

Tristan du Pree (Nikhef)  
NL HSSIP CERN  
2 mei 2018

# DE LHC-EXPERIMENTEN & HET HIGGS-BOSON



**ATLAS**  
EXPERIMENT





SUISSE  
FRANCE

CMS

LHCb

ATLAS

CERN Meyrin

CERN Prévessin

SPS 7 km

ALICE

LHC 27 km



## ATLAS & CMS

Higgs-boson  
Supersymmetrie  
Donkere Materie  
Exotische deeltjes

## LHCb

Anti-materie

## ALICE

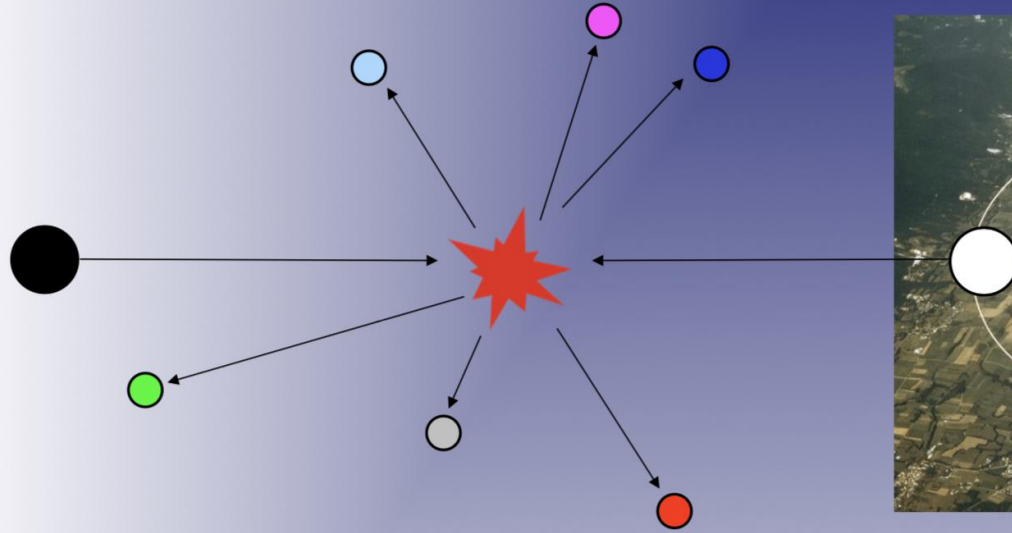
Zware ionen

# De fundamentele bouwstenen!

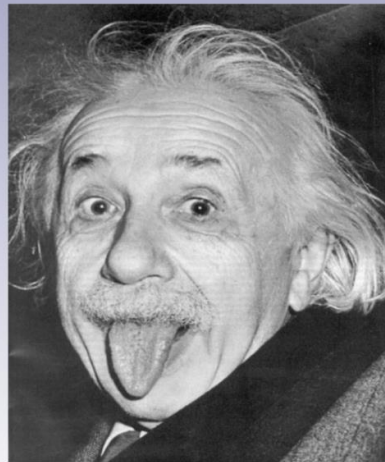




# Hoe maak je nieuwe deeltjes?



$$E=mc^2$$



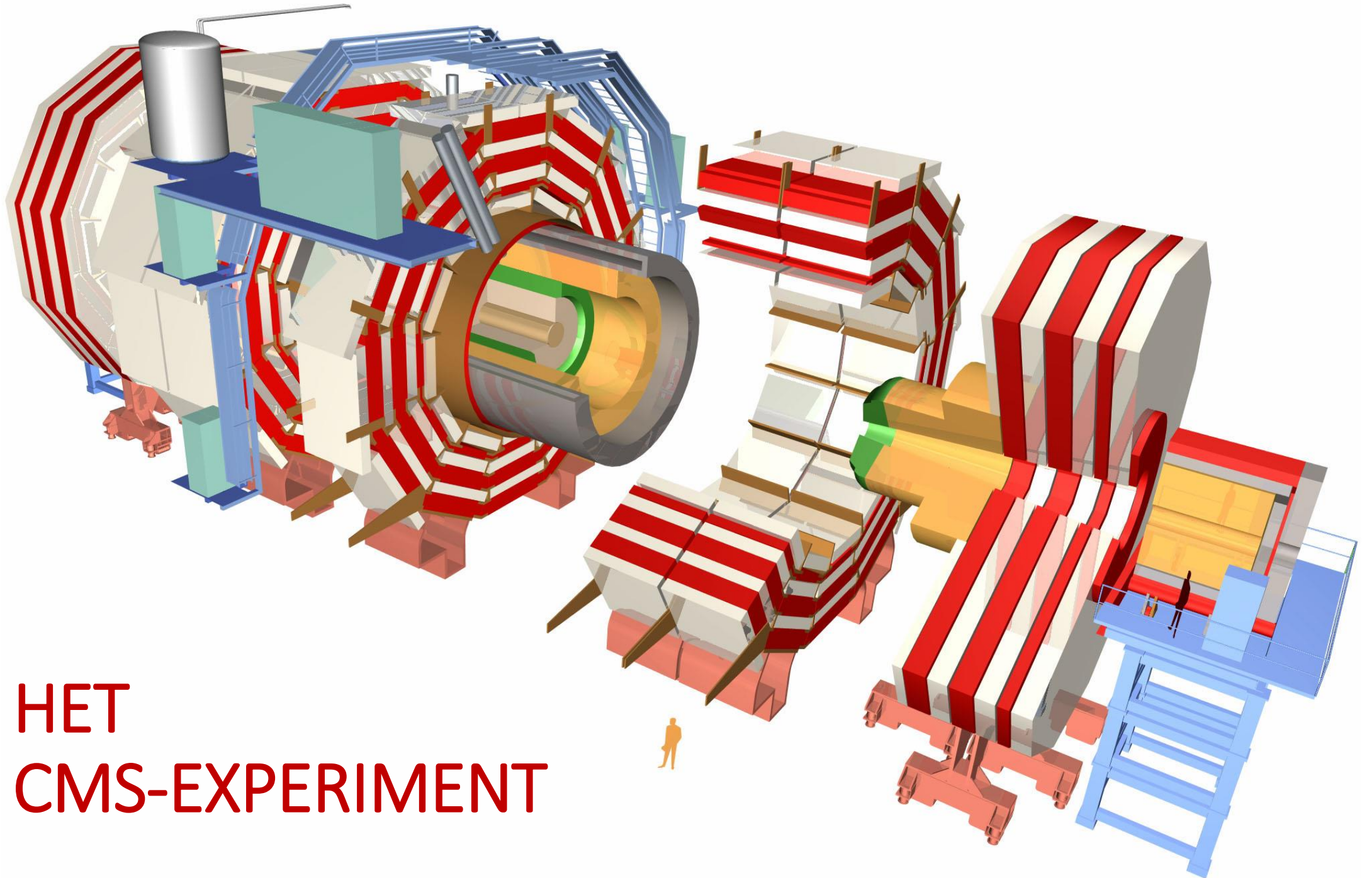
2010 - 2012:  $E=8$  TeV

1 TeV = 1000 GeV

1 GeV = 1 proton-massa

Sinds 2015:  $E=13$  TeV!





HET  
CMS-EXPERIMENT



# CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes  
Overall diameter : 15.0 m  
Overall length : 28.7 m  
Magnetic field : 3.8 T

STEEL RETURN YOKE  
12,500 tonnes

SILICON TRACKERS  
Pixel (100x150  $\mu\text{m}$ ) ~16m<sup>2</sup> ~66M channels  
Microstrips (80x180  $\mu\text{m}$ ) ~200m<sup>2</sup> ~9.6M channels

SUPERCONDUCTING SOLENOID  
Niobium titanium coil carrying ~18,000A

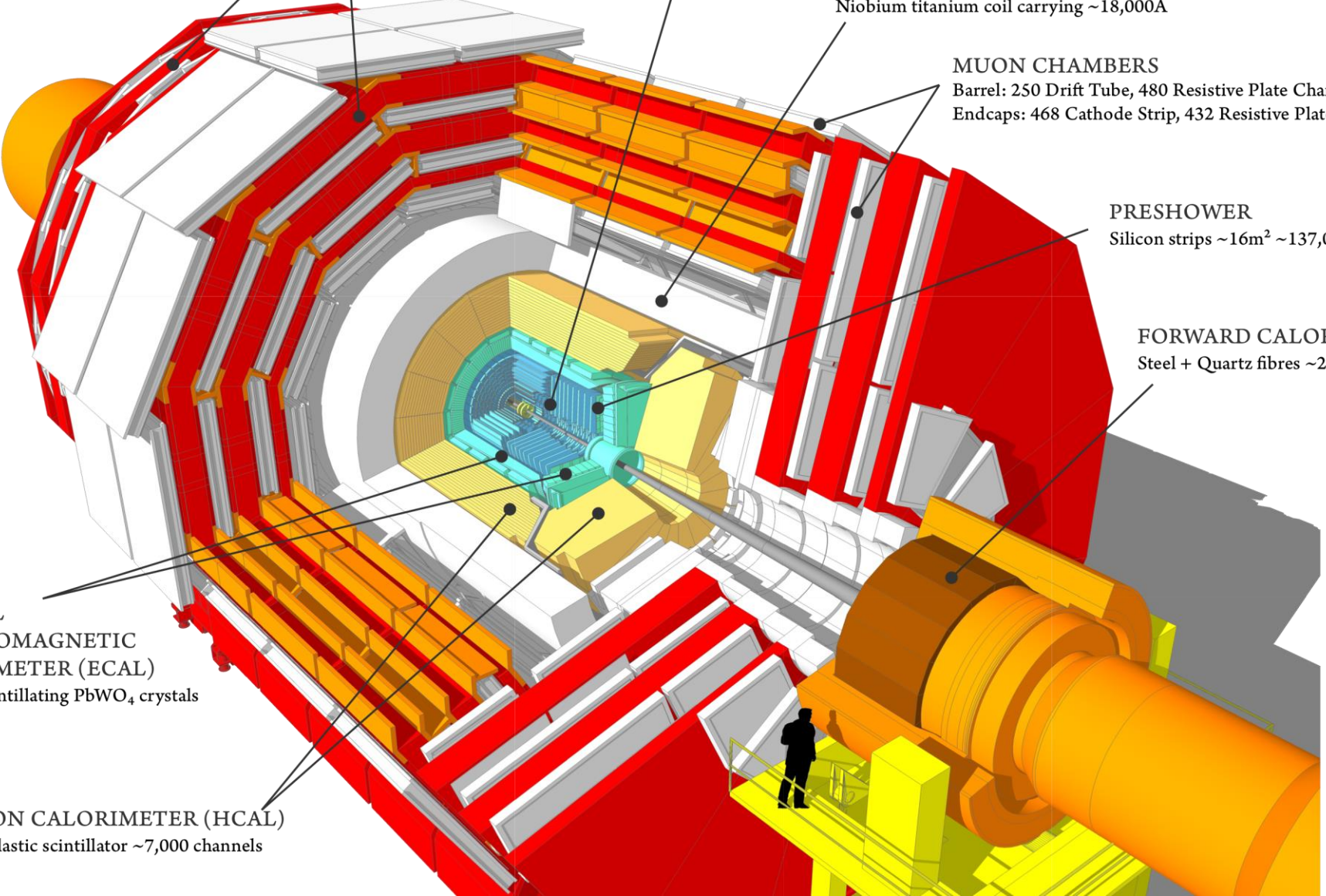
MUON CHAMBERS  
Barrel: 250 Drift Tube, 480 Resistive Plate Chambers  
Endcaps: 468 Cathode Strip, 432 Resistive Plate Chambers

PRESHOWER  
Silicon strips ~16m<sup>2</sup> ~137,000 channels

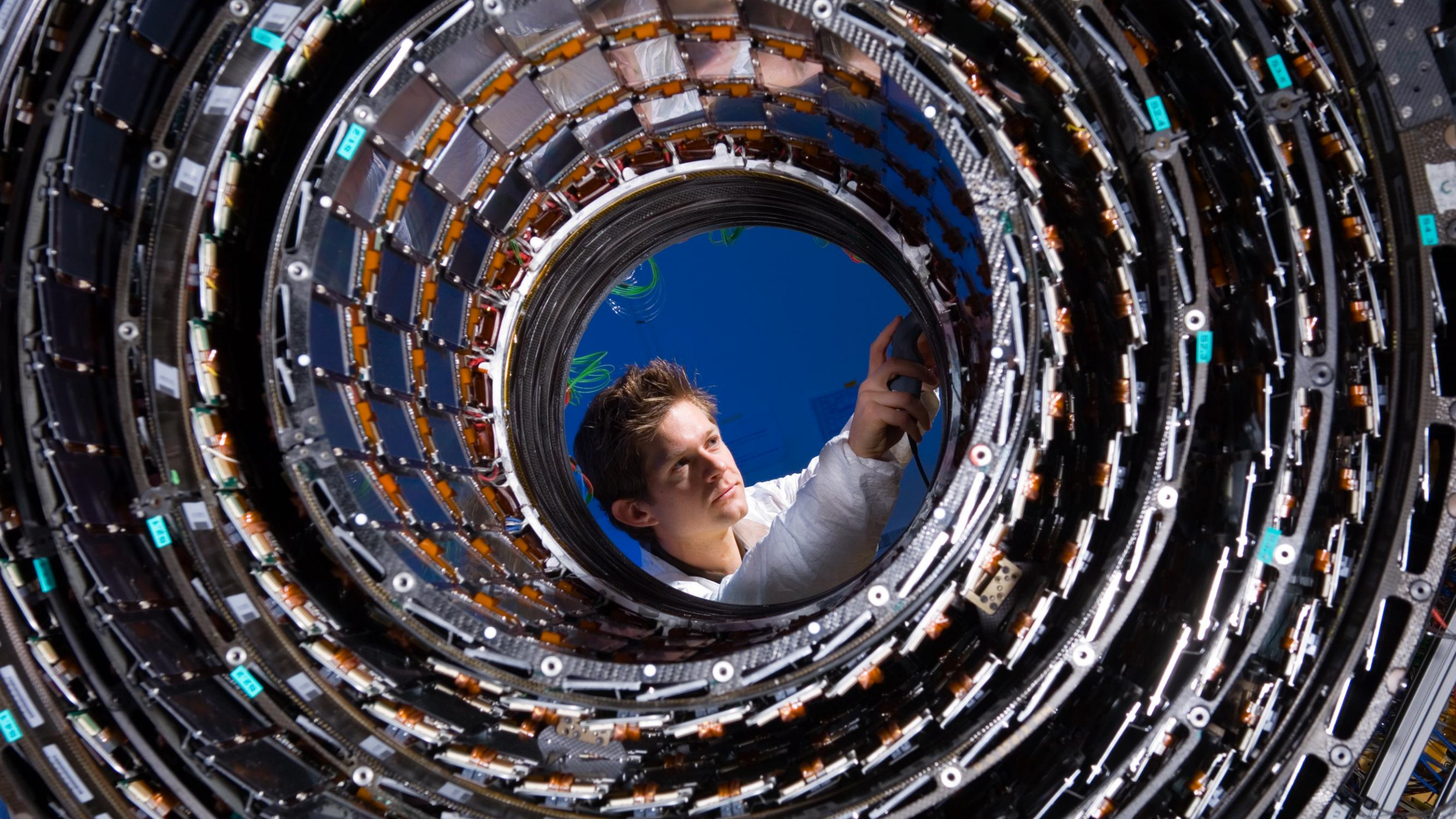
FORWARD CALORIMETER  
Steel + Quartz fibres ~2,000 Channels

