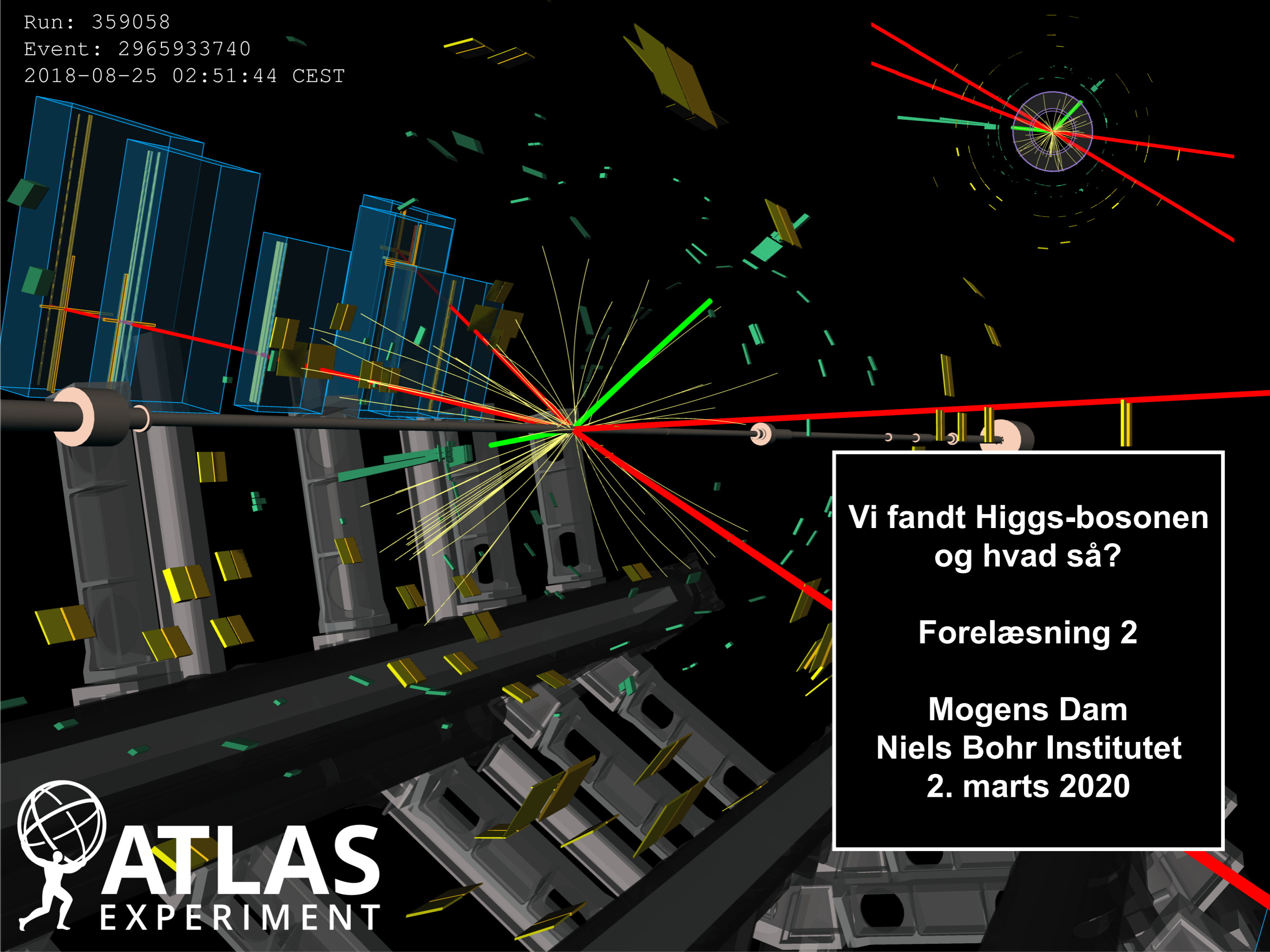


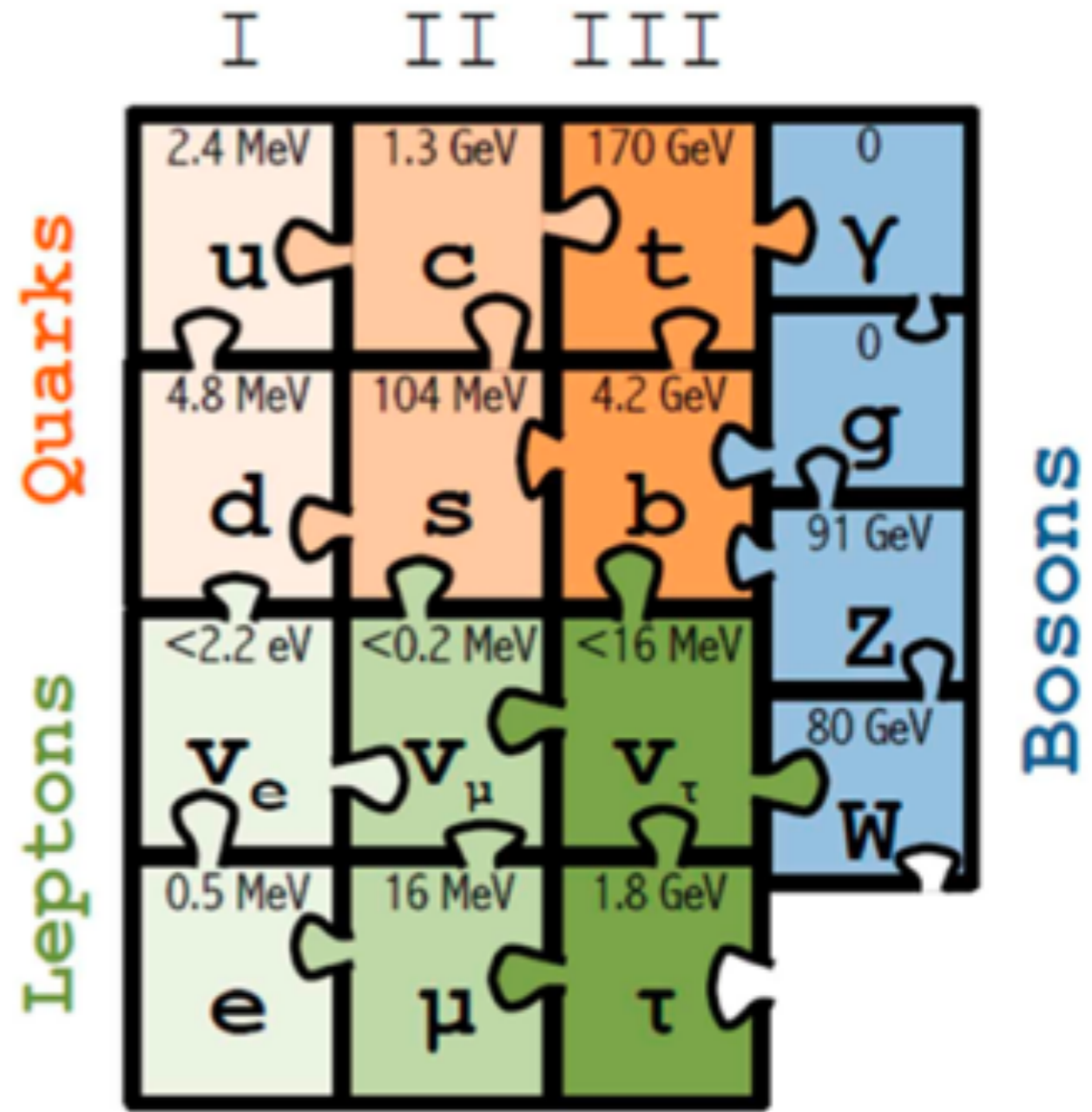
Run: 359058
Event: 2965933740
2018-08-25 02:51:44 CEST



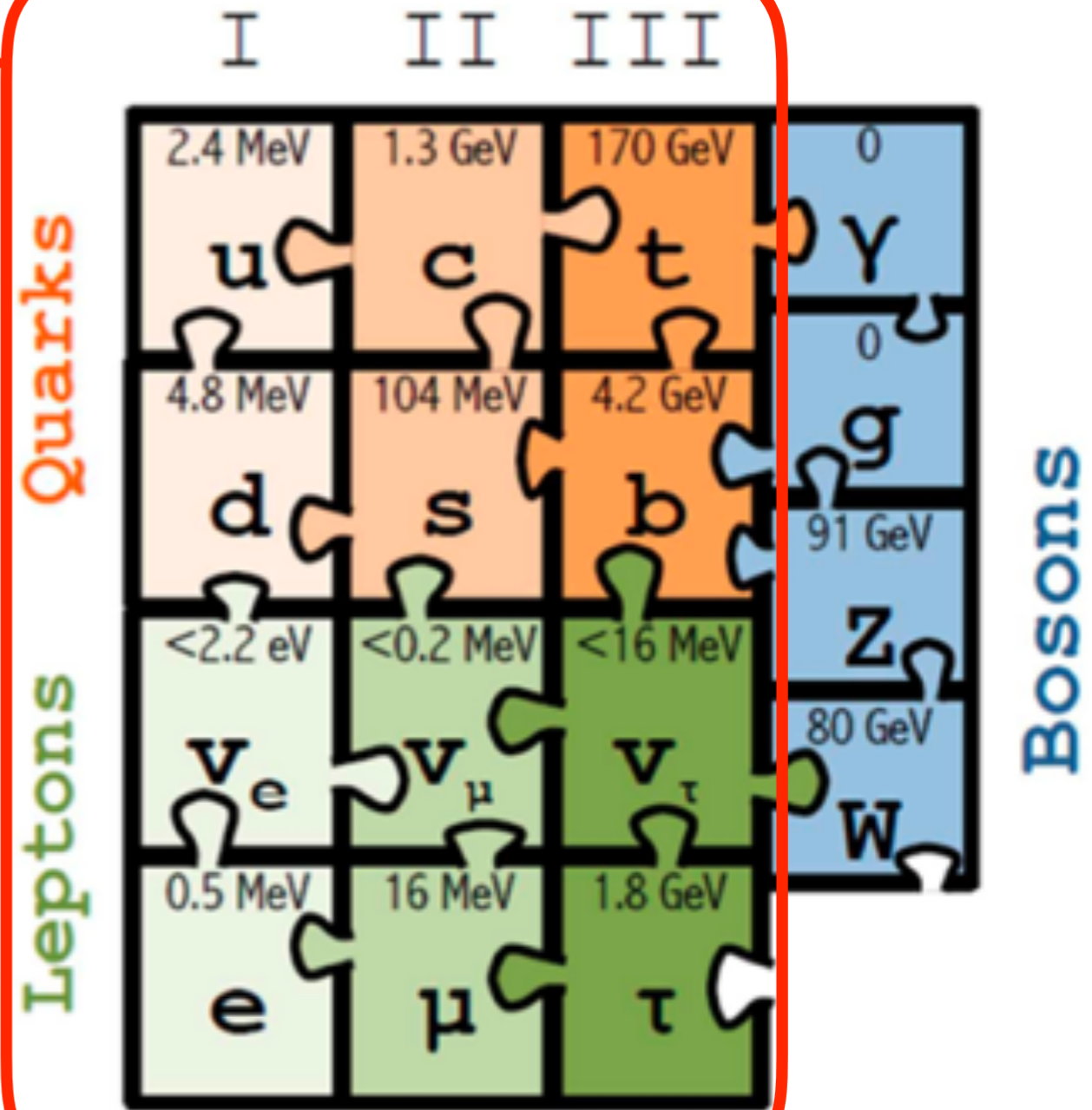
**Vi fandt Higgs-bosonen
og hvad så?**

Forelæsning 2

**Mogens Dam
Niels Bohr Institutet
2. marts 2020**

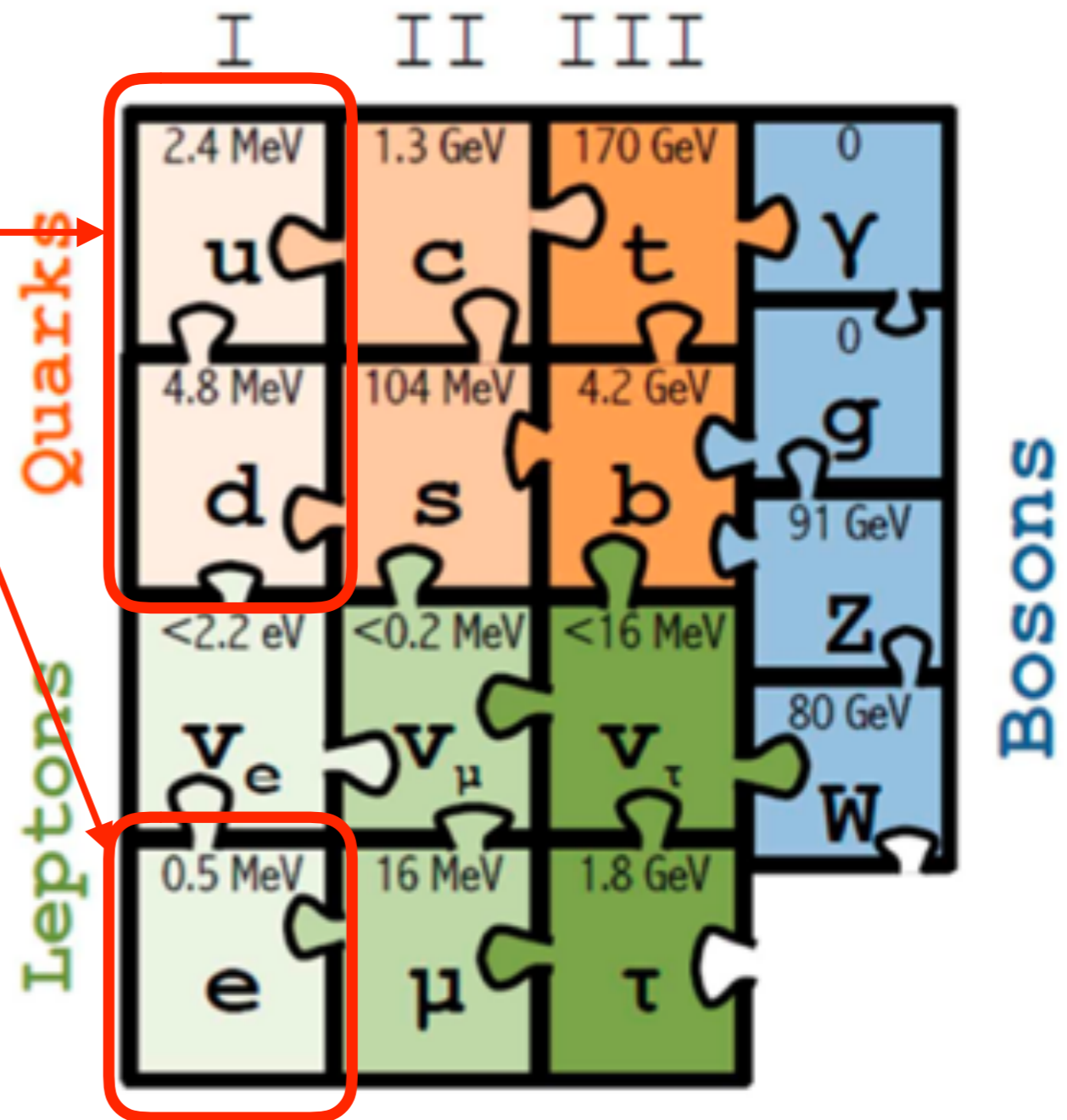


Tre generationer af stofflige partikler
- Leptoner og kvarker



Tre generationer af stoflige partikler
- Leptoner og kvarker

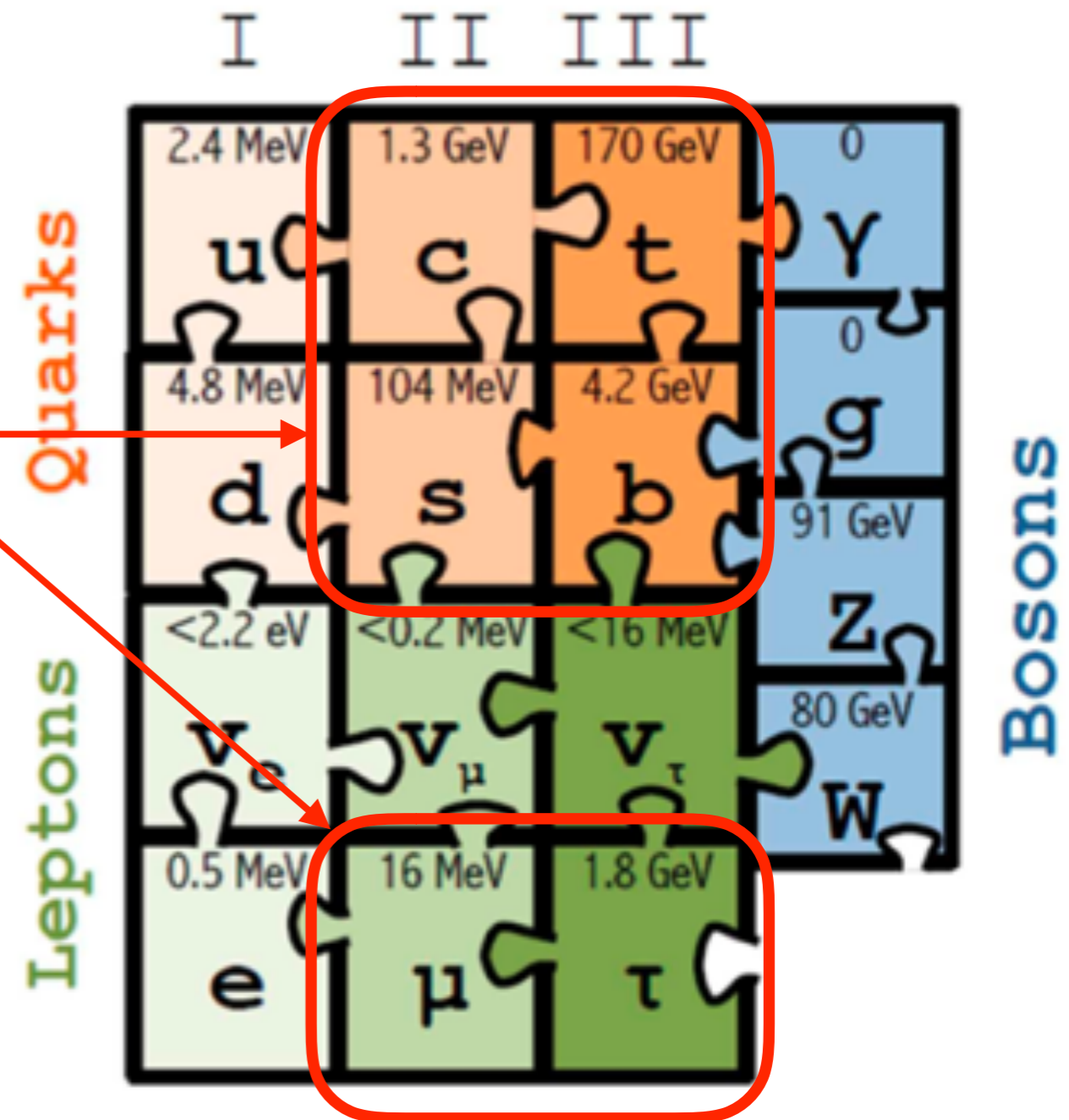
Al stof (materie) består udelukkende
af første generation: u, d, og e⁻



Tre generationer af stoflige partikler
- Leptoner og kvarker

Al stof (materie) består udelukkende
af første generation: u, d, og e⁻

Partiklerne i 2. og 3. generation er
tunge og ustabile

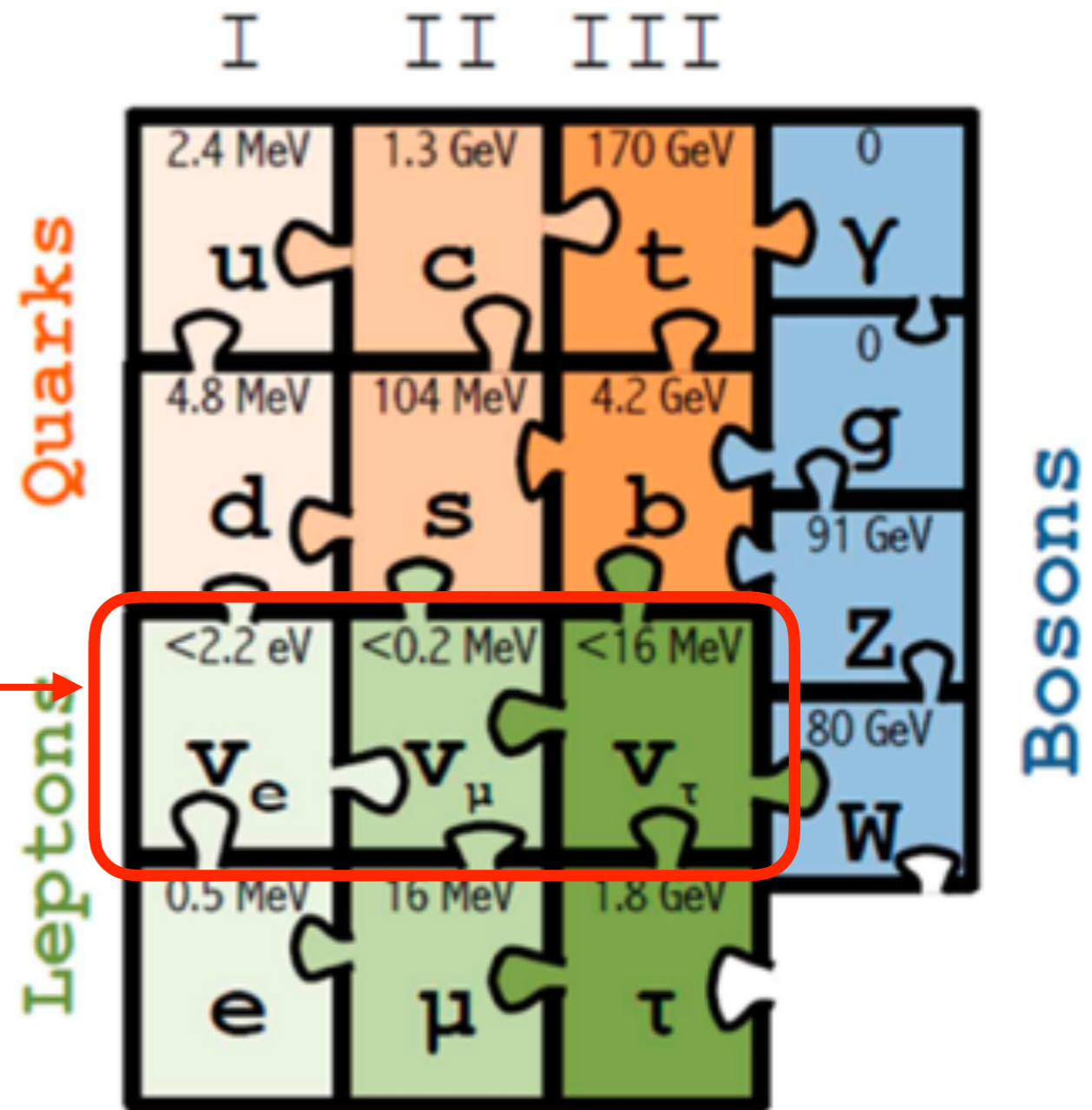


Tre generationer af stoflige partikler
- Leptoner og kvarker

Al stof (materie) består udelukkende
af første generation: u, d, og e^-

Partiklerne i 2. og 3. generation er
tunge og ustabile

Neutrinoerne vekselvirker kun svagt
og binder sig ikke til stof. Men der er
mange af dem.



Tre generationer af stoflige partikler
- Leptoner og kvarker

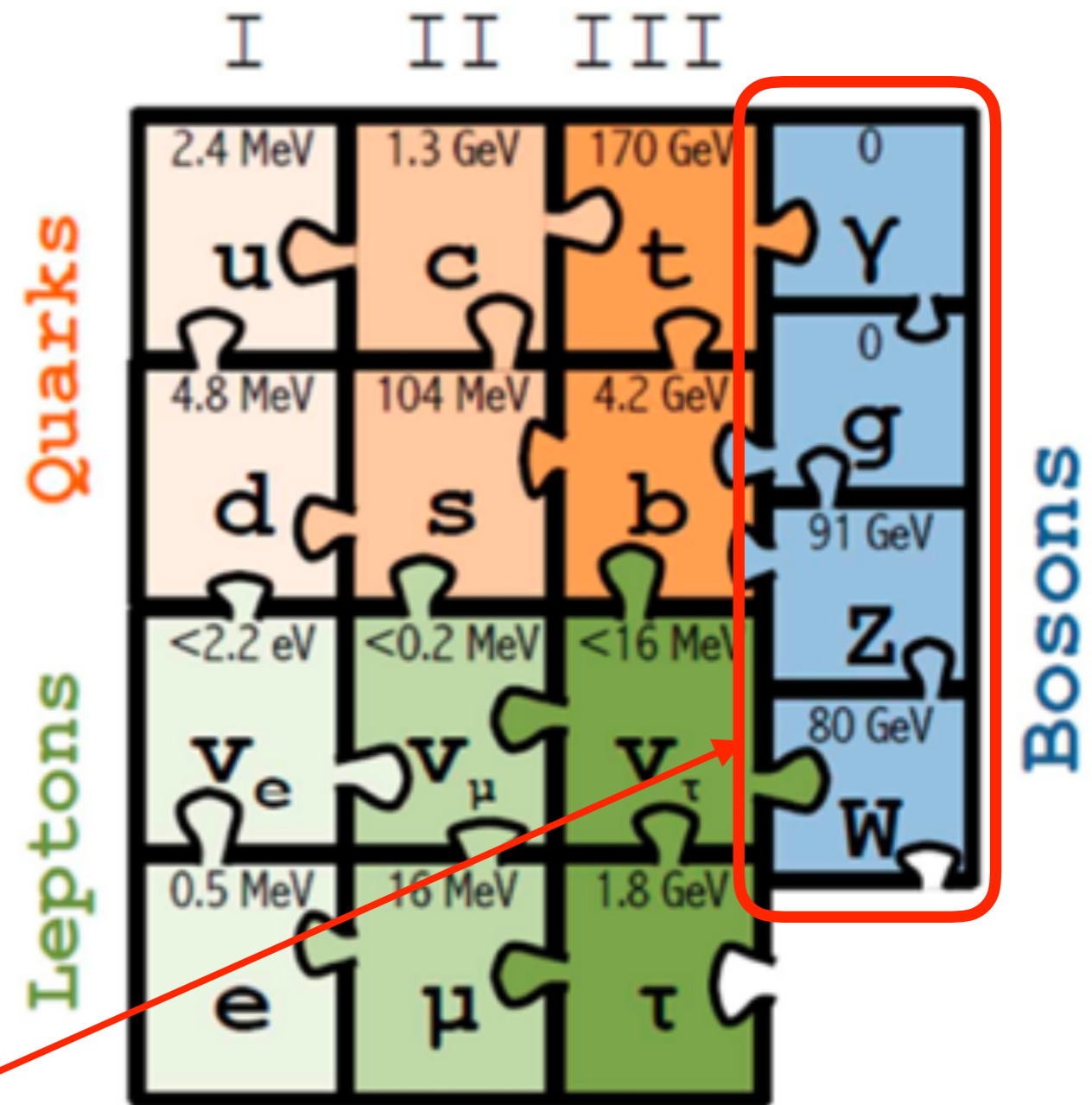
Al stof (materie) består udelukkende
af første generation: u, d, og e^-

Partiklerne i 2. og 3. generation er
tunge og ustabile

Neutrinoerne vekselvirker kun svagt
og binder sig ikke til stof. Men der er
mange af dem.

