

# Elementaire quantum deeltjes: van trage foto's naar snelle silicium chips in LHC experimenten en 'Medipix/Timepix'

Erik H.M. Heijne



Nikhef

CERN EP Department Geneva  
Inst. of Experimental and Applied Physics  
aan de Czech Technical University in Prague  
Nikhef Amsterdam



Erik HEIJNE CERN EP Department

Quark Travel januari-maart 2025





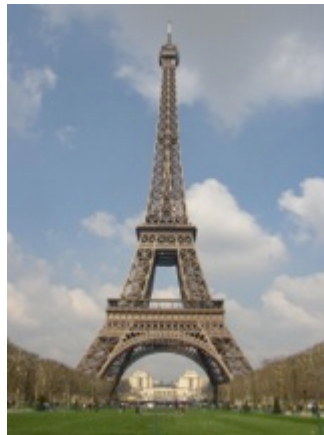
**Steen tijd**



**Brons tijd**



**IJzer tijd**



**Silicium tijd**

# Halfgeleiders Silicium / Silicon



Erik HEIJNE CERN EP Department

Quark Travel januari-maart 2025

Mendeleev ~1880

# Periodiek Systeem van Elementen

Halgeleiders

1	IA	1	IIA																	III A	IV A	V A	VIA	VII A	2
2		3	4																	5	6	7	8	9	10
3		11	12	III B	IV B	V B	VIB	VII B	VII			IB	IB	13	14	15	16	17	18						
4		19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36						
5		37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54						
6		55	56	*La	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86						
7		87	88	+Ac	104	105	106	107	108	109	110														

* Lanthanide Series	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
+ Actinide Series	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Legend - click to find out more...

- H - gas
- Li - solid
- Br - liquid
- Tc - synthetic
- Non-Metals
- Transition Metals
- Rare Earth Metals
- Halogens
- Alkali Metals
- Alkali Earth Metals
- Other Metals
- Inert Elements





zelf metingen doen met Timepix, vrijdagmorgen



# nanoelektronika vervangt nu fotografie

Vanaf 1950 wordt elektronika steeds kleiner  
toen ~cm nu nm → lengte x  $10^{-7}$  oppervlak x  $10^{-14}$

Kan je met zulke kleine diodes en versterkers  
dan ook elementaire deeltjes (elektron, proton,..)  
direkt en snel waarnemen en zelfs onderscheiden ?

= de wereld van deeltjes: 1 nm ~10 atomen

proton is 10 000 x kleiner dan een atoom

atoom eigenlijk praktisch leeg, volume kern ~  $10^{-12}$



# nanoelektronika vervangt nu fotografie

Vanaf 1950 wordt elektronika steeds kleiner  
toen ~cm nu nm → lengte x  $10^{-7}$  oppervlak x  $10^{-14}$

Kan je met zulke kleine diodes en versterkers  
dan ook elementaire deeltjes (elektron, proton,..)  
direkt en snel waarnemen en zelfs onderscheiden ?

= de wereld van deeltjes: 1 nm ~10 atomen

proton is 10 000 x kleiner dan een atoom

atoom eigenlijk praktisch leeg, volume kern ~  $10^{-12}$

als een vlieg in een kathedraal



# nanoelektronika vervangt nu fotografie

Vanaf 1950 wordt elektronika steeds kleiner  
toen ~cm nu nm → lengte x  $10^{-7}$  oppervlak x  $10^{-14}$

Kan je met zulke kleine diodes en versterkers  
dan ook elementaire deeltjes (elektron, proton,..)  
direkt en snel waarnemen en zelfs onderscheiden ?

= de wereld van deeltjes: 1 nm ~10 atomen

proton is 10 000 x kleiner dan een atoom

atoom eigenlijk praktisch leeg, volume kern ~  $10^{-12}$

In 1985 begon op CERN een groepje technici  
te leren hoe je zelf complexe chips kan ontwerpen

= deze werden eerst nog in Vlaanderen of Zwitserland gemaakt

maar vanaf 1992 al in Taiwan en later bij IBM-USA

= als je ze zelf bedenkt, doen die chips precies wat je wilt



Erik HEIJNE

een vlieg in een kathedraal

onzichtbare, elementaire deeltjes zien ?

*altijd via interacties met andere deeltjes in een medium*

fotografie met AgCl of AgBr moleculen in film

*Freya Blekman p.10*      Becquerel, Röntgen

~1900 condensatie van damp in een 'Wilson vat'

Wilson 'cloud chamber = nevel kamer'

elektrische impulsen in gasgevulde 'ionisatiekamer'

Geiger-Müller teller

licht-emissie in scintillatoren, via Cerenkov effect, etc

Hofstadter, Cerenkov,

→ 1950 gasbelletjes – spoor vorming in een bellenvat

Glaser

1967 elektrische signalen in gasgevulde 'dradenkamer'

Charpak – Sauli e.a.

1943 elektrische signalen in halfgeleider kristal

Pieter van Heerden, U. Utrecht AgCl

Bell Labs Ge; Oak Ridge Si; Philips Si dambord detector, etc.





Isolatoren: alle elektronen gebonden

→ keramische materialen, glas, ...

Geleiders: vol vrije elektronen

→  $\sim 10^{23}/\text{cm}^2$  in metalen: koper, aluminium, ijzer, ...

Halfgeleiders:

minder of meer elektronen  $n$  en 'gaten'  $p$

→ kan variëren tussen  $10^{11}$  en  $10^{23}/\text{cm}^2$

silicium, germanium, gallium-arsenide, ...

# Halfgeleiders Silicium / Silicon



Erik HEIJNE CERN EP Department

Quark Travel januari-maart 2025

# Halfgeleiders Silicium / Silicon

silicium is nu technisch  
de belangrijkste halfgeleider  
met heel veel toepassingen in elektronika

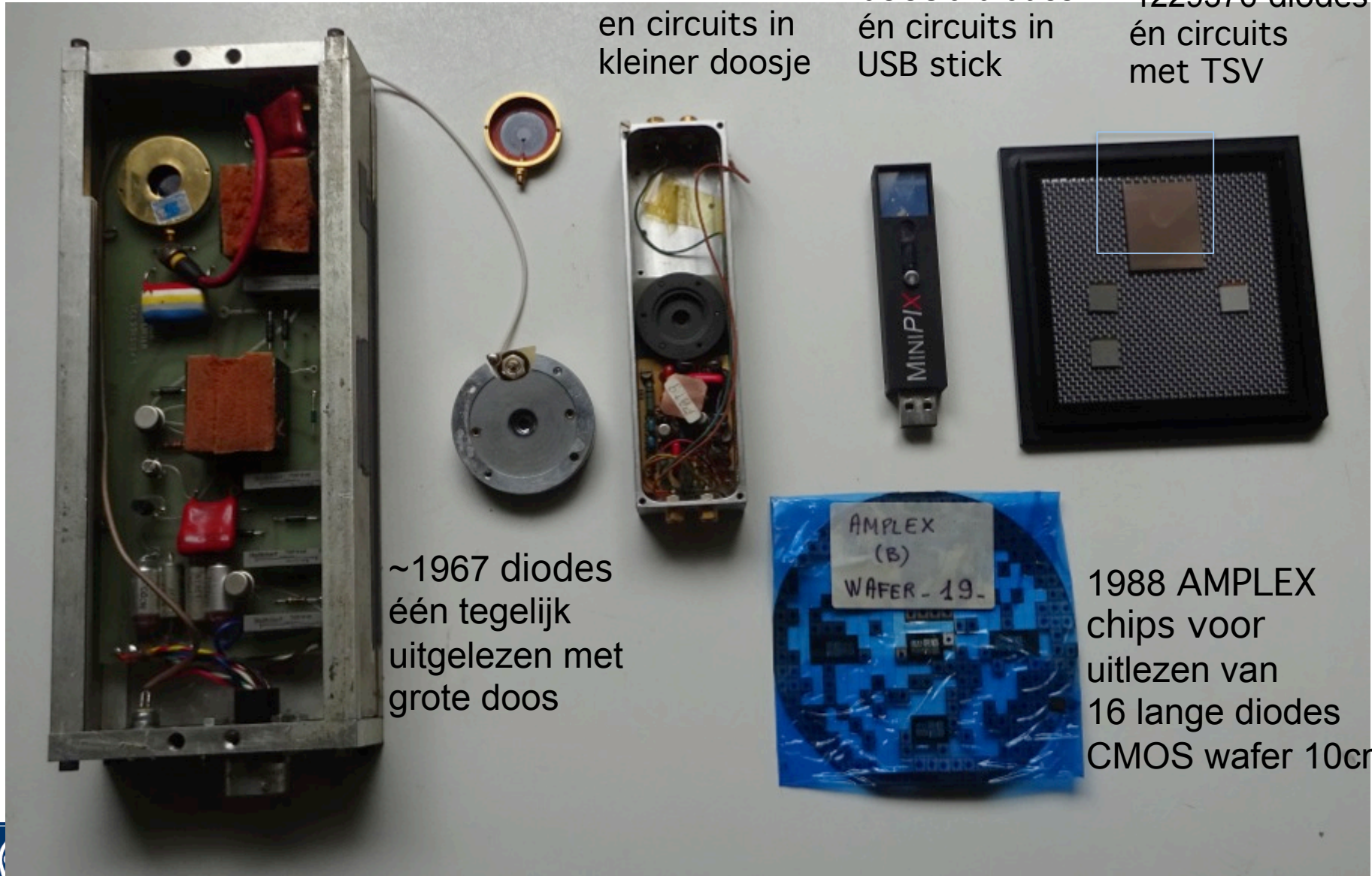
chips zitten overal in

halfgeleiders zijn 'handig' want je kan er  
de stroom in variëren met allerlei truukjes  
en ze zijn gevoelig voor licht en andere straling



# Si detektoren en elektronika in ons team 1970 - 2024

1978 2 diodes en circuits in kleiner doosje	2007 Timepix 65536 diodes én circuits in USB stick	2023 Timepix 4229376 diodes én circuits met TSV
---	---	--



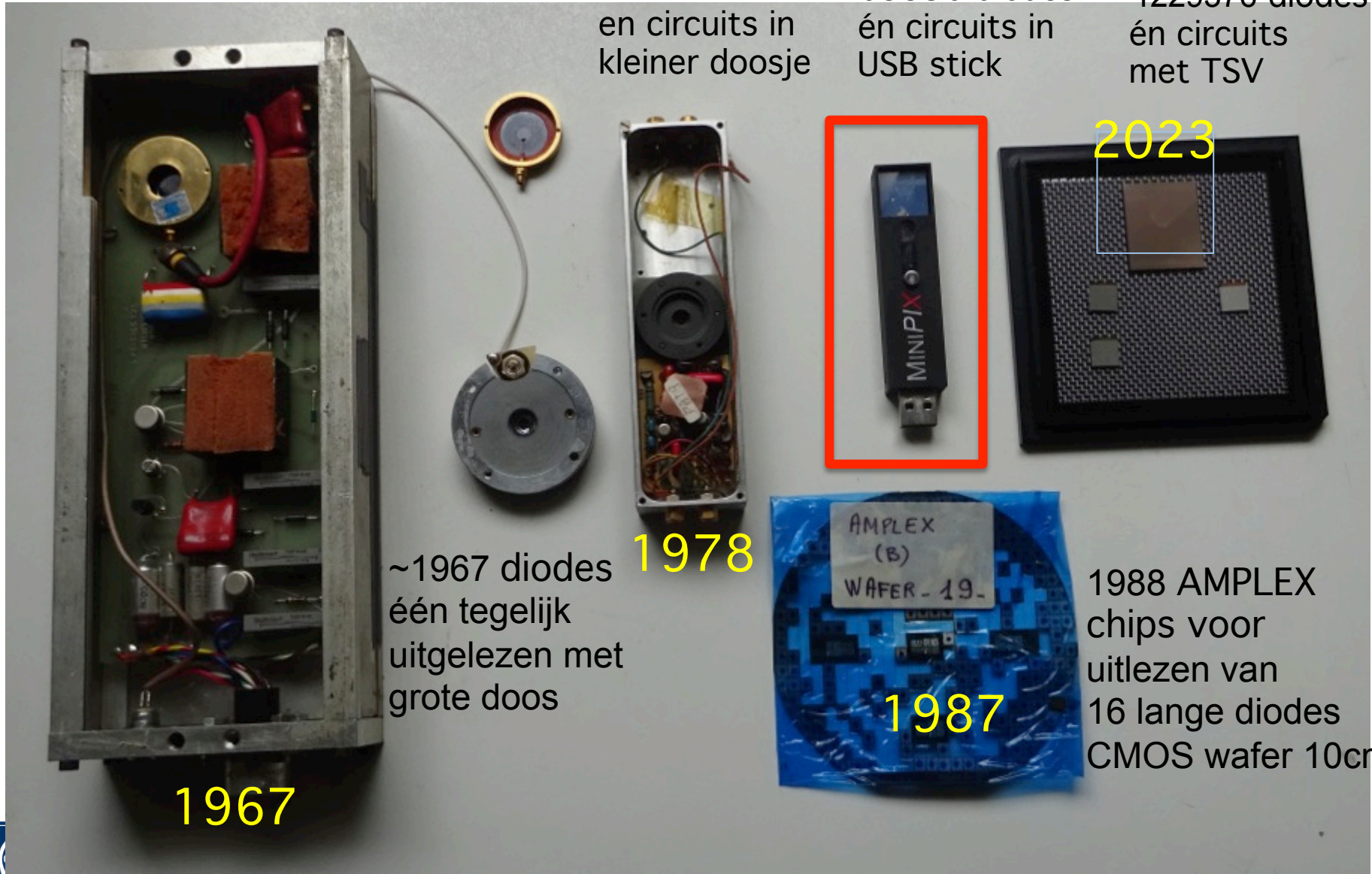
~1967 diodes  
één tegelijk  
uitgelezen met  
grote doos

1988 AMPLEX  
chips voor  
uitlezen van  
16 lange diodes  
CMOS wafer 10cm



# Si detektoren en elektronika in ons team 1970 - 2024

1978 2 diodes en circuits in kleiner doosje	2007 Timepix 65536 diodes én circuits in USB stick	2023 Timepix 4229376 diodes én circuits met TSV
---	---	--



~1967 diodes  
één tegelijk  
uitgelezen met  
grote doos

1978



1987

1988 AMPLEX  
chips voor  
uitlezen van  
16 lange diodes  
CMOS wafer 10cm





met signaal processing in elke pixel  
worden nieuwe toepassingen mogelijk

Timepix kan amplitude van het signaal meten in keV

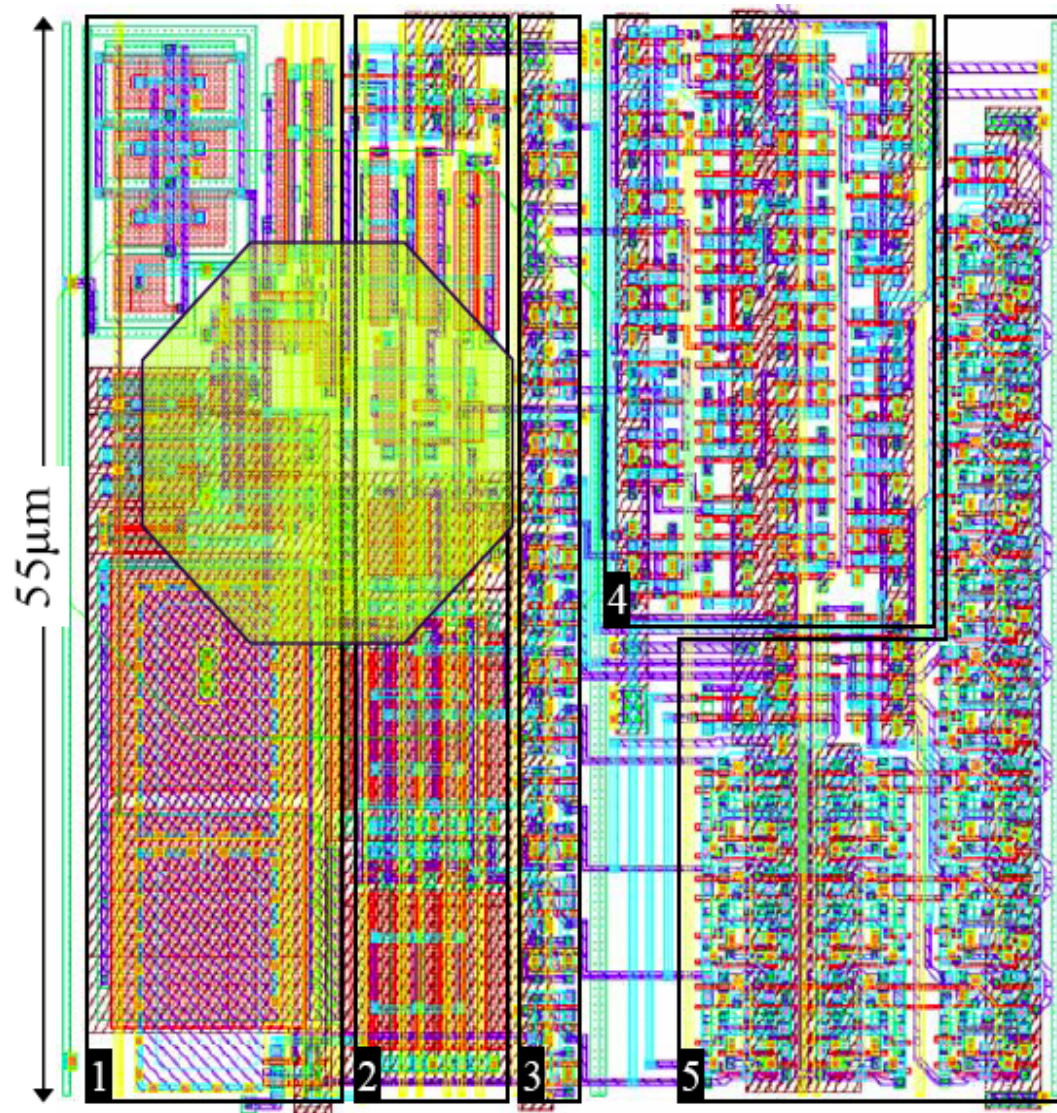
en ook de tijd van inval van het deeltje/quantum in ns

Timepix 2-3-4 kunnen alletwee onthouden, maar  
de EduPix (originele Timepix) alleen de één of de ander

Later nog iets over de werking van deze circuits



# 2007 1e Timepix: schakelingen in iedere pixel



ontwerper was  
Xavier LLOPART  
CERN

PhD proefschrift p. 107  
256x256 pixels  
40MHz klok geeft  
voor invallend quantum  
25ns tijds-bepaling  
en keV amplitude meting

1. versterker 'Charge Sensitive Ampli'
2. drempel , 4-bit regelbaar
3. 8-bitregister voor configuratie
4. ref klok & synchronisatie
5. 14-bit tel-register

~550 transistors

Quark Travel januari-maart 2025

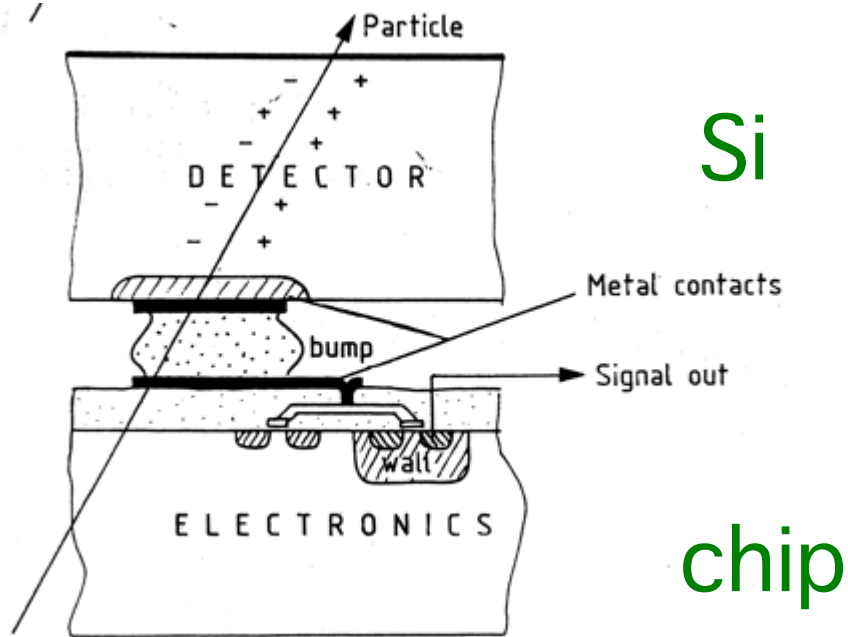




# 'Omega' hybride Si PIXEL SENSOR 1991

CERN : Campbell, Heijne

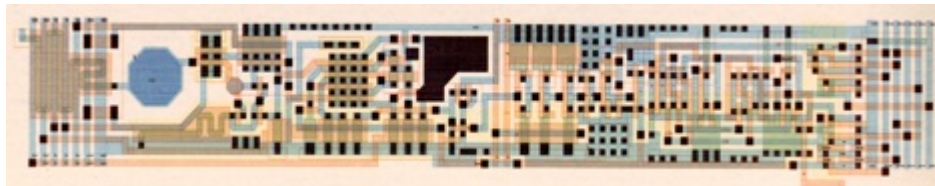
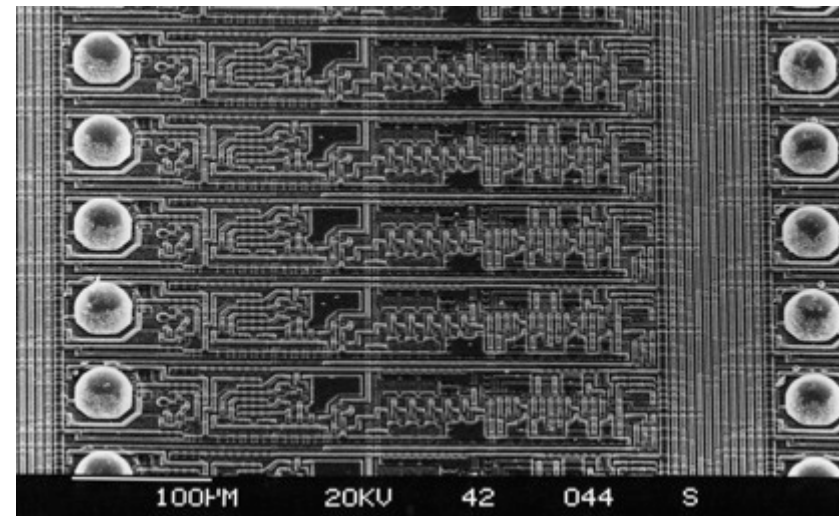
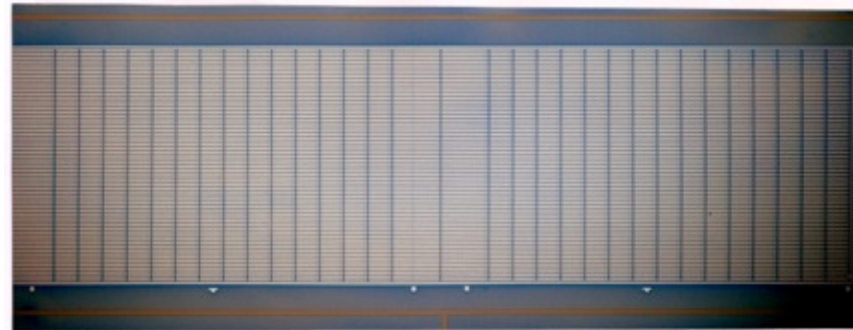
Sensor: Matrix van diodes  
geeft echt 2-dim beeld



