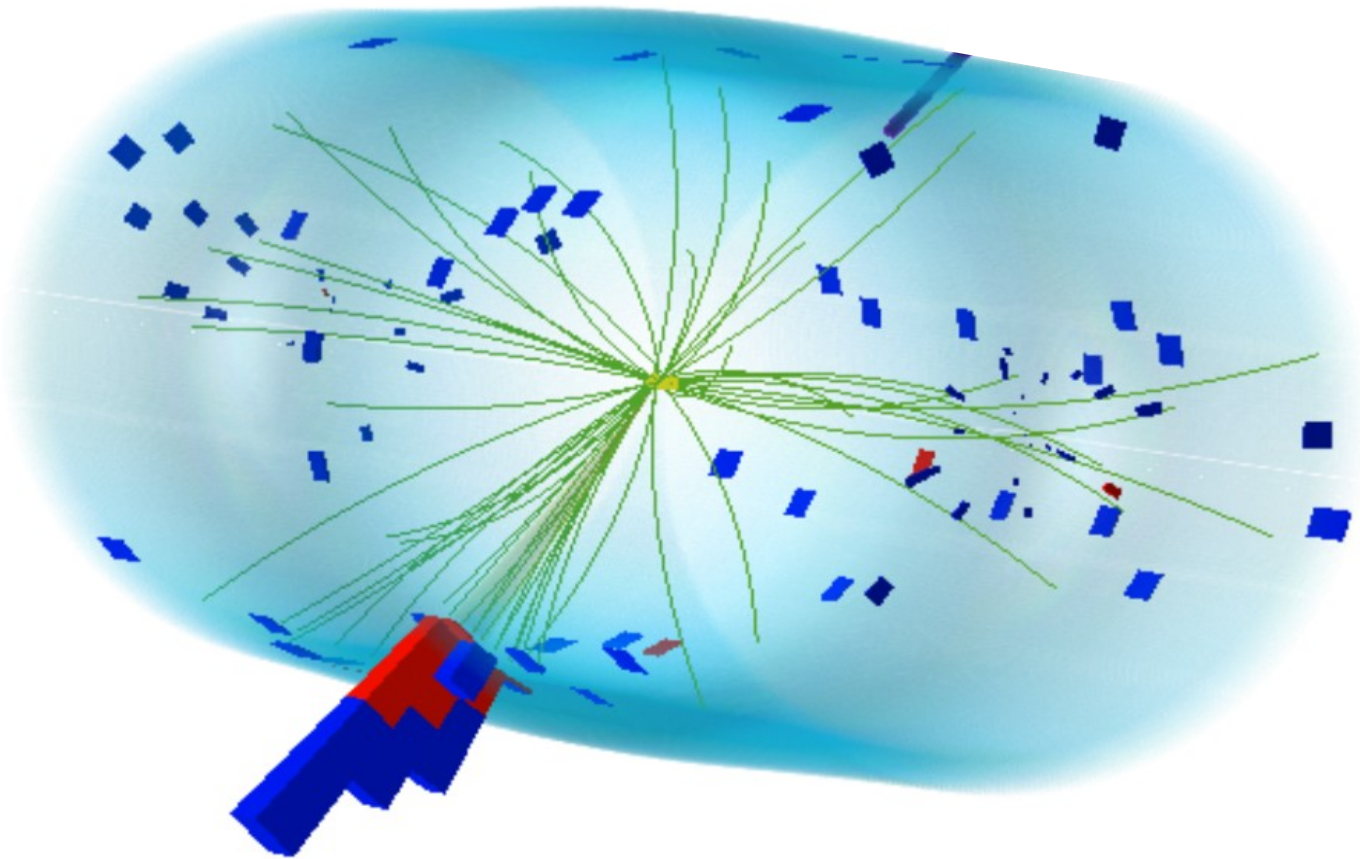


Speuren naar sporen van donkere materie



Speuren naar sporen van donkere materie

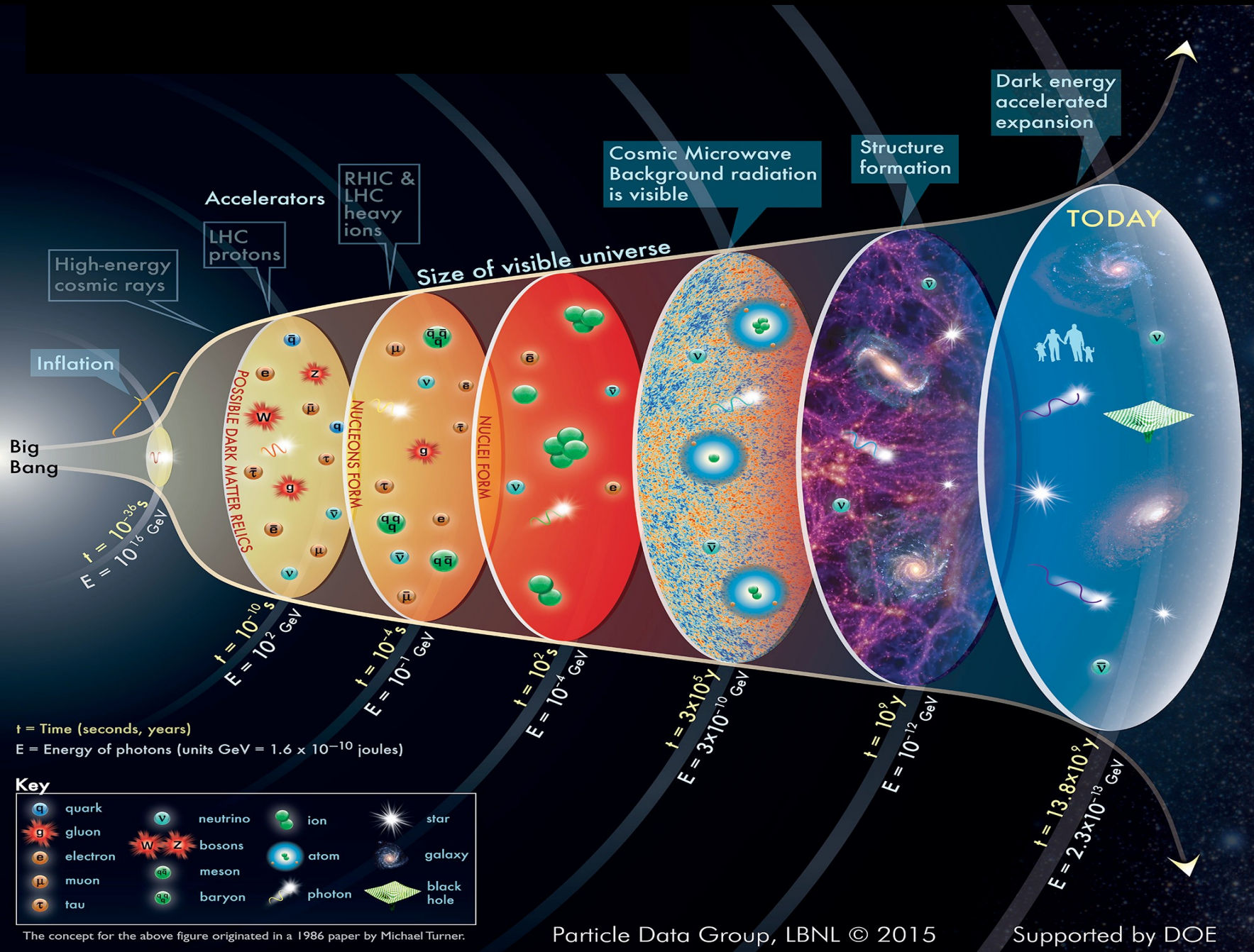
Hoe zoeken?

Wat is donker?

Wat is materie?

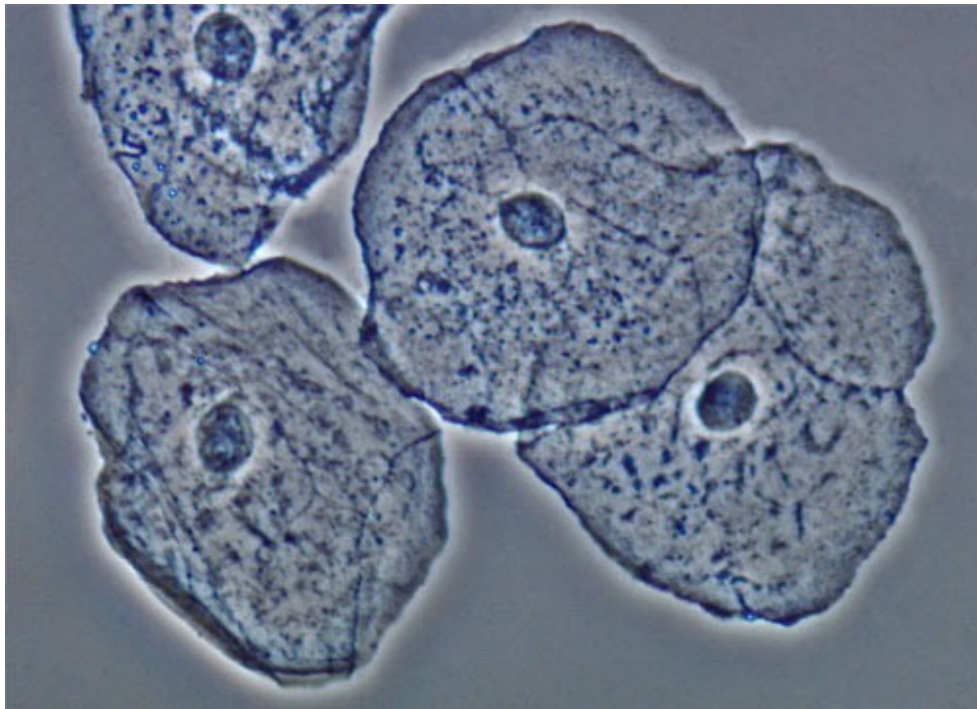


Op reis tussen allergrootste en allerkleinste



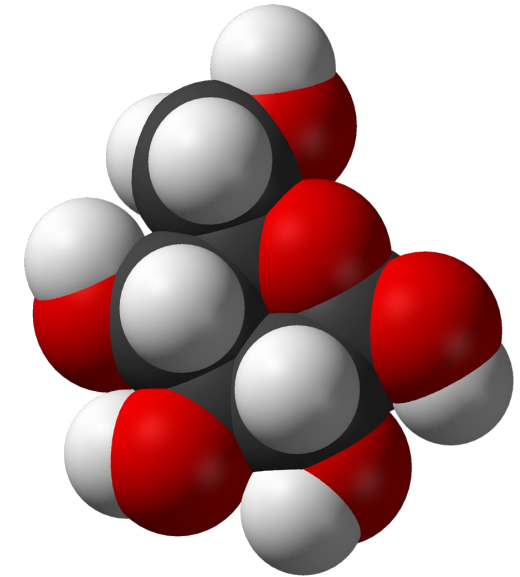
Inzoomen!

- als we inzoomen op onszelf vinden we cellen
 - een rode bloedcel meet 200'ste van een millimeter
- eerst gezien in 1665
- dit is het domein van de **biologie**



Inzoomen!

- als we nu nog eens 1000 keer inzoomen
 - moleculen en atomen
- einde 19de eeuw
- dit is het domein van de **chemie**



Periodic Table of the Elements

Legend:

- Metals (Blue)
- Transition Elements (Yellow)
- Radioactive (Red)
- Nonmetals (Pink)
- Lanthanide Series (Green)
- Synthetic (Light Blue)
- Noble Gases (Orange)
- Actinide Series (Purple)
- Atomic weight of the most stable isotope

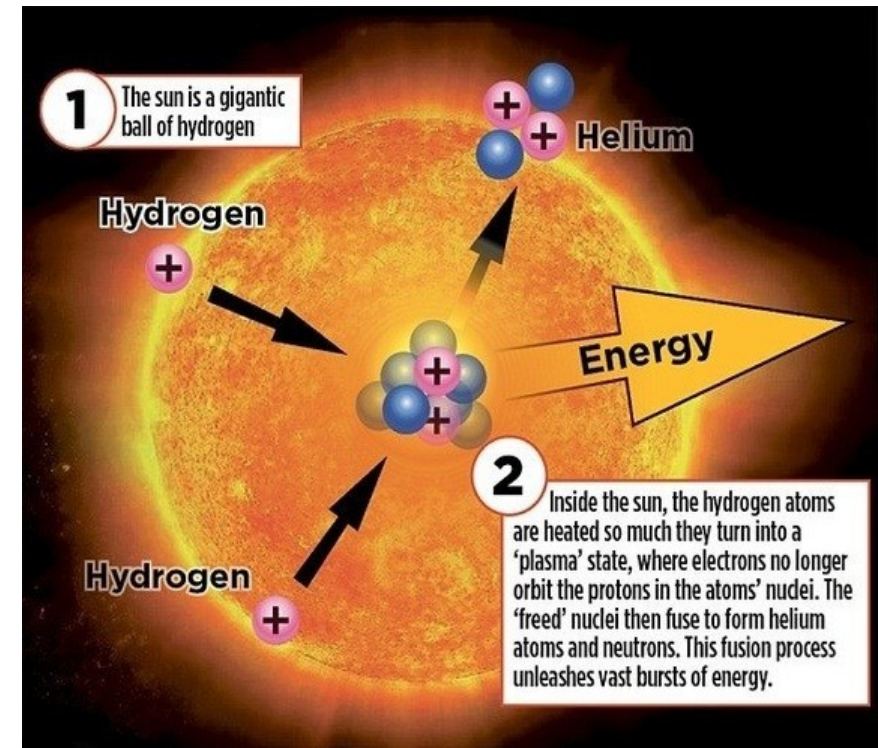
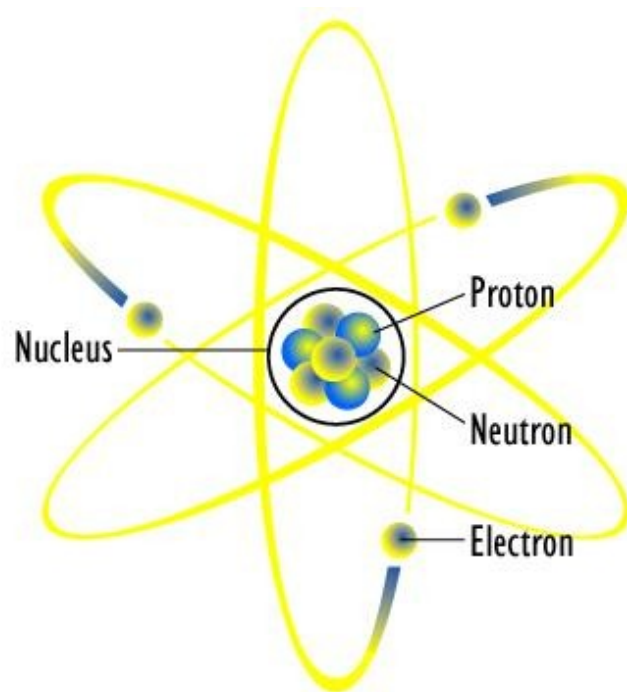
Key:

- Group notation (VIA 16)
- Atomic Number (8)
- Number of electrons in each shell (2, 8, 18)
- Symbol (O)
- Name (Oxygen)
- Atomic Mass (15.9994)
- Period (2)

1	IA	1	H	1.00784	2	He	4.00260																																																
2	2	3	Li	6.941	4	Be	9.012182	5	B	10.811	6	C	12.011	7	N	14.00674	8	O	15.9994	9	F	18.9984	10	Ne	20.1797																														
3	3	11	Na	22.98977	12	Mg	24.3050	13	Al	26.981539	14	Si	28.0855	15	P	30.9736	16	S	32.066	17	Cl	35.4527	18	Ar	39.948																														
4	4	19	K	39.0983	20	Ca	40.078	21	Sc	44.9559	22	Ti	47.867	23	V	50.9415	24	Cr	51.9961	25	Mn	54.93805	26	Fe	55.845	27	Co	58.93320	28	Ni	58.6934	29	Cu	63.546	30	Zn	65.39	31	Ga	69.723	32	Ge	72.61	33	As	74.92159	34	Se	78.96	35	Br	79.904	36	Kr	83.80
5	5	37	Rb	85.4678	38	Sr	87.62	39	Y	88.90585	40	Zr	91.224	41	Nb	92.90638	42	Mo	95.94	43	Tc	(98)	44	Ru	101.07	45	Rh	102.9055	46	Pd	106.42	47	Ag	107.8682	48	Cd	112.411	49	In	114.818	50	Sn	118.710	51	Sb	121.760	52	Te	127.60	53	I	126.90447	54	Xe	131.29
6	6	55	Cs	132.9054	56	Ba	137.327	57-71	La-Lu	72	Hf	178.49	73	Ta	180.9479	74	W	183.84	75	Re	186.207	76	Os	190.23	77	Ir	192.22	78	Pt	195.08	79	Au	196.9665	80	Hg	200.59	81	Tl	204.3833	82	Pb	207.2	83	Bi	208.980	84	Po	(209)	85	At	(210)	86	Rn	(222)	
7	7	87	Fr	(223)	88	Ra	(226.025)	89-103	Ac-Lr	104	Unq	(261)	105	Unp	(262)	106	Unh	(263)	107	Uns	(262)	108	Uno	(265)	109	Une	(266)	110	Uun	(268)	111	Uuu	(272)																						
8	8	89	Ac	227.028	90	Th	232.0381	91	Pa	231.03688	92	U	238.0289	93	Np	237.046	94	Pu	(244)	95	Am	(243)	96	Cm	(247)	97	Bk	(247)	98	Cf	(251)	99	Es	(252)	100	Fm	(257)	101	Md	(258)	102	No	(259)	103	Lr	(260)									

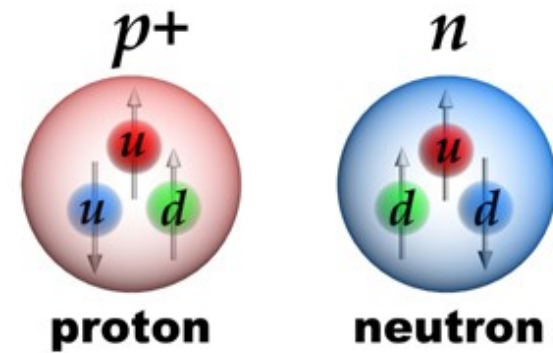
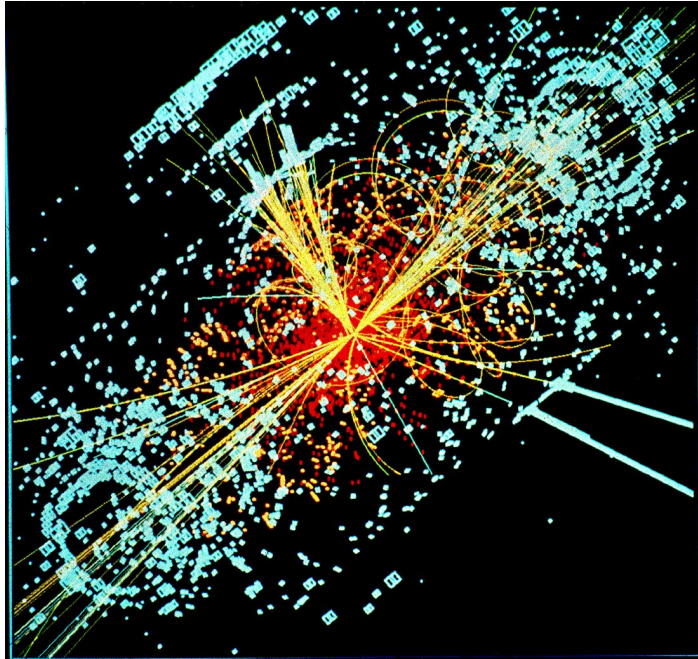
Inzoomen!

- nu zoomen we nog eens 1 miljoen keer in
 - protonen en neutronen
- sinds ~1930
- dit is het domein van de kernfysica



Inzoomen!

- en nog eens minstens 1000 keer inzoomen
 - quarks!
- sinds 1964
- dit is het domein van de **deeltjesfysica**



Het Standaard Model

De theorie om dat alles te beschrijven



Het Standaard Model



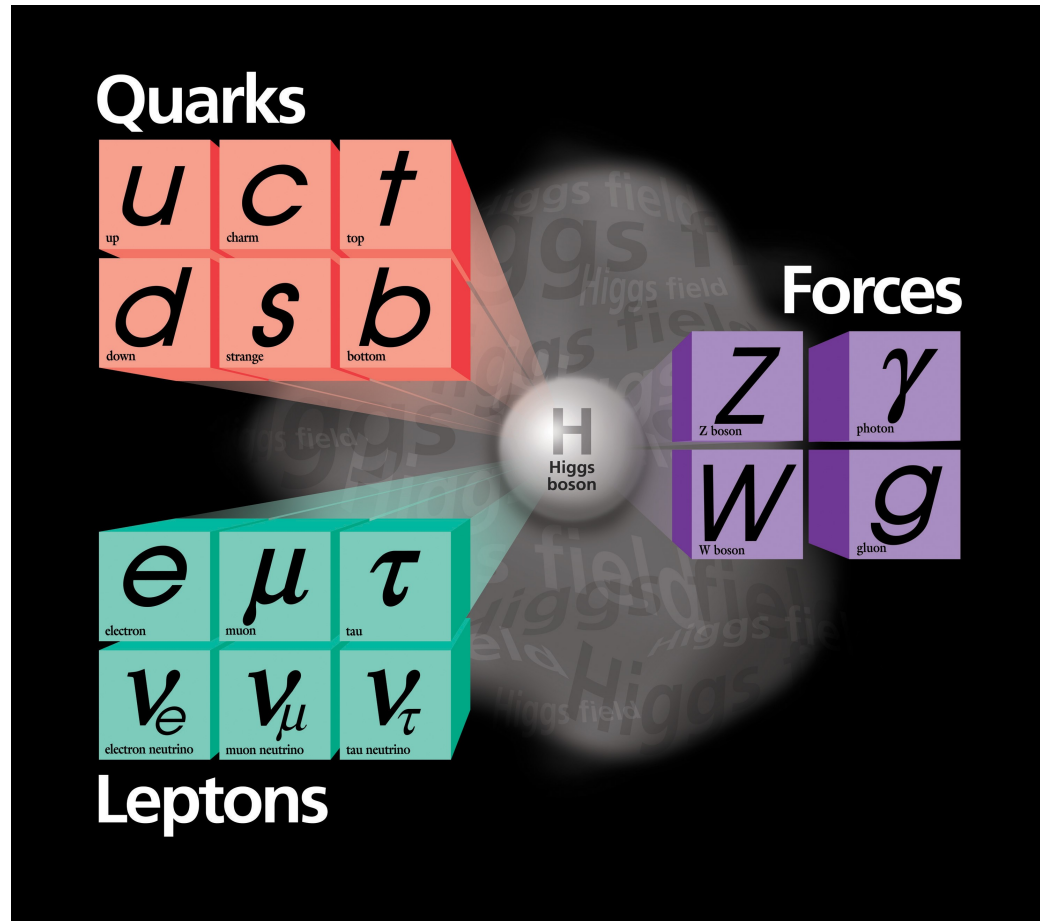
De theorie om dat alles te beschrijven



De succesvolste wetenschappelijke theorie ooit!

