



Waarom bestaat er iets in plaats van niets?

Marcel Merk, Sterrenwacht Vesta, 21-9-2023

Nikhef



*"Over Beauty-deeltjes, antimaterie
en een nieuwe natuurkracht"*



STICHTING VESTA
STERRENWACHT



Waarom bestaat er iets in plaats van niets?

Marcel Merk, Sterrenwacht Vesta, 21-9-2023

Nik|hef



Inhoud:

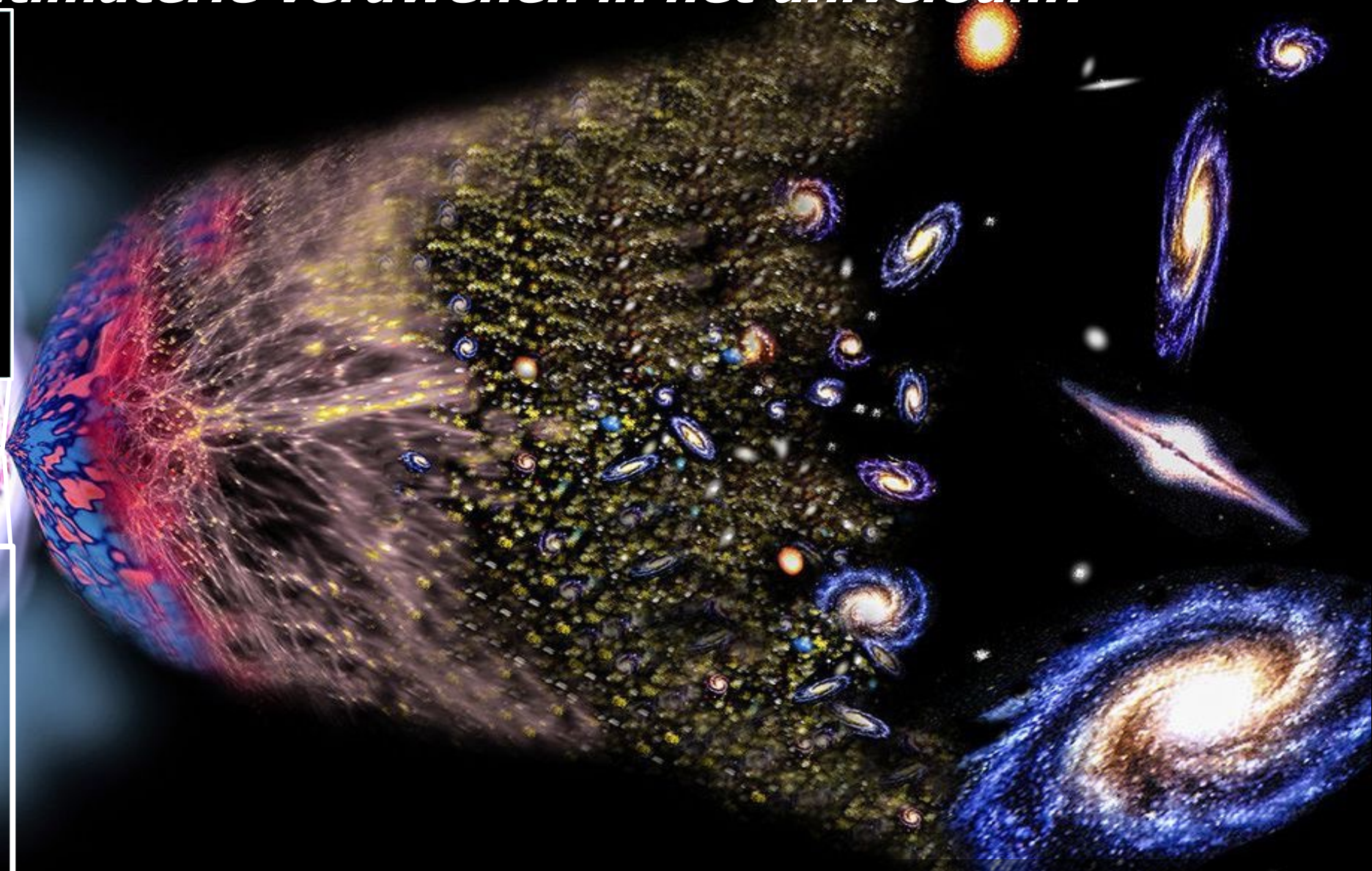
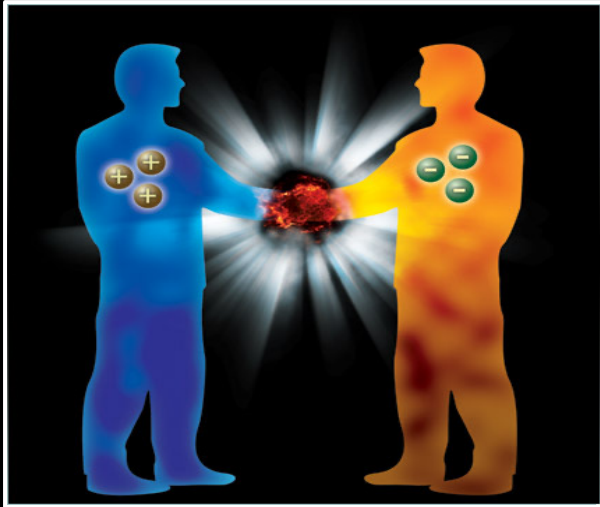
- 1: Materie en antimaterie
- 2: Antimaterie en de Big Bang
- 3: Deeltjes en CERN
- 4: Krachten: het Standaard Model
- 5: Symmetrie in materie en antimaterie?
- 6: Een nieuwe natuurkracht?

*"Over Beauty-deeltjes, antimaterie
en een nieuwe natuurkracht"*



STICHTING VESTA
STERRENWACHT

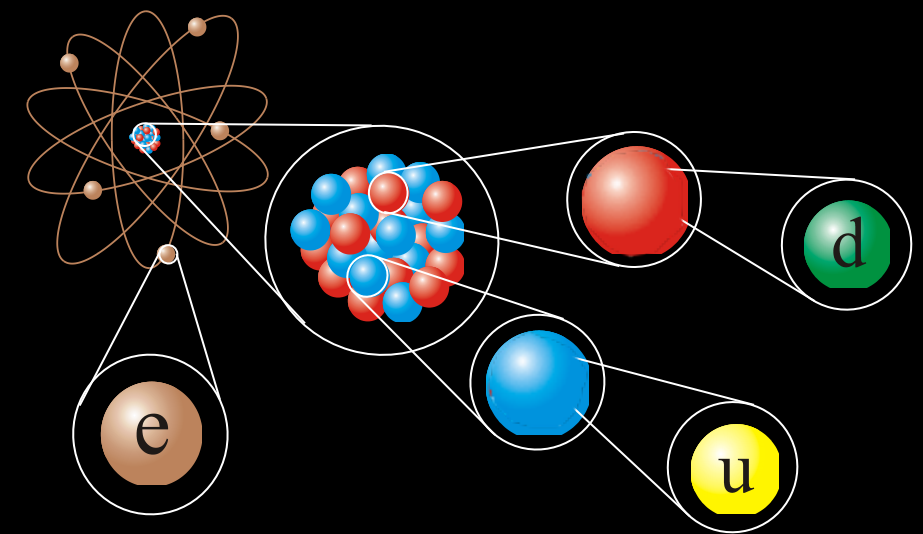
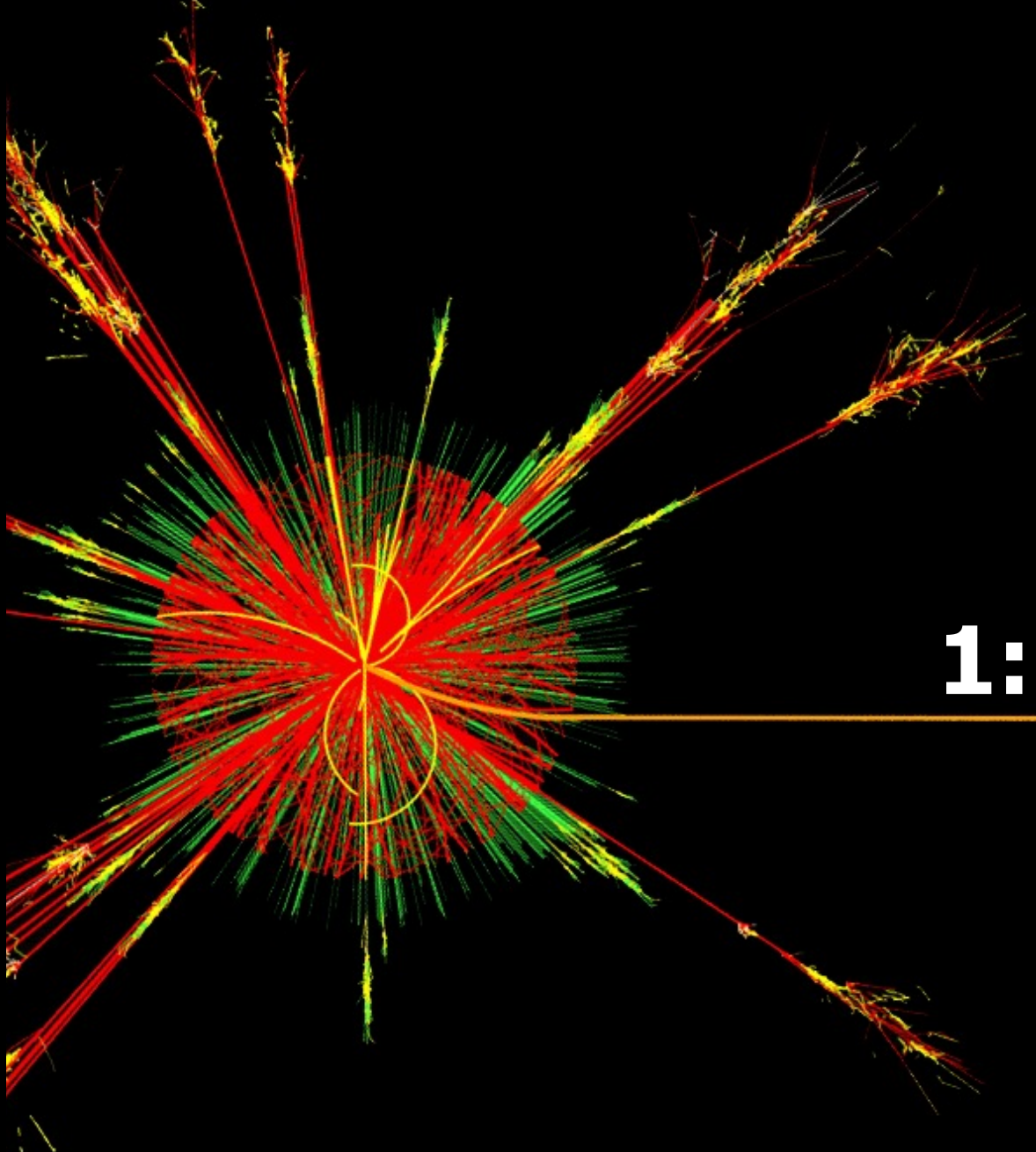
Hoe is de antimaterie verdwenen in het universum?



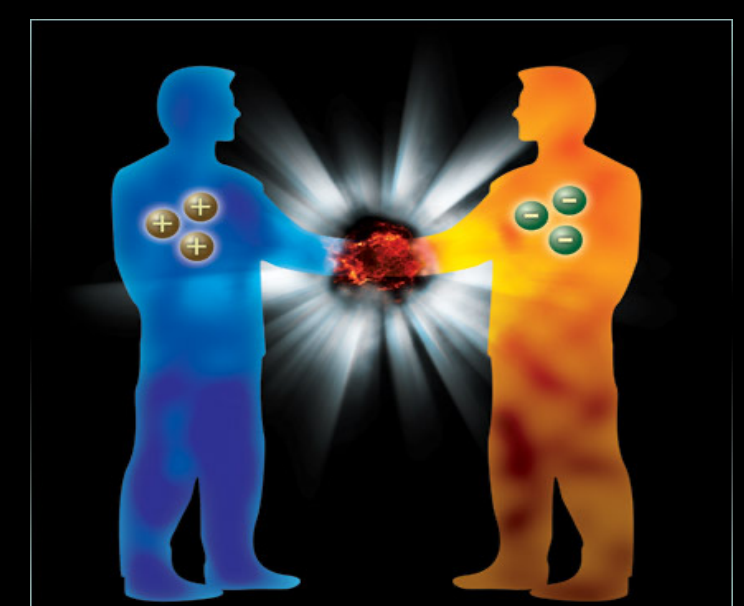
Fermionen: spin=1/2 deeltjes

Quarks			H	Krachten	
u	c	t		Z	γ
d	s	b	W	g	
1	2	3			
Leptonen					
ν_e	ν_μ	ν_τ			
e	μ	τ			

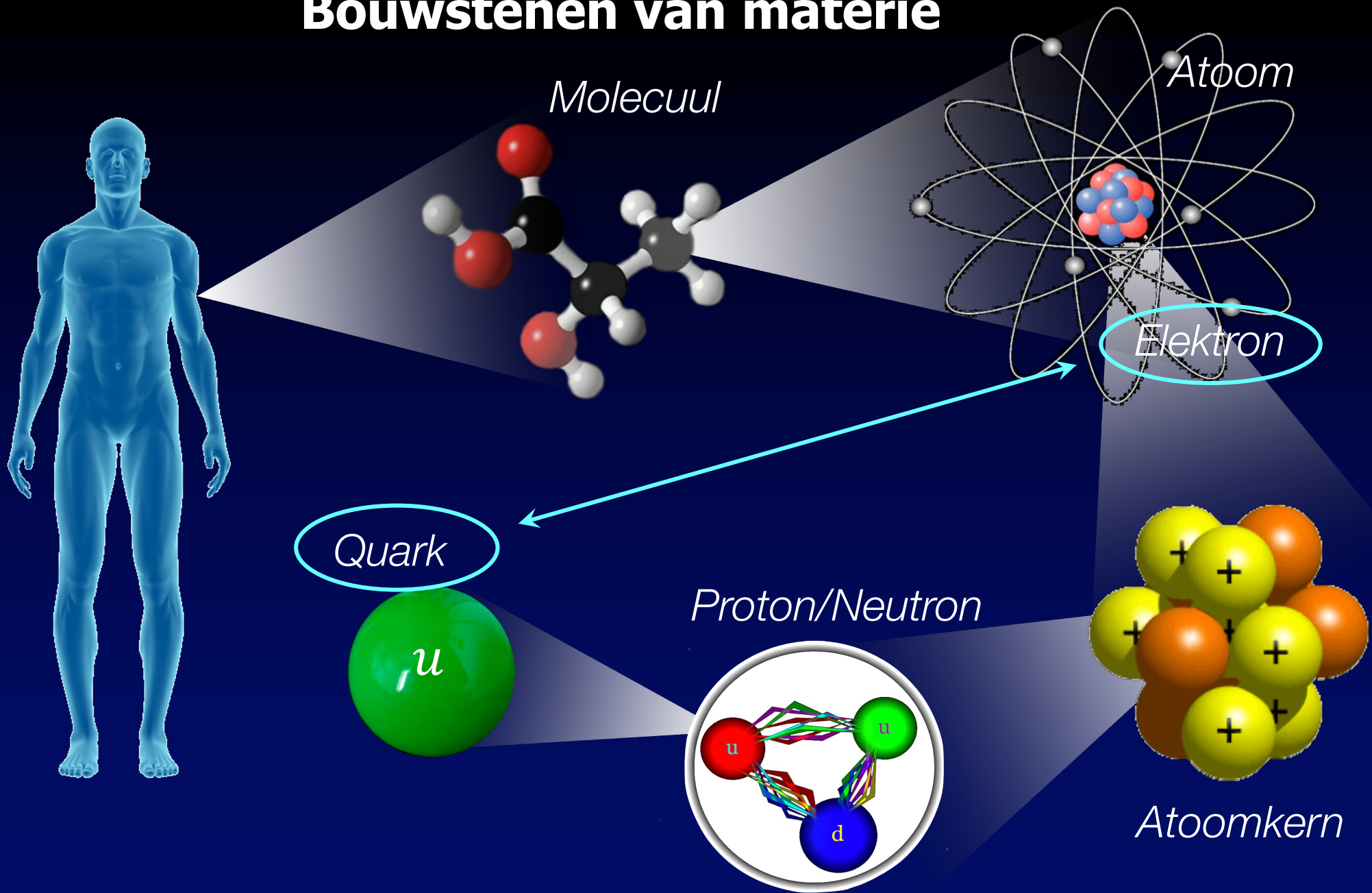
Flavor puzzle: waarom bestaan er drie generaties identieke deeltjes?



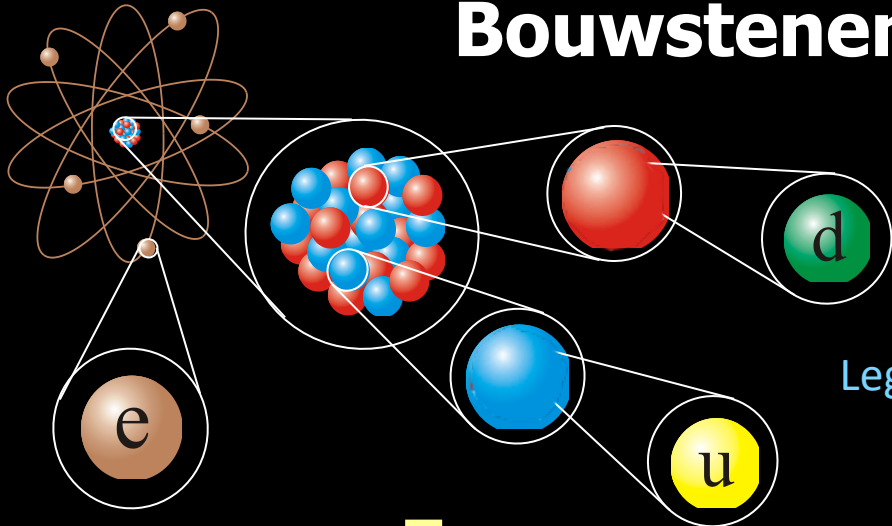
1: Materie en Antimaterie



Bouwstenen van materie



Bouwstenen van materie

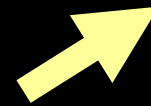


Lego blokken van de natuur



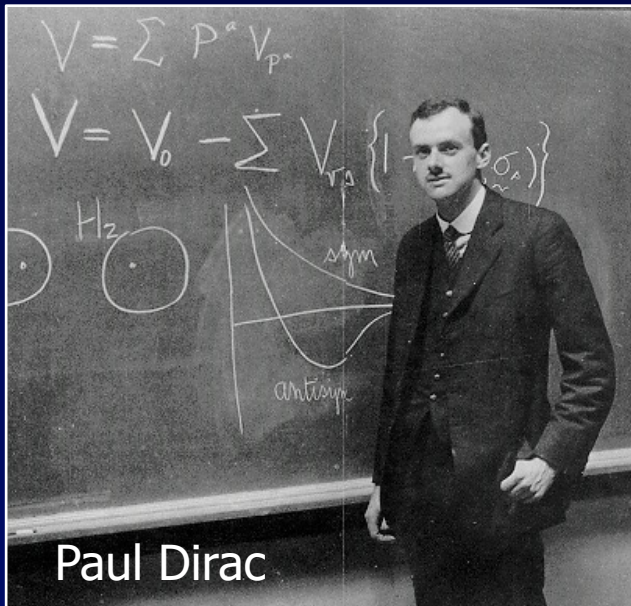
periodiek systeem

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



Paul Dirac en antimaterie

- 1928:
 - Dirac's relativistische quantum theorie
 - Voorspelling: *voor elk type deeltje bestaat er een identiek anti-deeltje!*
- 1932:
 - Anderson ontdekt het anti-elektron



Paul Dirac



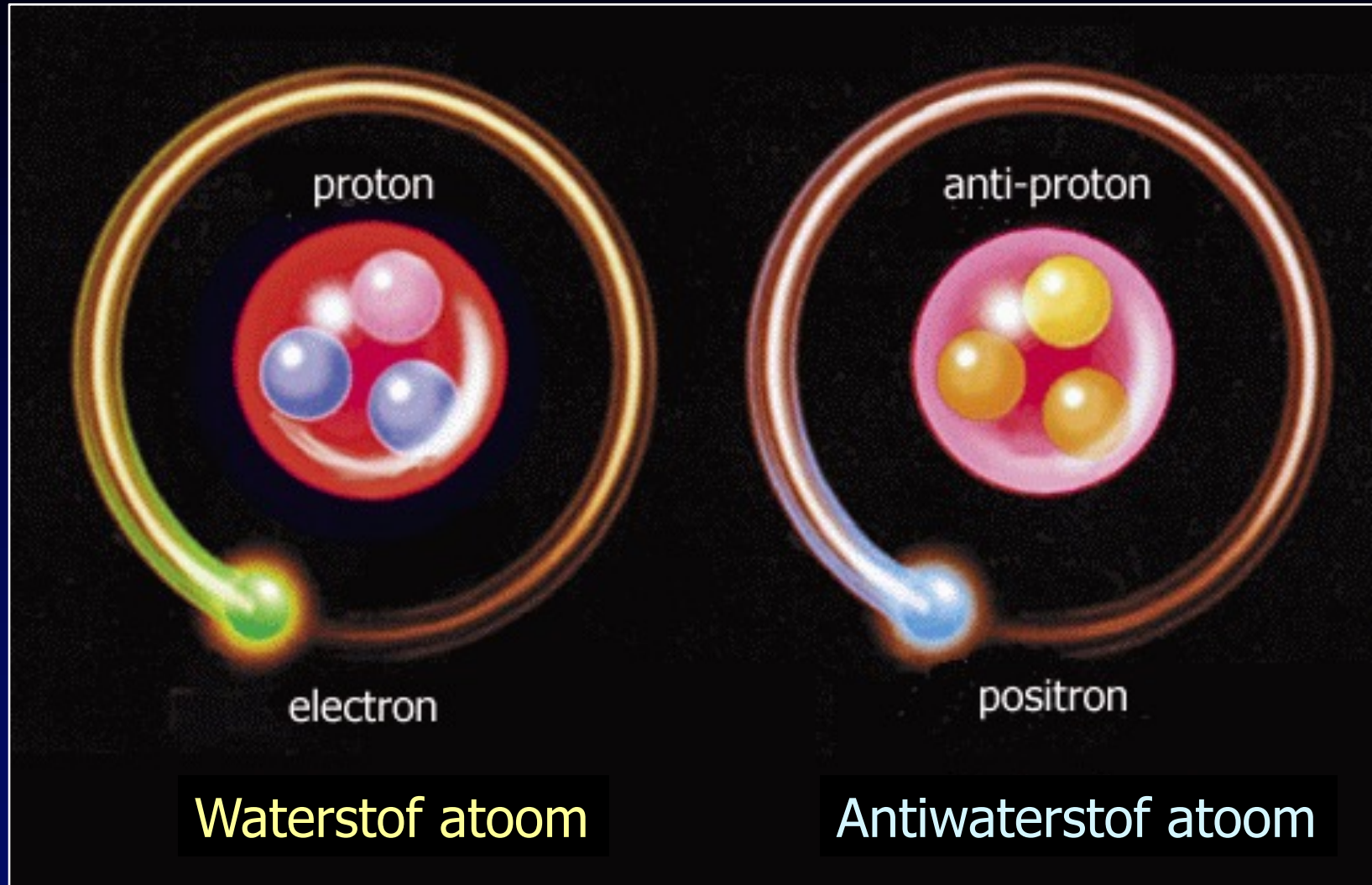
Carl Anderson



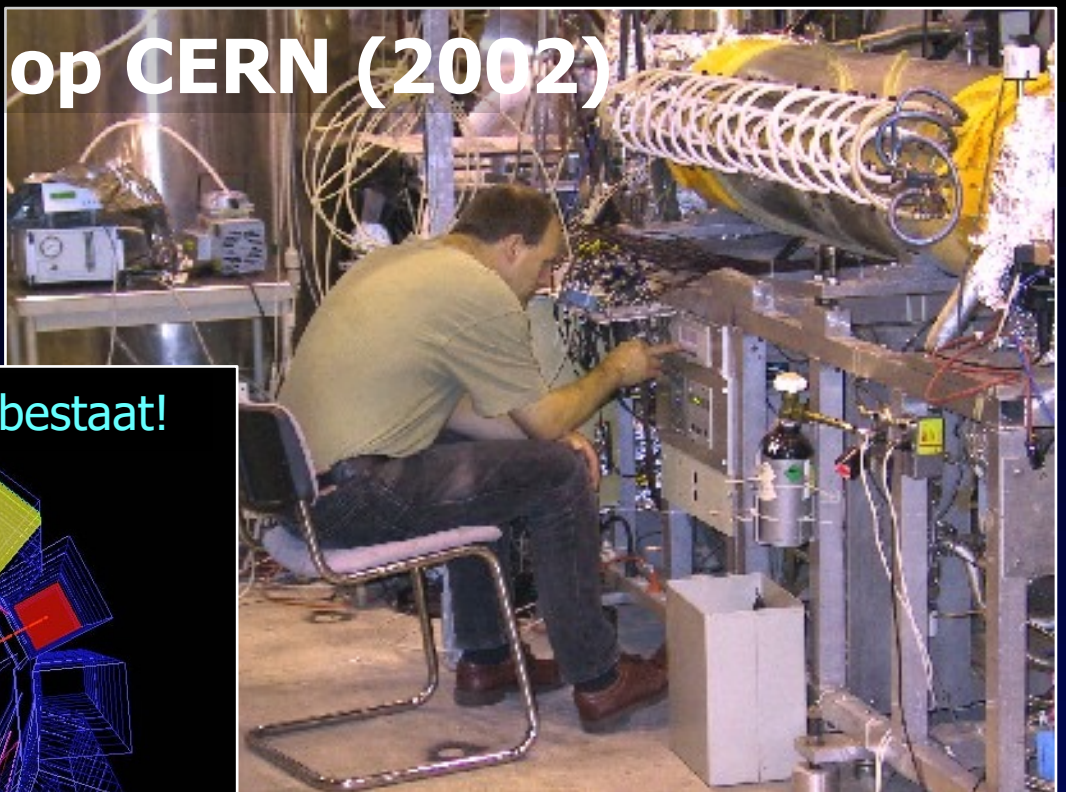
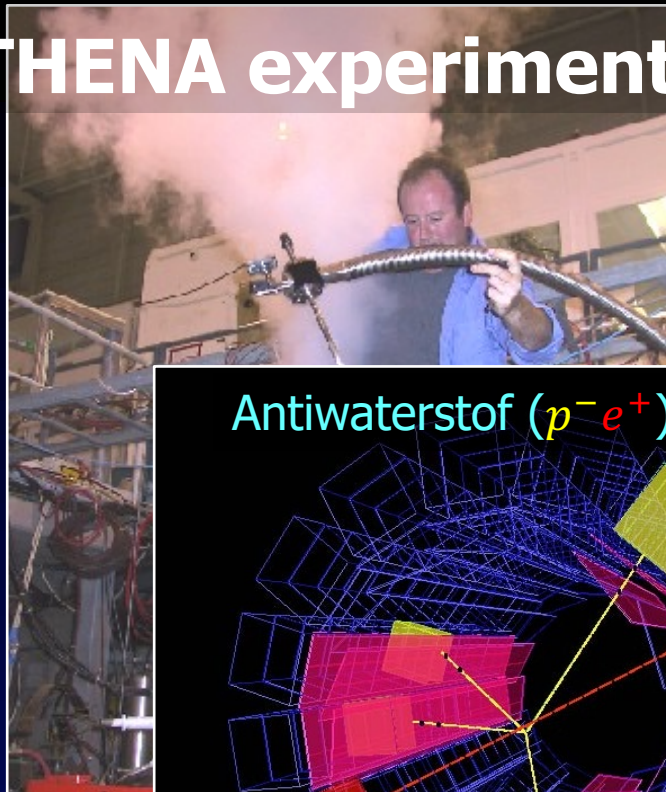
Dirac

AntiDirac

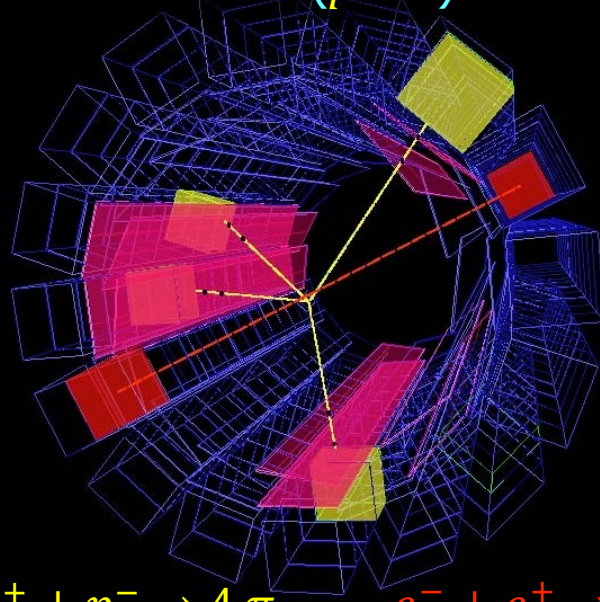
Antimaterie



Het ATHENA experiment op CERN (2002)



Antiwaterstof ($p^- e^+$) bestaat!



$$p^+ + p^- \rightarrow 4\pi$$

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma\gamma$$



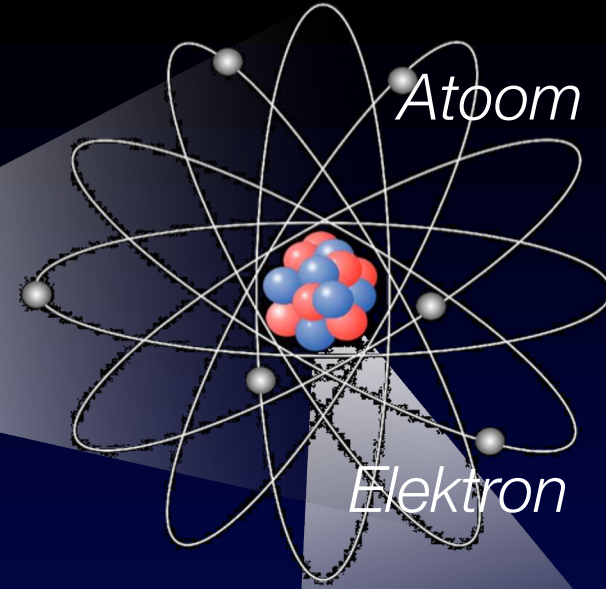
Een wereld van materie en ...



