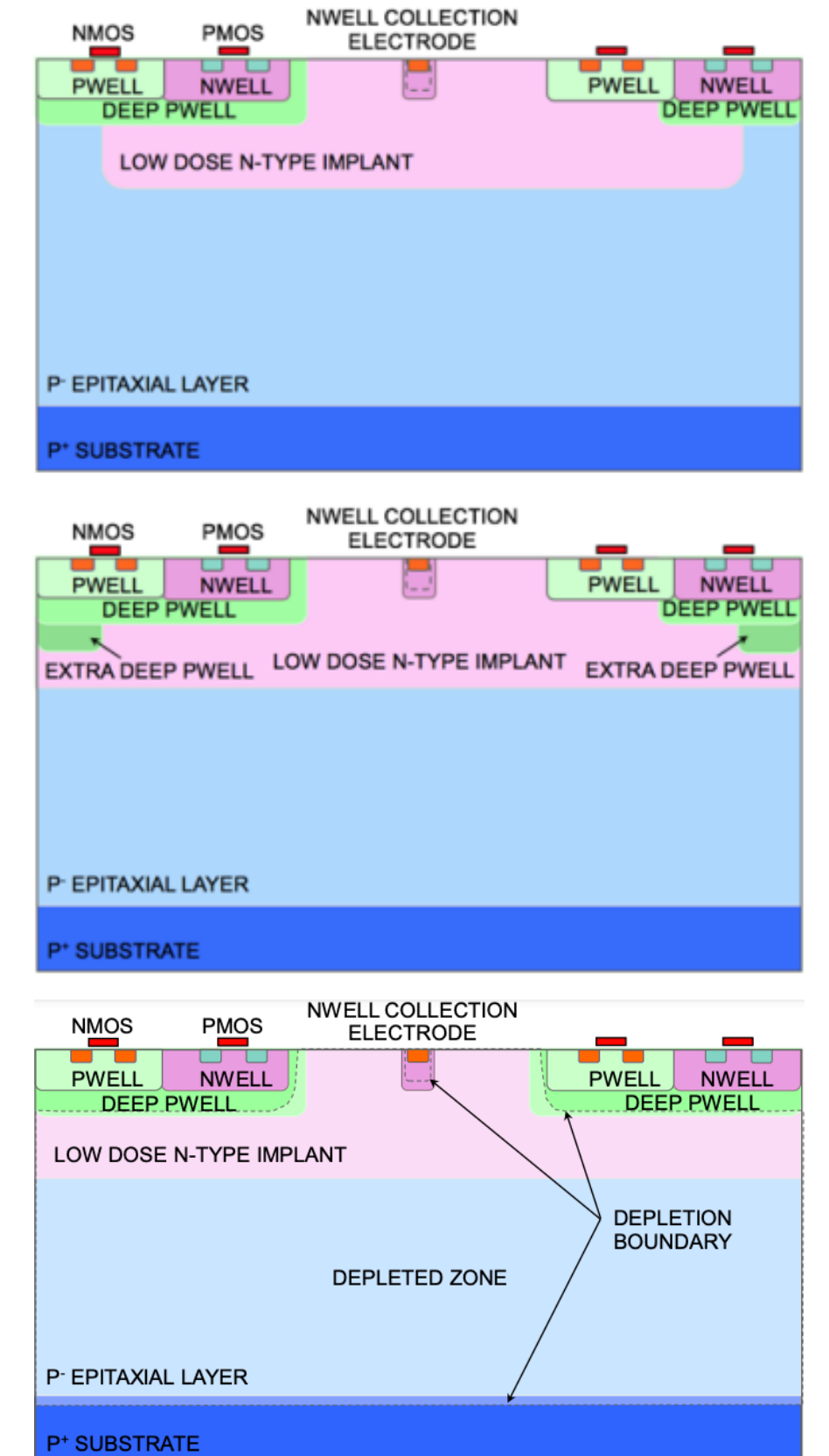
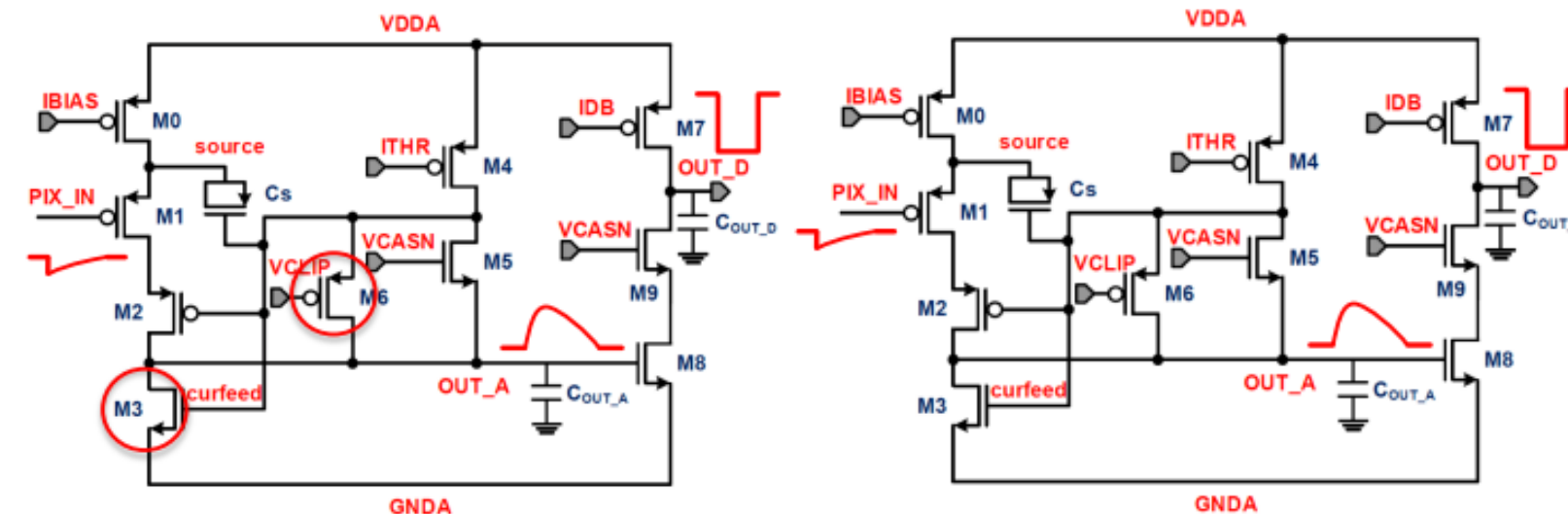
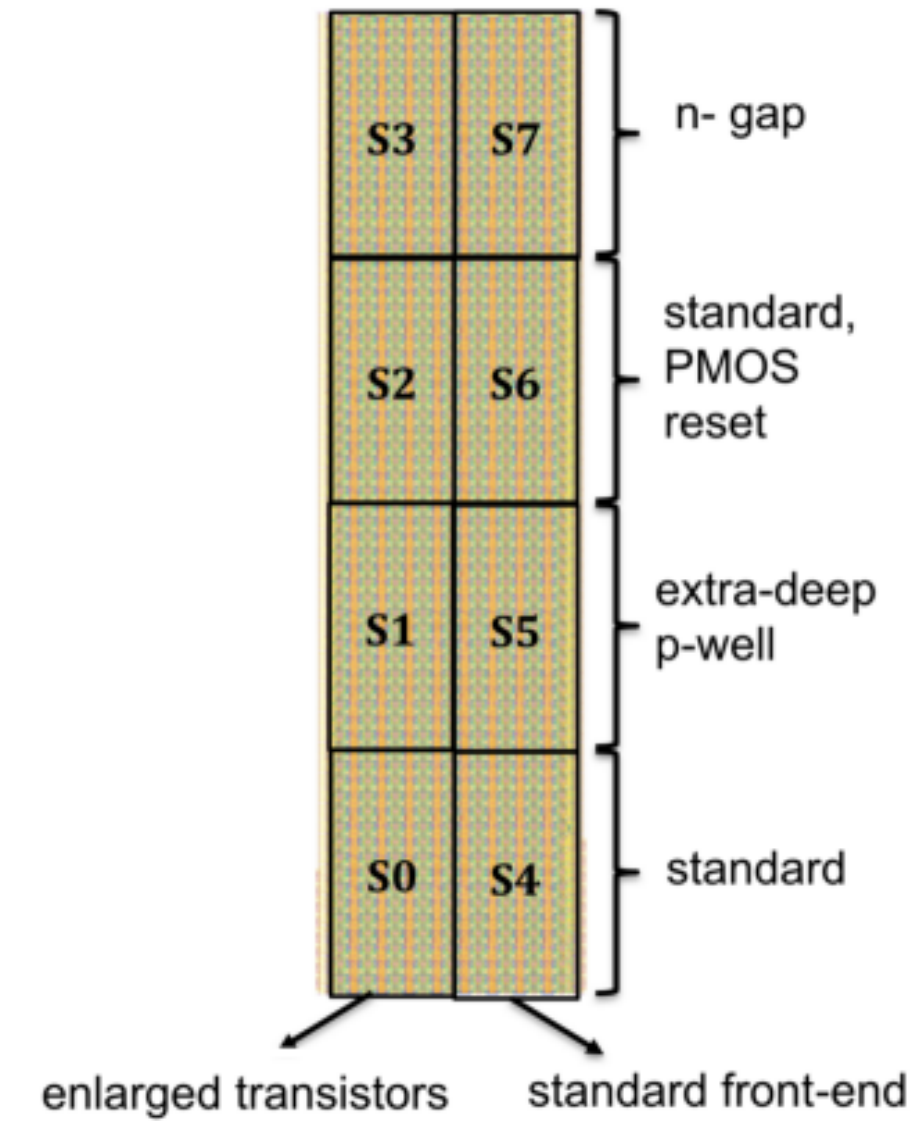
MALTA

2019 Ocak



mini-MALTA

- MALTA sensöründen elde edilen sonuçlar değerlendirilerek yeni piksel tasarım simülasyon çalışmaları yapılmıştır.
- Piksel tarımlarında, piksellerin köşelerindeki kaybı azaltarak köşelerede ulaşan düzgün bir elektrik alan dağılımı hedeflenmiştir.
- Analog ön uçta ise transistörlerinin bazıları (M3 ve M6) büyütülerek radyasyondan kaynaklanan RTS gürültüsünün önüne geçilmesi hedeflenmiştir.
- Daha küçük bir piksek matrisi kullanılarak MALTA'da kullanılan piksel ve analog ön uç tasarımlarını ve yeni tasarımları aynı anda karşılaştırmamızı sağlayacak şekilde tasarlanmıştır.
- Bu yüzden, piksel matrisi her biri 16 x 8 pikselden oluşan 8 bölümden oluşmaktadır.

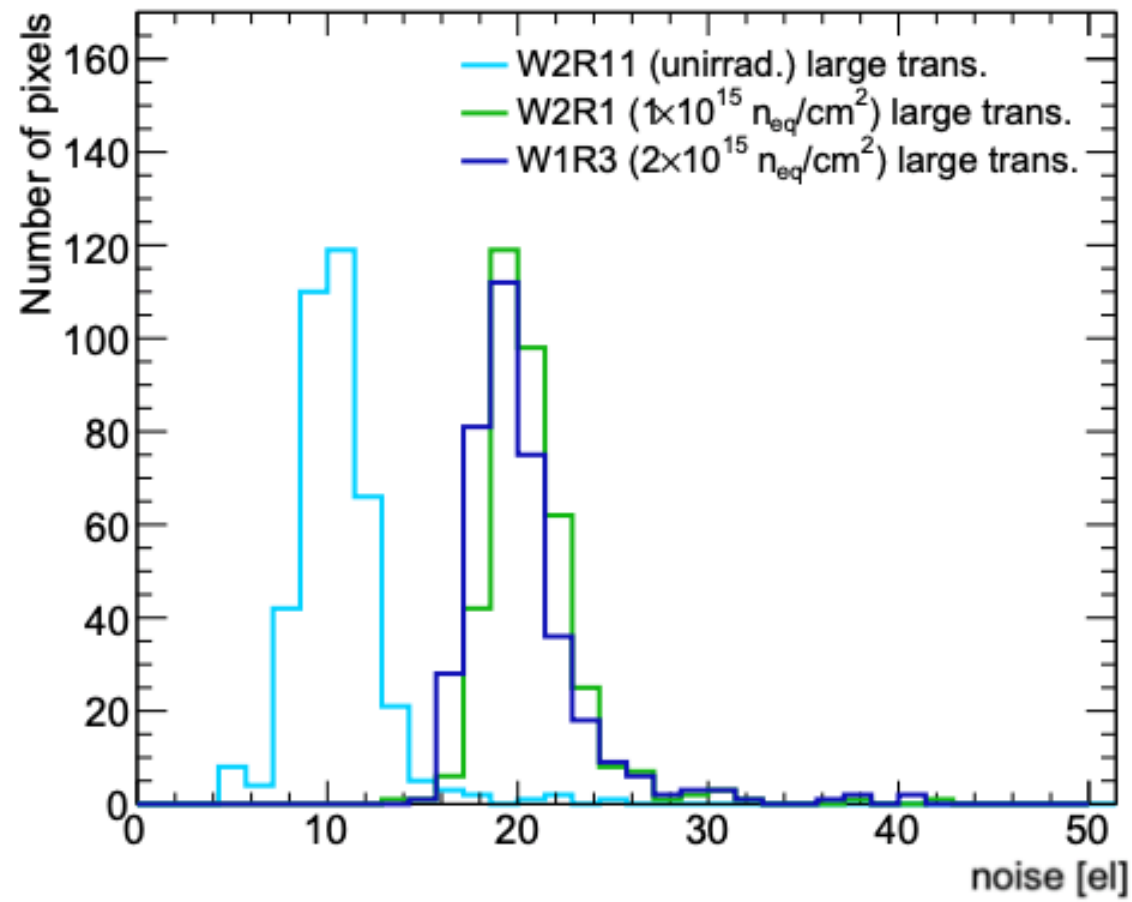
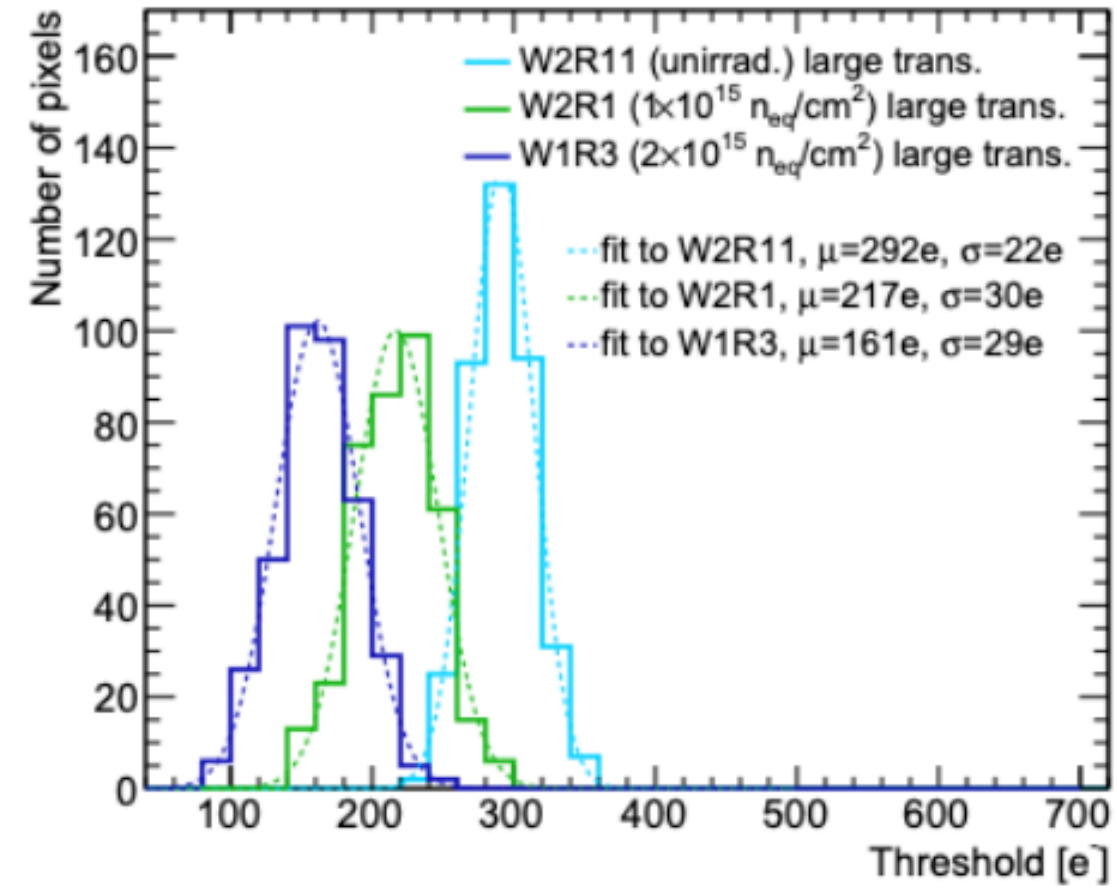




