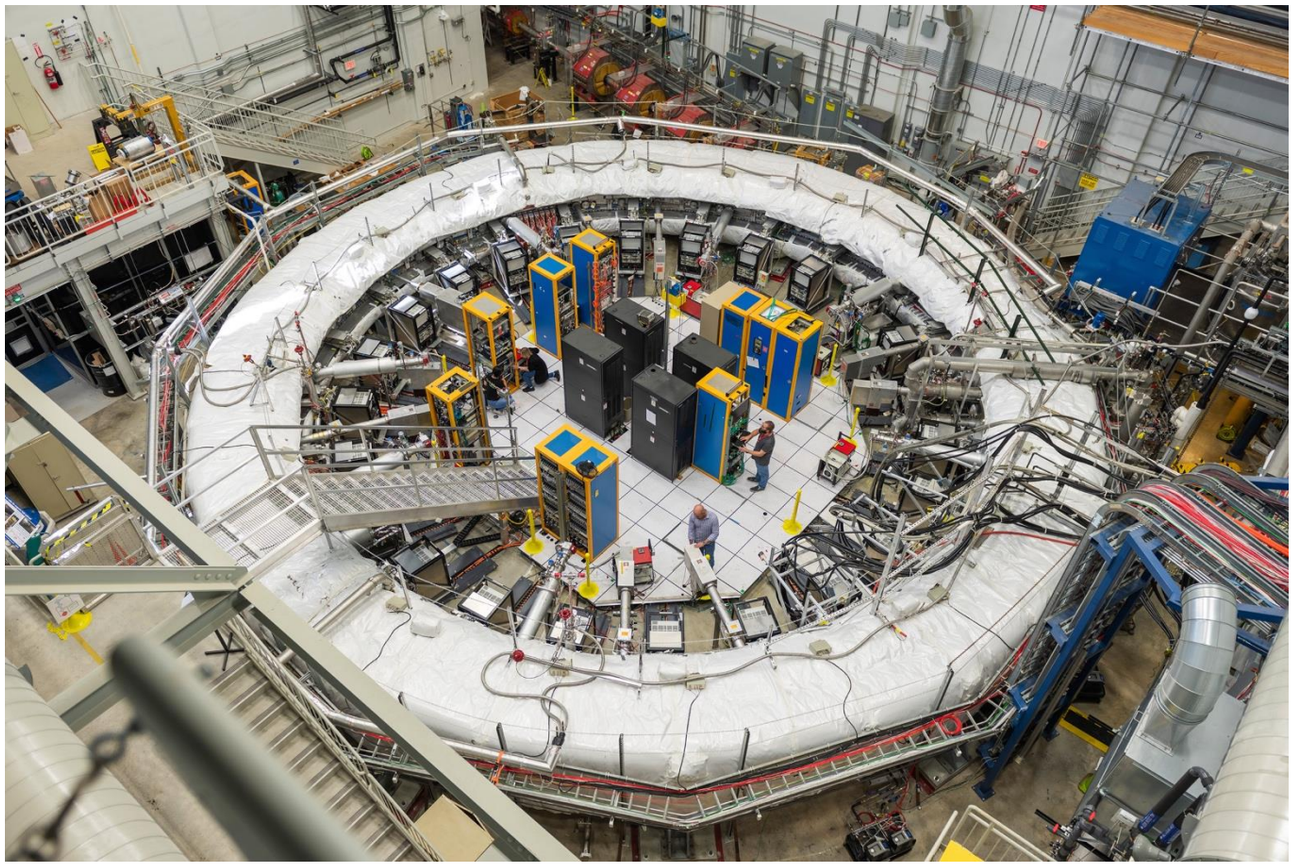
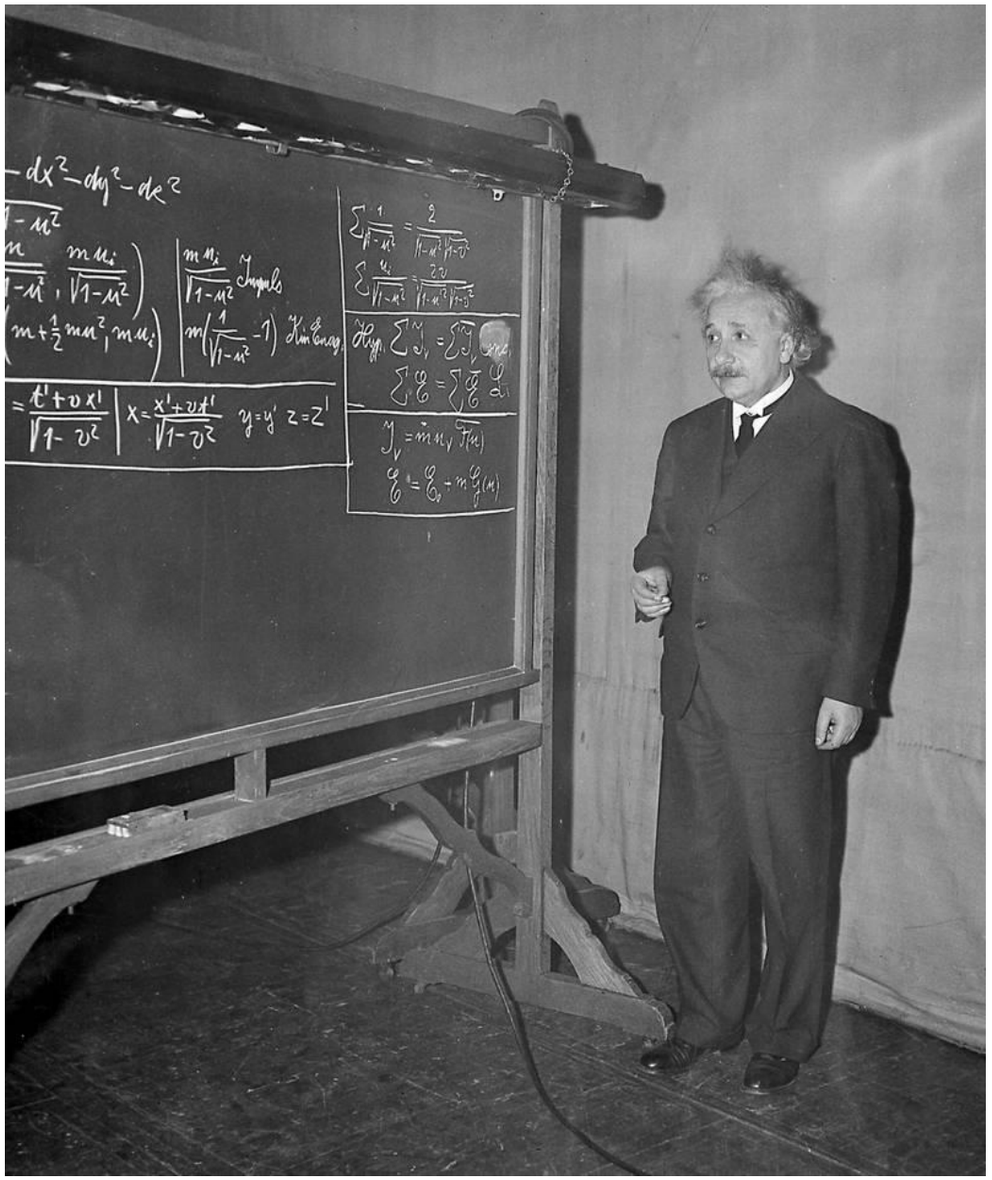
En muon-collider
i lyset af den specielle relativitetsteori

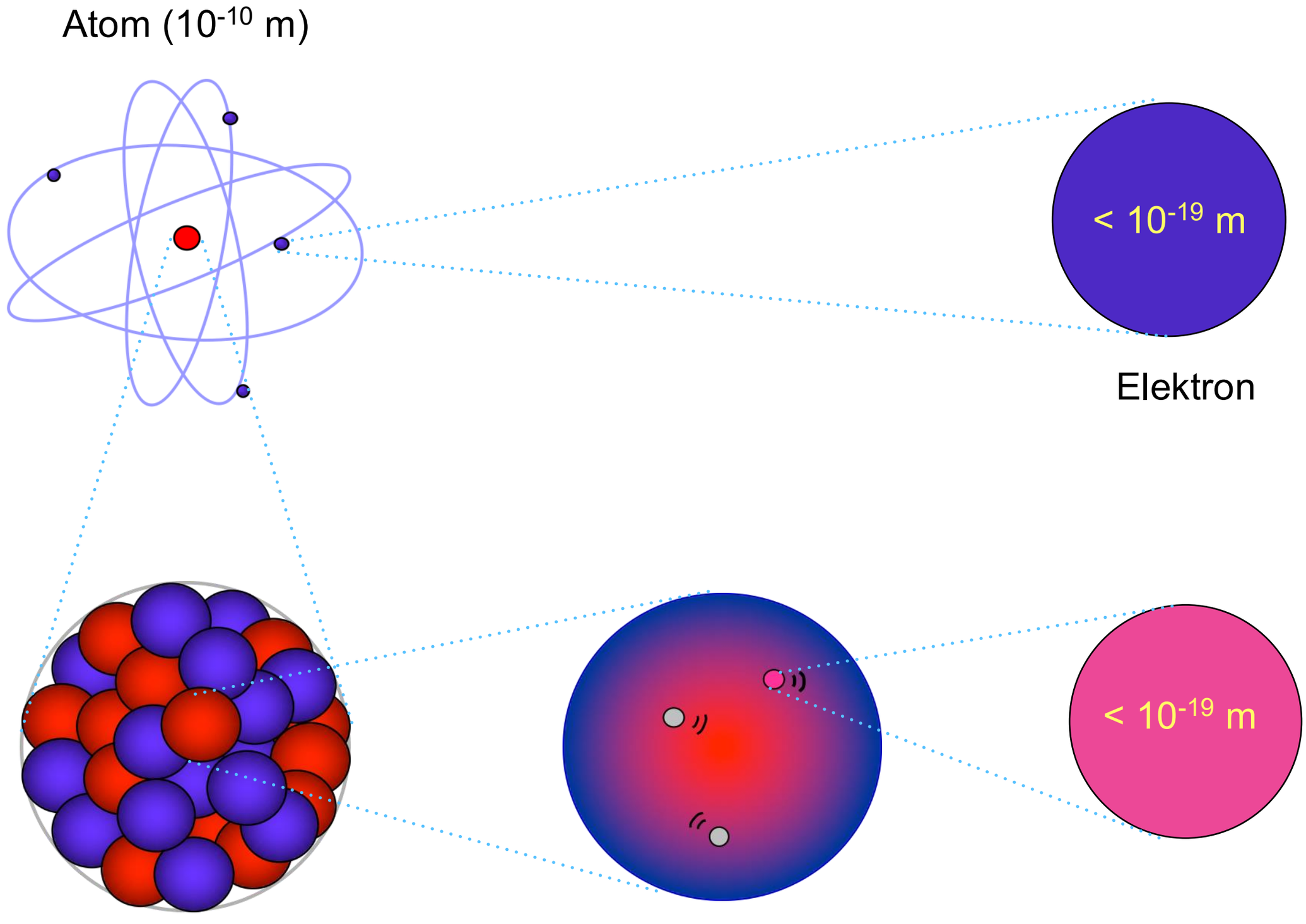




Prof. Mogens Dam
Niels Bohr Institute

UNF, København
20. oktober, 2026

Stoffets struktur



MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Naturens fundamentale partikler

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Stoflige partikler
Fermioner: spin-$\frac{1}{2}$

Kraftbærende partikler
Bosoner: spin-1 og -0

QUARKS

UP	CHARM	TOP
mass 2,3 MeV/c^2	1,275 GeV/c^2	173,07 GeV/c^2
charge ⅔	⅔	⅔
spin ½	½	½
u	c	t

DOWN	STRANGE	BOTTOM
4,8 MeV/c^2	95 MeV/c^2	4,18 GeV/c^2
-⅓	-⅓	-⅓
½	½	½
d	s	b

LEPTONS

ELECTRON	MUON	TAU
0,511 MeV/c^2	105,7 MeV/c^2	1,777 GeV/c^2
-1	-1	-1
½	½	½
e	μ	τ

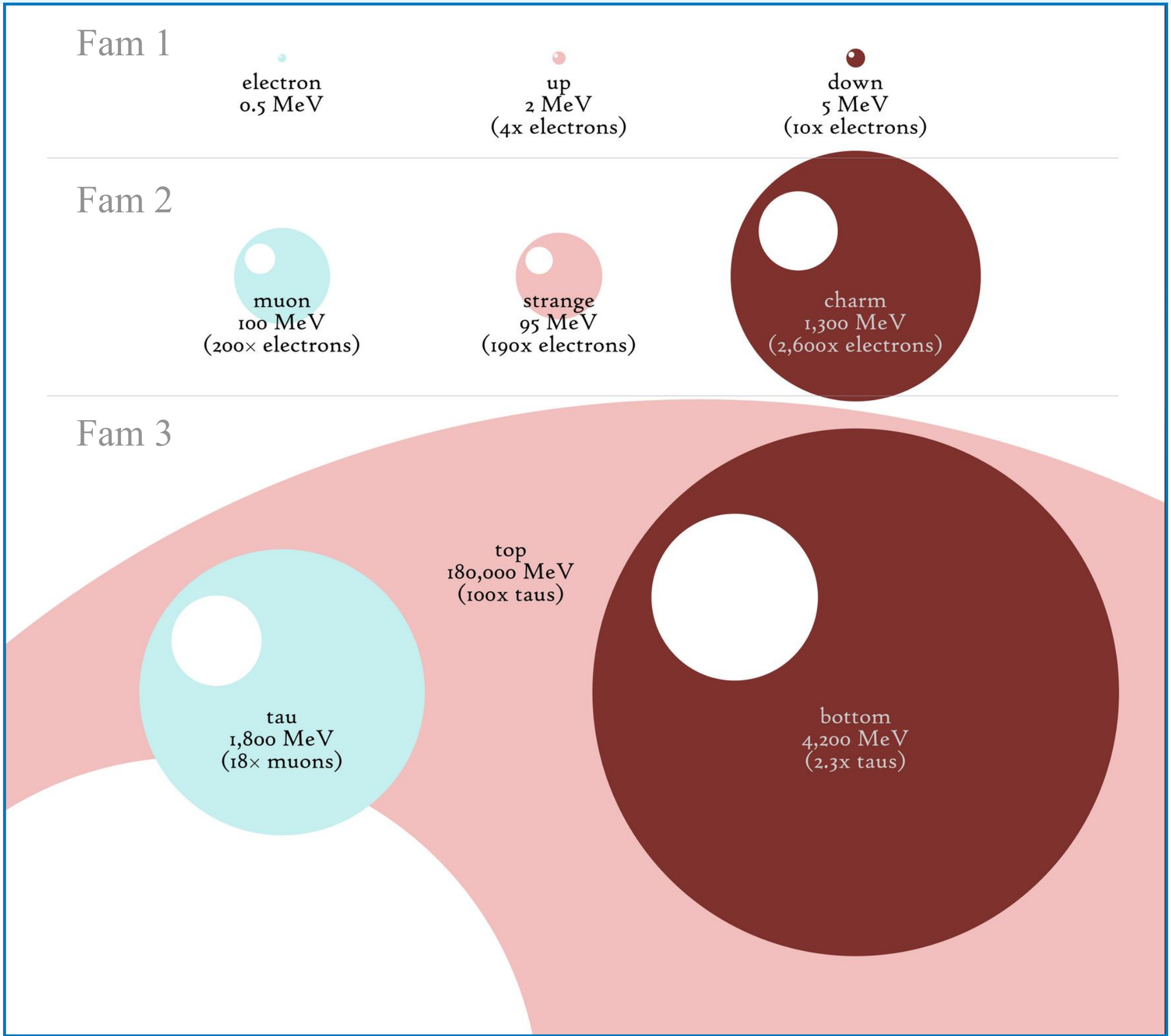
ELECTRON NEUTRINO	MUON NEUTRINO	TAU NEUTRINO
<2,2 eV/c^2	<0,17 MeV/c^2	<15,5 MeV/c^2
0	0	0
½	½	½
ν_e	ν_μ	ν_τ

GLUON	HIGGS BOSON
0	126 GeV/c^2
0	0
1	0
g	H

PHOTON	Z BOSON	W BOSON
0	91,2 GeV/c^2	80,4 GeV/c^2
0	0	±1
1	1	1
γ	Z	W

GAUGE BOSONS

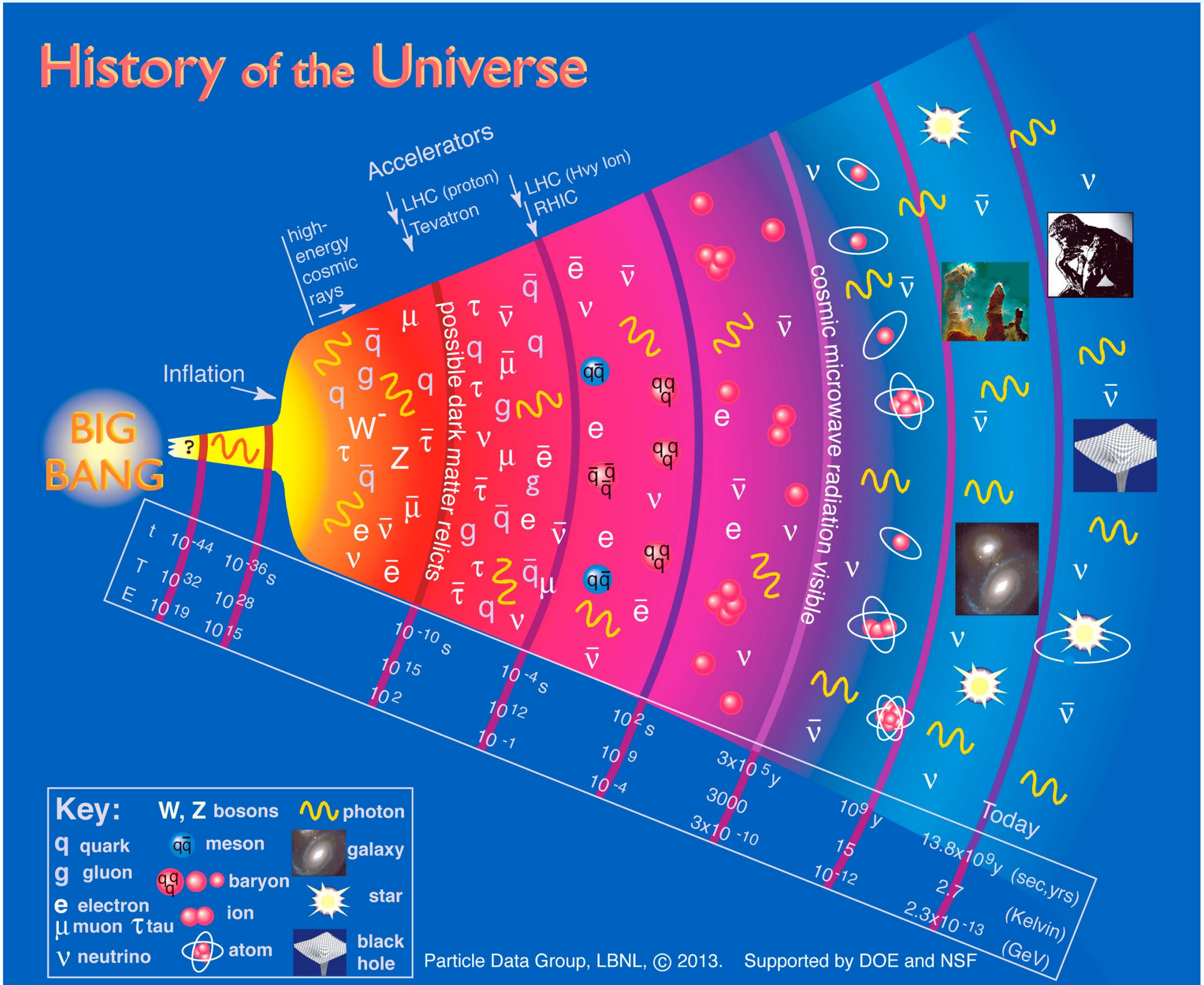
Fermionmasser



Et eller andet mønstre, men hvilket?

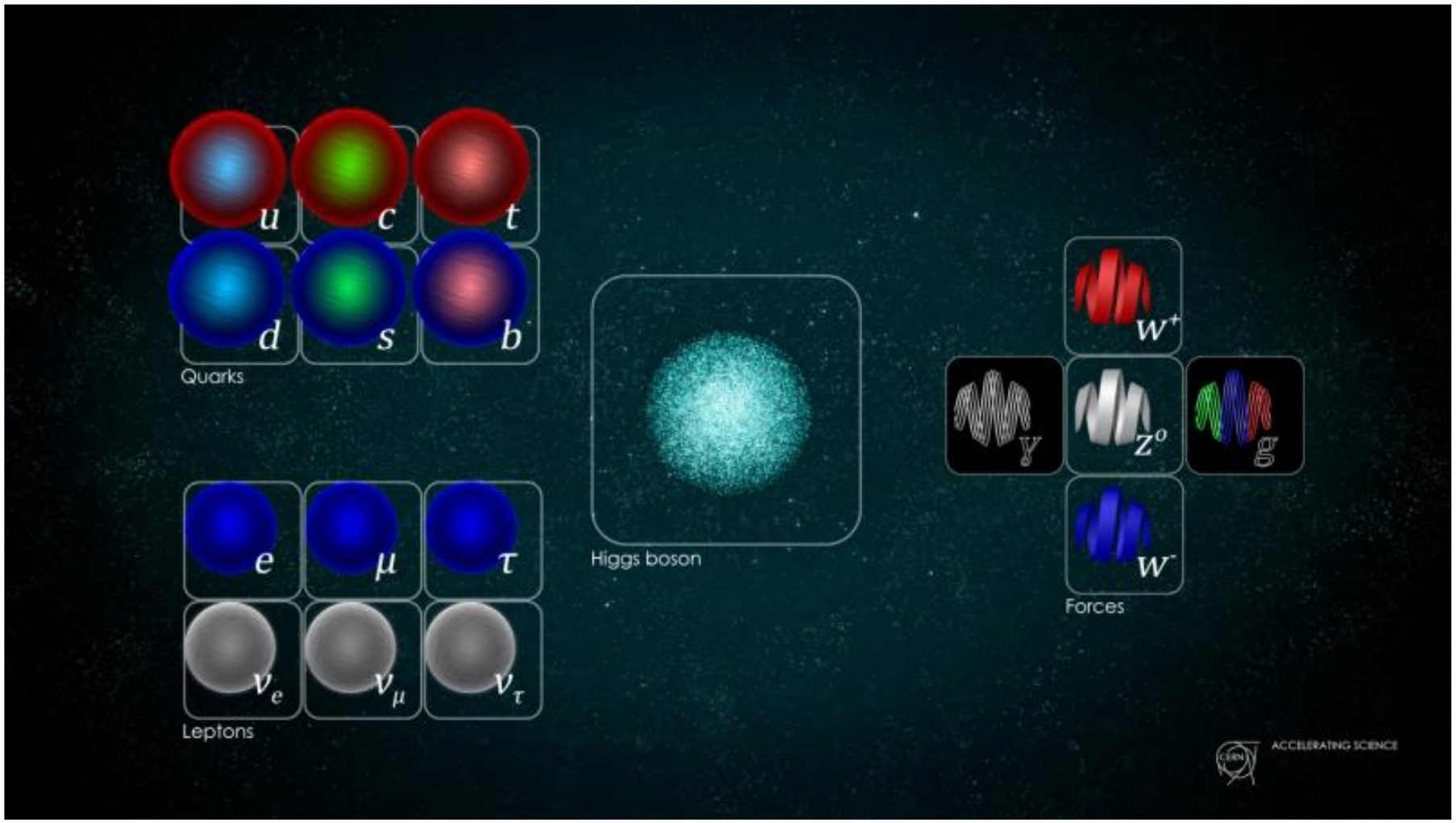
MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE



Higgspartiklen

- *Higgsmekanismen* teoretiseret første gang i begyndelsen af 1960'erne.
- Vigtig del af partikelfysikkens *Standardmodel* siden begyndelsen af 1970'erne
  - *Higgsmekanismen* giver masse til alle Standardmodellens elementære partikler
  - *Higgsmekanismen* forudsiger eksistensen af Higgspartikelen



- Higgspartiklen eksperimentel eftersøgt siden 1970'erne
- Endelig påvist ved CERN's LHC kollider i 2012
- Vanskelig at finde: den er *tung* og kobler svagt andre partikler, altså *sjældent* produceret

Higgsmekanismen

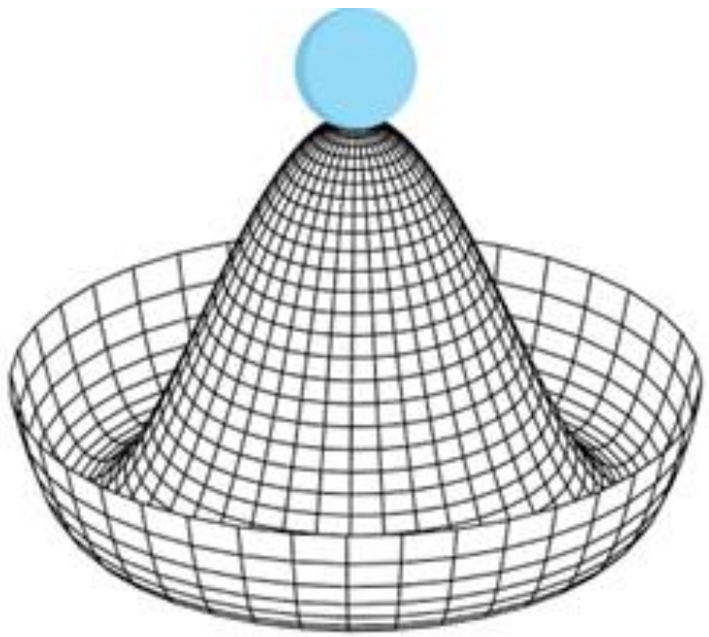
Hvordan elementarpartiklerne opnåede masser.

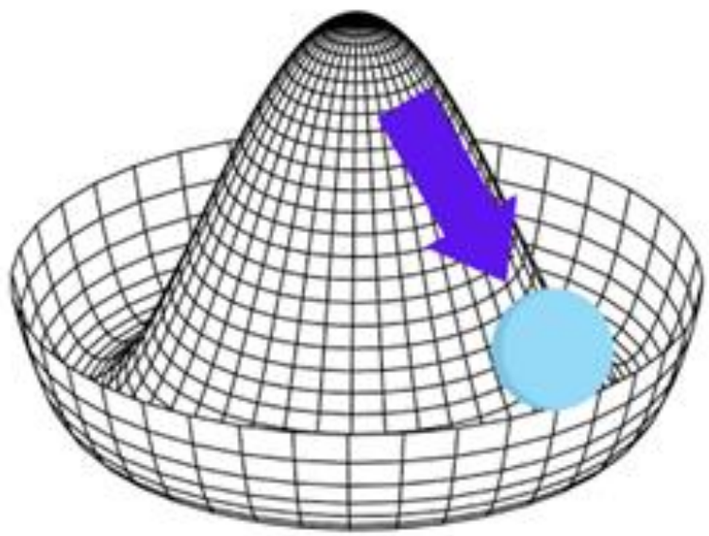
Den grundliggende teori for partikelfysikken, *Standardmodellen*, formuleret mere end 50 år tilbage, er baseret på symmertrier. En ikke-symmetrisk teori giver ingen mening - giver ikke solide forudsigelser. Indførelse af partikelmasser ødelægger symmerrien og dermed teorien. Opgave: Indføre masser uden at ødelægge symmetrien.

=> **Higgs-mekanismen**

Ved universets begyndelse eksisterede Higgs-feltet som en *symmetrisk* tilstand. Potentialet udviklede sig, og feltet så efterhånden sig selv i en ustabil tilstand. Som en bold på toppen af en høj.

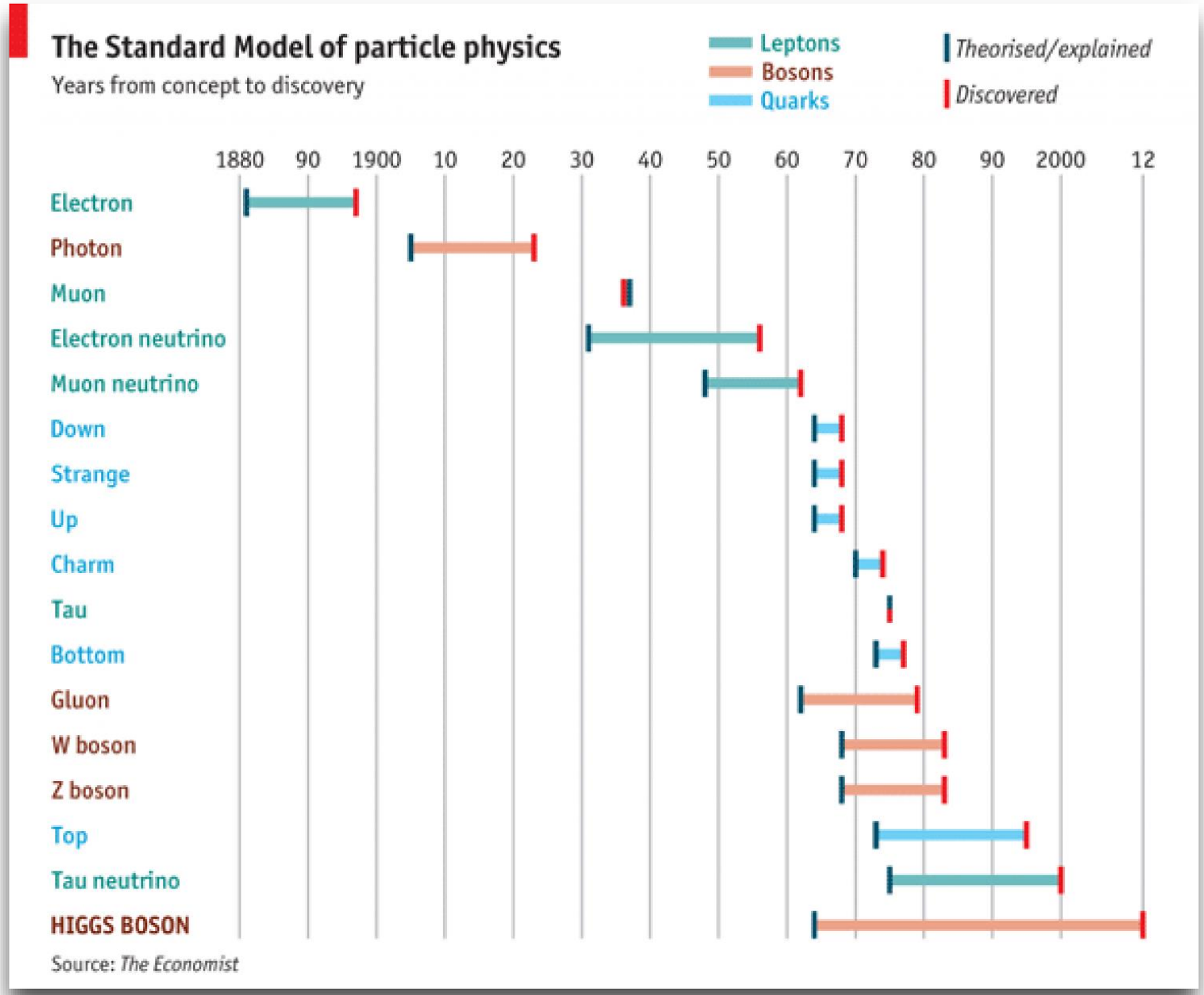
Denne tilstand kollapsede og "trillede" ned til en stabil tilstand. Derved blev symmetrien brudt (*spontan symmetribrud*). Gennem elementarpartiklernes kobling til Higgs-feltet opnåede disse derved masser.





Higgs-mekanismen forudser eksistensen af Higgs-partiklen.
Find den og verificér dermed mekansimen.

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE


The Standard Model of particle physics
Years from concept to discovery
Leptons
Bosons
Quarks
Theorised/explained
Discovered
1880
90
1900
10
20
30
40
50
60
70
80
90
2000
12
Electron
Photon
Muon
Electron neutrino
Muon neutrino
Down
Strange
Up
Charm
Tau
Bottom
Gluon
W boson
Z boson
Top
Tau neutrino
HIGGS BOSON
Source: The Economist

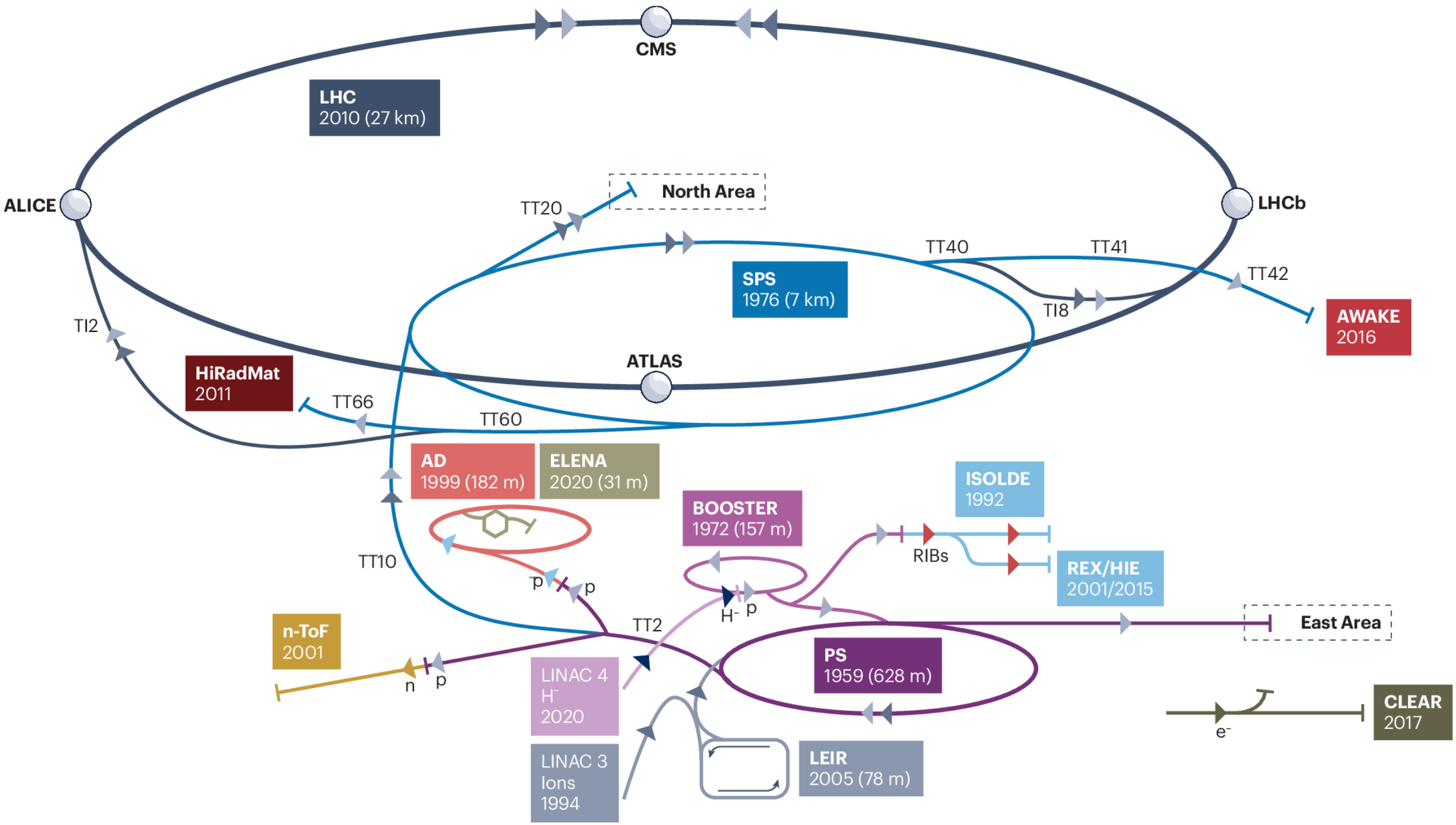
❖ Europæisk Center for Partikelfysik





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

CERN's acceleratorkompleks



MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Elektromagnetisk kraft på ladet partikel ("Lorentz-kraften"):

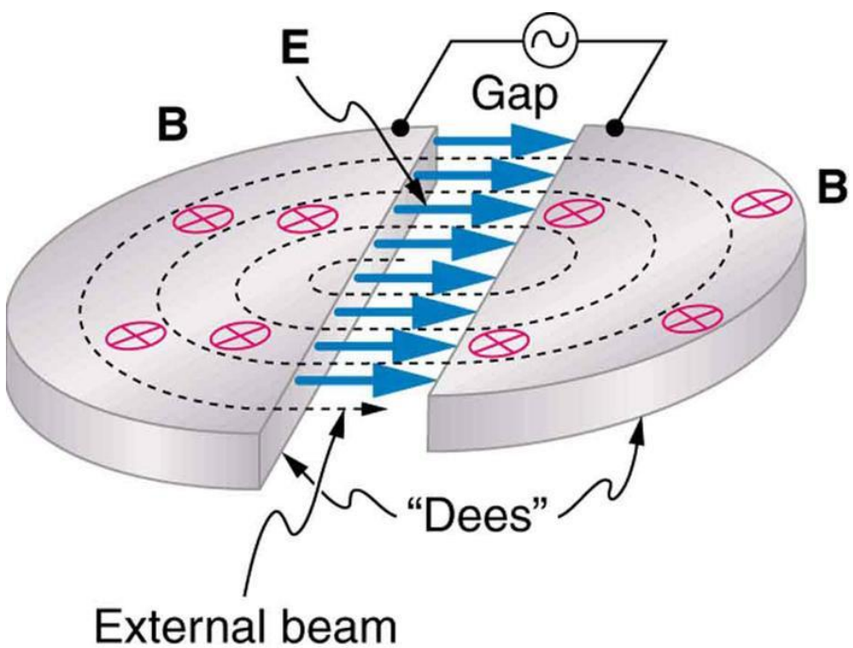
$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

Parallel med elektrisk felt.
Acceleration

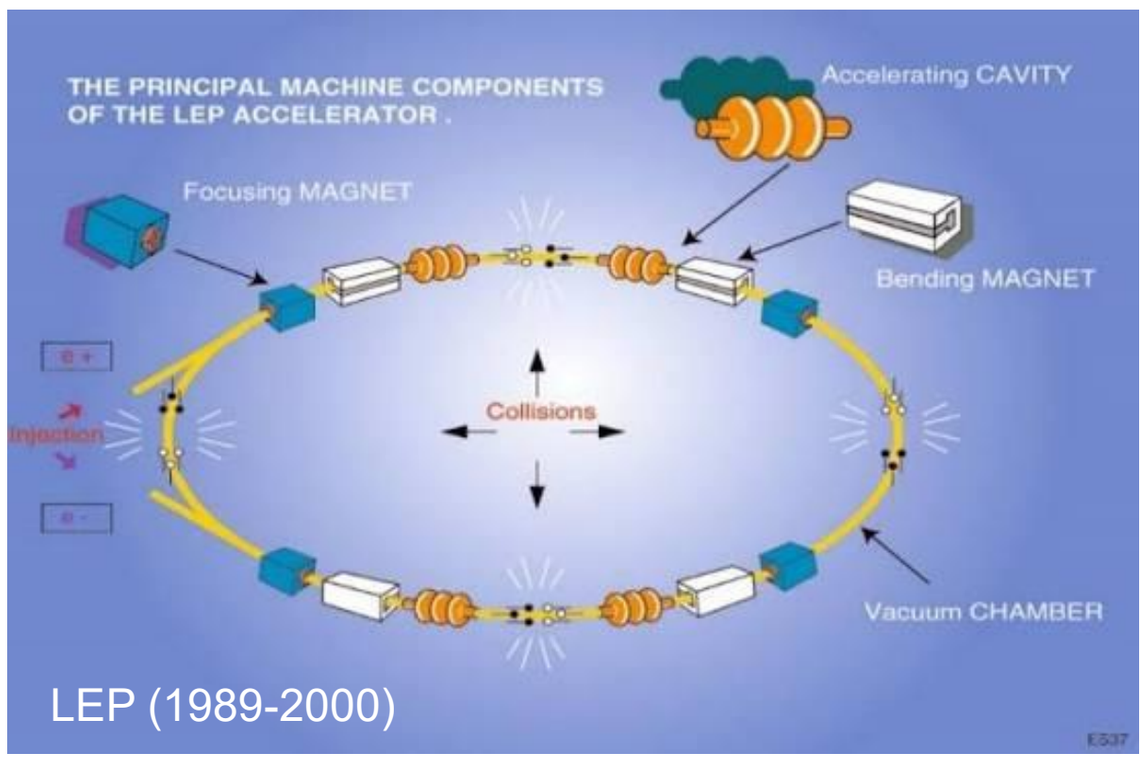
Vinkelret på hastighed og magnetisk felt.
Afbøjning. Holder partikel på cirkulær bane.

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Cyklotron
Udviklet 1929-1930

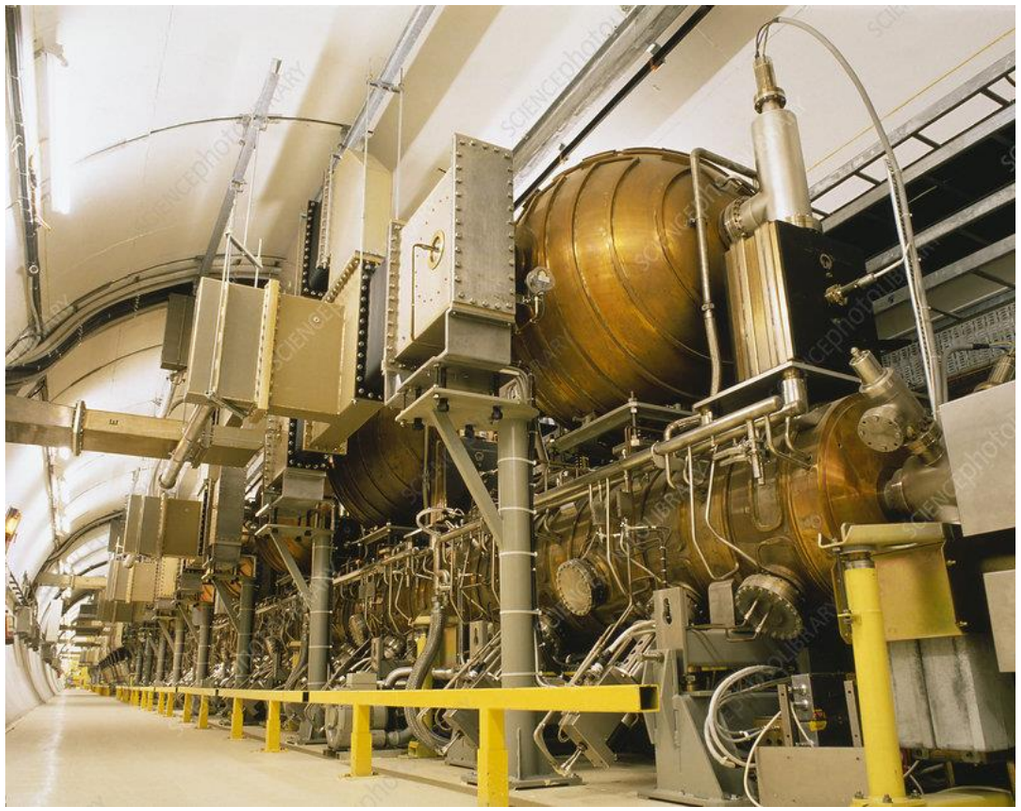


Synchrotron
1944-1945



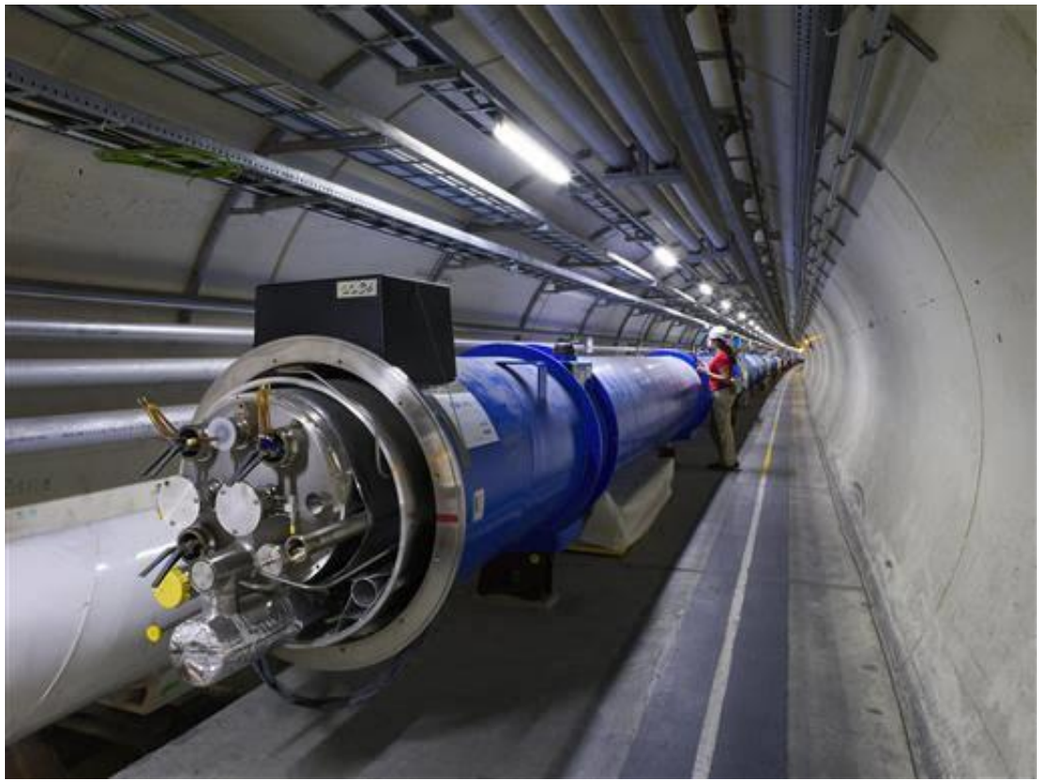
LEP (1989-2000)

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE









Large Hadron Collider - LHC (2009-2041)



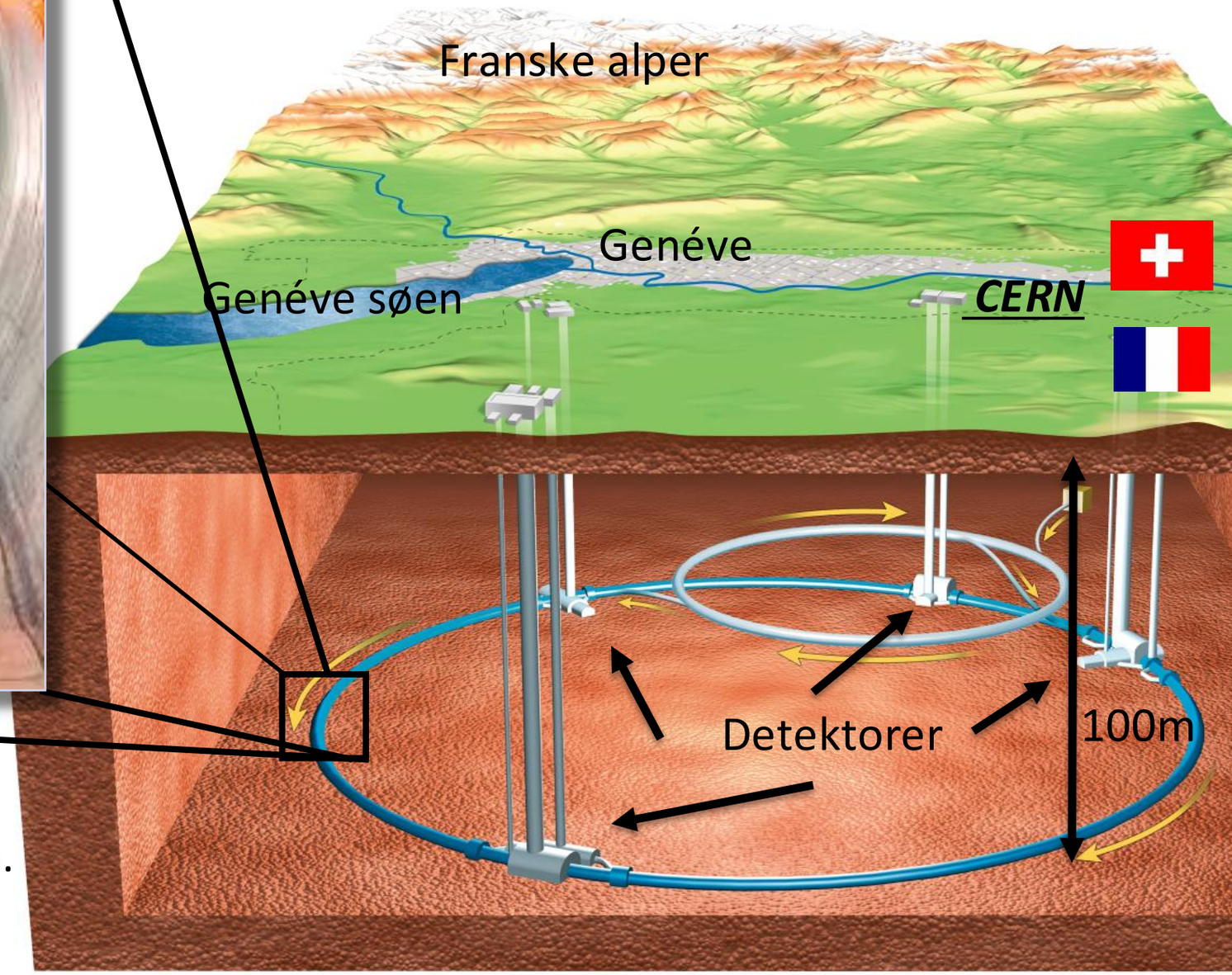
MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Large Hadron Collider



Proton-proton-sammenstød ved meget høj energi: 14.000 GeV

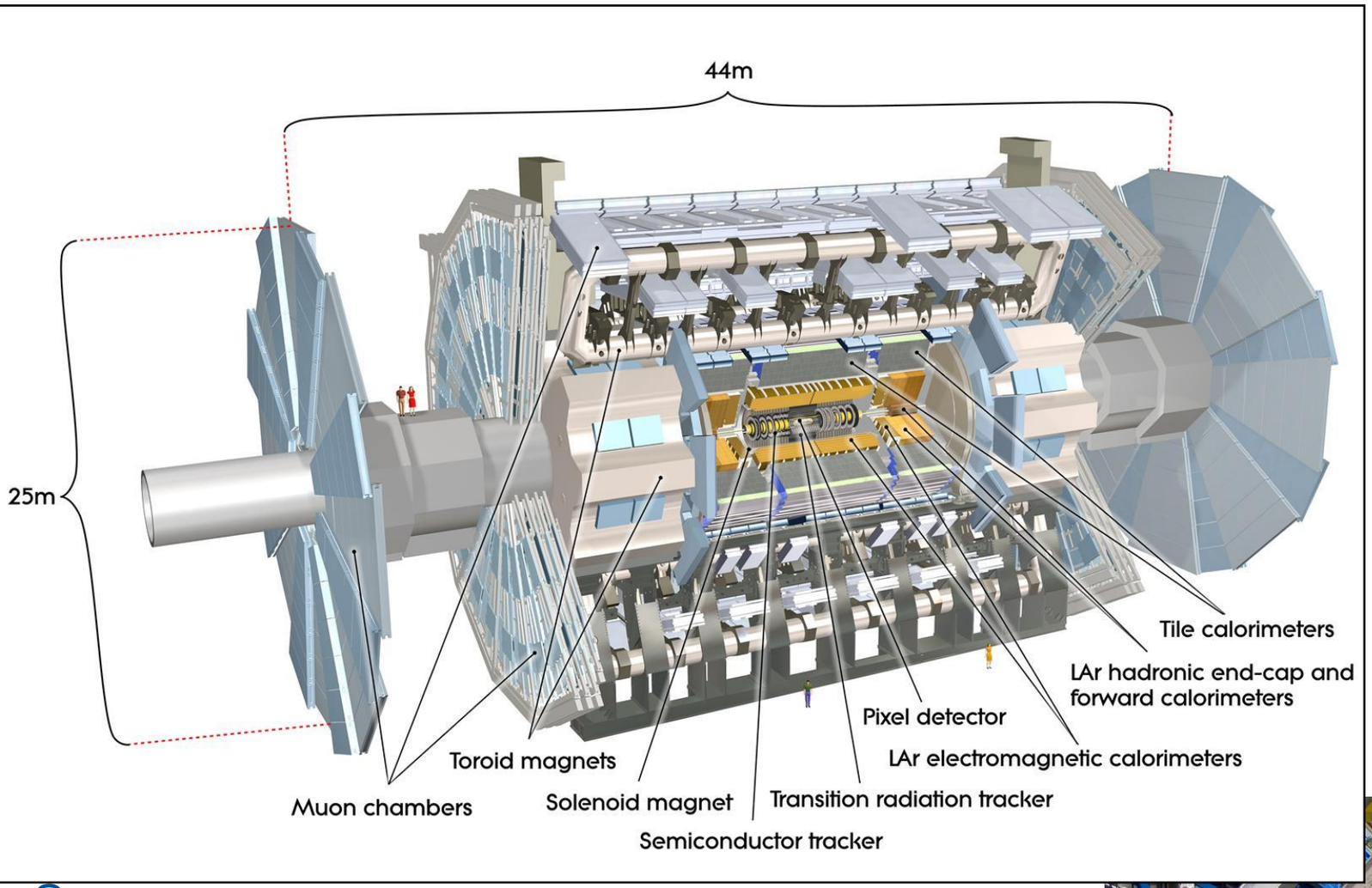
1 GeV ≃ hvileenergi af en proton ($E = mc^2$)



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

MOGENS DA

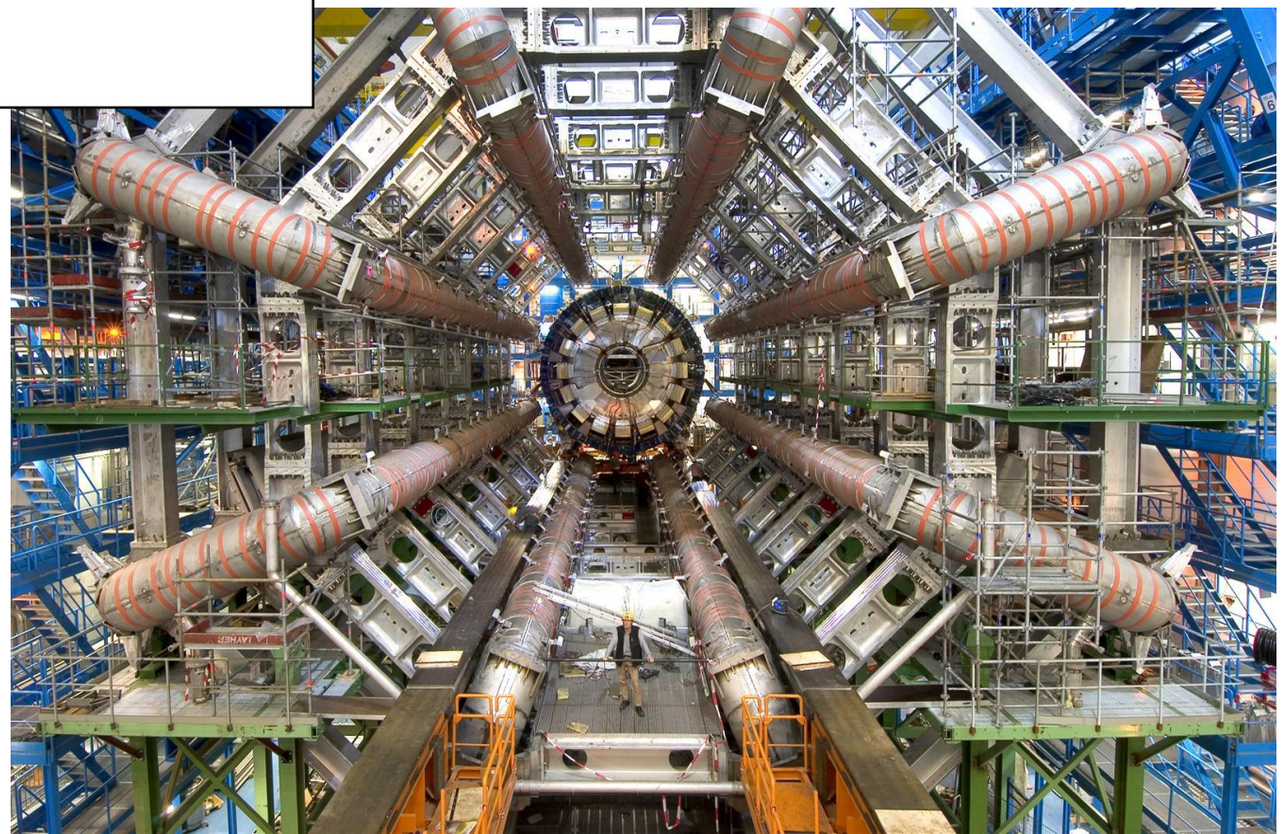
ATLAS Detector



En af fire detektorer ved LHC

Som et stort 3D kamera.
40.000.000 billeder pr. sekund

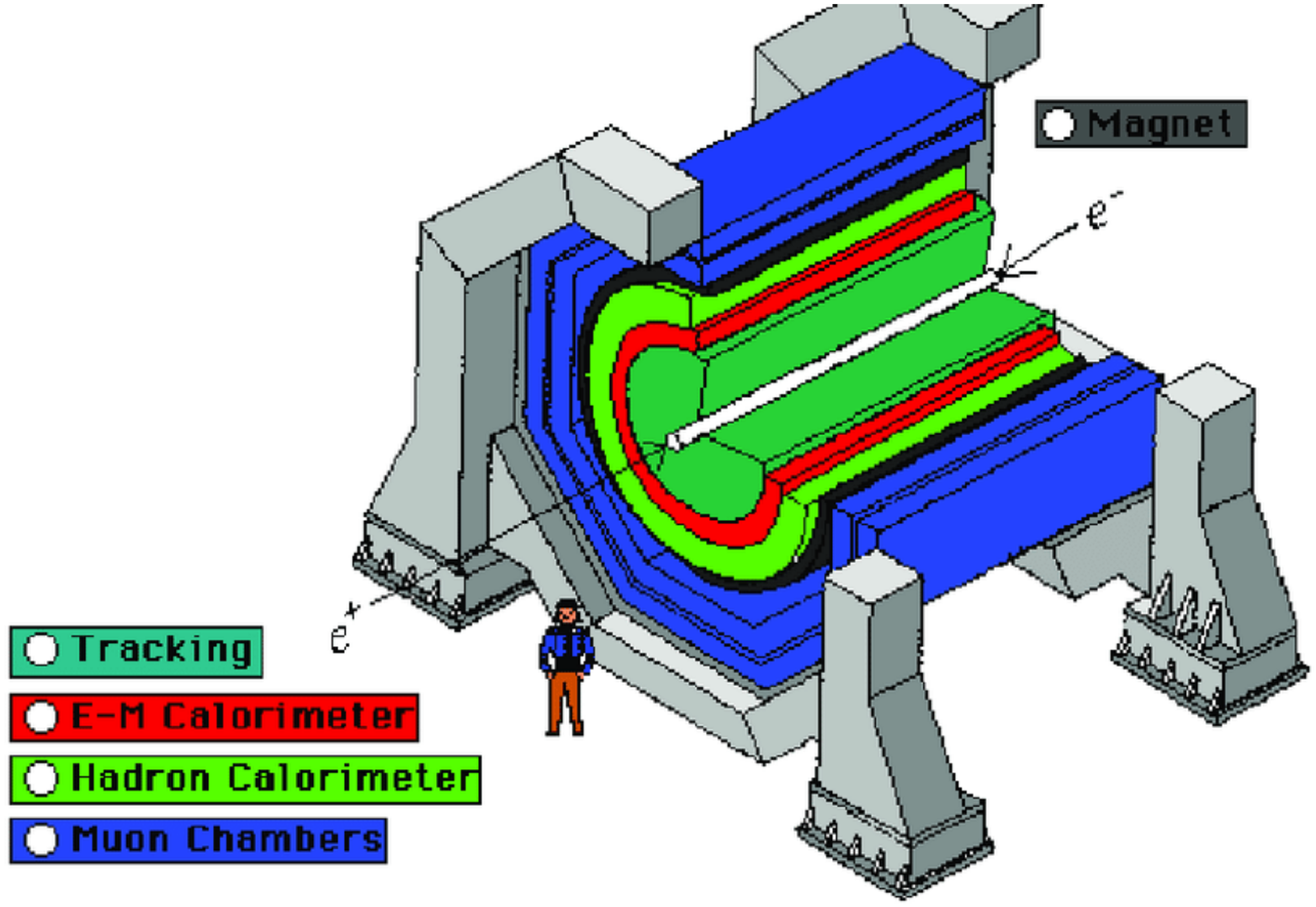
Længde:	44 m
Højde:	25 m
Vægt:	7.000 tons
Antal udlæsningskanaler:	90.000.000
Antal forskere:	3.000



MOGENS DAM, NIELS BO

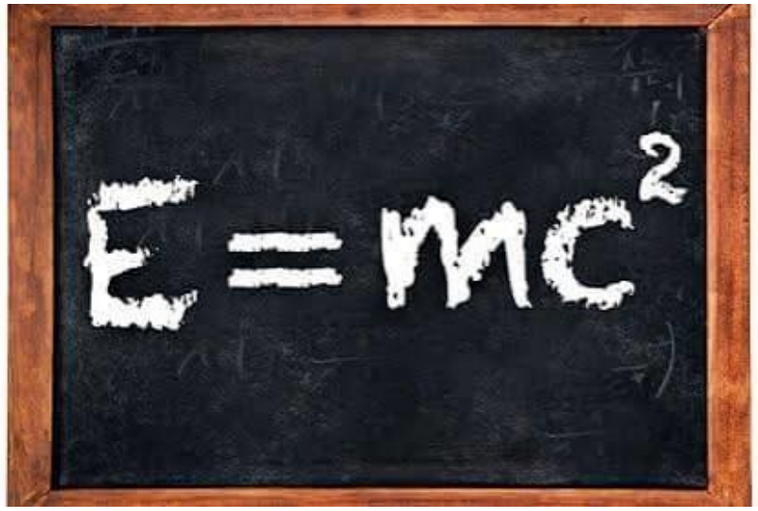
En partikeldetektor principielt

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



MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Skabe nye partikler – $E=mc^2$



Einsteins mest berømte formel:

- Energi og masse er ækvivalente størrelser.