Het Standaard Model

Vervolledigd met Brout-Englert-Higgs boson in 2012



Het Standaard Model

Maar... nog vele **onbeantwoorde vragen**

- hoe **gravitatie** te beschrijven?
- waarom is gravitatie **zoveel zwakker**?
- wat is de **donkere materie**?
- hoe krijgen de **neutrinos massa**?
- waarom zijn er **19 vrije parameters**?
- waarom zijn er **drie generaties** deeltjes?
- **unificeren de krachten** bij hoge energie?
- ...

Het Standaard Model

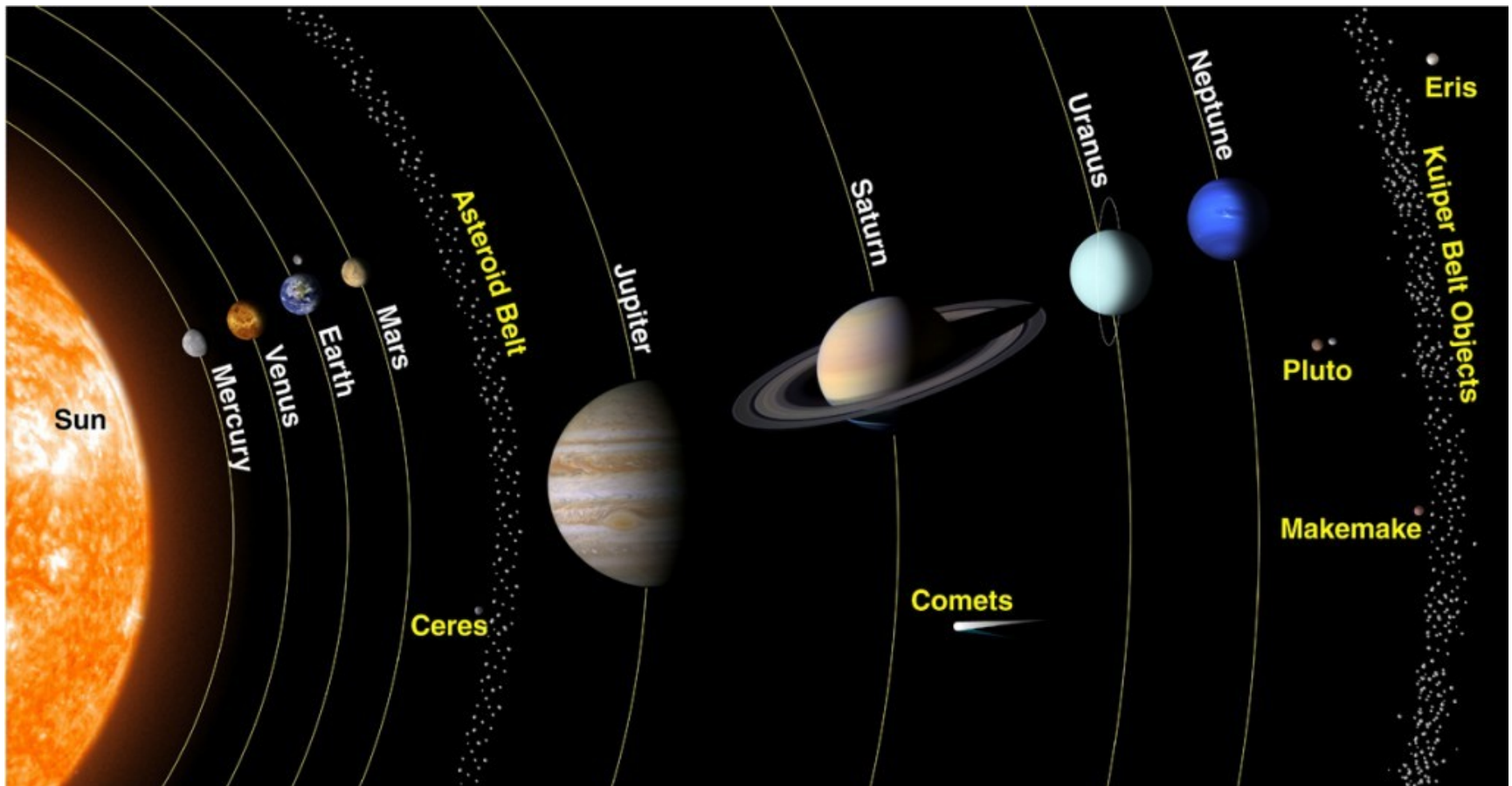
Maar... nog vele **onbeantwoorde vragen**

- hoe gravitatie te beschrijven?
- waarom is gravitatie zoveel zwakker?
- wat is de **donkere materie**?
- hoe krijgen de neutrinos massa?
- waarom zijn er 19 vrije parameters?
- waarom zijn er drie generaties deeltjes?
- unificeren de krachten bij hoge energie?
- ...

Ons zonnestelsel

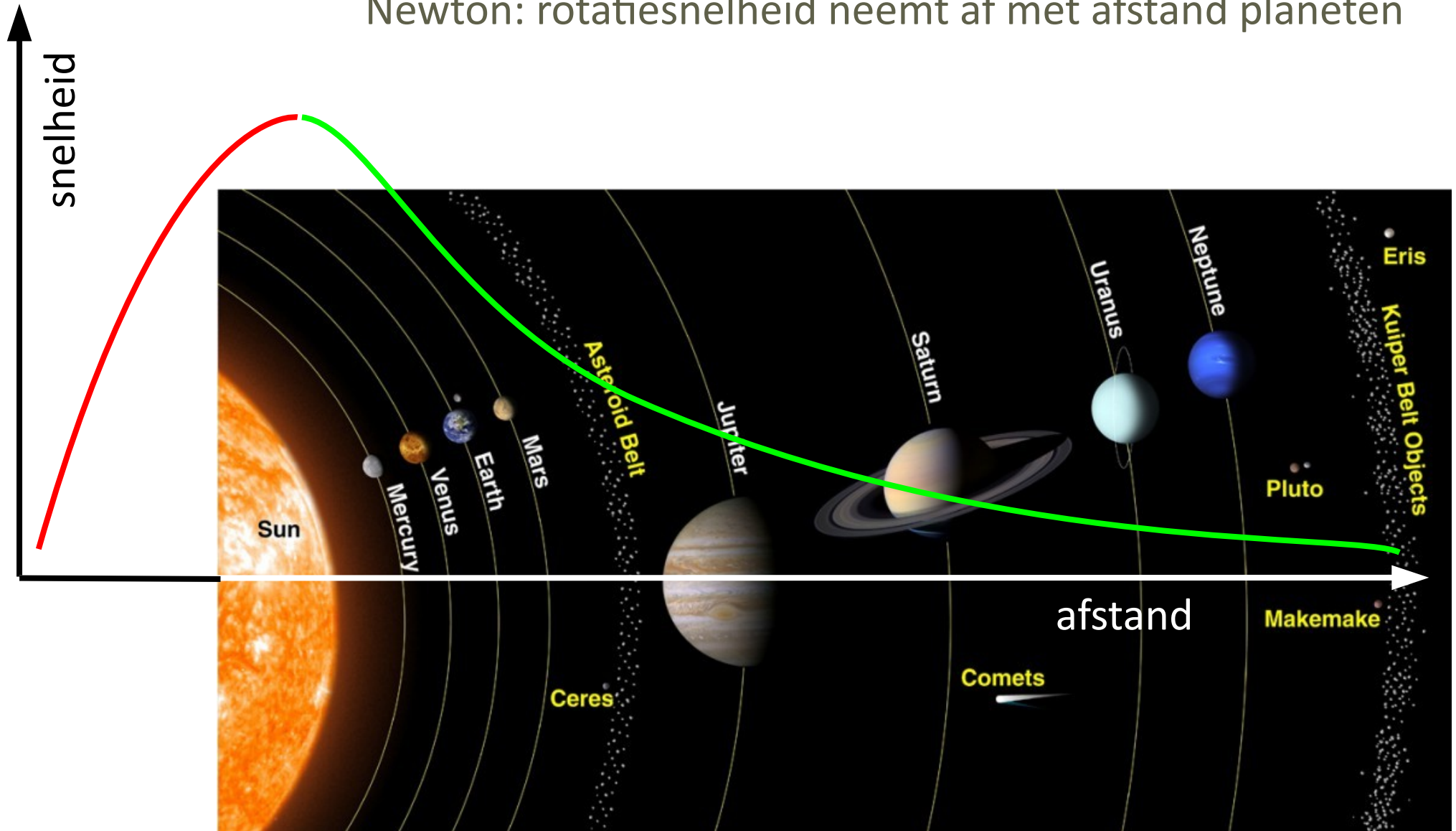
Zwaartekrachttheorie Newton

- werkt quasi perfect in ons zonnestelsel

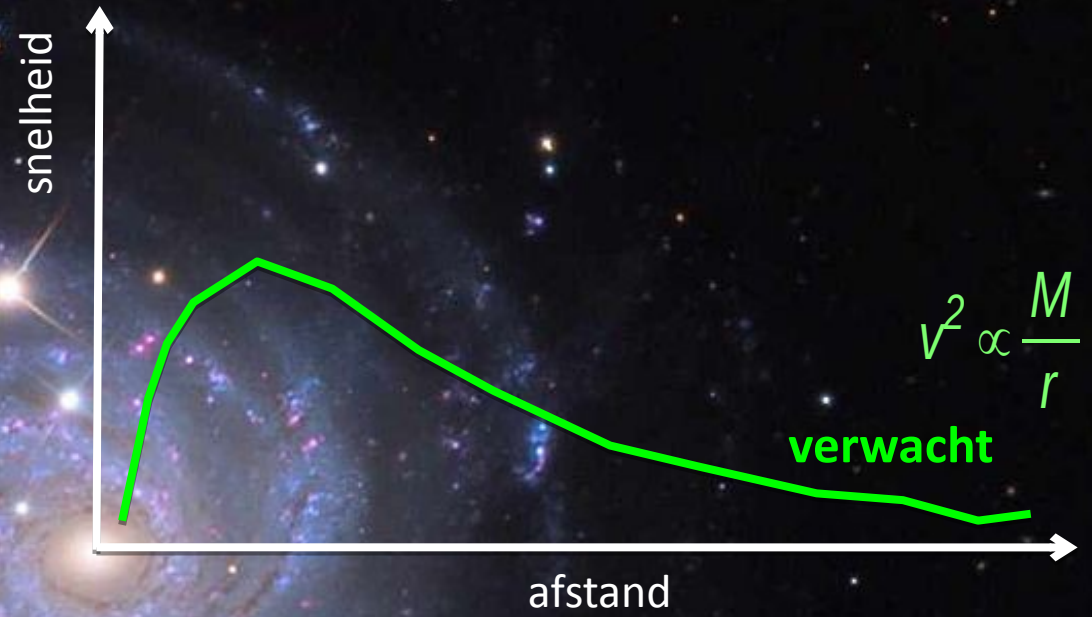


Rotatie zonnestelsel

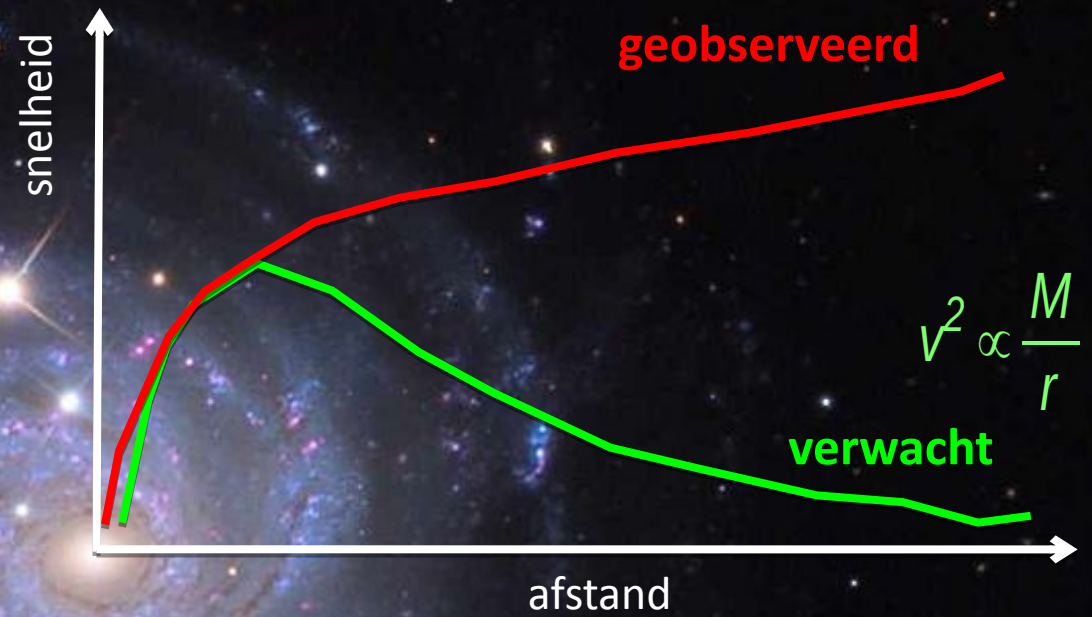
Newton: rotatiesnelheid neemt af met afstand planeten



Rotatie sterrenstelsel

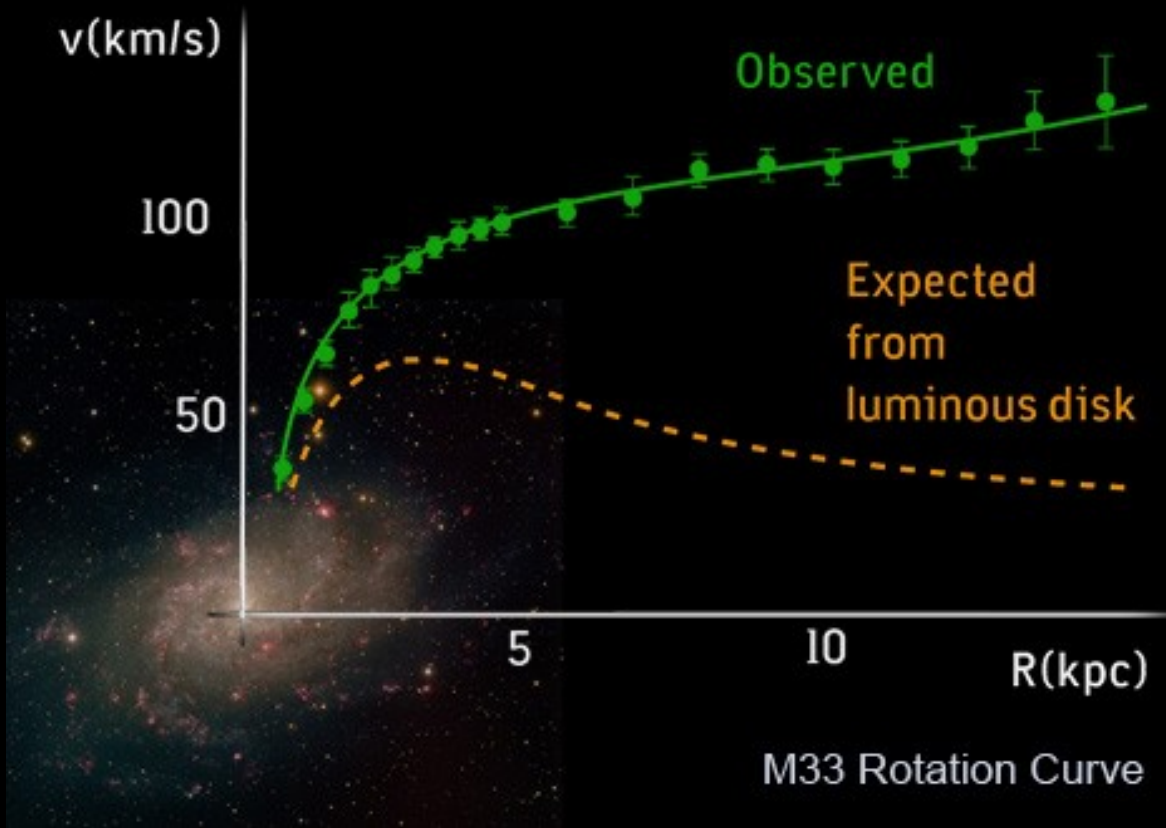
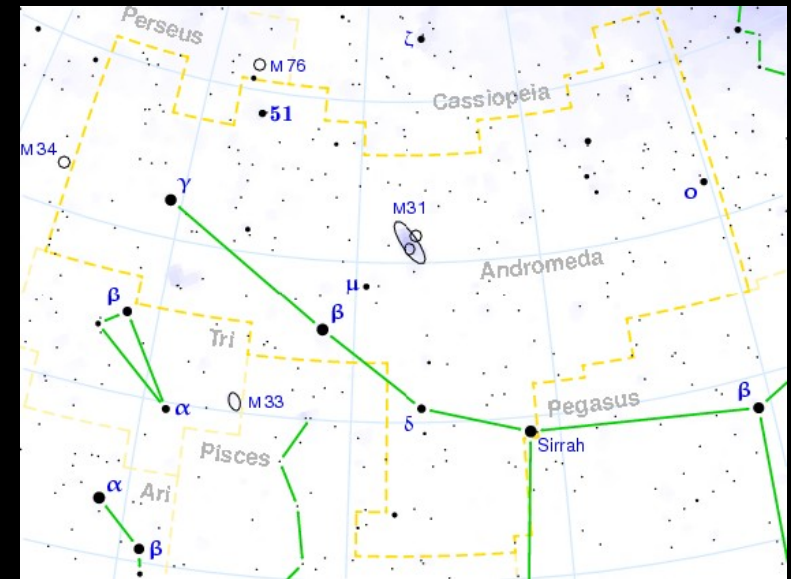