# Geliştirme Süreci: mini-MALTA

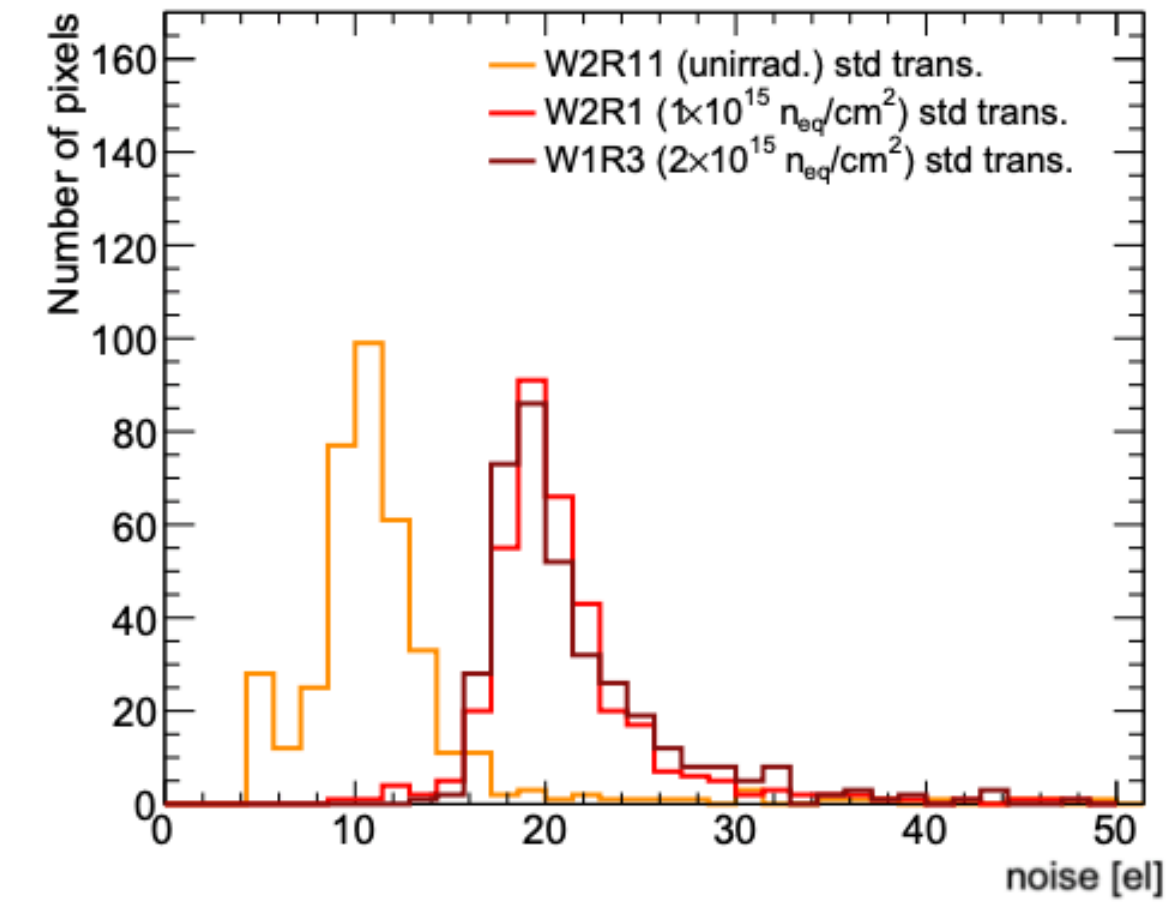
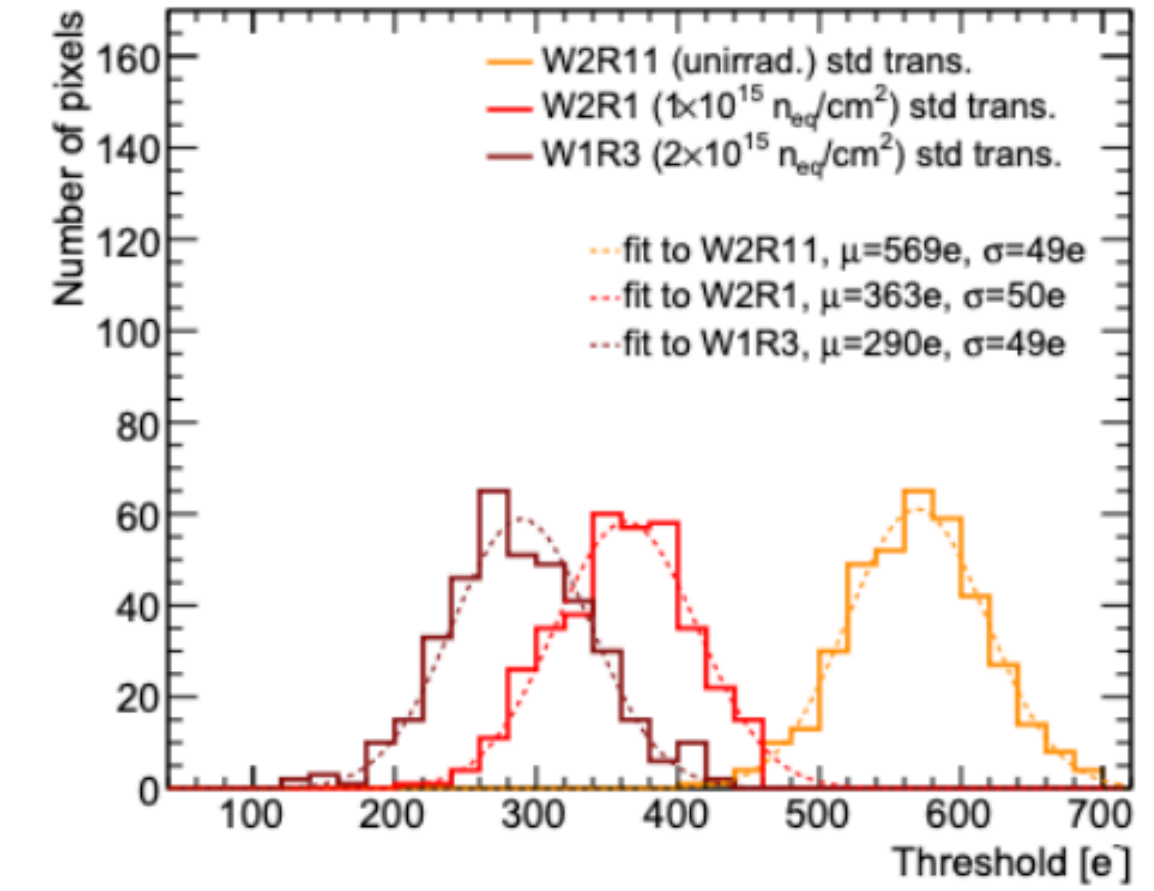
## Laboratuvar Ölçümleri :

Daha düşük ve dar eşik değeri dağılımı!

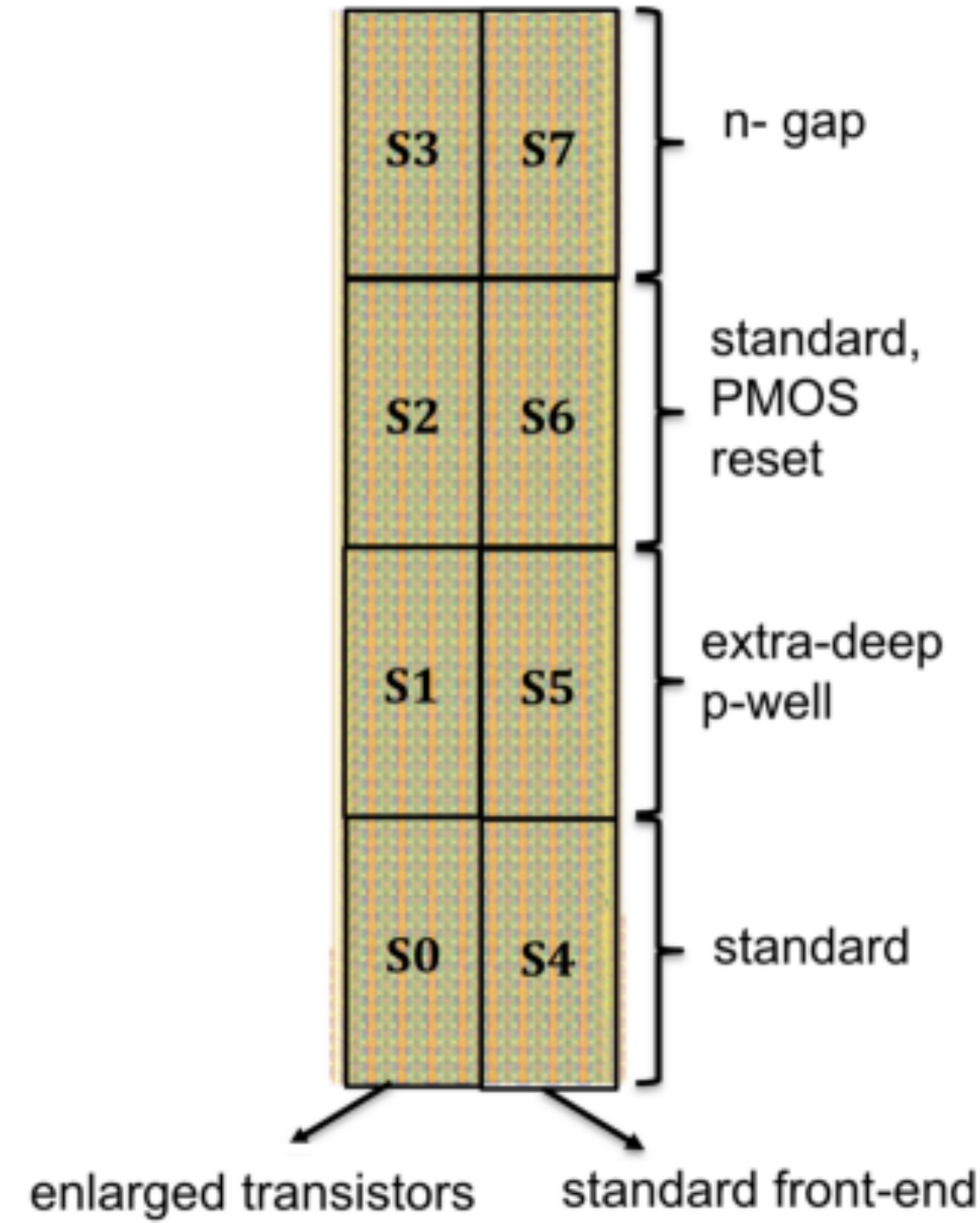


Daha dar ve kısa kuyruklu gürültü değeri dağılımı!

Daha yüksek ve geniş eşik değeri dağılımı!



Daha geniş ve uzun kuyruklu gürültü değeri dağılımı!



