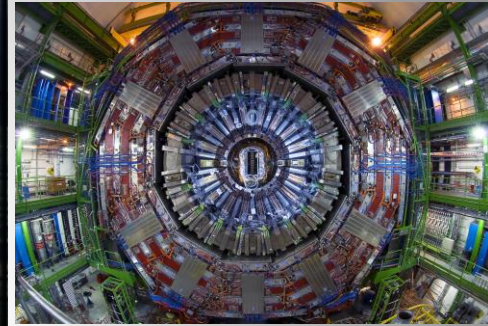
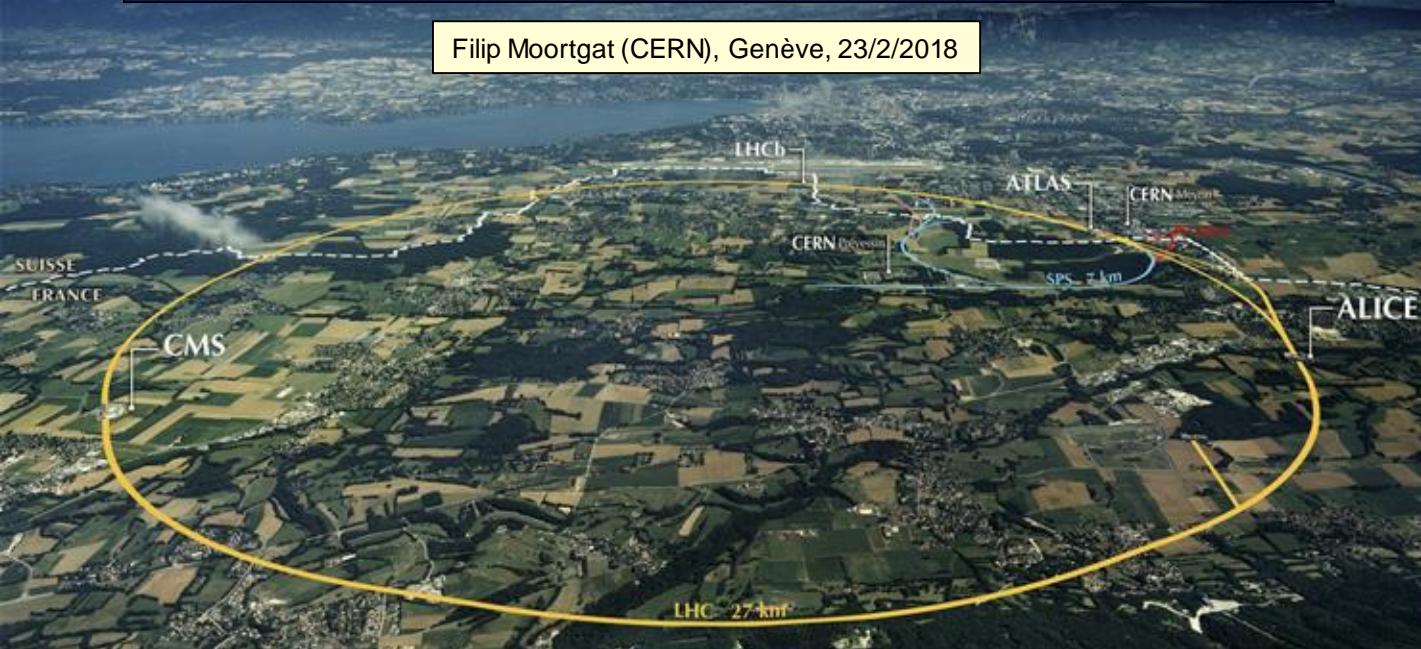




CERN: Wie zijn we? Wat doen we? En waarom?

Filip Moortgat (CERN), Genève, 23/2/2018

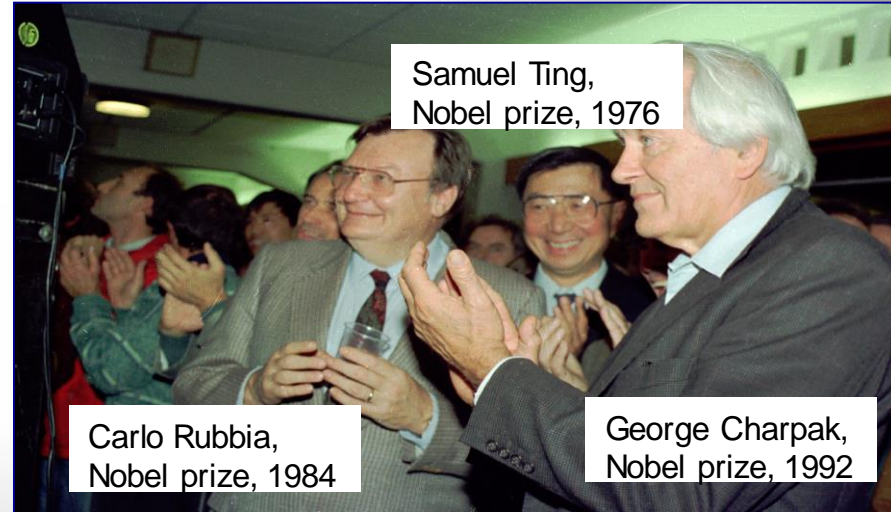


CERN : het grootste onderzoekslaboratorium ter wereld



Opdracht:

- ❑ **Wetenschappelijk onderzoek:** grensverleggend fundamenteel onderzoek in kern- en deeltjesfysica (bvb. ontdekking van de W, Z & Higgs bosonen)
- ❑ **Technologie en innovatie** → overdracht naar maatschappij (bvb. het World Wide Web, medische toepassingen)
- ❑ **Opleiding en educatie**
- ❑ **Samenbrengen** van verschillende landen en culturen: > 110 nationaliteiten



1945: Europa na 2 verwoestende oorlogen in 30 jaar



“Les chercheurs quittent l’ Europe pour USA”



CERN was founded in 1954: 12 European States Today: 22 Member States

Member States: Austria, Belgium, Bulgaria, the Czech Republic, Denmark, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Israel, Italy, the Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Spain, Sweden, Switzerland and the United Kingdom

Associate Member States: Cyprus, India, Pakistan, Serbia, Slovenia, Turkey, Ukraine

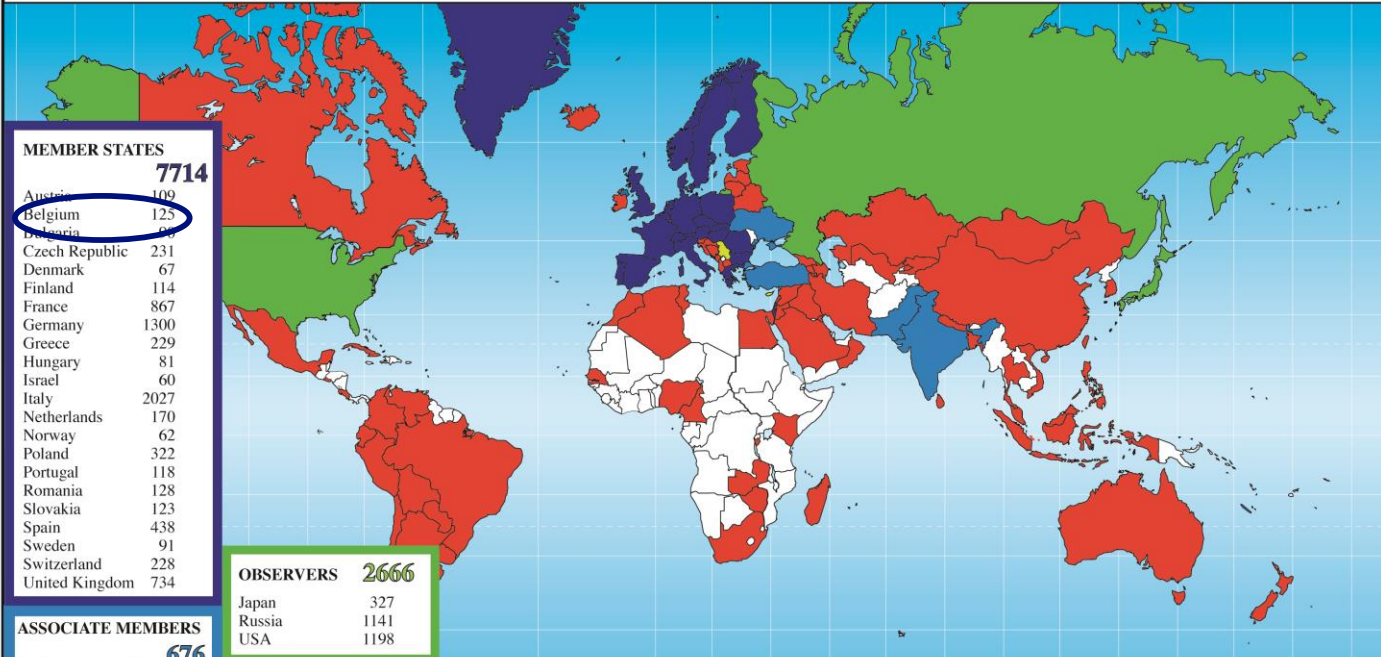
~ 2500 staff, 3700 on payroll
~ 13000 users from all over the world

Budget (2016) ~1100 MCHF (~ 1 cappuccino/year per European citizen):
each Member State contributes in proportion to its Net National Income

Belgium: ~ 2.7% (~ 25 Meuro)



Distribution of All CERN Users by Nationality on 20 January 2017



MEMBER STATES
7714

Austria	109
Belgium	125
Bulgaria	66
Czech Republic	231
Denmark	67
Finland	114
France	867
Germany	1300
Greece	229
Hungary	81
Israel	60
Italy	2027
Netherlands	170
Norway	62
Poland	322
Portugal	118
Romania	128
Slovakia	123
Spain	438
Sweden	91
Switzerland	228
United Kingdom	734