Kræfter medieres af intermediære
kraftbærende partikler (bosoner):

- Elektromagnetisk kraft: fotonen / γ
- Stærk kraft: gluonerne / g
- Svag kraft: W^+ , W^- og Z^0
- Gravitation/tyngde: Ekstrem svag
på mikroskopisk niveau. Negligeres



Tre generationer af stoflige partikler
- Leptoner og kvarker

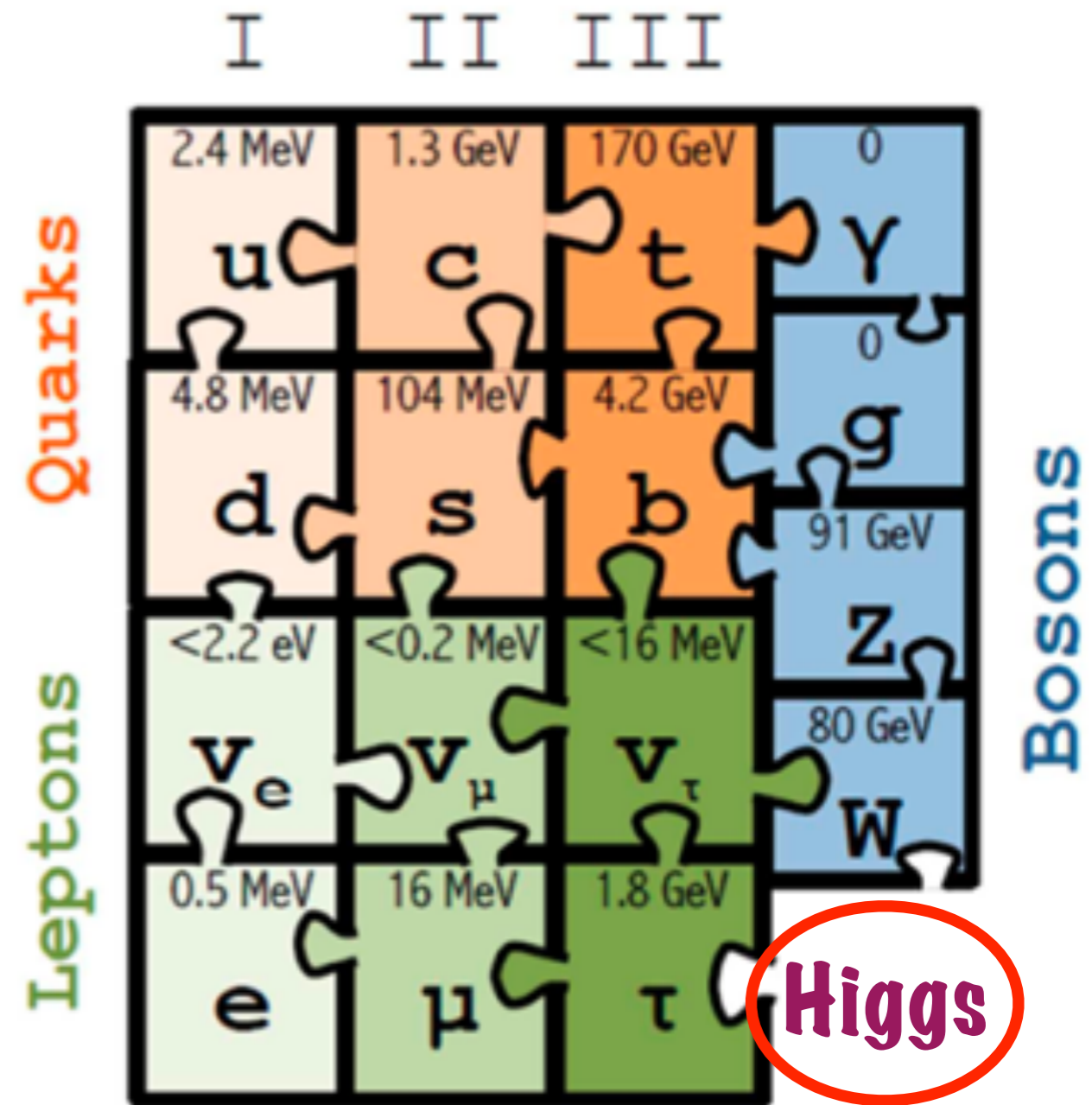
Al stof (materie) består udelukkende
af første generation: u, d, og e⁻

Partiklerne i 2. og 3. generation er
tunge og ustabile

Neutrinoerne vekselvirker kun svagt
og binder sig ikke til stof. Men der er
mange af dem.

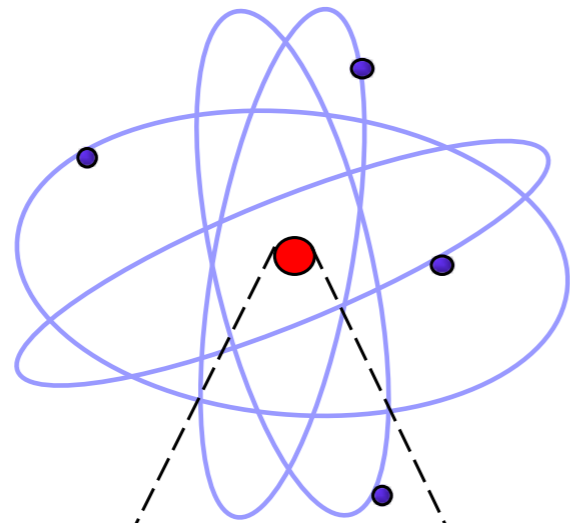
Kræfter medieres af intermediære
kraftbærende partikler (bosoner):

- Elektromagnetisk kraft: fotonen / γ
- Stærk kraft: gluonerne / g
- Svag kraft: W⁺, W⁻ og Z⁰
- Gravitation/tyngde: Ekstrem svag
på mikroskopisk niveau. Negligeres

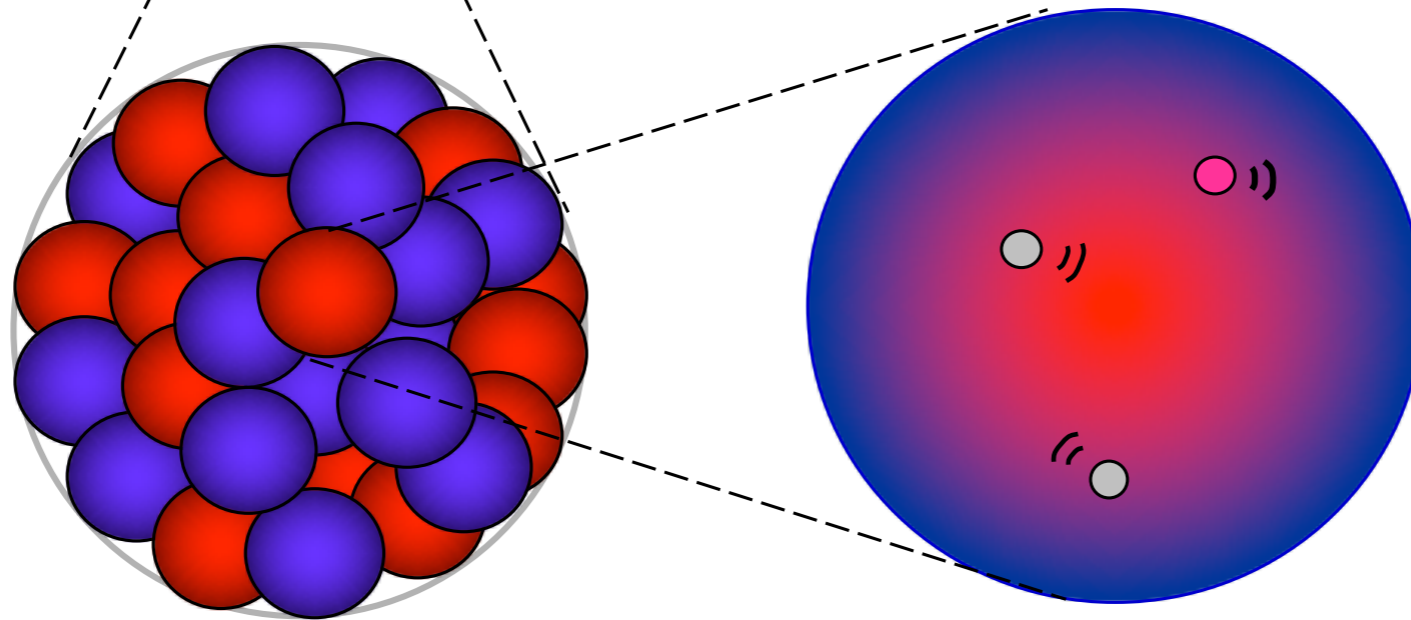
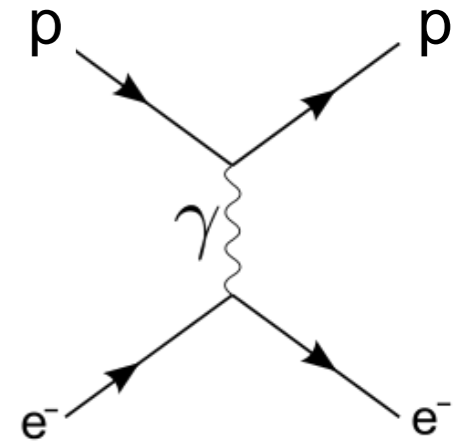


- * Stærke vekselvirkninger
- * De fire naturkræfter
- * Neutrinoer og svagheden af de svage vekselvirkninger
- * Naturkræfterne og gaugetoerier
- * Elementarpartiklerne og masse
- * Standardmodellen
- * Apparatur

Stærke vekselvirkninger

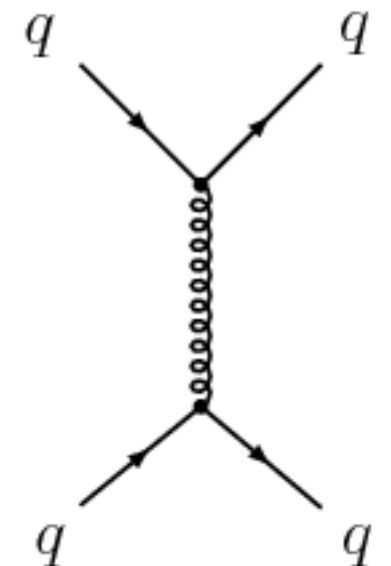


Den elektromagnetiske kraft med tiltrækning mellem den positivt ladede kerne og de negativt ladede elektroner holder sammen på atomet

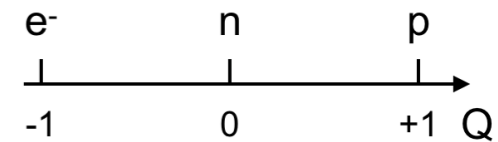


Den stærke kraft er også ansvarlig for at binde nukleonerne sammen til kerner

Den stærke kraft holder sammen på kvarkerne så de danner hadroner, deriblandt nukleonerne - proton og neutron



- * Den elektromagnetiske krafts ladning er én-dimensionel
- * Ladningerne tilsvarende den stærke kraft lever i 3 dimensioner
- * **Parallell med de tre grundfarver; derfor taler vi om farveladninger**

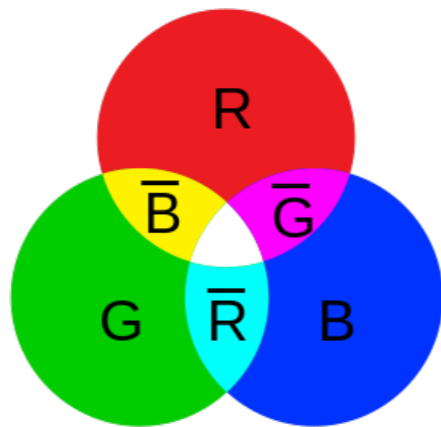


Alle hadroner er farveløse

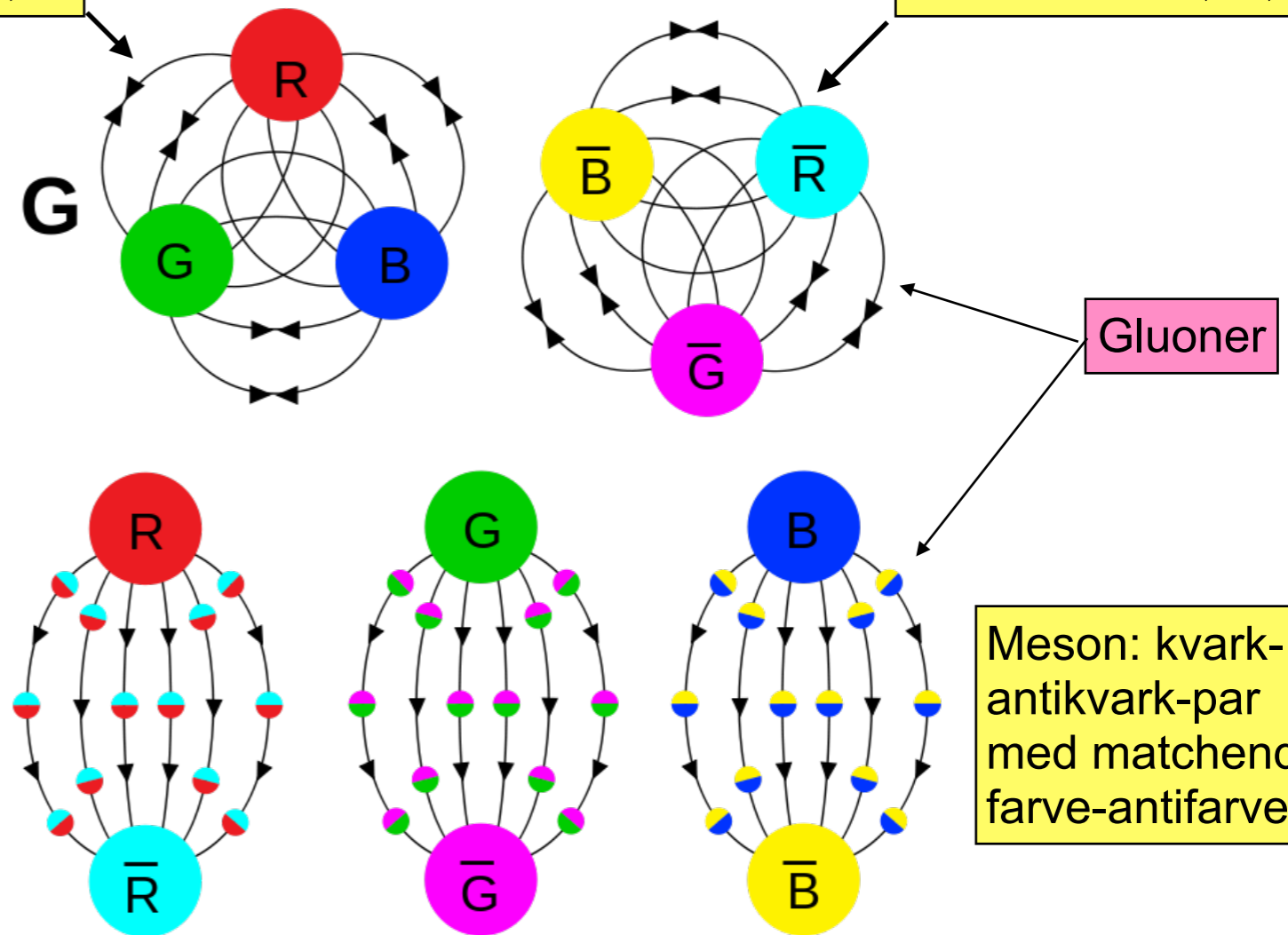
Baryon: Tre kvarker R, G, B

Anti-baryon: Tre anti-kvarker \bar{R} , \bar{G} , \bar{B}

Kvarker har én af tre farver, R, G, B



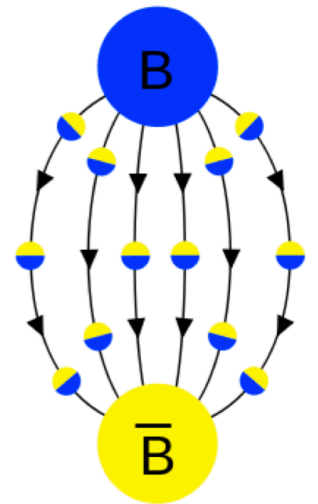
Anti-kvarker har én af tre anti-farver



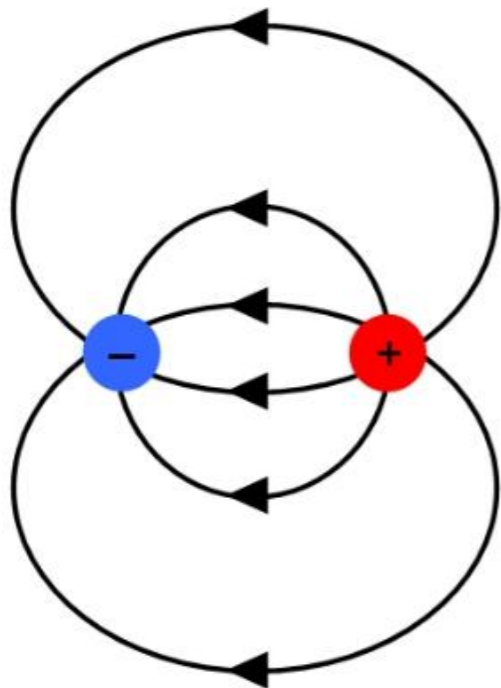
Meson: kvark-antikvark-par med matchende farve-antifarve



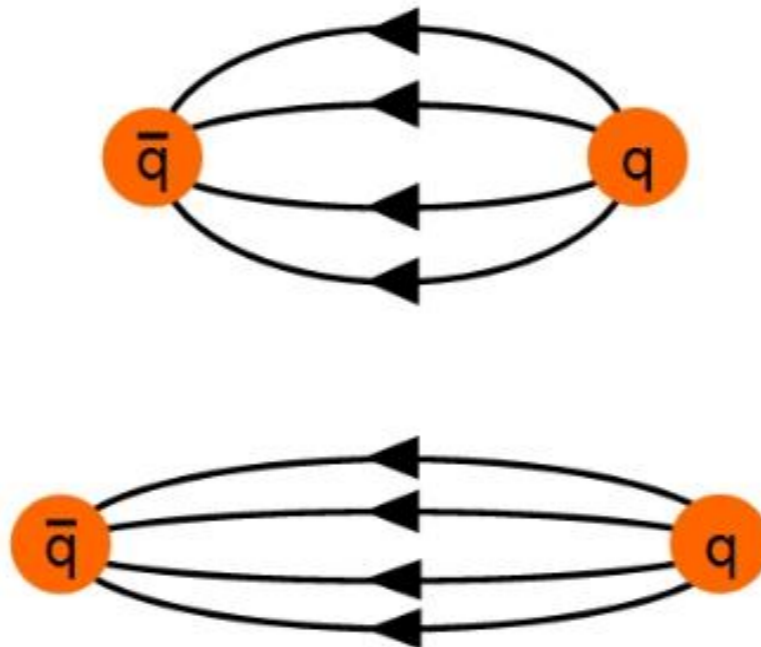
- * Vi observerer elektrisk ladede partikler
- * Ingen har nogensinde observeret en fri partikel, som bærer farveladning
- * Alle frie partikler er farveløse - dermed ingen frie kvarker
- * Hvorfor den store forskel?
 - * Gluonerne bærer selv den ladning de kobler til
 - * Dermed "klistrer" de sammen og danne "strengene"



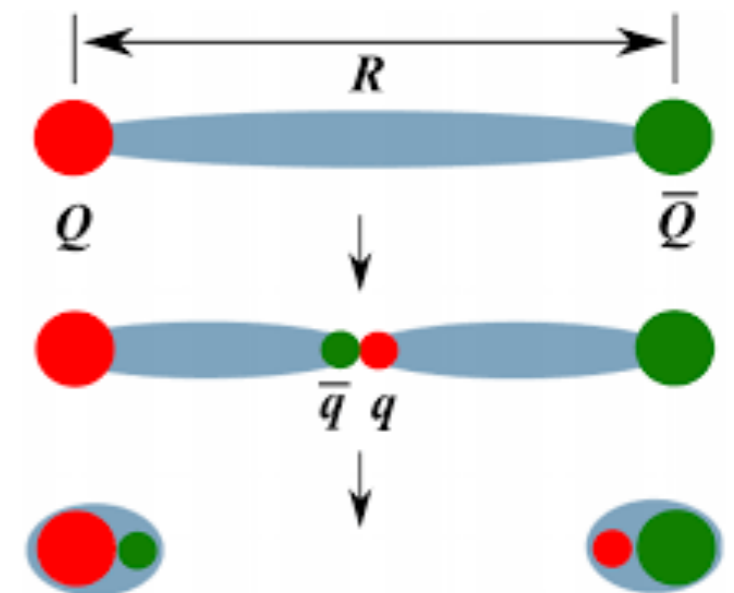
Elektromagnetisk kraft:
Fotonen er elektrisk neutral;
feltlinjerne spredes ud



Stærk kraft: Gluonerne bærer farveladning;
feltlinjerne klistrer sammen til "strengene"

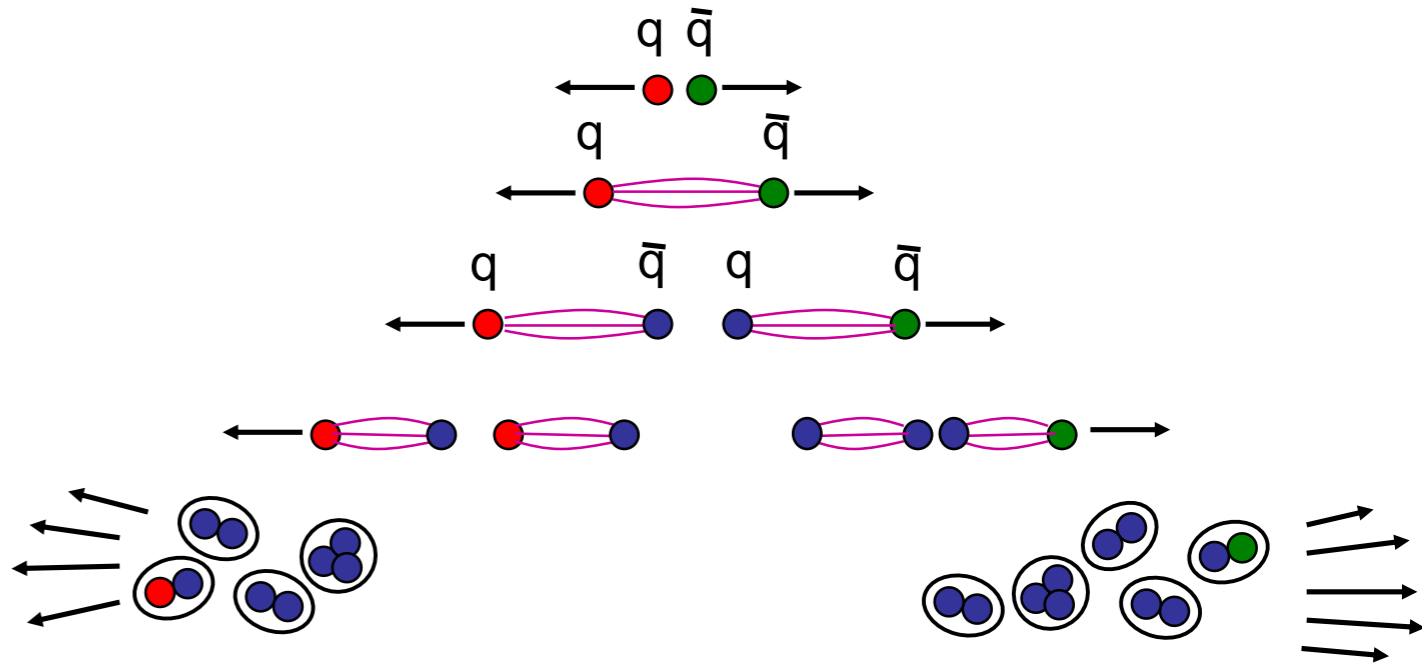


Forsøger vi at adskille to kvarker, bliver energien i "strengen" så stor, at det er favorabelt ($E = mc^2$) at skabe to nye kvarker



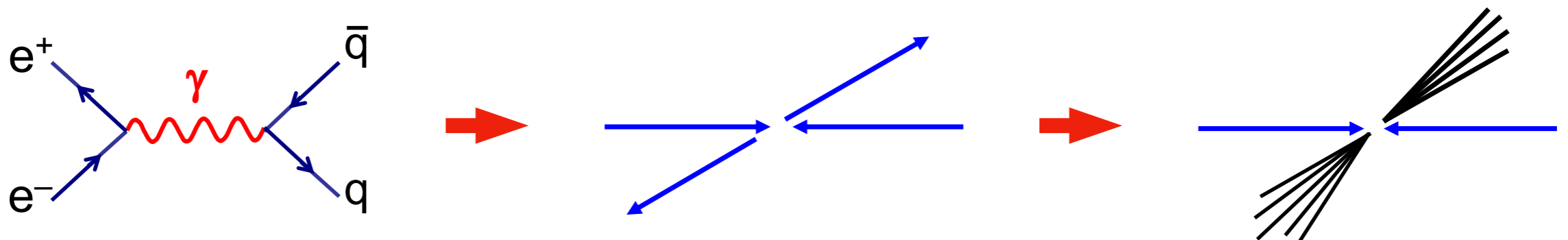
* Betragter højenergetisk kvark-antikvark-par, der separerer:

- i) De oprindelige kvarker bevæger sig væk fra hinanden med høj energi
- ii) Der dannes en farvestreng mellem dem
- iii) Energien i farvestrengen er tilstrækkelig for dannelsen af et nyt $q\bar{q}$ -par
- iv) Processen fortsætter indtil alle kvarker er samlet i hadroner, der danner to "jets"



* Denne proces kaldes **hadronisering**

* Resultatet er, at højenergetiske kvarker (og gluoner) optræder som jets i vore eksperimenter



