

HV-MAPS

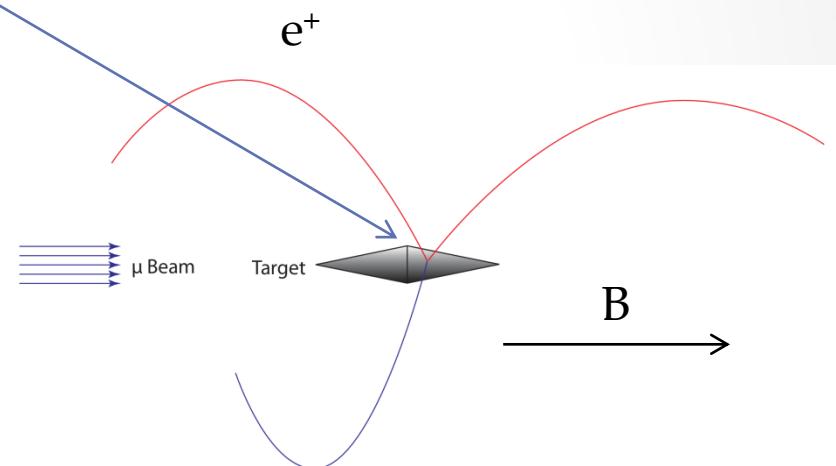
Dirk Wiedner
Physikalisches Institut
der Universität Heidelberg

Vom Spurnachweis zu Pixel-Detektoren

...

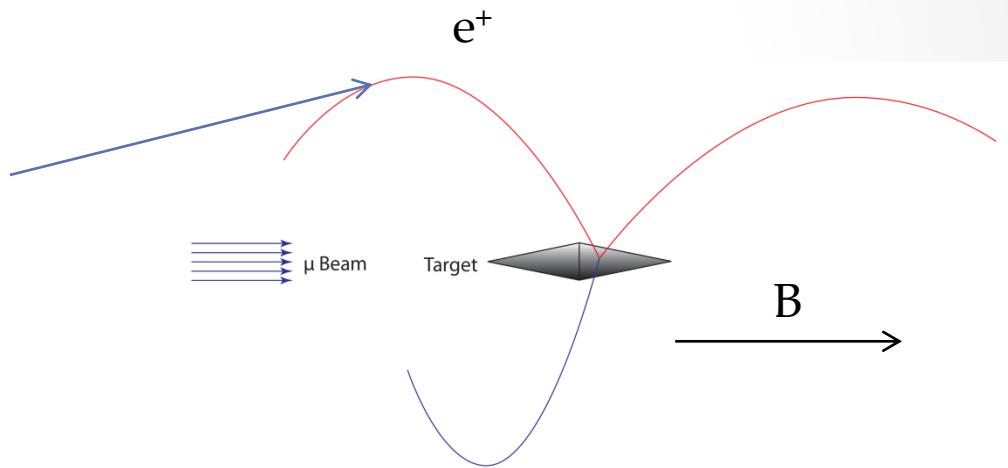
Spurnachweis

- Zerfallspunkt
 - Zerfallspunkt:
 - Spuren der Zerfallsprodukte zeigen auf den Zerfallspunkt
- Impuls
 - Geladene Teilchen werden im Magnetfeld abgelenkt
 - Krümmung \rightarrow Impuls
- Teilchen Identifikation
 - Information von Sub-Detektoren wird zugeordnet



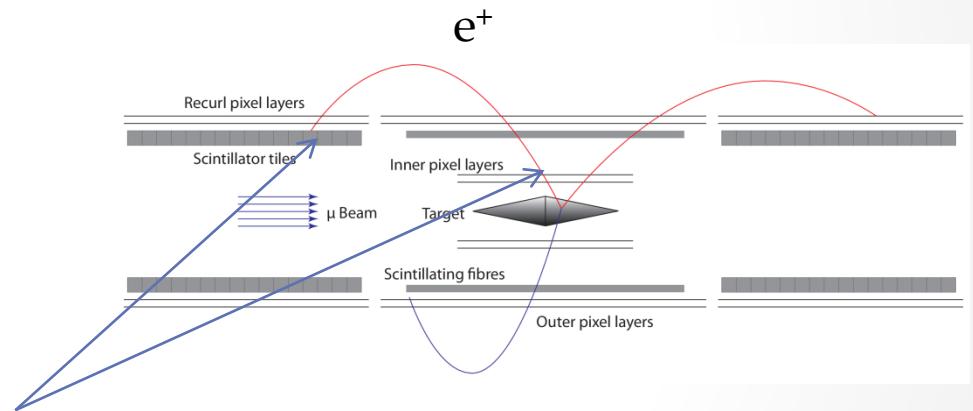
Spurnachweis

- Zerfallspunkt
 - Zerfallspunkt:
 - Spuren der Zerfallsprodukte zeigen auf den Zerfallspunkt
- Impuls
 - Geladene Teilchen werden im Magnetfeld abgelenkt
 - Krümmung \rightarrow Impuls
- Teilchen Identifikation
 - Information von Sub-Detektoren wird zugeordnet



Spurnachweis

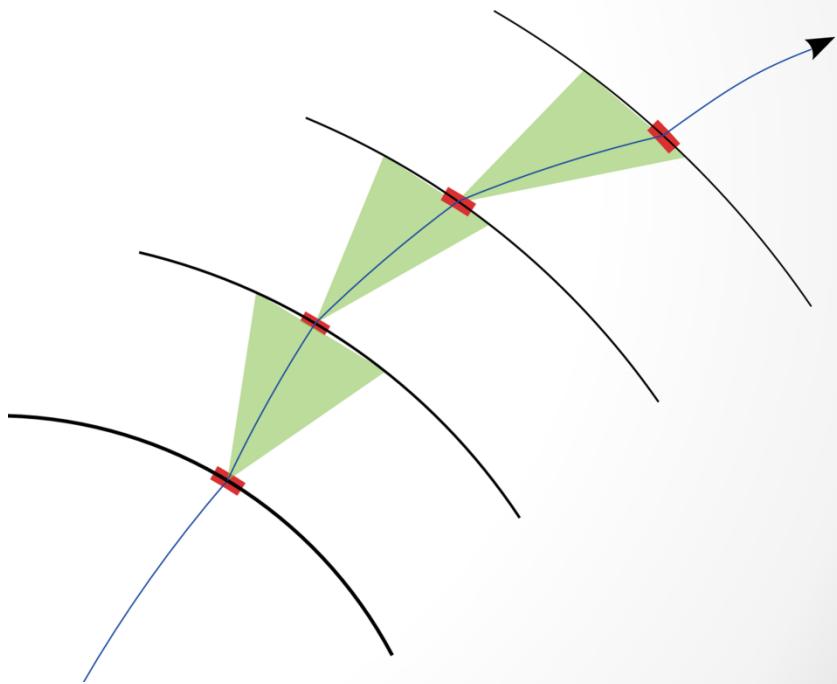
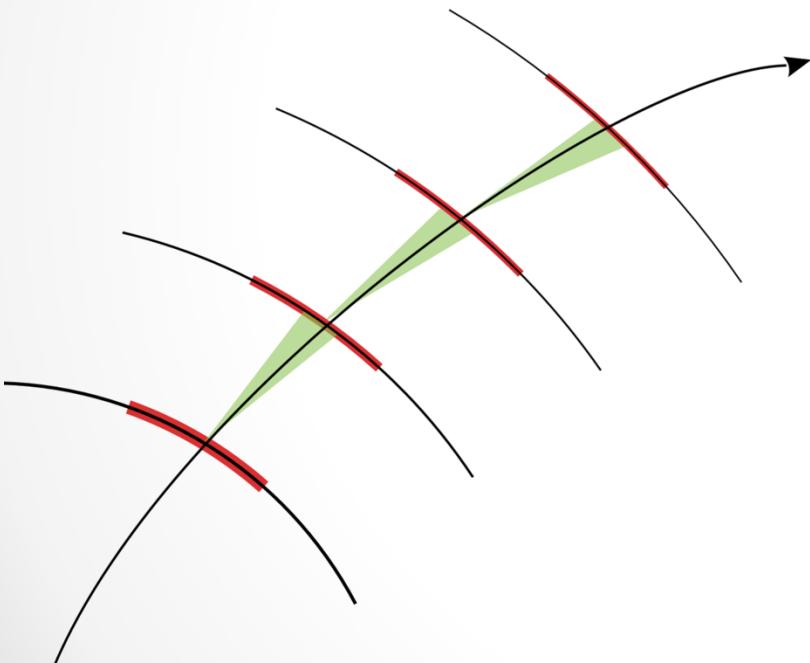
- Zerfallspunkt
 - Zerfallspunkt:
 - Spuren der Zerfallsprodukte zeigen auf den Zerfallspunkt
- Impuls
 - Geladene Teilchen werden im Magnetfeld abgelenkt
 - Krümmung → Impuls
- Teilchen Identifikation
 - Information von Sub-Detektoren wird zugeordnet



Spur-Auflösung

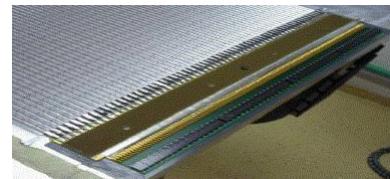
Zellgrößen dominiert

Durch Streuung dominiert

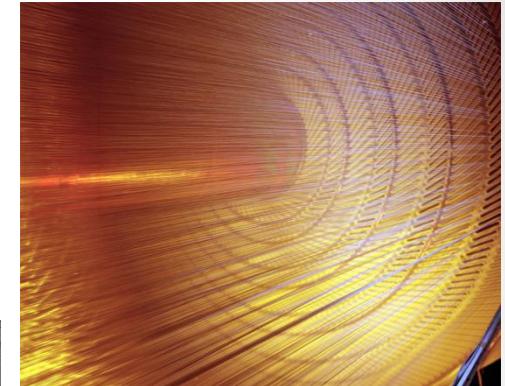


Spurdetektoren

- Gasdetektoren
 - Drahtkammern
 - Straw-Detektoren
 - Zeit-Projektions-Kammern
 - ...
- Siliziumdetektoren
 - Siliziumstreifenzähler
 - Siliziumpixeldetektoren
 - ...
- Szintillations-Faser Detektoren



LHCb outer tracker straw tubes



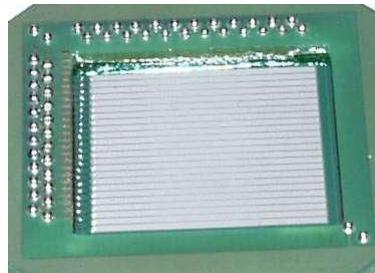
CDF central wire chamber



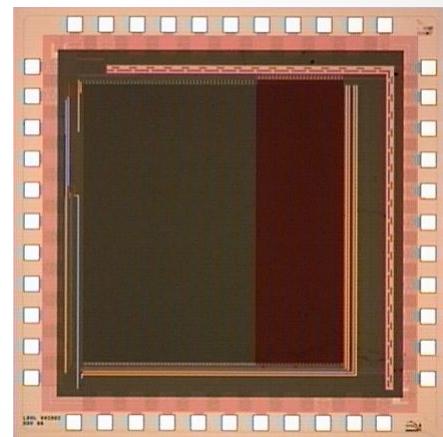
ALICE TPC

Spurdetektoren

- Gasdetektoren
 - Drahtkammern
 - Straw-Detektoren
 - Zeit-Projektions-Kammern
 - ...
- Siliziumdetektoren
 - Siliziumstreifenzähler
 - Siliziumpixeldetektoren
 - ...
- Szintillations-Faser Detektoren



Silicon strip prototype (NRL)



Pixel chip (Berkley)



SciFi (RWTH)

Welche Art Detektor ist am besten geeignet?

Gasdetektoren

- + Preiswert
 - + Große Flächen realisierbar
- + Leicht
 - + Geringe Vielfachstreuung
- + Gut bekannte Technik
 - + Produktion im Institut
- + Geringe Leistungsaufnahme
 - + Verstärker außerhalb
- Alterung
 - Gasbestandteile reagieren chemisch
- Geringe Granularität
 - Eingeschränkte Ortsauflösung
- Einige Bauformen langsam

Siliziumdetektoren

Welche Art Detektor ist am besten geeignet?

Gasdetektoren

- + Preiswert
 - + Große Flächen realisierbar
- + Leicht
 - + Geringe Vielfachstreuung
- + Gut bekannte Technik
 - + Produktion im Institut
- + Geringe Leistungsaufnahme
 - + Verstärker außerhalb
- Alterung
 - Gasbestandteile reagieren chemisch
- Geringe Granularität
 - Eingeschränkte Ortsauflösung
- Einige Bauformen langsam

Siliziumdetektoren

Welche Art Detektor ist am besten geeignet?

Gasdetektoren

- + Preiswert
 - + Große Flächen realisierbar
- + Leicht
 - + Geringe Vielfachstreuung
- + Gut bekannte Technik
 - + Produktion im Institut
- + Geringe Leistungsaufnahme
 - + Verstärker außerhalb
- Alterung
 - Gasbestandteile reagieren chemisch
- Geringe Granularität
 - Eingeschränkte Ortsauflösung
- Einige Bauformen langsam

Siliziumdetektoren

- + Sehr gute Ortsauflösung
- + Feine Granularität
 - + Pixel: $15 \times 15 \mu\text{m}^2$
- + Strahlungshart
 - + $10^{16} \text{ 1MeV Neutron eq. } / \text{cm}^2$
- + Schnell
 - + Ladungssammlung durch Drift
- Hohe Leistungsaufnahme
 - Vorverstärker im Detektor
- Teuer
- Mehr Material als Gasdetektoren
 - Vielfachstreuung
- Produktion bei Fremdfirma

Welche Art Detektor ist am besten geeignet?

Gasdetektoren

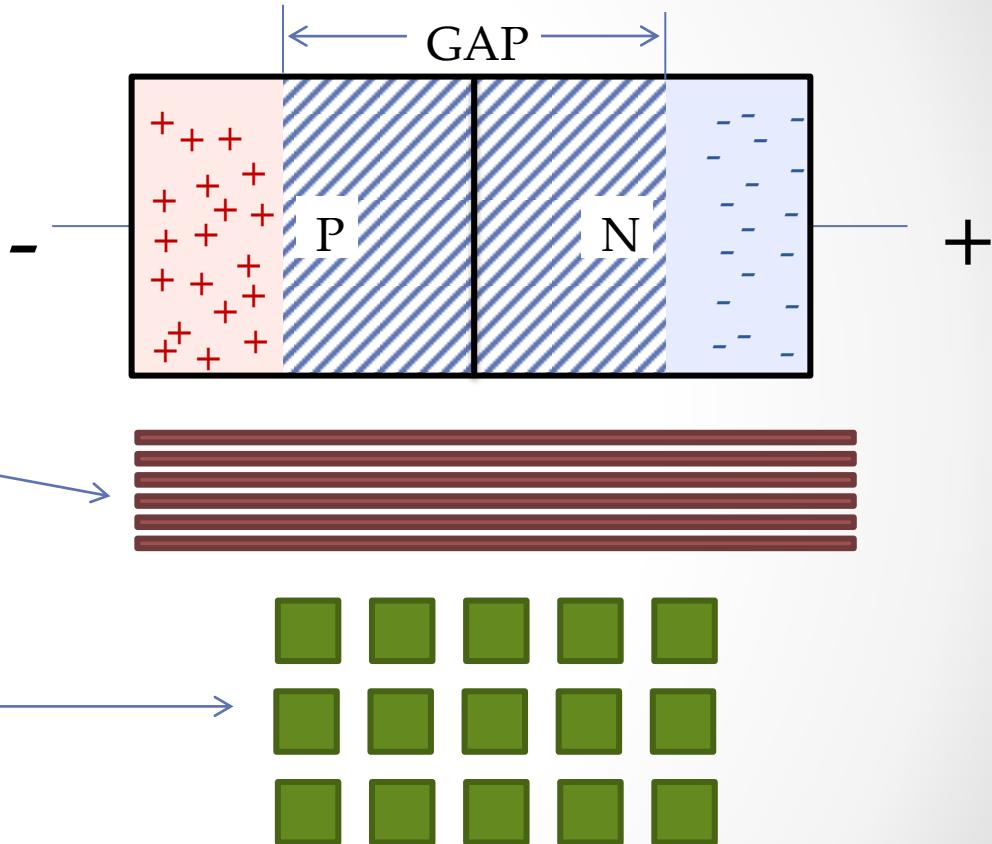
- + Preiswert
 - + Große Flächen realisierbar
- + Leicht
 - + Geringe Vielfachstreuung
- + Gut bekannte Technik
 - + Produktion im Institut
- + Geringe Leistungsaufnahme
 - + Verstärker außerhalb
- Alterung
 - Gasbestandteile reagieren chemisch
- Geringe Granularität
 - Limitierte Ortsauflösung
- Einige Bauformen langsam

Siliziumdetektoren

- + Sehr gute Ortsauflösung
- + Feine Granularität
 - + Pixel: $15 \times 15 \mu\text{m}^2$
- + Strahlungshart
 - + $10^{16} \text{ 1MeV Neutron eq. } / \text{cm}^2$
- + Schnell
 - + Ladungssammlung durch Drift
- Hohe Leistungsaufnahme
 - Vorverstärker im Detektor
- Teuer
- Mehr Material als Gasdetektoren
 - Vielfachstreuung
- Produktion bei Fremdfirma

Siliziumdetektoren

- PN-Diode
 - Voll verarmt
 - 100-500V
- Siliziumstreifen
 - O(10) cm lang
 - O(50) μm breit
 - Extra Auslese-Chip
- Silizium-Pixel
 - Ca. $50 \times 50 \mu\text{m}^2$
 - Hybrid – extra Auslese
 - Monolithisch – integrierte Auslese

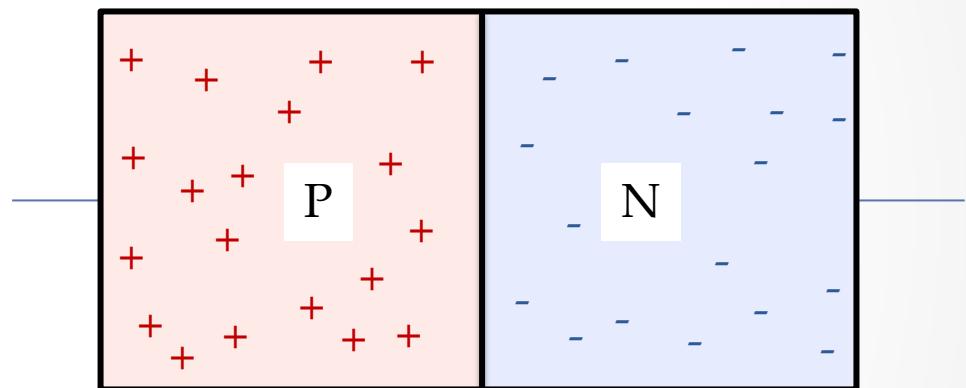


Nachweisprinzip bei Siliziumdetektoren

...

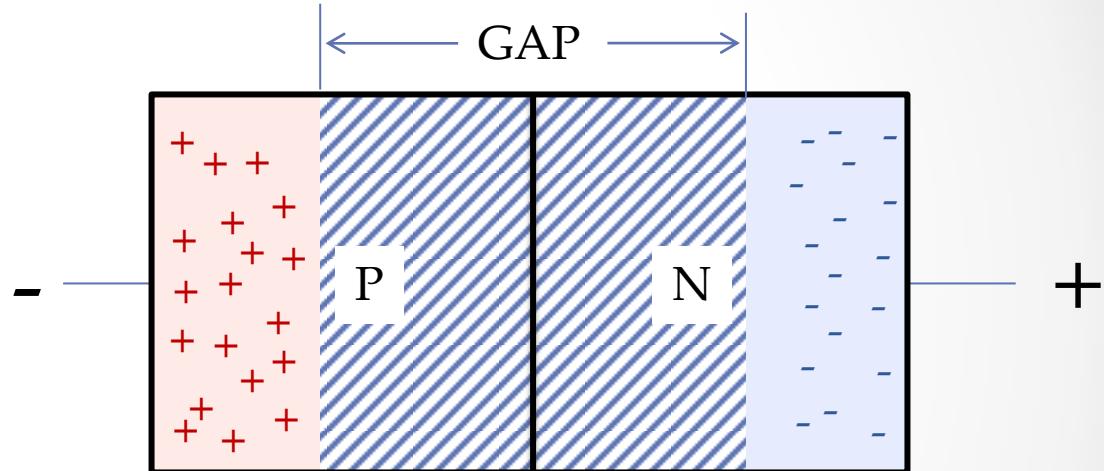
PN-Übergang

- PN-Diode



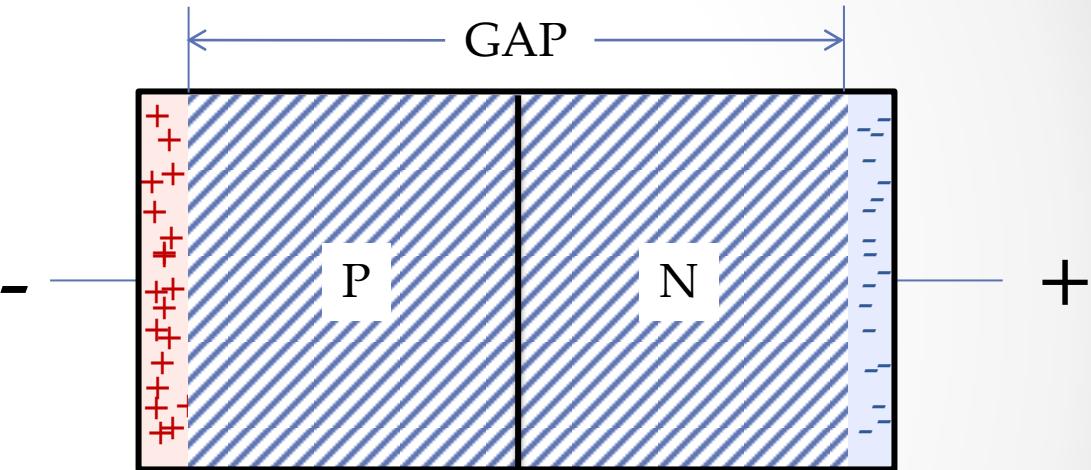
Verarmungs-Zone

- PN-Diode
- Gegenspannung
 - Verarmungszone



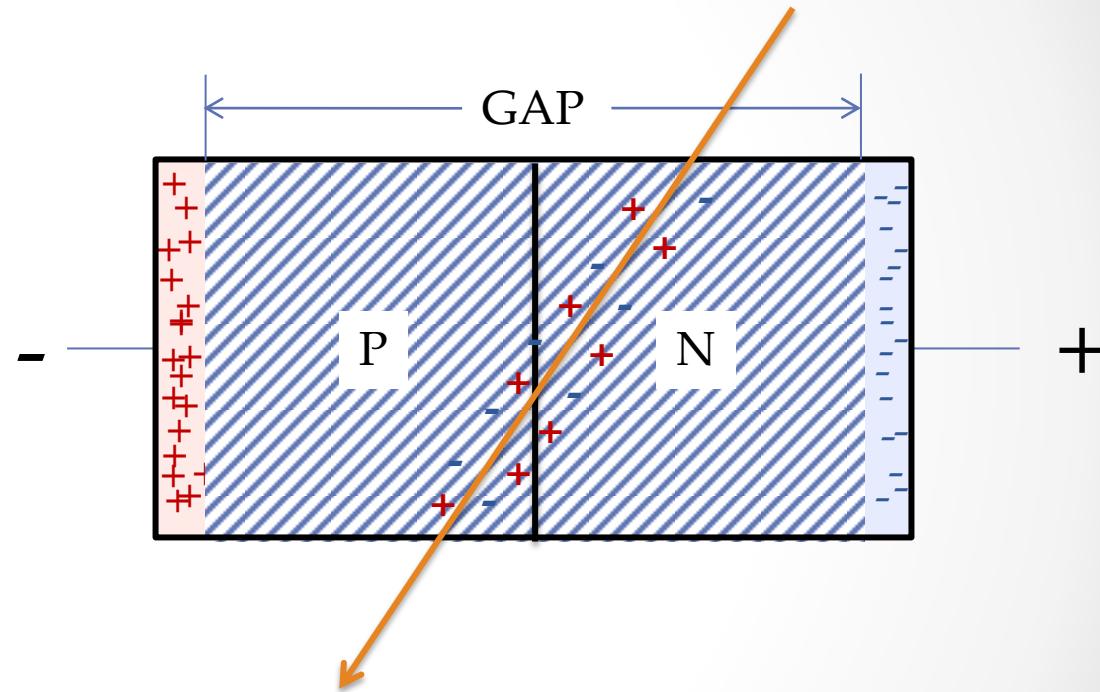
Verarmungs-Zone

- PN-Diode
- Gegenspannung
 - Verarmungszone
 - Volle Verarmung für maximale Effizienz



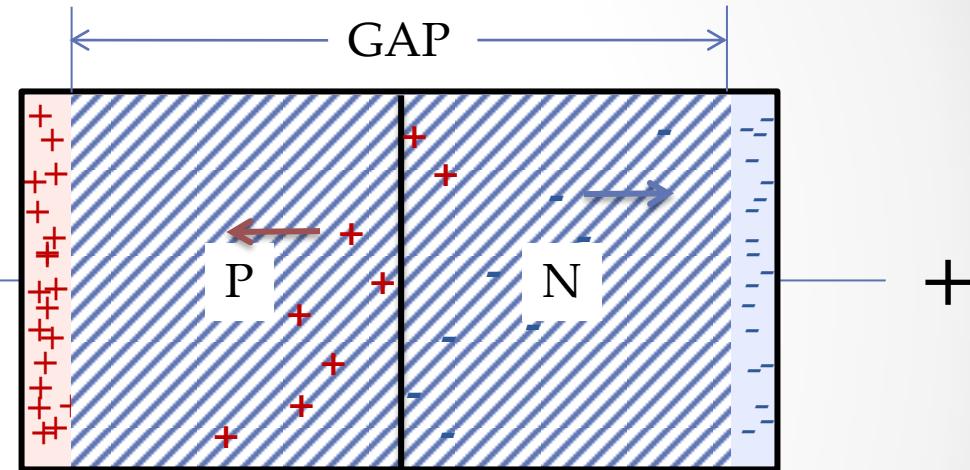
Spur eines geladenen Teilchens

- PN-Diode
- Gegenspannung
 - Verarmungszone
 - Volle Verarmung für maximale Effizienz
- Spuren geladener Teilchen
 - Elektron- Loch Paare



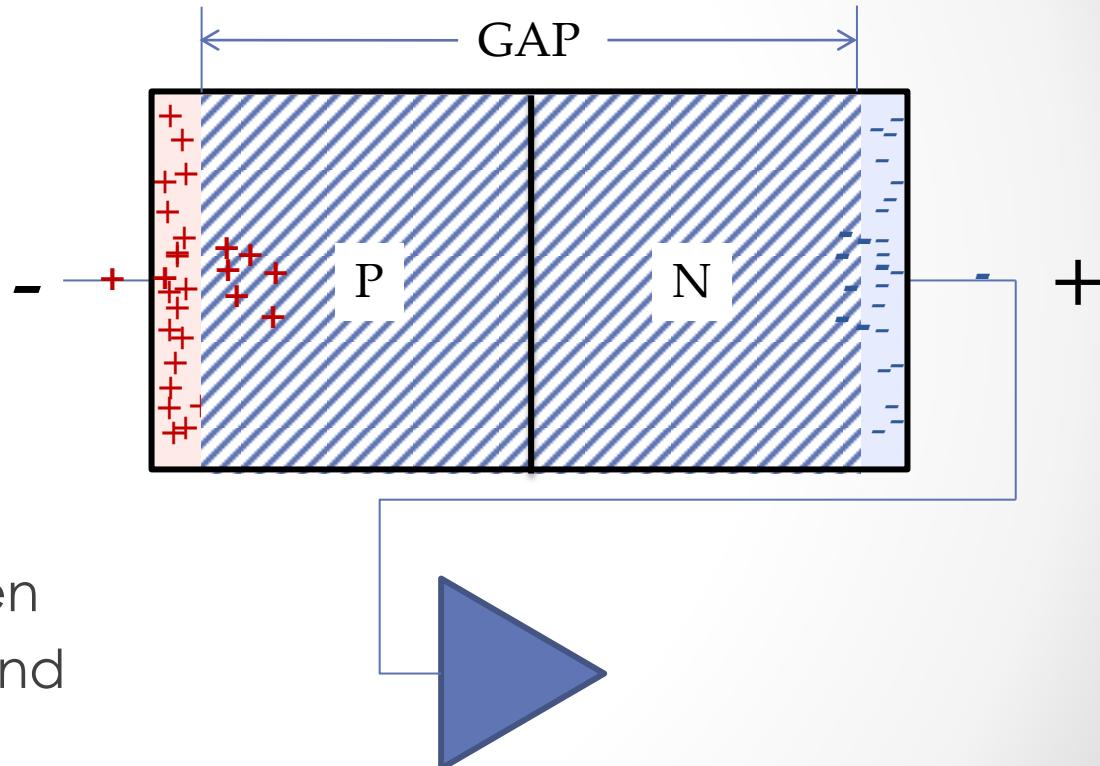
Ladungsdrift

- PN-Diode
- Gegenspannung
 - Verarmungszone
 - Volle Verarmung für maximale Effizienz
- Spuren geladener Teilchen
 - Elektron- Loch Paare
 - Drift zu den Elektroden
 - Diffusion langsamer



Ladungssammlung

- PN-Diode
- Gegenspannung
 - Verarmungszone
 - Volle Verarmung für maximale Effizienz
- Spuren geladener Teilchen
 - Elektron- Loch Paare
 - Drift zu den Elektroden
 - Ladungssammlung und Vorverstärkung



Welche Art Detektor ist am besten geeignet?

