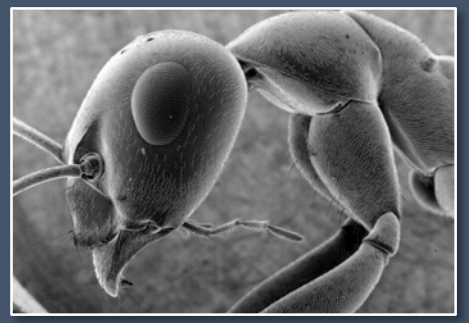
Elementaire deeltjes en velden

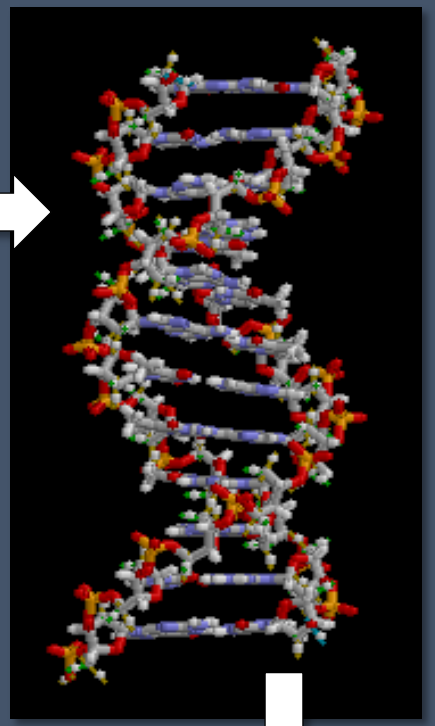
een sub-hoofdstuk in de geschiedenis ‘Van het Universum tot de Mens’
van Ronney de Abreu

Jos Engelen,
Professor emeritus University of Amsterdam / Nikhef

Op zoek naar de kleinste bouw-stenen van de natuur



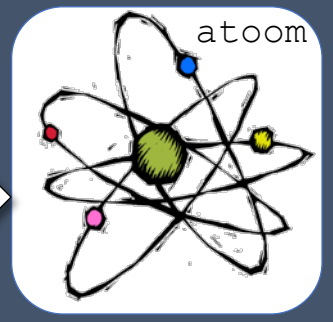
20 Å



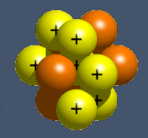
DNA

Waarom is DNA ‘rechtshandig’?
Mogelijk is er een verband met elementaire deeltjes…

1 Å



0,0001 Å



atoomkern

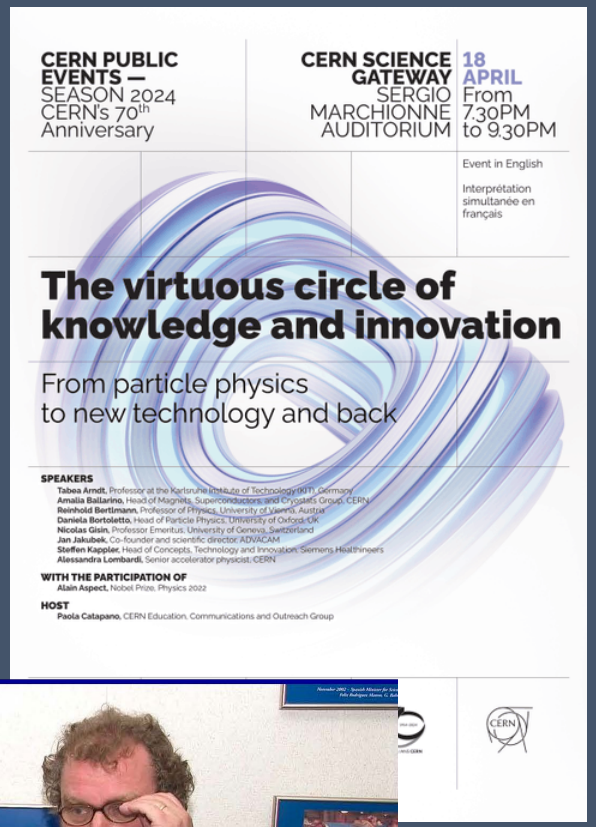
Verdere substructuur?
Ja (kern) en nee (elektron)

1 Å = 0,0000000001 m

met dank aan Ivo van Vulpen

Gedreven door nieuwsgierigheid… en al doende de grenzen van ons ‘kennen’ en van ons ‘kunnen’ verleggend en aldus ‘meetellen’ in de wereld (van internationale samenwerking) en verworven kennis en kunde beschikbaar maken voor samenleving en het bedrijfsleven.

World Wide Web, vacuümtechnolgie, (medische) beeldvorming, radiotherapie (ook: hadrontherapie), etc.



CERN mag zich verheugen in steun v.d. (internationale) politiek

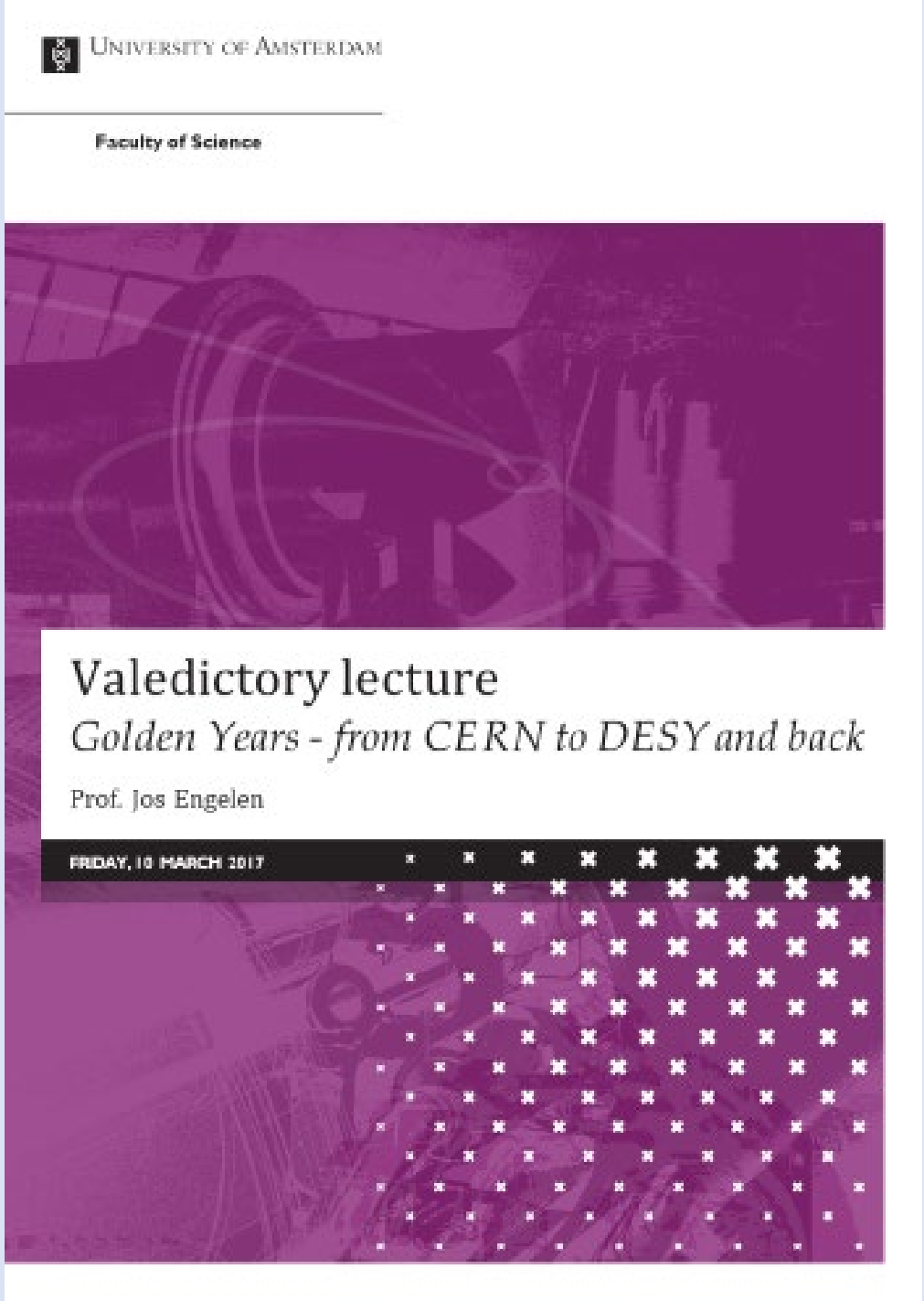
CERN welcomes

Voor extra achtergrondmateriaal zie:

Afscheidscollege
en enkele recente artikelen (o.a. Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde over ‘Hoe Quarks hun entree maakten in ons wereldbeeld via kosmische stralen en de eerste protonversnellers’)
hier:

[Homepage Jos J. Engelen (nikhef.nl)]

https://www.nikhef.nl/~h02/



Atomaire afmetingen schatten met behulp van getal van Avogadro 6 10^{23}

(Hoe kennen we dit getal? We moeten ergens beginnen…)

1 m^3 vloeibare waterstof weegt 71 kg

1 m^3 bevat dus 71/2 x10^3x6 10^{23} moleculen

dan is de straal van 1 molecuul de derdemachtswortel
uit 3/ (4πx71/2x 600 10^{24}) kubieke meter is

1,4 10^{-10} meter is

~1 Å

De elementaire-deeltjesfysica heeft een periode van grote bloei gekend de afgelopen 60 jaar

1964 – introductie **quarks** Gell-Mann, Zweig
1964 – 'Higgs' theorie (!) (Higgs; Brout, Englert)
1968 – Charpak vindt Multiwire Proportional Chambers uit; NP 1992
1969 – **elektron** – quark verstrooiing SLAC
1971 - 't Hooft, Veltman bewijzen renormeerbaarheid relativistische quantumvelden theorie met ijkinvariantie van massieve ijkvelden (**W, Z bosonen**)
1973 – QCD, quantum-chromodynamica (Gell-Mann et al)
1973 – ontdekking neutrale stromen, CERN (geen Nobelprijs)
1974 - ontdekking **J/psi (charm quarks)** Brookhaven, SLAC
1977 – ontdekking **Ypsilon (beauty quarks)** Fermilab
1989 – start LEP, elektron-**positron** b.b., CERN; aanleiding tot NP 't H., V. 1999
1991 – start HERA, elektron/positron – proton b.b., DESY, veel unieke kennis over o.a. protonstructuur, onmisbaar voor analyse LHC
1983 – ontdekking W, Z; CERN (NP, Rubbia, V.d. Meer 1984)
1995 – 0ntdekking **top-quark**, Fermilab
2012 – Ontdekking **Higgs-boson, CERN**
(nachtelijk telefoontje: 'I think we've got the object')

1967 – eerstejaars S3, later N4
1967 – college prof. Janner: $E=Mc^2$
1971 – begin afstudeerstage exp. Hef
1972 – zomerstage CERN
1973 – promotieonderzoek, 'zachte' sterke wisselwerkingen, bellenvat, CERN
1979 – promotie; naar CERN; 90 GeV **foton**bundel, foton-quark verstrooiing, meting quarklading, studie quark-**gluon** dynamica (QCD)
1985 – naar Nikhef - Amsterdam; elektron (**positron**) – proton b.b. HERA, DESY; (2000 – astrodeeltjes; 2002 – directeur)
2004 – naar CERN directie
2008 – succesvolle start LHC, na paar dagen ontploffing alleen mat. schade

2009 – naar NWO, Den Haag (was al gepland vóór de ontploffing

Table 1.1

REST MASSES OF THE MOST STABLE ELEMENTARY PARTICLES

Particle	Symbol*	Rest mass, Mev
Photon	$\gamma(\bar{\gamma} \equiv \gamma)$	0
Neutrino	$\nu_e, \nu_\mu(\bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu)$	0
Electron	$e(e^+)$	0.51
Mu meson	$\mu^-(\mu^+)$	106
Pi meson	$\pi^+(\pi^-)$	140
	$\pi^0(\overline{\pi^0} \equiv \pi^0)$	135
K meson	$K^+(K^-)$	494
	$K^0(\overline{K^0})$	498
Eta meson	$\eta^0(\overline{\eta^0} \equiv \eta^0)$	548
Proton	$p(\bar{p})$	938.2
Neutron	$n(\bar{n})$	939.5
Λ Hyperon	$\Lambda(\bar{\Lambda})$	1115
Σ Hyperon	$\Sigma^+(\overline{\Sigma^-})$	1192
	$\Sigma^0(\overline{\Sigma^0})$	1194
	$\Sigma^-(\overline{\Sigma^+})$	1197
Ξ Hyperon	$\Xi^0(\overline{\Xi^0})$	1310
	$\Xi^-(\overline{\Xi^+})$	1320
Ω Hyperon	$\Omega^-(\overline{\Omega^+})$	1676

* Antiparticle symbol in parenthesis.

1.10 Velocity Addition

One of the postulates of special relativity states t
free space has the same value for all observers, rega
tion. But "common sense" tells us that, if we thr
sec from a car moving at 80 ft/sec, the ball's spee
130 ft/sec, the sum of the two speeds. Hence we
light emitted in a frame of reference S' in the
velocity v relative to another frame S will have a s
in S, contradicting the above postulate. "Commor
as a guide in science than it is elsewhere, and we

Uit: Concepts of Modern Physics (Beiser, Revised Edition, **1967**)

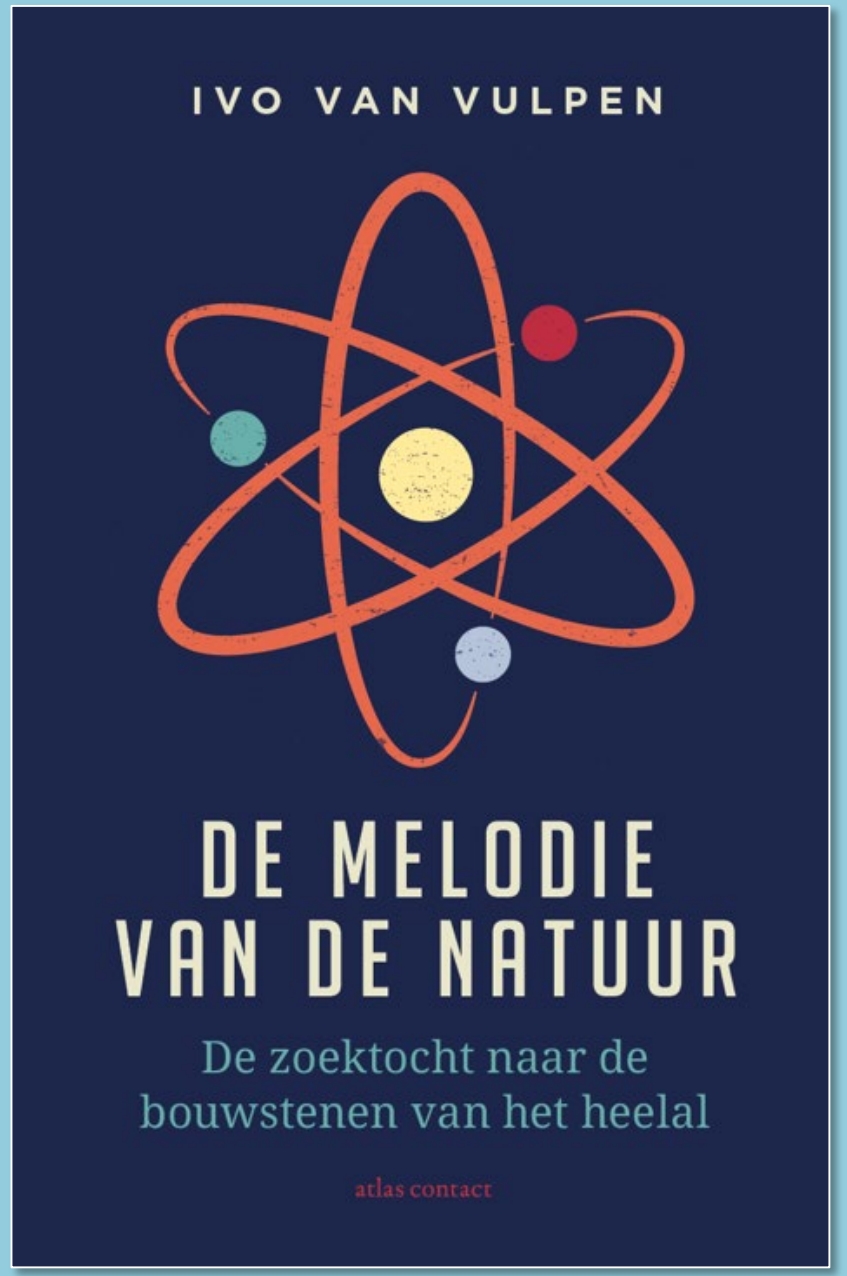
De elementaire-deeltjesfysica heeft een periode van grote bloei gekend de afgelopen 60 jaar

1964 – introductie **quarks** Gell-Mann, Zweig
1964 – 'Higgs' theorie (!) (Higgs; Brout, Englert)
1968 – Charpak vindt Multiwire Proportional Chambers uit; NP 1992
1969 – **elektron** – quark verstrooiing SLAC
1971 - 't Hooft, Veltman bewijzen renormeerbaarheid relativistische quantumvelden theorie met ijkinvariantie van massieve ijkvelden (**W, Z bosonen**)
1973 – QCD, quantum-chromodynamica (Gell-Mann et al)
1973 – ontdekking neutrale stromen, CERN (geen Nobelprijs)
1974 - ontdekking **J/psi (charm quarks)** Brookhaven, SLAC
1977 – ontdekking **Ypsilon (beauty quarks)** Fermilab
1989 – start LEP, elektron-**positron** b.b., CERN; aanleiding tot NP 't H., V. 1999
1991 – start HERA, elektron/positron – proton b.b., DESY, veel unieke kennis over o.a. protonstructuur, onmisbaar voor analyse LHC
1983 – ontdekking W, Z; CERN (NP, Rubbia, V.d. Meer 1984)
1995 – 0ntdekking **top-quark**, Fermilab
2012 – Ontdekking **Higgs-boson, CERN**
(nachtelijk telefoontje: 'I think we've got the object')

