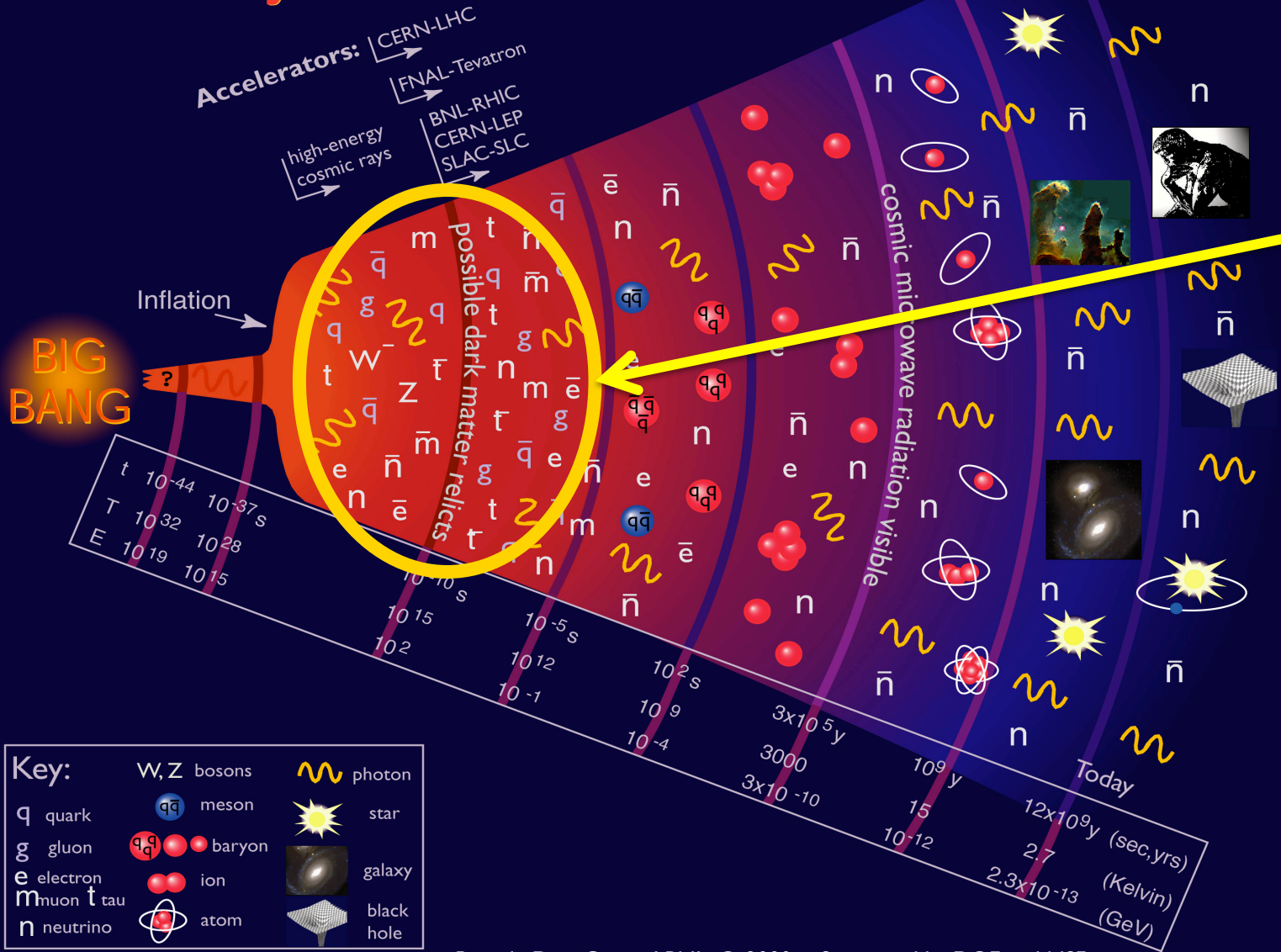


# Higgs-partiklens opdagelse

## Åbne spørgsmål i partikelfysikken

Mogens Dam  
Niels Bohr Institutet  
December 2014

# History of the Universe



Partikelfysik

Ældre... Større... Koldere... lavere energitæthed

# Program

- i. Partikelfysikkens standardmodel
  - Elementære partikler og kræfter
  - Partikelmasser og Higgs-mekanismen
- ii. Optakt til opdagelse af Higgs-partiklen
- iii. LHC og opdagelsen af Higgs-partiklen
- iv. Åbne spørgsmål
- v. Fremtidige eksperimentelle muligheder
- vi. Opsummering, konklusioner, udsyn

# Standardmodellen

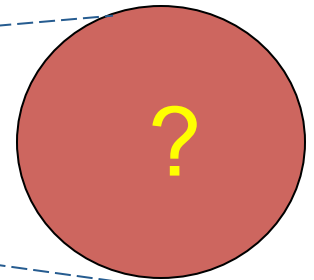
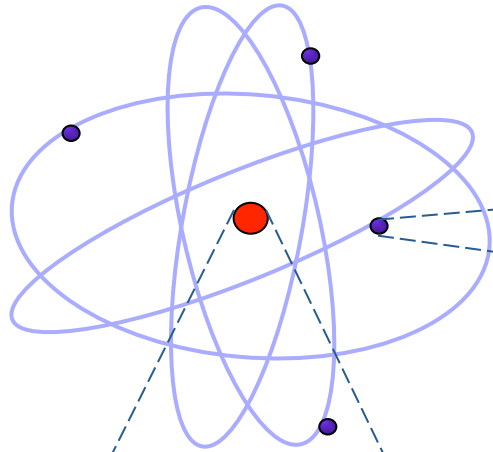
Elementære partikler

og

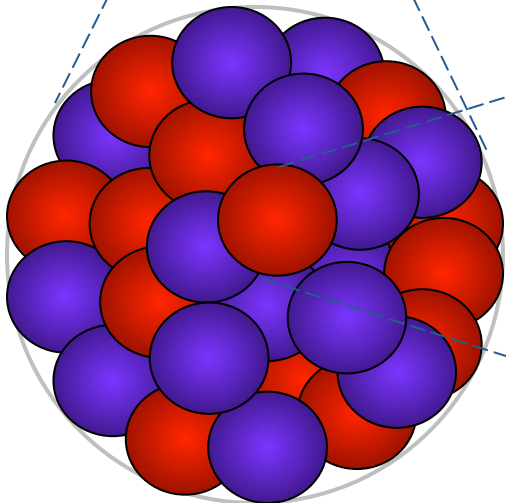
kræfter

# Stoffets struktur

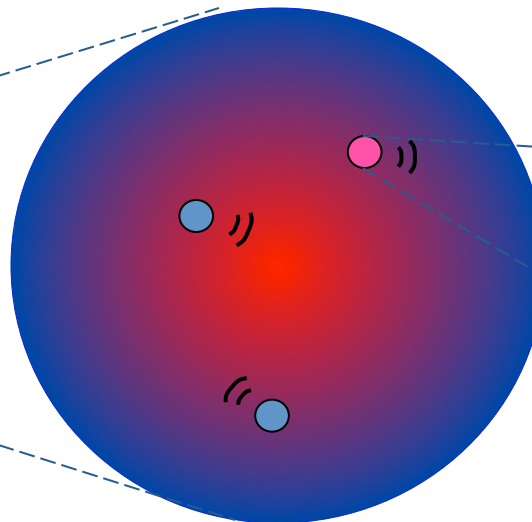
Atom ( $10^{-10}$  m)



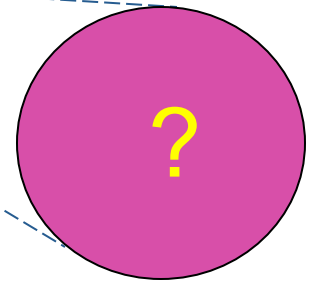
Elektron



${}^5$  Kerne ( $10^{-14}$  m)



Nucleon ( $10^{-15}$  m)



Quark  
<  $10^{-18}$  m










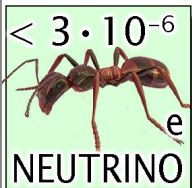


# Stoflige partikler

|                     |          |                                  |                              |                                |         |
|---------------------|----------|----------------------------------|------------------------------|--------------------------------|---------|
| Fermioner: spin-1/2 | Leptoner | $\nu_e$<br>e-neutrino            | $\nu_\mu$<br>$\mu$ -neutrino | $\nu_\tau$<br>$\tau$ -neutrino | Ladning |
|                     |          | $e^-$<br>electron                | $\mu^-$<br>muon              | $\tau^-$<br>tau                | 0       |
|                     |          | <hr/>                            |                              |                                | -1      |
|                     | Quarker  | u<br>up                          | c<br>charm                   | t<br>top                       | 2/3     |
|                     |          | d<br>down                        | s<br>strange                 | b<br>bottom                    | -1/3    |
|                     |          | Generationer: I      II      III |                              |                                |         |

Vore omgivelser består udelukkende af 1. generation: u, d og e  
For eksempel: proton = uud, neutron = udd

Til enhver partikel hører en tilsvarende anti-partikel

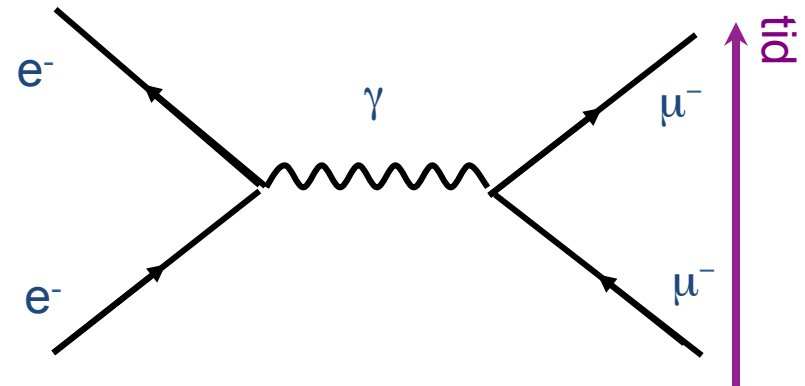
# Partiklerne har (meget forskellige) masser

|   |   |   |   |
|---|---|---|---|
| Kvarker   |  2.75<br>UP                            |  1300<br>CHARM                  |  178000<br>TOP                   |
|   |  6<br>DOWN                             |  110<br>STRANGE                 |  4500<br>BOTTOM                  |
|   |  0.511<br>ELECTRON                     |  105.7<br>MUON                  |  1777<br>TAU                     |
| Leptoner  |  $< 3 \cdot 10^{-6}$<br>e<br>NEUTRINO |  $< 0.19$<br>$\mu$<br>NEUTRINO |  $< 18.2$<br>$\tau$<br>NEUTRINO |
| Stof partikler<br>(fermioner – spin $\frac{1}{2}$ ) |   |   |   |

Enheder i MeV  
[Protonens masser er 938 MeV]

# Vekselvirkninger og kræfter

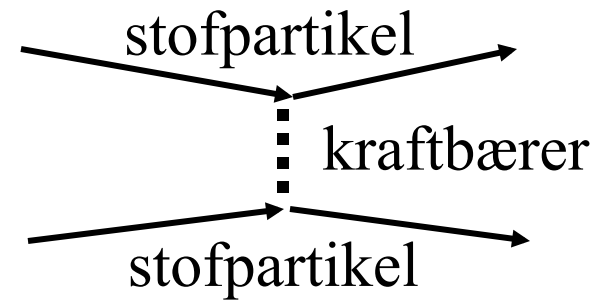
- Hvad holder naturens byggestene sammen ?
  - Hvordan "føler" to magneter hinanden, så de tiltrækkes eller frastødes?
  - Hvordan tiltrækker Solen Jorden?
- Kræfter er noget, der kommunikeres mellem objekter:
  - udveksling af **kraftbærende partikler**



Eksempel: spredning af elektron og muon ved udveksling af foton



# Kræfter og kraftbærere



Elektromagnetisk kraft



Fotonen

Svag kernekraft

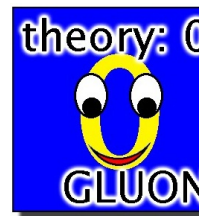


Z-bosonen



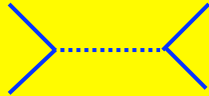

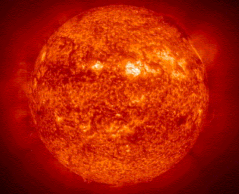
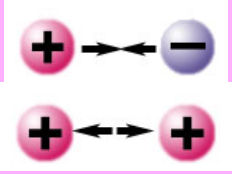
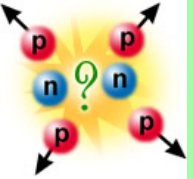
W<sup>+</sup> og W<sup>-</sup> bosonerne

Stærk kernekraft



Gluoner

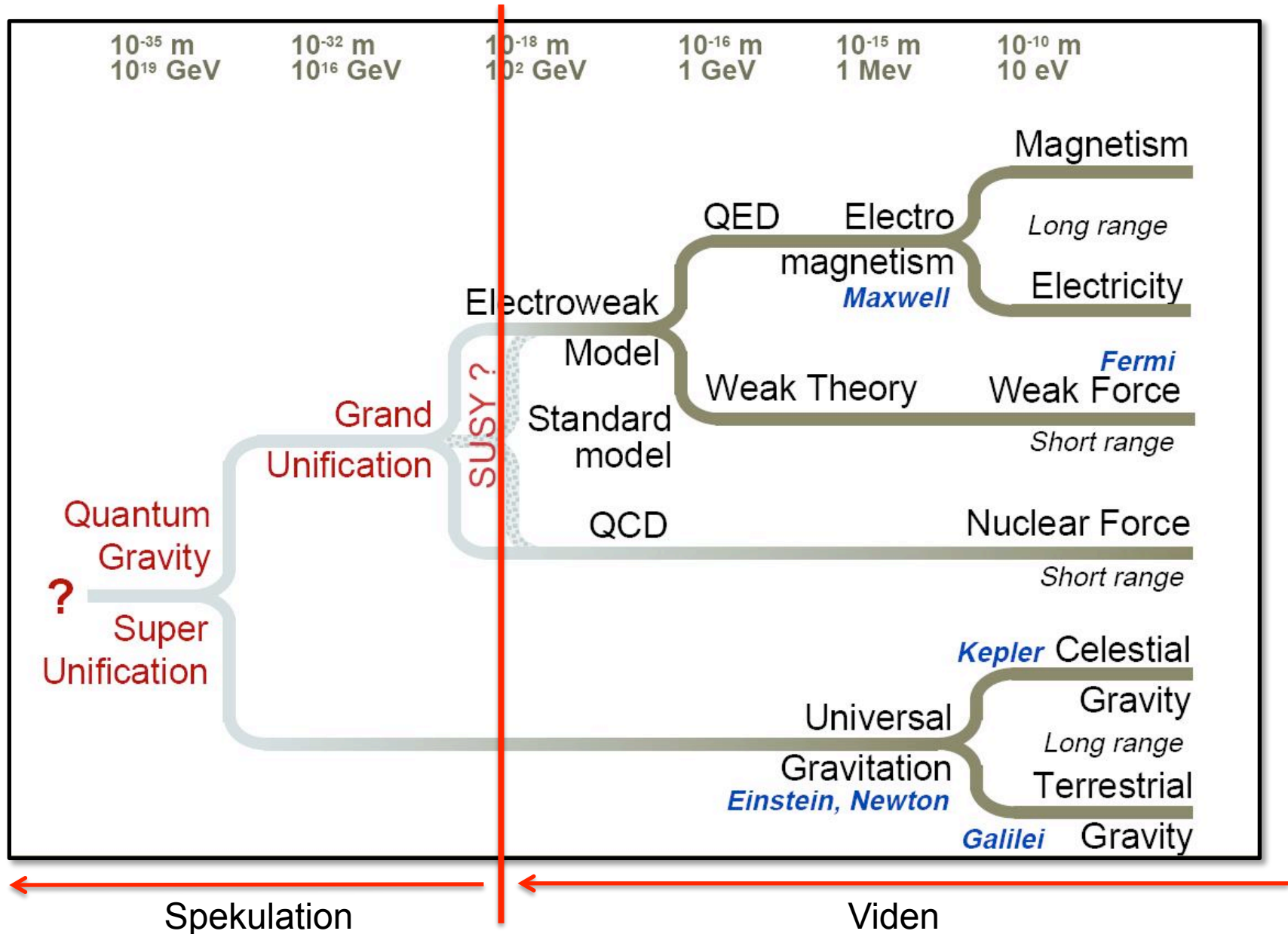
# Fire fundamentale vekselvirkninger

| Vekselvirkning         | Primær effekt i naturen                         | Kraftpartikel<br> | Rækkevidde       | Relativ styrke |   |
|------------------------|---|--|------------------|----------------|---|
| Tyngdekraft            | Kosmologi;<br>Planetbaner                       | Graviton, g<br>(uobserveret)   | Uendelig         | $10^{-39}$     |    |
| Svag kernekraft        | Radioaktive henfald; Stjerners energiproduktion | $W^+, W^-, Z^0$<br>(tung)  | $10^{-17}$ meter | $10^{-5}$      |    |
| Elektromagnetisk kraft | Atomfysik; Kemi;                                | Foton: $\gamma$<br>(masseløs)  | Uendelig         | 1/137          |   |
| Stærk kernekraft       | Atomkerner og deres fysik                       | Gluoner: g<br>(masseløs)   | $10^{-15}$ meter | 1              |  |

Tyngdekraften er uhyre svag men kumulativ:

⇒ Negligible i partikelfysik-sammenhænge

# Kræfter og deres forening



# Standardmodellen

Partikelmasser  
og  
Higgs-mekanismen

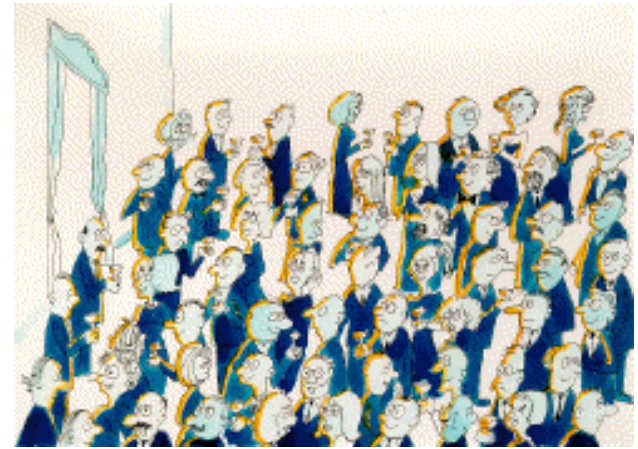
# Higgs-mekanismen

- Den matematiske struktur af Standardmodellen (symmetrier) tillader ikke, at elementarpartiklerne har masser
  - Specielt er det *forbudt* at indføre masser for Z,  $W^+$  og  $W^-$  !!
  - Åbenbar uoverensstemmelse med virkeligheden
- Matematisk “trick”: Indfør et nyt **felt** overalt i rummet
  - Det nye felt, *Higgs-feltet*, har 4 komponenter (frihedsgrader)
  - Tre frihedsgrader bruges til at give masse til Z,  $W^+$  og  $W^-$
  - Én frihedsgrad i overskud: **Higgs-partiklen**
- Check om dette trick er ren fantasi eller er bundet i virkeligheden:
  - **Eftervis eksistensen af Higgs-partiklen!!**

# Higgs-mekanismen

Eller hvordan man kan få større træghed (masse) via vekselvirkning med sine omgivelser:

1) En reception med en masse fysikere



2) En berømt fysiker kommer ind i rummet og forsøger at bane sig vej til baren i den modsatte side



3) Folk stimler sammen om ham, og han får vanskeligere ved at komme frem; han har fået større masse p.g.a. vekselvirkning med omgivelserne



# Higgs-partiklen

Mekanismen virker også, hvis der blot går rygter om, at der er en berømt til stede:  
**Higgs-partiklen**