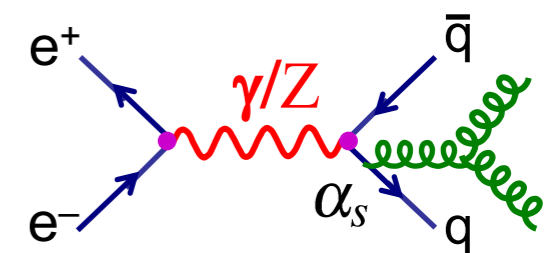
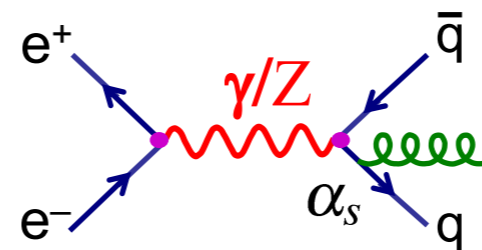
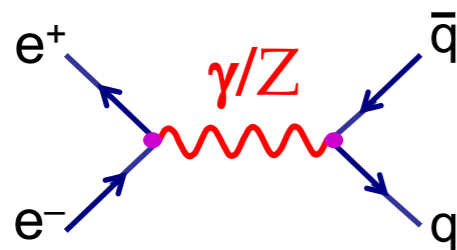
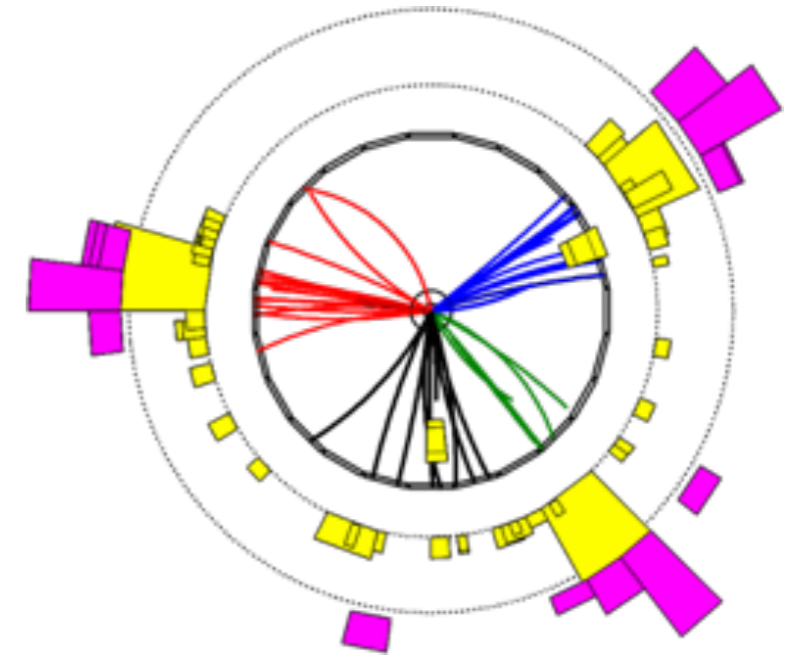
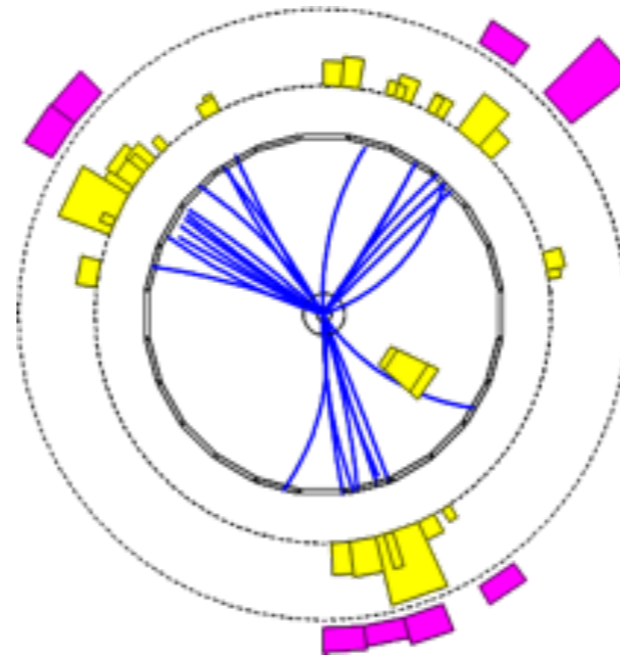
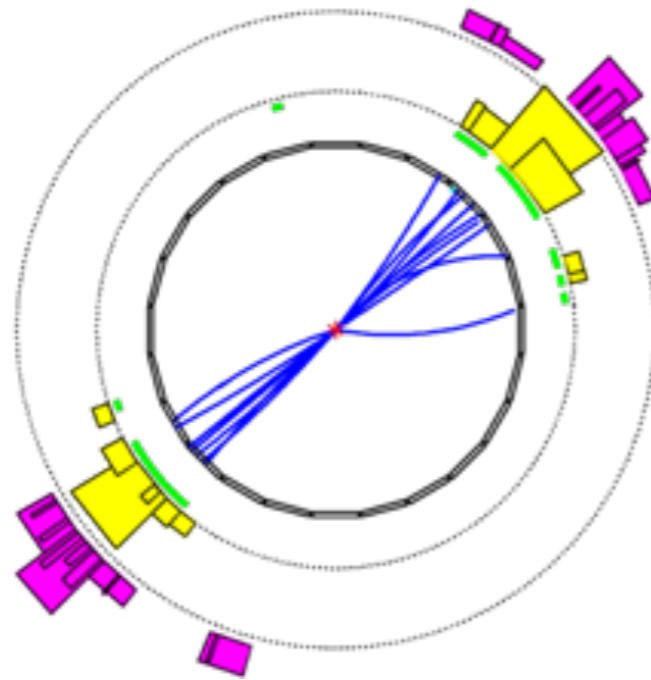
* Elektron-positron-sammenstød har bragt mange resultater i fysikken

$$e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow 2 \text{ jets}$$

$$e^+e^- \rightarrow q\bar{q}g \rightarrow 3 \text{ jets}$$

$$e^+e^- \rightarrow q\bar{q}gg \rightarrow 4 \text{ jets}$$

OPAL at LEP (1989-2000)



Kvark-jets opdaget i 1975 ved SLAC (Stanford Linear Accelerator Centre), CA, USA

3-jet-begivenheder første gang iagttaget ved DESY, Hamburg i 1979.
Opdagelse af gluon-jet og dermed af gluoner

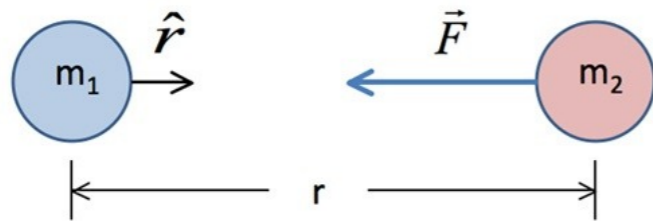
4-jet-begivenheder giver adgang til at påvise (og måle) gluonens kobling til sig selv

De fire naturkræfter

Kraft	Karakteristisk effekt i Naturen	Kraft-partikel	Afstand	Relativ styrke	
Tyngdekraft	Kosmologi, planetbaner	Graviton ($m=0$)	Uendelig	10^{-38}	
Svag kernekraft	Radioaktive henfald, stjerners energi	W^+ , W^- , Z^0 (tunge)	10^{-17} m	$\sim 1/40$	
Elektromagnetisme	Atomfysik kemi, elektronik	Foton, γ ($m=0$)	Uendelig	$1/137$	
Stærk kernekraft	Kernefysik, hadron-partikler	Gluon, g ($m=0$)	10^{-15} m	1	

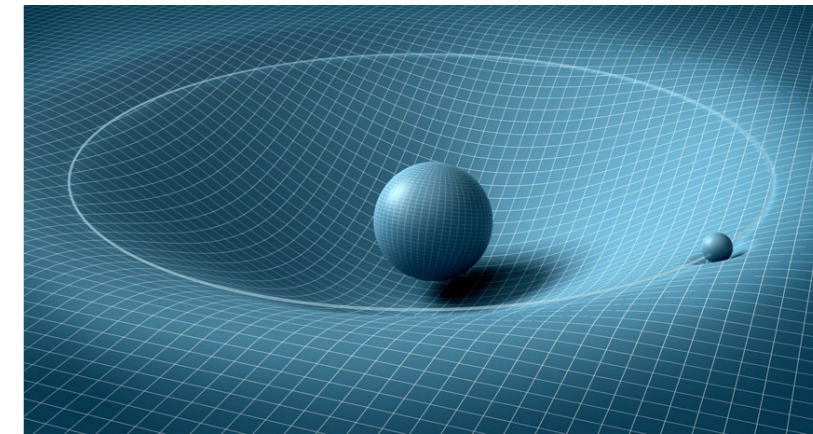
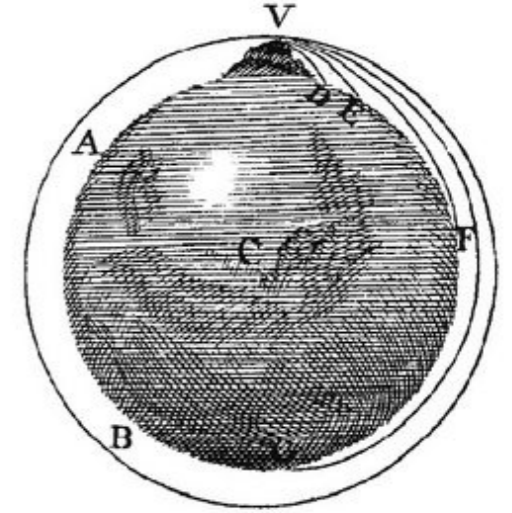
NB. Tyngdekraften er uhyre svag sammenlignet med de andre kræfter. Ubetydelig i partikelfysikken. Men den er kumulativ, og dermed vigtig over store afstande

- * Virker på energi og dermed på **alle partikler**
- * Newton: forenet for himmelsk og jordiske gravitation



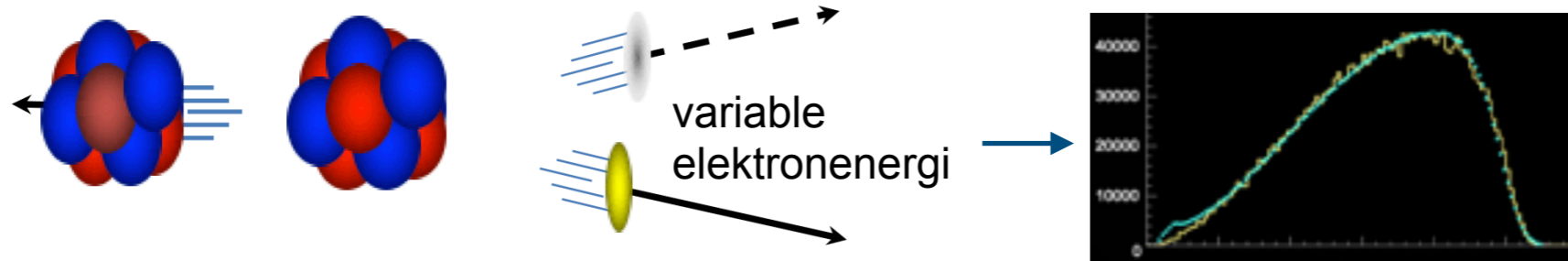
$$\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r}$$

- * Einstein beskriver gravitation ved en *krumning af rumtiden*
- * Endnu efter mere end 90 år, endnu ingen formulering af en kvantemekanisk teori for gravitation
- * **Hierarki**: Gravitation er uhyre svag sammenlignet med de andre tre naturkræfter (10^{-38})
- * Gravitation, ingen betydning i partikelfysikken (?)
- * Men kumulativ: Ingen anti-masse
 - * Elektromagnetisk kraft mellem makroskopiske legeme forsvindende, fordi plus- og minus-ladninger udligner hinanden
 - * Dermed dominerer gravitation over store afstande



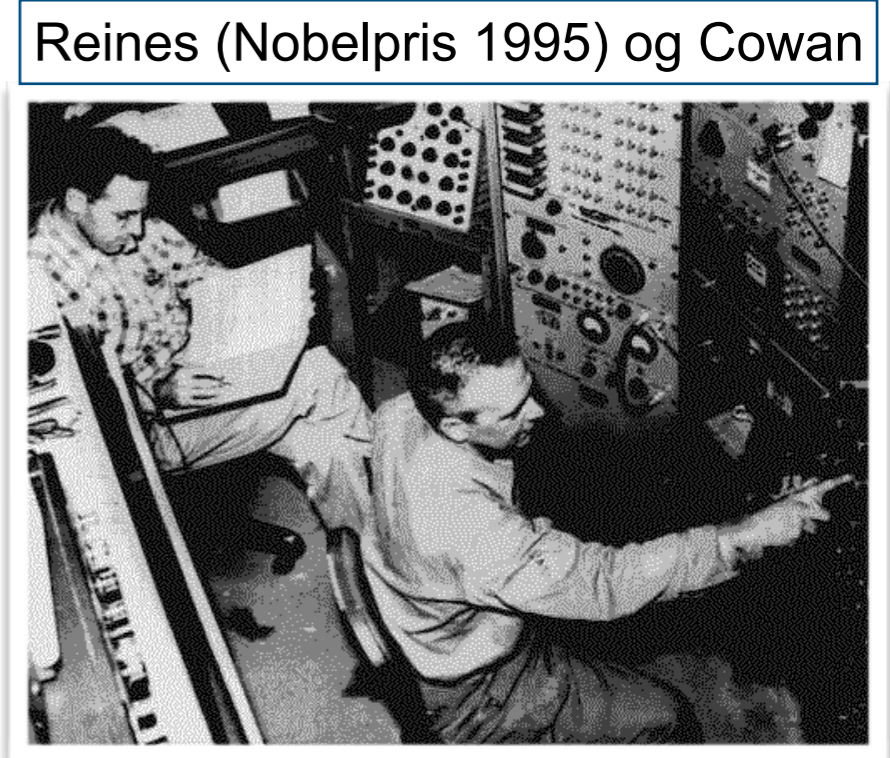
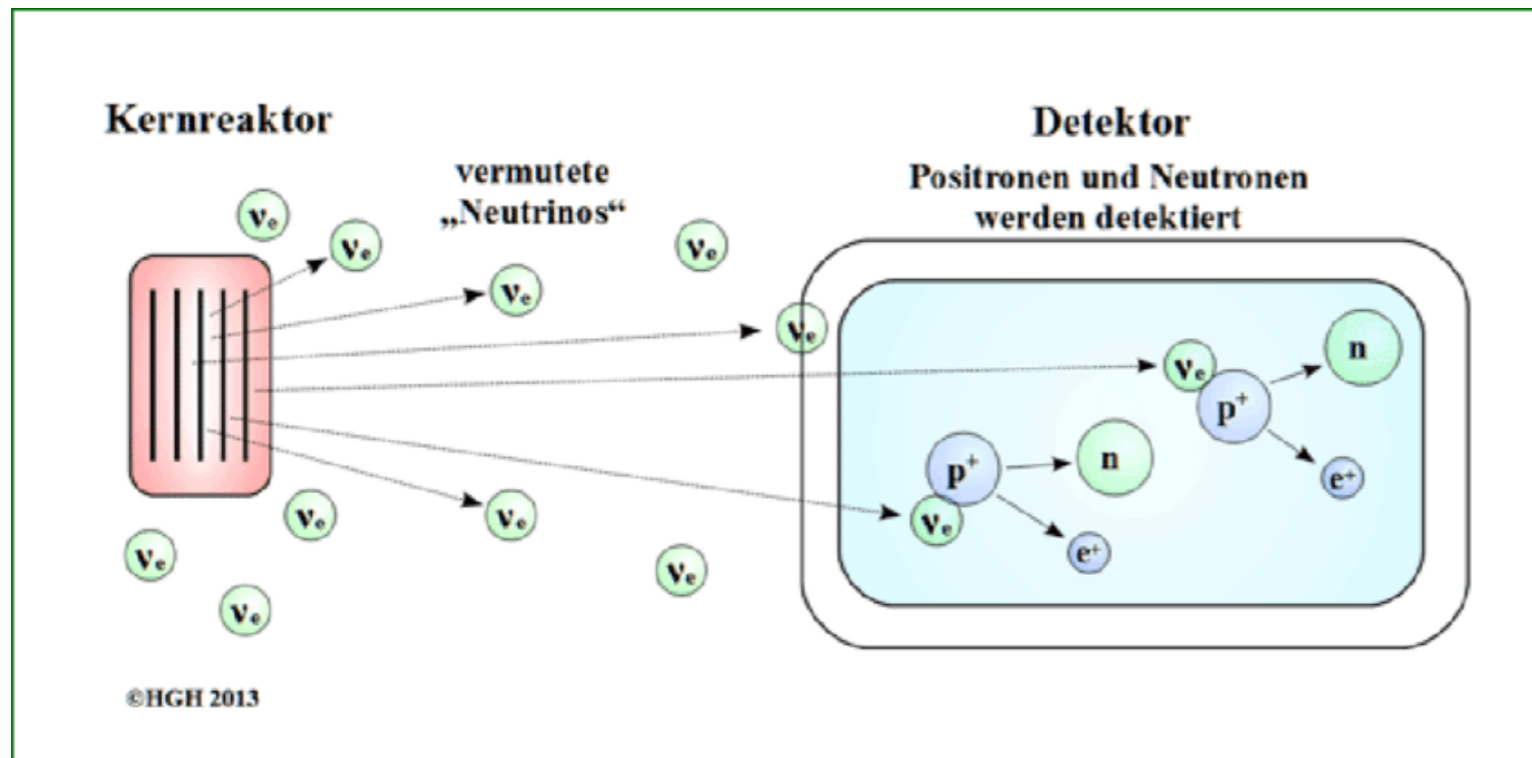
Neutrinoer og svagheden af de svage kræfter

- * "Opfundet" W. Pauli i 1930 for at forklare, hvorfor elektronen i β -henfald ikke er mono-energetisk



W. Pauli, Nobelpris 1945

- * Eksperimentelt påvist i 1956 af Cowan og Reines med udstyr opstillet tæt på (militær) kernereaktor



Reines (Nobelpris 1995) og Cowan



- * Siden 1989 har vi vidst, at der er 3 generationer af neutrinoer (og ikke flere)
 - * Der er neutrinoer overalt:
 - * Fra Big Bang er der efterladt 330 neutrinoer per cm^3 i hele Universet
 - * Dermed næst-hyppigste partikel. Fotoner er den hyppigste med ~ 400 per cm^{-3}
 - * Fra Solen gennemstrømmes vi af 10^{11} neutrinoer per cm^2 per sekund
 - * Men de er sky - vekselvirker uhyre svagt:
 - * En typisk neutrino fra Solen har en middelvejlængde på omkring 100 lysår (10^{18} m) i normalt stof
 - * Der går dermed adskillige timer mellem hver gang en neutrino fra Solen vekselvirker i et menneskes krop
- $$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$$
- * I mange år blev neutrinoer antaget masseløse
 - * Således også i den oprindelige formulering af Standardmodellen
 - * Siden 1998 har vi haft indikationer af, at de har (meget) små masser
 - * “neutrino-oscillationer”

- * Heisenbergs usikkerhedsrelation: Grundlæggende begrænsning på viden ifølge kvantemekanikken

Usikkerheden i positionen...

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$

...gange usikkerheden i impulsen...

...kan ikke være nul. Må overstige denne konstant

- * Alternativ form

$$\Delta E \cdot \Delta t \simeq \hbar/2$$

- * tillader naturen at bryde energibevarelse, ΔE , hvis blot regnskabet går op kort tid senere, Δt

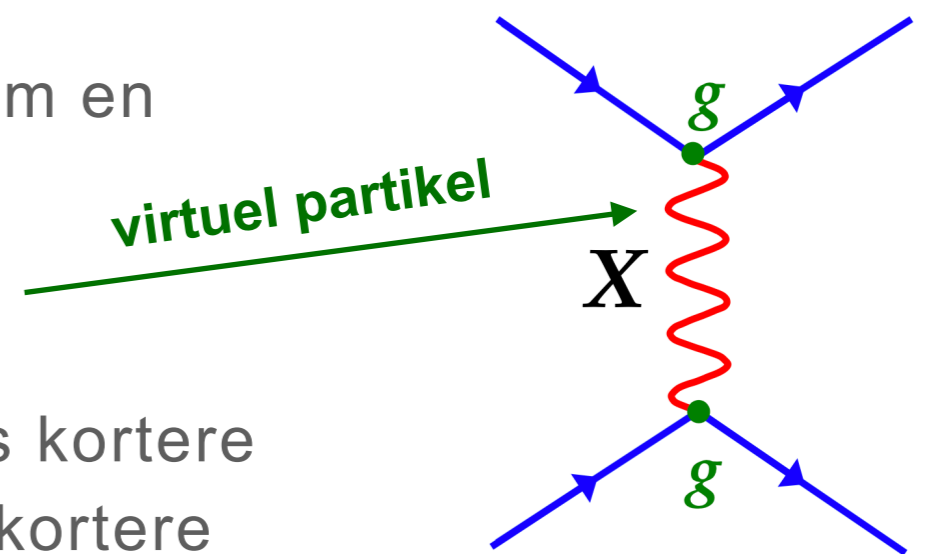
- * Dette tillader igen *kortvarige* brud med den fundamentale Einstein'ske sammenhæng mellem en partikels energi, masse og impuls, således at

$$E^2 = m^2 + m^2 \quad \rightarrow \quad E^2 \neq m^2 + m^2$$

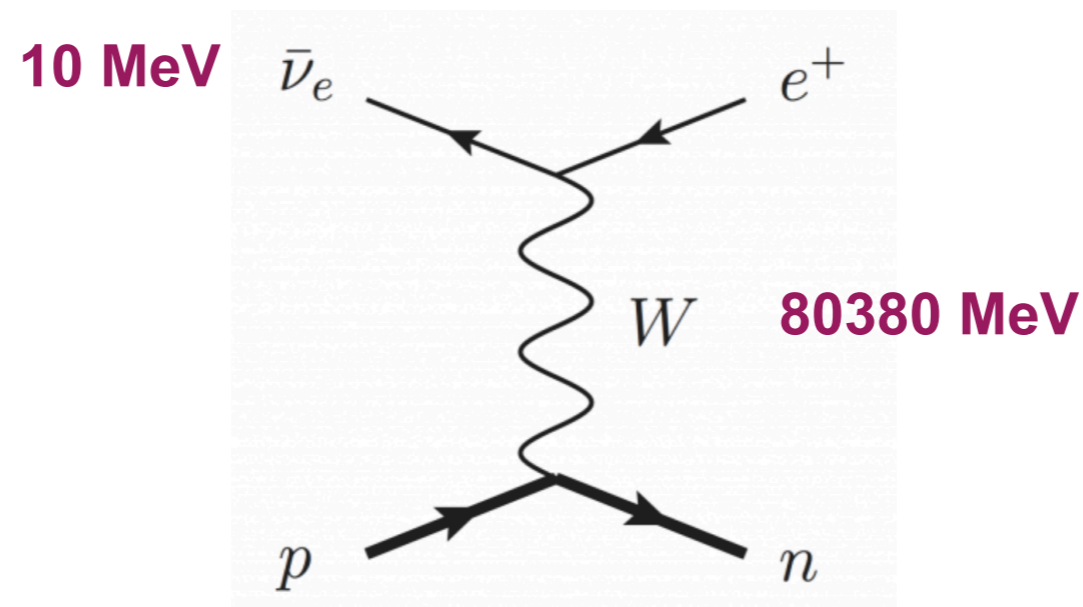
- * Des mere virtuel en partikel er (større ΔE), des kortere tid kan partiklen eksistere (mindre Δt), og des kortere kan partiklen bevæge sig: Kortere rækkevidde af kraften



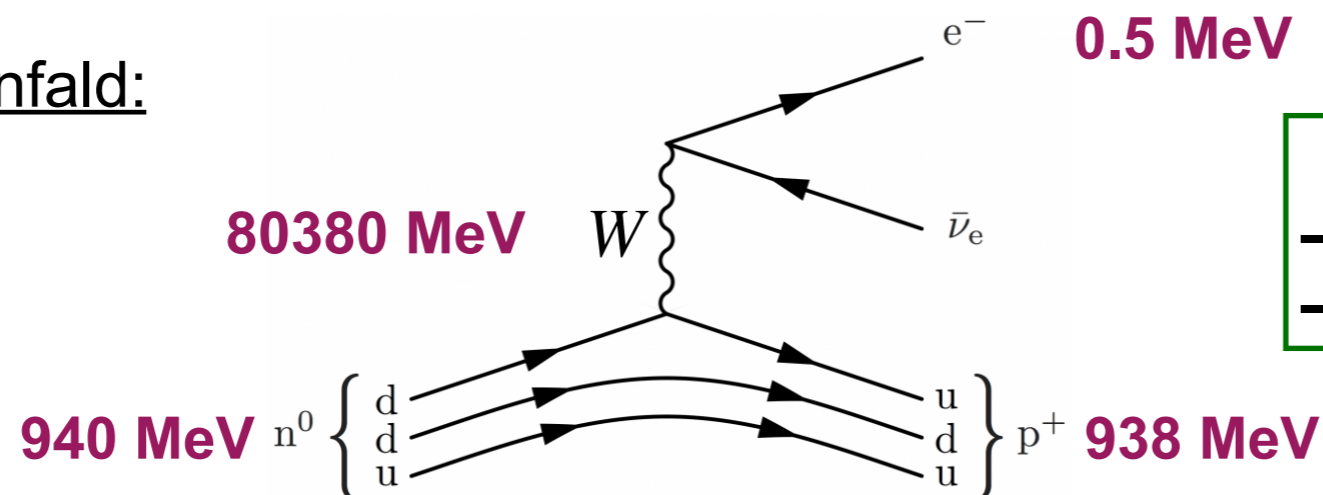
W. Heisenberg, Nobelpris 1932



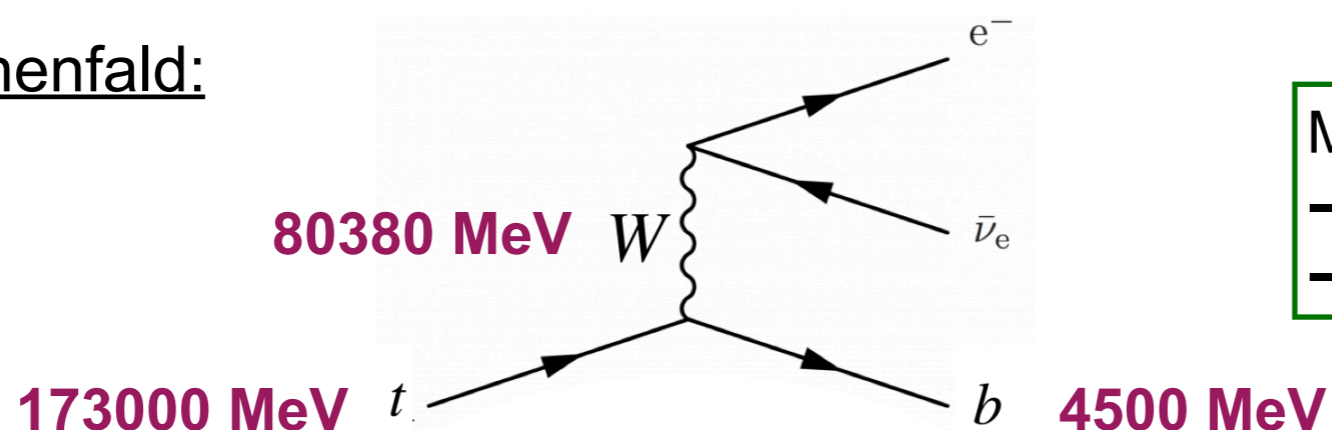
- * En (anti-)neutrino fra Solen vekselvirker med stof:



- * For at vekselvirkningen kan foregå, må Naturen “købe” en W -boson. Denne har en pålydende værdi (masse) på 80380 MeV
- * Men en typisk neutrino fra Solen har kun (en energi på) 10 MeV til rådighed: Den må da nøjes med at “købe” en meget virtuel W -bosonen
 - * Denne kan da højst bevæge sig omkring 10^{-18} m
 - * Altså, må neutrinoen passere tættere end dette på (en af de to u -kvarker inde i) protonen, for at processen vil kunne foregå.
 - * Dette tilsvare et ekstremt lille areal. Husk at protonen befinder sig i et atom. Atomets tværsnitsareal er omkring 10^{16} gange større.
 - * Dermed vil neutrinoen passere gennem uhyre mange atomer før en vekselvirkning endelig sker.