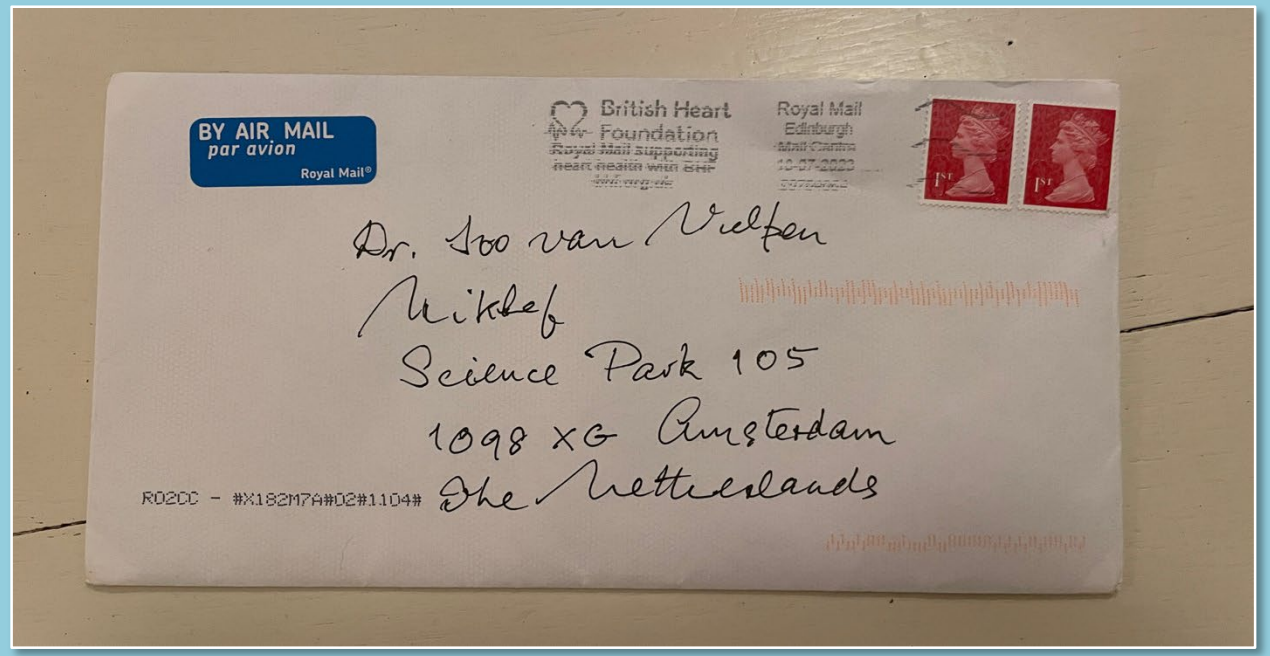
1967 – eerstejaars S3, later N4
1967 – college prof. Janner: $E=Mc^2$
1971 – begin afstudeerstage exp. Hef
1972 – zomerstage CERN
1973 – promotieonderzoek, 'zachte' sterke wisselwerkingen, bellenvat, CERN
1979 – promotie; naar CERN; 90 GeV **foton**bundel, foton-quark verstrooiing, meting quarklading, studie quark-**gluon** dynamica (QCD)
1985 – naar Nikhef - Amsterdam; elektron (positr.) – proton b.b. HERA, DESY; (2000 – astrodeeltjes; 2002 – directeur)
2004 – naar CERN directie
2008 – succesvolle start LHC, na paar dagen ontploffing alleen mat. schade

2009 – naar NWO, Den Haag (was al gepland vóór de ontploffing

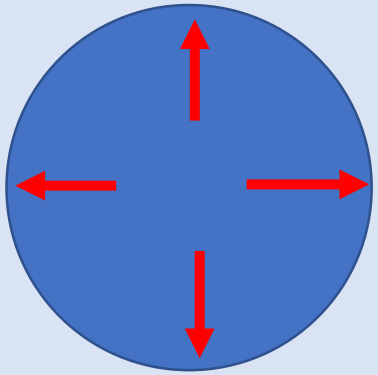
Aankondiging ontdekking Higgs-boson, CERN auditorium, 4 juli, 2012
Het sluitstuk van het Standaard Model van de elementaire deeltjes en hun wisselwerkingen



Letter from Peter Higgs
'with a few remarks'



Waar deze voordracht **niet** over zal gaan is de Big Bang, wat daarna kwam en wat komen gaat…



ontstaan van de elementaire deeltjes en hun wisselwerkingen

13,8 miljard jaar geleden
hete ‘oersoep’

expansie
afkoeling

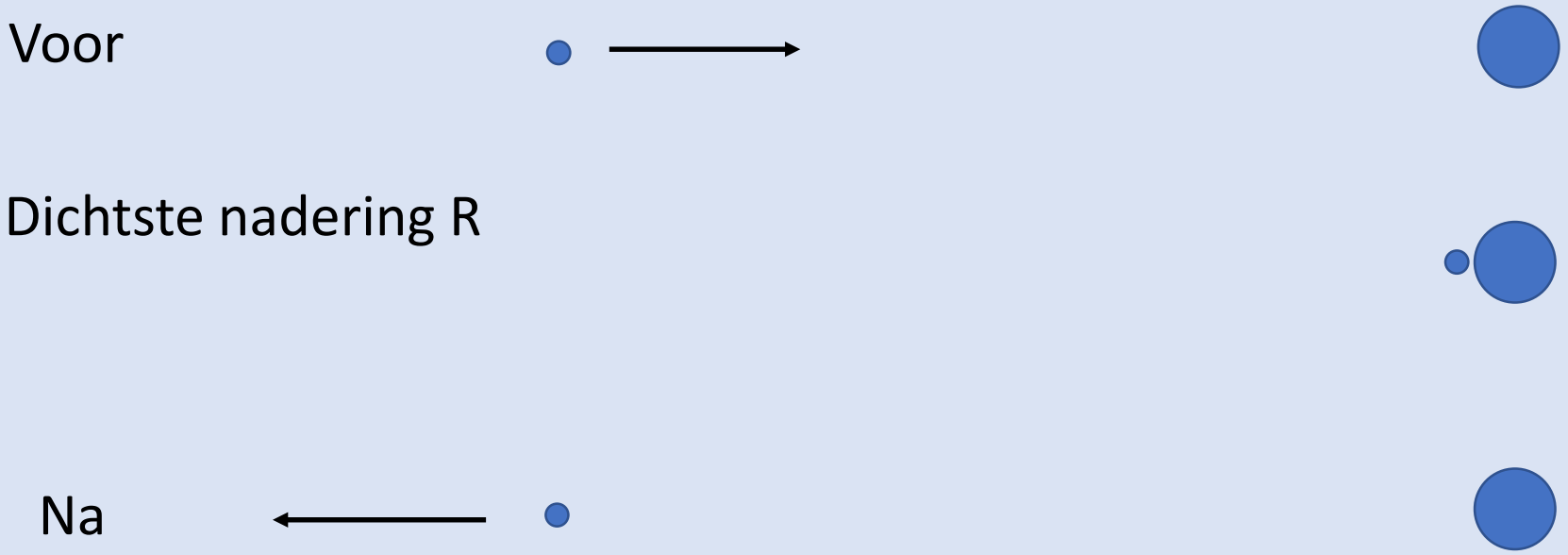
nu

2,7K

(((van ‘hoe’ naar ‘waarom’ – antropisch principe)))

‘Het begin’ ± 1910

Rutherford-verstrooiing van **alpha-deeltje** (Z=2) aan **goudkern** (Z=79)



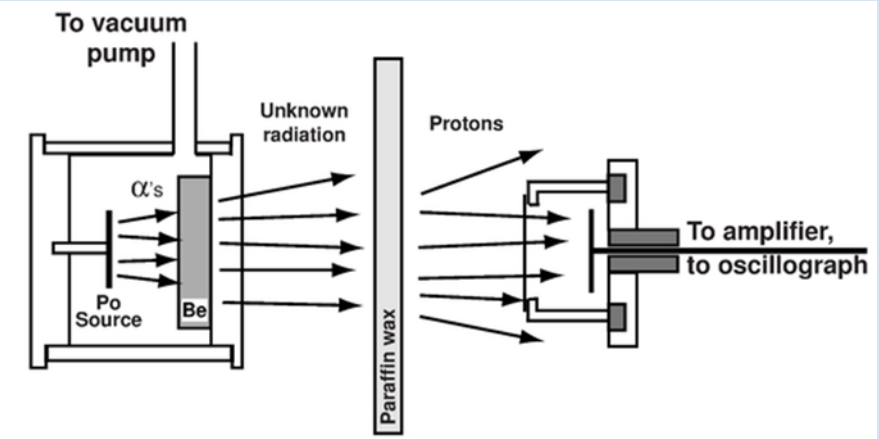
R volgt uit: potentiele energie ~ 1/R = kinetische energie (bekend)

$R \sim 10^{-14}$ m

Elektron (Thomson 1897, kathodestralen; Lorentz 1897, Zeeman effect)

Proton (Goldstein < 1897, ‘anodestralen’)

Neutron (Chadwick 1932)

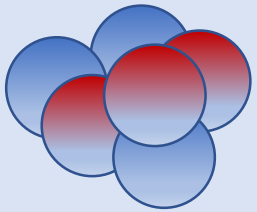


Welke kracht bindt proton en neutronen tot atoomkernen?
‘p en n zijn twee toestanden van hetzelfde deeltje in een nieuwe abstracte ruimte’ (Heisenberg, 1932) – Isospin

Overspringend deeltje (Yukawa, 1935) → 12 jaar later wordt het pion (**π meson**) ontdekt

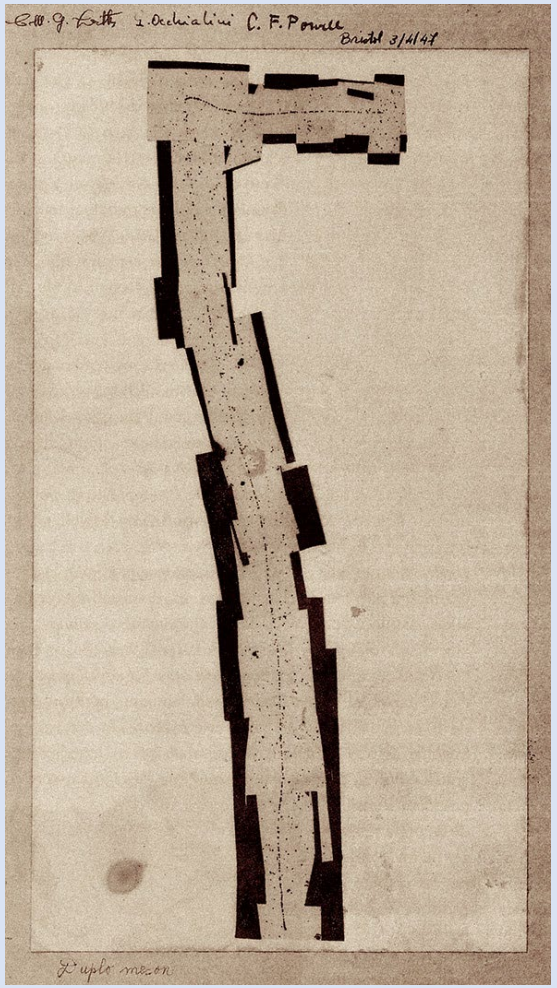
De ontdekking van pionen in kosmische stralen (1947) en bij de eerste protonversnellers (jaren ‘50; CERN Protonsynchrotron 1959)

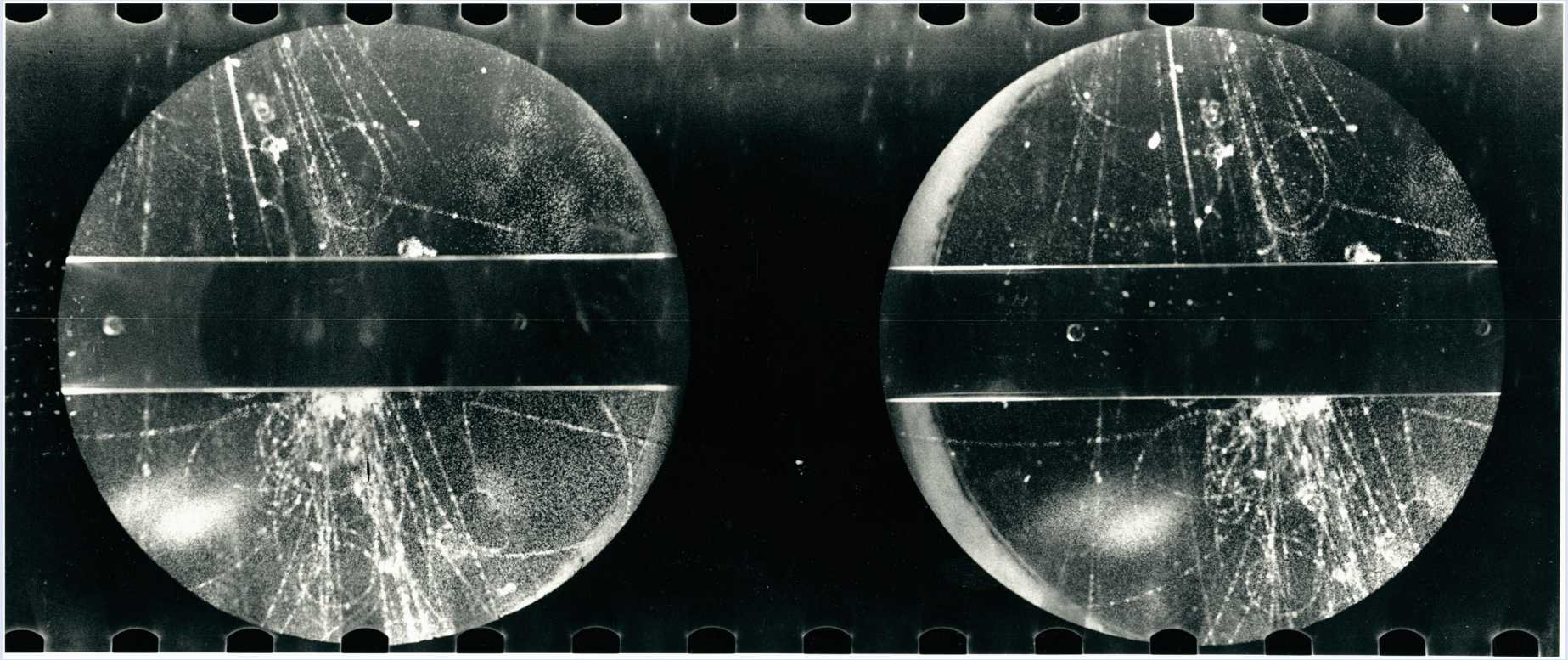
Atoommodel Rutherford 1911;
Bohr 1913



Kern ^{6}Li

Elekton: zou op de schaal van deze figuur 300 meter verderop moeten zitten





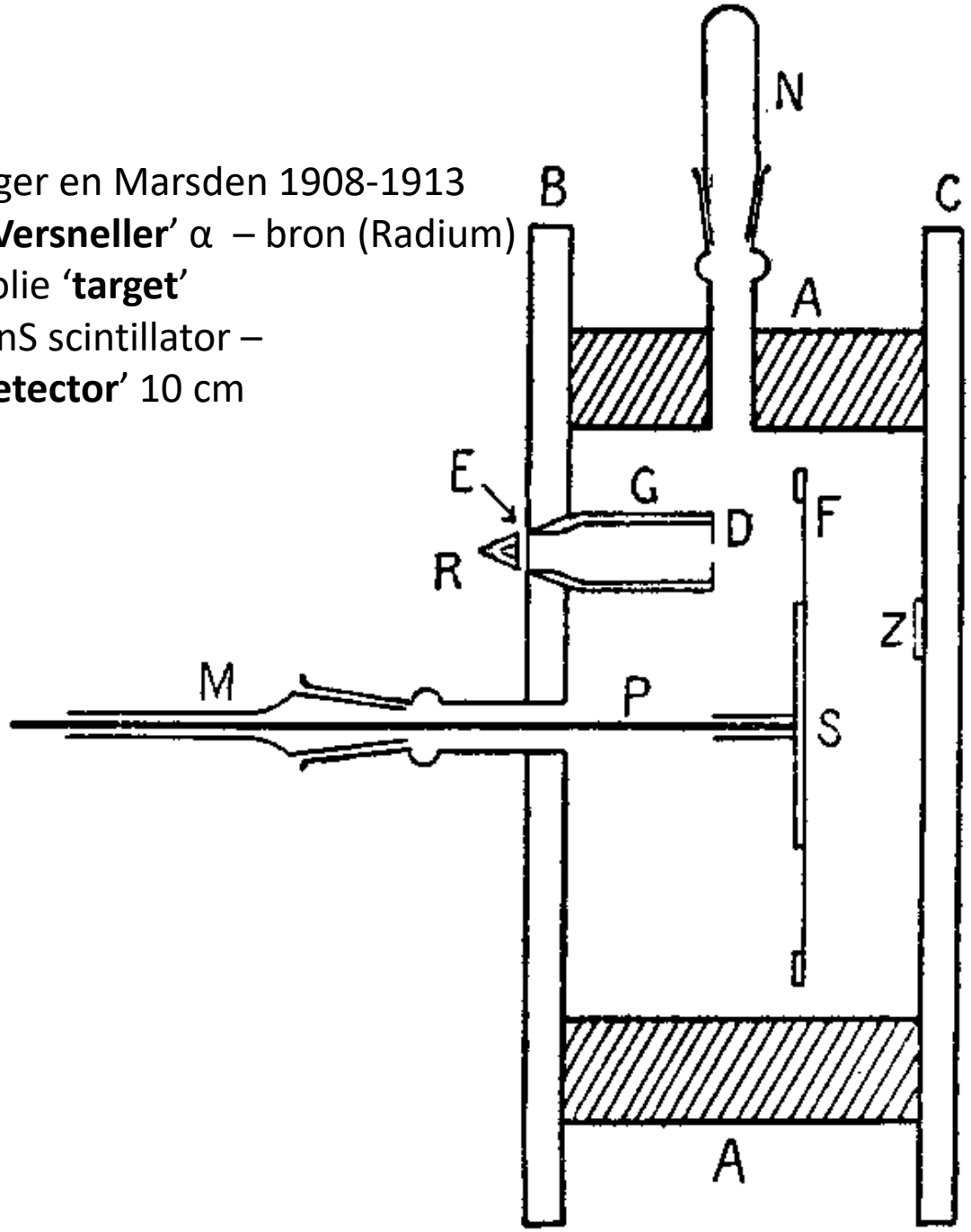
Expansie Nevelvat

Fotografische emulsie

Ontdekking van ‘pion’ en ‘kaon’, allebei 1947, allebei ‘single event discoveries’.

In de natuurwetenschappen heeft het experiment vaak het eerste maar **altijd** het laatste woord!