1) Det bliver fejlagtigt annonceret, at en berømt fysiker er i rummet

2) Fysikerene stimler sammen, fordi de tror berømteden er iblandt dem



**Higgs-mekanismen medfører  
eksistensen af Higgs-partiklen**

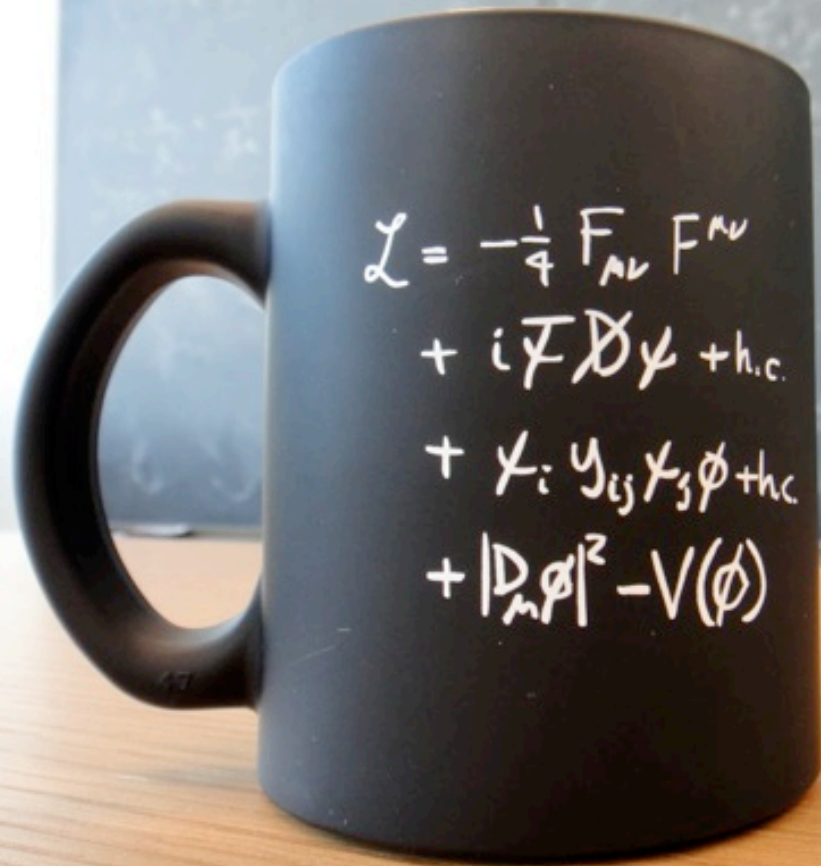
# Standardmodellen



# Stoflige og kraftbærende partikler + Higgs-partiklen

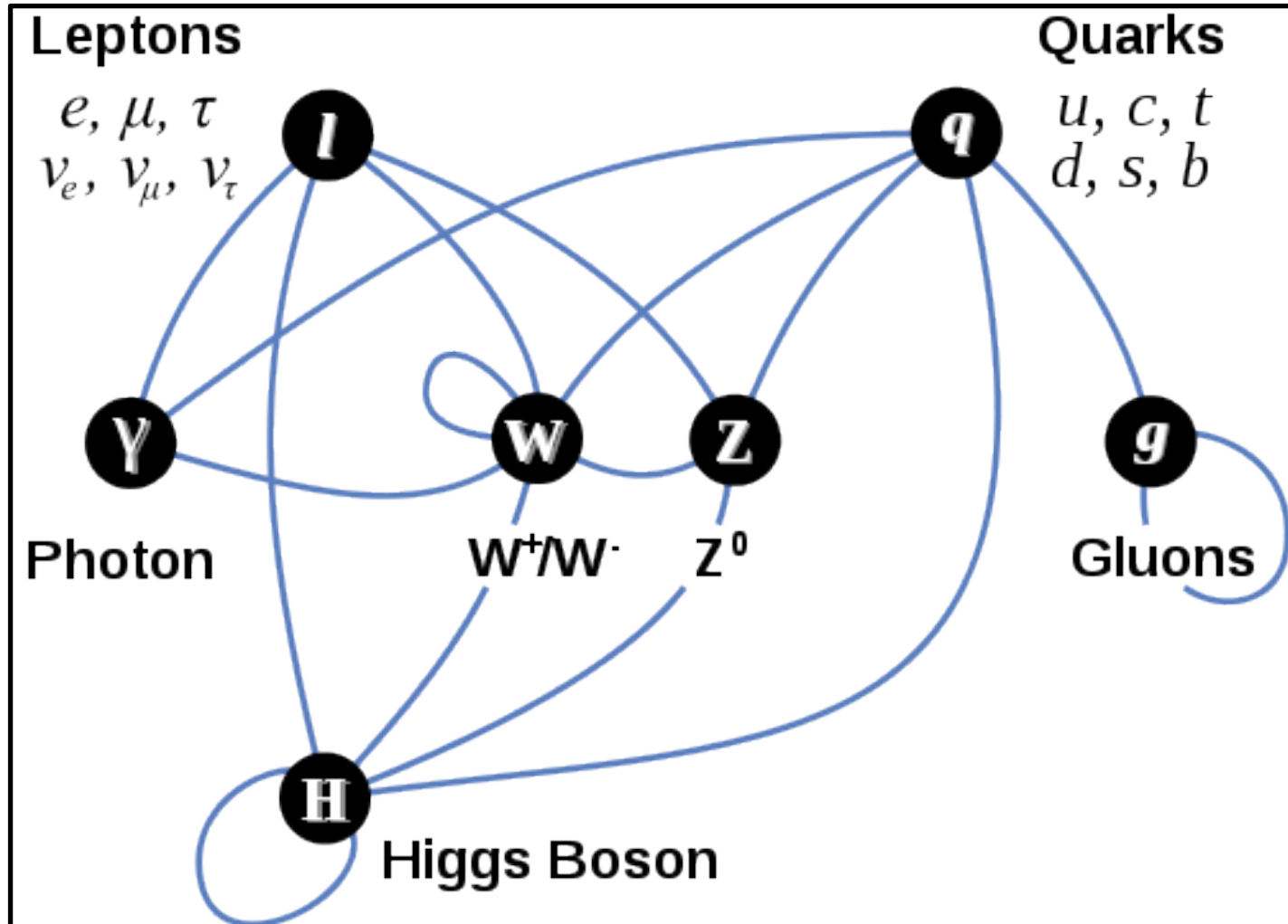
|                | I                  | II                    | III                   |               |
|----------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|
| <b>Quarks</b>  | 2.4 MeV<br>u       | 1.3 GeV<br>c          | 170 GeV<br>t          | 0<br>$\gamma$ |
|                | 4.8 MeV<br>d       | 104 MeV<br>s          | 4.2 GeV<br>b          | 0<br>g        |
|                | <2.2 eV<br>$\nu_e$ | <0.2 MeV<br>$\nu_\mu$ | <16 MeV<br>$\nu_\tau$ | 91 GeV<br>Z   |
| <b>Leptons</b> | 0.5 MeV<br>e       | 16 MeV<br>$\mu$       | 1.8 GeV<br>$\tau$     | 80 GeV<br>W   |
|                |                    |                       |                       | 126 GeV<br>H  |
|                |                    |                       |                       | <b>Bosons</b> |

Matematisk  
struktur  
baseret på  
*kvantefeltteori.*  
Adskillige  
interne  
*symmetrier*



- Forudsiger stærke bindinger mellem et utal af målbare størrelser
- (Kun) omkring 20 input-parametre
  - 3 koblingskonstanter, 9 (12) fermion-masser, 3-10 “mixing-parametre”
  - Det præcise antal kommer an på, hvordan vi beskriver neutrino-sektoren
    - I Standardmodellen Classic er neutrinoerne masseløse ...
    - ... det er de ikke længere

# Standardmodellens hvem vekselvirker med hvem?



Nå ja, for at være ærlig, så var udtrykket på kruset skrevet på en ret kompakt form. Skrives man det ud, får man dette

Og selv om hvert led her er en 4x4 tensor (matrix), så er det stadigvæk imponerende, at "lidt" matematik kan udtrykke alt vi ved om mikro-verdenen.

*Hvorfor er det egentlig, at naturen kan beskrives via matematik?*

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - ig_{c_w} (\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)) - \\
 & ig_{s_w} (\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)) - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^- W_\nu^+ + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\nu^+ Z_\nu^0 W_\mu^- - \\
 & Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\nu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w (A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\
 & \beta_h \left( \frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right) + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - \\
 & g\alpha_h M (H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-) - \\
 & \frac{1}{8}g^2 \alpha_h (H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2) - \\
 & gM W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \\
 & \frac{1}{2}ig (W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)) + \\
 & \frac{1}{2}g (W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) + W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H)) + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) + \\
 & M (\frac{1}{c_w} Z_\mu^0 \partial_\mu \phi^0 + W_\mu^+ \partial_\mu \phi^- + W_\mu^- \partial_\mu \phi^+) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + ig_{s_w} M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - \\
 & W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + ig_{s_w} A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \\
 & \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- (H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-) - \frac{1}{8}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 (H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-) - \\
 & \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
 & g^2 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- + \frac{1}{2}ig_s \lambda_{ij}^a (\bar{q}_i^\alpha \gamma^\mu q_j^\alpha) g_\mu^a - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda (\gamma \partial + m_\nu^\lambda) \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + \\
 & m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + ig_{s_w} A_\mu (-\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3} (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3} (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda) + \\
 & \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 \{ (\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) d_j^\lambda) + \\
 & (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 + \gamma^5) u_j^\lambda) \} + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ ((\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) U^{lep}{}_{\lambda\kappa} e^\kappa) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa)) + \\
 & \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- ((\bar{e}^\kappa U^{lep}{}_{\kappa\lambda} \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\kappa\lambda}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_e^\kappa (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) e^\kappa) + m_\nu^\lambda (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) e^\kappa) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_e^\lambda (\bar{e}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) \nu^\kappa) - m_\nu^\kappa (\bar{e}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) \nu^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda}{M} H (\bar{\nu}^\lambda \nu^\lambda) - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_\lambda}{M} H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda}{M} \phi^0 (\bar{\nu}^\lambda \gamma^5 \nu^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda}{M} \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) - \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \hat{\nu}_\kappa - \\
 & \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \hat{\nu}_\kappa + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_\lambda}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c + \\
 & \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + ig_{c_w} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig_{s_w} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + ig_{c_w} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig_{s_w} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + ig_{c_w} Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + ig_{s_w} A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}gM (\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w} \bar{X}^0 X^0 H) + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM (\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-) + \\
 & \frac{1}{2c_w} igM (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + igM s_w (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + \\
 & \frac{1}{2}igM (\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0) .
 \end{aligned}$$

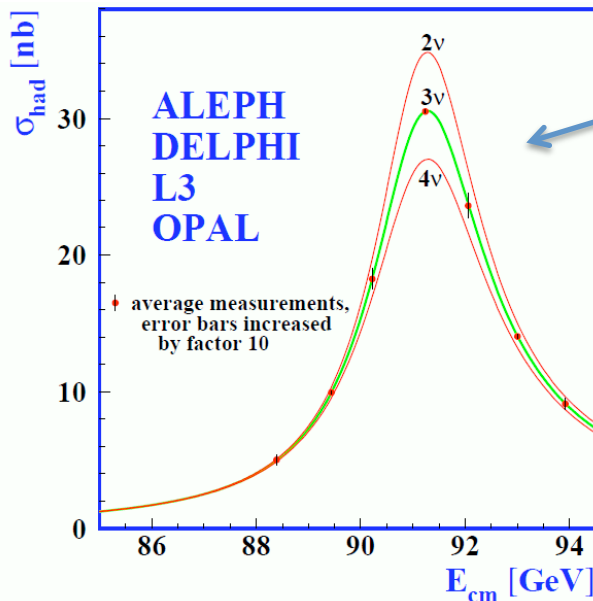
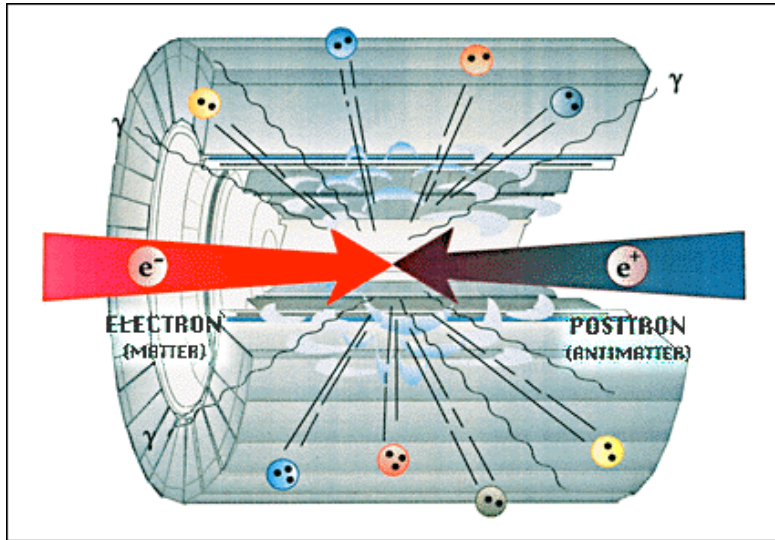
# Før Higgs-opdagelsen

Hvad vidste vi før LHC?

# Megen information fra præcisionsmålinger

Specielt fra LEP (1989-2000)

Elektron-positron kollisioner ved 91 og 160 GeV



3 neutrino-generationer i naturen

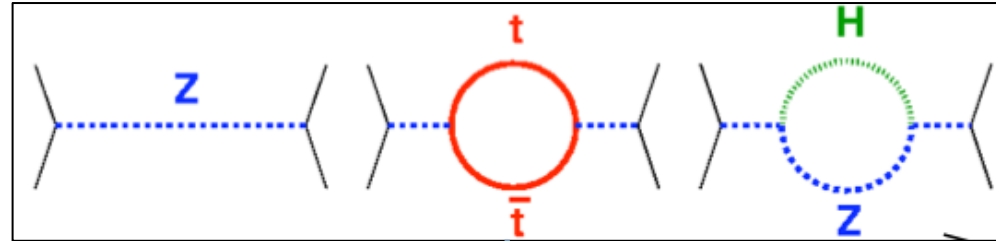
Konsistenscheck af Standardmodellen. Alle målbare størrelser stemmer overens indenfor modellens rammer

|  | Measurement           | Fit     | $10 \frac{\sigma^{\text{meas}} - \sigma^{\text{fit}}}{\sigma^{\text{meas}}}$ |
|--|-----------------------|---------|--|
| $\Delta\alpha_{\text{had}}^{(5)}(m_Z)$                   | $0.02750 \pm 0.00033$ | 0.02759 | 0.3  |
| $m_Z$ [GeV]  | $91.1875 \pm 0.0021$  | 91.1874 | 0.1  |
| $\Gamma_Z$ [GeV]   | $2.4952 \pm 0.0023$   | 2.4959  | 0.3  |
| $\sigma_{\text{had}}^0$ [nb]                             | $41.540 \pm 0.037$    | 41.478  | 1.5  |
| $R_l$  | $20.767 \pm 0.025$    | 20.742  | 0.1  |
| $A_{\text{fb}}^{0,l}$                                    | $0.01714 \pm 0.00095$ | 0.01645 | 0.4  |
| $A_l(P_\tau)$  | $0.1465 \pm 0.0032$   | 0.1481  | 0.1  |
| $R_b$  | $0.21629 \pm 0.00066$ | 0.21579 | 0.1  |
| $R_c$  | $0.1721 \pm 0.0030$   | 0.1723  | 0.1  |
| $A_{\text{fb}}^{0,b}$                                    | $0.0992 \pm 0.0016$   | 0.1038  | 3.0  |
| $A_{\text{fb}}^{0,c}$                                    | $0.0707 \pm 0.0035$   | 0.0742  | 0.5  |
| $A_b$  | $0.923 \pm 0.020$     | 0.935   | 0.1  |
| $A_c$  | $0.670 \pm 0.027$     | 0.668   | 0.1  |
| $A_l(\text{SLD})$  | $0.1513 \pm 0.0021$   | 0.1481  | 1.5  |
| $\sin^2\theta_{\text{eff}}^{\text{lept}}(Q_{\text{fb}})$ | $0.2324 \pm 0.0012$   | 0.2314  | 0.4  |
| $m_W$ [GeV]  | $80.385 \pm 0.015$    | 80.377  | 0.1  |
| $\Gamma_W$ [GeV]   | $2.085 \pm 0.042$     | 2.092   | 0.1  |
| $m_t$ [GeV]  | $173.20 \pm 0.90$     | 173.26  | 0.1  |

March 2012

# Præcisionsmålinger og top

Via **kvantemekaniske fluktuationer** ("loop diagrams") er præcise målinger følsom over for partikler ved (langt) højere energier end dem man har eksperimentelt til rådighed.

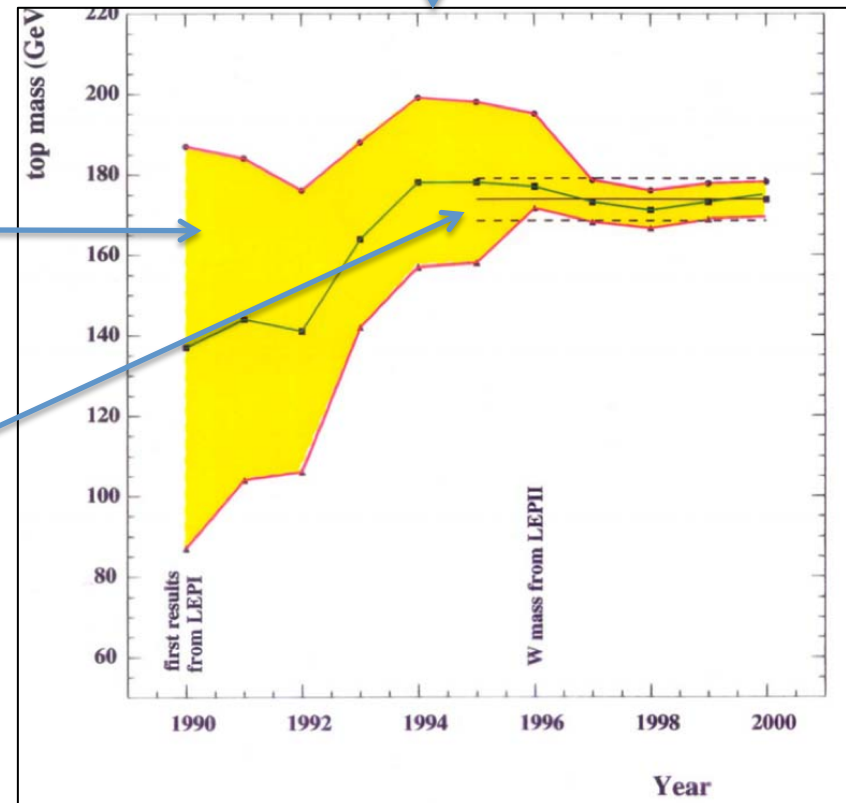


Vigtigt eksempel: Top-kvarken

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

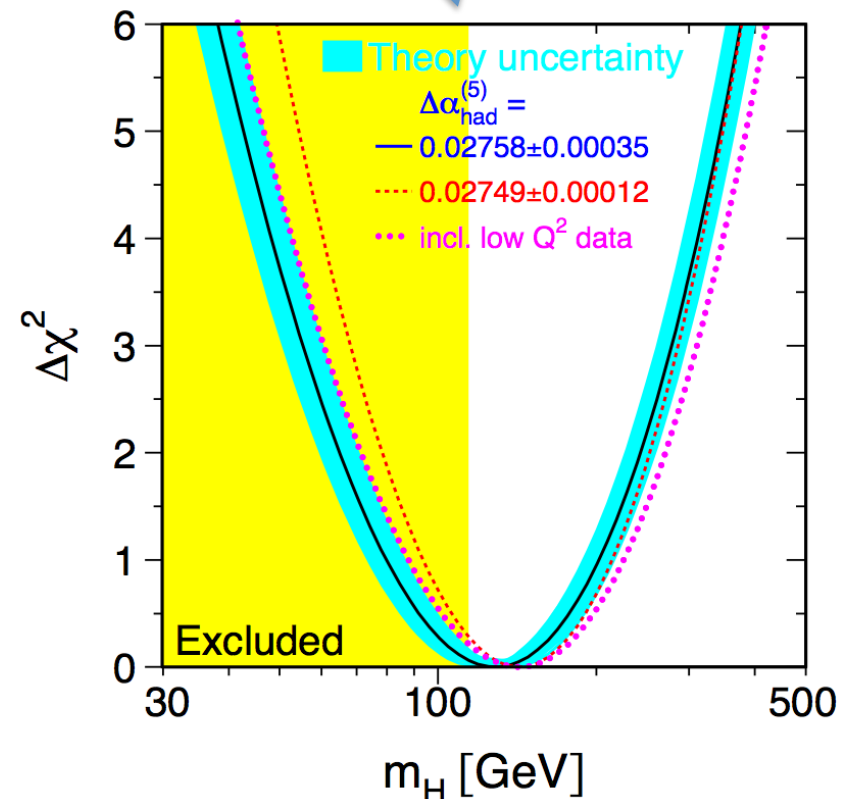
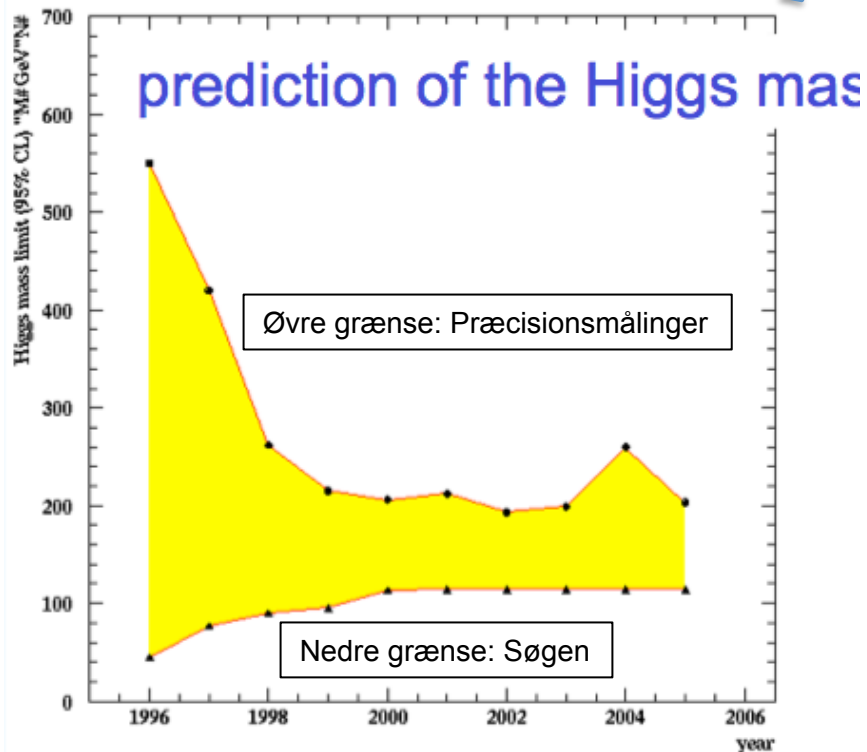
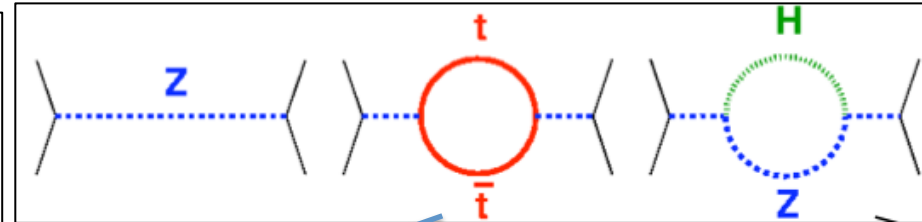
Stiplede linjer:  
I 1995 opdagedes top-kvarken i  
proton-antiproton-kollisioner ved  
Fermilab (Chicago) præcis ved den  
af LEP forudsagte masse

