

Het Higgs boson

Ivo van Vulpen (UvA/Nikhef)

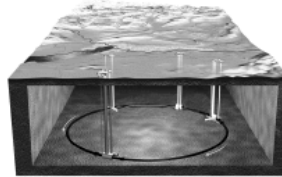
VWO examen natuurkunde 2012

Opgave 5 LHC

Lees het krantenartikel.

Large Hadron Collider (LHC) geopend

Wetenschappers zijn al jaren op zoek naar het zogenaamde Higgs-deeltje. Om dit te vinden, is in de buurt van Genève in het voorjaar van 2012 de Large Hadron Collider (LHC) in gebruik genomen. Deze ondergrondse versneller heeft een diameter van maar liefst 8,4858 km de grootste ter wereld.



In de LHC worden protonen versneld tot bijna de lichtsnelheid. De LHC bestaat uit een ondergrondse ring met daarin twee cirkelvormige buizen. In de twee buizen gaan twee bundels tegengestelde richting.

Als ze door het versnellen een energie van 7,0 TeV (tera-elektronvolt) bereiken, worden de protonen in een botsing met elkaar botsen. Tijdens de botsing ontstaan allerlei elementaire deeltjes. Wetenschappers hopen hierbij het Higgs-deeltje te vinden.

Voordat de protonen in de ring van de LHC binnenkomen, worden ze eerst versneld in een lineaire versneller. (Deze versneller is niet in het artikel.) Daarbij doorlopen de protonen een groot aantal keren een elektrische spanning van 5,0 kV.

- 20 Bereken hoe vaak de protonen deze spanning moeten overlopen om een snelheid van $1,2 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ te krijgen als ze vanuit stilstand beginnen.

Voordat de protonen in de grote ring komen, worden ze eerst versneld in een lineaire versneller. Daarna worden de protonen versneld totdat ze een snelheid van $1,2 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ hebben.

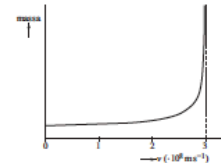
- 21 Bereken hoeveel procent de snelheid van de protonen kleiner is dan de lichtsnelheid.

VW-1023-a-12-1-a

10

Als je met de klassieke theorie de kinetische energie van 7,0 TeV omrekent naar de snelheid van het proton vind je een waarde die veel groter is dan de lichtsnelheid. Volgens de relativiteitstheorie is dit niet mogelijk, omdat de massa van een deeltje toeneemt als het deeltje de lichtsnelheid bereikt. Dit is weergegeven in figuur 1.

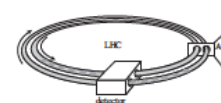
figuur 1



- 22 Bij elke omwenteling neemt de kinetische energie van een proton toe. Leg uit aan de hand van figuur 1 dat een proton een steeds groter wordende kinetische energie ophoopt.

In de ring bevinden zich twee buizen waarin de protonen tegengestelde richting bewegen. Dit is schematisch weergegeven in figuur 2.

figuur 2



De protonen worden in de buizen in een cirkelbaan gehouden door elektromagneten om de buizen.

In figuur 2 is aangegeven dat de protonen in de linkerbuiz van je af (a) en in de rechterbuiz van je af (b) bewegen.

- 23 Teken in de figuur op de uitwerkbijlage de richting van de protonen in de linker- en rechterbuiz afzonderlijk.

Let op: de laatste vragen van dit examen staan op de uitwerkbijlage.

VW-1023-a-12-1-a

11

Voor een proton met een energie van 7,0 TeV dat rondgaat in een buis geldt voor de middelpuntzoekende kracht:

$$F_{\text{mpz}} = \frac{E}{r}$$

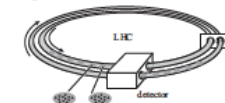
Hierin is:

- E de energie van het proton,
- r de straal van de baan.

- 24 Bereken de sterkte van het magnetisch veld.

De protonen gaan in groepjes door de buizen. Dit is schematisch weergegeven in figuur 3.

figuur 3



In één buis bewegen 2808 groepjes protonen. Hierdoor is in die buis de stroomsterkte gelijk aan 0,582 A.

- 25 Bereken hoeveel protonen er in één groepje zitten.

In de detector laten de wetenschappers de bundels elkaar snijden. Als twee protonen op elkaar botsen, kunnen nieuwe elementaire deeltjes ontstaan. De wetenschappers hopen hierbij het Higgs-deeltje te vinden. De massa van het Higgs-deeltje is nog niet bekend. Wel zijn schattingen gemaakt. Een van de schattingen stelt dat de massa van het Higgs-deeltje in de orde van grootte van 10^{-25} kg is.

- 26 Laat met een berekening zien of de energie van de twee botsende protonen genoeg is om een Higgs-deeltje te laten ontstaan.

VW-1023-a-12-1-a

12

afsluit

“Tijdens de botsing ontstaan allerlei elementaire deeltjes. Hierbij hopen de wetenschappers het Higgs-deeltje te vinden.”

Wie ben ik



Ivo van Vulpen

1991 studie natuurkunde en sterrenkunde in Utrecht

Eigen internet-bedrijf

promotie bij Nikhef in
de deeltjesfysica

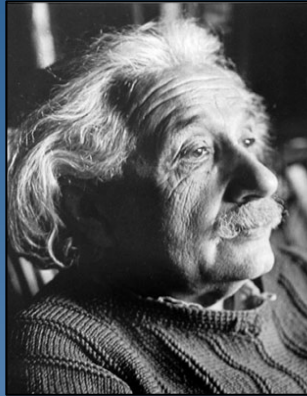
Consultancy/banking

CERN (Geneve)

?

Docent bij de UvA
Onderzoeker bij het Nikhef

1^e jaar: inleiding programmeren
2^e jaar: deeltjesfysica
Master: Higgs mechanisme



Prof. dr. Einstein

*“Imagination is more important
than knowledge”*



dr. Van Vulpen

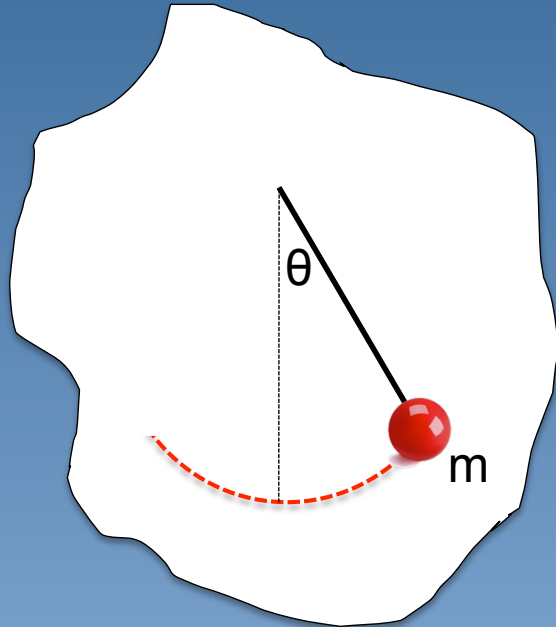
*“... dat zal wel Albert, maar zonder
knowledge ben je ook nergens”*



drs. Voets

*“... en zonder computing skills
krijg je nooit een baan”*

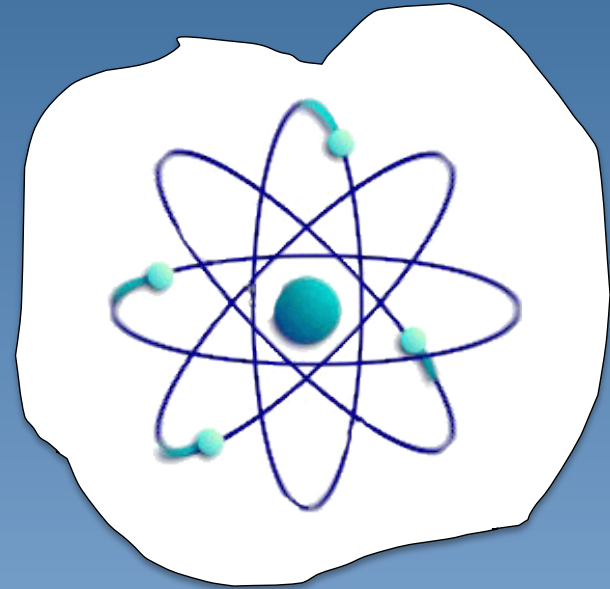
observatie als leidraad en ideeën versus wiskunde



slinger



ruimte en tijd



het atoom

De wereld zit raar (en mooi) in elkaar. Komende tijd alle kennis opnemen.

Klassieke mechanica

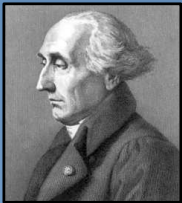
“hoe slingert een slinger?”

de slinger

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m (l \dot{\theta})^2$$

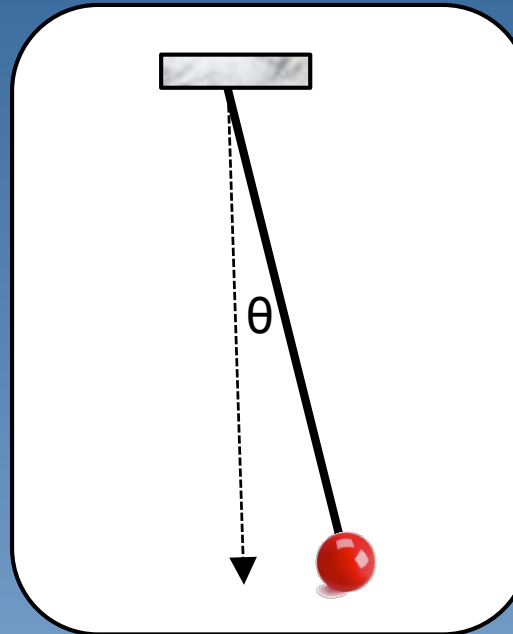
$$E_{\text{pot}} = -mgl \cos(\theta)$$

Bewegingsvergelijking ?



*Principe van
minimale ‘actie’*

concept



Euler-Lagrange vergelijking ?

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0$$

$L = \text{Lagrangiaan} = E_{\text{kin}} - E_{\text{pot}}$

$$\ddot{\theta} + \frac{g}{l} \sin(\theta) = 0$$

Kleine hoeken $\theta \ll 1$:

$$\ddot{\theta} = -\frac{g}{l} \theta \rightarrow \theta(t) = \theta_0 \cos\left(\sqrt{\frac{g}{l}} t\right)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Alle hoeken:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\left(\frac{(2n)!}{(2^n n!)^2} \right)^2 \sin^{2n} \left(\frac{\theta_0}{2} \right) \right]$$

Maar: wrijving, gekoppelde slingers, veer, op een draaiende schijf, smeltend blokje ijs i.p.v. balletje, ...

