



Deeltjes om ons heen

en in versnellers -- en het detecteren daarvan!

Nikhef

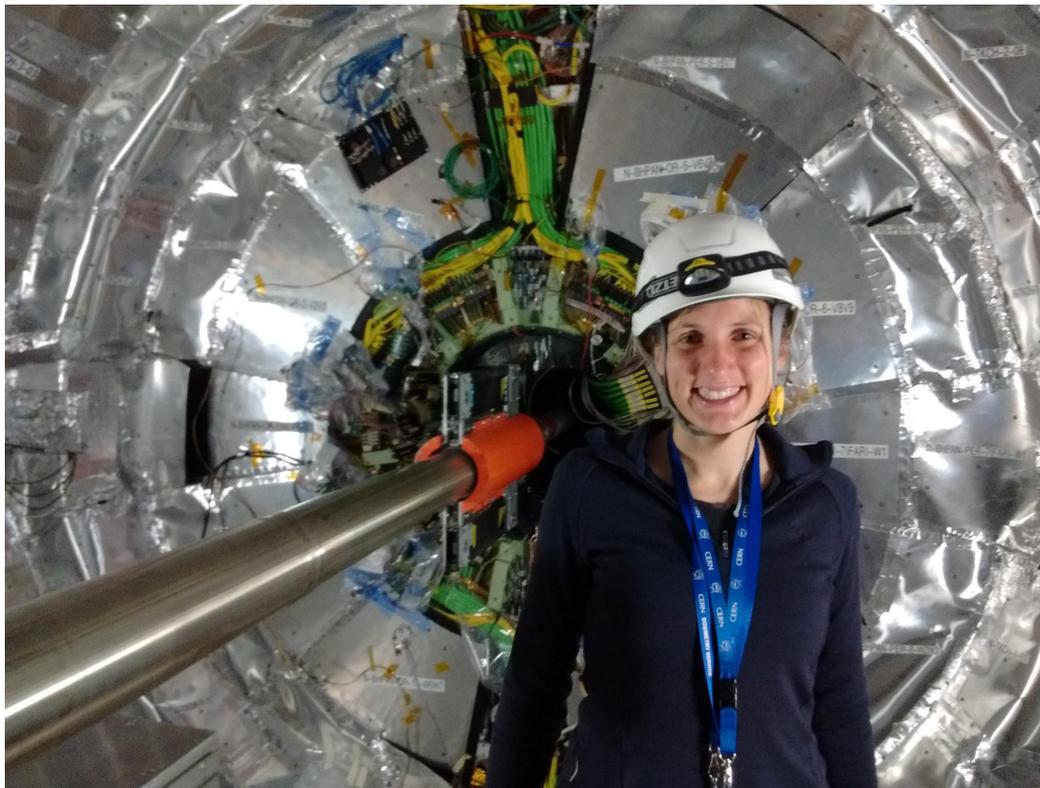
jory.sonneveld@cern.ch

Ik ben natuurkundige

Ik analyseer data, maar ik bedien en test ook detectoren.

Hier sta ik voor een deeltjesdetector waaraan gewerkt heb op CERN.

Door de buis gaan hele kleine deeltjes met bijna de lichtsnelheid. De deeltjes zijn zo klein, we zien ze niet!



Wat is CERN?

CERN is een groot wetenschappelijk laboratorium



Maar CERN is ook een mini-staat op zichzelf

Naast meer dan 10,000 wetenschappers van meer dan 100 nationaliteiten een eigen brandweer, verpleging, ingenieurs, technici...

Jij kan er ook werken!



[Le dauphine](#)

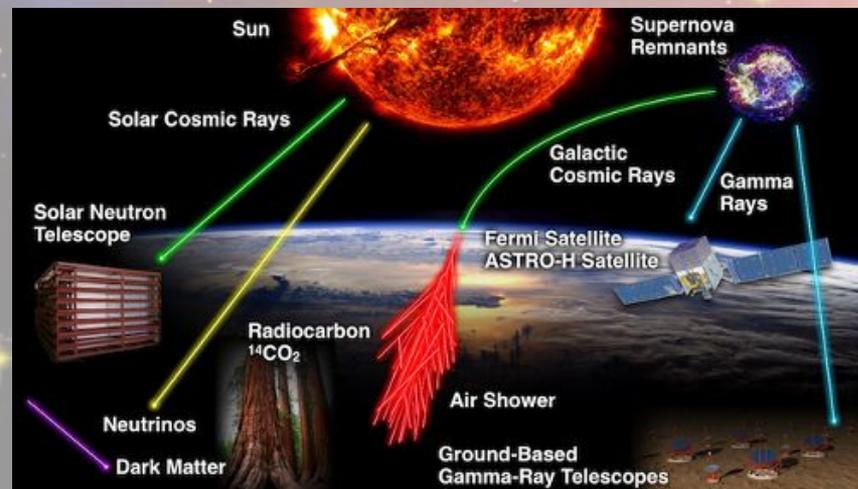
Waar zijn deeltjes?

Deeltjes vanuit de ruimte

10000 keer per seconde gaan er deeltjes uit kosmische stralen door jou heen



Wat zijn die deeltjes en hoe gedragen ze zich?
Waarvan zijn wij en het universum gemaakt?



HESS: high energy stereoscopic system,
in Namibië, kan gamma stralen detecteren

http://www2.cnr.fr/sites/en/image/hess_new_large_hd.jpg

http://www.isee.nagoya-u.ac.jp/en/assets_c/2016/03/study01_thumbnail-500xauto-153.png

Hoe kunnen we zo'n deeltje
detecteren?

γ stralen:

fotonen

γ -ray enters the atmosphere

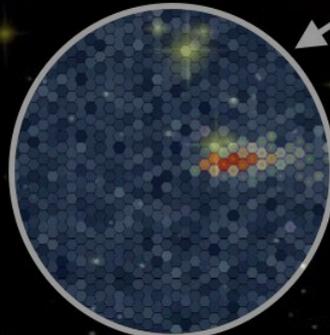
Electromagnetic cascade

Primary γ



Cherenkov telescoop:

- Licht is 0.03 % langzamer in lucht
- Ultra-hoge-energie deeltjes kunnen sneller dan licht in lucht
- Een blauwe flash van “Cherenkov licht” ontstaat
- Net als een sonic boom van een vliegtuig dat door de geluidsbarriere gaat

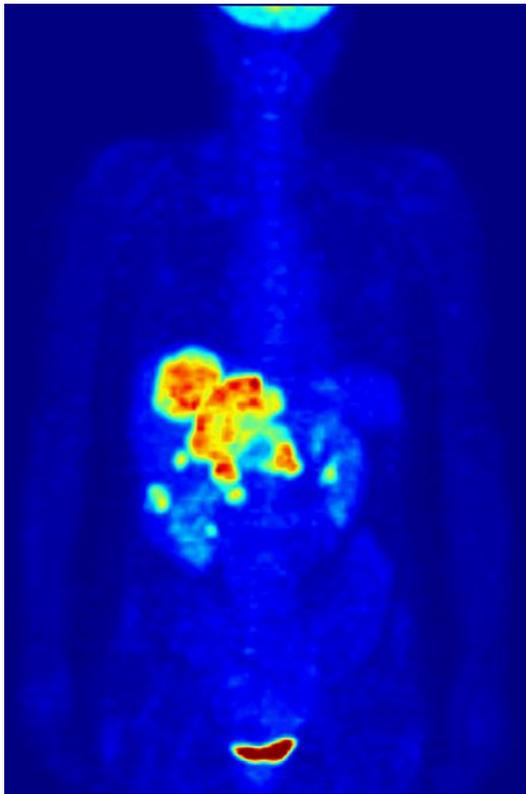


10 nanosecond snapshot



0.1 km² “light pool”, a few photons per m².

Meer deeltjesdetectoren



Magnetic resonance imaging

(b)

Positron emission tomography



Wat zijn al die 'deeltjes'?



group → 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

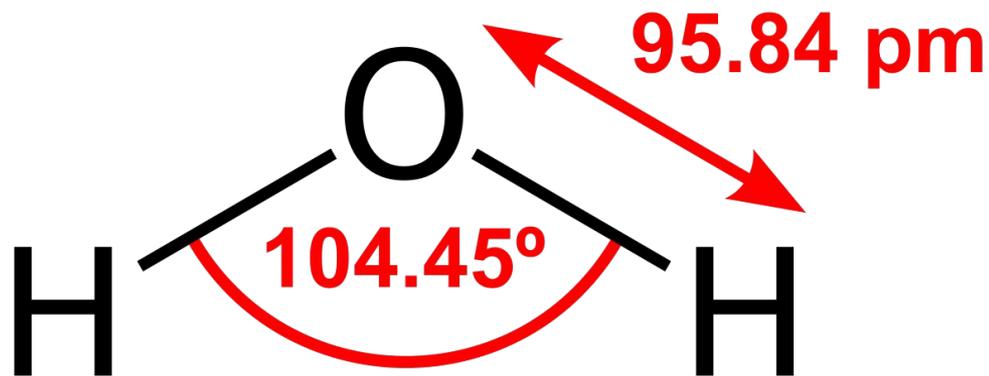
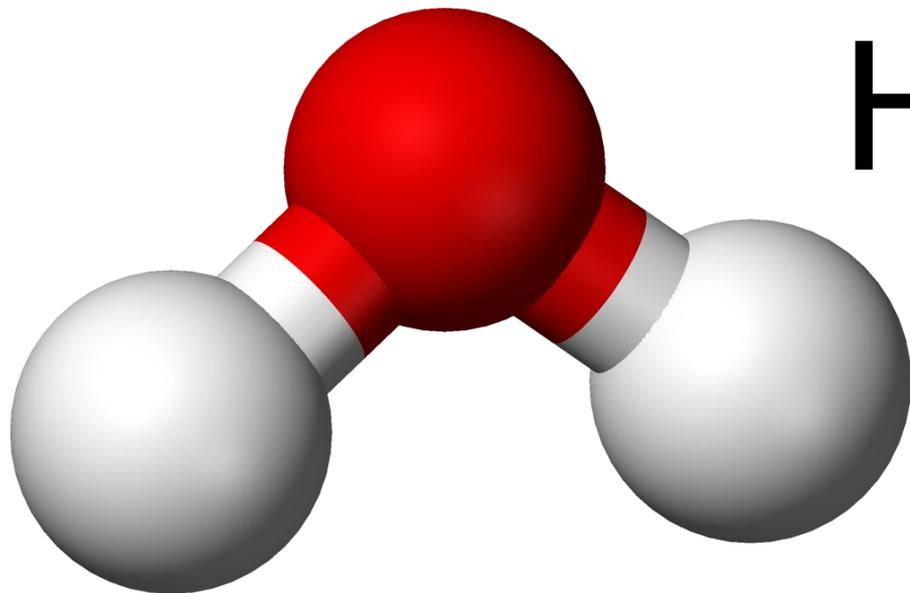
period ↓

Periodiek systeem der elementen

waterstof!

