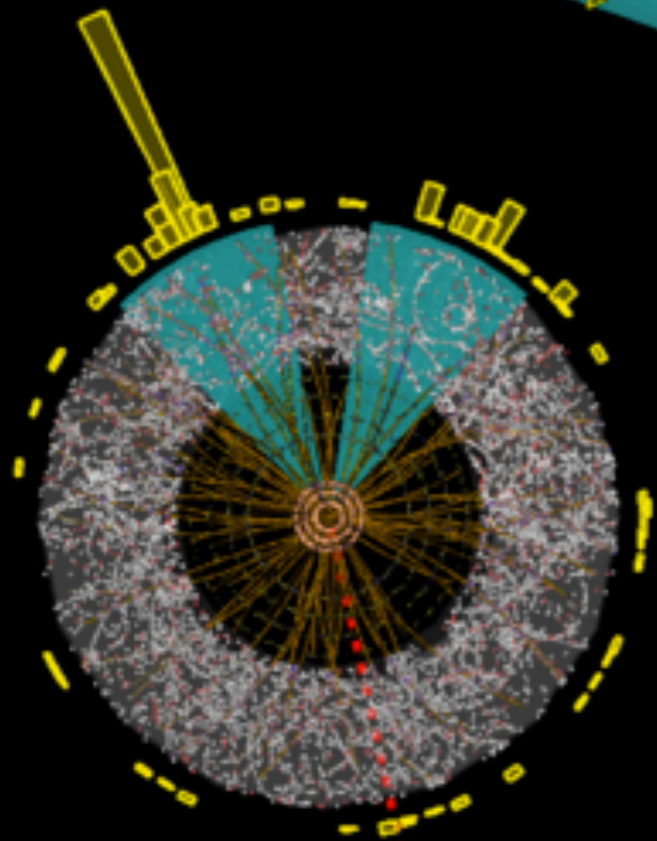


# De LHC-experimenten, het Higgs-boson & donkere materie

Tristan du Pree (Nikhef)



DM?

NNV Middelbare Scholieren  
29 september 2017, CERN

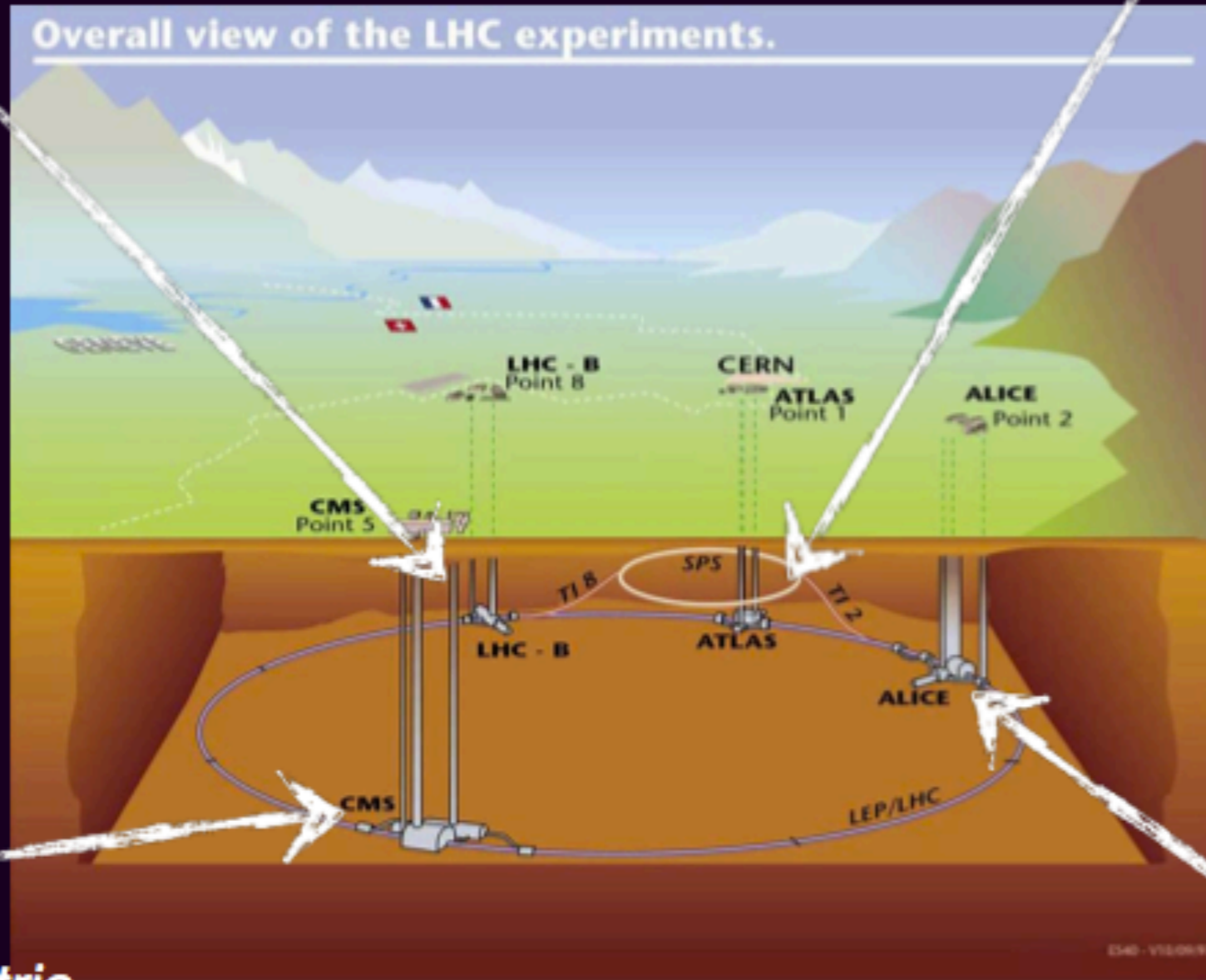
#DarkMatter

# LHCb

- materie/anti-materie
- indirect: nieuwe deeltjes

# ATLAS

- Higgs!
- Supersymmetrie
- materie/anti-materie
- exotische deeltjes
- ionen fysica
- donkere materie
- .....



# CMS

- Higgs!
- Supersymmetrie
- materie/anti-materie
- exotische deeltjes
- ionen fysica
- donkere materie
- .....

# Alice

- ionen fysica

➔ De fundamentele bouwstenen!

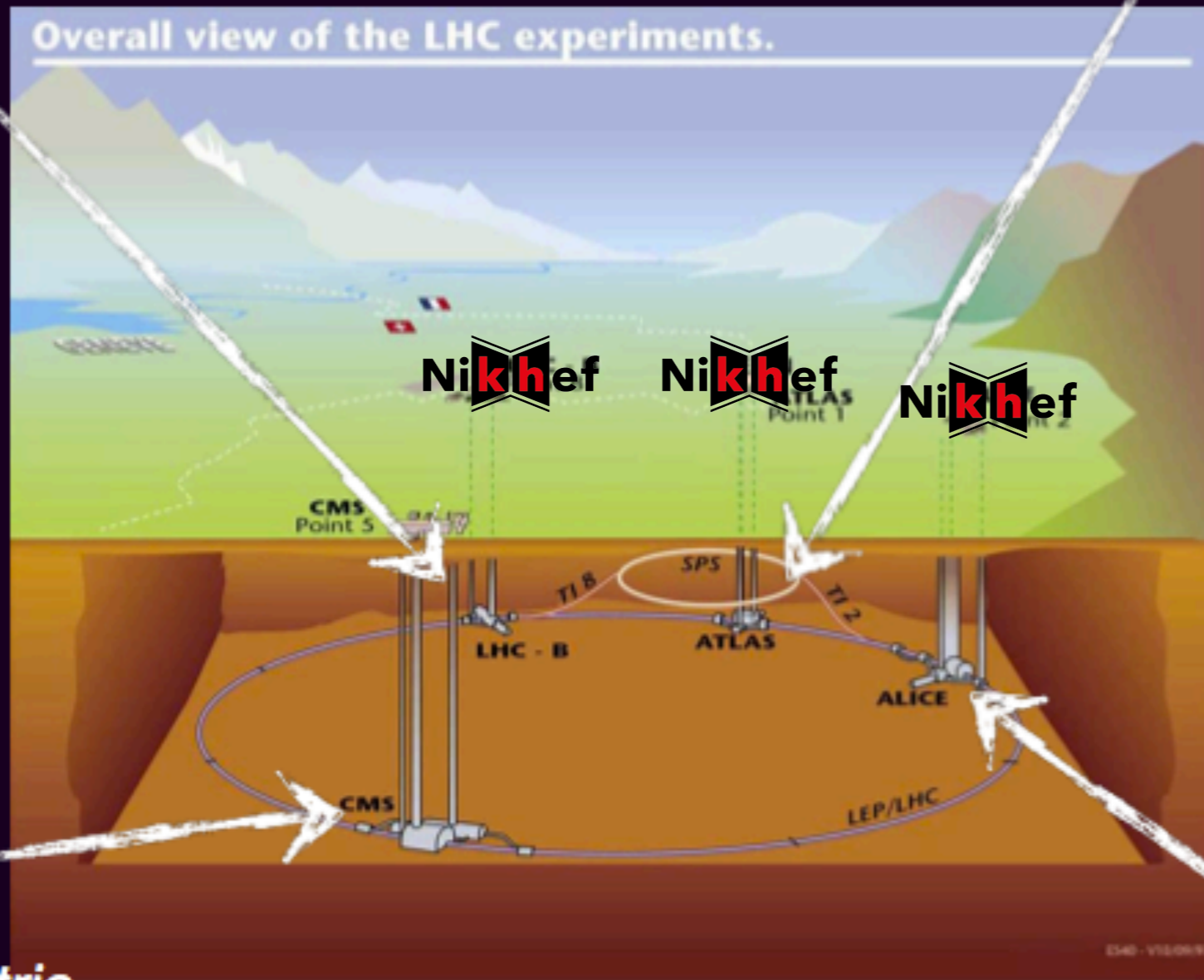


# LHCb

- materie/anti-materie
- indirect: nieuwe deeltjes

# ATLAS

- Higgs!
- Supersymmetrie
- materie/anti-materie
- exotische deeltjes
- ionen fysica
- donkere materie
- .....



# CMS

- Higgs!
- Supersymmetrie
- materie/anti-materie
- exotische deeltjes
- ionen fysica
- donkere materie
- .....

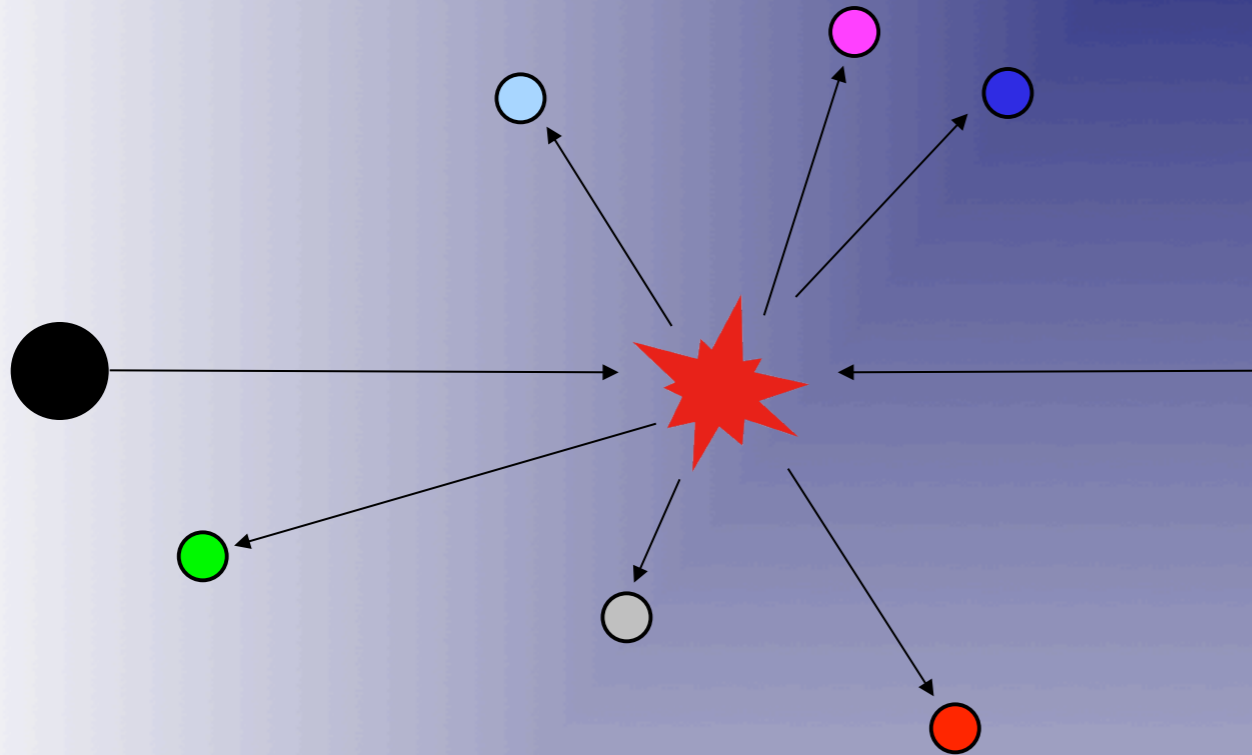
# Alice

- ionen fysica

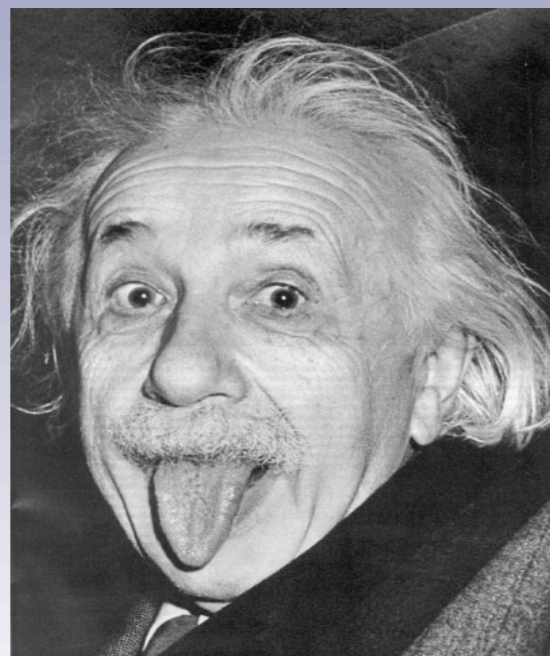
➔ De fundamentele bouwstenen!



# Hoe maak je nieuwe deeltjes?



$$E=mc^2$$



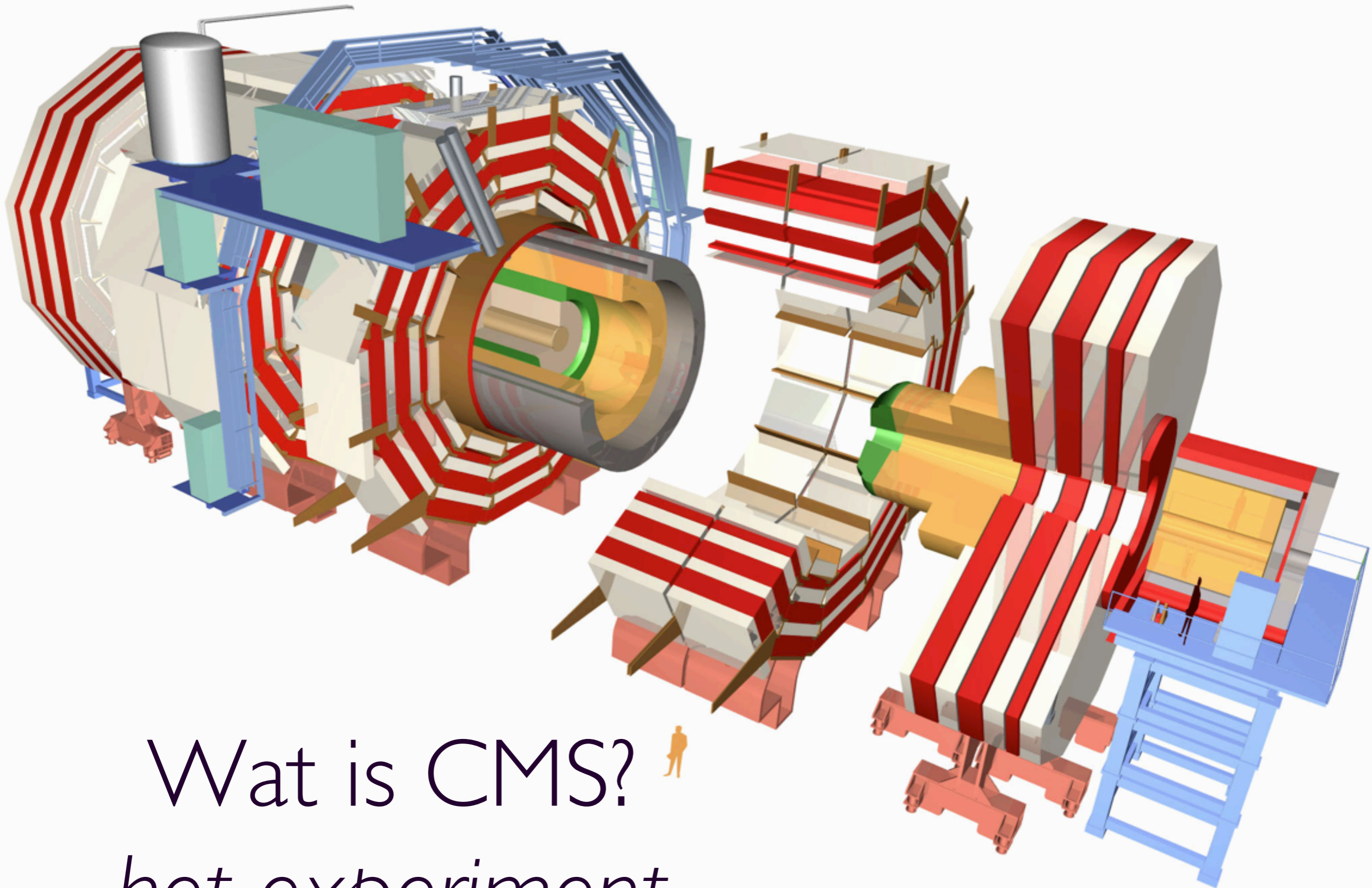
2010 - 2012:  $E=8$  TeV

1 TeV = 1000 GeV

1 GeV = 1 proton-massa

Sinds 2015:  $E=13$  TeV!





Wat is CMS?   
*het 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 ( $100 \times 150 \mu\text{m}$ )  $\sim 16\text{m}^2 \sim 66\text{M}$  channels  
Microstrips ( $80 \times 180 \mu\text{m}$ )  $\sim 200\text{m}^2 \sim 9.6\text{M}$  channels

SUPERCONDUCTING SOLENOID

Niobium titanium coil carrying  $\sim 18,000\text{A}$

MUON CHAMBERS

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

PRESHOWER

Silicon strips  $\sim 16\text{m}^2 \sim 137,000$  channels

FORWARD CALORIMETER

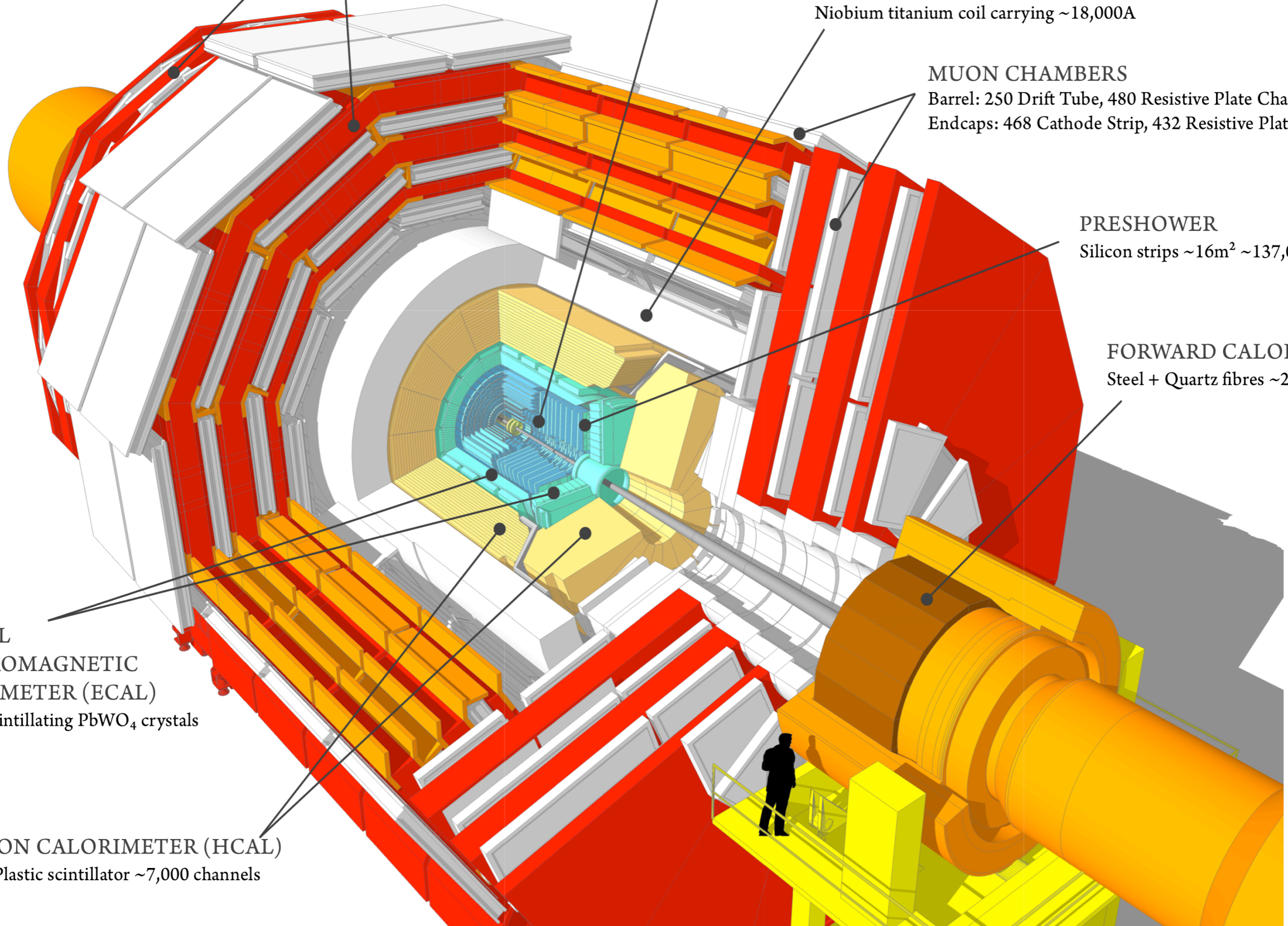
Steel + Quartz fibres  $\sim 2,000$  Channels

CRYSTAL  
ELECTROMAGNETIC  
CALORIMETER (ECAL)