[wikipedia](#)

Klassieke mechanica



Pioneer ruimtevaartuig

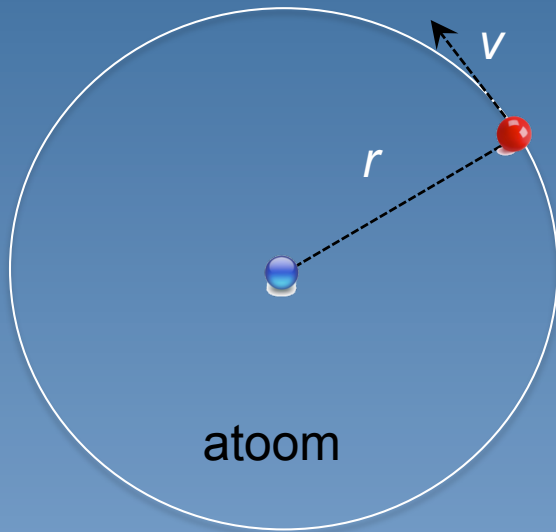
$$\ddot{\mathbf{r}}_i = \sum_{j \neq i} \frac{\mu_j (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i)}{r_{ij}^3} \left(1 - \frac{2(\beta + \gamma)}{c^2} \sum_{k \neq i} \frac{\mu_k}{r_{ik}} - \frac{2\beta - 1}{c^2} \sum_{k \neq j} \frac{\mu_k}{r_{jk}} - \frac{3}{2c^2} \left[\frac{(\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) \dot{\mathbf{r}}_j}{r_{ij}} \right]^2 + \frac{1}{2c^2} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) \ddot{\mathbf{r}}_j - \frac{2(1 + \gamma)}{c^2} \dot{\mathbf{r}}_i \dot{\mathbf{r}}_j + \right. \\ \left. + \gamma \left(\frac{v_i}{c} \right)^2 + (1 + \gamma) \left(\frac{v_j}{c} \right)^2 \right) + \frac{1}{c^2} \sum_{j \neq i} \frac{\mu_j}{r_{ij}^3} \left([\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j] \cdot [(2 + 2\gamma) \dot{\mathbf{r}}_i - (1 + 2\gamma) \dot{\mathbf{r}}_j] \right) (\dot{\mathbf{r}}_i - \dot{\mathbf{r}}_j) + \frac{3 + 4\gamma}{2c^2} \sum_{j \neq i} \frac{\mu_j \ddot{\mathbf{r}}_j}{r_{ij}} \quad (3)$$

Curiosity marslander



Quantum mechanics

“ waarom valt een electron niet op de kern ?”



$$\frac{mv^2}{r} = \frac{e^2}{r^2}$$

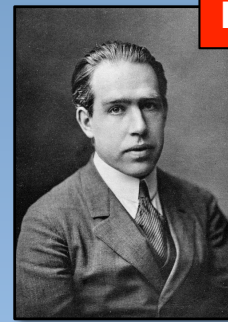
Middelpuntzoekende kracht

electromagnetische kracht

$$v = \sqrt{\frac{e^2}{mr}}$$

Baanimpulsmoment:

$$L = mvr = \sqrt{e^2 mr}$$



Niels Bohr

idee

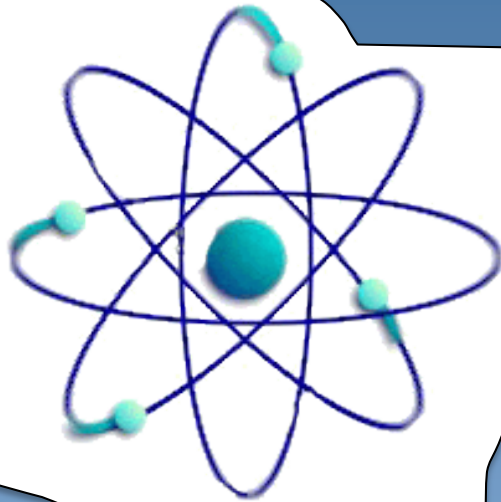
“L is gequantiseerd”

$$L = n\hbar$$

$n=1,2,3,4, \dots$

Quantum mechanics

“ waarom bestaat een atoom ?”



atoom

$$L = n\hbar \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{Ze^2 m_e} \quad r_1 = a_0 = 0.5 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

Bohr radius

$$E_n = \frac{-13.6 \text{ eV}}{n^2} = - \frac{m_e e^4}{2(4\pi\epsilon_0)^2 \hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

Rydberg constante

Fundamenteel anders gedrag van materie op de schaal van een atoom

Consequenties: naast deeltje versus golf gedrag van materie ook transistoren (computers) , kernenergie, quantum computing (Kouwenhoven), etc.

Relativiteitstheorie

“structuur van tijd en ruimte”

De snelheid van een tennisbal en een lichtstraal gezien vanuit de ogen van een bewegende waarnemer



$$v = 299.792.458 \text{ [m/s]}$$



$$v = 20 \text{ [m/s]}$$

Snelheid ?



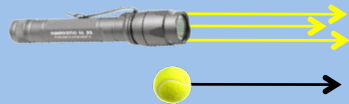
bal

lichtstraal

<i>bal</i>	<i>lichtstraal</i>
20	299.792.458

Hoe verandert dit als de waarnemer zelf beweegt ?

relatieve snelheid
bal lichtstraal



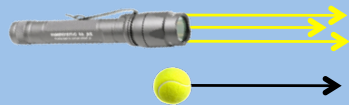
$v = 299.792.458 \text{ [m/s]}$

$v = 20 \text{ [m/s]}$



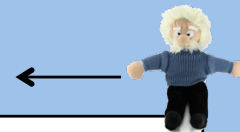
20

299.792.458



$v = 299.792.458 \text{ [m/s]}$

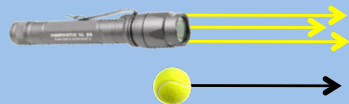
$v = 20 \text{ [m/s]}$



$v = -10 \text{ [m/s]}$

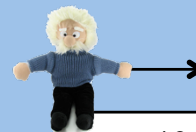
30

299.792.458



$v = 299.792.458 \text{ [m/s]}$

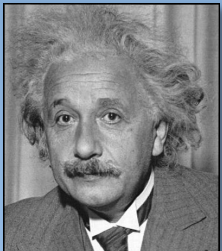
$v = 20 \text{ [m/s]}$



$v = +10 \text{ [m/s]}$

10

299.792.458



Idee (en observatie)

“de snelheid van het licht is constant voor elke waarnemer”

Albert Einstein

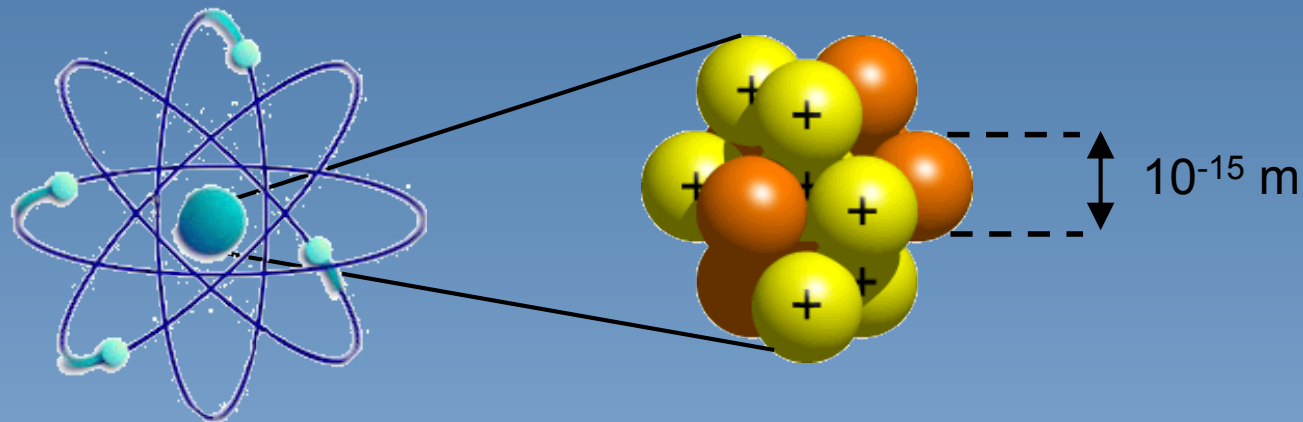
Consequenties:

Ruimte en tijd verbonden, gelijktijdigheid niet uniek gedefiniëerd, ...

Speciale/algemene relativiteitstheorie:

tijd langzamer in een gravitatieveld TomTom

Deeltjesfysica



atoom

kern

De atoomkern en kleiner
... een totaal nieuwe wereld

De stand van zaken op 28 augustus 2012



[http:// pdg.lbl.gov](http://pdg.lbl.gov)

De elementaire deeltjes



up

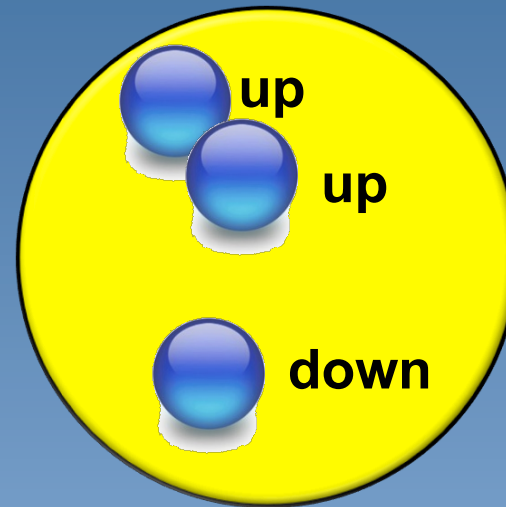


down

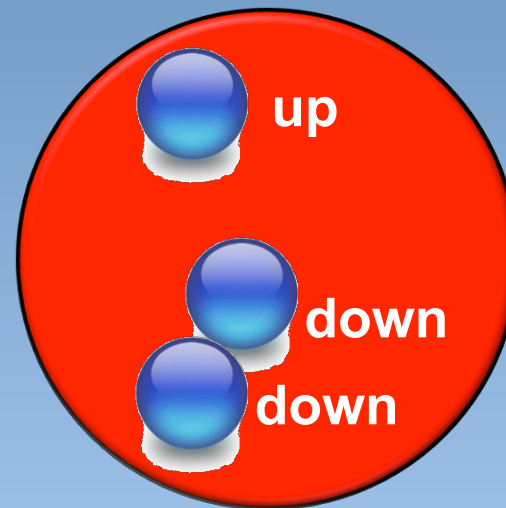


elektron

+ 4 natuurkrachten



Proton



Neutron

Wat kan je maken met deze 3 bouwstenen ?

*periodiek systeem
van Mendeleev*

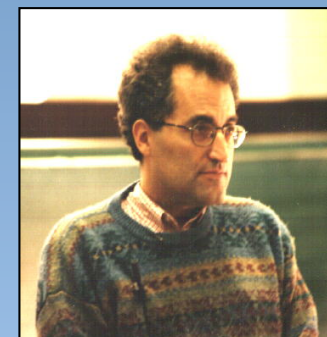
1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	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
87 Fr	88 Ra	103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt									
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				



Alles!



Alles wat we nodig hebben !



Edward Witten

bouwstenen van proton/neutron

Deeltjes

Krachten

Quarks

Leptons

1) Electromagnetisme

2) Zwakke kernkracht

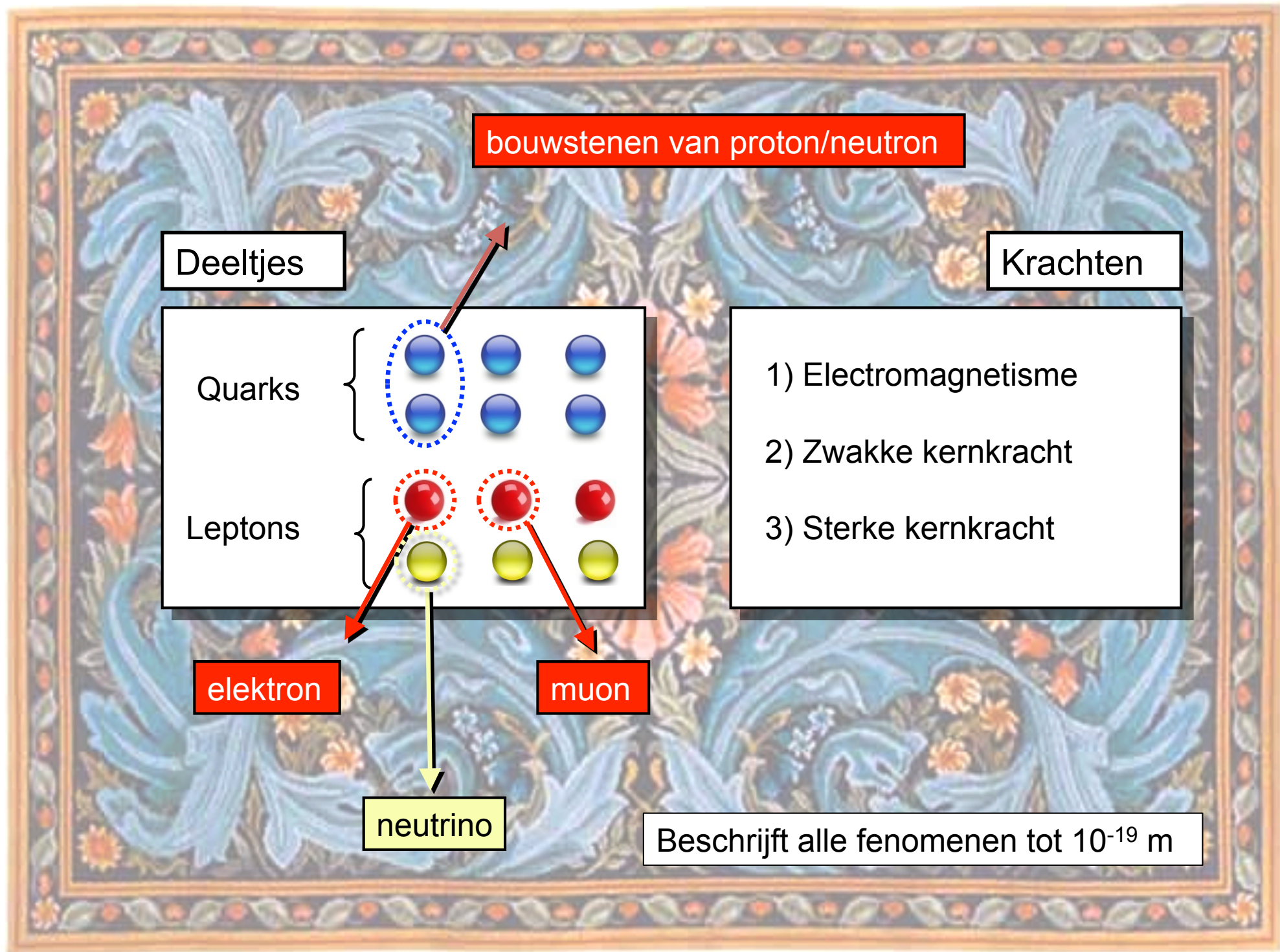
3) Sterke kernkracht

elektron

muon

neutrino

Beschrijft alle fenomenen tot 10^{-19} m



Paar kleine puntjes open:

...

