



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

Erik H.M. Heijne



CERN EP Department Geneva

Inst. of Experimental and Applied Physics

aan de Czech Technical University in Prague

Nikhef Amsterdam

Nikhef





NE A

AGE



Steen tijd



Brons tijd



IJzer tijd



Silicium tijd

Halfgeleiders Silicium / Silicon

-



Mendeleev ~1880

Periodiek Systeem van Elementen

Halfeleiders

1	IA	1	H	IIA	2	He																				
2	3	Li	4	Be	5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne										
3	11	Na	12	Mg	III B	IV B	V B	VIB	VII B	VIII	IX	X	IB	13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar	
4	19	K	20	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr
5	37	Rb	38	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe
6	55	Cs	56	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn
7	87	Fr	88	Ra	+Ac	Rf	Ha	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 ->  ngte 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

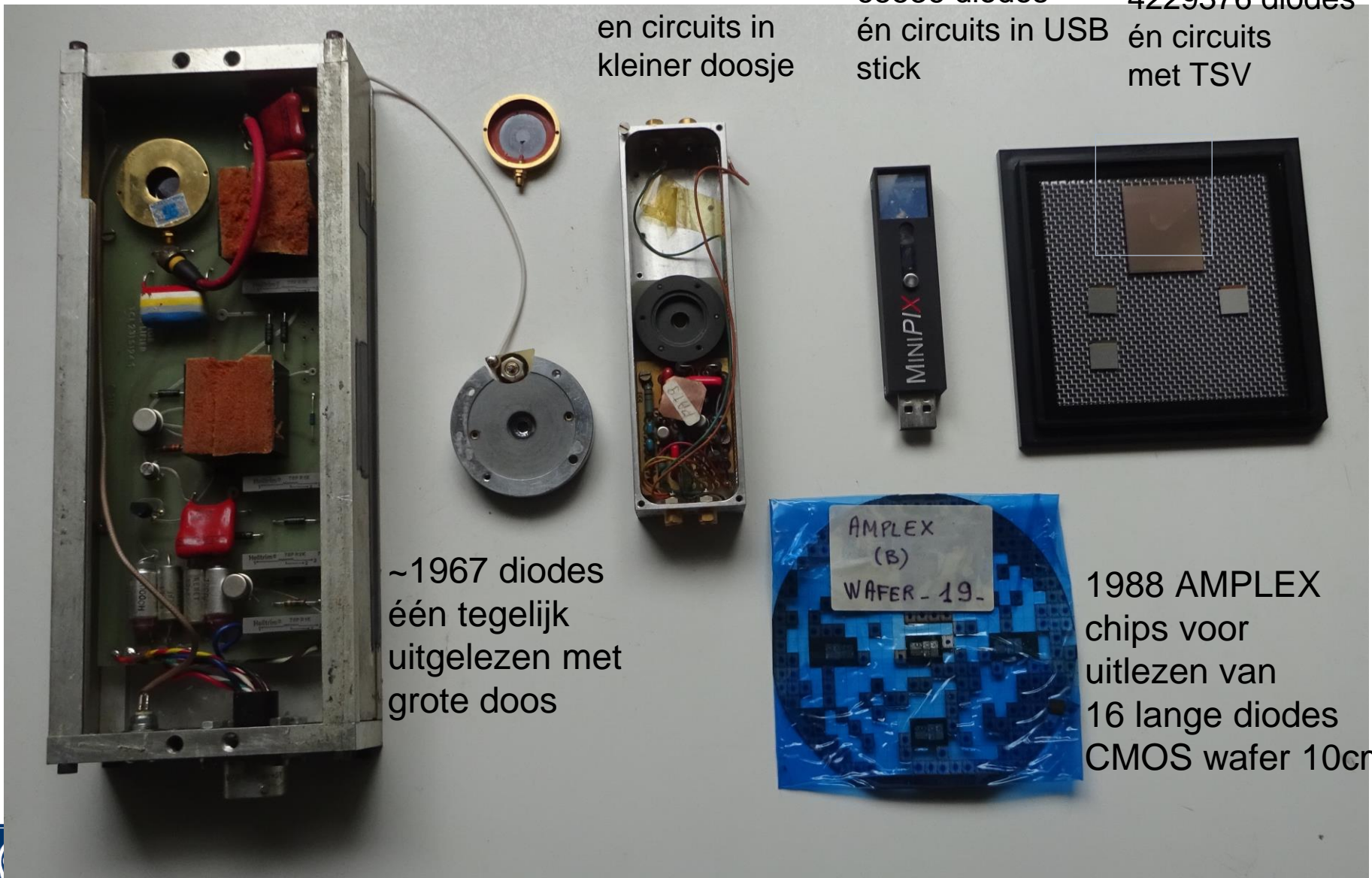
= deze werden eerst nog in Vlaanderen of Zwitserland gemaakt

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

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



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

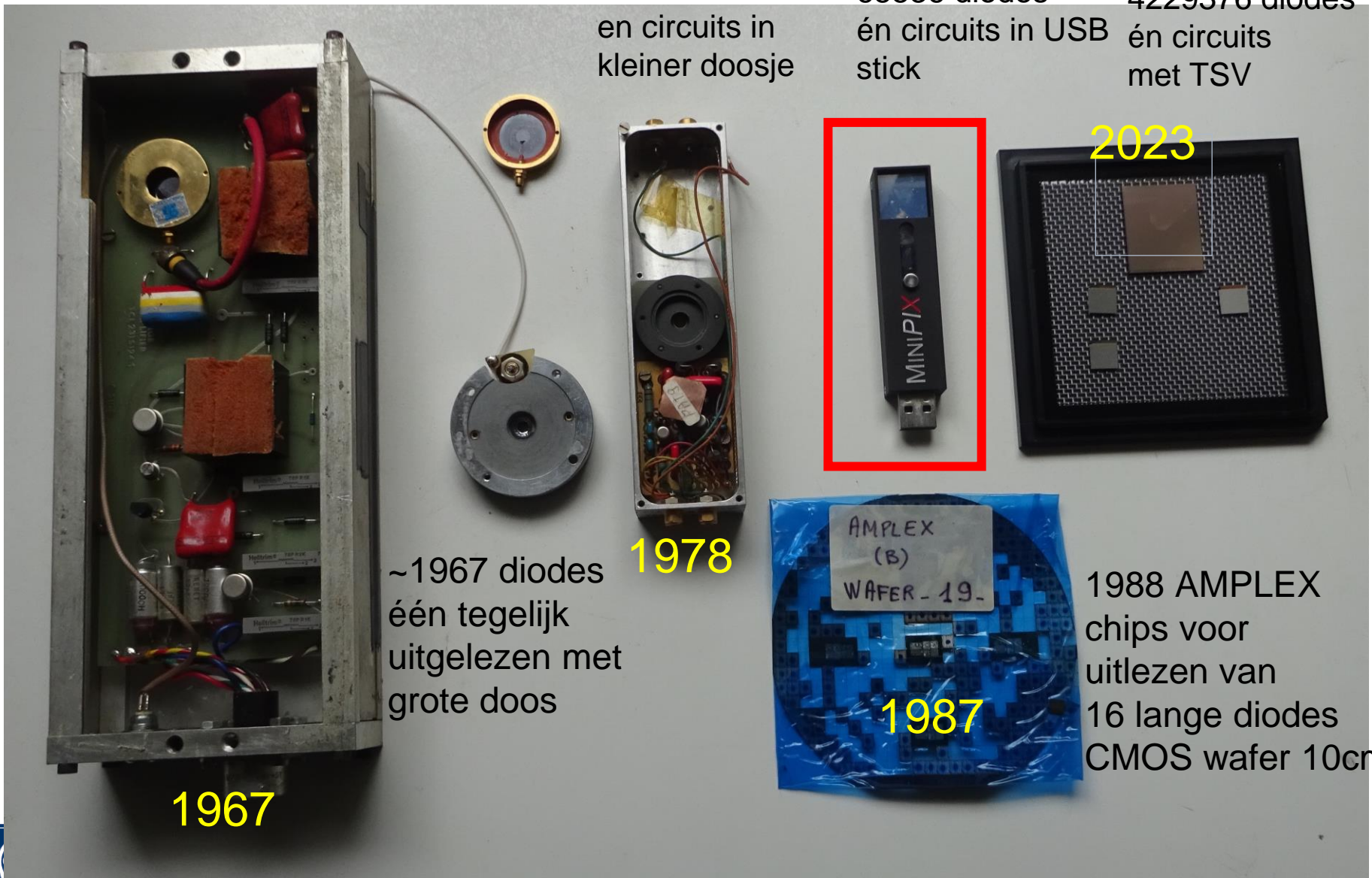
~1967 diodes één tegelijk uitgelezen met grote doos

AMPLEX (B) WAFER - 19 -

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

2023



met signaal processing in elke pixel worden nieuwe toepassingen mogelijk

Timepix kan amplitude van het signaal meten in keV

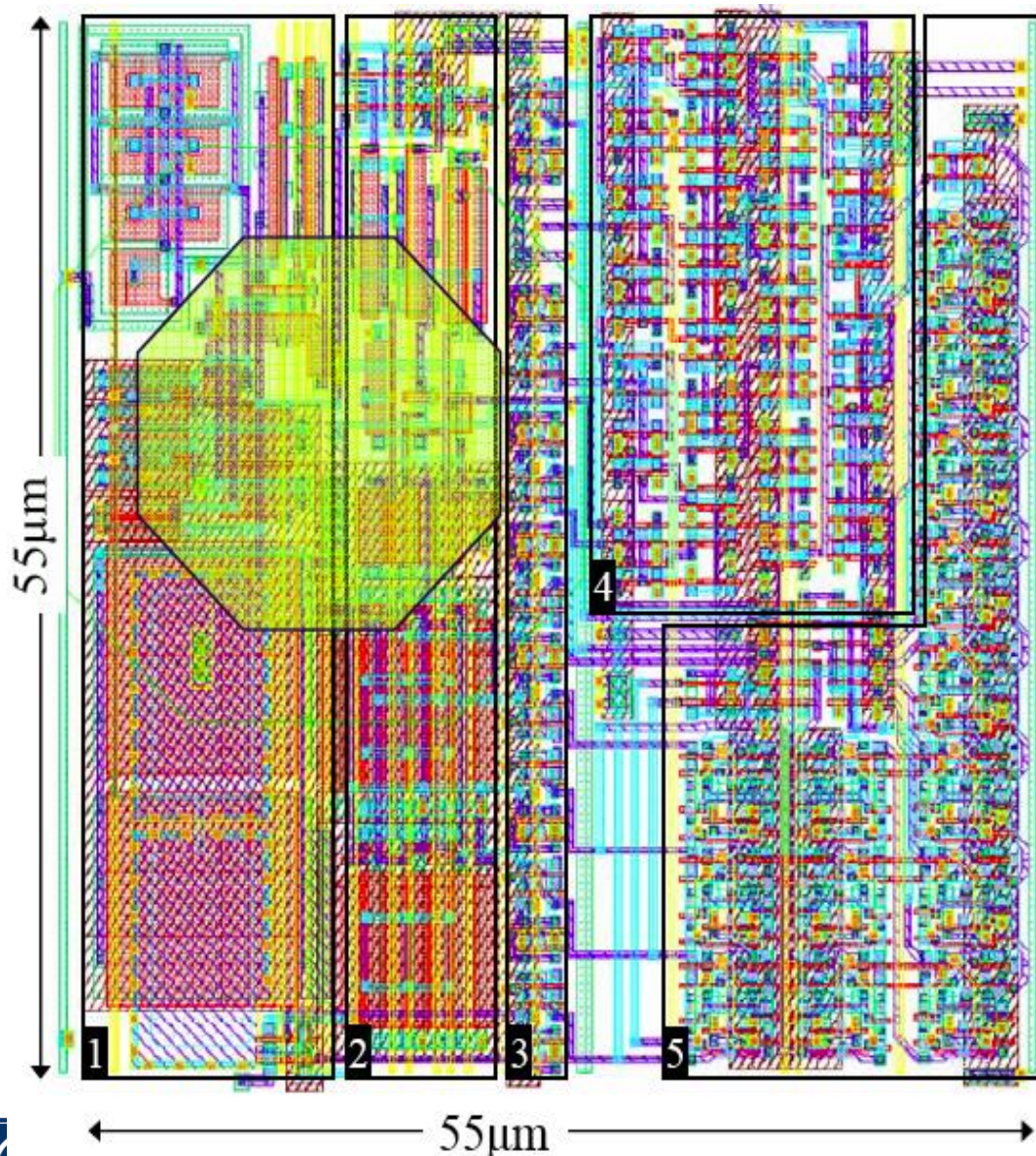
en ook de tijd van inval van het deeltje/quantum in ns

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

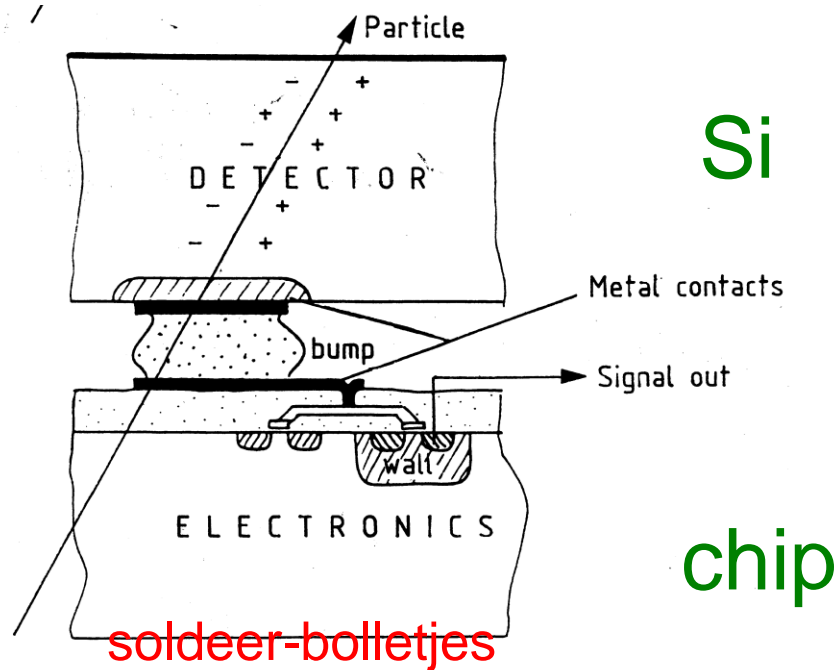
~550 transistors



Omega hybride SI PIXEL SENSOR 1991

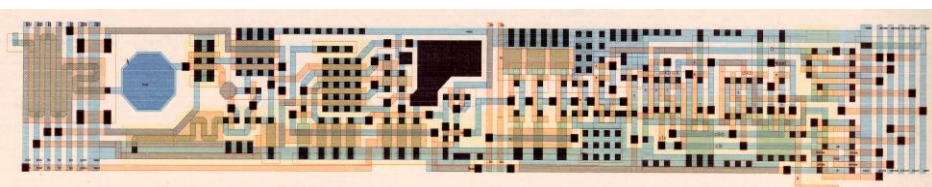
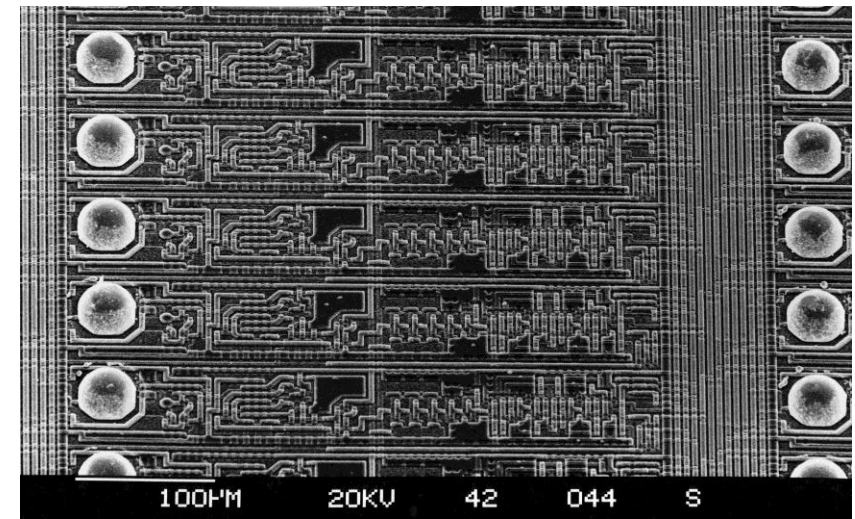
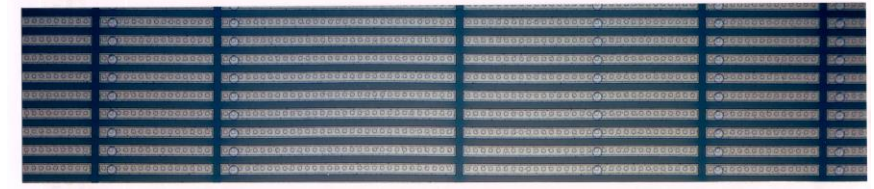
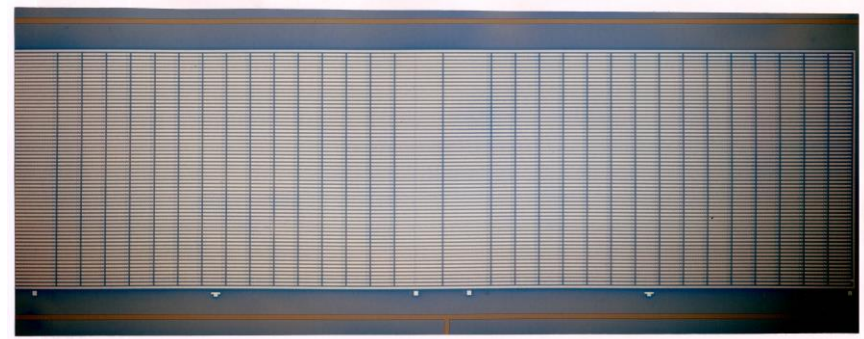
CERN: Campbell, Heijne