OBSERVERS
2666

Japan	327
Russia	1141
USA	1198

ASSOCIATE MEMBERS
676

India	336
Pakistan	67
Turkey	173
Ukraine	100

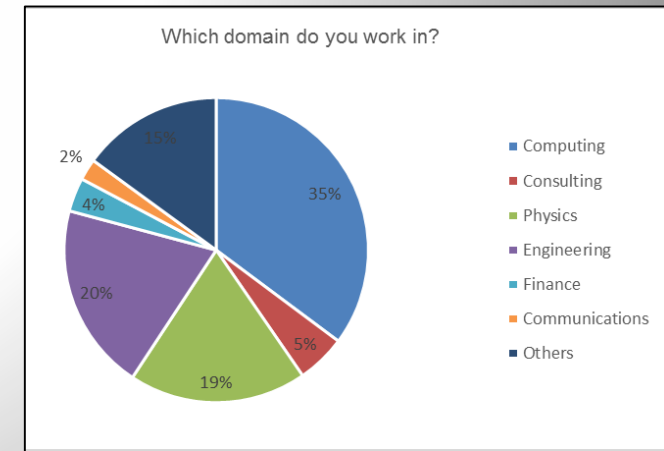
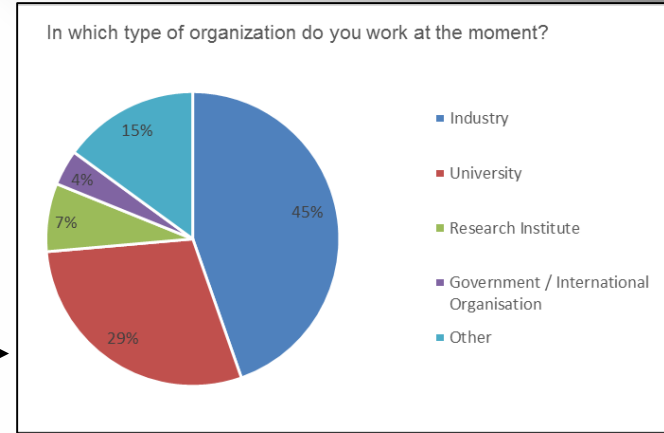
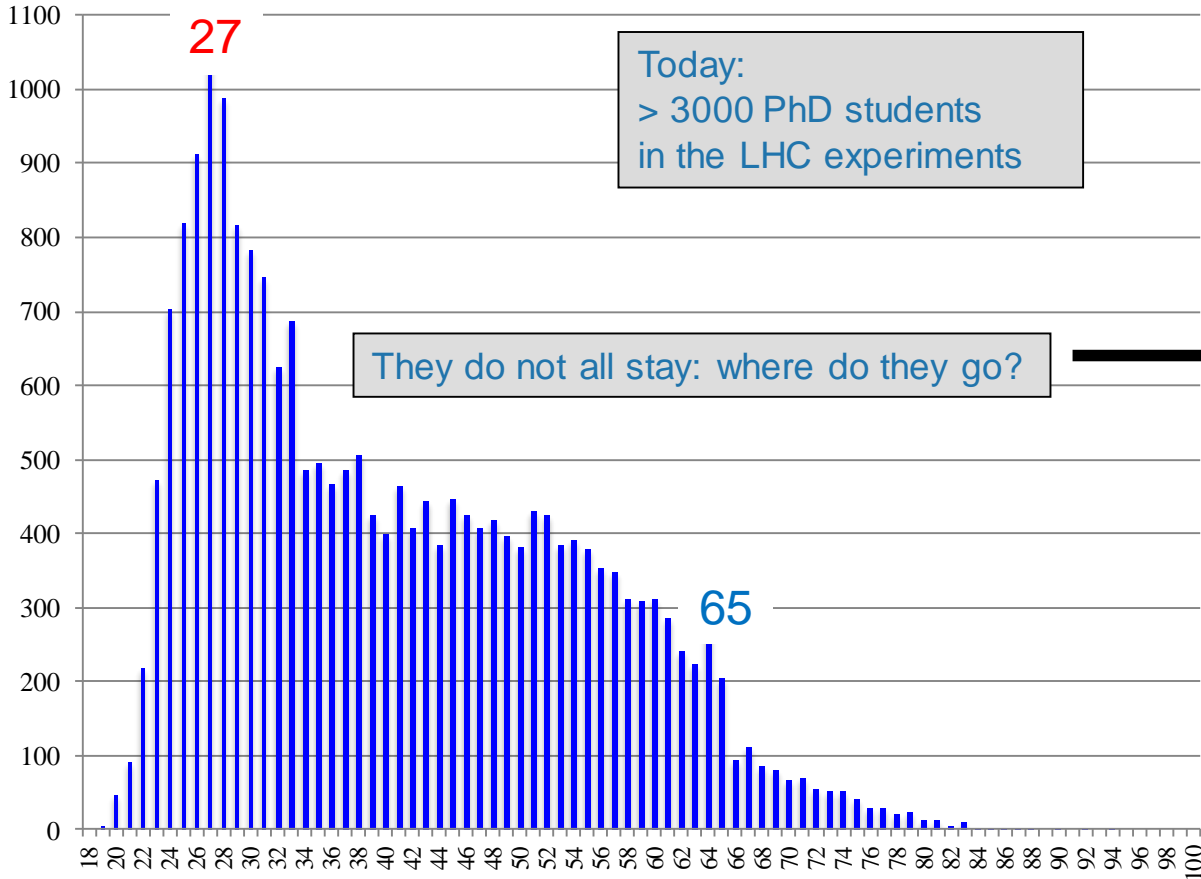
ASSOCIATE MEMBERS IN THE PRE-STAGE TO MEMBERSHIP
70

Cyprus	25
Serbia	45

OTHERS
1803

Bosnia & Herzegovina	1	Ecuador	4	Kazakhstan	1	Mauritius	2	Peru	6	Taiwan	54
Brazil	123	Egypt	31	Kenya	3	Mexico	82	Philippines	3	Thailand	23
Albania	4	Burundi	1	El Salvador	1	Korea Rep.	172	Mongolia	2	San Marino	1
Algeria	13	Cameroon	1	Estonia	13	Kyrgyzstan	1	Montenegro	4	Saudi Arabia	1
Argentina	21	Canada	152	Georgia	47	Latvia	2	Morocco	18	Senegal	2
Armenia	25	Chile	21	Iceland	5	Lebanon	17	Nepal	9	Singapore	6
Australia	32	China	439	Indonesia	12	Lithuania	32	New Zealand	6	Sint Maarten	1
Azerbaijan	9	Colombia	43	Iran	59	Luxembourg	1	Nigeria	3	Slovenia	31
Bangladesh	11	Costa Rica	2	Iraq	1	Madagascar	2	Oman	3	South Africa	39
Belarus	46	Croatia	41	Ireland	16	Malaysia	19	Palestine (O.T.)	7	Sri Lanka	3
Bolivia	4	Cuba	16	Jordan	2	Malta	10	Paraguay	1	Syria	1

Age distribution of scientists working at CERN - and where they go afterwards -



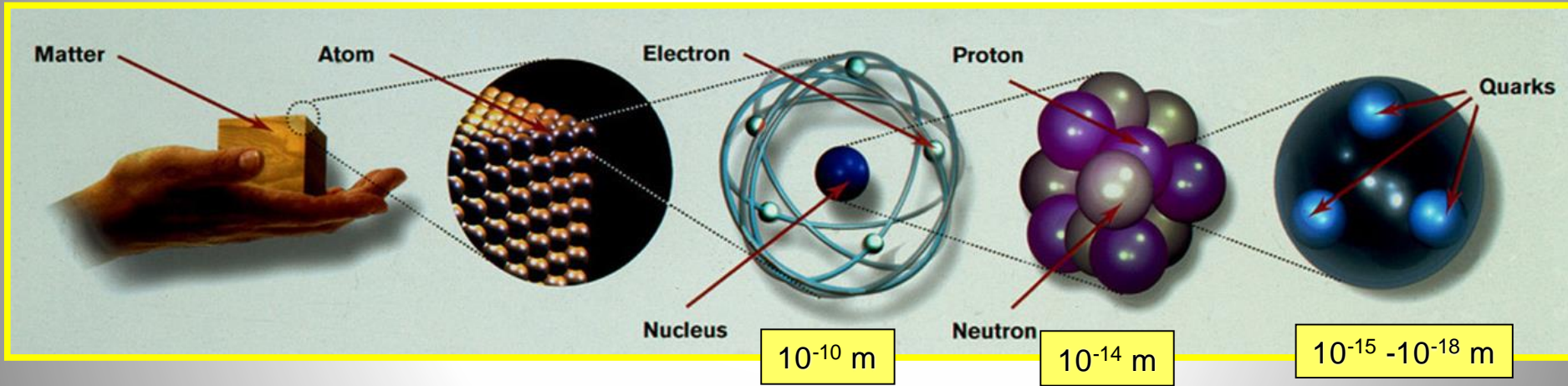


De grote vragen van de deeltjesfysica:

- Wat zijn de fundamentele bouwstenen van de materie?
- Hoe interageren deze bouwstenen met elkaar?
- Waar komt “massa” vandaan?
- Wat is “donkere materie”?
- Hoe is het universum ontstaan?
- Hoe zal het universum evolueren?

Hoe proberen we die vragen te beantwoorden?

