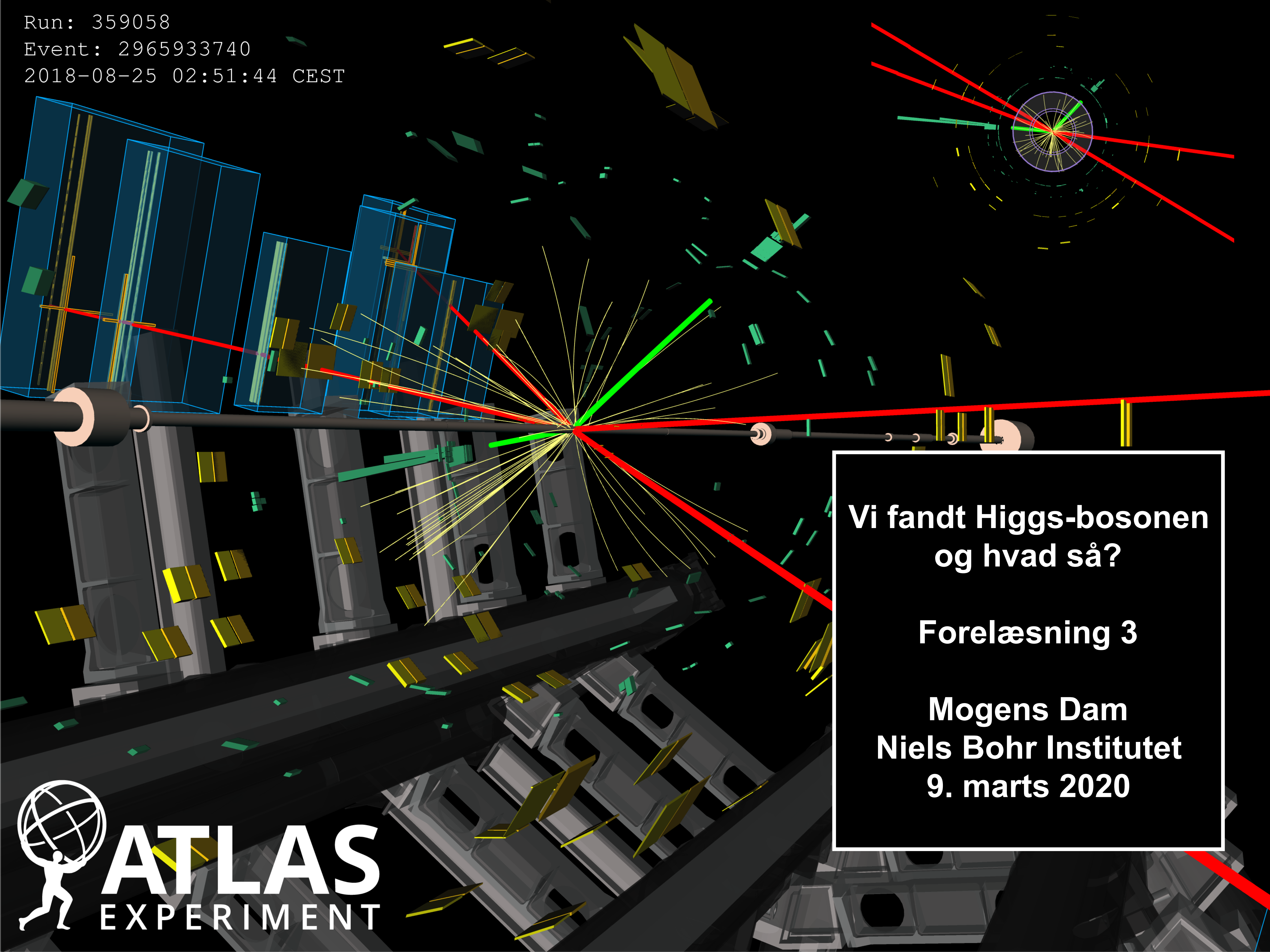


Vi fandt Higgs-bosonen og hvad så?

Forelæsning 3

Mogens Dam
Niels Bohr Institutet
9. marts 2020

Dagens (ambitiøse) program

- Apparatur
- Opdagelsen af Higgs-bosonen ved LHC
- Præsicionsmålinger af Standardmodellen ved LEP
- Standardmodellen - en succesrig præcisionsteori
- Udsyn
- Hinsides Standardmodellen
- Tilbage til Higgs-mekanismen
- Eksperimentel fremtid - LHC
- Eksperimentel fremtid - Future Circular Collider

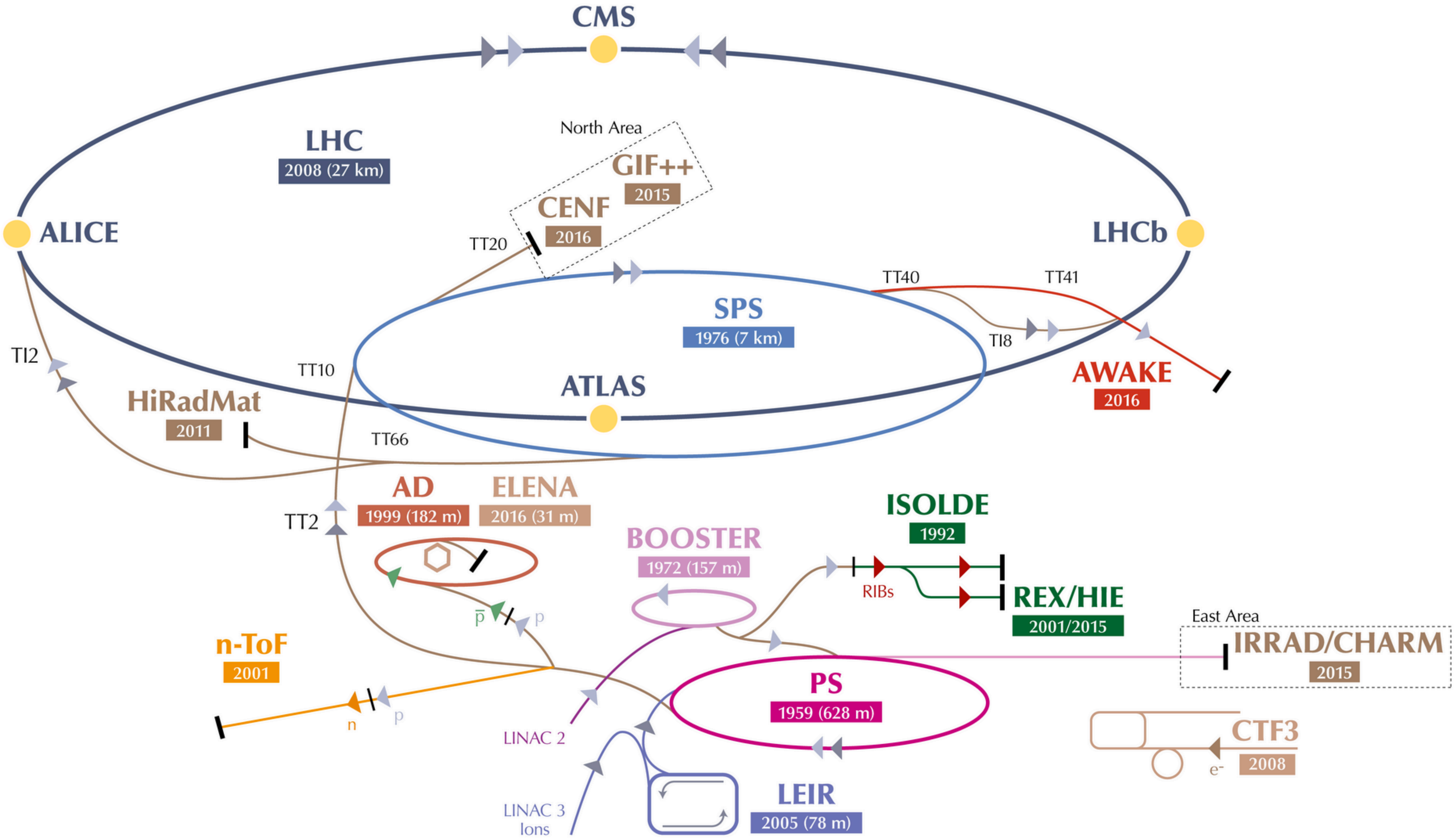
Apparatur

CERN

- Europæisk Center for Partikelfysik

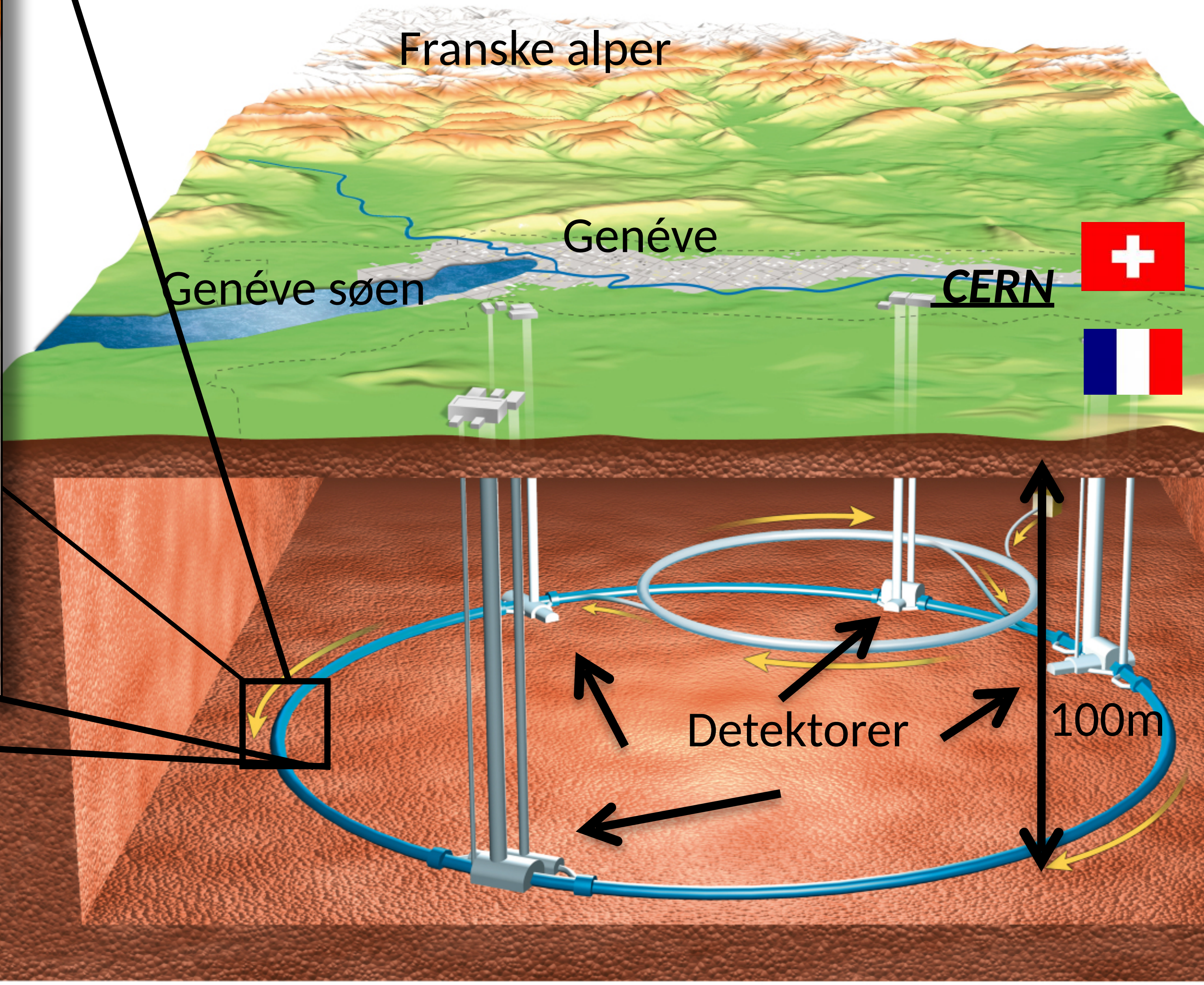
- Verdens største og ledende partikelfysiklaboratorium
- Multinationalt laboratorium ved den Schweiz-franske grænse ved Geneve
- Samarbejdet startede i 1954, initieret af blandt andre Niels Bohr

CERNs acceleratorkompleks



Large Hadron Collider (2009-2037)

Proton-proton-kollisioner med meget høj energi: 14.000 GeV

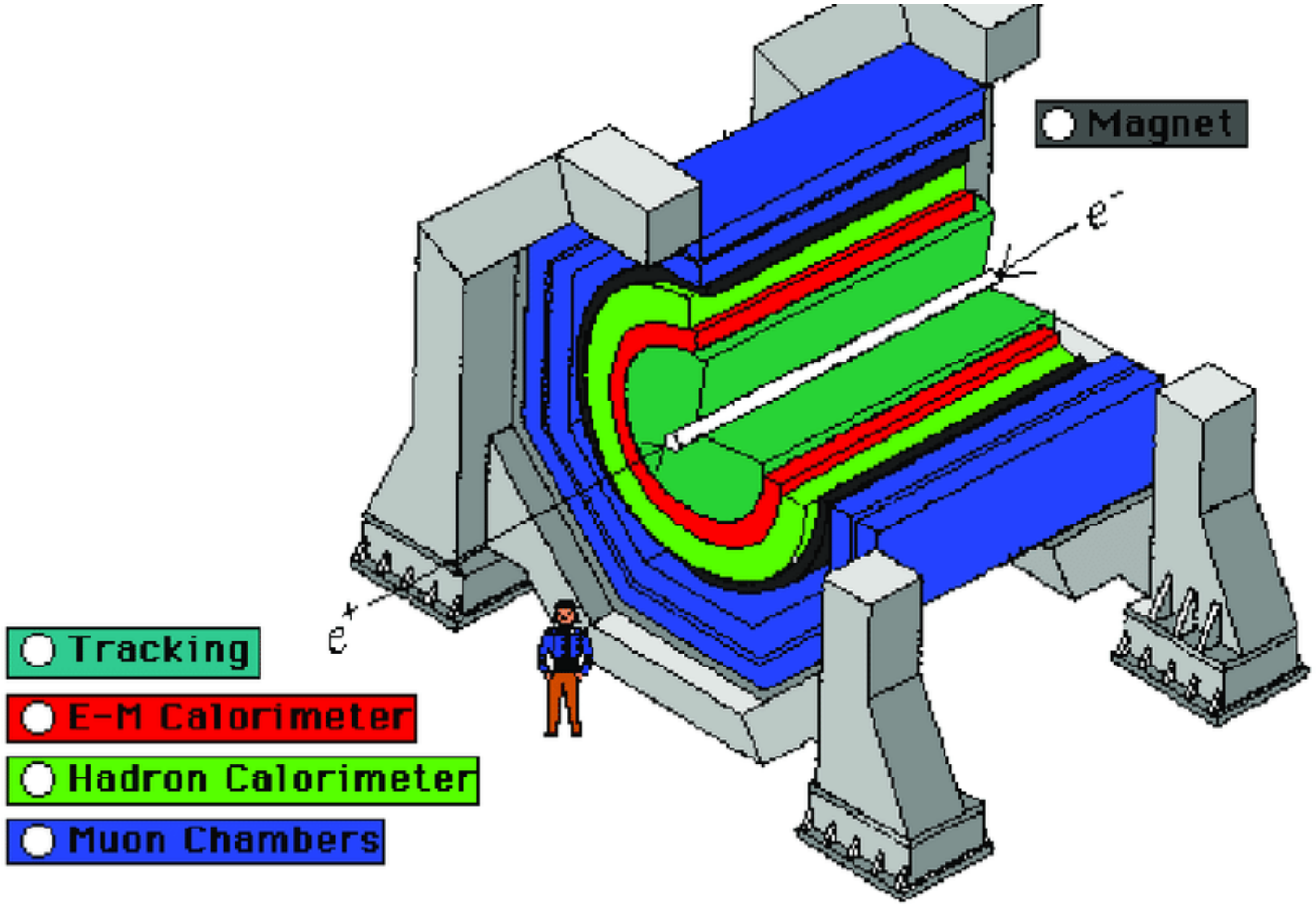


Protoner bevæger sig med 99.9999...% af lysets hastighed (11 km/t langsommere)
Pakker med 100 milliarder partikler
40.0000.000 kollisioner i sekundet!

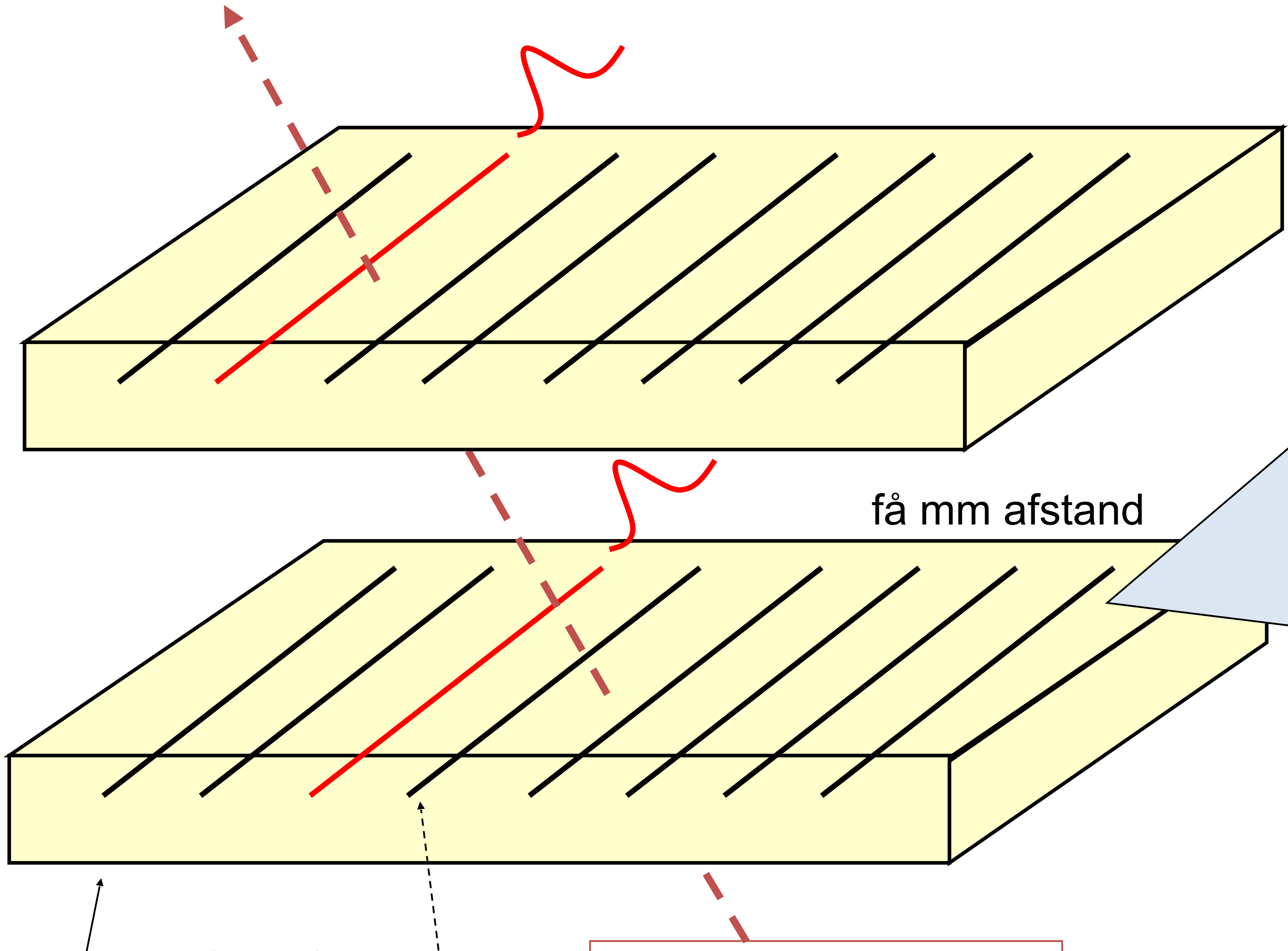
Large Hadron Collider

Princippet i en partikeldetektor

- Opbygget som et løg, med lag på lag af detektorelementer:
  - Tracking: bestemme ladede partiklers retning of impuls
  - Kalorimetre: Stoppe partikler for at måle deres energi
  - Partikel-identifikation: Bestemme partikeltype (elektron, proton, ...)



Princippet i en spor-detektor



Når en ladet partikel passerer igennem, ioniserer den gassen.

Dette skaber frie elektroner, som tiltrækkes af tråden med fx +1500 V

En spændingspuls genereres

En puls på tråden afslører at en partikel kom forbi

Kammer fyldt med gas, f.eks. xenon

Tråd med +1500 V

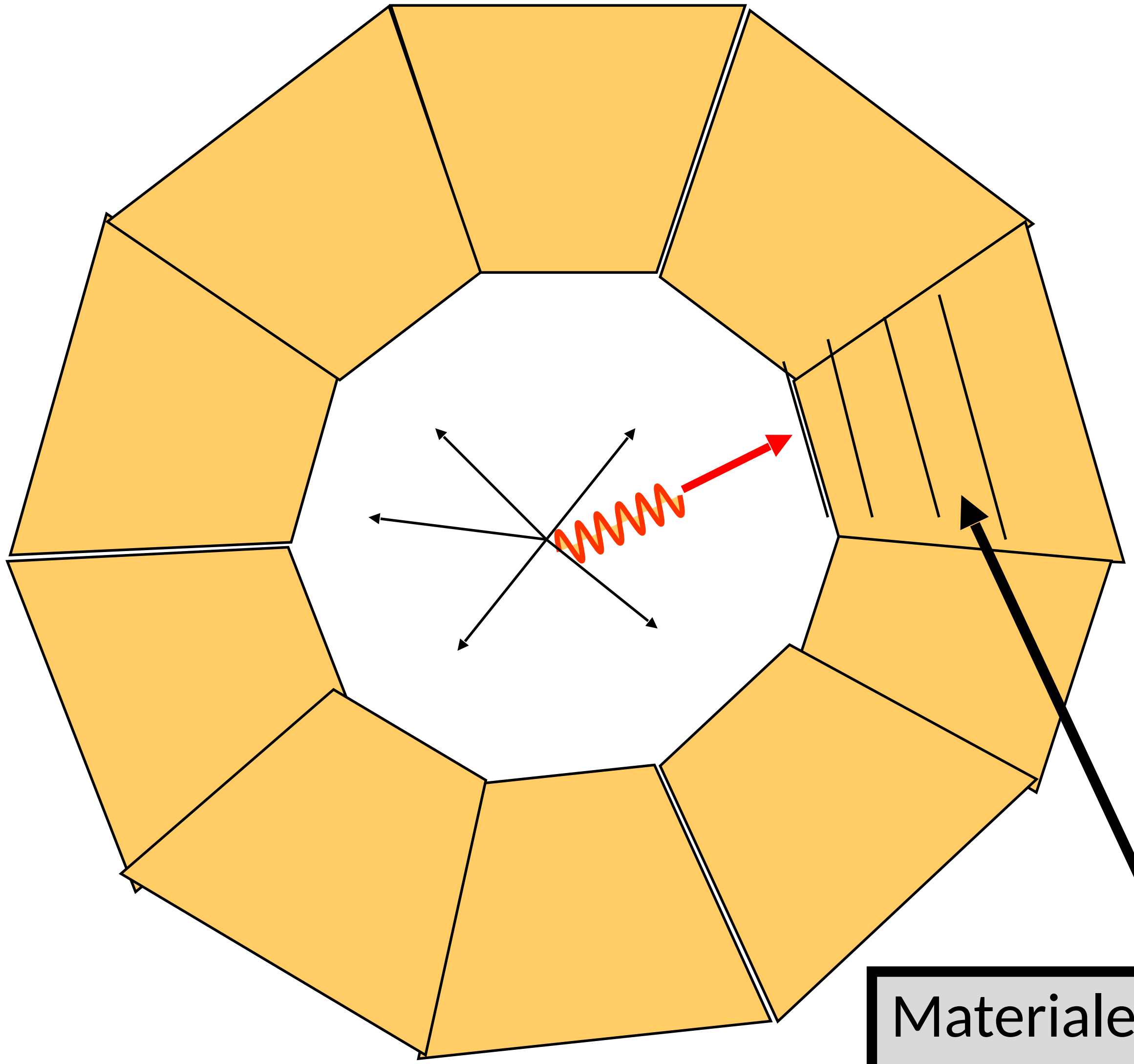
En ladet partikel: proton, elektron, π⁺, ...

Mere og mere normalt, at spor-detektorer bliver lavet af tynde silicium-sensorer

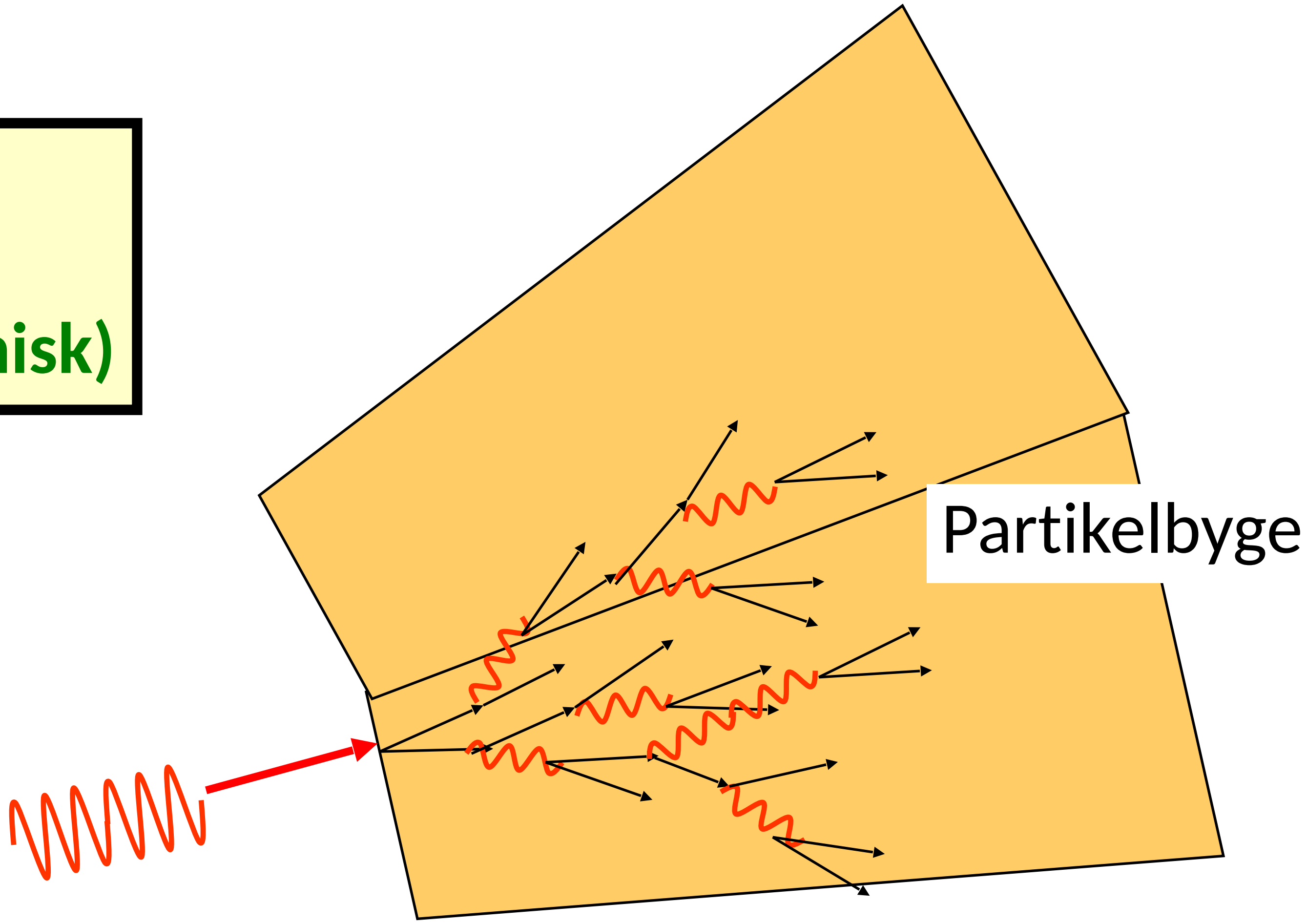
Kalorimetre

Bruges til at detektere elektroner og fotoner (ElektroMagnetisk)
eller protoner, neutroner, π,… (Hadronisk)

Et **kalorimeter** set fra gavlen



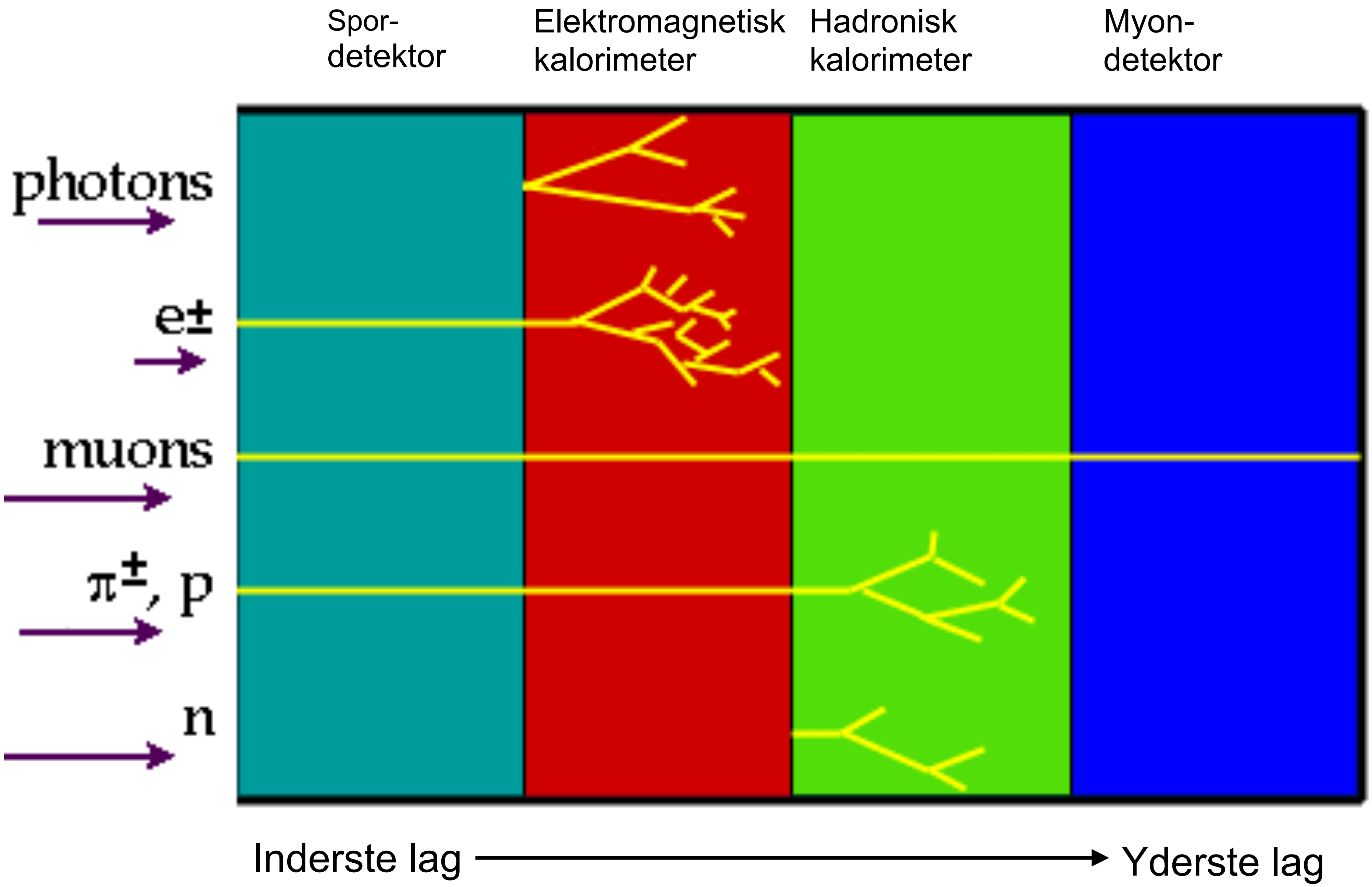
Materiale med høj tæthed, såsom bly (EM)
eller jern (hadronisk) med indlejrede detektorer



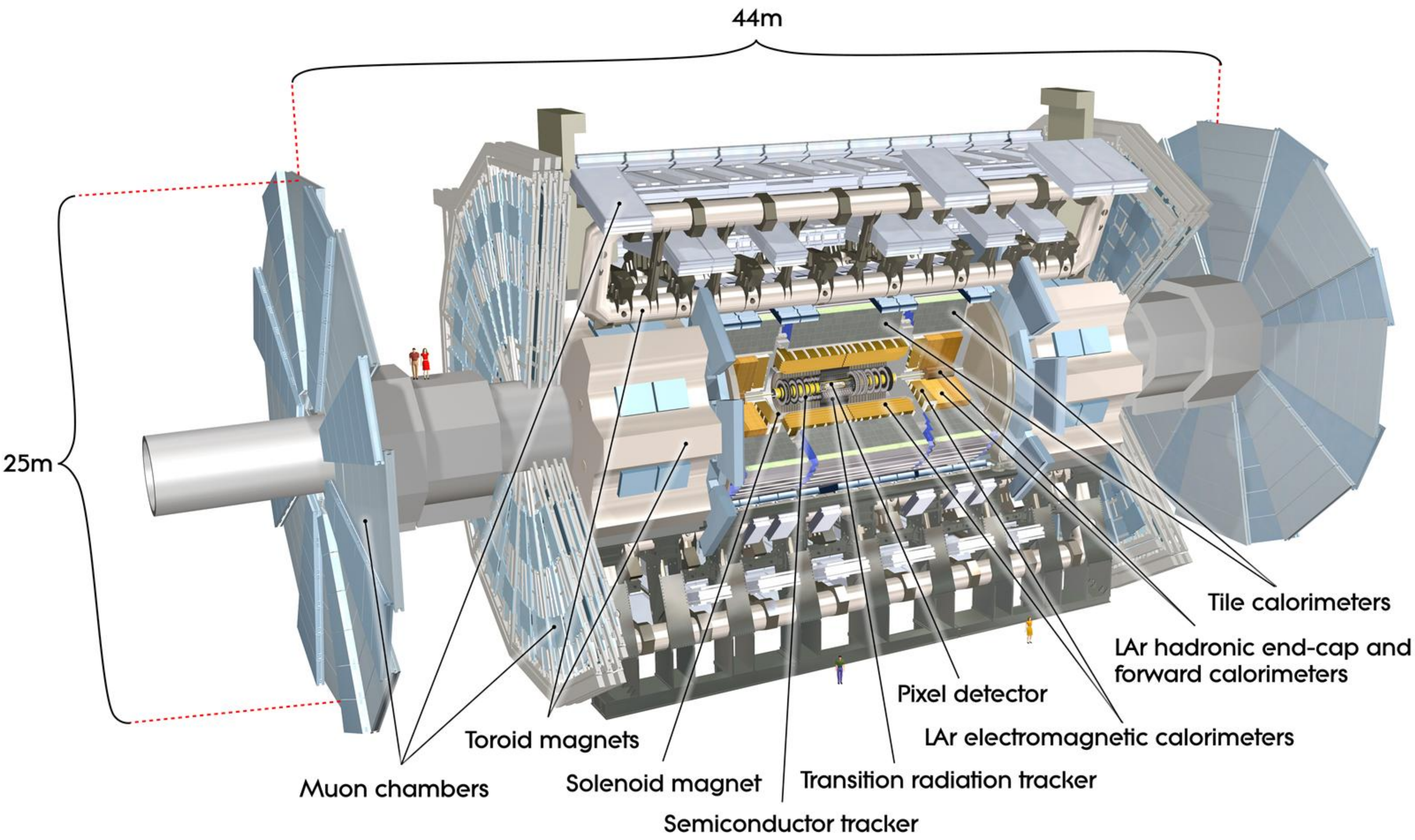
Kalorimetre måler energi ved at omsætte en partikels energi til nye ladede partikler (kan måles)