Masse omdannes til energi:

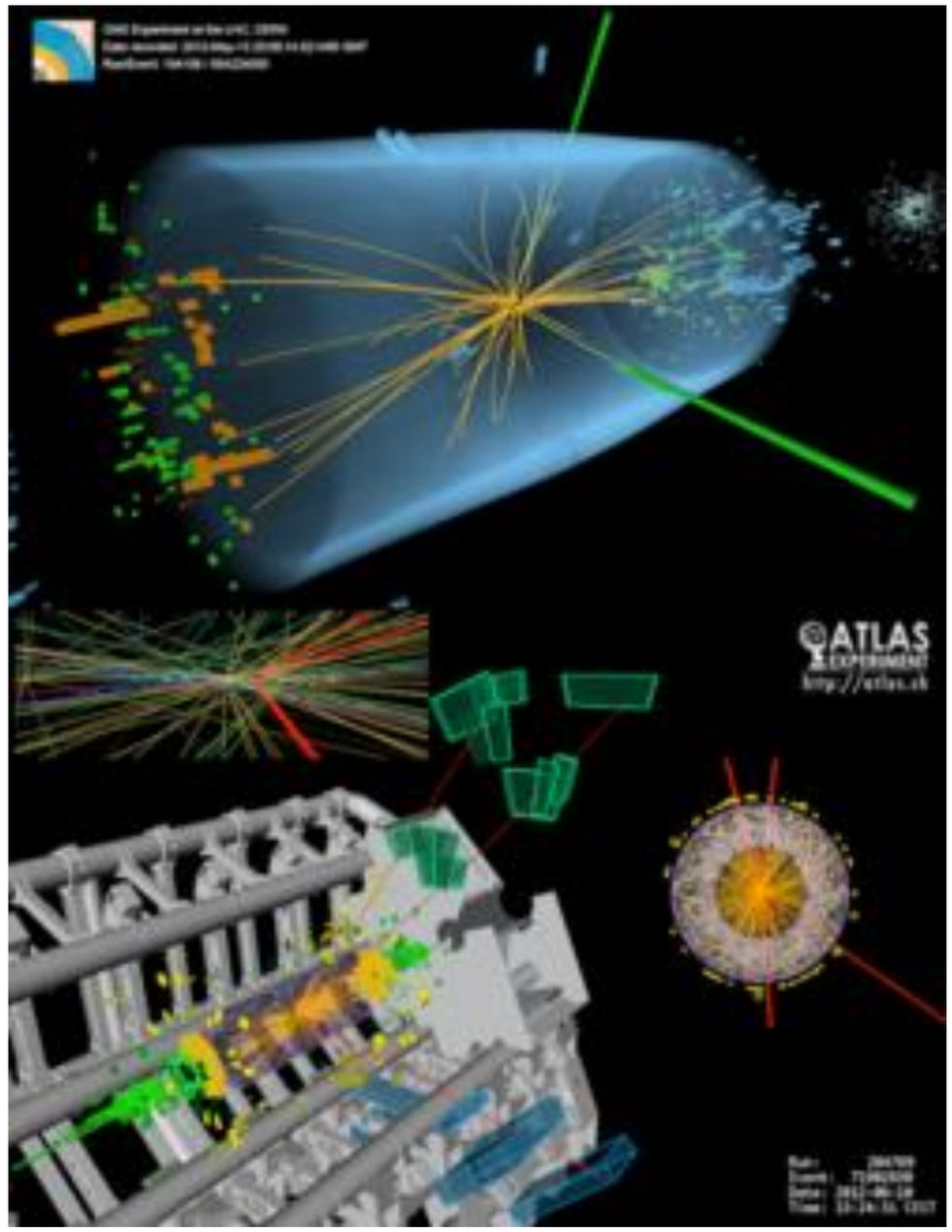
Proces	Brøkdel omdannet
Stof + antistof	100%
Solen 4H->He	0.7%
Uran fission	0.08%
Afbrænding af benzin	0.00000005%

Men energi kan også omdannes til masse:

$$e^+ + e^- \rightarrow Z + H$$

Masseregnskab:

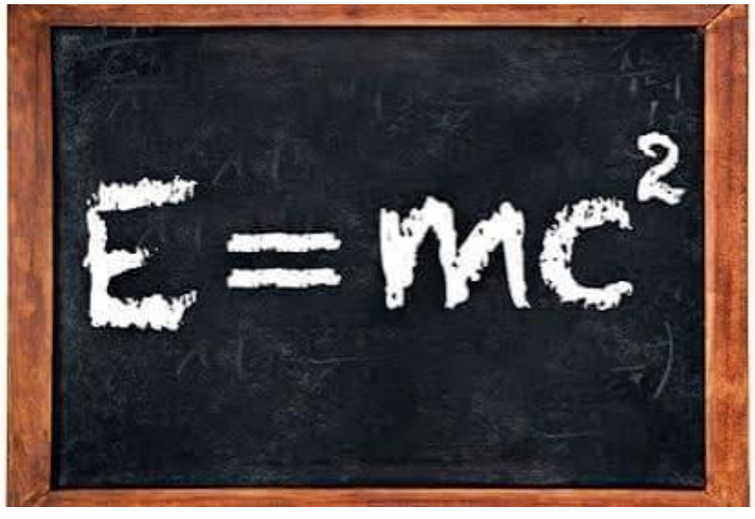
$$0.5\,\mathrm{MeV} + 0.5\,\mathrm{MeV} \rightarrow 91000\,\mathrm{MeV} + 125000\,\mathrm{MeV}$$



- Ikke massebevarelse, men energibevarelse.
- Kinetisk energi omdannes til masse

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Hvileenergi - partikel i hvile:

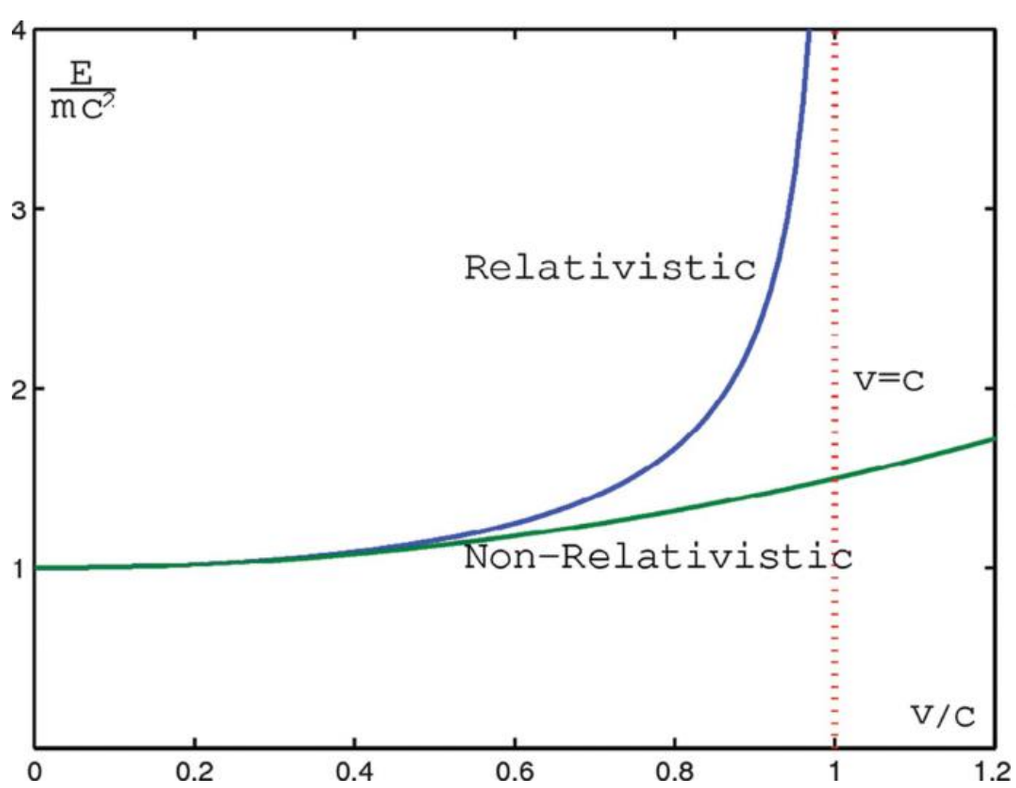


Totalenergi = hvileenergi + kinetisk energi

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Relativistisk gamma-faktor

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



$K = \frac{1}{2}mv^2$

Relativistisk: hastigheder > c ikke tilladte

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

LHC – proton-proton-sammenstød



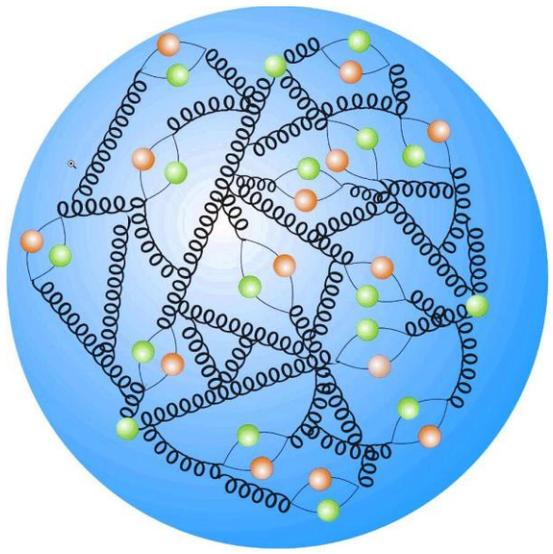
$$m = 0.938\,\text{GeV}/c^2$$

$$E = 7000\,\text{GeV}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{E}{mc^2} = 7500$$

$$v/c = 0.9999999991$$

Men protonen består at *partoner:* *kvarker* og *gluoner*



Resultat:

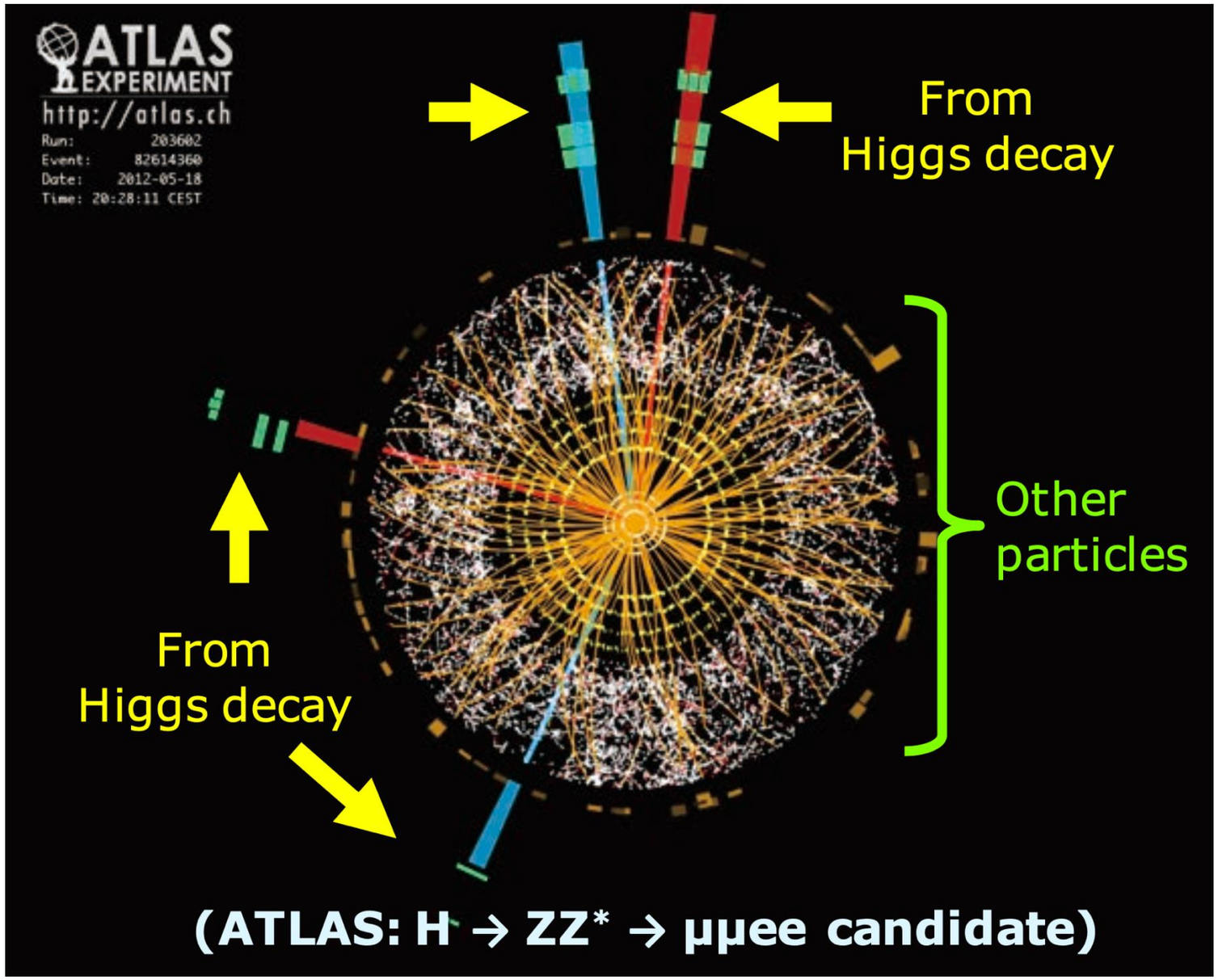
Energien fordelt på mange elementære sammenstød

- Lavere energi i hver af de elementære sammenstød
- Mange samtidige elementære sammestød.
  Rodet begivenhed

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Higgs-kandidat ved LHC

$$H \rightarrow Z + Z^* \rightarrow ee + \mu\mu$$

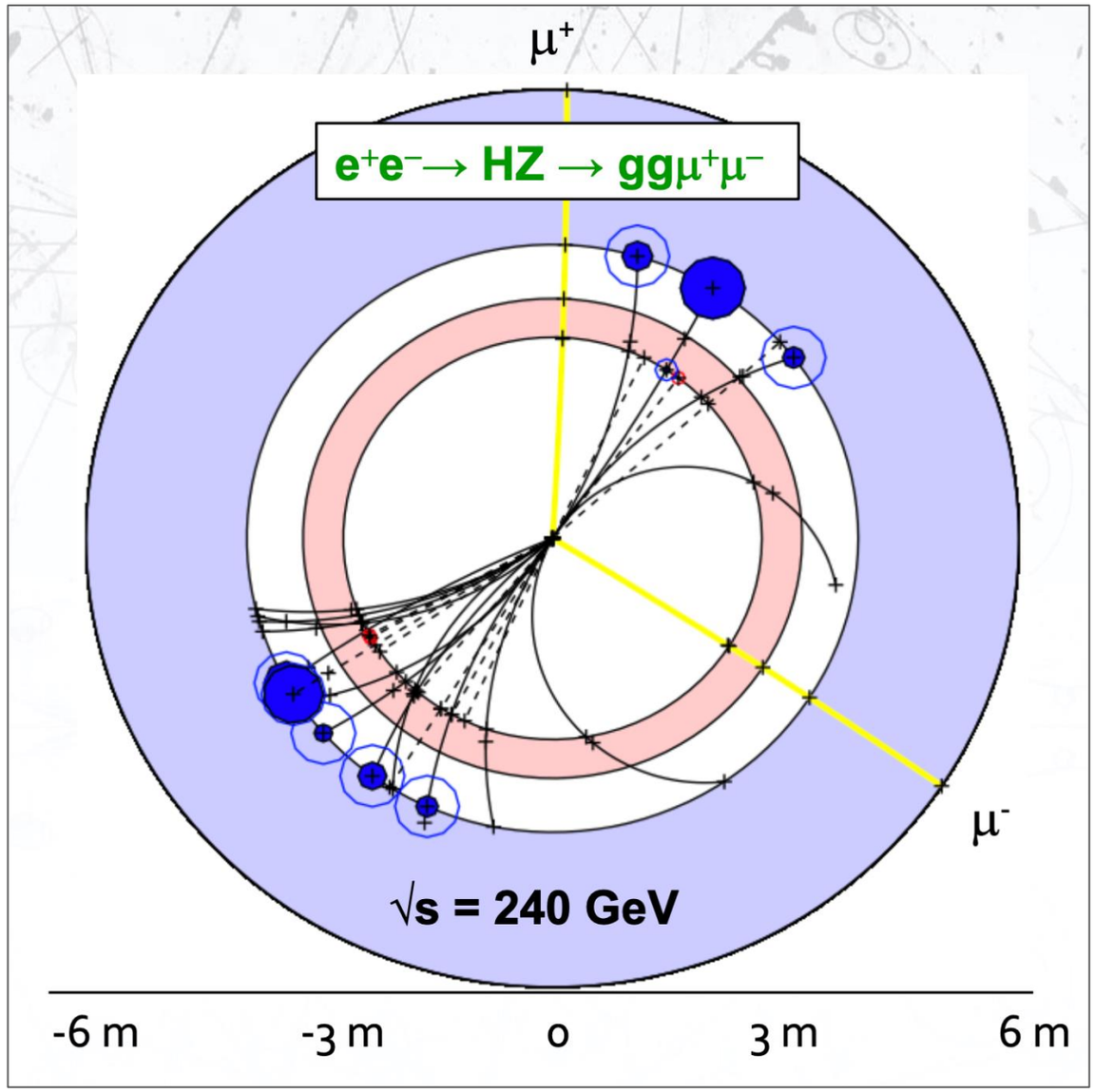


Proton-proton-sammenstød:
Rodet begivenhed: mange andre partikler end dem fra Higgs-henfaldet

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Elektron-positron-sammenstød

Eksempel: Higgs-produktion

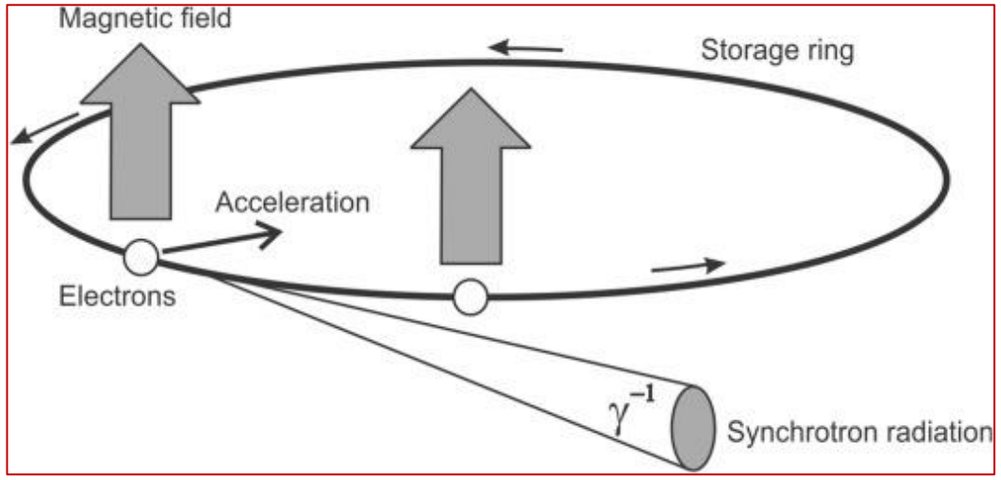


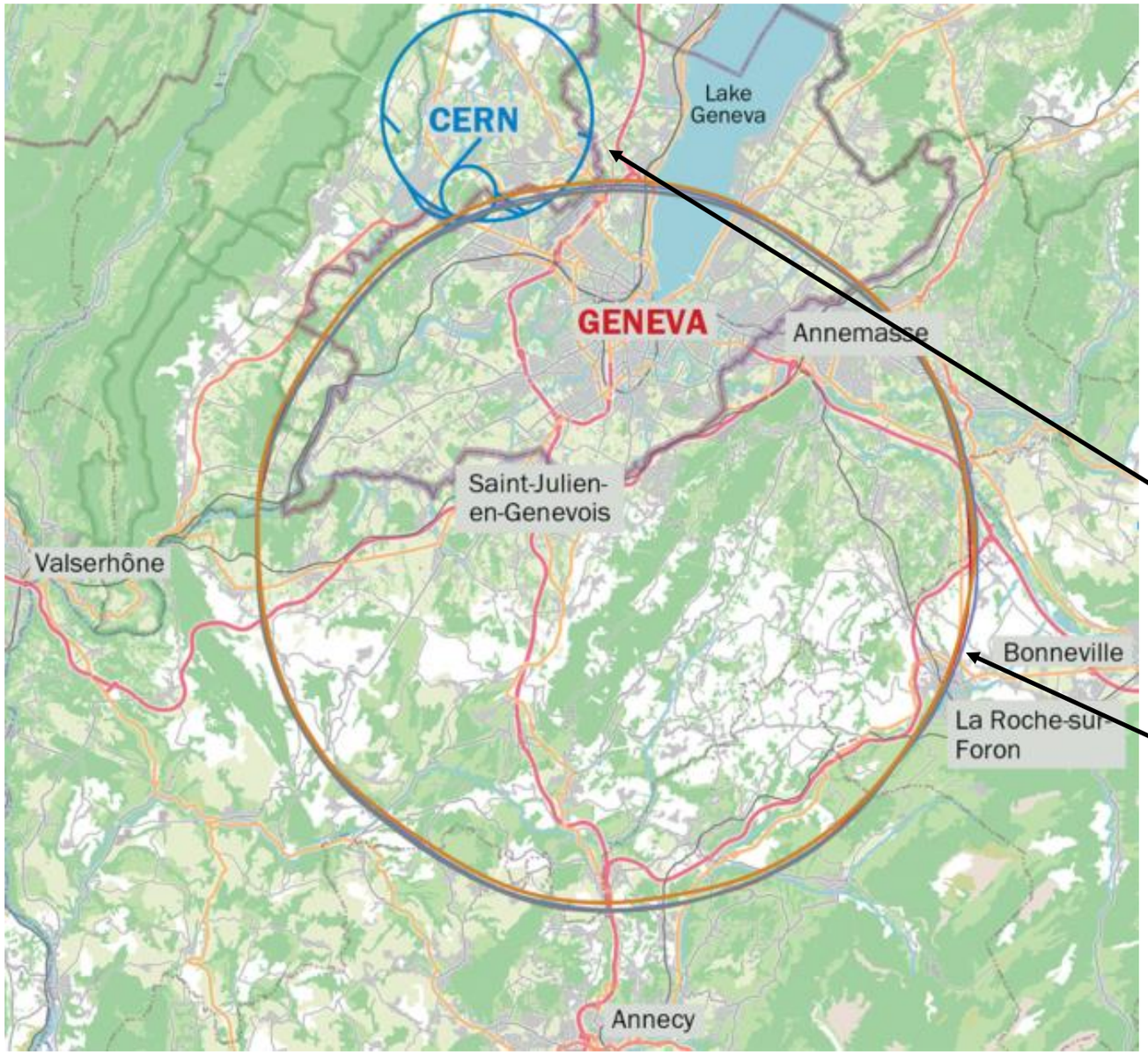
"Rene" begivenheder: Sammenstød mellem elementære partikler

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Elektron-positron-sammenstød

- Vi vil gerne kollidere elementære partikler snarere end de sammensatte protoner.
- Eneste stabile elementære partikel: elektronen (og dens antipartikel, positronen)





- Men elektroner er lette
  => De udstråler energi, når de drejes rundt i cirkulær bane
  - *Synkrotronstråling*
  - Energitab $\propto \gamma^4$ (og $\propto 1/R$)

Elektron-positron sammenstød:

- LEP (1989-2000):
  omkreds 27 km
  E_{max} = 210 GeV

- FCC-ee (2045-2060): 91 km
  omkreds 91 km
  E_{max} = 400 GeV

FUTURE CIRCULAR COLLIDER

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

23 Protoner – langt højere energi i samme tunnel

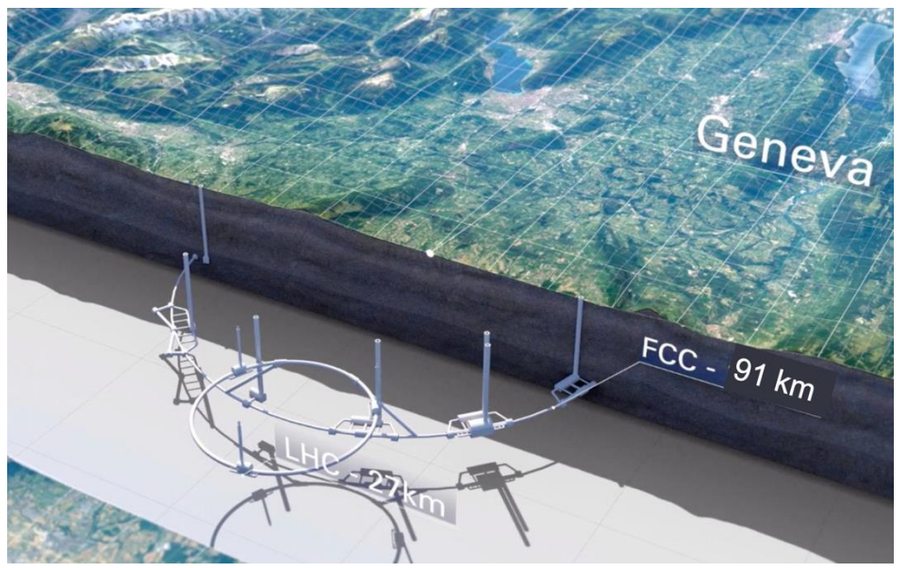
LEP / LHC tunnel – 27 km



LEP
Elektron-positron
1989-2000
E_{max} = 210 GeV
γ = 200000

LHC
Proton-proton
2010-2041
E_{max} = 14000 GeV
γ = 7500

FCC tunnel – 91 km



FCC-ee
Elektron-positron
2045-2060
E_{max} = 400 GeV
γ = 400000

FCC-hh
Proton-proton
2070-2100?
E_{max} = 100000 GeV
γ = 50000

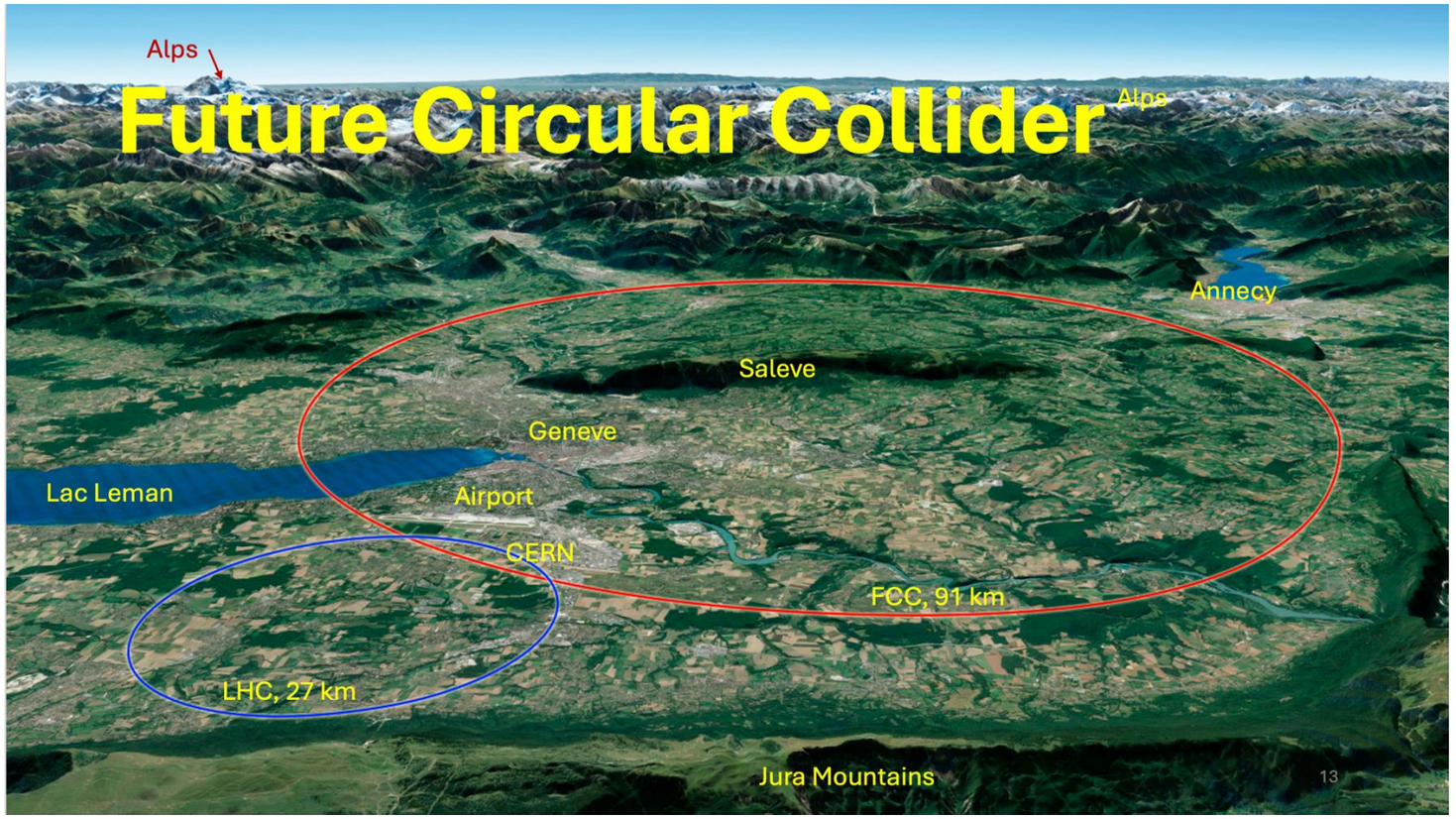
Synkrotronstråling sætter begrænsningen

FUTURE CIRCULAR COLLIDER

Styrken af magnetfelt sætter begrænsningen
=> Superledende magneter

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Future Circular Collider



- Det europæiske partikelfysikmiljøs og dermed CERNs absolut foretrukne bud på en stor, ambitiøs fremtidig accelerator ved CERN.
- Planerne er allerede meget fremskredne
  - FCC-ee: elektron-positron-sammenstød, E=90-365 GeV, ekstrem høj *luminositet*
    - Konstruktion 2030-1025, Operation 2045-2060.
    - Håber på godkendelse fra CERN Council (og dermed europæisk politisk niveau) i 2028
  - FCC-hh: proton-proton-sammenstød, E > 100.000 GeV
    - Konstruktion 2060-2070, Operation 2070-?
    - Beslutning senere
- På trods af dette, er der stadig fysikere der "drømmer" om en muon-collider
  - Især fra USA

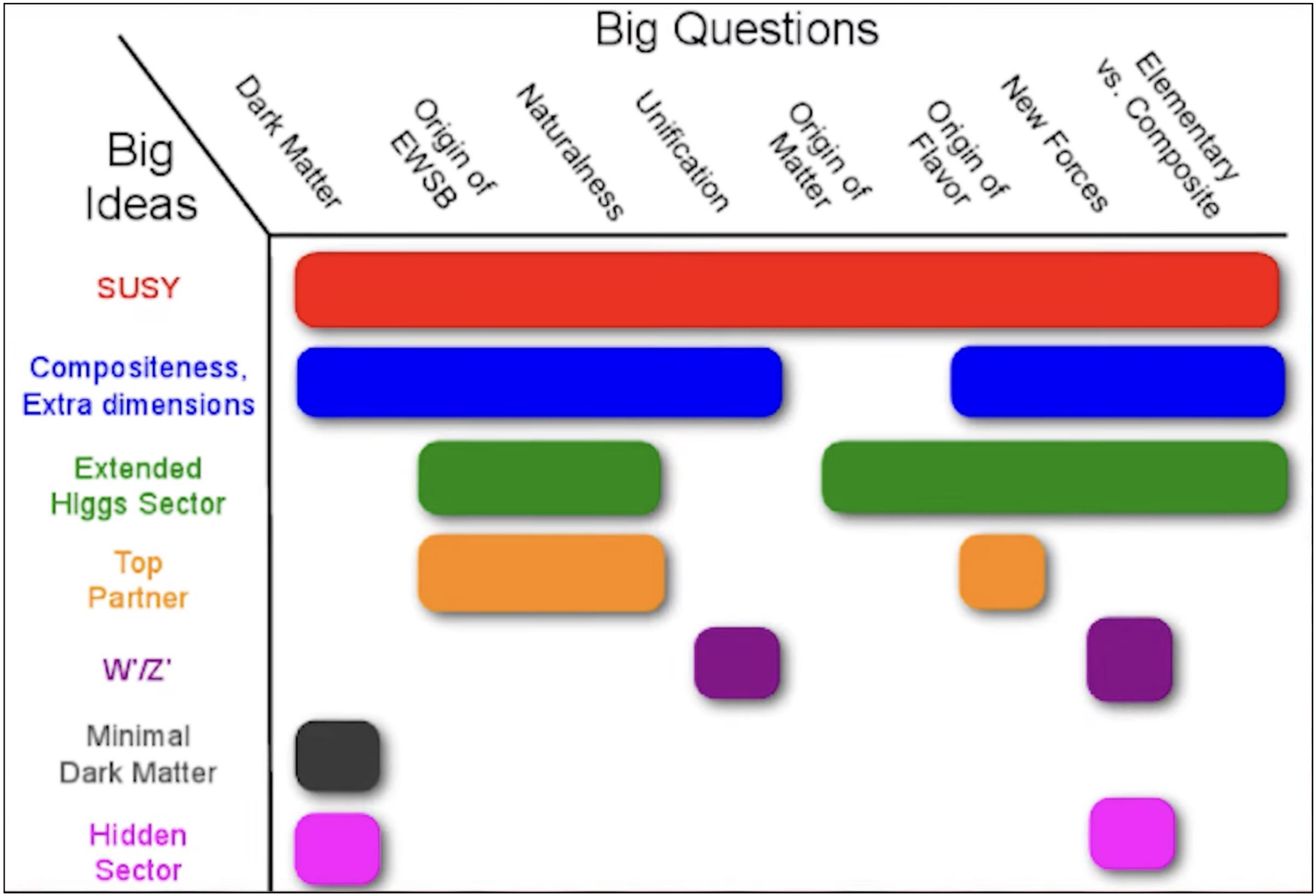
Hvorfor en fremtidig collider

- Med opdagelsen af Higgs-partiklen er Standardmodellens partikellandskab fuldkommen
  - Alle forudsagte partikler eftervist
- Higgs-partiklen spiller en hel unik rolle. Den giver masse til alle andre partikler. Og den er den eneste elementære spin-0 partikel vi kender:
  - Spin: Som en snurretop. Spin-0: Den snurrer ikke. Kender ikke til retning i rummet.
  - Spin-0: Teoretiske problemer med at forstår massen: ikke beskyttet af symmetrier
  - Er Higgs-partiklen virkelig elementær, eller er den en sammensat partikel?
  - LHC giver vigtige oplysninger om Higgsens egenskaber men ikke med høj præcision
  - Vi har brug for en “Higgs Factory”, hvor Higgs-partiklen kan undersøges præcist.

- Andre fundamentale spørgsmål:
  - Hvad er mørkt stof. Sandsynligivis en (endnu ikke opdaget) partikel ?
  - Hvorfor er der stof (materie) i Universet? Hvis stof og anti-stof var fuldkomne spejlbilleder af hinanden, så ville alt nu være annihileret. Universet ville blot indeholde fotoner.
  - Hvad giver (ekstremt små) masser til neutrinoerne.
  - …

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Store spørgsmål, store teoretiske ideer

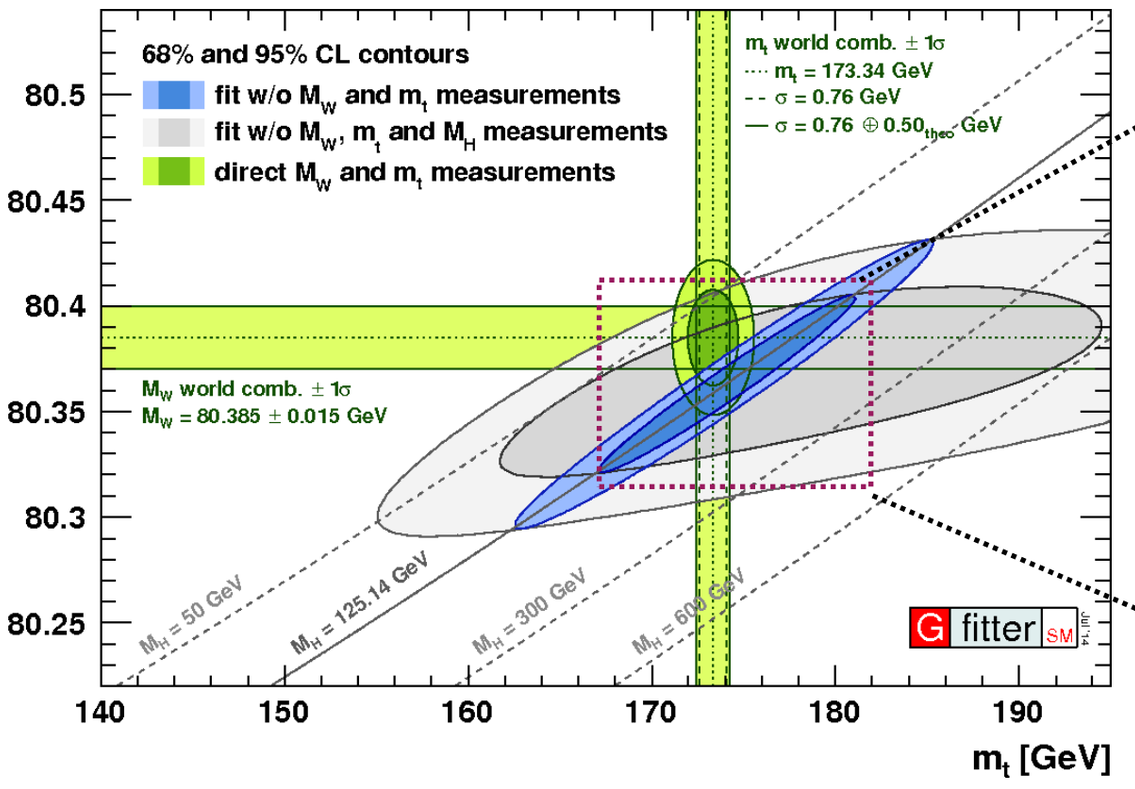


MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

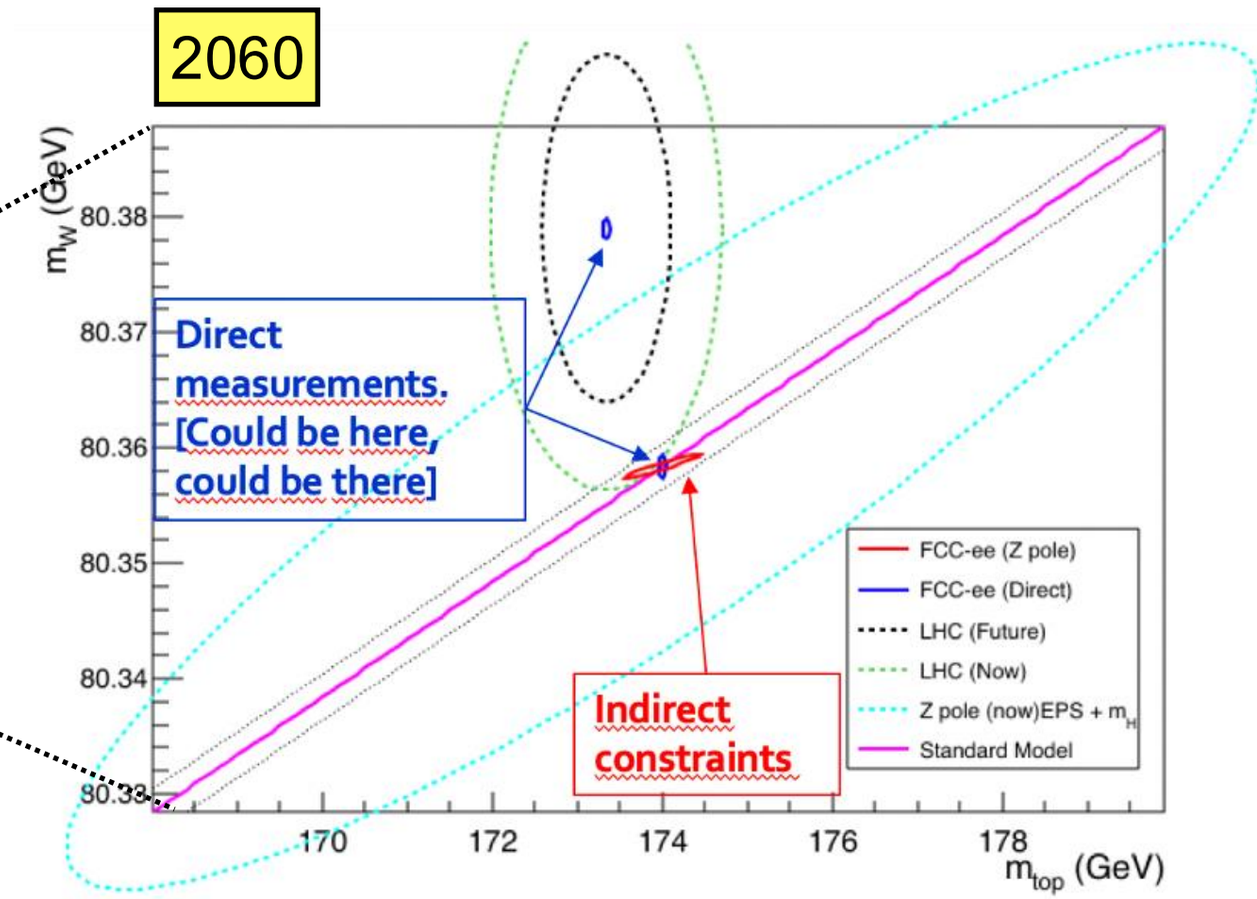
FCC-ee - et kraftigere mikroskop

Generelt en faktor 10-100 forbedring af præcision

I dag



2060

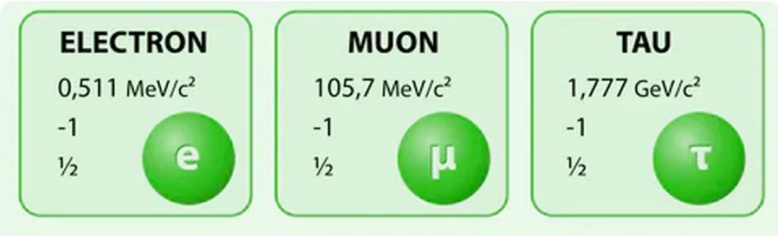


Indirekte følsomhed over for ny fysik op til energier på ~7 TeV

Indirekte følsomhed over for ny fysik op til energier på ~70 TeV

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

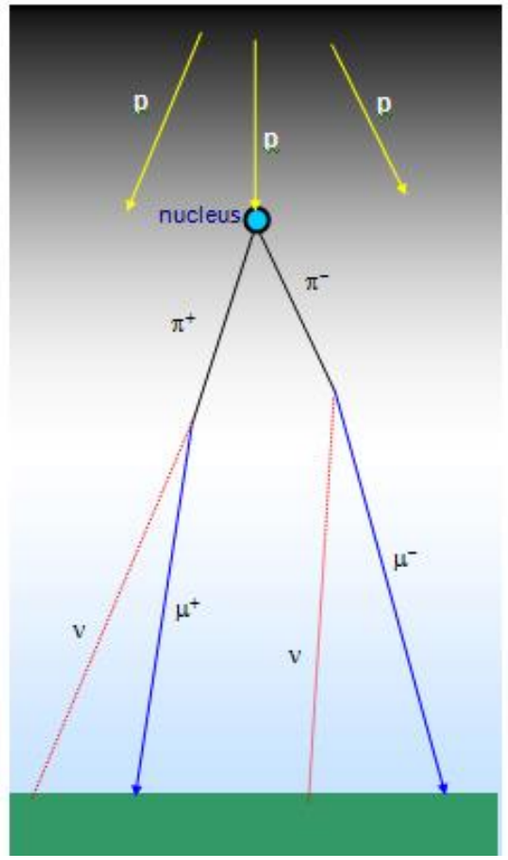
Muoner



Elektronen har en tungere storesøster: muonen

- 200 gange tungere (9 gange lettere end protonen)
- 200 gange mindre γ-faktor for samme energi: $\gamma = E/mc^2$
- γ^4 = 1.600.000.000 gange mindre synkrotronstråling for samme energi og omkreds

Så hvad med muon-antimuon-collider?

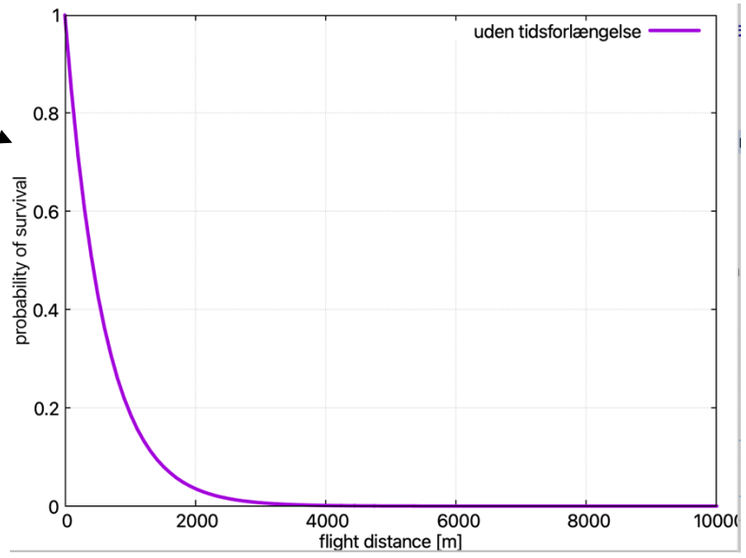


Komplikation: muonens er ustabil.
Dens levetid er kun τ_μ = 2,2 micro-sekunder (2,2 x 10^{-6} s)

- Muoner findes ikke naturligt; vi observerer dem i naturen som et resultat af kosmisk stråling, der rammer den øvre atmosfære (sammanstød: proton + atomkerne)
- Antager vi, at en muon bevæger sig med lyshastigheden, *c*, ville den højest kunne bevæge sig afstanden

$$d = c \cdot \tau_\mu = (3 \times 10^8\,\mathrm{m/s} \cdot 2{,}2 \times 10^{-6}\,\mathrm{s}) = 660\,\mathrm{m}$$

- Men her er der noget, der ikke stemmer:
  ”Kosmiske muoner” produceres i ~20 km højde, men når alligevel ned til jordoverfladen i stort antal
  => Relativitetsteori: **tidsforlængelse**



Speciel relativitetsteori



Formuleret af Einstein; offentliggjort i 1905

Grundlæggende antagelse

Al bevægelse er relativ

- Enhver hastighed af et legeme giver kun mening, hvis opgivet ***i forhold til*** et andet legeme
- Der findes ingen absolut bevægelse, intet *absolut hvile*
- Kendt fænomen fra mekanikken: Newtons love tillader udelukkende at skelne mellem jævn og accelereret bevægelse. Men *ikke* mellem jævn bevægelse og hvile.
- Imidlertid tænkte man sig i lang tid, at der kunne være fænomener ud over mekanikken, som tillod af eftervise ***det absolutte rum***.

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}$$

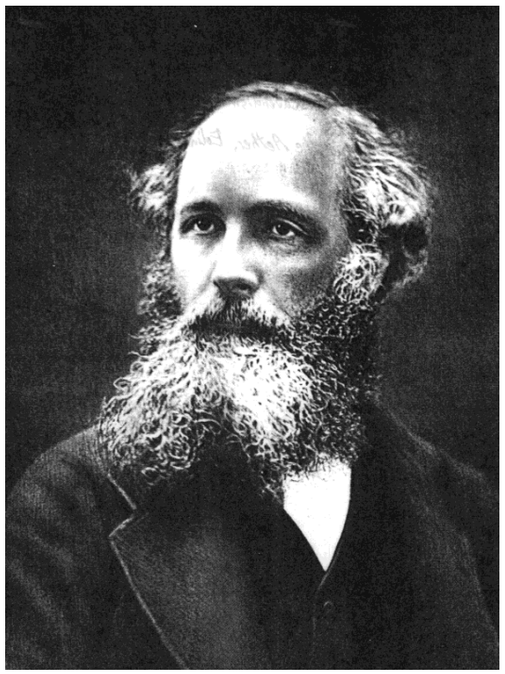
For eksempel udbredelsen af lys…



MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTET

Udbredelse af lys

- Maxwell (1869): Lys er elektromagnetisk bølger
  - Udbredelseshastighed: c = 300.000.000 m/s
- Hastighed *i forhold til* hvad ?
  - Udbredelse i hvad? Hvad er det, der svinger?
- Parallel: lydbølger → svingninger i luften
  - 300 m/s *i forhold til* luften
  - Eksempel: lydhastighed i forhold til jordoverfladen





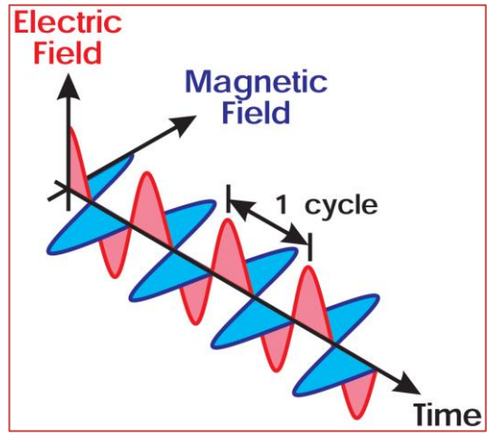




Anna

Vind -> 30 m/s

Berit



Lyd bevæger sig hurtigere fra Anna til Berit end fra Berit til Anna

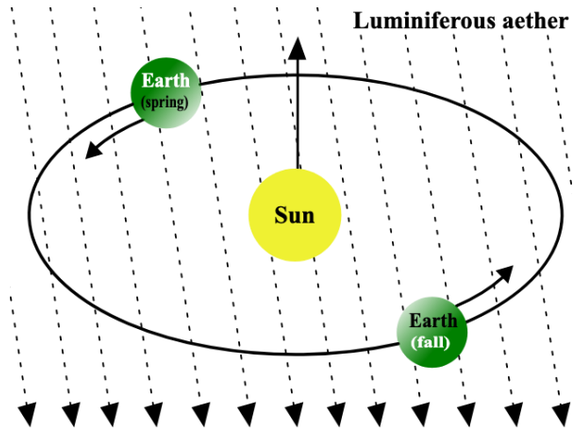
Anna til Berit: 330 m/s
Berit til Anna: 270 m/s

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Udbredelse af lys

- Hvilket medie udbreder lys sig i? Hvad er det der svinger?
  - Sidst i 1800-tallet indførte man *ad hoc* begrebet *"æter"*
    - Lys er svingninger i *"æteren"*
  - Lyshastigheden er da 300.000.000 m/s *i forhold til* æteren
- Men da burde lys kunne have medvind / modvind....
  - Må kunne måles, hvis *Jorden bevæger sig i forhold til æteren*
    - Forskellig lyshastighed i forskellige retninger
- Fastlæggelse af *"ætervinden"*
  - Efterstræbt måling i 1800-tallets sidste halvdel
  - Alle forsøg på at måle ætervinden gav negativ resultat
    - Æteren tilsyneladende i hvile i forhold til Jorden...

      Utroværdig konklusion...



- Måske er der bare ikke nogen æter ?

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Michelson-Morley-Eksperimentet

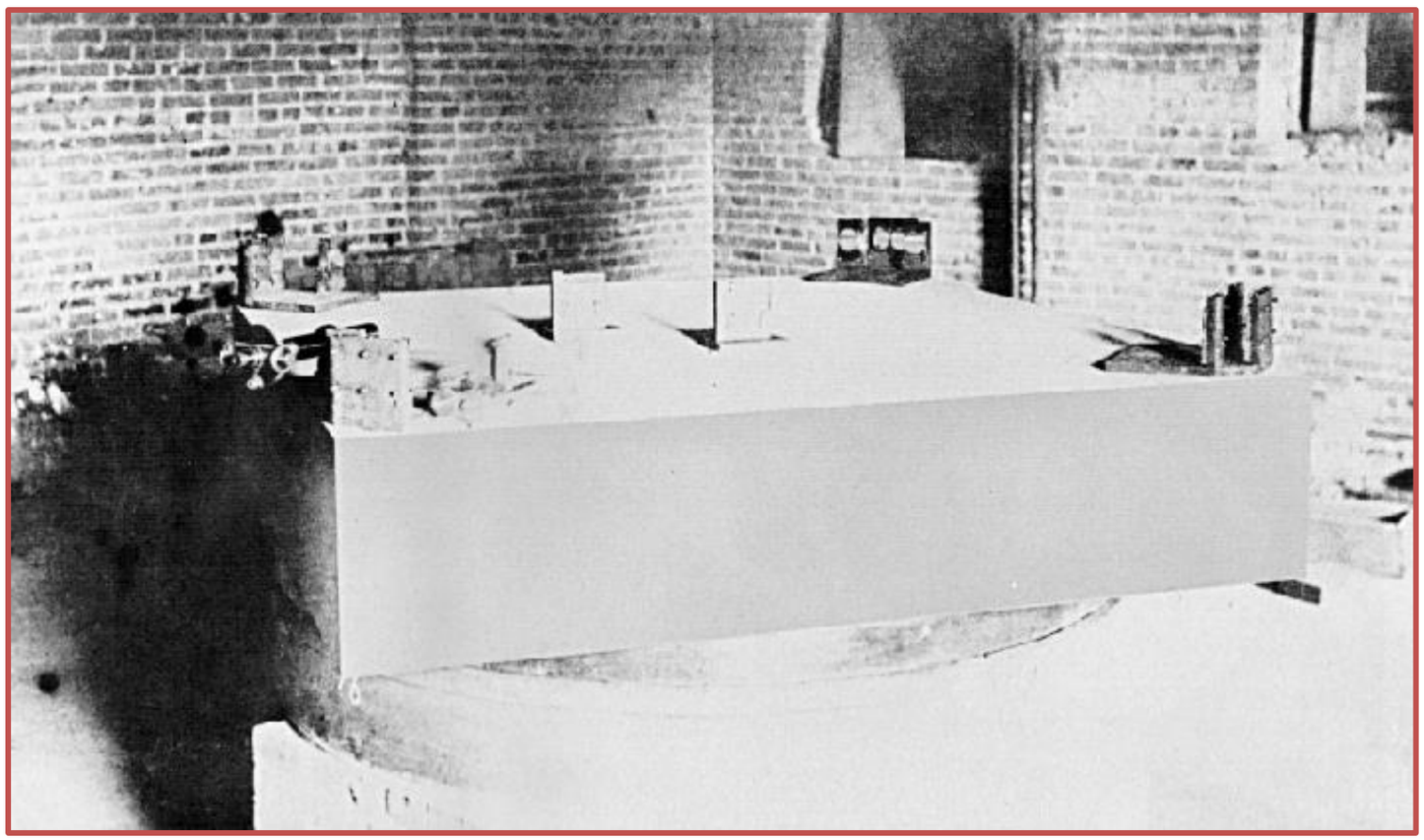


A.A. Michelson
1852 - 1931

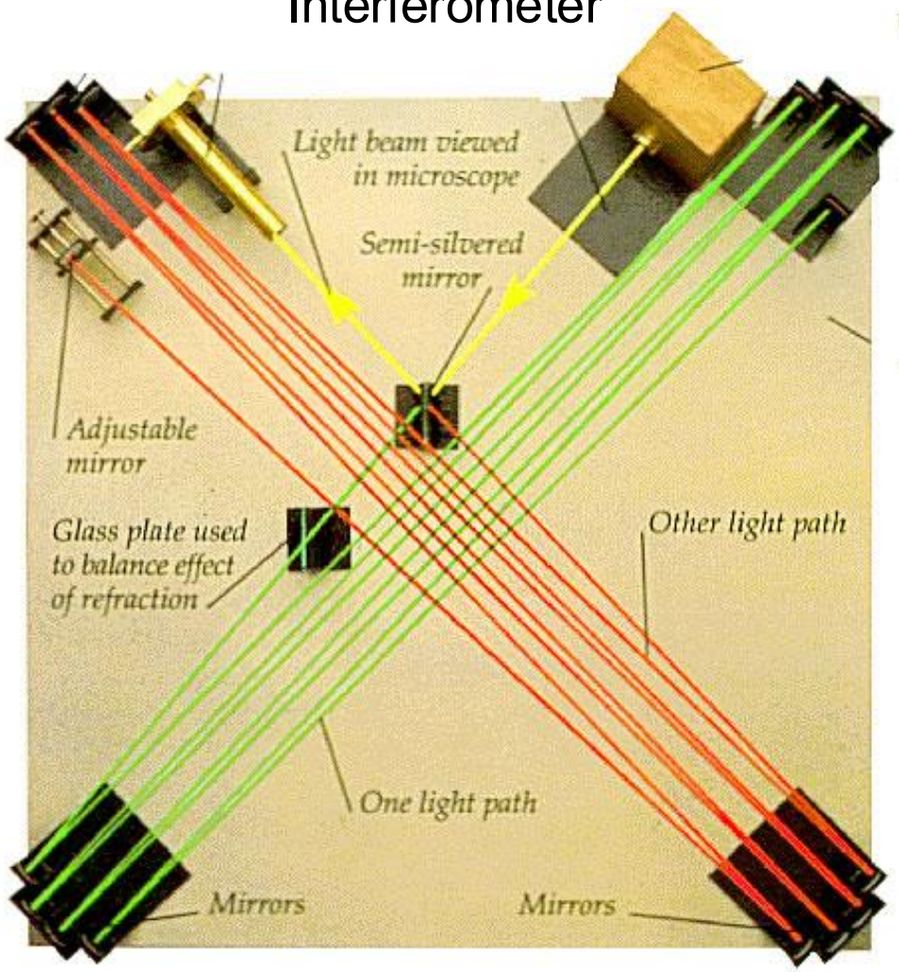


E.W. Morley
1838 - 1923

Det mest berømte eksperiment til eftervisning af ætervinden.
Viste nul-resultat.