Gasdetektoren

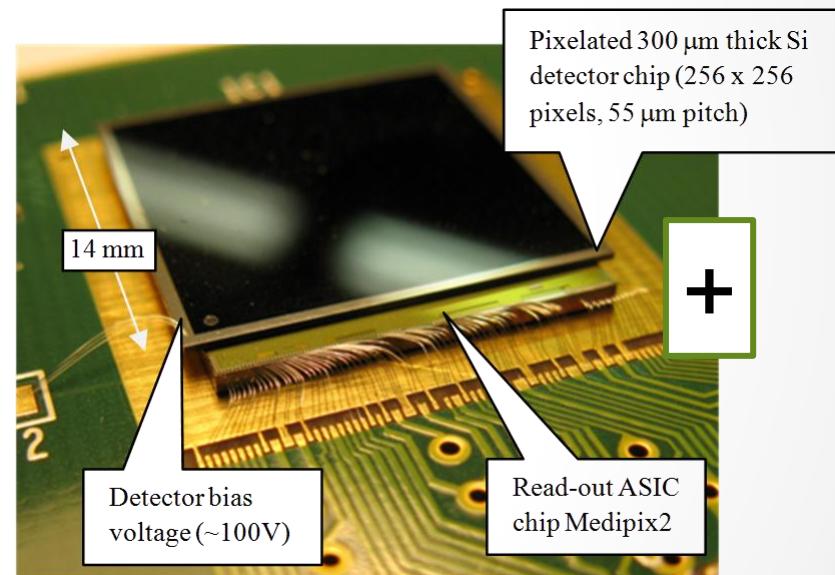
- + Preiswert
- + Leicht
- + Gut bekannte Technik
- + Geringe Leistungsaufnahme
- Alterung
- Geringe Granularität
- Einige Bauformen langsam

Siliziumdetektoren

- + Sehr gute Ortsauflösung
- + Feine Granularität
- + Strahlungshart
- + Schnell
- Hohe Leistungsaufnahme
- Teuer
- Mehr Material als Gasdetektoren
- Produktion bei Fremdfirma

Silizium-Pixel-Detektor mit Hybridtechnik

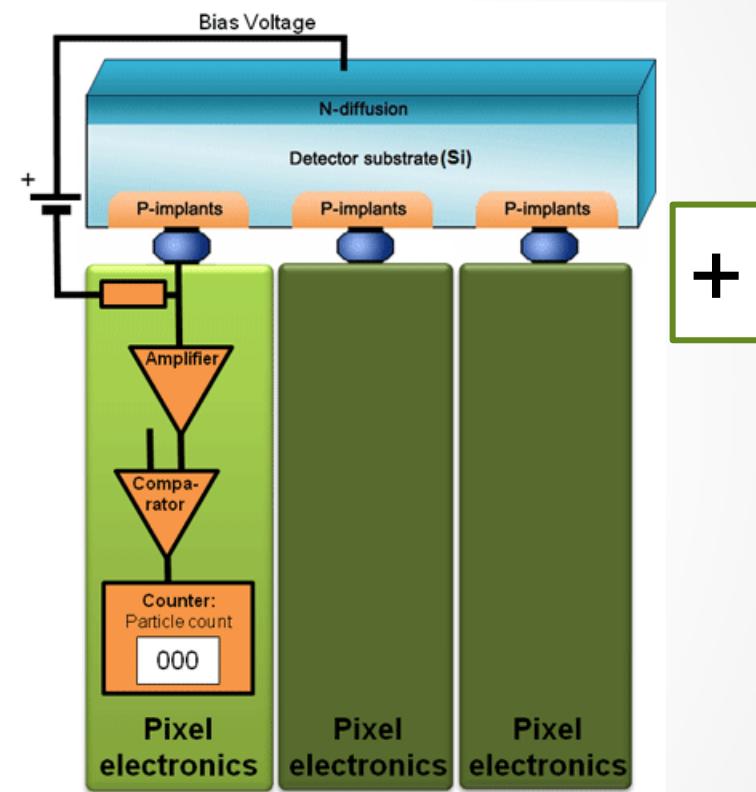
- + Sehr gute Ortsauflösung
- + Feine Granularität
 - + Pixel: $55 \times 55 \mu\text{m}^2$
- + Strahlenhart
 - + $10^{16} \text{ 1MeV Neutron eq. } / \text{cm}^2$
- + Schnell
 - + Ladungssammlung durch Drift



MediPix (Michal Platkevič Uni Prag)

Silizium-Pixel-Detektor mit Hybridtechnik

- + Sehr gute Ortsauflösung
- + Feine Granularität
 - + Pixel: $55 \times 55 \mu\text{m}^2$
- + Strahlenhart
 - + $10^{16} 1\text{MeV Neutron eq.}/\text{cm}^2$
- + Schnell
 - + Ladungssammlung durch Drift
- Hohe Leistungsaufnahme
 - Vorverstärker im Detektor
- Teuer
- **Mehr Material als Gasdetektor**
 - **Vielfachstreuung**
- Produktion bei Fremdfirma



MediPix (Michal Platkevič Uni Prag)

Welche Art Detektor ist am besten geeignet?

Gasdetektoren

- + Preiswert
- + Leicht
- + Gut bekannte Technik
- + Geringe Leistungsaufnahme
- Alterung
- Geringe Granularität
- Einige Bauformen langsam

Siliziumdetektoren

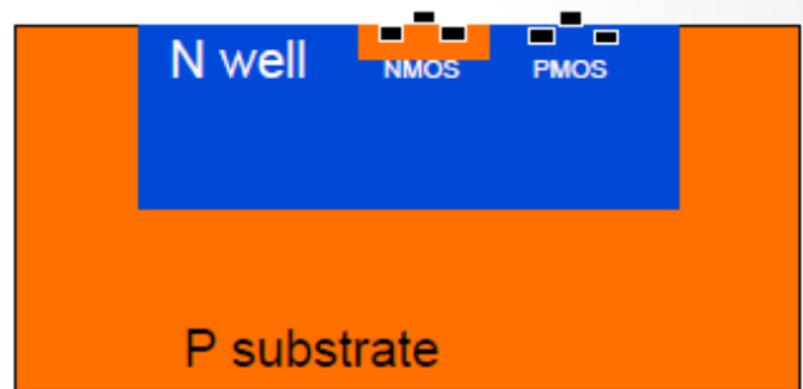
- + Sehr gute Ortsauflösung
- + Feine Granularität
- + Strahlungshart
- + Schnell
- Hohe Leistungsaufnahme
- Teuer
- Mehr Material als Gasdetektoren
- Produktion bei Fremdfirma

HV-MAPS

• • •

HV-MAPS

- High Voltage Monolithic Active Pixel Sensors
- HV-CMOS Technologie
- In Sperrrichtung betrieben

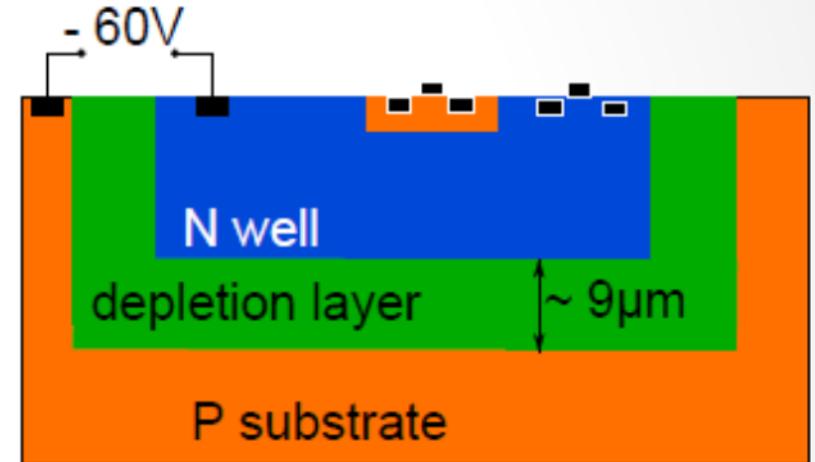


by Ivan Peric

I. Peric, A novel monolithic pixelated particle detector implemented in high-voltage CMOS technology
Nucl.Instrum.Meth., 2007, A582, 876

HV-MAPS

- High Voltage Monolithic Active Pixel Sensors
- HV-CMOS Technologie
- In Sperrrichtung betrieben
 - ~60V
 - Ladungssammlung durch Drift
 - Schnell $O(10 \text{ ns})$
 - Dünnen auf $< 50 \mu\text{m}$ möglich

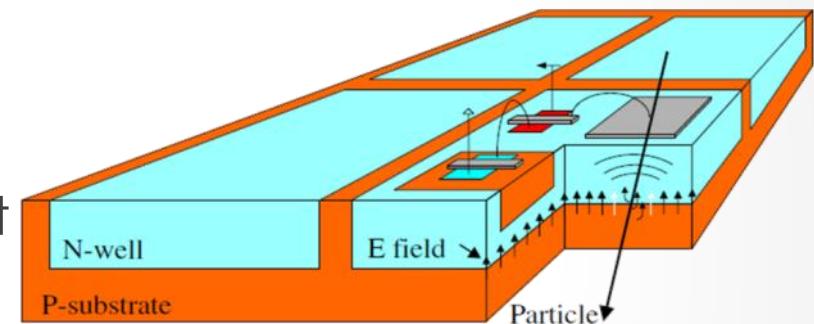


by Ivan Peric

I. Peric, A novel monolithic pixelated particle detector implemented in high-voltage CMOS technology
Nucl.Instrum.Meth., 2007, A582, 876

HV-MAPS

- High Voltage Monolithic Active Pixel Sensors
- HV-CMOS Technologie
- In Sperrrichtung betrieben
 - ~60V
 - Ladungssammlung durch Drift
 - Schnell O(10 ns)
 - Dünnen auf < 50 µm möglich
- Integrierte Ausleseelektronik
 - Vorverstärker
 - Digitalauslese
 - Diskriminator
 - Zeitstempel und Adresse
 - Nullunterdrückung

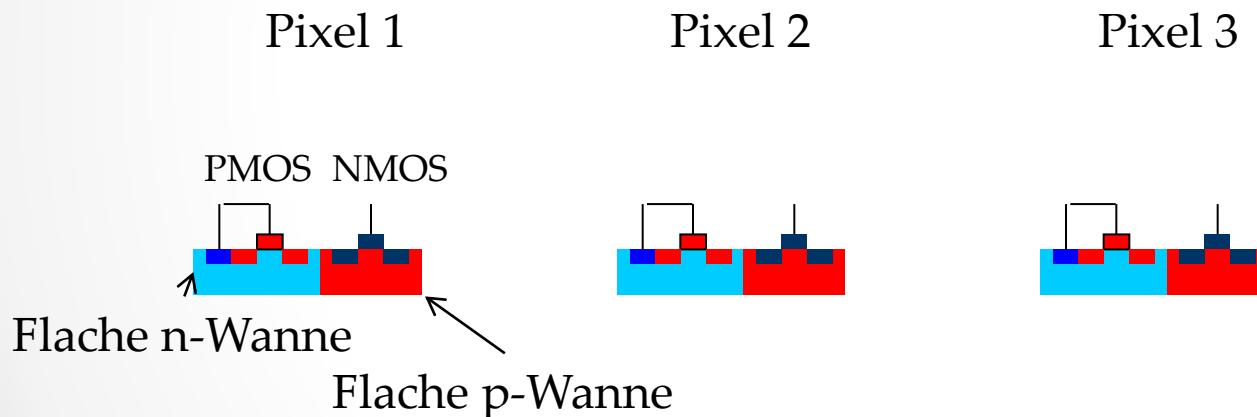


by Ivan Peric

I. Peric, A novel monolithic pixelated particle detector implemented in high-voltage CMOS technology
Nucl.Instrum.Meth., 2007, A582, 876

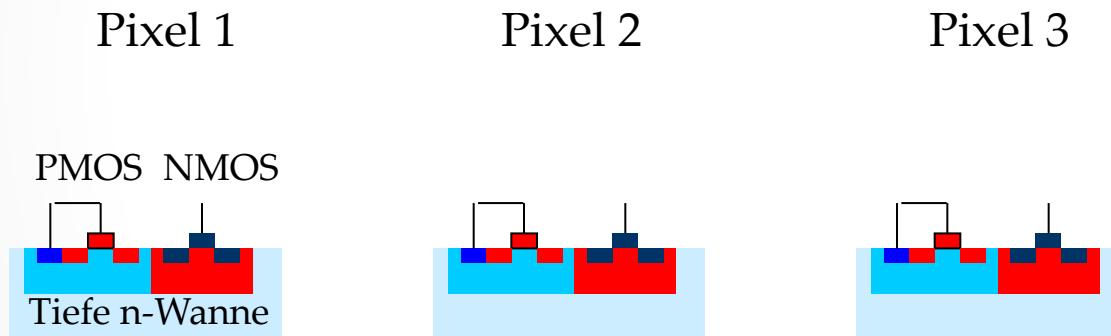
HV CMOS Detektoren

- Monolithische aktive Pixel-Sensoren
- CMOS basierte Pixel-Elektronik
- In kommerziellen Technologien implementiert
- PMOS und NMOS Transistoren sind in flachen n- und p-Wannen.



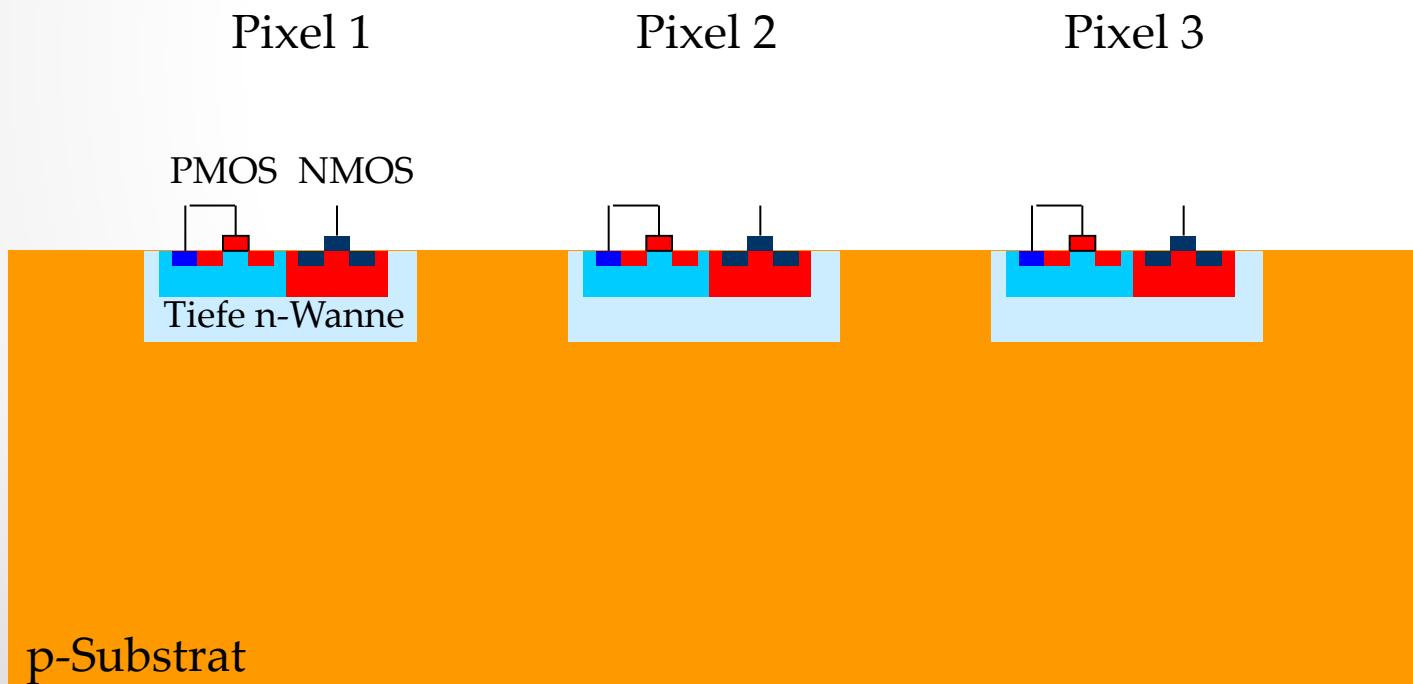
HV CMOS Detektoren

- Eine tiefe n-Wanne umgibt die Elektronik eines jeden Pixels.



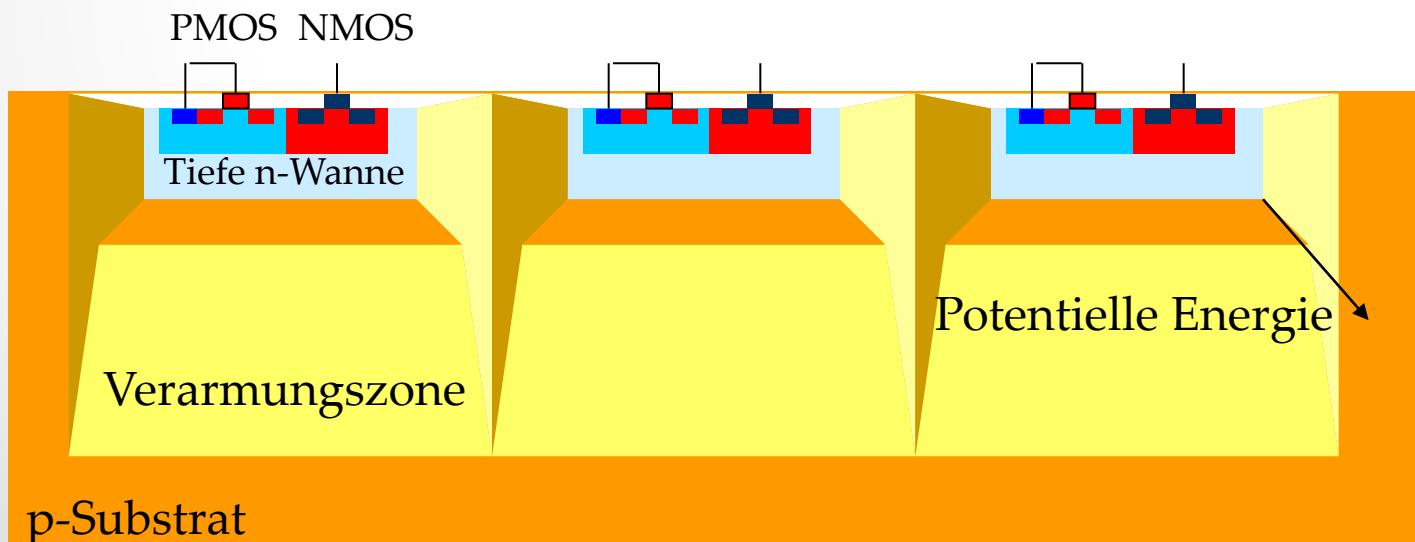
HV CMOS Detektoren

- Die tiefe n-Wannen isolieren die Pixel-Elektronik vom p-Substrat.



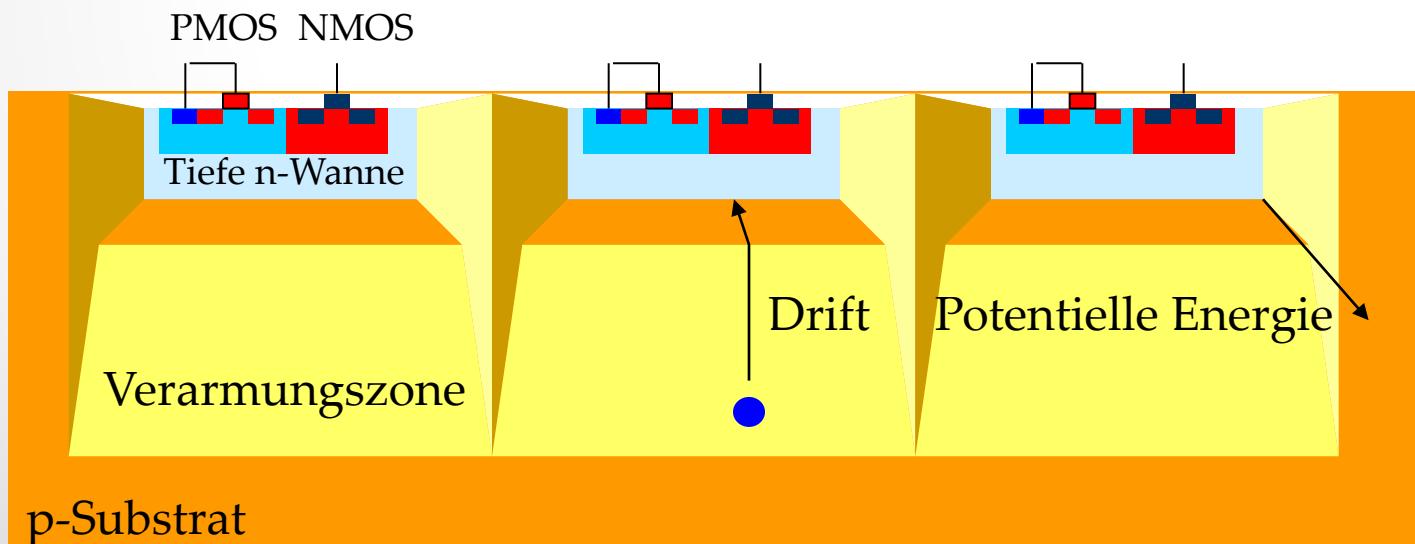
HV CMOS Detektoren

- Das Substrat kann auf hohe negative Spannungen gezogen werden, ohne die Transistoren zu schädigen.
- So entstehen Verarmungszonen um die n-Wannen.
- => Potentialminima für Elektronen



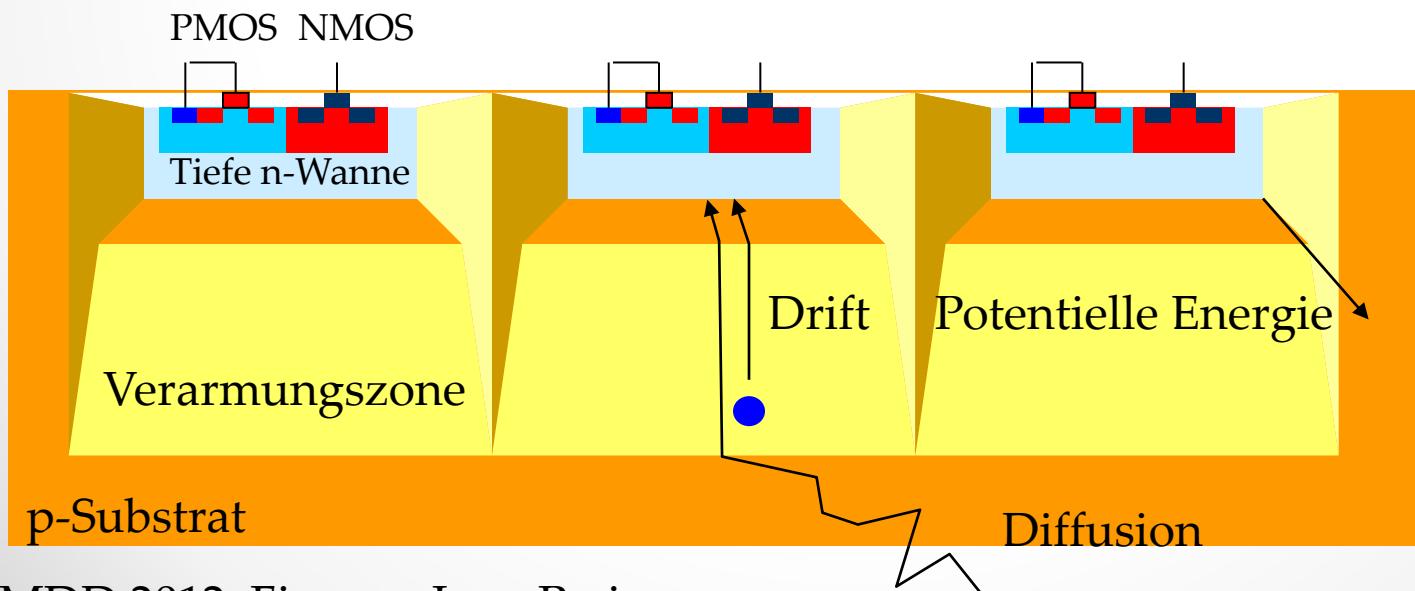
HV CMOS Detektoren

- Ladungssammlung durch Drift
 - Hauptanteil des Signals



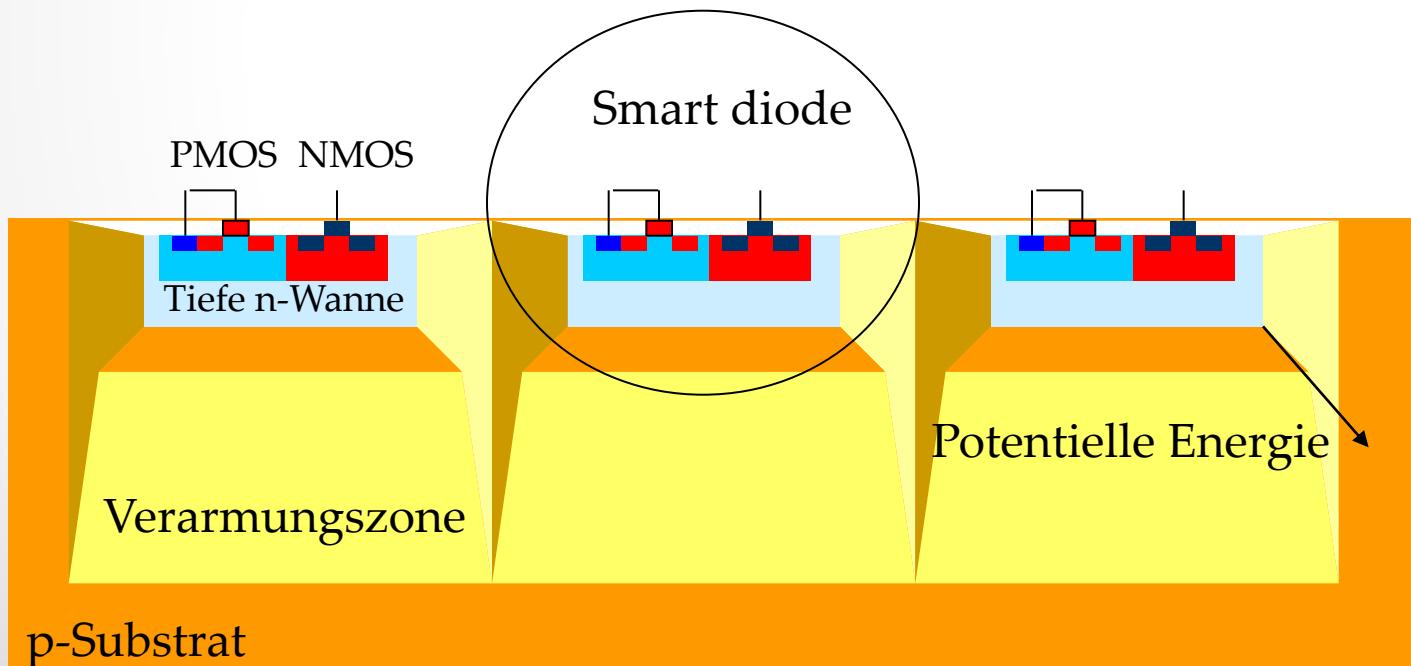
HV CMOS Detektoren

- Ladungssammlung durch Drift
 - Hauptanteil des Signals
- Zusätzliche Ladungssammlung durch Diffusion.



