



Robert Brout



Compact
Muon
Solenoid
experiment at
CERN's LHC



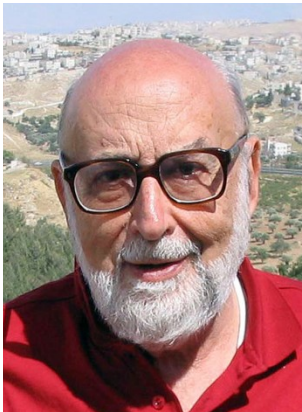
Higgsin bosoni

S. Lehti

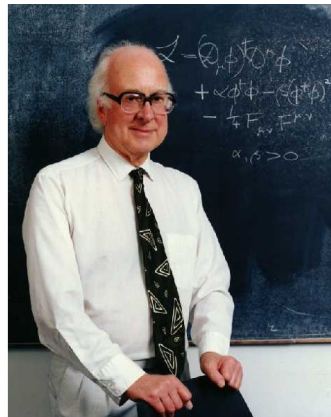
Fysiikan tutkimuslaitos
Helsinki

sami.lehti@cern.ch

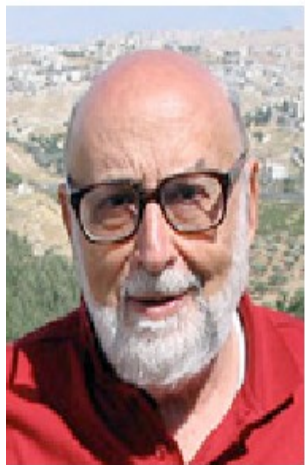
Francois Englert



Peter Higgs



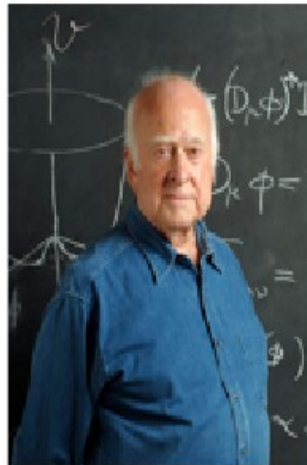
To the great minds who made a theoretical breakthrough half-a-century ago, which took so long to confirm experimentally, and Ad Memoriam Robert Brout (1928-2011)



François Englert



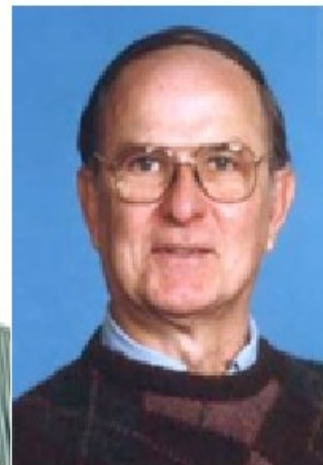
Robert Brout



Peter Higgs



Gerald Guralnik



Carl Hagen



Tom Kibble

BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS*

F. Englert and R. Brout

Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium

(Received 26 June 1964)

GLOBAL CONSERVATION LAWS AND MASSLESS PARTICLES*

G. S. Guralnik,[†] C. R. Hagen,[‡] and T. W. B. Kibble

Department of Physics, Imperial College, London, England

(Received 12 October 1964)

BROKEN SYMMETRIES, MASSLESS PARTICLES AND GAUGE FIELDS

P. W. HIGGS

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Scotland

Received 27 July 1964

VOLUME 13, NUMBER 16

PHYSICAL REVIEW LETTERS

19 OCTOBER 1964

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland

(Received 31 August 1964)

G.Landsberg in EPS-HEP 2013

Muutamia peruskäsitteitä

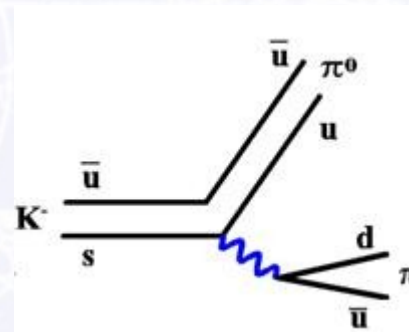
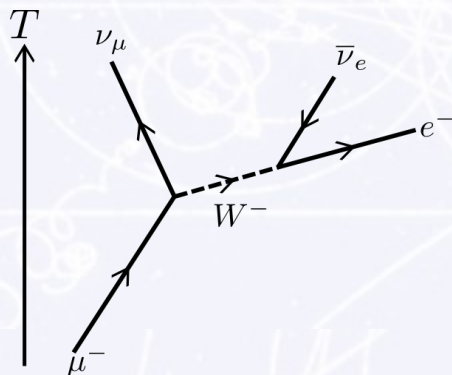
- **Leptonit:** alkeishiukkasia, jotka eivät vuorovaikuta vahvasti. Esimerkkejä e , μ , τ , **neutrinot**.
- **Kvarkit:** alkeishiukkasia jotka vuorovaikuttavat vahvasti ja muodostavat värittömiä yhdistelmähiukkasia, kuten protonin.

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

- **Bosonit:** hiukkasia, joiden sisäinen pyörimismäärä, spin, on kokonaisluku. Yhdessä kvantttilassa voi olla useampi kuin yksi bosoni
 - *jakamattomat* alkeishiukkaset, **fotoni, $W^\pm$, Z, gluoni**
 - *yhdistelmähiukkaset*, jotka rakentuvat toisista hiukkasista, kuten mesonit, ytimet joiden protoni ja neutroni määrä on parillinen, atomi joiden protoni, neutroni ja elektronimäärä on parillinen
- **Fermionit:** hiukkasia, joiden sisäinen pyörimismäärä, spin, on puolikkaan monikerta. Yhdessä kvantttilassa voi olla vain yksi fermioni kerrallaan.
 - valkoisen kääpiön ja neutronitähden degeneroitunut aine tuottaa paineen, joka estää luhistumisen

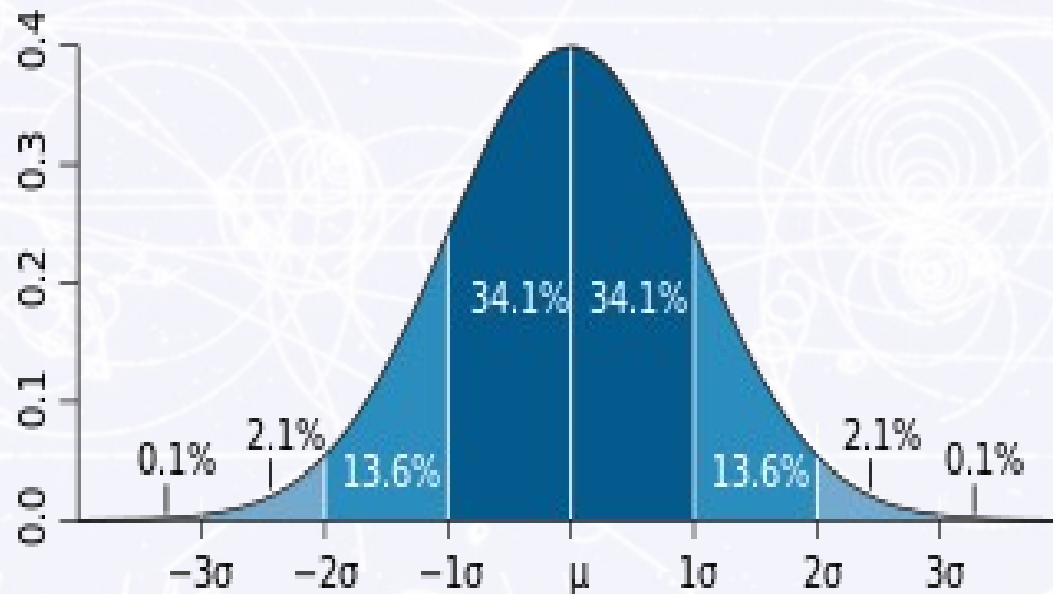
- **Luonnolliset yksiköt** $\hbar = c = 1$: Energia, liikemäärä ja massa voidaan ilmaista yksiköissä elektronivoltti, eV. Luonnolliset yksiköt ovat hiukkasfysiikassa yleisessä käytössä. Elektronivoltteja voidaan käyttää myös SI yksiköissä, tällöin esimerkiksi massa ilmaistaan yksiköissä eV/c².

- **Hajoamiskanava ja lopputila:** Useimmat LHC:llä törmäyksissä tuotetut hiukkaset ovat lyhytikäisiä, ja ne hajoavat nopeasti.
 - **Hajoamiskanava:** yksi mahdollisista tavoista, jolla hiukkanen hajoaa
 - **Lopputila:** joukko hiukkasia, jotka pystytään havaitsemaan ilmaisimessa



- **Vaikutusala:** todennäköisyys, että tietty reaktio tapahtuu (pinta-alayksikköä kohti)
- **Luminositeetti:** törmäystapahtumien lukumäärä aikayksikössä pinta-alayksikköä kohti, esim $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- **Integroitu luminositeetti:** valitun ajanjakson yli summattu (integroitu) luminositeetti. Usein yksiköissä $1/\text{vaikutusalayksikkö} = 1/\text{pb}$.

- **Tilastollinen merkitsevyys:** mitta sille, että tulos ei johdu taustakohinasta.
 - Usein uuden löytämisen rajana pidetään kolmea standardipoikkeamaa (sigmaa), vastaa 0.3% todennäköisyyttä, että mittaus johtuu kohinasta
 - 5 sigma vastaa todennäköisyyttä 1/3.500.000

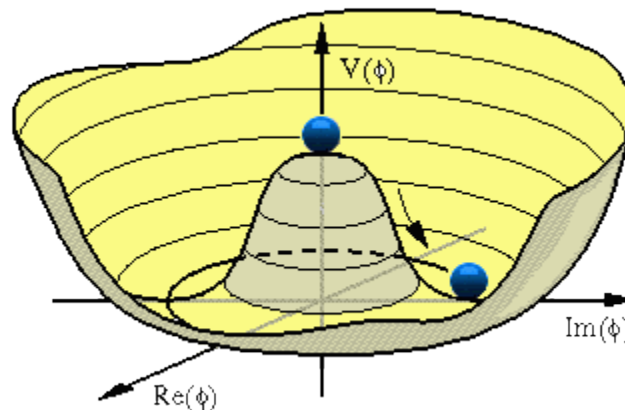


Higgsin mekanismi

Hiukkasfysiikan standardimalli rakentuu kvanttikenttien varaan. Tilannetta, jossa kvanttikenttää voidaan matemaattisesti muuntaa toisen muotoiseksi, mutta fysiikan säilyessä muuttumattomana sanotaan invarianssiksi.

Standardimallissa on sisäänrakennettuna **mittainvarianssi**

Lisäämällä Standardimalliin **Higgsin kenttä**, voidaan saada aikaan tilanne, jossa malli säilyy invarianttina, mutta **matalimman energiatilan (tyhjiö) odotusarvo saakin nolasta poikkeavan arvon**, eikä ole invariantti. Tätä sanotaan **spontaaniksi symmetriarikoksi**



Higgsin mekanismi (II)

Higgsin kentällä on 4 vapausastetta, joista kolme tuottaa mittabosonien massan, ja neljäs vapausaste näkyy Higgsin bosonina. **Massa syntyy Higgsin kentän** ja mittakenttien **vuorovaikutuksesta**, joka saa nollasta poikkeavan arvon, koska Higgsin kentän tyhjiön odotusarvo poikkeaa nollasta.

Fermionit, joilla ei ole Higgsin mekanismin kanssa varsinaisesti mitään tekemistä, saavat myös **massan vuorovaikutuksesta Higgsin kentän kanssa**



Historiaa

Higgsin historiaa

1957: Schwinger mainitsi ensimmäistä kertaa massan generoimisen epätyhjän tyhjiön kanssa tapahtuvan vuorovaikutuksen avulla

- 1960:** Gell-Mann ja Levy yhdistivät Schwingerin mallin ja symmetriarikon

- 1961:** Glashow yhdisti sähkömagneettisen ja heikon vuorovaikutuksen.

- 1961:** Goldstonen teoreema: mittainvarianssin spontaanin rikkoutumisen seurauksena syntyy massattomia bosoneja

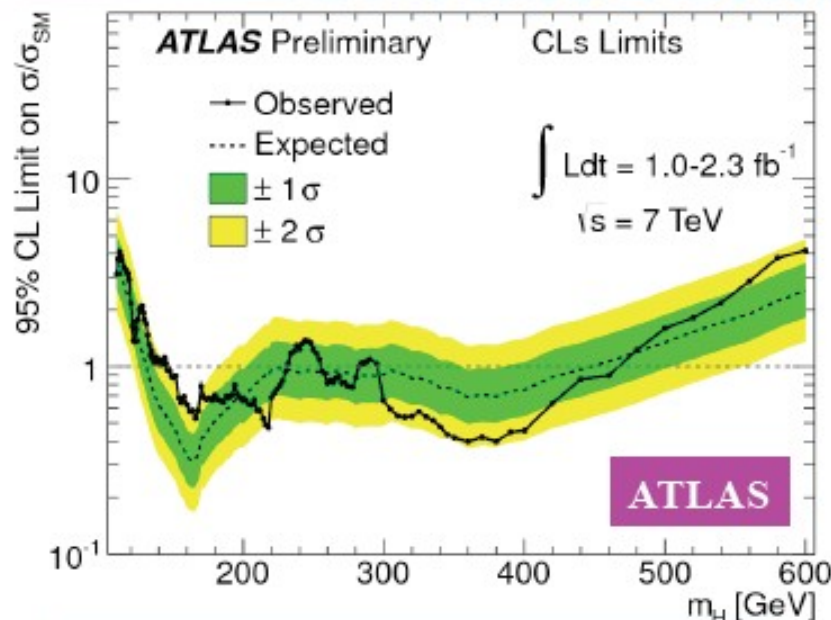
- 1964:** **F. Englert ja R. Brout** osoittivat että vektoribosonit saavat massan nollasta poikkeavan tyhjiön odotusarvon kautta.