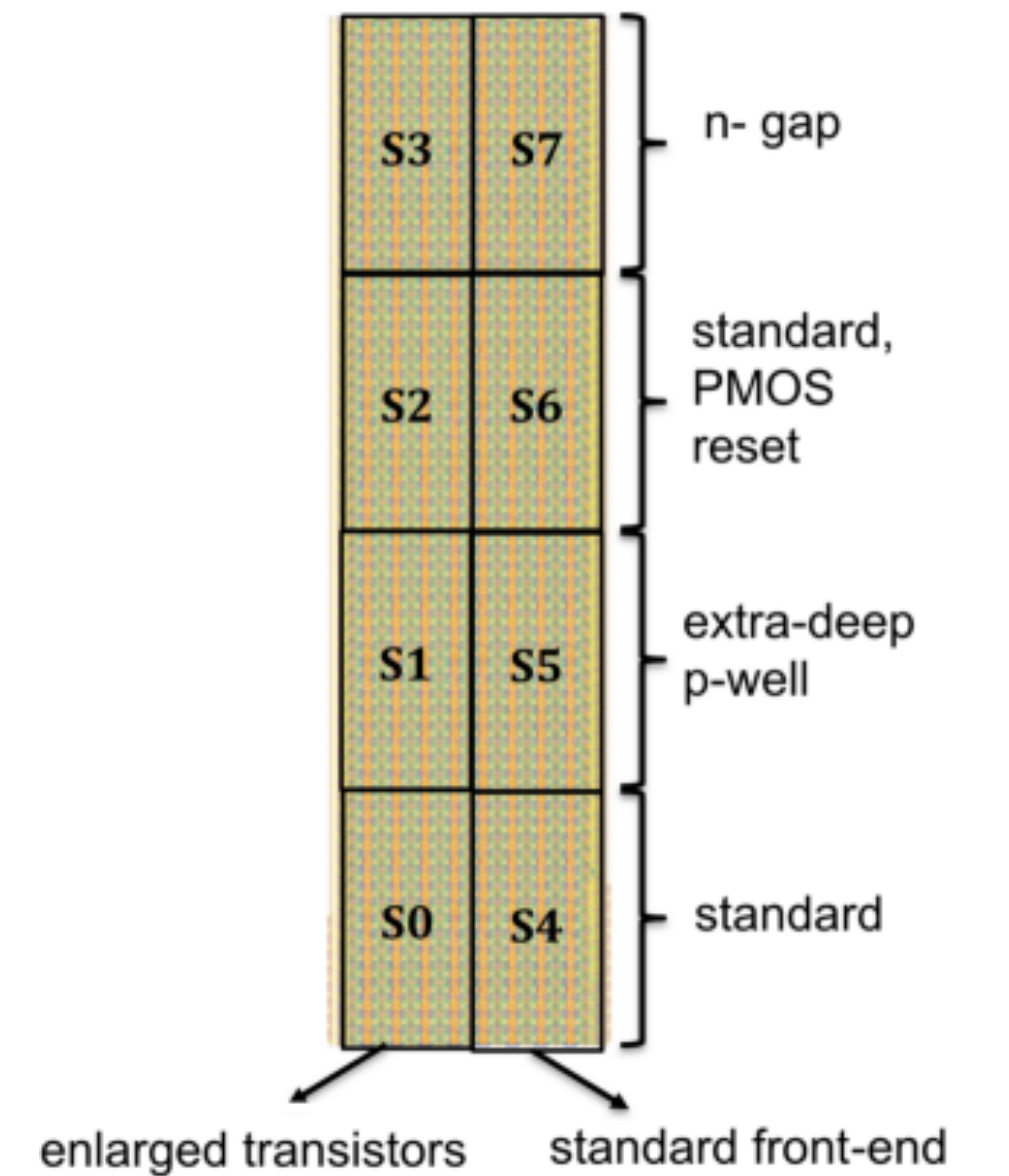
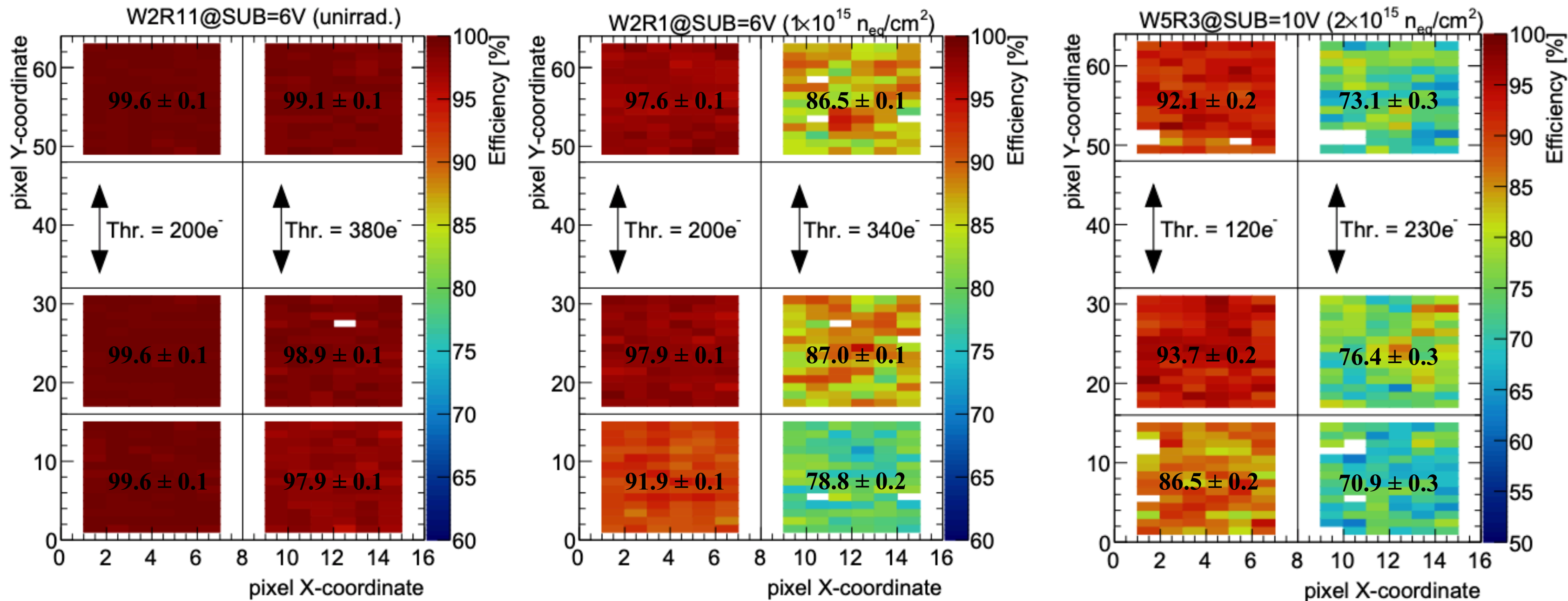
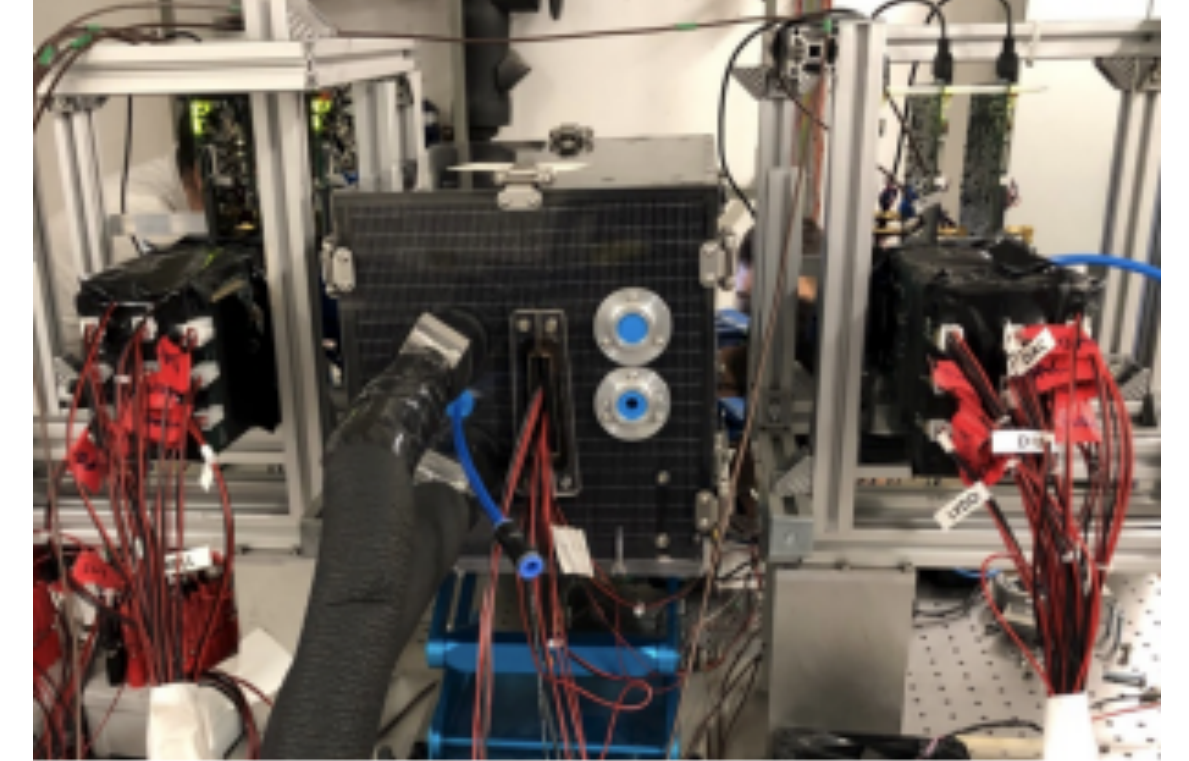
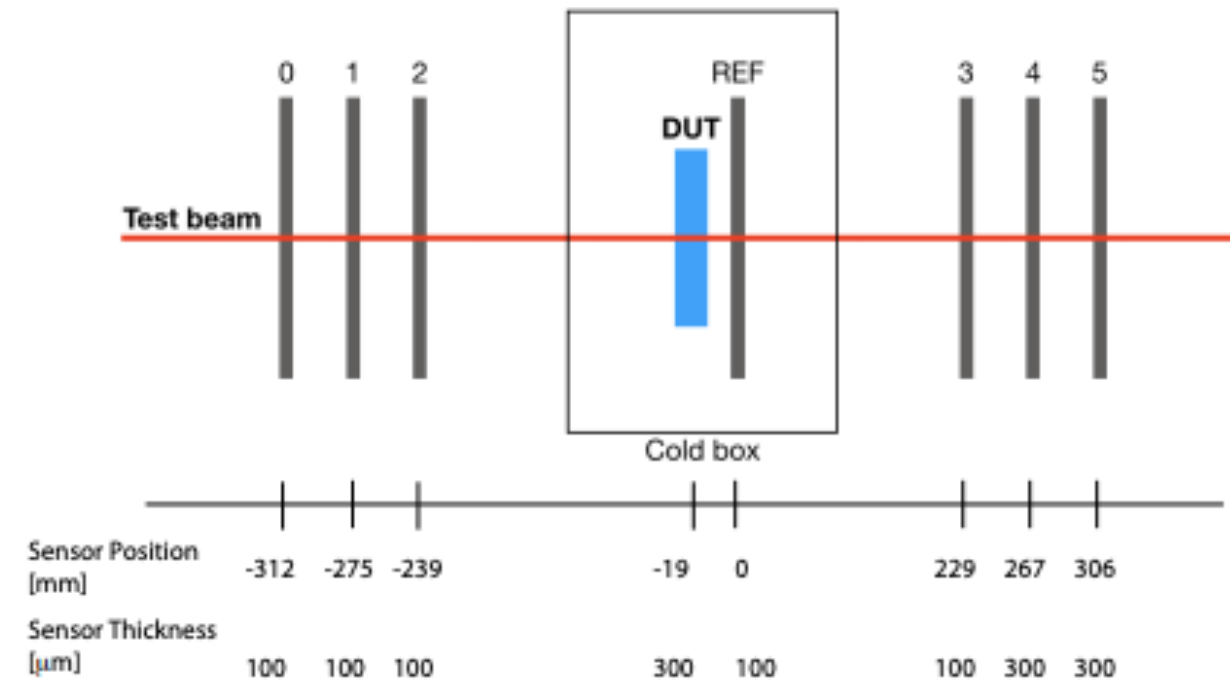


# Geliştirme Süreci: mini-MALTA

## Test Işını Ölçümleri :

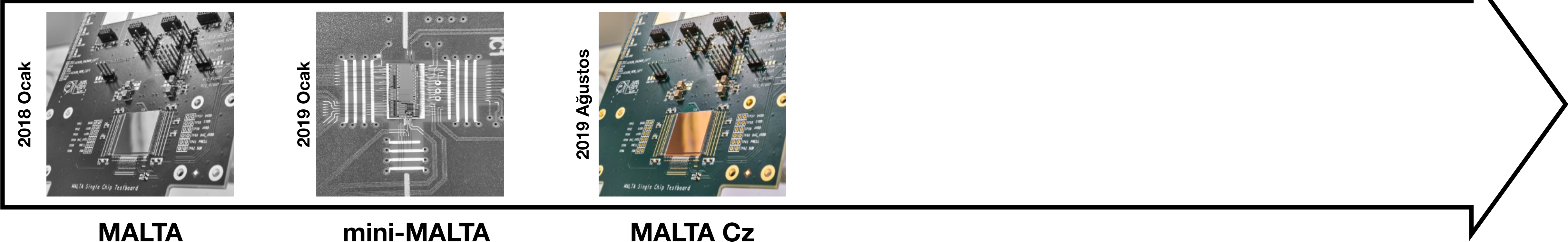
- Test Işını 2019 Yılında ELSA ve DESY'de bulunan tesislerde gerçekleştirilmiştir.
- Mini MALTA örnekleri 3-5 GeV elektron demetleri altında test edilmiştir.
- Örnekler MIMOSA ve MALTA teleskobuna yerleştirilmiş ve radyasyonun sebep olduğu termal gürültüyü önlemek için ölçümler  $-20^{\circ}\text{C}$  gerçekleştirilmiştir.