Rotatie sterrenstelsel

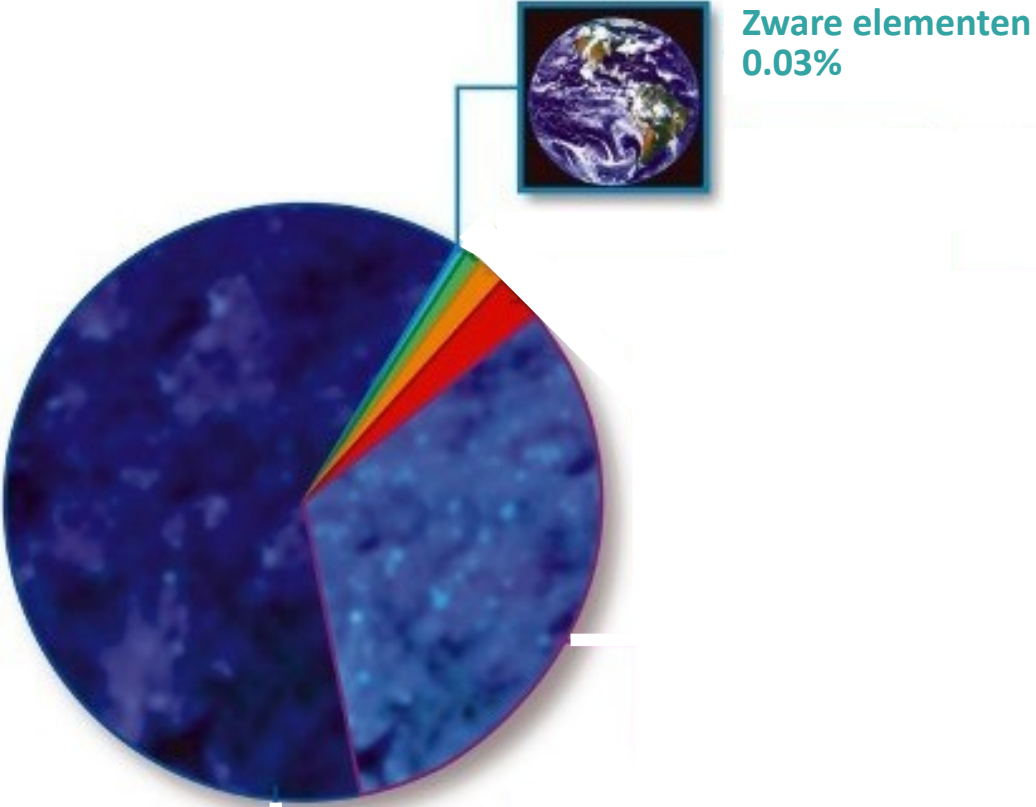


hypothese: donkere materie

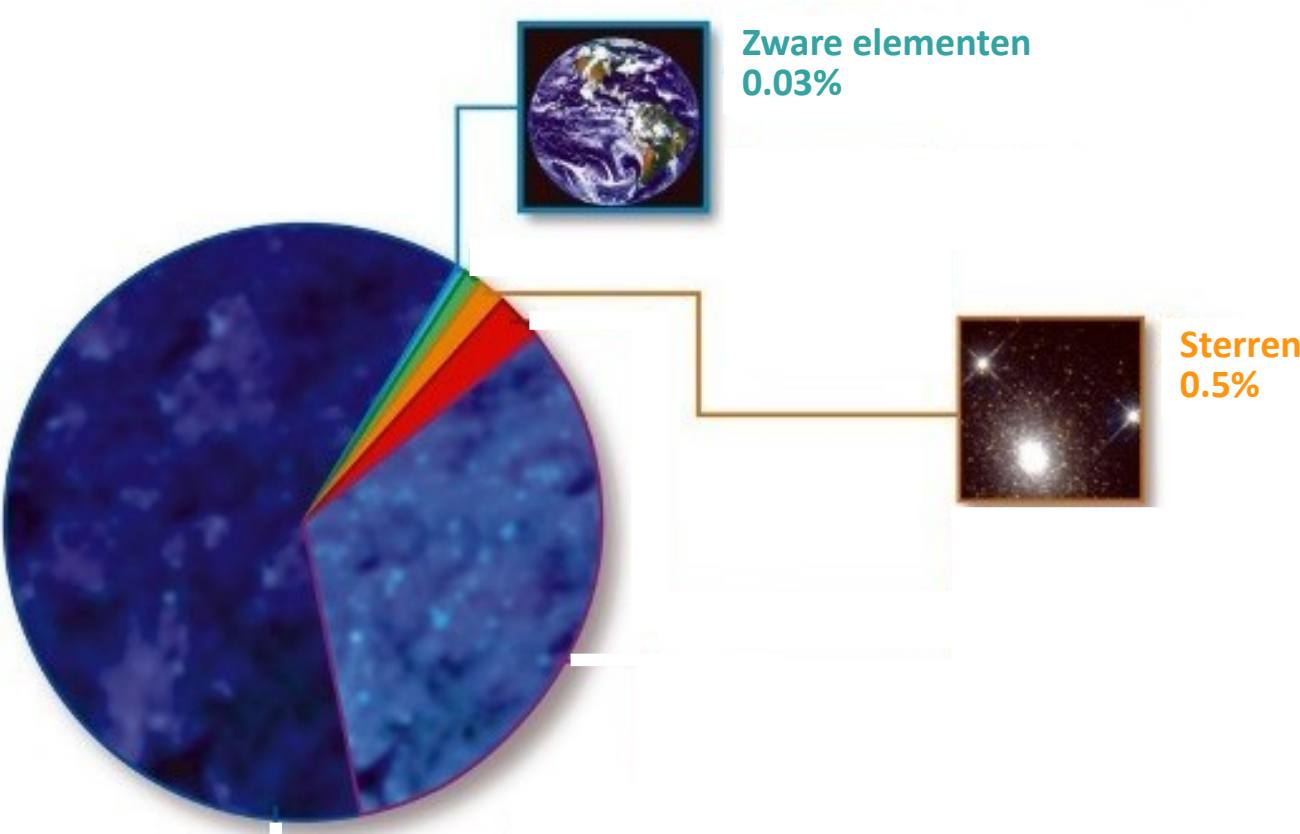
Voorbeeld: M33



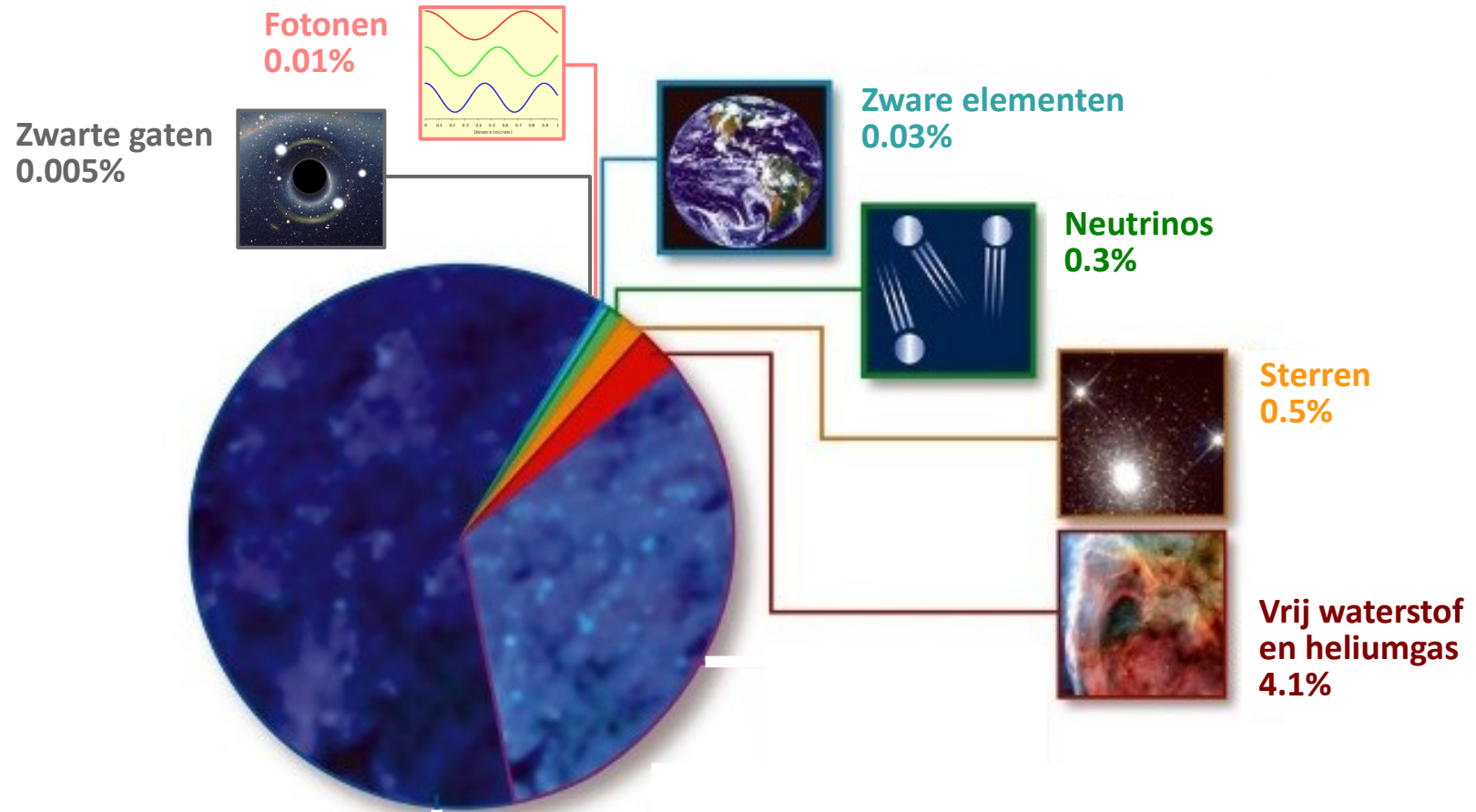
Ons universum



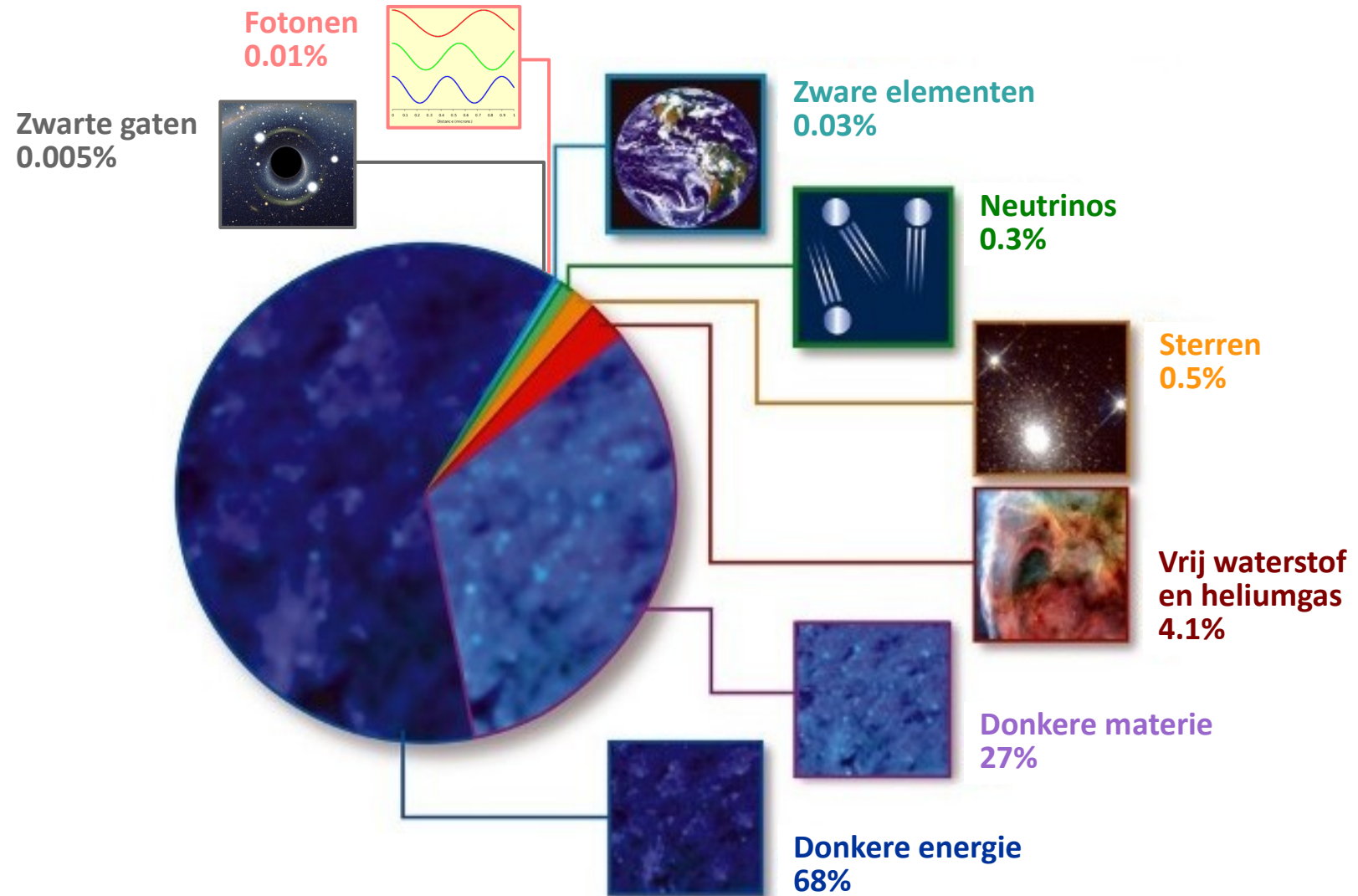
Ons universum



Ons universum



Ons universum



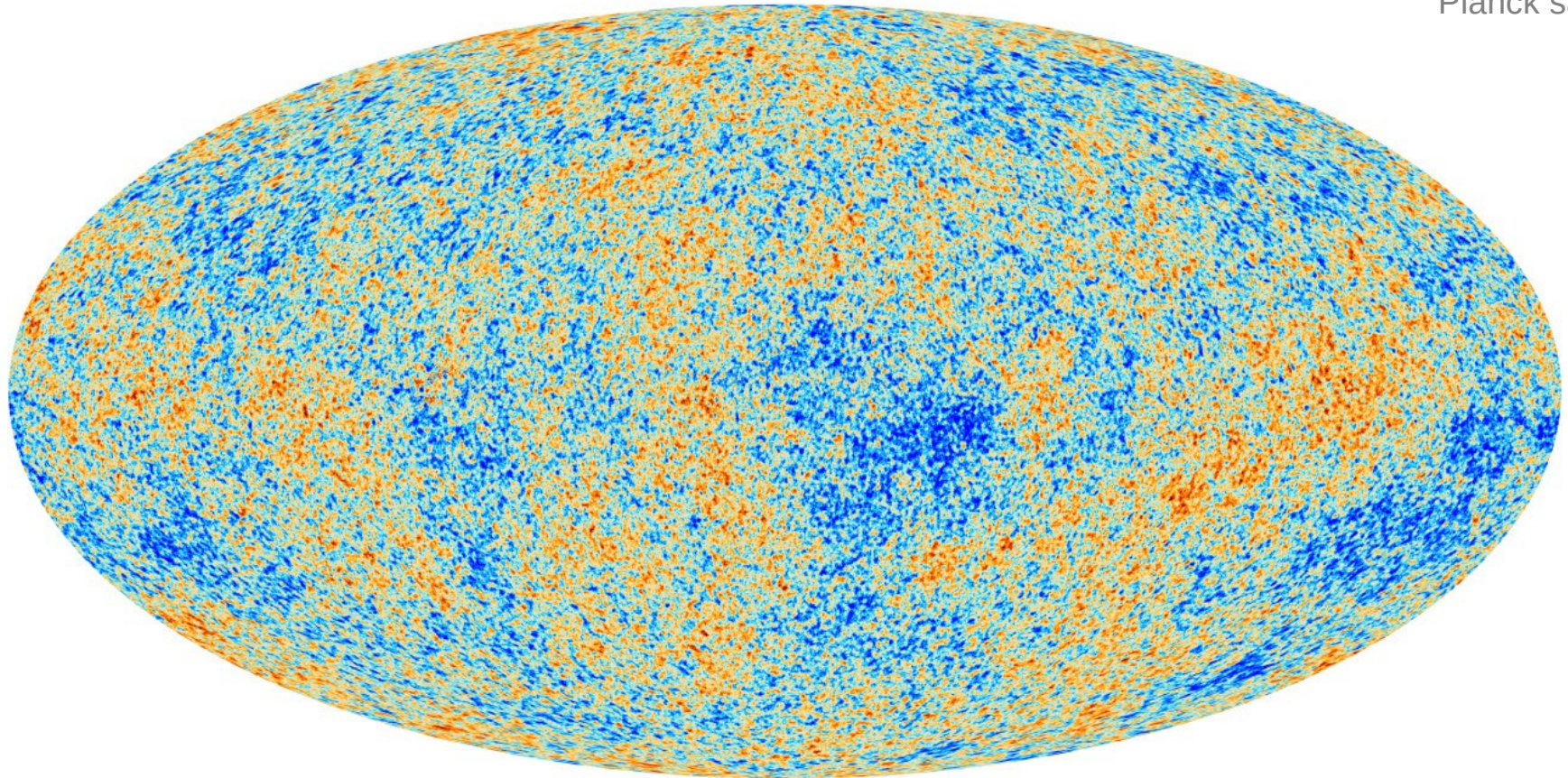
Hoe weten we dat?

kosmische achtergrondstraling

voetafdruk universum 380000j oud



Planck satelliet

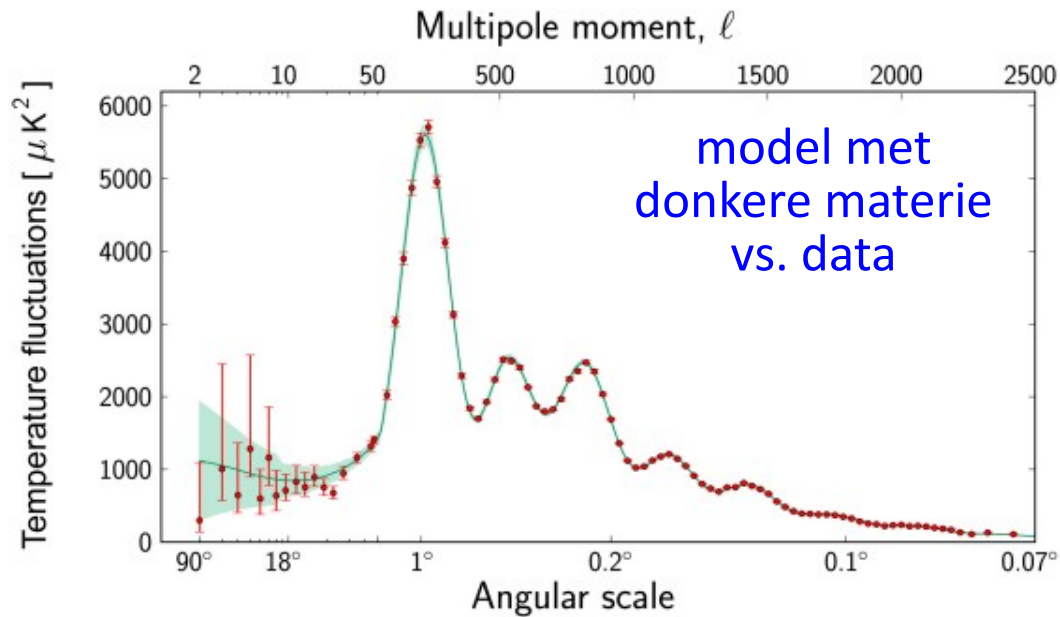


temperatuur universum nu: **2.73K**

fluctuaties 1 per 100000

Hoe weten we dat?

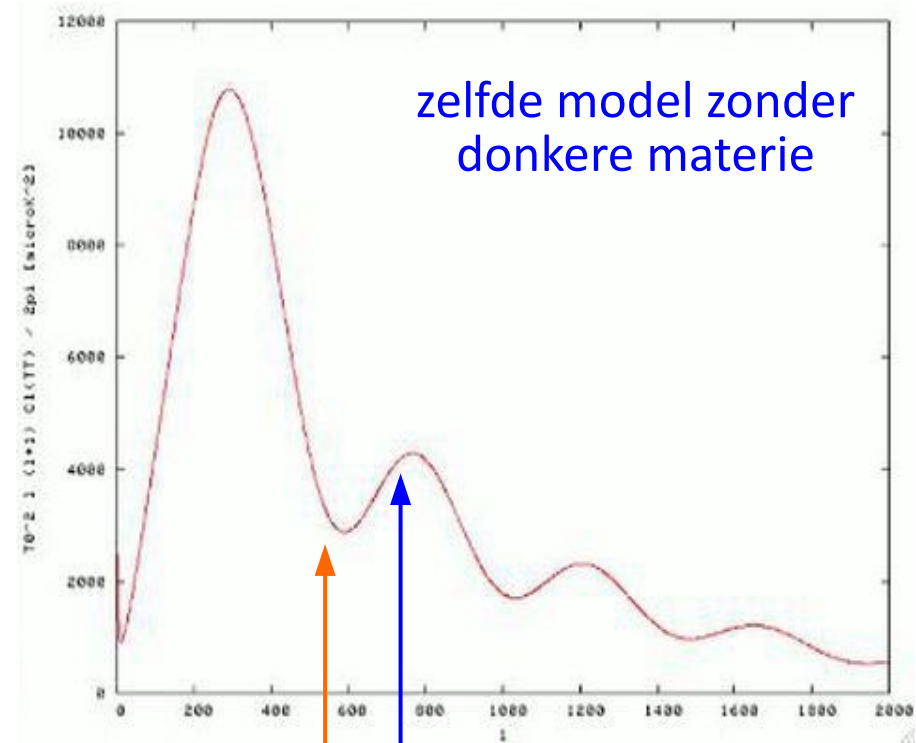
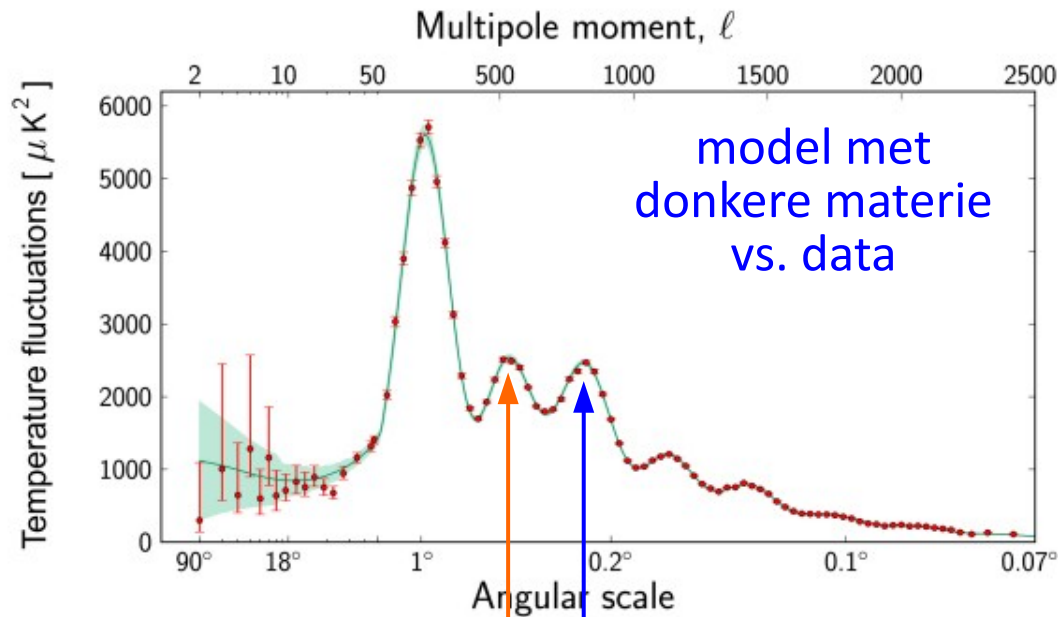
Kosmologisch model beschrijft de Planck data fantastisch



Hoe weten we dat?

Kosmologisch model beschrijft de Planck data fantastisch

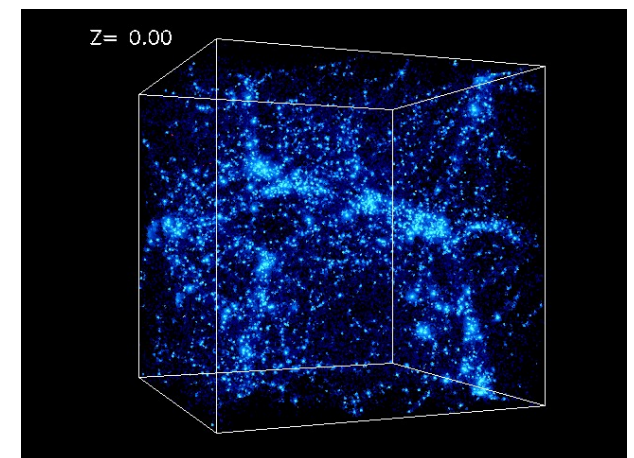
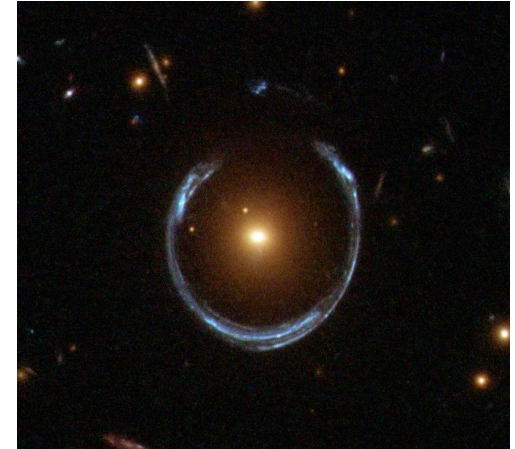
- werkt niet zonder donkere materie!



Nog veel meer bewijs

- kosmische achtergrondstraling
- rotaties sterrenstelsels
- radiale snelheden in clusters van sterrenstelsels
- gravitationele lenzen
- “bullet cluster”
- structuurvorming in het heelal
- ...