"des højere energi,
des flere partikler,
des højere signal"

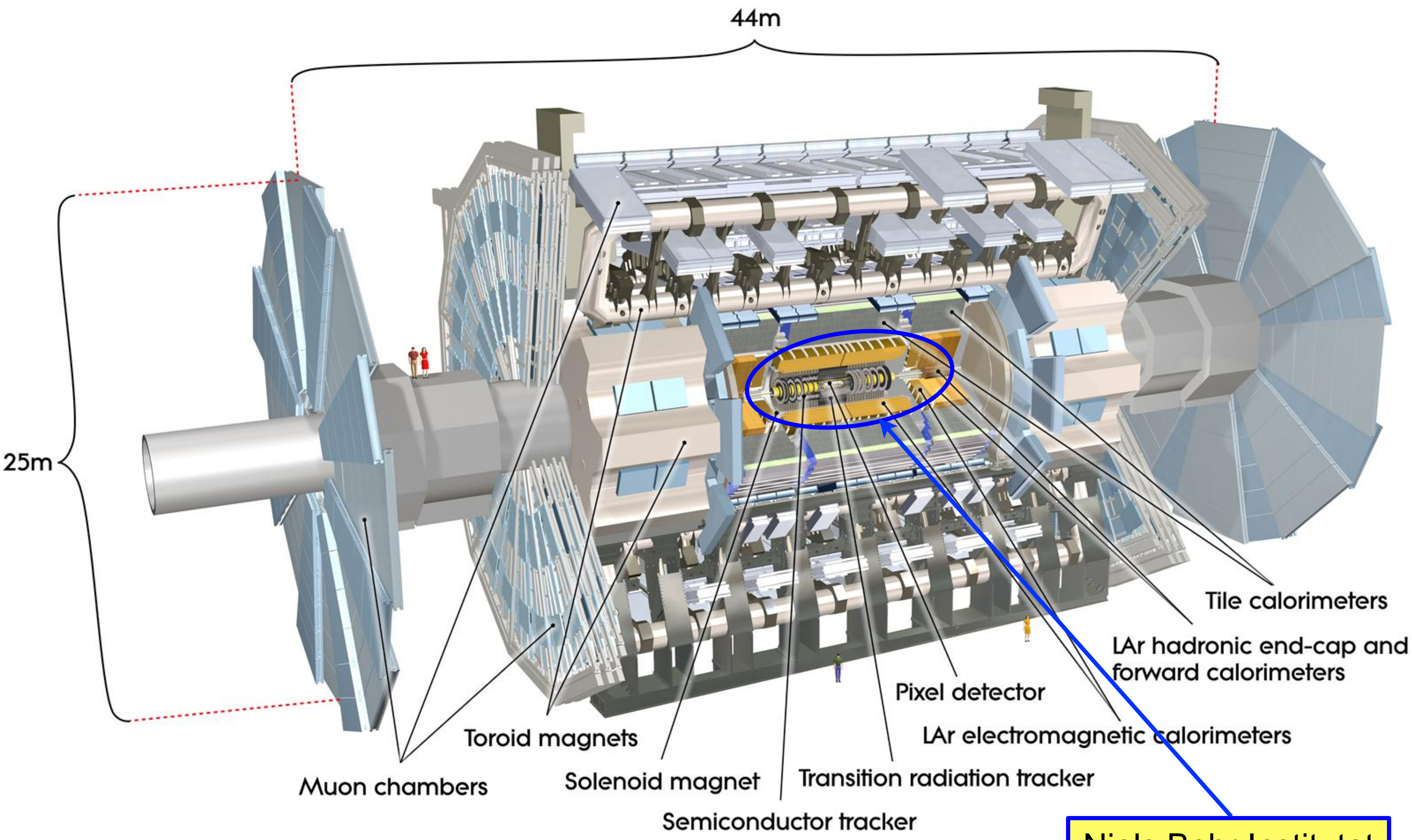
Partiklers “fingeraftryk”



ATLAS-eksperimentet

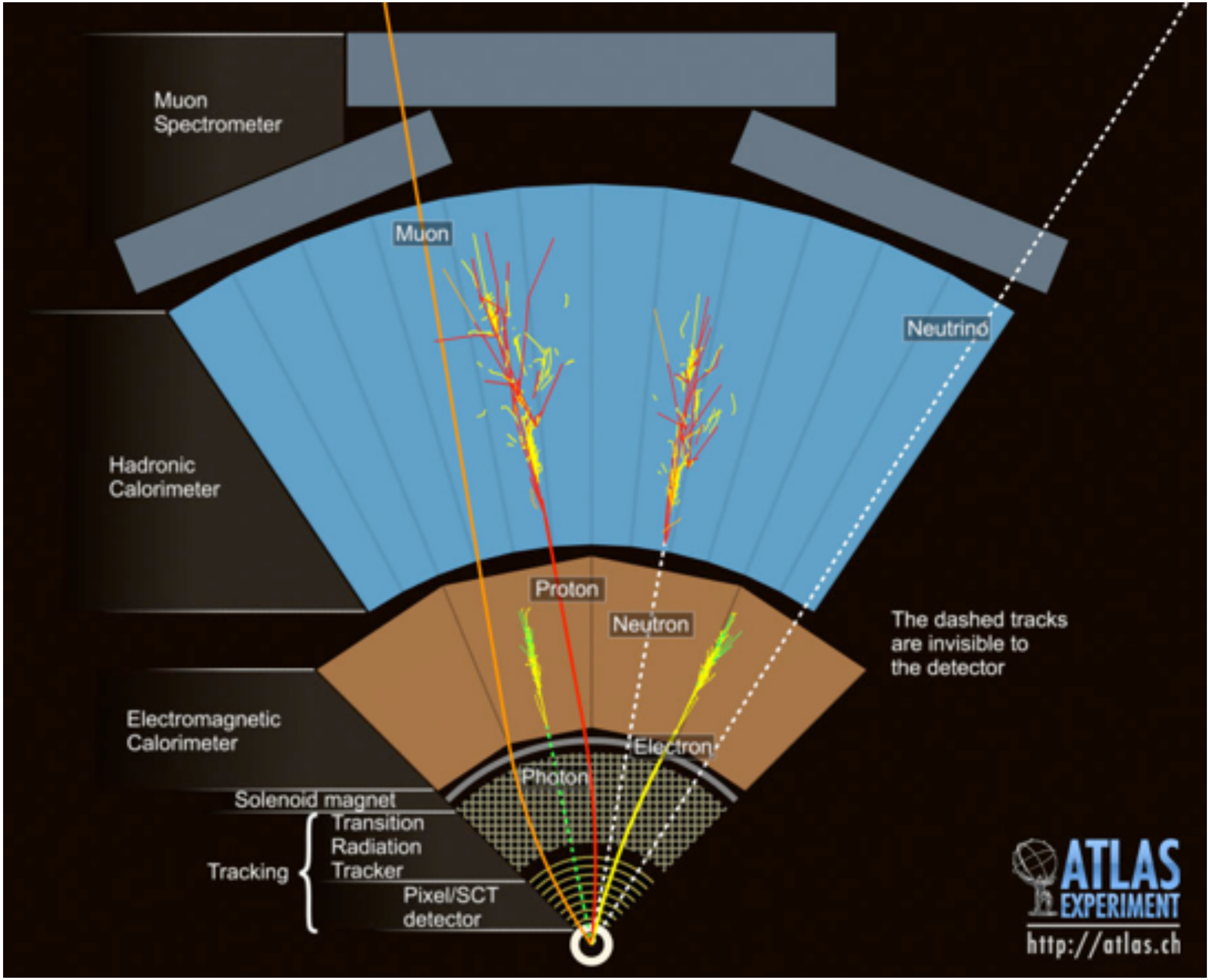


ATLAS-eksperimentet

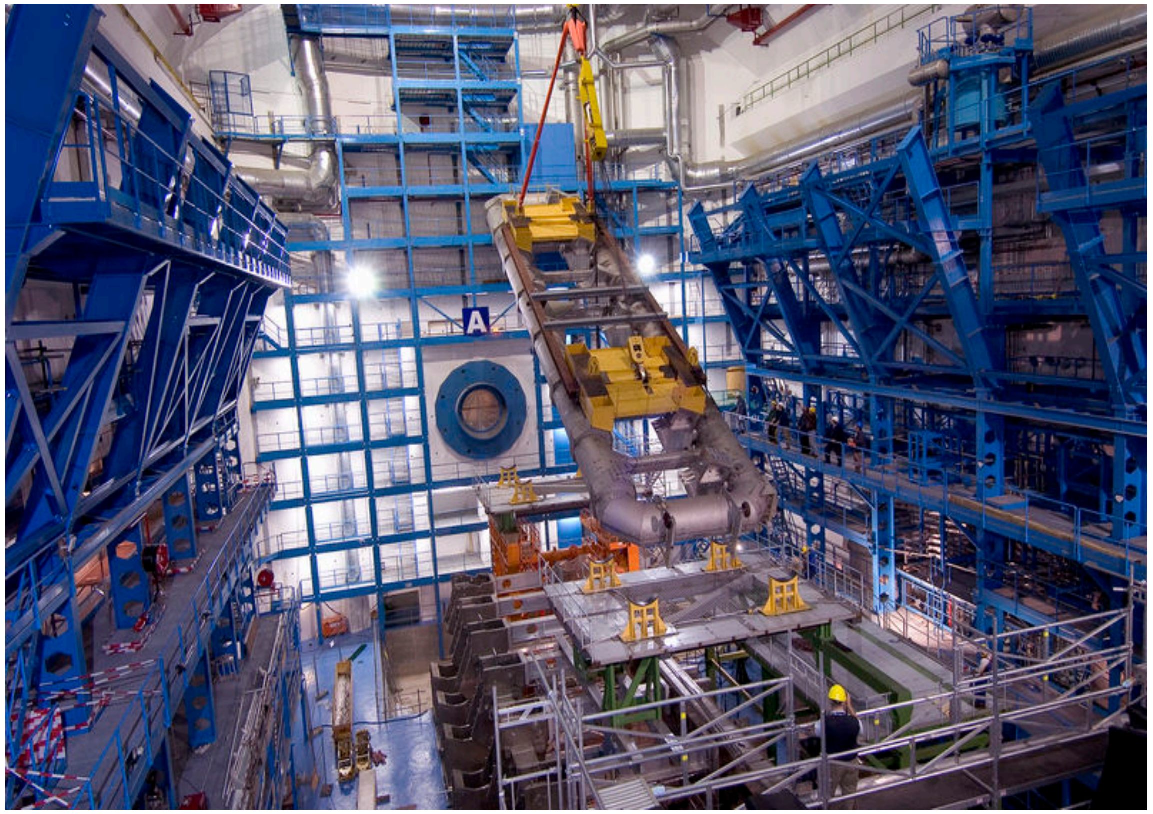


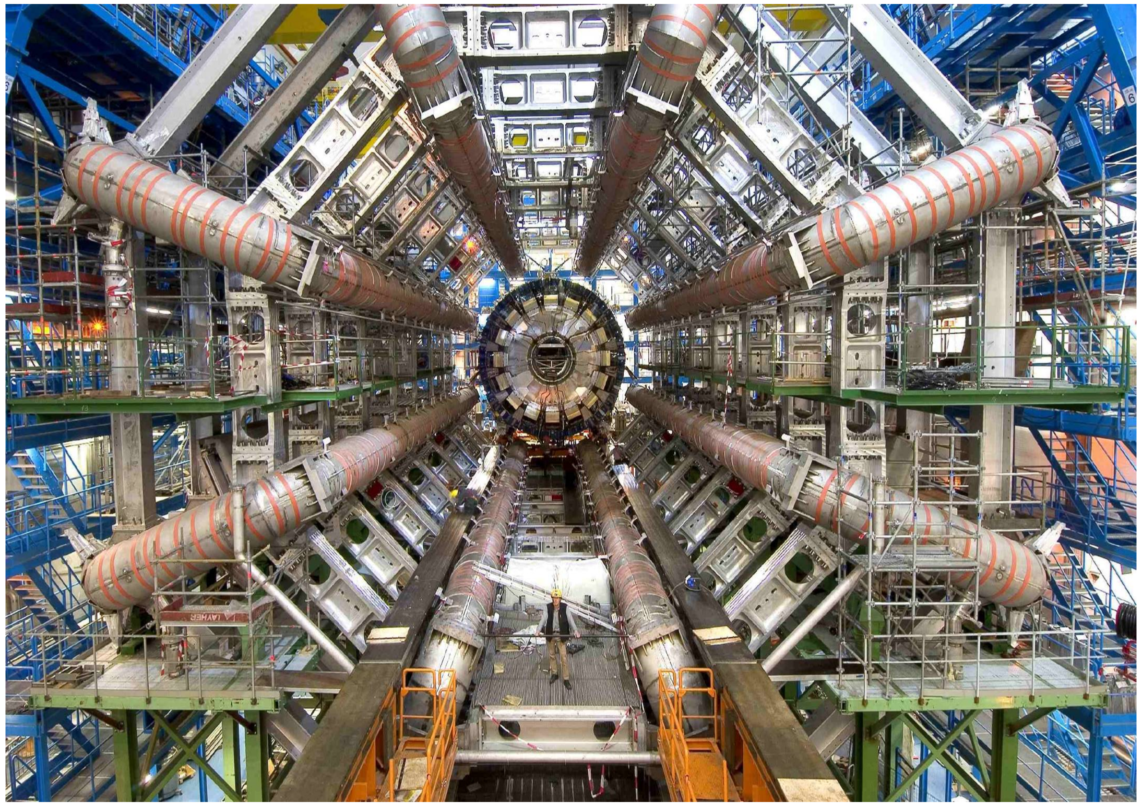
Niels Bohr Institutet med her

Partikler i ATLAS-detektoren

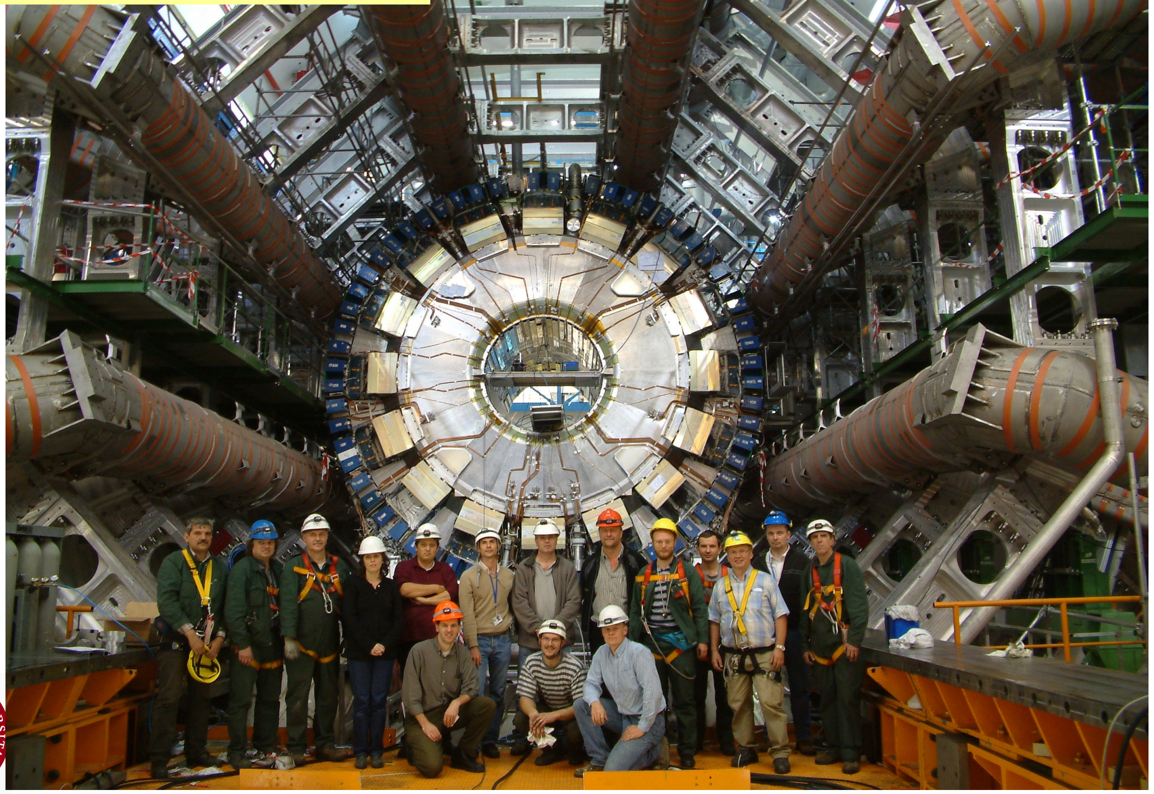


Konstruktion af ATLAS-eksperimentet

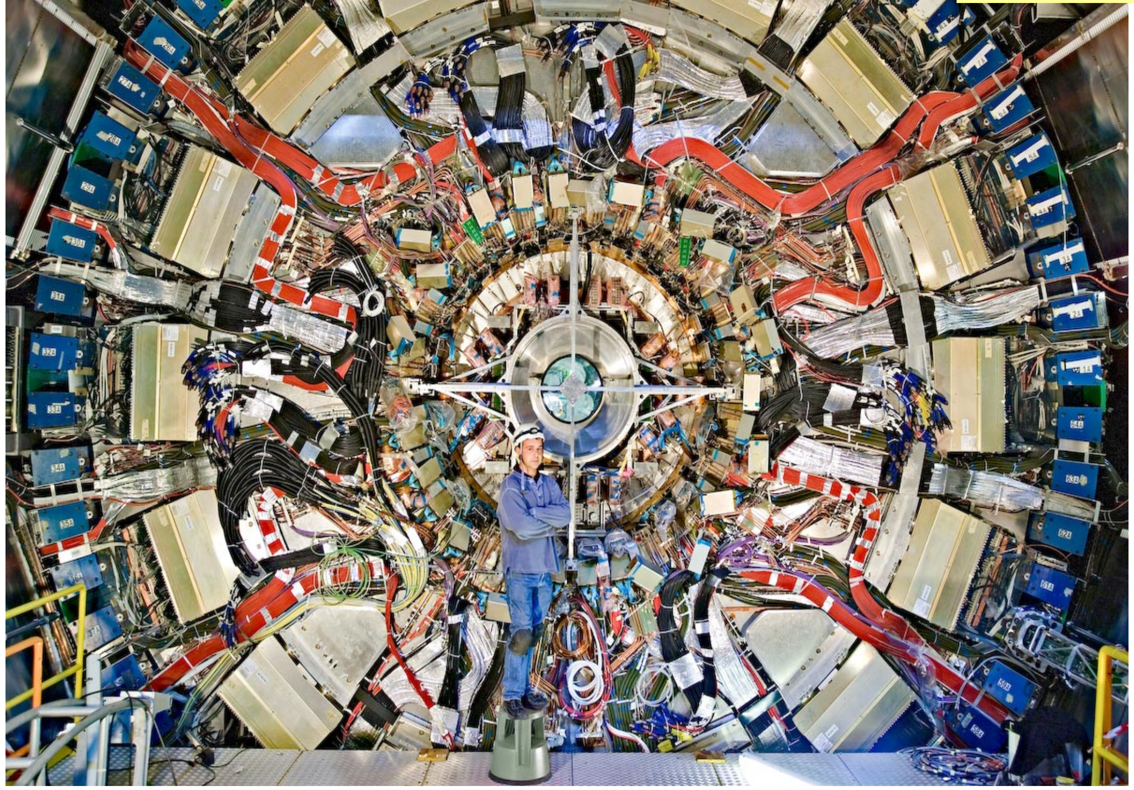




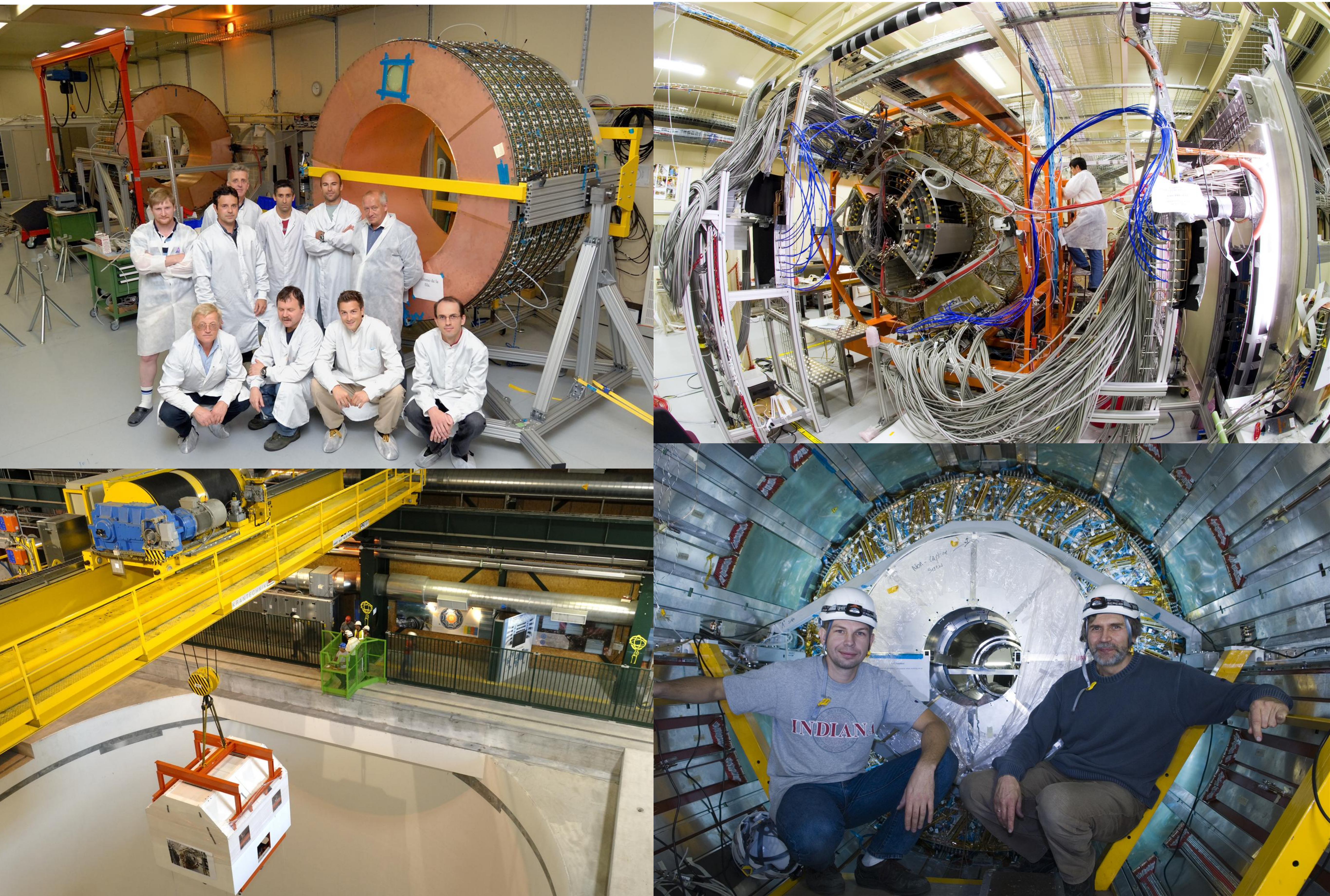
November 2005



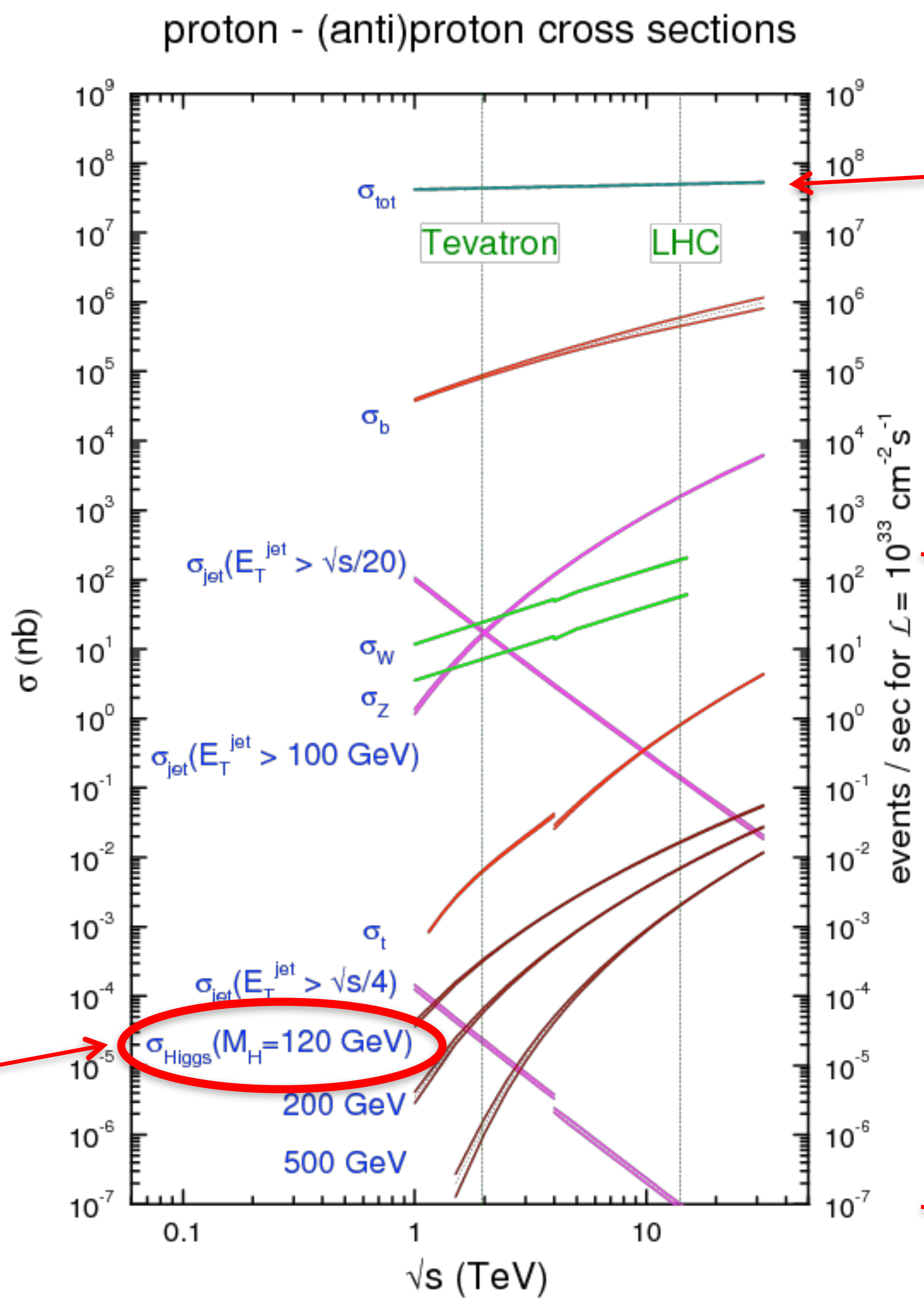
Maj 2007



Dansk bidrag til ATLAS



LHC - Interessante begivenheder er sjældne



Total-rate

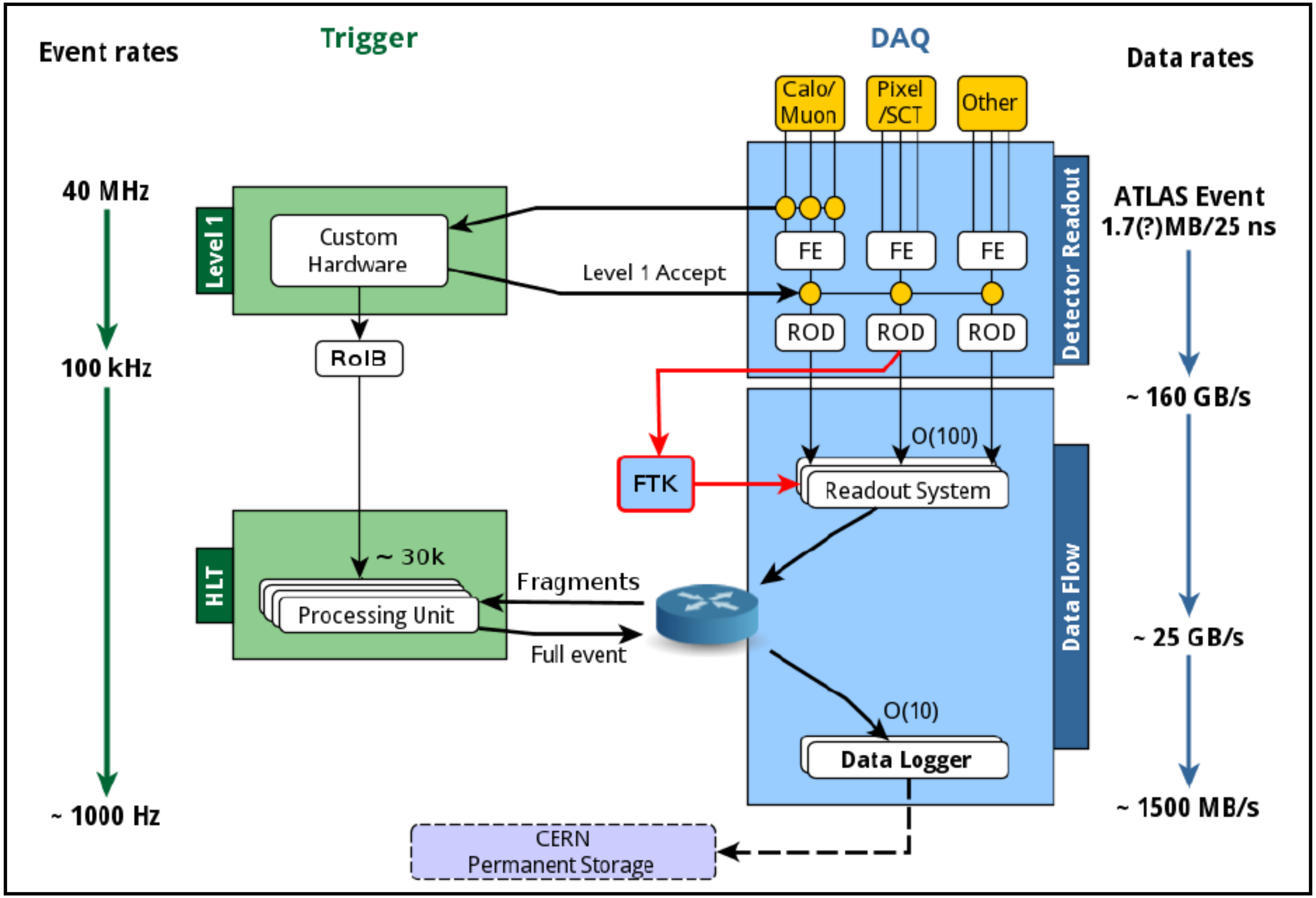
1/1.000.000 –
1/1.000.000.000

“Interessant” fysik

Higgs!!