P. Higgs työskenteli riippumattomasti saman aiheen parissa, ja mekanismi sai nimen hänen mukaansa.

- Nämä työt pohjautuvat kehitystyölle, joka tapahtui samanaikaisesti kiinteiden aineiden fysiikassa (Suprajohtavuus, Anderson, 1958, 1963)

- 1967: **Kibble** laajensi Higgsin työn ei-abelisiin teorioihin.
- 1967: Weinberg ja Salam yhdistivät Kibblen ja Glashow'in työn.
- 1997: **Englert, Brout and Higgs** palkittiin Euroopan fyysikkoseuran Korkean energian palkinnolla ensimmäistä kertaa johdonmukaisen teorian luomisesta massallisille vektoribosoneille.
- 2011: Ensimmäiset tulokset LHC:n 7 TeV:n ajosta eivät sulje pois Higgsin bosonia

ATLAS & CMS: Standard Model Higgs Combined Exclusion Limits

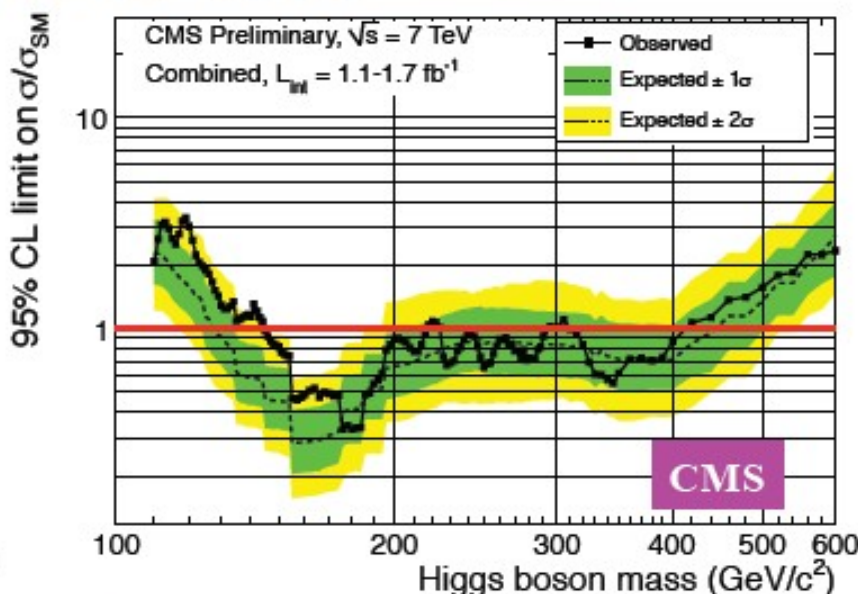


Standard Model Higgs boson is excluded at 95% CL:

$$146 < m_H < 232 \text{ GeV}$$

$$256 < m_H < 282 \text{ GeV}$$

$$296 < m_H < 466 \text{ GeV}$$



Standard Model Higgs boson is excluded at 95% CL:

$$145 < m_H < 216 \text{ GeV}$$

$$226 < m_H < 288 \text{ GeV}$$

$$310 < m_H < 400 \text{ GeV}$$

No significant excess ($<2\sigma$) is found in mass range between 110-600 GeV

Tunnelmia tiedeyhteisössä 2011

Eräs teoreetikko konferenssissa Mumbaissa, Intiassa:

- *Vuonna 1981 Leptonikonferenssin loppupuheessa määriteltiin hiukkasfysiikan polttavin ongelma. Ollakseen polttavin ongelman täytyy olla teoreettisesti edistynyt ja kiireellinen. Sen pitäisi olla myös kokeellisesti varmennettavissa. Mielestäni ongelma numero 1 suurenergiafysiikassa on **skalaarihiukkaset**.*
- *LHC:n suunnitteluparametrit valittiin siten, että LHC pystyy tutkimaan Standardimallin Higgsin bosonia koko sen ennustetulla massa-alueella.*
- *Nyt jo, LHC-ohjelman alussa, meillä on viitteitä 140 GeV:n hujakoilla olevasta Higgsin bosonista. Sekä ATLAS että CMS näkevät pienen ylimäärän tapahtumia ennustettuun taustaan verrattuna. 140 GeV:n Higgs voidaan löytää tänä vuonna 5 fb^{-1} :lla dataa.*
- *On vaikea olla olematta kärsimätön.*
- *Jos Higgsin massa on 120 GeV, tarvitaan 10 fb^{-1} tai enemmän dataa.*

- 1967: **Kibble** laajensi Higgsin työn ei-abelisiin teorioihin.
- 1967: Weinberg ja Salam yhdistivät Kibblen ja Glashow'in työn.
- 1997: **Englert, Brout and Higgs** palkittiin Euroopan fyysikkoseuran Korkean energian palkinnolla ensimmäistä kertaa johdonmukaisen teorian luomisesta massallisille vektoribosoneille.
- 2011: Ensimmäiset tulokset LHC:n 7 TeV:n ajosta eivät sulje pois Higgsin bosonia
- 2012: Higgsin kaltaisen hiukkasen löytyminen LHC:llä.



4. Heinäkuuta 2012



Ilmoitus Higgsin kaltaisen
hiukkasen löytymisestä



- 1967: Kibble laajensi Higgsin työn ei-abelisiin teorioihin.
- 1967: Weinberg ja Salam yhdistivät Kibblen ja Glashow'in työn.
- 1997: Englert, Brout and Higgs palkittiin Euroopan fyysikkoseuran Korkean energian palkinnolla ensimmäistä kertaa johdonmukaisen teorian luomisesta massallisille vektoribosoneille.
- 2011: Ensimmäiset tulokset LHC:n 7 TeV:n ajosta eivät sulje pois Higgsin bosonia
- 2012: Higgsin kaltaisen hiukkasen löytyminen LHC:llä.
- 2013: Varmistus sille, että uusi hiukkanen on Higgsin bosoni.
- 2013: Euroopan fyysikkoseuran palkinto ATLAS ja CMS kollaboraatioille sekä Della Negralle, Jennille ja Virdeelle Higgsin bosonin löytämisestä.

European Physical Society PRIZE



The 2013 High Energy and Particle Physics Prize

for an outstanding contribution to High Energy Physics

is awarded to the

ATLAS and CMS collaborations

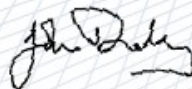
"for the discovery of a Higgs boson, as predicted by the Brout-Englert-Higgs mechanism"

and to

Michel Della Negra, Peter Jenni, and Tejinder Virdee

"for their pioneering and outstanding leadership rôles in the making of the ATLAS and CMS experiments"

John Dudley

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'John Dudley'.

President
European Physical Society

Paris Sphicas

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'P. Sphicas'.

Chairman
High Energy and Particle Physics Division

Stockholm, Sweden, July 2013

- 1967: **Kibble** laajensi Higgsin työn ei-abelisiin teorioihin.
- 1967: Weinberg ja Salam yhdistivät Kibblen ja Glashow'in työn.
- 1997: **Englert, Brout ja Higgs** palkittiin Euroopan fyysikkoseuran Korkean energian palkinnolla ensimmäistä kertaa johdonmukaisen teorian luomisesta massallisille vektoribosoneille.
- 2011: Ensimmäiset tulokset LHC:n 7 TeV:n ajosta eivät sulje pois Higgsin bosonia
- 2012: Higgsin kaltaisen hiukkasen löytyminen LHC:llä.
- 2013: Varmistus sille, että uusi hiukkanen on Higgsin bosoni.
- 2013: Euroopan fyysikkoseuran palkinto ATLAS ja CMS kollaboraatioille sekä **Della Negralle, Jennille ja Virdeelle** Higgsin bosonin löytämisestä.
- 2013: Fysiikan Nobel-palkinto 2013 **Higgsille ja Englertille**

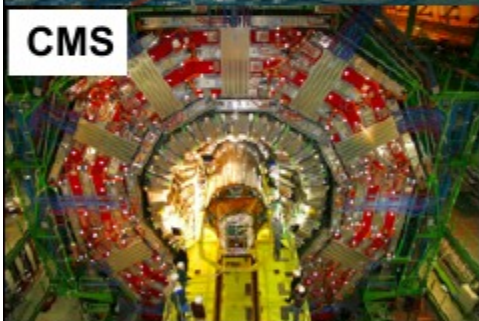


Laitteistot

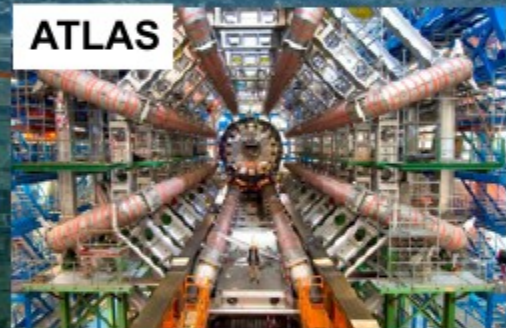
Two gigantic detectors for the Higgs search