Studie van elementaire deeltjes (de bouwstenen van materie: electrons and quarks) en de krachten die ertussen werken op het meest fundamentele niveau



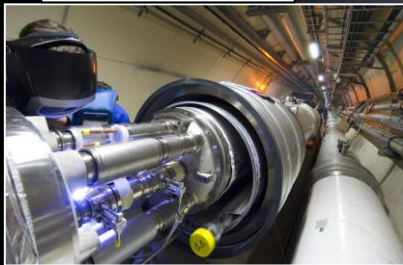
Met moderne versnellrs kunnen we de fundamentele wetten van de natuurkunde bestuderen tot op een schaal van 10^{-18} m

- Inzicht in de structuur en de evolutie van het Universum
- van het hele kleine to het hele grote ...

Evolutie van het Universum

Big Bang

Versnellers

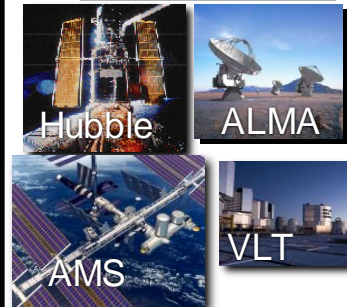


380000 jaar

13.7 miljard jaar

10^{28} cm

Telescopen



today

Waar is materie van gemaakt?



Democritus , ~5 BC

“Het Universum bestaat uit twee elementen: de atomen en de lege ruimte waarin ze bestaan en bewegen”

‘Alle materie bestaat uit **onzichtbare deeltjes die ‘atomen’ heten**



Leucippus , ~5 BC

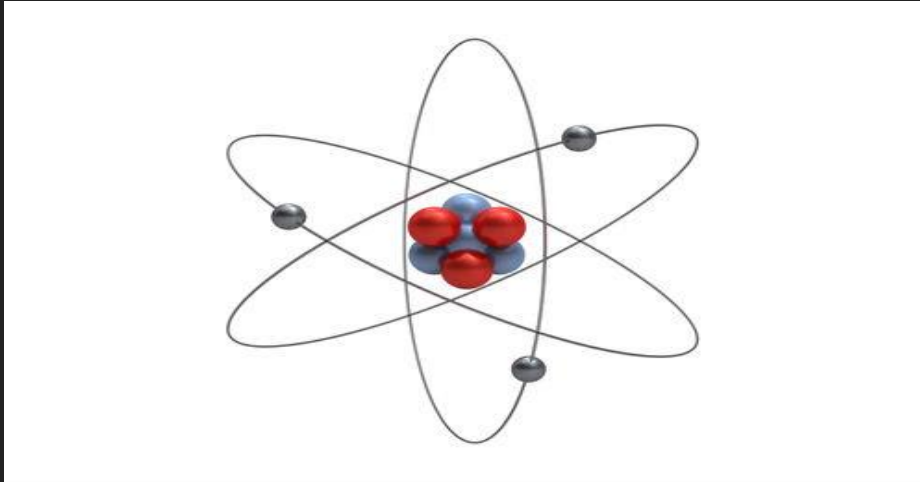
Het woord *atoom* komt van *atomos*, een oud grieks woord dat *ondeelbaar* betekent

‘Atomen zijn **onverwoestbaar**, vast en onzichtbaar, homogeen, en verschillen in grootte, vorm, massa, positie en configuratie’

Waar is materie van gemaakt?



Waaruit bestaat een atoom?



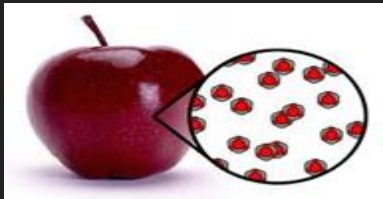
Proton



Neutron



Electron

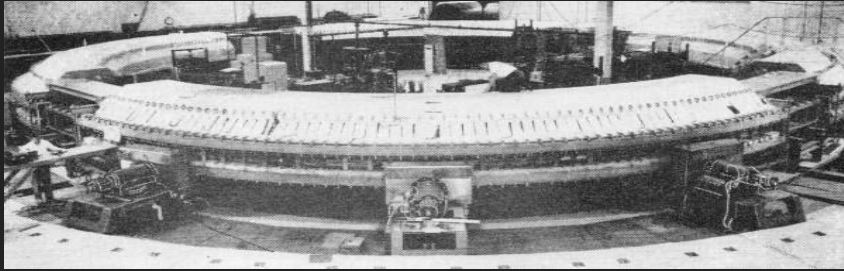


- 1897 electron ontdekt door J.J. Thompson
- 1911 atoomkern ontdekt door Ernest Rutherford (kern van waterstofatoom = proton)
- 1932 neutron ontdekt door James Chadwick

Waar is materie van gemaakt?



Eerste deeltjesversnellers (1950s)

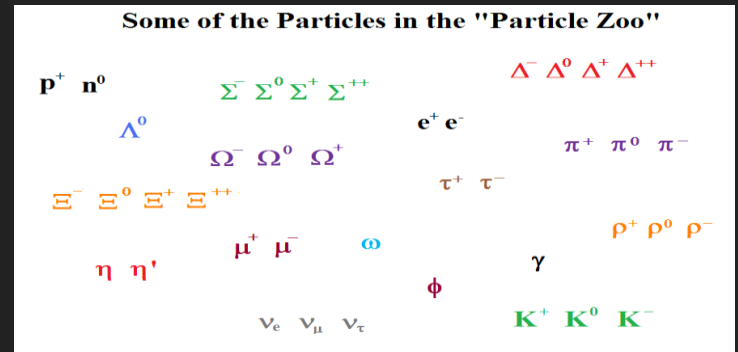


De Brookhaven Cosmotron



Plethora aan NIEUWE deeltjes ontdekt met de eerste versnellers!

Sigma deeltjes, rho deeltjes, Delta deeltjes, kaonen, Lambda deeltjes...



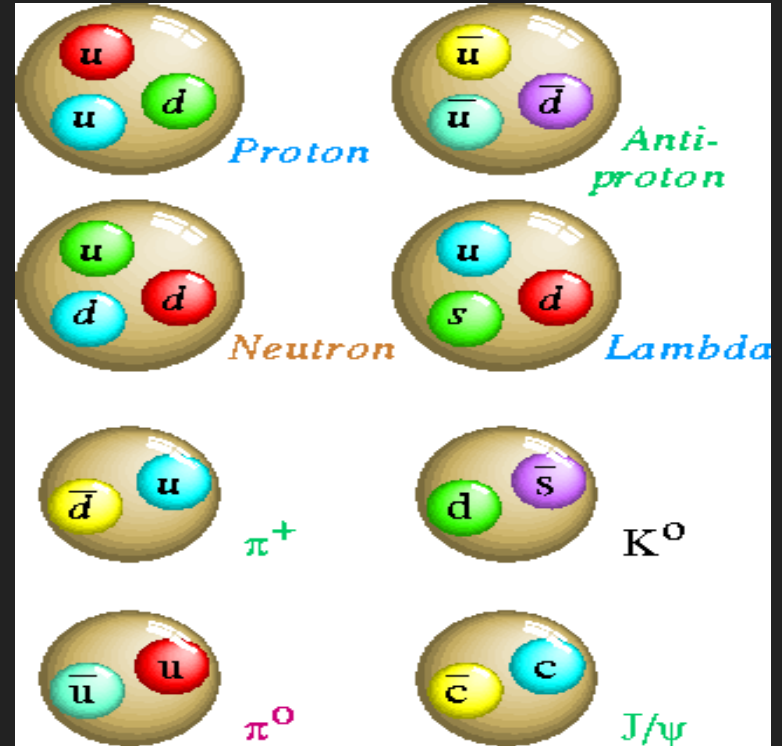
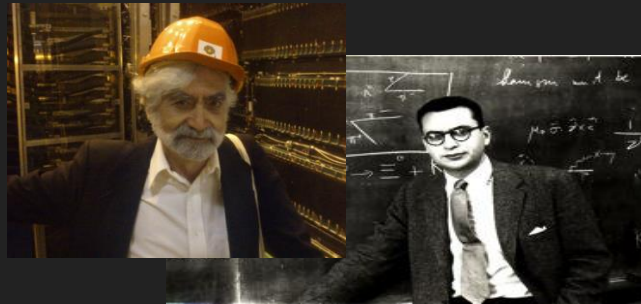
Opnieuw de rijt vraag:
is er een onderliggende structuur?

Waar is materie van gemaakt?



DOORBRAAK

1960s Murray Gell-Mann (Caltech) en George Zweig (CERN) poneerden dat hadronen uit meer fundamentele deeltjes bestaan: *quarks*.



Quarks kunnen enkel per 2 of 3 bestaan.
Er bestaan 6 “smaken” van quarks (u, d, s, c, b, t) en 3 “kleuren” (rood, groen, blauw)

Waar is materie van gemaakt?



Mesons $q\bar{q}$

Mesons are bosonic hadrons.
There are about 140 types of mesons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$

Baryons are fermionic hadrons.
There are about 120 types of baryons.

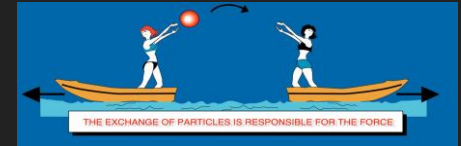
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
\bar{p}	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	-1	1.672	3/2

Waar zijn de fundamentele krachten?

