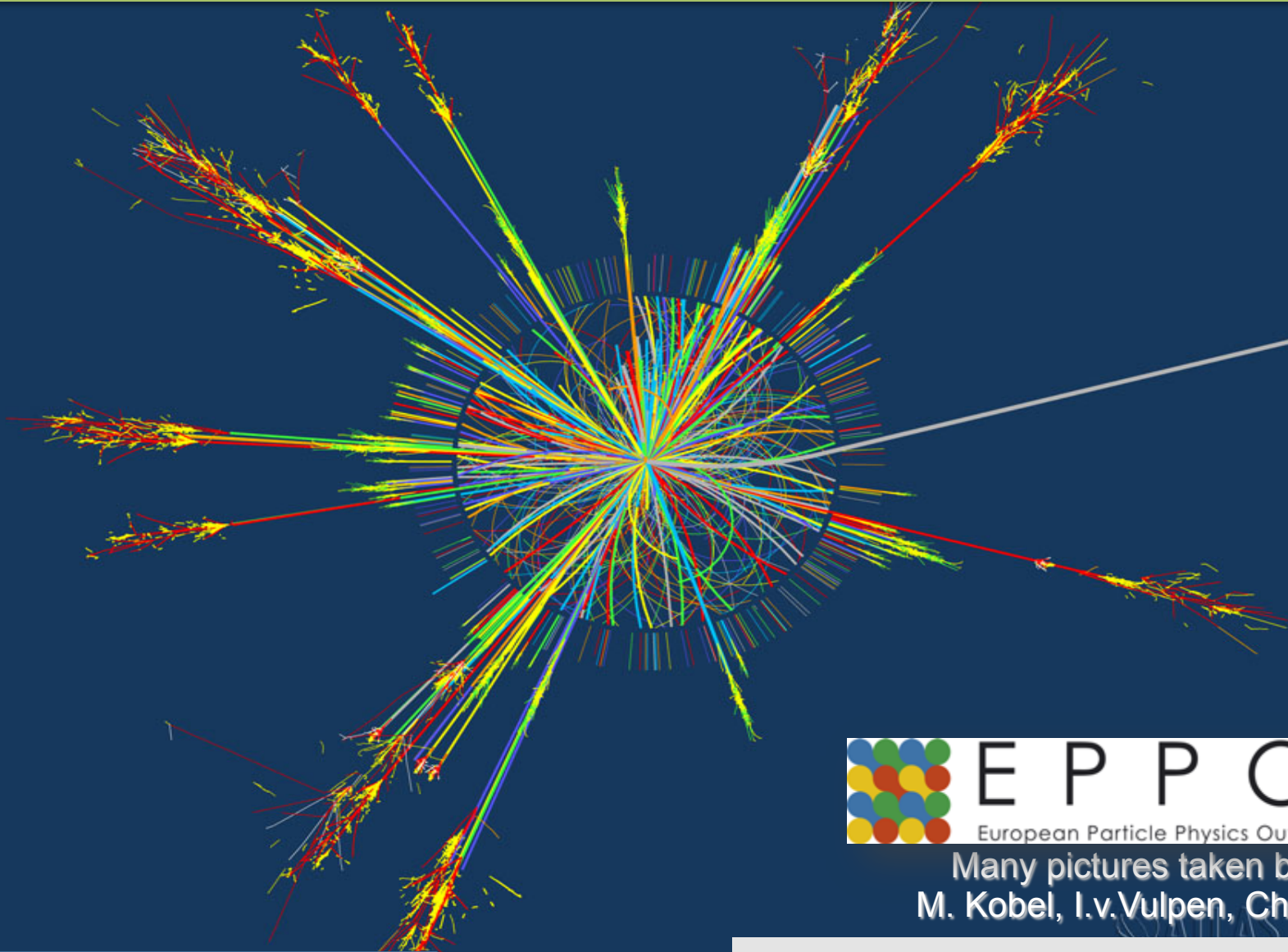


# Hands on Particle Physics Masterclasses

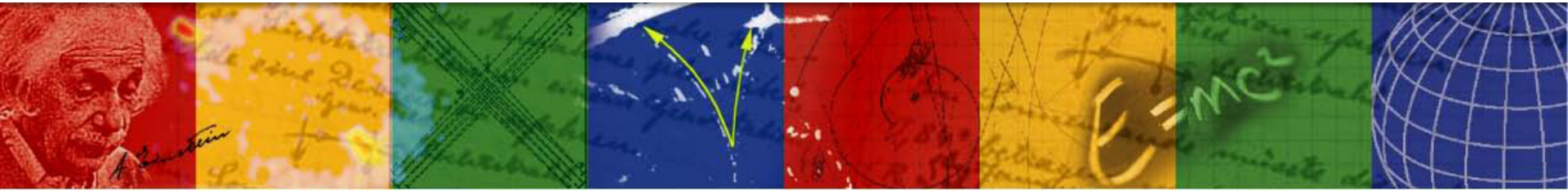


Many pictures taken by e.g.  
M. Kobel, I.v.Vulpen, Ch. Berger

simuleert ATLAS event voor de  
productie van zwarte gaten

Dr. Sascha Caron, Radboud  
Universiteit Nijmegen

# Hands on Particle Physics Masterclasses 2010



E P P O G  
European Particle Physics Outreach Group

## Verloop van de dag: Nijmegen 2013

- 10:30 Presentatie „deeltjes“ door Prof. Dr. Ronald Kleiss  
(theoretisch natuurkundige , Radboud Universiteit)**
- 11:15 Presentatie „Experimentele Deeltjesfysica en het experiment  
van vandaag“ door Dr. Sascha Caron  
(experimenteel natuurkundige Radboud Universiteit)**
- 12:00 lunch**
- 13:00 praatje “Meetings met Hypatia” door Sascha Caron**
- 13:30 Practicum “Meet deeltjes in echte LHC data”**
- 16:15 Pause**
- 16:30 International video conference (Frankrijk, Polen, Zwitserland)**

# Atoom

Afmeting:  $10^{-10}$  m

**400 v Chr.:**

**Demokrit vermoed**

dat de wereld

Uit niet meer deelbare

(atomos)

atomen

opgebouwd is

**1906:**

**Rutherford**

**vind:**

Atom bestaat uit

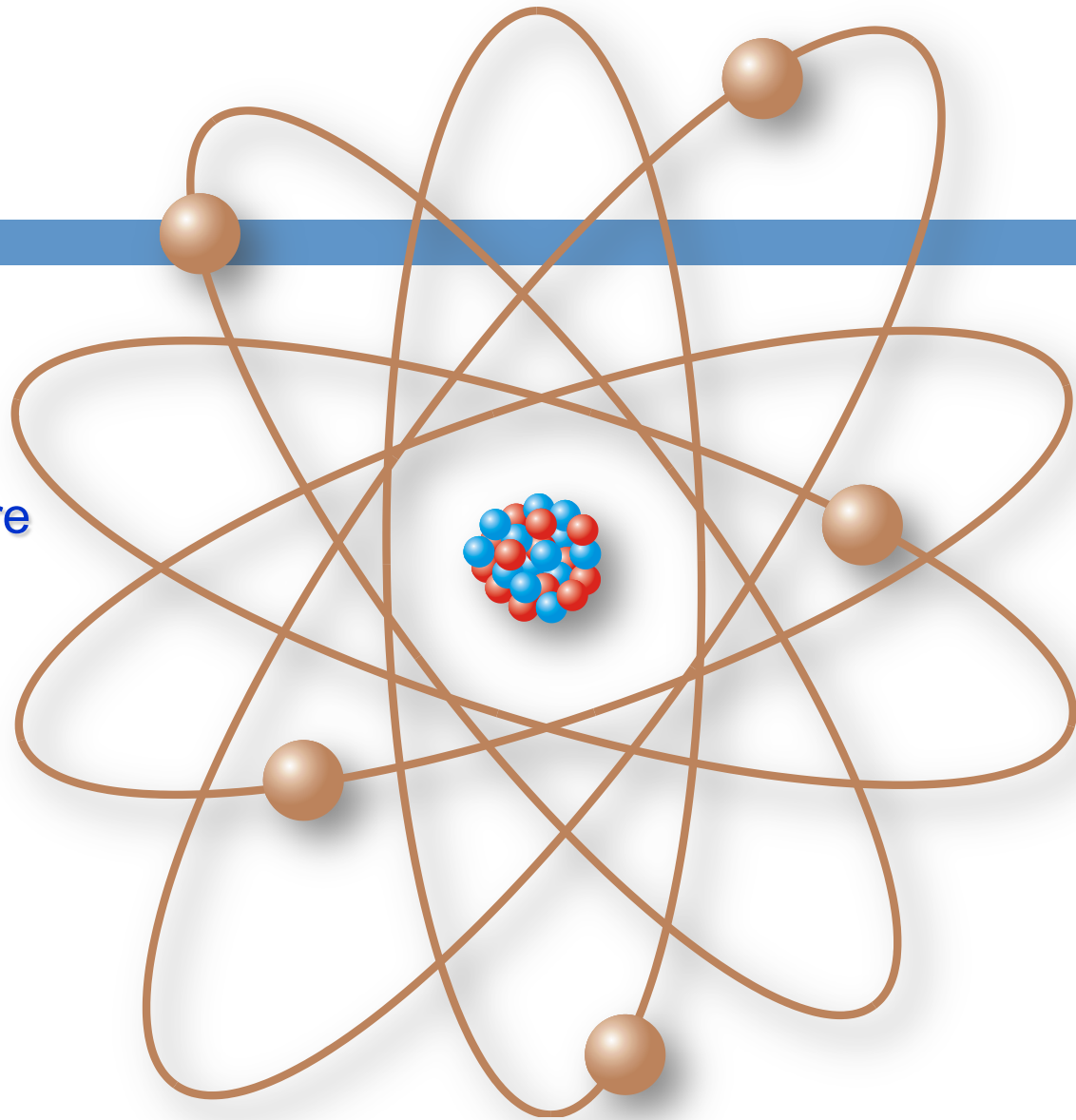
negatief geladen

elektronen om

een positief

geladen

atoomkern



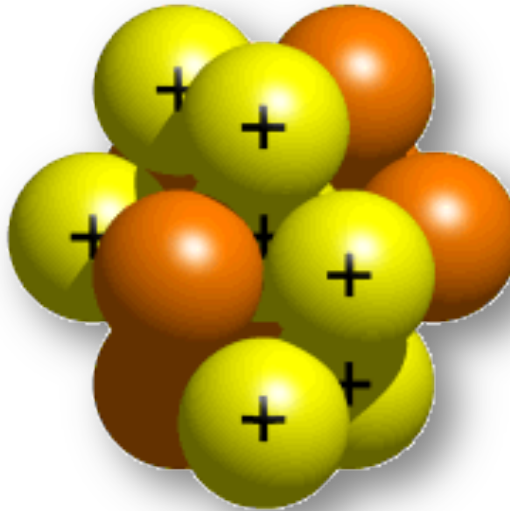
Kracht tussen atoomkern en elektronen is elektromagnetisch

# Atoomkern

Afmeting:  $10^{-15}$  m

Positief geladen protonen

Niet geladen Neutronen



Vraag aan jullie:

Waarom stuiten de positief geladen deeltjes elkaar niet af?



# Wisselwerkingen en Krachten

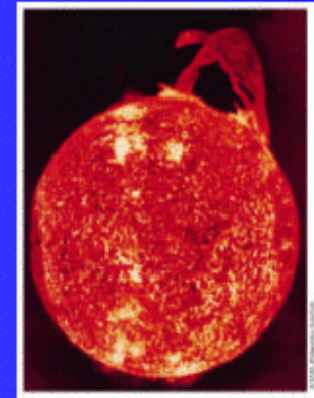


Gravitatie

Elektromagnetische  
Kracht

Zwakke Kracht

Sterke Kracht





Om nieuwe deeltjes of krachten te ontdekken met een  
Grotere massa hebben wij versnellers nodig met een  
Heel grootte energie (omdat  $E=mc^2$ )  
→ Hooge Energie Fysica

Deeltjesfysica is een **fundamentele Wetenschap**  
Doel is niet “geld maken ermee”, maar kennis  
Spin offs: bijv. World Wide Web

# Hoe zwaar is een elementair deeltje ?

7

- **Energie:**

**1 ElektronVolt = 1eV**

**1 KiloElektronVolt = 1 keV = 1000 eV**

**1 MegaElektronVolt = 1 MeV = 1.000.000 eV**

**1 GigaElektronVolt = 1 GeV = 1.000.000.000 eV**

- **Een Proton weegt ongeveer 1 GeV, een elektron is weegt ongeveer 1800 keer minder, een Z0 deeltje ongeveer 91 keer meer!**
- **1 GeV: „veel“ voor een deeltje, maar macroscopisch heel weinig: een zaklantaarn (1,6 Watt) zou 0,000.000.0001 seconden schijnen**