Molecuul

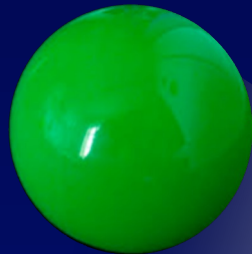


Atoom

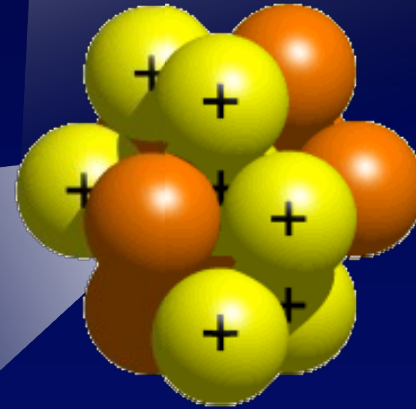
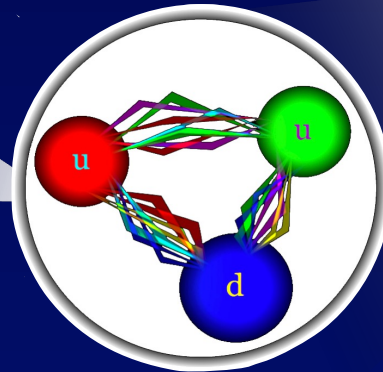


Elektron

Quark



Proton/Neutron



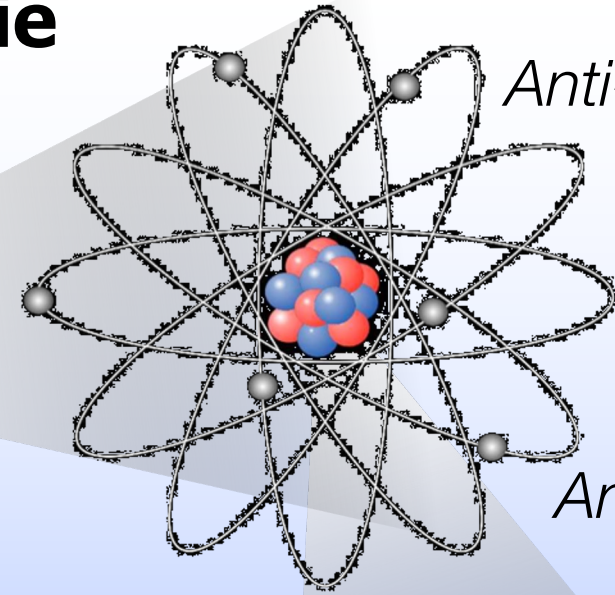
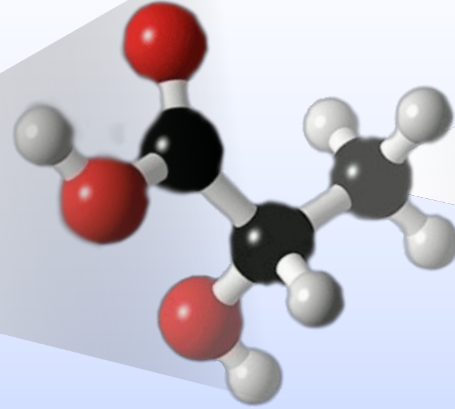
Atoom kern

... een wereld van antimaterie



**Identieke
anti-wereld**

Anti-Molecuul



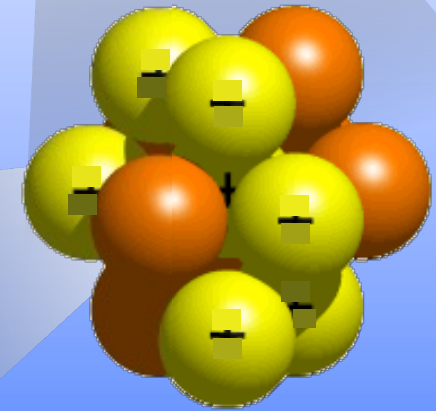
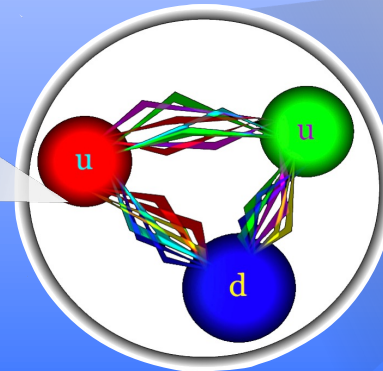
Anti-Atoom

Anti-elektron

Anti-Quark

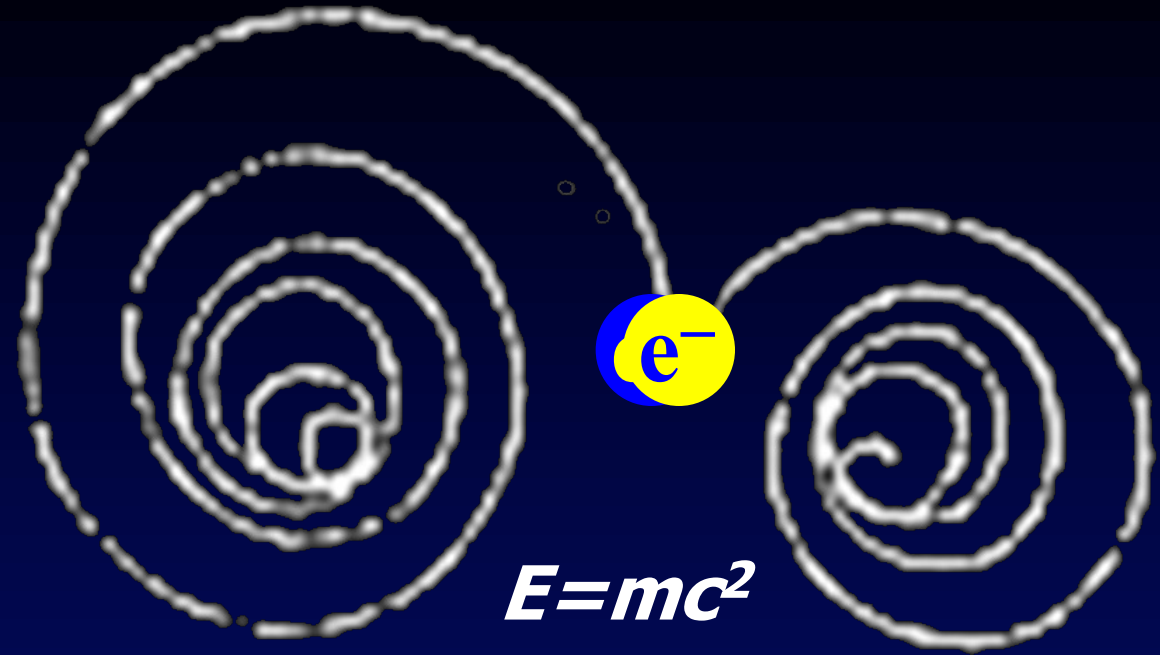
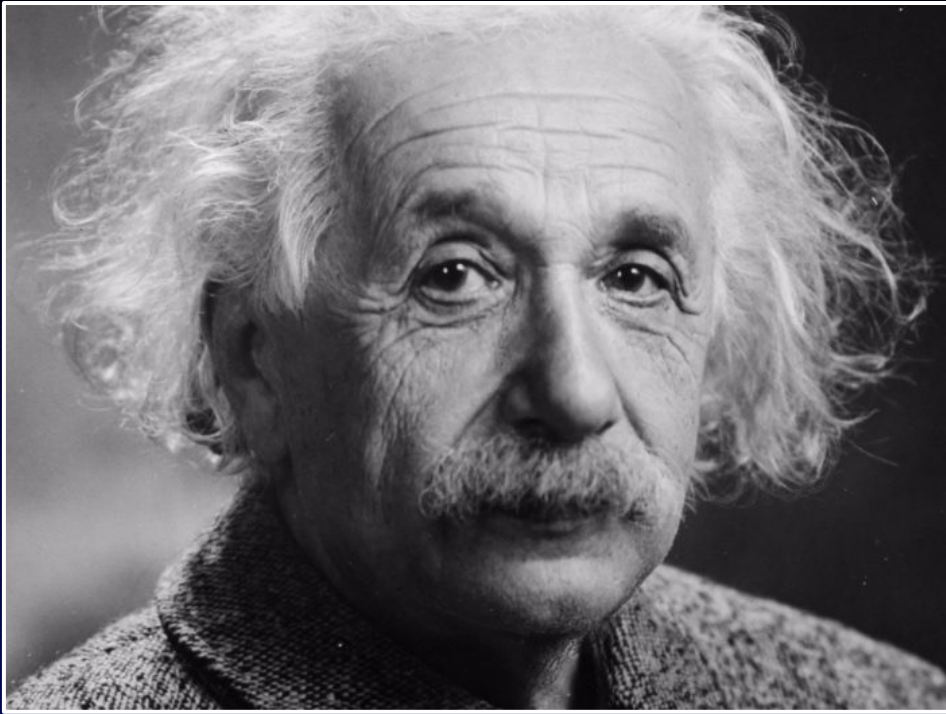


*Anti-Proton /
anti-Neutron*



Anti-atoomkern

Albert Einstein: Energie = materie + antimaterie

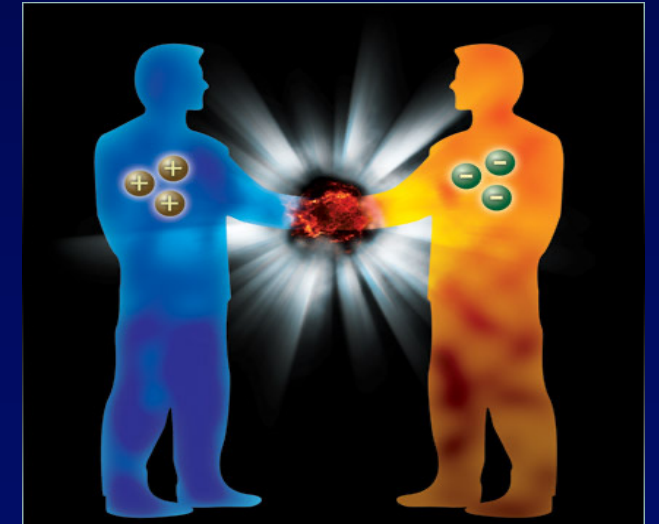


Creatie:

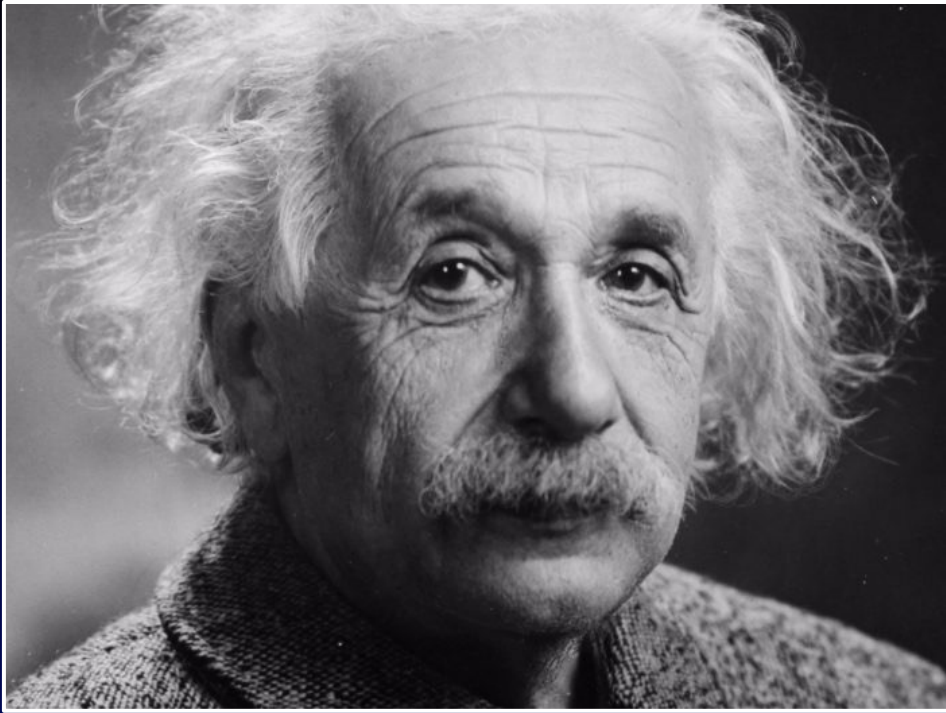
Energie → materie + antimaterie :  →  

Annihilatie:

materie + antimaterie → energie :   →  



Albert Einstein: Energie = materie + antimaterie

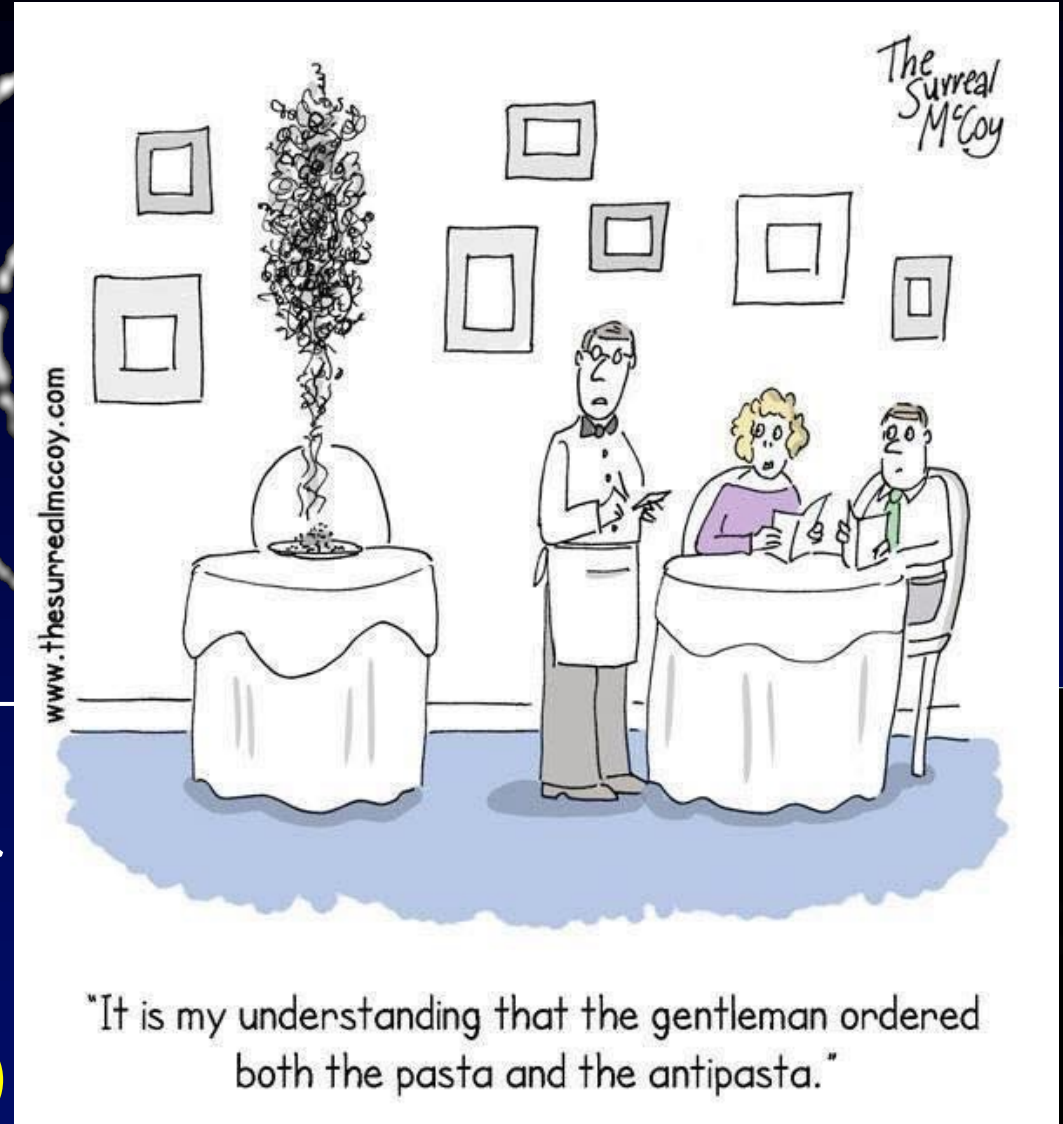


Creatie:

Energie \rightarrow materie + antimaterie :  \rightarrow

Anihilatie:

materie + antimaterie \rightarrow energie :  



Is er antimaterie in de natuur?

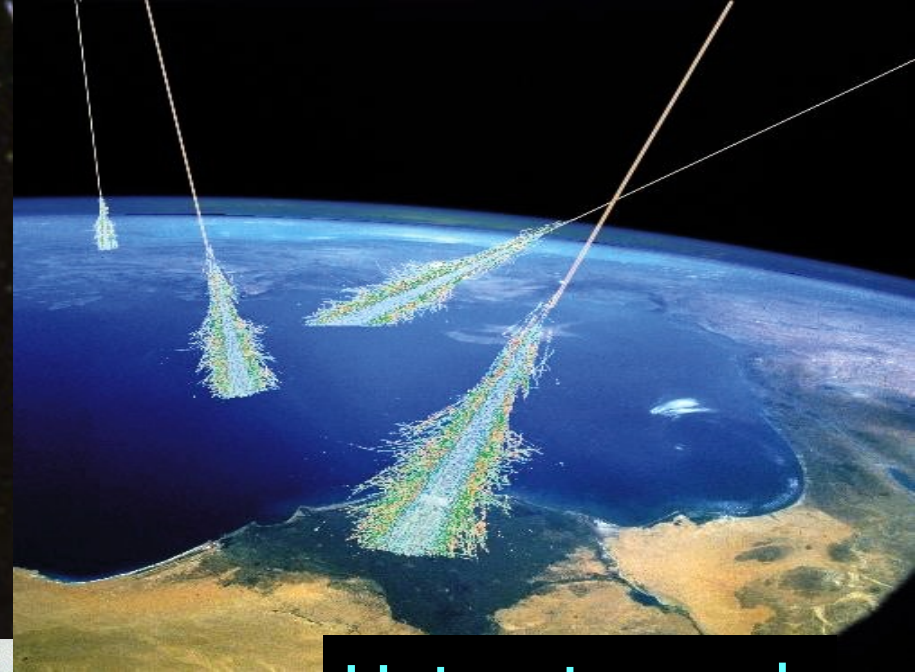
- Komt het voor op Aarde?



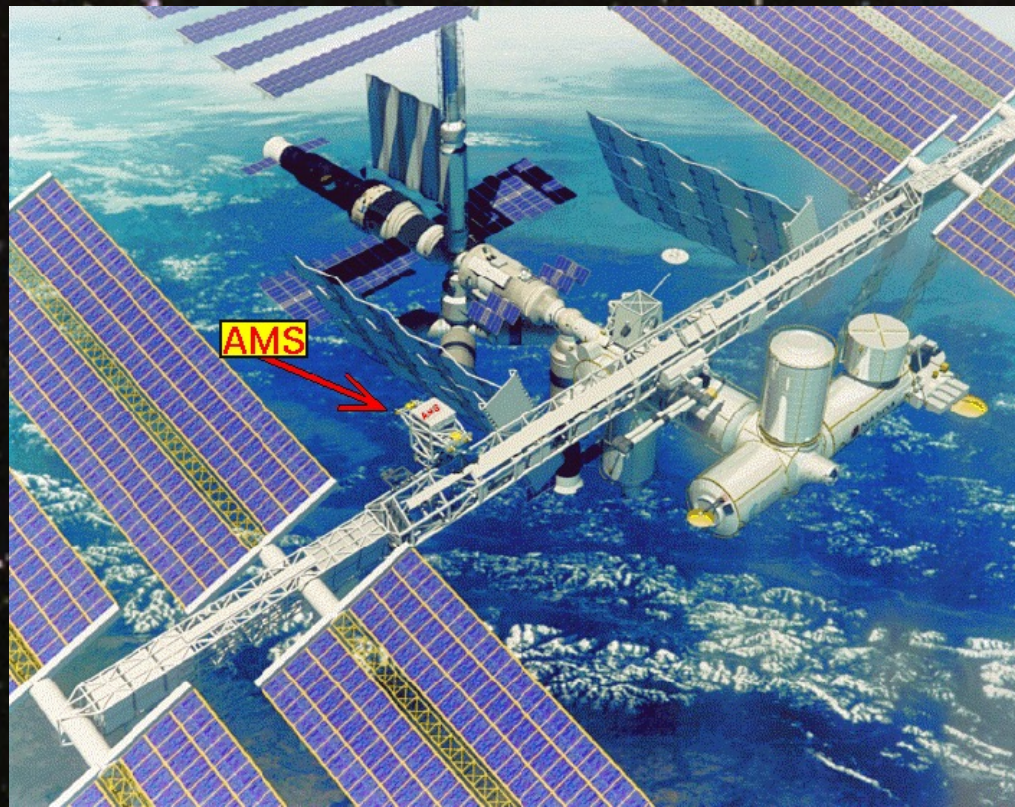
- Nee, we zouden het onmiddellijk zien:
 - "Annihilatie"



- Is er antimaterie in kosmische straling?
 - Het AMS experiment



Het antwoord:

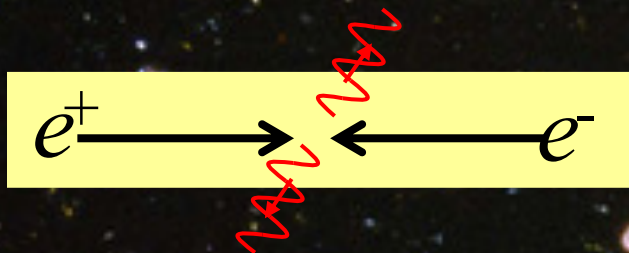


Neel

Zijn er antimaterie sterrenstelsels?



Nee!

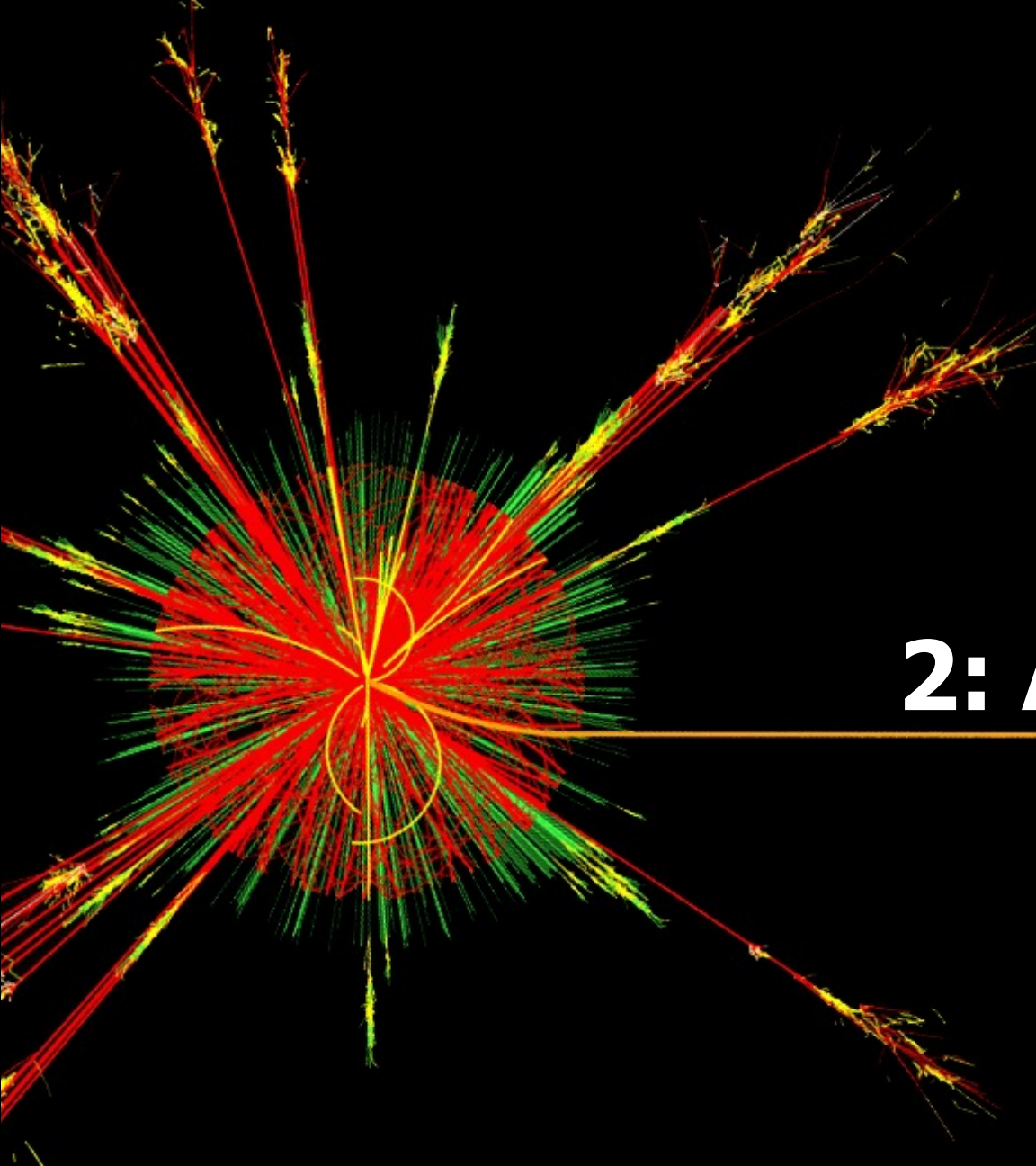


(materie + anti-materie =
Intense gamma stralen)

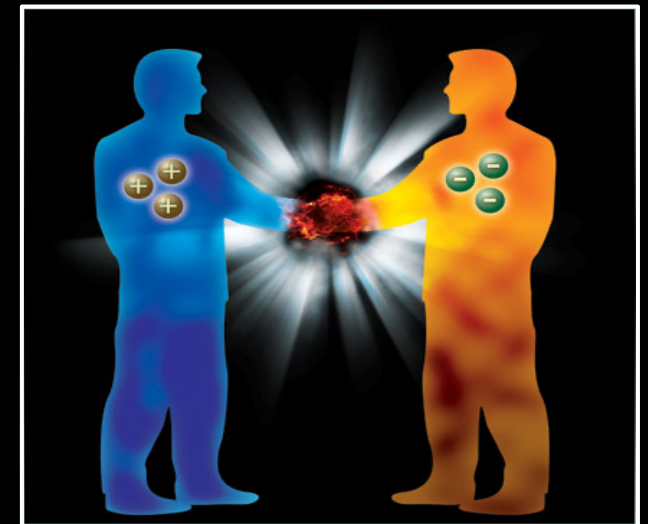
Vroege Universum: waar is de antimaterie heen?



Inderdaad: Waarom is er eigenlijk iets in plaats van niets?!



2: Antimaterie en Big Bang



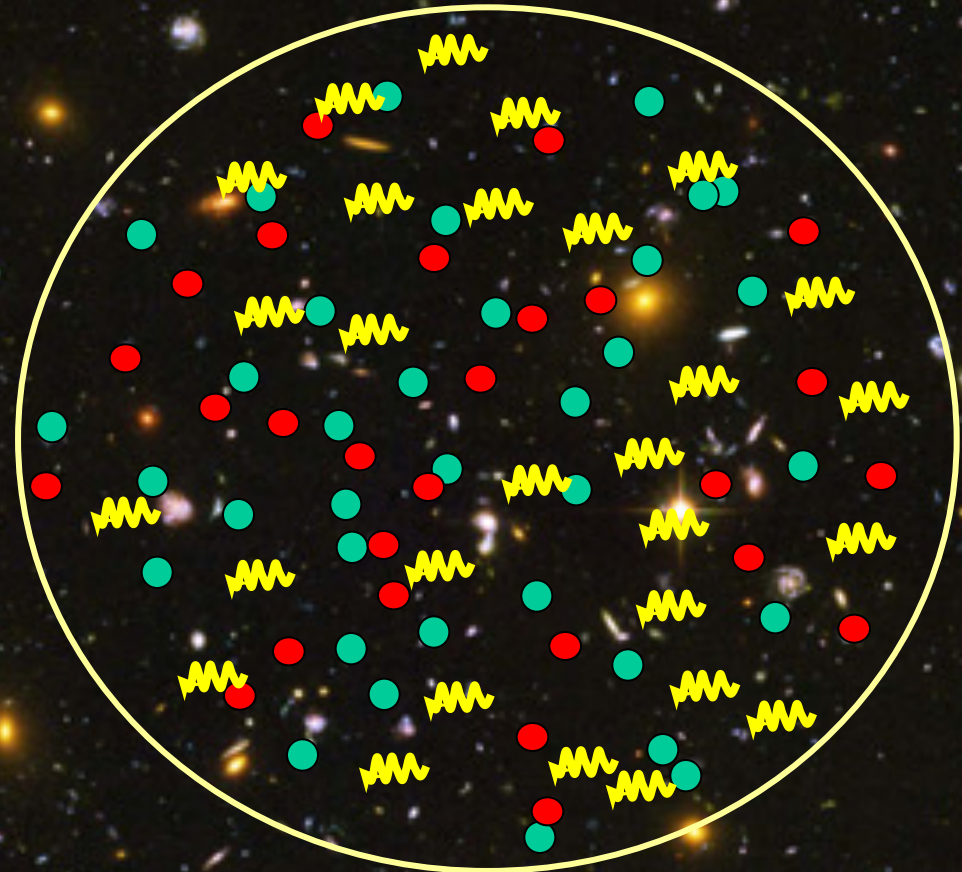
Terug naar de Oerknal

Veronderstelling: Er ontstaat materie en antimaterie!

Het vroege hete heelal

Tijd=0.000000000001 seconde

$(E=mc^2)$



- Stel:
- *materie:*
1000000001
 - *antimaterie:*
1000000000
 - ⚡ licht

Dus: "ietsiepietsie" meer **materie** deeltjes dan **antimaterie** deeltjes

Het afgekoelde heelal

Tijd ~ 1 seconde

Na afkoelen
heffen ● en ●
elkaar op



- *materie*
- *antimaterie*
- ~ *licht*

Er blijft over: veel licht en een beetje materie

Verhouding : 1000000000 : 1

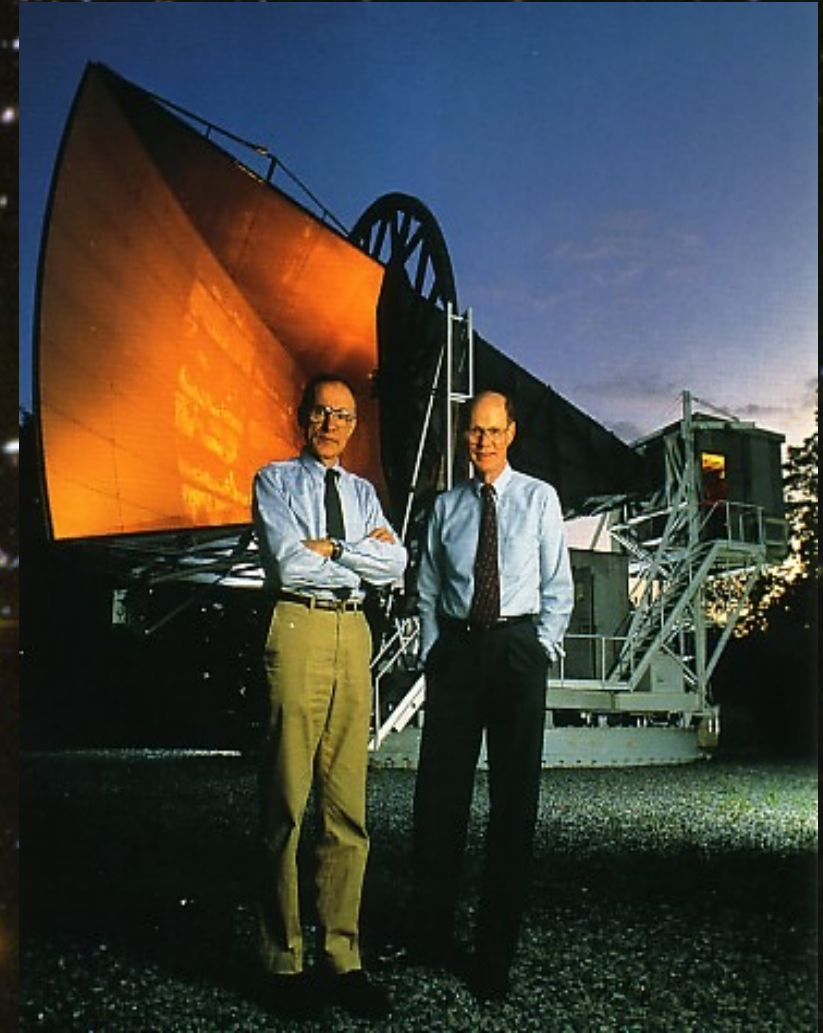
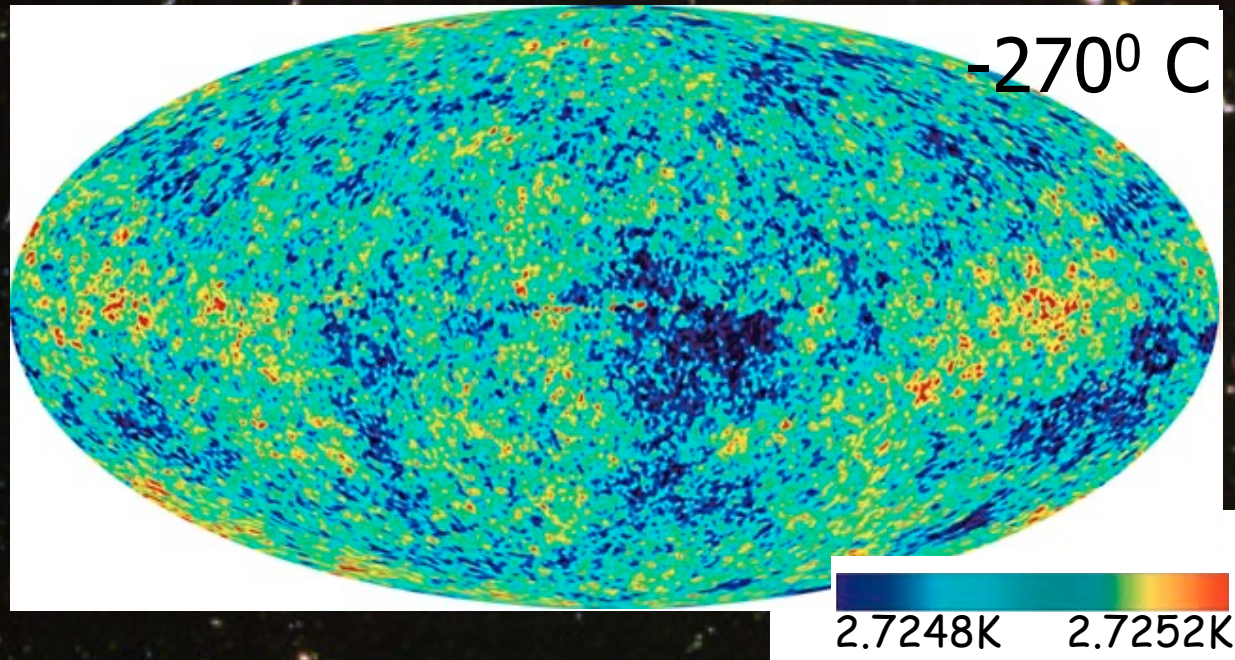


Ons huidige heelal....