Sensor: Matrix van diodes geeft echt 2-dim beeld



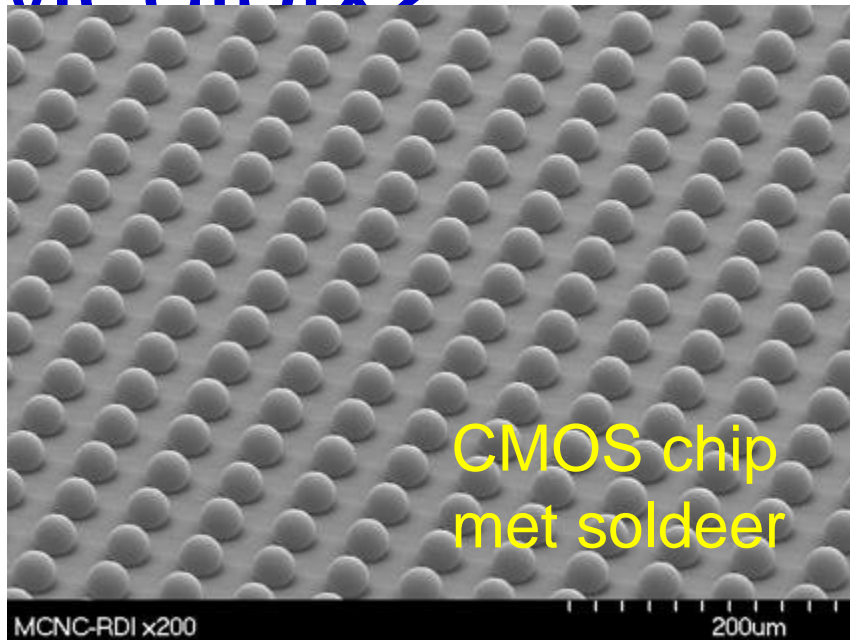
+

elektronica voor signaal-verwerking



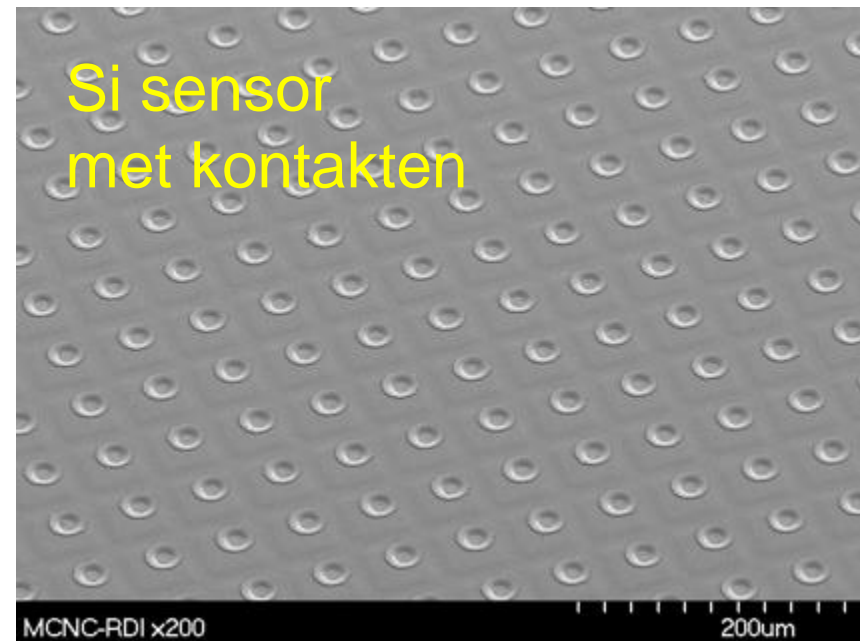
2001 hybride pixel detector

Medinix2



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

PITCH 55 μm



MEDIPIX2 CERN 2001
Campbell & Llopart
256 kolommen x 256 rijen
pixel 55 μm x 55 μm



wat kunnen wij dan nu hiermee?

•



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

H6 Pion Bundel 2007
Inkomend van rechts



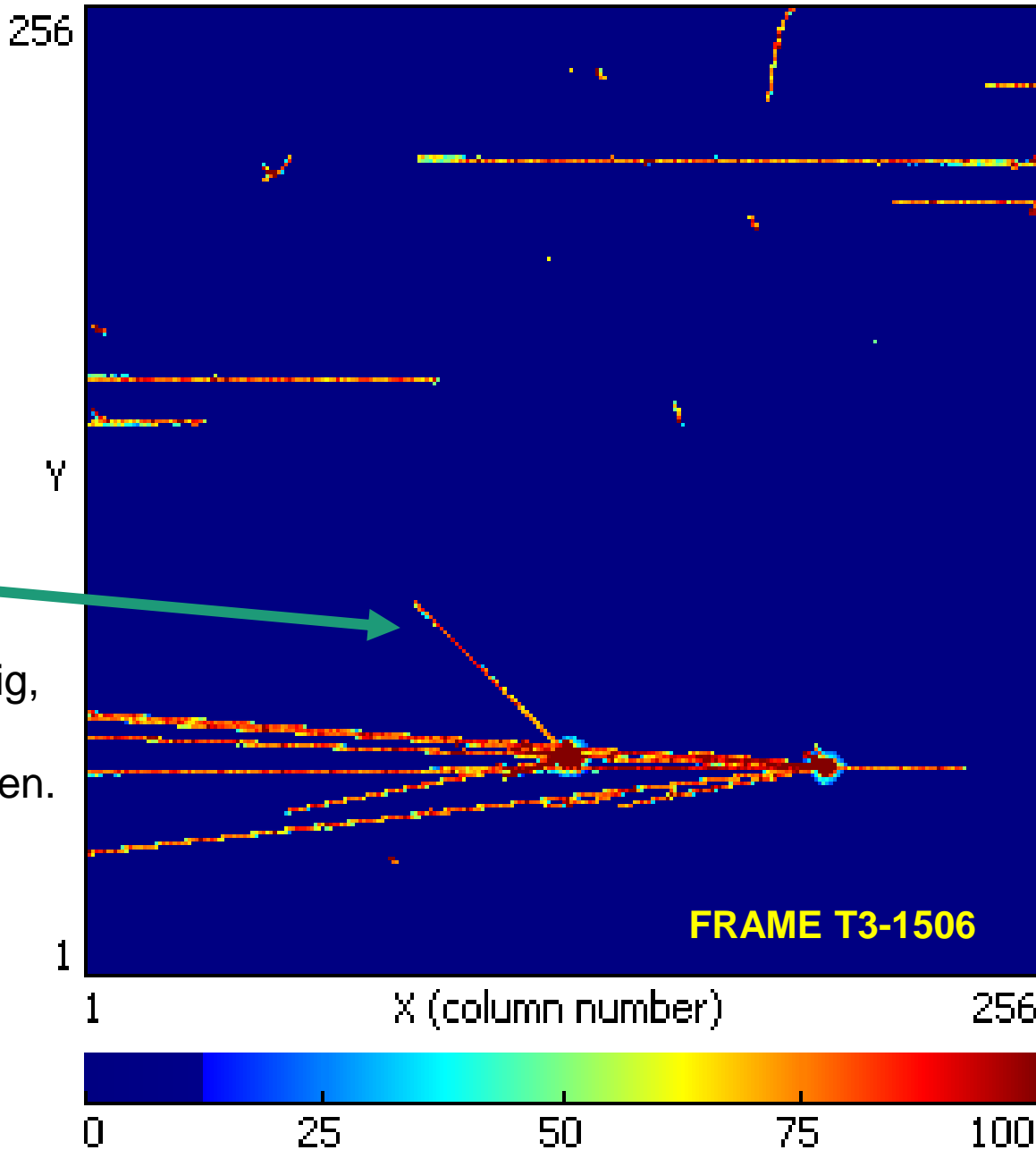
lopen de korte sporen
naar voren of naar achter ?
er zijn meer sensor vlakken nodig,
of je zou de doorlooptijd van de
signaal electronen moeten kennen.

Dit kan nu in de TPX2-3-4

metingen door Erik
samen met John Idarraga



Erik HEIJNE CERN EP Departm



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



Binnenste silicium detektors in CMS



ATLAS IM

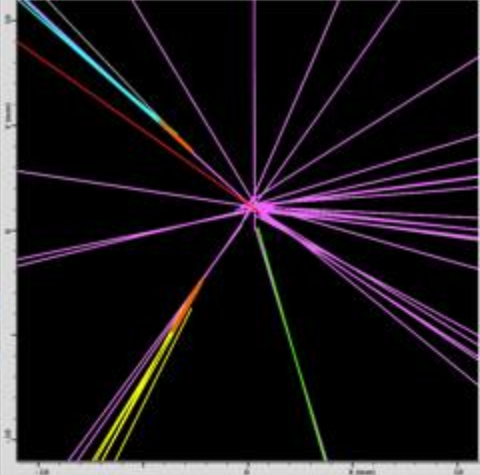
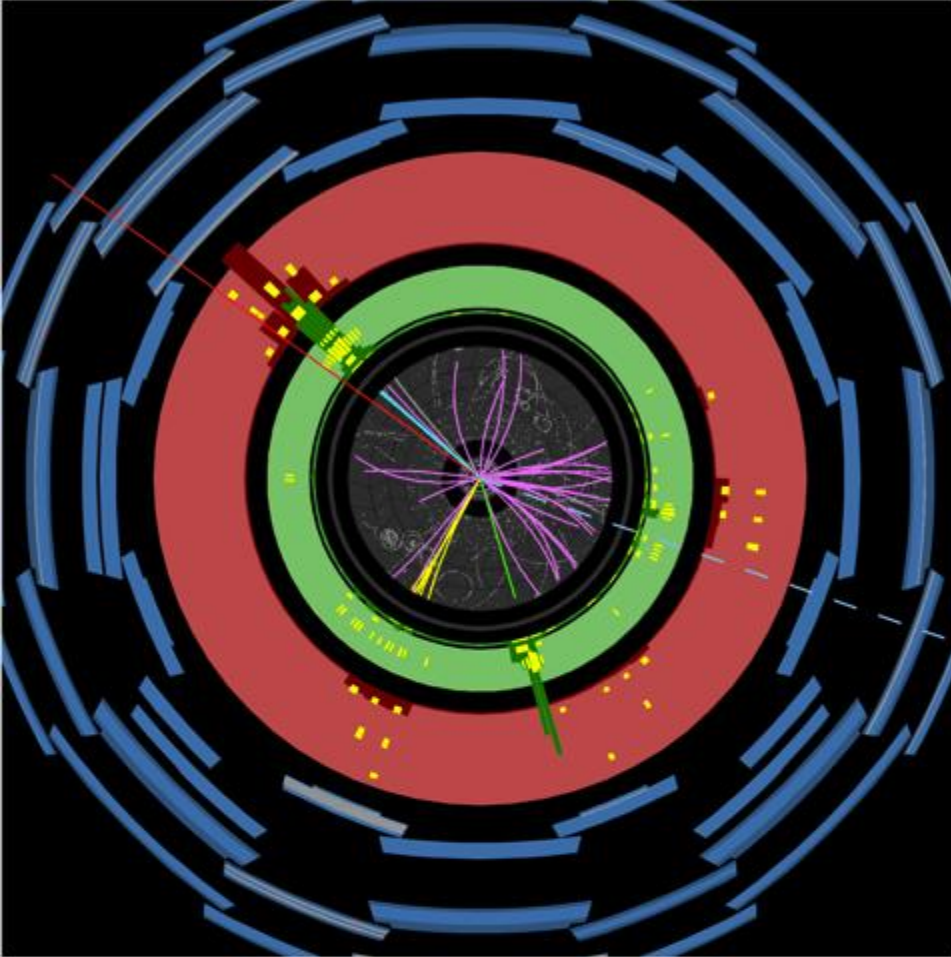
Imaging Now
All Electronic
with 3-D
Reconstruction

Many Tracks
and 2 "Jets"

40 million / sec

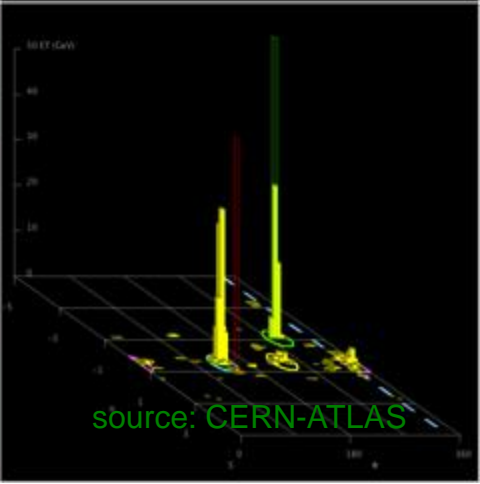
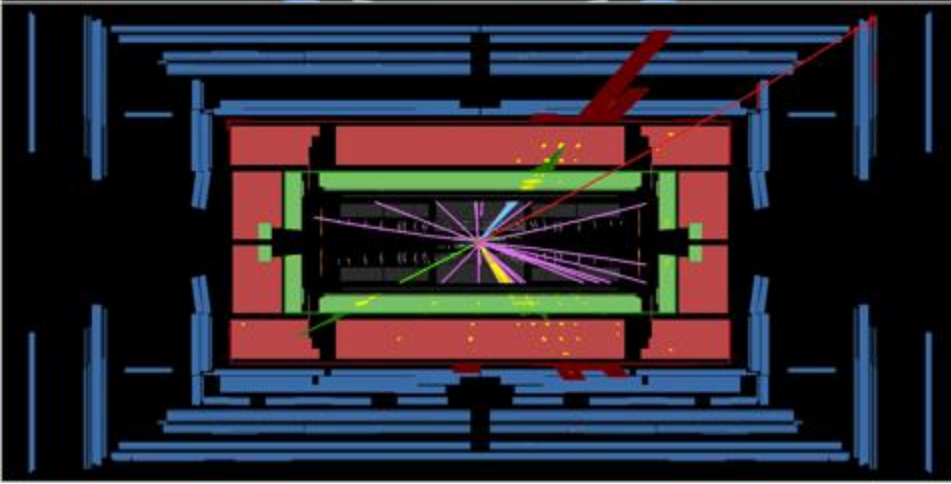
Secondary
Vertex:
a short-lifetime
particle is a
messenger for
something new