Hoe krijgen deeltjes massa ?

Waar is donkere materie van gemaakt ?

Waar is alle anti-materie gebleven ?

...

Volume van het heelal: (on)eindig ?

(Hoe) is de tijd begonnen ?

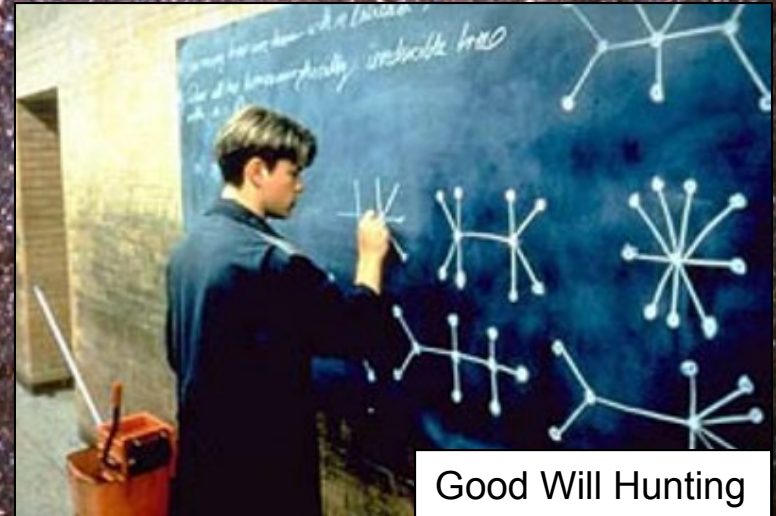
Waarom is elektrische lading gequantiseerd ?

...

Oplossing energievraagstukken

Materiaaleigenschappen, quantumcomputing, ...

...



Good Will Hunting

Bewegingsvergelijking van elementaire deeltjes

Standaard Model Lagrangiaan

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\mu^a g_\mu^b g_\mu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\mu^c g_\mu^d g_\mu^e + \frac{1}{2}ig_s^2 (\bar{q}_i^\nu \gamma^\mu q_j^\nu) g_\mu^a + \\ & G^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu G^a G^b g_\mu^c - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2}M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \\ & \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - \frac{1}{2}m_H^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\ & \frac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h [\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-)] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - igc_w [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\ & W_\mu^- W_\nu^+) - Z_\mu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - igs_w [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - \\ & W_\mu^- W_\nu^+) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \\ & \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\nu^+ W_\mu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ W_\nu^- - Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\mu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - \\ & A_\nu A_\mu W_\nu^+ W_\mu^-) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\mu^- W_\nu^+) - 2A_\nu Z_\mu^0 W_\mu^+ W_\nu^-] - g\alpha [H^3 + \\ & H \phi^0 \phi^0 + 2H \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \alpha_h [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + \\ & 2(\phi^0)^2 H^2] - gM W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \frac{1}{2}ig [W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \\ & \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2}g [W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \\ & \phi^0 \partial_\mu H) - ig \frac{s_w}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + igs_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \\ & \phi^- \partial_\mu \phi^+) + igs_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\ & \frac{1}{4}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \\ & \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - \\ & W_\mu^- \phi^+) - g^2 s_w^2 (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - g^4 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - e^\lambda (\gamma \partial + m_\lambda^2) e^\lambda - \\ & \bar{\nu}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_\lambda^2) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_\lambda^2) d_j^\lambda + igs_w A_\mu [-(e^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \\ & \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)] + \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu \nu^\lambda) + (e^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - \\ & 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \\ & \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\lambda) + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda) + \frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_\lambda^2}{M} [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \\ & \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} [H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_\lambda^2 (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \\ & \gamma^5) d_j^\lambda) + m_\lambda^2 (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\lambda) + \frac{ig}{2\sqrt{2}} \phi^- [m_\lambda^2 (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\lambda) - m_\lambda^2 (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \\ & \gamma^5) u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \\ & \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + igc_w W_\mu^+ (\partial_\mu X^0 X^- - \\ & \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + igs_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + igc_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + \\ & igs_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + igc_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^- - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + igs_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^- + \\ & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}gM [\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w^2} \bar{X}^0 X^0 H] + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \\ & \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} igM [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + igM s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \\ & \frac{1}{2}igM [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0] \end{aligned}$$

Bladmuziek (J.S. Bach) bladmuziek



Het Higgs mechanisme

De theorie:

Massaloze kracht(deeltjes) in
een lokale ijk-invariante theorie

$$SU(2)_L \otimes U(1)_Y \otimes SU(3)_C$$

De werkelijkheid:

Massieve
deeltjes en
krachtdeeltjes



(In)famous Higgs boson



Het Higgs boson



Paris Hilton

Beroemd en constant in het nieuws
... maar zijn ze belangrijk ?

Het Higgs mechanisme

De theorie:

Massaloze kracht(deeltjes) in een lokale ijkinvariante theorie

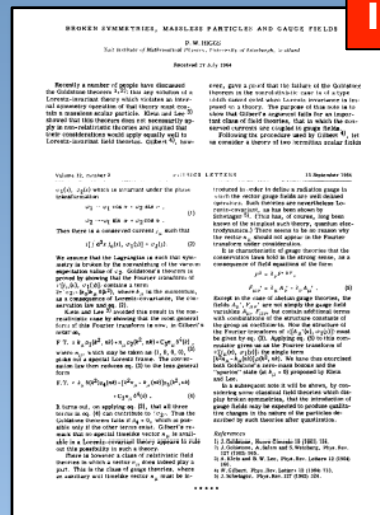
$$SU(2)_L \otimes U(1)_Y \otimes SU(3)_C$$

De werkelijkheid:

Massieve deeltjes en krachtdeeltjes



idee

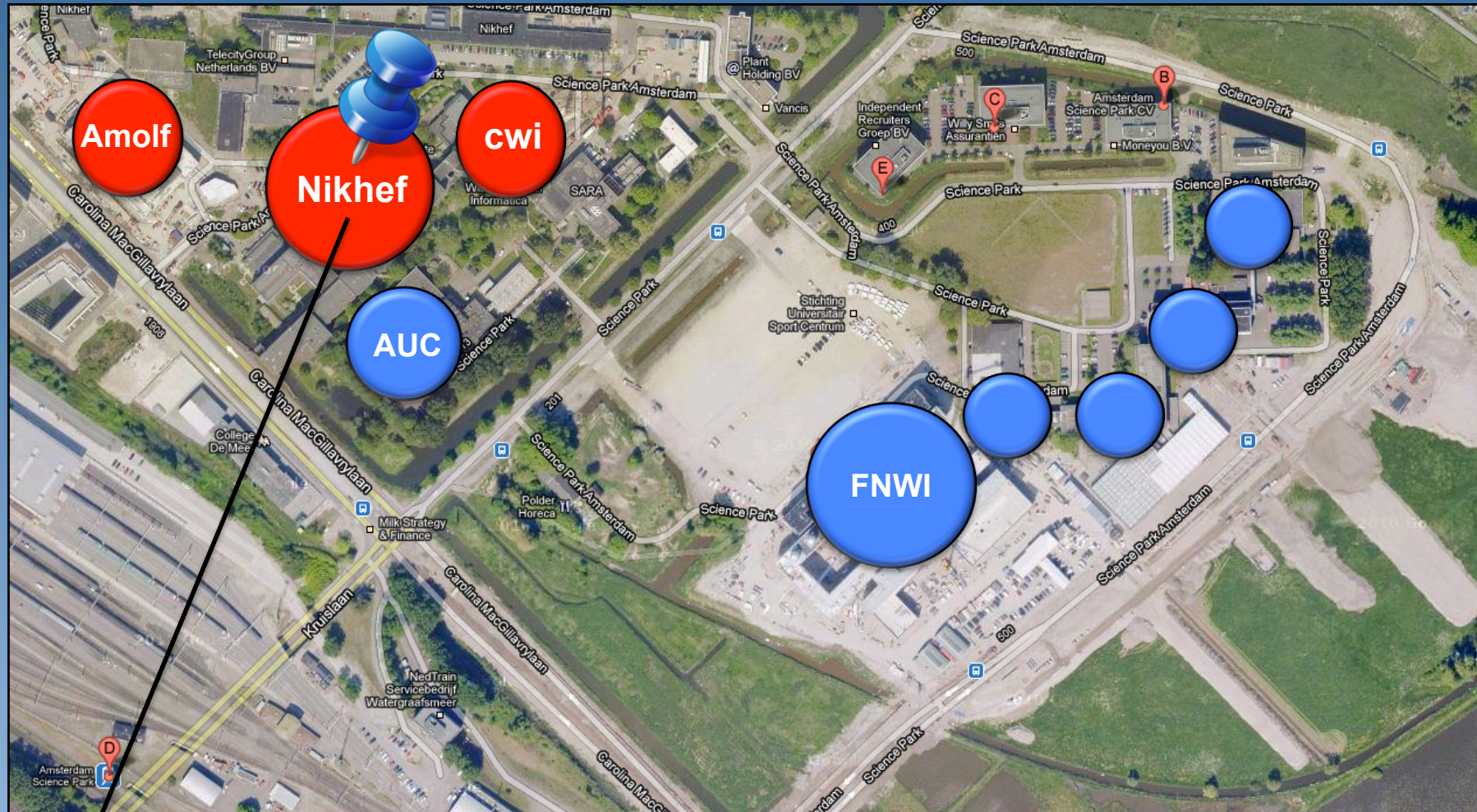


Er is een manier om deze 2 werelden te combineren.