Triggersystem

- Formål:
  - Hurtig udvælgelse af interessante begivenheder, som gemmes for videre analyse

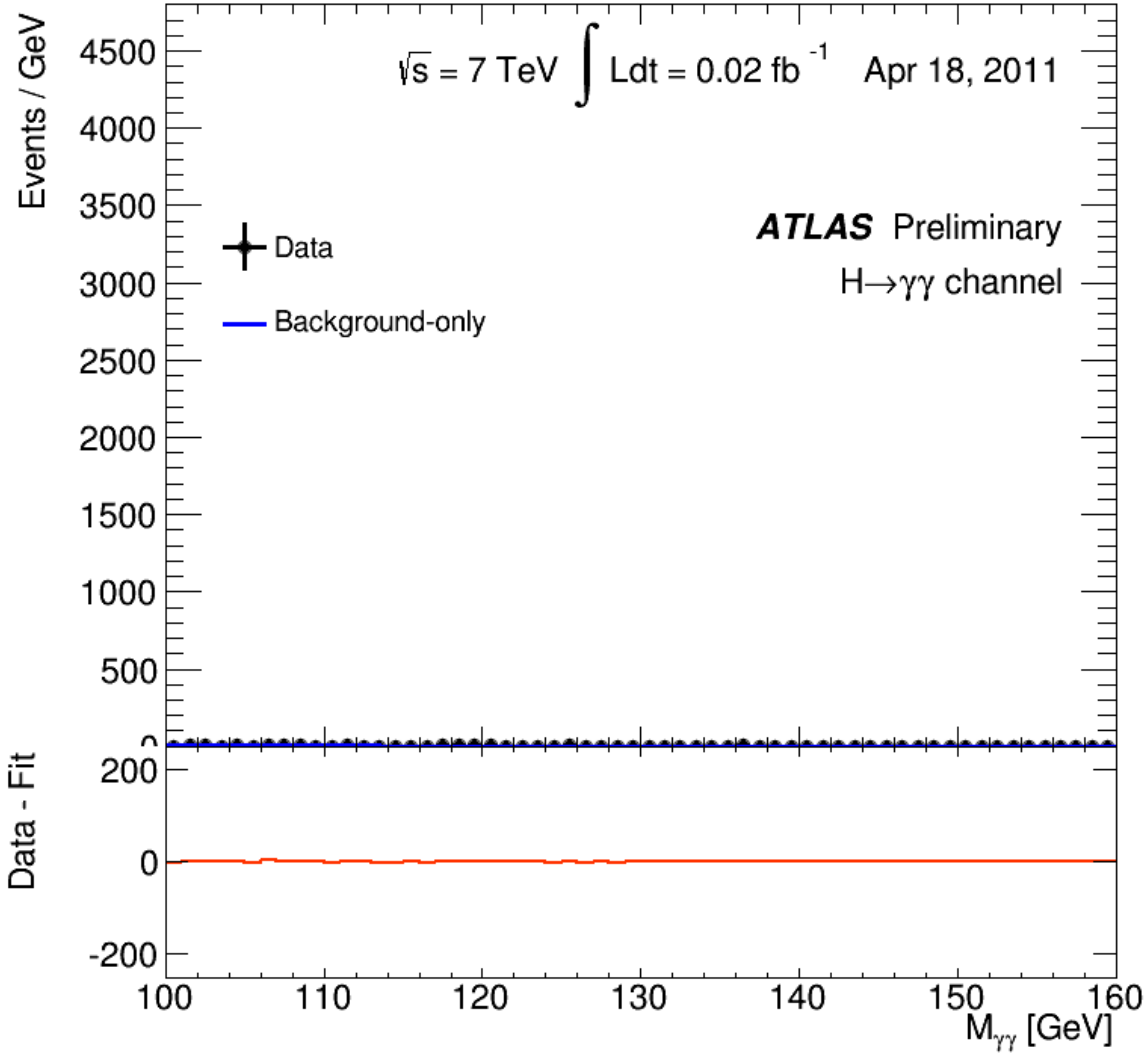


~50 TB/s

Opdagelsen af Higgs-bosonen ved LHC

Higgs-bosonens opdagelse ved LHC

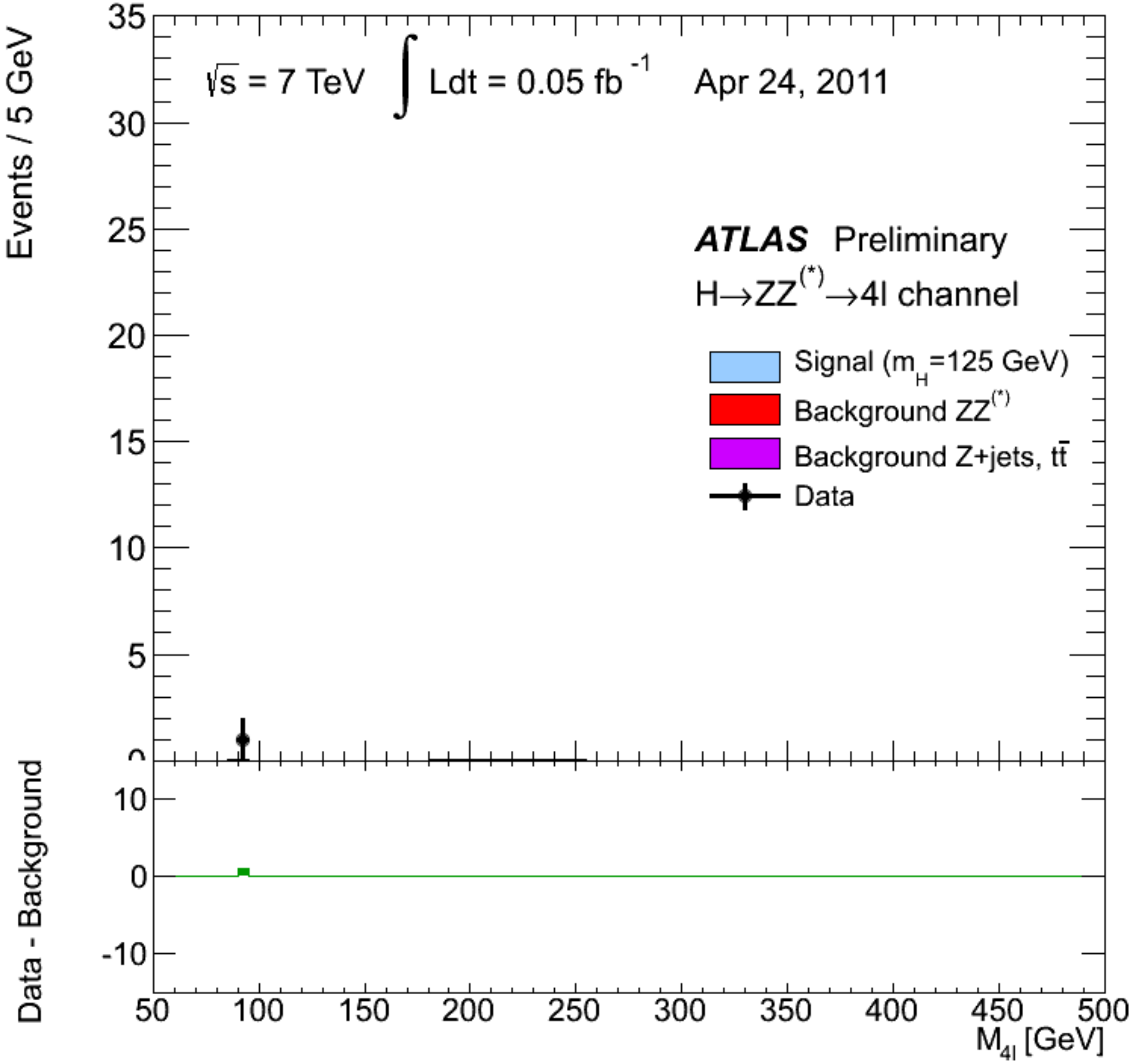
Her i 2-foton-sluttilstande



0.23% af alle Higgs-henfald

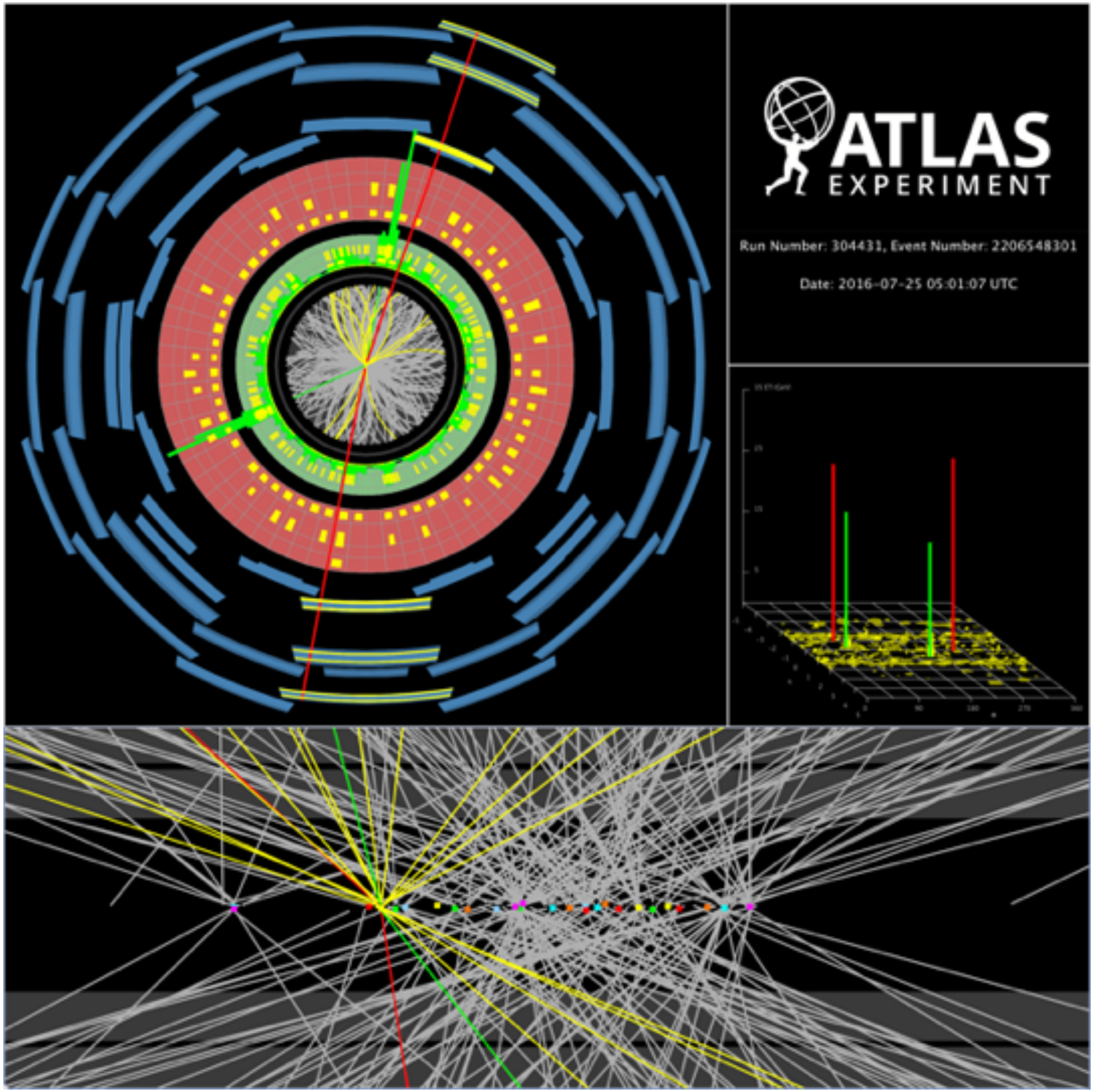
Higgs-bosonen opdagelse ved LHC

Her i 4-lepton-sluttilstande



0.01% af alle Higgs-henfald

En Higgs-kandidat: $H \to ZZ^* \to 4e$



Higgs-bosonen studeres ved LHC

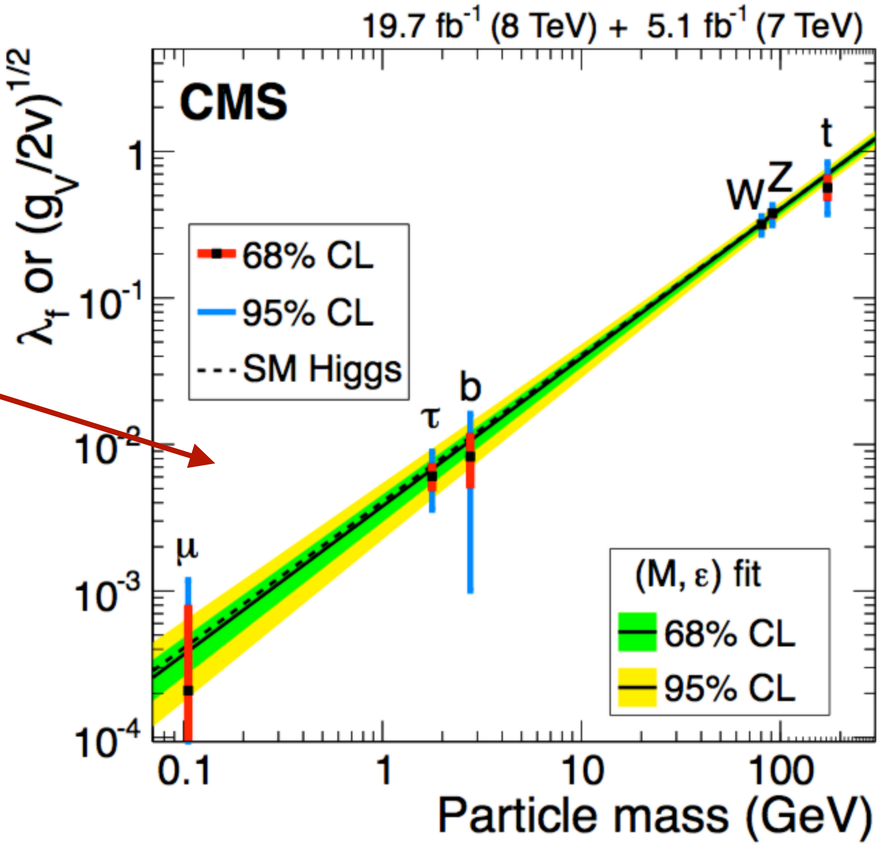
- Higgs-mekanismen giver masser til W±- og Z-bosonerne og til de stoflige partikler (fermioner: leptoner og kvarker)
- Ved denne mekanismer bliver koblingen mellem Higgs-bosonen og de andre partikler proportional med disses masser.
  - Dette betyder fx at sandsynlighed for henfald til b-kvark i forhold til c-kvark bliver

$$R = \left(\frac{m_b}{m_c}\right)^2 \simeq \left(\frac{5\ \textbf{GeV}}{1.25\ \textbf{GeV}}\right)^2 \simeq 16$$

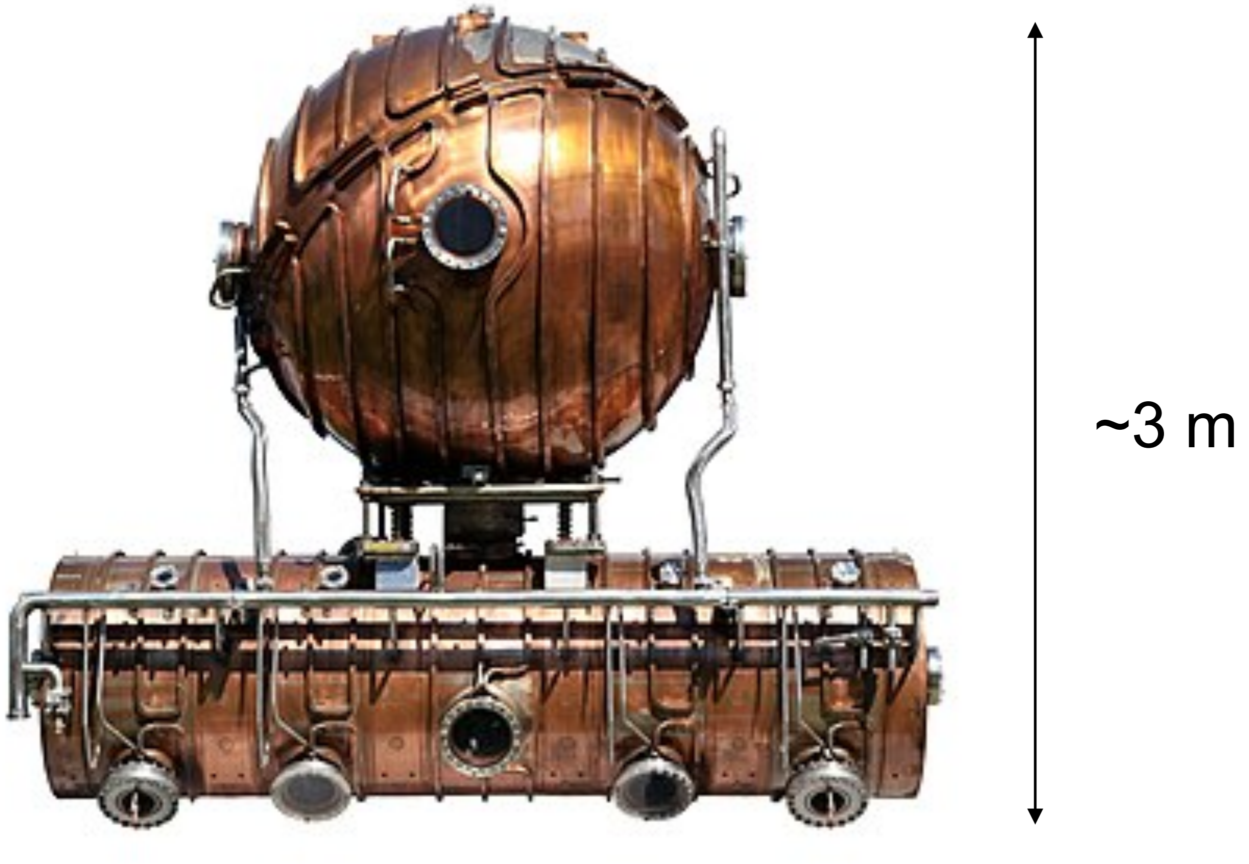
  - Stemmer godt med data inden for den nuværende præcision

m_H = 125 GeV

Decay	BR [%]	Unc. [%]
bb	57.7	3.3
ττ	6.32	5.7
cc	2.91	12.2
μμ	0.022	6.0
WW	21.5	4.3
gg	8.57	10.2
ZZ	2.64	4.3
γγ	0.23	5.0
Zγ	0.15	9.0
ΓH [MeV]	4.07	4.0



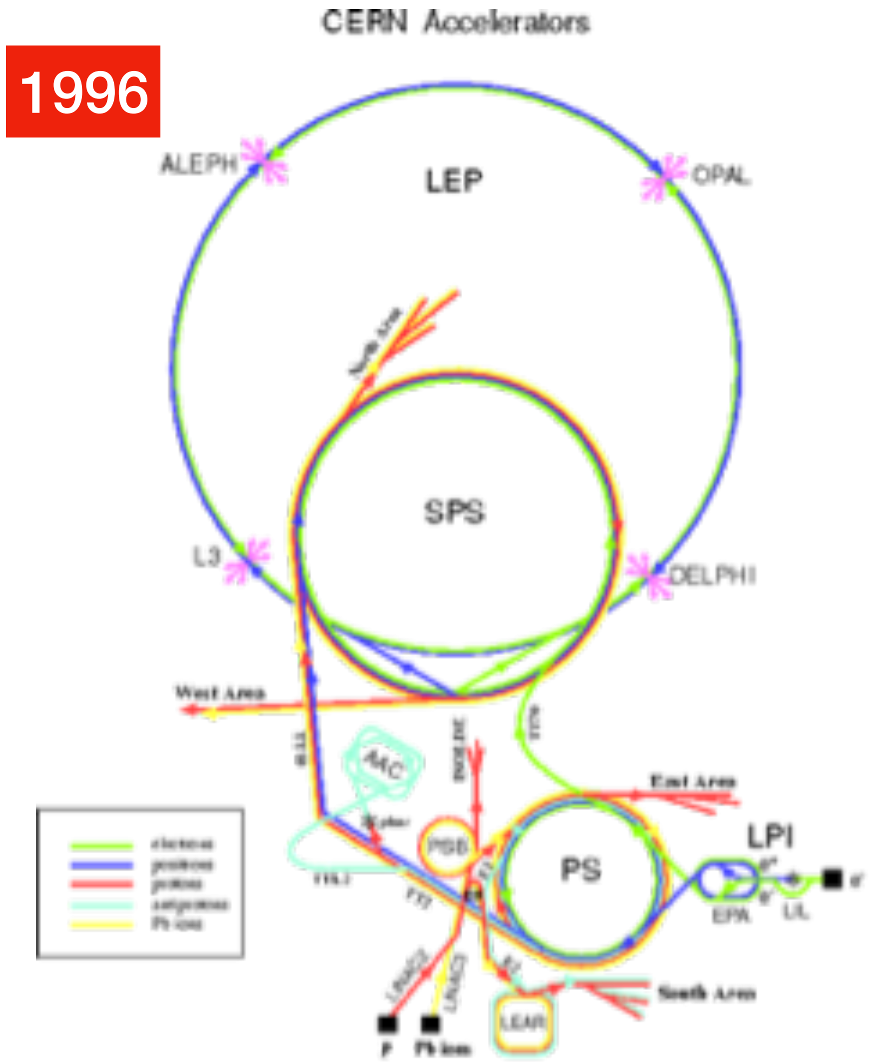
Præcisionsmålinger af Standardmodellen ved LEP

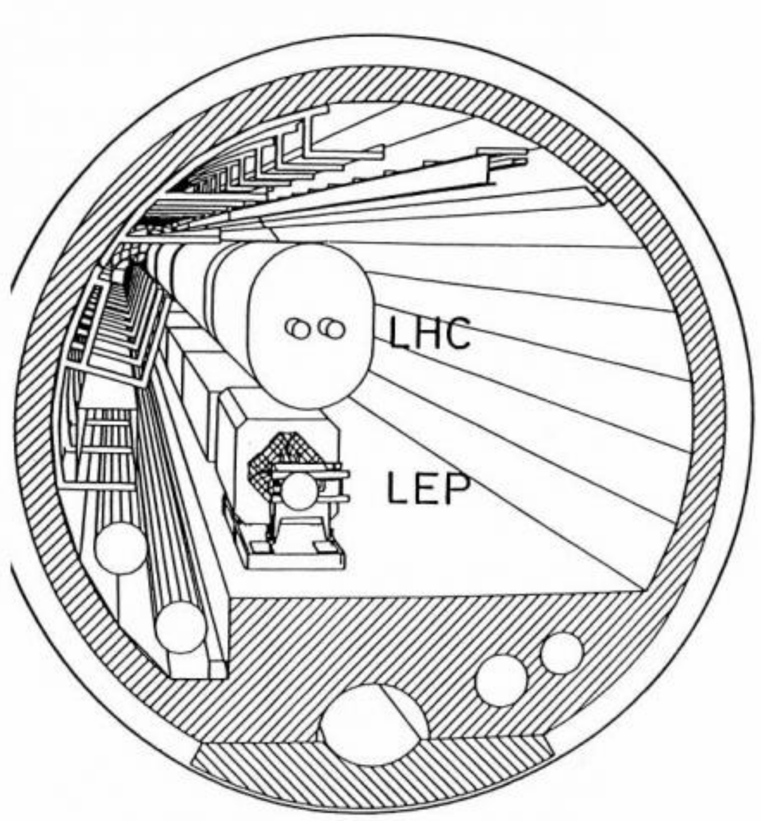


LEP accelerations-kavitet

Large Electron-Positron Collider - LEP

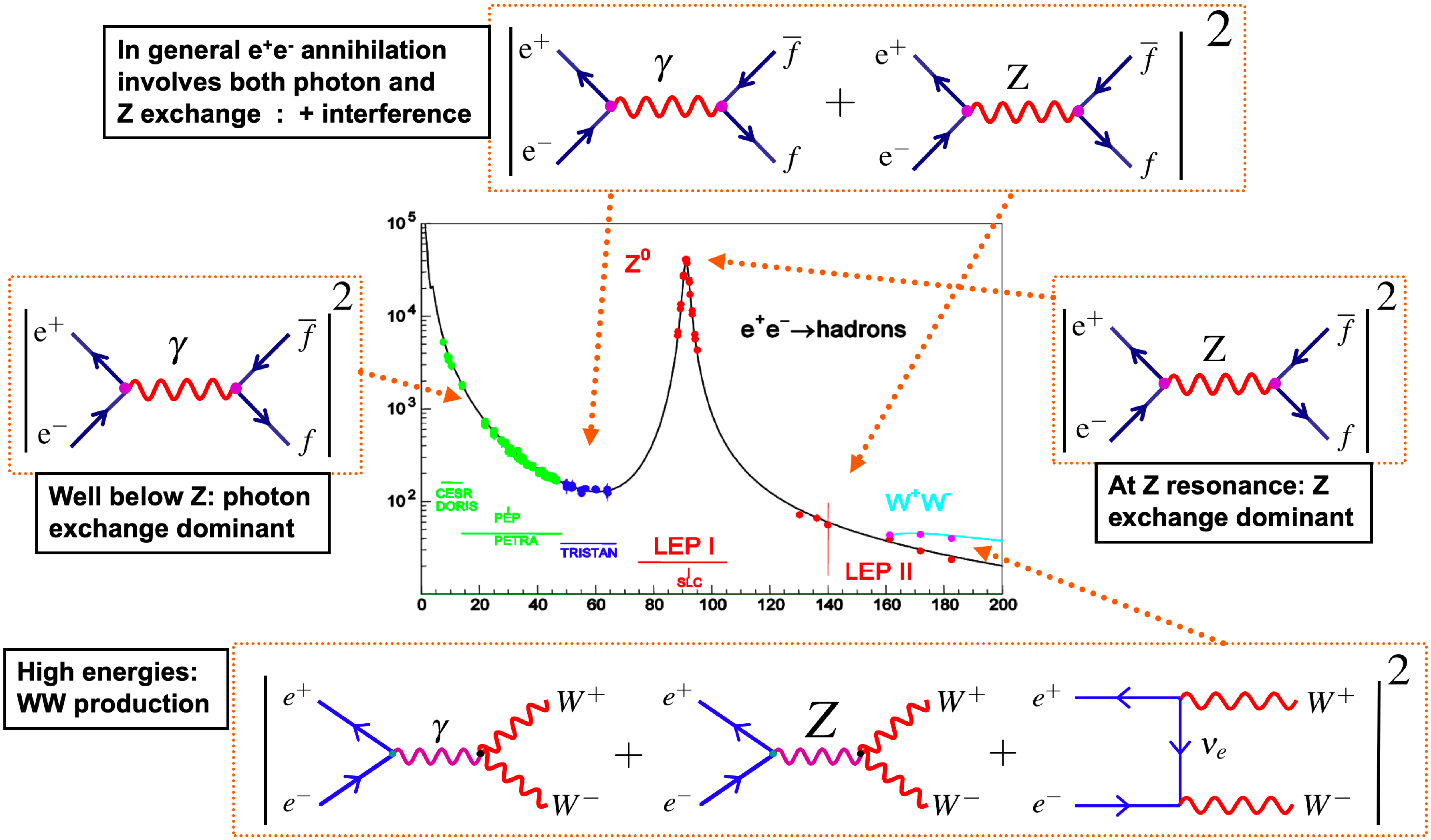
- I perioden 1989-2000 opererede LEP acceleratoren i denne samme tunnel, som nu huser LHC
  - Formål: Præcisionsmålinger af Standardmodellen gennem høj-statistik studier at Z- og W-bosonerne
    - 1989-1995: Produktion af 20.000.000 Z-bosoner ved energier 89-100 GeV
    - 1996-2003: Produktion af 80.000 W-bosoner ved energier 160-209 GeV





Figur fra oprindelig designrapport (1984), hvor man forestillede sig, at LEP og LHC kunne være installeret samtidigt

e^+e^- Annihilation in Feynman Diagrams



In general e^+e^- annihilation involves both photon and Z exchange : + interference

Well below Z: photon exchange dominant

At Z resonance: Z exchange dominant

High energies: WW production

Bestemmelse af antal neutrino-generationer

- De kendte neutrinoer er alle ekstremt lette, omkring en faktor 1.000.000 lettere end elektronen
- Skulle der eksistere en fjerde neutrino-generation, så er der god grund til at antage, at denne også vil være let
- Dermed ville Z-bosonen kunne henfalde til disse

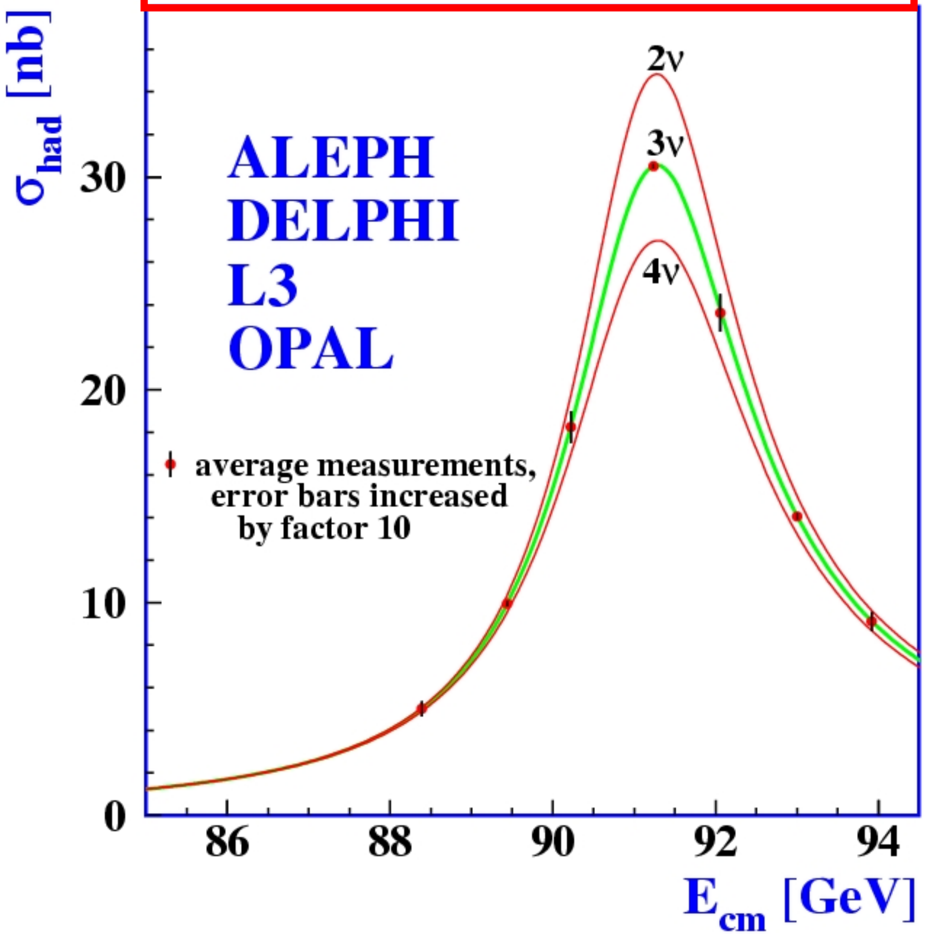
$$Z \to \nu_4 \bar{\nu}_4$$

- Ved LEP målte vi produktionssandsynligheden (tværsnittet) som funktion af kollisionsenergien af e^+e^-
- Ser at dataene stemmer med tre neutrino-generationer:

$$\boxed{N_\nu = 2.984 \pm 0.008}$$

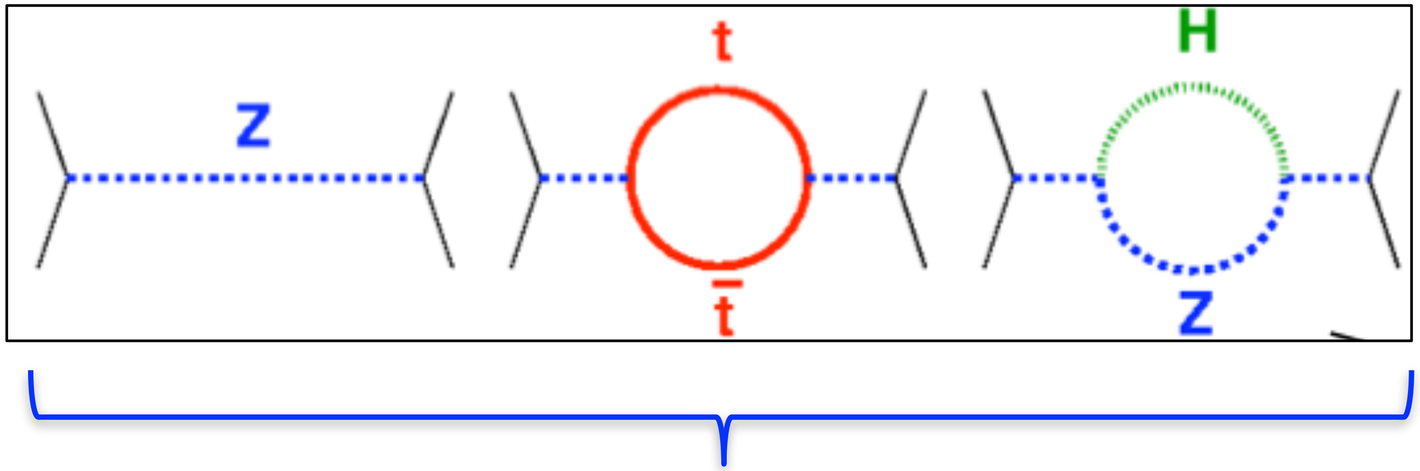
- **Altså tre og kun tre generationer !**

$$\boxed{e^+e^- \to Z \to \text{hadrons}}$$



Præcisionsmålinger og top-kvarken

Via kvantemekaniske fluktuationer (*“loop diagrams”*) er præcise målinger følsom over for partikler ved (langt) højere energier end dem, der er direkte eksperimentelt tilgængelige

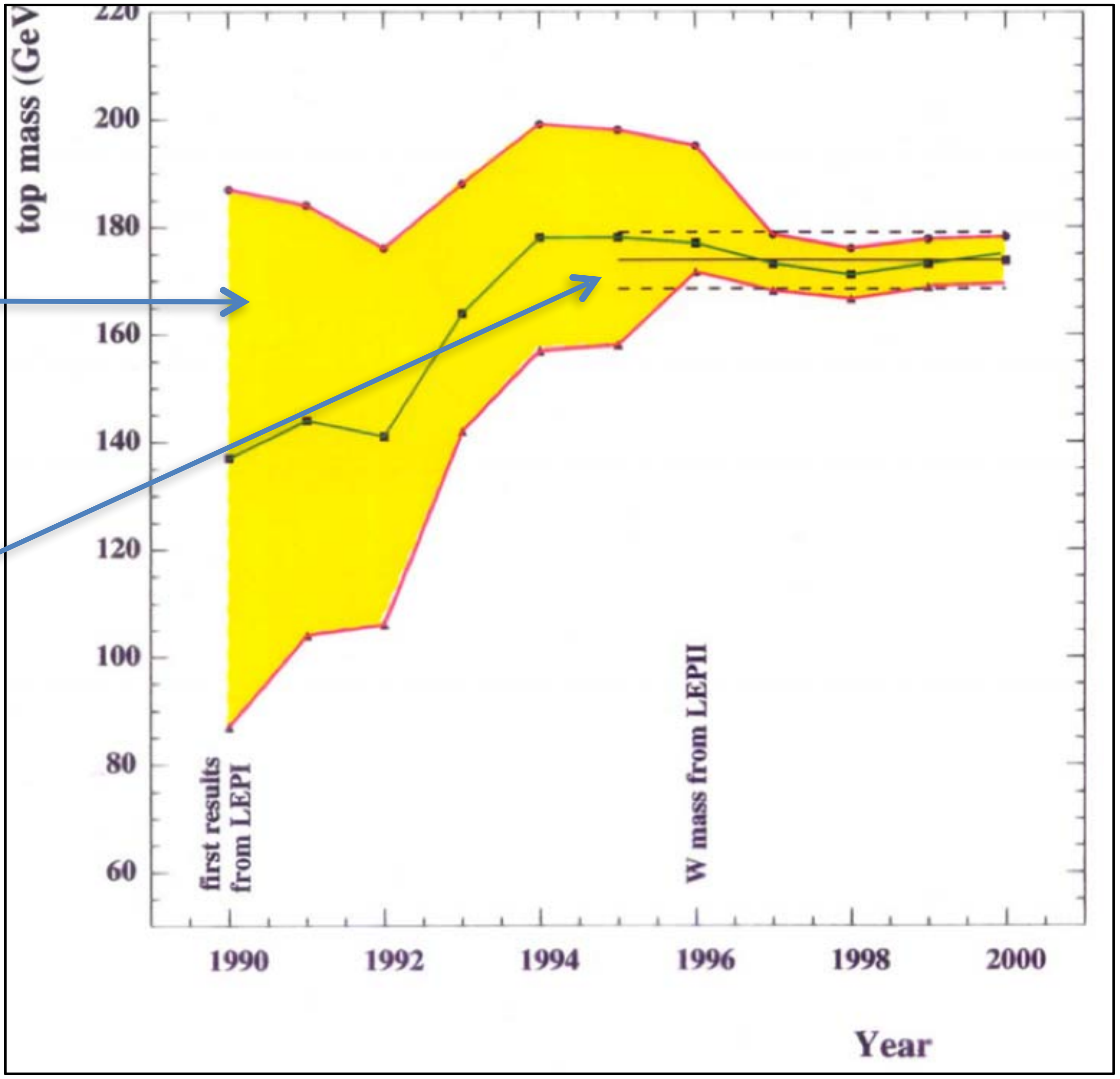


Vigtigt eksempel: Top-kvarken

Gult bånd:
LEP *indirekte* måling af top-kvark massen

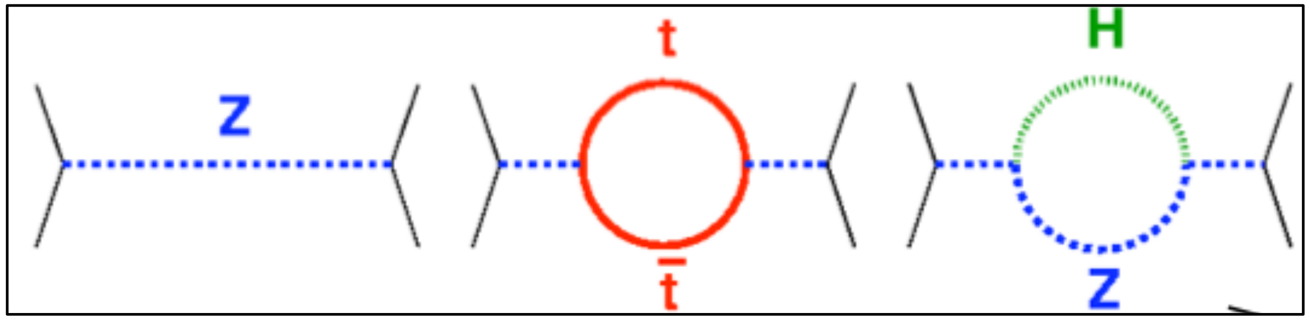
Stiplede linjer:
I 1995 opdagedes top-kvarken i proton-antiproton-kollisioner ved Fermilab (Chicago) præcis ved den af LEP forudsagte masse