CRYSTAL ELECTROMAGNETIC CALORIMETER (ECAL)  
~76,000 scintillating PbWO<sub>4</sub> crystals

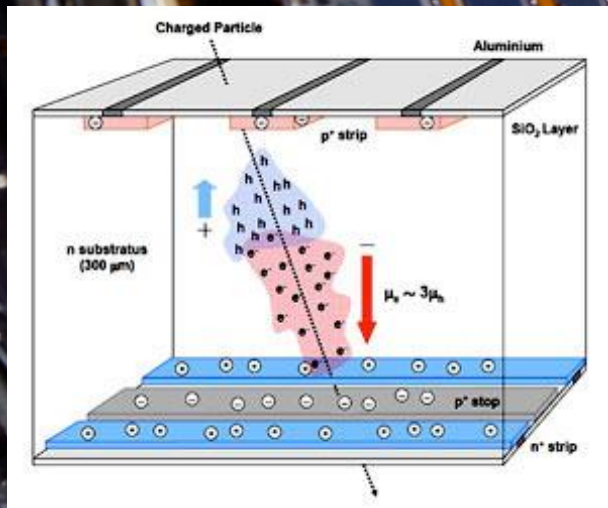
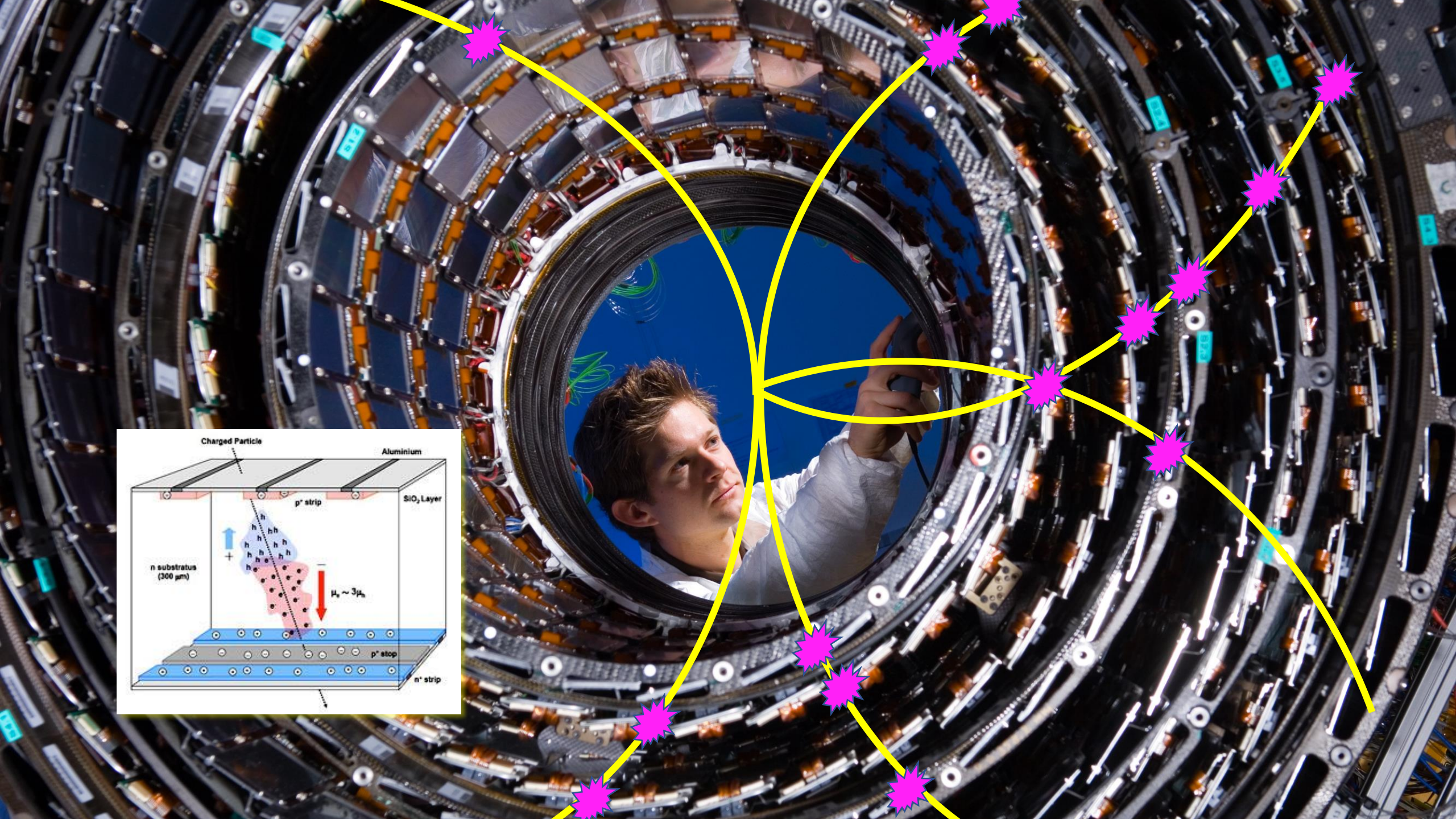
HADRON CALORIMETER (HCAL)  
Brass + Plastic scintillator ~7,000 channels







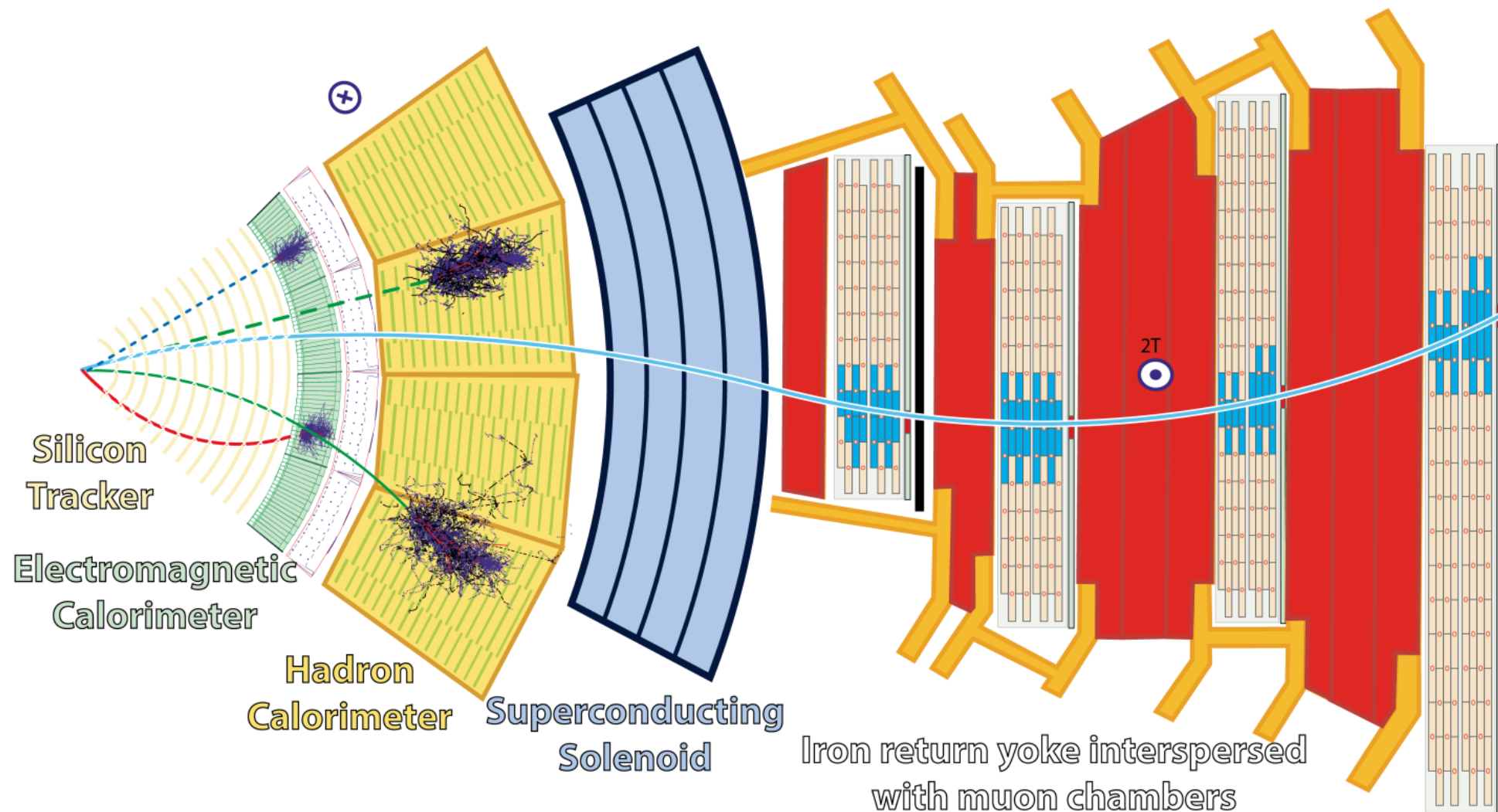






# RECONSTRUCTIE

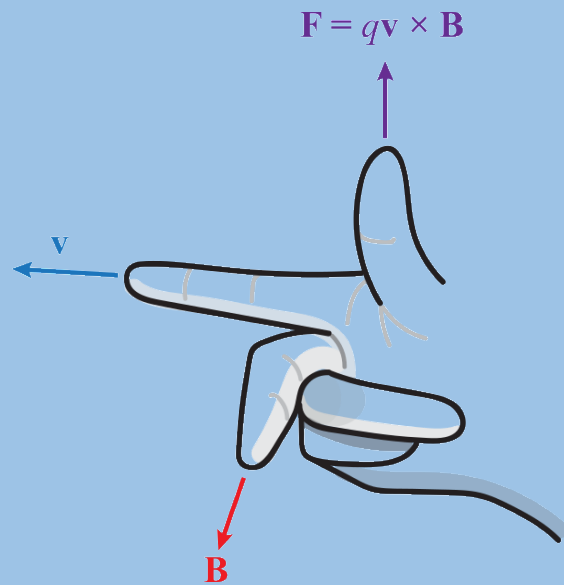
Muon  
Electron  
Hadrons  
Photon





# LORENTZKRACHT

- 1) Versneller: afbuigen
- 2) Detector: reconstructie

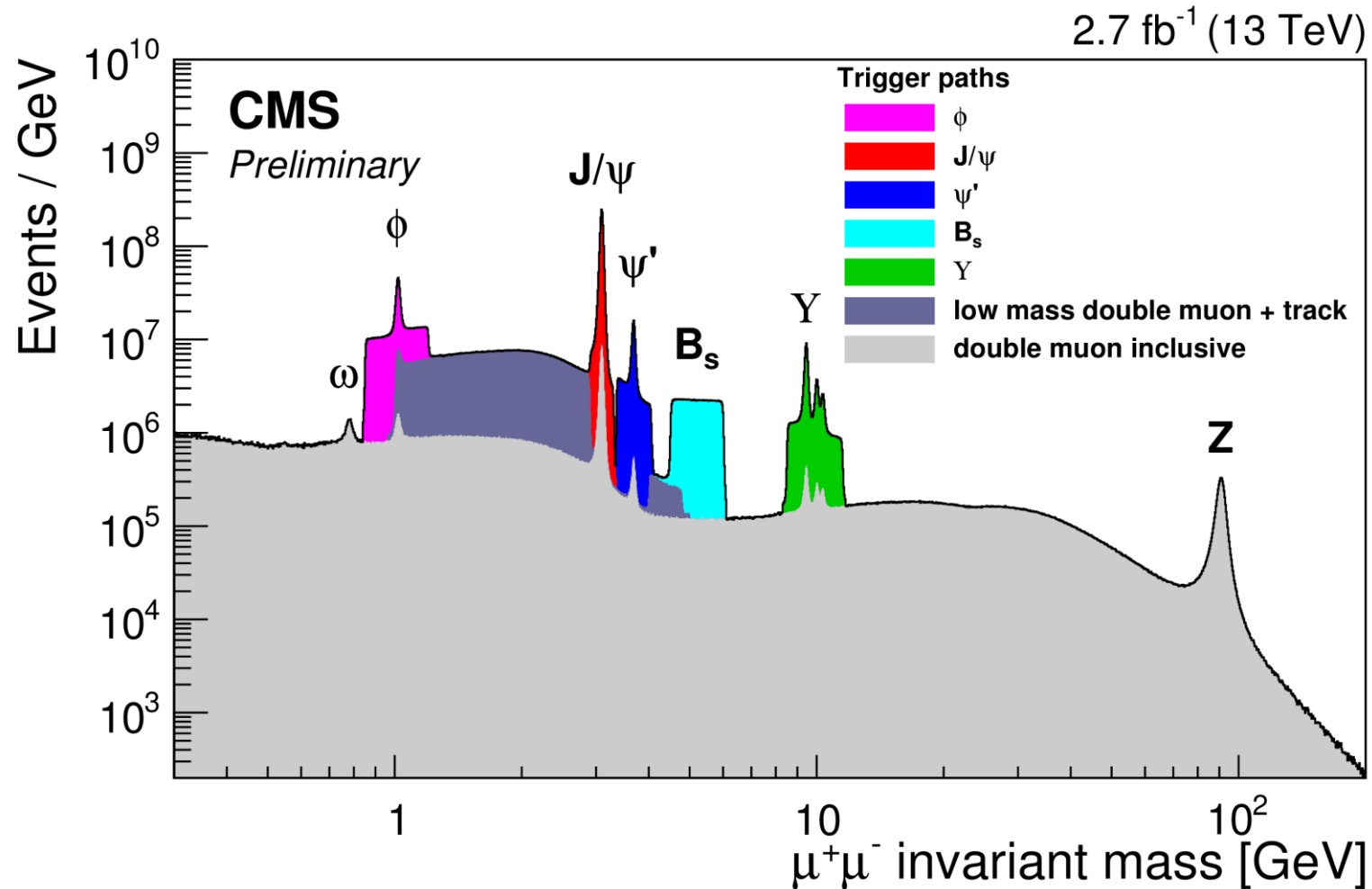


- Ook op straat in Leiden!  
➤ [www.muurformules.nl](http://www.muurformules.nl)





# VOORBEELD: 2 MUONEN





# WAT SLAAN WE OP?

**Data: 1 TB per seconde!**

1 miljard botsingen p/s

➤ 25 x 40.000.000 Hz

1 MB per botsing

➤ 1 iPhone foto

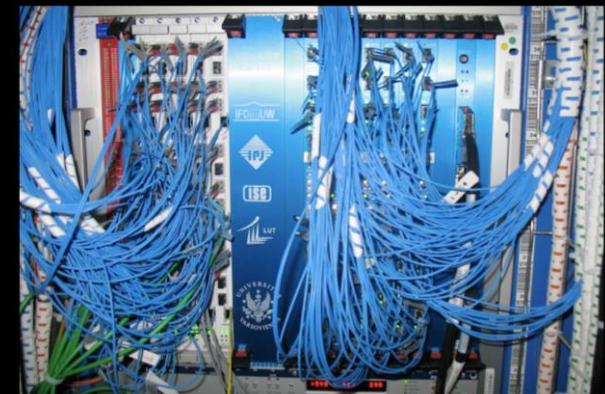
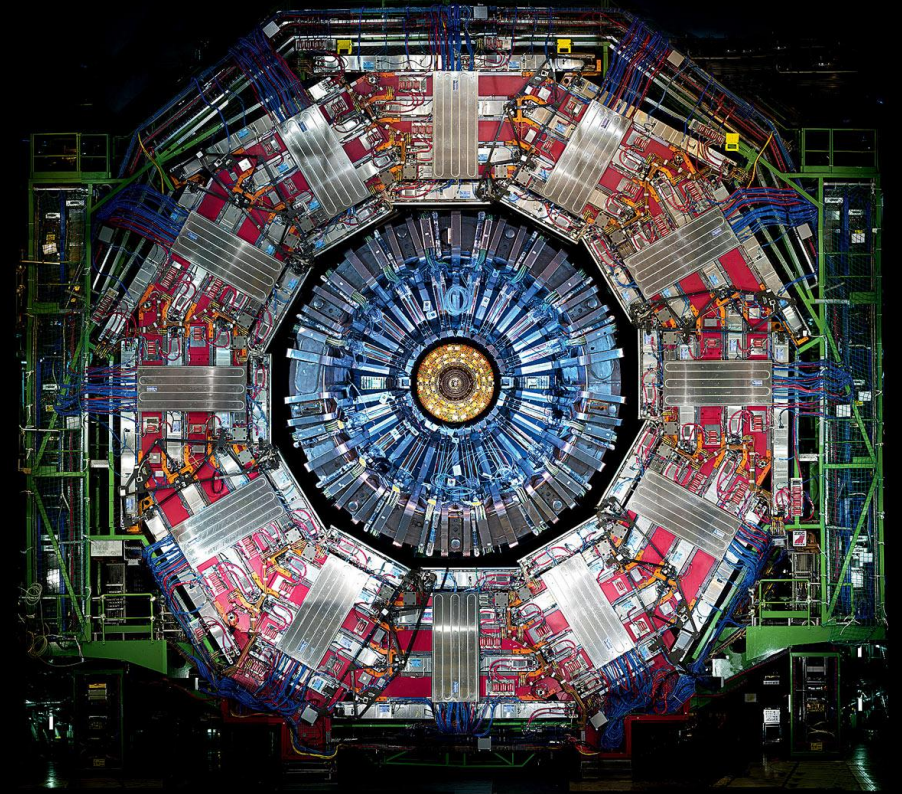
**Opslag**

100 per seconde

➤ De rest slaan we niet op!