$\sim 76,000$  scintillating  $\text{PbWO}_4$  crystals

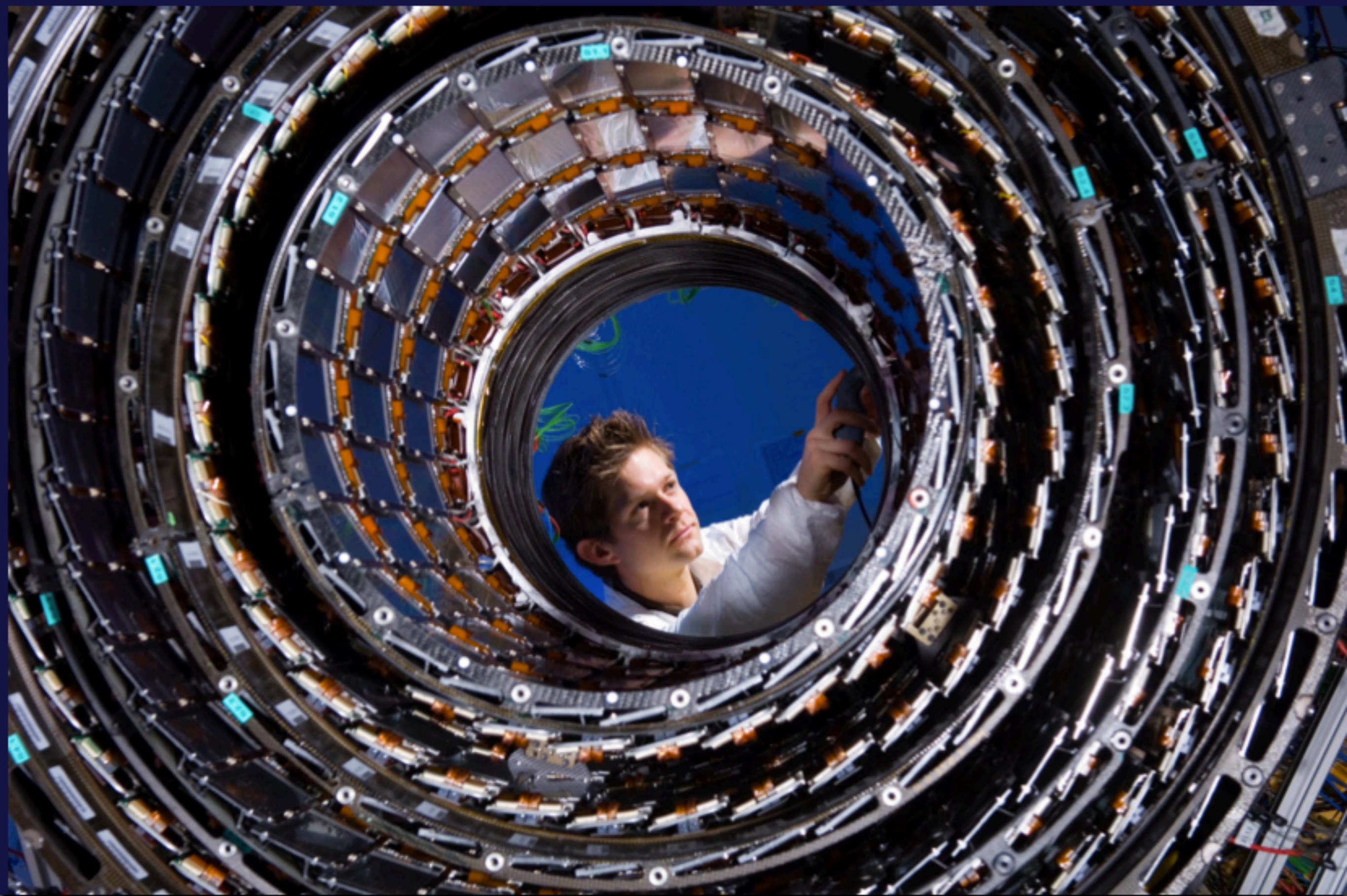
HADRON CALORIMETER (HCAL)

Brass + Plastic scintillator  $\sim 7,000$  channels



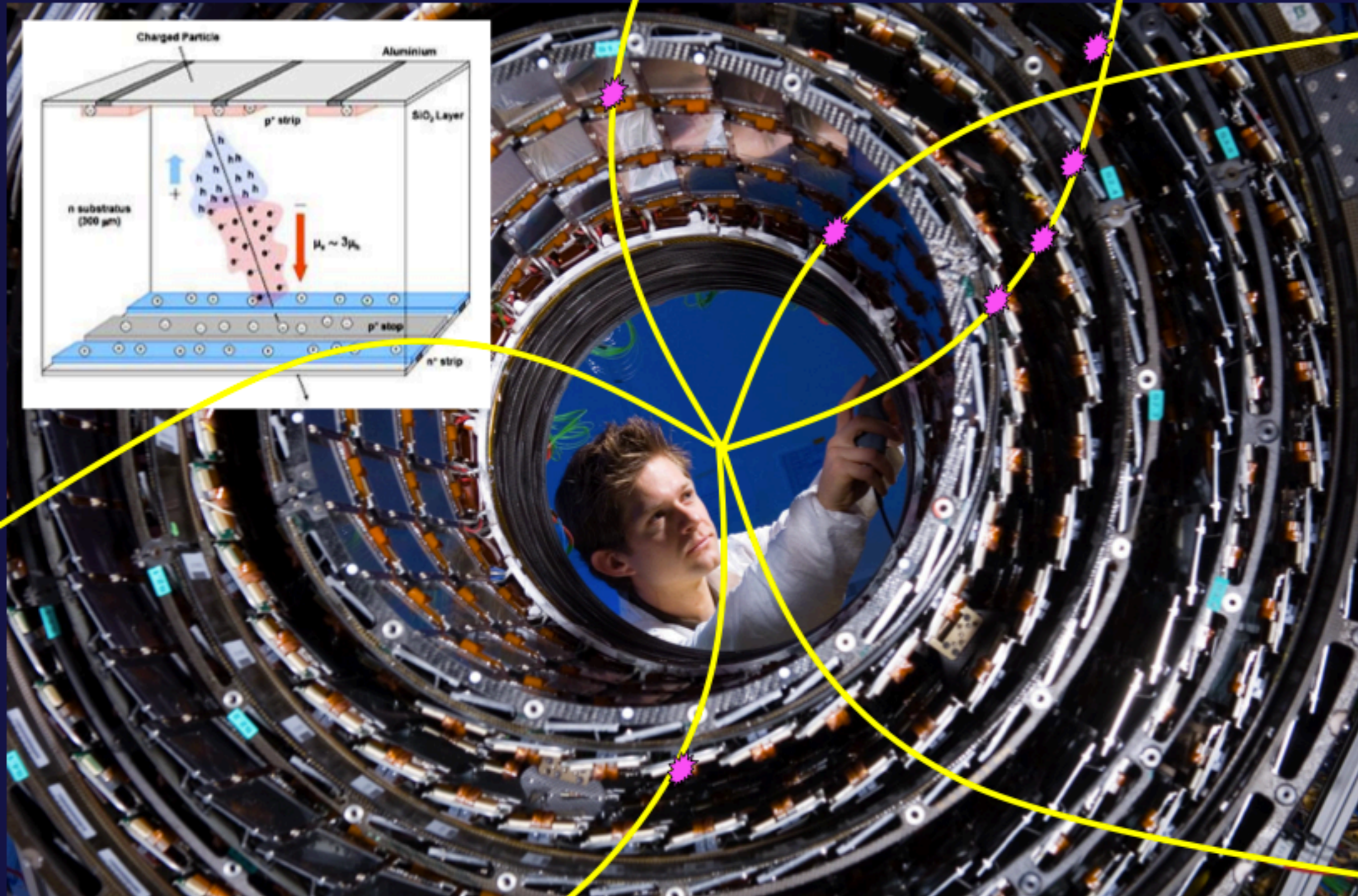
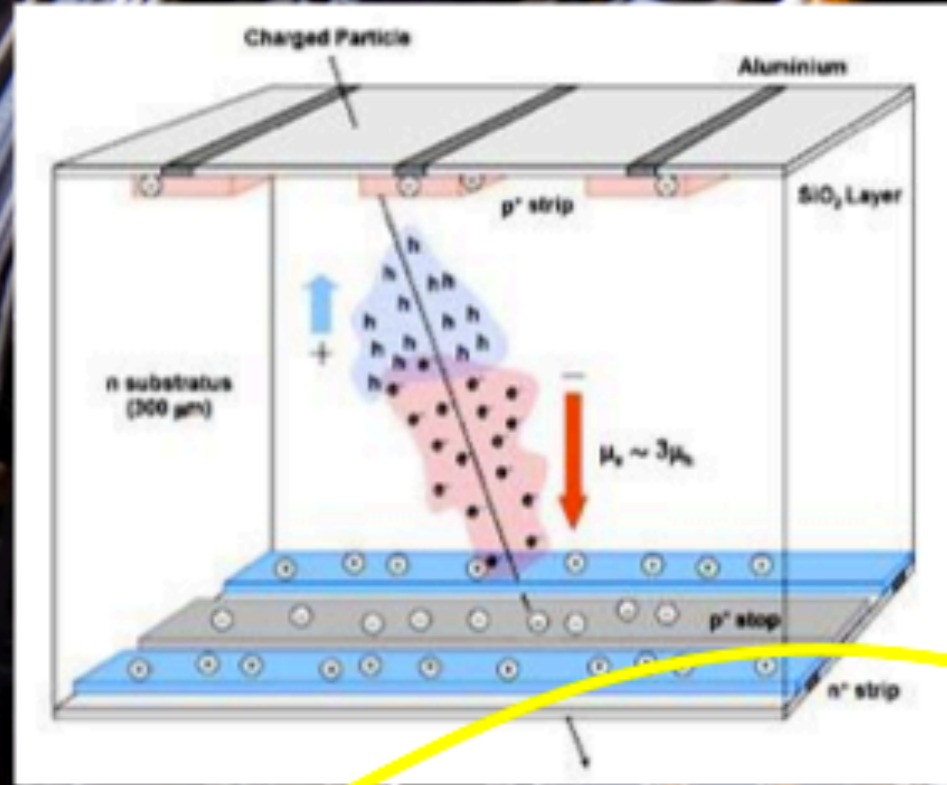


# Silicium detectoren: traject meting





# Silicium detectoren: traject meting





# De Lorentzkracht

- 1) LHC  
Versnellen+afbuigen
- 2) Detectoren  
Spoorreconstructie



# De Lorentzkracht

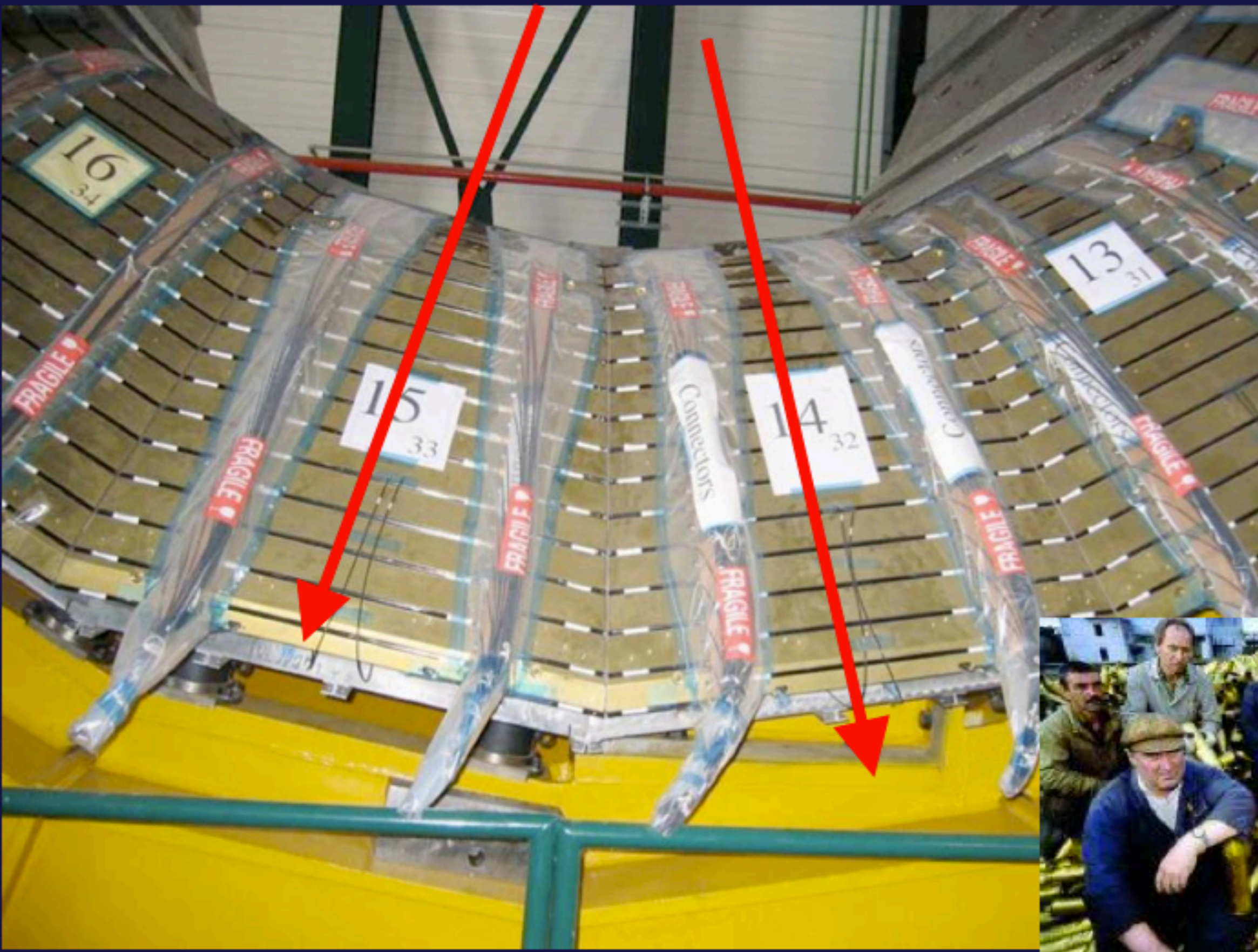
- 1) LHC  
Versnellen + afbuigen
- 2) Detectoren  
Spoorreconstructie



- Lorentzkracht nu ook uitgelegd op straat in Leiden!
- S. v/d Molen (ULeiden) & I. van Vulpen (UvA) & Stichting Tegenbeeld



# Calorimeters: energie meting

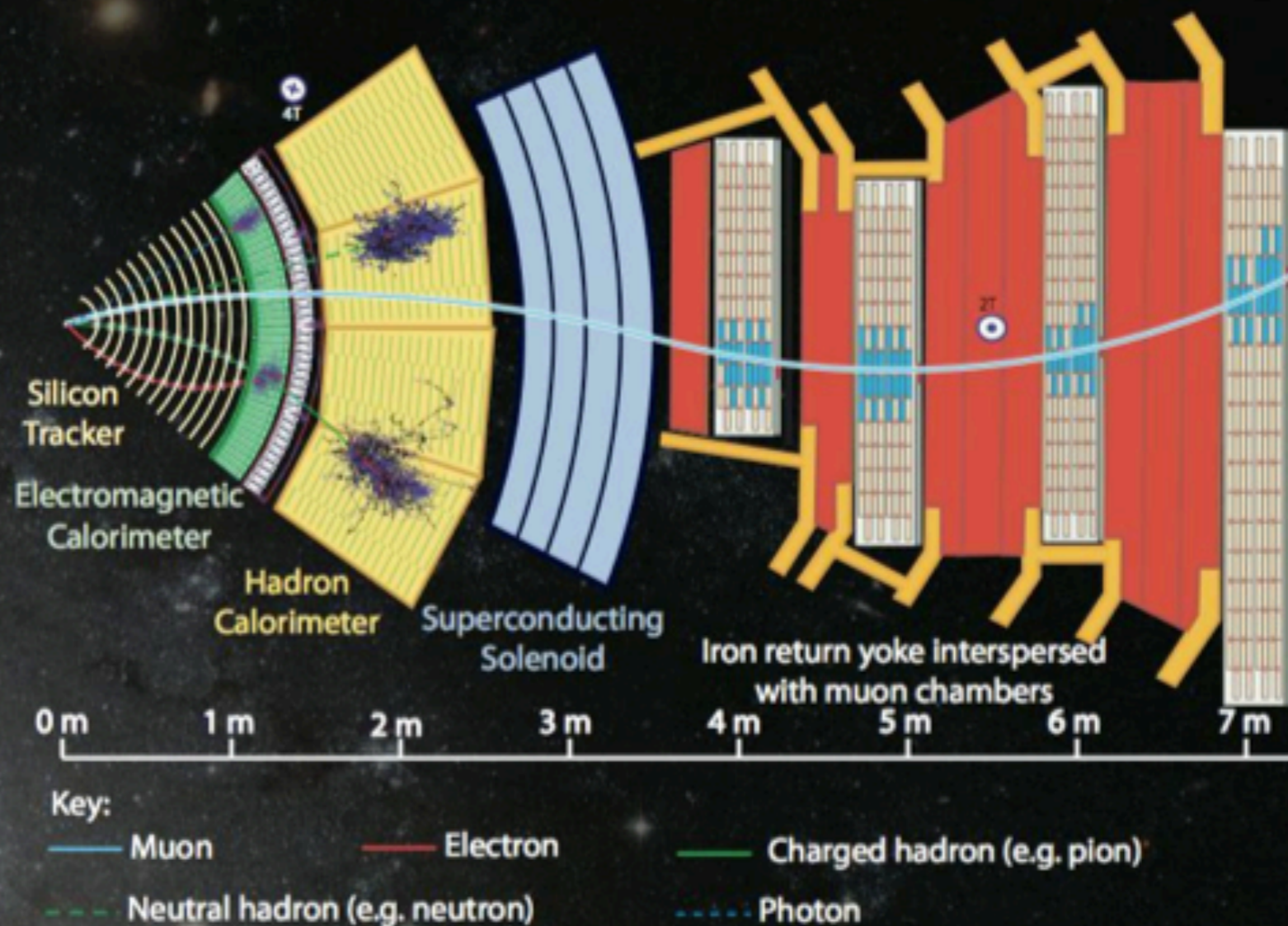




# Hoe zie je deeltjes?

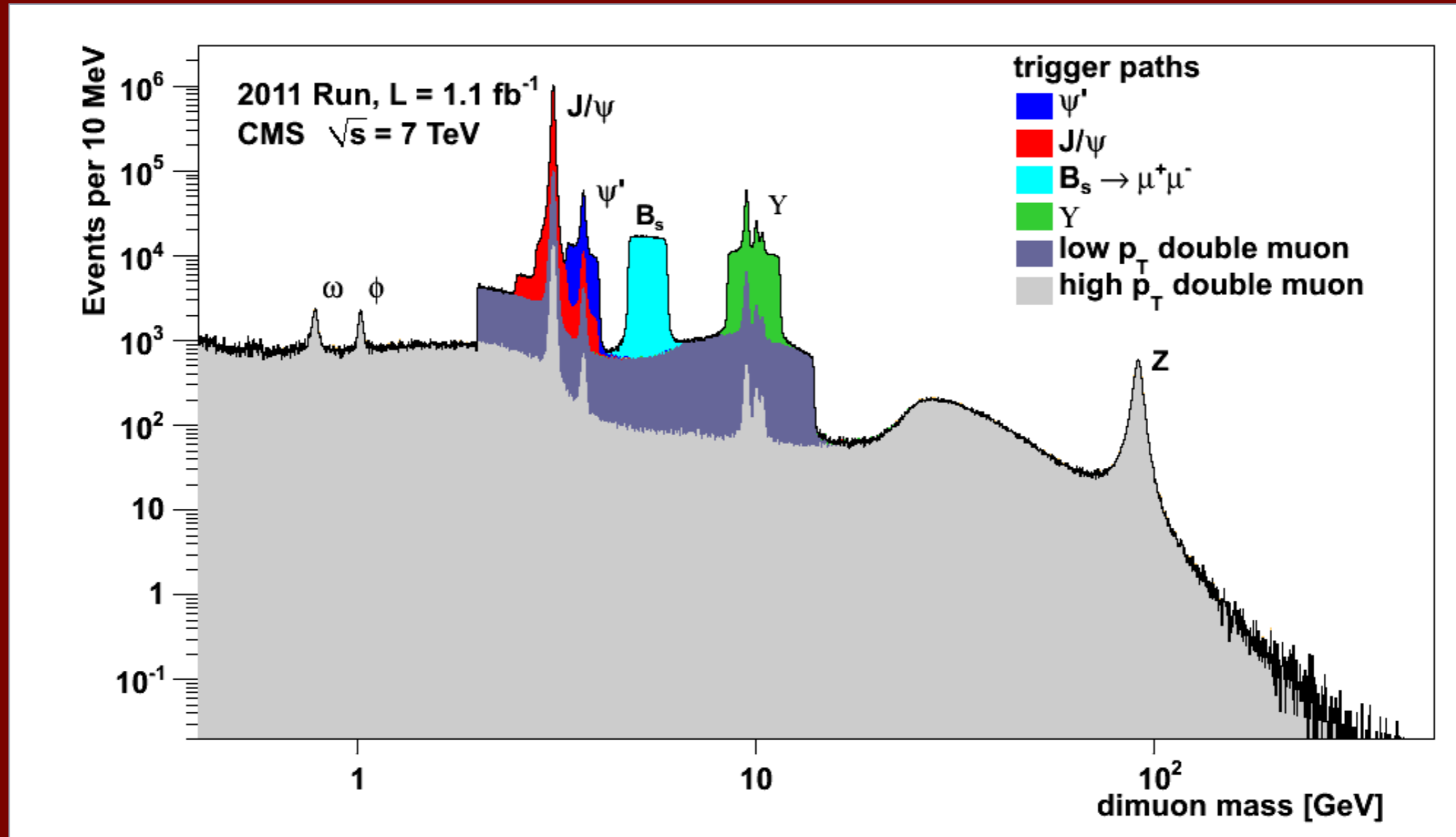
De deeltjes die we maken zijn (meestal) niet stabiel en vervallen naar lichtere stabiele deeltjes:

- protonen
- electronen
- muonen
- pionen
- kaonen
- fotonen (licht)
- en neutrinos





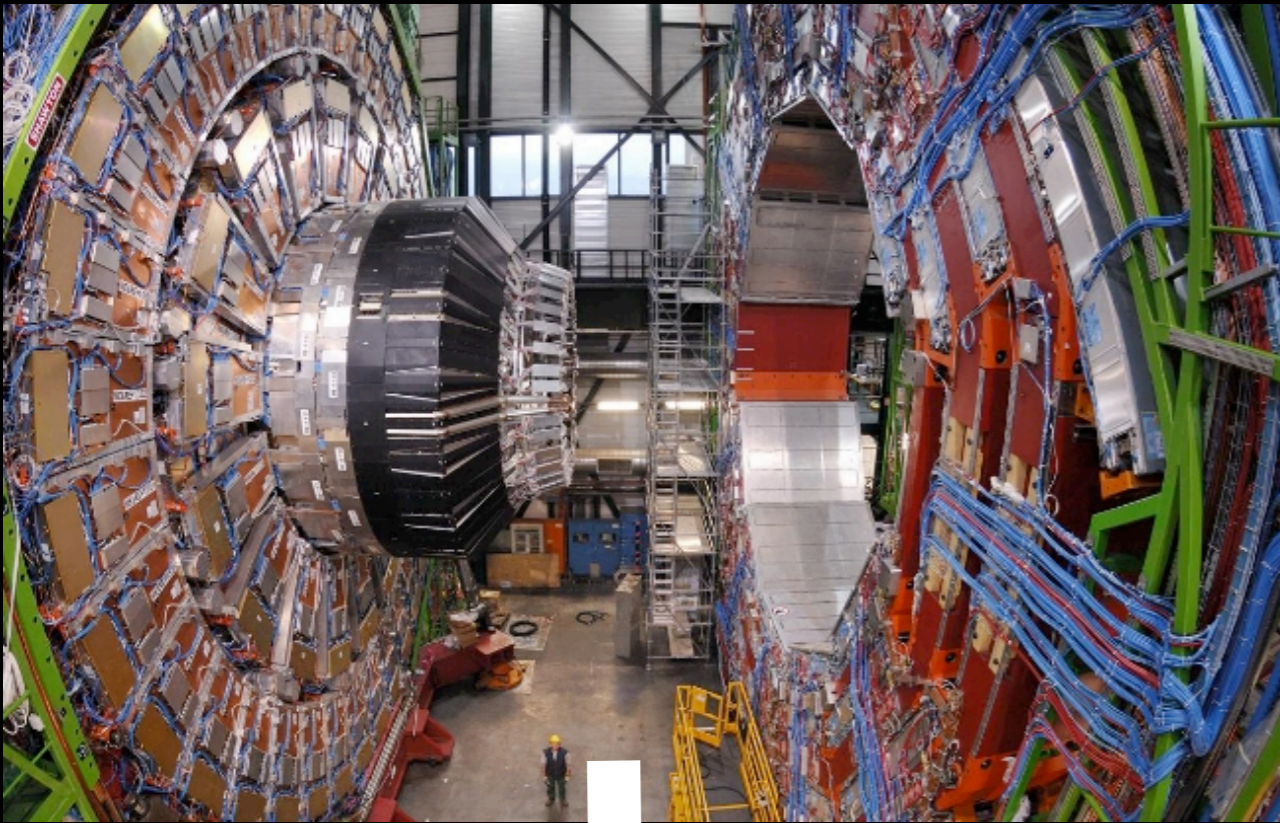
# Combineren van de gemeten deeltjes



Voorbeeld: 2 muonen



# Trigger - wat slaan we op?



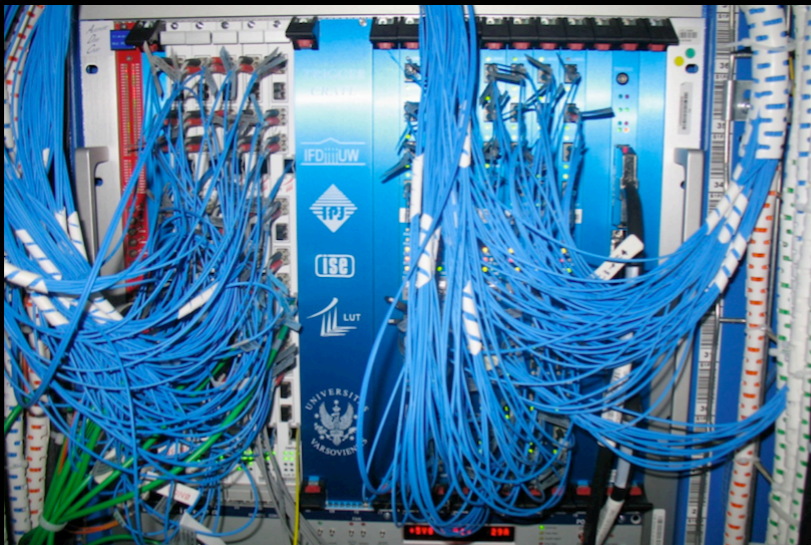
We nemen **1TB per seconde** aan data(!).