Dan moet er ook **Higgs boson** zijn

- September 1964 -

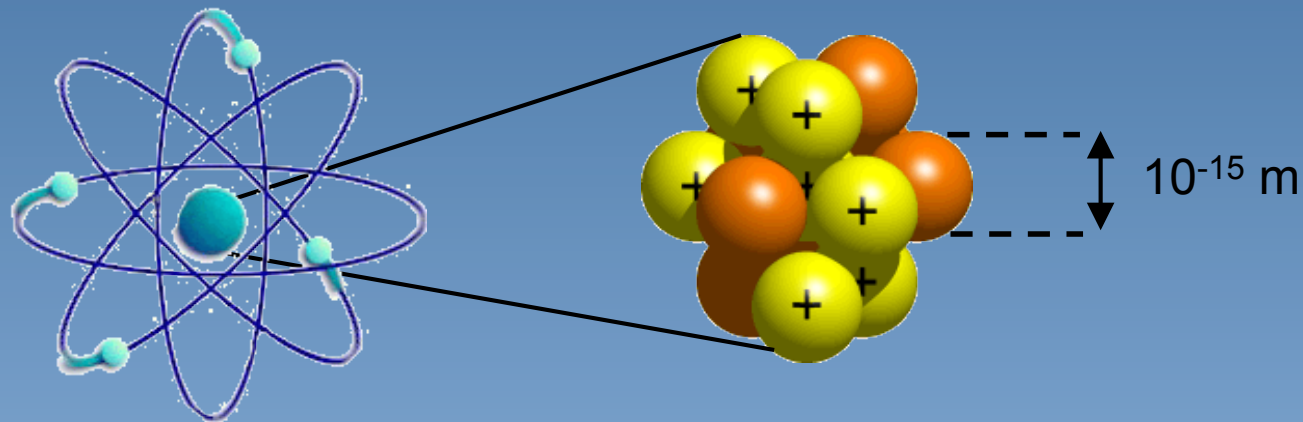
Het Amsterdam Science Park is meer dan alleen de UvA



Nikhef = Nationaal Instituut voor Subatomaire fysica

1^e jaar: Stan Bentvelsen, Auke-Pieter Colijn, Ivo van Vulpen, Marcel Vreeswijk
later: andere vakken en bachelor en master projecten

Deeltjesfysica



atoom

kern

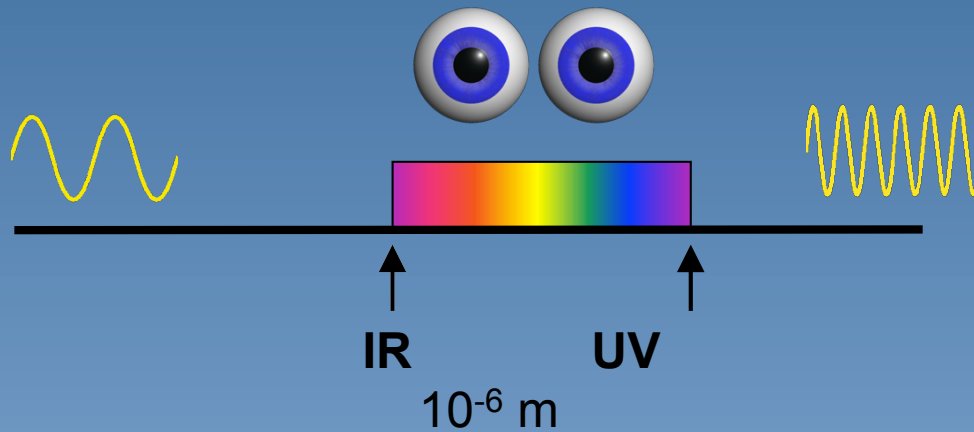
Hoe bekijk je dingen op deze afstanden eigenlijk ?

Kijken zonder je ogen te gebruiken



1] Kijken met licht

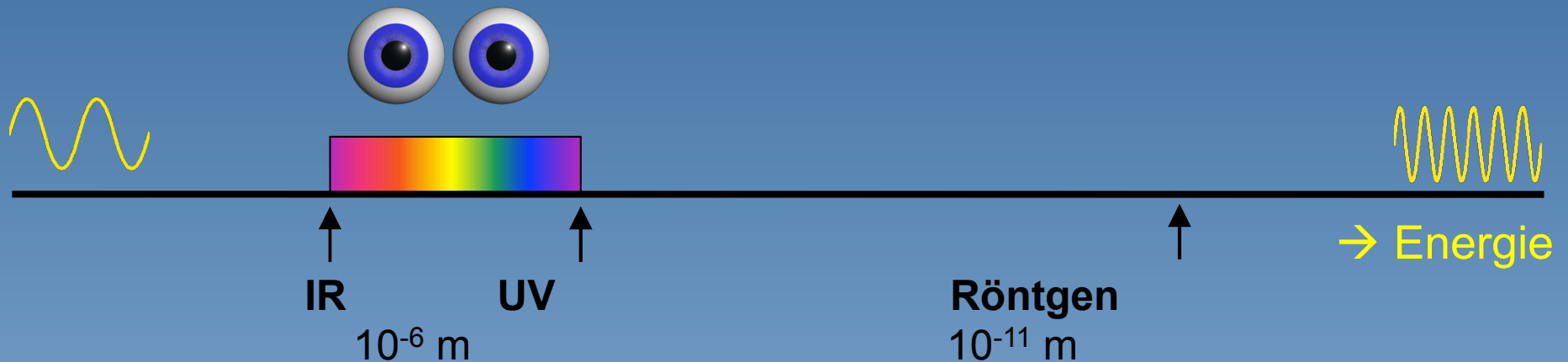
Licht verstrooit aan objecten die groter zijn dan zijn golflengte



Met je oog kan je niks zien
dat kleiner is dan 10^{-6} m

1] Kijken met licht

Licht verstrooit aan objecten die groter zijn dan zijn golflengte.



2] Kijken met deeltjes

Quantummechanica: deeltjes zijn golven

→ microscoop voor zeer kleine afstanden:

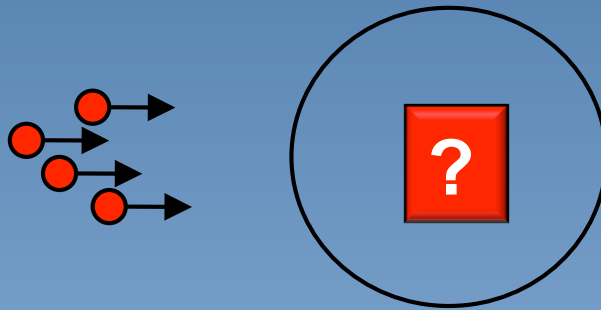
- klein: elektronen microscoop
- kleinst: protonen microscoop

De Broglie:

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{p} = \frac{2\pi\hbar}{\gamma m v}$$

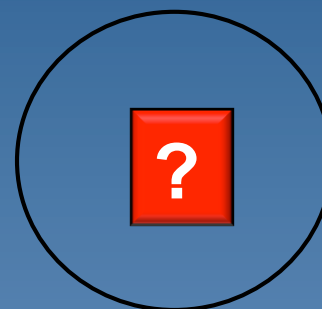
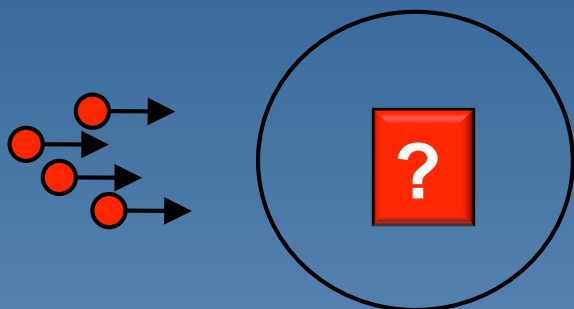
onbekend voorwerp achter een gordijn
... en 100 kogeltjes

bovenaanzicht

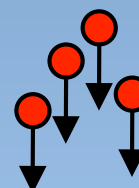
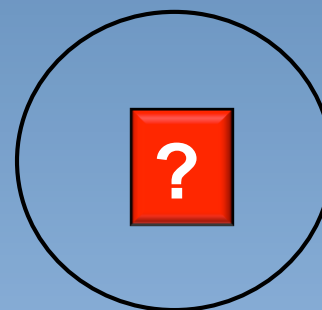
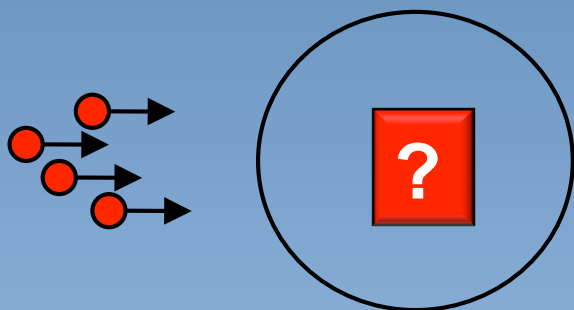


Hoe ketsen de kogels af ?

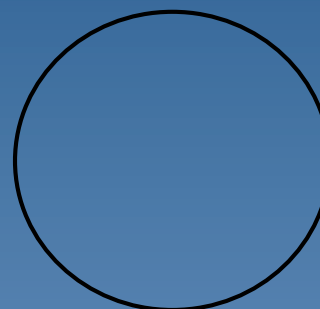
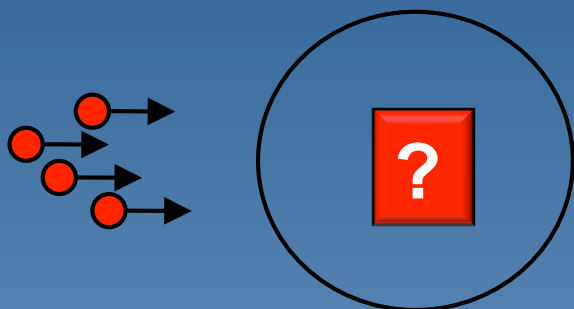
Situatie 1



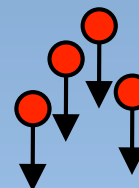
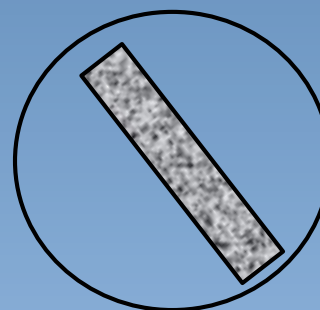
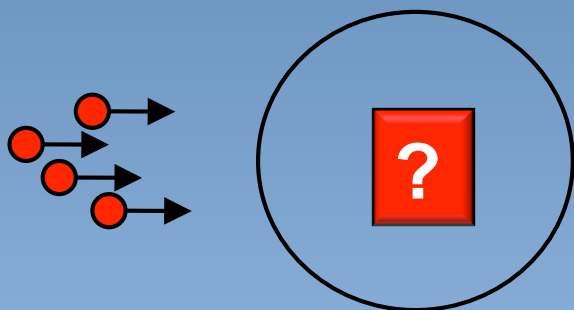
Situatie 2



Situatie 1



Situatie 2



Het zichtbaar maken van (niet-)afgeketste deeltjes

Röntgen foto

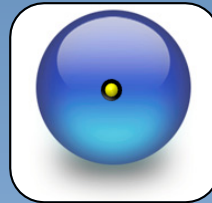


Het atoom, Rutherford scattering



6 MeV alfa deeltje: zeer korte golf

Hypothese:

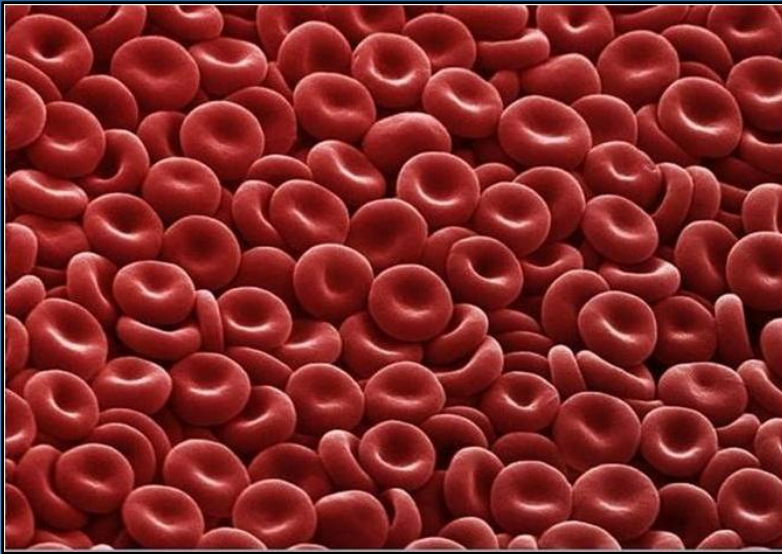


$$V \propto \frac{1}{r}$$

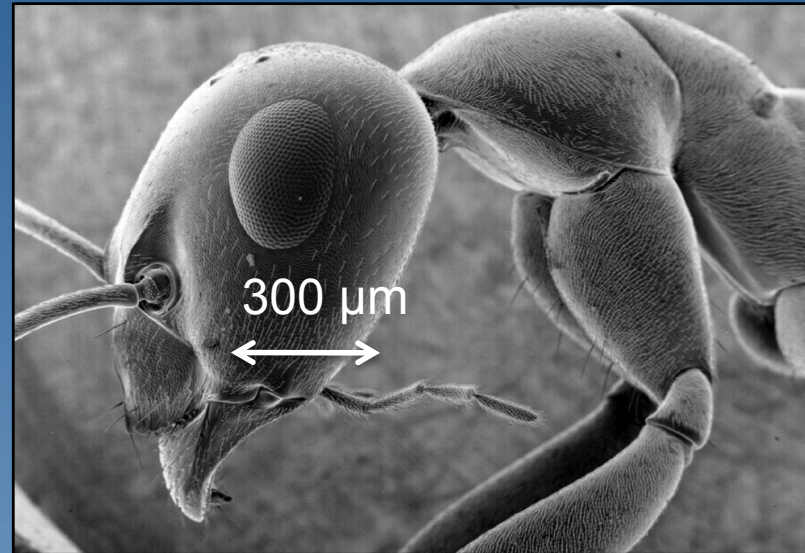
$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) = \left(\frac{ZZ'}{4E} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\theta/2)}$$