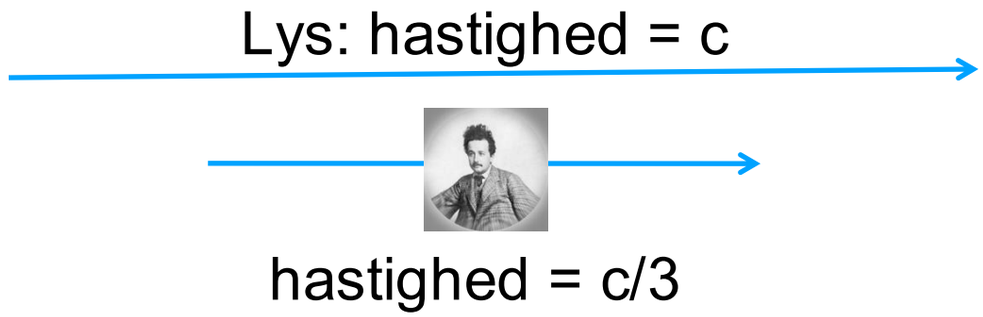
Interferometer



MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

33 Samtidig: Einstein spekulerer over lys

- Einstein: Hvis lys udbreder sig med hastigheden *c*=300.000.000 m/s, så må det *i princippet* være muligt at bevæge sig ved siden af en lysbølge, lige så hurtigt som denne, og betragte lysbølgen i hvile i forhold til sig selv.
  - Hvordan vil en sådan lysbølge "se ud"?
- Einstein undersøger Maxwells ligninger: Men nej, disse har kun og alene løsninger for lys, der udbreder sig med hastigheden *c*.
  - Jamen, det dur jo ikke. Fx.



- Iagttager skulle *i princippet* kunne have *enhver* hastighed *i forhold til* lysstrålen
  - Så, er der ikke noget galt med Maxwells teori ?
  - Nej, viser det sig. Det er ikke Maxwell, der er noget i vejen med... Men noget langt mere fundamentalt!

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

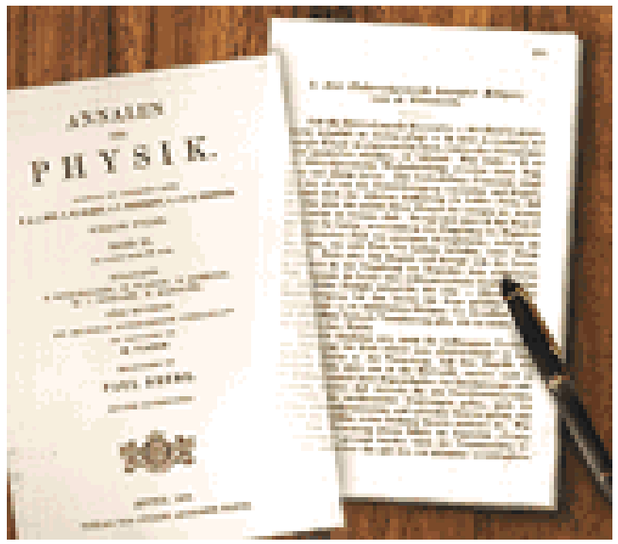
Einsteins relativitetsprincip (1905)

Einstein postulerer i 1905 (26 år gammel) :

1. ***Alle inertialsystemer er ligeværdige for udførelse af samtlige fysiske forsøg***

   a. meningsløst at spørge, hvem der er i hvile, og hvem, der bevæger sig; **al bevægelse er relativ**

   b. æteren er død: Hvis der fantes en æter, ville det system, der var i hvile i forhold til æteren, være speciel (og altså ikke ligeværdigt med andre)



2. ***I det tomme rum har lys samme konstante hastighed, c, for enhver iagttager***

Set med traditionelle briller, er dette ret vanvittigt!

- Lige meget hvor hurtigt man forsøger at indhente en lysstråle, vil denne altid fjerne sig fra én med samme hastighed, *c*

Einsteins postulater fører til en ny opfattelse af rum + tid

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Samme hastighed for enhver iagttager

hverdag



150 km/t



40 km/t

Hastighed af bil *i forhold til* cykel:
v = (150-40) km/t = 110 km/t

=> Hastigheder lægges sammen (trækkes fra hinanden), som normale tal

lys

lysstråle

300.000 km/s



100.000 km/s

Hastighed af lysstråle i forhold til Einstein er uanset hans bevægelse:
v = 300.000 km/s

=> Hastigheder lægges *ikke* sammen, som normale tal...

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

36 Samme hastighed for enhver iagttager (ii)

Q: Hvad er så specielt ved lys, at vi ikke kan benytte “normale” regler for sammensætning af hastigheder?

A: Hastigheden er høj!

- Faktisk den højeste opnåelige (ikke-abstrakte) hastighed overhoved

- Strengt taget er det *aldrig* 100% korrekt at addere hastigheder
  - Men for hverdagshastigheder er det ok til ~ 14 decimalers præcision...
- Hvordan/hvorfor?

hastighed = afstand i **rum** / afstand i **tid** (fx. 50 km / time)

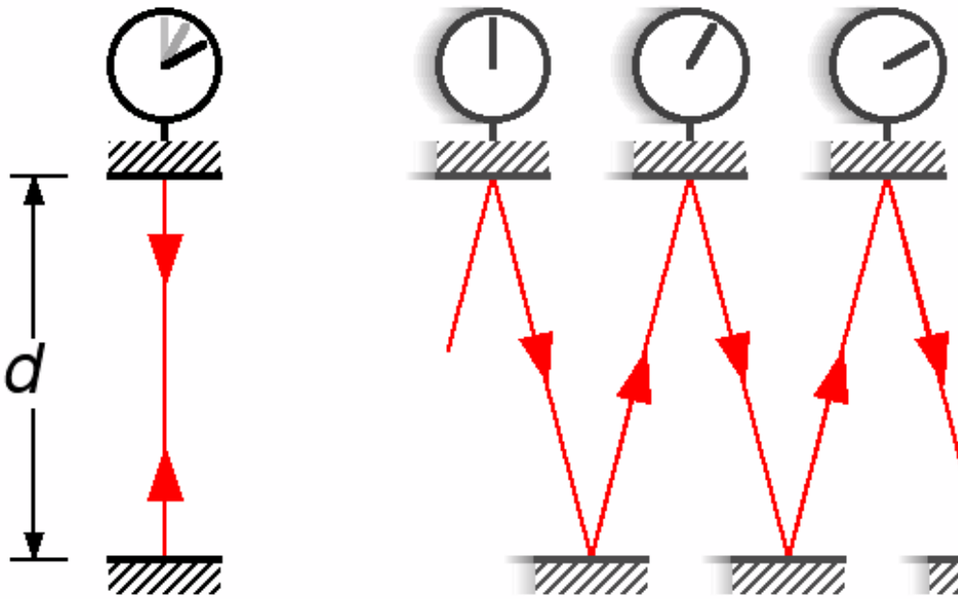
Sammenbrud af hastighedsadditionsreglen:

Strukturen af rum + tid er anderledes end, hvad vores hverdagserfaring fortæller os

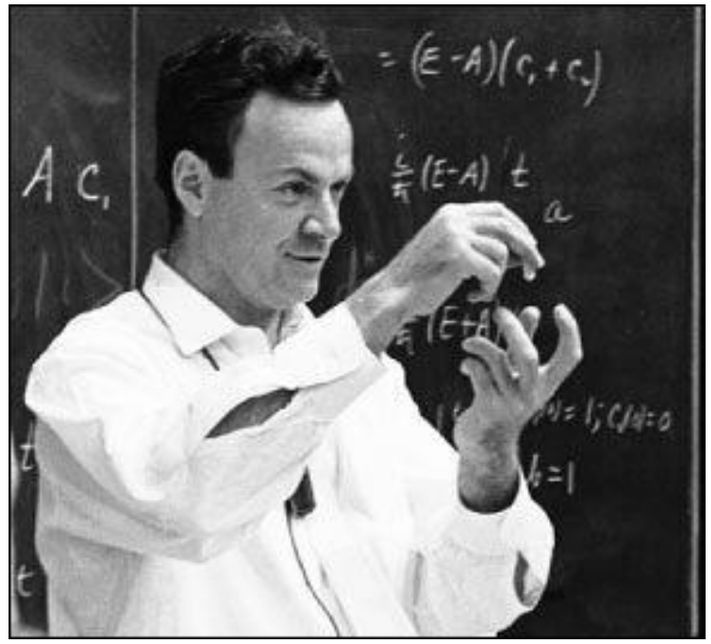
MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Revision af fundamentale begreber: Tid

- Et ur, der bevæger sig, tikker langsommere.
- Dette kan anskueliggøres direkte v.hj.a. et såkaldt lysur.
- Lysvejen i det bevægede ur er længere; det bevægede ur tikker altså langsommere



Hver gang lyset rammer det øvre spejl, tikker uret én gang



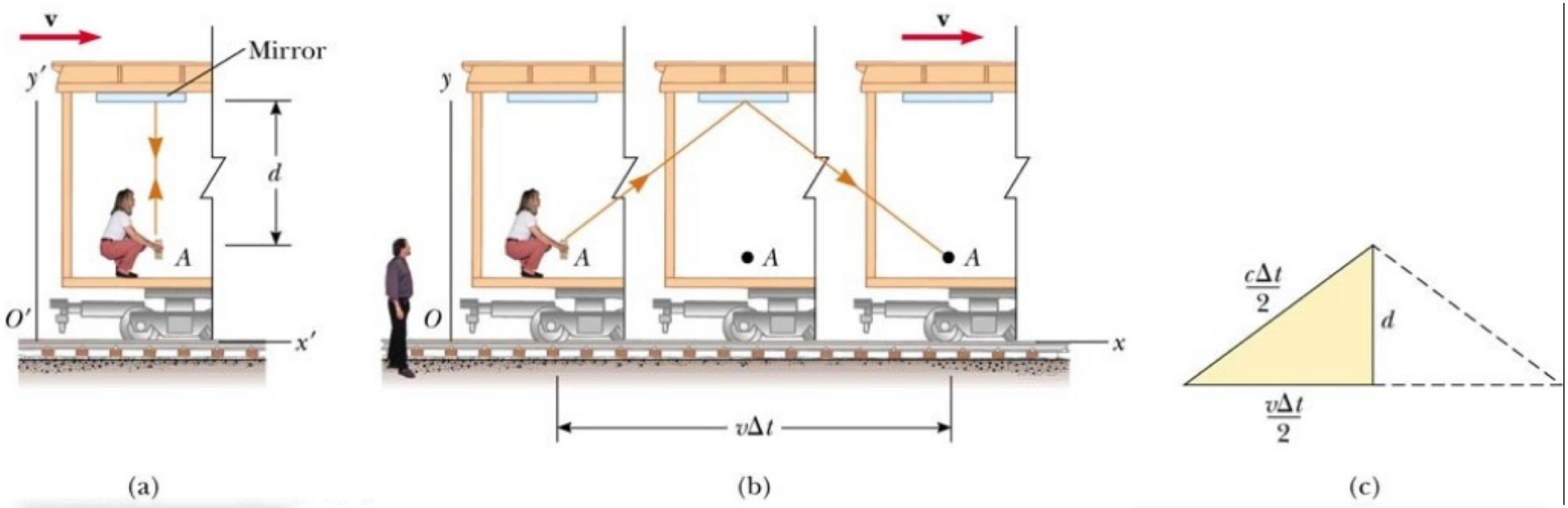
Argument efter R.Feynman

- Et ur går langsommere, hvis det er i bevægelse i forhold til iagttageren
- En iagttager ser, at tiden går langsommere i et system i bevægelse

Tidsforlængelse

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE



$$\Delta t_{proper} = \frac{2d}{c}$$

Egentid (proper time): Tid i system, hvor uret er i hvile

Pythagoras + samme lyshastighed for alle

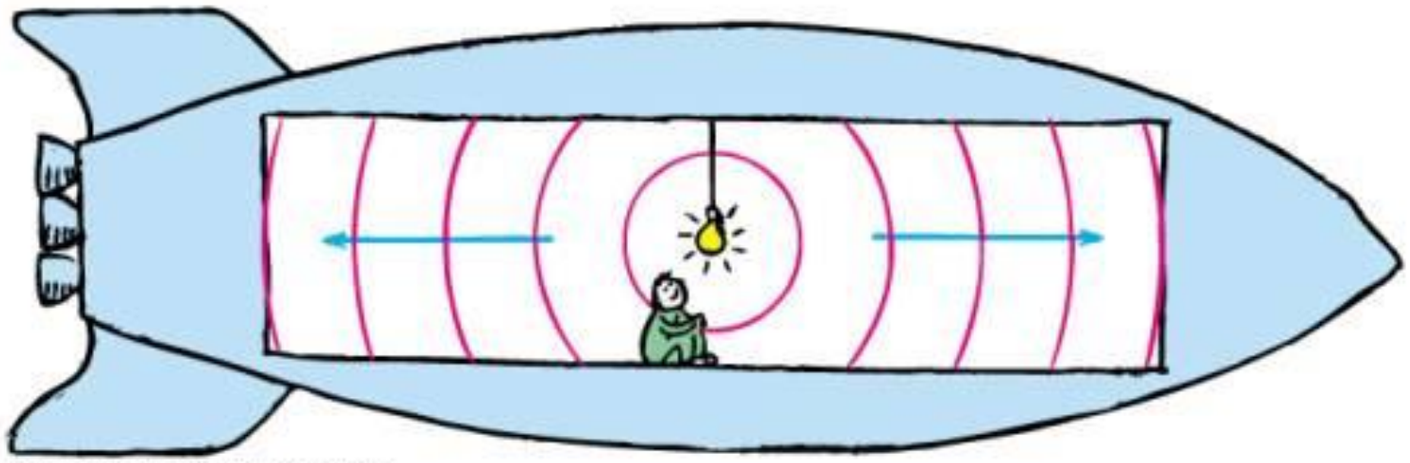
$$\left(\frac{c\Delta t}{2}\right)^2 = \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2 + d^2$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t_p}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma \Delta t_p$$

Tid i skinnesystemet

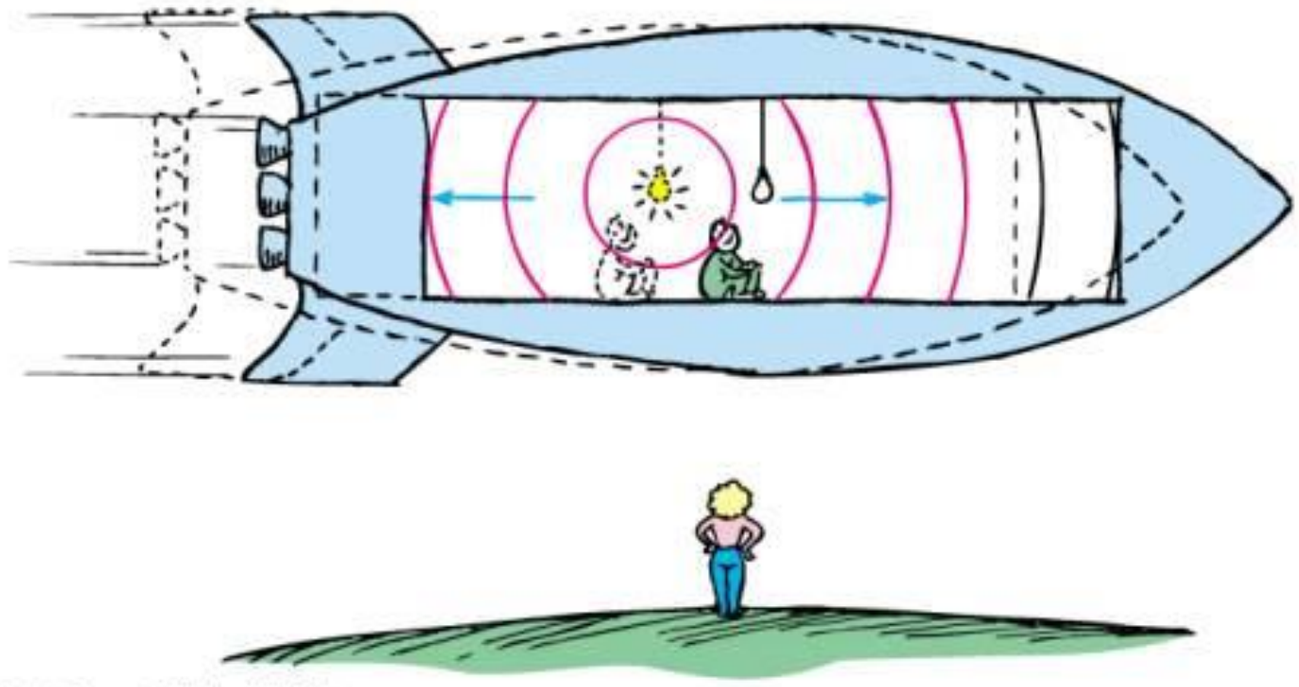
Egentid

Revision af fundamentale begreber: Samtidighed



Hewitt, *Conceptual Physics*, Ninth Edition.
Copyright © 2002 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley. All rights reserved.

En iagttager i rumskibet ser, at et lysglimt udsendt fra midten af rumskibet rammer kabinens to ender til samme tid.



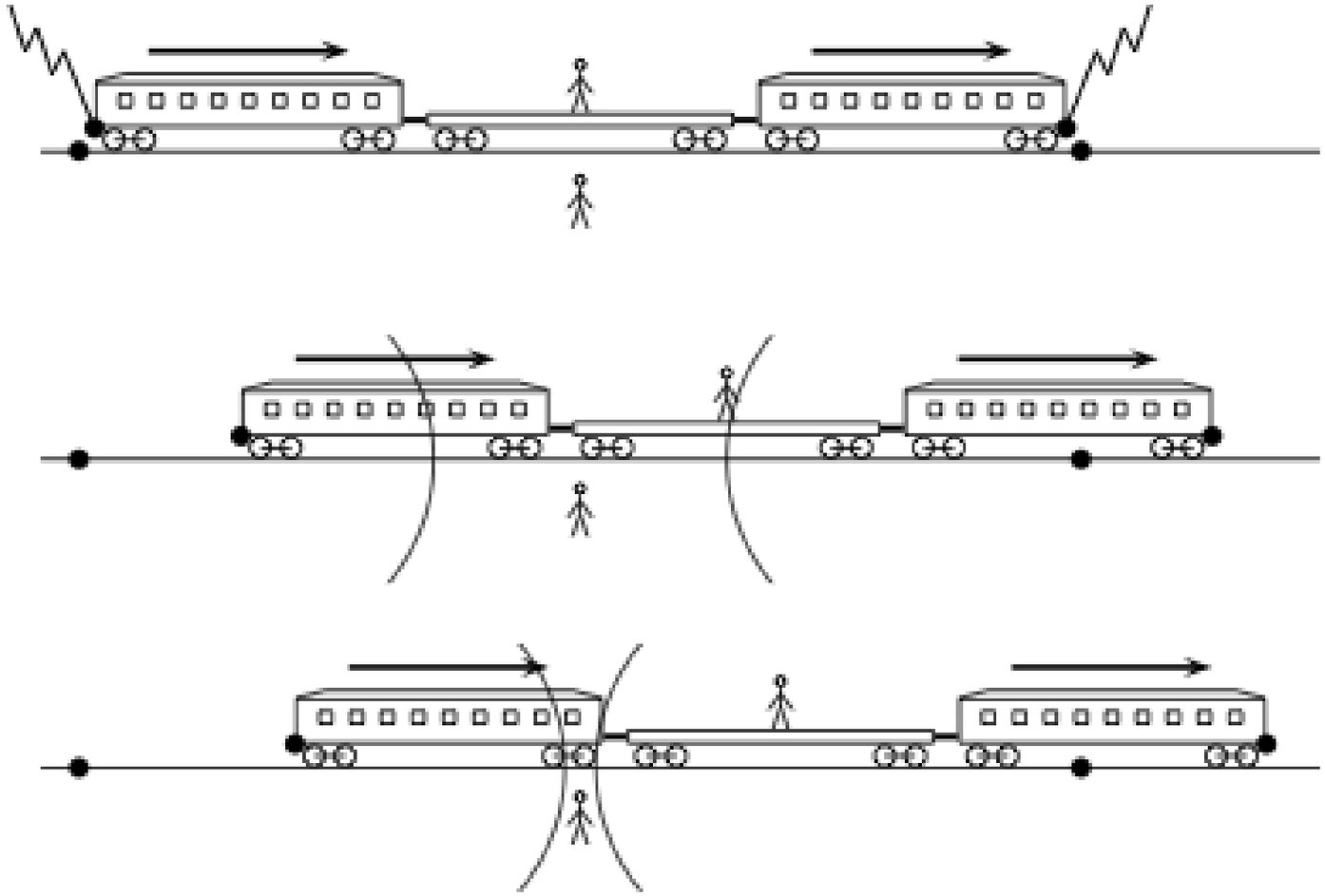
Hewitt, *Conceptual Physics*, Ninth Edition.
Copyright © 2002 Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley. All rights reserved.

For en iagttager, der ser rumskibet passere forbi, medfører betingelsen om den samme lyshastighed i alle retninger *i sit eget system*, at de to begivenheder ikke vil være samtidige. Lysglimtet vil først ramme bagvæggen, dernæst forvæggen.

Samtidighed er relativ, ikke absolut !

Revision af fundamentale begreber: Længde

Måling af længden af et legeme i bevægelse:
Afstand mellem to mærker afsat *samtidig* ved legemets for- og bagende.



Idet to iagttagere i relativ bevægelse er uenige om samtidigheden af de to begivenheder, vil de også være uenige om længen af legemet.

Her, to lynnedslag, der er samtidige i skinnesystemet. Afstanden mellem mærkerne på skinnerne repræsenterer togets længde i skinnesystemet.
I togsystemet slår lynet ved forenden ned først, dernæst ved bagenden. Afstanden mellem mærkerne på skinnerne må da være kortere end togest længde i togsystemet.

Et legeme er kortere, når det iagttages fra et system i hvilket det bevæger sig.
Længdeforkortning

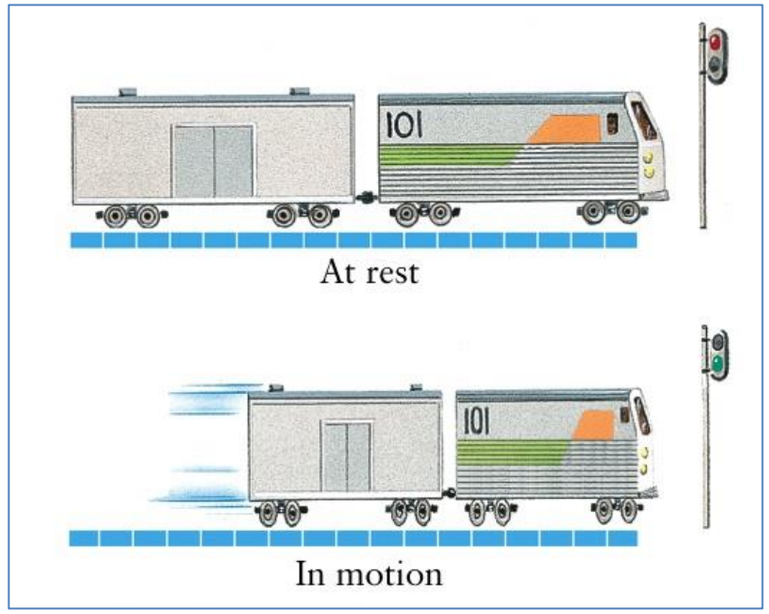
De relativistiske effekter

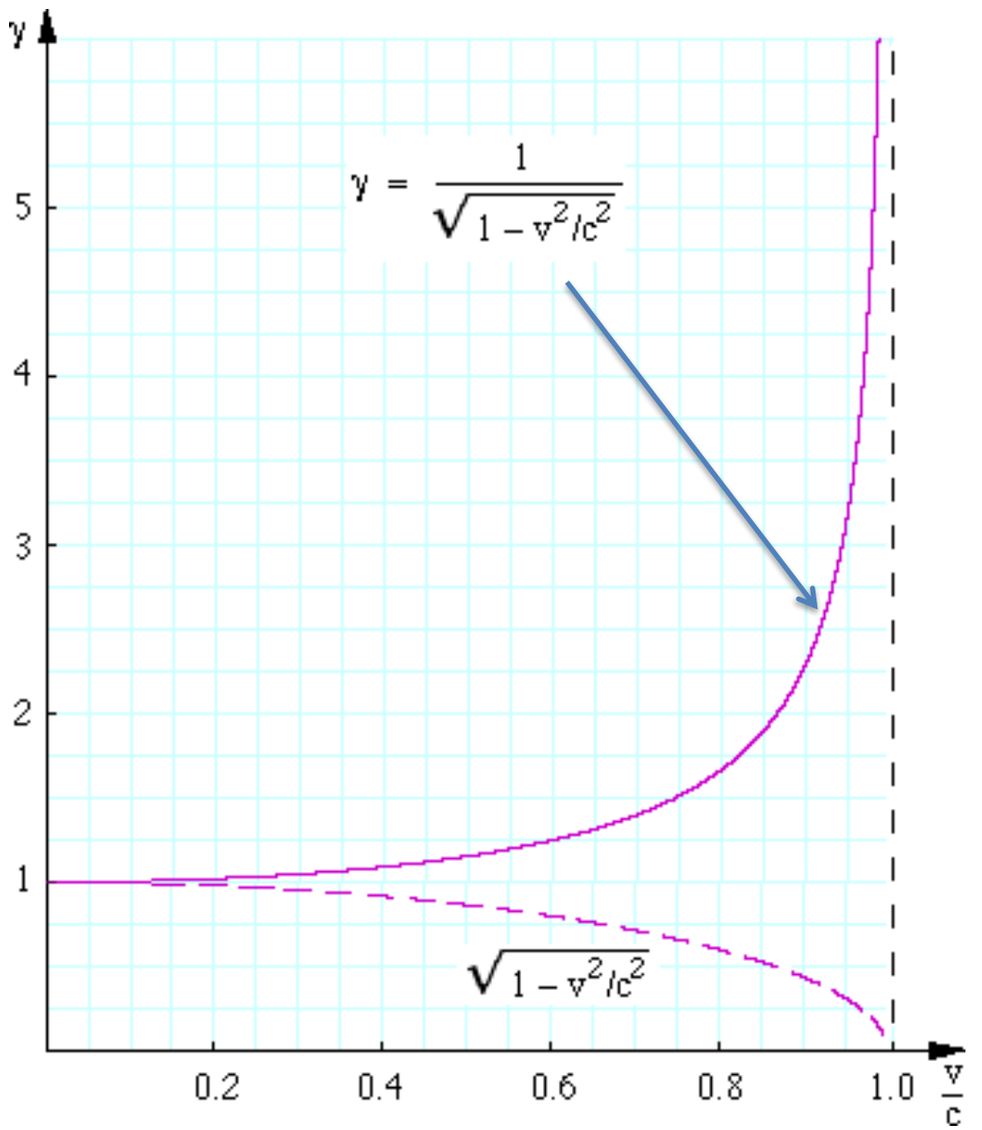
- **Længdeforkortning**
  - Længde af legeme i system, hvor legemet er i hvile: **Hvilelængden**: L_0
  - I ethvert andet system er legemet kortere:

$$L = L_0/\gamma = L_0\sqrt{1 - v^2/c^2}.$$

- **Tidsforlængelse**
  - Varighed af process i system, hvor start og slut sker i samme punkt: **Egentiden**: T_0
  - I ethvert andet system er varigheden større:

$$T = \gamma T_0 = \frac{T_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$





Hastighed i enheder af lyshastigheder

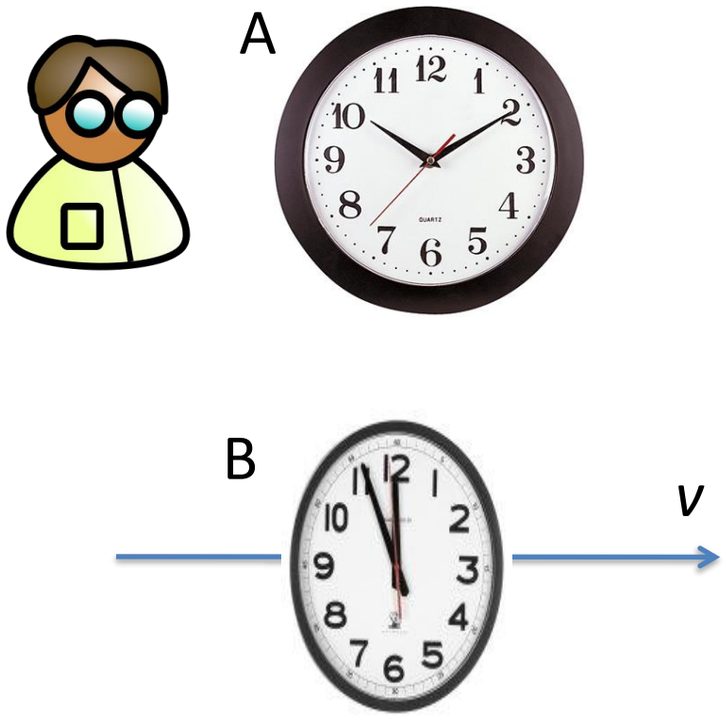
γ-funktionen
(mål for hvor relativistisk problemstillingen er)

$$\gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Relativistiske effekter går (selvfølgelig!) begge veje

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Set fra A-systemet

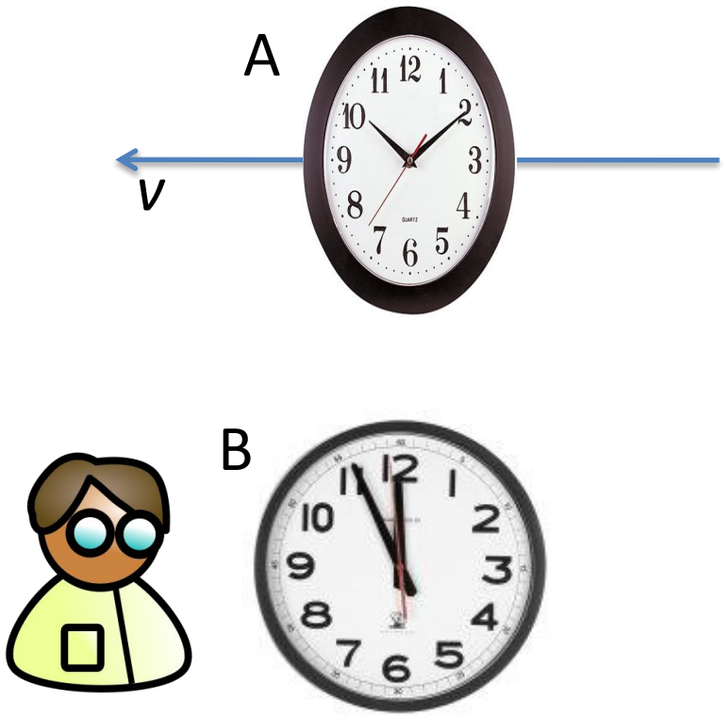


- A stationært
- B mod højre med farten v

$$T_A = \gamma\, T_B$$

1 sek på B tager γ sek målt på A

Set fra B-systemet



- B stationært
- A mod venstre med farten v

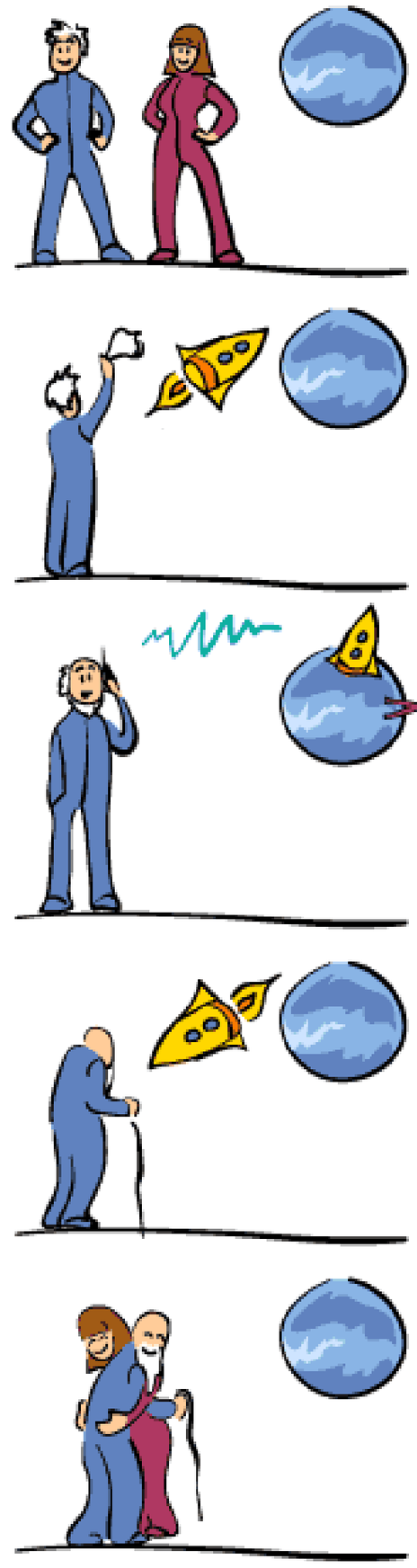
$$T'_B = \gamma\, T'_A$$

1 sek på A tager γ sek målt på B

De to systemer er ligeberettigede
=> tidsforlængelse og længdeforkortning går begge veje

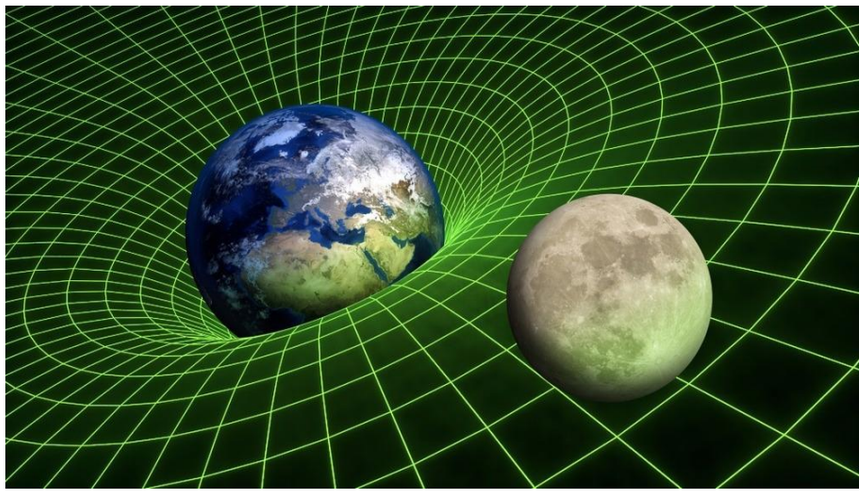
Hold dig ung; rejs!

- Et ur i bevægelse tikker langsommere
  - Gælder (selvfølgelig) også biologiske ure
- Eksempel: Rejs tur/retur til vores nærmeste stjerne med 80% af lyshastigheden:
  - Afstand tur/retur: 2 x 4 lysår = 8 lysår
  - Altså tager rejsen 8 år/0.80 = 10 år set fra Jorden.
  - Set fra raketsystemet tager det 2 x 3 år, altså 6 år
  - Når pigen kommer hjem, er hun 4 år yngre end sin tvillingebror
- Men hov, skulle tidsforlængelsen ikke gå begge veje? Kunne man ikke med lige god ret argumentere, at søsteren er ældst?
  - **Nej, de to bevægelser er ikke ligeberettigede:**
    - Bror: er konstant i ikke-accelereret bevægelse
    - Søster: befinder sig i accelereret system i del af bevægelsen (start/vend/stop)
  - Det er faktisk ikke accelerationen *i sig selv*, der er årsag til aldersforskellen, men kombinationen af acceleration og rejse



MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

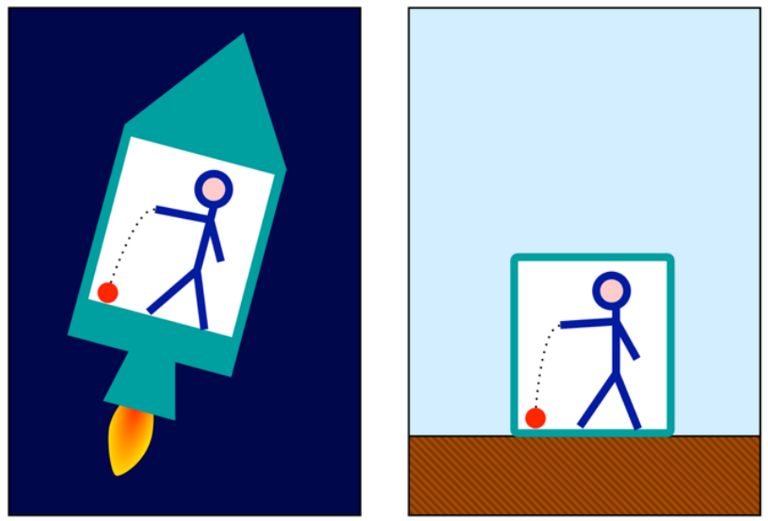
44 Intermetzo fra den Almene Relativitetsteori



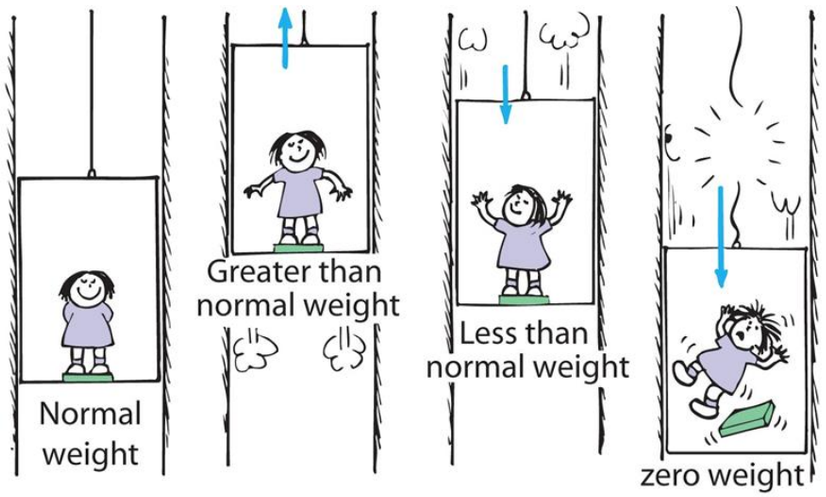
- Vi har på forrige slide lært en vigtig lektie fra den almene relativitetsteori:
  - ***I et accelereret system går tiden langsommere***
- Og da i denne teori acceleration og gravitation er ækvivalente:
  - ***I et område med gravitation går tiden langsommere***
    - Ved jordoverfladen, faktor 1.0000000007 (22 msek pr. År)
    - Ved et sort huls begivenhedshorisont, faktor udendelig. Tiden står stille set udefra

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{Rc^2}}}$$

Grundlæggende aksiom for den almene relativitetsteori.
Einstein (1907):
"The happiest thought of my life"



Acceleration = Gravitation



Ingen tyngde i "free fall system"

- Iagttageren kan ikke skelne mellem de to situationer
  - Gravitation kan anses som et resultat af valg af referencesystem

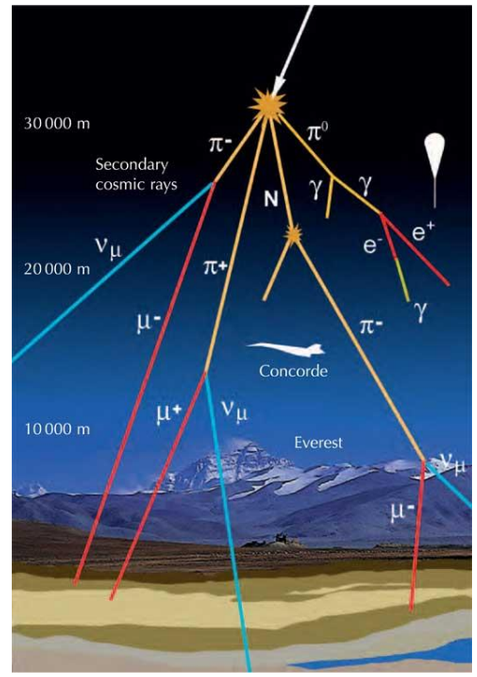
MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

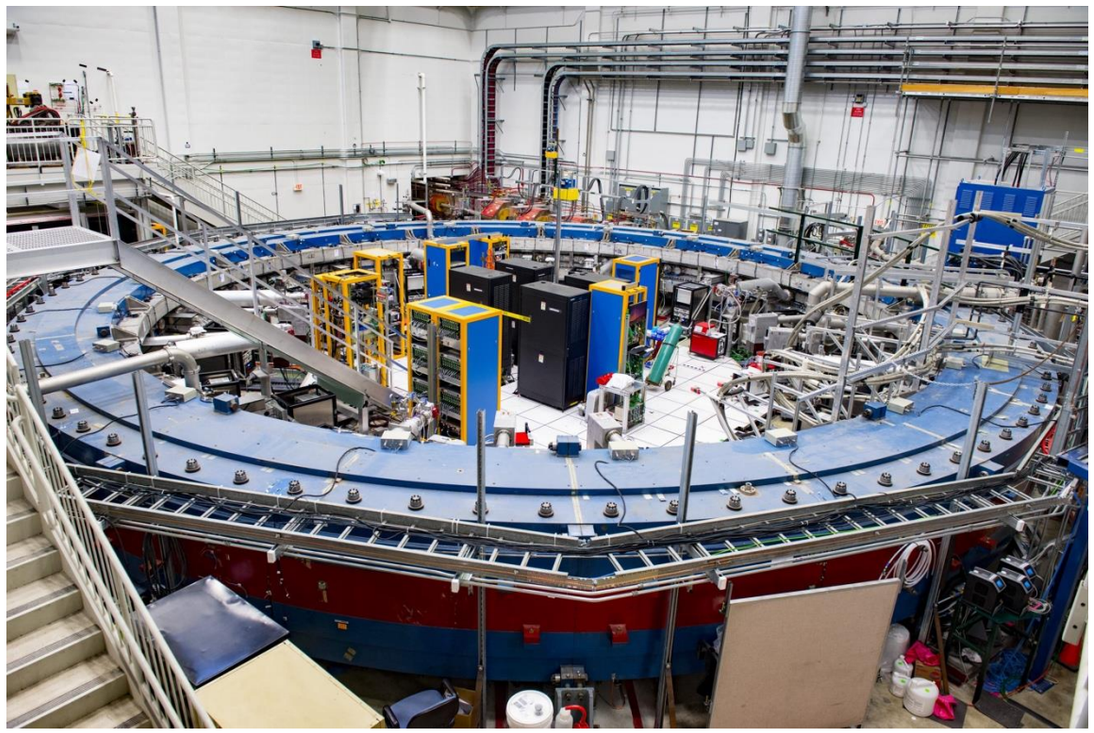
Et gensyn med muonen

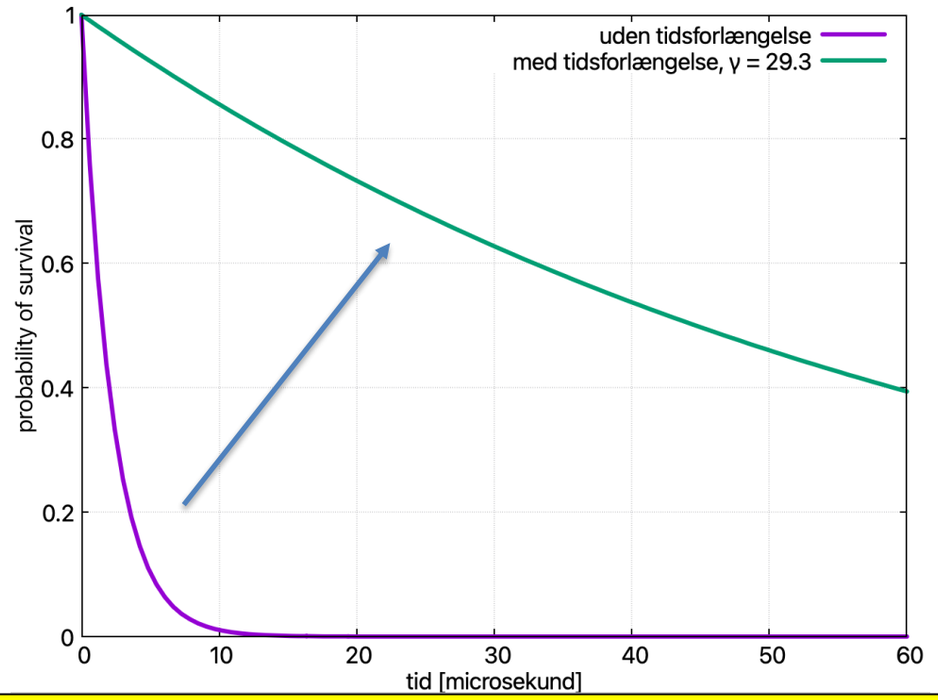
- Husk, at de kosmiske muoner når ned til os p.g.a. relativistisk tidsforlængelse
- Denne tidsforlænglese udnyttes allerede ekserimentelt i det såkaldte g-2 ("g-minus-2") ved Fermilab, USA.
  - Muoner accelereres op til totalenergien E=3,25 GeV og holdes i en cirkulær bane med omkreds 44,7 m.

$$\gamma = E/mc^2 = 29{,}3$$

  - Tidsforlængelse med factor 29,3
  - Overlever 432 omdrejninger før henfald



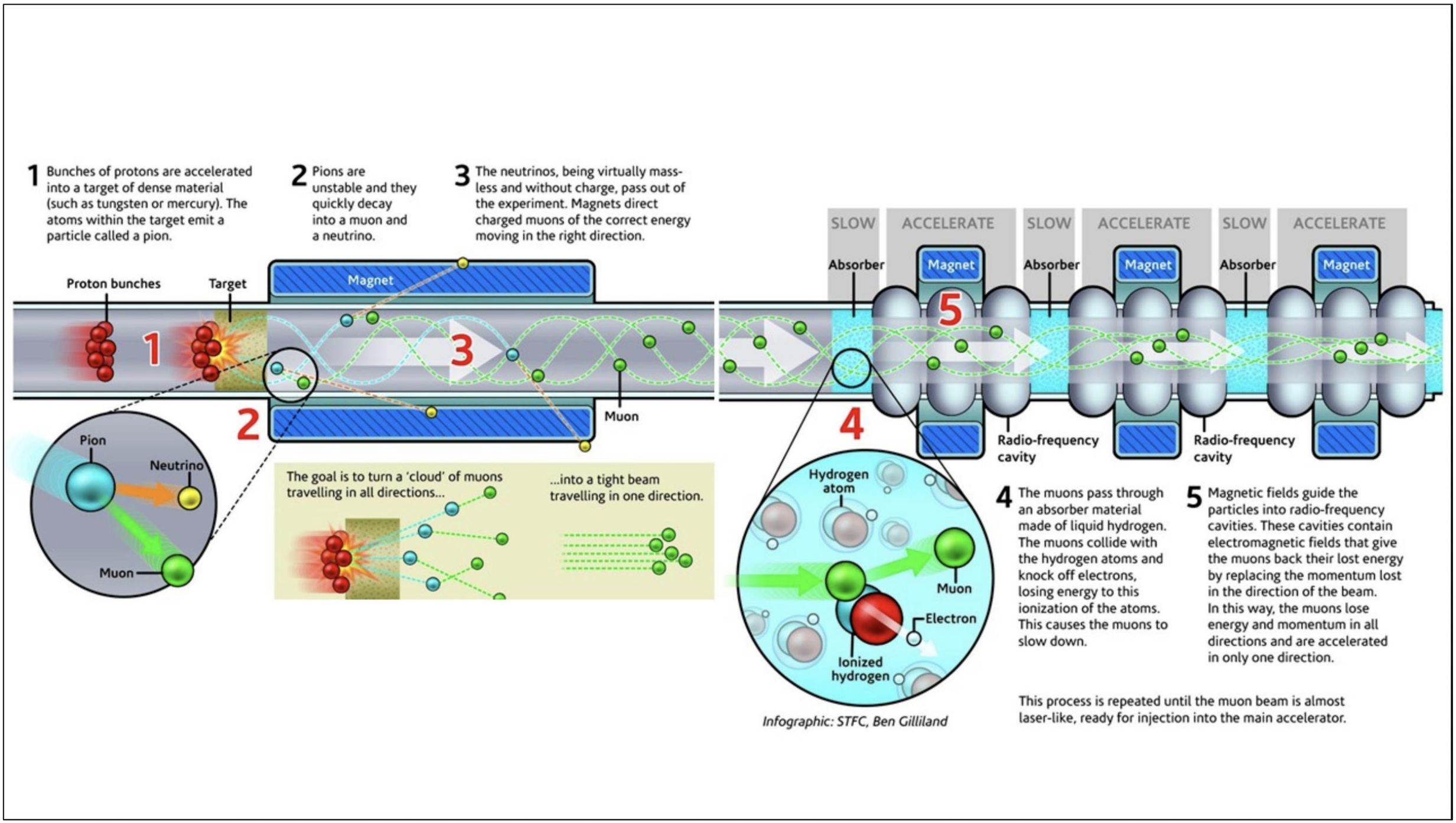




Principielt fuldkommen parallel med tvillingeforsøget

- Den rejsende muon ældes langsommere end en muon, man ville efterlade i hvile i laboratoriet

Hvordan producere en stråle af muoner

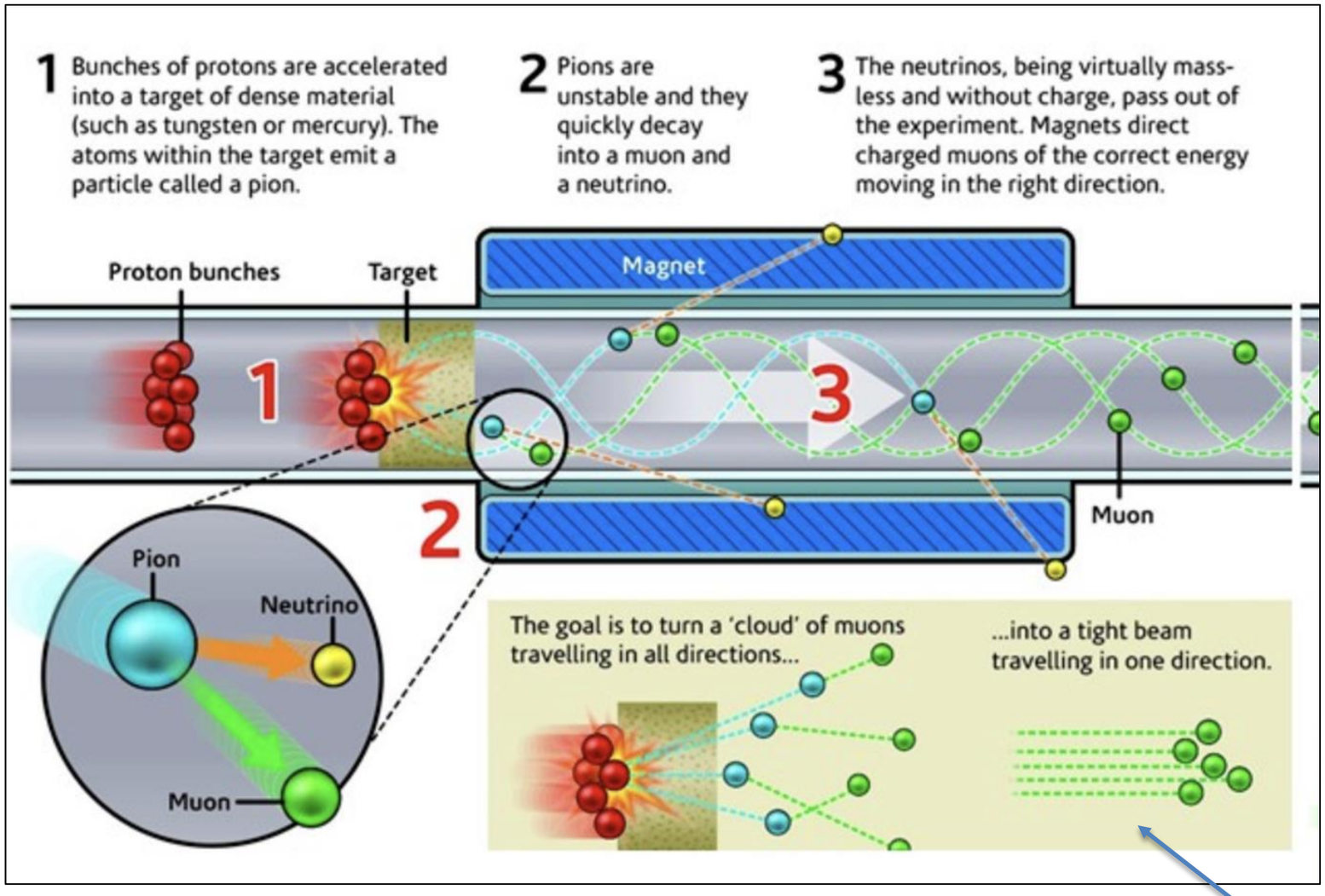


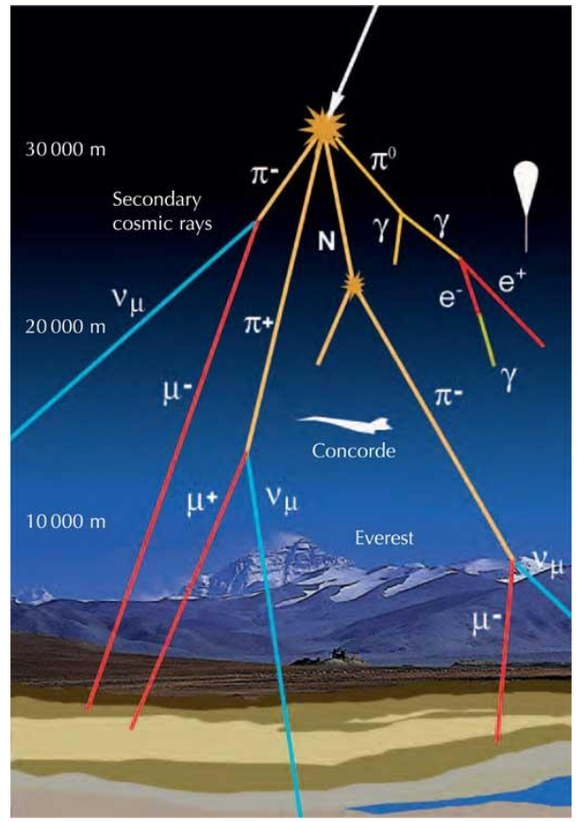
MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

En stråle af muoner (i)

De først trin er identiske til den naturen gør ved produktion af kosmiske muoner

- Hamre højenergetiske protoner mod stof (atomkerner); få pioner (π^+ og π^-) ud som resultat





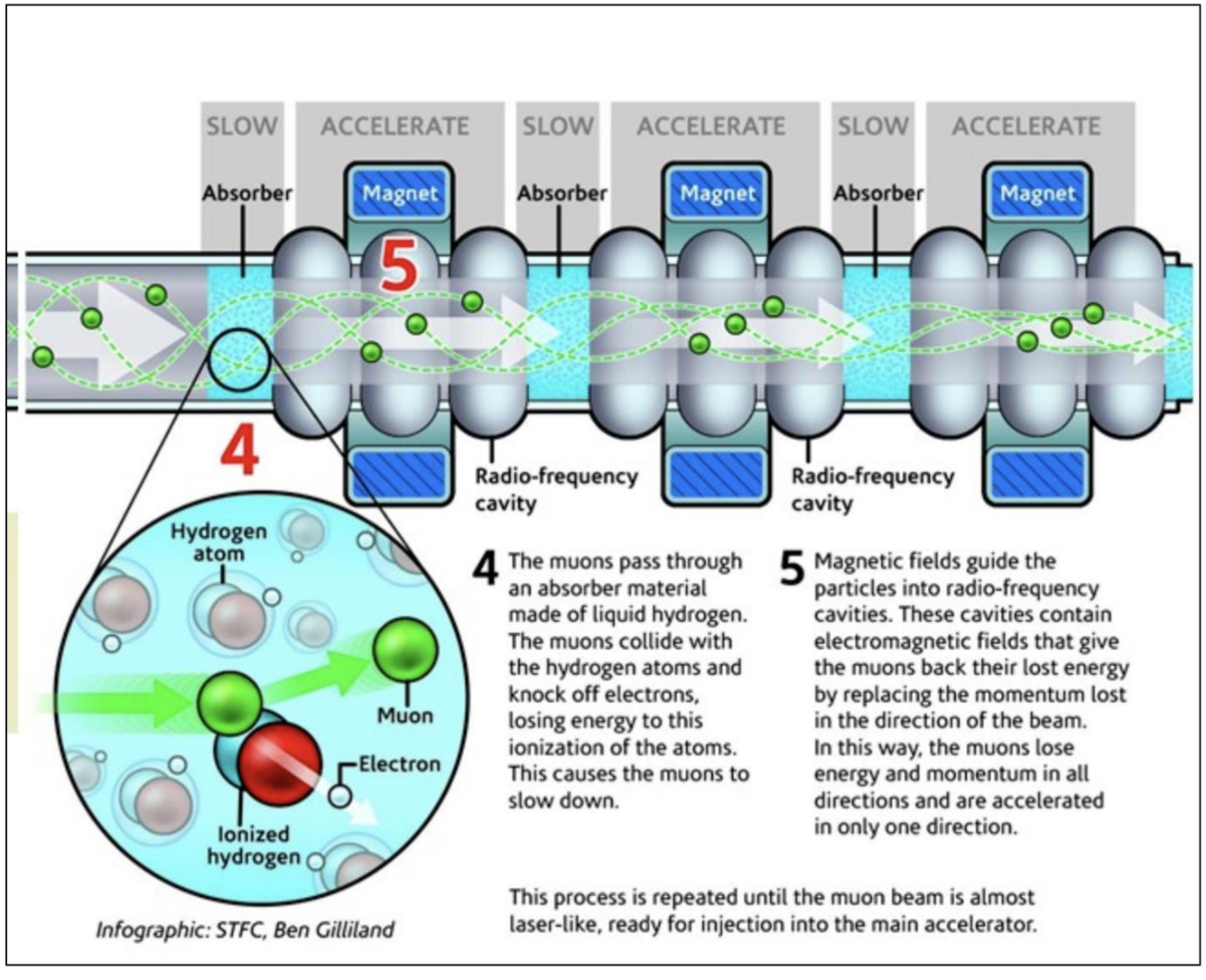
- Pion henfalder hurtigt (28 nsek) til muon + neutrino
- neutrino flyver væk, muon fanges af magnetfelt

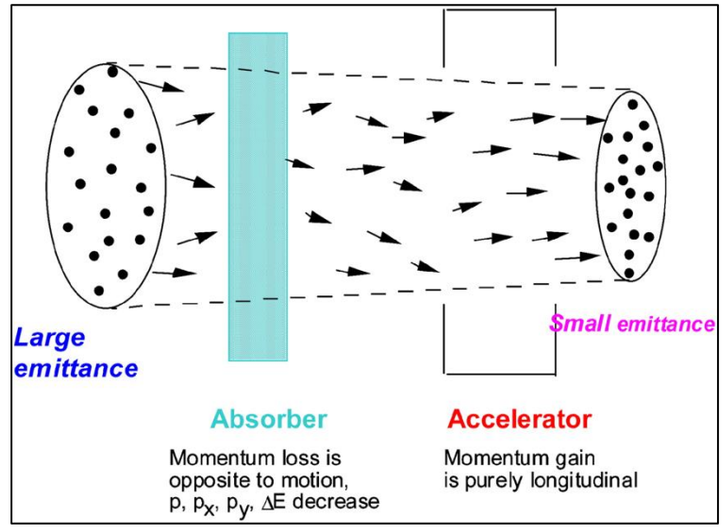
Vi ønsker at alle muoner rejser i samme retnnig med samme energi. Vi siger vi *afkøler* muonstrålen.

En stråle af muoner (i)

Vi ønsker at alle muoner rejser i samme retnnig med samme energi.
Vi siger vi *afkøler* muonstrålen.