Wat bewaren we?

➤ Herken een Higgsboson!





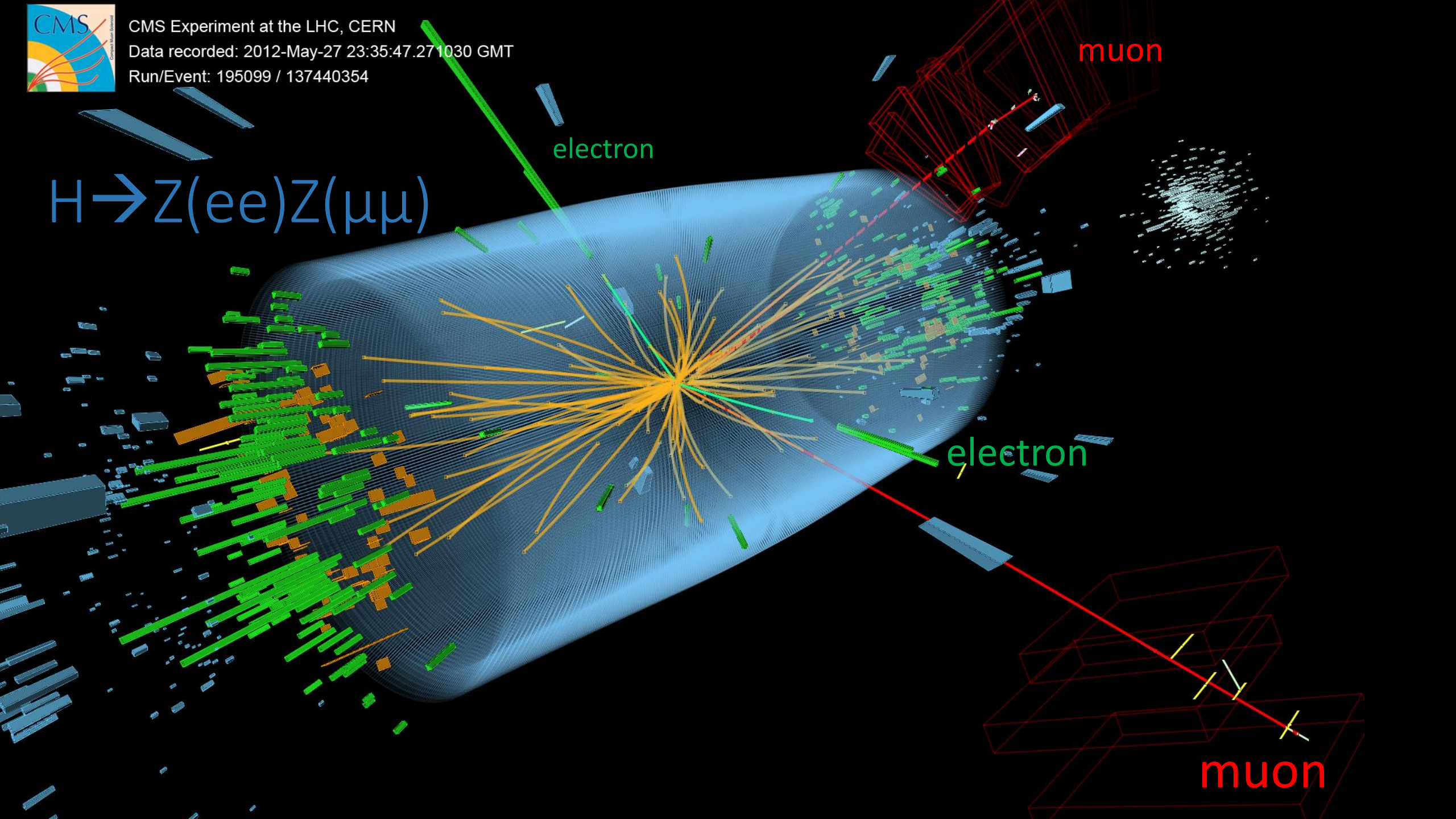


CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2012-May-27 23:35:47.271030 GMT