## MALTA Teleskobu:

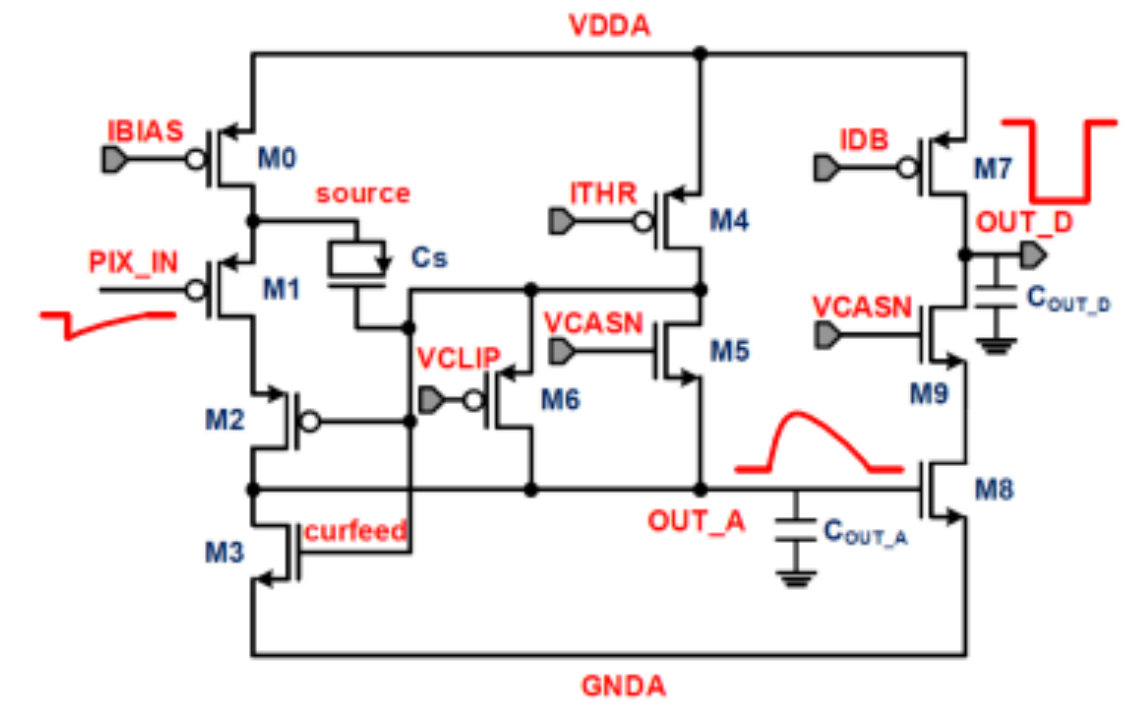




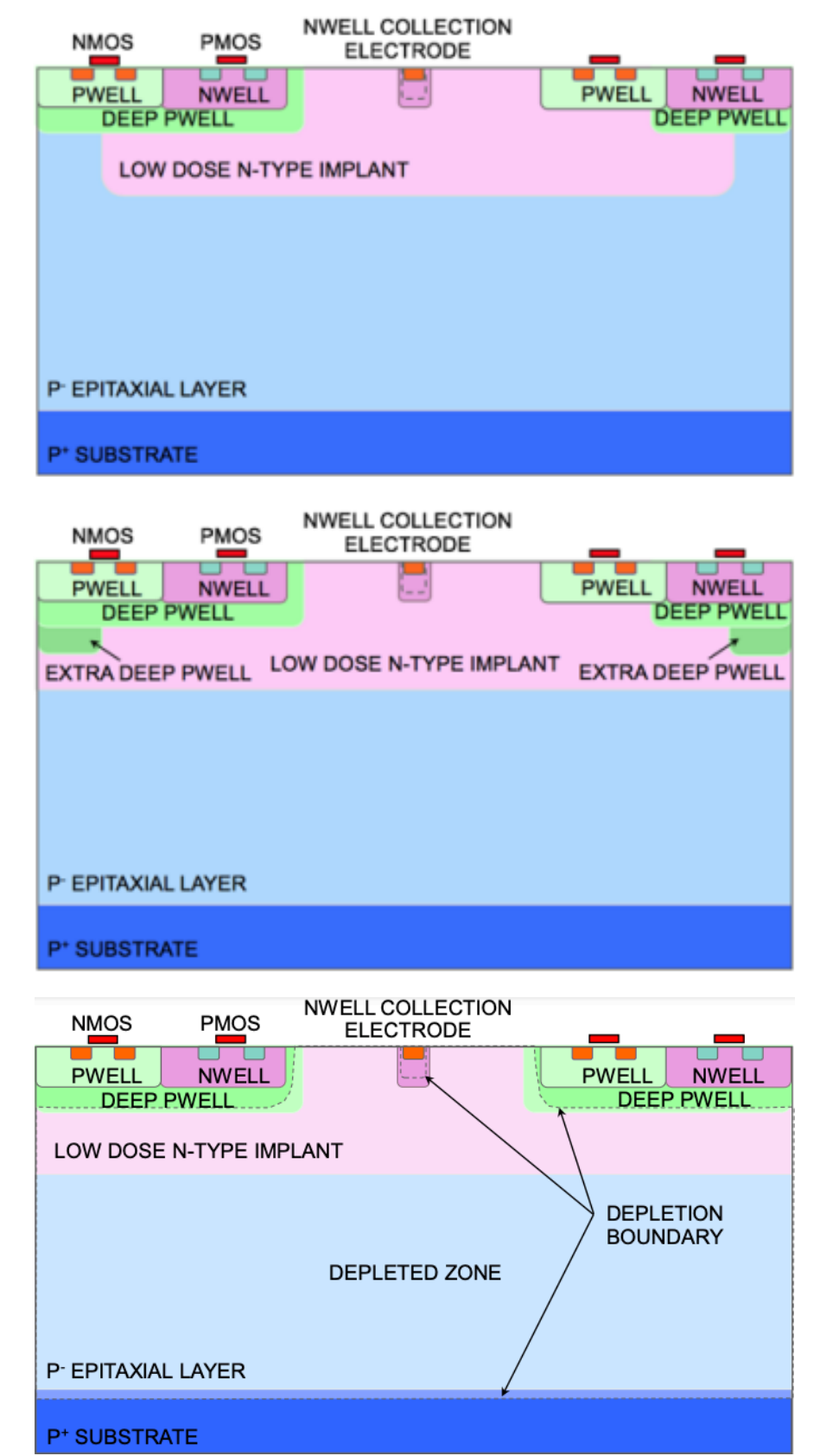
# Geliştirme Süreci: MALTA Cz



- 180 nm TowerJazz CMOS teknolojisiyle yüksek dirençli Czochralski (Cz) silikon (3-4 kΩ·cm) üzerine üretilmiştir.
- Yüksek dirençli özelliği daha fazla gerilim uygulamamıza olanak sağlar ve daha geniş bir tükenme bölgesi elde edilmiş olur. Böylelikle radyasyonun verdiği zarar dengelenmiş olur.
- MALTA sensörünün toplam kalınlığı 300 μm'dir.
- Piksel tarımlarında, piksellerin köşelerindeki kaybı azaltarak köşelerde ulaşan düzgün bir elektrik alan dağılımı hedeflenmiştir.
- MALTA sensöründe kullanılan analog ön yüz (front-end) kullanılmıştır.
- Piksel matrisi yine her biri 64 x 512 pikselden oluşan 8 bölümden oluşmaktadır.



S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
diode reset	diode reset	diode reset	diode reset	PMOS reset	PMOS reset	PMOS reset	PMOS reset
2 μm el. size	2 μm el. size	3 μm el. size	3 μm el. size	3 μm el. size	3 μm el. size	2 μm el. size	2 μm el. size
4 μm spacing	4 μm spacing	3.5 μm spacing	3.5 μm spacing	3.5 μm spacing	3.5 μm spacing	4 μm spacing	4 μm spacing
med. deep p-well	max. deep p-well	max. deep p-well	med. deep p-well	med. deep p-well	max. deep p-well	max. deep p-well	med. deep p-well



\*Figürler ilgili makaleden (<https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164381>) alınmıştır.

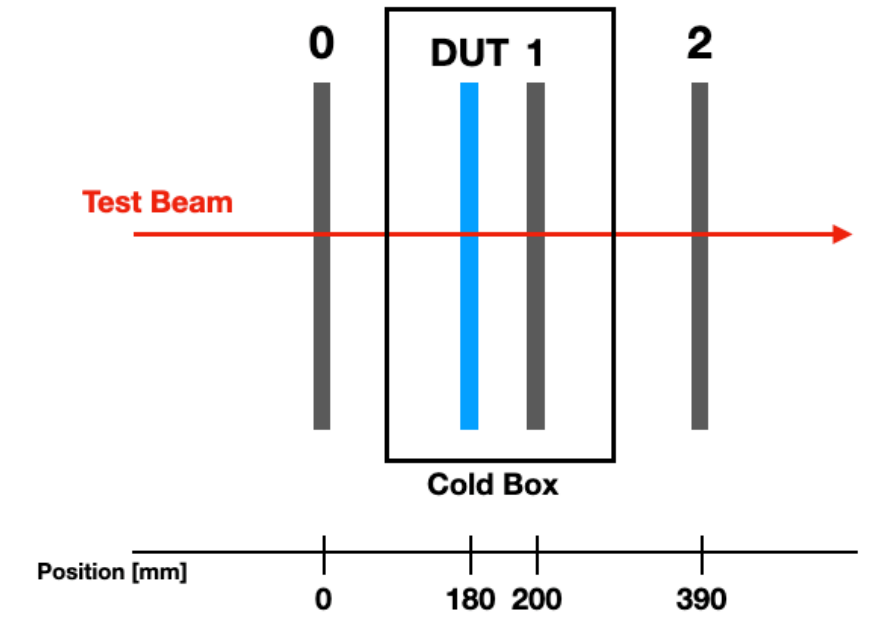


# Geliştirme Süreci: MALTA Cz

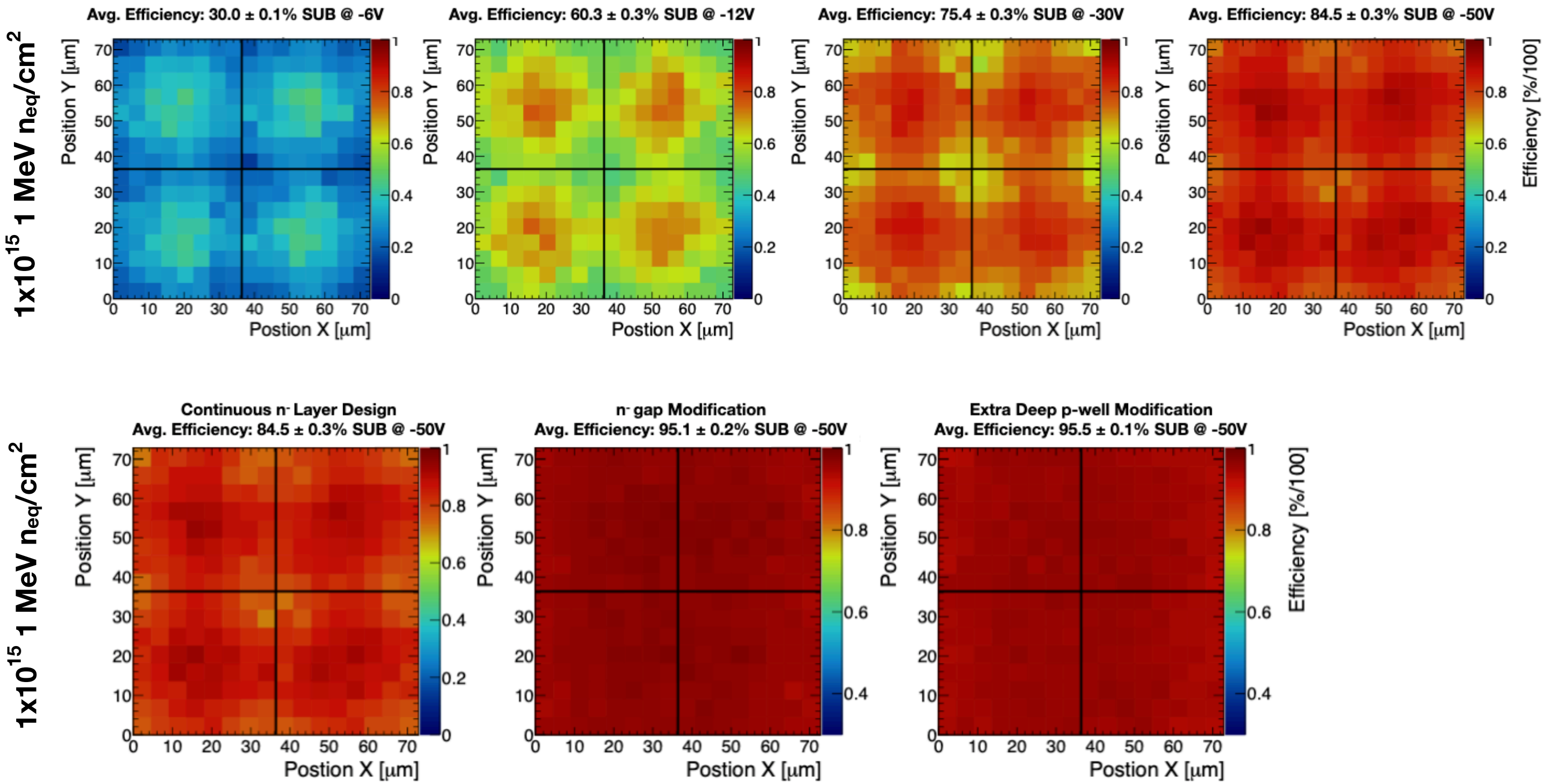
## Test Işını Ölçümleri :

- Test Işını 2019 Yılında DESY’de gerçekleştirilmiştir.
- MALTA Cz örnekleri 3-5 GeV elektron demetleri altında test edilmiştir.
- MALTA teleskobuna yerleştirilmiş ve radyasyonun sebep olduğu termal gürültüyü önlemek ölçümler -20°C gerçekleştirilmiştir.
- Ölçümler sırasında daha küçük bir MALTA teleskopu kullanılmıştır.