Geiger en Marsden 1908-1913
R: ‘**Versneller**’ α – bron (Radium)
F: folie ‘**target**’
Z: ZnS scintillator –
- ‘**detector**’ 10 cm



Straks: ATLAS ~2010
LHC: ‘**Versneller**’ 27 km)
‘**target**’ botsende bundels microns
ATLAS – ‘**detector**’ 50 m
500 MSF

Verstrooiingsexperimenten:

- Hoe hoger de energie van de bundel, des te kleiner de afstand waarop bundel en doelwit (‘fixed target’) of bundel en bundel (‘colliding beams’) elkaar kunnen naderen → onderzoek van structuur der materie tot op de kleinste schaal

- Hoe hoger de energie, des te zwaarder de deeltjes die in de verstrooiingsreactie geproduceerd kunnen worden: $E=Mc^2$

Onzekerheidsrelaties (quantummechanica): 10^{-19} meter ~ 1 TeV = 1 miljard kilo-elektronvolt
1 TeV is ook 1000 protonmassa’s, het zwaarste elementaire deeltje dat we kennen is de top quark, ongeveer 175 proronmassa’s

De energie van de Large Hadron Collider is 13 TeV

De ontdekking van het pion, net als proton en neutron de **sterke wisselwerking** hebbend, markeert (voor mij) het begin van de hoge-energiefysica. (Hoe weten we dat ook pionen sterk wisselwerken?)

Meer ‘sterk wisselwerkende’ deeltjes werden ontdekt, in kosmisch stralen en, heel veel , bij protonversnellers. (M.b.v. fotografische emulsies, nevelvaten, bellenvaten)

Behalve ‘isospin’ bleek er een tweede eigenschap (quantumgetal; behouden grootheid) karakteristiek voor deze nieuwe deeltjes, ‘vreemdheid’.

‘Ad hoc’ ordening in ‘supermultipletten’ – ‘etiketjes plakken’ of diepere betekenis?

‘Etiketjes plakken’ levert mooie plaatjes op → symmetrie (‘een groep’) → een onderliggende structuur: **quarks**

Even een stapje terug: de exploratie van wat kosmische stralen te bieden hadden leverde in 1932 de ontdekking van ‘**positronen**’ op. Positieve elektronen = ‘anti-materie’.

En (in 1936) van ‘**muonen**’ in hun gedrag lijkend op elektronen (d.w.z.
geen sterke wisselwerking) maar 200 x zo zwaar
(‘who ordered that?’, I.I. Rabi)

Even samenvatten:
we hebben nu proton, neutron (samen atoomkernen), elektron (samen met atoomkernen: atomen – meer hebben we niet nodig!). Er is meer: positron, muon (+,-).
En nog meer: pionen (+,-,0), en nog meer: kaonen, lambda, etc.

Kunnen we orde scheppen in deze chaos? Ja! Eerst etiketjes plakken!

Etiketjes:
isospin, **vreemdheid** voor deeltjes met de sterke wisselwerking

voor de ‘elektronachtige’ deeltjes (zoals muon) ‘**leptongeta**l’
deze deeltjes hebben de elektromagnetische wisselwerking
en ook de zwakke wisselwerking

Spin ‘intrinsiek’ impulsmoment (halftallig, heeltallig)

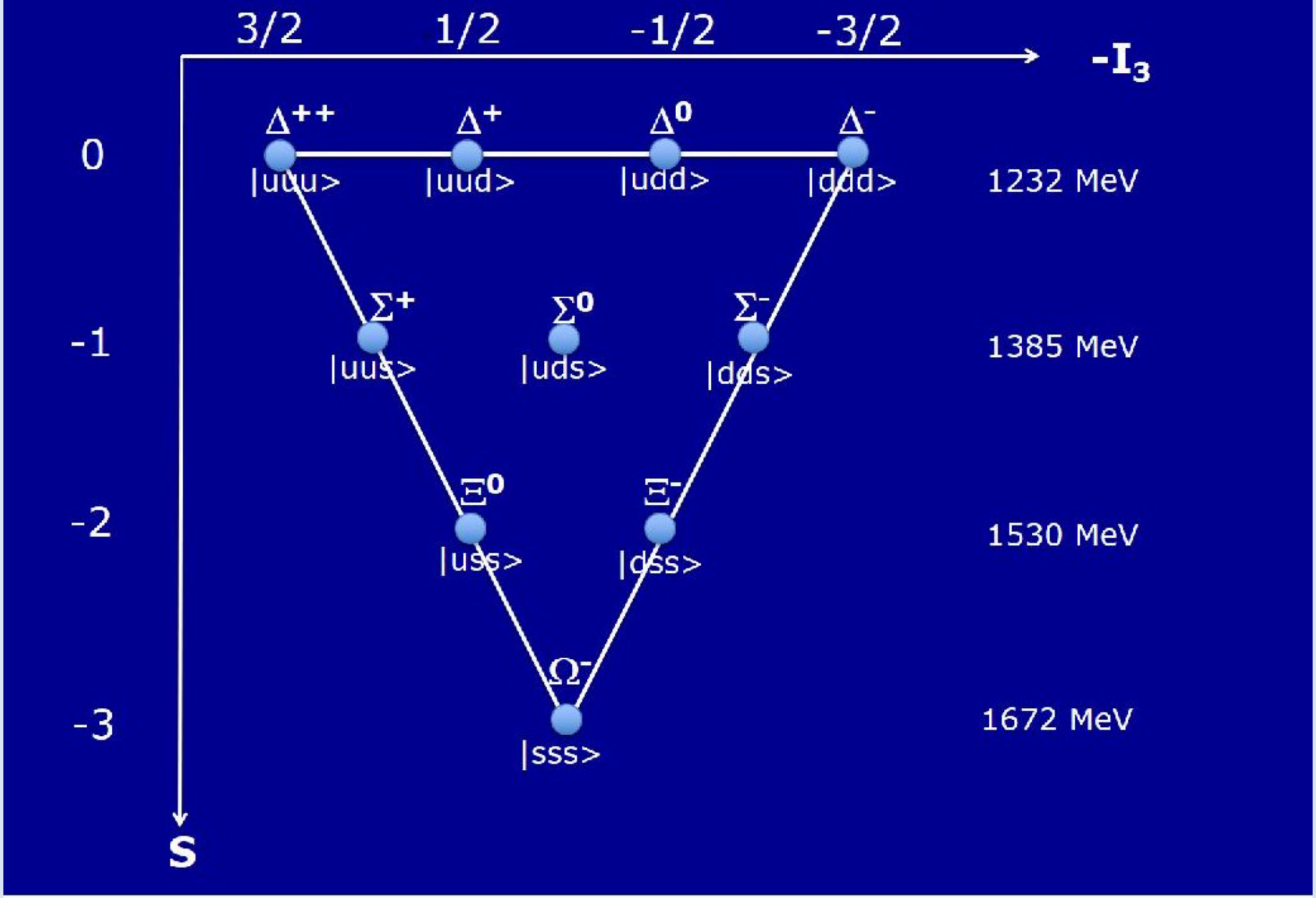
Lading

Massa (de massa van de elementaire deeltjes is heel verschillend,
dit is onbergrepen)

Wisselwerkingen tussen deeltjes vinden ook plaats via deeltjes:
foton, W boson, Z boson, gluon

Proton-achtige deeltjes:
drie quarks

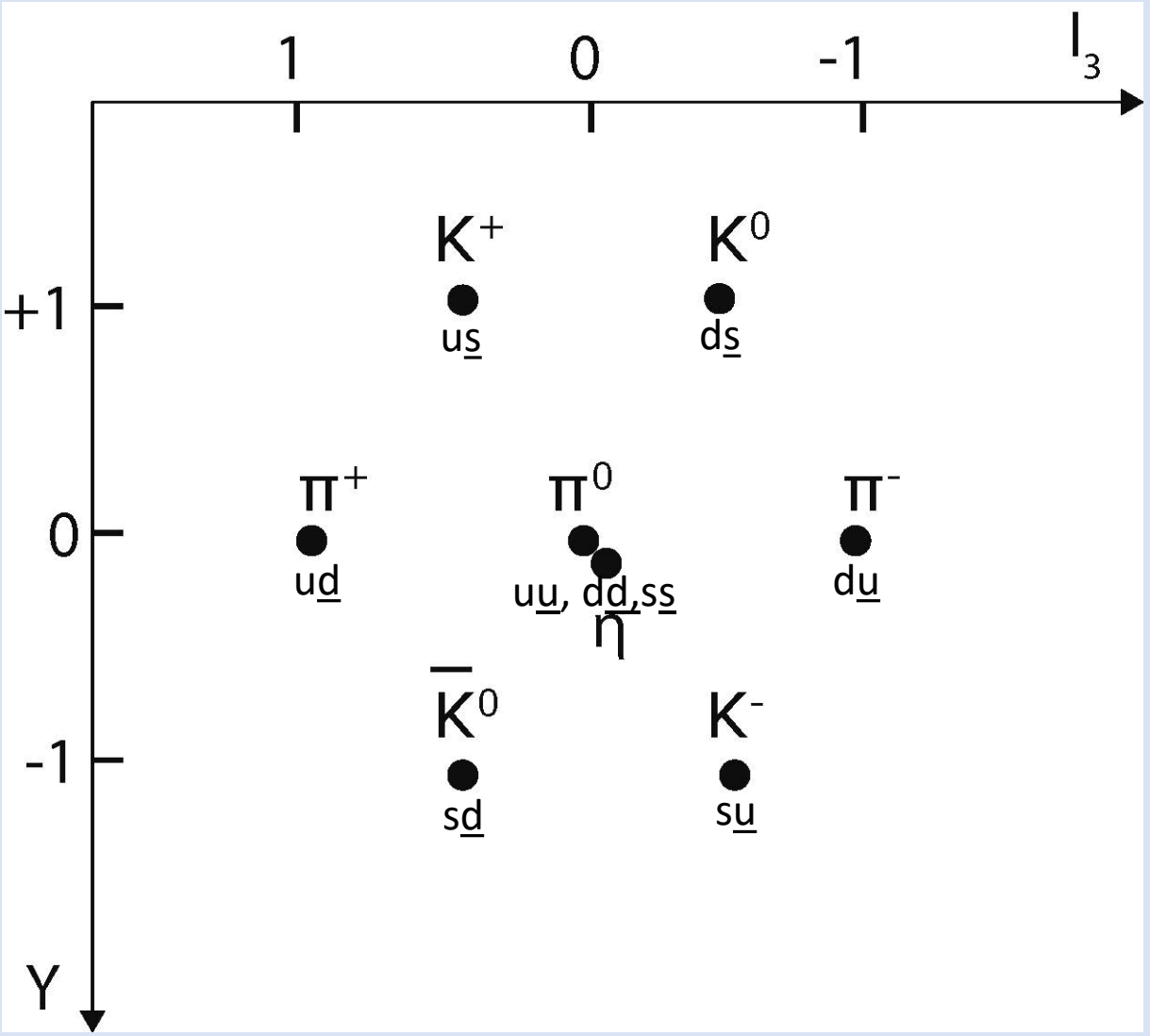
baryonen

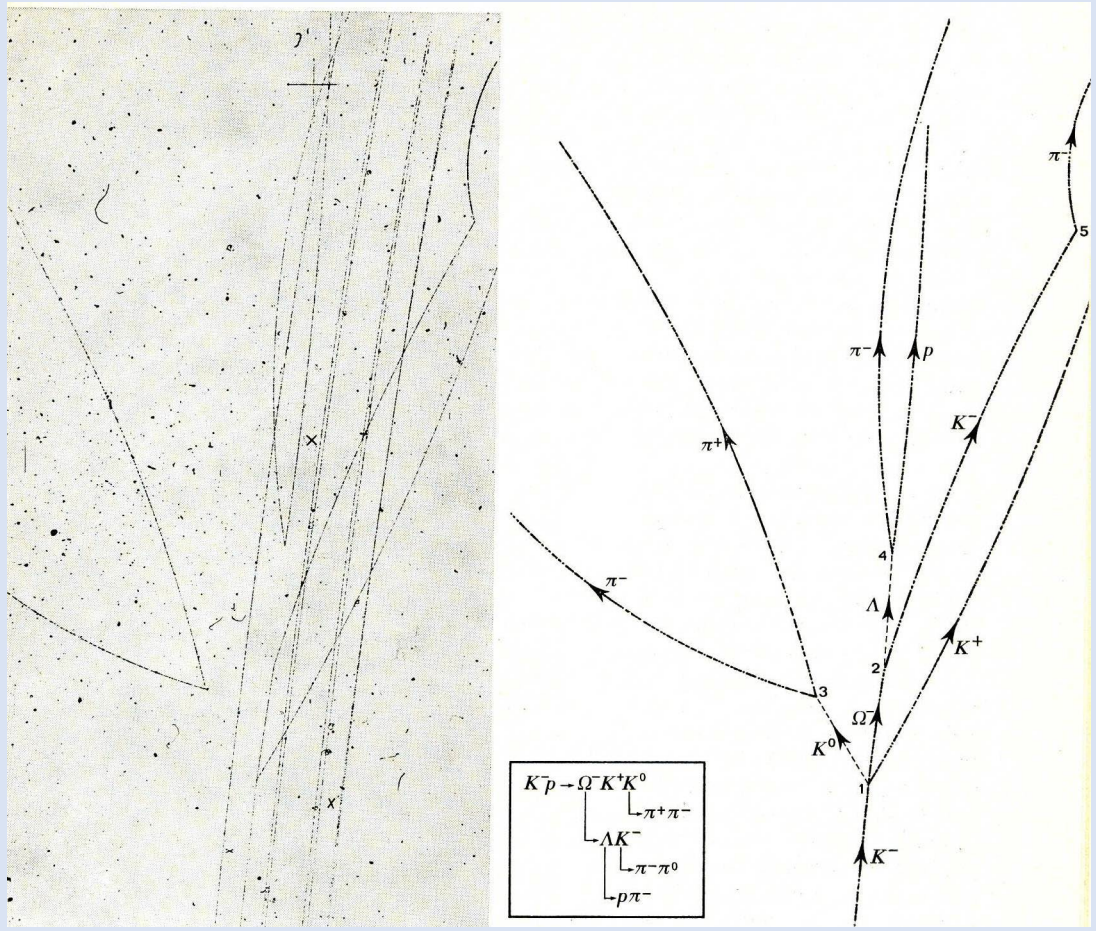


Pion-achtige deeltjes:
 quark-antiquark

mesonen

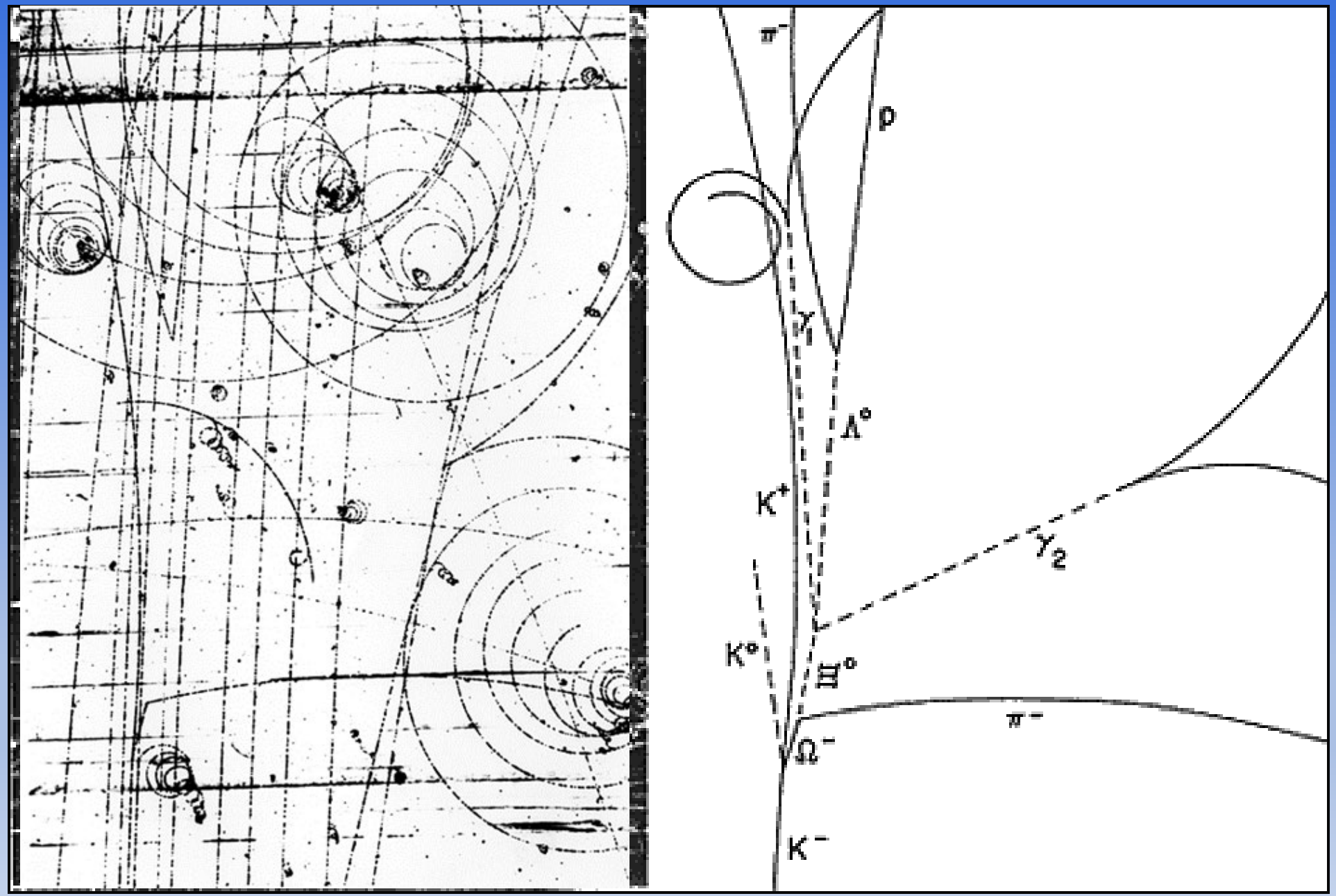
(antiquarks aangegeven met onderstreping, eigenlijk moet het streepje boven de letter staan)