Run/Event: 195099 / 137440354

$H \rightarrow Z(ee)Z(\mu\mu)$





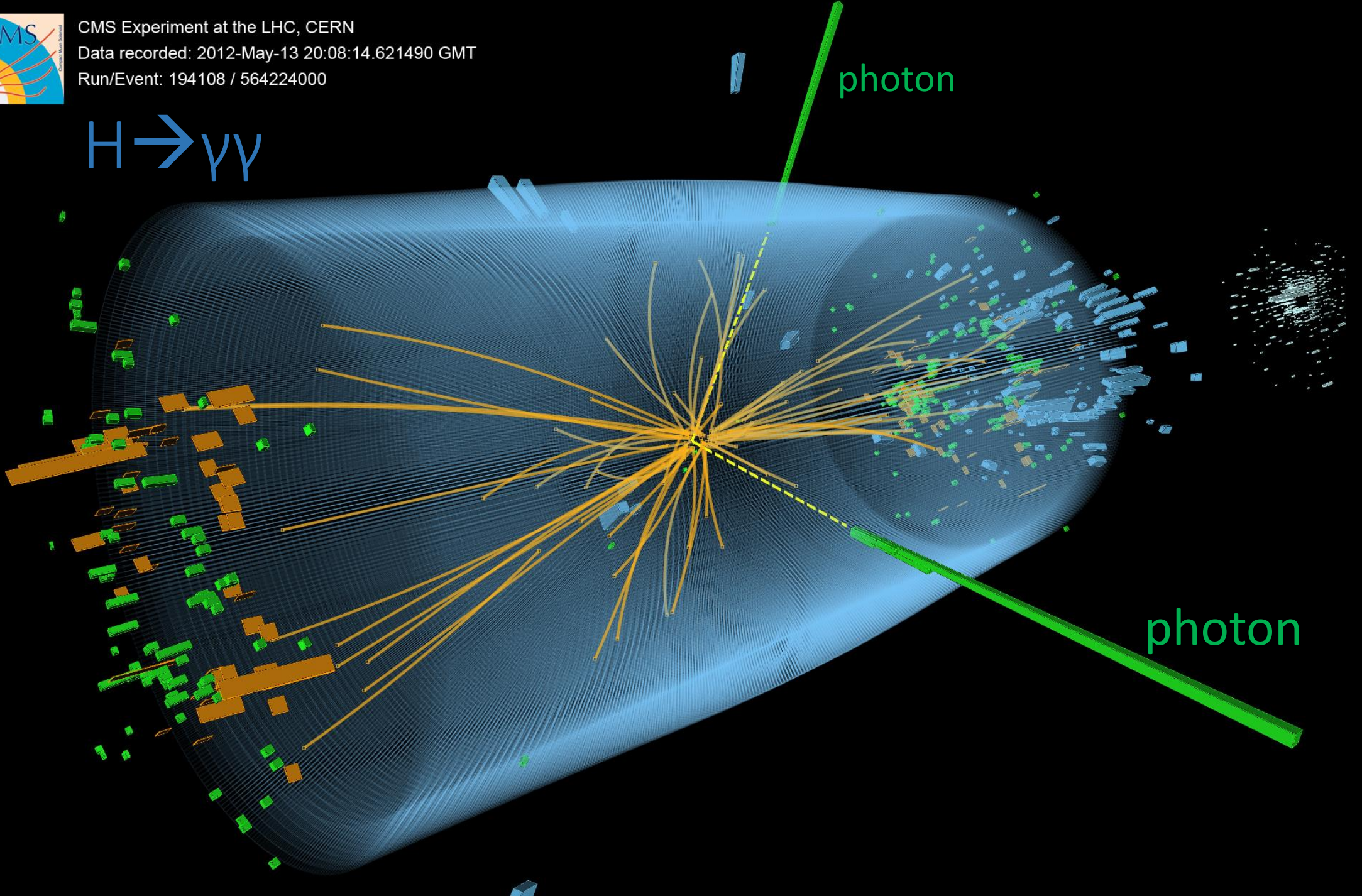


CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT

Run/Event: 194108 / 564224000

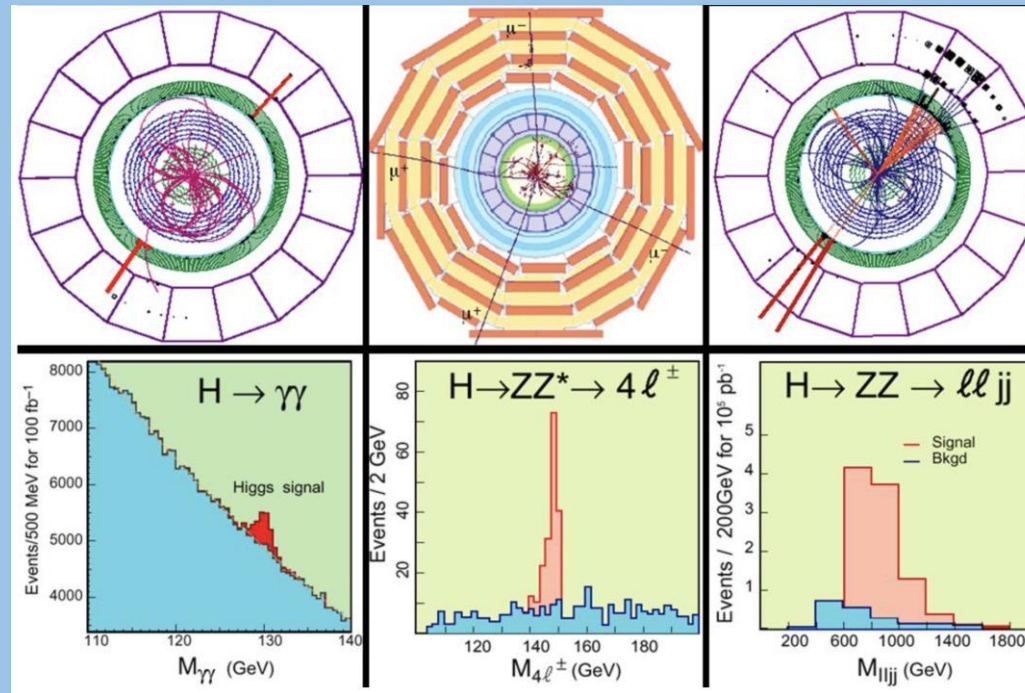
$$H \rightarrow \gamma\gamma$$





# SIMULATIES

We zoeken een speld in een hooiberg



➤ Daarom doen we eerst veel simulaties





Amsterdam

4 July 2012



CERN



CERN



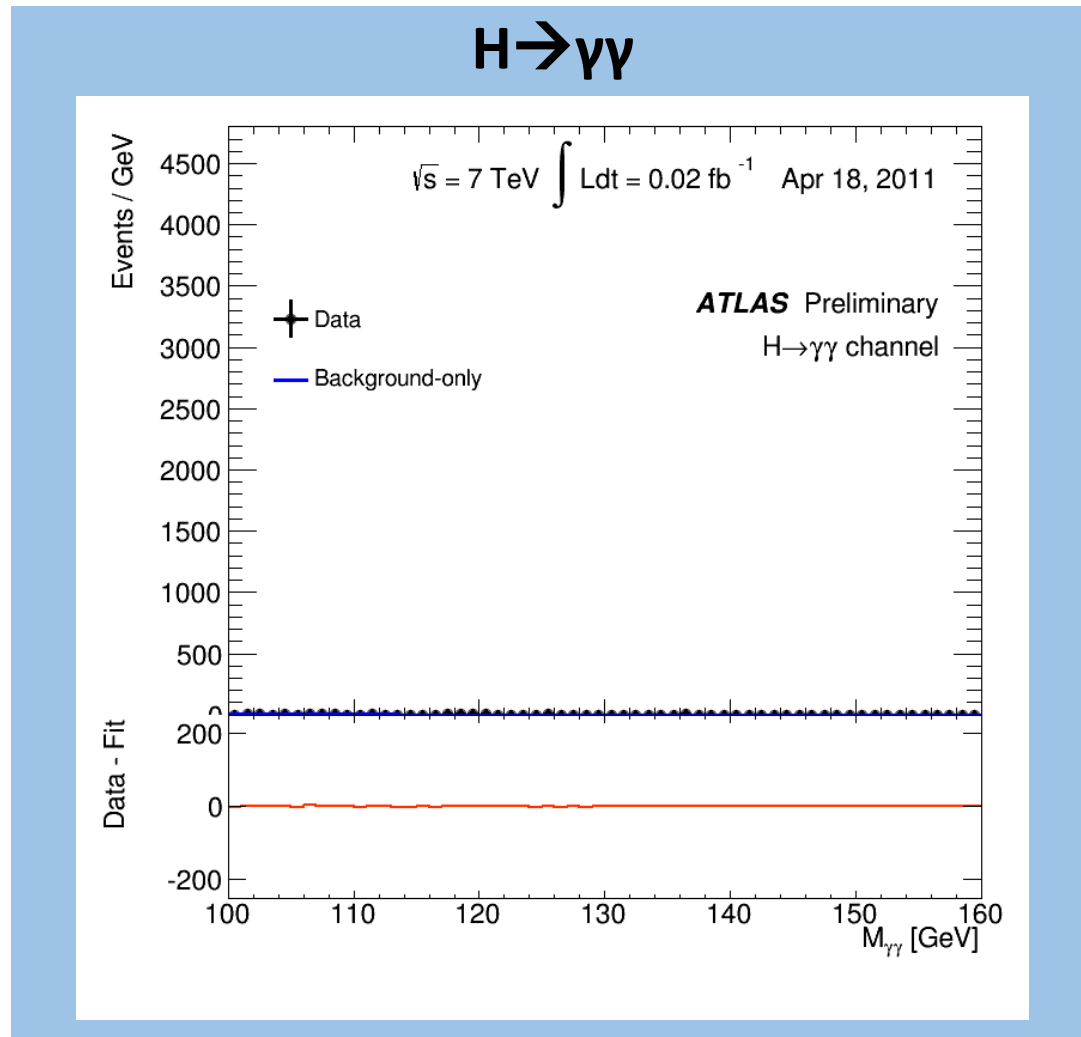
Sydney



Amsterdam



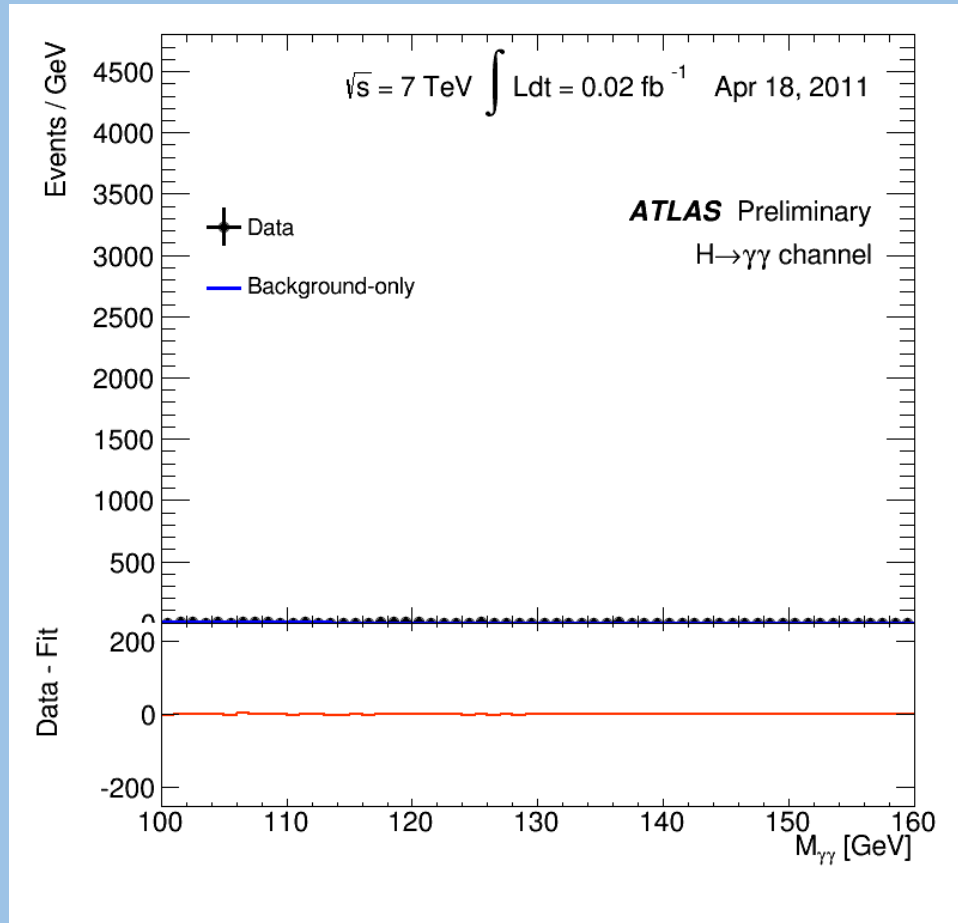
# BEWIJS



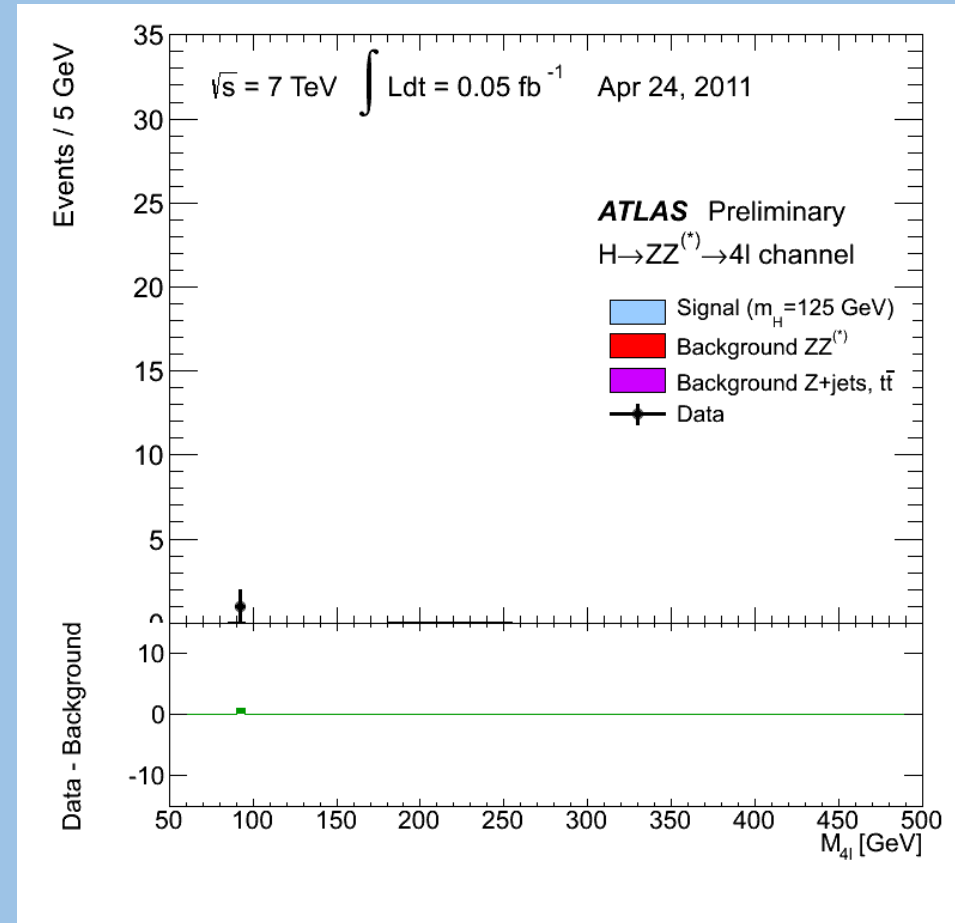


# BEWIJZEN

## H → $\gamma\gamma$



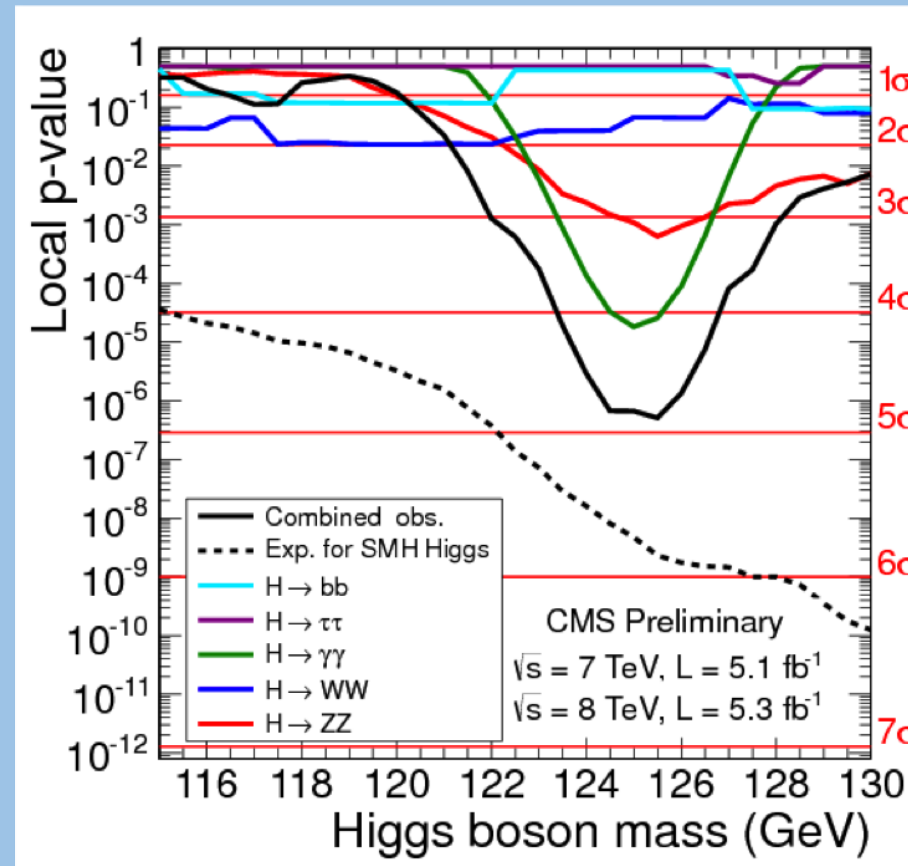
## H → ZZ





# ALLE KANALEN SAMEN

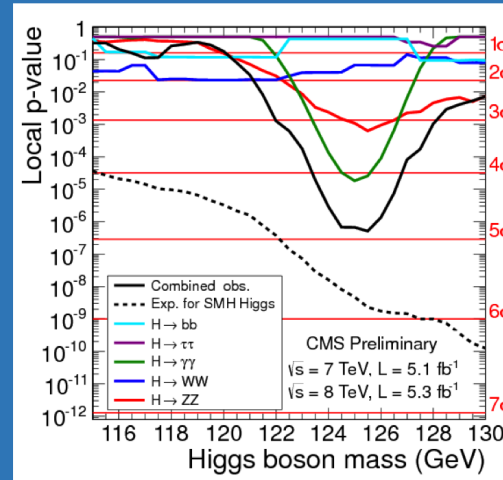
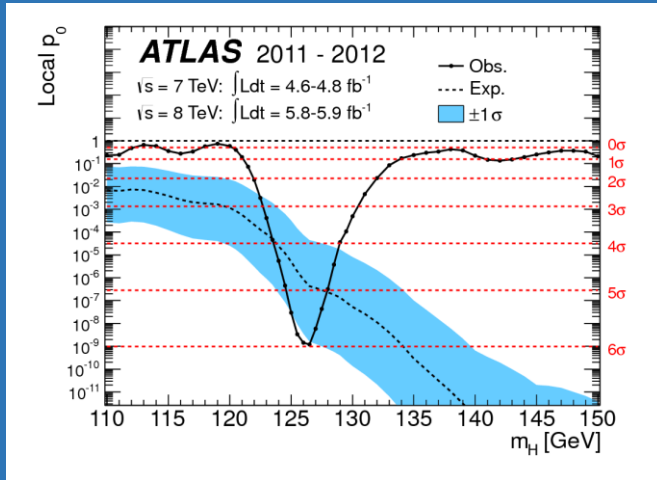
Waarschijnlijkheid



➤ Kans dat dit toeval is: minder dan 1 op miljoen !



# BEIDE RESULTATEN



# HIGGS GEVONDEN!



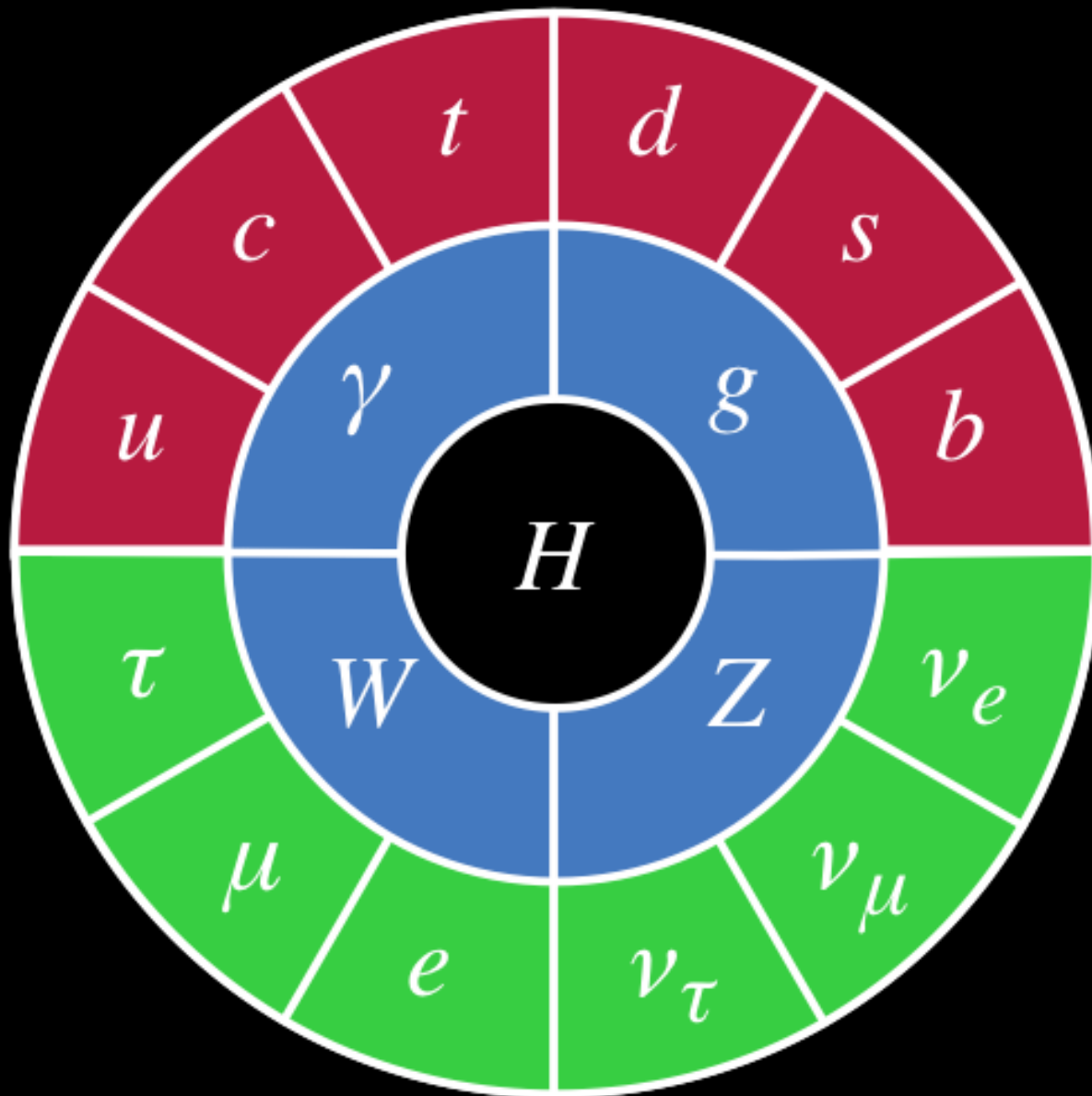
# NOBELPRIJS 2014



➤ ONTDEKKING HALVE EEUW NA THEORETISCHE VOORSPELLING!