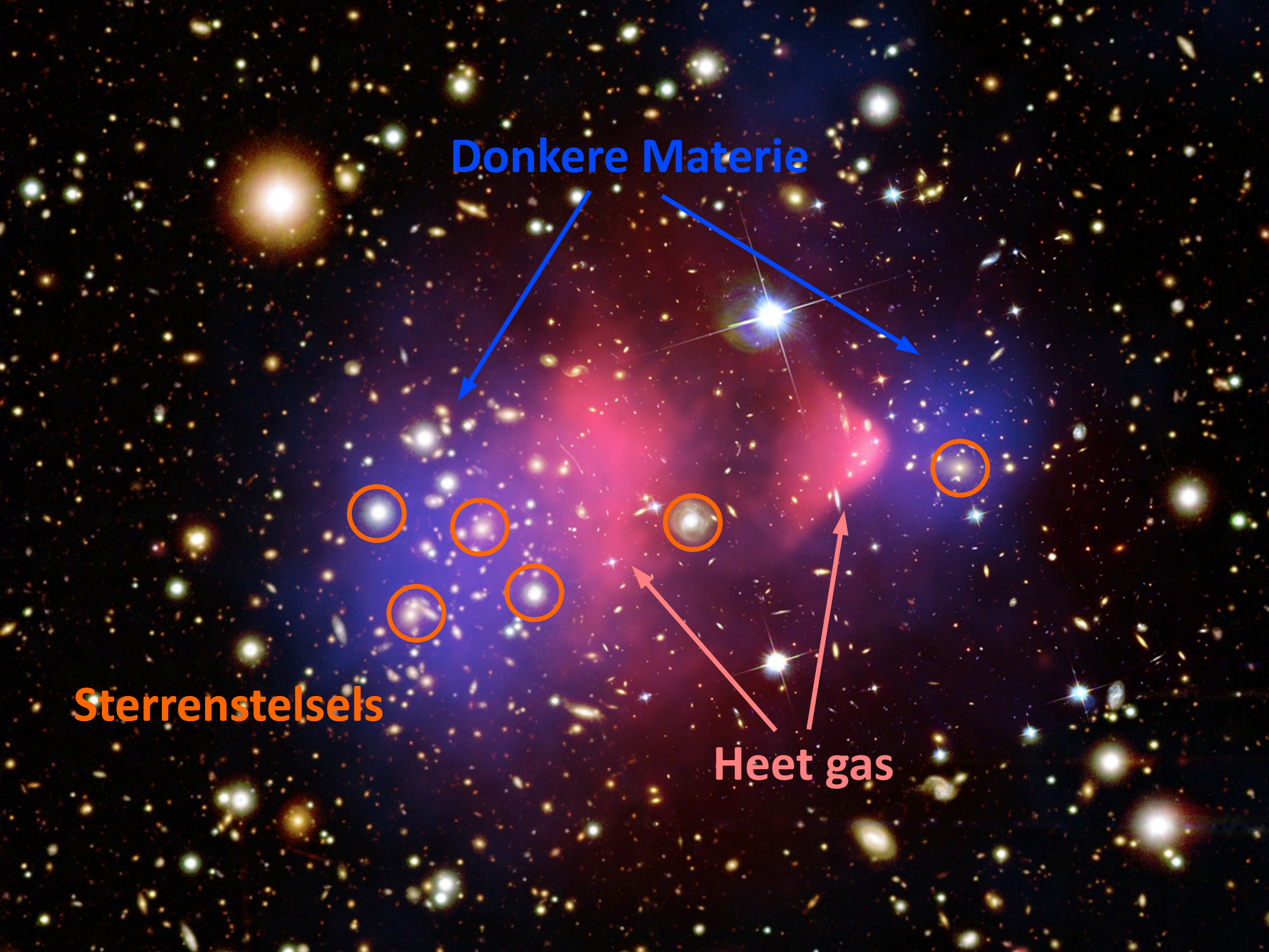
- bewijs komt van zeer verschillende astrofysische schalen
 - altijd gravitationeel



Donkere Materie

Sterrenstelsels

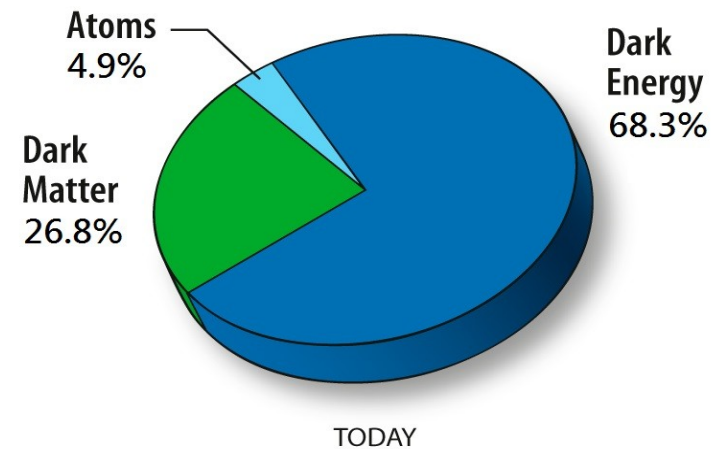
Heet gas



Donkere materie: ID kaart

Wat we denken te weten

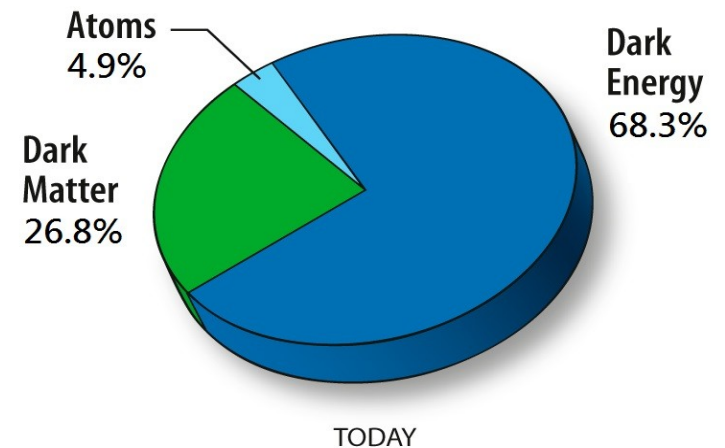
- deeltje: materie!
- stabiel
- geen elektrische lading: donker!
- interageert niet via sterke kernkracht
- niet relativistisch: “koud”
- interageert gravitationeel



Donkere materie: ID kaart

Wat we echt weten

- deeltje
 - corpusculair
- stabiel
 - of toch zeer langlevend
- geen elektrische lading
 - maximaal zeer kleine lading
- interageert niet via sterke wisselwerking
 - of veel zwakker dan verwacht
- niet relativistisch
 - hoewel...
- interageert gravitationeel
 - ja! dat is een zekerheid!



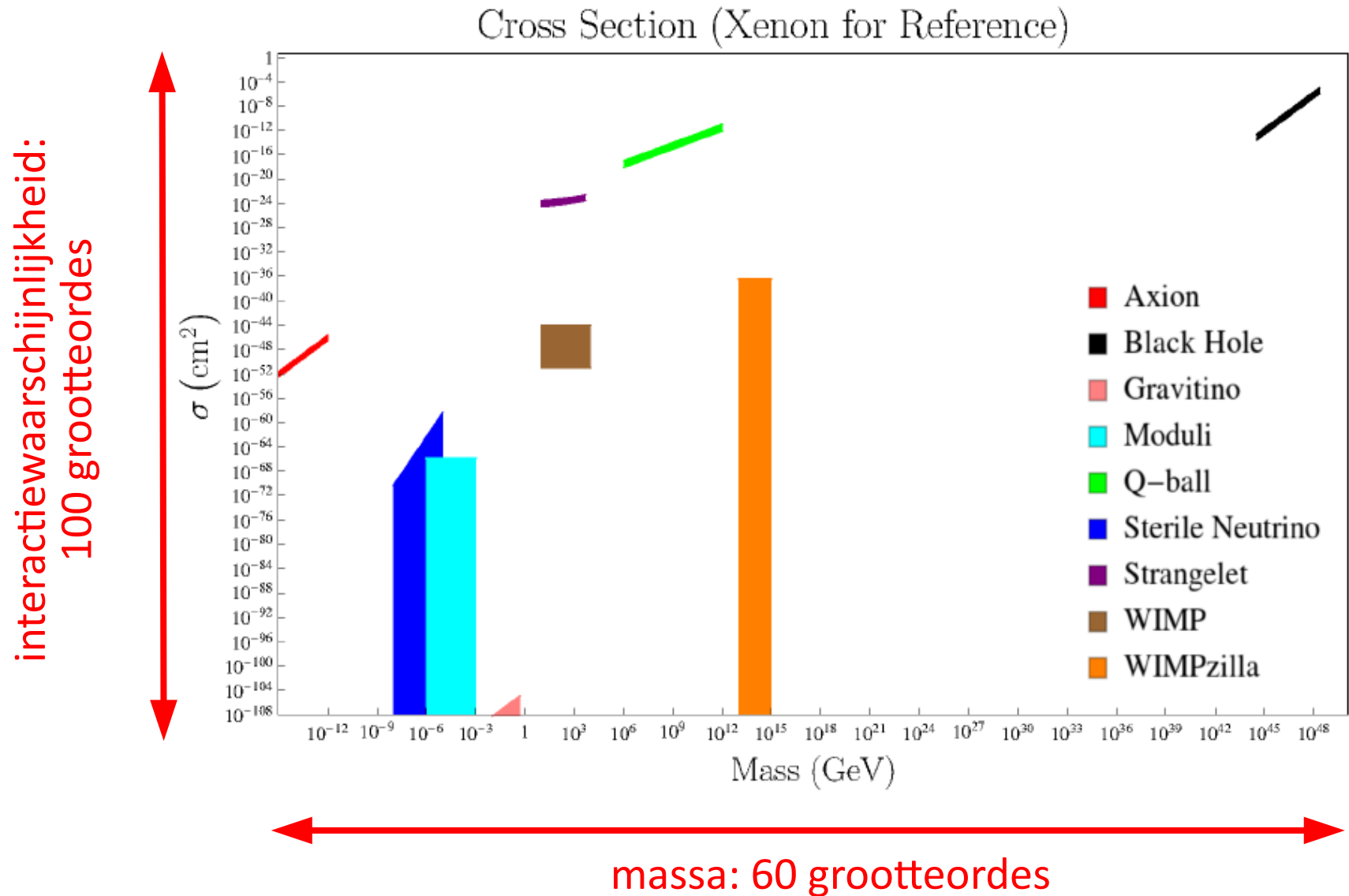
Donkere materie: een mysterie

Wat we niet weten

- 1 of meer deeltjes?
- elementair of composiet?
- massa?
- stabiel?
- quantum eigenschappen?
- deeltje of ook antideeltje?
- overblijfsel productie bij big bang?
- met welke deeltjes interageert het?
- interageert het met zichzelf?
- welke nieuwe fysica zit erachter?



Theoretische voorstellen



En nu?

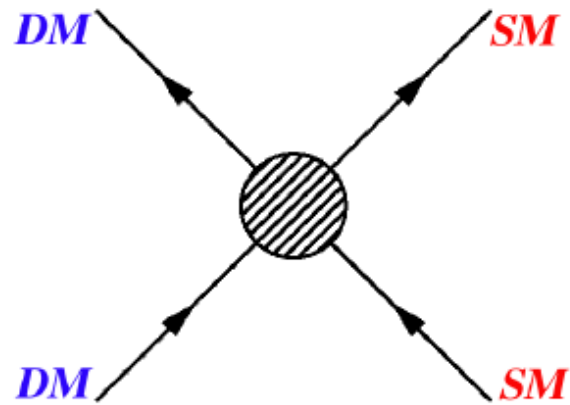
“It doesn't matter how beautiful your theory is.
It doesn't matter how smart you are.
If it doesn't agree with experiment, it's wrong.”

Richard P. Feynman

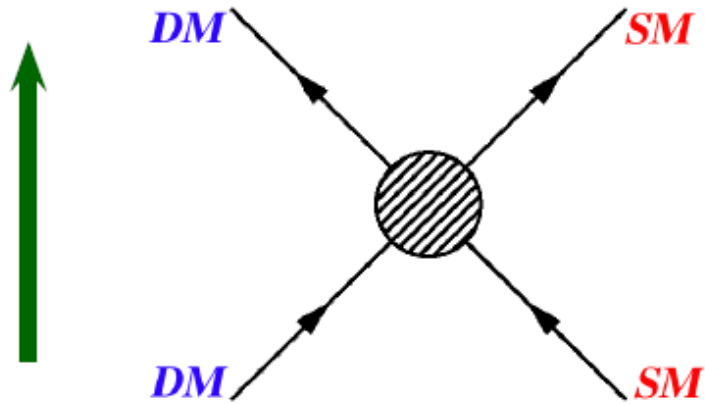
doorbraak moet van experiment komen!

**Donkere materie is een van de grootste
uitdagingen in de moderne fysica!**

Experimentele zoektocht

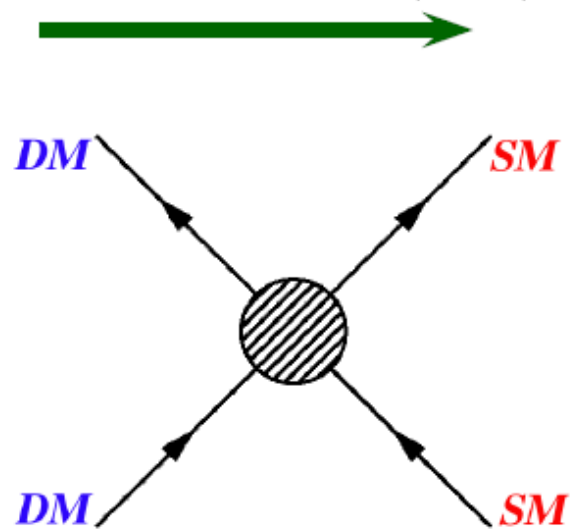


Directe detectie



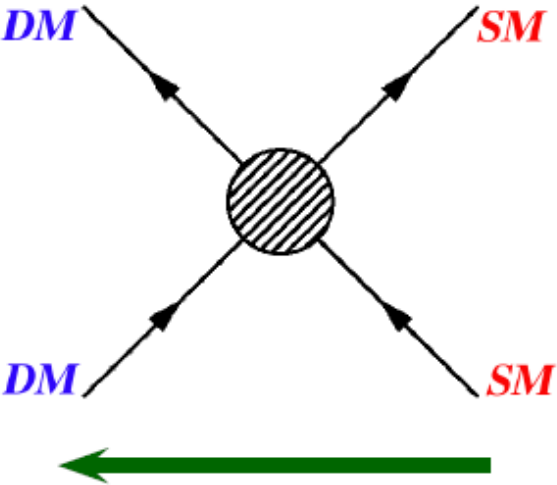
Raken!

Indirecte detectie



Kraken!

Creatie in het labo

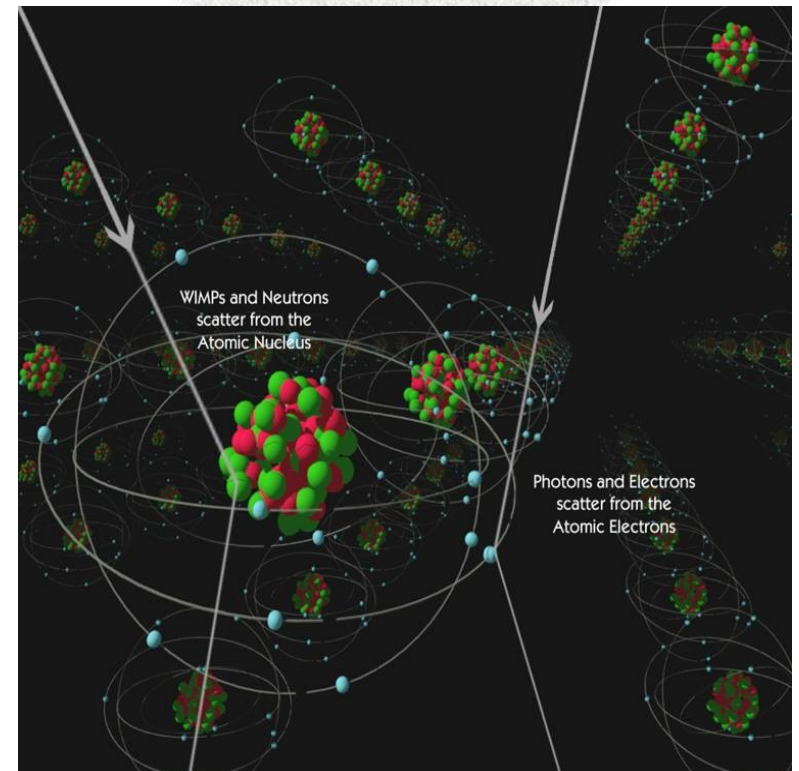
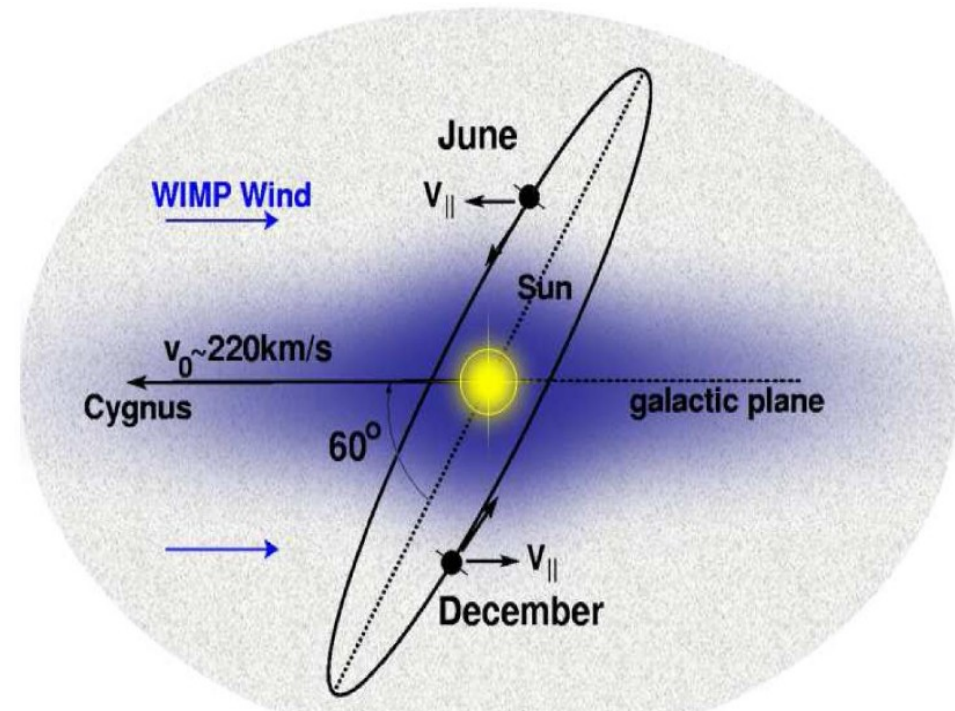


Maken!

Directe detectie

Principe

- donkere materie halo in melkweg
 - dichtheid $\frac{1}{2} m(p) / \text{cm}^3$
- snelheid zon in melkweg: 220km/s
- snelheid aarde rond zon: 30km/s
- wij vliegen door een **donkere materie "wind"**
 - maximaal in juni
- uiterst gevoelige detectoren om botsingen te registreren
 - **zeer zeldzaam**
 - **laag-energetisch**



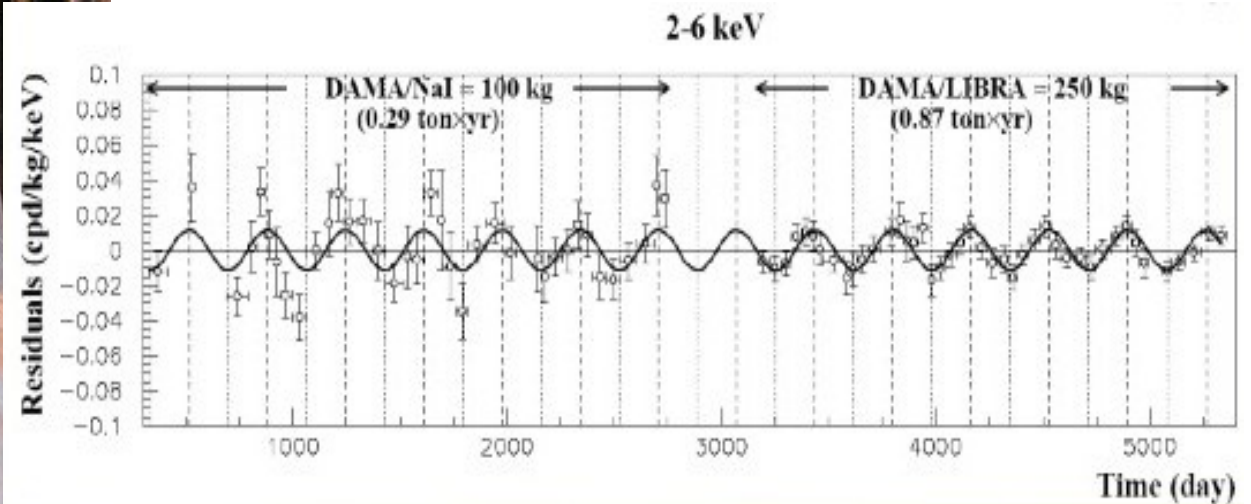
Directe detectie

- zeer hoogtechnologisch en intens domein
- tot nog toe geen bevestigde ontdekking

Xenon1T



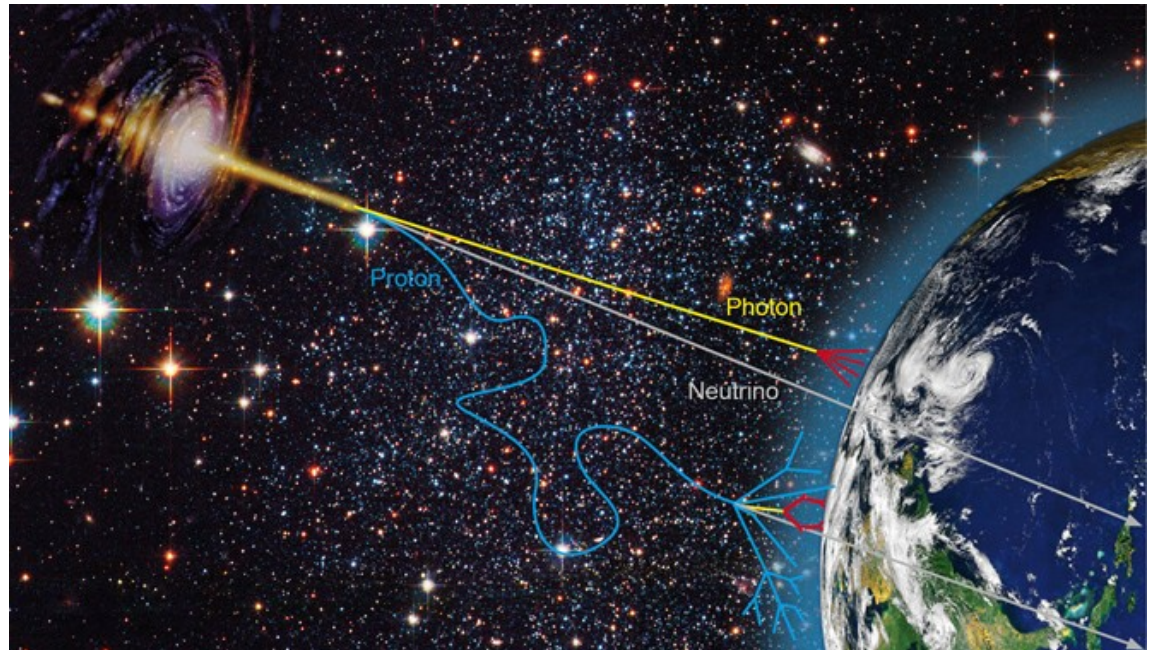
DAMA/LIBRA



Indirecte detectie

Principe

- **annihilatie of verval**
 - afkomstig van grote DM dichtheid: centrum melkweg, zon, aarde
- mogelijk signaal in **fotonen**, **neutrinos**, **electronen**, ...
 - fotonen ondergaan absorptie
 - geladen deeltjes afgebogen in galactisch magnetisch veld
- detectietechnieken
 - satellieten
 - grondobservatoria
 - neutrino telescopen



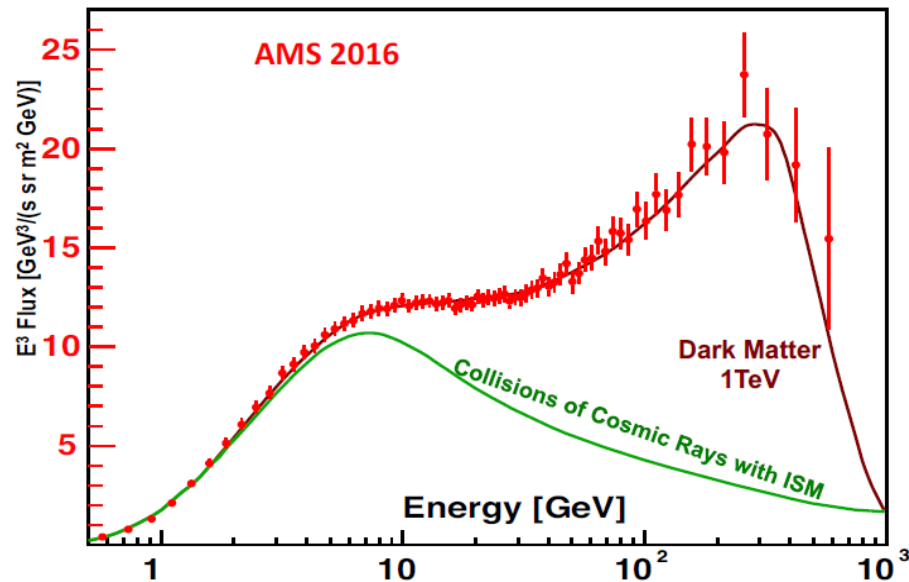
Indirecte detectie

- signaal in Fermi data?
 - teveel fotonen van centrum melkweg
 - kunnen ook pulsars zijn

Fermi LAT

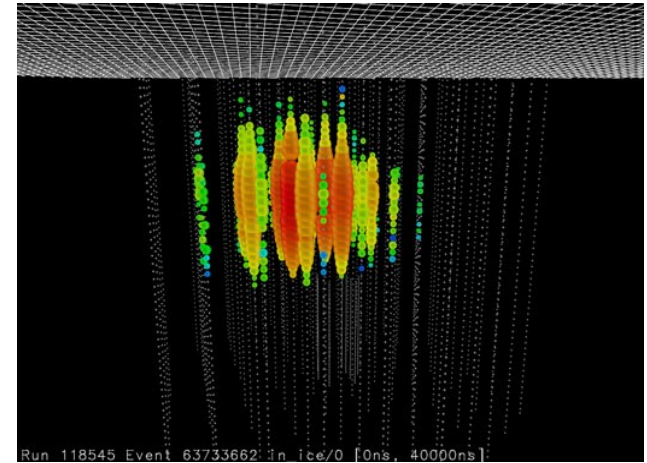


- signaal in AMS data?
 - interpretatie niet gemakkelijk...