17 botsingen x 40 MHz x **1.5 MB.**

Maar we kunnen maximaal 100 Hz opslaan.

Welke botsingen willen we bewaren?

Hoe herkennen we een specifiek deeltje zoals het Higgs?

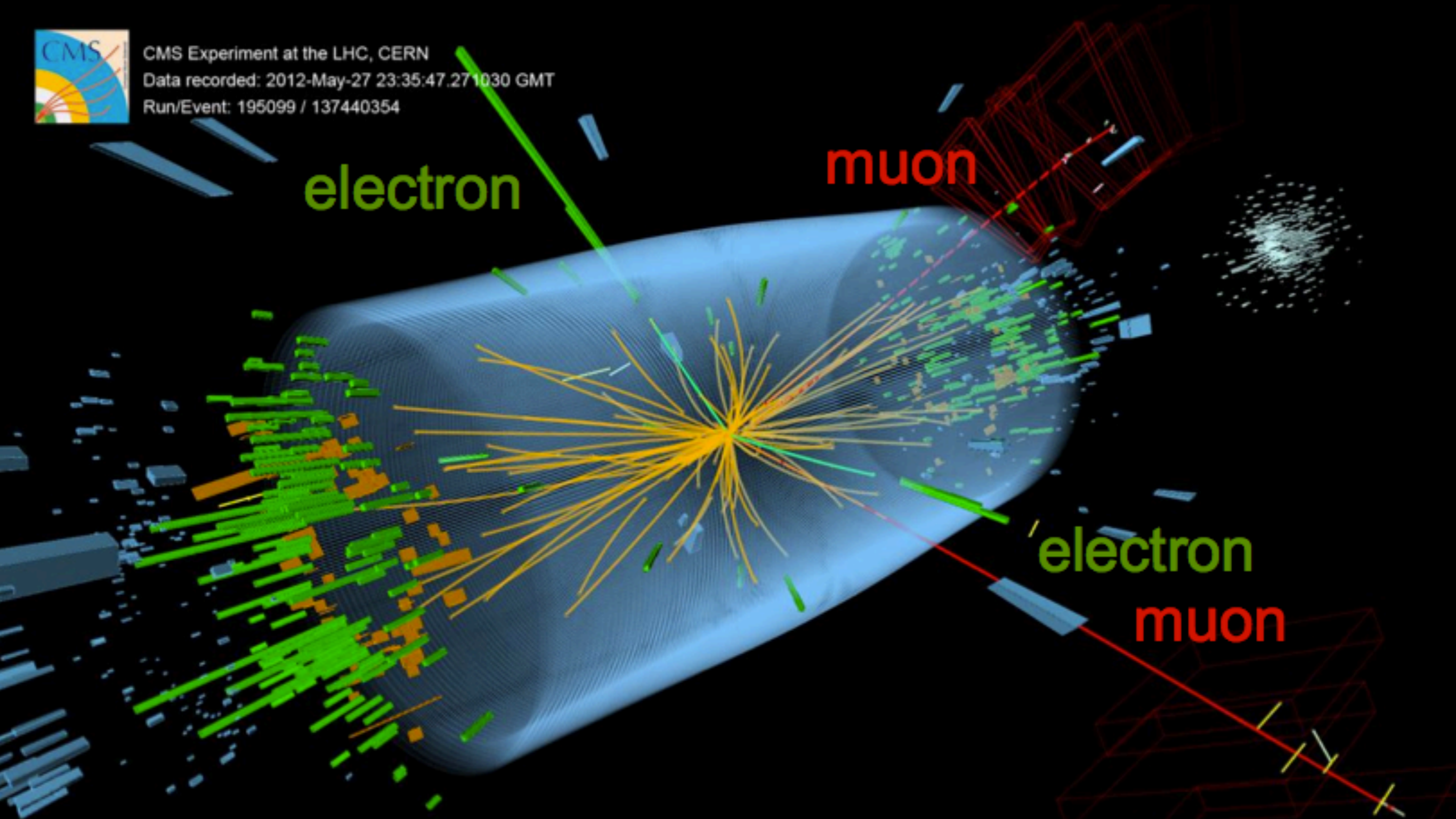




# $H \rightarrow ZZ \rightarrow 2 \text{ muonen} + 2 \text{ electronen}$ ?



CMS Experiment at the LHC, CERN  
Data recorded: 2012-May-27 23:35:47.271030 GMT  
Run/Event: 195099 / 137440354



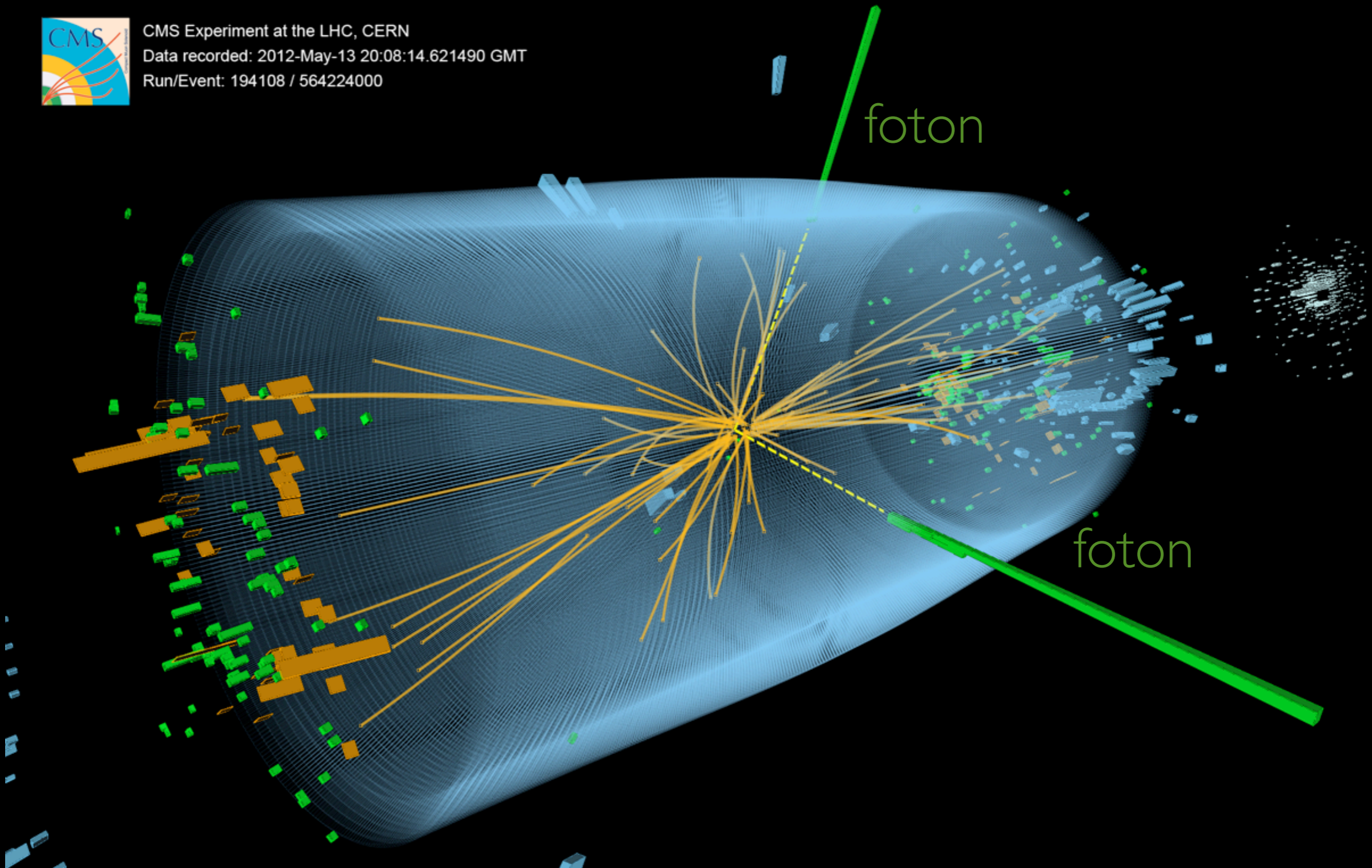
**Higgs boson is instabiel en kan vervallen naar combinaties van andere deeltjes.**



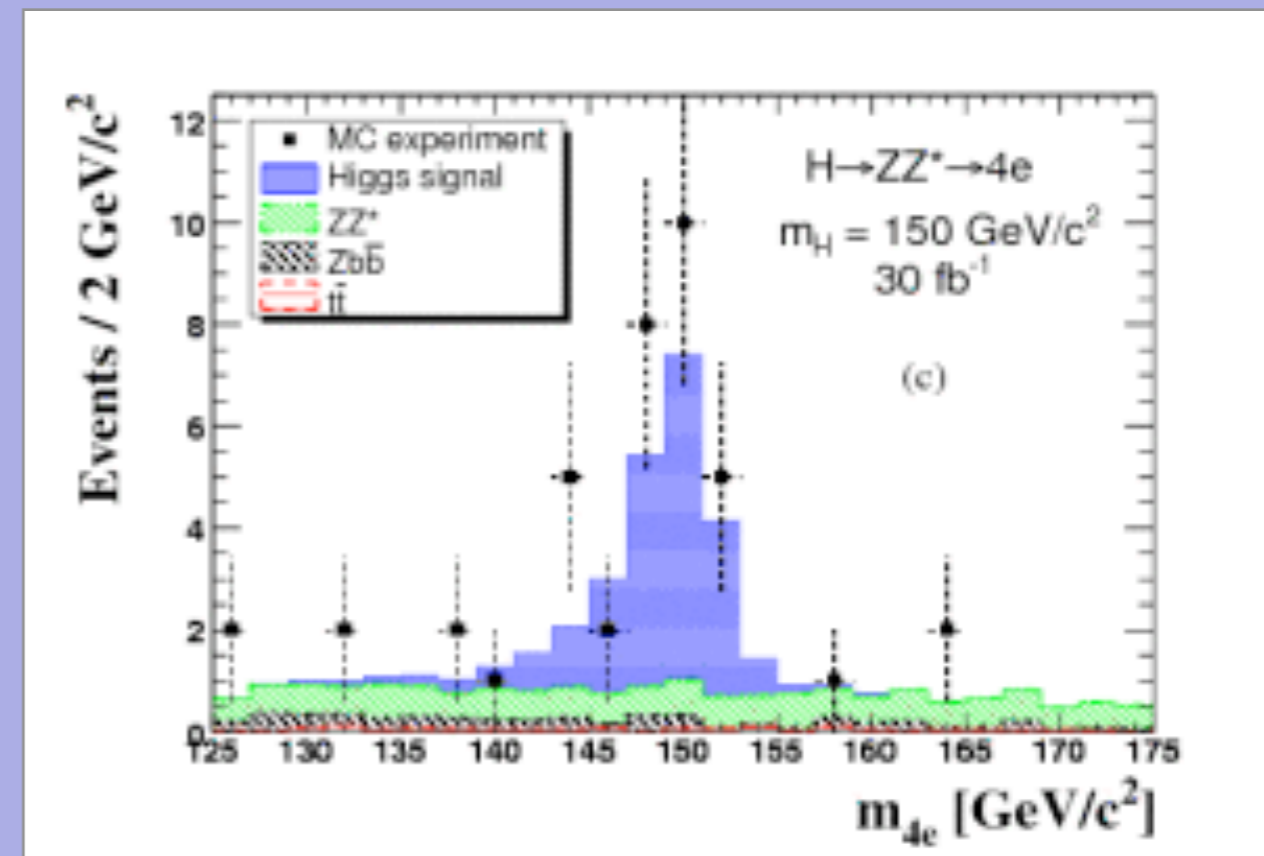
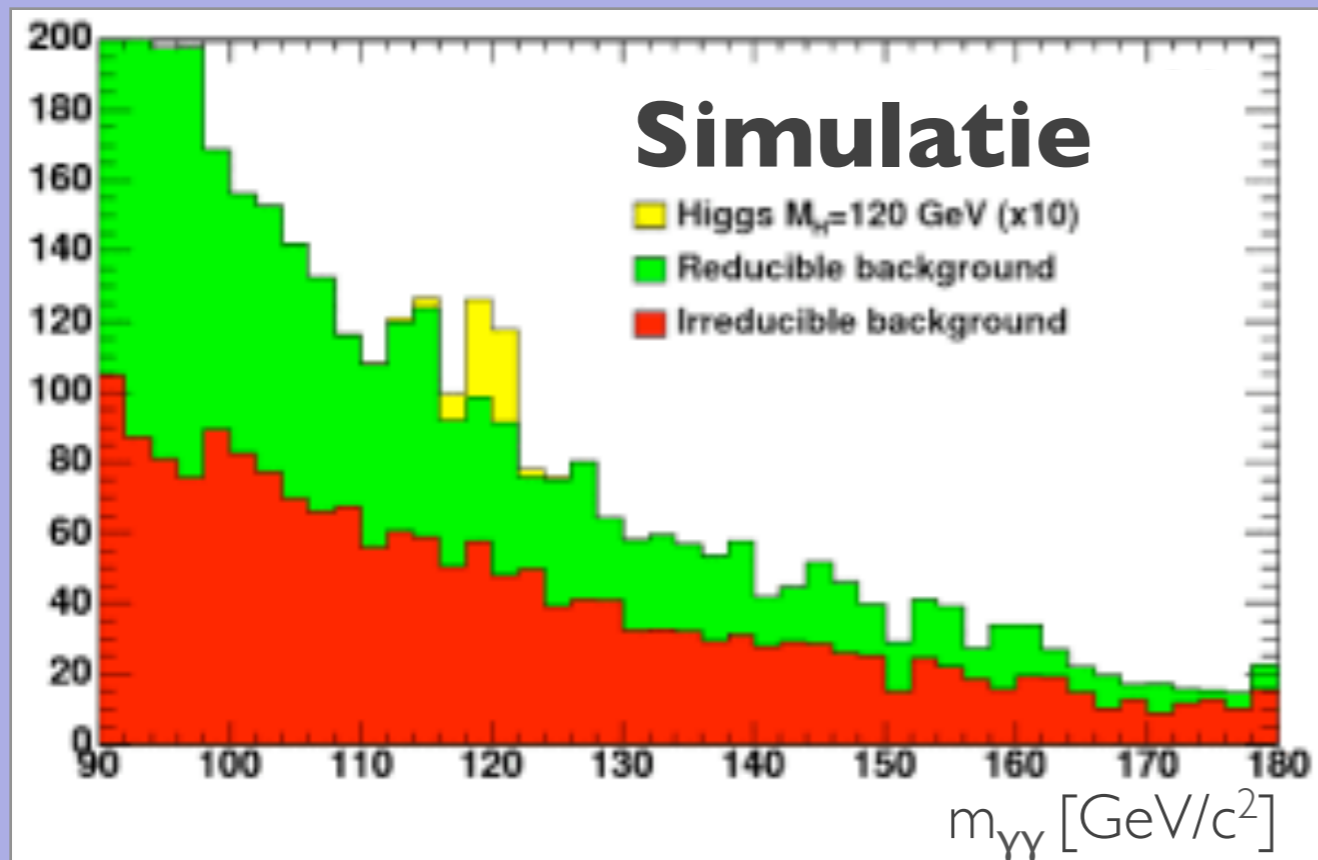
# $H \rightarrow 2$ fotonen



CMS Experiment at the LHC, CERN  
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT  
Run/Event: 194108 / 564224000







# Higgs - een speld in een hooiberg

Heel veel botsingen lijken op een Higgs botsing!

We simuleren onze verwachtingen en kijken of het overeenkomt met wat we zien.



Amsterdam



en???

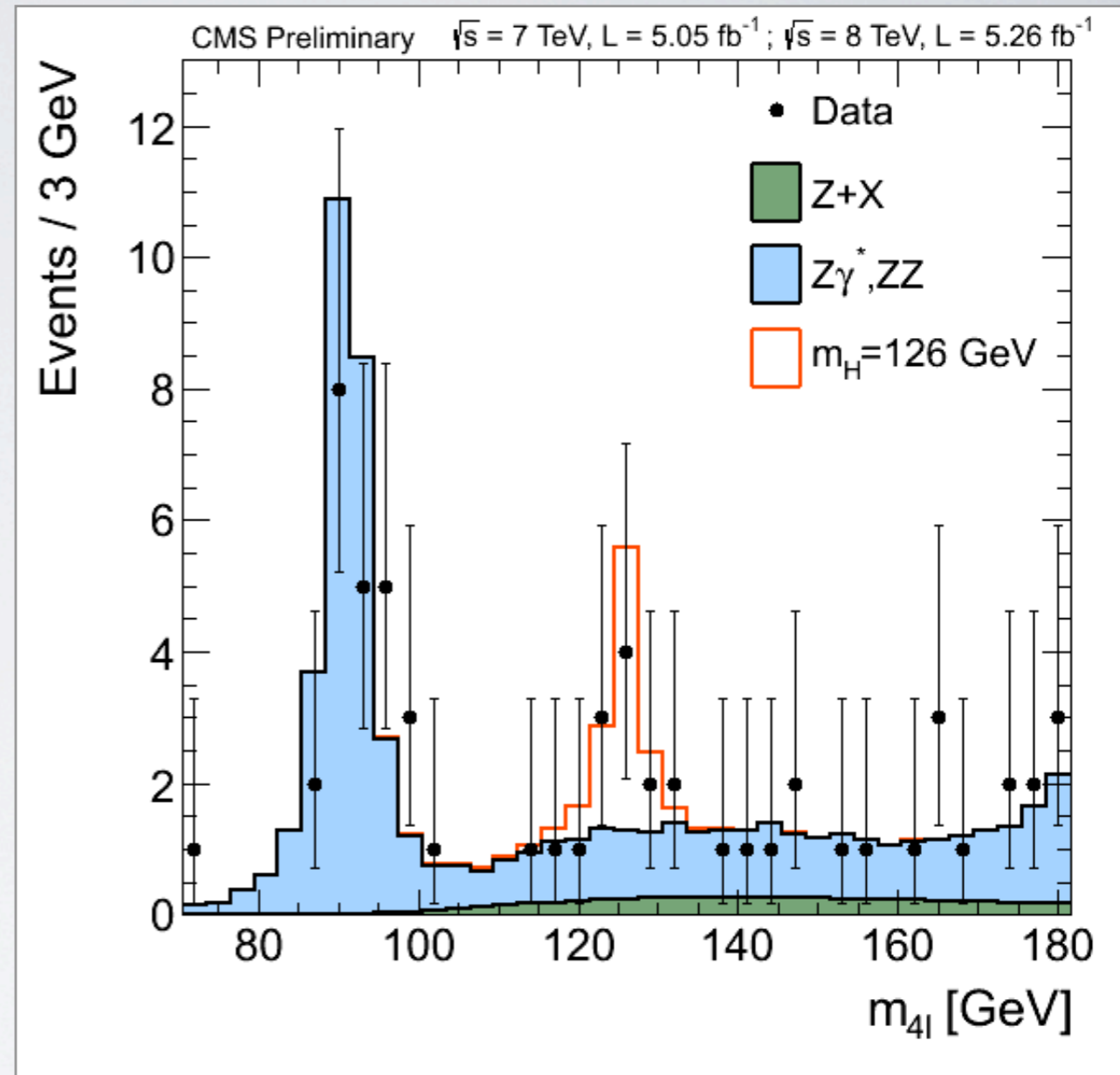
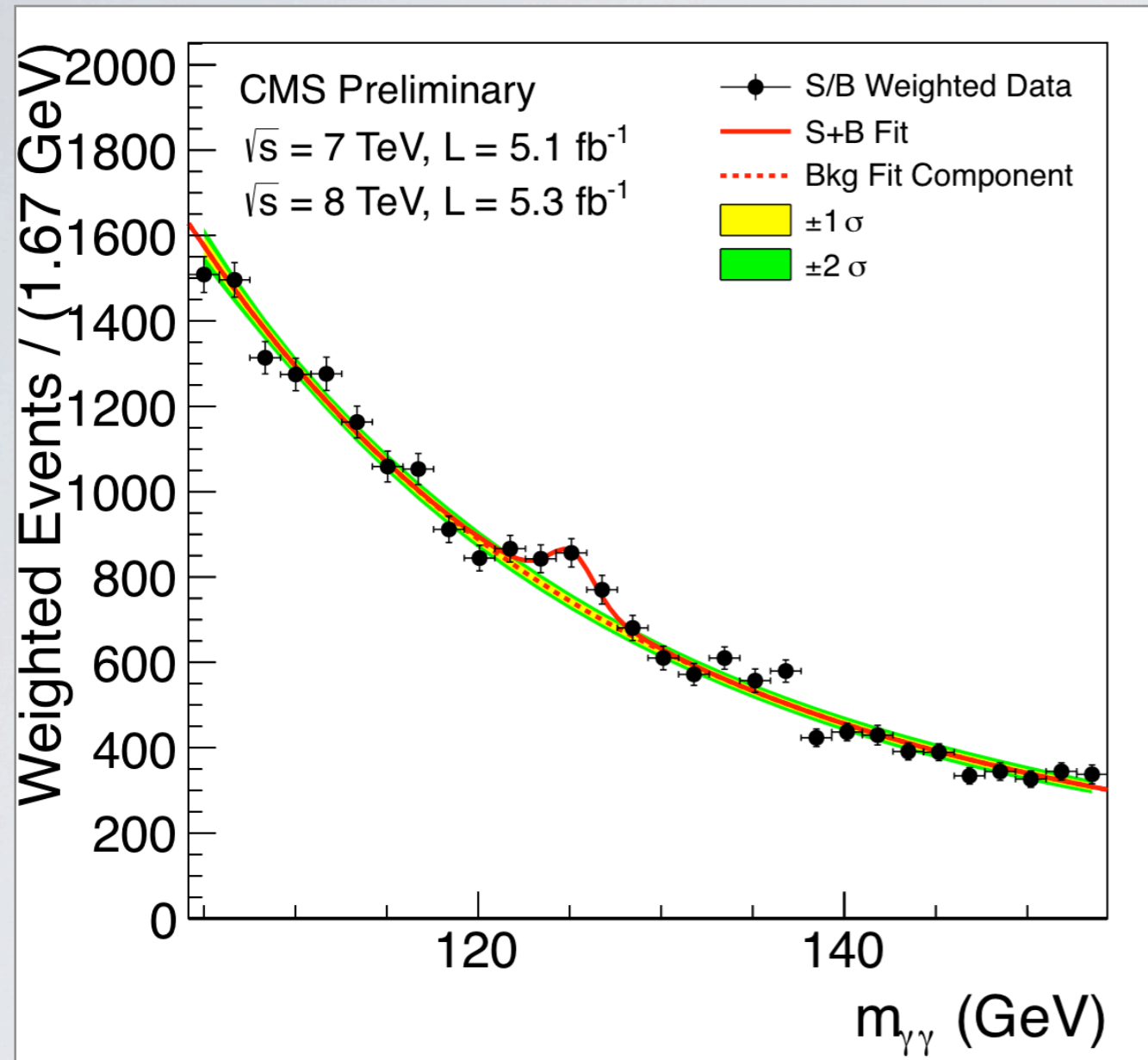
persconferentie 4 juli 2012