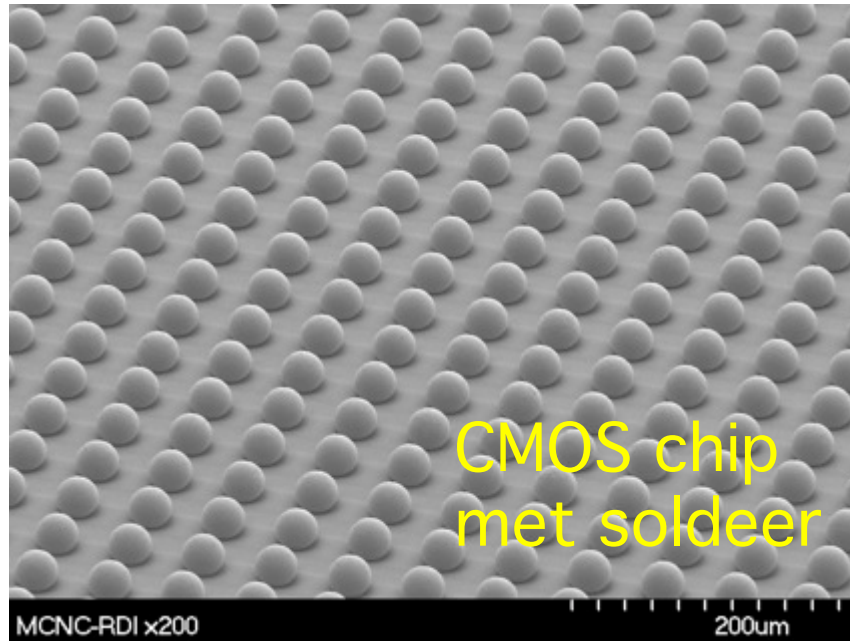
soldeer-bolletjes

+

elektronica voor signaal-verwerking

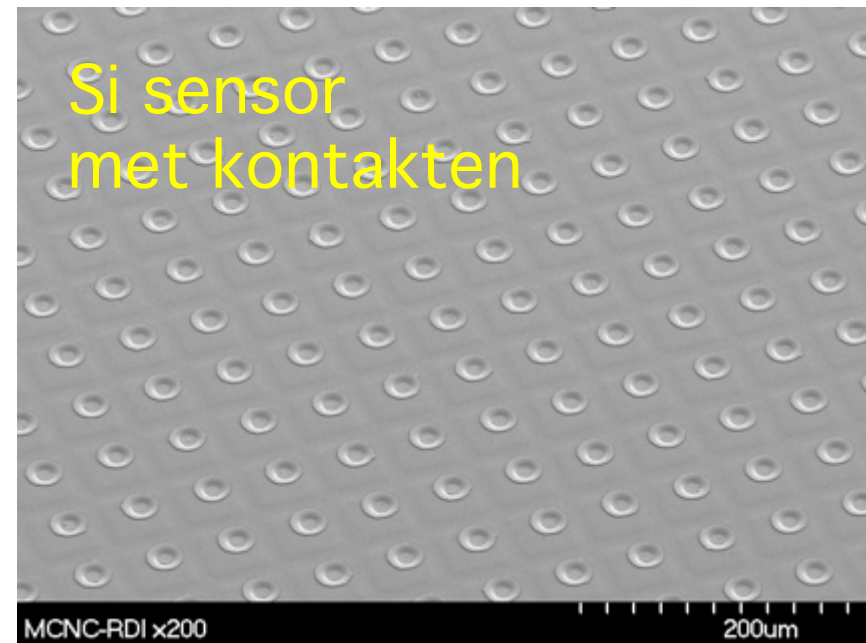


# 2001 hybride pixel detector Medipix2



SEM fotos gemaakt door  
MCNC-RDI, Durham NC – USA  
vóór de assemblage

PITCH 55  $\mu\text{m}$



MEDIPIX2 CERN 2001  
Campbell & Llopart  
256 kolommen x 256 rijen  
pixel 55  $\mu\text{m}$  x 55  $\mu\text{m}$



wat kunnen wij dan nu hiermee?





TIMEPIX instrument lijkt op een 'foto-emulsie' of 'Bellenvat'

H6 Pion Bundel 2007  
Inkomend van rechts



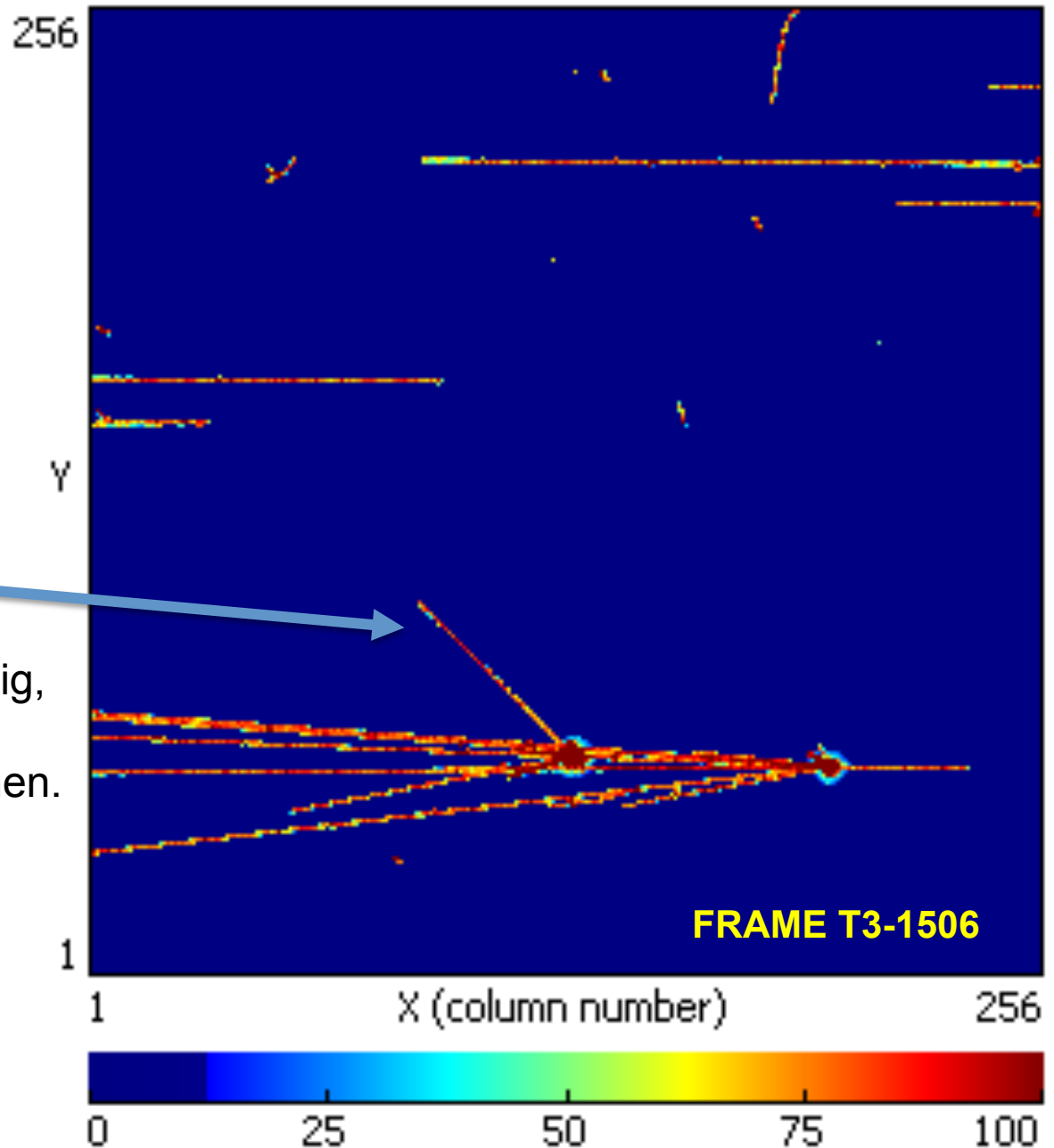
lopen de korte sporen  
naar voren of naar achter ?  
er zijn meer sensor vlakken nodig,  
of je zou de doorlooptijd van de  
signaal electronen moeten kennen.

Dit kan nu in de TPX2-3-4

metingen door Erik  
samen met John Idarraga



Erik HEIJNE CERN EP Departm



Spoorzoeken

Erik Heijne  
CERN EP Dept

Bellenvaten 1955 - 1985

Veel nieuwe deeltjes ontdekt

gedetailleerde registratie

maar slechts ~ één foto per seconde

11465

xM 465



ik bedacht oorspronkelijk de pixel detector  
om sporen in LHC experimenten te bepalen

ATLAS of CMS zijn één heel grote  
elektronische camera

Ze zitten vol met ICs: silicium chips

(IC Integrated Circuits)

ieder experiment >> één miljoen, zelf bedachte chips

later werden allerlei andere toepassingen mogelijk





# ATLAS binnenste Si pixel lagen



source: CERN- ATLAS

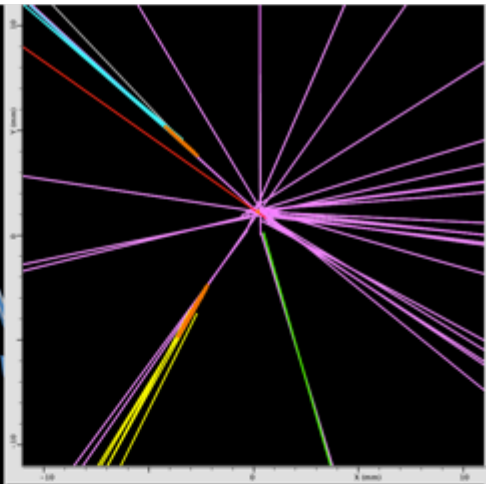
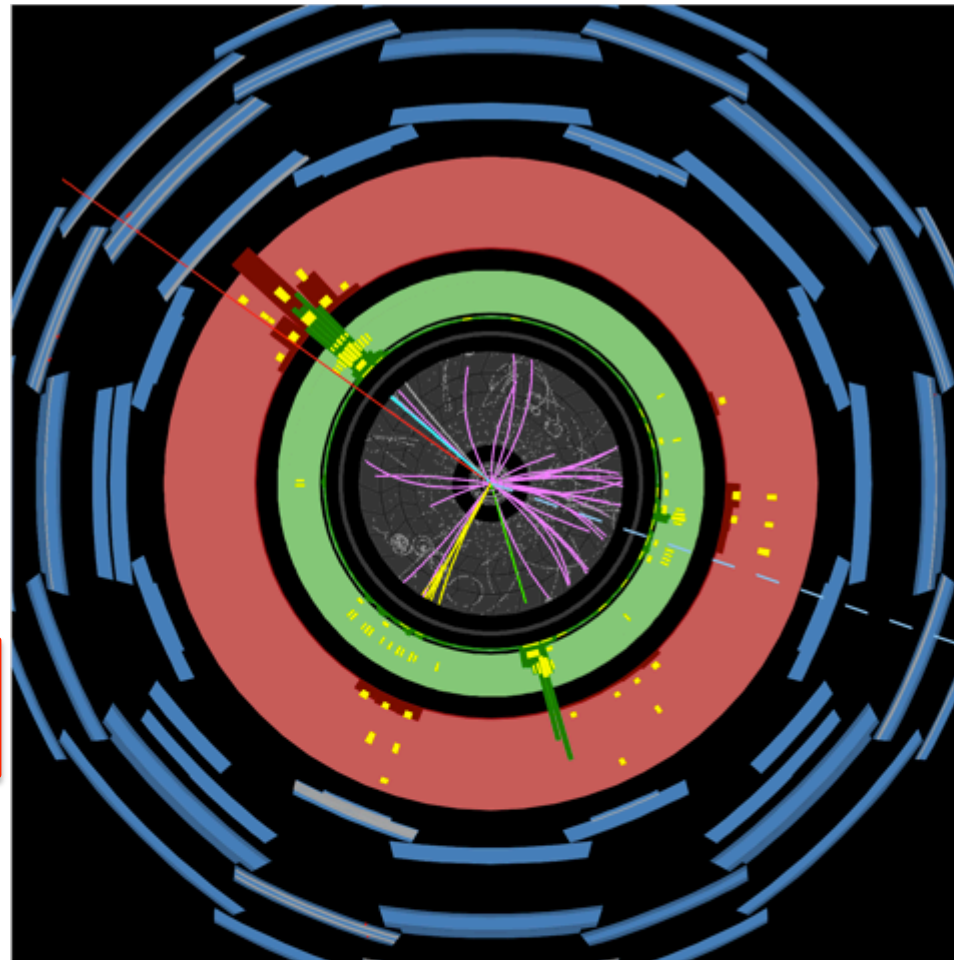
Imaging Now  
All Electronic  
with 3-D  
Reconstruction

Many Tracks  
and 2 “Jets”

40 million / sec

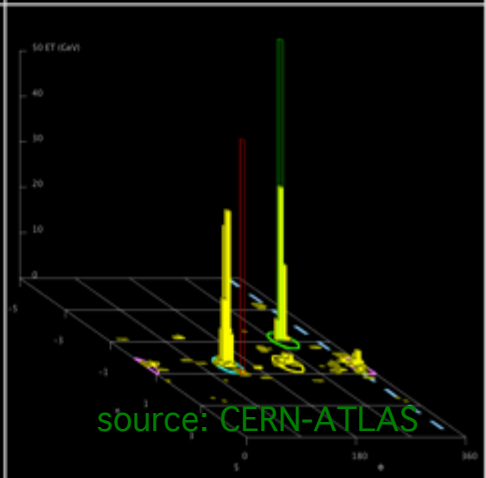
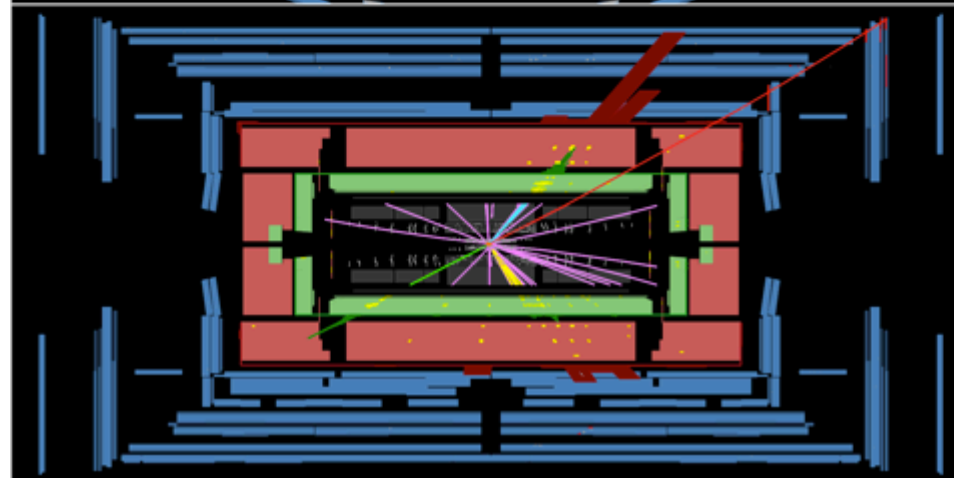
Secondary  
Vertex:  
a short-lifetime  
particle is a  
messenger for  
something new