AMS press release 8/12/2016

IceCube



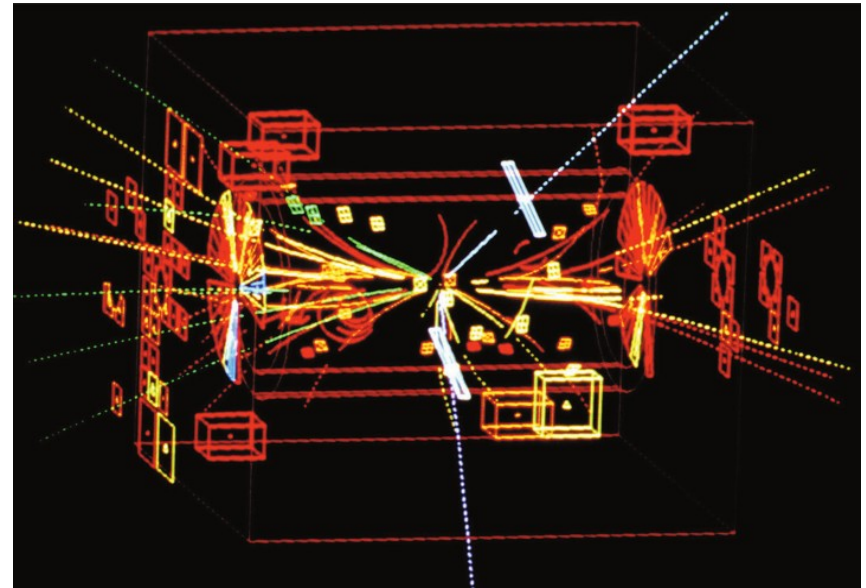
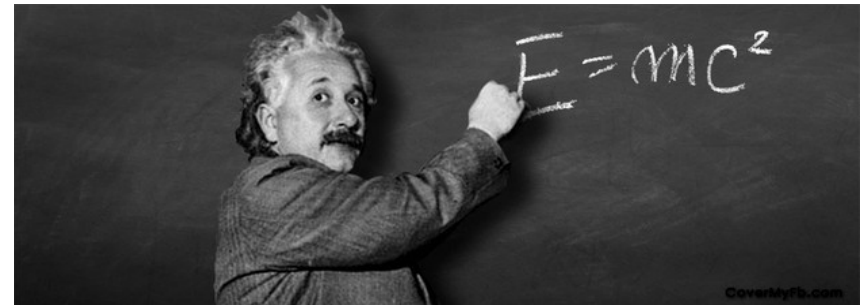
AMS



Creatie in het labo

Hoe nieuwe deeltjes maken?

- we creëren **hoge energiedichtheden** in het laboratorium
 - met deeltjesversnellers
- en dan zetten we energie in massa om
 - $E = m.c^2$
- **deeltjesversnellers** zijn de **werktuigen om nieuwe deeltjes te ontdekken**



eerste Z boson in the UA1 detector (1983)

Versnellers

Versnellers als microscopen

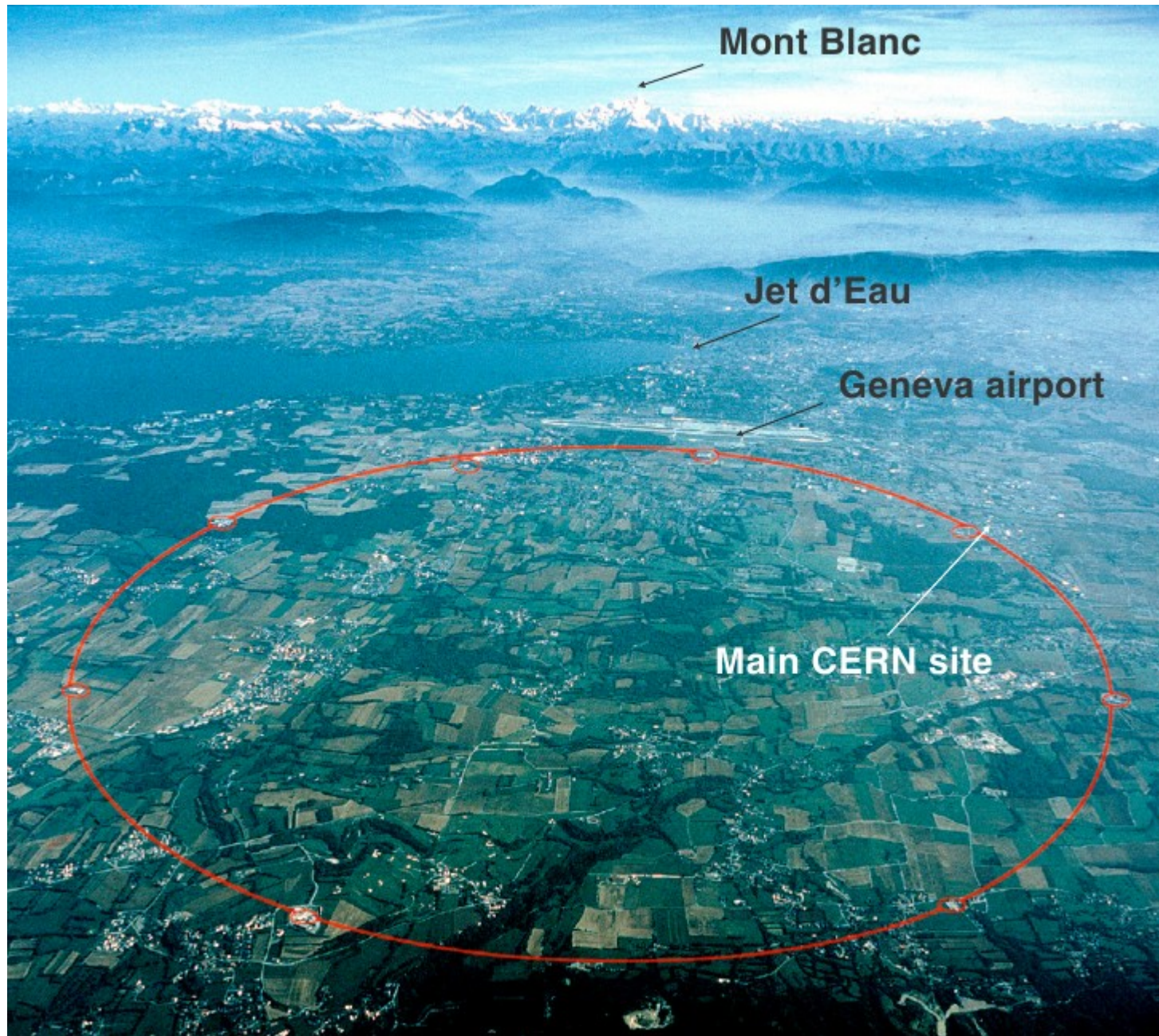
- lichtmicroscop: vergroten tot **de golflengte van het licht**
 - zichtbaar licht **400 – 600 nm**
- kleinere schalen: kleinere golflengte, oftewel **hogere energie**, bvb. X-stralen
- met deeltjes in deeltjesversnellers kunnen we nog **veel kleiner kijken**
 - quantummechanica: **deeltje ~ golf**
 - hoe hoger de energie in onze deeltjes, hoe kleiner de afstand waarop we kunnen onderzoeken
- in de huidige versnellers kunnen we **de materie bestuderen tot op 10^{-18} m !**



Ons laboratorium: het CERN



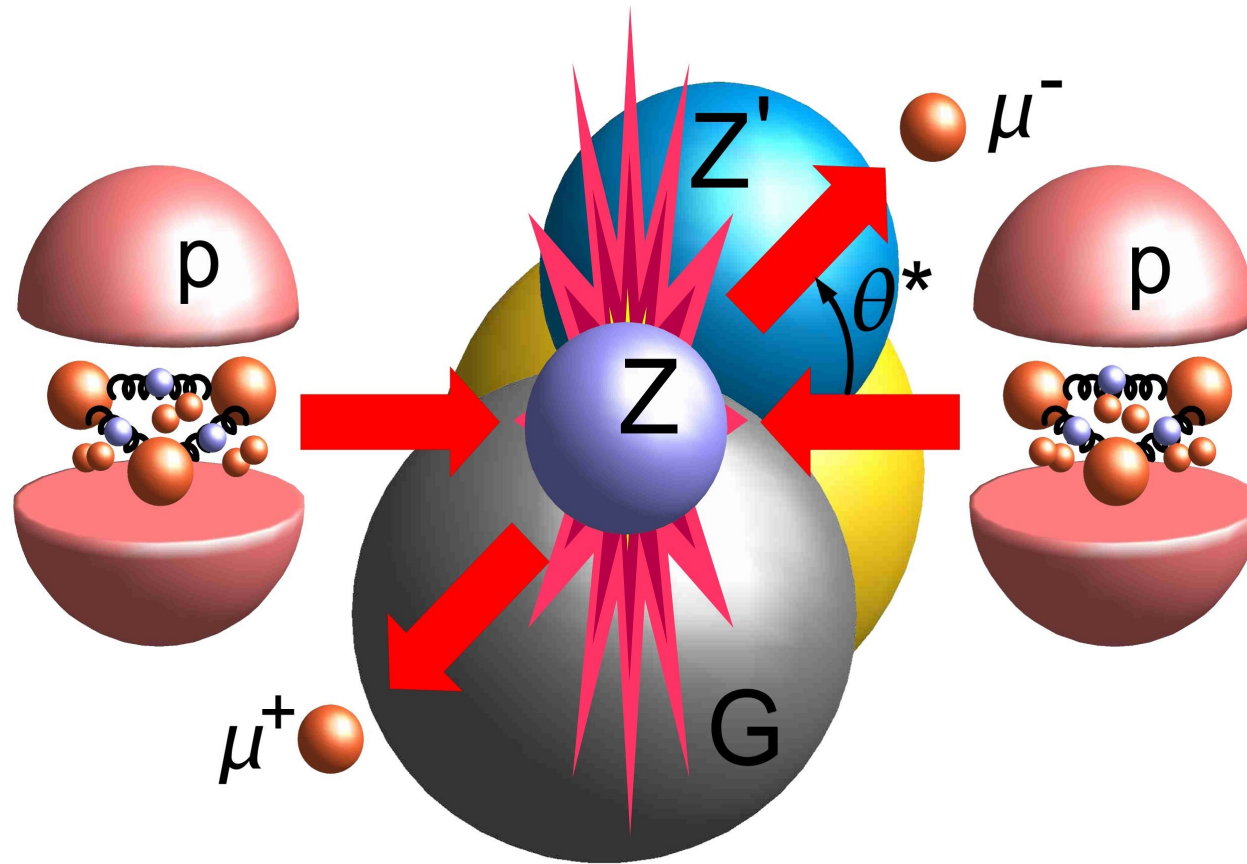
De LHC aan het CERN



De LHC aan het CERN

De Large Hadron Collider

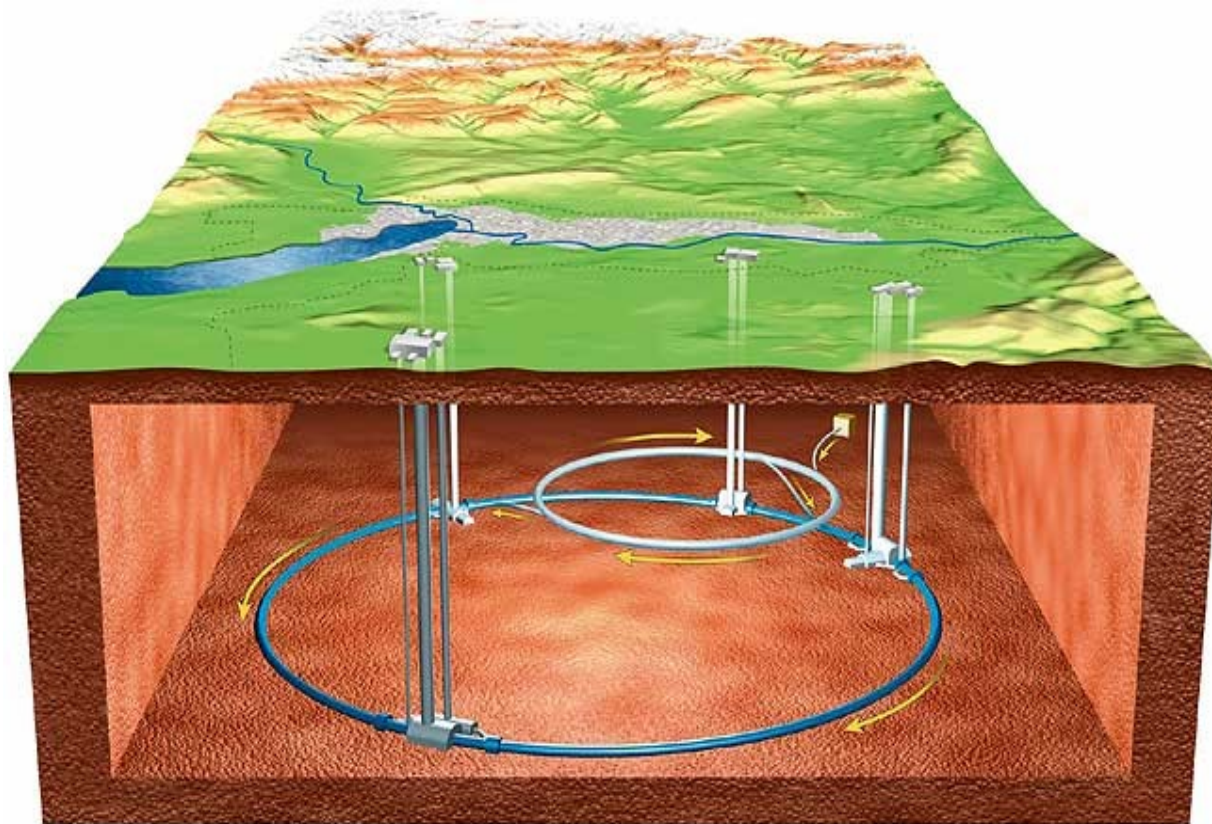
- proton versneller



De LHC aan het CERN

De Large Hadron Collider

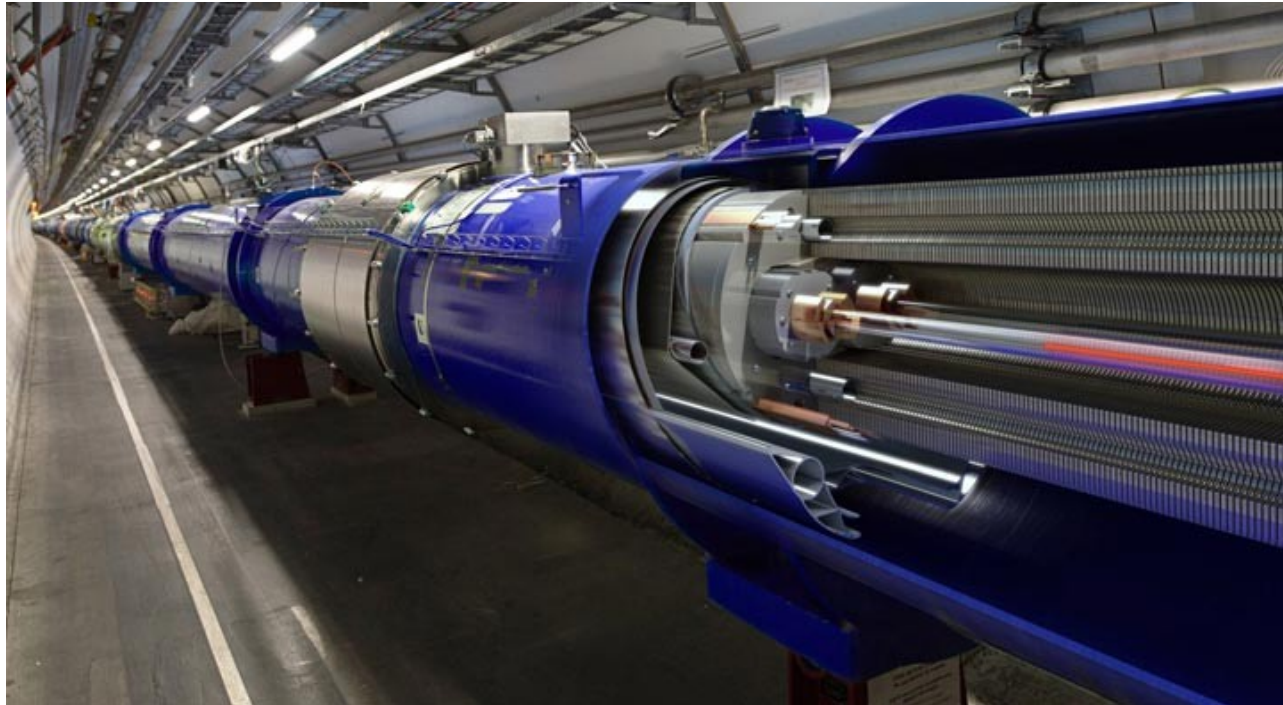
- proton versneller
- 27km omtrek, ~100m onder de grond



De LHC aan het CERN

De Large Hadron Collider

- proton versneller
- 27km omtrek, ~100m onder de grond
- enkele duizenden **supergeleidende magneten**
 - jaarlijks 1% electriciteitsverbruik België



De LHC aan het CERN

De Large Hadron Collider

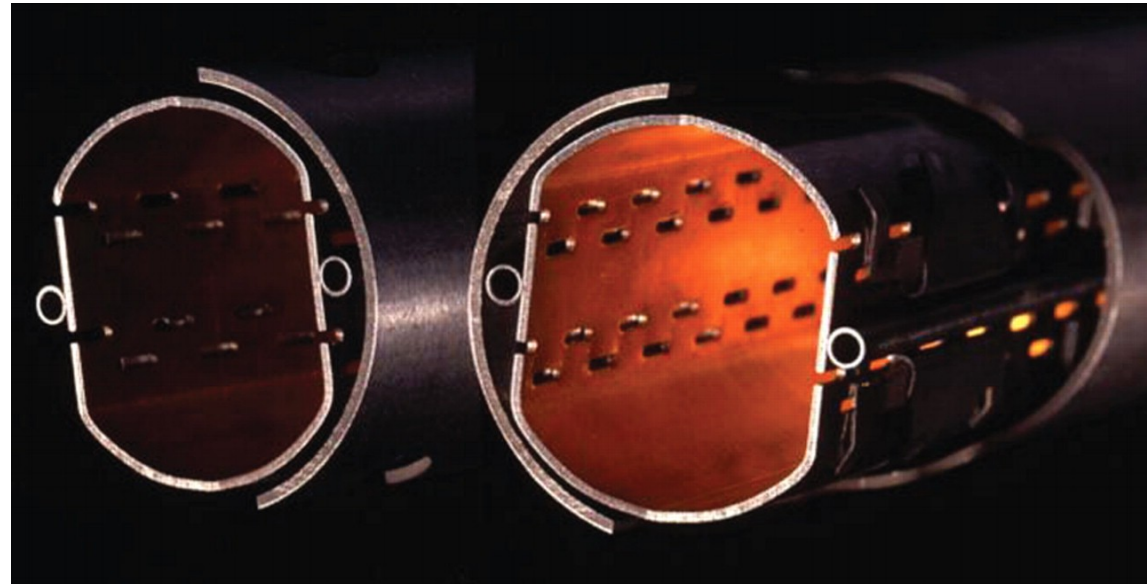
- proton versneller
- 27km omtrek, ~100m onder de grond
- enkele duizenden **supergeleidende magneten**
 - jaarlijks 1% electriciteitsverbruik België
- grootste **koelsysteem** op aarde:
120 ton helium aan -271 graden
 - kouder dan het heela!