Melbourne





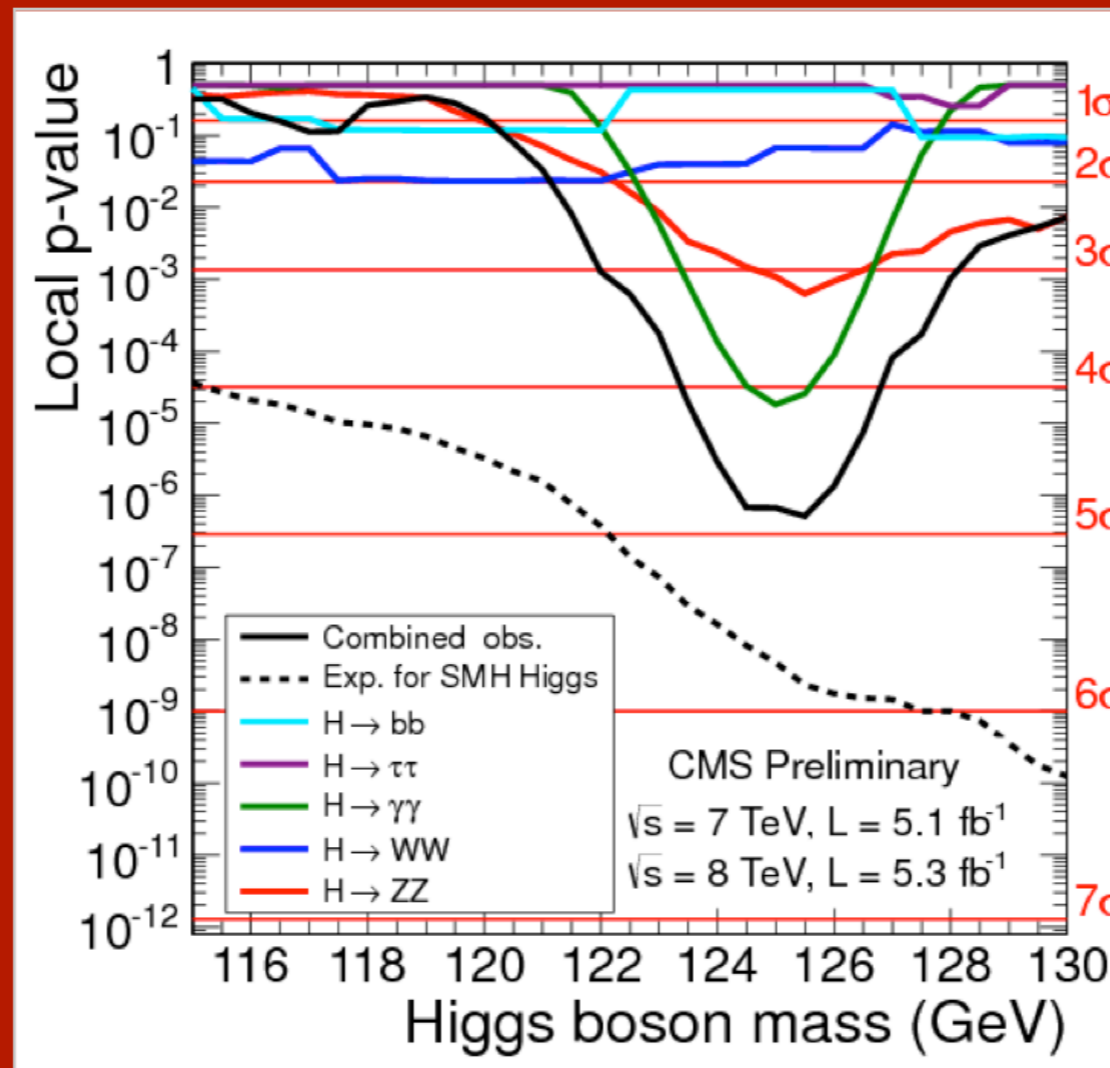
# Alle kandidaat botsingen





# Alle kanalen samen

↓  
Waarschijnlijkheid

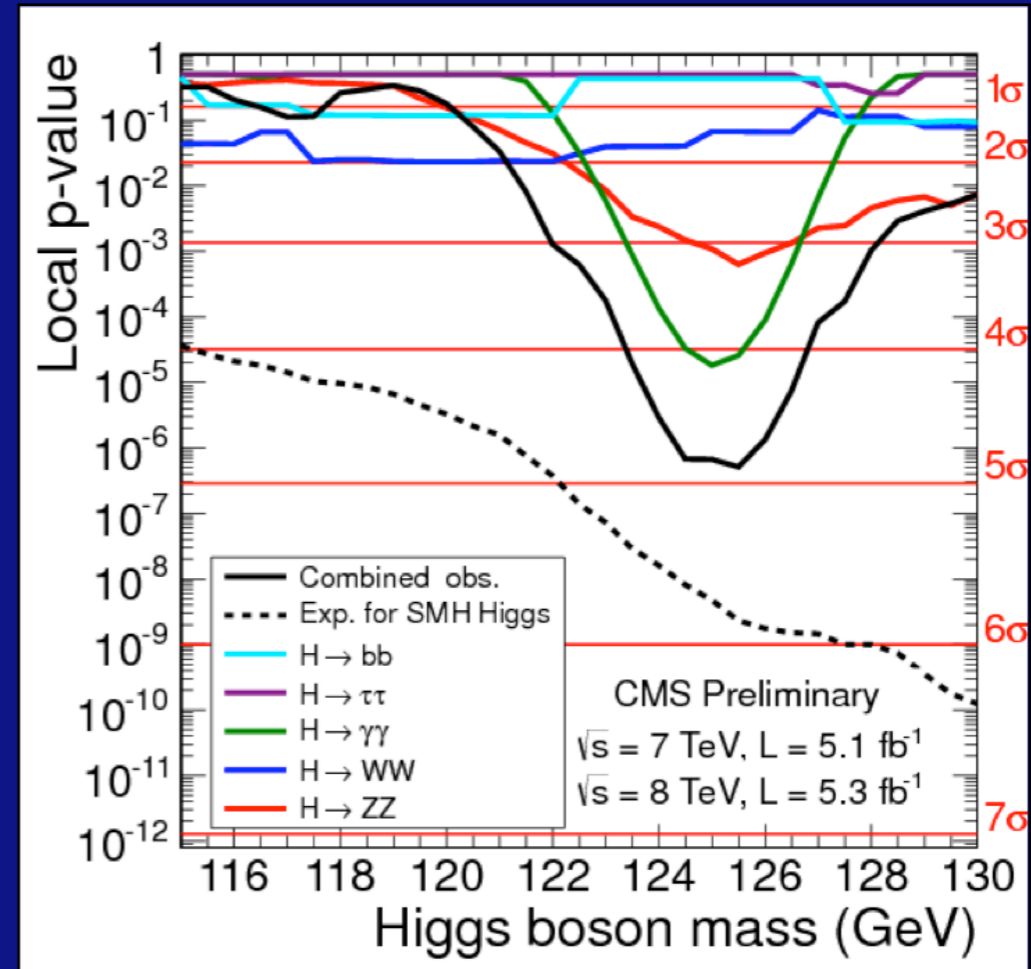
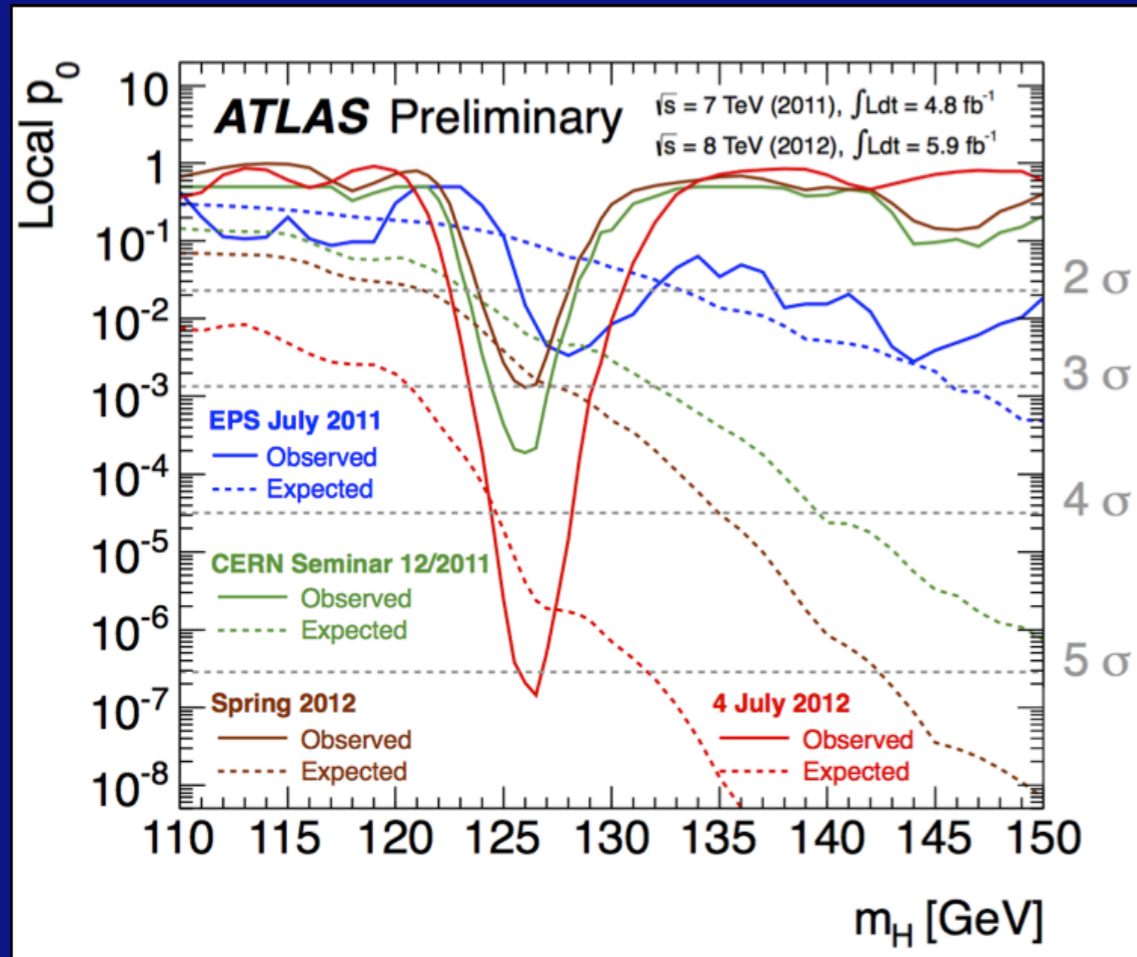


We hebben een Higgs gevonden met een massa van ongeveer 125 GeV (125x proton massa)\*

\*Een kans van 1 op 3.5 miljoen dat dit een toevallige samenloop is van waarnemingen zonder dat we er een Higgs op die massa bestaat.



# Beide resultaten

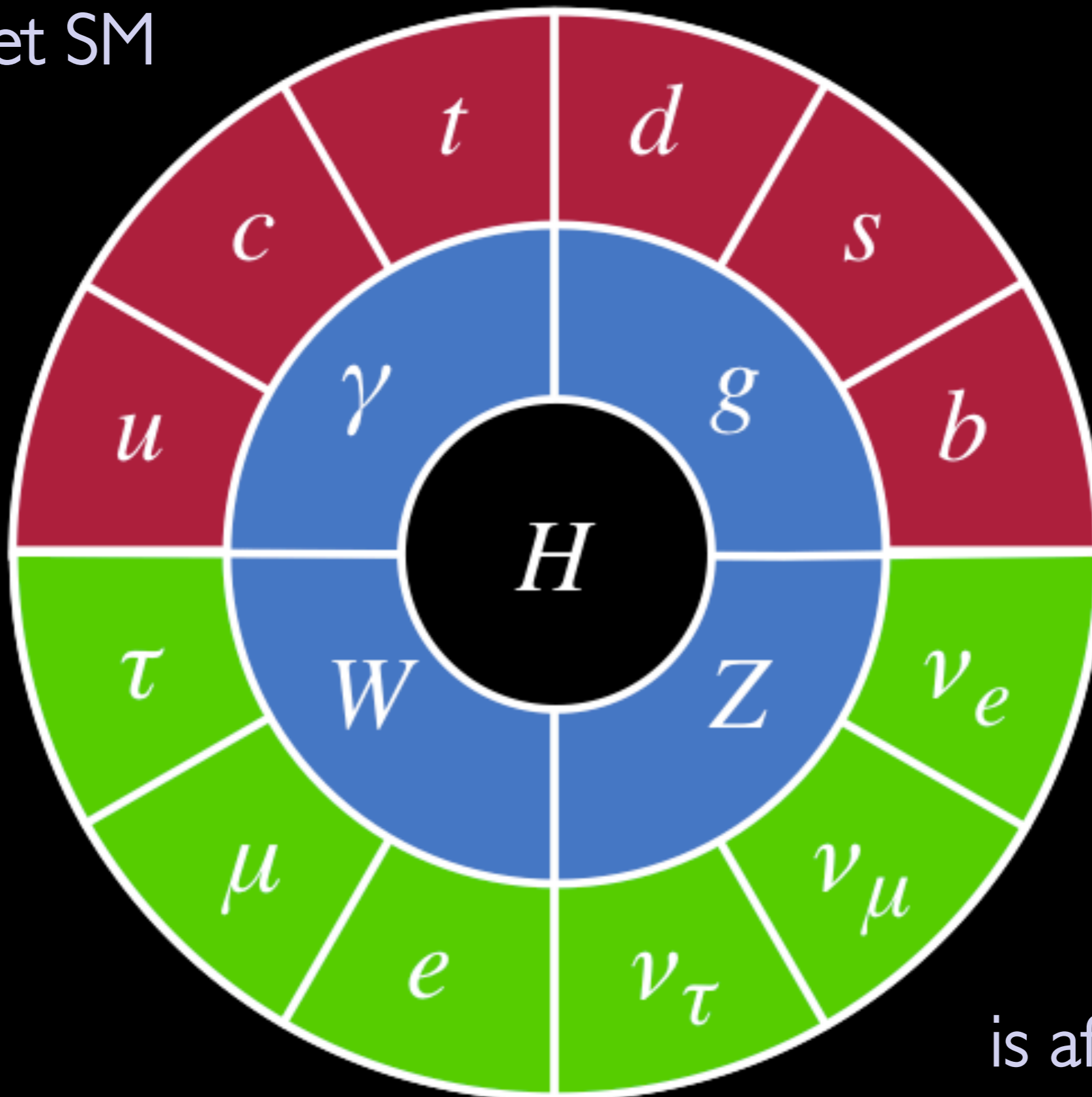


## Higgs gevonden!





# Het SM



is af...



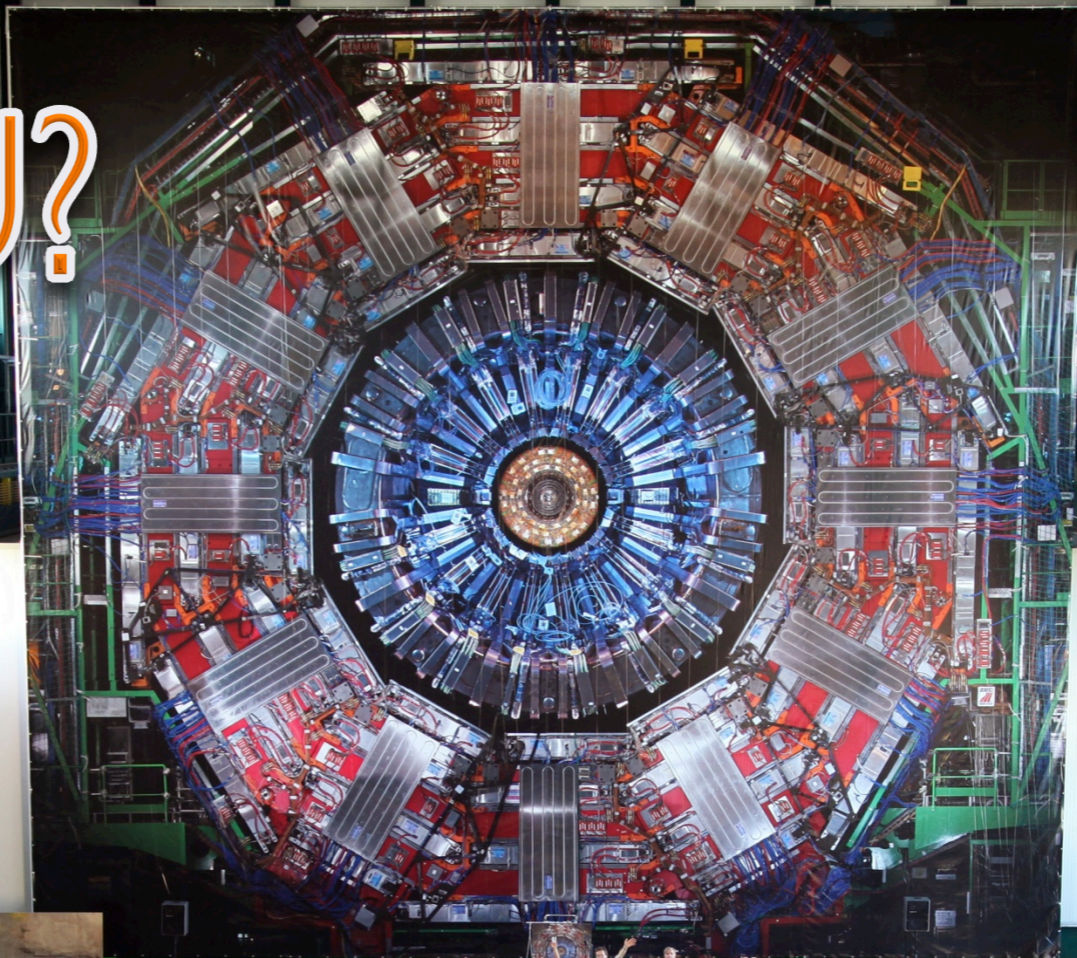
$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi} \not{D} \psi + \text{h.c.} \\ & + \bar{\psi}_i Y_{ij} \psi_j \phi + \text{h.c.} \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)\end{aligned}$$

't Standaard Model

past op een mok!