Præcisionsmålinger og  
direkte søg er komplementære



# 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 !





# CERN og Large Hadron Collider

# CERN

Europæisk center for Partikelfysik

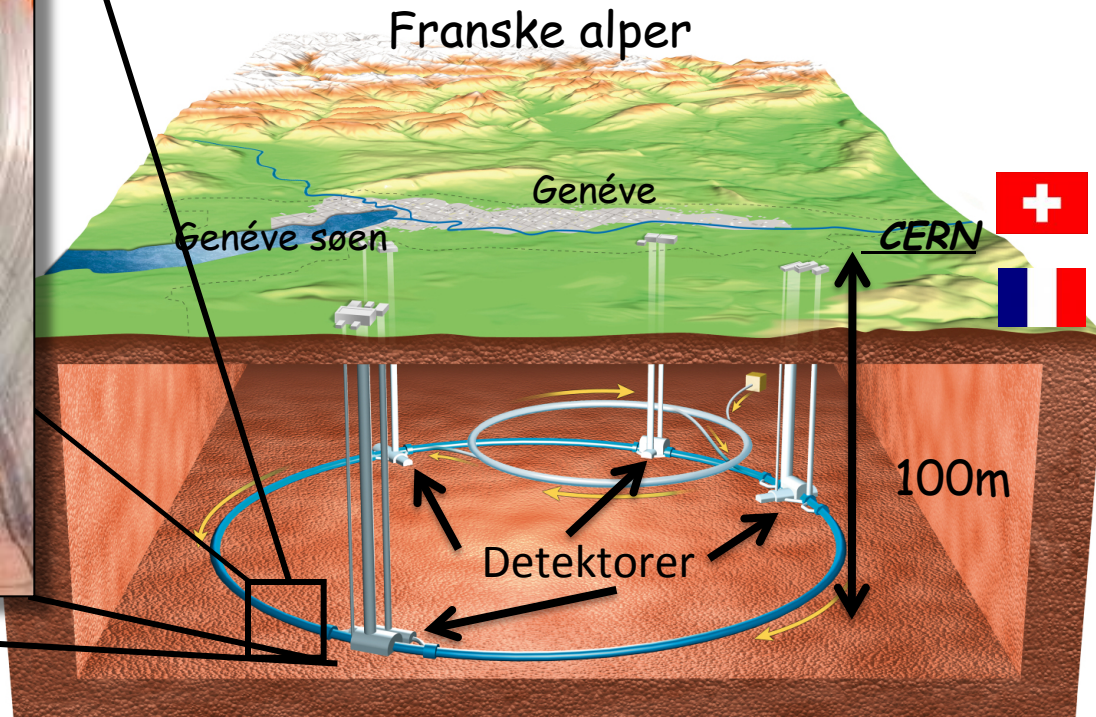


- Verdens største partikelfysiklaboratorium
- Samarbejde startede i 1954
- Europæisk/multi-nationalt laboratorium uden for Geneve ved den Schweiz-Franske grænse
- Danmark har været med siden starten
  - Niels Bohr én af initiativtagerne

# The Large Hadron Collider

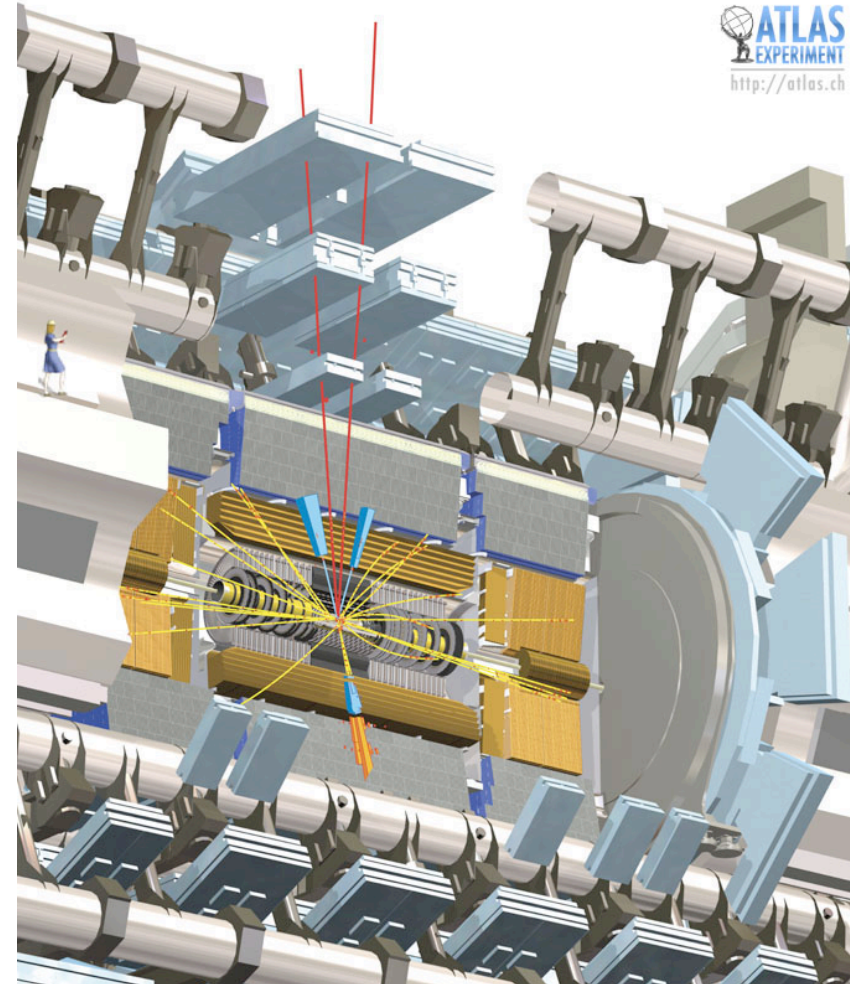
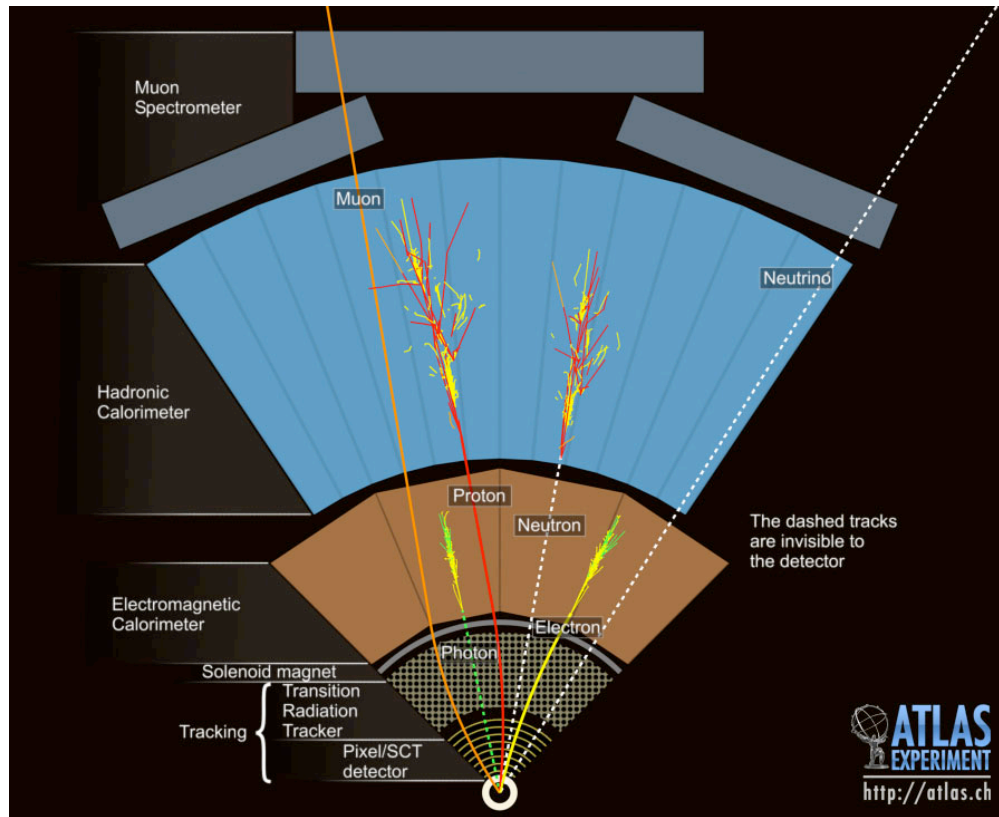


Proton-proton kollisioner ved ekstrem høj energi: 8000 (14000) GeV.  
Altså omkring 8000 (14000) gange hvileenergien af en proton [ $E = mc^2$ ].



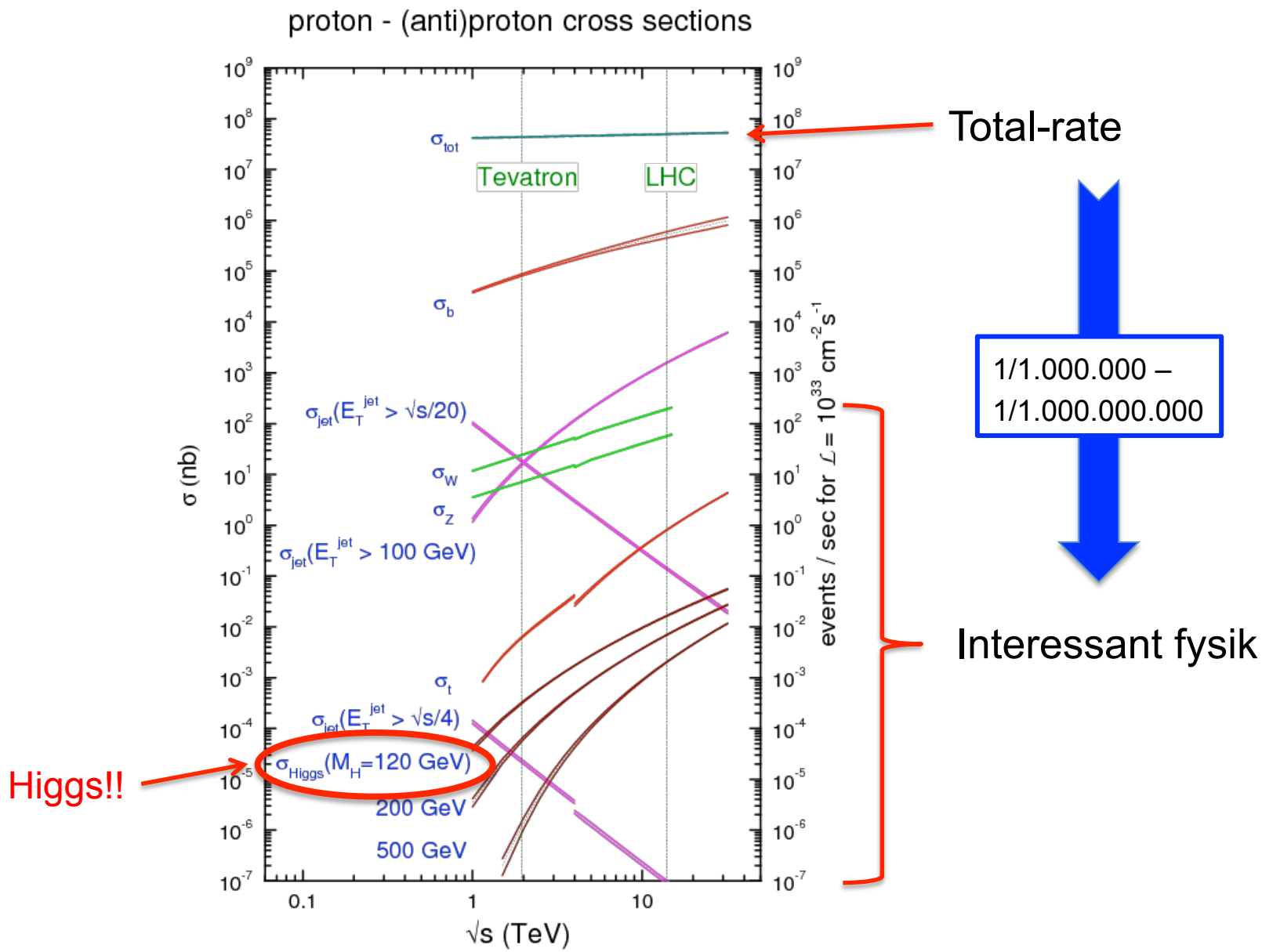
Protonerne bevæger sig med 99.9999...% af lysets hastighed (11 km/t langsommere)  
Pakker med 100 milliarder partikler kolliderer 40.0000.000 gange per sekund.

# ATLAS Detektoren

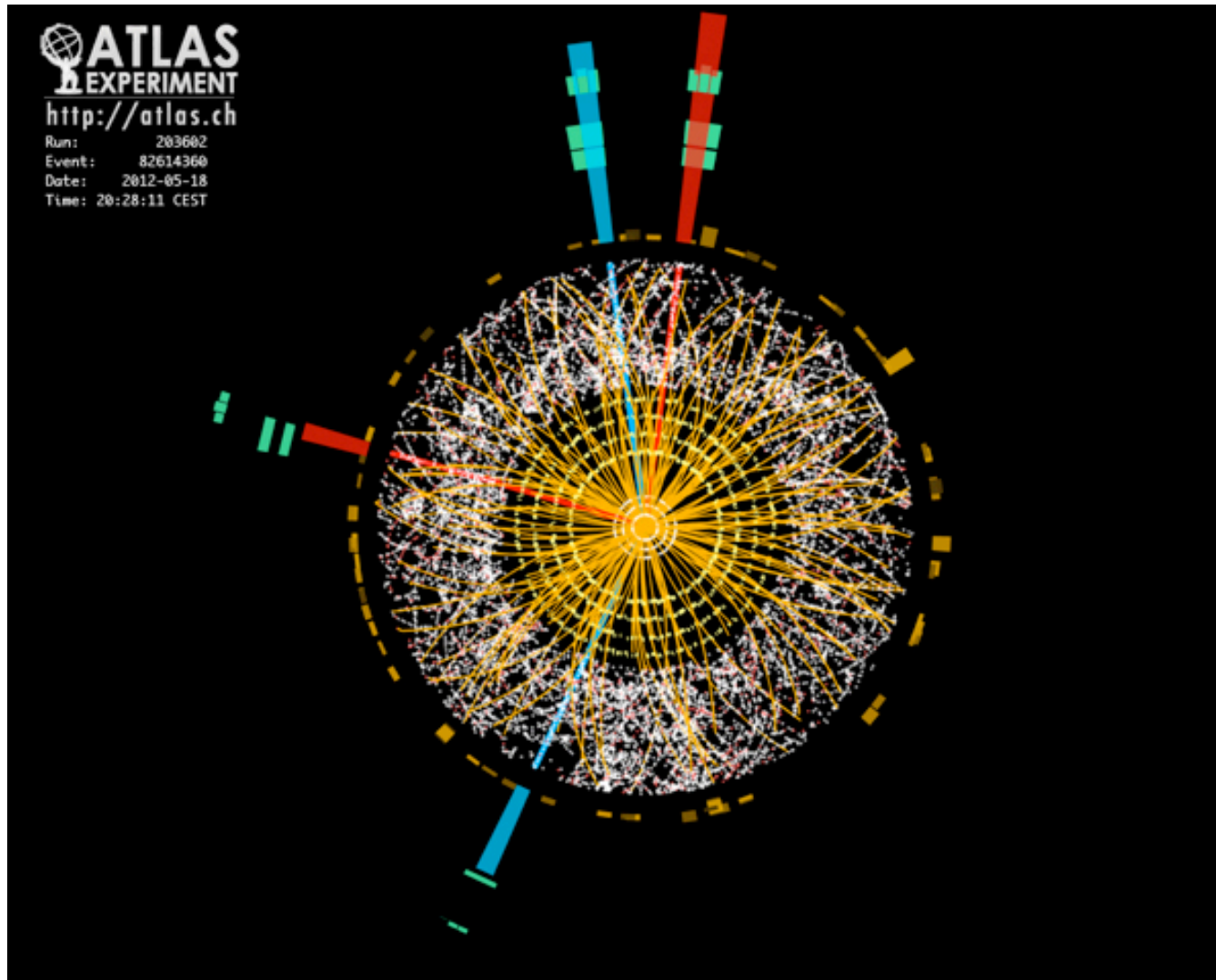


Opgaven: Find, type-bestem og mål alt om alle partikler, der kommer ud fra kollisionen

# Interessante begivenheder er sjændne



# En ATLAS begivenhed



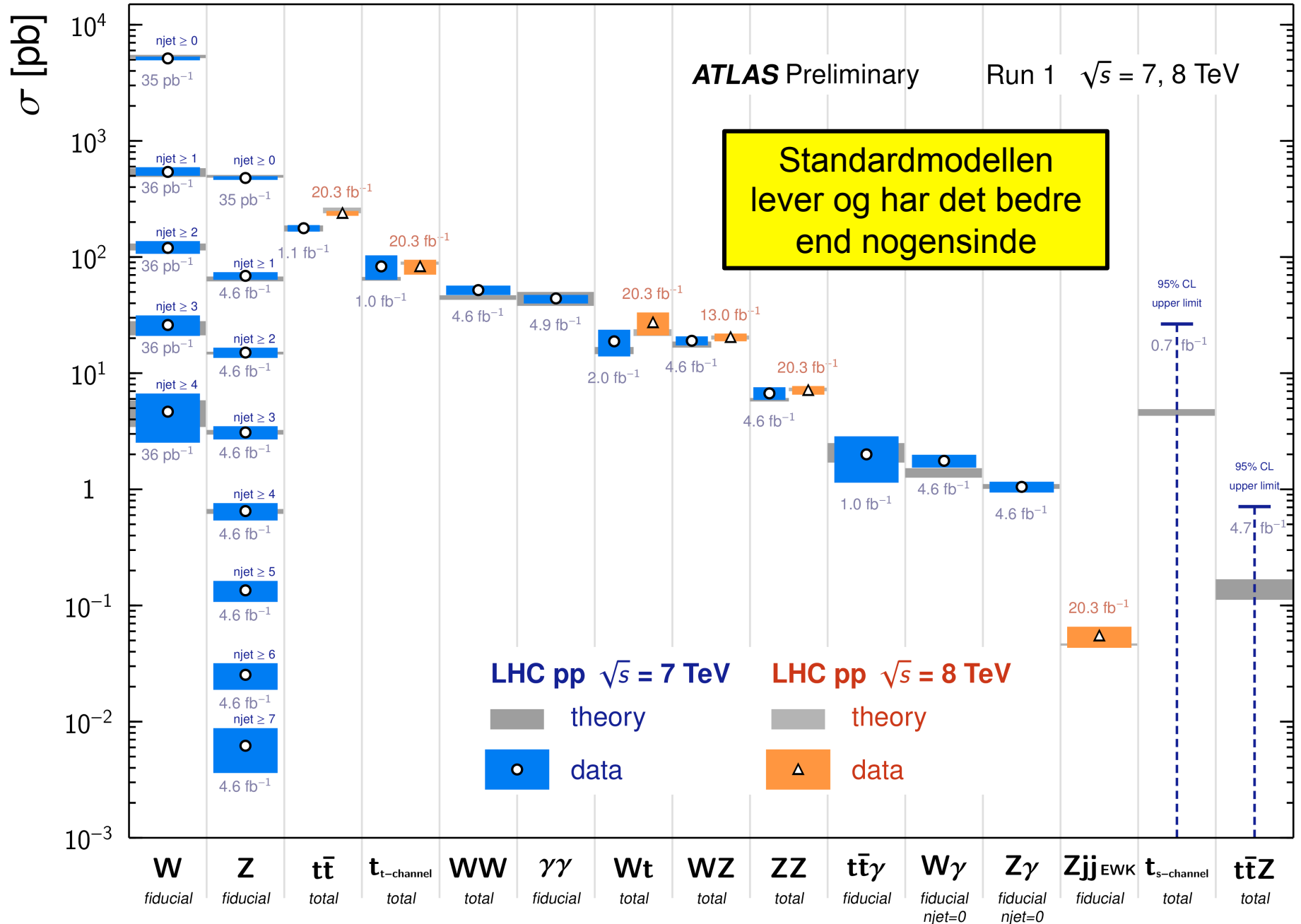
Higgs-kandidat:  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ elektroner}$