Neutron-henfald:

- W-bosonen er ekstremt virtual
- Undertrykt proces
 - Neutronens levetid: ~15 min

Top-kvark-henfald:

- Masser af energi til rådighed.
- W vil være reel
 - top-kvarkens levetid: 5×10^{-25} s

- * De svage vekselvirkninger er altså udelukkende svage p.g.a. den store masse af W- (og Z-) bosonerne
- * Ved "normale" processer er W- (og Z-) bosonerne stærkt virtuelle
- * I processer, hvor der er nok energi til rådighed, og hvor W- (og Z-) bosonerne kan være reelle, er de svage vekselvirkninger slet ikke svage

Naturkræfterne og Gaugeeteorier

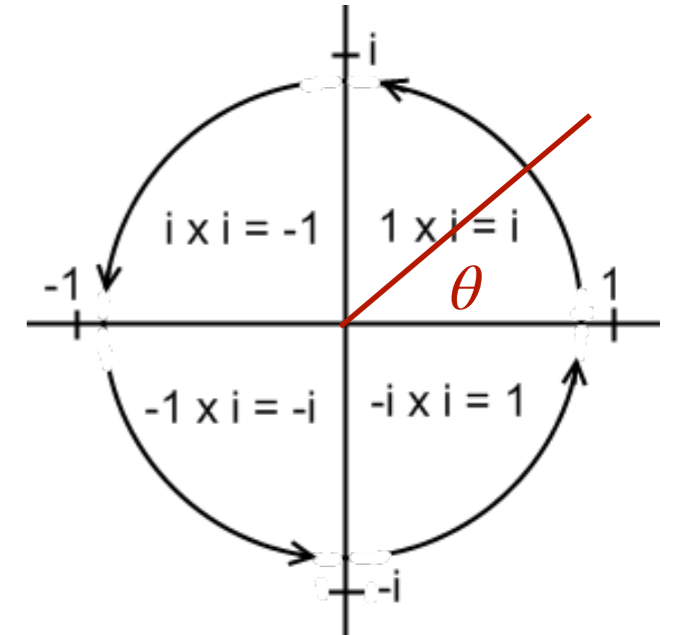
- * I kvantemekanikken beskrives partikler via en bølgefunktion, $\psi = \psi(x, t)$
- * Målbare størrelser afhænger af **kvadratet** på bølgefunktionen, $|\psi|^2$

* **Altså er fortegnet på bølgefunktionen irrelevant**

* samme fysik for $+\psi$ som for $-\psi$

* **Udvidet fortegnsbegreb: det komplekse plan**

* Samme fysik uafhængig af rotation i det komplekse plan



* **Global gauge-transformation:**

* Rotation af bølgefunktionen i det komplekse plan med samme konstante vinkel θ overalt i tid og rum

$$\psi \rightarrow \psi' = \psi e^{i\theta}$$

* **Lokal gauge-transformation:**

* Rotation af bølgefunktionen med en vinkel, hvis værdi er tids- og positionsafhængig

$$\psi \rightarrow \psi' = \psi e^{i\theta(x,t)}$$

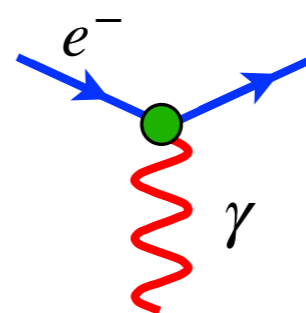
- * Hvor en global gauge transformation (trivielt) ingen indflydelse har på fysikken, så er situationen mere kompliceret for en lokal transformation.
- * Kan opretholde invariansen af fysikken under en lokal gauge transformation ved at:
 - * Indføre endnu et felt (udover partikelfeltet ψ). Dette felt må have spin-1, og altså repræsentere en kraftbærende partikel, fx. fotonen (felt A_μ)
 - * Sikre os, at dette felt vekselvirker på en ganske bestemt måde med partikelfeltet
- * Eksempel: Elektromagnetisk kraft
 - * Stoflig partikel med elektrisk ladning q , fx elektron

e^-

Fri elektron
(felt ψ)

$$\psi \rightarrow \psi' = \psi e^{iq\chi(x)}$$

Krav om invarians under lokal gauge transformation



Elektromagnetisk vekselvirkning mellem elektron og foton

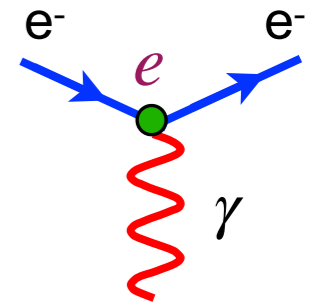
$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{j} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \end{aligned}$$

Maxwells elektromagnetisme

- * Vore naturkræfter beskrives via gaugeteorier (teorier med lokal gaugeinvarians)

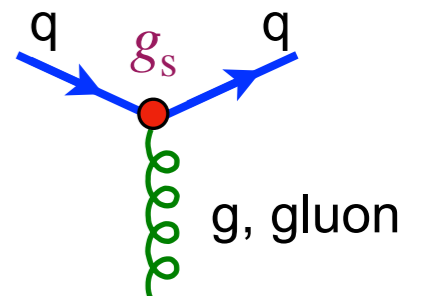
- * **Elektromagnetisme**

- * Én ladning: positiv (+), negativ (-)
- * Gaugetransformation (rotation) i det komplekse plan, **U(1)**: én foton



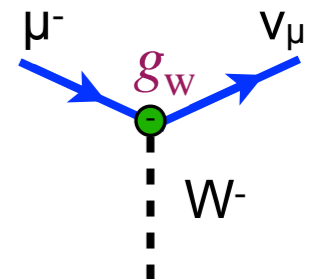
- * **Stærk kraft**

- * Tre ladninger: rød, grøn, blå
- * Gaugetransformation i 3D “farve-rum”, **SU(3)**: 8 gluoner



- * **Svag kraft**

- * To ladninger: kompliceret...
- * Gaugetransformation i et 2D rum, **SU(2)**: 3 vektorbosoner

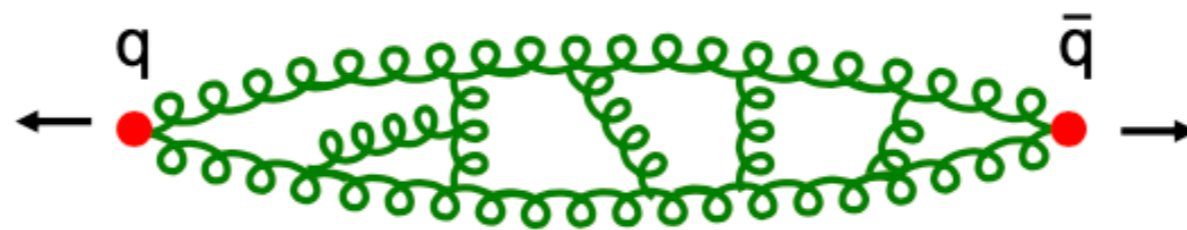
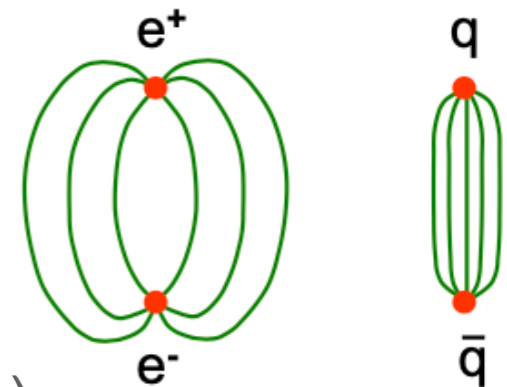
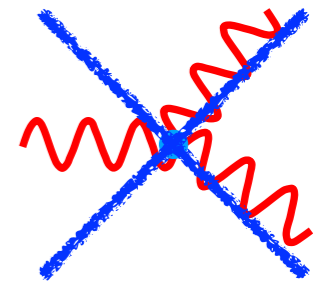


- * Den vigtige lære er, at **lokal gaugesymmetri specificerer fuldstændig formen af hver af de tre naturkræfter**

- * **Kun én fri parameter per naturkraft: koblingskonstanten**

- * elektromagnetisme: e , stærk kraft: g_s , svag kraft: g_w

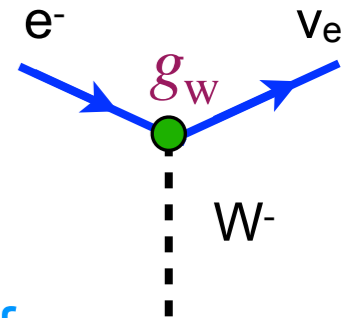
- * Elektromagnetisme beskrives via gruppen **U(1)**
- * **Kommutativ gruppe: fotonen vekselvirker ikke med sig selv**
- * Den stærke kraft beskrives via gruppen **SU(3)**
- * **Ikke-kommutativ: gluoner vekselvirker med sig selv**
- * De to forskellige opførsler giver anledning til den forskellige måde, hvorpå feltlinjerne breder sig ud i rummet:
- * **Fotoner kender ikke til hinandens eksistens; de spreder sig**
- * **Gluoner vekselvirker indbyrdes; de "klistrer" sammen og giver ledning til en "colour tube"**
- * Dette igen giver anledning til "confinement" (ingen frie kvarker)



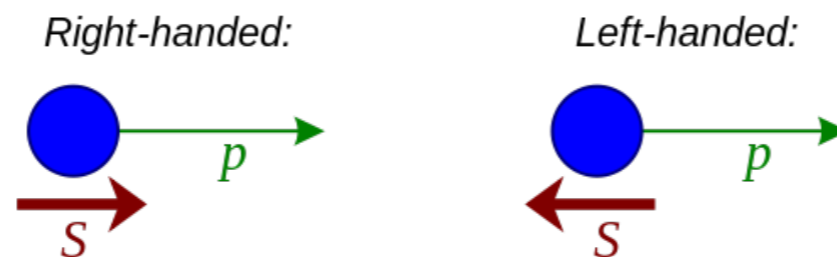
- * Den svage kraft beskrives via gruppen SU(2)
- * Partikler, der vekselvirker svagt, optræder i en 2D matematisk struktur, kaldet en “*weak isospin doublet*”

- * Eksempel elektronen

$$\varphi_L = \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L$$

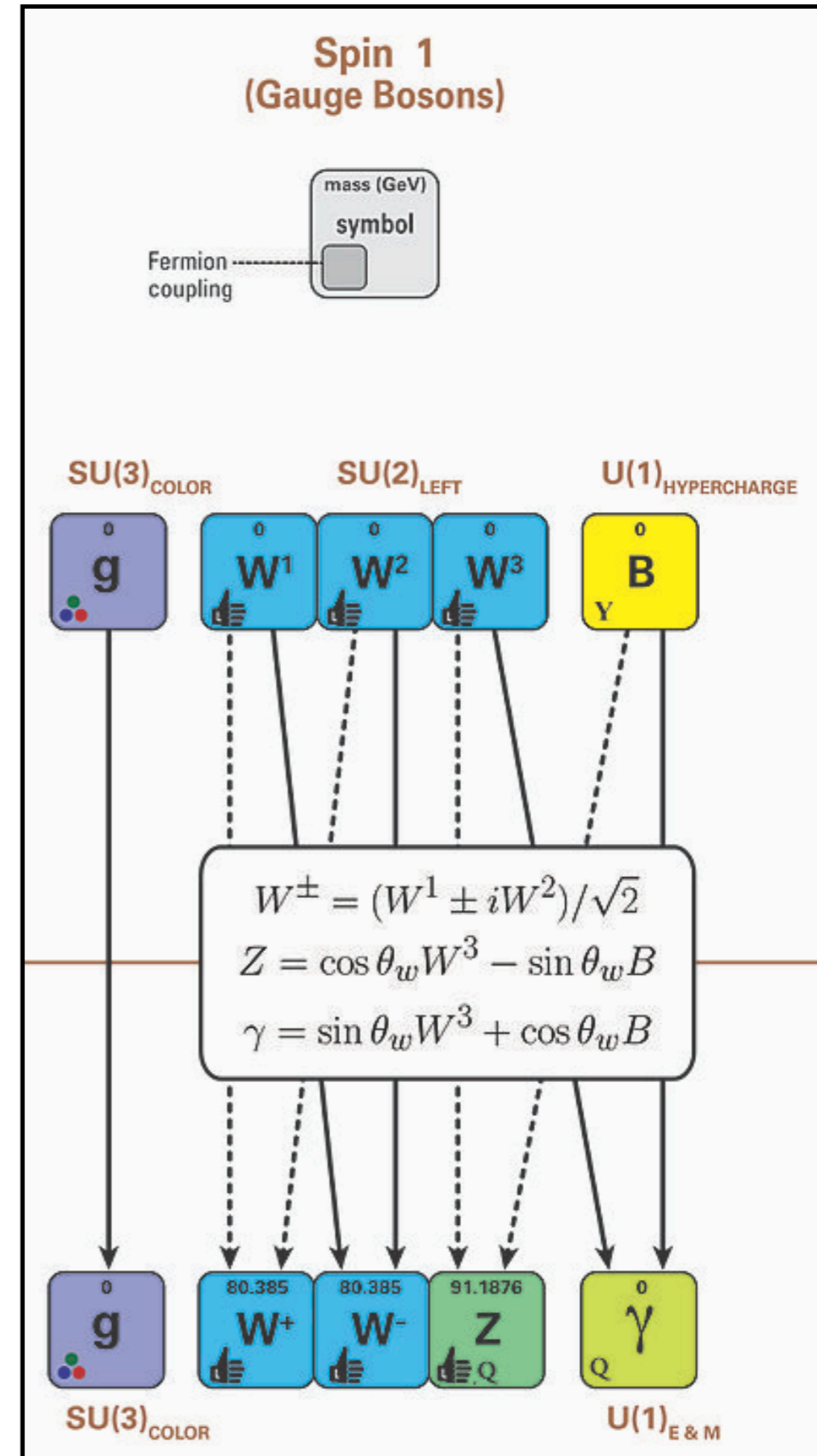


- * Svag vekselvirkning “transformerer” inden for dette rum, og kan fx “omdanne” en elektron til en elektron-neutrino
- * Kun venstrehåandede partikler og højrehåandede anti-partikler (L) vekselvirker med W-bosonerne.

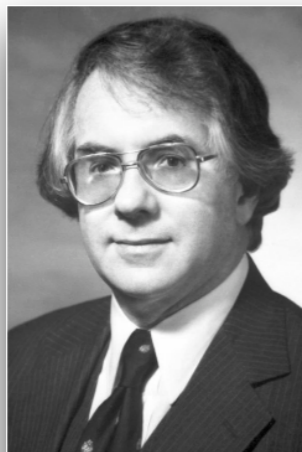


- * SU(2) forudser tre “gauge-bosoner”.
 - * Fristende at associere disse med W^- , Z^0 , W^+
 - * Dette er korrekt for W^- , W^+ , men ikke for Z^0

- * I Standardmodellen optræder felterne tilsvarende de endelige kraftbærende partikler, γ og Z^0 , som linearkombinationer af to "oprindelige" felter, B og W^3
- * W^3 -feltet er SU(2)-partner med W^1 - og W^2 -felterne, som kombinerer til at danne W^- og W^+
- * B-feltet tilhører en U(1)-gruppe, hvis ladning kaldes *hyperladning*
 - * $U(1)_{EM}$ optræder først efter miksing
- * Styrken med hvilken B og W^3 mikser til at danne γ og Z^0 angives via en vinkel, θ_w ,
 - * *Weinbergvinklen* eller *weak mixing angle*



Nobelpris 1979



Sheldon Lee Glashow

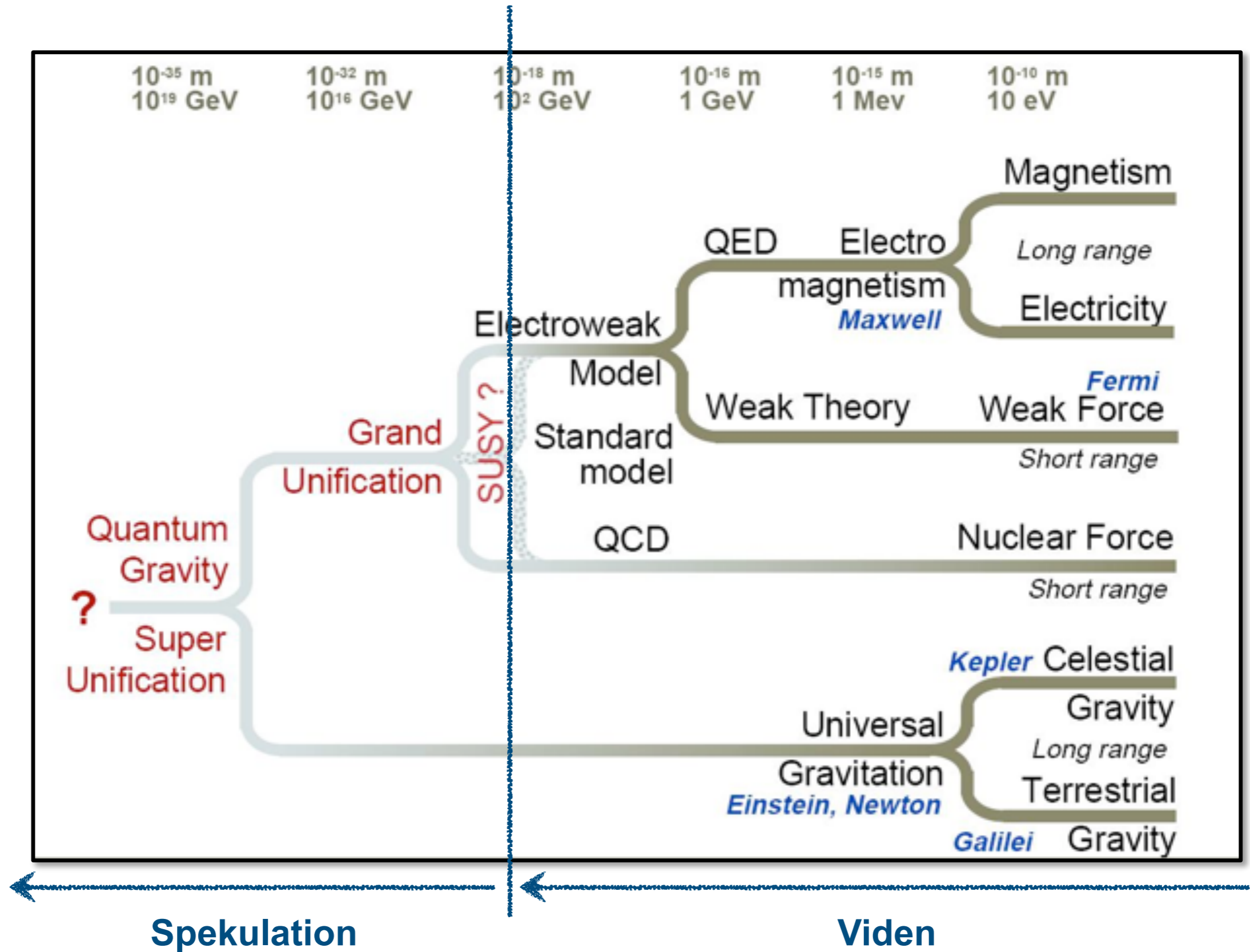


Abdus Salam



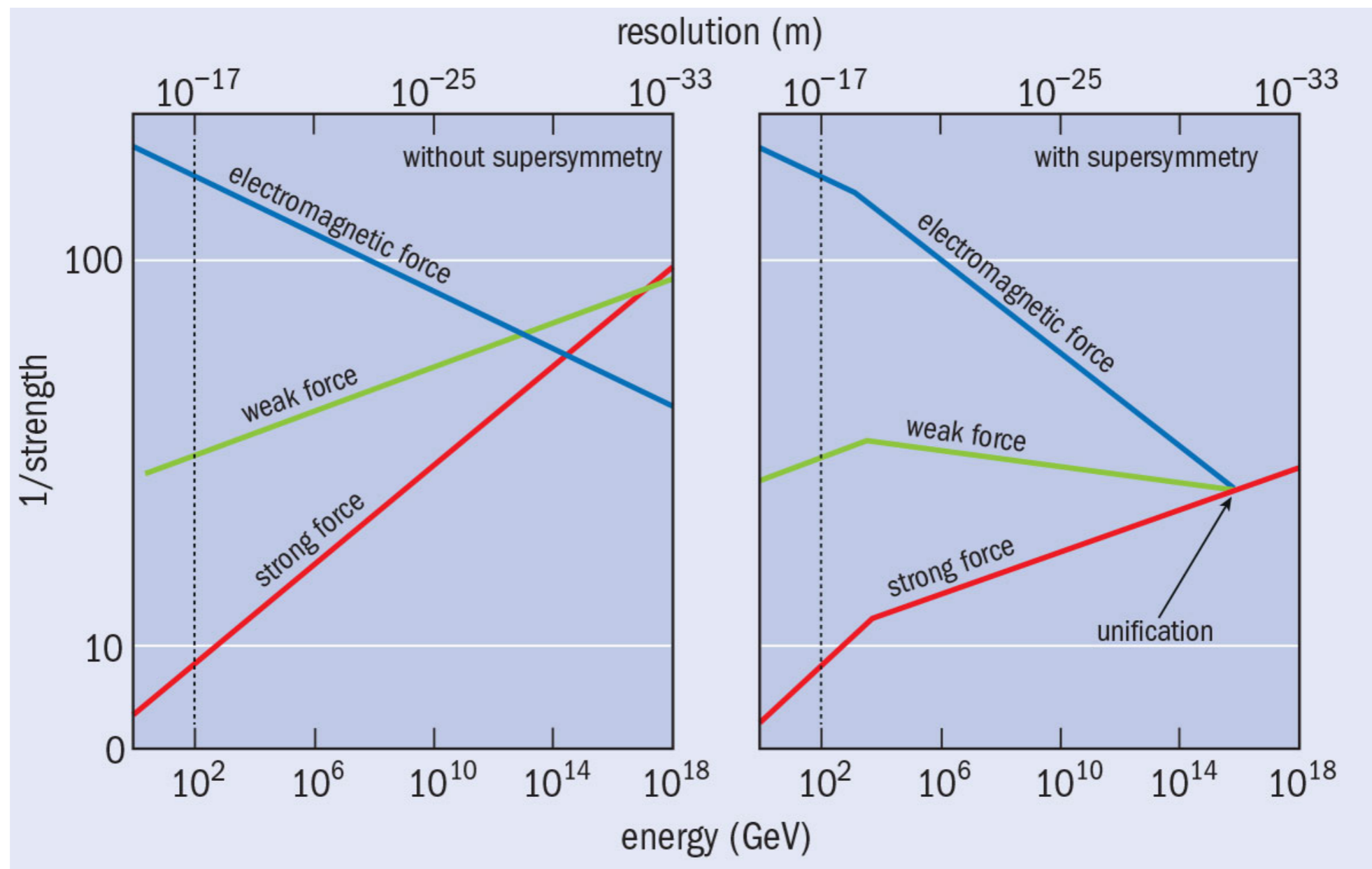
Steven Weinberg





- * Vi har set, at vekselvirkningerne i Standardmodellen er baseret på tre symmetri grupper
 - * $SU(3)_{\text{colour}}$, $SU(2)_L$, og $U(1)_{\text{hypercharge}}$
- * Fotonen og Z^0 -bosonen opstår gennem en sammenblanding (miksing) af de neutrale felter tilhørende $SU(2)_L$ og $U(1)_{\text{hypercharge}}$
- * Strukturen af vekselvirkningerne er fuldstændig givet via symmetri gruppernes egenskaber
- * Til hver gruppe er der tilknyttet én fri parameter, koblingskonstanten, som vi må bestemme eksperimentelt
- * Derudover er den svage mikse-vinkel er fri parameter.
- * I vekselvirkningsdelen af Standardmodellen er der altså (kun!) fire frie parametre:
 - * Styrken af den elektromagnetiske kraft: $\alpha_{\text{em}} \simeq 1/137$
 - * Styrken af den svage kraft: $\alpha_{\text{w}} \simeq 1/40$
 - * Styrken af den stærke kraft: $\alpha_{\text{s}} \simeq 0.1 - 1$
 - * Den svage mikse-vinkel: $\sin^2 \theta_{\text{w}} \simeq 0.23$

- * Det viser sig, at koblingskonstanterne faktisk ikke er konstante, men afhænger af energien
- * Ved at ekstrapolere op i energi, kan vi da spørge om konstanterne mødes
- * Det ser besnærende ud, men kun ved at indføre *supersymmetri* kan man få et perfekt match



Elementarpartiklerne og masse

- * Vi har set, at gaugeprincippet giver en præcis beskrivelse af Standardmodellens vekselvirkninger
- * Der er bare ét “lille” problem: Princippet virker kun, hvis alle involverede partikler er masseløse
- * **Specielt må W- og Z-bosonerne være masseløse**
 - * Men da ville den svage kraft have uendelig rækkevidde, præcis som den elektromagnetiske kraft (masseløs foton); og dermed ville Solen brænde op på et splitsekund
- * **Men også de stoflige partikler må være masseløse**
 - * De ville da bevæge sig med lyshastigheden og ikke kunne danne stof.
- * **Så, nej det går ikke. Vi bliver nødt til at skaffe masser!**
- * Løsning: **Higgs-mekanismen**

Peter Higgs

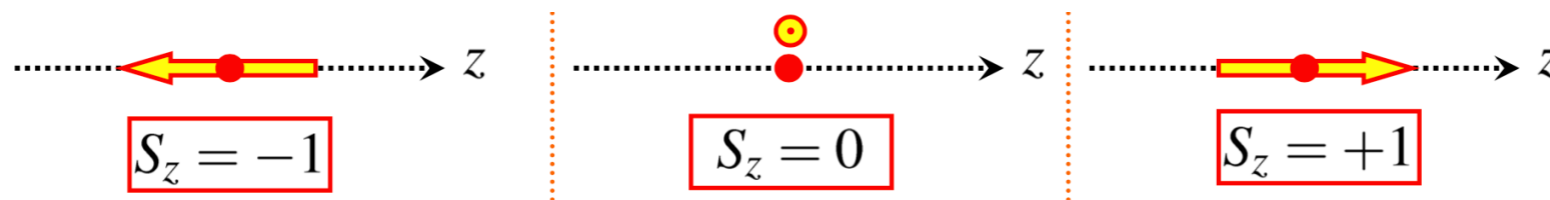


Englert & Brout

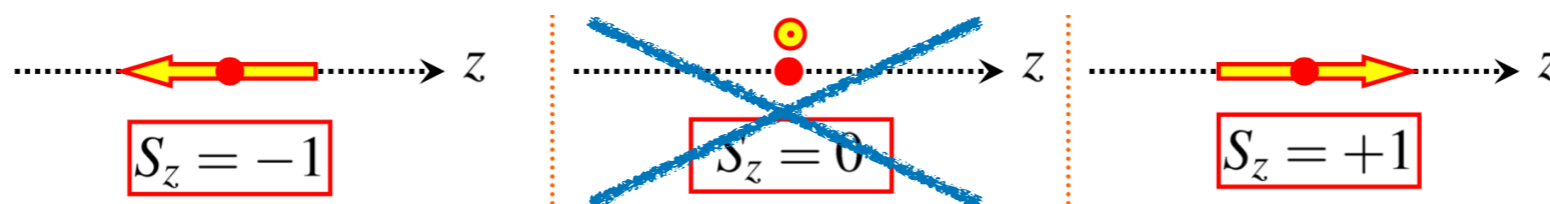


Higgs & Englert, Nobelpris 1913

- * Lys består af fotoner, som er spin-1-partikler
- * Normalt vil en spin-1 partikel have tre mulige spinretninger:



- * Fotonen er masseløs og bevæger sig dermed med lyshastigheden
- * Dermed er kun de to parallelle spin-retninger mulige



- * Læren er, at for gaugebosoner (spin-1-partikler)

masseløs partikel \neq massiv partikel

på samme
måde som

$2 \neq 3$

- * For at gøre en masseløs partikel massiv, må vi "lægge 1 til"

2 frihedsgrader + **1** frihedsgrad = **3** frihedsgrader

masseløs
gaugeboson

**Higgs-
mekanismen**

massiv
gaugeboson

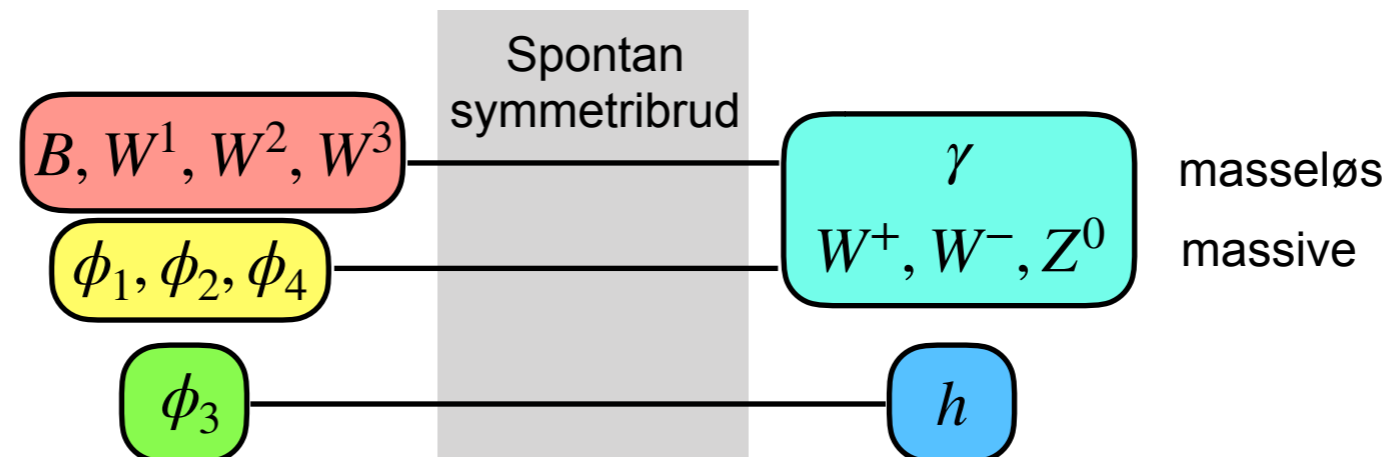
- * W- og Z-bosonerne tilhører den svage kraft. Symmetrigruppen er SU(2)
- * **Stoflige partikler optræder som dubletter i det tilhørende 2D rum**

