


De zoektocht naar het Higgs deeltje –
*de oorsprong van massa,
fundament van de moderne deeltjesfysica*

W. Verkerke (NIKHEF)

De Higgs – Waar gaat het over?

- Op 4 juli dit jaar hebben de ATLAS en CMS experimenten op CERN een nieuw deeltje ontdekt wat zeer waarschijnlijk het lang gezochte Higgs boson is

NRC  **HANDELSBLAD**

Woensdag 4 juli 2012 Jaargang 42 no.233 Algemeen Handelsblad (1828) en Nieuwe Rotterdamse Courant (1844) Prijs €2,-

Kairo is synoniem met seksueel geweld **Pininfarina gaf Ferrari een gezicht** **Afstudeerfilms: lelijke kinderen, dolende zielen**
buitenland 10 het grote verhaal 12-13 film 18-19



Grafische weergave van de sporen van een proton-protonbotsing in een van de deeltjesdetectoren van CERN, het deeltjesversnellerinstituut bij Genève. Foto AFP / CERN

Historische stap in het onderzoek naar de bouwstenen waaruit heelal is opgebouwd

Higgsdeeltje 'vrijwel zeker' ontdekt

Door BRUNO VAN WAYENBURG
AMSTERDAM. Na twee uur spanningsrekenende presentaties komt CERN-directeur Rolf Heuer vanmorgen met de mededeling: „We hebben een ontdekking, de waarneming van een nieuw deeltje, met de eigenschappen van een Higgs-boson“.

Het Higgsdeeltje dus, het enige deeltje in het Standaardmodel van de natuurkunde waarvan het bestaan wel voorspeld was maar nog niet aantoonbaar.

Het is het deeltje dat andere deeltjes hun massa geeft.

Het is groot nieuws: de mededeling leidt tot een ontsluiting in de taal bij het CERN, het deeltjesversnellerinstituut bij Genève. Het publiek van vooral natuurkundigen klappt en joelt.

Aanzienlijk zazzelend applauseren ook de onderzoekers en pers die samengekomen zijn in Nikhef, het instituut voor deeltjesfysica in Amsterdam.

Het lijkt er nu toch echt op dat ze, zij het virtueel, aanwezig zijn bij een historische aankondiging. Uit presentaties van Joe Incandela van de CMS-deeltjesdetector en van Gianotti van de ATLAS-detector, blijkt dat er maar een hele kleine kans op toeval is: minder dan 1 op de 3,5 miljoen. „Er is absoluut een nieuw deeltje ontdekt, dat valt niet meer te ontkennen“, zegt ook Stan Benvenise, projectleider van de Nederlandse inbreng in het ATLAS-experiment, waarbij 45 onderzoekers betrokken zijn.

Om het Higgsdeeltje aan te toonen, moet je nieuwe deeltjes maken. Dat is popodiat, maar eenvoudig. Je laat in een deeltjesversneller deeltjes met vrijwel de lichtsnelheid met elkaar botsen. Hoe harder de botsing, hoe meer energie er wordt omgezet in nieuwe deeltjes. Zoals het Higgs-boson, dat in de jaren zestig voorspeld werd door zes theoretisch natuurkundigen. Het werd naar een van hen genoemd, Peter Higgs.

De Higgs is nodig om te verklaren hoe het komt dat alles massa heeft: doordat deeltjes worden afgereemd door het zogeheten Higgs-veld. Zo alomtegenwoordig als het uitgesproken Higgs is, zo ongreepbaar is het als deeltje.

Zo gauw het ontstaat uit de enorme energie die vrijkomt bij een botsing, zo snel valt het ook weer uit: kaar in verschillende elementaire deeltjes. Alleen die brokstukken zijn, meteen na een botsing, goed te zien in de detectoren.

Maar wel vaker ontstaat er bij een botsing geen Higgs, maar een mix van al bekende deeltjes. Onderscheid maken tussen 'Higgs- en niet-Higgs-botsingen' is een kwestie van netjes meten en turven en zware statistiek.

Daarover gaat het allemaal, in de presentaties van Gianotti en Incandela.

In het deeltjeslagen gaat het om de sigma-waarde: een statistische maat voor de kans dat de gevonden botsingen, ook al lijken ze op een nieuw deeltje, toch een toevallige uitschieter zijn. De afspraak is dat je een deeltje pas mag claimen bij een sigma van 5: de kans dat het om een toevallige uitschieter zou gaan is dan 1 op de 3,5 miljoen. Incandela eindigt met een tergende 4,9, net geen 5. Maar Gianotti komt na eindeloze details uit op 5,0.

„Nu moeten we onderzoeken of het ook de Higgs is“, zegt Benvenise. Daar lijkt het wel op. „Al vervalt het wel iets vaker in twee fotonen dan je zou verwachten.“

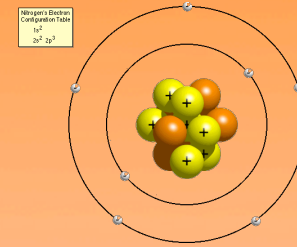
Maar mocht het geen Higgs-boson zijn, of zelfs maar een licht zwaar Higgs-boson, dan zou dat nog groter nieuws zijn. Want meer nog dan naar het Higgs-boson, snakken natuurkundigen naar "nieuwe natuurkunde": metingen of deeltjes die eindelijk eens een keer niet overeenkomen met het Standaardmodel, is dus het devies. „Dit is pas het begin“, concludeert ook Gianotti.

Waarom is dit belangrijk?

Waarom is het zo moeilijk dat duizenden wetenschappers hier tientallen jaren aan gewerkt hebben?

Overzicht

1) Elementaire deeltjes –
hoe vinden we die?



2) Fundamentele krachten –
hoe beschrijven we die



3) Krachten & deeltjes -
wat is de oorsprong van massa



4) De LHC en het Higgs deeltje

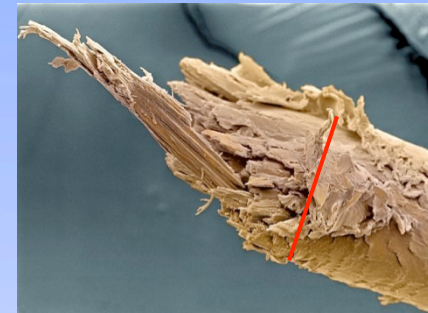


Waarom denken we dat er kleinere deeltjes zijn - Kijken

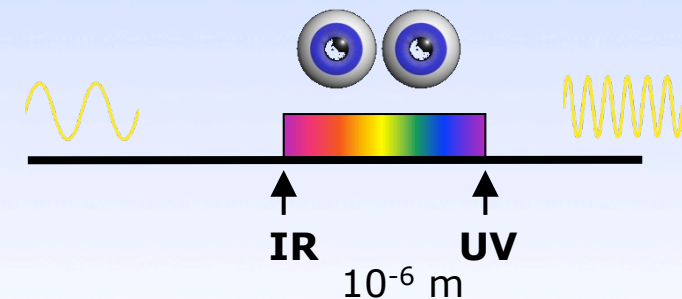
- Zien is geloven, maar wat kan je zien?
- Kijken is verstrooiing van licht



'gespleten haarpunt'

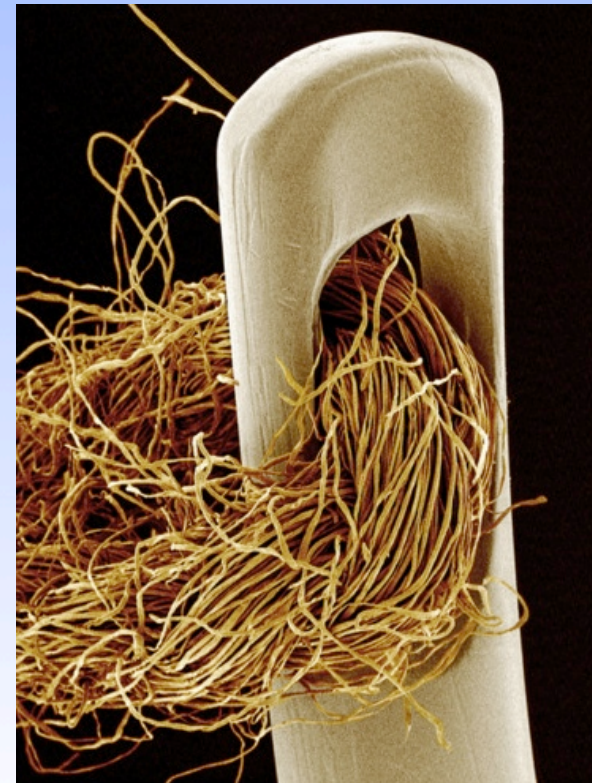
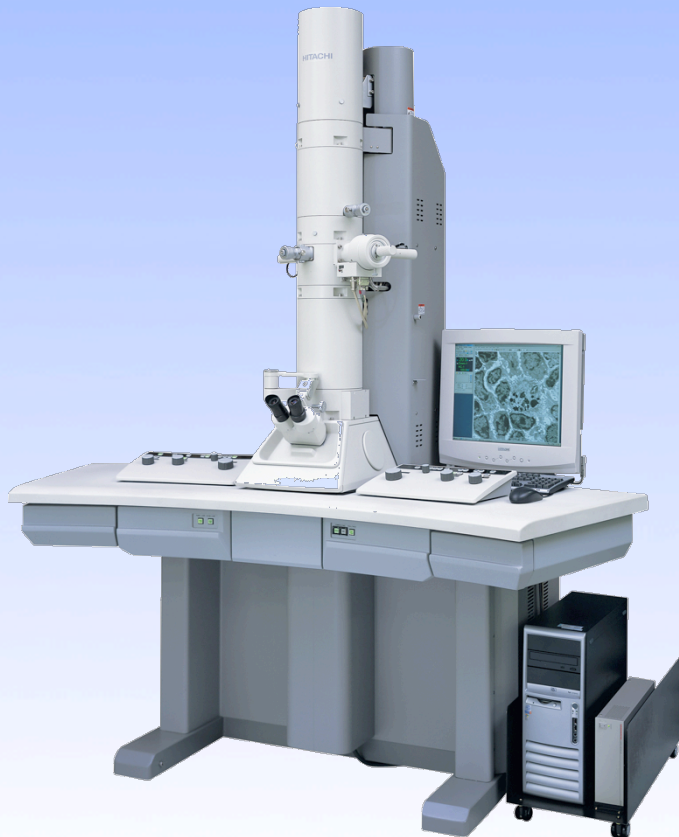


Je kunt geen dingen zien die *kleiner* zijn dan de golflengte van het licht (ca 1/50 haardikte)



Waarom denken we dat er kleinere deeltjes zijn 2 - Kijken

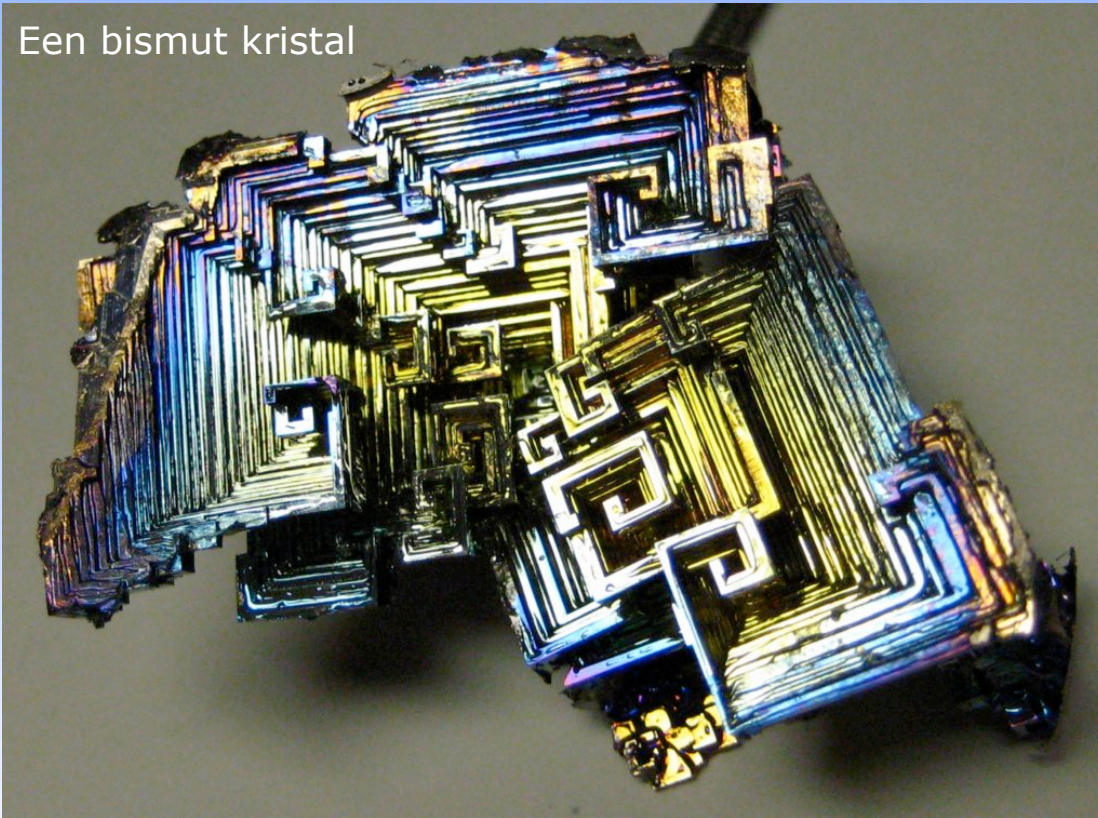
- Zien is geloven, maar wat kan je zien?
- **Kijken is ook verstrooiing van deeltjes.** Vervang oog door detector
- Electronen microscoop bekendste voorbeeld
 - Energie van electron bepaalt nu resolutie → tot 100.000 kleiner, maar kan nog steeds geen atoom(kernen) zien



Waarom denken we dat er kleinere deeltjes zijn - Patronen

- Kijken is niet altijd nodig – opbouw van materie uit bouwstenen kan also blijken uit patronen

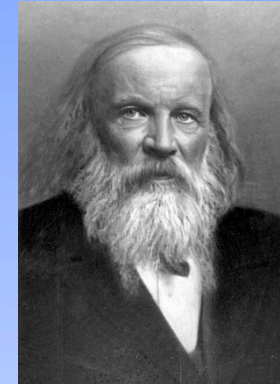
Een bismut kristal



Waarom denken we dat er kleinere deeltjes zijn - Patronen

- Het periodiek systeem der elementen

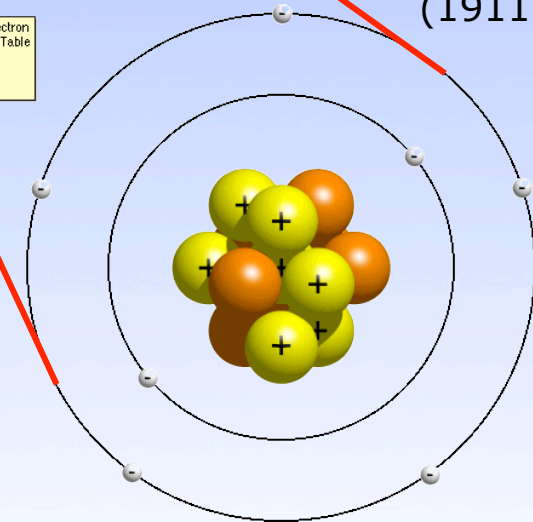
Mendelejev



	1																18	
	1a																0	
1	1	2											13	14	15	16	17	2
	H	He											IIIa	IVa	Va	VIIa	VIIa	He
2	3	4											5	6	7	8	9	10
	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	11	12	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	Na	Mg	IIIb	IVb	Vb	VIIb	VIIIb	VIIIb	VIIIb	IB	IIb		Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	37	38	39	40	41	42	(43)	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	55	56	.	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
	Cs	Ba	.	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	87	88	**	(104)	(105)	(106)	(107)	(108)	(109)	(110)	(111)	(112)	(113)	(114)	(115)	(116)	(117)	(118)
	Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Ff	Uup	Lv	Uts	Uuo
*Lanthaniden	57	58	59	60	(61)	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71			
	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
**Actiniden	89	90	91	92	(93)	(94)	(95)	(96)	(97)	(98)	(99)	(100)	(101)	(102)	(103)			
	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			

Nitrogen's Electron Configuration Table
 $1s^2$
 $2s^2 2p^3$

Atoommodel Rutherford (1911)

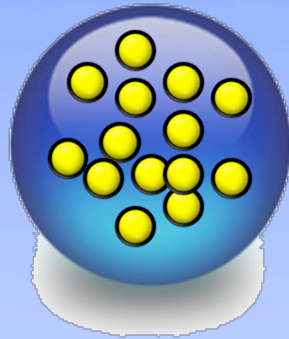


Patronen waren indicatie dat atomen zijn opgebouwd uit kleinere bouwstenen *voordat* experimenten atoommodel verifieerden

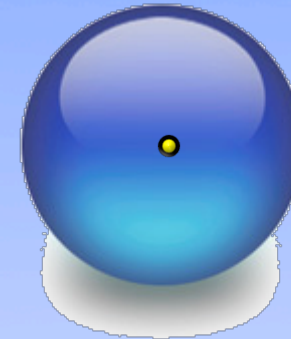
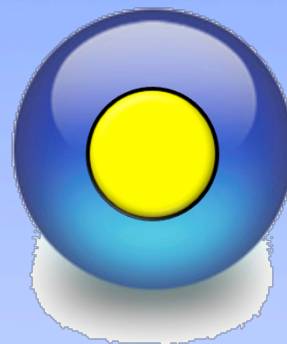
Kijken naar atomen – het experiment van Rutherford

- Actuele vraag ca 1900 – hoe ziet het atoom eruit?