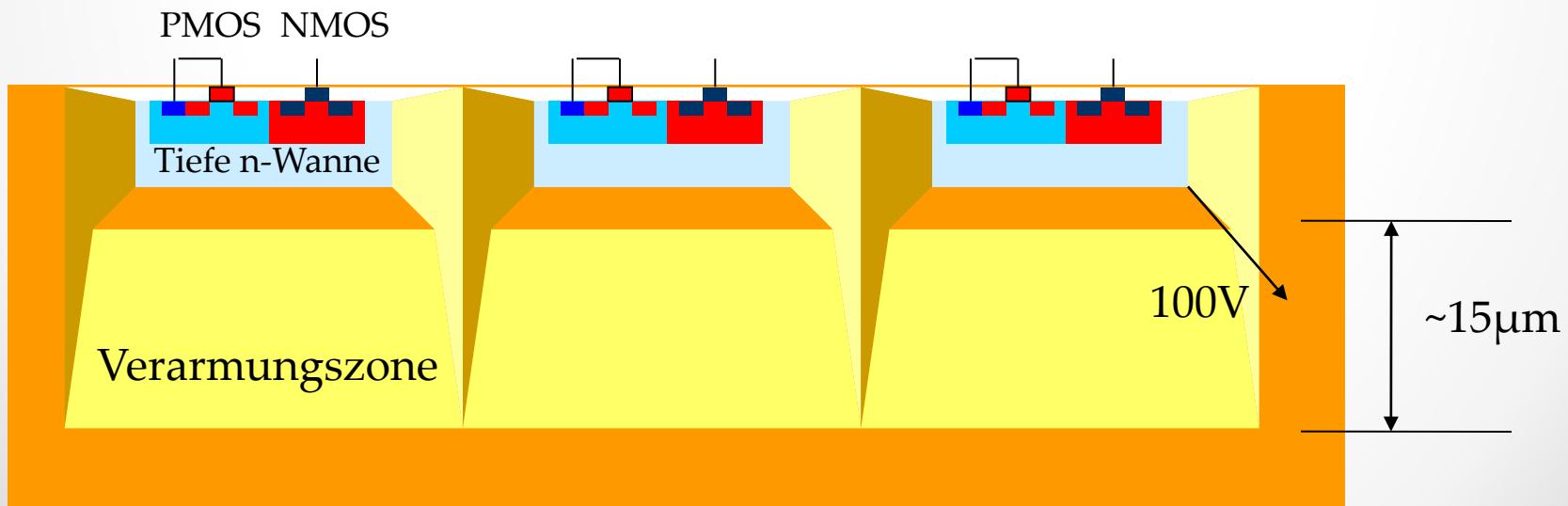
HV CMOS Detektoren

- HV-CMOS Sensoren können in **jeder** CMOS Technologie implementiert werden
 - Welche **tiefe n-Wannen um p-Wannen für Niederspannung hat.**
 - TSMC 65nm wurde erfolgreich genutzt: **2.5 µm** Pixel
- Beste Resultate bei **Hochspannungs**-Technologien:
 - Diese Technologien haben **tiefere n-Wannen** und
 - Substrat mit **höherem Widerstand** als bei LV CMOS.



HV CMOS Detektoren

- Beispiel AMS 350 nm HVCmos:
 - Verarmungsspannung 60-100 V und
 - Tiefe der Verarmungszone $\sim 15 \mu\text{m}$.
- $20 \Omega\text{cm}$ Substratwiderstand ->
 - Akzeptordichte $\sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.
- E-Feld: 100 V/ $15 \mu\text{m}$ oder 67 kV/cm oder 6.7 V/ μm .

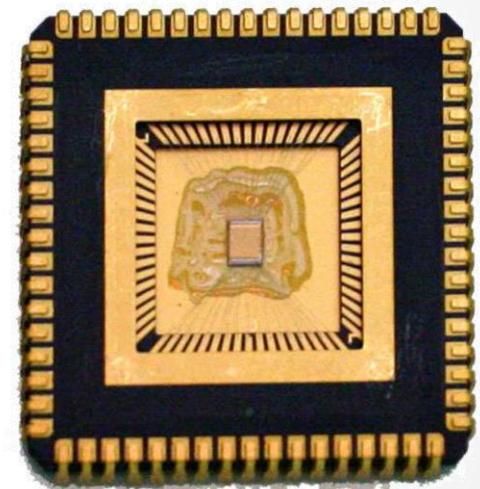


Chip Prototypen

...

Chip Prototypen

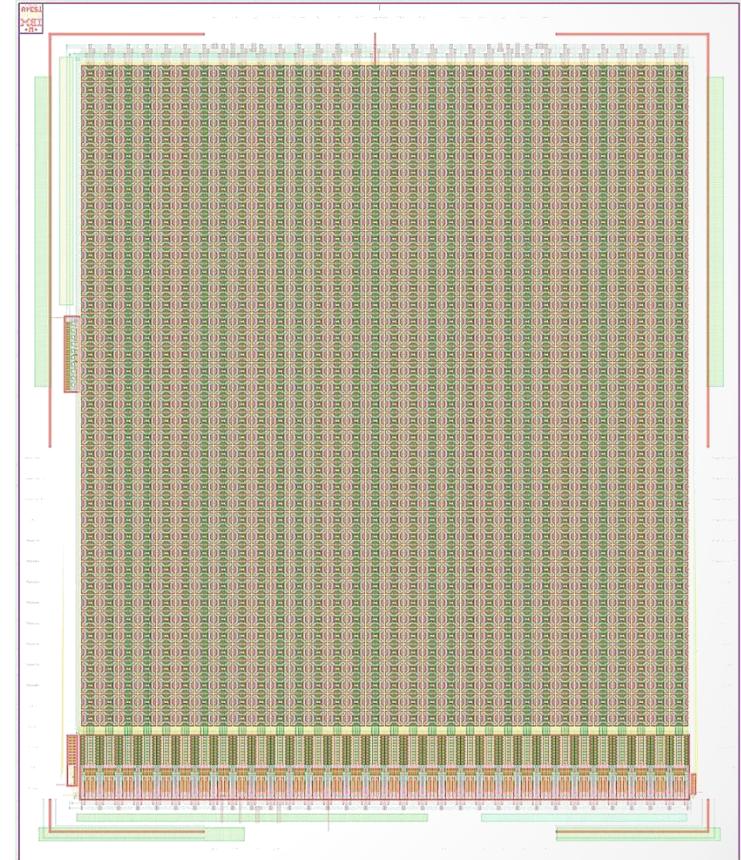
- 180 nm HV-CMOS
- Pixel Matrix:
 - 42 x 36 Pixel
 - Je $30 \times 39 \mu\text{m}^2$
- Ivan Peric ZITI
 - Analogteil fast fertig
 - Digitalteil in Entwicklung



MuPix2

Chip Prototypen

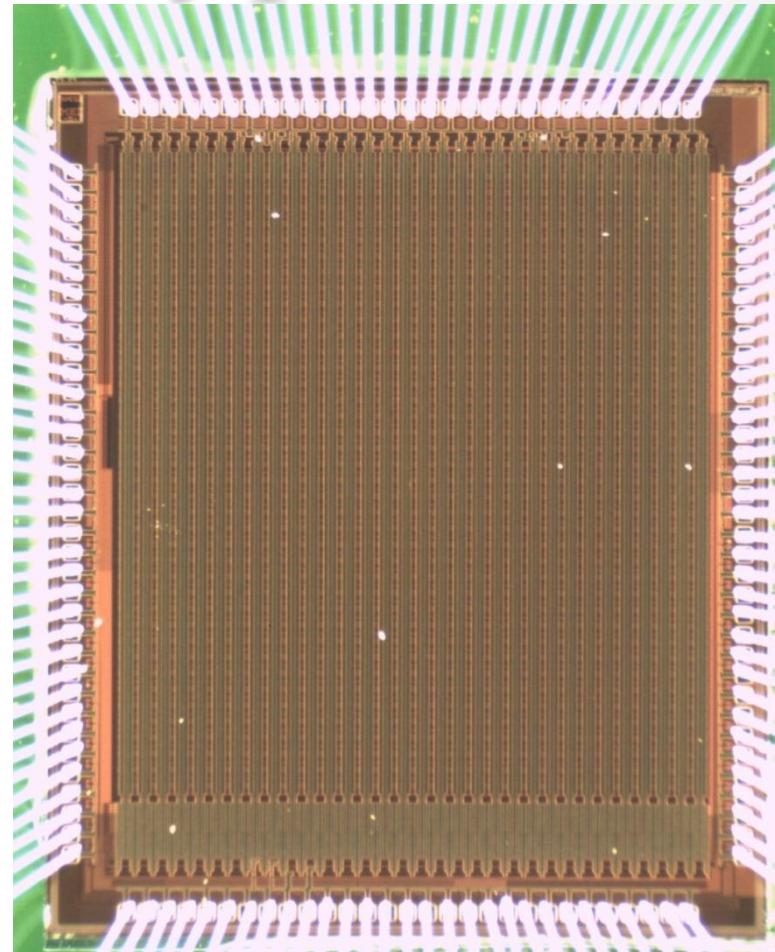
- 180 nm HV-CMOS
- Pixel Matrix:
 - 40 x 32 Pixel
 - Je $92 \times 80 \mu\text{m}^2$
- Ivan Peric ZITI
 - Analogteil fast fertig
 - Digitalteil in Entwicklung



MuPix3

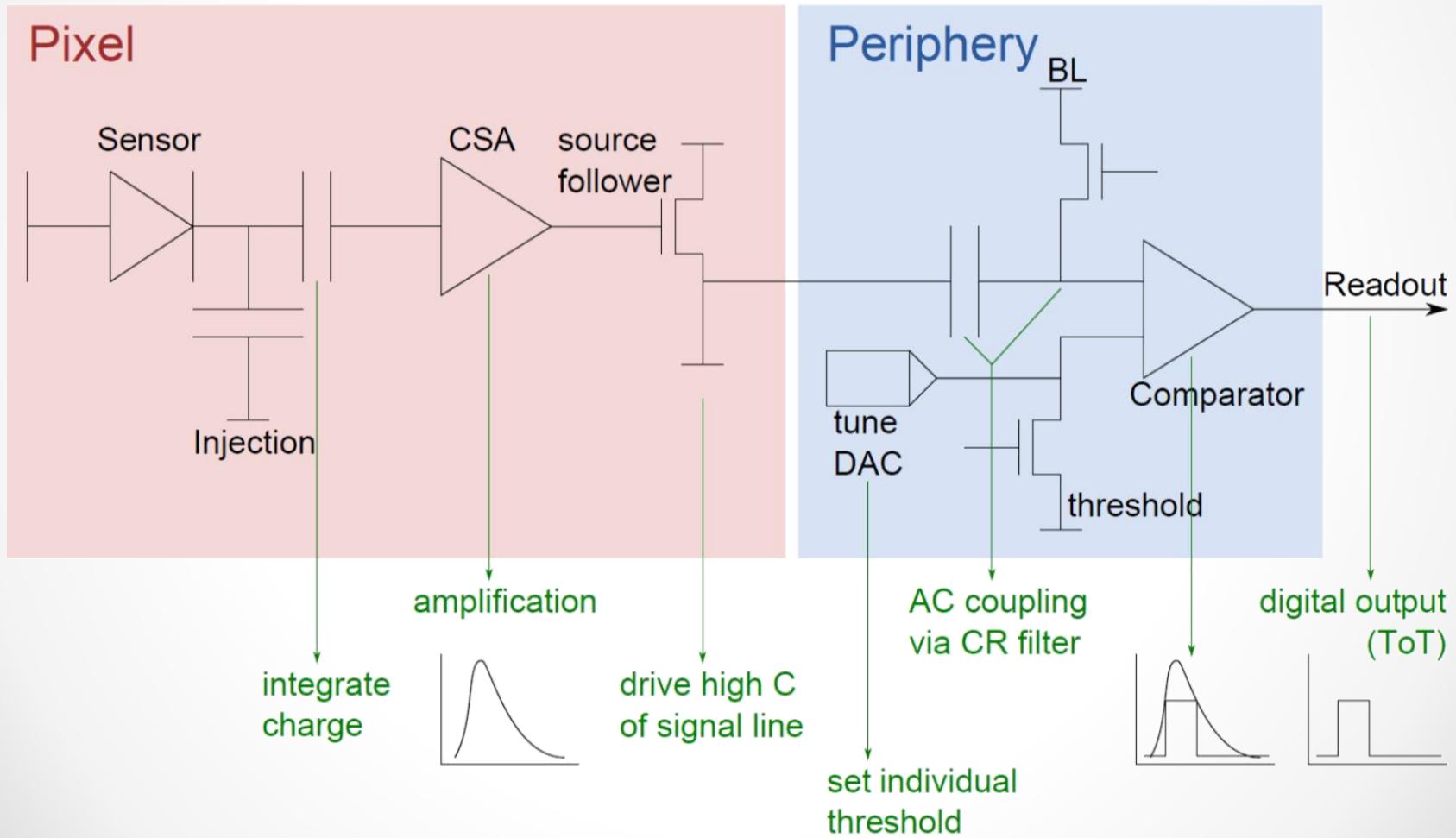
Chip Prototypen

- 180 nm HV-CMOS
- Pixel Matrix:
 - 40 x 32 Pixel
 - Je $92 \times 80 \mu\text{m}^2$
- Ivan Peric ZITI
 - Analogteil fast fertig
 - Digitalteil in Entwicklung



MuPix3

Sensor + Analog + Digital



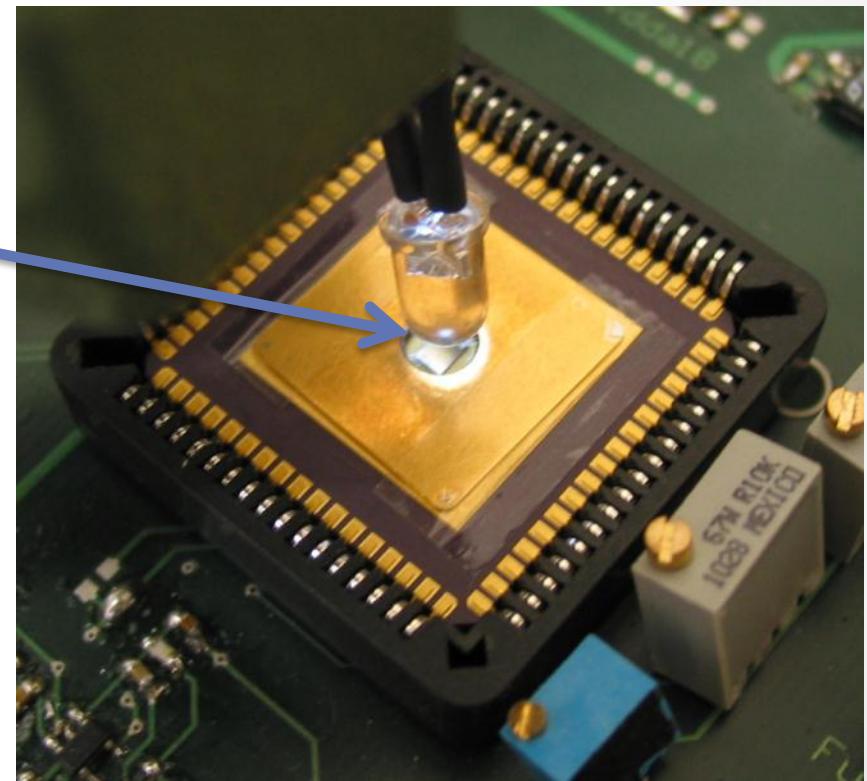
Test Ergebnisse



Aus: A.-K. Perrevoort,
Characterization of High-Voltage Monolithic Active Pixel Sensors
for the Mu3e Experiment,
Masterarbeit, University of Heidelberg, 2012.

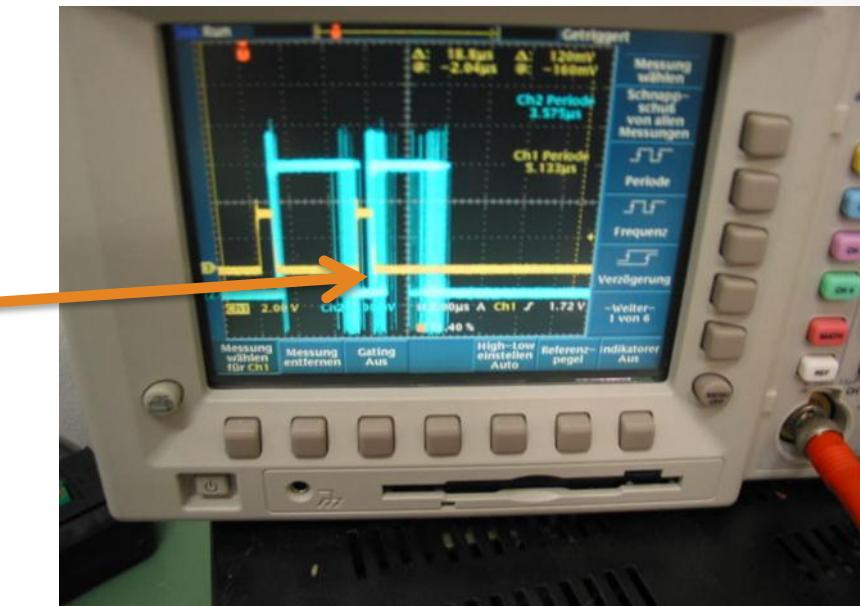
Zeitverhalten

- Zeitverhalten kritisch
 - 10^9 Teilchen/s
 - $\Theta(10\text{ ns})$ Auflösung
- LED gepulster Sensor
- Doppelpulsauflösung



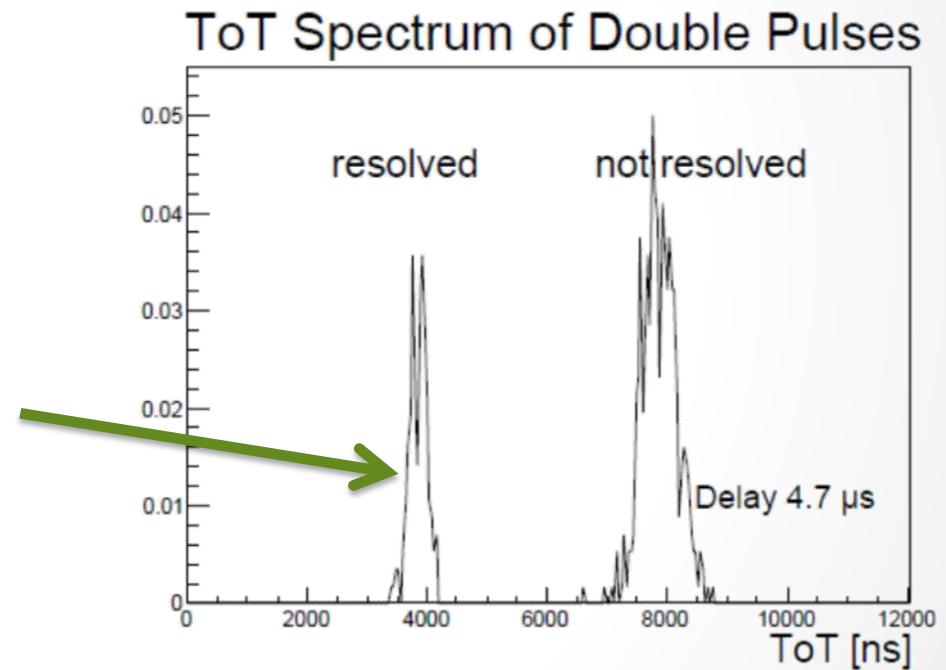
Zeitverhalten

- LED gepulster Sensor
- Doppelpulsauflösung
 - Auf Oszilloskop sichtbar



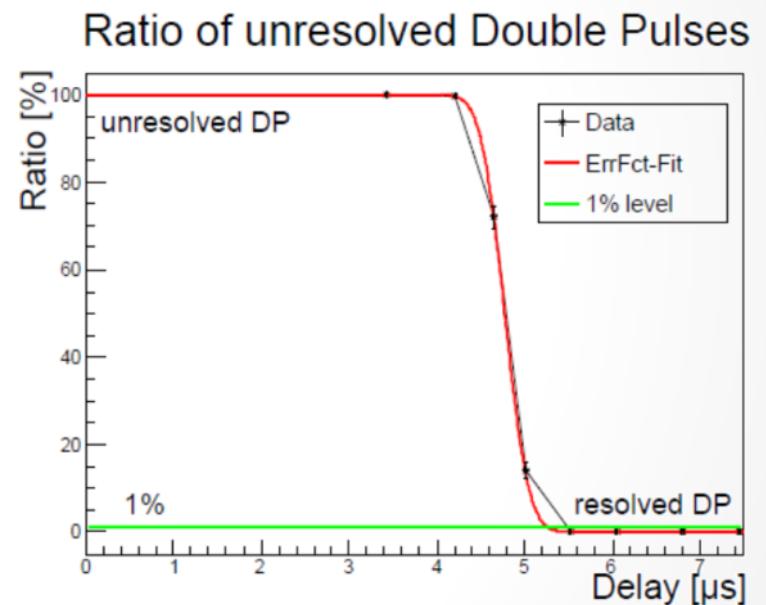
Zeitverhalten

- LED gepulster Sensor
- Doppelpulsauflösung
 - Auf Oszilloskop sichtbar
 - ... oder in der Pulsbreite



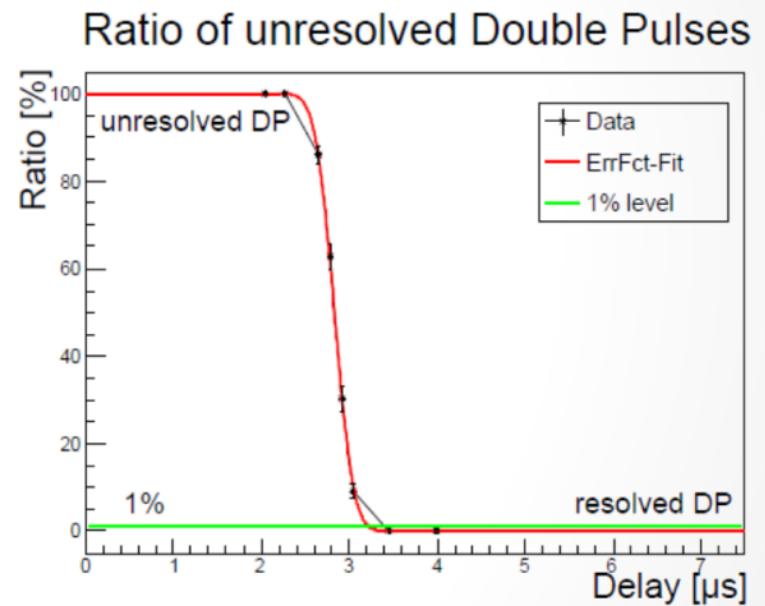
Doppelpulsauflösung

- Verhältnis zwischen
 - Aufgelösten und
 - Nicht aufgelösten Doppelpulsen
- $5.27 \pm 0.01 \mu\text{s}$



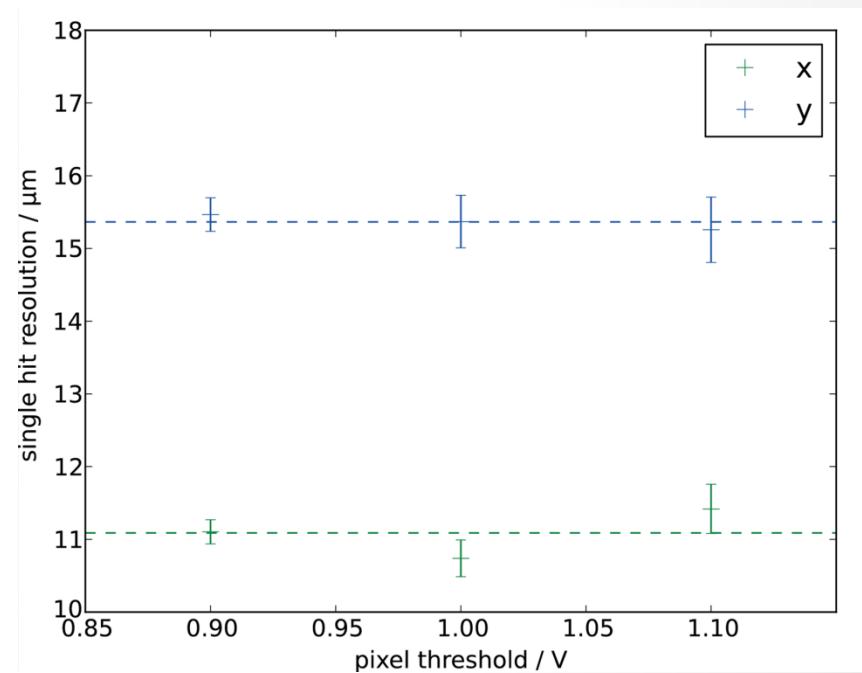
Doppelpulsauflösung

- Verhältnis zwischen
 - Aufgelösten und
 - Nicht aufgelösten Doppelpulsen
- Standard: $5.27 \pm 0.01 \mu\text{s}$
- Pixel Vorstrom Einstellung
- Optimiert: $3.23 \pm 0.01 \mu\text{s}$
 - Weitere Verringerung nötig



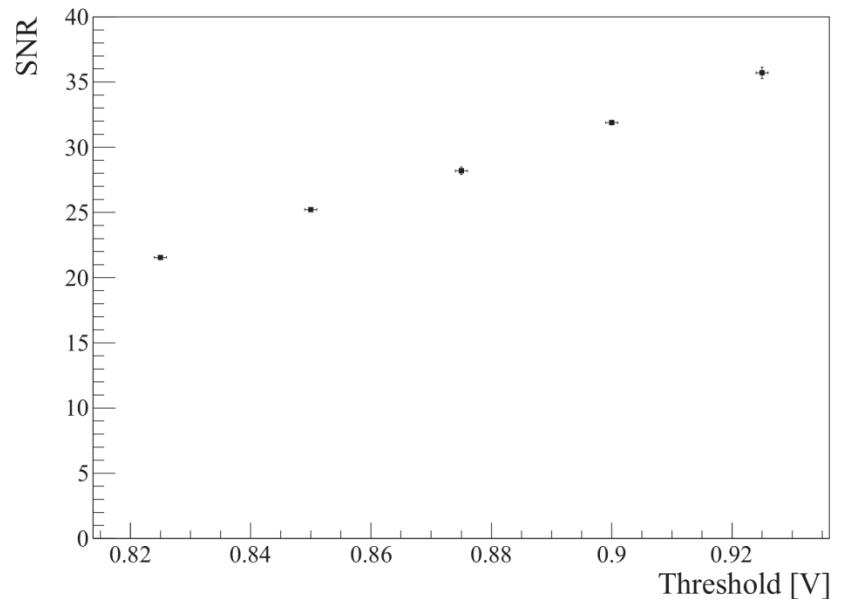
Pixel Auflösung

- MuPix2 Prototyp
 - 170 GeV Pion Strahl
 - TimePix-Teleskop
 - Pixel Größe:
 - 30 µm in x
 - 39 µm in y
 - Auflösung:
 - 11 µm in x
 - 15 µm in y
- Gute Auflösung



Signal zu Rausch Verhältnis

- Vorverstärker bei Pixel
 - Geringe Kapazität
 - Wenig Rauschen
- Gutes Signal zu Rausch Verhältnis
- Übersprechen vom Digitalteil möglich
 - Digitalteil am Rand
- Strahlenschäden erhöhen Rauschen...