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L, \dots$$

- * For at generere masser til W^\pm og Z må vi tilføje (mindst) 3 nye frihedsgrader i dette rum
- * **Dette gør vi ved at indføre en dublet af komplekse skalare (spin-0) felter**

$$\phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \phi_1 + i\phi_2 \\ \phi_3 + i\phi_4 \end{pmatrix}$$

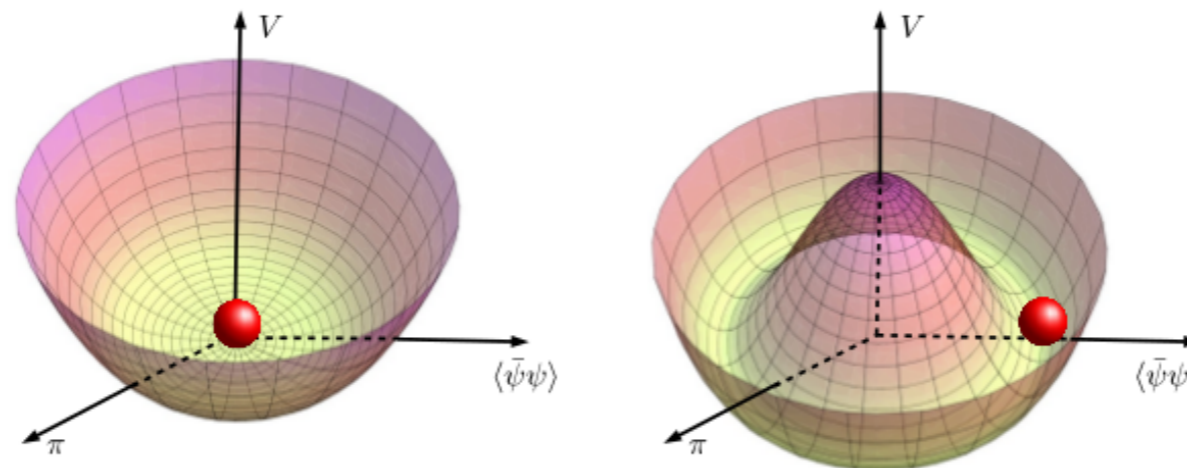
- * Denne har godt nok 4 frihedsgrader ($\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$), men der er ingen måde, hvorpå vi kan ramme præcis 3, så det må vi leve med
- * Den ekstra, fjerde frihedsgrad viser sig at repræsentere Higgs-partiklen



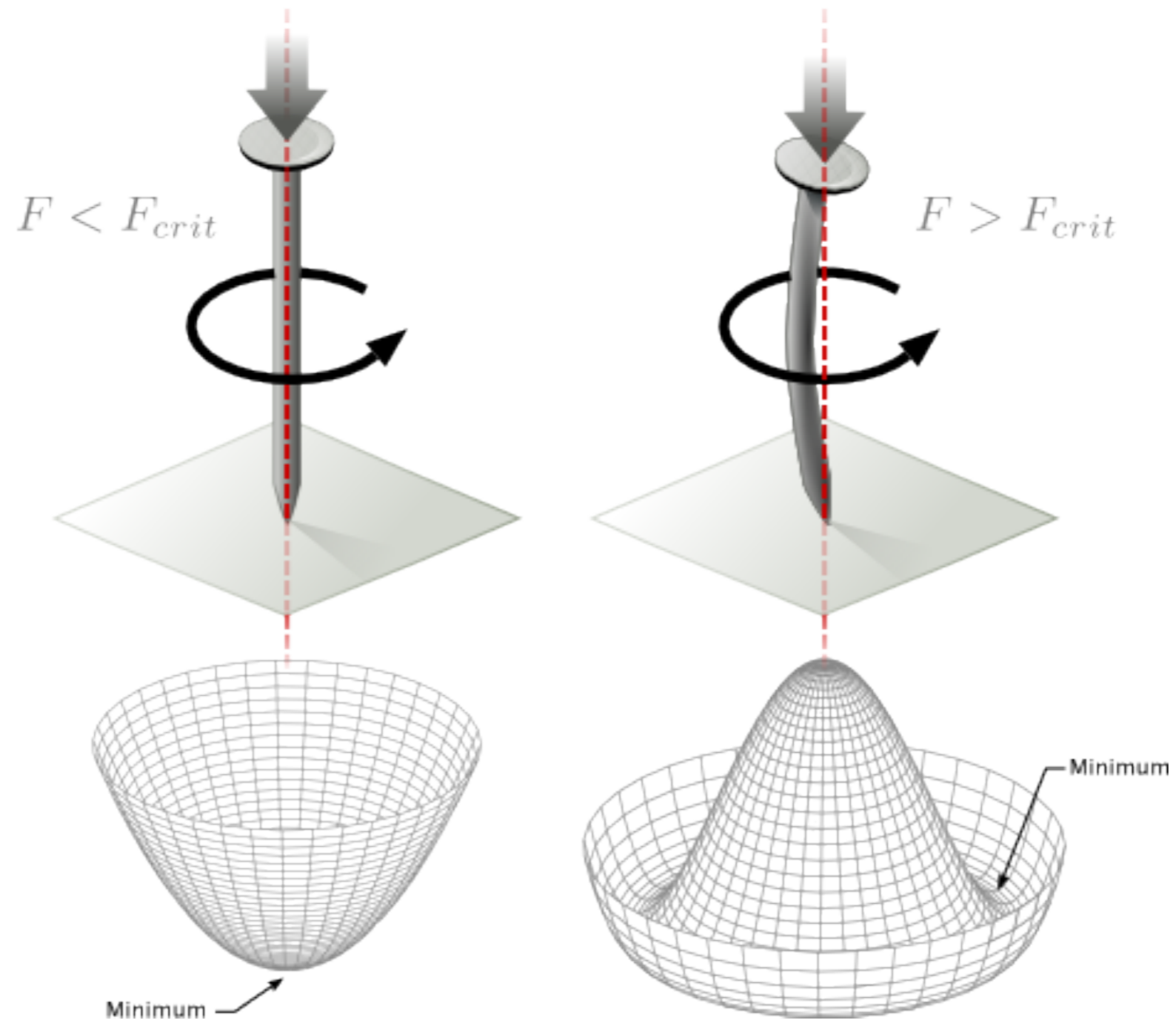
- * Ved at indføre Higgs-feltet sker der i sig selv ikke noget interessant
- * Dette sker først med det **spontane symmetribrud**
- * Vigtigt at opretholde teoriens (gauge-)symmetri, da den ellers mister sin beregnbarhed
- * Så alt hvad vi gør skal tilfredsstillende **SU(2)-symmetrien**
- * For det nye felt indfører vi en (SU(2)-symmetrisk!) potentiel energifunktion
 - * For at illustrere situationen går vi nedenfor ned i dimension til U(1)

Spontan symmetribrud

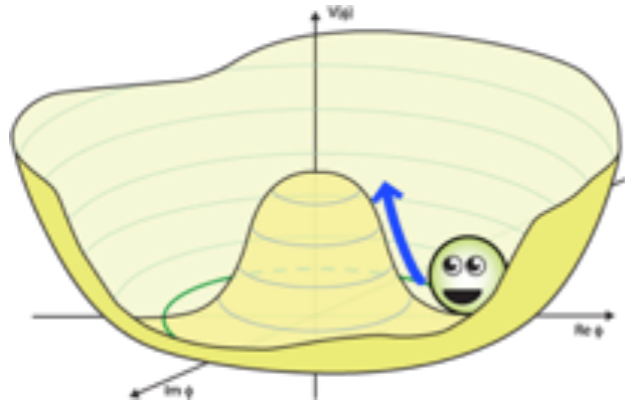
På denne side sker der intet interessant. Potentialfunktionen er symmetrisk. Minimum er i midten. Kuglen bliver liggende på symmetriaksen



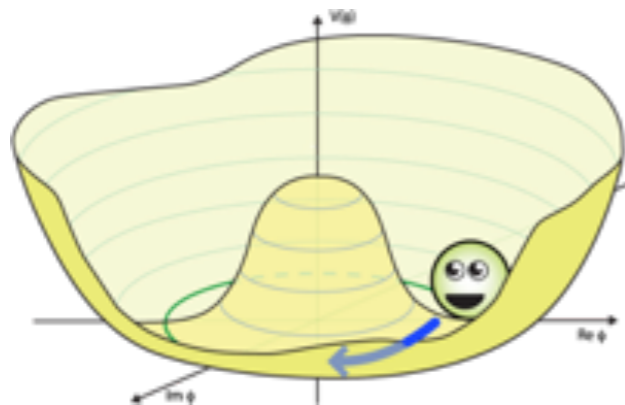
Herovre er det straks mere spændende. Potentialfunktionen er stadig symmetrisk. Men minimum ligger på en ring væk fra symmetriaksen. Kuglen triller ned. Tilfældigt (spontant) må den vælge en retning. På trods af teoriens underliggende symmetri, må naturen bryde denne.



- * Nu sidder naturen nede i bunden af den mexikanske hat og kan bevæge sig i to retninger



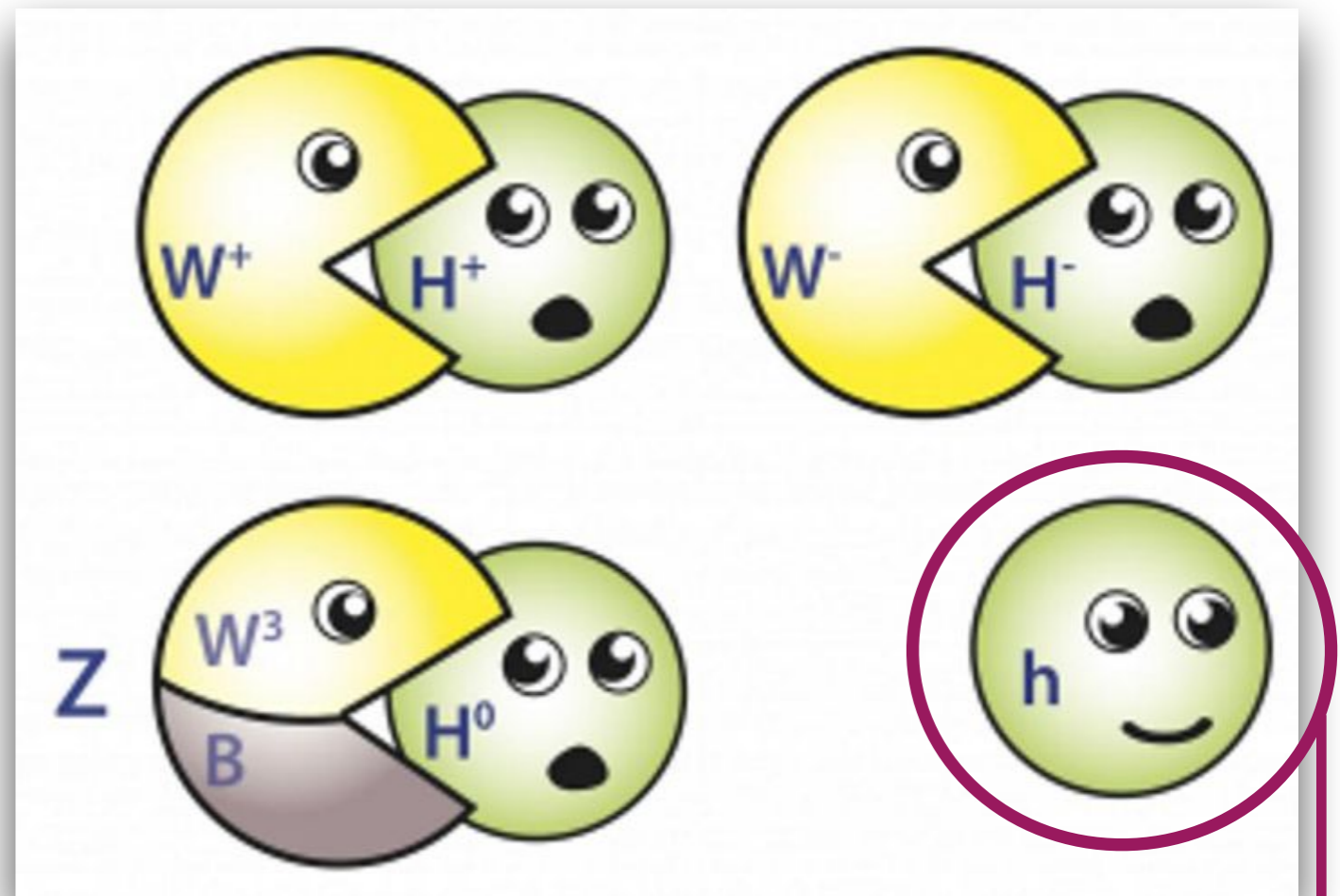
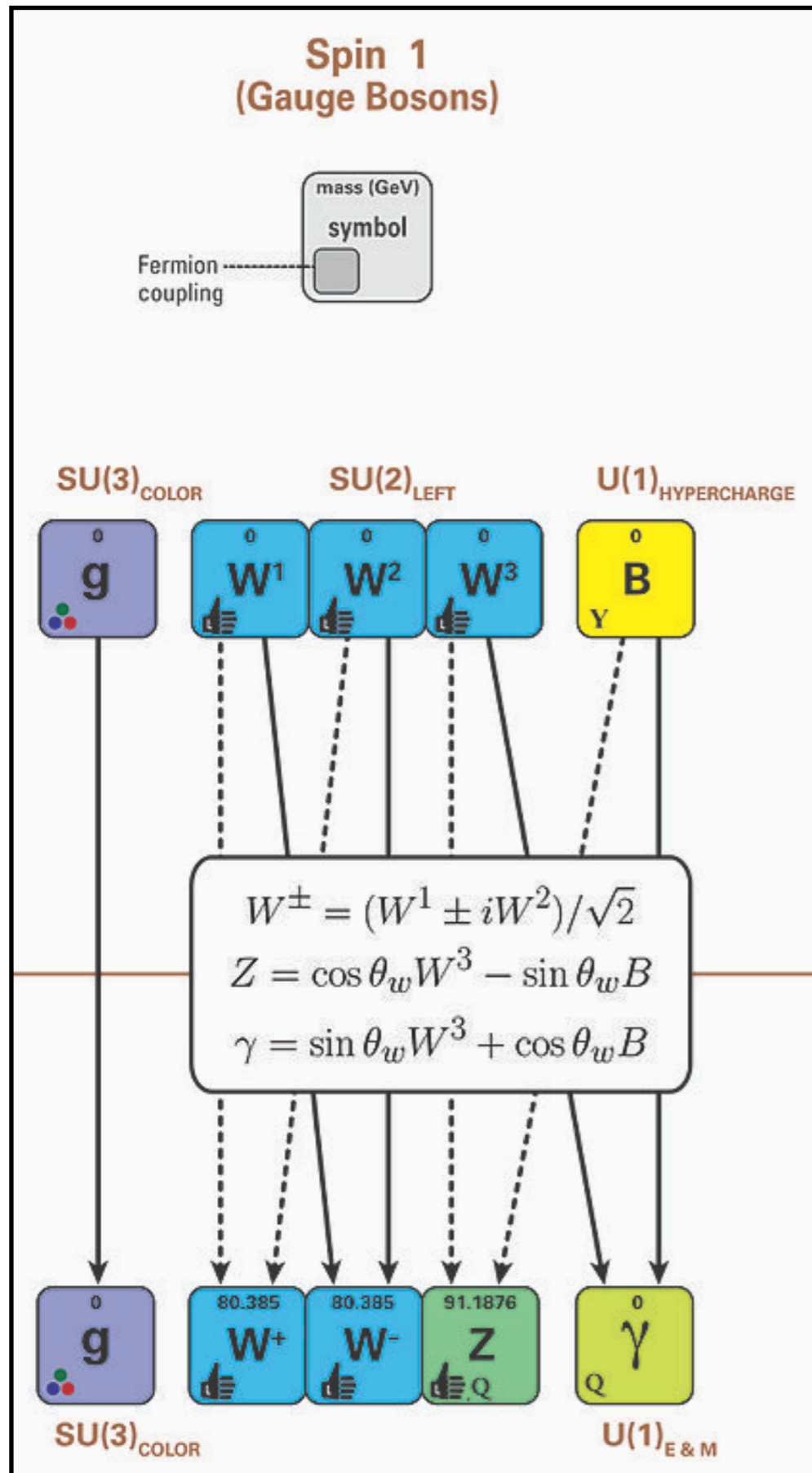
- Denne retning tilsvare, en partikel med masse. Krumningen er proportional med masse. Denne retning kommer til at tilsvare Higgs-bosonen



- I denne retning går det ikke op ad bakke; ingen krumning; retningen er flad. Dette tilsvare (endnu) en masseløs partikel

Vi synes langt fra målet...

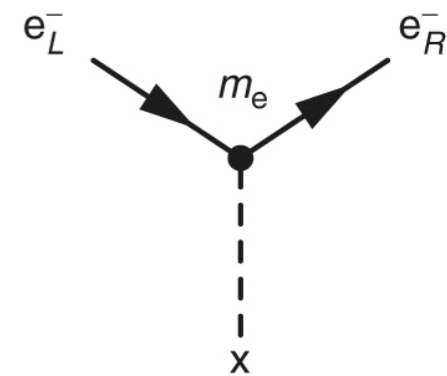
- * Nu går vi så tilbage til SU(2), hvor denne mekanisme fører til **én massiv partikel** og ikke mindre end **tre nye masseløse partikler**
- * Det matematiske “mirakel” er nu, at disse tre nye frihedsgrader kommer til at optræde som de longitudinelle frihedsgrader af de tre gaugebosoner tilsvarende SU(3)
- * W^+ , W^- , og Z^0 har fået masser !!



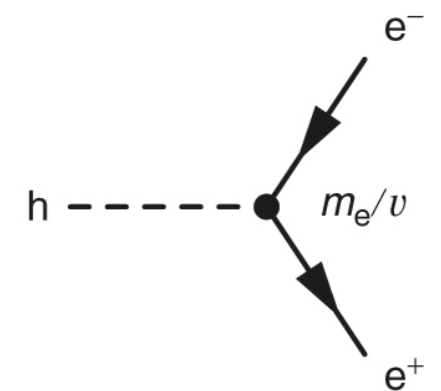
Vi opnåede, det vi søgte

- Vi fik givet W^\pm og Z bosonerne masser uden at vi måtte bryde gaugesymmetrien
- Men som et biprodukt, fik vi et nyt felt, som tilsvarende en ny partikel: Higgs-bosonen
- Eftervis, at denne model har noget med virkeligheden at gøre: Find Higgs-bosonen!

- * Gaugesymmetrien forbyder ligeledes en direkte indførelse af masser for fermionerne, de stoflige partikler
- * Også her kan Higgs-feltet tjene os:
 - * Vi indfører en kobling mellem fermionfeltet ψ og Higgs-feltet ϕ . Koblingskonstanten er proportional den ønskede fermionmasse, fx elektronmassen
 - * Via det spontane symmetribrud får fermionen (fx. elektronen) da den ønskede masse



- * Dette kommer så også til at betyde, at Higgs-bosonen, h , kobler til en partikels masse (som en foton kobler til dens elektriske ladning)

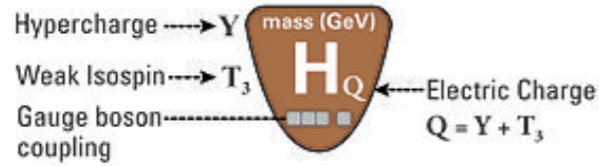


- * Higgs-bosonen henfalder fortrinsvist til tunge partikler
- *

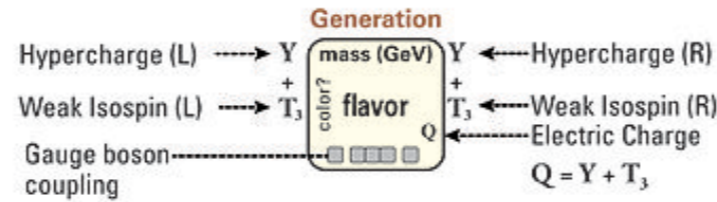
Standardmodellen

The Standard Model of Particle Physics

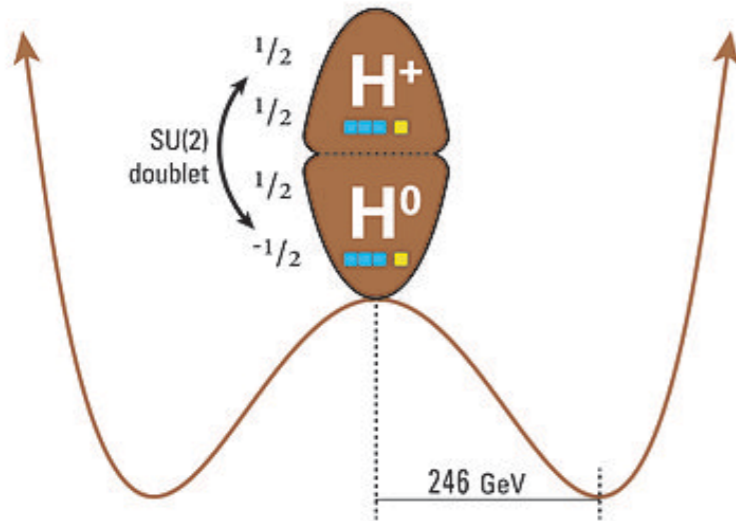
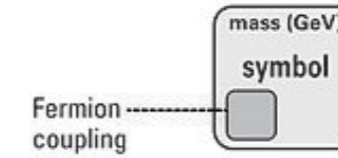
Spin 0 (Higgs Boson)



Spin 1/2 (Fermions)



Spin 1 (Gauge Bosons)



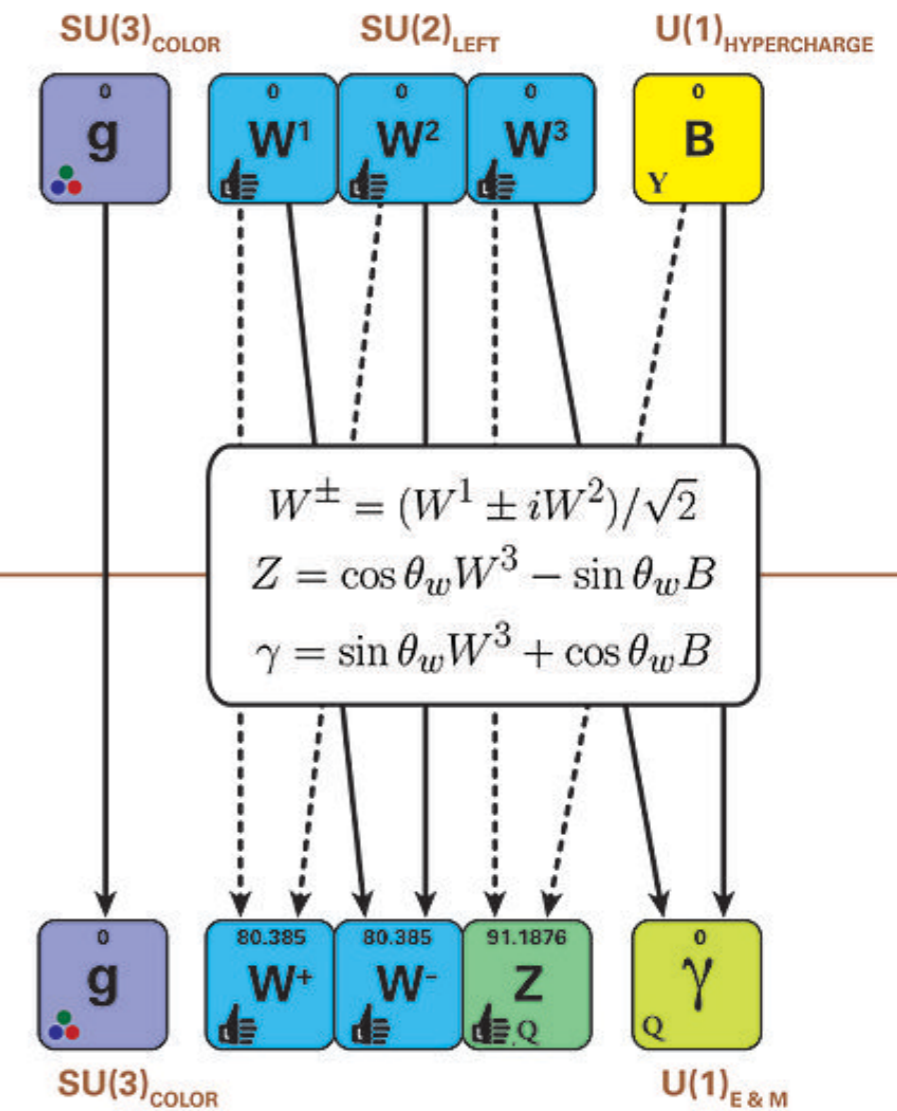
Unbroken Symmetry
Broken Symmetry

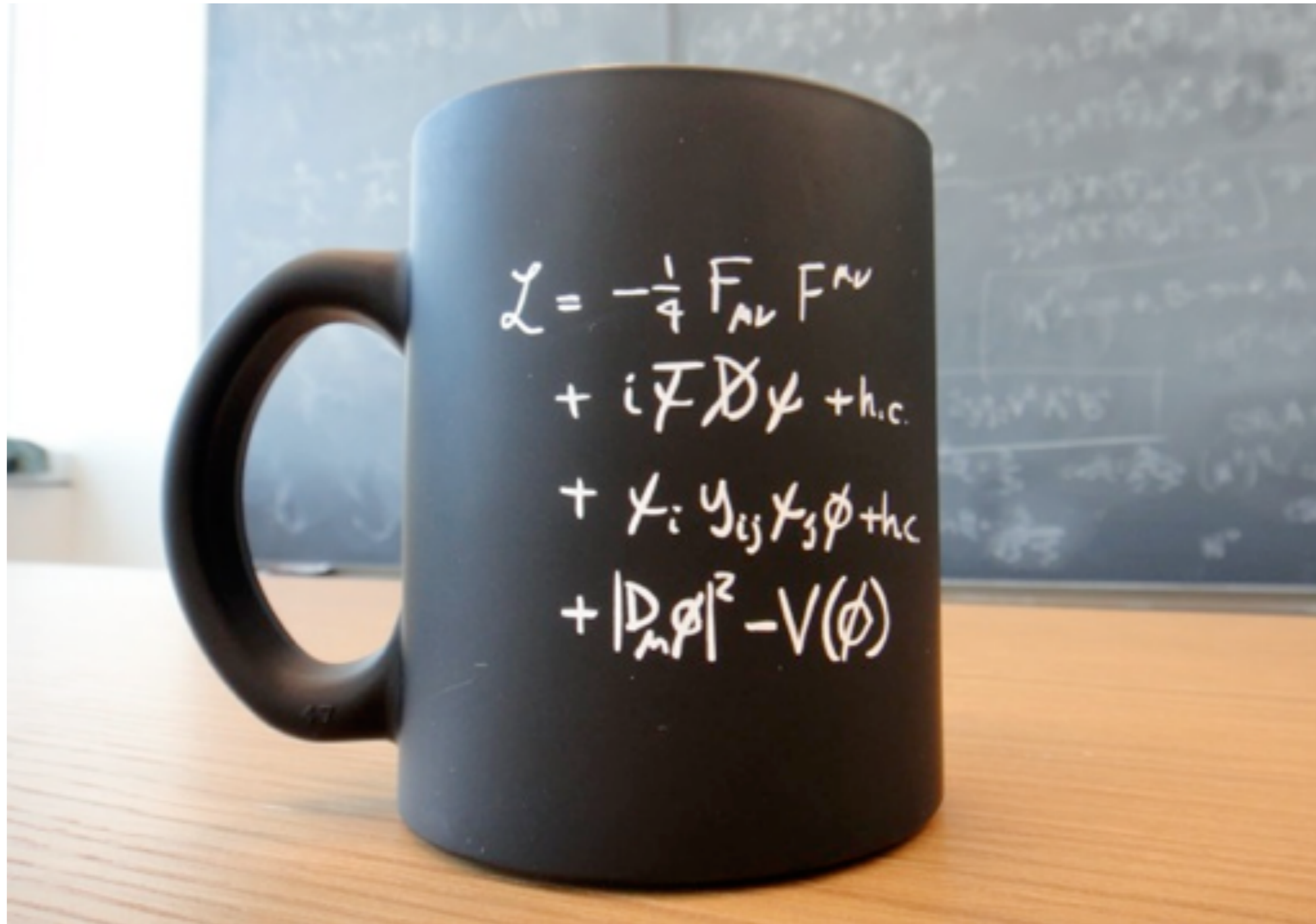
	1 st	2 nd	3 rd		
Left handed SU(2) doublet	$1/6$	$1/6$	$1/6$	$2/3$	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	0	
	$1/6$	$1/6$	$1/6$	$-1/3$	
	$-1/2$	$-1/2$	$-1/2$	0	
	Left handed SU(2) doublet	$-1/2$	$-1/2$	$-1/2$	0
		$1/2$	$1/2$	$1/2$	0
$-1/2$		$-1/2$	$-1/2$	-1	
$-1/2$		$-1/2$	$-1/2$	0	
Right handed		$2/3$	$2/3$	$2/3$	0
		$1/6$	$1/6$	$1/6$	0
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	0	0	0	0	
	0	0	0	-1	
	0	0	0	0	