see next
blow-up



ATLAS
EXPERIMENT

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



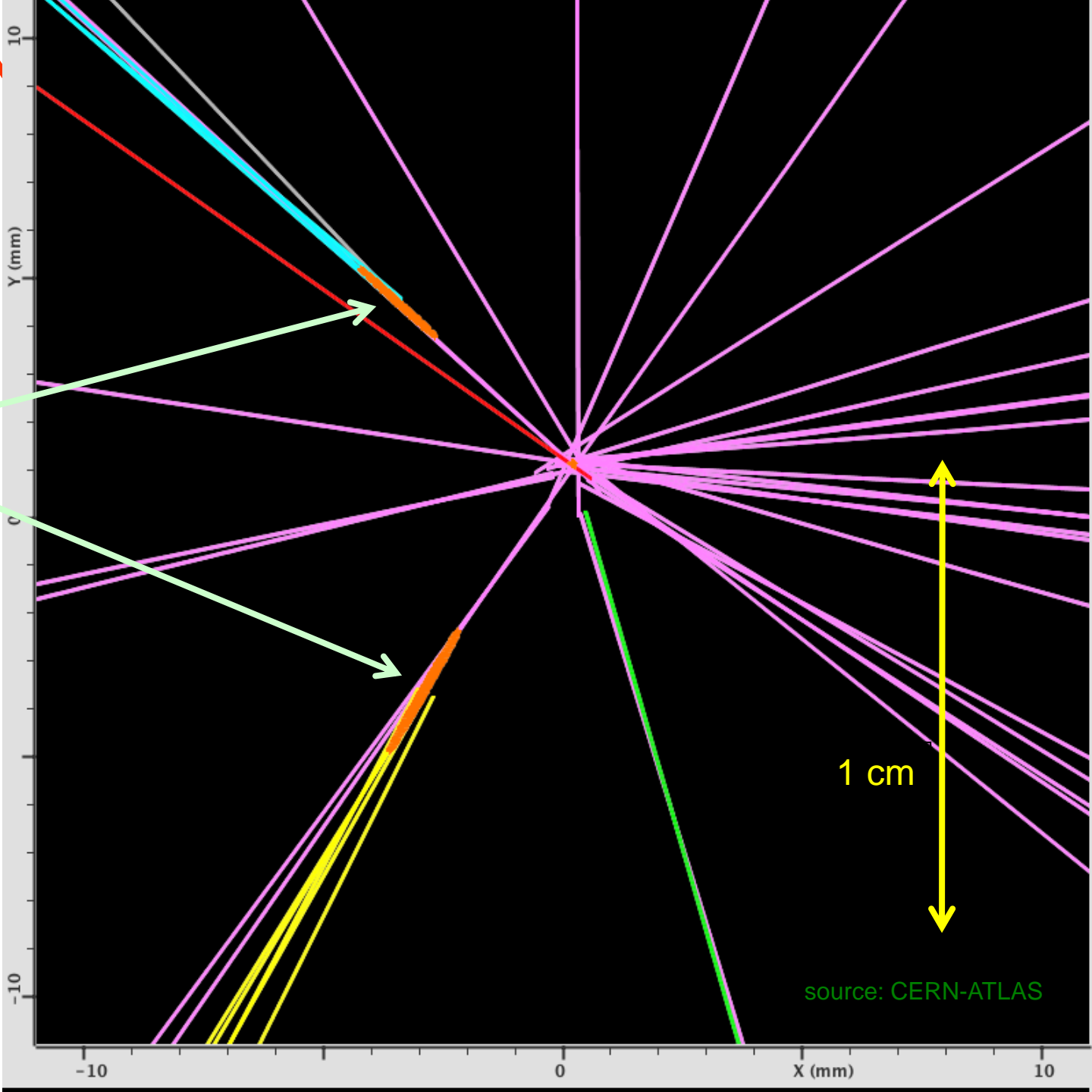
ATLAS IN

Blow-up

Details around
Primary Vertex

Two Secondary
Vertices

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

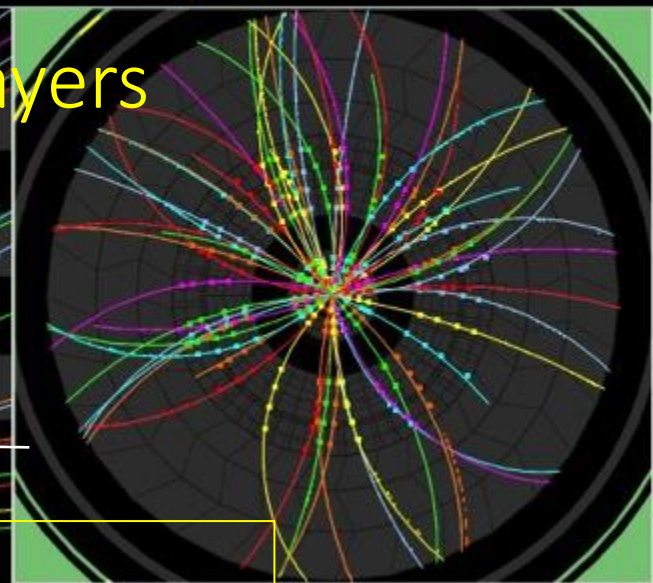
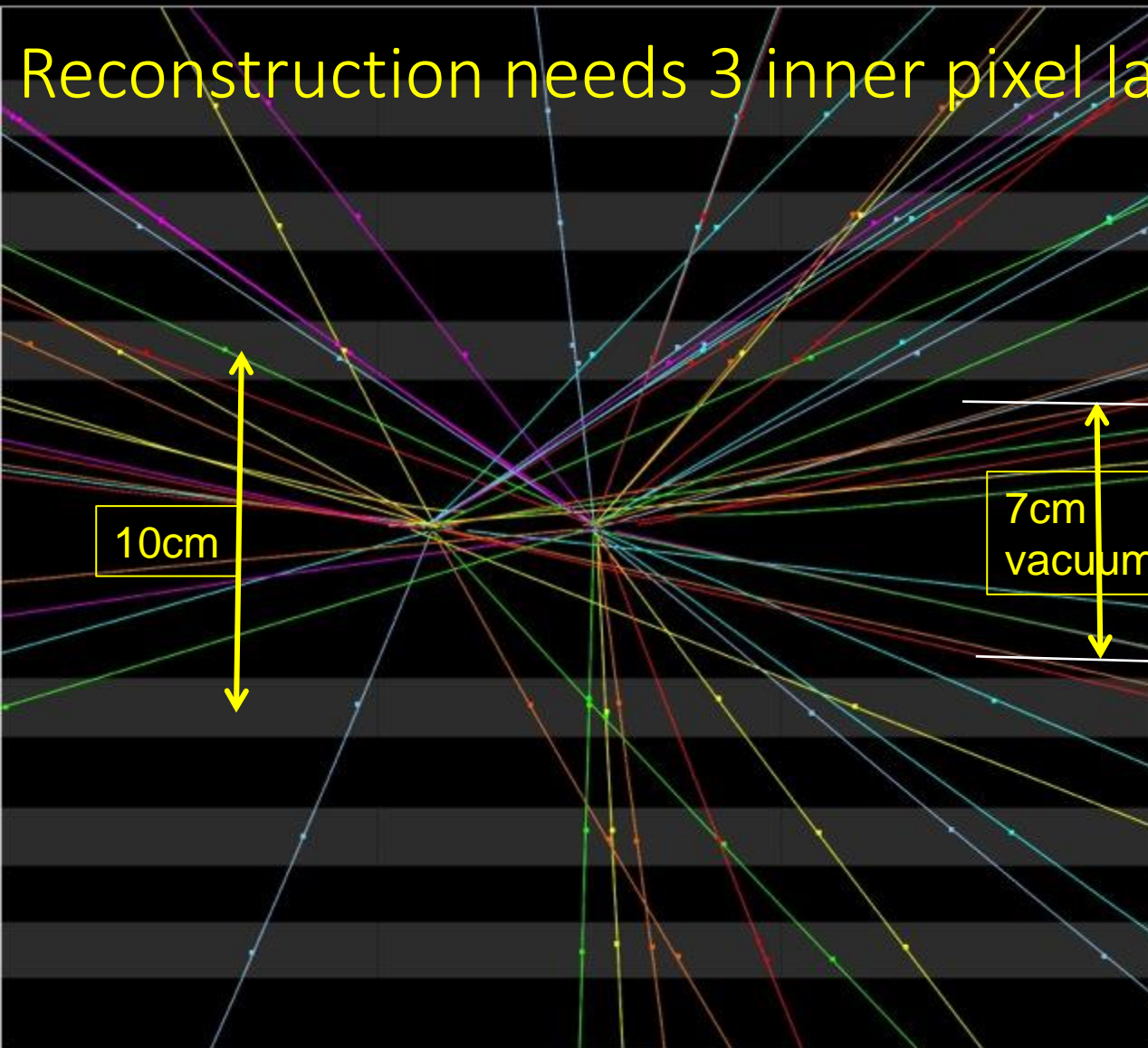


1 cm

source: CERN-ATLAS

Collision Event at 7 TeV with 2 Pile Up Vertices

Reconstruction needs 3 inner pixel layers

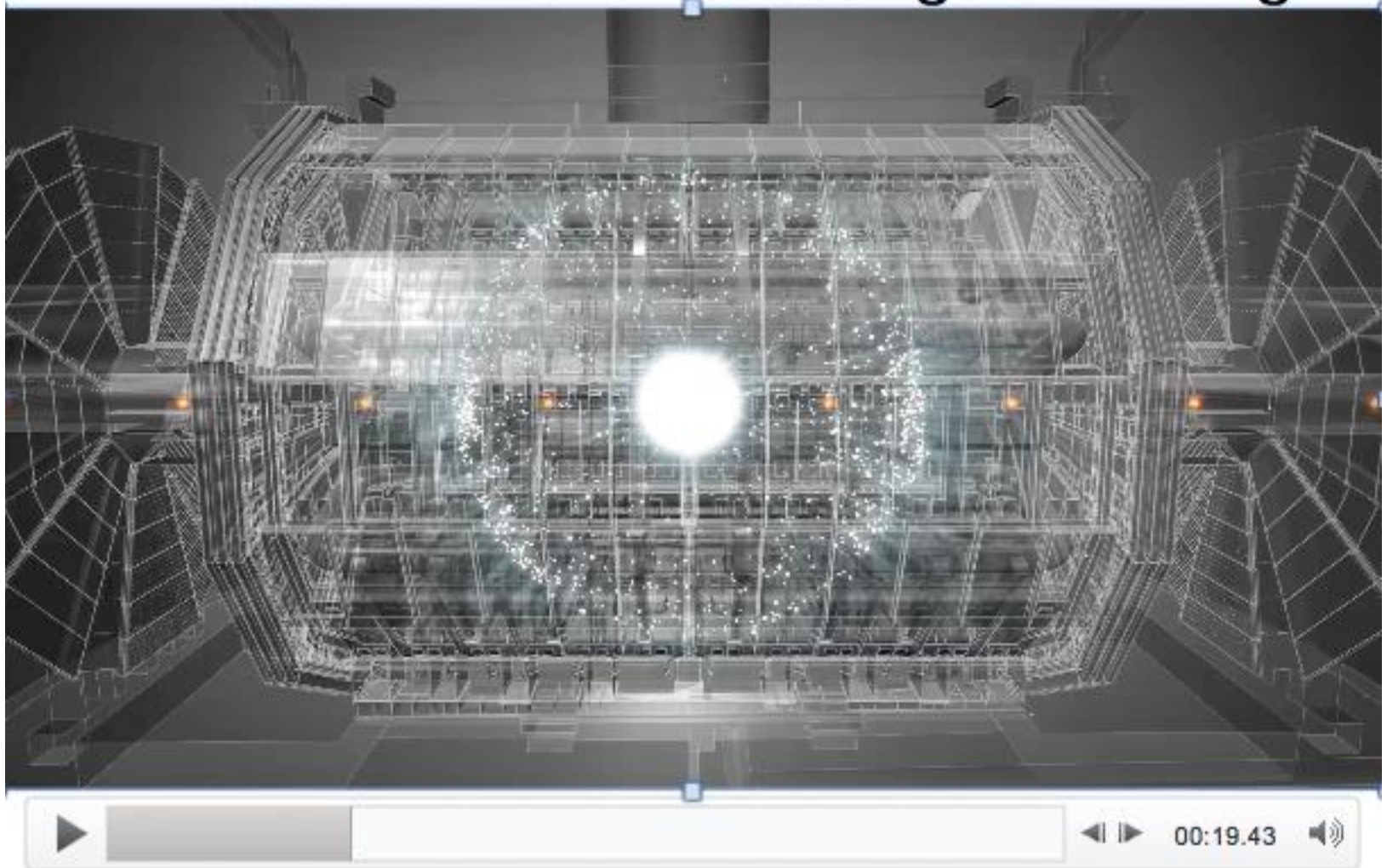


ATLAS EXPERIMENT

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



Erik HEIJNE CERN EP Department

Quark Travel januari-maart 2025

experimenteren met een Timepix



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*

ri-maart 2025



TIMEPIX praktijk morgen, vrijdag

kompakte deeltjes afbeelding
via USB aansluiting
op Mac of PC

programma Pixet Advacam Praag



Pixet software

samenwerking met IEAP/CTU Praag

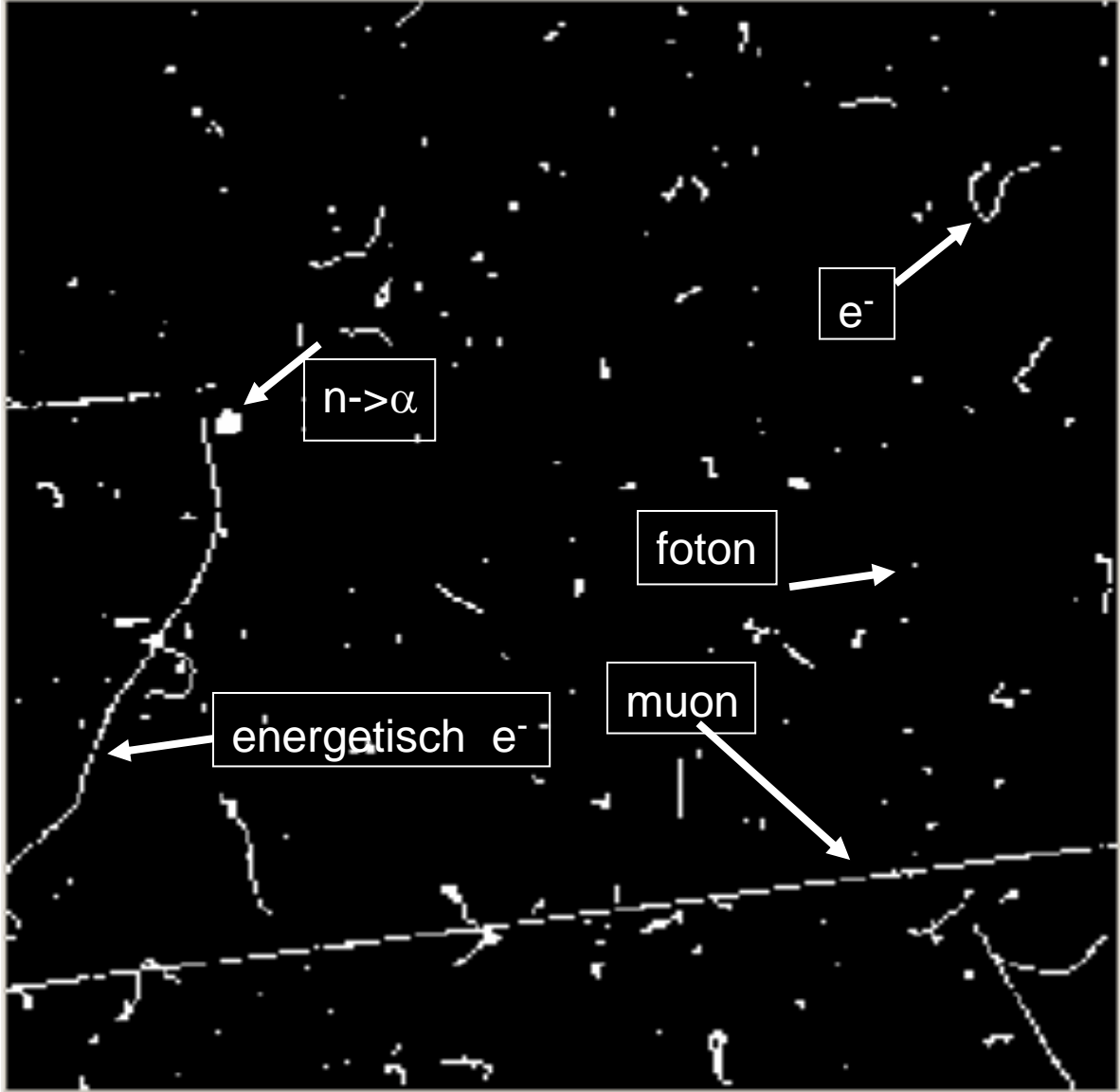
kosmische deeltjes geven typische clusters in Medipix

256 x 256 PIXELS
300 μm dik Si


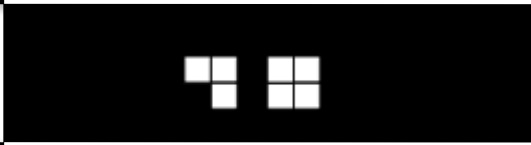
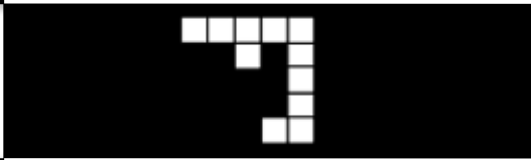
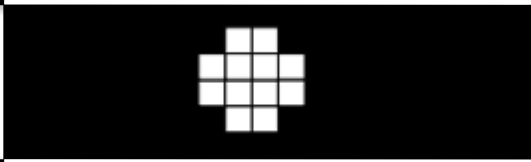
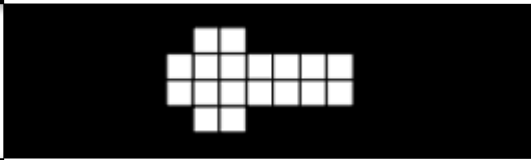

te gebruiken als
dosis meter

- 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 detector

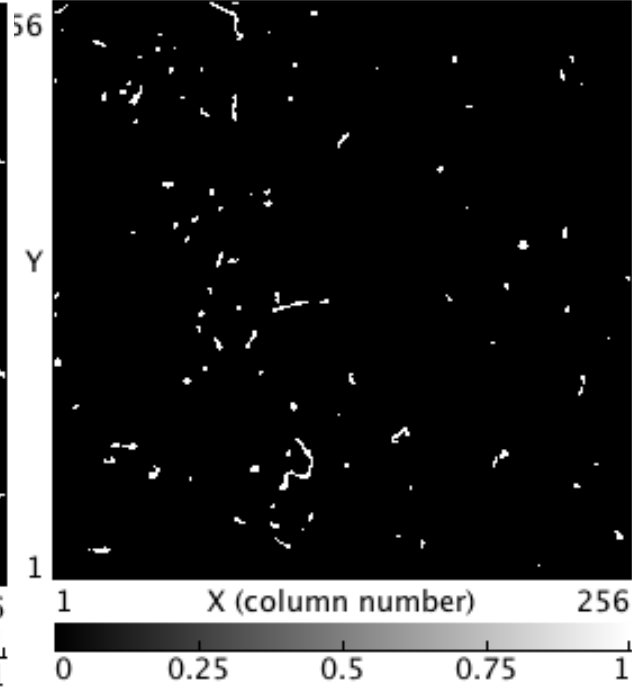
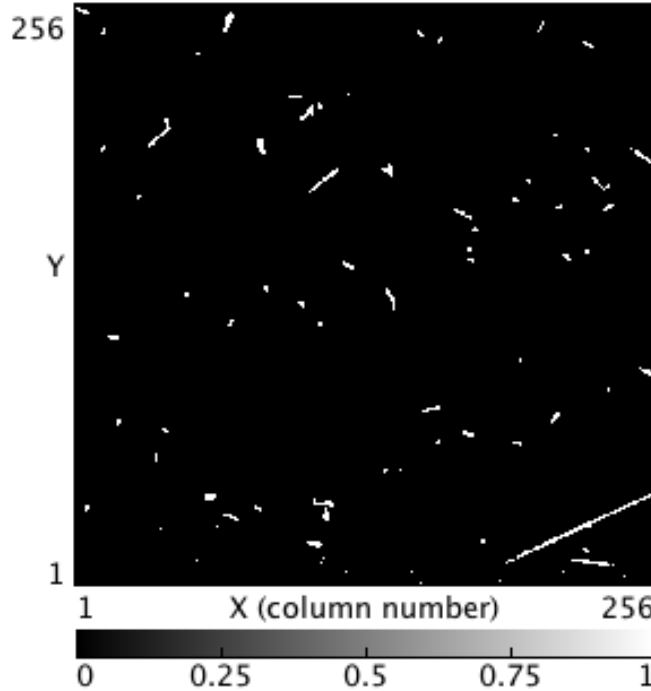
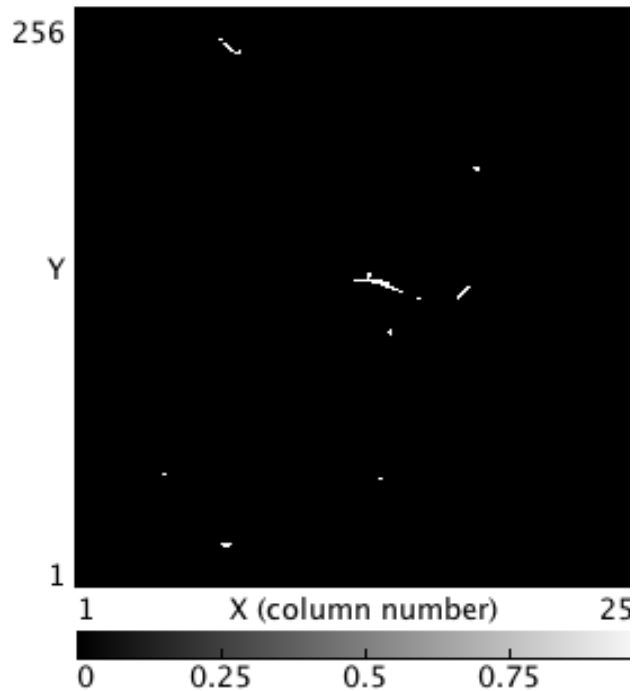
1) Dot		Photons and electrons (10keV)
2) Small blob		Photons and electrons (~100keV)
3) Curly track		Electrons (MeV range)
4) Heavy blob		Heavy ionizing particles with short range (alpha particles,...)
5) Heavy track		Heavy energetic ionizing particles (MeV protons,nuclei, Fe, ...)
6) Straight track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