see next  
blow-up



 **ATLAS**  
EXPERIMENT

Run Number: 160958, Event Number: 9038972  
Date: 2010-08-08 11:01:12 BST





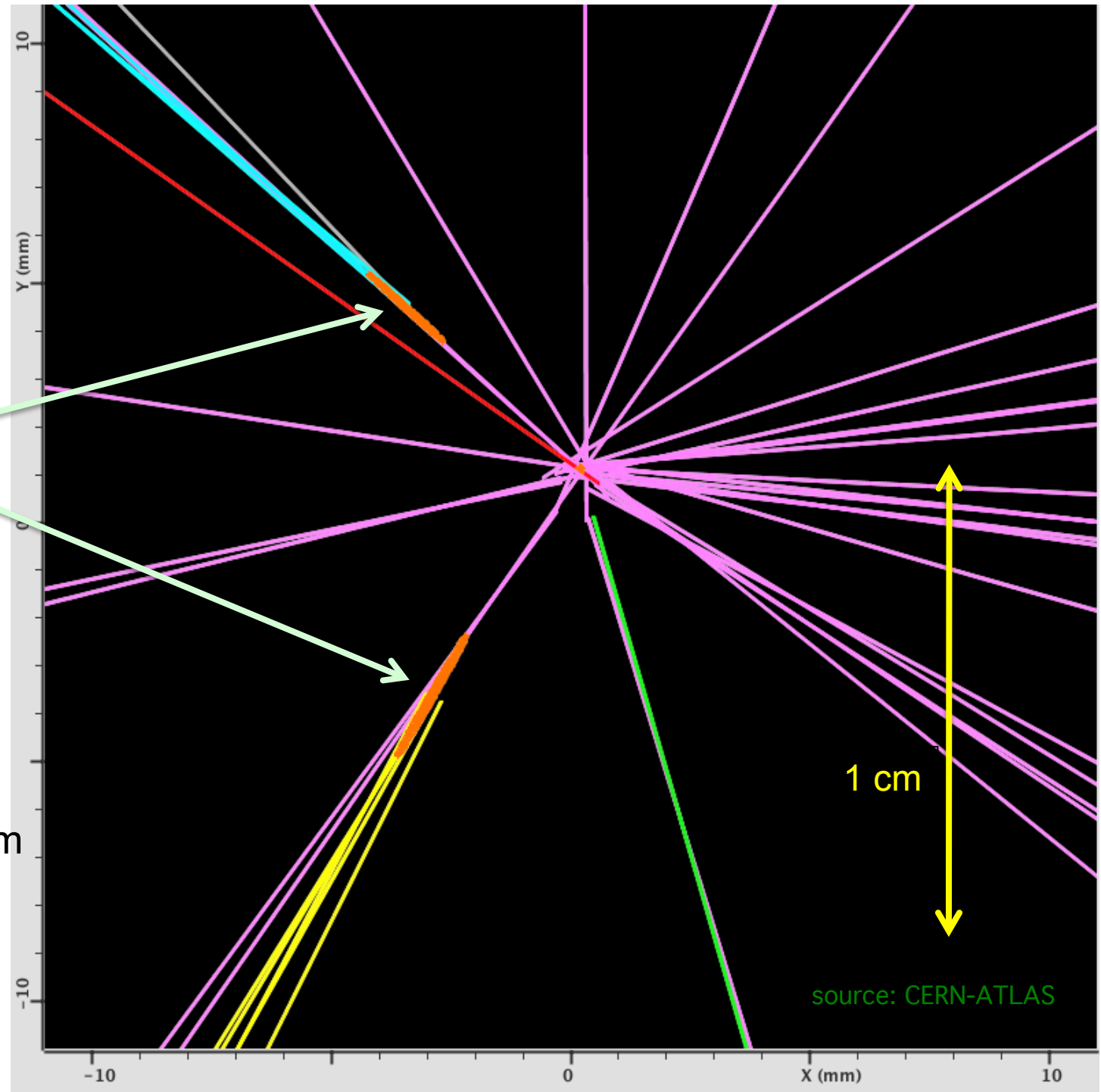
ATLAS

Blow-up

Details around  
Primary Vertex

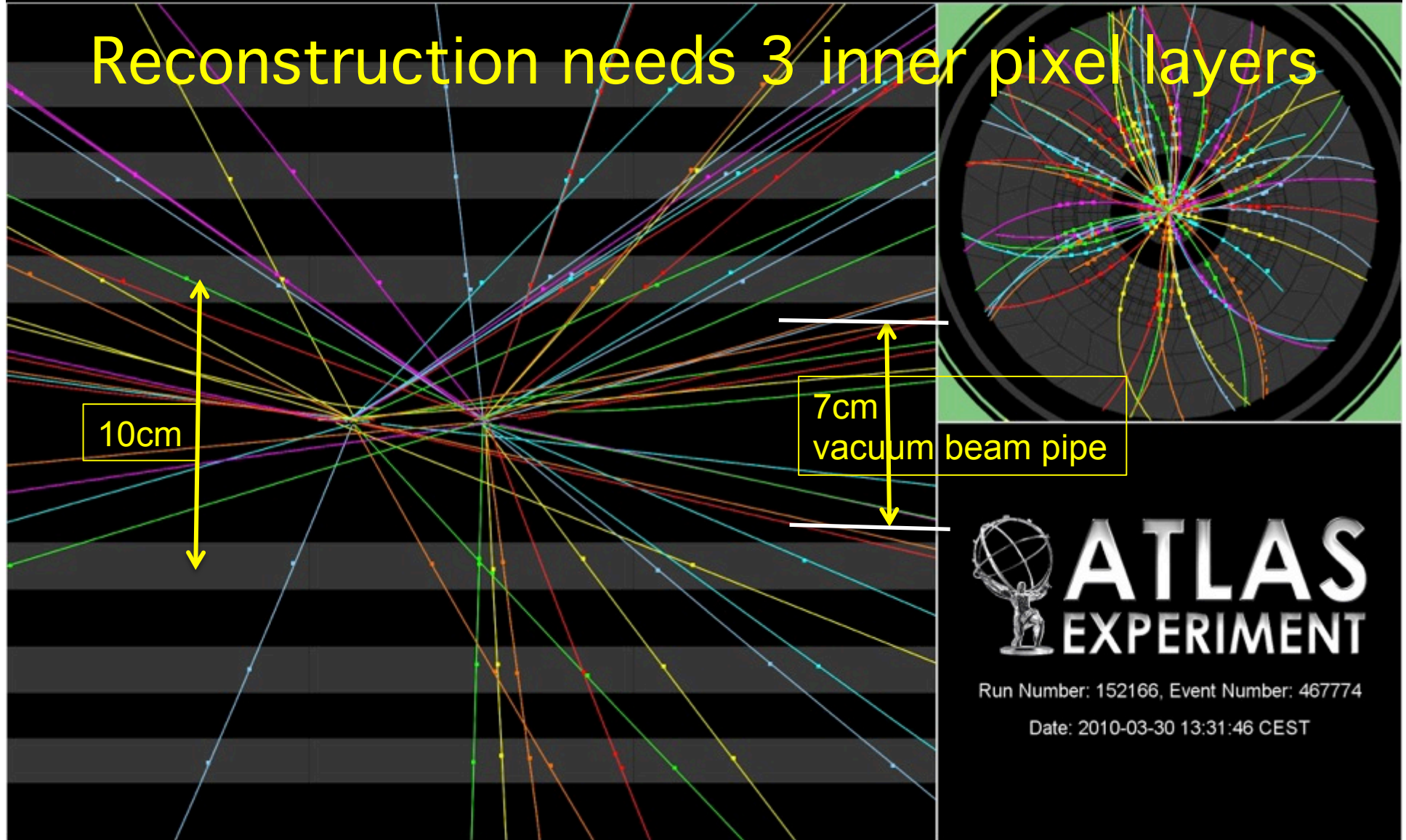
Two Secondary  
Vertices

Note scale  
1 cm  
all this is INSIDE  
beam pipe  $\varnothing$  7cm



# Collision Event at 7 TeV with 2 Pile Up Vertices

Reconstruction needs 3 inner pixel layers



10cm

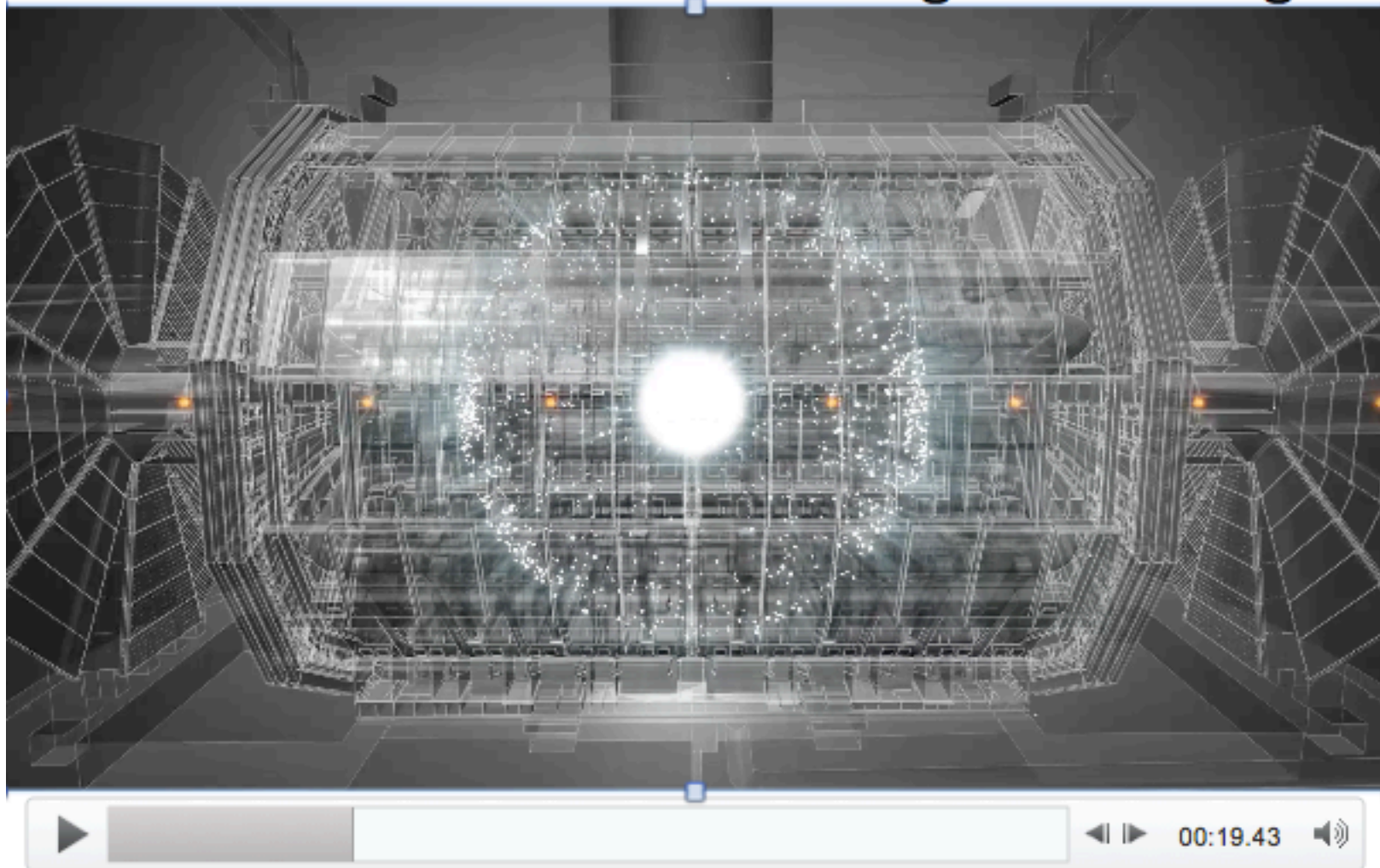
7cm  
vacuum beam pipe



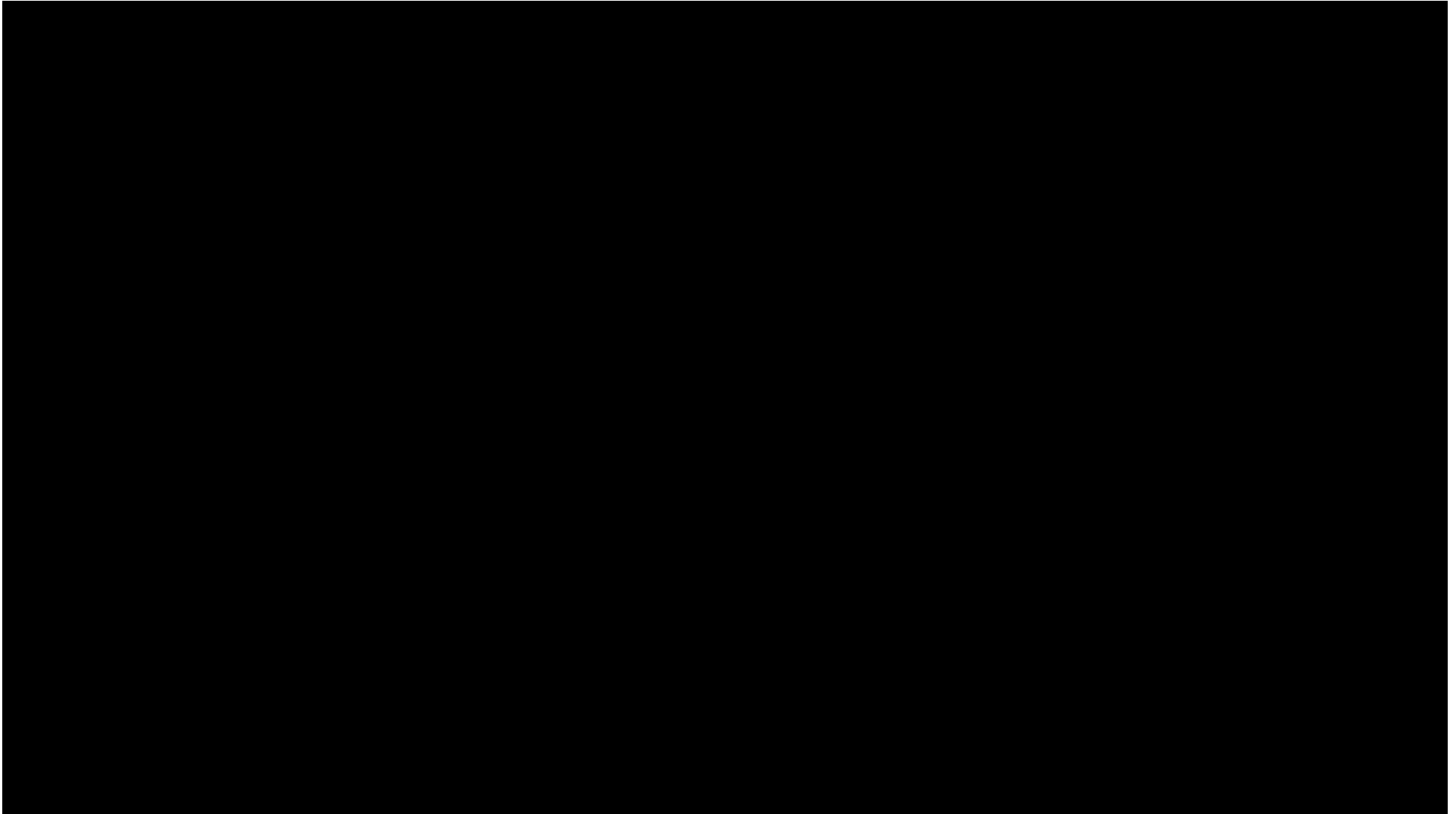
Run Number: 152166, Event Number: 467774

Date: 2010-03-30 13:31:46 CEST

# Animatie van Bunch Crossings en Timing



# Animatie van LHC bunch crossing en timing





# experimenteren met een Timepix



Erik HEIJNE CERN EP Department

Quark Travel januari-maart 2025

# TIMEPIX@school

From CERN's Large Hadron Collider to schools,  
a chip to revolutionize STEM Education.



CERN & Society  
Foundation



**Pinelopi Christodoulou**  
IEAP/CTU, Prague  
Advacam EduPix

Pinelopi Christodoulou - PhD student  
at Czech Technical University (CTU)  
in Prague. Biomedical engineering /  
CERN MEDIPIX collaboration



11 maart 2025

# TIMEPIX praktikum morgen, vrijdag

kompakte deeltjes afbeelding  
via USB aansluiting  
op Mac of PC

programma Pixet Advacam Praag



Pixet software

samenwerking met IEAP/CTU Praag

D.Turecek et al. JINST(2011) JINST 6 C01046 [doi:10.1088/1748-0221/6/01/C01046](https://doi.org/10.1088/1748-0221/6/01/C01046)

# kosmische deeltjes geven typische clusters in Medipix

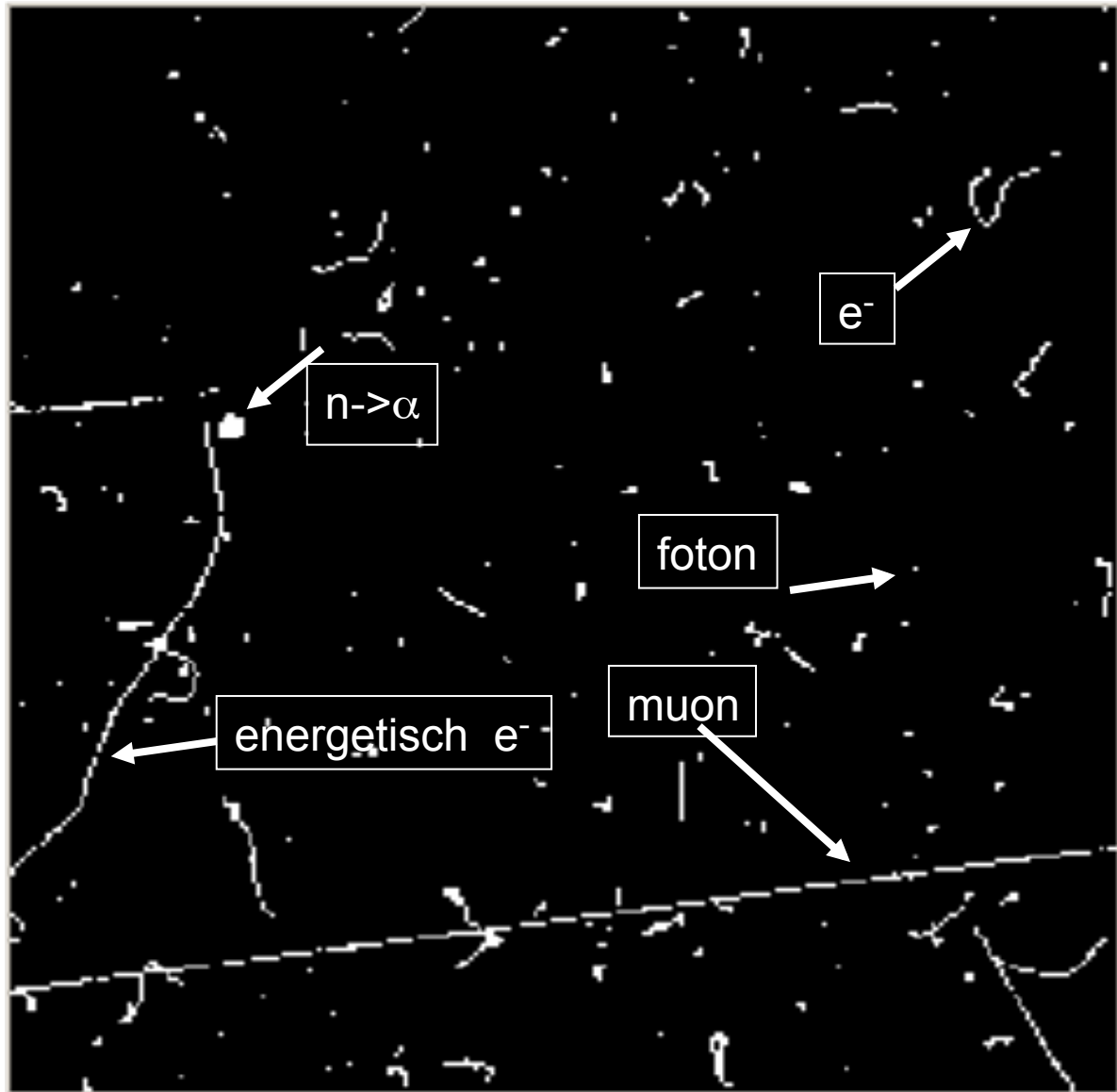
256 x 256 PIXELS

300  $\mu\text{m}$  dik Si

te gebruiken als  
dosis meter

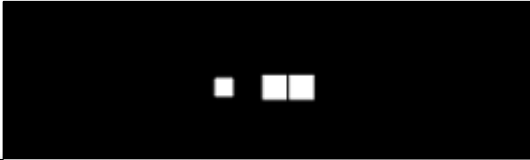
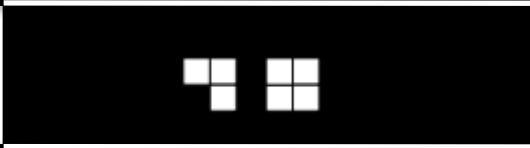
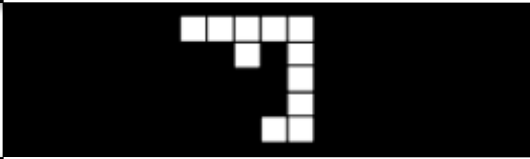
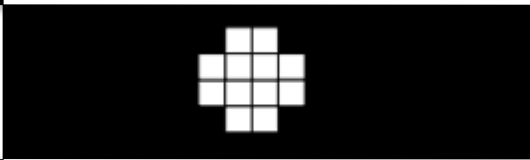
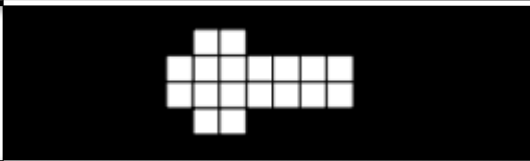
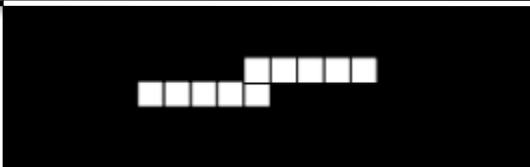
invallende  
quantum deeltjes  
met verschillende clusters  
elektronen  $e^-$   
fotonen  
neutronen via alpha  
min-ioniserend muon

regelbare belichting in  
ms – minuten-uren geeft  
groot dynamisch bereik





# de elementaire deeltjes maken ieder een karakteristiek cluster patroon in deze pixel detektor

1) Dot		Photons and electrons (10keV)
2) Small blob		Photons and electrons (~100keV)
3) Curly track		Electrons (MeV range)
4) Heavy blob		Heavy ionizing particles with short range (alpha particles,...)
5) Heavy track		Heavy energetic ionizing particles (MeV protons,nuclei, Fe, ...)
6) Straight track		Energetic light charged particles (MIP, Muons,...)