1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be										5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg										13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	* 71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	* 103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
			* 57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb		
			* 89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No		

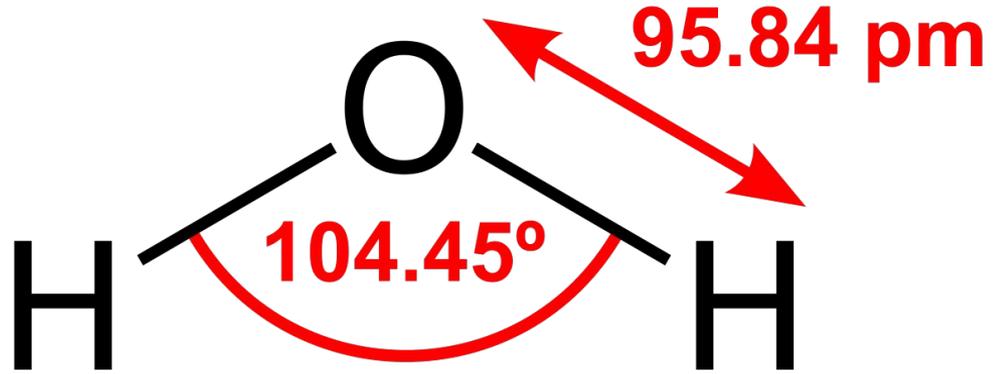
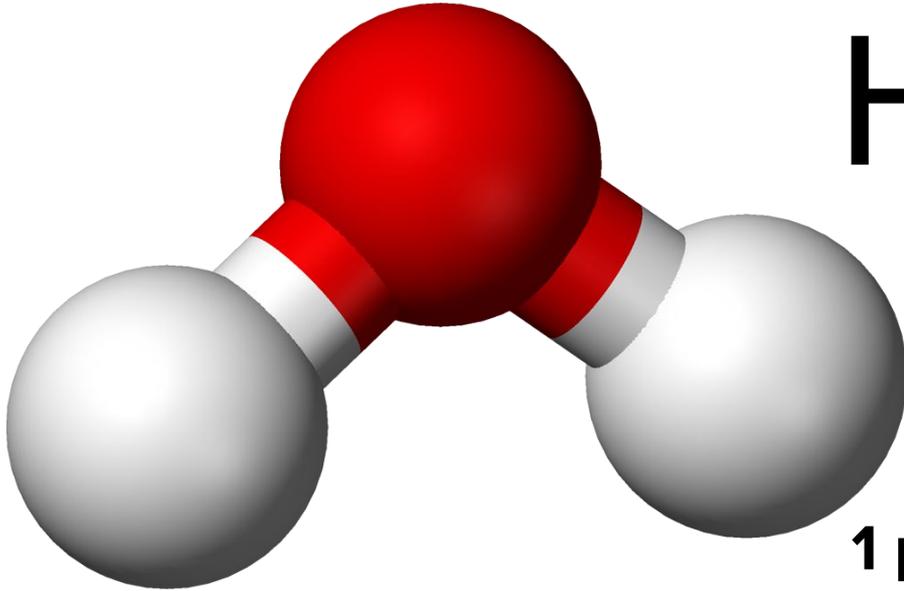
Water is een molecuul



O = oxygen = zuurstof
H = hydrogen = waterstof

Wat is pm?

Water is een molecuul



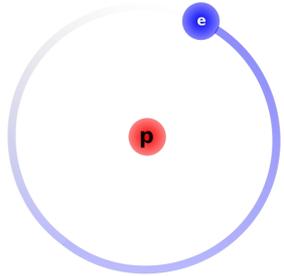
1 pm = 1 picometer = 10^{-12} meter!
 10^{-12} m = $1/10^{12}$ = 0.0000000000001 m

Waterstof atoom

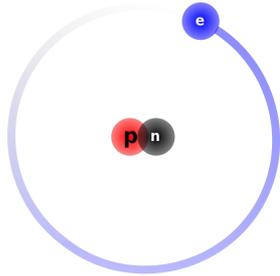
waterstof:

1 proton

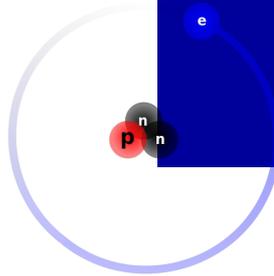
1 elektron



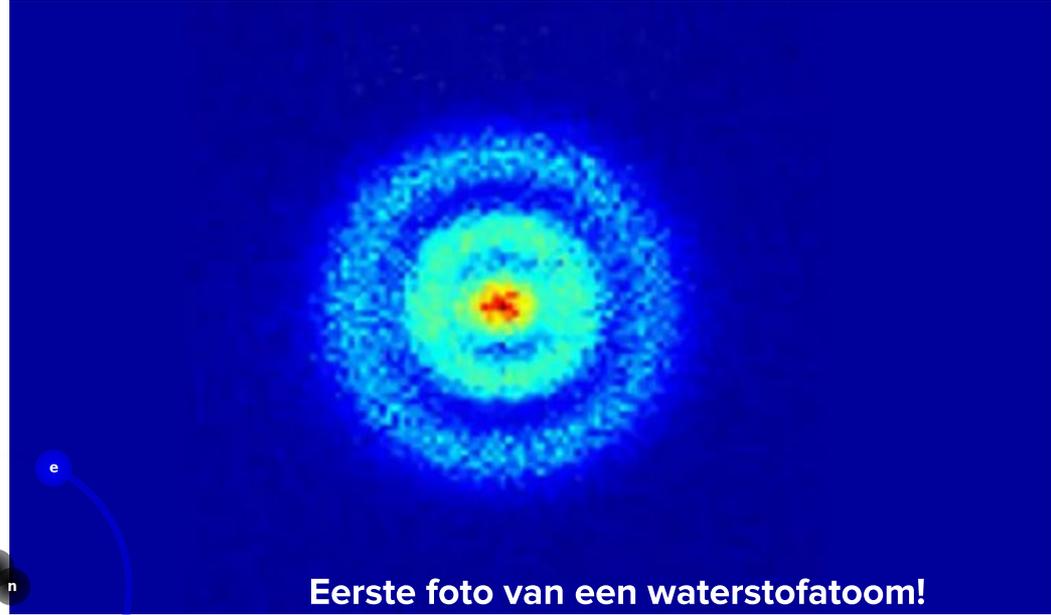
protium



deuterium



tritium

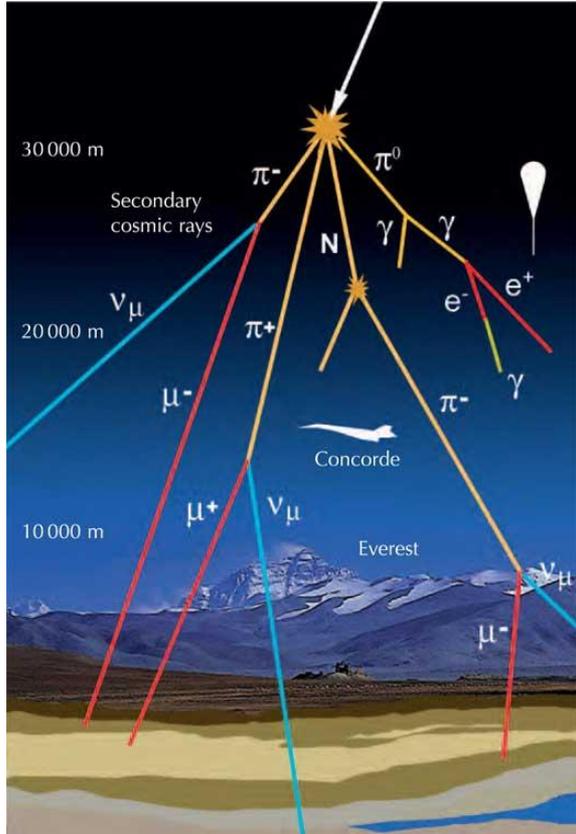


Eerste foto van een waterstofatoom!

Mede door wetenschappers uit
Nederland

Vele verschillende deeltjes!

Waar is het proton?



Standard Model of Elementary Particles

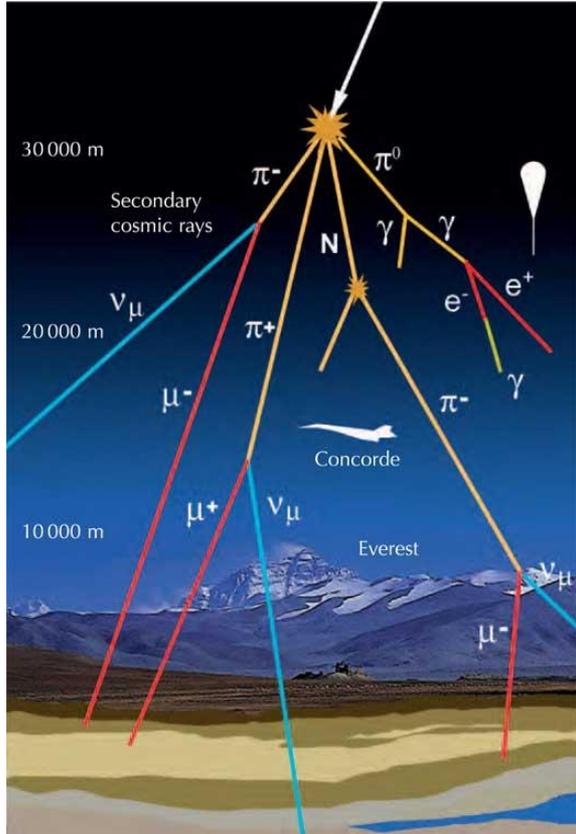
	three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H higgs
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	

QUARKS (left side)
LEPTONS (left side)
GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS (bottom)
SCALAR BOSONS (right side)

Ieder deeltje gedraagt zich anders, afhankelijk van massa, lading. Op aarde zien we veel **muonen**.

Vele verschillende deeltjes!

Proton = $u+u+d$
3 quarks! Samengehouden door gluonen.



Standard Model of Elementary Particles

	three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
QUARKS	u up	c charm	t top	g gluon	H higgs
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONS	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	0	-1	-1	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
					SCALAR BOSONS
					GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS

Waarom zijn zij zo moeilijk te zien?

Ieder deeltje gedraagt zich anders, afhankelijk van massa, lading. Op aarde zien we veel **muonen**.

Large Hadron Collider: dé krachtigste deeltjesversneller

De meest krachtige magneet op aarde zit in deze detector!

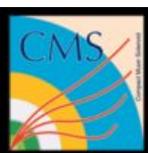


LHC magneten: worden afgekoeld op dit moment!

LHC

Naar 1.8 K zodat de magneten (in het blauwe omhulsel) supergeleidend worden

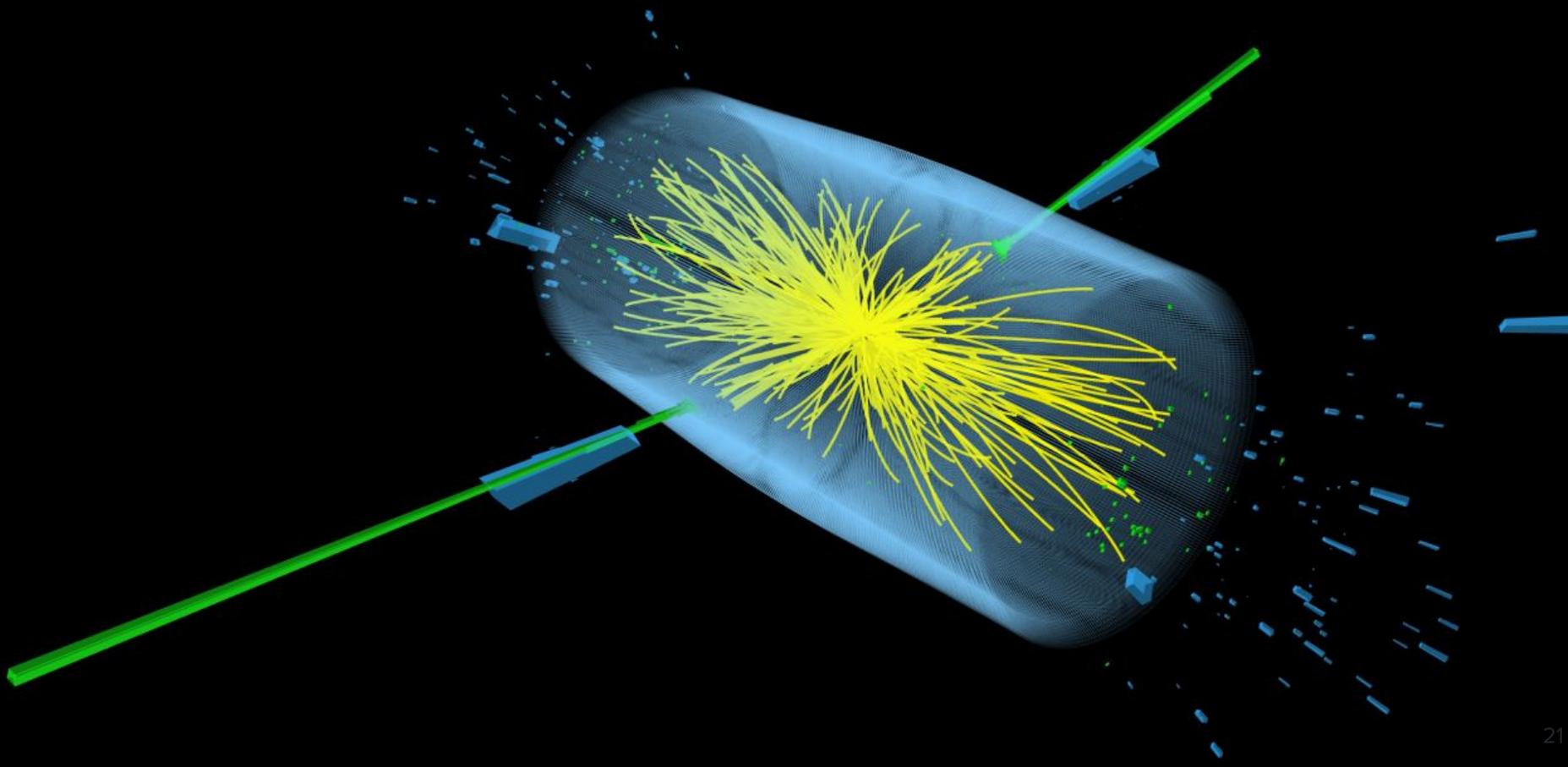
Het universum is warmer: 2.73 kelvin!