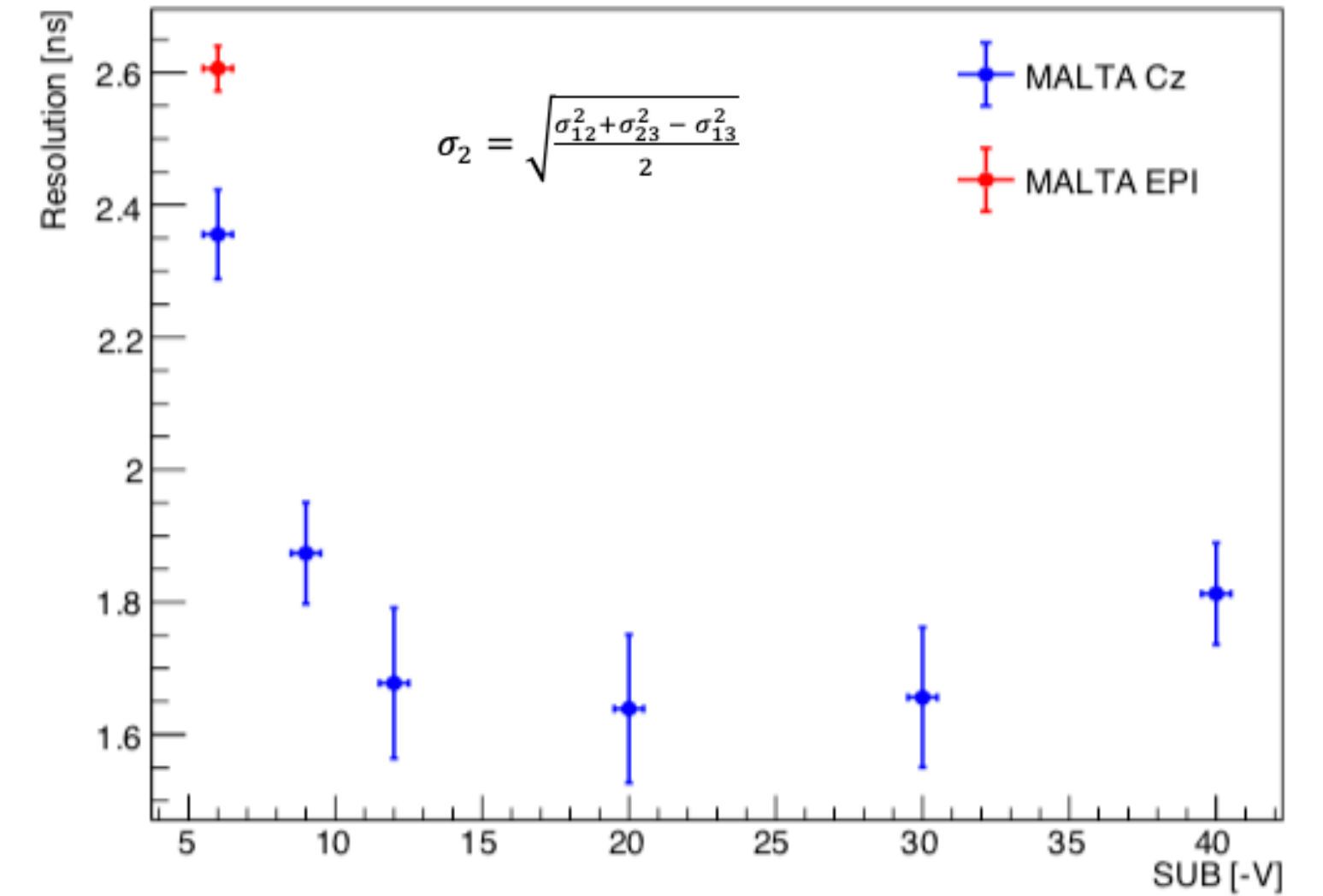
MALTA Teleskobu:



## Uygulanan Gerilime Göre Piksel İzleme Verimlilikleri



## Uygulanan Gerilime Göre Zaman Çözünürlüğü



\*Sensörlerden gelen sinyal zamanı PicoTDC ile ölçülmüştür. Teleskop elemanlarının birbirleri lineer bağlantı kullanılarak zaman çözünürlüğü elde edilmiştir.

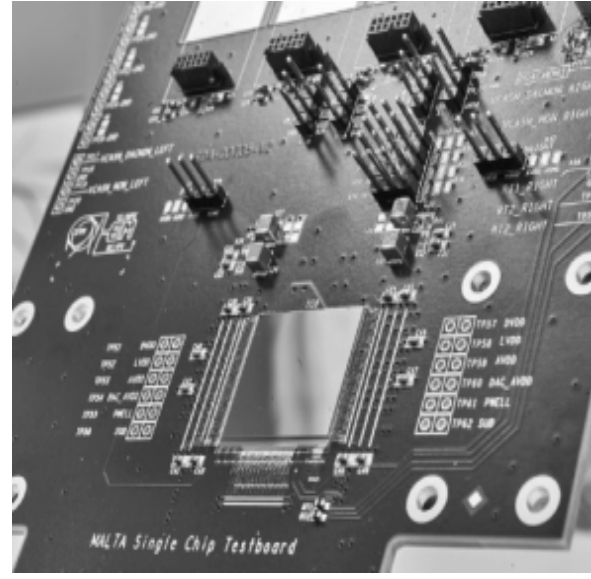
\*Figürler ilgili makaleden (<https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164381>) alınmıştır.

\*Zaman çözünürlükleri PicoTDC ile ölçülmüştür.



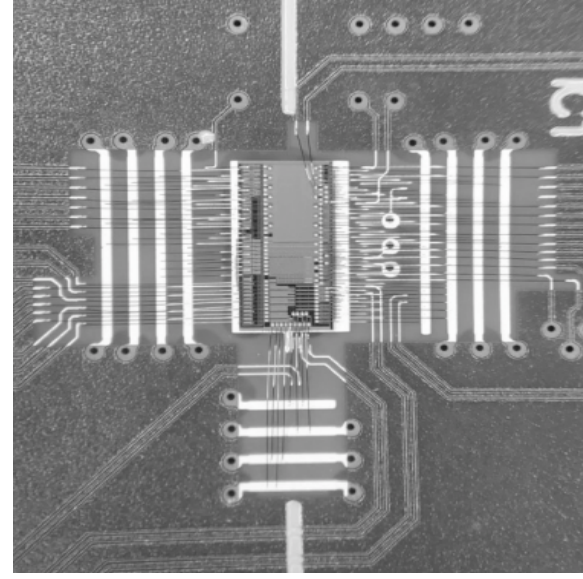
# Geliştirme Süreci: MALTA2

2018 Ocak



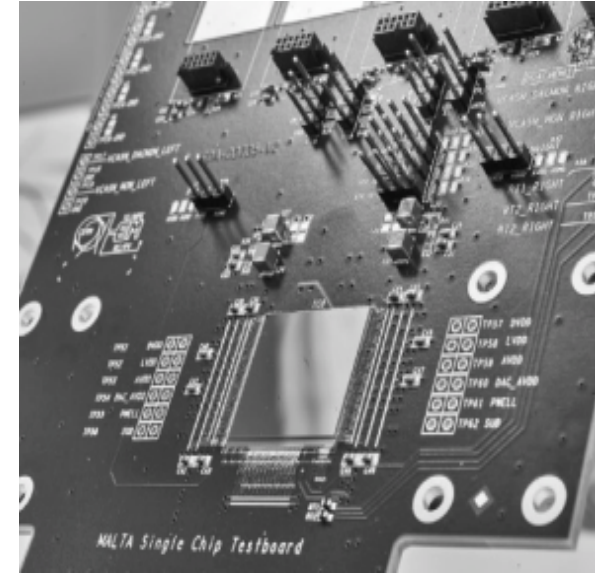
MALTA

2019 Ocak



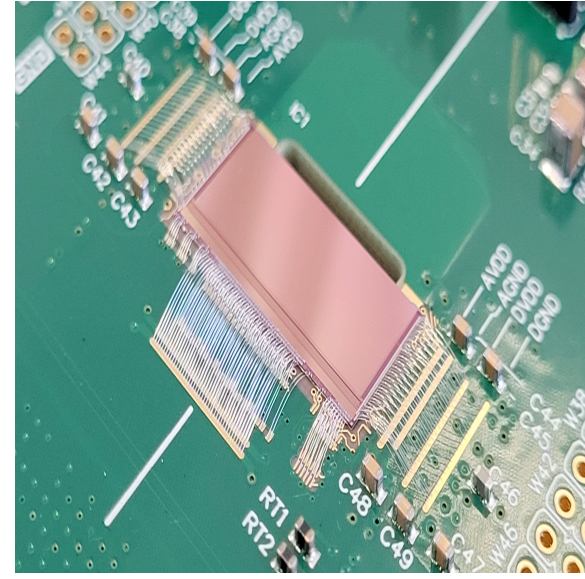
mini-MALTA

2019 Ağustos



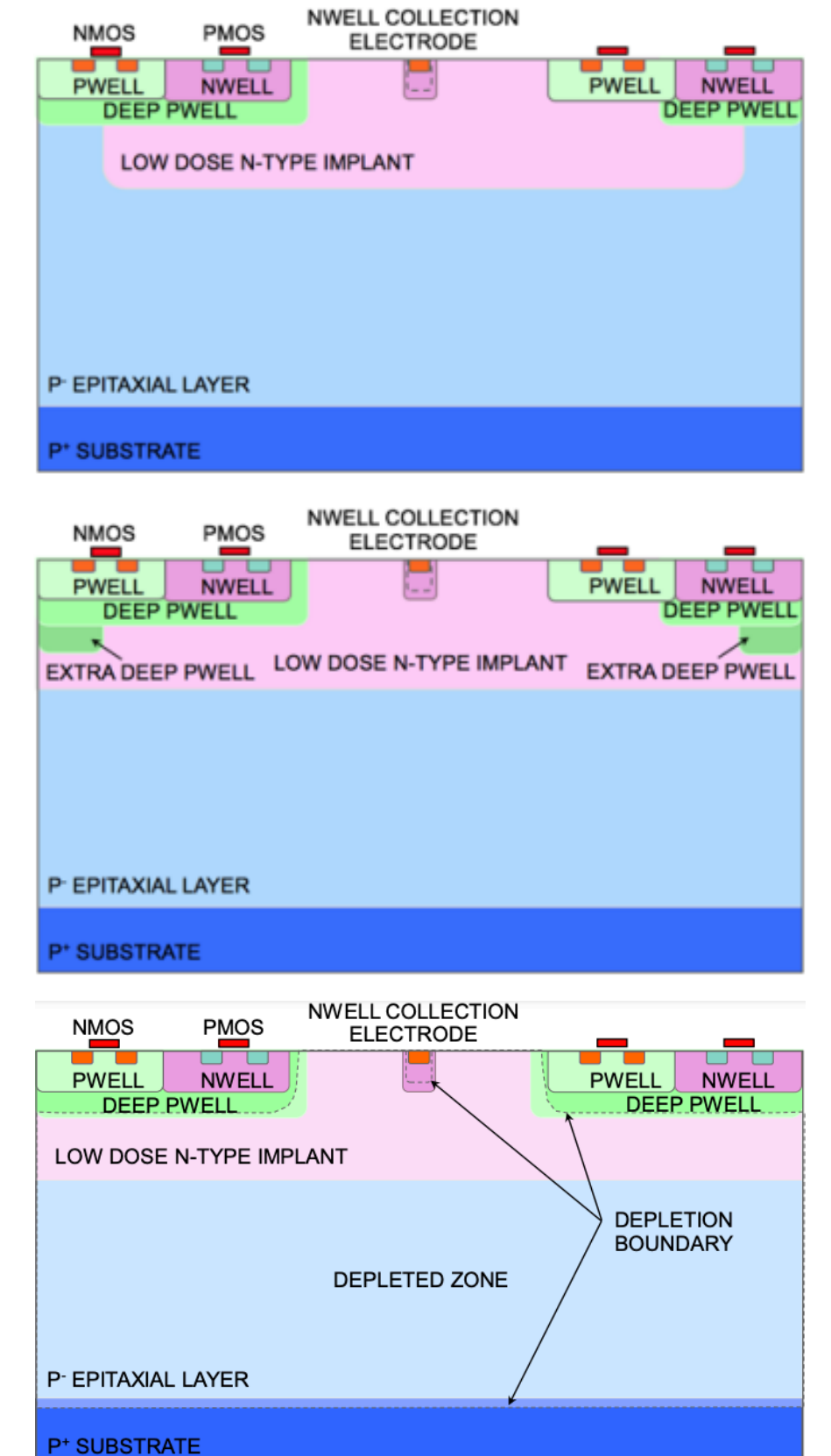
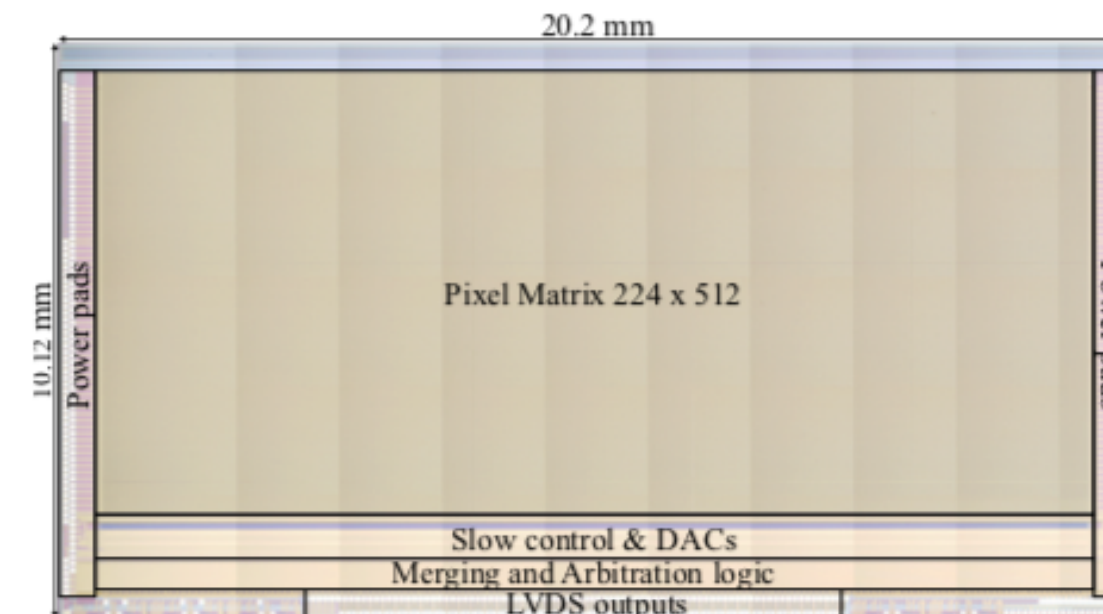
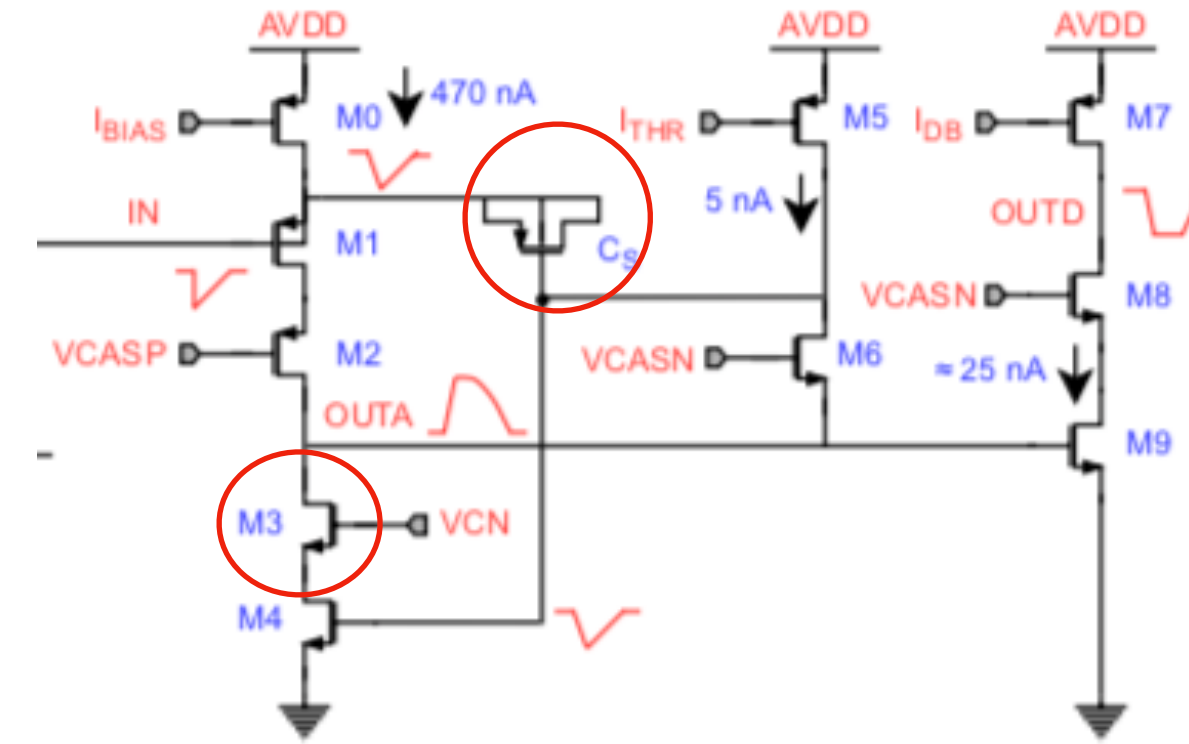
MALTA Cz