'T SM



IS AF

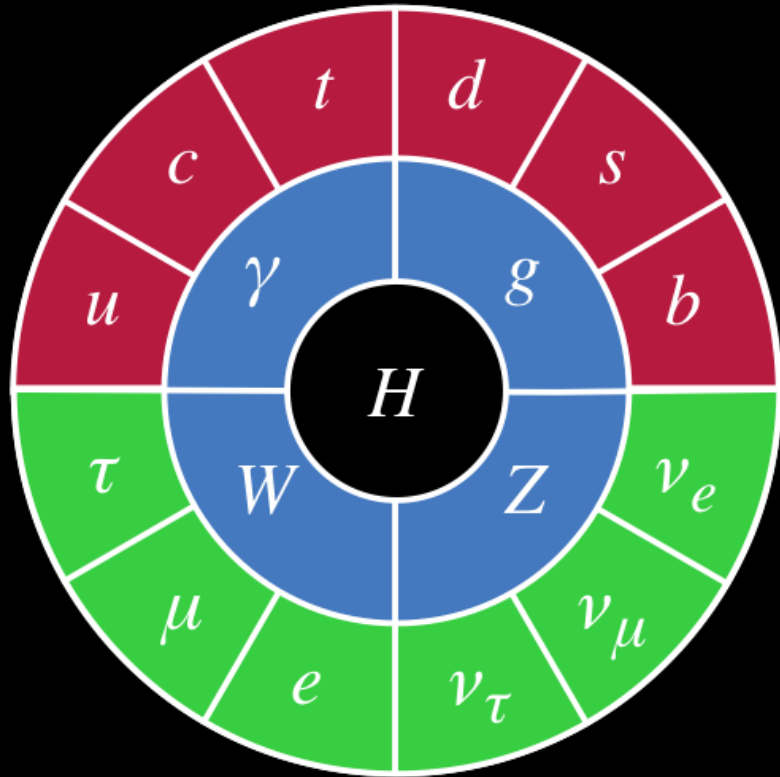


EN NU?

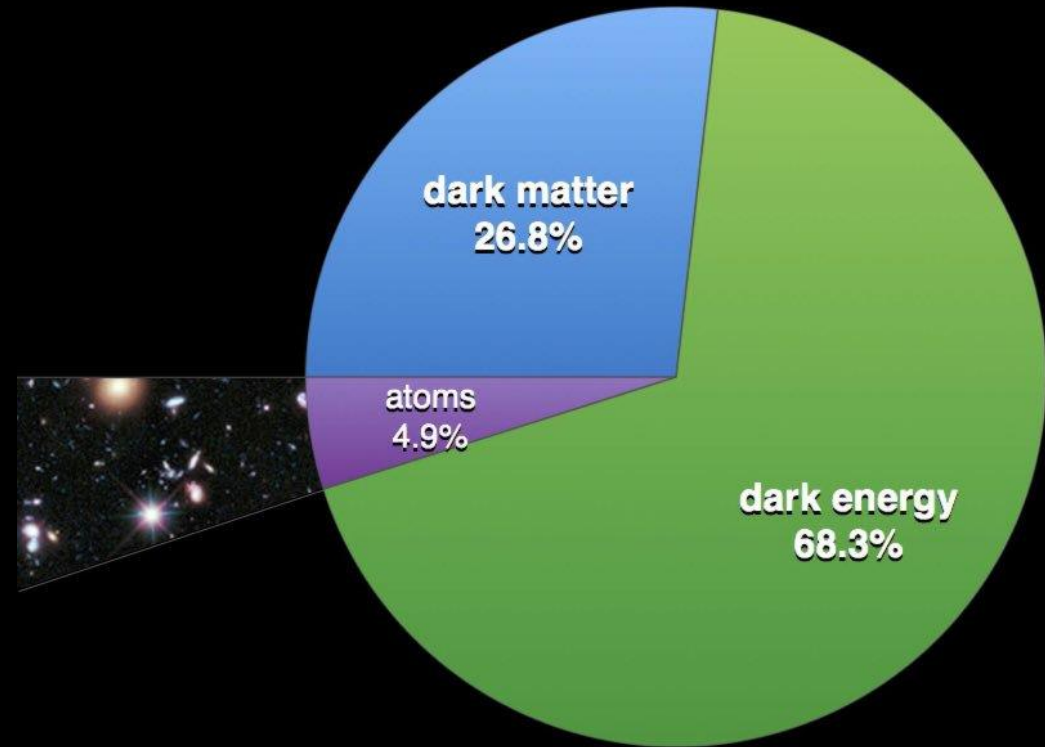




# DARK MATTER?



Alle deeltjes die we kennen



Slechts 5% van het Universum?



# Dutch Matters

BULLETIN OF THE ASTRONOMICAL INSTITUTES OF THE NETHERLANDS.		
1932 August 17	Volume VI.	No. 238.
COMMUNICATION FROM THE OBSERVATORY AT LEIDEN.		
The force exerted by the stellar system in the direction perpendicular to the galactic plane and some related problems, by <i>J. H. Oort</i> .		
<i>Notations.</i> $z$ distance from the galactic plane, $Z$ velocity component perpendicular to the galactic plane, $Z_0$ the value of $Z$ for $z = 0$ ,	<b>4.</b> From VAN RHIJN's tables in <i>Groningen Publication</i> No. 38 the density distribution $\Delta(z)$ has been computed for four intervals of visual absolute magnitude (Table 13 and Figure 1). Figures 2 and 3 show $\log \Delta(z)$ for A stars and yellow giants, as derived by	

## Kapteyn & Oort ('20-'30)

- Melkwegstructuur
- Sterrenkinematica

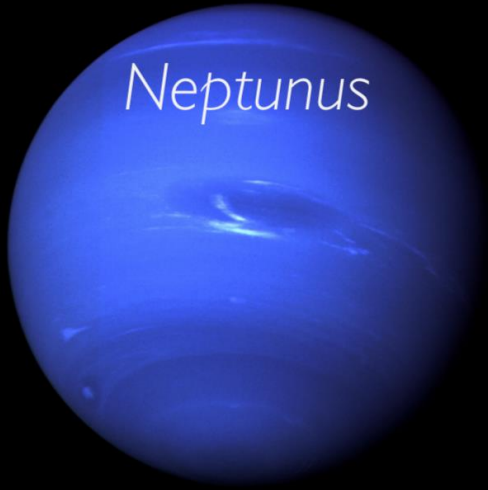
via arXiv/1605.04909

## A. Bosma

- Proefschrift (1978)
- Rotatiecurves

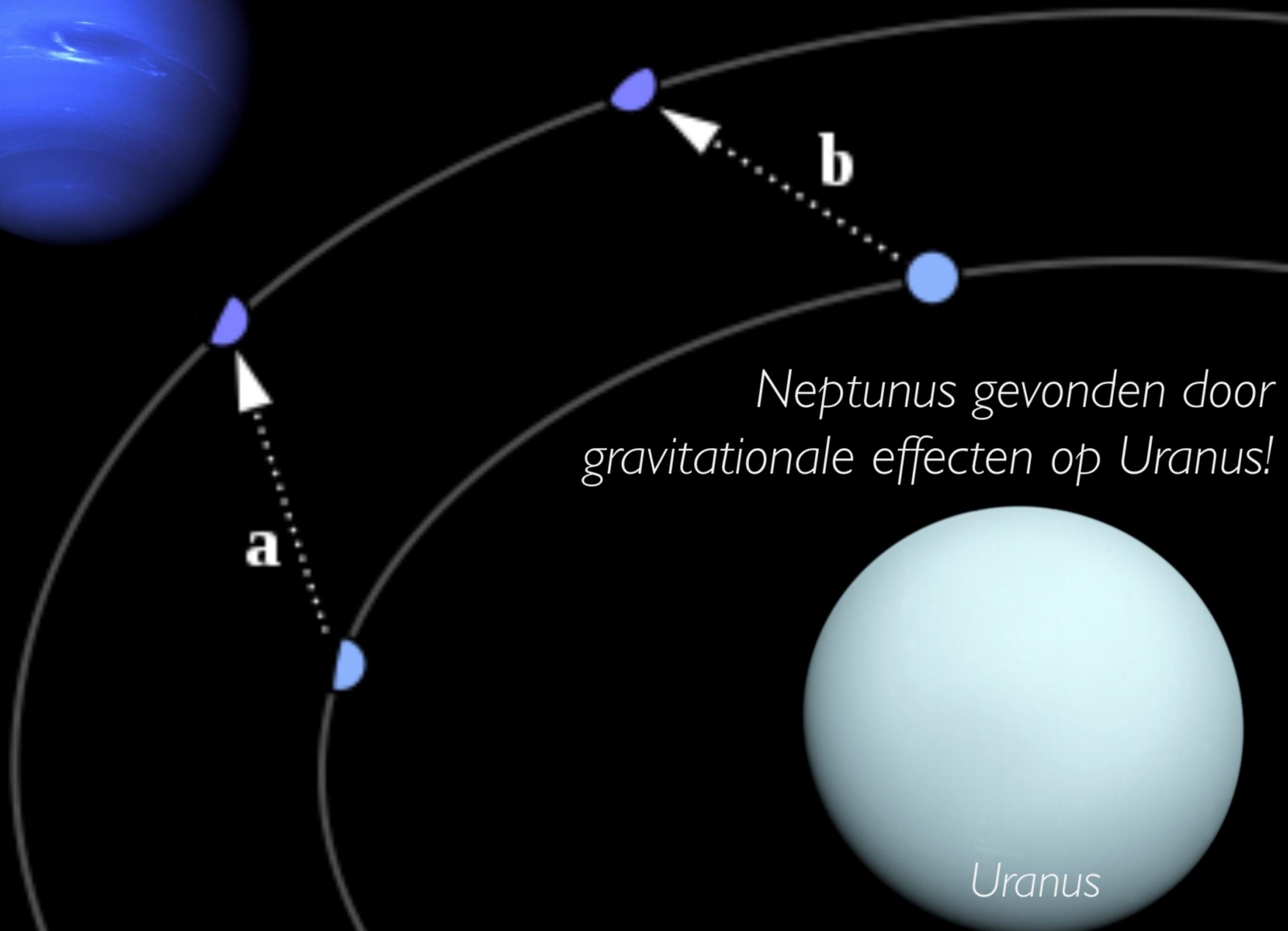
De waarnemingen plaatsten ons telkens weer voor verrassingen. Het ene stelsel na het andere bleek niet te voldoen aan het simpele beeld dat een spiraalstelsel bestaat uit een bulge en een schijf met daarin de spiraalstructuur als kleine verstoring. Een groot aantal stelsels blijkt grote schaal verstoringen van de cirkelvormige schijf te hebben. Sommige hebben vermoedelijk een ellipsachtige structuur in het vlak van de schijf die veel lijkt op een balk, ook als er geen balk op foto's te zien is; andere hebben waarschijnlijk een vervormde schijf die kan worden beschreven als een systeem van wiebelende fornuisringen. Enkele stelsels zijn zelfs zo vervormd in

andere, meer door de waarneemapparatuur bepaalde, problemen die hierop van invloed zijn. Toch zijn er nog wel enkele zinvolle uitspraken te doen, zij het dat een grote mate van voorzichtigheid moet worden betracht. Het blijkt dat we geen goede schattingen van de totale massa kunnen maken: de metingen duiden erop dat er nog veel massa aanwezig moet zijn buiten de gebieden van de stelsels waaruit signaal wordt gedetecteerd. Deze massa moet bestaan uit betrekkelijk donkere materie. Voorts vinden we enige aanwijzingen dat de hoeveelheden sterren van verschillende afmetingen veranderen als de afstand tot het centrum van het stelsel verandert: er zijn wellicht relatief meer dwergsterren aan de buitenkant van een spiraalstelsel.



Neptunus

# Donkere Materie anno 1846



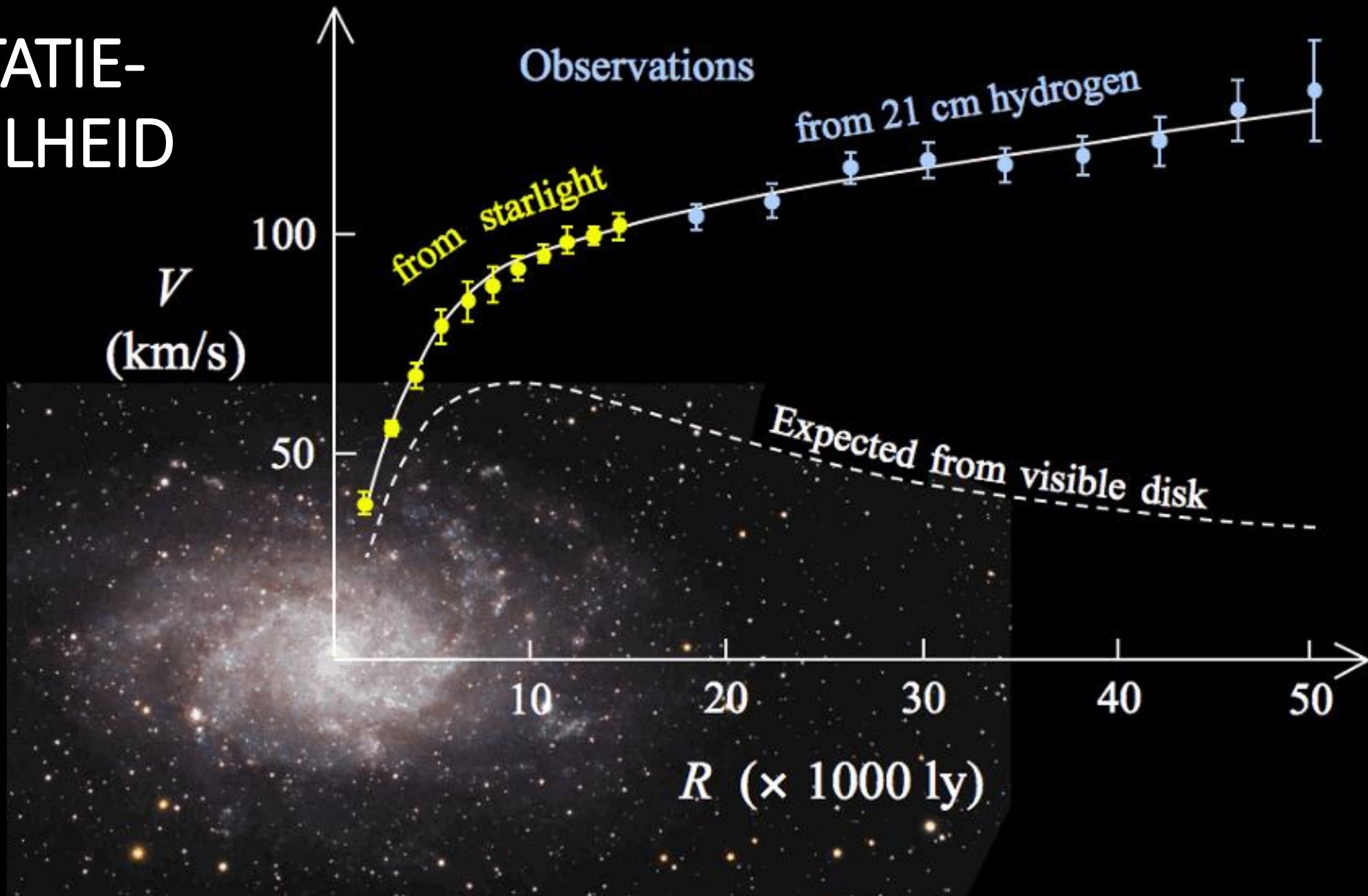
*Neptunus gevonden door  
gravitationale effecten op Uranus!*