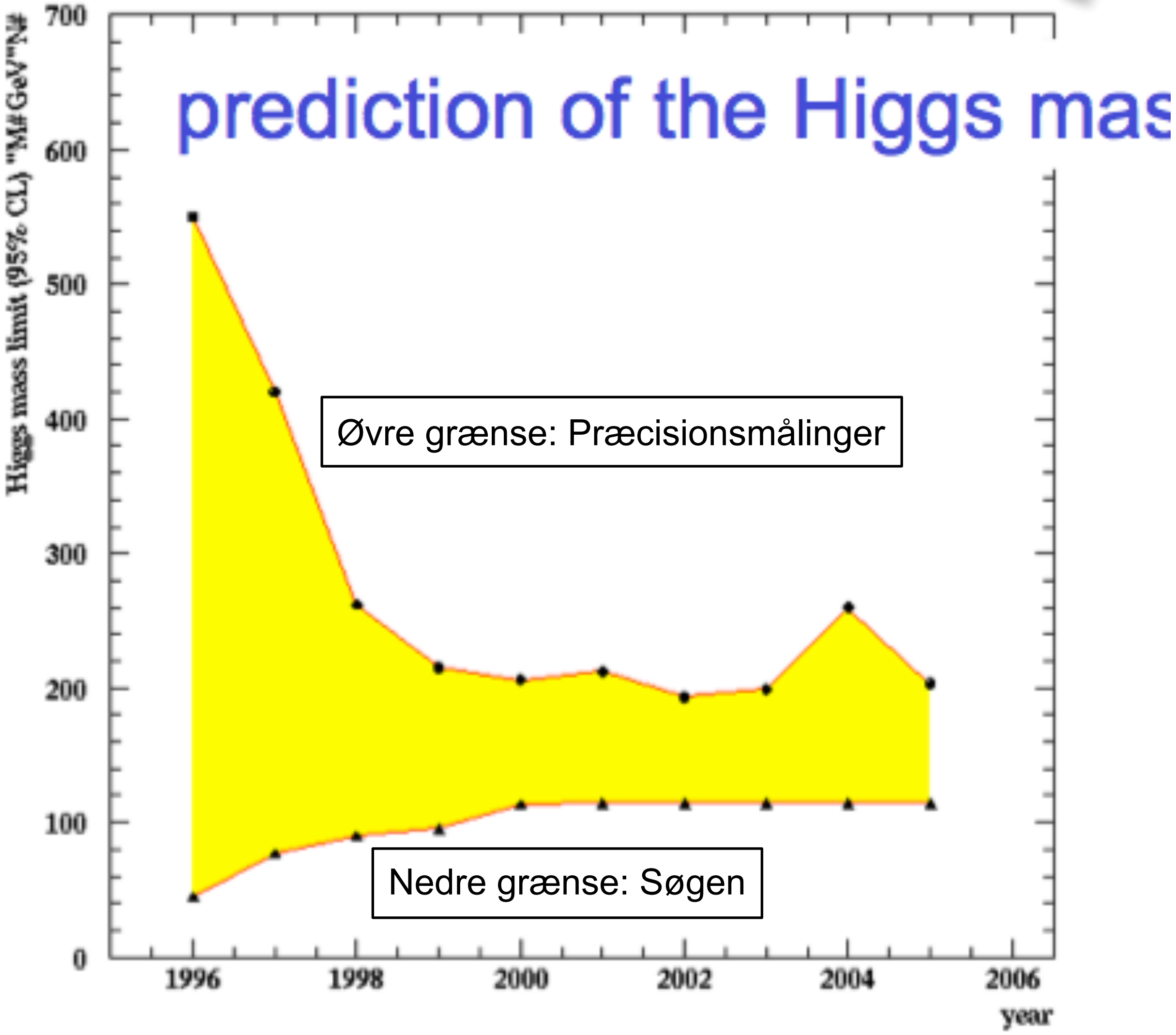
Præcisionsmålinger og direkte søg er komplimentære



Præcisionsmålinger og Higgs-massen

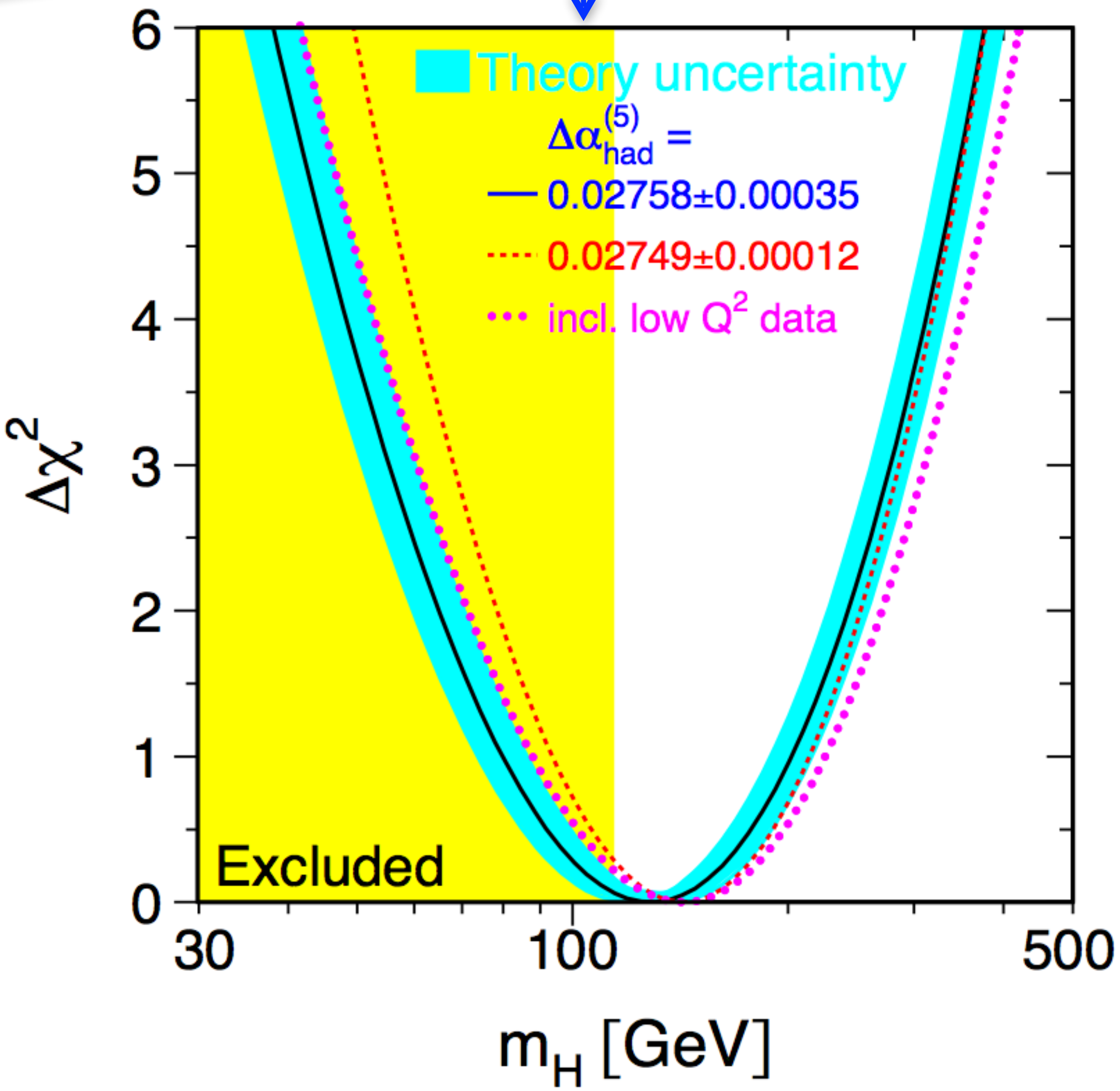
Da man fra 1996 kendte top-kvark-massen, begyndte præcisionsmålingerne fra LEP (og andre) at give information om Higgs-massen: Higgs'en er let !





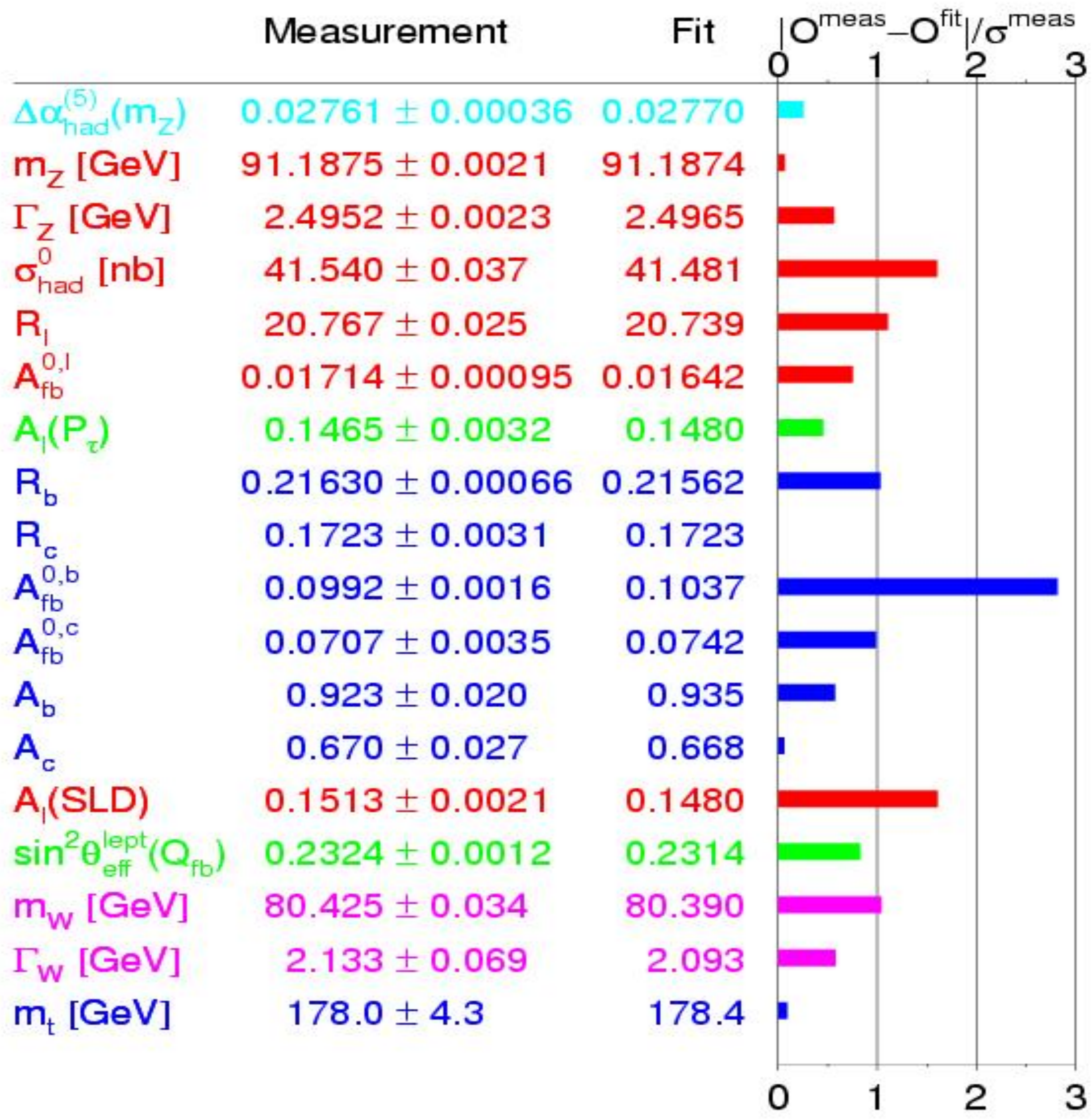
Øvre grænse: Præcisionsmålinger

Nedre grænse: Søgen



Standardmodellen - en succesrig præcisionsteori

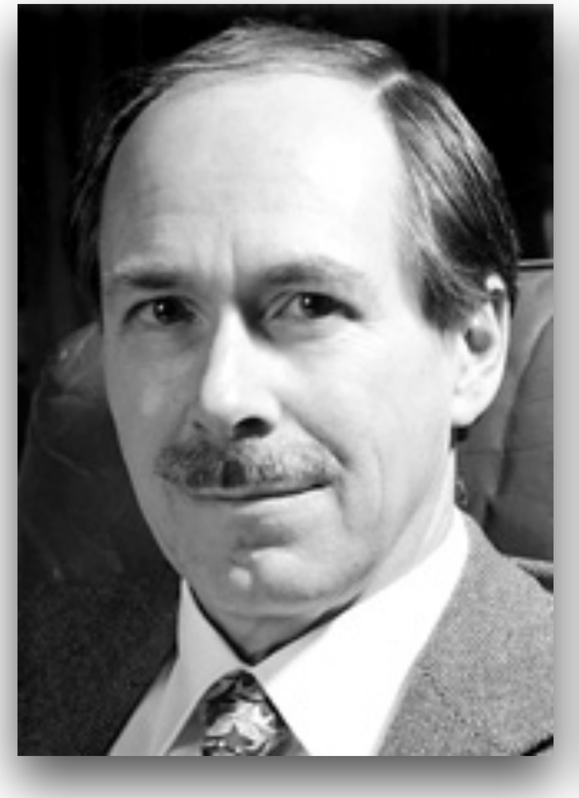
Standardmodellen,en successfuld teori



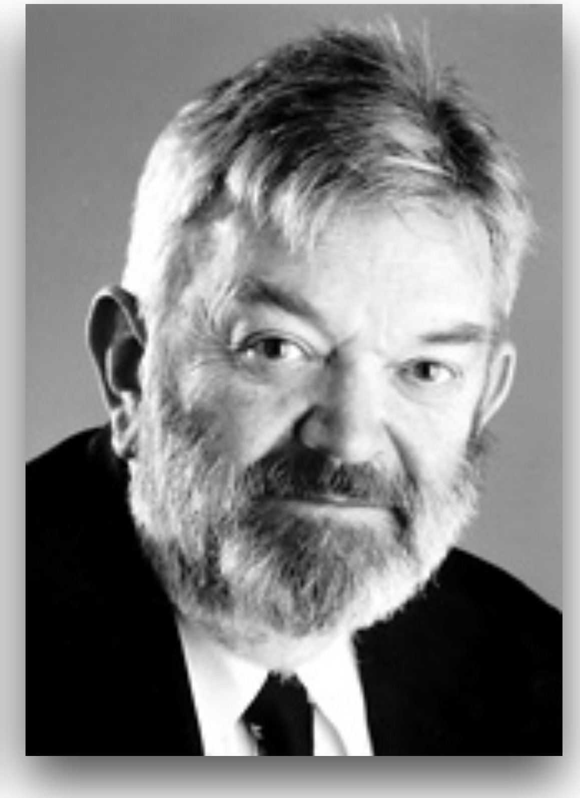
	Measurement	Fit
$\Delta\alpha^{(5)}_{had}(m_Z)$	0.02761 ± 0.00036	0.02770
m_Z [GeV]	91.1875 ± 0.0021	91.1874
Γ_Z [GeV]	2.4952 ± 0.0023	2.4965
σ^0_{had} [nb]	41.540 ± 0.037	41.481
R_l	20.767 ± 0.025	20.739
$A^{0,l}_{fb}$	0.01714 ± 0.00095	0.01642
$A_l(P_\tau)$	0.1465 ± 0.0032	0.1480
R_b	0.21630 ± 0.00066	0.21562
R_c	0.1723 ± 0.0031	0.1723
$A^{0,b}_{fb}$	0.0992 ± 0.0016	0.1037
$A^{0,c}_{fb}$	0.0707 ± 0.0035	0.0742
A_b	0.923 ± 0.020	0.935
A_c	0.670 ± 0.027	0.668
A_l(SLD)	0.1513 ± 0.0021	0.1480
$\sin^2\theta^{lept}_{eff}(Q_{fb})$	0.2324 ± 0.0012	0.2314
m_W [GeV]	80.425 ± 0.034	80.390
Γ_W [GeV]	2.133 ± 0.069	2.093
m_t [GeV]	178.0 ± 4.3	178.4

Konsistens af (mange) målbare størrelser

Renormaliserbar teori, der virker bedre end til 1%!



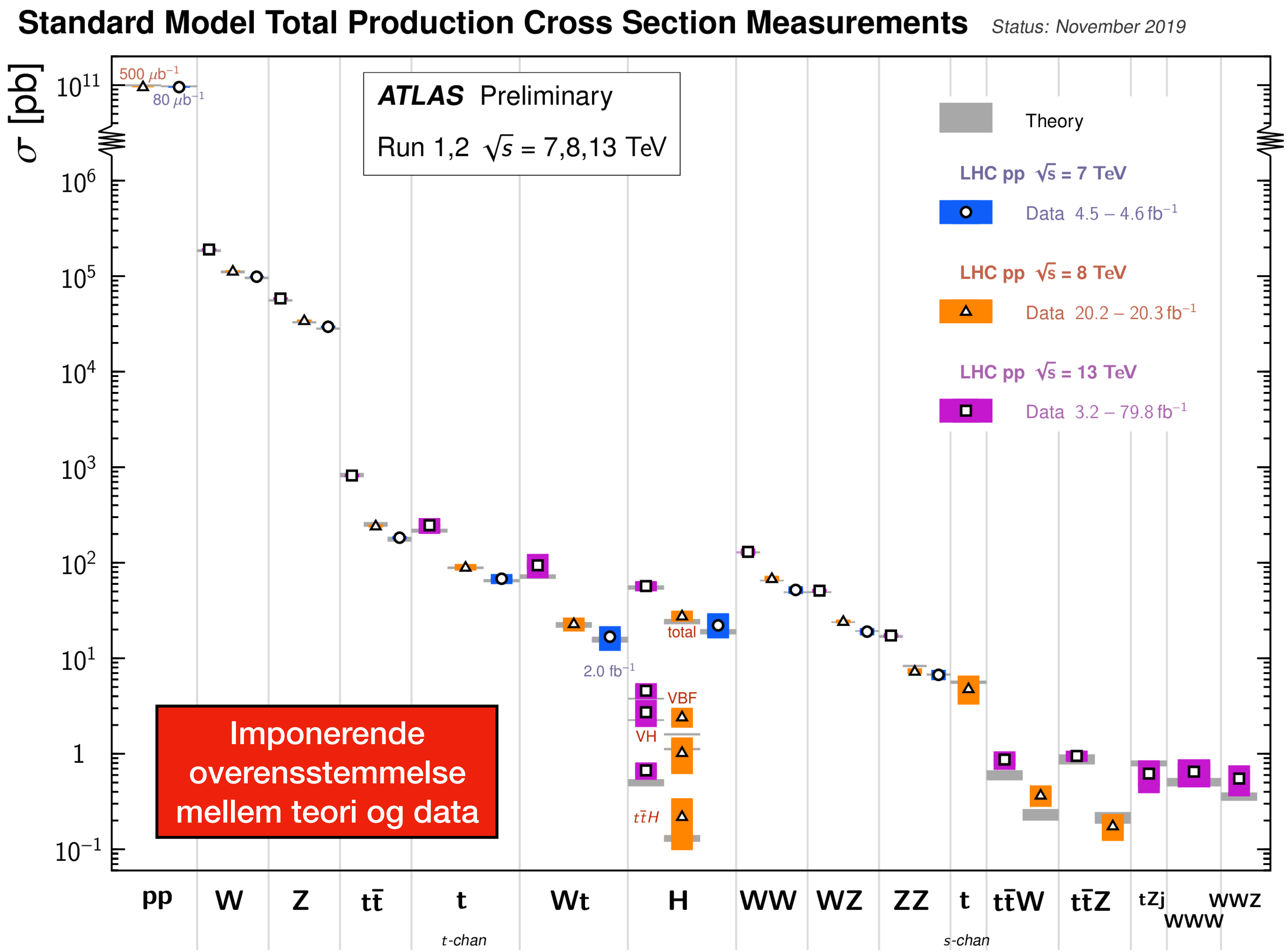
t'Hooft



Veltman

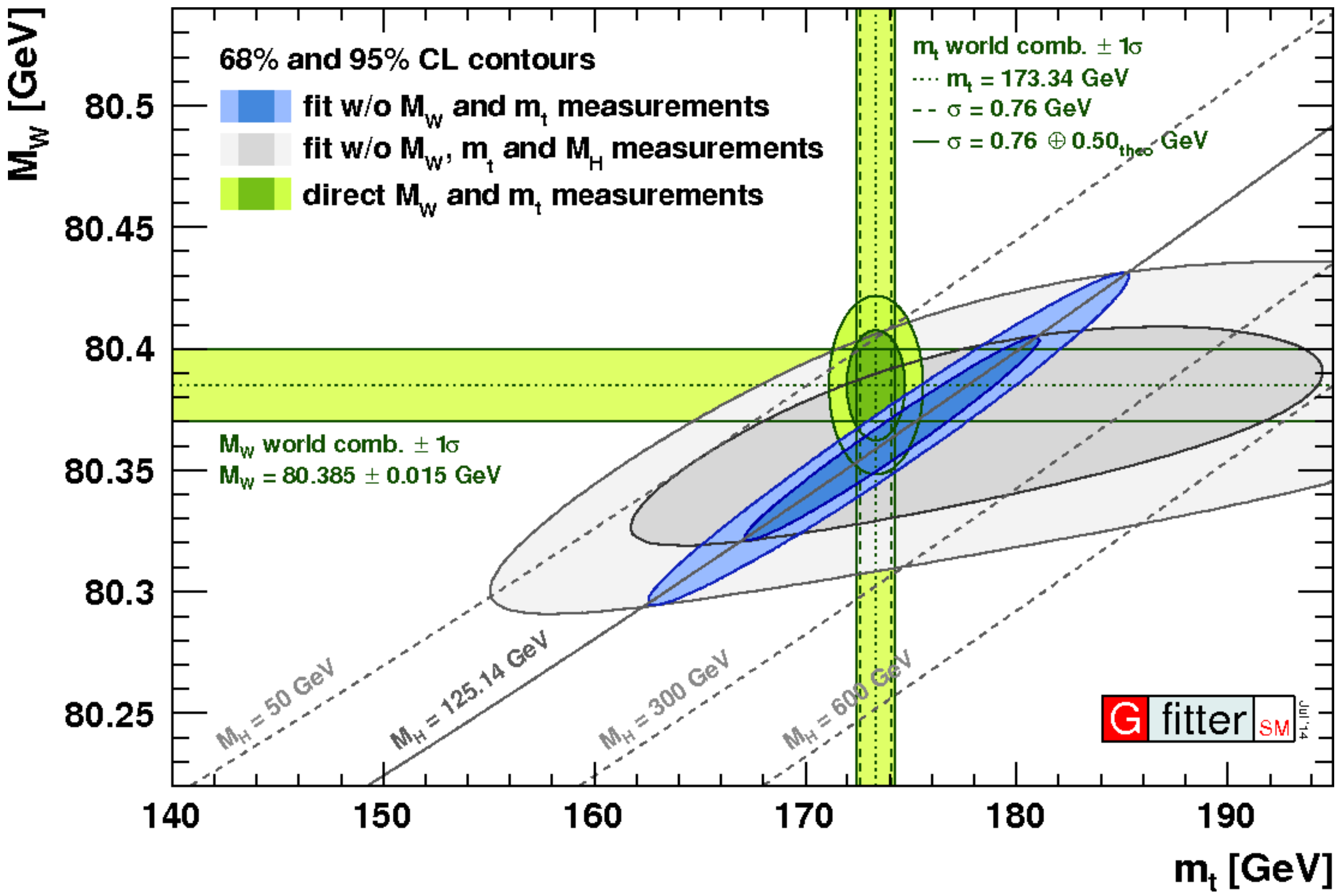
Arbejdet 1971 (PhD thesis)
Nobelpris 1999

Produktionstværsnit ved LHC



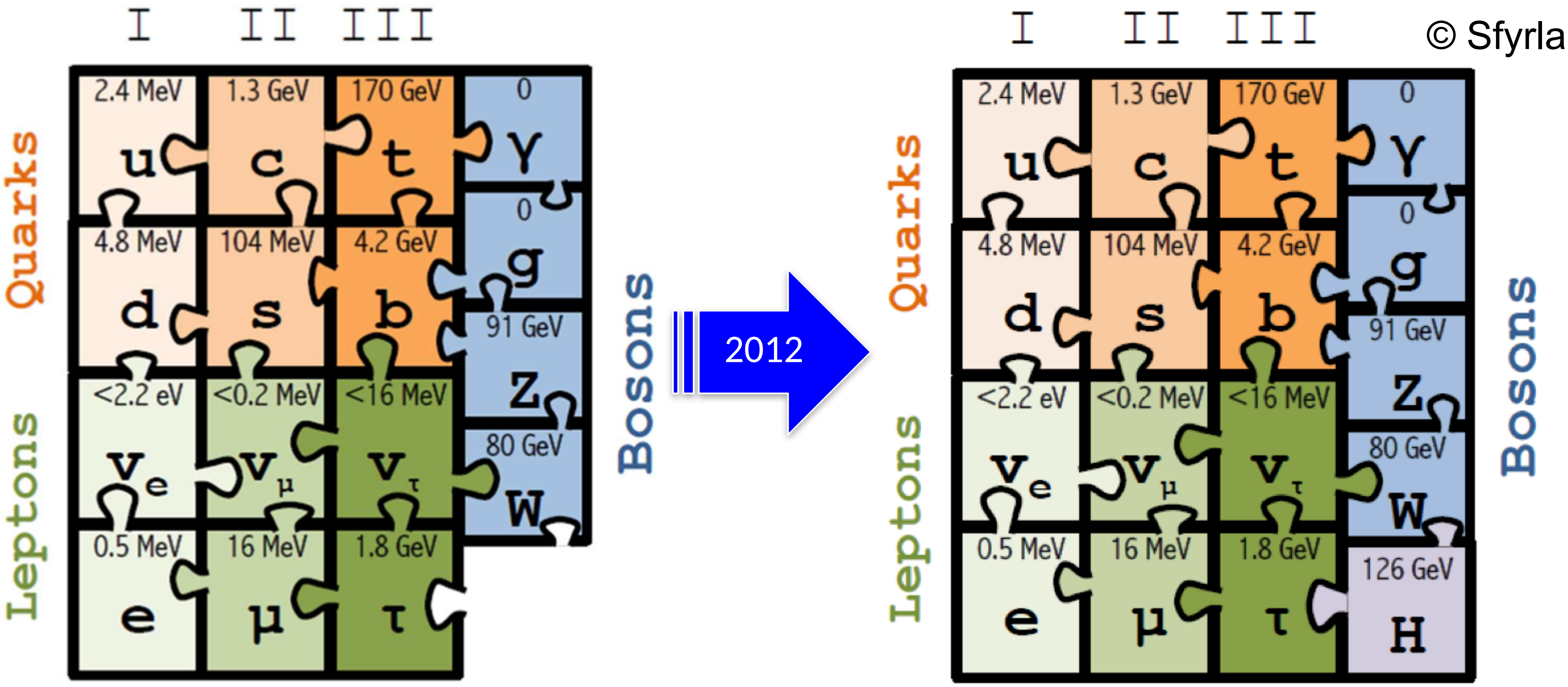
Imponerende overensstemmelse mellem teori og data

Status af Standardmodellen



- Overordnet konklusion:
  - Vi har målt og kender Standardmodellen til en imponerende præcision
  - Inden for denne præcision er (stort set) alle målinger i overensstemmelse med teorien

Higgs-bosonen fuldender Standardmodellen



© Sfyrla

- Med opdagelsen af Higgs-bosonen har vi for første gang i historien en **komplet**, **selv-konsistent** teori som lader sig ekstrapolere til eksponentielt højere energier
  - Fra et teoretisk synspunkt, ikke tvingende nødvendig, at der findes yderligere, ny fysik

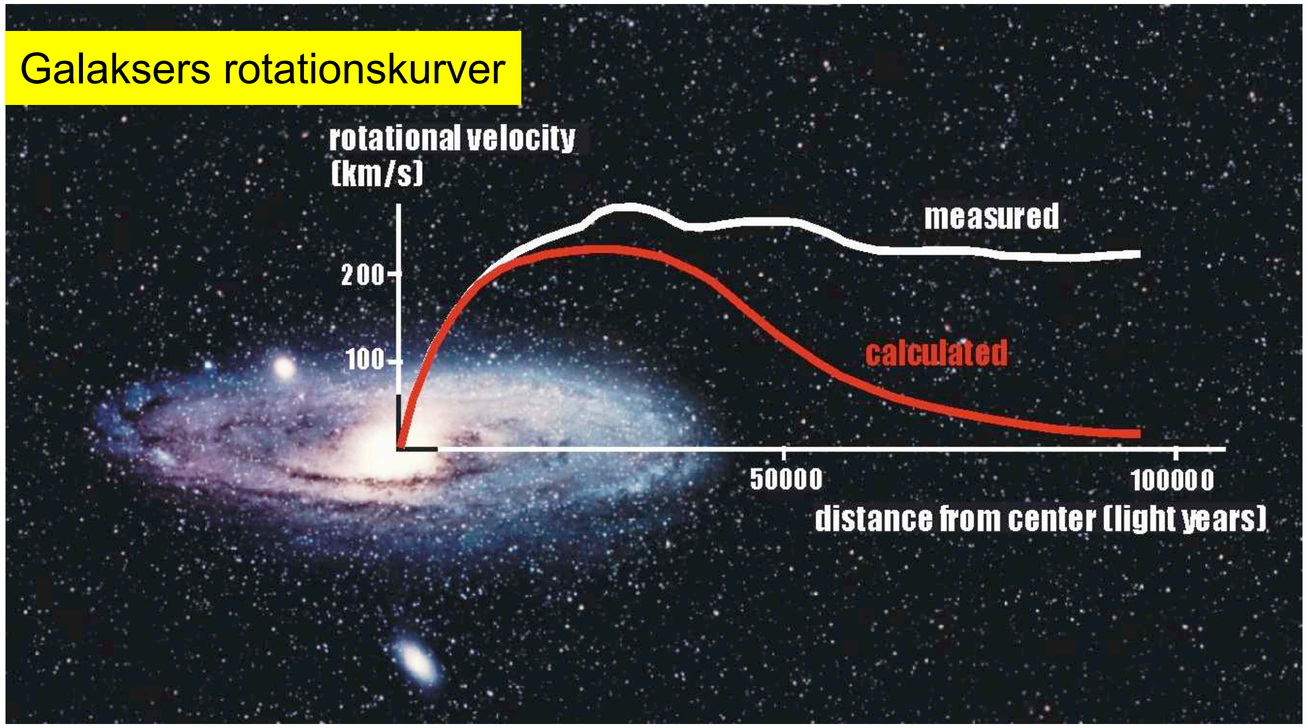
Udsyn

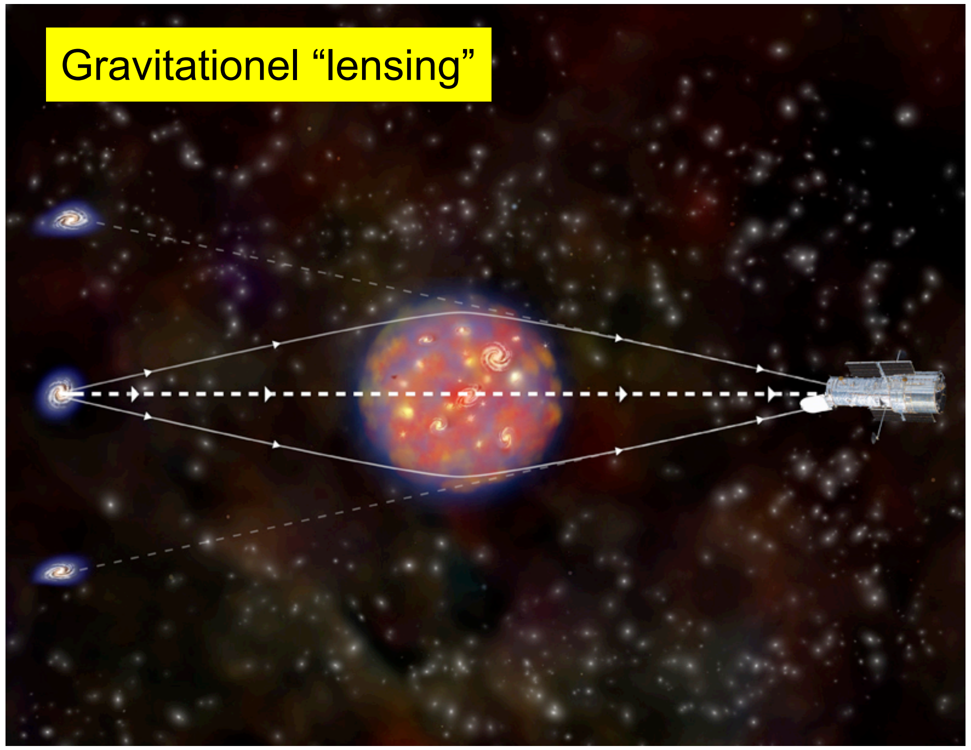
Har vi nået enden af vores færd?

- Med opdagelsen af Higgs-bosonen er partikel-indholdet af Standardmodellen (tilsyneladende) komplet. Betyder det, at vores færd er fuldbyrdet? Har vi nået vort mål? Er dette enden på partikelfysikken?
- Absolut ikke!
- Standardmodellen giver en beskrivelse af fysikken vi betragter, men efterlader en lang mængde fundamentale spørgsmål ubesvarede.