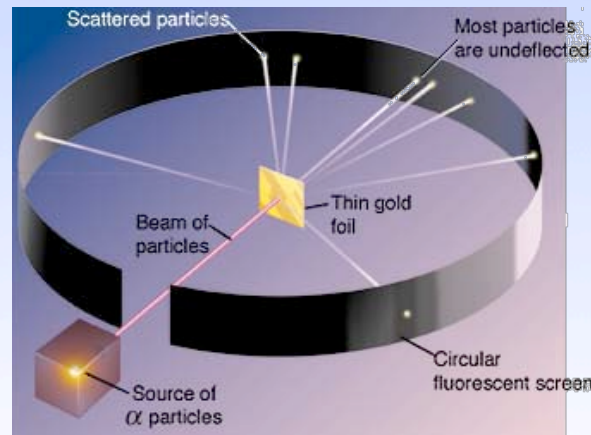
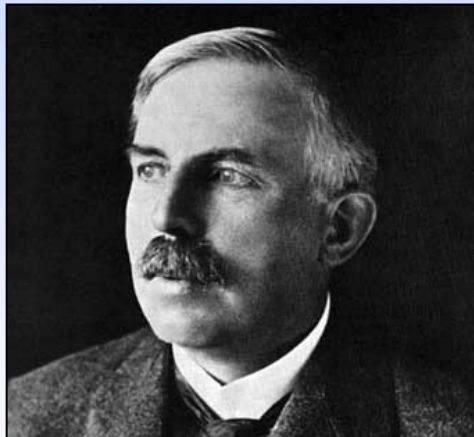
Atoommodel van Thomson



Atoommodel van Bohr



- 'Kijken' - experiment van Rutherford
beschiet met α -deeltjes \rightarrow bekijk verstrooiing



Meeste deeltjes rechtdoor
heel soms kaatsen ze
keihard *terug*

'ijle wolk met harde kern'

We begrijpen het atoom

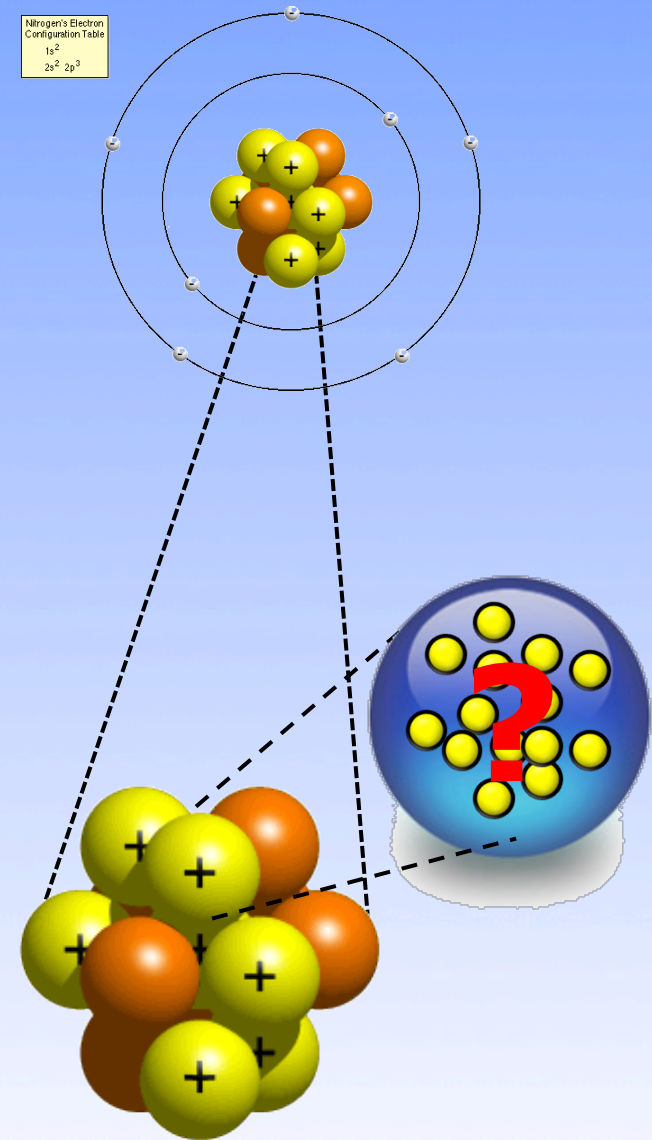
- **Het atoom model van Bohr**

- Compacte kern met protonen & neutronen
- Elektronen in banen eromheen

- *Verklaart periodiek systeem*, basis van o.a. Scheikunde

- Maar ook veel *nieuwe* vragen

- **Waarom volgen electronen vaste banen (schillenmodel)?**
→ Kwantummechanika
- **Wat houdt de atoomkern bij elkaar?**
→ Er zijn (kennelijk) nieuwe sterkere natuurkrachten die de kern bij elkaar houden
- **Zijn protonen en neutronen dan elementaire deeltjes?**
→ Zien we patronen, of kunnen we in een proton kijken?



Wat zit er in een proton/neutron?

- **Kijken** - Rutherford experiment gebruikte deeltjes uit radioactieve bron om atomen te beschieten → *onvoldoende energie om **in** een atoomkern te kijken*

Zijn er nog meer proton-achtige deeltjes?

- **Patronen** – Weinig te zien met 2 deeltjes, maar wellicht bestaan er nog meer deeltjes vergelijkbaar aan protonen & neutronen!
 - Niet zo'n raar idee – periodiek systeem heeft ook instabiele elementen die niet vrij in de natuur voorkomen, maar die je wel kan maken

p	n	?	?	?	?	?
?	?	?	?	?	?	?

*Lanthaniden
**Actiniden

Deeltjes maken - Einsteins beroemde formule

- Relativiteits theorie zegt dat massa en energie uitwisselbare grootheden zijn

$$E = mc^2$$

energie

Wisselkoers

(lichtsnelheid kwadraat

= 90.000.000.000.000.000

massa

- Conversie van massa levert zeer veel energie op – gebeurt o.a in kernsplitsing: 1 gram = 21 k

1 gram = 21 kiloton TNT

1 gram = 25 Gigawatt-uur



Deeltjes maken - Einsteins beroemde formule

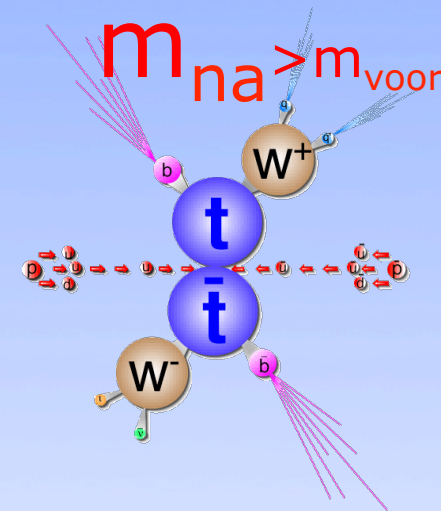
- Andersom kan ook: **maak massa (deeltje) uit energie**

Klassiek botsen:

$$m_{na} = m_{voor}$$



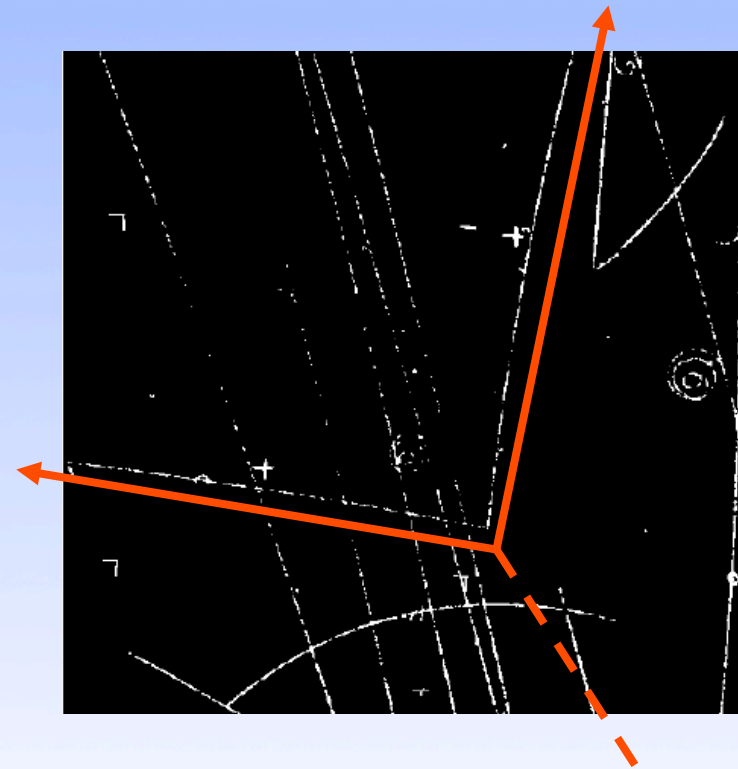
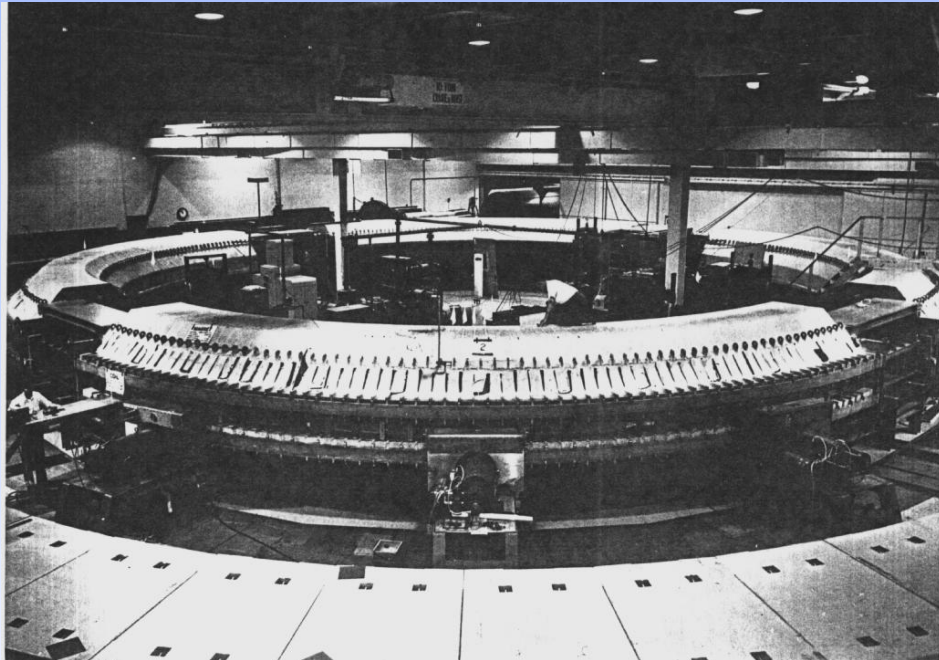
Relativistisch botsen:



- Zeer veel energie nodig → minuscule hoeveelheden exotische materie geproduceerd.
 - Maak ca. 0.000000000000001 gram (niet gevaarlijk!)

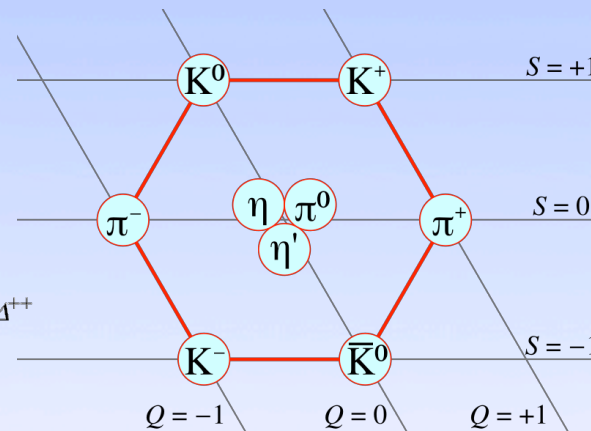
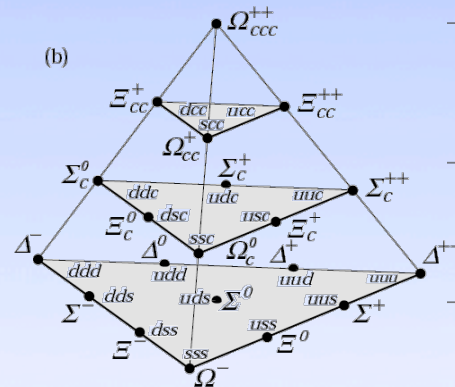
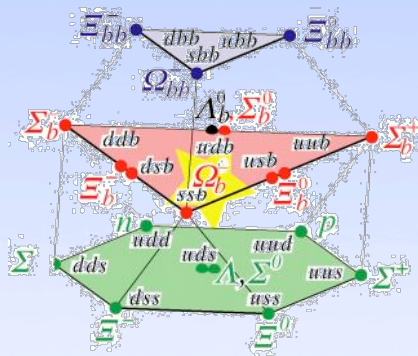
Deeltjes maken – in de praktijk

- Jaren 50 – Bewegings energie van protonen is voldoende om nieuwe deeltjes met proton-massa te kunnen maken



De hadronische jungle

- **Technisch succes:** tientallen nieuwe soorten deeltjes geproduceerd die vergelijkbaar zijn met protonen, neutronen.
- **Natuurkundig succes:** Kunnen allemaal *geclassificeerd* kunnen worden met een eigen 'periodiek systeem'
 - M. Gell-Mann - "The eightfold way"

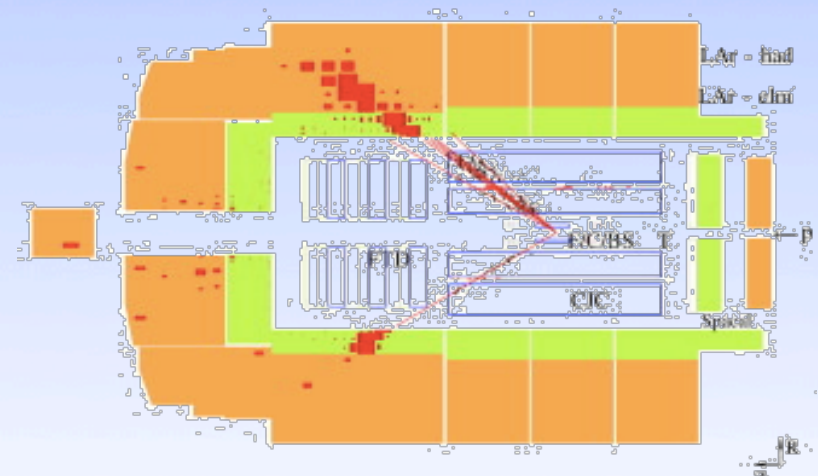
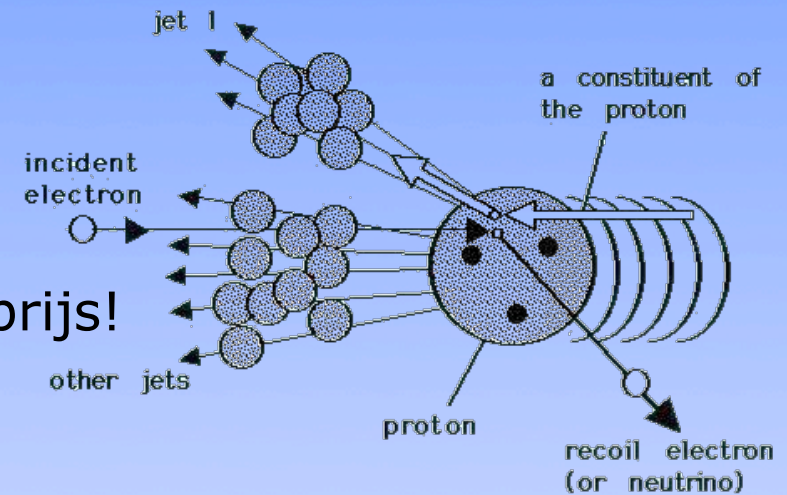


De jaren zestig – biljarten met protonen

- Vooruitgang in versneller technologie in jaren zestig:

Beschiet protonen met electronen om samenstelling in quarks te bevestigen – Nobelprijs!

- Hier de moderne versie de HERA versneller in Hamburg (1992-2006)



De bouwstenen van het heelal

- We weten nu: er bestaan zes soorten quarks.
- Maar om protonen en neutronen te maken heb je alleen 'up' en 'down' nodig
 - De andere quarks zijn bouwstenen van exotische materie
- Alle zichtbare materie kan worden opgebouwd uit 3 elementaire deeltjes!
 - Alle materie (inclusief exotische) opgebouwd uit 12 elementaire deeltjes

Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino
	e electron	μ muon	τ tau

Veel quarks – maar één electron?

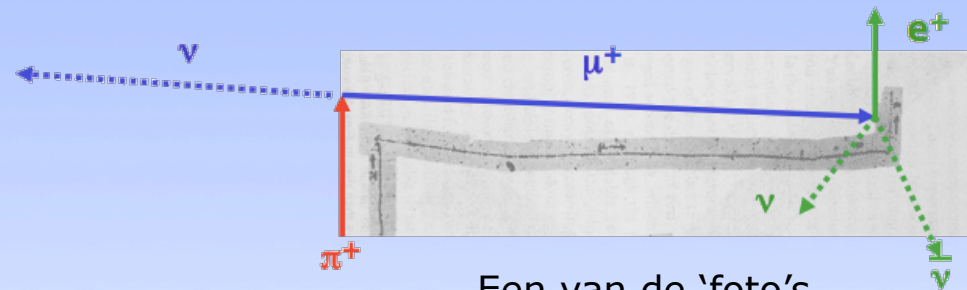
- Het electron heeft ook broertjes...
- Gevonden in de 'natuur' – als bijproduct van kosmische stralen

Cecil Powell laat weer ballon op met een plaat fotografische film



Neutraal
bijna onzichtbaar
deeltje '**neutrino**'

'**Muon**' =
electrisch geladen
'zwaar electron'



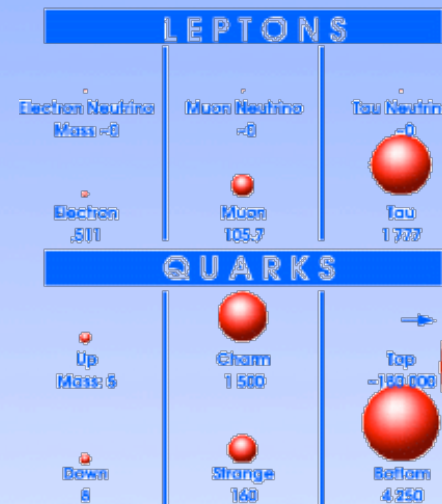
Een van de 'foto's met de interpretatie

Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino
	e electron	μ muon	τ tau

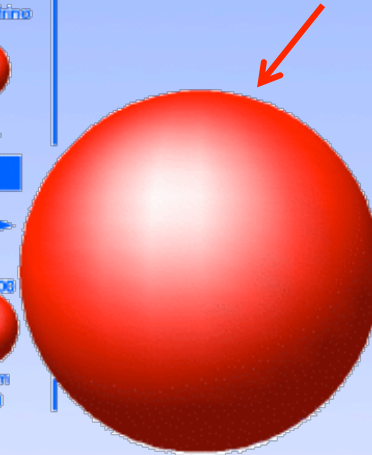
De bouwstenen van materie

- We kennen nu $3 \times 2 \times 2 = 12$ elementaire bouwstenen

Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino
	e electron	μ muon	τ tau



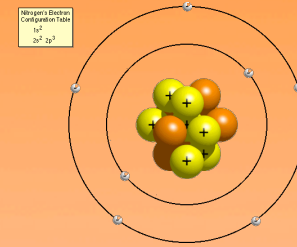
'top quark' als laatste gevonden want enorm zwaar (1996)



- Compleet? Niet met zekerheid te zeggen, maar er zijn wel aanwijzingen.
- Een andere verrassing: de massa varieert enorm – van vrijwel nul tot 170 keer de proton massa. Waarom?

Overzicht

1) Elementaire deeltjes –
hoe vinden we die?



2) Fundamentele krachten –
hoe beschrijven we die



3) Krachten & deeltjes -
wat is de oorsprong van massa



4) De LHC en het Higgs deeltje



Natuurkrachten – wat willen we weten?

- **Welke krachten zijn er?**
 - Zwaartekracht & Electromagnetisme bekend uit het dagelijks leven
 - Zijn er meer? → Bohrs atoom model impliceert het bestaan van extra kernkrachten
- **Waarin verschillen de krachten?**
 - Maxwell (1864)
Elektriciteit en magnetisme twee manifestaties van een kracht
 - Zijn kernkrachten en elektromagnetisme fundamenteel verschillend, of ook manifestaties van een onderliggende kracht
- **Hoe beschrijven we een kracht?**



De vier fundamentele natuurkrachten

Zwaartekracht



Werkt op alle deeltjes met massa

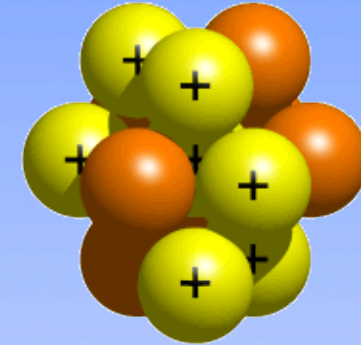
Elektromagnetisme



Werkt op alle elektrisch geladen deeltjes

Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino
	e electron	μ muon	τ tau

Sterke kernkracht



Werkt op alle quarks

Zwakke kernkracht

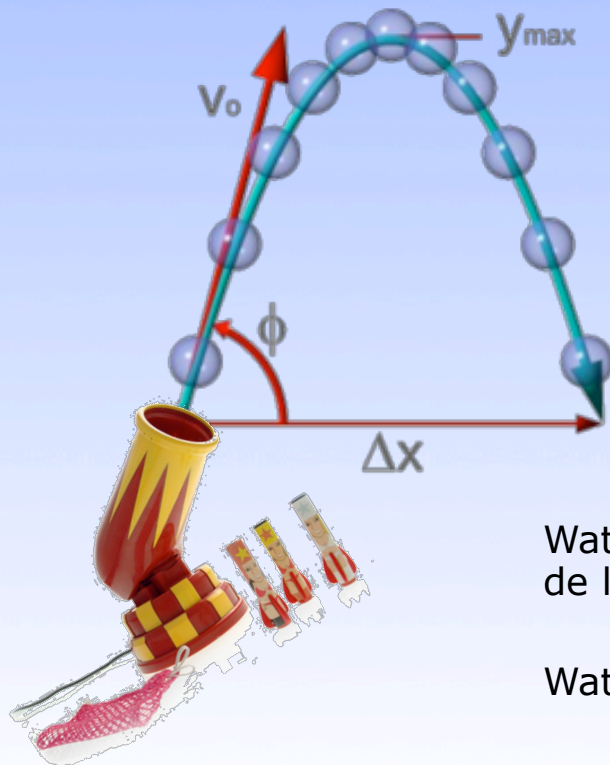


Werkt op alle deeltjes

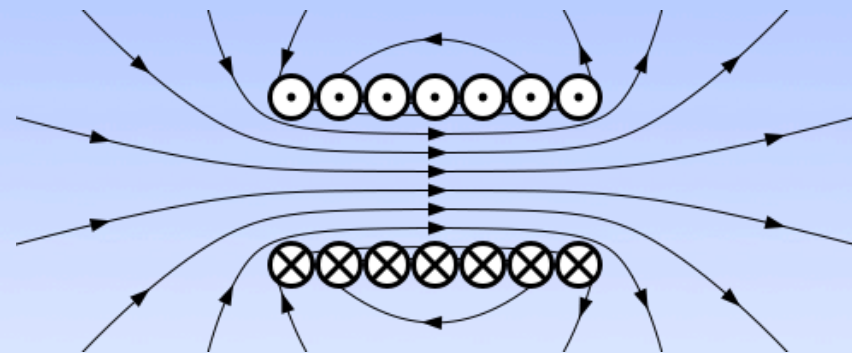
Natuurkrachten – wat willen we weten?