Kosmische achtergrond straling

1964: Penzias en Wilson
ontdekken: "achtergrond licht"
(fotonen)
Restant van de oerknal

Een temperatuur kaart ...
van het heelal



Voor elk materie deeltje
zijn er miljard fotonen

Het heelal zoals we het nu zien

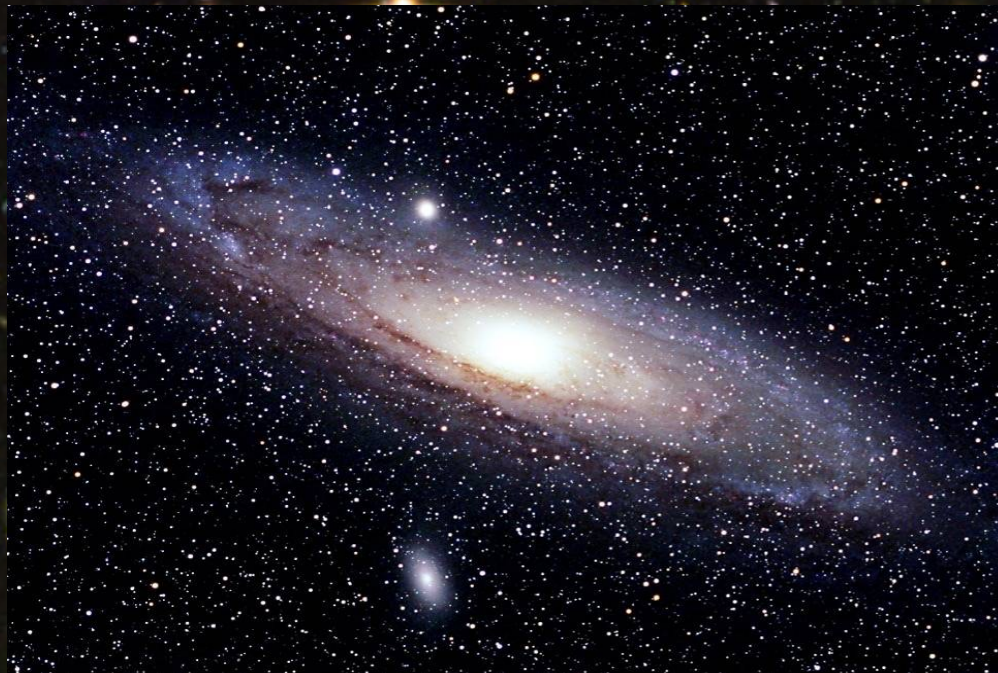
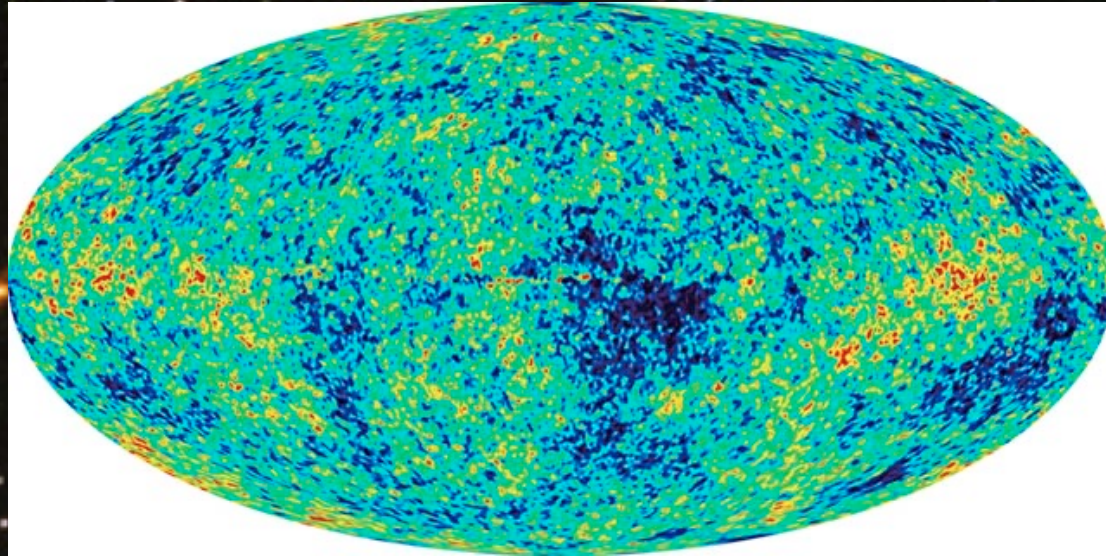
Waargenomen
Nagloeilicht:

"veel"
(1000000000)

+

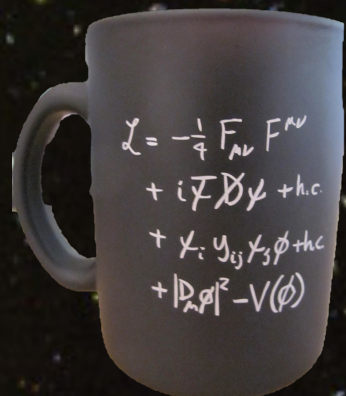
Resterende
materie:

"weinig"
(1)



Hoe verdween antimaterie in de Big Bang?

Natuurwetten



Big Bang



Klein overschot

49.9999999%
anti-materie
50.0000001%
materie



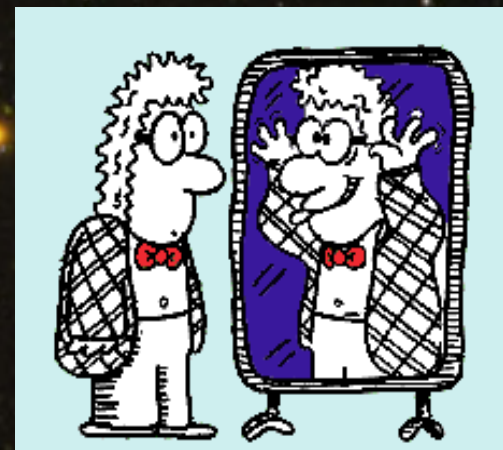
Domineert

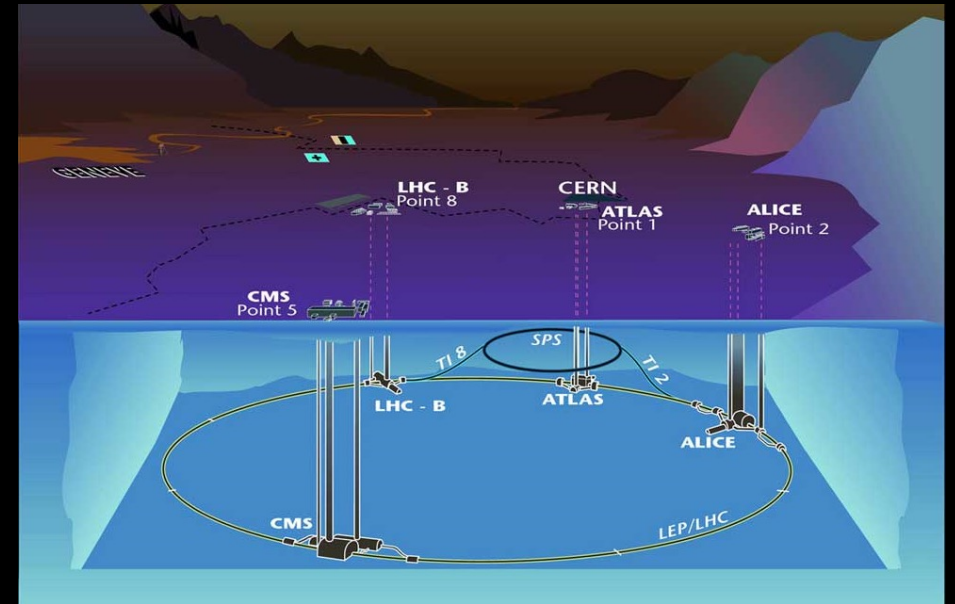
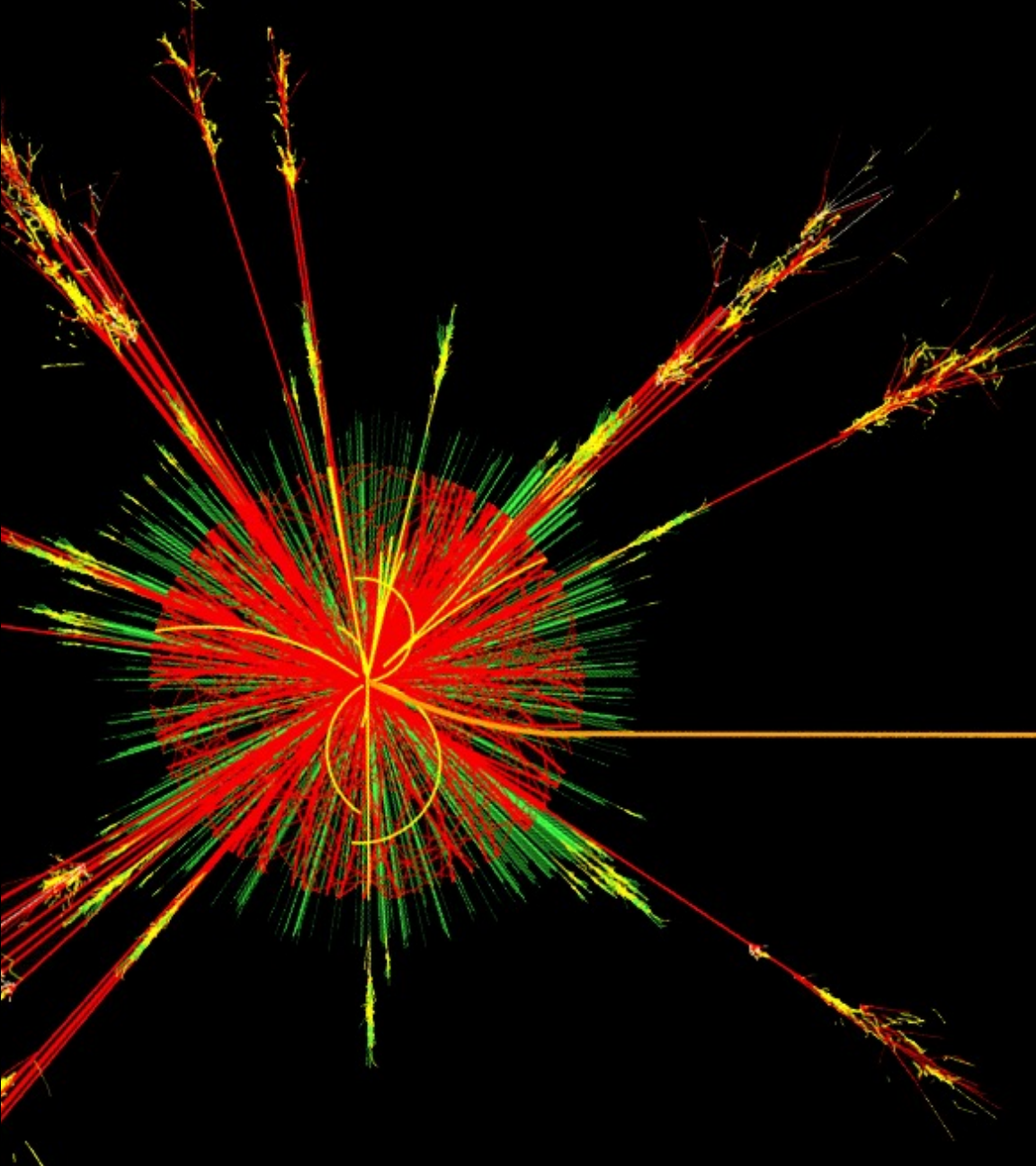
0.000001%
materie

(+99.999999% straling)



Antimaterie niet het exacte spiegelbeeld van materie?





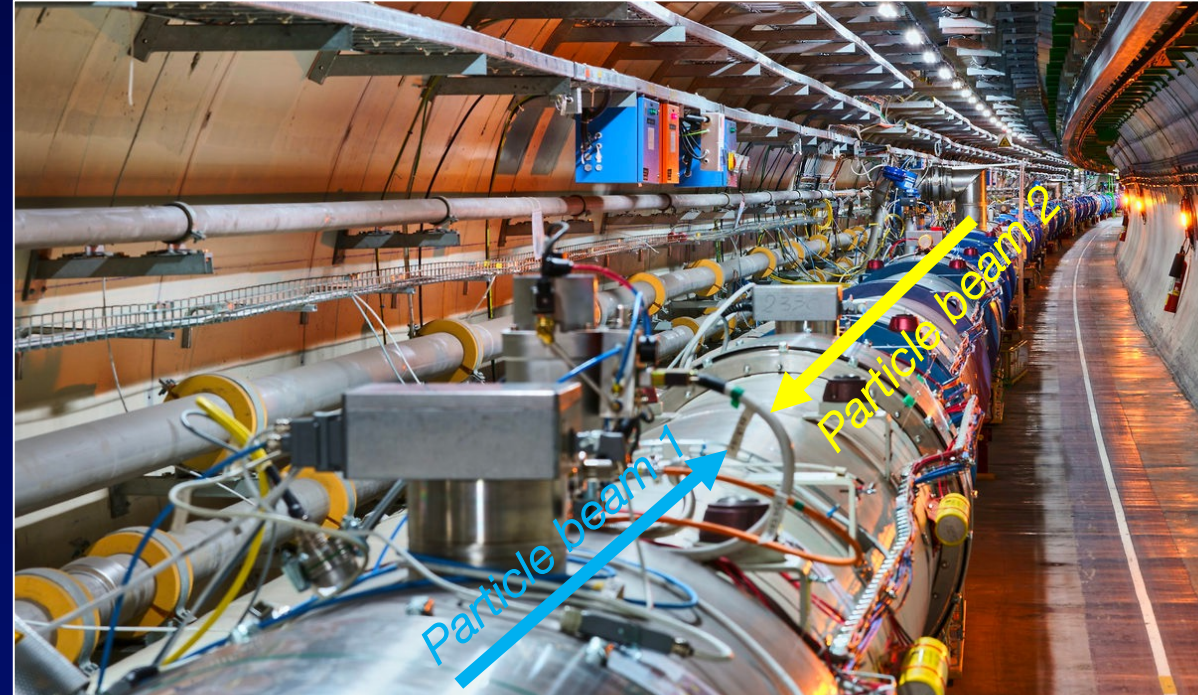
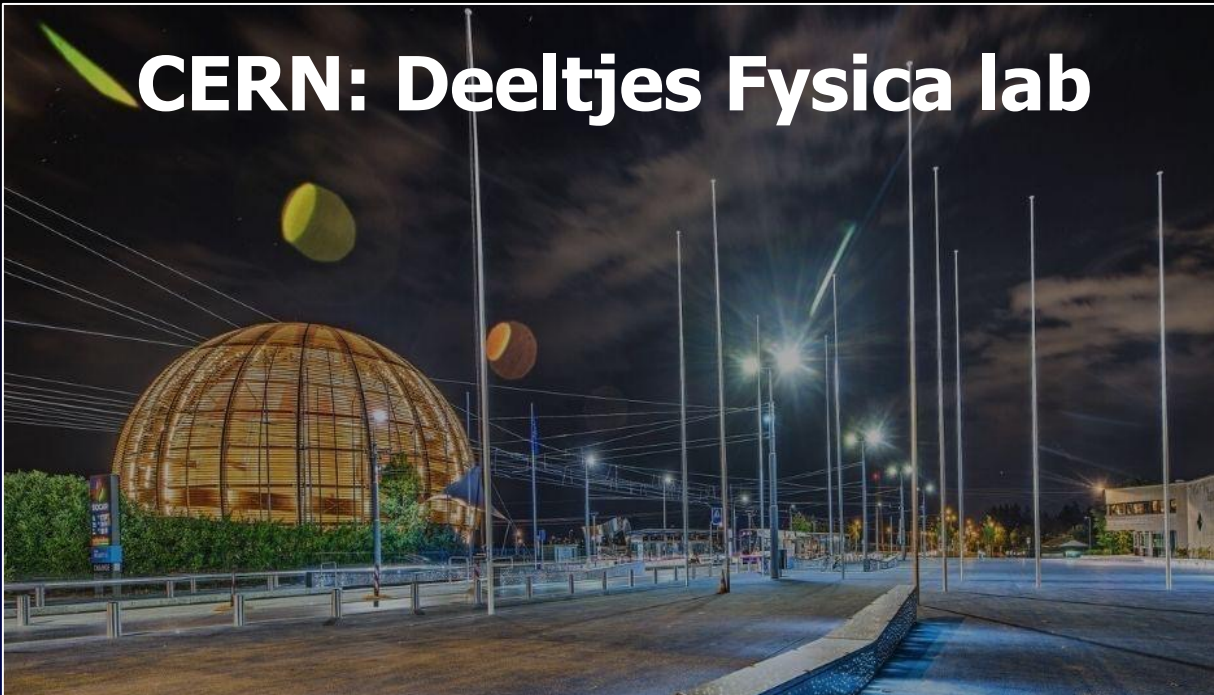
3: Deeltjes & CERN



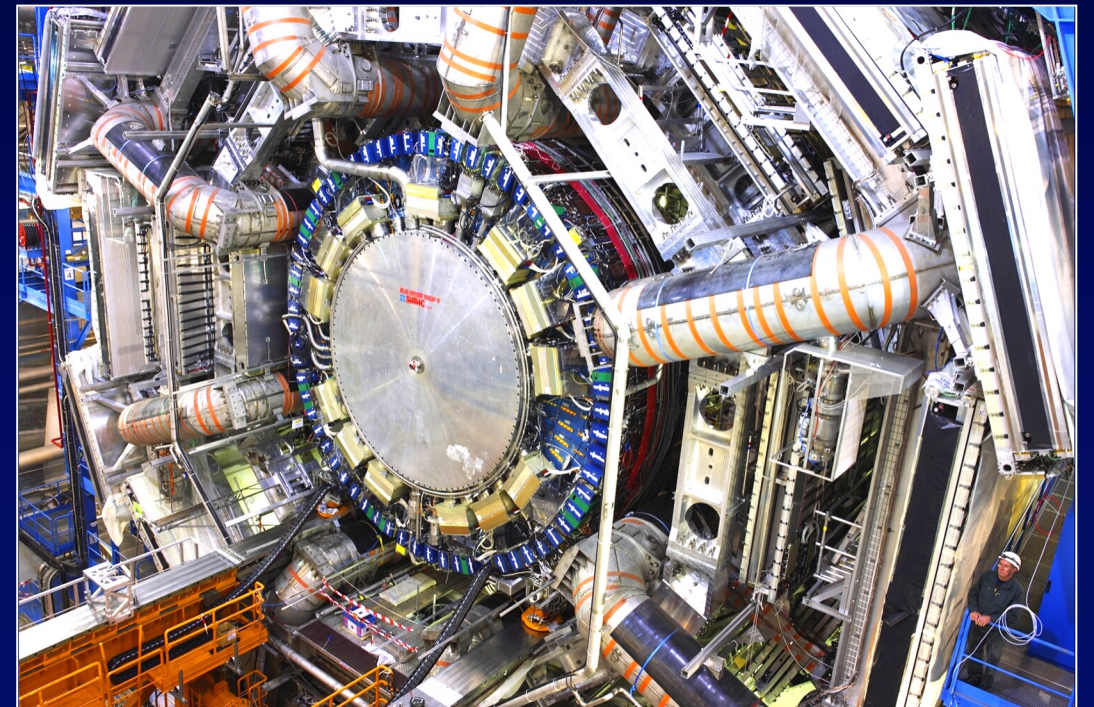
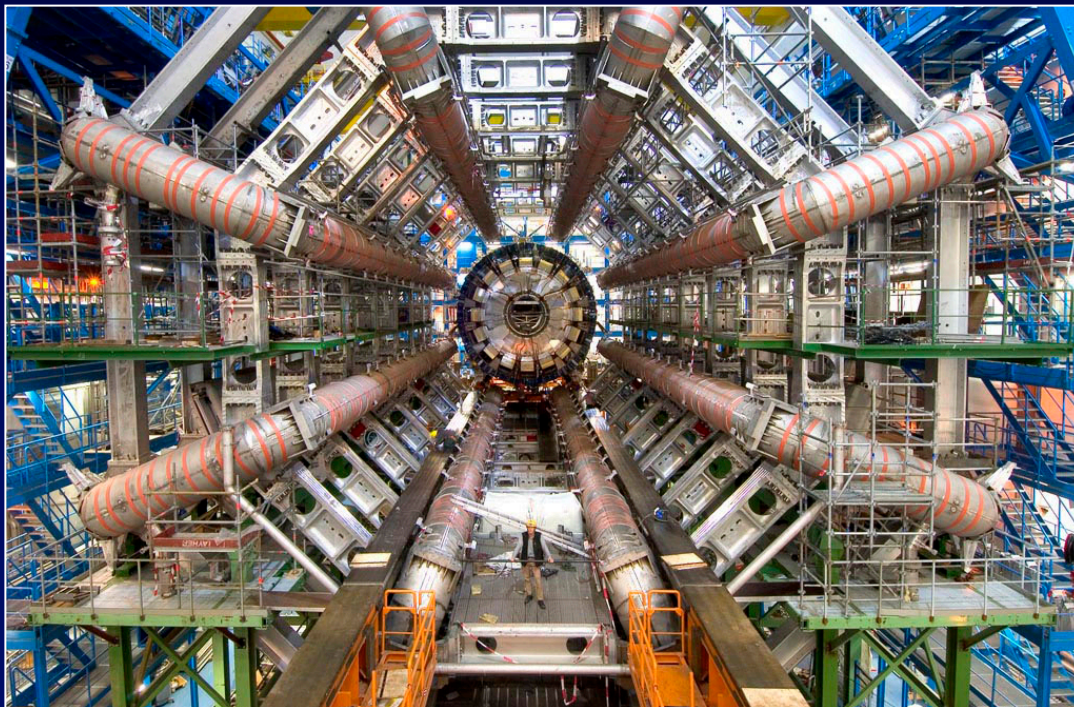
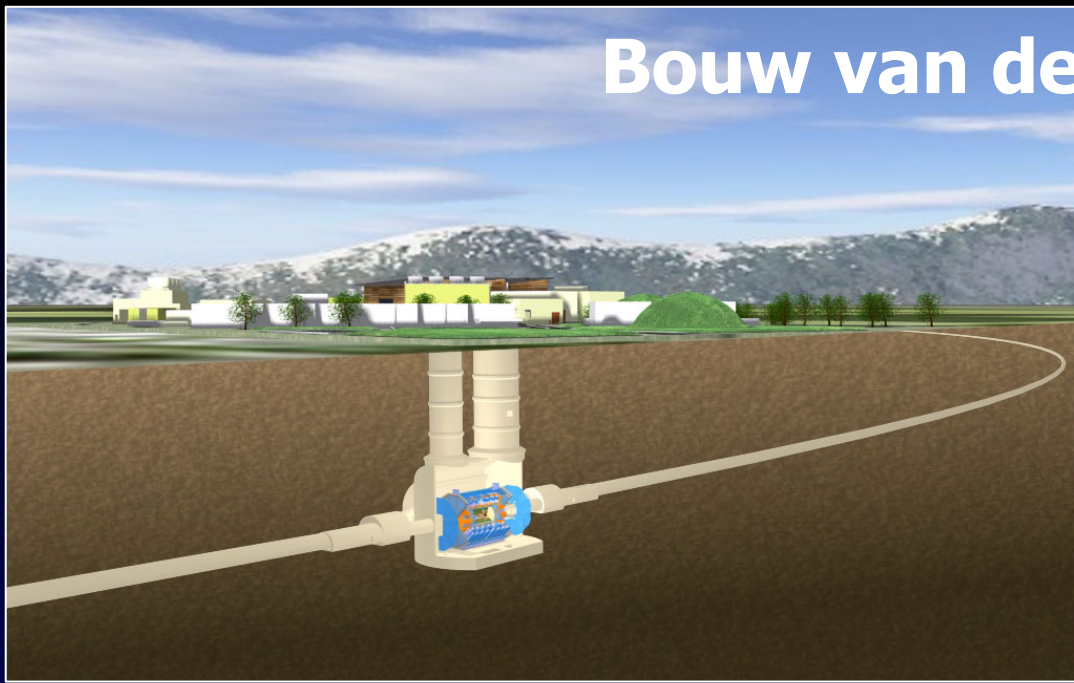
Member States (Dates of Accession)

AUSTRIA (1959)	DENMARK (1953)	GREECE (1953)	NORWAY (1953)	SPAIN (1/1961-12/1968-1/1983)
BELGIUM (1953)	FINLAND (1991)	HUNGARY (1992)	POLAND (1991)	SWEDEN (1953)
BULGARIA (1999)	FRANCE (1953)	ITALY (1953)	PORTUGAL (1986)	SWITZERLAND (1953)
CZECH FR (1993)	GERMANY (1953)	NETHERLANDS (1953)	SLOVAK FR (1993)	UNITED KINGDOM (1953)

CERN: Deeltjes Fysica lab



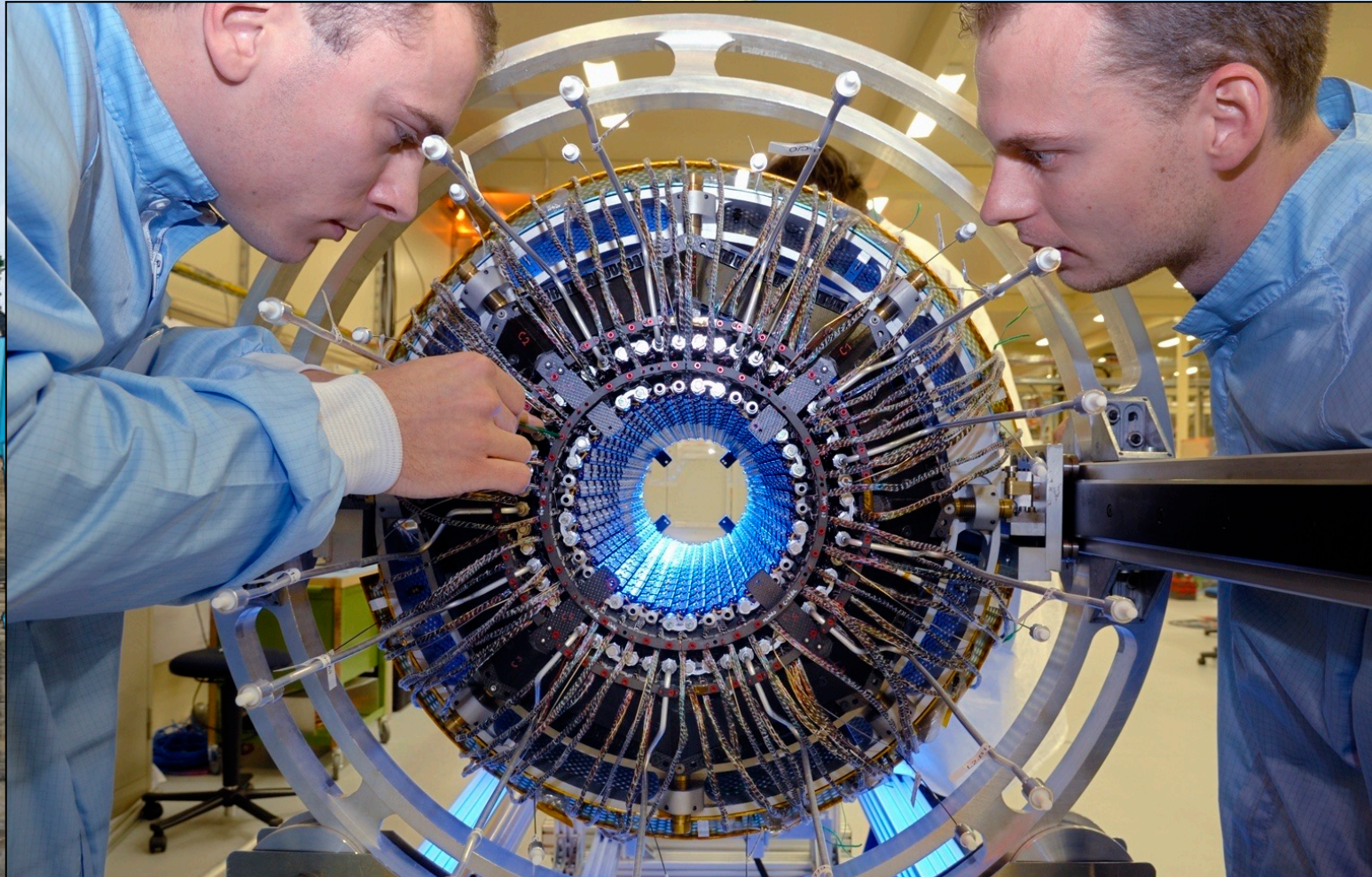
Bouw van de Atlas detector



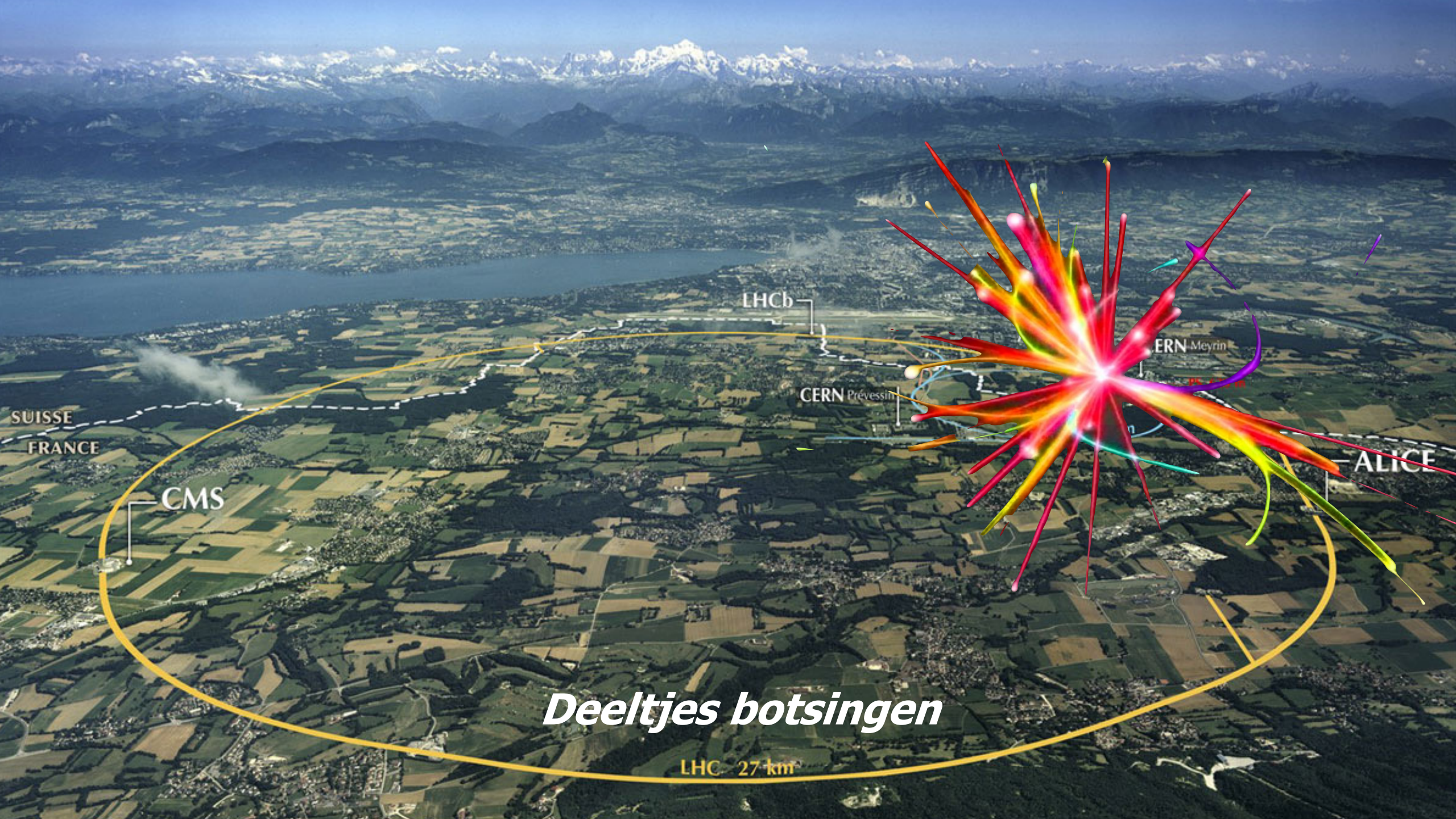
Het Atlas Experiment

Het grootste fototoestel op aarde

- 45 m x 25 m
- 3000 fysici



80 MegaPixel "camera": 40.000.000 foto's per seconde



SUISSE
FRANCE

CMS

LHCb

CERN Prévessin

CERN Meyrin

ALICE

Deeltjes botsingen

LHC 27 km

QM: "Alles dat **kan** gebeuren **zal** gebeuren"