De LHC aan het CERN

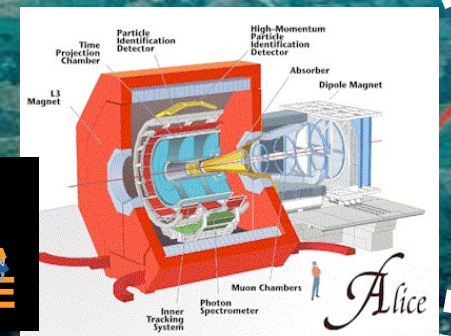
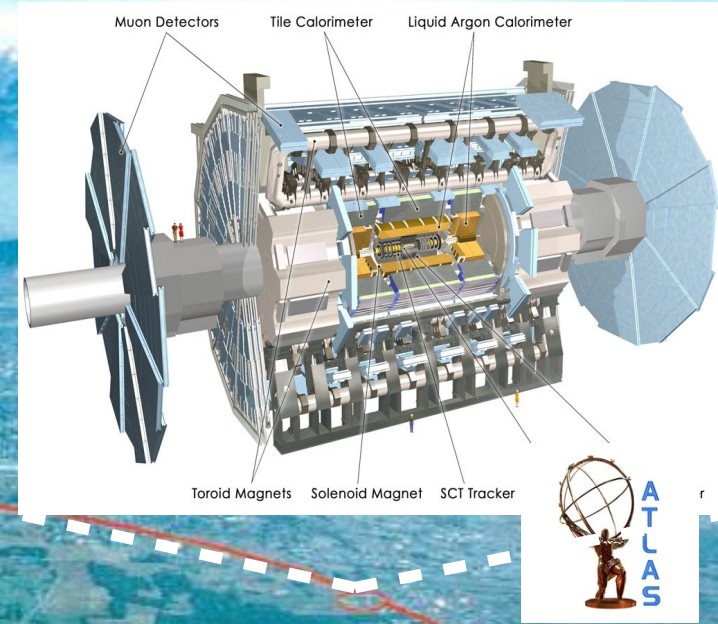
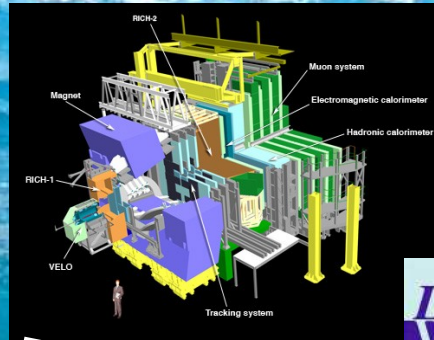
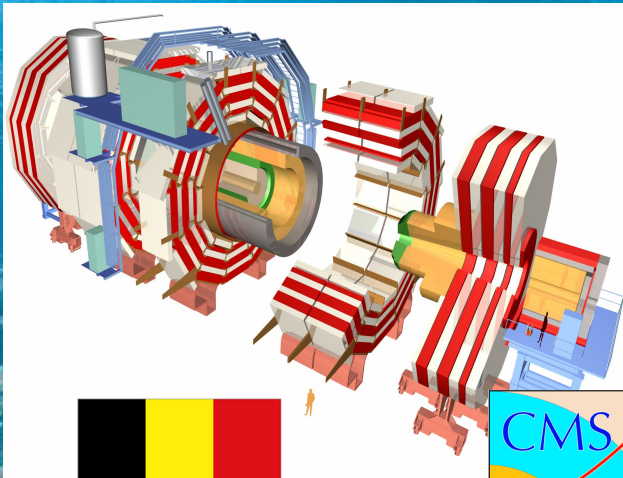
De Large Hadron Collider

- proton versneller
- 27km omtrek, ~100m onder de grond
- enkele duizenden **supergeleidende magneten**
 - jaarlijks 1% electriciteitsverbruik België
- grootste **koelsysteem** op aarde:
120 ton helium aan -271 graden
 - kouder dan het heelal
- enorm groot en sterk **vacuum**
 - leger dan de ruimte
tussen de sterren





De LHC experimenten



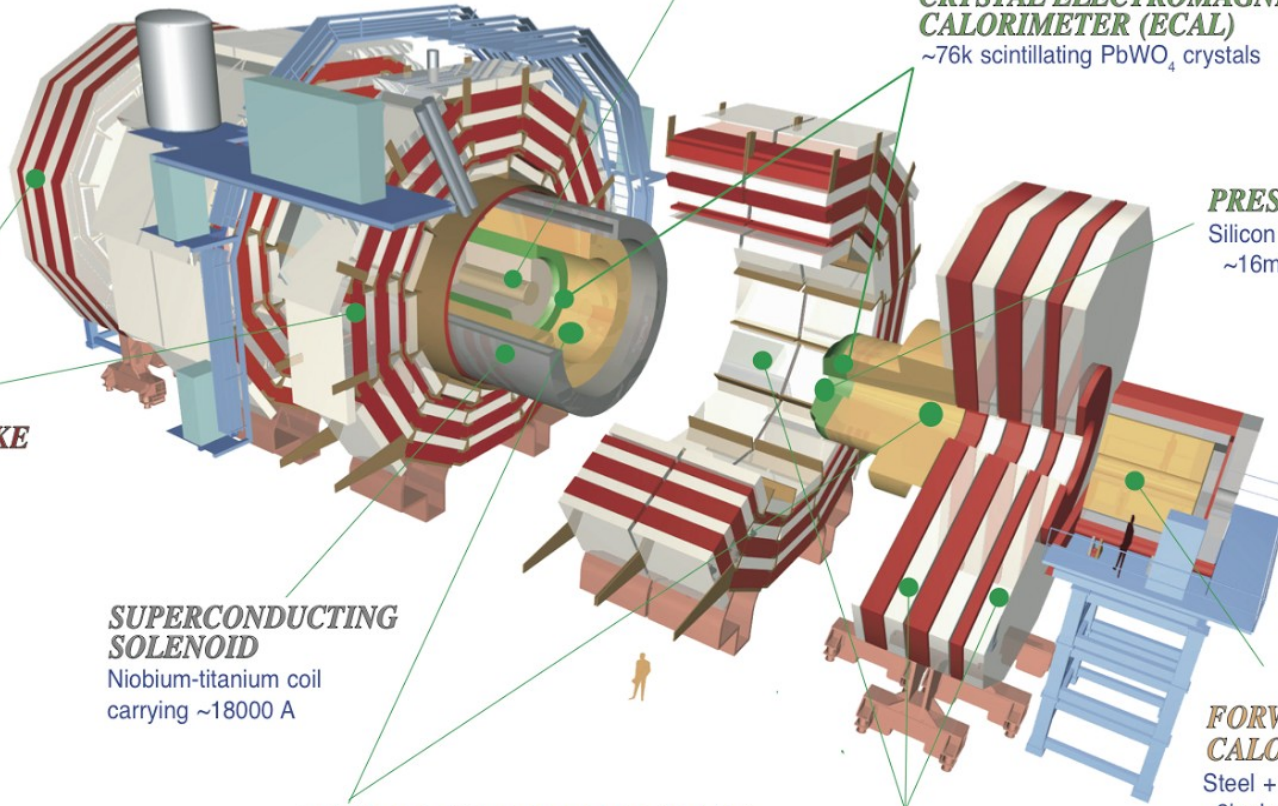
CMS: ongeveer 3000 fysici



De CMS detector schematisch

CMS Detector

Pixels
Tracker
ECAL
HCAL
Solenoid
Steel Yoke
Muons



SILICON TRACKER
Pixels ($100 \times 150 \mu\text{m}^2$)
~1m² ~66M channels
Microstrips (80-180 μm)
~200m² ~9.6M channels



CRYSTAL ELECTROMAGNETIC CALORIMETER (ECAL)
~76k scintillating PbWO₄ crystals

PRESHOWER
Silicon strips
~16m² ~137k channels

STEEL RETURN YOKE
~13000 tonnes

SUPERCONDUCTING SOLENOID
Niobium-titanium coil
carrying ~18000 A

HADRON CALORIMETER (HCAL)
Brass + plastic scintillator
~7k channels

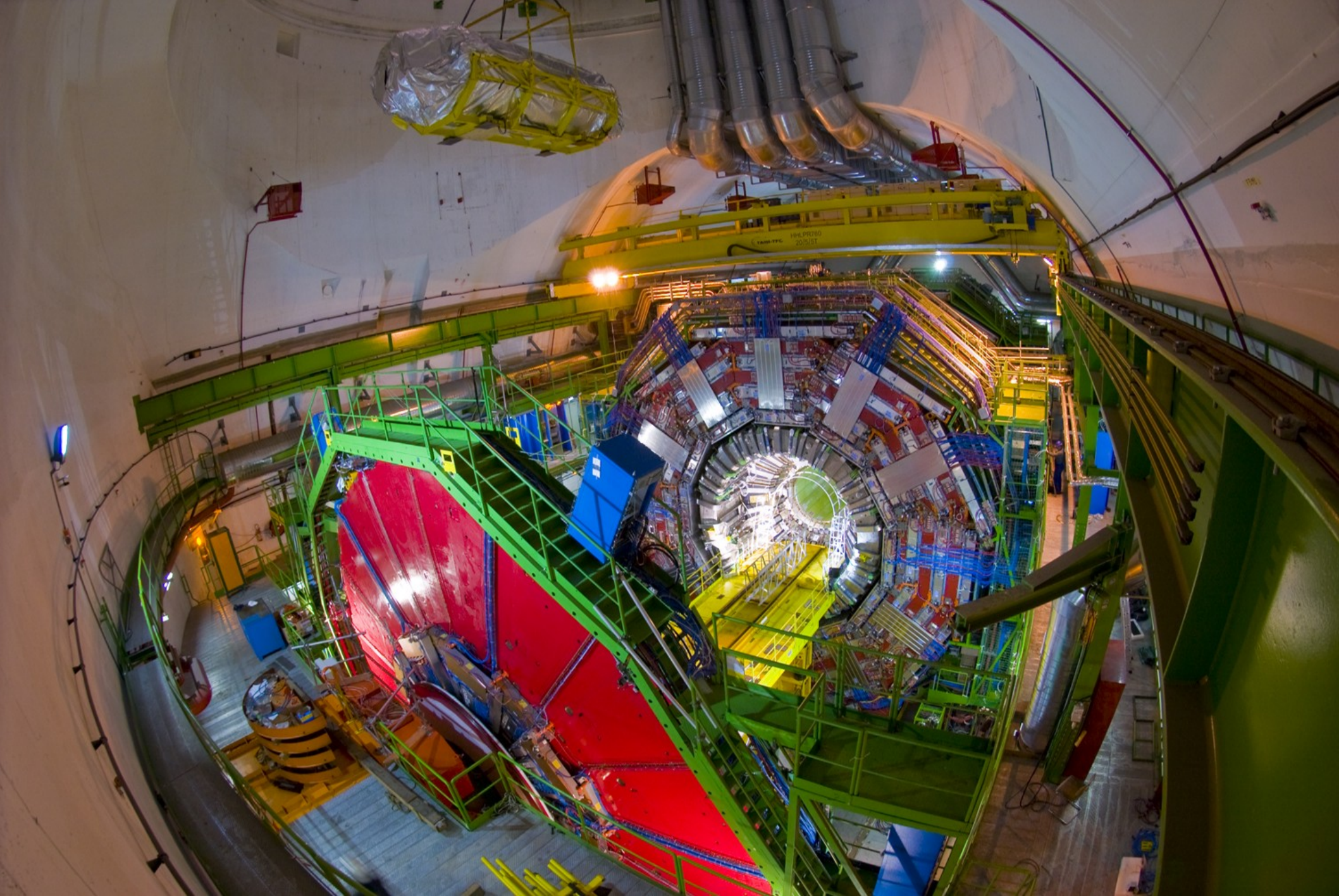
FORWARD CALORIMETER
Steel + quartz fibres
~2k channels

MUON CHAMBERS
Barrel: 250 Drift Tube & 480 Resistive Plate Chambers
Endcaps: 468 Cathode Strip & 432 Resistive Plate Chambers

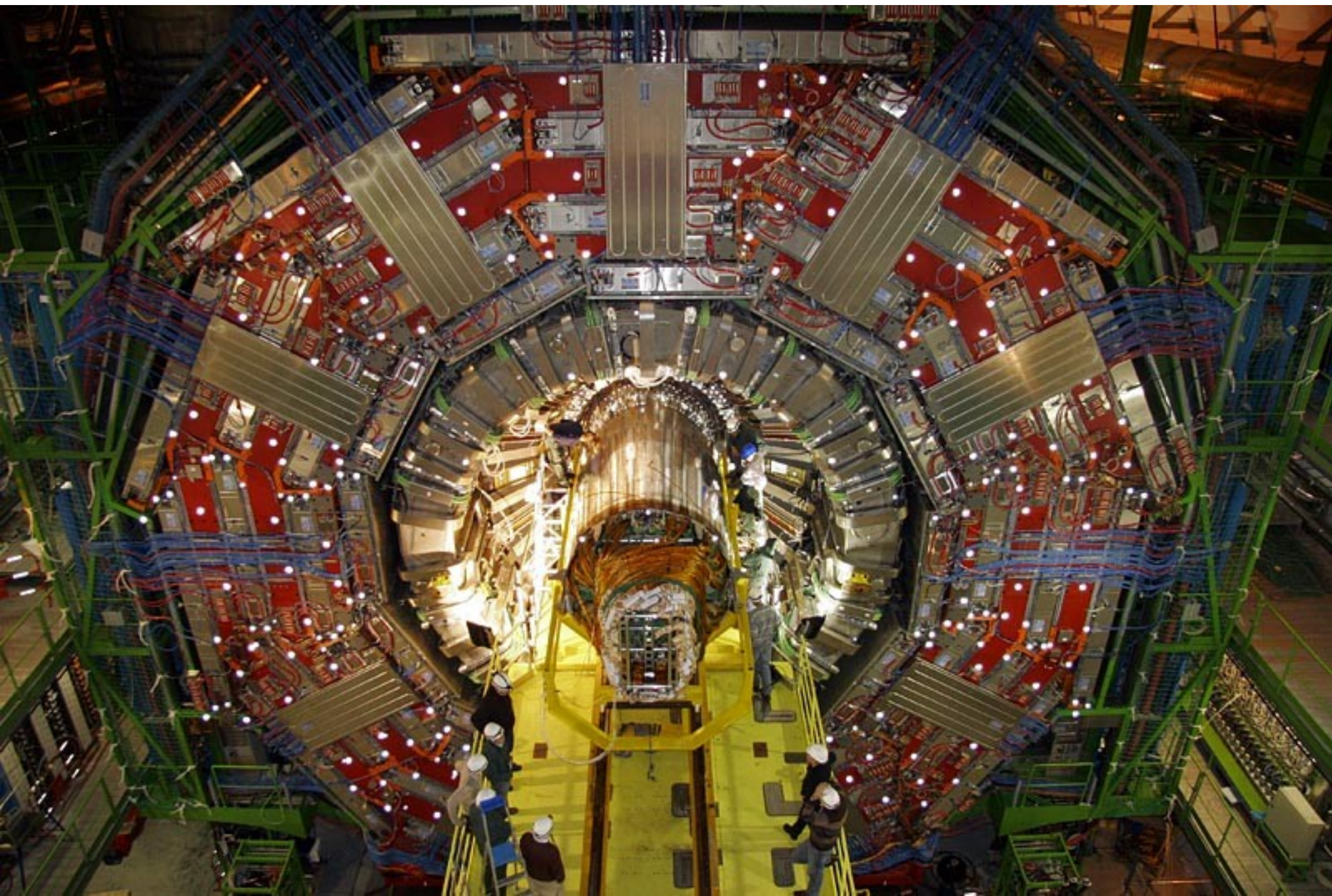
Total weight : 14000 tonnes
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 28.7 m
Magnetic field : 3.8 T



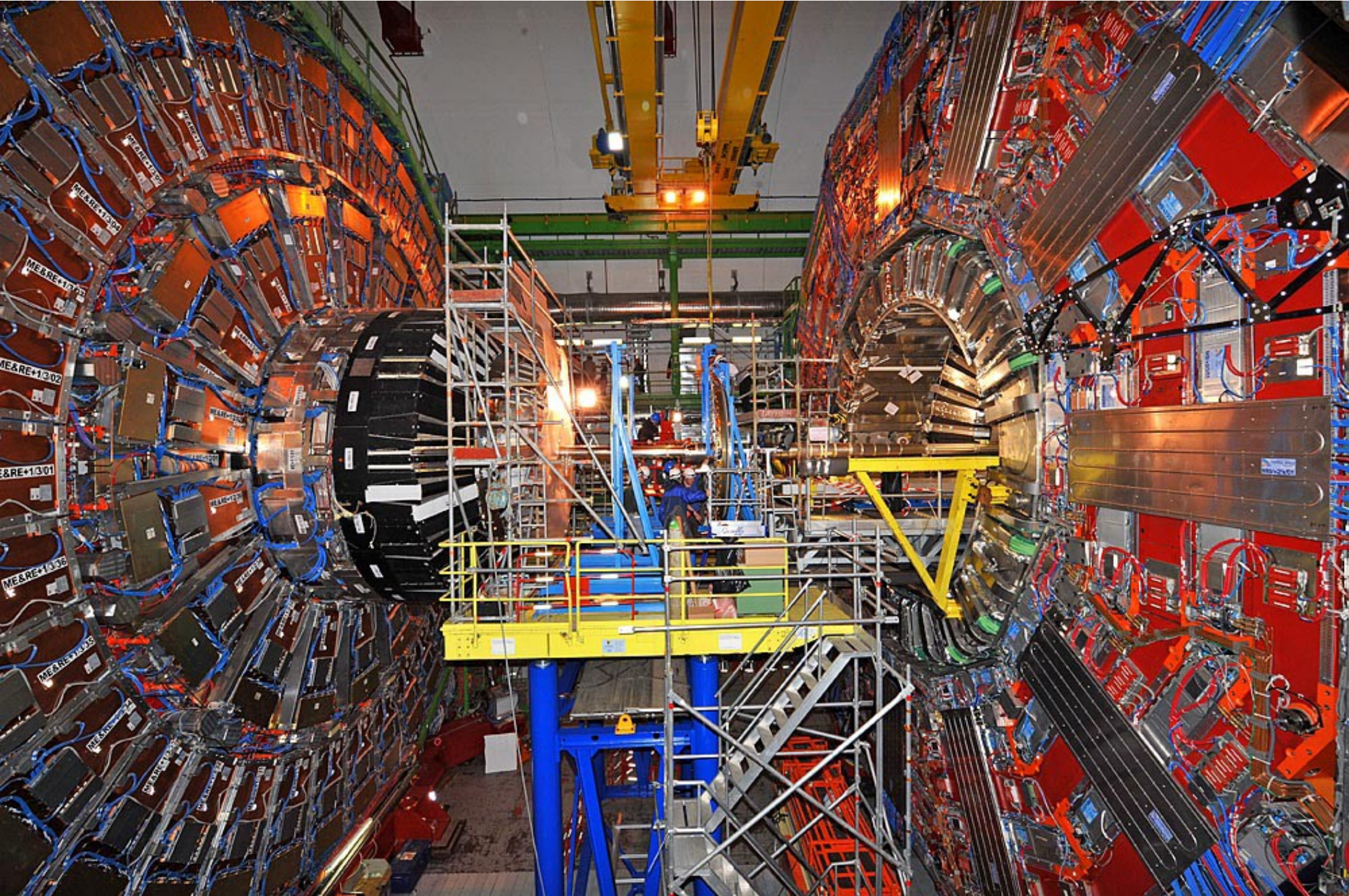
CMS installatie 2007



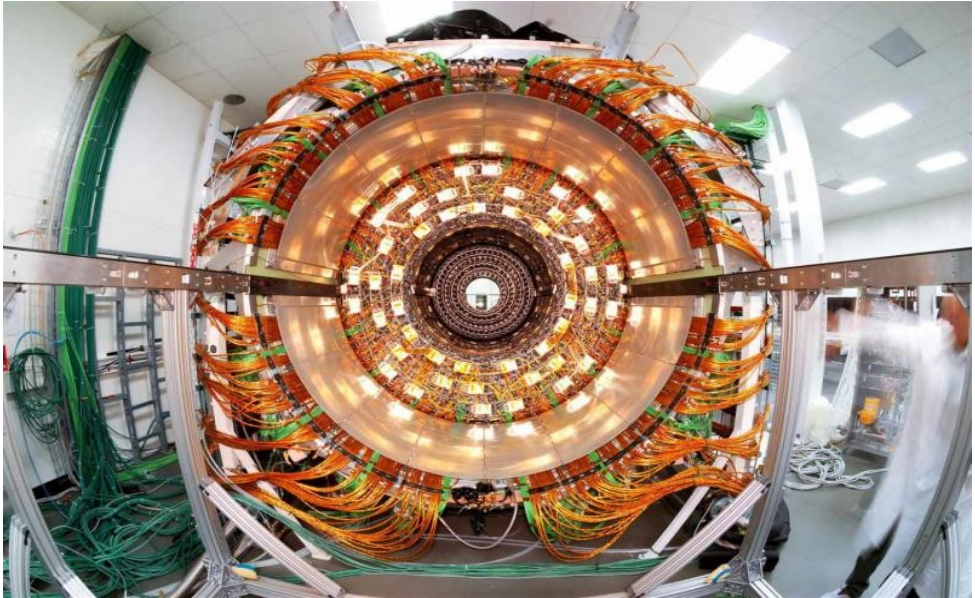
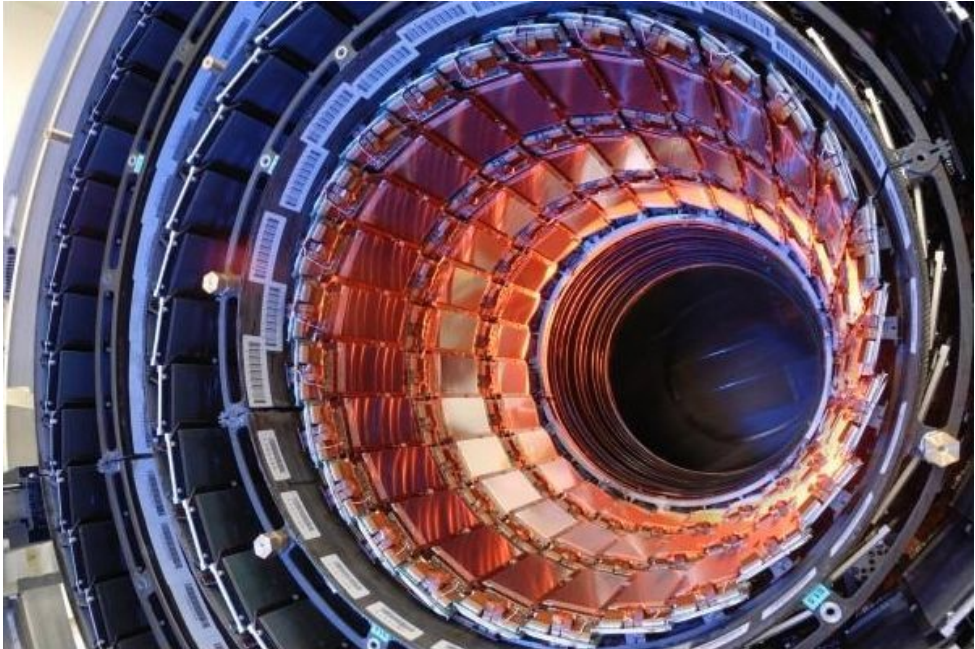
CMS installatie 2007



CMS installatie 2007



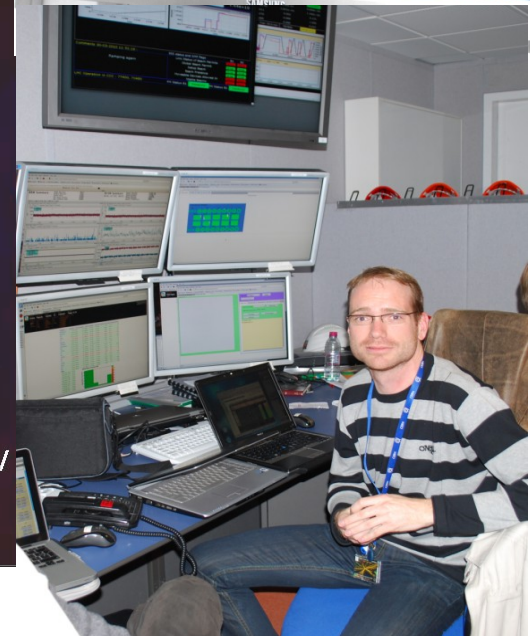
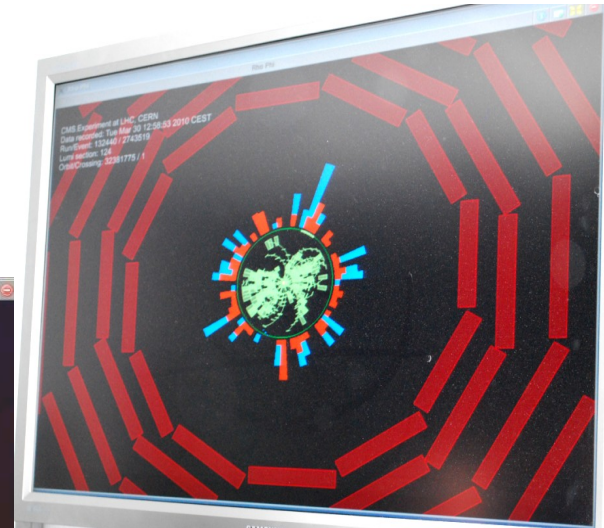
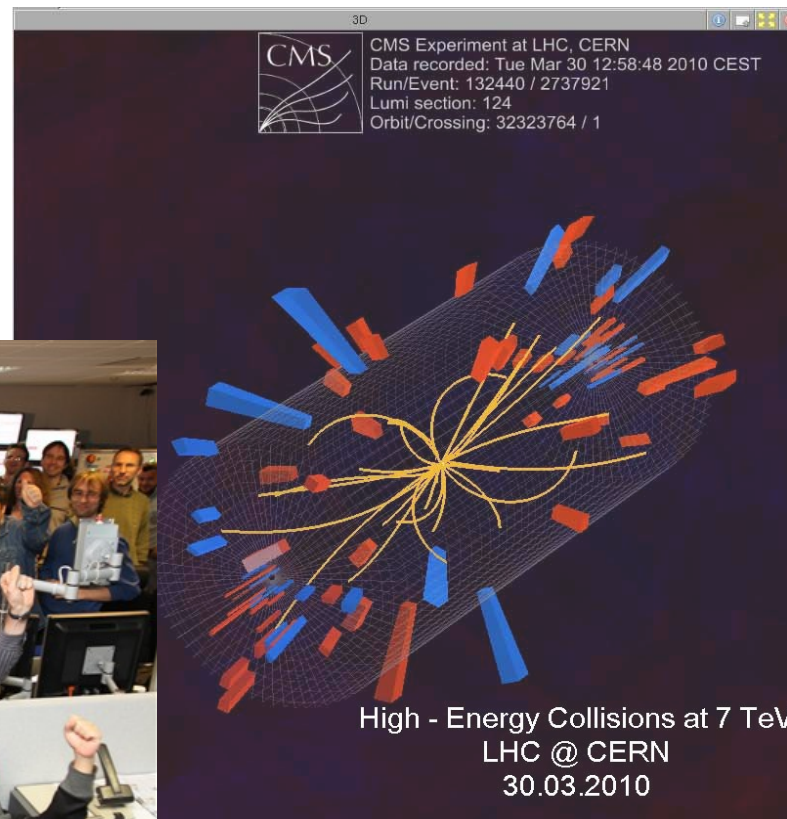
CMS constructie



Aan de slag!