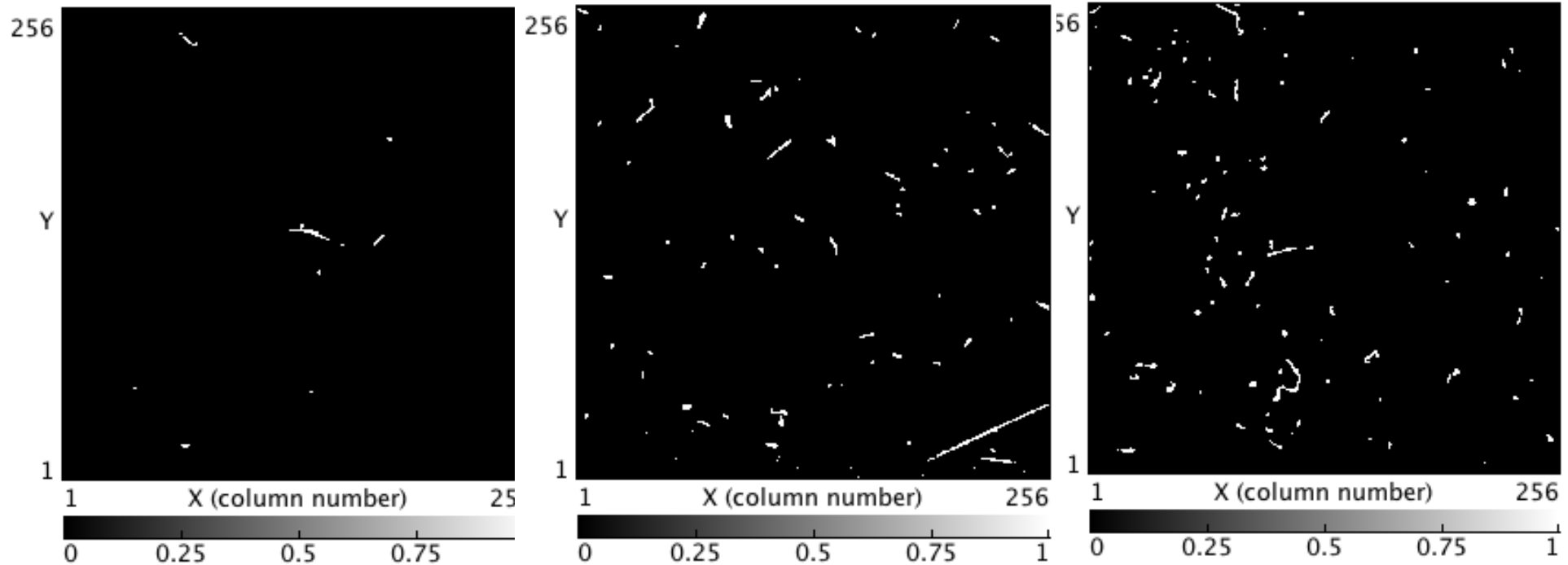


# aparte quanta zijn overal om ons heen

60s belichting op  
zee niveau

60s belichting op  
8km hoogte in vliegtuig

6s belichting met  
oud horloge (radium)



de stralings dosis overal steeds nog op een veilig, toelaatbaar niveau

# stralings-detektoren voor scholen en amateurs

## SESTRA kit

IEAP/CTU, Prague



Advacam Praag

MX-10 niet meer leverbaar



Jablotron & IEAP/CTU, Prague



AdvaCam & IEAP/CTU, Prague



CERN Timepix beelchip zit er in

<http://ardent.web.cern.ch/ardent/ardent.php>

# toepassingen van de CERN pixel technologie



Erik HEIJNE CERN EP Department

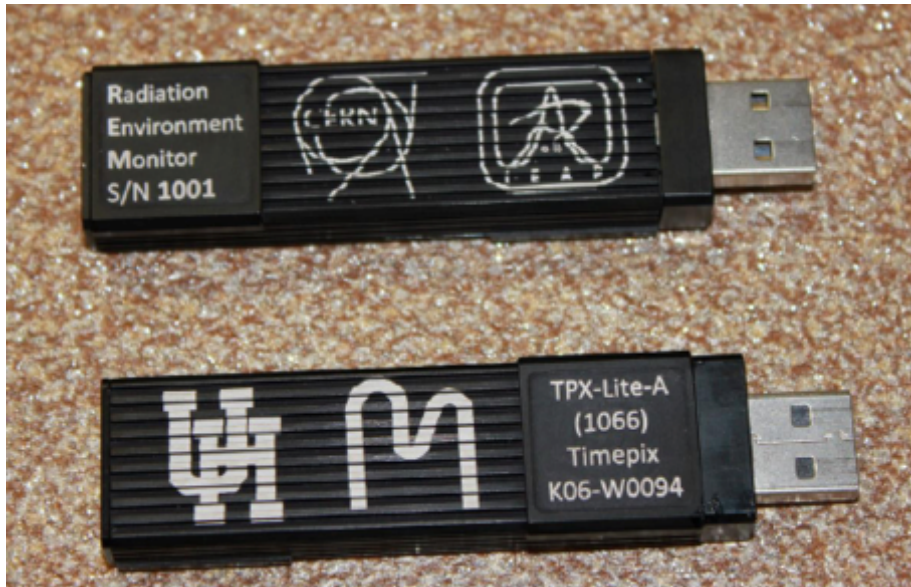
Quark Travel januari-maart 2025



# Metingen van straling in de ruimte met satellieten. NASA Artemis of in het 'International Space Station' IST



# Pixel chips voor dosimetrie in Int. Space Station ISS

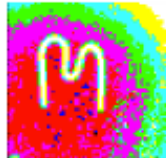
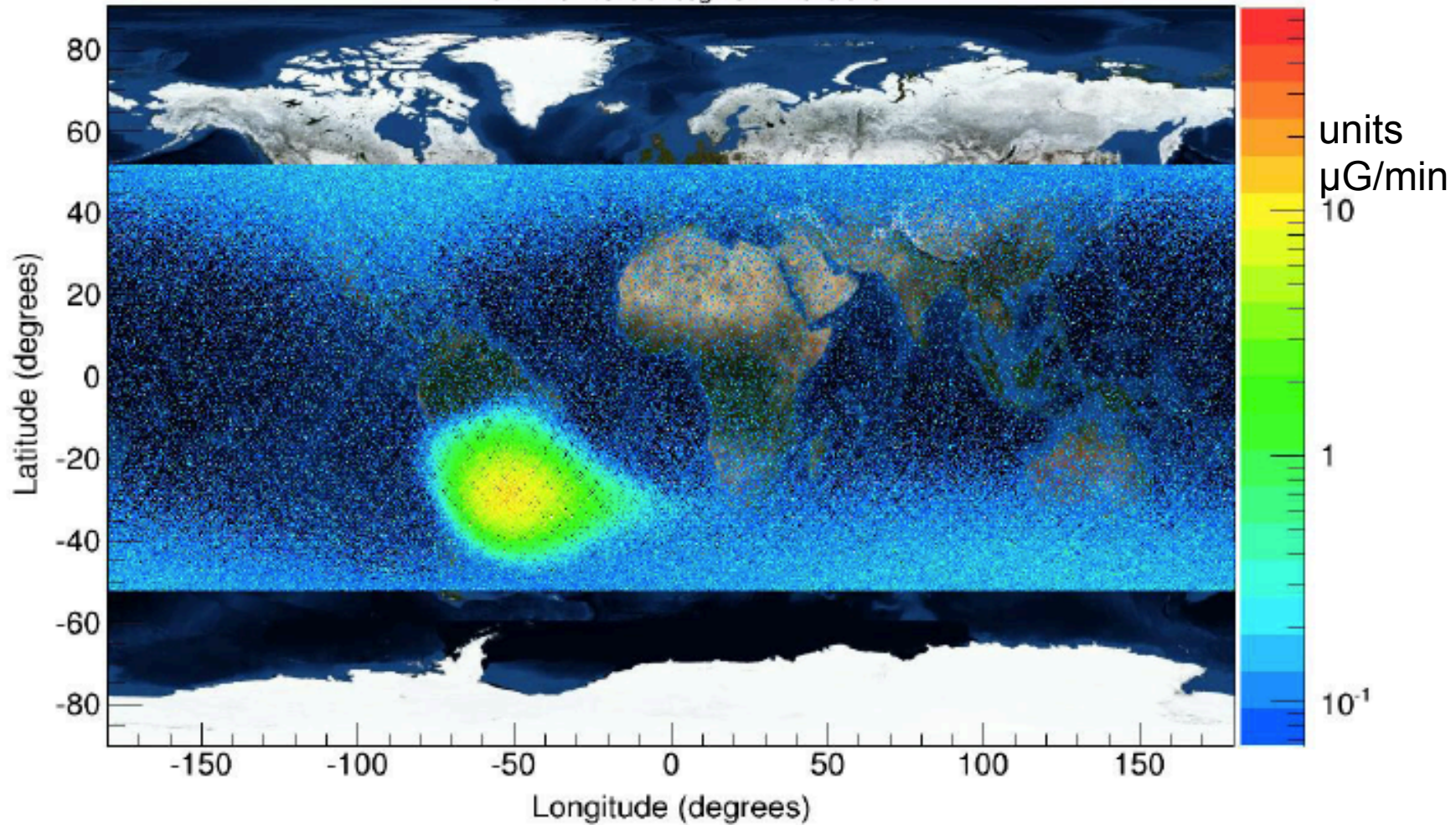


AMS grootste experiment....  
Pixel chip wel het kleinste

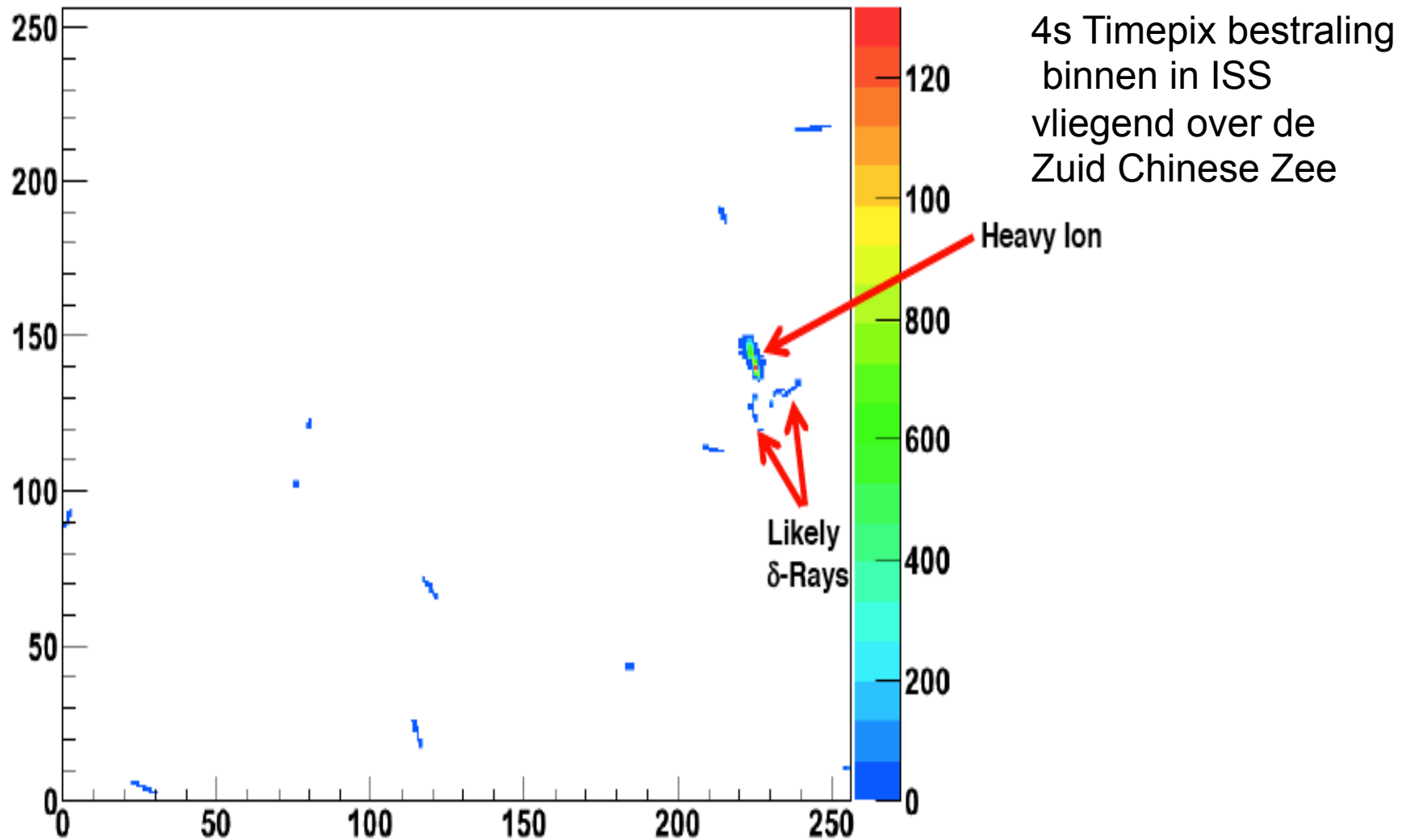


# stralingsmetingen in het Int Space Station ISS

REM Orbital Dose Rate Map ( $\mu\text{Gy}/\text{min}$ )  
D03-W0094 (S/N 1007)  
GMT 2012/320 through GMT 2013/045

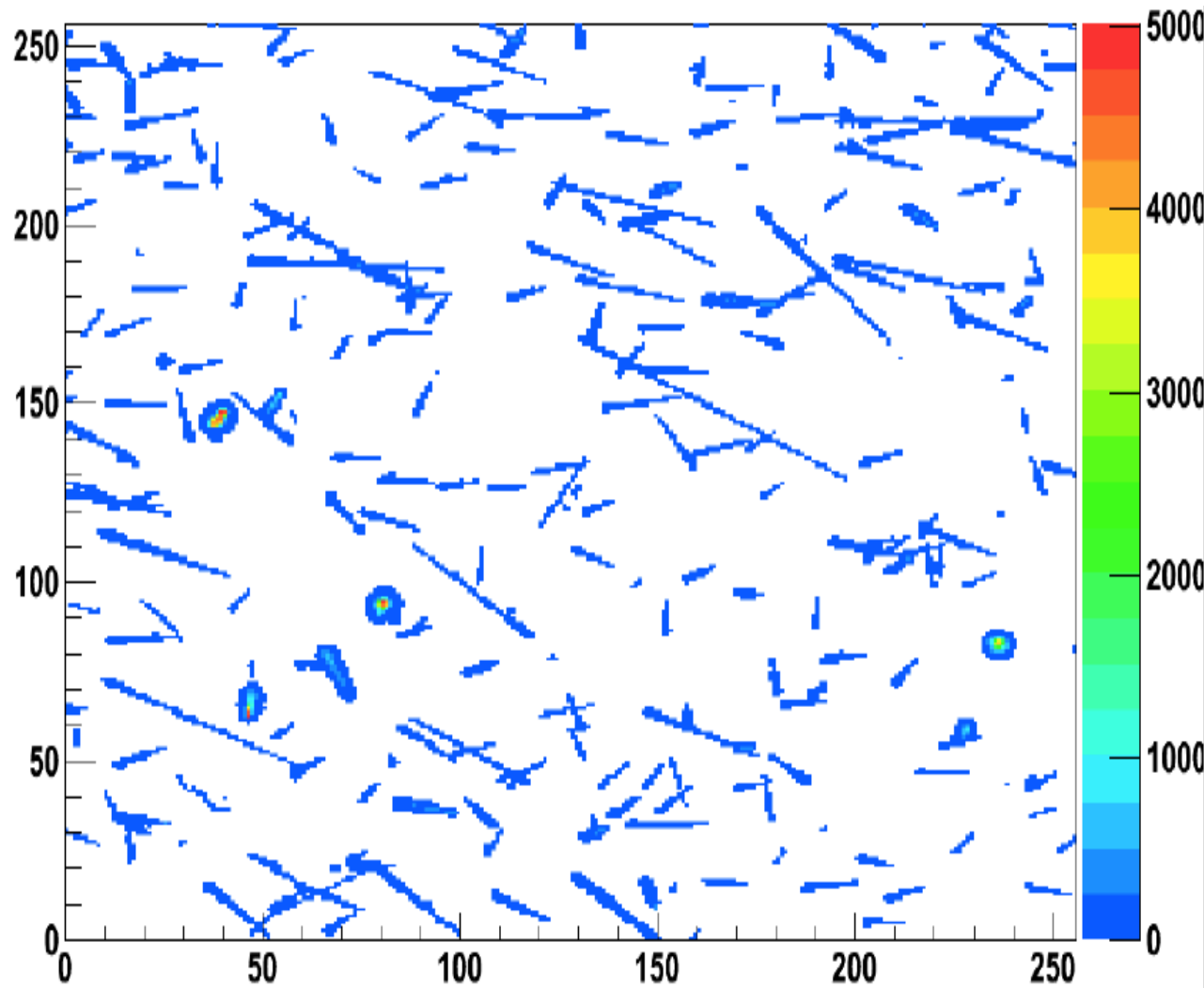


# stralingsmetingen in het Int Space Station ISS

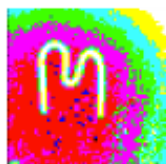




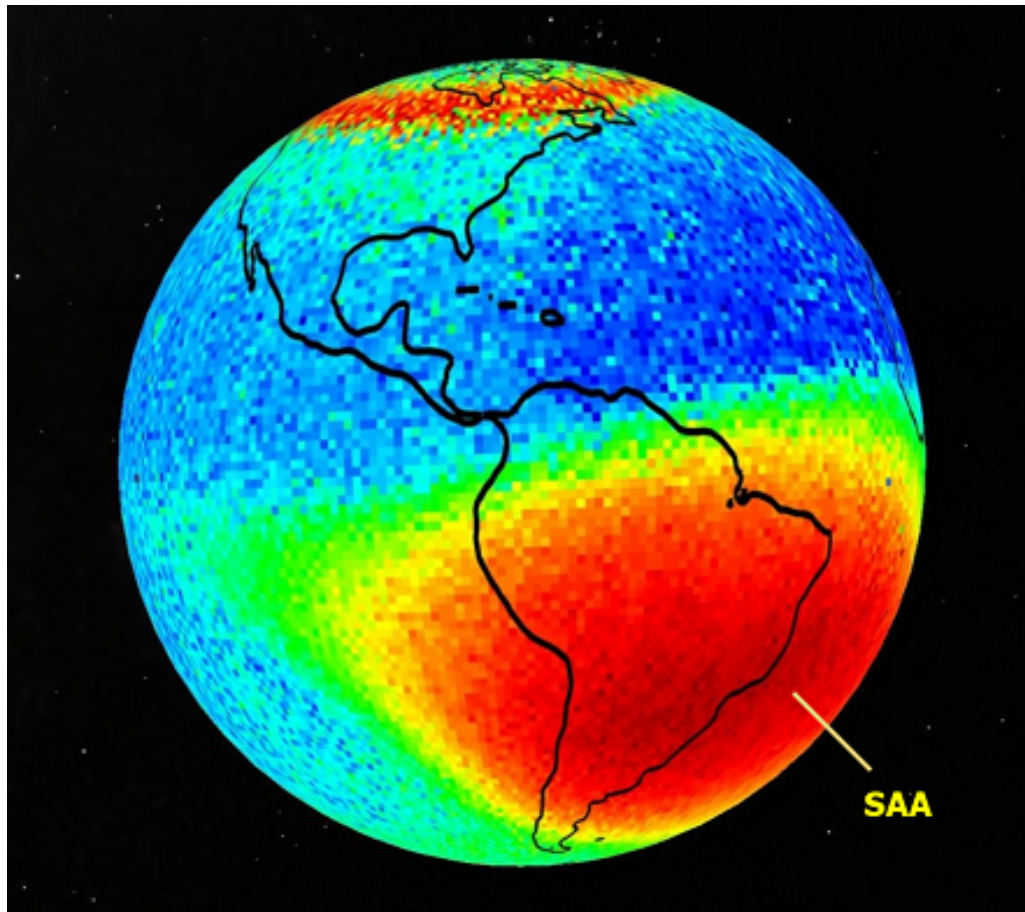
# stralingsmetingen in het Int Space Station ISS



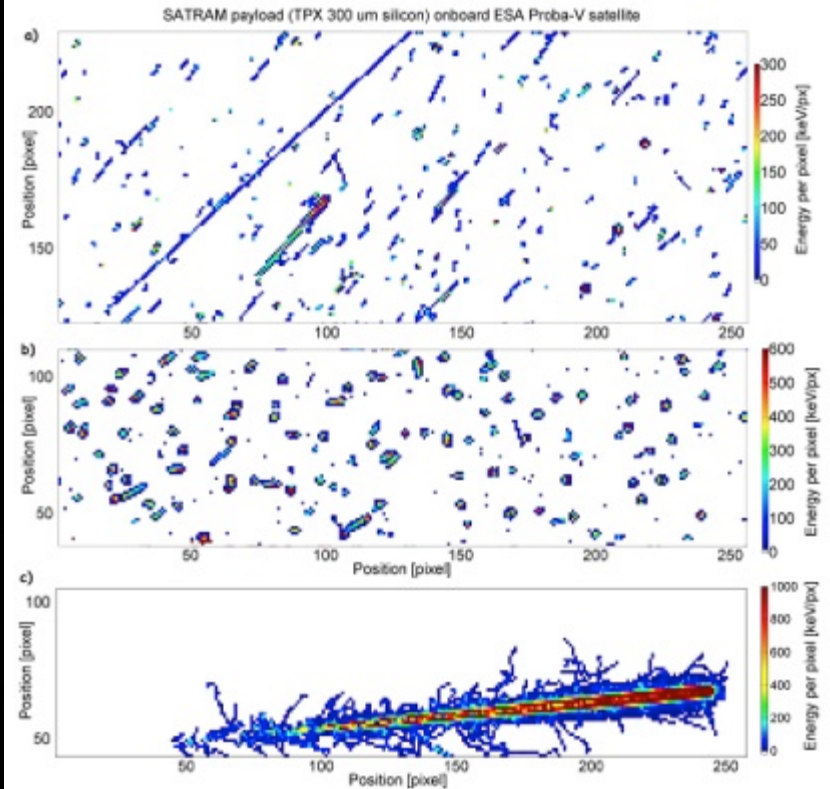
4s Timepix bestraling  
binnen in ISS  
vliegend door SAA  
South Atlantic Anomaly