- Hoe beschrijven we een kracht?
- Praktisch doel: gegeven een configuratie van deeltjes kunnen we voorspellen hoe ze bewegen?
- Klassiek beeld:

Zwaartekracht



Electromagnetisme



Wat gebeurt er als de kanonskogel met 90% van de lichtsnelheid gaat?

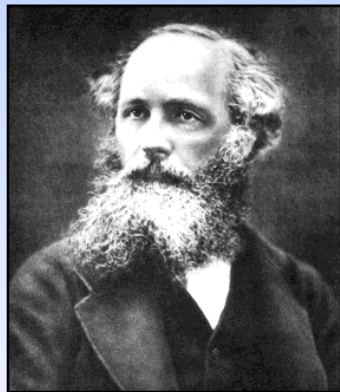
Wat gebeurt er veldlijnen als de spoel 10 atomen groot is?

De grote stappen van de 20e eeuw

Een *betere beschrijving* van zwaartekracht en electromagnetisme



Newton



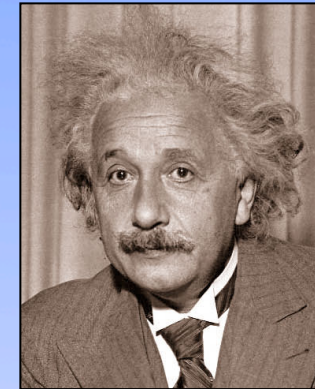
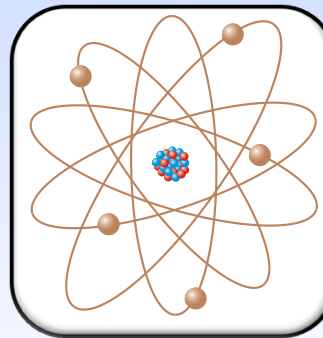
Maxwell



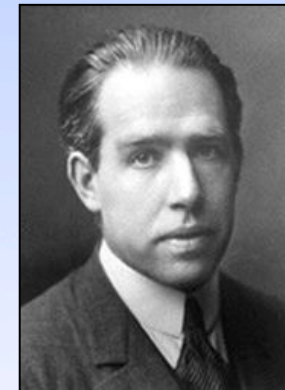
Relativiteitstheorie



Quantummechanica



Einstein

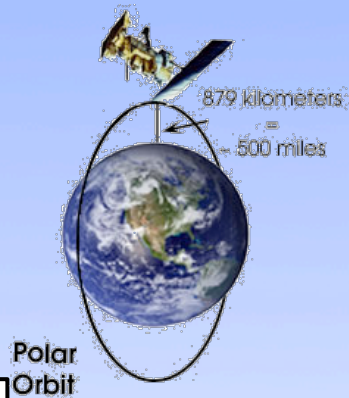


Bohr

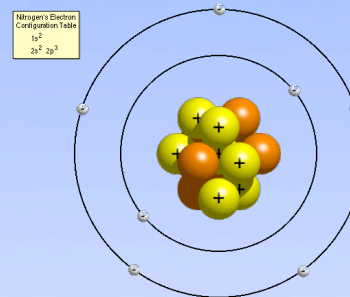
Quantummechanica – de natuur in het klein

Correcte beschrijving van natuur op atomaire schaal
– waar natuurwetten er heel anders uitzien

Een satelliet kan (in principe)
in elke baan om de aarde



Een electron kan *niet*
in elke willekeurige baan
om een atoomkern



Er is een eindig aantal
oplossing voor de
electron impuls (snelheid)
'kwantisatie'



Niels Bohr

*"Quantum mechanica cruciaal voor
begrip werking transitors."*



(Speciale) relativiteitstheorie

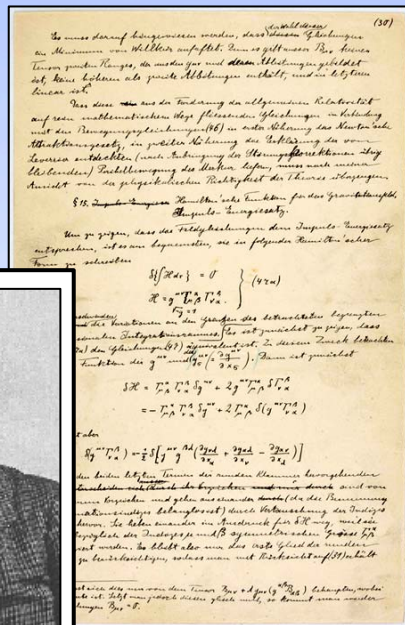
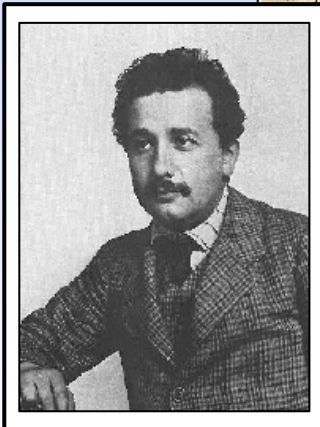
Correcte beschrijving van natuur bij hoge snelheden

Snelheden tellen niet 'simpel' op: $\frac{2}{3}$ lichtsnelheid + $\frac{2}{3}$ lichtsnelheid = $\frac{12}{13}$ lichtsnelheid!

Concept van 'gelijktijdig' niet absoluut maar afhankelijk van waarnemer

Energie en massa zijn equivalent ($E=mc^2$)

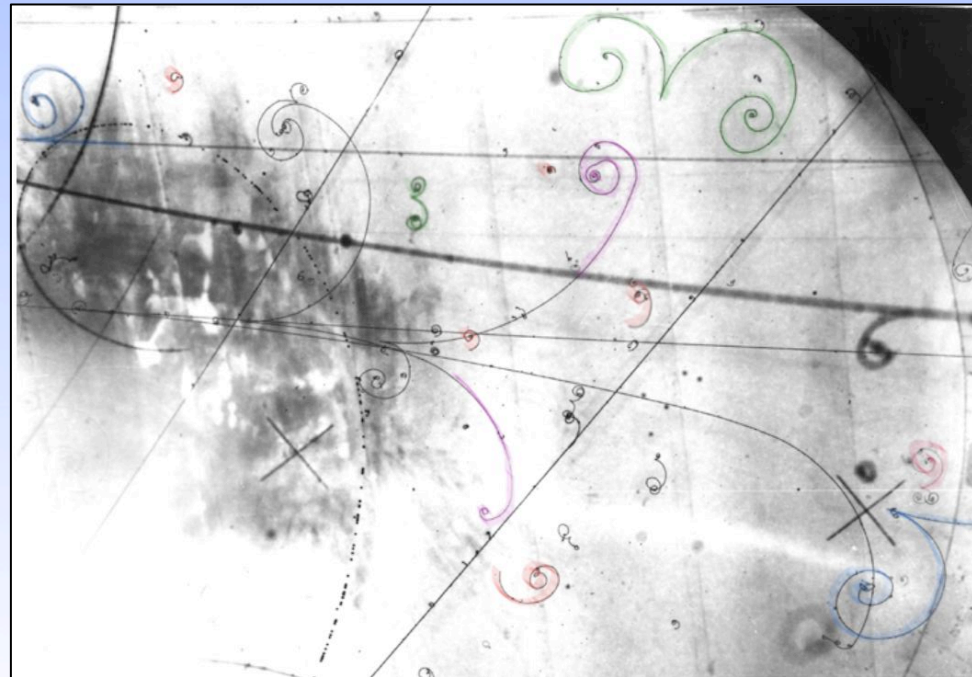
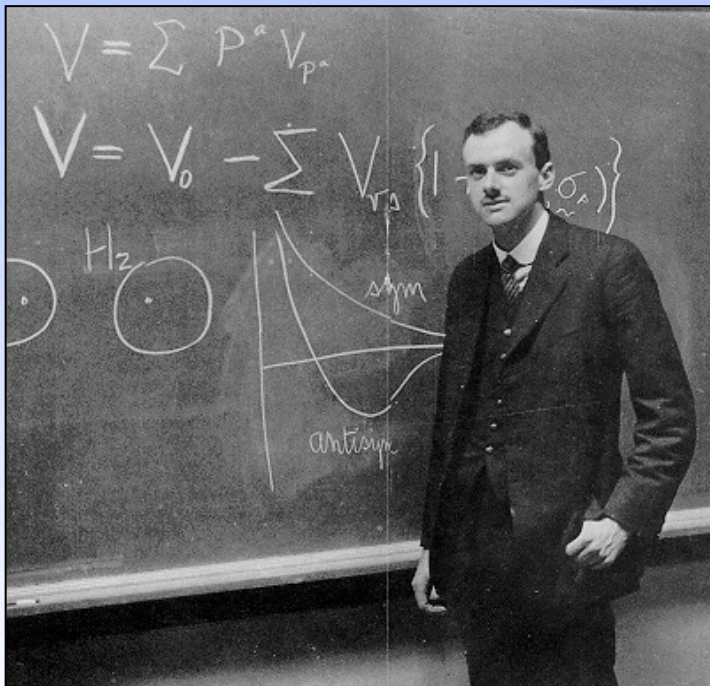
(Algemene relativiteitstheorie is uitbreiding die ook zwaartekracht meeneemt)



“Zonder relativiteitstheorie zit de GPS er 10 km per dag naast!”

Relativistische kwantum theorie

- Speciale relativiteitstheorie + kwantummechanica = relativistische quantummechanica (Dirac 1928)
- Wiskundige eigenschappen theorie doen voorspelling:
Voor elk deeltje bestaat een anti-deeltje
→ er moet anti-materie bestaan!
 - Anti-deeltjes paar jaar *later* ook experimenteel bewezen



De bouwstenen van (anti)-materie

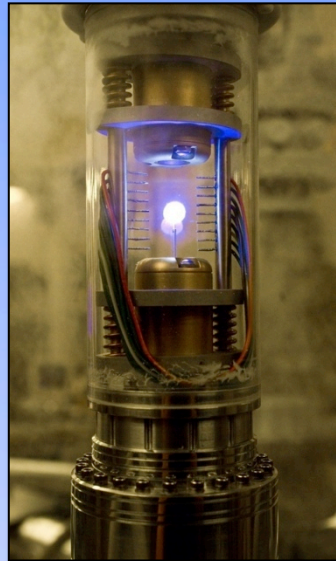
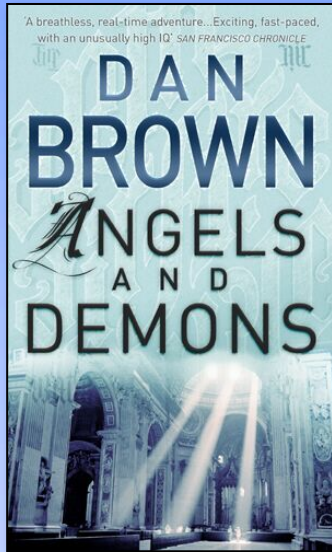
Elementaire deeltjes

Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino
	e^- electron	μ^- muon	τ^- tau

Elementaire anti-deeltjes

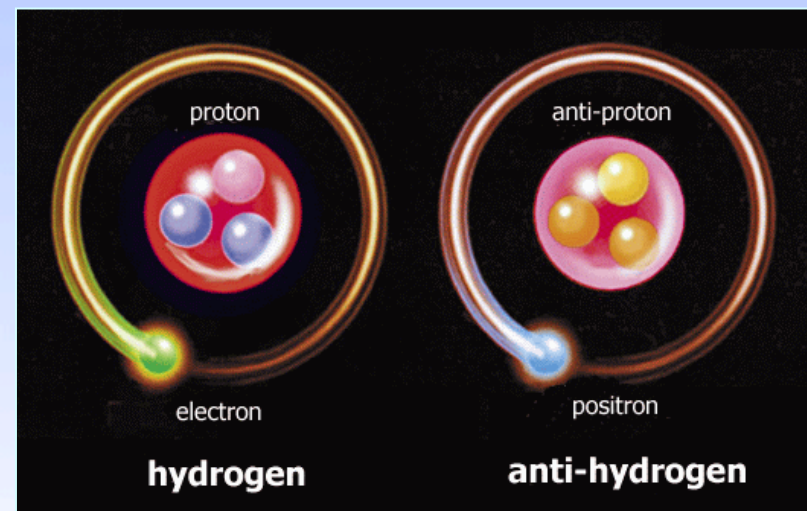
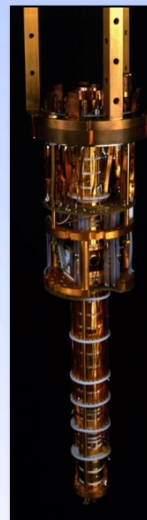
Quarks	\bar{u} up	\bar{c} charm	\bar{t} top
	\bar{d} down	\bar{s} strange	\bar{b} bottom
Leptons	$\bar{\nu}_e$ electron neutrino	$\bar{\nu}_\mu$ muon neutrino	$\bar{\nu}_\tau$ tau neutrino
	e^+ electron	μ^+ muon	τ^+ tau

Anti-materie – feiten & fictie



- CERN kan 10 miljoen anti-protonen per seconde maken!
- 1 gram protonen ~ 602,214,150,000,000,000,000,000
- Hoe lang duurt het om ¼ gram anti-protonen te maken ? ~ ½ miljard jaar !

- Dan Brown wil het vaticaan opblazen met ¼ gram anti-materie gestolen op CERN

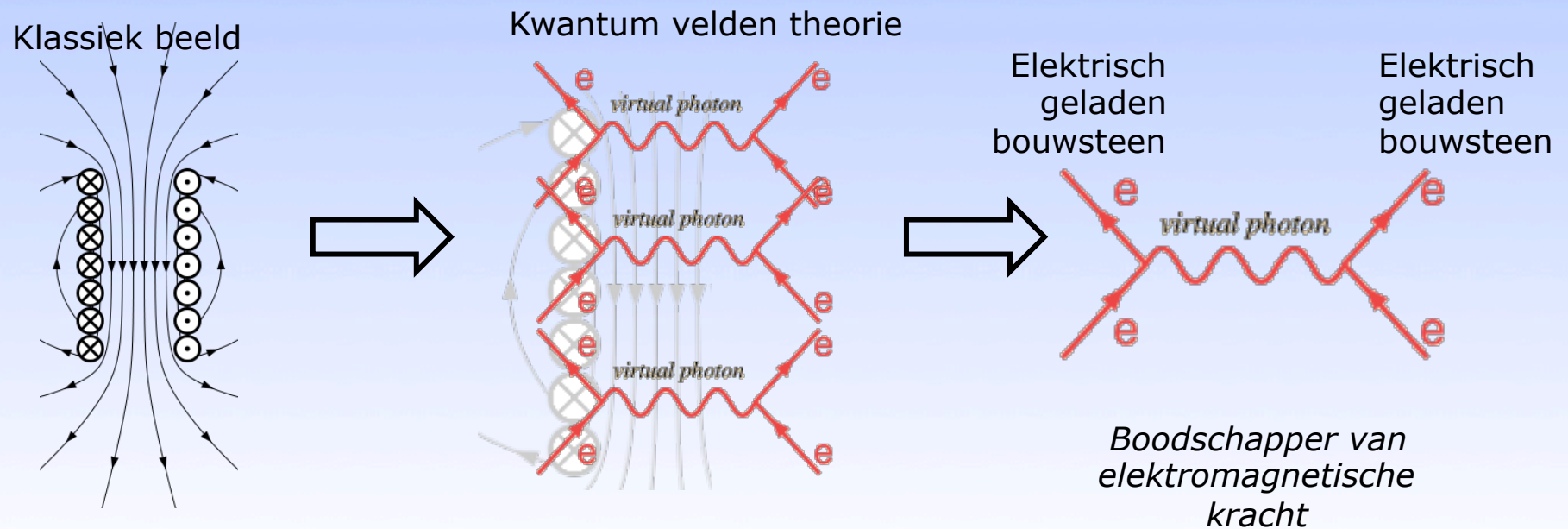


Een coherent model van bouwstenen & krachten

- Voorspelling van anti-materie door combinatie van kwantummechanica en relativiteits theorie laat zien dat we *deeltjes en krachten niet los van elkaar kunnen zien*
- Doel: ontwikkel een theorie die alle bouwstenen van materie beschrijft **en** alle krachten tussen deze bouwstenen
- Uiteindelijk doel – ‘theorie van alles’
 - Wat bepaalt de identiteit van een deeltje?
 - Waarom zijn er drie ‘generaties’ van elementaire deeltjes?
 - Wat bepaalt de massas van elementaire deeltjes en waarom zijn die zo verschillend?
 - Wat is de oorsprong van de vier natuurkrachten?
- Interim doel - **beschrijven wat je weet & begrijpt, en dan verder bouwen → ‘het Standaard Model’**

Ijk-theorien – krachten als deeltjes

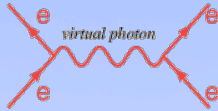
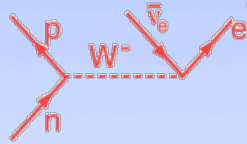
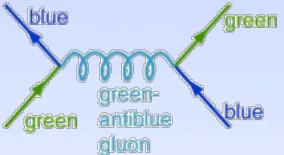
- Jaren 50 – ontwikkeling van kwantumveldentheorie en ijktheorien als taal van moderne natuurkunde
 - Doel: wiskundig *framework* opzetten dat elementaire deeltjes en hun krachten op een coherente elegante manier kan beschrijven
- **Relateert natuurkrachten aan symmetrie**
 - **Symmetrie in theorie = natuurkracht beschreven door uitwisselen van 'boodschapper deeltjes'**



Ijkttheorien als wiskundige abstractie van de natuur

- Heeft ijkttheorie een relatie met de werkelijkheid? Ja...