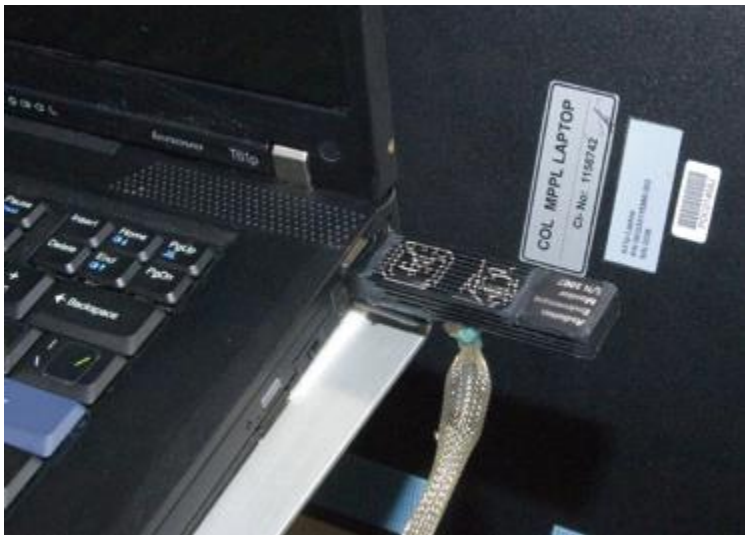
toepassingen van de CERN pixel technologie



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



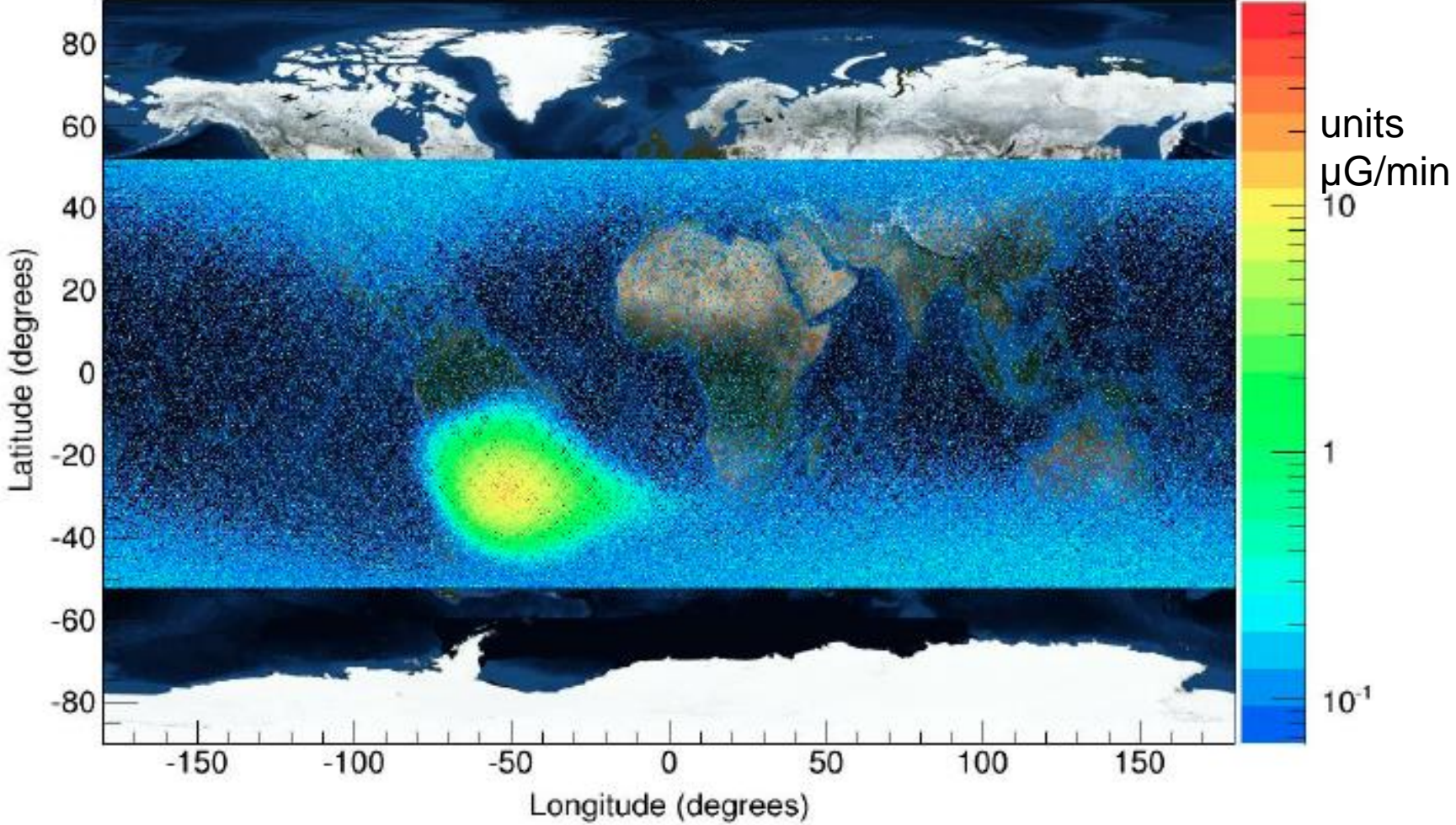
Pixel chips voor dosimetrie in Int. Space Station ISS



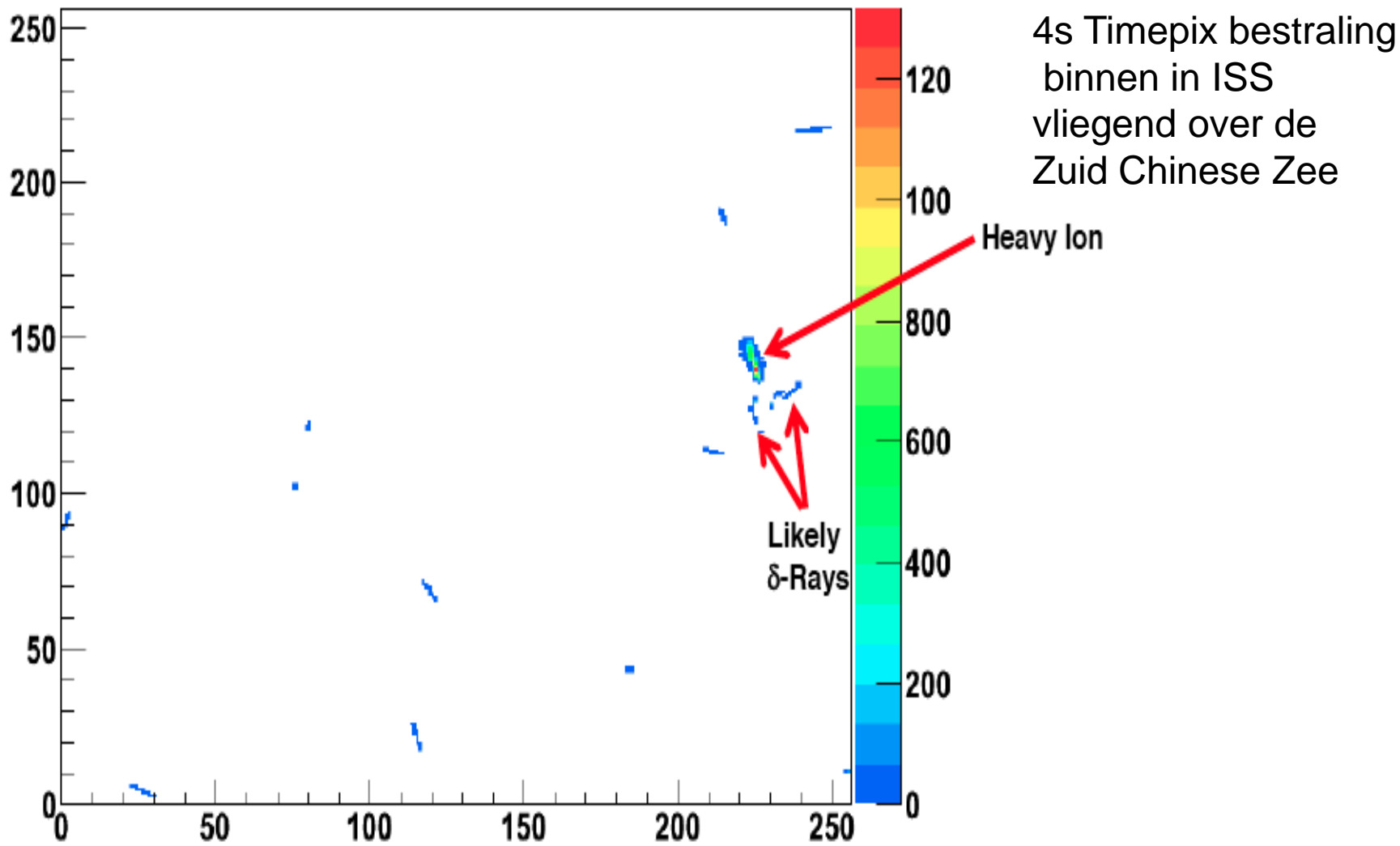
AMS grootste experiment....
Pixel chip wel het kleinste

stralingsmetingen in het Int Space Station ISS

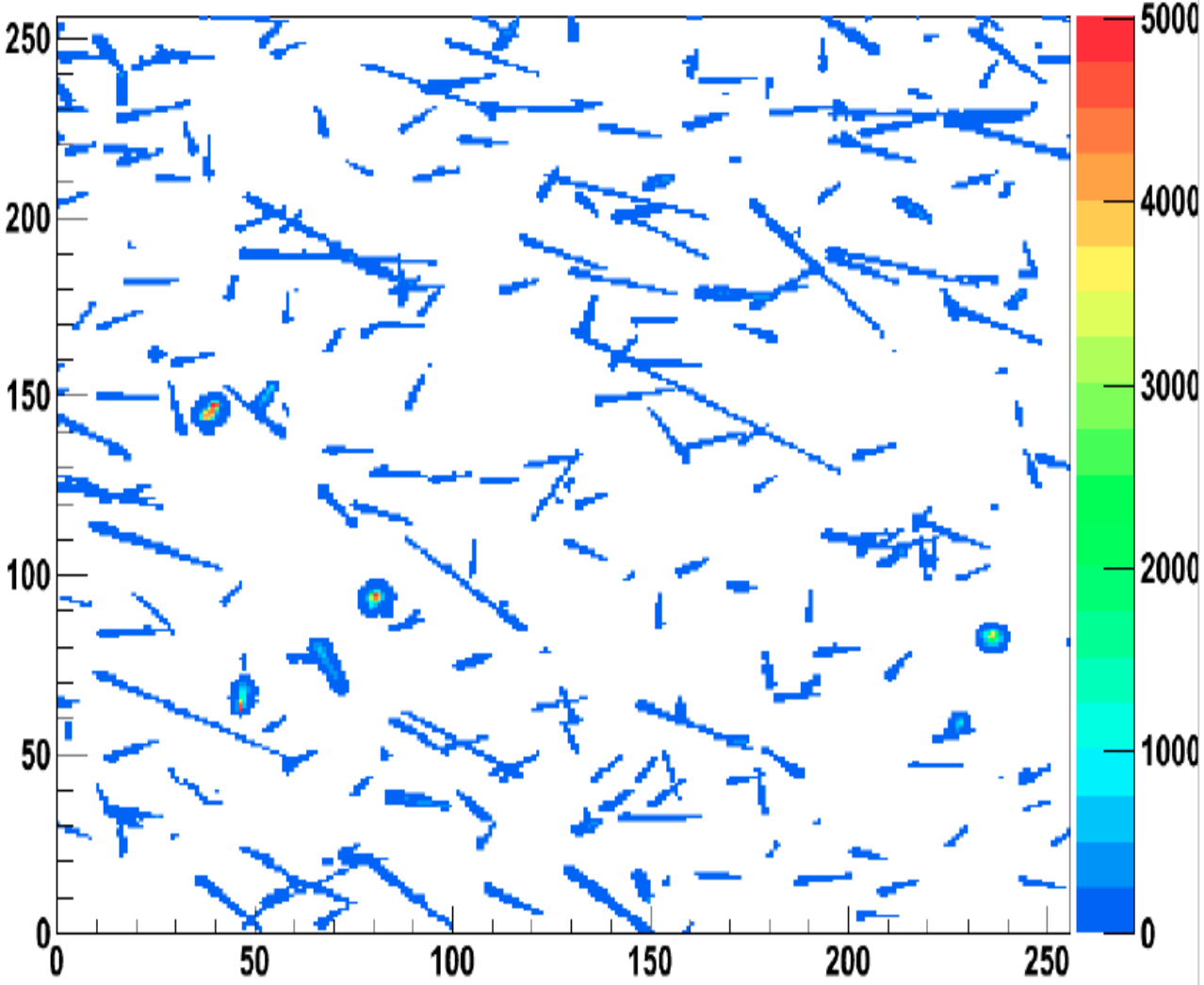
REM Orbital Dose Rate Map ($\mu\text{Gy}/\text{min}$)
D03-W0094 (S/N 1007)
GMT 2012/320 through GMT 2013/045