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2016-May-11 21:40:47.974592 GMT

Run / Event / LS: 273158 / 238962455 / 150





100 meter onder de grond is een holte voor experimentatie, van de grootte van een kathedraal, die 1 van de twee experimenten herbergt die het Higgs boson heeft gevonden: CMS, een detector van 14000 ton !



Pixeldetector van CMS

Ik werk met de detectoren die in het hart van deze enorme experimenten zitten. Die moeten goed draaiend blijven en goed werken om de beste kwaliteit data te krijgen om te analyseren!



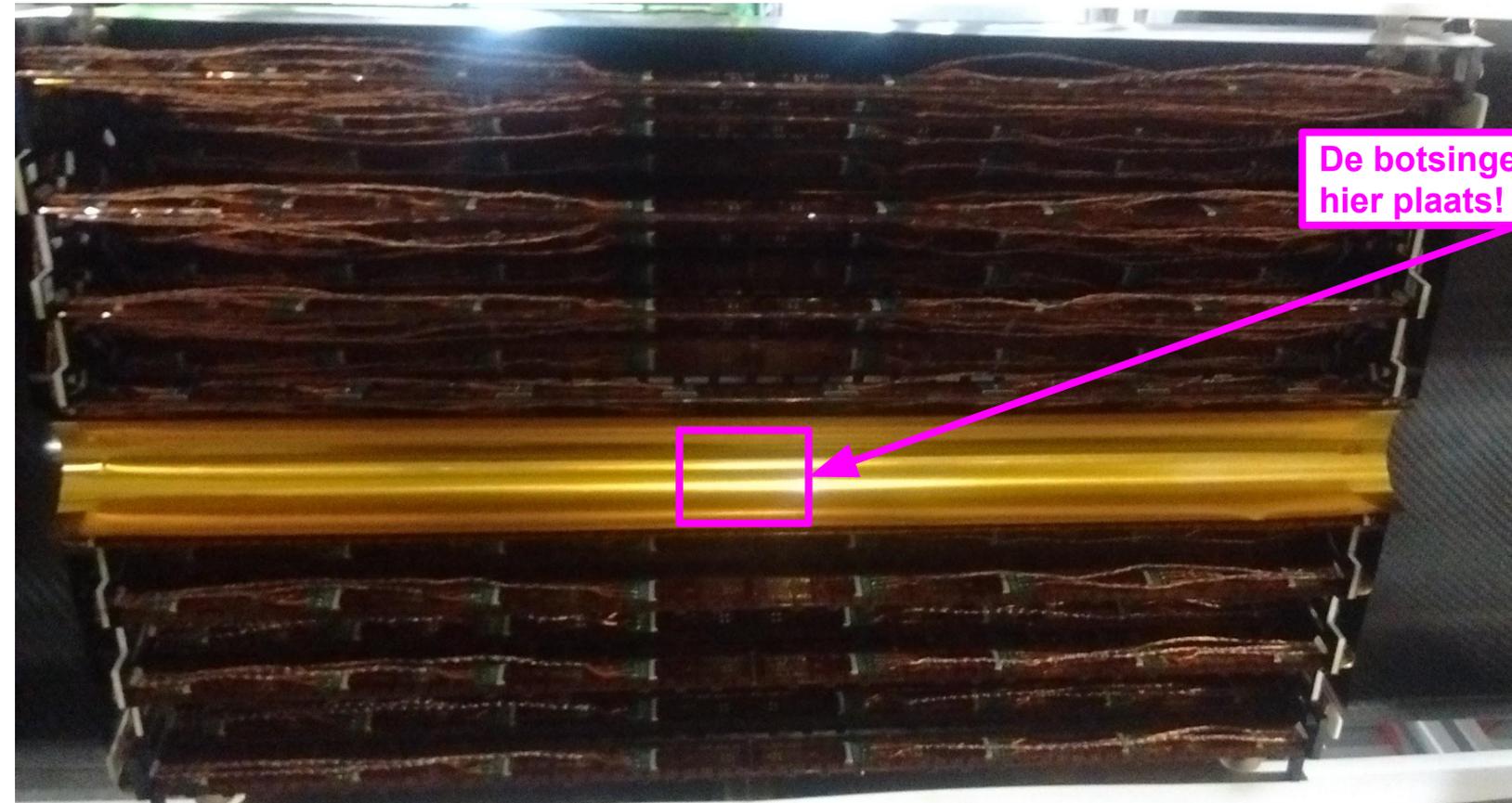
**De CMS pixel detector
is nu voor onderhoud
boven op het
aardoppervlak**



**Je kunt nu dwars door
CMS heen kijken!**

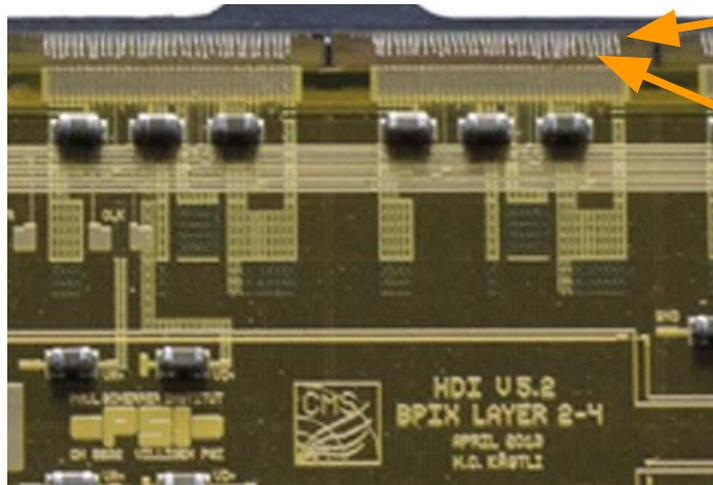
Hoe weten we wat er in een botsing
geproduceerd wordt?

Een pixeldetector

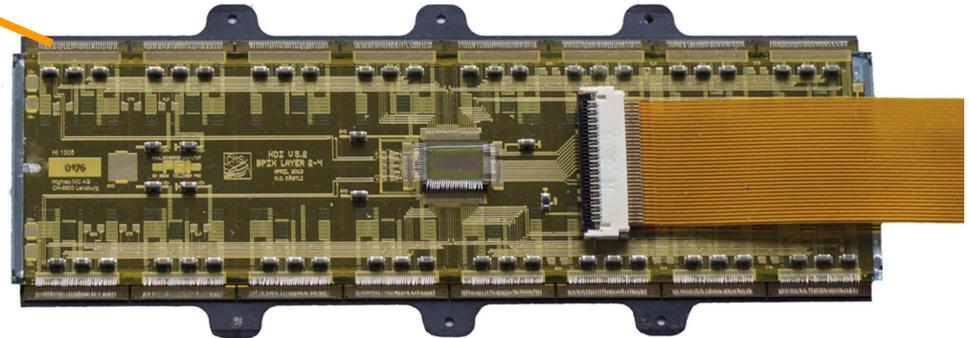


De botsingen vinden hier plaats!

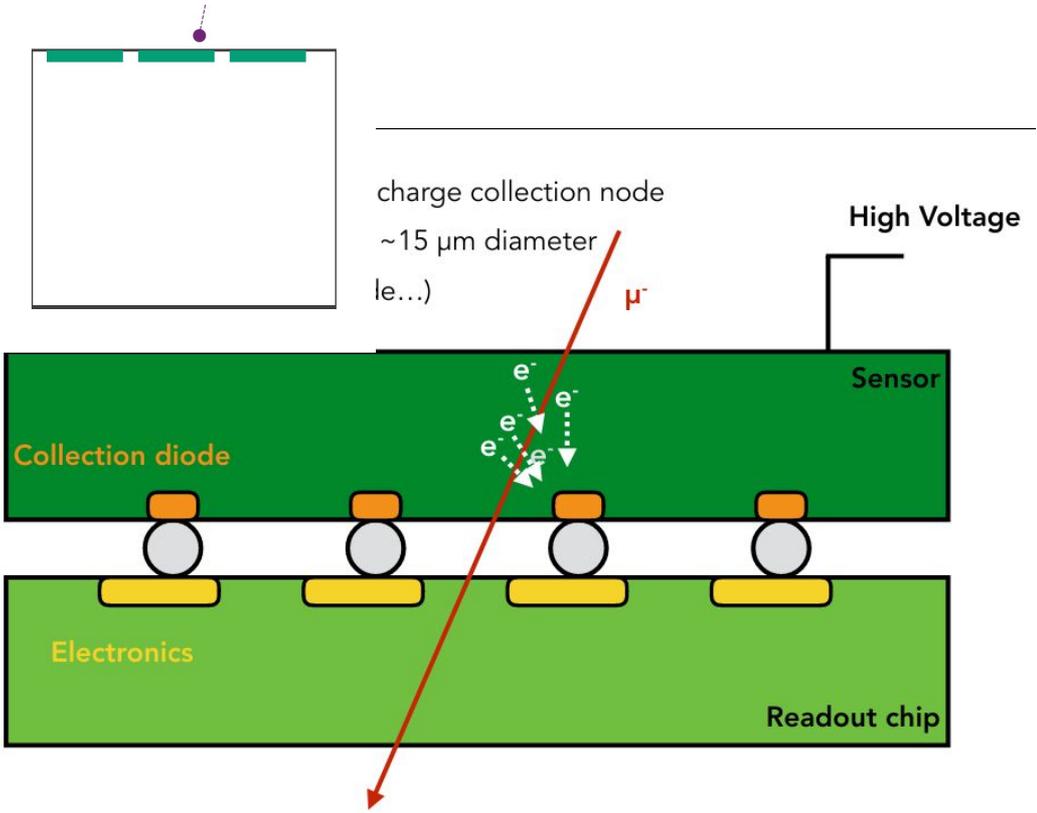
Een pixeldetector



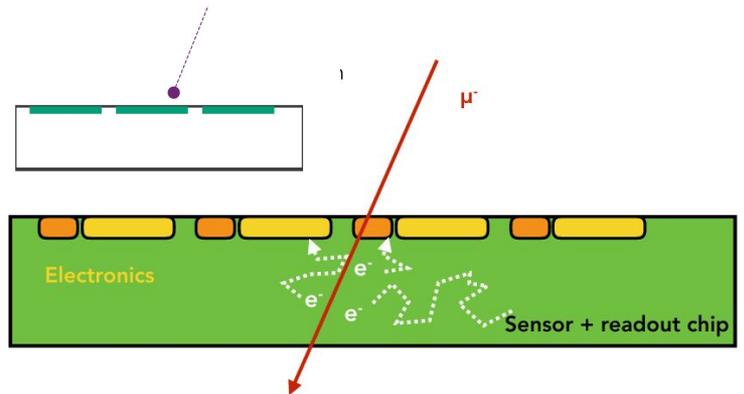
Hele kleine draadverbindingen voor een elektronische verbinding