Afkøling af muonstråle ved skiftevis opbremsning og acceleration

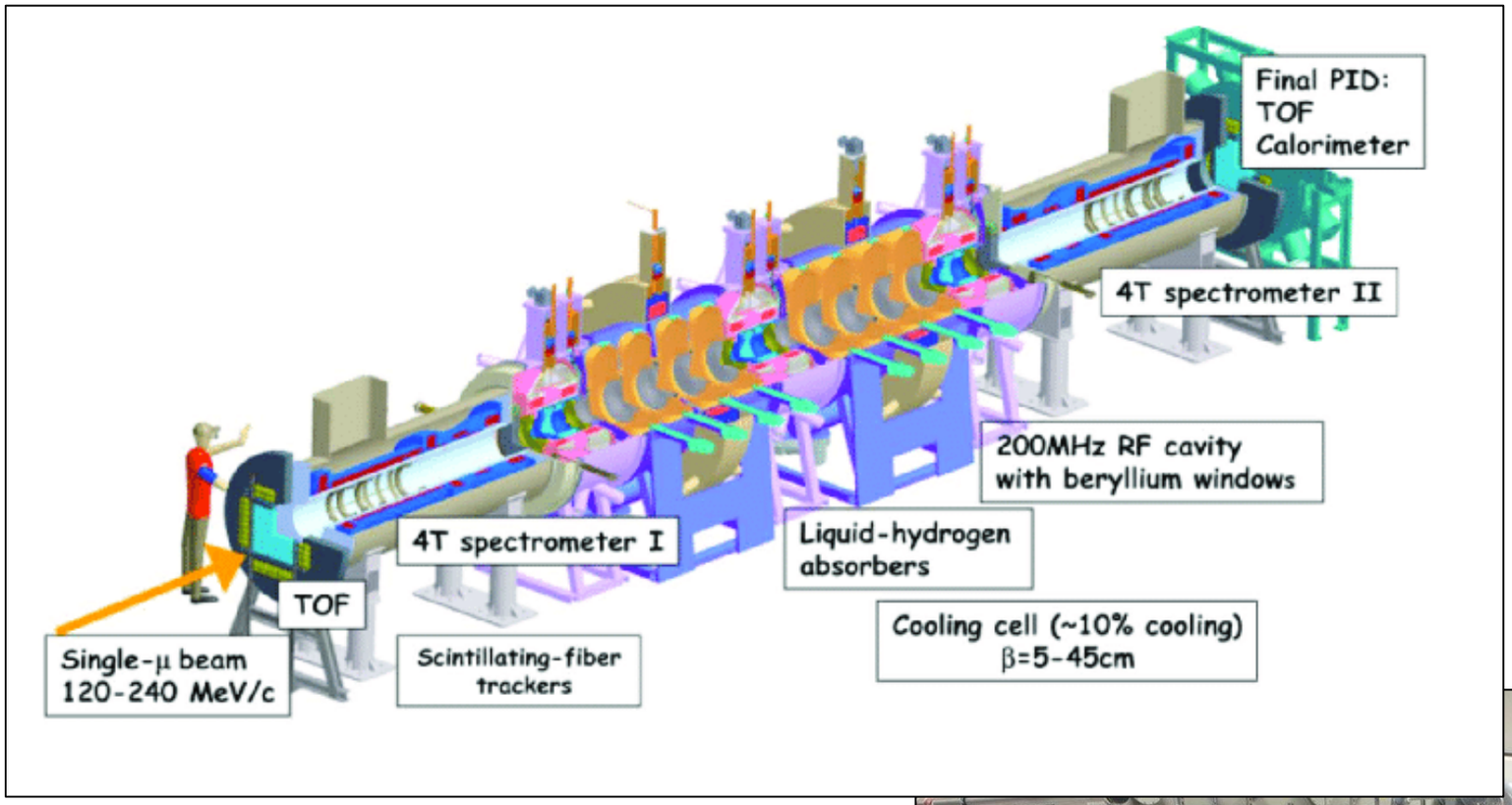




Muonerne bremses modsat deres bevægelsesretning, men accelereres i udelukkende én retning

Processen gentages igen og igen indtil strålen er næsten laser-agtig

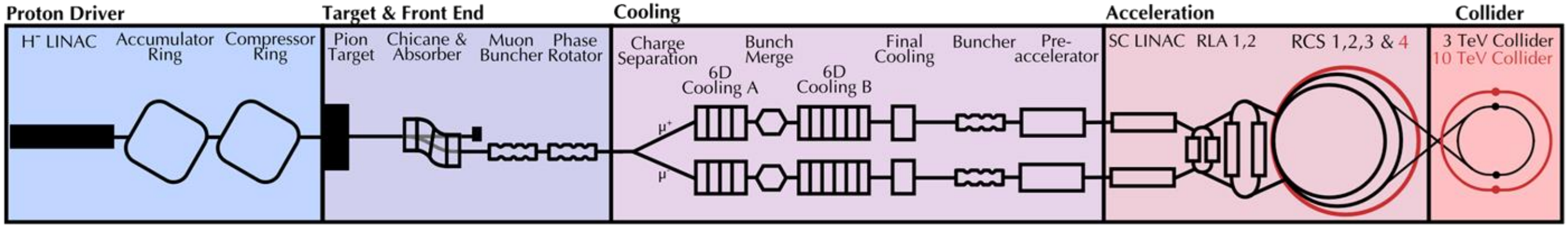
MICE - Eksperiment til afkøling af muonstråle





MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

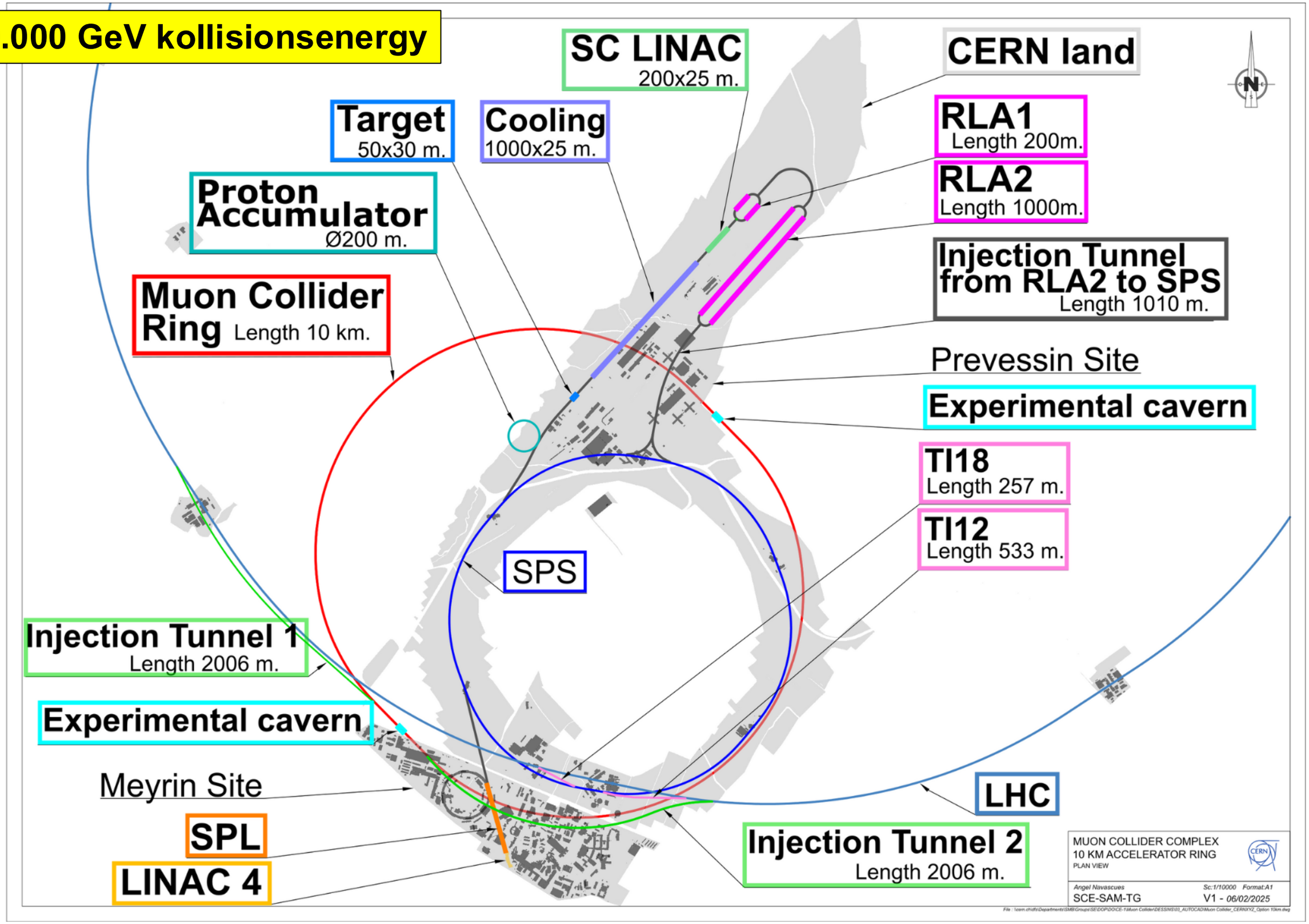
Muon-collider principielt



Hvad der er brug for, for at kunne lave en muon-collider med interessant begivenhedsrate

- Intens protontråle for at få et tilstrækkeligt stort antal muoner
  - 2-4 MW
- Robust target som ikke umiddelbart fordamper
  - Flydende kviksølv som danner et “vand”-fald, eller muligvis grafit
- Effektiv opsamling af muoner fra pion-henfald
  - Focussering via solenoide-magneter med enorme feltstyrker (~40 Tesla)
- Afkøling af muonstrålen for producere en skarp, monoenergetisk stråle
  - Alternerende opbremsning og re-acceleration
- Hurtig acceleration og injection i cirkulær ring
  - Flere accelerationringe af voksende omkreds of
- Injektion af modsatrettede μ^- og μ^+-stråler i kollisions-ring

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE



MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Afrunding og udsyn

- I elementarfysikkens verden er relativitetsteori hverdag.
  - Partikler skabes / annihileres via

$$\boxed{E = mc^2}$$

  - "Alt" bevæger sig tæt på lyshastigheden. Tidsforlængelse er normen

$$\boxed{T = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} T_0 = \gamma T_0}$$

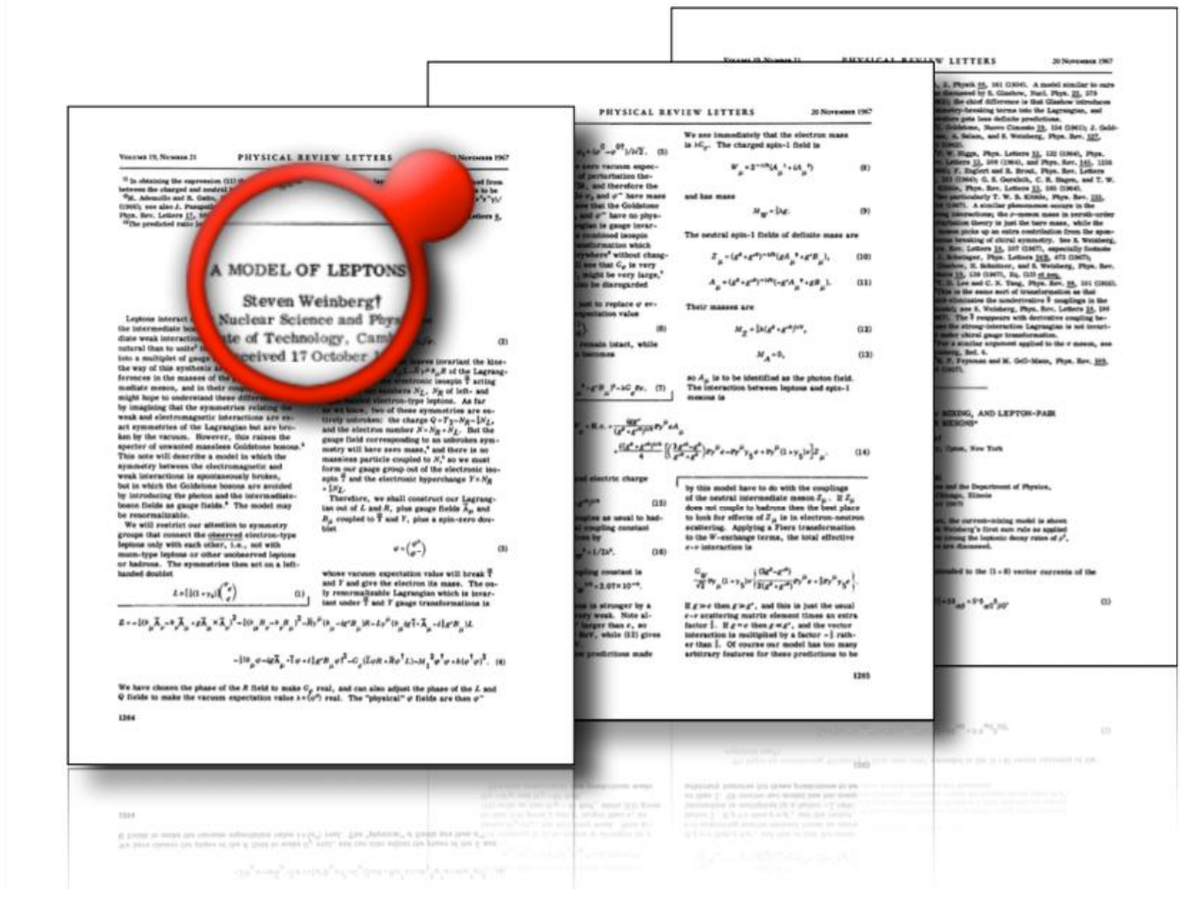
    - Heldigvis er det langt enklere at regne relativistisk end klassisk
- Med Standardmodellen og dens eksperimentelle verifikation over det seneste århundrede står partikelfysikken I dag på et meget solidt grundlag.
- Eksperimeter udføres ved store partikelacceleratorer
  - Det europæiske CERN er I dag det dominerende laboratorium
- Efter det aktuelle LHC-program med slutdato i 2041 håber vi at kunne bygge en ny stor accelerator, FCC, først med elektron-positron-sammenstød dernæst muligvis med proton-proton-sammenstød
- Samtidig afsøger en del af det videnskablige miljø muligheden af muon-muon-sammenstød
  - Eksperimentelt udfordrende p.g.a. muonens korte levetid
    - Uden relativistisk tidsforlængelse ville det være komplet umuligt

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

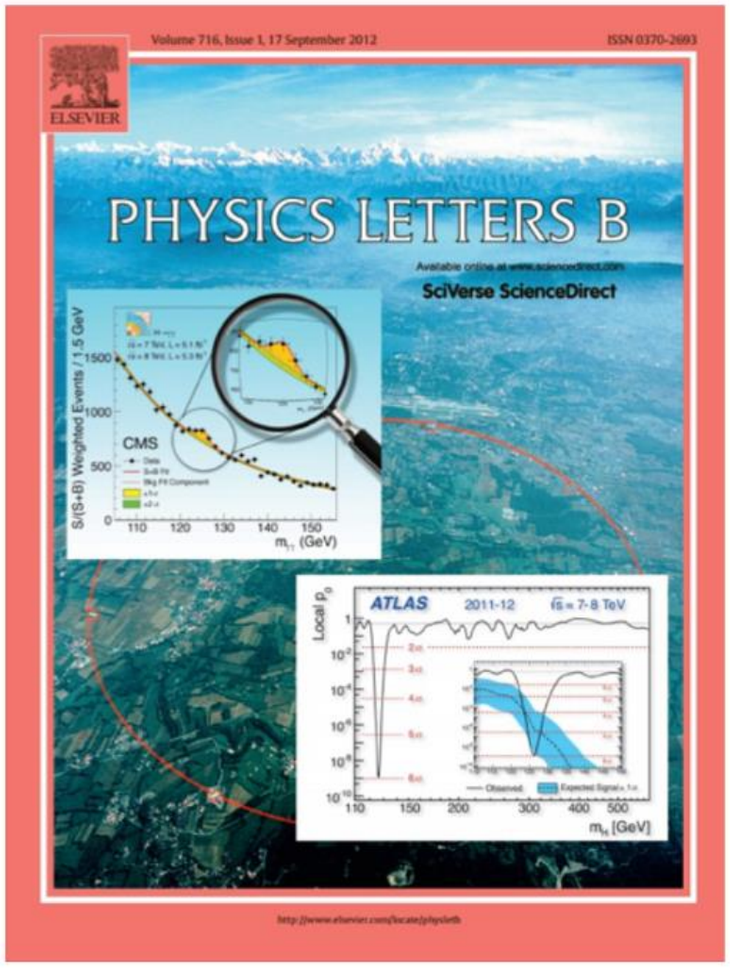
Ekstramateriale

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTET

1967: Formulering



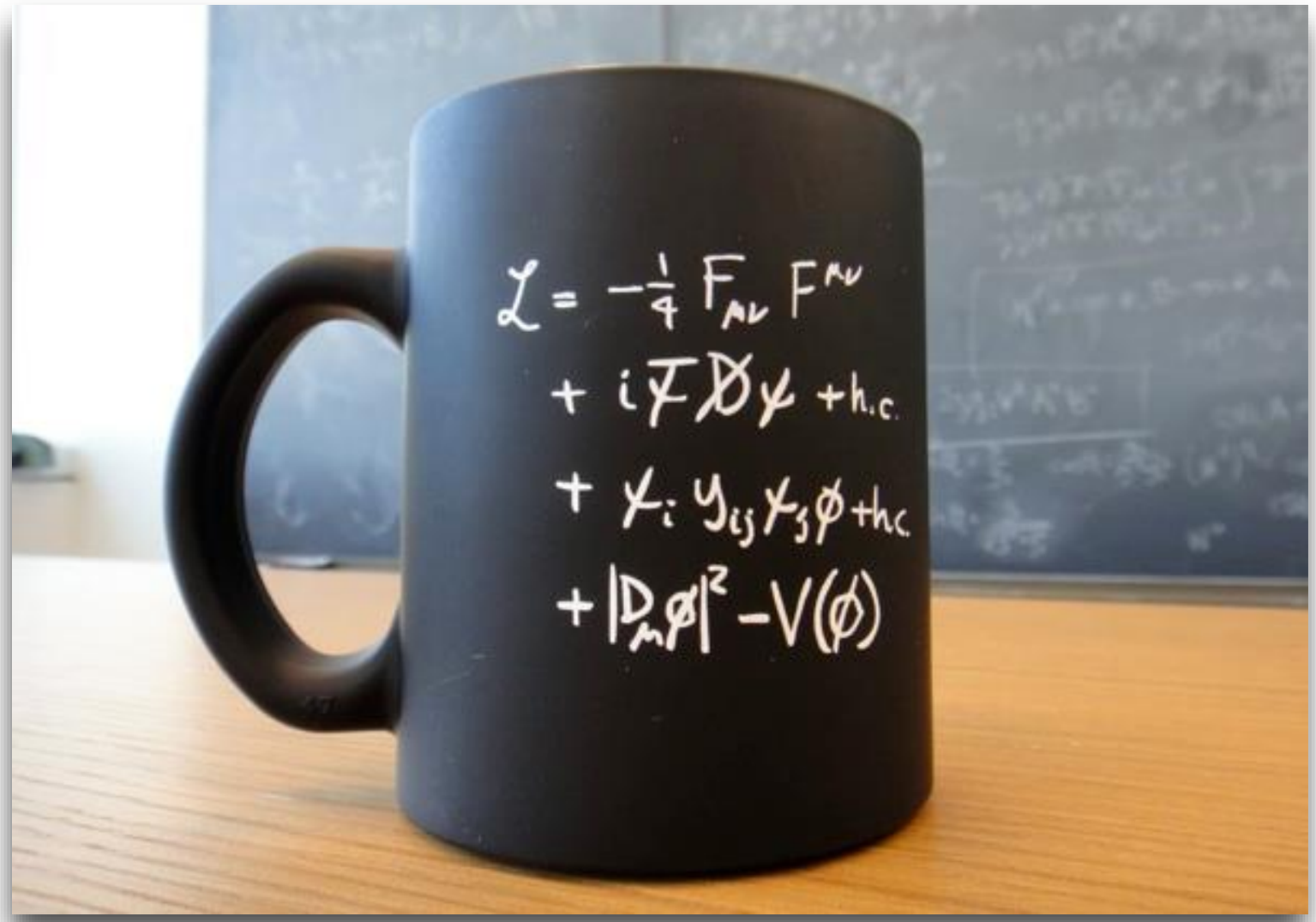
2012: Endelige eksperimentel bekræftelse



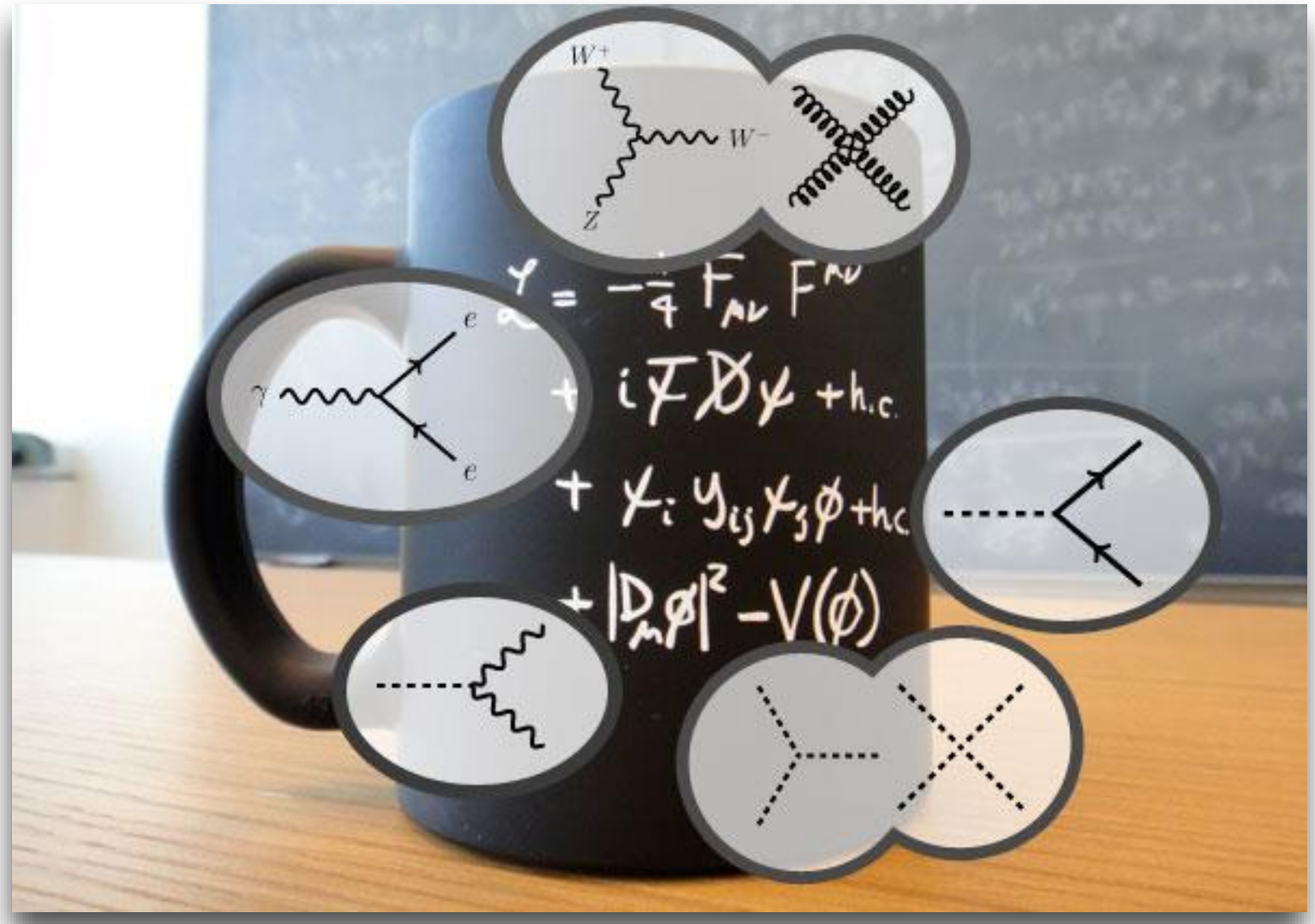
MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

$$\mathcal{L}_{SM} = -\tfrac{1}{2}\partial_\nu g^a_\mu \partial_\nu g^a_\mu - g_s f^{abc}\partial_\mu g^a_\nu g^b_\mu g^c_\nu - \tfrac{1}{4}g_s^2 f^{abc}f^{ade}g^b_\mu g^c_\nu g^d_\mu g^e_\nu - \partial_\nu W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - M^2 W^+_\mu W^-_\mu - \tfrac{1}{2}\partial_\nu Z^0_\mu \partial_\nu Z^0_\mu - \tfrac{1}{2c_w^2}M^2 Z^0_\mu Z^0_\mu - \tfrac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - igc_w(\partial_\nu Z^0_\mu (W^+_\mu W^-_\nu - W^+_\nu W^-_\mu) - Z^0_\nu (W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\mu \partial_\nu W^+_\mu) + Z^0_\mu (W^+_\nu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\nu \partial_\nu W^+_\mu)) - igs_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)) - \tfrac{1}{2}g^2 W^+_\mu W^-_\mu W^+_\nu W^-_\nu + \tfrac{1}{2}g^2 W^+_\mu W^-_\nu W^+_\mu W^-_\nu + g^2 c_w^2 (Z^0_\mu W^+_\mu Z^0_\nu W^-_\nu - Z^0_\mu Z^0_\mu W^+_\nu W^-_\nu) + g^2 s_w^2 (A_\mu W^+_\mu A_\nu W^-_\nu - A_\mu A_\mu W^+_\nu W^-_\nu) + g^2 s_w c_w (A_\mu Z^0_\nu (W^+_\mu W^-_\nu - W^+_\nu W^-_\mu) - 2A_\mu Z^0_\mu W^+_\nu W^-_\nu) - \tfrac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \tfrac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \beta_h \left(\tfrac{2M^2}{g^2} + \tfrac{2M}{g}H + \tfrac{1}{2}(H^2 + \phi^0\phi^0 + 2\phi^+\phi^-) \right) + \tfrac{2M^4}{g^2}\alpha_h - g\alpha_h M (H^3 + H\phi^0\phi^0 + 2H\phi^+\phi^-) - \tfrac{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) - gMW^+_\mu W^-_\mu H - \tfrac{1}{2}g\tfrac{M}{c_w^2}Z^0_\mu Z^0_\mu H - \tfrac{1}{2}ig\left(W^+_\mu(\phi^0\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^0) - W^-_\mu(\phi^0\partial_\mu\phi^+ - \phi^+\partial_\mu\phi^0)\right) + \tfrac{1}{2}g\left(W^+_\mu(H\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu H) + W^-_\mu(H\partial_\mu\phi^+ - \phi^+\partial_\mu H)\right) + \tfrac{1}{2}g\tfrac{1}{c_w}(Z^0_\mu(H\partial_\mu\phi^0 - \phi^0\partial_\mu H) + M\left(\tfrac{1}{c_w}Z^0_\mu\partial_\mu\phi^0 + W^+_\mu\partial_\mu\phi^- + W^-_\mu\partial_\mu\phi^+\right) - ig\tfrac{s_w^2}{c_w}MZ^0_\mu(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) + igs_w MA_\mu(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) - ig\tfrac{1-2c_w^2}{2c_w}Z^0_\mu(\phi^+\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^+) + igs_w A_\mu(\phi^+\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^+) - \tfrac{1}{4}g^2 W^+_\mu W^-_\mu (H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+\phi^-) - \tfrac{1}{8}g^2\tfrac{1}{c_w^2}Z^0_\mu Z^0_\mu (H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2\phi^+\phi^-) - \tfrac{1}{2}g^2\tfrac{s_w^2}{c_w}Z^0_\mu\phi^0(W^+_\mu\phi^- + W^-_\mu\phi^+) - \tfrac{1}{2}ig^2\tfrac{s_w^2}{c_w}Z^0_\mu H(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) + \tfrac{1}{2}g^2 s_w A_\mu\phi^0(W^+_\mu\phi^- + W^-_\mu\phi^+) + \tfrac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H(W^+_\mu\phi^- - W^-_\mu\phi^+) - g^2\tfrac{s_w}{c_w}(2c_w^2 - 1)Z^0_\mu A_\mu\phi^+\phi^- - g^2 s_w^2 A_\mu A_\mu\phi^+\phi^- + \tfrac{1}{2}ig_s\,\lambda^a_{ij}(\bar{q}^\sigma_i\gamma^\mu q^\sigma_j)g^a_\mu - \bar{e}^\lambda(\gamma\partial + m^\lambda_e)e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda(\gamma\partial + m^\lambda_\nu)\nu^\lambda - \bar{u}^\lambda_j(\gamma\partial + m^\lambda_u)u^\lambda_j - \bar{d}^\lambda_j(\gamma\partial + m^\lambda_d)d^\lambda_j + igs_w A_\mu\left(-(\bar{e}^\lambda\gamma^\mu e^\lambda) + \tfrac{2}{3}(\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu u^\lambda_j) - \tfrac{1}{3}(\bar{d}^\lambda_j\gamma^\mu d^\lambda_j)\right) + \tfrac{ig}{4c_w}Z^0_\mu\{(\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}^\lambda_j\gamma^\mu(\tfrac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5)d^\lambda_j) + (\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu(1 - \tfrac{8}{3}s_w^2 + \gamma^5)u^\lambda_j)\} + \tfrac{ig}{2\sqrt{2}}W^+_\mu\left((\bar{\nu}^\lambda\gamma^\mu(1+\gamma^5)U^{lep}{}_{\lambda\kappa}e^\kappa) + (\bar{u}^\lambda_j\gamma^\mu(1+\gamma^5)C_{\lambda\kappa}d^\kappa_j)\right) + \tfrac{ig}{2\sqrt{2}}W^-_\mu\left((\bar{e}^\kappa U^{lep\dagger}_{\kappa\lambda}\gamma^\mu(1+\gamma^5)\nu^\lambda) + (\bar{d}^\kappa_j C^\dagger_{\kappa\lambda}\gamma^\mu(1+\gamma^5)u^\lambda_j)\right) + \tfrac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^+\left(-m^\kappa_e(\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa}(1-\gamma^5)e^\kappa) + m^\lambda_\nu(\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)e^\kappa)\right) + \tfrac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^-\left(m^\lambda_e(\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)\nu^\kappa) - m^\kappa_\nu(\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}_{\lambda\kappa}(1-\gamma^5)\nu^\kappa\right) - \tfrac{g}{2}\tfrac{m^\lambda_\nu}{M}H(\bar{\nu}^\lambda\nu^\lambda) - \tfrac{g}{2}\tfrac{m^\lambda_e}{M}H(\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \tfrac{ig}{2}\tfrac{m^\lambda_\nu}{M}\phi^0(\bar{\nu}^\lambda\gamma^5\nu^\lambda) - \tfrac{ig}{2}\tfrac{m^\lambda_e}{M}\phi^0(\bar{e}^\lambda\gamma^5 e^\lambda) - \tfrac{1}{4}\,\bar{\nu}_\lambda M^R_{\lambda\kappa}(1-\gamma_5)\hat{\nu}_\kappa - \tfrac{1}{4}\,\bar{\nu}_\lambda M^R_{\lambda\kappa}(1-\gamma_5)\hat{\nu}_\kappa + \tfrac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^+\left(-m^\kappa_d(\bar{u}^\lambda_j C_{\lambda\kappa}(1-\gamma^5)d^\kappa_j) + m^\lambda_u(\bar{u}^\lambda_j C_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)d^\kappa_j)\right) + \tfrac{ig}{2M\sqrt{2}}\phi^-\left(m^\lambda_d(\bar{d}^\lambda_j C^\dagger_{\lambda\kappa}(1+\gamma^5)u^\kappa_j) - m^\kappa_u(\bar{d}^\lambda_j C^\dagger_{\lambda\kappa}(1-\gamma^5)u^\kappa_j\right) - \tfrac{g}{2}\tfrac{m^\lambda_u}{M}H(\bar{u}^\lambda_j u^\lambda_j) - \tfrac{g}{2}\tfrac{m^\lambda_d}{M}H(\bar{d}^\lambda_j d^\lambda_j) + \tfrac{ig}{2}\tfrac{m^\lambda_u}{M}\phi^0(\bar{u}^\lambda_j\gamma^5 u^\lambda_j) - \tfrac{ig}{2}\tfrac{m^\lambda_d}{M}\phi^0(\bar{d}^\lambda_j\gamma^5 d^\lambda_j) + \bar{G}^a\partial^2 G^a + g_s f^{abc}\partial_\mu\bar{G}^a G^b g^c_\mu + \bar{X}^+(\partial^2 - M^2)X^+ + \bar{X}^-(\partial^2 - M^2)X^- + \bar{X}^0(\partial^2 - \tfrac{M^2}{c_w^2})X^0 + \bar{Y}\partial^2 Y + igc_w W^+_\mu(\partial_\mu\bar{X}^0X^- - \partial_\mu\bar{X}^+X^0) + igs_w W^+_\mu(\partial_\mu\bar{Y}X^- - \partial_\mu\bar{X}^+Y) + igc_w W^-_\mu(\partial_\mu\bar{X}^-X^0 - \partial_\mu\bar{X}^0X^+) + igs_w W^-_\mu(\partial_\mu\bar{X}^-Y - \partial_\mu\bar{Y}X^+) + igc_w Z^0_\mu(\partial_\mu\bar{X}^+X^+ - \partial_\mu\bar{X}^-X^-) + igs_w A_\mu(\partial_\mu\bar{X}^+X^+ - \partial_\mu\bar{X}^-X^-) - \tfrac{1}{2}gM\left(\bar{X}^+X^+H + \bar{X}^-X^-H + \tfrac{1}{c_w^2}\bar{X}^0X^0H\right) + \tfrac{1-2c_w^2}{2c_w}igM\left(\bar{X}^+X^0\phi^+ - \bar{X}^-X^0\phi^-\right) + \tfrac{1}{2c_w}igM\left(\bar{X}^0X^-\phi^+ - \bar{X}^0X^+\phi^-\right) + igMs_w\left(\bar{X}^0X^-\phi^+ - \bar{X}^0X^+\phi^-\right) + \tfrac{1}{2}igM\left(\bar{X}^+X^+\phi^0 - \bar{X}^-X^-\phi^0\right).$$

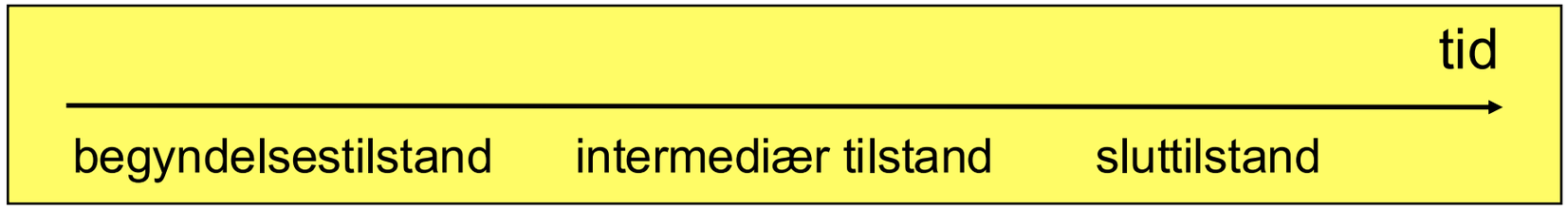
MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE



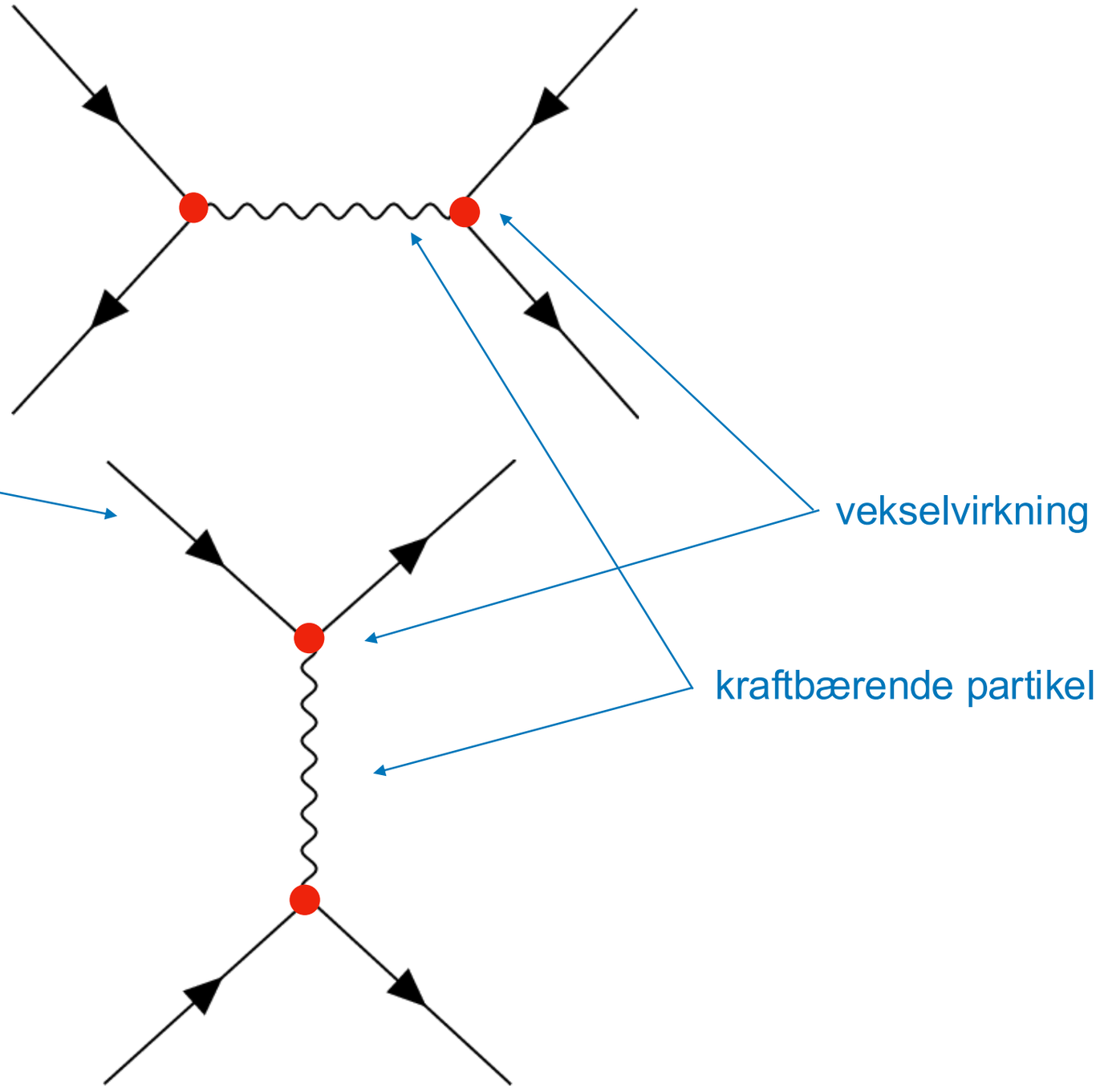
MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE



MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE



annihilationsproces



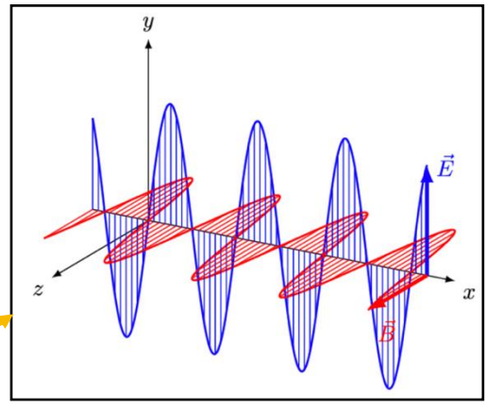
spredningsproces

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

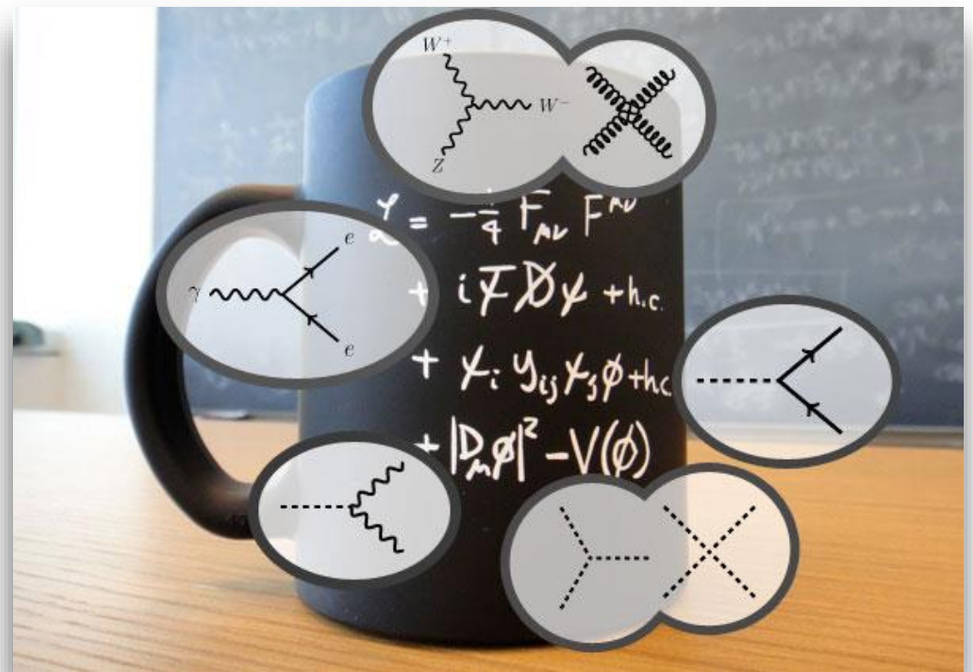
Og hvad betyder alt dette det så?

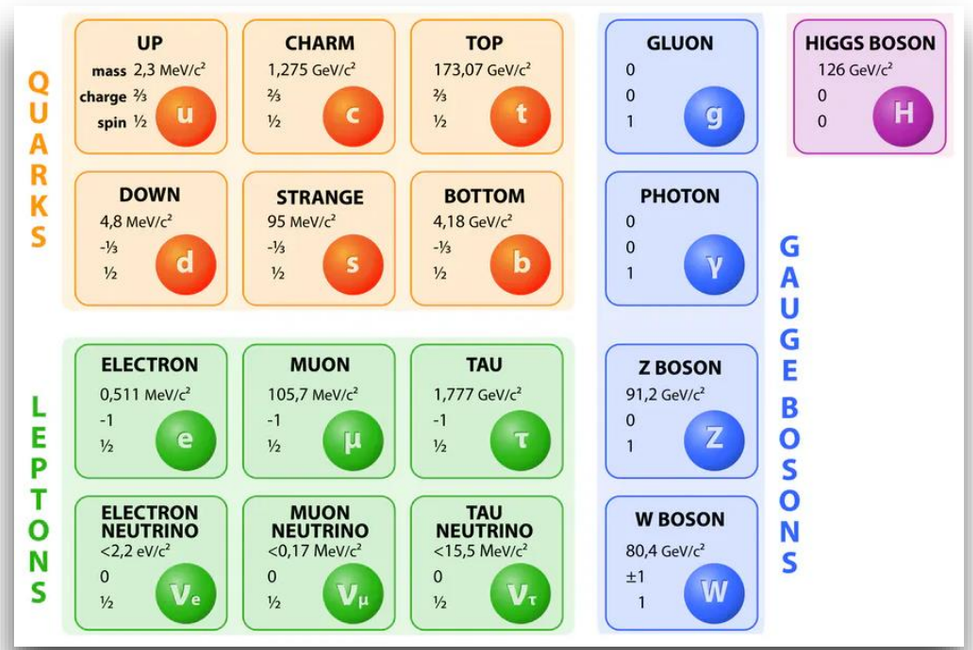
Hvad drejer al den matematik sig om?

- Vi taler om den *mikroskopiske verden*, altså **kvantemekanik**
- Kvantemekanik: **dualitet mellem partikler og bølger**
- Bølger er noget det optræder i **felter**
  - Eksempel: elektromagnetiske bølger - svingninger i elektromagnetisk felt



  - lys, Røntgenstråling, gamma-stråling, radiobølger, wifi, GSM, …
  - **Dualitet:** Til en elektromagnetiske bølger svarer en partikel:
    - for elektromagnetisk bølge: lyskvantet - fotonen (γ)
- For at beskrive Standardmodellen, lad os vende os mod partikelbilledet

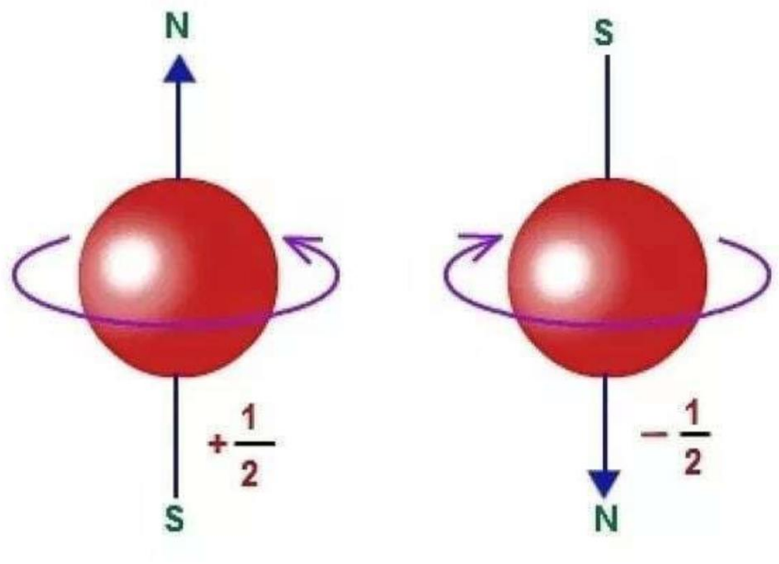




MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Spin?

- Skønt elementarpartikler ikke har nogen udstrækning (er punktformede), har de alligevel ***spin***. Som en snurretop.
  - Her eksemplificeret ved en fermion (spin-$\frac{1}{2}$)
- Dette giver dem en "fornemmelse" af retning:
  - De peger i en retning - som en magnet.

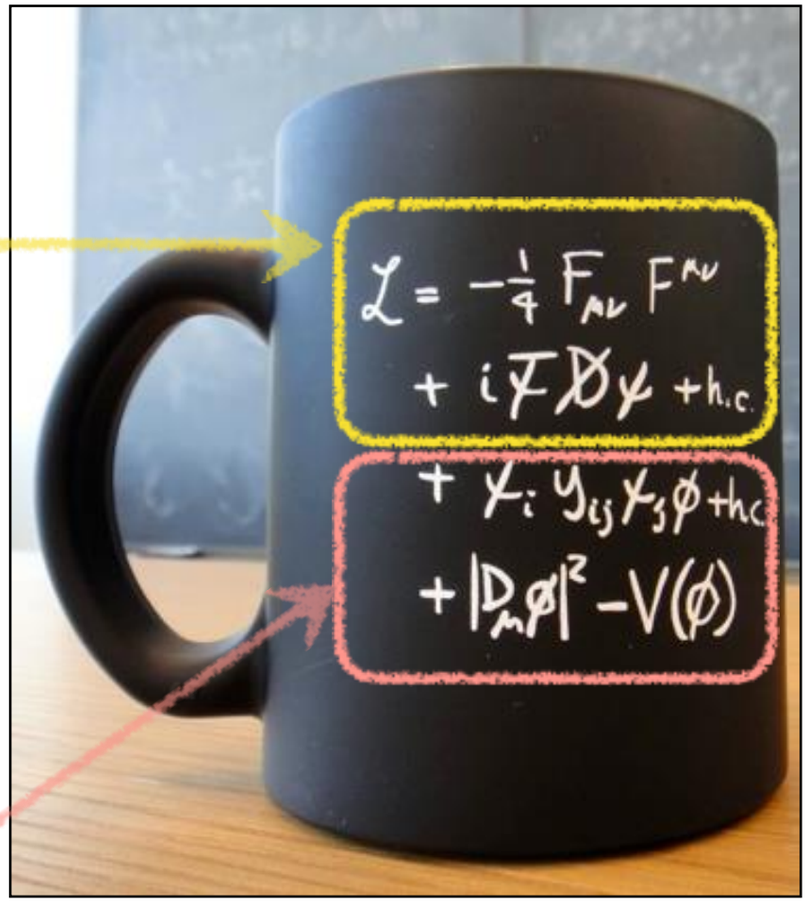


- **Spin-$\frac{1}{2}$: fermioner - stofpartikel**
  - Paulis udelukkelsesprincip (1925):
    - To fermioner kan *ikke* være i samme kvantetilstand
    - En forsamling af fermioner fylder noget - de danner stof
- **Spin-1 : vektorbosoner**
  - Pauli:
    - To fermioner kan være i samme kvantetilstand
    - En forsamling af bosoner fylder intet - ikke stof
- **Spin-0 : skalare bosoner**
  - Intet spin **- i**ngen retnings-"sans"

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Partikelmasser og Higgs-mekanismen

- Oprindeligt problem:
  - De svage vekselvirkninger virker forskelligt på "højrehåndede" og "venstrehåndede" fermioner - teorien er *kiral*. Dermed ikke muligt at indføre partikelmasser direkte i teorien. Bryder teoriens symmetri.
    - I en kiral teori må alle partikler være masseløse.
  - I åbenbar modstrid med observation: Hvis W bosonerne var masseløse ville de svage vekselvirkninger være stærke
    - Solen ville være brændt ud på for længe siden…
  - Vi ved jo da også, at partikler har masser



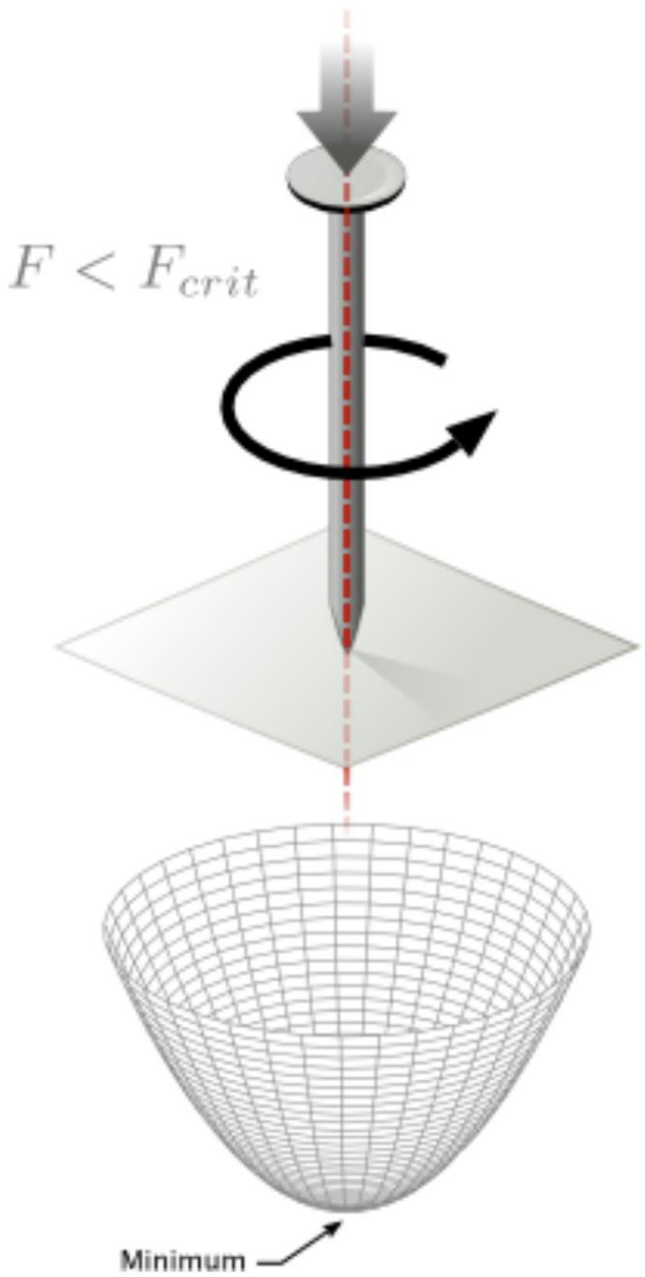
- Ind på scenen: Peter Higgs (1964)
  - Indfører et nyt felt, Higgs-feltet
  - Higgs-feltet kobler til de øvrige felter; gaugeboson-felterne og fermion-felterne
  - Ved at arrangere Higgs-feltets potential på passende vis brydes ikke teoriens symmetri direkte (som er forbudt), men "spontant"
  - Dette ***spontane symmetribrud*** (**SSB**) bibeholder teoriens oprindelige, grundlæggende symmetri og tillader samtidig, at partikler opnår masser

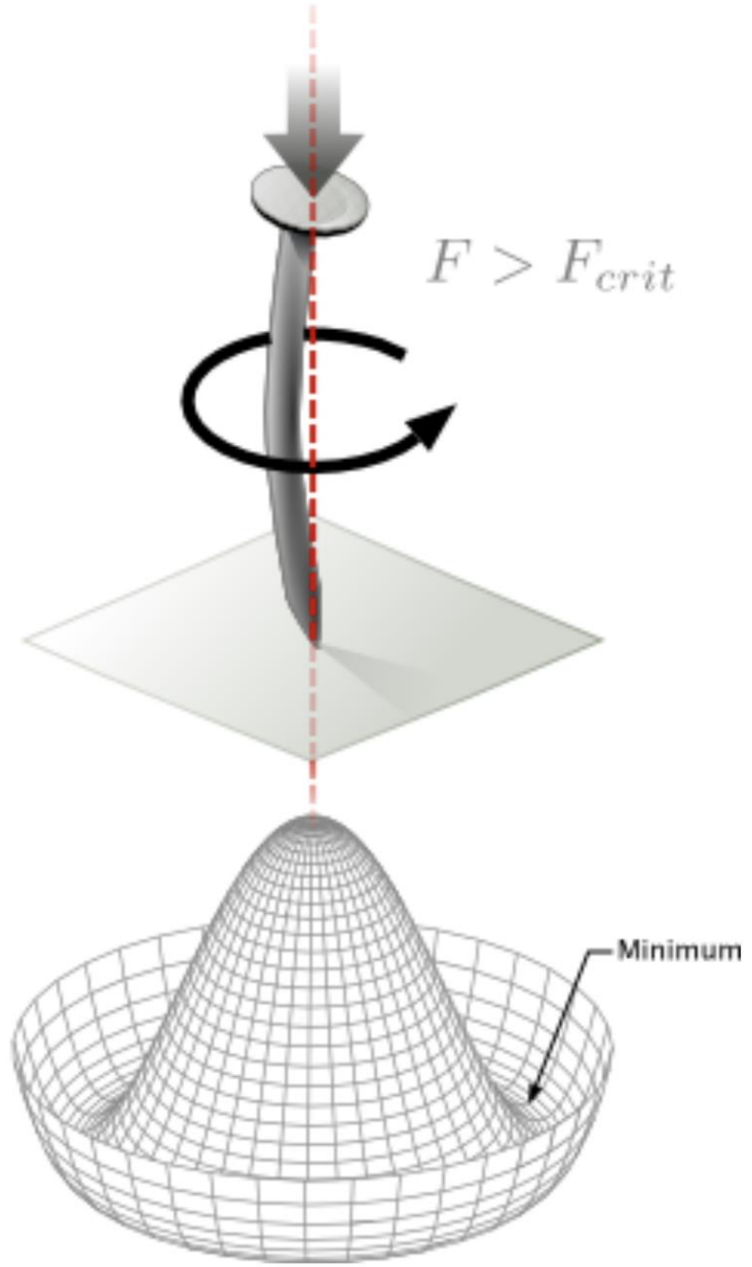
MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Spontan Symmetribrud - Et eksempel

Symmetrisk starttilstand

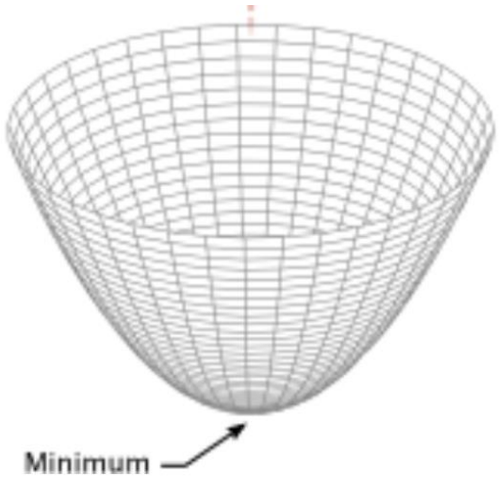
Over en vis kraftpåvirkning er det energetisk fordelagtigt, at sømmet bøjer.
Retningen kan ikke forudsiges:
Systemets symmetri brydes *spontant*



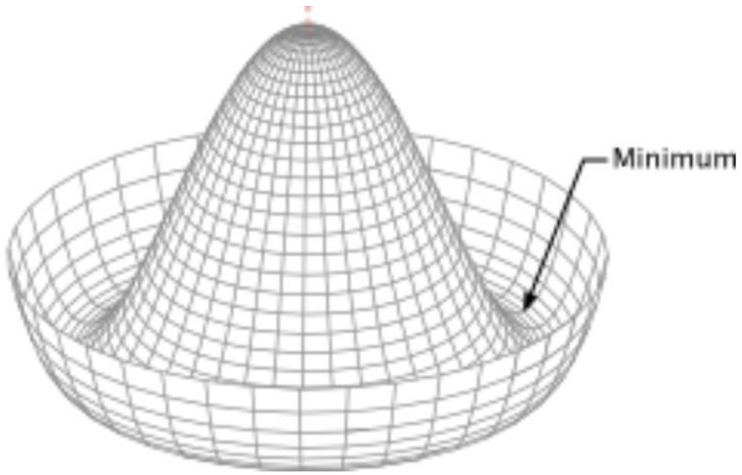


MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Higgs-potentialet i et historisk perspektiv



Umiddelbart efter Big Bang.
Alle partikler er masseløse.



Omkring 10^{-12} efter Big Bang:
Spontan symmetribrud (SSB).
Partikler erhverver masser.

- Masse er ikke noget partikler ***har***.
- Masse er noget partikler ***erhverver*** gennem vekselvirkning med omgivelserne, altså Higgs-feltet

Det vides ikke, hvad der drev Higgs mekanismen i det tidlige univers

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE



The Higgs field is like a very crowded room and a particle is like a person trying to cross the room



The more famous the person is, the more followers cluster around, making him slower (heavier)



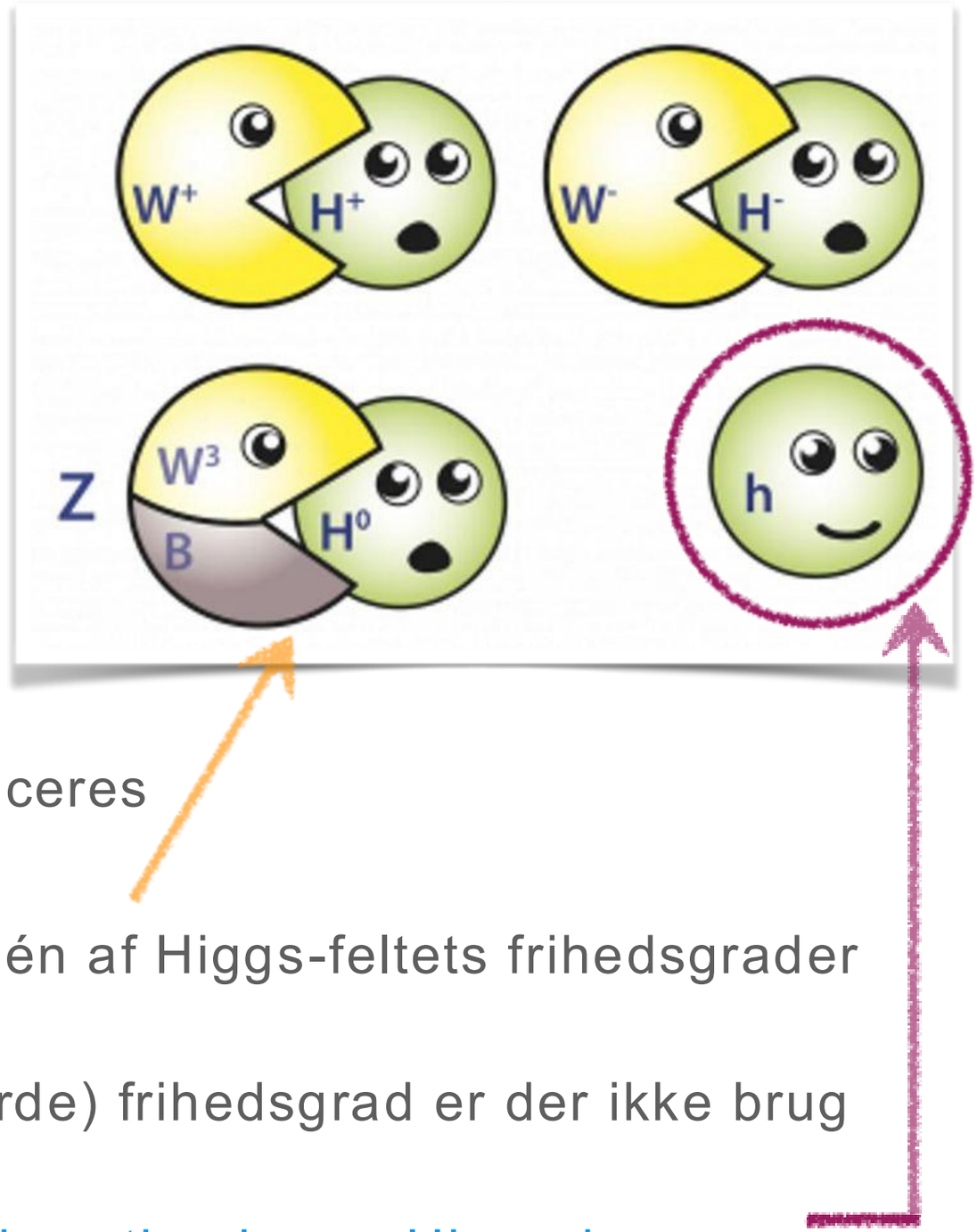
If instead a rumour crosses the room (an excitation of the Higgs field)...