Uranus



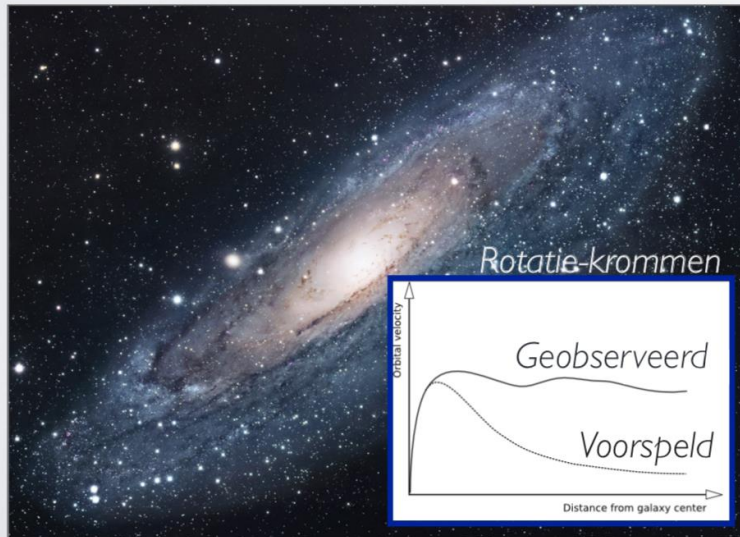
# ROTATIE- SNELHEID



# Zoeken met de LHC

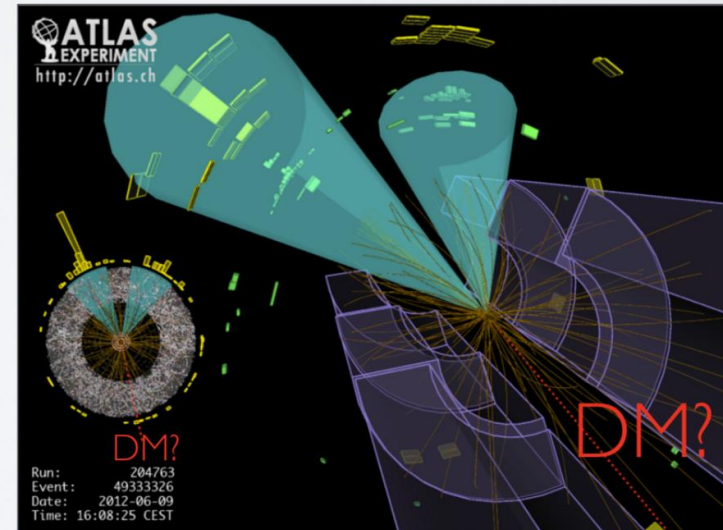
## Astronomie: waarnemen in ruimte

- Donker - niet zichtbaar
- Interactie: zwaartekracht



## LHC: Produceren in botsing

- Geen interactie met detector
- Energie disbalans



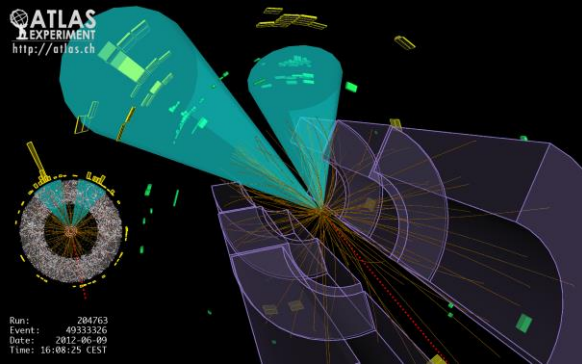


**AMSTERDAM SCIENCE PARK**

**Nikhef**

**NATIONAAL INSTITUUT VOOR SUBATOMAIRE FYSICA**

## ATLAS

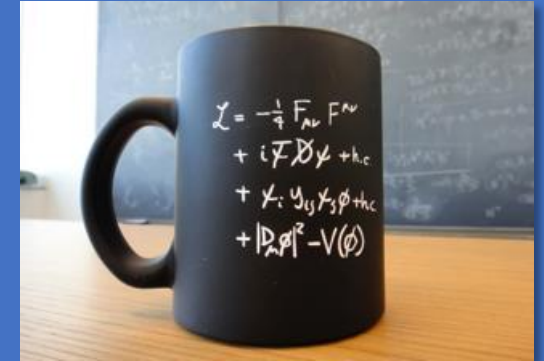


LHC: Botsingen

Nikhef

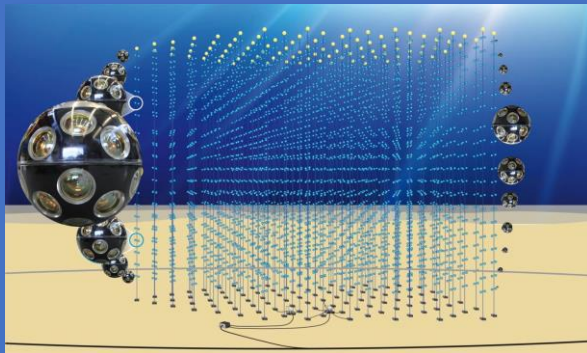
[www.nikhef.nl](http://www.nikhef.nl)

## Theorie



Nieuwe modellen

## KM3NeT



Onderzee: Neutrino's

## Xenon1T



Ondergronds: WIMPs



HOE BEN IK



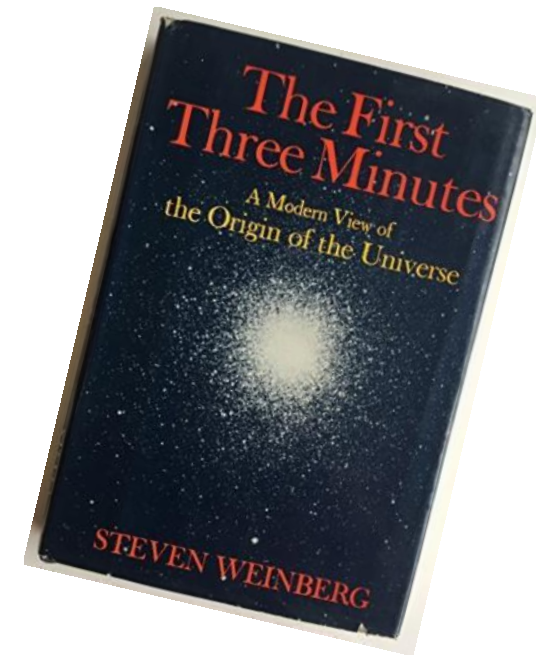
HIER TERECHTGEKOMEN ?

# TU ?





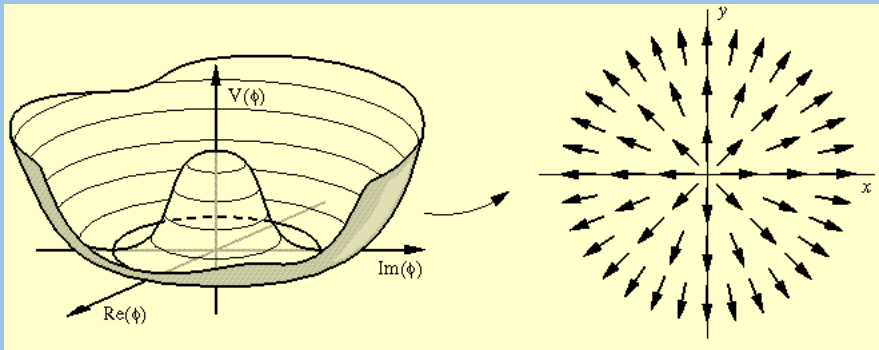
# DE BUS NAAR SALOU



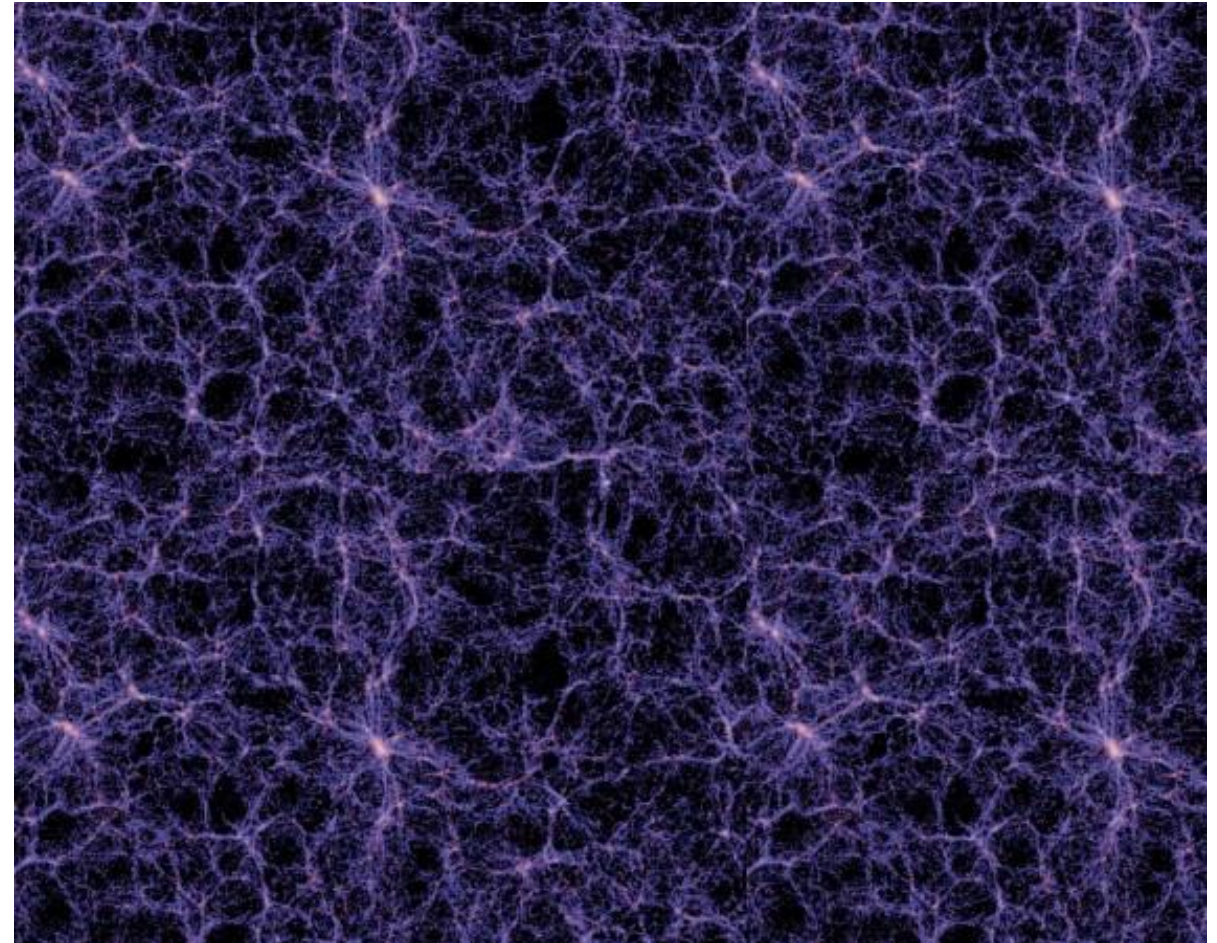
# THEORIE

- **MSc**
  - Universiteit Utrecht, 2000-2005

- **Theoretische Natuurkunde**



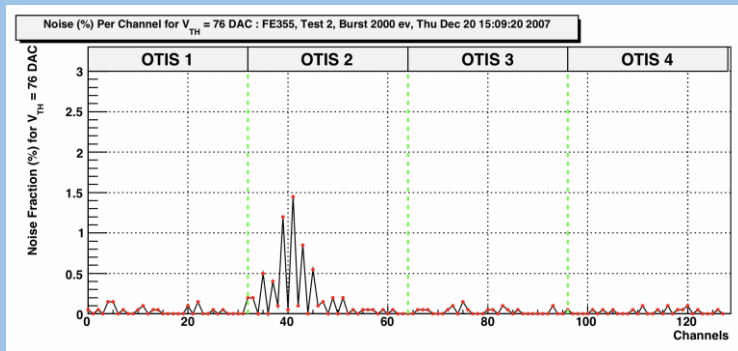
- **Supersymmetric cosmic strings**
  - Theorie, cosmologie, SUSY



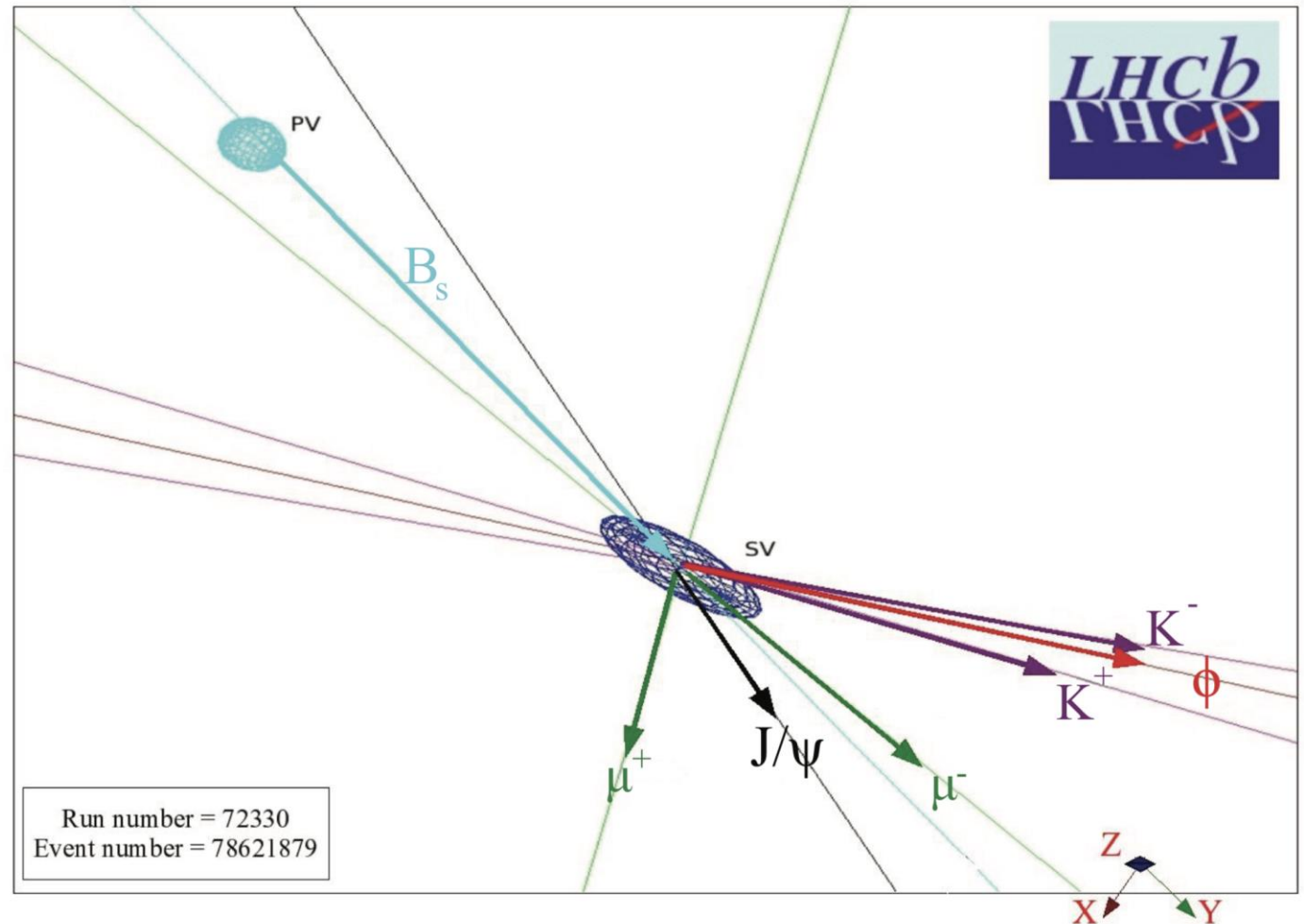


# LHCb

- PhD
  - Nikhef, 2006-2010
  - Vrije Universiteit Amsterdam
- Experimentele natuurkunde