In de taal van ijkttheorie kunnen we **3 van de 4 fundamentele krachten beschrijven zoals we die zien in de natuur** als het gevolg van $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$ symmetrie

Natuurkracht	Symmetrie	Boodschapper	Voorbeeld
elektromagnetisme	$U(1)$	γ photon	
zwakke kernkracht	$SU(2)$	Z Z boson W W boson (2x)	
sterke kernkracht	$SU(3)$	g gluon (8x)	

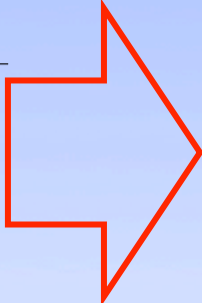
- Gevonden boodschapper deeltjes (aantal en eigenschappen) precies in overeenstemming met 'voorspelling' ijkttheorie

Alles bij elkaar = het Standaard Model (1964)

Het Standaard Model

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \frac{1}{2}ig_s^2 (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a + \\
 & \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{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}{2c_w^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 - ig_{c_w} [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - ig_{s_w} [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\nu^+ W_\mu^- + \\
 & \frac{1}{2}g^2 W_\nu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\mu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\nu^+ Z_\nu^0 W_\mu^- - Z_\nu^0 Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\mu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\nu^+ A_\nu W_\mu^- - \\
 & A_\nu A_\mu W_\nu^+ W_\mu^-) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-] - g\alpha [H^3 + \\
 & H \phi^0 \phi^0 + 2H \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{8}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] - g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}ig \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^+) + ig_{s_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^+) + ig_{s_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 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 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \\
 & \bar{\nu}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + ig_{s_w} A_\mu [-(\bar{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 (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{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^\kappa)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_h^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_h^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_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \\
 & \gamma^5) d_j^\kappa) + m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa) + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_d^\lambda (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\kappa (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \\
 & \gamma^5) u_j^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_h^2}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_h^2}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_h^2}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_h^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 + ig_{c_w} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig_{s_w} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + ig_{c_w} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + \\
 & ig_{s_w} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + ig_{c_w} Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + ig_{s_w} A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}g M [\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} ig M [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \\
 & \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} ig M [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + ig M s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \\
 & \frac{1}{2}ig M [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$

'even rekenen'



Verklaart alle waarneembare vormen van materie

en 3 van de 4 natuurkrachten die erop werken

Quarks	u up	c charm	t top	γ photon	Force carriers
	d down	s strange	b bottom	Z Z boson	
Leptons	ν _e electron neutrino	ν _μ muon neutrino	ν _τ tau neutrino	W W boson	
	e electron	μ muon	τ tau	g gluon	

Het Standaard model is op alle mogelijke manieren getest in duizenden experimenten sinds 40 jaar: het werkt perfect!

Op een klein probleempje na...

- IJk-theorie werkt alleen voor *massaloze deeltjes!*

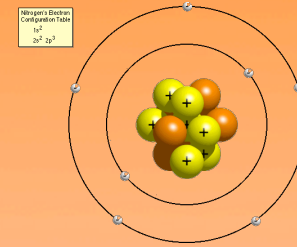


Quarks	u up	c charm	t top	γ photon	Force carriers
	d down	s strange	b bottom	Z Z boson	
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
	e electron	μ muon	τ tau	g gluon	

- Het blijkt *onmogelijk* om massa als intrinsieke eigenschap van deeltjes te beschrijven...
 - In tegenstelling tot bv elektrische lading
- Als massa is geen intrinsieke eigenschap...
wat is het dan wel???

Overzicht

1) Elementaire deeltjes –
hoe vinden we die?



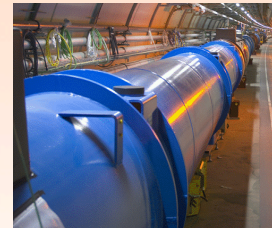
2) Fundamentele krachten –
hoe beschrijven we die



3) Krachten & deeltjes -
wat is de oorsprong van massa

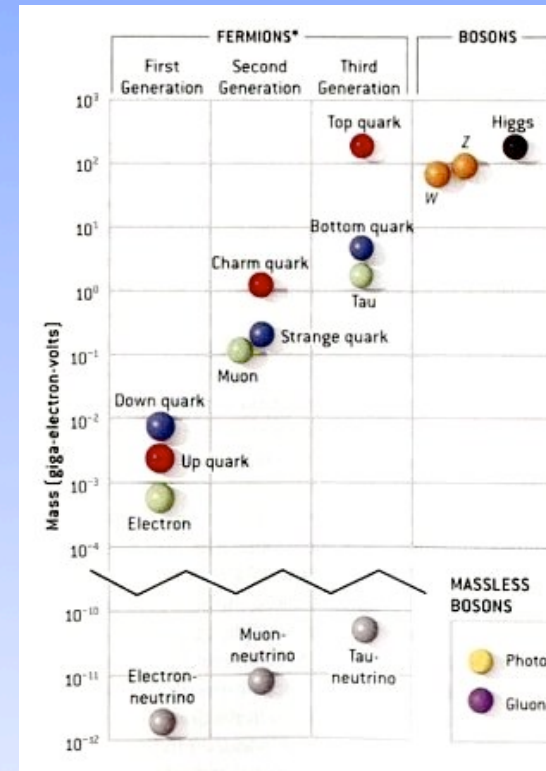
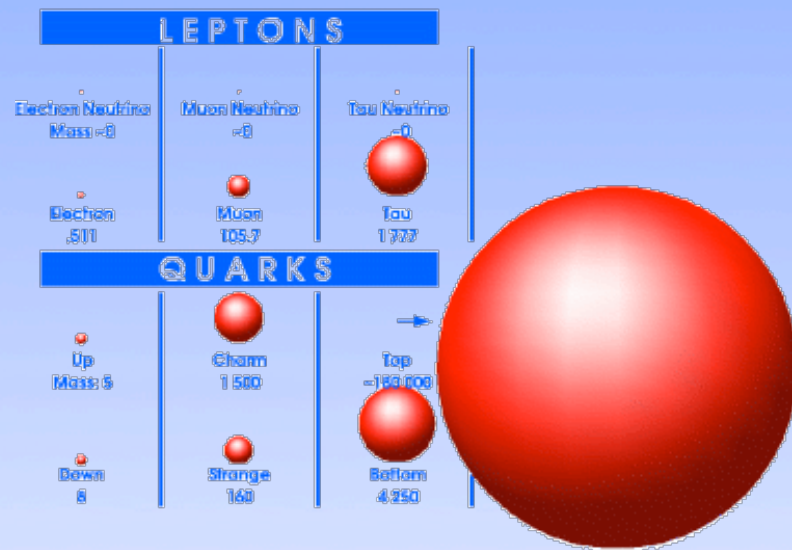


4) De LHC en het Higgs deeltje



Het massa mysterie...

- Experiment: de meeste deeltjes *wel* massa hebben
 - En ze lopen enorm uiteen

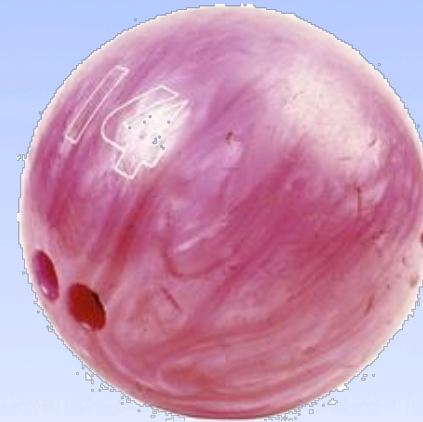


- Dus gezocht: **de oorsprong van massa van elementaire deeltjes**
 - Want als het er in niet 'in' zit waar komt de dan vandaan?

Niet verwarren – massa en gewicht

- Let op: massa en gewicht zijn niet hetzelfde
- Gewicht = effect zwaartekracht op massa
- In de ruimte is alles gewichtloos – maar niet massaloos

Schop tegen voetbal = doelpunt Schop tegen bowlingbal = zere voet



Is ook zo in de ruimte!
Want: gevolg van massa, niet van gewicht...

Wat is massa – Volgens Isaac Newton (1687)

- Massa is de 'wisselkoers' tussen kracht en versnelling

$$F = m \cdot a$$

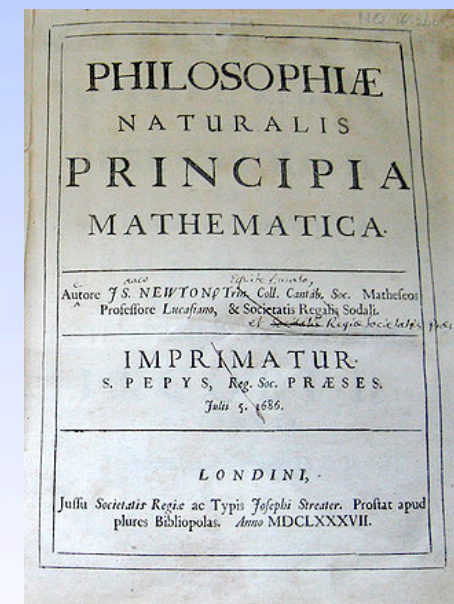
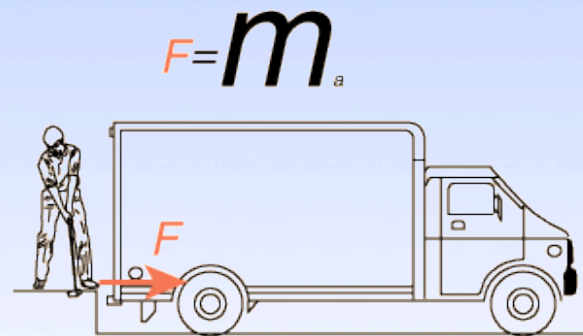
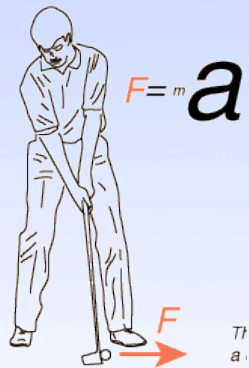
Kracht

Versnelling

Beschrijft niet wat massa is, maar wel hoe het beweging beïnvloedt

Kleine massa
grote versnelling

Grote massa
kleine versnelling



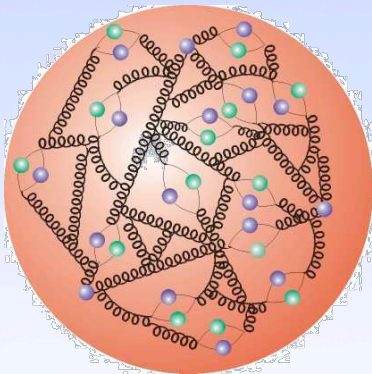
Wat is massa – volgens Albert Einstein (1905)

- Massa is 'rust energie'

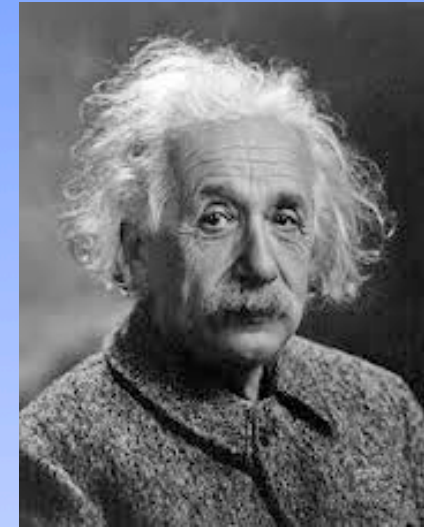
$$E = m \cdot c^2$$

- Beschrijft wel wat massa **is**, maar niet waar het vandaan komt

Kan bindings energie zijn (bv in protonen)



Geen oplossing voor elementaire 'puntdeeltjes'



13. *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?*
von A. Einstein.

Die Resultate einer jüngst in diesen Annalen von mir publizierten elektrodynamischen Untersuchung¹⁾ führen zu einer sehr interessanten Folgerung, die hier abgeleitet werden soll. Ich legte dort die Maxwell-Hertz'schen Gleichungen für den leeren Raum nebst dem Maxwell'schen Ausdruck für die elektromagnetische Energie des Raumes zugrunde und außerdem das Prinzip:

Die Gesetze, nach denen sich die Zustände der physikalischen Systeme ändern, sind unabhängig davon, auf welches von zwei relativ zueinander in gleichförmiger Parallel-Translationsbewegung befindlichen Koordinatensystemen diese Zustandsänderungen bezogen werden (Relativitätsprinzip).

Gestützt auf diese Grundlagen²⁾ leitete ich unter anderem das nachfolgende Resultat ab (l. c. § 8):

Ein System von ebenen Lichtwellen besitze, auf das Koordinatensystem (x, y, z) bezogen, die Energie l ; die Strahlrichtung (Wellennormale) bilde den Winkel φ mit der x -Achse des Systems. Führt man ein neues, gegen das System (x, y, z) in gleichförmiger Paralleltranslation begriffenes Koordinatensystem (ξ, η, ζ) ein, dessen Ursprung sich mit der Geschwindigkeit v längs der x -Achse bewegt, so besitzt die genannte Lichtmenge — im System (ξ, η, ζ) gemessen — die Energie:

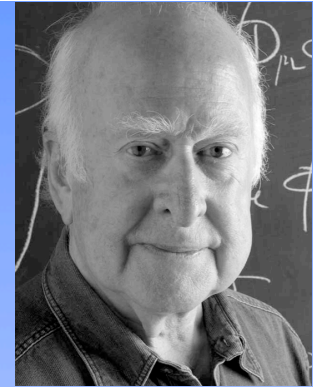
$$l^* = l \frac{1 - \frac{v}{F} \cos \varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{F}\right)^2}}$$

wobei F die Lichtgeschwindigkeit bedeutet. Von diesem Resultat machen wir im folgenden Gebrauch.

1) A. Einstein, Ann. d. Phys. 17. p. 891, 1905.

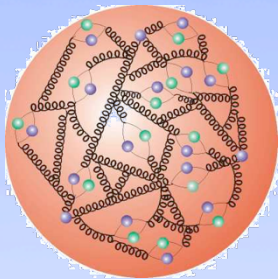
2) Das dort benutzte Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ist natürlich in den Maxwell'schen Gleichungen enthalten.

Wat is massa – Volgens Peter Higgs (1964)



- De massa van elementaire deeltjes is het gevolg van **interactie met alomtegenwoordig 'Higgs veld'**

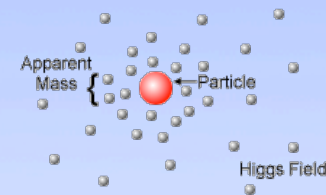
Einstein:
proton massa =
bindings energie



Elementair deeltje
in lege ruimte:
geen rust-energie=
geen massa



Elementair deeltje
in Higgs veld:
rust energie =
interactie met Higgs veld
= massa



- Revolutionair – met spectaculaire consequenties :
de ruimte is *niet* leeg, maar gevuld met soort 'aether'
- Maar: Is het waar? Hoe bewijs je het?
Kan je het uberhaupt bewijzen?

Het Higgs veld – kun je het zien?

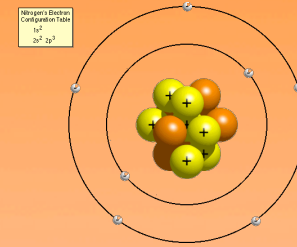
- Probleem: Het Higgs veld is uniform – als het meer in deze foto. Het gebrek aan structuur maakt metingen extreem moeilijk...
- Maar misschien kunnen we 'rimpeling' kan maken

- De theorie van Higgs: als het veld bestaat is er **ook een bijbehorend deeltje**
- Opdracht zoek het deeltje!



Overzicht

1) Elementaire deeltjes –
hoe vinden we die?



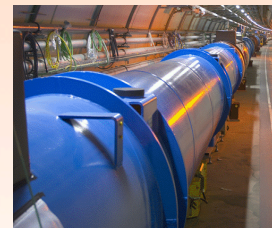
2) Fundamentele krachten –
hoe beschrijven we die



3) Krachten & deeltjes -
wat is de oorsprong van massa



4) De LHC en het Higgs deeltje



Deel 2 – De zoektocht naar de Higgs

**Als het Higgs deeltje bestaat – kun je hem maken in
hoog-energetische botsingen ($E=mc^2$)**



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

De LHC geprojecteerd op de kaart

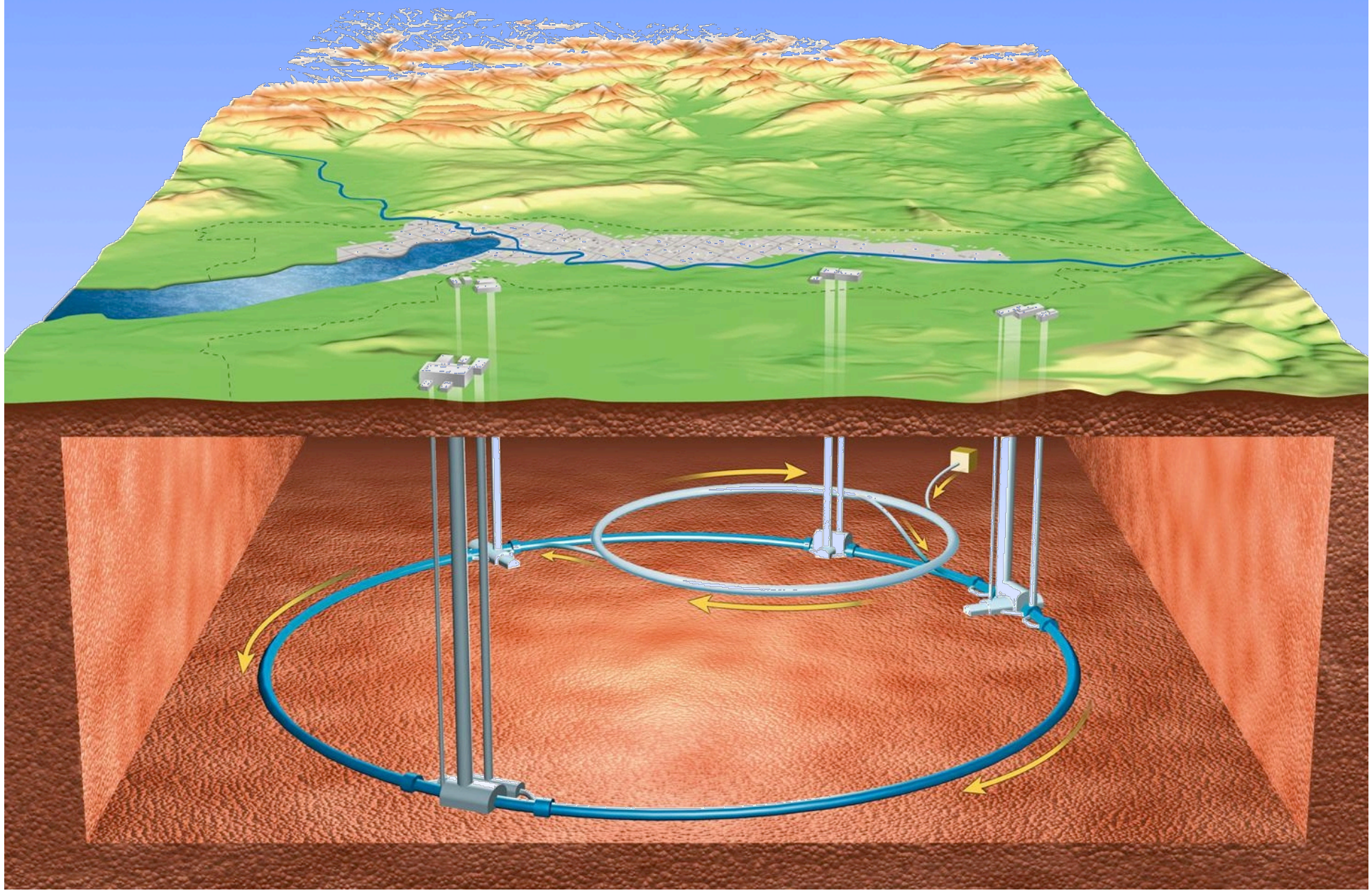
LHC: 27 km



A10: 32 km

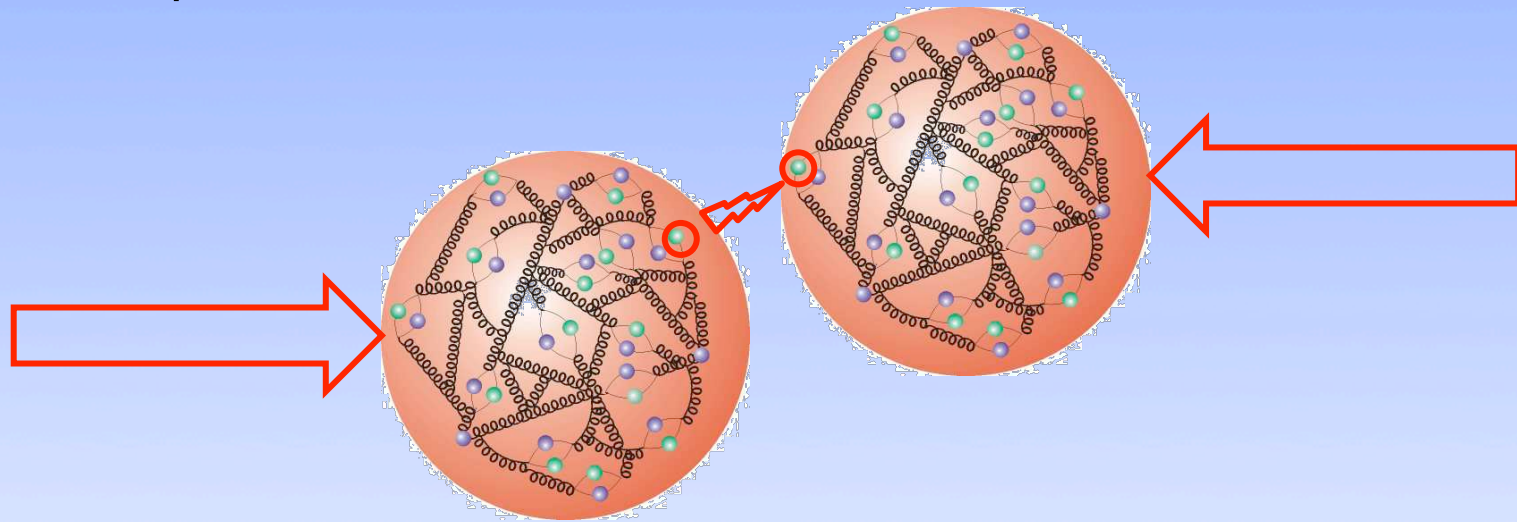


De LHC onder de grond



Hoeveel energie zit er in de LHC bundels?