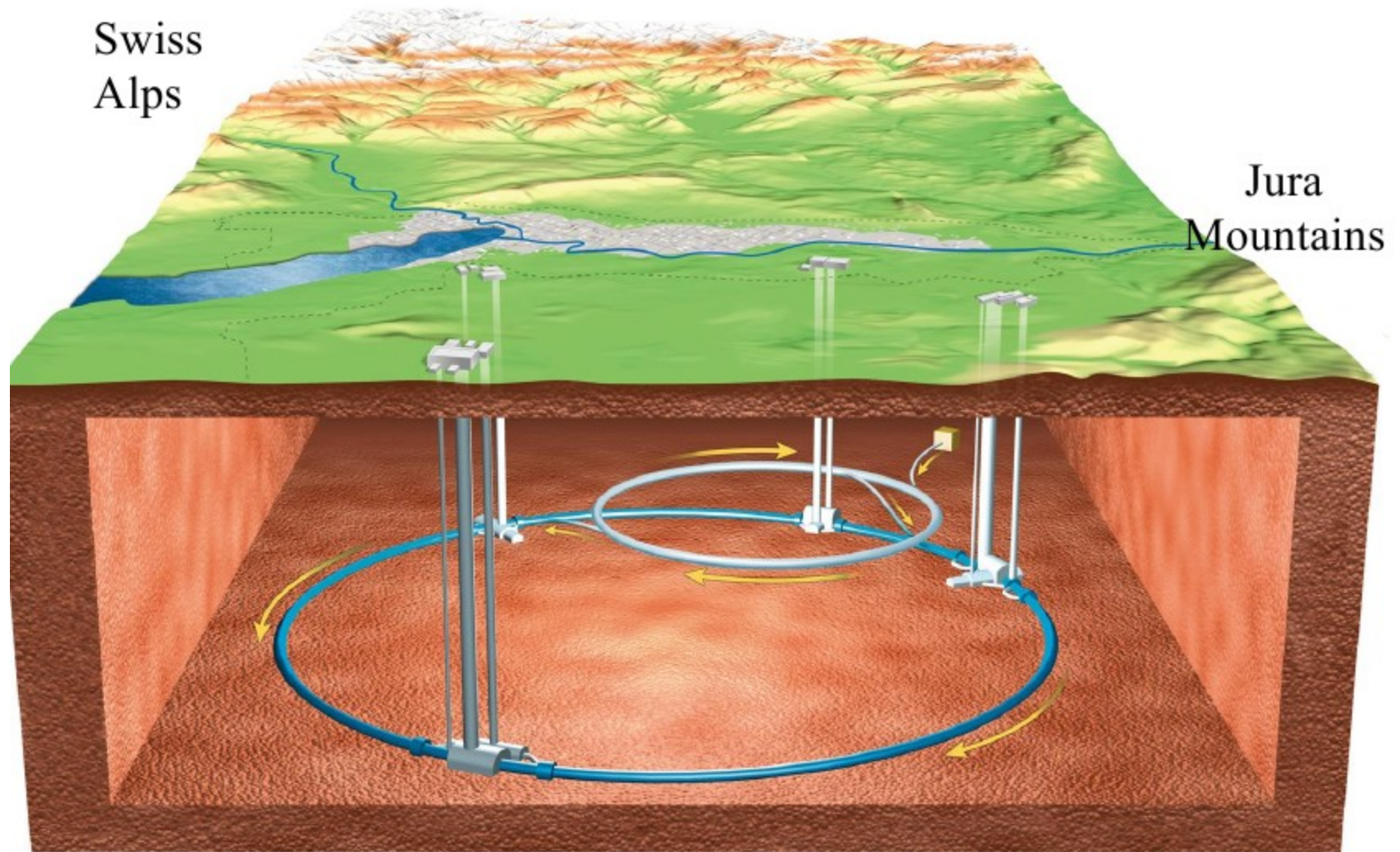


CMS



ATLAS

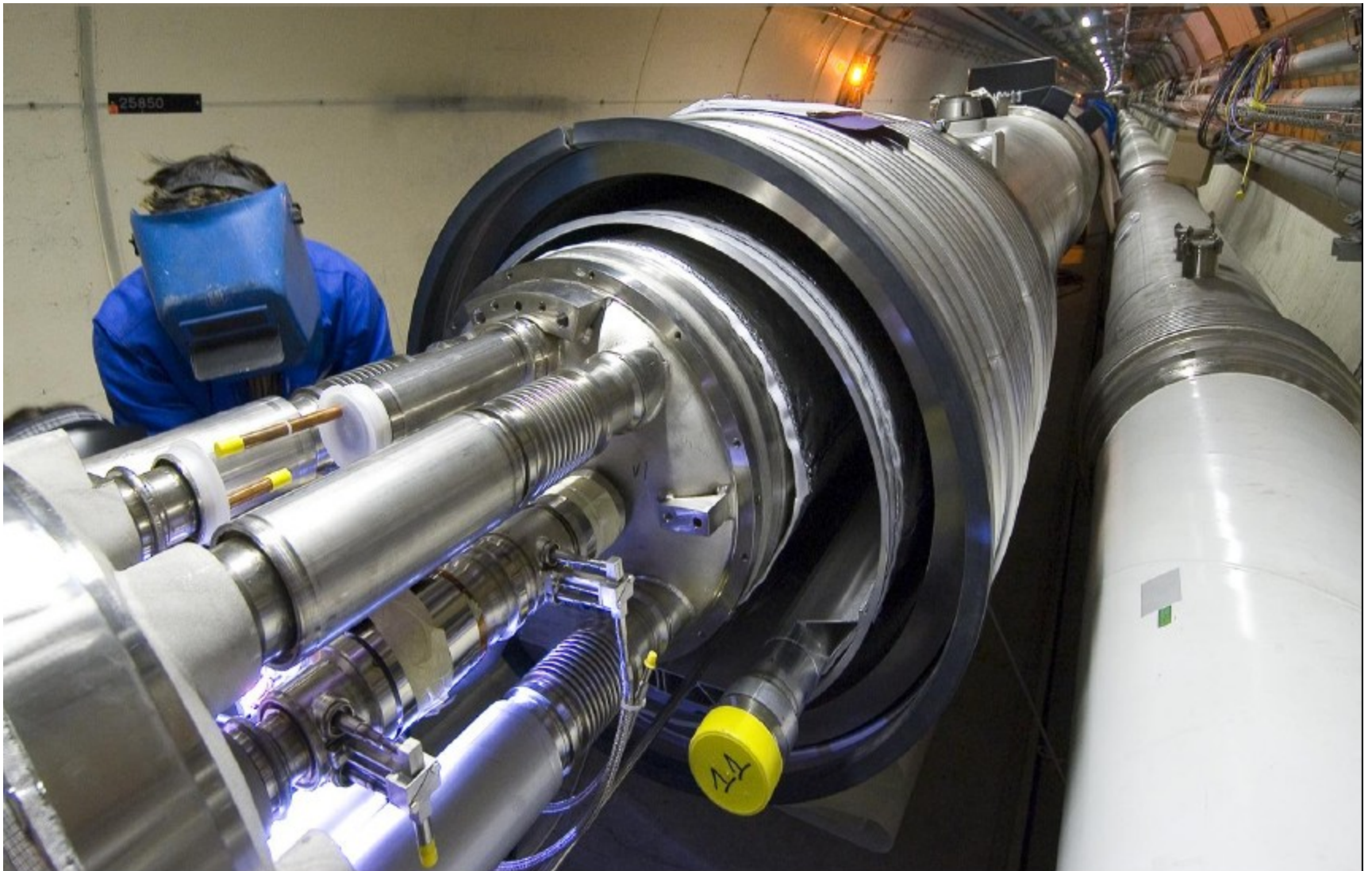




LHC:n rakentaminen



LHC-putki



ATLAS ja CMS kokeet

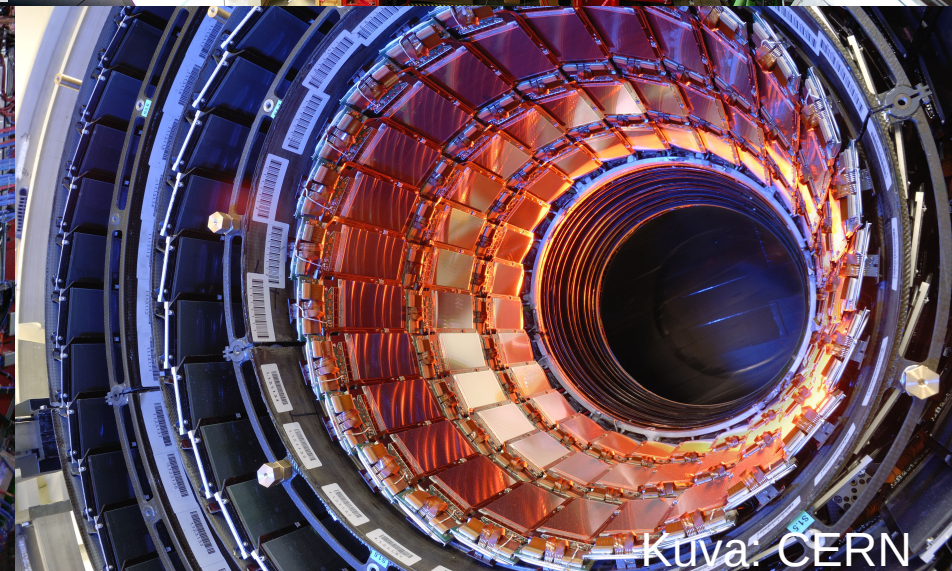
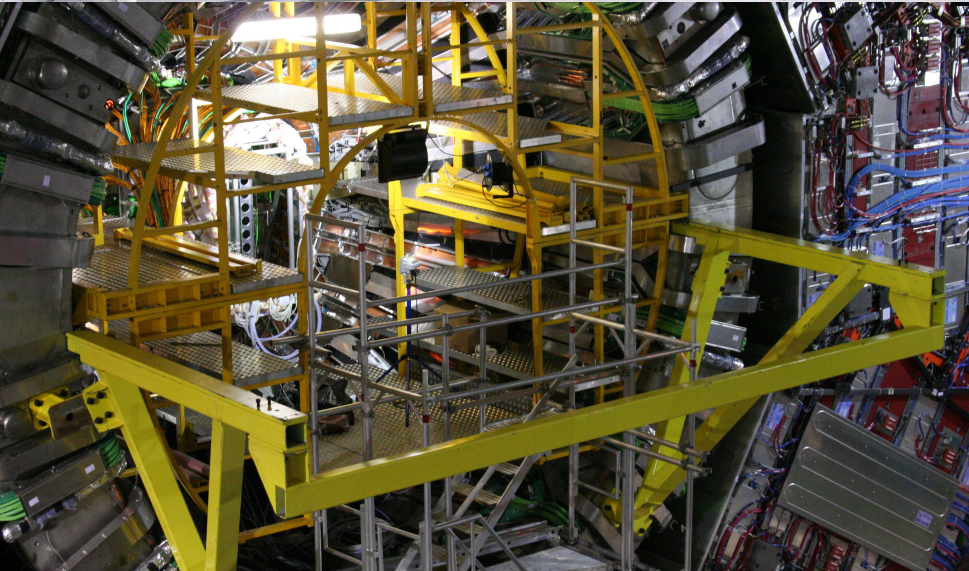
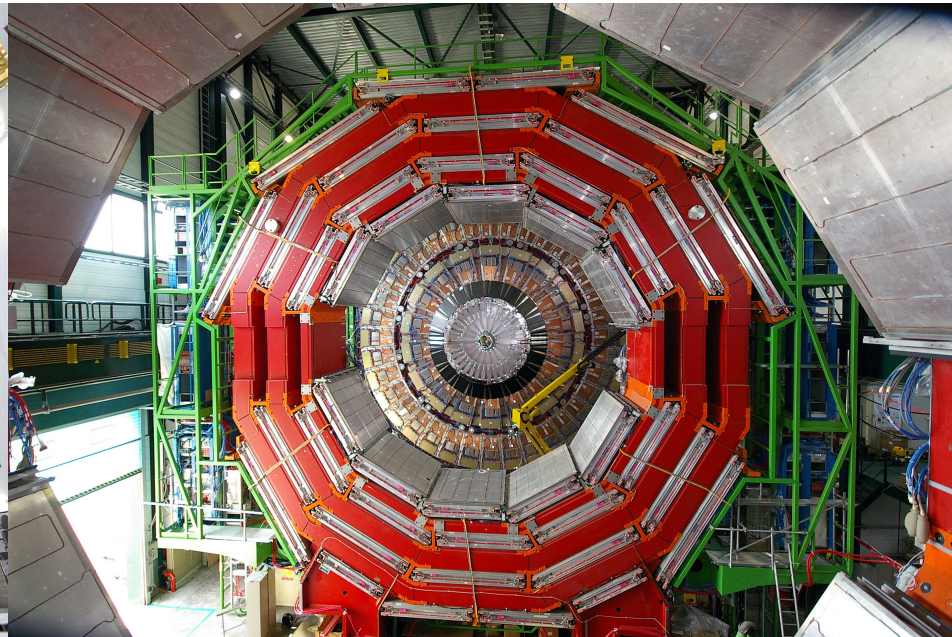
Kuusikerroksinen talo

ATLAS

CMS

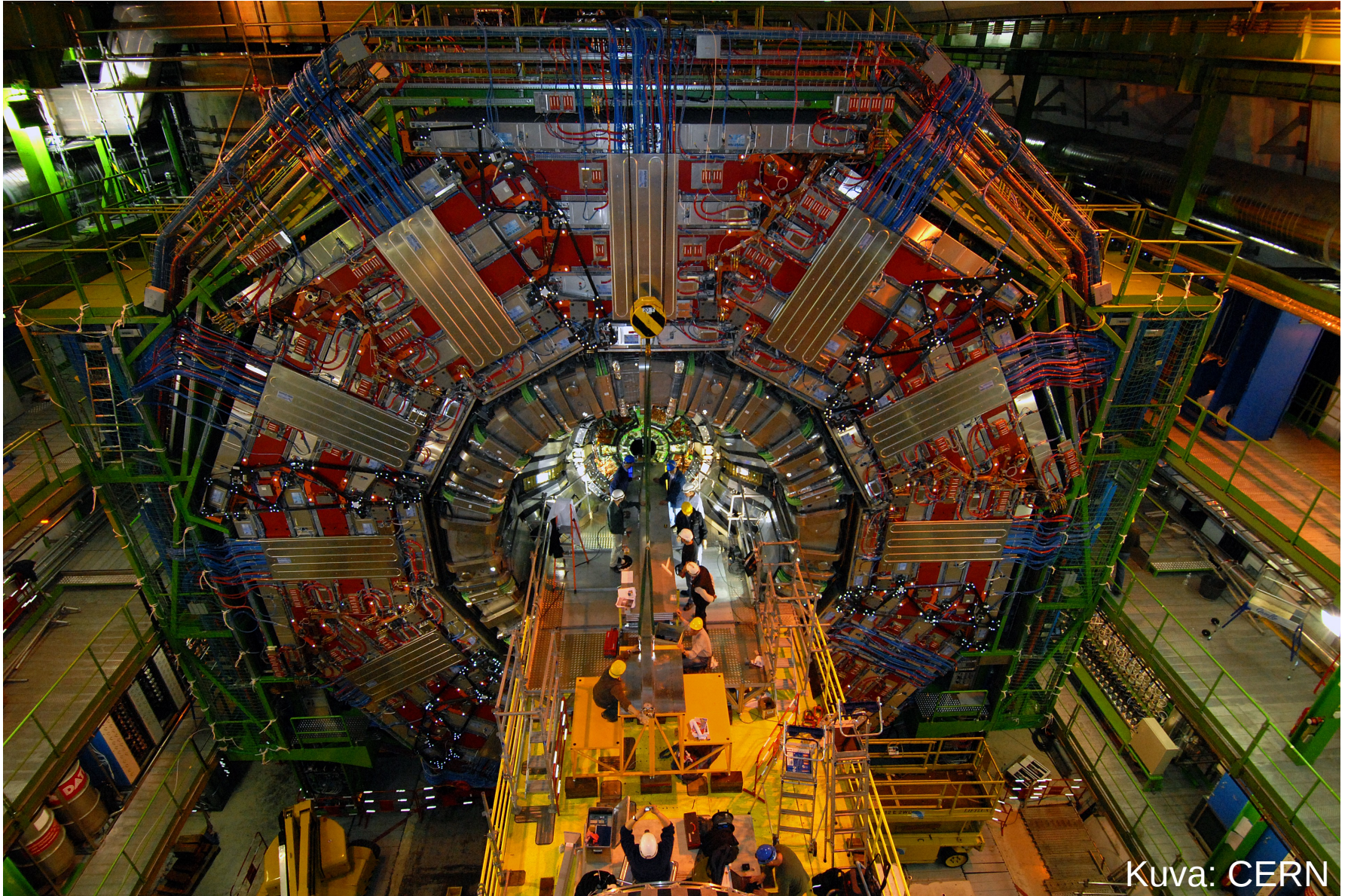


Vuosien rakennusurakka



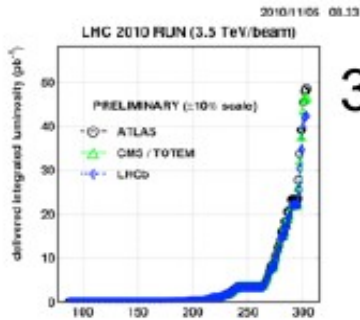
Kuva: CERN

CMS, tyhjiöputken asennus



Kuva: CERN

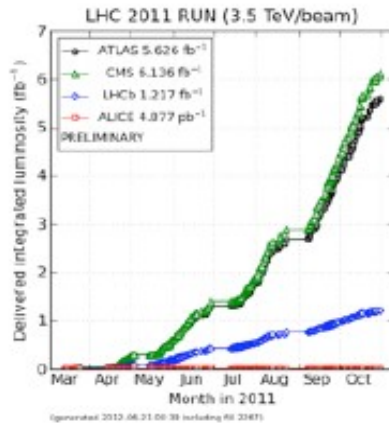
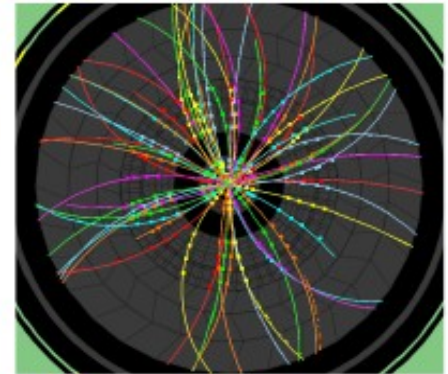
Haasteita..