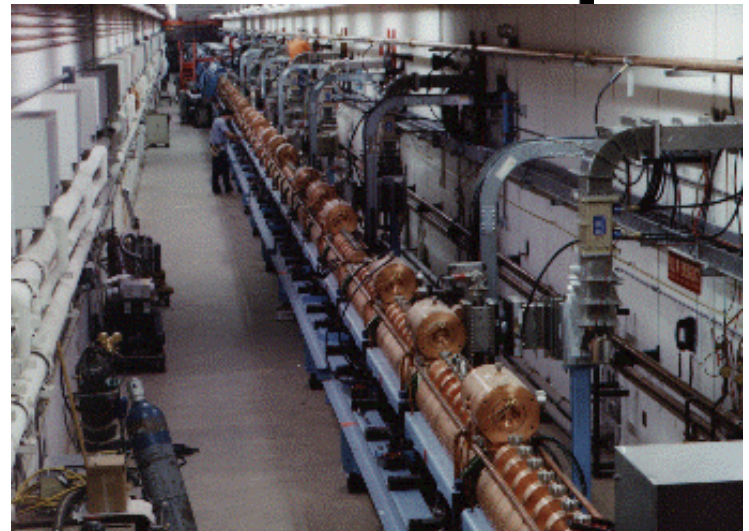
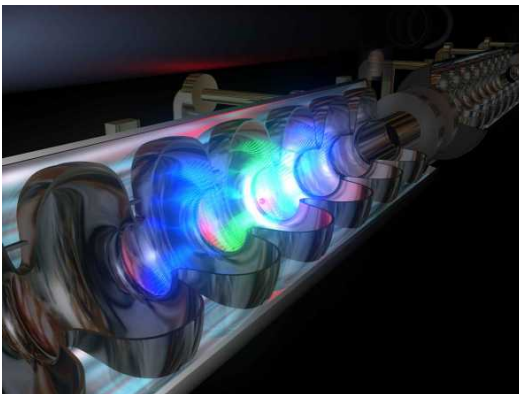
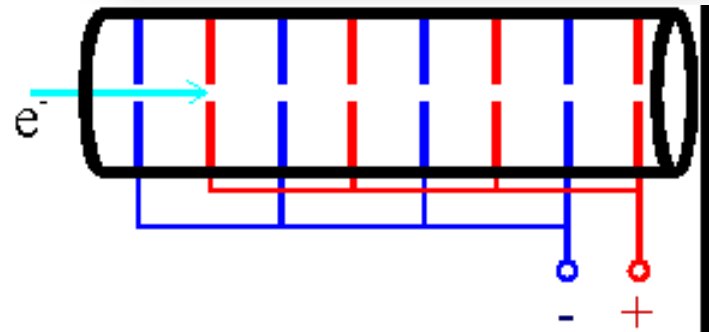
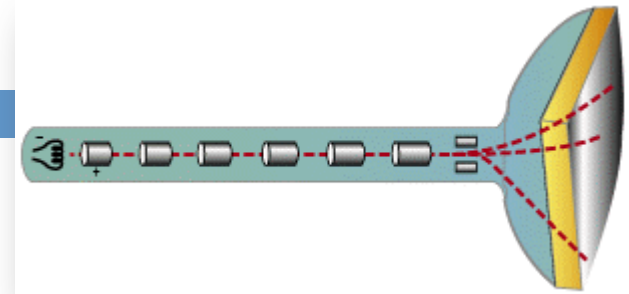




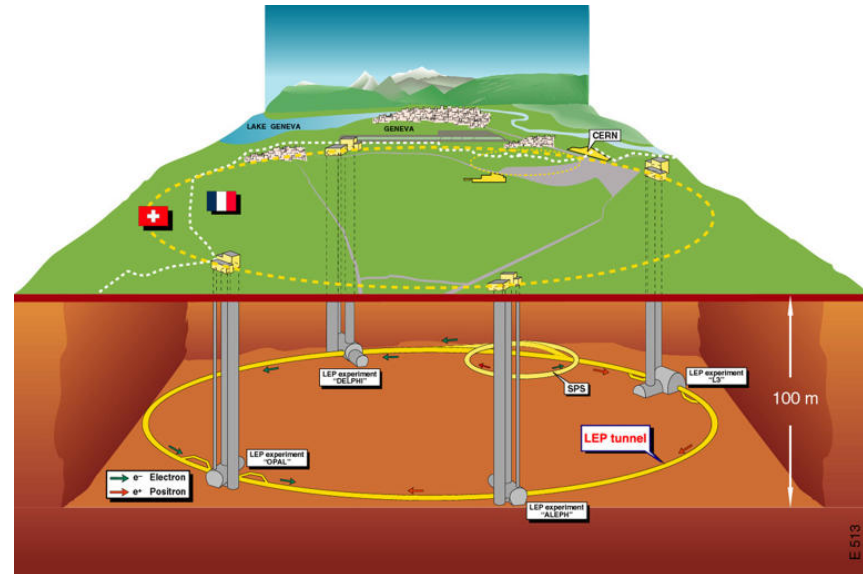
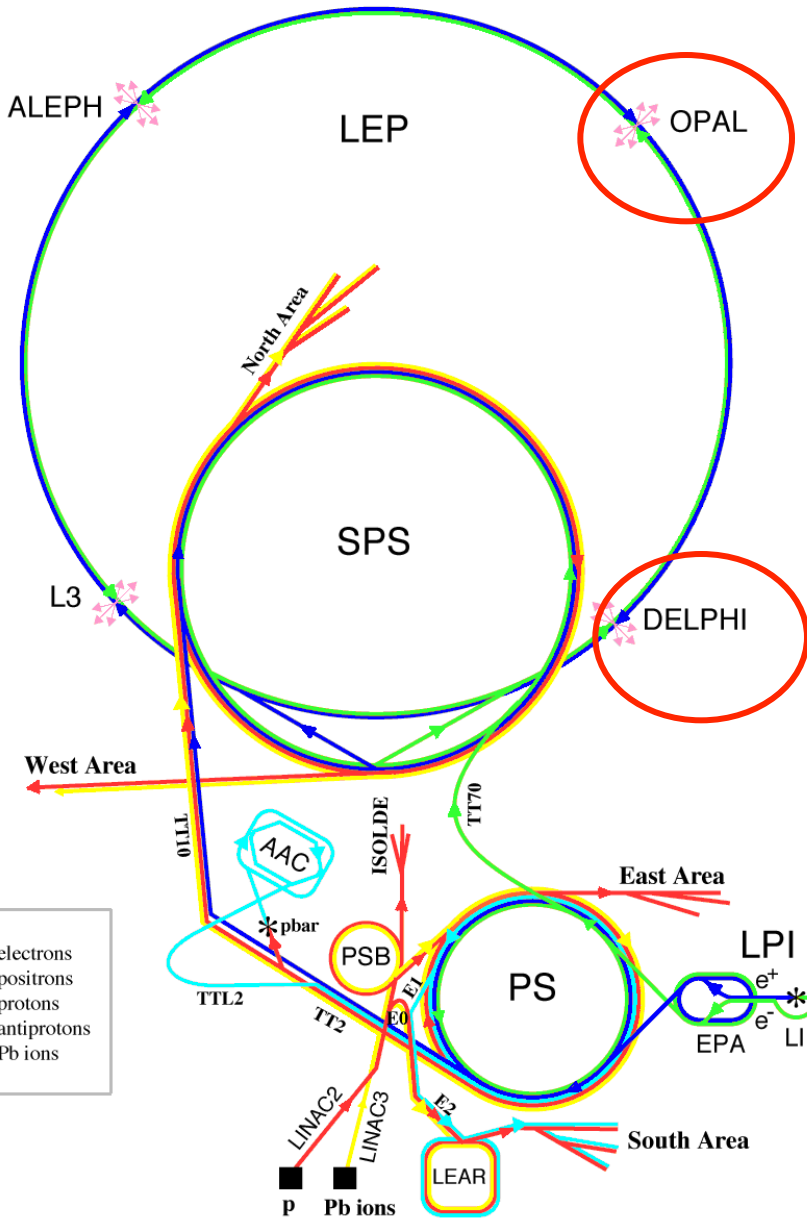
# De Microscopen van de deeltjesfysica: Versnellers

8

- Hebben jullie ook thuis gehad!
- Hoe werkt de versnelling ?
- Linearversnellers:
  - Fermilab, Chicago (loopt)
  - Japan (misschien 2020?)



# Tot 2000: $e^-e^+$ vernietiging bij CERN met LEP



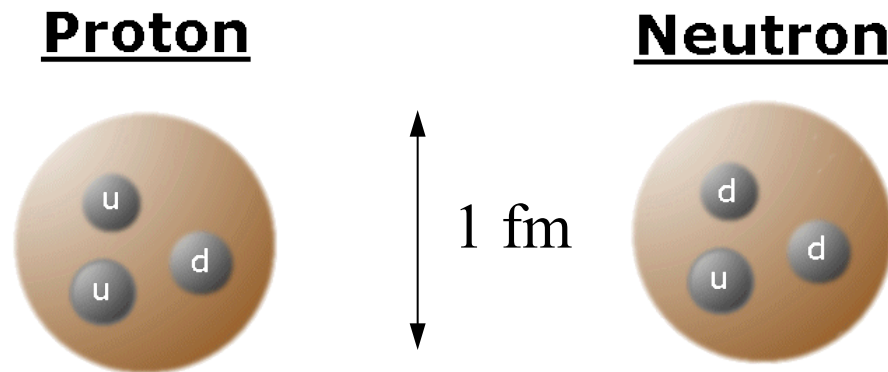


# Substructuur van de Materie

10

1970: Proton en Neutron zijn niet elementair, maar in elkaar gezet uit 3 Quarks en vele Gluonen

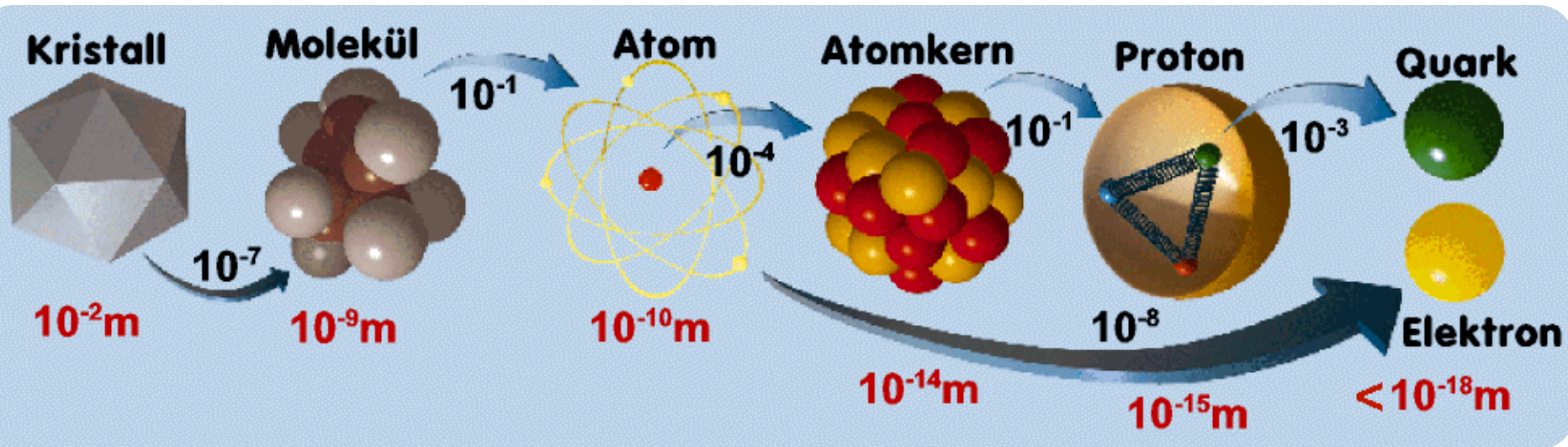
Bewijs door beschieting van protonen met elektronen



**Hoeveel deeltjes hebben wij nog gevonden? Is er een structuur?**

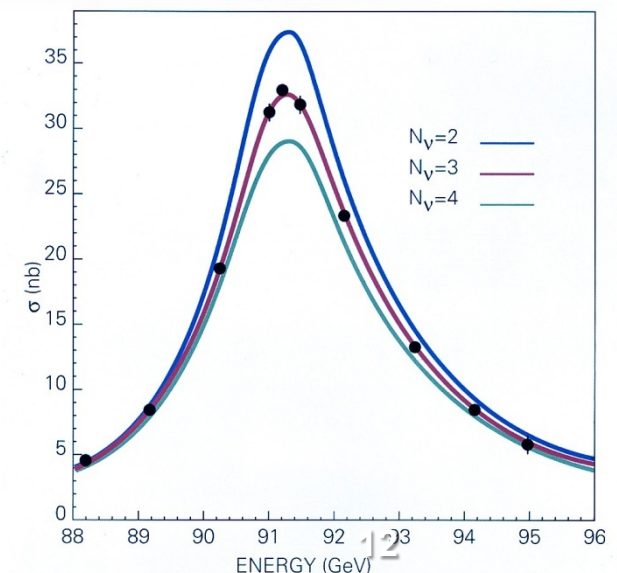
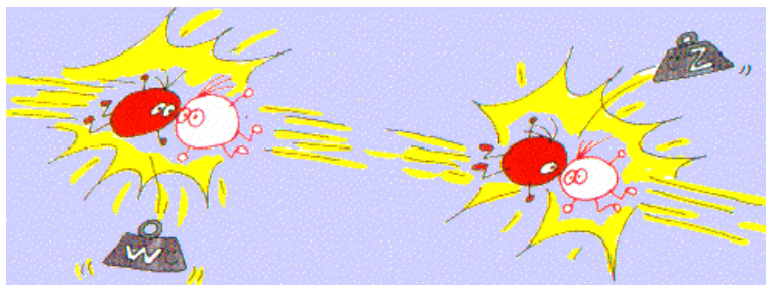
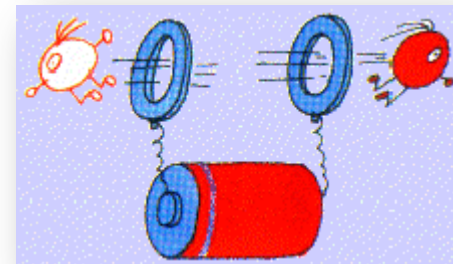
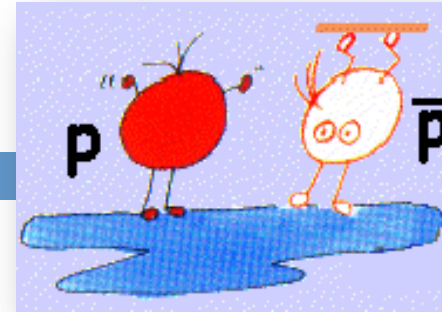
# Naar de bouwstenen van de materie