- De LHC bundels worden gevuld met protonen versneld tot 7 TeV
- Elk proton heeft voldoende bewegingsenergie om 7000 nieuwe protonen te kunnen maken.



- Maar: protonen zijn samengestelde deeltjes – effectieve botsing (bv) tussen twee quarks elk een fractie van de proton energie hebben
 - Fractie meestal klein → heel vaak botsen om een paar harde botsingen te krijgen (40 miljoen per seconde!)

2005 – opslag van magneten



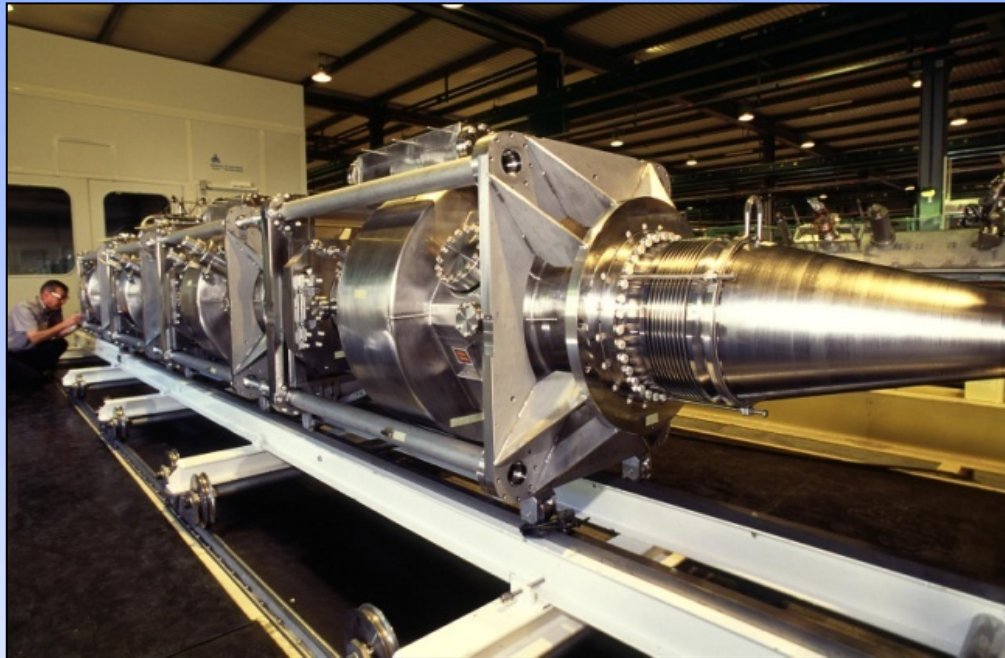
De installatie

- Logistieke nachtmerrie
- Onwaarschijnlijk veel werk (er zijn 1232 dipool magneten!)



Waarom is een versneller rond?

- Versneller secties duur – een ronde versneller gebruikt de zelfde versneller sectie. Efficient!



In de LHC tunnel

- Voornamelijk supergeleidende afbuigmagneten – 8.4 Tesla
- >1000x sterker dan 'koelkast magneet'
- Hoeveelheid protonen in bundel $\sim 1 \text{ mm}^3$ lucht
- Bij 7 TeV is totale bundel energie gelijk aan die van een TGV op volle snelheid



Botsingen bekijken – een plek voor de detector



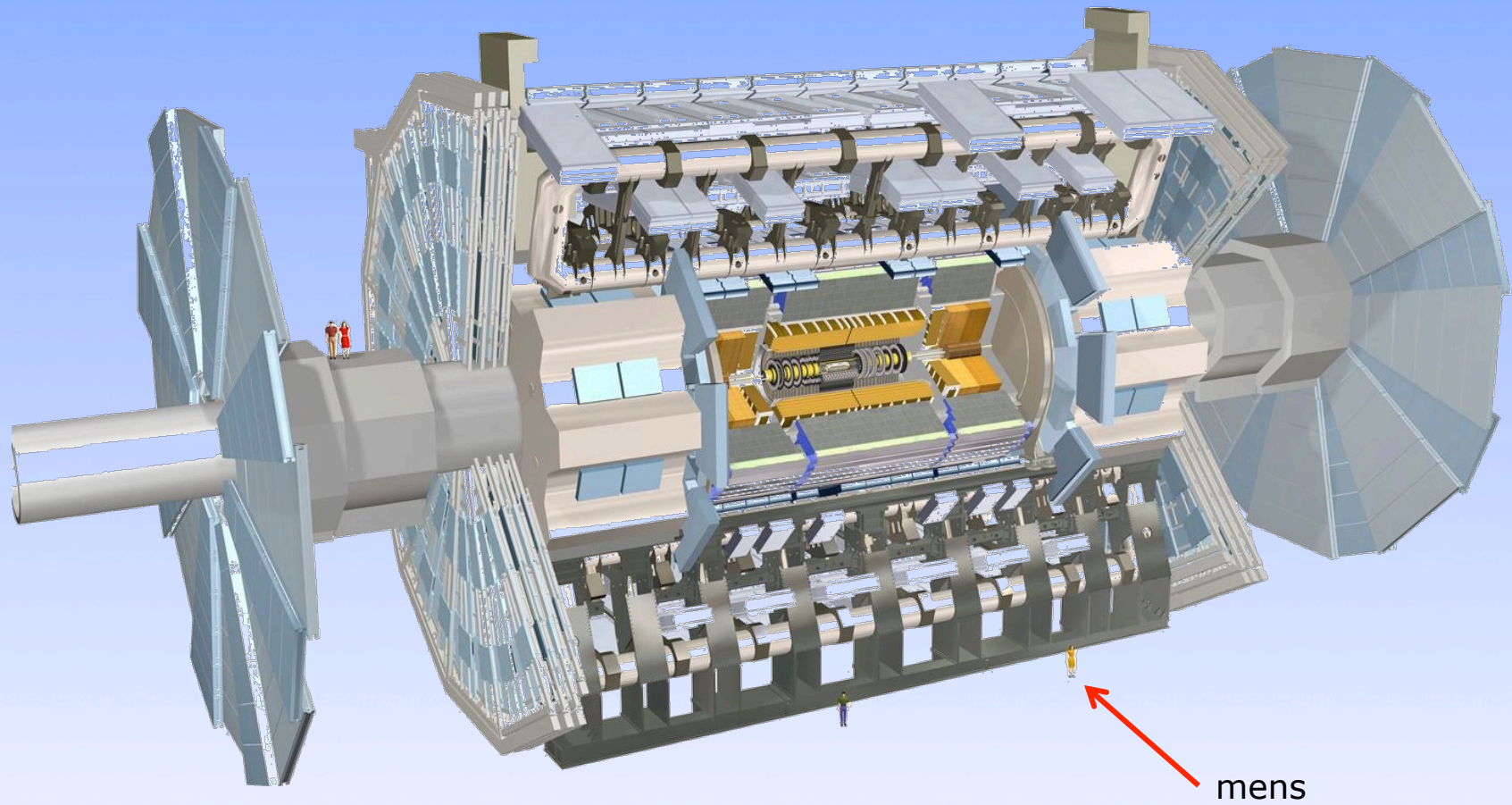
De ATLAS put - graven



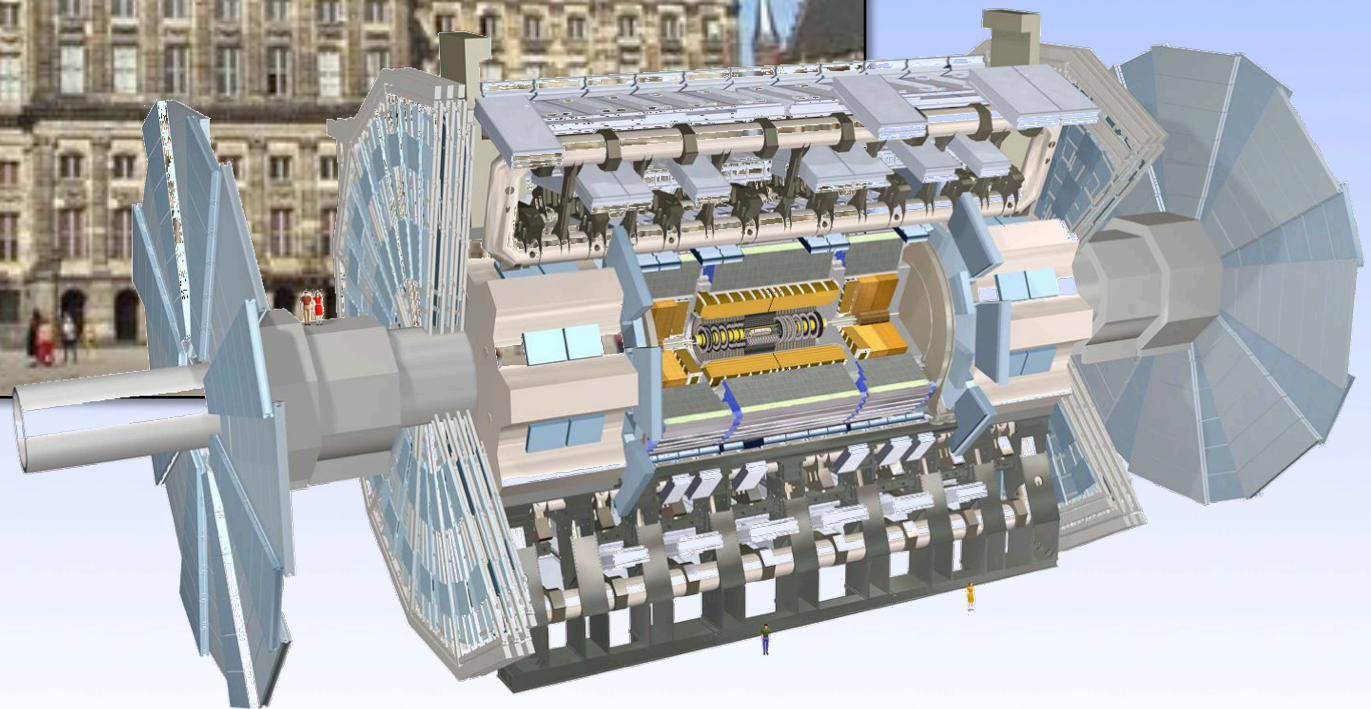
De CMS put - klaar



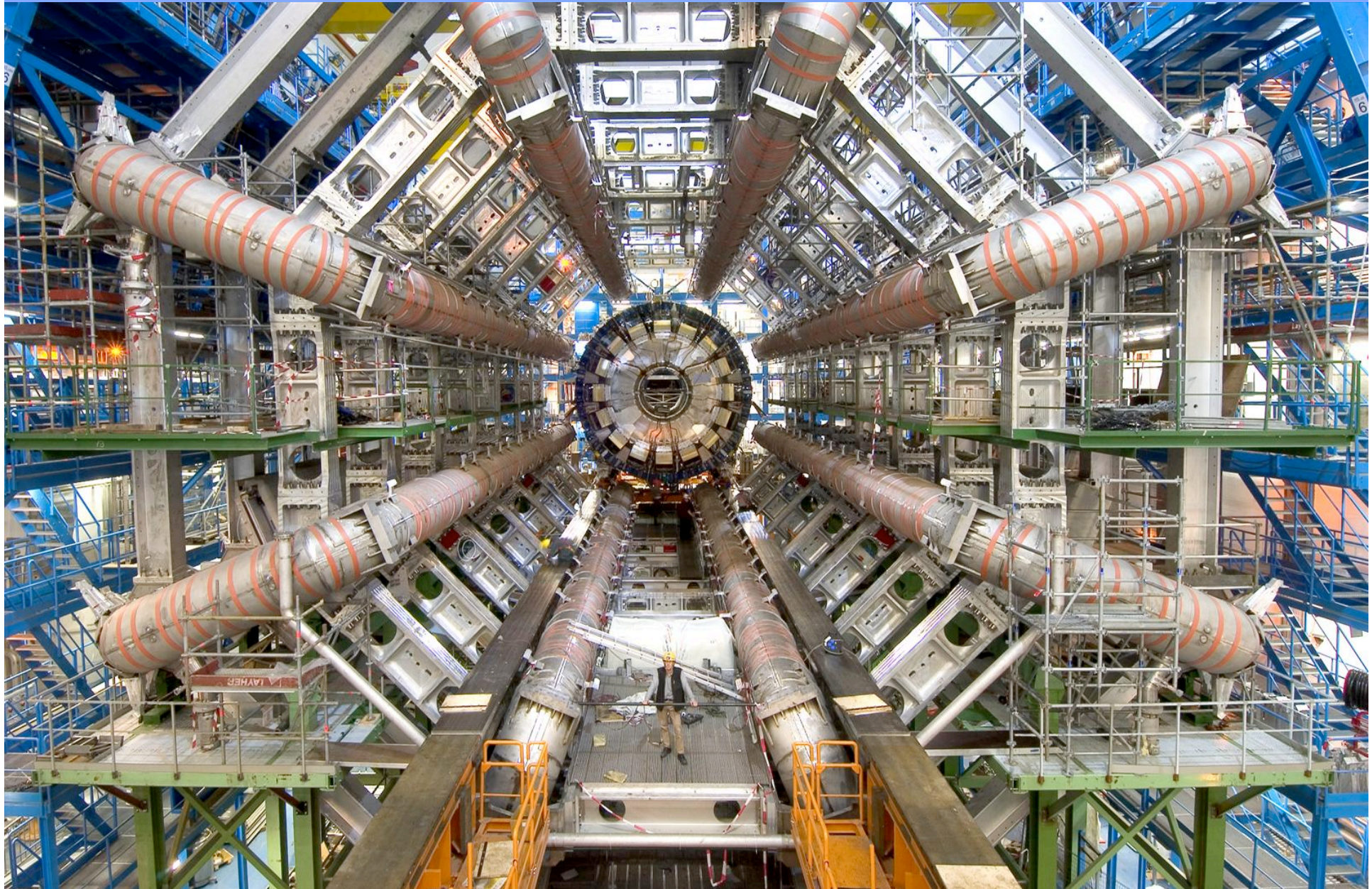
De ATLAS detector – dit moet erin



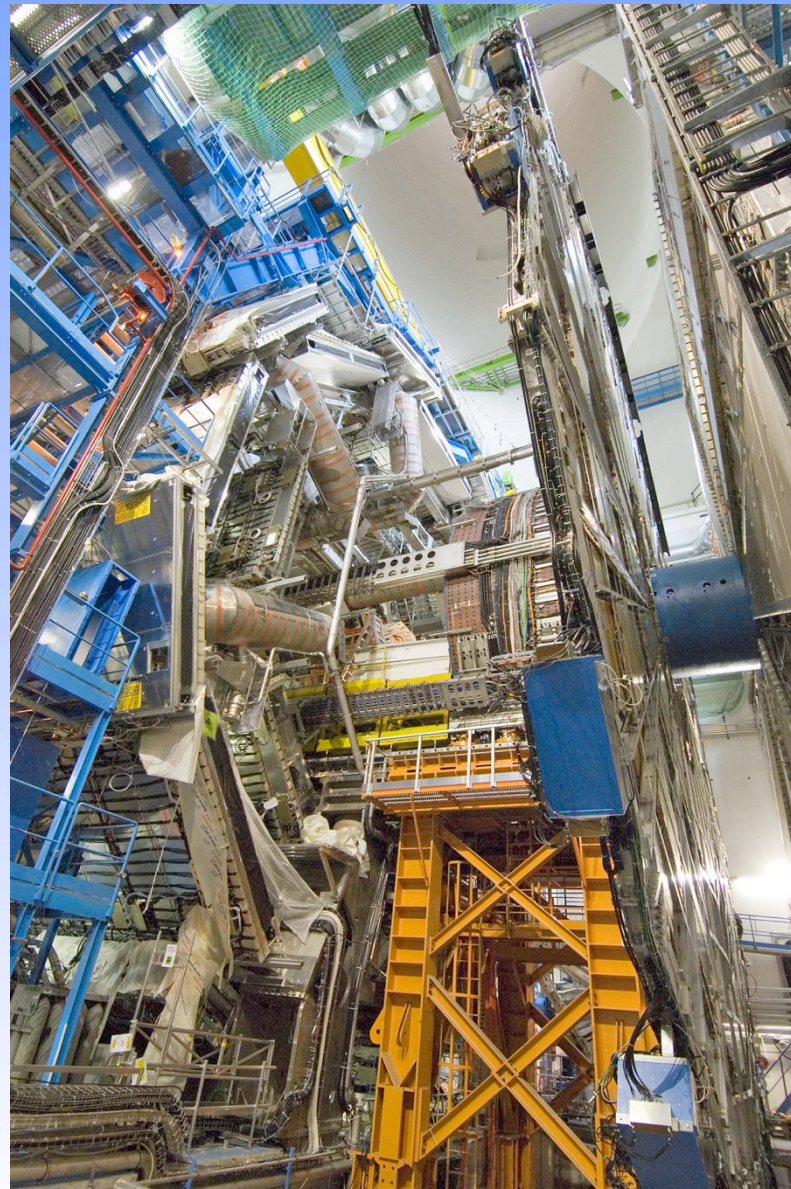
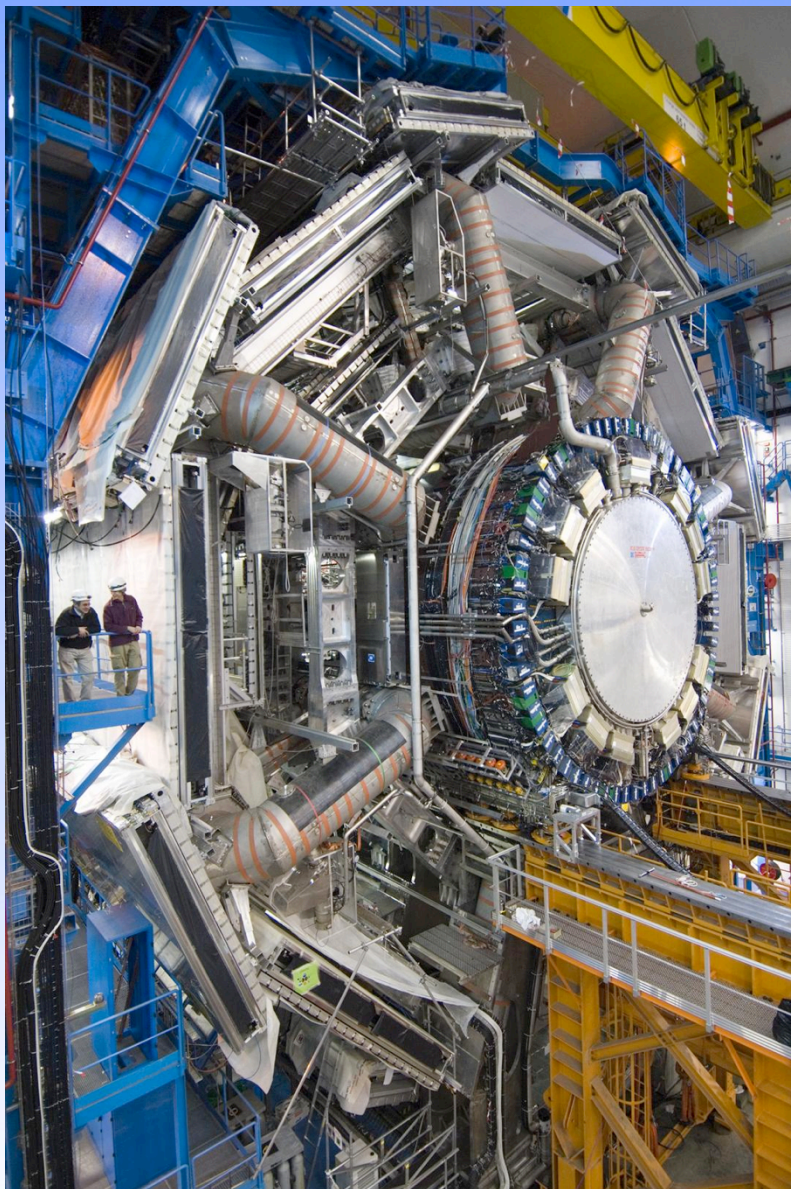
Hoe groot is de ATLAS detector