HV MAPS Eigenschaften

- + Gute Auflösung
- + Feine Granularität
- + Strahlenhart
- + Schnell
- + Preiswert
- + Ähnliche Strahlungslänge wie Gasdetektoren
- Mittlere Leistungsaufnahme
- Produktion bei Fremdfirma

HV MAPS Eigenschaften

Gasdetektoren

- + Preiswert
- + Leicht
- + Gut bekannte Technik
- + Geringe Leistungsaufnahme
- Alterung
- Geringe Granularität
- Einige Bauformen langsam

Silicon detectors

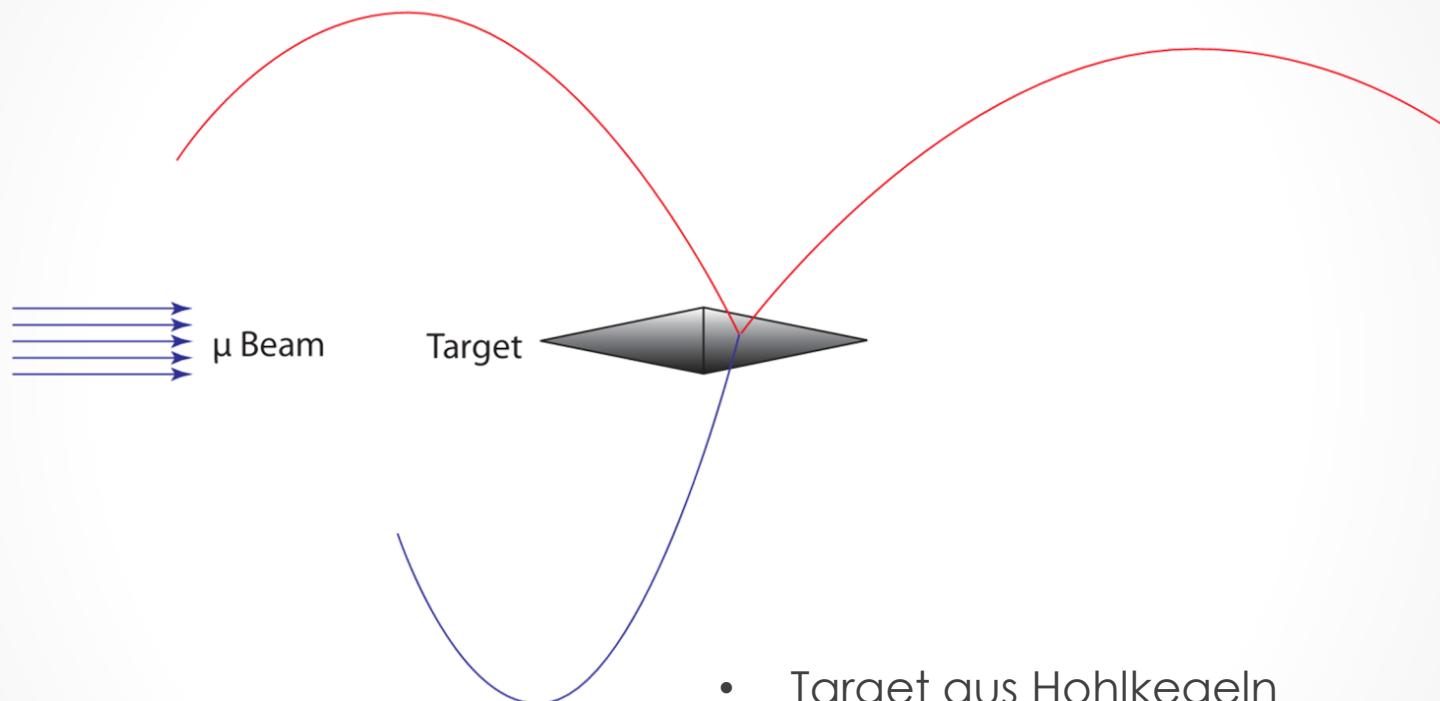
- + Sehr gute Ortsauflösung
- + Feine Granularität
- + Strahlungshart
- + Schnell
- Hohe Leistungsaufnahme
- Teuer
- Mehr Material als Gasdetektoren
- Produktion bei Fremdfirma

HV-MAPS

- + Gute Auflösung
- + Feine Granularität
- + Strahlenhart
- + Schnell
- + Preiswert
- + Ähnliche Strahlungslänge wie Gasdetektoren
- Mittlere Leistungsaufnahme
- Produktion bei Fremdfirma

HV-MAPS Detektor: Mu3e Spurdetektor ...

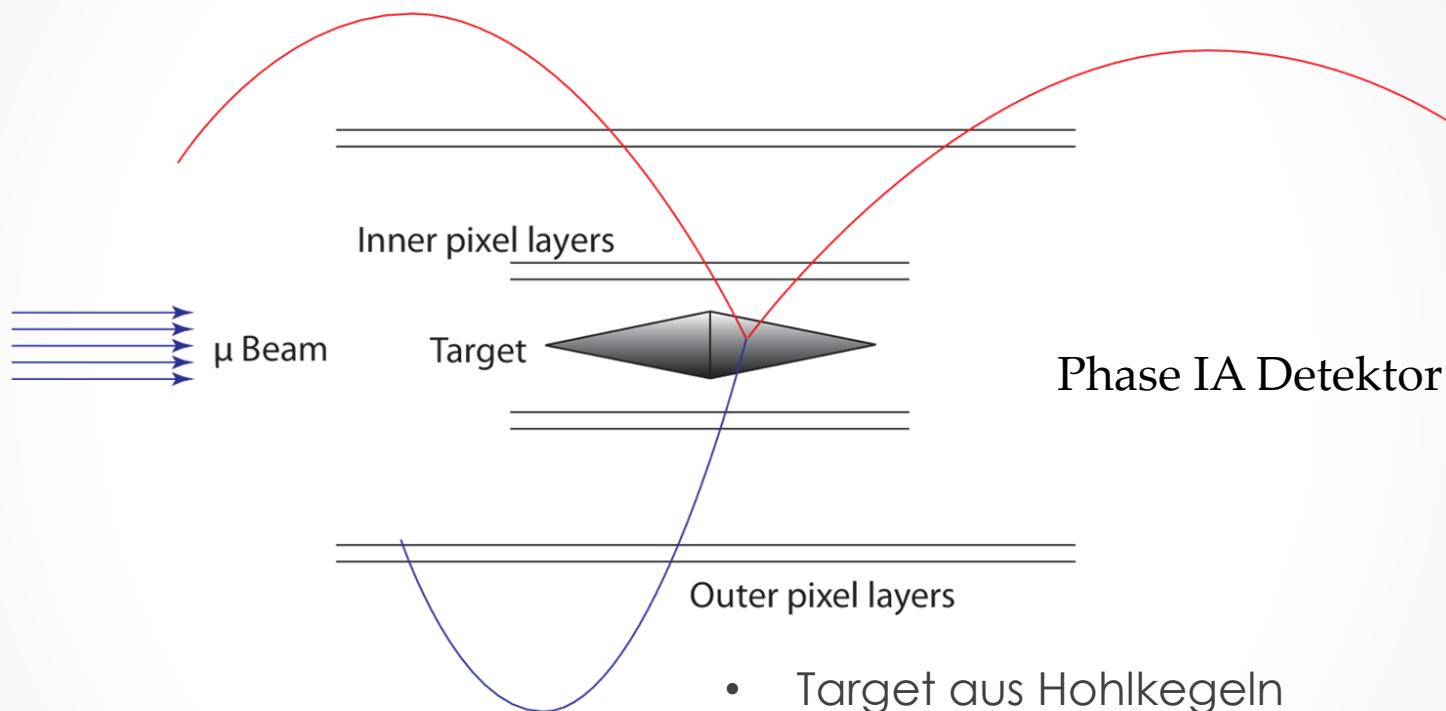
Das Mu3e-Experiment



- Myonstrahl $\mathcal{O}(10^9/s)$
- Helium-Atmosphäre
- 1 T B-Feld

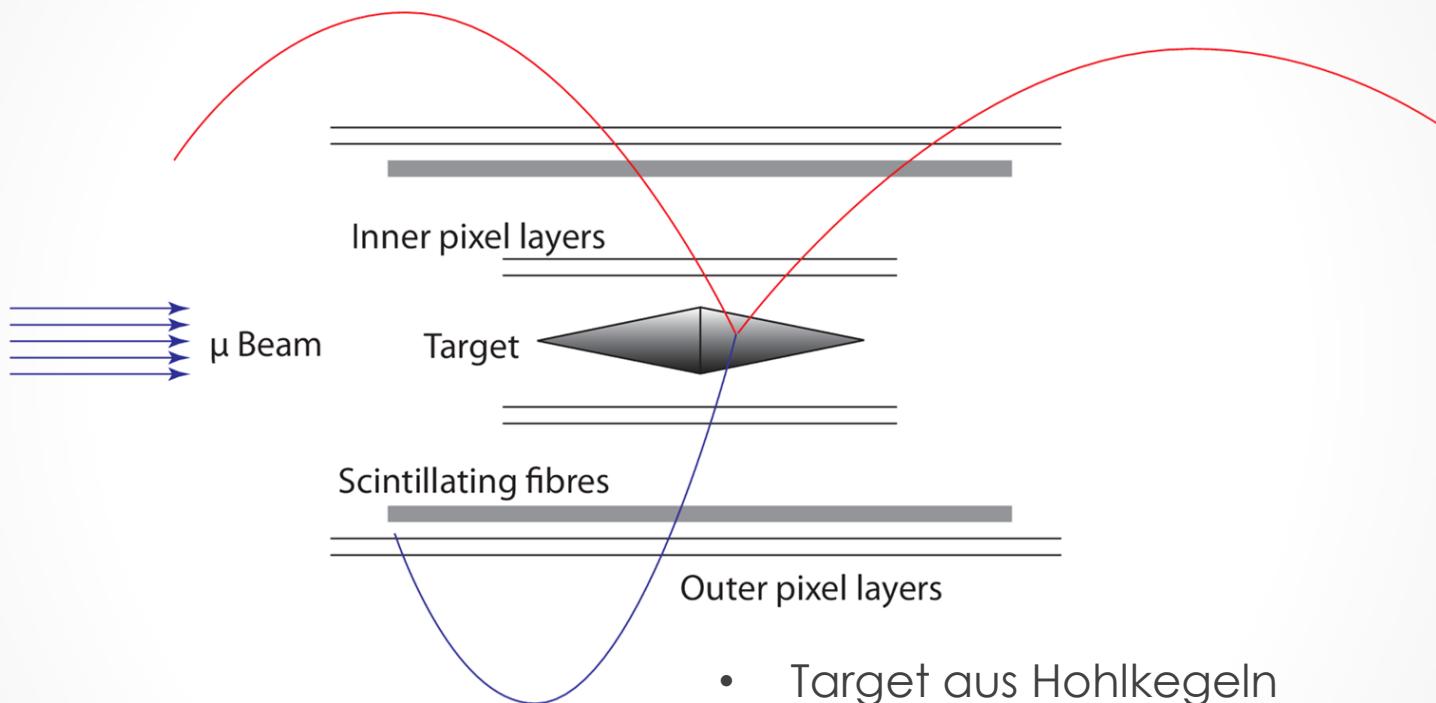
- Target aus Hohlkegeln
- Silizium Pixel Detektor
- Szintillations-Faser Detektor
- Rückwärts- und Vorwärts-Station
- Szintillierende Kacheln

Das Mu3e-Experiment



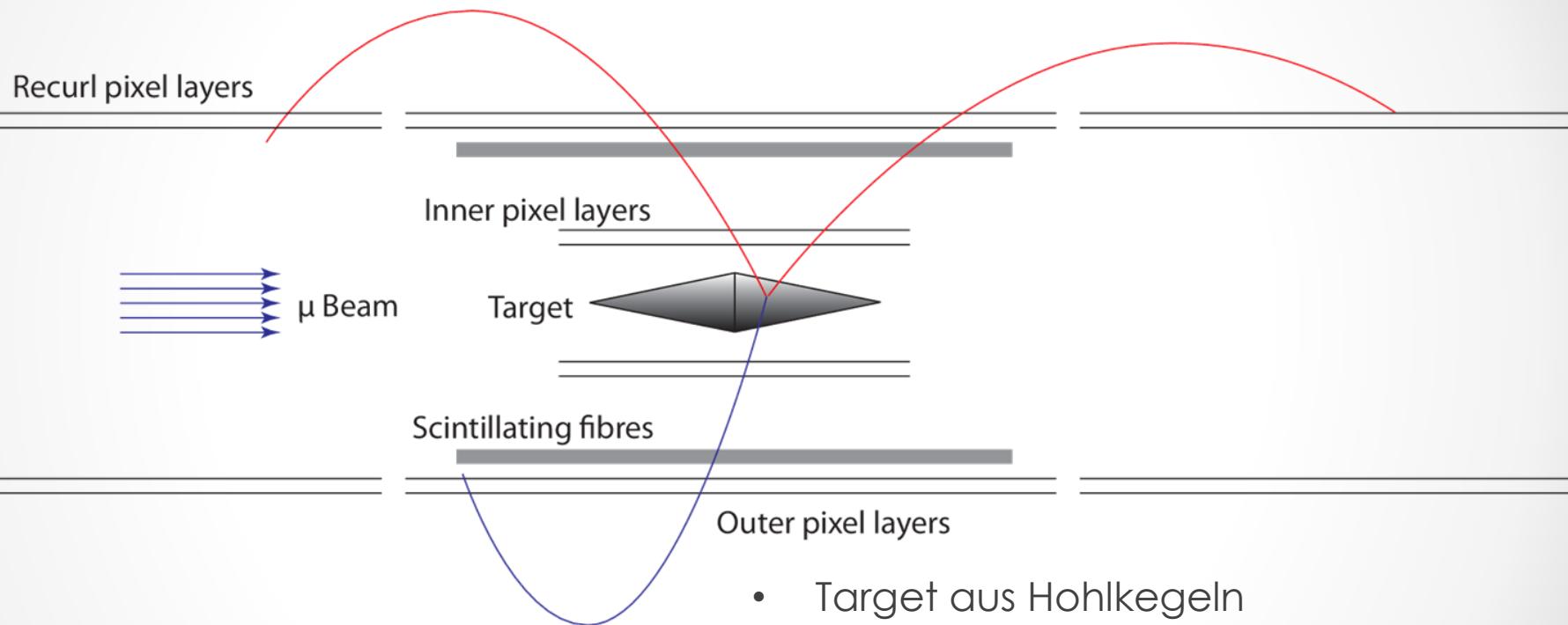
- Myonstrahl $\mathcal{O}(10^9/\text{s})$
 - Helium-Atmosphäre
 - 1 T B-Feld
- Target aus Hohlkegeln
 - Silizium Pixel Detektor
 - Szintillations-Faser Detektor
 - Rückwärts- und Vorwärts-Station
 - Szintillierende Kacheln

Das Mu3e-Experiment



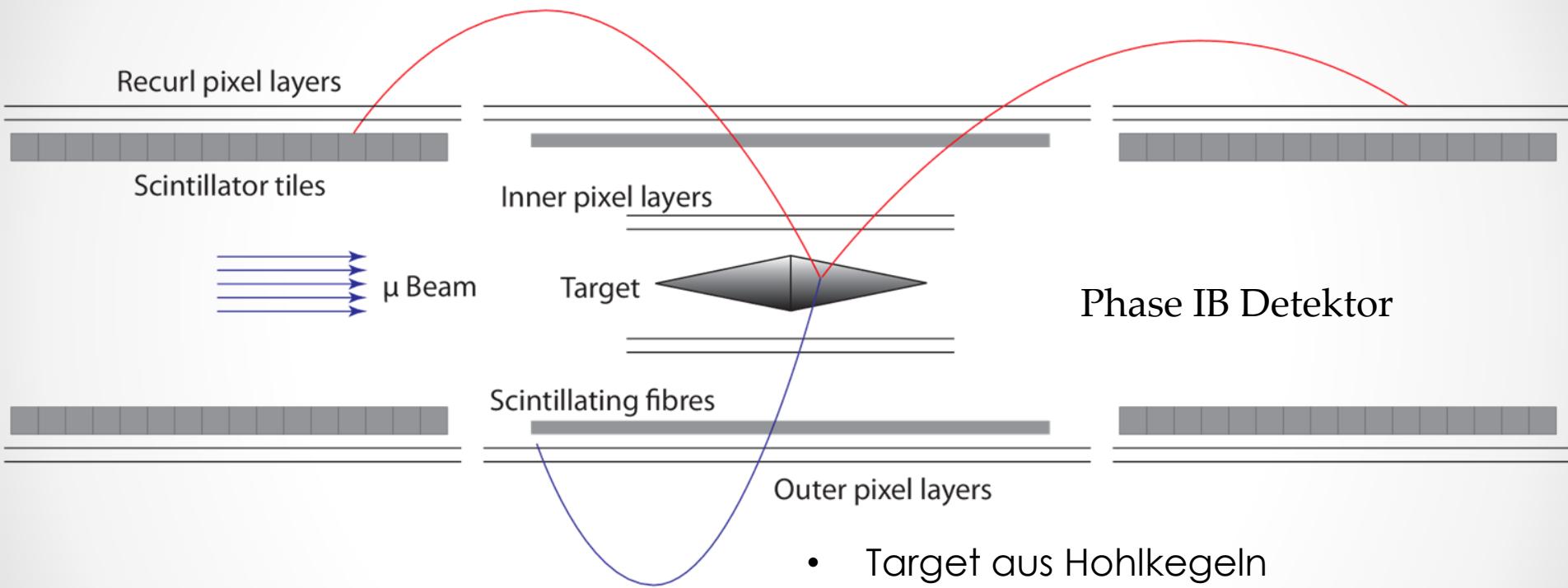
- Myonstrahl $\mathcal{O}(10^9/s)$
 - Helium-Atmosphäre
 - 1 T B-Feld
- Target aus Hohlkegeln
 - Silizium Pixel Detektor
 - Szintillations-Faser Detektor
 - Rückwärts- und Vorwärts-Station
 - Szintillierende Kacheln

Das Mu3e-Experiment



- Myonstrahl $\mathcal{O}(10^9/\text{s})$
- Helium-Atmosphäre
- 1 T B-Feld
- Target aus Hohlkegeln
- Silizium Pixel Detektor
- Szintillations-Faser Detektor
- Rückwärts- und Vorwärts-Station
- Szintillierende Kacheln

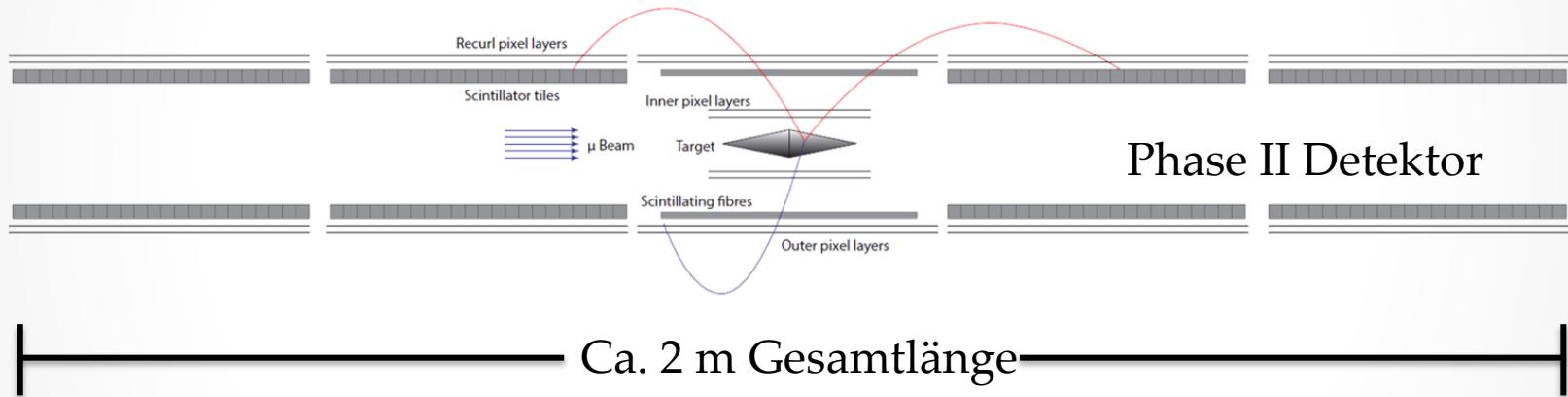
Das Mu3e-Experiment



- Myonstrahl $\text{O}(10^9/\text{s})$
- Helium-Atmosphäre
- 1 T B-Feld

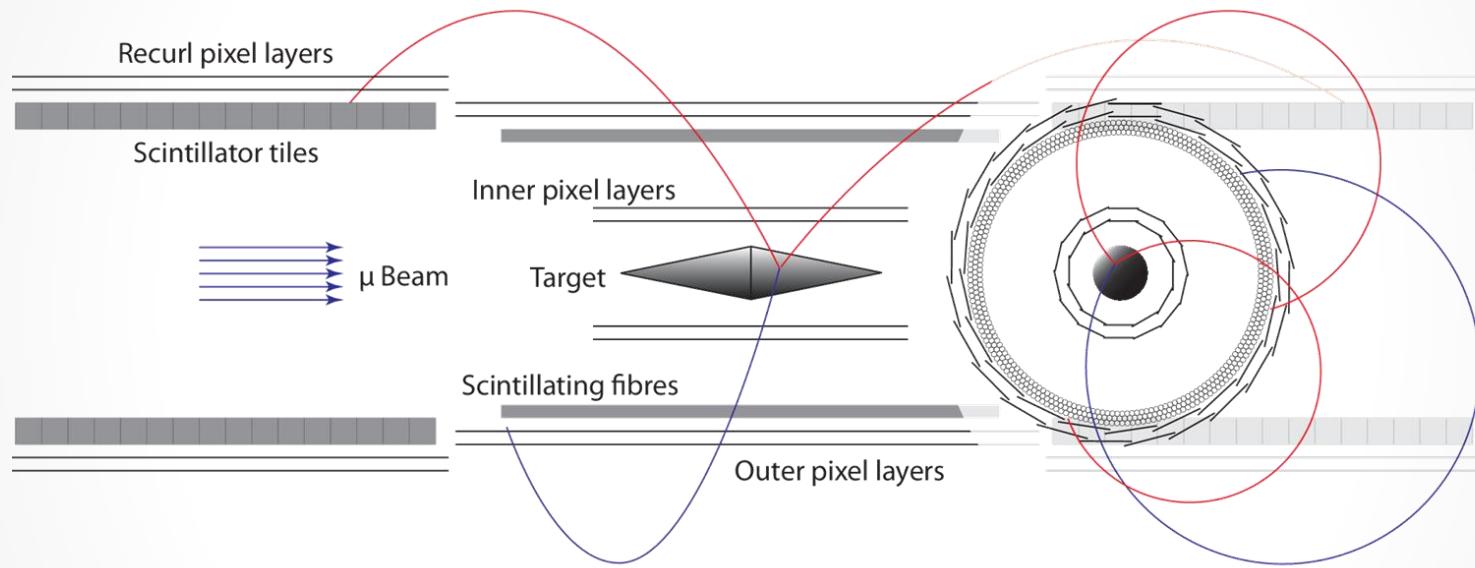
- Target aus Hohlkegeln
- Silizium Pixel Detektor
- Szintillations-Faser Detektor
- Rückwärts- und Vorwärts-Station
- Szintillierende Kacheln

Das Mu3e-Experiment



- Myonstrahl $\text{O}(10^9/\text{s})$
- Helium-Atmosphäre
- 1 T B-Feld
- Target aus Hohlkegeln
- Silizium Pixel Detektor
- Szintillations-Faser Detektor
- Rückwärts- und Vorwärts-Station
- Szintillierende Kacheln

Das Mu3e-Experiment



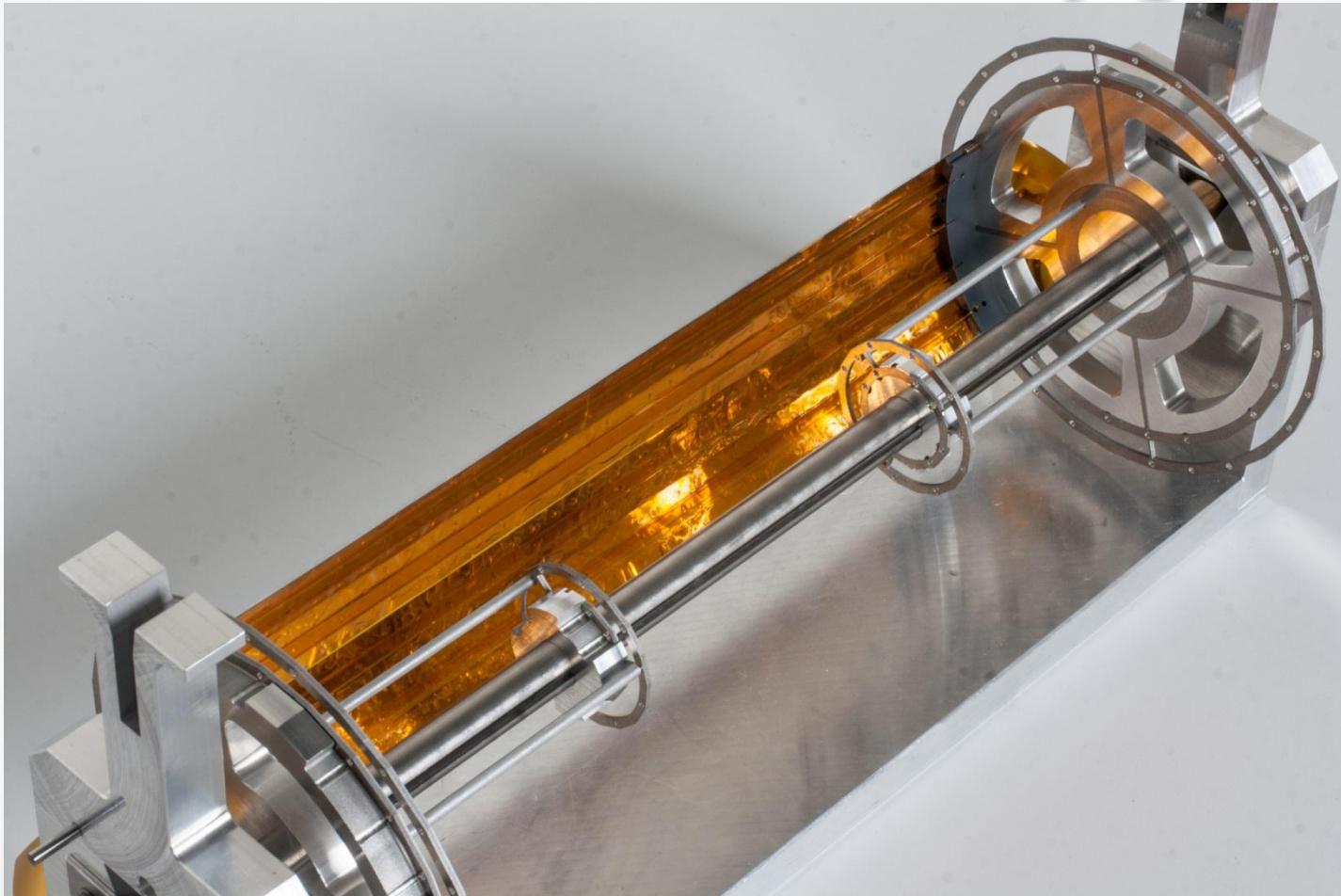
- Myonstrahl $\mathcal{O}(10^9/\text{s})$
- Helium-Atmosphäre
- 1 T B-Feld
- Target aus Hohlkegeln
- Silizium Pixel Detektor
- Szintillations-Faser Detektor
- Rückwärts- und Vorwärts-Station
- Szintillierende Kacheln

Innere Doppellage



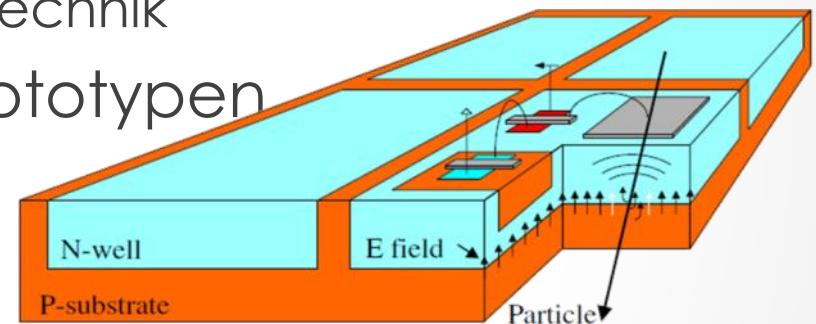
Sehr stabile selbsttragende Struktur

Stations-Prototyp



Zusammenfassung

- High Voltage Monolithic Active Pixel Sensoren vereinen die guten Eigenschaften von
 - Gasdetektoren
 - Siliziumdetektoren in Hybrid-Technik
- Erste vielversprechende Prototypen
 - Geringes Rauschen
 - Schnell
 - Strahlenhart
- Erstes HV-MAPS Detektorsystem wird für das Mu3e Experiment gebaut

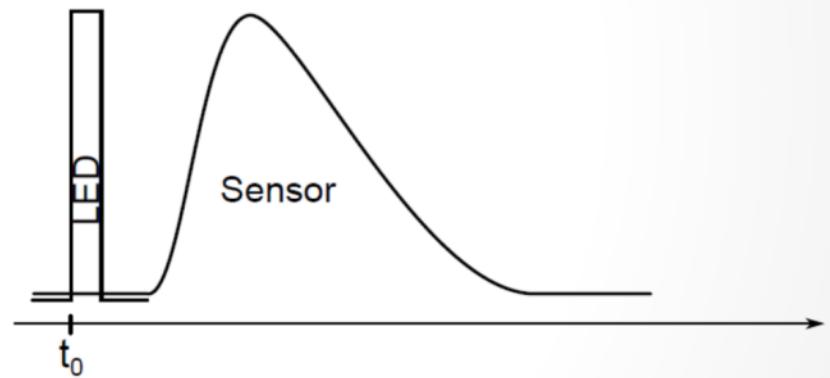


Backup Slides

...