2021 Ocak



MALTA2

- MALTA2 EPI ve Cz olmak üzere iki farklı silikon yapısı test edilmiştir.
- TowerJazz ile 180 nm teknoloji kullanılarak 300  $\mu\text{m}$  silikon üzerine üretilmiş ve 100  $\mu\text{m}$  kadar inceltilmiştir.
- Düşük dozda n-tipi ek, MALTA2 sensöründe farklı doz seviyeleri (düşük, orta, yüksek ve daha yüksek) ile test edilmiştir.
- Mini-MALTA ve MALTA Cz de kullanılan yeni piksel tasarımları MALTA2'de de kullanılmıştır.
- Elde edilen tecrübelerle yeni bir analog ön yüz geliştirilmiştir. Yeni ön yüzde yapılan geliştirmelerle radyasyonun sebep olduğu RTS gürültüsü önlenmesi ve hızlı çalışması hedeflenmiştir.
- Piksel matrisinde tek tip piksel özellikleri kullanılmış ve piksel matrisi 224 x 512 pikselden oluşmaktadır.



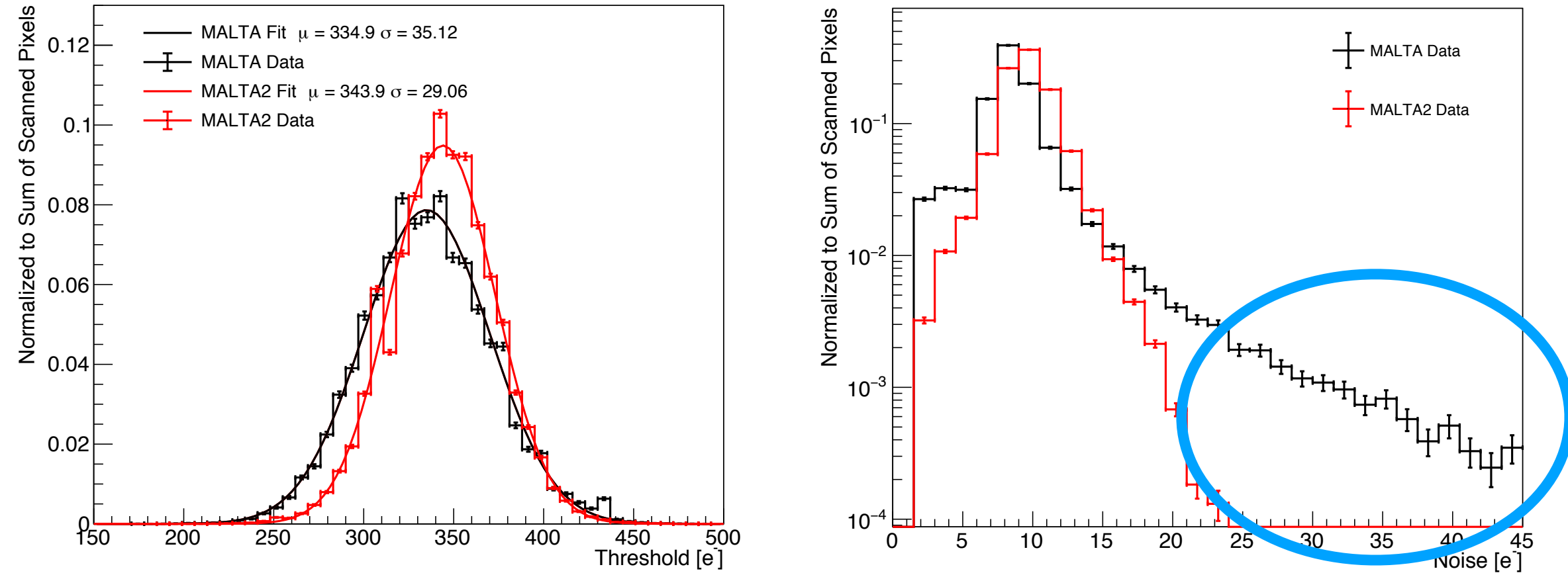


# Geliştirme Süreci: MALTA2

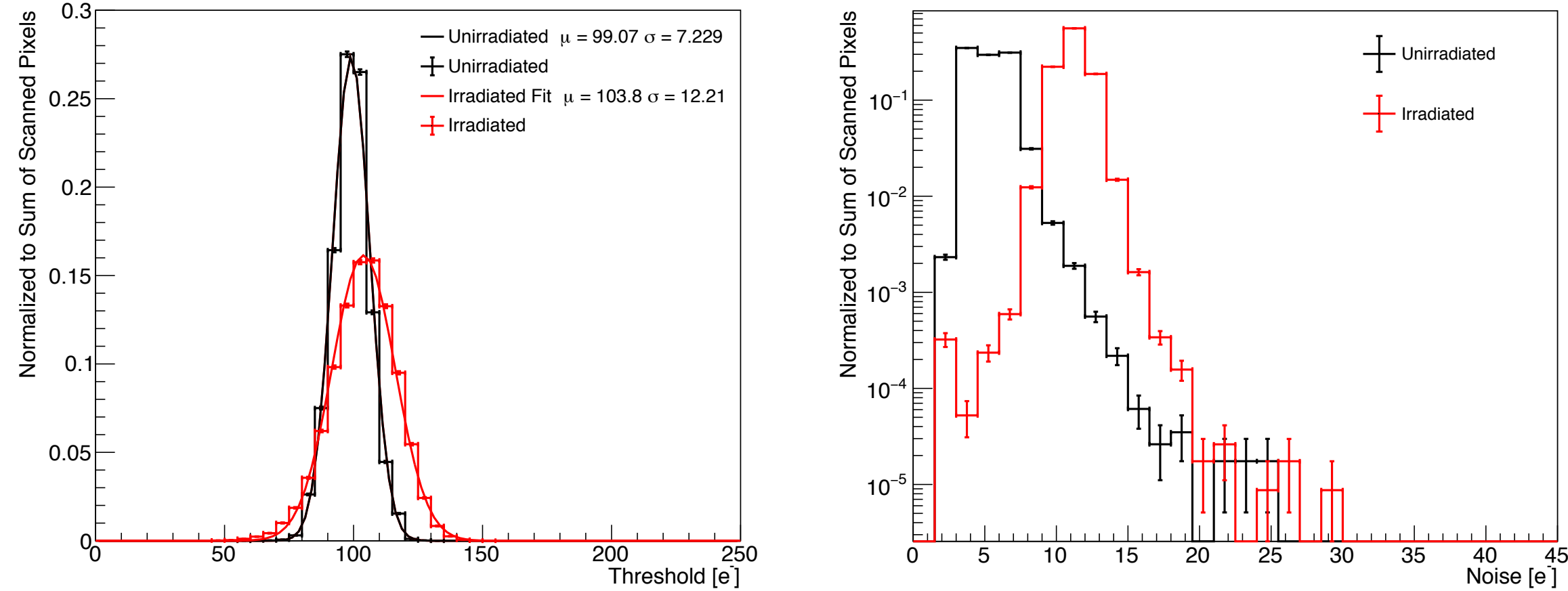
## Laboratuvar Ölçümleri :

### Eşik ve Gürültü Ölçümleri

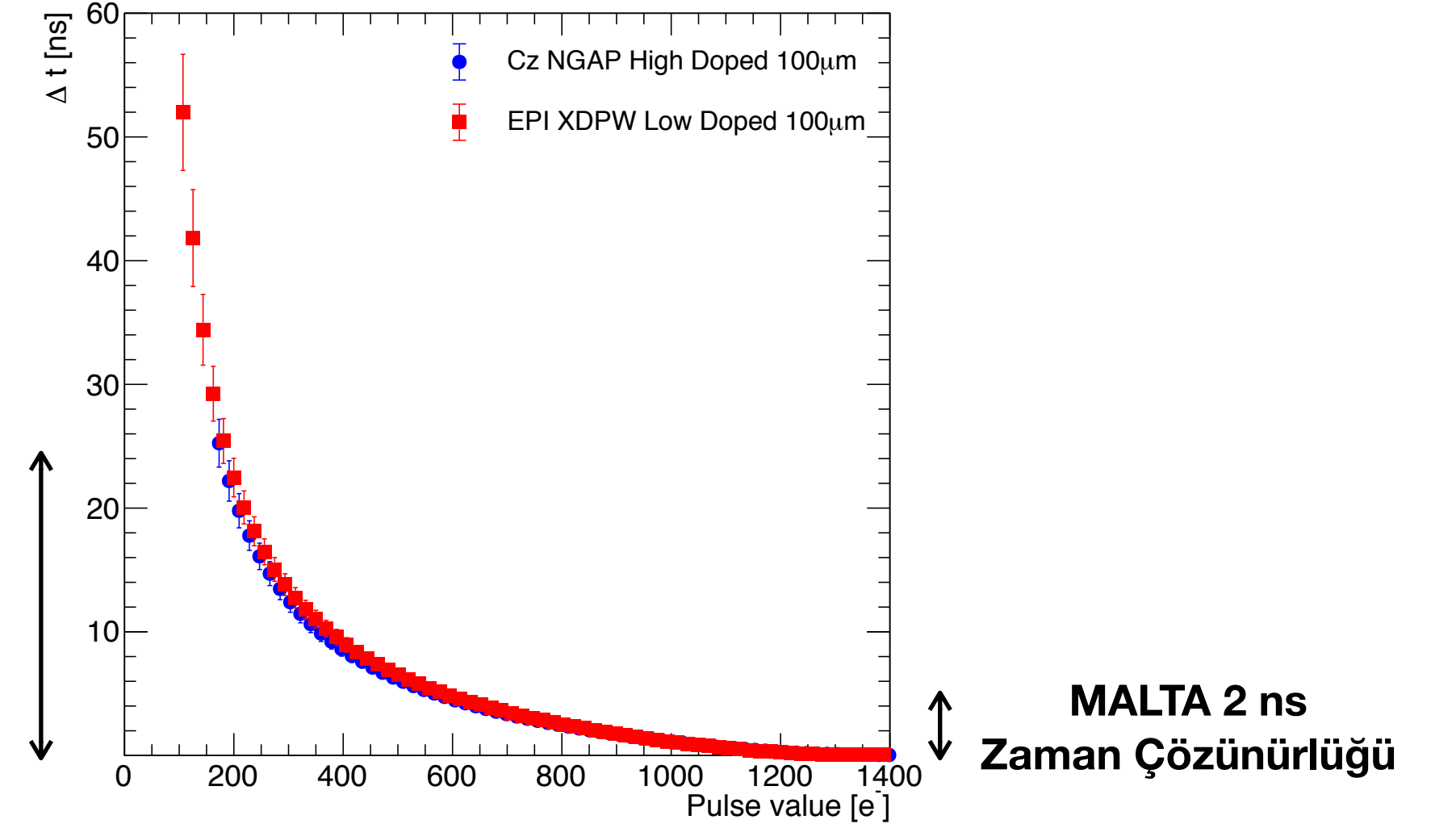
MALTA ve MALTA2 için Eşik ve Gürültü Değeri Karşılaştırması