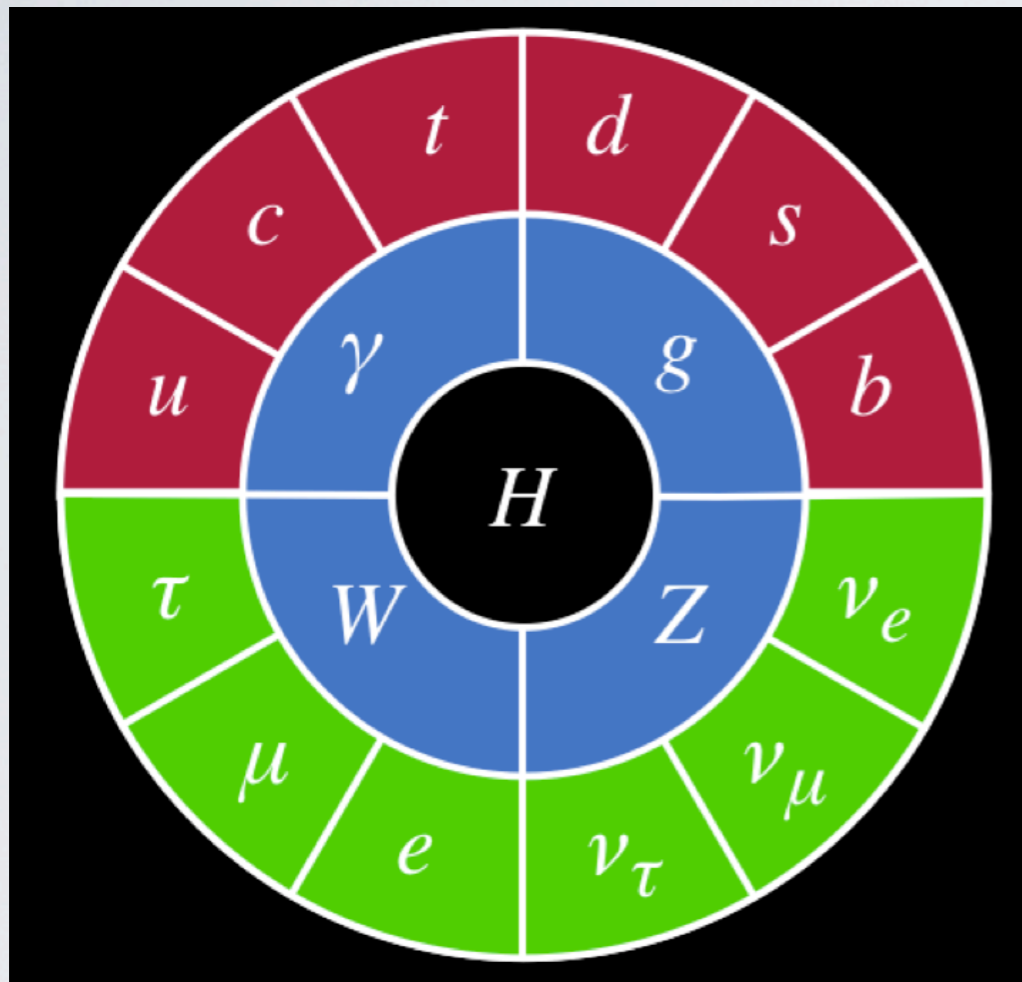


# ENNU?

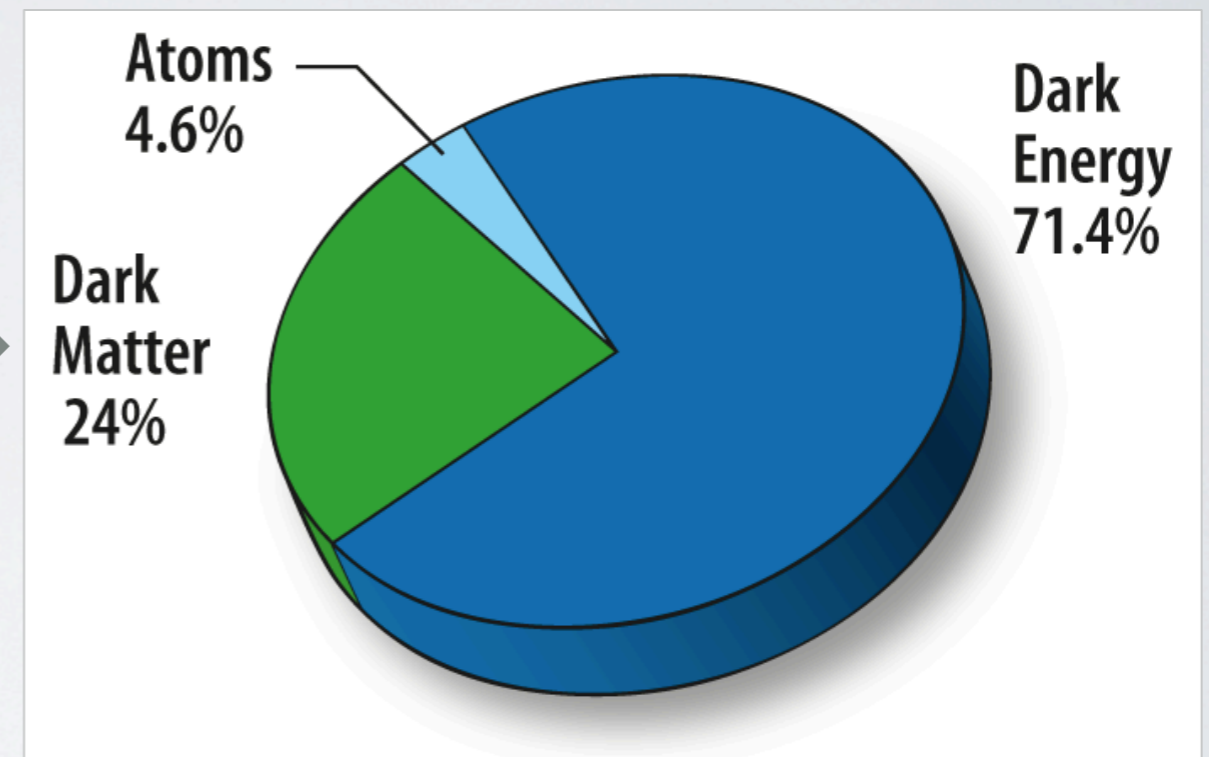




# Dark Matter!



Standaard model  
Alle deeltjes die we kennen



Standaard model  
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 *J. H. Oort*.

### Notations.

$z$  distance from the galactic plane,  
 $Z$  velocity component perpendicular to the galactic plane,  
 $Z_0$  the value of  $Z$  for  $z = 0$ ,

4. From VAN RHIJN's tables in *Groningen Publication* 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

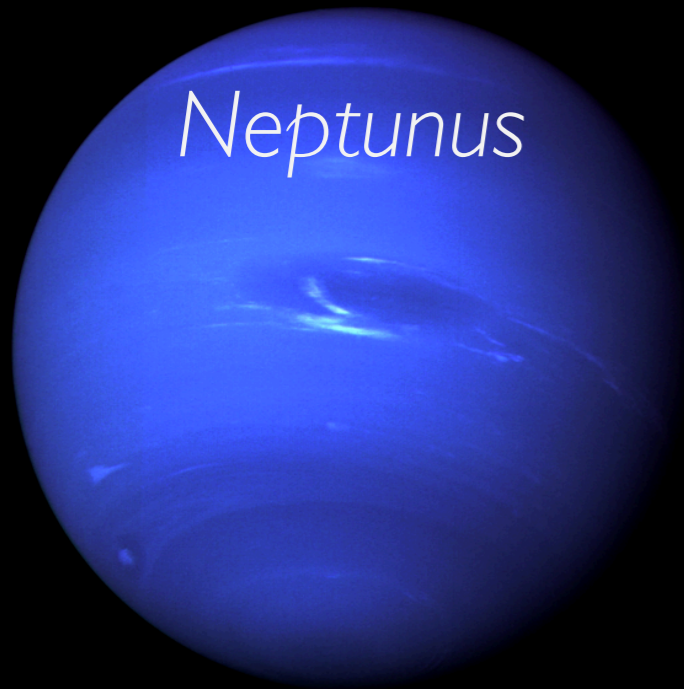
- Proefschrift (1978)
- Rotatiecurves

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

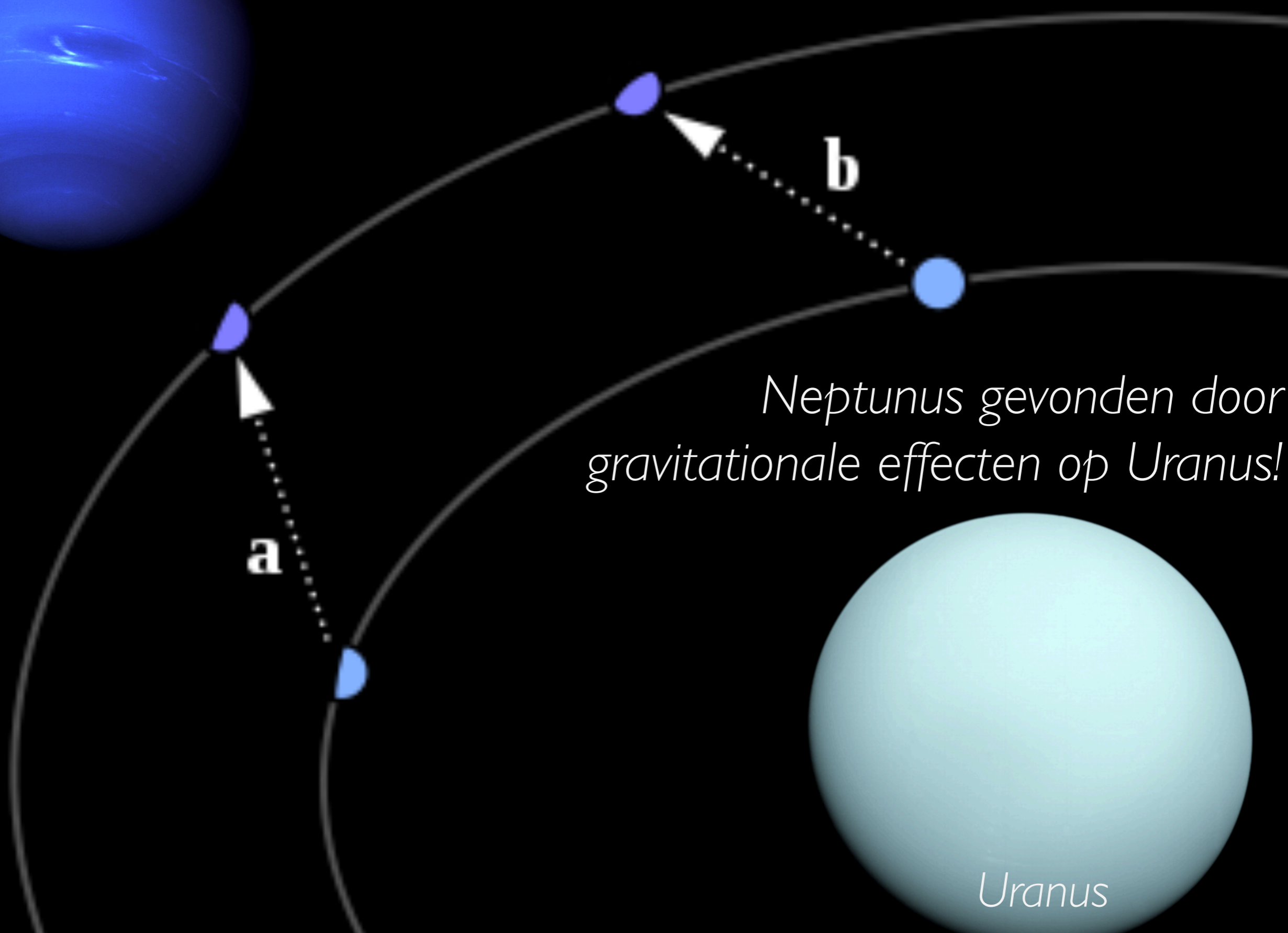
andere, meer door de waarneemapparatuur bepaalde, problemen die hierop van invloed zijn. Toch zijn er nog wel enkele zinvolle uitspraken te doen, zij het dat een grote mate van voorzichtigheid moet worden betracht. Het blijkt dat we geen goede schattingen van de totale massa kunnen maken: de metingen 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.



# Donkere Materie anno 1846

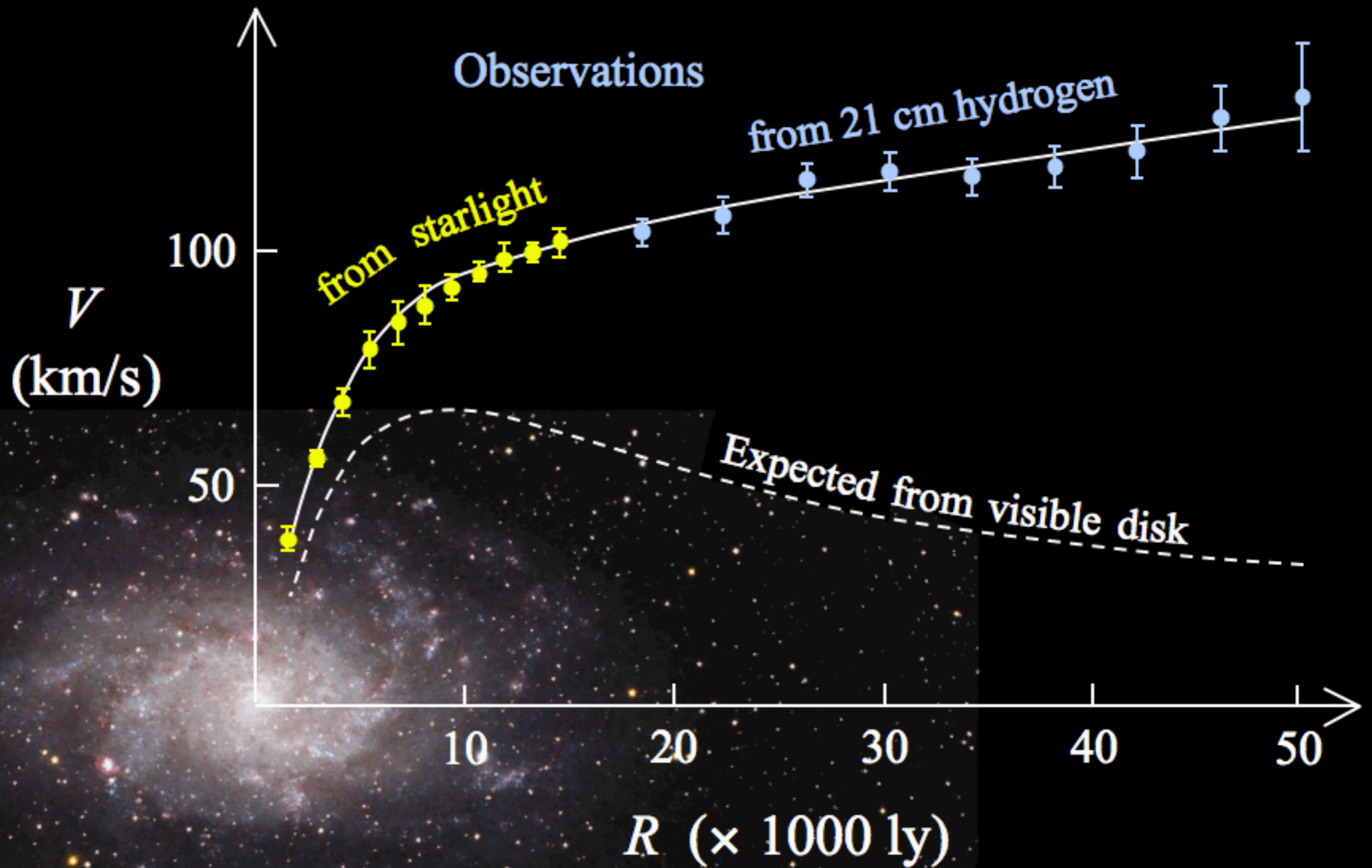


*Neptunus gevonden door  
gravitationale effecten op Uranus!*



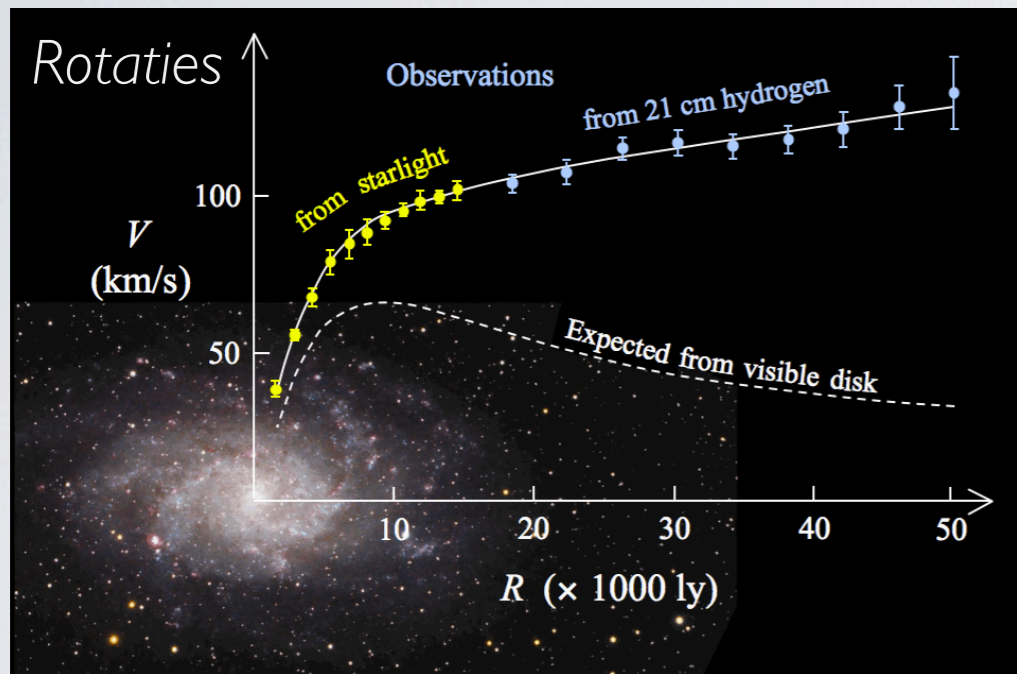


# Rotatie-snelheid

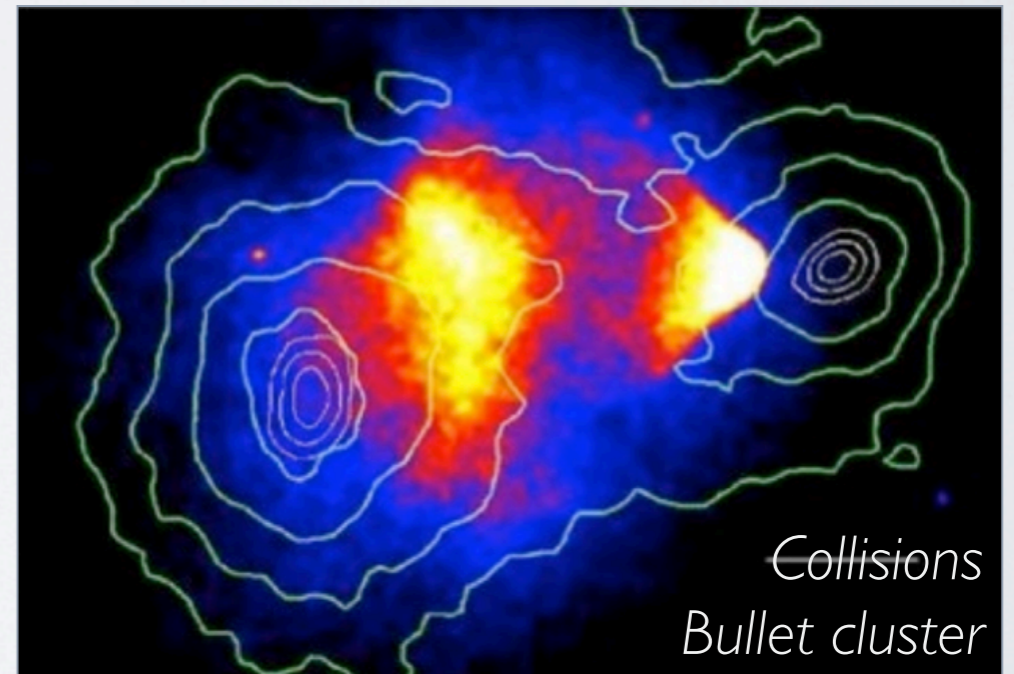
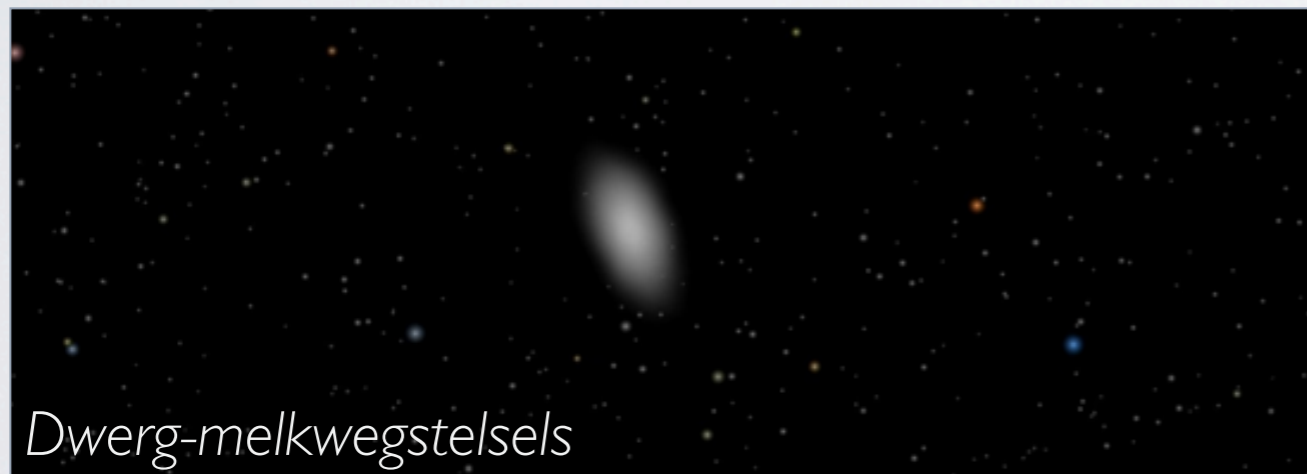




# Bewijsmateriaal



(en méér!)