Deeltjes maken lading los in een sensor: *ionisatie*

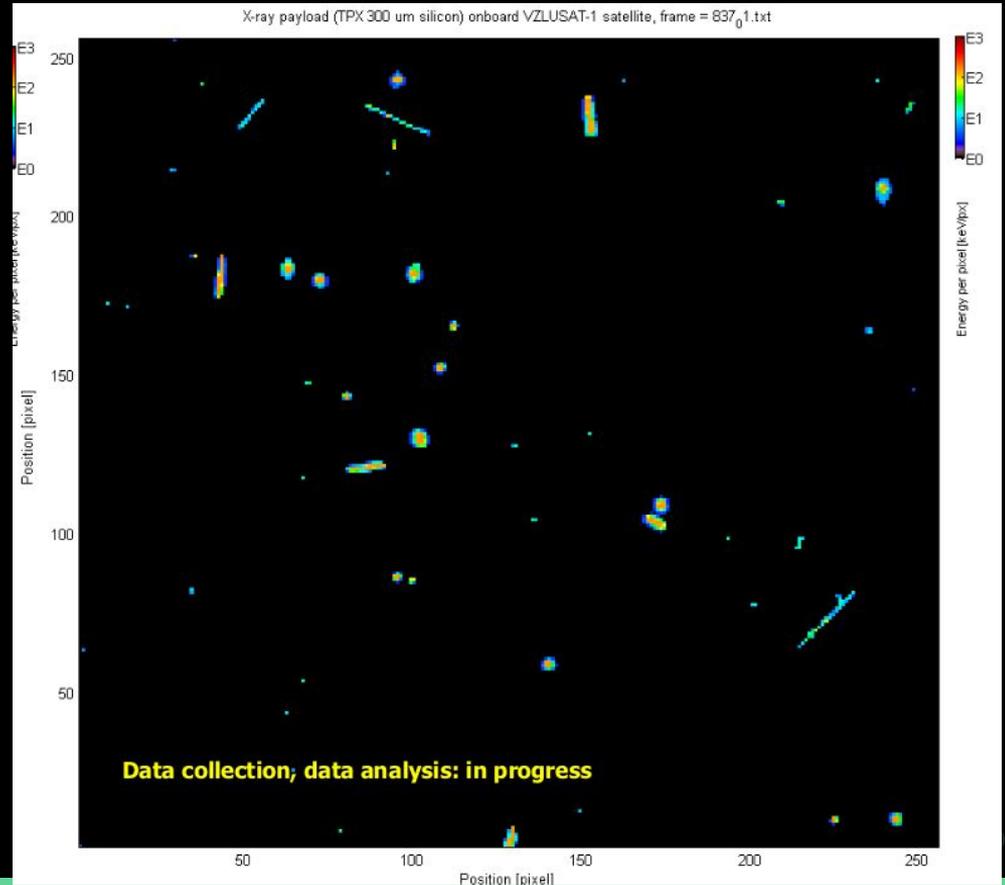


Ionisatie: atoom of molecuul raakt een elektron kwijt of krijgt er één bij.



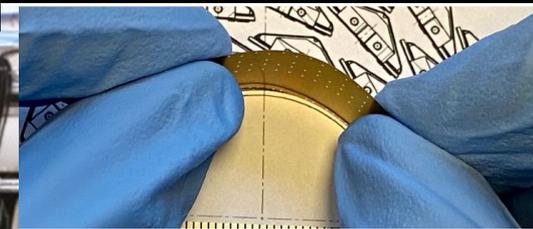
Detectie van deeltjes

Deeltjes laten sporen achter!



Mijn passie: pixeldetectors van silicium -- ook in je telefoon!

Steeds dunner: zo dun, we kunnen ze buigen



Nog
dichter
bij de
oerknal

We willen hele snelle: $10 \text{ ps} = 0.00000000001$ seconde!



Het goud is overigens geen goud, maar polyimide-folie met ragdunne koperen voedingskabels voor de sensoren. Dun genoeg om vrijkomende

zijn ontstaan. ITS moet de deeltjes betrappen die uit die ziedende oersoep ontsnappen en de fysici vertellen wat daarbinnen precies gaande is.

dezelfde plak silicium zitten. Dat scheelt kabels en elektronica in de detector. In de komende meetperiode kan ITS gemakkelijker honderd keer zoveel meetgegevens verzamelen als alles wat ALICE in

data verzamelt en toegankelijk maakt, wordt eveneens vernieuwd.

De upgrade-periode is een hectische tijd. Het binnenste van de grote ondergrondse detector is vorig najaar al in trillingsvrije kratten van Amsterdam

ALICE-team met eindeloos geduld de koeling en de sensoren stuk voor stuk 30

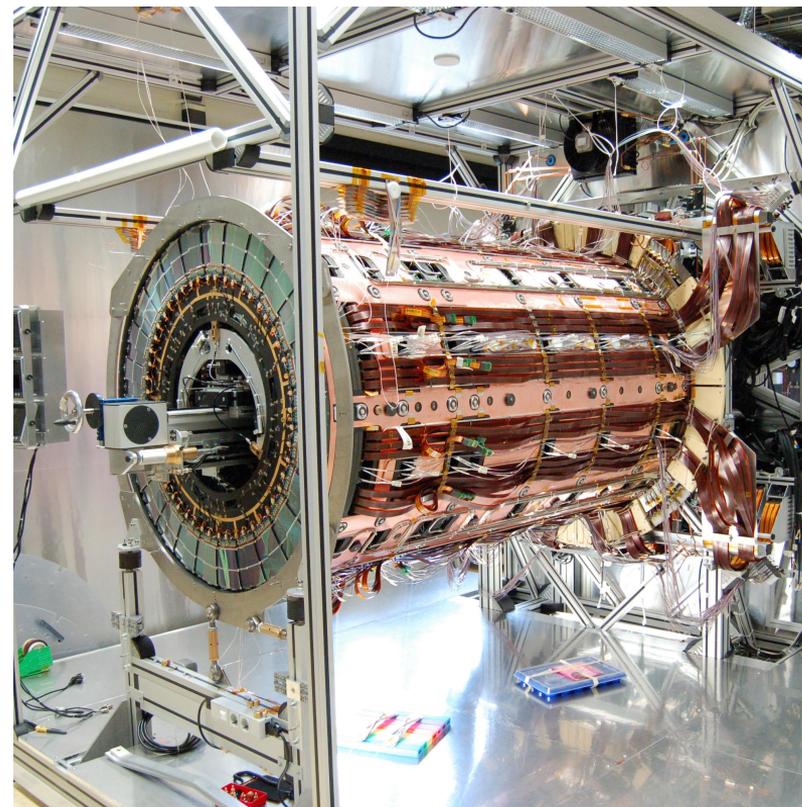
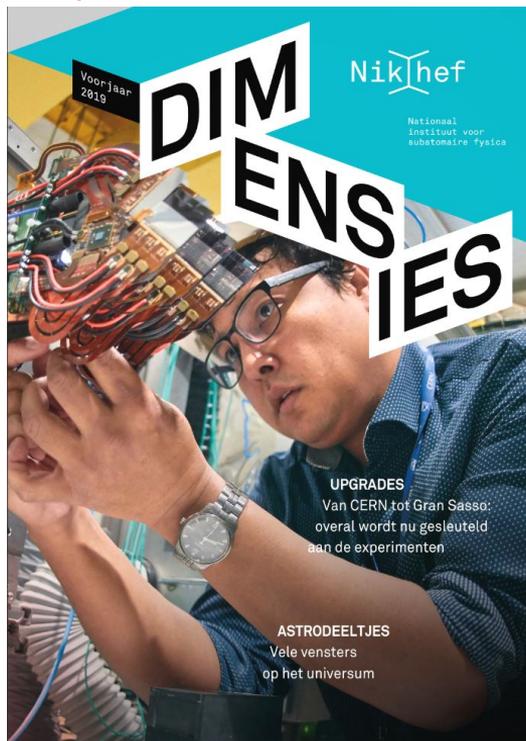
handmatig op de ijle koolstofvezel dragers. Deze sensordruigen zijn vorig najaar al in trillingsvrije kratten van Amsterdam

hart 6

Kom eens langs op Nikhef of CERN

<https://www.nikhef.nl/publiek/bezoek-nikhef/open-dag/>

Op Nikhef werken we onder andere aan detectoren die **nu** op de LHC worden geïnstalleerd!



Extra materiaal

CMS = compact muon solenoid

De CMS solenoid:

- Is de grootste supergeleidende magneet ooit gemaakt
- Weegt 12000 ton
- Is gekoeld tot 4.65 K, 2 graden warmer dan in de ruimte
- Is 100,000 keer sterker dan het magneetveld op aarde
- Heeft genoeg energie om 18 ton goud te smelten
- Heeft bijna twee keer zoveel ijzer als de Eiffeltoren

Credits

Many thanks to Erik Butz, [Simon Spannagel](#), [Freya Blekman](#), [Peter Schleper](#), Erika Garutti
Wikipedia

Discovery of antimatter

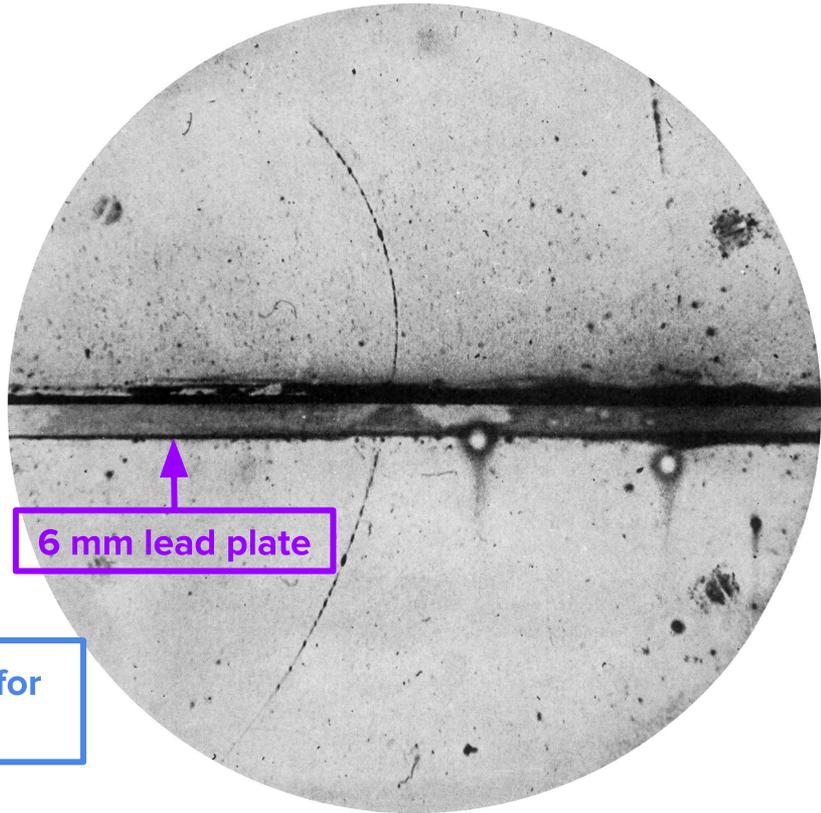
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/69/PositronDiscovery.jpg>

C.D. Anderson <https://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.43.491>

The first positron ever observed!

Wilson cloud chamber: gaseous mixture of supersaturated water or alcohol. Energetic particle ionizes gas and ions form condensation centers visible as a 'cloud'.

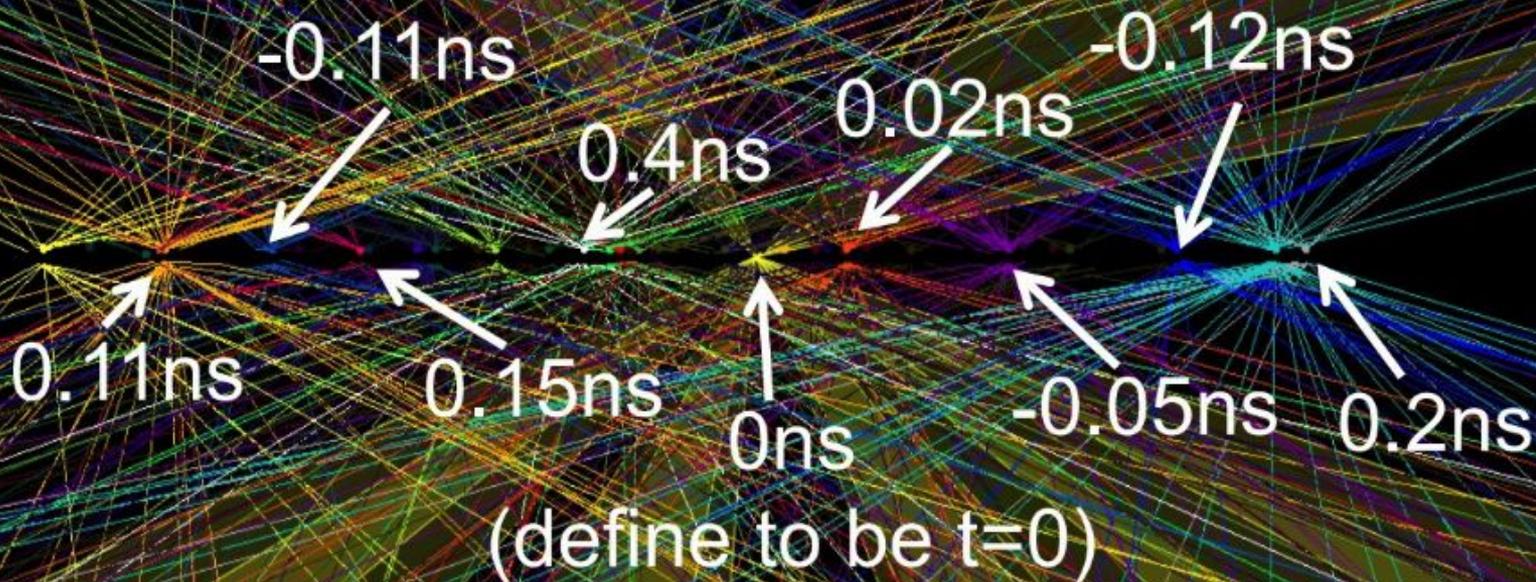
15000 Gauss = 1.5T magnetic field Wilson chamber for detecting cosmic rays