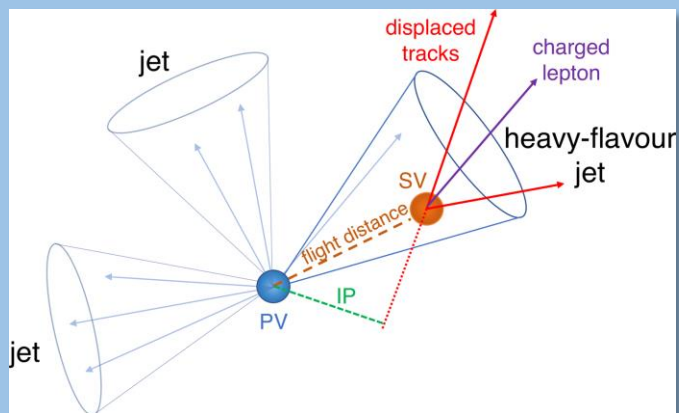
- CP schending
  - Verschil materie & anti-materie
  - Simulaties, trigger, reconstructie



# CMS

- **Postdoc, 2010-2017**

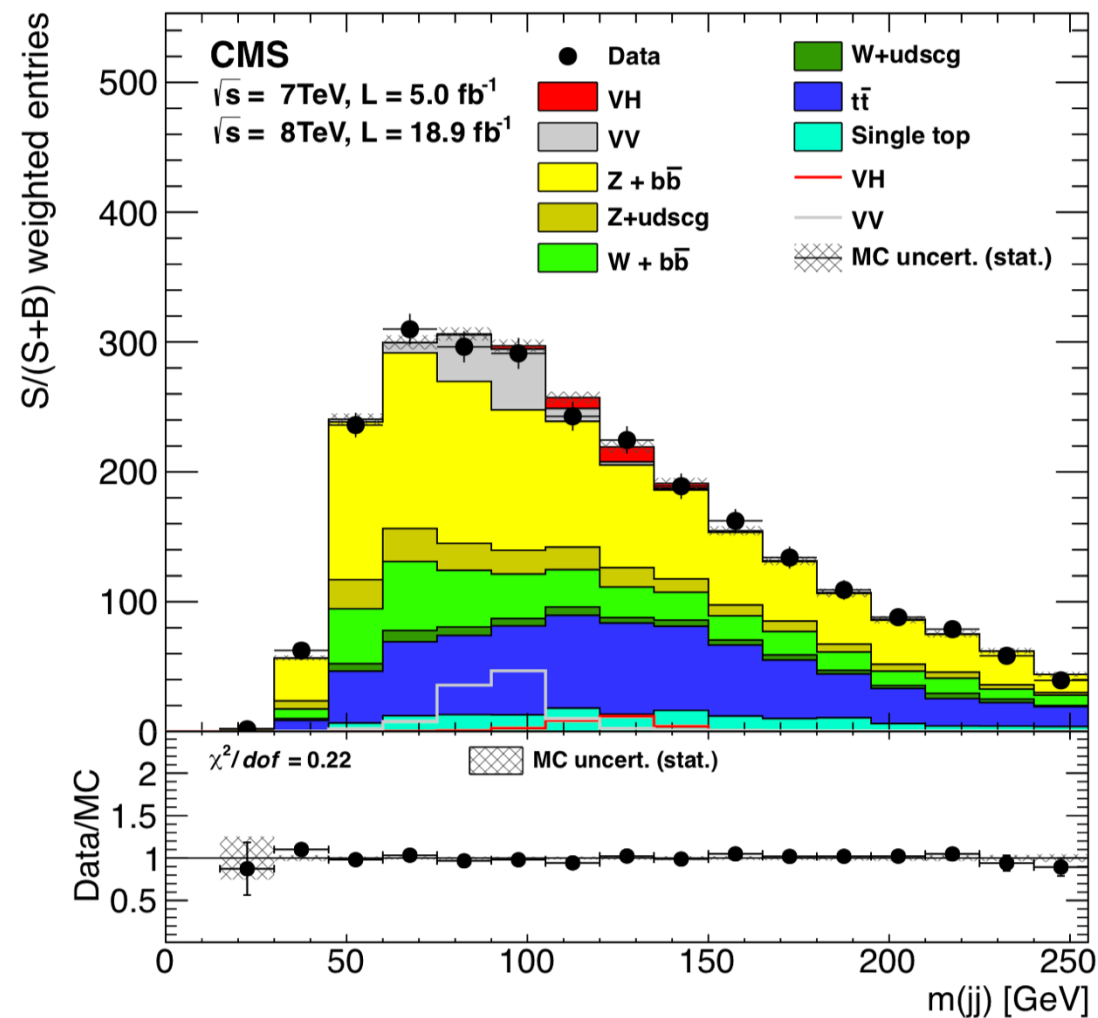
- CERN fellow
- België: UCLouvain



- **$H \rightarrow b\bar{b}$**

- B-tagging

- **Dark Matter**





# ATLAS

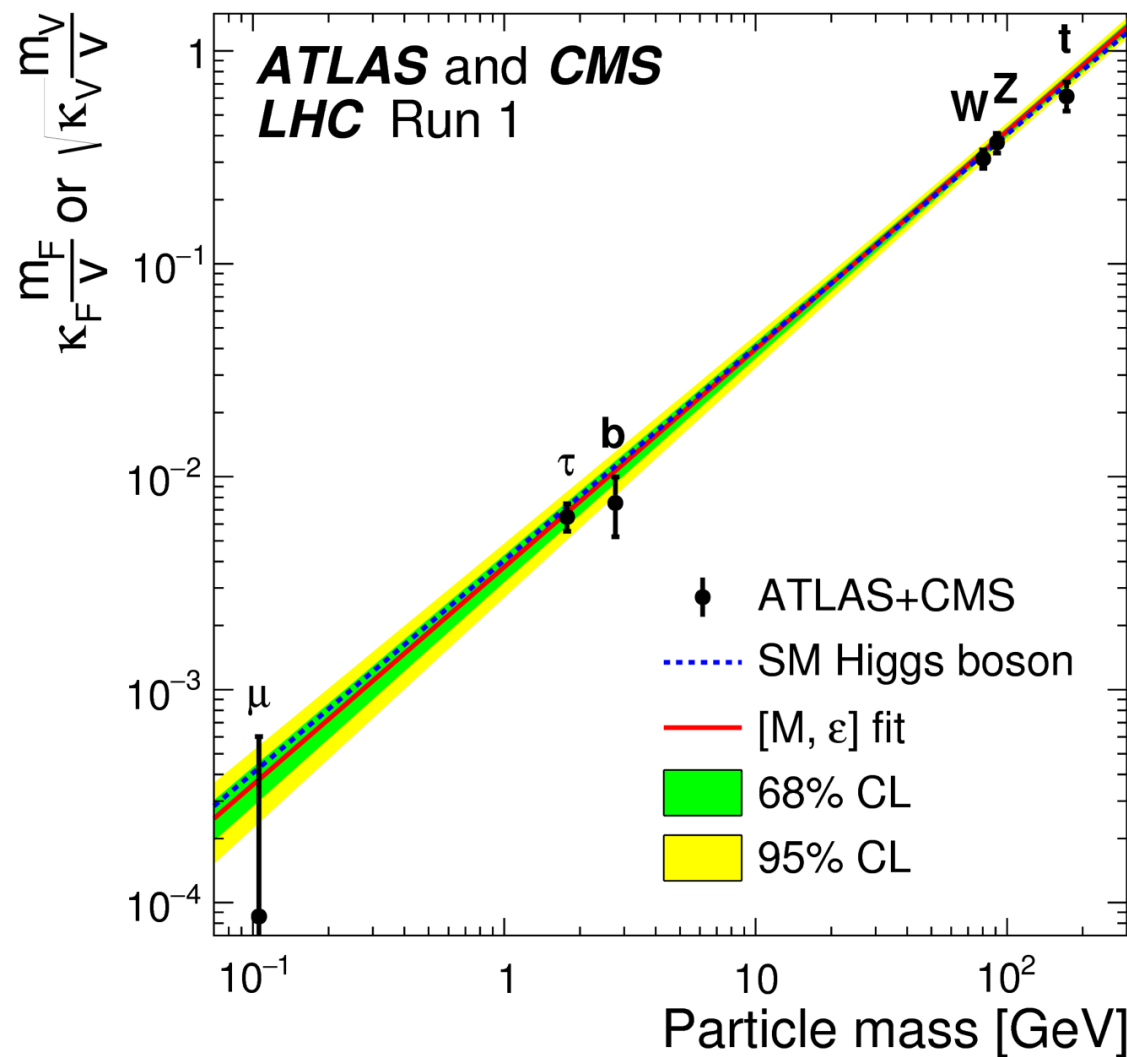


Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek

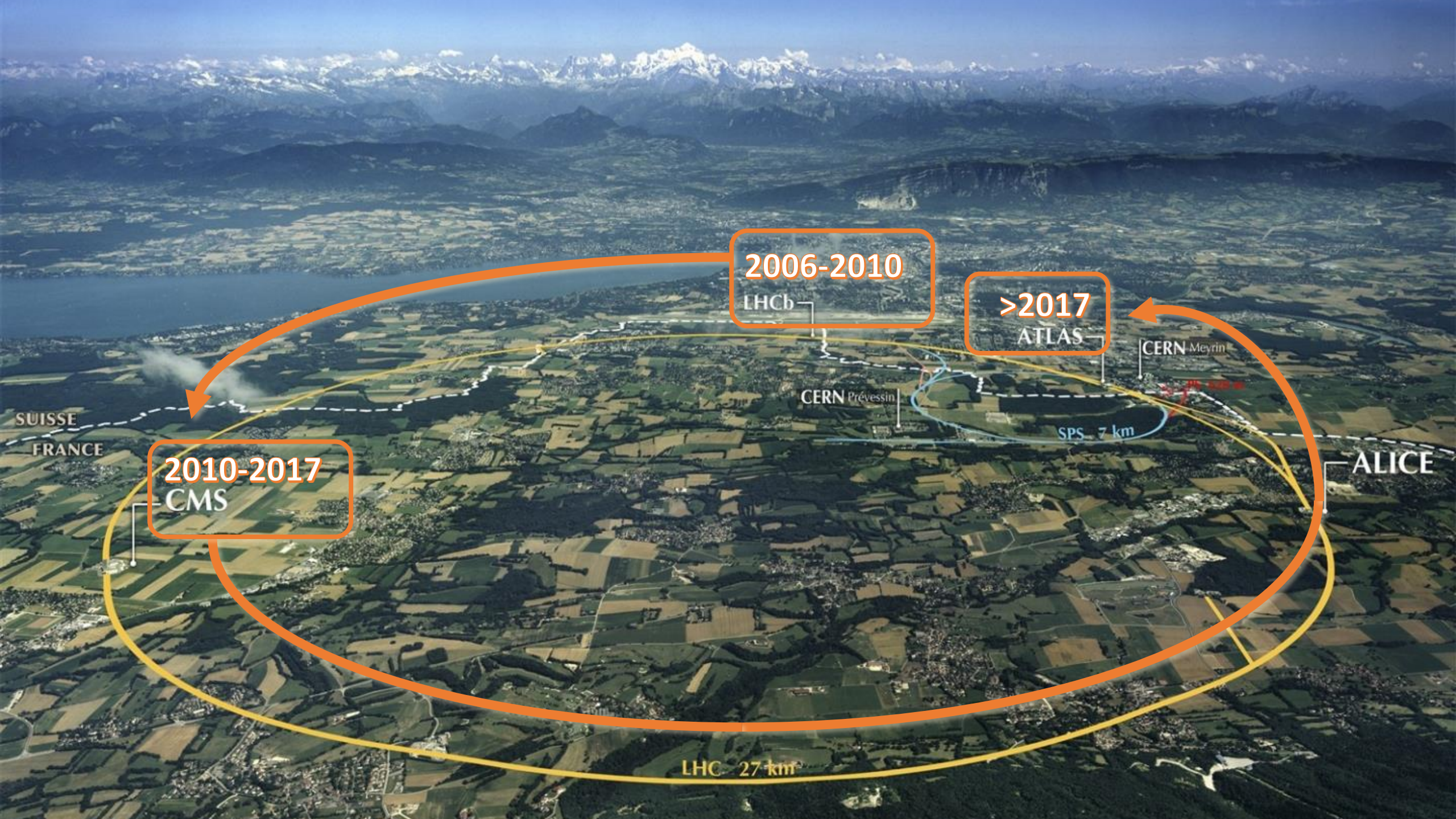
- ‘Higgs van Z tot A’
  - 2 studenten
  - Nikhef, Amsterdam

	I	II	III		
mass	≈2.4 MeV/c <sup>2</sup>	≈1.275 GeV/c <sup>2</sup>	≈172.44 GeV/c <sup>2</sup>	0	≈125.09 GeV/c <sup>2</sup>
charge	2/3	2/3	2/3	0	0
spin	1/2	1/2	1/2	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> Higgs
<b>QUARKS</b>	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>γ</b> photon	
	≈4.8 MeV/c <sup>2</sup>	≈95 MeV/c <sup>2</sup>	≈4.18 GeV/c <sup>2</sup>	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>Z</b> Z boson	
<b>LEPTONS</b>	≈0.511 MeV/c <sup>2</sup>	≈105.67 MeV/c <sup>2</sup>	≈1.7768 GeV/c <sup>2</sup>	≈91.19 GeV/c <sup>2</sup>	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	
	<2.2 eV/c <sup>2</sup>	<1.7 MeV/c <sup>2</sup>	<15.5 MeV/c <sup>2</sup>	≈80.39 GeV/c <sup>2</sup>	
	0	0	0	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
				<b>SCALAR BOSONS</b>	
				<b>GAUGE BOSONS</b>	

- Higgs precisie studies
  - Het Standaard Model begrijpen!