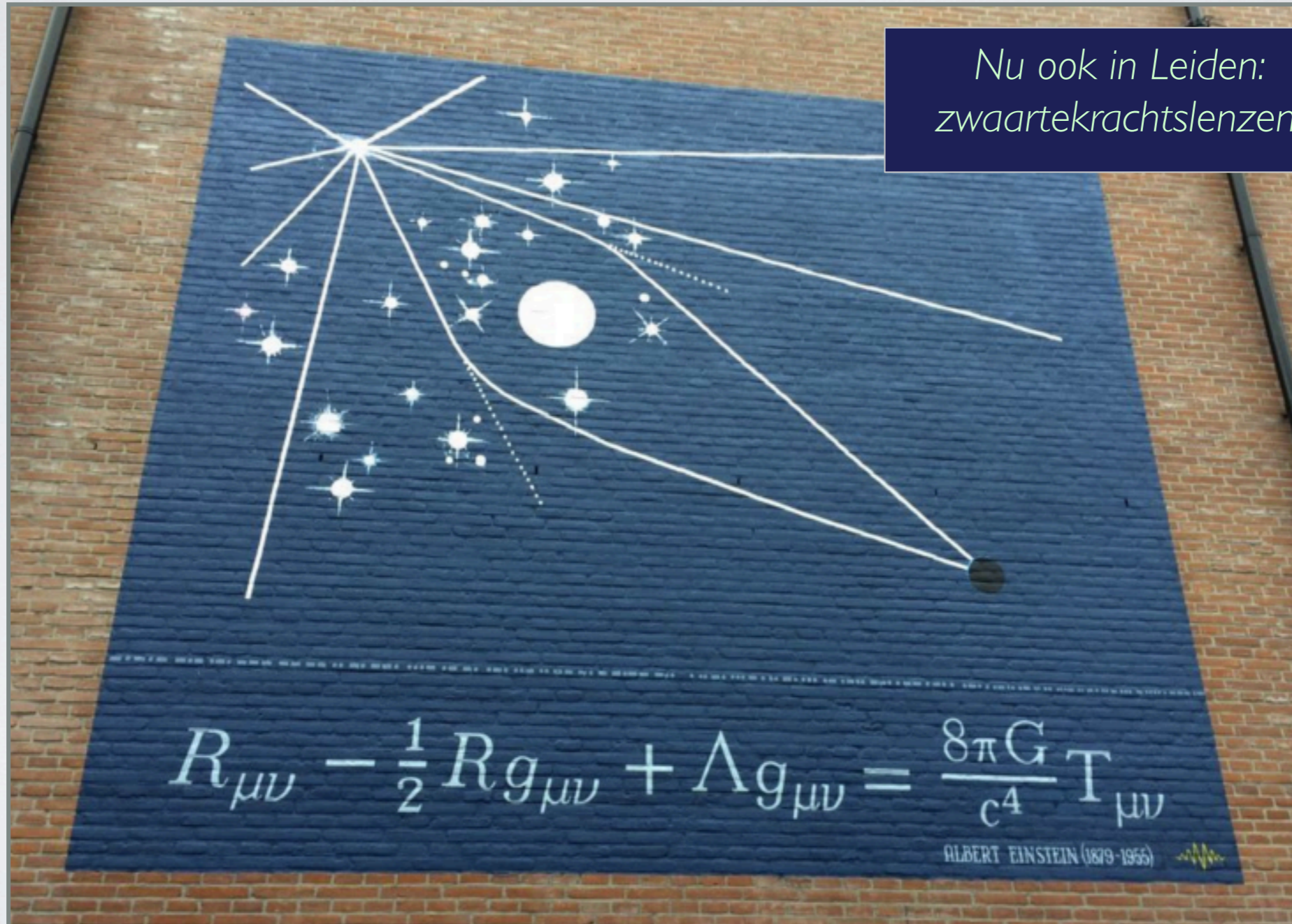
- 1) Massief deeltje
- 2) Zwakke interactie



# Zwaartekracht

Massa bepalen door lichtafbuiging

S.v.d.Molen & I.v.Vulpen & Stichting Tegenbeeld





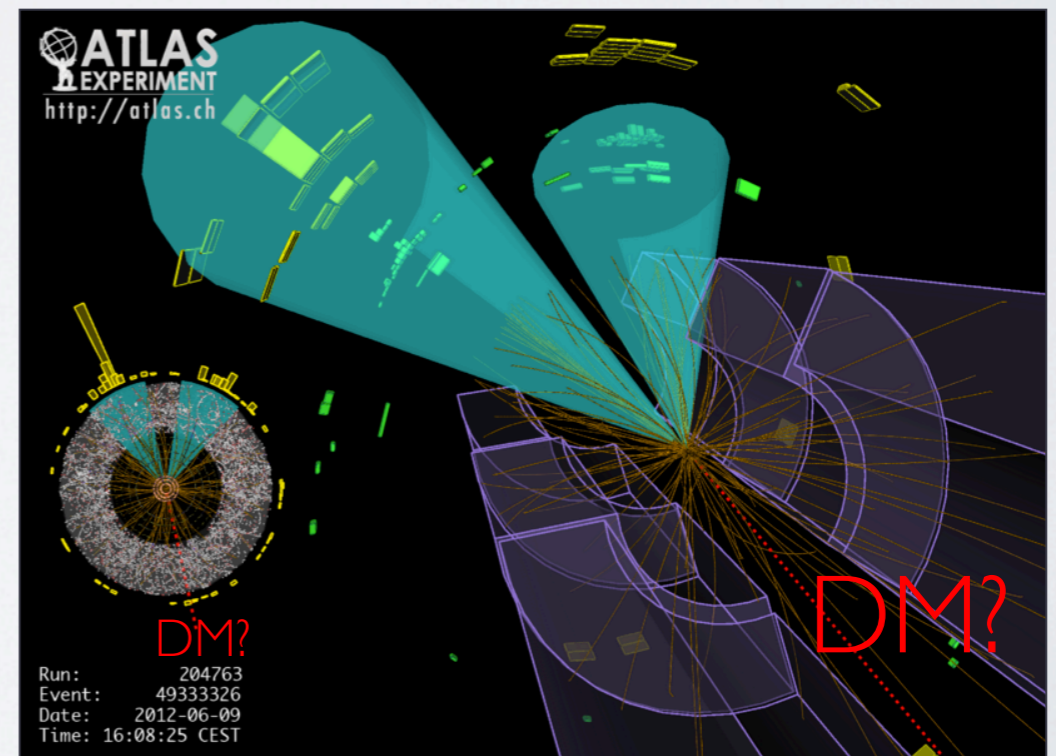
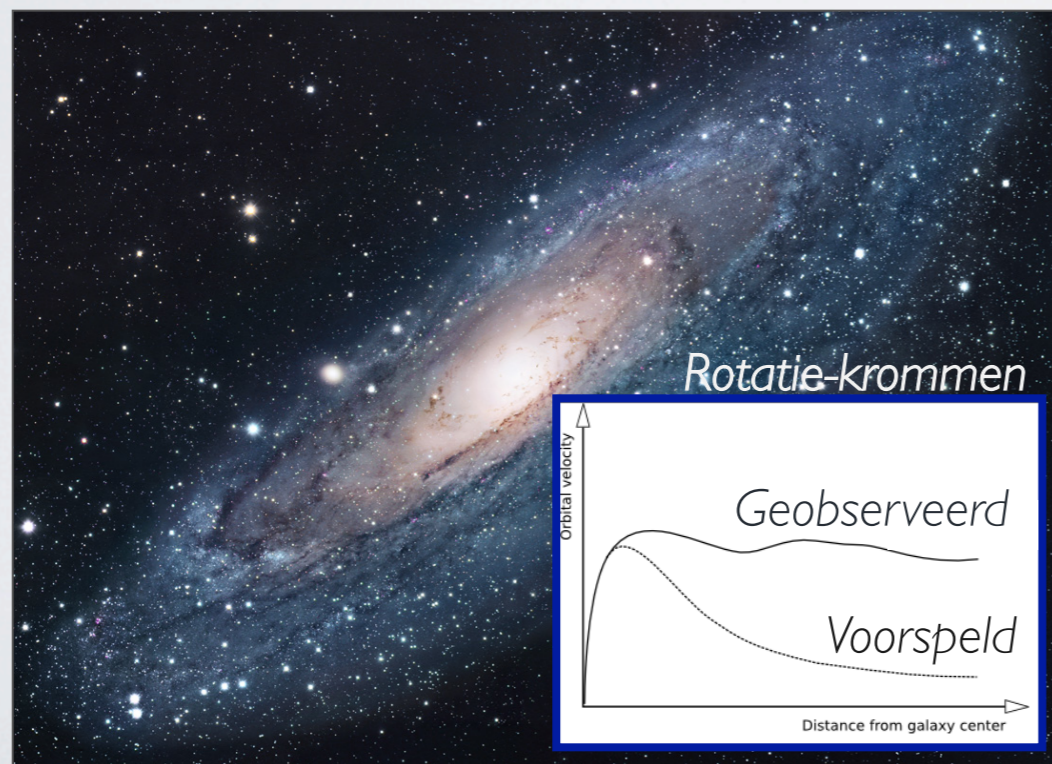
# Zoeken naar Donkere Materie

## Astronomie: waarnemen in ruimte

- Donker - niet zichtbaar
- Interactie: zwaartekracht

## LHC: Produceren in botsing

- Geen interactie met detector
- Energie disbalans

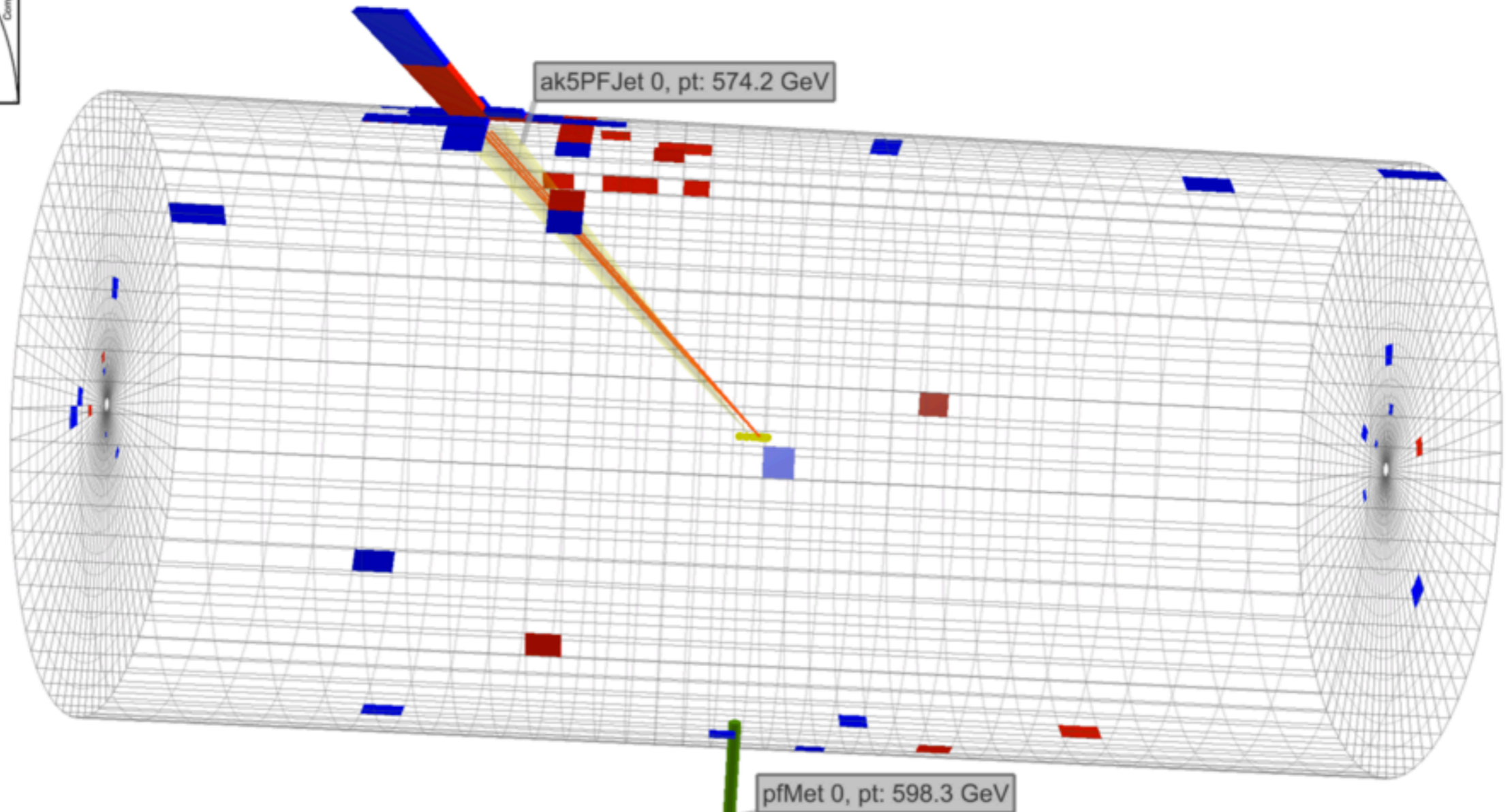




# DM@LHC: monojet



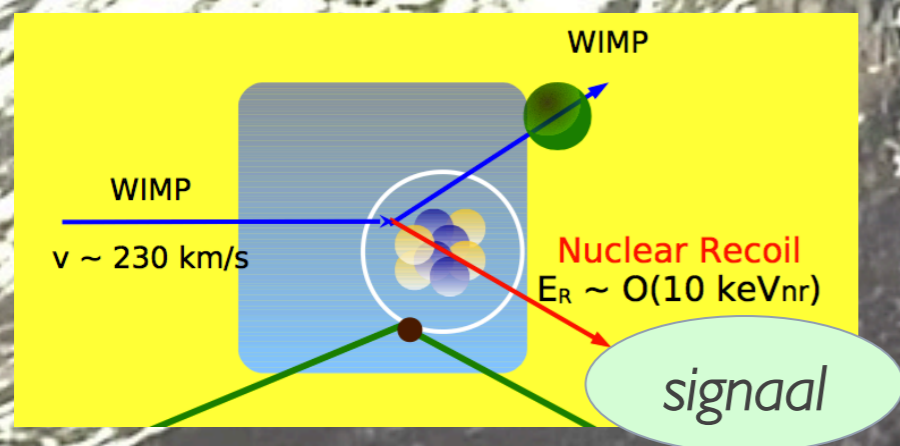
CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Tue Oct 4 02:50:32 2011 CEST  
Run/Event: 177783 / 442962676  
Lumi section: 273



Donkere  Materie?



# Diep onder de grond...



[nikhef.nl/programma/xenon1t](http://nikhef.nl/programma/xenon1t)

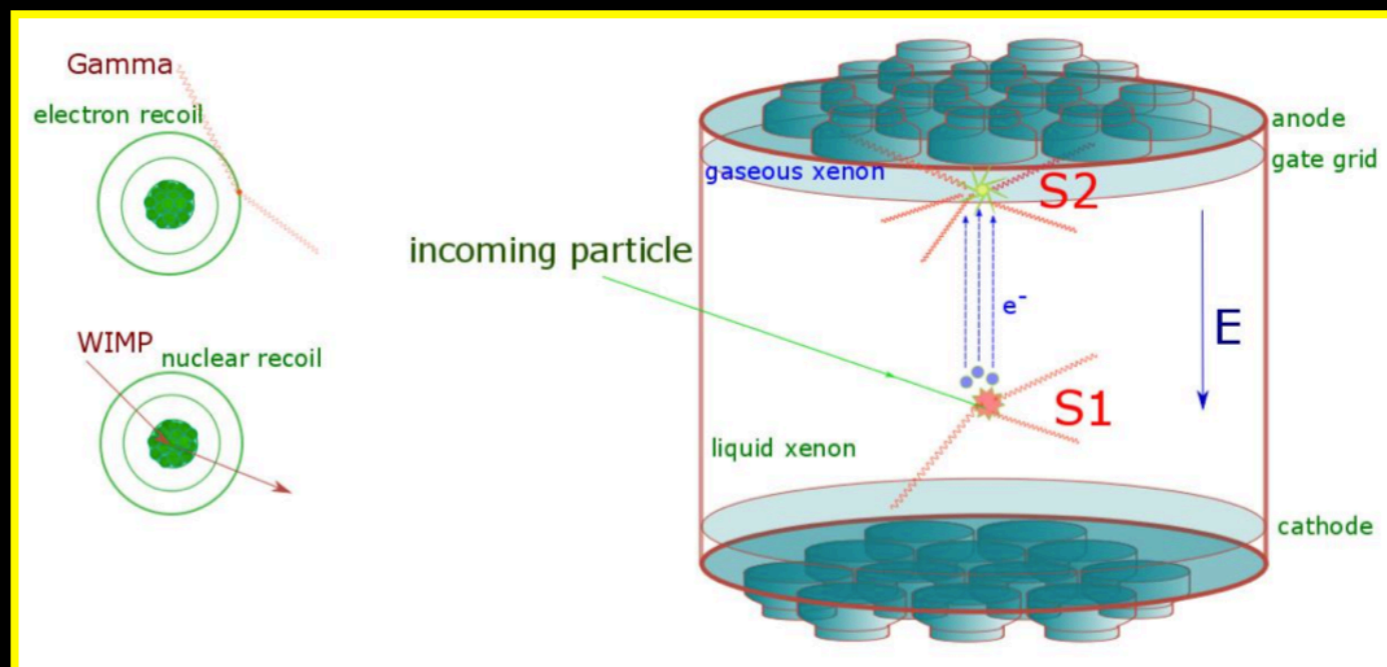


“Directe Detectie”  
*LUX / PandaX / Xenon1T*



# Diep onder de grond...

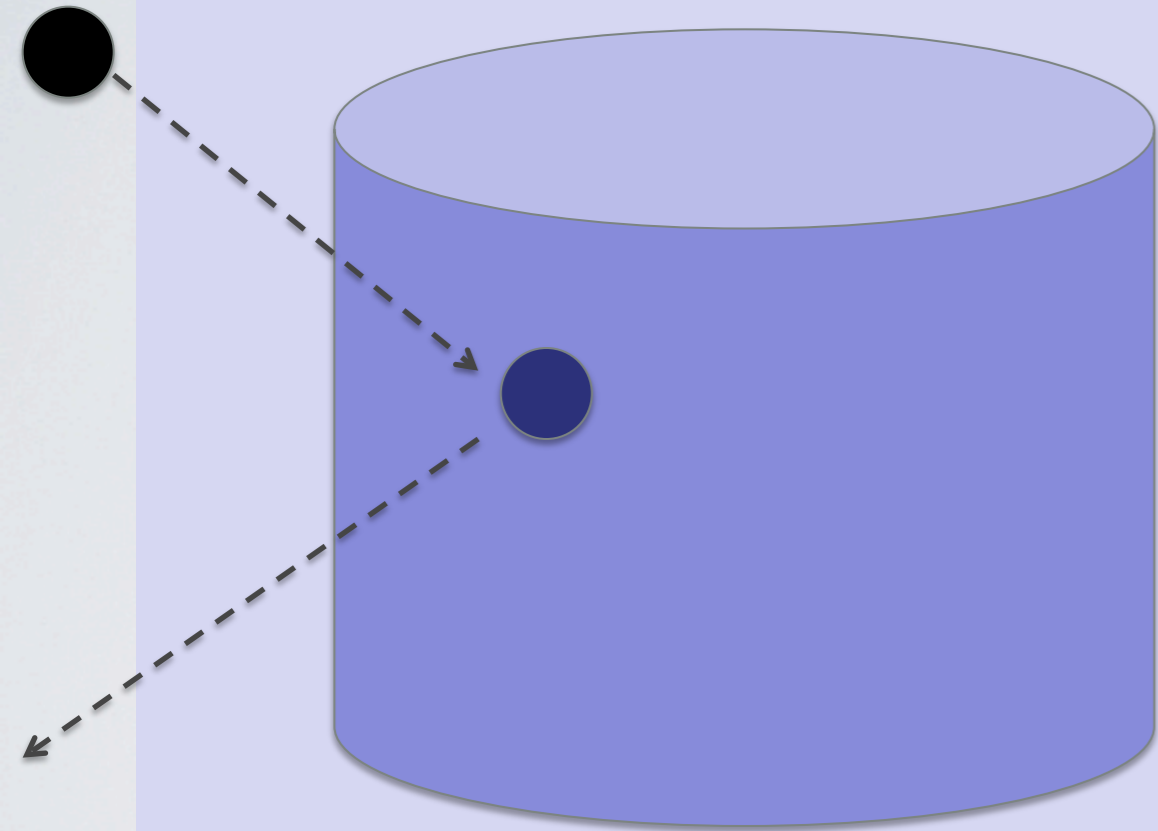
“Directe Detectie”  
LUX / PandaX / Xenon IT