Quarks

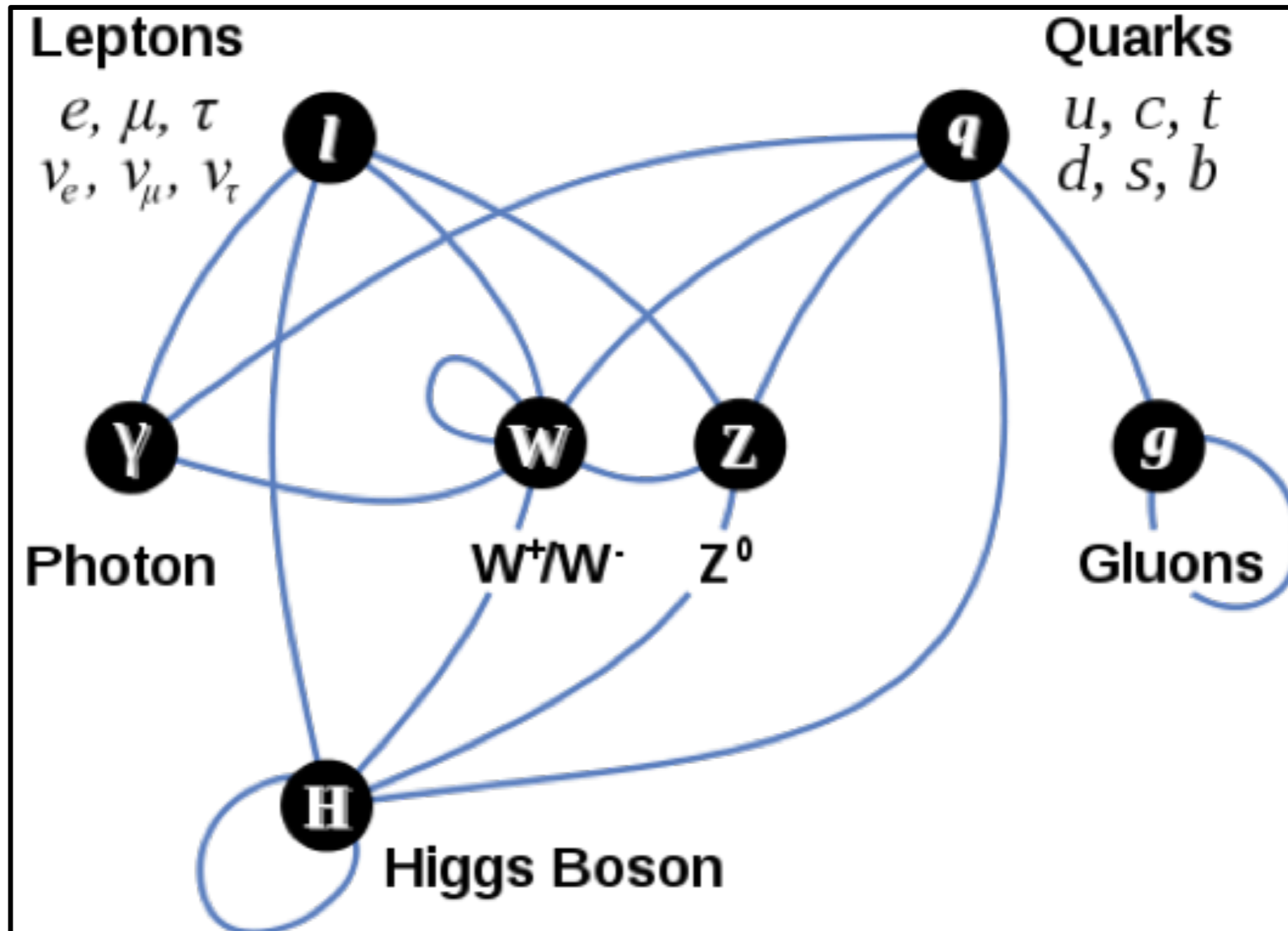
Leptons

	1 st	2 nd	3 rd
0.0023	1.275	173.07	
u	c	t	
$2/3$	$2/3$	$2/3$	
0.0048	0.095	4.18	
d	s	b	
$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	
m_1	M_1	m_2	M_2
0	0	0	0
v_e	v_μ	v_τ	
0	0	0	
0.000511	0.105658	1.77682	
e	μ	τ	
-1	-1	-1	

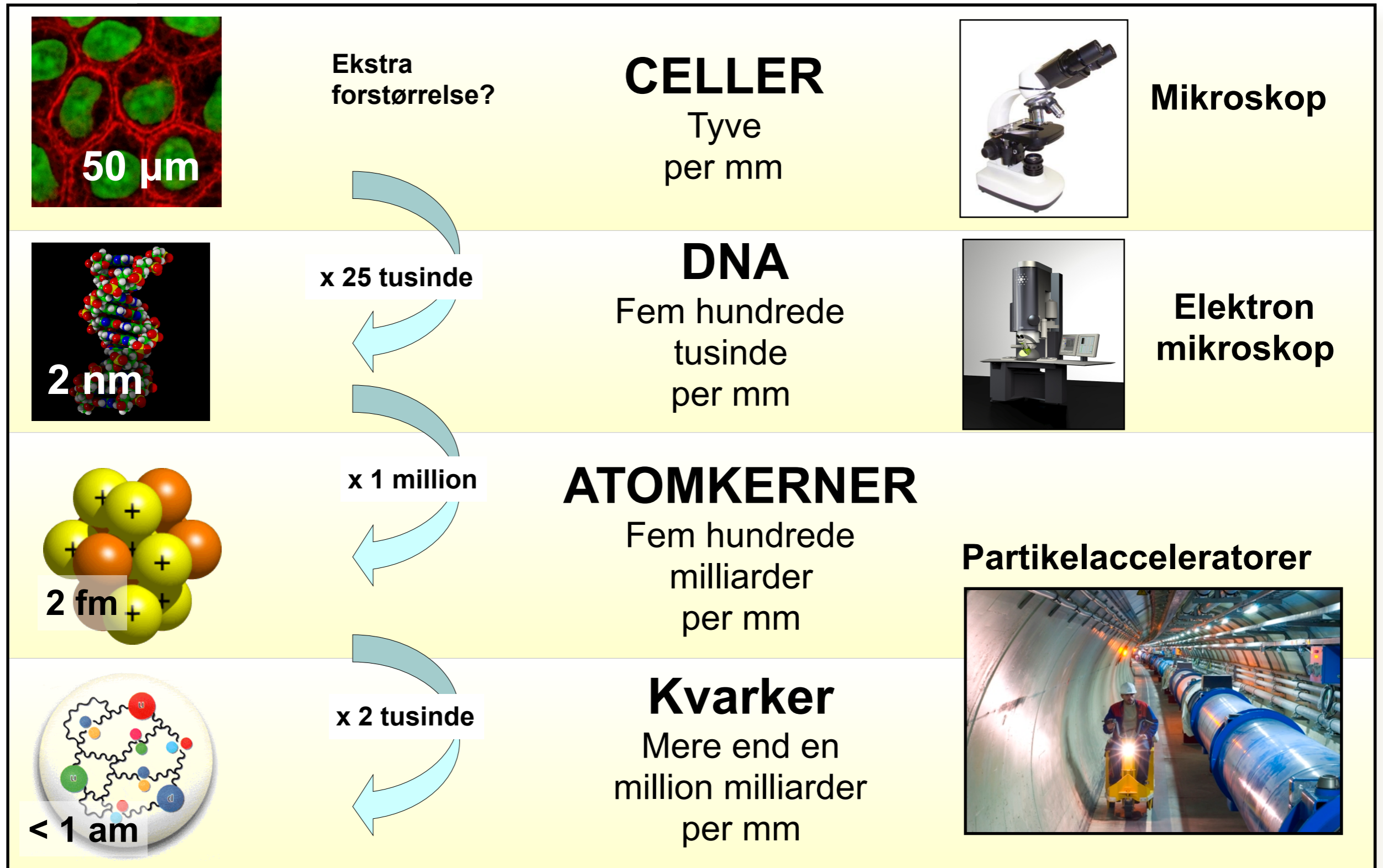


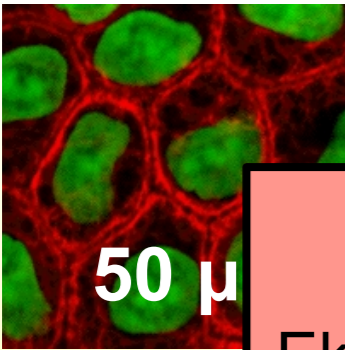


$$\begin{aligned}
\mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
& M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu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



Apparatur






50 μ m

Ekstra forstørrelse?

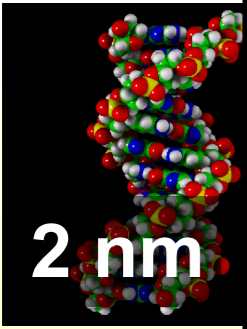
CELLER



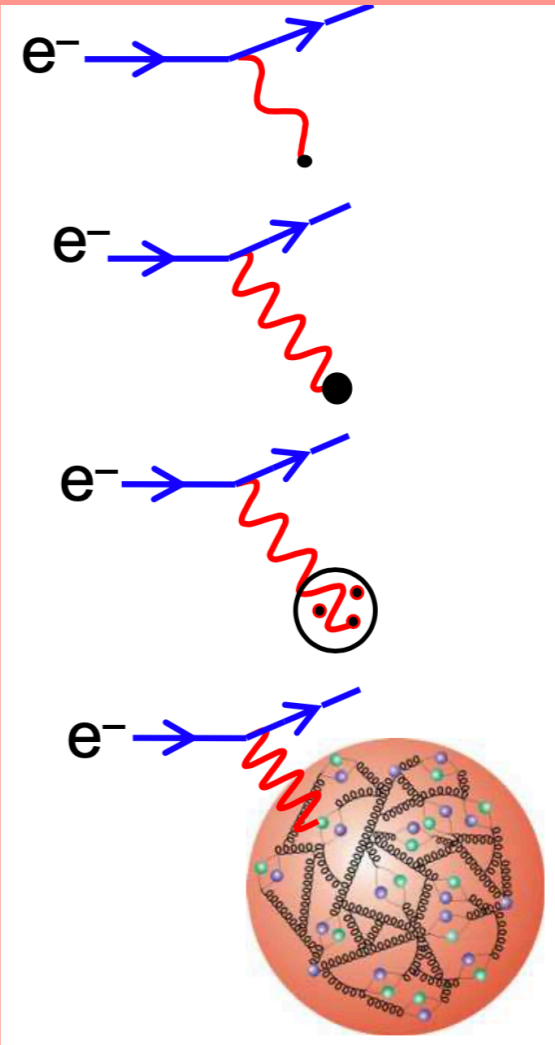
Mikroskop

Eksempel: Studie af protons indre struktur:


- Spredning af elektroner på proton-target (flydende brint)
- Vekselvirkning (spredning) gennem udveksling af foton
- Fotonens bølgelængde er invers proportional til dens energi: $\lambda = h/E$
- For at se indre (meget lille) struktur kræves meget lille bølgelængde og dermed høj energi, E



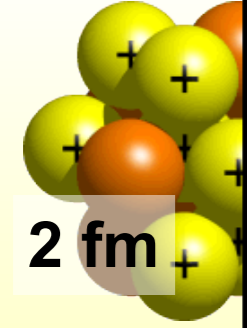
2 nm



ron
skop

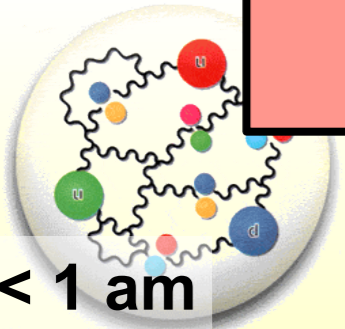


rer



2 fm

mere end en million milliarder per mm



< 1 am

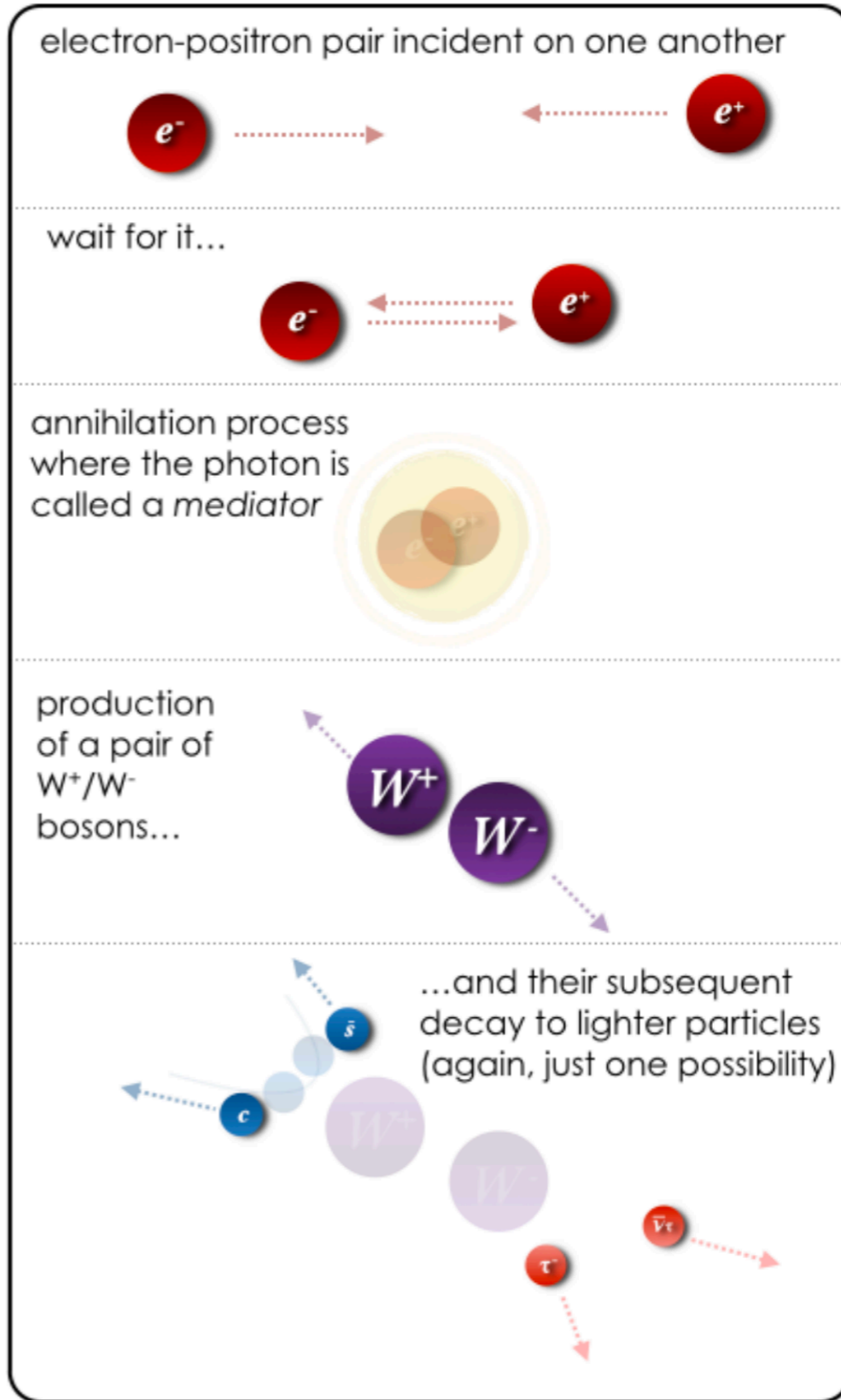
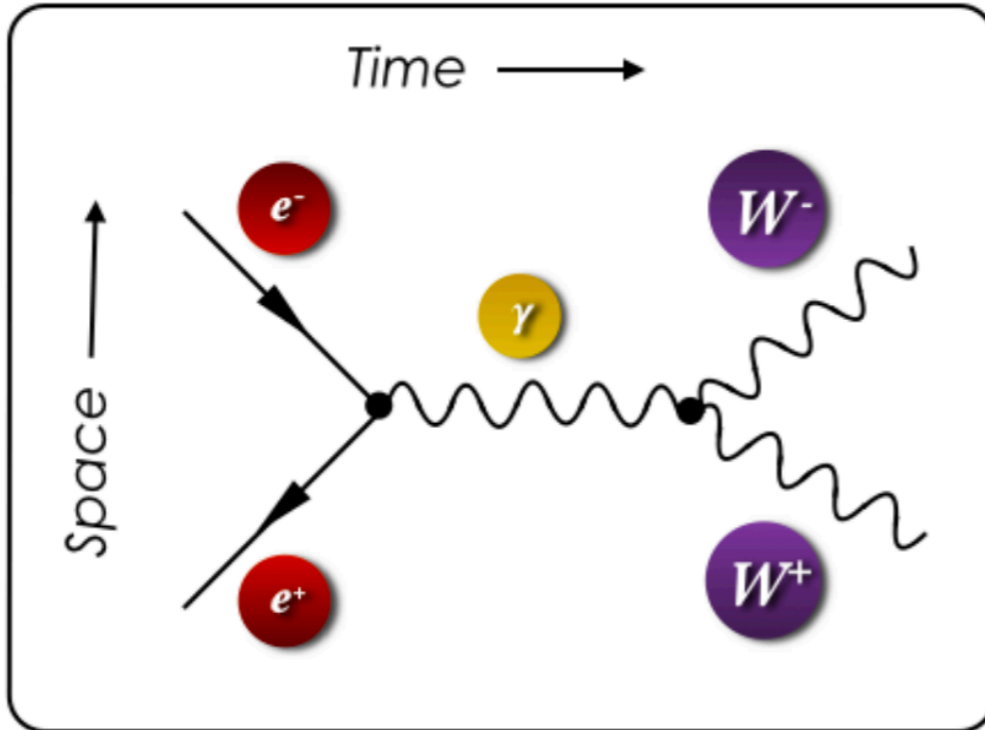
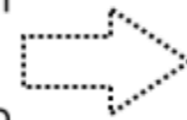
The 'annihilation' of an electron and anti-electron

(just one possible interaction...)

The Feynman diagram representation



The sequential cartoon representation



Time

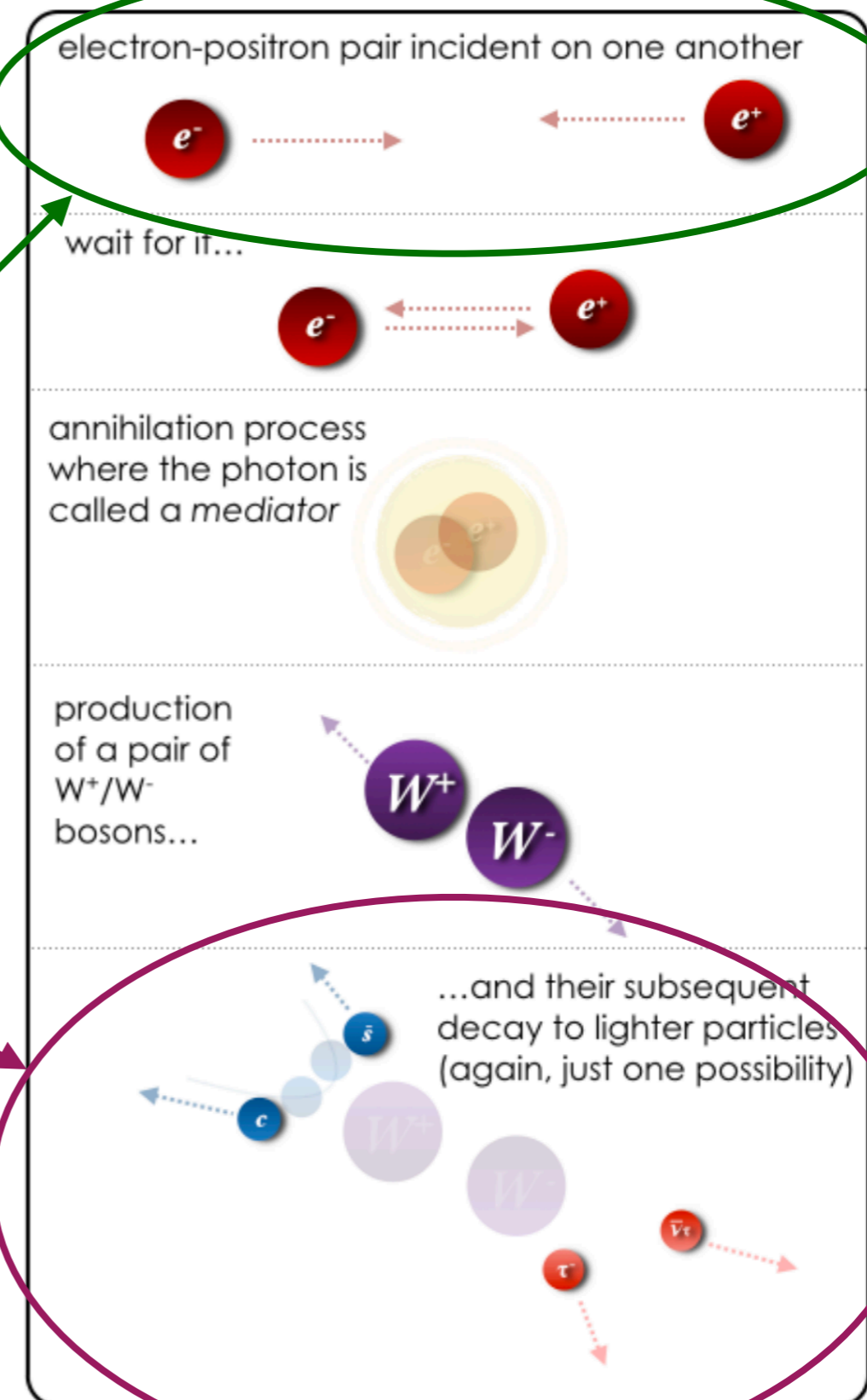
$$E = mc^2$$



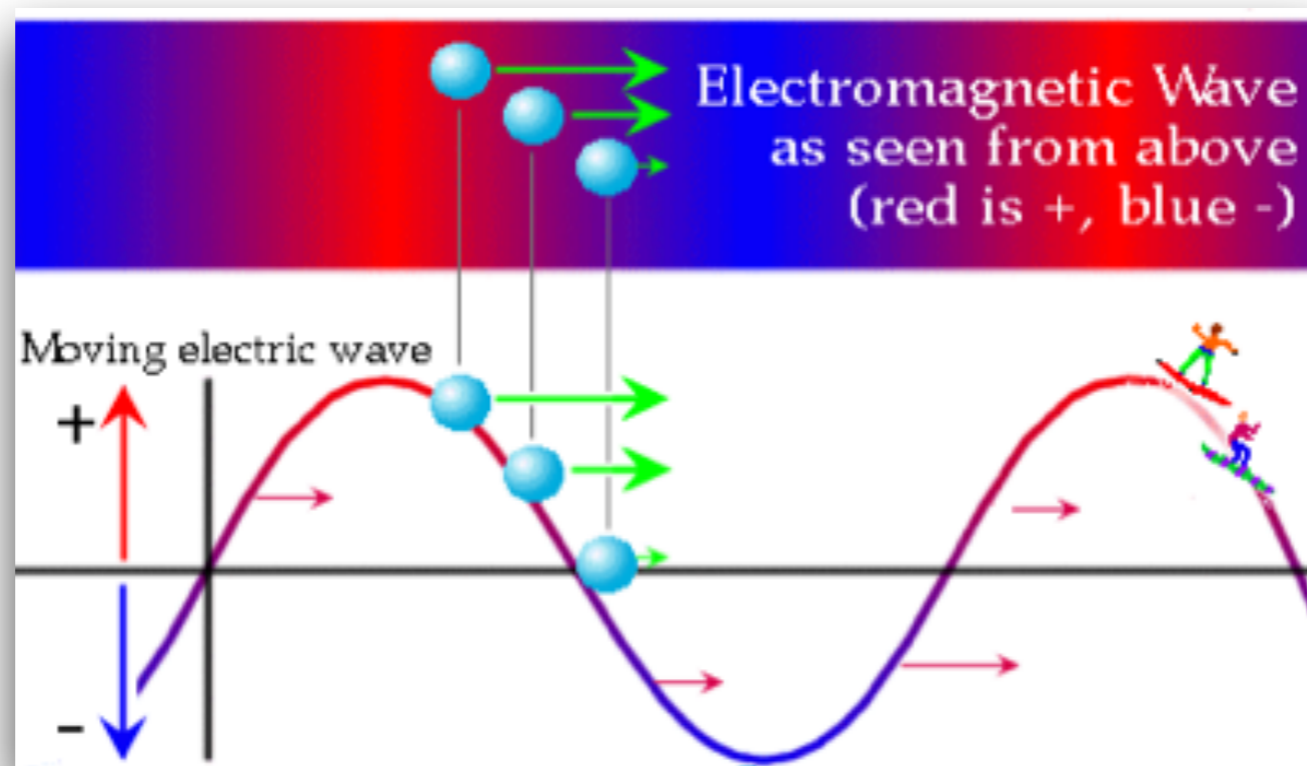
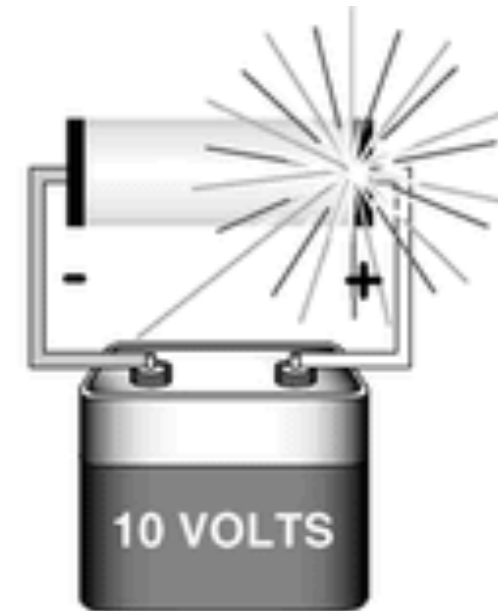
Vi har brug for