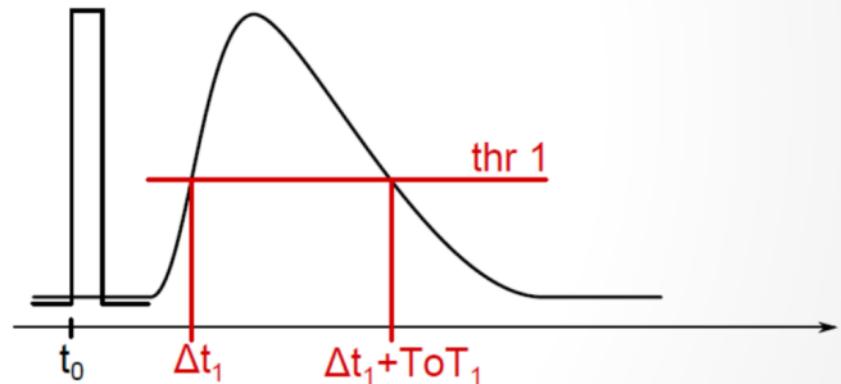
Pulse Shape

- LED setup
- Test pulse latency
- + time over threshold



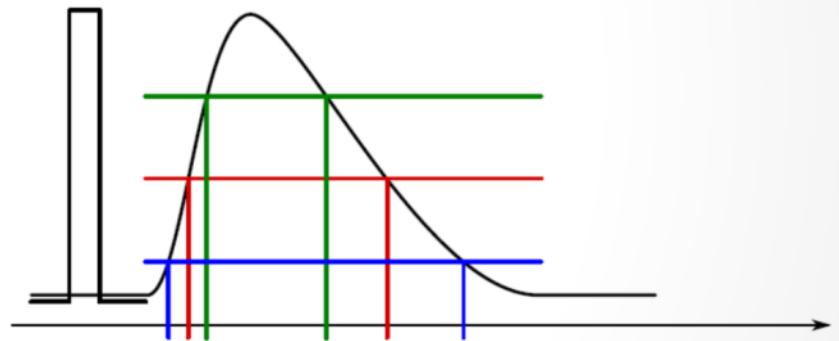
Pulse Shape

- LED setup
- Test pulse latency
- + time over threshold



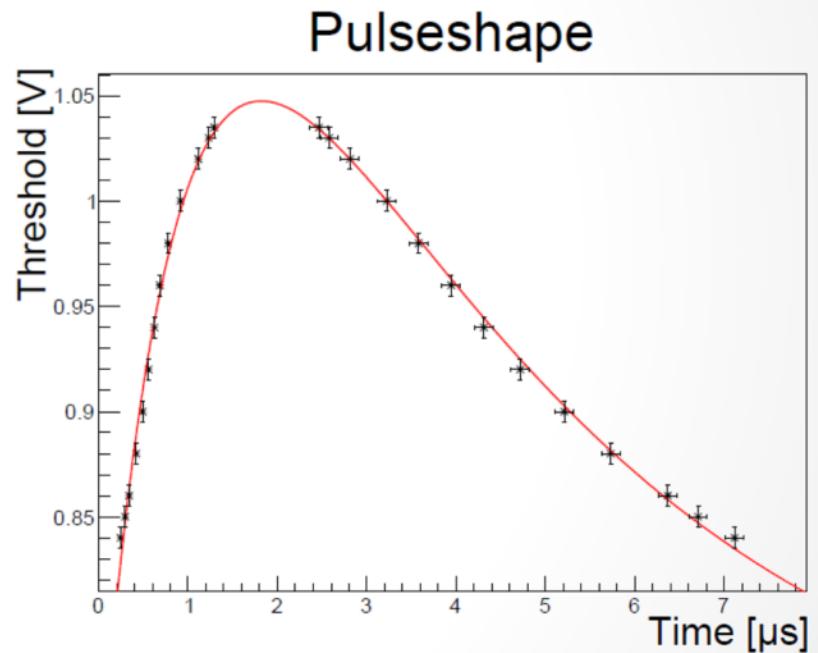
Pulse Shape

- LED setup
- Test pulse latency
- + time over threshold
- ... for different thresholds



Pulse Shape

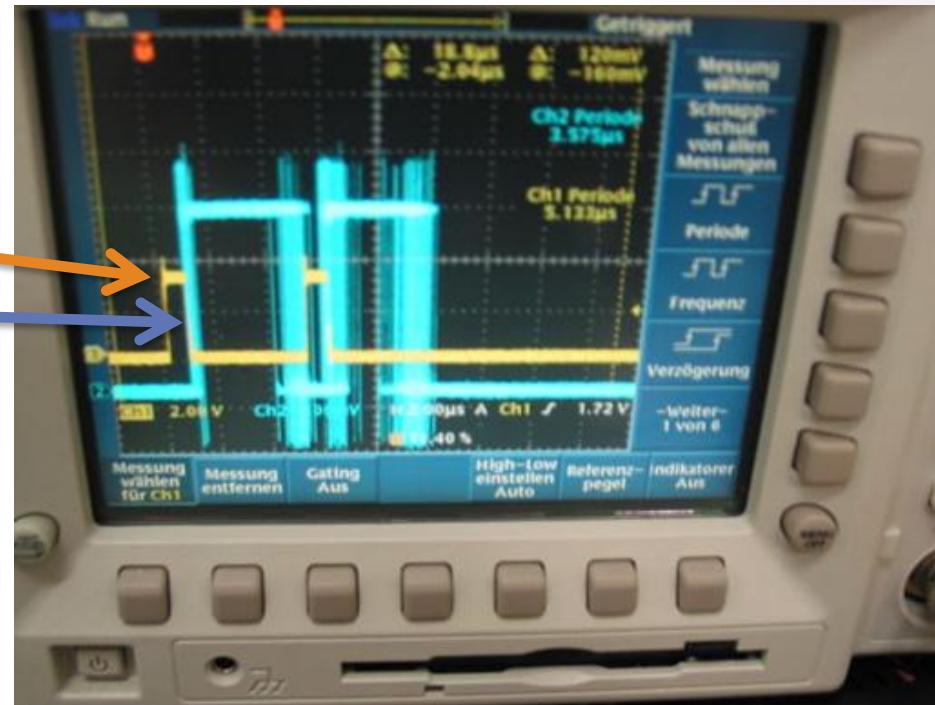
- LED setup
- Test pulse latency
- + time over threshold
- ... for different thresholds
- faster shaping needed



Timing: Latency jitter

- Precise timing important for:
 - High occupancy
 - Short readout frames
- Latency between
 - signal-pulse and
 - pixel response

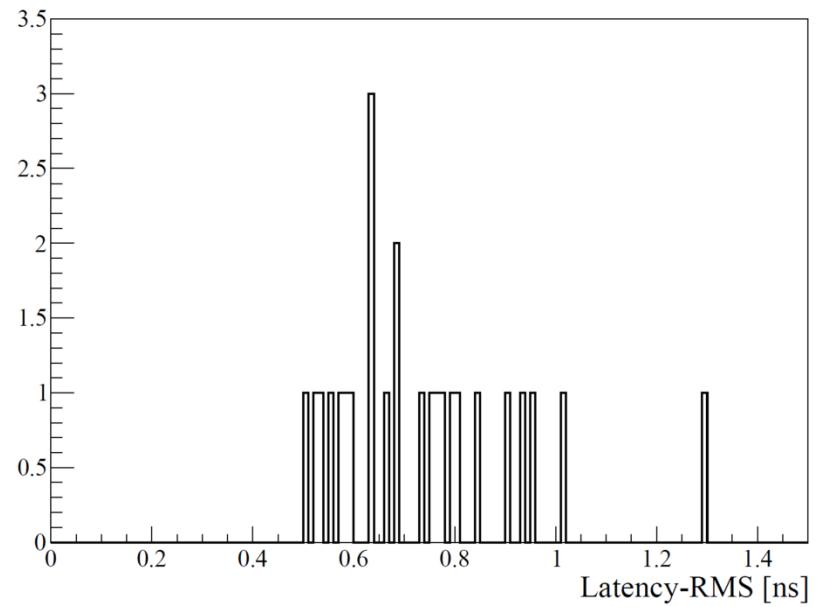
...should be constant



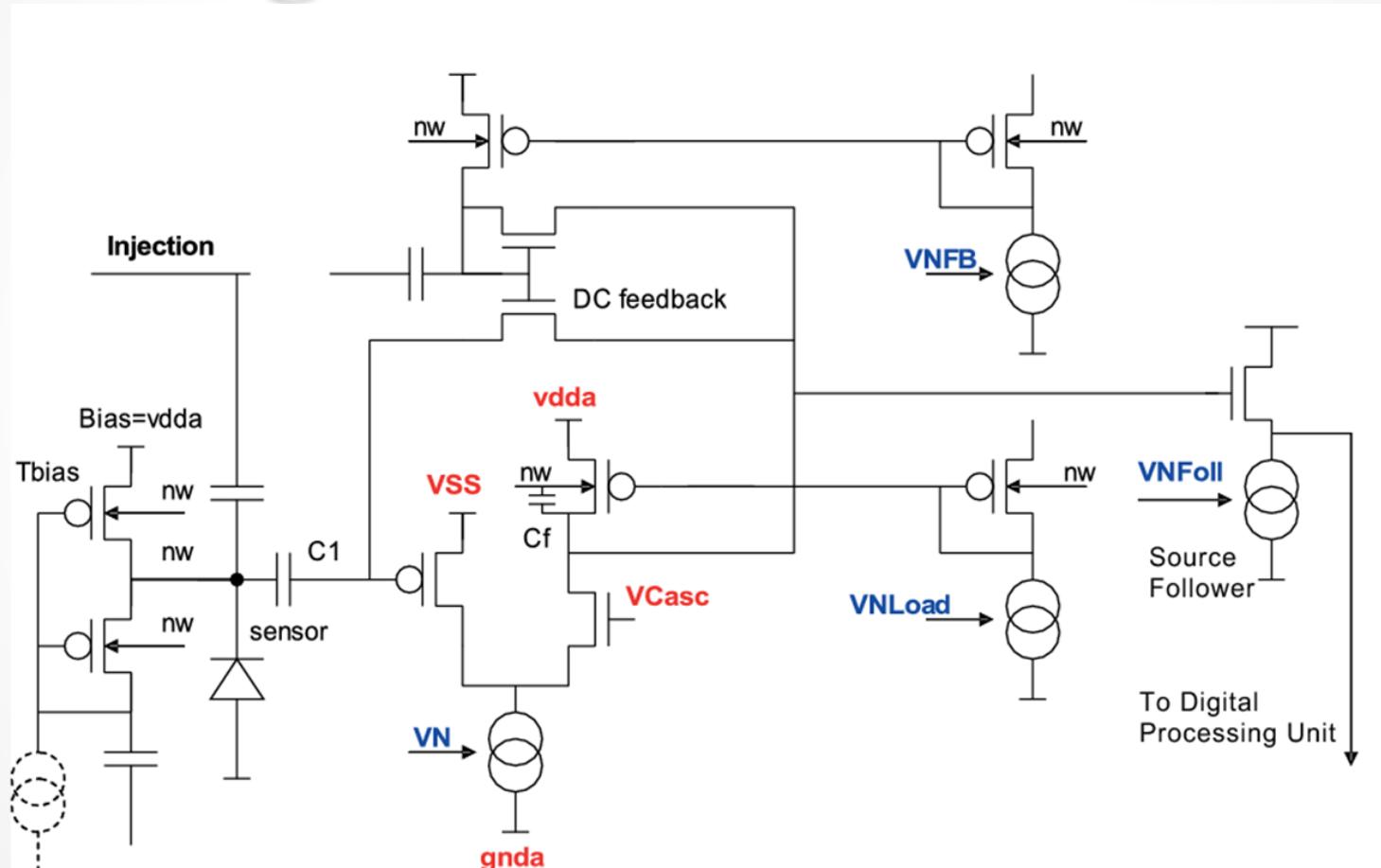
Timing: Latency jitter

- Latency between
 - test-pulse and pixel response
 - Latency 59.37 ± 1.63 ns
 - Latency jitter **0.74 ± 0.18 ns**
- **Fast**
- But: Pulse height dependency
- Measure Time over Threshold
 - Pulse height
 - Time correction

Latency jitter distribution



Analog Electronics MuPix



Mu3e

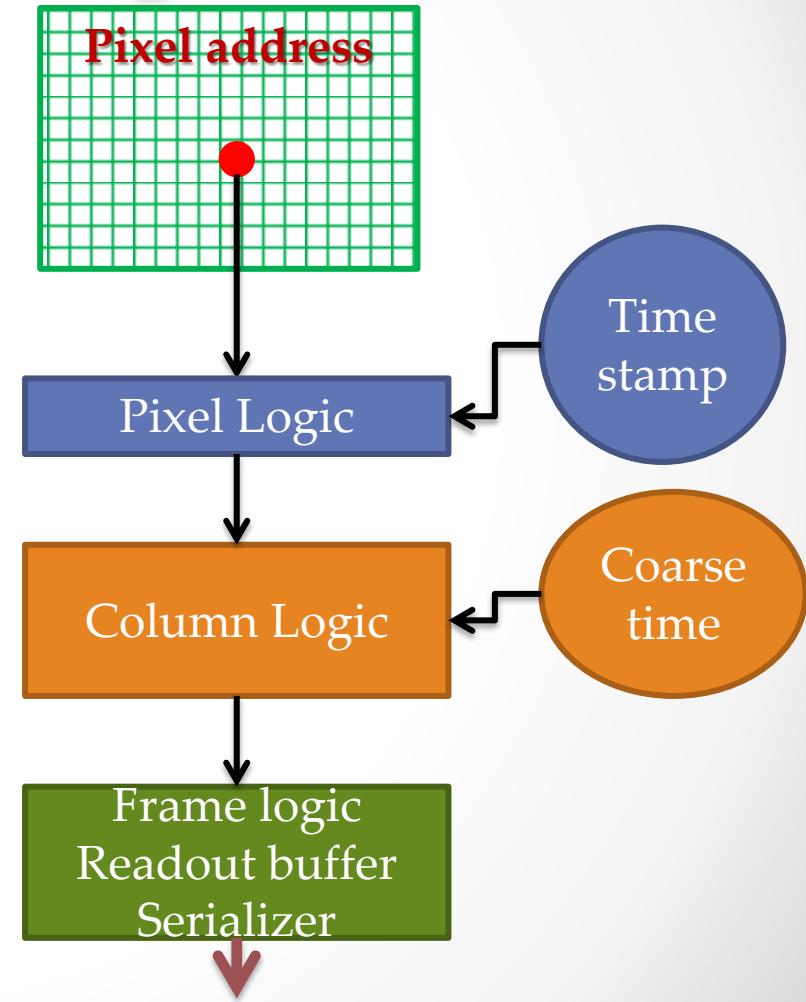
1Tbit/s Readout

• • •

Digital Logic

Zero suppressed readout:

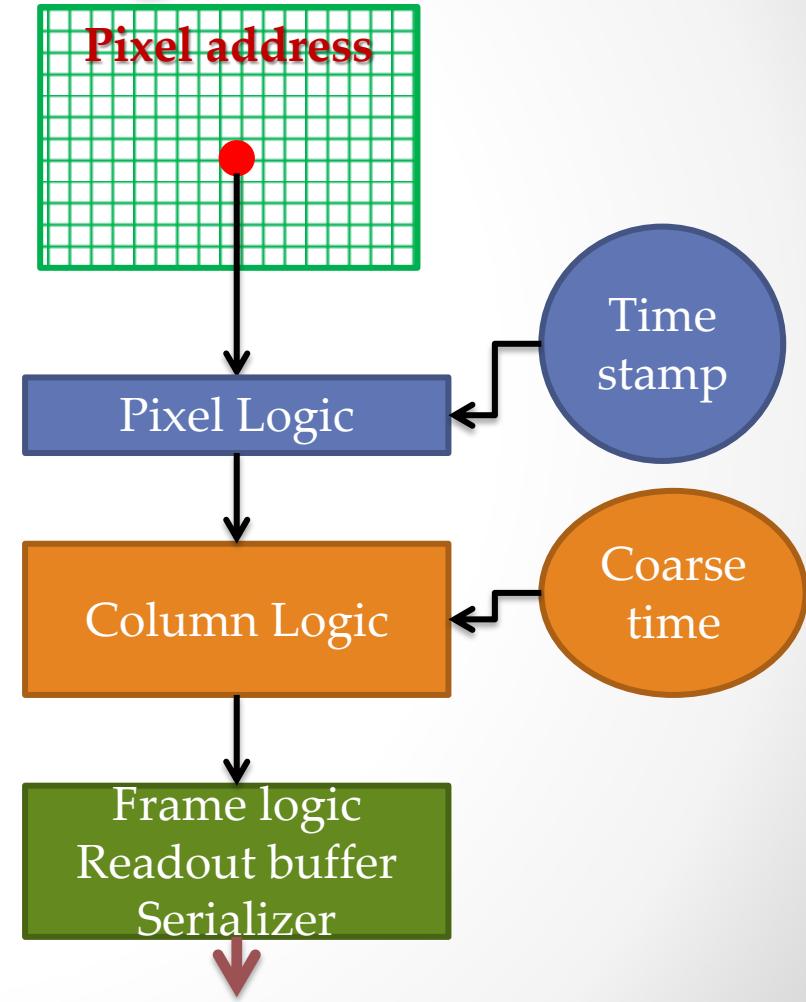
- Pixel logic:
 - Address generation
 - Time stamp
 - Column bus logic
- Column logic
 - Priority logic
 - ... using tri-state bus
 - Fifo buffer
- Chip wide logic
 - Data frame generation
- Serializer(s)
 - 800 Mbit/s LVDS



Digital Logic

Zero suppressed readout:

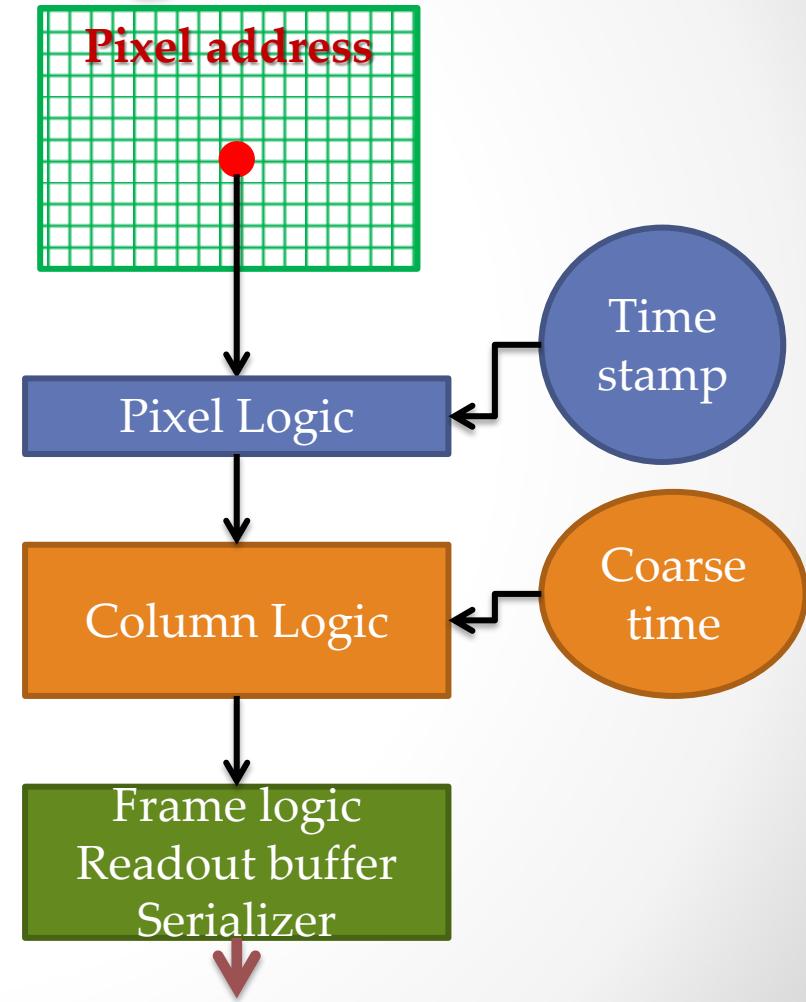
- Pixel logic:
 - Address generation
 - Time stamp
 - Column bus logic
- Column logic
 - Priority logic
 - ... using tri-state bus
 - Fifo buffer
- Chip wide logic
 - Data frame generation
- Serializer(s)
 - 800 Mbit/s LVDS



Digital Logic

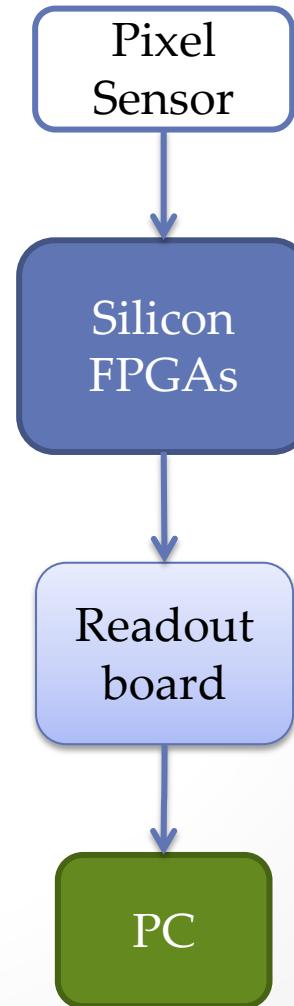
Zero suppressed readout:

- Pixel logic:
 - Address generation
 - Time stamp
 - Column bus logic
- Column logic
 - Priority logic
 - ... using tri-state bus
 - Fifo buffer
- Chip wide logic
 - Data frame generation
- Serializer(s)
 - 800 Mbit/s LVDS



Data Acquisition

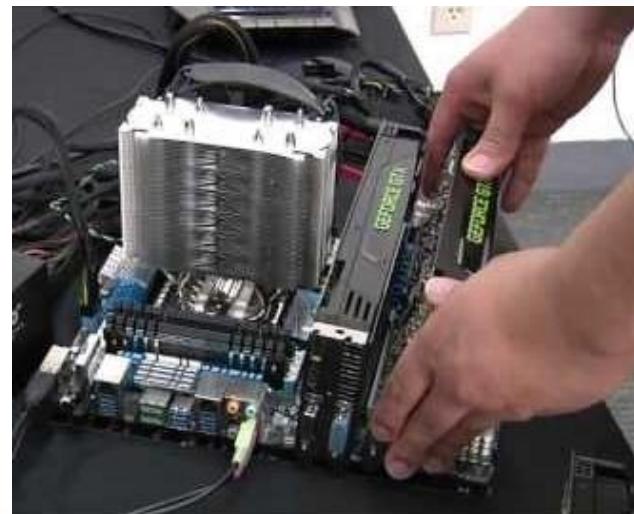
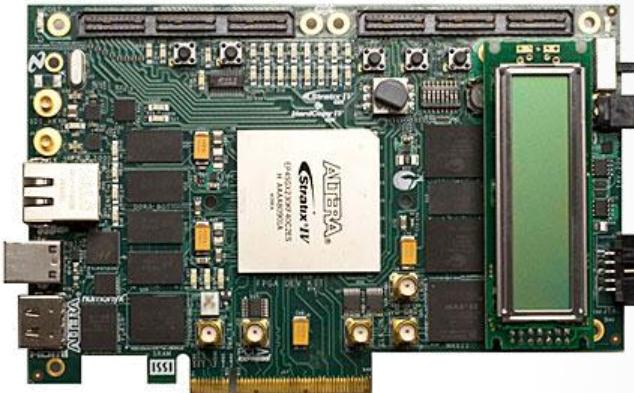
- 2.5 GHz muon decays
- 50 ns readout frames
- $\mathcal{O}(5000)$ pixel chips
 - 800 Mb/s readout links
- $\mathcal{O}(7500)$ scintillating fibers
- $\mathcal{O}(7000)$ timing tiles
 - DRS readout
- 3 layers switching FPGAs
 - Optical data links
- Online filtering



Event Filter Farm

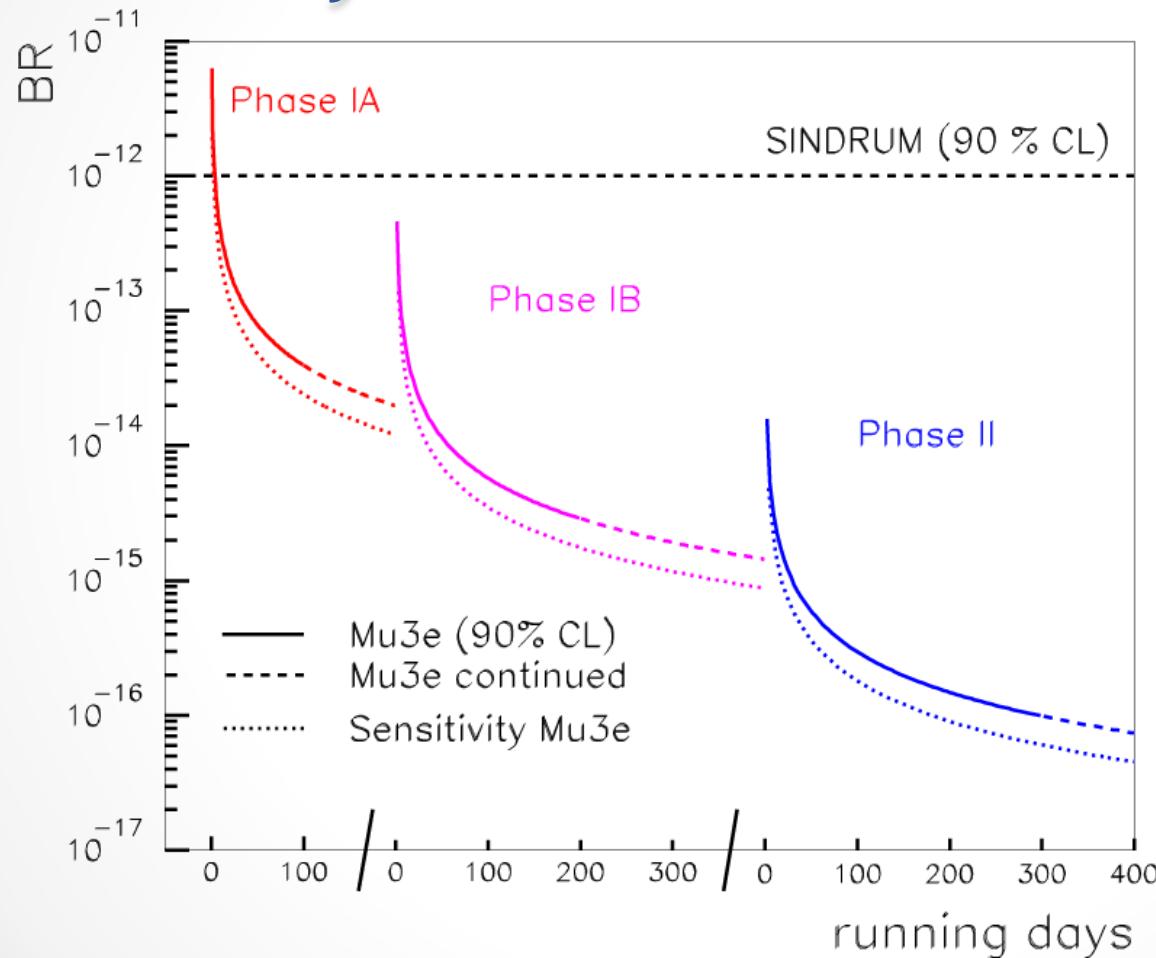
- Trigger less readout
- GPU computers
 - PCIe FPGA/optical input
 - Tflop/s GPU
- 10x faster than CPU
 - Requires custom code
 - + Makes farm affordable

Optical mezzanine connectors



GPU computer

Projected Sensitivity



Schedule

- **2012 Letter of intent** to PSI, tracker prototype, technical design, research proposal
- **2013 Detector construction**
- **2014 Installation and commissioning** at PSI
- **2015 Data taking at up to a few $10^8 \mu\text{s}$**
- **2016+ Construction of new beam-line** at PSI
- **2017++ Data taking at up to $3 \cdot 10^9 \mu\text{s}$**



Institutes

- Mu3e collaboration:

- DPNC Geneva University



- Paul Scherrer Institute



- Particle Physics ETH Zürich



- Physics Institute Zürich University



- Physics Institute Heidelberg University



- ZITI Mannheim

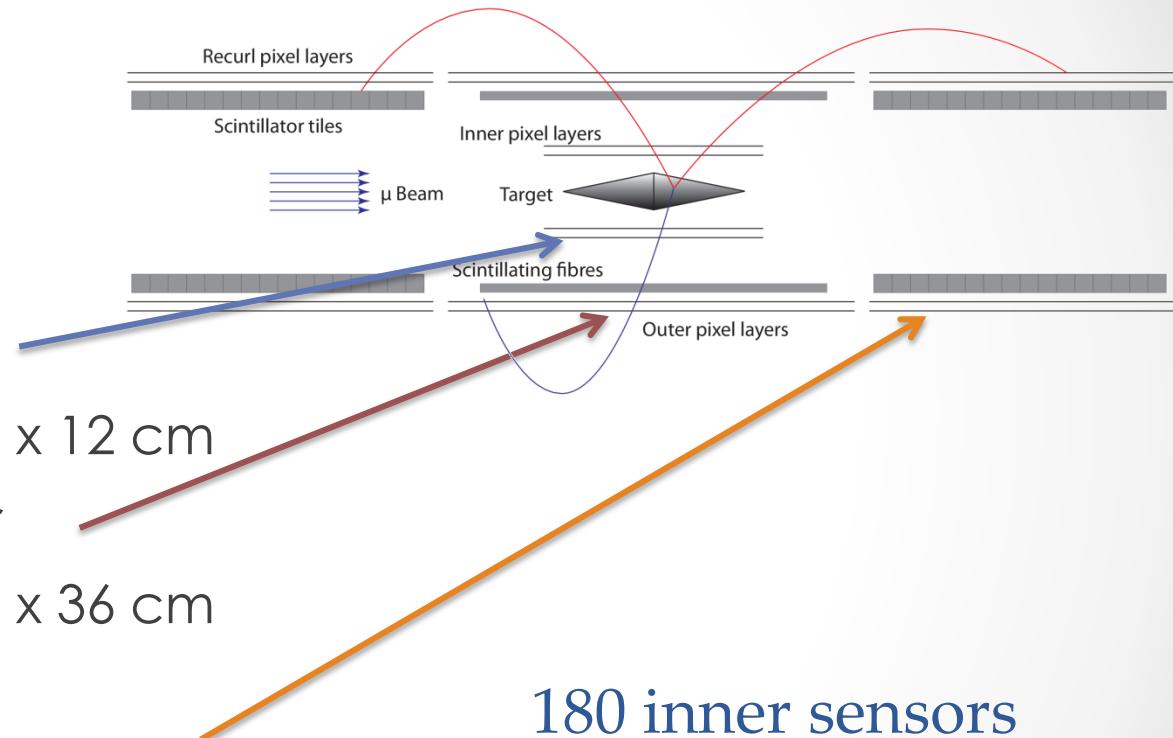


- KIP Heidelberg



Mu3e Silicon Detector

- Conical target
- Inner double layer
 - 12 and 18 sides of $1 \times 12 \text{ cm}$
- Outer double layer
 - 24 and 28 sides of $2 \times 36 \text{ cm}$
- Re-curl layers
 - 24 and 28 sides of $2 \times 72 \text{ cm}$
 - Both sides (x2)



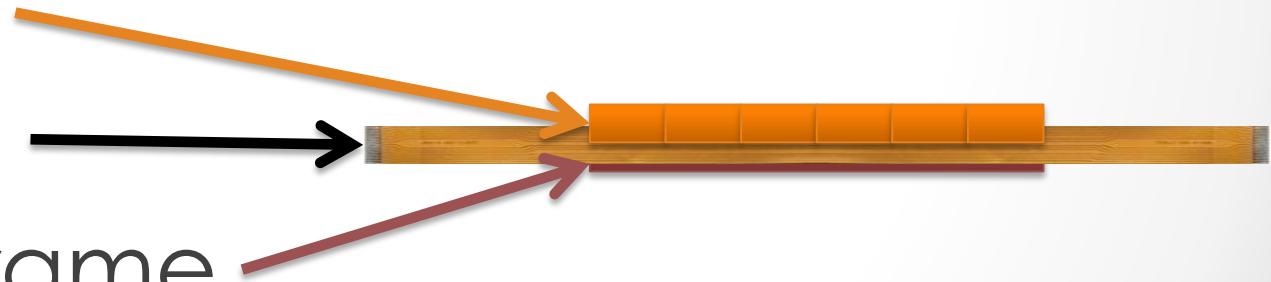
180 inner sensors
4680 outer sensors
➤ 274 752 000 pixel

Lightweight Detector

...