# LHC resultater fra “Run 1” [Ikke-Higgs]

Ekstremt skematisk

# Standard Model Production Cross Section Measurements

Status: March 2014





Søgt efter alskens "ny fysik". Intet fundet så vidt...

| Model   | $e, \mu, \tau, \gamma$  | Jets                        | $E_T^{\text{miss}}$ | $\int \mathcal{L} dt [\text{fb}^{-1}]$ |                 | Reference                               |   |                      |
|---|---|-----------------------------|---------------------|--|-----------------|---|---|----------------------|
| Inclusive Searches  | MSUGRA/CMSSM  | 0                           | 2-6 jets            | Yes                                    | 20.3            | $\tilde{q}, \tilde{g}$                  | $m(\tilde{q})=m(\tilde{g})$   | ATLAS-CONF-2013-047  |
|   | MSUGRA/CMSSM  | 1 $e, \mu$                  | 3-6 jets            | Yes                                    | 20.3            | $\tilde{g}$                             | any $m(\tilde{q})$  | ATLAS-CONF-2013-062  |
|   | MSUGRA/CMSSM  | 0                           | 7-10 jets           | Yes                                    | 20.3            | $\tilde{g}$                             | any $m(\tilde{q})$  | 1308.1841            |
|   | $\tilde{q}\tilde{q}, \tilde{q} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0$   | 0                           | 2-6 jets            | Yes                                    | 20.3            | $\tilde{q}$                             | $m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$   | ATLAS-CONF-2013-047  |
|   | $\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}\tilde{\chi}_1^0$  | 0                           | 2-6 jets            | Yes                                    | 20.3            | $\tilde{g}$                             | $m(\tilde{\chi}_1^0) < 0 \text{ GeV}$   | ATLAS-CONF-2013-047  |
|   | $\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow q\tilde{q}W^\pm\tilde{\chi}_1^0$  | 1 $e, \mu$                  | 3-6 jets            | Yes                                    | 20.3            | $\tilde{g}$                             | $m(\tilde{\chi}_1^0) < 200 \text{ GeV}, m(\tilde{\chi}^\pm)=0.5(m(\tilde{\chi}_1^0)+m(\tilde{g}))$  | ATLAS-CONF-2013-062  |
|   | $\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}\ell(\ell/\nu)/\nu\tilde{\chi}_1^0$  | 2 $e, \mu$                  | 0-3 jets            | -                                      | 20.3            | $\tilde{g}$                             | $m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$   | ATLAS-CONF-2013-089  |
|   | GMSB ( $\tilde{\ell}$ NLSP)   | 2 $e, \mu$                  | 2-4 jets            | Yes                                    | 4.7             | $\tilde{g}$                             | $\tan\beta < 15$  | 1208.4688            |
|   | GMSB ( $\tilde{\ell}$ NLSP)   | 1-2 $\tau$                  | 0-2 jets            | Yes                                    | 20.7            | $\tilde{g}$                             | $\tan\beta > 18$  | ATLAS-CONF-2013-026  |
|   | GGM (bino NLSP)   | 2 $\gamma$                  | -                   | Yes                                    | 20.3            | $\tilde{g}$                             | $m(\tilde{\chi}_1^0) > 50 \text{ GeV}$  | ATLAS-CONF-2014-001  |
|   | GGM (wino NLSP)   | 1 $e, \mu + \gamma$         | -                   | Yes                                    | 4.8             | $\tilde{g}$                             | $m(\tilde{\chi}_1^0) > 50 \text{ GeV}$  | ATLAS-CONF-2012-144  |
|   | GGM (higgsino-bino NLSP)  | $\gamma$                    | 1 $b$               | Yes                                    | 4.8             | $\tilde{g}$                             | $m(\tilde{\chi}_1^0) > 220 \text{ GeV}$   | 1211.1167            |
| GGM (higgsino NLSP)   | 2 $e, \mu$ (Z)  | 0-3 jets                    | Yes                 | 5.8                                    | $\tilde{g}$     | $m(\tilde{H}) > 200 \text{ GeV}$        | ATLAS-CONF-2012-152   |                      |
| Gravitino LSP   | 0   | mono-jet                    | Yes                 | 10.5                                   | $F^{1/2}$ scale | $m(\tilde{g}) > 10^{-4} \text{ eV}$     | ATLAS-CONF-2012-147   |                      |
| $3^{\text{rd}}$ gen. $\tilde{g}$ med.                             | $\tilde{g} \rightarrow b\tilde{b}\tilde{\chi}_1^0$  | 0                           | 3 $b$               | Yes                                    | 20.1            | $\tilde{g}$                             | $m(\tilde{\chi}_1^0) < 600 \text{ GeV}$   | ATLAS-CONF-2013-061  |
|   | $\tilde{g} \rightarrow t\tilde{t}\tilde{\chi}_1^0$  | 0                           | 7-10 jets           | Yes                                    | 20.3            | $\tilde{g}$                             | $m(\tilde{\chi}_1^0) < 350 \text{ GeV}$   | 1308.1841            |
|   | $\tilde{g} \rightarrow t\tilde{t}\tilde{\chi}_1^\pm$  | 0-1 $e, \mu$                | 3 $b$               | Yes                                    | 20.1            | $\tilde{g}$                             | $m(\tilde{\chi}_1^0) < 400 \text{ GeV}$   | ATLAS-CONF-2013-061  |
|   | $\tilde{g} \rightarrow b\tilde{t}\tilde{\chi}_1^\pm$  | 0-1 $e, \mu$                | 3 $b$               | Yes                                    | 20.1            | $\tilde{g}$                             | $m(\tilde{\chi}_1^0) < 300 \text{ GeV}$   | ATLAS-CONF-2013-061  |
| $3^{\text{rd}}$ gen. squarks direct production                    | $\tilde{b}_1\tilde{b}_1, \tilde{b}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^0$   | 0                           | 2 $b$               | Yes                                    | 20.1            | $\tilde{b}_1$                           | $m(\tilde{\chi}_1^0) < 90 \text{ GeV}$  | 1308.2631            |
|   | $\tilde{b}_1\tilde{b}_1, \tilde{b}_1 \rightarrow t\tilde{\chi}_1^\pm$   | 2 $e, \mu$ (SS)             | 0-3 $b$             | Yes                                    | 20.7            | $\tilde{b}_1$                           | $m(\tilde{\chi}_1^\pm)=2 m(\tilde{\chi}_1^0)$   | ATLAS-CONF-2013-007  |
|   | $\tilde{t}_1\tilde{t}_1$ (light), $\tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^\pm$   | 1-2 $e, \mu$                | 1-2 $b$             | Yes                                    | 4.7             | $\tilde{t}_1$                           | $m(\tilde{\chi}_1^0)=55 \text{ GeV}$  | 1208.4305, 1209.2102 |
|   | $\tilde{t}_1\tilde{t}_1$ (light), $\tilde{t}_1 \rightarrow Wb\tilde{\chi}_1^0$  | 2 $e, \mu$                  | 0-2 jets            | Yes                                    | 20.3            | $\tilde{t}_1$                           | $m(\tilde{\chi}_1^0)=m(\tilde{t}_1)-m(W)-50 \text{ GeV}, m(\tilde{t}_1) < m(\tilde{\chi}_1^\pm)$  | 1403.4853            |
|   | $\tilde{t}_1\tilde{t}_1$ (medium), $\tilde{t}_1 \rightarrow t\tilde{\chi}_1^0$  | 2 $e, \mu$                  | 2 jets              | Yes                                    | 20.3            | $\tilde{t}_1$                           | $m(\tilde{\chi}_1^0)=1 \text{ GeV}$   | 1403.4853            |
|   | $\tilde{t}_1\tilde{t}_1$ (medium), $\tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^\pm$  | 0                           | 2 $b$               | Yes                                    | 20.1            | $\tilde{t}_1$                           | $m(\tilde{\chi}_1^0) < 200 \text{ GeV}, m(\tilde{\chi}_1^\pm)-m(\tilde{\chi}_1^0)=5 \text{ GeV}$  | 1308.2631            |
|   | $\tilde{t}_1\tilde{t}_1$ (heavy), $\tilde{t}_1 \rightarrow t\tilde{\chi}_1^0$   | 1 $e, \mu$                  | 1 $b$               | Yes                                    | 20.7            | $\tilde{t}_1$                           | $m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$   | ATLAS-CONF-2013-037  |
|   | $\tilde{t}_1\tilde{t}_1$ (heavy), $\tilde{t}_1 \rightarrow t\tilde{\chi}_1^\pm$   | 0                           | 2 $b$               | Yes                                    | 20.5            | $\tilde{t}_1$                           | $m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$   | ATLAS-CONF-2013-024  |
|   | $\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0$   | 0                           | mono-jet/c-tag      | Yes                                    | 20.3            | $\tilde{t}_1$                           | $m(\tilde{t}_1)-m(\tilde{\chi}_1^0) < 85 \text{ GeV}$   | ATLAS-CONF-2013-068  |
|   | $\tilde{t}_1\tilde{t}_1$ (natural GMSB)   | 2 $e, \mu$ (Z)              | 1 $b$               | Yes                                    | 20.3            | $\tilde{t}_1$                           | $m(\tilde{\chi}_1^0) > 150 \text{ GeV}$   | 1403.5222            |
| $\tilde{t}_2\tilde{t}_2, \tilde{t}_2 \rightarrow \tilde{t}_1 + Z$ | 3 $e, \mu$ (Z)  | 1 $b$                       | Yes                 | 20.3                                   | $\tilde{t}_2$   | $m(\tilde{\chi}_1^0) < 200 \text{ GeV}$ | 1403.5222   |                      |
| EW direct   | $\tilde{L}_{LR}\tilde{L}_{LR}, \tilde{\ell} \rightarrow \ell\tilde{\chi}_1^0$   | 2 $e, \mu$                  | 0                   | Yes                                    | 20.3            | $\tilde{\ell}$                          | $m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$   | 1403.5294            |
|   | $\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \ell\nu(\ell\bar{\nu})$   | 2 $e, \mu$                  | 0                   | Yes                                    | 20.3            | $\tilde{\chi}_1^\pm$                    | $m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}, m(\tilde{\ell}, \tilde{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_1^\pm)+m(\tilde{\chi}_1^0))$                                | 1403.5294            |
|   | $\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\tau}\nu(\tilde{\tau}\bar{\nu})$   | 2 $\tau$                    | -                   | Yes                                    | 20.7            | $\tilde{\chi}_1^\pm$                    | $m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}, m(\tilde{\tau}, \tilde{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_1^\pm)+m(\tilde{\chi}_1^0))$                                | ATLAS-CONF-2013-028  |
|   | $\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\ell}_L\nu\tilde{\ell}_L\ell(\bar{\nu}\nu), \ell\tilde{\nu}\tilde{\ell}_L\ell(\bar{\nu}\nu)$                 | 3 $e, \mu$                  | 0                   | Yes                                    | 20.3            | $\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^0$  | $m(\tilde{\chi}_1^\pm)=m(\tilde{\chi}_2^0), m(\tilde{\chi}_1^0)=0, m(\tilde{\ell}, \tilde{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_1^\pm)+m(\tilde{\chi}_1^0))$ | 1402.7029            |
|   | $\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0 Z\tilde{\chi}_1^0$  | 2-3 $e, \mu$                | 0                   | Yes                                    | 20.3            | $\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^0$  | $m(\tilde{\chi}_1^\pm)=m(\tilde{\chi}_2^0), m(\tilde{\chi}_1^0)=0, \text{ sleptons decoupled}$  | 1403.5294, 1402.7029 |
|   | $\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow W\tilde{\chi}_1^\pm h\tilde{\chi}_1^0$  | 1 $e, \mu$                  | 2 $b$               | Yes                                    | 20.3            | $\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_2^0$  | $m(\tilde{\chi}_1^\pm)=m(\tilde{\chi}_2^0), m(\tilde{\chi}_1^0)=0, \text{ sleptons decoupled}$  | ATLAS-CONF-2013-093  |
| Long-lived particles  | Direct $\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_1^\pm$ prod., long-lived $\tilde{\chi}_1^\pm$  | Disapp. trk                 | 1 jet               | Yes                                    | 20.3            | $\tilde{\chi}_1^\pm$                    | $m(\tilde{\chi}_1^\pm)-m(\tilde{\chi}_1^0)=160 \text{ MeV}, \tau(\tilde{\chi}_1^\pm)=0.2 \text{ ns}$  | ATLAS-CONF-2013-069  |
|   | Stable, stopped $\tilde{g}$ R-hadron  | 0                           | 1-5 jets            | Yes                                    | 22.9            | $\tilde{g}$                             | $m(\tilde{\chi}_1^0)=100 \text{ GeV}, 10 \mu\text{s} < \tau(\tilde{g}) < 1000 \text{ s}$  | ATLAS-CONF-2013-057  |
|   | GMSB, stable $\tilde{\tau}, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{\tau}(\tilde{e}, \tilde{\mu}) + \tau(e, \mu)$   | 1-2 $\mu$                   | -                   | -                                      | 15.9            | $\tilde{\chi}_1^0$                      | $10 < \tan\beta < 50$   | ATLAS-CONF-2013-058  |
|   | GMSB, $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{G}, \text{ long-lived } \tilde{\chi}_1^0$  | 2 $\gamma$                  | -                   | Yes                                    | 4.7             | $\tilde{\chi}_1^0$                      | $0.4 < \tau(\tilde{\chi}_1^0) < 2 \text{ ns}$   | 1304.6310            |
|   | $\tilde{q}\tilde{q}, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow q\tilde{q}\mu$ (RPV)  | 1 $\mu, \text{ displ. vtx}$ | -                   | -                                      | 20.3            | $\tilde{q}$                             | $1.5 < c\tau < 156 \text{ mm}, \text{BR}(\mu)=1, m(\tilde{\chi}_1^0)=108 \text{ GeV}$   | ATLAS-CONF-2013-092  |
| RPV   | LFV $pp \rightarrow \tilde{\nu}_\tau + X, \tilde{\nu}_\tau \rightarrow e + \mu$   | 2 $e, \mu$                  | -                   | -                                      | 4.6             | $\tilde{\nu}_\tau$                      | $\lambda'_{311}=0.10, \lambda_{132}=0.05$   | 1212.1272            |
|   | LFV $pp \rightarrow \tilde{\nu}_\tau + X, \tilde{\nu}_\tau \rightarrow e(\mu) + \tau$   | 1 $e, \mu + \tau$           | -                   | -                                      | 4.6             | $\tilde{\nu}_\tau$                      | $\lambda'_{311}=0.10, \lambda_{1(2)33}=0.05$  | 1212.1272            |
|   | Bilinear RPV CMSSM  | 1 $e, \mu$                  | 7 jets              | Yes                                    | 4.7             | $\tilde{q}, \tilde{g}$                  | $m(\tilde{q})=m(\tilde{g}), c\tau_{LSP} < 1 \text{ mm}$   | ATLAS-CONF-2012-140  |
|   | $\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow ee\tilde{\nu}_\mu, e\mu\tilde{\nu}_e$         | 4 $e, \mu$                  | -                   | Yes                                    | 20.7            | $\tilde{\chi}_1^\pm$                    | $m(\tilde{\chi}_1^0) > 300 \text{ GeV}, \lambda_{121} > 0$  | ATLAS-CONF-2013-036  |
|   | $\tilde{\chi}_1^\pm\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tau\tau\tilde{\nu}_e, e\tau\tilde{\nu}_\tau$ | 3 $e, \mu + \tau$           | -                   | Yes                                    | 20.7            | $\tilde{\chi}_1^\pm$                    | $m(\tilde{\chi}_1^0) > 80 \text{ GeV}, \lambda_{133} > 0$   | ATLAS-CONF-2013-036  |
|   | $\tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}q$   | 0                           | 6-7 jets            | -                                      | 20.3            | $\tilde{g}$                             | $\text{BR}(\tau)=\text{BR}(b)=\text{BR}(c)=0\%$   | ATLAS-CONF-2013-091  |
| $\tilde{g} \rightarrow \tilde{t}_1 t, \tilde{t}_1 \rightarrow bs$ | 2 $e, \mu$ (SS)   | 0-3 $b$                     | Yes                 | 20.7                                   | $\tilde{g}$     |   | ATLAS-CONF-2013-007   |                      |
| Other   | Scalar gluon pair, $\text{sgluon} \rightarrow q\tilde{q}$   | 0                           | 4 jets              | -                                      | 4.6             | sgluon                                  | incl. limit from 1110.2693  | 1210.4826            |
|   | Scalar gluon pair, $\text{sgluon} \rightarrow t\bar{t}$   | 2 $e, \mu$ (SS)             | 2 $b$               | Yes                                    | 14.3            | sgluon                                  |   | ATLAS-CONF-2013-051  |
|   | WIMP interaction (D5, Dirac $\chi$ )  | 0                           | mono-jet            | Yes                                    | 10.5            | $M^*$ scale                             | $m(\chi) < 80 \text{ GeV}, \text{limit of } < 687 \text{ GeV for D8}$   | ATLAS-CONF-2012-147  |

$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$  full data  $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$  partial data  $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$  full data

Mass scale [TeV]

\*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. All limits quoted are observed minus  $1\sigma$  theoretical signal cross section uncertainty.