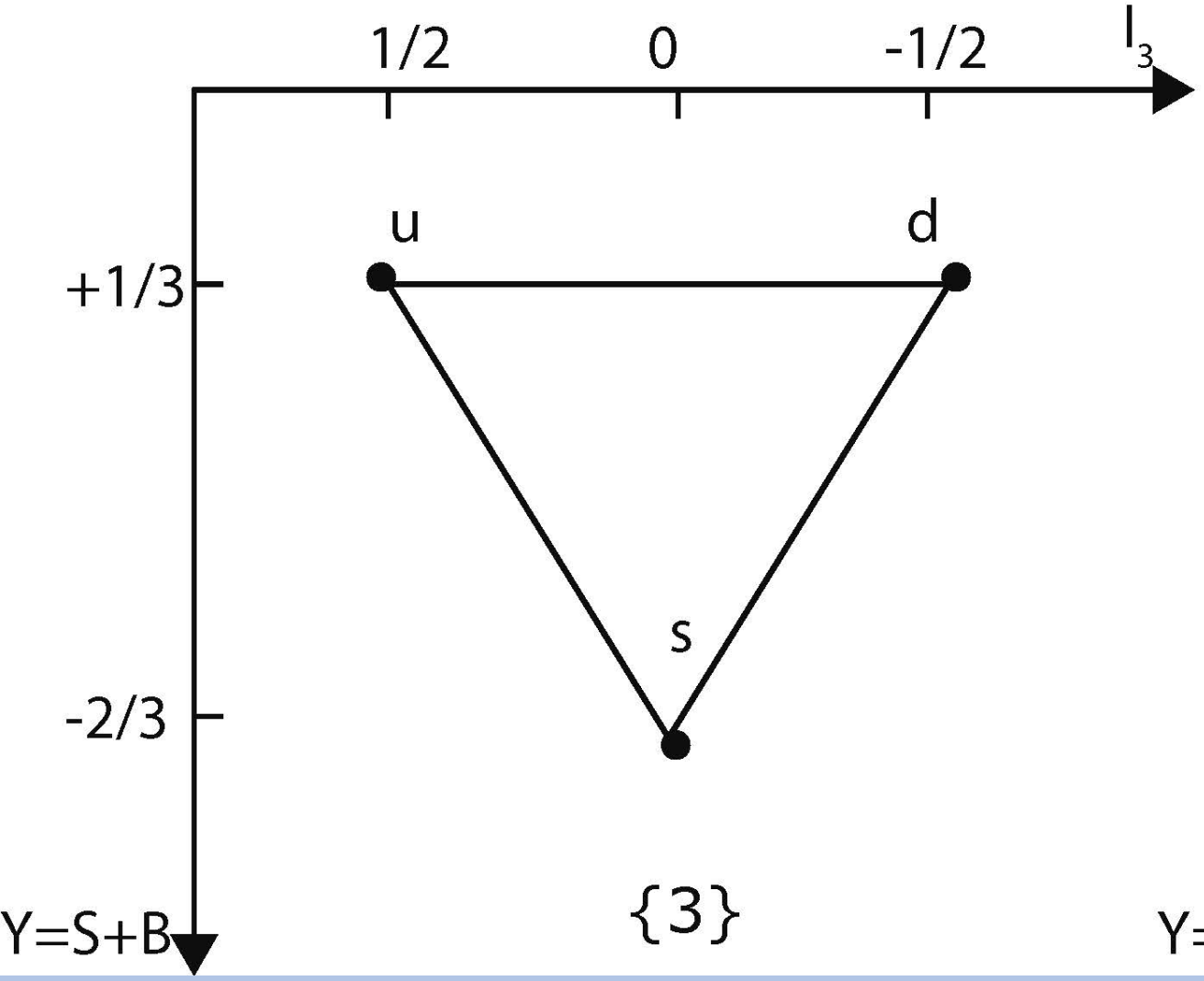

$K^-p \to \Omega^- K^+ K^0$
$\pi^+\pi^-$
ΛK^-
$\pi^-\pi^0$
$p\pi^-$
π^-
π^+
π^-
p
K^-
π^-
Λ
K^+
Ω^-
K^0
K^-
1
2
3
4
5

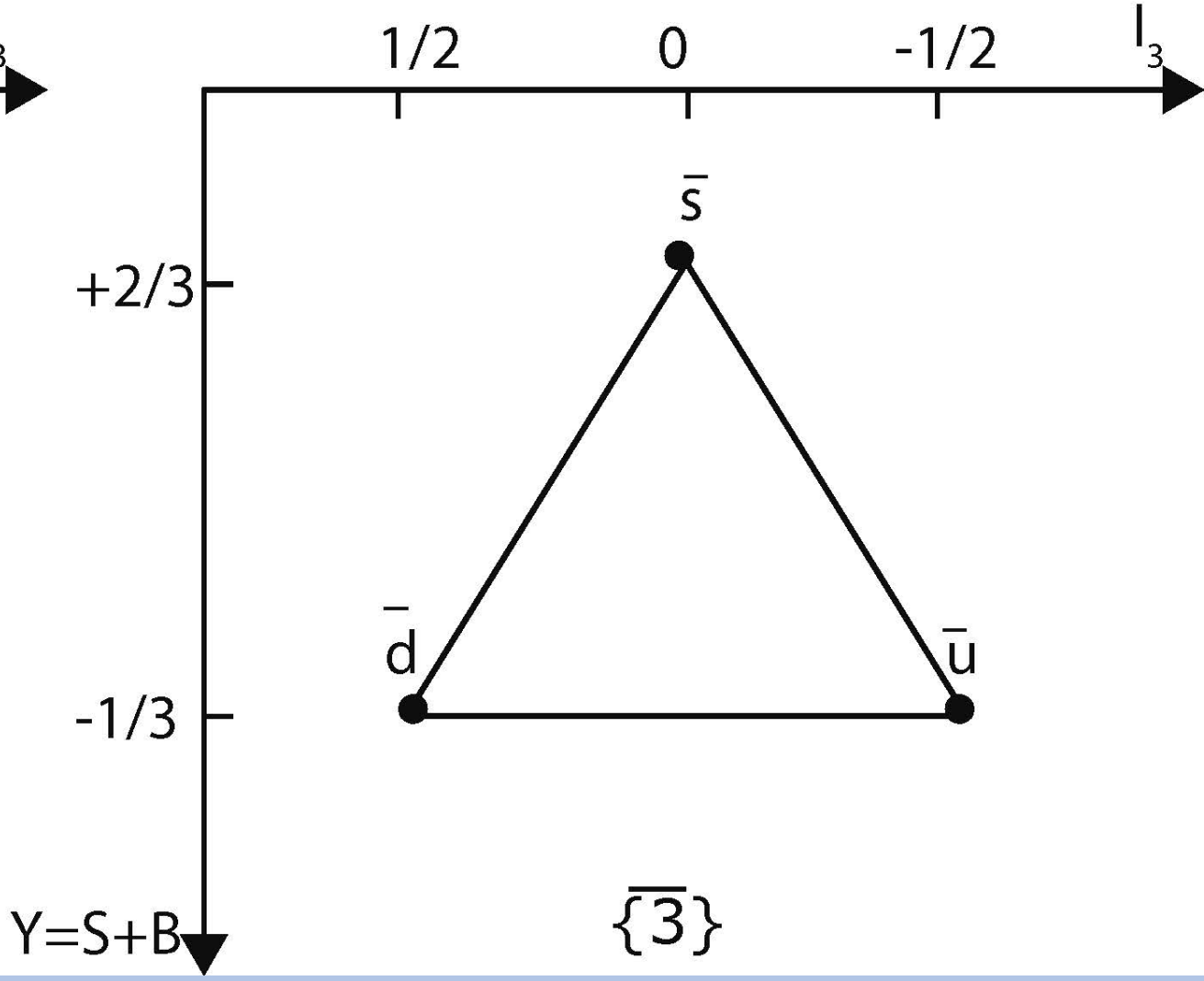
Bellenvat

$K^- p \rightarrow \Omega^- K^+ K^0$

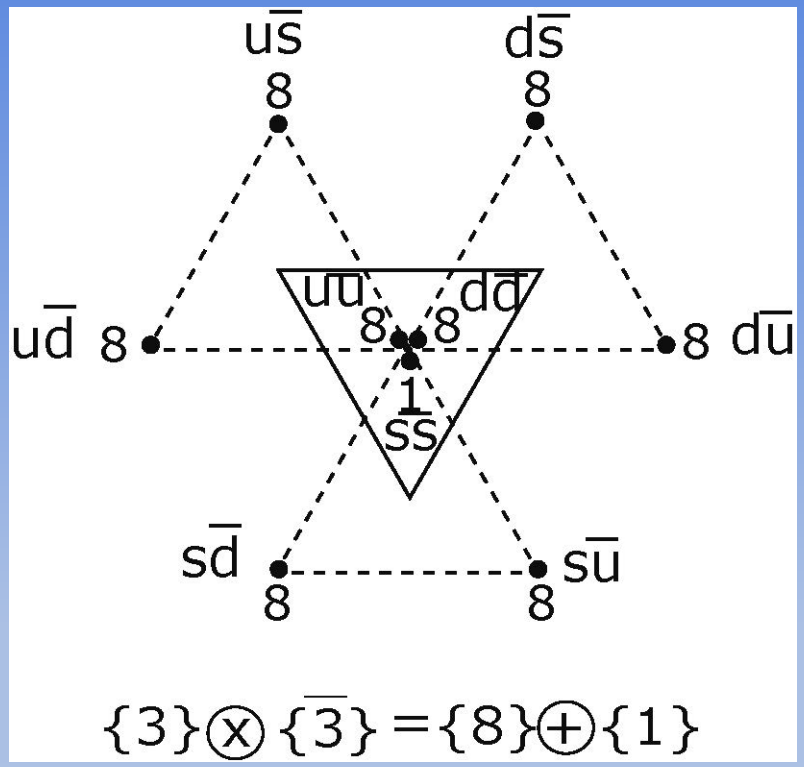


Quarks als fundamentele representaties van SU(3)

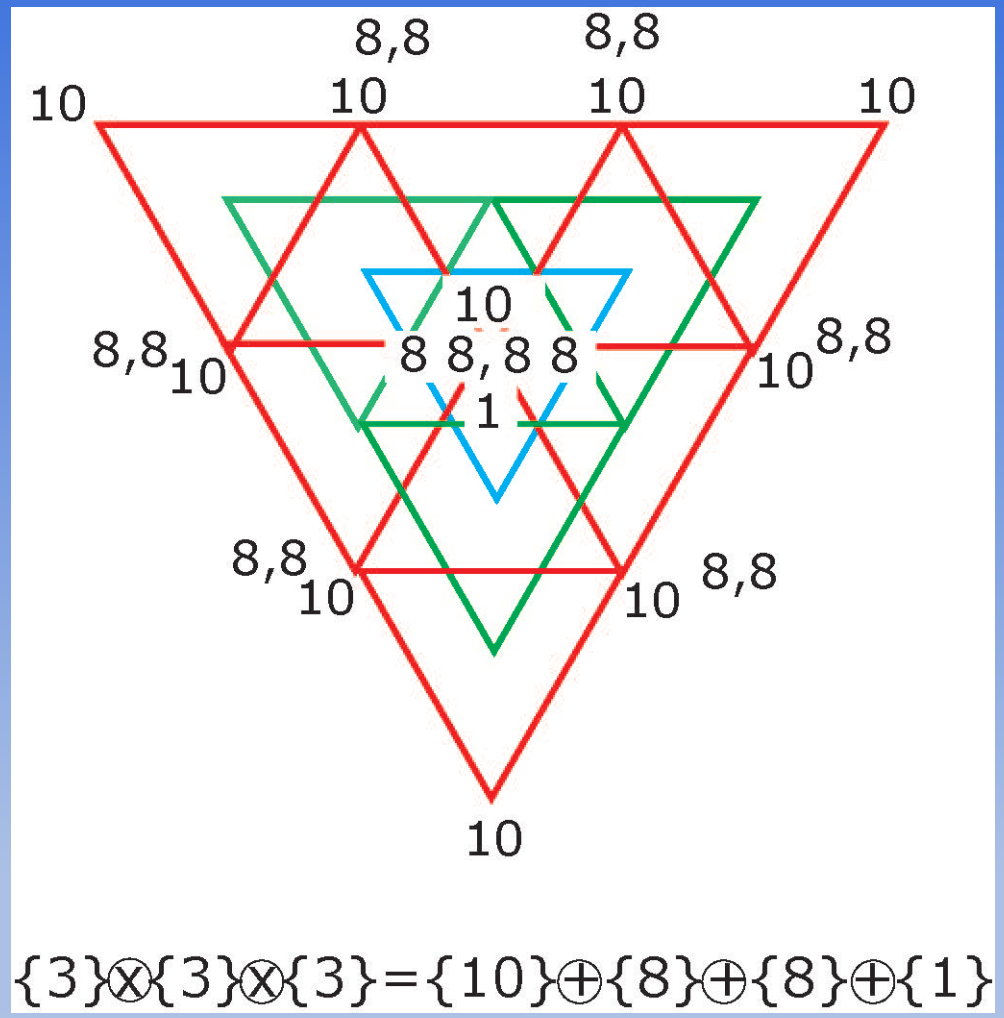




Constructie van het meson-octet



Constructie van het baryon-decuplet en meer



Bij hun theoretische introductie (1964) waren **quark**s zeer **controversieel.**
(Het artikel van Zweig werd nooit gepubliceerd!)
Vooral vanwege hun **‘fractionele’ lading**: 2/3, 1/3 maal de elektronlading
(de ‘elementairlading’). In een, overigens veel geciteerd artikel uit 1963(!)
schoof Johan de Swart deze ‘representatie’ van SU(3) terzijde als ‘unphysical’.
Daar moet hij later enorm spijt van hebben gehad…

In 1969 werden ze echter ‘waargenomen’ als harde pitjes in het proton bij verstrooiing
van elektronen (20 GeV) aan protonen

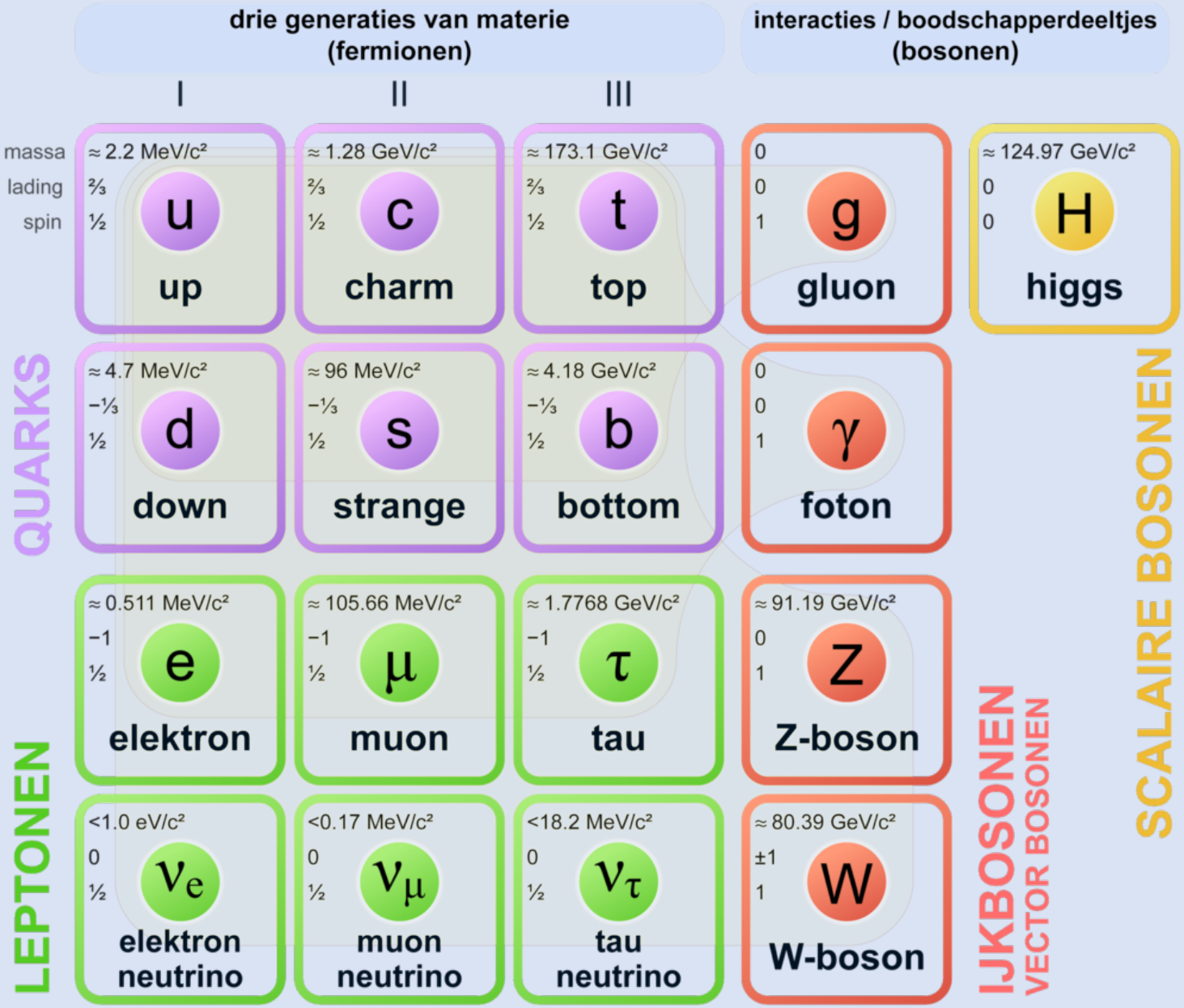
In 1974, 1977, 1995 werden nog drie ‘zware’ quarks ontdekt; in totaal zijn er dus
6 ‘smaken’, maar baryonen bestaan nog steeds uit 3 quarks en mesonen uit $q\underline{q}$

Er is nu een veldentheorie van quarks en de bijbehorende velddeeltjes (gluonen),
de Quantum Chromodynamica die perfect werkt

Quarks (en gluonen) blijven echter buitenbeentjes omdat ze niet (kunnen)
voorkomen als vrije deeltjes, ze zitten **opgesloten** in deeltjes zoals het proton,
het pion (hadronen). Volgt deze ‘confinement’ uit QCD?

Goed, laten we nu een blik werpen op wat we hebben:

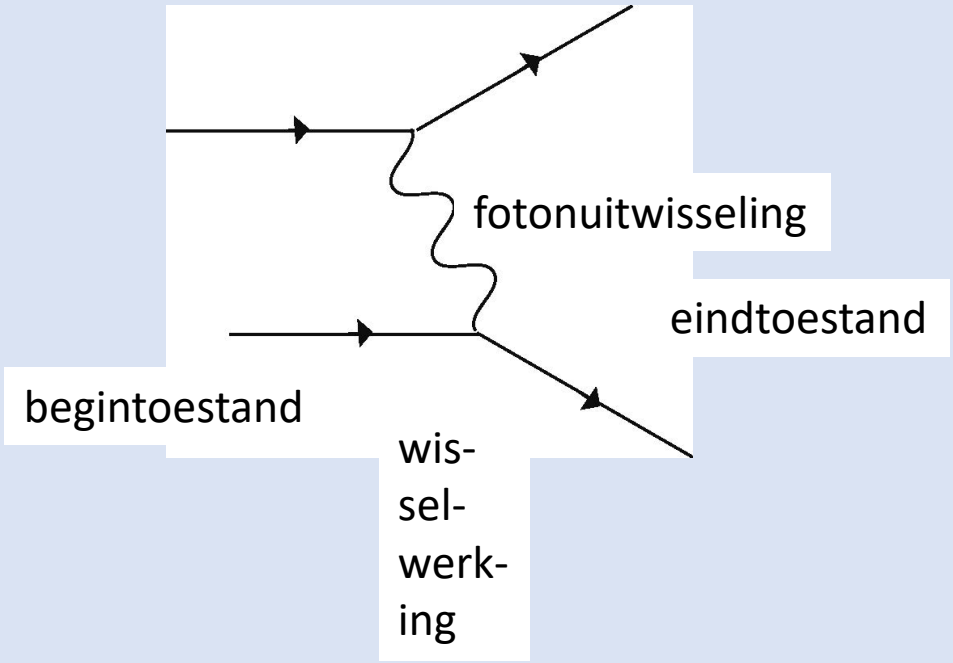
Standaardmodel van de Elementaire Deeltjes



neutrino's

Over H moeten we het nog hebben!