- Foton (licht quantum) – deeltje dat de electromagnetische kracht overdraagt gesuggereerd door Einstein in 1905
- Later: “kracht-overdragend” deeltjes (bosonen) die corresponderen met de 4 fundamentele krachten:

Fundamental Force Particles

Force	Particles Experiencing	Force Carrier Particle	Range	Relative Strength*
Gravity acts between objects with mass	all particles with mass	graviton (not yet observed)	infinity	much weaker ↓ much stronger
Weak Force governs particle decay	quarks and leptons	W^+ , W^- , Z^0 (W and Z)	short range	
Electromagnetism acts between electrically charged particles	electrically charged	γ (photon)	infinity	
Strong Force** binds quarks together	quarks and gluons	g (gluon)	short range	



Het “standaardmodel”

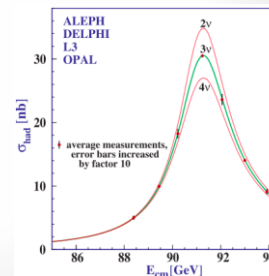


Ontwikkeld over de voorbije 100 jaar: de combinatie van **Quantum Mechanica en Speciale Relativiteitstheory** tesamen met alle ontdekte fundamentele deeltjes heeft geleid tot het **Standaardmodel van de deeltjesfysica.**

Nobelprijs voor Salam,
Glashow and Weinberg

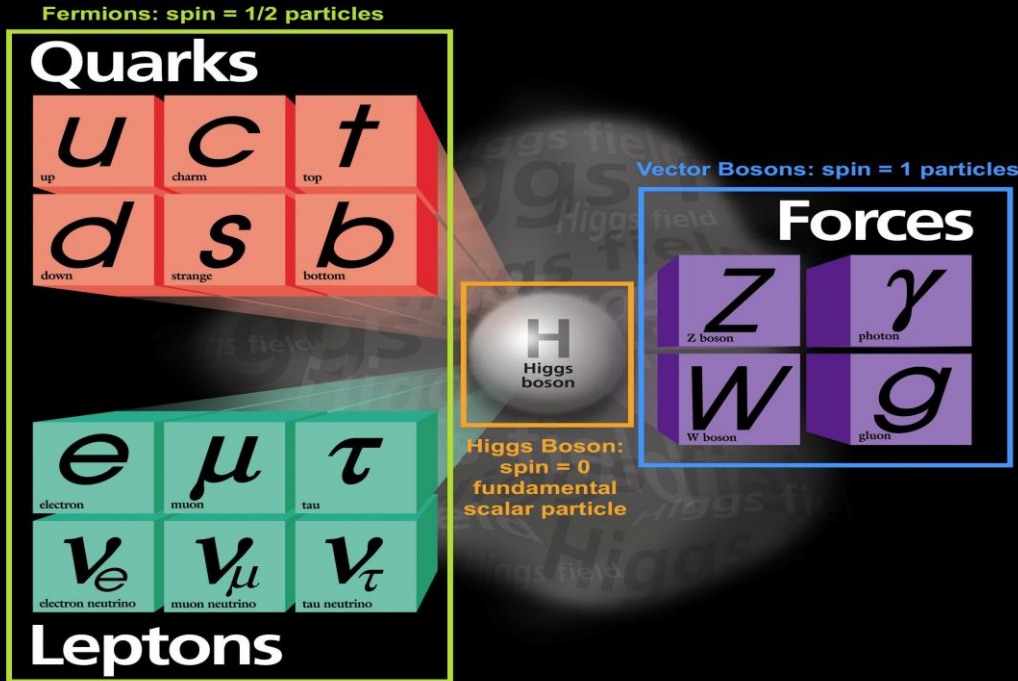


Getest (tot 0.1% precisie) door verschillende experimenten (CERN, DESY, Fermilab, ...)



Perfect akkoord tussen de theoretische voorspellingen en de experimentele metingen in alle laboratoria

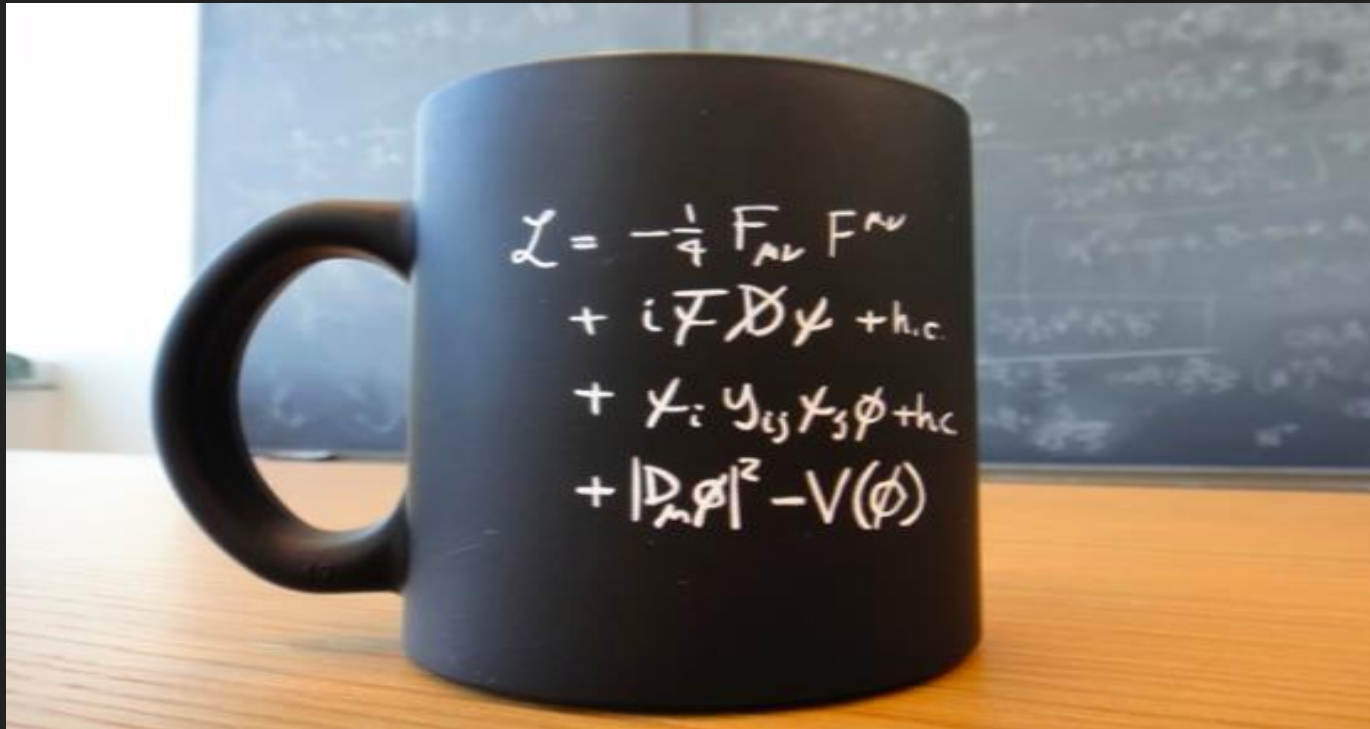
Het standaardmodel: deeltjes



Het Higgs boson was het laatste van de fundamentele deeltjes voorspeld door het standaardmodel (in 1968) dat nog niet ontdekt was.

Ontdekt door de LHC op CERN in 2012.

Het standaardmodel: interacties



De oorsprong van massa



Probleem met het standaardmodel (zonder Higgs boson): alle deeltjes zijn massaloos. Introduceren van massa breekt de fundamentele ijksymmetrie. Oei.

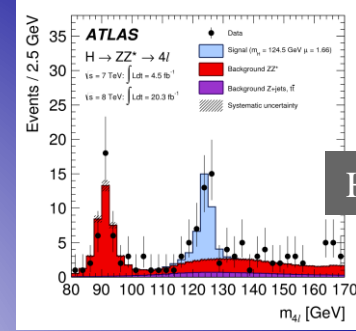
Oplossing voorgesteld door Brout-Englert-Higgs:

- er bestaat een scalair veld doorheen het universum
- deeltjes die interageren met dit veld krijgen een massa – hoe sterker de interactie, hoe groter de massa
- het deeltje geassocieerd met het Brout-Englert-Higgs veld is het **Higgs boson**

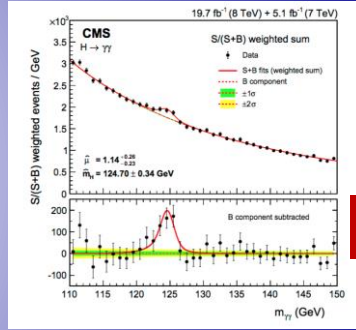


licht

zwaar



$H \rightarrow 4l$



$H \rightarrow \gamma\gamma$

The Nobel Prize in Physics 2013 was awarded jointly to François Englert and Peter W. Higgs "for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider".

Vorbij het Standaardmodel



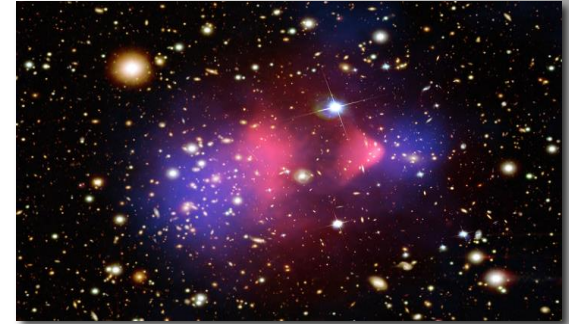
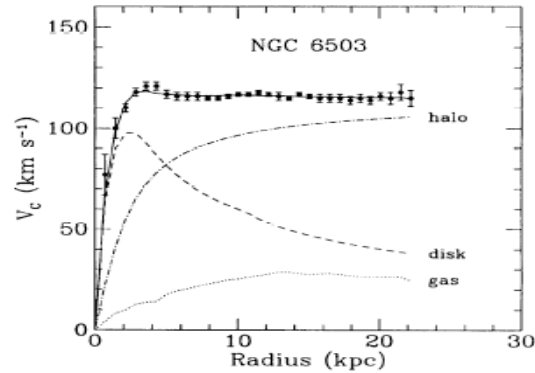
Het Standaardmodel is echter niet de “ultieme” theorie van de deetjesfysica:

- Zwaartekracht ontbreekt !!!
- Wat is de “Donkere Materie”?
- Bestaan er extra dimensies ?
- Massa van neutrinos?
- Waarom is er zoveel materie en zo weinig antimaterie in het universum ?
- ... en een heleboel andere fundamentele open vragen

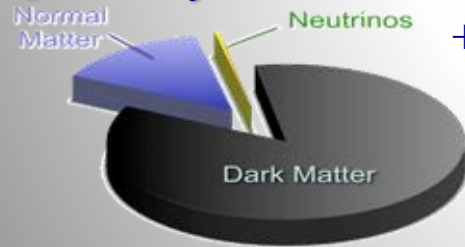
Donkere Materie

- ❑ Rotational curves
- ❑ Gravitational lensing
- ❑ Hot gas in clusters

→ Er bestaat zoiets als Donkere Materie



Quantify?