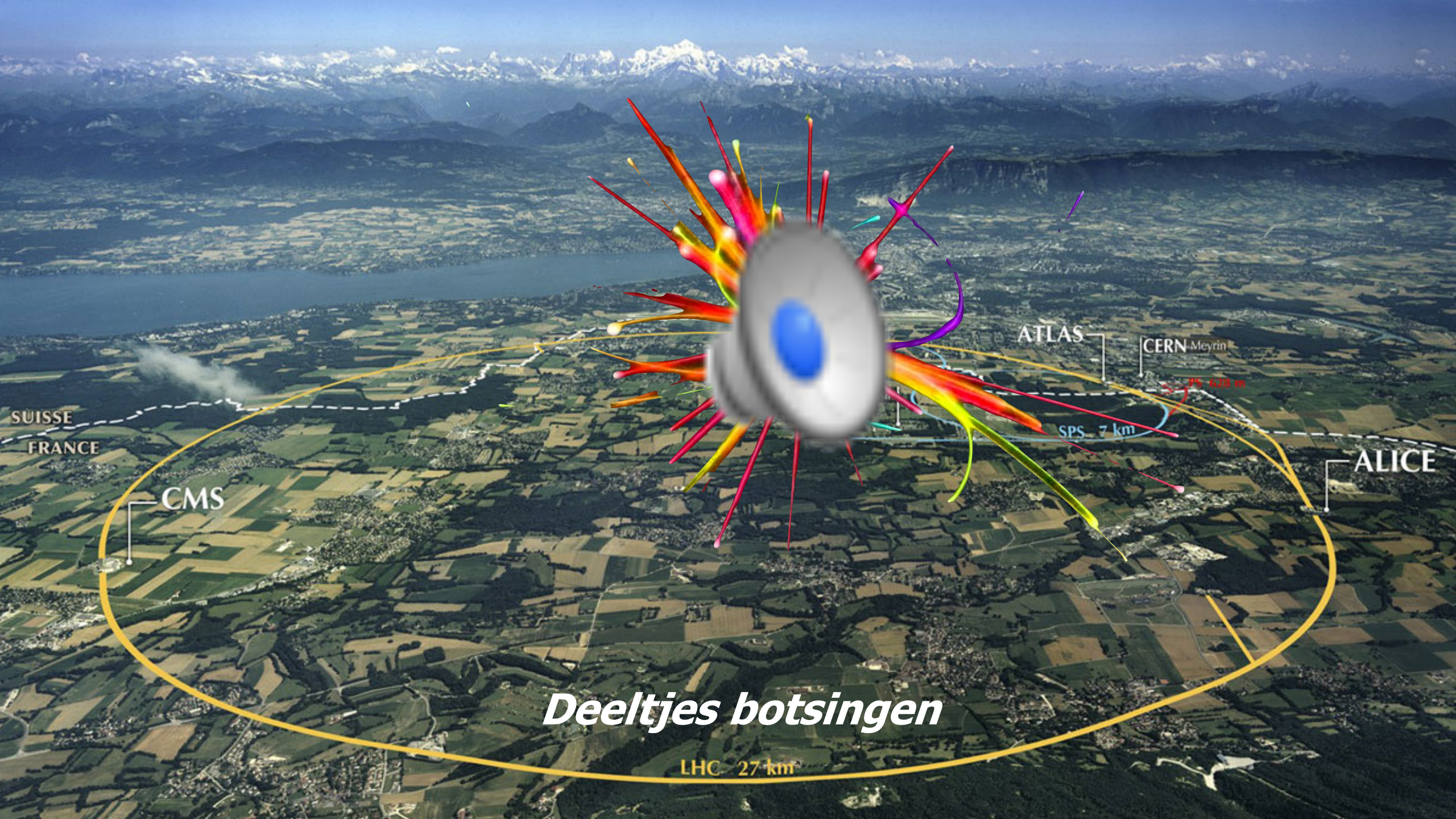
SUISSE
FRANCE

CMS

ALICE

Deeltjes botsingen

LHC 27 km



SUISSE
FRANCE

CMS

ATLAS

CERN Meyrin

PS 6.28 km

SPS 7 km

ALICE

LHC 27 km

Deeltjes botsingen

De Elementaire Deeltjes

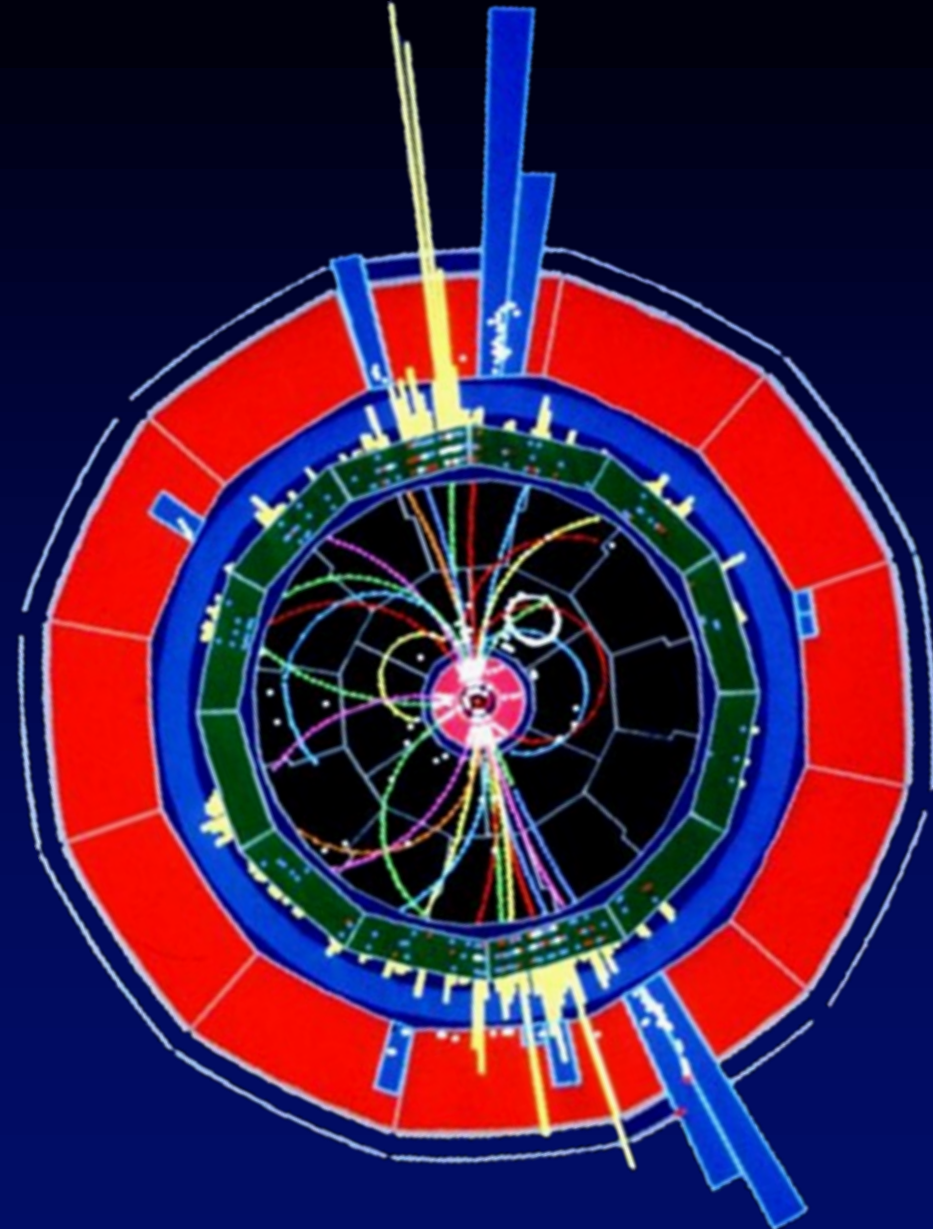
Generatie:

	I	II	III	<u>Lading</u>
quarks	u (1976)	c (1976)	t (1995)	+2/3 e
	d (1947)	s (1947)	b (1978)	-1/3 e

3 "generaties" van deeltjes!

leptons	e (1895)	μ (1936)	τ (1973)	-1 e
	ν_e (1956)	ν_μ (1963)	ν_τ (2000)	0 e

Materie



De Elementaire Deeltjes

Generatie:

	I	II	III	<u>Lading</u>
quarks	u	c	t	+2/3 e
	d	s	b	-1/3 e

3 "generaties" van deeltjes!

leptons	e	μ	τ	-1 e
	ν_e	ν_μ	ν_τ	0 e

Materie

	<u>Lading</u>	I	II	III
-2/3 e	\bar{u}	\bar{c}	\bar{t}	
+1/3 e	\bar{d}	\bar{s}	\bar{b}	

3 "generaties" van anti-deeltjes!

+1 e	\bar{e}	$\bar{\mu}$	$\bar{\tau}$
0 e	$\bar{\nu}_e$	$\bar{\nu}_\mu$	$\bar{\nu}_\tau$

Anti-materie

De Elementaire Deeltjes

Generatie:

	I	II	III	<u>Lading</u>
quarks	u	c	t	+2/3 e
	d	s	b	-1/3 e

<u>Lading</u>	I	II	III
-2/3 e	\bar{u}	\bar{c}	\bar{t}
+1/3 e	\bar{d}	\bar{s}	\bar{b}

“Flavor puzzle”: Waarom bestaan er 3 generaties van deeltjes??

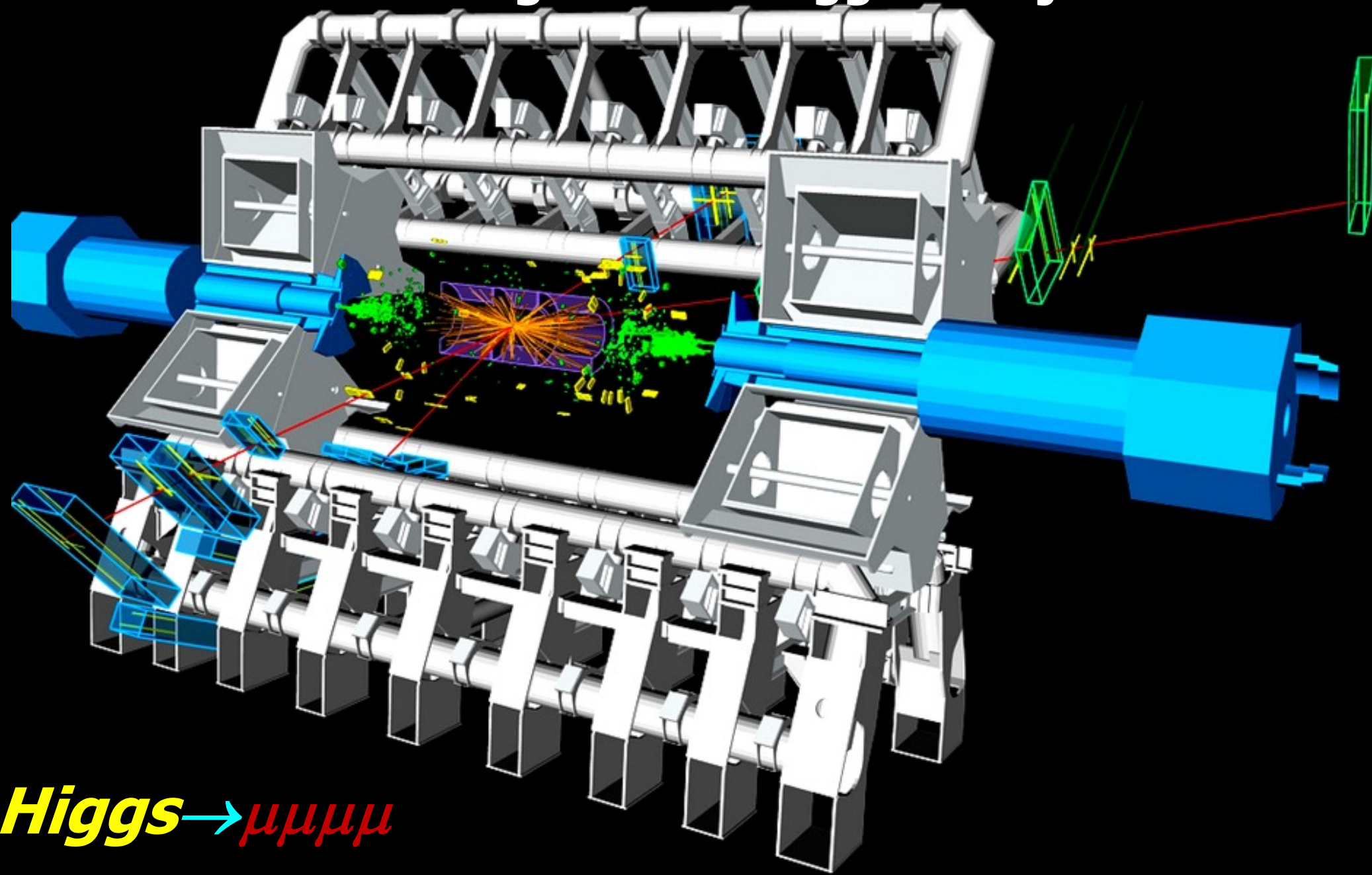
leptons	e	μ	τ	-1 e
	ν_e	ν_μ	ν_τ	0 e

+1 e	\bar{e}	$\bar{\mu}$	$\bar{\tau}$
0 e	$\bar{\nu}_e$	$\bar{\nu}_\mu$	$\bar{\nu}_\tau$

Materie

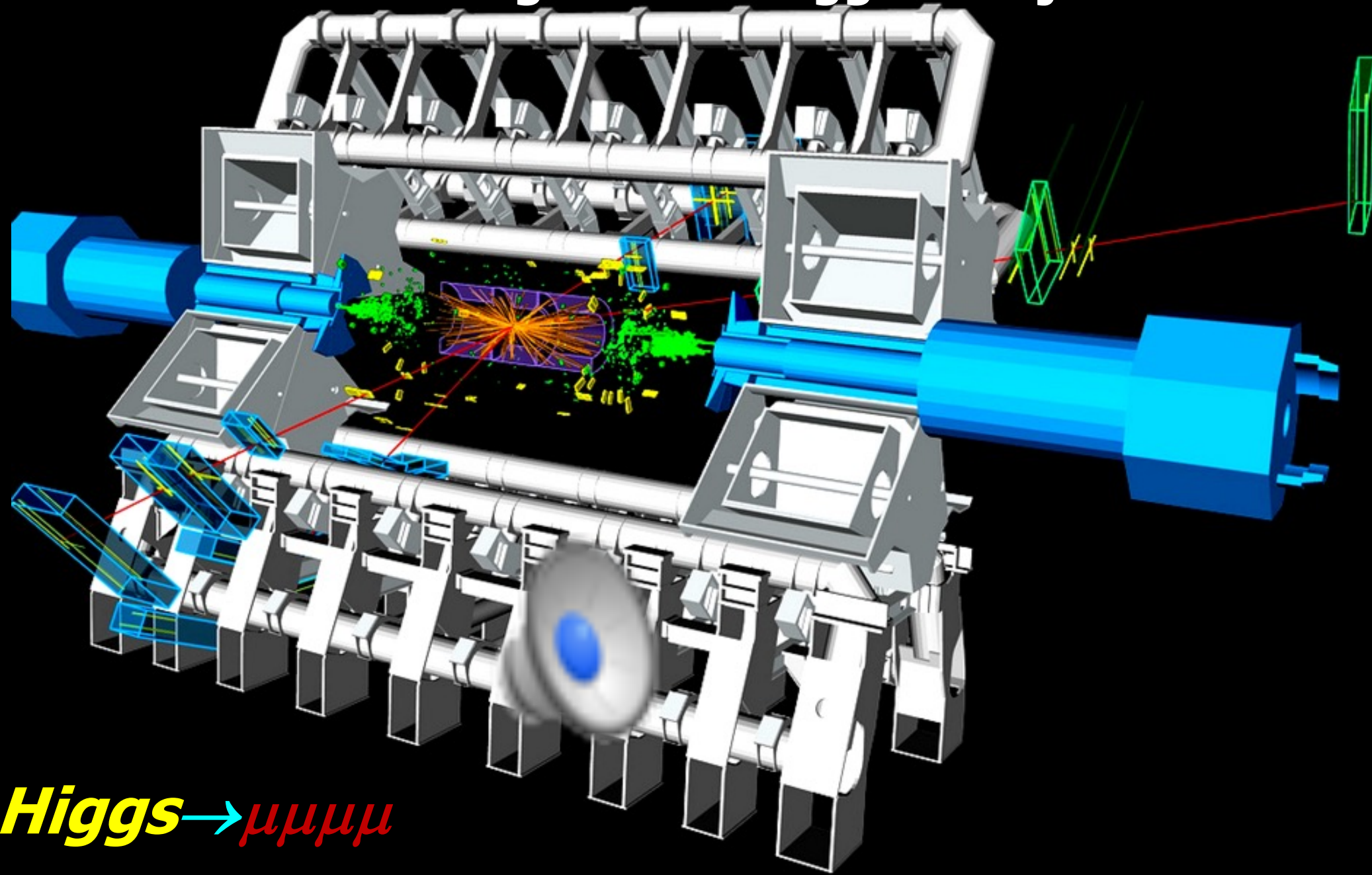
Anti-materie

Ontdekking van het Higgs deeltje



$pp \rightarrow Higgs \rightarrow \mu\mu\mu\mu$

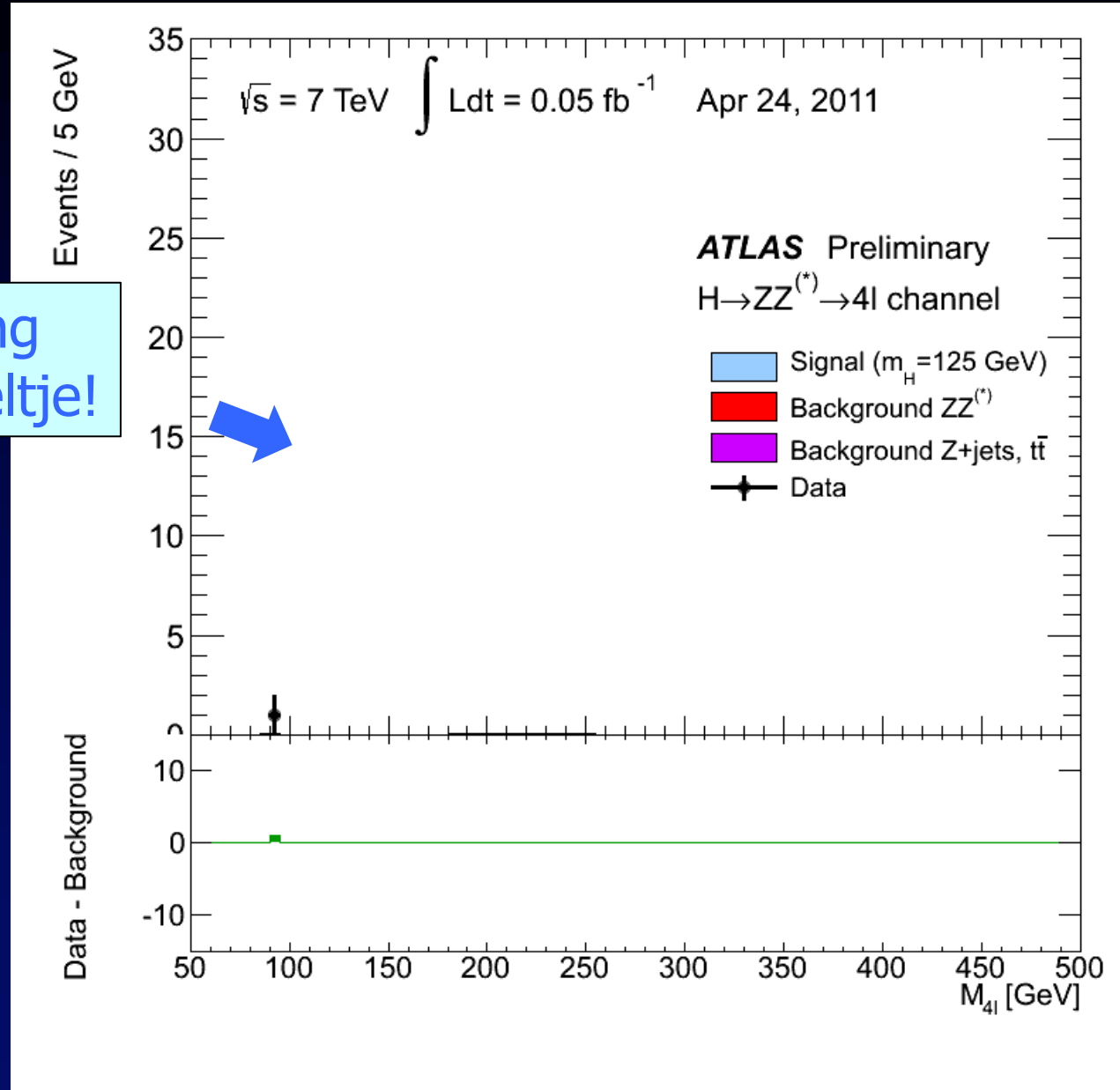
Ontdekking van het Higgs deeltje



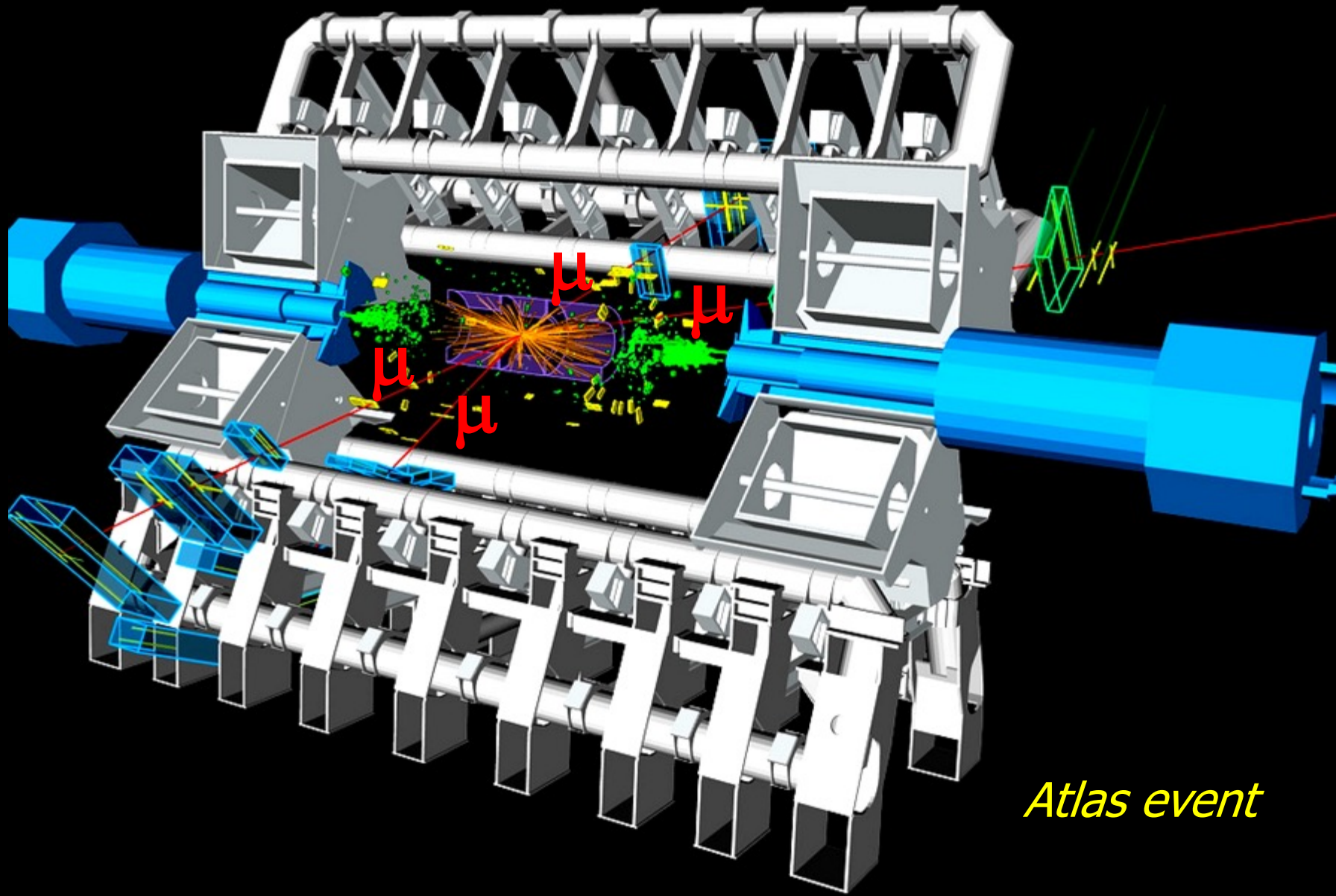
$pp \rightarrow Higgs \rightarrow \mu\mu\mu\mu$

Higgs: data verzamelen en Theorie testen

Ontdekking
Higgs deeltje!

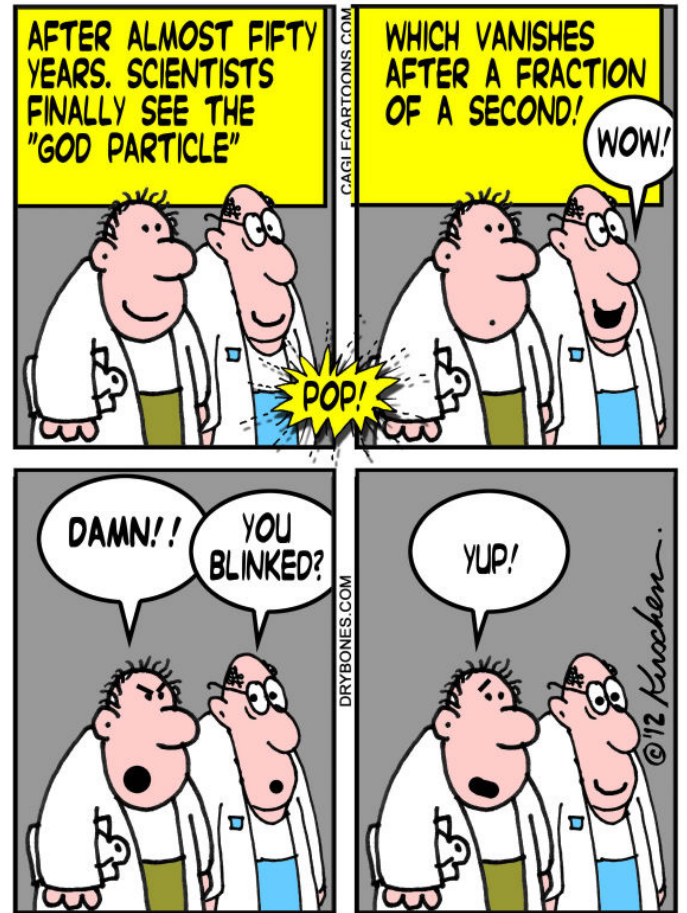


$$pp \rightarrow \text{Higgs} \rightarrow \mu\mu\mu\mu$$



Atlas event

Dry Bones HIGGS BOSON



4 July 2012

Bekendmaking Higgs ontdekking



2013 Nobel prijs in
Natuurkunde



Robert Brout



Francois Englert

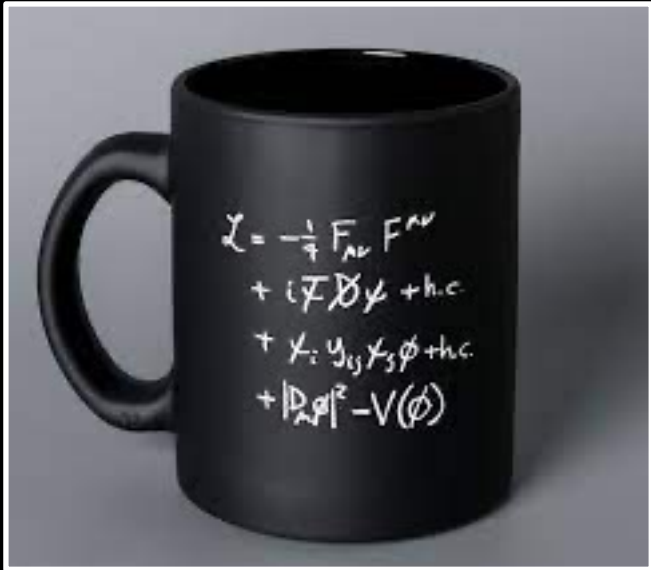
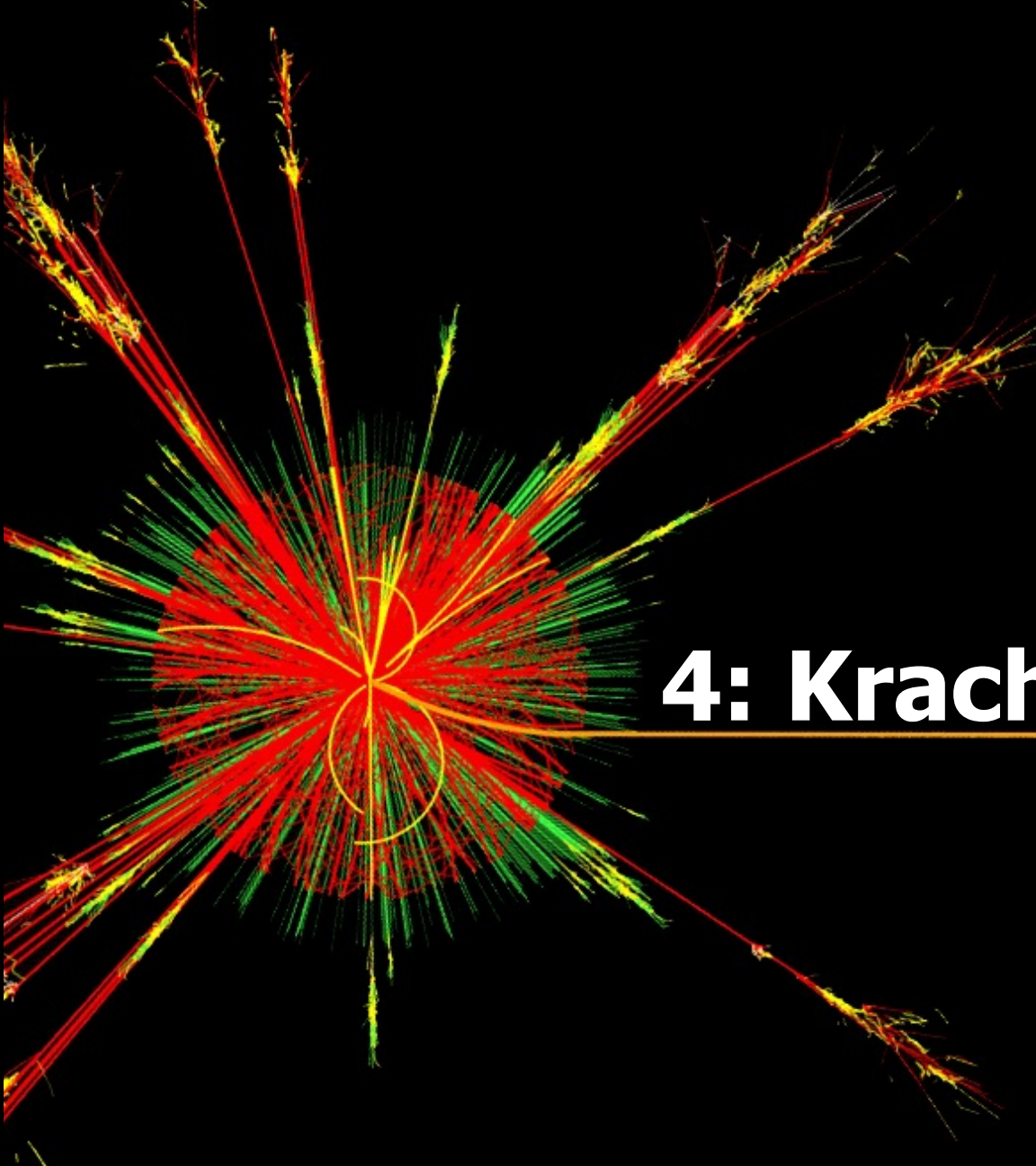
Peter Higgs

HORSEY
©2002
LOS ANGELES
TIMES

"PHYSICISTS HAVE JUST CONFIRMED THERE'S
A 'GOD PARTICLE' -- THE HIGGS BOSON --
THAT BINDS THE UNIVERSE TOGETHER
AND MAKES ALL THINGS
POSSIBLE!!"



PERSPECTIVE IS EVERYTHING.



4: Krachten: "Standaard Model"

Fermionen: spin=1/2 deeltjes

Quarks		
u	c	t
d	s	b

Higgs field

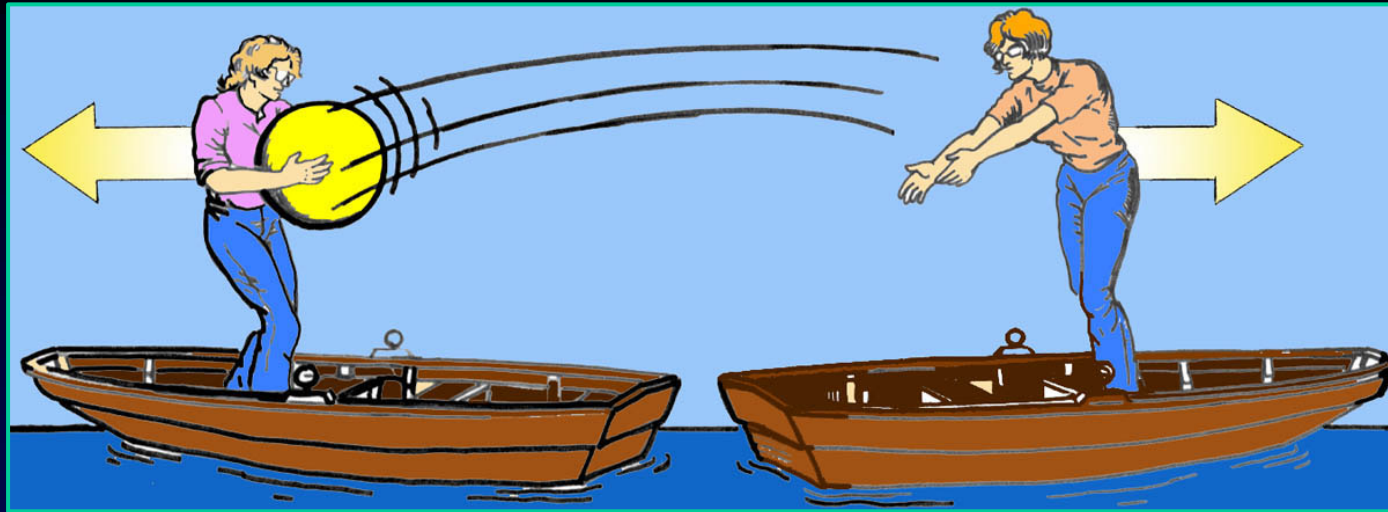
bosonen spin=1 deeltjes

Krachten	
Z	γ
W	g

H

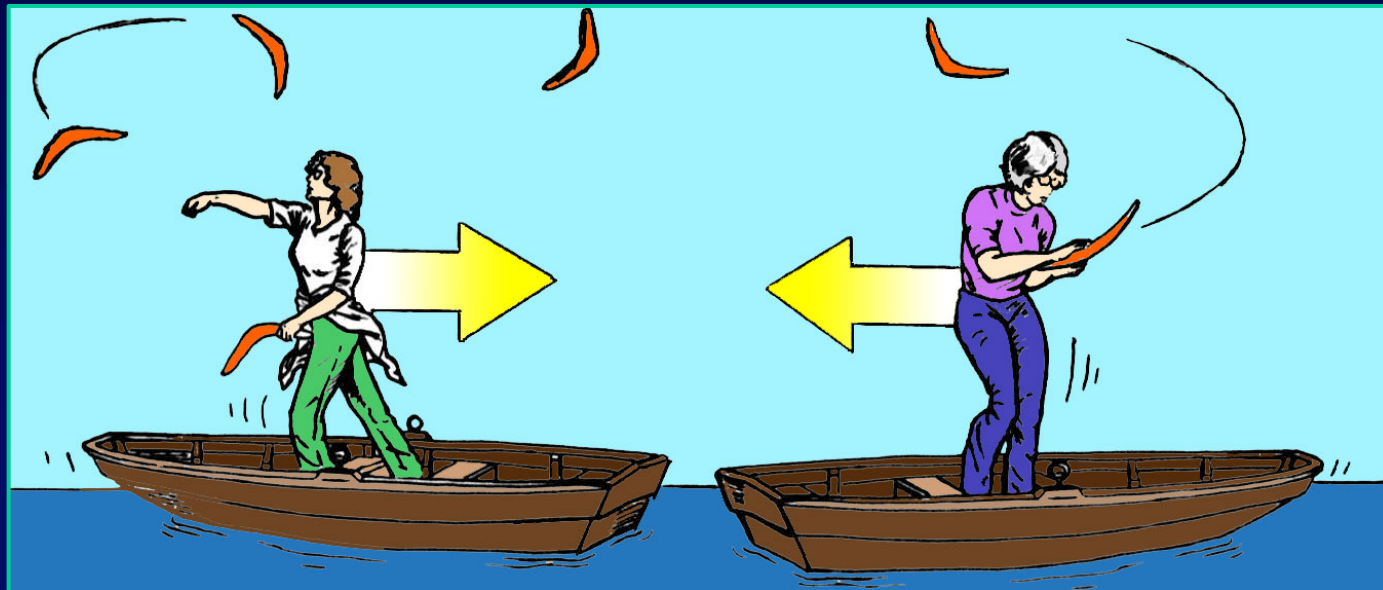
Leptonen		
ν_e	ν_μ	ν_τ
e	μ	τ

Krachten in Quantum Mechanica: deeltjesuitwisseling



“Afstotende kracht”

Er is geen
“actie op afstand”



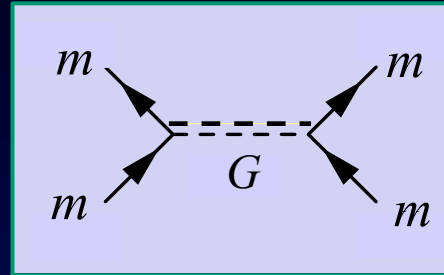
“Aantrekkende kracht”

Vier fundamentele natuurkrachten

Zwaartekracht:

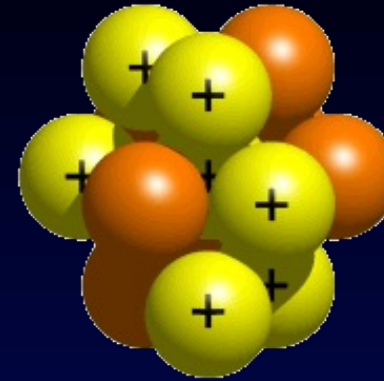


Quantum
Graviton exchange?