# dosimetrie met de TPX op ESA satelliet Proba-V



frames in een LEO baan ~800km,  
in diverse posities



dank aan Carlos Granja IEAP-CTU (2015)

ionen spoor met  $\partial$  electronen

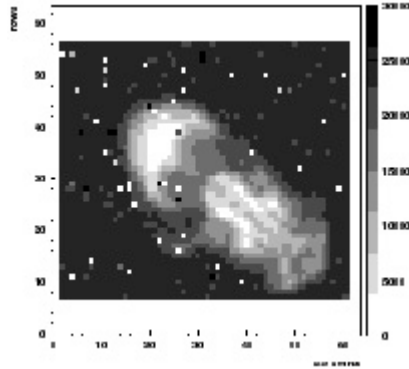


# Medipix voor medisch onderzoek 'computed tomography' CT

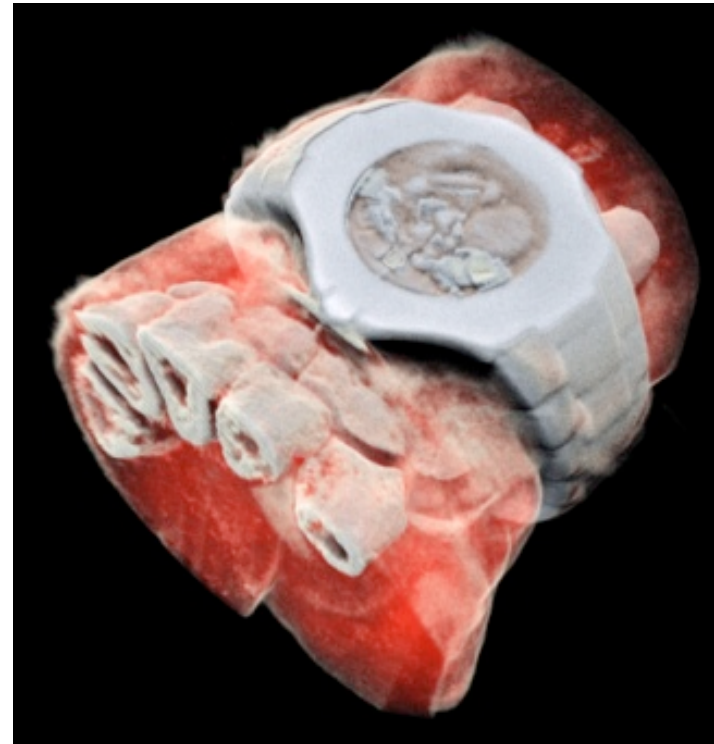
samenwerking met 'MARS'  
in Canterbury, Nieuw Zeeland



# Röntgen opnames : 1998 - 2019



Lukas Tlustos ~2001  
met de eerste foton teller chip



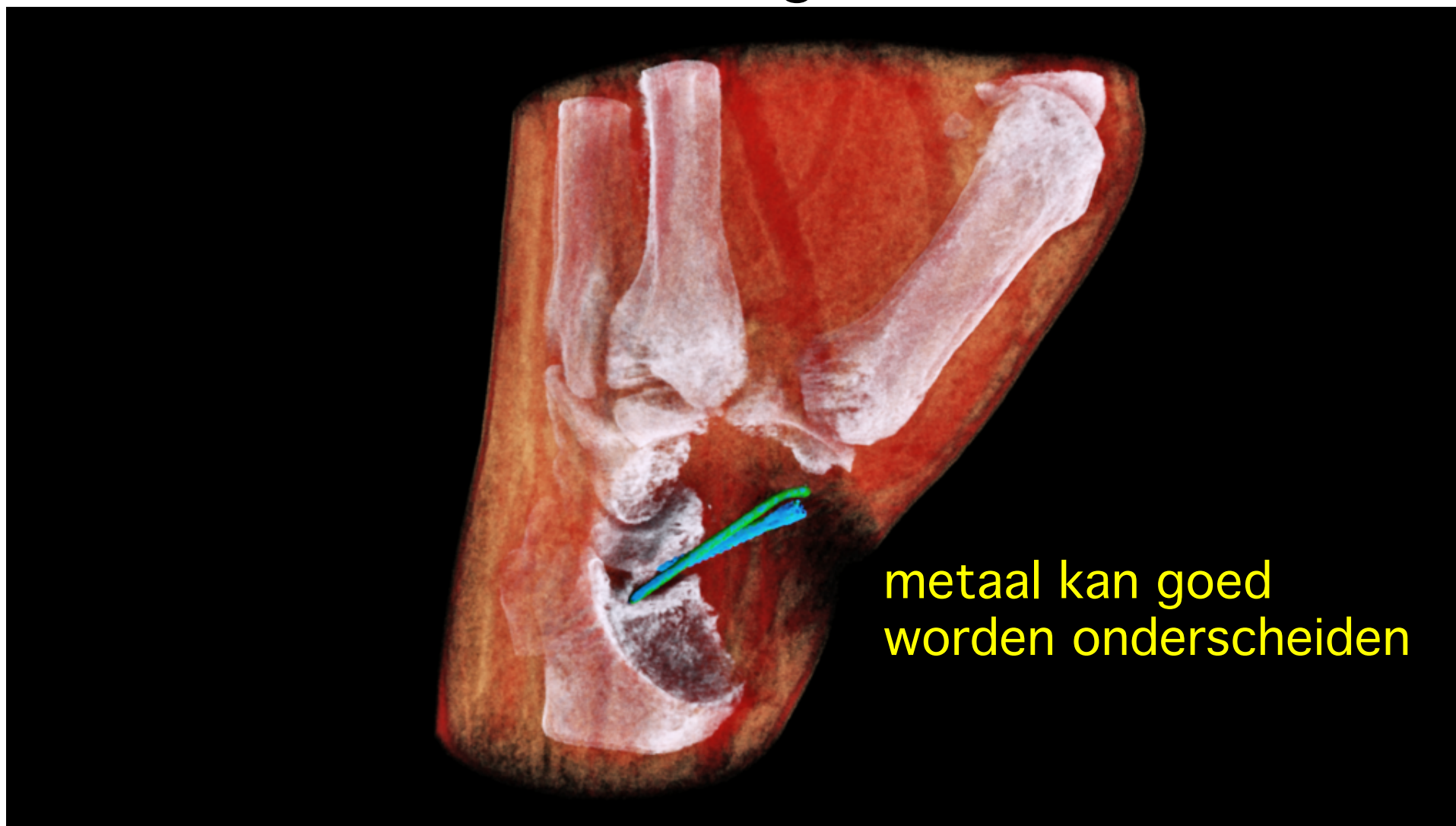
MARS Bio imaging Canterbury  
Röntgen CT met Medipix3 2019

processing van individuele fotonen  
begint nu gebruikt te worden





# benutten van de energie van ieder foton



# Timepix voor molecuul-spectroscopie

Separation of heavy molecules by Time-of-Flight AMOLF Amsterdam

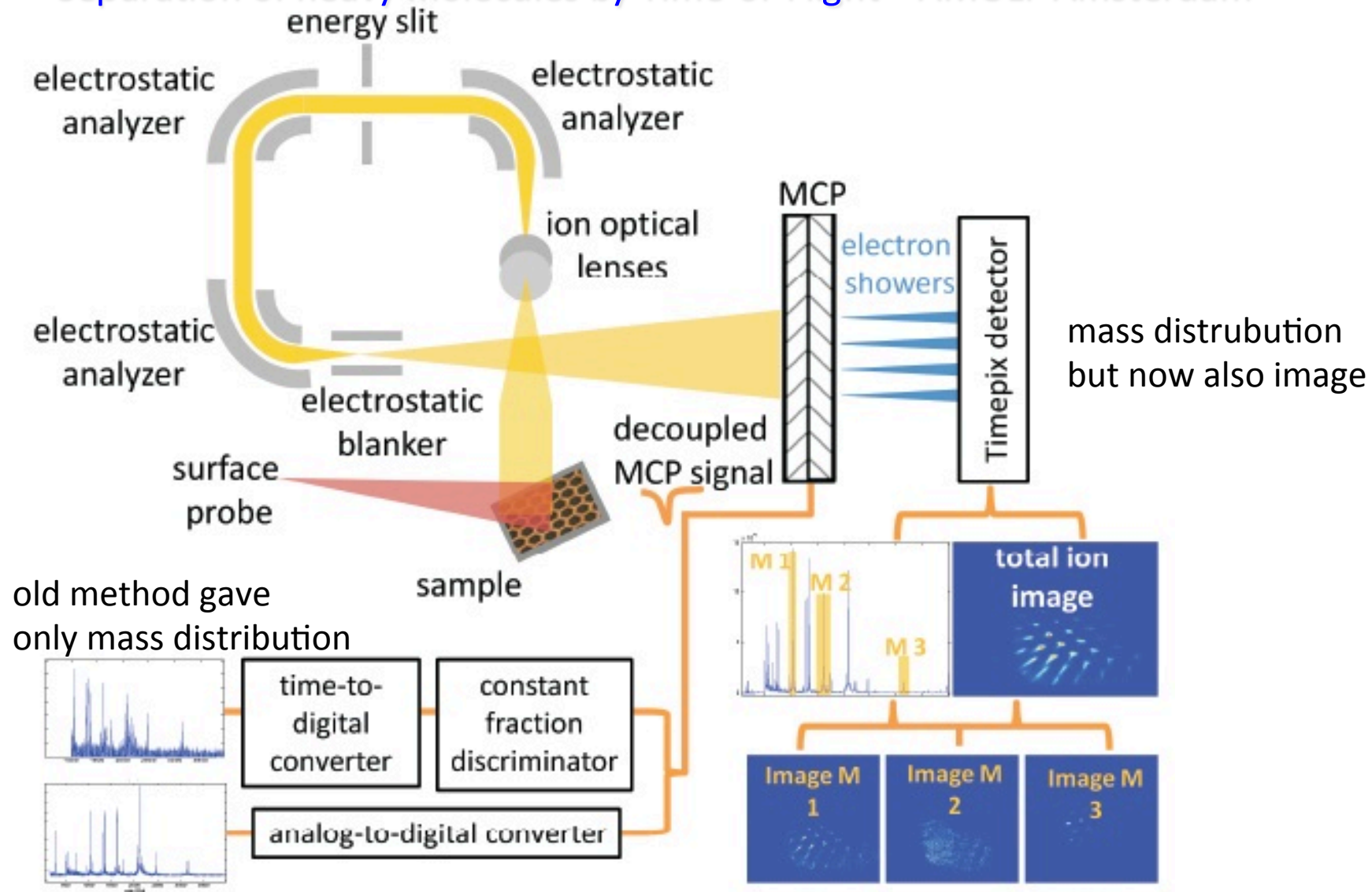


figure from J. Jungmann – PhD Thesis Univ Utrecht (2011) p. 96

# Timepix schakelingen

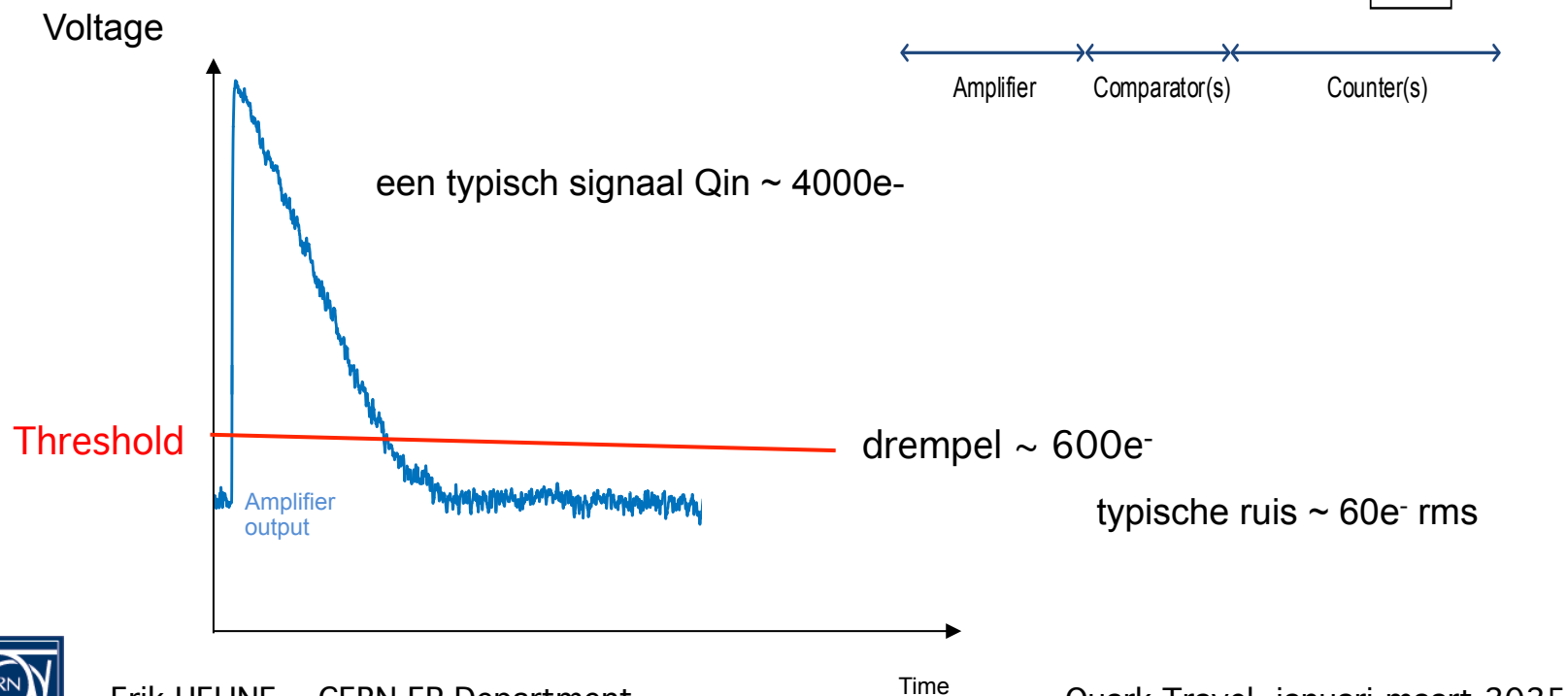
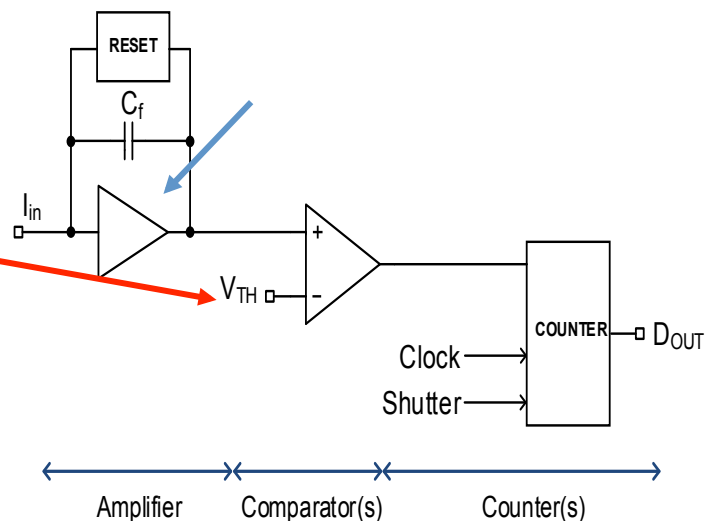


Erik HEIJNE CERN EP Department

Quark Travel januari-maart 2025

# Werking van Timepix detektoren – het principe

→ Drempel schakeling  
 onderdrukt alle ruis  
 laat alleen de echte signalen toe





# verschillende manieren om Timepix te gebruiken

deeltjes alleen tellen

• tijd van inval\*

• meting signaal amplitude

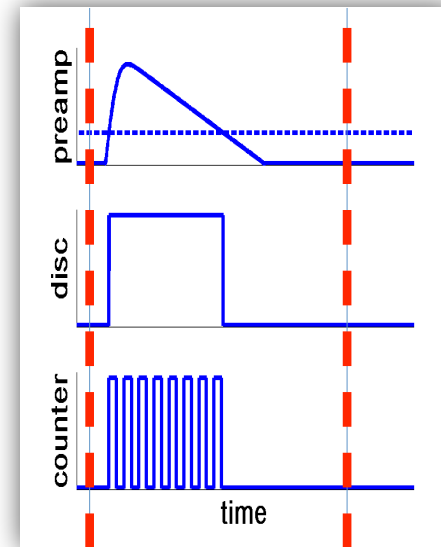
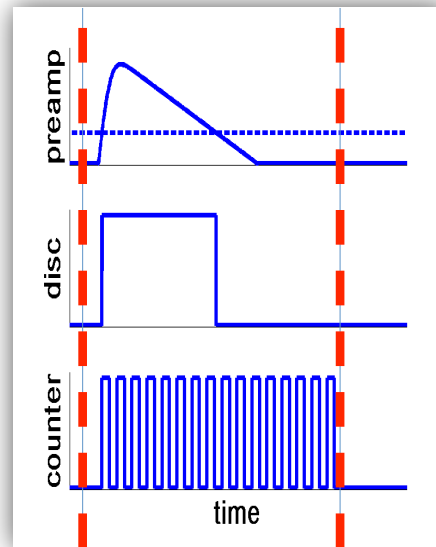
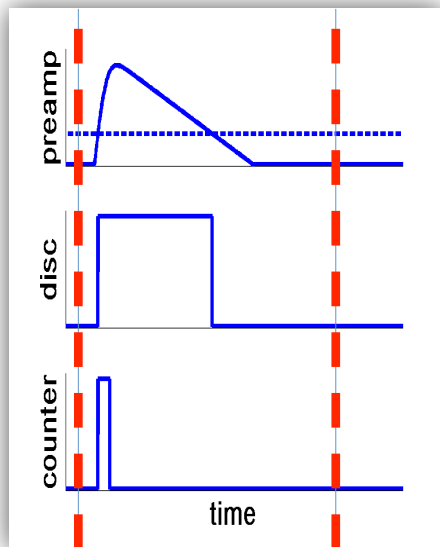
*Open shutter*      *Close shutter*

*Open shutter*      *Close shutter*

*Open shutter*      *Close shutter*

*tijd boven  
drempel*

*naar  
telregister*



\* oorspronkelijk verzocht op Nikhef door de EUDet Collaboratie  
na suggestie van Jan Visschers