30 pb⁻¹

2010

O(2) pileup events
150 ns inter-bunch spacing



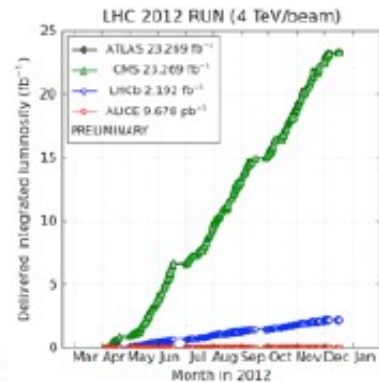
5.8 fb⁻¹

2011

O(10) pileup events
50 ns inter-bunch spacing



Highest Luminosity ~ 8 Hz/nb
Design Luminosity 10 Hz/nb



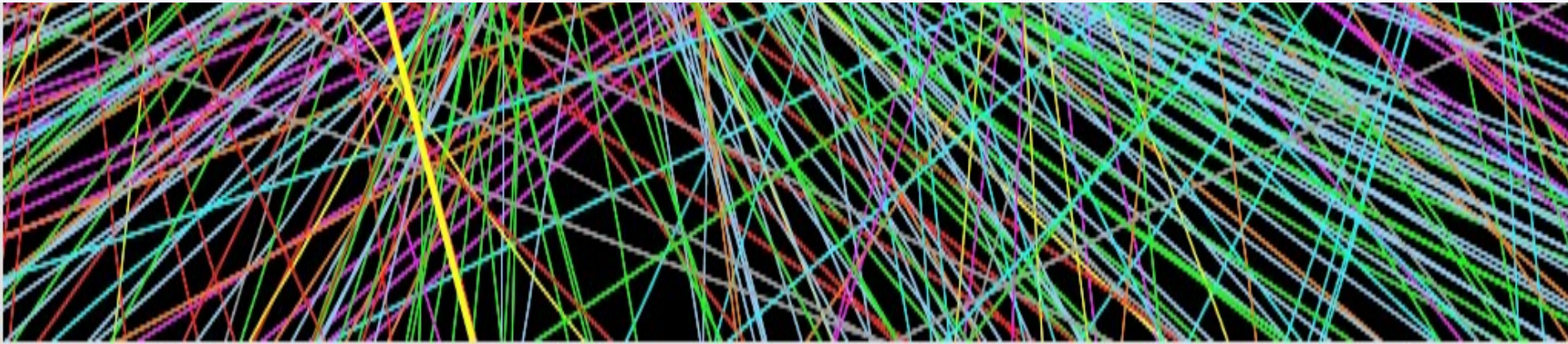
25 fb⁻¹

2012

O(20) pileup events
50 ns inter-bunch spacing

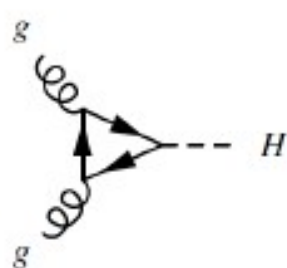


Haasteita..

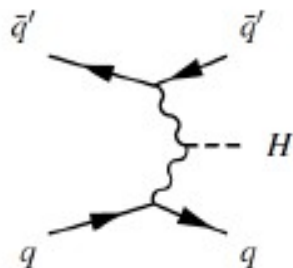


- **Liipaisuhaaste:** Kuinka valita 400 tapahtumaa 20M tapahtumasta joka sekunti, säilyttäen kuitenkin samalla kiinnostavat ja uuden fysiikan tapahtumat.
- **Tietojenkäsittelyhaaste:** kuinka varastoida 400 tapahtumaa sekunnissa joka sekunti? Kuinka varastoida loppujen lopuksi yli sata petatavua dataa jokaista koetta kohti? Kuinka analysoida tuo datamäärä?
- **Analyysihaaste:** hyvän hiukkasrekonstruktio- ja tunnistustehokkuuden ylläpitäminen samanaikaisista tapahtumista huolimatta.

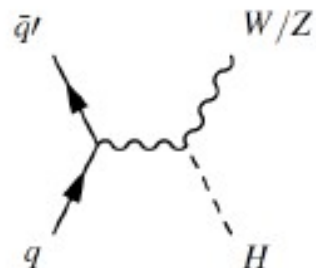
Higgsin bosonin tuotto ja hajoaminen LHC:llä