Quantumelektrodynamica (1949) Feynman, Tomonaga, Schwinger
Bijvoorbeeld: verstrooiing van elektron aan elektron via uitwisseling foton.
Is helemaal uit te rekenen.
Feynmandiagram:



Hier horen precieze rekenvoorschriften bij (Feynmanregels) uiteraard in overeenstemming met de relativiteitstheorie, de quantummechanica en lokale ijkinvariantie (Yang-Mills)

Glashow, Weinberg, Salam (1968) breidden de theorie uit met W, Z uitwisseling; probleem: deze deeltjes hebben massa, de theorie zou (bij hogere orde termen) wel eens ‘oneindig’ kunnen opleveren, i.e. niet renormeerbaar kunnen zijn

‘t Hooft, Veltman (1971) bewijzen: de theorie is renormeerbaar, de ‘oneindigheden’ worden opgeheven door diagrammen met een Higgsboson (1964, ook Brout, Englert) op te nemen.

Ga op zoek naar het Higgs-boson, alleen geen idee hoe zwaar het is! Dat maakt het zoeken moeilijk!

Bij LEP werd het Higgs-boson niet gevonden → zwaarder dan 100x de protonmassa
(een **elementair** deeltje zo zwaar als een zilveratoom! E=Mc2 moet hard aan het werk!) → de Large Hadron Collider met experimentele opstellingen die niets
kan ontgaan!

Hoe werkt een (circulaire) versneller? RF station om te versnellen, magneten om af te buigen, herhaal tot max. energie, knijp bundels samen om ze te laten botsen.
Hoge energie: hoog magneetveld (supergeleidend), grote ring (energie ~ BR).
Bij LHC 50 'events' met productie van tientallen/honderden deeltjes elke 25 nanoseconden. Stralingsbestendige materialen en snelle elektronica!

Hoe zien de bijbehorende opstellingen er uit?

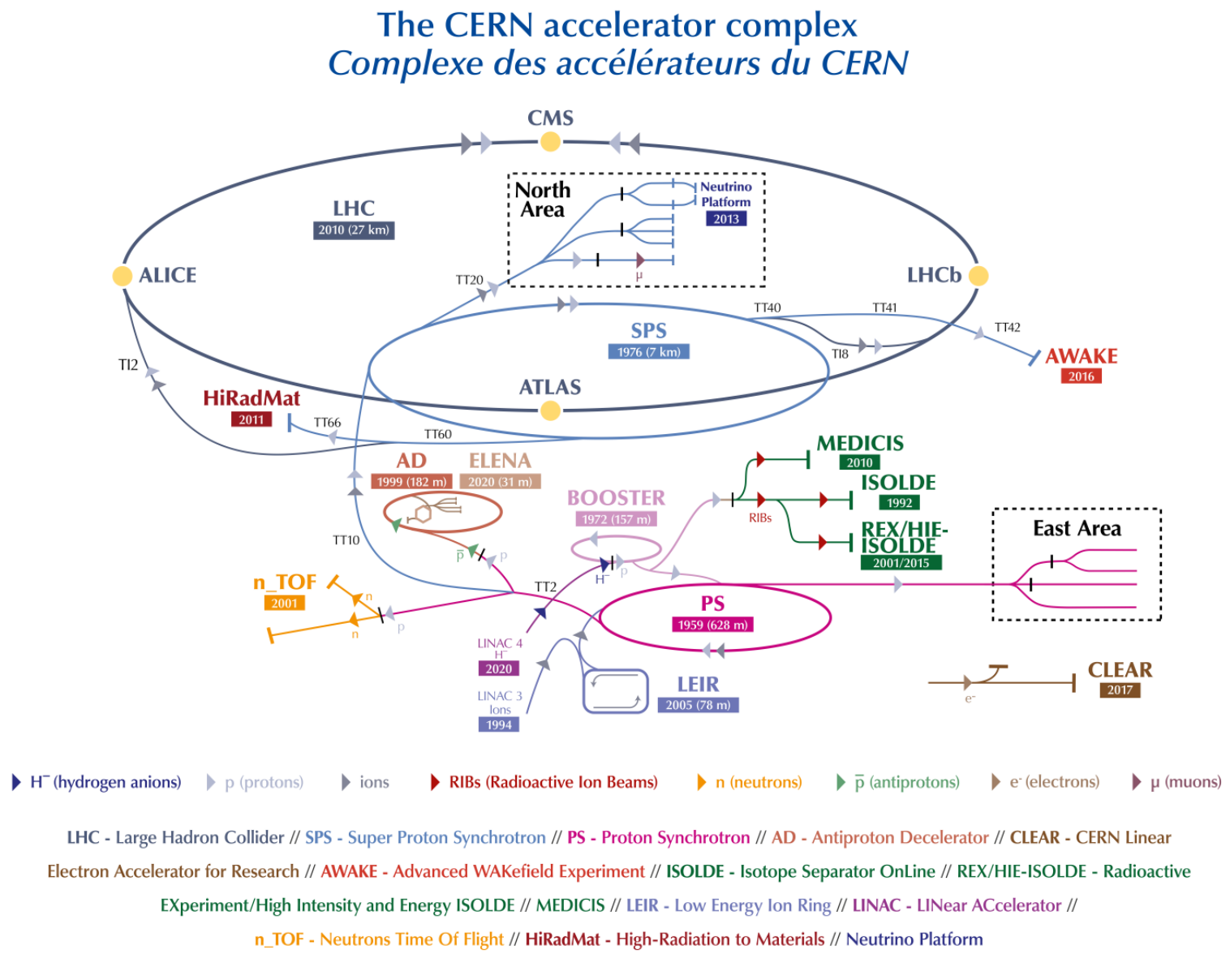
CERN: grootschalig(er)

De grote ring (tunnel) heeft een omtrek van 27 km, van 1989 -2000 was LEP hierin in bedrijf

en vanaf
2010 de LHC

Opmerking: de LHC is niet in de eerste plaats een innovatie vanwege de afmeting, maar vanwege ‘high tech’ toepassing van supergeleiding van NbTi bij 1,9 K superfluïde helium

etc…



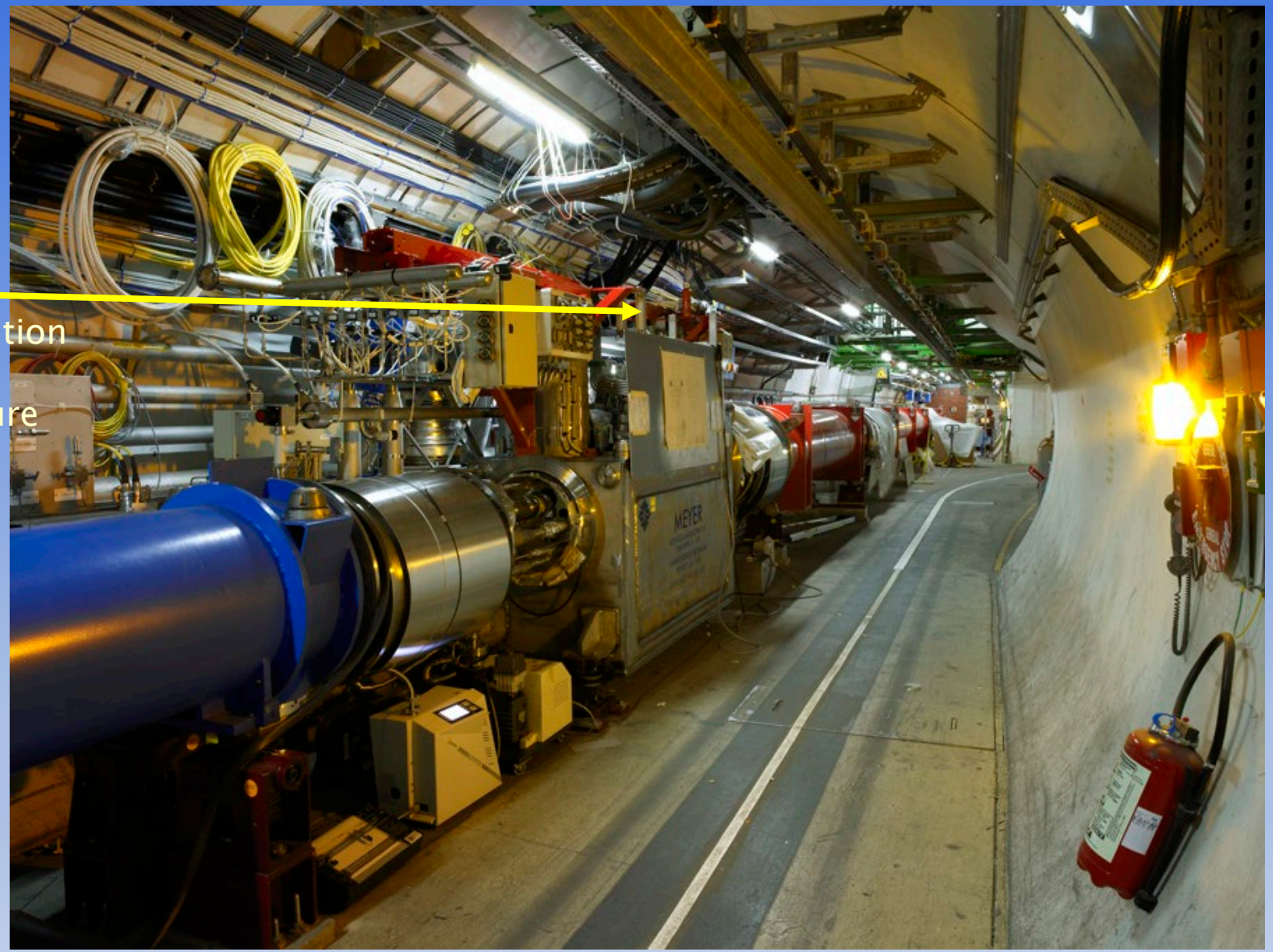
Het wetenschappelijke programma bevat meer dan de LHC.

Maar zonder de LHC zou het overige (zeer rijke) programma er niet zijn!

In the tunnel

Beam delivery towards interaction point

Current distribution using High Temperature Supercondutor current leads



Experimentation in High Energy Physics

Multi-Wire Proportinal Chambers (Charpak, 1967+1, Nobel Prize 1992) Nuclear Instruments and Methods 62 (1968) 202 - 26.

- MWPC, drift, MDT, honeycomb, straw

Semiconductor (Si) trackers

- Si strip, pixels

Calorimeters

- Compensating Uranium/Scint cals

Cherenkov detectors

- RICH

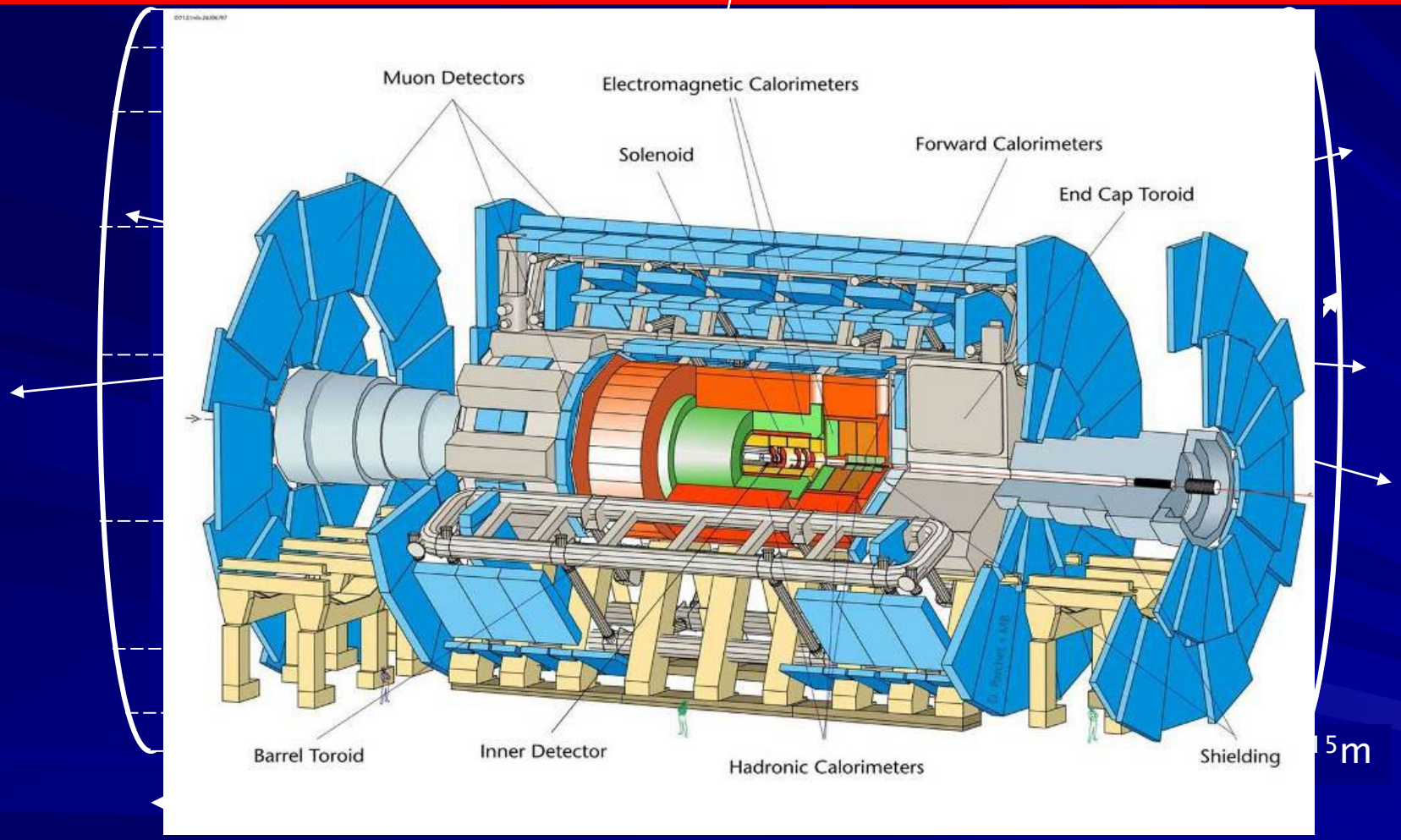
Mechanical 'system' design

(Front end) **electronics**, ascics, deep sub-micron technology, 250 nm for LHC expts (initially)

Triggering, data-acquisition, (grid) **computing**

All these technologies mastered by Nikhef at state of the art level and beyond

Colliding beams at the Large Hadron Collider



One billion, 10^9 collisions per second, hundreds of particles per collision.
Write O(100) events = O(100 MB) to storage medium/second

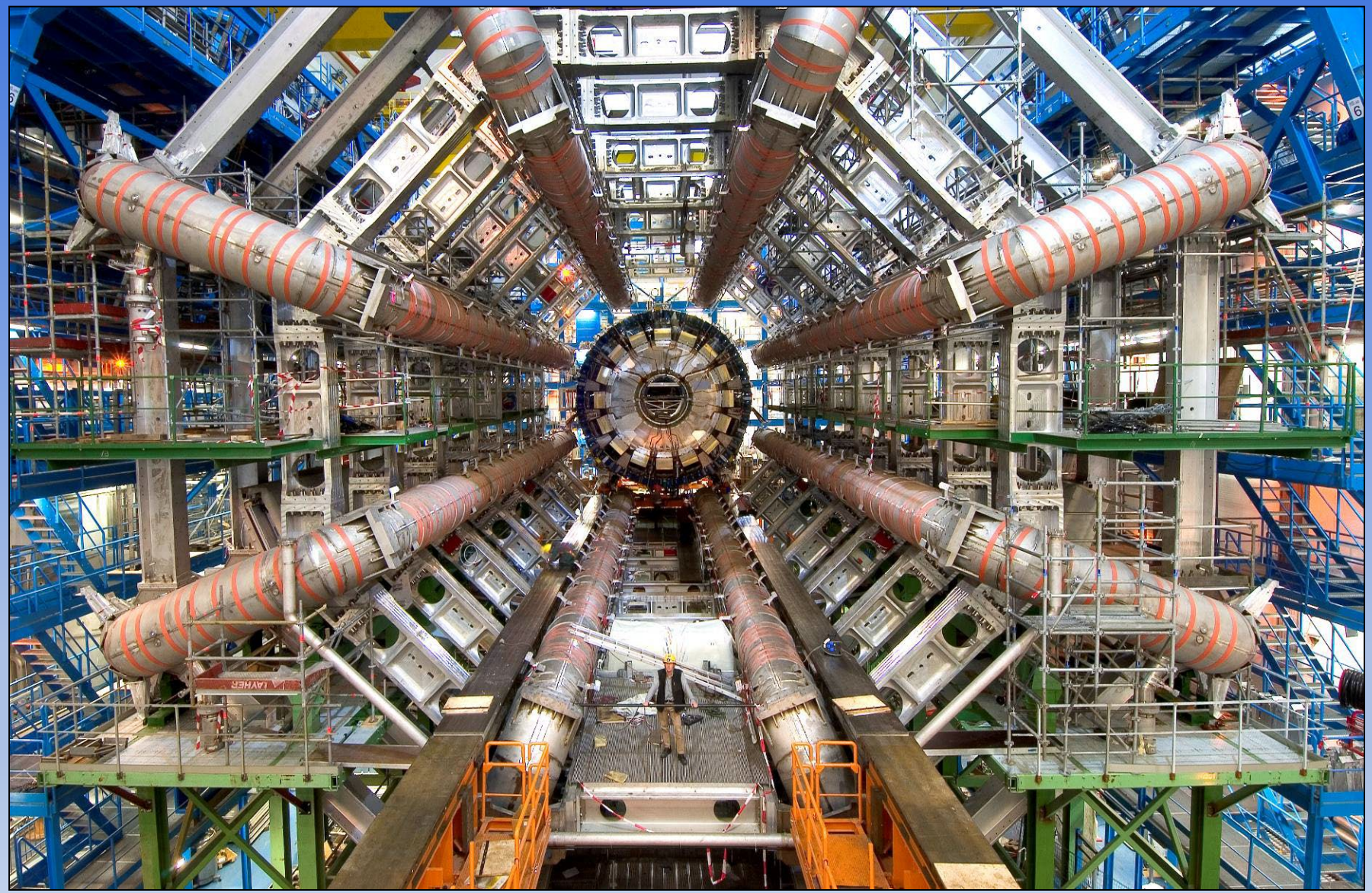
Point 1 - UX15 vault demolition of central pillar - September 20, 2000 - CERN ST-CE