...there is also a clustering propagating like a particle of a certain mass (Higgs boson)

Higgs-mekanismen - Masse til $W^{+/-}$ og Z^0

- **2 ≠ 3** ⇒ En *masseløs* og en *massiv* vektorboson er fundamentalt forskellige
  - ➤ En masseløs vektorboson har 2 polarisationsretninger
    - ➤ eksempel: foton
  - ➤ En massiv vektorboson har 3 polarisationsretninger
- For at gøre en masseløs vektorboson massiv må der tilføres *én frihedsgrad*
  - ➤ 2 + 1 = 3
- Higgs-feltet med fire frihedsgrader introduceres
  - ➤ Fire værdier i ethvert punkt i rummet
- De tre partikler W^+, W^- og Z^0 "spiser" hver én af Higgs-feltets frihedsgrader og bliver derved massive
- Higgs-feltets resterende, uundgåelige (fjerde) frihedsgrad er der ikke brug for
  - ➤ Er til overs: Optræder i Naturen; dens kvantisering er Higgs-bosonen
- Hvordan finde ud af, om Higgs-mekanismen er virkelighed eller fri fantasi?
  - ➤ Se efter om Higgs-bosonens virkelig eksistens

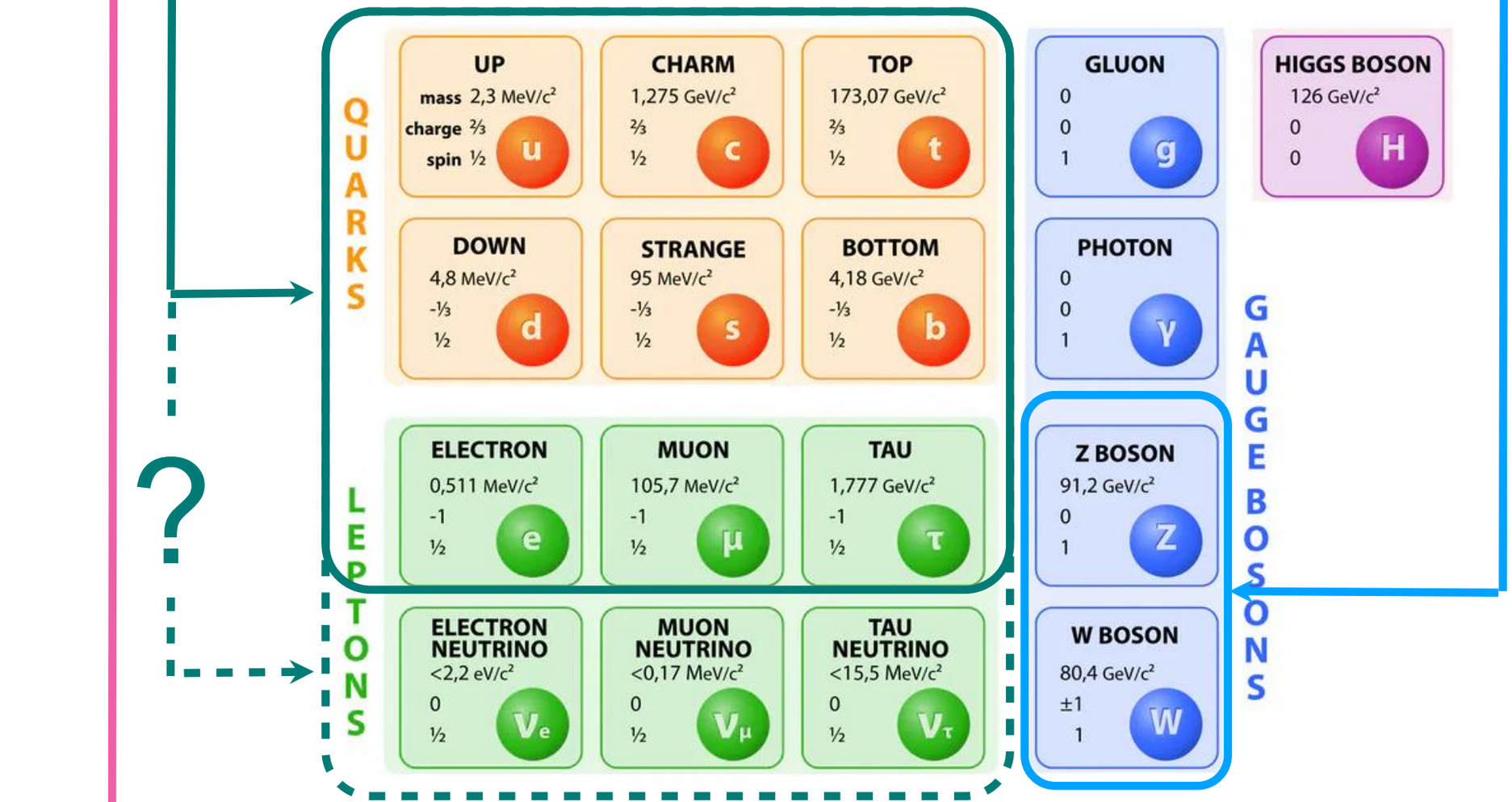


MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Fermion-masser

Higgs-mekanismen giver masser til W og Z.
Dette var præcis formålet med dens indførelse.

Gennem kobling til Higgs-feltet kan også fermionerne bibringes masser:
Én "Yukava"-kobling per fermion; præcist tilpasset til at give iagttagne masser.



Forudsigelse: Higgs-bosonen kobler proportional med masse

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Standardmodellens frie parametre

a) Oprindelig, masseløs teori: 4 frie parametre



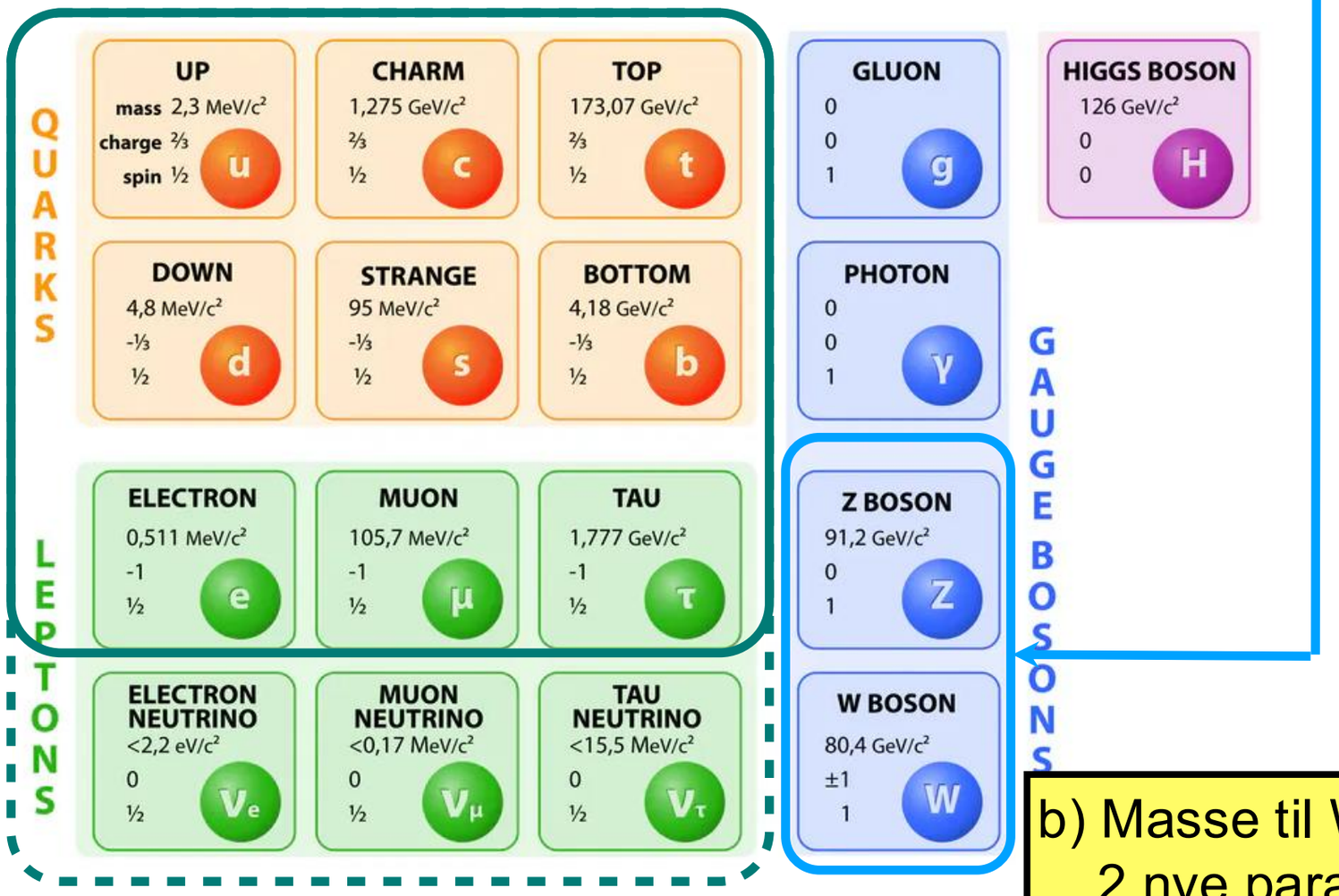
Higgs-mekanismen giver masser til W og Z.
Dette var præcis formålet med dens indførelse.

Gennem kobling til Higgs-feltet kan også fermionerne bibringes masser:
Én "Yukava"-kobling per fermion; præcist tilpasset til at give iagttagne masser.



c) Massive fermioner: 20 nye parametre, i alt 26

?



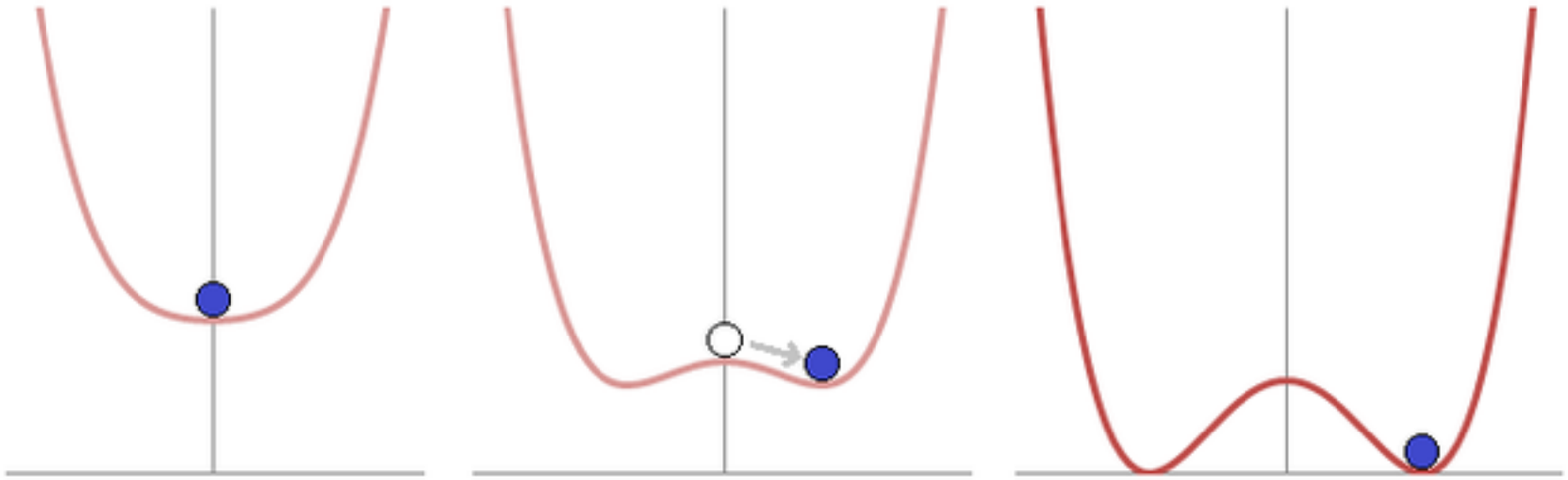


b) Masse til W og Z:
2 nye parametre, i alt 6

Forudsigelse: Higgs-bosonen kobler proportional med masse

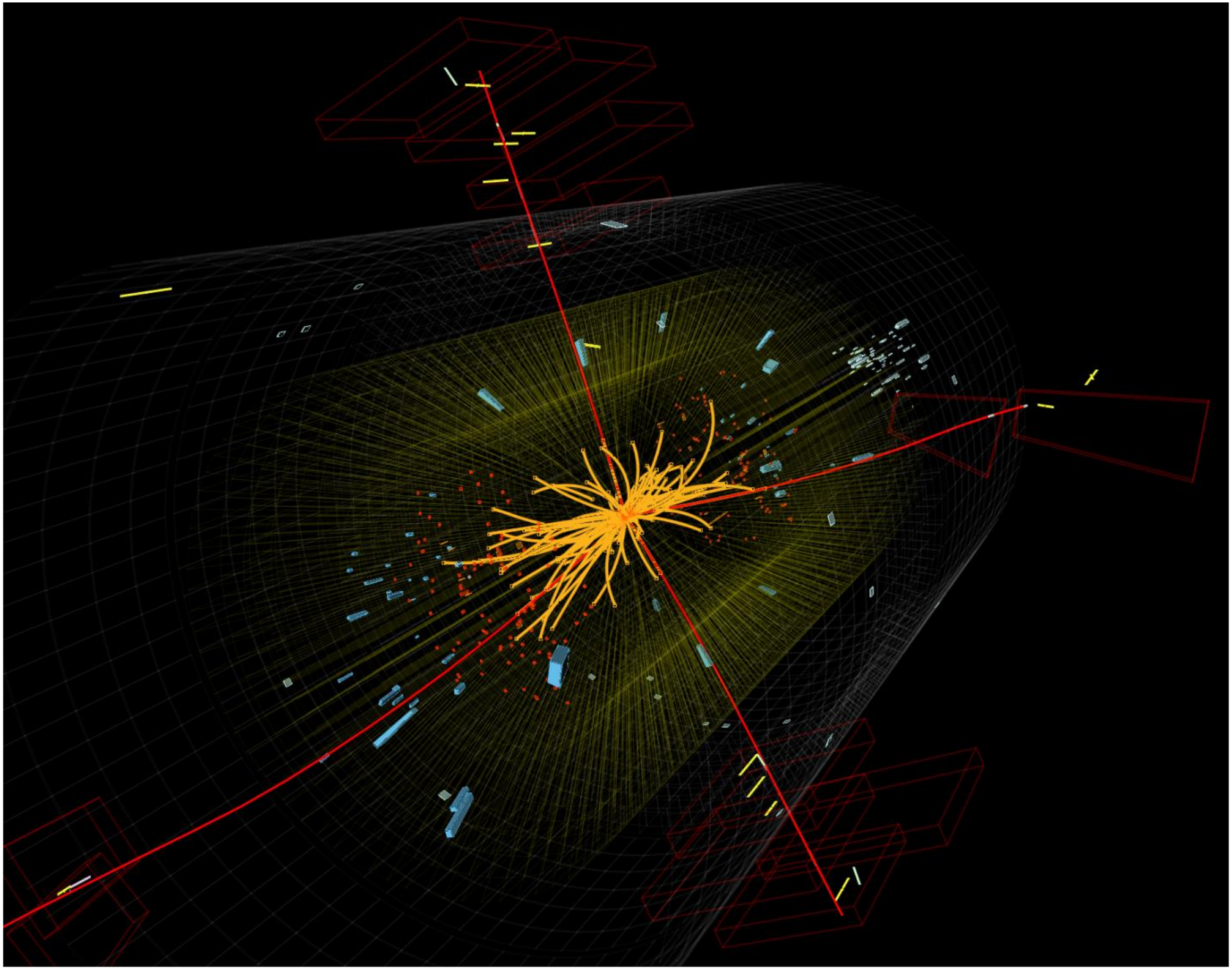
MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Higgs feltets vakuum-forventningsværdi



MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

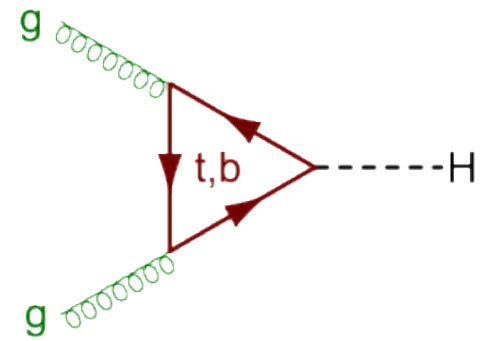
2012: Higgs-bosonen eftervises



MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

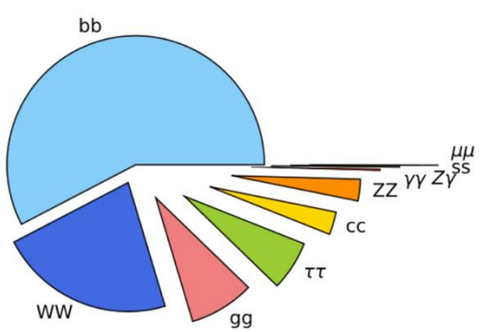
Hvordan man finder en Higgs-boson

- Ved sammenstød sammenpresses en enorm energimængde i et meget lille volumen
  - Derved skabes (masser af) nye partikler via $E = mc^2$
    - Den store energitæthed omformes til de nye partiklers masser + kinetiske energi
- Proton-proton-sammestød ved LHC
  - Med lille men endelig sandsynlighed skabes en Higgs-partikel
  - Når dette sker, så fortrinsvist via "gluon-gluon-fusion"



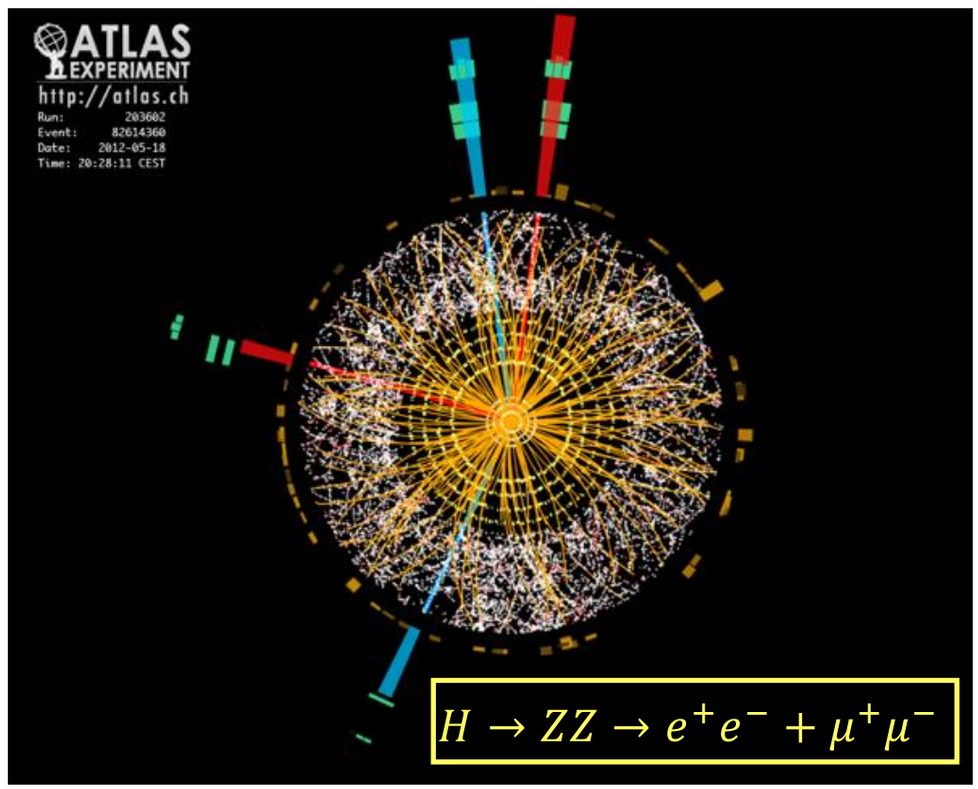
- Higgs-partiklen identificeres dernæst via dets henfald (levetid ~10^{-20} s)

Teoretisk beregnede forgreningsforhold



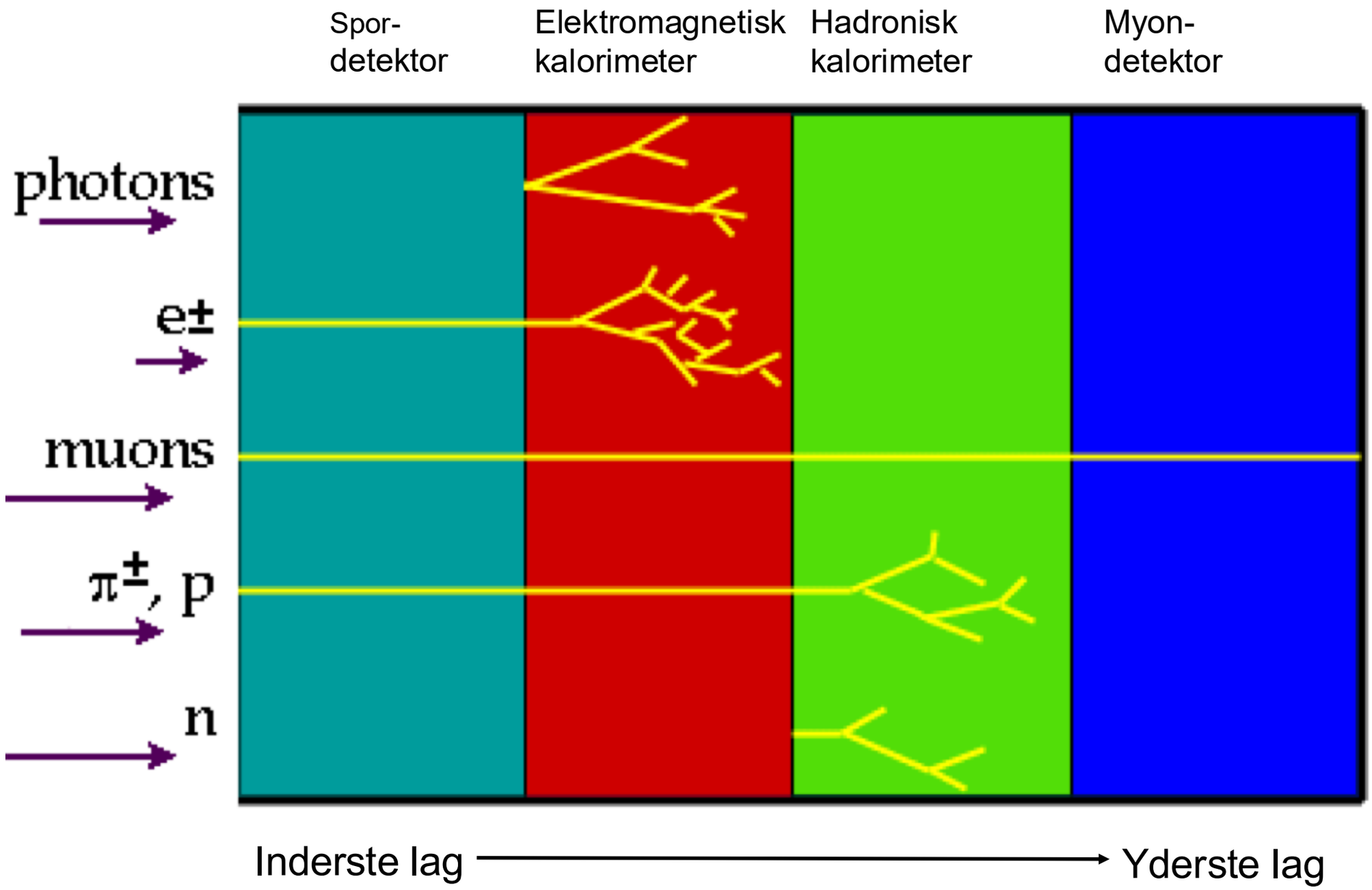
m_H = 125 GeV	
Decay	BR [%]
bb	57.7
ττ	6.32
cc	2.91
μμ	0.022
WW	21.5
gg	8.57
ZZ	2.64
γγ	0.23
Zγ	0.15
ΓH [MeV]	4.07

Må benytte henfaldskanaler, som giver et karakteristisk signatur. Disse er desværre ret sjælne.



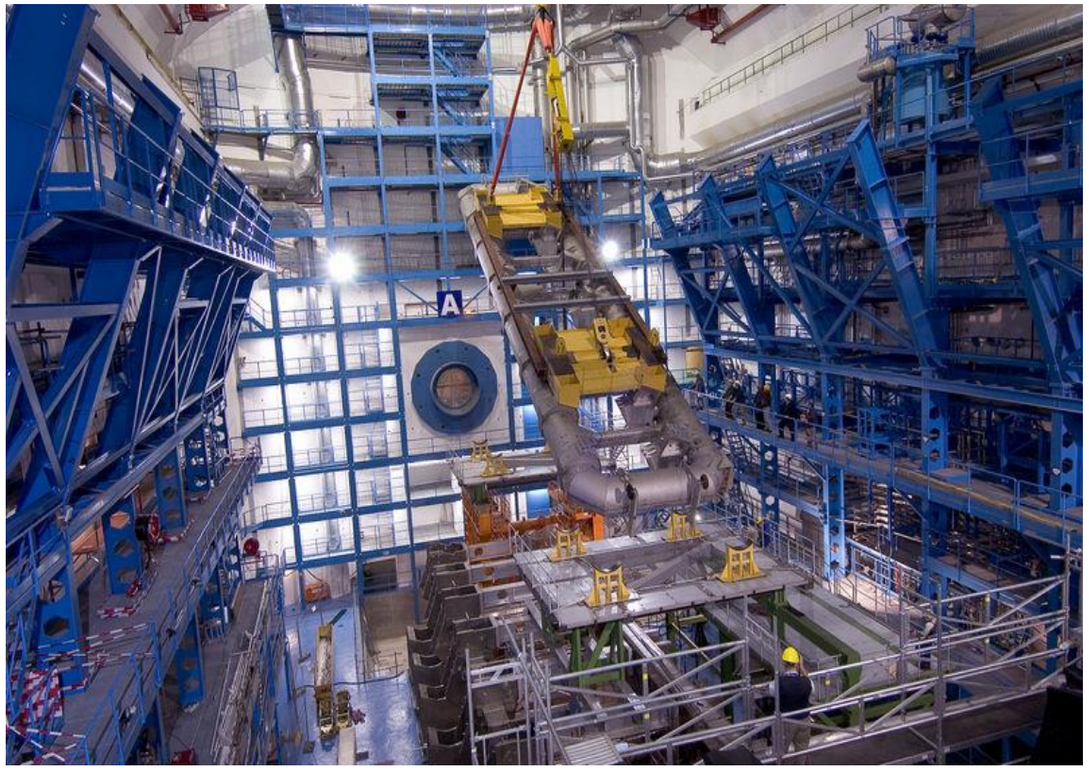
MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

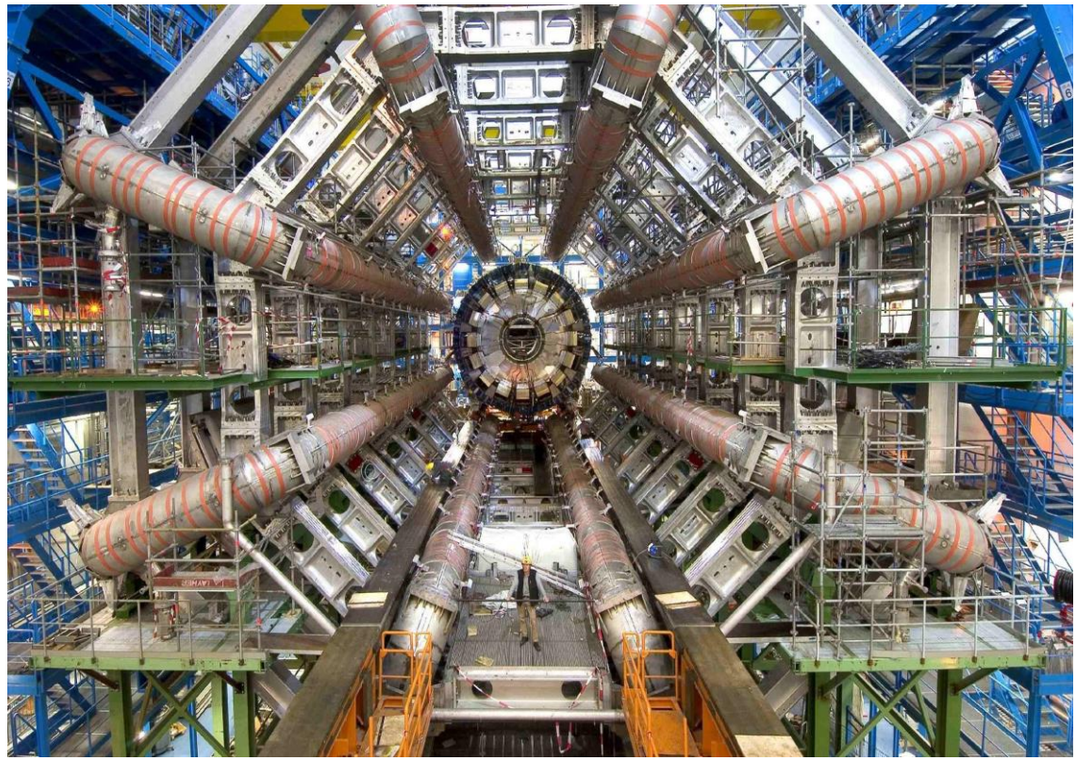
Partiklers "fingeraftryk"



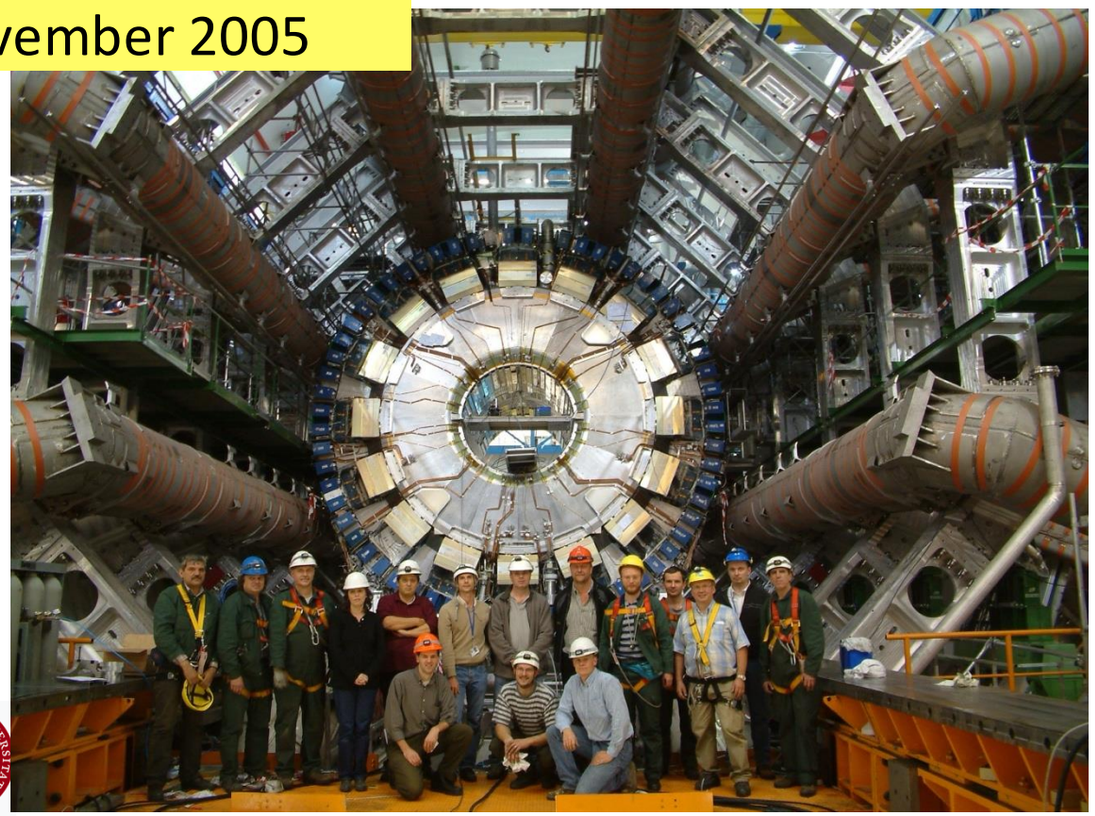
MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Konstruktion af ATLAS-detektoren

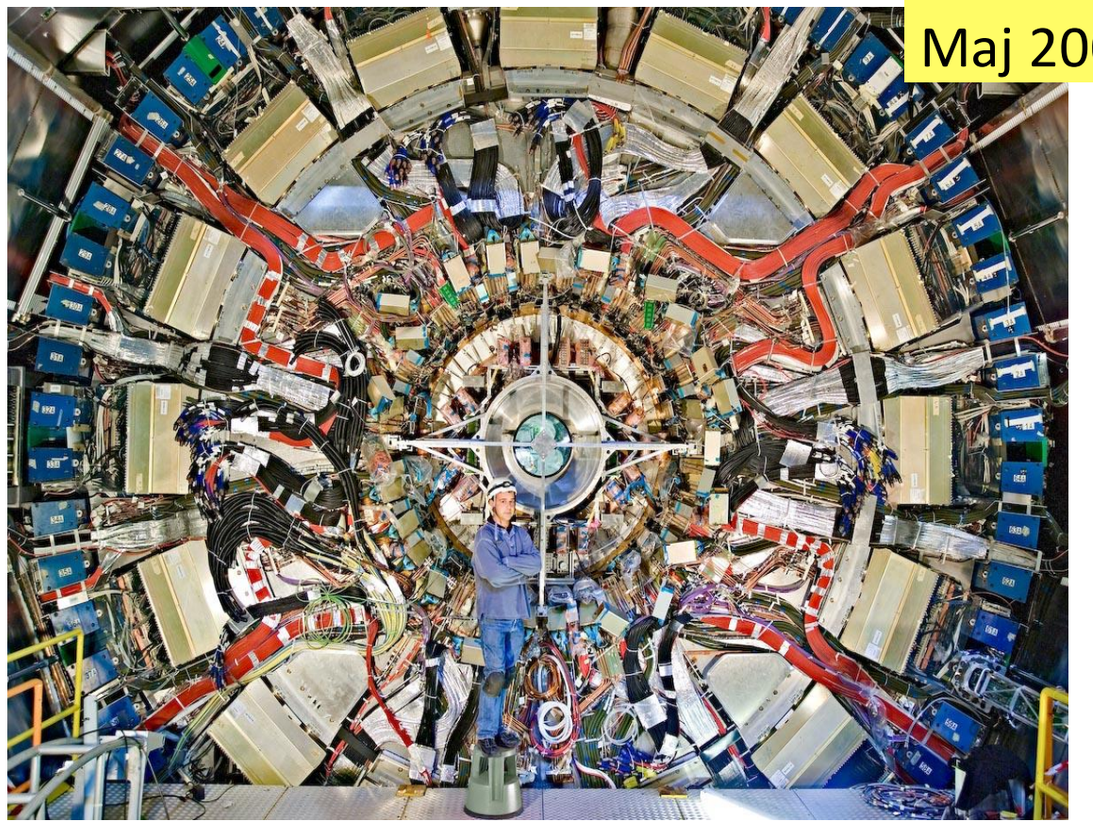




November 2005



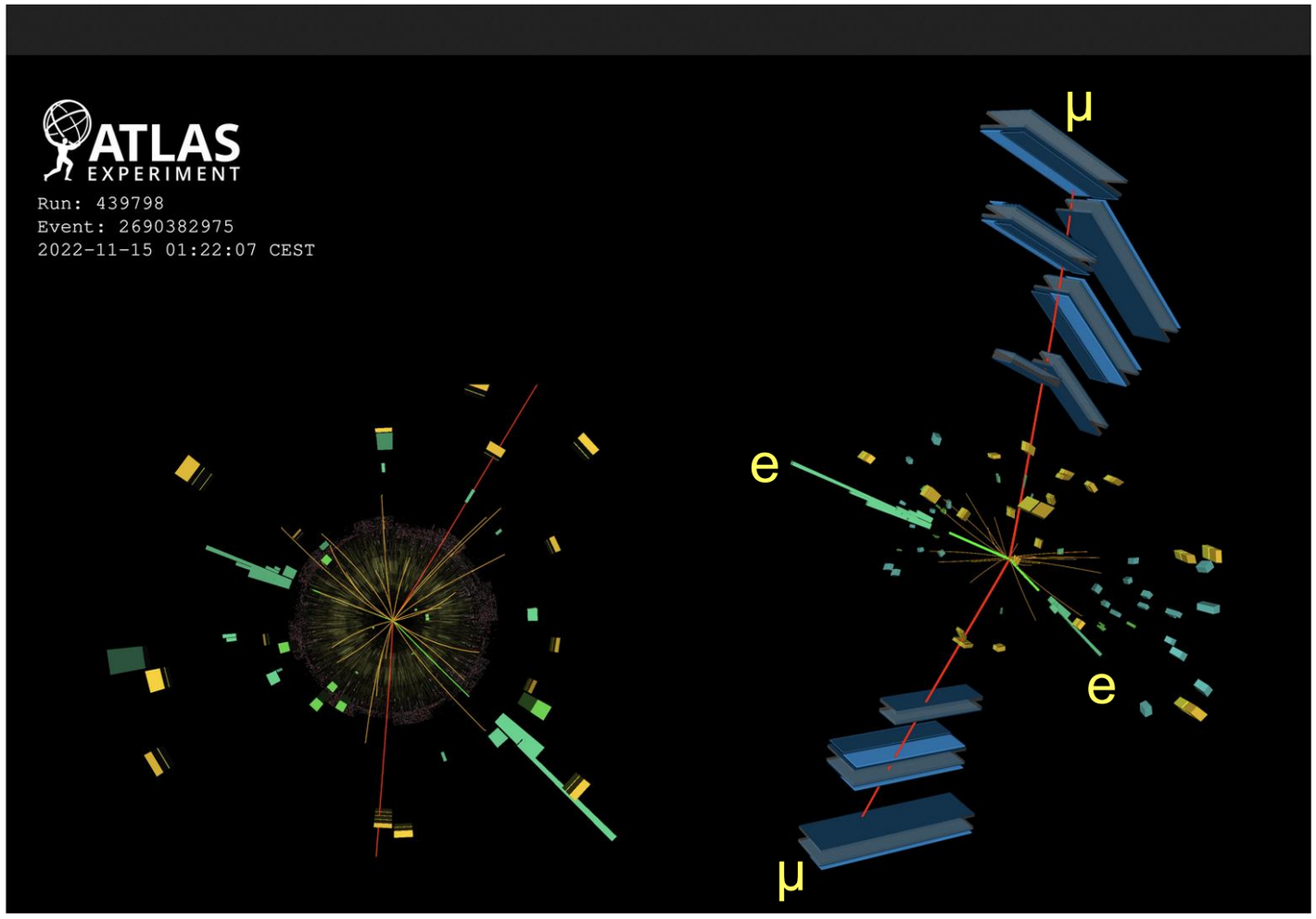
Maj 2007



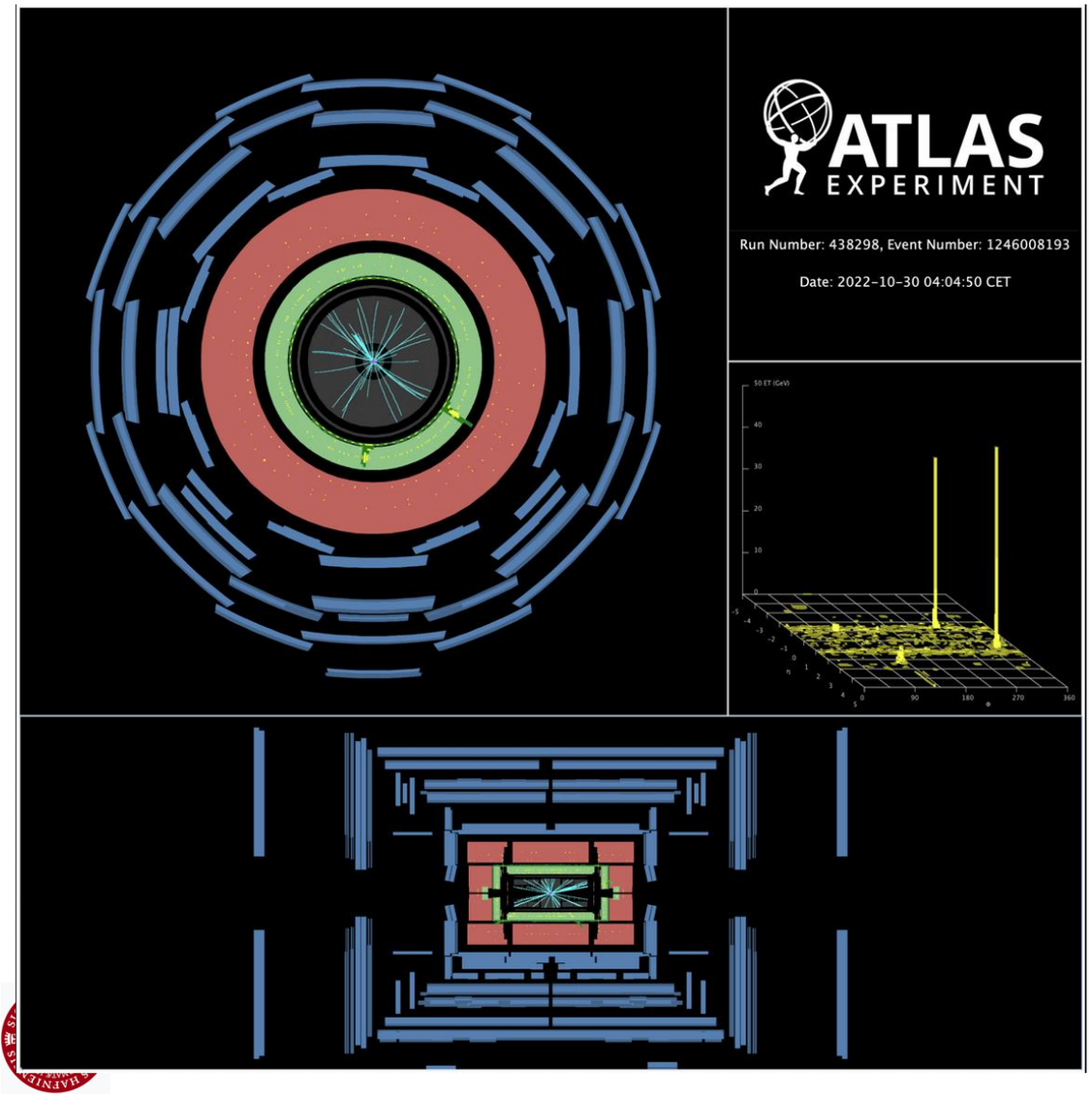
MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

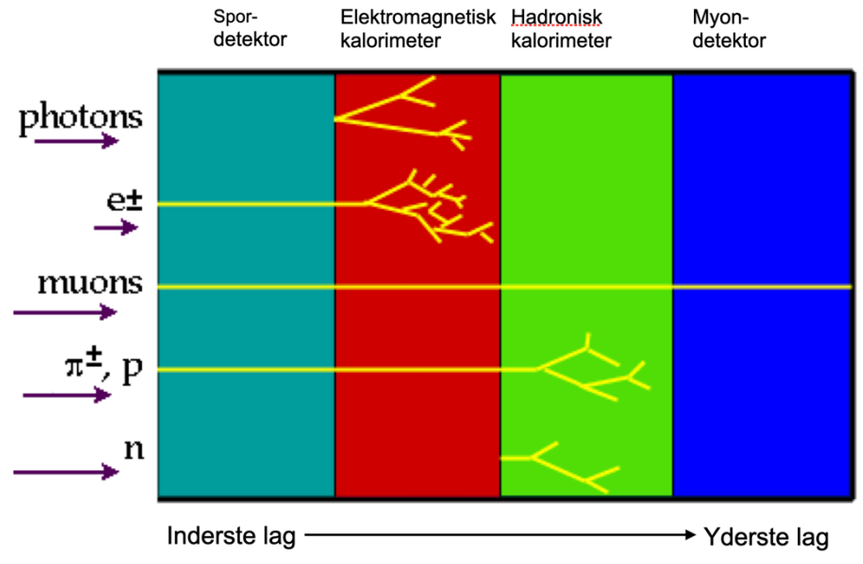
Higgs Candidate Event Displays

$H \to ZZ \to e^+e^-\mu^+\mu^-$ candidate event

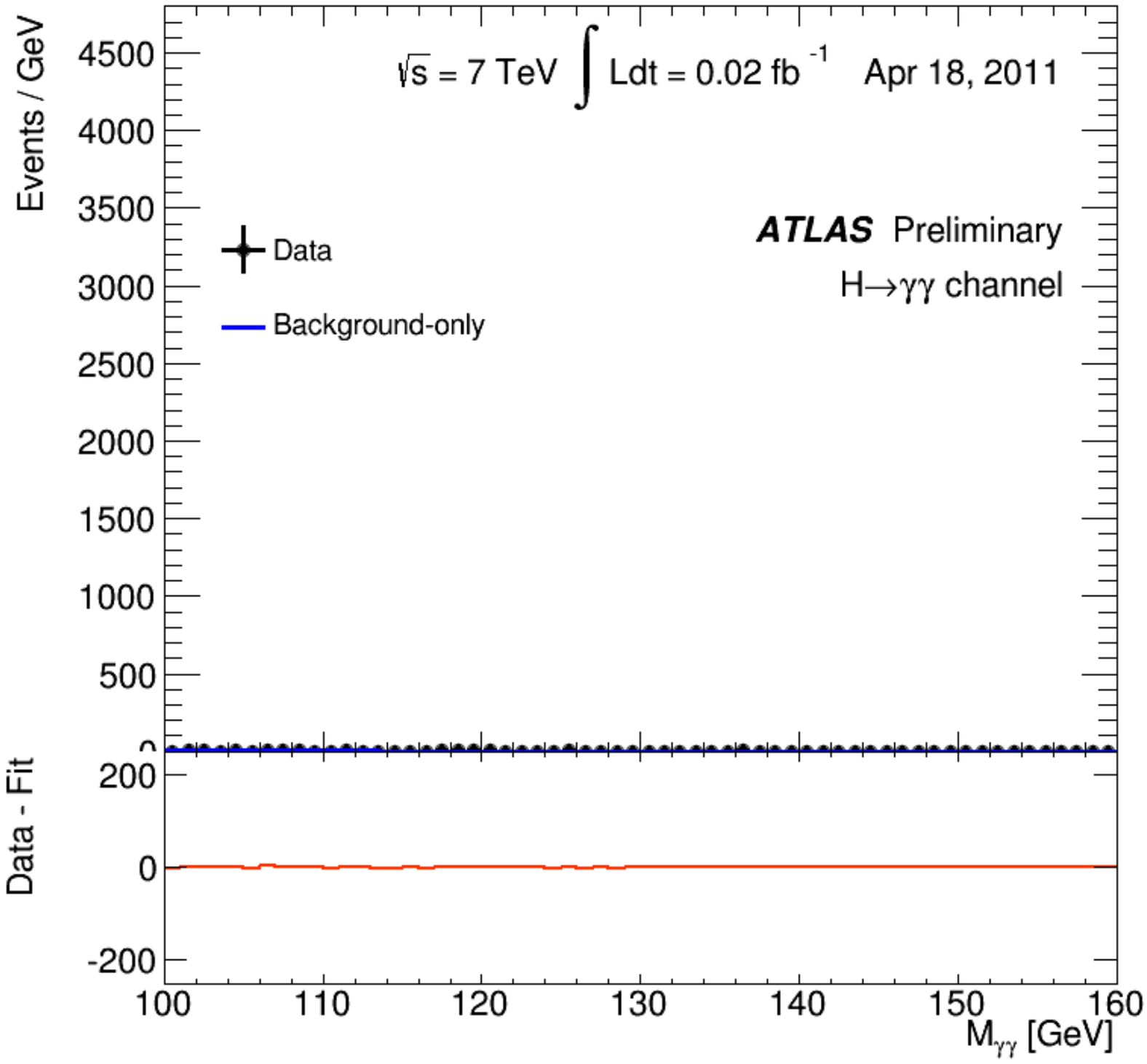


$H \to \gamma\gamma$ candidate event





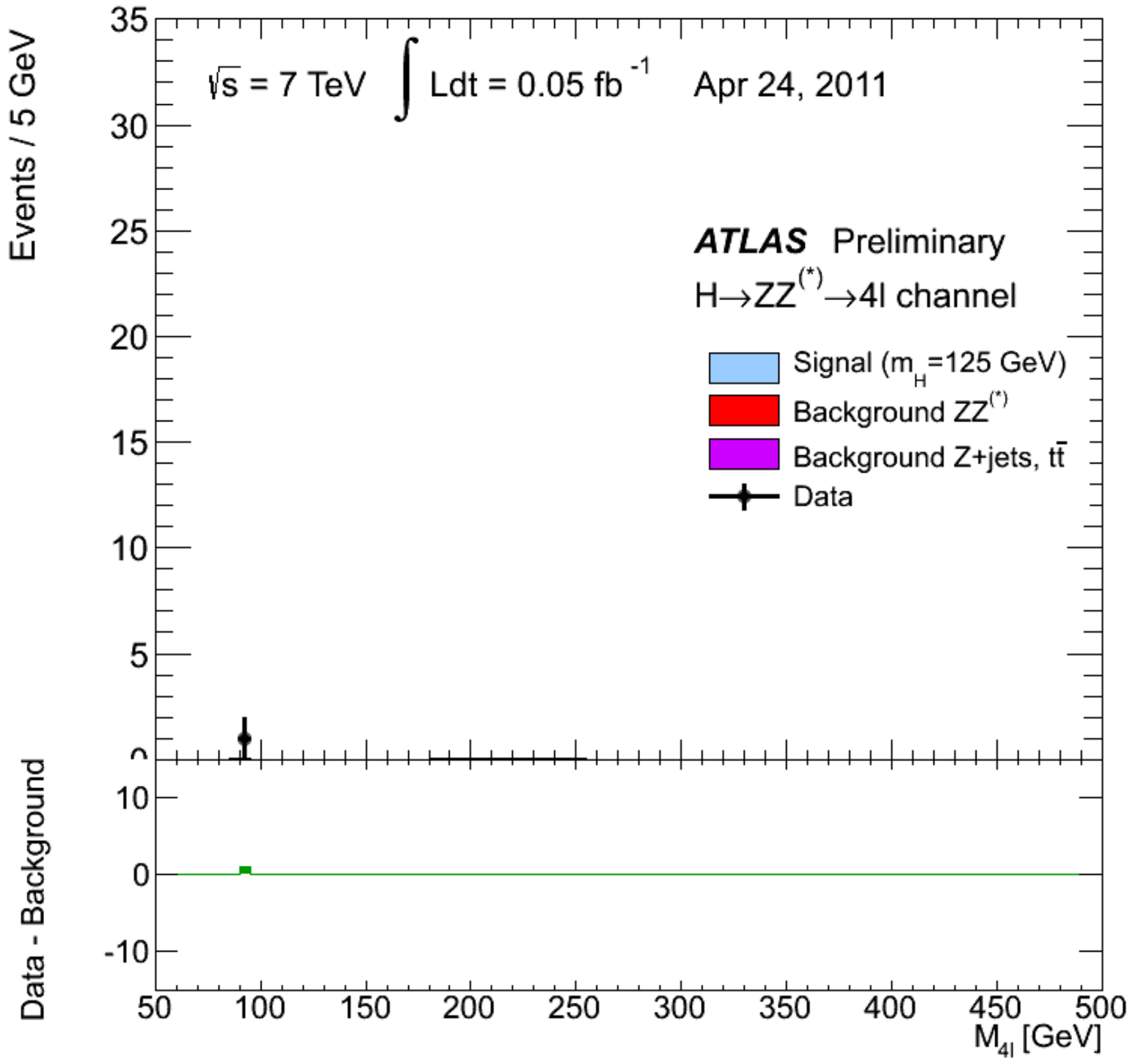
Her i 2-foton-sluttilstande



0.23% af alle Higgs-henfald

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Her i 4-lepton-sluttilstande

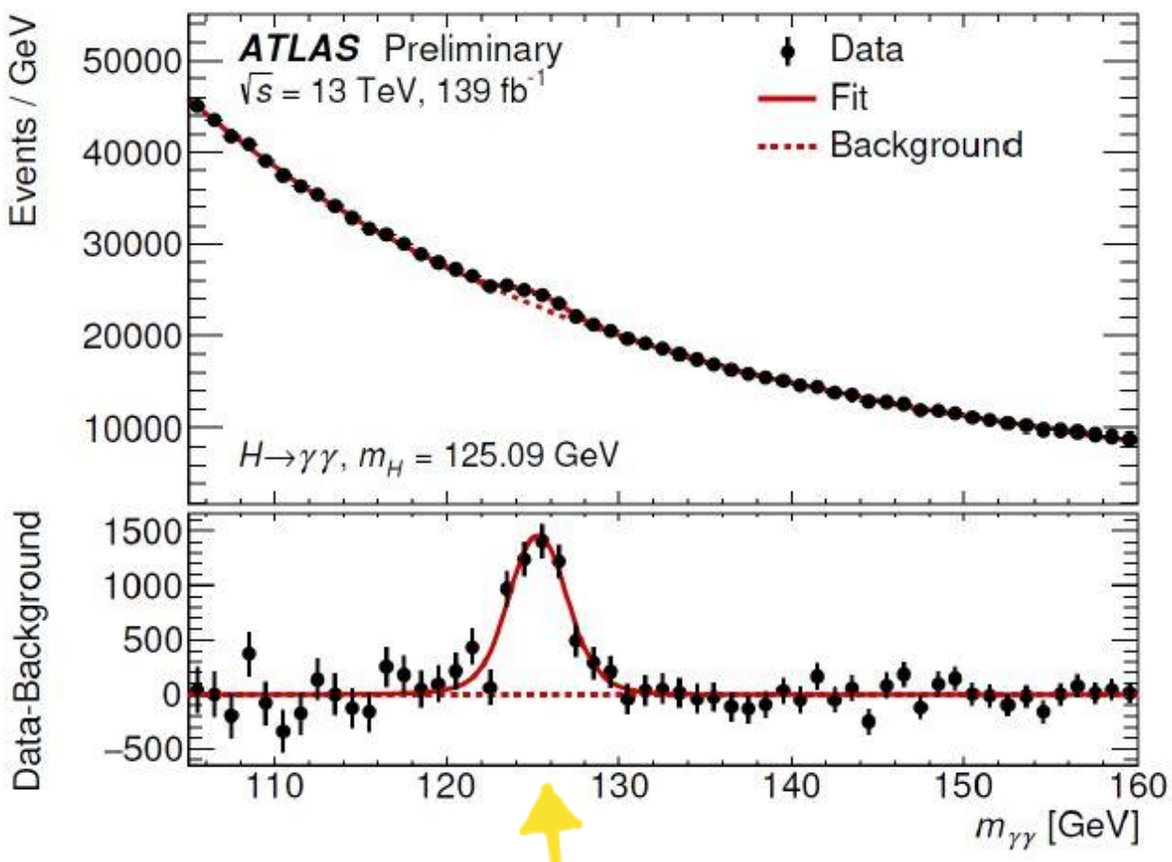


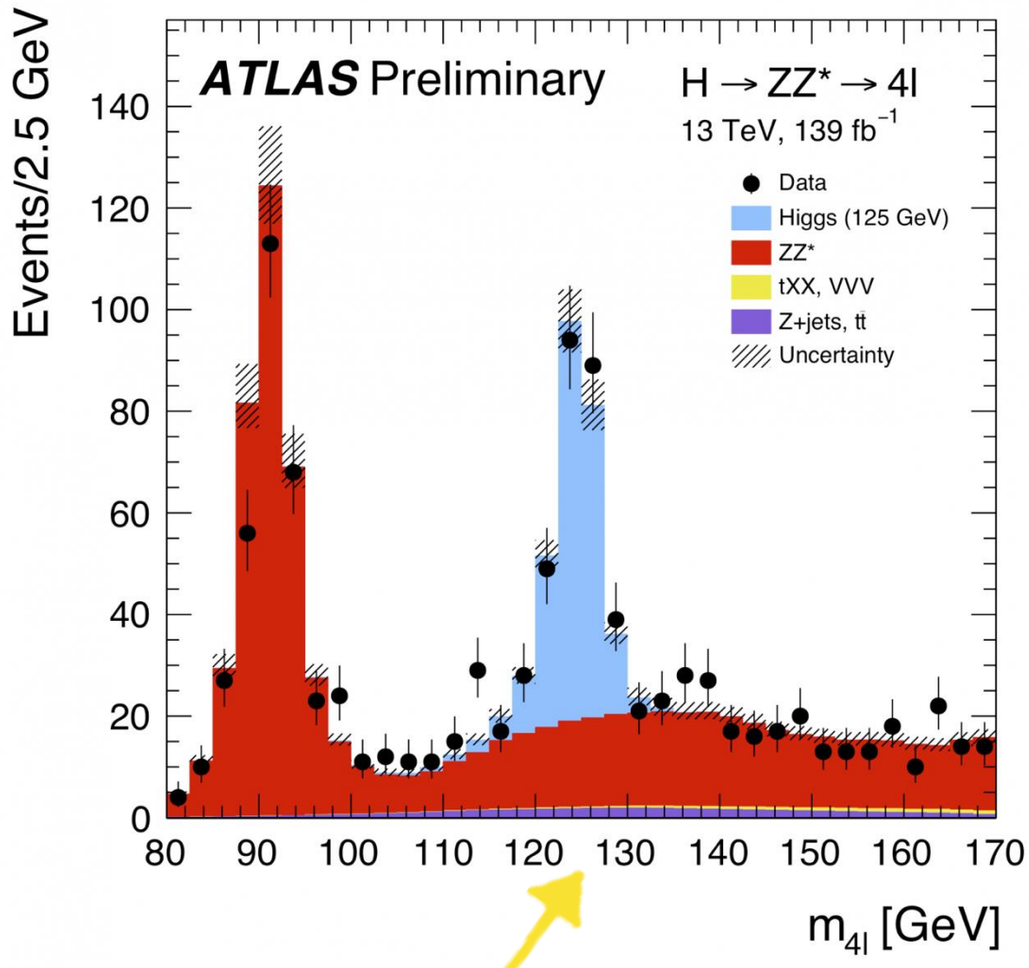
0.01% af alle Higgs-henfald

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Med 5 gange højere statistik

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

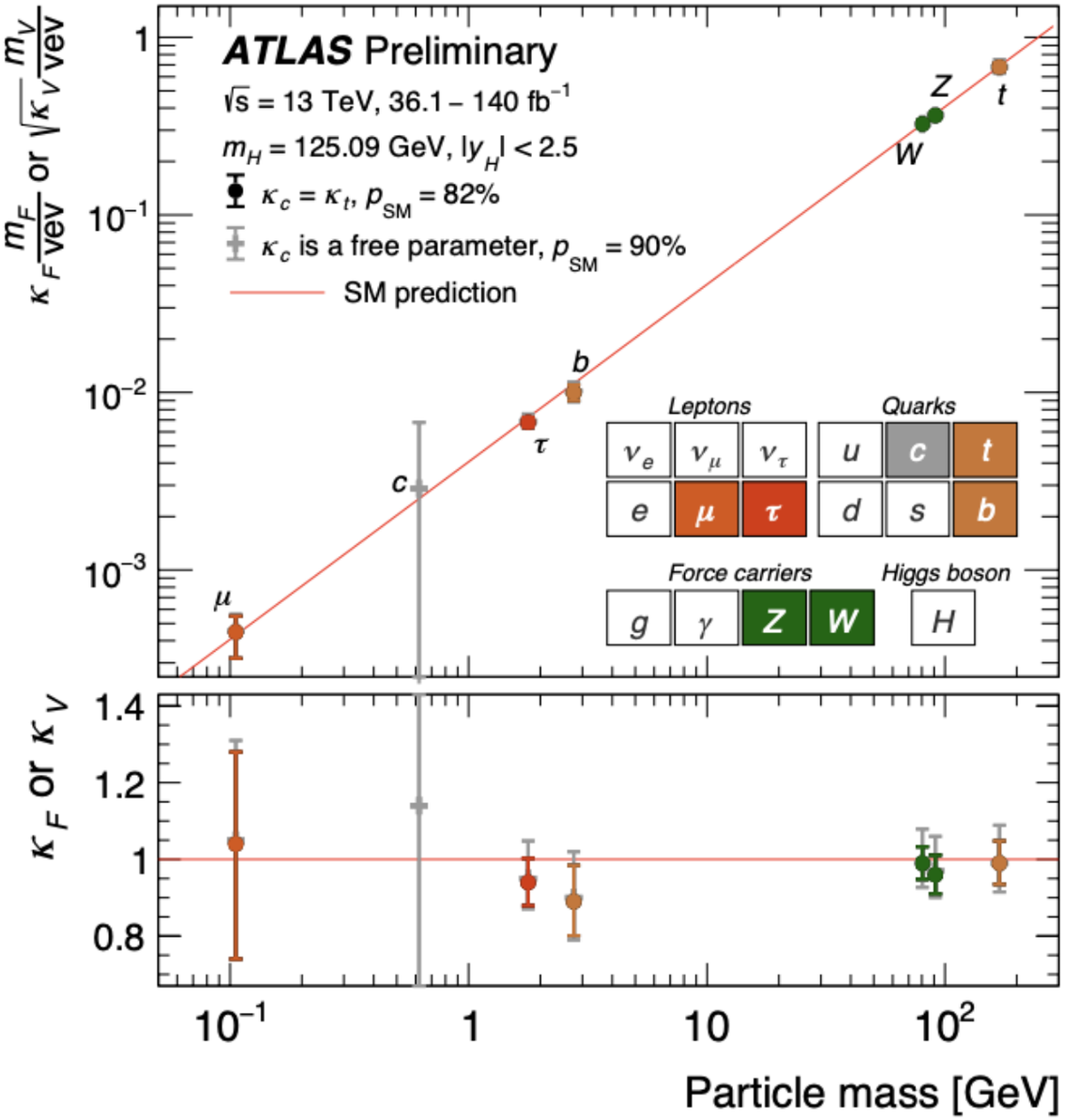


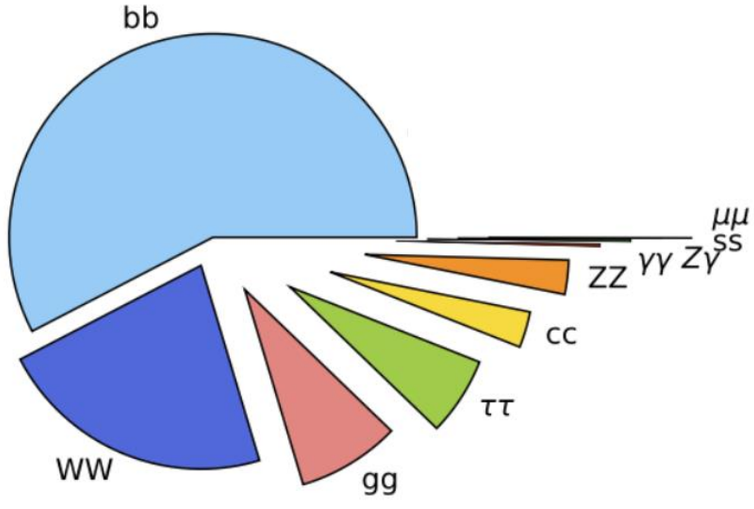


Higgs bosonens masse: $m_{\mathrm{H}} = 125\,GeV$

Målte Higgs-koblinger

- Målte koblinger er proportionale med partikelmasserne
  - Præcis som forudsagt af Higgs mekanismen!!