1) En accelerator, som kan producere begyndelsestilstanden med tilstrækkelig energi (og rate) til at producere den ønskede sluttilstand

2) Et detektorsystem, der er i stand til at observere sluttilstanden og skelne denne fra diverse baggrundsreaktioner

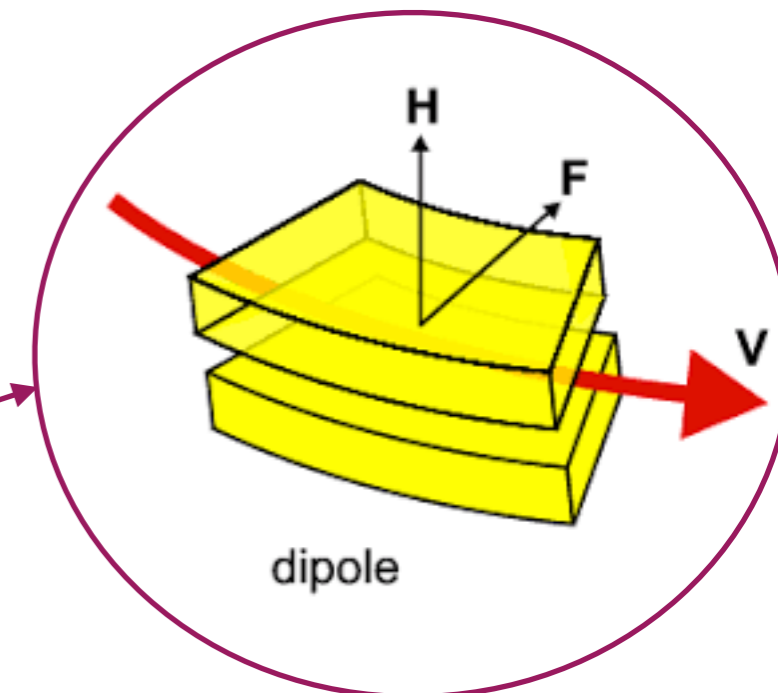
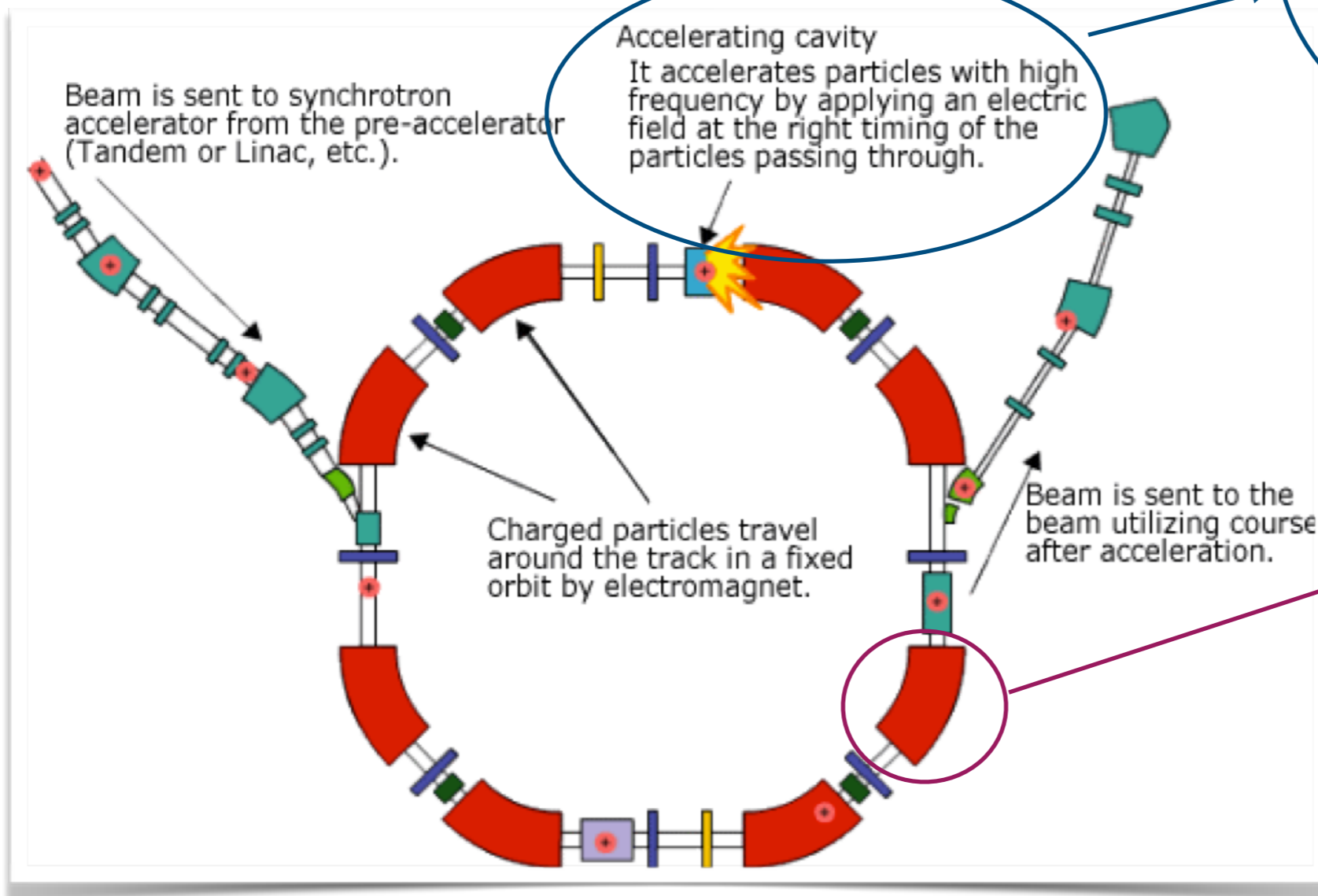
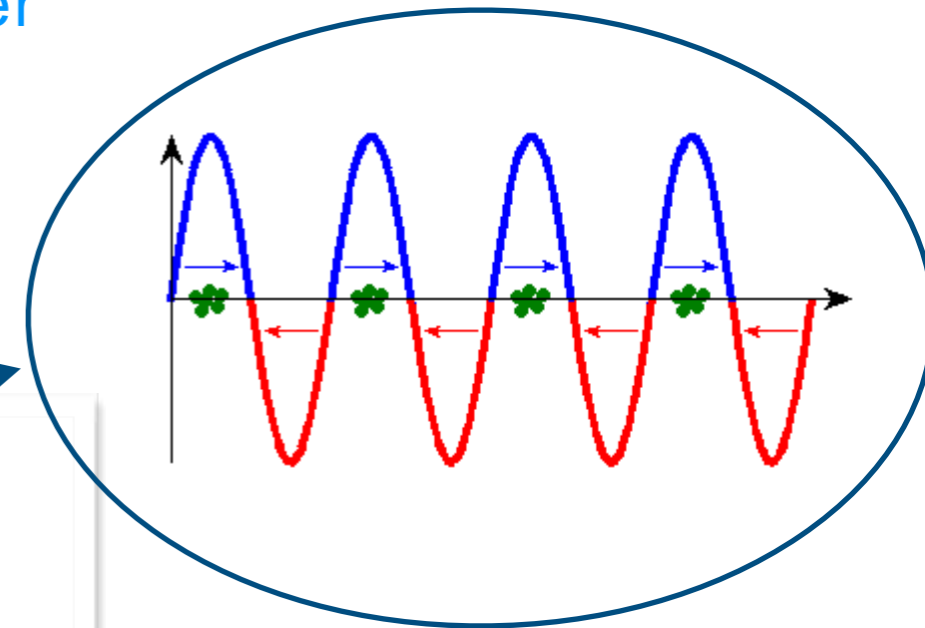


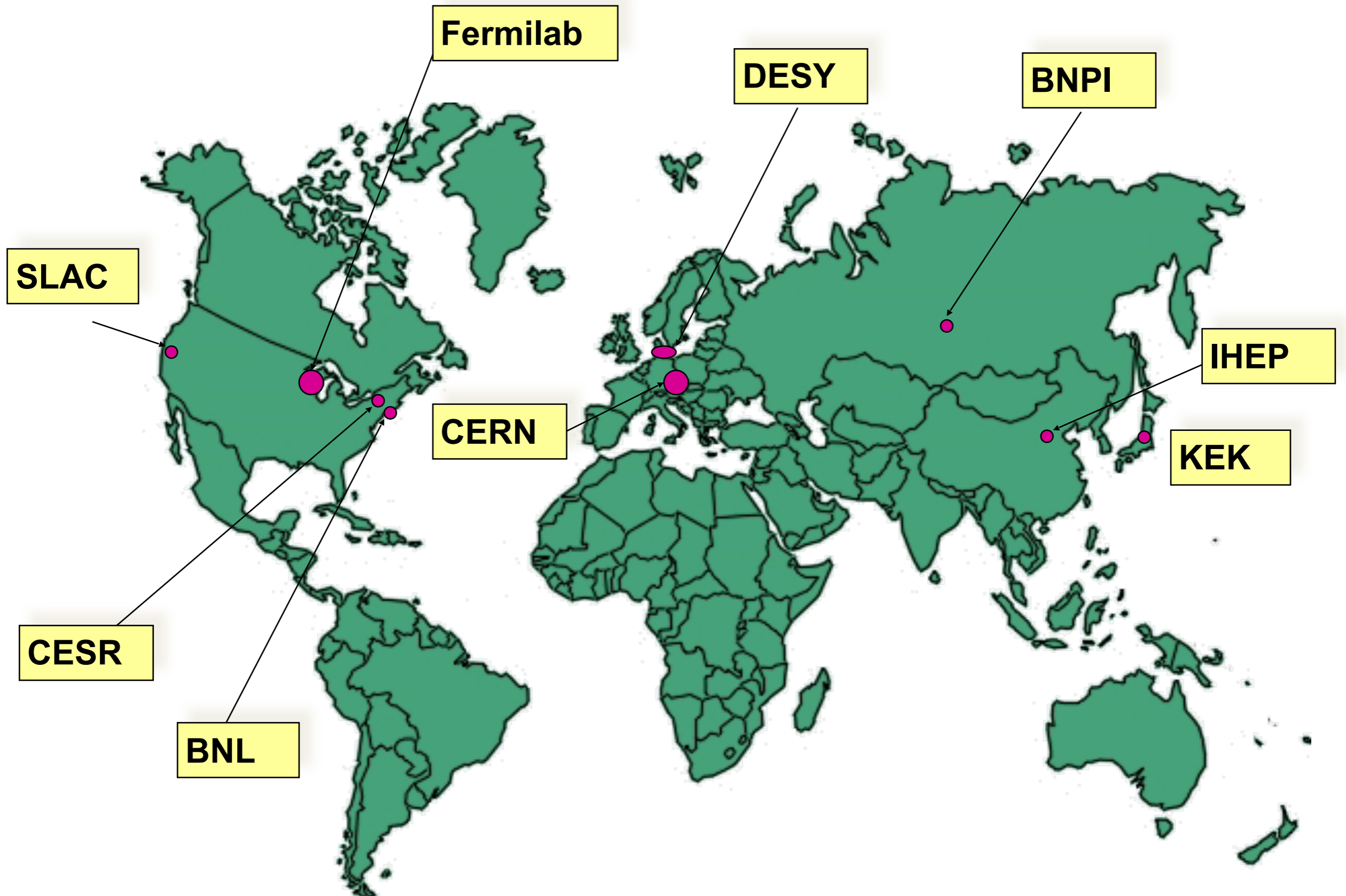
- * En elektrisk ladet partikel kan accelereres op over et spændingsfelt
- * I eksemplet her, vil elektronen have en energi på 10 eV, når den når frem til +-polen
- * Skal vi nå højere energier (og det skal vi!), så accelererer vi ved hjælp af en elektromagnetisk bølge



- * Ved LHC opnår partikelstrålen en energi på 7 TeV, som er 700.000.000.000 gange mere end med et 10 V batteri

- * Ved en cirkulær accelerator kan man benytte den samme accelerationsstruktur mange gange
- * Giv partiklerne et "spark" hver gang de passerer
- * Kræver (stærke) dipolmagneter for at dreje partiklerne tilbage

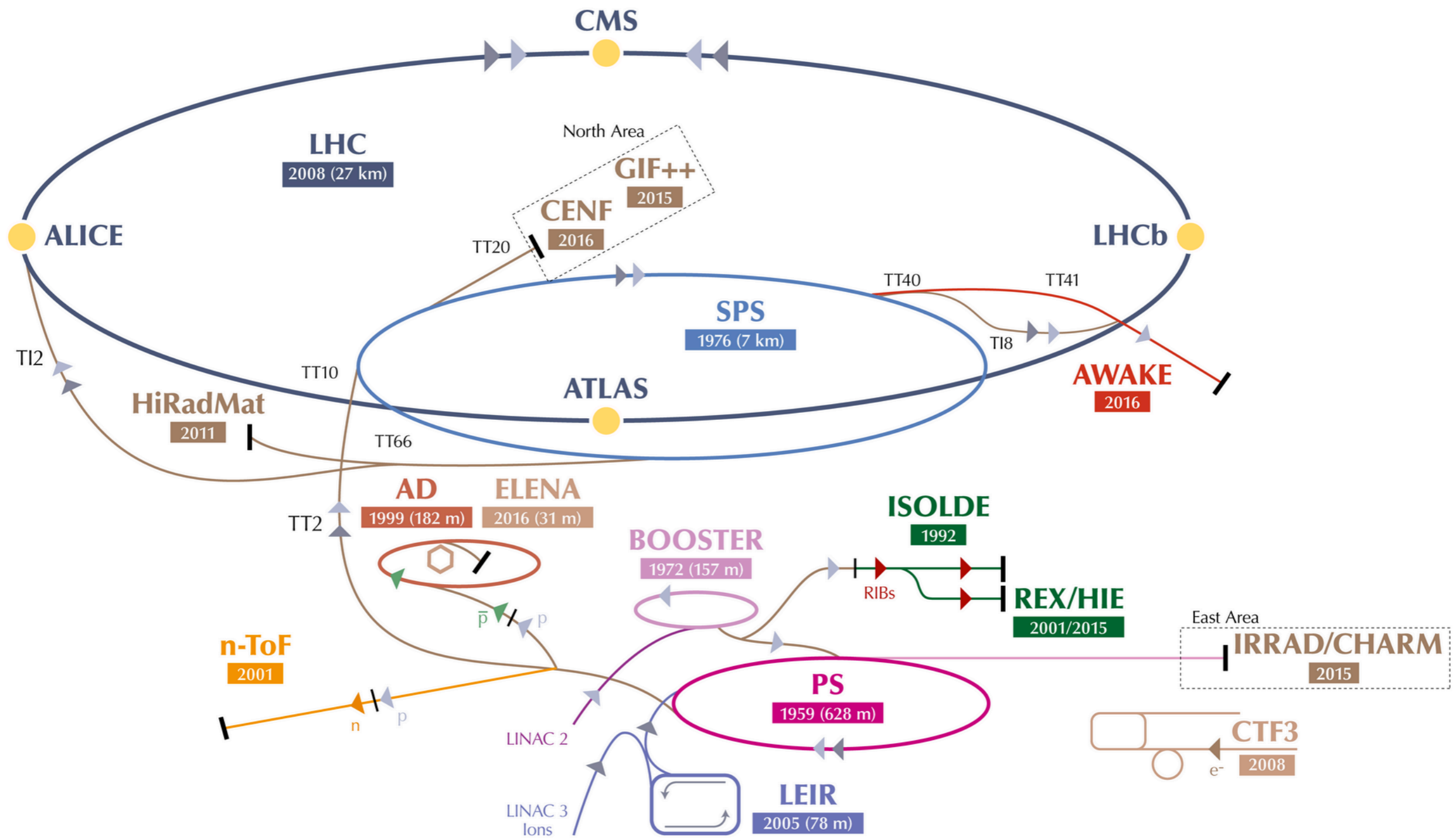




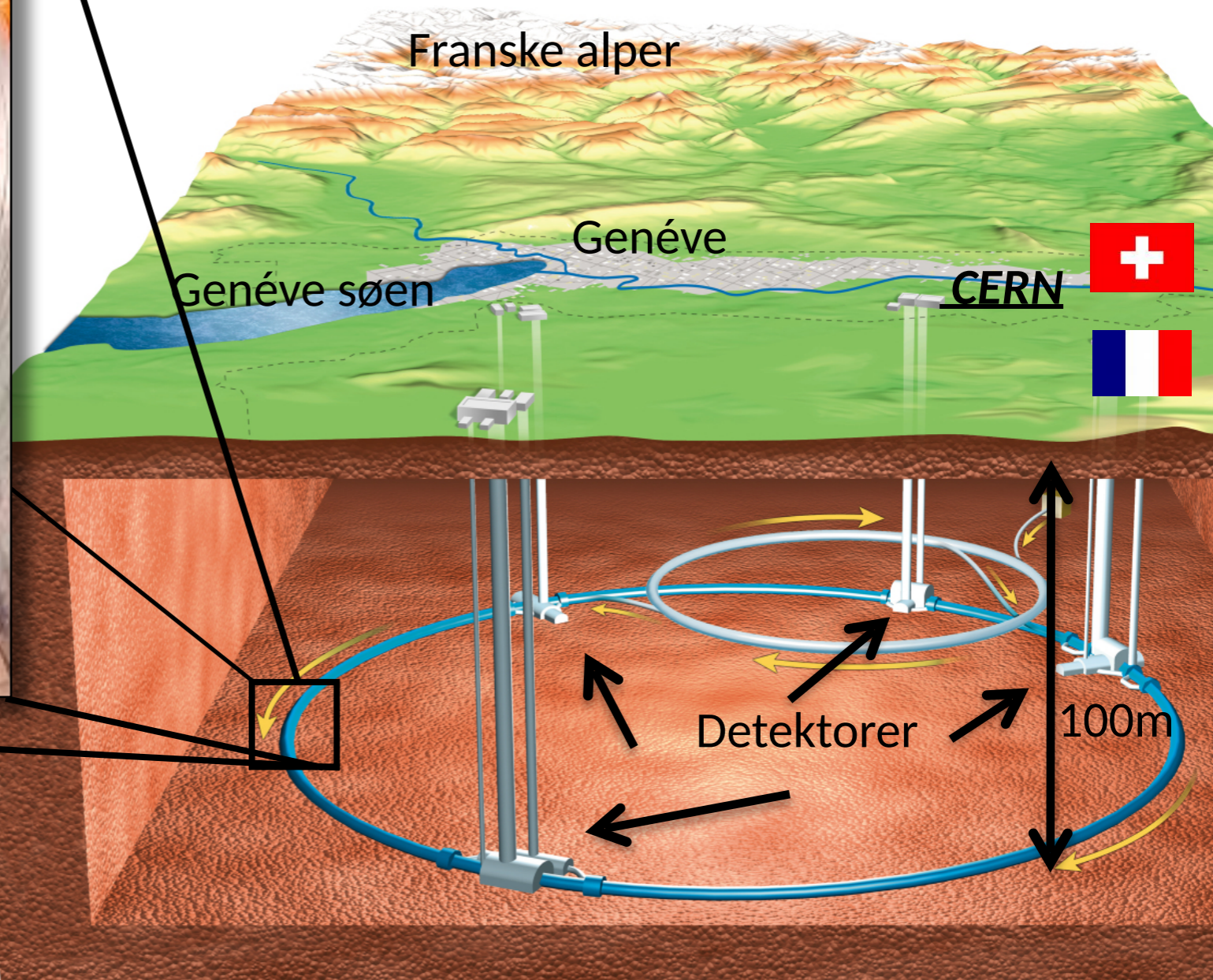
* Europæisk Center for Partikelfysik



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



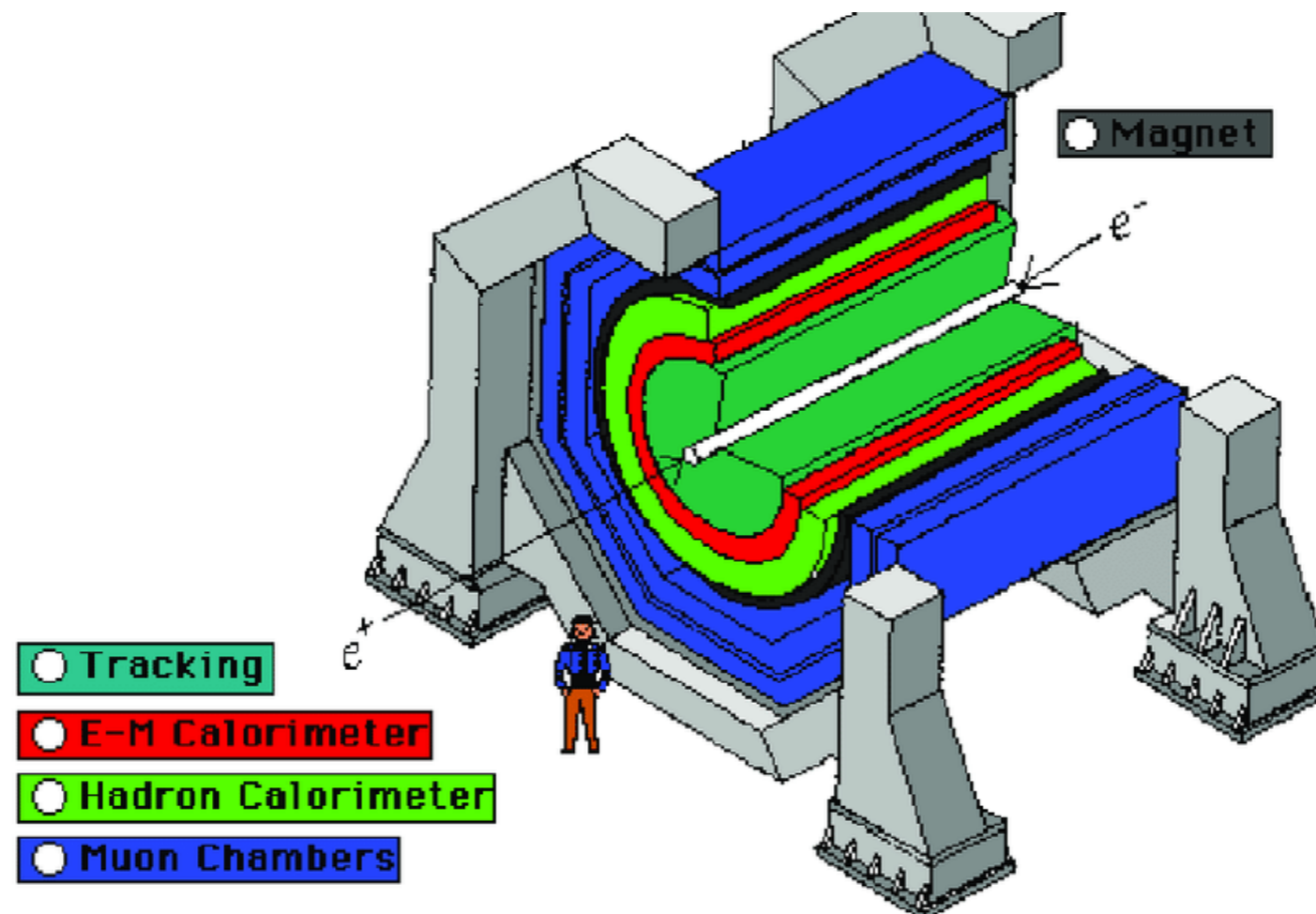
Proton-proton-kollisioner med meget høj energi: 14.000 GeV

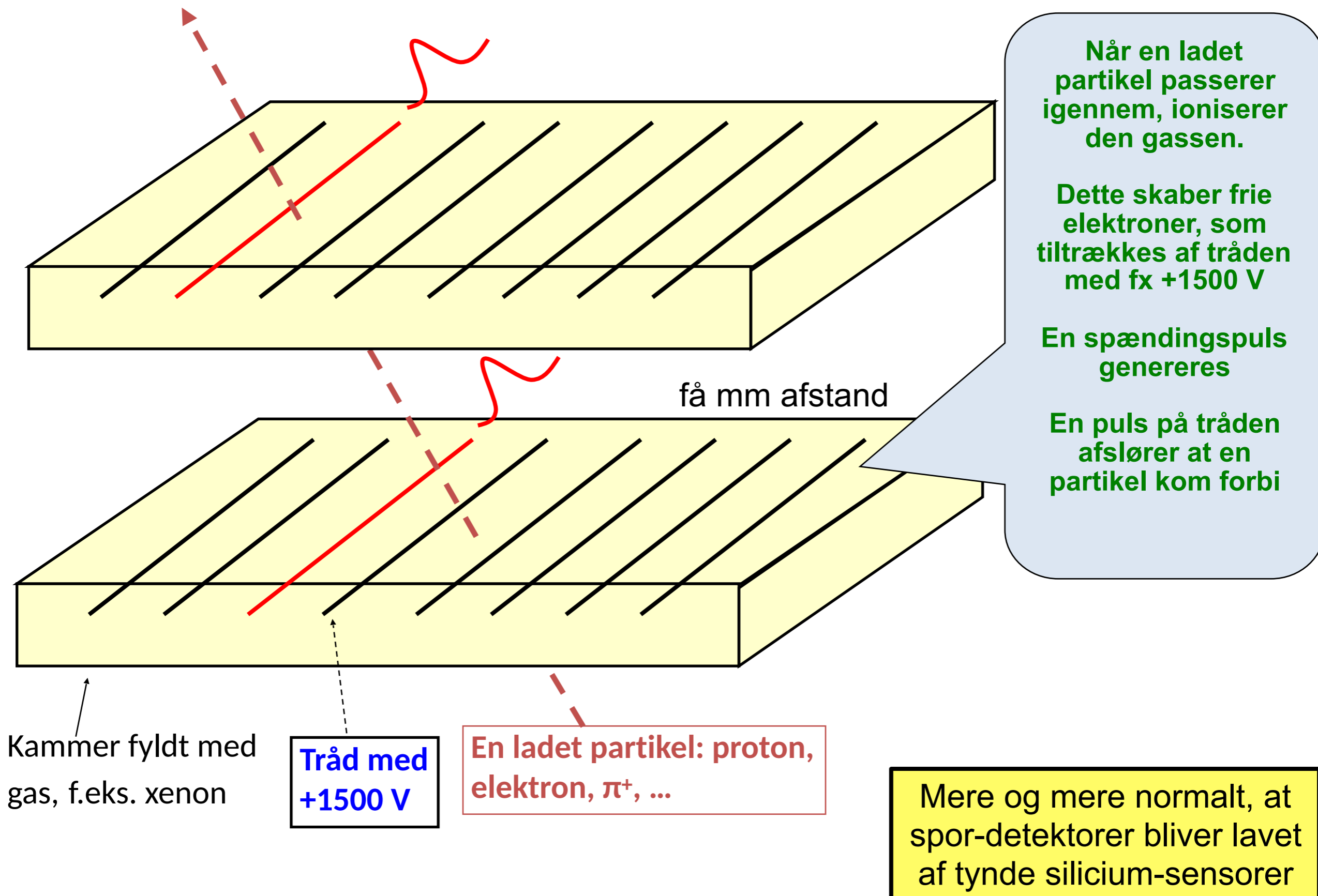


Protoner bevæger sig med 99.9999...% af lysets hastighed (11 km/t langsommere)
 Pakker med 100 milliarder partikler
 40.0000.000 kollisioner i sekundet!