De inauguratie

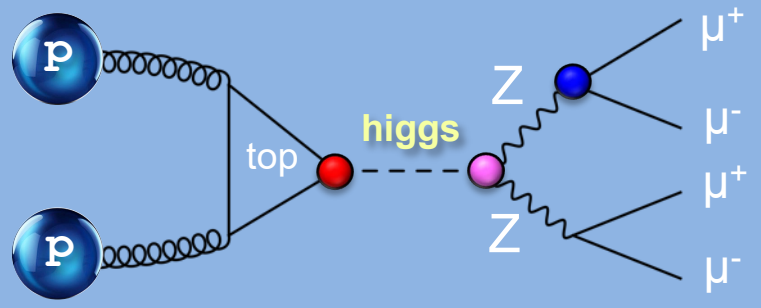
A

Barrel Toroid installation status

The mechanical installation is complete, electrical and cryogenic connections are being made now, for a first in-situ cool-down and excitation test in spring 2006



Higgs boson

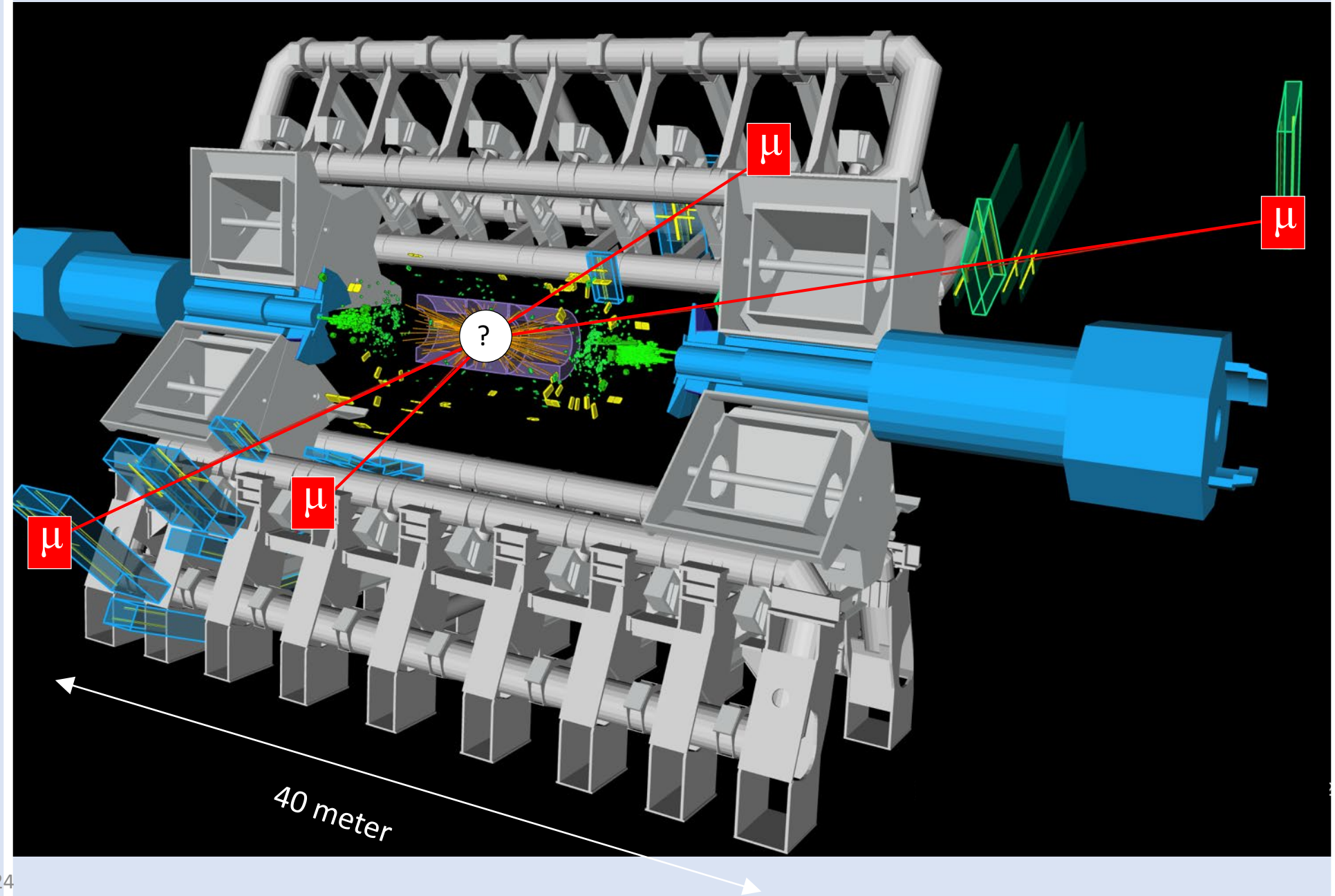


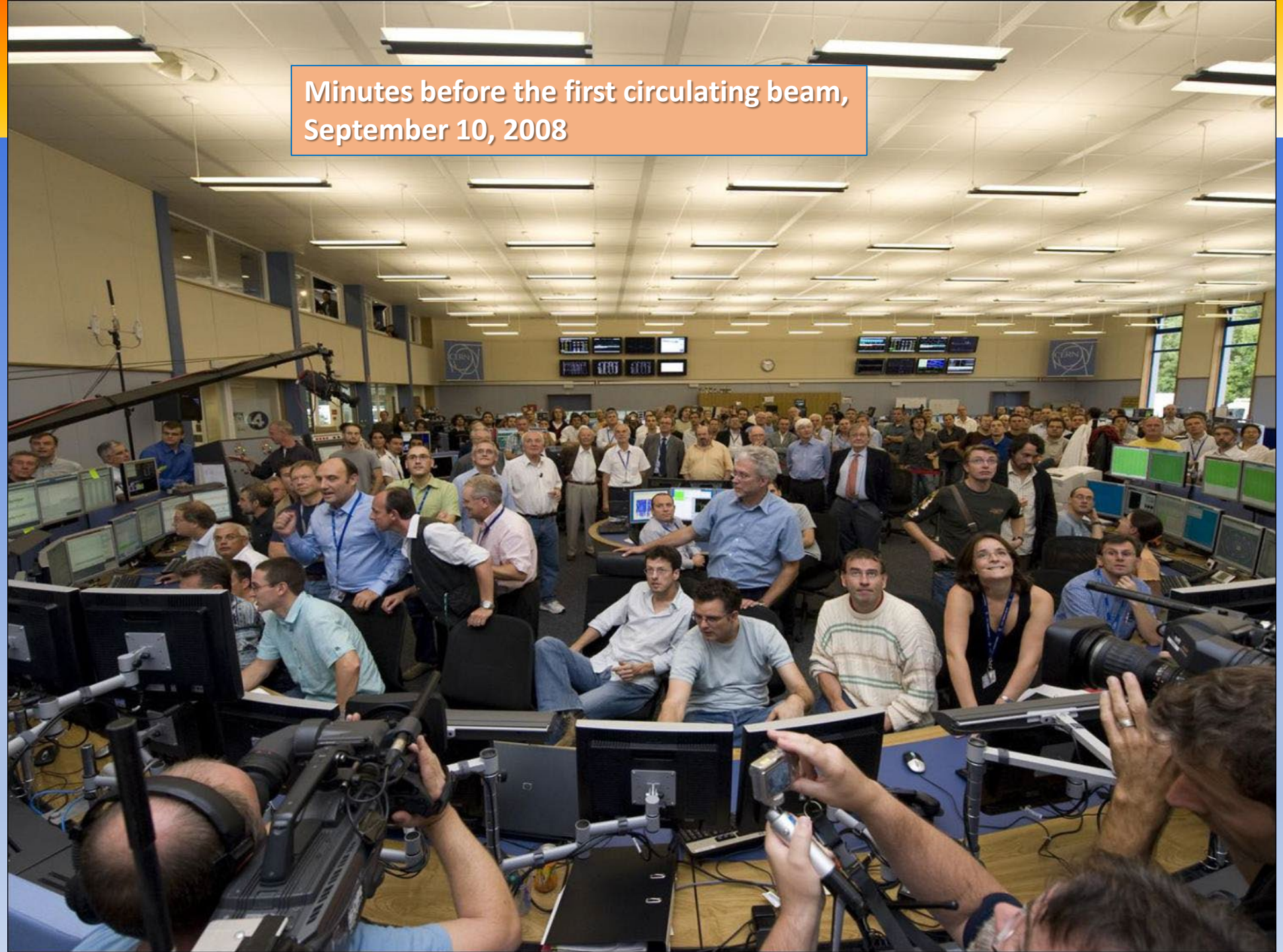
0,000000000000000000000001 sec

afhankelijk van de massa (onbekend) zijn er andere vervalswijzen: de detectoren moeten op alle mogelijkheden voorbereid zijn

Standard Model Lagrangiaan

$$
\begin{aligned}
\mathcal{L}_{\rm SM} = & -\frac{1}{2}(\partial_\mu W^+_\nu - \partial_\nu W^+_\mu)(\partial^\mu W^{-\nu} - \partial^\nu W^{\mu-}) - \frac{1}{4}(\partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu)^2 - \frac{1}{4}(\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu)^2 \\
& - \frac{1}{4}(\partial_\mu G^a_\nu - \partial_\nu G^a_\mu)^2 + i\frac{g^2}{\sqrt{g^2+g'^2}}(g^{\alpha\gamma}g^{\beta\delta} - g^{\alpha\delta}g^{\beta\gamma})(W^-_\gamma Z_\delta \partial_\alpha W^+_\beta + Z_\gamma W^+_\delta \partial_\alpha W^-_\beta \\
& + W^+_\gamma W^-_\delta \partial_\alpha Z_\beta) + i\frac{gg'}{\sqrt{g^2+g'^2}}(g^{\alpha\gamma}g^{\beta\delta} - g^{\alpha\delta}g^{\beta\gamma})(W^-_\gamma A_\delta \partial_\alpha W^+_\beta + A_\gamma W^+_\delta \partial_\alpha W^-_\beta \\
& + W^+_\gamma W^-_\delta \partial_\alpha A_\beta) - g_s f^{abc} G^a_\mu G^b_\nu \partial^\mu G^{c\nu} + \frac{g^2 g'^2}{g^2+g'^2}(g^{\alpha\gamma}g^{\beta\delta} - g^{\alpha\beta}g^{\gamma\delta}) W^+_\alpha W^-_\beta A_\gamma A_\delta \\
& + \frac{g^4}{g^2+g'^2}(g^{\alpha\gamma}g^{\beta\delta} - g^{\alpha\beta}g^{\gamma\delta}) W^+_\alpha W^-_\beta Z_\gamma Z_\delta + g^2(g^{\alpha\beta}g^{\gamma\delta} - g^{\alpha\gamma}g^{\beta\delta}) W^+_\alpha W^+_\beta W^-_\gamma W^-_\delta \\
& + \frac{g^3 g'}{g^2+g'^2}(g^{\alpha\delta}g^{\beta\gamma} + g^{\alpha\gamma}g^{\beta\delta} - 2g^{\alpha\beta}g^{\gamma\delta}) W^+_\alpha W^-_\beta A_\gamma Z_\delta - \frac{1}{4}g_s^2 f^{rab} f^{rcd} G^a_\mu G^b_\nu G^{c\mu} G^{d\nu} \\
& + i\overline{\psi}_e \gamma_\mu \partial^\mu \psi_e + i\overline{\psi}_{\nu_L} \gamma_\mu \partial^\mu \psi_{\nu_L} + i\sum_n \overline{\psi}_{q_n} \gamma_\mu \partial^\mu \psi_{q_n} - \frac{gg'}{\sqrt{g^2+g'^2}} \overline{\psi}_e \gamma_\mu A^\mu \psi_e \\
& + \frac{g}{\sqrt{2}}(\overline{\psi}_{\nu_L} \gamma_\mu W^{+\mu} \psi_{e_L} + \overline{\psi}_{e_L} \gamma_\mu W^{-\mu} \psi_{\nu_L}) + \frac{1}{2}\sqrt{g^2+g'^2}\, \overline{\psi}_{\nu_L} \gamma_\mu Z^\mu \psi_{\nu_L} \\
& + \frac{1}{2}\sqrt{g^2+g'^2}\left(\overline{\psi}_e \gamma_\mu Z^\mu \left[\frac{2g'^2}{g^2+g'^2} - \frac{1}{2}(1-\gamma_5)\right]\psi_e\right) + g_s \sum_n \overline{\psi}_{q_n} G^a_\mu \gamma^\mu t^a \psi_q \\
& + g\sum_{I,i}(\overline{\psi}_{q_I} \gamma_\mu W^{+\mu} \psi_{q_{i,L}} V^+_{Ii} + \overline{\psi}_{q_i} \gamma_\mu W^{-\mu} \psi_{q_{I_L}} V_{iI}) + \frac{gg'}{\sqrt{g^2+g'^2}} \sum_n Q_n \overline{\psi}_{q_n} \gamma_\mu A^\mu \psi_{q_n} \\
& + \frac{1}{2}\sqrt{g^2+g'^2}\sum_I \left(\overline{\psi}_{q_I} \gamma_\mu Z^\mu \left[\frac{1}{2}(1-\gamma_5) - \frac{2Q_I g'^2}{g^2+g'^2}\right]\psi_{q_I}\right) \\
& + \frac{1}{2}\sqrt{g^2+g'^2}\sum_i \left(\overline{\psi}_{q_i} \gamma_\mu Z^\mu \left[-\frac{1}{2}(1-\gamma_5) - \frac{2Q_i g'^2}{g^2+g'^2}\right]\psi_{q_i}\right) \\
& + \frac{1}{2}(\partial_\mu \phi)^2 - \frac{1}{2}m_h^2 \phi^2 + \frac{1}{4}v^2 g^2 W^+_\mu W^{-\mu} + \frac{1}{8}v^2(g^2+g'^2) Z^2_\mu + \frac{1}{2}v g^2 \phi W^+_\mu W^{-\mu} \\
& + \frac{1}{4}(g^2+g'^2)\phi Z^2_\mu + \frac{1}{4}g^2 \phi^2 (W^+_\mu W^{-\mu} + 2Z^2_\mu) - \frac{m_h^2}{2v}\phi^3 - \frac{m_h^2}{8v^2}\phi^4 \\
& - m_e \overline{\psi}_e \psi_e - \sum_n m_n \overline{\psi}_{q_n} \psi_{q_n} - \frac{m_e}{v}\phi \overline{\psi}_e \psi_e - \frac{1}{v}\sum_n m_n \phi \overline{\psi}_{q_n} \psi_{q_n}
\end{aligned}
$$


μ
μ
μ
μ
?
40 meter



Minutes before the first circulating beam, September 10, 2008

Is it safe?

SPC REPORT ON LSAG DOCUMENTS

The CERN Scientific Policy Committee (SPC) was asked by the President of the CERN Council to examine the documents produced by the LHC Safety Assessment Group (LSAG) and to provide Council with an independent opinion on the conclusions stated in those documents. A dedicated SPC panel was set up, composed of Peter Braun-Munzinger, Matteo Cavalli-Sforza, Gerard 't Hooft, Bryan Webber and Fabio Zwirner. The documents made available to the panel were: "Review of the Safety of LHC Collisions", by the LHC Safety Assessment Group (LSAG report); "Astronomical Implications of Hypothetical Stable TeV-Scale Black Holes", by S.B.Giddings and M.L.Mangano (GM paper). After thorough review, discussion and ensuing endorsement by the full SPC, the requested opinion is summarized in the present document.