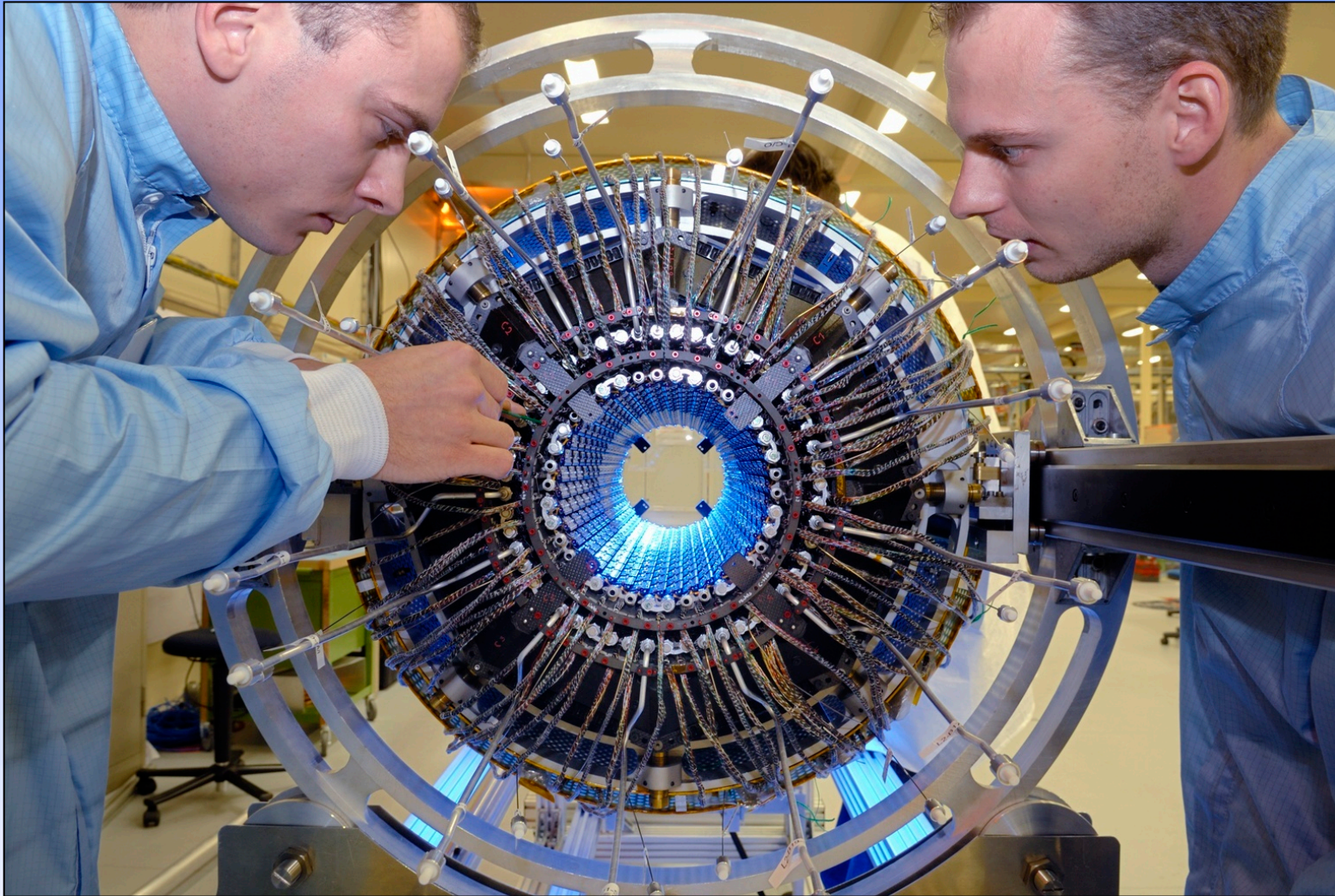
Installatie



Alles op zijn plek

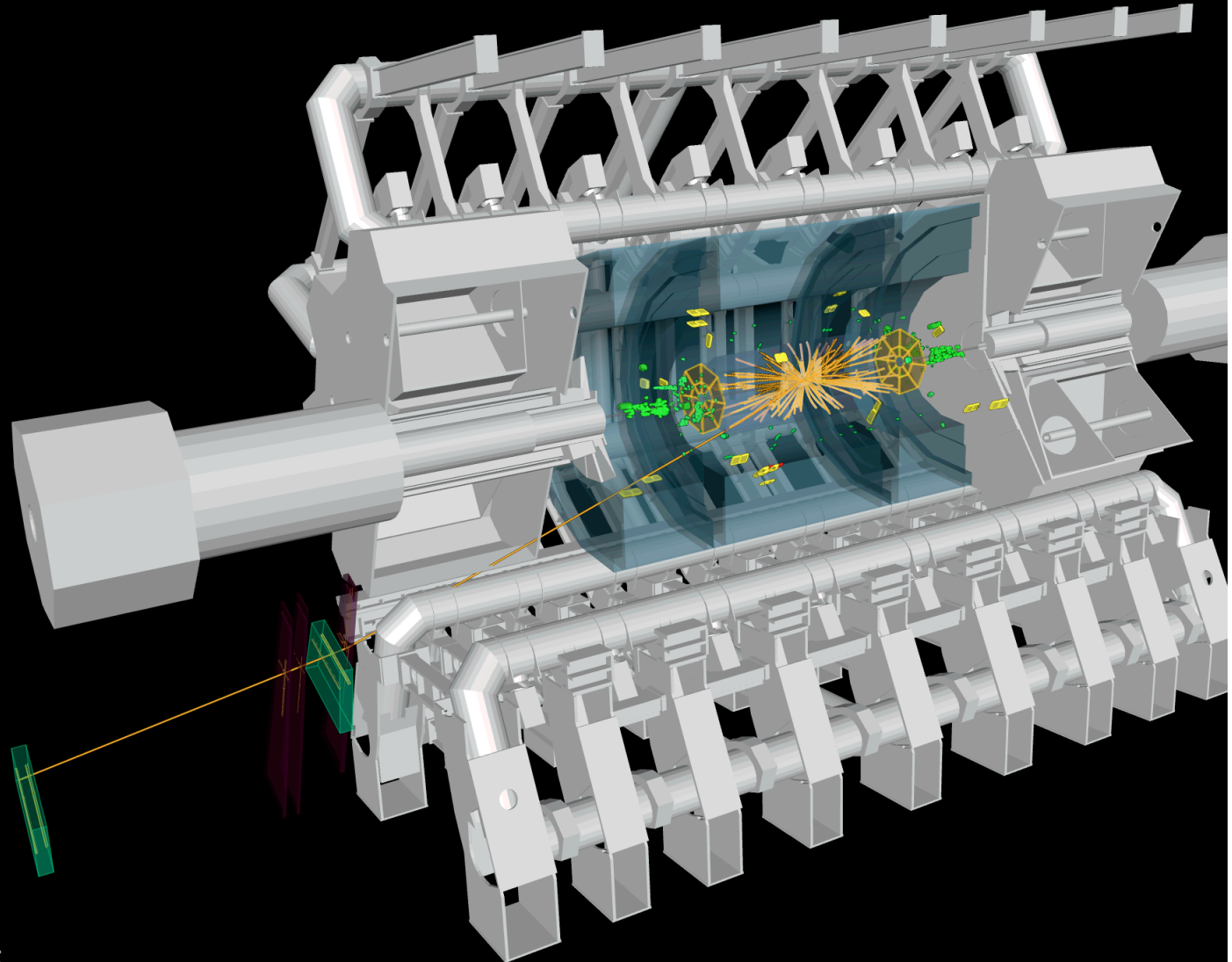
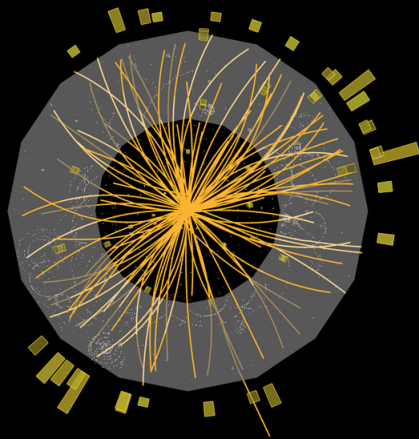


Helemaal binnenin – het hart van ATLAS



Pixel detector – 'Fotoestel' van 80 Megapixel – 40 miljoen fotos/seconde

Een gemiddelde botsing



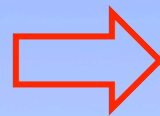
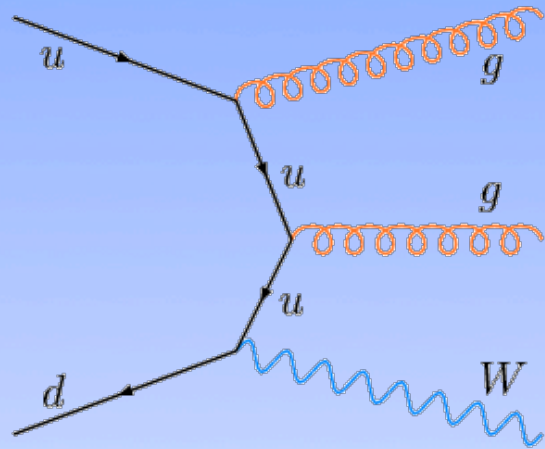
 **ATLAS**
EXPERIMENT

2010-03-30, 12:59 CEST
Run 152166, Event 322215

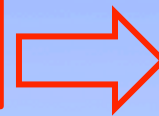
<http://atlas.web.cern.ch/Atlas/public/EVTDISPLAY/events.html>