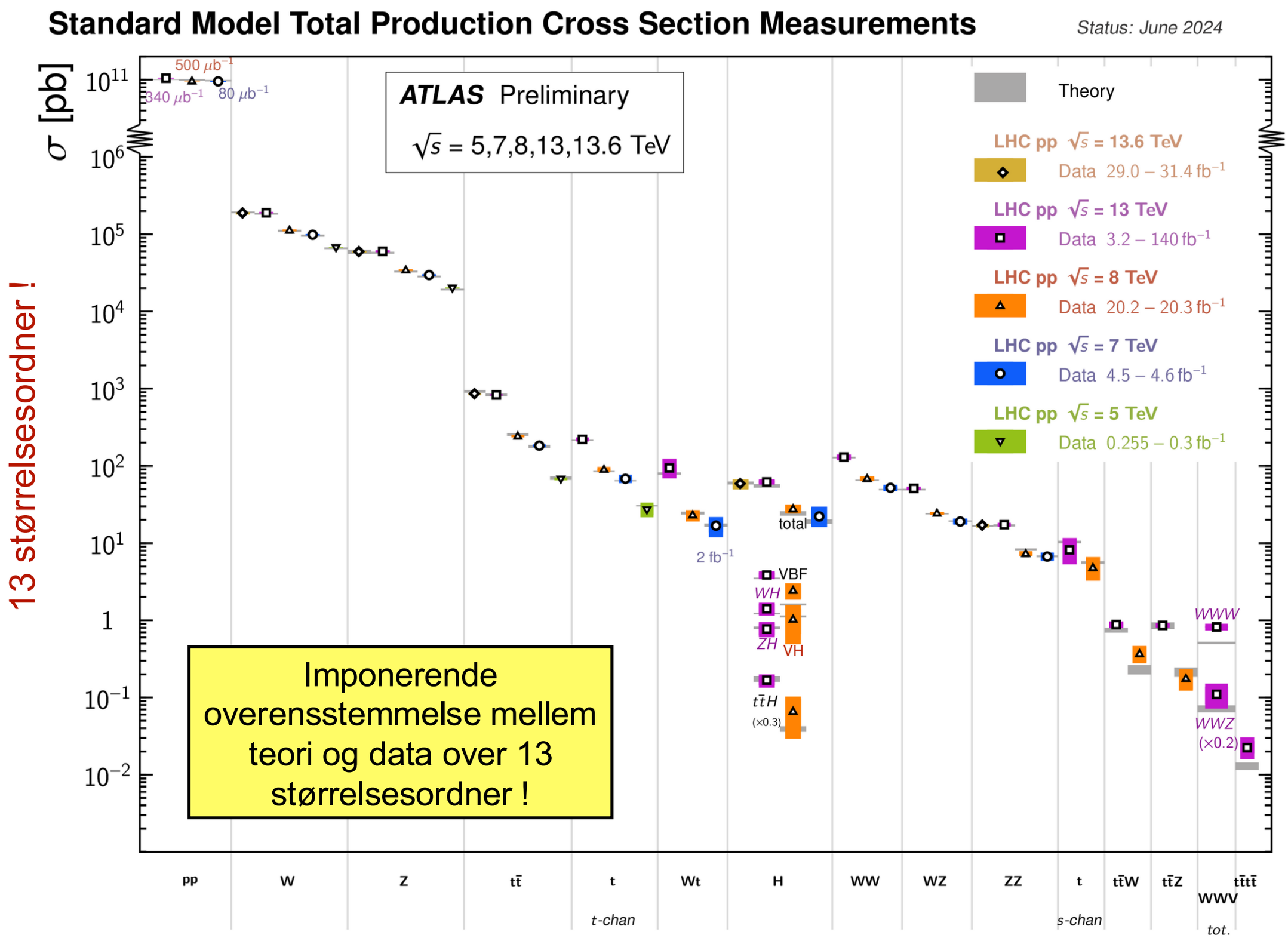
Forudsagte forgreningsforhold

➔ Partiklen vi fandt i 2012 virker til at være standardmodel-agtig

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTET

Status af Standardmodellen

LHC: Mange andre målinger end Higgs



13 størrelsesordner !

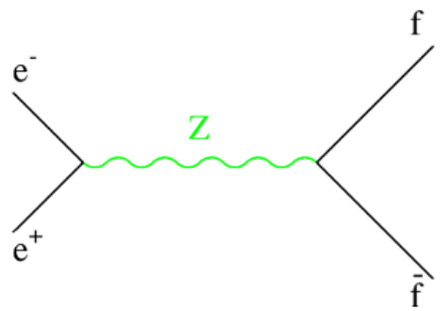
Imponerende overensstemmelse mellem teori og data over 13 størrelsesordner !

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

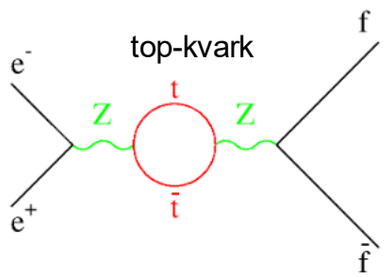
Standardmodellens indre bindinger

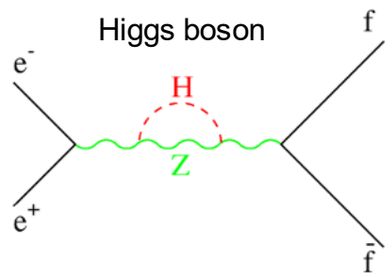
- Standardmodellen udgør en tætvævet matematisk struktur med mange interne bindinger
  - Nøje sammenhæng mellem forskelligeartede målbare størrelser
    - Eksempel:

Præcisionsstudier af Z-bosonen i elektron-positron sammenstød



påvirkes at tungere partikler, der optræder på kvantemekanisk vis i "løkkediagrammer"

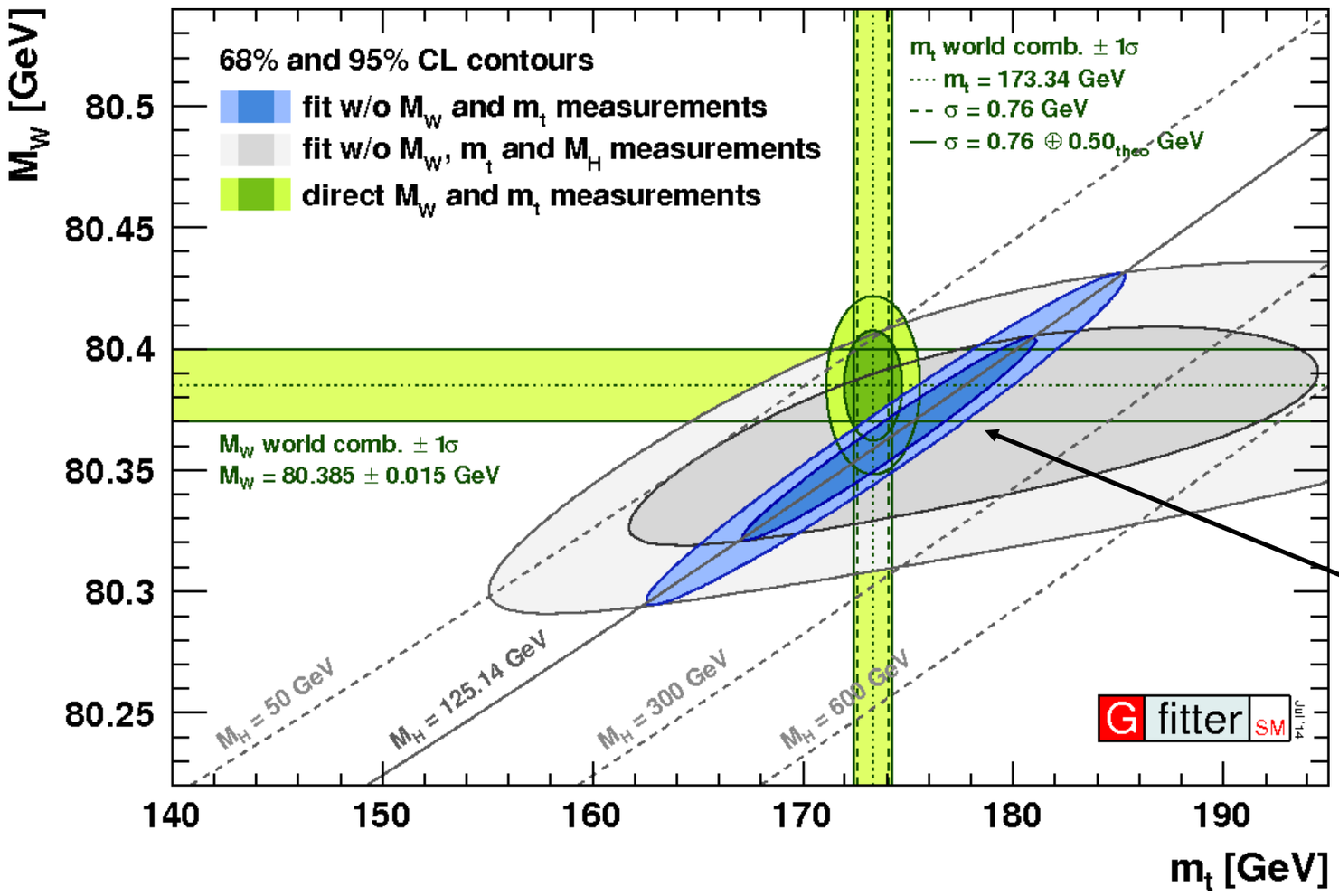




- Dermed kan præcisionsmålinger give information om partikler, ved højere masseskalaer - ved energier, som eventuelt endnu ikke er tilgængelige
  - Eksempel: Via elektron-positron-sammenstød i 1990'erne (LEP-acceleratoren ved CERN) havde man allerede information om top-kvarkens og Higgs-bosonens masser før disse partikler var eksperimentelt eftervist !!

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

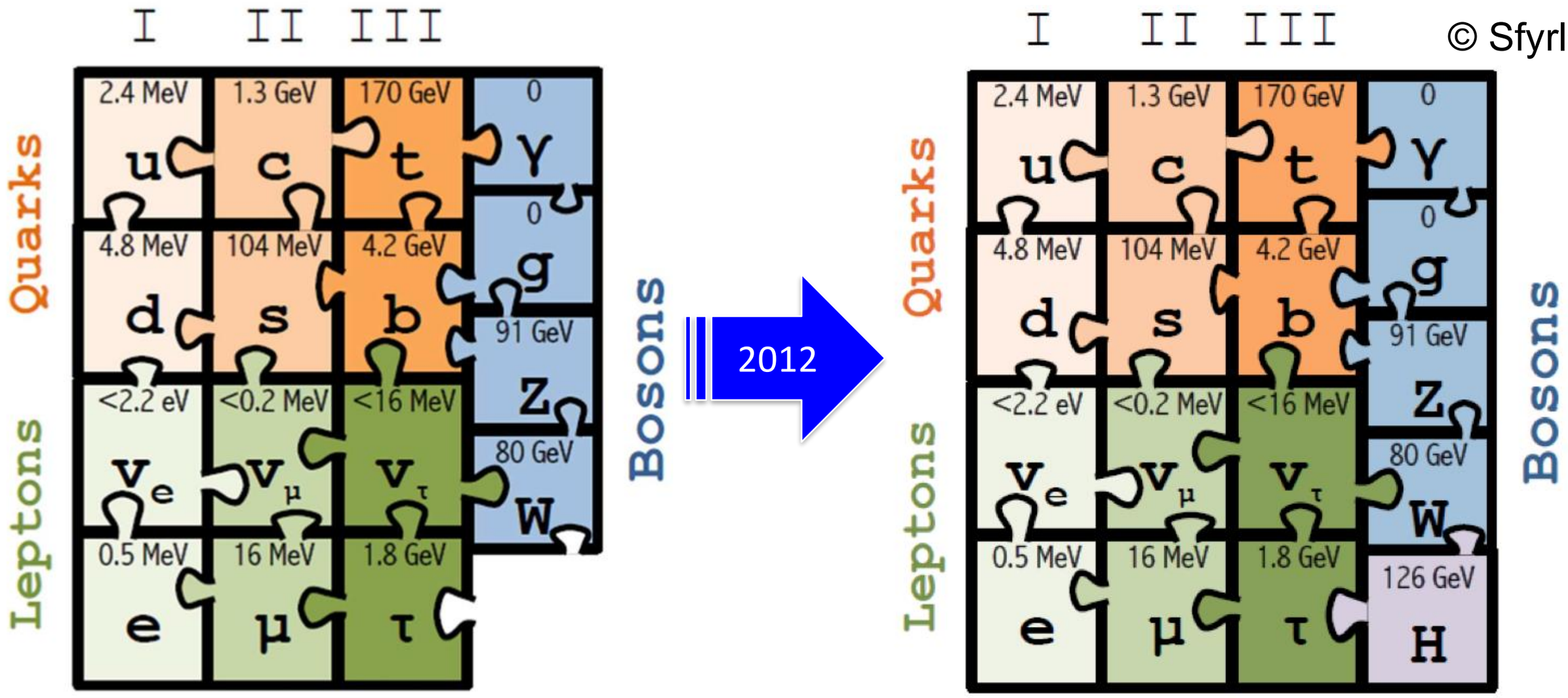
Overordnet status af Standardmodellen



Indre konsistens:
Grøn og blå blop overlapper

- To metoder til at bestemme masserne af W-bosonen og top-kvarken
  - Grønne bånd: Direkte målinger
  - Blå "cigar": Indirekte målinger via kvanteeffekter inden for Standardmodellens struktur
- Overordnet konklusion:
  - Vi kender Standardmodellen gennem "utallige" målinger
  - Hidtil er alle målinger konsistente og i overensstemmelse med teorien
- Men hvad nu hvis vi kiggede nøjere efter?
  - Ville Standardmodellen overleve et granskning med en faktor 10 højere præcision?

Higgs-bosonen fuldender Standardmodellen



- Med opdagelsen af Higgs-bosonen har vi for første gang i historien en teori som er
  - i) **komplet**
  - ii) **selv-konsistent**
  - iii) **lader sig ekstrapolere til vilkårligt højere energier**
- Fra et teoretisk synspunkt, ikke tvingende nødvendig, at der findes yderligere, ny fysik
- Er vi så færdige? Er vi nået til vejs ende. Kan vi lukke bogen og gå hjem?

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Fysik hinsides Standardmodellen ?

- Mange fundamentale spørgsmål lades ubesvaret af Standardmodellen:
  - Hvorfor findes der (præcis) tre familier af stoflige partikler (fermioner)?
    - Er der en underliggende forklaring på det observerede massemønster?
    - Er der noget specielt, der driver de meget små neutrinomasser?
  - Hvad drev naturen til at foretage det spontane symmetribrud, hvorved partikelmasserne ifølge Higgs-mekanismen opstod?
  - Hvordan kan kvantemekanik og gravitation forenes? Hvordan kan gravitation kvantiseres?
- Standardmodellen er tavs omkring disse spørgsmål
  - Som alle har noget med gøre med *masse* (og dermed Higgs-mekanismen)

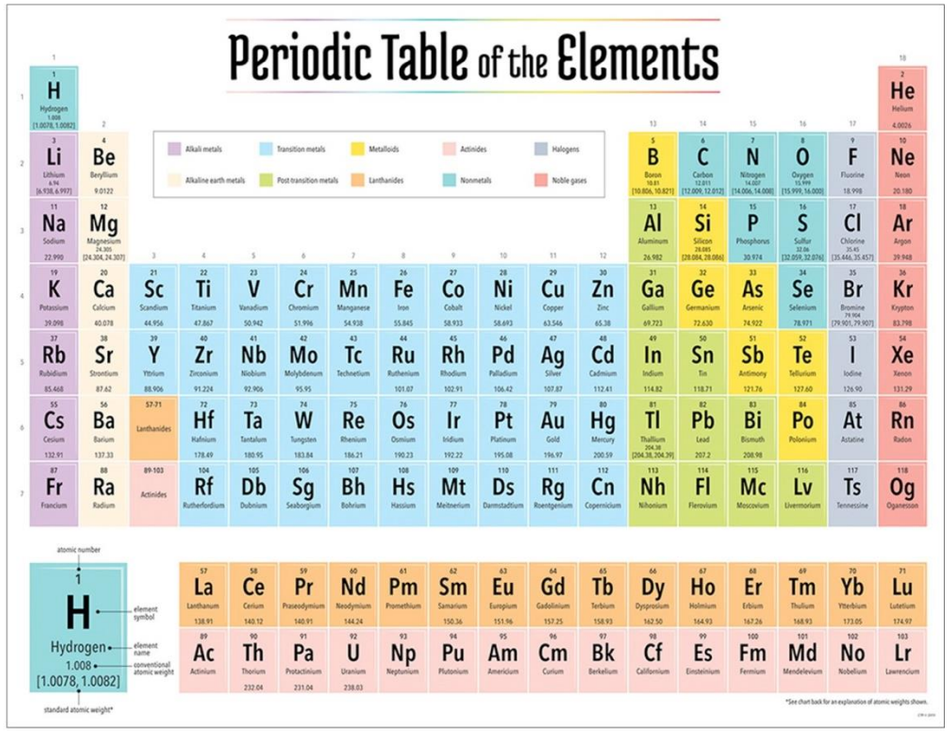
- På en måde kan det siges, at Standardmodellen giver en fantastisk vellykket beskrivelse af, **hvad** vi observerer i naturen. Men ikke **hvorfor** naturen er som den er
  - Besvarer ikke vores mest grundliggende spørgsmål.

- Derfor …
  - Gives der et en underliggende struktur?
  - Gives der et “hinsides Standardmodellen” ?
    - Beyond Standard Model - BSM?

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Underliggende struktur ?

Mendeleevs periodiske system



Underliggende struktur?

Ja, en meget rig en af slagsen:

- Atommodel med kerne og elektroner
- Kvantemekanik
- Nukleoner inde i kernen
- Kvarker inde i nukleonerne
- Ultimativt Standardmodellen

Standardmodellen



Underliggende struktur?

Vi ved det endnu ikke.

- Kun yderligere studier kan give svar

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Udestående spørgsmål af eksperimentel karakter

- Ud over de mere teoretiske spørgsmål findes der tre store eksperimentelle spørgsmål, som ikke gives svar inden for Standardmodellen

  i) Hvorfor dominerer stof over antistof i universet ?

  - Der findes mekanismer i Standardmodellen, der giver asymmetri mellem stof og antistof. Men disse er ikke stærke nok (med mange størrelsesordner) til at forklare det observerede univers

  ii) Hvad er mørkt stof?

  - Sandsynligvis en partikel. Men ikke en af Standardmodellens partikler.

  iii) Hvad genererer de meget små neutrinomasser?

  - Er det Higgs-mekanismen eller er det noget andet?

- I det følgende, én slide om hver hver af disse spørgsmål

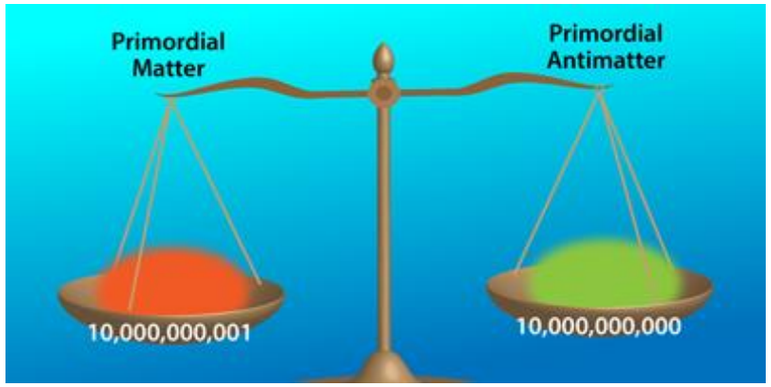
MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

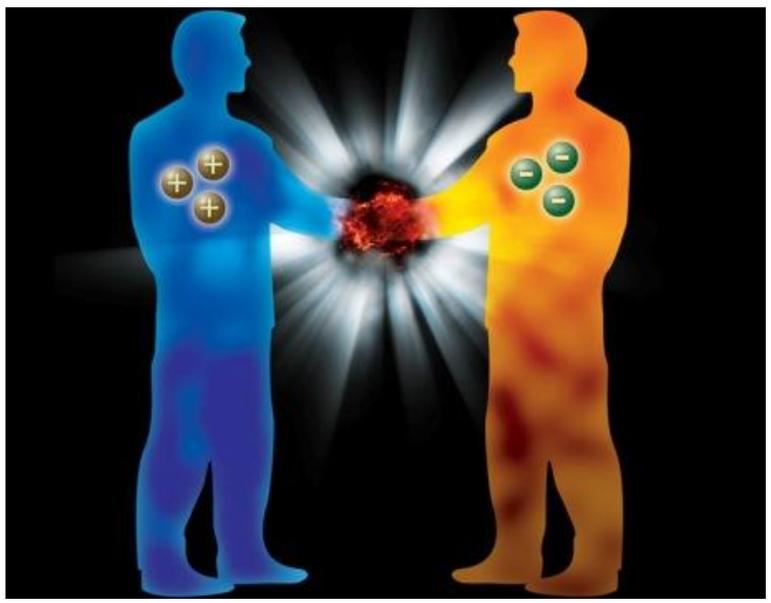
Hvorfor stof og intet antistof i universet

- Vi observerer kun stof i Universet, intet anti-stof. Alle galakser synes af bestå af stof.
- Hvis der var perfekt symmetri mellem stof og antistof, ville man ved Big Bang forvente, at der blev dannet lige store mænger stof og anti-stof.
- Men sådan ser der *heldigvis* ikke ud til at være. Big Bang-teorien siger, at der blev skabt et lille-bitte overskud af stof i forhold til anti-stof.
- Dernæst annihilerede al anti-stof med stof, og kun den lille-bitte mængde af overskydende stof blev tilbage
- Krav i det tidlige univers for at dette kan ske (Sakharov, 1967)
  - a) Baryontals-brud
  - b) C- og CP-brud

  } Stof-antistof-asymmetri
  - c) Systemet ude af termisk ligevægt
- Betingelserne a) og b) er til stede i Standardmodellen, men langt fra med nok styrke til at forklare det observerede univers.
  - Der må findes endnu en kilde til stof-antistof-asymmetri?
- Betingelse c) kan eventuelt skabes via Higgs-mekanismens spontane symmetribrud (*"førsteordens fasetransition"*)
  - Men kræver ny fysik, nye partikler. Hvor, hvilke?



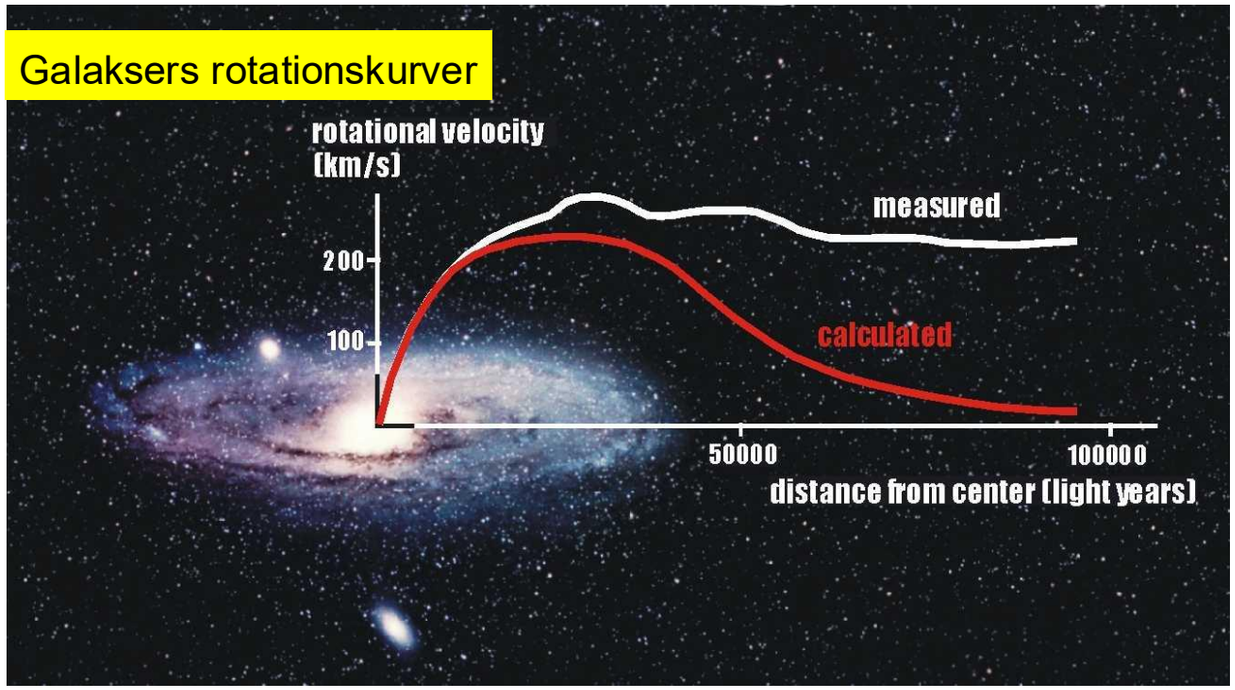


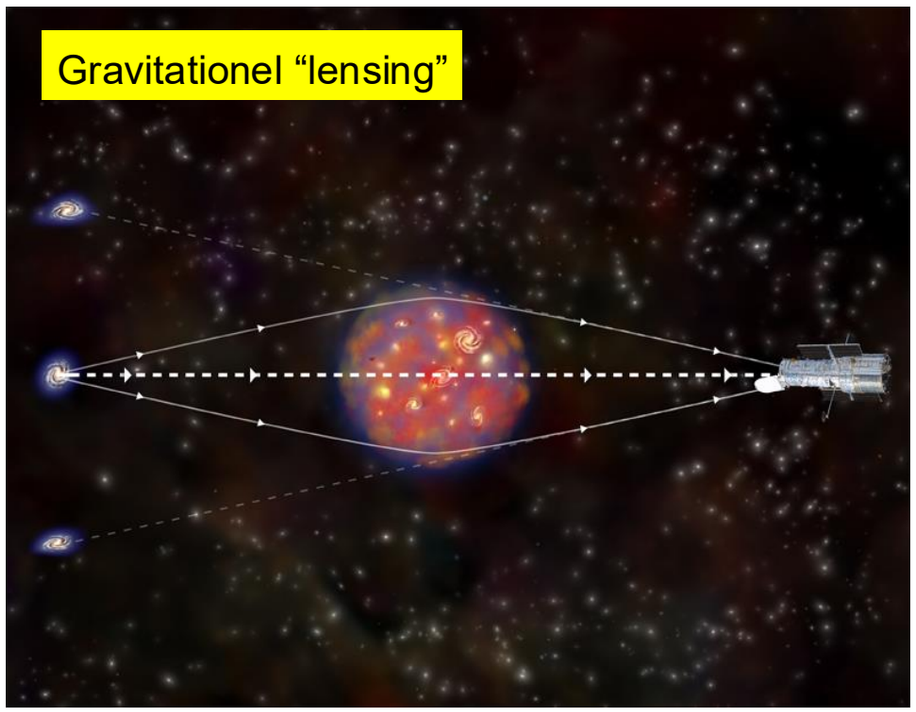


MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

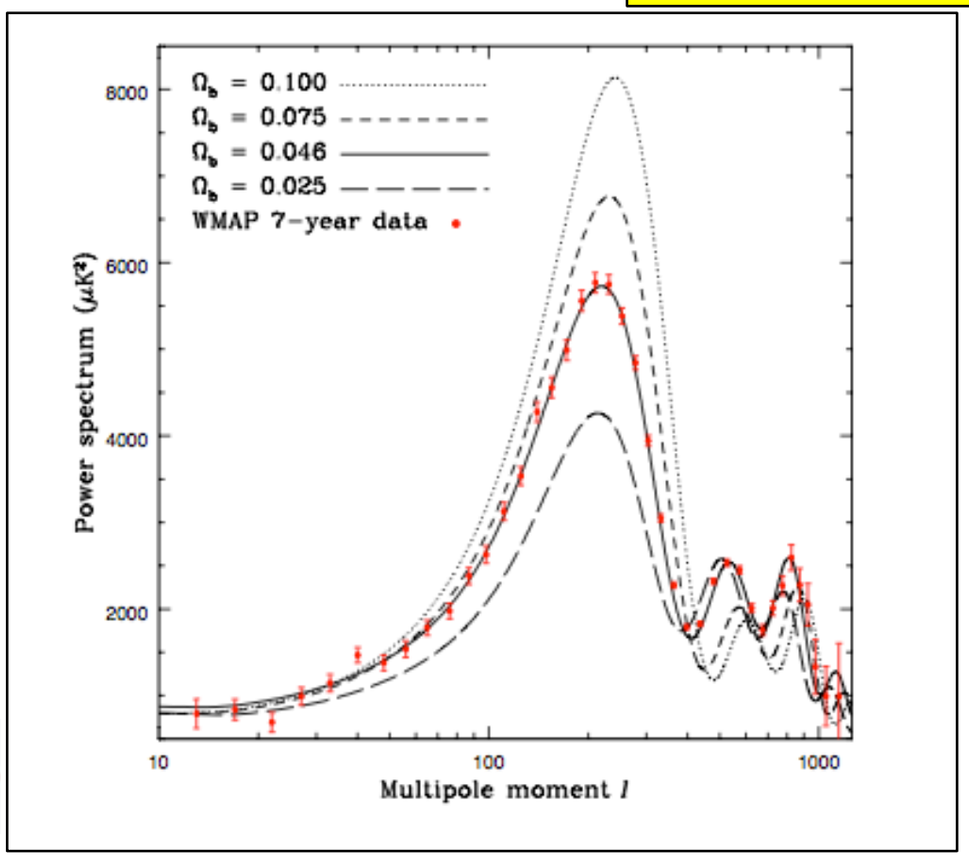
Mørkt stof - overvældende evidens

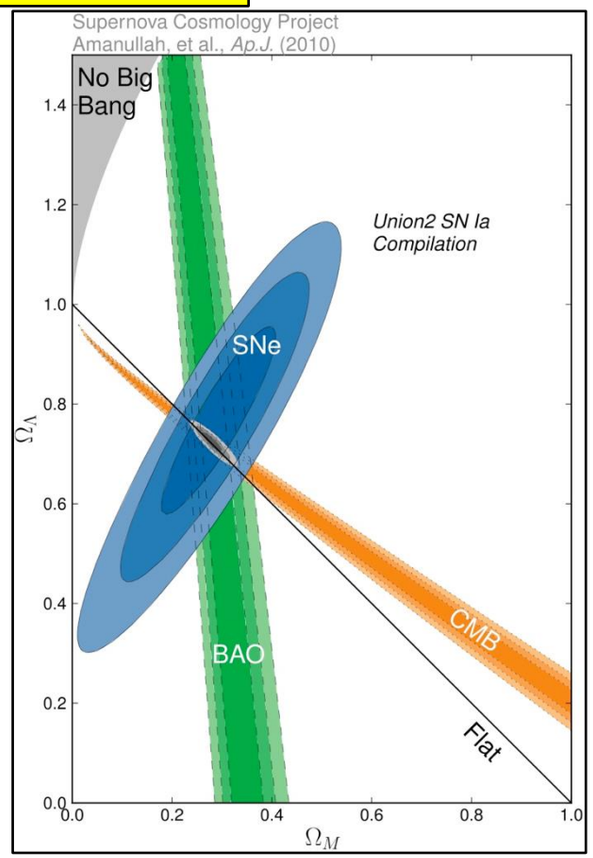
MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE



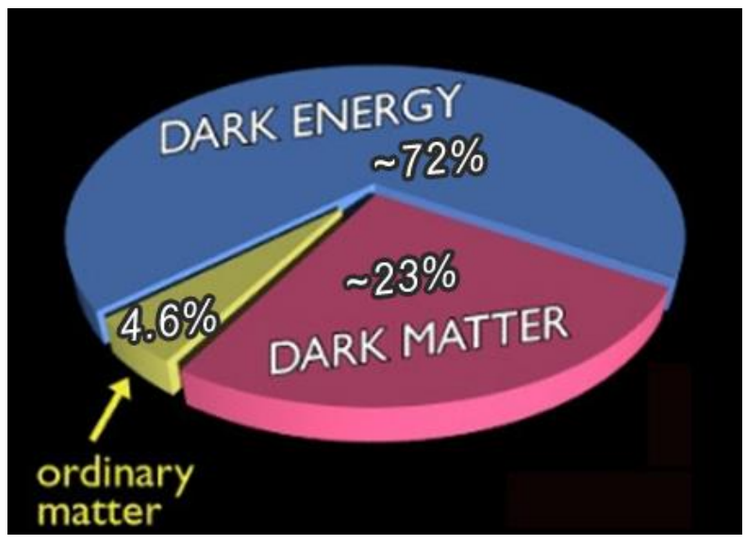


Cosmic microwave background





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



“Mørk energi”: spørg ikke mig…

- Har neutrinomasser samme forklaring som andre fermion-masser - altså Higgs-mekanismen ?

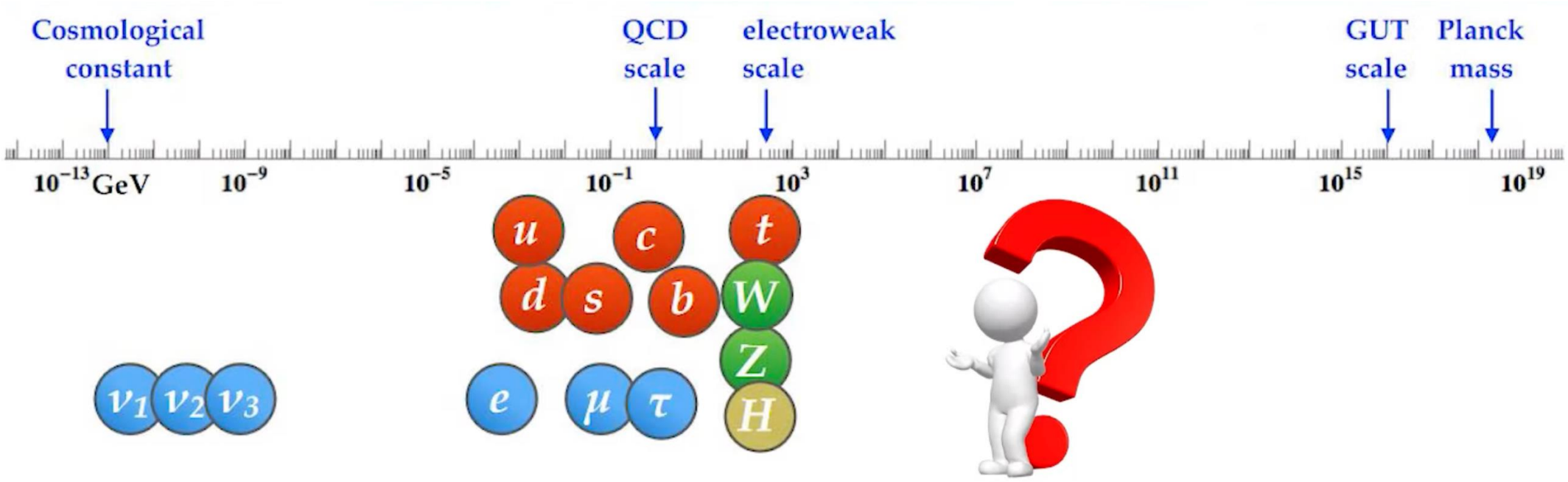
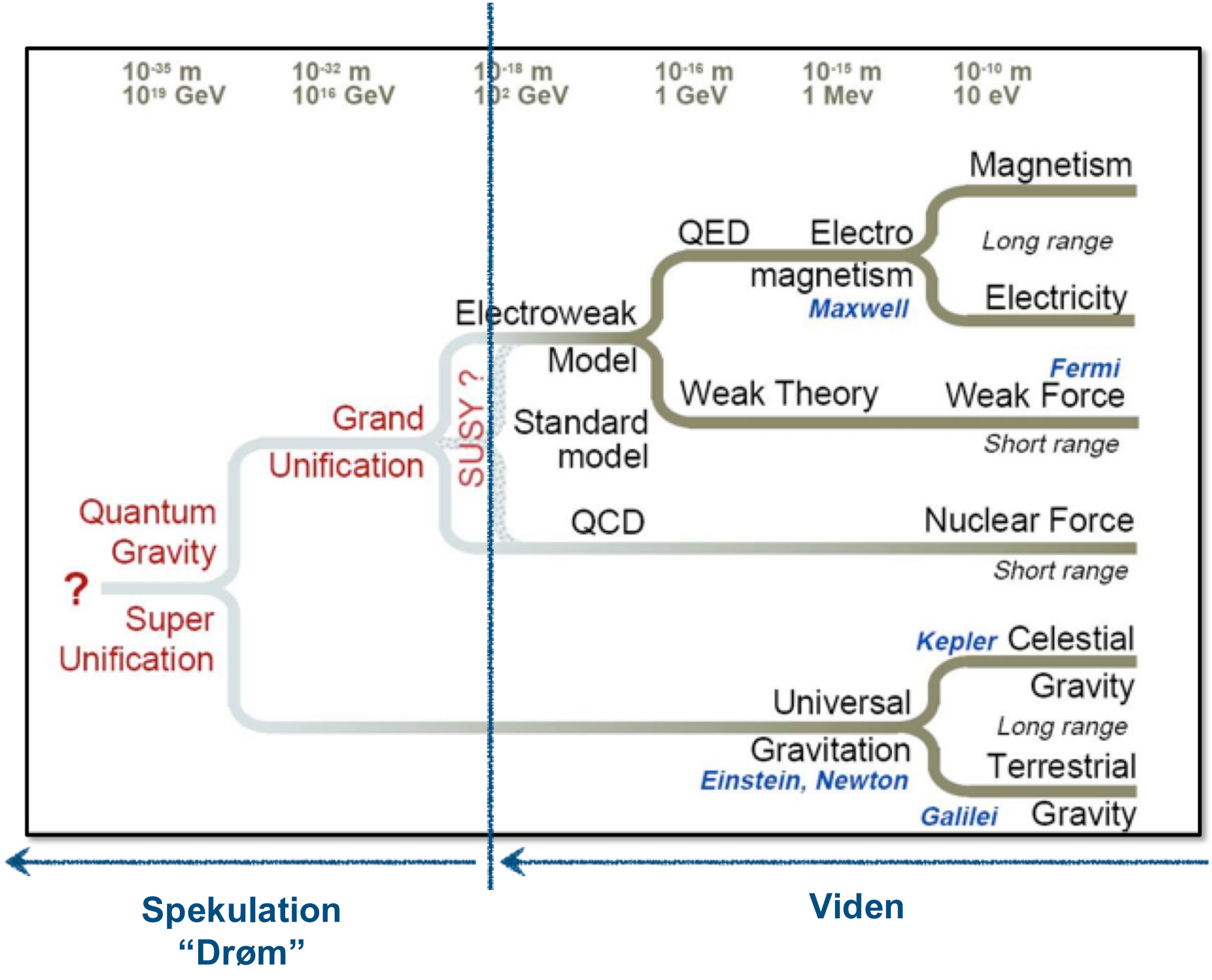


Fig. 1: The distribution of masses of the elementary particles, along with some of the relevant energy scales. The absolute values of neutrino masses are not known - their placement on the graph is indicative of the upper bound.

Udbredt opfattelse, at neutrinoer spiller en speciel rolle i Standmodellen:
- Ingen "ladninger": En neutrino kan være sin egen anti-partikel
- Atypiske små masser: Hvis masse via Higgs-mekanismen, så er deres koblinger til Higgs-feltet ekstremt svage (~10^{-12}). Hvorfor det?
  - Populær teori: "*See-saw mechanism*"



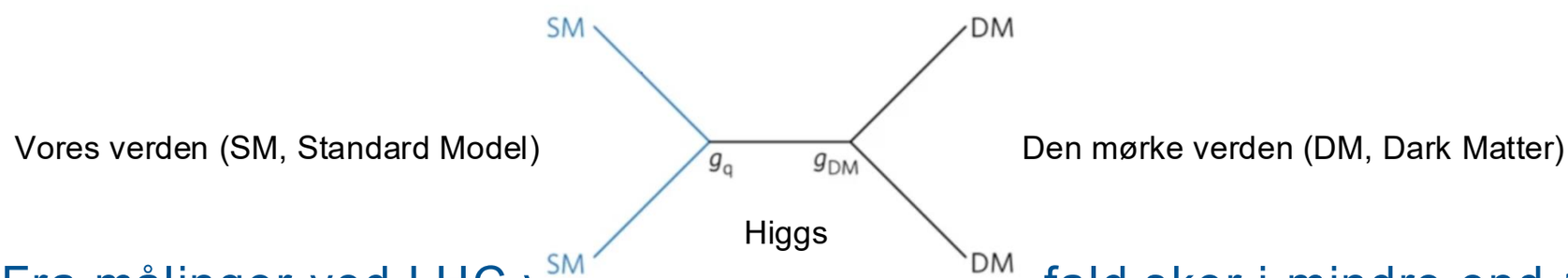
Kræfter og deres (mulige) forening



MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Hvad er Higgs-bosonen *egentlig* for en ?

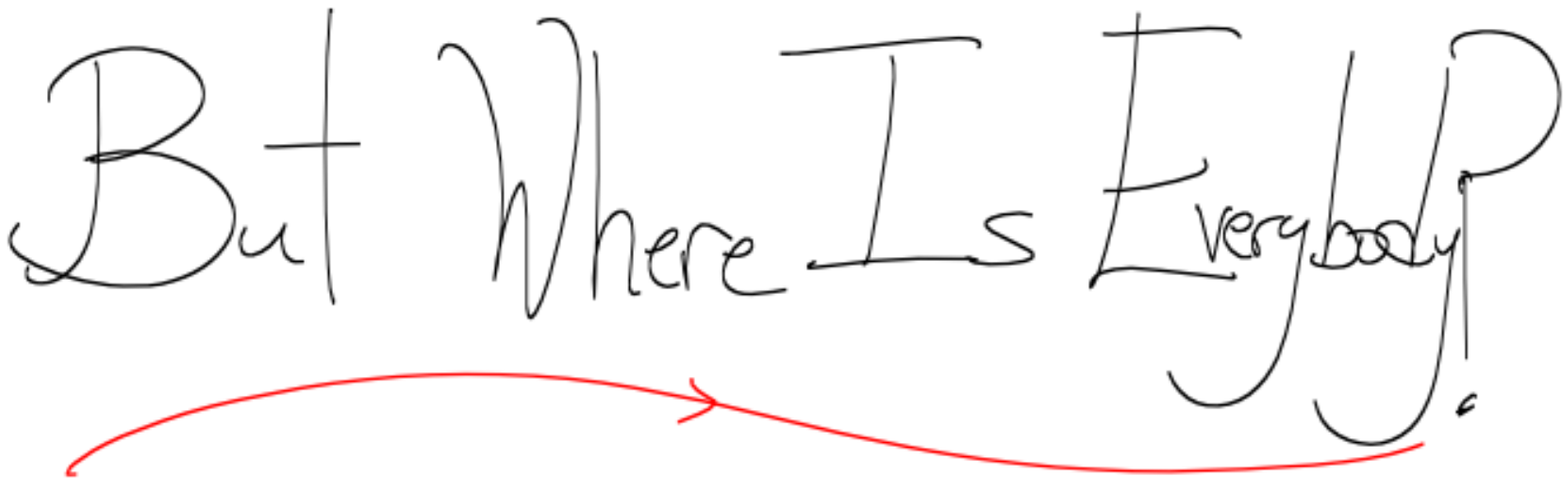
- Er Higgs-bosonen en elementær partikel eller er den sammensat ?
  - Hvis den er elementær, så er det den første elementære skalare (spin-0) partikel vi har observeret i naturen
    - En spin-0 partikel har helt særegne teoretiske "problemer" ("*Naturalness problem*") : Ingen symmetri beskytter dens masse fra at "løbe" til højere skalaer drevet af kvantekorrektioner. Pludselig er problemet, hvorfor Higgsen er så let (og ikke mange størrelsesordner tungere).
    - Den er den *første*, men er den også den *eneste* af sin slags? Findes der måske andre skalare partikler i naturen?
  - Hvis den er sammensat, så burde der vel findes eksisterede tilstande?
    - Yderligere tungere skalarpartikler? Eventuelt også spin-1-tilstande?
- Kobler Higgsen til mørkt stof? Danner den en portal til den mørke verden?
  - I givet fald ville en del af dens henfald være usynlige for vore detektorer



- Fra målinger ved LHC ved vi, at usynlige henfald sker i mindre end 10% af tilfældene

Ny fysik?

- Der findes mange forskelligartede teoretiske idéer til udvidelse Standardmodellen (med nye partikler)



Nima Arkani-Hamed

- Findes der ny fysik ved højere masser? Eller ved svagere koblinger? Eller måske ved begge ?
- Kun en måde at besvare: **Gå ud og kig efter !**
  - Direkte søgen ved højere masser:
    - Har brug for acceleratorer med højere energier

☞ Energy frontier

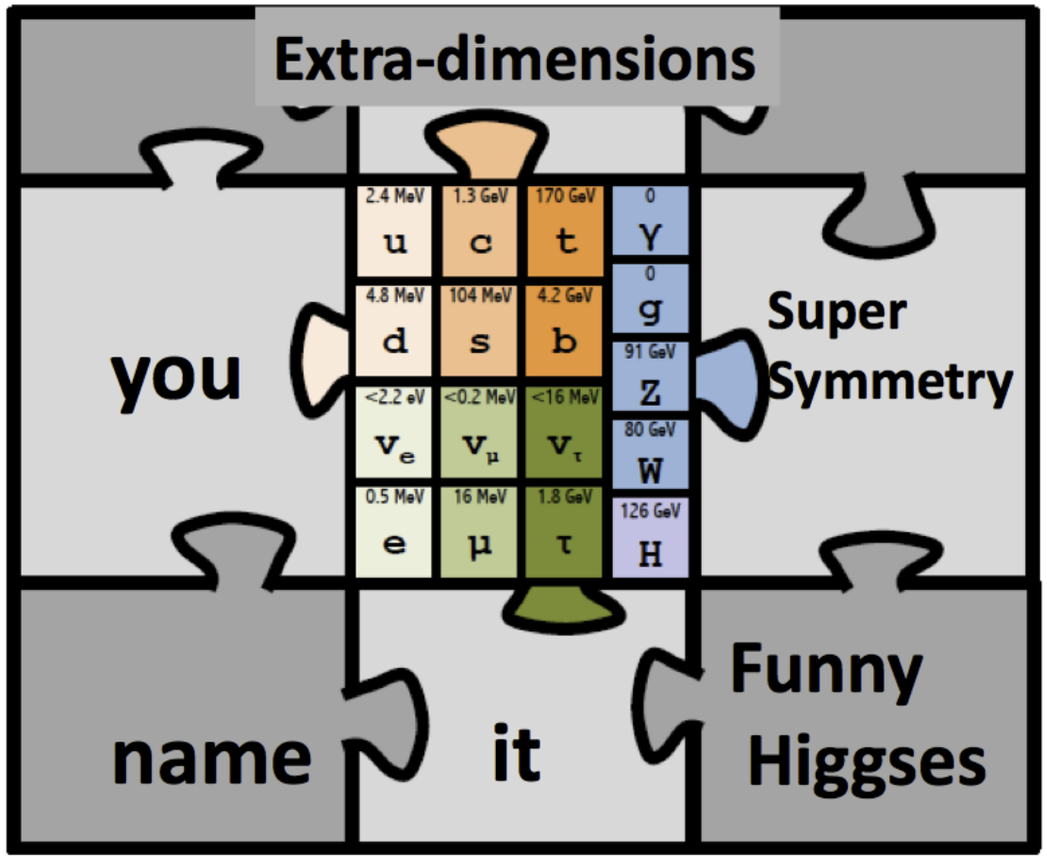
  - Søgen efter aftryk af ny fysik ved lavere energier, fx på egenskaberne af Z, W, top og Higgs:
    - Har brug for acceleratorer/målinger med højere præcision

☞ Precision frontier

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Ny fysik ved højere energiskalaer?

- Et populært paradigme har været, at ny fysik ville findes ved højere energiskalaer.
  - Standardmodellen anses for at være en del af en mere grundlæggende - ofte "mere symmetrisk" - teori.



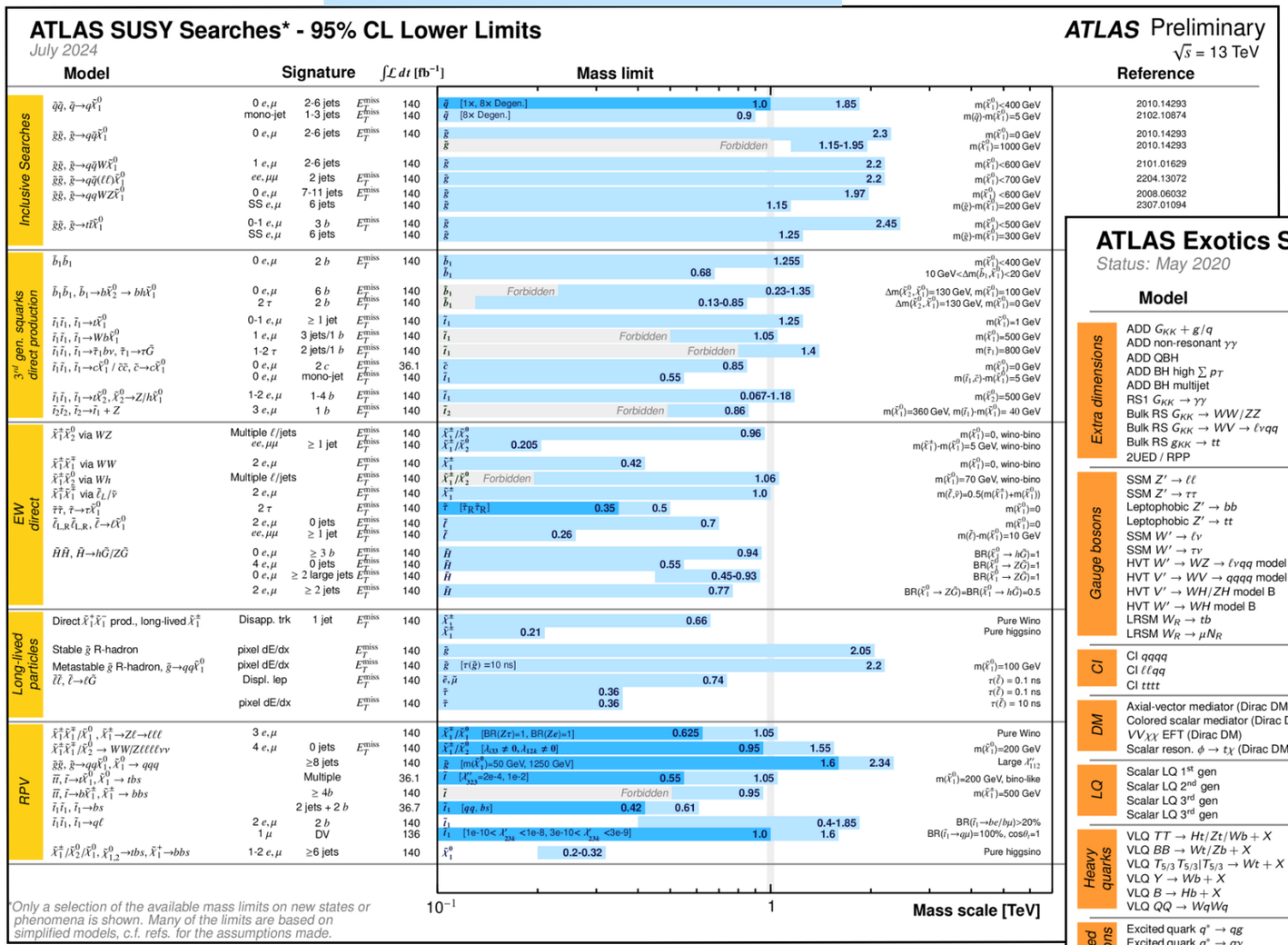
- Af mange årsager, bl.a. for at løse "Naturalness problem", forudsiges det oftest at nye partikler ikke ligger langt over vores kendte energiskala
  - LHC-resultaterne har betydet en delvis skuffelse for denne retning.

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

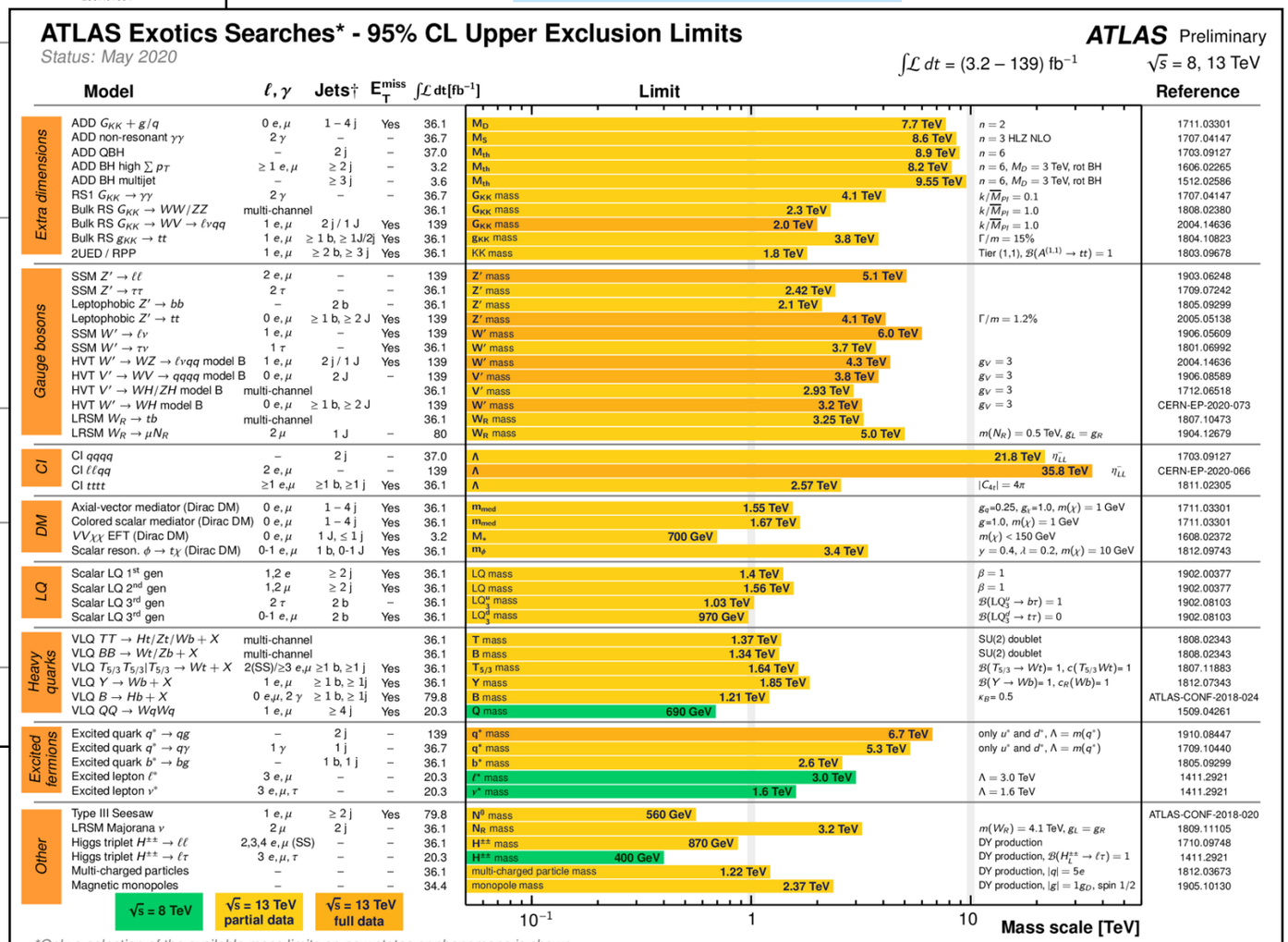
Beyond Standard Model Searches ved LHC

- Mange forskelligartede søg efter “ny fysik” ved LHC
  - Until videre ingen nye, BSM partikler fundet;
  - Etablerede grænser er med til at begrænse teoretiske “spekulationer”

Supersymmetriske partikler

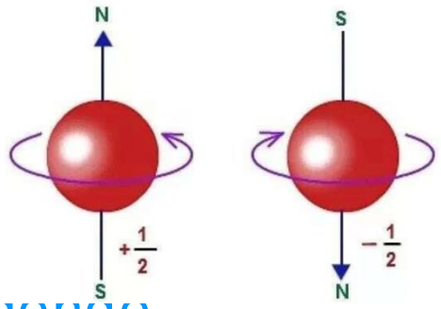


“Eksotiske” partikler

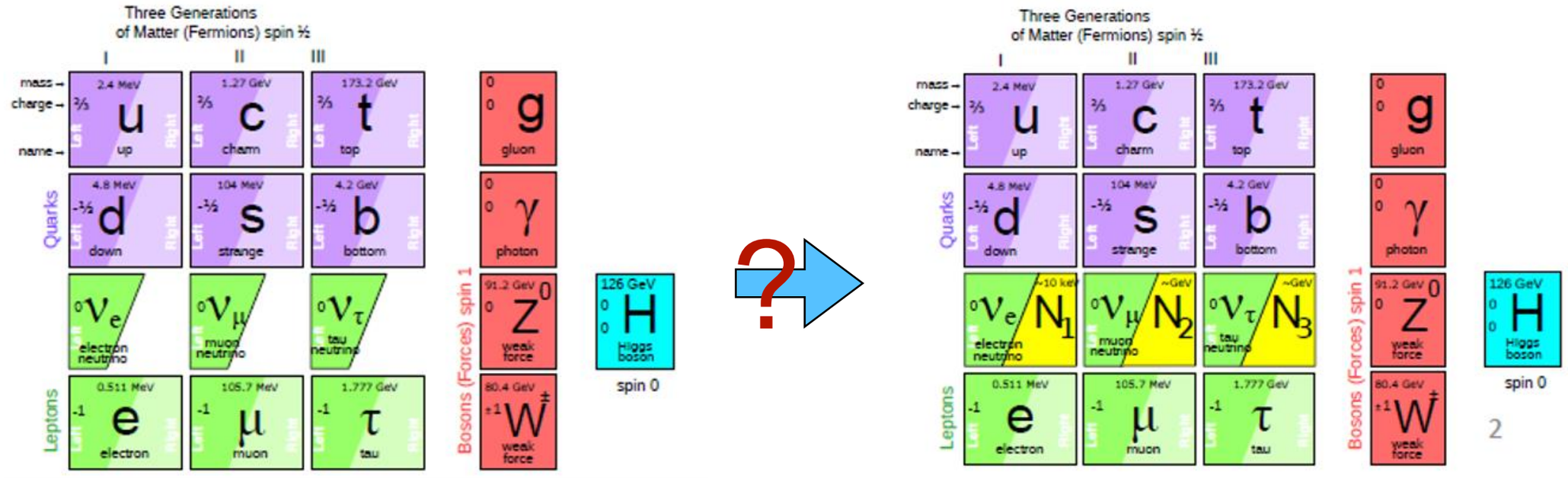


MO

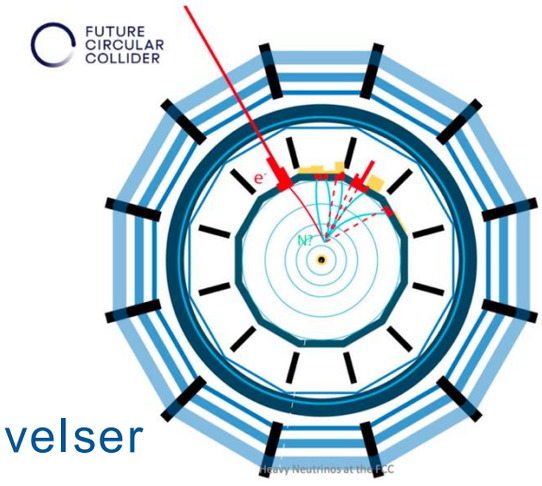
Højrehåndede neutrinoer ?