arXiv.org > hep-ph > arXiv:0806.3381

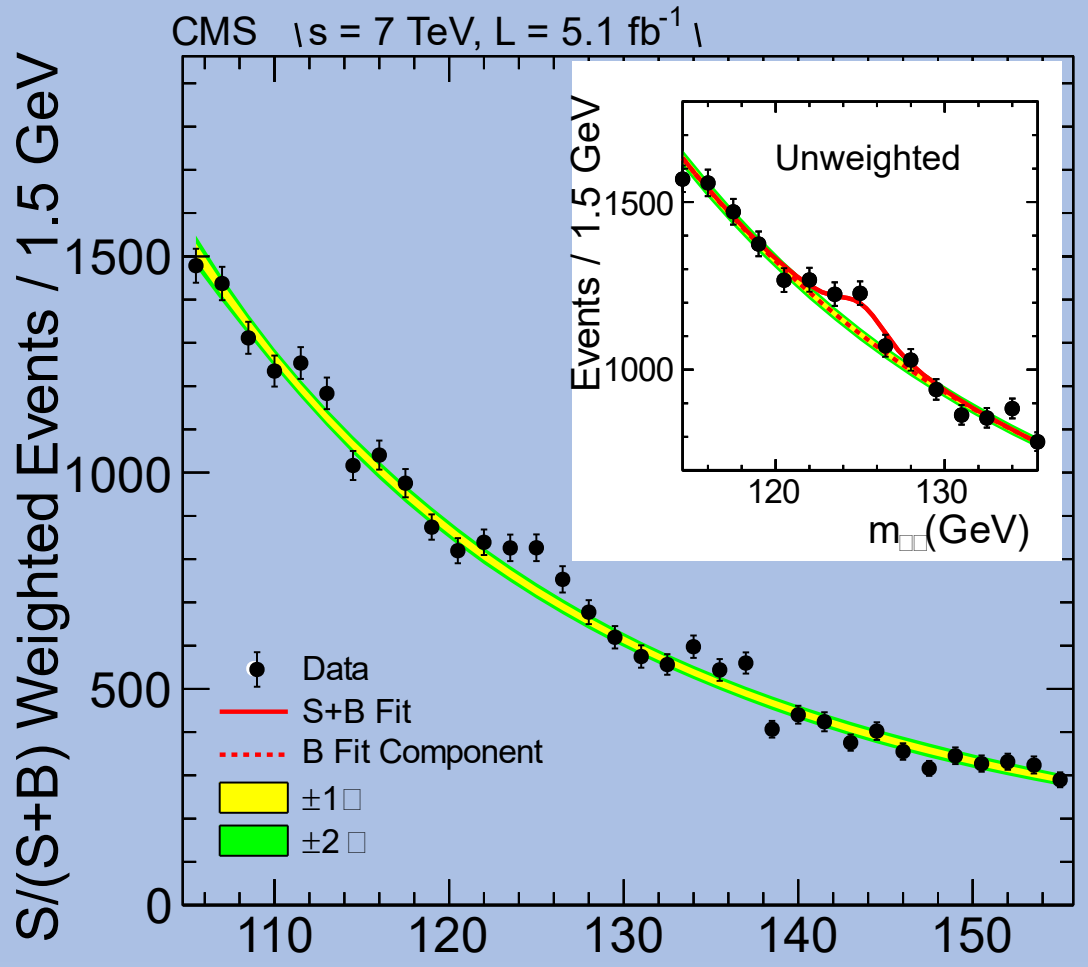
High Energy Physics - Phenomenology

Astrophysical implications of hypothetical stable TeV-scale black holes

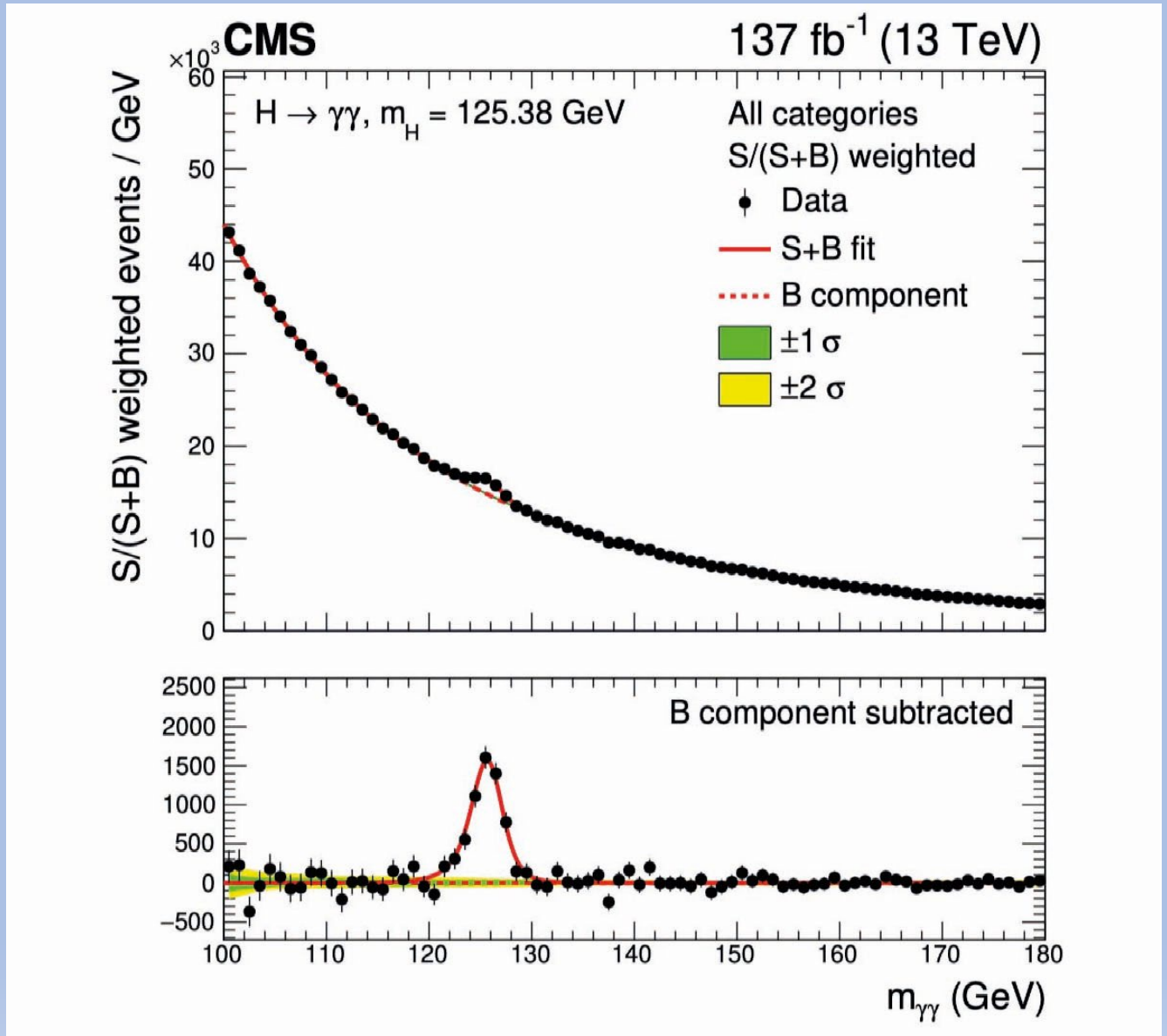
Steven B. Giddings, Michelangelo M. Mangano

(Submitted on 20 Jun 2008 (v1), last revised 23 Sep 2008 (this version, v2))

Discovery – 2012:



2021, 25 x statistics:



Hoe gaat dit onderzoek verder?

Er zijn nog (veel) vragen, maar wijzen die naar een gericht experimenteel onderzoeksprogramma?

Formulering van quantumveldentheorie van zwaartekracht?

Donkere materie? (Supersymmetrie?)

Hebben de LHC resultaten nog verrassingen in petto? (na upgrade)

Is de Higgs echt de standaardmodel Higgs (zelfkoppelingen); hebben elektron, muon en tauon echt precies dezelfde koppelingen?; is de materie-antimaterie asymmetrie (CP schending) begrepen? …

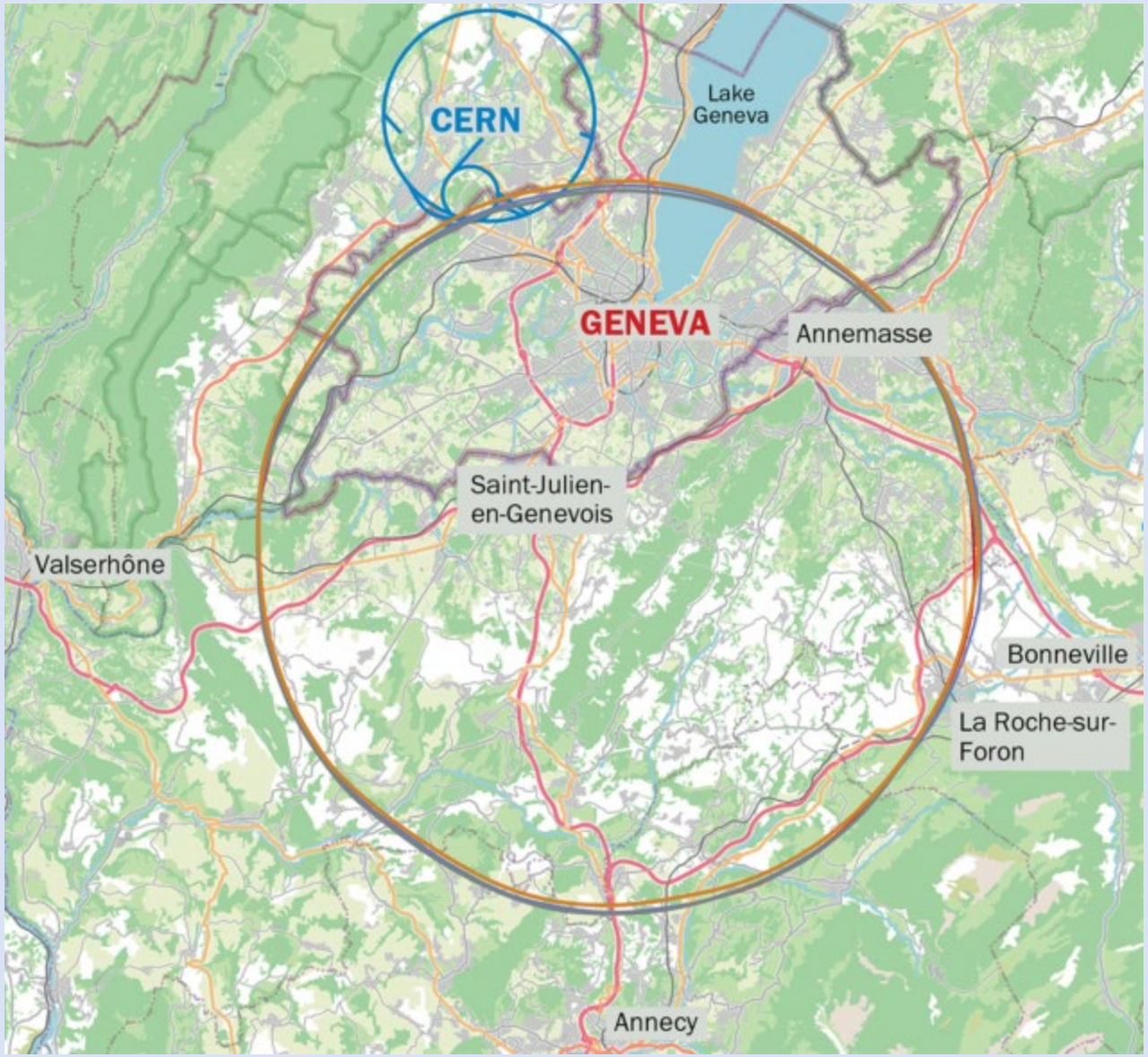
We kunnen met het LHC programma nog jaren (10) vooruit, maar…

is er een volgende versnellerproject (voor CERN) aan de horizon?

Bijvoorbeeld de FCC: Future Circular Collider (eerst ee, dan pp 100 TeV).

China maakt vergelijkbare plannen!

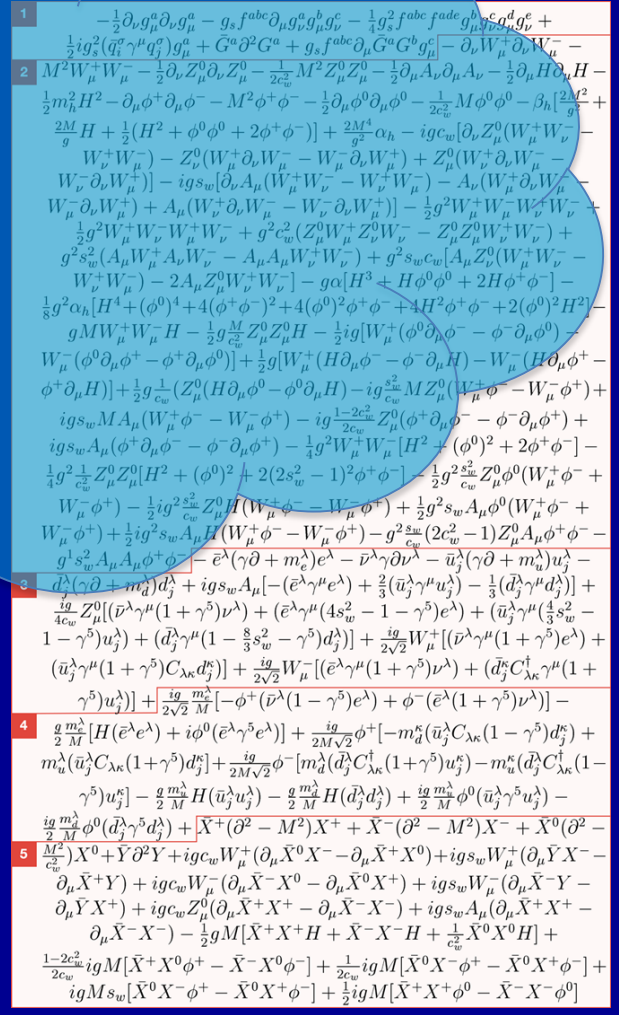
Er wordt gesproken over een muon-collider (in de VS).


CERN
Lake
Geneva
GENEVA
Annemasse
Saint-Julien-
en-Genevois
Valserhône
Bonneville
La Roche-sur-
Foron
Annecy

Lobbyen…

Topsectoren…ja…het begint met ruimte voor vrij onderzoek…budget…3% bnp

Ben →



1

$$-\frac{1}{2}\partial_\nu g^a_\mu \partial_\nu g^a_\mu - g_s f^{abc}\partial_\mu g^a_\nu g^b_\mu g^c_\nu - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g^b_\mu g^c_\nu g^d_\mu g^e_\nu +$$
$$\frac{1}{2}ig_s^2(\bar{q}^\sigma_i \gamma^\mu q^\sigma_j)g^a_\mu + \bar{G}^a\partial^2 G^a + g_s f^{abc}\partial_\mu \bar{G}^a G^b g^c_\mu$$

2

$$-\partial_\nu W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - M^2 W^+_\mu W^-_\mu - \frac{1}{2}\partial_\nu Z^0_\mu \partial_\nu Z^0_\mu - \frac{1}{2c_w^2}M^2 Z^0_\mu Z^0_\mu - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H -$$
$$\frac{1}{2}m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2\phi^+\phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu\phi^0\partial_\mu\phi^0 - \frac{1}{2c_w^2}M\phi^0\phi^0 - \beta_h[\frac{2M^2}{g^2} +$$
$$\frac{2M}{g}H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0\phi^0 + 2\phi^+\phi^-)] + \frac{2M^4}{g^2}\alpha_h - igc_w[\partial_\nu Z^0_\mu(W^+_\mu W^-_\nu -$$
$$W^+_\nu W^-_\mu) - Z^0_\nu(W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\mu \partial_\nu W^+_\mu) + Z^0_\mu(W^+_\nu \partial_\nu W^-_\mu -$$
$$W^-_\nu \partial_\nu W^+_\mu)] - igs_w[\partial_\nu A_\mu(W^+_\mu W^-_\nu - W^+_\nu W^-_\mu) - A_\nu(W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu -$$
$$W^-_\mu \partial_\nu W^+_\mu) + A_\mu(W^+_\nu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\nu \partial_\nu W^+_\mu)] - \frac{1}{2}g^2 W^+_\mu W^-_\mu W^+_\nu W^-_\nu +$$
$$\frac{1}{2}g^2 W^+_\mu W^-_\nu W^+_\mu W^-_\nu + g^2 c_w^2(Z^0_\mu W^+_\mu Z^0_\nu W^-_\nu - Z^0_\mu Z^0_\mu W^+_\nu W^-_\nu) +$$
$$g^2 s_w^2(A_\mu W^+_\mu A_\nu W^-_\nu - A_\mu A_\mu W^+_\nu W^-_\nu) + g^2 s_w c_w[A_\mu Z^0_\nu(W^+_\mu W^-_\nu -$$
$$W^+_\nu W^-_\mu) - 2A_\mu Z^0_\mu W^+_\nu W^-_\nu] - g\alpha[H^3 + H\phi^0\phi^0 + 2H\phi^+\phi^-] -$$
$$\frac{1}{8}g^2\alpha_h[H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+\phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2\phi^+\phi^- + 4H^2\phi^+\phi^- + 2(\phi^0)^2H^2] -$$
$$gMW^+_\mu W^-_\mu H - \frac{1}{2}g\frac{M}{c_w^2}Z^0_\mu Z^0_\mu H - \frac{1}{2}ig[W^+_\mu(\phi^0\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^0) -$$
$$W^-_\mu(\phi^0\partial_\mu\phi^+ - \phi^+\partial_\mu\phi^0)] + \frac{1}{2}g[W^+_\mu(H\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu H) - W^-_\mu(H\partial_\mu\phi^+ -$$
$$\phi^+\partial_\mu H)] + \frac{1}{2}g\frac{1}{c_w}(Z^0_\mu(H\partial_\mu\phi^0 - \phi^0\partial_\mu H) - ig\frac{s_w^2}{c_w}MZ^0_\mu(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) +$$
$$igs_w MA_\mu(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) - ig\frac{1-2c_w^2}{2c_w}Z^0_\mu(\phi^+\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^+) +$$
$$igs_w A_\mu(\phi^+\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W^+_\mu W^-_\mu[H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+\phi^-] -$$
$$\frac{1}{4}g^2\frac{1}{c_w^2}Z^0_\mu Z^0_\mu[H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2\phi^+\phi^-] - \frac{1}{2}g^2\frac{s_w^2}{c_w}Z^0_\mu\phi^0(W^+_\mu\phi^- +$$
$$W^-_\mu\phi^+) - \frac{1}{2}ig^2\frac{s_w^2}{c_w}Z^0_\mu H(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu\phi^0(W^+_\mu\phi^- +$$
$$W^-_\mu\phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) - g^2\frac{s_w}{c_w}(2c_w^2 - 1)Z^0_\mu A_\mu\phi^+\phi^- -$$
$$g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu\phi^+\phi^-$$

3

$$- \bar{e}^\lambda(\gamma\partial + m_e^\lambda)e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda\gamma\partial\nu^\lambda - \bar{u}^\lambda_j(\gamma\partial + m_u^\lambda)u^\lambda_j -$$
$$\bar{d}^\lambda_j(\gamma\partial + m_d^\lambda)d^\lambda_j + igs_w A_\mu[-(\bar{e}^\lambda\gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu u^\lambda_j) - \frac{1}{3}(\bar{d}^\lambda_j\gamma^\mu d^\lambda_j)] +$$
$$\frac{ig}{4c_w}Z^0_\mu[(\bar{\nu}^\lambda\gamma^\mu(1+\gamma^5)\nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda\gamma^\mu(4s_w^2 - 1 - \gamma^5)e^\lambda) + (\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu(\frac{4}{3}s_w^2 -$$
$$1 - \gamma^5)u^\lambda_j) + (\bar{d}^\lambda_j\gamma^\mu(1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5)d^\lambda_j)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}}W^+_\mu[(\bar{\nu}^\lambda\gamma^\mu(1+\gamma^5)e^\lambda) +$$
$$(\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu(1+\gamma^5)C_{\lambda\kappa}d^\kappa_j)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}}W^-_\mu[(\bar{e}^\lambda\gamma^\mu(1+\gamma^5)\nu^\lambda) + (\bar{d}^\kappa_j C^\dagger_{\lambda\kappa}\gamma^\mu(1 +$$
$$\gamma^5)u^\lambda_j)] +$$

4

$$\frac{ig}{2\sqrt{2}}\frac{m_e^\lambda}{M}[-\phi^+(\bar{\nu}^\lambda(1-\gamma^5)e^\lambda) + \phi^-(\bar{e}^\lambda(1+\gamma^5)\nu^\lambda)] -$$
$$\frac{g}{2}\frac{m_e^\lambda}{M}[H(\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0(\bar{e}^\lambda\gamma^5 e^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^+[-m_d^\kappa(\bar{u}^\lambda_j C_{\lambda\kappa}(1-\gamma^5)d^\kappa_j) +$$
$$m_u^\lambda(\bar{u}^\lambda_j C_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)d^\kappa_j] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^-[m_d^\lambda(\bar{d}^\lambda_j C^\dagger_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)u^\kappa_j) - m_u^\kappa(\bar{d}^\lambda_j C^\dagger_{\lambda\kappa}(1-$$
$$\gamma^5)u^\kappa_j] - \frac{g}{2}\frac{m_u^\lambda}{M}H(\bar{u}^\lambda_j u^\lambda_j) - \frac{g}{2}\frac{m_d^\lambda}{M}H(\bar{d}^\lambda_j d^\lambda_j) + \frac{ig}{2}\frac{m_u^\lambda}{M}\phi^0(\bar{u}^\lambda_j\gamma^5 u^\lambda_j) -$$
$$\frac{ig}{2}\frac{m_d^\lambda}{M}\phi^0(\bar{d}^\lambda_j\gamma^5 d^\lambda_j) +$$

5

$$\bar{X}^+(\partial^2 - M^2)X^+ + \bar{X}^-(\partial^2 - M^2)X^- + \bar{X}^0(\partial^2 -$$
$$\frac{M^2}{c_w^2})X^0 + \bar{Y}\partial^2 Y + igc_w W^+_\mu(\partial_\mu\bar{X}^0 X^- - \partial_\mu\bar{X}^+ X^0) + igs_w W^+_\mu(\partial_\mu\bar{Y}X^- -$$
$$\partial_\mu\bar{X}^+ Y) + igc_w W^-_\mu(\partial_\mu\bar{X}^- X^0 - \partial_\mu\bar{X}^0 X^+) + igs_w W^-_\mu(\partial_\mu\bar{X}^- Y -$$
$$\partial_\mu\bar{Y}X^+) + igc_w Z^0_\mu(\partial_\mu\bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu\bar{X}^- X^-) + igs_w A_\mu(\partial_\mu\bar{X}^+ X^+ -$$
$$\partial_\mu\bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}gM[\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w^2}\bar{X}^0 X^0 H] +$$
$$\frac{1-2c_w^2}{2c_w}igM[\bar{X}^+ X^0\phi^+ - \bar{X}^- X^0\phi^-] + \frac{1}{2c_w}igM[\bar{X}^0 X^-\phi^+ - \bar{X}^0 X^+\phi^-] +$$
$$igMs_w[\bar{X}^0 X^-\phi^+ - \bar{X}^0 X^+\phi^-] + \frac{1}{2}igM[\bar{X}^+ X^+\phi^0 - \bar{X}^- X^-\phi^0]$$

Dank voor de aandacht!