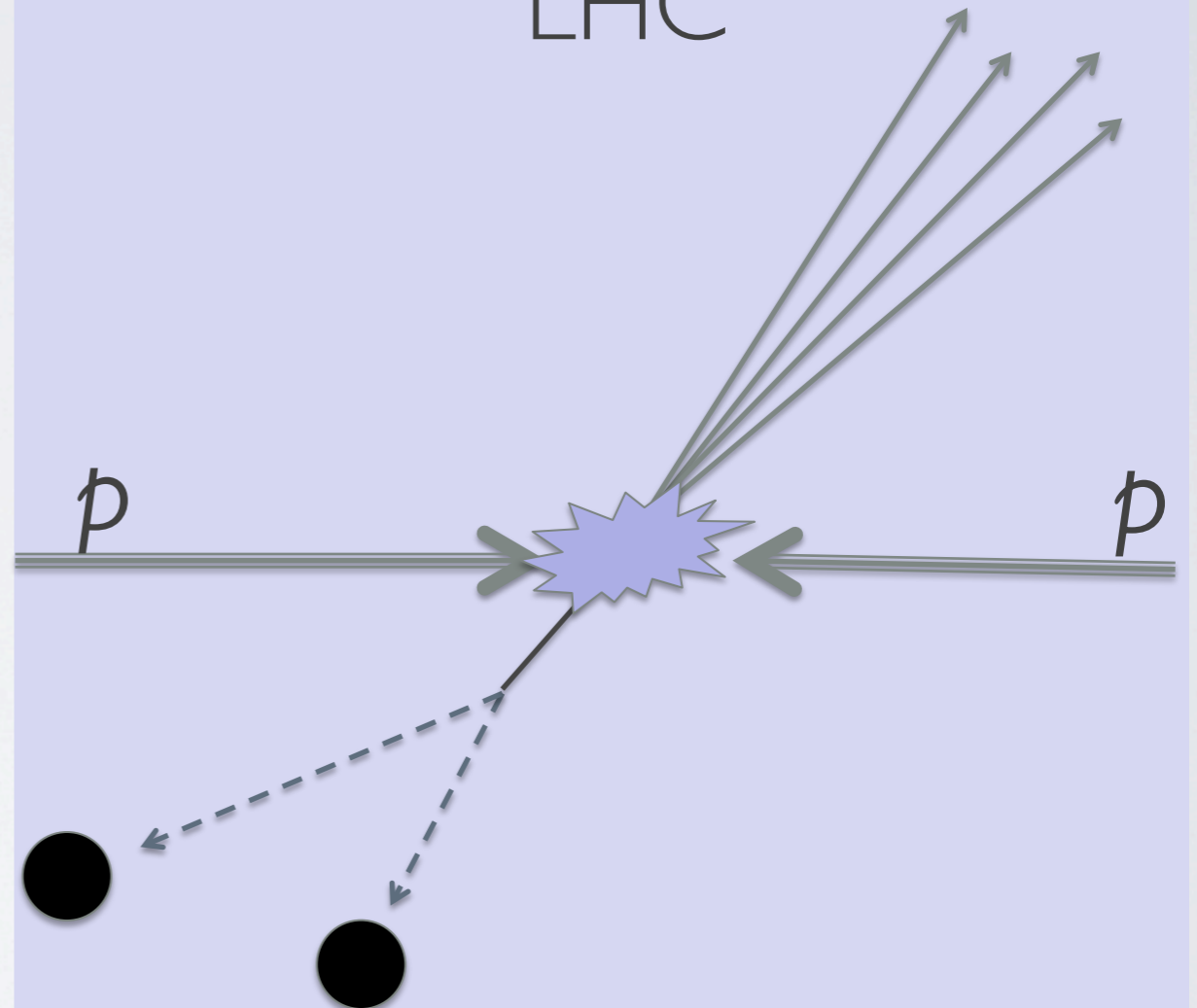


# Ondergronds

DD

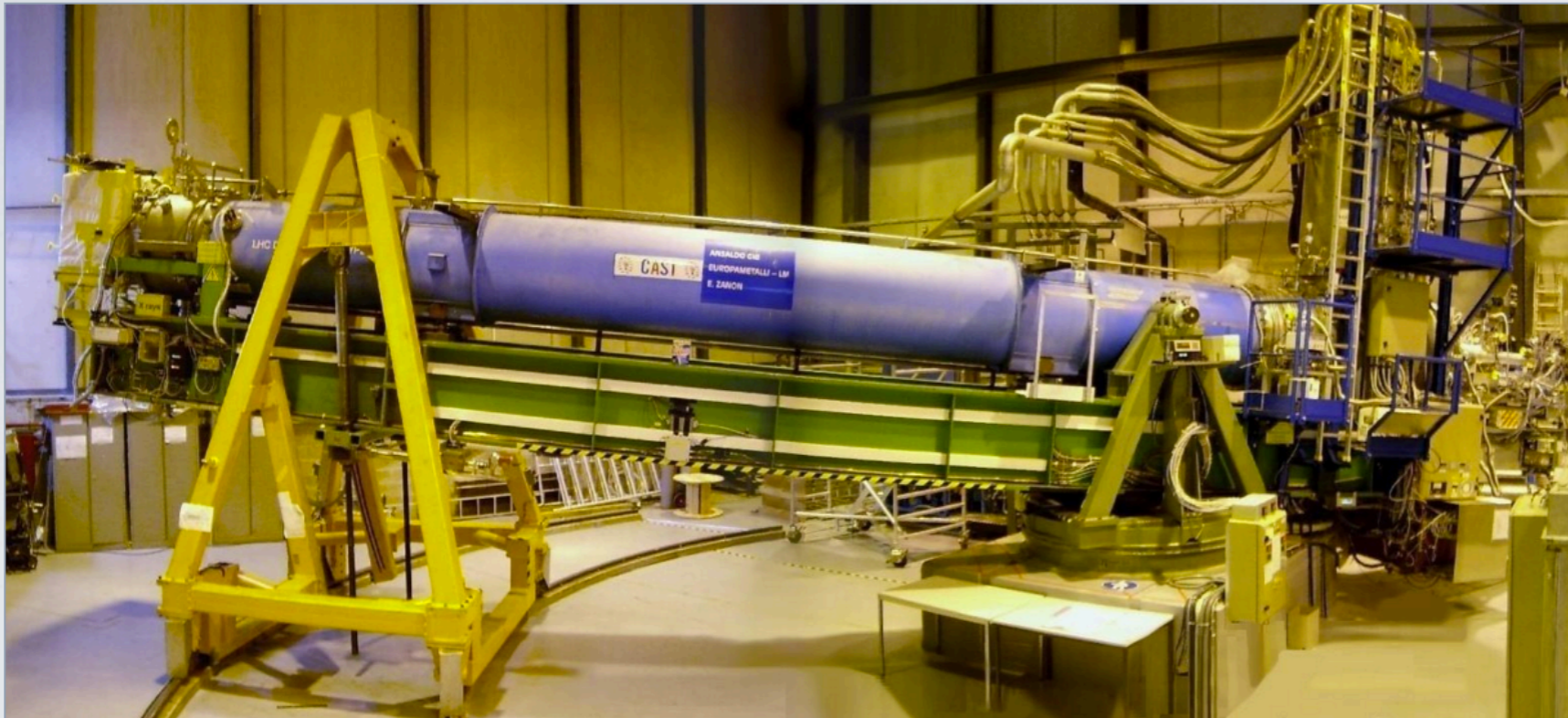


LHC



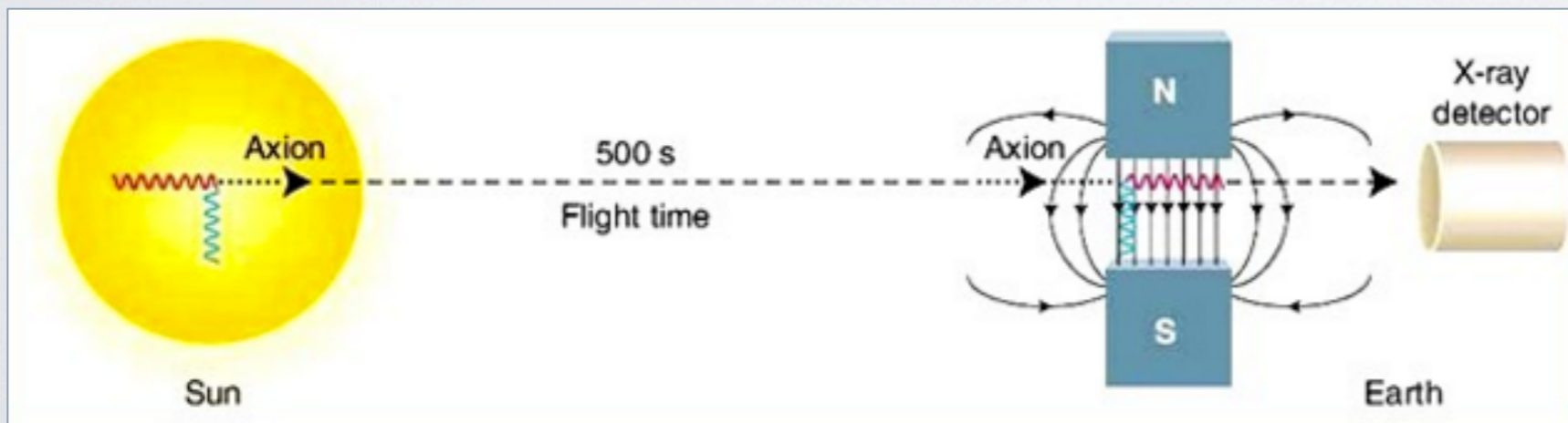


# Alternatieven?



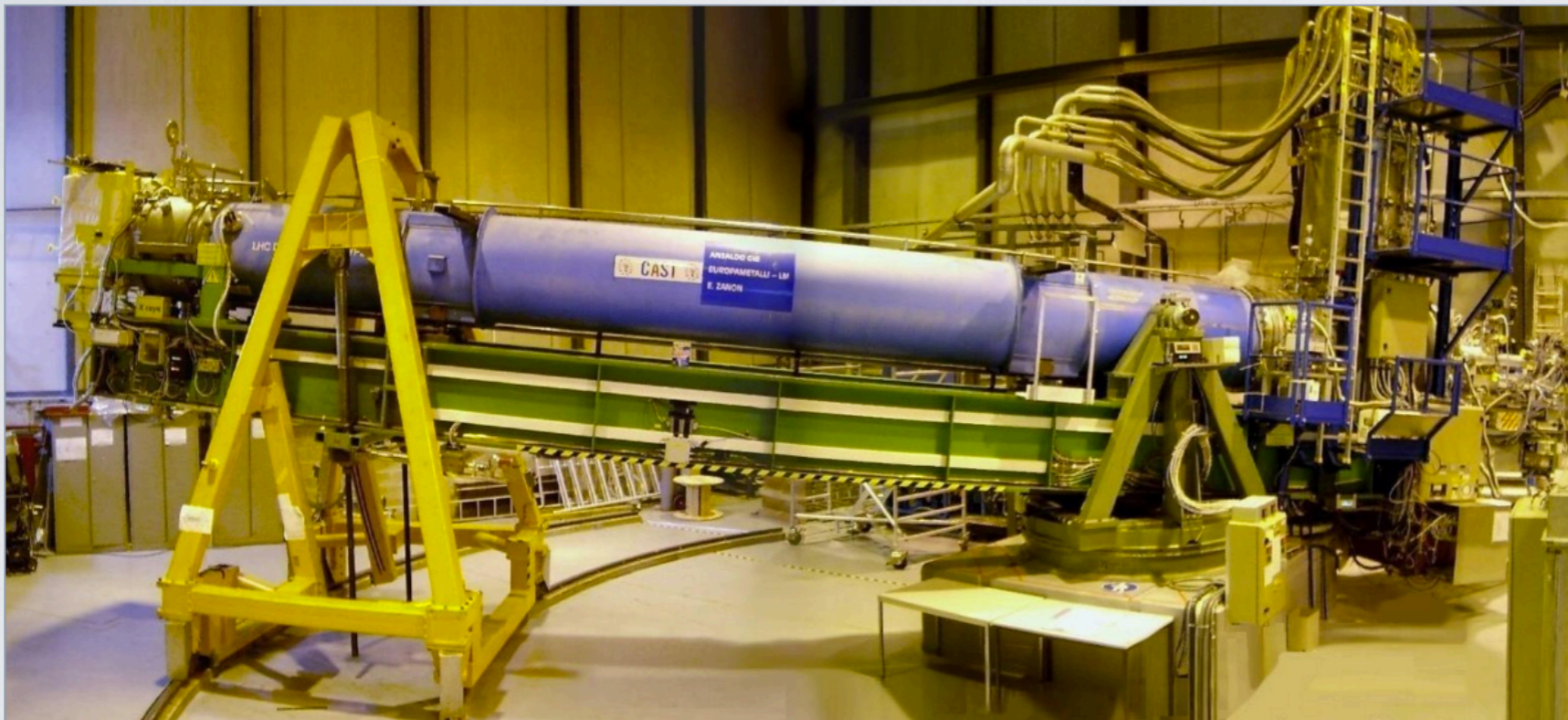
## Axionen

- Cast @ CERN
- LHC-magneet





# Alternatieven?



## Axionen

- Cast @ CERN
- LHC-magneet

## Gemodificeerde zwaartekracht?

- E. Verlinde (UvA)



There's dark energy, dark matter, normal matter, and they all interact.



# Paar slides over mezelf



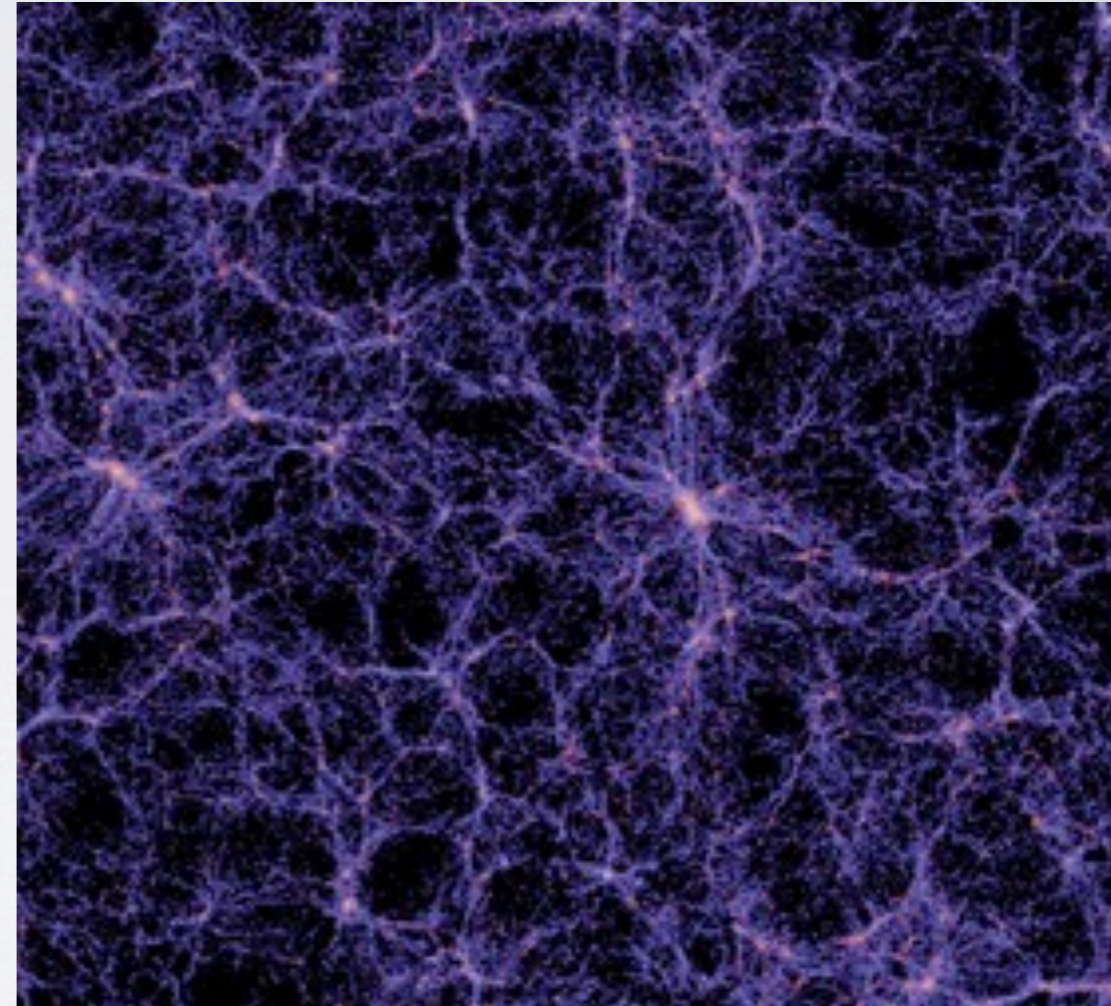
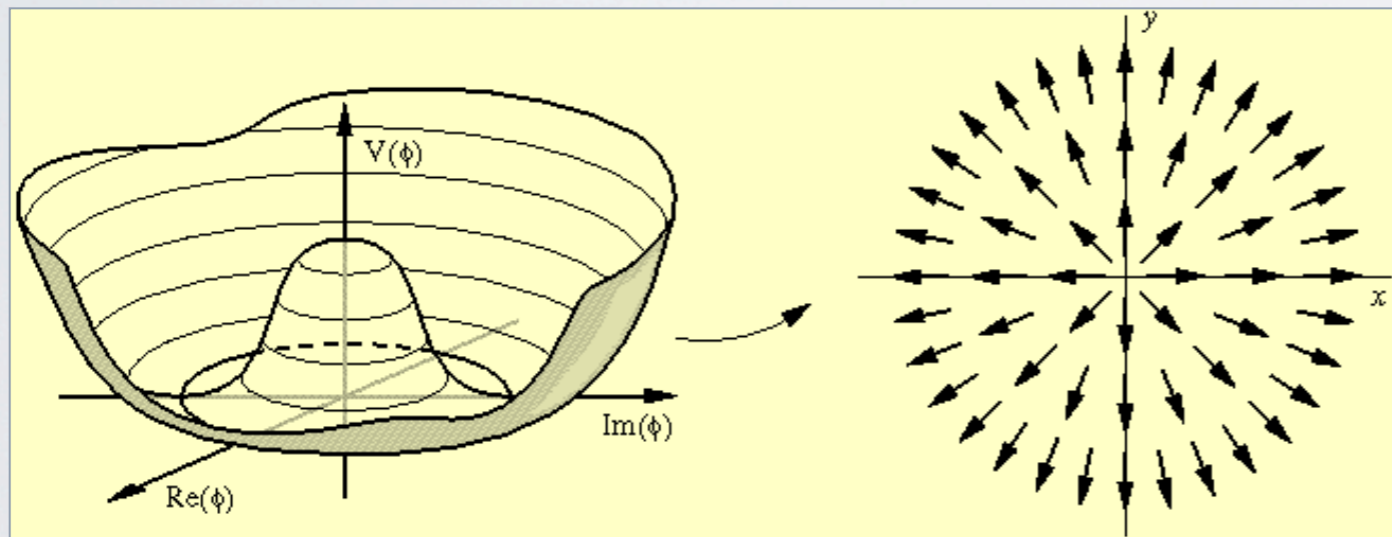
Hoe ben ik hier terechtgekomen?



# MSc: Theorie

Natuur- & sterrenkunde – Universiteit Utrecht (2000-2005)

- Master's: theoretische natuurkunde
- Scriptie: supersymmetrische kosmische strings



➤ Zelf nieuwe deeltjes proberen te vinden bij de LHC!

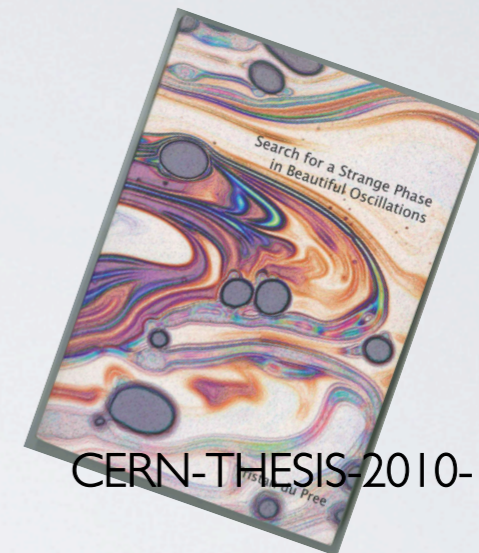


# PhD: LHCb

PhD studie op Nikhef (Amsterdam, 2006-2010)

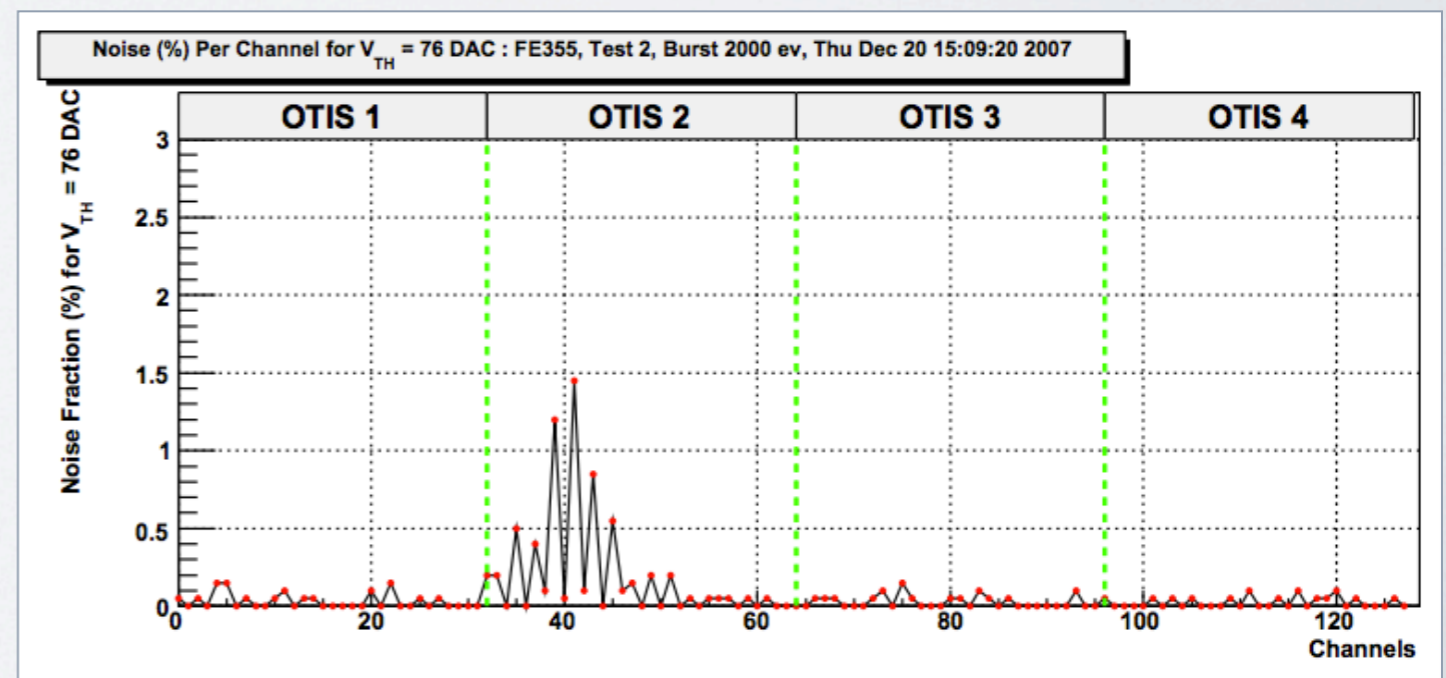
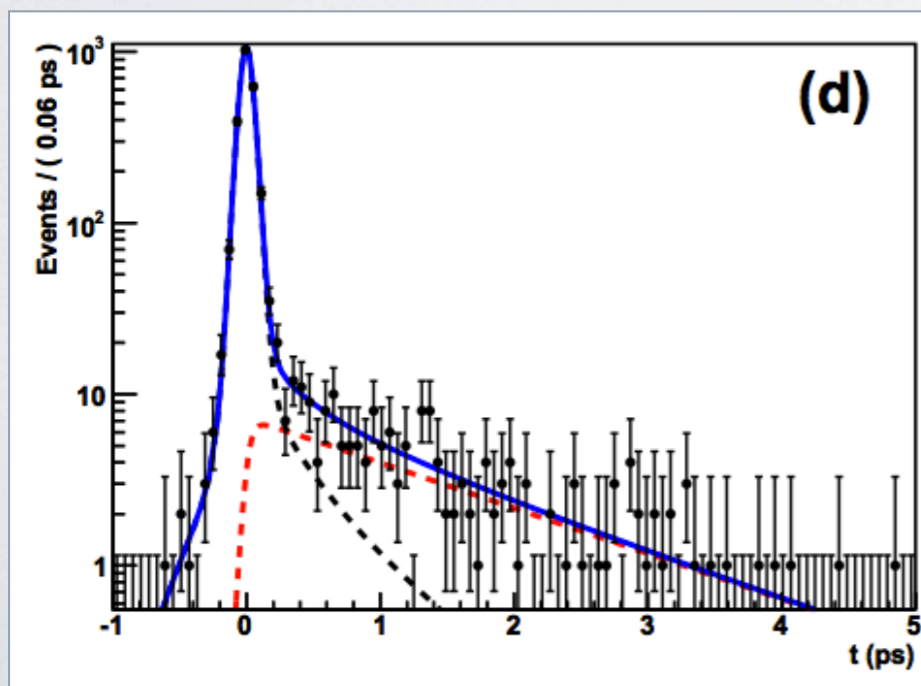
Promotie aan de Vrije Universiteit

- LHCb:  $B_s \rightarrow J/\psi (\mu^+ \mu^-) \phi (K^+ K^-)$   
Verschil tussen materie & anti-materie



CERN-THESIS-2010-124

- Simulatie, trigger, tracker

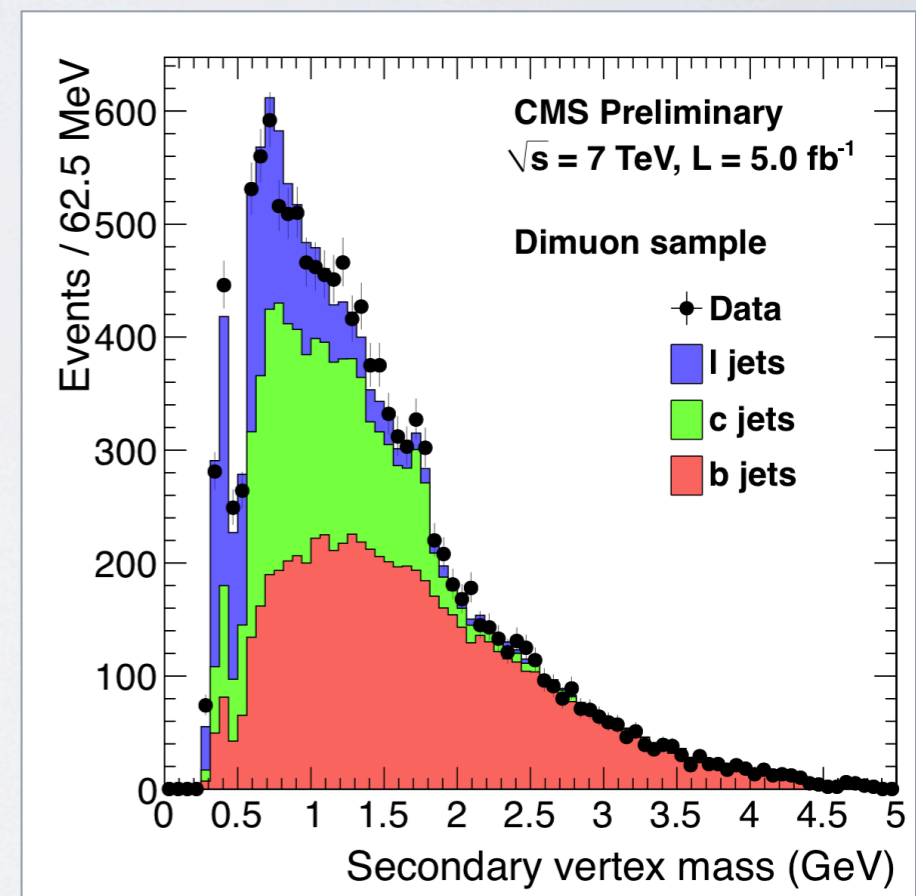
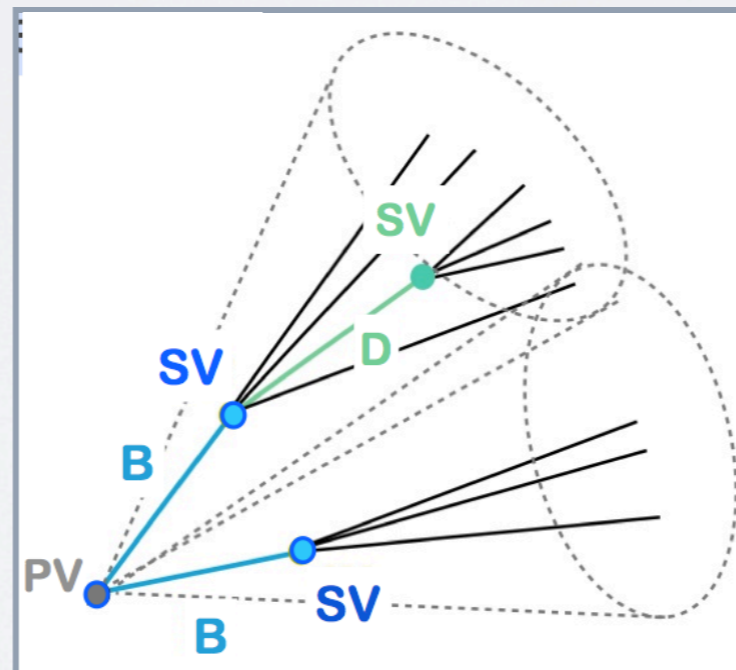
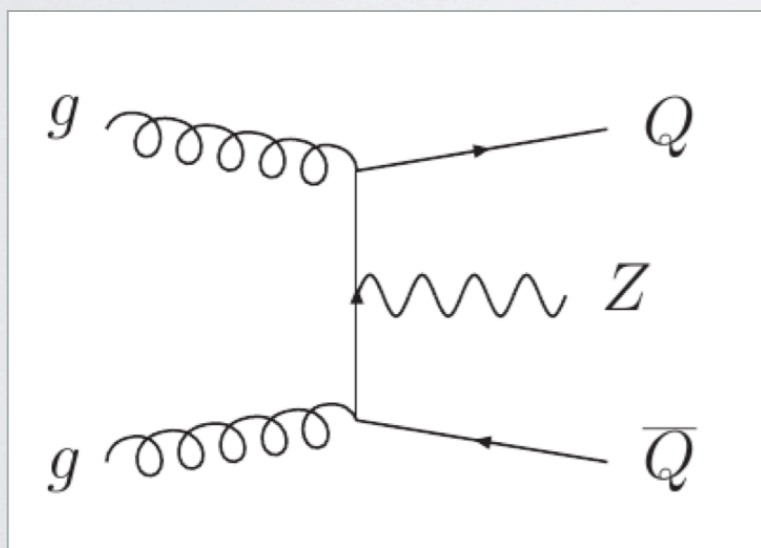