- Standardmodellen er komplet… Eller er den nu også det?
  - Husk, at fermioner optræder i to spin-tilstande
    - Kun den ene ("venstrehåndede") deltager i svag vekselvirkning
  - Alle *ladede* fermioner optræder som både højre- og venstre-håndede
  - Men neutrinoer kun som venstrehåndede !!



- Introducér tre højrehåndede neutrinoer (N_1, N_2, N_3)
  - Ville vekselvirke ekstremt svagt med sædvanlige partikler
  - Men kunne potentielt forklare næsten alt
    - i) Små neutrino masser, ii) mørkt stof, iii) stof-dominans i universet
  - Ville kunne observeres
    - Ved "eksotisk", ekstrem sjældne Z henfald: Z → vN → "sen monojet"
    - Observation ville kræve et meget stort antal af Z-bosoner i "rene" omgivelser



MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Den nære fremtid: LH-LHC

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUT

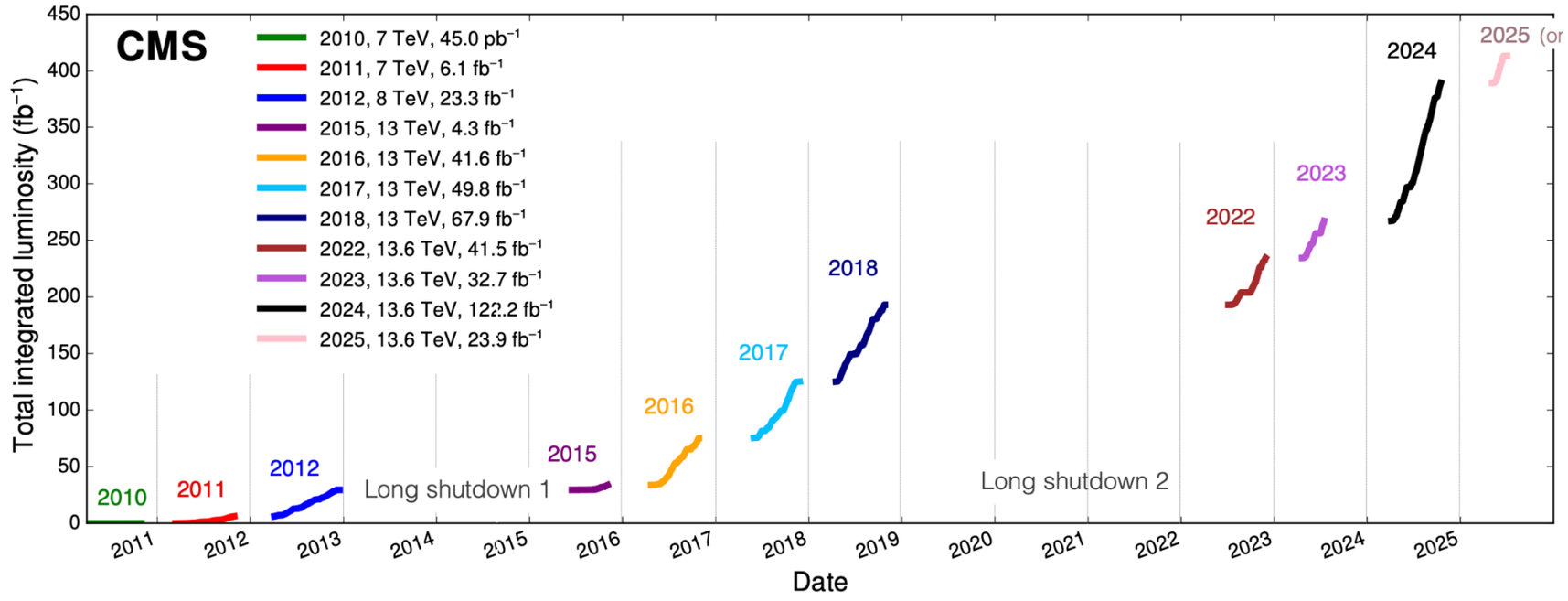
MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Den nære fremtid: LH-LHC

LH = High Luminosity = meget høj event rate

LHC alive and kicking

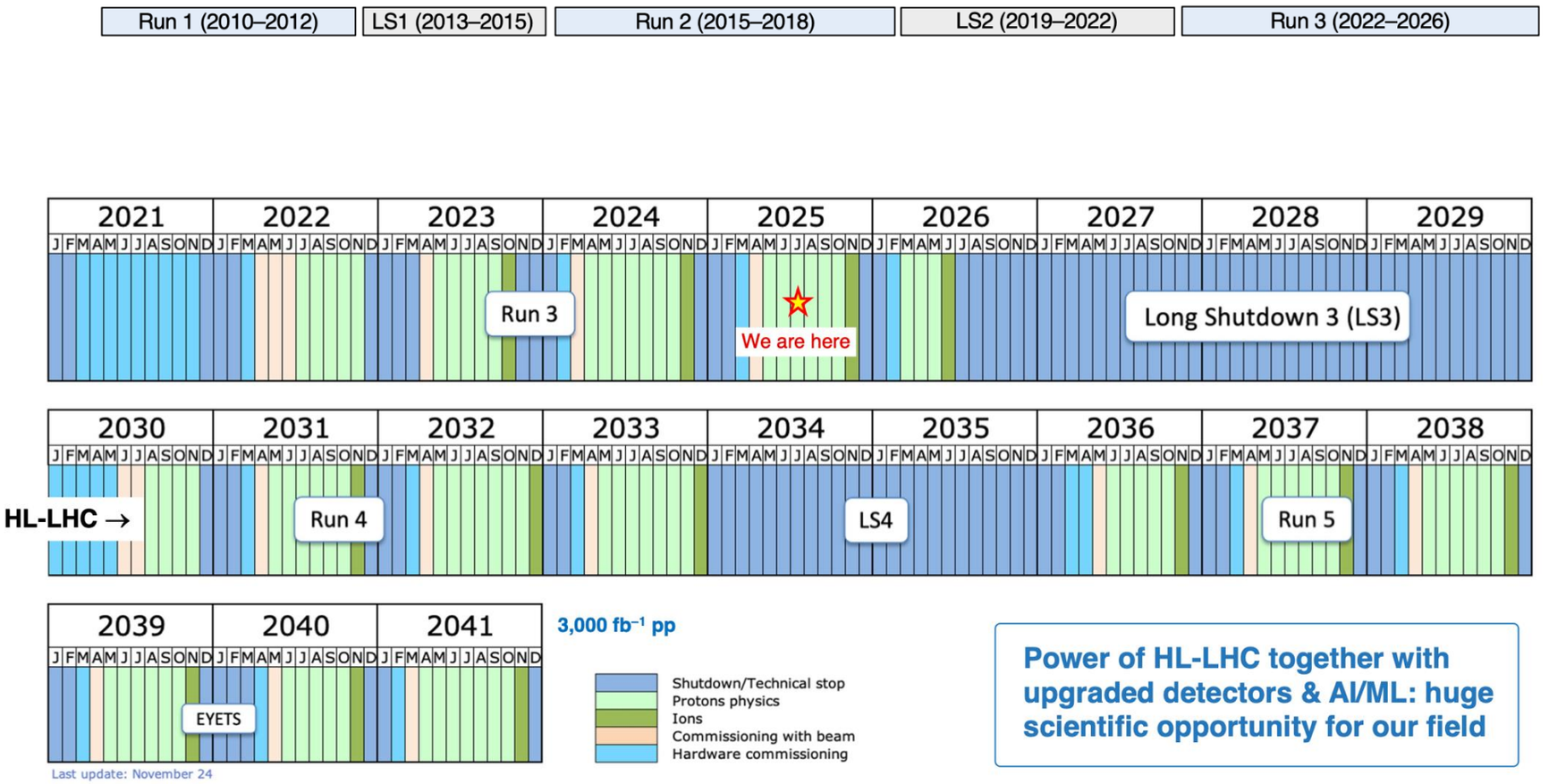
Fra opstart i 2010 til i dag, data-indsamling med stigende rate



Plan for at køre frem til 2041.

Fra 2030 HL-LHC:
- 5-7 gange højere rate.

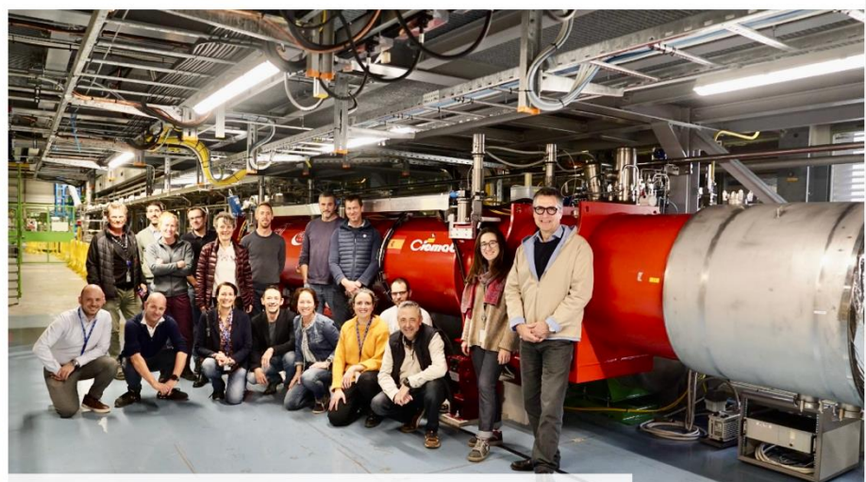
Froventer at indsamle i alt omkring faktor 10 mere data end vi har i dag



MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Accelerator upgrade

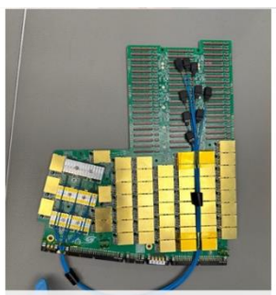
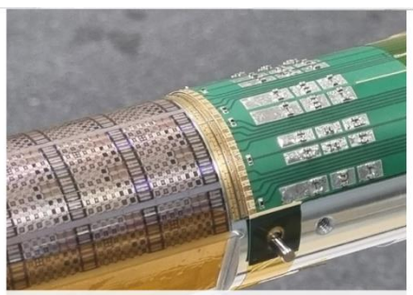
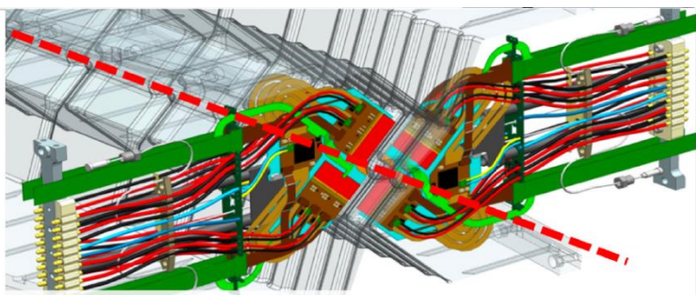




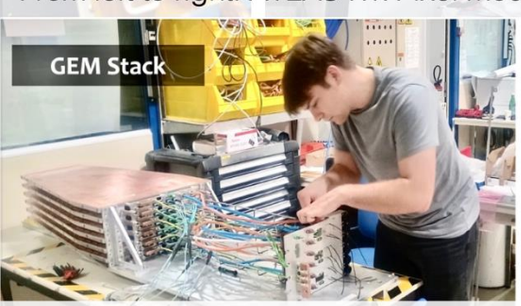
Fully realistic inner triplet string test facility at CERN, from left to right: installation of superconducting link, installation of D1 and Q2a cryo-assemblies, tests to start in Oct 2025

Detector upgrade

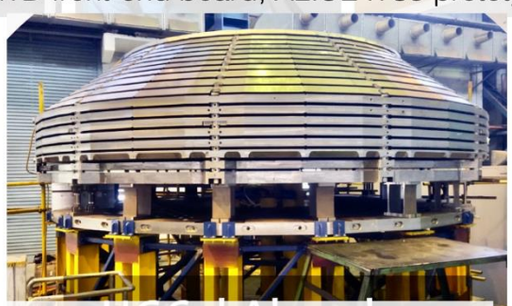
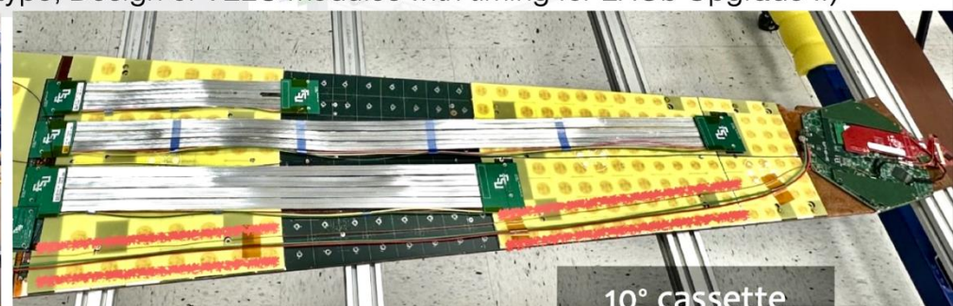


From left to right: ATLAS ITk Pixel modules, Strip module production cleanroom, HGTD front-end board, ALICE ITS3 prototype, Design of VELO modules with timing for LHCb Upgrade II)





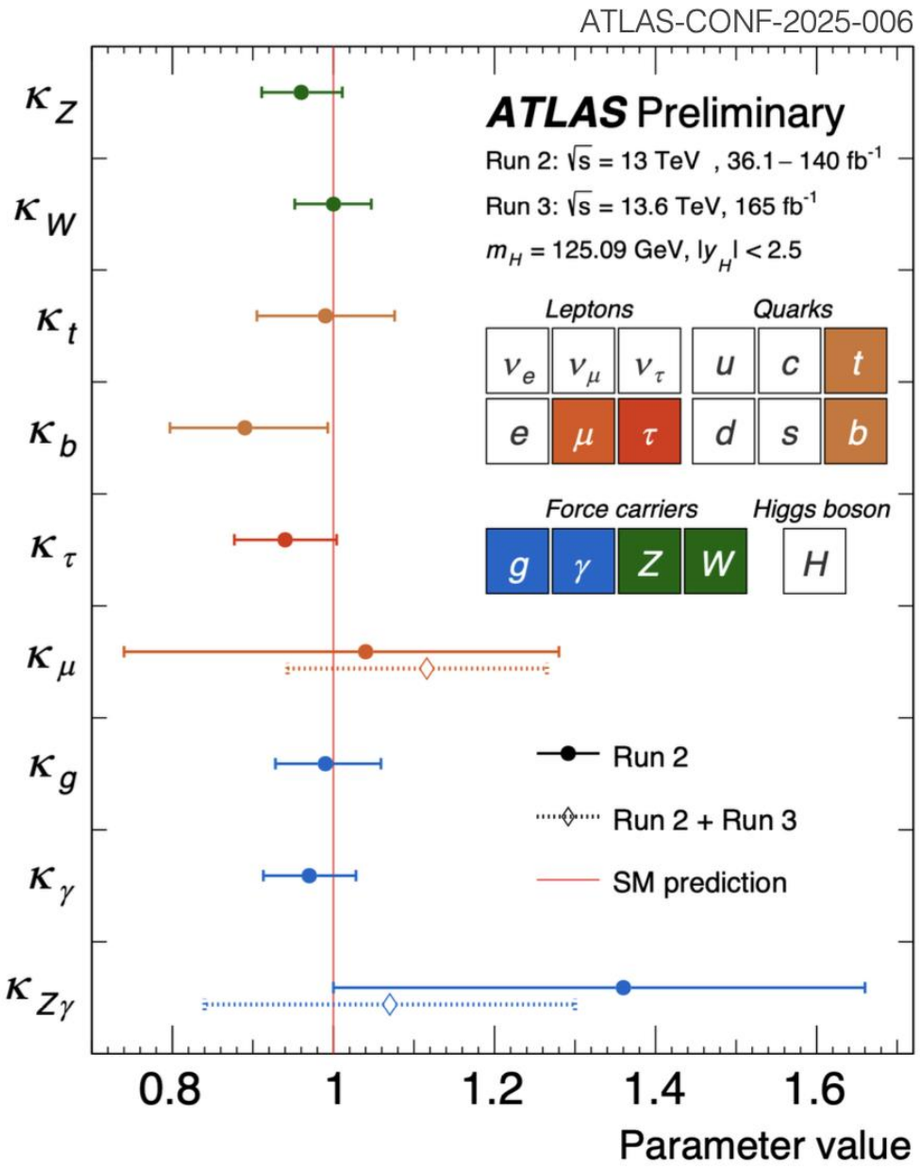
From left to right: CMS muon MEo (GEM) assembly, outer tracker ladder with modules, HGCAL cassette and absorber

HL-LHC: Højere præcision på Higgs-koblinger

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

2025

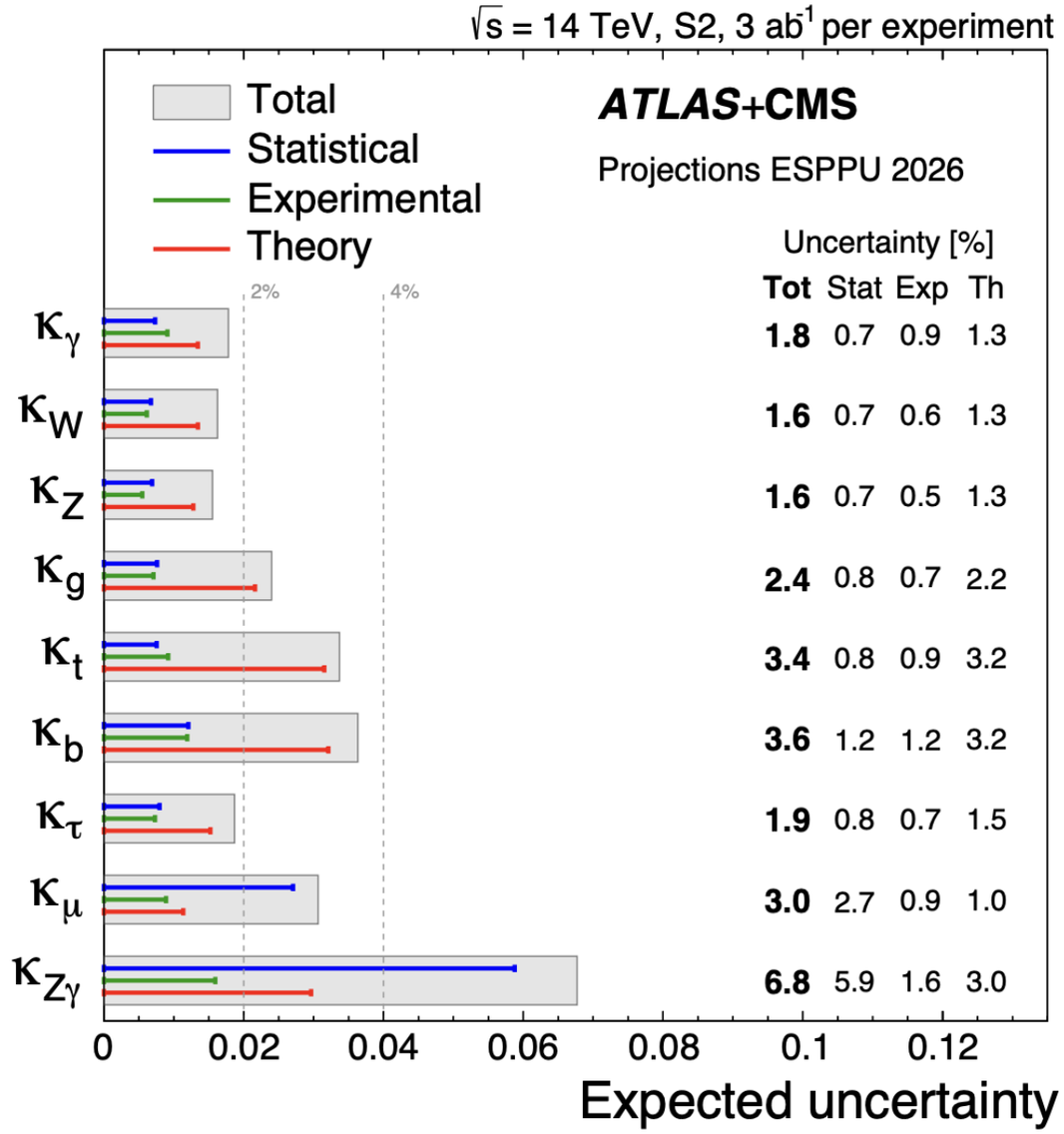
ATLAS Experiment, Run 2 + Run 3



Typisk præcision: 7-20%

Forudsigelse for 2041

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

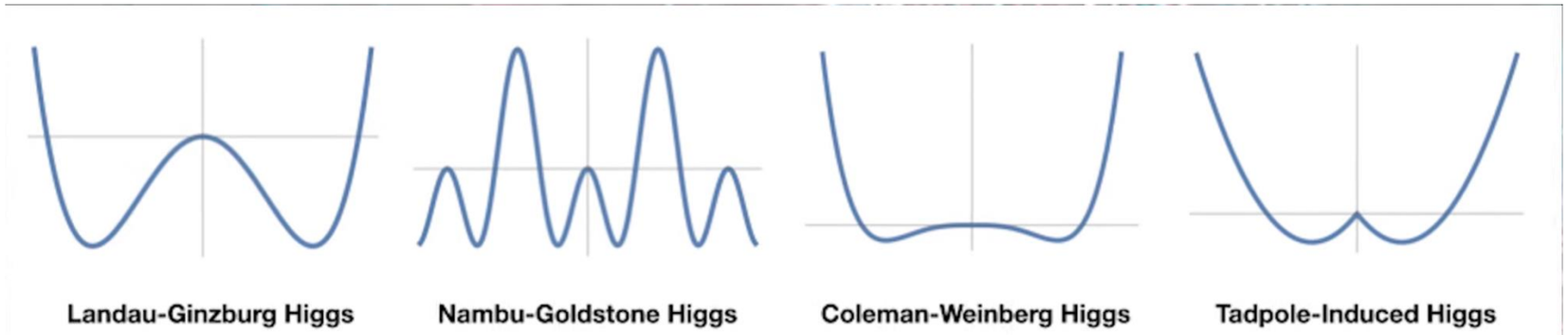


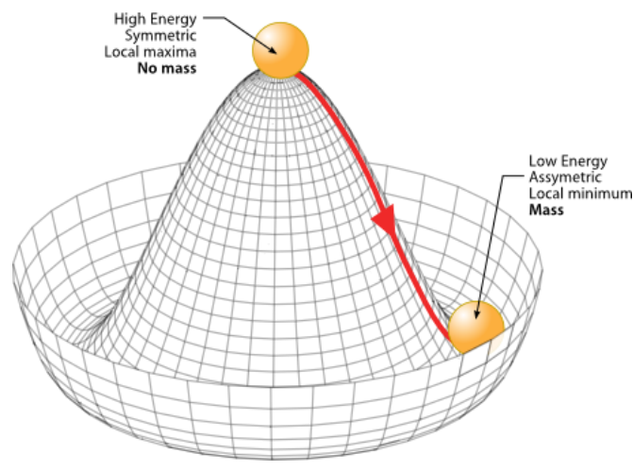
Typisk præcision: 2-4%

Begynder at nærme sig en virkelig interessant præcision:
Typiske BSM-teorier forudsiger afvigelser fra SM på ‰-%-niveau

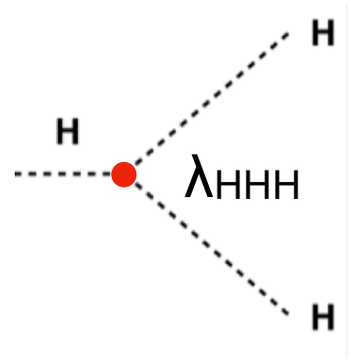
HL-LHC: Higgs'ens selvkobling

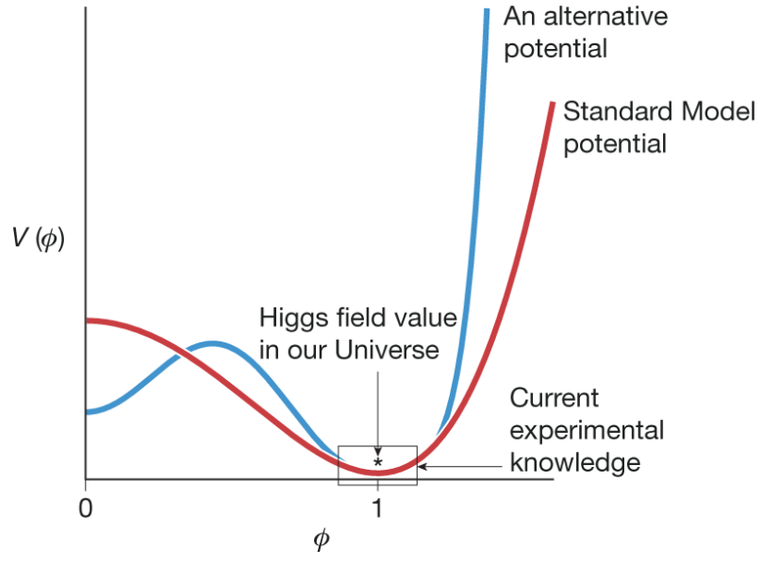
- Higgs-potentialet introduceredes *ad hoc* i teorien for at give masser til partiklerne.
- Valget af "den mexikanske hat" er det simpleste valg vi kunne gøre, men det er langt fra unikt!





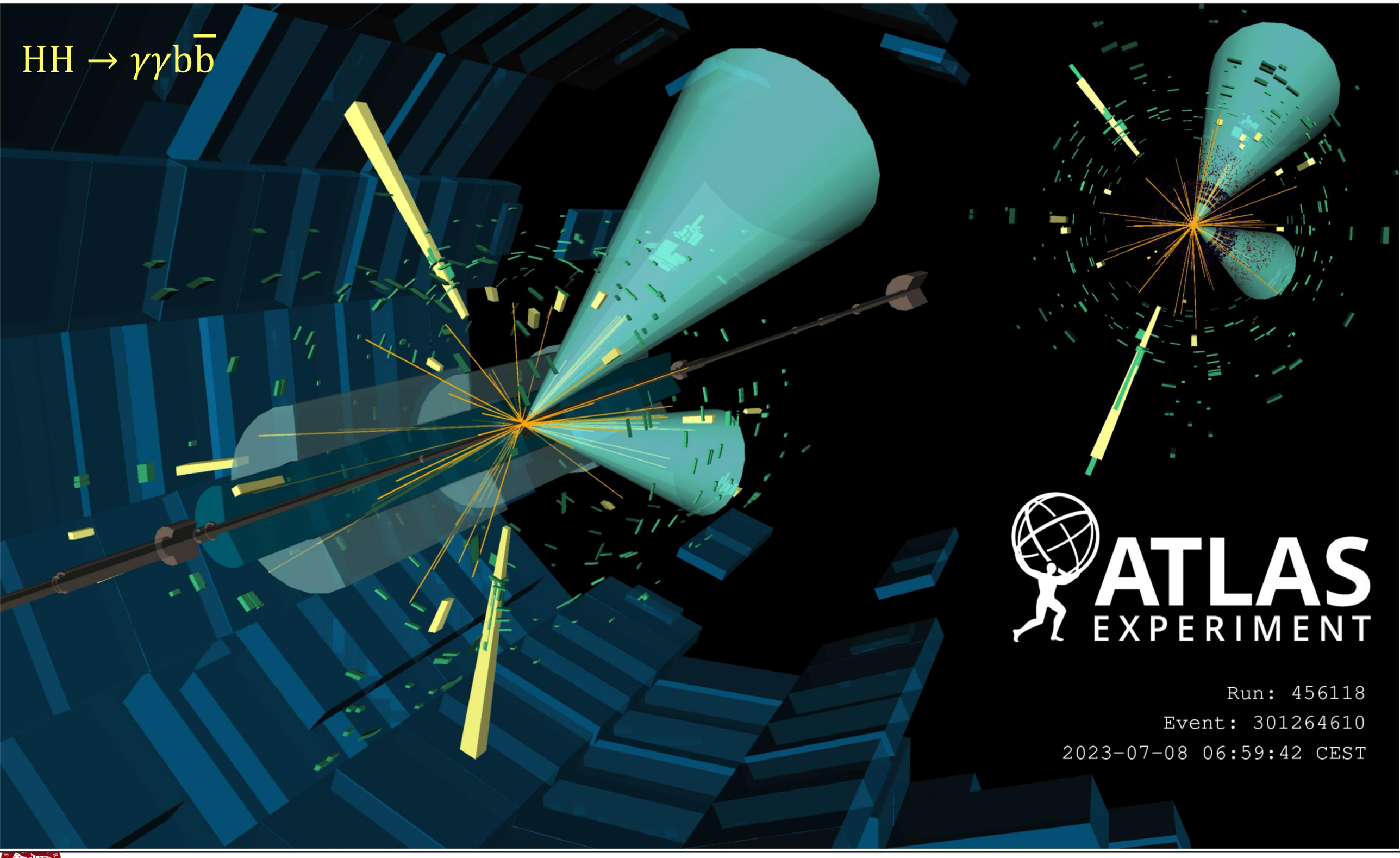
- Hvordan kan vi eftervise, og dette valg også er det rigtige? At dette er valget naturen gjorde?
- Styrken hvormed Higgs'en kobler til sig selv, λ_{HHH}, er sensitiv til formen på potentialet
- Vanskelig måling: Kigger efter begivenheder med 2 Higgs'er.
  - Yderst sjældne
- Efter det fulde HL-LHC-program med to eksperimenter forudser vi at ville kunne måle λ_{HHH} med en præcision på omkring 25%.
  - En af de mest spændende målinger ved HL-LHC





MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

101 Two-Higgs Candidate Event

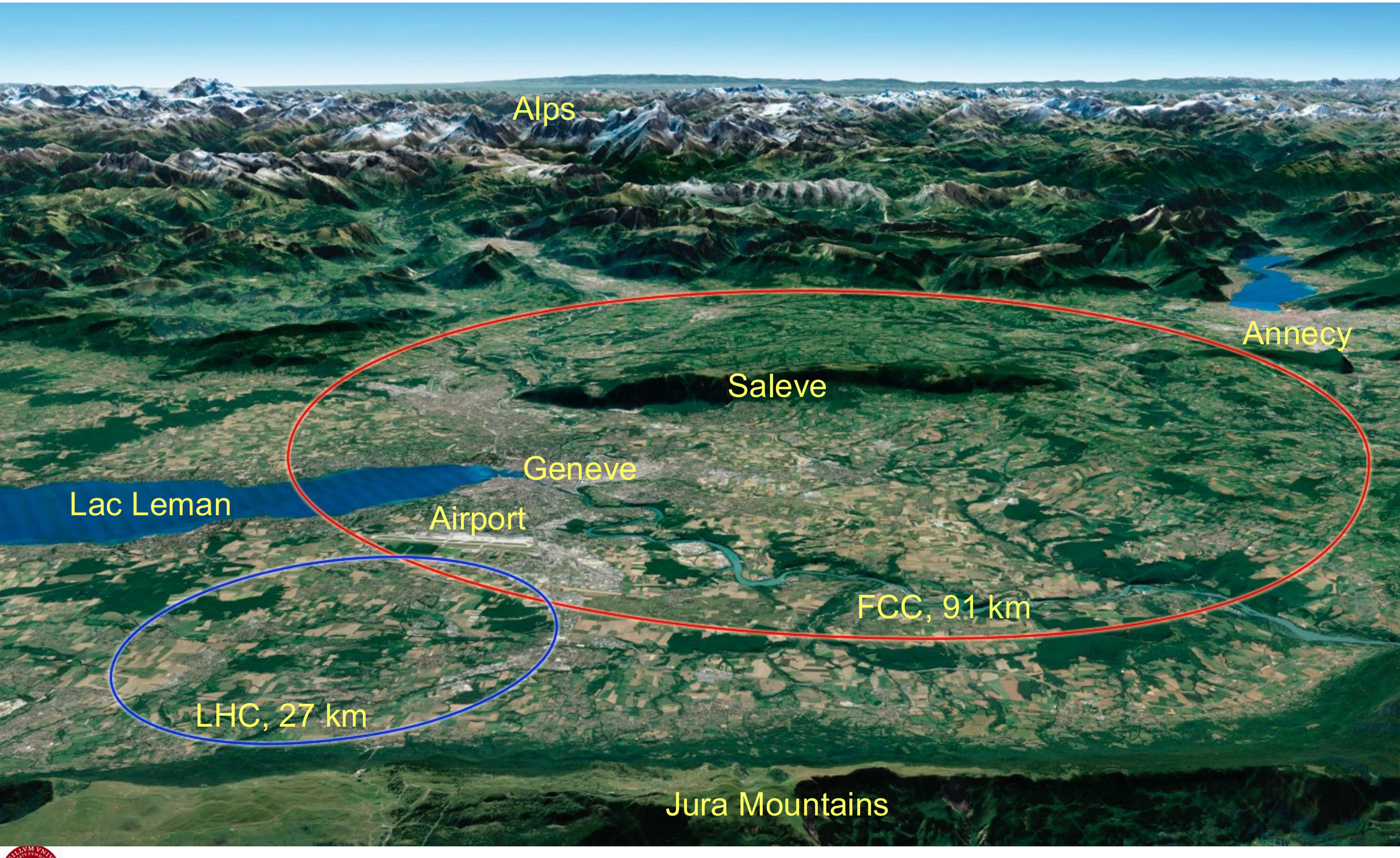


MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

En mulig fremtid:

FCC - Future Circular Collider

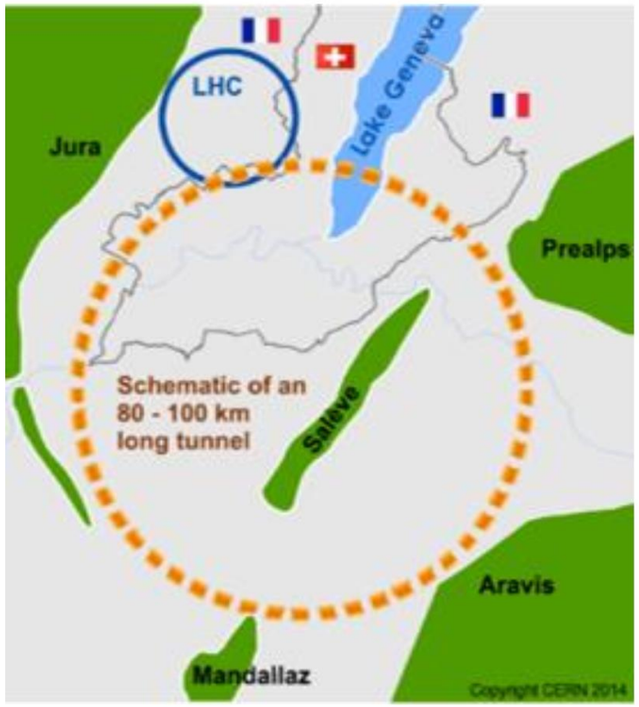
Future Circular Collider



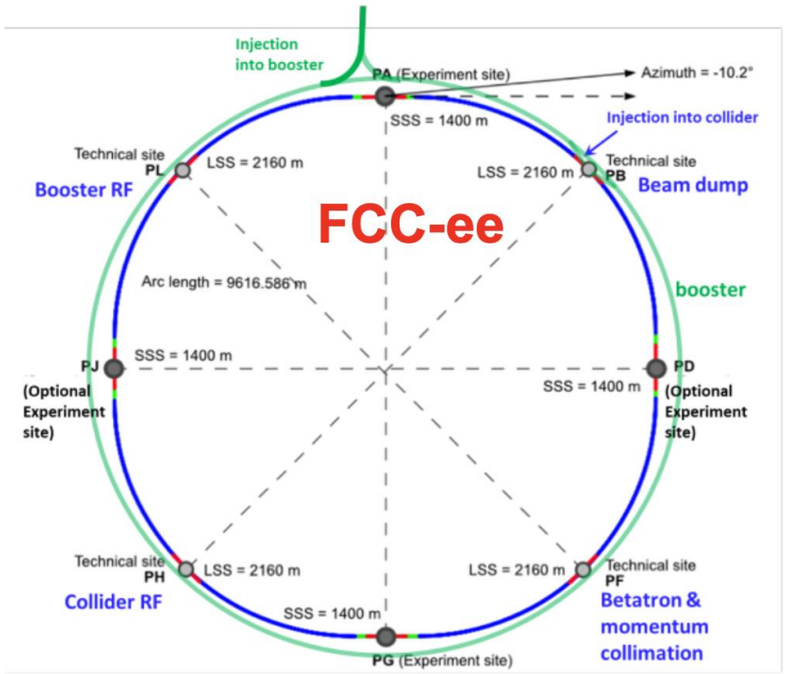
FCC 19 May 2025

FCC integrated program – scope and timeline

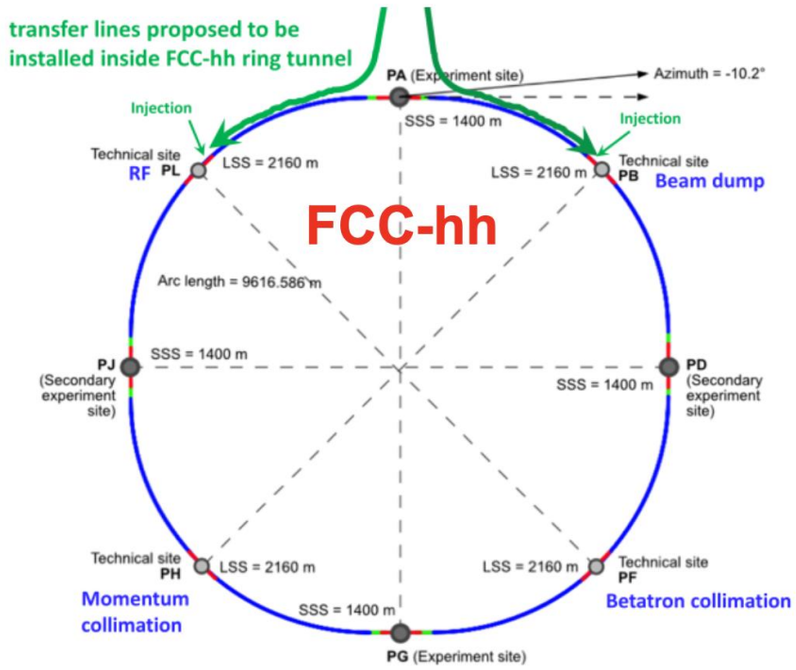
- **stage 1: FCC-ee (Z, W, H, tt̄) as Higgs factory, electroweak & top factory at highest luminosities**
- **stage 2: FCC-hh (~100 TeV) as natural continuation at energy frontier, pp & AA collisions; e-h option**
- highly synergetic and complementary programme maximising the physics opportunities
- common civil engineering and technical infrastructures, building on and reusing CERN's existing infrastructure
- FCC integrated project allows the start of a new, major facility at CERN within a few years of the end of HL-LHC



2020 - 2045



2045 - 2065



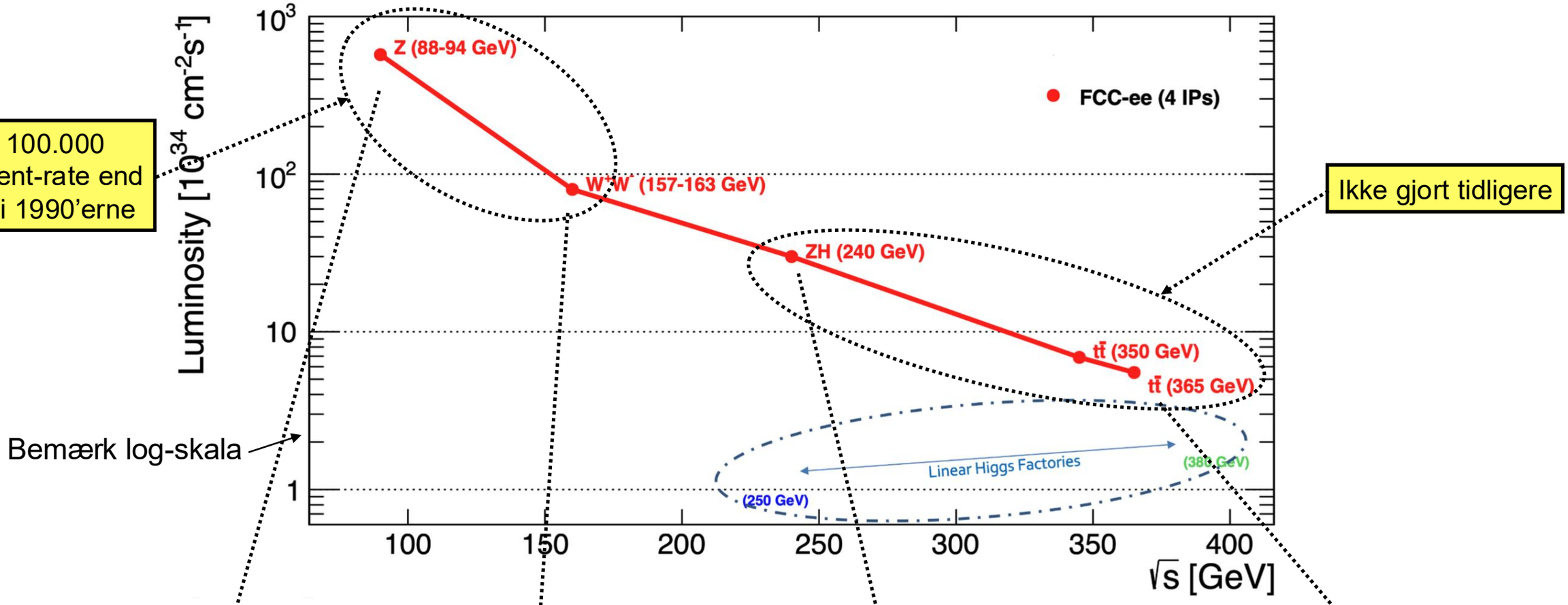
2070 - 2100

☞ Precision frontier

☞ Energy frontier

Høj-præcisions-studier af Standardmodellens fire tungeste partikler

elektron-positron-sammenstød



Faktor 100.000 højere event-rate end ved LEP i 1990'erne

Ikke gjort tidligere

Bemærk log-skala

6 × 10^{12} Z-bosoner på 4 år

2.4 × 10^{8} WW-par på 2 år

1.5 × 10^{6} Higgs- bosoner på 3 år

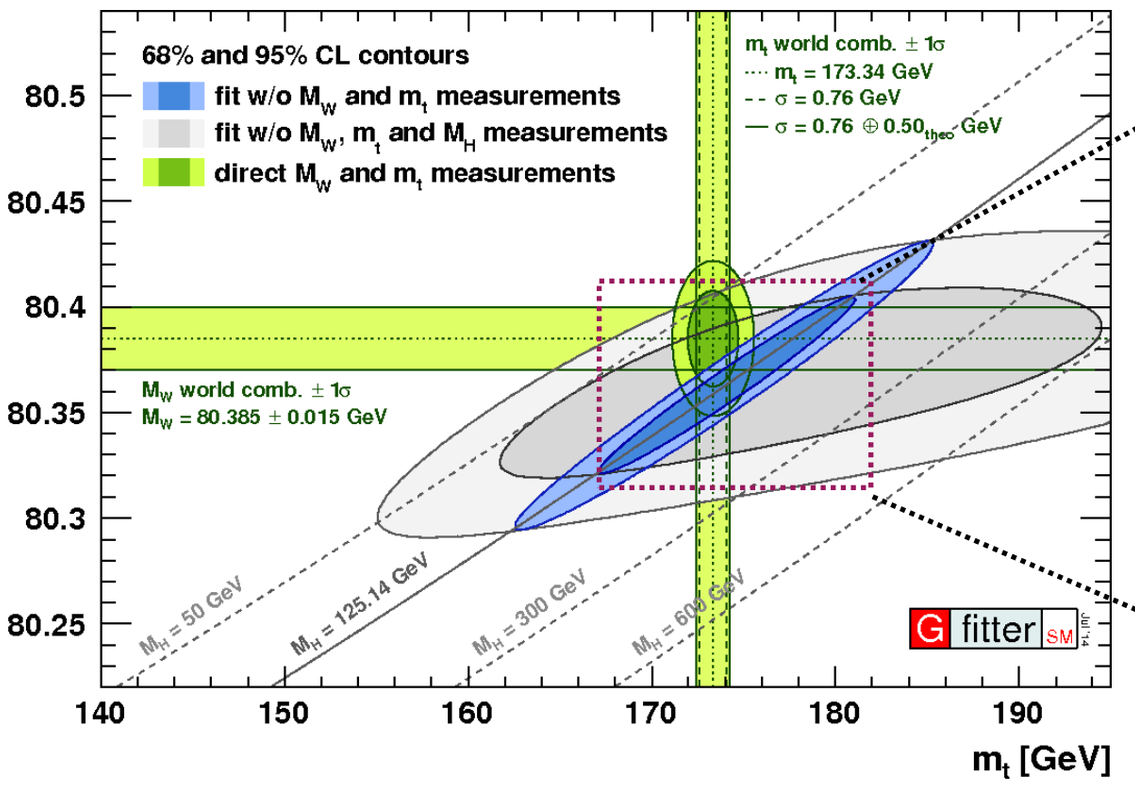
1.9 × 10^{6} top-kvarker på 5 år

LEP

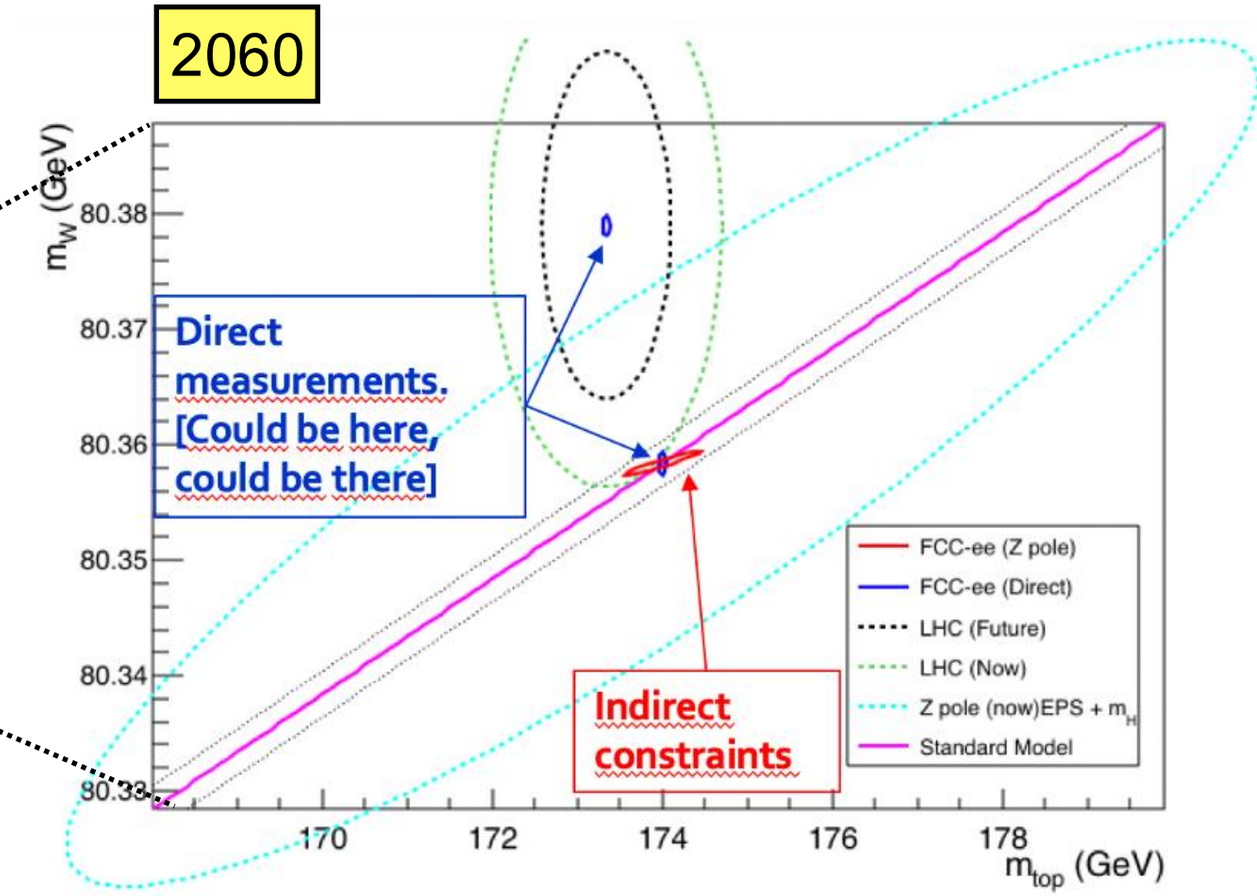
MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Generelt en faktor 10-100 forbedring af præcision

I dag



2060



Indirekte følsomhed over for ny fysik op til energier på ~7 TeV

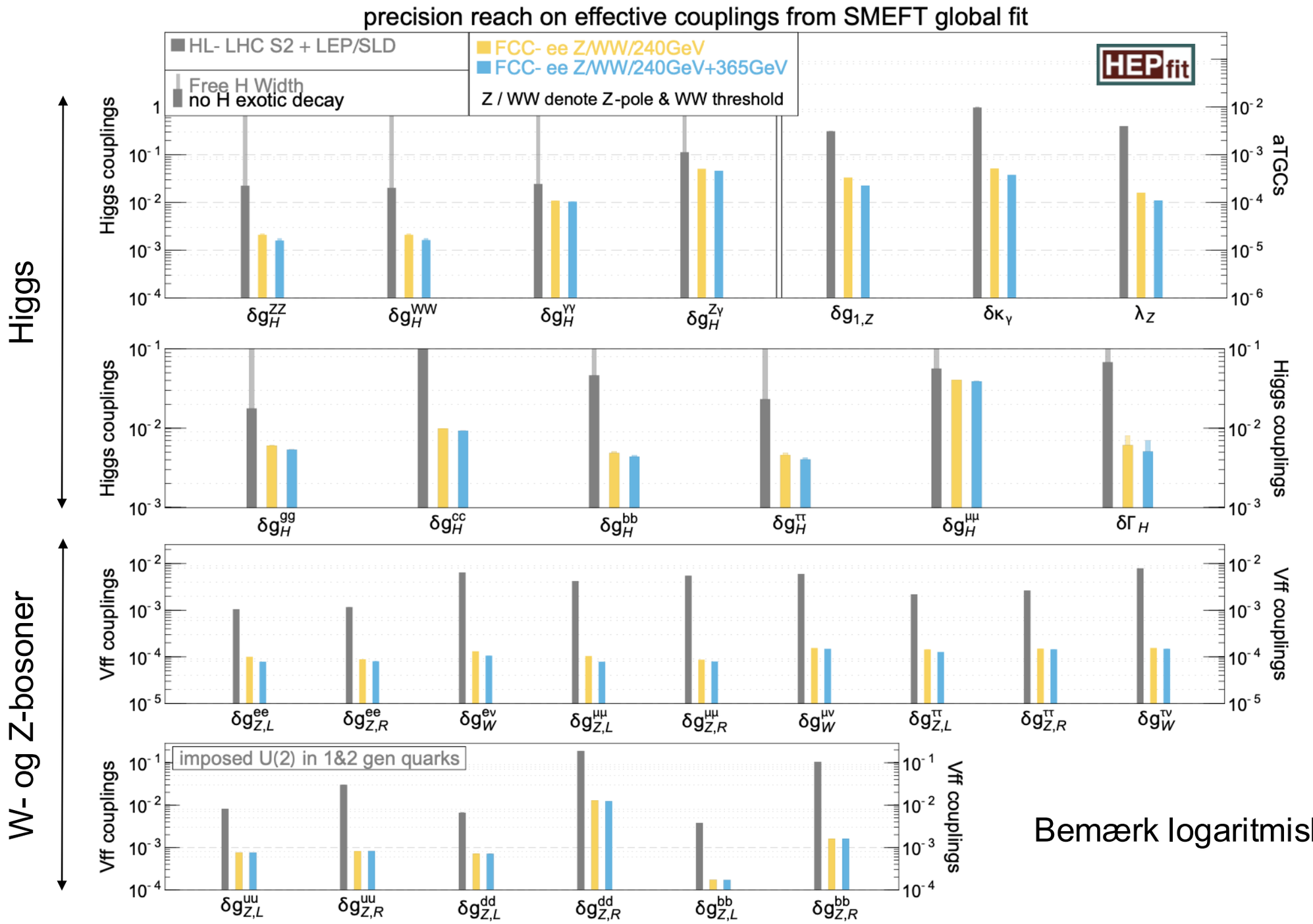
Indirekte følsomhed over for ny fysik op til energier på ~70 TeV

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Øget præcision: Higgs-koblinger

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

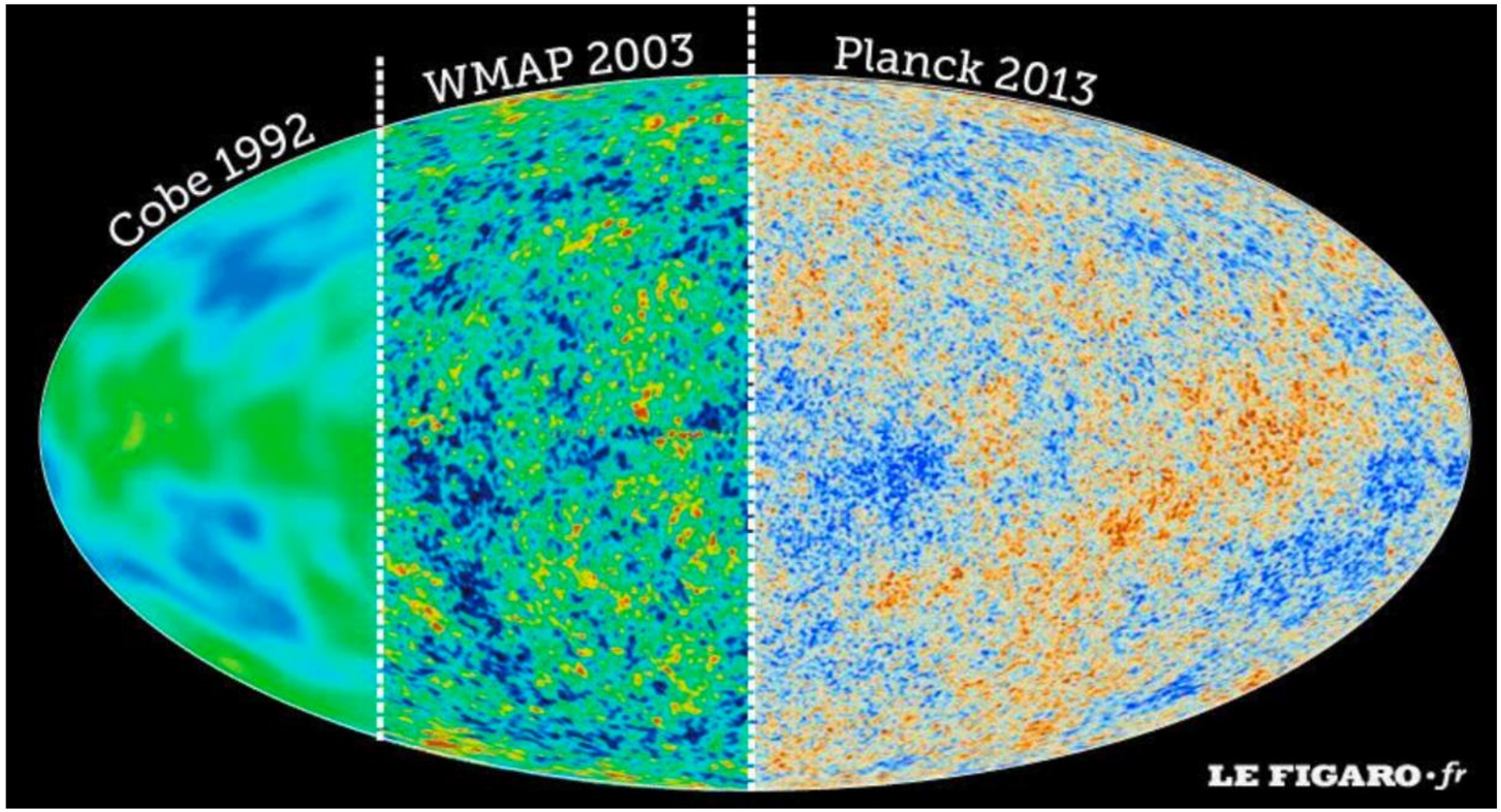
HL-LHC ➔ FCC-ee ➔ FCC-hh



Bemærk logaritmisk skala

Generelt en faktor 10 højere præcision

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE



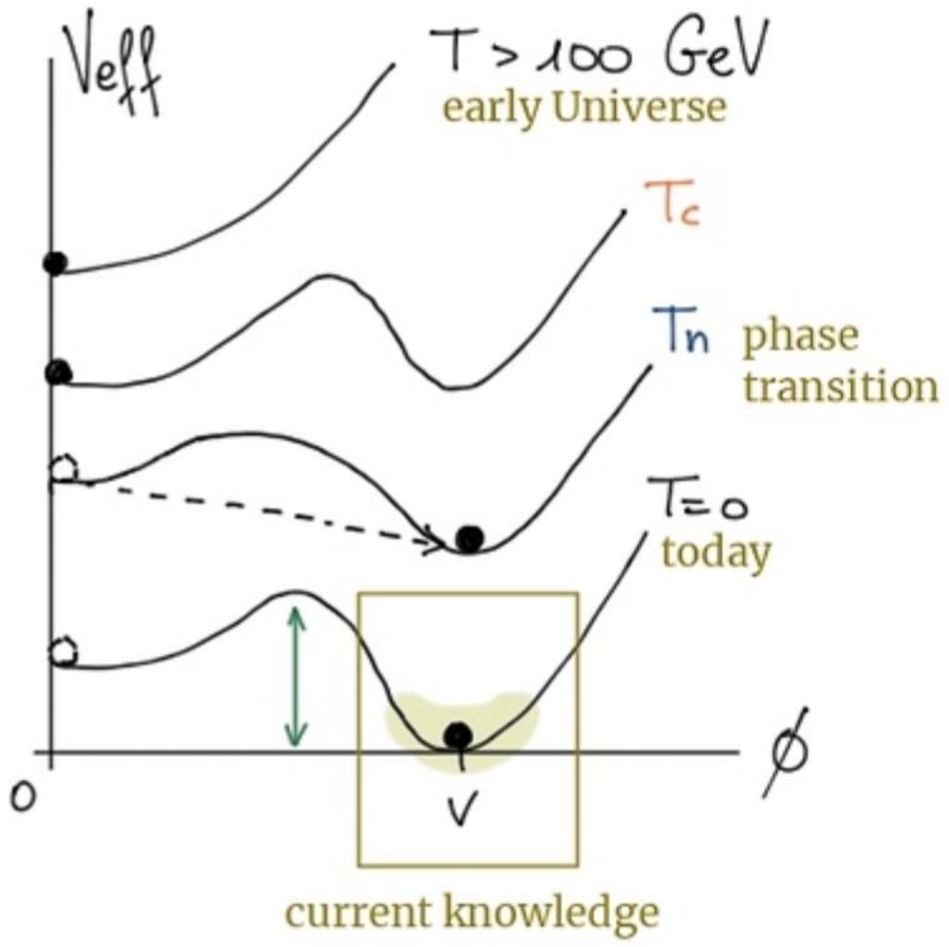
Øget opløsning afslører underliggende struktur

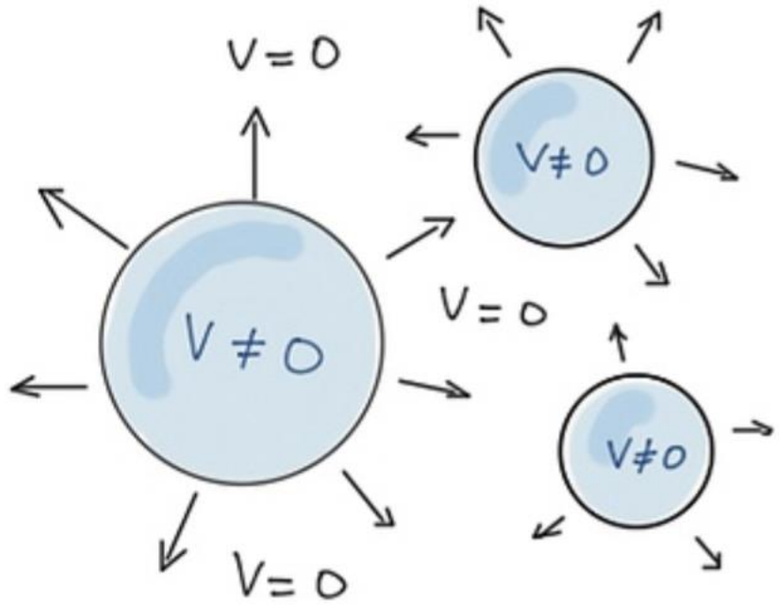
Konklusion - Udsyn

- Partikelfysikkens Standardmodel har etableres sig over 60 år til at være en fænomenal god beskrivelse af den mikroskopiske fysik
- Opdagelse af Higgs-bosonens i 2012 indebar en verifikation of Higgs-mekanismen, hvorved Standardmodellens partikler erhvervede masser i det tidlige univers
- Higgs-bosonen spiller en helt særegen rolle i Standardmodellen og åbner mange spørgsmål
  - Første elementære(?) spin-0 partikel i naturen
  - Men er den nu også elementær eller måske sammensat?
  - Findes der andre (elementære) spin-0 partikler i naturen (tungere eller lettere)
  - Er Higgs-bosonen er portal til “usynlige partikler” - en “portal” til det “mørke univers”?
  - En spin-0-partikel har teoretiske problemer med stabiliteten af massen; hvorfor så let?