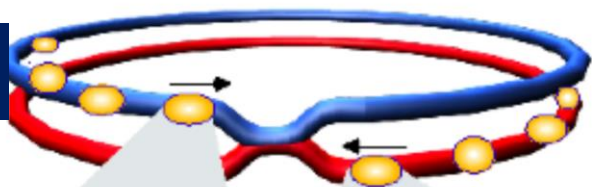
From Cosmic Microwave Background measurements
+ large scale structures + Big Bang Nucleosynthesis:

~ 85% van de materie in het universum is
Donkere Materie!

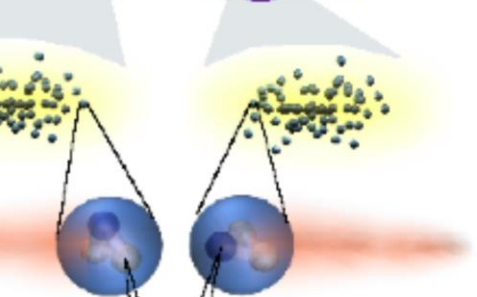
Hoe kunnen we dit alles bestuderen?



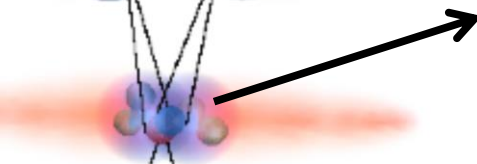
proton bundels



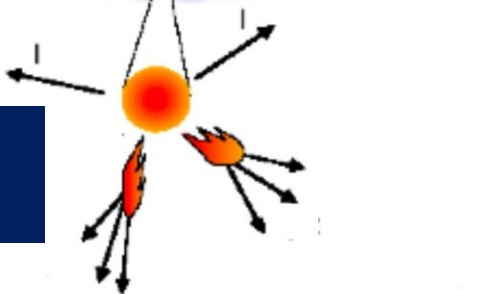
protonen botsen



interagerende quarks

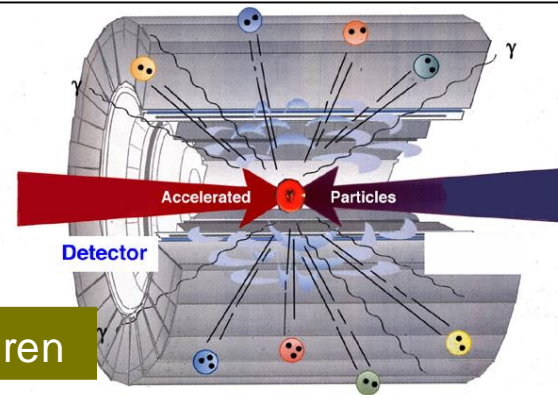


productie en verval van een nieuw deeltje



deeltjesversnellers

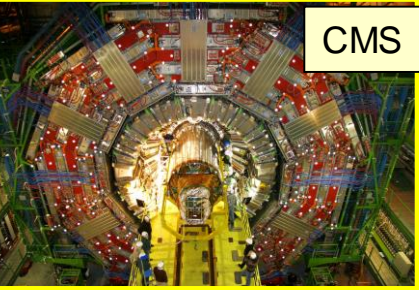
- studie van de fundamentele bouwstenen van de materie
- productie van (nieuwe) zware deeltjes ($E=mc^2$)
- botsingsenergie = temperatuur van universum 10^{-12} s na Oerknal



deeltjesdetectoren

The Large Hadron Collider (LHC) project: de krachtigste versneller ter wereld

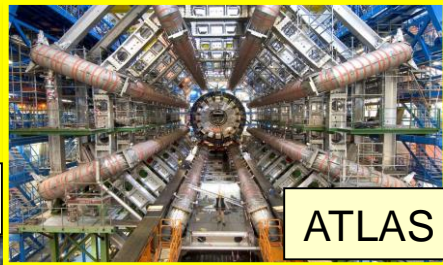
- ❑ 27 km ring, 100 m onder de grond
- ❑ operationeel in 2010 → exploratie van nieuw energiedomein



CMS



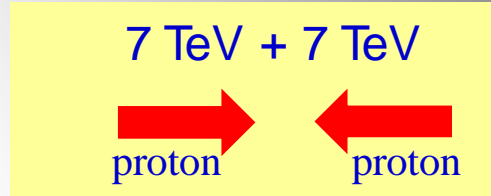
LHCb



ATLAS



ALICE



1 TeV = 1 Tera electron volt
= 10^{12} electron volt



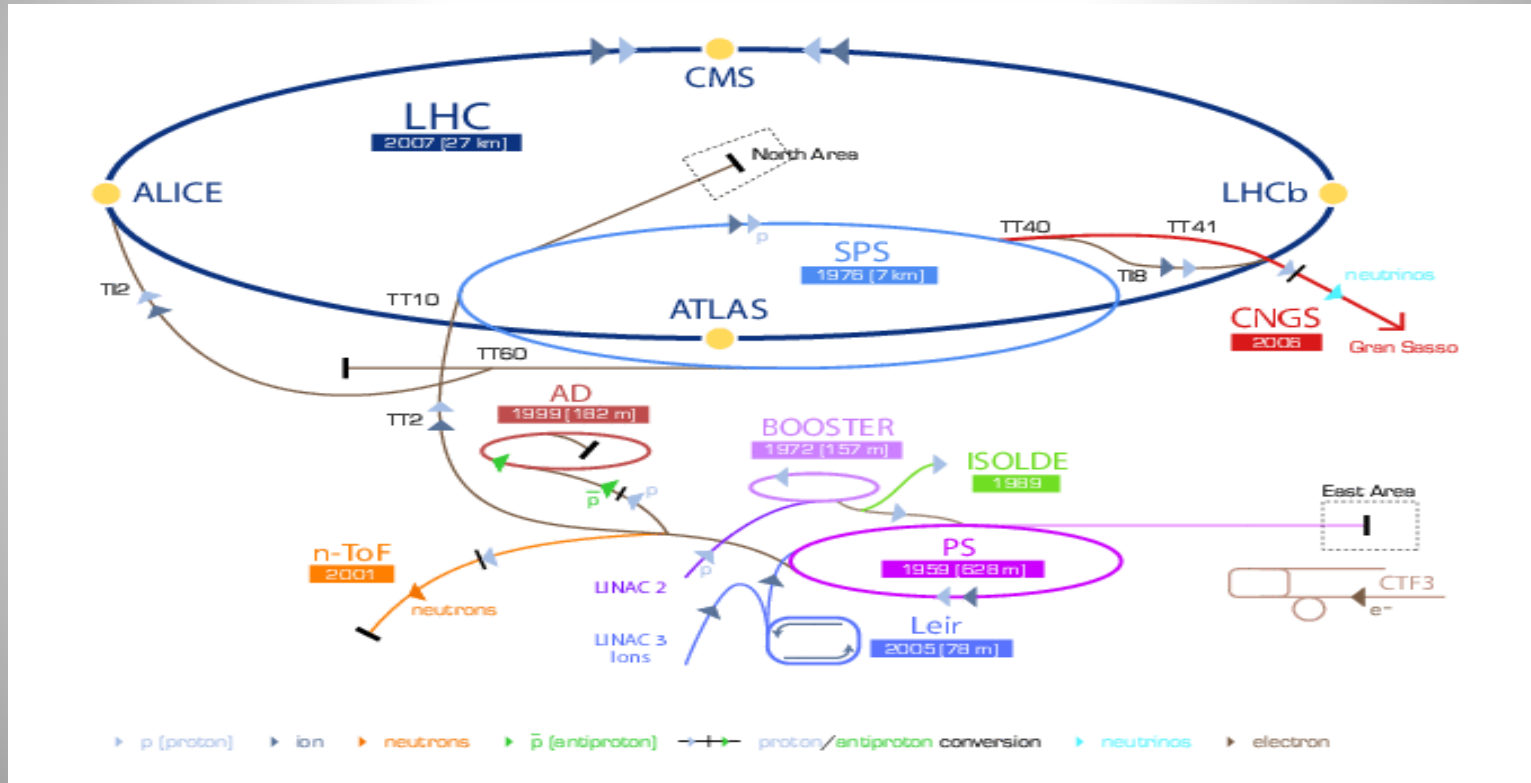
Belgische universiteiten dragen bij tot het CMS experiment