Dipoles

waiting to be installed in the tunnel

Standard Model Lagrangiaan

$$
\begin{aligned}
\mathcal{L}_{\rm SM} &= -\frac{1}{2}(\partial_\mu W^+_\nu - \partial_\nu W^+_\mu)(\partial^\mu W^{-\nu} - \partial^\nu W^{\mu-}) - \frac{1}{4}(\partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu)^2 - \frac{1}{4}(\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu)^2 \\
&- \frac{1}{4}(\partial_\mu G^a_\nu - \partial_\nu G^a_\mu)^2 + i\frac{g^2}{\sqrt{g^2+g'^2}}(g^{\alpha\gamma}g^{\beta\delta} - g^{\alpha\delta}g^{\beta\gamma})(W^-_\gamma Z_\delta \partial_\alpha W^+_\beta + Z_\gamma W^+_\delta \partial_\alpha W^-_\beta \\
&+ W^+_\gamma W^-_\delta \partial_\alpha Z_\beta) + i\frac{gg'}{\sqrt{g^2+g'^2}}(g^{\alpha\gamma}g^{\beta\delta} - g^{\alpha\delta}g^{\beta\gamma})(W^-_\gamma A_\delta \partial_\alpha W^+_\beta + A_\gamma W^+_\delta \partial_\alpha W^-_\beta \\
&+ W^+_\gamma W^-_\delta \partial_\alpha A_\beta) - g_s f^{abc} G^a_\mu G^b_\nu \partial^\mu G^{c\nu} + \frac{g^2 g'^2}{g^2+g'^2}(g^{\alpha\gamma}g^{\beta\delta} - g^{\alpha\beta}g^{\gamma\delta}) W^+_\alpha W^-_\beta A_\gamma A_\delta \\
&+ \frac{g^4}{g^2+g'^2}(g^{\alpha\gamma}g^{\beta\delta} - g^{\alpha\beta}g^{\gamma\delta}) W^+_\alpha W^-_\beta Z_\gamma Z_\delta + g^2(g^{\alpha\beta}g^{\gamma\delta} - g^{\alpha\gamma}g^{\beta\delta}) W^+_\alpha W^+_\beta W^-_\gamma W^-_\delta \\
&+ \frac{g^3 g'}{g^2+g'^2}(g^{\alpha\delta}g^{\beta\gamma} + g^{\alpha\gamma}g^{\beta\delta} - 2g^{\alpha\beta}g^{\gamma\delta}) W^+_\alpha W^-_\beta A_\gamma Z_\delta - \frac{1}{4}g_s^2 f^{rab} f^{rcd} G^a_\mu G^b_\nu G^{c\mu} G^{d\nu} \\
&+ i\overline{\psi}_e \gamma_\mu \partial^\mu \psi_e + i\overline{\psi}_{\nu_L} \gamma_\mu \partial^\mu \psi_{\nu_L} + i\sum_n \overline{\psi}_{q_n} \gamma_\mu \partial^\mu \psi_{q_n} - \frac{gg'}{\sqrt{g^2+g'^2}} \overline{\psi}_e \gamma_\mu A^\mu \psi_e \\
&+ \frac{g}{\sqrt{2}}(\overline{\psi}_{\nu_L} \gamma_\mu W^{+\mu} \psi_{e_L} + \overline{\psi}_{e_L} \gamma_\mu W^{-\mu} \psi_{\nu_L}) + \frac{1}{2}\sqrt{g^2+g'^2}\overline{\psi}_{\nu_L} \gamma_\mu Z^\mu \psi_{\nu_L} \\
&+ \frac{1}{2}\sqrt{g^2+g'^2}\left(\overline{\psi}_e \gamma_\mu Z^\mu \left[\frac{2g'^2}{g^2+g'^2} - \frac{1}{2}(1-\gamma_5)\right]\psi_e\right) + g_s \sum_n \overline{\psi}_{q_n} G^a_\mu \gamma^\mu t^a \psi_q \\
&+ g\sum_{I,i}(\overline{\psi}_{q_I} \gamma_\mu W^{+\mu} \psi_{q_{i,L}} V^+_{Ii} + \overline{\psi}_{q_i} \gamma_\mu W^{-\mu} \psi_{q_{I_L}} V_{iI}) + \frac{gg'}{\sqrt{g^2+g'^2}} \sum_n Q_n \overline{\psi}_{q_n} \gamma_\mu A^\mu \psi_{q_n} \\
&+ \frac{1}{2}\sqrt{g^2+g'^2}\sum_I \left(\overline{\psi}_{q_I} \gamma_\mu Z^\mu \left[\frac{1}{2}(1-\gamma_5) - \frac{2Q_I g'^2}{g^2+g'^2}\right]\psi_{q_I}\right) \\
&+ \frac{1}{2}\sqrt{g^2+g'^2}\sum_i \left(\overline{\psi}_{q_i} \gamma_\mu Z^\mu \left[-\frac{1}{2}(1-\gamma_5) - \frac{2Q_i g'^2}{g^2+g'^2}\right]\psi_{q_i}\right) \\
&+ \frac{1}{2}(\partial_\mu \phi)^2 - \frac{1}{2}m_h^2 \phi^2 + \frac{1}{4}v^2 g^2 W^+_\mu W^{-\mu} + \frac{1}{8}v^2(g^2+g'^2) Z^2_\mu + \frac{1}{2}v g^2 \phi W^+_\mu W^{-\mu} \\
&+ \frac{1}{4}v(g^2+g'^2)\phi Z^2_\mu + \frac{1}{4}g^2\phi^2(W^+_\mu W^{-\mu} + 2Z^2_\mu) - \frac{m_h^2}{2v}\phi^3 - \frac{m_h^2}{8v^2}\phi^4 \\
&- m_e \overline{\psi}_e \psi_e - \sum_n m_n \overline{\psi}_{q_n} \psi_{q_n} - \frac{m_e}{v}\phi \overline{\psi}_e \psi_e - \frac{1}{v}\sum_n m_n \phi \overline{\psi}_{q_n} \psi_{q_n}
\end{aligned}
$$

$$\mathcal{L} =$$

1

$$-\frac{1}{2}\partial_\nu g^a_\mu \partial_\nu g^a_\mu - g_s f^{abc}\partial_\mu g^a_\nu g^b_\mu g^c_\nu - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g^b_\mu g^c_\nu g^d_\mu g^e_\nu +$$
$$\frac{1}{2}ig_s^2(\bar{q}^\sigma_i \gamma^\mu q^\sigma_j) g^a_\mu + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc}\partial_\mu \bar{G}^a G^b g^c_\mu - \partial_\nu W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu -$$

2

$$M^2 W^+_\mu W^-_\mu - \frac{1}{2}\partial_\nu Z^0_\mu \partial_\nu Z^0_\mu - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z^0_\mu Z^0_\mu - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H -$$
$$\frac{1}{2}m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h [\frac{2M^2}{g^2} +$$
$$\frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-)] + \frac{2M^4}{g^2}\alpha_h - igc_w[\partial_\nu Z^0_\mu (W^+_\mu W^-_\nu -$$
$$W^+_\nu W^-_\mu) - Z^0_\nu (W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\mu \partial_\nu W^+_\mu) + Z^0_\mu (W^+_\nu \partial_\nu W^-_\mu -$$
$$W^-_\nu \partial_\nu W^+_\mu)] - igs_w[\partial_\nu A_\mu (W^+_\mu W^-_\nu - W^+_\nu W^-_\mu) - A_\nu (W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu -$$
$$W^-_\mu \partial_\nu W^+_\mu) + A_\mu (W^+_\nu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\nu \partial_\nu W^+_\mu)] - \frac{1}{2}g^2 W^+_\mu W^-_\mu W^+_\nu W^-_\nu +$$
$$\frac{1}{2}g^2 W^+_\mu W^-_\nu W^+_\mu W^-_\nu + g^2 c_w^2 (Z^0_\mu W^+_\mu Z^0_\nu W^-_\nu - Z^0_\mu Z^0_\mu W^+_\nu W^-_\nu) +$$
$$g^2 s_w^2 (A_\mu W^+_\mu A_\nu W^-_\nu - A_\mu A_\mu W^+_\nu W^-_\nu) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z^0_\nu (W^+_\mu W^-_\nu -$$
$$W^+_\nu W^-_\mu) - 2A_\mu Z^0_\mu W^+_\nu W^-_\nu] - g\alpha[H^3 + H\phi^0\phi^0 + 2H\phi^+\phi^-] -$$
$$\frac{1}{8}g^2\alpha_h[H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+\phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2\phi^+\phi^- + 4H^2\phi^+\phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2] -$$
$$gMW^+_\mu W^-_\mu H - \frac{1}{2}g\frac{M}{c_w^2} Z^0_\mu Z^0_\mu H - \frac{1}{2}ig[W^+_\mu(\phi^0\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^0) -$$
$$W^-_\mu(\phi^0\partial_\mu\phi^+ - \phi^+\partial_\mu\phi^0)] + \frac{1}{2}g[W^+_\mu(H\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu H) - W^-_\mu(H\partial_\mu\phi^+ -$$
$$\phi^+\partial_\mu H)] + \frac{1}{2}g\frac{1}{c_w}(Z^0_\mu(H\partial_\mu\phi^0 - \phi^0\partial_\mu H) - ig\frac{s_w^2}{c_w} M Z^0_\mu (W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) +$$
$$igs_w M A_\mu (W^+_\mu \phi^- - W^-_\mu \phi^+) - ig\frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z^0_\mu (\phi^+\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^+) +$$
$$igs_w A_\mu (\phi^+\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W^+_\mu W^-_\mu [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+\phi^-] -$$
$$\frac{1}{4}g^2\frac{1}{c_w^2} Z^0_\mu Z^0_\mu [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2\phi^+\phi^-] - \frac{1}{2}g^2\frac{s_w^2}{c_w} Z^0_\mu \phi^0 (W^+_\mu \phi^- +$$
$$W^-_\mu \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2\frac{s_w^2}{c_w} Z^0_\mu H (W^+_\mu \phi^- - W^-_\mu \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W^+_\mu \phi^- +$$
$$W^-_\mu \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W^+_\mu \phi^- - W^-_\mu \phi^+) - g^2\frac{s_w}{c_w}(2c_w^2 - 1) Z^0_\mu A_\mu \phi^+\phi^- -$$
$$g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+\phi^-$$

3

$$- \bar{e}^\lambda(\gamma\partial + m_e^\lambda)e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda\gamma\partial\nu^\lambda - \bar{u}^\lambda_j(\gamma\partial + m_u^\lambda)u^\lambda_j -$$
$$\bar{d}^\lambda_j(\gamma\partial + m_d^\lambda)d^\lambda_j + igs_w A_\mu[-(\bar{e}^\lambda\gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu u^\lambda_j) - \frac{1}{3}(\bar{d}^\lambda_j\gamma^\mu d^\lambda_j)] +$$
$$\frac{ig}{4c_w} Z^0_\mu[(\bar{\nu}^\lambda\gamma^\mu(1+\gamma^5)\nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda\gamma^\mu(4s_w^2 - 1 - \gamma^5)e^\lambda) + (\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu(\frac{4}{3}s_w^2 -$$
$$1 - \gamma^5)u^\lambda_j) + (\bar{d}^\lambda_j\gamma^\mu(1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5)d^\lambda_j)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W^+_\mu[(\bar{\nu}^\lambda\gamma^\mu(1+\gamma^5)e^\lambda) +$$
$$(\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu(1+\gamma^5)C_{\lambda\kappa}d^\kappa_j)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W^-_\mu[(\bar{e}^\lambda\gamma^\mu(1+\gamma^5)\nu^\lambda) + (\bar{d}^\kappa_j C^\dagger_{\lambda\kappa}\gamma^\mu(1 +$$
$$\gamma^5)u^\lambda_j)] +$$

4

$$\frac{ig}{2\sqrt{2}}\frac{m_e^\lambda}{M}[-\phi^+(\bar{\nu}^\lambda(1-\gamma^5)e^\lambda) + \phi^-(\bar{e}^\lambda(1+\gamma^5)\nu^\lambda)] -$$
$$\frac{g}{2}\frac{m_e^\lambda}{M}[H(\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0(\bar{e}^\lambda\gamma^5 e^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^+[-m_d^\kappa(\bar{u}^\lambda_j C_{\lambda\kappa}(1-\gamma^5)d^\kappa_j) +$$
$$m_u^\lambda(\bar{u}^\lambda_j C_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)d^\kappa_j] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^-[m_d^\lambda(\bar{d}^\lambda_j C^\dagger_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)u^\kappa_j) - m_u^\kappa(\bar{d}^\lambda_j C^\dagger_{\lambda\kappa}(1-$$
$$\gamma^5)u^\kappa_j] - \frac{g}{2}\frac{m_u^\lambda}{M}H(\bar{u}^\lambda_j u^\lambda_j) - \frac{g}{2}\frac{m_d^\lambda}{M}H(\bar{d}^\lambda_j d^\lambda_j) + \frac{ig}{2}\frac{m_u^\lambda}{M}\phi^0(\bar{u}^\lambda_j\gamma^5 u^\lambda_j) -$$
$$\frac{ig}{2}\frac{m_d^\lambda}{M}\phi^0(\bar{d}^\lambda_j\gamma^5 d^\lambda_j)$$

5

$$+ \bar{X}^+(\partial^2 - M^2)X^+ + \bar{X}^-(\partial^2 - M^2)X^- + \bar{X}^0(\partial^2 -$$
$$\frac{M^2}{c_w^2})X^0 + \bar{Y}\partial^2 Y + igc_w W^+_\mu(\partial_\mu\bar{X}^0 X^- - \partial_\mu\bar{X}^+ X^0) + igs_w W^+_\mu(\partial_\mu\bar{Y}X^- -$$
$$\partial_\mu\bar{X}^+ Y) + igc_w W^-_\mu(\partial_\mu\bar{X}^- X^0 - \partial_\mu\bar{X}^0 X^+) + igs_w W^-_\mu(\partial_\mu\bar{X}^- Y -$$
$$\partial_\mu\bar{Y}X^+) + igc_w Z^0_\mu(\partial_\mu\bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu\bar{X}^- X^-) + igs_w A_\mu(\partial_\mu\bar{X}^+ X^+ -$$
$$\partial_\mu\bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}gM[\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w^2}\bar{X}^0 X^0 H] +$$
$$\frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM[\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} igM[\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] +$$
$$igMs_w[\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2}igM[\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]$$

The Standard Model Lagrangian derived from Diagrammatica, ***a theoretical physics reference written by Nobel Laureate Martinus Veltman****.*

(Thomas Gutierrez, California Polytechnic State University;

In his dissemination of the transcript, he noted a sign error he made somewhere in the equation. Good luck finding it!)

From left to right, front row : Italian Vice Minister for Research G. Possa, President of the Geneva State Council R. Cramer, President of the Swiss Confederation J. Deiss, HM King Juan Carlos I of Spain, CERN Director-General R. Aymar, President of the French Republic J. Chirac, Cczech Minister of Education, Youth and Sports P. Buzkovà, CERN Council President E. Iarocci, Geneva Cantonal Department Head M. Spoerri, Geneva Representative, Geneva State Councillor C. Lamprecht Second row : Director of the the Danish Research Agency J. M. Hansen, University of Amsterdan Dean Faculty of Science W. Hoogland, Greek Minister of Tourism D. Avramopoulos, Slovak Minister of Education M. Fronc, Finnish Minister of Trade and Industry M. Pekkarinen, British Minister for Science and Innovation Lord Sainsbury of Turville, Geneva State Chancellor R. Hensler Third row : European Commission Ambassador C. Trojan, Belgian Ambassador F. Roux, Swedish Secretary of State K. Eliasson, US Mission Representative L. Cassel, Japanese Former Minister A. Toyama, Bulgarian Deputy Minister of Science and Education K. Velev, German State Secretary U. Kasparick, Royal Norwegian Ministry of Education and Research State Secretary B. Haugstad, Portuguese Secretary of State for Science and Innovation P. de Sampaio Nunes, Isrealian Ambassador to the United Nations Office in Geneva I. Levanon, Hungarian National Office of Research and Technology Vice-President A. Siegler, UNESCO Director, Division of Basic and Engineering Sciences N. Maciej, Russian Minister of Education and Science A. Fursenko, Turkish Ambassador T. Kurttekin