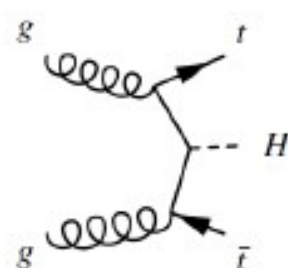
(a) $gg \rightarrow H$



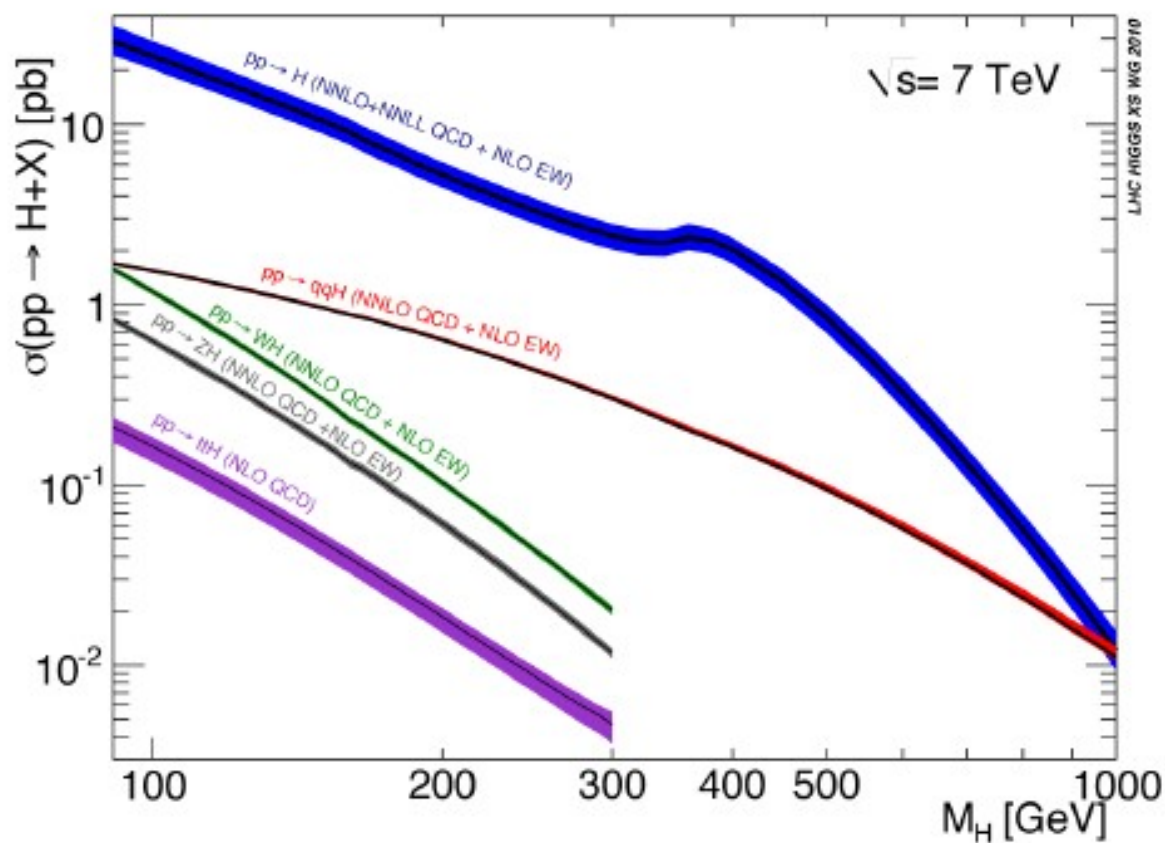
(b) VBF

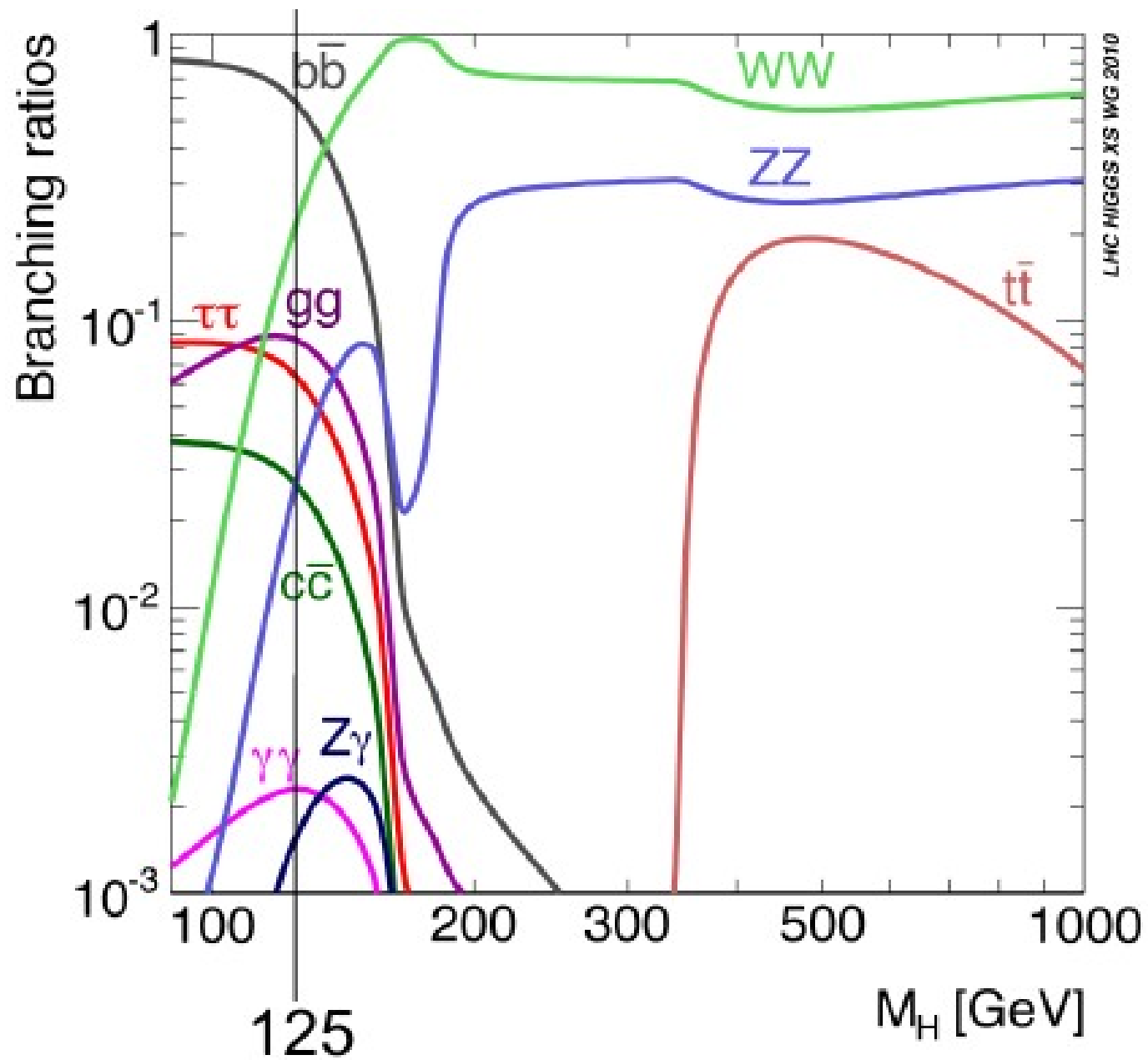


(c) VH



(d) $t\bar{t}H$



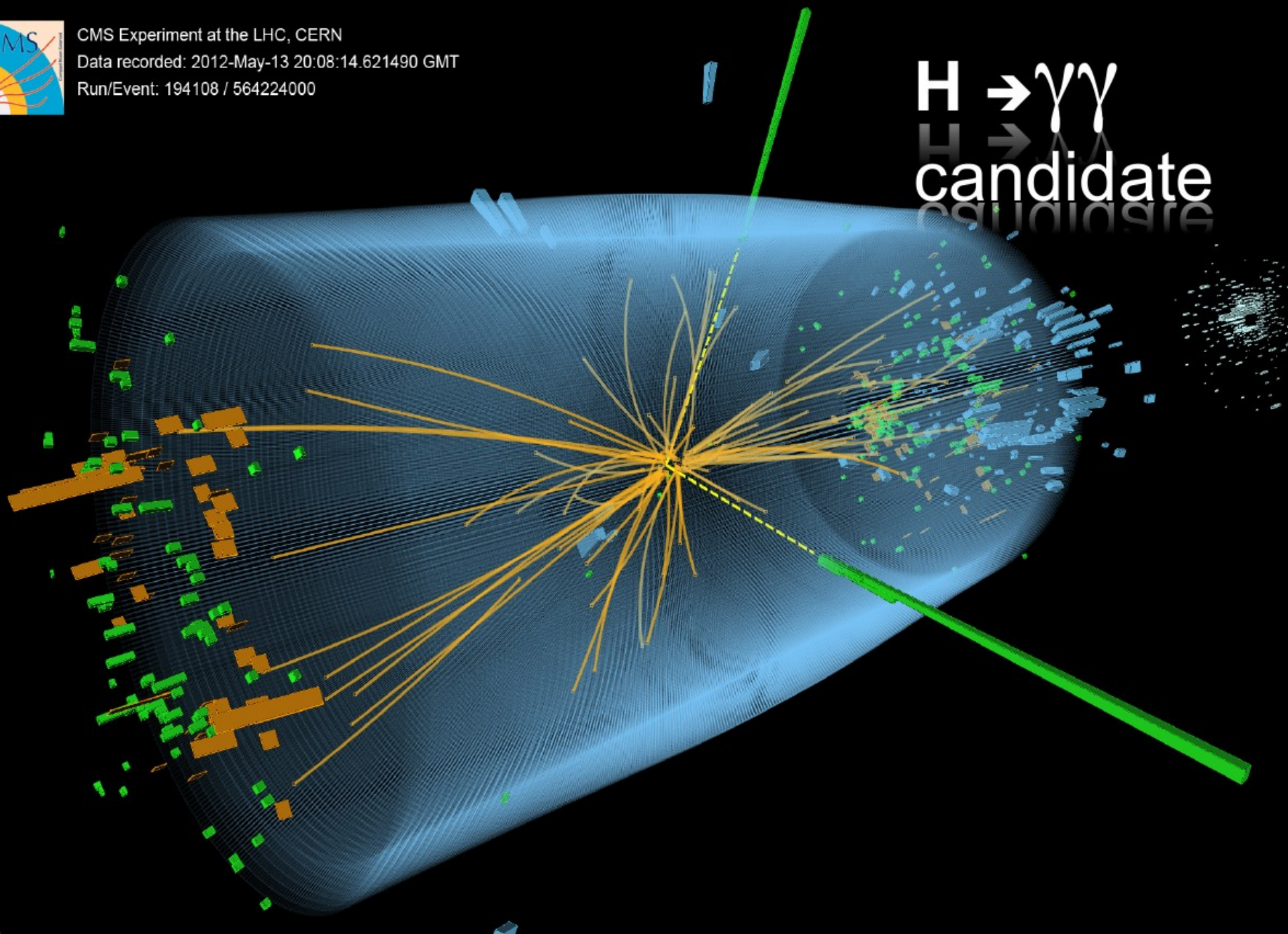


Tulokset

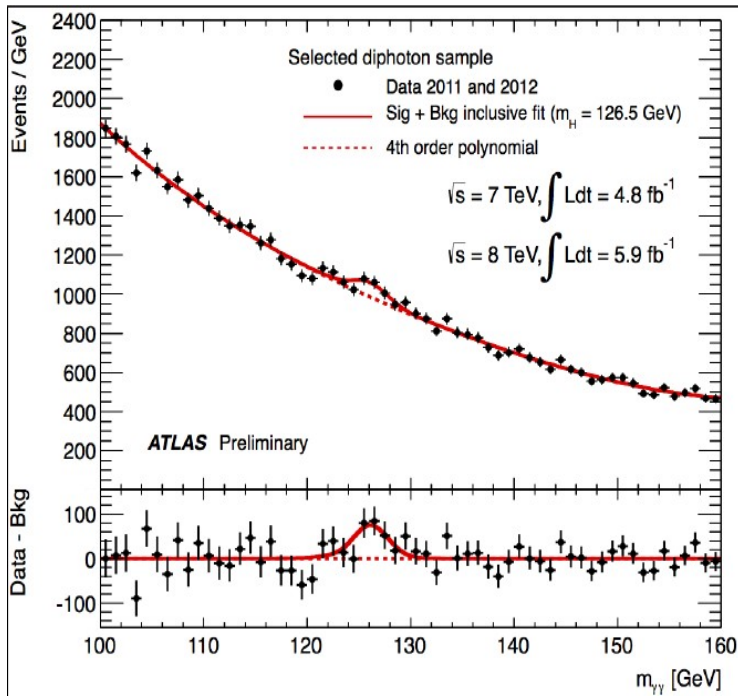


CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT
Run/Event: 194108 / 564224000