11



# Antimaterie

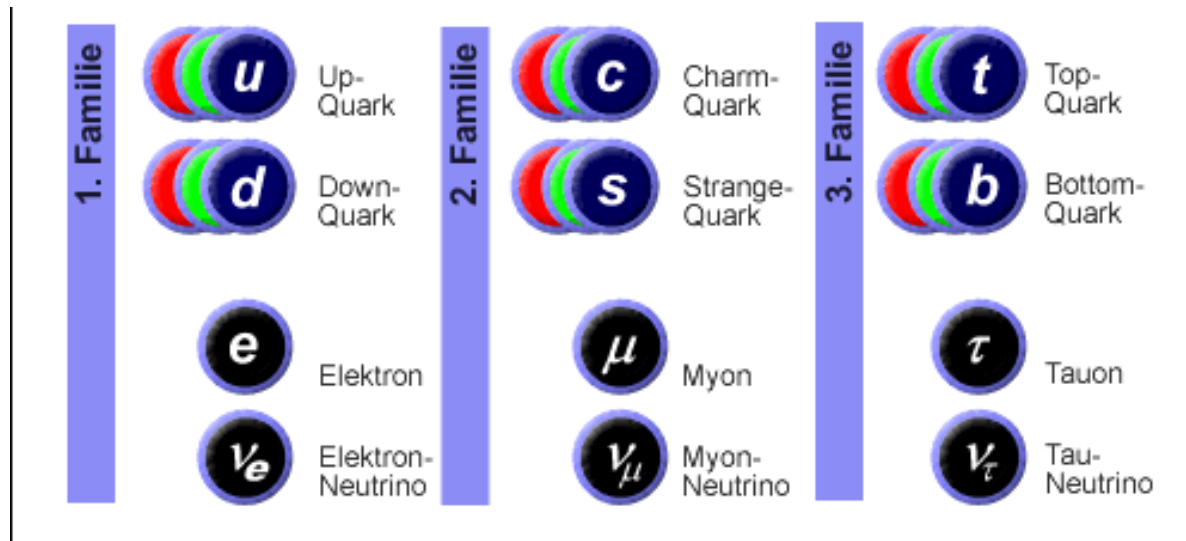
- Voor elk deeltje bestaat een antideeltje met een ander ladingsvoorteken en een “antideeltje eigenschap”
- Anders zijn alle eigenschappen (massa, levensduur) het zelfde
- Uit krachtdeeltjes kunnen een paar van Materie- en antimateriedeeltjes ontstaan
- Ook kunnen materie- en antimateriedeeltjes weer een krachtdeeltje maken bijvoorbeeld  $e^+ + e^- \rightarrow Z^0$ , dit gaat heel goed als  $2E_e = m_{Z^0}c^2$





# Het Standaard Model

## 1. Materiedeeltjes (Fermionen)



## 2. Krachtdeeltjes (Bosonen)

Sterke Kracht:

Elektro-magnetisch-zwakke Kracht:

Gravitatie:

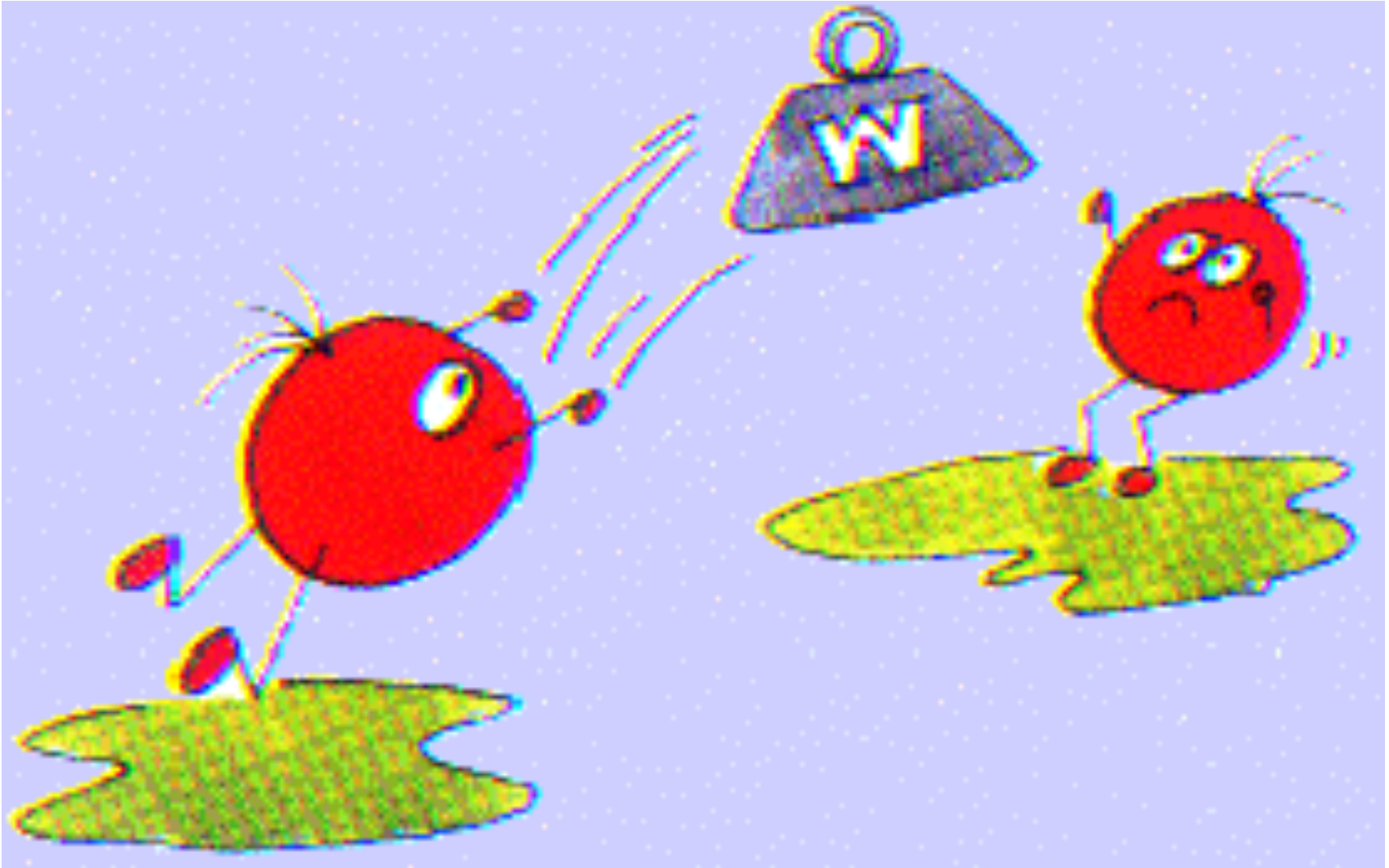
8 gluonen (g)

$W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$ , Photon

Graviton?

# Krachten en deeltjes

14



# De elektromagnetische Kracht

15

- *Lading*: elektrische Lading  $Q$
- *Soorten*: 1 soort van lading : „getal“, positief of negatief
- *Krachtdeeltje*: het foton
- *Eigenschappen*: elektrisch neutraal:  $Q=0$   
massa :  $m=0$
- |         |      |      |          |          |
|---------|------|------|----------|----------|
| Deeltje | Up   | Down | Neutrino | Elektron |
| Lading  | +2/3 | -1/3 | 0        | -1       |
- Extras:
  - ▣ onbeperkte reikwijdte
  - ▣ Macroscopisch waarneembaar
  - ▣ Magnetische velden buigen elektrisch geladen deeltjes.  
Hoe minder hoe hoger de energie van de deeltjes!

# De sterke Kracht

16

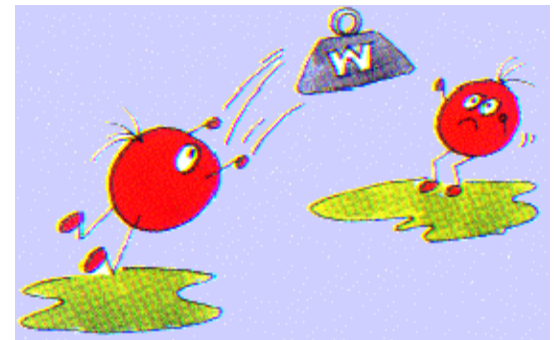
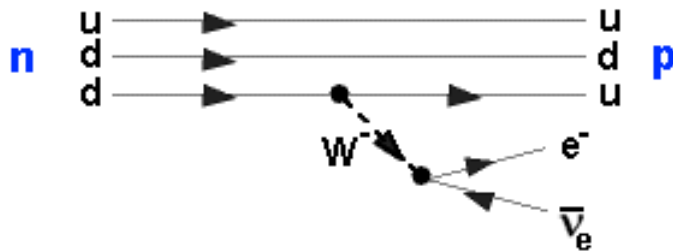
- *Lading*: sterke Lading
- *Soorten*: 3 soorten van lading: „kleur“, plus Antikleur
- *Krachtdeeltjes*: 8 Gluonen
- *Eigenschappen*: dragen zelf kleur en anti-kleur  
massaloos :  $m=0$
- |         |         |         |          |          |
|---------|---------|---------|----------|----------|
| Deeltje | Up      | Down    | Neutrino | Elektron |
| Lading  | r, b, g | r, b, g | -        | -        |
- Extra:
  - ▣ Beperkte reikwijdte ca 1 fm
  - ▣ houd p, n en atoomkern aan elkaar



# De zwakke Kracht

17

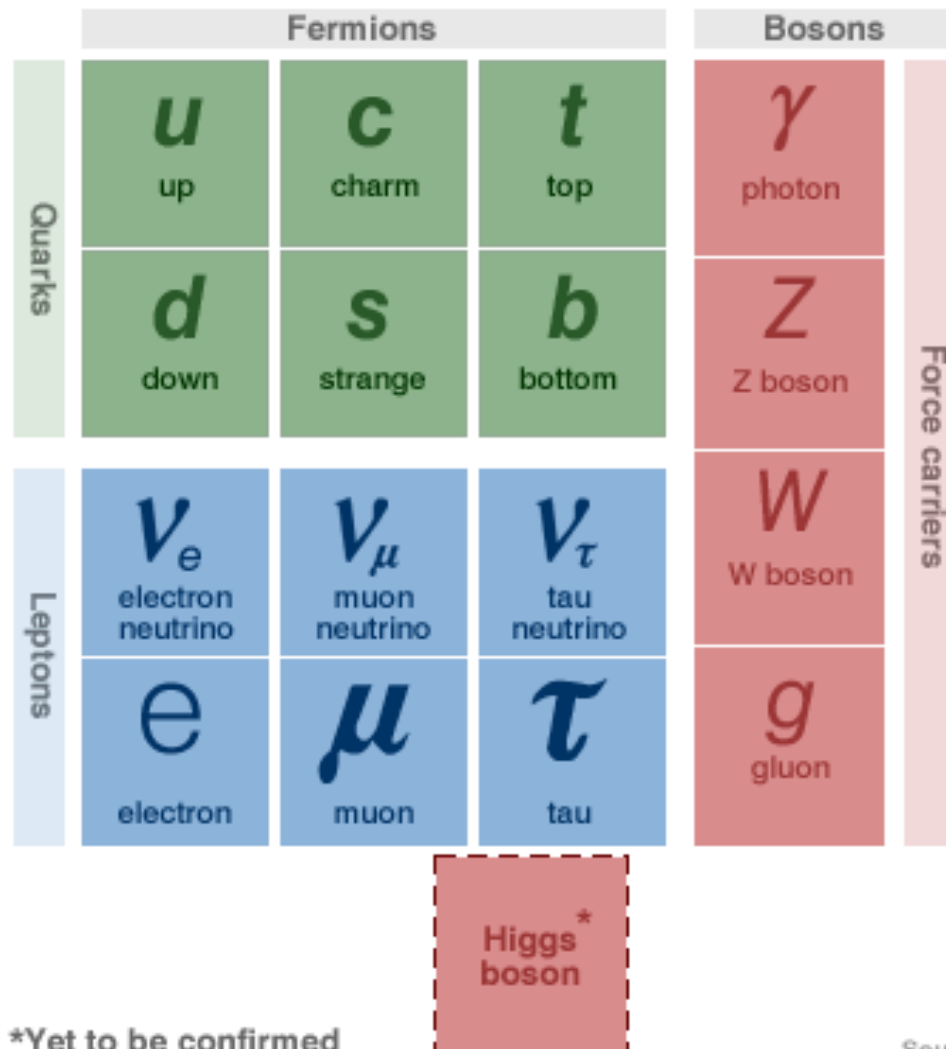
- *Lading*: zwakke lading
- *Soorten* : complicated (swakke hyperlading en isospin)
- *Krachtdeeltjes*:  $W^-$ ,  $Z^0$ ,  $W^+$
- *Eigenschappen*: dragen zelf zwakke lading:  
Massa :  $m = 80 - 90 \text{ GeV}$
- Extras:
  - ▣ Beperkte reikwijdte ca  $0.0025 \text{ fm}$
  - ▣ Radioactieve „verfall“ van het neutron



# The Standard Model

18

## THE STANDARD MODEL



Source: AAAS

# The Higgs idea

*suggested in 1962 by Anderson and developed into a full model in 1964 independently by Englert and Brout; by Peter Higgs; and by G. Guralnik, C. R.*

*Hagen, and T. Kibble*

19

Remember:

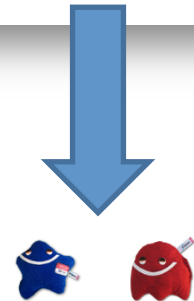
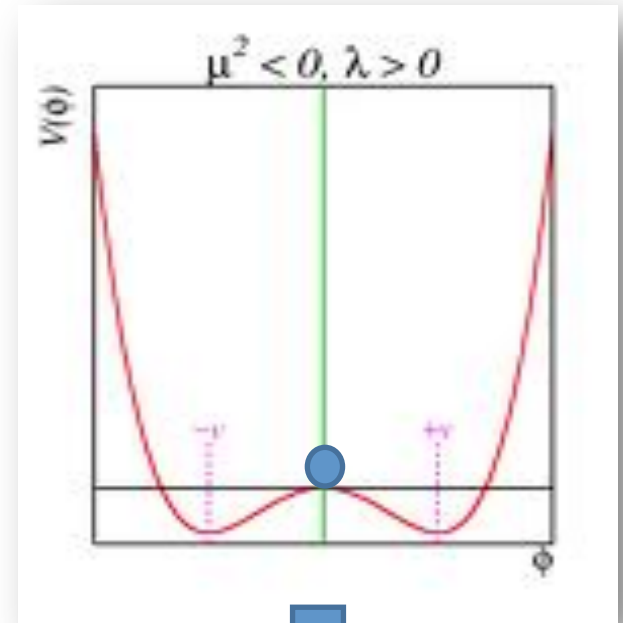
- Quantum field theory describes **the forces of nature via the exchange of particles**
- These particles are the **photon, the W and Z** for the electromagnetic-weak force and **gluons** for the strong force
- The particles W and Z are **massive**, the photon and the gluon are **massless ( $m=0$ )**

**Problem** with massive W and Z → Including a simple mass term in theory violate (local) gauge invariance: **yielding infinities**  
(higgs theory renormalizable: 't Hooft, Veltman)

# Higgs and the 4 forces of nature!

20

- **Higgs mechanism** explains electroweak symmetry breaking, i.e. **why W and Z are massive and the photon is not**
- Idea: A scalar field is added with a non-zero ground state
- After nature has chosen for a certain ground state (“electroweak symmetry breaking”) this field results in one observable Higgs particle and massive W and Z

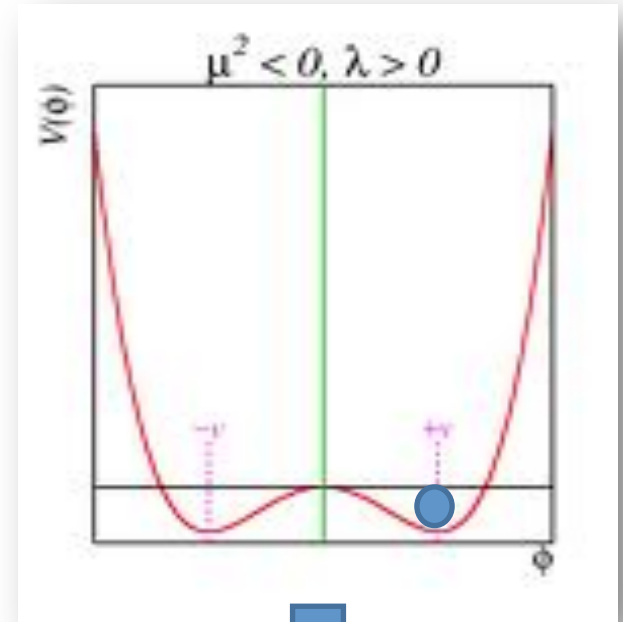




# Higgs and the 4 forces of nature!

21

- ❑ **Higgs mechanism** explains electroweak symmetry breaking, i.e. **why W and Z are massive and the photon is not**
- ❑ Idea: A scalar field is added with a non-zero ground state
- ❑ After nature has chosen for a certain ground state (“electroweak symmetry breaking”) this field results in one observable Higgs particle and massive W and Z



# Higgs and the forces of nature

22

- Message 1: The Higgs boson explains **the masses of the W and Z bosons, i.e. the fact that the weak force is so different from the electromagnetic force**
- ***What can be more fundamental than this ?***

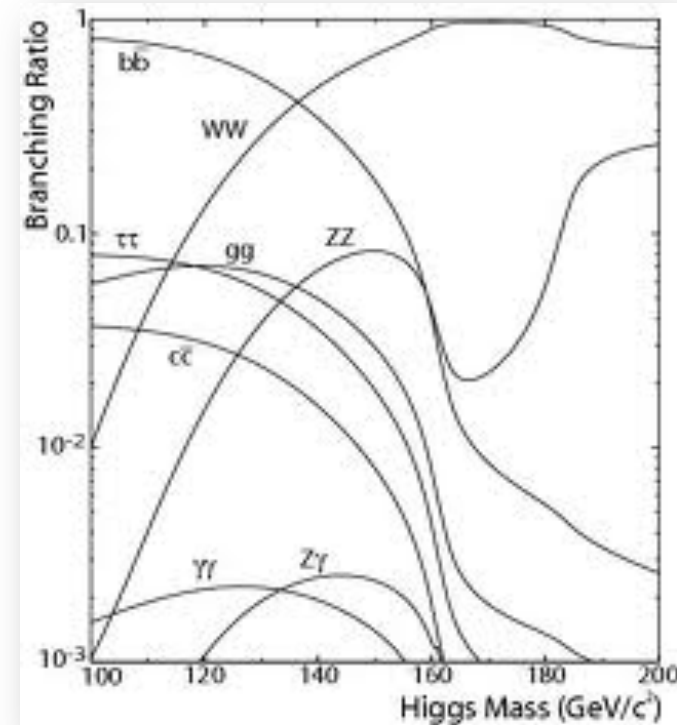
*Remember: There is a coupling of the Higgs to W and Z bosons, This means the Higgs can decay to pairs of W and pairs of Z bosons*

*➔ These are main search channels of ATLAS and CMS*

# Higgs and the mass of all particles!

23

- The Higgs field may allow for mass terms for the fermions (quarks and leptons) as well.
- Maybe the fermions get their mass by their coupling to the Higgs field
- If this is the case, the Higgs should couple stronger to heavier particles, see Higgs decays



**Message 2: The Higgs would give masses to all quarks and leptons !**

***What can be more fundamental than this ?***

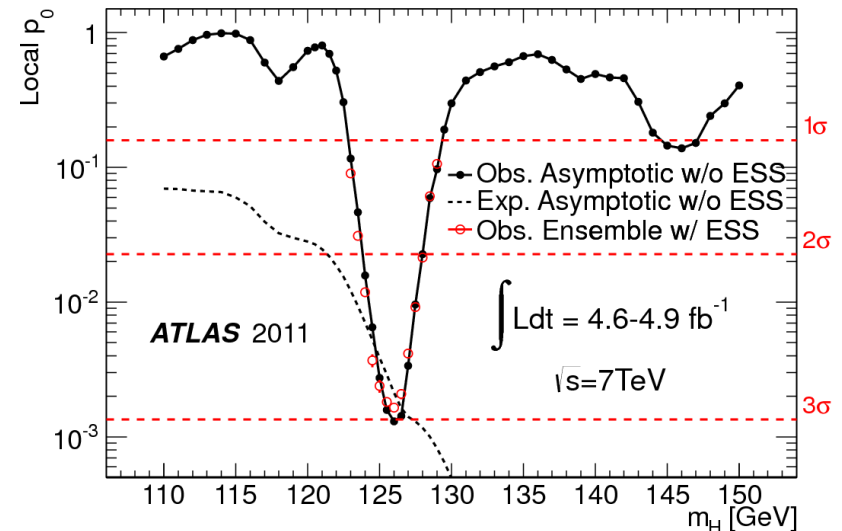
# Higgs statistics basics

24

- P-value: Probability to find outcome if there is no Higgs ! **Small p-value → Higgs more likely**
- Convention: p-value should be very small (below  $2.5 \times 10^{-7}$ , i.e. 5 sigma) for discovery

## Higgs discovery requires:

- 5 sigma in 2 experiments (local p-value)
  - Same mass
- Channels consistent with SM expectation



# The search for the Higgs boson in the Netherlands

25

*We are searching the Higgs with data of two colliders and 4 experiments*

**LHC** (CERN, Geneva):

**ATLAS** and **CMS** experiment



Two Dutch universities are involved (+ FOM institute **NIKHEF**):

- **University of Amsterdam** (D0 and ATLAS)

- **Radboud University Nijmegen** (D0 and ATLAS): *Nicolo de Groot, Frank Filthaut, Adriaan Koenig, Sijbrand de Jong, S.C. and 10 PhD students*  
*contributions to Higgs  $\rightarrow$  ZZ, Higgs  $\rightarrow$  WW (F.F. a main author!), b-tagging, muon chambers, Searches for physics beyond the Standard Model*
  - And many many many dutch theory contributions !



# Next? Hierarchy and stability problem

26

## Quadratic quantum corrections to the Higgs mass

- Higgs mass should be order of Planck scale
  - But we found it at X GeV?
- **New physics needed to cancel corrections or very very very large fine tuning**

## Higgs potential becomes unstable for low higgs masses

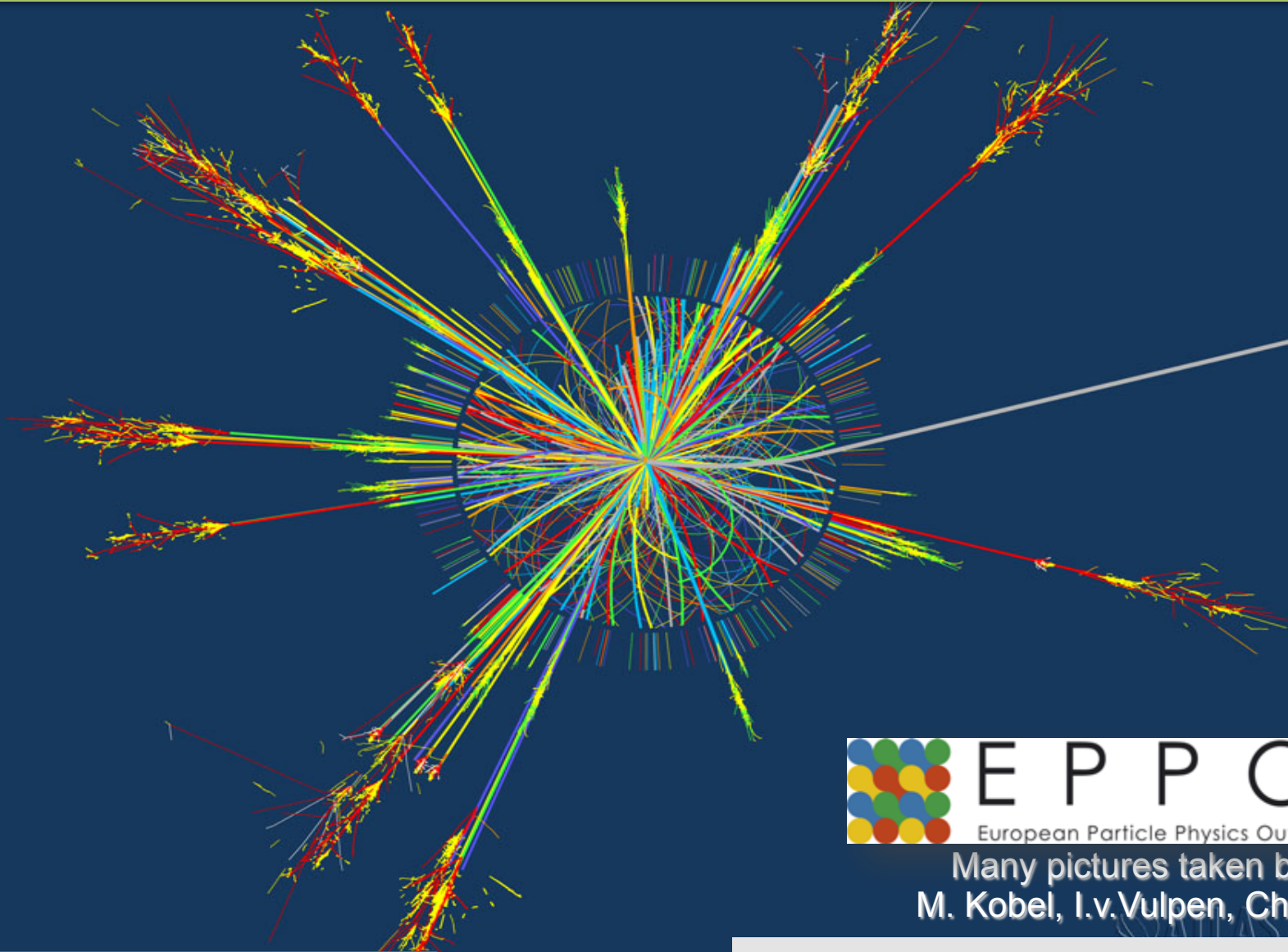
- Serious problem or **new physics**  
Is the mass of the Higgs low enough that this is true ?