stralingsmetingen in het Int Space Station ISS



stralingsmetingen in het Int Space Station ISS



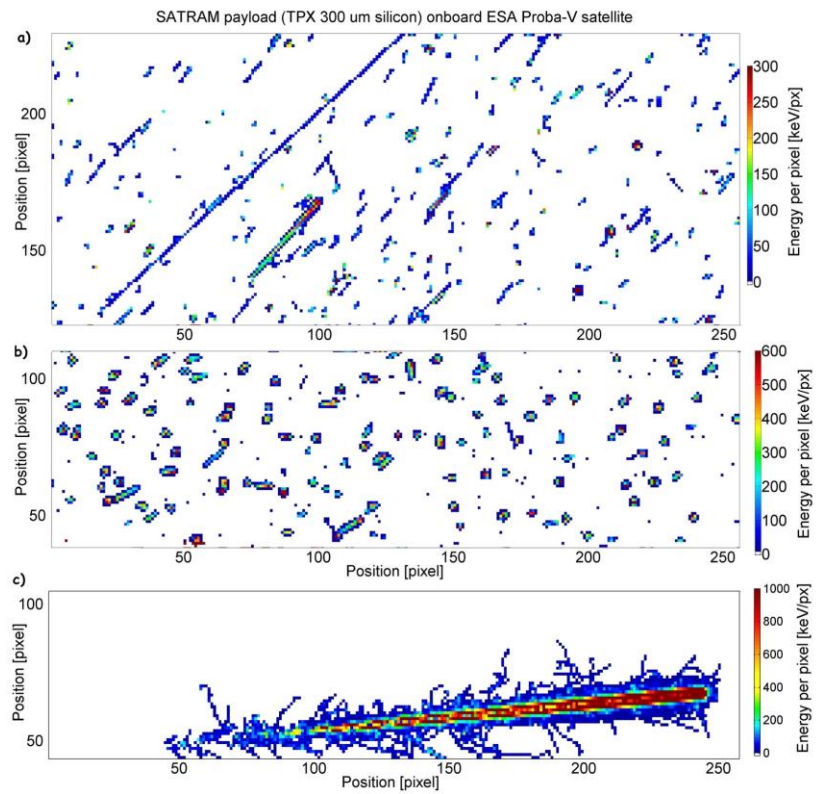
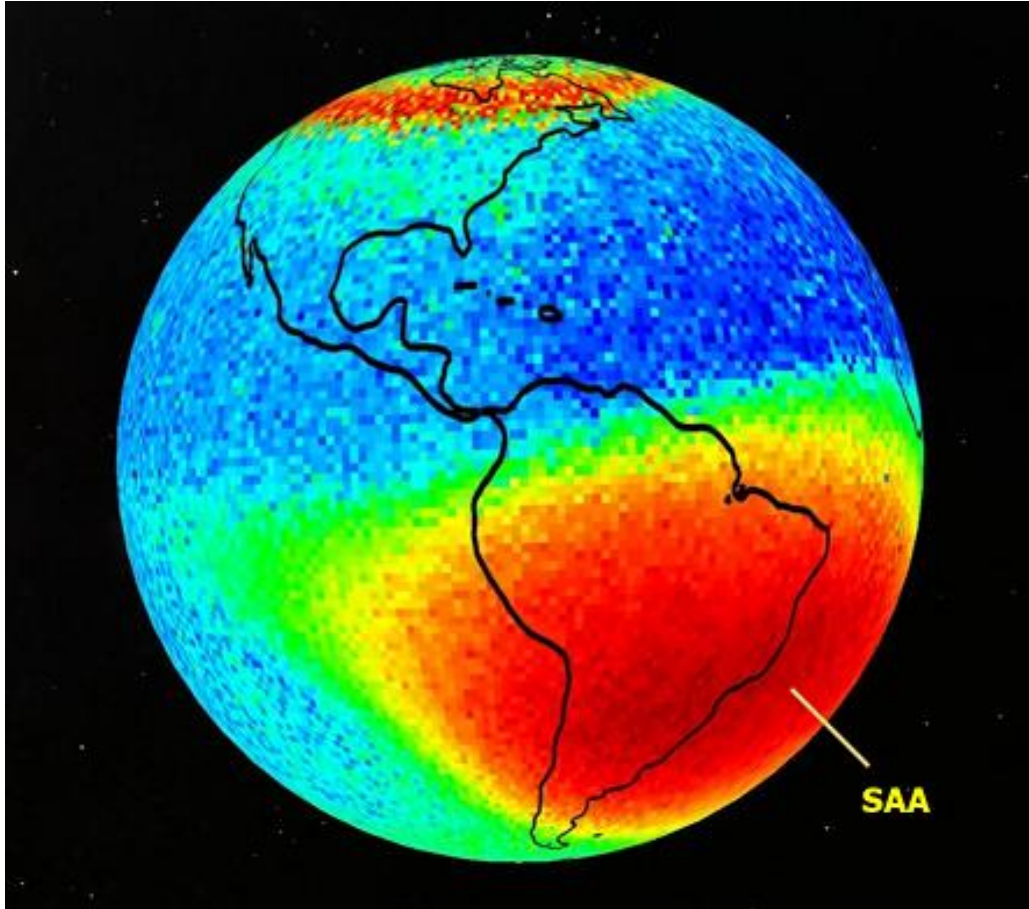
4s Timepix bestraling
binnen in ISS
vliegend door SAA
South Atlantic Anomaly



Pinsky - June 3, 2013 - Freiburg

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 ∂ electronen

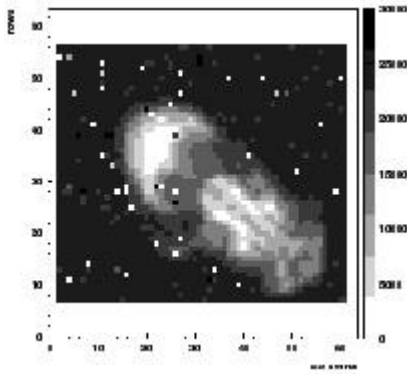


Medipix voor medisch onderzoek
'computed tomography' CT

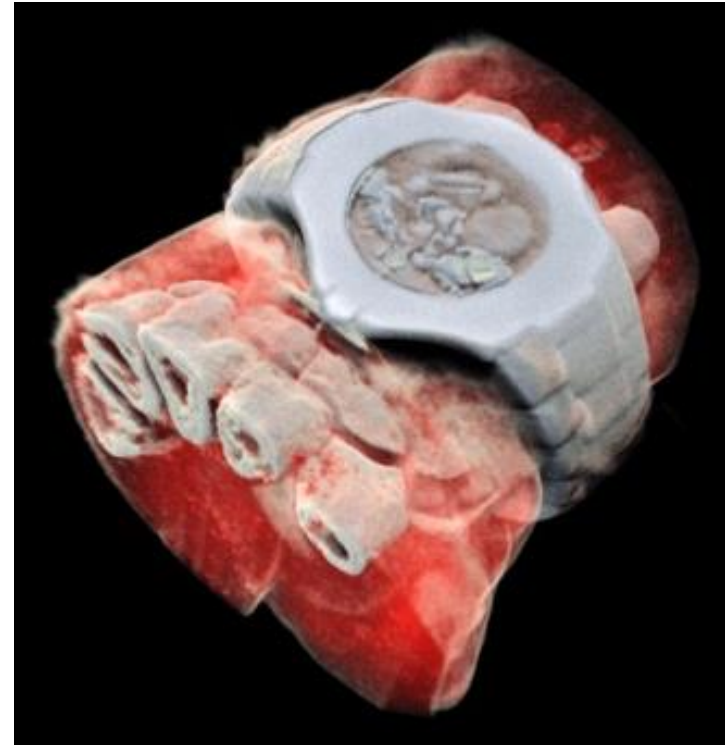
samenwerking met 'MARS'
in Canterbury, Nieuw Zeeland



Röntgen opnames : 1998 - 2019



Lukas Tlustos ~2001
met de eerste foton teller chip

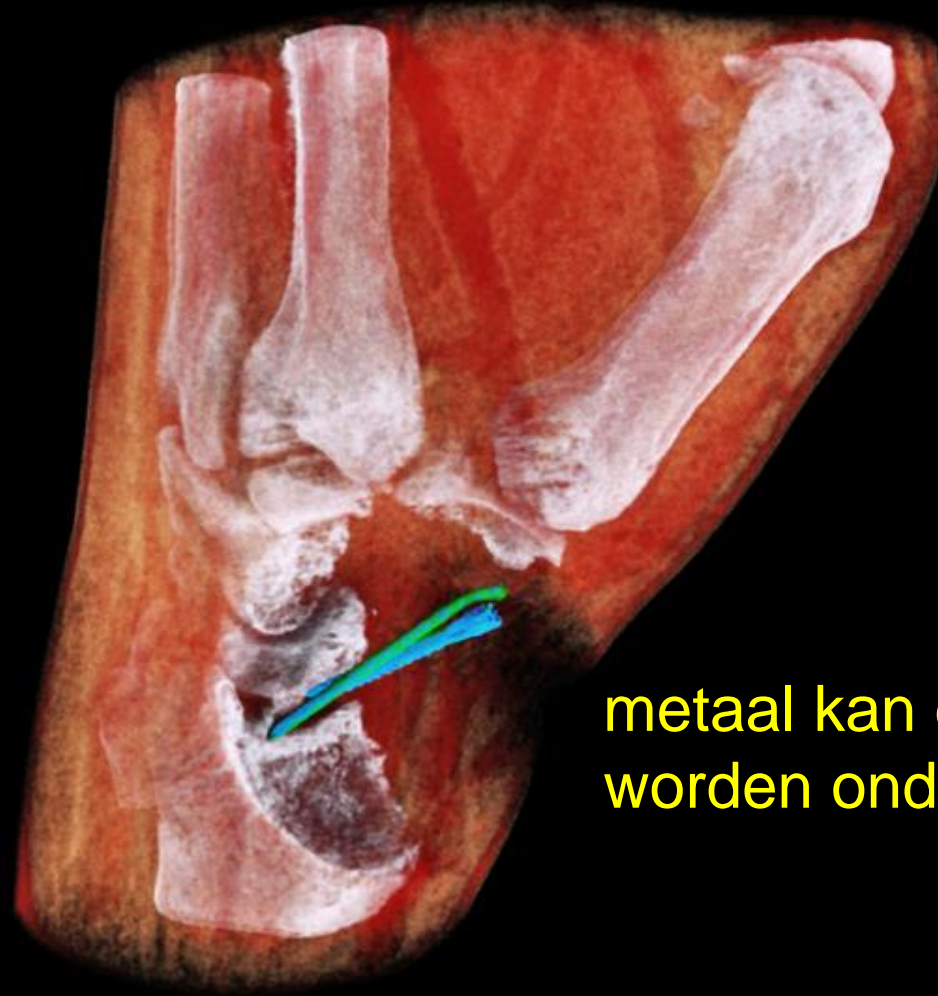


MARS Bio imaging Canterbury
Röntgen CT met Medipix3 2019

- processing van individuele fotonen
- begint nu gebruikt te worden



benutten van de energie van ieder

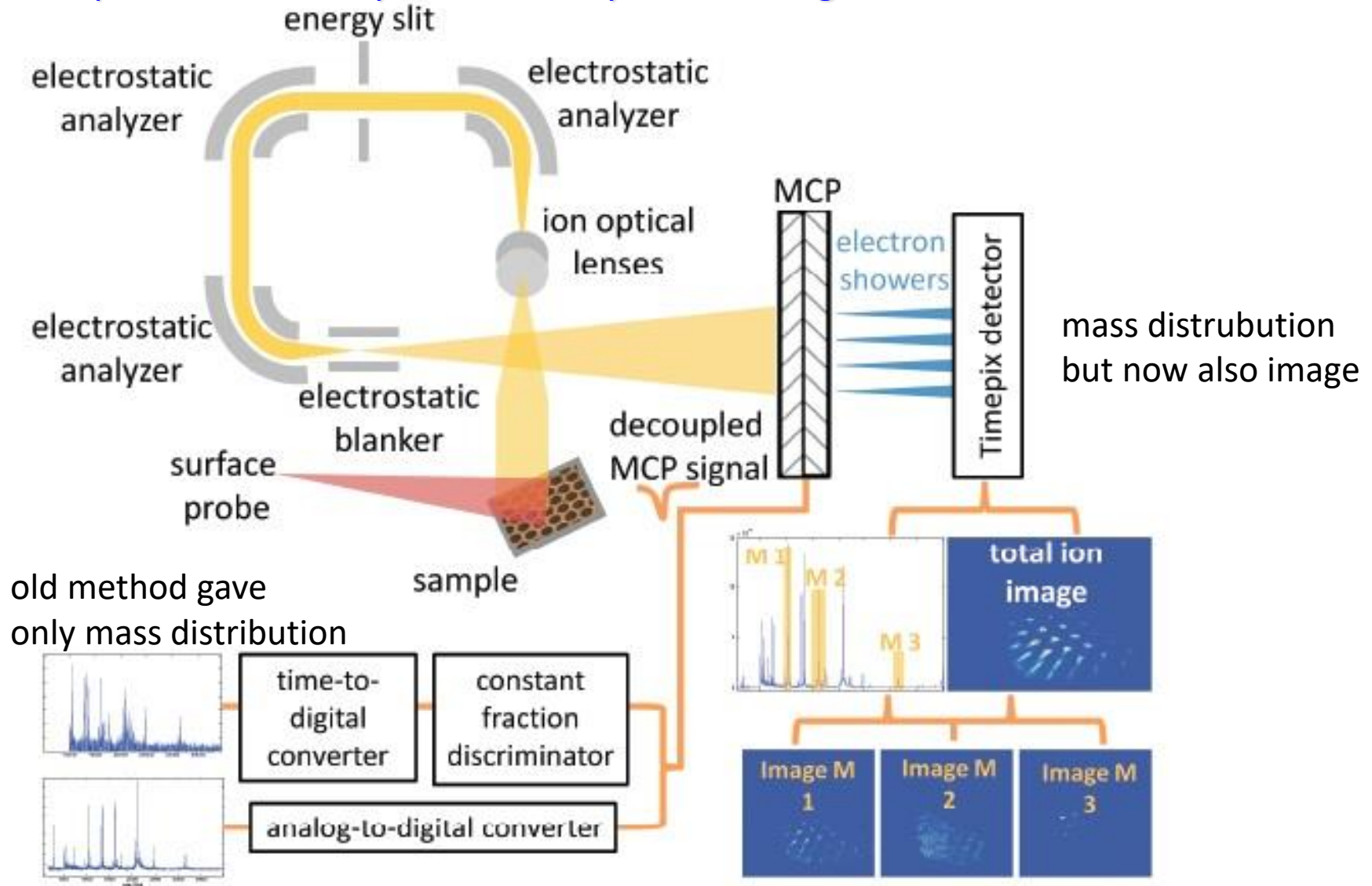


metaal kan goed
worden onderscheiden



Timepix voor molecuul-spectroscopie

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

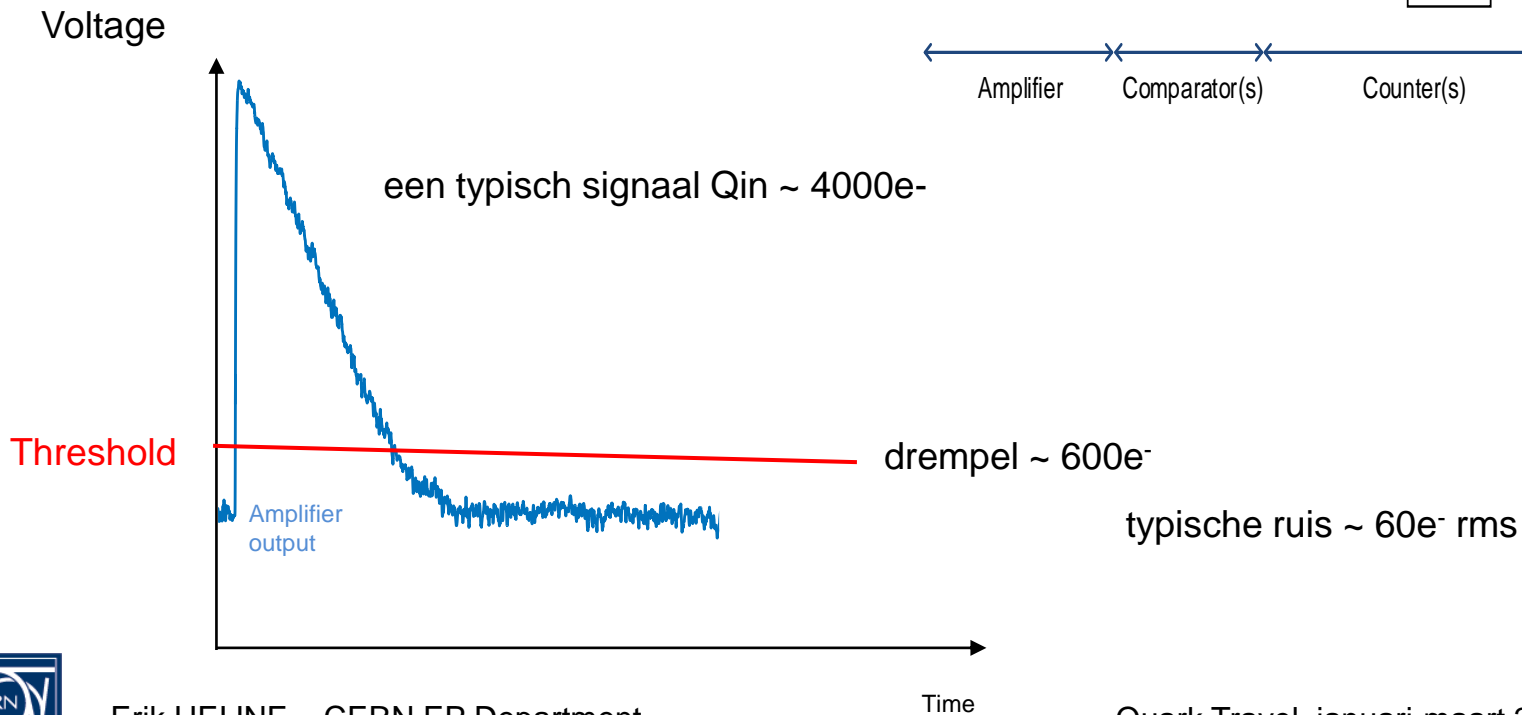
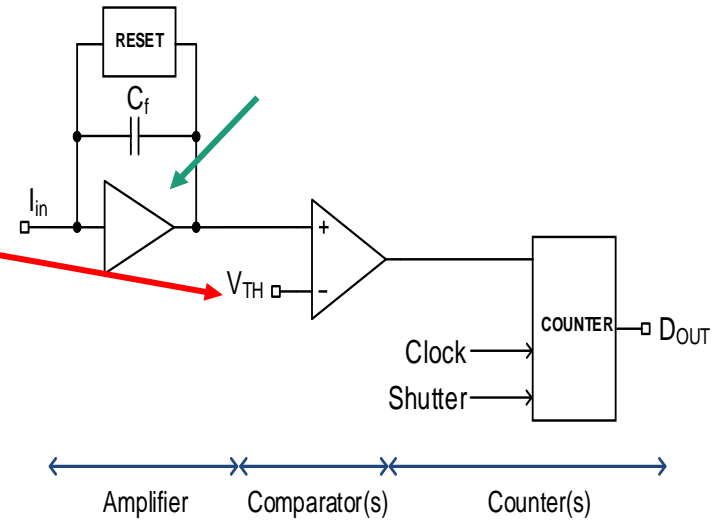