# ATLAS Exotics Searches\* - 95% CL Lower Limits (Status: May 2013)

ATLAS  
Preliminary

$\int L dt = (1 - 20) \text{ fb}^{-1}$   
 $\sqrt{s} = 7, 8 \text{ TeV}$

Extra dimensions

CI

V'

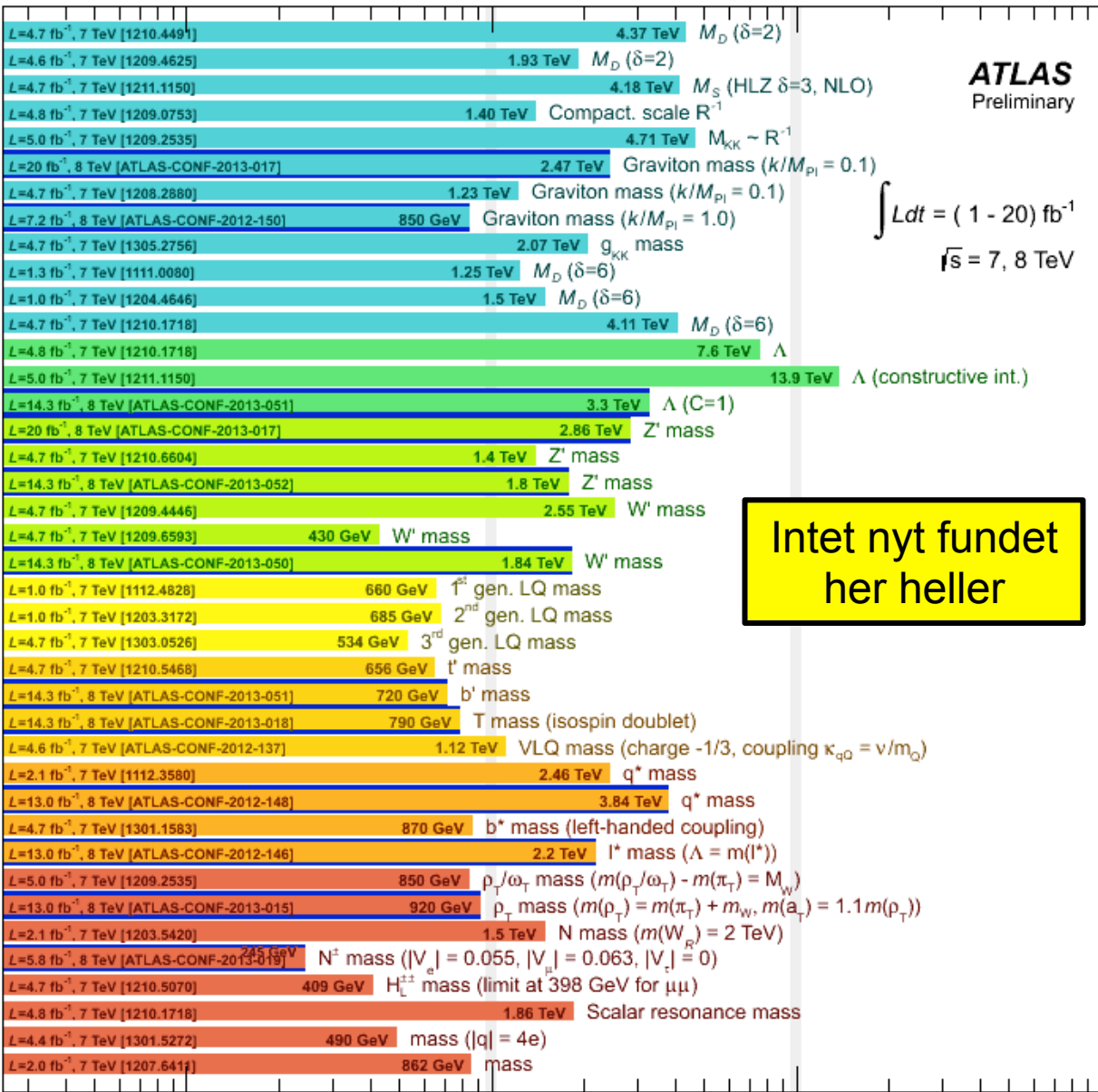
LQ

New quarks

Excit. ferm.

Other

- Large ED (ADD) : monojet +  $E_{T,miss}$
- Large ED (ADD) : monophoton +  $E_{T,miss}$
- Large ED (ADD) : diphoton & dilepton,  $m_{\gamma\gamma/\ell\ell}$
- UED : diphoton +  $E_{T,miss}$
- $S^1/Z_2$  ED : dilepton,  $m_{\ell\ell}$
- RS1 : dilepton,  $m_{\ell\ell}$
- RS1 : WW resonance,  $m_{T,NV}$
- Bulk RS : ZZ resonance,  $m_{\ell\ell}$
- RS  $g_{KK} \rightarrow t\bar{t}$  (BR=0.925) :  $t\bar{t} \rightarrow l+jets$ ,  $m_{t\bar{t}}$
- ADD BH ( $M_{TH}/M_D=3$ ) : SS dimuon,  $N_{ch,part}$
- ADD BH ( $M_{TH}/M_D=3$ ) : leptons + jets,  $\Sigma p_T$
- Quantum black hole : dijet,  $F(m_{jj})$
- qqqq contact interaction :  $\chi(m_{jj})$
- qqll CI : ee &  $\mu\mu$ ,  $m_{\ell\ell}$
- uutt CI : SS dilepton + jets +  $E_{T,miss}$
- Z' (SSM) :  $m_{ee/\mu\mu}$
- Z' (SSM) :  $m_{\tau\tau}$
- Z' (leptophobic topcolor) :  $t\bar{t} \rightarrow l+jets$ ,  $m_{t\bar{t}}$
- W' (SSM) :  $m_{T,e/\mu}$
- W' ( $\rightarrow tq, g_R=1$ ) :  $m_{tq}$
- W' ( $\rightarrow tb, LRSM$ ) :  $m_{tb}$
- Scalar LQ pair ( $\beta=1$ ) : kin. vars. in eejj, evjj
- Scalar LQ pair ( $\beta=1$ ) : kin. vars. in  $\mu\mu jj, \mu\nu jj$
- Scalar LQ pair ( $\beta=1$ ) : kin. vars. in  $\tau\tau jj, \tau\nu jj$
- 4<sup>th</sup> generation : b'b'  $\rightarrow$  SS dilepton + jets +  $E_{T,miss}$
- 4<sup>th</sup> generation : t't'  $\rightarrow$  WbWb
- Vector-like quark : TT  $\rightarrow$  Ht+X
- Vector-like quark : CC,  $m_{lv,q}$
- Excited quarks :  $\gamma$ -jet resonance,  $m_{\gamma jet}$
- Excited quarks : dijet resonance,  $m_{jj}$
- Excited b quark : W-t resonance,  $m_{Wt}$
- Excited leptons : l- $\gamma$  resonance,  $m_{l\gamma}$
- Techni-hadrons (LSTC) : dilepton,  $m_{ee/\mu\mu}$
- Techni-hadrons (LSTC) : WZ resonance (h $\nu$ l),  $m_{WZ}$
- Major. neutr. (LRSM, no mixing) : 2-lep + jets
- Heavy lepton N<sup>±</sup> (type III seesaw) : Z-l resonance,  $m_{Zl}$
- H<sub>L</sub><sup>±±</sup> (DY prod., BR(H<sub>L</sub><sup>±±</sup>→ll)=1) : SS ee ( $\mu\mu$ ),  $m_{ee}$
- Color octet scalar : dijet resonance,  $m_{jj}$
- Multi-charged particles (DY prod.) : highly ionizing tracks
- Magnetic monopoles (DY prod.) : highly ionizing tracks



Intet nyt fundet her heller

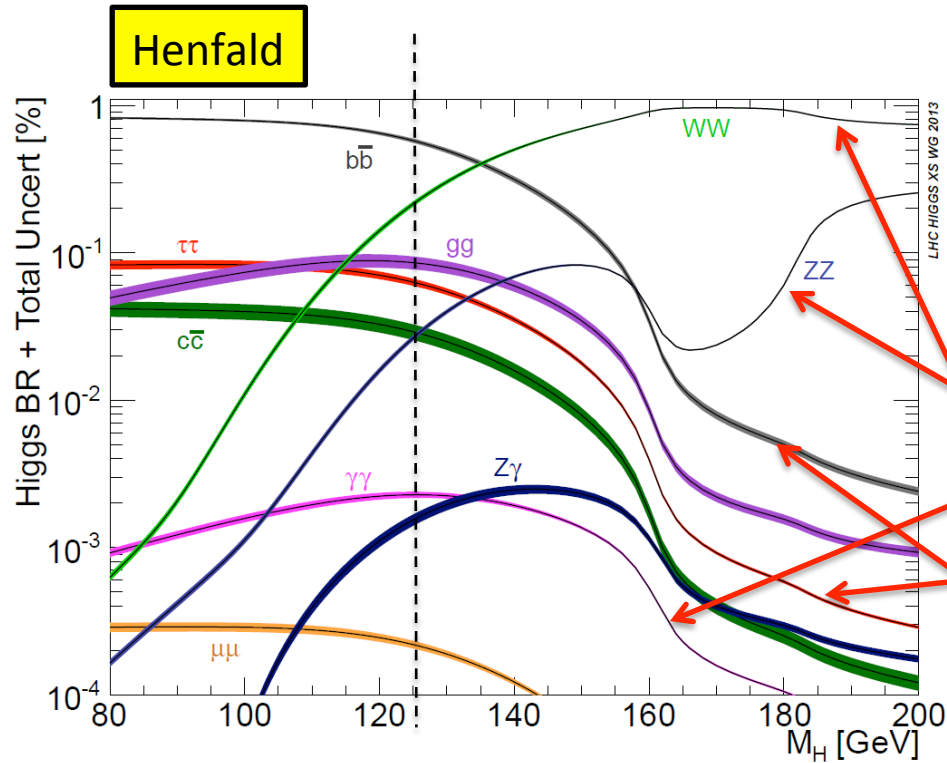
10<sup>-1</sup> 1 10 10<sup>2</sup>  
Mass scale [TeV]

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

# LHC resultater fra “Run 1” [Higgs]



# Higgs ved LHC



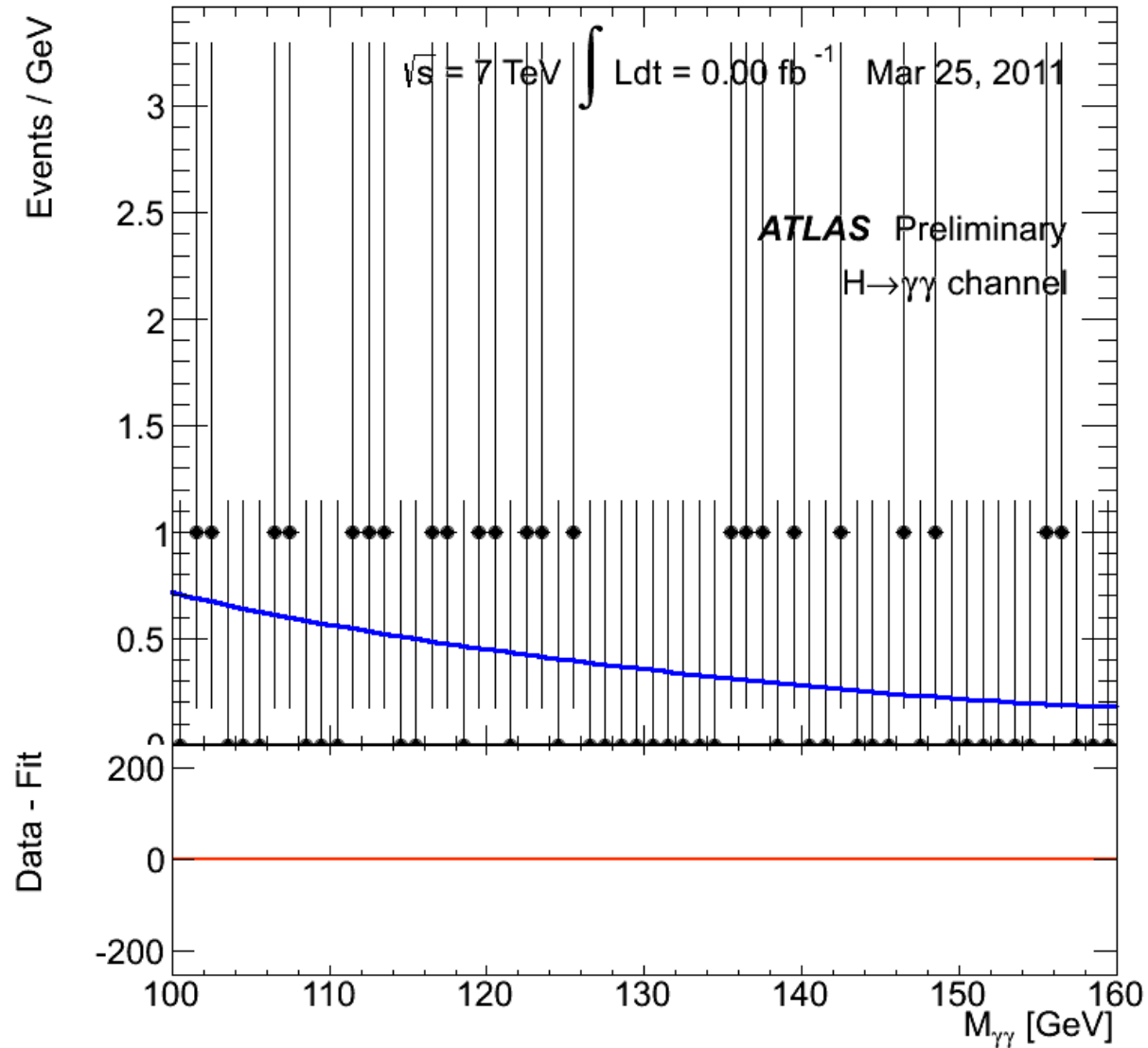
Mange forskellige henfalds-kanaler.  
De hyppige er desværre de vanskeligste at skelne fra baggrund.

Påviste henfald:

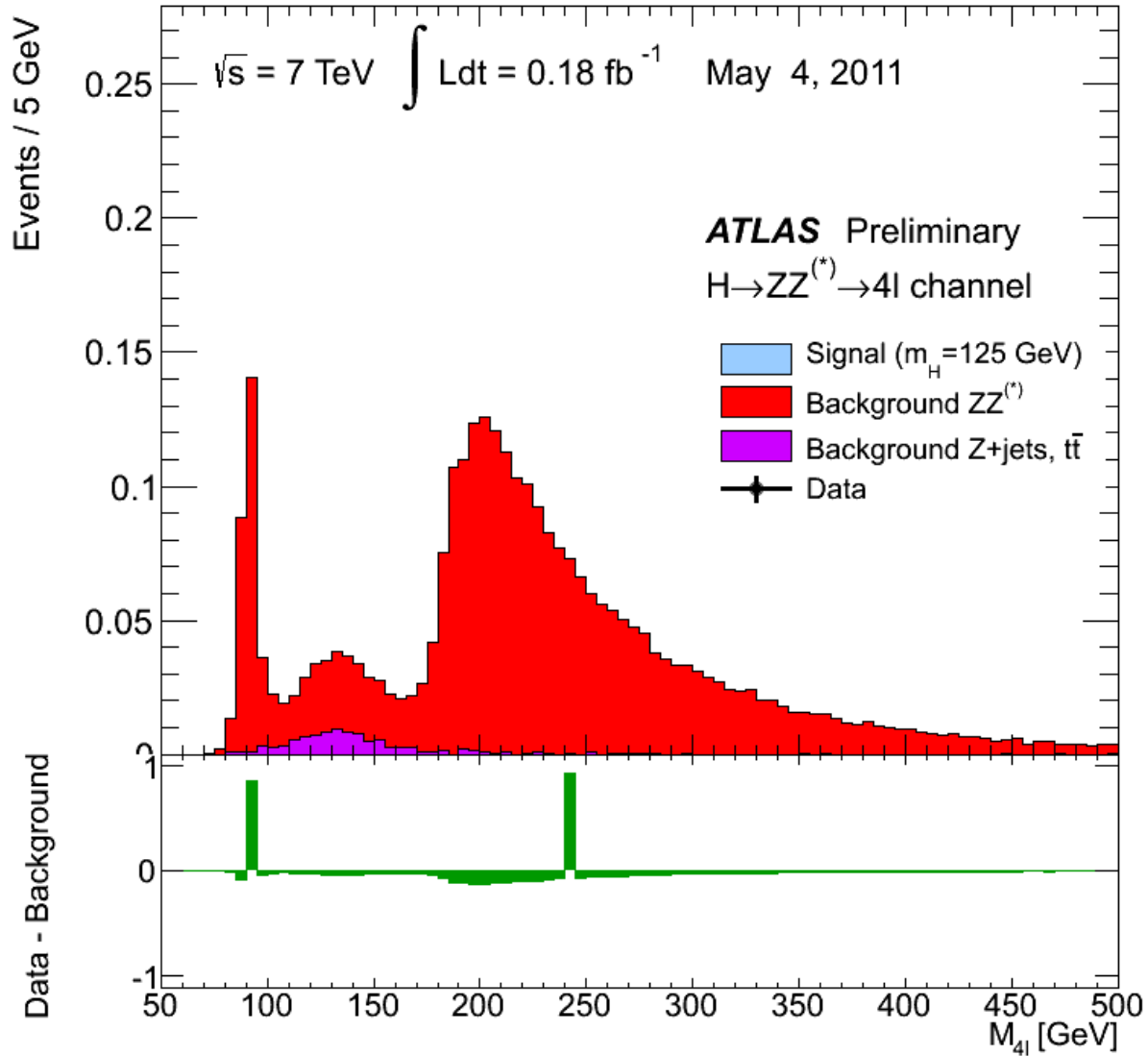
- $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$  ( $l$ =elektron ell. muon)
- $H \rightarrow \text{gamma} + \text{gamma}$
- $H \rightarrow WW$
- $H \rightarrow \text{tau tau}$
- $H \rightarrow b\bar{b}$



# Higgs til 2 fotoner

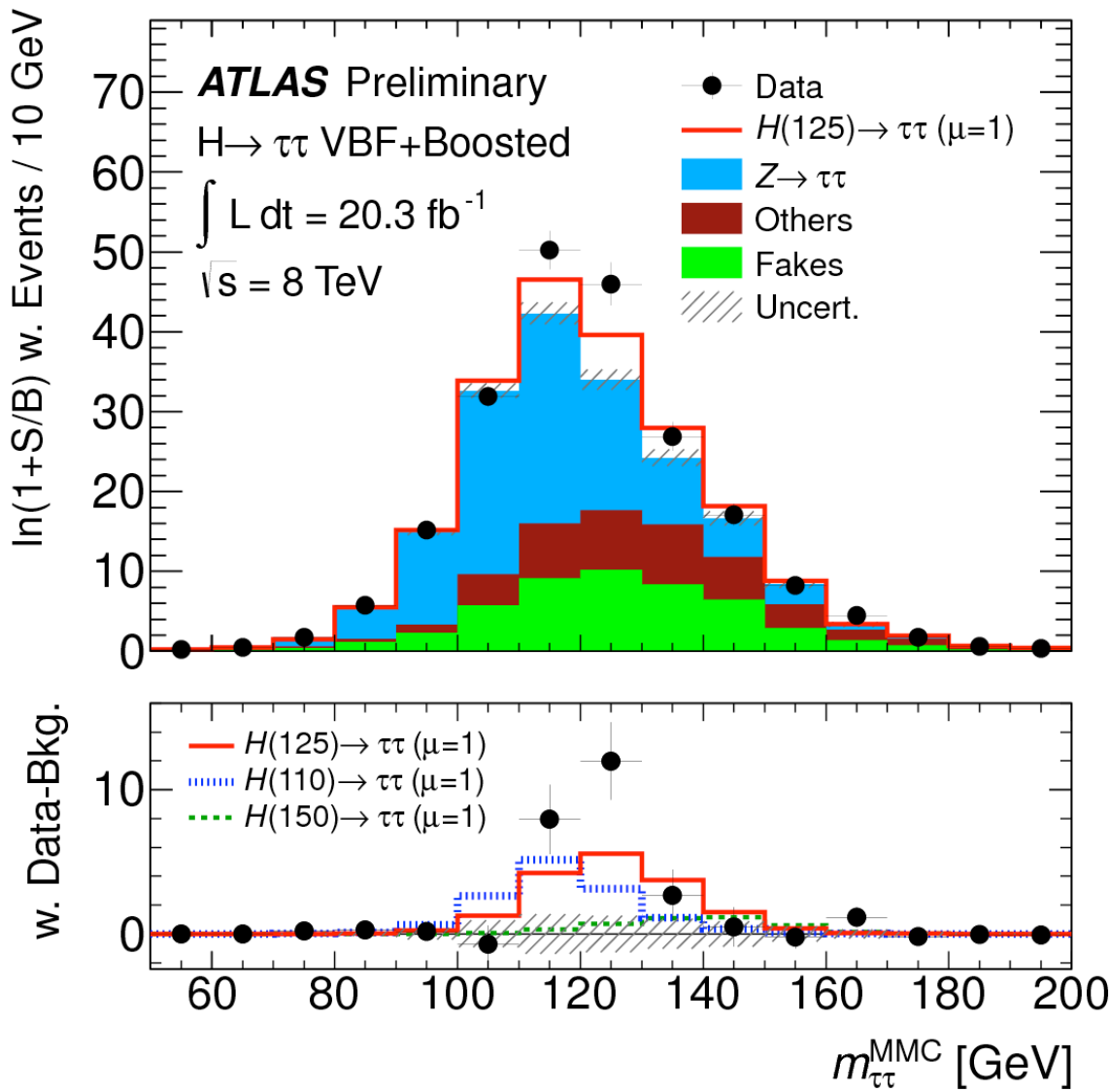


# Higgs til ZZ til 4 leptoner



NBI bidrag

# Higgs to $\tau^+\tau^-$



NBI bidrag

# Higgs-partiklen - hvad vi ved så vidt

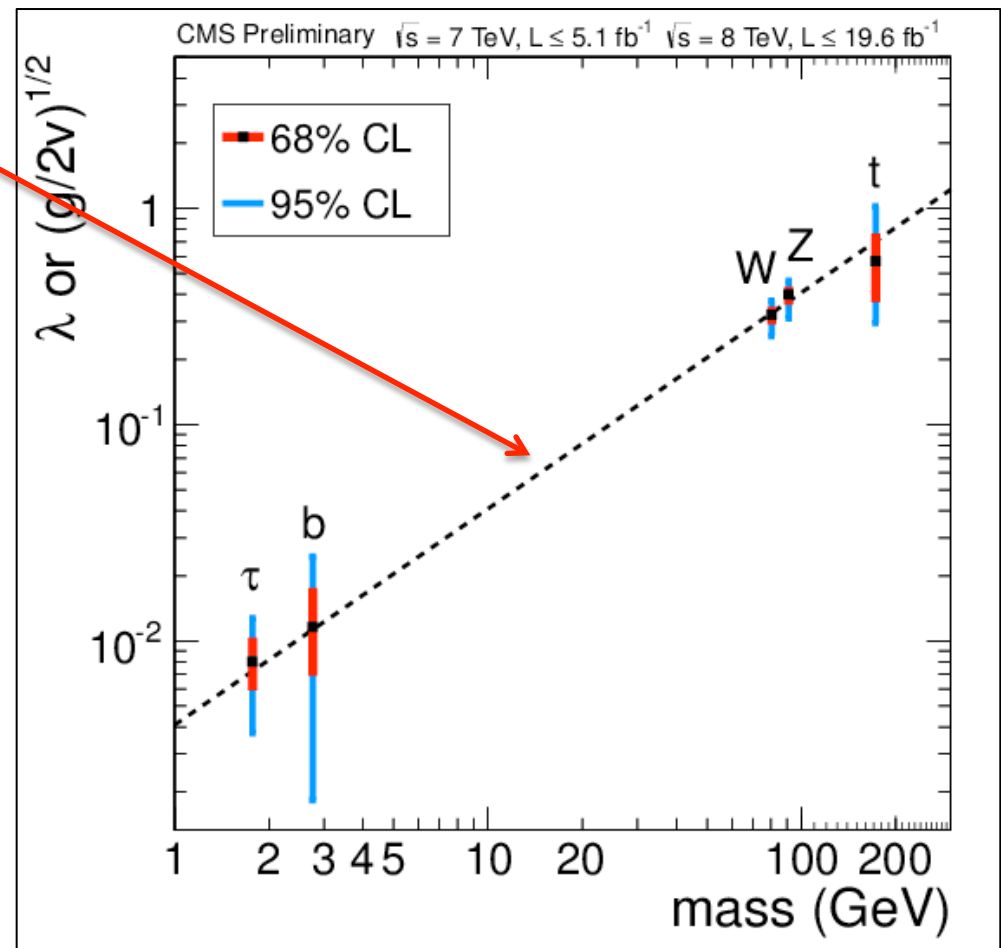
Alt, hvad vi hidtil har målt, bekræfter, at den nye partikel ved 125 GeV opfører sig som Higgs-bosonen fra Standardmodellen.