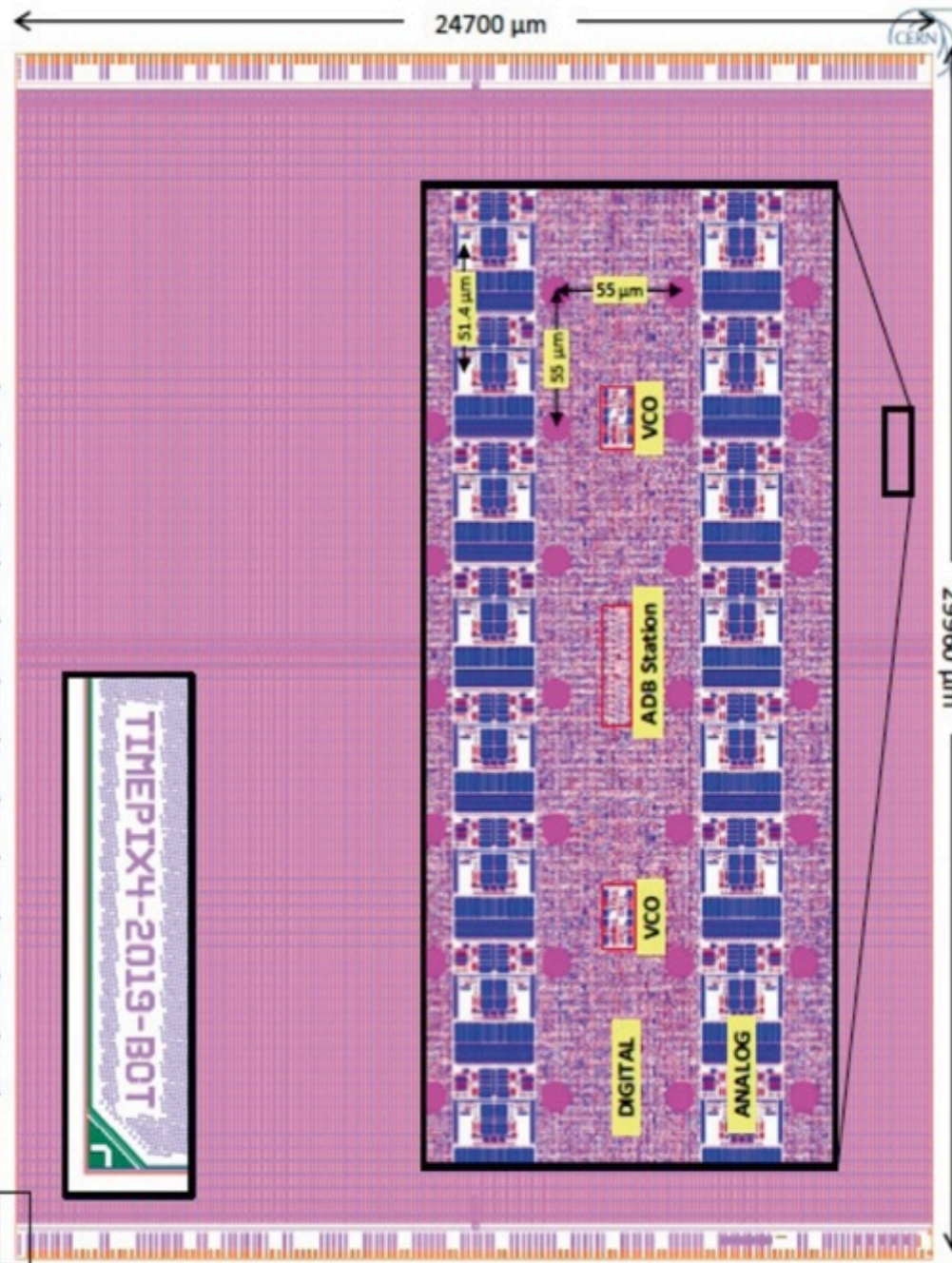


# Timepix4 (November 2019)

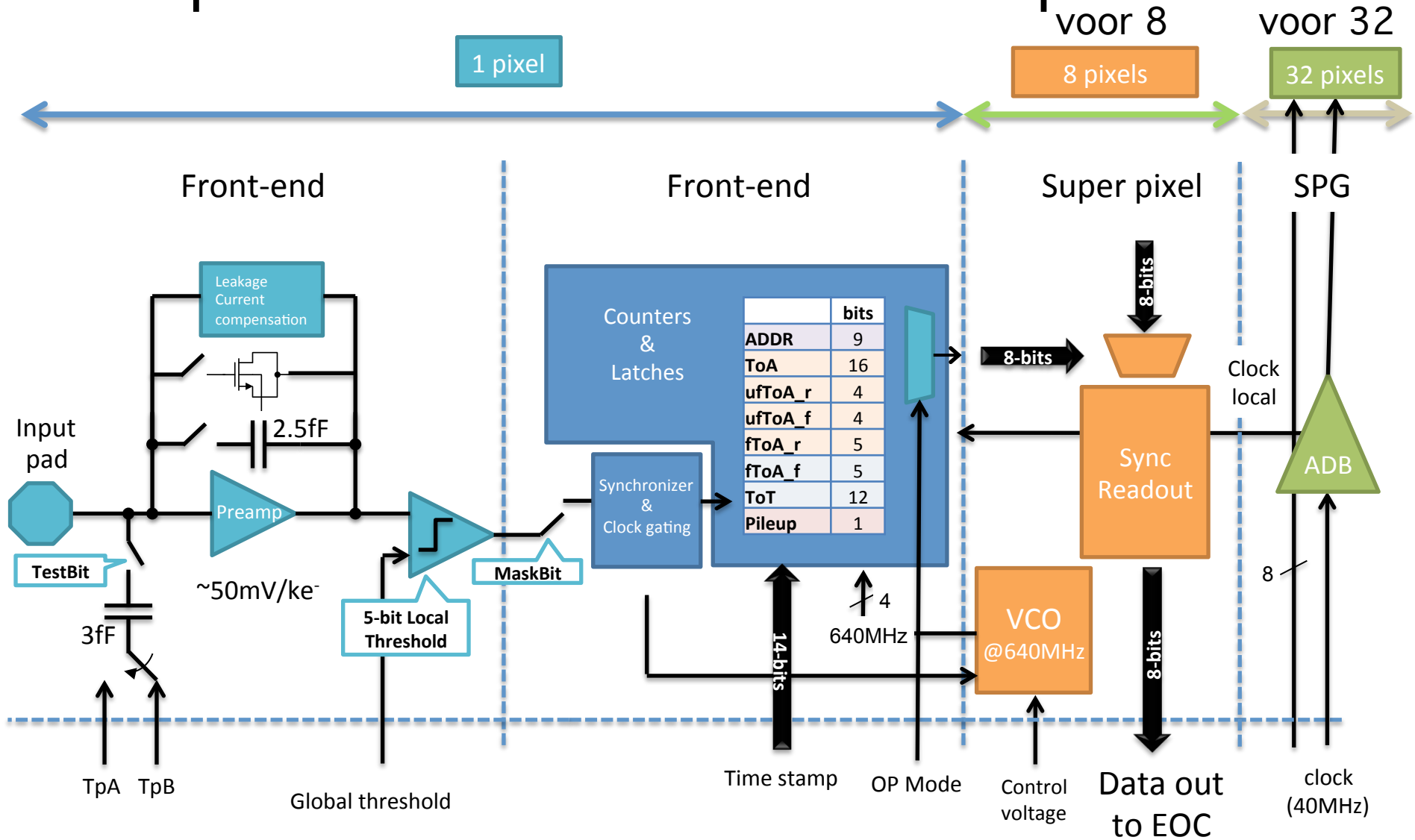
TPX4 met super-pixel-blokken

Pixel size	55 x 55 $\mu\text{m}$
Array	512 x 448
Pixels	229376
aPLL	19
aDLL	16
10.24 Gbps serializers (Nikhef)	16
On-pixel VCO (Nikhef)	28672
dDLL Columns	448
Biasing DACs	13
ADC (IFAE)	1
Transistors in pixel	~6000
Transistors in chip	~1.5 bn

~6000 transistors per pixel  
ong 1.5 miljard op de chip



# Timepix4 definitief schema van pixel circuit



De tijdmeting geeft ook de diepte in de sensor  
waar de lading is ontstaan

voor-achter kan nu worden onderscheiden

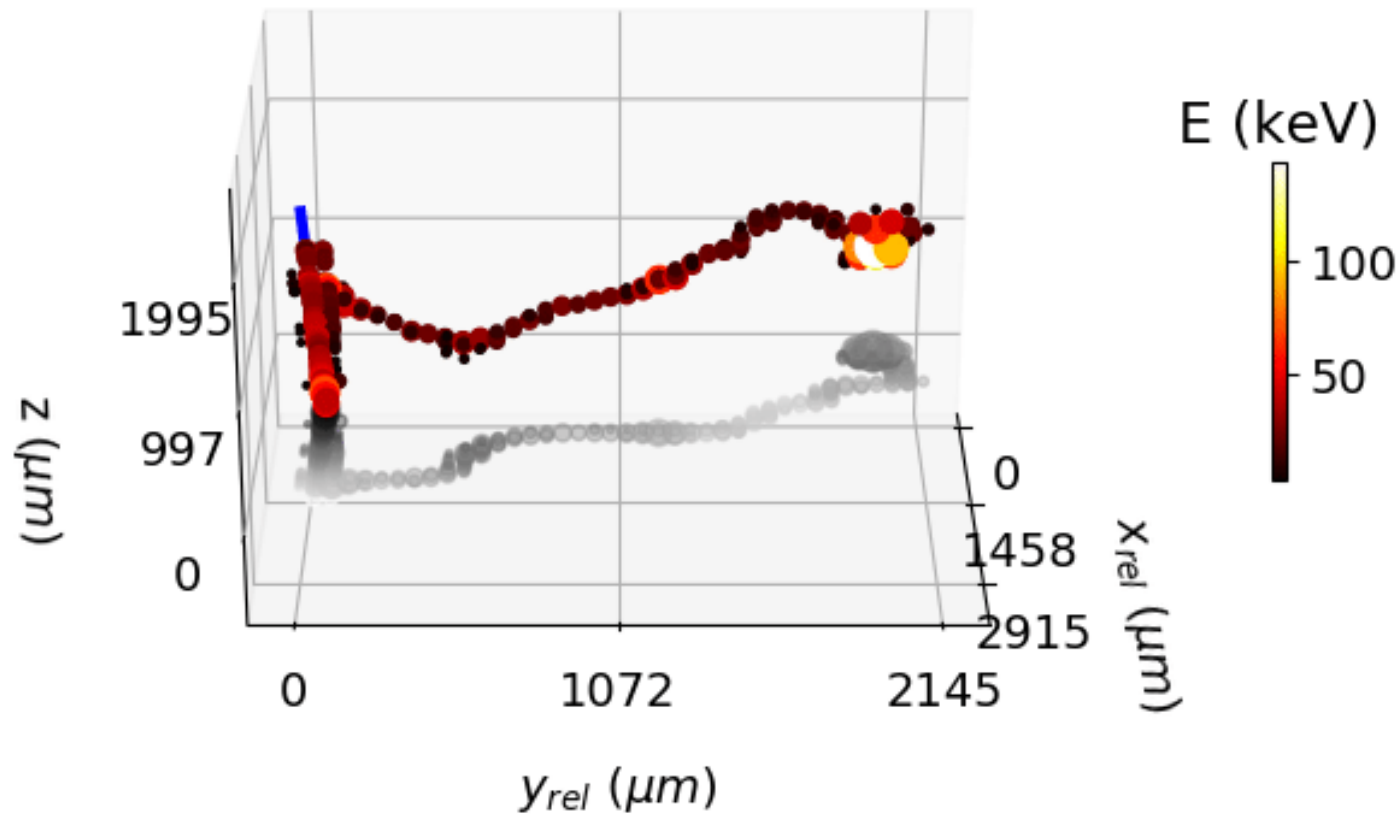
zo kan het spoor  
door de sensor in 3D worden bepaald





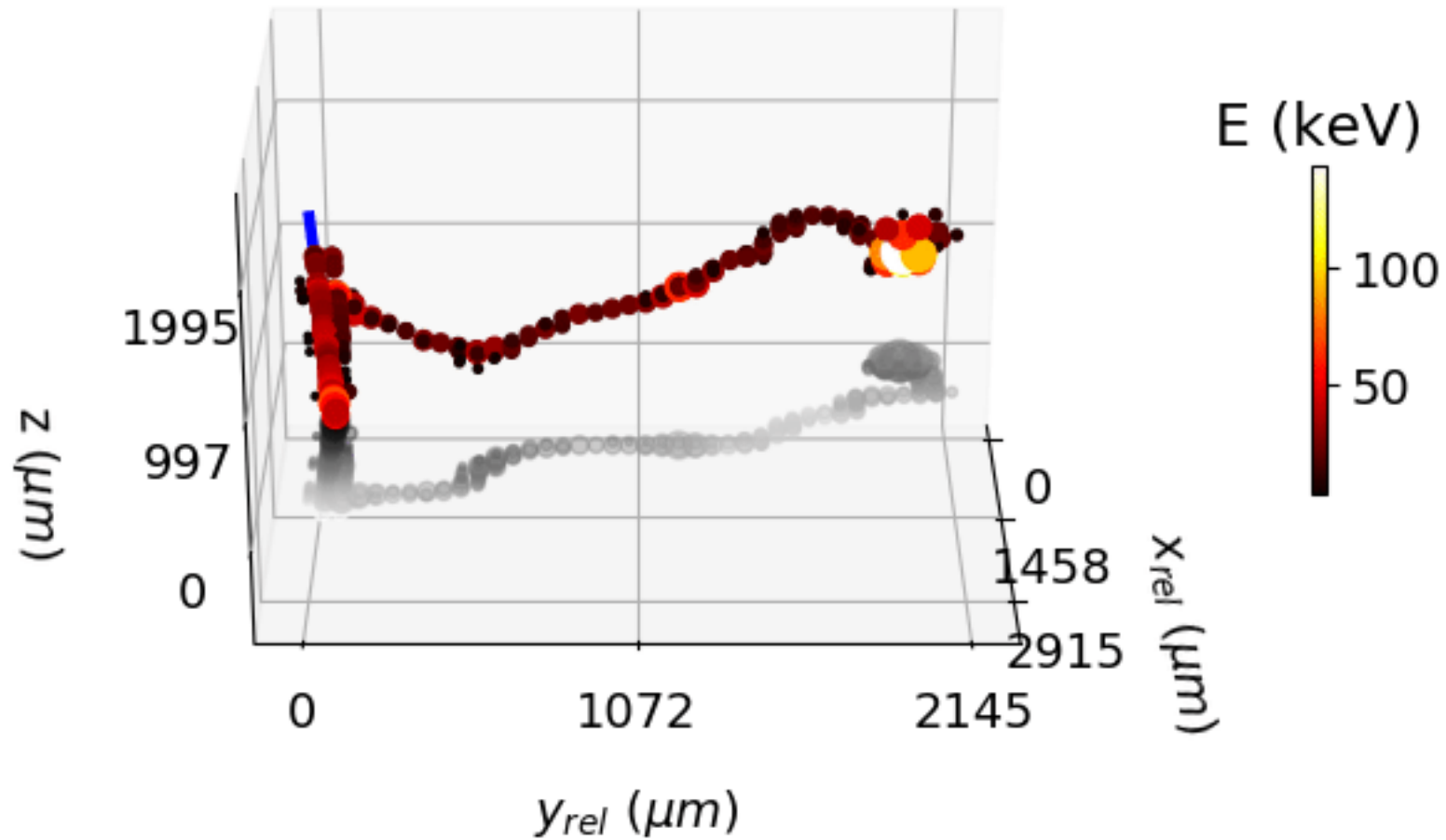
# diepte en beeld van recht pion spoor met lang delta electron

$$\frac{dE}{dx} = 3.39 \frac{\text{MeVcm}^2}{\text{g}}$$

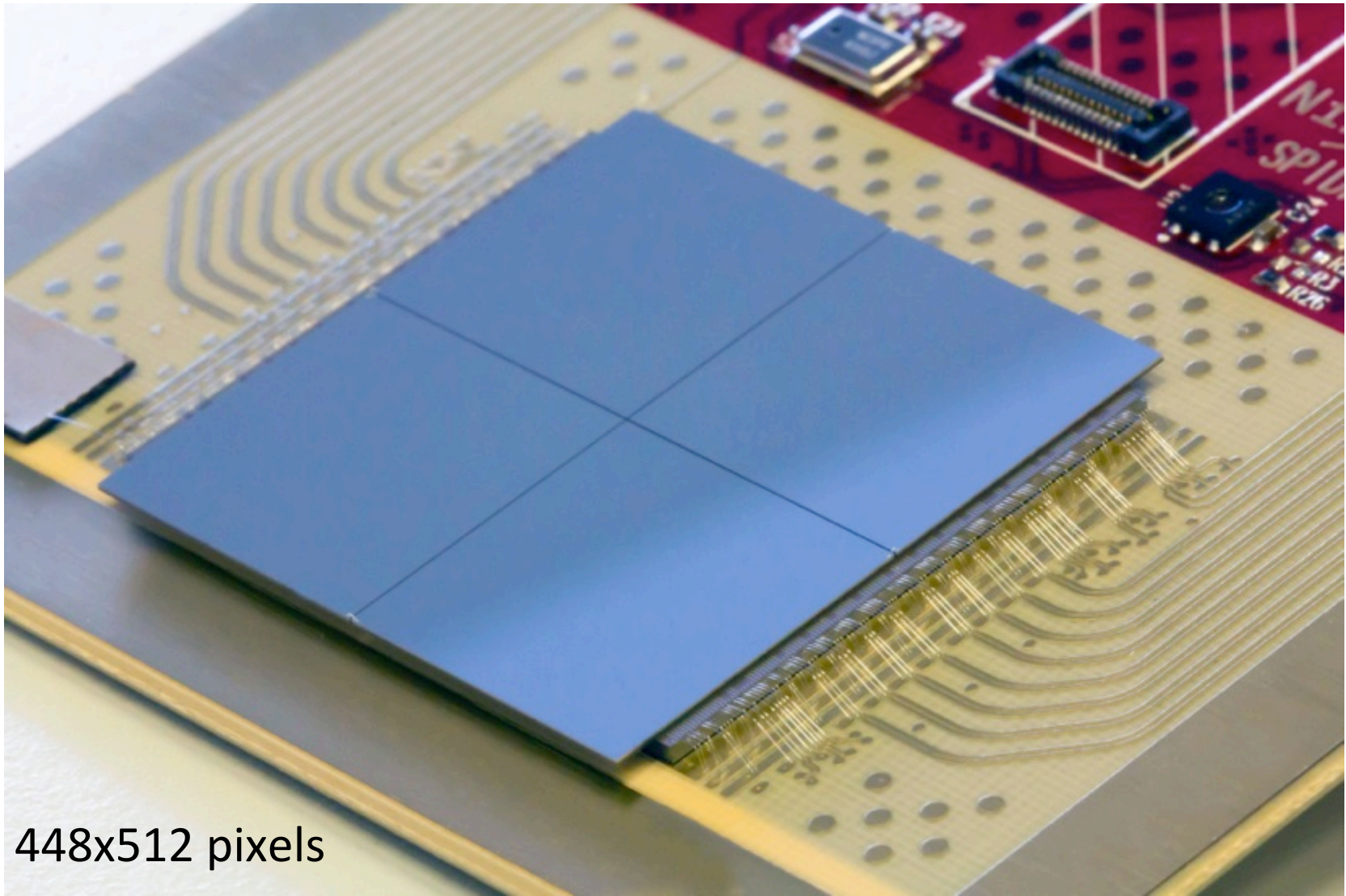


# diepte en beeld van het spoor

$$\frac{dE}{dx} = 3.39 \frac{\text{MeVcm}^2}{\text{g}}$$



Timepix4 30x24.7 mm<sup>2</sup> met 4 Si sensors er op



448x512 pixels



Erik HEIJNE CERN EP Department

foto Martin Fransen, Nikhef, A'dam  
Quark Travel januari-maart 2025

# Besluit ?

[extra slides]





# toch nog iets over deeltjes fotografie



Erik HEIJNE CERN EP Department

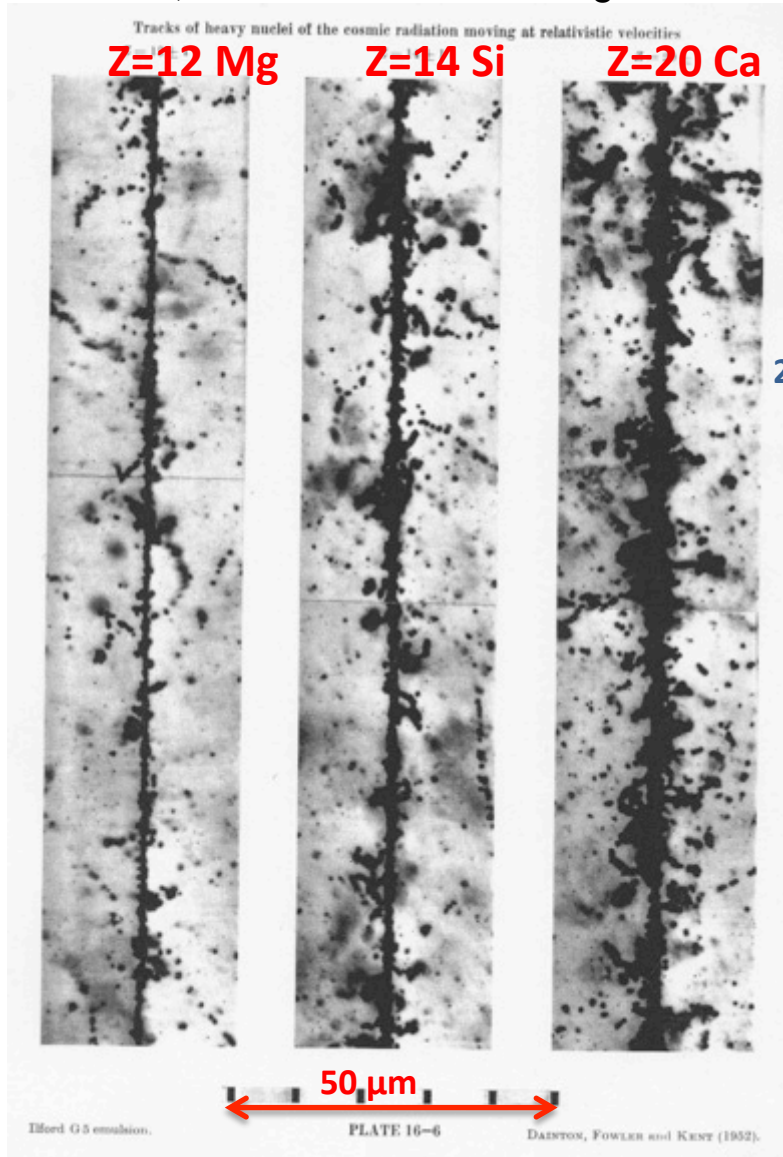
Quark Travel januari-maart 2025

# energetische ionen vliegen door emulsie, 1940's

ionen in kosmische straling

Powell, Fowler & Perkins- Pergamon 1959

precisie !