Timepix schakelingen



Werking van Timepix detektoren – het principe

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



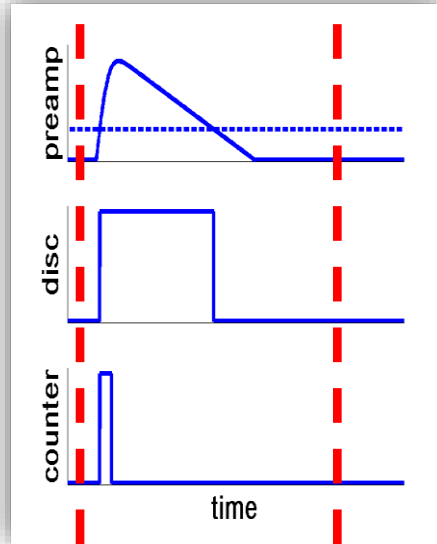
verschillende manieren om Timepix te gebruiken

- deeltjes alleen tellen

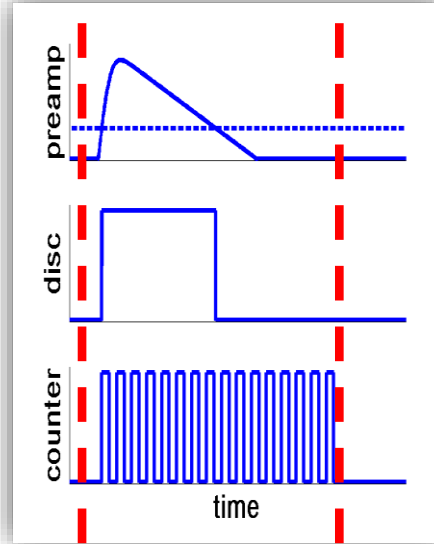
- tijd van inval*

- meting signaal amplitude

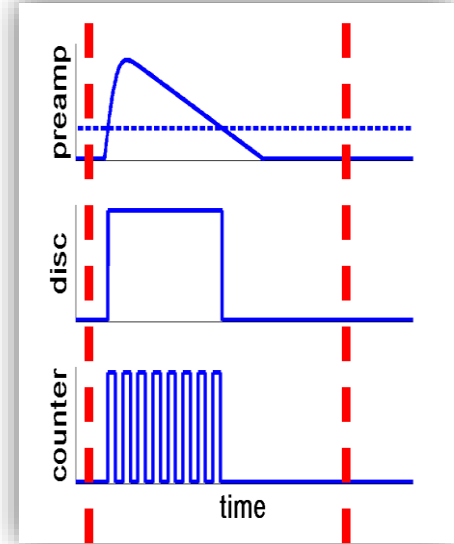
Open shutter *Close shutter*



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

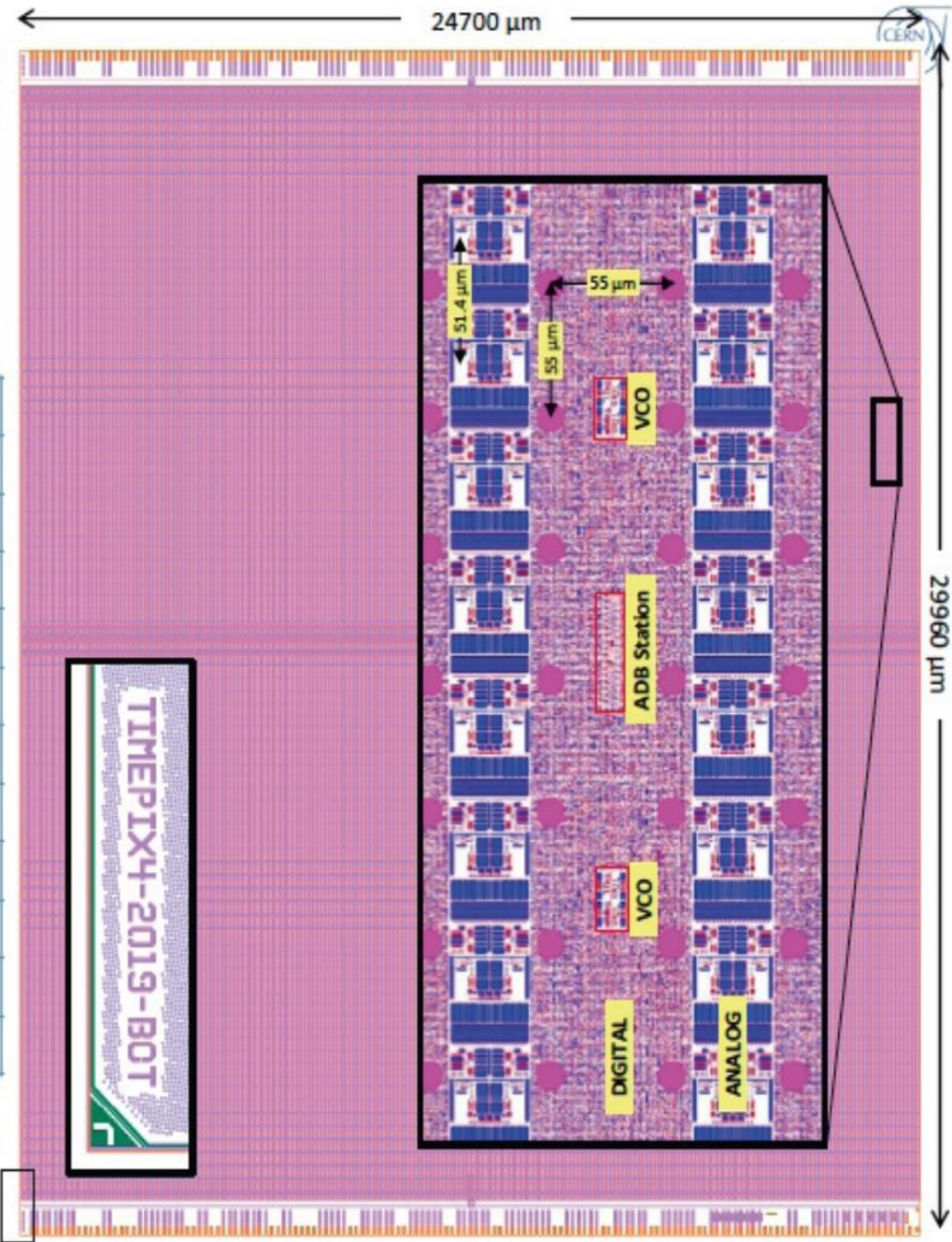


Timepix4 (November 2019)

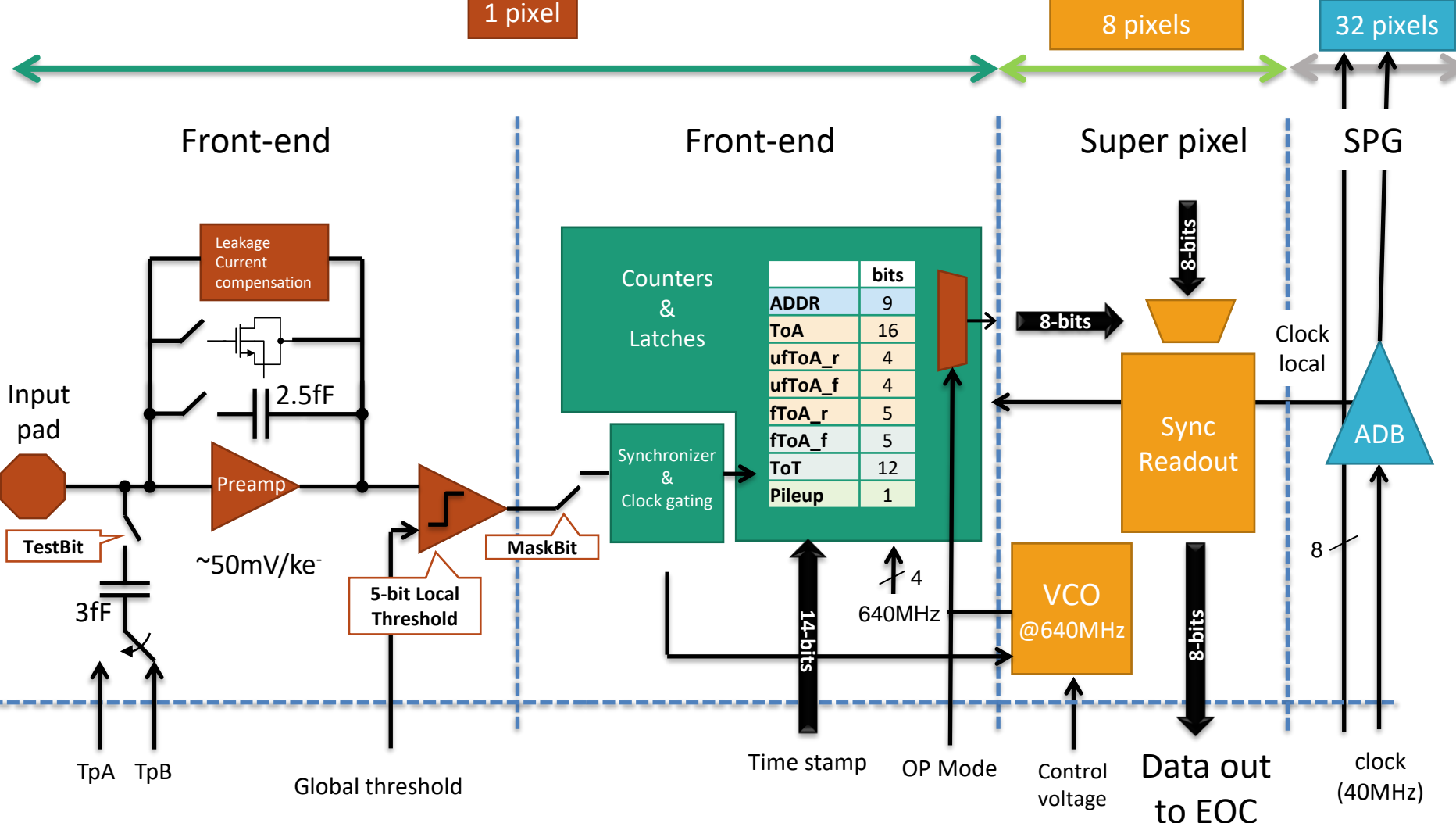
TPX4 met super-pixel-blokken

Pixel size	55 x 55 μm
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 sensor
waar de lading is ontstaan

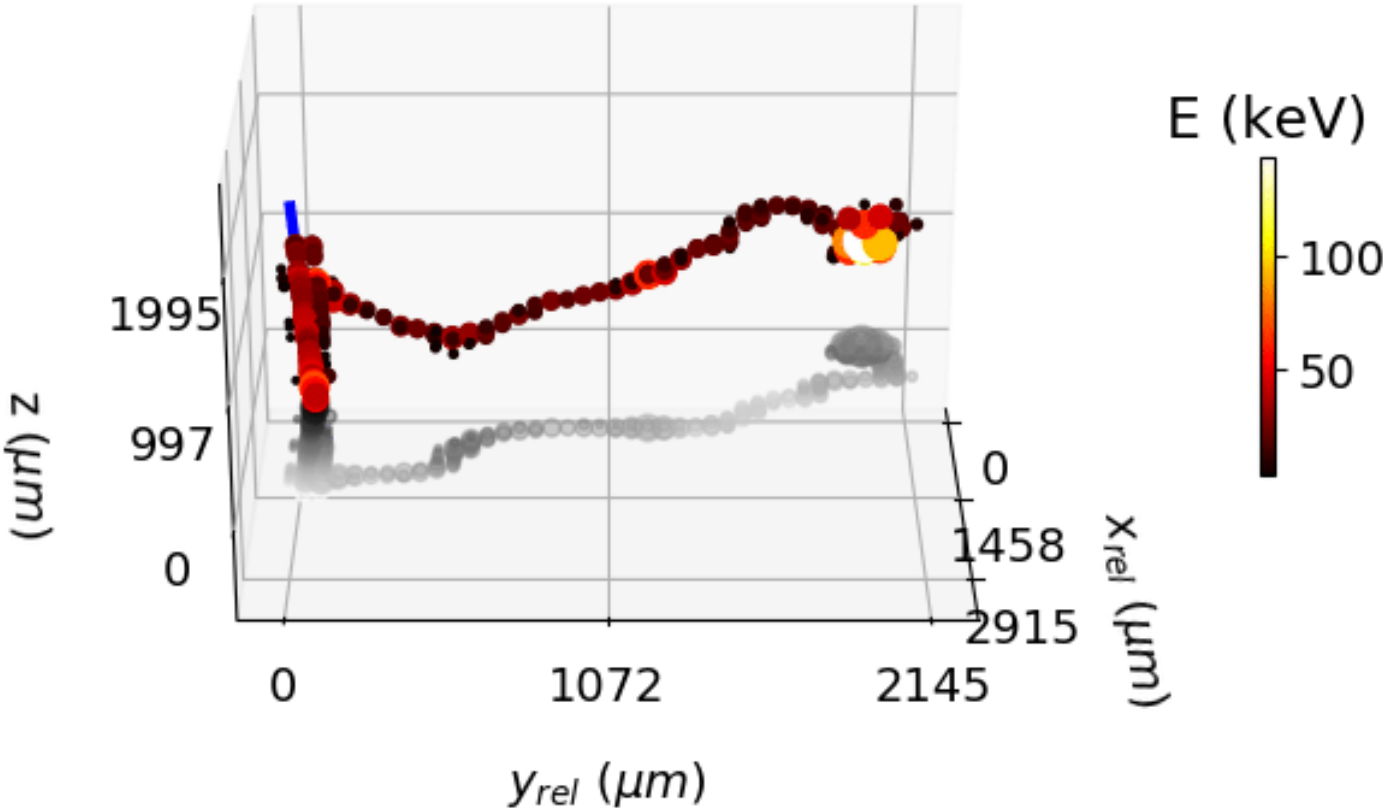
voor-achter kan nu worden
onderscheiden

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

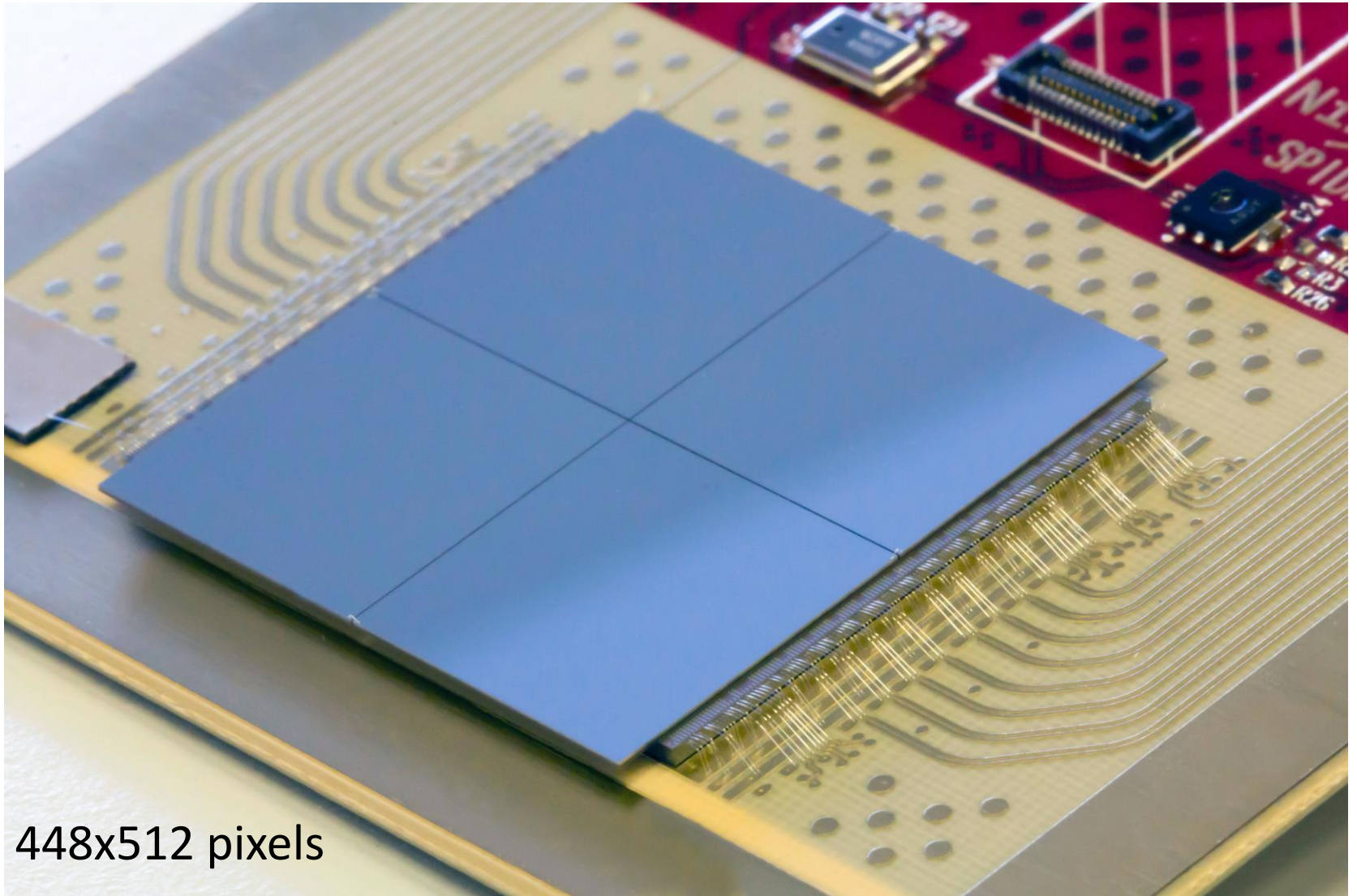


diepte en beeld var

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



Timepix4 30x24.7 mm² 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]

Quark Travel januari-maart 2025

toch nog iets over deeltjes fotografie



energetische ionen vliegen door emulsie, 1940's

• ionen in kosmische straling

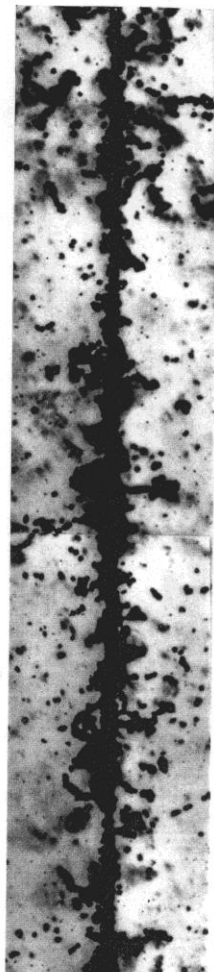
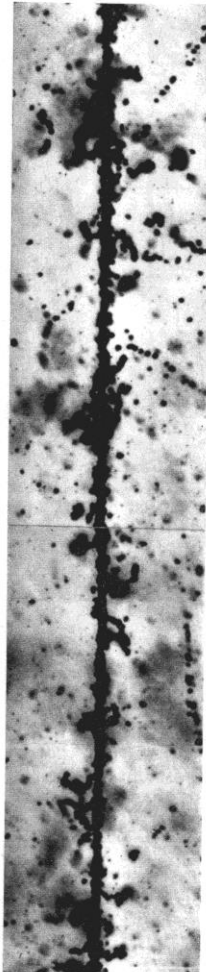
• Powell, Fowler & Perkins- Pergamon 1959

Tracks of heavy nuclei of the cosmic radiation moving at relativistic velocities

Z=12 Mg

Z=14 Si

Z=20 Ca



50 μm

Hford G 5 emulsion.