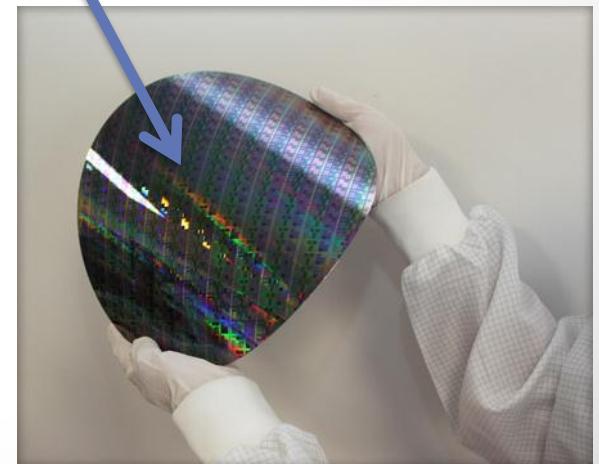
Material

- HV-MAPS
- Flex print
- Kapton Frame



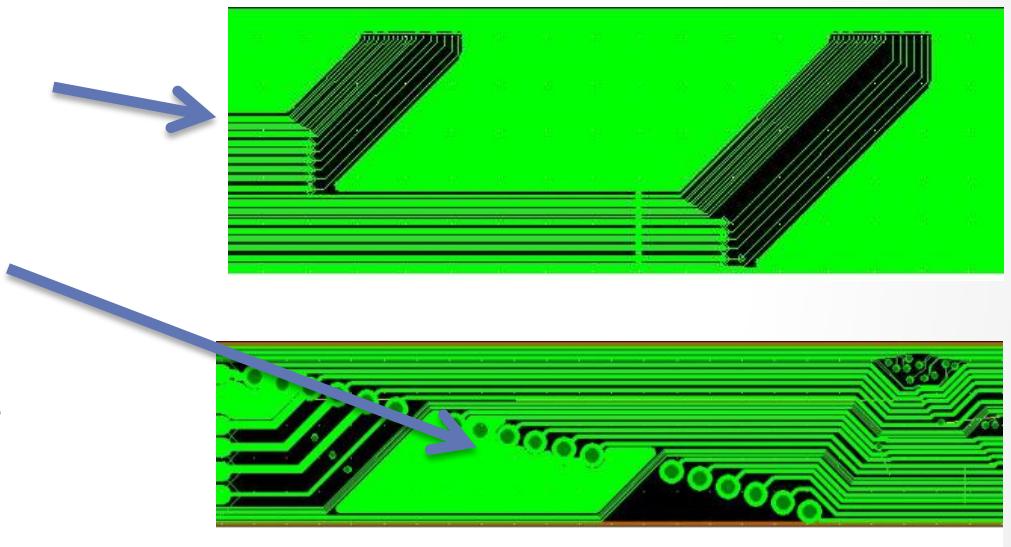
Thinning

- 50 µm Si-wafers
 - Commercially available
 - HV-CMOS 75 µm (AMS)
- Single die thinning
 - For chip sensitivity studies
 - < 50 µm desirable
 - In house grinding?
 - Local company

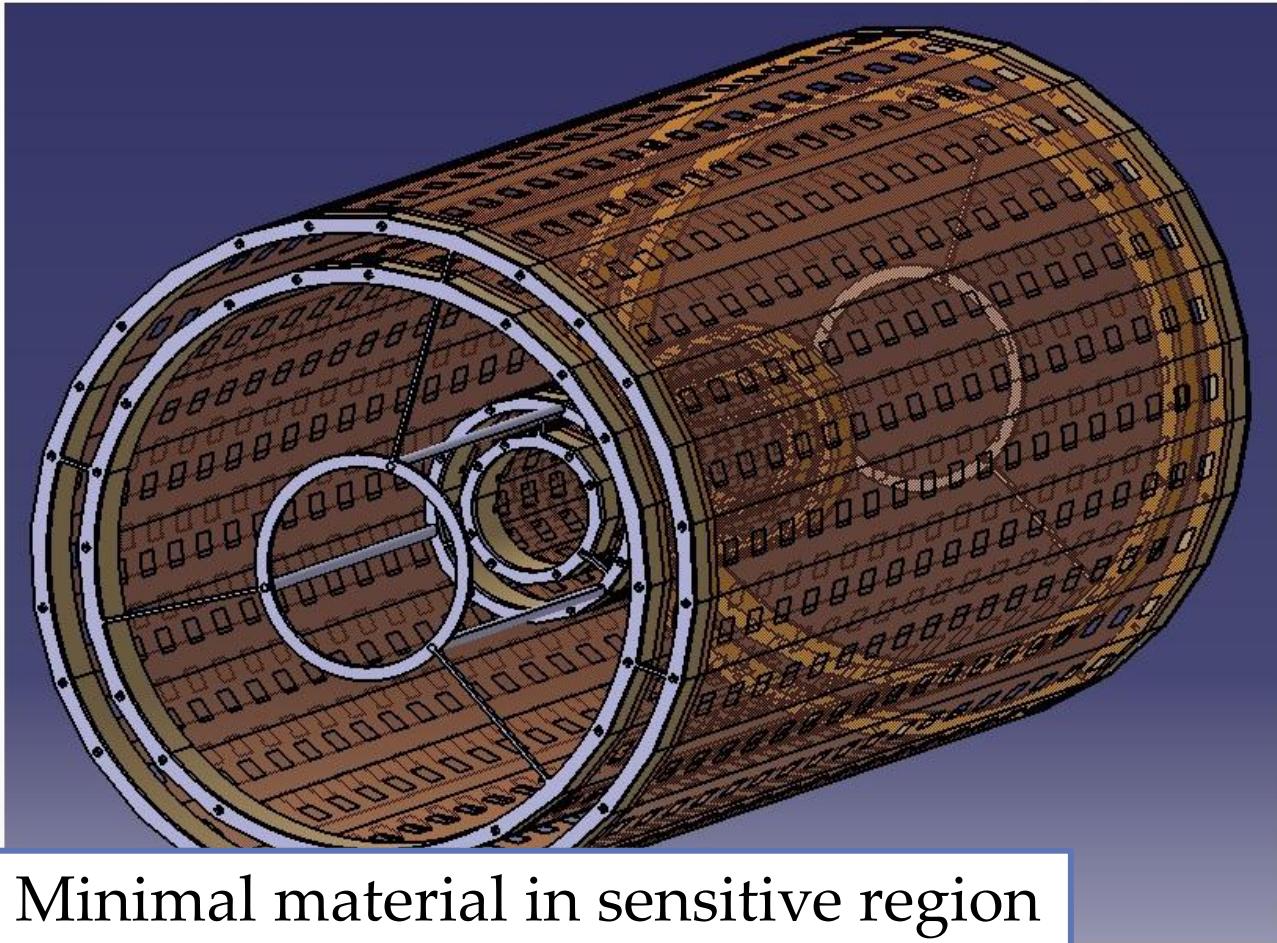


Flex Print

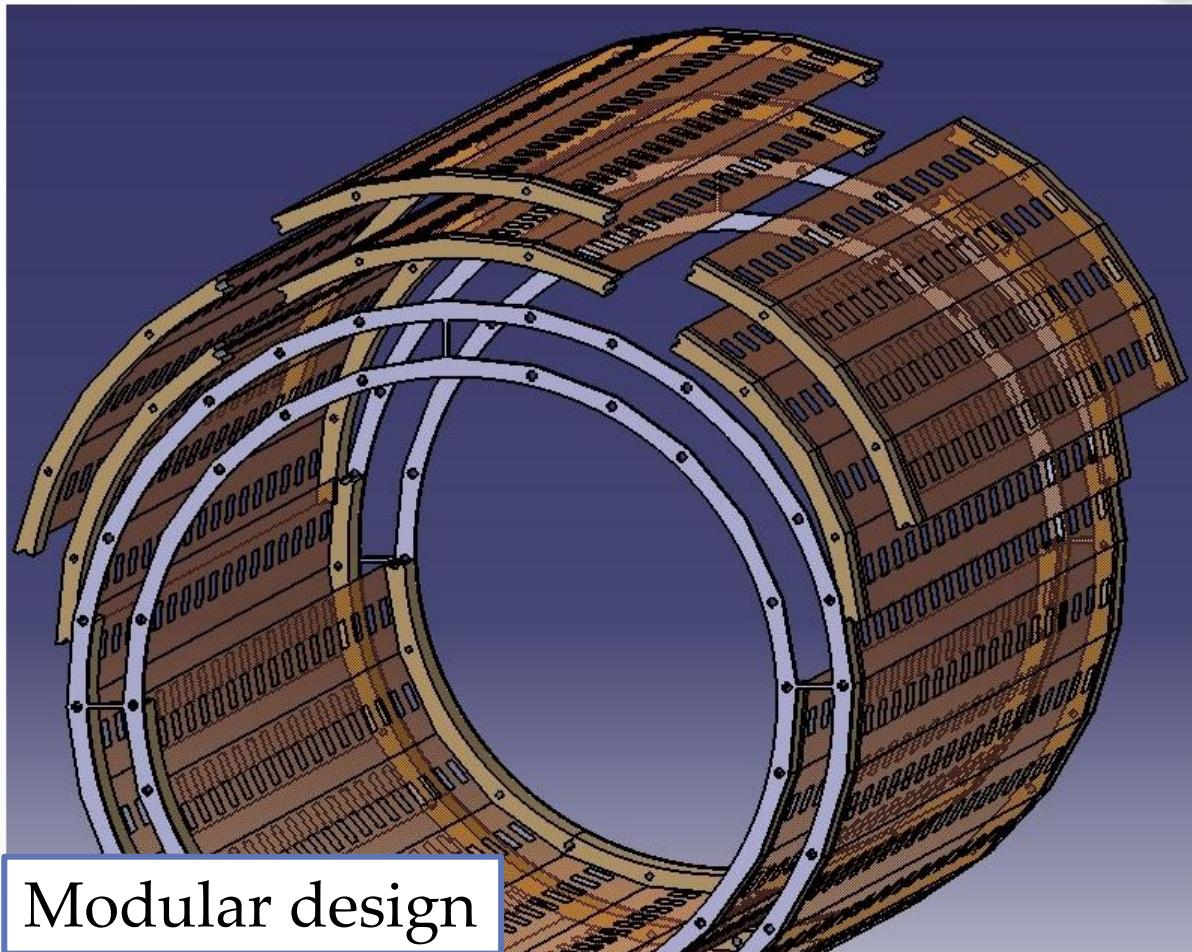
- Single Layer in active region
- Multilayer in “cable” end
- LVDS buffers at edge



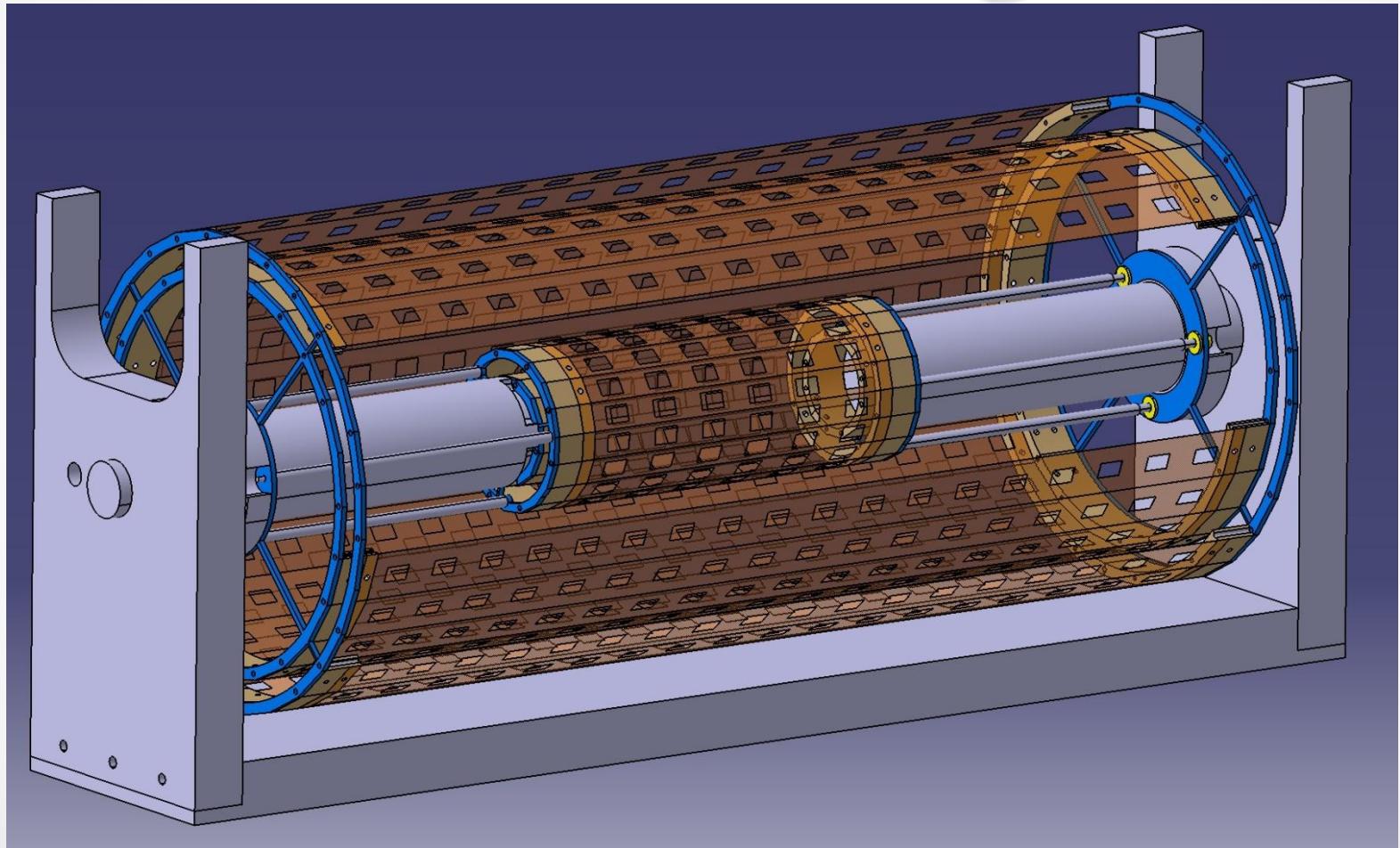
Outer Double Layer



Outer Doublet Design



Station Design

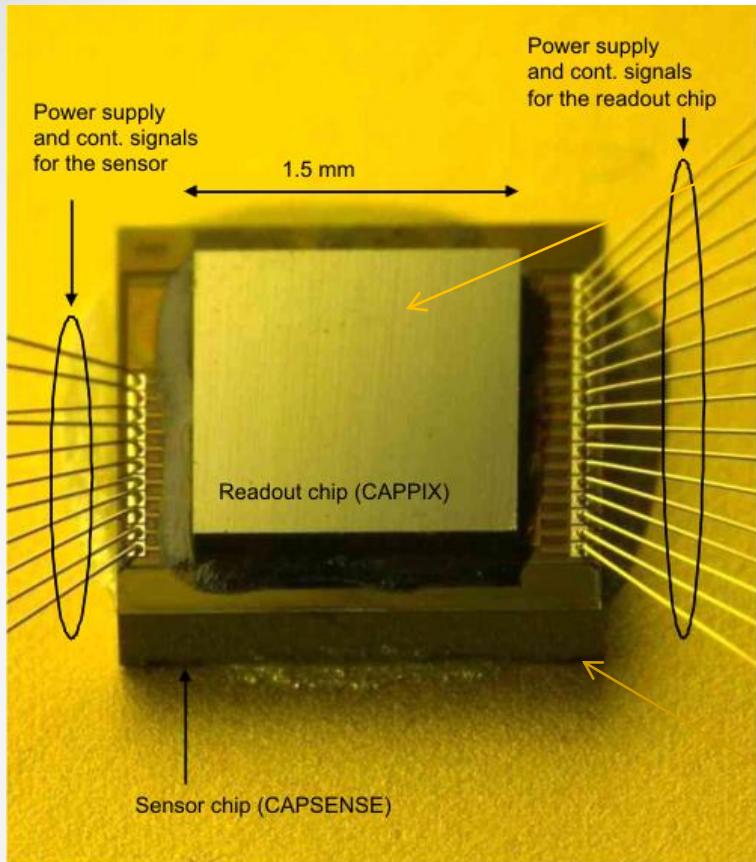


Proton irradiation

KIT (Karlsruhe) 10^{15} n_{eq}/cm²

RESMDD 2012, Firenze, Ivan Peric

Irradiated device: CCPD2



Readout chip

Digital part



Sensor

CAPPIX/CAPSENSE
edgeless CCPD
50x50 μm pixel size

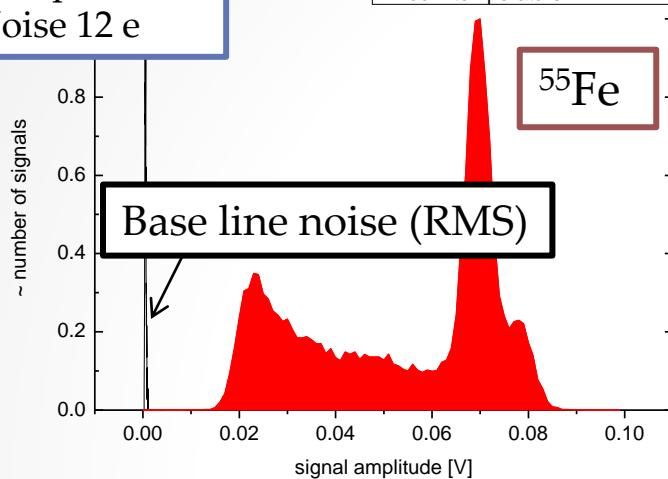
Irradiation with protons at KIT 10^{15} n_{eq}/cm²

Not irradiated

Room temperature

RMS Noise 12 e

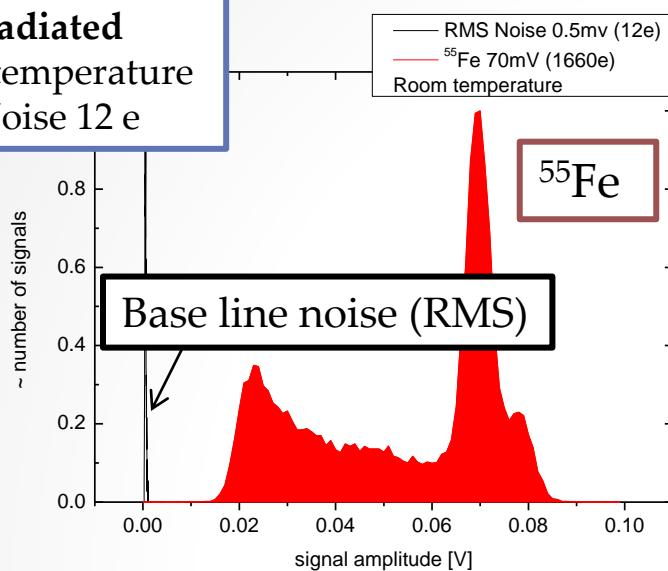
— RMS Noise 0.5mv (12e)
— ^{55}Fe 70mV (1660e)
Room temperature



Irradiation with protons at KIT 10^{15} n_{eq}/cm²

Not irradiated

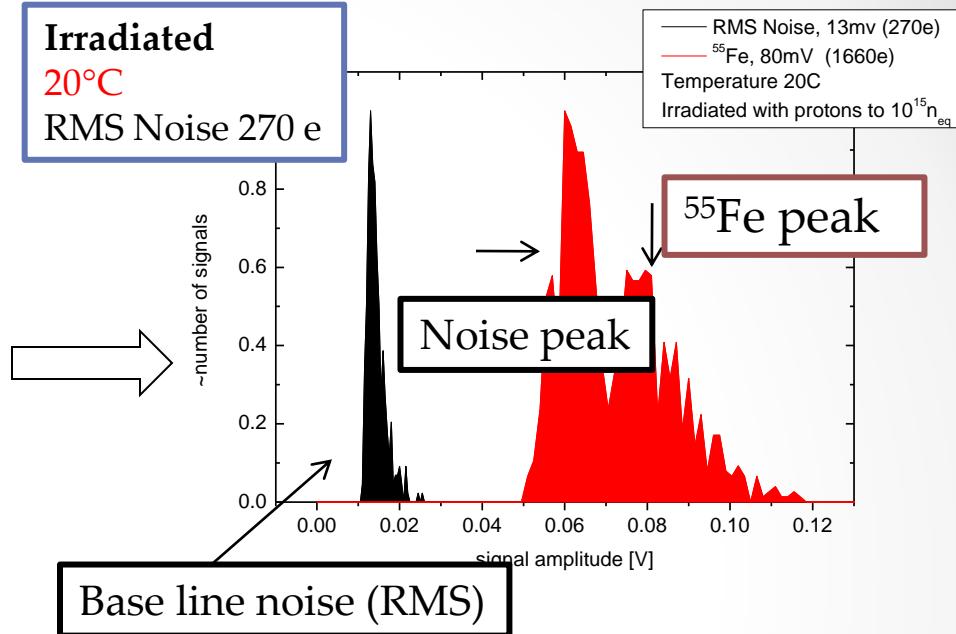
Room temperature
RMS Noise 12 e



Irradiated

20°C

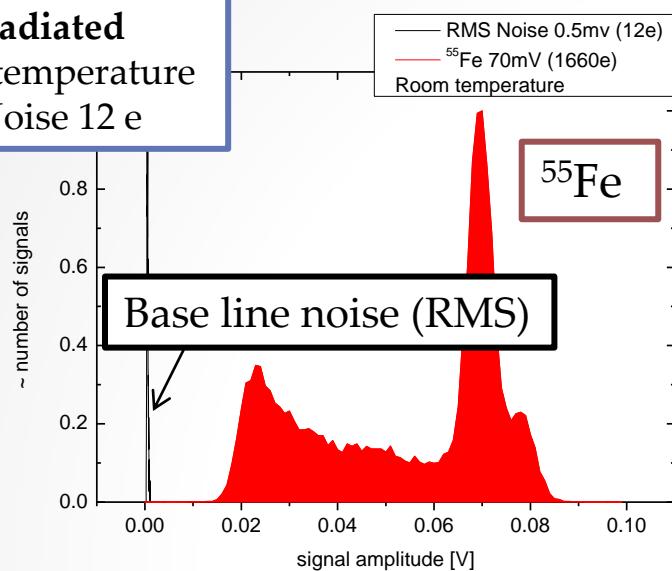
RMS Noise 270 e



Irradiation with protons at KIT 10^{15} n_{eq}/cm²

Not irradiated

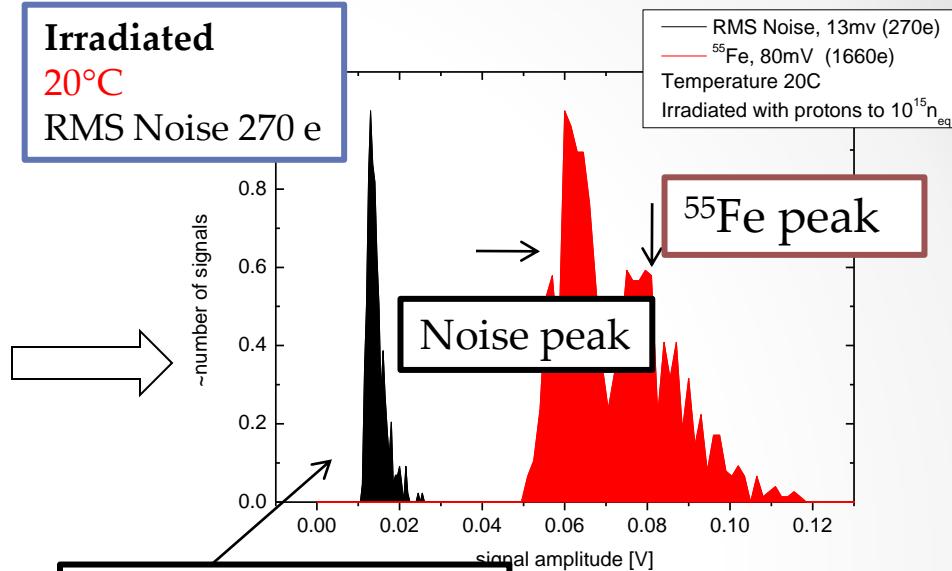
Room temperature
RMS Noise 12 e



Irradiated

20°C

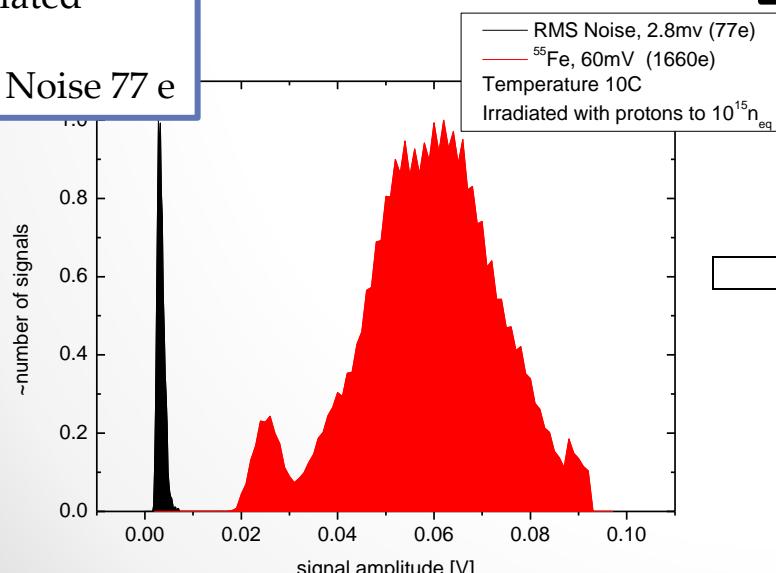
RMS Noise 270 e



Irradiated

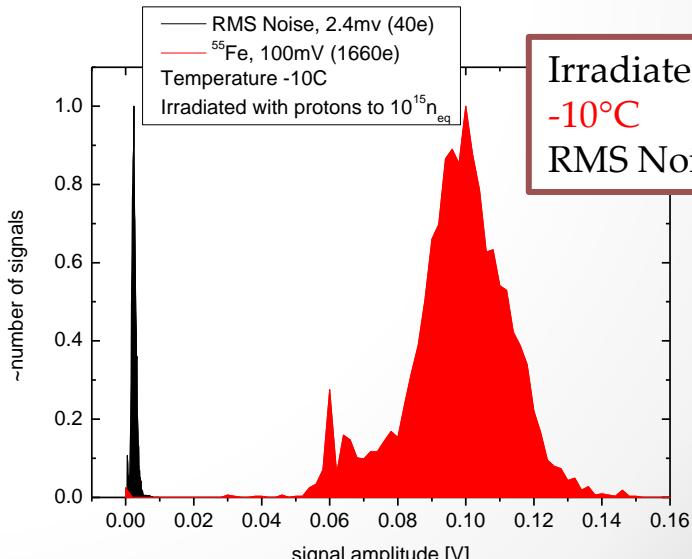
10°C

RMS Noise 77 e

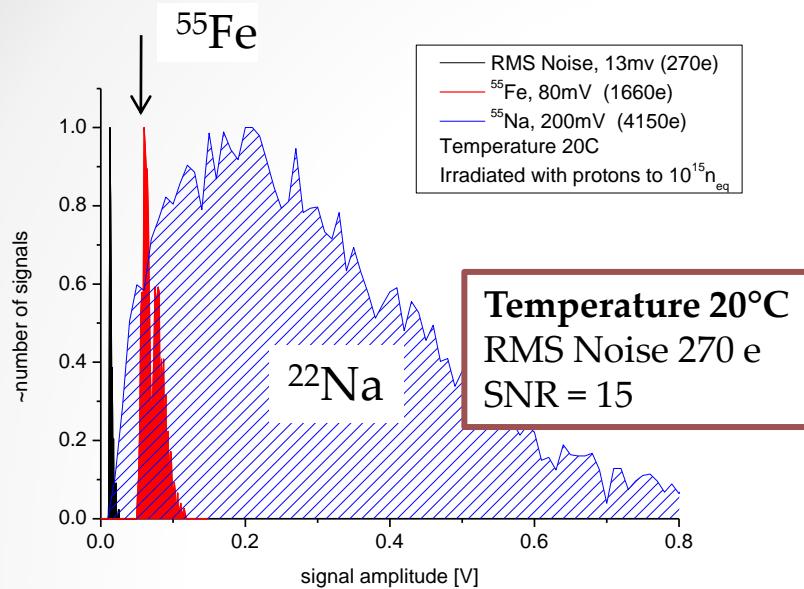


Base line noise (RMS)