$dE/dx$   
met talloze  $\delta$ -elektronen

25GeV photon

1980

50 μm

charm verval in CERN Omega experiment WA58

M.J. Adamovich et al.,

Observation of pairs of charmed particles produced by high-energy photons in nuclear emulsions coupled with a magnetic spectrometer,

Phys.Lett. 99B (1981) 271-276

Quark Travel januari-maart 2025

# Fotografie met gevoelige emulsie

In de vorige eeuw zijn veel van de tot dan onbekende deeltjes met film geïdentificeerd

- = gestapelde laagjes van emulsie voor kosmische straling
- = rollen film voor 3D rekonstruktie van interacties in nevel kamers, vonken kamers of bellenvaten

## Allerlei voordelen:

- = sporen zijn heel nauwkeurig, met veel ruimtepunten
- = visueel, en tonen overtuigend bestaan van nieuw deeltje

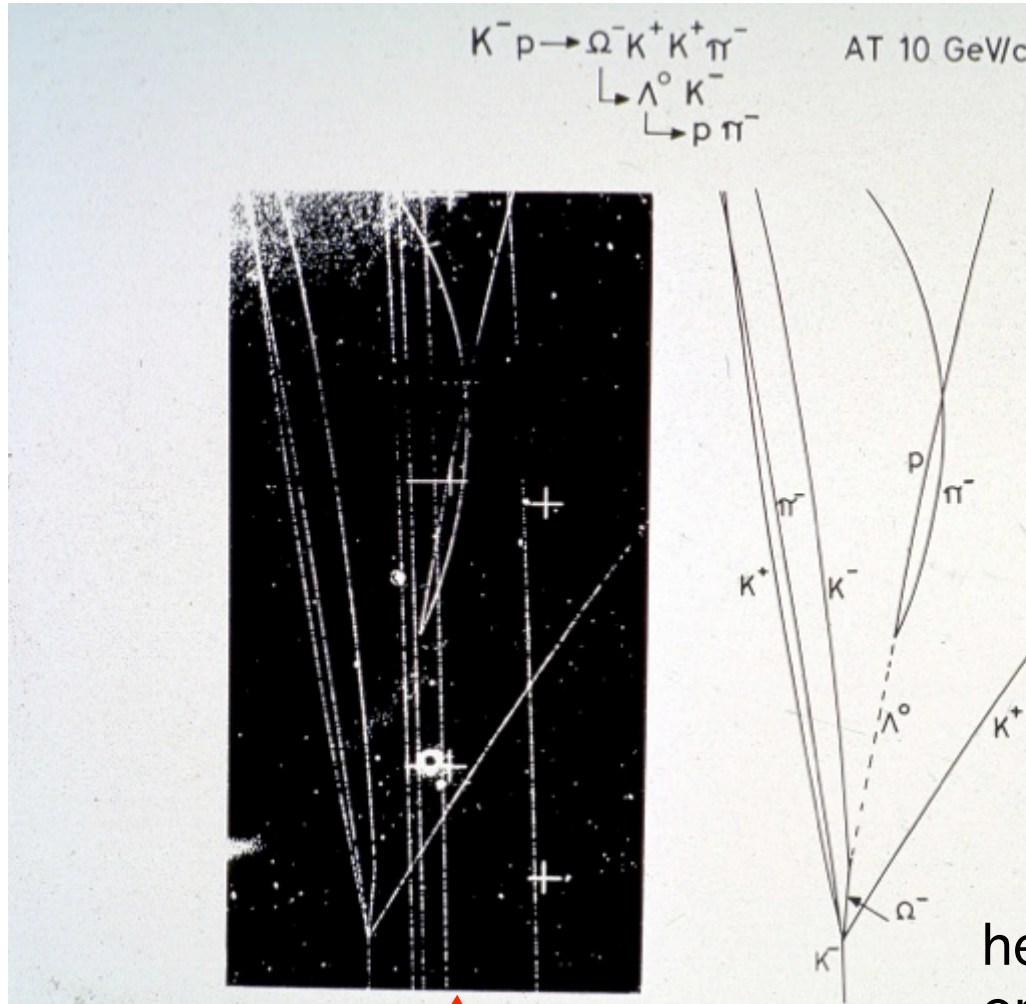
## Problemen:

- = weinig metingen mogelijk en uiterst langzaam  
bellenvat nam maar ~ één foto per seconde
- = zeldzame processen kunnen dan niet worden bestudeerd
- = bij hogere energie past de interactie er niet helemaal op
- = emulsie kan niet worden gebruikt met 'keuze-trigger' en kan ook niet worden uitgewist en hergebruikt

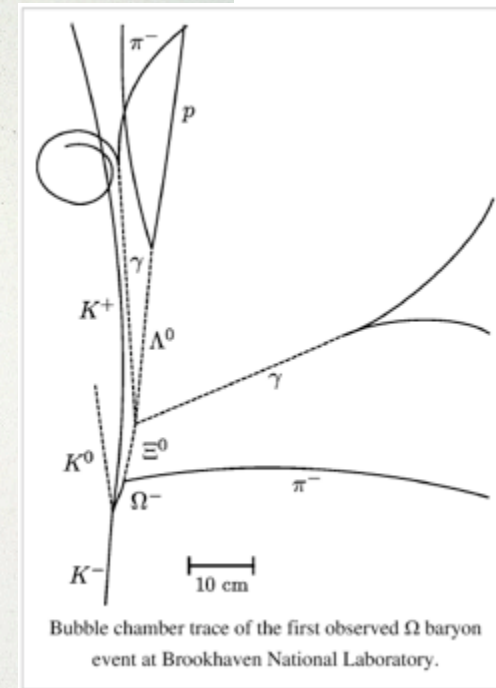
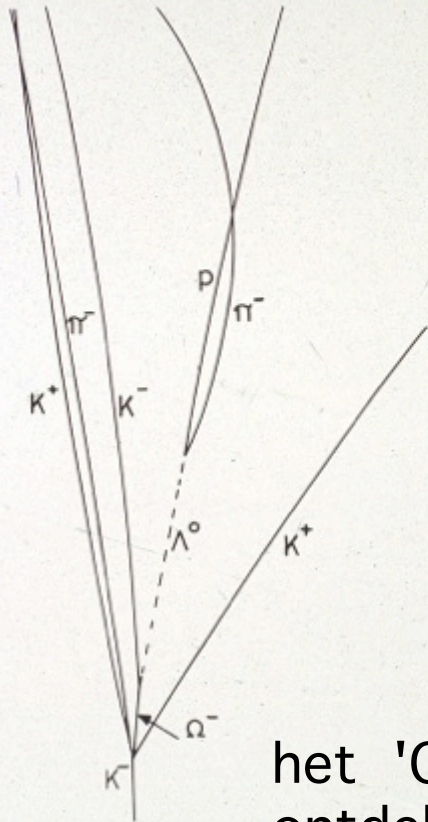


# Fotografie was het eerste 'instrument'

links foto met een ingewikkelde interactie



hieronder de rekonstruktie van de opeenvolgende deeltjes



















proton  bundel

het 'Omega'  $\Omega$  deeltje ontdekt in 1964 via deze bellenvat foto



Radioactief verval van zware elementen geeft 'blob's' in Timepix  
meestal van uranium, thorium,  
voornaamste bron van natuurlijke straling, te zien in praktikum

				92 Uranium 238  4.51x10 <sup>9</sup> jaar		92 Uranium 234  2.48x10 <sup>5</sup> jaar	4.5 miljard 250 000	92	uranium
				$\alpha$ ↓		91 Protactinium 234  1.3 seconde		91	protactinium
						90 Thorium 230  24.1 dag	14 miljard 75 000	90	thorium
						90 Thorium 228  1.9 jaar		90	thorium
						89 Actinium 227  6.13 uur		89	actinium
						88 Radium 226  1622 jaar		88	radium
						88 Radium 224  3.64 dag		88	radium
						$\alpha$ ↓		87	francium
						86 Radon 220  54.5 seconden		86	radon
						$\alpha$ ↓		85	astatine
						84 Polonium 216  0.158 seconden		84	polonium 84
						84 Polonium 212  3x10 <sup>-7</sup> seconden		84	polonium 84
						83 Bismuth 214  60.6 minuten		83	bismuth 83
						$\alpha$ ↓		83	bismuth 83
						82 Lood 214  26.8 minuut		82	lood 82
						$\alpha$ ↓		82	lood 82
						82 Lood 210  22 jaar		82	lood 82
						$\beta$ ↓	stabiël	82	lood 82
						81 Thallium 208  3.1 minuten		81	thallium 81
						81 Thallium 206  stabiële isotoop		81	thallium 81

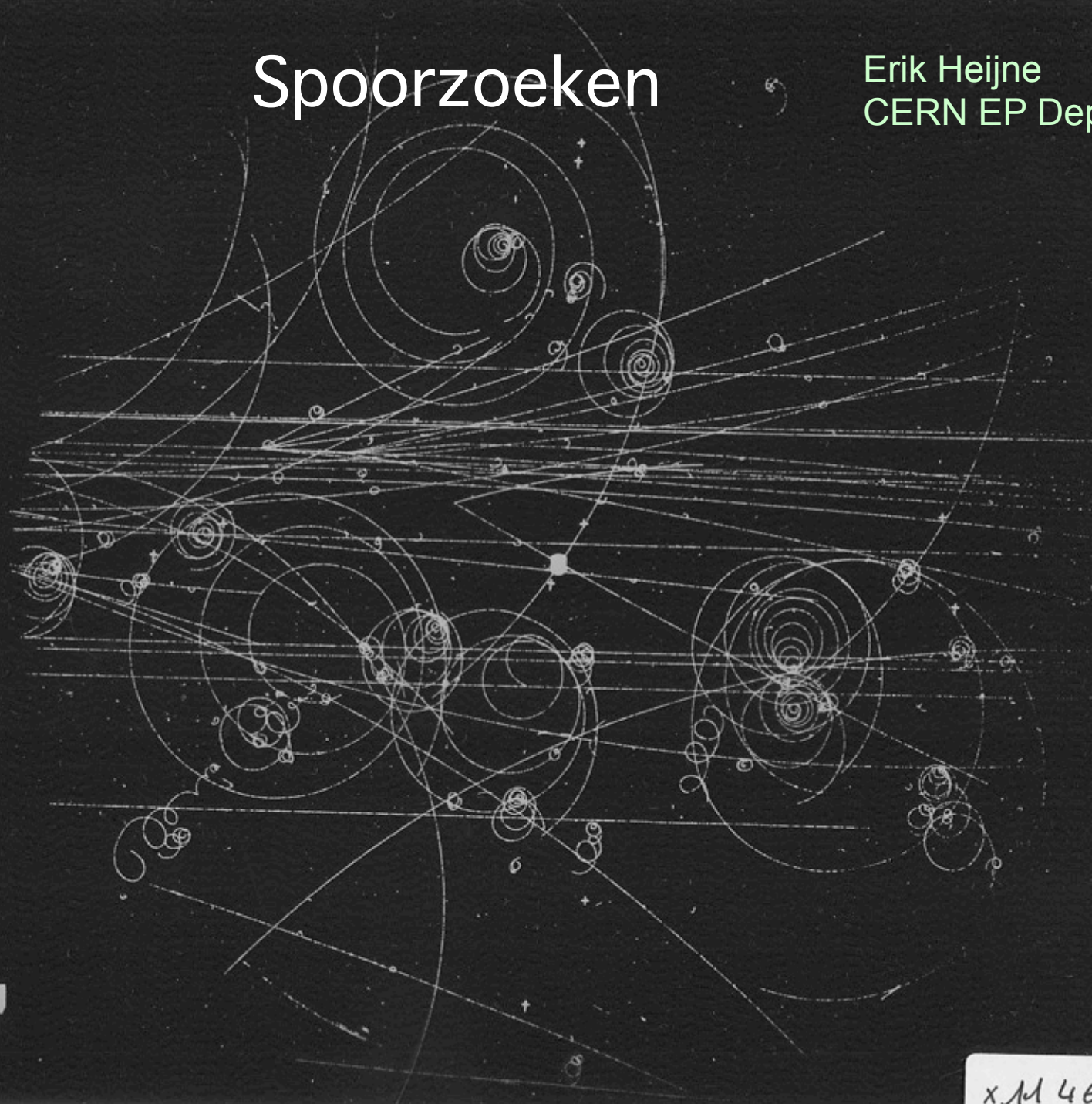
# Spoorzoeken

Erik Heijne  
CERN EP Dept



11465

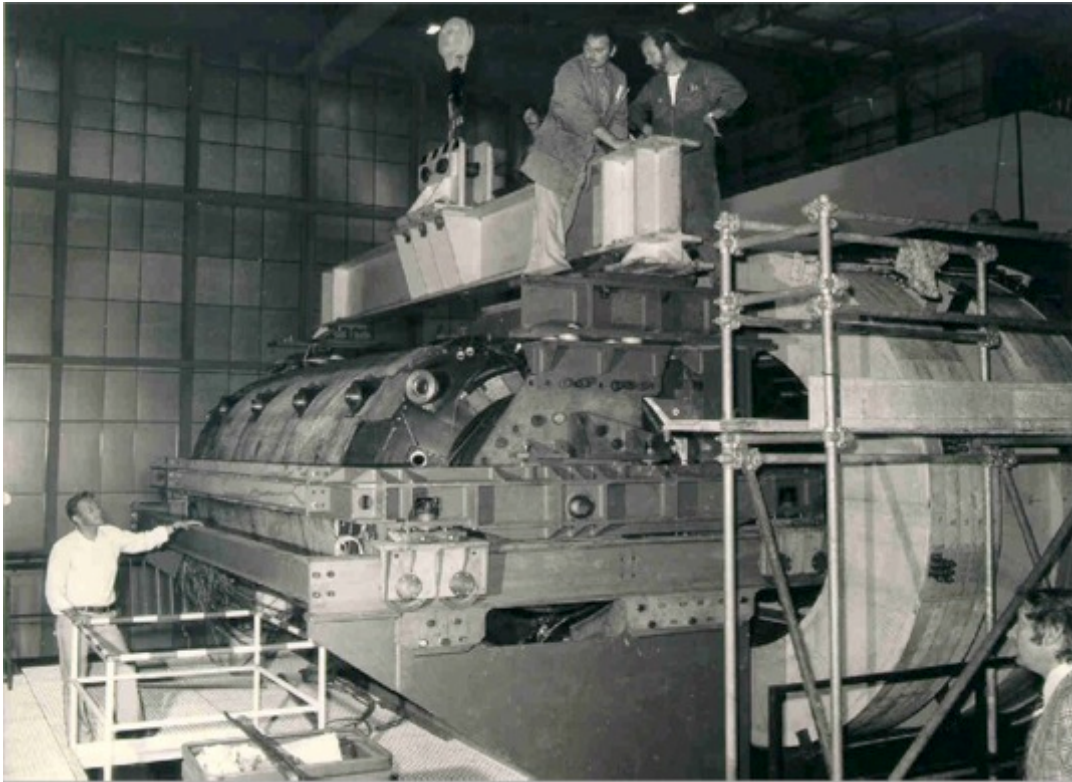
xM 465





# Spoorzoeken

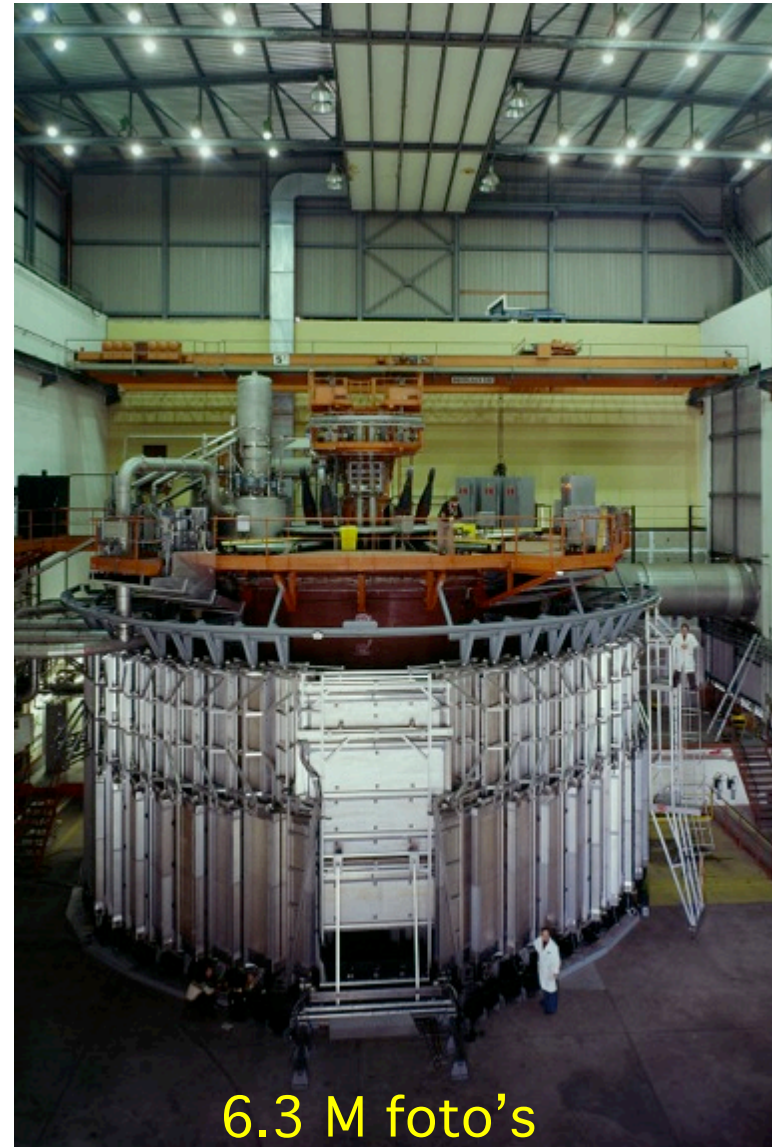
## Bellenvaten op CERN 1958 - 1985



Gargamelle 1970 - 1982

BEBC 1973 - 1984

*was toen grootste instrument op CERN*



6.3 M foto's

Nog wat

[extra]



Erik HEIJNE CERN EP Department

Quark Travel januari-maart 2025



silicium is 2<sup>e</sup> meest voorkomend element (28%) in de aardkorst  
kwarts ( $\text{SiO}_2$ ) zand – meest ook  $\text{SiO}_2$



Erik HEIJNE CERN EP Department

Quark Travel januari-maart 2025

silicium is 2<sup>e</sup> meest voorkomend element (28%) in de aardkorst  
kwarts ( $\text{SiO}_2$ ) zand – meest ook  $\text{SiO}_2$



koolstof is belangrijker,  
want al het leven  
is er op gebaseerd  
maar er is veel minder C dan Si



# Een grote sprong: 1974 - 1980 nieuwe deeltjes, nieuwe detektoren: silicium

in 1974 werd het nieuw J/psi 'meson' ontdekt  
door Sam Ting in Brookhaven en Burt Richter bij SLAC

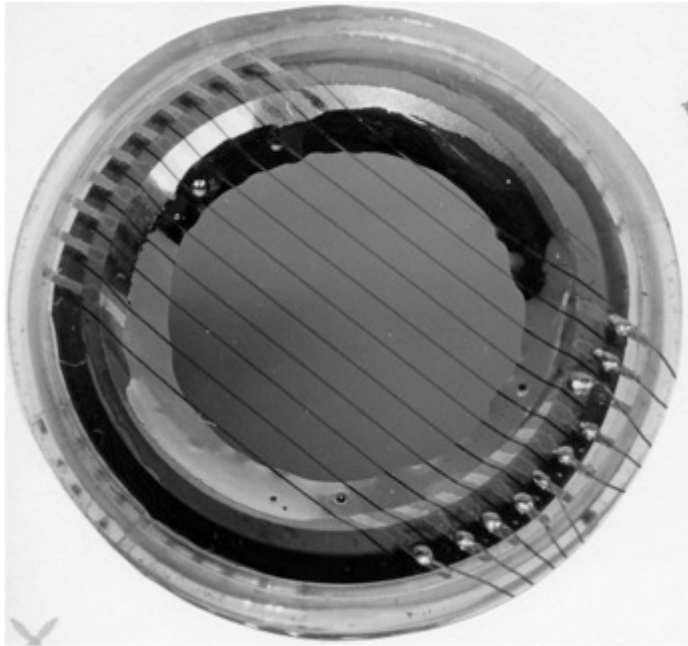
dit meson bevat een tot dan onbekende quark: 'charm'  
deeltjes met 'charm' blijken nogal lang te leven,  
 $\sim 10^{-13}$  s wat resulteert in 0.1-2 mm weglengte

bellenvaten kunnen dit niet waarnemen, want de  
belletjes zelf zijn ook 1-2mm

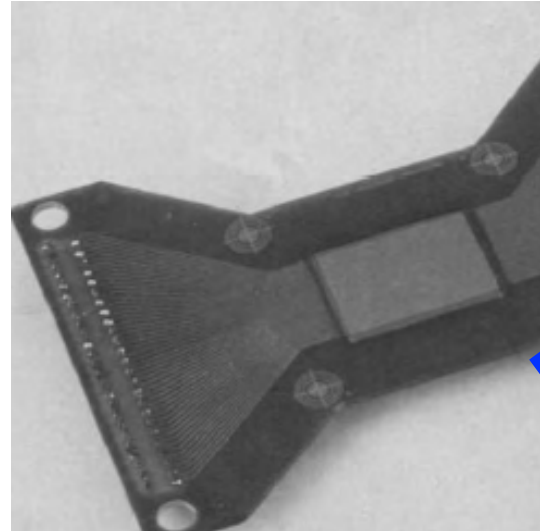
ik had al in 1966 bij IKO-Philips Si detektoren gezien,  
die ook deeltjes kunnen waarnemen, met grote precisie  
dambord-detektor  nu de Si microstrip detektor



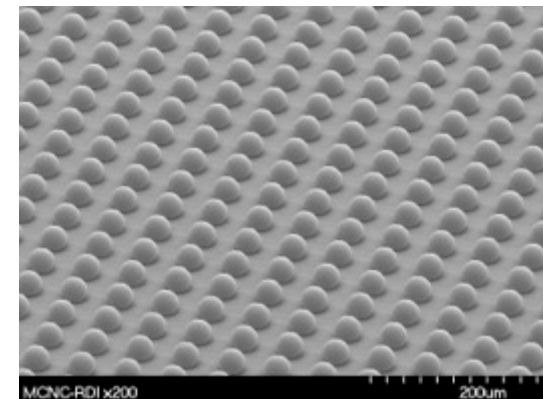
# Segmenteren van een diode op silicium plakje



~1965 Dambord detektor  
PHILIPS – Amsterdam – IKO  
10 strips 1.37 mm breed beide zijden  
plaatje 100µm dik