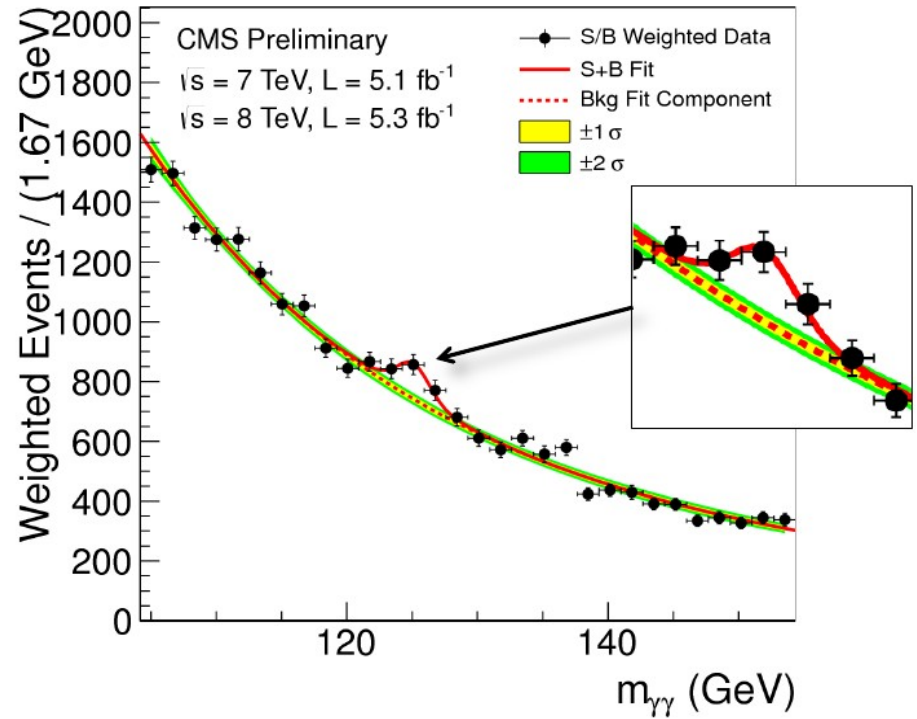
$H \rightarrow \gamma\gamma$
candidate



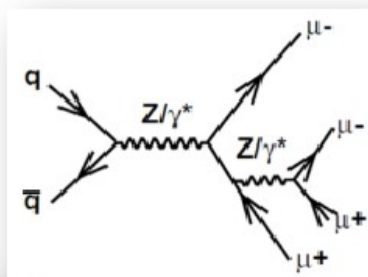
$$H \rightarrow \gamma\gamma$$



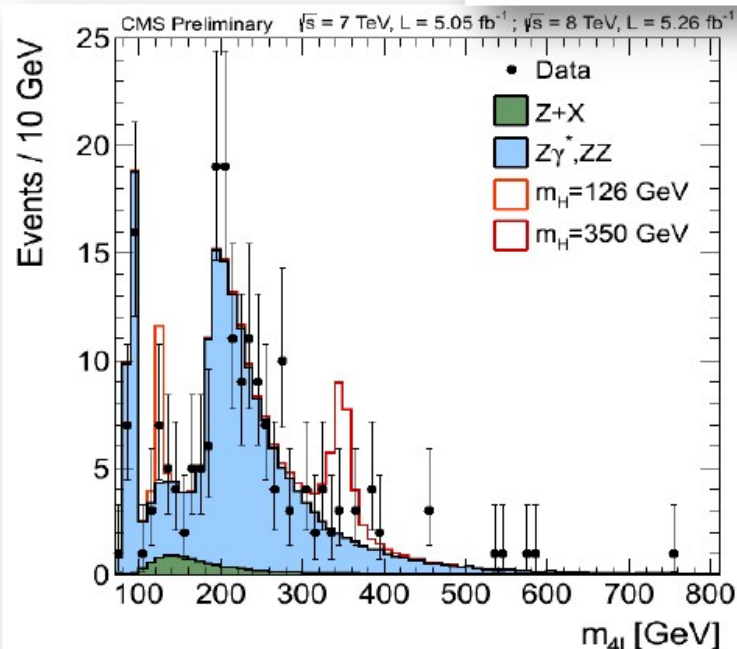
ATLAS



CMS



Results: $m(4\ell)$ spectrum

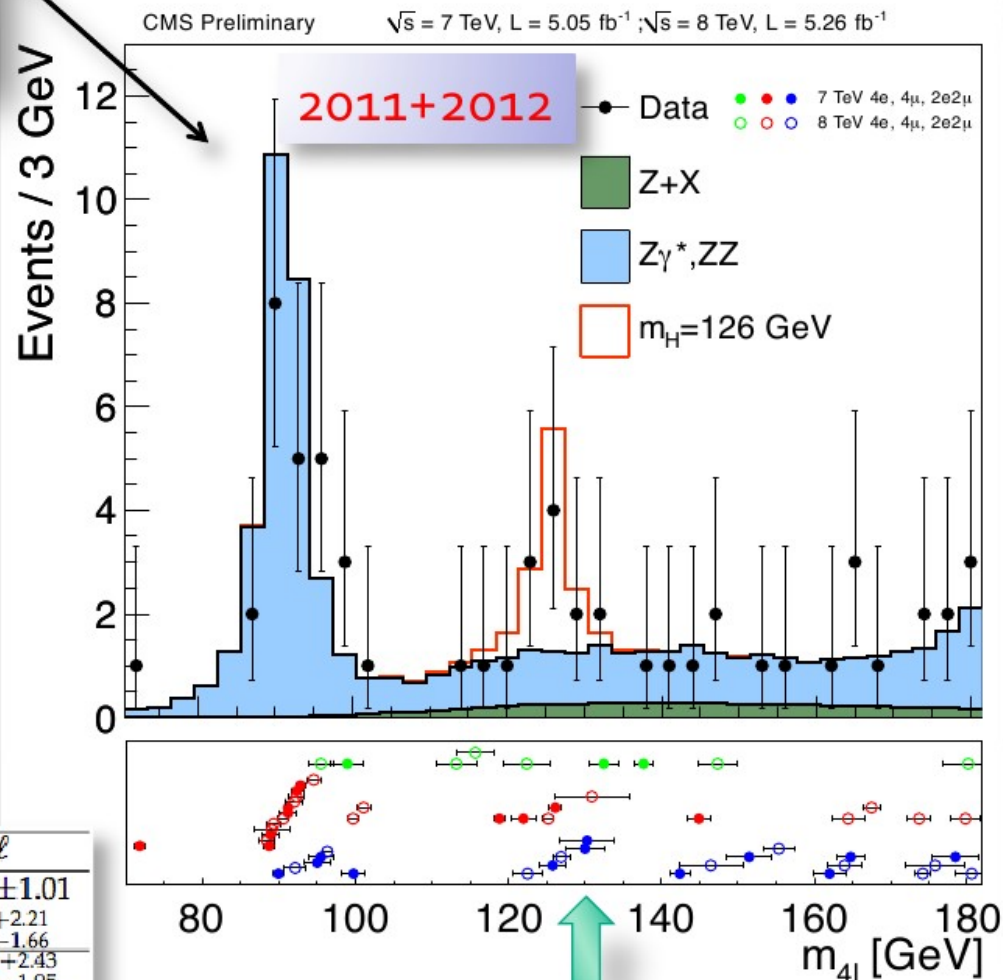


Yields for $m(4\ell) = 110..160 \text{ GeV}$

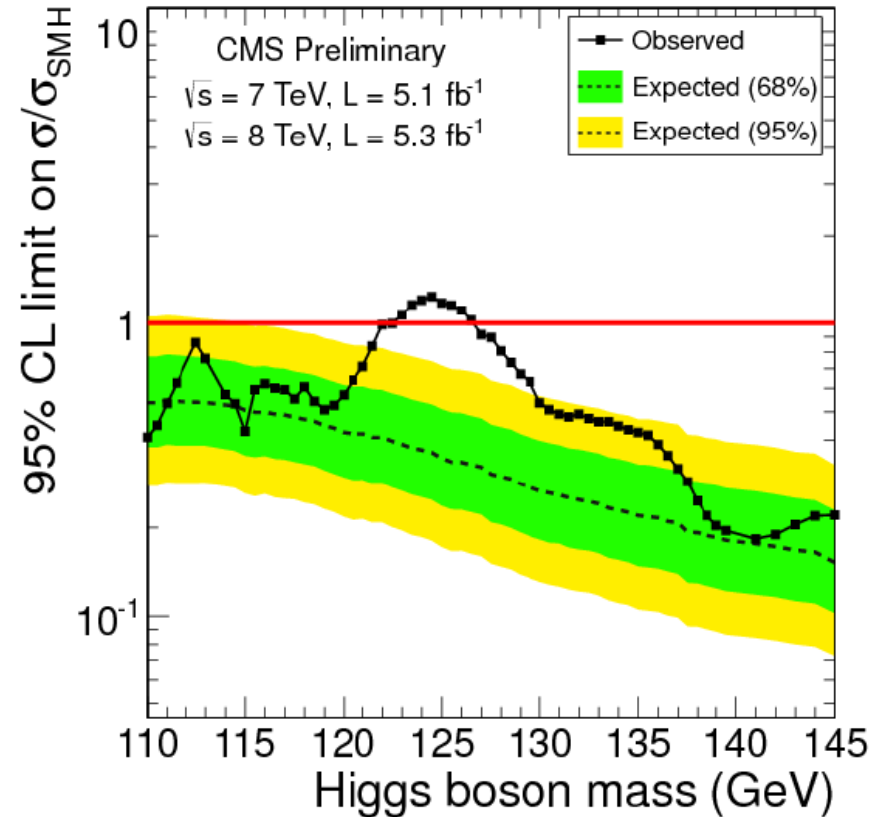
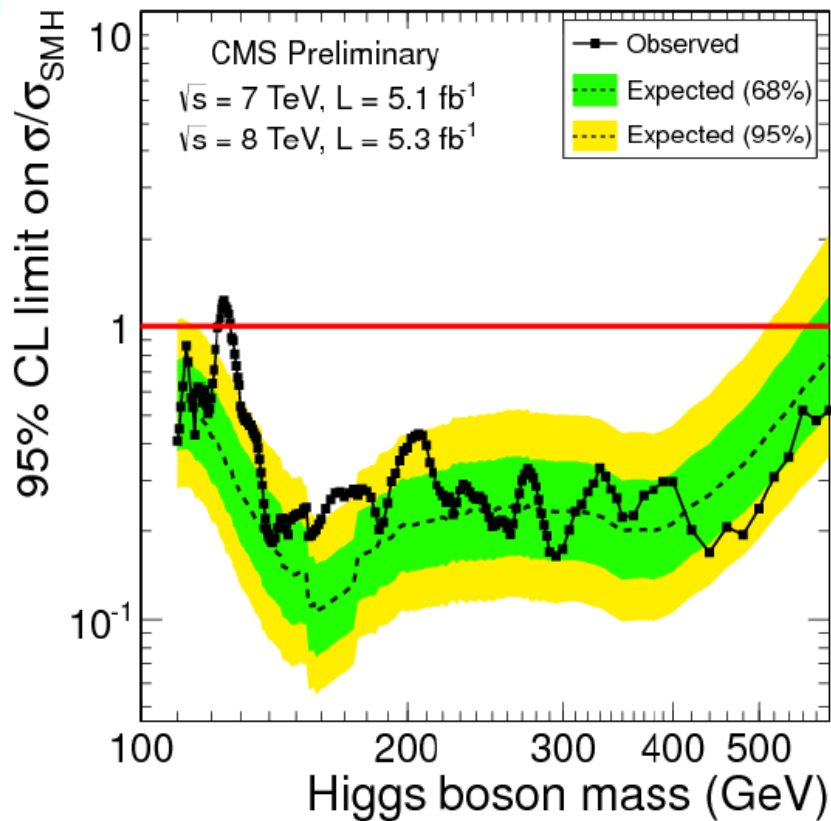
Channel	4e	4 μ	2e2 μ	4 ℓ
ZZ background	2.65 ± 0.31	5.65 ± 0.59	7.17 ± 0.76	15.48 ± 1.01
Z+X	$1.20^{+1.08}_{-0.78}$	$0.92^{+0.65}_{-0.55}$	$2.29^{+1.81}_{-1.36}$	$4.41^{+2.21}_{-1.66}$
All backgrounds	$3.85^{+1.12}_{-0.84}$	$6.58^{+0.88}_{-0.81}$	$9.46^{+1.96}_{-1.56}$	$19.88^{+2.43}_{-1.95}$
$m_H = 126 \text{ GeV}$	1.51 ± 0.48	2.99 ± 0.60	3.81 ± 0.89	8.31 ± 1.18

164 events expected in [100, 800 GeV]

172 events observed in [100, 800 GeV]



Signaalin vahvuus (CMS)



Observed:

110 – 122.5

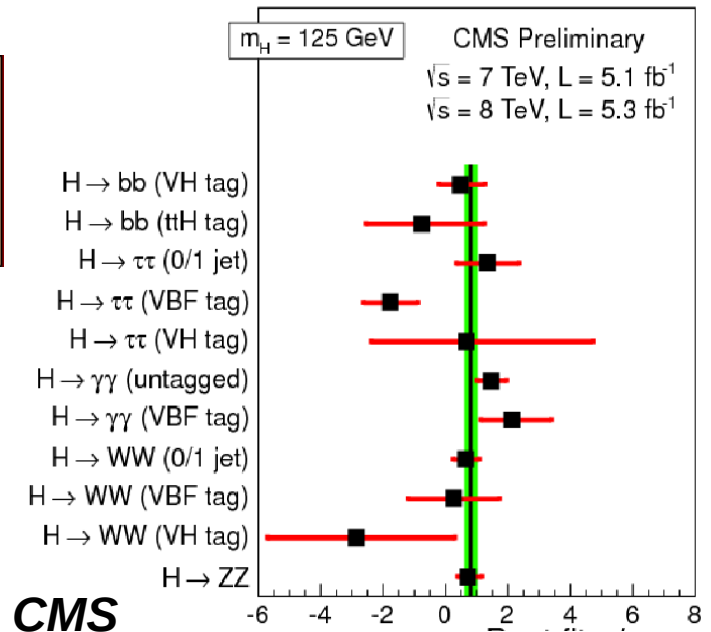
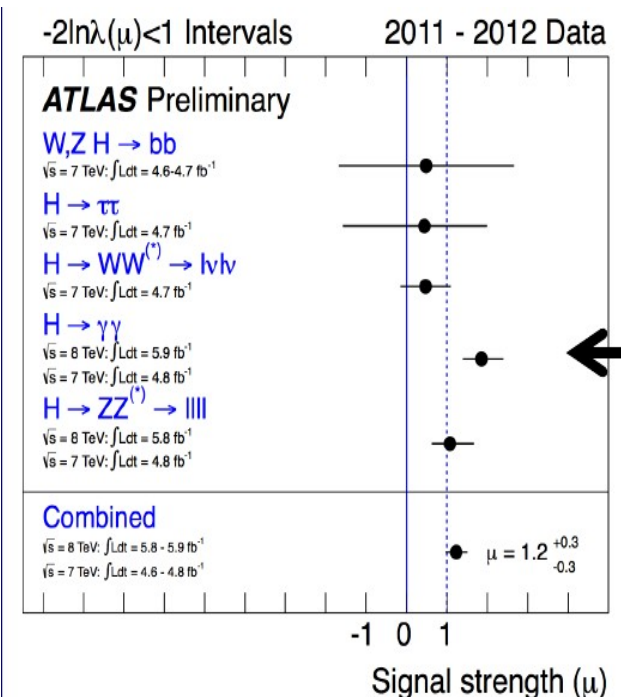
....

127 – 600 GeV at 95% CL

Me olemme löytäneet Higgsin kaltaisen bosonin!

Best-fit signal strengths, normalized to the SM expectations, for all studied channels, at $m_H = 126.5 \text{ GeV}$,

ATLAS

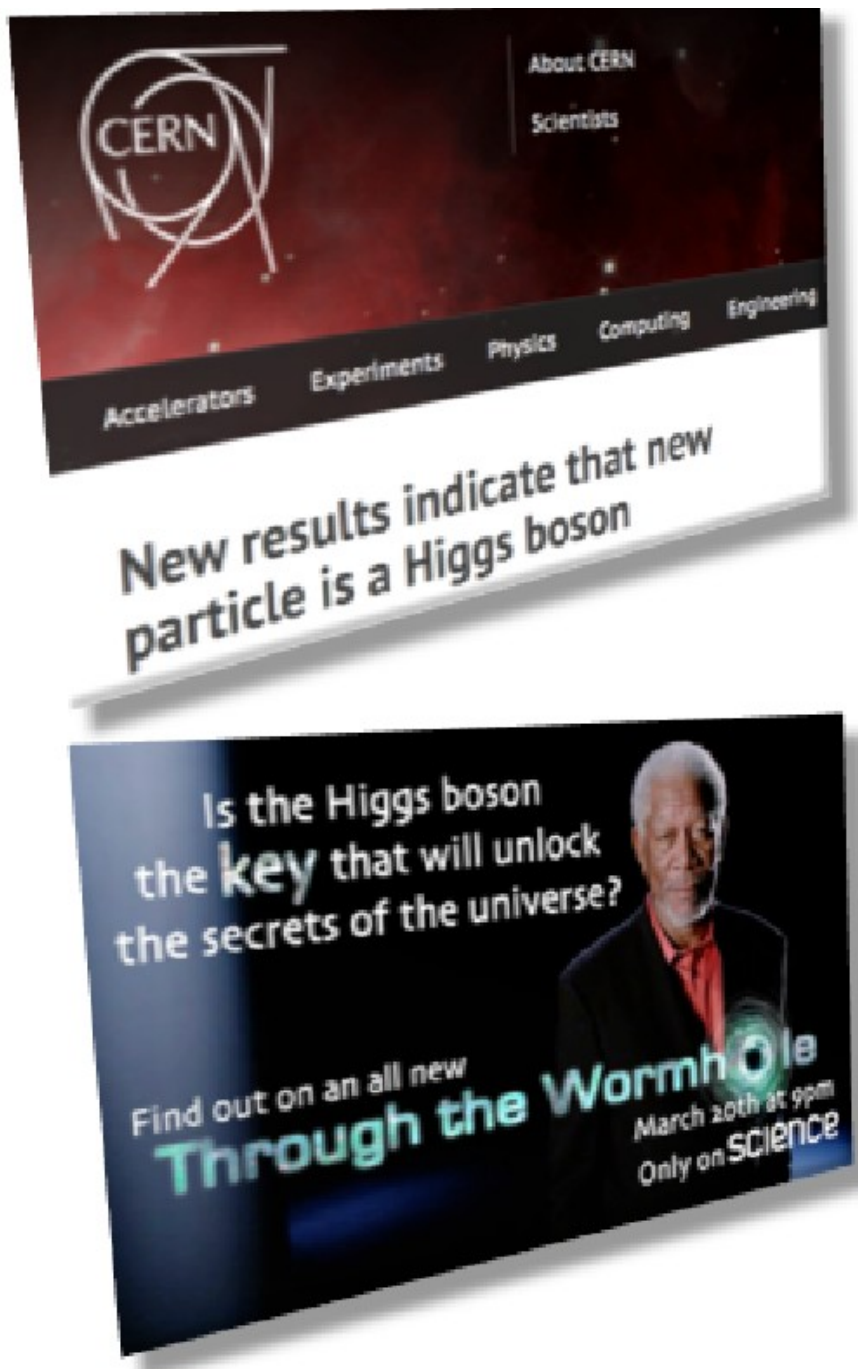


We have observed a new boson with a mass of

$125.3 \pm 0.6 \text{ GeV}$

at

4.9σ significance !