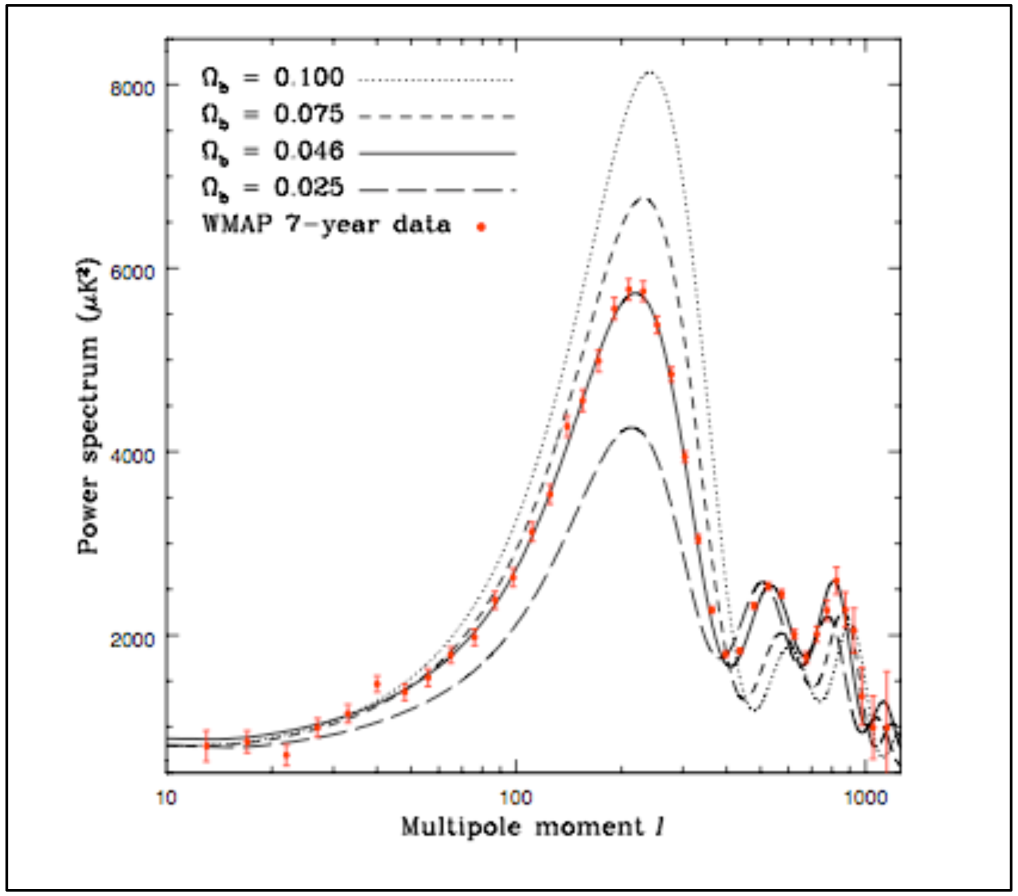
- Eksperimentelle iagttagelser, som fortjener svar:
  - Hvad er mørks stof ?
  - Hvad forklarer dominansen af stof over antistof i Universet
  - Hvad er forklaringen bag de (meget små) neutrino-masser?
- Derudover et “teoretisk” problem:
  - Hierarki-problemet: hvorfor er Higgs-bosonen så let ?

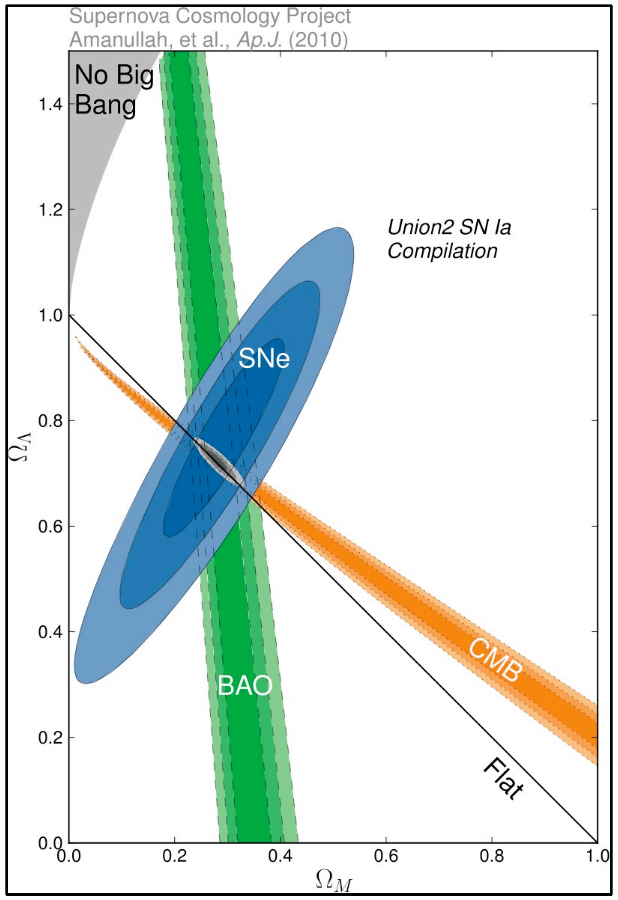
Mørkt stof - overvældende evidens


Galaksers rotationskurver

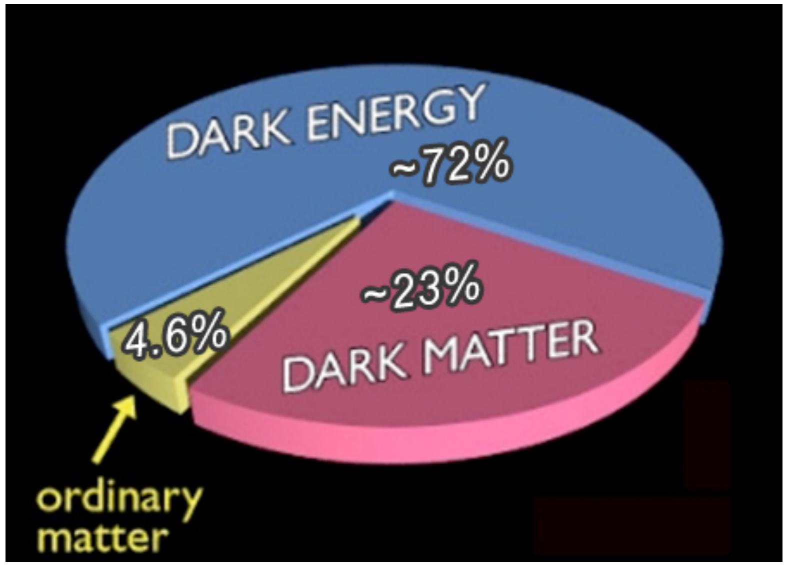

Gravitationel "lensing"

Cosmic microwave background




Supernova Cosmology Project
Amanullah, et al., *Ap.J.* (2010)

Konklusion: Under 20% af al Universets **stof** er ordinær, baryonisk stof. Resten er *"mørkt stof"*.

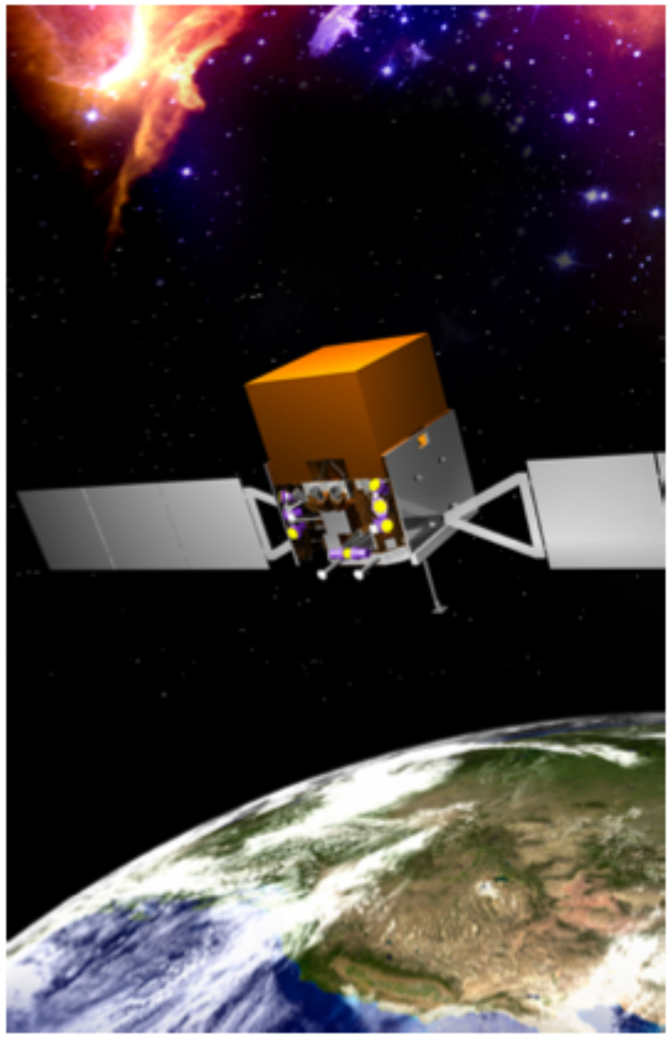


"Mørk energi": spørg ikke mig…

Eftersøgning af mørks stof

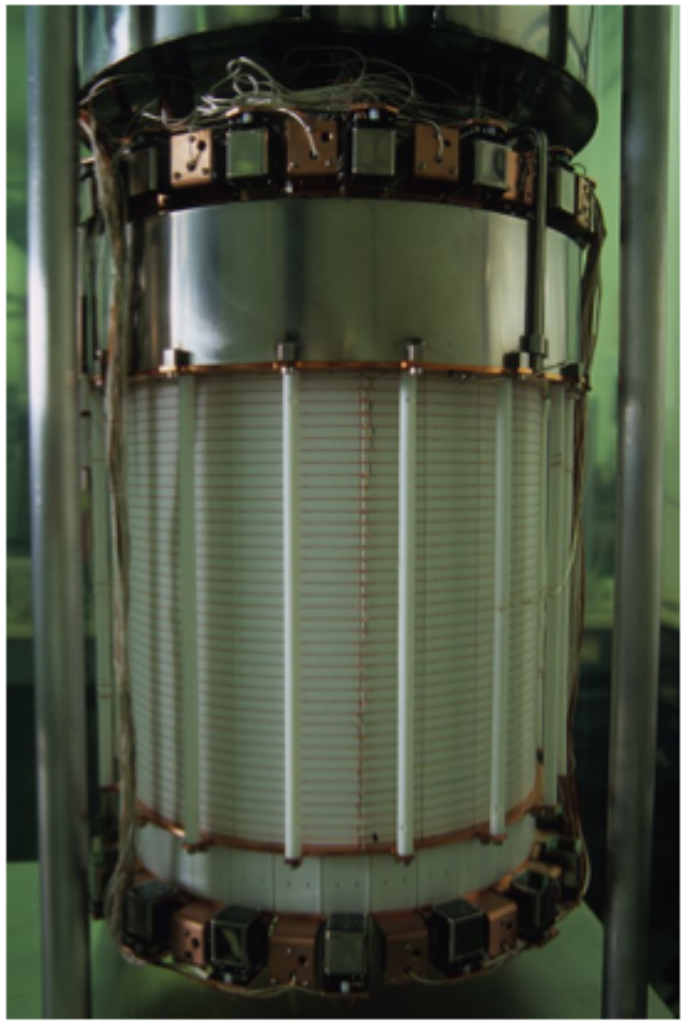
WIMP = Weakly Interacting Massive Particle

- Indirect detection



$\chi\chi \to e^+e^-, p\bar{p}$

- Direct detection



$\chi N \to \chi N$

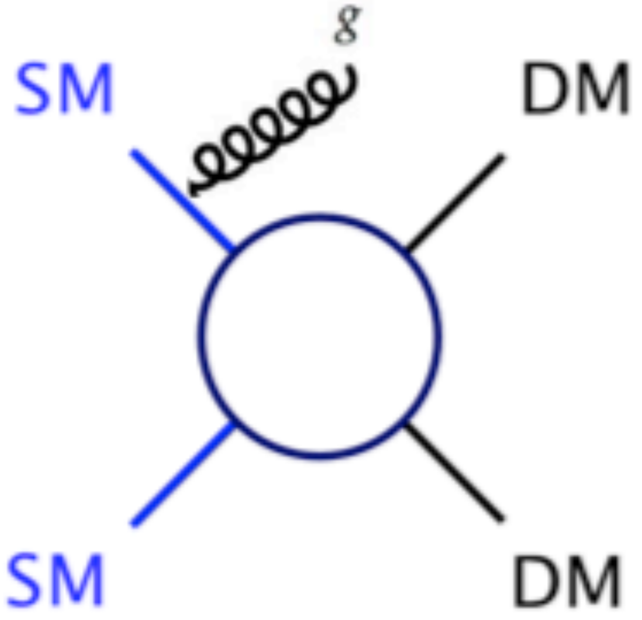
- Production at LHC

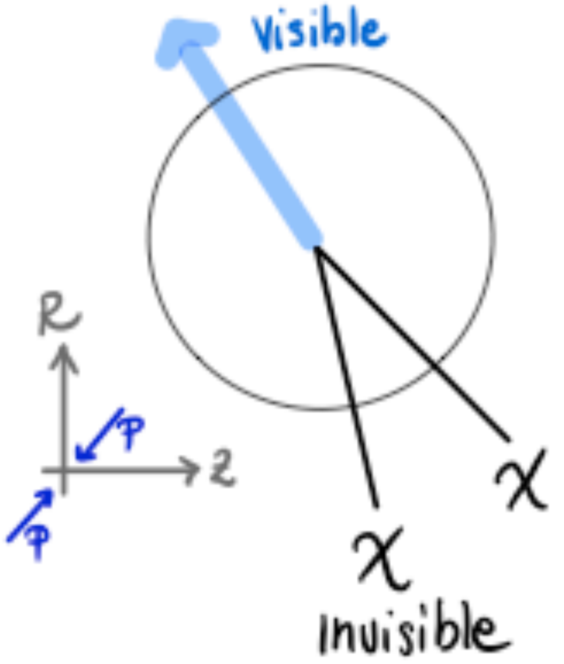
$p + p \to \chi + \text{a lot}$

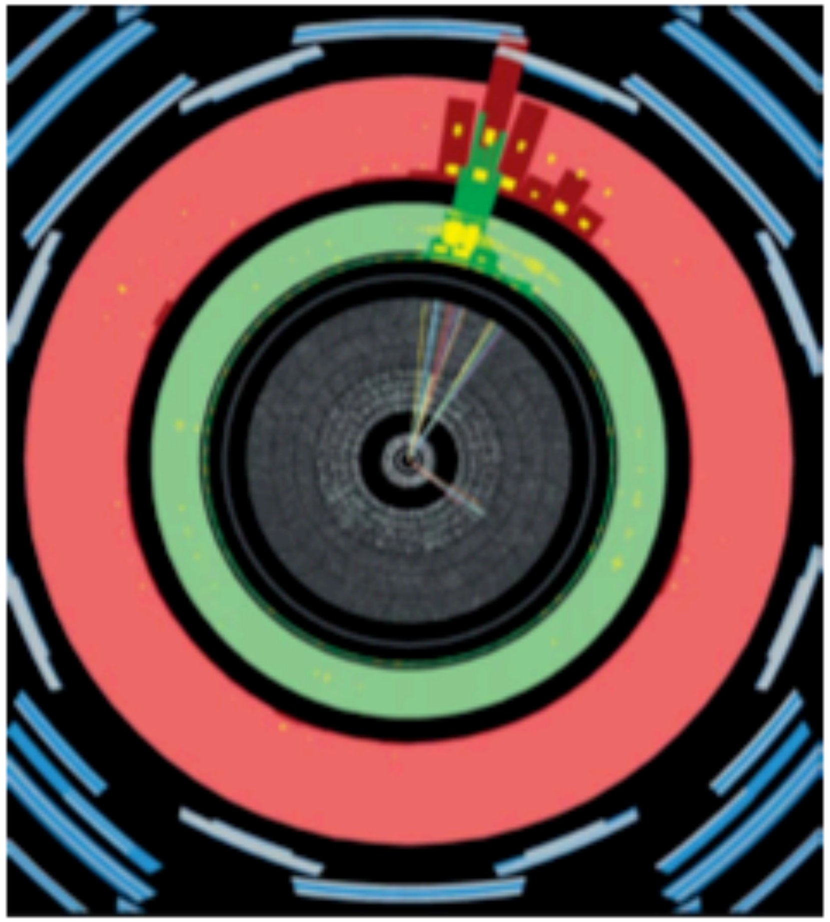
Looking for ~~in~~visible particles at the LHC

Rely on **visible particles** to detect invisible particles

“Mono-X” searches (example)



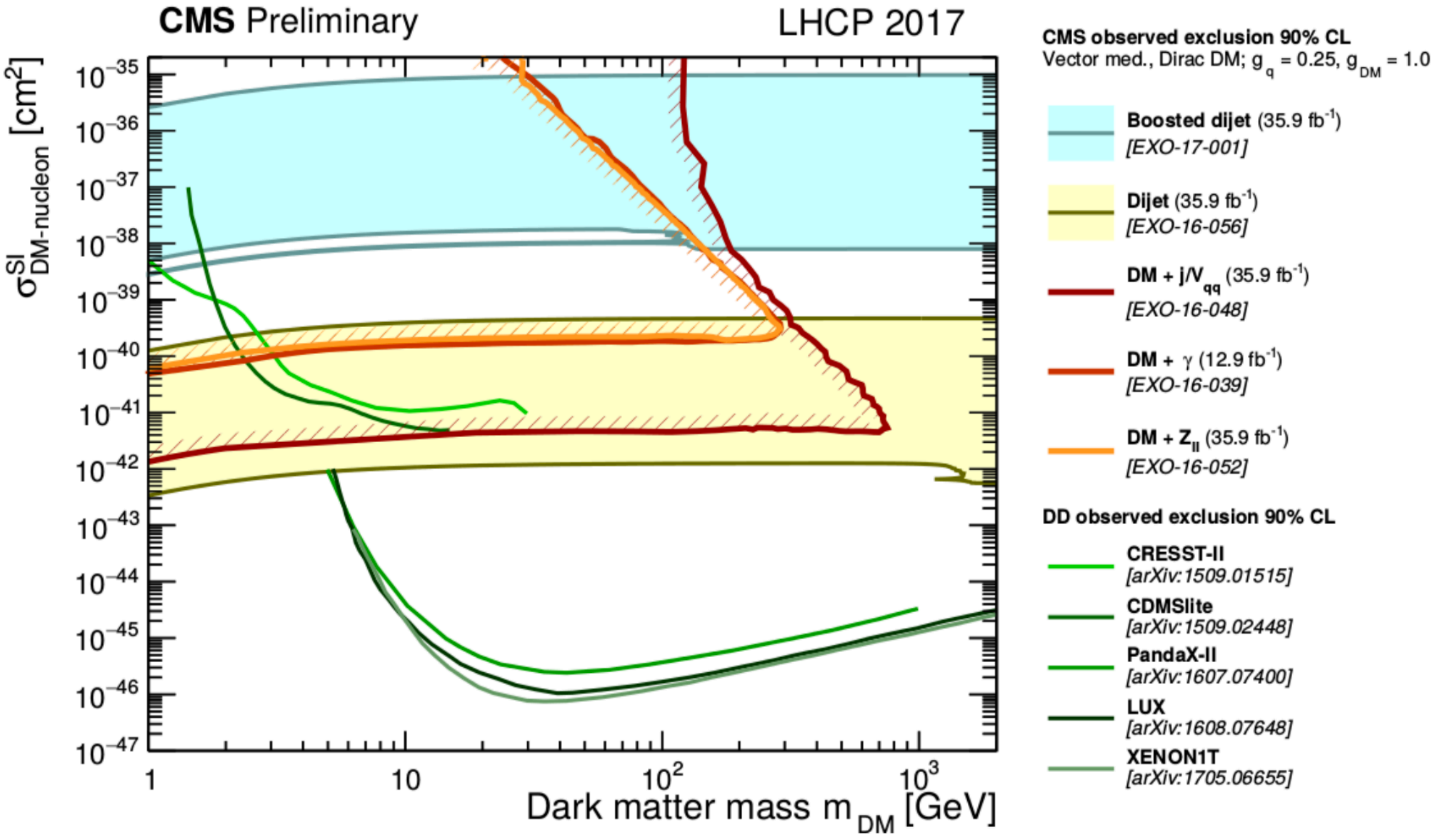




Signature of invisible particles
(like Dark Matter):
missing transverse momentum (E_T^{miss})

Mørkt stof: Status af eftersøgninger

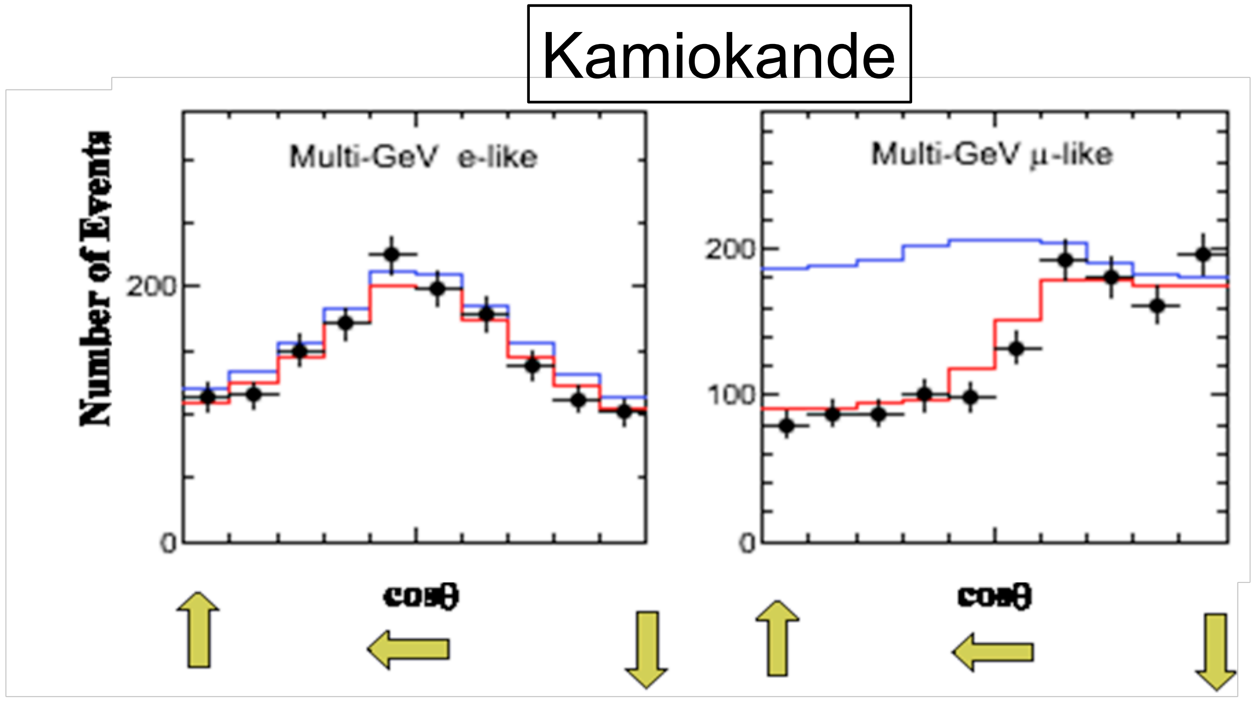
- Mange forskelligartede eftersøgninger
  - Et par eksperimenter mener at have fundet noget, men generelt ikke reproducerbar af andre
  - Opsummeret i et plot af denne type:

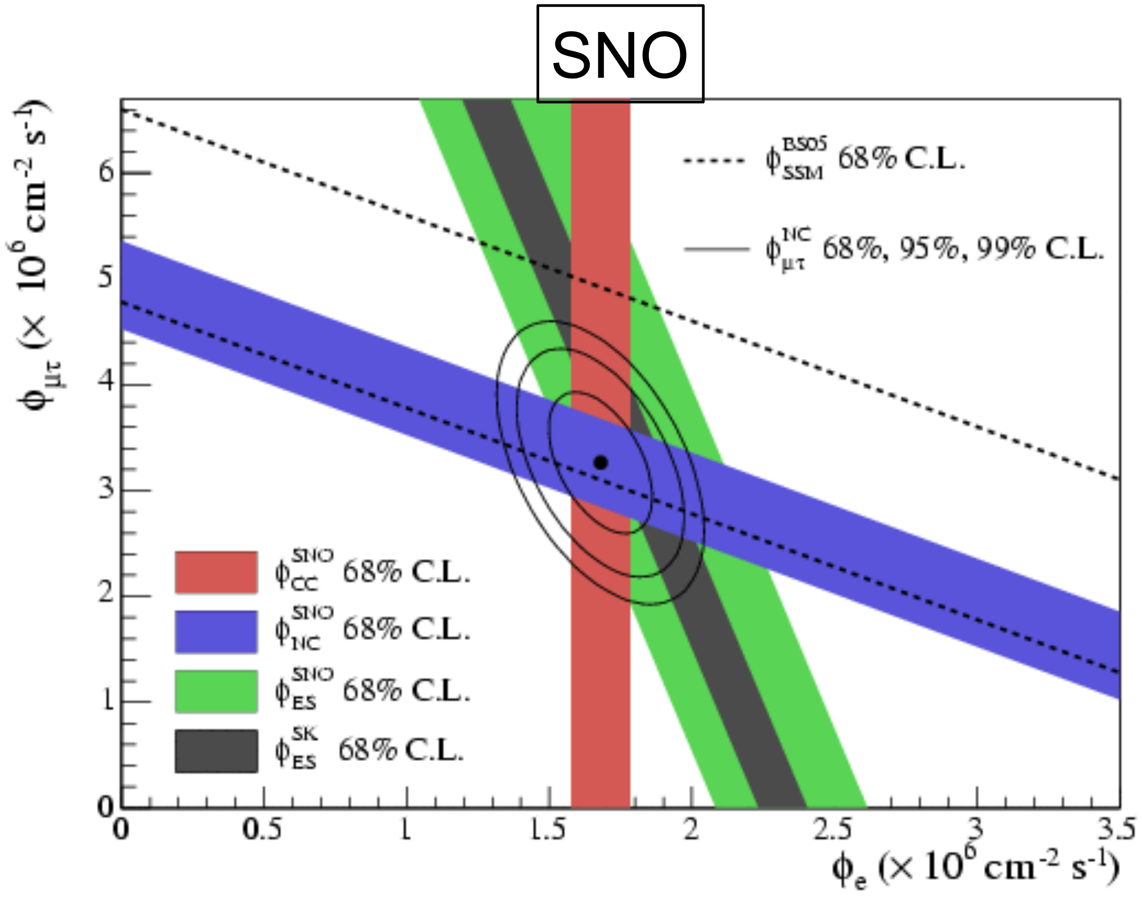


BAU: Baryon-asymmetri i Universet

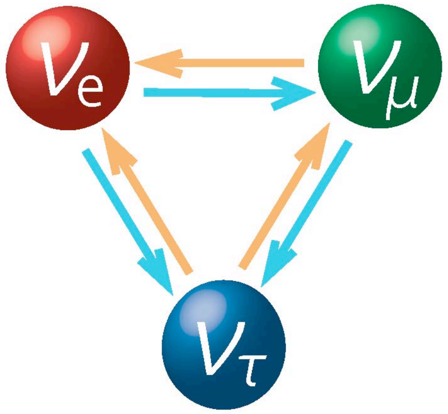
- Ved Big Bang kunne man forvente, at der blev skabt lige store mængde at stof og anti-stof.
- Men idag observerer vi kun stof i Universet, intet anti-stof. Alle galakser synes af bestå af stof.
- Det gængse billede fortæller, at der for hver 1 milliard antistof-partikler blev produceret 1 milliard + 1 partikler
  - De 1 milliard partikel-antipartikel-par fandt hinanden og annihilerede, og blev til stråling
  - Tilbage blev den ene, tiloversblevne partikel, som er det stof vi nu observerer
- Vi har målt (og beskrevet i Standardmodellen) et brud på stof-antistof-symmetri i kvark-sektoren
  - Dette er ikke stærkt nok til at forklare den observerede BAU
- Der mp være endnu et symmetri-bidrag, som vi endnu ikke kender
  - Lepton-sektoren, neutrinoer ?

Neutrinomasser: Oscillationer <=> masser





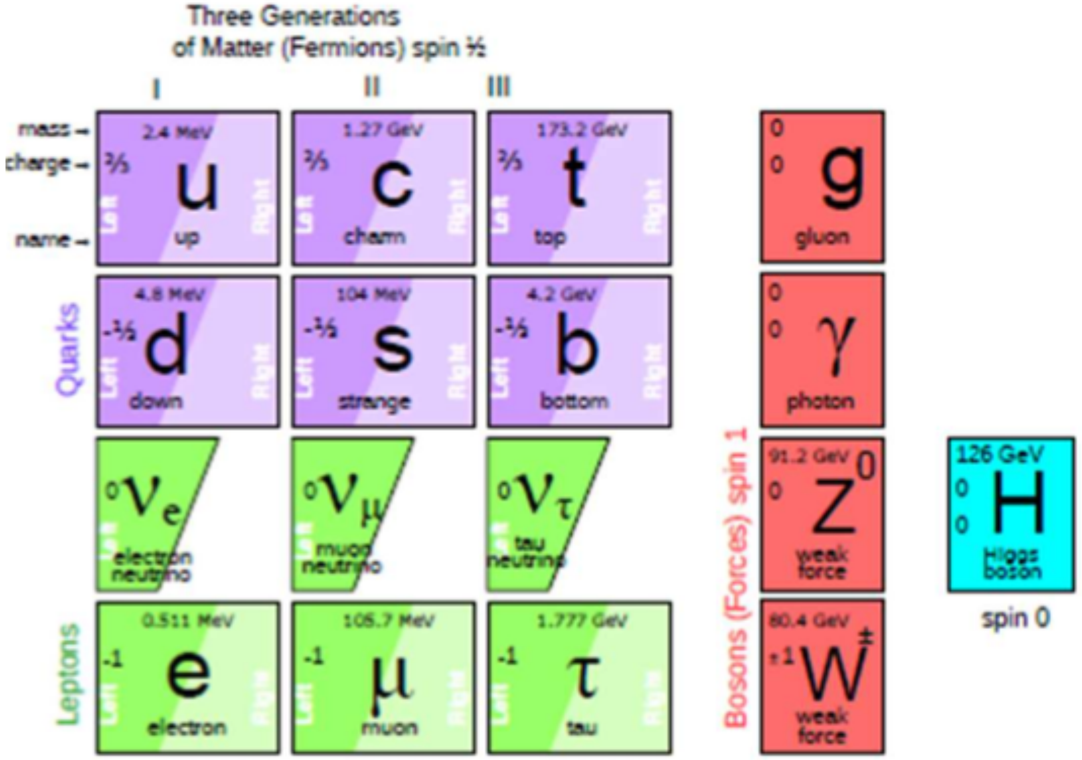
- Gennem fire årtier, massiv evidens for, at neutrinoer skifter identitet under deres rejse
  - Neutrino-oscillationer

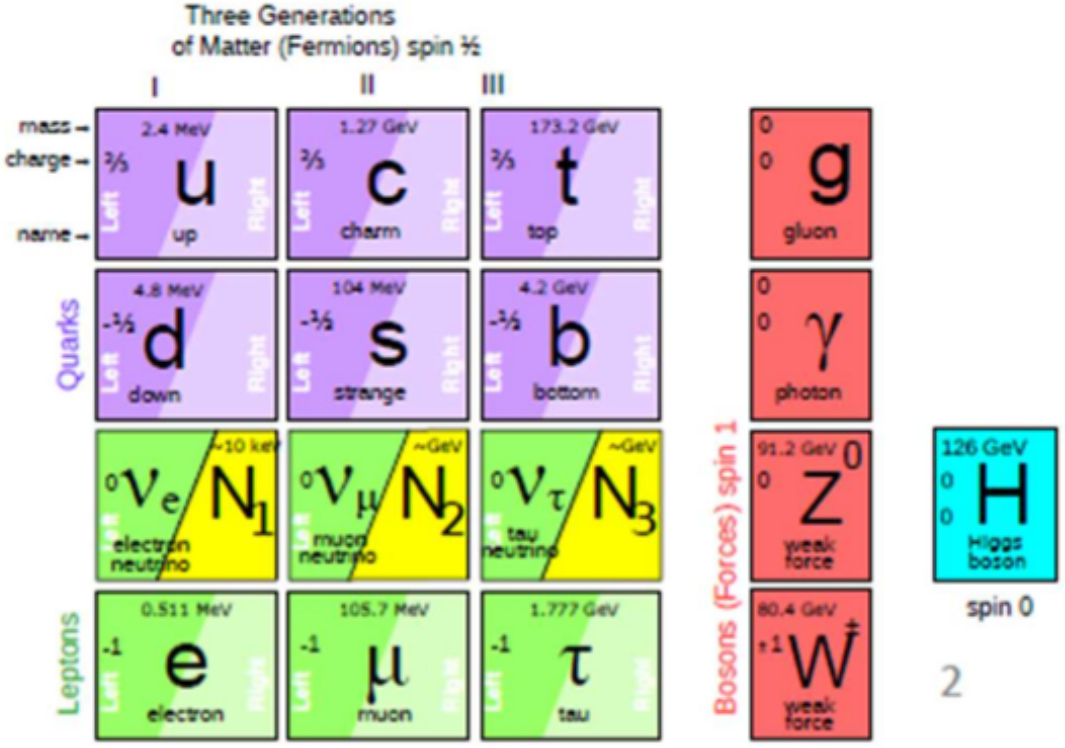


- Oscillationer kun mulige, hvis neutrinoerne har masser
- Neutrinoer vekselvirker gennem svag kraft, men kun venstrehåndende
- Eksisterer højrehåndende neutrinoer
  - Også kaldet “sterile” - ekstrem svag vekselvirkning
  - Teoretisk ukendte masse: meV - ZeV

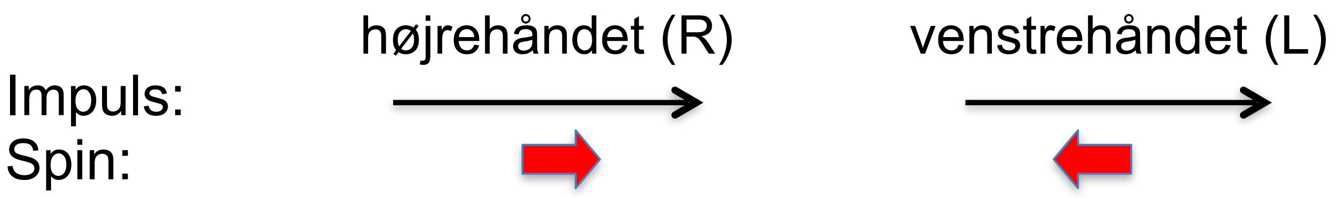
Neutrino-masser

- Standardmodellen er komplet…, men mindst tre brikker synes at mangle





- Alle stoflige partikler (fermioner) eksisterer i to kiraliteter:
  - Højre- og venstrehåndede


højrehåndet (R)

venstrehåndet (L)

Impuls:

Spin:

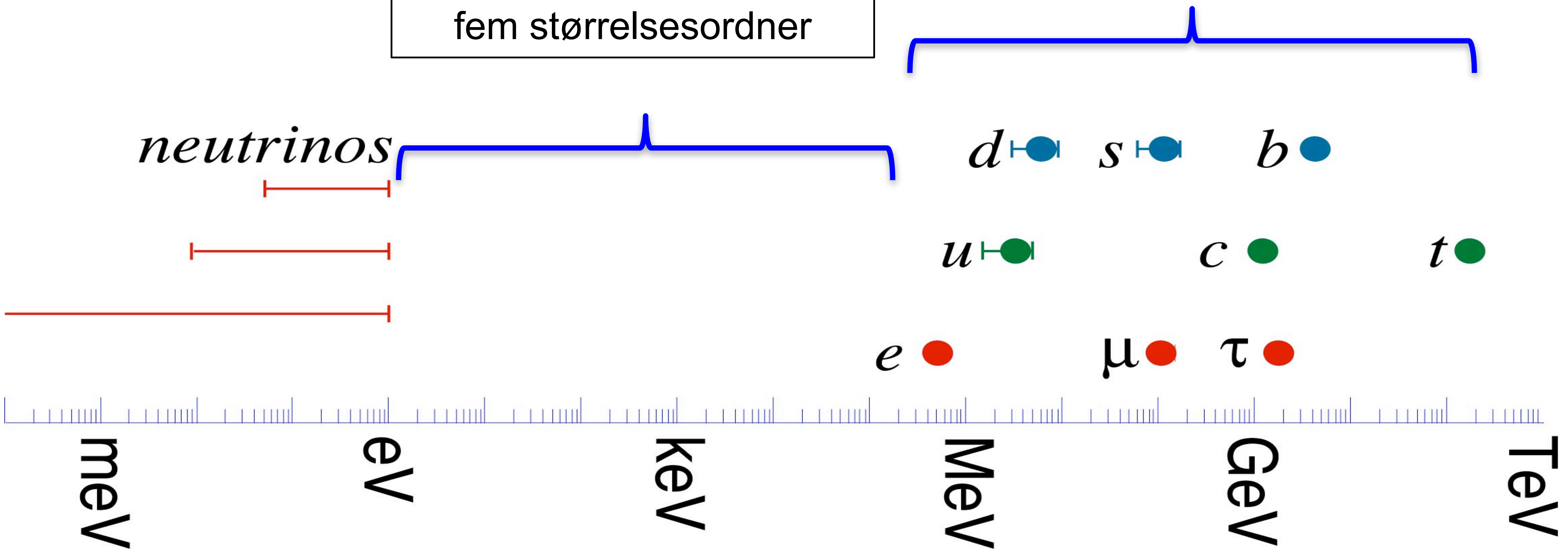
- Kun venstrehåndede (L) fermioner vekselvirker via den svage kraft
  - Højrehåndede neutrinoer ville ikke have nogen (standard) vekselvirkninger

Mekanismen bag neutrinomasser

- Har neutrinomasserne samme forklaring som andre fermionmasser ?
  - Altså Higgs-mekanismen

Fra elektronen og ned til neutrinoerne er der mindst fem størrelsesordner

Masserne af de ladede fermioner spænder over omkring seks størrelsesordner



Udbredt opfattelse, at neutrinoerne spiller en speciel rolle i Standmodellen:

- Ingen “ladninger”: Kan være deres egne antipartikler
- Atypiske små masser: Hvis masse via Higgs-mekanismen, så er deres kobling til Higgs-feltet ekstremt svagt. Hvorfor?