Depending on top mass and  $\alpha_s$  :

New physics scale required if  $m_{\text{higgs}} < 129 (+/- 6) \text{ GeV}$

(arxiv 1205.2893)

# Hands on Particle Physics Masterclasses



Many pictures taken by e.g.  
M. Kobel, I.v.Vulpen, Ch. Berger

simuleert ATLAS event voor de  
productie van zwarte gaten

Dr. Sascha Caron, Radboud  
Universiteit Nijmegen

# Hoe vinden wij een nieuw deeltje ?

$$\boxed{p_\mu p^\mu = E^2/c^2 - \vec{p}^2 = m^2 c^2} \quad (1.24)$$

We can expand the  $E = \gamma mc^2$  formula for  $v \ll c$  in a Taylor series (of  $v/c$ ):

$$E = mc^2 \left( 1 + \frac{v^2}{2c^2} + \frac{3v^4}{8c^4} + \dots \right)$$

and write this as a rest energy term and a kinetic energy term:

$$E = mc^2 + T \text{ with kinetic energy}$$

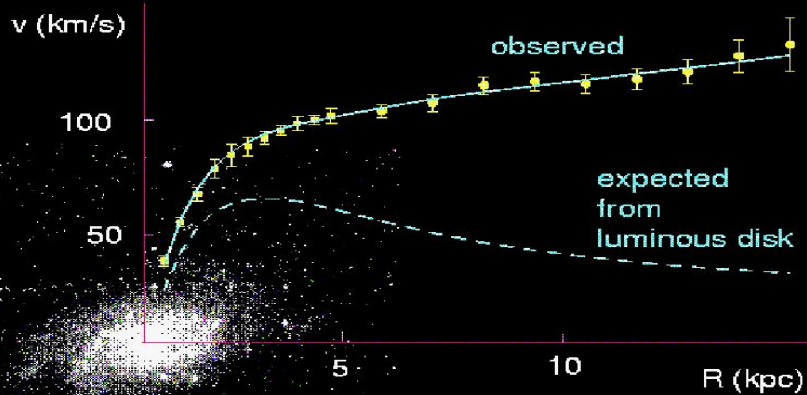
$$T = mc^2(\gamma - 1) = 1/2mv^2 + 3/8m\frac{v^4}{c^2} + \dots$$

OK we have the  
Higgs:  
Snappen de  
natuurkundige nu  
alles ?

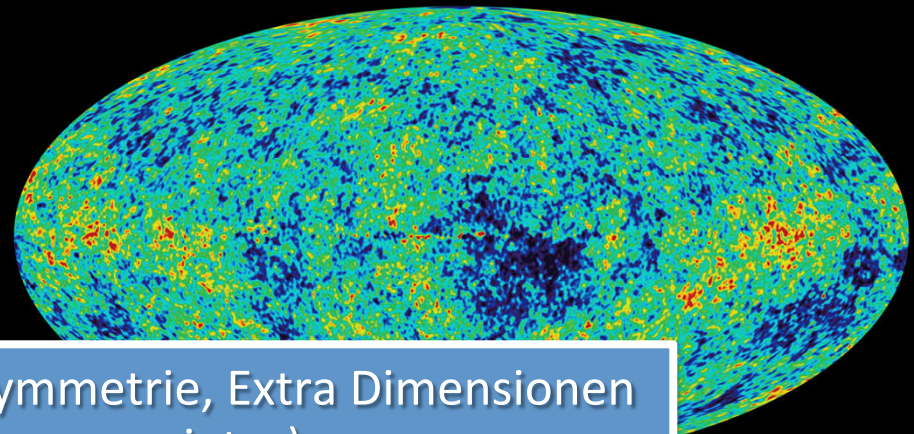
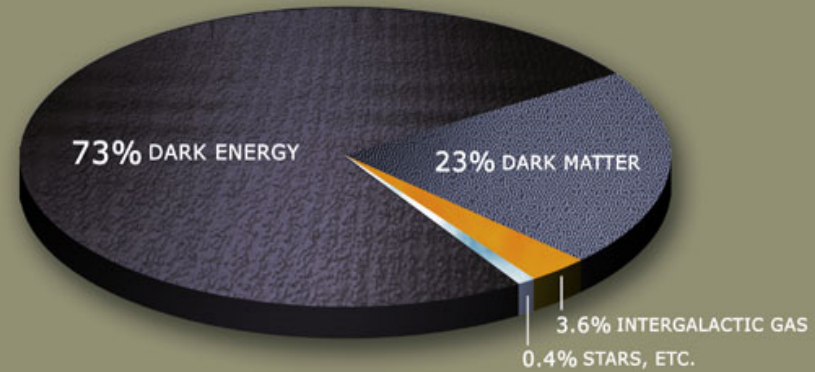


# Donkere Materie ??

30



M33 rotation curve

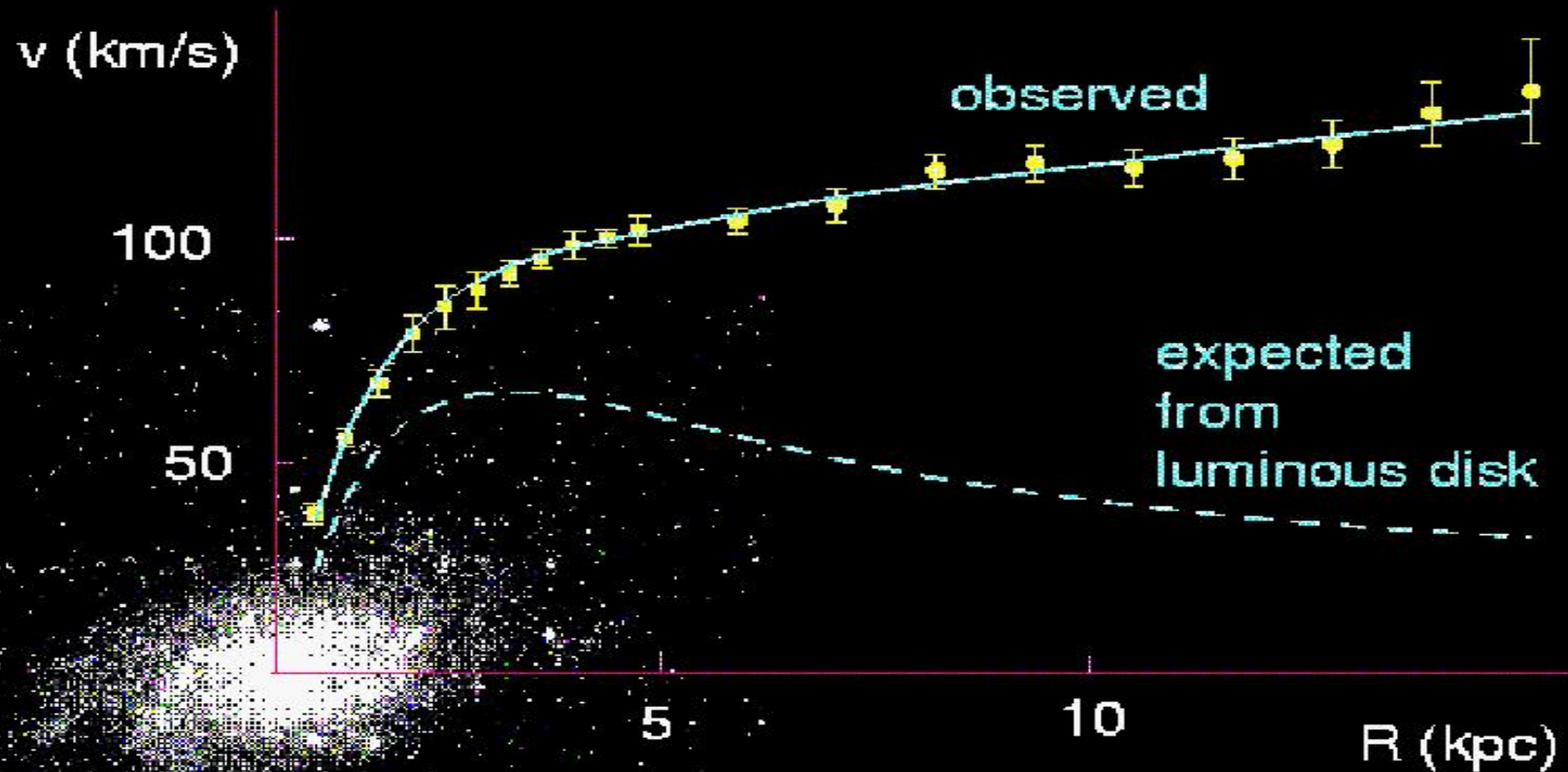


Kandidaten voor DM : Supersymmetrie, Extra Dimensionen  
→ Wij zoeken naar zoiets ;)



# Donkere Materie ??

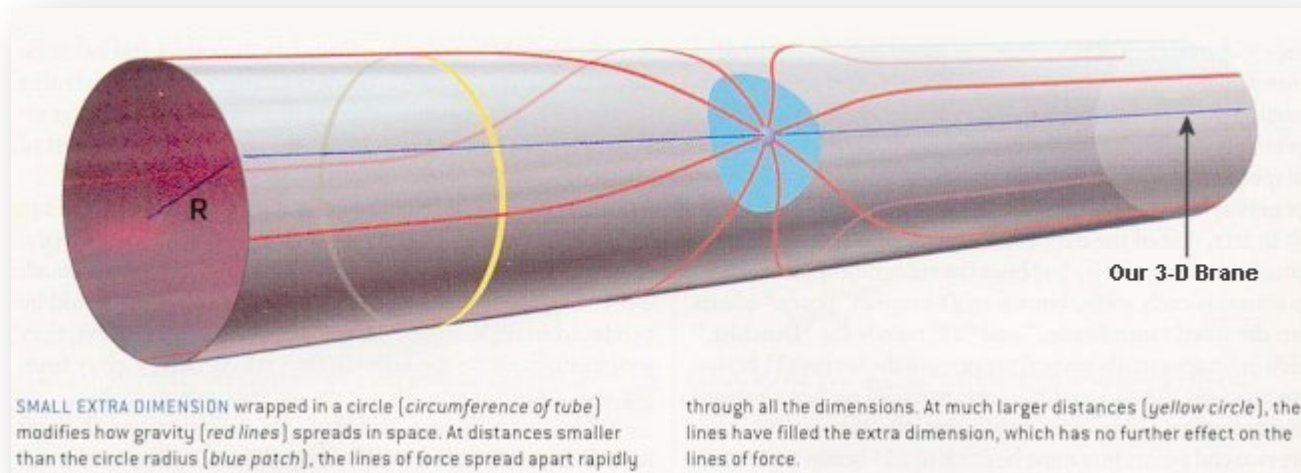
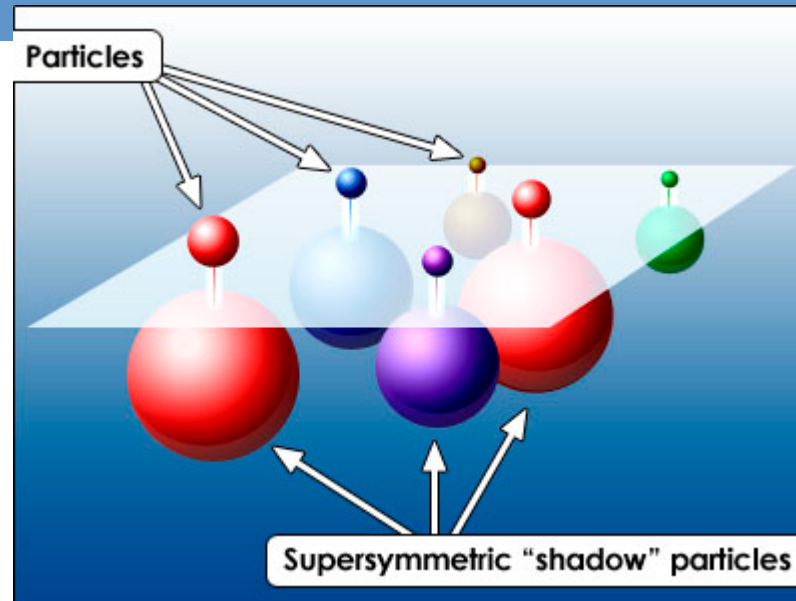
31



M33 rotation curve

# Supersymmetrie of Extra Dimensionen of ???

32



Theoretici hebben oplossingen:

Supersymmetrie?

Extra Dimensions?

String theory?

Superdupertheorie (nog niet bedacht)?

## Beyond het Standard Modell...

TODAY'S LESSON :  $W_0$  OR "WITTEN'S DOG"

Theoretische Deeltjesfysica /Kosmologie:  
Zoeken naar de fundamentele theorie van het Universum  
(bvbl. Supersymmetrische Stringtheorie)

$$e^- + p \rightarrow \Omega + \nu$$
$$\Omega \nu = \sum_{i=1}^{\infty} \left[ \left( \frac{m_i}{93 \text{ eV}} \right) + \frac{\langle \Omega_b W_0 \rangle}{(Z+1)^4} \right]^2$$

"SUPERDUPERSYMMETRIC  
STRING THEORY"

Maar de theorie weet niet verder  
→ Wij hebben input van experimenten nodig



Het “vlaggenschip” van de deeltjesfysica

An aerial photograph of a vast, green, mountainous landscape in Switzerland. A large red oval is superimposed on the image, representing the path of the Large Hadron Collider (LHC) tunnel. The oval is marked with several small red circles at intervals. In the background, a range of snow-capped mountains is visible under a clear blue sky. The text 'LHC' and 'Het grootste experiment van de wereld' is overlaid on the image.