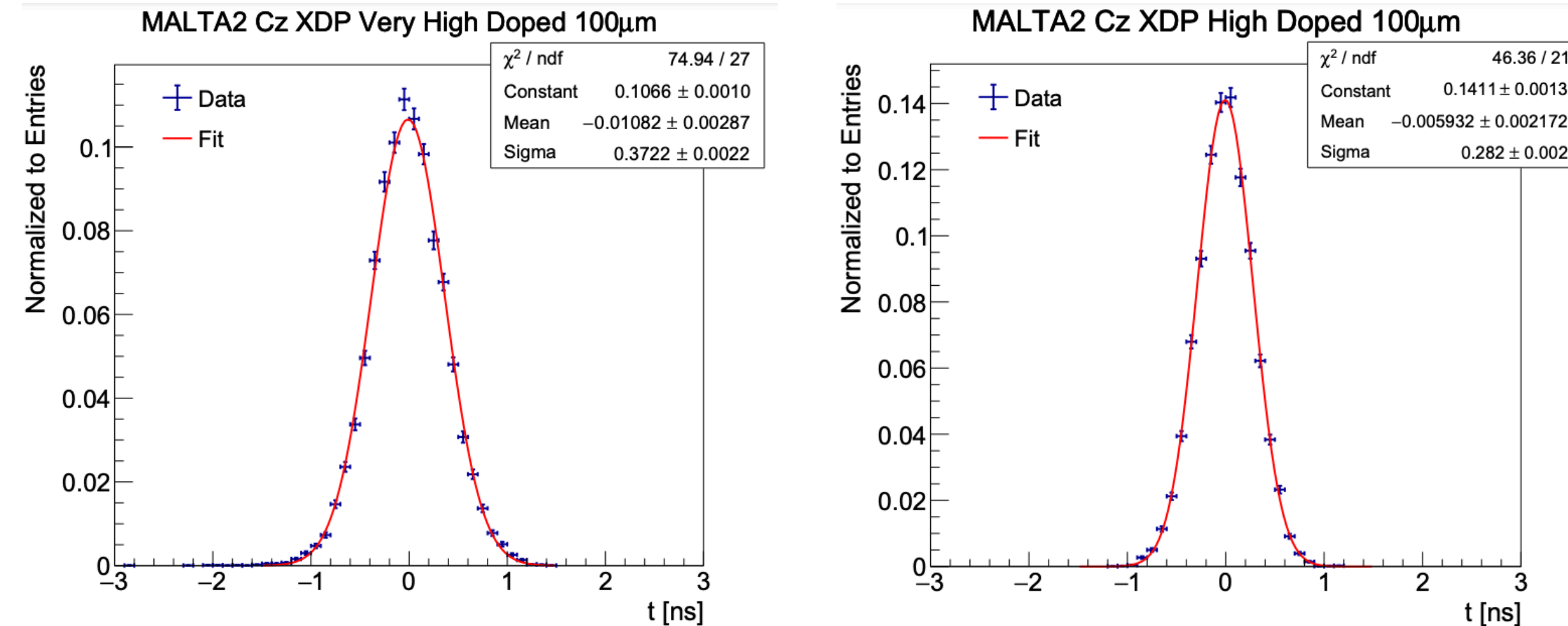
Işınlanmamış ve  $3 \times 10^{15} \text{ 1 MeV } n_{eq}/\text{cm}^2$  NIEL MALTA2 Örneklerinin Eşik ve Gürültü Değeri Karşılaştırması



Zaman Ölçümleri  
Yüke Göre Zaman Gelişimi (Time-walk)



Analog Ön Yüzde Oluşan Titreşim (Jitter)

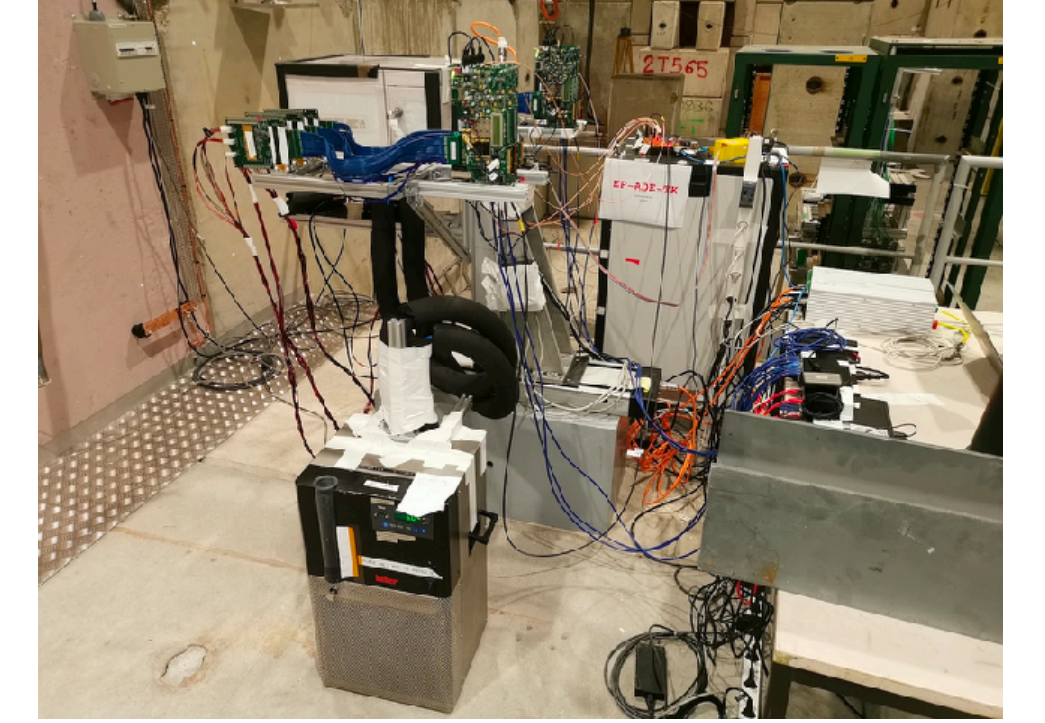
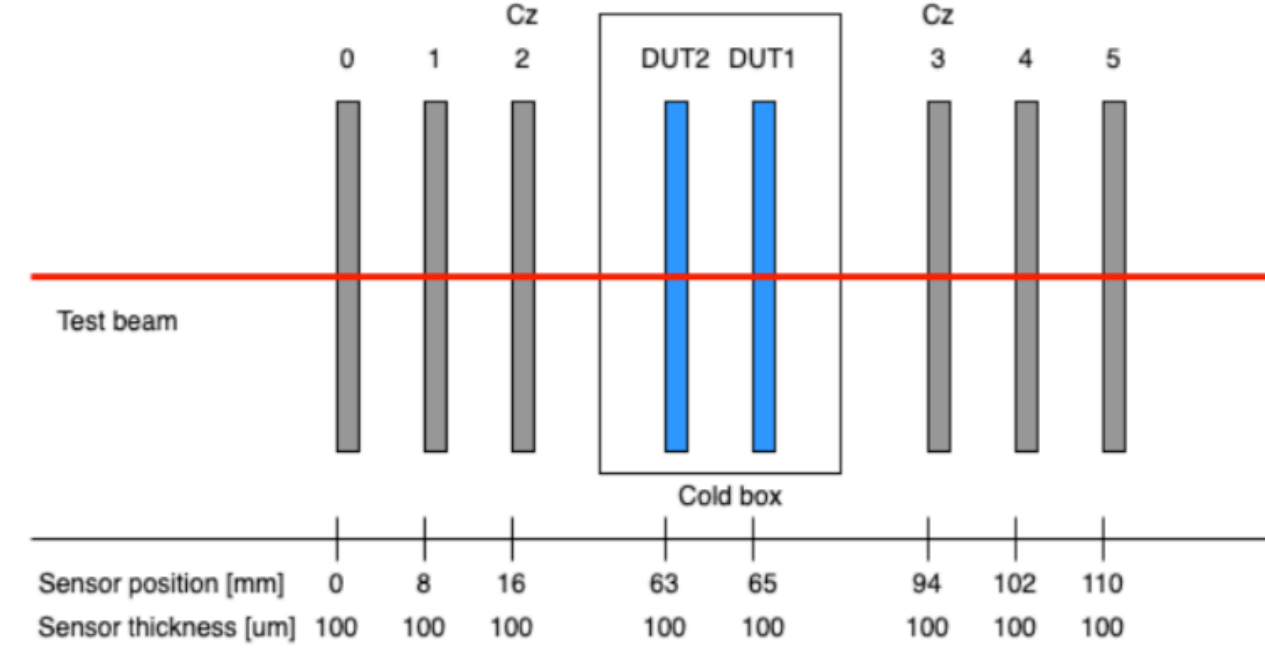


# Geliştirme Süreci: MALTA2

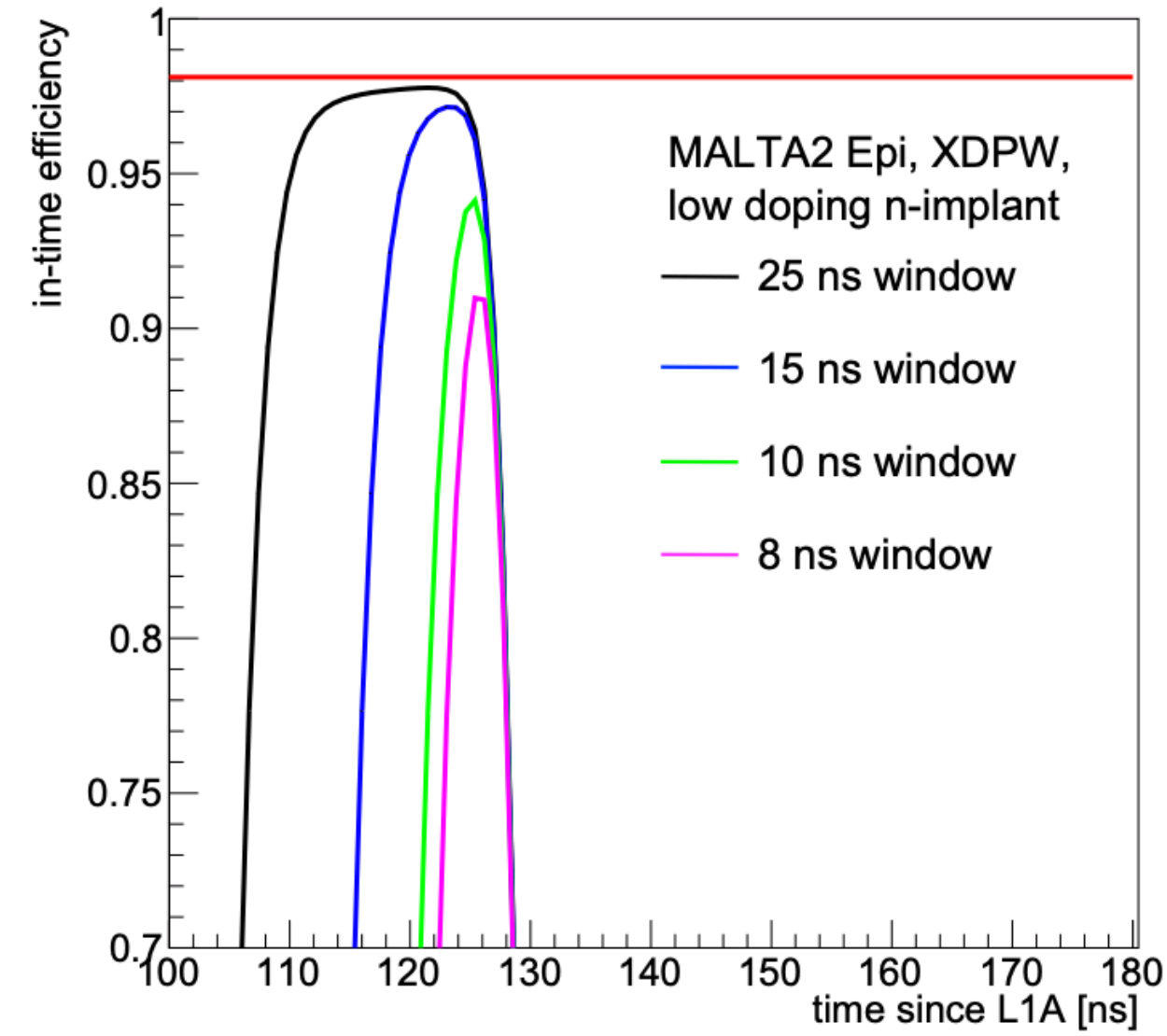
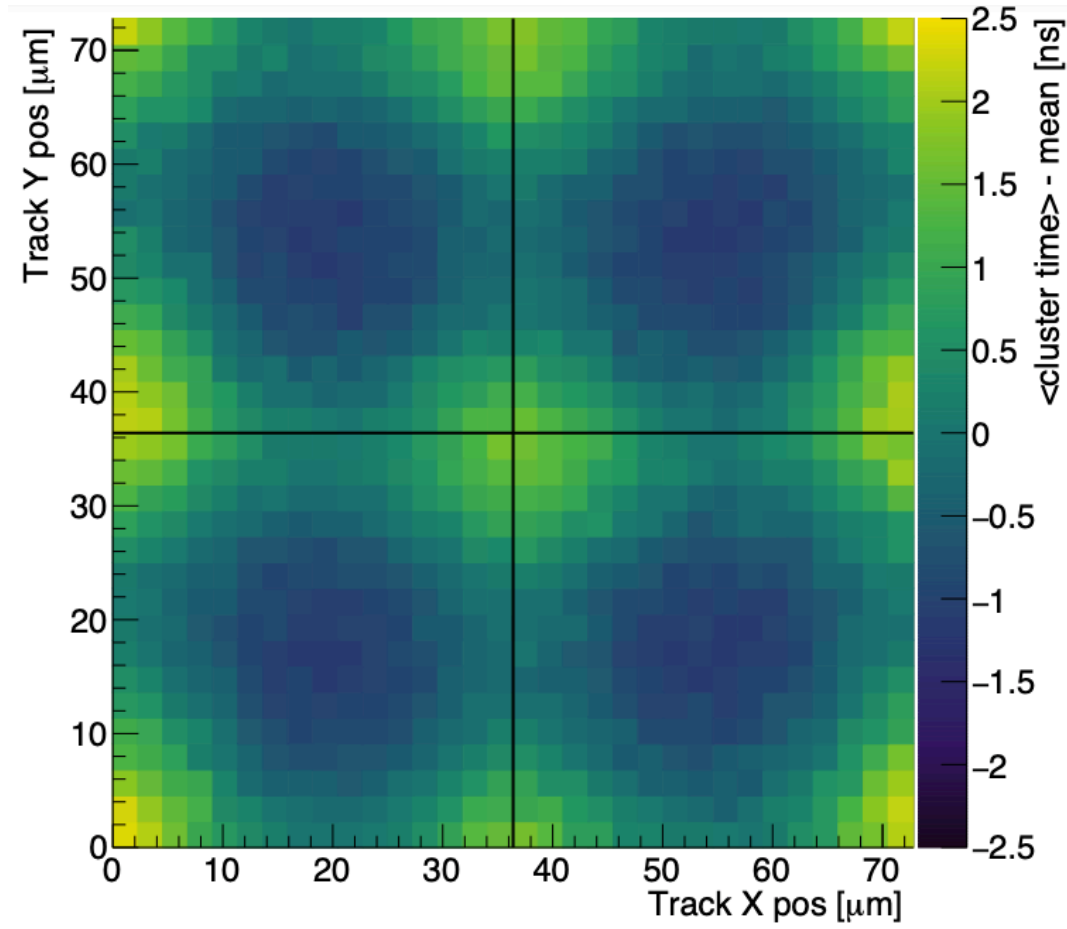
## Test Işını Ölçümleri :

- Test Işını 2021 Yılında CERN'de bulunan SPS tesisinde gerçekleştirilmiştir.
- MALTA2 örnekler 180 GeV pion demetleri altında test edilmiştir.
- MALTA teleskobuna yerleştirilmiş ve radyasyonun sebep olduğu termal gürültüyü önlemek ölçümler  $-20^{\circ}\text{C}$  gerçekleştirilmiştir.
- Özellikle piksellerin zaman çözünürlükleri üzerinde çalışılmıştır.