Teoretiske problemer med Higgs-massen

Standardmodellen synes "unaturlig"

Kvantekorrektioner fra "loop diagrams" giver bidrag til Higgs-massen af formen:

$$\underbrace{m^2_{physical}}_{what\ we\ measure} = \underbrace{m^2_h}_{free\ parameter} + \frac{3\lambda}{8\pi}\underbrace{\Lambda^2}_{theory\ cutoff}$$

(125 GeV)^2

(10^{15} GeV)^2, hvis ingen ny fysik under GUT-skalaen

Hvis dette regnestykke skal gå op, skal de to led på højresiden være lige store til en relativ præcision på omkring 10^{-26}.

$$M_H^2 = \mathbf{nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,n60{,}000}$$
$$- \mathbf{nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,nnn,n44{,}375}$$

- "Fine tuning"
- "Naturalness Problem"

En mere komplet list af åbne spørgsmål

The Standard Model : Problems/Open Questions

- ★ **The Standard Model has too many free parameters:**

$$m_{\nu_1}, m_{\nu_2}, m_{\nu_3}, m_e, m_\mu, m_\tau, m_d, m_s, m_b, m_u, m_c, m_t$$

$$\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}, \delta \quad + \quad \lambda, A, \rho, \eta \qquad e, G_F, \theta_W, \alpha_S \qquad m_H, \theta_{CP}$$

- ★ **Why three generations ?**
- ★ **Why $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)$?**
- ★ **Unification of the Forces**
- ★ **Origin of CP violation in early universe ?**
- ★ **What is Dark Matter ?**
- ★ **Why is the weak interaction V-A ?**
- ★ **Why are neutrinos so light ?**
- ★ **Ultimately need to include gravity**

★ **Over the last 25 years particle physics has progressed enormously.**

In the next 10 years we will almost certainly have answers to some of the above questions – maybe not the ones we expect…

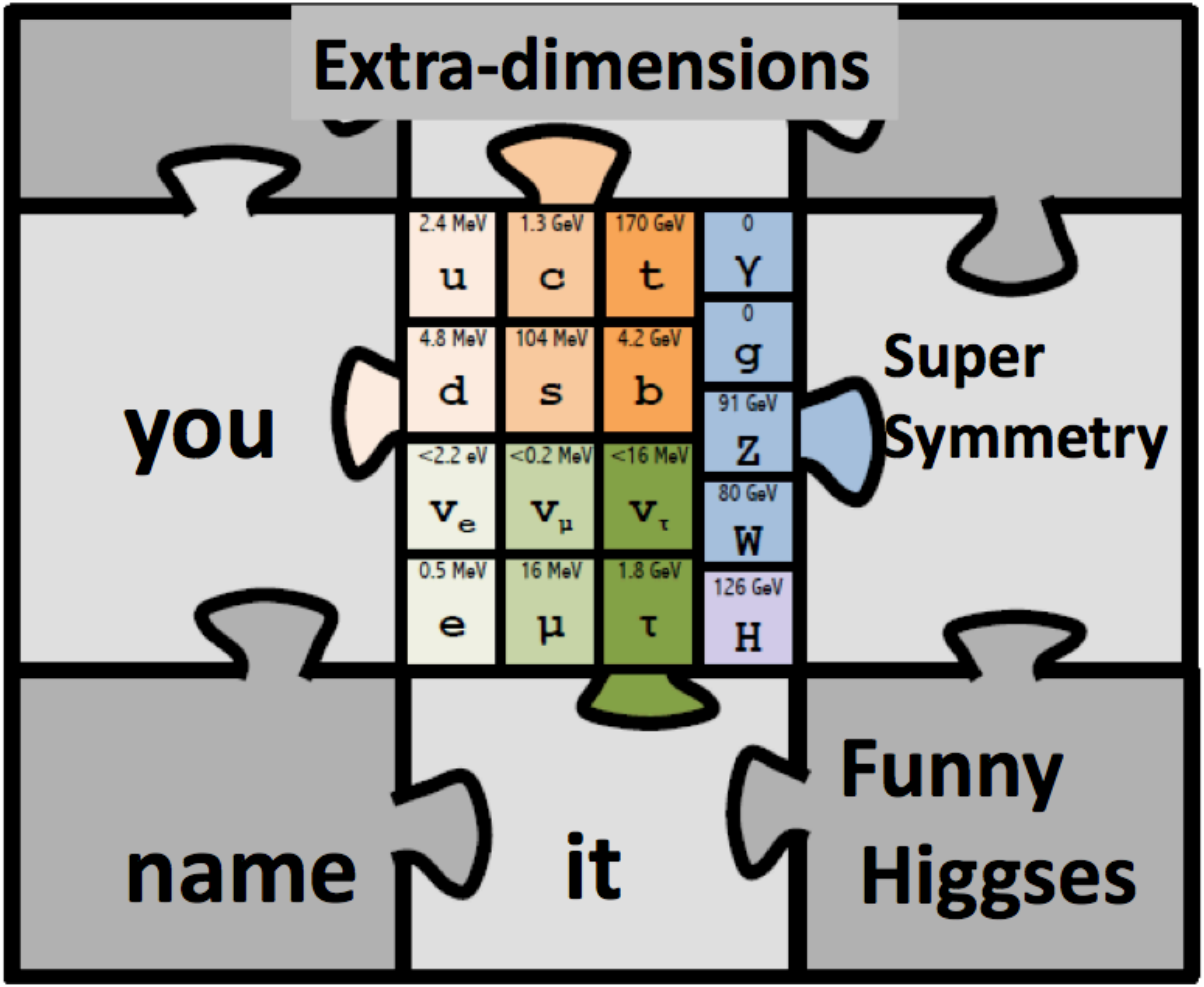
MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Hinsides Standardmodellen

-

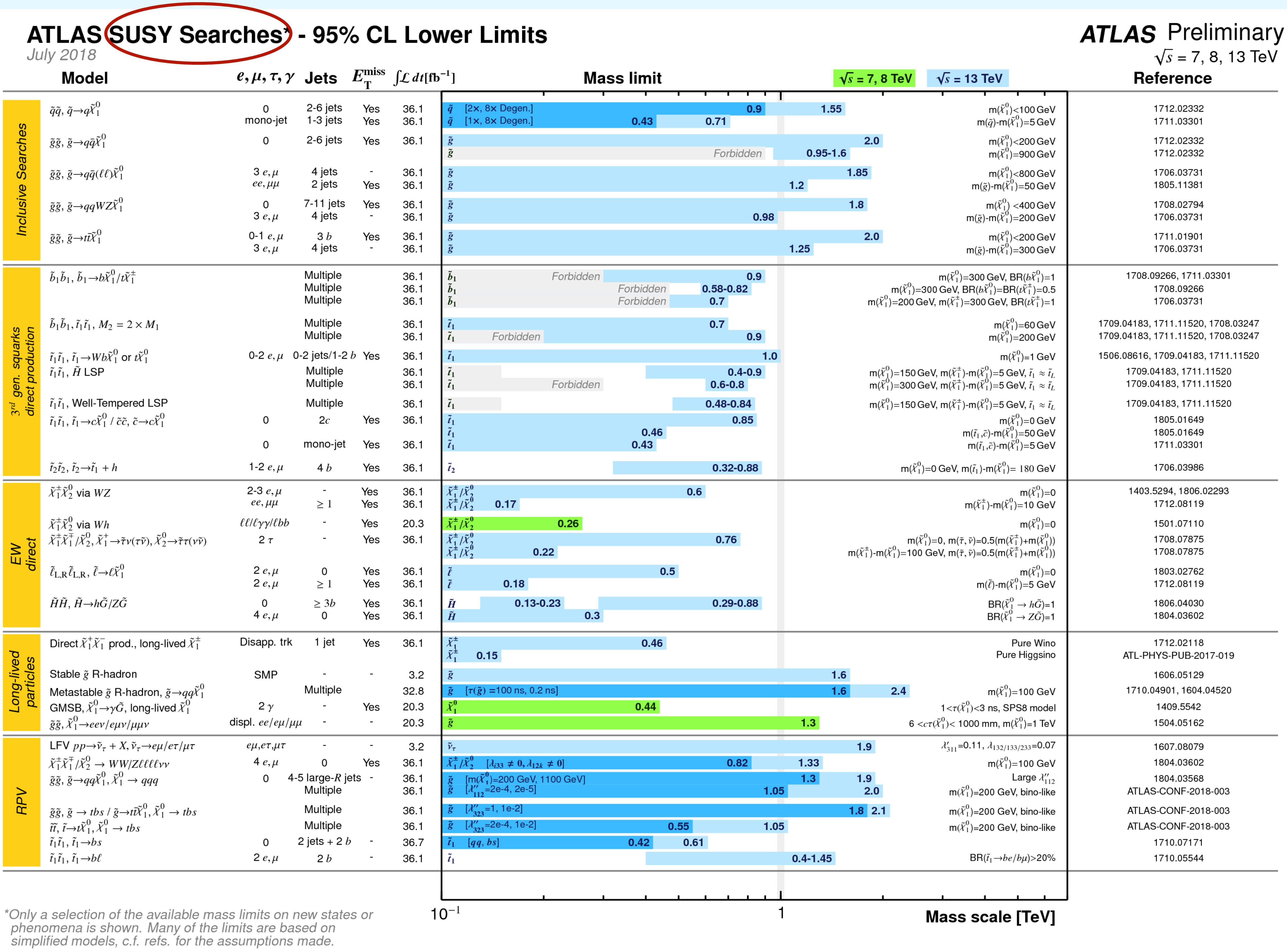
Beyond the Standard Model

Standardmodellen som en del af en større teori?



2.4 MeV u	1.3 GeV c	170 GeV t	0 γ
4.8 MeV d	104 MeV s	4.2 GeV b	0 g
<2.2 eV ν_e	<0.2 MeV ν_μ	<16 MeV ν_τ	91 GeV Z
0.5 MeV e	16 MeV μ	1.8 GeV τ	80 GeV W
			126 GeV H

Vi søger ved LHC, endnu “forgæves” (i)



ATLAS SUSY Searches* - 95% CL Lower Limits

July 2018

***ATLAS* Preliminary**

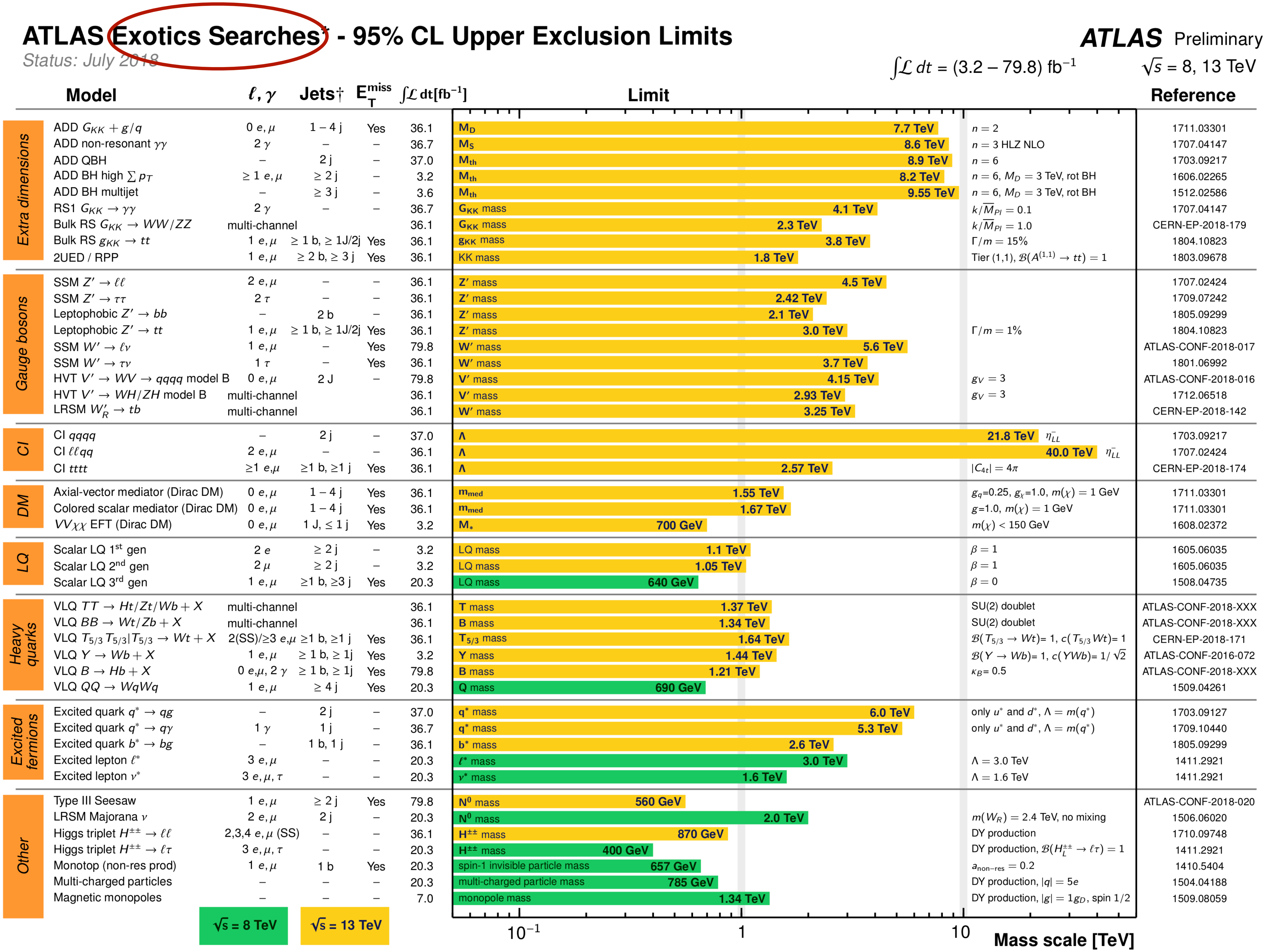
$\sqrt{s}$ = 7, 8, 13 TeV

🟩 $\sqrt{s}$ = 7, 8 TeV 🟦 $\sqrt{s}$ = 13 TeV

	Model	e, μ, τ, γ	Jets	E_T^{miss}	$\int \mathcal{L}\, dt [fb^{-1}]$	Mass limit		Reference
Inclusive Searches	$\tilde q\tilde q, \tilde q\to q\tilde\chi^0_1$	0	2-6 jets	Yes	36.1	$\tilde q$ [2x, 8x Degen.] 0.9 1.55	m($\tilde\chi^0_1$)<100 GeV	1712.02332
		mono-jet	1-3 jets	Yes	36.1	$\tilde q$ [1x, 8x Degen.] 0.43 0.71	m($\tilde q$)-m($\tilde\chi^0_1$)=5 GeV	1711.03301
	$\tilde g\tilde g, \tilde g\to q\bar q\tilde\chi^0_1$	0	2-6 jets	Yes	36.1	$\tilde g$ 2.0	m($\tilde\chi^0_1$)<200 GeV	1712.02332
						$\tilde g$ Forbidden 0.95-1.6	m($\tilde\chi^0_1$)=900 GeV	1712.02332
	$\tilde g\tilde g, \tilde g\to q\bar q(\ell\ell)\tilde\chi^0_1$	3 e,μ	4 jets	-	36.1	$\tilde g$ 1.85	m($\tilde\chi^0_1$)<800 GeV	1706.03731
		$ee,\mu\mu$	2 jets	Yes	36.1	$\tilde g$ 1.2	m($\tilde g$)-m($\tilde\chi^0_1$)=50 GeV	1805.11381
	$\tilde g\tilde g, \tilde g\to qqWZ\tilde\chi^0_1$	0	7-11 jets	Yes	36.1	$\tilde g$ 1.8	m($\tilde\chi^0_1$) <400 GeV	1708.02794
		3 e,μ	4 jets	-	36.1	$\tilde g$ 0.98	m($\tilde g$)-m($\tilde\chi^0_1$)=200 GeV	1706.03731
	$\tilde g\tilde g, \tilde g\to t\bar t\tilde\chi^0_1$	0-1 e,μ	3 b	Yes	36.1	$\tilde g$ 2.0	m($\tilde\chi^0_1$)<200 GeV	1711.01901
		3 e,μ	4 jets	-	36.1	$\tilde g$ 1.25	m($\tilde g$)-m($\tilde\chi^0_1$)=300 GeV	1706.03731
3^{rd} gen. squarks direct production	$\tilde b_1\tilde b_1, \tilde b_1\to b\tilde\chi^0_1/t\tilde\chi^\pm_1$		Multiple		36.1	$\tilde b_1$ Forbidden 0.9	m($\tilde\chi^0_1$)=300 GeV, BR($b\tilde\chi^0_1$)=1	1708.09266, 1711.03301
			Multiple		36.1	$\tilde b_1$ Forbidden 0.58-0.82	m($\tilde\chi^0_1$)=300 GeV, BR($b\tilde\chi^0_1$)=BR($t\tilde\chi^\pm_1$)=0.5	1708.09266
			Multiple		36.1	$\tilde b_1$ Forbidden 0.7	m($\tilde\chi^0_1$)=200 GeV, m($\tilde\chi^\pm_1$)=300 GeV, BR($t\tilde\chi^\pm_1$)=1	1706.03731
	$\tilde b_1\tilde b_1, \tilde t_1\tilde t_1, M_2 = 2\times M_1$		Multiple		36.1	$\tilde t_1$ 0.7	m($\tilde\chi^0_1$)=60 GeV	1709.04183, 1711.11520, 1708.03247
			Multiple		36.1	$\tilde t_1$ Forbidden 0.9	m($\tilde\chi^0_1$)=200 GeV	1709.04183, 1711.11520, 1708.03247
	$\tilde t_1\tilde t_1, \tilde t_1\to Wb\tilde\chi^0_1$ or $t\tilde\chi^0_1$	0-2 e,μ	0-2 jets/1-2 b	Yes	36.1	$\tilde t_1$ 1.0	m($\tilde\chi^0_1$)=1 GeV	1506.08616, 1709.04183, 1711.11520
	$\tilde t_1\tilde t_1, \tilde H$ LSP		Multiple		36.1	$\tilde t_1$ 0.4-0.9	m($\tilde\chi^0_1$)=150 GeV, m($\tilde\chi^\pm_1$)-m($\tilde\chi^0_1$)=5 GeV, $\tilde t_1\approx\tilde t_L$	1709.04183, 1711.11520
			Multiple		36.1	$\tilde t_1$ Forbidden 0.6-0.8	m($\tilde\chi^0_1$)=300 GeV, m($\tilde\chi^\pm_1$)-m($\tilde\chi^0_1$)=5 GeV, $\tilde t_1\approx\tilde t_L$	1709.04183, 1711.11520
	$\tilde t_1\tilde t_1$, Well-Tempered LSP		Multiple		36.1	$\tilde t_1$ 0.48-0.84	m($\tilde\chi^0_1$)=150 GeV, m($\tilde\chi^\pm_1$)-m($\tilde\chi^0_1$)=5 GeV, $\tilde t_1\approx\tilde t_L$	1709.04183, 1711.11520
	$\tilde t_1\tilde t_1, \tilde t_1\to c\tilde\chi^0_1$ / $\tilde c\tilde c, \tilde c\to c\tilde\chi^0_1$	0	$2c$	Yes	36.1	$\tilde t_1$ 0.85	m($\tilde\chi^0_1$)=0 GeV	1805.01649
						$\tilde t_1$ 0.46	m($\tilde t_1,\tilde c$)-m($\tilde\chi^0_1$)=50 GeV	1805.01649
		0	mono-jet	Yes	36.1	$\tilde t_1$ 0.43	m($\tilde t_1,\tilde c$)-m($\tilde\chi^0_1$)=5 GeV	1711.03301
	$\tilde t_2\tilde t_2, \tilde t_2\to\tilde t_1 + h$	1-2 e,μ	4 b	Yes	36.1	$\tilde t_2$ 0.32-0.88	m($\tilde\chi^0_1$)=0 GeV, m($\tilde t_1$)-m($\tilde\chi^0_1$)= 180 GeV	1706.03986
EW direct	$\tilde\chi^\pm_1\tilde\chi^0_2$ via WZ	2-3 e,μ	-	Yes	36.1	$\tilde\chi^\pm_1/\tilde\chi^0_2$ 0.6	m($\tilde\chi^0_1$)=0	1403.5294, 1806.02293
		$ee,\mu\mu$	≥ 1	Yes	36.1	$\tilde\chi^\pm_1/\tilde\chi^0_2$ 0.17	m($\tilde\chi^\pm_1$)-m($\tilde\chi^0_1$)=10 GeV	1712.08119
	$\tilde\chi^\pm_1\tilde\chi^0_2$ via Wh	$\ell\ell/\ell\gamma\gamma/\ell bb$	-	Yes	20.3	$\tilde\chi^\pm_1/\tilde\chi^0_2$ 0.26	m($\tilde\chi^0_1$)=0	1501.07110
	$\tilde\chi^\pm_1\tilde\chi^\mp_1/\tilde\chi^0_2, \tilde\chi^+_1\to\tilde\tau\nu(\tau\tilde\nu), \tilde\chi^0_2\to\tilde\tau\tau(\nu\tilde\nu)$	2 τ	-	Yes	36.1	$\tilde\chi^\pm_1/\tilde\chi^0_2$ 0.76	m($\tilde\chi^0_1$)=0, m($\tilde\tau,\tilde\nu$)=0.5(m($\tilde\chi^\pm_1$)+m($\tilde\chi^0_1$))	1708.07875
						$\tilde\chi^\pm_1/\tilde\chi^0_2$ 0.22	m($\tilde\chi^\pm_1$)-m($\tilde\chi^0_1$)=100 GeV, m($\tilde\tau,\tilde\nu$)=0.5(m($\tilde\chi^\pm_1$)+m($\tilde\chi^0_1$))	1708.07875
	$\tilde\ell_{L,R}\tilde\ell_{L,R}, \tilde\ell\to\ell\tilde\chi^0_1$	2 e,μ	0	Yes	36.1	$\tilde\ell$ 0.5	m($\tilde\chi^0_1$)=0	1803.02762
		2 e,μ	≥ 1	Yes	36.1	$\tilde\ell$ 0.18	m($\tilde\ell$)-m($\tilde\chi^0_1$)=5 GeV	1712.08119
	$\tilde H\tilde H, \tilde H\to h\tilde G/Z\tilde G$	0	$\geq 3b$	Yes	36.1	$\tilde H$ 0.13-0.23 0.29-0.88	BR($\tilde\chi^0_1\to h\tilde G$)=1	1806.04030
		4 e,μ	0	Yes	36.1	$\tilde H$ 0.3	BR($\tilde\chi^0_1\to Z\tilde G$)=1	1804.03602
Long-lived particles	Direct $\tilde\chi^+_1\tilde\chi^-_1$ prod., long-lived $\tilde\chi^\pm_1$	Disapp. trk	1 jet	Yes	36.1	$\tilde\chi^\pm_1$ 0.46	Pure Wino	1712.02118
						$\tilde\chi^\pm_1$ 0.15	Pure Higgsino	ATL-PHYS-PUB-2017-019
	Stable $\tilde g$ R-hadron	SMP	-	-	3.2	$\tilde g$ 1.6		1606.05129
	Metastable $\tilde g$ R-hadron, $\tilde g\to qq\tilde\chi^0_1$		Multiple		32.8	$\tilde g$ [$\tau(\tilde g)$ =100 ns, 0.2 ns] 1.6 2.4	m($\tilde\chi^0_1$)=100 GeV	1710.04901, 1604.04520
	GMSB, $\tilde\chi^0_1\to\gamma\tilde G$, long-lived $\tilde\chi^0_1$	2 γ	-	Yes	20.3	$\tilde\chi^0_1$ 0.44	1<$\tau(\tilde\chi^0_1)$<3 ns, SPS8 model	1409.5542
	$\tilde g\tilde g, \tilde\chi^0_1\to ee\nu/e\mu\nu/\mu\mu\nu$	displ. $ee/e\mu/\mu\mu$	-	-	20.3	$\tilde g$ 1.3	6 <$c\tau(\tilde\chi^0_1)$< 1000 mm, m($\tilde\chi^0_1$)=1 TeV	1504.05162
RPV	LFV $pp\to\tilde\nu_\tau + X, \tilde\nu_\tau\to e\mu/e\tau/\mu\tau$	$e\mu,e\tau,\mu\tau$	-	-	3.2	$\tilde\nu_\tau$ 1.9	λ'_{311}=0.11, $\lambda_{132/133/233}$=0.07	1607.08079
	$\tilde\chi^\pm_1\tilde\chi^\mp_1/\tilde\chi^0_2\to WW/Z\ell\ell\ell\ell\nu\nu$	4 e,μ	0	Yes	36.1	$\tilde\chi^\pm_1/\tilde\chi^0_2$ [$\lambda_{i33}\neq 0, \lambda_{12k}\neq 0$] 0.82 1.33	m($\tilde\chi^0_1$)=100 GeV	1804.03602
	$\tilde g\tilde g, \tilde g\to qq\tilde\chi^0_1, \tilde\chi^0_1\to qqq$	0	4-5 large-R jets	-	36.1	$\tilde g$ [m($\tilde\chi^0_1$)=200 GeV, 1100 GeV] 1.3 1.9	Large λ''_{112}	1804.03568
			Multiple		36.1	$\tilde g$ [λ''_{112}=2e-4, 2e-5] 1.05 2.0	m($\tilde\chi^0_1$)=200 GeV, bino-like	ATLAS-CONF-2018-003
	$\tilde g\tilde g, \tilde g\to tbs$ / $\tilde g\to t\bar t\tilde\chi^0_1, \tilde\chi^0_1\to tbs$		Multiple		36.1	$\tilde g$ [λ''_{323}=1, 1e-2] 1.8 2.1	m($\tilde\chi^0_1$)=200 GeV, bino-like	ATLAS-CONF-2018-003
	$\tilde t\tilde t, \tilde t\to t\tilde\chi^0_1, \tilde\chi^0_1\to tbs$		Multiple		36.1	$\tilde g$ [λ''_{323}=2e-4, 1e-2] 0.55 1.05	m($\tilde\chi^0_1$)=200 GeV, bino-like	ATLAS-CONF-2018-003
	$\tilde t_1\tilde t_1, \tilde t_1\to bs$	0	2 jets + 2 b	-	36.7	$\tilde t_1$ [qq, bs] 0.42 0.61		1710.07171
	$\tilde t_1\tilde t_1, \tilde t_1\to b\ell$	2 e,μ	2 b	-	36.1	$\tilde t_1$ 0.4-1.45	BR($\tilde t_1\to be/b\mu$)>20%	1710.05544

*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. Many of the limits are based on simplified models, c.f. refs. for the assumptions made.

Vi søger ved LHC, endnu “forgæves” (ii)



ATLAS Exotics Searches* - 95% CL Upper Exclusion Limits

Status: July 2018

ATLAS Preliminary

$\int \mathcal{L}\,dt$ = (3.2 – 79.8) fb^{-1} $\sqrt{s}$ = 8, 13 TeV

	Model	ℓ,γ	Jets†	E_T^{miss}	$\int\mathcal{L}\,dt[\text{fb}^{-1}]$	Limit		Reference
Extra dimensions	ADD $G_{KK}+g/q$	0 e,μ	1 – 4 j	Yes	36.1	🟨 M_D 7.7 TeV	$n=2$	1711.03301
	ADD non-resonant $\gamma\gamma$	2 γ	–	–	36.7	🟨 M_S 8.6 TeV	$n=3$ HLZ NLO	1707.04147
	ADD QBH	–	2 j	–	37.0	🟨 M_{th} 8.9 TeV	$n=6$	1703.09217
	ADD BH high $\sum p_T$	≥ 1 e,μ	≥ 2 j	–	3.2	🟨 M_{th} 8.2 TeV	$n=6$, $M_D=3$ TeV, rot BH	1606.02265
	ADD BH multijet	–	≥ 3 j	–	3.6	🟨 M_{th} 9.55 TeV	$n=6$, $M_D=3$ TeV, rot BH	1512.02586
	RS1 $G_{KK}\to\gamma\gamma$	2 γ	–	–	36.7	🟨 G_{KK} mass 4.1 TeV	$k/\overline{M}_{Pl}=0.1$	1707.04147
	Bulk RS $G_{KK}\to WW/ZZ$	multi-channel			36.1	🟨 G_{KK} mass 2.3 TeV	$k/\overline{M}_{Pl}=1.0$	CERN-EP-2018-179
	Bulk RS $g_{KK}\to tt$	1 e,μ	≥ 1 b, ≥ 1J/2j	Yes	36.1	🟨 g_{KK} mass 3.8 TeV	$\Gamma/m=15\%$	1804.10823
	2UED / RPP	1 e,μ	≥ 2 b, ≥ 3 j	Yes	36.1	🟨 KK mass 1.8 TeV	Tier (1,1), $\mathcal{B}(A^{(1,1)}\to tt)=1$	1803.09678
Gauge bosons	SSM $Z'\to\ell\ell$	2 e,μ	–	–	36.1	🟨 Z' mass 4.5 TeV		1707.02424
	SSM $Z'\to\tau\tau$	2 τ	–	–	36.1	🟨 Z' mass 2.42 TeV		1709.07242
	Leptophobic $Z'\to bb$	–	2 b	–	36.1	🟨 Z' mass 2.1 TeV		1805.09299
	Leptophobic $Z'\to tt$	1 e,μ	≥ 1 b, ≥ 1J/2j	Yes	36.1	🟨 Z' mass 3.0 TeV	$\Gamma/m=1\%$	1804.10823
	SSM $W'\to\ell\nu$	1 e,μ	–	Yes	79.8	🟨 W' mass 5.6 TeV		ATLAS-CONF-2018-017
	SSM $W'\to\tau\nu$	1 τ	–	Yes	36.1	🟨 W' mass 3.7 TeV		1801.06992
	HVT $V'\to WV\to qqqq$ model B	0 e,μ	2 J	–	79.8	🟨 V' mass 4.15 TeV	$g_V=3$	ATLAS-CONF-2018-016
	HVT $V'\to WH/ZH$ model B	multi-channel			36.1	🟨 V' mass 2.93 TeV	$g_V=3$	1712.06518
	LRSM $W'_R\to tb$	multi-channel			36.1	🟨 W' mass 3.25 TeV		CERN-EP-2018-142
CI	CI $qqqq$	–	2 j	–	37.0	🟨 Λ 21.8 TeV η_{LL}^{-}		1703.09217
	CI $\ell\ell qq$	2 e,μ	–	–	36.1	🟨 Λ 40.0 TeV η_{LL}^{-}		1707.02424
	CI $tttt$	$\geq$1 e,μ	$\geq$1 b, $\geq$1 j	Yes	36.1	🟨 Λ 2.57 TeV	$\lvert C_{4t}\rvert=4\pi$	CERN-EP-2018-174
DM	Axial-vector mediator (Dirac DM)	0 e,μ	1 – 4 j	Yes	36.1	🟨 m_{med} 1.55 TeV	g_q=0.25, g_χ=1.0, $m(\chi)=1$ GeV	1711.03301
	Colored scalar mediator (Dirac DM)	0 e,μ	1 – 4 j	Yes	36.1	🟨 m_{med} 1.67 TeV	g=1.0, $m(\chi)=1$ GeV	1711.03301
	$VV\chi\chi$ EFT (Dirac DM)	0 e,μ	1 J, ≤ 1 j	Yes	3.2	🟨 M_* 700 GeV	$m(\chi)<150$ GeV	1608.02372
LQ	Scalar LQ 1st gen	2 e	≥ 2 j	–	3.2	🟨 LQ mass 1.1 TeV	$\beta=1$	1605.06035
	Scalar LQ 2nd gen	2 μ	≥ 2 j	–	3.2	🟨 LQ mass 1.05 TeV	$\beta=1$	1605.06035
	Scalar LQ 3rd gen	1 e,μ	$\geq$1 b, $\geq$3 j	Yes	20.3	🟩 LQ mass 640 GeV	$\beta=0$	1508.04735
Heavy quarks	VLQ $TT\to Ht/Zt/Wb+X$	multi-channel			36.1	🟨 T mass 1.37 TeV	SU(2) doublet	ATLAS-CONF-2018-XXX
	VLQ $BB\to Wt/Zb+X$	multi-channel			36.1	🟨 B mass 1.34 TeV	SU(2) doublet	ATLAS-CONF-2018-XXX
	VLQ $T_{5/3}T_{5/3}\lvert T_{5/3}\to Wt+X$	2(SS)/$\geq$3 e,μ	$\geq$1 b, $\geq$1 j	Yes	36.1	🟨 $T_{5/3}$ mass 1.64 TeV	$\mathcal{B}(T_{5/3}\to Wt)$= 1, $c(T_{5/3}Wt)$= 1	CERN-EP-2018-171
	VLQ $Y\to Wb+X$	1 e,μ	$\geq$ 1 b, $\geq$ 1j	Yes	3.2	🟨 Y mass 1.44 TeV	$\mathcal{B}(Y\to Wb)$= 1, $c(YWb)$= 1/$\sqrt{2}$	ATLAS-CONF-2016-072
	VLQ $B\to Hb+X$	0 e,μ, 2 γ	$\geq$ 1 b, $\geq$ 1j	Yes	79.8	🟨 B mass 1.21 TeV	κ_B= 0.5	ATLAS-CONF-2018-XXX
	VLQ $QQ\to WqWq$	1 e,μ	$\geq$ 4 j	Yes	20.3	🟩 Q mass 690 GeV		1509.04261
Excited fermions	Excited quark $q^*\to qg$	–	2 j	–	37.0	🟨 q^* mass 6.0 TeV	only u^* and d^*, $\Lambda=m(q^*)$	1703.09127
	Excited quark $q^*\to q\gamma$	1 γ	1 j	–	36.7	🟨 q^* mass 5.3 TeV	only u^* and d^*, $\Lambda=m(q^*)$	1709.10440
	Excited quark $b^*\to bg$	–	1 b, 1 j	–	36.1	🟨 b^* mass 2.6 TeV		1805.09299
	Excited lepton ℓ^*	3 e,μ	–	–	20.3	🟩 ℓ^* mass 3.0 TeV	$\Lambda=3.0$ TeV	1411.2921
	Excited lepton ν^*	3 e,μ,τ	–	–	20.3	🟩 ν^* mass 1.6 TeV	$\Lambda=1.6$ TeV	1411.2921
Other	Type III Seesaw	1 e,μ	$\geq$ 2 j	Yes	79.8	🟨 N^0 mass 560 GeV		ATLAS-CONF-2018-020
	LRSM Majorana ν	2 e,μ	2 j	–	20.3	🟩 N^0 mass 2.0 TeV	$m(W_R)=2.4$ TeV, no mixing	1506.06020
	Higgs triplet $H^{\pm\pm}\to\ell\ell$	2,3,4 e,μ (SS)	–	–	36.1	🟨 $H^{\pm\pm}$ mass 870 GeV	DY production	1710.09748
	Higgs triplet $H^{\pm\pm}\to\ell\tau$	3 e,μ,τ	–	–	20.3	🟩 $H^{\pm\pm}$ mass 400 GeV	DY production, $\mathcal{B}(H_L^{\pm\pm}\to\ell\tau)=1$	1411.2921
	Monotop (non-res prod)	1 e,μ	1 b	Yes	20.3	🟩 spin-1 invisible particle mass 657 GeV	$a_{\text{non-res}}=0.2$	1410.5404
	Multi-charged particles	–	–	–	20.3	🟩 multi-charged particle mass 785 GeV	DY production, $\lvert q\rvert=5e$	1504.04188
	Magnetic monopoles	–	–	–	7.0	🟩 monopole mass 1.34 TeV	DY production, $\lvert g\rvert=1g_D$, spin 1/2	1509.08059