LHC  
Het grootste experiment van de wereld



# Hoe zwaar is een elementair deeltje ?

36

- **Energie:**

**1 ElektronVolt = 1eV**

**1 KiloElektronVolt = 1 keV = 1000 eV**

**1 MegaElektronVolt = 1 MeV = 1.000.000 eV**

**1 GigaElektronVolt = 1 GeV = 1.000.000.000 eV**

- **Een Proton weegt ongeveer 1 GeV, een elektron is weegt ongeveer 1800 keer minder, een Z0 deeltje ongeveer 91 keer meer!**

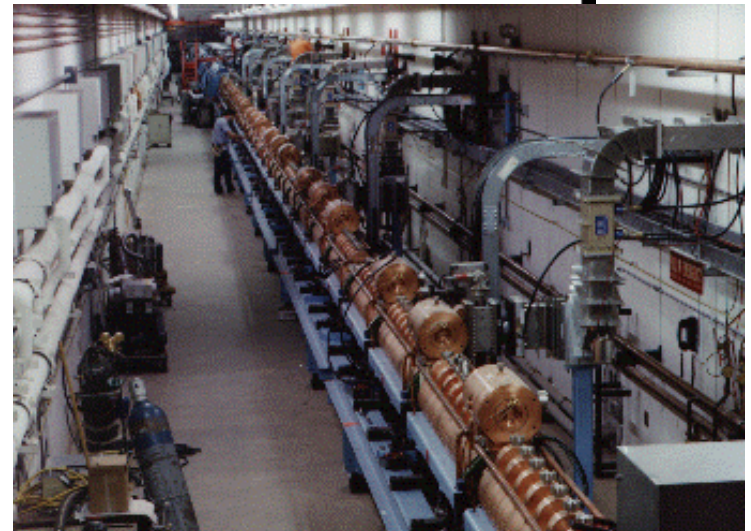
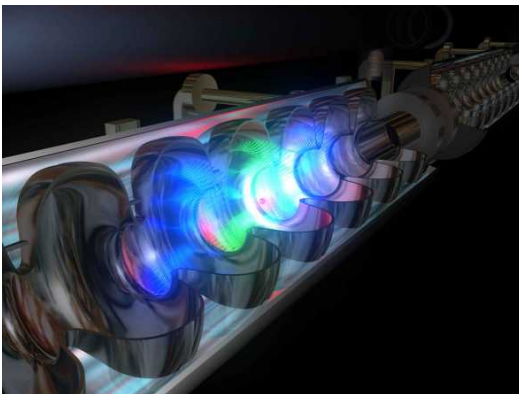
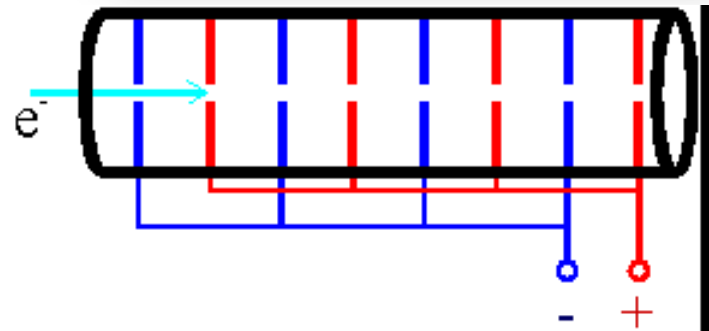
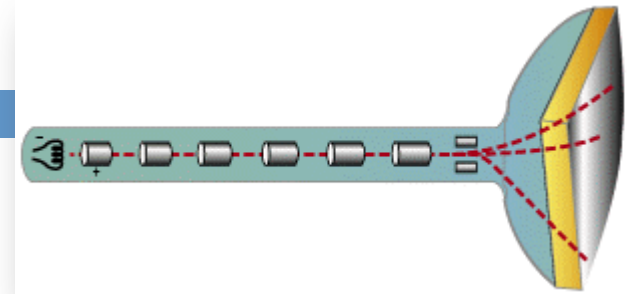
- **1 GeV: „veel“ voor een deeltje, maar macroscopisch heel weinig:  
een zaklantaarn (1,6 Watt) zou 0,000.000.0001 seconden schijnen**



# De Microscopen van de deeltjesfysica: Versnellers

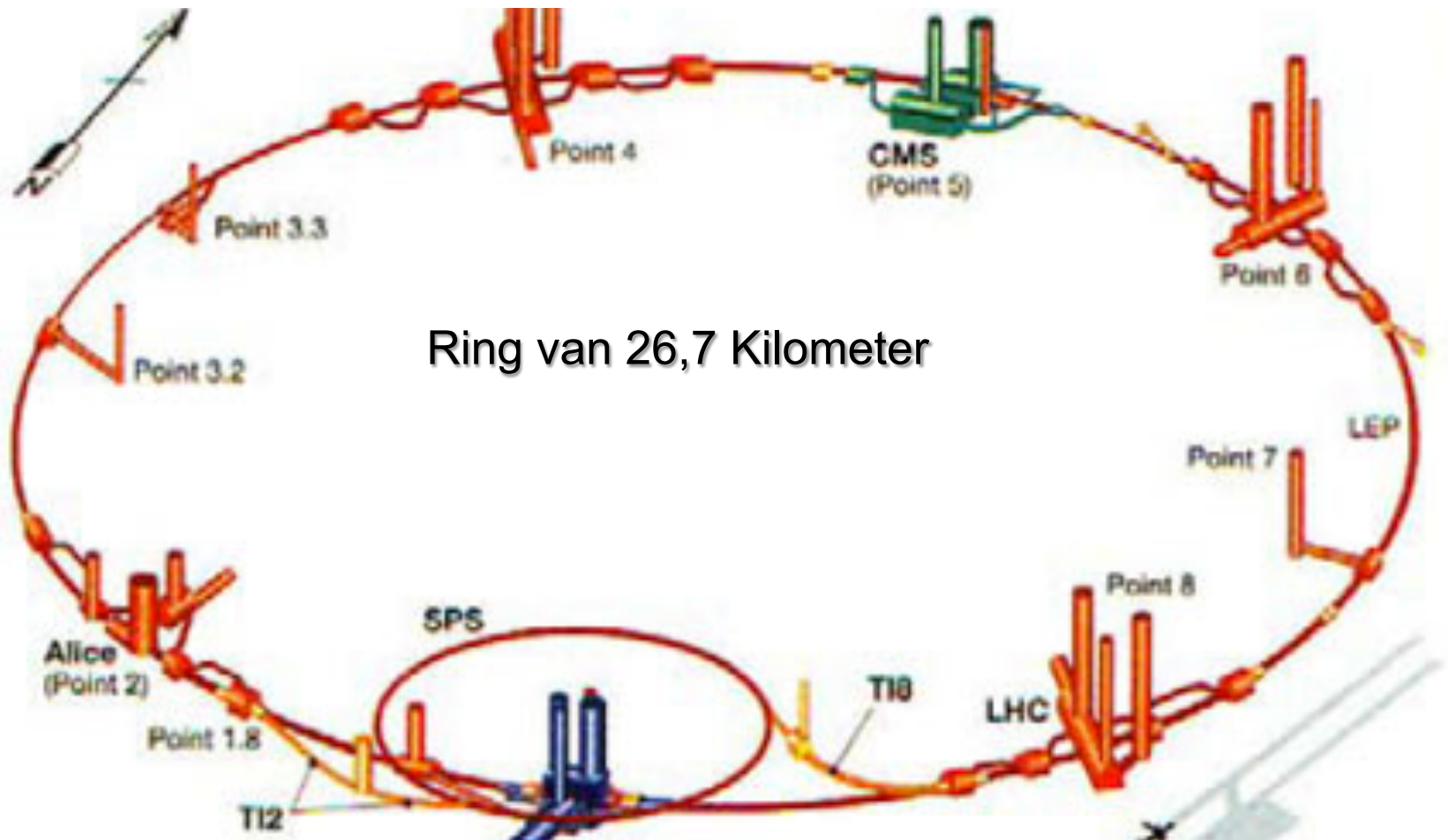
37

- Hebben jullie ook thuis gehad!
- Hoe werkt de versnelling ?
- Linearversnellers:
  - Fermilab, Chicago (loopt)
  - Japan (misschien 2020?)