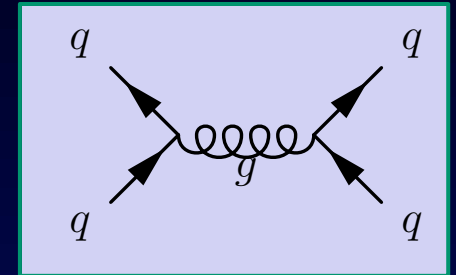
Werkt op alle deeltjes met massa

Sterke kernkracht:



Werkt op alle quarks

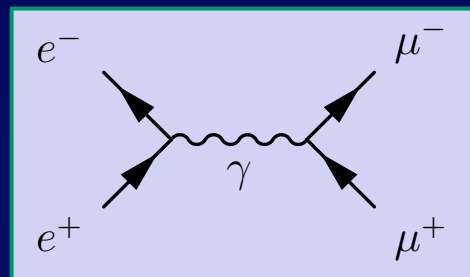
Quantum
gluon exchange:



Elektromagnetisme:



Quantum
photon exchange:



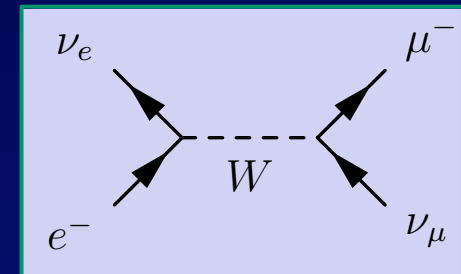
Werkt op alle elektrisch geladen deeltjes

Zwakke kernkracht:



Werkt op alle deeltjes

Quantum
W, Z exchange:

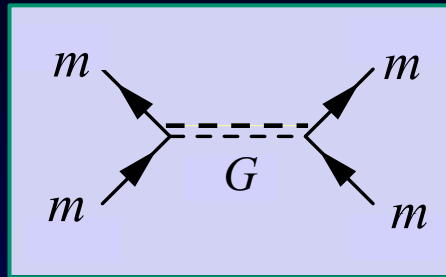


Vier fundamentele natuurkrachten

Zwaartekracht:

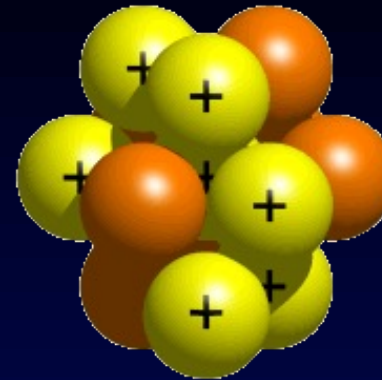


Quantum
Graviton exchange?

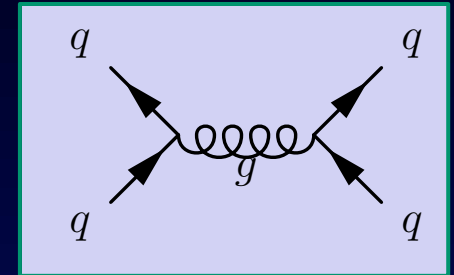


Werkt op alle deeltjes met massa

Sterke kernkracht:



Quantum
gluon exchange:

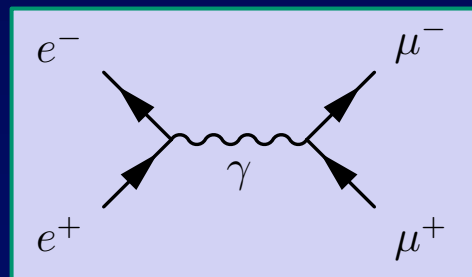


Werkt op alle quarks

Elektromagnetische:

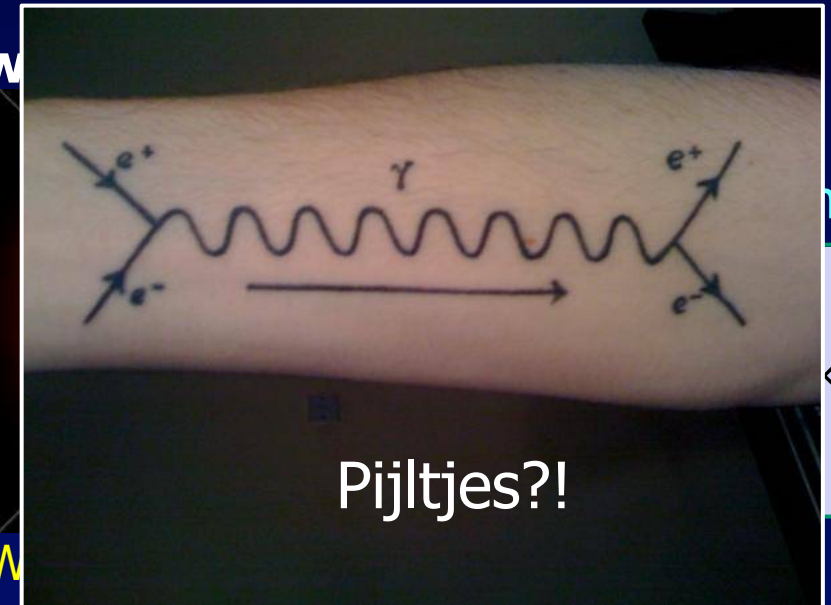


Quantum
photon exchange:

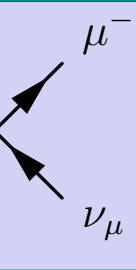


Werkt op alle geladen deeltjes

Zwakke:

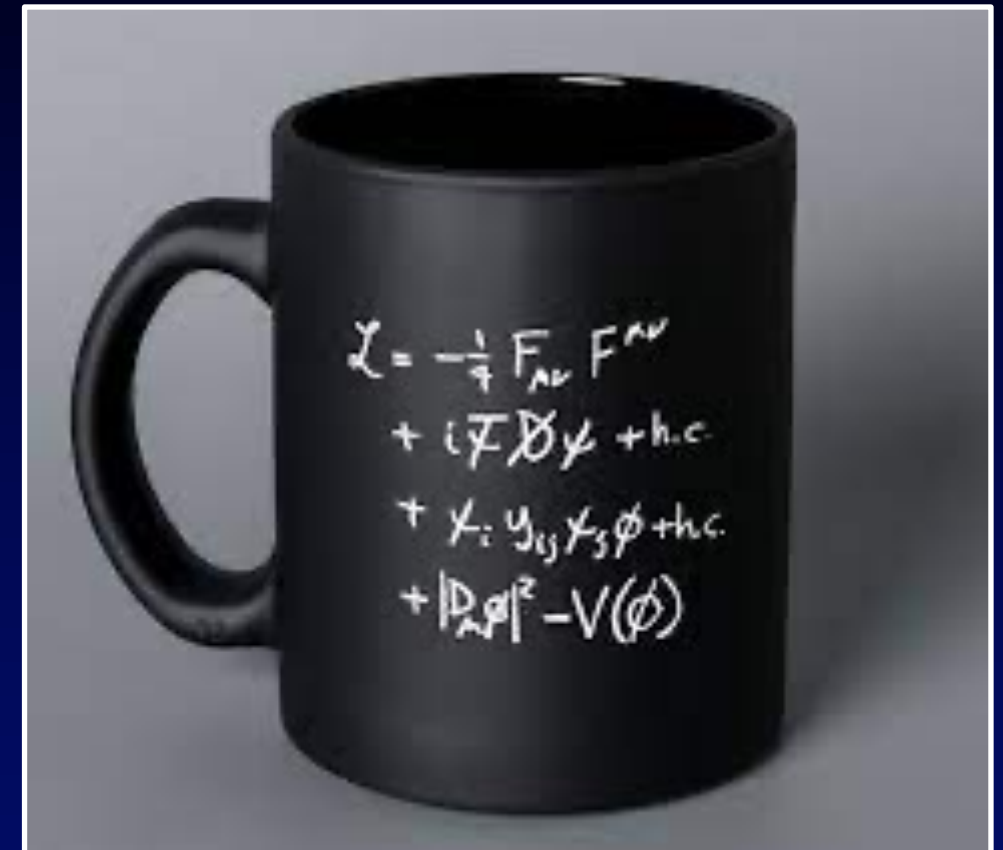
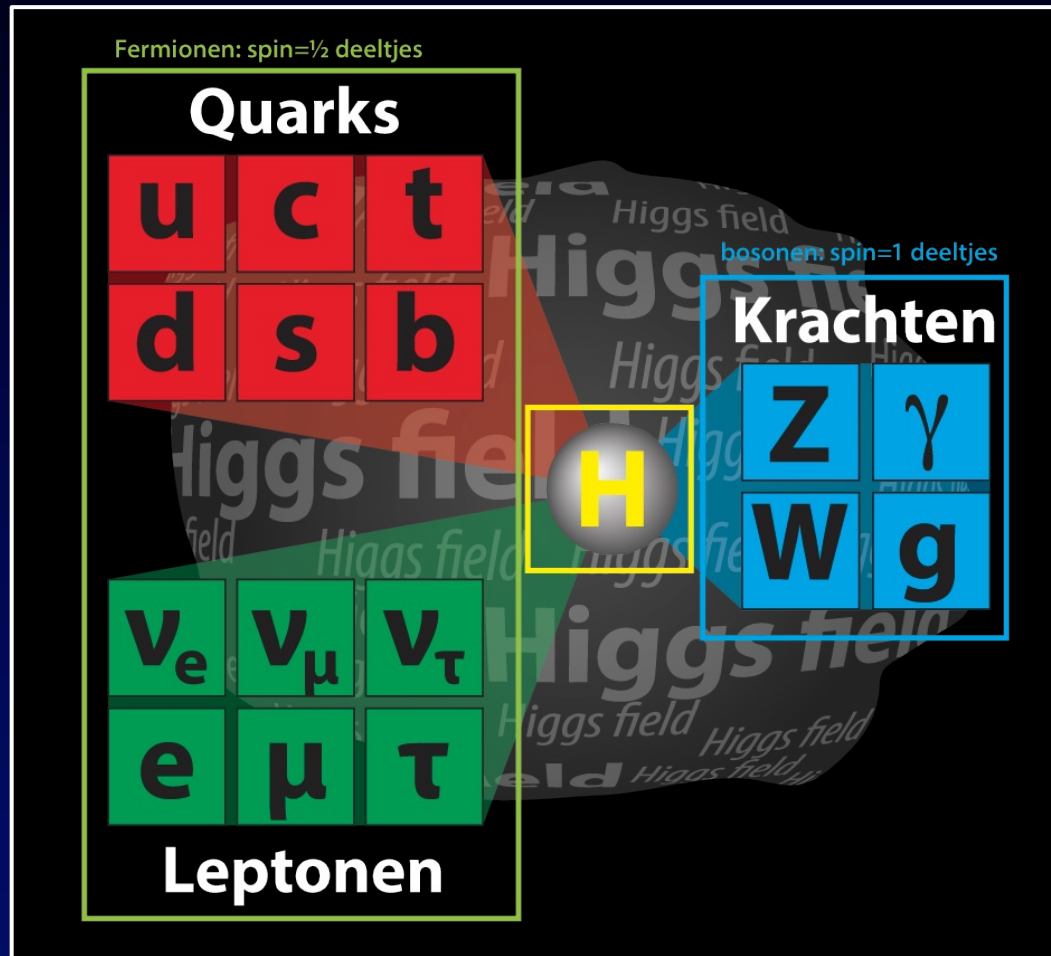


Quantum
neutrino exchange:

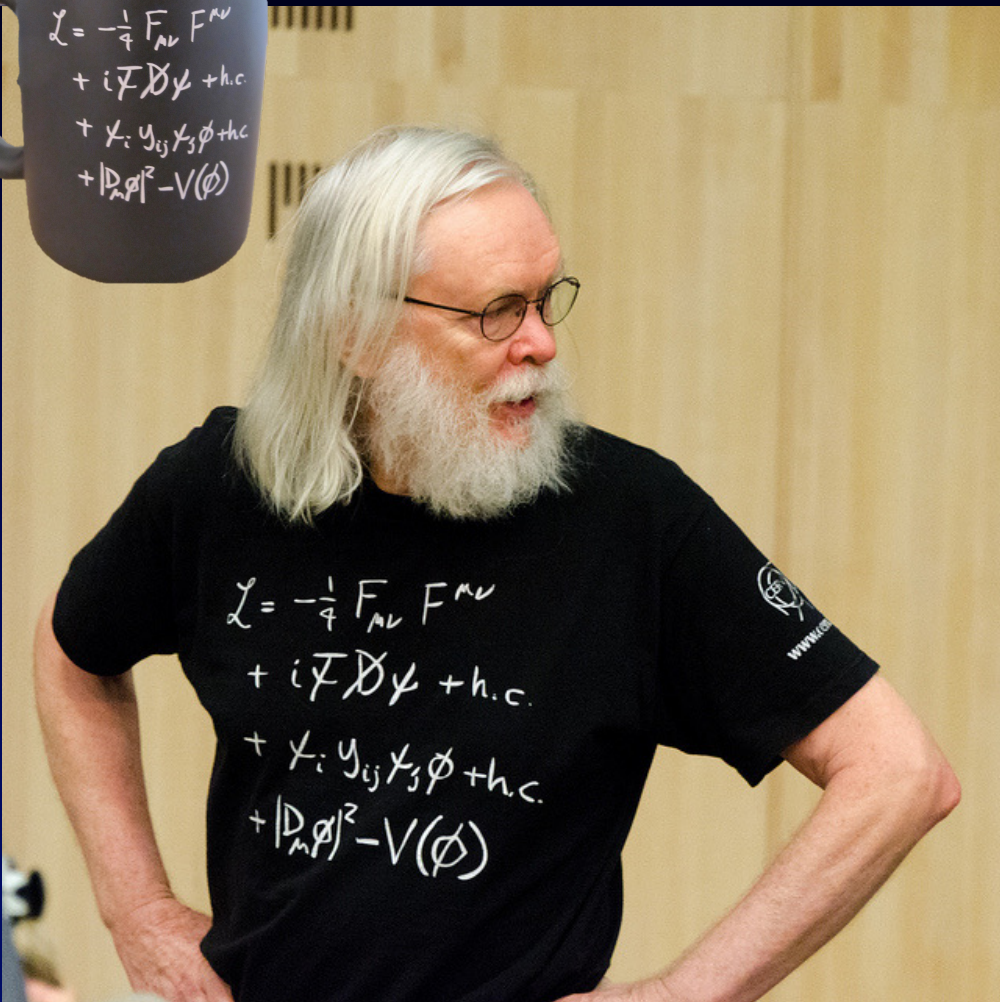
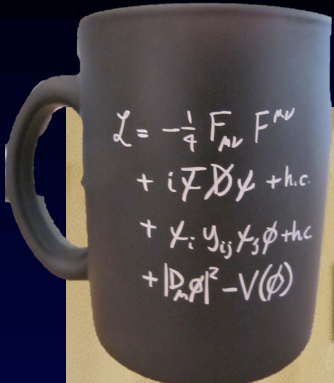


Werkt op alle quarks

Het Standaardmodel: Deeltjes en Krachten



Standaard Model: Theorie

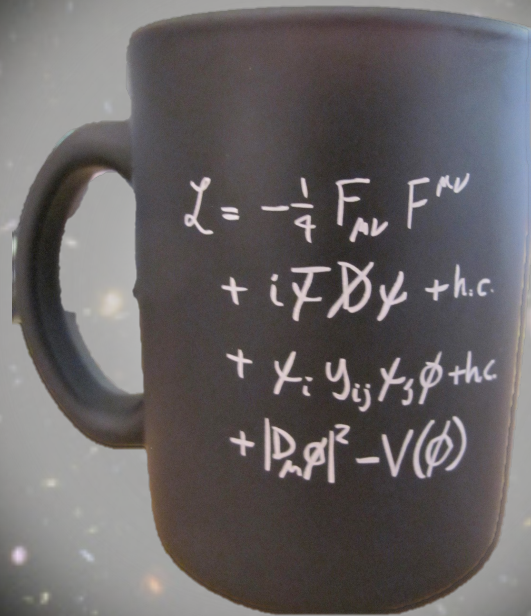


$$-\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^b \partial_\mu g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \frac{1}{2}ig_s^2 (\bar{q}_i^\mu \gamma^\mu q_j^\nu) g_\mu^a + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a 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}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 q \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 W_\nu^+ W_\mu^- - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\nu^0 (W_\nu^- \partial_\mu 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^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\nu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 W_\nu^+ W_\mu^- - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-] - g\alpha [H^3 + H\phi^0 \phi^0 + \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^-] + gM W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w} Z_\mu^0 Z_\nu^0 H - \frac{1}{2}ig [W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - 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) - \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^+ 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^- - 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 \frac{1}{4}g^2 \frac{1}{c_w} Z_\mu^0 Z_\nu^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} W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu 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 - 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 + n m_\lambda^j) d_j^\lambda + ig s_w A_\mu [-(\bar{e}^\lambda \gamma e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma d_j^\lambda)] + \frac{1}{4} \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) (\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 \gamma^5) C_{\lambda c} 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 c}^\mu \gamma^\mu (\frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_c^2}{M} [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \frac{g}{2} 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 c} (1 - \gamma^5) d_j^\lambda) + n \gamma^5) d_j^\lambda] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_\lambda^2 (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda c}^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda) - m_\lambda^2 (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda c}^\mu \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} \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} igc_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^- - igc_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 - igc_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^1 - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + ig s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^1 - \frac{1}{2}gM[\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w} \bar{X}^0 X^0 H] + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} ig[\bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} igM[\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2}igM[\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]$$

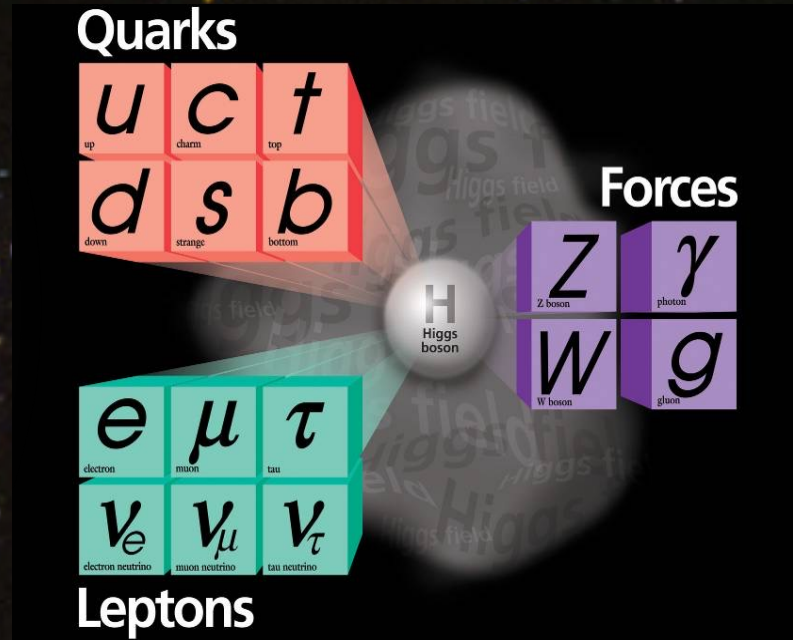


Het Standaard Model

"De formules"



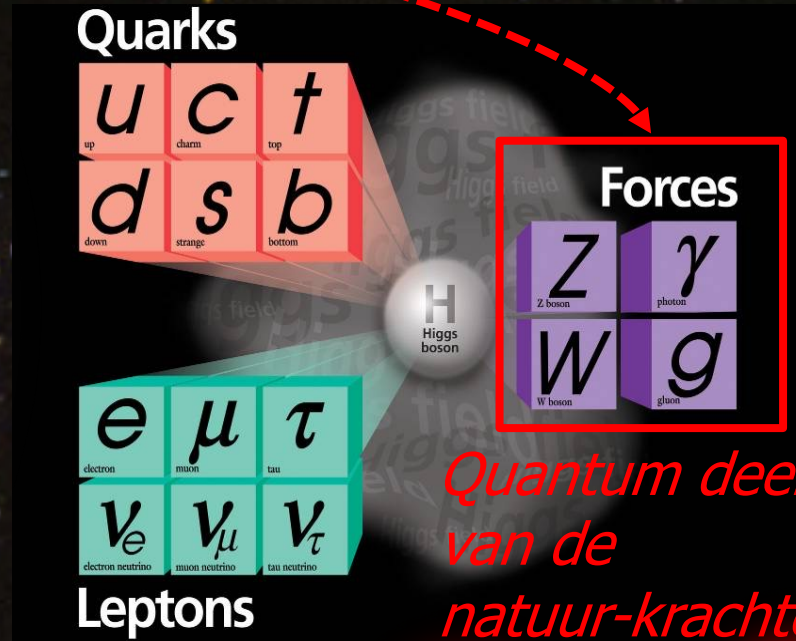
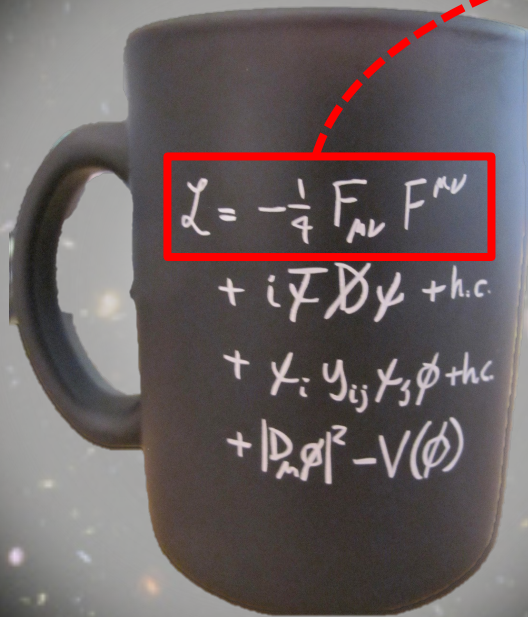
"De bouwstenen van de natuur"



Het Standaard Model

"De formules"

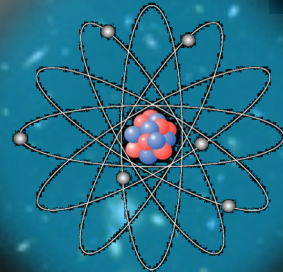
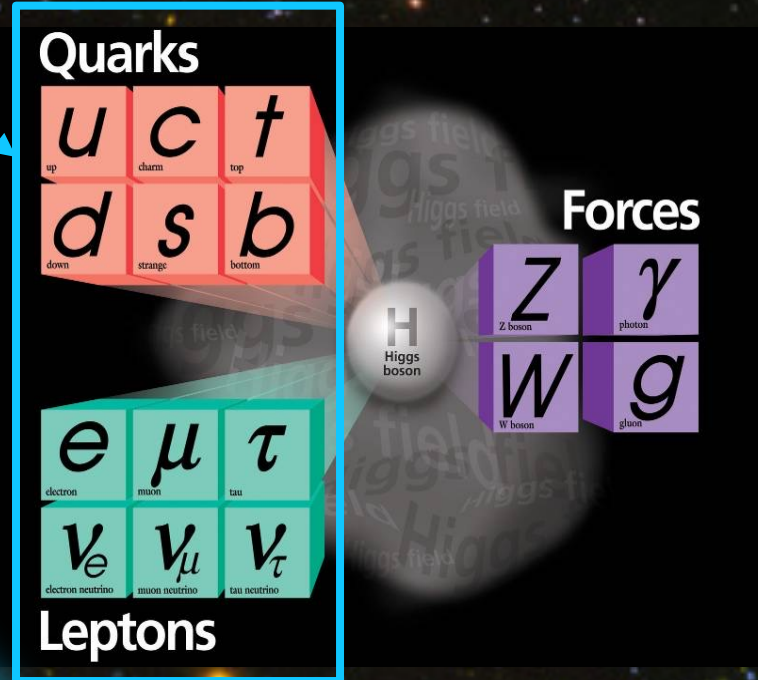
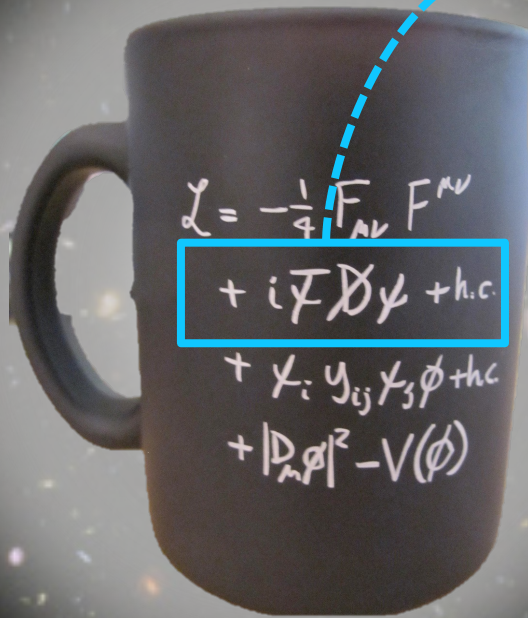
"De bouwstenen van de natuur"



Het Standaard Model

"De formules"

"De bouwstenen van de natuur"

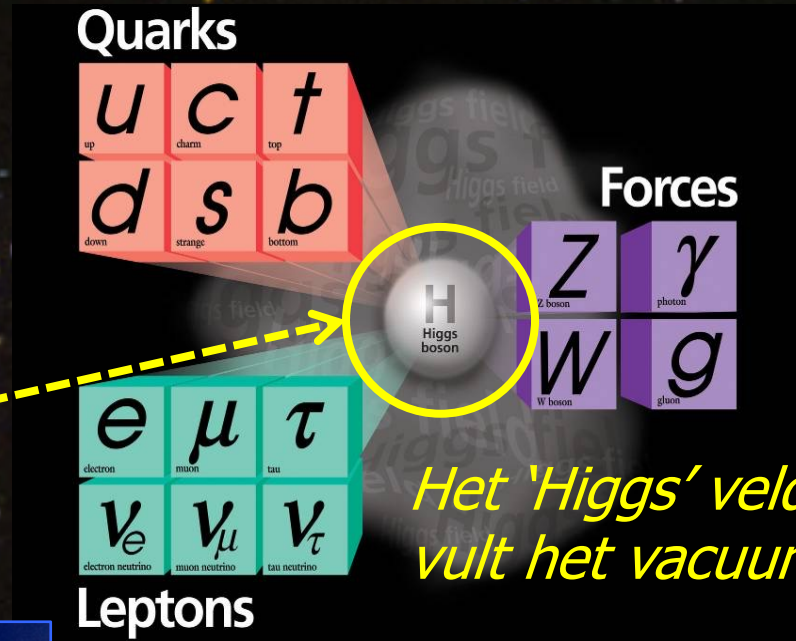
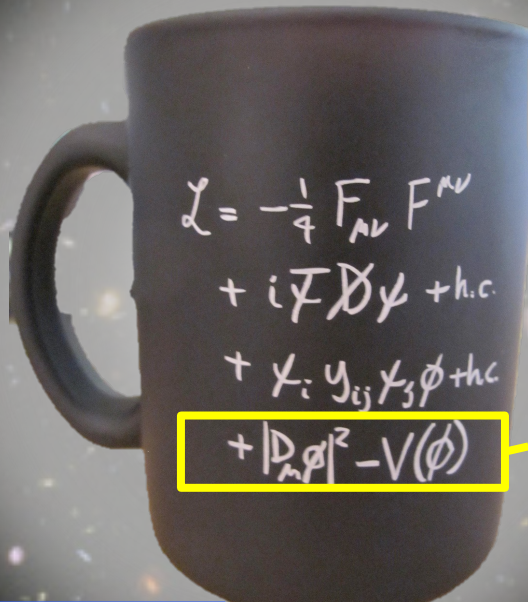


Bouwstenen van materie

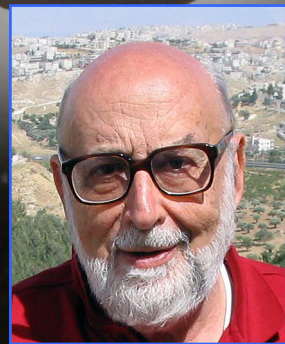
Het Standaard Model

"De formules"

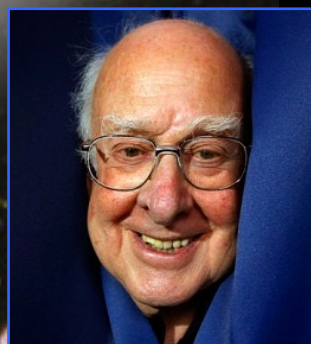
"De bouwstenen van de natuur"



Brout



Englert



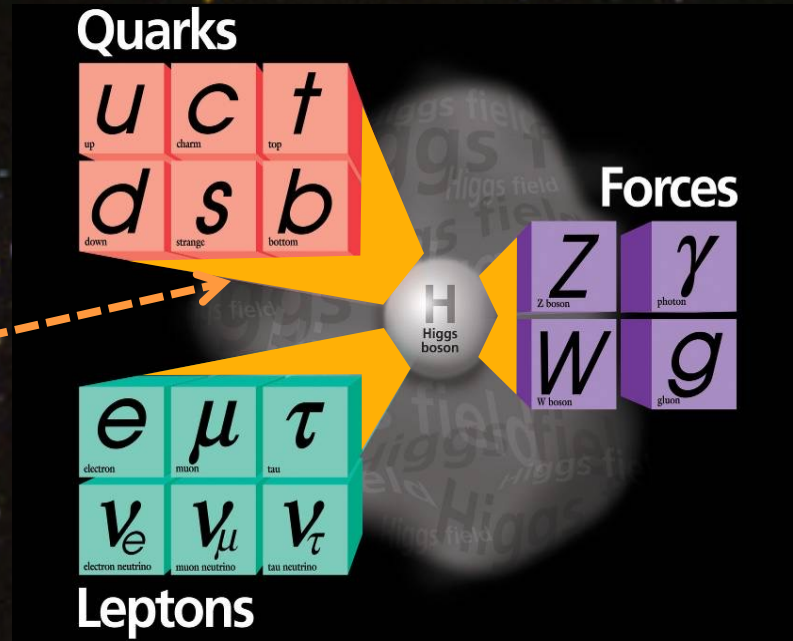
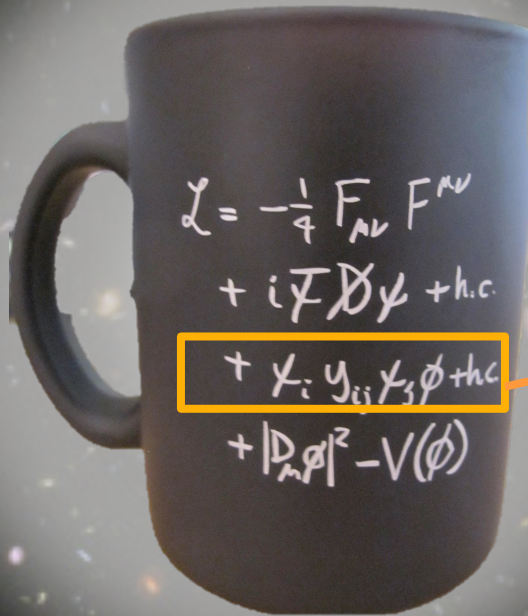
Higgs

1964:
Standaard Model voorspelling:
lege ruimte is niet leeg!

Het Standaard Model

"De formules"

"De bouwstenen van de natuur"



Kobayashi



Maskawa

Massa wordt veroorzaakt door het Higgs veld!

1972:

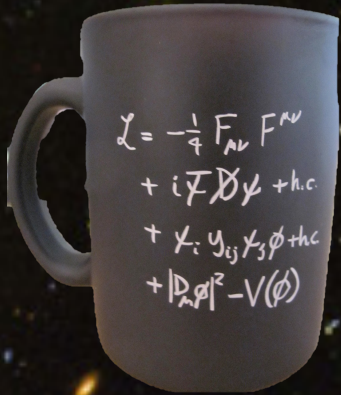
Met 3 kopieën deeltjes is asymmetrie tussen materie en antimaterie mogelijk!

Hoe verdween antimaterie in de Big Bang?