🟩 $\sqrt{s}$ = 8 TeV 🟨 $\sqrt{s}$ = 13 TeV

**Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown.*

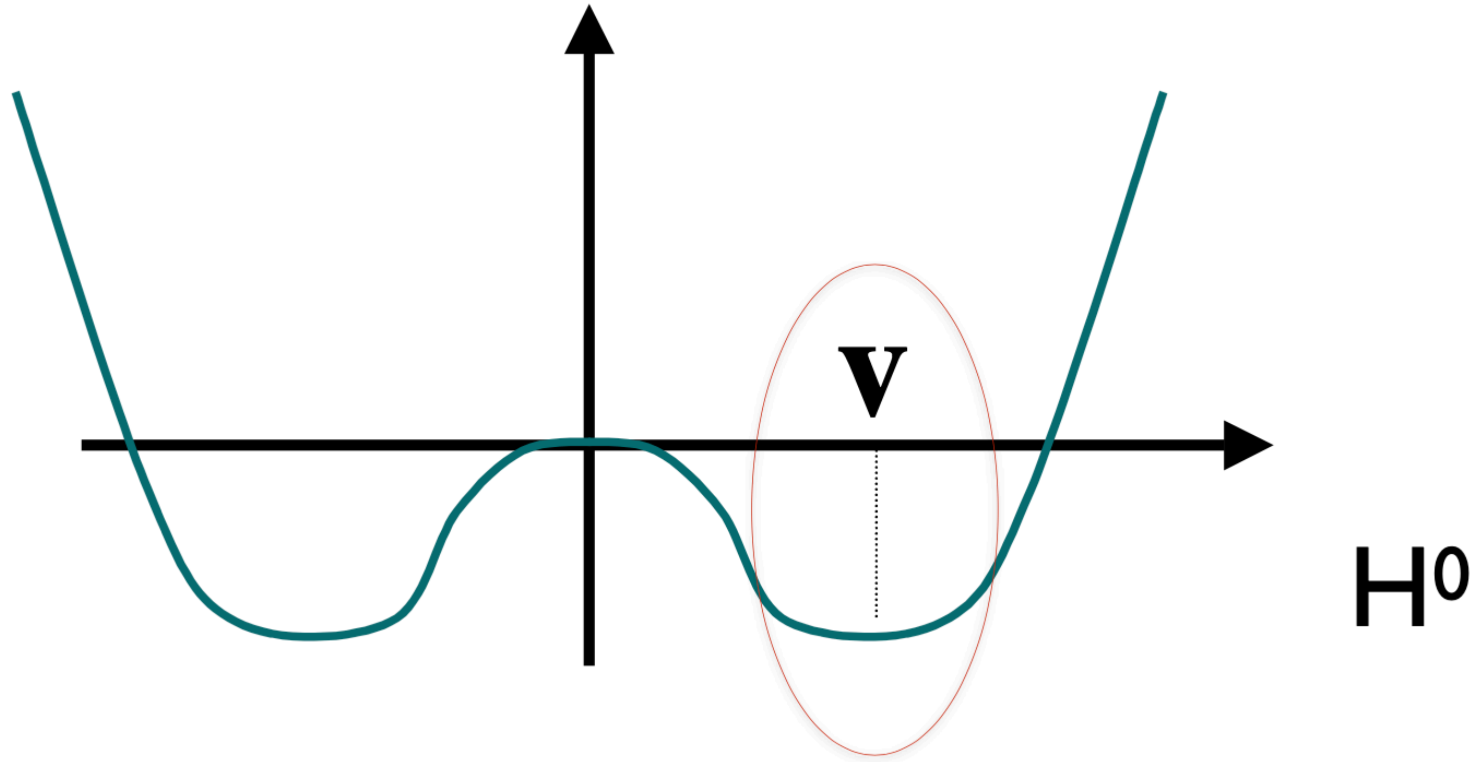
†Small-radius (large-radius) jets are denoted by the letter j (J).

But Where Is Everybody?

Nima Arkani-Hamed

Tilbage til Higgs-mekanismen

Hvem står bag den meksikanske hat ?

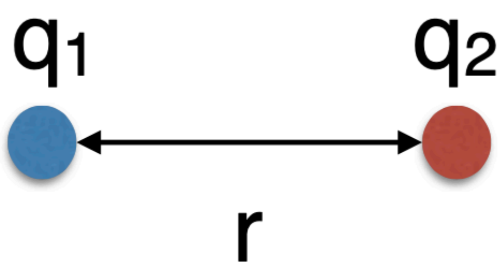


$$V(H) = -\mu^2 |H|^2 + \lambda |H|^4$$

Who ordered that ?

Elektromagnetisme vs. Higgs

Elektromagnetisme



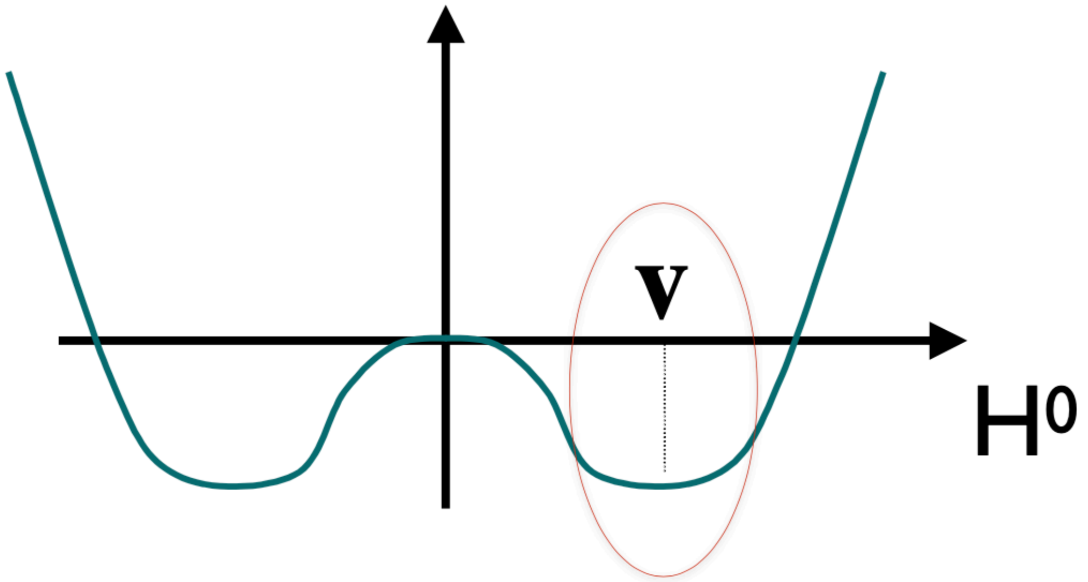
$$V(r) = + \frac{q_1 \times q_2}{r^1}$$

quantized, in units of fixed charge

sign fixed by photon spin

power determined by gauge invariance/charge conservation/Gauss theorem

Higgs



any function of $|H|^2$ would be ok wrt known symmetries

$$V_{SM}(H) = -\mu^2 |H|^2 + \lambda |H|^4$$

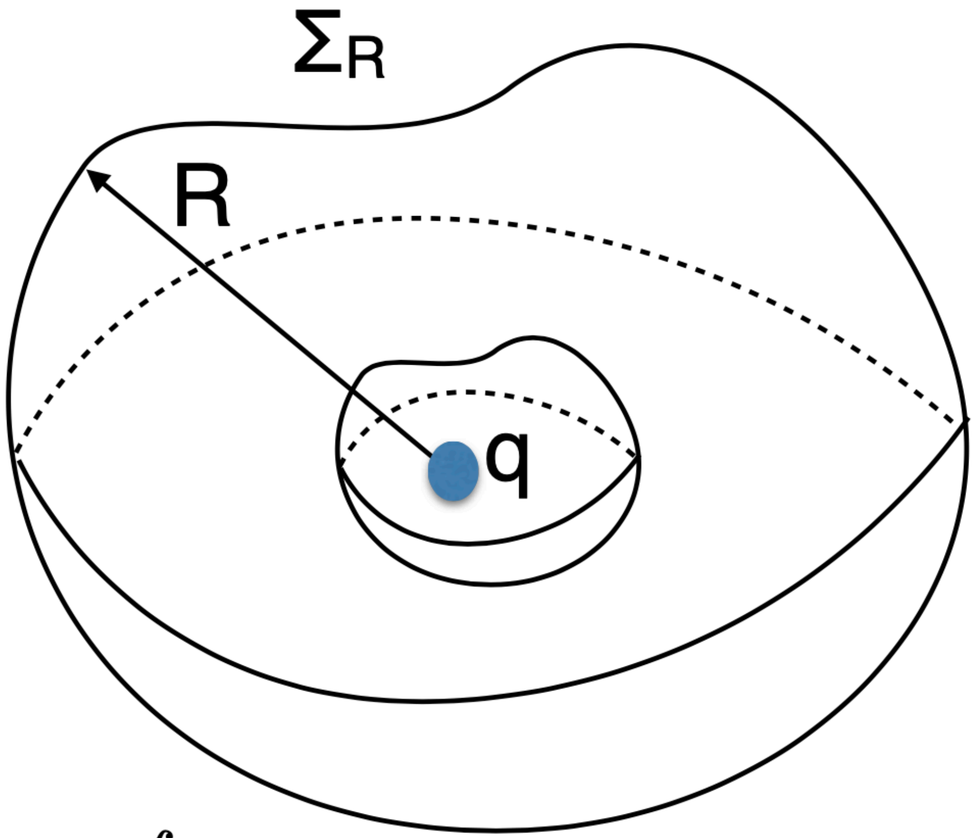
both sign and value totally arbitrary

>0 to ensure stability, but otherwise arbitrary

Elektromagnetisme vs. Higgs

Elektromagnetisme

E&M



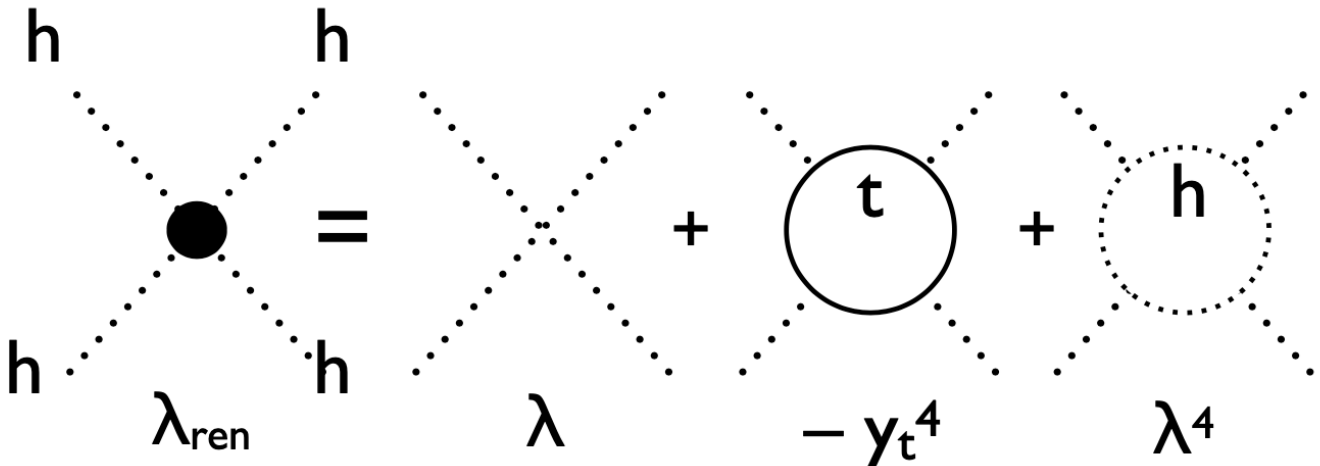
$$\int_{\Sigma_R} \vec{\nabla} V_q \cdot d\vec{\sigma} = 4\pi q, \quad \forall R$$

Fysik ved korte længdeskalaer (høje energier) påvirker ikke ladningen observeret ved store afstande

Higgs

$$V_{SM}(H) = -\mu^2 |H|^2 + \lambda |H|^4$$

$$\Delta\mu^2 \sim (\, c_B\, m_B^2 - c_F\, m_F^2 \,) \text{ x } (\, \Lambda / v)^2$$

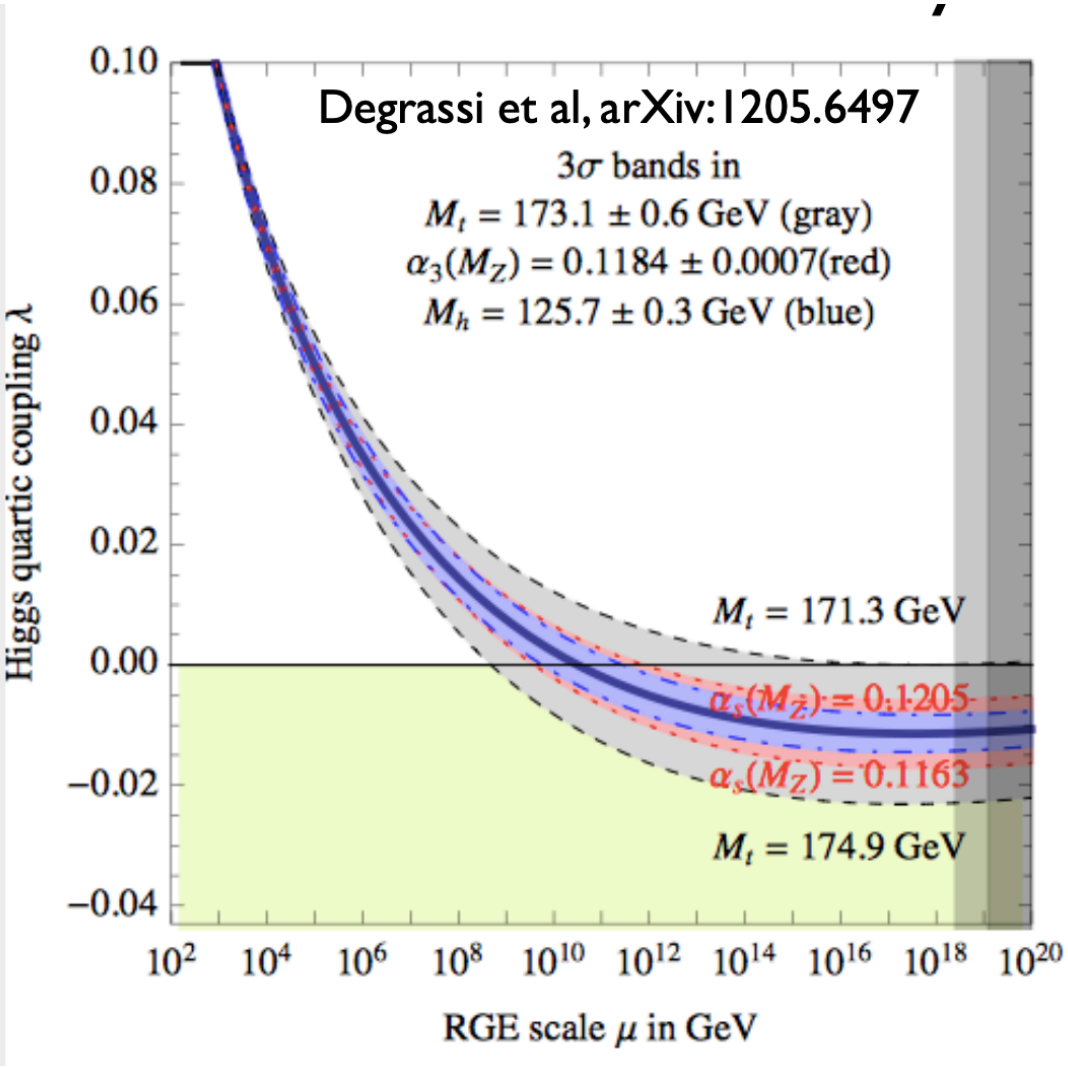


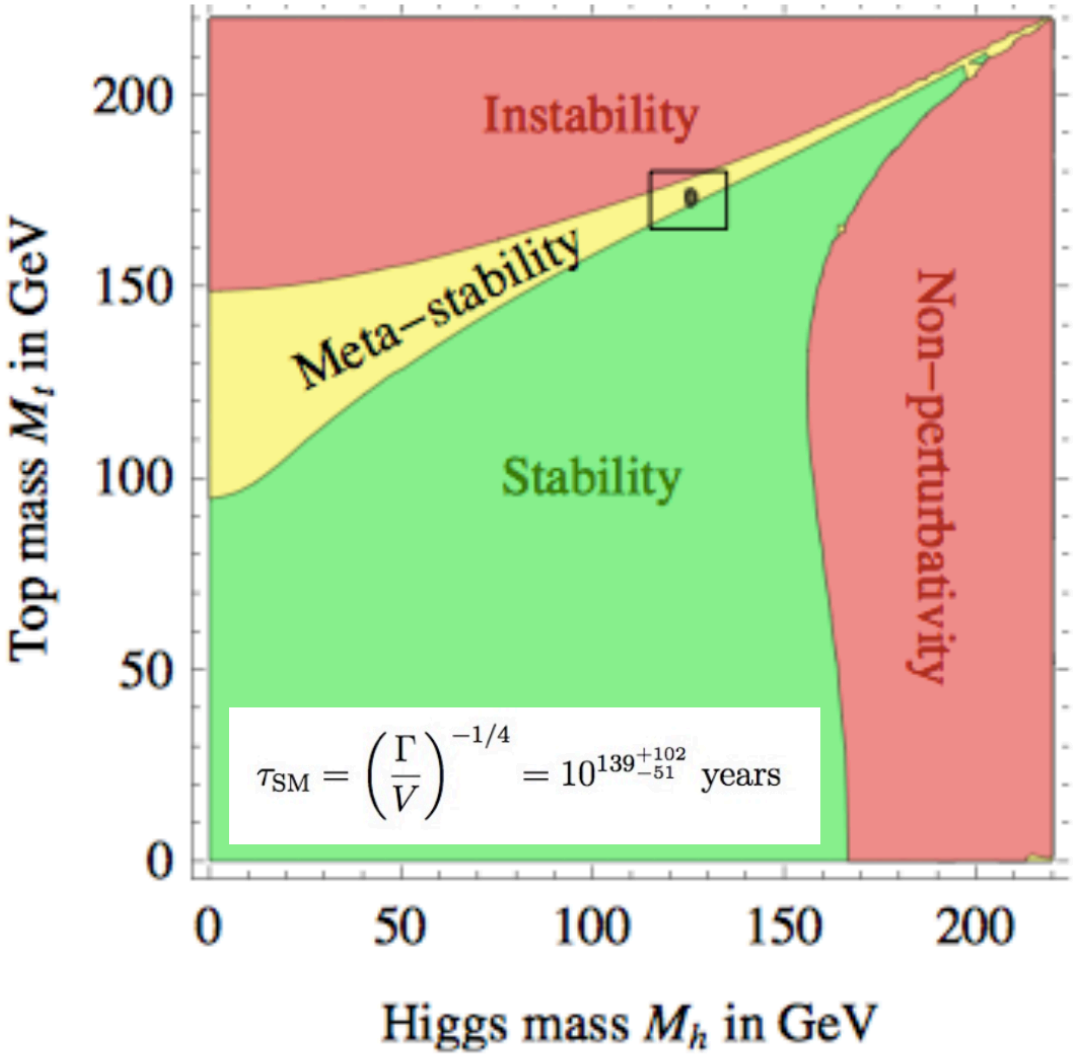
$$\Rightarrow \frac{d\lambda}{d \log \mu} \propto \lambda^4 - y_t^4 \quad \propto a\, m_H^4 - b\, m_t^4$$

Højenergetiske fænomener kan ændre den observerede fysik dramatisk: stabilitet og dynamik => **hierarki-problemet**

Hvad er Higgs'en egentlig for noget ?

- Er Higgs-bosonen en fundamental partikel, eller er den sammensat ?
- Hvis den er fundamental, udgør den så det eneste skalare felt, eller er der andre?
  - Får alle partikler deres masser fra det samme Higgs-felt ?
  - Er Higgs-koblingen "flavour"-bevarende? $\mathrm{H} \rightarrow \mu\tau$?, $\mathrm{H} \rightarrow \mathrm{e}\tau$?, $\mathrm{t} \rightarrow \mathrm{Hc}$?
- Er der en dyb årsag til, at vakuumet tilsyneladende er metastabilt?

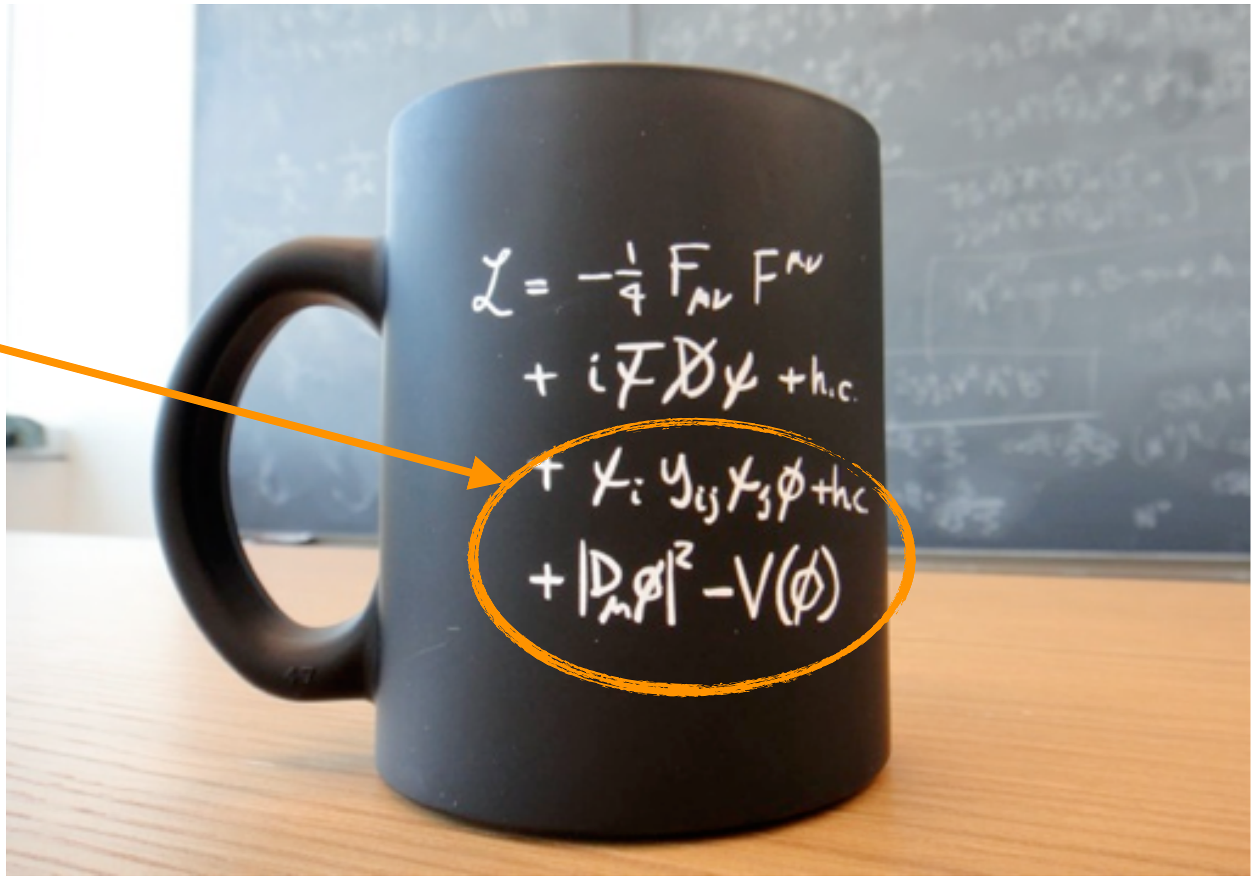




$$\tau_{\mathrm{SM}} = \left(\frac{\Gamma}{V}\right)^{-1/4} = 10^{139^{+102}_{-51}} \text{ years}$$

Higgs-mekanismen udsyn

- Higgs-mekanismen
  - Udgør “halvdelen” at Standardmodellen
  - er eksperimentelt kun 8 år gammel, og er derfor ikke veludforsket
  - efterlader mange åbne spørgsmål
  - kan muligvis levere svar på nogle af de store spørgsmål vi har til naturen



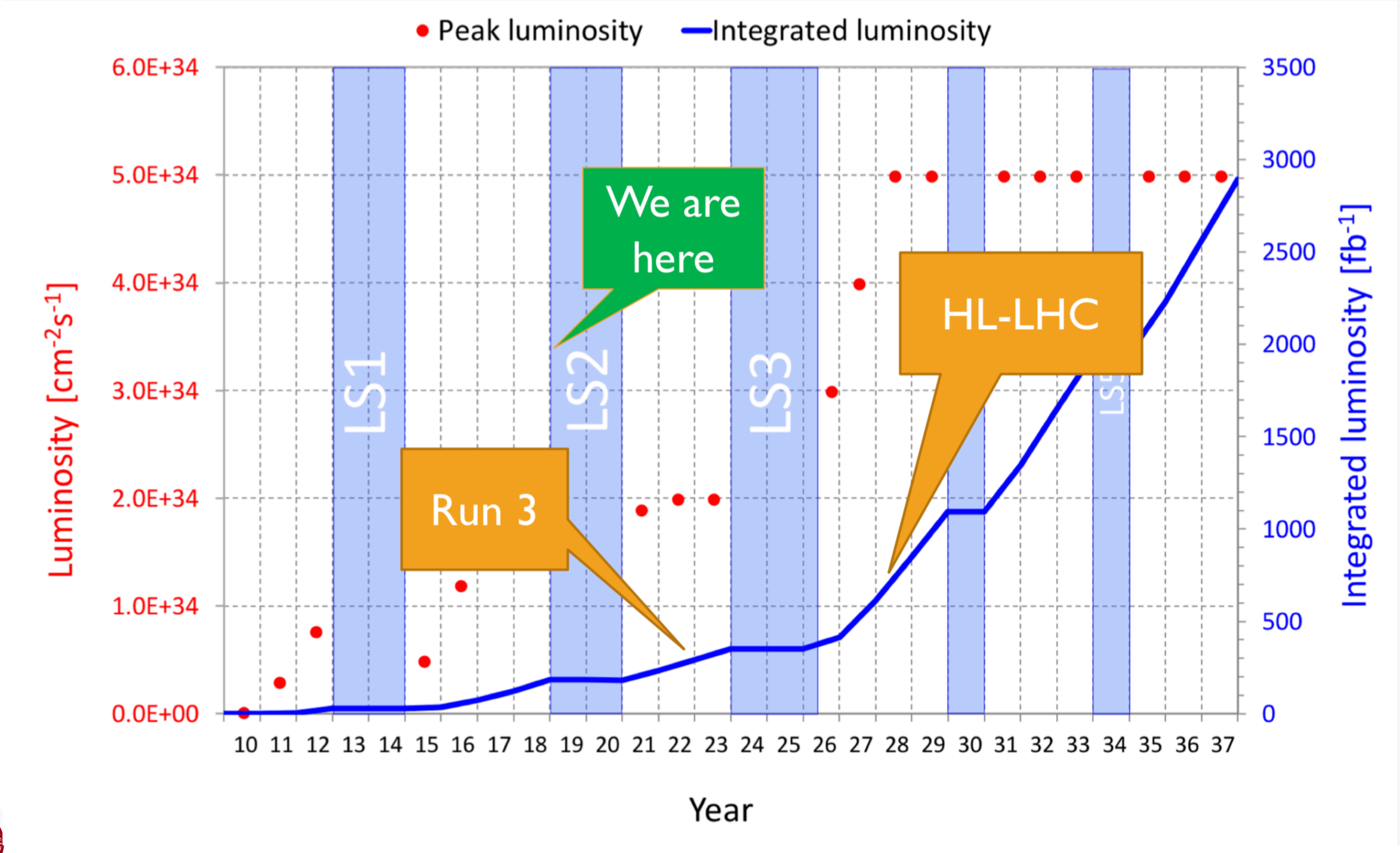
- Alt dette retfærdiggør et eksperimentelt program med fokus på præcisionsmålinger af Higgs-fysik

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

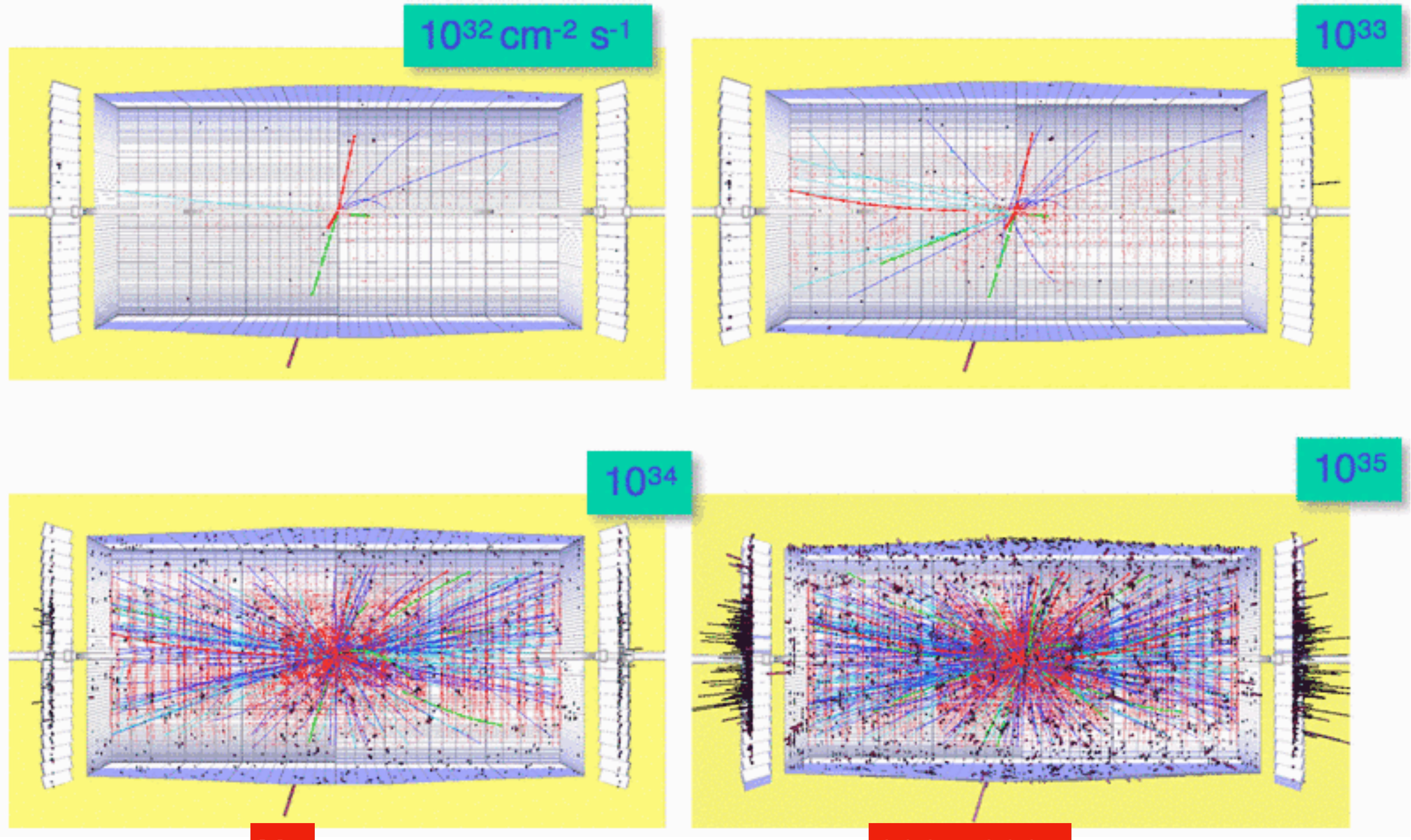
Eksperimentel fremtid

LHC

LHC Program


● Peak luminosity
Integrated luminosity
6.0E+34
5.0E+34
4.0E+34
3.0E+34
2.0E+34
1.0E+34
0.0E+00
Luminosity [cm^{-2}s^{-1}]
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
Integrated luminosity [fb^{-1}]
10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37
Year
LS1
LS2
LS3
LS5
We are here
Run 3
HL-LHC