CMS

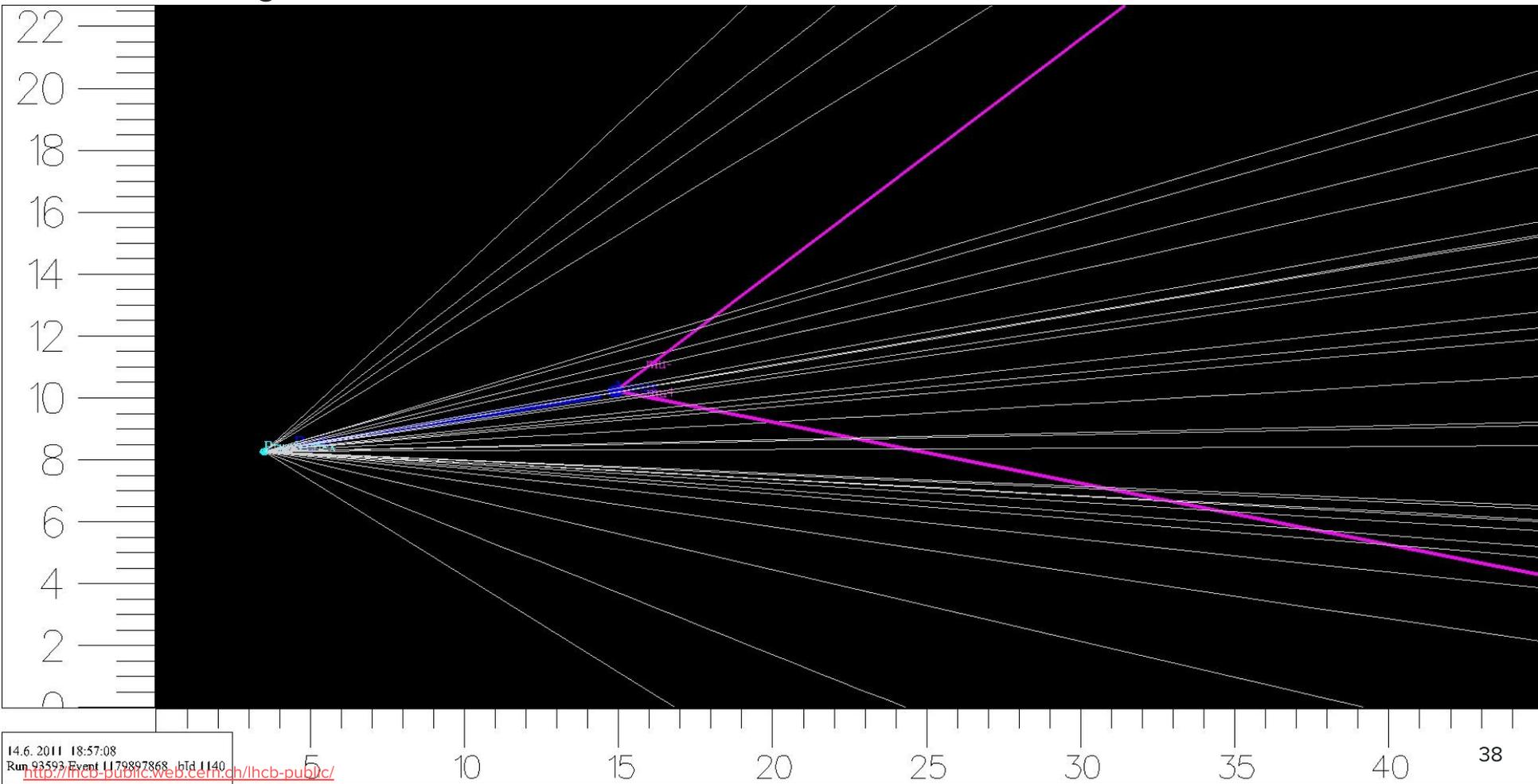
E
CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Mon May 28 01:16:20 2012 CEST
Run/Event: 195099 / 35438125
Lumi section: 65
Orbit/Crossing: 16992111 / 2295

LHC Bunch Crossing 1ns Clip

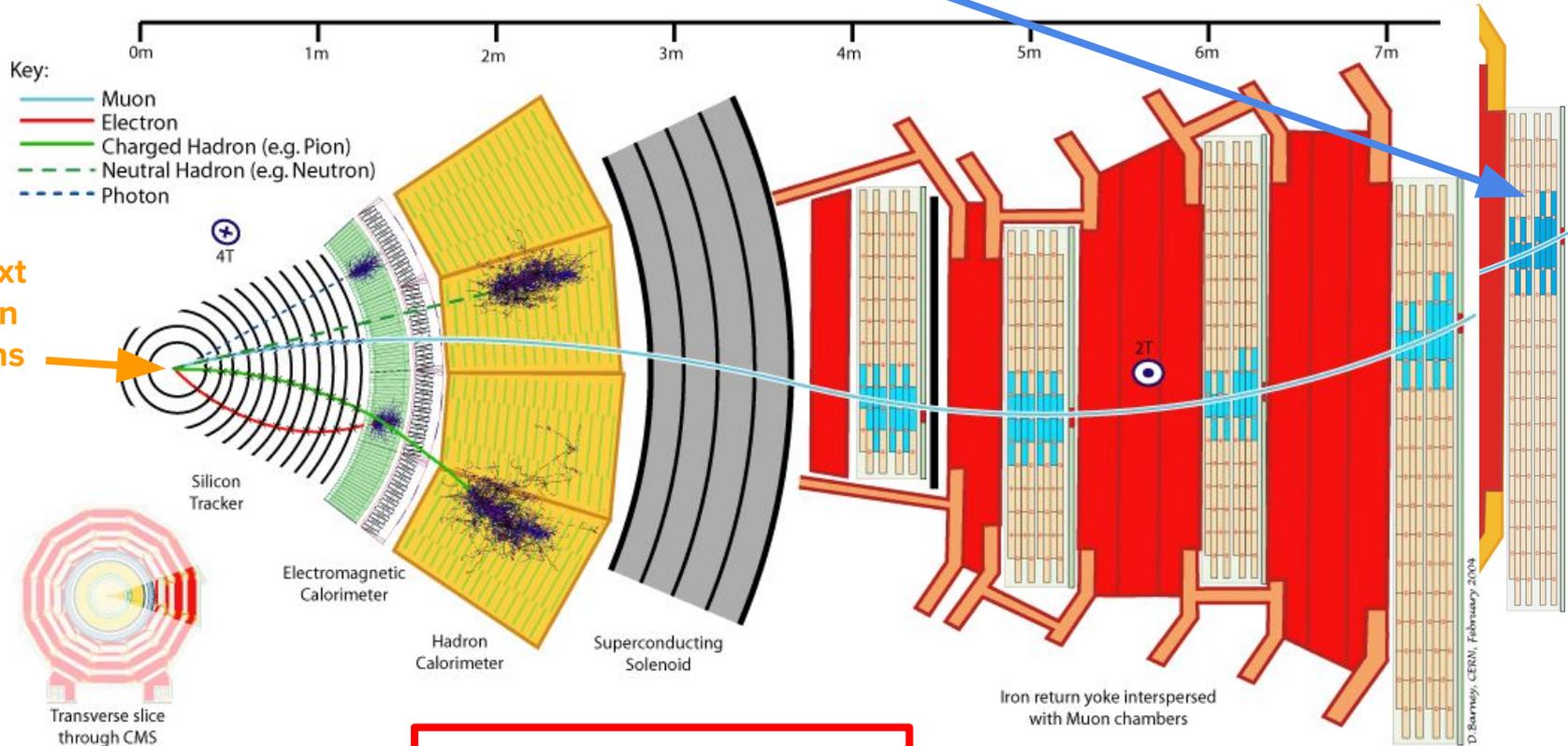


Raw $\Sigma E_T \sim 2$ TeV
14 jets with $E_T > 40$
Estimated PU ~ 50

LHCb $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$



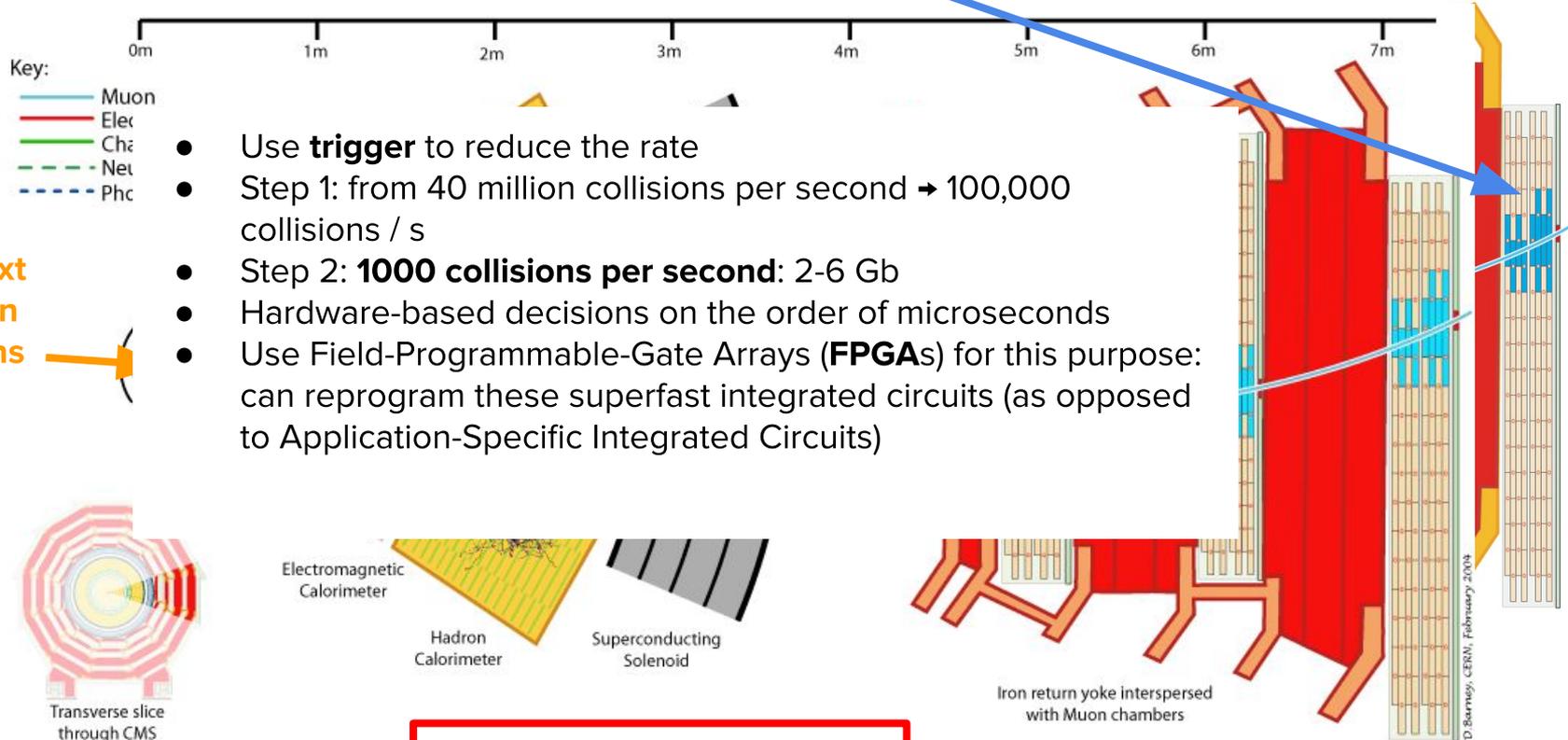
Note when the muon arrives here



The next collision happens here:

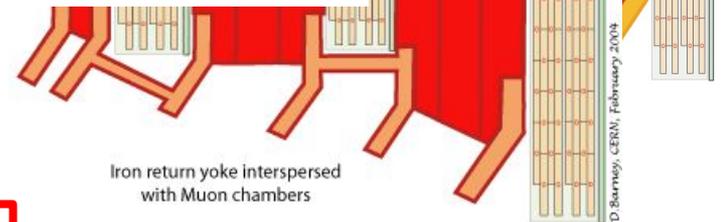
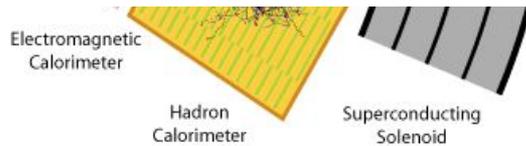
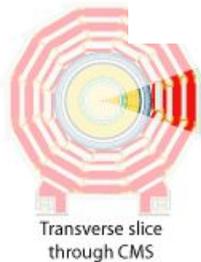
$$25 \text{ ns} \cdot c \approx 7.5 \text{ m}$$

Note when the muon arrives here

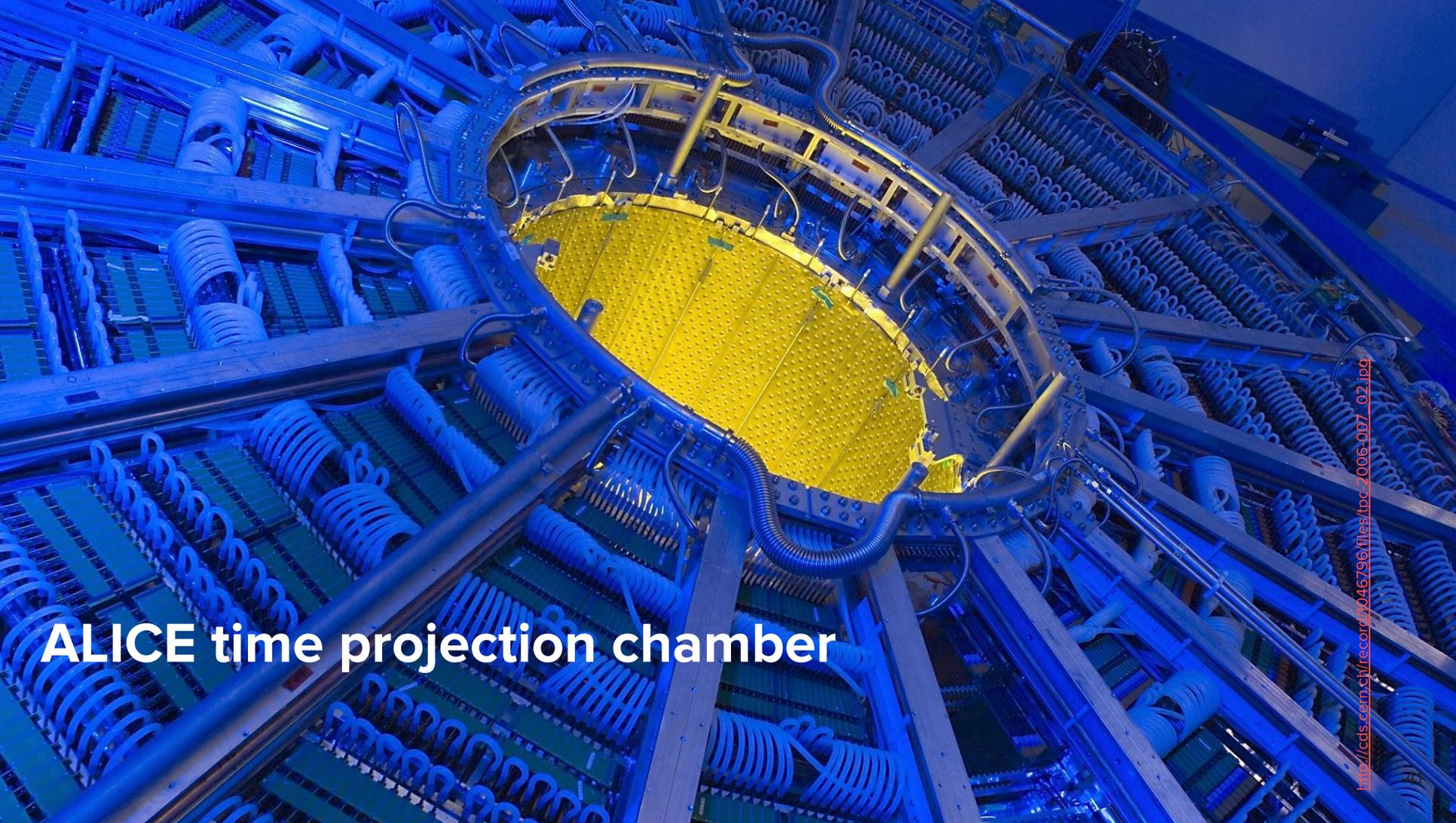


The next collision happens here:

- Use **trigger** to reduce the rate
- Step 1: from 40 million collisions per second → 100,000 collisions / s
- Step 2: **1000 collisions per second**: 2-6 Gb
- Hardware-based decisions on the order of microseconds
- Use Field-Programmable-Gate Arrays (**FPGAs**) for this purpose: can reprogram these superfast integrated circuits (as opposed to Application-Specific Integrated Circuits)



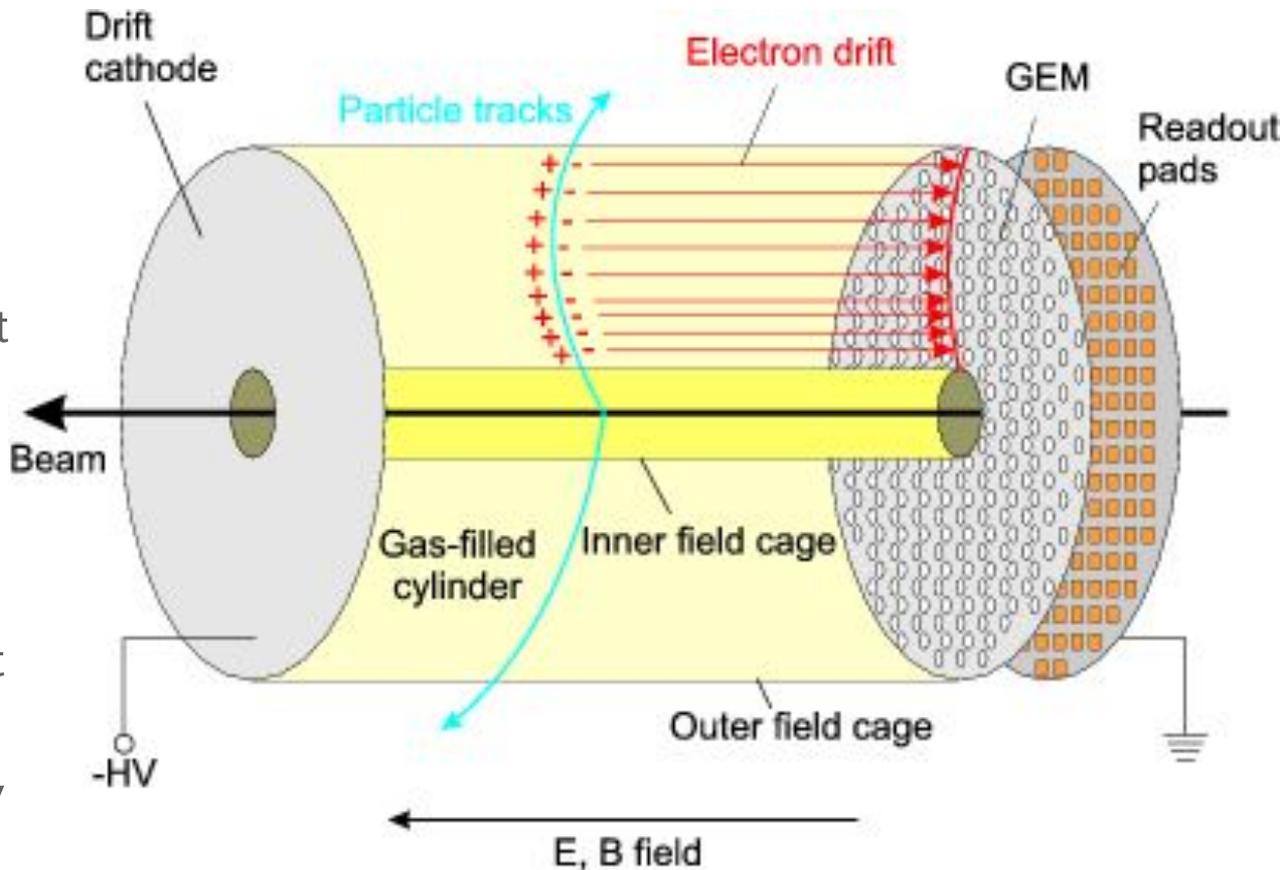
$$25 \text{ ns} \cdot c \approx 7.5 \text{ m}$$

A photograph of the ALICE time projection chamber (TPC) detector. The central feature is a large, circular, yellow-colored detector structure, which is the TPC volume, surrounded by a complex network of blue and silver metal support structures and numerous blue cables. The entire setup is illuminated with a strong blue light, creating a high-tech, industrial atmosphere. The cables are bundled and run along the metal framework, which is composed of various beams and supports.