Big Bang

Klein overschot

Domineert



49.9999999%
anti-materie
50.0000001%
materie



0.0000001%
materie

(+99.9999999% straling)



Fermionen: spin=1/2 deeltjes

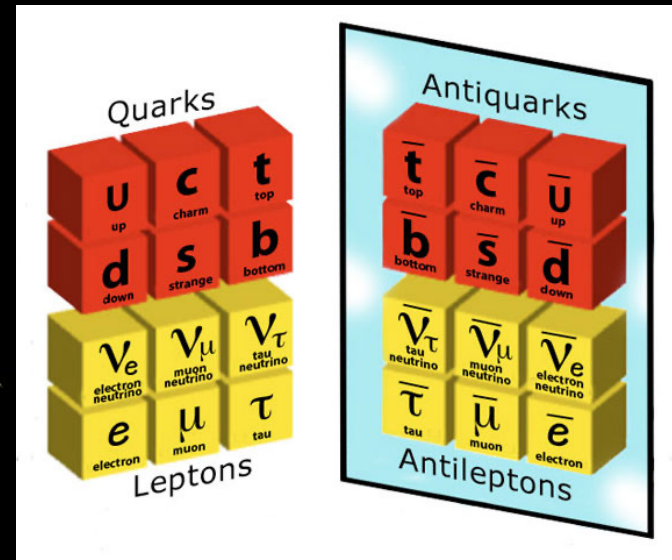
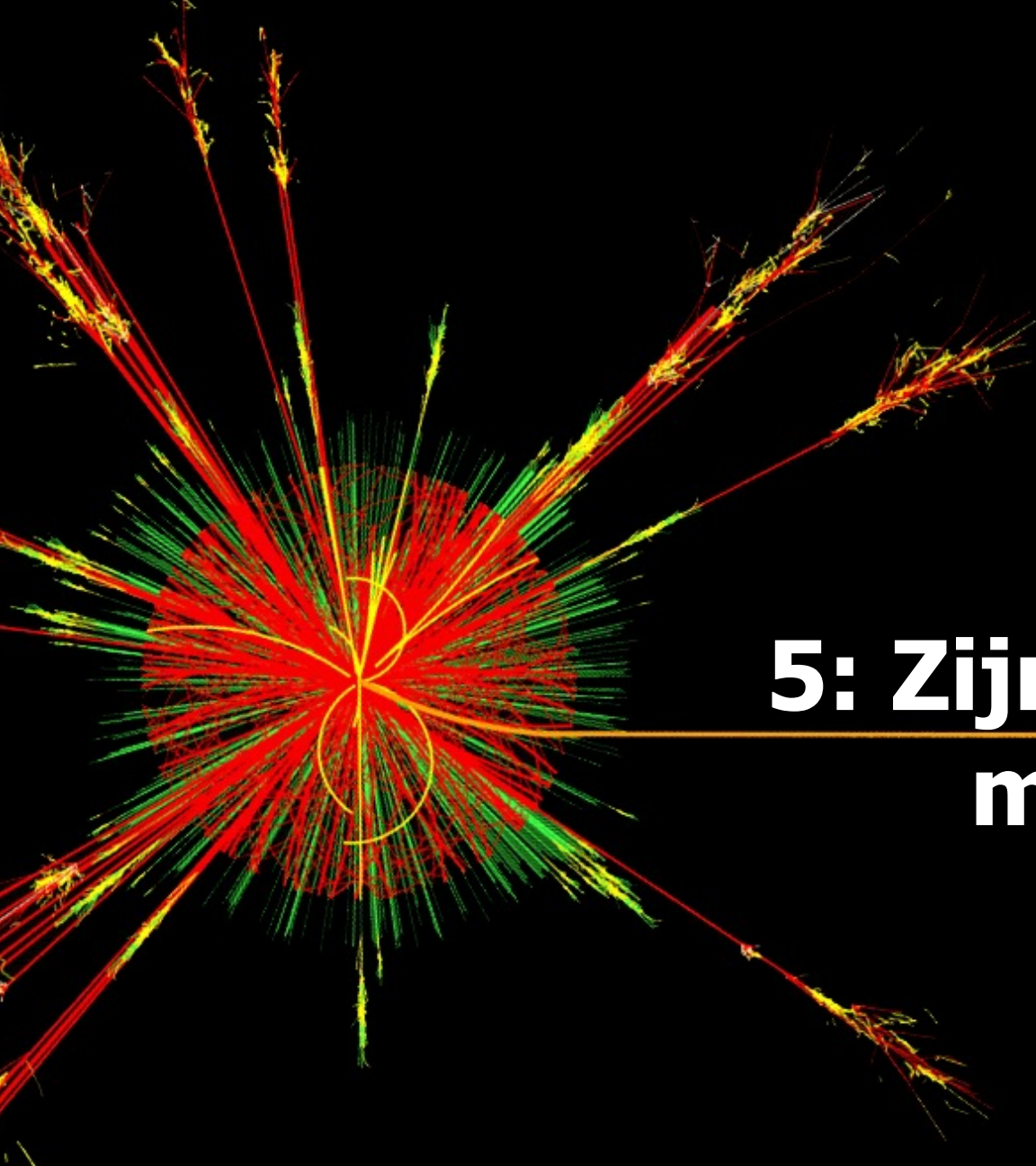
Quarks			H	Krachten	
u	c	t		Z	γ
d	s	b	W	g	
1	2	3			
Leptonen					
ν _e	ν _μ	ν _τ			
e	μ	τ			

bosonen spin=1 deeltjes

Antimaterie niet het exacte spiegelbeeld van materie?

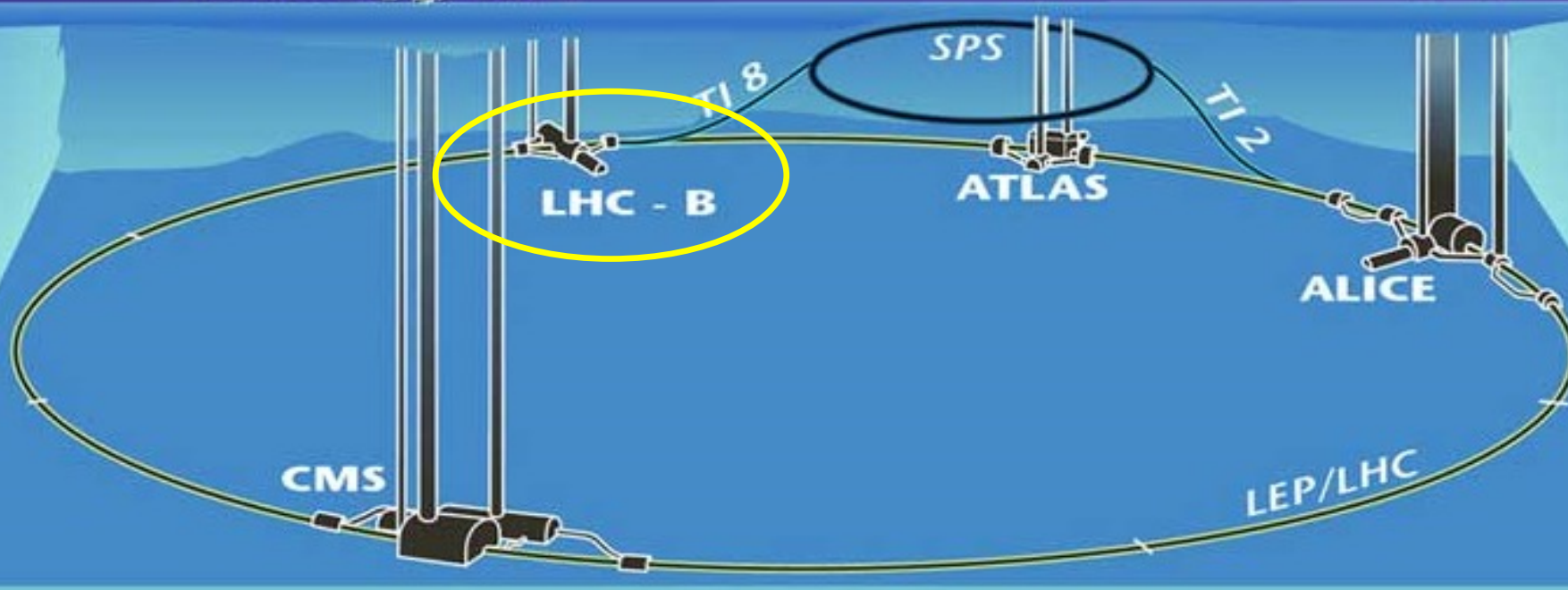
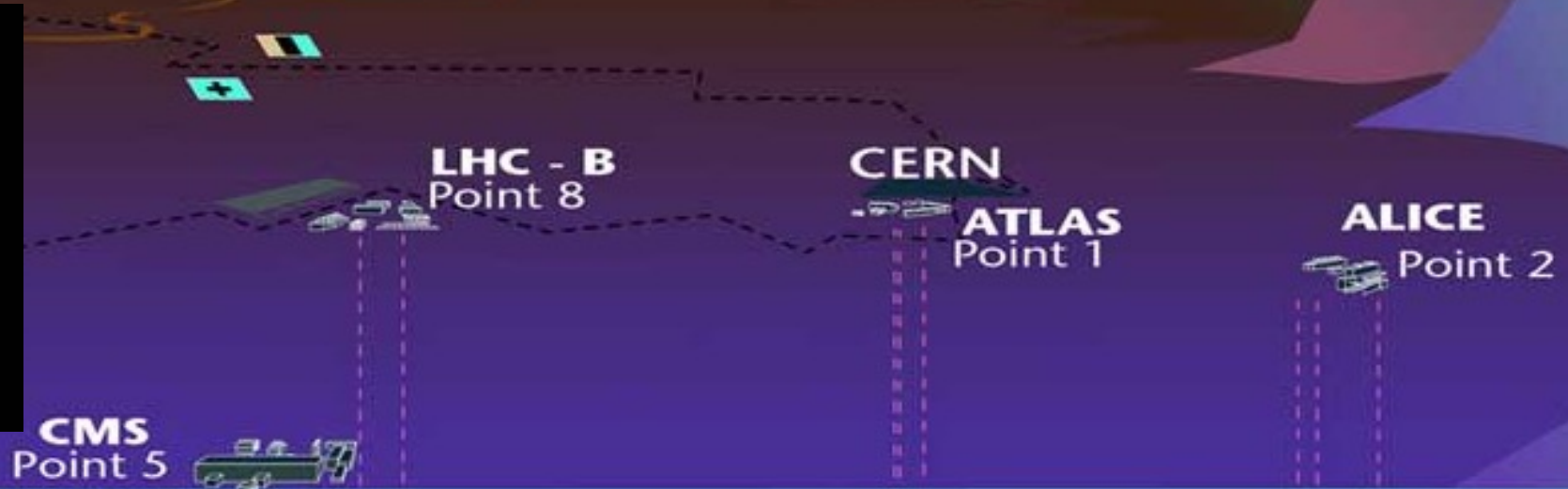
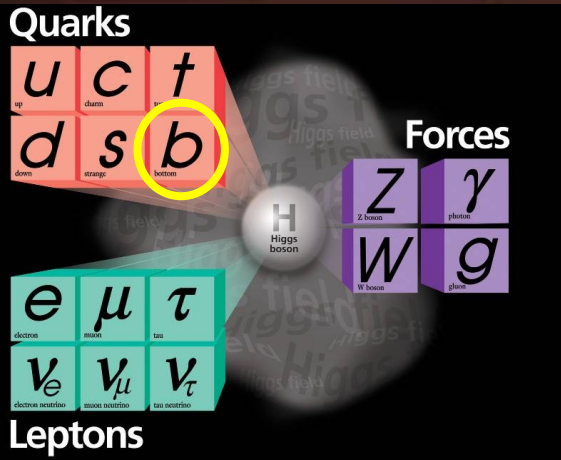
In de theorie zijn hiervoor drie generaties van deeltjes nodig!



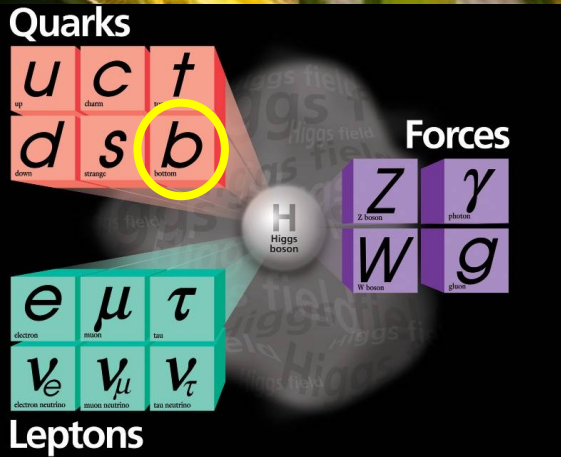


5: Zijn krachten identiek voor materie and antimaterie?

LHCb experiment: vervallen van **B** deeltjes



LHCb Detector: B-deeltjes



Zoom in op botsingspunt

Reconstrueer miljoenen B -deeltjes vervallen en selecteer interessante gevallen. Gaat verval anders bij materie dan bij antimaterie?



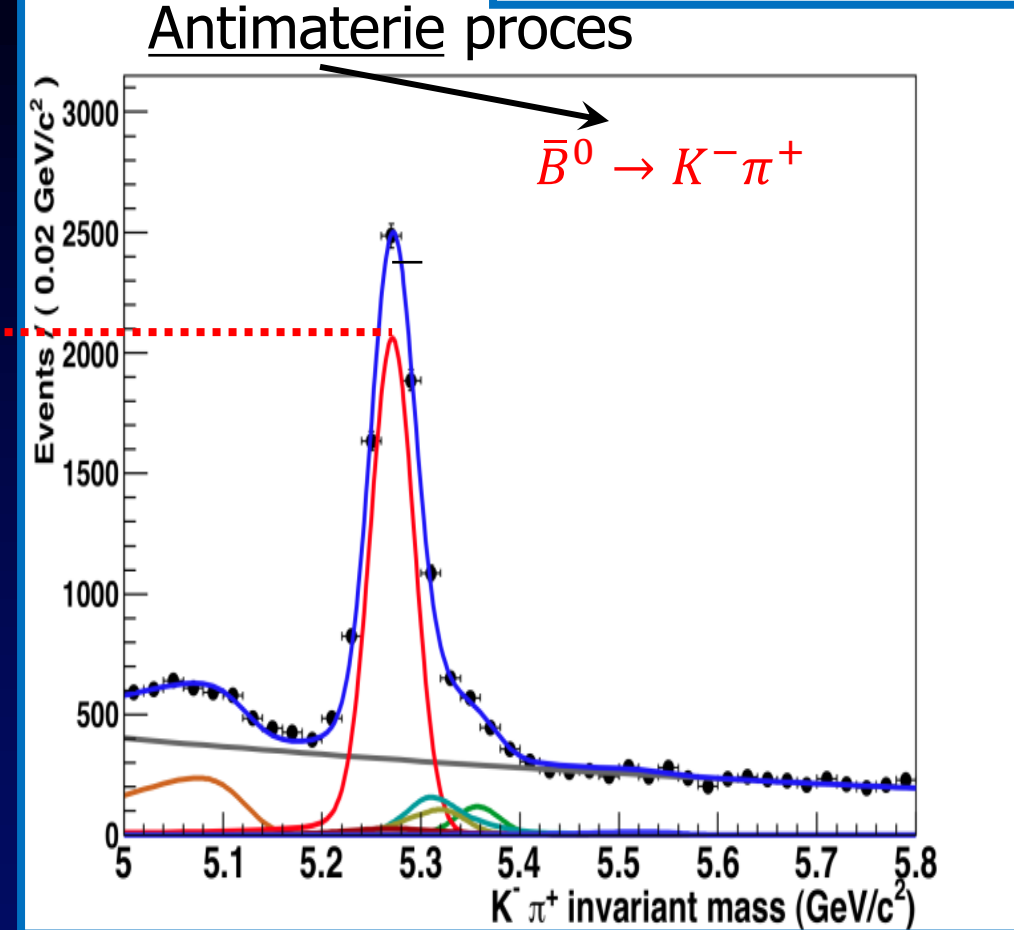
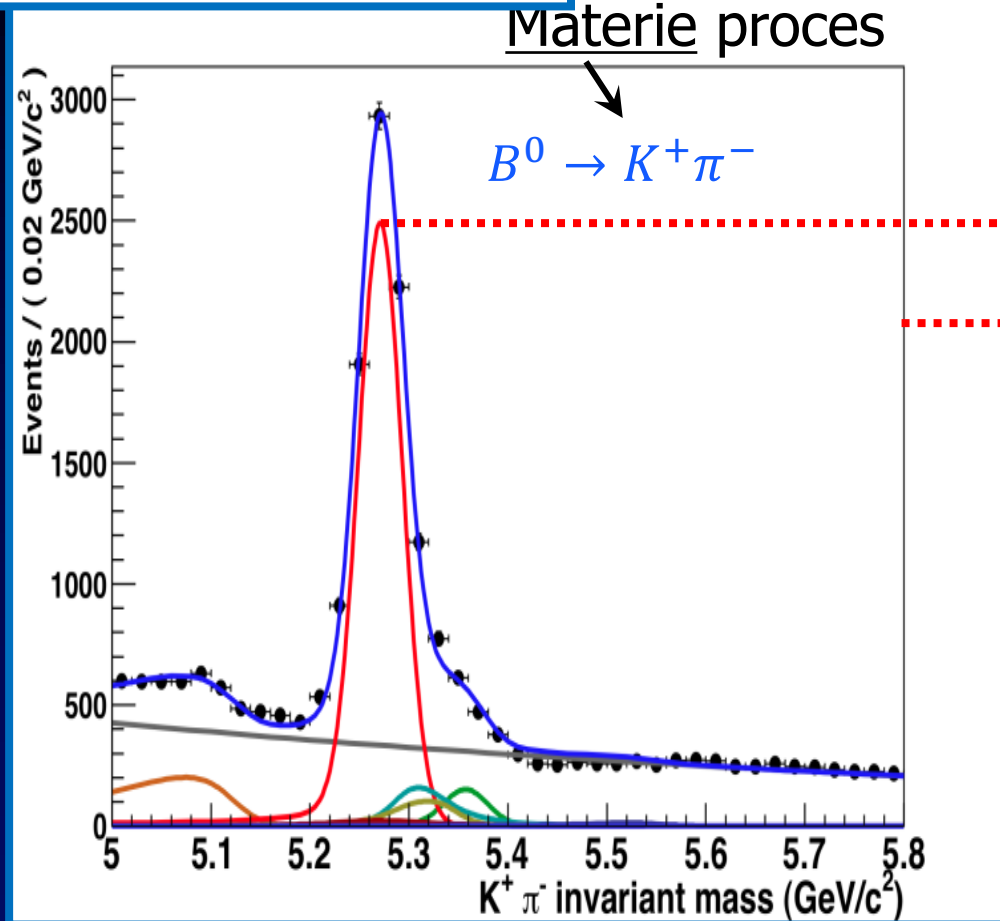
23 sep 2010
Run 79646

19:49:24
Event 143858637

B-vervalsproces: materie vs antimaterie

***B* deeltje** verval naar
een K^+ en een π^- particle

***anti-B* deeltje** verval naar
een K^- en een π^+ deeltje



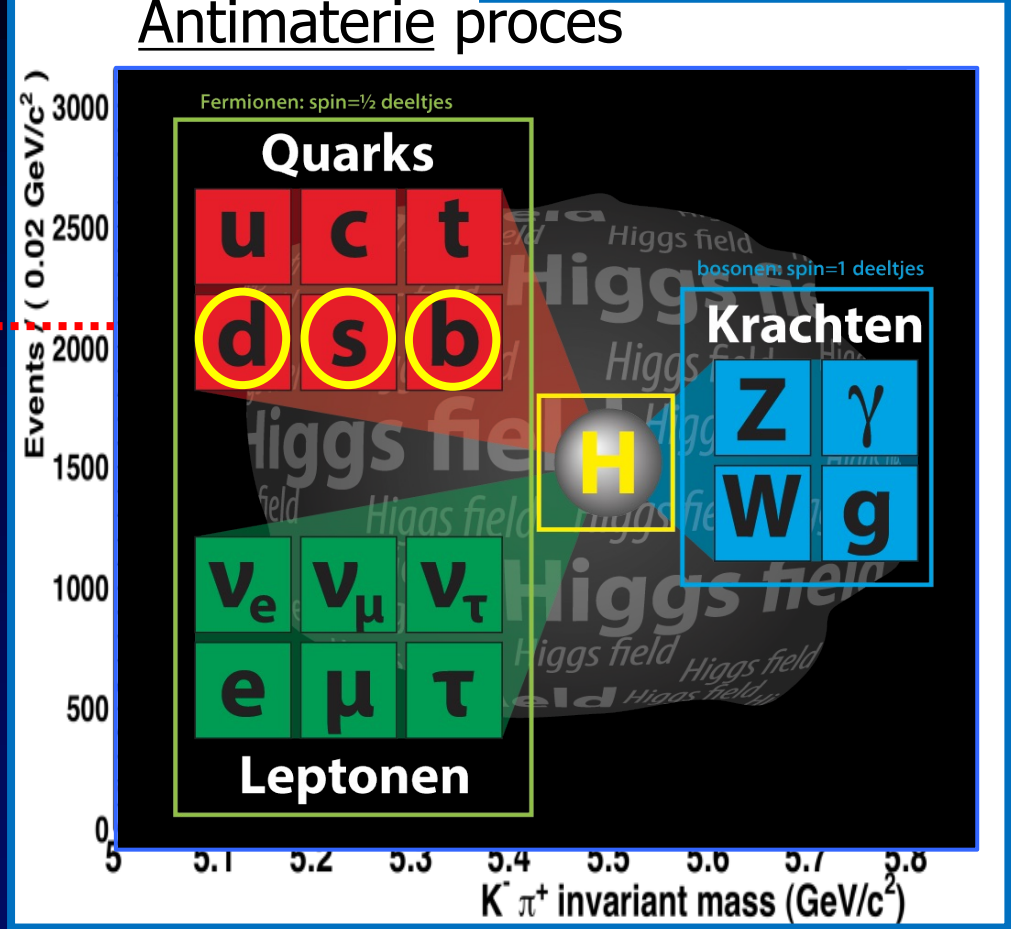
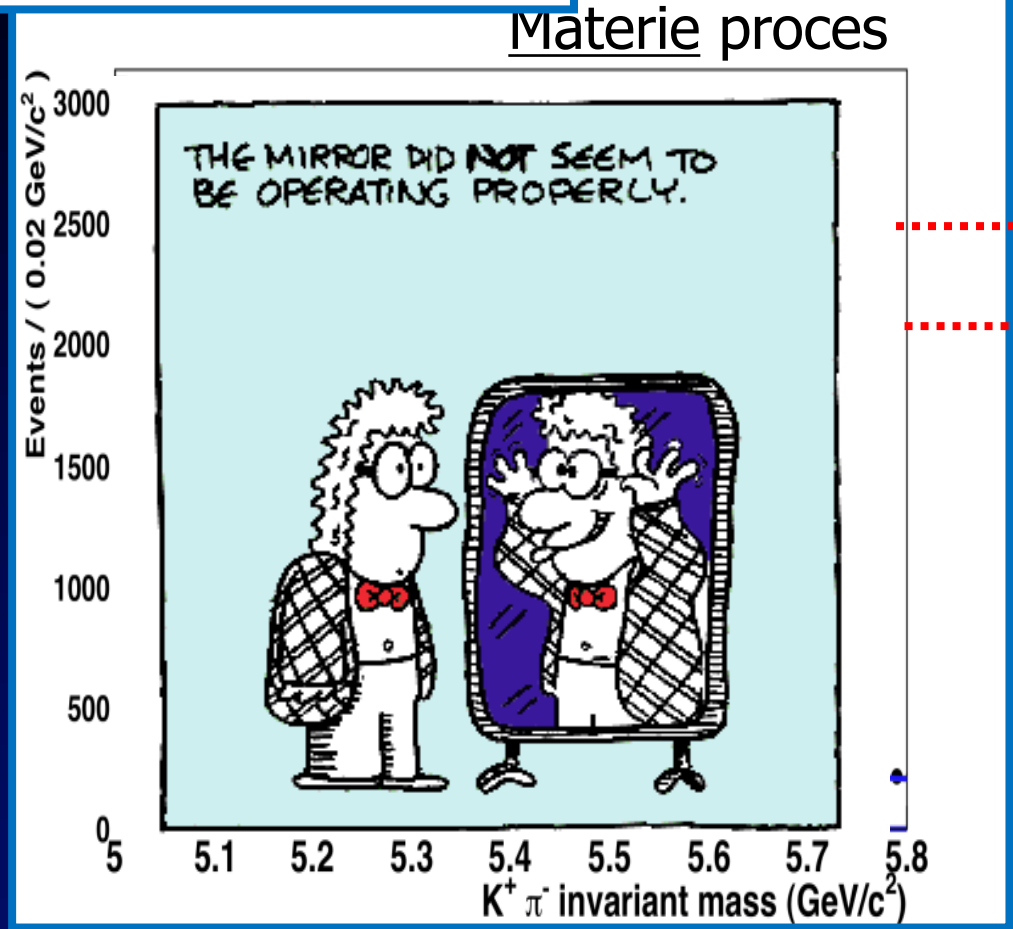
Asymmetrie: Materie vervalsproces anders dan antimaterie versie!

Quantum krachten tussen deeltjes en anti-deeltjes ***niet altijd identiek!***

B-vervalsproces: materie vs antimaterie

B deeltje verval naar een K^+ en een π^- particle

anti-B deeltje verval naar een K^- en een π^+ deeltje



The materie – antimaterie symmetrie is verbroken

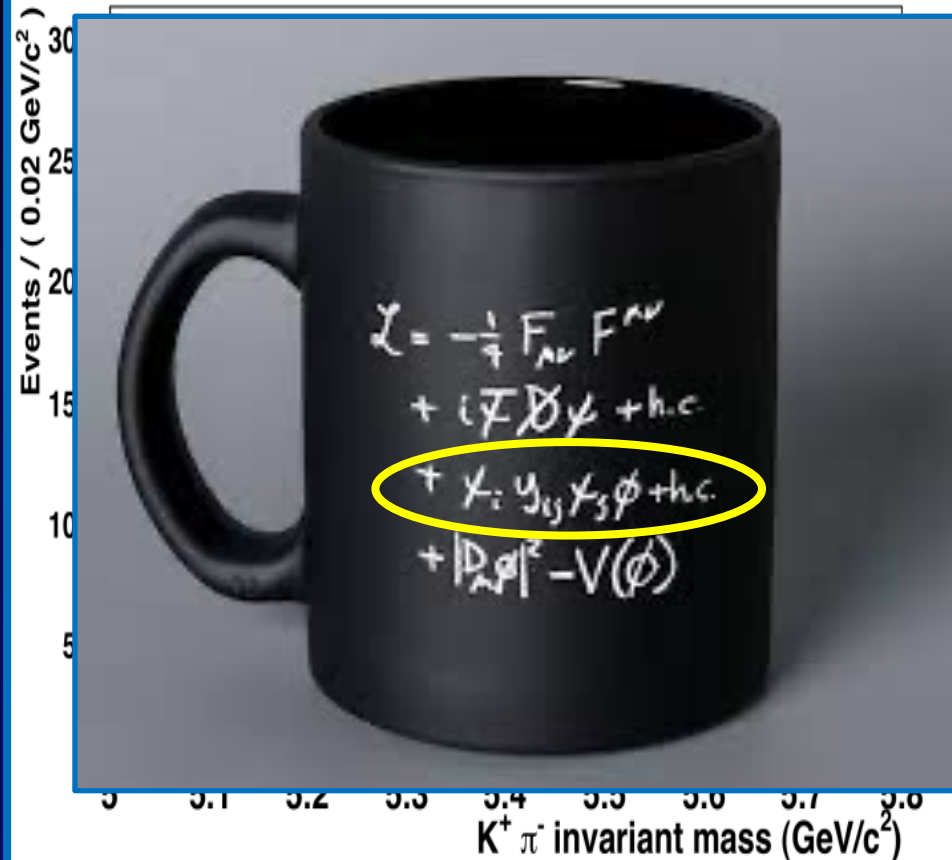
Dit gebeurt **alleen** als er tenminste **drie generaties** deeltjes bestaan!!!

B-vervalsproces: materie vs antimaterie

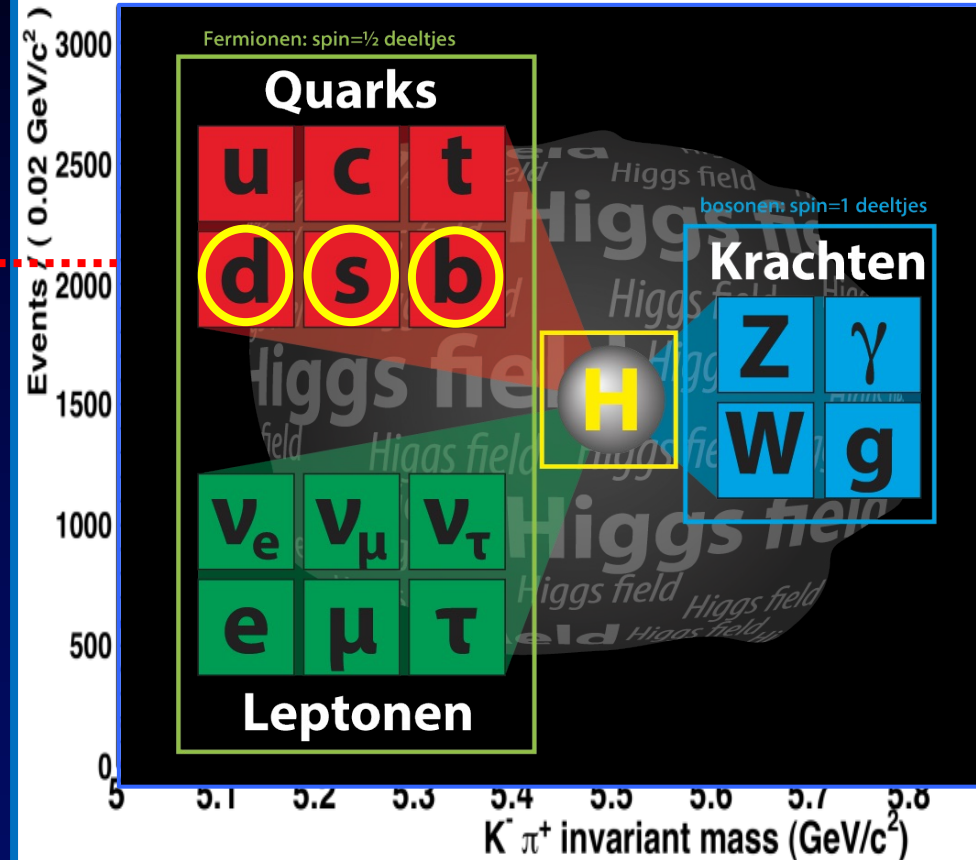
B deeltje verval naar
een K^+ en een π^- particle

anti-B deeltje verval naar
een K^- en een π^+ deeltje

Materie proces



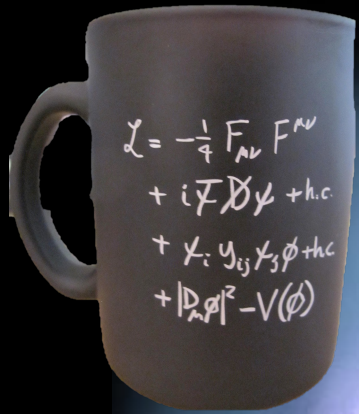
Antimaterie proces



The materie – antimaterie
symmetrie is verbroken

Dit gebeurt **alleen** als er tenminste
drie generaties deeltjes bestaan!!!

Vroege Universum: waar is de antimaterie heen?



- Asymmetrie in kracht
- Beetje meer materie dan antimaterie
- Rest annihileert
- Materie universum blijft over



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

50.000001%

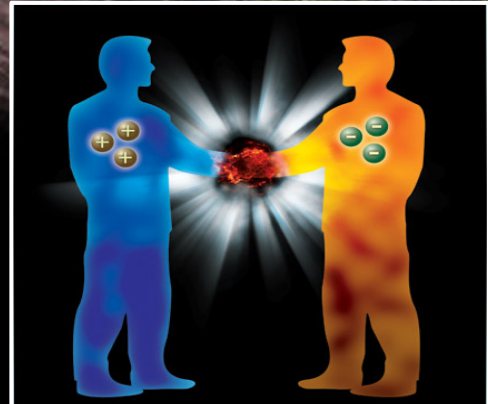
Antiquarks

\bar{t} top	\bar{c} charm	\bar{u} up
\bar{b} bottom	\bar{s} strange	\bar{d} down

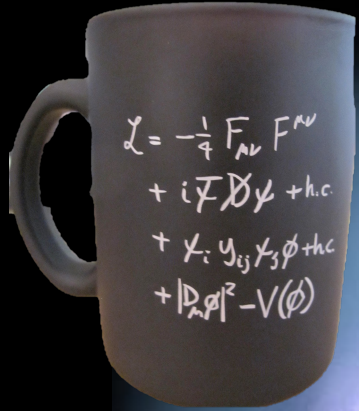
Antileptons

$\bar{\nu}_\tau$ tau neutrino	$\bar{\nu}_\mu$ muon neutrino	$\bar{\nu}_e$ electron neutrino
$\bar{\tau}$ tau	$\bar{\mu}$ muon	\bar{e} electron

49.999999%



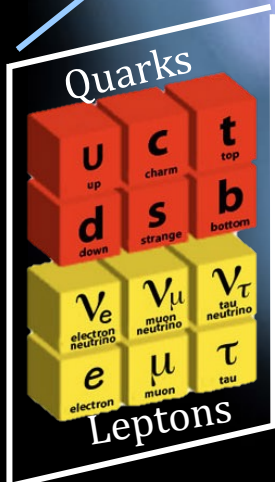
Vroege Universum: waar is de antimaterie heen?



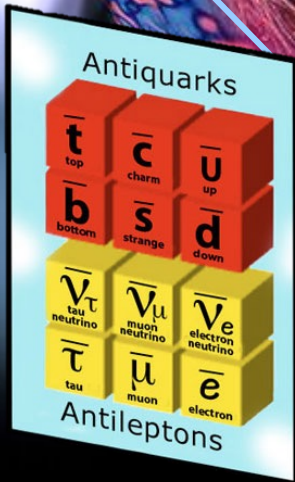
Helaas: het werkt niet!

Asymmetrie is niet groot genoeg.

Verklaring vereist nieuwe kracht of deeltjes!