Hoe begrijpen wat er gebeurt - simulatie

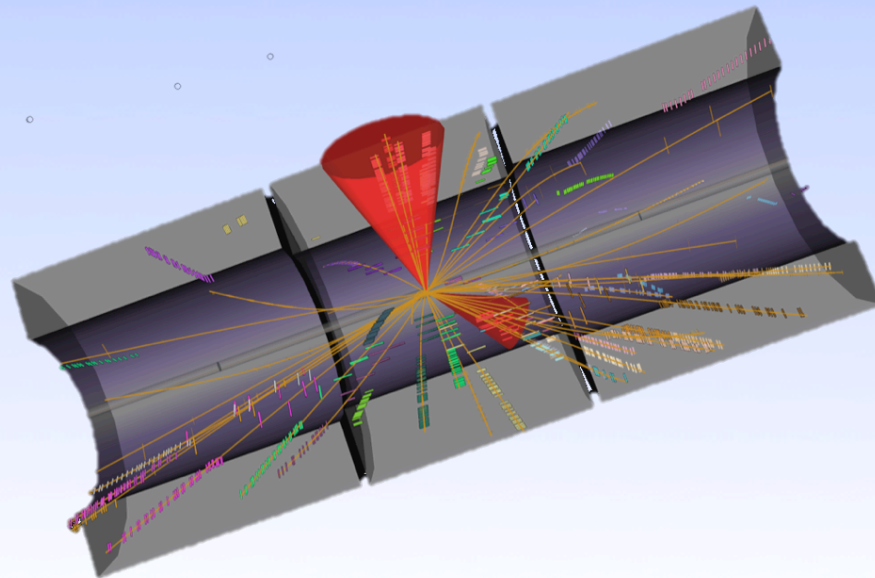
Standaard Model
botsings process



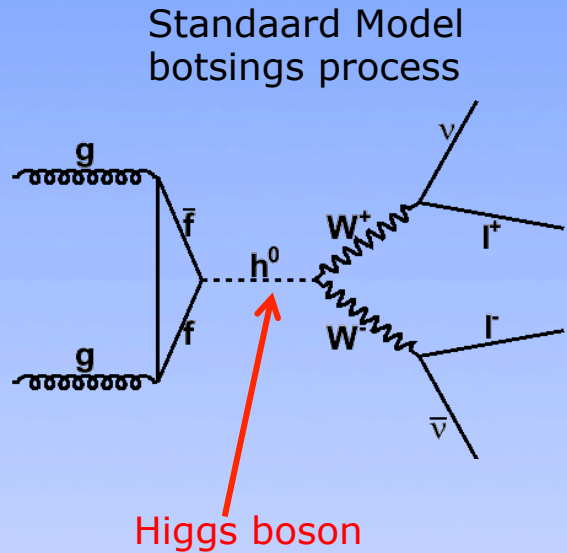
Simulatie van
fysica processen



Simulatie van
detector

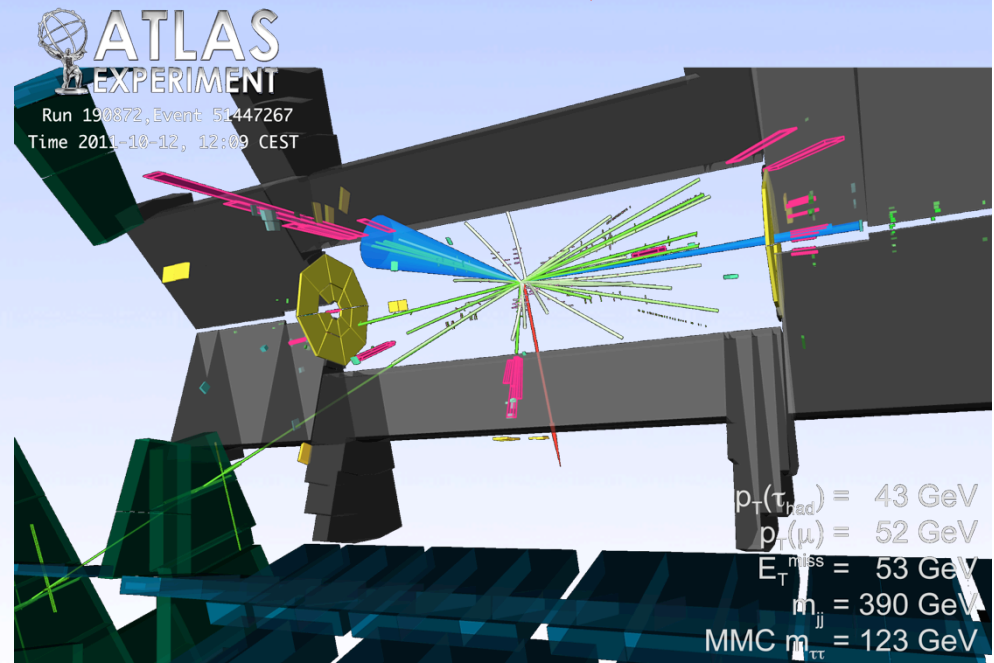


Hoe begrijpen wat er gebeurt - simulatie

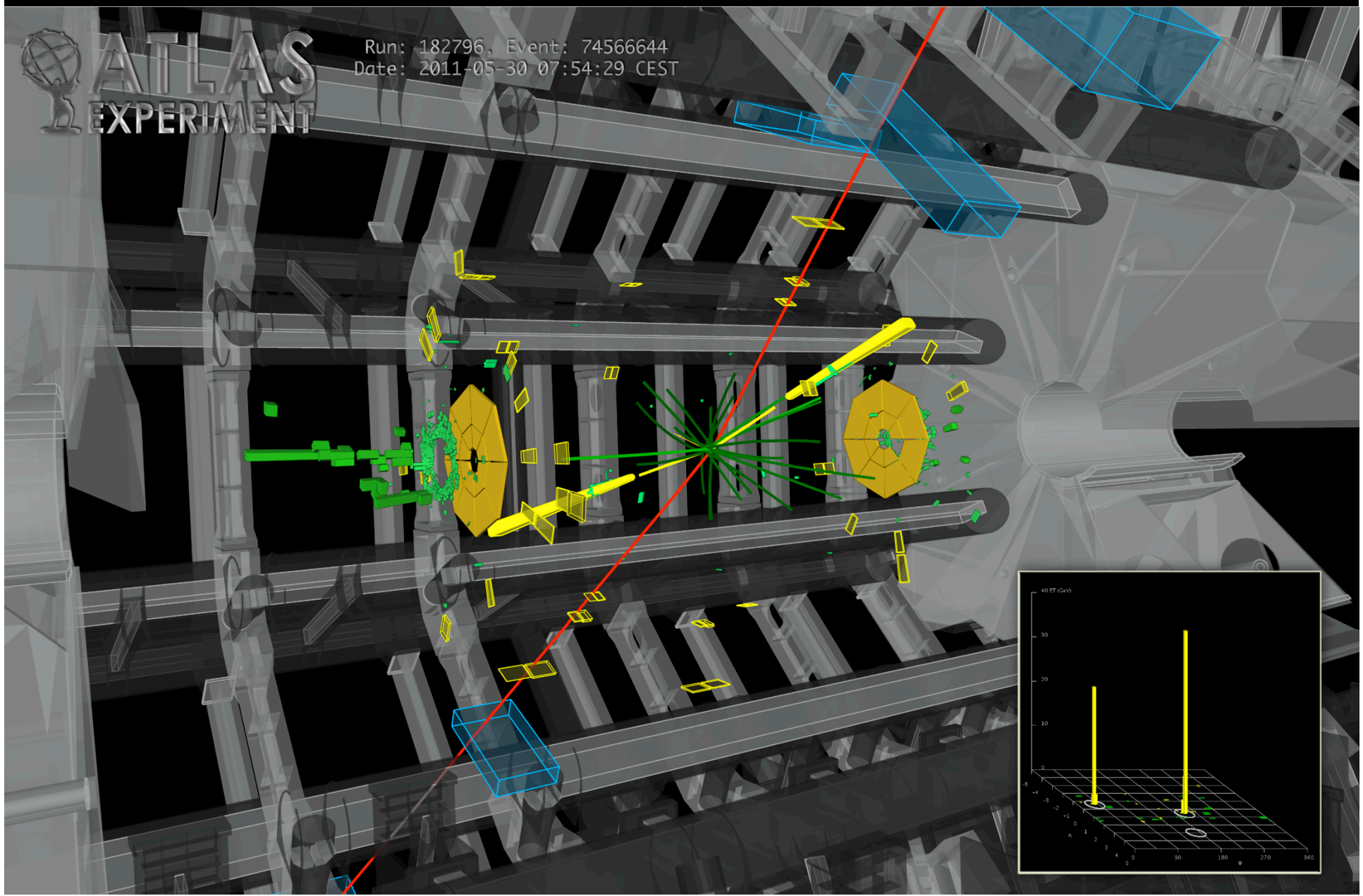


Simulatie van fysica processen

Simulatie van detector

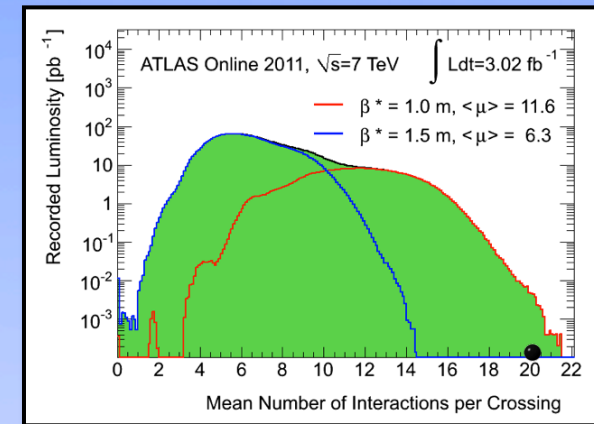
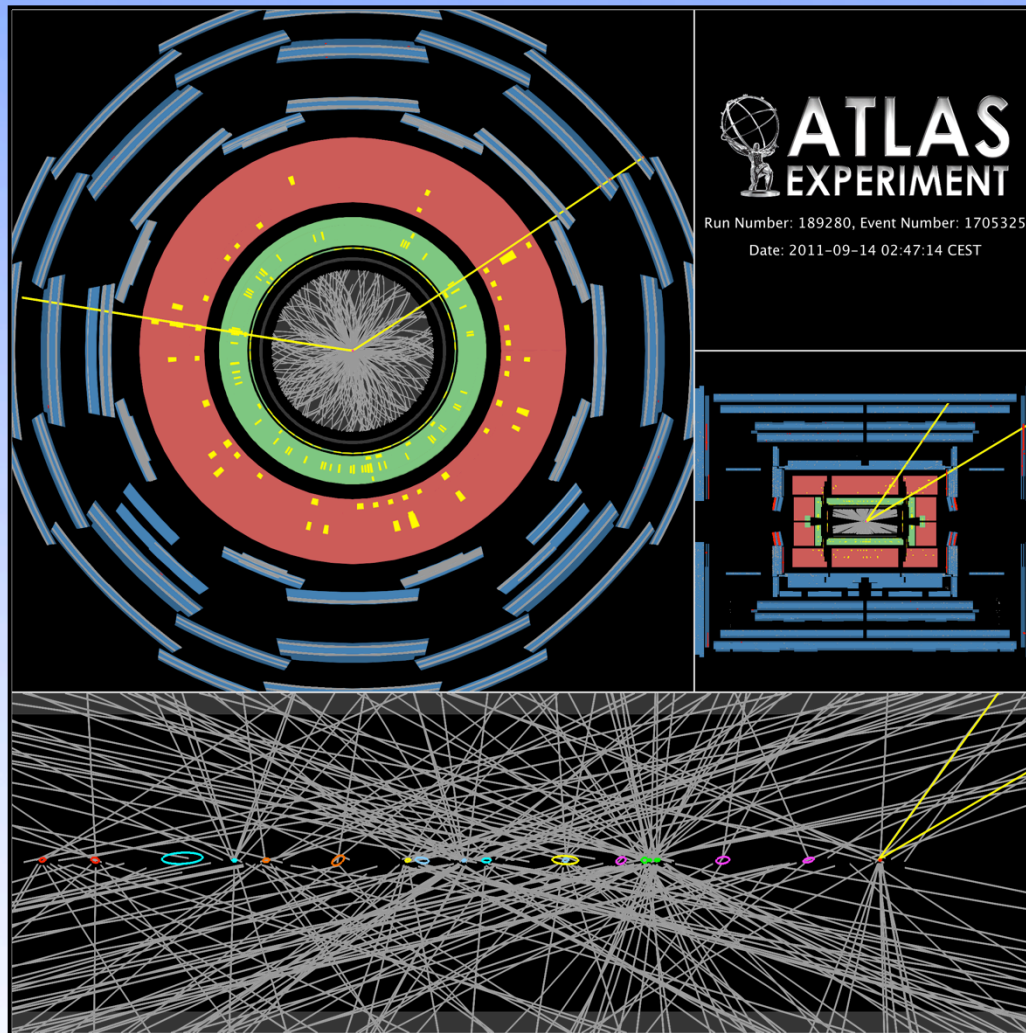


Een bijzondere botsing – Dit zou een Higgs boson kunnen zijn...



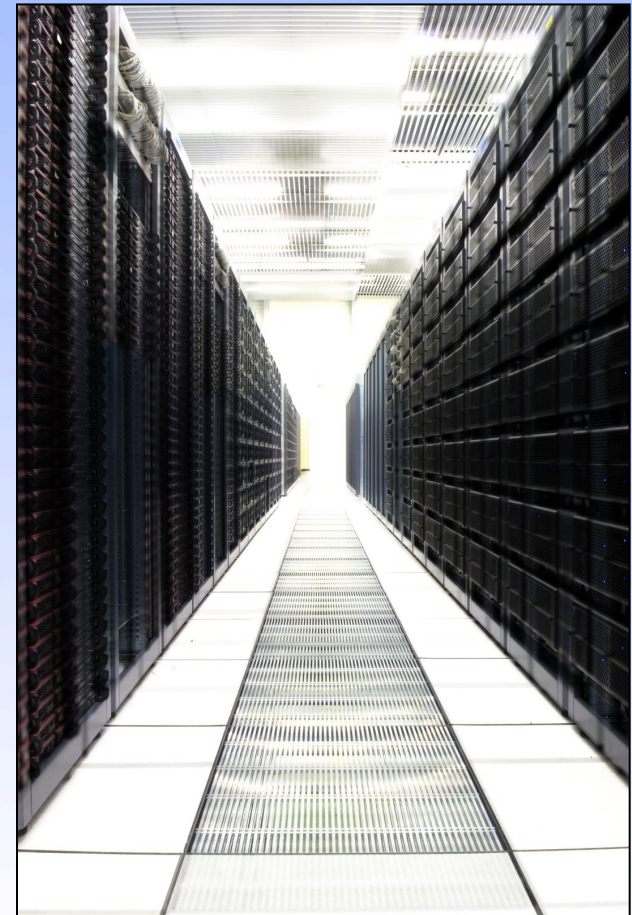
LHC: Heel veel botsingen (tegelijktijd)

- Soms wel 20 botsingen tegelijkertijd – zoekpuzzel!



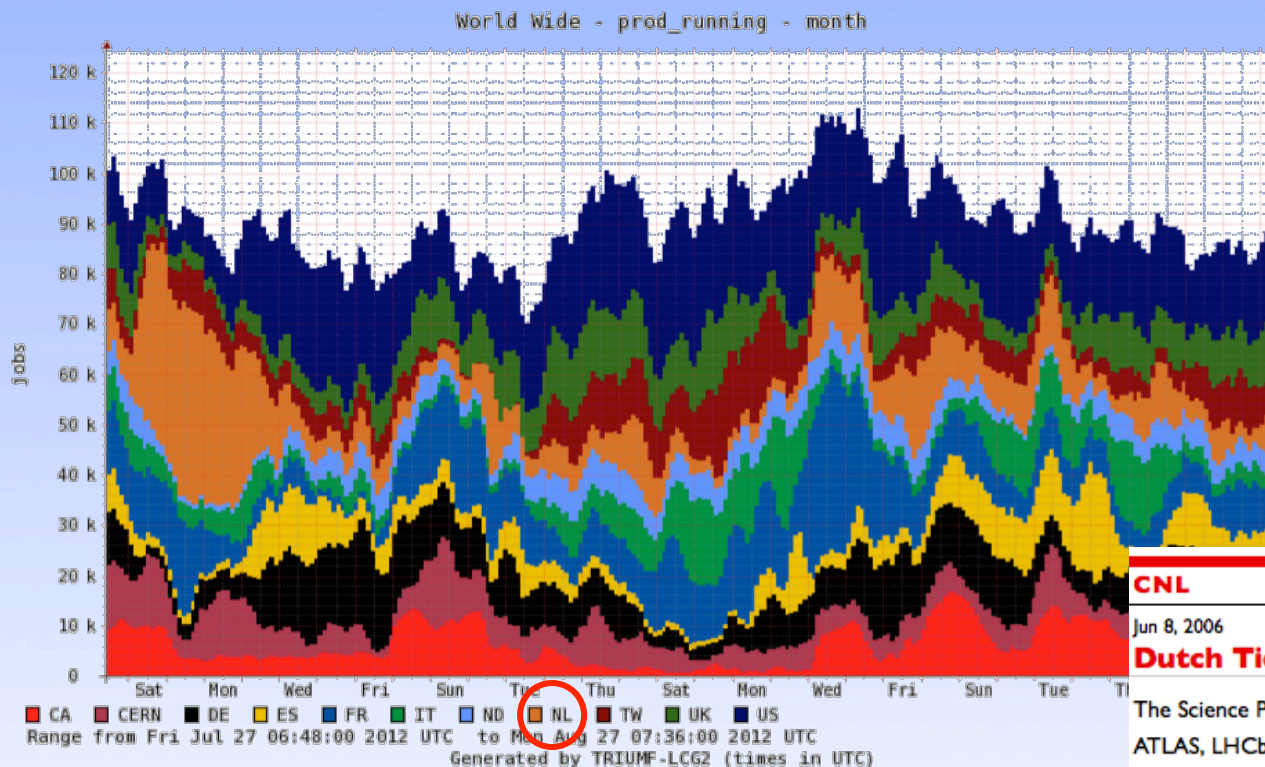
LHC – Heel vaak botsen = heel veel data...

- 40 miljoen botsingen per seconde – 2Gb data per botsing
- 600 botsingen per second = 10.000 Terabyte/jaar
- **Nodig: real-time selectie:** 1 op 60.000 bewaren, beslissen in millisecondes
- Heel veel computers – online farm van 3000 CPUs doet bulk van het werk...



LHC – data analyse

- Reconstructie, calibratie, selectie gebeurt op LHC Computing Grid (10tal computer centra wereldwijd)
- ATLAS – 100.000 CPU cores *non-stop* in gebruik



CNL

Jun 8, 2006

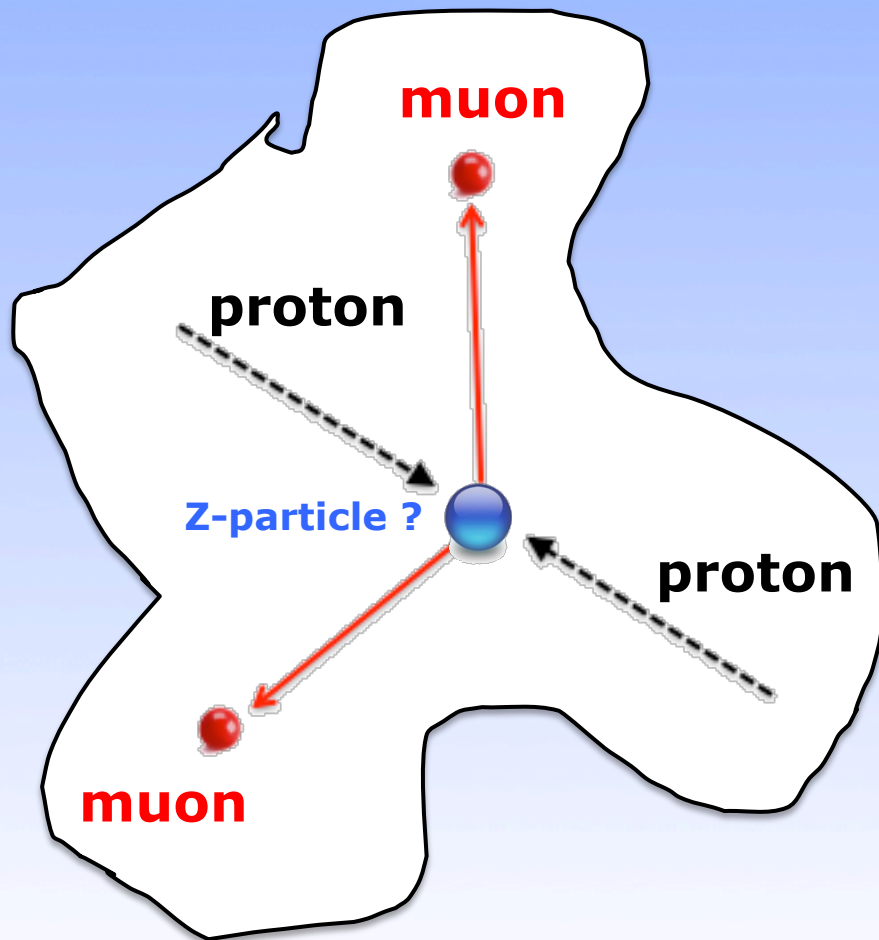
Dutch Tier-I centre has first-rate connections

The Science Park Amsterdam will be home to a Tier-I centre for the ATLAS, LHCb and ALICE experiments. This Large Hadron Collider (LHC) Tier-I will be jointly operated by SARA, the Dutch national supercomputer centre, and NIKHEF, the Dutch National Institute for Nuclear Physics and High-Energy Physics. The centre will provide about 20% of the total worldwide Tier-I capacity for LHCb, about 10% of that for ATLAS and about 5% for ALICE.

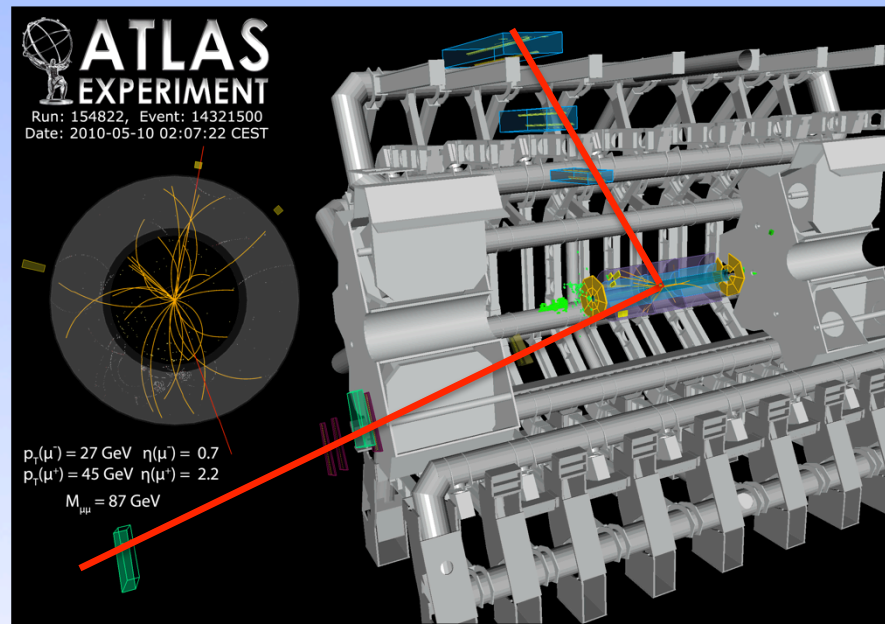
Nederlandse contributie (SARA/NIKHEF)

Automatische analyse – een noodzaak

- Wat doen al die computers – automatische event analyse..



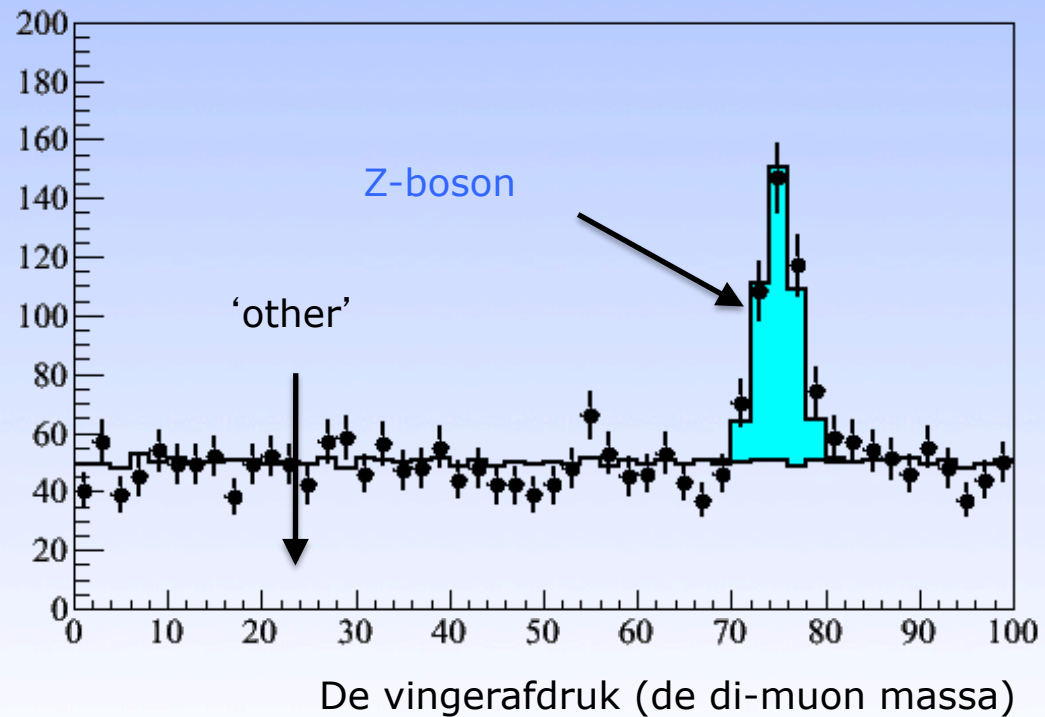
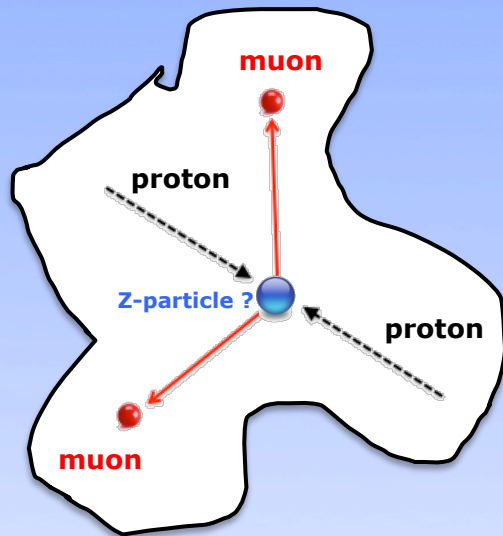
2-muons as seen in the ATLAS detector



Wat is de 'vingerafdruk' van een Z:
→ de di-muon massa

Een makkelijk voorbeeld - $Z \rightarrow \mu\mu$

- Vergelijk distributie van 'dimuon mass' in data met simulatie voorspelling voor signaal en achtergrond

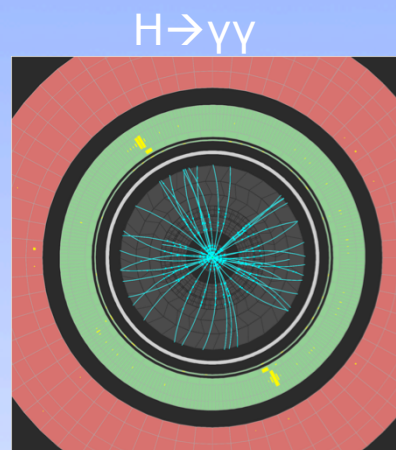


Hoe ziet een Higgs event eruit?