Irradiated
-10°C
RMS Noise 40 e

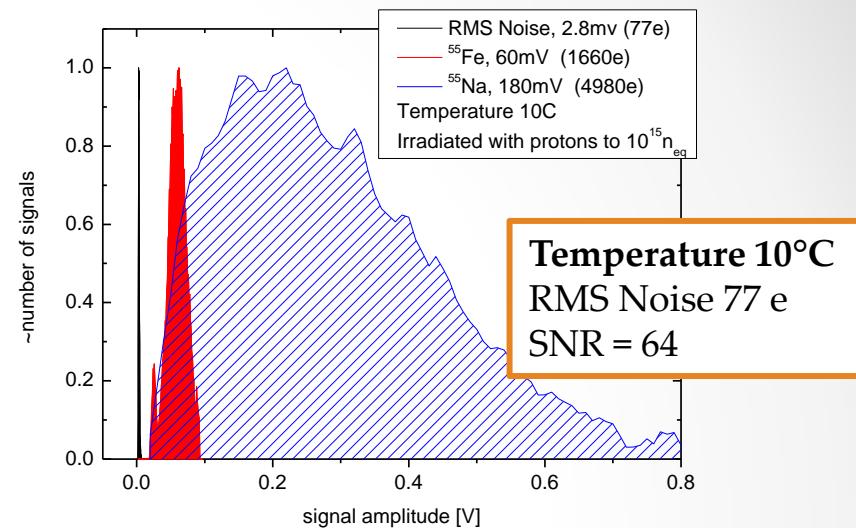
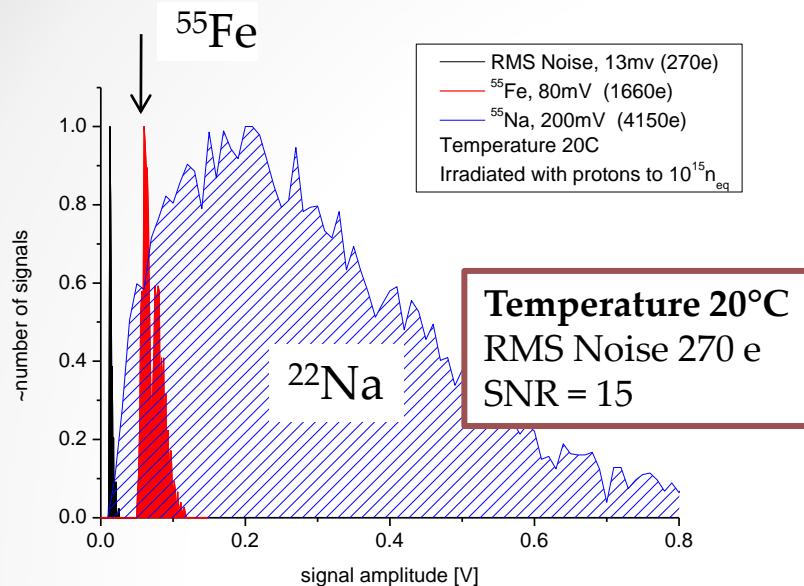


Irradiation with protons at KIT 10^{15} n_{eq}/cm²

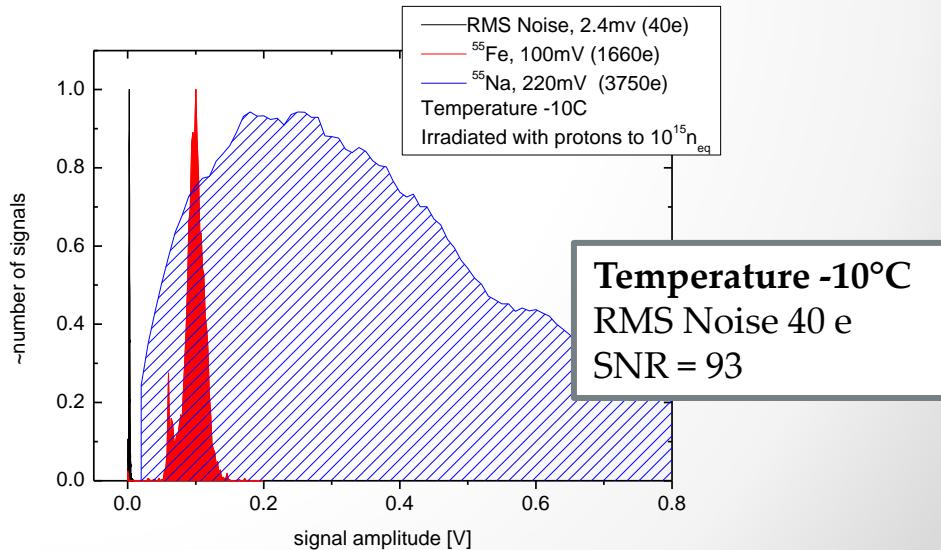


^{55}Fe and ^{22}Na spectrum, RMS noise

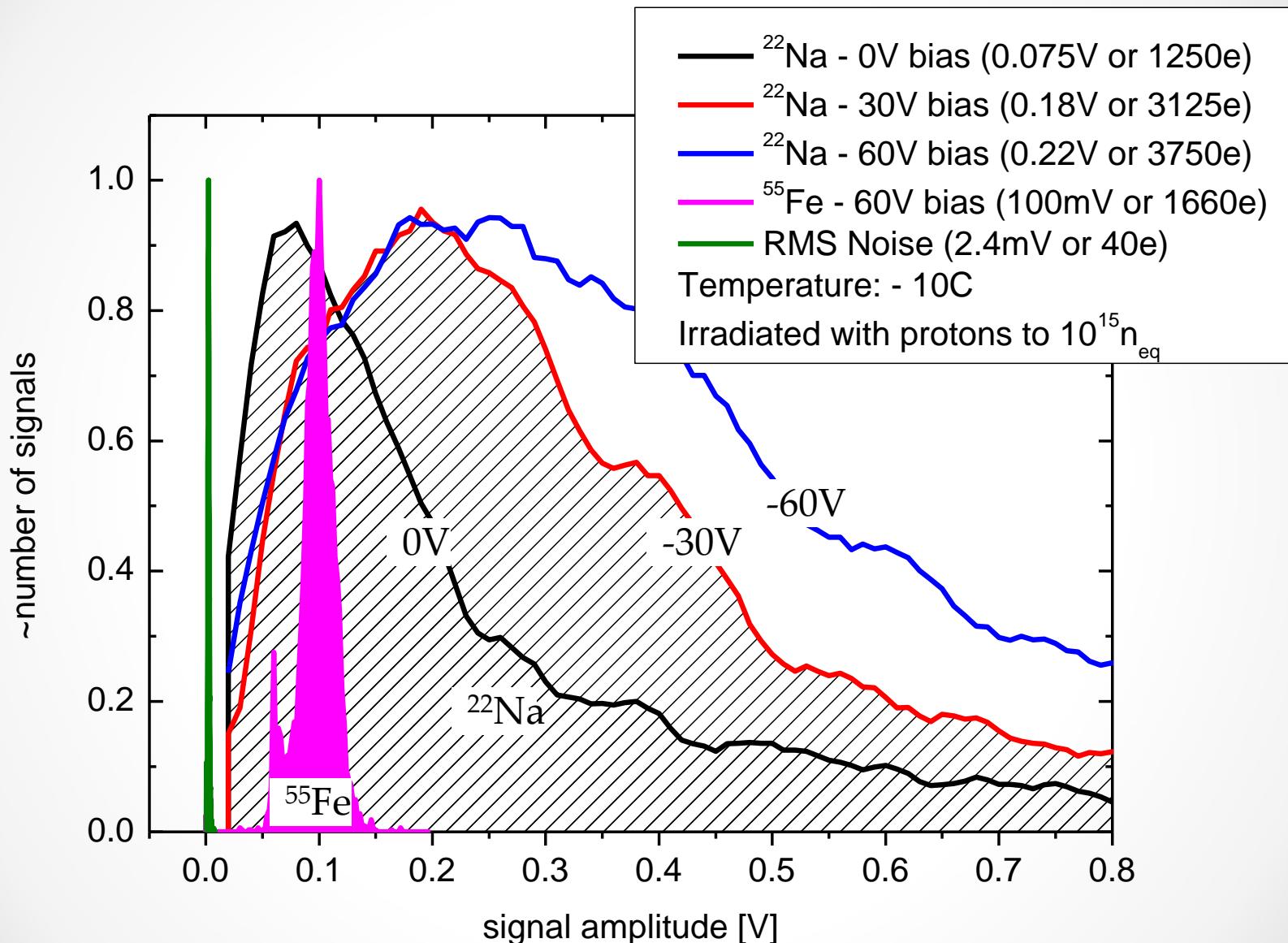
Irradiation with protons at KIT 10^{15} n_{eq}/cm²



^{55}Fe and ^{22}Na spectrum, RMS noise



Irradiation with protons at KIT (10^{15} n_{eq}/cm²)



Radiation hardness

- Irradiation test of HVCMOS sensors with:
 - **neutrons** $10^{14} n_{eq}$ at Munich,
 - **protons** $10^{15} n_{eq}$ and $8 \times 10^{15} n_{eq}$ - 380 MRad at KIT and PS
 - **x-rays** 50MRad at KIT
- Two main effects are observed:
 - **Reduction** of the secondary **signal** part that is collected by diffusion
 - **Increase** of **leakage current**
- Good SNR can be achieved after irradiation
 - if the sensors are **cooled** to $\sim 0^\circ\text{C}$
- Charge multiplication factor can further increase SNR
- Although we still do not understand all effects, the HVCMOS sensors seem to have a high radiation tolerance.

Physics Motivation

Lepton flavor violation?

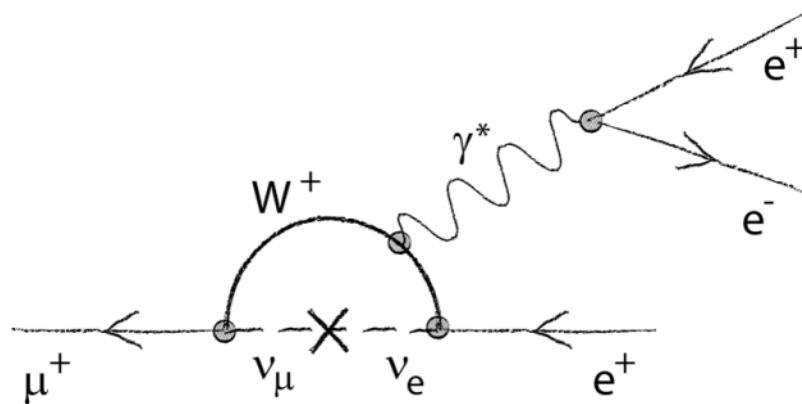
Three Generations of Matter (Fermions)				
	I	II	III	
mass →	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	
charge →	2/3	2/3	2/3	
spin →	1/2	1/2	1/2	
name →	u up	c charm	t top	
Quarks	4.8 MeV/c ² -1/3 1/2 d down	104 MeV/c ² -1/3 1/2 s strange	4.2 GeV/c ² -1/3 1/2 b bottom	0 0 1 γ photon
	<2.2 eV/c ² 0 1/2 ν _e electron neutrino	<0.17 MeV/c ² 0 1/2 ν _μ muon neutrino	<15.5 MeV/c ² 0 1/2 ν _τ tau neutrino	91.2 GeV/c ² 0 1 Z ⁰ Z boson
	0.511 MeV/c ² -1 1/2 e electron	105.7 MeV/c ² -1 1/2 μ muon	1.777 GeV/c ² -1 1/2 τ tau	80.4 GeV/c ² ±1 1 W [±] W boson
	Leptons			Gauge Bosons

Standard model:

- No lepton flavor violation

Physics Motivation

Lepton flavor violation: $\mu^+ \rightarrow e^+ e^- e^+$

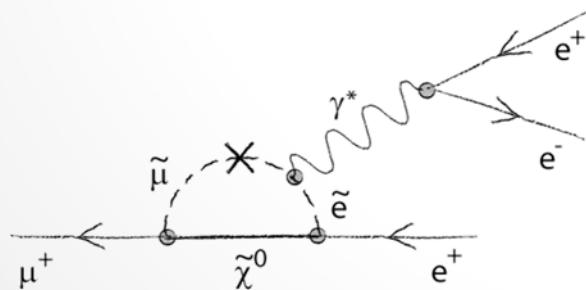
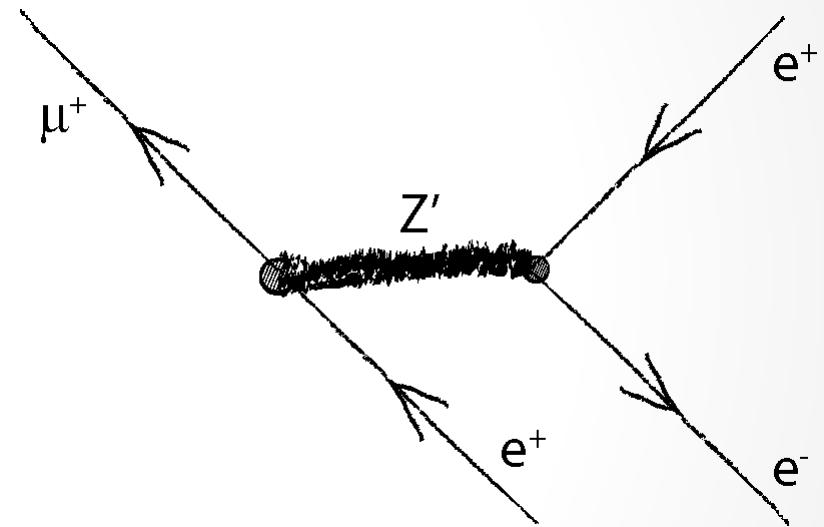


Standard model:

- No lepton flavor violation, but:
 - Neutrino mixing
 - Branching ratio $< 10^{-50} \rightarrow$ unobservable

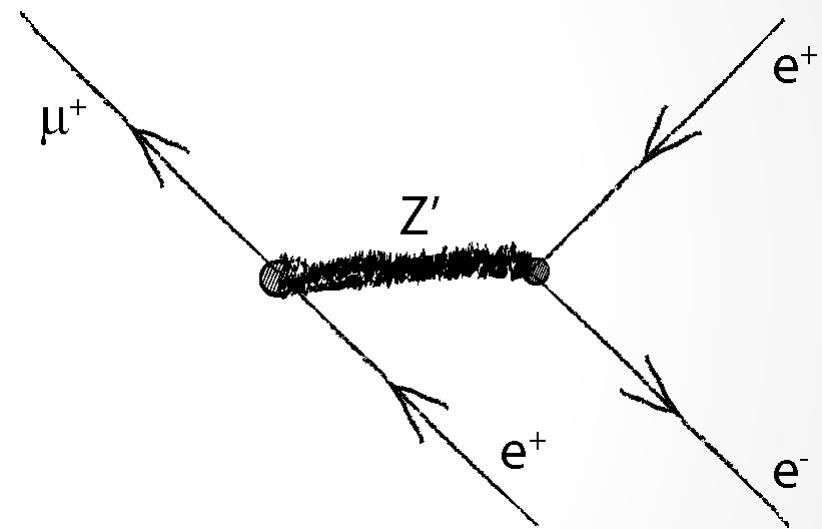
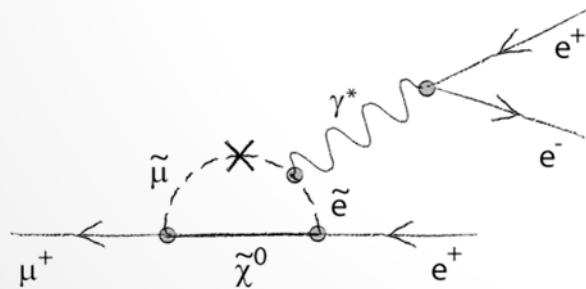
The Mu3e Signal

- $\mu \rightarrow eee$ rare in SM
- Enhanced in:
 - Super-symmetry
 - Grand unified models
 - Left-right symmetric models
 - Extended Higgs sector
 - Large extra dimensions



The Mu3e Signal

- $\mu \rightarrow eee$ rare in SM
- Enhanced in:
 - Super-symmetry
 - Grand unified models
 - Left-right symmetric models
 - Extended Higgs sector
 - Large extra dimensions

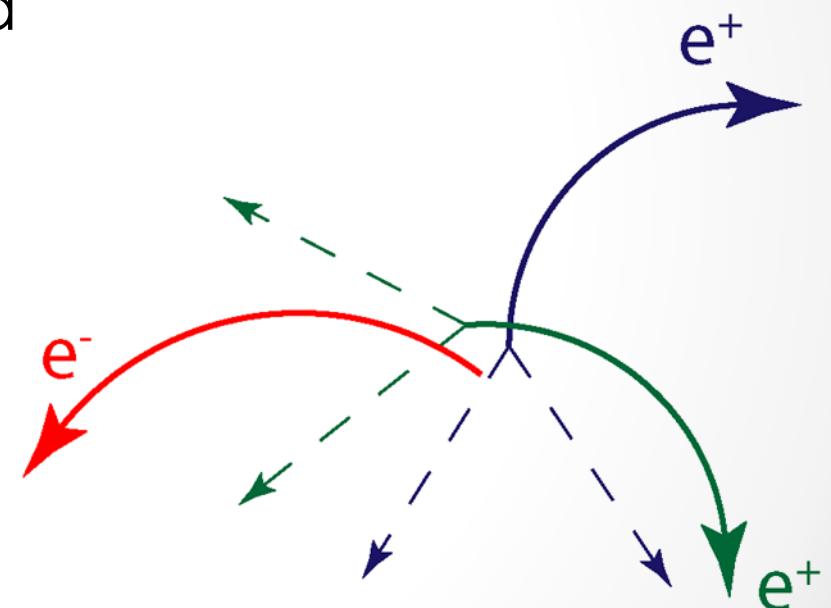


- Rare decay ($BR < 10^{-12}$, SINDRUM)
- For $BR \mathcal{O}(10^{-16})$
 - $> 10^{16}$ muon decays
 - **High decay rates $\mathcal{O}(10^9 \text{ muon/s})$**

The Mu3e Background

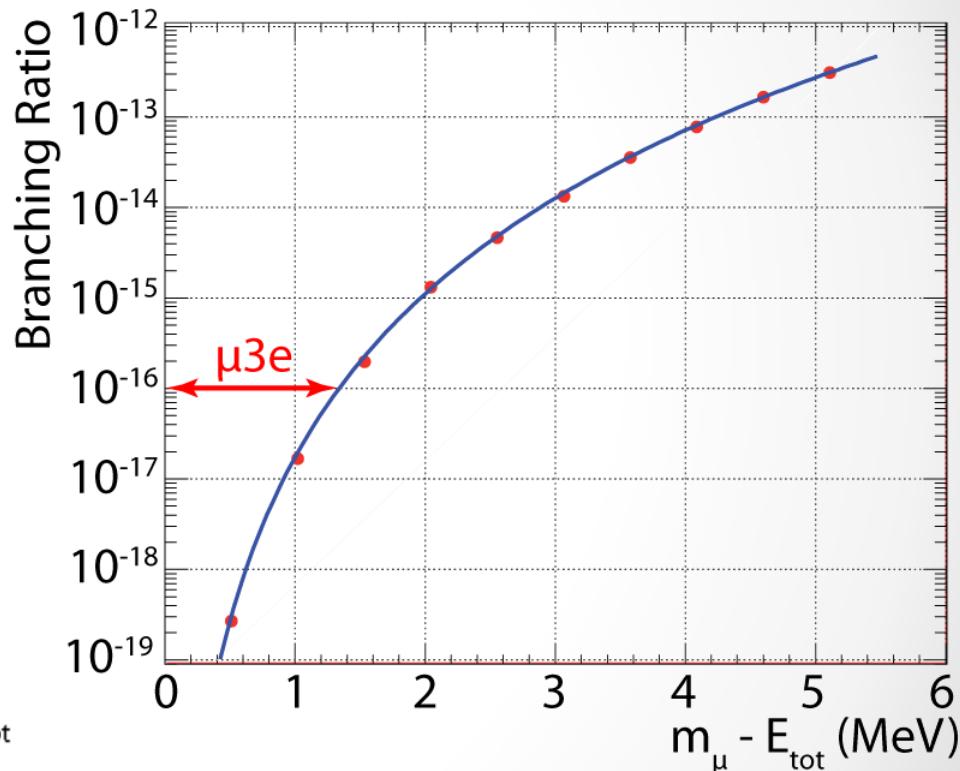
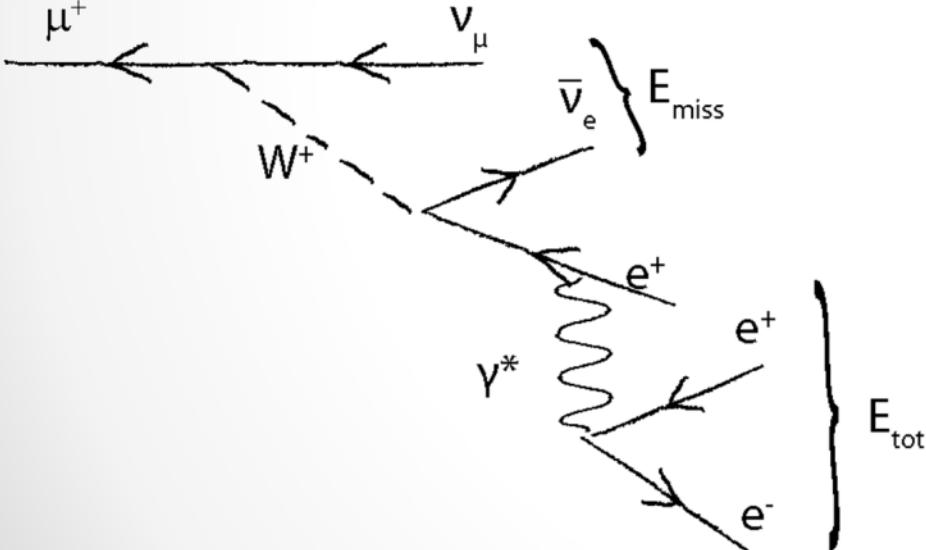
- Combinatorial background
 - $\mu^+ \rightarrow e^+vv$ & $\mu^+ \rightarrow e^+vv$ & e^+e^-
 - many possible combinations

- Good time and
- Good vertex resolution required



The Mu3e Background

- $\mu^+ \rightarrow e^+ e^- e^+ \nu \bar{\nu}$
 - Missing energy (ν)
 - **Good momentum resolution**



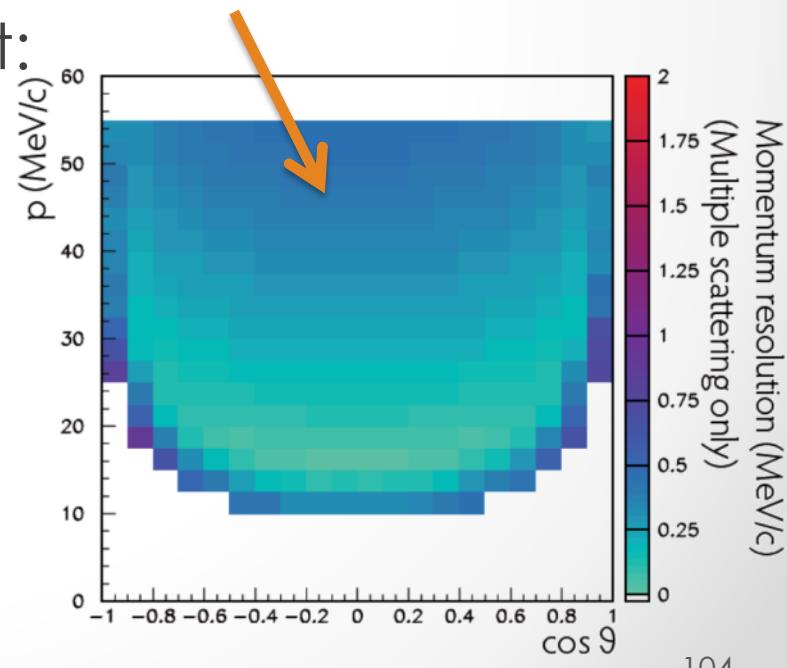
(R. M. Djilkibaev, R. V. Konoplich,
Phys.Rev. D79 (2009) 073004)

Challenges

- High rates
- Good timing resolution
- Good vertex resolution
- Excellent momentum resolution
- Extremely low material budget

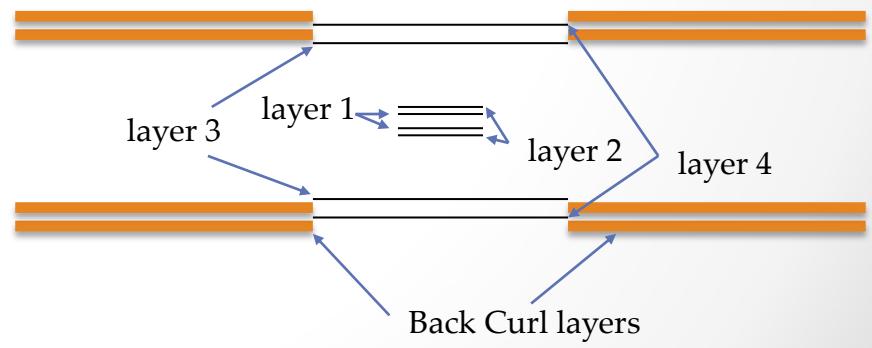
Challenges

- High rates: $10^9 \mu/\text{s}$
- Good timing resolution: 100 ps
- Good vertex resolution: $\sim 100 \mu\text{m}$
- Excellent momentum resolution: $\sim 0.5 \text{ MeV}/c^2$
- Extremely low material budget:
 - $1 \times 10^{-3} X_0$ (Si-Tracker Layer)
- **HV-MAPS** spectrometer
 - 50 μm thin sensors
 - $B \sim 1 \text{ T}$ field
- + Timing detectors