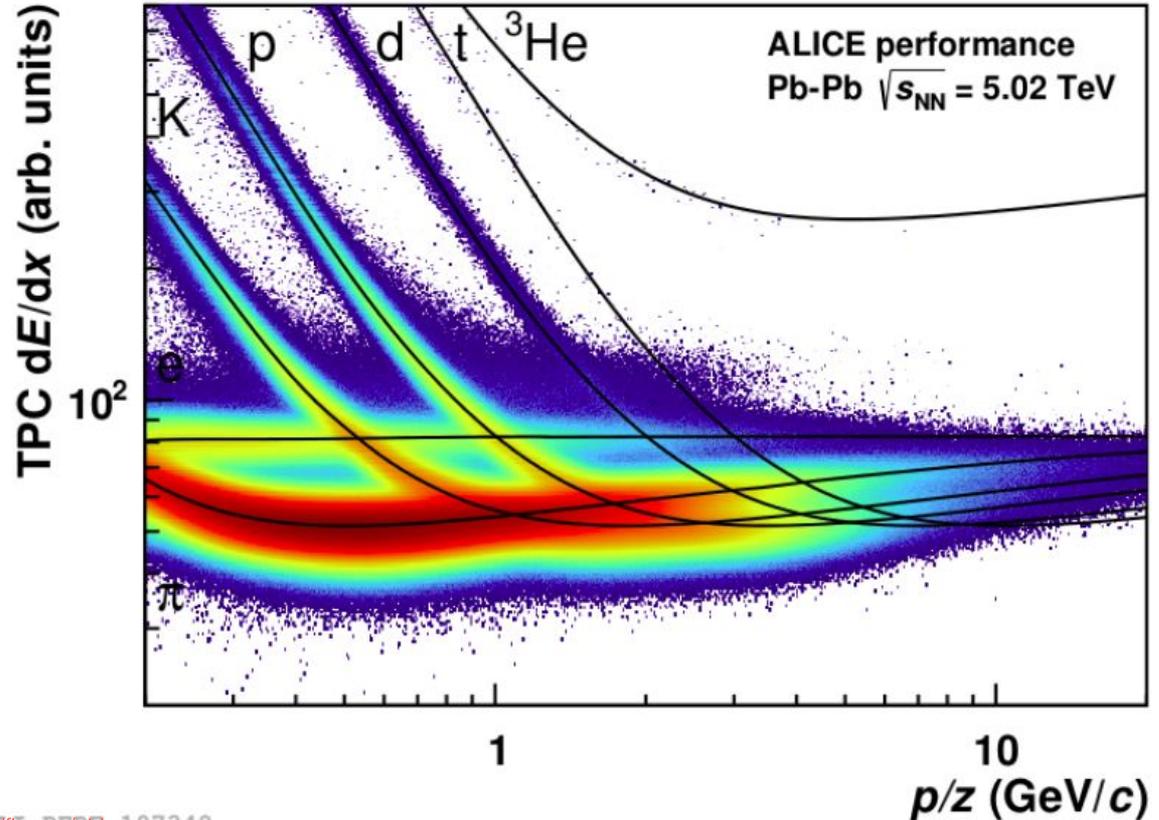
ALICE time projection chamber

TPC

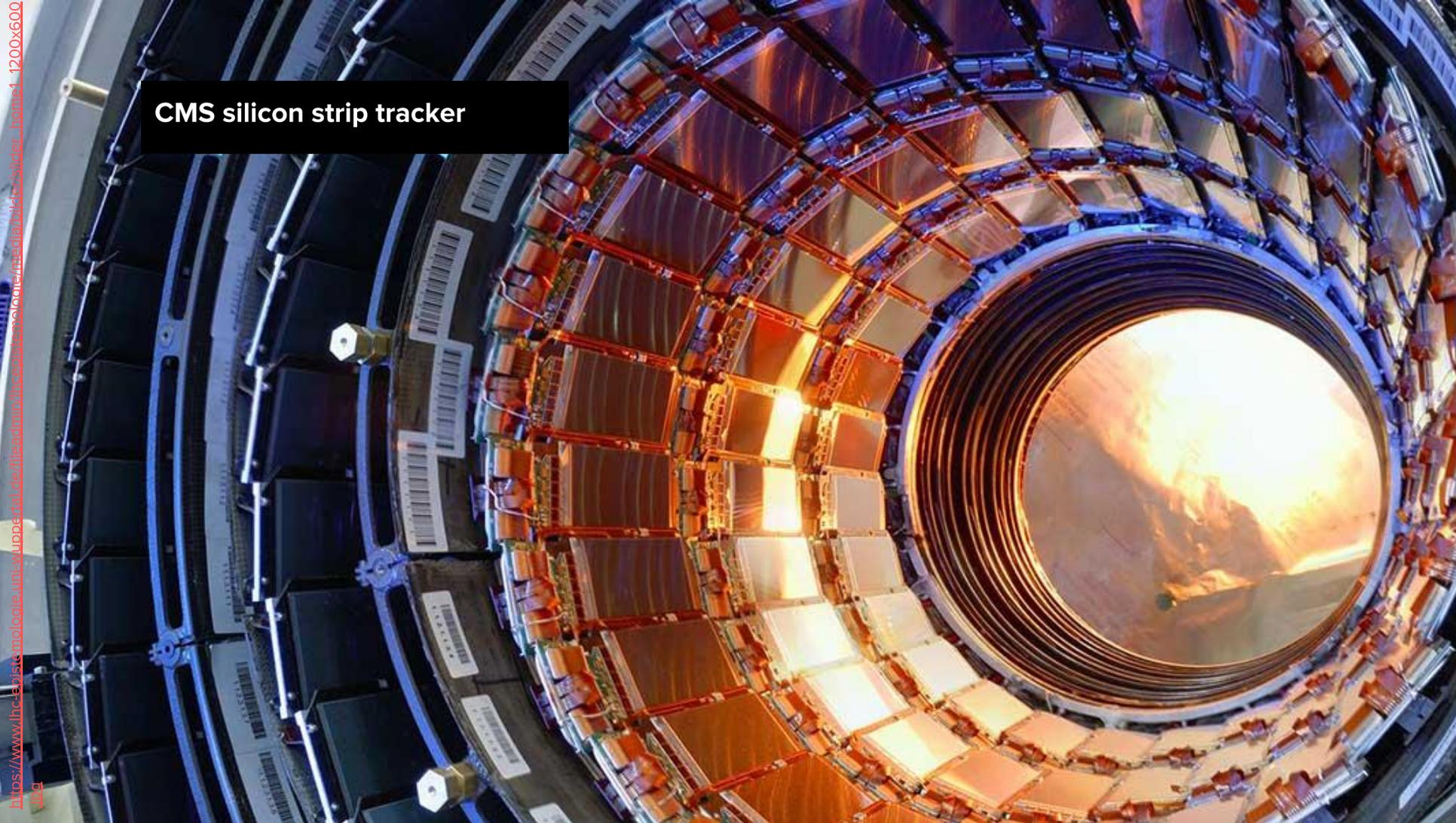
1. Ionization of gas in **chamber** with electric field causes electron drift
2. Signal gets amplified, in this case by gas electron multipliers \rightarrow electron avalanche
3. Readout pads can detect signal that can be **projected** onto trajectory
4. z (along beam) information from **timing**



- Every point is one measurement!
- Can identify particles for low momenta
- For higher momenta, all particles behave like a minimum ionizing particle (MIP)

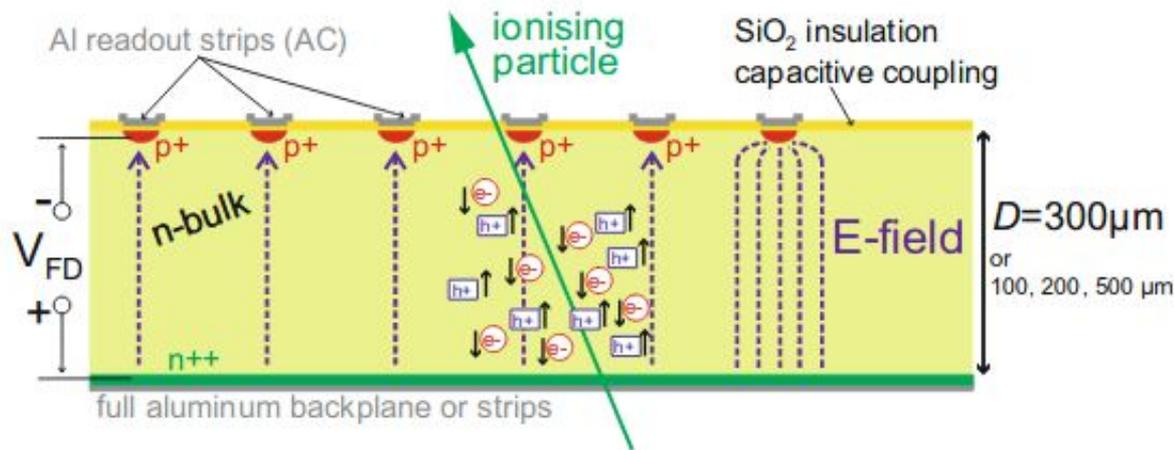


CMS silicon strip tracker



Ideal signal detection with silicon sensors

- A minimum ionizing particle (MIP) traveling through a fully depleted region (V_{FD}) creates electron hole pairs
- The charges drift to opposite directions under the electric field
- Within nanoseconds, charges are collected at the readout



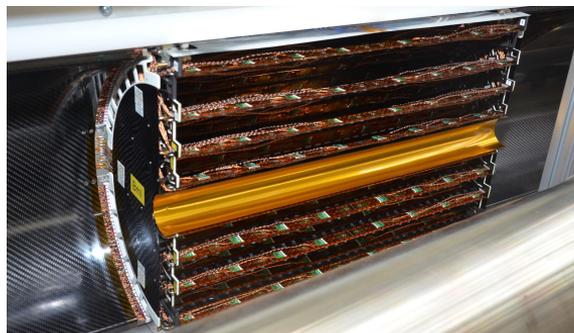
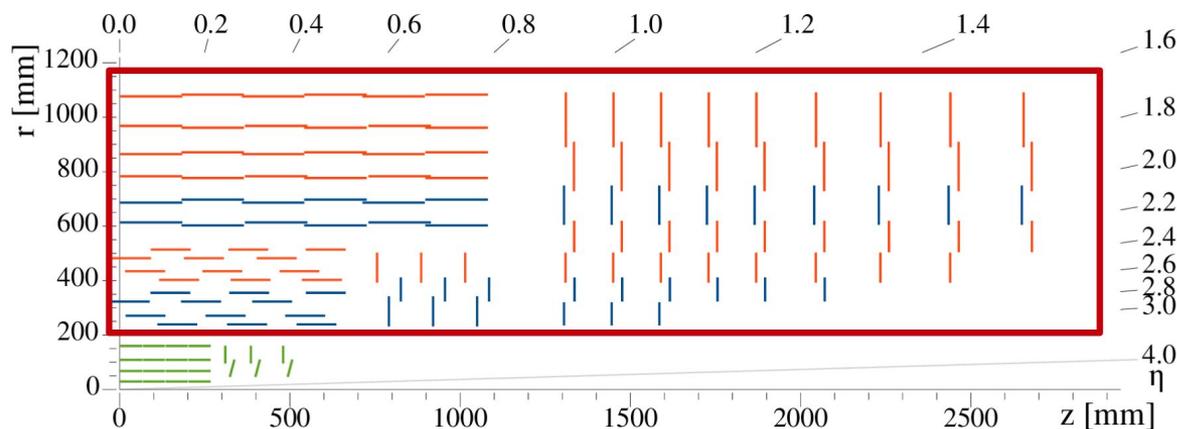
p-in-n silicon sensor

CMS silicon tracker



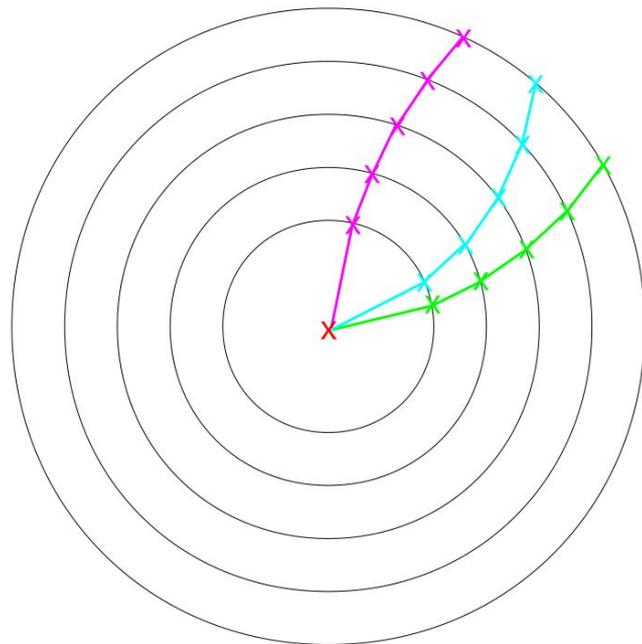
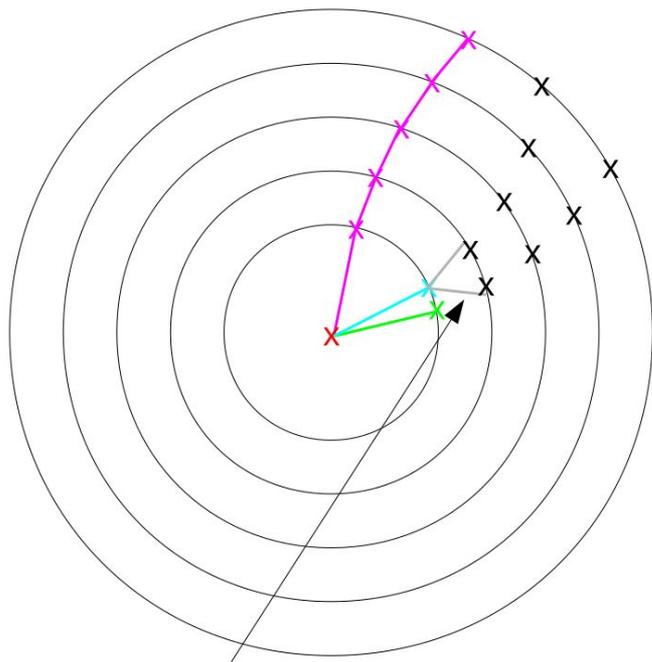
Strips vs pixels: how to determine location with strips?

- 10-12 layers of silicon sensors
- 15148 modules
- 9.3 million electronic channels
- Operated at -20°C and $< 20\%$ humidity
- In over 10 years of beam more than a billion particles fly through detector!