PLATE 16-6

DAINTON, FOWLER and KENT (1952).

precisie !

dE/dx
met talloze δ -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

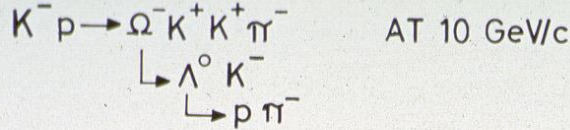
= emulsie kan niet worden gebruikt met 'keuze-trigger' en

kan ook niet worden uitgewist en hergebruikt



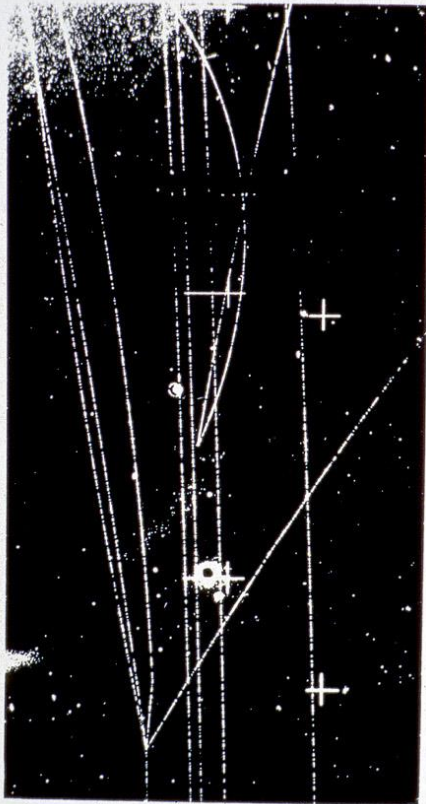
Fotografie was het eerste 'instrument'

links foto met een ingewikkelde interactie

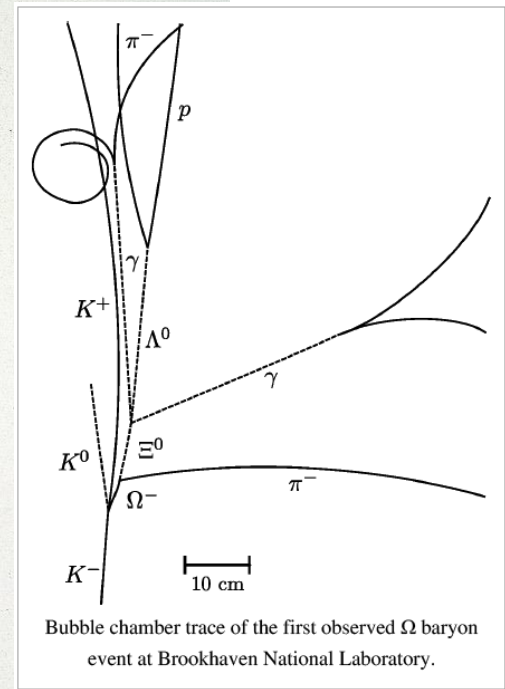
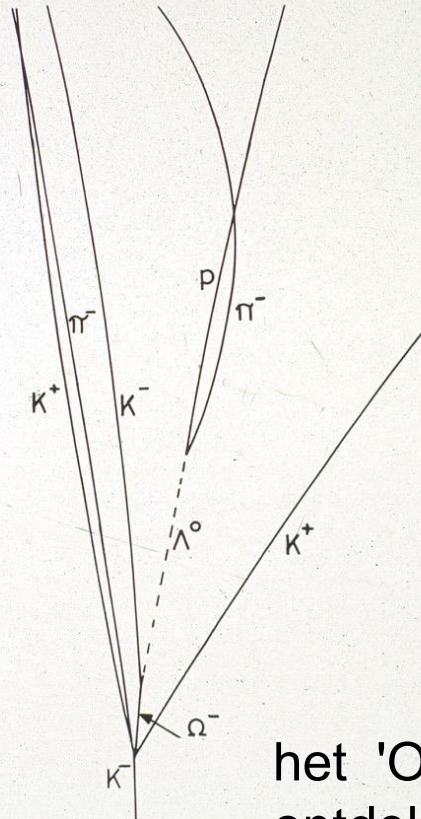


AT 10 GeV/c

hieronder de rekonstruktie van de opeenvolgende deeltjes

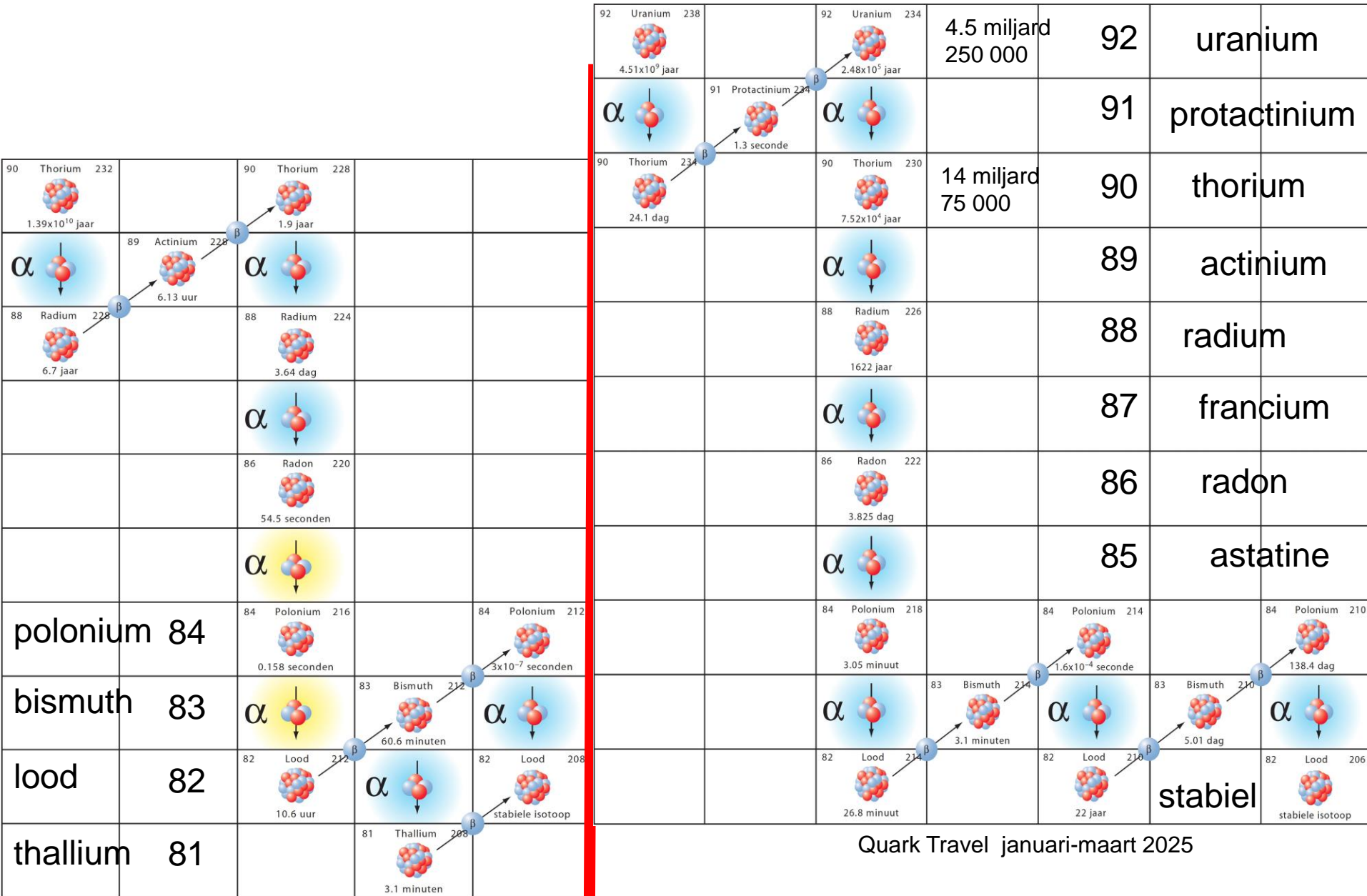


proton bundel



het 'Omega' Ω 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 praktijk



Erik Heijne
CERN EP Dept

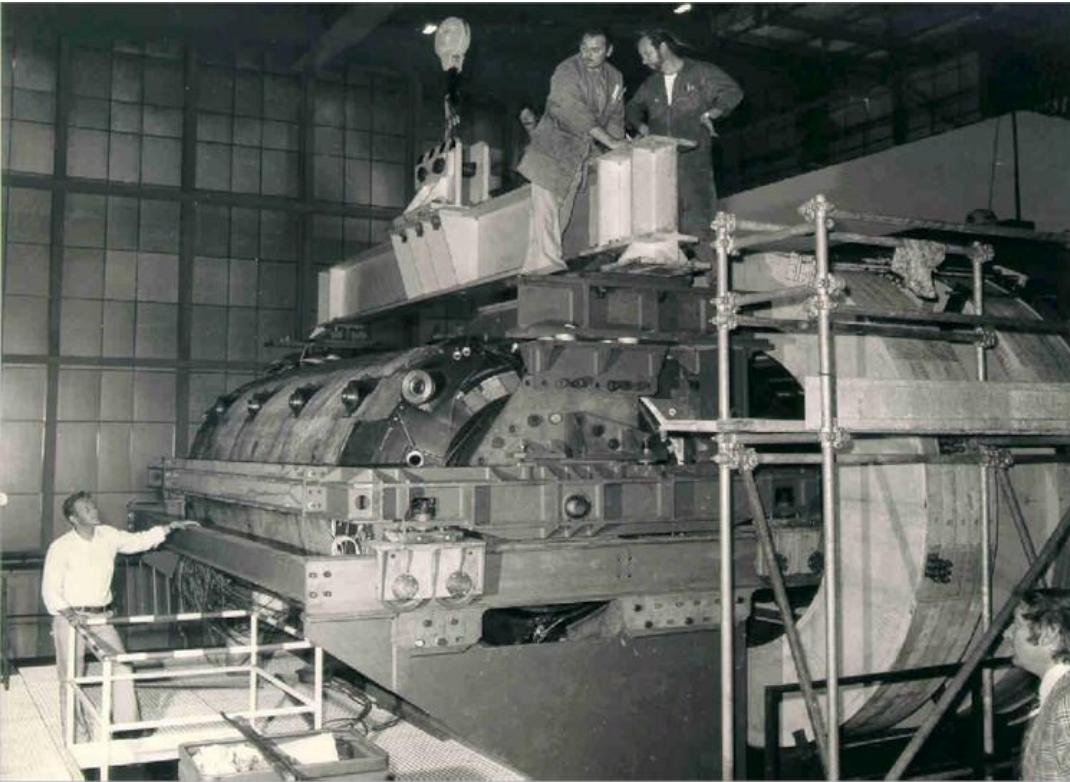


11465

xM 465

Spoorzoecken

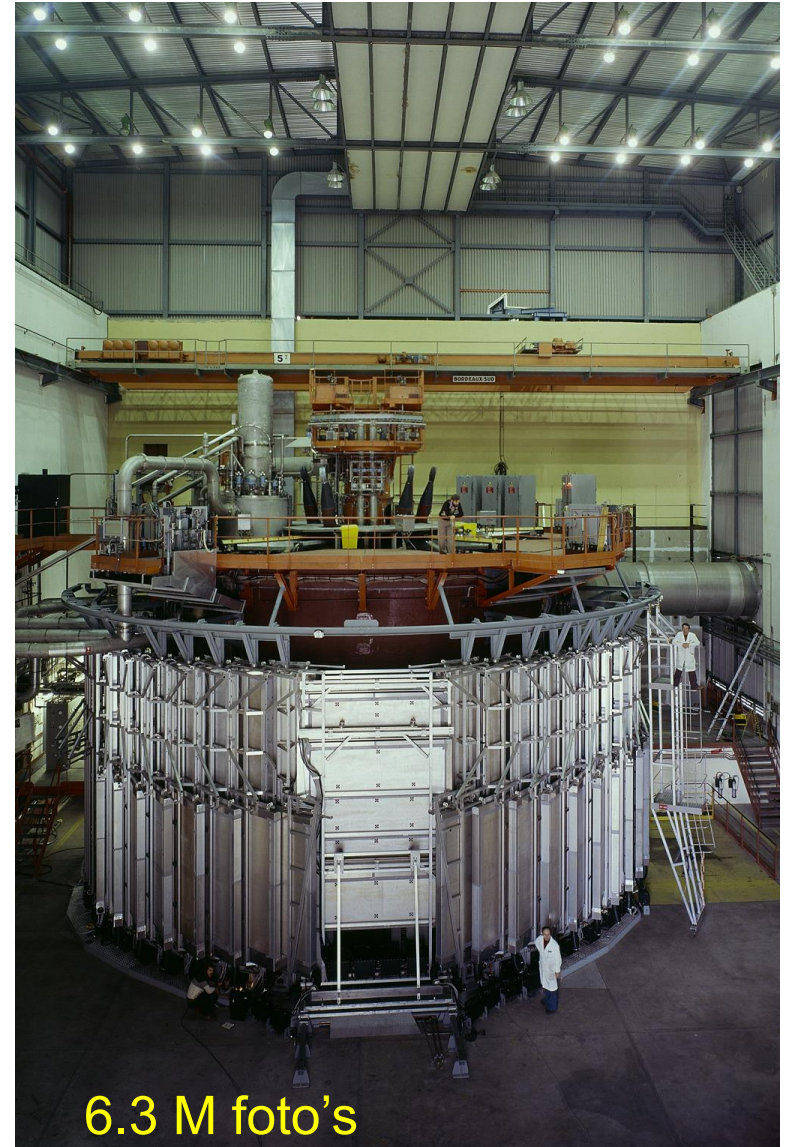
Bellenvaten op CERN 1958 - 1985



Gargamelle 1970 – 1982

BEBC 1973 – 1984

was toen grootste instrument op CERN



6.3 M foto's

- Nog wat

silicium is 2^e meest voorkomend element (28%) in de aardkorst
kwarts (SiO_2) zand – meest ook SiO_2



silicium is 2^e meest voorkomend element (28%) in de aardkorst
kwarts (SiO_2) zand – meest ook 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/ψ '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



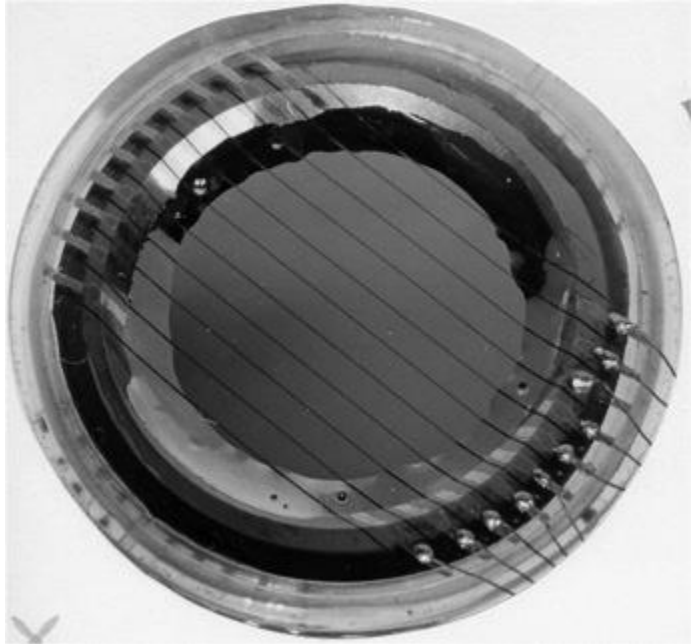
dambord-detektor

Erik HEIJNE CERN EP Department

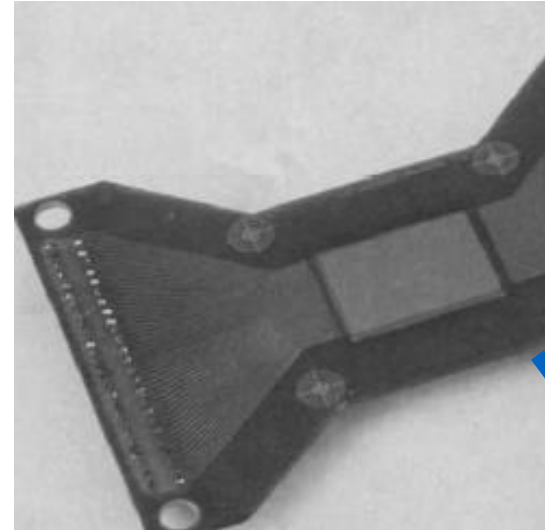
nu de Si microstrip detektor

Quark Travel januari-maart 2025

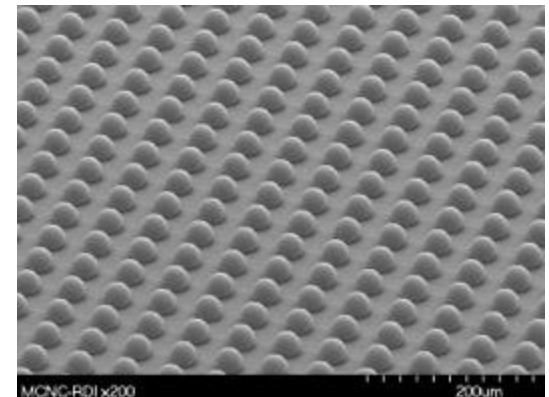
Segmenteren van een diode op silicium plakje