Ja, Higgs-koblingen er proportional med massen, som forudsagt (ret linje).

Også måling af spin og paritet stemmer med Standardmodellens  $J^P = 0^+$

Usikkerheder endnu store:

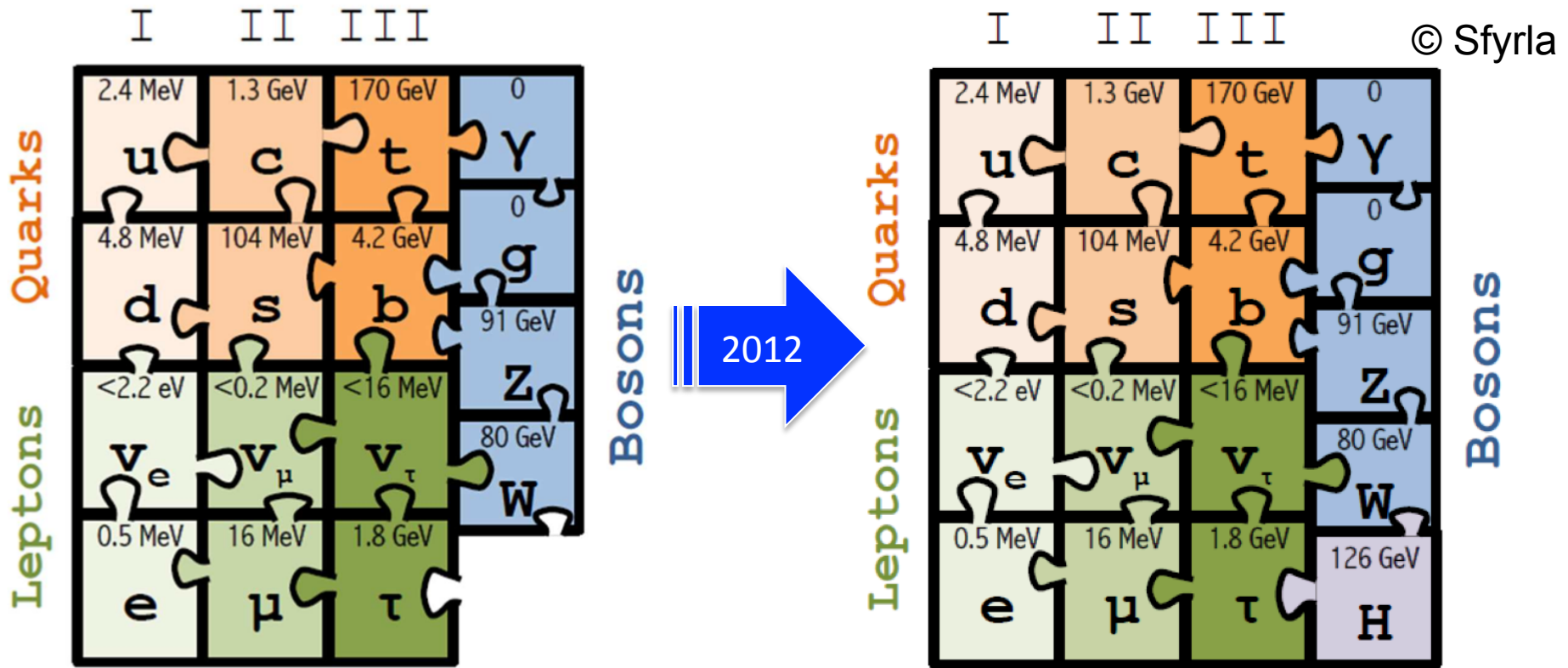
- Begrænset af statistik
- Vi må samle mere data!
- LHC er en "Higgs factory"





# Status af Standardmodellen efter LHC Run 1

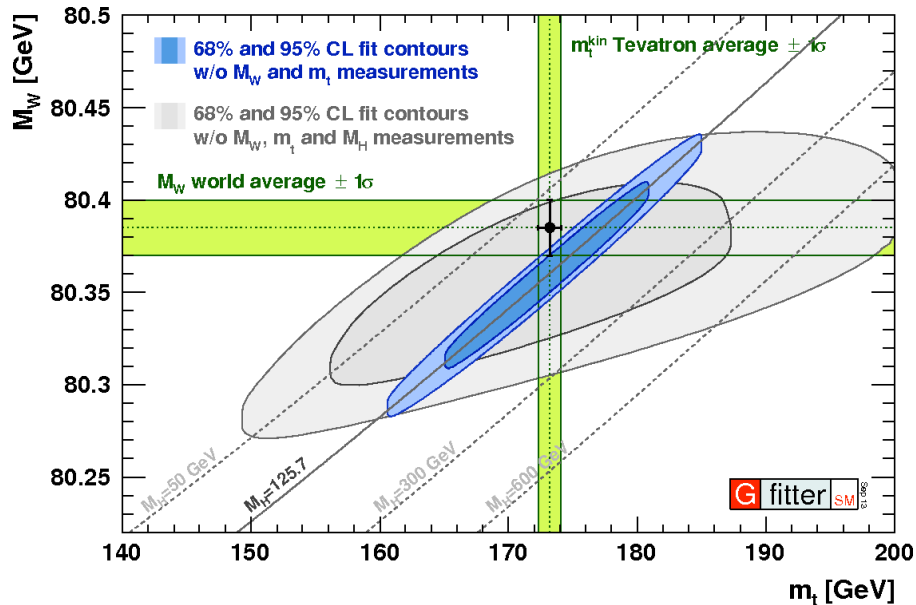
# Standardmodellen efter Higgs-partiklens opdagelse



Med opdagelsen af Higgs-partiklen har vi for første gang i historien en **komplet, selv-konsistent teori**, som lader sig ekstrapolere til eksponentielt højere energier.

- *Teoretisk ikke tvingende nødvendig, at der findes ny fysik.*

# Status at Standardmodellen anno 2014

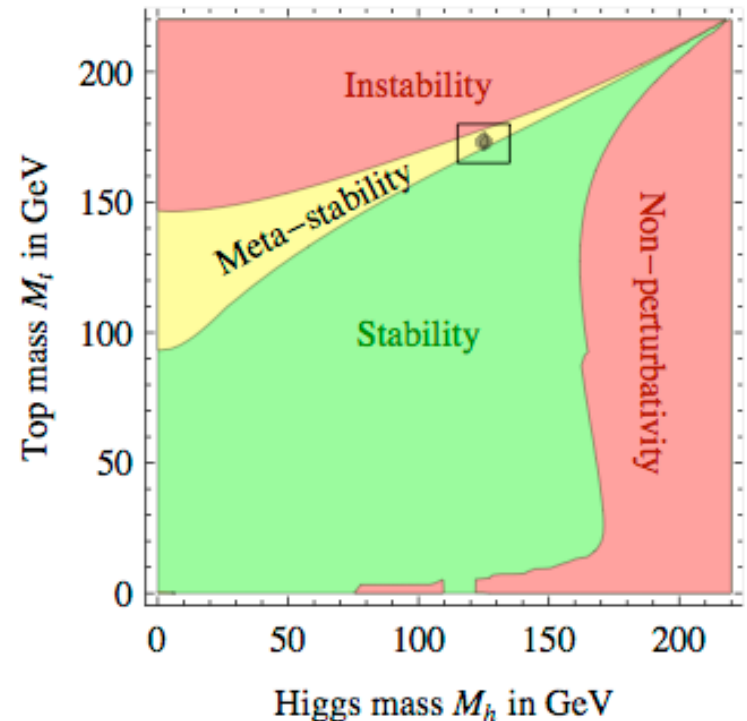


Higgs-massen er i overensstemmelse med præcisionsdata

- Ikke overraskende, idet præcisionsdata jo netop forudsagde en let Higgs, præcis som vi fandt den

Men vi ser ud til, at kunne være havnet i et meta-stabilt vacuum...

- Efter sigende, ingen grund til panik



# En komplet teori? Har vi da nået målet?

Så afgjort ikke!

Der findes adskillige **eksperimentelle** beviser for, at der er mere at forstå:

- a. Mørkt stof
- b. Baryon-asymmetrien i Universet
- c. Neutrino-masser

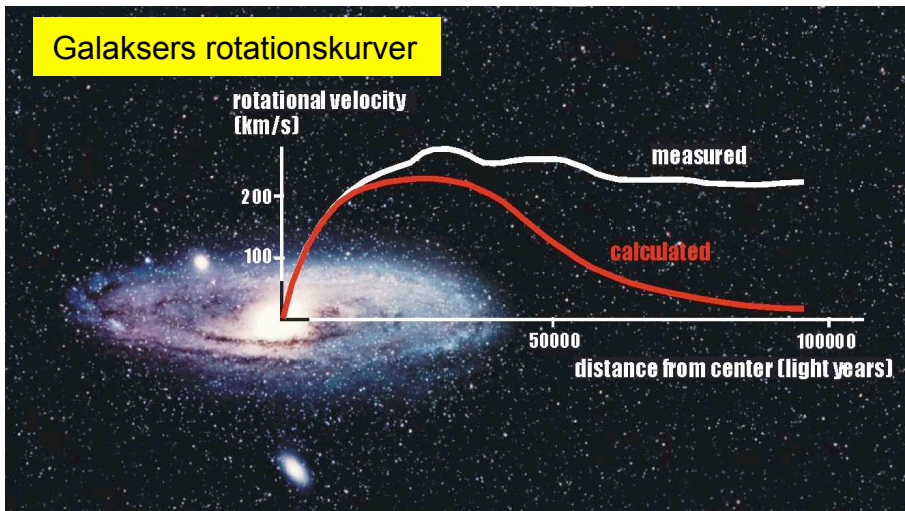
Derudover er der **teoretiske** problemer med Higgs-massen i Standardmodellen:

- d. Hieraki-problemet

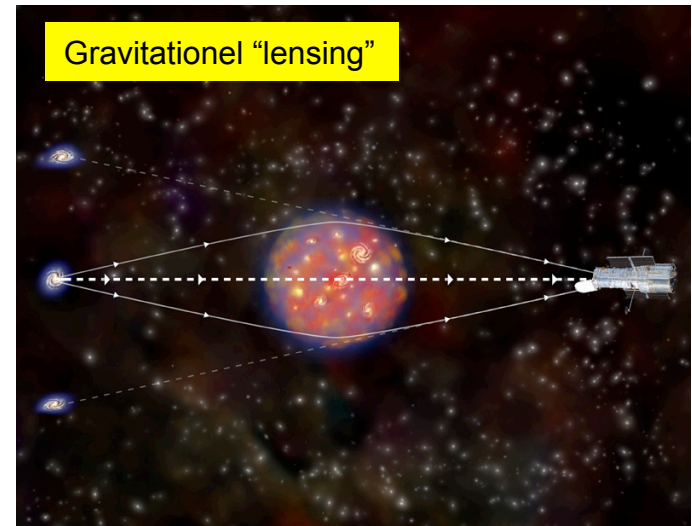
**Vi må forsætte vores mission!**

# Mørkt stof: Overvældende evidens

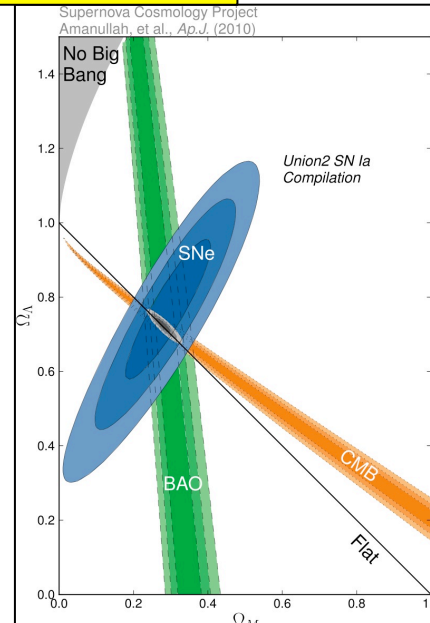
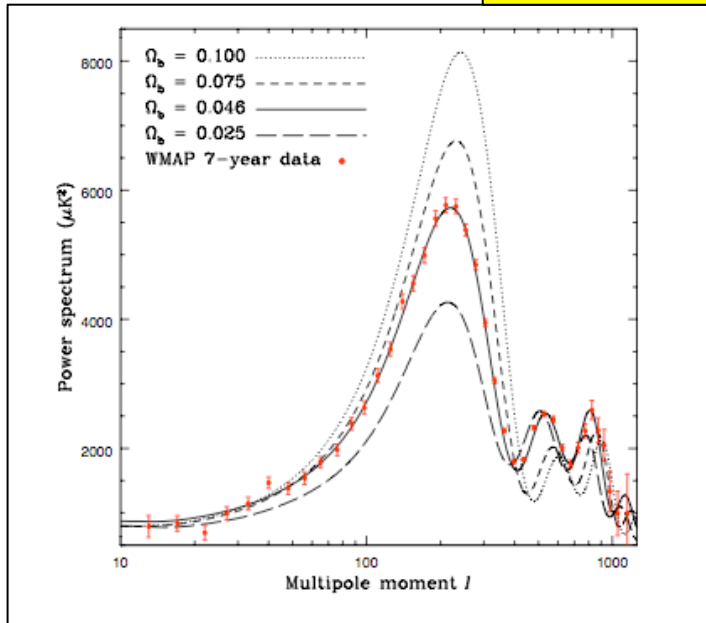
Galaxers rotationskurver



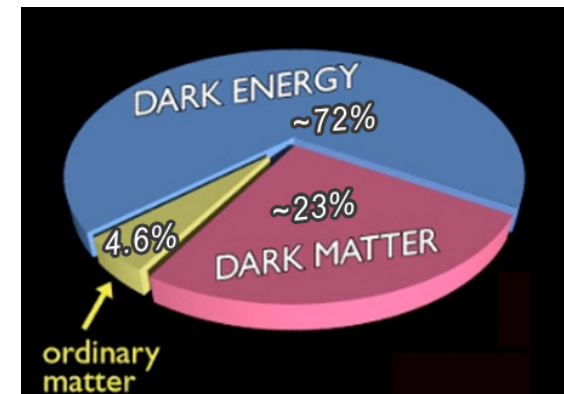
Gravitationel "lensing"



Cosmic microwave background



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

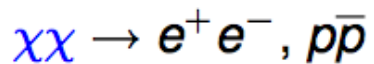


"Mørk energi": spørg ikke mig...

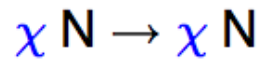
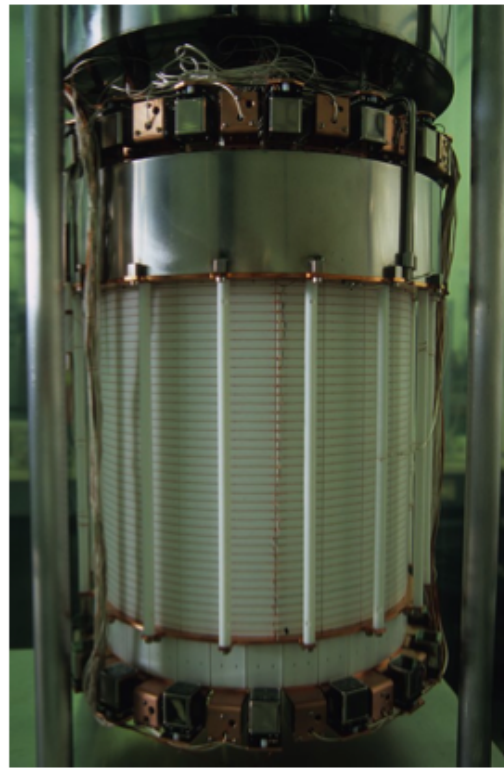
# Mørkt stof: Direkte eftersøgning

WIMP = Weakly Interacting Massive Particles

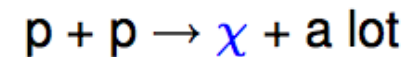
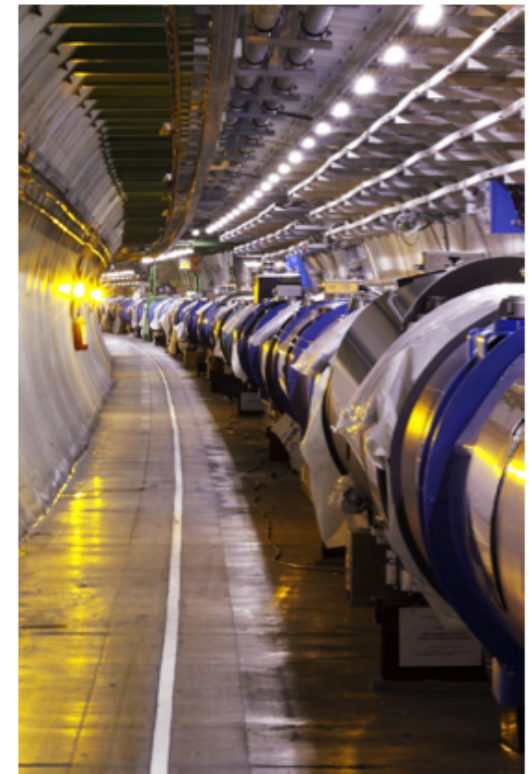
● Indirect detection