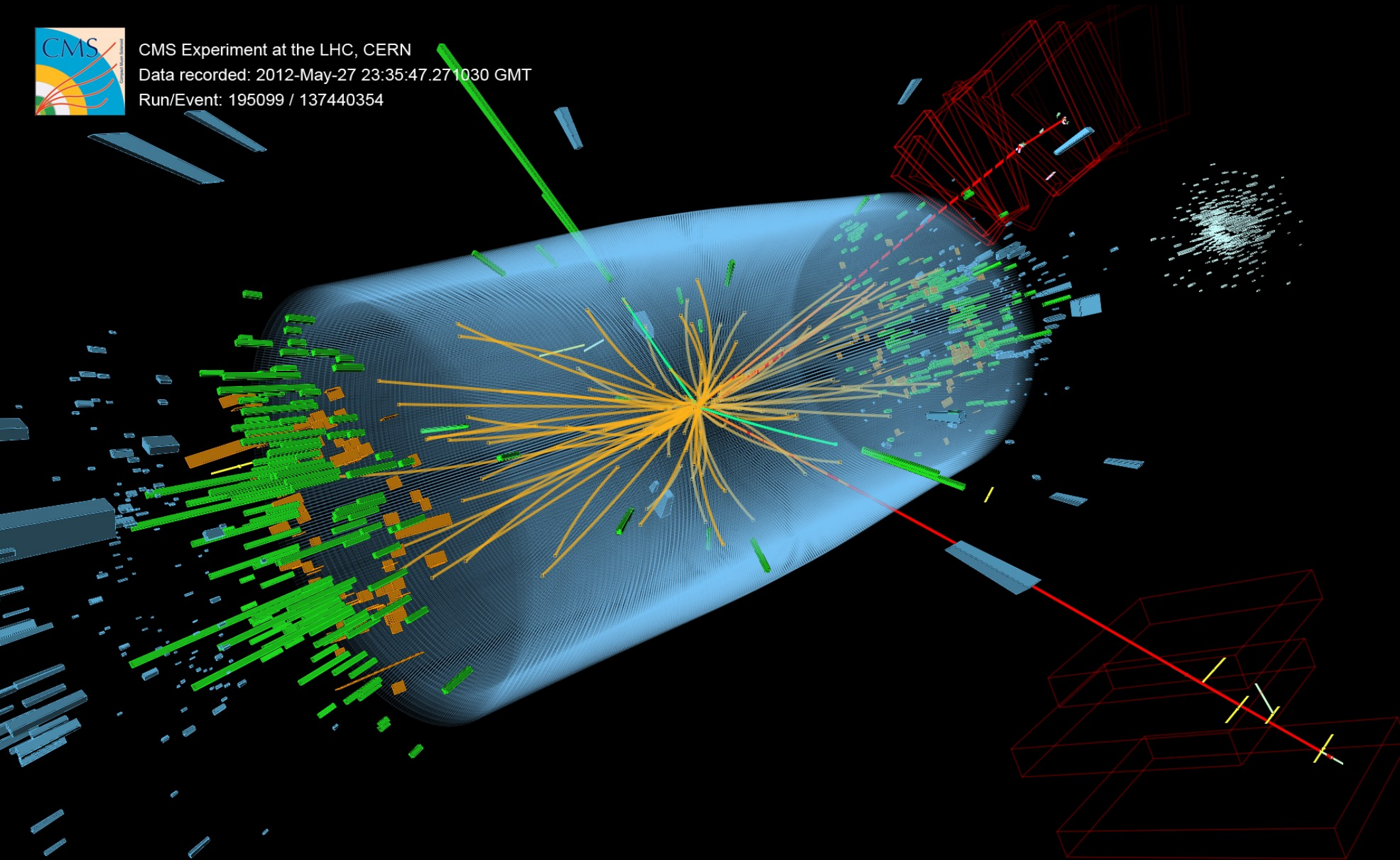
Botsingen!

- eerste botsingen op 30 maart 2010





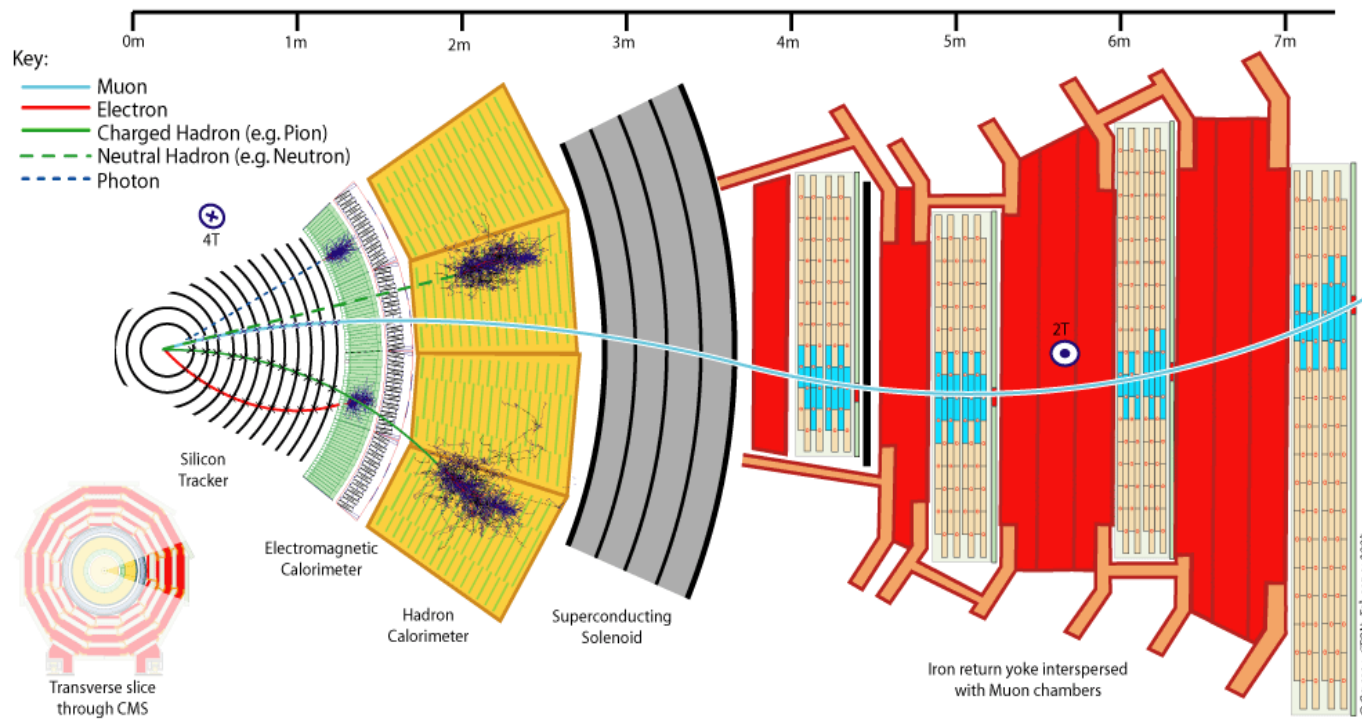
CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-27 23:35:47.271030 GMT
Run/Event: 195099 / 137440354



Higgs boson ontdekt in juli 2012

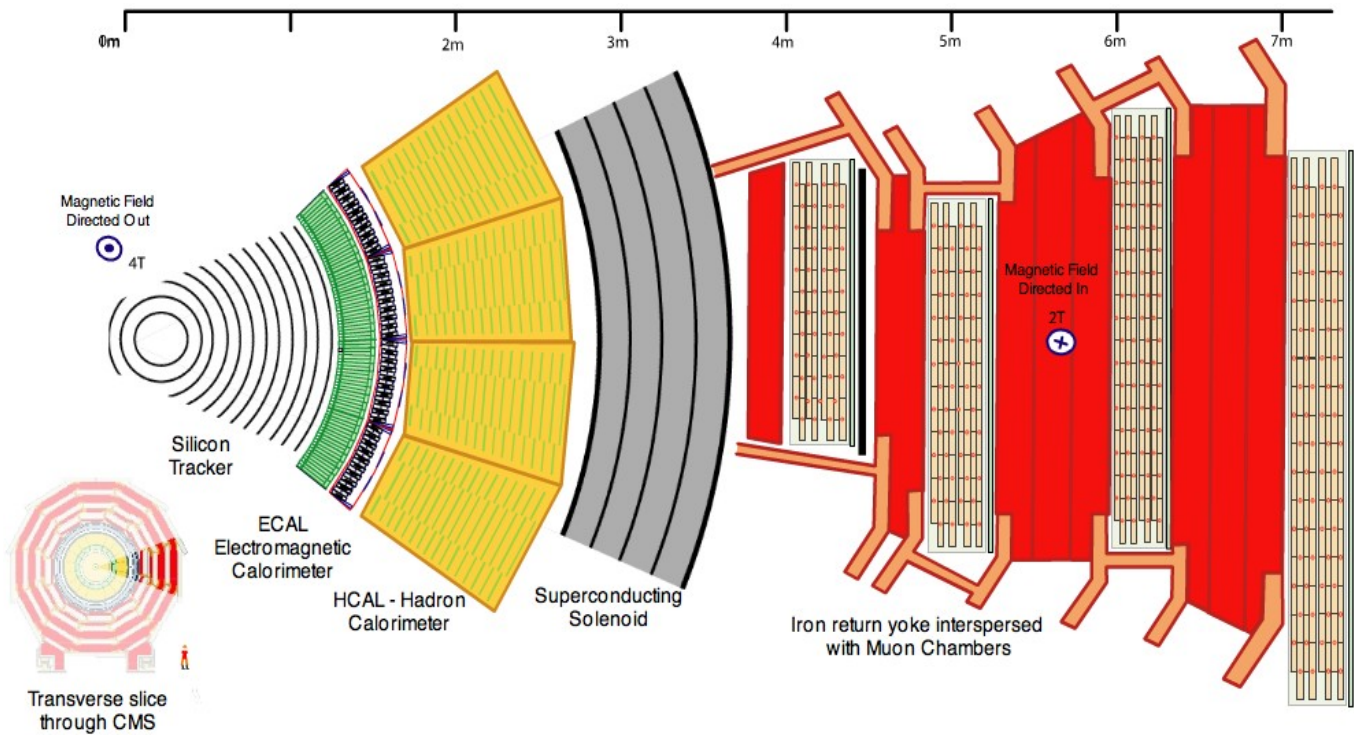
Speuren naar donkere materie in CMS

Deeltjesdetectie



Speuren naar donkere materie in CMS

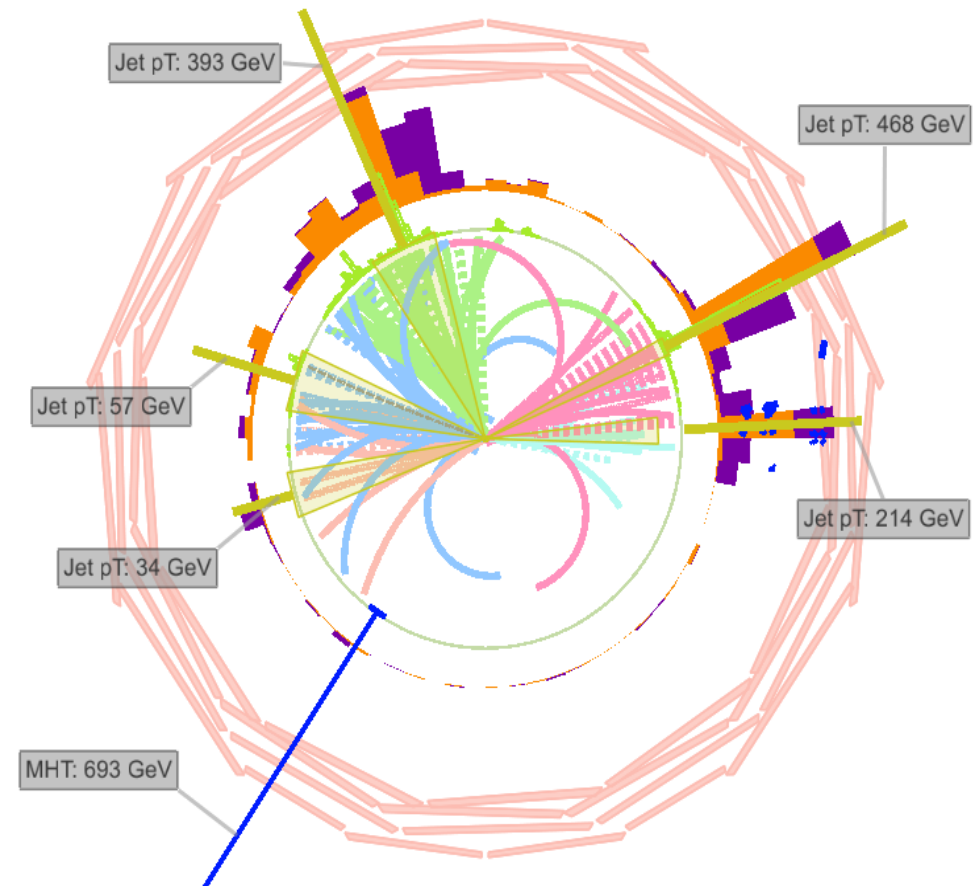
Donkere materie detectie?



Speuren naar donkere materie in CMS

Ontbrekende energie

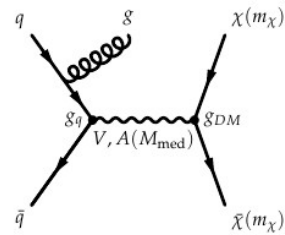
- donkere materie vliegt dwars door onze detector
- met **behoud van energie** kunnen we onzichtbare deeltjes aantonen



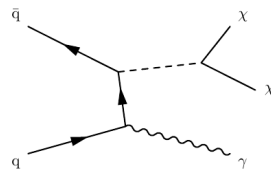
Hoe zoeken?

Zoveel mogelijk uitpluizen

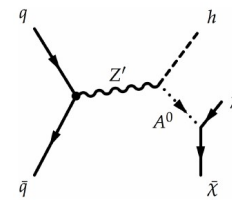
- veel experiment-theorie interactie



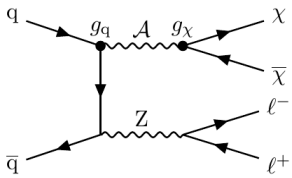
MonoJet



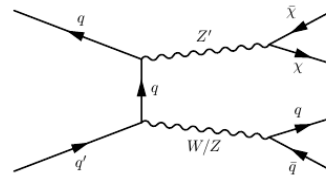
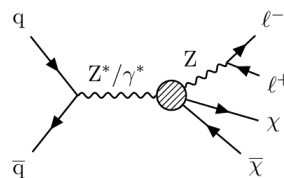
MonoPhoton



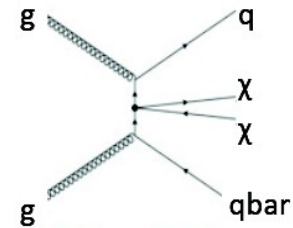
MonoHiggs



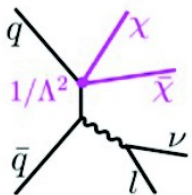
MonoZ (leptonic)



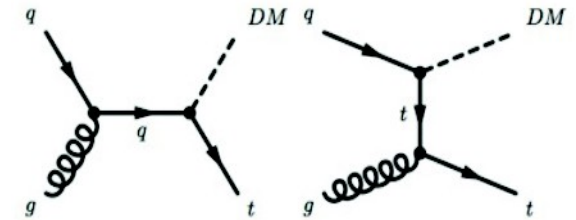
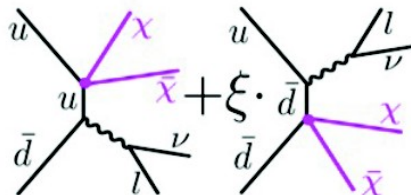
MonoW/Z (Hadronic)



BBbar / TTbar



MonoW (monoLepton)



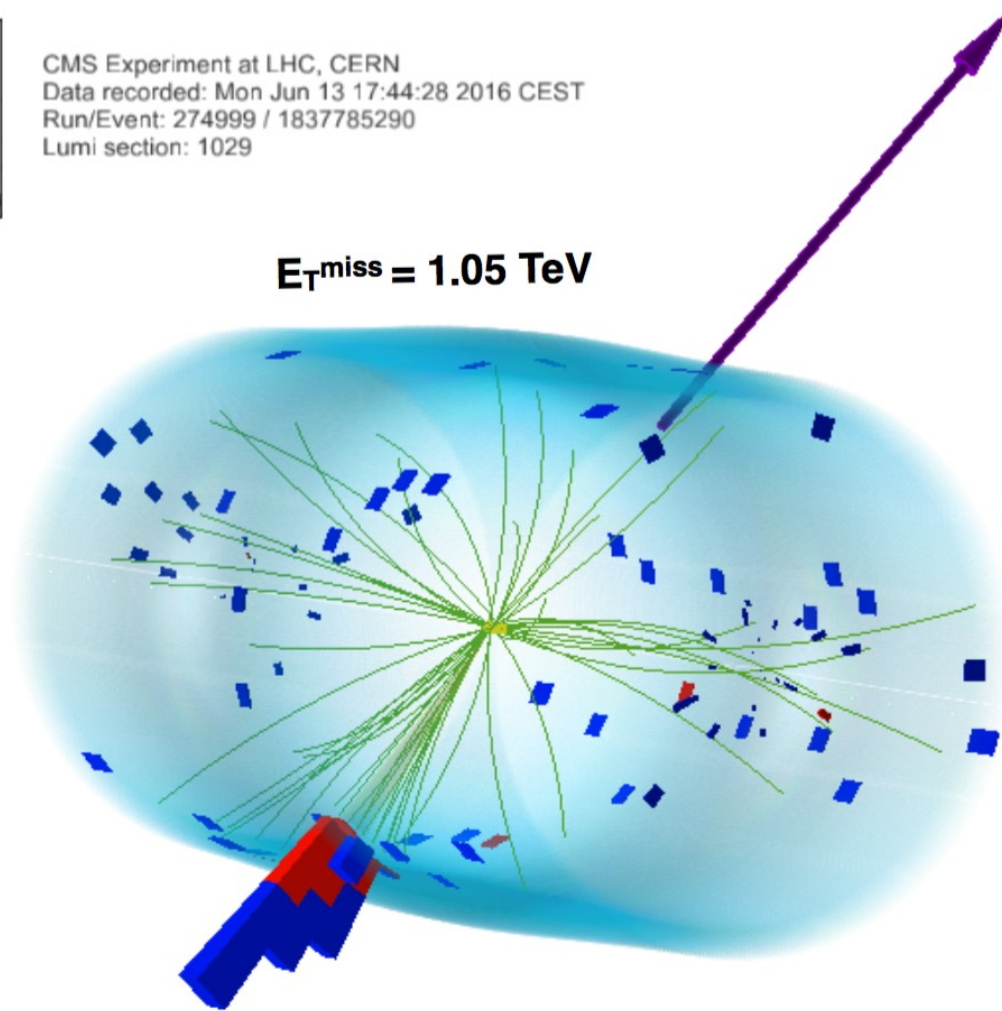
MonoTop

Spectaculaire!