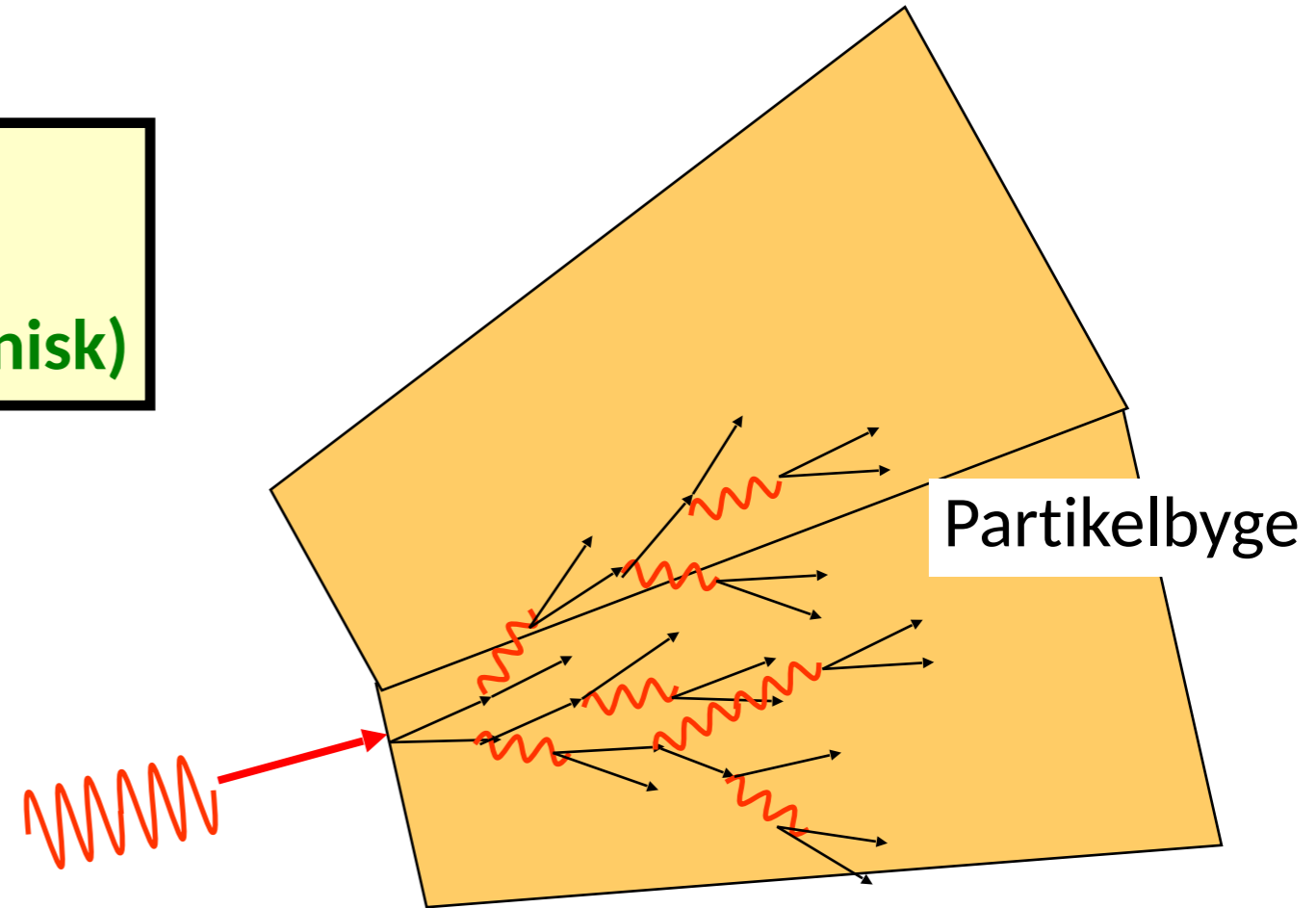
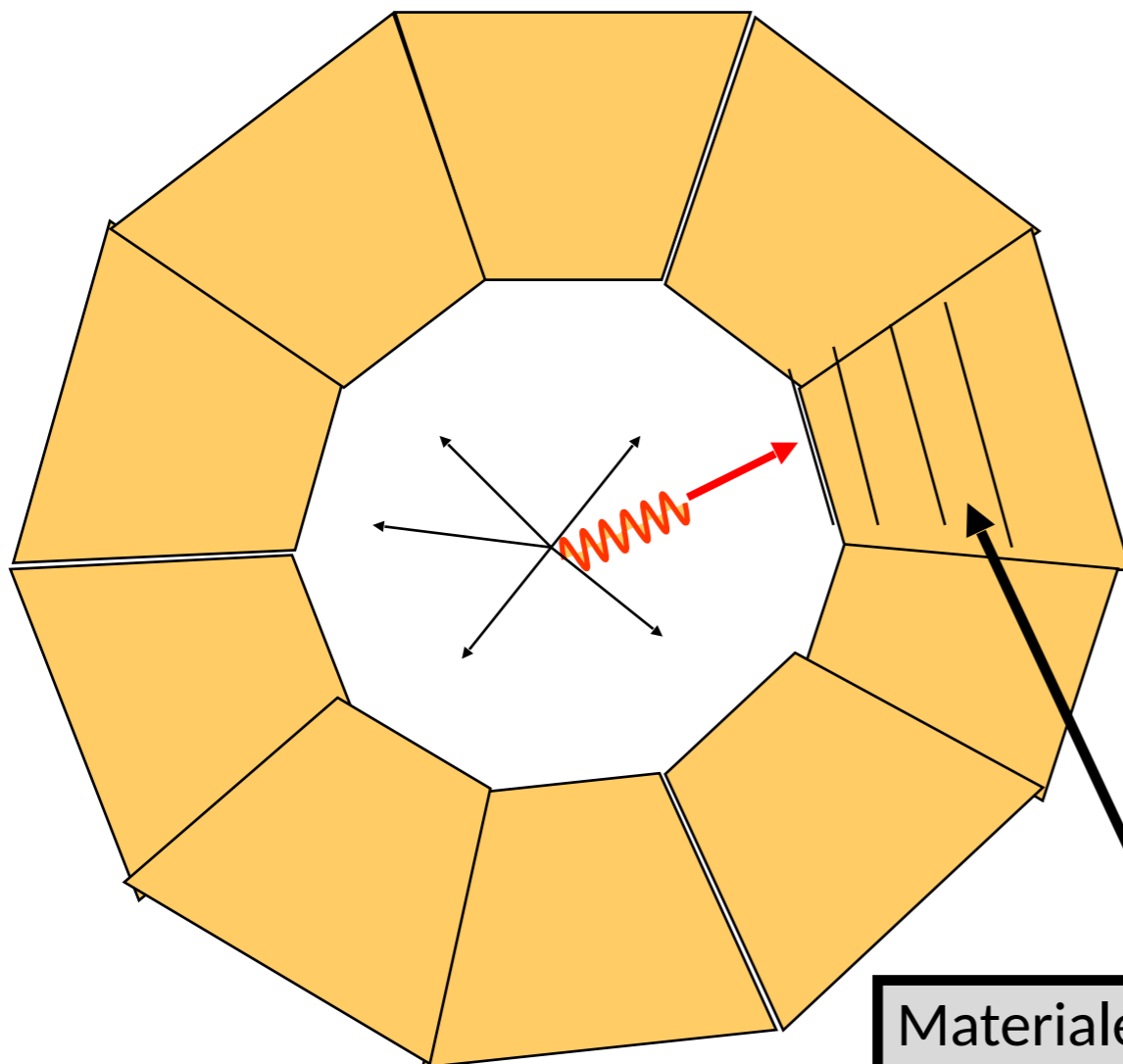
- * Opbygget som et løg, med lag på lag af detektorelementer:
- * Tracking: bestemme ladede partiklers retning og impuls
- * Kalorimetre: Stoppe partikler for at måle deres energi
- * Partikel-identifikation: Bestemme partikeltype (elektron, proton, ...)





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

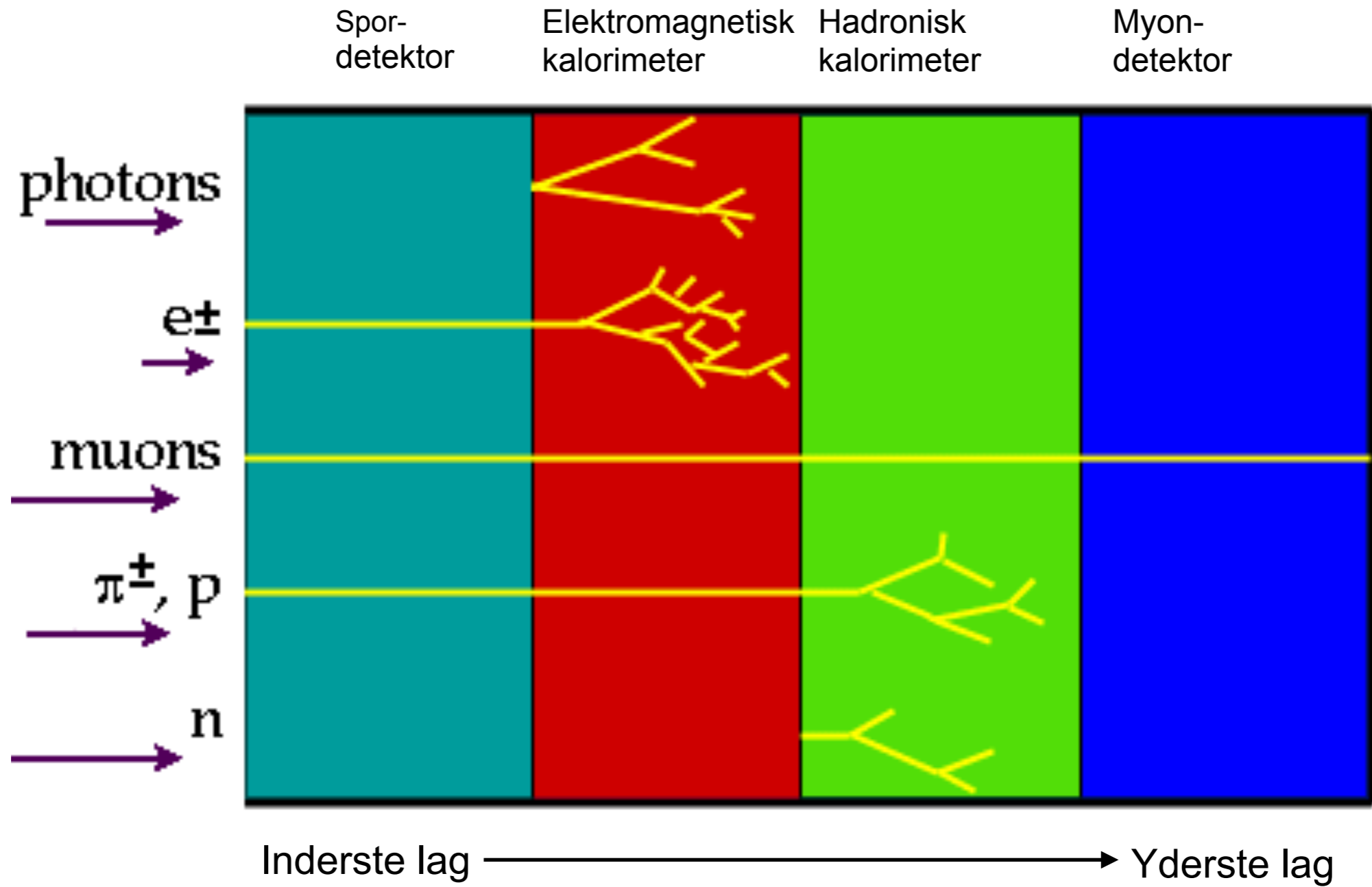
Et **kalorimeter** set fra gavlen

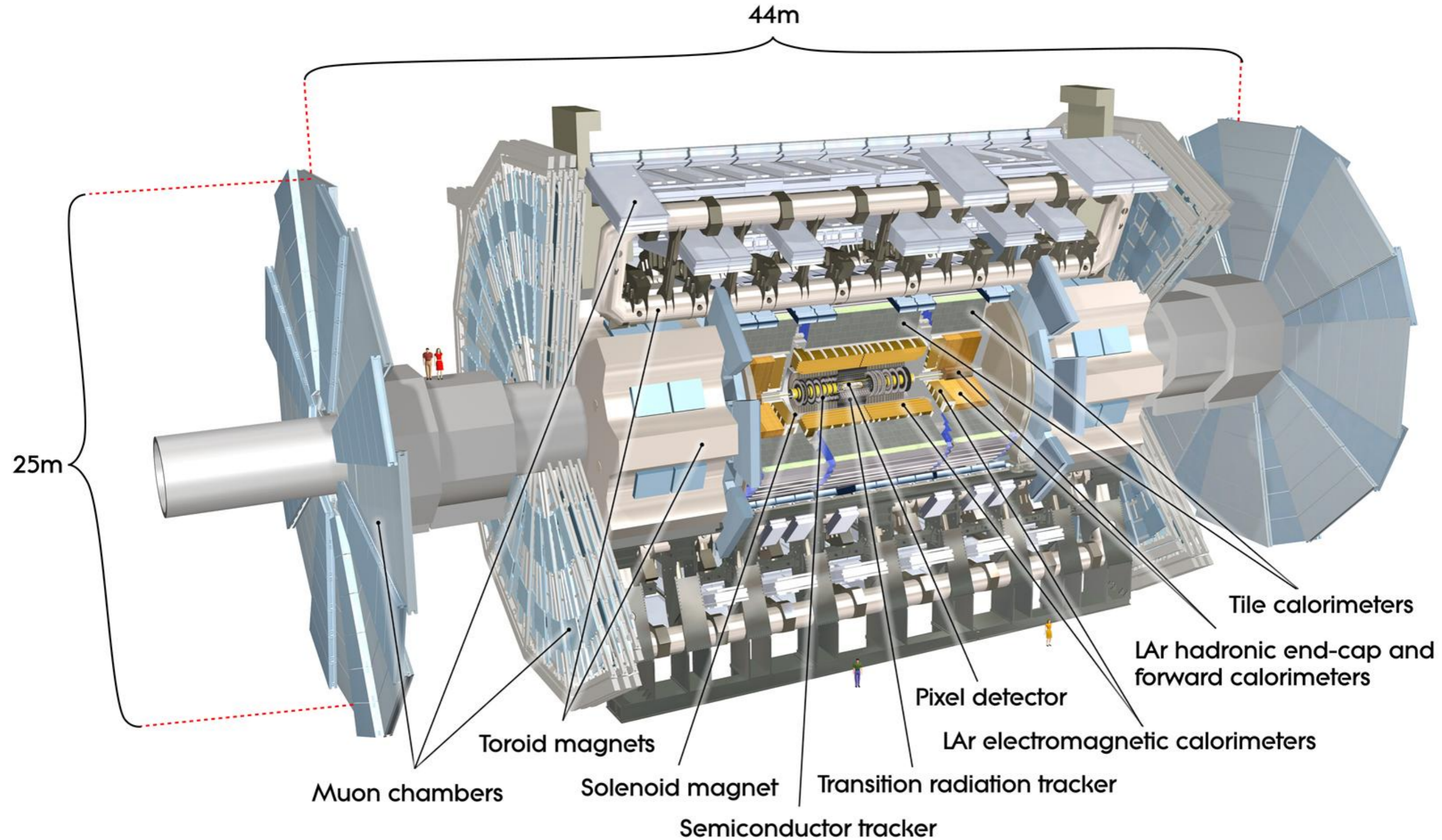


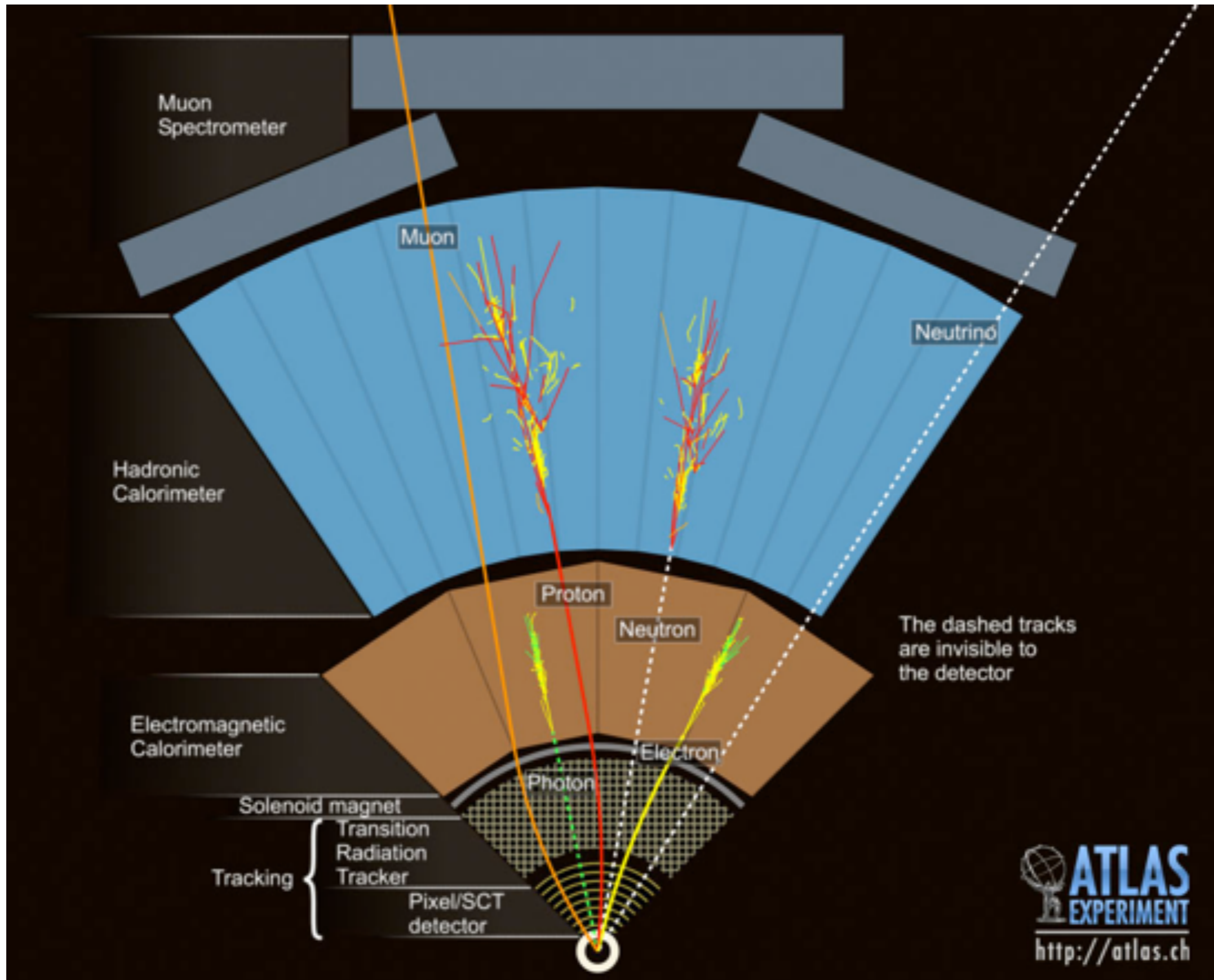
Kalorimetre måler energi ved at omsætte en partikels energi til nye ladede partikler (kan måles)

**“des højere energi,
des flere partikler,
des højere signal”**

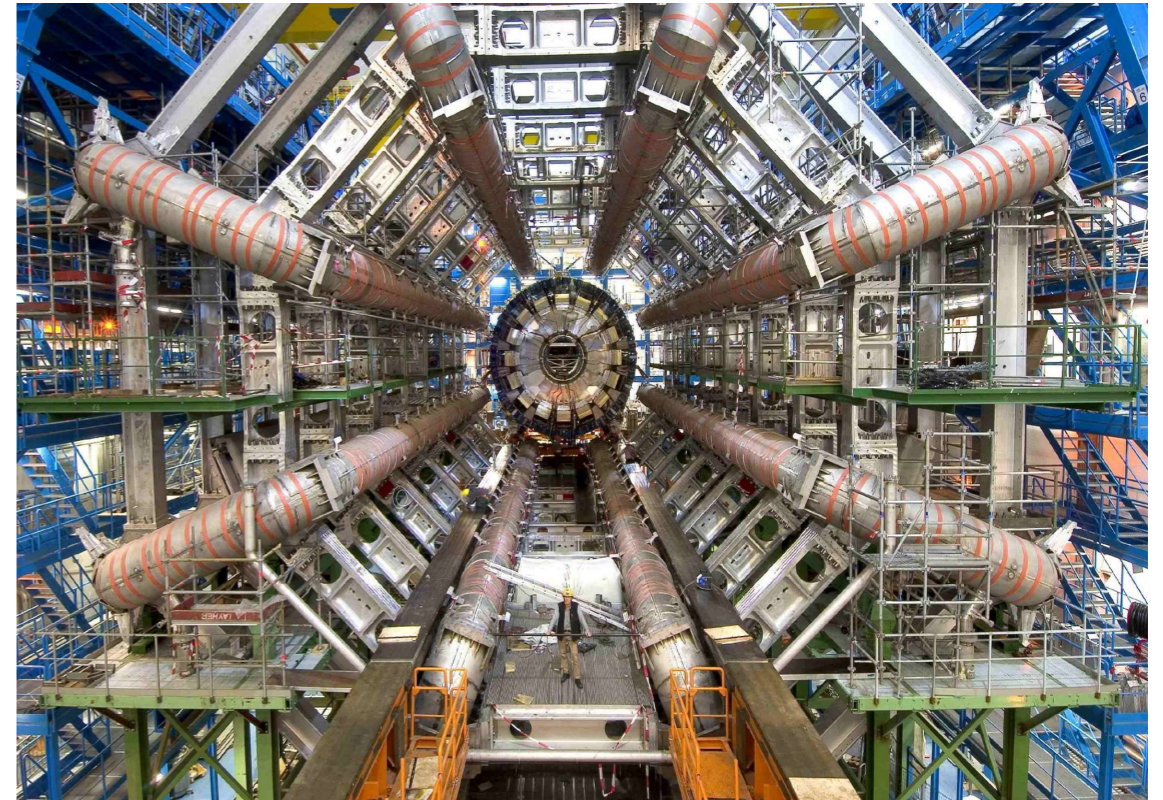
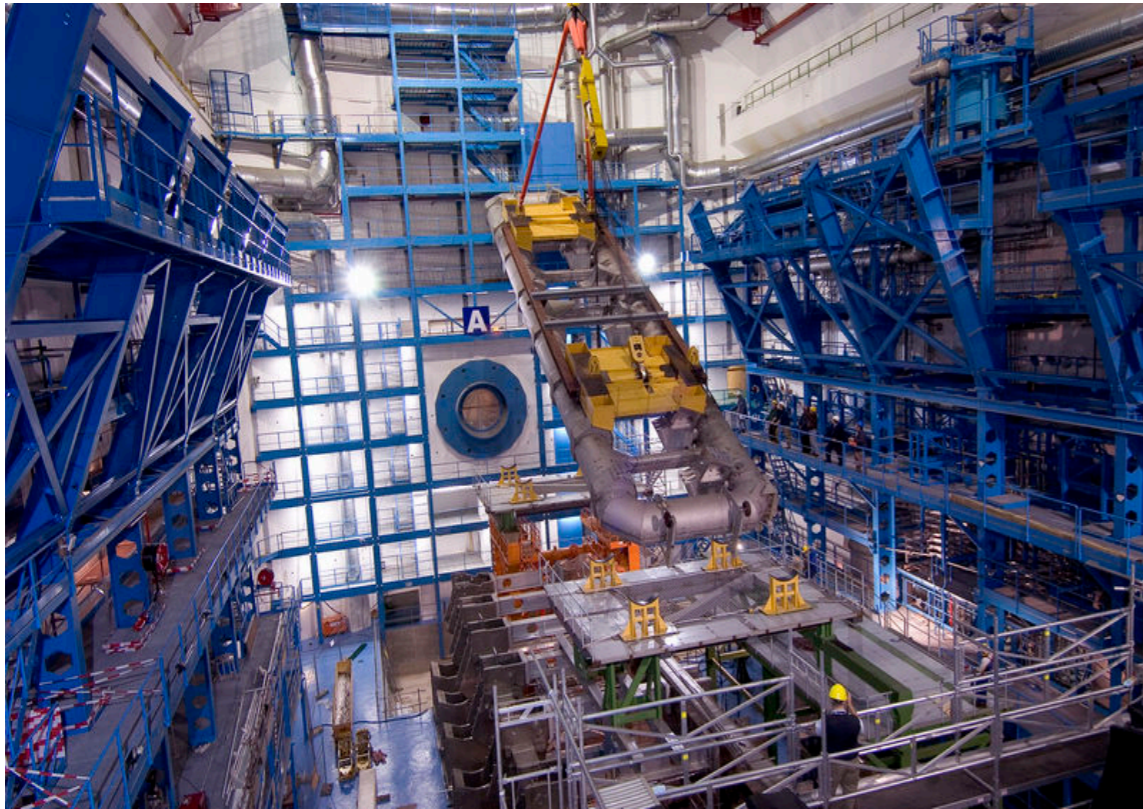
Materiale med høj tæthed, såsom bly (EM) eller jern (hadronisk) med indlejrede detektorer





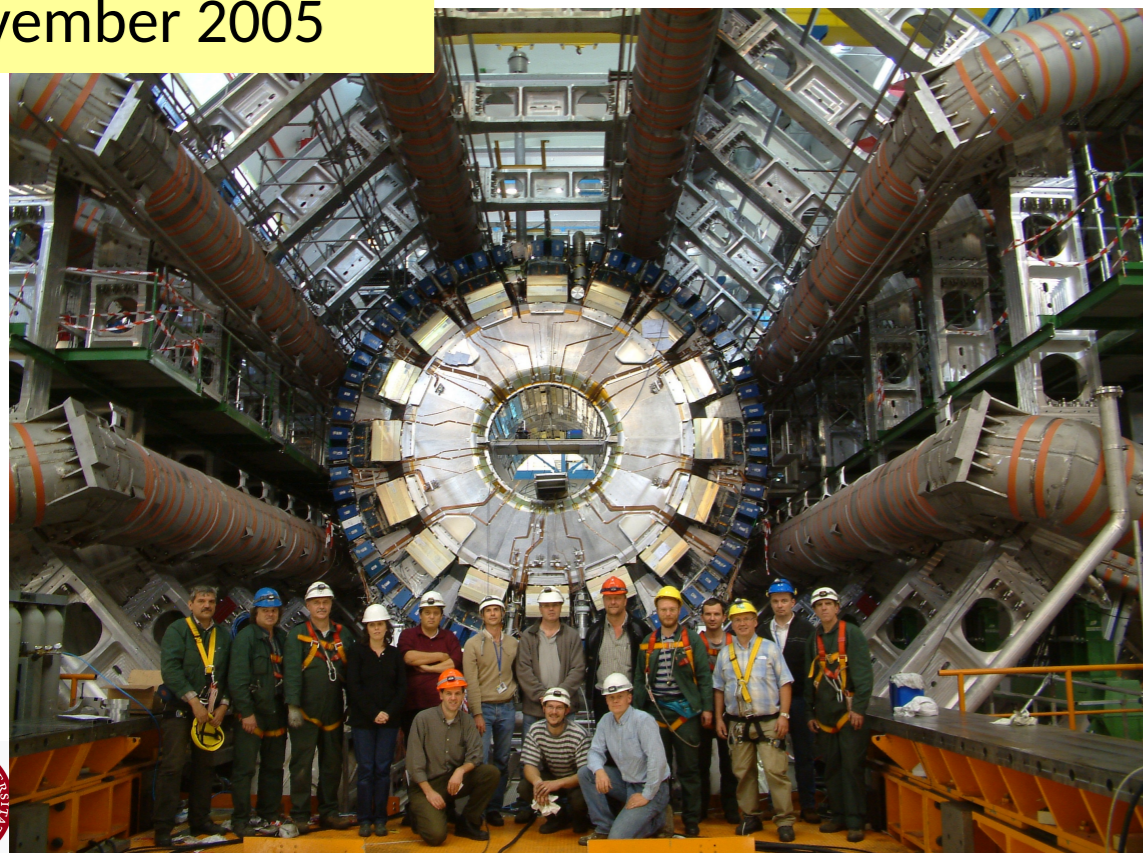


67 Konstruktion af ATLAS-eksperimentet



November 2005

Maj 2007



STITUTE

MOGENS DAM, NIELS BOHR