● Direct detection



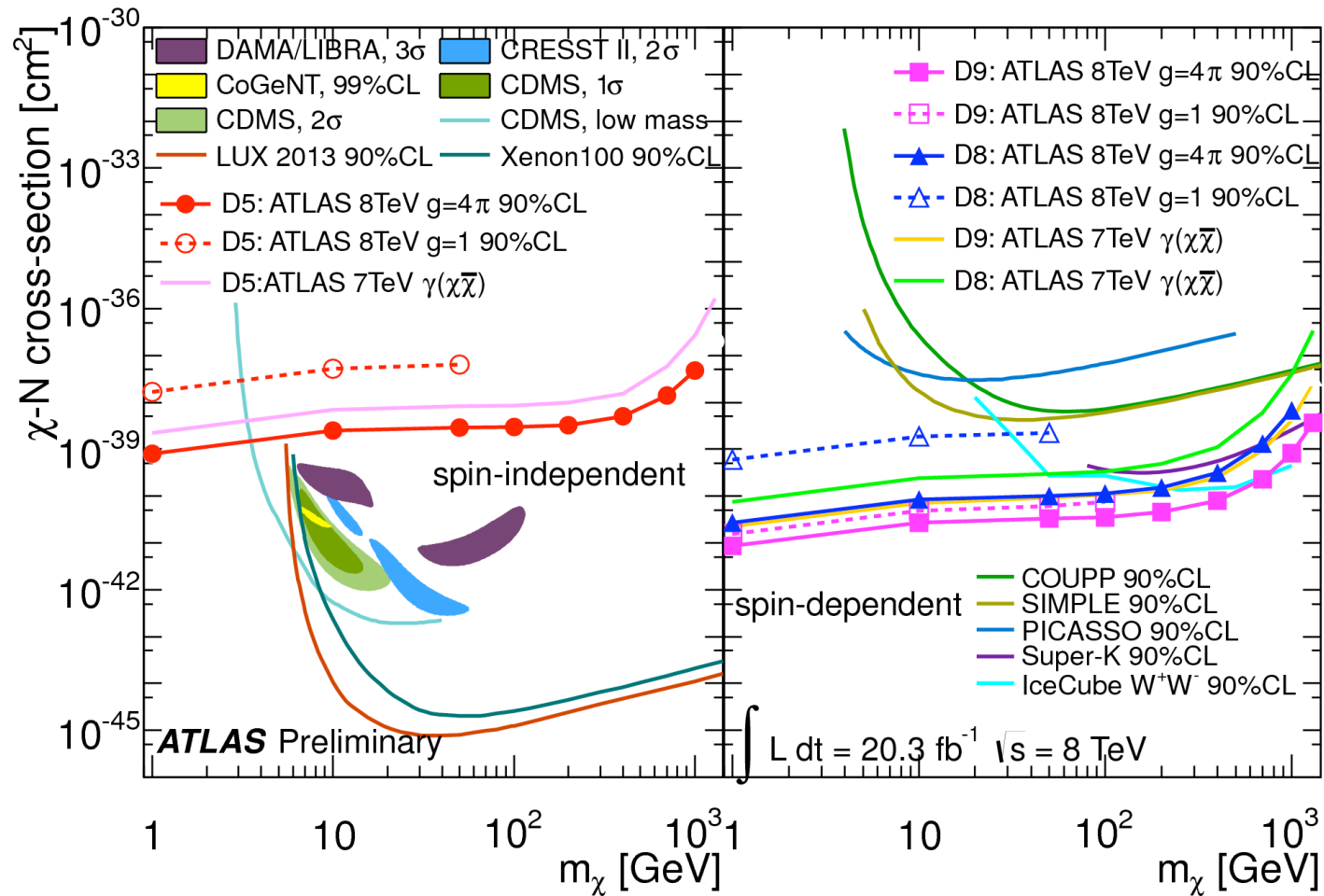
● Production at LHC



# Mørkt stof: Status af eftersøgninger

Mange forskelligartede eftersøgninger

- Et par eksperimenter mener at have set et positivt signal, men generelt ikke reproducerbart af andre
- Opsummeret i plots af denne type:

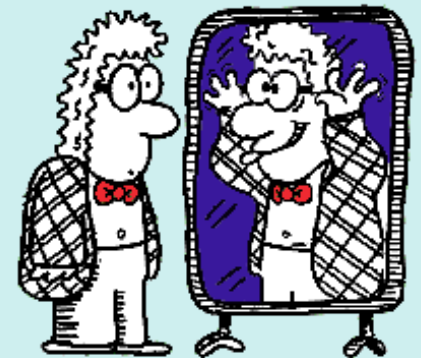


# BAU: Baryon-asymmetri i Universet

- Ved Big Bang “burde” stof og anti-stof være produceret i lige store mængder.
- Stof og anti-stof ville derefter annihilere og blive til stråling:
  - Al materie vi observerer: Overskud af stof
- Vi ser ingen regioner af Universet som synes domineret af anti-stof:
  - Ingen annihilations-signaler fra væggene mellem regioner.
- Vi har målt (og beskrevet i Standardmodellen) en **lille** stof-antistof-asymmetri i kvark-sektoren
  - Ikke stor nok til at beskrive BAU
- Må være et yderligere asymmetri-bidrag, som vi (endnu) ikke kender
  - Lepton-sektoren? Neutrinoer?

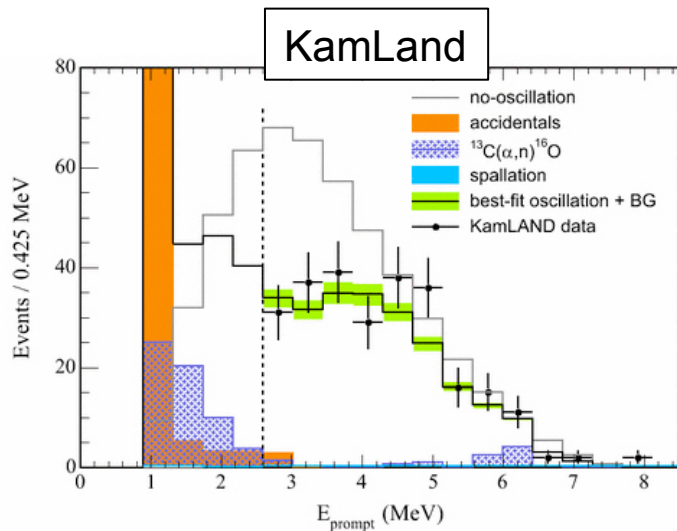


*Det kosmiske spejl virkede  
tilsyneladende ikke helt  
korrekt*



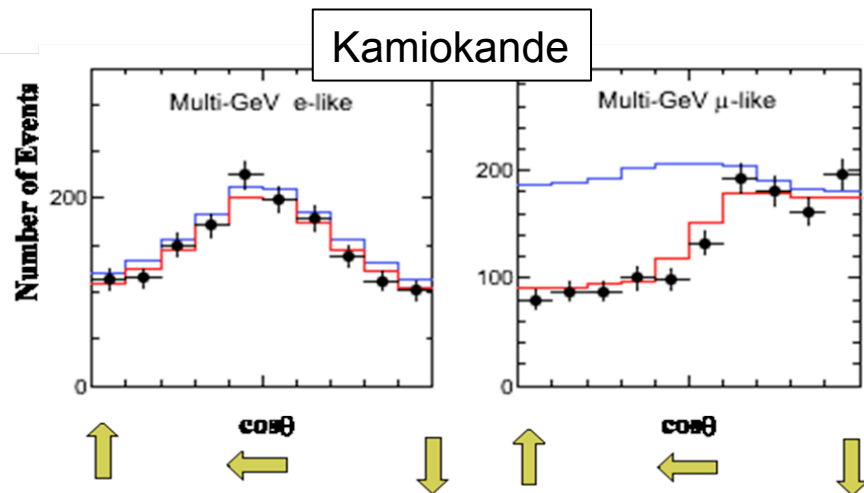
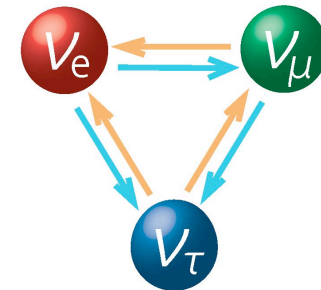


# Neutrinoer-masser: Oscillationer => Masser



Gennem 3 årtier, massiv evidens for, at neutrinoer skifter identitet under deres rejse.

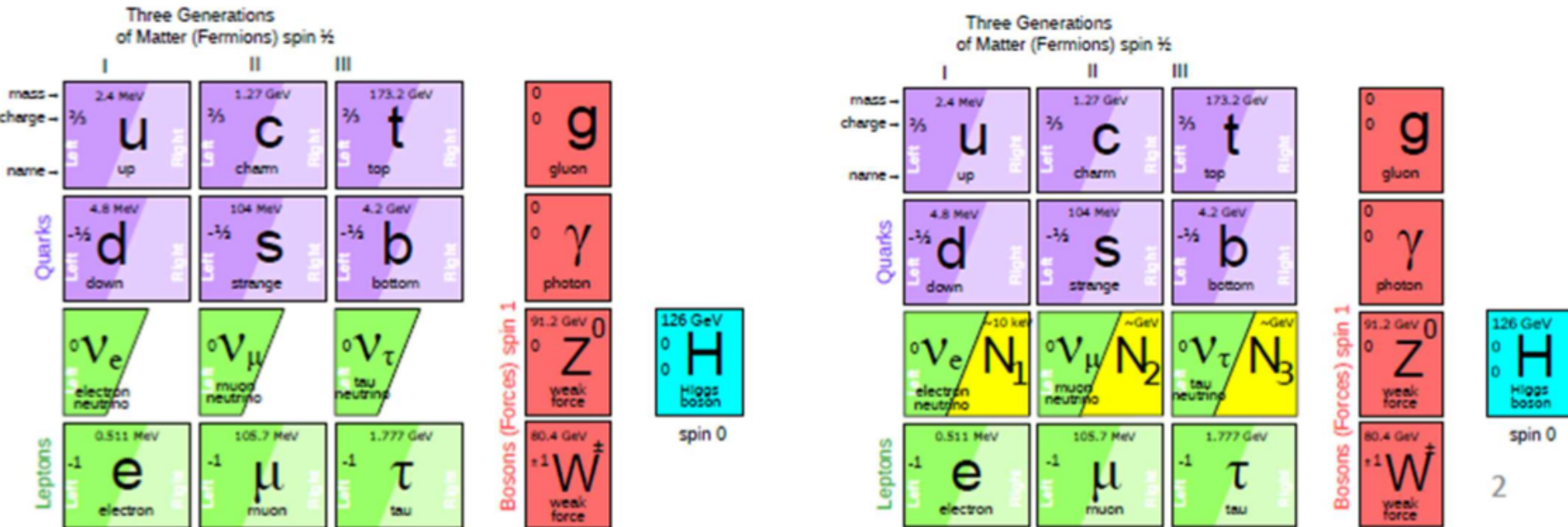
Neutrinoerne oscillerer:



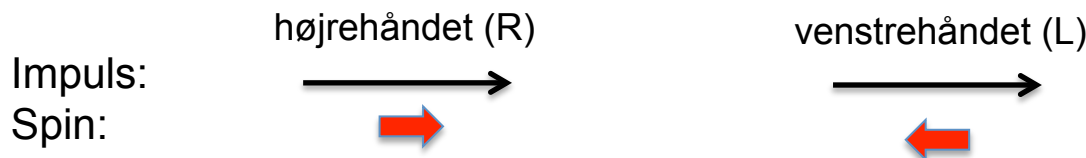
- Oscillation kun mulig, hvis neutrinoerne har masse!
- Højre-håndede neutrinoer må da eksistere!
- Neutrinoer vekselvirker udelukkende svagt; men kun venstrehåndede partikler mærker svag kraft.
- Partikler (næsten) uden vekselvirkning?
  - "Sterile"
- Ukendte masser (meV - ZeV)

# Neutrino-masser:

Standardmodellen er komplet...  
Men mindst tre brikker mangler stadig



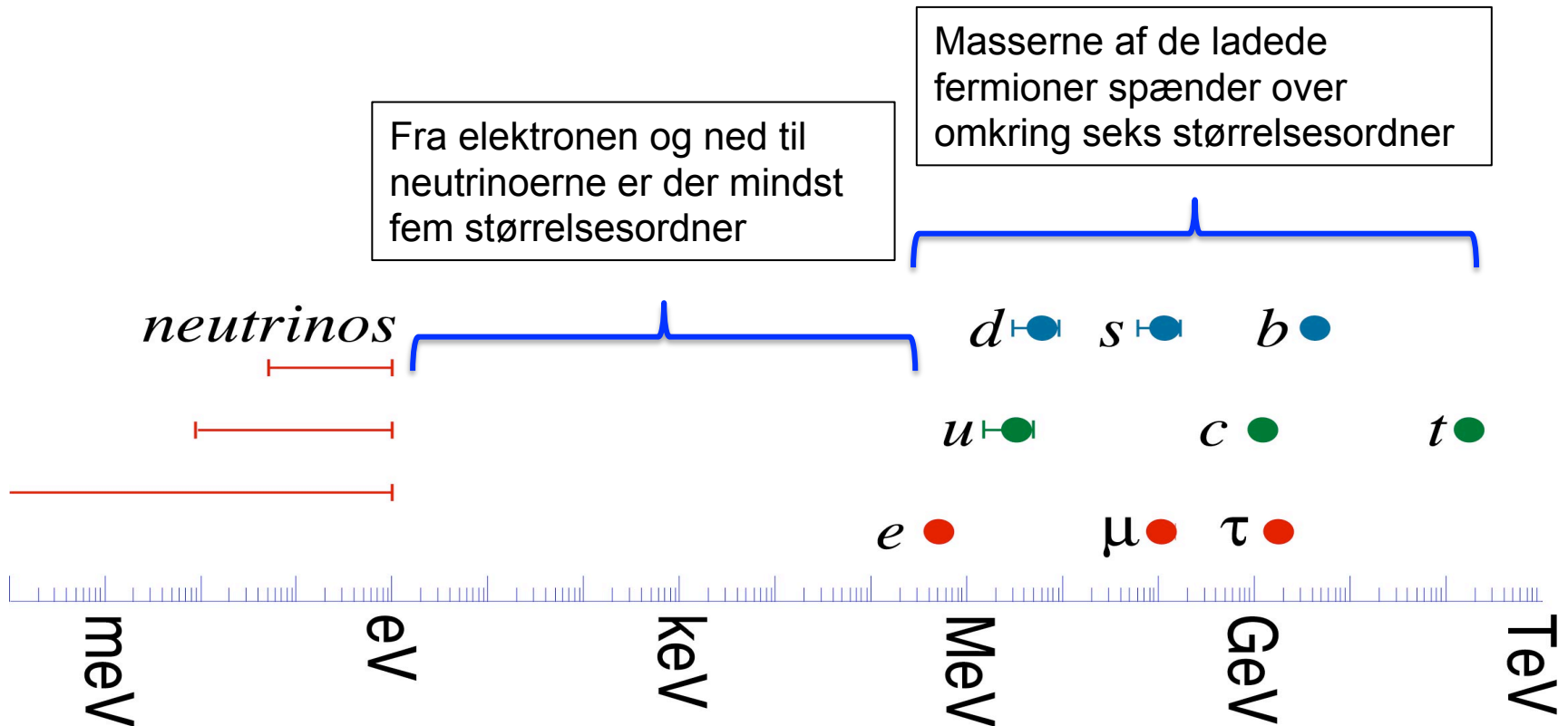
- Alle stofflige partikler (fermioner) har to chiraliteter: Højre- og venstrehådede.
- For "hurtige" partikler er de 2 tilstande ~ækvivalente med de 2 retninger af spin:



- Kun venstrehådede (L) fermioner vekselvirker ved den svage kraft.
  - Højrehådede neutrinoer har ingen (standard) vekselvirkninger

# Neutrino-masser:

## Samme forklaring som andre masser?



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

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

# Teoretiske problemer med Higgs'en (eller rettere med dens masse)

Standardmodellen synes "unaturlig"



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

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

(126 GeV)<sup>2</sup>

(10<sup>15</sup> GeV)<sup>2</sup>, 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<sup>-26</sup>.

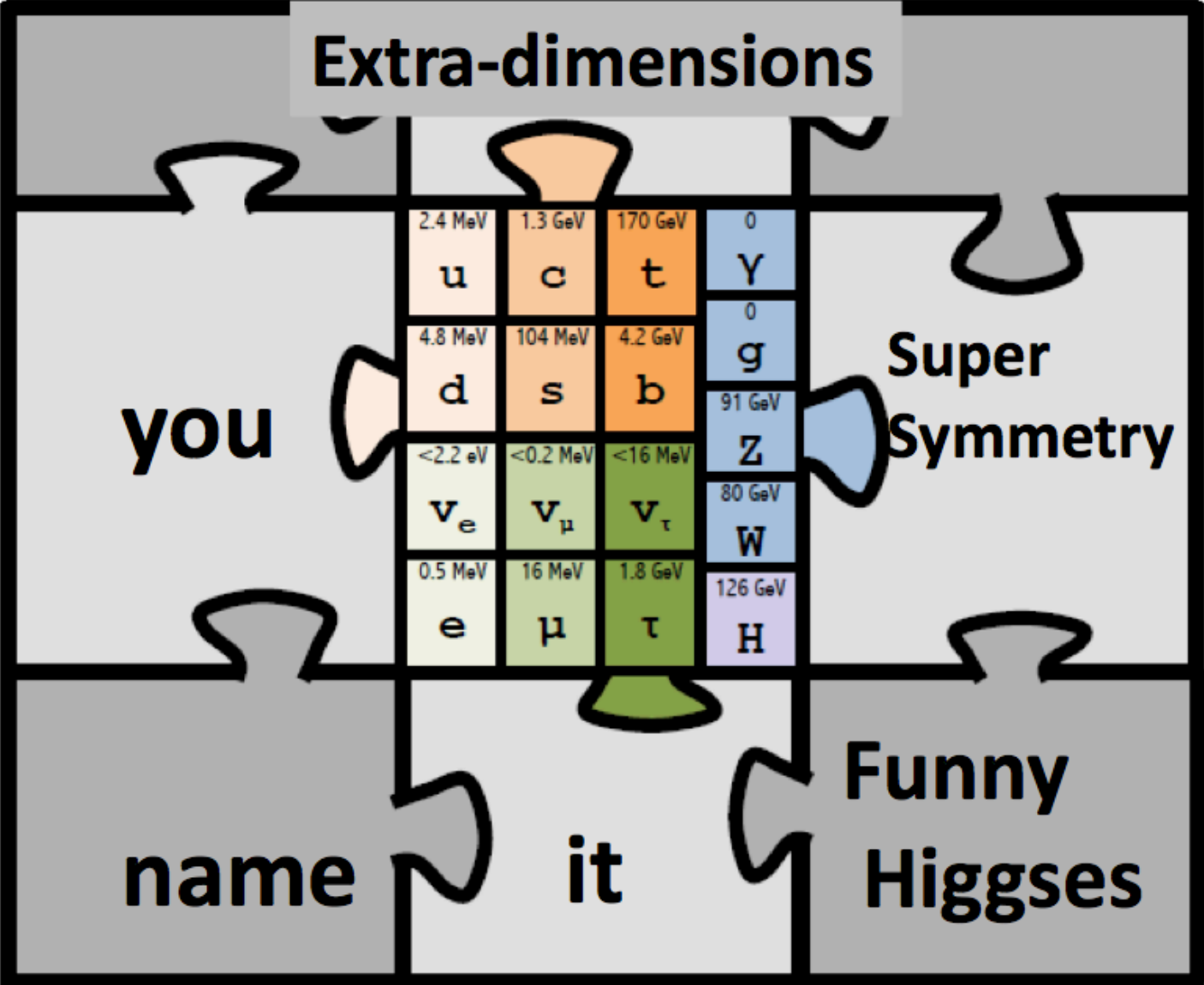
$$M_H^2 = \text{nnn, nnn, nnn, nnn, nnn, nnn, nnn, nnn, nnn, nnn, n60,000} \\ - \text{nnn, nnn, nnn, nnn, nnn, nnn, nnn, nnn, nnn, nnn, n44,375}$$

- "Fine tuning"
- "Naturalness Problem"

# Hinsides Standardmodellen? [Beyond the Standard Model?]

Hvis ikke alt vi observerer kan beskrives indenfor Standardmodellen, hvad så?

Er Standardmodellen en del af en større teori?




But Where Is Everybody?



Nima Arkani-Hamed

But Where Is Everybody?