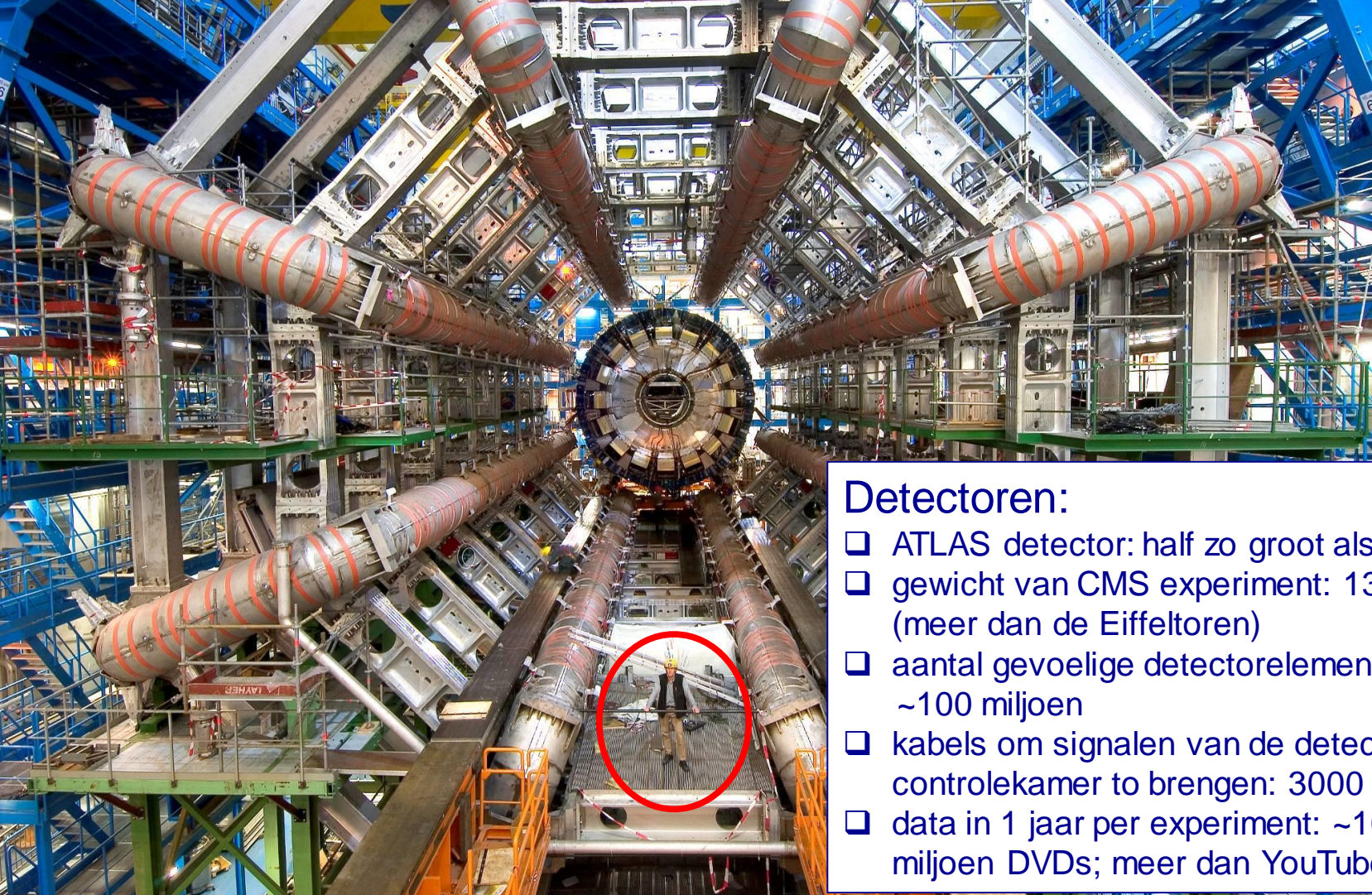


LHC versneller:

- 1232 high-tech supergeleidende magneten (8 Tesla)
- operationele temperatuur: 1.9 K (-271 °C)
→ LHC is de koudste plek in het universum
- aantal protonen per bundel: 200000 miljard
- toeren per seconde in de 27 km ring: 11000
- aantal botsingen per seconde: 40 miljoen
- botsing “temperatuur: 10^{16} K (miljard keer heter dan de zon)
- meest “lege” plek in ons zonnestelsel (vacuum)

CERN – world biggest accelerator complex

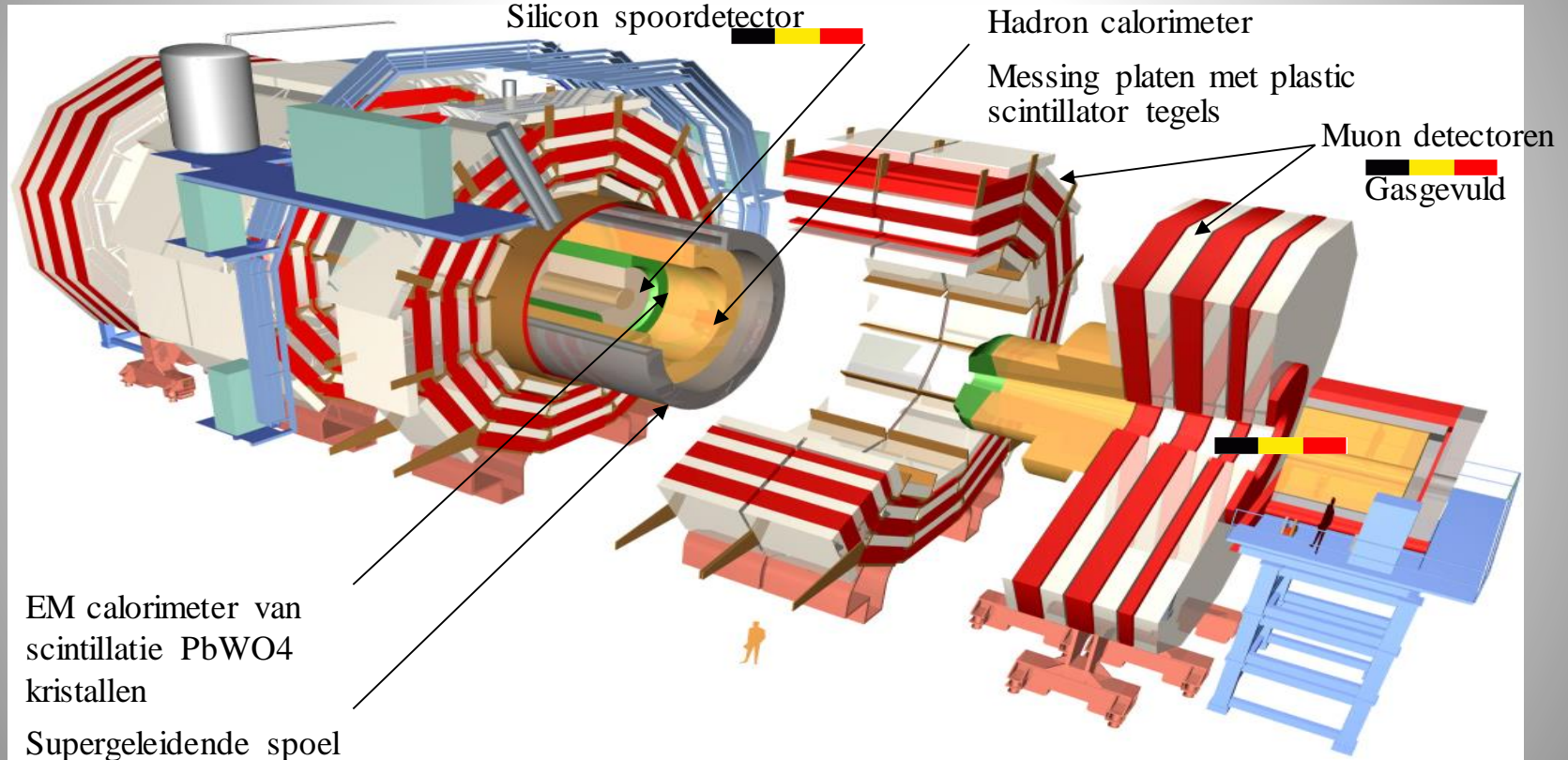




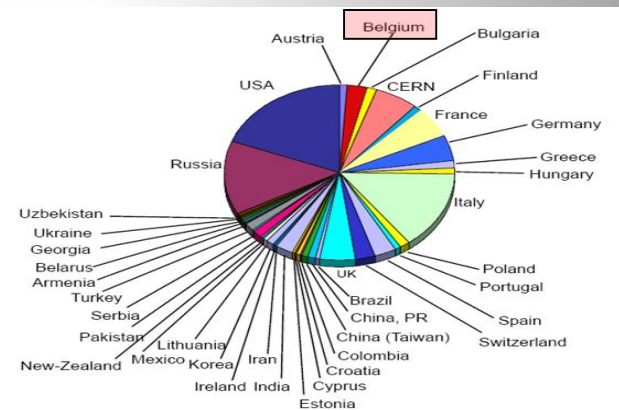
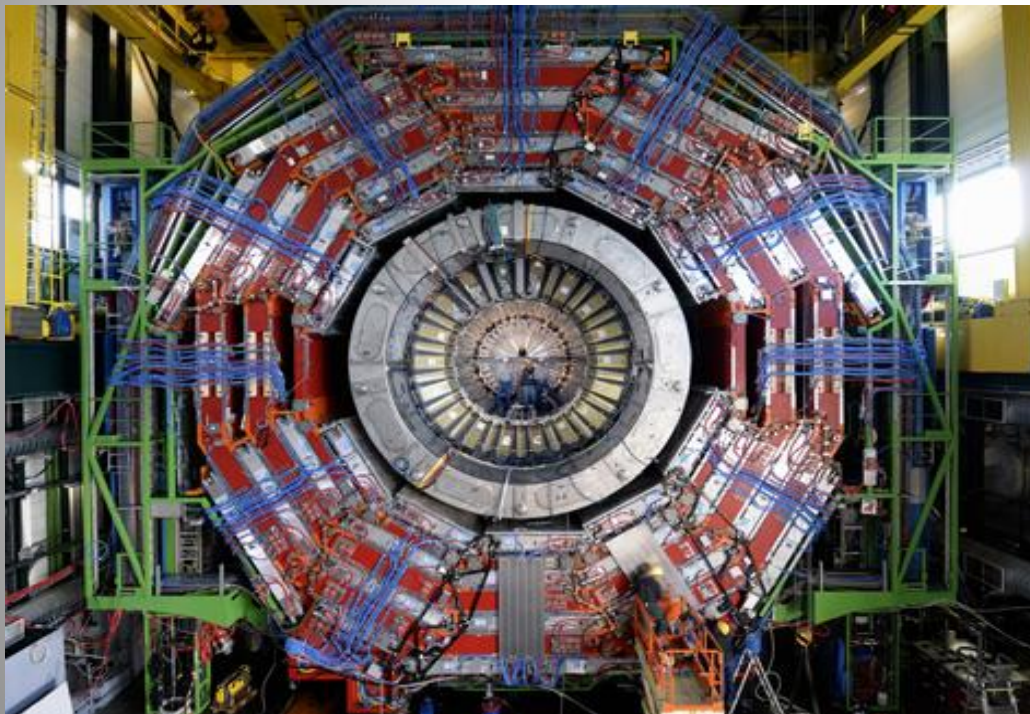
Detectoren:

- ATLAS detector: half zo groot als Notre Dame
- gewicht van CMS experiment: 13000 ton (meer dan de Eiffeltoren)
- aantal gevoelige detectorelementen: ~100 miljoen
- kabels om signalen van de detector naar de controlekamer to brengen: 3000 km
- data in 1 jaar per experiment: ~10 PB (20 miljoen DVDs; meer dan YouTube, Twitter)

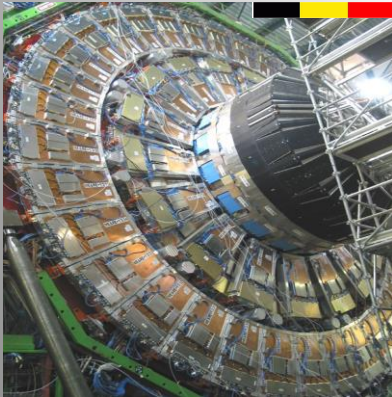
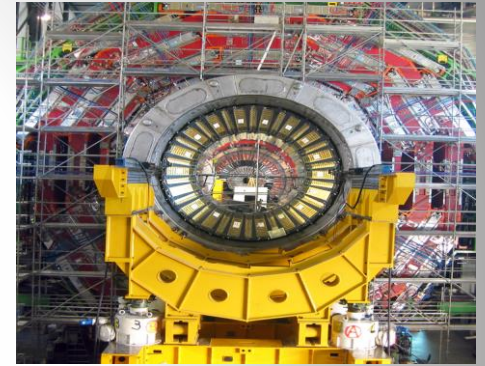
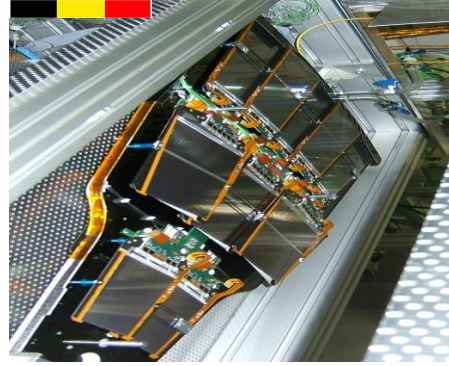
De CMS detector



Belgische bijdragen tot CMS



CMS in opbouw



CMS: de silicium sporendetector



Silicium sensoren met fijne onderverdeling (baantjes en pixels) laten toe de deeltjessporen te meten in het magneetveld en aldus hun impuls te bepalen.

Een digitale camera met meer dan 70 miljoen pixels die 40 miljoen fotos per seconde trekt !

Doel: Meten van de trajecten van geladen deeltjes

CMS: de electromagnetische calorimeter



80000 kristallen van PbWO_4 (loodtungstaat) geven scintillatielicht waarvan de intensiteit evenredig met de energie van het invallend deeltje (electron of foton)

~80% metaal – volledig doorschijnend !

Doel: meting der energie van electronen, positronen en gammas

CMS : de hadron calorimeter

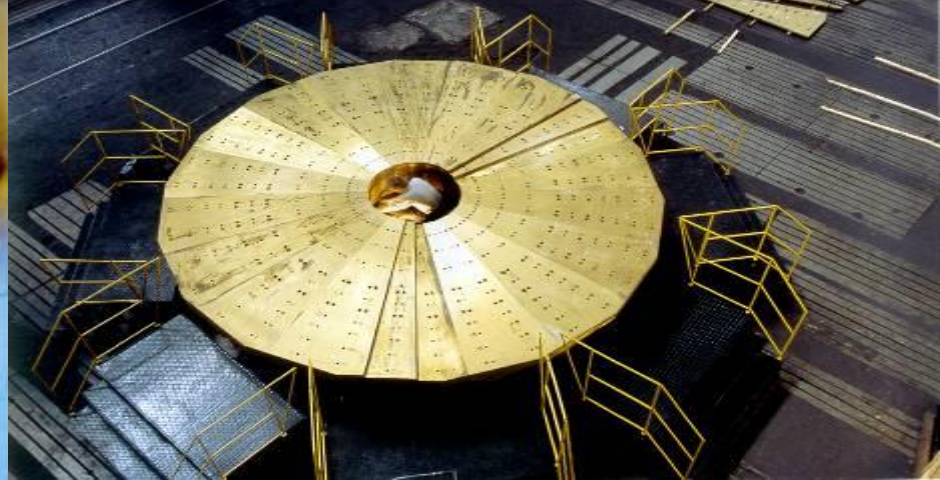


Opgebouwd uit alternerende lagen van messing en plastieken scintillator tegels.

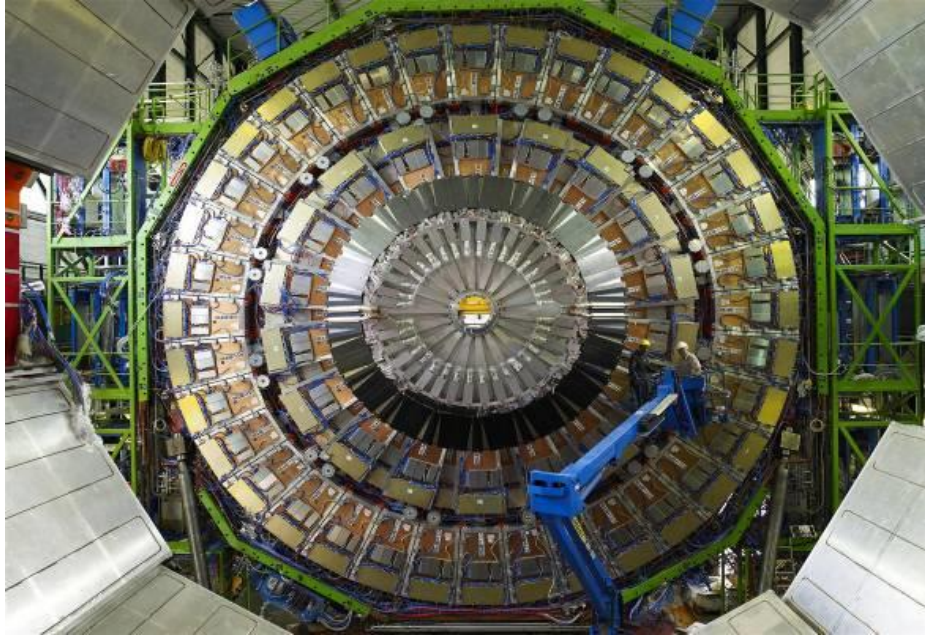
Hulzen van oude obussen van de Russische marine werden hiervoor gerecycleerd !

Doel: meting van de energie van hadronen (bv. proton, neutron)

Recyclage!



CMS: de muon detectoren



CMS gebruikt 3 soorten muon detectors: drift kamers (DT), cathode strip kamers (CSC) en resistieve platen kamers (RPC).

De totale oppervlakte beslaat ongeveer die van een voetbalveld...
6000 m² !

Doel: muonen identificeren en hun impuls meten

LHC is gebouwd om antwoorden te vinden op fundamentele vragen



Wat is de oorsprong van de massa van elementaire deeltjes (quarks, electronen, ...) ? → gebeurt via het Higgs boson ✓

85% van de materie in het universum is “donker”: wat is dit?

Waarom is er zo weinig antimaterie in het universum?

Wat zijn de eigenschappen van het oerplasma dat het universum vulde $\sim 10 \mu\text{s}$ na de Oerknal?

Bestaan er andere krachten of dimensies?