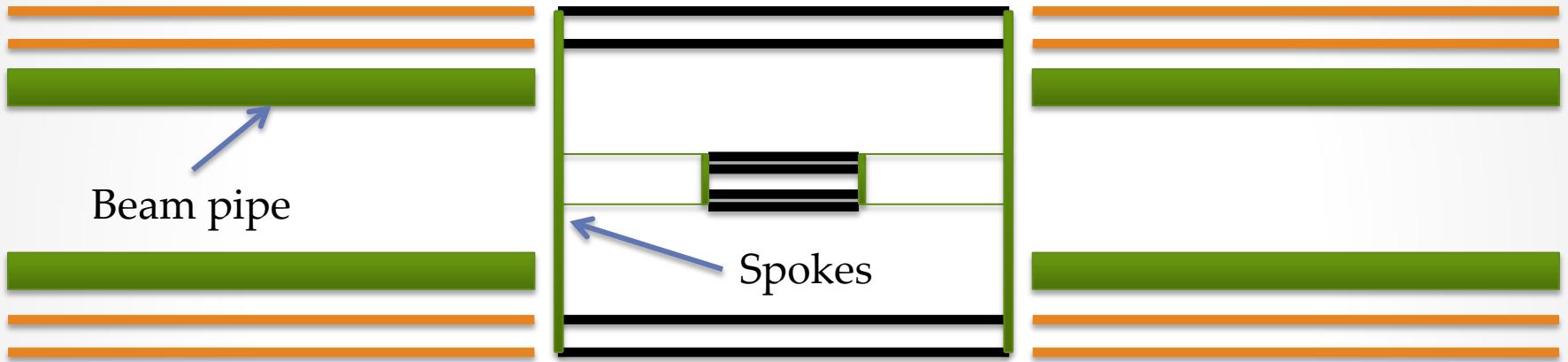


Si-Layer Rad Length

- Radiation length per layer
 - 2x 25 μm Kapton
 - $X_0 = 1.75\text{e-}4$
 - 15 μm thick aluminum traces (50% coverage)
 - $X_0 = 8.42\text{e-}5$
 - 50 μm Si MAPS
 - $X_0 = 5.34\text{e-}4$
 - 10 μm adhesive
 - $X_0 = 2.86\text{e-}5$
- Sum: $8.22\text{e-}4$ (x4 layers)
 - For $\Theta_{\min} = 22.9^\circ$
 - $X_0 = 21.1\text{e-}4$



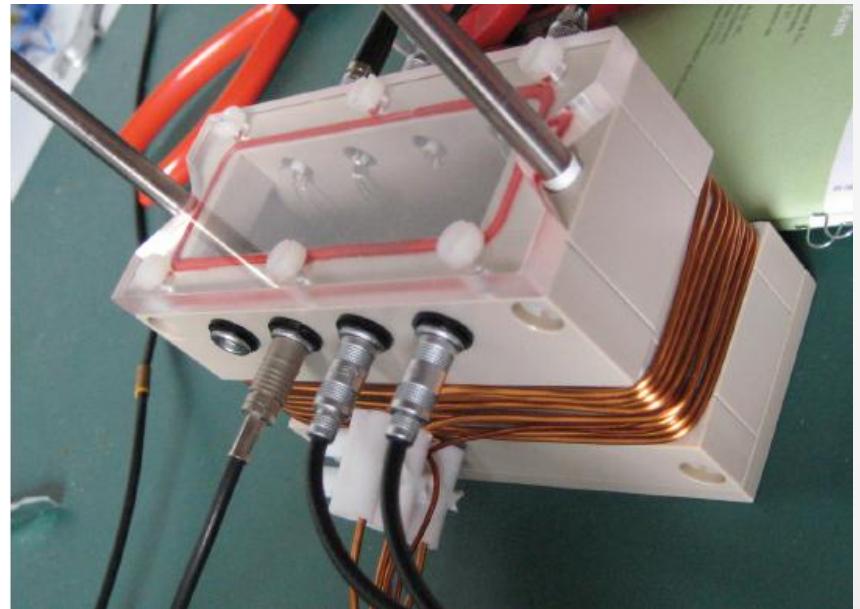
Frame Support



- Support design light weight
 - Spokes combine all separate modules
 - Connected by metal beams
 - ... running in bushings

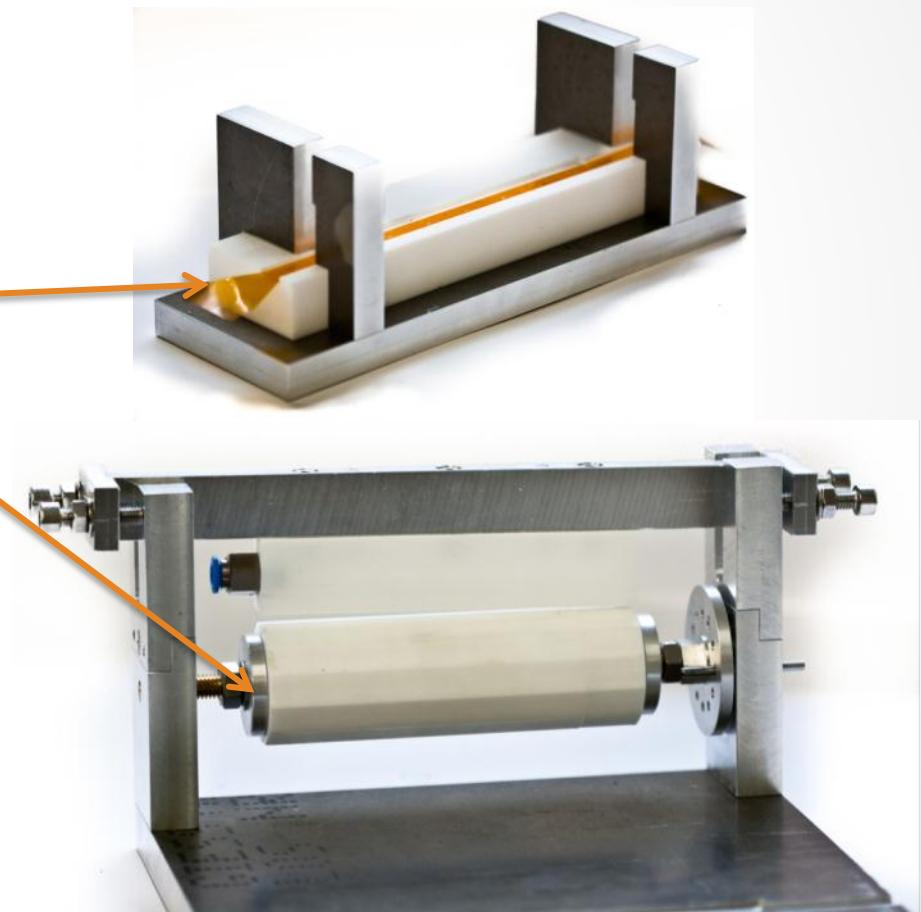
Cooling

- 2 m² silicon detector
- Up to 200mW/cm²
- ≤ 4 kW cooling
- 60 °C maximum
- Gaseous helium
- Laminar flow
- Tests:
 - Inductive heating
 - Aluminum foil



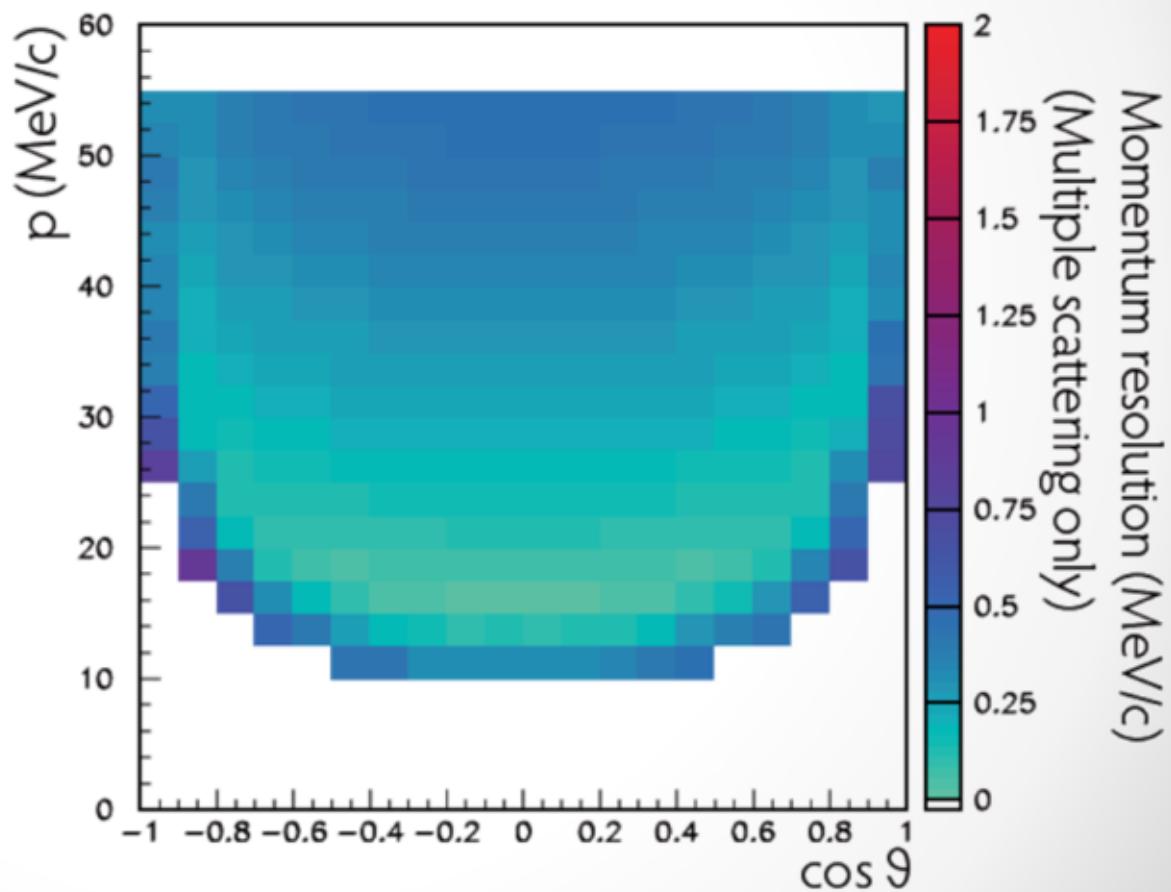
Tools

- Kapton-Frame tools:
 - Sensor on Flex print
 - Gluing groove
 - Vacuum lift
 - Tools are tested with
 - 25 μm Kapton foil
 - 50 μm glass

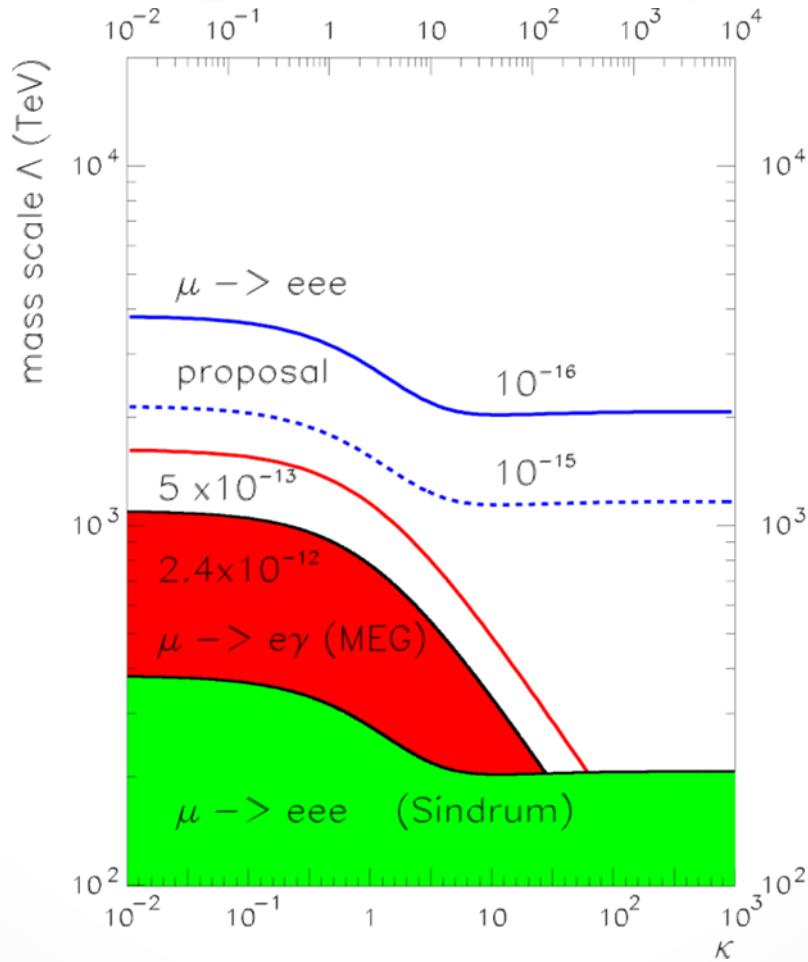


Momentum Resolution

- Multiple scattering only
- Current design:
 - 50 μm silicon
 - 50 μm Kapton
 - Helium gas cooling
 - 3 layer fiber tracker



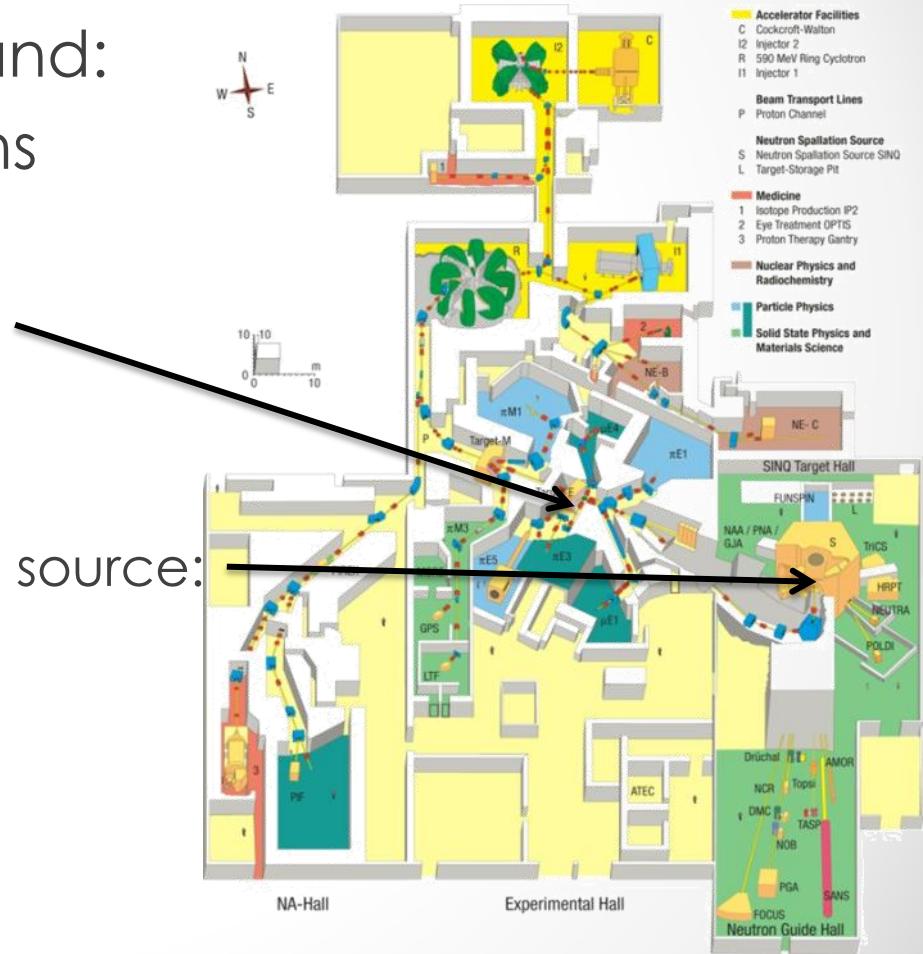
Mu3e complementary to MEG



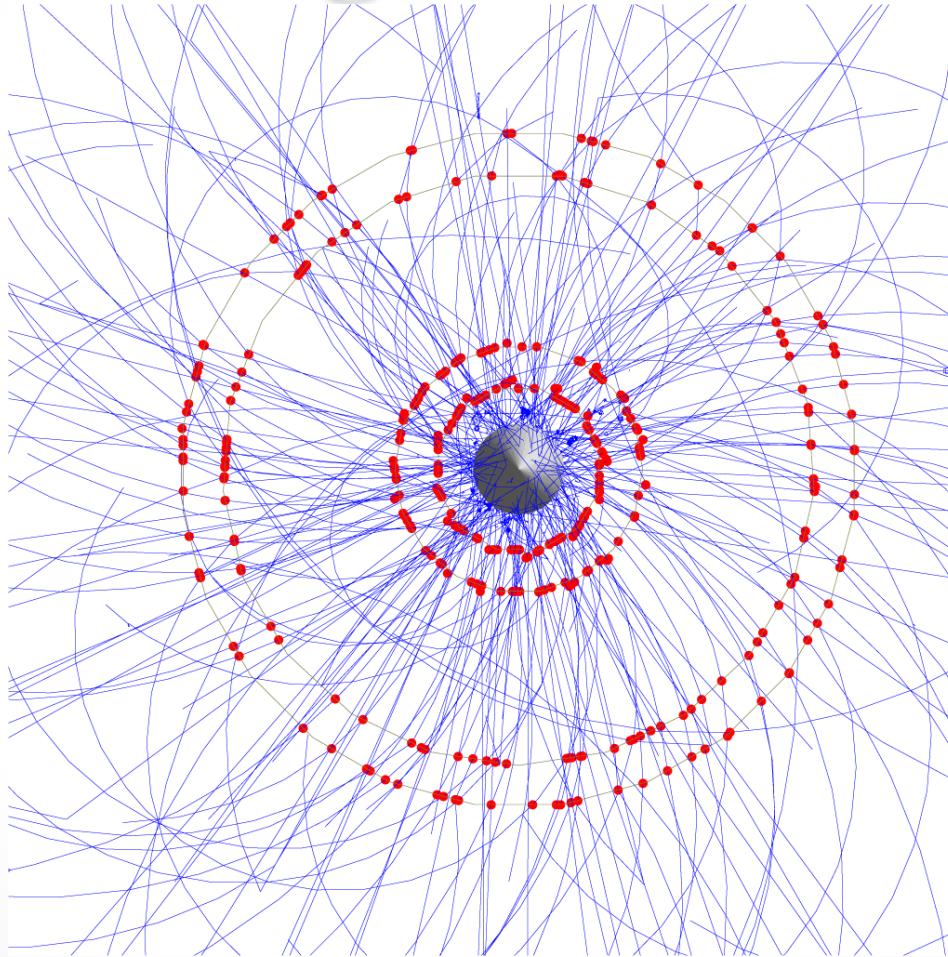
PSI μ -Beam

Paul Scherrer Institute Switzerland:

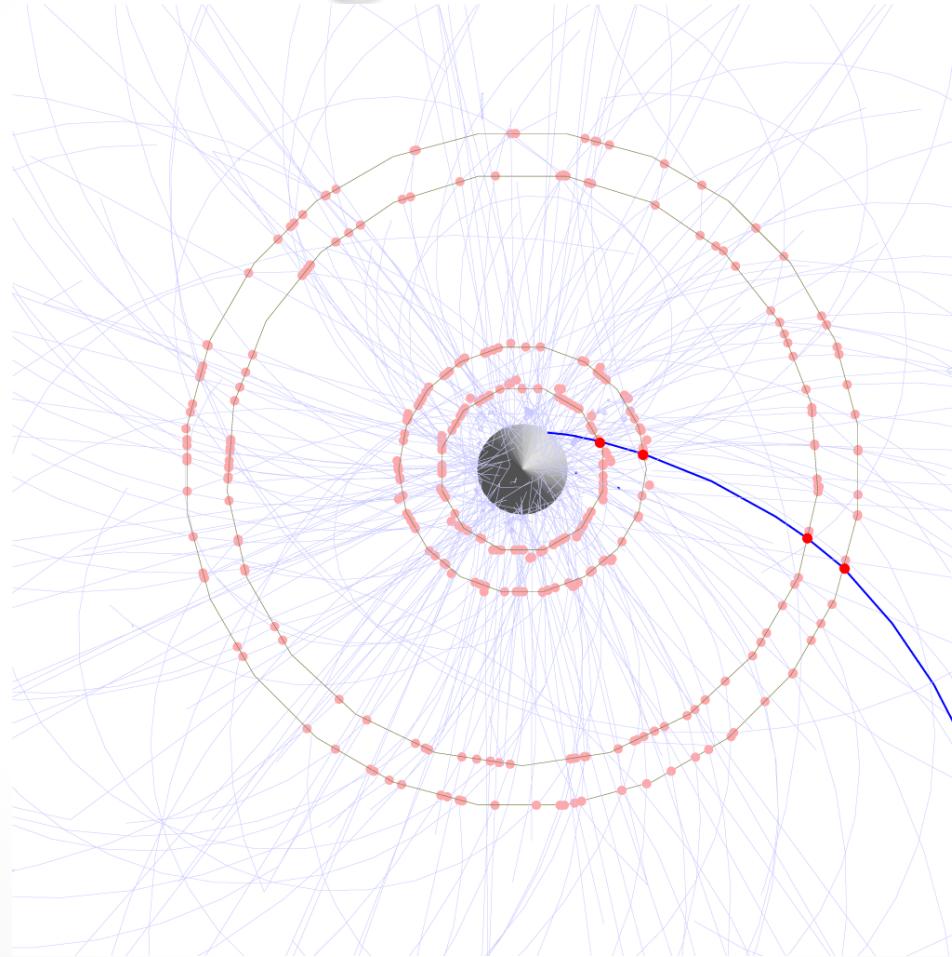
- 2.2 mA of 590 MeV/c protons
- Phase I:
 - Surface muons from target E
 - Up to a few $10^8 \mu/s$
- Phase II:
 - New beam line at the neutron source: HIMB project (2y application)
 - Several $10^9 \mu/s$ possible
 - $>10^{16}$ muon decays per year
 - BR 10^{-16} (90% CL)



Timing Detectors



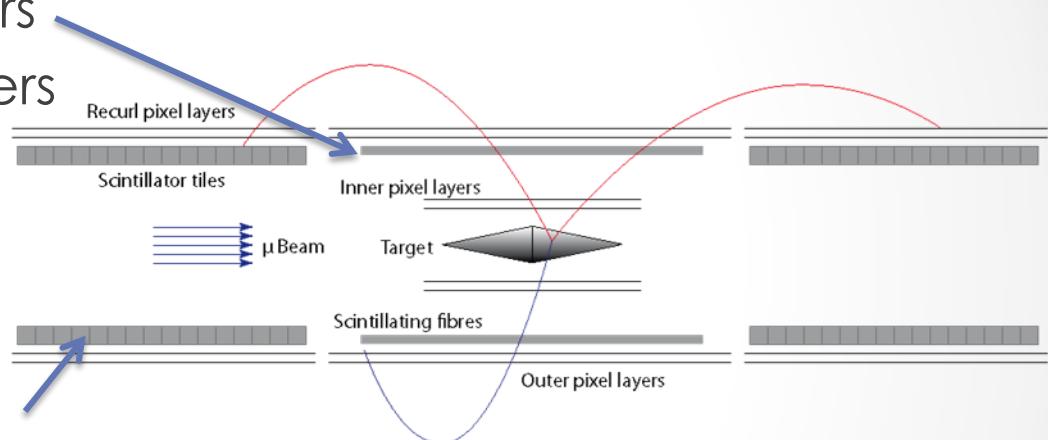
Timing Detectors



Timing Detectors

- Fiber hodoscope

- Before outer pixel layers
- 250 µm scintillating fibers
- SiPMs
- 1 ns resolution

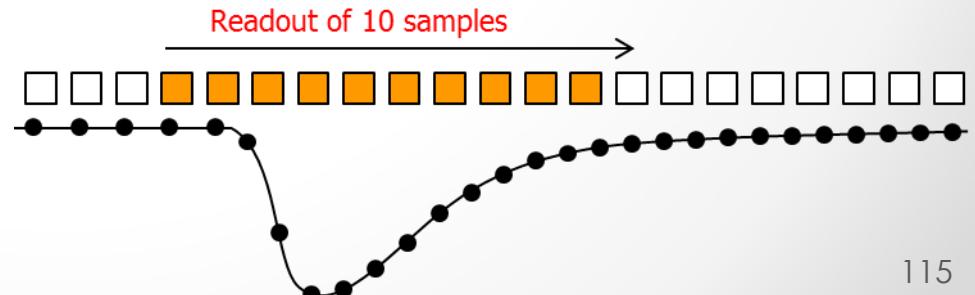
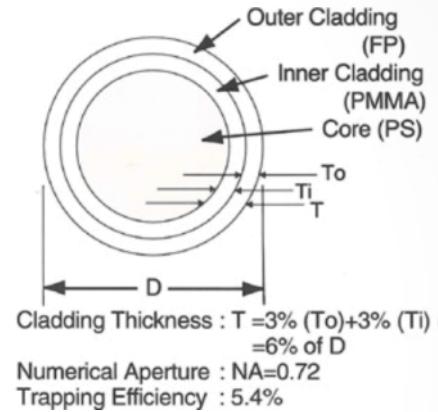


- Tile detector

- After recurl pixel layers
- 1x1 cm² scintillating tiles
- SiPMs
- 100 ps resolution

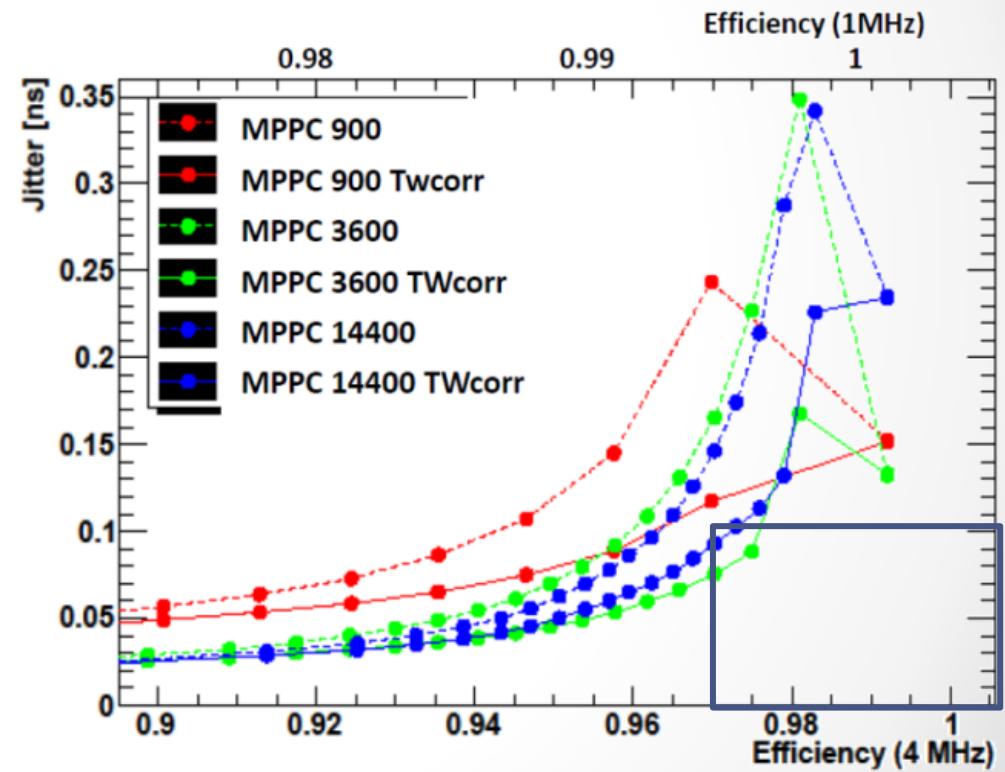
Fiber Hodoscope

- 250 μm scintillating fibers
 - Kuraray SCSF-81M
 - double cladding
 - 7500 in total
- Very high occupancies:
 - 24% in 50ns time frame
- Sampling readout
 - SiPM
 - DRS5 chip
 - From Stefan Ritt, PSI



Tile Detector

- 1x1 cm² scintillating tiles
 - O(7000)
- GosSip simulation
 - MPPC with 3600 pixels
 - 100 ps resolution (RMS)
 - 97% efficiency



Summary

- Mu3e searches for lepton flavor violation
- $> 10^{16} \mu$ -decays $\rightarrow \text{BR} < 10^{-16}$ (90% CL)
- Silicon tracker with $\sim 275\text{M}$ pixel
- HV-MAPS 50 μm thin
- Two SiPM based timing systems
- Prototypes look encouraging