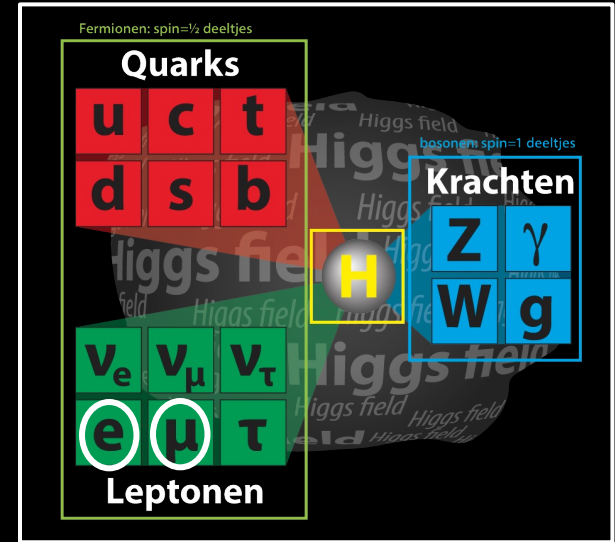
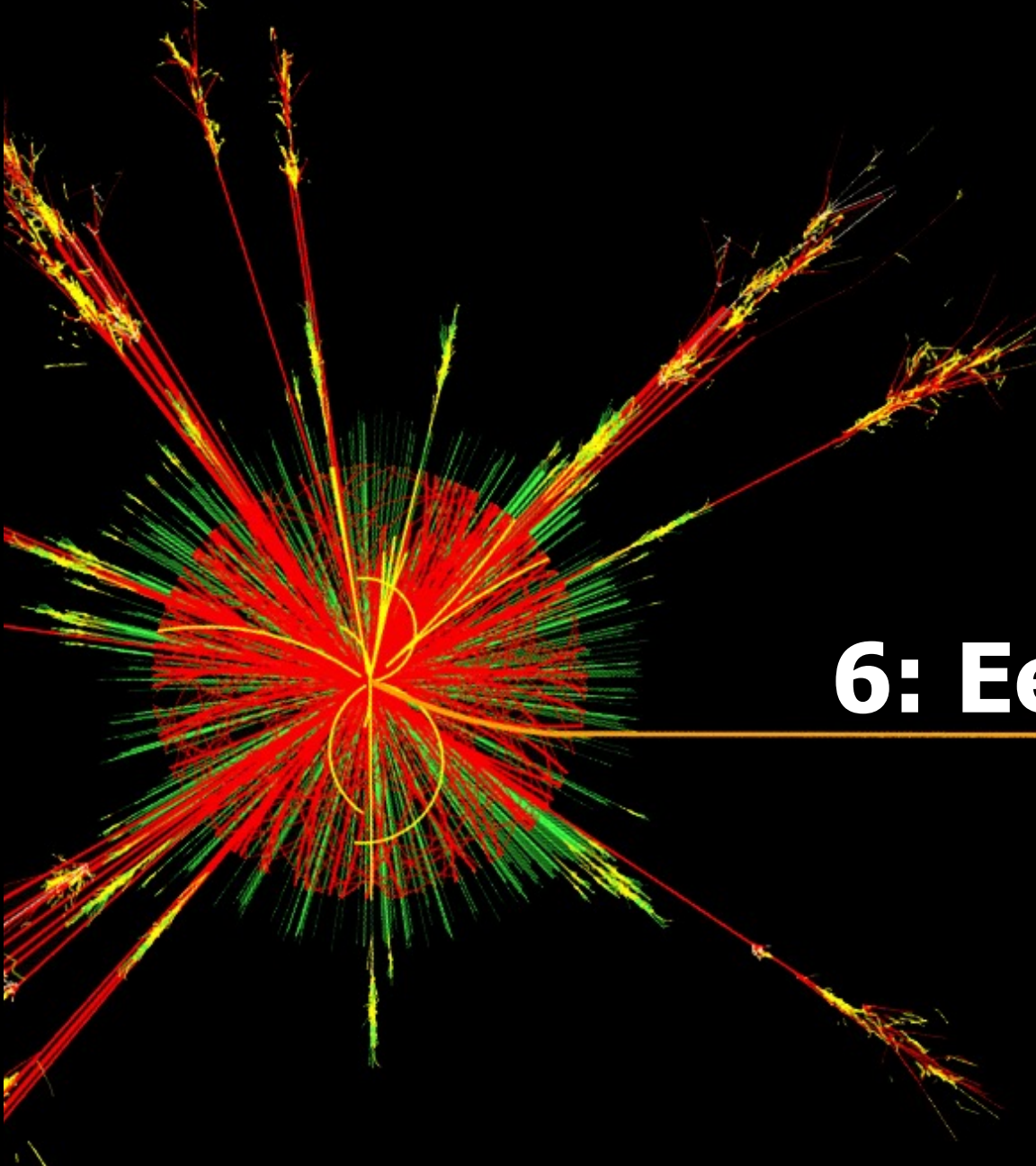


50.000001%

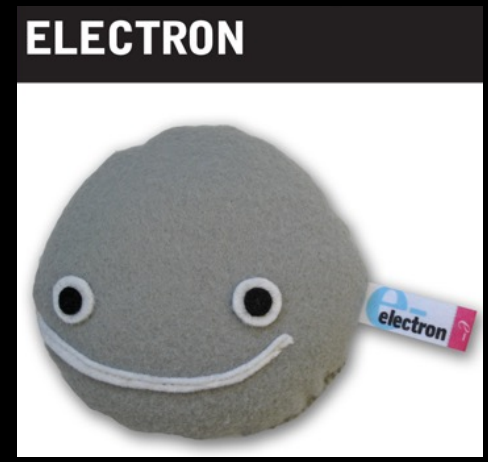


49.999999%

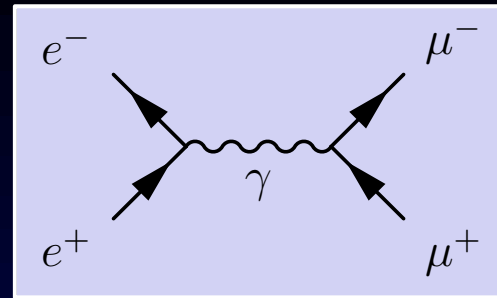
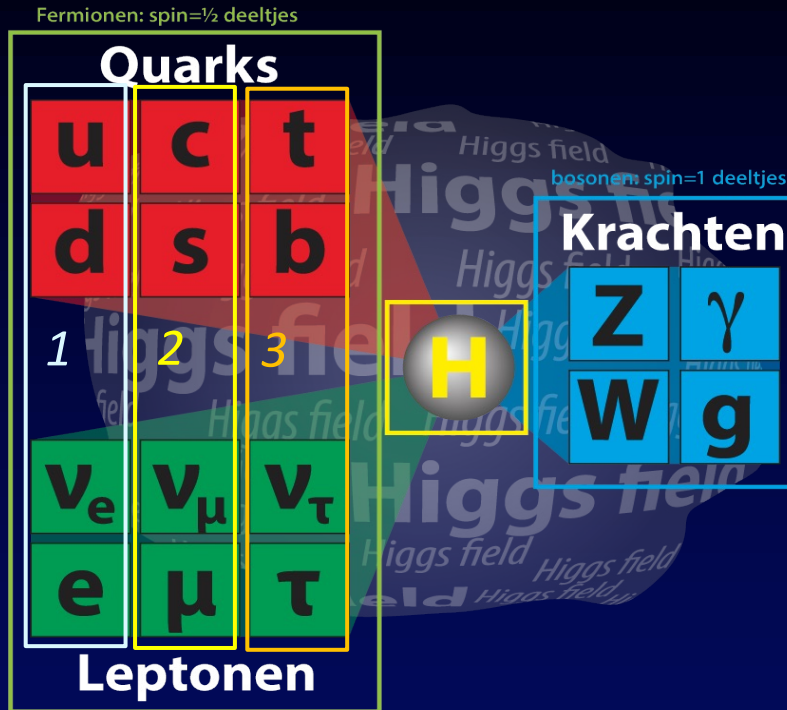




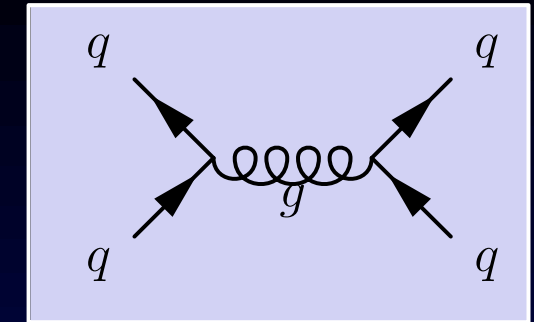
6: Een nieuwe natuurkracht?



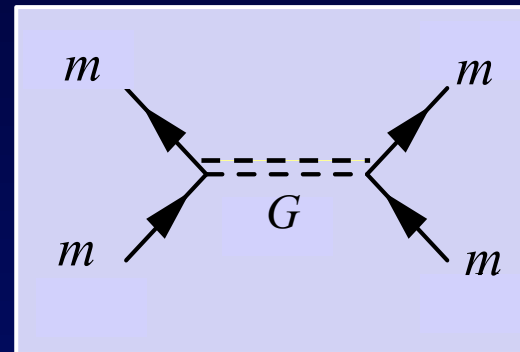
Standaardmodel: Universaliteit van de Krachten



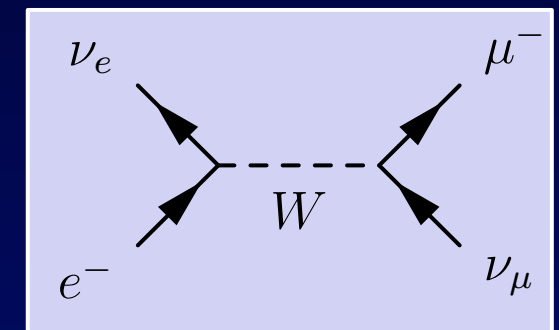
Elektromagnetisme



Sterke kernkracht



Zwaartekracht



Zwakke kernkracht

Krachten zijn identiek voor deeltjes van 1^e, 2^e en 3^e generatie.

→ "Universaliteit"

Fermionen: spin=1/2 deeltjes

Quarks

u	c	t
d	s	b

Higgs field

Krachten

Z	γ
W	g

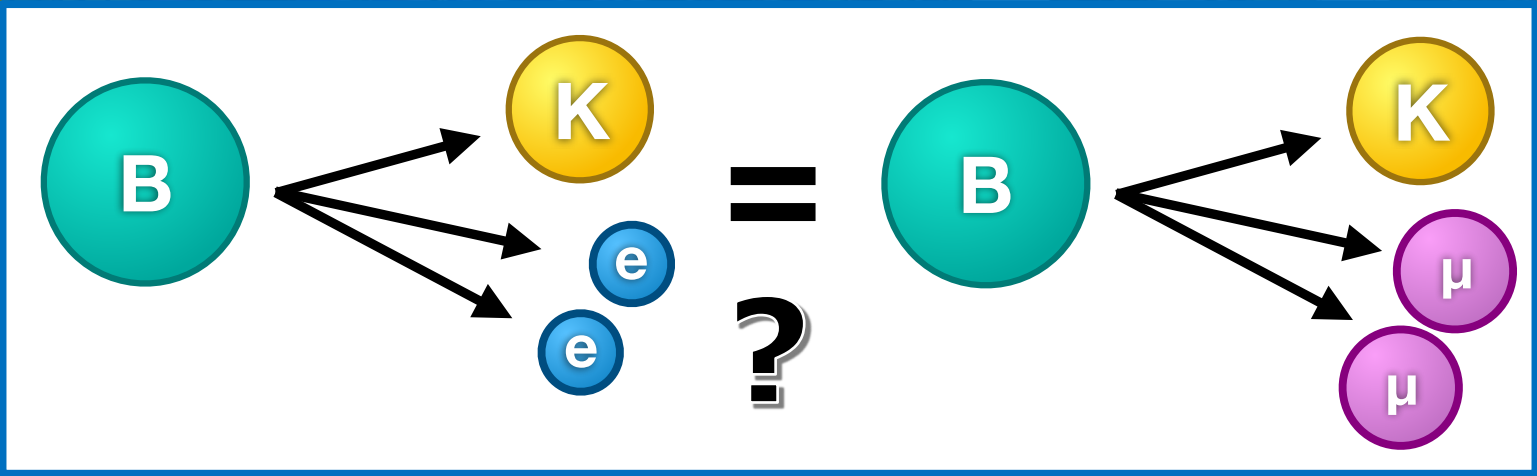
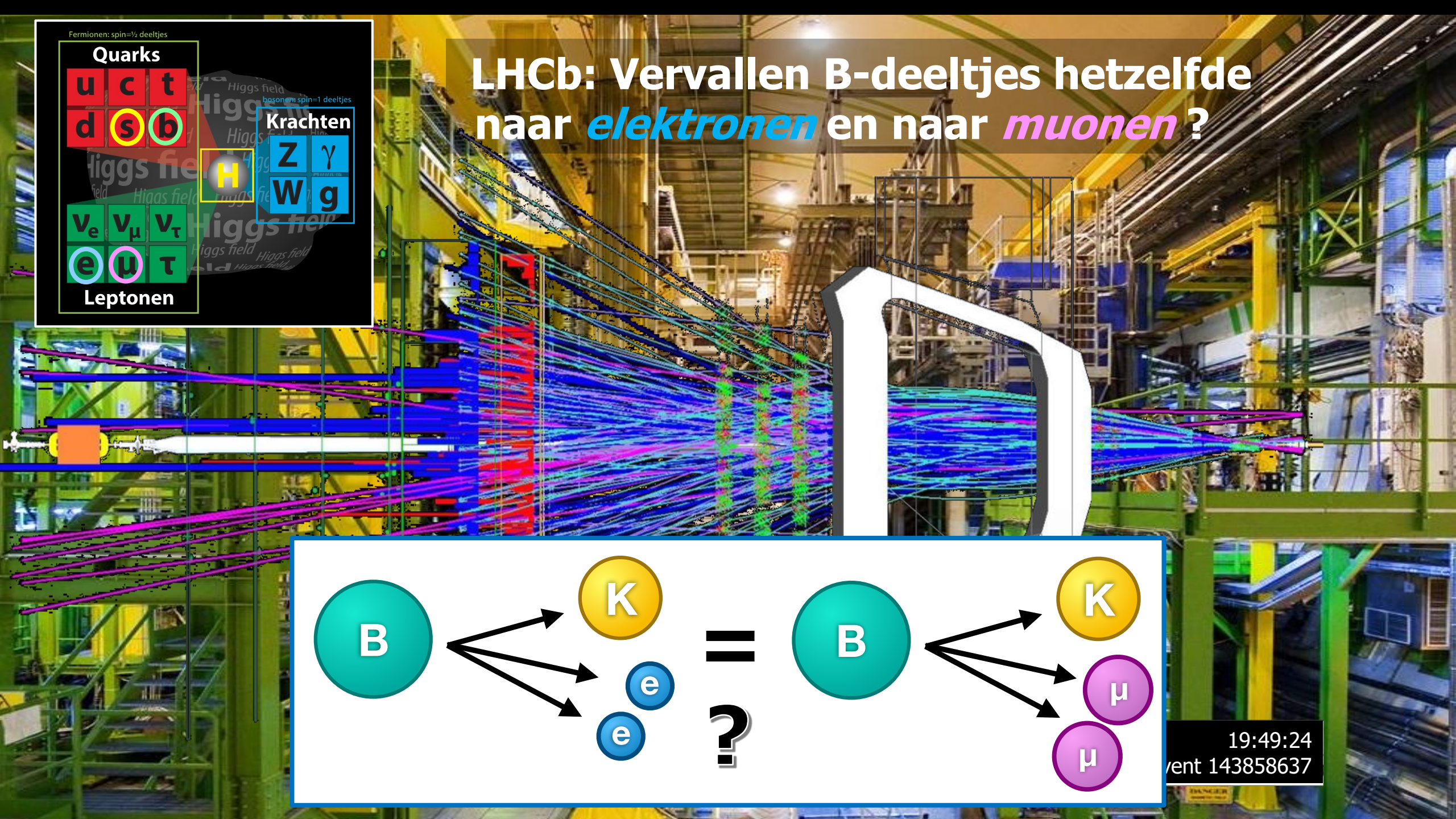
Higgs field

Leptonen

ν_e	ν_μ	ν_τ
e	μ	τ

Higgs field

LHCb: Vervallen B-deeltjes hetzelfde naar *elektronen* en naar *muonen* ?



LHCb: Vervallen B-deeltjes hetzelfde naar *elektronen* en naar *muonen*?

Fermionen: spin=1/2 deeltjes

Quarks

u	c	t
d	s	b

Higgs field
bosonen spin=1 deeltjes

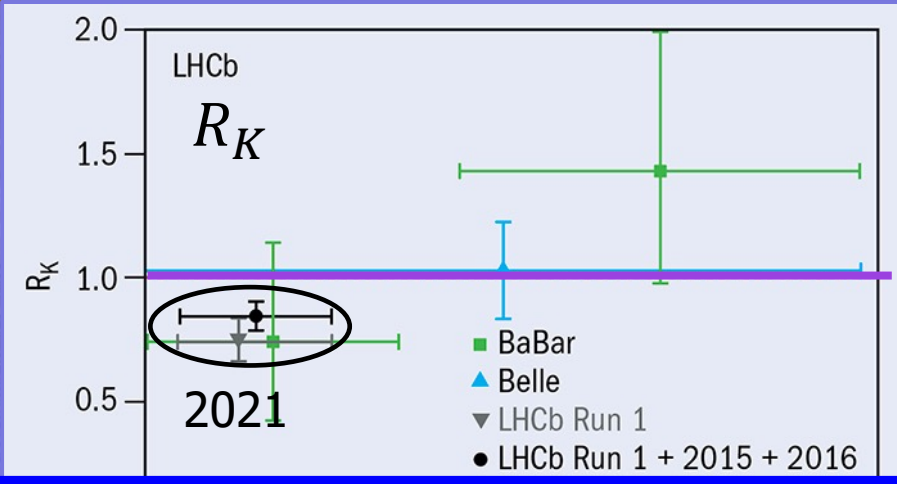
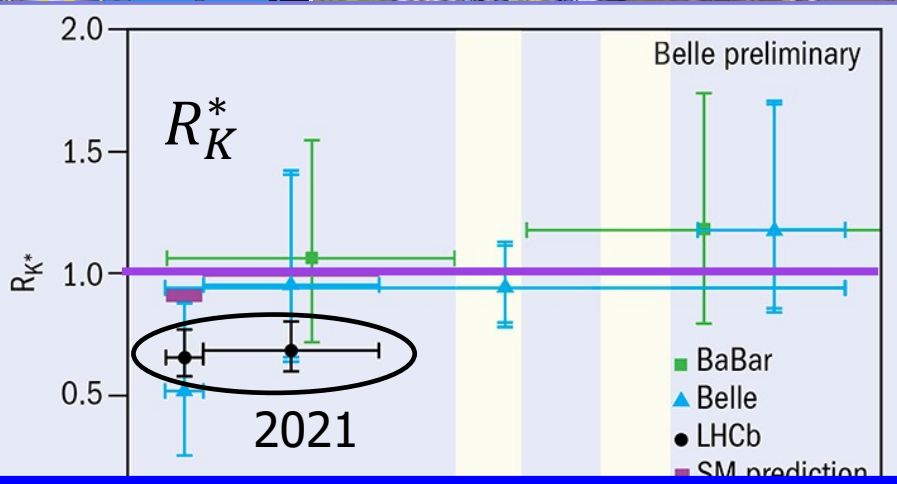
Krachten

Z	γ
---	---

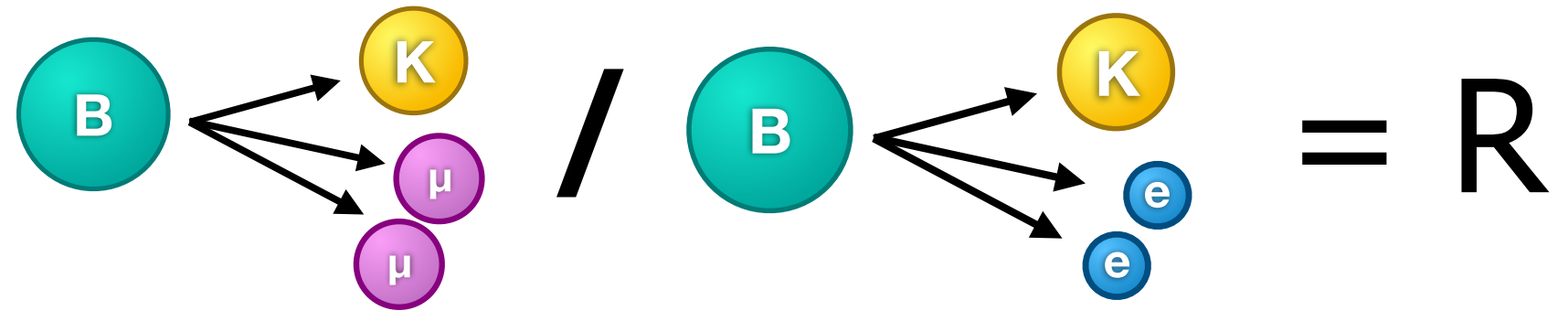
Higgs field

Leptonen

ν_e	ν_μ	ν_τ
e	μ	τ



R niet precies gelijk aan 1??
 → Verschillende kracht voor elektronen and muonen?!



23 Maart 2021: Krantenkoppen... "voorzichtige opwinding"

Menu **nrc**

Voorzichtige opwinding onder fysici: deeltje gedraagt zich vreemd

Deeltjesfysica Het muon, het zware broertje van het elektron, gedraagt zich niet altijd als verwacht. Dat kan duiden op een barstje in het standaardmodel.

Margriet van der Heijden 23 maart 2021 Leestijd 3 minuten



Cern experiment hints at new force of nature - Guardian

Experts reveal 'cautious excitement' over unstable particles that fail to decay as standard model suggests



de Volkskrant

NIEUWS

Natuurkundigen van Cern vinden aanwijzing die ons begrip van de werkelijkheid op zijn kop kan zetten

Een gloednieuw deeltje, een nog onbekende natuurkracht... fysici bij onderzoeksinstituut Cern zien aanwijzing op zijn kop kan zetten. 'Dit is

George van Hal 23 maart 2021, 9:00

Zijn we een nieuwe natuurkracht met muonen aan het ontdekken?!



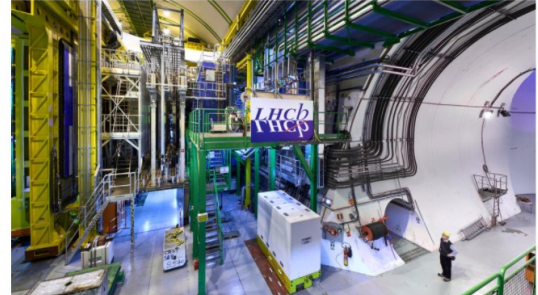
TELEGRAAF.NL
Experts zijn nieuwe natuurkracht op het spoor: 'We trilden helemaal'
Na de vondst van het Higgs-deeltje, negen jaar geleden, klinken er nu opnieuw opgetogen ...

NEWS / LIFE

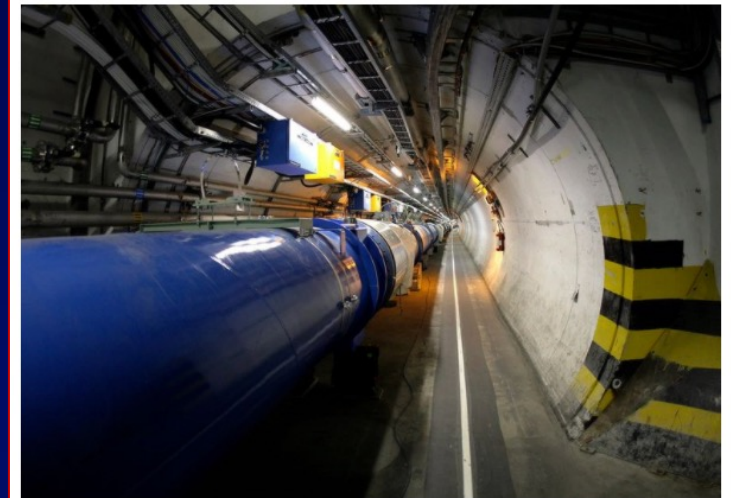
CERN data on 'beauty quarks' behaviour may rewrite physics as we know it

24 MAR 2021

Beauty quarks or B mesons particles are not decaying as they should and while the findings may warrant "cautious excitement", more research needs to be done, scientists say.



FILE PHOTO: A view of the Large Hadron Collider at CERN, near Geneva, Switzerland. (CERN)



De tunnel van deeltjesversneller LHC bij Cern, Genève. In de blauwe buis zwiepen deeltjes met bijna de lichtsnelheid rond tot ze op elkaar knallen. Tussen de brokstukken van die botsing zoeken fysici naar aanwijzingen voor hoe de wereld op het kleinste niveau werkt. Beeld AP

Twee weken later in Fermilab ... muon magnetisch moment?!

Menu **nrc**

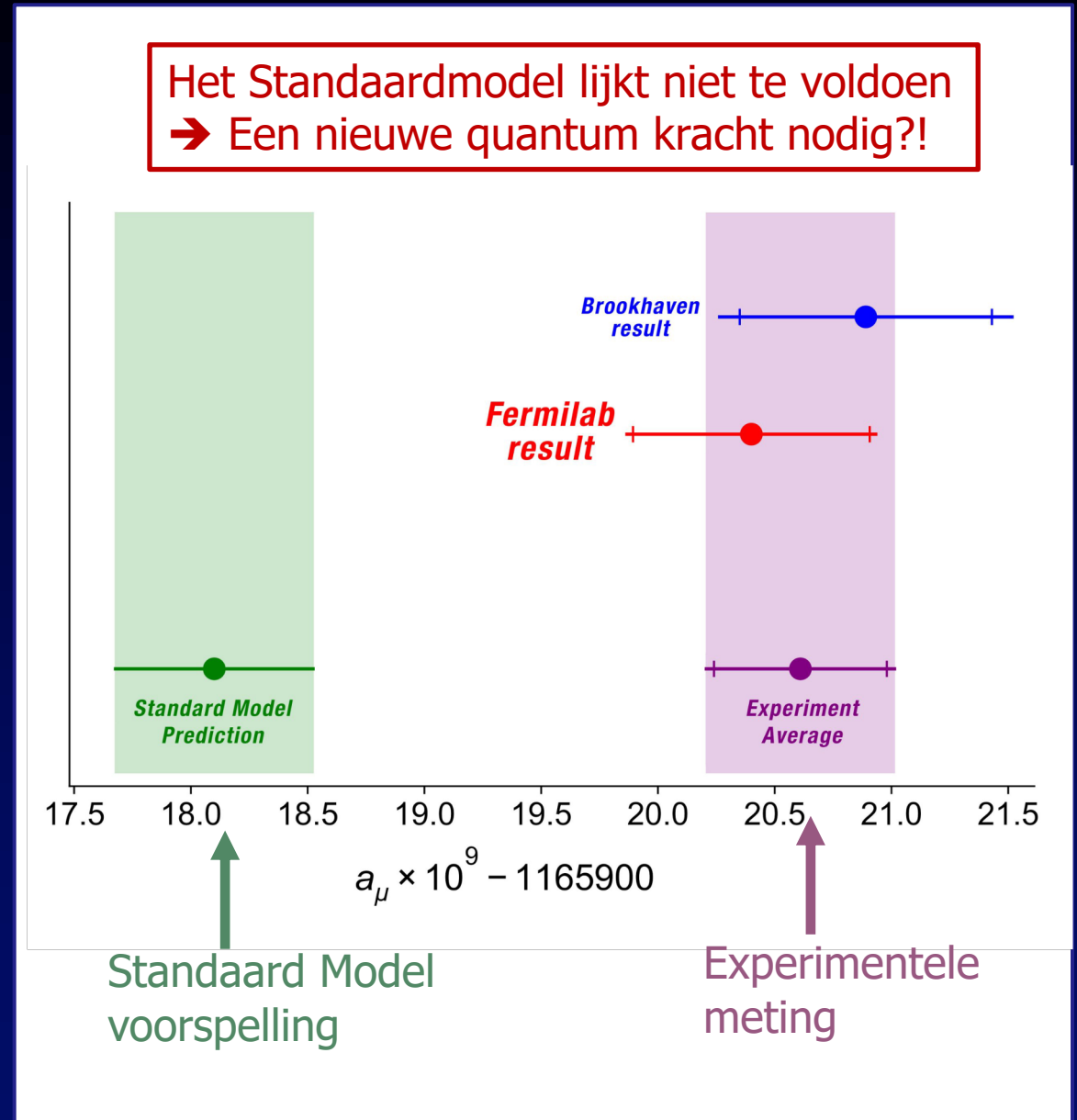
Opnieuw barstje in standaardmodel van deeltjesfysica

Natuurkunde Gaat het standaardmodel van de deeltjesfysica breken? Resultaten uit een Amerikaans experiment leiden tot opwinding.

Dorine Schenk 7 april 2021 Leestijd 3 minuten



De Muon g-2-ring in het Fermilab in de buurt van Chicago. Het experiment wordt uitgevoerd bij een temperatuur van -268 graden Celsius.
Foto Reidar Hahn/Fermilab



Fermionen: spin=1/2 deeltjes

Quarks

u	c	t
d	s	b

Krachten

Z	γ
W	g

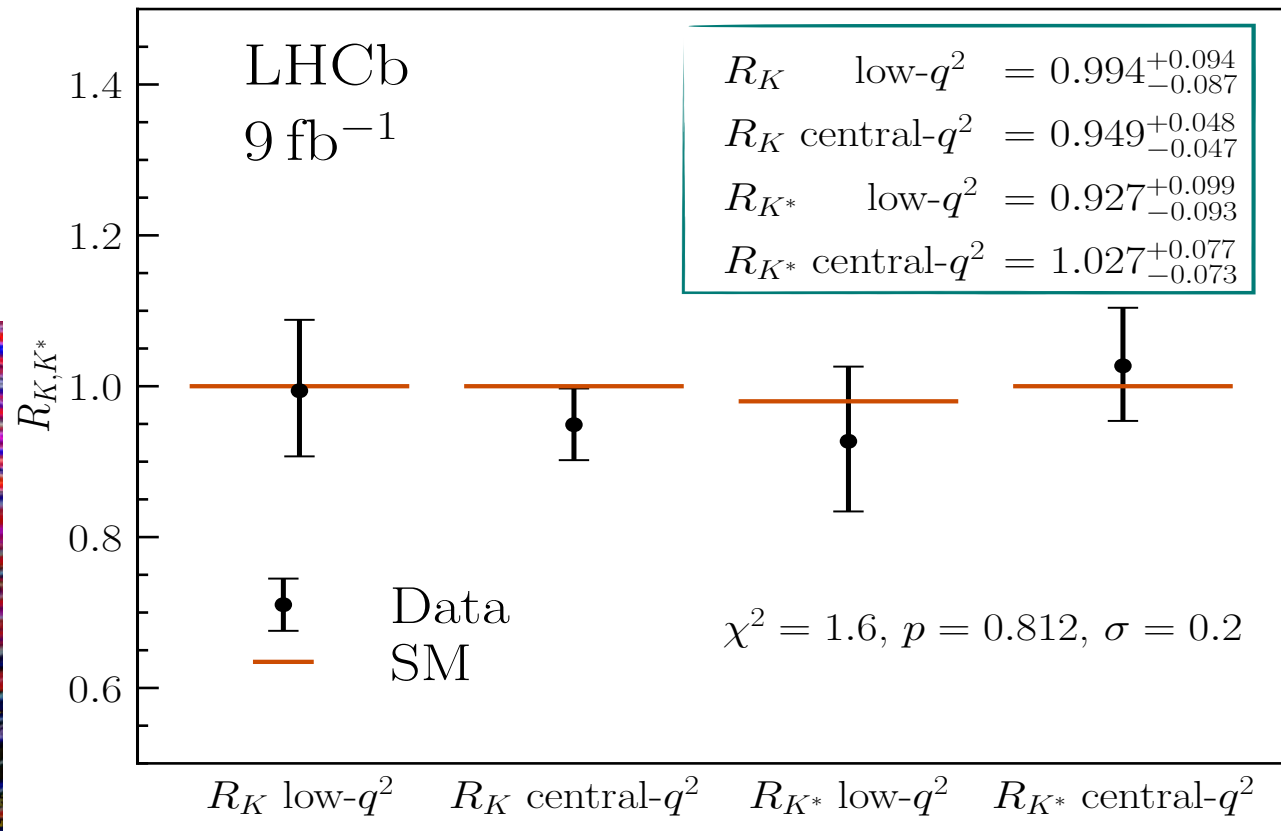
Leptonen

ν_e	ν_μ	ν_τ
e	μ	τ

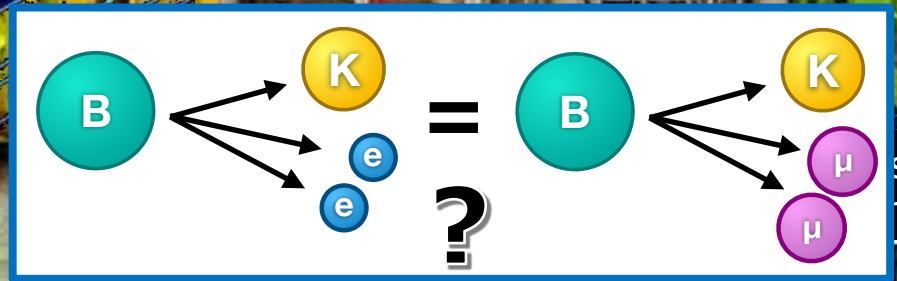
Higgs field

H

LHCb: Vervallen B-deeltjes hetzelfde naar *elektronen* en naar *muonen*?



December 2022:
verbeterde meting
van de *elektronen*...