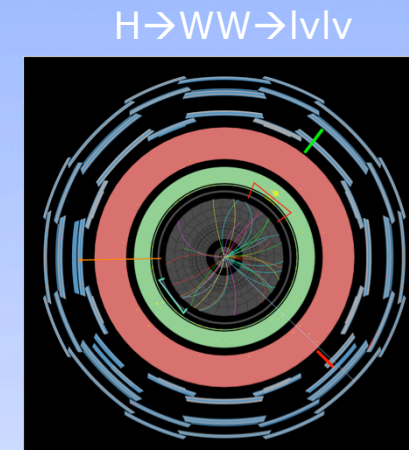
- (Te) veel mogelijkheden, de meeste hopeloos onherkenbaar
- Voorbeelden uit 'meest veelbelovende' vervalsmogelijkheden



~50% kans
dat deze botsing
achtergrond is



~95% kans
dat deze botsing
achtergrond is



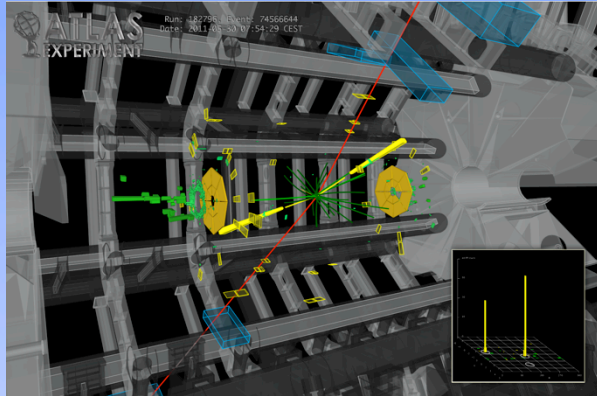
~90% kans
dat deze botsing
achtergrond is

'Gouden kanaal'
maar uiterst zeldzaam:

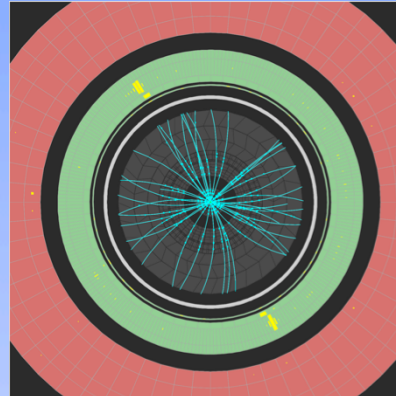
*verwacht slechts 5
events in totaal in
2 jaar data nemen!*

Automatische analyse van 2 jaar data...

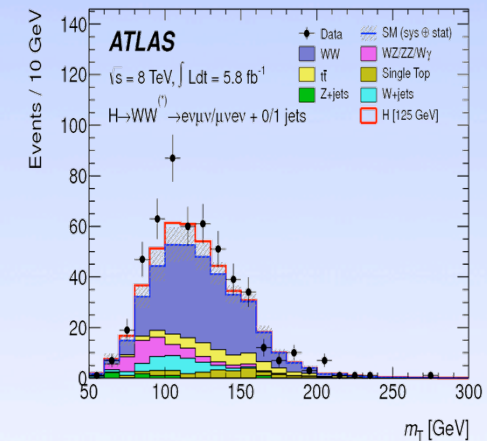
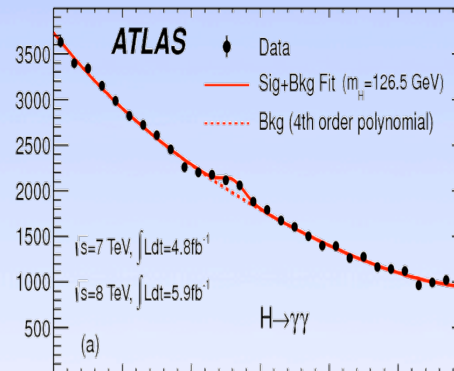
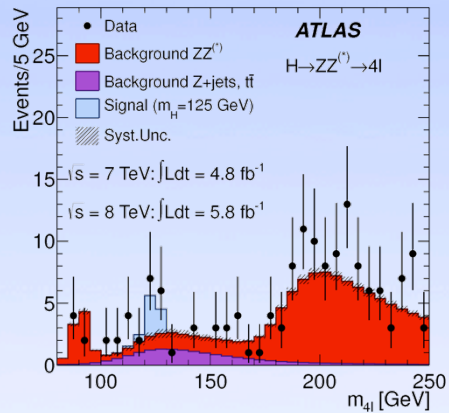
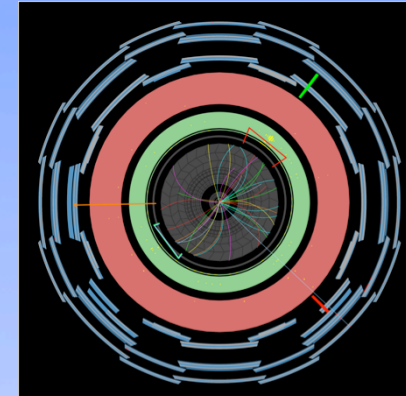
$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$



$H \rightarrow \gamma\gamma$



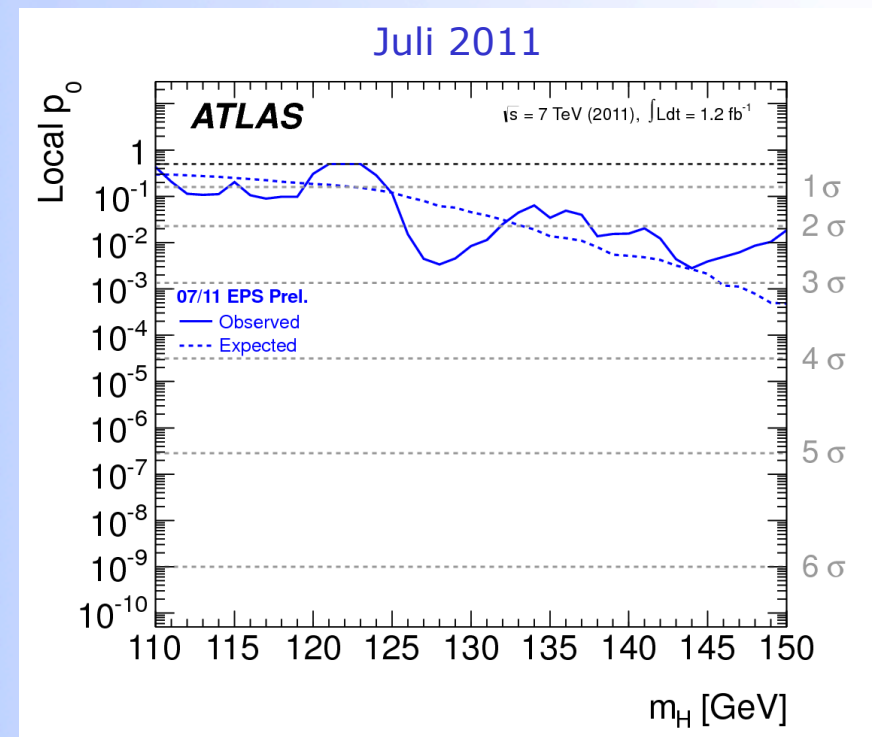
$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$



Plots geven wel hints – maar individueel niet overtuigend

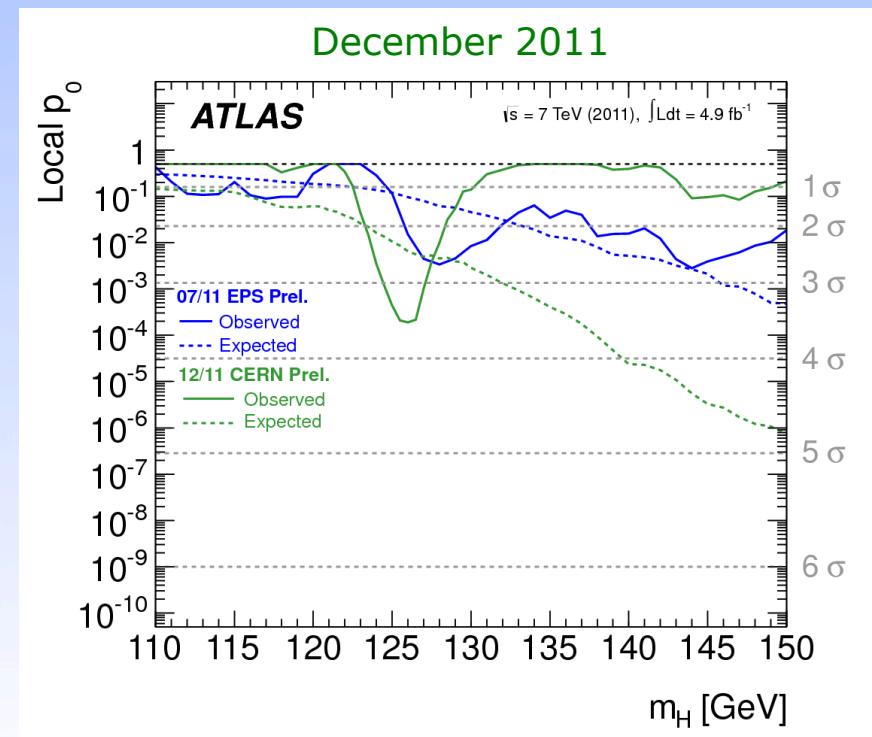
Statistische analyse van alle kanalen

- Voor maximale gevoeligheid: combineer informatie van alle kanalen (10 stuks)
- Voor maximale betrouwbaarheid: neem alle onzekerheden in voorspellingen mee (van detector simulatie & theorie – 439 parameters)
- Bereken:
 - kans dat geobserveerd signaal in alle kanalen vals is ('een statistische fluctuatie')
 - **Kans groot → niks gevonden**
 - Kans zeer klein → Higgs ontdekt!



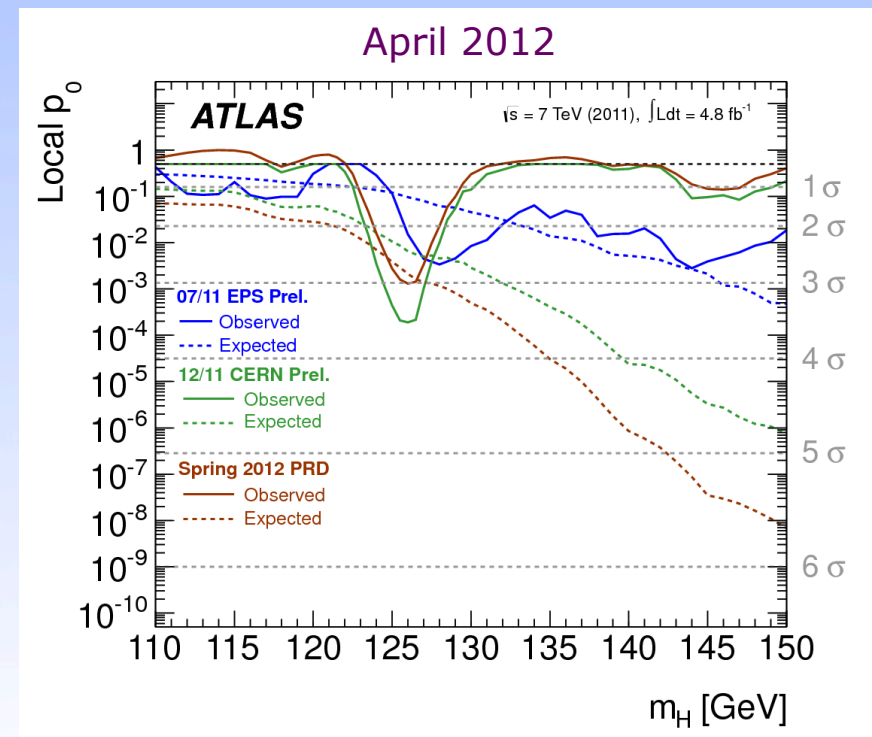
Statistische analyse van alle kanalen

- Voor maximale gevoeligheid: combineer informatie van alle kanalen (10 stuks)
- Voor maximale betrouwbaarheid: neem alle onzekerheden in voorspellingen mee (van detector simulatie & theorie – 439 parameters)
- Bereken:
kans dat geobserveerd signaal in alle kanalen vals is ('een statistische fluctuatie')
 - **Kans groot → niks gevonden**
 - Kans zeer klein → Higgs ontdekt!



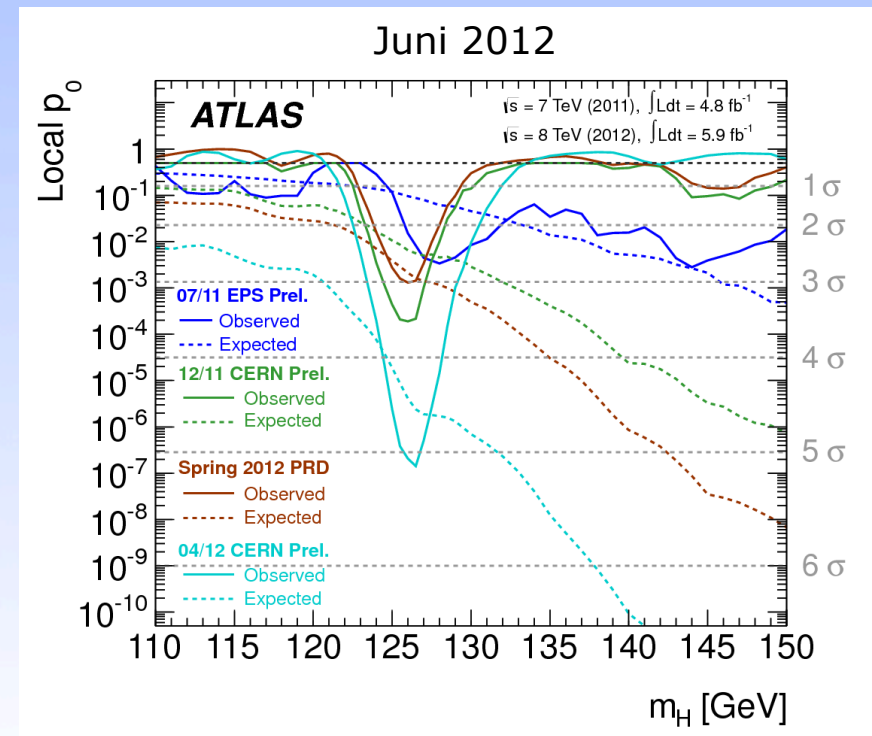
Statistische analyse van alle kanalen

- Voor maximale gevoeligheid: combineer informatie van alle kanalen (10 stuks)
- Voor maximale betrouwbaarheid: neem alle onzekerheden in voorspellingen mee (van detector simulatie & theorie – 439 parameters)
- Bereken:
kans dat geobserveerd signaal in alle kanalen vals is ('een statistische fluctuatie')
 - **Kans groot → niks gevonden**
 - Kans zeer klein → Higgs ontdekt!



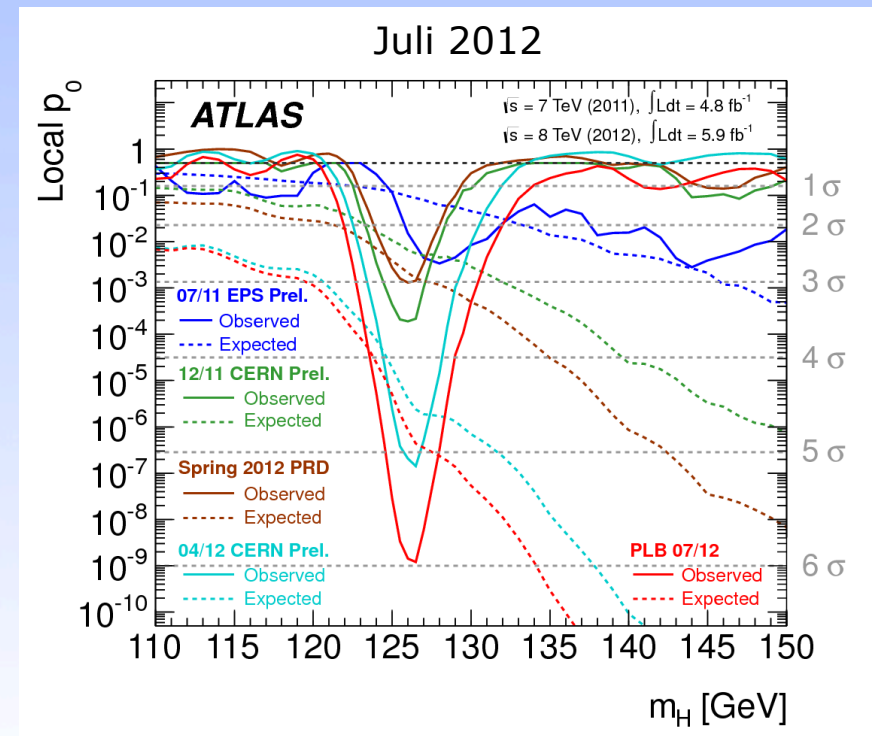
Statistische analyse van alle kanalen

- Voor maximale gevoeligheid: combineer informatie van alle kanalen (10 stuks)
- Voor maximale betrouwbaarheid: neem alle onzekerheden in voorspellingen mee (van detector simulatie & theorie – 439 parameters)
- Bereken:
kans dat geobserveerd signaal in alle kanalen vals is ('een statistische fluctuatie')
 - Kans groot → niks gevonden
 - **Kans kleiner dan 1:3 miljoen → Higgs ontdekt!**



Statistische analyse van alle kanalen

- Voor maximale gevoeligheid: combineer informatie van alle kanalen (10 stuks)
- Voor maximale betrouwbaarheid: neem alle onzekerheden in voorspellingen mee (van detector simulatie & theorie – 439 parameters)
- Bereken:
 - kans dat geobserveerd signaal in alle kanalen vals is ('een statistische fluctuatie')
 - Kans groot → niks gevonden
 - **Kans kleiner 1: miljard → Higgs ontdekt!**

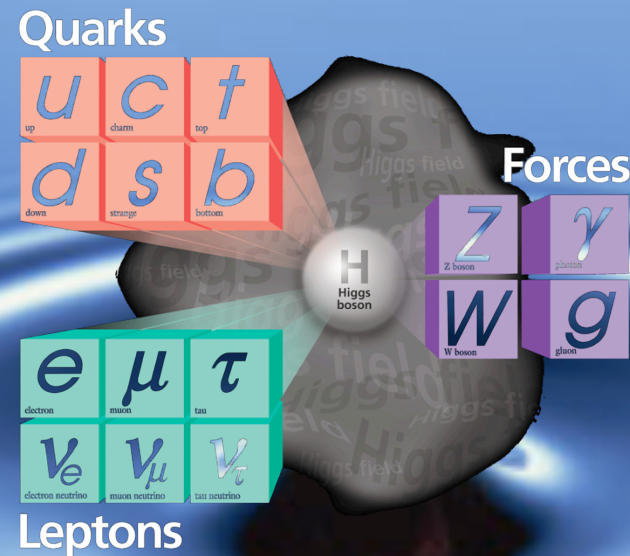


Hebbes – Feestje...



Einde voor vandaag! – Wat weten we nu?

- Het Higgs boson bestaat!
- Het Higgs veld is de oorsprong van massa van elementaire deeltjes



- Het cruciale ontbrekende deel van Standaard Model terecht!

Wat doen we morgen?

- Nog veel open vragen!
 - Waarom zijn de massa van elementaire deeltjes zo verschillend ?
 - Waar is donkere materie van gemaakt ?
 - Waar is alle anti-materie gebleven ?
 - Waarom zijn er vier natuurkrachten ?
 - Wat gebeurde er vlak na de Big Bang ?
- De LHC werkt als een trein!
 - Hopelijk antwoord op meer vragen
- Vanaf eind 2014 met verdubbelde energie
 - Nieuwe verassingen/