dit bleek te kloppen

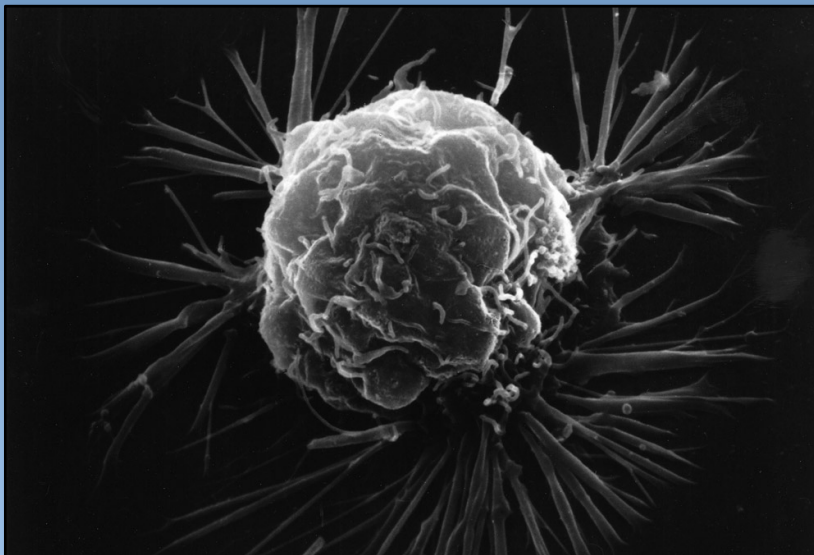
Rode bloedlichaampjes



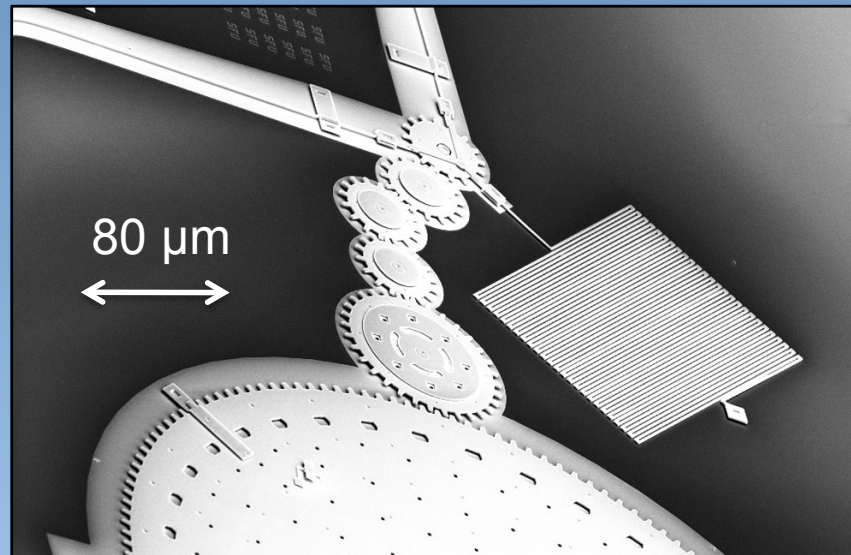
Mier



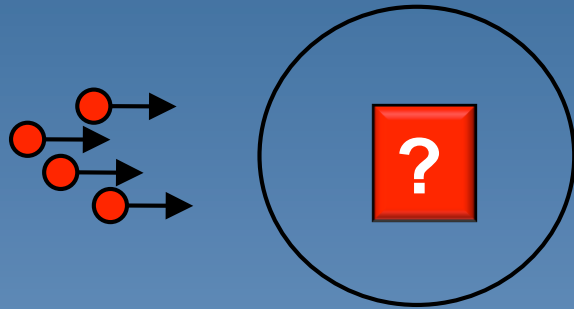
Borstkanker cel



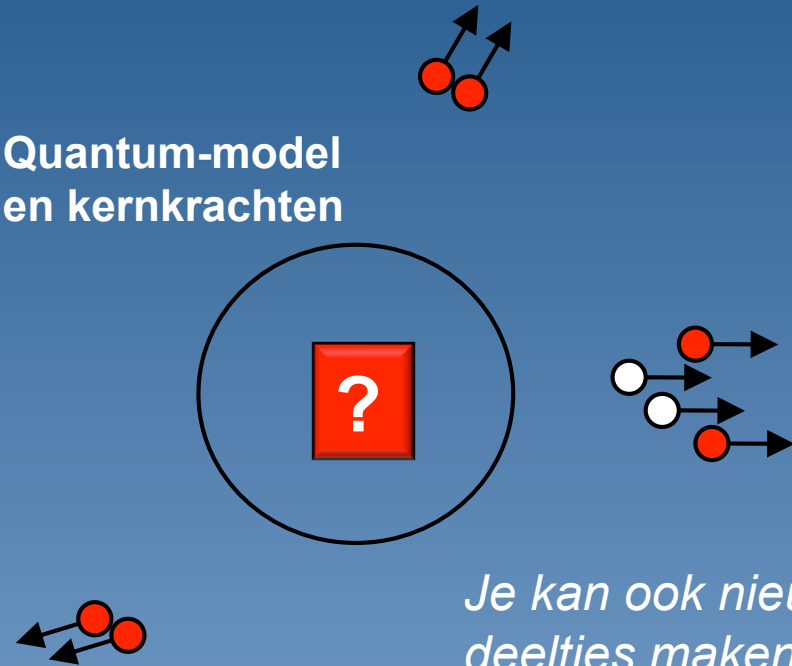
Microelectronisch systeem



Situatie 3



Quantum-model en kernkrachten



*Je kan ook nieuwe
deeltjes maken*

‘Kijken’ naar sub-atomaire structuren:

- 1) Kleine kogels maken:
- 2) Berekenen wat je verwacht voor een hypothese:
- 3) Afgeketste deeltjes kunnen bekijken:

Deeltjesversneller

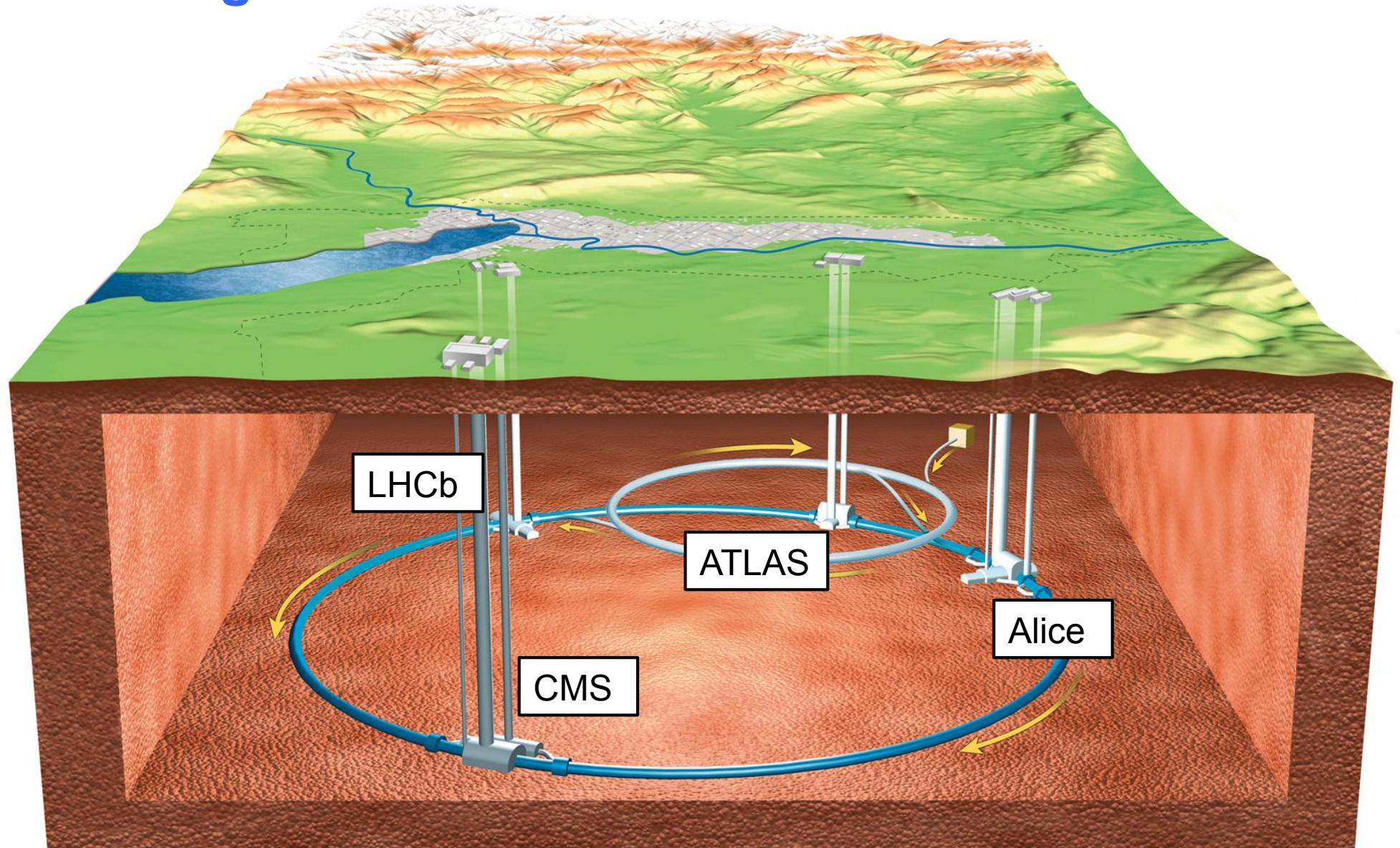
Theorie

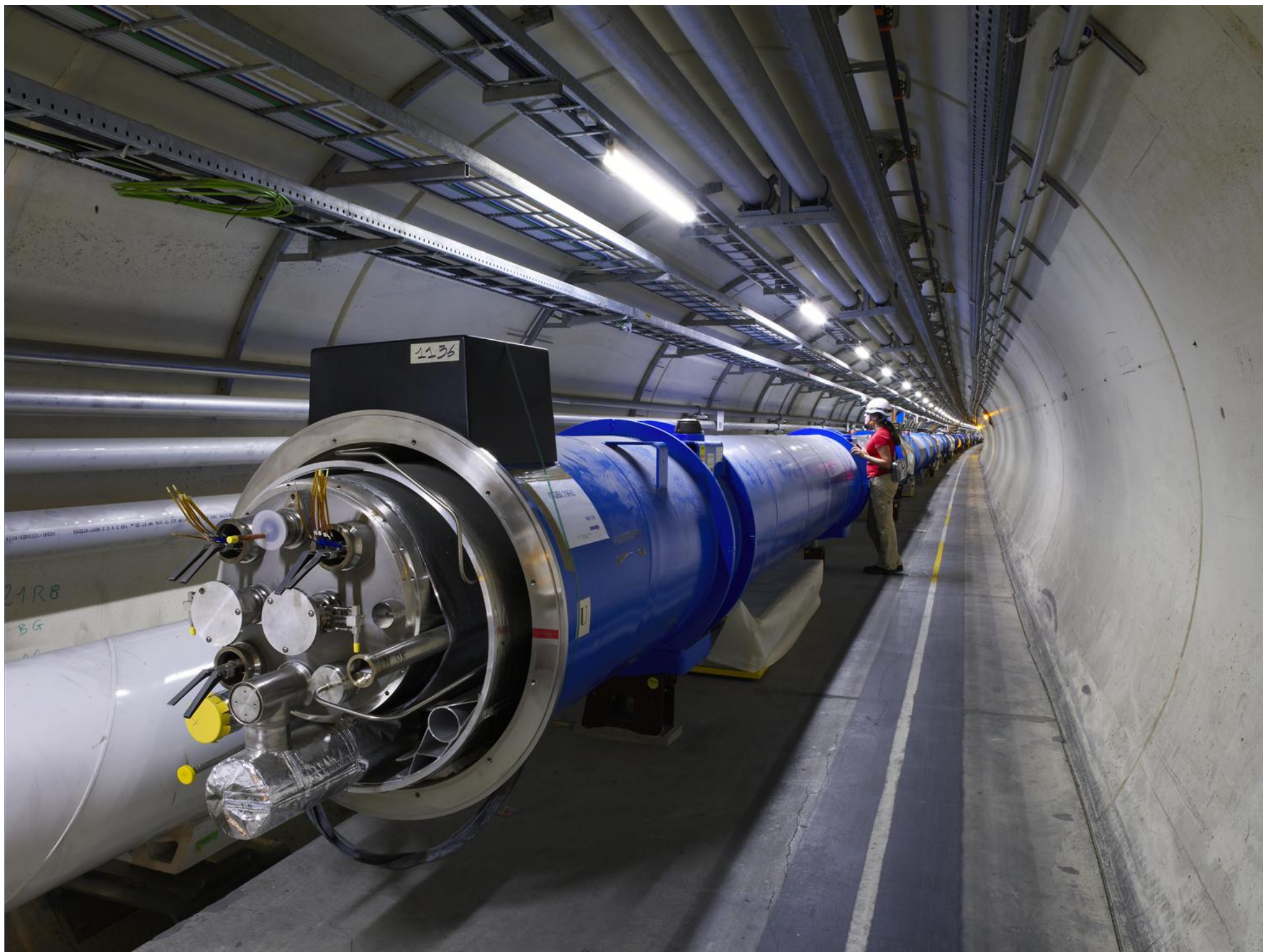
Detector

An aerial photograph of the CERN region near Geneva, Switzerland. The image shows a vast landscape with a patchwork of green and brown fields in the foreground, a large blue lake (Lake Geneva) in the middle ground, and a range of snow-capped mountains in the background. A large red oval is drawn across the middle of the image, highlighting the area where the Large Hadron Collider (LHC) is located. A semi-transparent blue box with white text is centered within this oval.

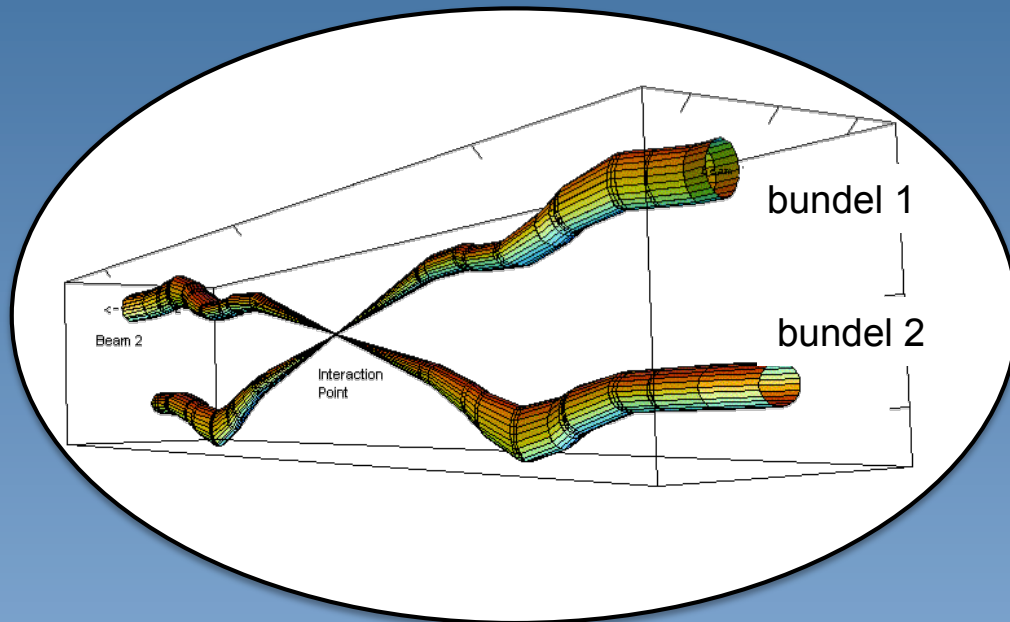
De grootste microscoop op aarde
de Large Hadron Collider (LHC)
op CERN bij Genève

De Large hadron collider



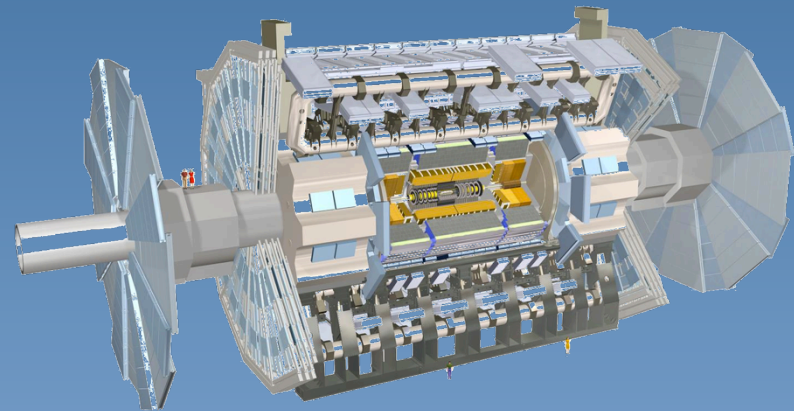


onze objecten en kogels:
botsend protonen



40 miljoen botsingen per seconde
Helaas maar 200 Hz bewaren

ons 'fototoestel'

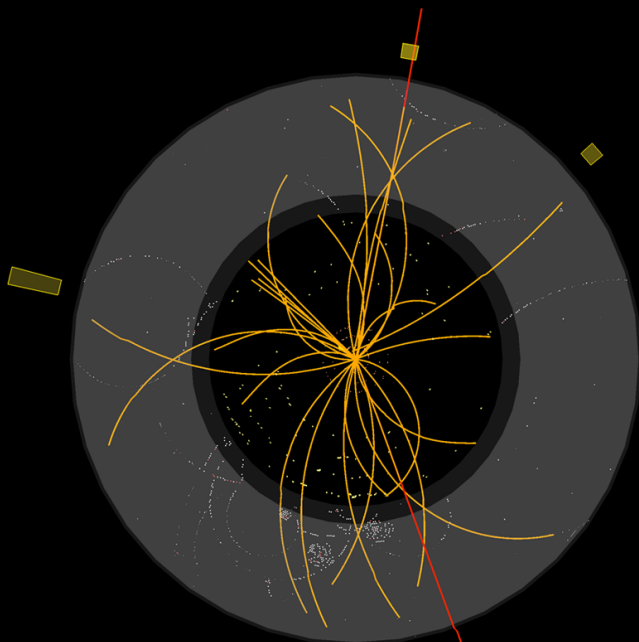


*Paleis op
de dam*



ATLAS EXPERIMENT

Run: 154822, Event: 14321500
Date: 2010-05-10 02:07:22 CEST

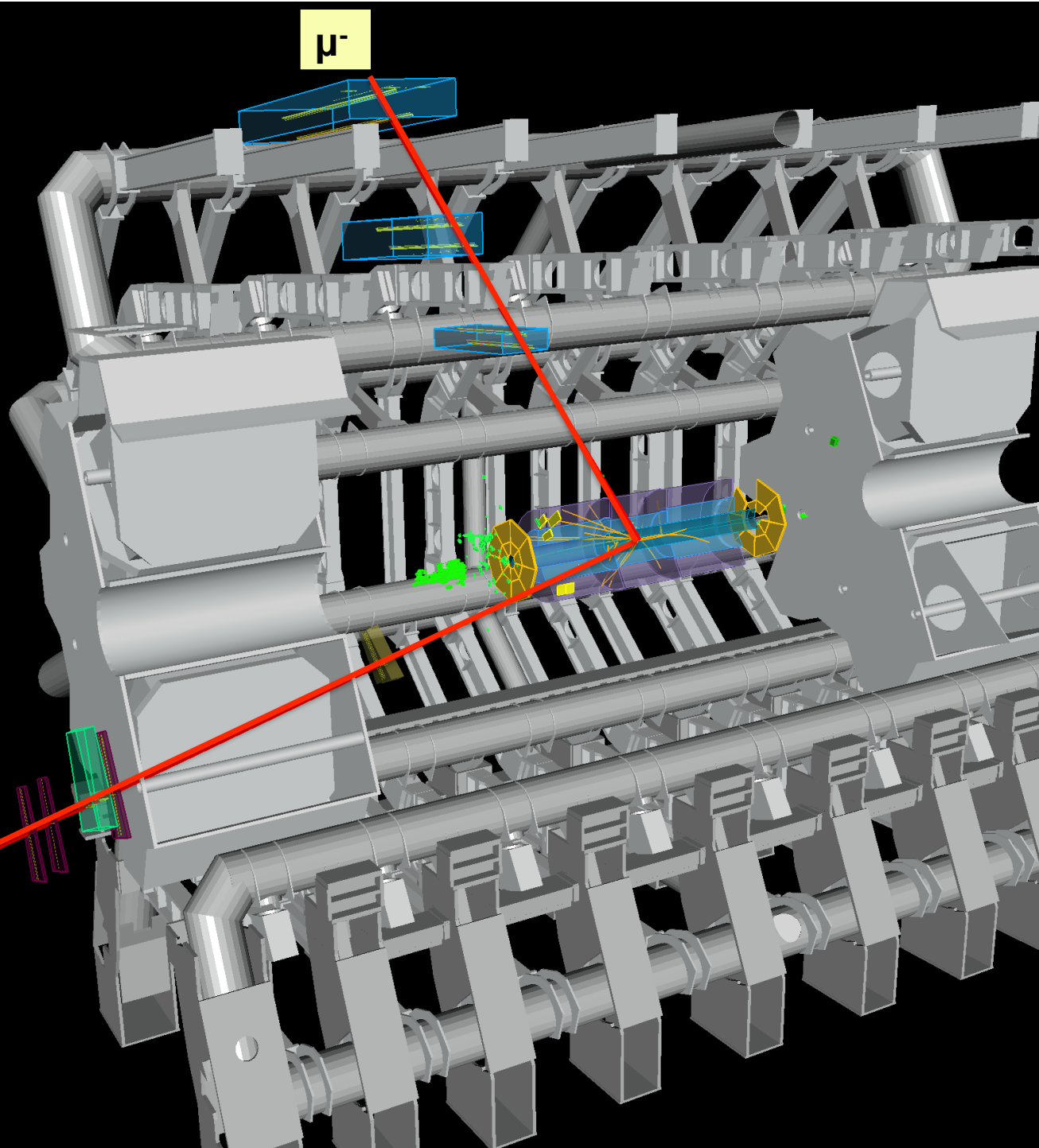


$p_T(\mu^-) = 27 \text{ GeV}$ $\eta(\mu^-) = 0.7$
 $p_T(\mu^+) = 45 \text{ GeV}$ $\eta(\mu^+) = 2.2$