Fermionen: spin=1/2 deeltjes

Quarks

u	c	t
d	s	b

Krachten

Z	γ
W	g

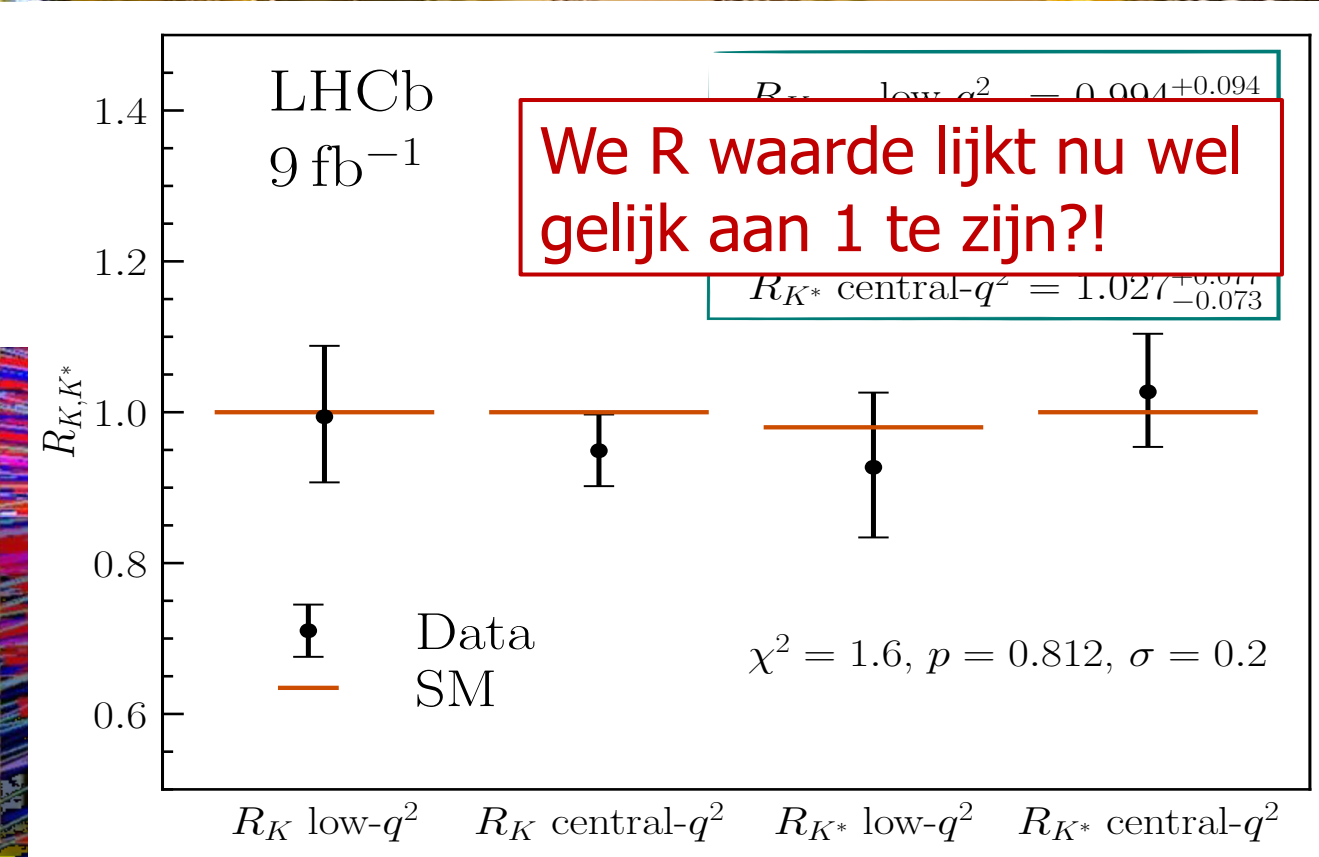
Leptonen

ν_e	ν_μ	ν_τ
e	μ	τ

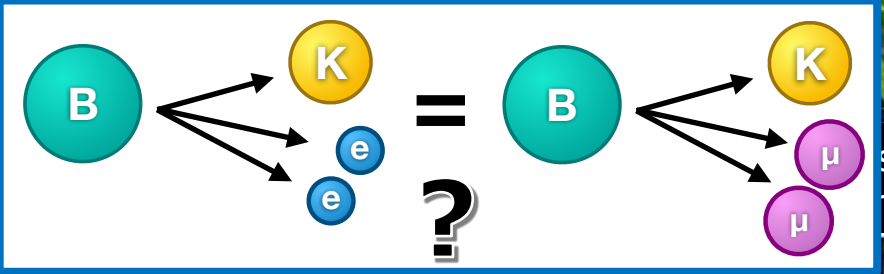
Higgs field

H

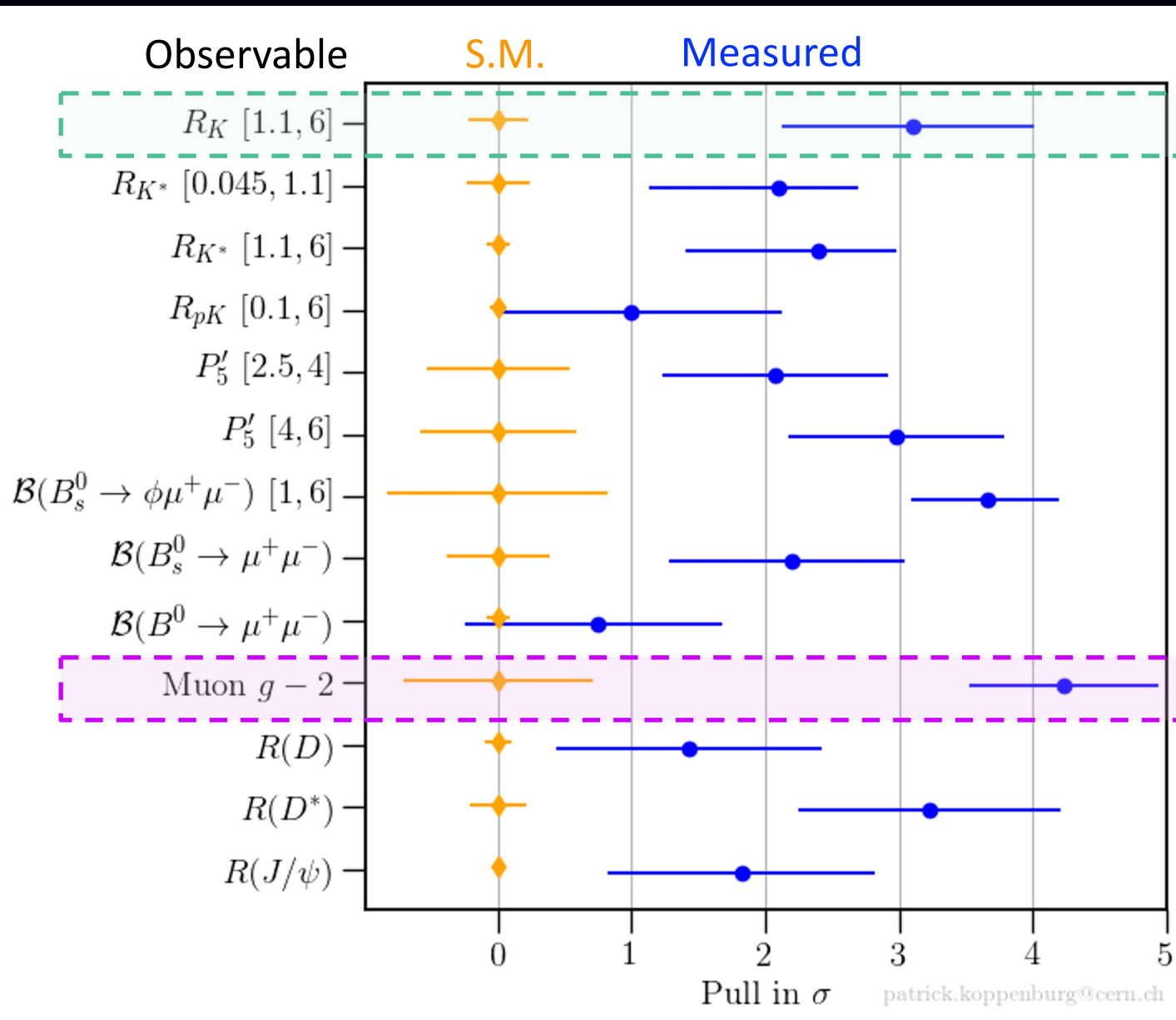
LHCb: Vervallen B-deeltjes hetzelfde naar *elektronen* en naar *muonen*?



December 2022:
verbeterde meting
van de *elektronen*...



Maar bij het muon kloppen steeds meer metingen niet!



LHCb resultaat

Fermilab g-2 resultaat

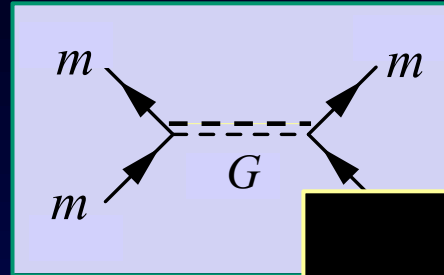
De puzzel wordt steeds dieper.

Vier(?) fundamentele natuurkrachten

Zwaartekracht:

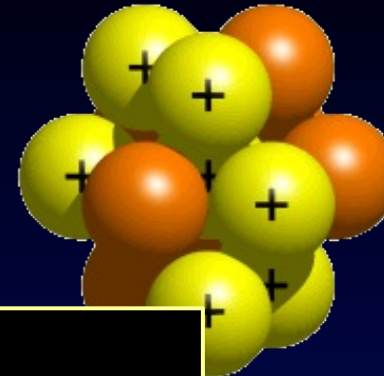


Quantum
Graviton exchange?



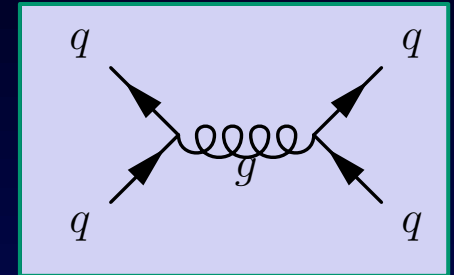
Werkt op alle deeltjes met massa

Sterke kernkracht:



alle quarks

Quantum
gluon exchange:



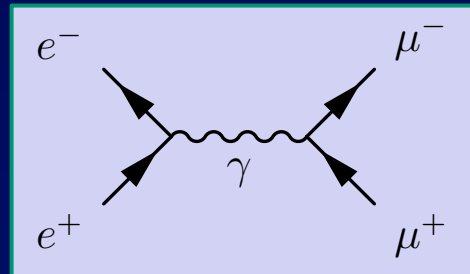
+ ????

Vijfde kracht?

Elektromagnetisme:

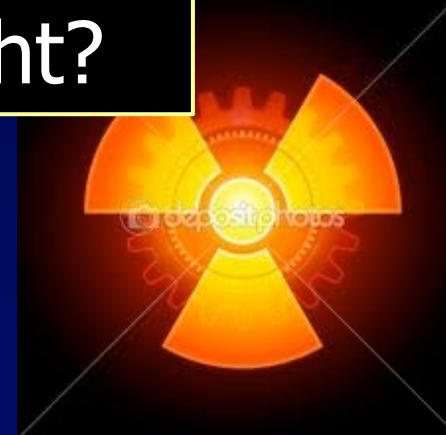


Quantum
photon exchange



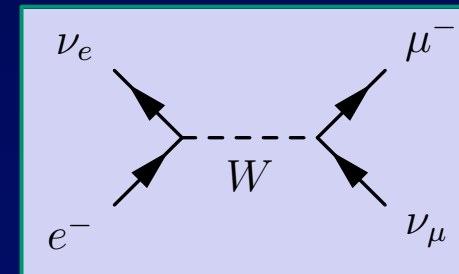
Werkt op alle elektrisch geladen deeltjes

Wakernkracht:

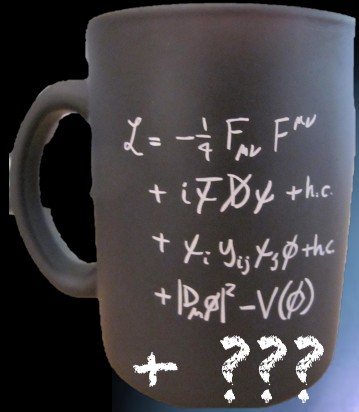


Werkt op alle deeltjes

Quantum
W, Z exchange:



Conclusie: Hoe is de antimaterie verdwenen in het universum?



Door een vijfde kracht in de Big Bang?!

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

50.000001%

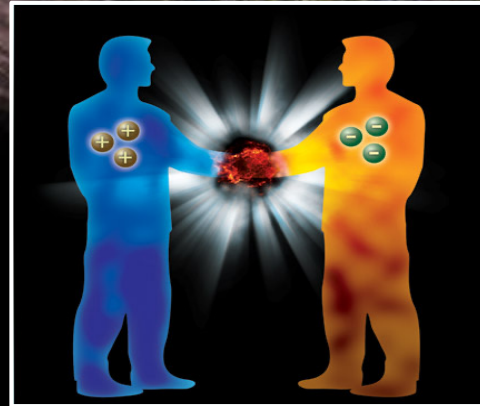
Antiquarks

\bar{t} top	\bar{c} charm	\bar{u} up
\bar{b} bottom	\bar{s} strange	\bar{d} down

Antileptons

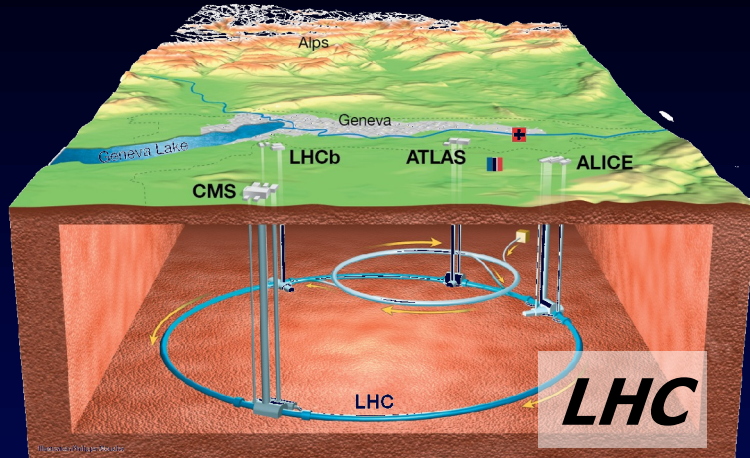
$\bar{\nu}_\tau$ tau neutrino	$\bar{\nu}_\mu$ muon neutrino	$\bar{\nu}_e$ electron neutrino
$\bar{\tau}$ tau	$\bar{\mu}$ muon	\bar{e} electron

49.999999%

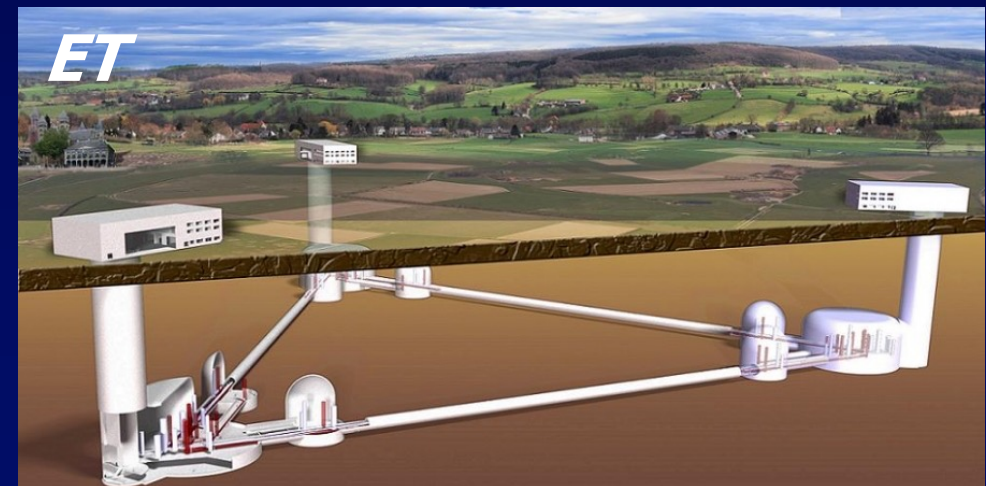
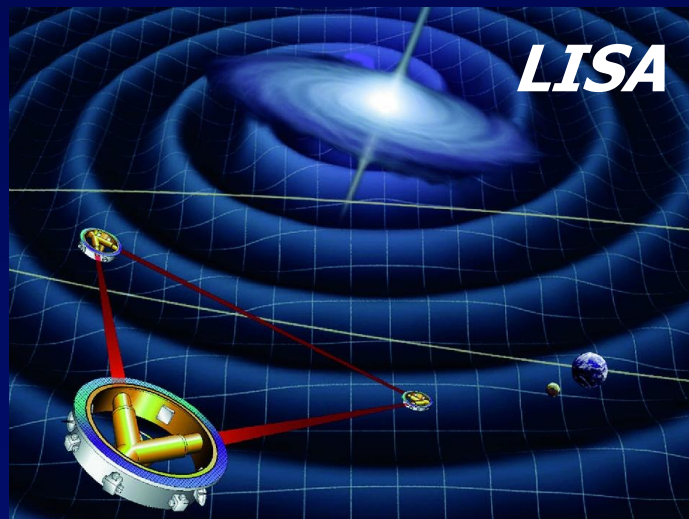


Toekomst: "Cirkels en Driehoeken"

Deeltjesversnellers: fysica van de Big Bang ...

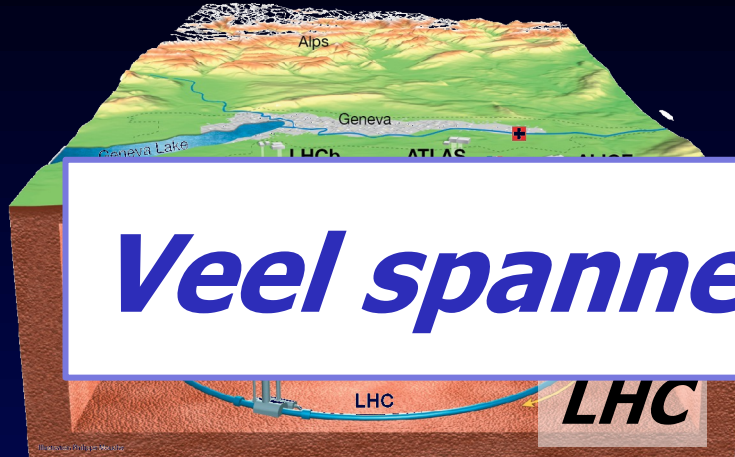


Gravitatie-detectoren: luisteren naar de Big Bang...



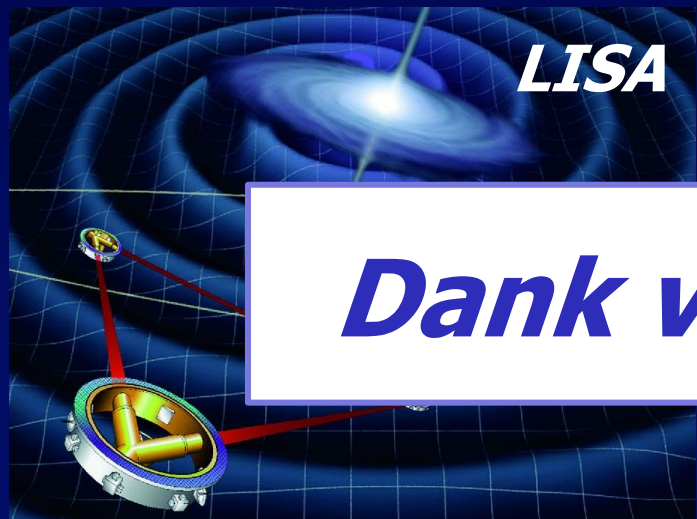
Toekomst: "Cirkels en Driehoeken"

Deeltjesversnellers: fysica van de Big Bang ...



Veel spannend onderzoek onderweg

Gravitatie-detectoren: luisteren naar de Big Bang...



Dank voor uw aandacht!

Donkere Materie



Zichtbare "baryonische" materie



Spiraalarm rotatie en gravitationele lenzen

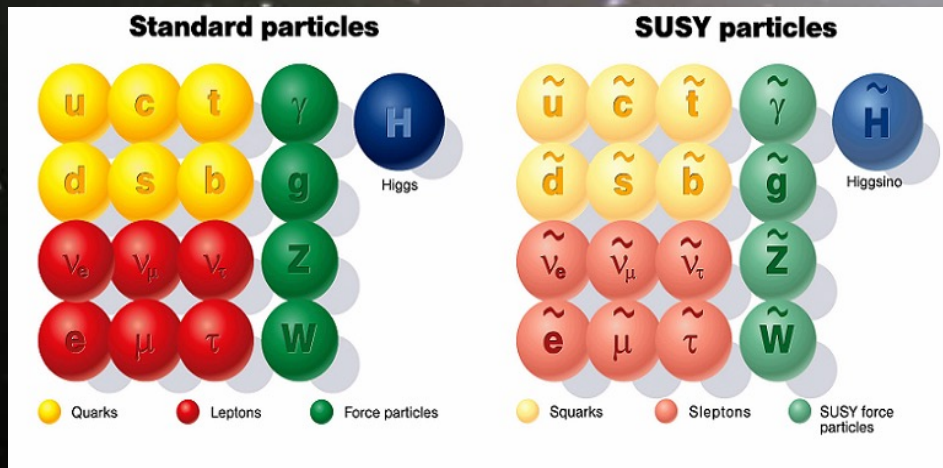


Gewone materie verstrooit en blijft achter
Donkere materie beweegt ongestoord verder

Donkere Materie

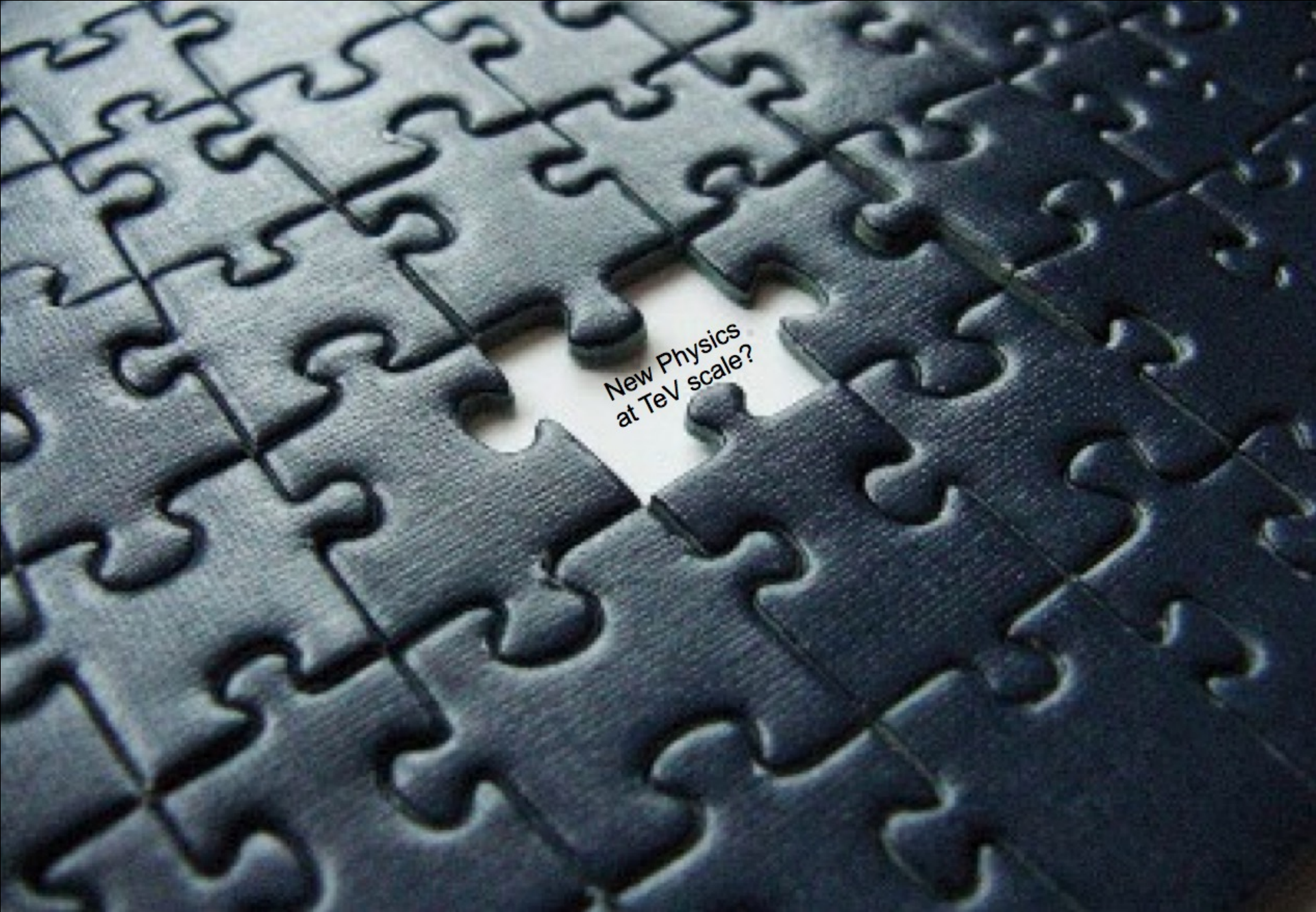
He H

donkere energie & donkere materie





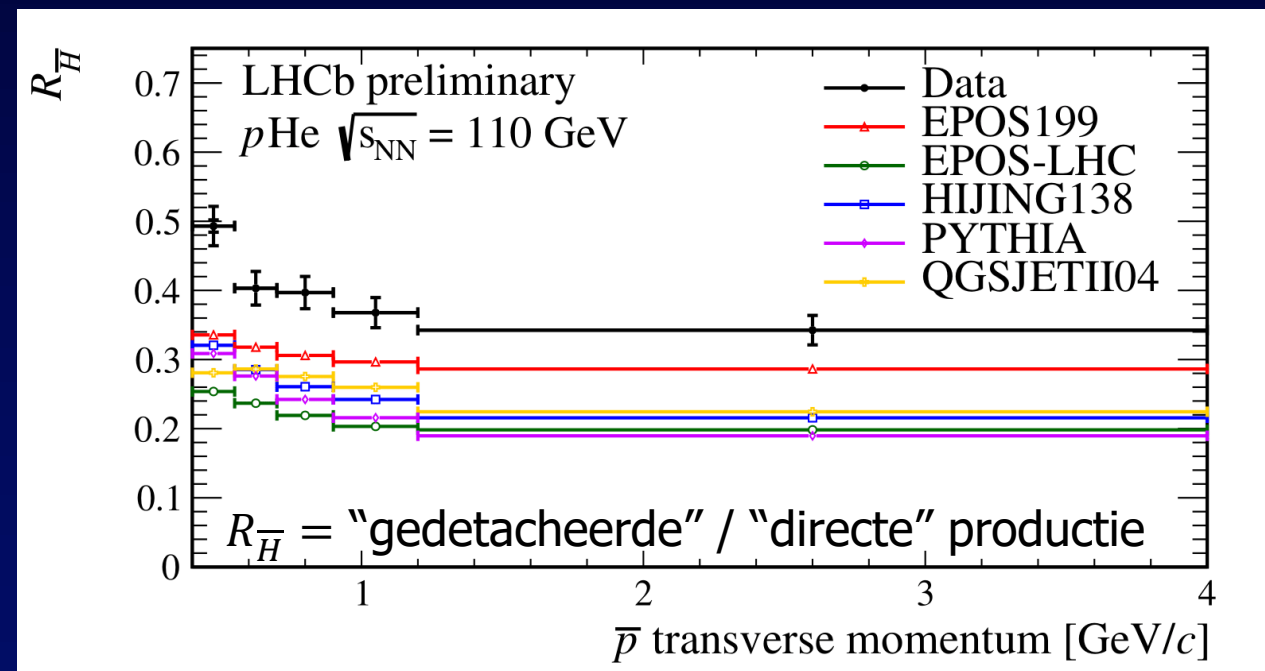
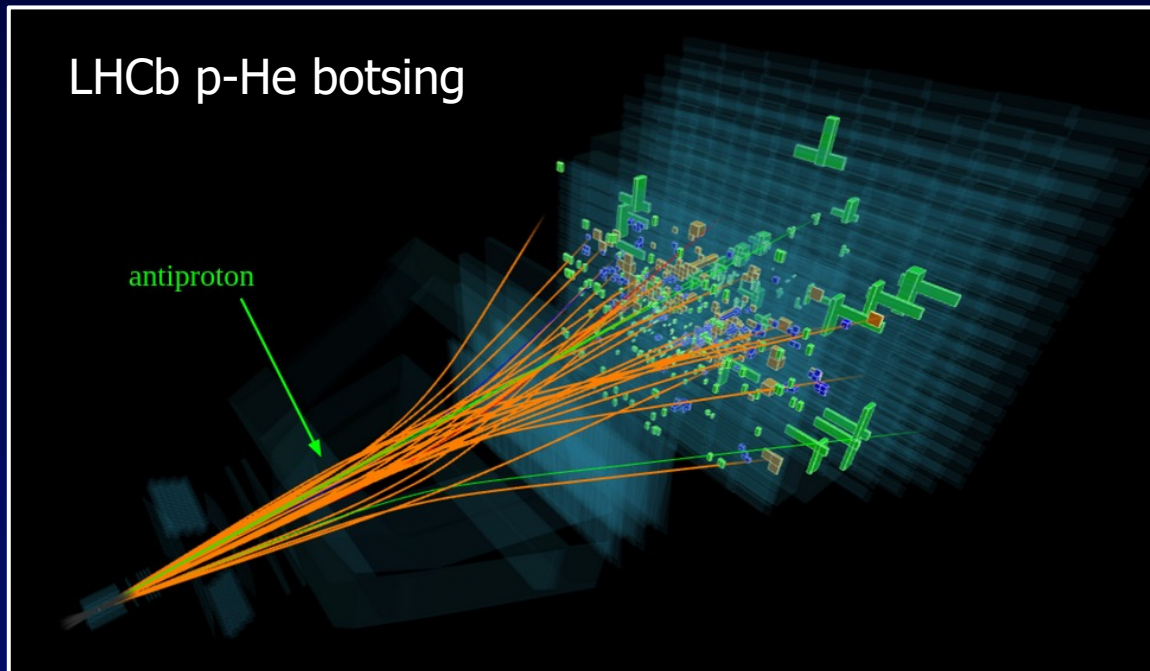
“The Dark Side rules the Universe”



New Physics
at TeV scale?

Antiproton productie (7 April, 2022)

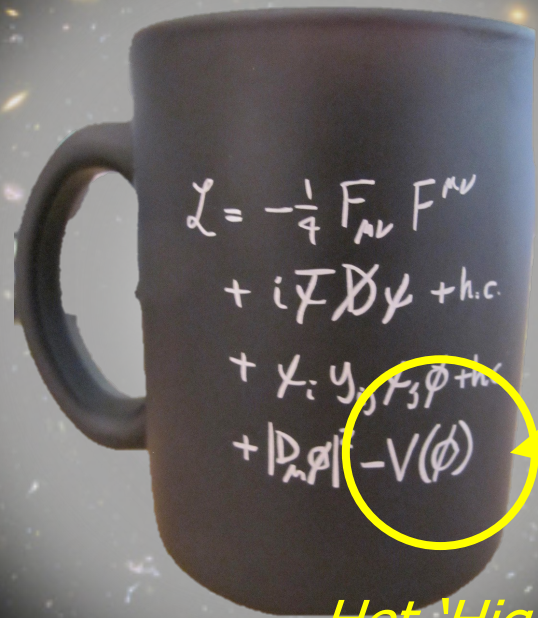
- AMS en Pamela experimenten meten antimaterie in de ruimte
- Antimaterie wordt ook gemaakt bij botsingen van protonen met gewone materie deeltjes (bv He)
 - De "gewone" antiproton (\bar{H}) productie is gemeten bij LHCb



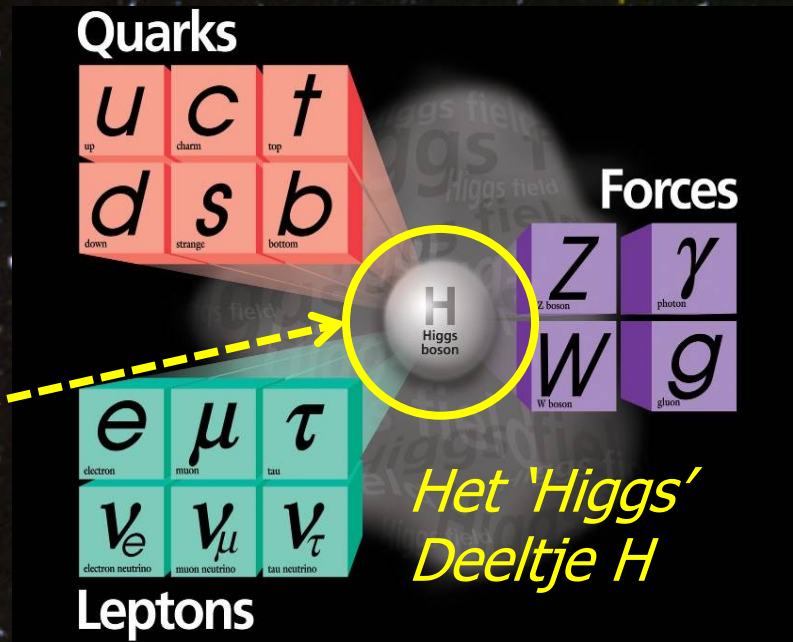
Het Standaard Model

"De formules"

"De bouwstenen van de natuur"



Het 'Higgs' Veld ϕ



Higgs Veld ϕ en Deeltje H

- Higgs veld ϕ is uniform, moeilijk waar te nemen.
- Higgs-boson deeltje H is "quantum-golf" van het veld.
- Massa ontstaat door interactie van materie deeltjes met het Higgs veld.

- Vergelijk:
 - Een foton is een kwantum van elektromagnetisch veld
 - Watergolf

ϕ

Higgs veld



H

Higgs deeltje
een "veld-kwantum"



Het Vacuum



Twee weken later in Fermilab ... muon magnetisch moment?!

Het Standaardmodel lijkt niet te voldoen
 → Een nieuwe quantum kracht nodig?!