2006-2010

LHCb

>2017

ATLAS

CERN Meyrin

CERN Prévessin

SPS 7 km

SUISSE  
FRANCE

2010-2017

CMS

ALICE

LHC 27 km





Nikhef

Nikhef

Nikhef

LHCb

ATLAS

CERN Meyrin

CERN Prévessin

SPS 7 km

ALICE

CMS

LHC 27 km

SUISSE  
FRANCE





Nikhef

Nikhef

Nikhef



LHCb

ATLAS

CERN Meyrin

CERN Prévessin

SPS 7 km

ALICE

CMS

LHC 27 km

SUISSE  
FRANCE

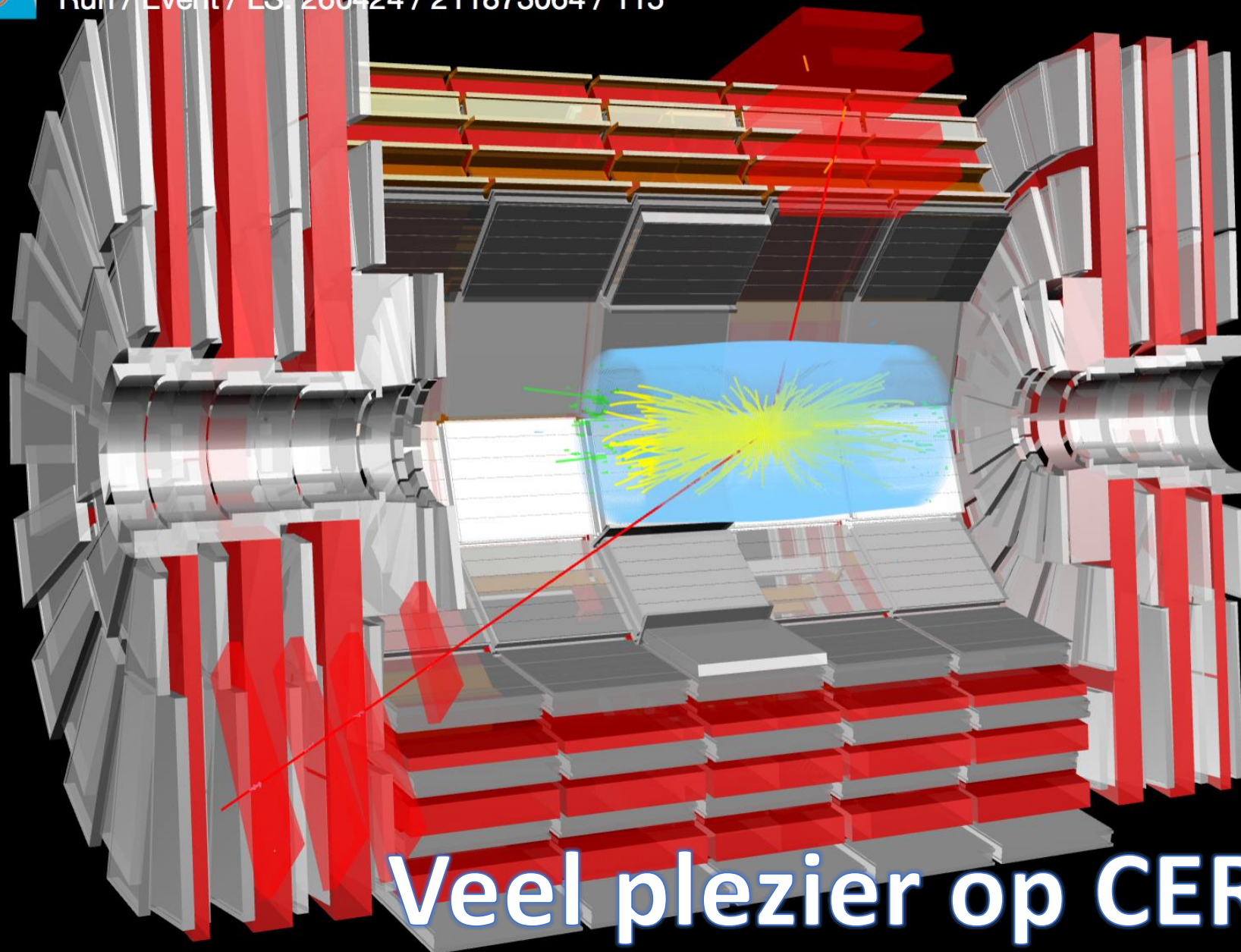




CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2015-Oct-30 19:23:54.631552 GMT

Run / Event / LS: 260424 / 211873064 / 115



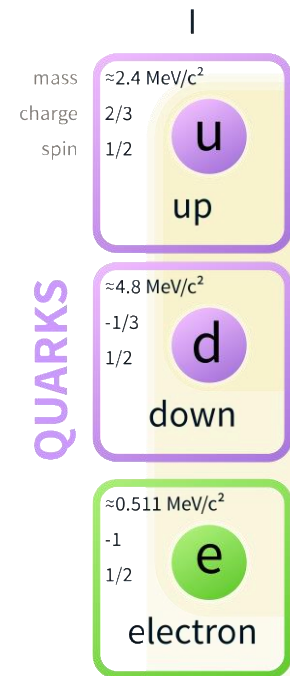
**Veel plezier op CERN!**

# HET PERIODIEK SYSTEEM

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
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
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
55 Cs	56 Ba	57 La	* 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
87 Fr	88 Ra	89 Ac	* 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
			* 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	71 Lu	
			* 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	103 Lr	



# ALLE MATERIE OP AARDE



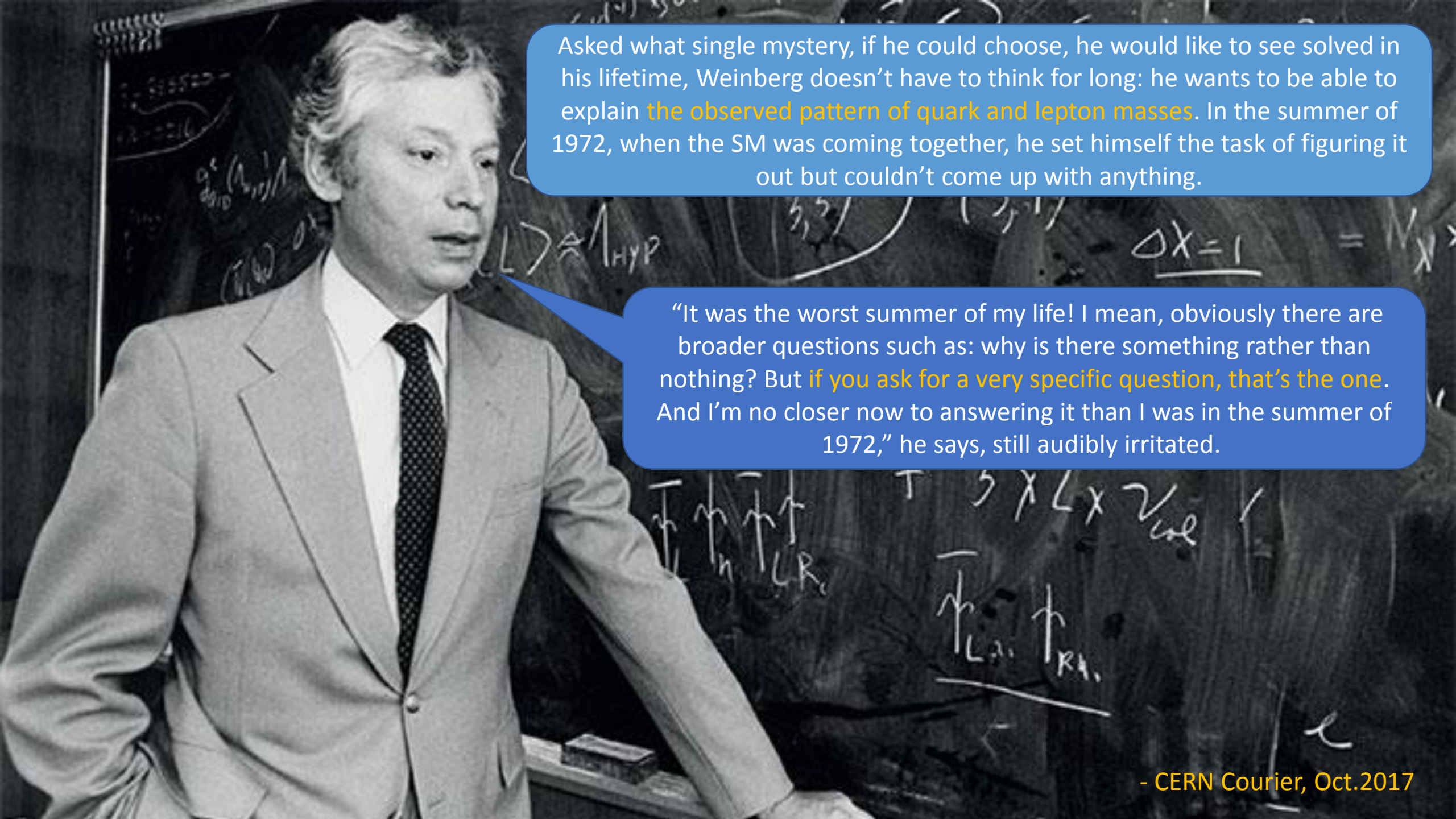
# HET STANDAARD MODEL

	I	II	III		
mass	$\approx 2.4 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 172.44 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$
charge	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> Higgs
<b>QUARKS</b>	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b><math>\gamma</math></b> photon	
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.67 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>Z</b> Z boson	<b>GAUGE BOSONS</b>
<b>LEPTONS</b>	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 1.7 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	$\pm 1$	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	



# WAAROM 3 ?

	I	II	III		
mass	$\approx 2.4 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 172.44 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$
charge	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> Higgs
<b>QUARKS</b>	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b><math>\gamma</math></b> photon	
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.67 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>Z</b> Z boson	
<b>LEPTONS</b>	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 1.7 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	$\pm 1$	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	
				<b>GAUGE BOSONS</b>	



Asked what single mystery, if he could choose, he would like to see solved in his lifetime, Weinberg doesn't have to think for long: he wants to be able to explain **the observed pattern of quark and lepton masses**. In the summer of 1972, when the SM was coming together, he set himself the task of figuring it out but couldn't come up with anything.

"It was the worst summer of my life! I mean, obviously there are broader questions such as: why is there something rather than nothing? But **if you ask for a very specific question, that's the one**. And I'm no closer now to answering it than I was in the summer of 1972," he says, still audibly irritated.



# 2016: DIPHOTON

20 DE VOORSKRANT  
MAANDAG 7 MAART 2016

## Wetenschap

# Opwinding over een lichtbobbeltje

Is het een glimp van een onbekende wereld? Of een statistische uitschieter? Fysici op het deeltjeslab CERN houden de adem in voor de 'bump'.

Door **Martijn van Calmthout**

**H**et is een gekken huis, deze dagen op deeltjeslab CERN in Genève, in de aanloop naar de voorjaarsvergadering Rencontres de Moriond, die het volgende weekend begint. Experimentatoren van de grote Atlas-detector en CMS-detector vliegen af en aan voor overleg, discussies en analyses. Theoretici gaan door de stapels verklaringen voor wat alle opwinding veroorzaakt: een onoorloglijk bobbeltje op de datagraaf. De vraag is of het echt is. En waar het betekent.

Sinds afgelopen december is die zogeheten 'bump' onderwerp van speculaties. Tussen de brokstukken van protonen, die in de opgevoerde LHC-versneller met ongekende energie op elkaar botsen, duiken opvallend veel paren lichtdeeltjes (fotonen) op die samen een energie van 750 gigaelektronvolt hebben. Die energie, bijna 800 protonmassa's groot, lijkt te komen van een onbekende, zeer zwaar deeltje dat tot nog toe buiten het bereik van alle versnellers lag. Bijzonder is dat daarbij alleen paren fotonen lijken te ontstaan. Dat, weten theoretici, past op geen enkele manier in de standaardnatuurkunde.

'Het Higgs-deeltje dat we in 2014 vonden, was een sluitsteen voor de bestaande theorie, en in zekere zin dus ook verwachte', zegt de van oorsprong Nederlandse CMS-fysicus Freya Blekman van de Vrije Universiteit Brussel. 'Maar als dit signaal stand houdt, is het iets wat niemand heeft zien aankomen. Dat verklaart de op-

Bezoekers bij de CMS-detector op CERN, die voor reparaties even bovengronds is gehaald. Foto CERN

**Een superzwaar deeltje dat uit elkaar valt in alleen licht, dat snapt niemand**

rectoren een vergelijkbaar signaal zagen, terwijl ze aan dezelfde versneller staan, maar verder helemaal onafhankelijk meten. 'Een beetje opwinding is geoorloofd', zei de nieuwe baas van CERN, Fabiola Gianotti in januari al. 'X(750)' kan werk betekenen voor een hele generatie fysici.'

En die slag om de arm is nog steeds nodig, zegt een andere Nederlander, op CERN, experimentator Tristan du Pree. 'Er zijn eerder bobbeltjes op de data verschenen die dan toch met doormeten weer verdwenen. Er zijn zoveel data dat er af en toe een excess zal opduiken. Heel streng zijn en meer data, daar draait het om.'

Sinds december, zegt Blekman, zijn er geen nieuwe meer gegevens; de LHC-versneller ligt tot april stil voor de jaarlijkse winterstop. 'Wat we nu doen is alle bestaande data opnieuw

analyseren.' CMS heeft wel een lowart van de data toegevoegd die eerder waren weggegooid omdat de grote mag niet in de detector door een koelprobleem niet aankwam. Dat moet meer statistische power geven. 'Dat kan ons piekje wat hoger maken', zegt Blekman ontzucht.

Van een echte ontdekking is echter hoe dan ook geen sprake. Fysici eisen voor een echte discovery minimaal 5 sigma betrouwbaarheid. Atlas en CMS meldde in december een effect van minimaal 2 sigma effect. Nu, is het gerucht op CERN, hebben beide detectoren zeker 3 sigma. 'Dat noem je in het jargon een hint', zegt Blekman. Een 5 sigma resultaat is te vergelijken met ongeveer 22 keer achter elkaar kop gooien met een munt; dan is er vrijwel zeker iets aan de hand met de munt. Zover is het nog niet met

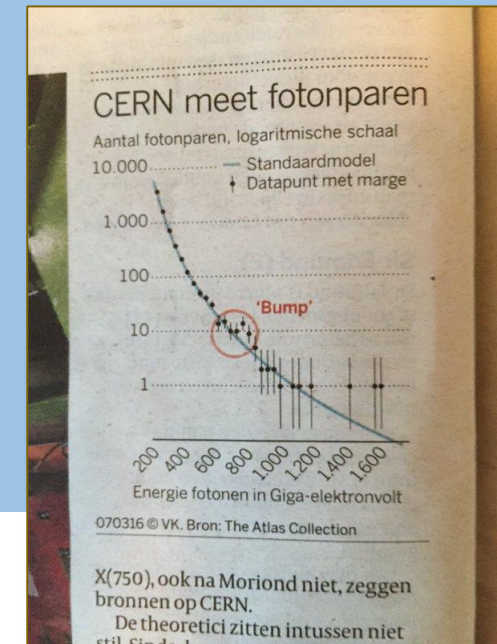
**CERN meet fotonparen**  
Aantal fotonparen, logaritmische schaal  
10.000  
1.000  
10  
1  
Energie fotonen in Giga-elektronvolt  
0 200 400 600 800 1.000 1.200 1.400 1.600  
070316 © VK. Bron: The Atlas Collection

X(750), ook na Moriond niet, zeggen bronnen op CERN.  
De theoretici zitten intussen niet stil. Sinds de eerste geruchten is er een lawne artikelen op de publicatiete Atlas verschenen. De teller staat daar nu op meer dan 250 papers. Ruwweg tien tot dertig mogelijke verklaringen. Er zou, denken sommige theoretici, sprake zijn van meer dimensies dan ruimte en tijd die we gewend zijn. Een extra natuurkracht, waarbij de vier bekende, zou ook een optie kunnen zijn. En ook is er de mogelijkheid dat het nieuwe domein donkere materie is, het spul dat wel zwaartekracht in het universum geeft maar geen licht geeft.

Op de Moriond-conferentie, dit jaar in skigebied Aosta, Italië, staat bobbel X(750) op de agenda voor volgende week woensdagmiddag. Of er een officiële publicatie komt, staat nog niet vast, zegt Blekman. 'Het kan bijvoorbeeld zijn dat Atlas hun data toch willen combineren tot een sterker resultaat en een echte paper.' Maar ook als het bij een voorlopige CERN-notitie blijft, kijkt de wereld toe, realiseert ze zich. 'Ierchi. De LHC is gebouwd voor twee dingen: de Higgs en nieuwe fysica. De Higgs hadden we al, meer vocht als een cadeau.'

## Opwinding

Opvallend is wel dat in december bij de eerste aanwijzingen beide detectoren een vergelijkbaar signaal zagen, terwijl ze aan dezelfde versneller staan, maar verder helemaal onafhankelijk meten. 'Een beetje opwinding is geoorloofd', zei de nieuwe baas van CERN, Fabiola



# DE VOLGENDE VERSNELLER ?





H z  
a