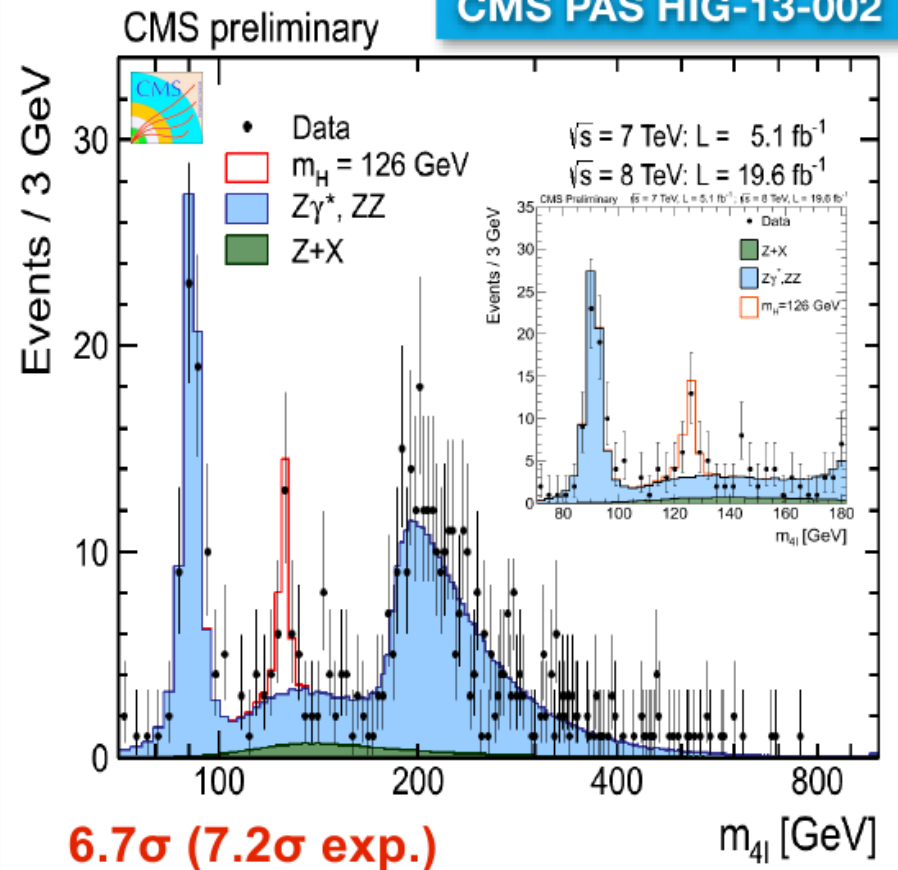
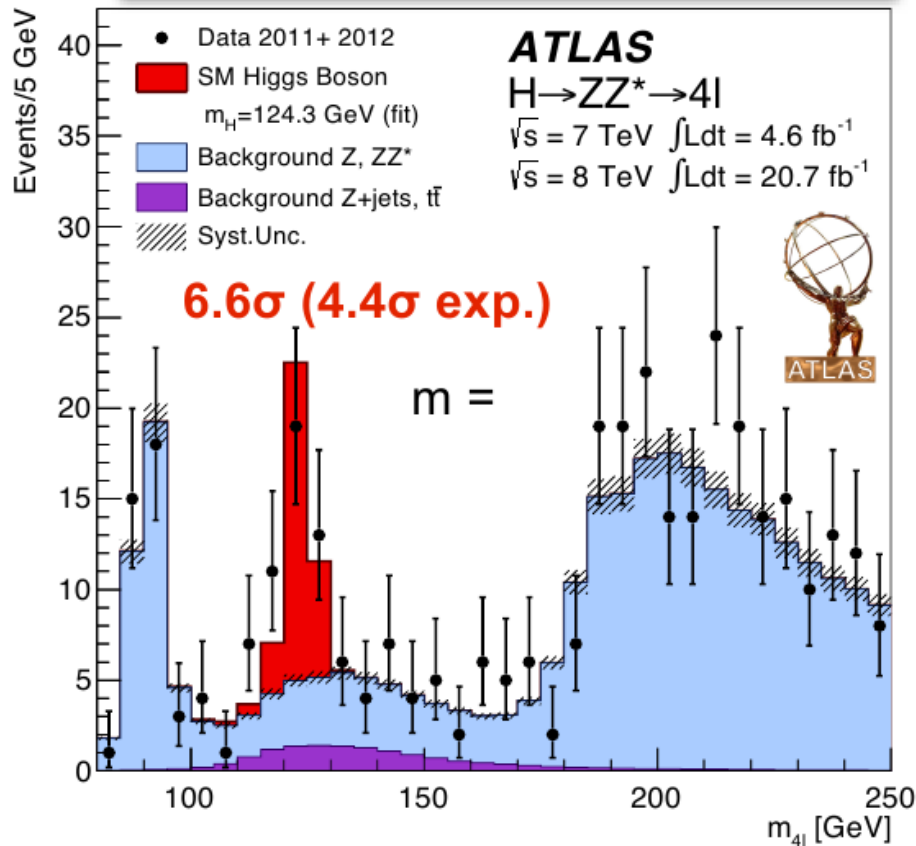


Higgs: 1 v syntymäpäivä

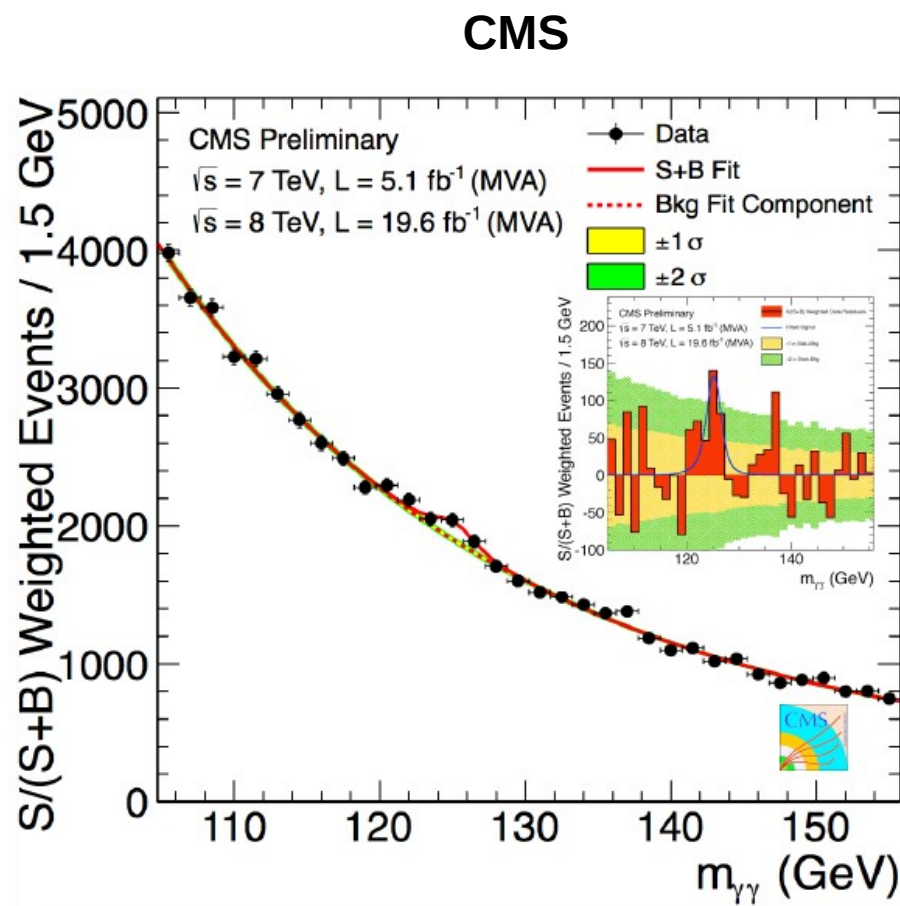
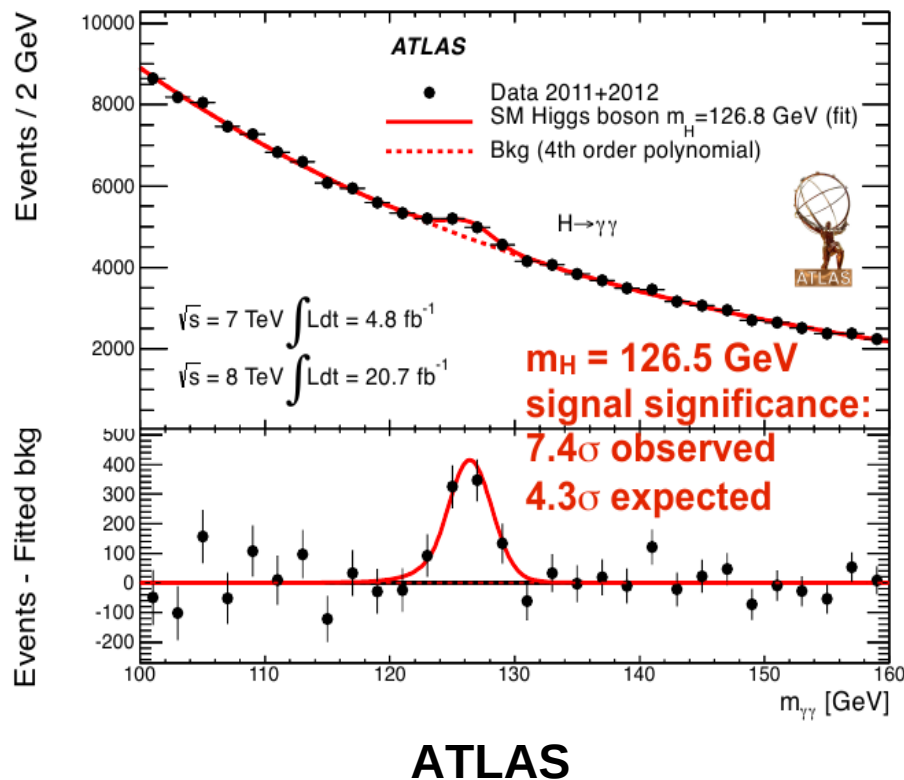
- **Pitkä matka yhdessä vuodessa**
 - Ei enää epäilystäkään uuden hiukkasen löytymisestä
 - Massa mitattu 0.50% tarkkuudella, mm. paremmin kuin yksikään kvarkki!
 - Kytkennoistä selvinnyt spin ja pariteetti $J^{CP}=0^{++}$
 - Kytkennät kolmannen perheen fermioneihin

Higgs $ZZ^* \rightarrow 4l$ kanavassa kaikella käytettävissä olevalla datalla

ATLAS Collaboration, arXiv:1307.1427



$$H \rightarrow \gamma \gamma$$



Higgs kandidaatin ominaisuuksia

- 1 vuosi uuden bosonin löytymisen jälkeen, sen ominaisuuksia on mitattu lisääntyvällä tarkkuudella, sekä LHC:llä että Tevatronilla
 - massa mitattu 3 promillen tarkkuudella
 - Todisteita spin 0^+ :sta
 - Todisteita kytkennöistä fermioneihin
 - Todisteita tuotosta Vektori-bosonifuusiolla
 - Kytkentätestit yhteensopivia Standardimallin kanssa
 - **Ei viitteitä** (vielä?) **uudesta fysiikasta** (näkymättömät hajonnat, Γ^{BSM} , looppikytkennät..)

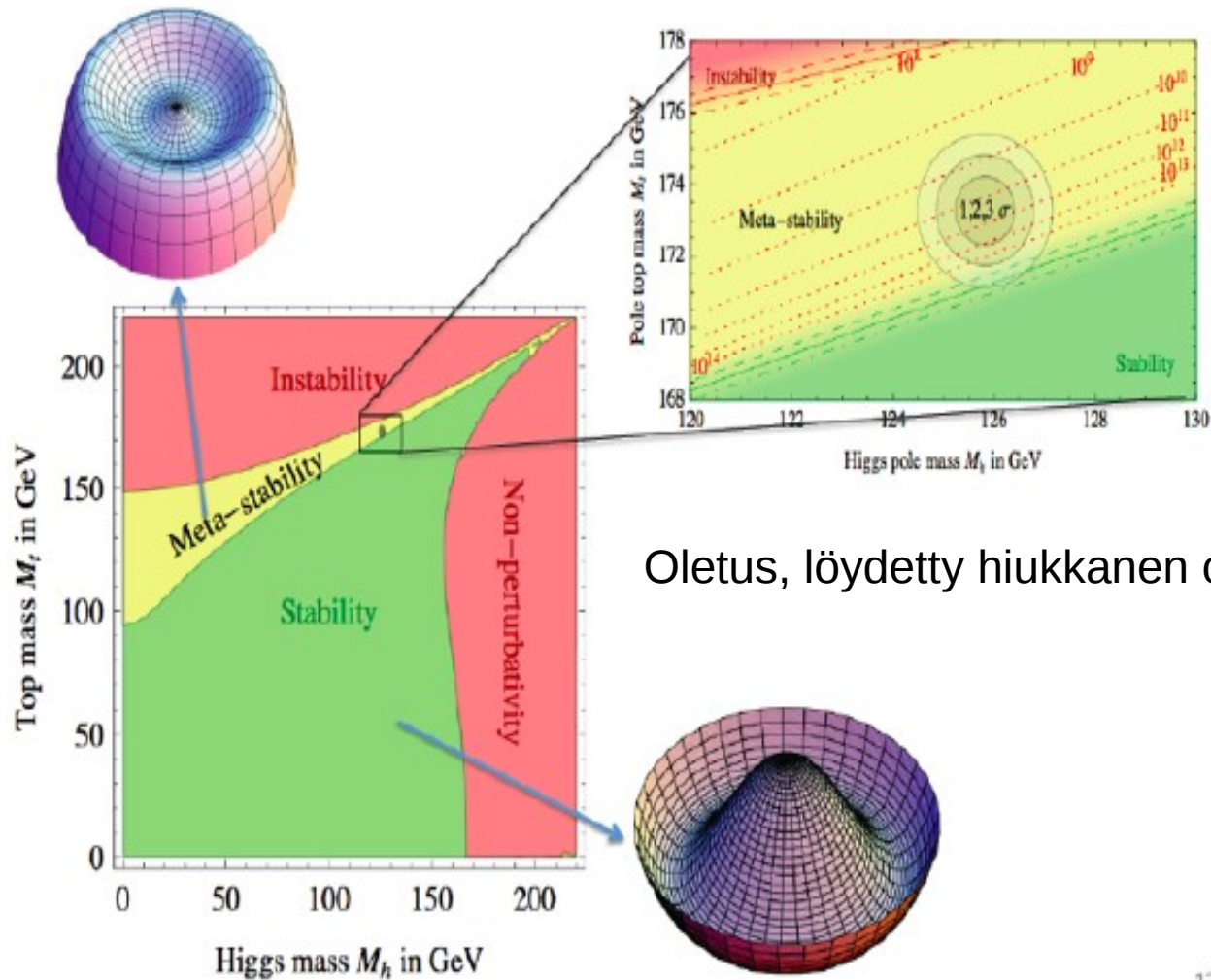
Kaikki mitatut ominaisuudet ovat yhtäpitäviä Standardimallin Higgsin bosonin ominaisuuksien kanssa

Tulosten tulkinta

Kaksi perustavaa laatua olevaa havaintoa LHC:ltä

- Löydetty hiukkasfysiikan Standardimallin puuttuva palikka: **Higgsin bosoni**
- Ei ole löydetty mitään muuta!