1980  
CERN / ENERTEC microstrip detektor  
100 strips x 40mm lang x 200µm breed

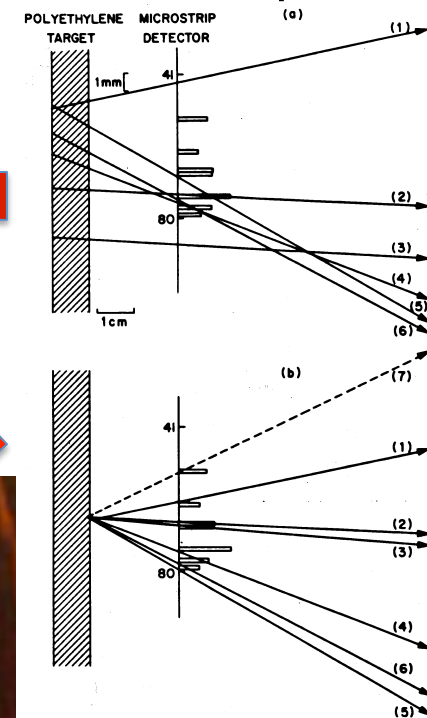
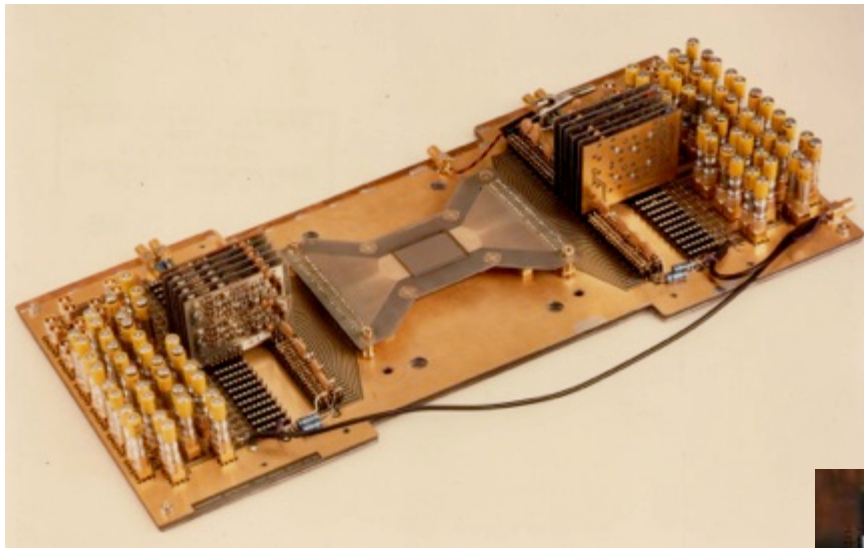


~2000 pixel detektor  
CERN / MEDIPIX  
65000 pixels van 55µm x 55µm



# de plannen voor een silicium detektor op het 1979 IEEE symposium San Francisco

1. projekt om silicium microstrip detektor te maken, afgeleverd in April 1980, getest in Mei in 2 bundels op CERN



2. ook nog een doosje gekocht met sequoia zaden:  
eerst 6 weken in de diepvries  
Muir Woods museum-winkel



# 35 jaar later

1. silicium microstrip detektors  
nu wijdverbreid:  
Vertex Locator in LHCb  
(hier de onderste helft)

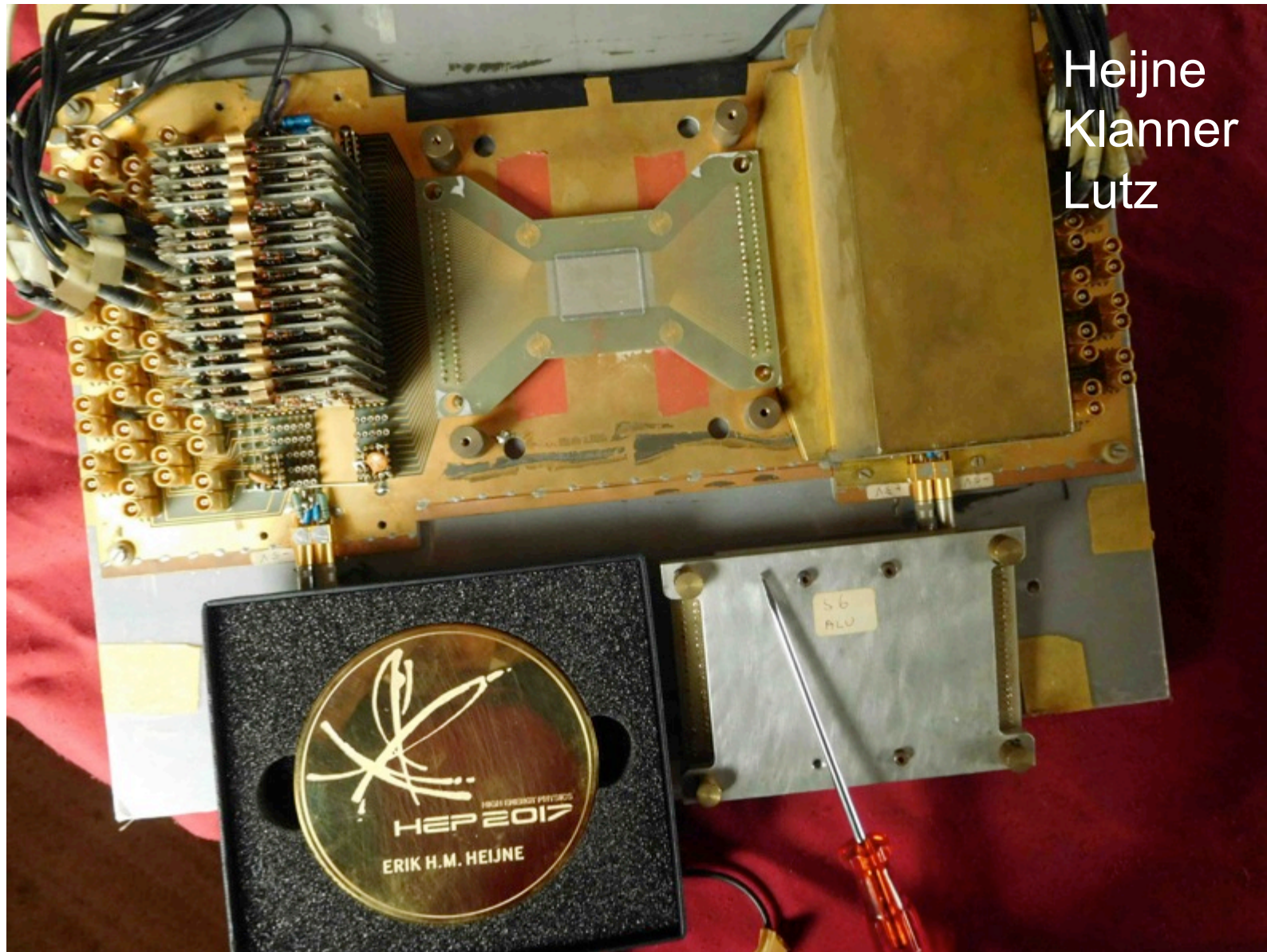
2. sequoia opgegroeid in Koewacht





European Physical Society

2017 HEP prijs



Heijne  
Klanner  
Lutz



# Voordelen van de Si detektor voor deeltjes

- = signaal van zowel elektronen  $e^-$  als gaten  $h^+$
- = beide bewegen snel in elektrisch veld  
snelheid in Si kristal tot  $\sim 100 \text{ km/sec}$
- = 0.1 mm dik Si geeft genoeg signaal (5000-10000  $e^-$ )
- = signaal-stroom is  $\gg$  diode donkerstroom
- = volume weer leeg na  $\sim 5 \text{ ns}$  versterker iets langzamer
- = aaneengesloten x-y matrix van kleine pixel diodes  
100% efficiënt      typische afmetingen 10 – 100  $\mu\text{m}$
- = kleine, dikke diodes geven dan karakteristieke cluster  
meestal kunnen deeltjes en fotonen worden geïdentificeerd
- = precisie van inval-punt beter dan een paar  $\mu\text{m}$
- = tijdsbepaling van doorgang  $< \text{ns}$  mogelijk





een nieuwe ontwikkeling in 1987  
Pixel detektor voor elementaire deeltjes  
(ik noemde dit toen de 'micro-pattern detector')

de microstrip detektor kan maar  
in één richting heel precies meten

voor 2 coördinaten is een  $x$ - $y$  matrix nodig  
dus een nieuw soort detektor, met 'pixels'

in 1988 ontwerpt ons team een eerste versie

sindsdien steeds meer complexiteit in de pixel

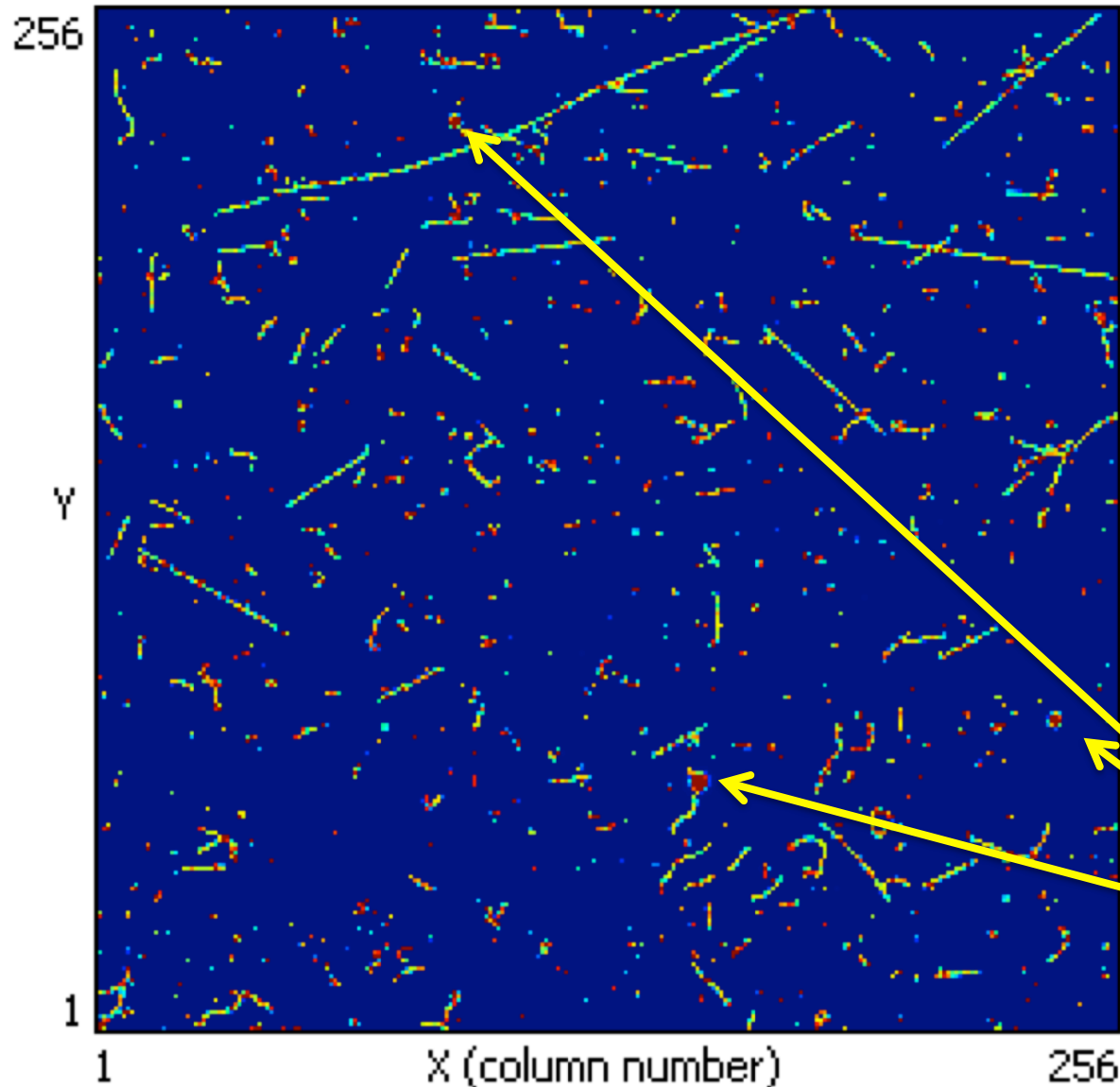


# stralingsmetingen in de omgeving



Erik HEIJNE CERN EP Department

Quark Travel januari-maart 2025



Natural background  
at home  
with Timepix

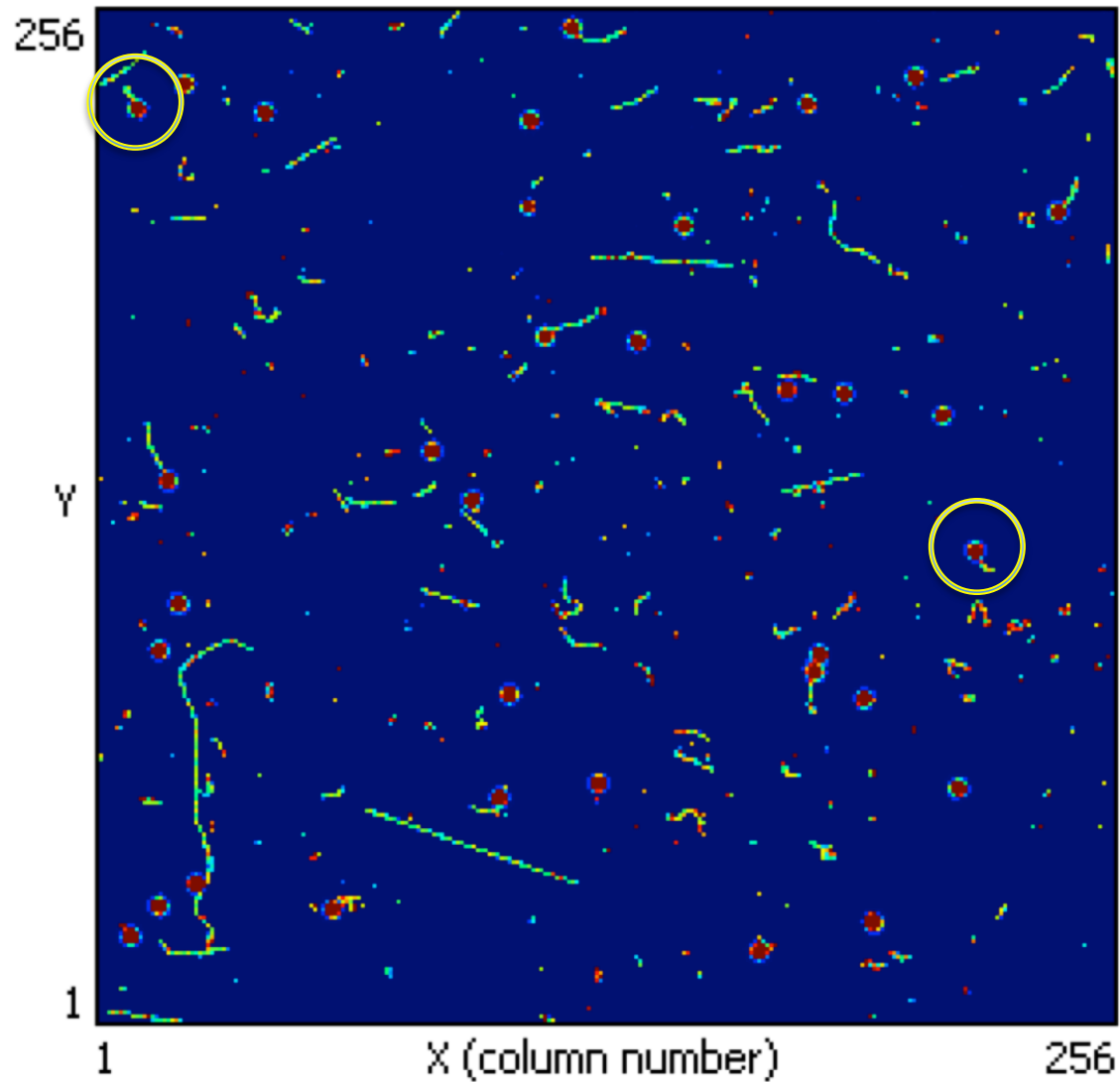
0.51 mSv el.mag.component  
0.63 mSv alpha.component

4764s exposure  
(extrapolated per year)

dose per hour  
e.m. 0.06 uSv/h  
alpha 0.07 uSv/h

The 3 alpha impacts  
contribute >half of the dose

23 June 2010 20.45 TPX D9-W15 1400 s EXPOSURE

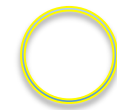


NEXT MEASUREMENT

23 MINS

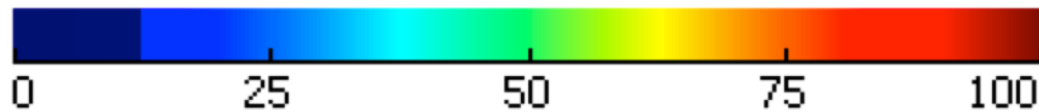
**34** ALPHA

13 with e- TAIL



a little FRIGHTENING !!

1.5 per minute  
MYSTERY.....?



Travel januari-maart 2025



# Nov 2010 in Zeeuwse krant

totale stralingsdosis waaraan Nederlanders blootstaan.

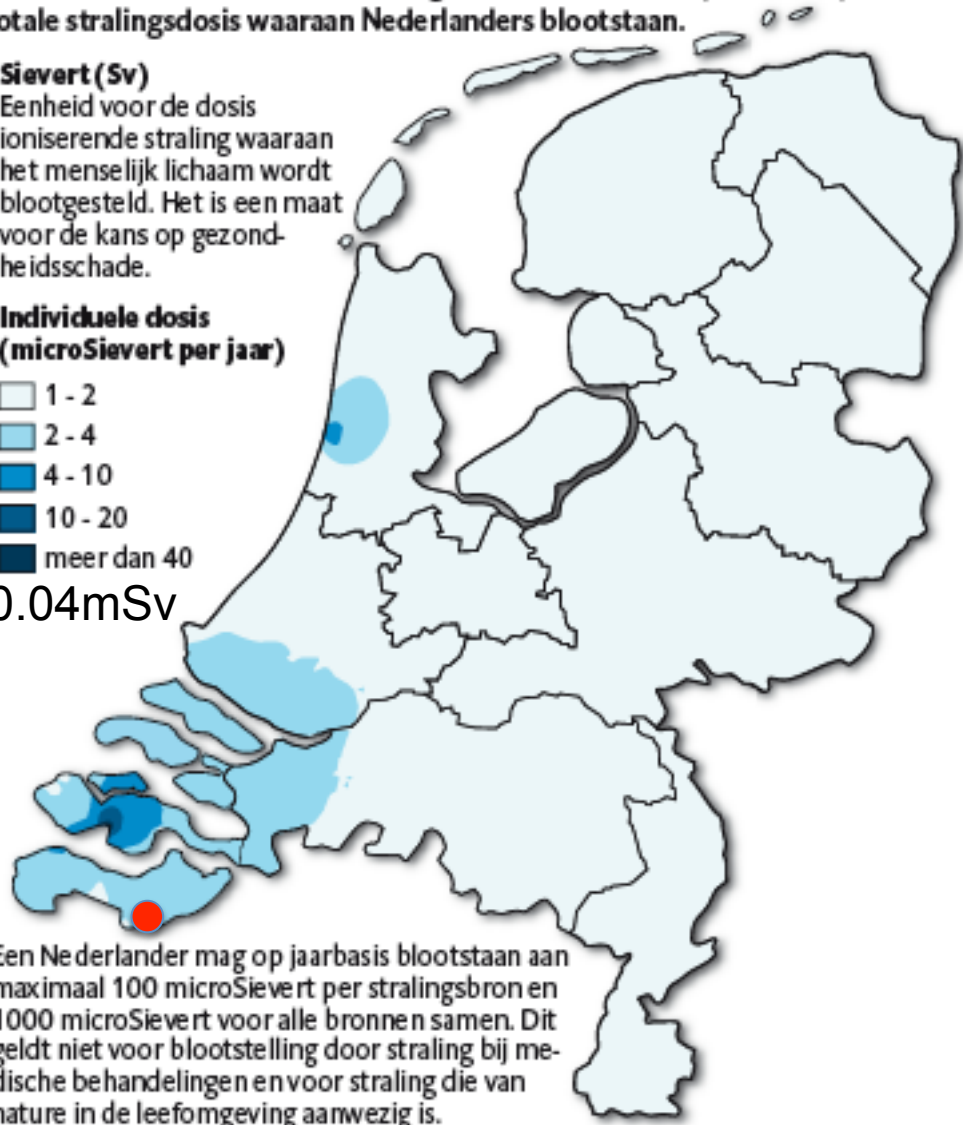
## Sievert (Sv)

Eenheid voor de dosis ioniserende straling waaraan het menselijk lichaam wordt blootgesteld. Het is een maat voor de kans op gezondheidsschade.

## Individuele dosis (microSievert per jaar)

- 1 - 2
- 2 - 4
- 4 - 10
- 10 - 20
- meer dan 40

>0.04mSv



Een Nederlander mag op jaarbasis blootstaan aan maximaal 100 microSievert per stralingsbron en 1000 microSievert voor alle bronnen samen. Dit geldt niet voor blootstelling door straling bij medische behandelingen en voor straling die van nature in de leefomgeving aanwezig is.

Donja Odijk | bron Compendium voor de Leefomgeving

ThermPhos (vroeger Hoechst)  
bij Borssele  
NU gesloten --> Kazakstan

fabriek haalt fosfor uit erts  
hoofdzakelijk voor  
fosfaat kunstmest

voornaamste vervuiling: DIOXINE

maar ook radioactiviteit die  
als bij product in het erts zit  
(uranium, thorium, polonium etc.)

was grootste bron  
voor radioactiviteit in lucht NL

# Besluit



Erik HEIJNE CERN EP Department

Quark Travel januari-maart 2025