Nima Arkani-Hamed

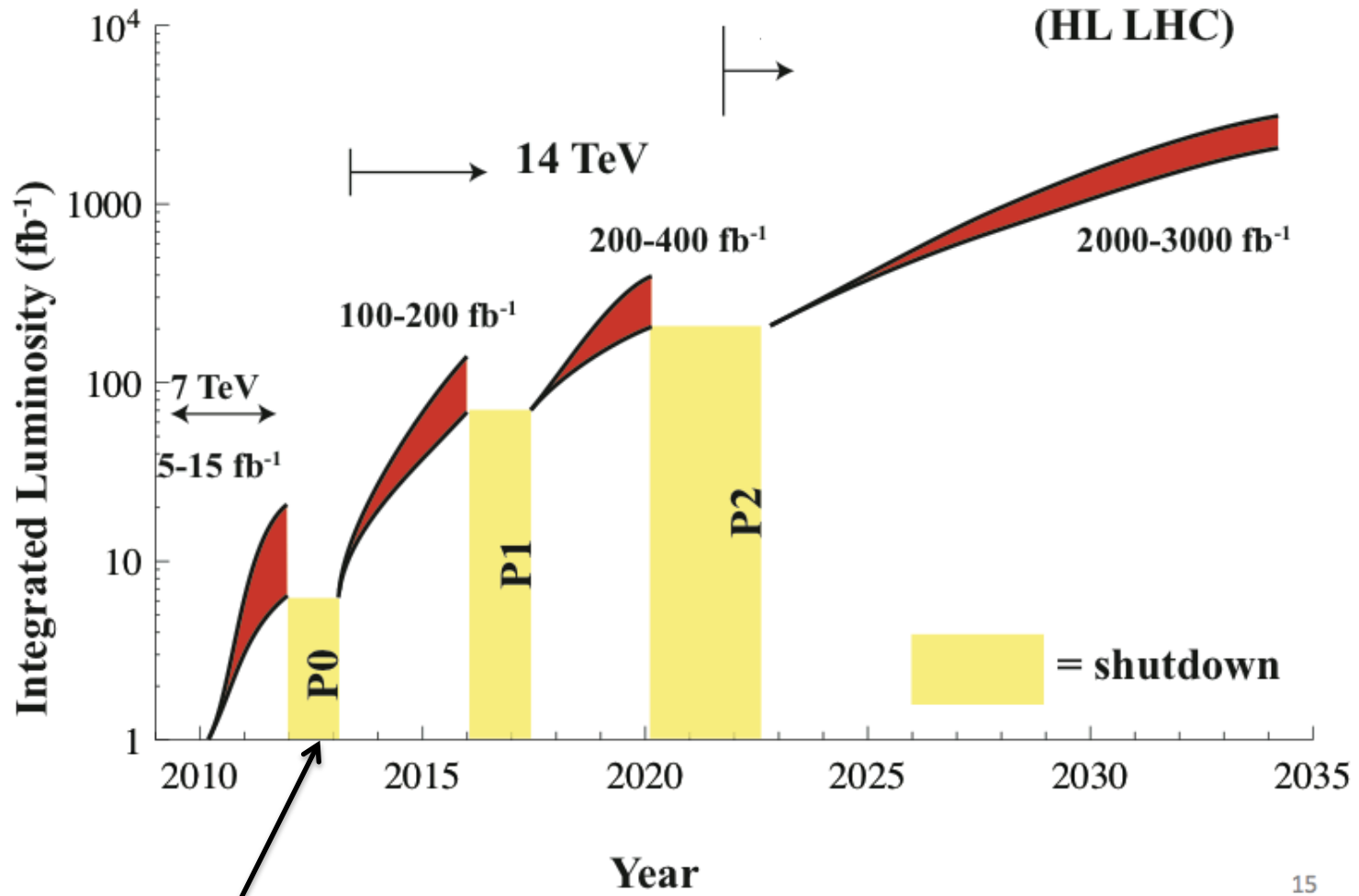
Måske hvis vi kigger nærmere efter...



Eksperimentel fremtid

LHC

# LHC's rejseplan

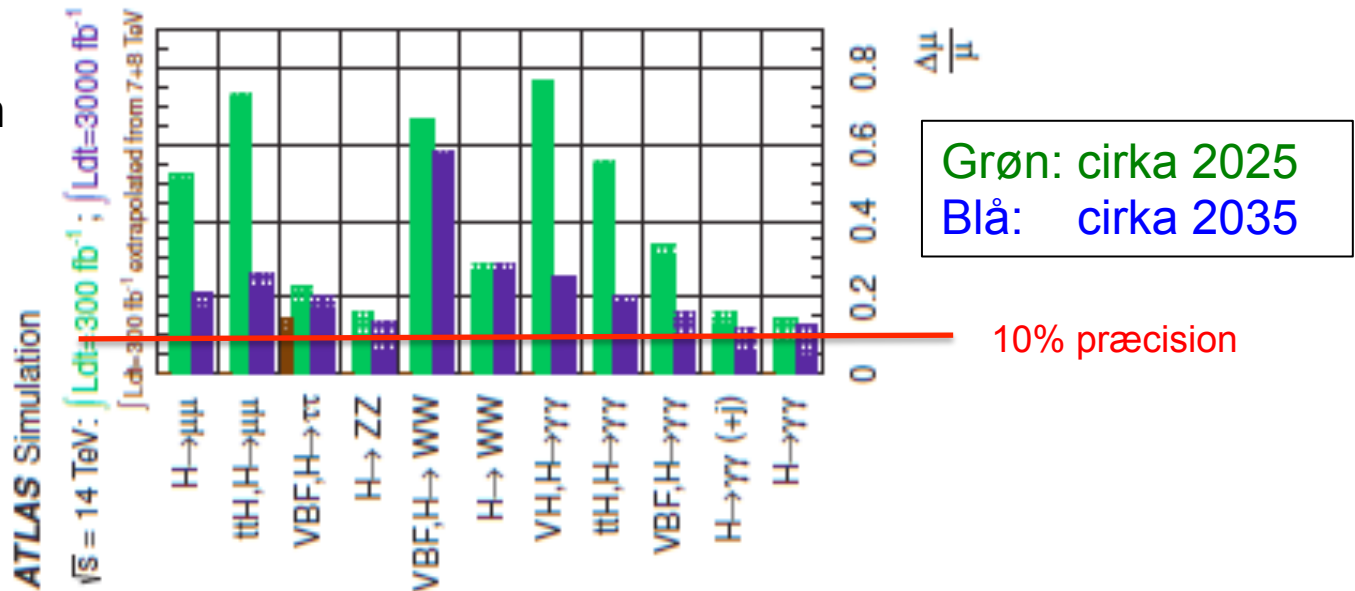


Vi er her; dog lidt forsinket. Gen-opstart ved 13-14 TeV om et halvt år

# LHC målingers fremtid

- Genopstart forår 2015 (endelig) ved design energien (13-14 TeV). Saml x10 så meget data som hidtil:
  - Faktor 2 højere rækkevidde for “searches”
    - Er der fx flere Higgs’er?
    - Supersymmetri (SUSY)???
    - Hvem ved...???
  - Øget præcision på Higgs-egenskaber
    - Er Higgs’en 100% Standardmodel?
- Fra 2025, x10 forøget kollisionsrate
  - Ultimativ sensitivitet til ny fysik og Higgs-egenskaber.

Forudsagt præcision på Higgs-koblinger: Signal-styrke.

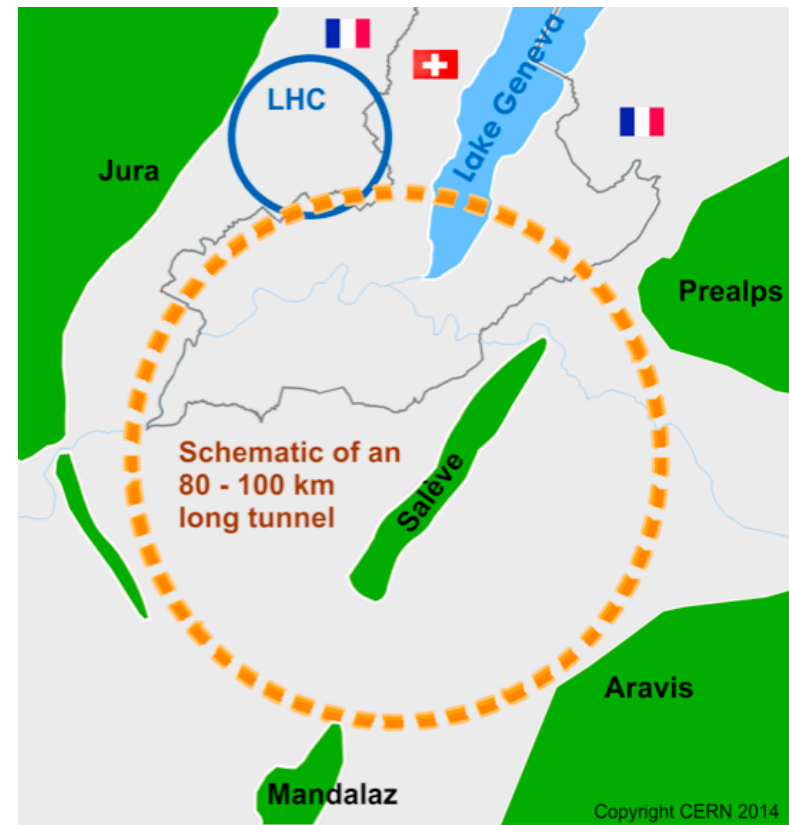


# Eksperimentel fremtid?

En ny cirkulær elektron-positron kollider ?

# Mulig fremtidig CERN-accelerator: **TLEP**

- Cirkulær elektron-positron-kollider med 80-100 km omkreds.
- Ekstrem stor begivenheds-rate.
- Fire interessante fysik-projekter, som alle involverer **præcisionsmålinger** og **søg efter sjældne henfald** (fx sterile neutrinoer!):
  - ✓ 91 GeV: Producér  $10^{12}$  ( $10^{13}$ ) Z-bosoner
  - ✓ 170 GeV: Producér  $5 \times 10^7$  W-boson-par
  - ✓ 240 GeV: Producér  $10^6$  Higgs-bosoner
  - ✓ 360 GeV: Producér  $10^6$  top-antitop-par



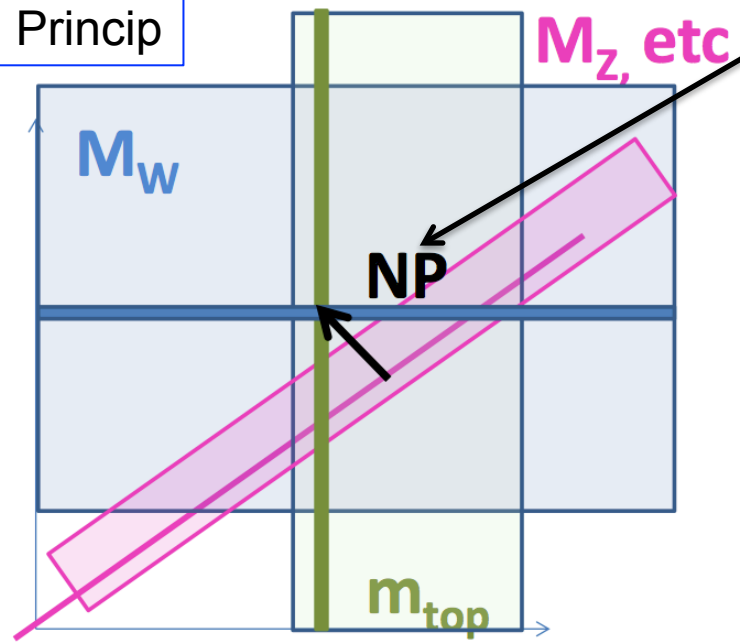
Conceptual Design Report: 2018

Mest optimistisk tidsplan: Dataopsamling fra 2032

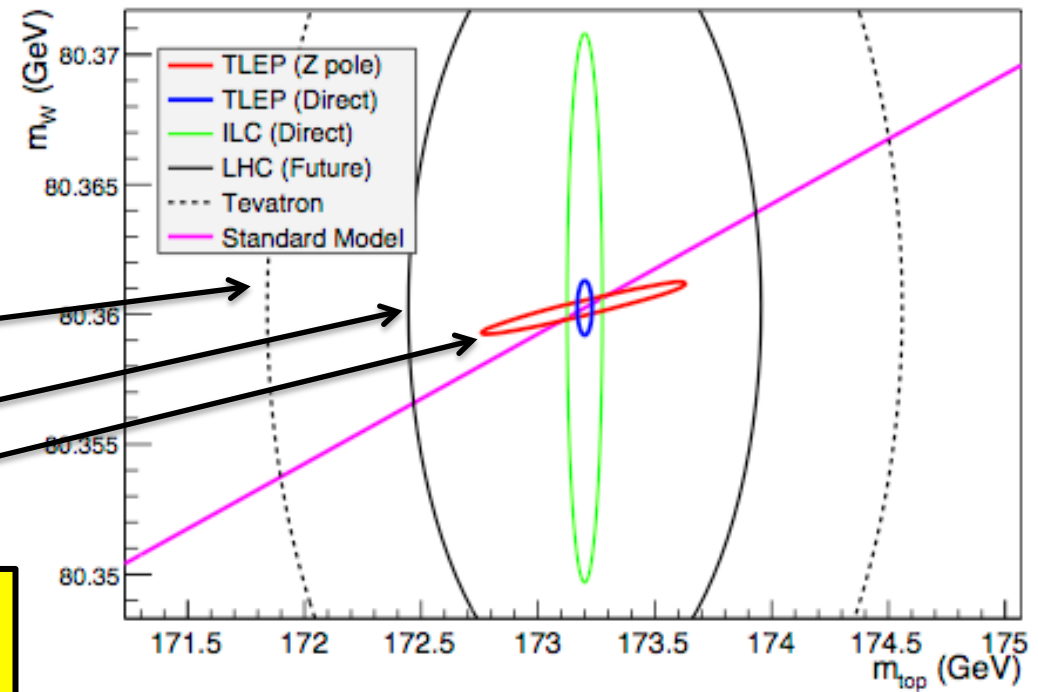
# Præcisionsmålinger

Princip

NP: New Physics  
Se efter afvig i dette plan.



Forudsagt præcision for forskellige fremtidige eksperimentelle faciliteter



Stiplet: Nu  
Sort linje: LHC potentiale  
Røde og blå ellipser: TLEP

Indirekte følsomhed over for ny fysik op til 30-100 TeV området

# Præcisionsmålinger: Higgs

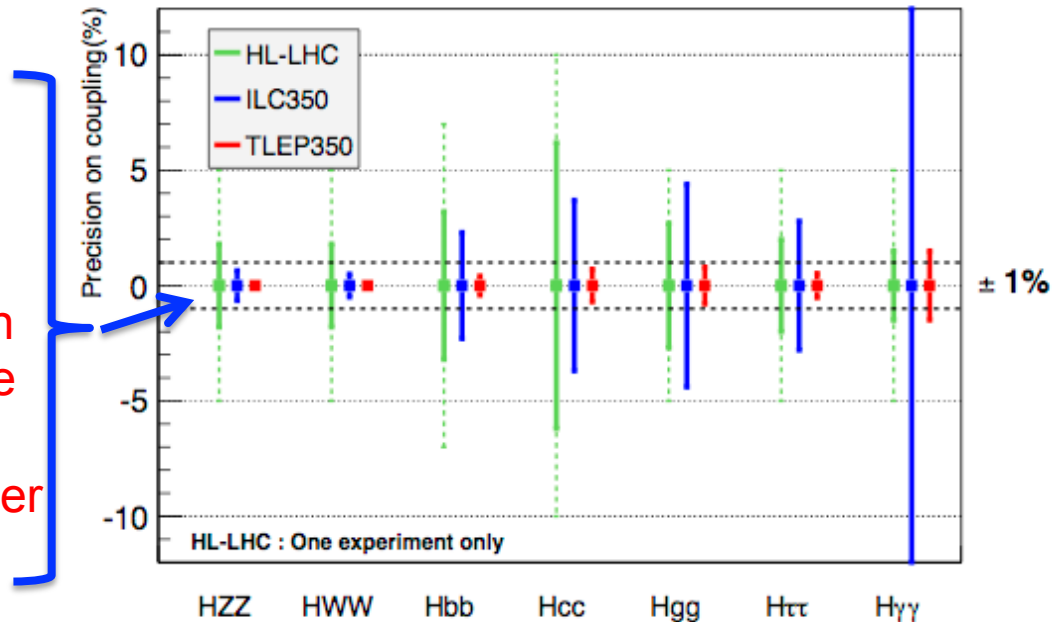
Populære udvidelser af Standardmodellen (SUSY, etc.) påvirker Higgs-fysik på en beregnbar måde.

Generelt kræves en præcision på **1% eller bedre** for at eftervise disse effekter.

Vi har brug for en “Higgs factory”

- **LHC** når desværre ikke denne præcision selv i 2035.
- “**Linear collider**” er på visse områder bedre, men ikke generelt.
- **TLEP** har overlegen præcision. Kan underkaste Higgs-bosonen alvorlige test: Er Higgs'en helt igennem som forudsagt af Standardmodellen? Eller finder vi endelig *Ny Fysik*?

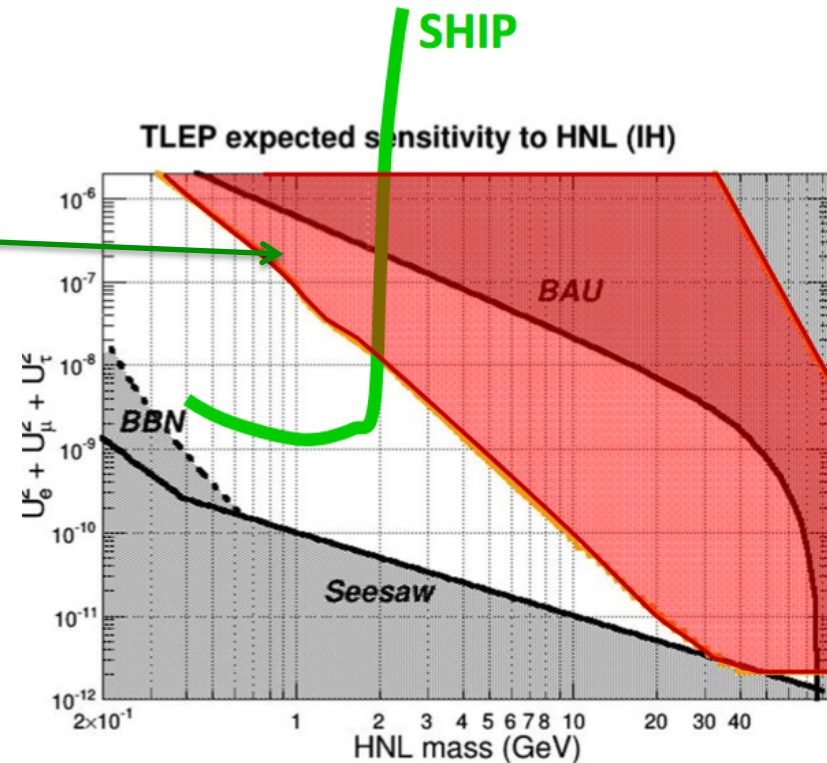
Med Higgs-bosonen har vi fået i hænde et fantastisk nyt håndtag, som tillader os at udforske partikelfysikken på nye måder!



# TLEP: Ekstrem stor statistik

Med et ekstremt stort antal begivenheder fås adgang til *sjældne henfaldskanaler*:

- Z-partiklen ( $10^{13}$ ): Kig efter
  - Henfald, der involverer højrehåndede (sterile) neutrinoer
  - Lepton flavour violation (fx.  $Z \rightarrow e^+\mu^-$ )
  - ...
- Higgs ( $10^6$ ): Kig efter
  - “Usynlige” henfald ( $H \rightarrow$  “ingenting”).
    - Kan være, at den eneste måde vi kan producere *mørkt stof* i laboratoriet er via Higgs-henfald (“Higgs portal”).







# CONCLUSIONS

Kick-off Meeting of the Future Circular Colliders Design Study  
12 - 15 February 2014, University of Geneva / Switzerland

photo by Michael.Hoch@cern.ch

**330 registered participants**

Opsummering, konklusioner,  
udsyn

# Opsummering/konklusioner (i)

- Standardmodellen har været hos os i snart 50 år.
  - En fantastisk god “parametrisering” af Naturen
  - Men giver ikke fuldgyldige svar på underliggende problemer.
- LHC-programmet er uhyre succesrigt.
  - Accelerator og eksperimenter virker fantastisk godt.
- LHC har underbygget Standardmodellen:
  - Higgs-bosonen fundet med masse som forudsagt.
    - Alle målte egenskaber i overensstemmelse med Standardmodellen.
  - Skønt ihærdig søgen efter “Ny Fysik” er ingen hints endnu fundet.
  - Er Standardmodellen simpelthen alt der er? Er vi færdige?
- I 2015 genopstarter LHC, nu ved design-energien 13-14 TeV. Større datamængder: x10 indtil 2022; x100 indtil 2035.
  - Fordoblet energi-område for søg efter ny fysik
    - Er der fx, flere Higgs'er?
  - Langt større præcision på Higgs-målinger

# Opsummering/konklusioner (ii)

- Gode grunde til at tro på Beyond Standard Model Physics
  - Eksperimentelle:
    - Mørkt stof; baryon-antibaryon-asymmetri; neutrino-masser
  - Teoretiske
    - Hvor passer tyngdekraften ind i teorien: Kvantegravitation???
    - Mange dybe spørgsmål: Hvorfor tre generationer? Underliggende forklaring på strukturen i partikel-masserne? ...
- Tid at tænke på og planlægge for efter LHC-æraen
  - Med opdagelsen af en let Higgs (126 GeV) har tankerne omkring en cirkulær elektron-positron-kollider fået en genopblomstring.
    - En lineær kollider måske ikke længere helt så interessant som tidligere(?)
  - En 80-100 km cirkulær kollider med en øvre kollisions-energi på 350 GeV (500 GeV) vil kunne sætte Standardmodellen under test som i **præcision** udgør et kvantespring i forhold til LHC.
    - Indirekte test af ny fysik op til 30-100 TeV skala (10 gange LHC)
    - Ekstreme rater: Søg efter hyper-sjældne henfald (fx. sterile neutrinoer, mørkt stof...)
  - Også tanker om en 100 TeV proton-proton-maskine i samme tunnel, som kunne efterfølge TLEP.