Onko universumi metastabiili?

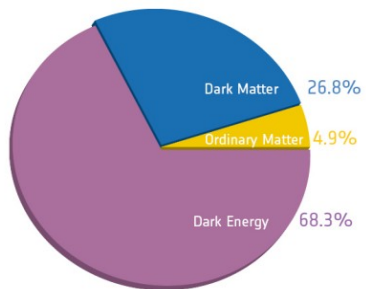
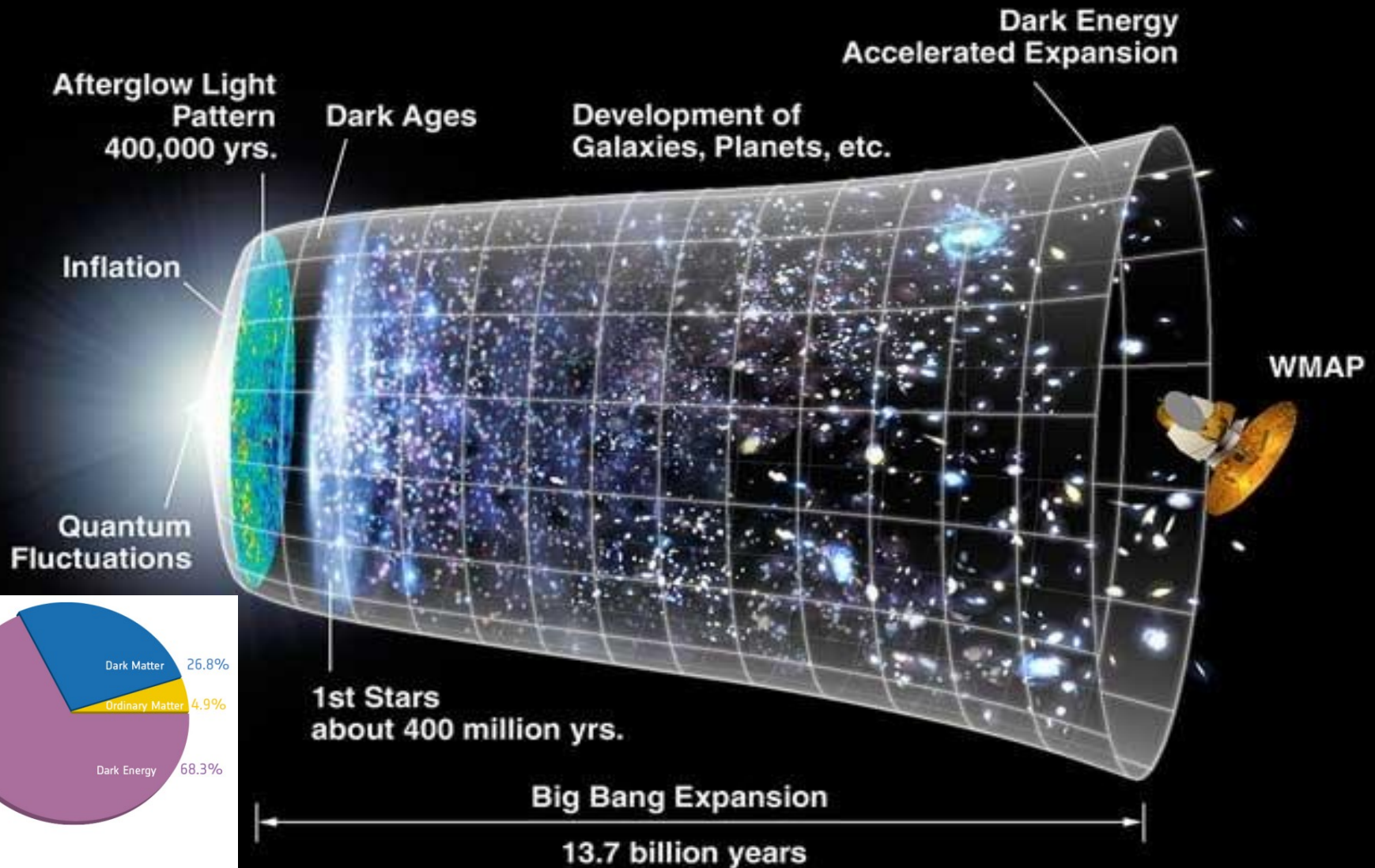


Oletus, löydetty hiukkanen on SM Higgs

Kysymyksiä..?

- Onko Higgsin bosoni alkeishiukkanen, onko sillä sisäistä rakennetta?
- Onko Standardimalli minimaalinen? Fermioneja on kolme perhettä, voisiko Higgs-dubletteja olla kaksi,.. tai kolme? Mikä on syynä fermionien perhehierarkiaan?
- Kytkeekö Higgsin bosoni pimeään aineeseen?

Mitä standardimalli selittää universumista?



After Planck

The background of the slide is a light blue color with a complex, abstract pattern of white lines and dots. The lines are of varying lengths and orientations, some forming concentric circles or spirals, while others are straight or slightly curved. The dots are small and scattered throughout the pattern, resembling a star map or a network diagram.

Jatko?

Higgsin fysiikkaa

- Tällä hetkellä meneillään oleva LHC:n pitkä huoltokatko 1 päättyy vuoden 2014 lopussa, ja datan kerääminen jatkuu 2015 suunnitellulla luminositeetilla ($10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$).
- Massakeskipiste-energia nostetaan 13 TeV:iin, ehkä jopa 14 TeV:iin
- Higgs vaikutusala kasvaa energian noston johdosta kertoimella 2.6
 - lisääntynyt herkkyys auttaa haastamaan Standardimallin ennustukset

Tämä on vasta rikkaan ja jännittävän

Higgsin fysiikkaohjelman alku!

Suunniteltu massakeskipiste-energia
14 TeV ?

Lähellä suunniteltua energiaa
13 TeV

LHCb

ATLAS

Massakeskipiste-energia
(2012)

8 TeV

Massakeskipiste-energia
(2010-2011)

7 TeV

CMS

ALICE

LHC aikajana

LS1 Machine Consolidation

LS2 Machine upgrades for high Luminosity

- Collimation
- Cryogenics
- Injector upgrade for high intensity (lower emittance)
- Phase I for ATLAS : Pixel upgrade, FTK, and new small wheel

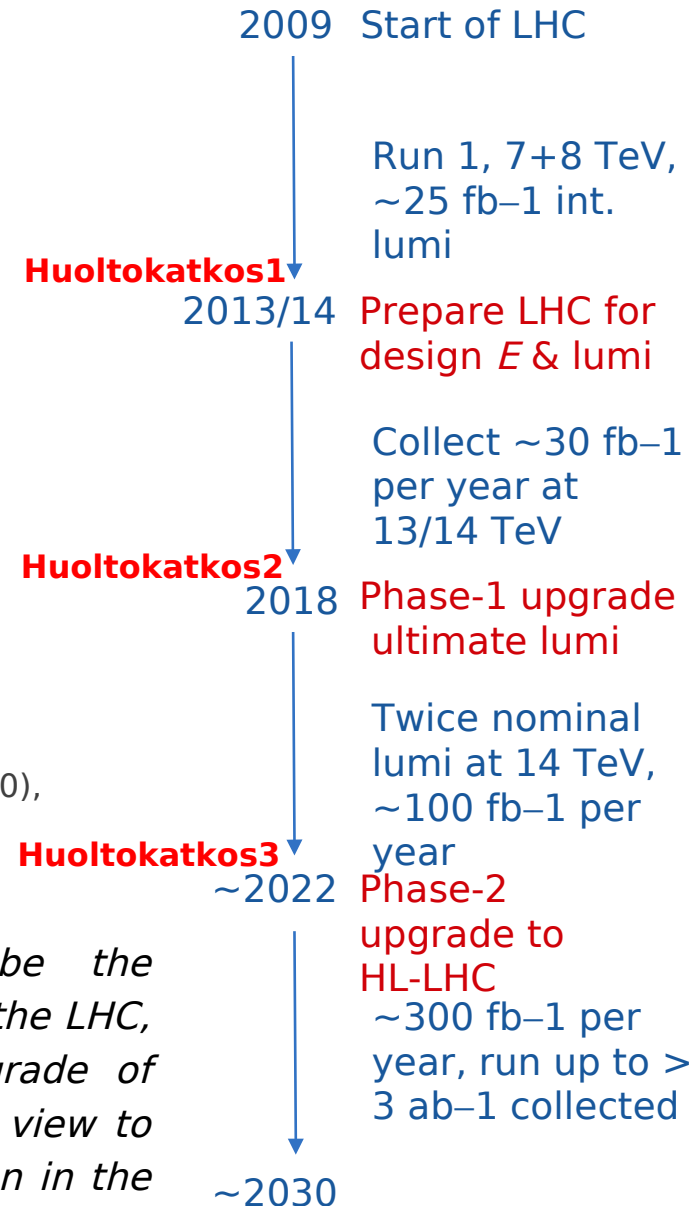
LS3 Machine upgrades for high Luminosity

- Upgrade interaction region
- Crab cavities?
- Phase II: full replacement of tracker, new trigger scheme (add L0), readout electronics.

Europe's top priority should be the exploitation of the full potential of the LHC, including the high-luminosity upgrade of the machine and detectors with a view to collecting ten times more data than in the initial design, by around 2030.

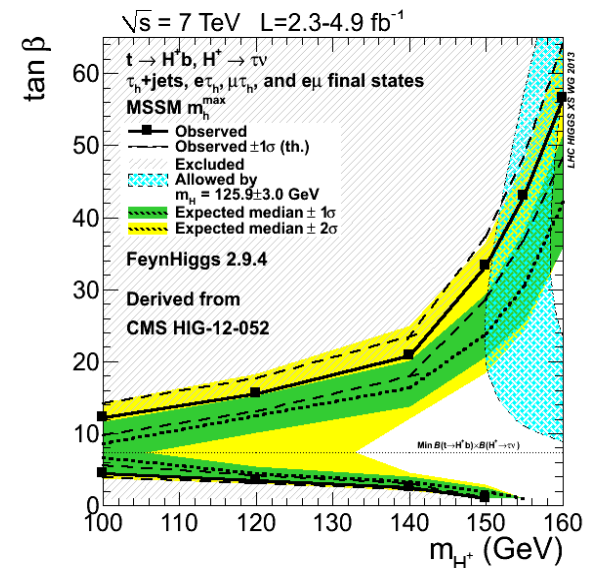
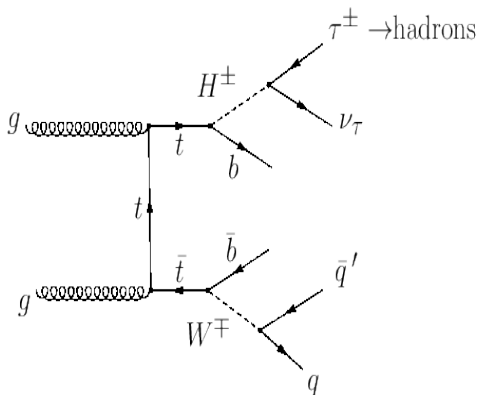


LHC timeline



Entä mitä suomalaiset tekevät?

- Suomi on mukana CMS-kollaboraatiossa, ja suomalaisia fyysikoita on mukana tutkimassa LHC-dataa
- Suomalaiset ovat CMS:n alusta asti antaneet panoksen Higgsin etsintään, ja ilmaisimen rakentamiseen ja kehittämiseen
 - Fysiikan tutkimislaitoksen vastuulla varatun tau-leptoniin hajoavan Higgsin bosonin etsintä CMS:ssä, täysin hadronisessa lopputilassa.
 - Tavoite saada uusia tuloksia julki vuodenvaihteen jälkeen

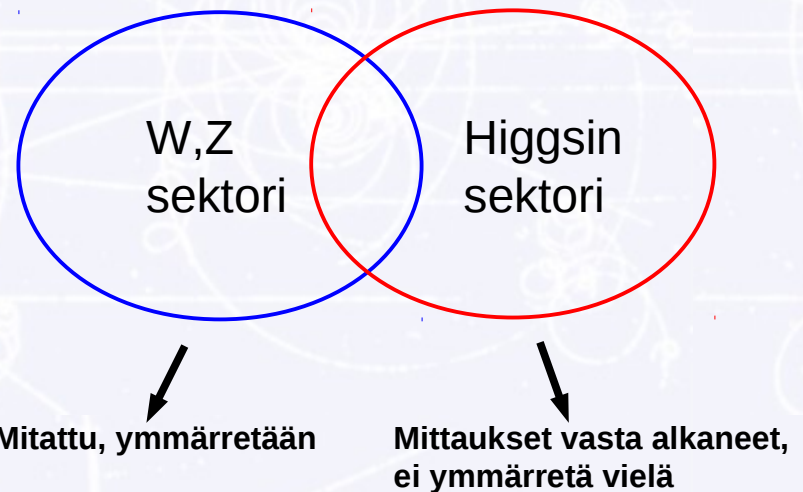


Yhteenveto



Yhteenveto

- 2012 löydettiin uusi bosoni
- Löydetyn bosonin ominaisuudet vastaavat **Higgsin bosonin** ominaisuuksia
- Kaikki mittaukset ovat toistaiseksi yhteensopivia Standardimallin kanssa
- Seuraavaksi Higgsin sektorin **tarkkuusmittauksia**



- Uuden fysiikan etsintä jatkuu