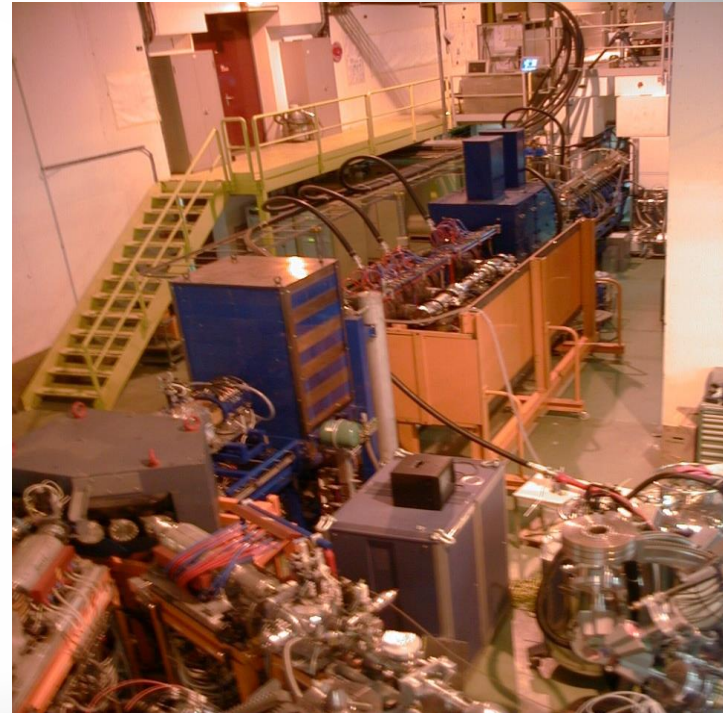
Etc. etc.

ISOLDE - Isotope Separator On Line, and Radioactive beam EXperiment (REX)



Een alchemie fabriek voor kernfysica

Laag-energetische bundels van radioactieve isotopen - atoomkernen. ISOLDE, gelegen naast de Proton-Synchrotron Booster (PSB), is zoals een kleine alchemiefabriek, die een element in een ander element kan veranderen. ISOLDE produceert meer dan 1000 verschillende isotopen voor een breed gamma van toepassingen.



AD: Studie van Antimaterie

Vergelijken van materie en antimaterie

Zeer belangrijk voor ons begrip van de fysica

$\bar{m}=m$ (massa) $\bar{g}=g$ (zwaartekracht)

ASACUSA
ATRAP
ALPHA

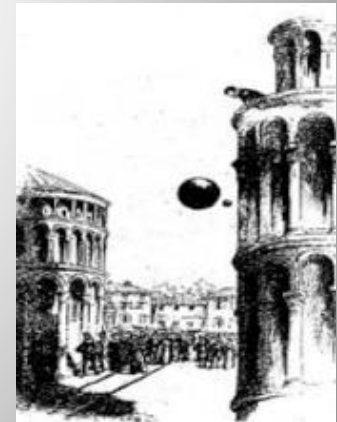
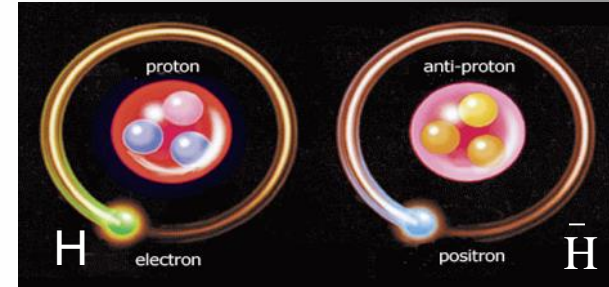
Vangen van \bar{H} in een magnetische fles

AEGIS

Kijk naar \bar{H} in vrije val
Galileo's experiment voor antimaterie!

ACE

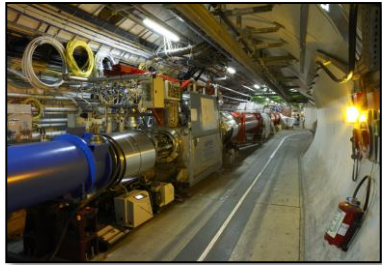
Biologische effecten van antiprotonen
Mogelijk gebruik voor kankertherapie



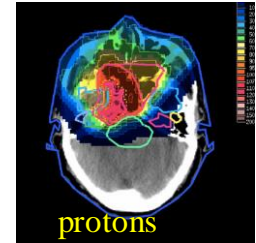
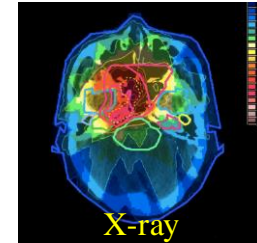
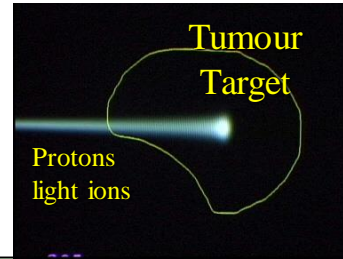


Complex, high-tech instruments needed in particle physics → cutting-edge technologies developed at CERN and collaborating Institutes → transferred to society

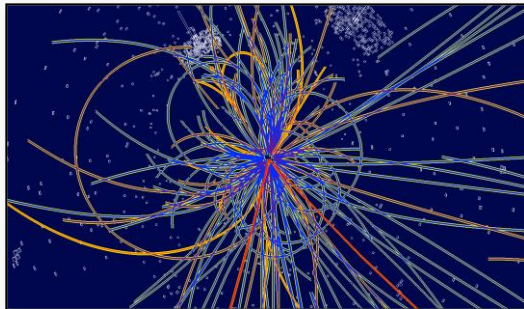
Examples of applications: medical imaging, cancer therapy, solar panels, materials science, airport scanners, cargo screening, food sterilization, nuclear waste transmutation, analysis of historical relics, etc. etc. ... not to mention the WEB ...



Hadron Therapy

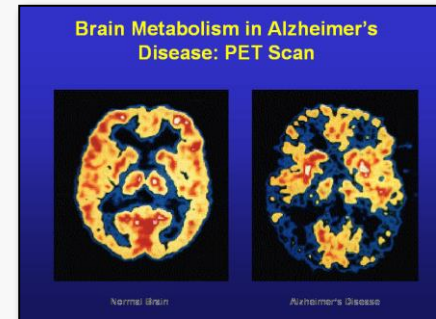


Particle accelerators: ~30'000 worldwide, of which ~17'000 used for medical applications
E.g. Hadron Therapy: > 50000 patients treated in Europe (14 facilities)



Imaging

e.g. PET scanner (based on CERN technology)
is main cancer diagnostic technique since 2000



CERN Education Activities



Scientists at CERN

Academic Training Programme



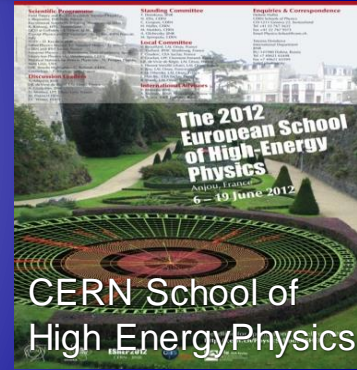
Asia-Europe-Pacific School of High-Energy Physics

Latin American School
CERN-Russia School



Young Researchers

CERN School of High Energy Physics
CERN School of Computing
CERN Accelerator School



CERN School of High Energy Physics

Physics Students

Summer Students Programme



CERN Teacher Schools

International and National Programmes

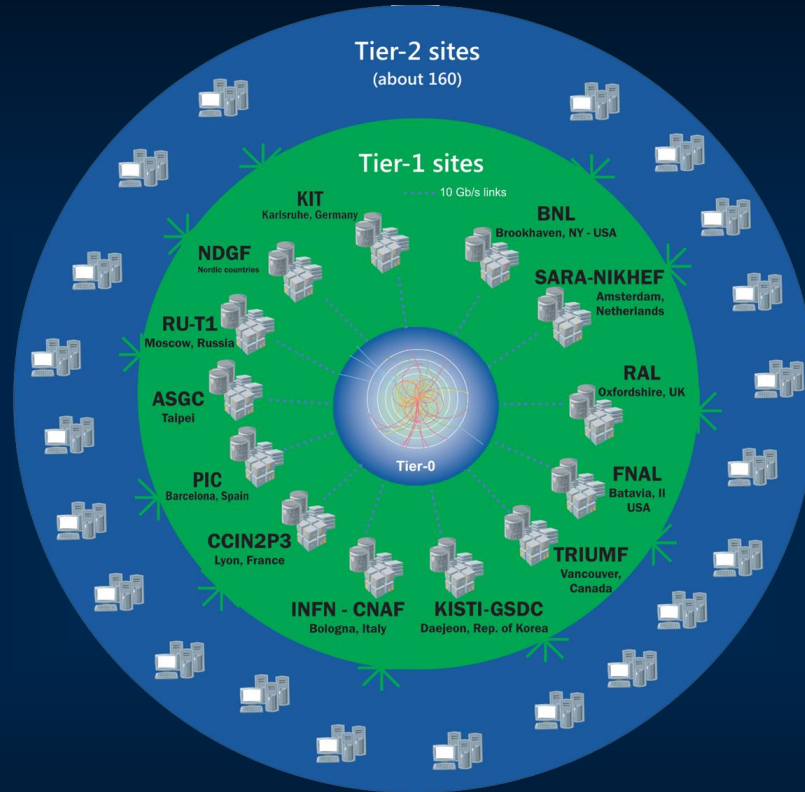


The Worldwide LHC Computing Grid

Tier-0
(CERN and Hungary):
data recording,
reconstruction and
distribution

Tier-1: permanent
storage, re-
processing,
analysis

Tier-2: Simulation,
end-user analysis
Belgium: Tier2



~170 sites,
40 countries

~500k CPU cores

500 PB of
storage

> 2 million jobs/day

10-100 Gb links

WLCG: An International collaboration to distribute and analyse LHC data

Integrates computer centres worldwide that provide computing and storage resource into a single infrastructure accessible by all LHC physicists

CERN



- **Doel:** antwoorden zoeken op fundamentele vragen over elementaire deeltjes en het universum → LHC is de krachtigste versneller ter wereld + vele kleinere experimenten
- Grensverleggende **technologische innovatie:** ook ten voordele van andere wetenschapsdomeinen en van de maatschappij
- **Opleiding:** studenten, leraars, jonge wetenschappers
- **Internationale samenwerking, diversiteit** en “**science for peace**”