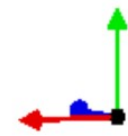
CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Mon Jun 13 17:44:28 2016 CEST
Run/Event: 274999 / 1837785290
Lumi section: 1029

$E_{T}^{\text{miss}} = 1.05 \text{ TeV}$



$p_{T}^{\text{jet}} = 1.04 \text{ TeV}$

Mass = 79 GeV

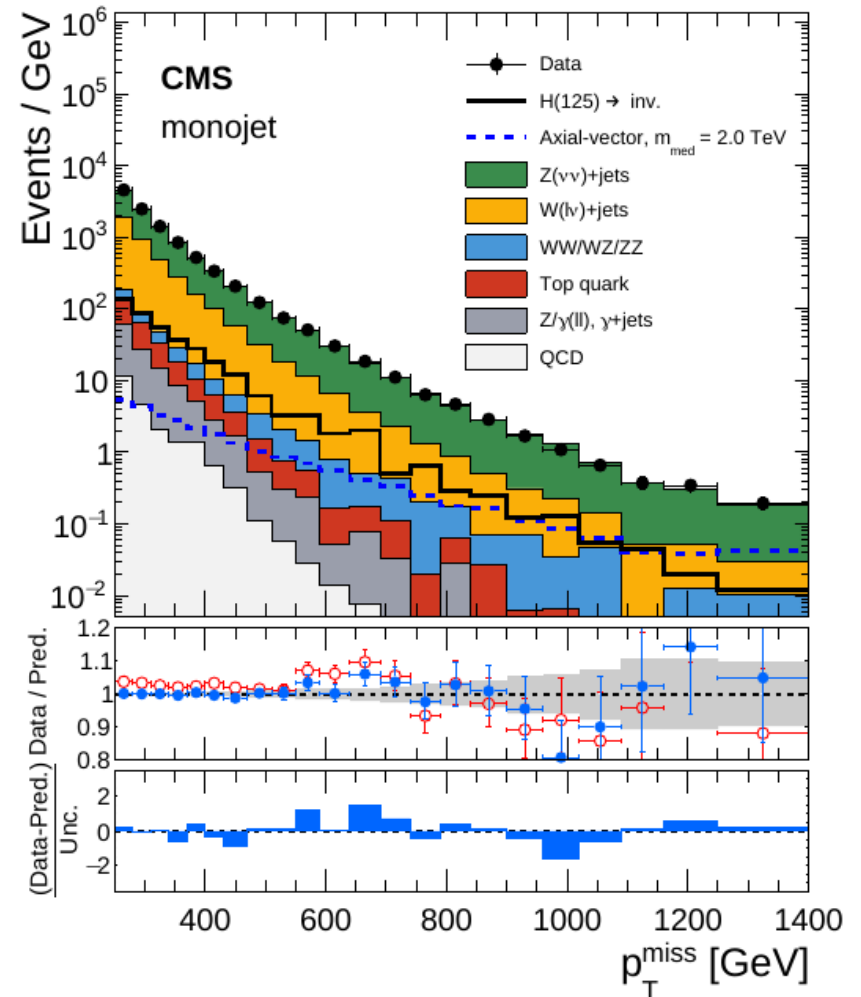


Resultaten

- tot nu toe...
- vele scenarios onderzocht
- quasi perfecte overeenstemming tussen data en voorspelling
- nog geen teken van nieuwe fysica
- nog veel meer data verwacht de komende jaren
- geen gebrek aan nieuwe ideeën

Phys. Rev. D 97, 092005 (2018)

35.9 fb⁻¹ (13 TeV)



Donkere materie, maar anders?

[arXiv.org](#) > [hep-ph](#) > [arXiv:1502.05409](#)

High Energy Physics - Phenomenology

Emerging Jets

[Pedro Schwaller](#), [Daniel Stolarski](#), [Andreas Weiler](#)

[arXiv.org](#) > [hep-ph](#) > [arXiv:1706.07407](#)

High Energy Physics - Phenomenology

Novel signatures for long-lived particles at the LHC

[Shankha Banerjee](#), [Geneviève Bélanger](#), [Biplob Bhattacharjee](#), [Fawzi Boudjema](#),
[Rohini M. Godbole](#), [Swagata Mukherjee](#)

[arXiv.org](#) > [hep-ph](#) > [arXiv:1810.09400](#)

High Energy Physics - Phenomenology

A Heavy Metal Path to New Physics

[Marco Drewes](#), [Andrea Giammanco](#), [Jan Hajer](#), [Michele Lucente](#), [Olivier Mattelaer](#)

[arXiv.org](#) > [hep-ph](#) > [arXiv:1612.00850](#)

High Energy Physics - Phenomenology

Triggering Soft Bombs at the LHC

[Simon Knapen](#), [Simone Pagan Griso](#), [Michele Papucci](#), [Dean J. Robinson](#)

[arXiv.org](#) > [hep-ph](#) > [arXiv:1503.00009](#)

High Energy Physics - Phenomenology

Semi-visible Jets: Dark Matter Undercover at the LHC

[Timothy Cohen](#), [Mariangela Lisanti](#), [Hou Keong Lou](#)

[arXiv.org](#) > [hep-ph](#) > [arXiv:1708.08951](#)

High Energy Physics - Phenomenology

Stable Sexaquark

[Glennys R. Farrar](#)

[arXiv.org](#) > [hep-ph](#) > [arXiv:1503.05505](#)

High Energy Physics - Phenomenology

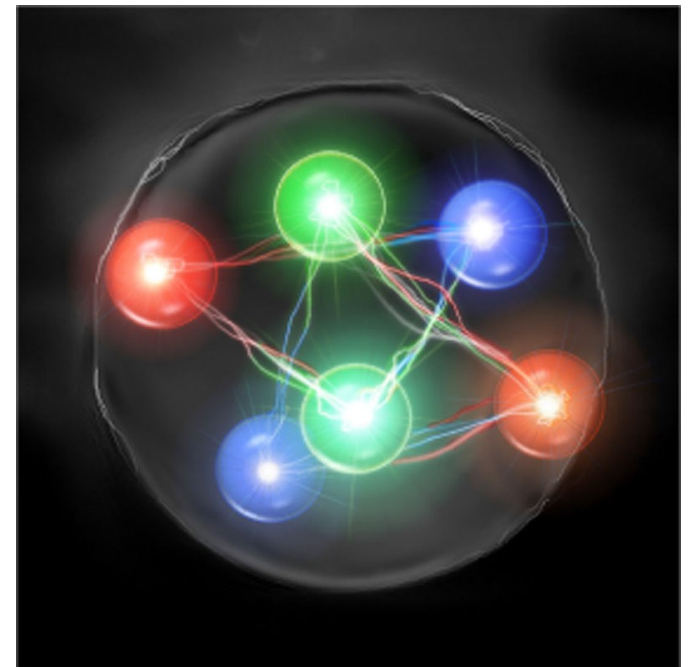
Simplified SIMPs and the LHC

[Nadir Daci](#), [Isabelle De Bruyn](#), [Steven Lowette](#), [Michel H.G. Tytgat](#), [Bryan Zaldivar](#)

Donkere materie, maar anders?

Een “exotisch” alternatief

- kan donkere materie ook uit standaard model deeltjes bestaan?
 - niet als elementair deeltje
 - maar misschien composiet?
- voorstel: **S(uudds)**
 - stabiel als $m(S) < 2m(p) + 2m(e)$
 - diepgebonden, compact deeltje
 - kosmologisch interessant
- onderzocht in de jaren '70
 - moeilijk; enkel gezocht bij hogere massa
- nu hernieuwde aandacht aan LHC
- “high-risk - high-gain”



Conclusie

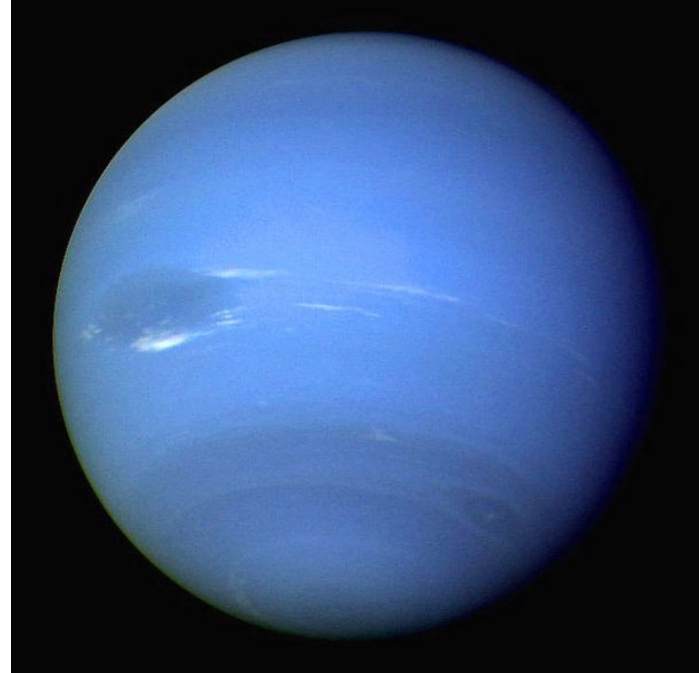
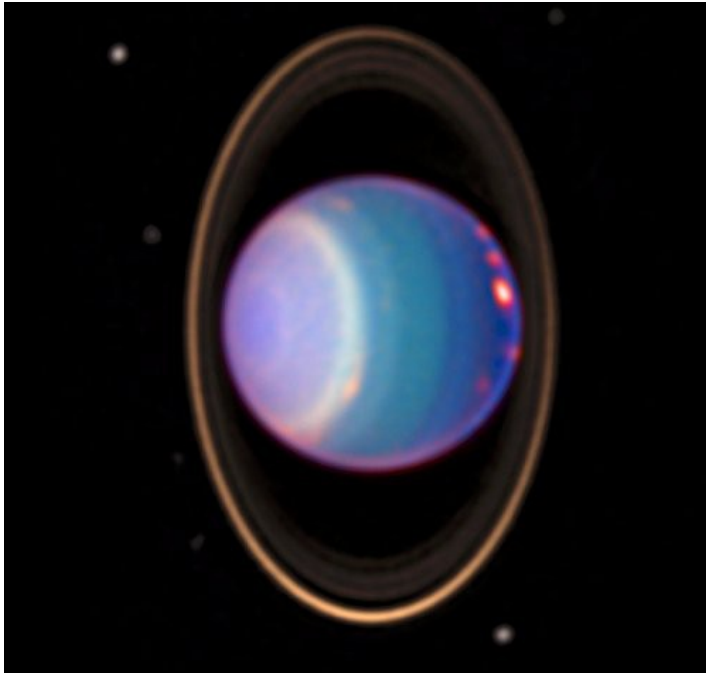
Zeer intense zoektocht naar donkere materie

- drie grote domeinen met sterke complementariteit
 - directe detectie
 - indirecte detectie
 - creatie in het lab
- al deze domeinen zeer actief met **vele experimenten, technieken, toekomstverwachtingen**
 - veel ruimte voor nieuwe ideeën!
- open geest naar exotische alternatieven

Donkere materie is een van de grootste uitdagingen in de moderne fysica!

Epiloog

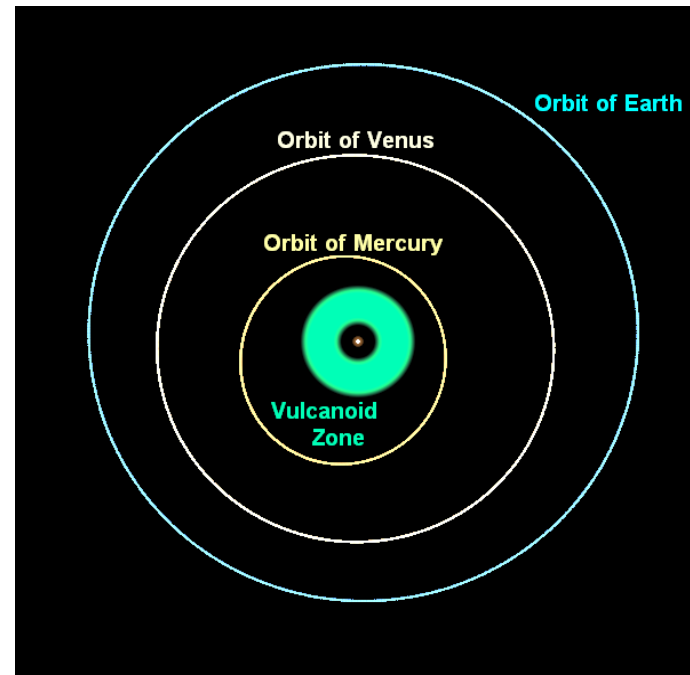
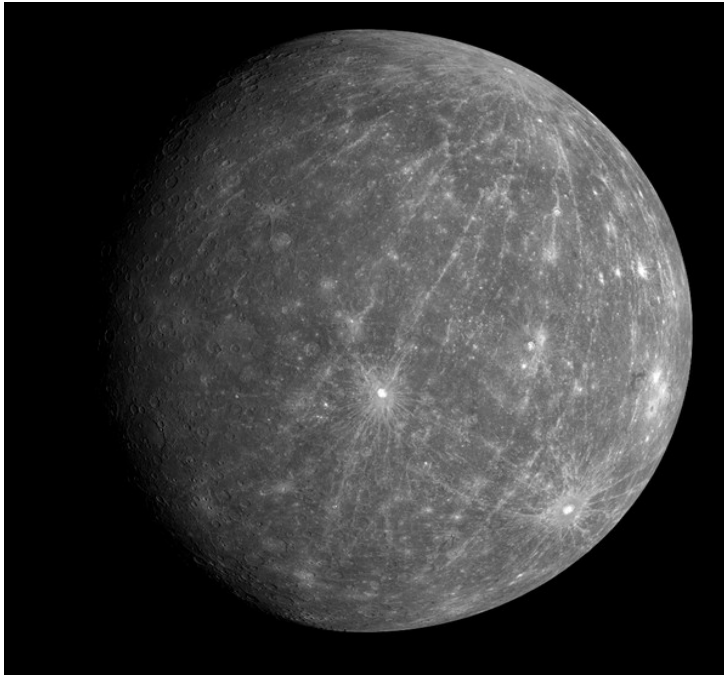
Anomale beweging van Uranus



- met Newtoniaanse mechanica voorspelde Le Verrier een nieuwe planeet
 - **Neptunus**, ontdekt in 1846
 - **binnen een graad van de voorspelde positie!**

Epiloog

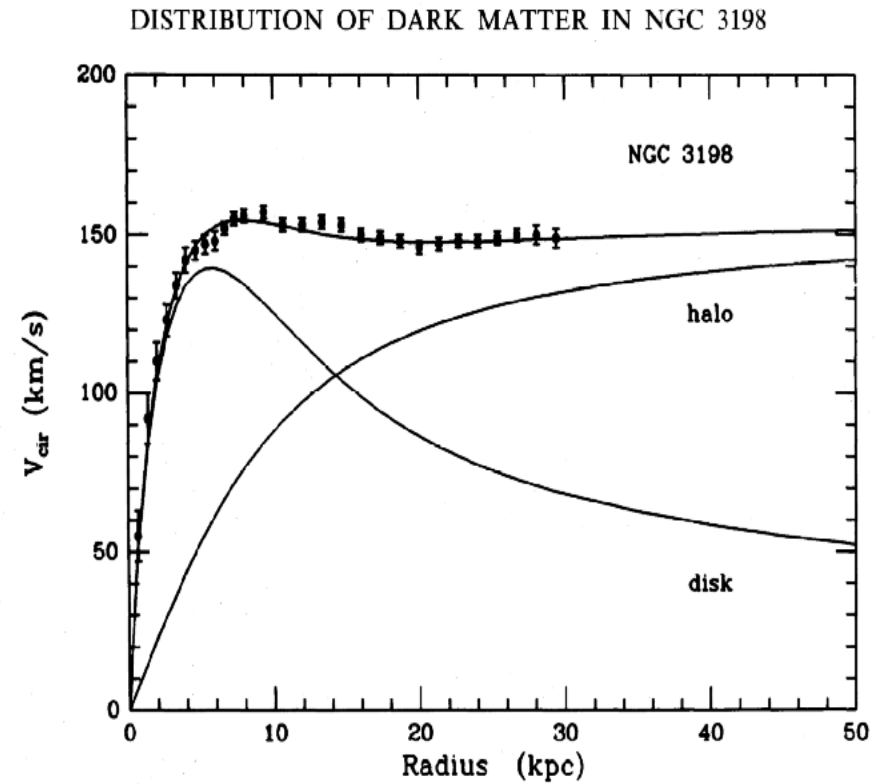
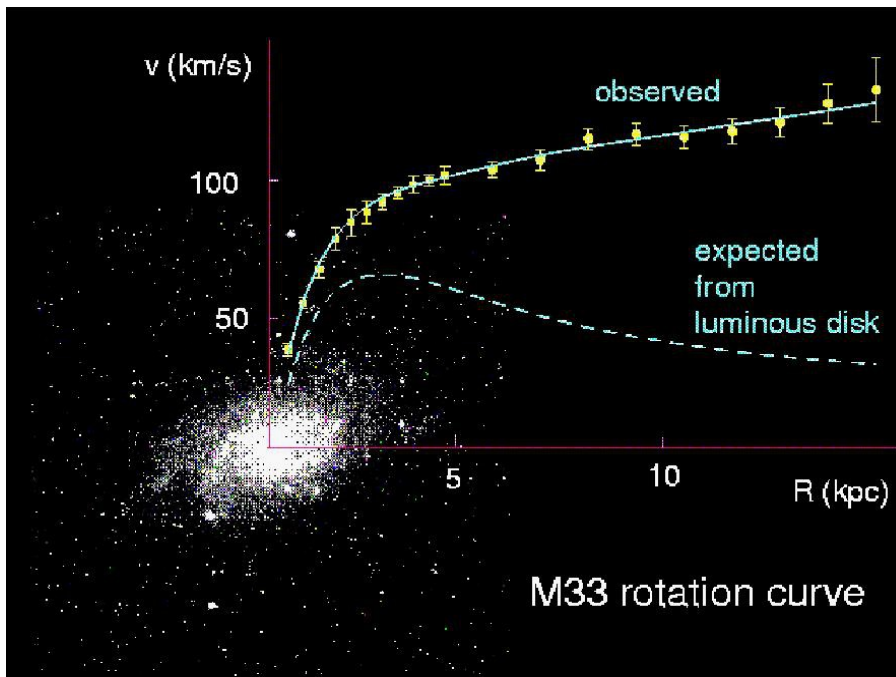
Anomale beweging van Mercurius



- op dezelfde manier voorspelde Le Verrier nog een nieuwe planeet
 - **Vulcan** – nooit ontdekt (ondanks vele “opeisingen”)
 - **Mercurius pas begrepen met Einstein's algemene relativiteitstheorie**

Epiloog

Anomale rotatie in sterrenstelsels

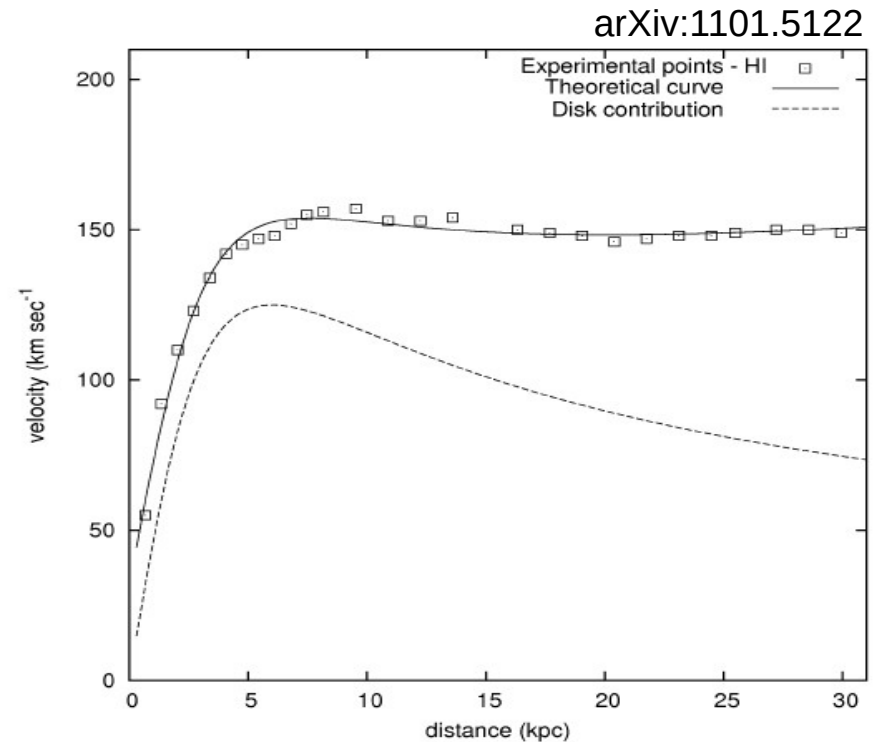


- einde jaren zestig: **sterrenstelsels roteren niet volgens hun massa inhoud**
- hypothese: **grote sferische halo van donkere materie**

Epiloog

Misschien begrijpen we gravitatie nog altijd niet goed?

- heel goed mogelijk!
- ook onderzoek in deze richting
 - wijzigen van Newtoniaanse dynamica op grote schaal
 - quantum gravity
 - of zelfs zonder nieuwe fysica, maar als gevolg van een niet-homogene massaverdeling in het universum
 - ...



- maar.. geen van deze kan zoveel verklaren als donkere materie

donkere materie is al 101 jaar oud!

FIRST ATTEMPT AT A THEORY OF THE ARRANGEMENT AND MOTION OF THE SIDEREAL SYSTEM¹

By J. C. KAPTEYN²

ABSTRACT

First attempt at a general theory of the distribution of masses, forces, and velocities in the stellar system.—(1) Distribution of stars. Observations are fairly well represented, at least up to galactic lat. 70° , if we assume that the equidensity surfaces are similar ellipsoids of revolution, with axial ratio 5.1, and this enables us to compute quite readily (2) the gravitational acceleration at various points due to such a system, by summing up the effects of each of ten ellipsoidal shells, in terms of the acceleration due to the average star at a distance of a parsec. The total number of stars is taken as 47.4×10^9 . (3) *Random and rotational velocities.* The nature of the equidensity surfaces is such that the stellar system cannot be in a steady state unless there is a general rotational motion around the galactic polar axis, in addition to a random motion analogous to the thermal agitation of a gas. In the neighborhood of the axis, however, there is no rotation, and the behavior is assumed to be like that of a gas at uniform temperature, but with a gravitational acceleration (G_η) decreasing with the distance ρ . Therefore the density Δ is assumed to obey the barometric law: $G_\eta = -\bar{u}^2(\delta\Delta/\delta\rho)/\Delta$; and taking the mean random velocity \bar{u} as 10.3 km/sec., the author finds that (4) the mean mass of the stars decreases from 2.2 (sun = 1) for shell II to 1.4 for shell X (the outer shell), the average being close to 1.6, which is the value independently found for the average mass of both components of visual binaries. In the galactic plane the resultant acceleration—gravitational minus centrifugal—is again put equal to $-\bar{u}^2(\delta\Delta/\delta\rho)/\Delta$, \bar{u} is taken to be constant and the average mass is assumed to decrease from shell to shell as in the direction of the pole. The angular velocities then come out such as to make the linear rotational velocities about constant and equal to 19.5 km/sec. beyond the third shell. If now we suppose that part of the stars are rotating one way and part the other, the relative velocity being 39 km/sec., we have a quantitative explanation of the phenomenon of star-streaming, where the relative velocity is also in the plane of the Milky Way and about 40 km/sec. It is incidentally suggested that when the theory is perfected it may be possible to determine the amount of dark matter from its gravitational effect. (5) The chief defects of the theory are: That the equidensity surfaces assumed do not agree with the actual surfaces, which tend to become spherical for the shorter distances; that the position of the center of the system is not the sun, as assumed, but is probably located at a point some 650 parsecs away in the direction galactic long. 77° , lat. -3° ; that the average mass of the stars was assumed to be the same in all shells in deriving the formula for the variation of G_η with ρ on the basis of which the variation of average mass from shell to shell and the constancy of the rotational velocity were derived—hence either the assumption or the conclusions are wrong; and that no distinction has been made between stars of different types.