# CMS: Higgs

Postdoc aan U.C.Louvain (Louvain-la-Neuve, BE, 2010-2014)

- Higgs:  $H \rightarrow bb$   
Achtergrond:  $Z+bb$
- Nieuwe Higgs-achtige deeltjes:  
 $H \rightarrow Z(\ell)A(bb)$



- B-tagging: identificatie van jets van b quarks

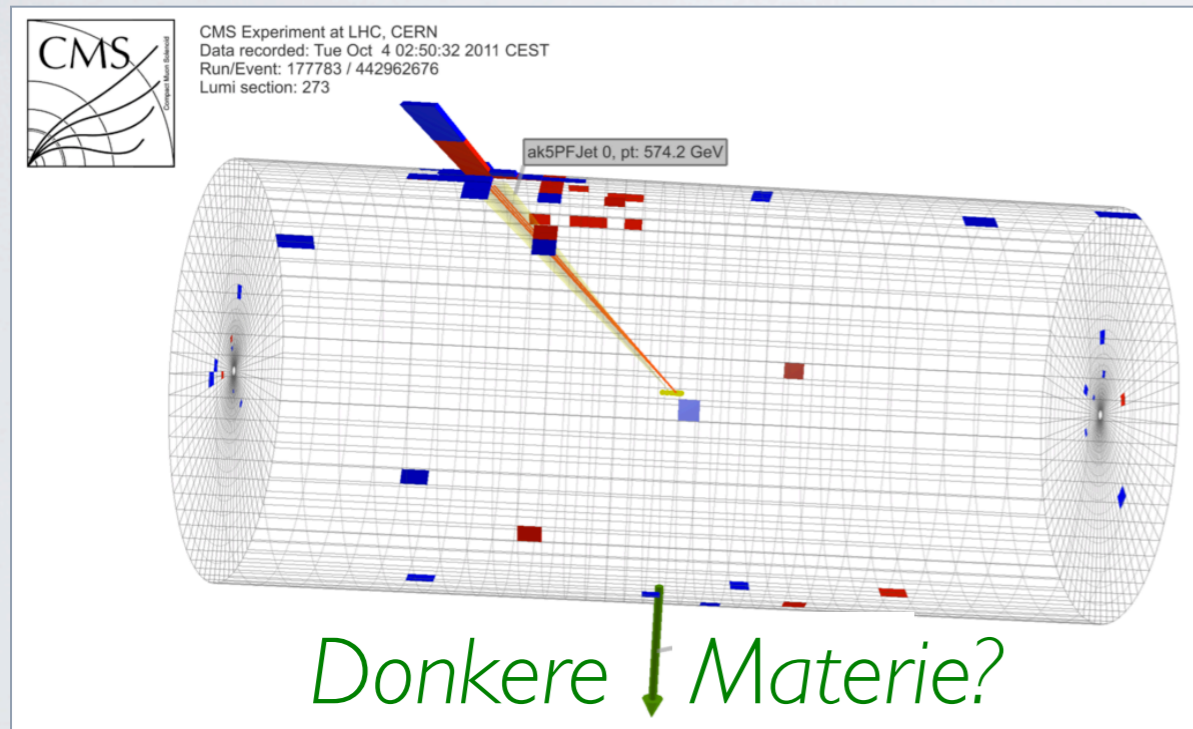


# CMS: DM

2014 – 2017: CERN research fellow

1) Donkere materie

2) CMS tracker upgrade



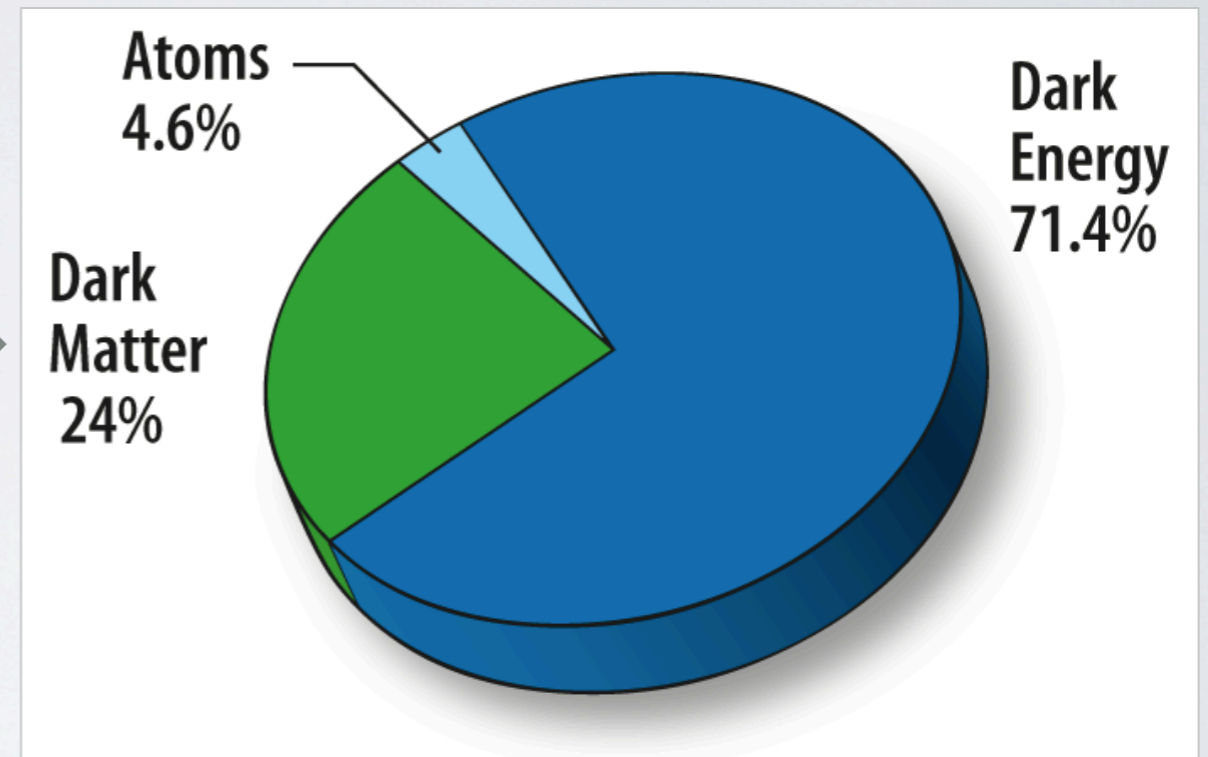
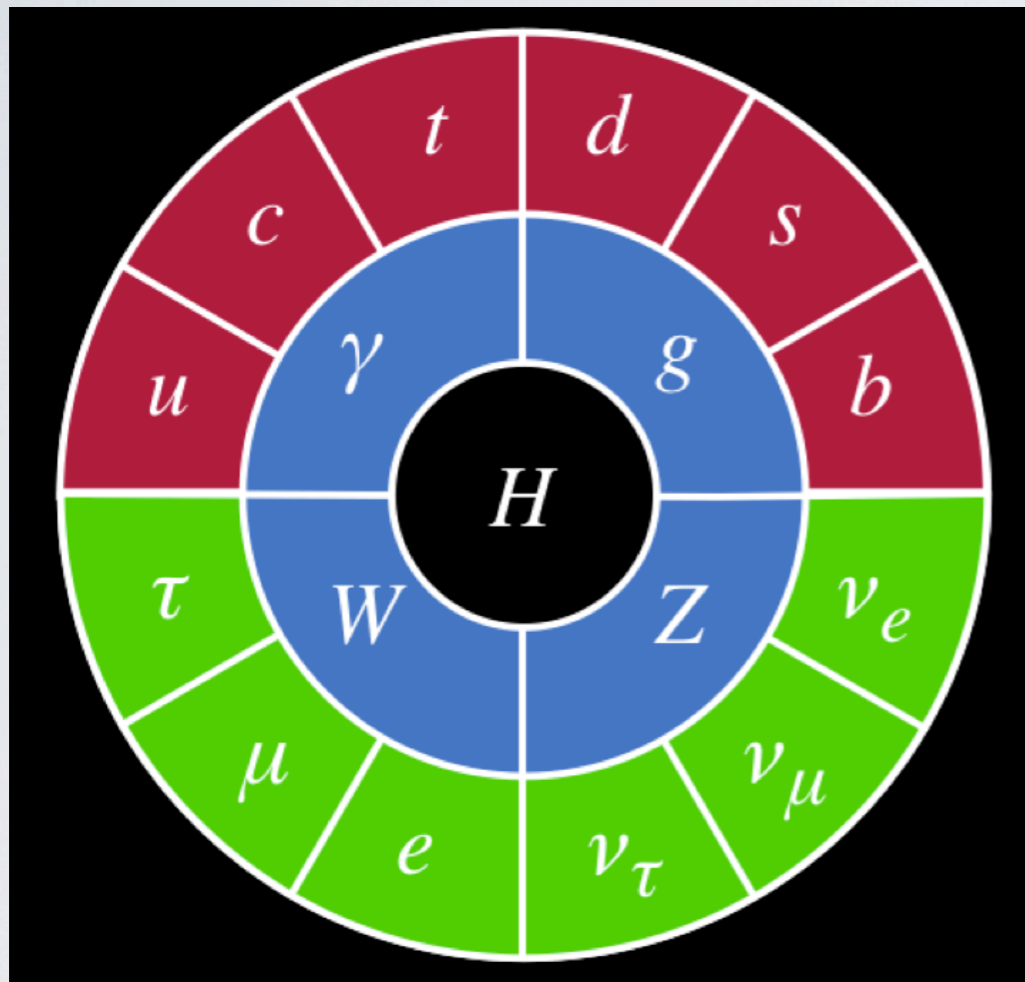




# Komende jaren



NWO VIDI onderzoeksproject



Standaard model  
Alle deeltjes die we kennen

Standaard model  
Slechts 5% van het Universum!



# Volkscrant, 7 maart 2016

20 DE VOLKSCRANT  
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 gekkenhuis, 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 onogelijk bobbeltje op de data-grafieken. De vraag is of het echt is. En wat 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 giga-elektronvolt hebben. Die energie, bijna 800 protonmassa's groot, lijkt te komen van een onbekend, 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 verwacht', 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**

winding: dit kan een eerste blik op echt nieuwe natuurkunde zijn.'

Blekman en andere natuurkundigen zijn druk doende met analyses van de gegevens die in 2015 met de LHC zijn verzameld. Tot Moriond mag er niet over de metingen worden gepraat, daar zullen ook de Atlas-fysici voor het eerst de data en analyses van CMS te zien krijgen.

Opvallend is wel dat in december bij de eerste aanwijzingen beide de-

etectoren 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 meetgegevens; 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 kwart van de data toegevoegd die eerder waren weggezet omdat de grote magnet in de detector door een koelprobleem niet aankocht. Dat moet meer statistische power geven. 'Dat kan ons piekje wat hoger maken', zegt Blekman omslachtig.

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 3 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  
100  
10  
1  
200 400 600 800 1.000 1.200 1.400 1.600  
Energie fotonen in Giga-elektronvolt  
070316 © VK. Bron: The Atlas Collection

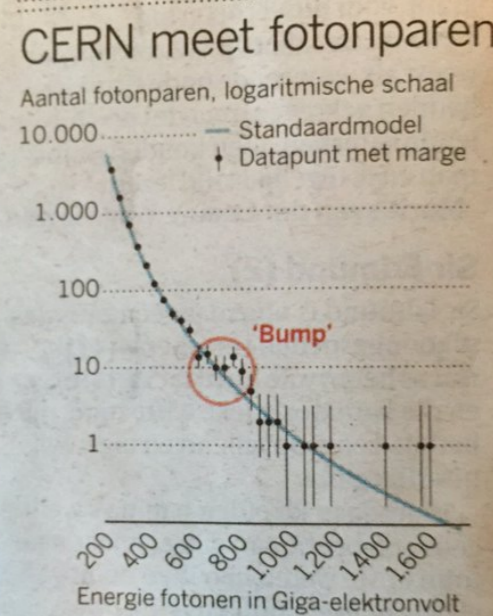
X(750), ook na Moriond niet, zeggen bronnen op CERN.

De theoretici zitten intussen niet stil. Sinds de eerste geruchten is er een lawine artikelen op de publicatiesite ArXiv verschenen. De teller staat daar nu op meer dan 250 papers. Ruwweg riep ze drie mogelijke verklaringen. Er zou, denken sommige theoretici, sprake zijn van meer dimensies dan ruimte en tijd die we gewend zijn. Een extra natuurkracht, voorbij 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 greft 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 en CMS 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 mee, realiseert ze zich. 'Ietsrecht. De LHC is gebouwd voor twee dingen: de Higgs en nieuwe fysica. De Higgs hadden we al, meer voelt 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



CERN meet fotonparen  
Aantal fotonparen, logaritmische schaal  
10.000  
1.000  
100  
10  
1  
200 400 600 800 1.000 1.200 1.400 1.600  
Energie fotonen in Giga-elektronvolt  
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 lawine artikelen op de publicatiesite ArXiv verschenen. De teller staat daar nu op meer dan 250 papers. Ruwweg riep ze drie mogelijke verklaringen. Er zou, denken sommige theoretici, sprake zijn van meer dimensies dan ruimte en tijd die we gewend zijn. Een extra natuurkracht, voorbij 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 greft 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 en CMS 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 mee, realiseert ze zich. 'Ietsrecht. De LHC is gebouwd voor twee dingen: de Higgs en nieuwe fysica. De Higgs hadden we al, meer voelt als een cadeau.'





# Om te onthouden



## Statistiek

- Cruciaal voor ontdekkingen





# Om te onthouden



## Statistiek

➤ Cruciaal voor ontdekkingen

## Programmeren

➤ Onmisbaar voor ons onderzoek





# Om te onthouden



## Statistiek

- Cruciaal voor ontdekkingen

## Programmeren

- Onmisbaar voor ons onderzoek

## Nederland

- O.a. CERN en Donkere Materie

@Tristan\_duPree

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





# Om te onthouden



## Statistiek

- Cruciaal voor ontdekkingen

## Programmeren

- Onmisbaar voor ons onderzoek

## Nederland

- O.a. CERN en Donkere Materie

## Leiden

- Bezoek ook 'ns de #muurformules!

*@Tristan\_duPree*

*www.nikhef.nl/~tdupree*





# Om te onthouden



## Statistiek

- Cruciaal voor ontdekkingen

## Programmeren

- Onmisbaar voor ons onderzoek

## Nederland

- O.a. CERN en Donkere Materie

## Leiden

- Bezoek ook 'ns de #muurformules!

## Amsterdam

- Nikhef @ Science Park – open dag 7 oktober

*@Tristan\_duPree*

*www.nikhef.nl/~tdupree*



*Bedankt voor  
jullie aandacht*



We blijven zoeken!

#DMatLHC

@tristan\_dupree

tristan.dupree@cern.ch



# Referenties & leesmateriaal

#DarkMatter @ AmsterdamSciencePark

Leesmateriaal

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



Atlas: [nikhef.nl/programma/atlas](http://nikhef.nl/programma/atlas)

Xenon IT: [nikhef.nl/programma/xenonIt](http://nikhef.nl/programma/xenonIt)

Theorie:

[nikhef.nl/programma/theoretische-fysica](http://nikhef.nl/programma/theoretische-fysica)  
& [iop.fnwi.uva.nl/grappa/](http://iop.fnwi.uva.nl/grappa/)

- 'A History of Dark Matter': [arxiv.org/abs/1605.04909](http://arxiv.org/abs/1605.04909)
- 'The Dark Matter app': <http://goo.gl/aM2HWp>
- A. Bosma: [lam.fr/anciennes-pages-d-equipe/dynamique-des-galaxies/article/homepage-of-albert-bosma](http://lam.fr/anciennes-pages-d-equipe/dynamique-des-galaxies/article/homepage-of-albert-bosma)
- Perimeter Instituut: [perimeterinstitute.ca/news/what-we-know-and-what-we-dont-about-dark-matter](http://perimeterinstitute.ca/news/what-we-know-and-what-we-dont-about-dark-matter)
- 'Starts with a Bang' (E. Siegel): [scienceblogs.com/startswithabang/?s=dark+matter](http://scienceblogs.com/startswithabang/?s=dark+matter)

TeVPA conferentie: [indico.cern.ch/event/469963/timetable/](http://indico.cern.ch/event/469963/timetable/)

*Recente conferentie-presentaties*

DD@TeVPA: [indico.cern.ch/event/469963/contributions/2277617/](http://indico.cern.ch/event/469963/contributions/2277617/)

en [indico.cern.ch/event/469963/sessions/206681/#20160912](http://indico.cern.ch/event/469963/sessions/206681/#20160912)

Axions@TeVPA: [indico.cern.ch/event/469963/contributions/2277618/](http://indico.cern.ch/event/469963/contributions/2277618/)

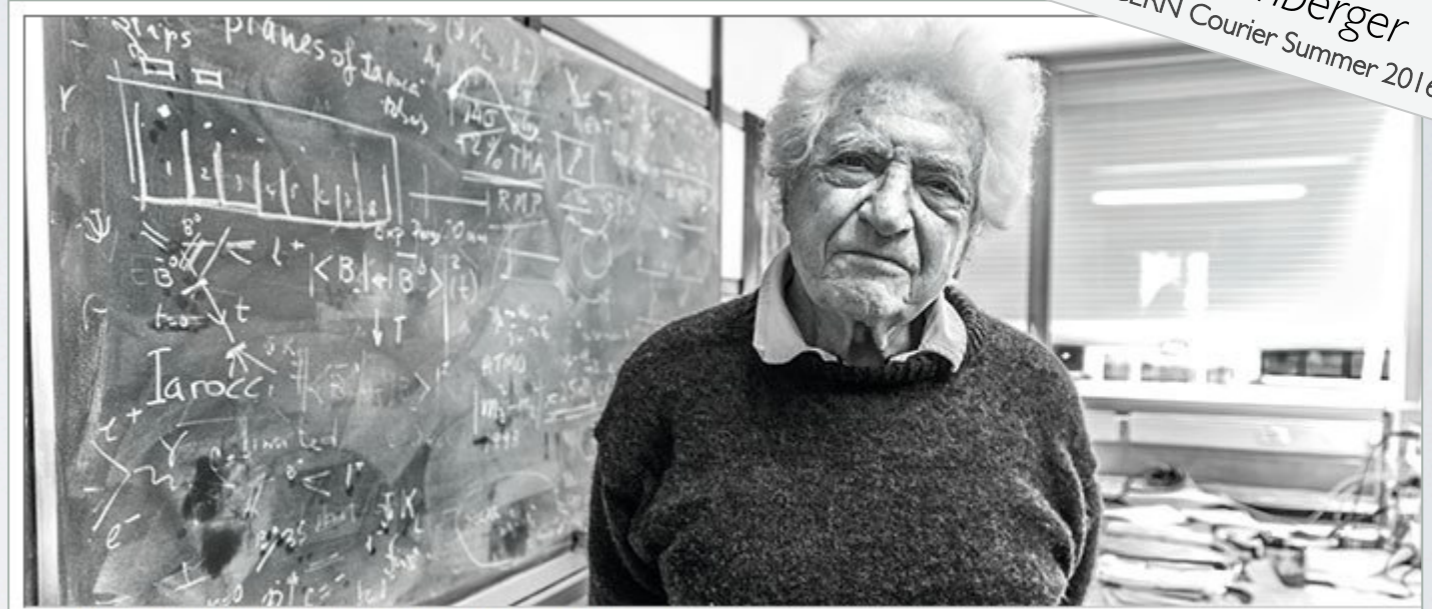
DM@LHC: [indico.ictp.it/event/7627/session/76/contribution/470/material/slides/](http://indico.ictp.it/event/7627/session/76/contribution/470/material/slides/)



# Theorie & experiment

Electron-Positron ( $e^+e^-$ ) collisions. The results of this and the other LEP experiments, he says, "dominated CERN physics, perhaps the world's, for a dozen or more years, with crucial precise measurements that confirmed the Standard Model of the unified electroweak and strong interactions".

These days, Jack still comes to CERN with the same curiosity for the field that he always had. He says he is "trying to learn astrophysics, in spite of my mental deficiencies", and thinks that the most interesting question today is dark matter. "You have a Standard Model which does not predict everything and it does not predict dark matter, but you can conceive of mechanisms for making dark matter in the Standard Model," he says. "You don't know if you really understand it, but you can imagine it. And I am not the only one who doesn't know."



Jack Steinberger photographed in his office at CERN in 2016.

J. Steinberger  
CERN Courier Summer 2016



from the sky, like Dark Energy, DM, baryogenesis and neutrino mass. The picture repeatedly suggested by the data in the last 20 years is simple and clear: take the SM, extended to include Majorana neutrinos, which can explain the smallness of active neutrino masses by the see-saw mechanism and baryogenesis through leptogenesis, plus some form of DM, as valid up to some very high energy. Indeed at present in particle physics the most crucial experimental problem is the nature of DM. In this case a vast variety of possible solutions exist from WIMPS to axions or to keV sterile neutrinos or.... Clearly

G. Altarelli  
arXiv:1407.2122