LHC - Udfordrene eksperimentelle forhold



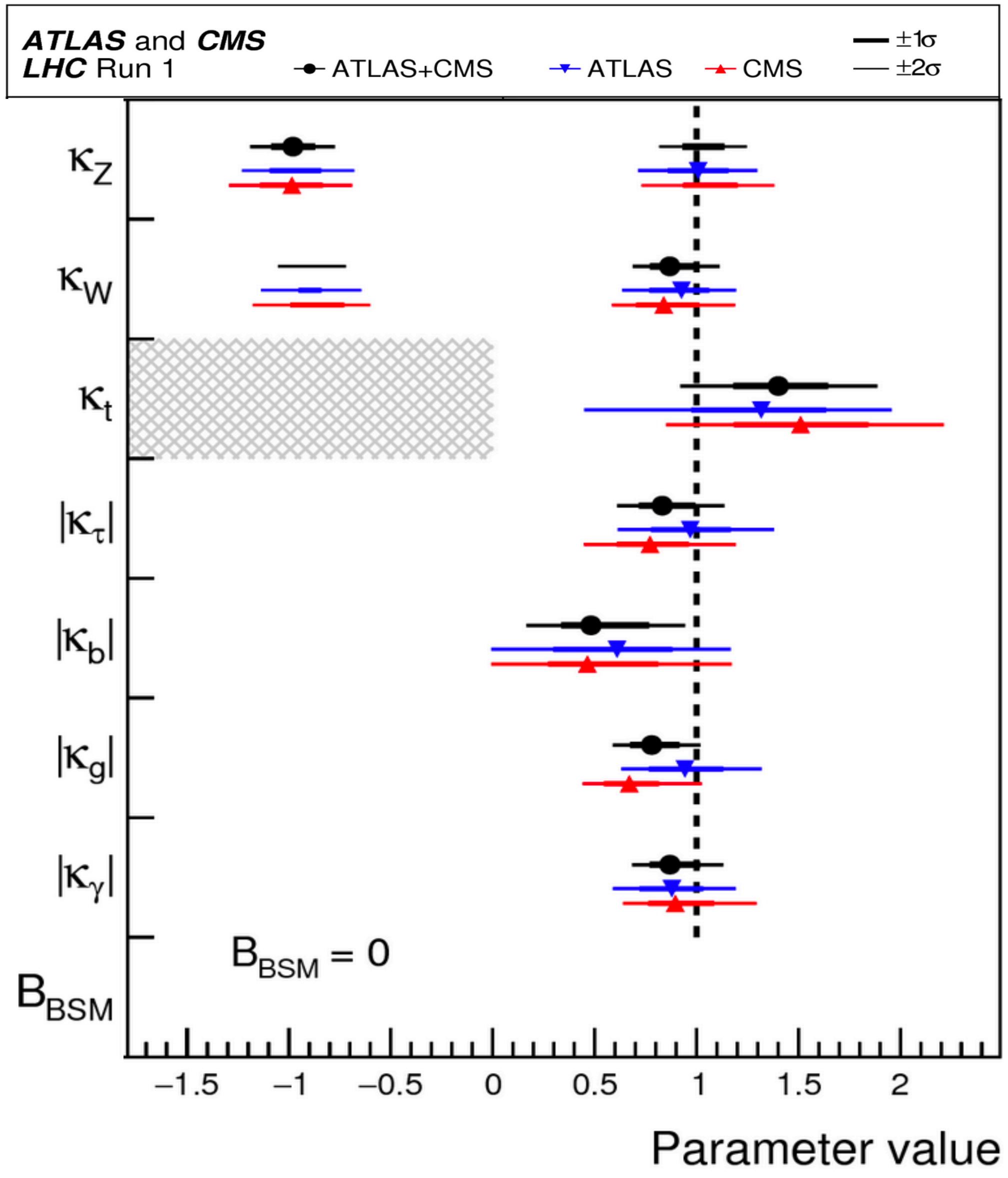
Nu

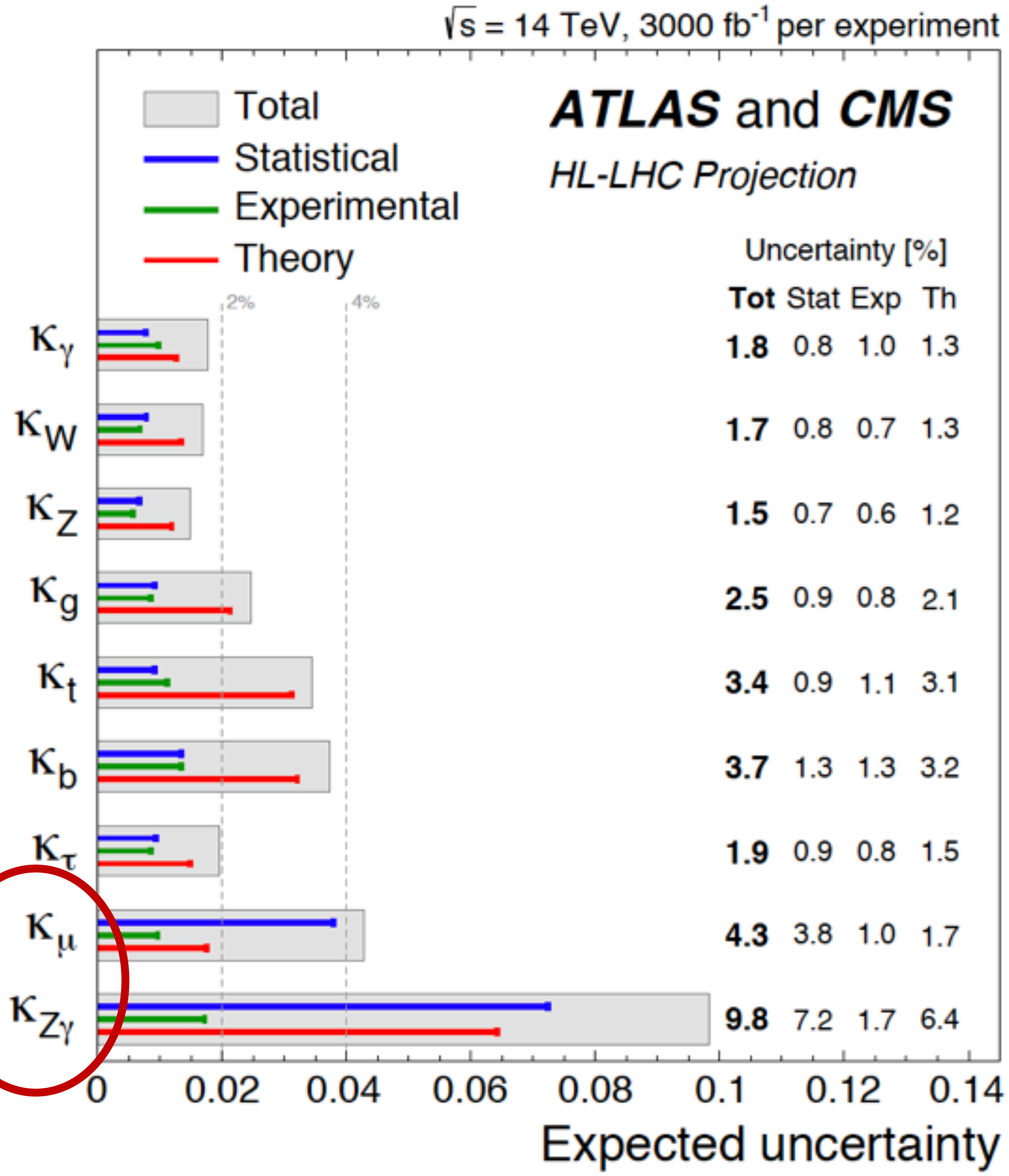
2027-2037

Øget præcision af Higgs-koblinger ved LH-LHC

LHC Run1: ~30 fb^{-1} per experiment

HL-LHC: 3000 fb^{-1} per experiment





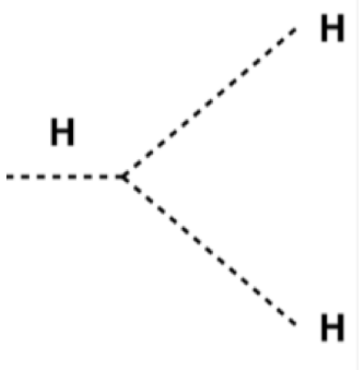
New

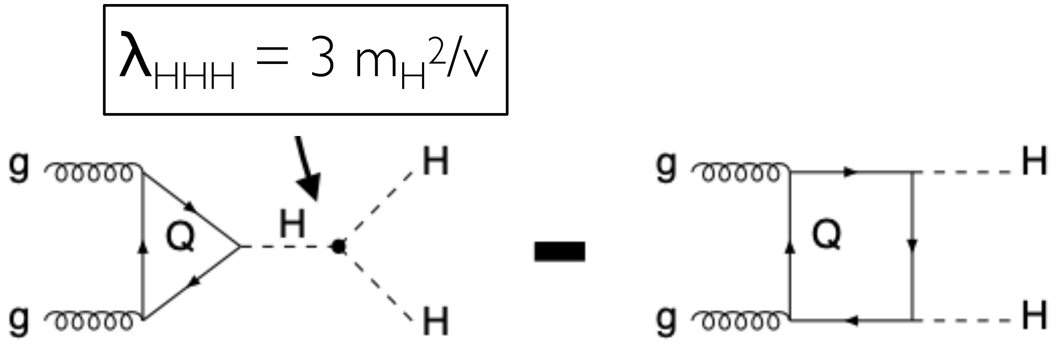
Typical precision: 12-30%

Typical precision: 2-4%

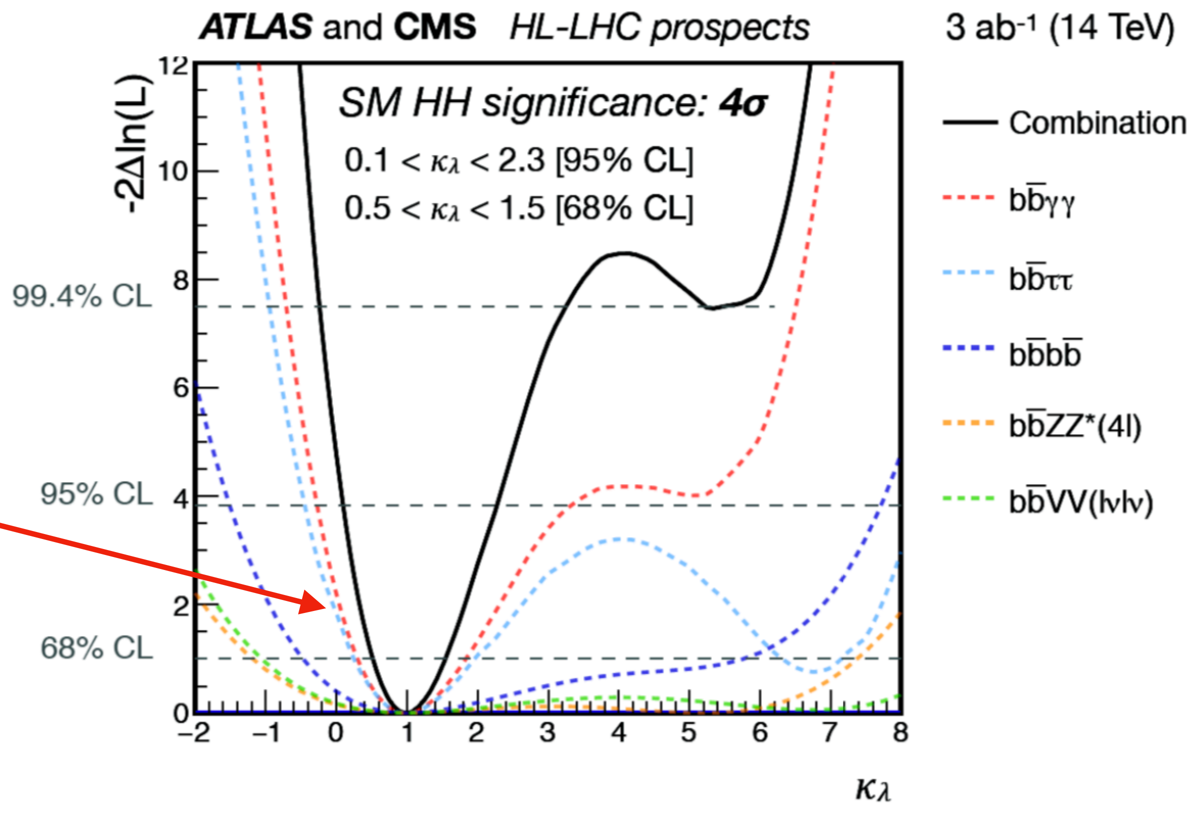
Higgs'ens selvkobling

- Higgs'ens kobling til sig selv er en essentiel del af Standardmodellen




$\lambda_{HHH} = 3\ m_H^2/v$

- Dens måling vil give ultimativ information om Higgs-mekanismen
- Meget vanskelig at måle, da processen, hvor man måler to Higgs-partikler samtidigt, er meget sjælden
- Efter det fulde HL-LHC-program forudses det, at man vil kunne vide selvkoblingen, λ_{HHH}, til 50%



Eksperimentel fremtid

Future Circular Collider

NIELS BOHR INSTITUTE
UNIVERSITY OF COPENHAGEN

FCC – Future Circular Collider

Mogens Dam
Niels Bohr Institute
Copenhagen University

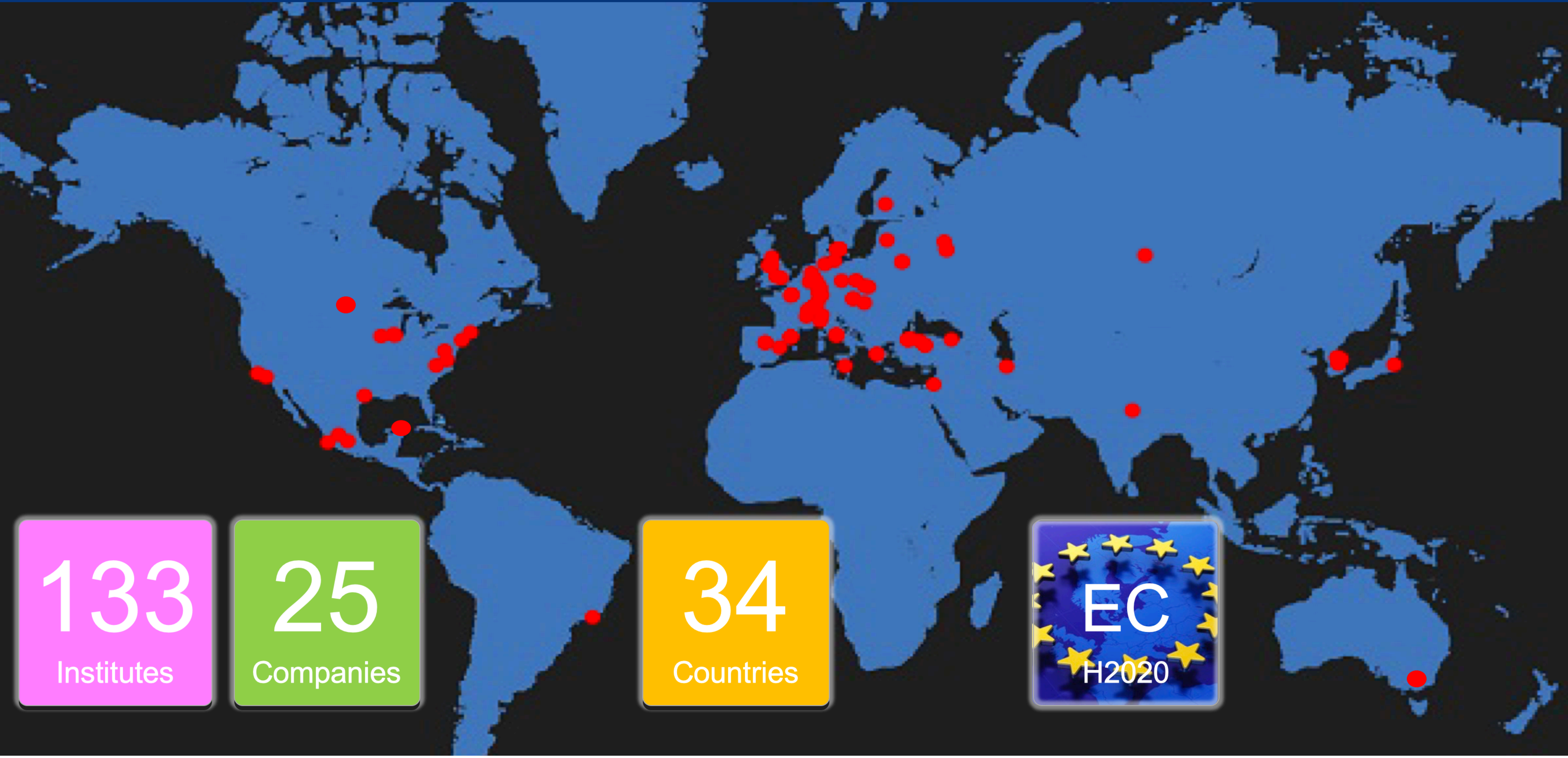
15th Recontres du Vietnam
Quy Nhon, Vietnam
September, 2019

icise QUY NHON VIETNAM
International Centre for Interdisciplinary Science and Education

XVth RENCONTRES DU VIETNAM
Gặp gỡ Việt Nam lần thứ 15

Picture and slide layout, courtesy Jörg Wenninger

Status of Global FCC Collaboration



133 Institutes

25 Companies

34 Countries

EC H2020

Future Circular Collider Study

International FCC collaboration to study (since 2014)

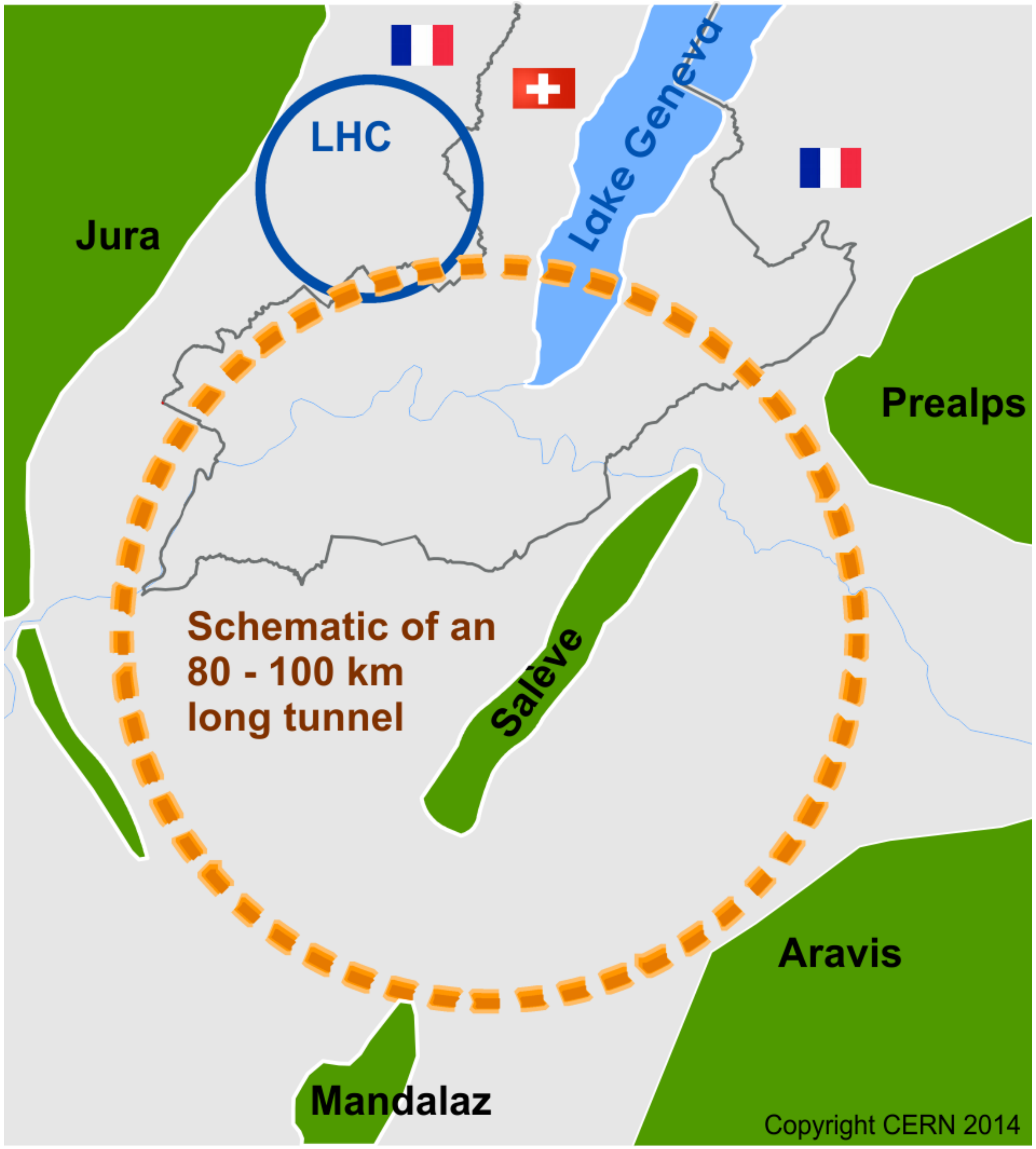
- ~100 km tunnel infrastructure in Geneva area, linked to CERN
- Ultimate goal: ≥ 100 TeV pp-collider (FCC-hh)

→ defining infrastructure requirements

First step:

- e^+e^- collider (FCC-ee)

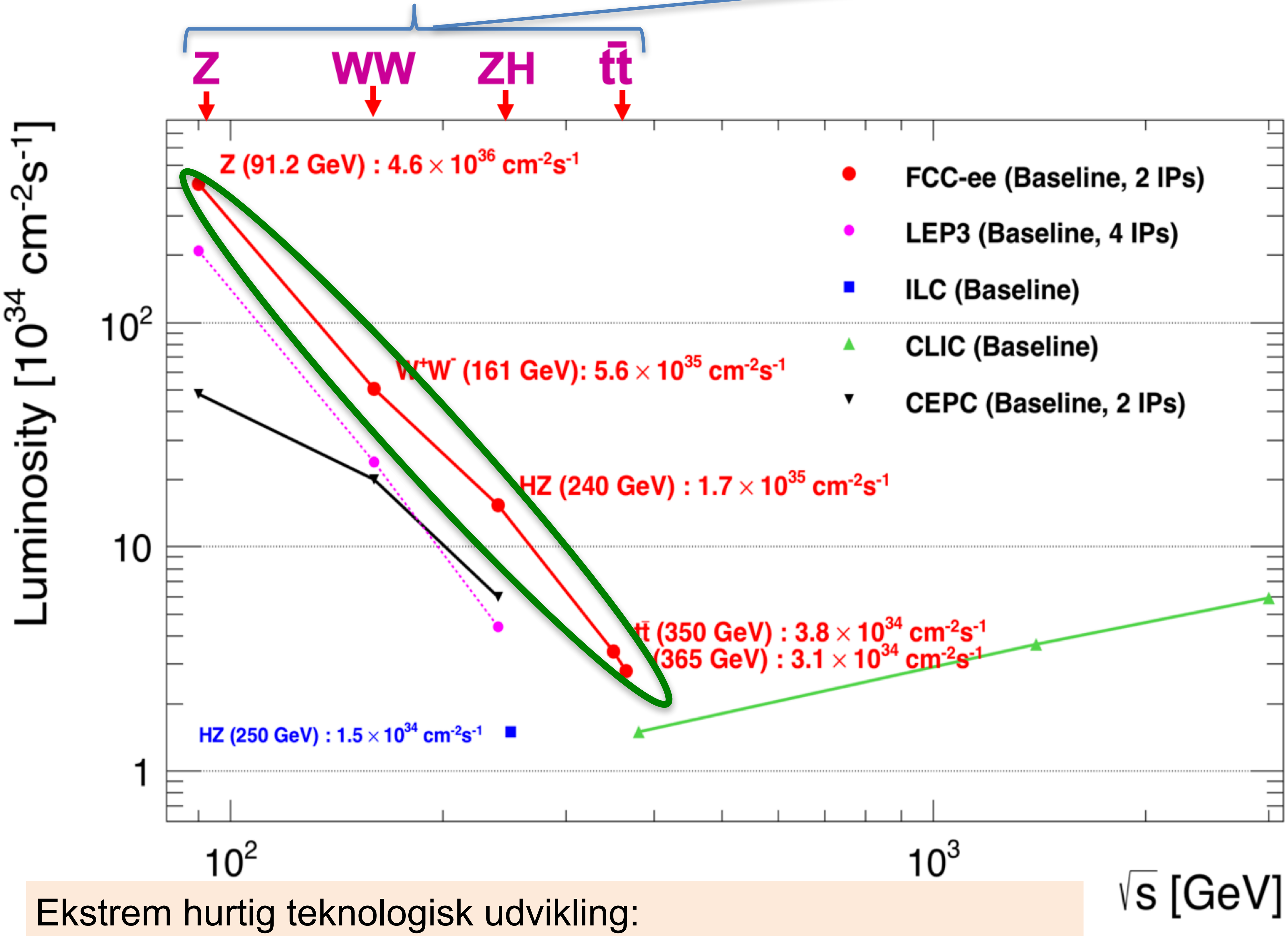
  High Lumi, E_{CM} = 90-400 GeV



Copyright CERN 2014

FCC-ee - Ekstrem høj begivenhedsrate

Studie af de fire tungeste partikler i Standardmodellen - Z, W, H, og top - med **ultimativ præcision**



Ekstrem hurtig teknologisk udvikling:
Omkring 100.000 gange højere begivenhedsrate end ved LEP

Higgs-koblinger efter FCC-ee / FCC-hh

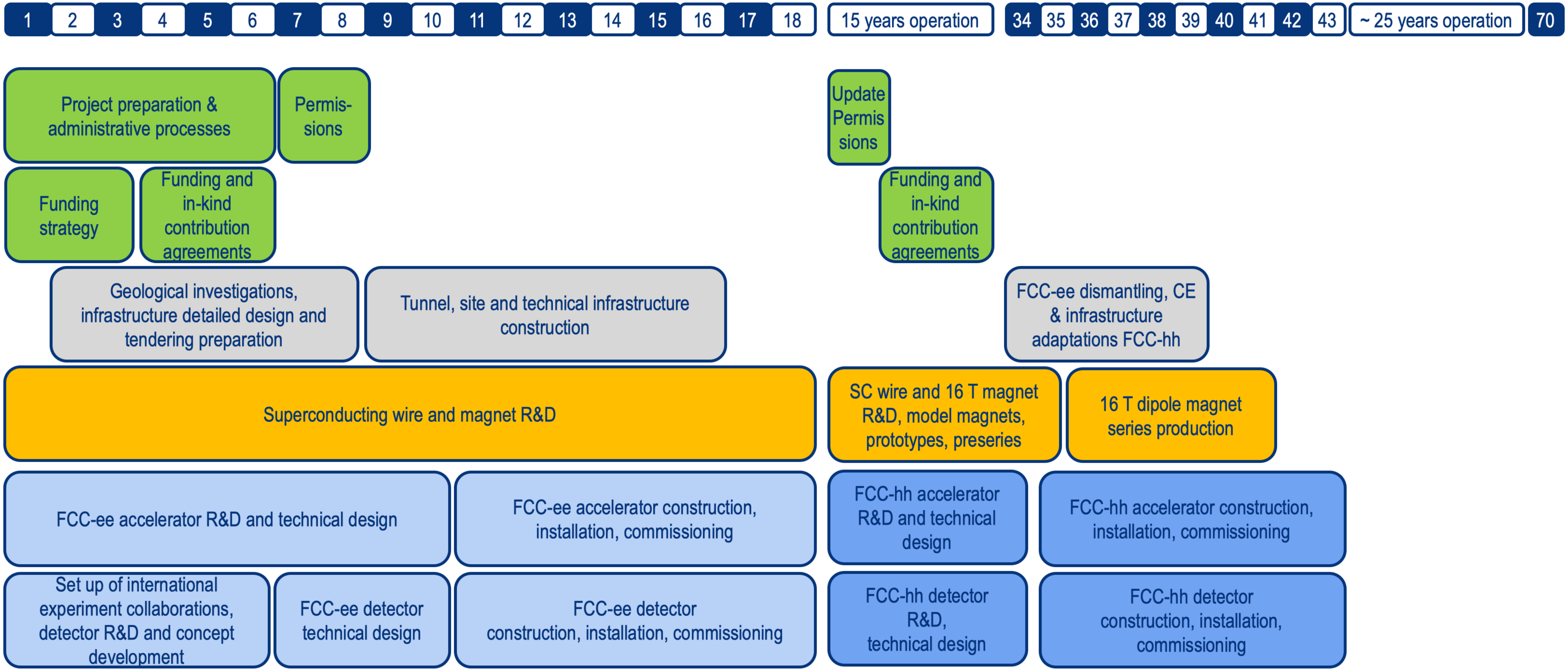
	HL-LHC	**FCC-ee**	**FCC-hh**
$\delta\Gamma_H / \Gamma_H$ (%)	SM	**1.3**	tbd
$\delta g_{HZZ} / g_{HZZ}$ (%)	1.5	**0.17**	tbd
$\delta g_{HWW} / g_{HWW}$ (%)	1.7	**0.43**	tbd
$\delta g_{Hbb} / g_{Hbb}$ (%)	3.7	**0.61**	tbd
$\delta g_{Hcc} / g_{Hcc}$ (%)	~70	**1.21**	tbd
$\delta g_{Hgg} / g_{Hgg}$ (%)	2.5 (gg->H)	**1.01**	tbd
$\delta g_{H\tau\tau} / g_{H\tau\tau}$ (%)	1.9	**0.74**	tbd
$\delta g_{H\mu\mu} / g_{H\mu\mu}$ (%)	4.3	9.0	**0.65 (*)**
$\delta g_{H\gamma\gamma} / g_{H\gamma\gamma}$ (%)	1.8	3.9	**0.4 (*)**
$\delta g_{Htt} / g_{Htt}$ (%)	3.4	–	**0.95 (**)**
$\delta g_{HZ\gamma} / g_{HZ\gamma}$ (%)	9.8	–	**0.9 (*)**
$\delta g_{HHH} / g_{HHH}$ (%)	50	~30 (indirect)	**6.5**
BR_{exo} (95%CL)	$BR_{inv} < 2.5\%$	**< 1%**	**$BR_{inv} < 0.025\%$**

* From BR ratios wrt B(H→4lept) @ FCC-ee

** From pp→ttH / pp→ttZ, using B(H→bb) and ttZ EW coupling @ FCC-ee

Absolute coupling measurements facilitated by width measurement from FCC-ee

FCC integral project schedule



1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 | 15 years operation | 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 | ~ 25 years operation | 70

Project preparation & administrative processes

Permis- sions

Funding strategy

Funding and in-kind contribution agreements

Geological investigations, infrastructure detailed design and tendering preparation

Tunnel, site and technical infrastructure construction

Superconducting wire and magnet R&D

FCC-ee accelerator R&D and technical design

FCC-ee accelerator construction, installation, commissioning

Set up of international experiment collaborations, detector R&D and concept development

FCC-ee detector technical design

FCC-ee detector construction, installation, commissioning

Update Permis sions

Funding and in-kind contribution agreements

FCC-ee dismantling, CE & infrastructure adaptations FCC-hh

SC wire and 16 T magnet R&D, model magnets, prototypes, preseries

16 T dipole magnet series production

FCC-hh accelerator R&D and technical design

FCC-hh accelerator construction, installation, commissioning

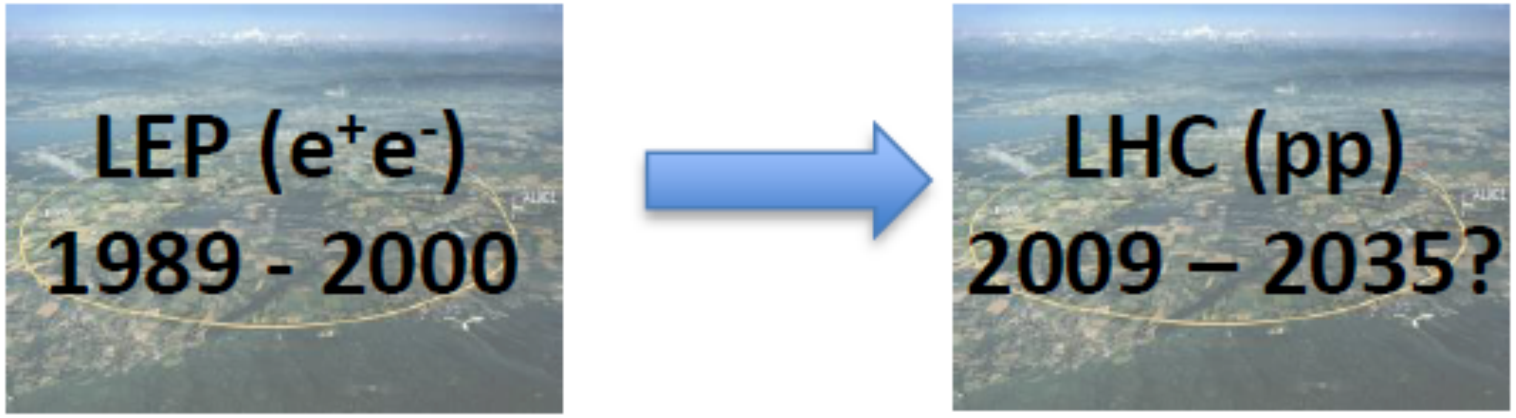
FCC-hh detector R&D, technical design

FCC-hh detector construction, installation, commissioning

Det integrerede FCC-program

Basér den næste generation at partikel-kollidere på en velprøvet model

- 27 km tunnel



- Næste skridt: 100 km tunnel

Afslutning

Afslutning

- Partikelfysikken har gjort enorme store fremskridt over det seneste århundrede i vores stræben efter at forstå naturens mindste bestanddele
- Standardmodellen, som blev formuleret op gennem 1960-70'erne giver en overraskende præcis beskrivelse af naturen
- Standardmodellens partikler opnår masser via Higgs-mekanismen, som forudsætter eksistensen af en ny partikel at hidtil ukendt type: En fundamental partikel uden spin
- Standardmodellen blev etableret som en præcisionsteori hovedsagelig ved LEP-acceleratoren op gennem 1990'erne
- Ved LHC blev Higgs-bosonens eksistens fastlagt i 2012
- Higgs-fysikken udgør en ny og spændende sektor at Standardmodellen, som potentielt kan indeholde svar på nogle af naturens største spørgsmål
- Det fortsatte LHC-program over de næste 15 år vil tilbyde nye langt mere præcise målinger bl.a. i Higgs-sektoren
- På længere sigt undersøges det at etablere en ny større accelerator ved CERN. Denne facilitet, FCC, vil tage et meget stort nyt skridt ind i hidtil uopdagede områder i fysikken inklusive Higgs-sektoren