## MALTA Teleskobu:

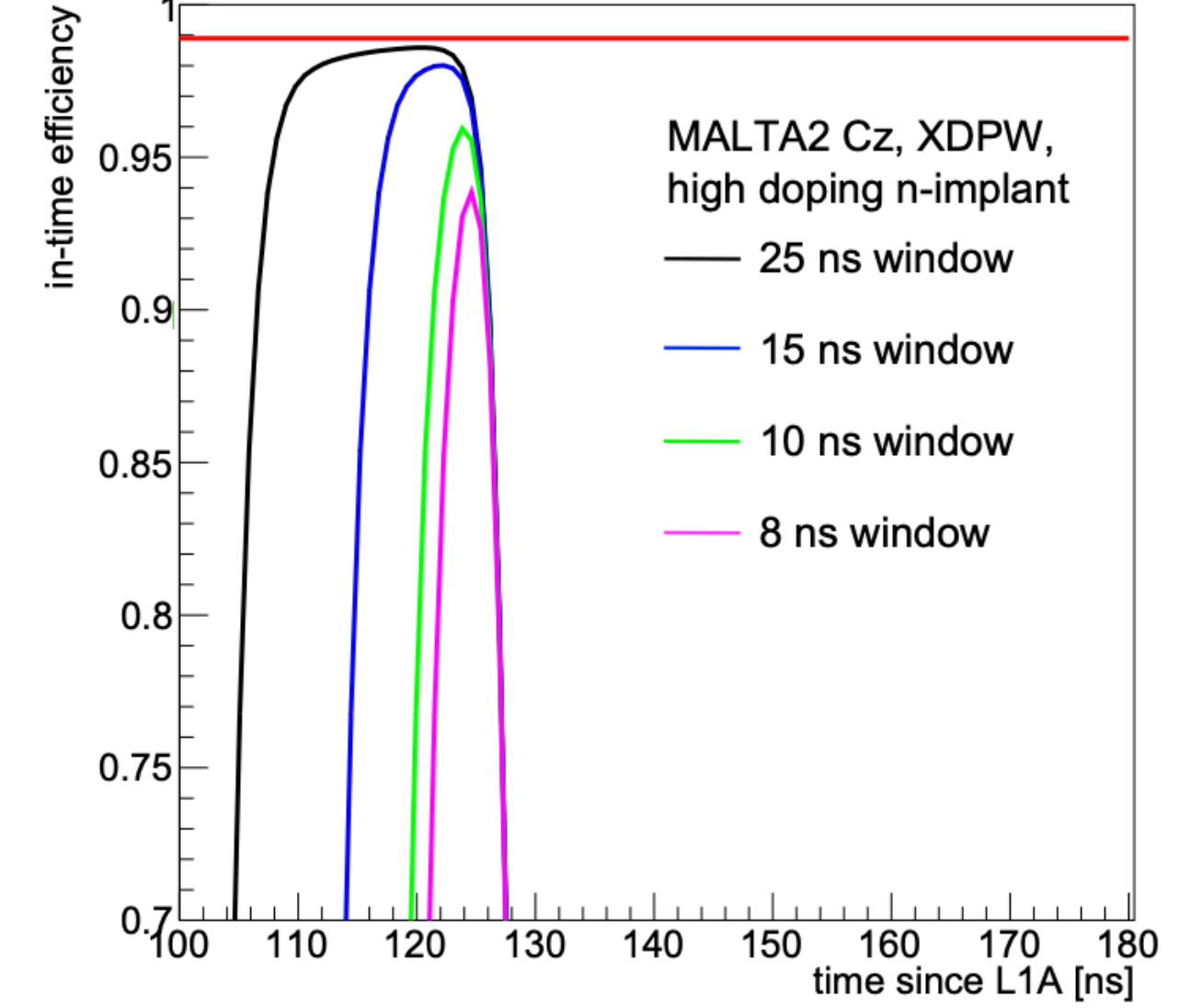
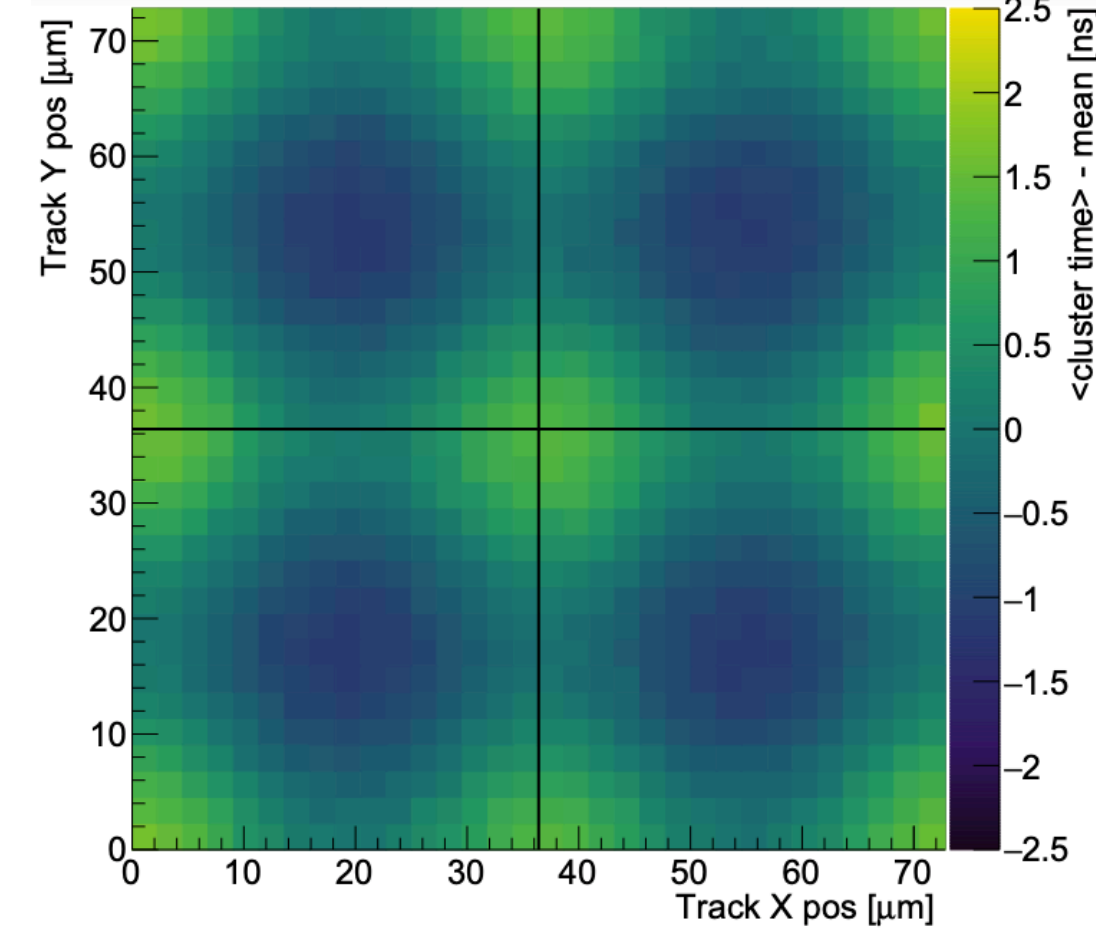


## SUB = -6 V



Th:170 elektron, 1.9 ns zaman çözünürlüğü 8 ns'lik zaman penceresinde!

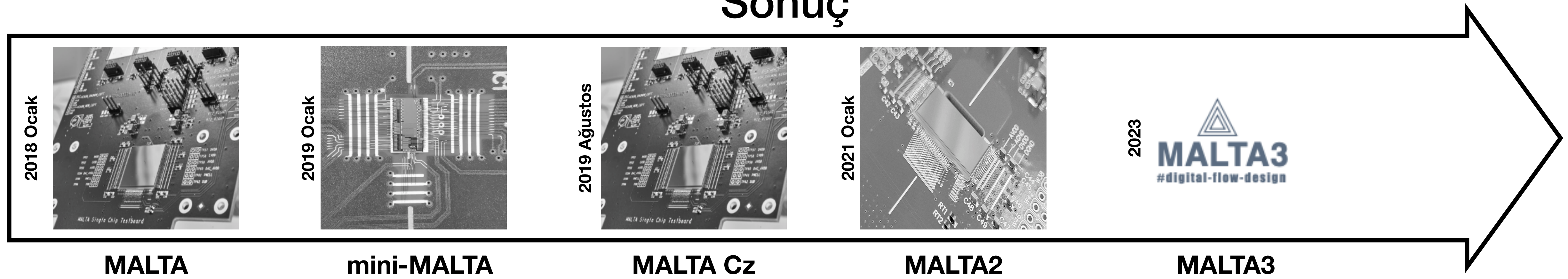
## SUB = -6 V



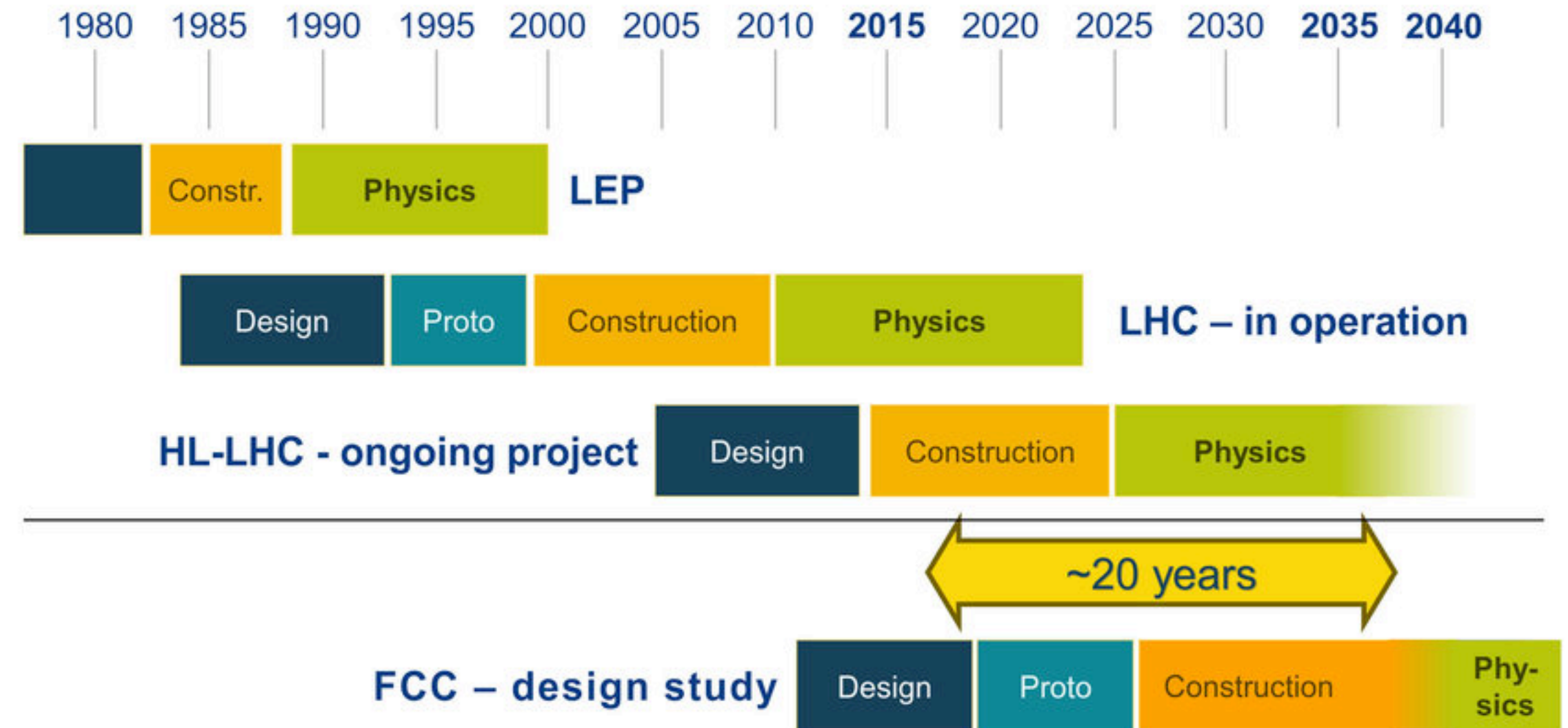
Th:130 elektron, 1.8 ns zaman çözünürlüğü 8 ns'lik zaman penceresinde!



# Sonuç



- MALTA3 geliştirme çalışmaları devam etmektedir.
- Sensörün içerisine toplanan yüklerden oluşan sinyali daha hassas bir şekilde ölçmesini sağlayan digital devre eklenmesi planlanmadır.
- Sahip olduğu radyasyon toleransı ve yüksek çözünürlüklü parçacık izleme performansı, MALTA sensörünü FCC-hh için önemli adaylardan biri yapmaktadır.
- Gelişen CMOS teknolojisiyle ve MALTA'dan elde edilen tecrübelerle geliştirilecek olan küçük elektrotlu piksel sensörler FCC-hh detektörünün radyasyon ve pile-up gibi temel sorunları için önemli noktadadır.





**Teşekkürler...**



# Acknowledgements

- The presenter has been supported partially by the Turkish Atomic Energy Authority (TAEK) under grant no 2018TAEK(CERN)A5.H6.F2-20.
- This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation program under grant agreement No 101004761.
- Supported by the Marie Skłodowska-Curie Innovative Training Network of the European Commission Horizon 2020 Program under contract number 675587 (STREAM).
- The measurements leading to these results have been performed at the TestBeam Facility at DESY Hamburg (Germany), a member of the Helmholtz Association (HGF).
- Measurements leading to these results have been performed at the E3 beam-line at the electron accelerator ELSA operated by the university of Bonn in Nordrhein-Westfalen, Germany.
- This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation program under Grant Agreement no. 654168 (IJS, Ljubljana, Slovenia).
- Dr. Ben Phoenix, Prof. David Parker and the operators at the MC40 cyclotron in Birmingham (UK).