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



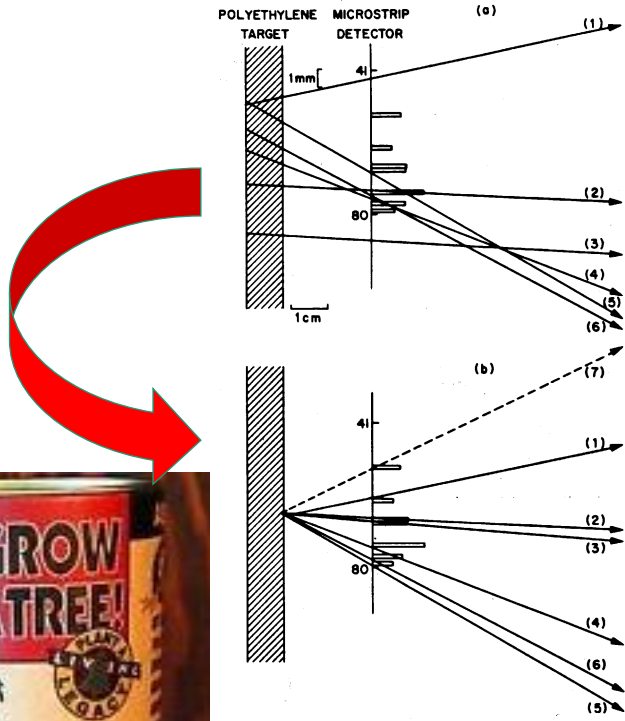
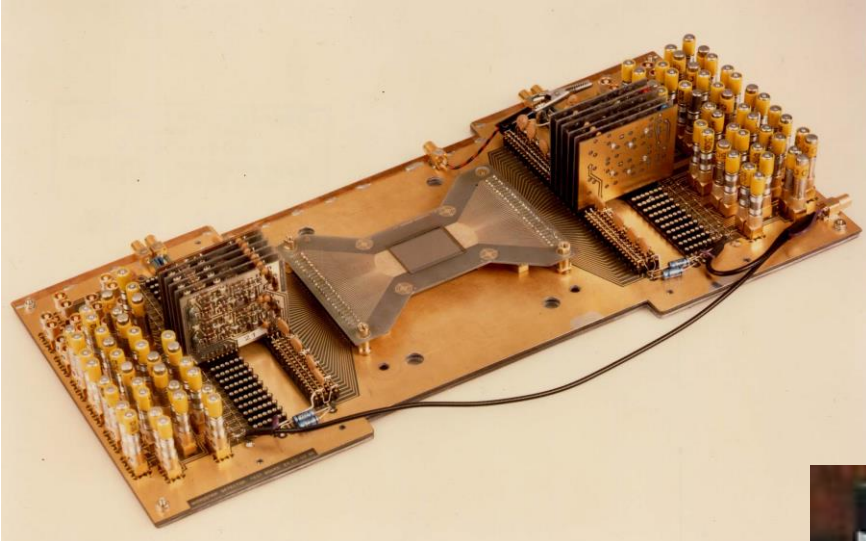
1980
CERN / ENERTEC microstrip detektor
100 strips x 40mm lang x 200µm breed



~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:



Erik HEIJNE CERN EP Department

eerst 6 weken in d

januari-maart 2025

35 jaar later

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



2. sequoia opgegroeid in Koewacht



Voordelen van de Si detektor voor deeltjes

- = signaal van zowel elektronen e^- als gaten h^+
- = beide bewegen snel in elektrisch veld
- $\qquad\qquad\qquad$ snelheid in Si kristal tot $\sim 100\text{km/sec}$
- = 0.1mm 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
- $\qquad\qquad\qquad$ 100% efficiënt $\qquad\qquad$ typische afmetingen 10 – 100 μm
- = kleine, dikke diodes geven dan karakteristieke cluster
- $\qquad\qquad\qquad$ meestal kunnen deeltjes en fotonen worden geïdentificeerd
- = precisie van inval-punt beter dan een paar μm
- = 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'

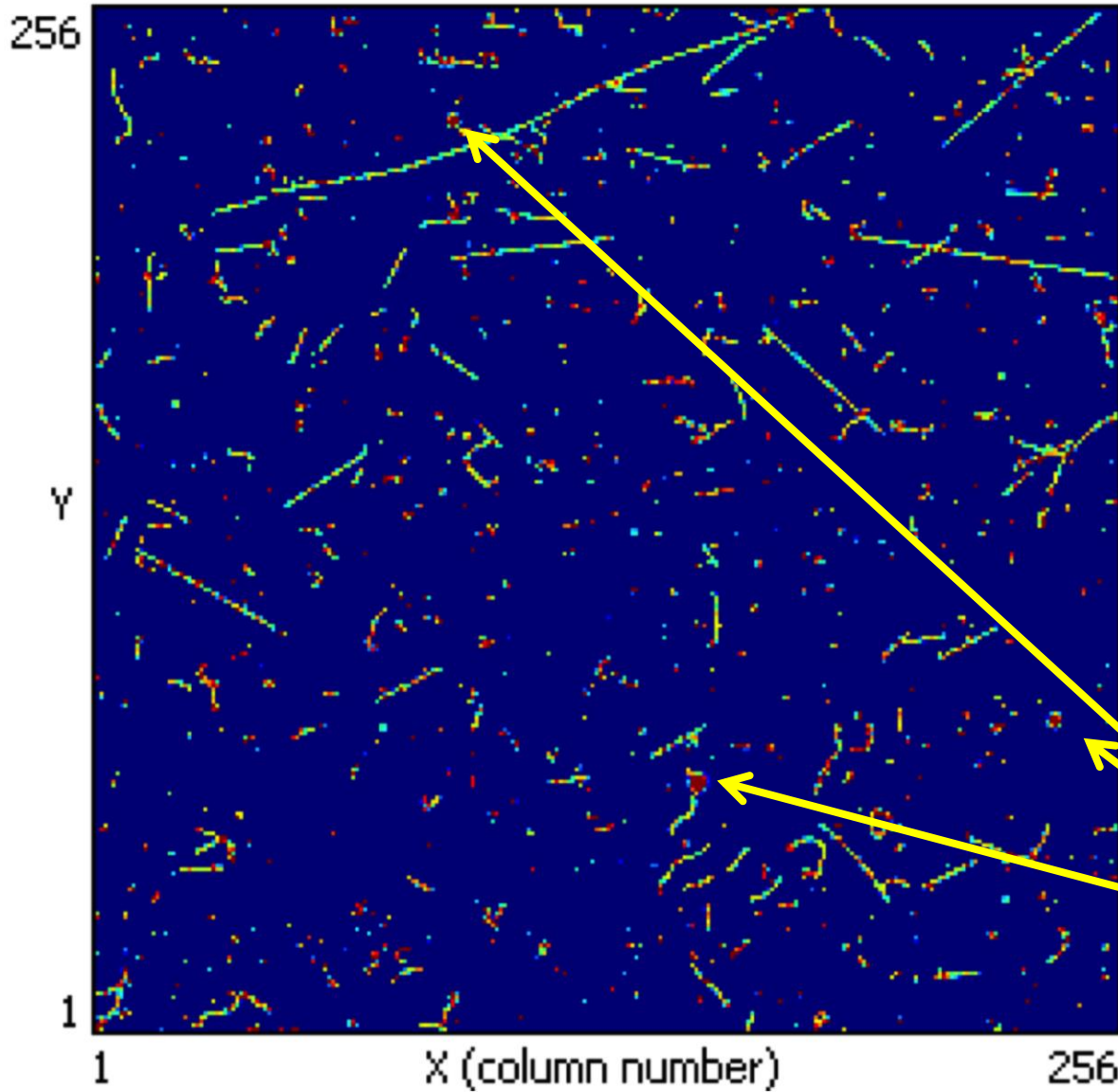
- in 1988 ontwerpt ons team een eerste versie

- sindsdien steeds meer complexiteit in de pixel



- stralingsmetingen in de omgeving





Natural background
at home
with Timepix

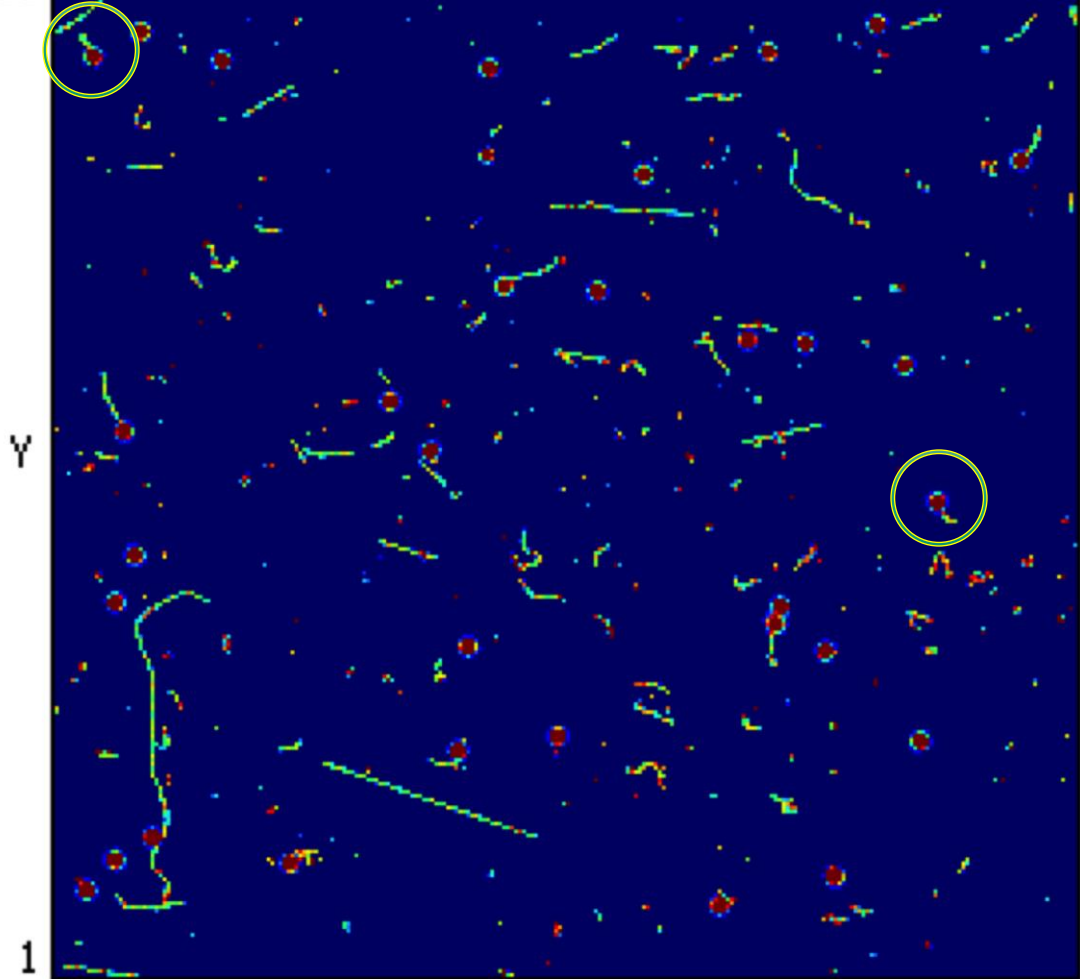
0.51 mSv el.mag.component
0.63 mSv alpha.component

4764s exposure
(extrapolated per year)

dose per hour
e.m. 0.06 μ Sv/h
alpha 0.07 μ Sv/h

The 3 alpha impacts
contribute >half of the dose

23 June 2010 20.45 TPX D9-W15 1400 s EXPOSURE

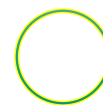


NEXT MEASUREMENT

23 MINS

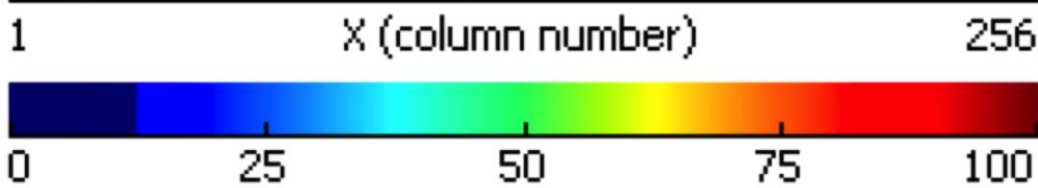
34 ALPHA

13 with e- TAIL



a little FRIGHTENING !!

1.5 per minute
MYSTERY.....?



Nov 2010 in Zeeuwse krant

totale stralingsdosis waaraan Nederlanders blootstaan.

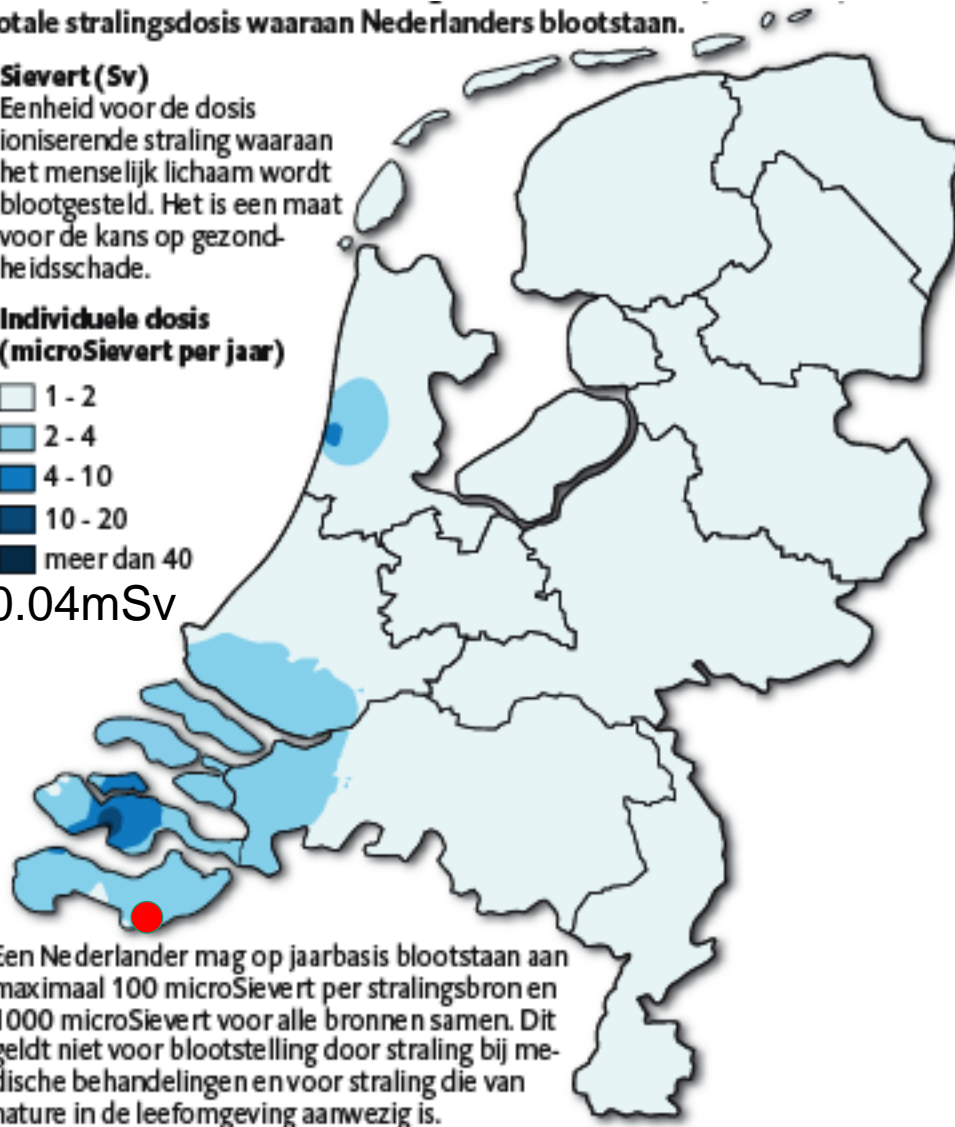
Sievert (Sv)

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

-