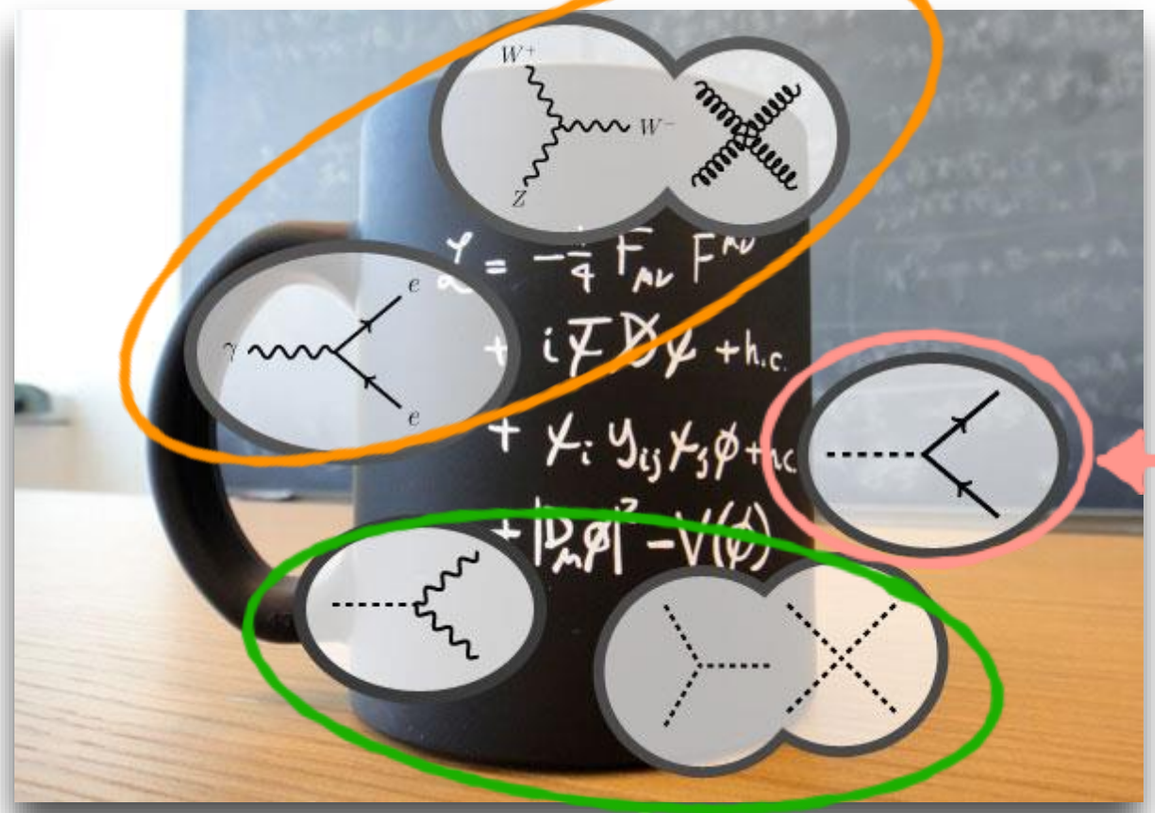
MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE





a) Præ-Higgs-mekanisme masseløs teori: 4 frie parametre



c) Higgs-mekanismen giver masser til fermionerne: 20 additionelle parametre; i alt 26

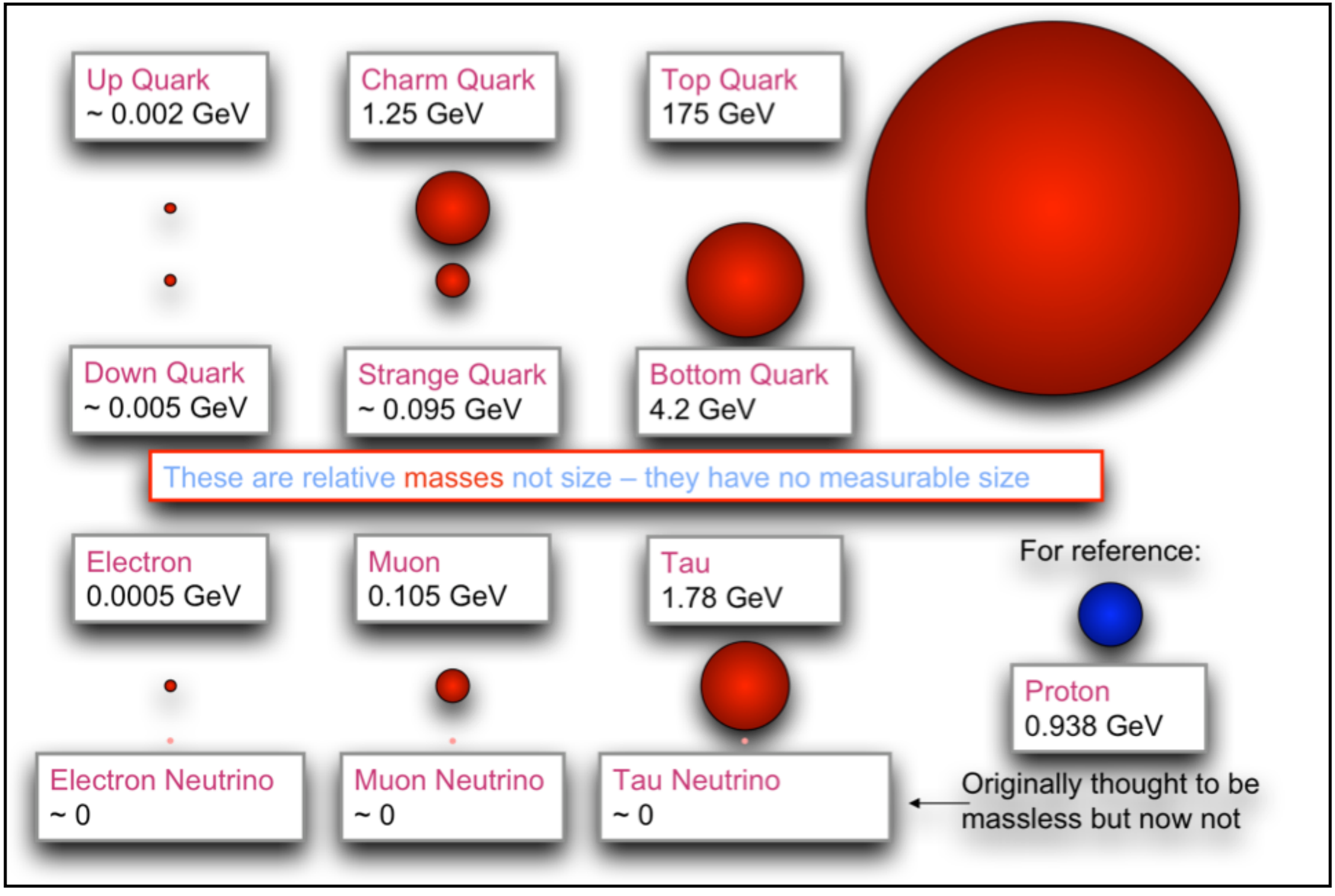
"Træ"

"Marmor"

b) Higgs-mekanismen giver masser til W + Z: 2 additionel parametre; i alt 6

- Standardmodellen er i udgangspunktet smuk og "enkel" med kun 5 frie parametre
- Higgs-mekanismen, især den fermioniske del, er uæstetisk, men det synes at virke

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

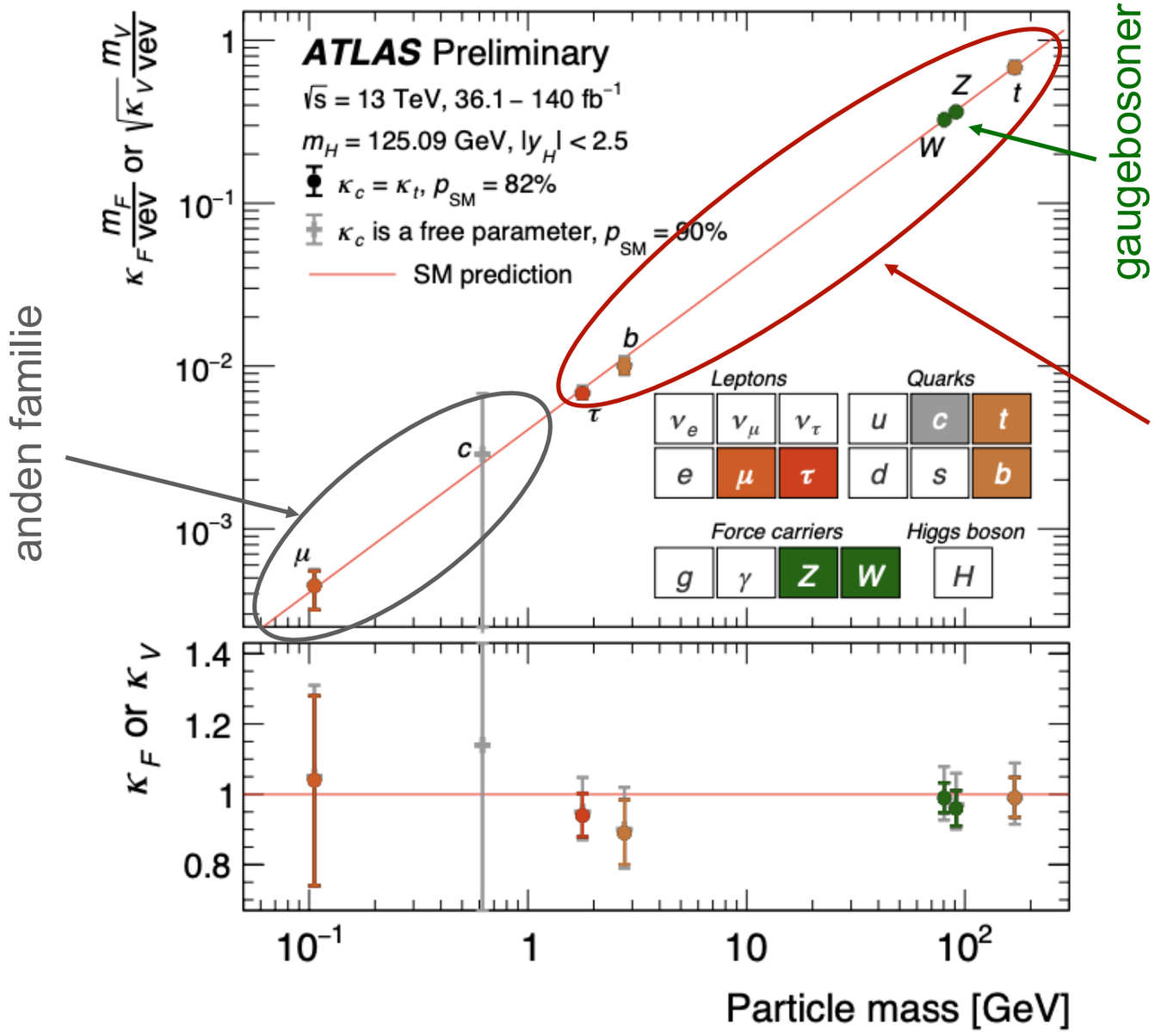


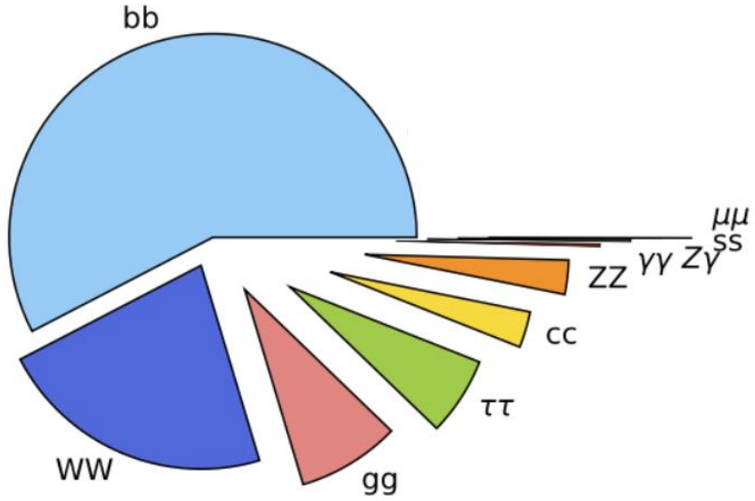
Der er helt klar et mønstrer, en struktur, men hvilken?

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Målte Higgs-koblinger

- Målte koblinger er proportionale med partikelmasserne
  - Præcis som forudsagt af Higgs mekanismen!!





Forudsagte forgreningsforhold

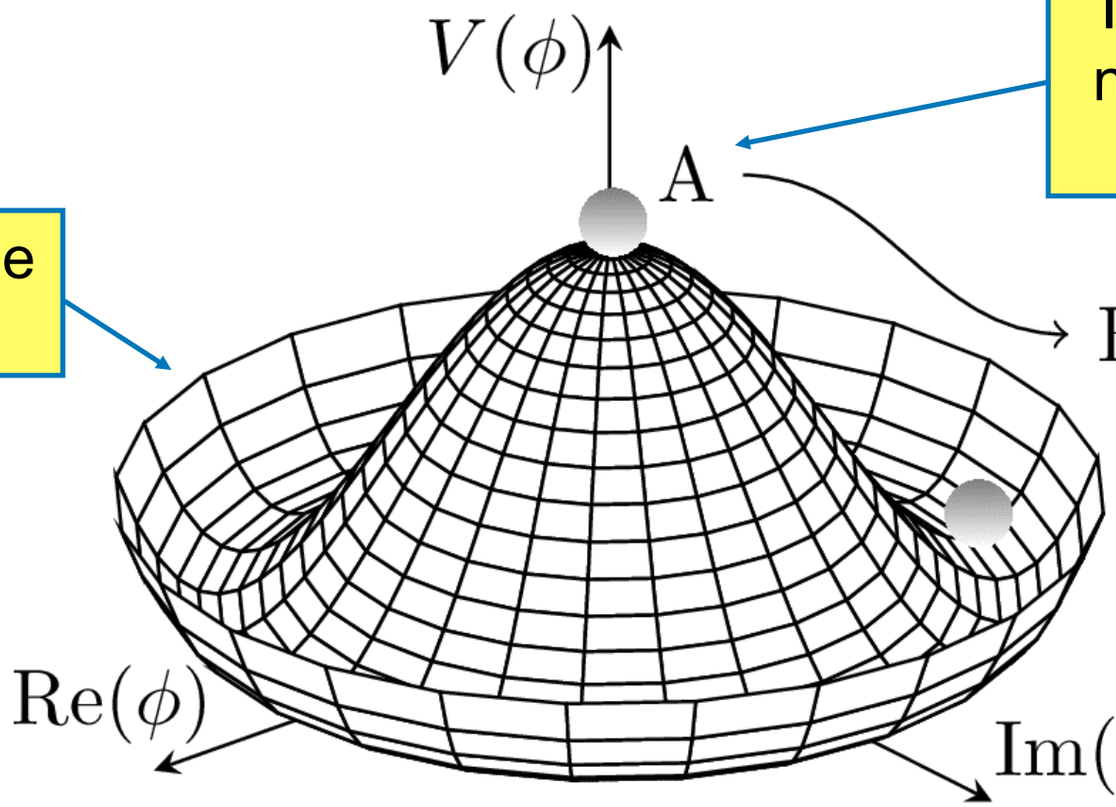
Tredje familie (og gaugebosoner):
- høj statistik, god præcision

Anden familie
- lav statistik, dårlig præcision

Første familie:
- forsvindende statistik, ingen måling

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

Spontan symmetribrud (SSB) og partikelmasser



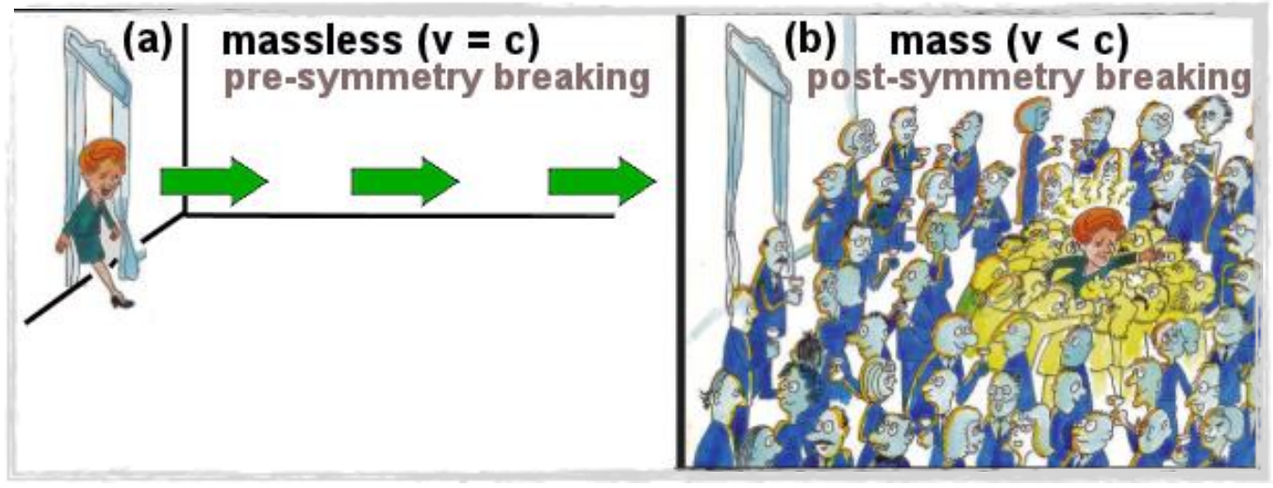
I udgangspunktet befinder naturen sig på toppen i det ustabile symmetripunkt.

Higgs-feltets potentielle energi er symmerisk.

Naturen må vælge retning og triller ned ad bakken. Hermed genereres partikelmasser

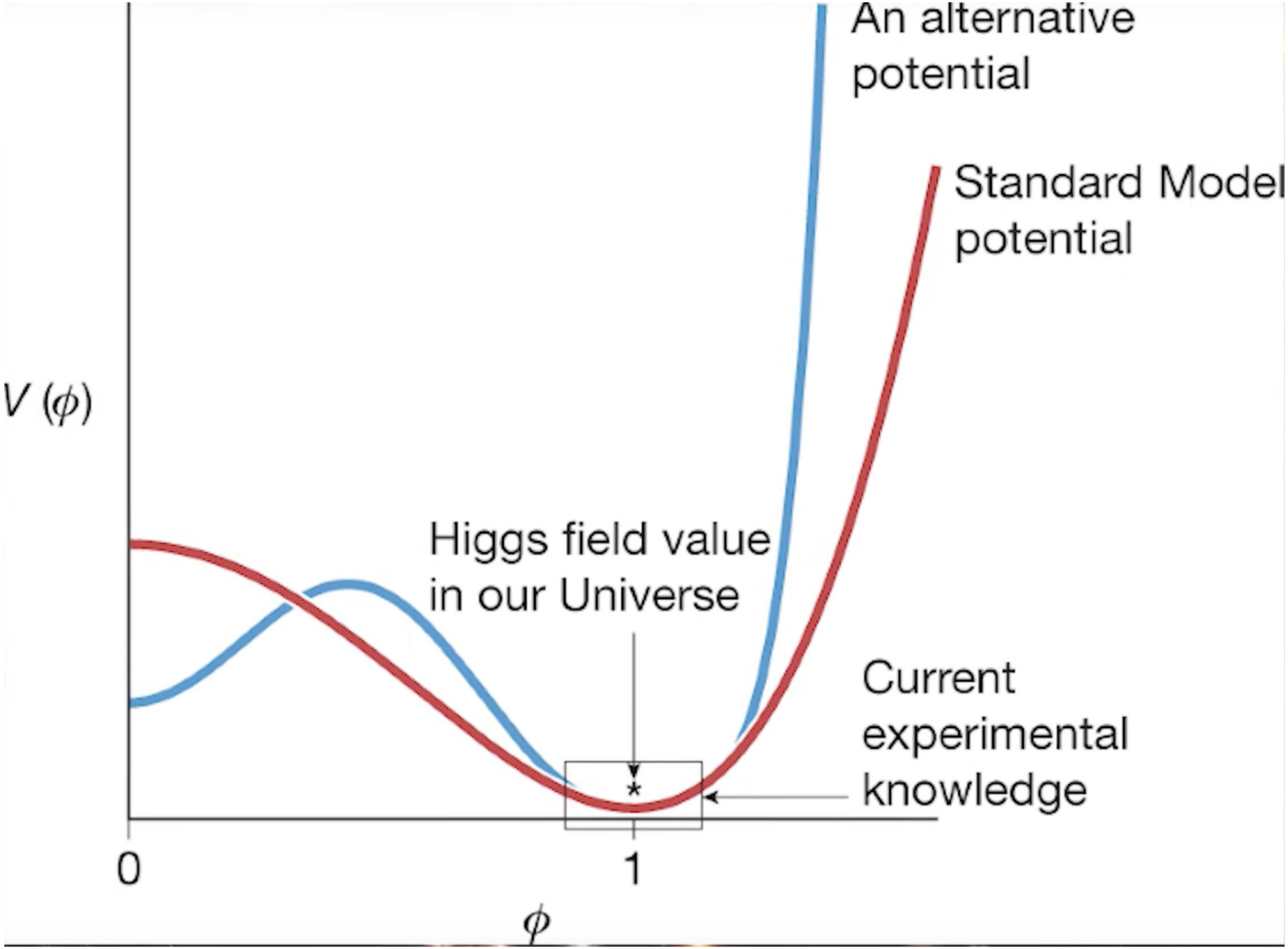
- Masse er ikke noget partikler ***har***.
- Masse er noget de ***erhverver*** ved vekselvirkning med omgivelserne, altså Higgs-feltet

Eksempel på masse (træghed) opnået via vekselvirkning med omgivelserne



MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE



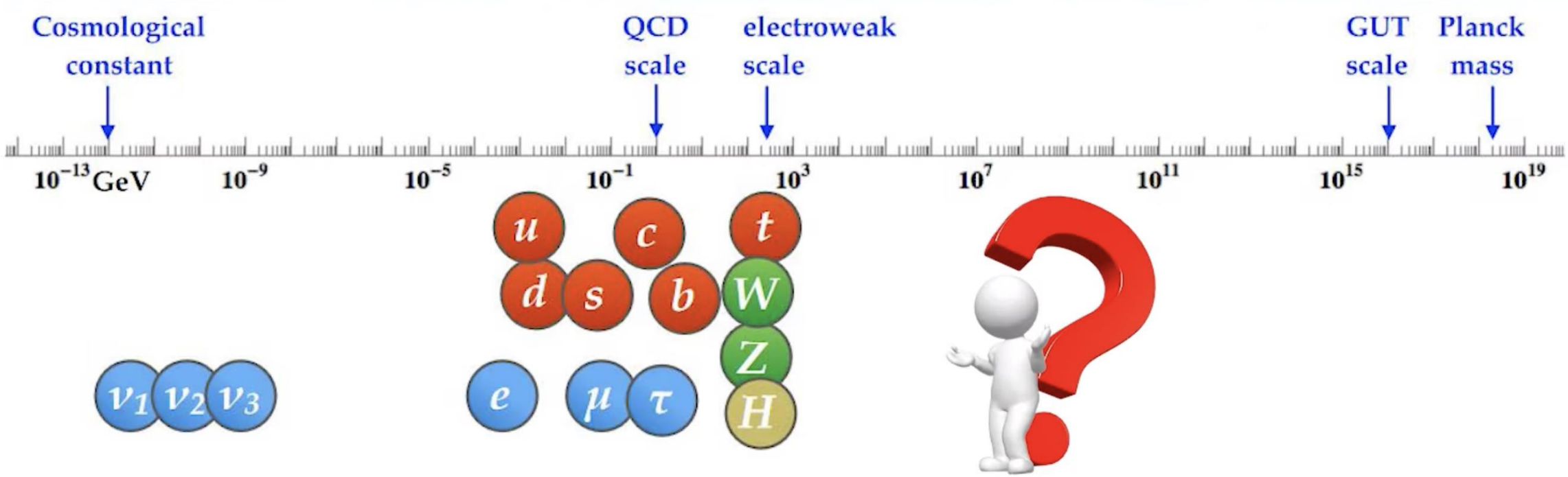


Fig. 1: The distribution of masses of the elementary particles, along with some of the relevant energy scales. The absolute values of neutrino masses are not known - their placement on the graph is indicative of the upper bound.

MOGENS DAM, N

Free parameters of the Standard Model

Masses

Parameter	Value	Method
m_u	1.9 MeV	Lattice
m_d	4.4 MeV	Lattice
m_s	87 MeV	Lattice
m_c	1.3 MeV	Collider
m_b	4.24 MeV	Collider
m_t	173 GeV	Collider
m_e	511 keV	Non-collider
m_μ	106 MeV	Non-collider
m_τ	1.78 GeV	Collider
m_z	91.2 GeV	Collider
m_H	125 GeV	Collider

Couplings

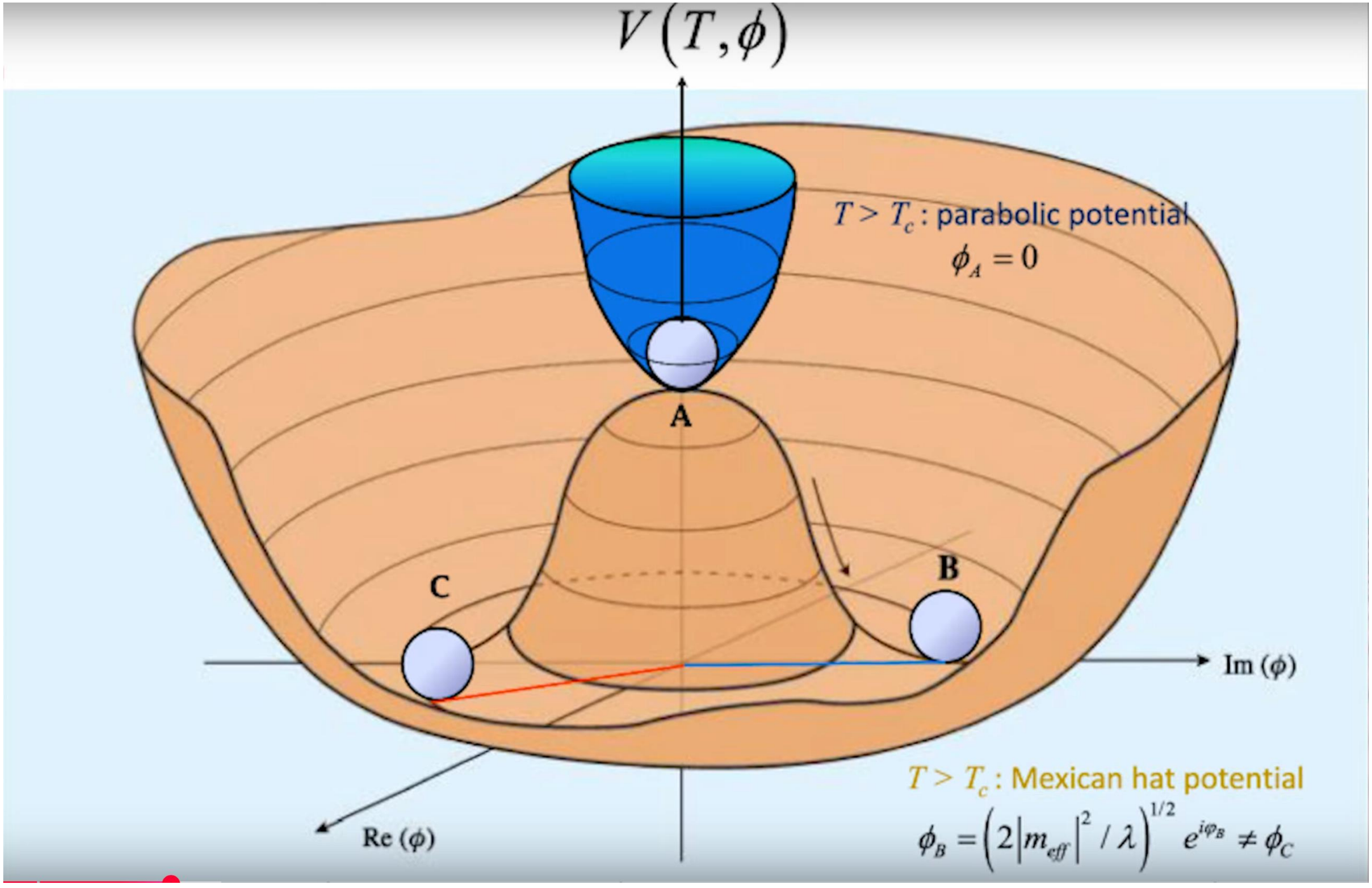
Parameter	Value	Method
α	0.0073	non-collider + collider
G_F	1.17×10^{-5}	Non-collider
α_s	0.12	Lattice + collider

Flavour and CP violation

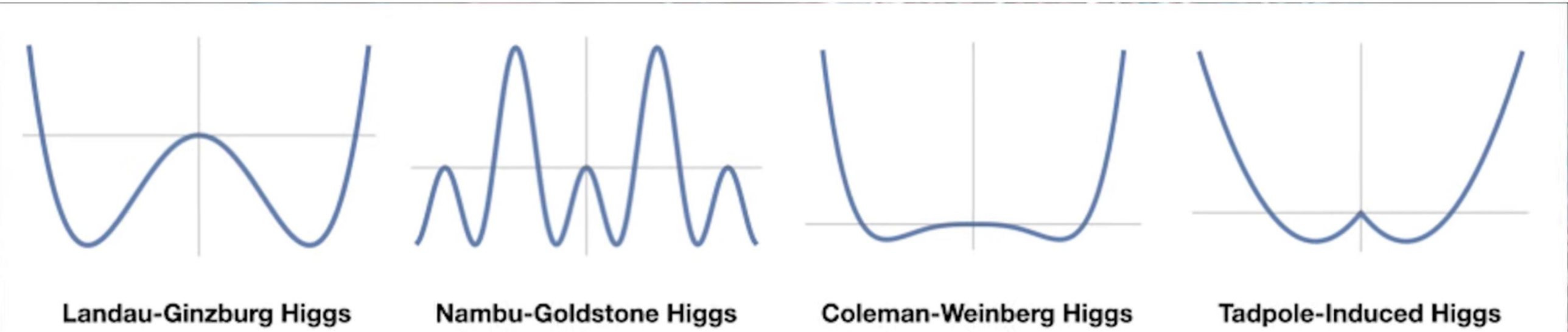
Parameter	Value	Method
θ_{12} (CKM)	13.1°	Collider
θ_{23} (CKM)	2.4°	Collider
θ_{13} (CKM)	0.2°	Collider
δ (CKM-CPV)	0.995	Collider
θ (strong CP)	~0	Non-collider

19 free parameters (massless neutrino version).
SM tests require both collider and non-colliders

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE



MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE



MOGENS DAM, NIELS E

120

Spontaneous Symmetry Breakdown without Massless Bosons*

PETER W. HIGGS†
Department of Physics, University of North Carolina, Chapel Hill, North Carolina
(Received 27 December 1965)

We examine a simple relativistic theory of two scalar fields, first discussed by Goldstone, in which as a result of spontaneous breakdown of $U(1)$ symmetry one of the scalar bosons is massless, in conformity with the Goldstone theorem. When the symmetry group of the Lagrangian is extended from global to local $U(1)$ transformations by the introduction of coupling with a vector gauge field, the Goldstone boson becomes the longitudinal state of a massive vector boson whose transverse states are the quanta of the transverse gauge field. A perturbative treatment of the model is developed in which the major features of these phenomena are present in zero order. Transition amplitudes for decay and scattering processes are evaluated in lowest order, and it is shown that they may be obtained more directly from an equivalent Lagrangian in which the original symmetry is no longer manifest. When the system is coupled to other systems in a $U(1)$ invariant Lagrangian, the other systems display an induced symmetry breakdown, associated with a partially conserved current which interacts with itself via the massive vector boson.

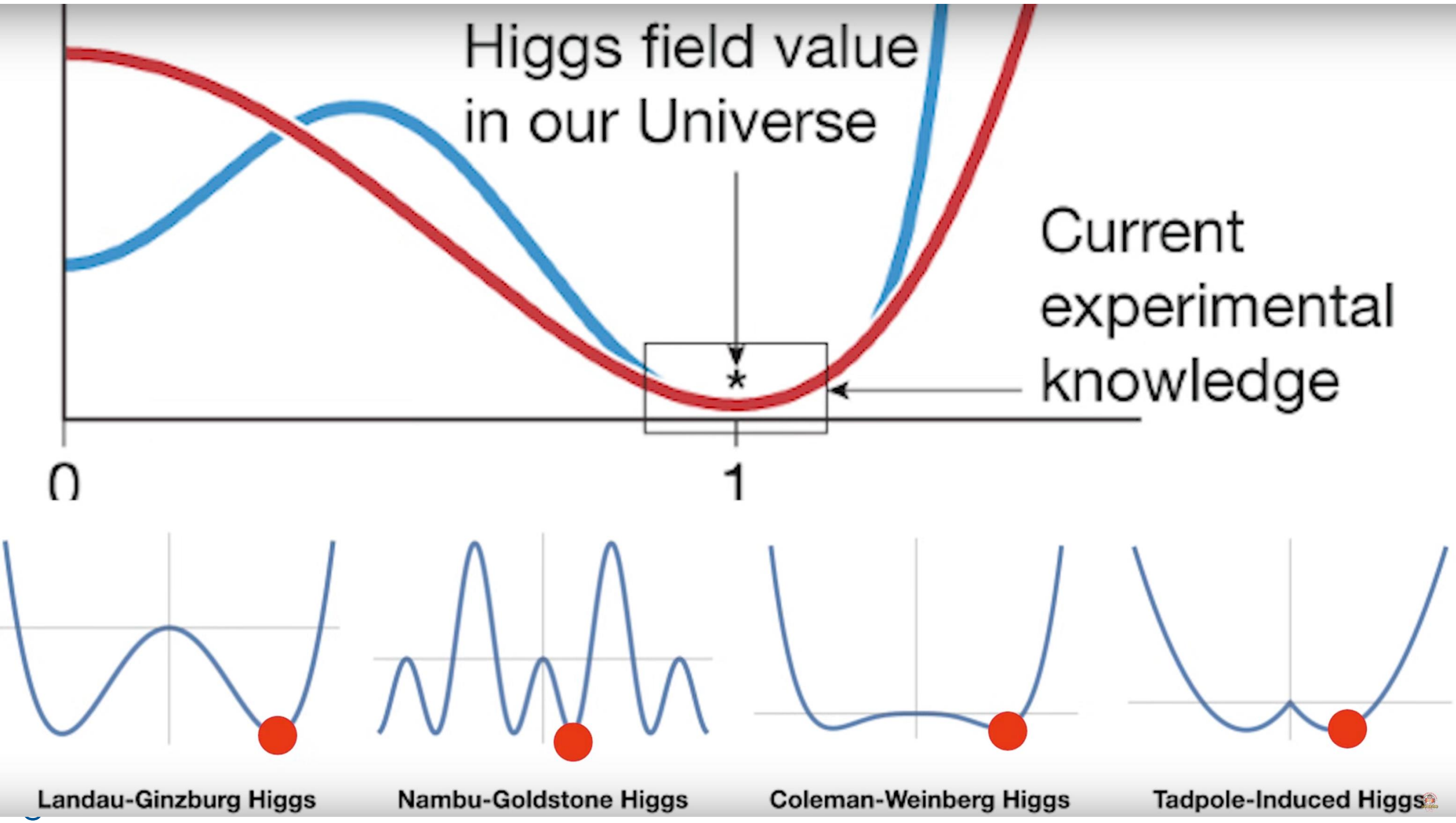
I. INTRODUCTION

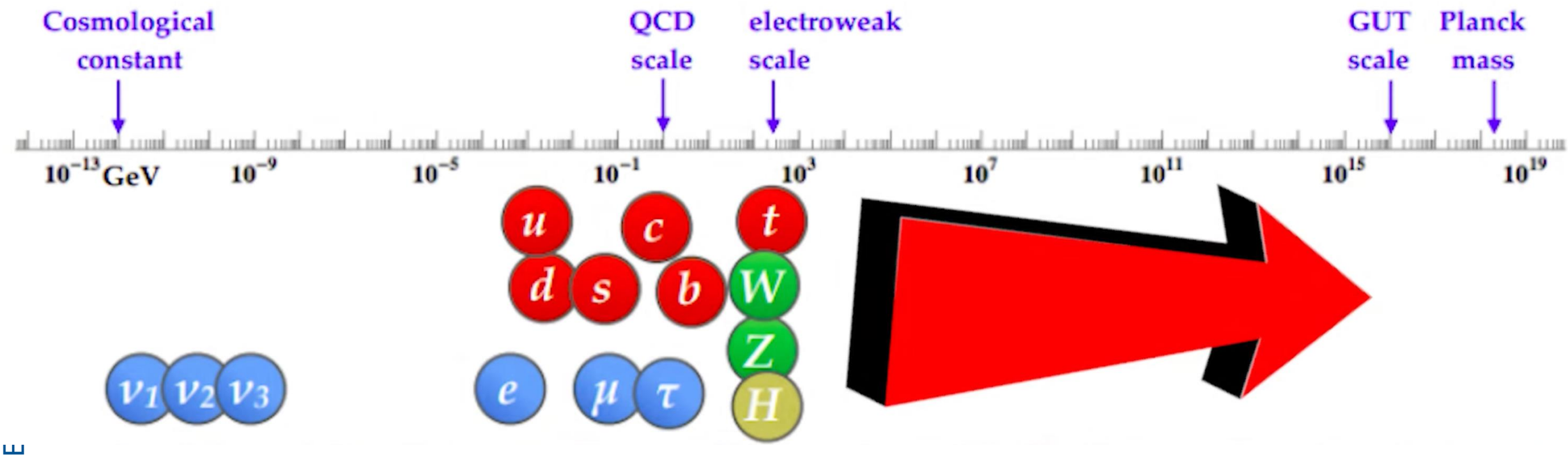
THE idea that the apparently approximate nature of the internal symmetries of elementary-particle physics is the result of asymmetries in the stable solutions of exactly symmetric dynamical equations, rather than an indication of asymmetry in the dynamical equations themselves, is an attractive one. Within the framework of quantum field theory such a "spontaneous" breakdown of symmetry occurs if a Lagrangian, fully invariant under the internal symmetry group, has such a structure that the physical vacuum is a member of a set of (physically equivalent) states which transform according to a nontrivial representation of the group. This degeneracy of the vacuum permits nontrivial multiplets of scalar fields (which may be either fundamental dynamic variables or polynomials constructed from them) to have nonzero vacuum expectation values, whose appearance in Feynman diagrams leads to symmetry-breaking terms in propagators and vertices. That vacuum expectation values of scalar fields, or "vacuons," might play such a role in the breaking of symmetries was first noted by Schwinger[1] and by Salam and Ward.[2] Under the alternative name, "tadpole" diagrams, the graphs in which vacuons appear have been used by Coleman and Glashow[3] to account for the observed pattern of deviations from $SU(3)$ symmetry.

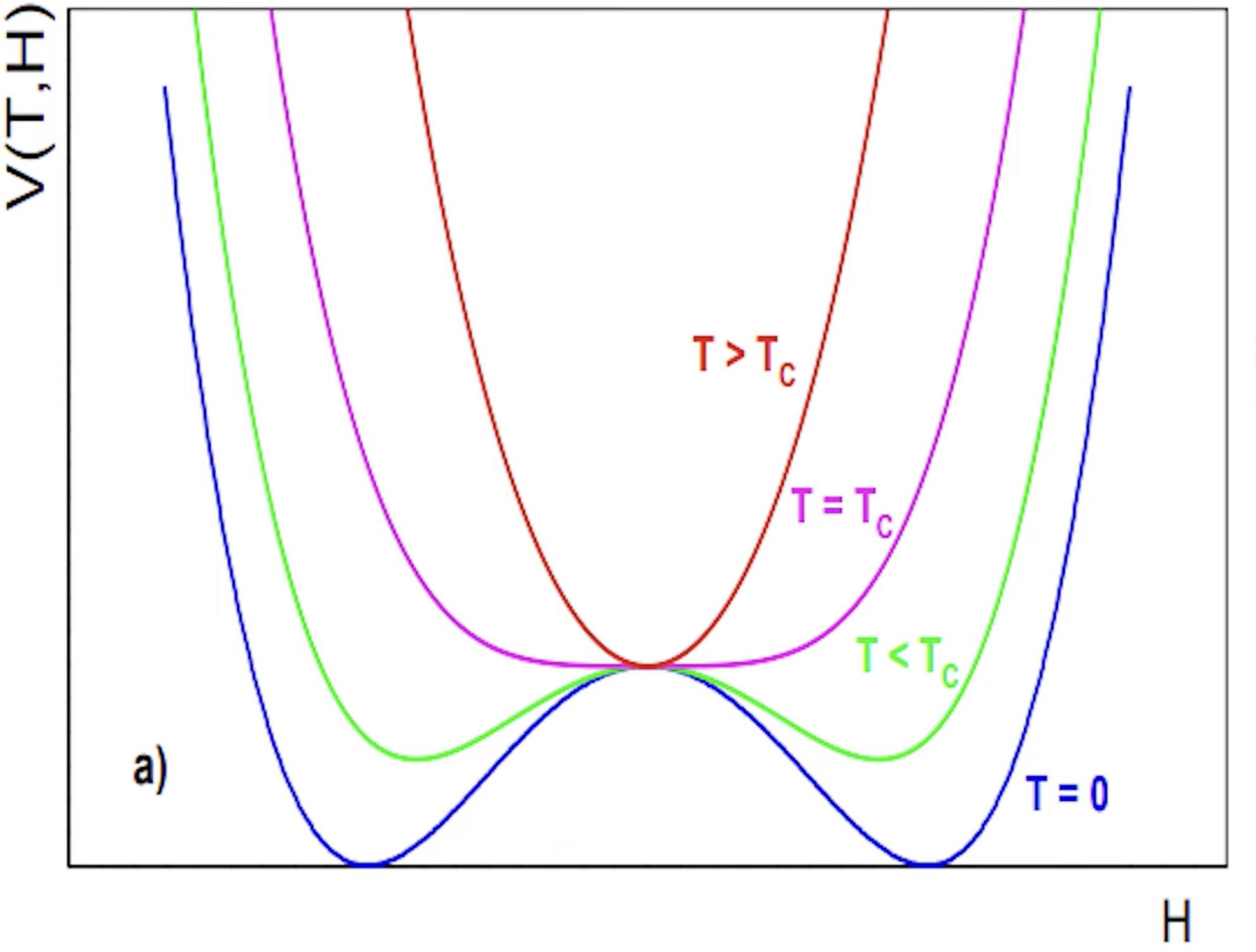
The study of field theoretical models which display spontaneous breakdown of symmetry under an internal Lie group was initiated by Nambu,[4] who had noticed[5] that the BCS theory of superconductivity[6] is of this type, and was continued by Glashow[7] and others.[8] All these authors encountered the difficulty that their theories predicted, *inter alia*, the existence of a number of massless scalar or pseudoscalar bosons, named "zerons" by Freund and Nambu.[9] Since the models which they discussed, being inspired by the BCS theory, used an attractive interaction between massless fermions and antifermions as the mechanism of symmetry breakdown, it was at first unclear whether zerons occurred as a result of the approximations (including the usual cutoff for divergent integrals) involved in handling the models or whether they would still be there in an exact solution. Some authors,

* This work was partially supported by the U. S. Air Force Office of Scientific Research under grant No. AF-AFOSR-153-64.
† On leave from the Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Scotland.
[1] J. Schwinger, Phys. Rev. **104**, 1164 (1954); Ann. Phys. (N. Y.) **2**, 407 (1957).
[2] A. Salam and J. C. Ward, Phys. Rev. Letters **5**, 390 (1960); Nuovo Cimento **19**, 167 (1961).
[3] S. Coleman and S. L. Glashow, Phys. Rev. **134**, B671 (1964).
[4] Y. Nambu and G. Jona-Lasinio, Phys. Rev. **122**, 345 (1961); **124**, 246 (1961); Y. Nambu and P. Pascual, Nuovo Cimento **30**, 354 (1963).
[5] Y. Nambu, Phys. Rev. **117**, 648 (1960).
[6] J. Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer, Phys. Rev. **106**, 162 (1957).
[7] M. Baker and S. L. Glashow, Phys. Rev. **128**, 2462 (1962); S. L. Glashow, *ibid.* **130**, 2132 (1962).
[8] M. Suzuki, Progr. Theoret. Phys. (Kyoto) **30**, 138 (1963); **30**, 627 (1963); N. Byrne, C. Iddings, and E. Shrauner, Phys. Rev. **139**, B918 (1965); **139**, B933 (1965).
[9] P. G. O. Freund and Y. Nambu, Phys. Rev. Letters **13**, 221 (1964).

MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE


Higgs field value
in our Universe
Current
experimental
knowledge
0
1
Landau-Ginzburg Higgs
Nambu-Goldstone Higgs
Coleman-Weinberg Higgs
Tadpole-Induced Higgs

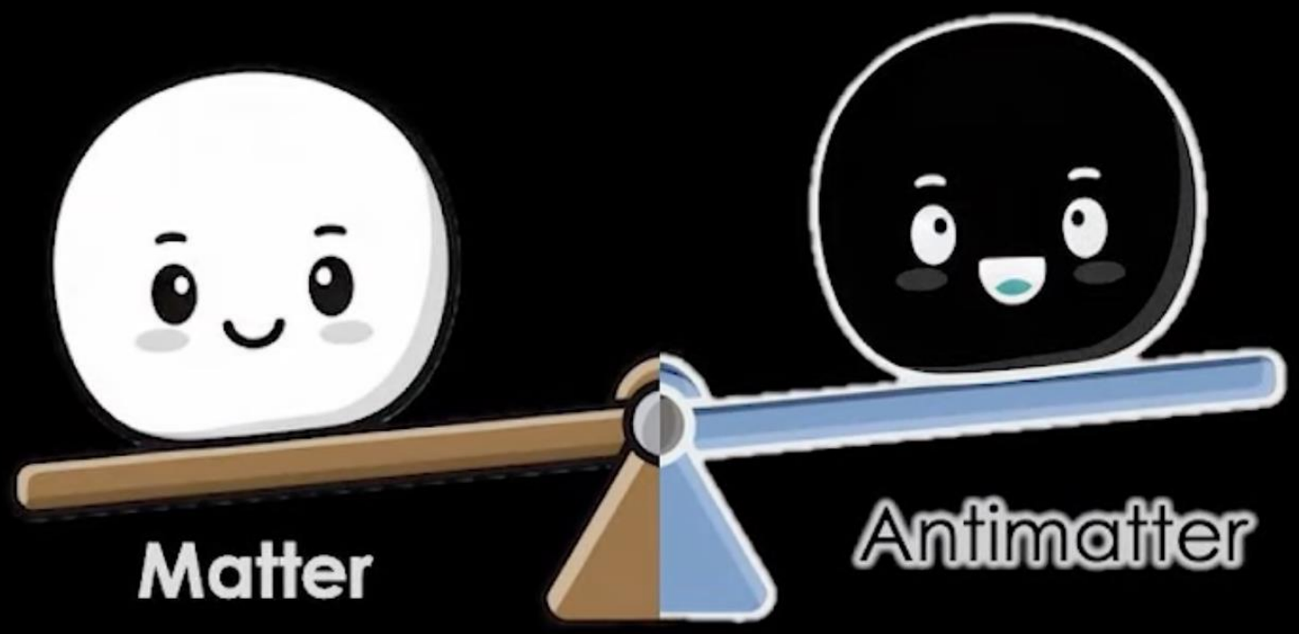

Cosmological constant
QCD scale
electroweak scale
GUT scale
Planck mass
10^{-13}GeV
10^{-9}
10^{-5}
10^{-1}
10^{3}
10^{7}
10^{11}
10^{15}
10^{19}
u
c
t
d
s
b
W
Z
H
e
μ
τ
ν_1
ν_2
ν_3



NIELS BOHR INSTITUTE

1 in 1,000,000,000

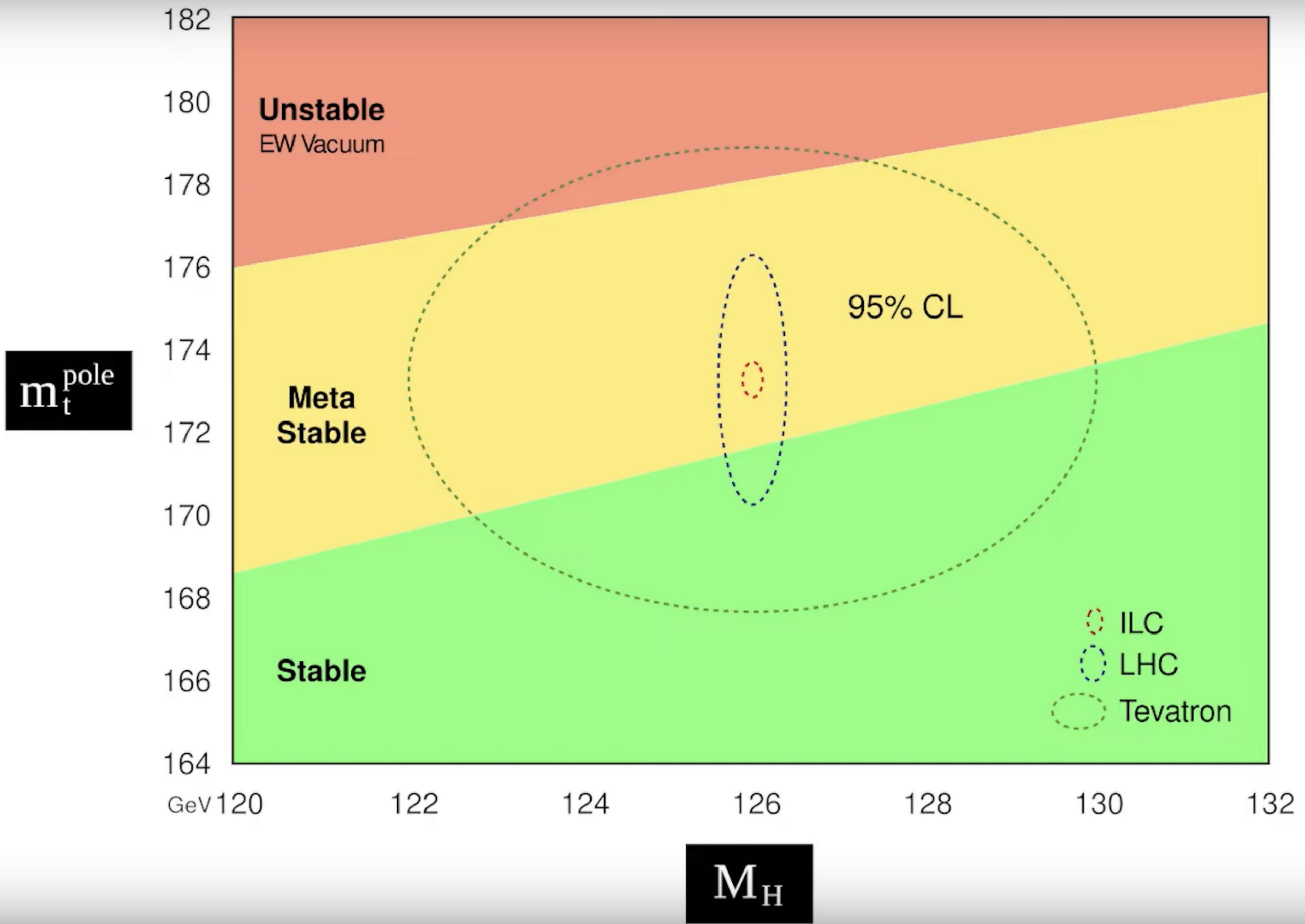
imbalance?



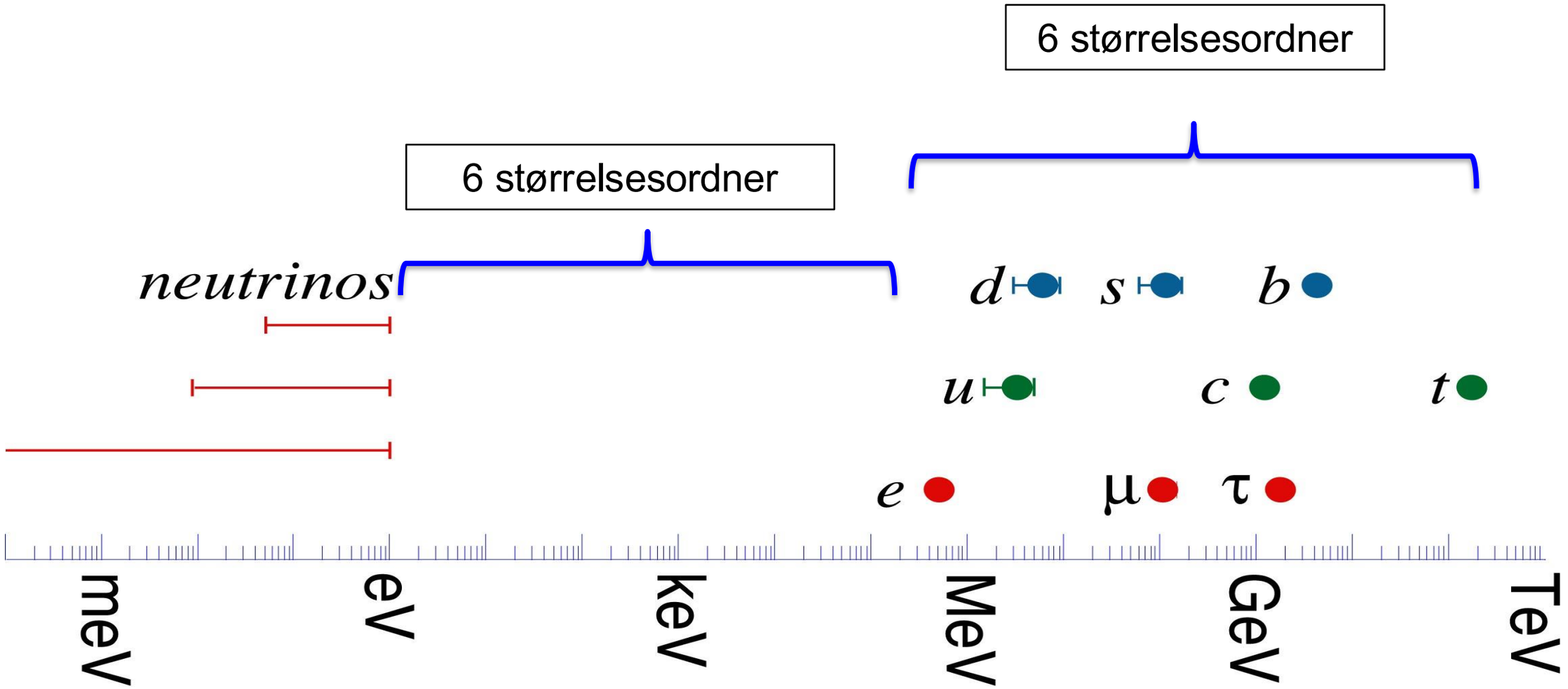
Where is

all the

Antimatter?


182
180
178
176
174
172
170
168
166
164
m_t^{pole}
Unstable
EW Vacuum
Meta
Stable
Stable
95% CL
ILC
LHC
Tevatron
GeV
120
122
124
126
128
130
132
M_H

- Har neutrinomasser samme forklaring som andre fermion-masser - altså Higgs-mekanismen ?



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

- Ingen "ladninger": En neutrino kan være sin egen anti-partikel
- Atypiske små masser: Hvis masse via Higgs-mekanismen, så er deres koblinger til Higgs-feltet ekstremt svage (~10^{-12}). Hvorfor det?
  - Populær teori: "*See-saw mechanism*"



MOGENS DAM, NIELS BOHR INSTITUTE