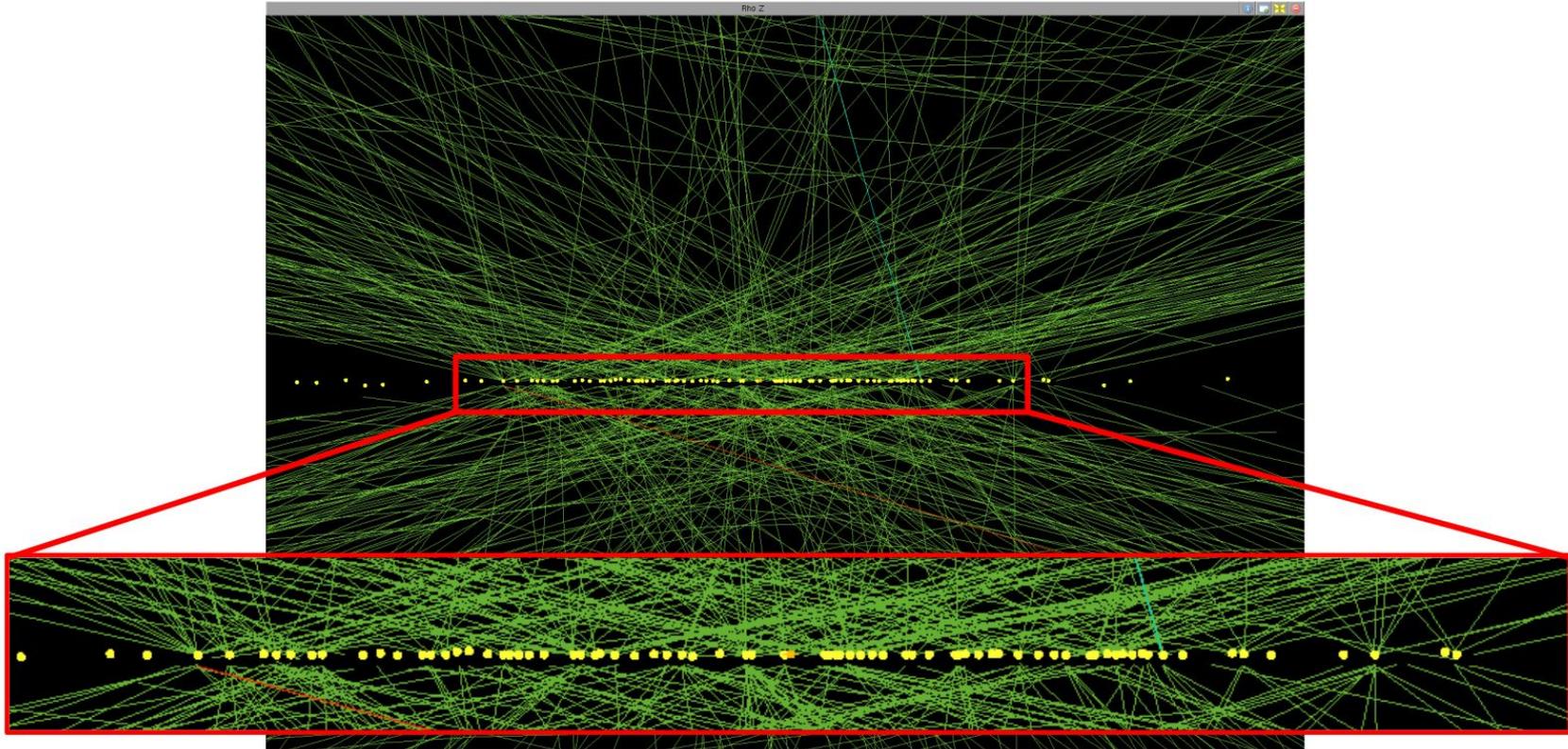


The pixel (or vertex) detector is so close to the beam pipe, it cannot survive this radiation: replaced in 2017, now inner layer will be replaced

Track reconstruction: find hits that belong to track

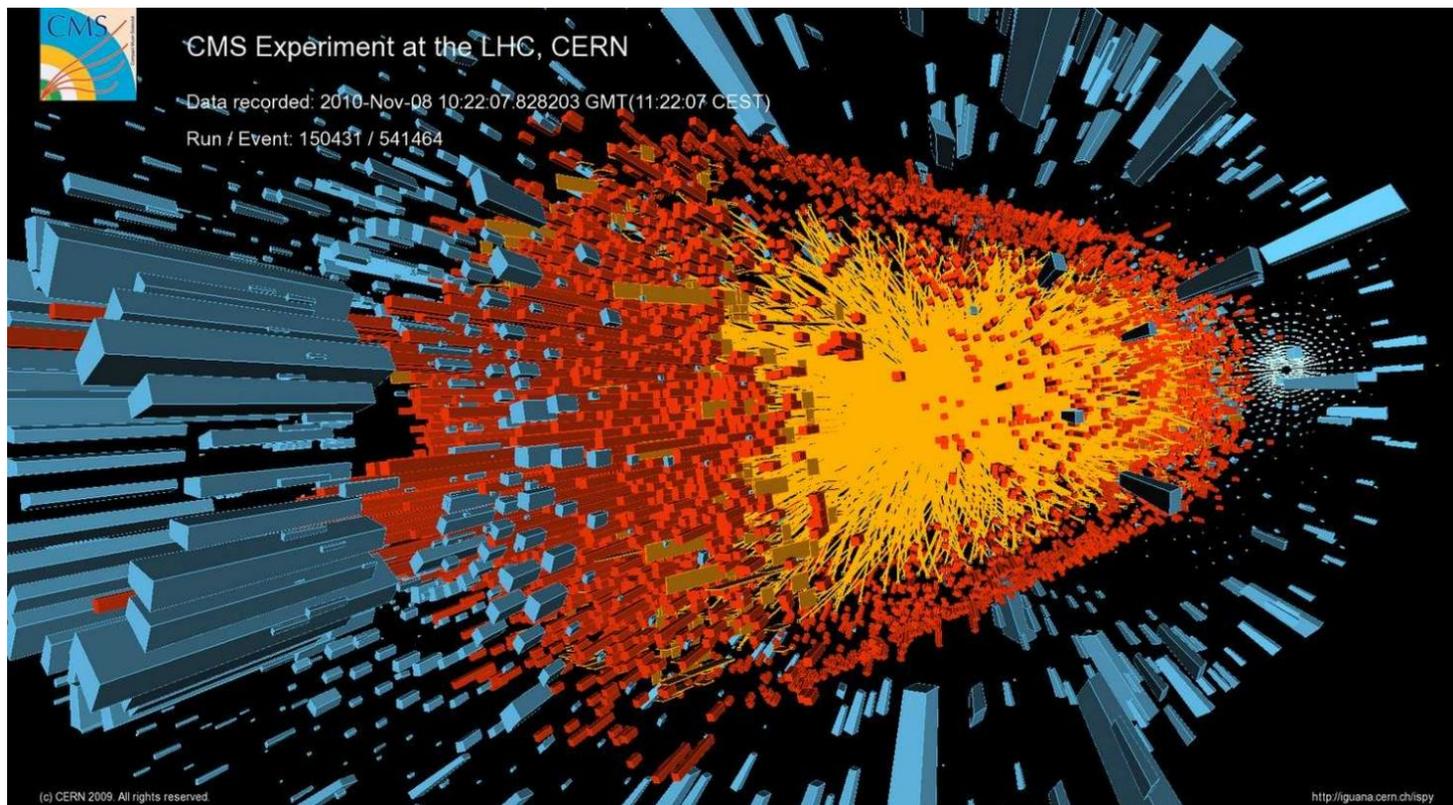


What if 78 interactions happen simultaneously?

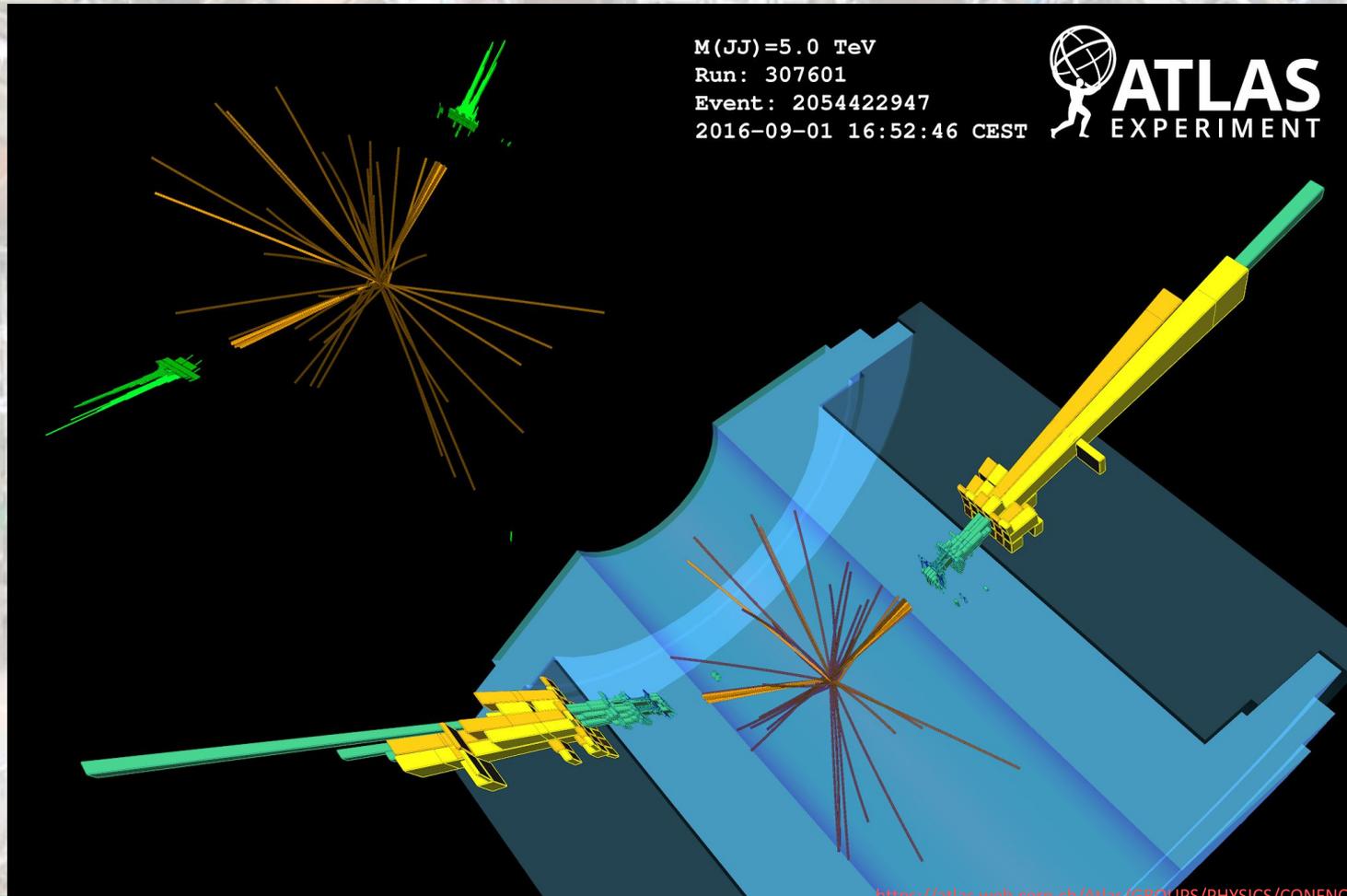


Or a collision of 2 lead nuclei?

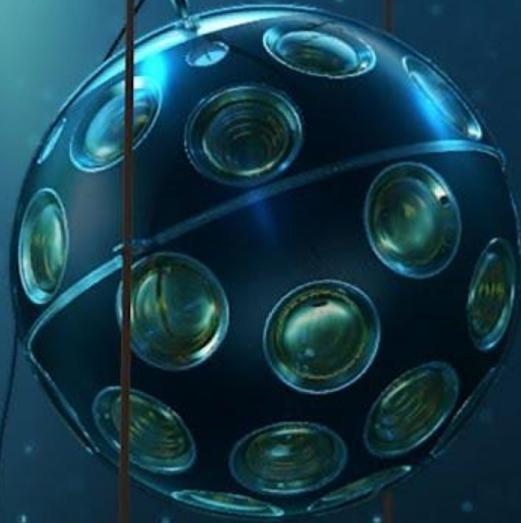
10000
charged
tracks!



Diboson event: jets in the ATLAS detector



- 10^9 neutrinos / cm^2/s
- Most from sun and atmosphere
- Rare events from black holes, supernovae...



KM3NeT: cubic kilometer neutrino telescope

- **Between 2 and 4 km deep in Mediterranean (FR-IT-GR)**
- **12000 digital optical modules (DOMs) on 600 strings**
- **Cherenkov detection with photomultipliers**
- **GeV, TeV, and PeV neutrinos**

Netherlands plays a large role in construction

Plan for the LHC