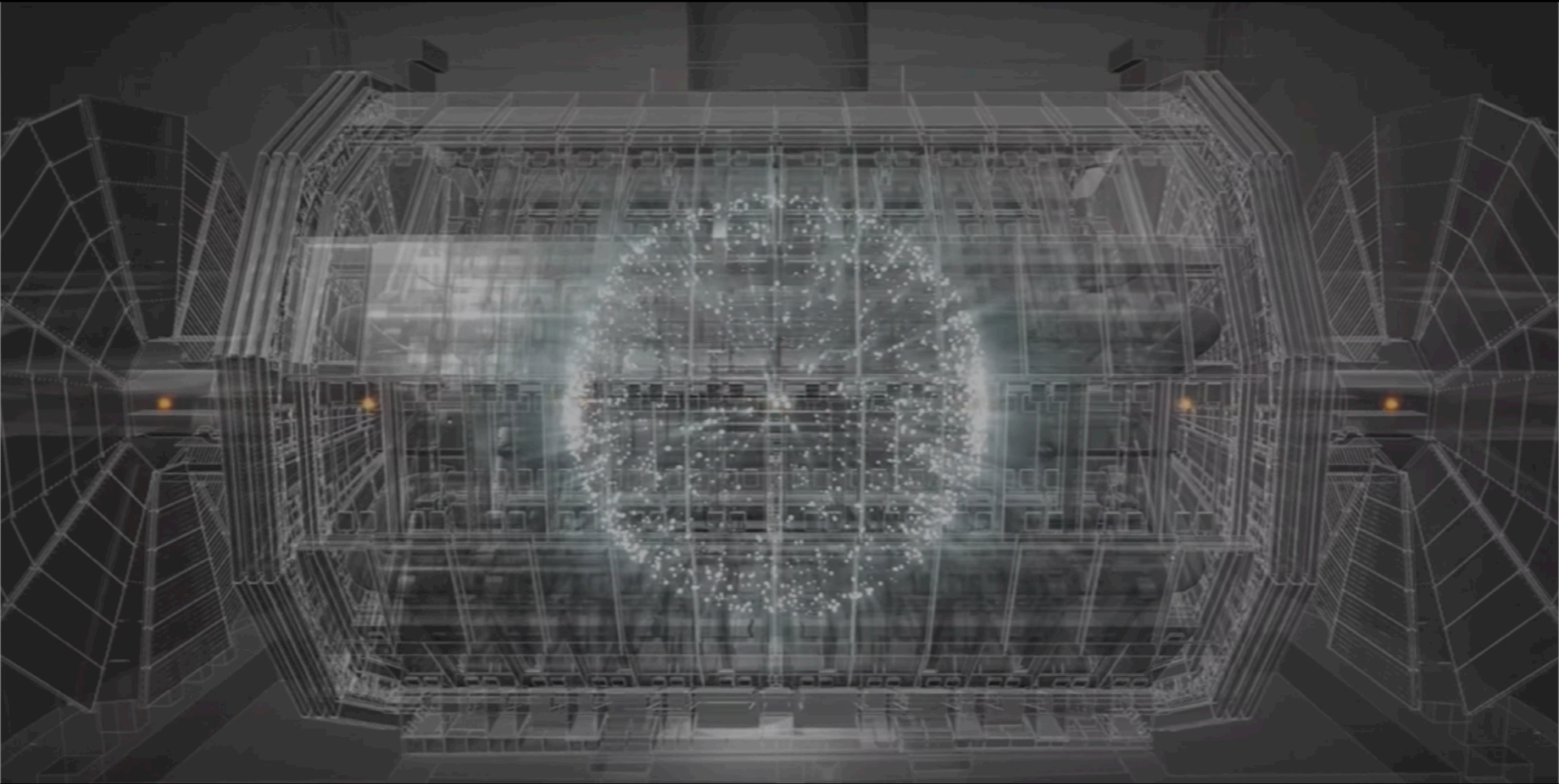


# Versneller bij LHC

38

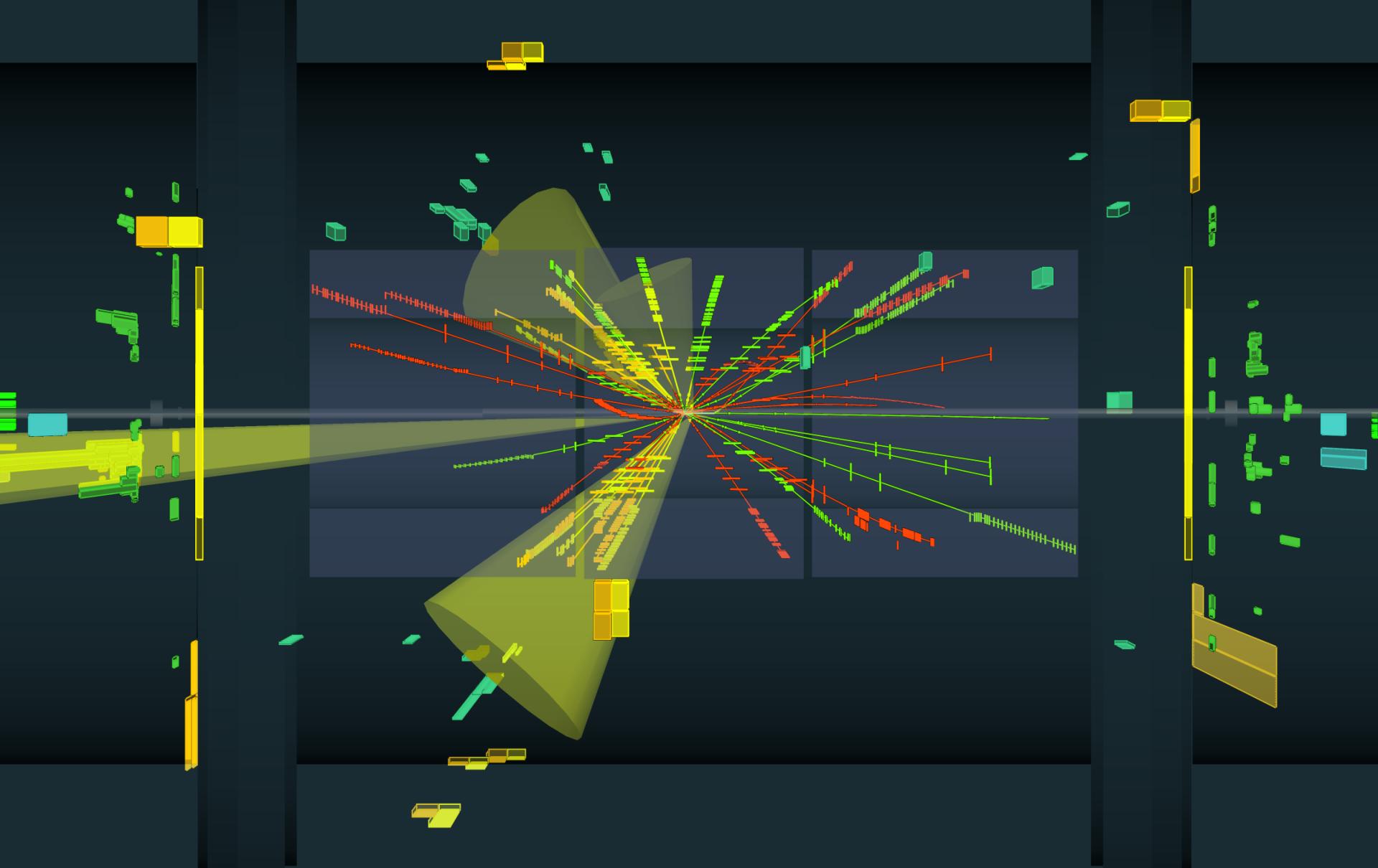


# COLLISIONS AT THE LARGE HADRON COLLIDER



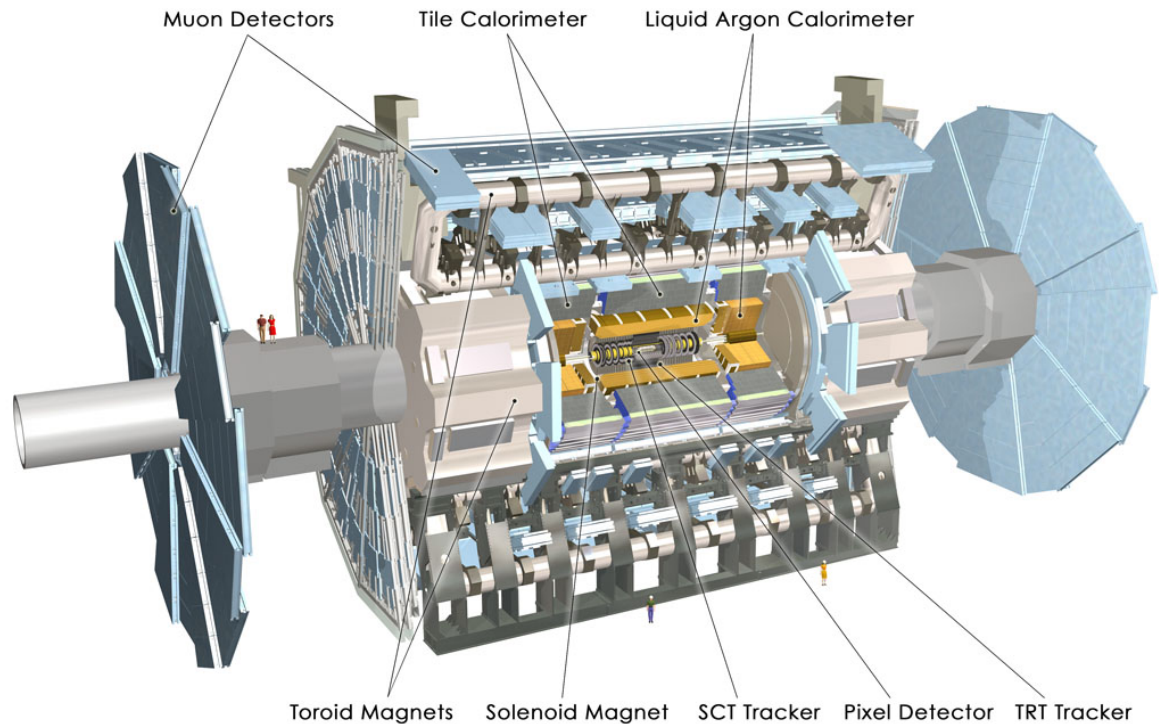
Bunch crossing every 25 ns... many collisions per bunch crossing





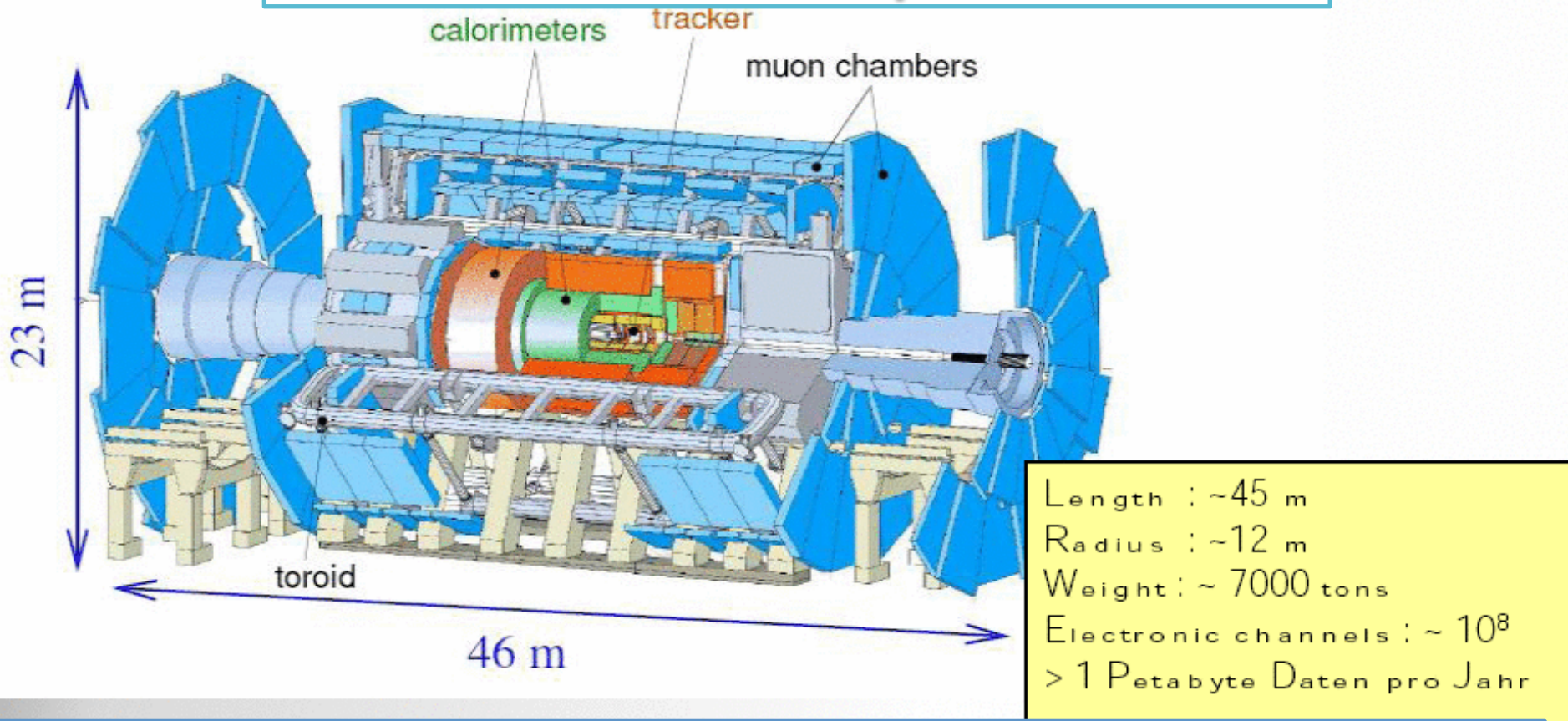
# Hoe erken ik deze deeltjes-reacties?

*Het oog van een  
deeltjesfysicus is  
een detector !*



De detectoren van de deeltjesfysica hebben een “ui-structuur” en bestaan uit verschillende “substructures”

# Het ATLAS experiment



Tracker: Silicon halfgeleider detector en spoordetector in een B-veld van 2 Tesla

Calorimeter: 2 Sampling Calorimeter (electromagnetic lead+liquid Argon => Cooling needed)

Muonsystem: Track-reconstruction van de muonen met driftkammern en een heel groot mageetveld voor de track

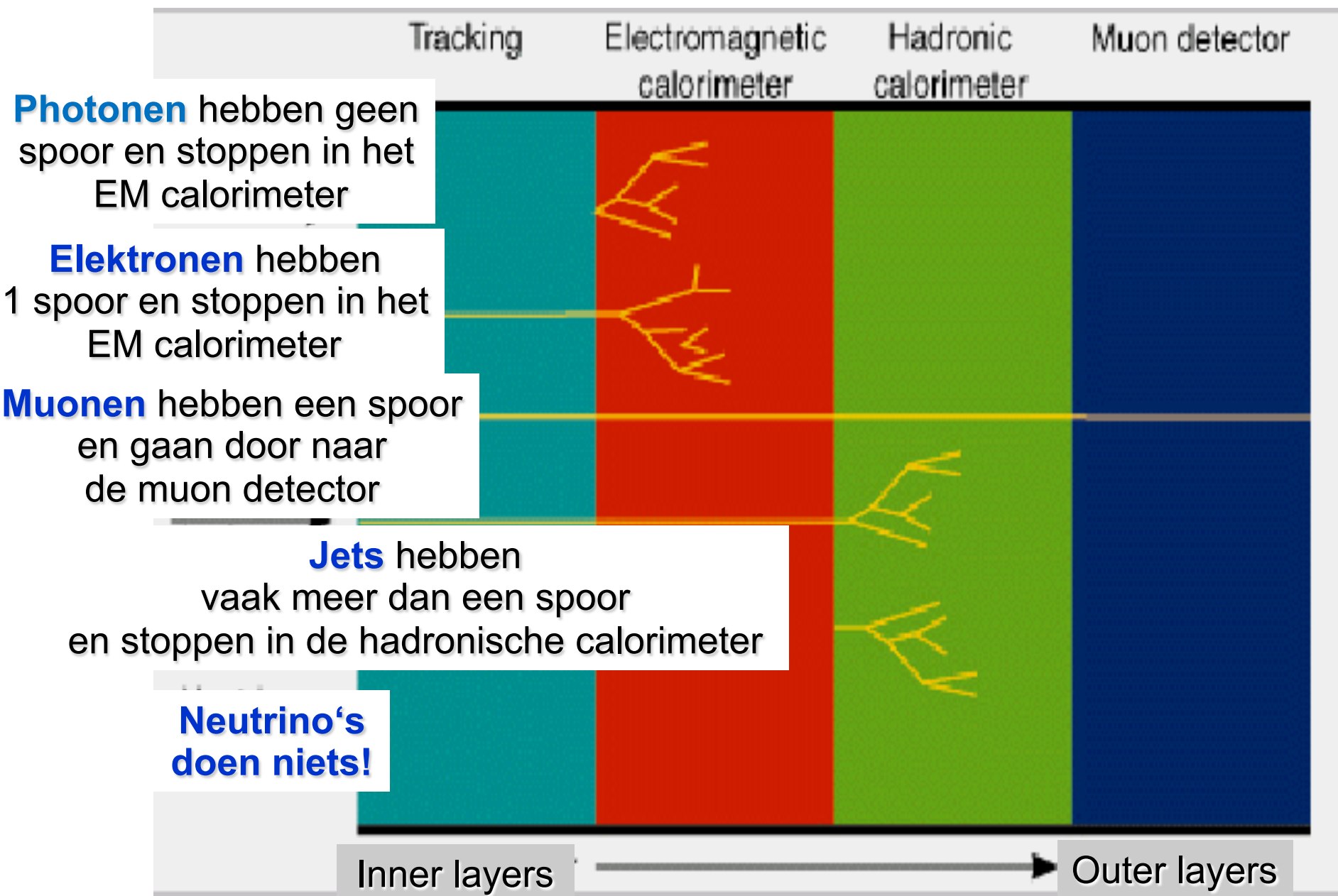
# Het experiment voor vandaag

43

- Jullie zoeken welke “finale deeltjes” in de botsingen zijn ontstaan
- Jullie meten de massa van de deeltjes die in de botsingen zijn ontstaan **door het meten van de energie en hoek van de vervals-producten** (dus de “finale deeltjes”)

➔ Hoe kan dat?



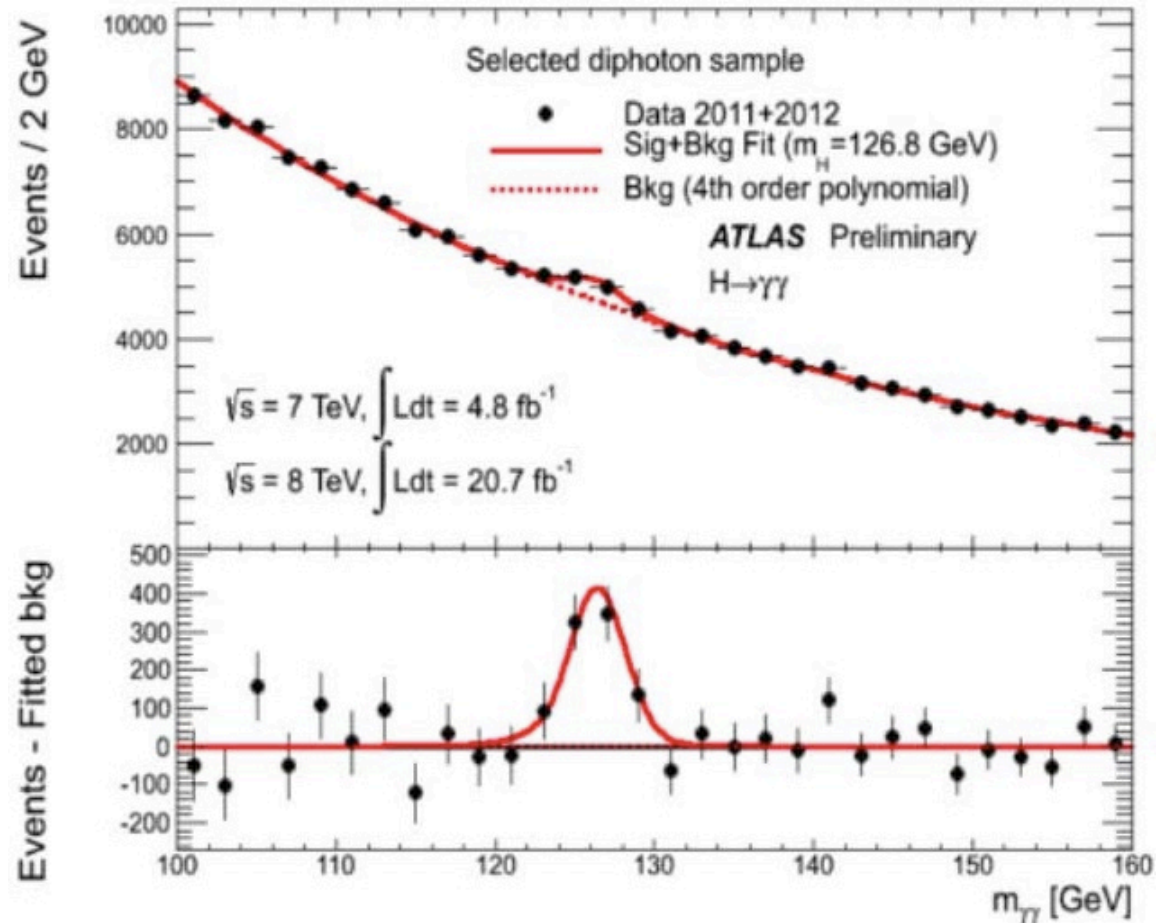


Onderscheid muonen, elektronen (en jets?) !