$M_{\mu\mu} = 87 \text{ GeV}$

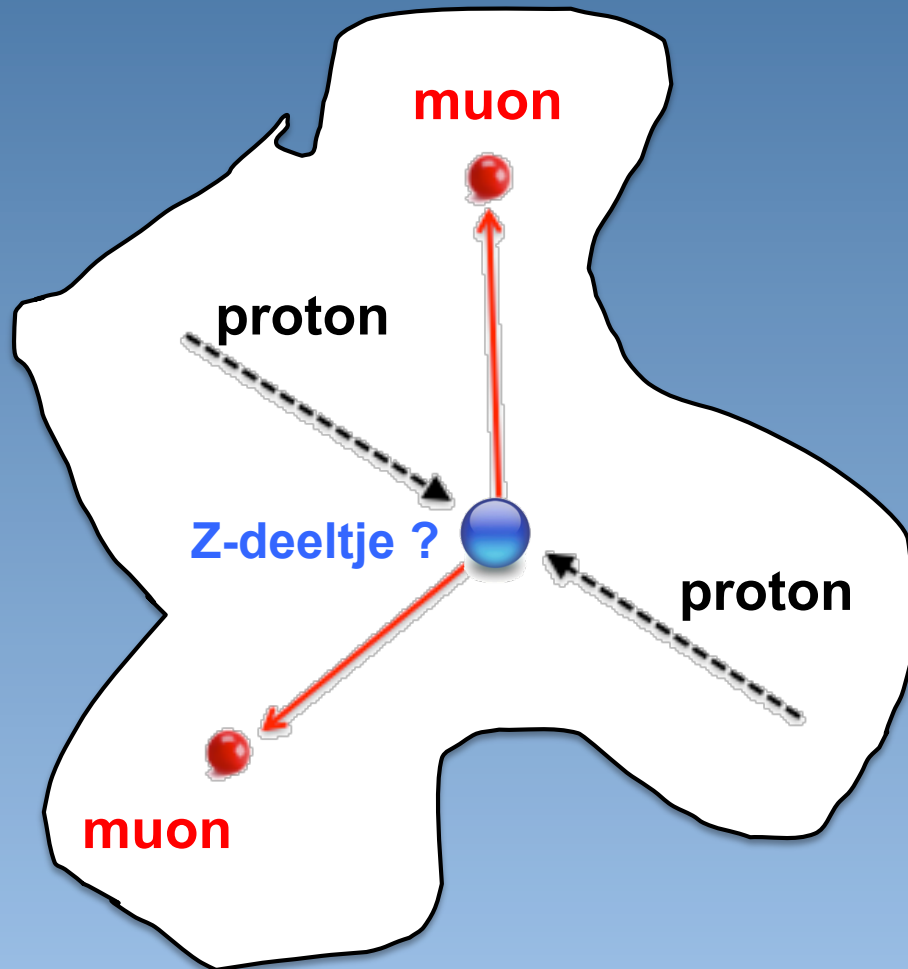
μ^+

μ^-

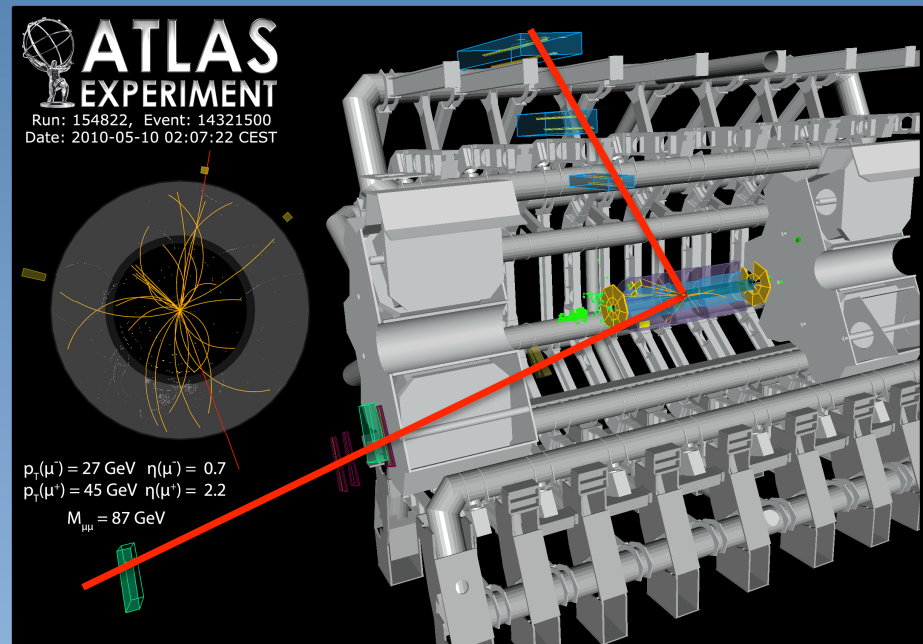


Hoe bewijs je dat er een Z-deeltje bestaat ?

Afwijking van de voorspelling in een model zonder Higgs boson



2-muonen gezien in de ATLAS detector



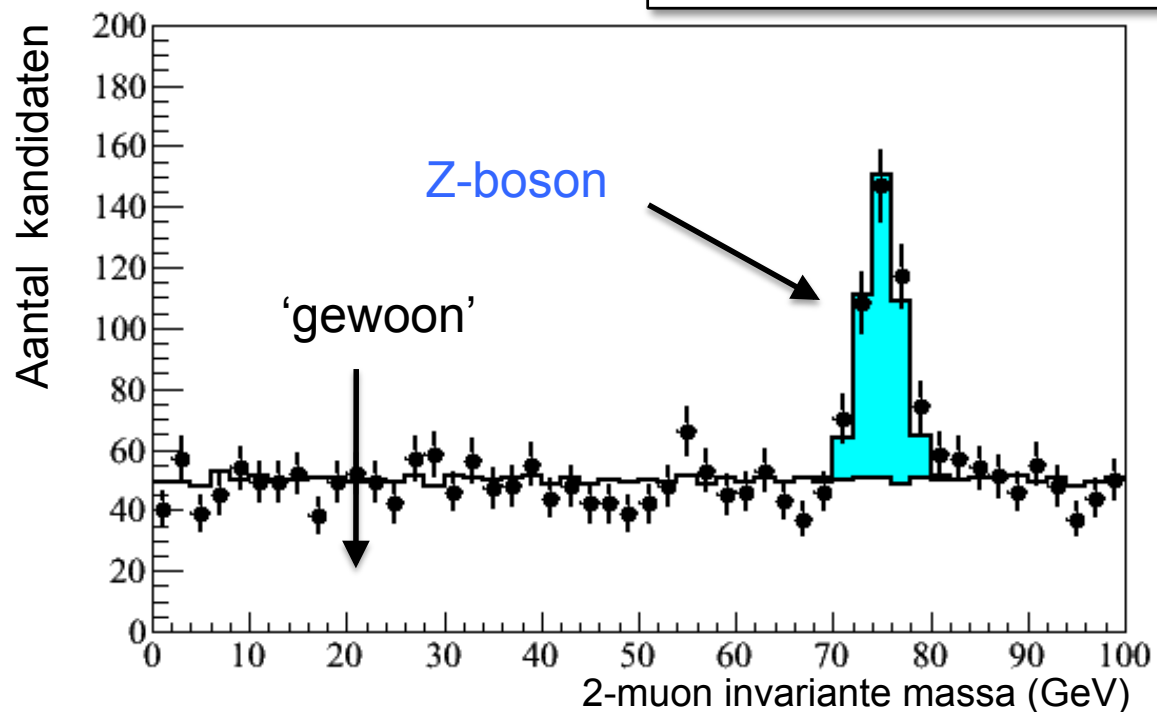


2-muon invariante massa

‘gewoon’: geen structuur

Z-boson: voornamelijk op 1 plek

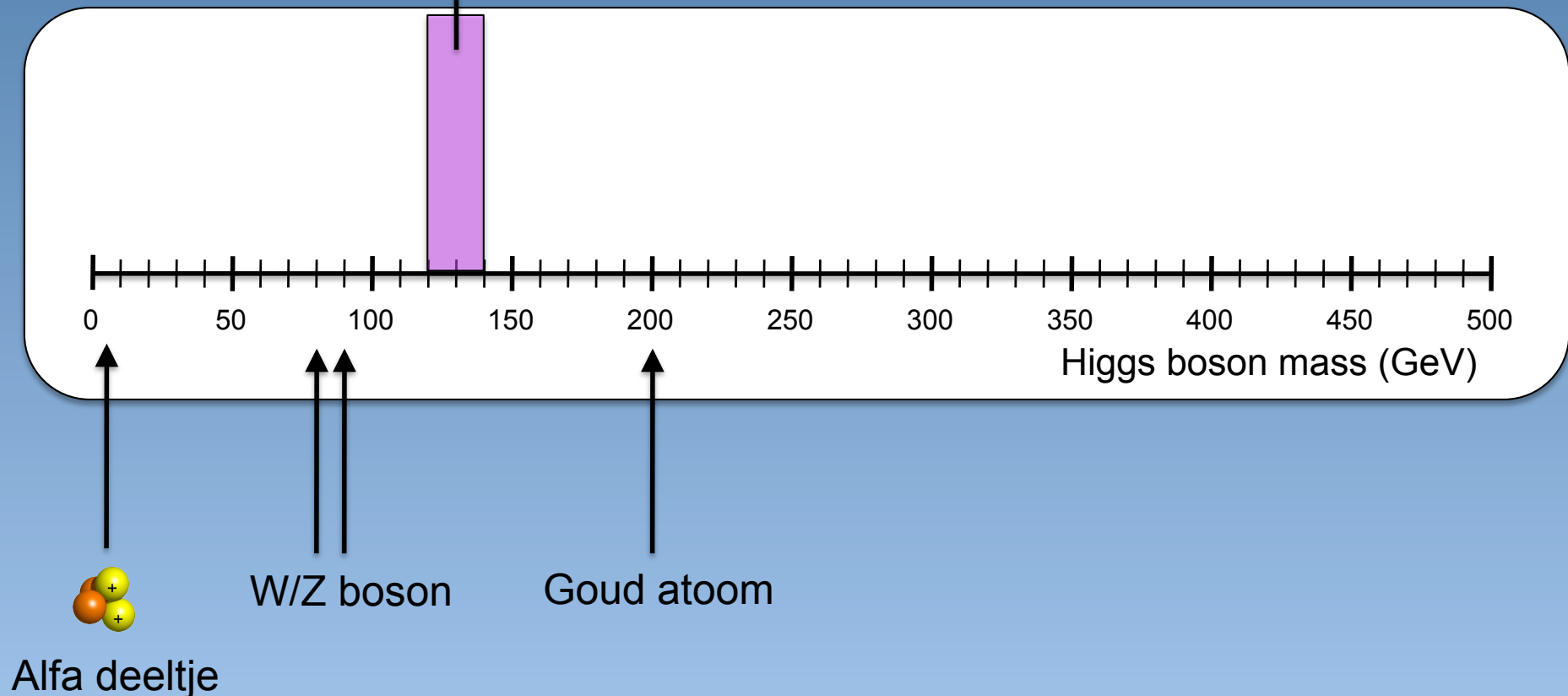
2-muon invariante massa



De massa van het Higgs boson

Vingerafdruk:

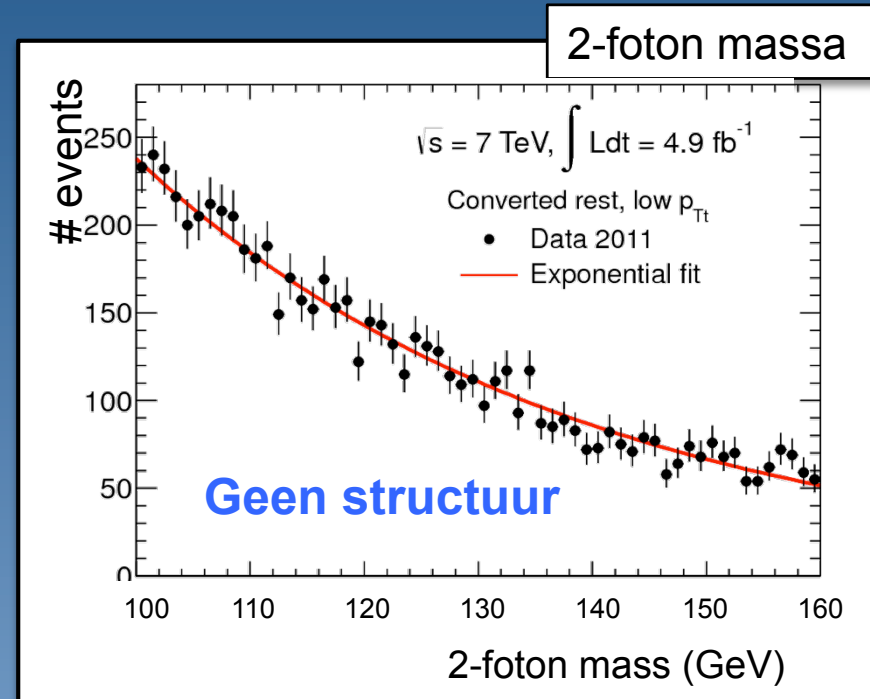
- piekje in 2 fotonen (redelijk makkelijk te zien)
- piekje in 4 muonen (redelijk lastig te zien)



Computersimulaties:

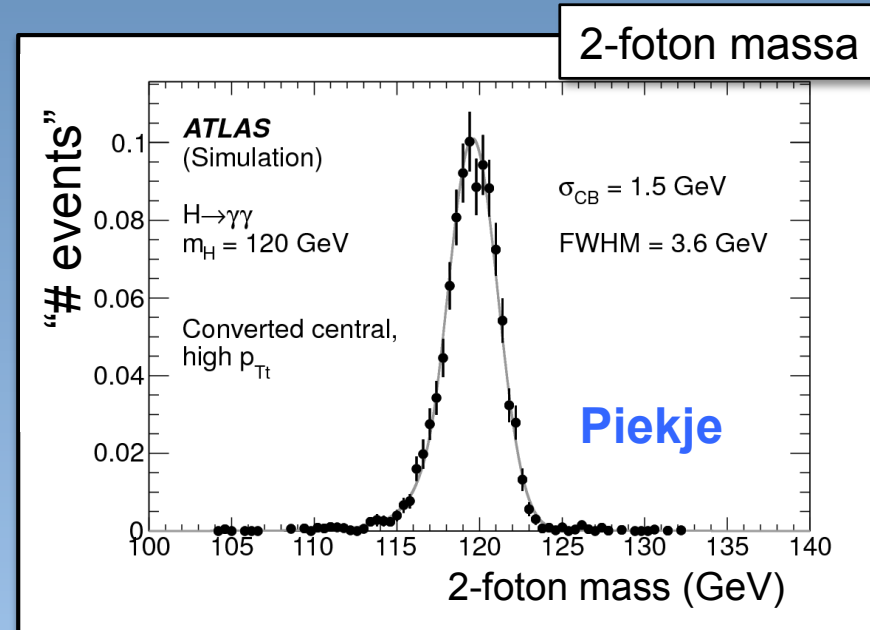
1) Er is geen Higgs boson

- geen structuur
- 10.000 botsingen



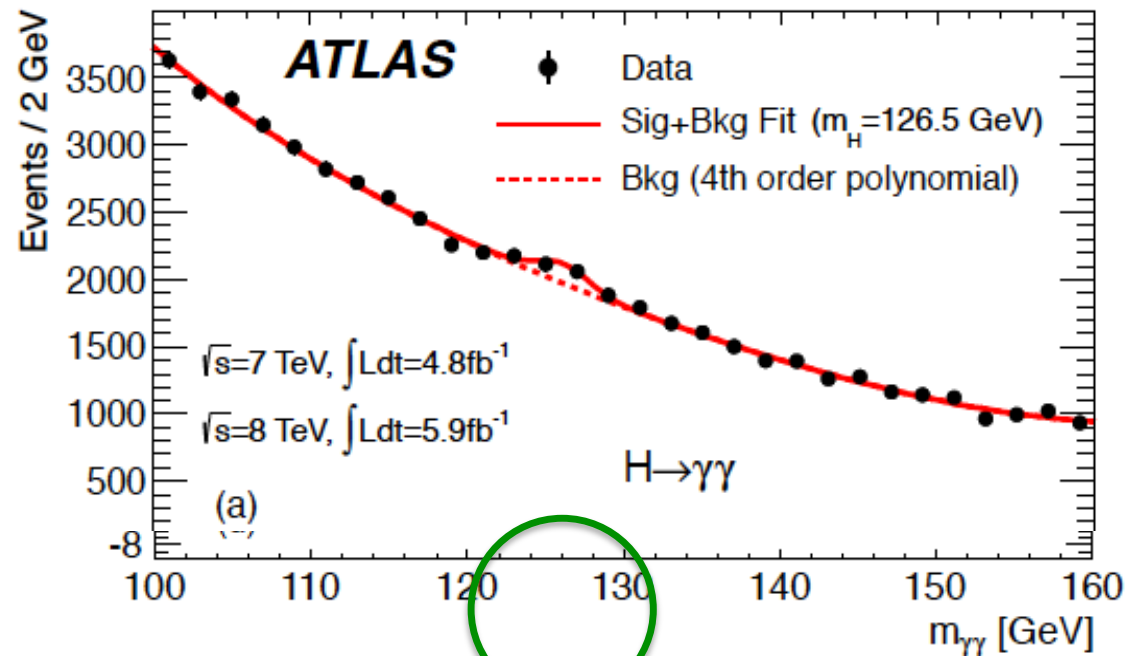
2) Extra Higgs boson

- piekje
- 40 extra botsingen



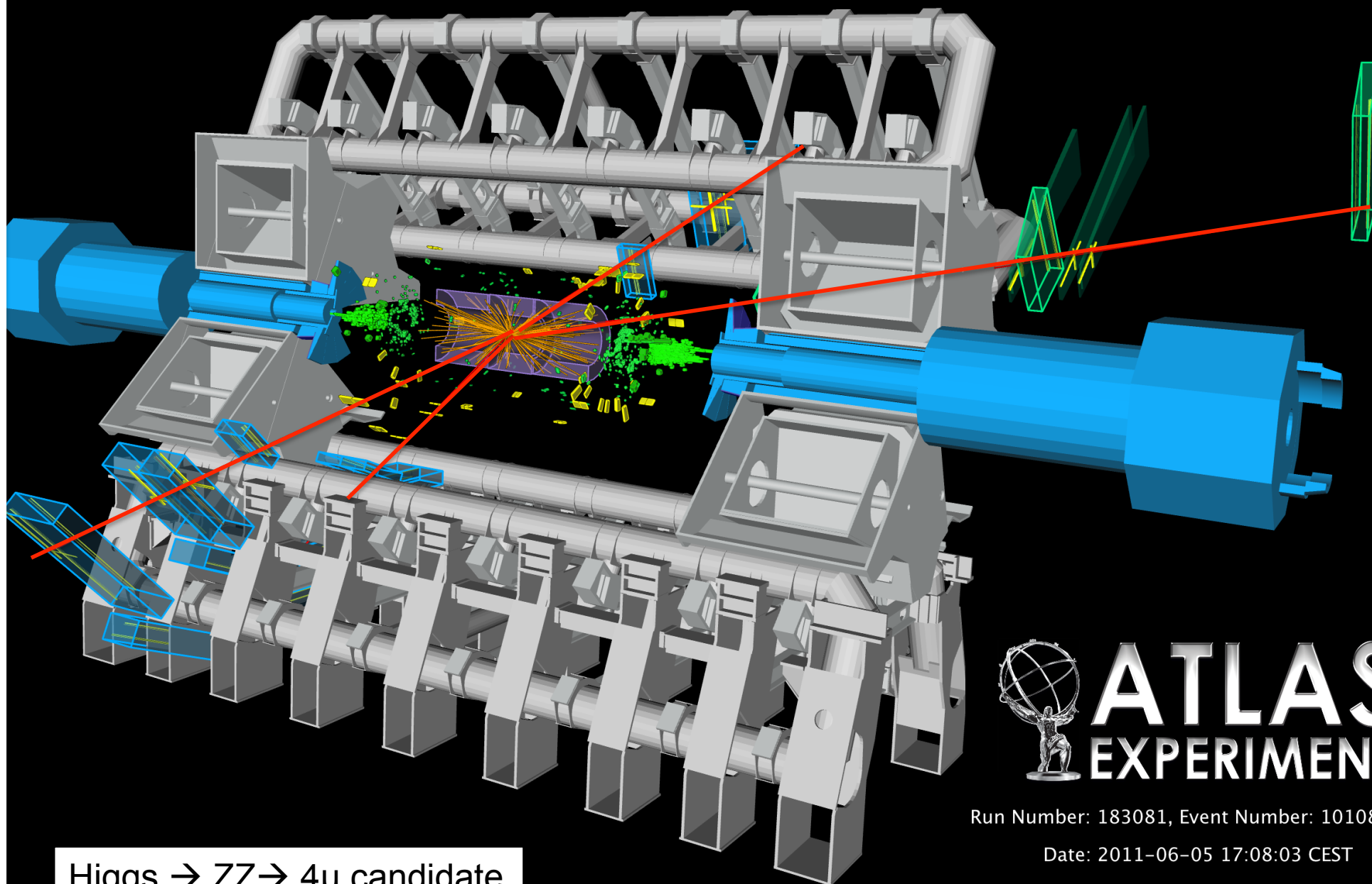
De resultaten van het ATLAS experiment - juli 2012 -

Higgs $\rightarrow$ 2 fotonen



Yes, een piekje !!!

Zien we ook aanwijzingen
in botsingen waar 4 muon
deeltjes gemaakt zijn ?



ATLAS
EXPERIMENT

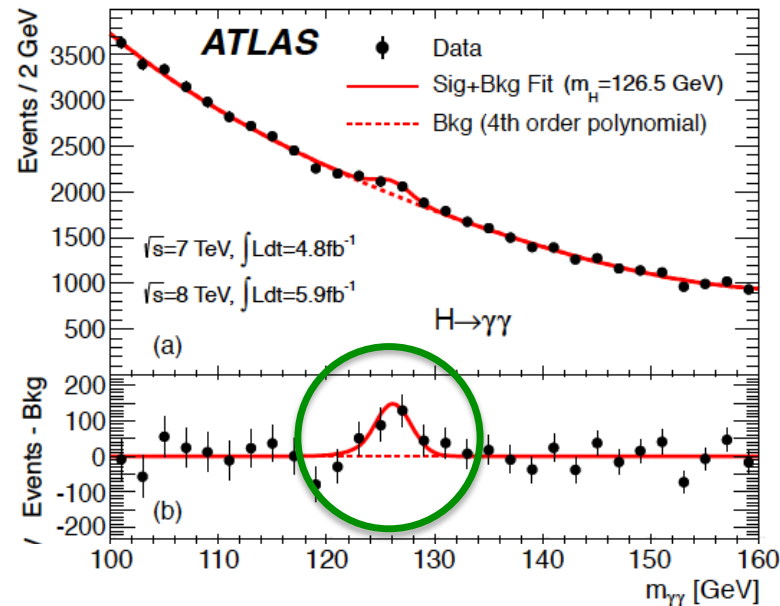
Run Number: 183081, Event Number: 10108572

Date: 2011-06-05 17:08:03 CEST

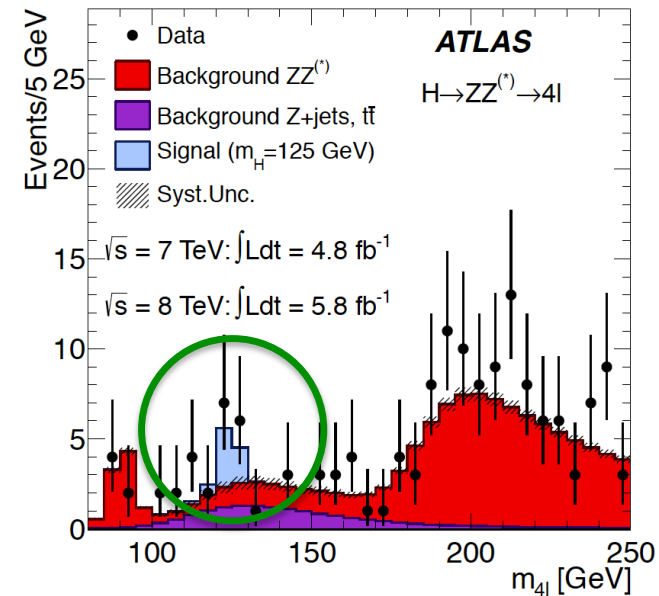
Higgs $\rightarrow$ ZZ $\rightarrow$ 4 μ candidate

De resultaten van het ATLAS experiment - juli 2012 -

Higgs $\rightarrow$ 2 fotonen



Higgs $\rightarrow$ 4 leptonen



De kans dat je toevallig zo'n excess krijgt in beide distributies als er niks nieuws zou zijn is ongeveer 1 op de miljard $\rightarrow$ we hebben iets nieuws ontdekt!

Verwondering over de natuur:

...

Hoe krijgen deeltjes massa



Waar is donkere materie van gemaakt ?

Waar is alle anti-materie gebleven ?

...

Volume van het heelal: (on)eindig ?

(Hoe) is de tijd begonnen ?

Waarom is elektrische lading gequantiseerd ?

...

Oplossing energievraagstukken

Materiaaleigenschappen, quantumcomputing, ...

...

Heel veel plezier met alle natuur- en wiskunde de komende tijd