# Hoe vind ik een deeltje wat naar 2 photon vervalst ?

45

- Meten van de energie en hoeken van de fotonen ...
- Berekenen van de Massa van een “deeltje” wat naar 2 foton zou vervallen... (Hypothesis)
- Statistische Test met hulp van een “Histogramma”



# Voorbeeld

46

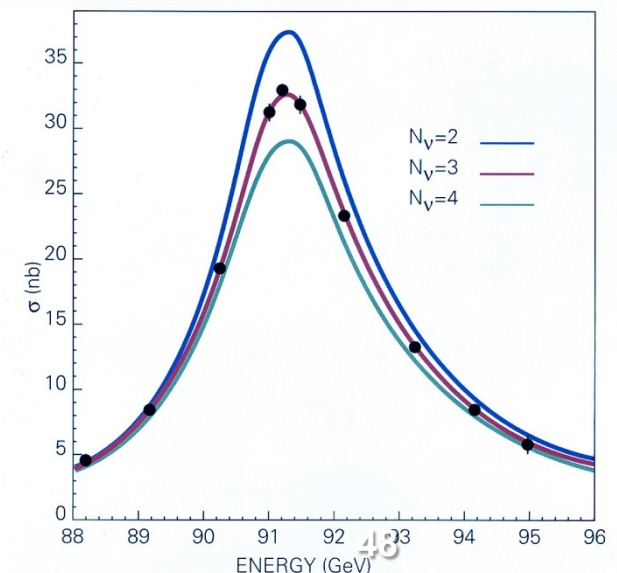
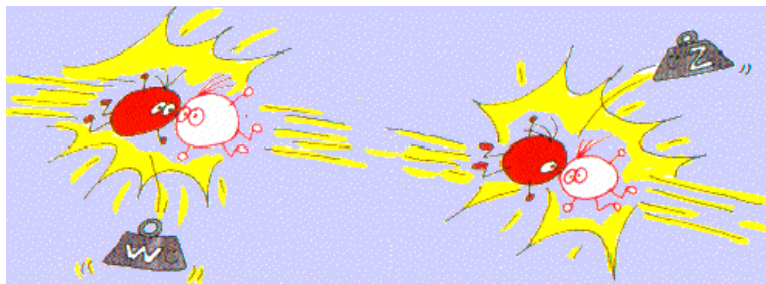
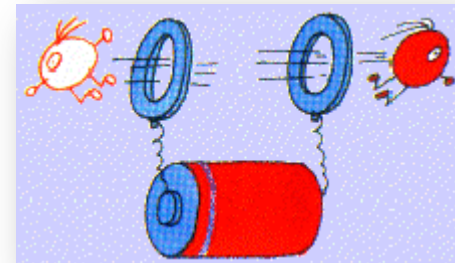
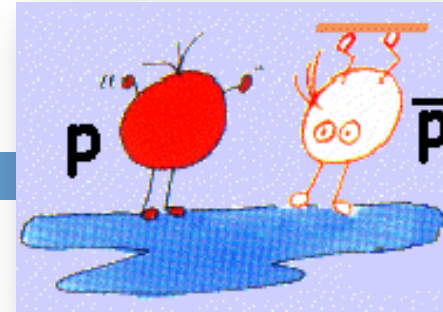
- Kinderen worden vaker in de lente geboren...

# De tweede deel van het verhaal...



# Antimaterie

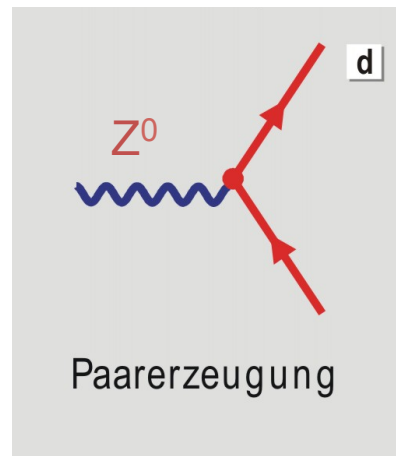
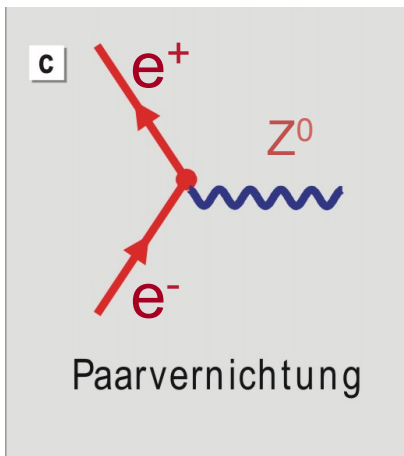
- Voor elk deeltje bestaat een antideeltje met een ander ladingsvoorteken en een “antideeltje eigenschap”
- Anders zijn alle eigenschappen (massa, levensduur) het zelfde
- Uit krachtdeeltjes kunnen een paar van Materie- en antimateriedeeltjes ontstaan
- Ook kunnen materie- en antimateriedeeltjes weer een krachtdeeltje maken bijvoorbeeld  $e^+ + e^- \rightarrow Z^0$ , dit gaat heel goed als  $2E_e = m_{Z^0}c^2$



# Z “verval”

49

- Een Z deeltje is niet stabiel
- Het wordt in  $3 \times 10^{-25} \text{ s}$  (!) twee andere deeltjes



→  
tijd



# Vervalskanalen

50

- Gaten zijn de „Vervalskanalen“
- Voor een Watermolecule kunnen wij niet zeggen door welk gat het uit de emmer gaat  
Voor een  $Z$ -deeltje weten wij ook niet de vervalskanal
- Vervalsverhouding voor vele  $Z$ s  
→ Grootte van de  
gate in de emmer

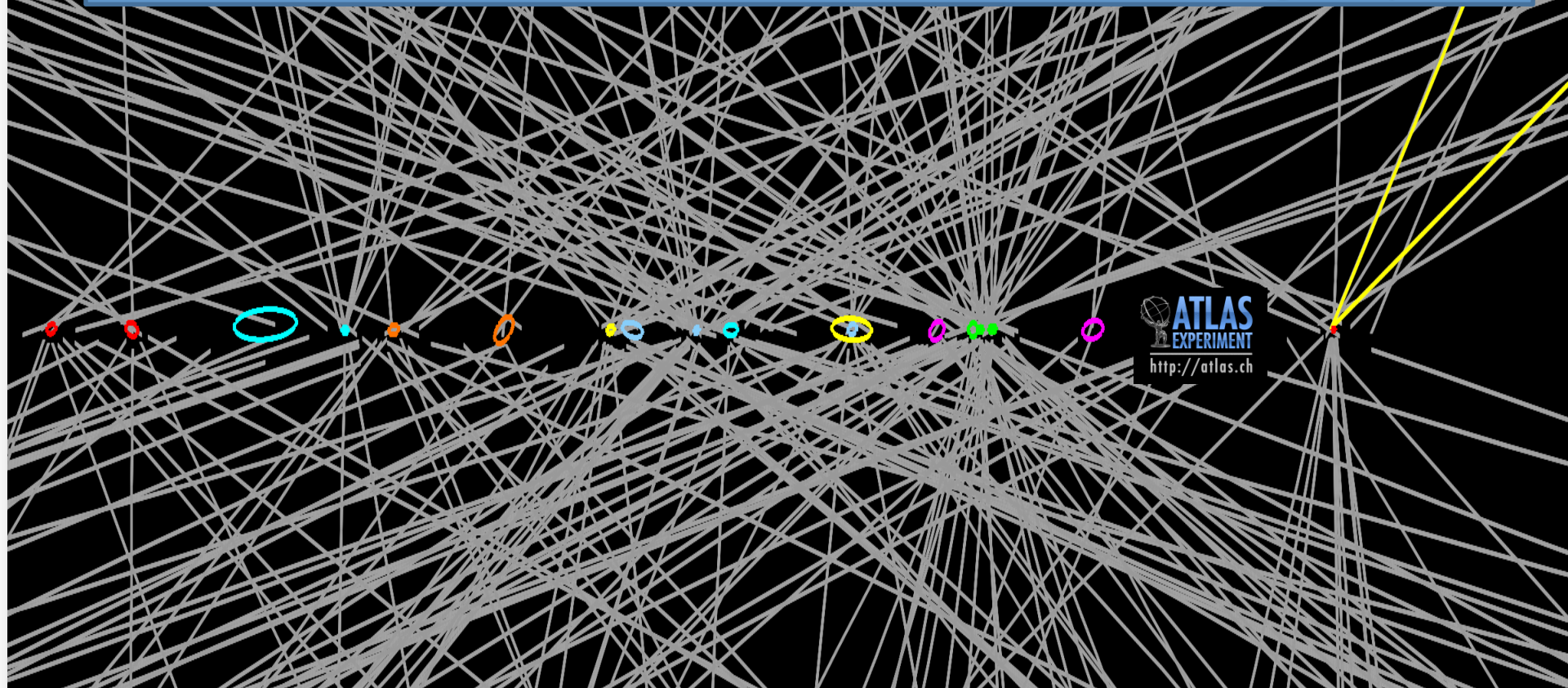


- Higgs gaat naar 2 Z deeltjes
- Een Z gaat bijvoorbeeld naar elektron+antielectron  
of muon+antimuon  
(10% leptons, 20% neutrinos, 70% quarks)
- Een Higgs gaat ook naar 2 fotonen  
(*een Z deeltje niet!*)
- ***Achtergrond van Quark verval processen***

# Multiple interactions

52

Challenge for 2012 data taking:  
High rate of multiple interactions due to decreased beam  
size → Effects modeled in Monte Carlo simulations, challenge for particle ID



Example of  $Z \rightarrow \mu\mu$  decay with 20 reconstructed vertices  
(shown  $\pm 15$  cm,  $p_T$  (track)  $> 0.4$  GeV)



# Invariant mass !

53

- See lectures this morning
- From 4 vector (Energy, 3-momentum) of 2 particles  
you can calculate the invariant mass of their mother

# Dit gaan jullie vanmiddag meeten

| Verfall    | Massa |  |  |  |
|------------|-------|--|--|--|
| ee         |       |  |  |  |
| $\mu\mu$   |       |  |  |  |
| 2 photonen |       |  |  |  |
| 4 leptonen |       |  |  |  |

# De data



Datasets:

ATLAS real pp---data  
from 2011 at 7 TeV

# Hypatia

Hypatia is een “event display”, dus een programma om de resultaten van de botsingen te bekijken

Hypatia is een java app. en wij kunnen het vanaf deze weblocatie draaien:

[http://atlas.physicsmasterclasses.org/en/zpath\\_data.htm](http://atlas.physicsmasterclasses.org/en/zpath_data.htm)

# Wat moeten wij doen? Step by step

1. In HYPATIA, for each collision, try to find signs of the existence of particles such as

a) a Z boson, by hunting for an electron---positron pair or a muon--antimuon pair,

b) a Higgs boson by hunting for a photon---photon pair

c) a Higgs boson by hunting for 2 lepton---pairs ( $e^+e^-$  and  $e^+e^-$ ,  $e^+e^-$  and  $\mu^+\mu^-$ ,  $\mu^+\mu^-$  and  $\mu^+\mu^-$ )

2. If you **cannot find such particle pairs, the event might be a background event.**

Use the pointing tools and particle information  
In HYPATIA to make your decision.

To help you keep track of which events you have looked at, fill in the tallysheet

3. If you believe the tracks belong to a particle like z or higgs, click on the track and it appears in the mass table!



# Step by step



4. If you believe the collision is a background event, ignore the event
5. At the end we can export the hypatia invariant mass table (in order to add/combine the measurements of the different groups)

# For the experts !

Some recommendations how to tackle the detective work

Briefly:

1. Set a minimum  $p_T$  cut of 5-10 GeV
2. Study remaining tracks and/or physics objects and classify if compatible with muon, electron or photon.
3. Zoom in both views to distinguish between single and double tracks
4. Check whether the invariant mass of a double track is consistent with a Converted photon
5. If needed, require at least 2 pixel hits to make sure that single or double tracks stem from the primary vertex.

# Als wij klaar zijn...

5. After analyzing all events, export the invariant Mass table from HYPATIA:  
File--->Export Invariant Masses.

a. The file is  
Called “Invariant\_Masses.txt”  
By default (do not change it).  
Place the file on your Desktop so you can easily find it.

6. Go to the OPloT page  
<http://cernmasterclass.uio.no/OPloT/index.php>,  
and upload the invariant mass  
file you have just made

# Het eind

61

Veel plezier !