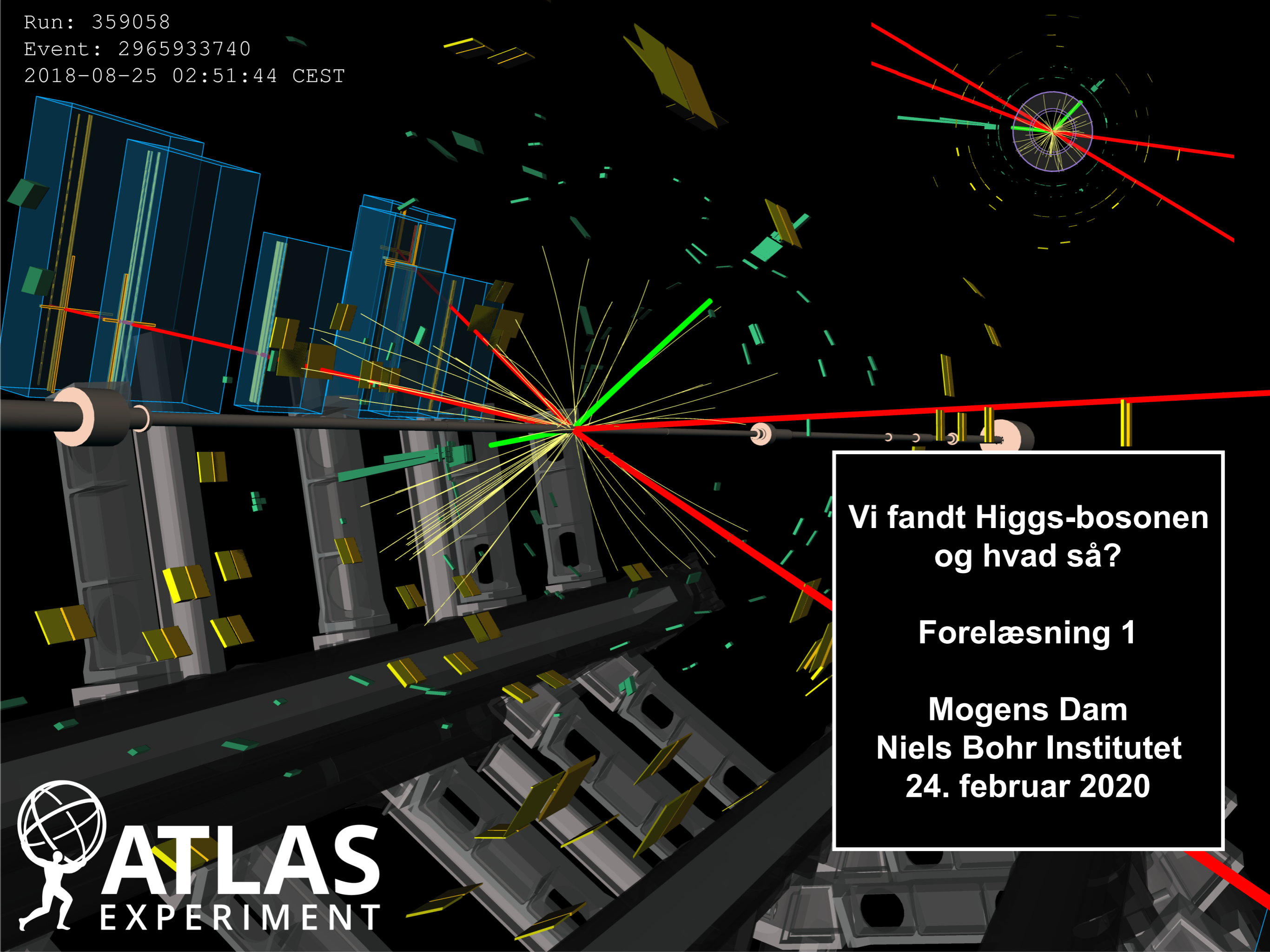


Run: 359058
Event: 2965933740
2018-08-25 02:51:44 CEST



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

Forelæsning 1

**Mogens Dam
Niels Bohr Institutet
24. februar 2020**

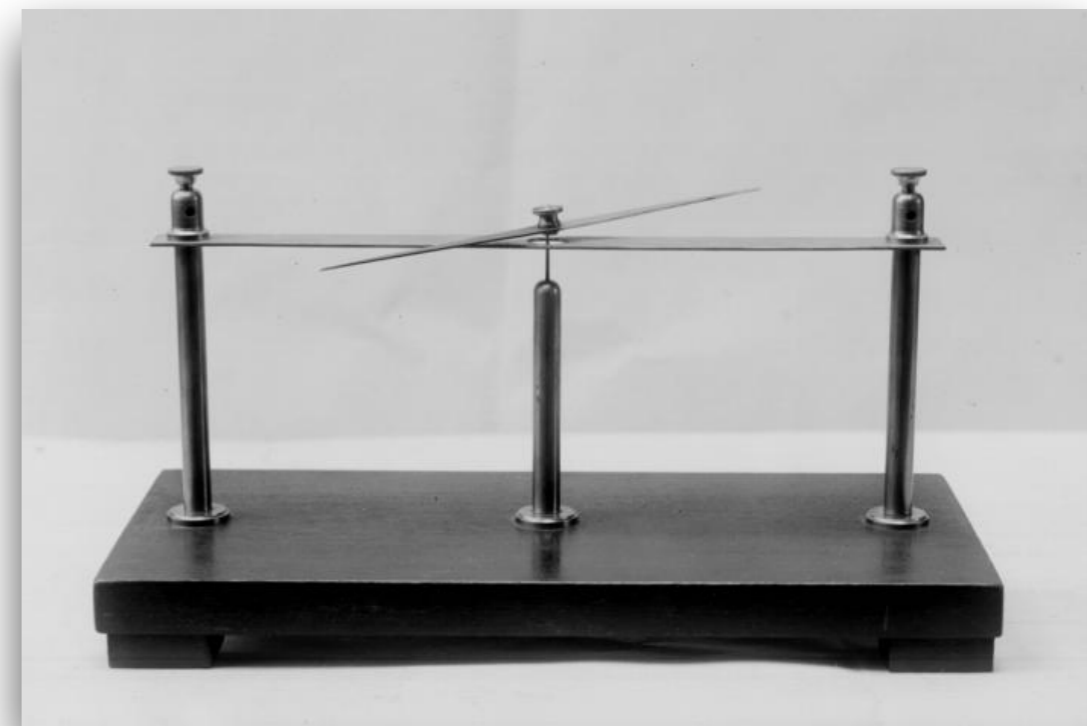
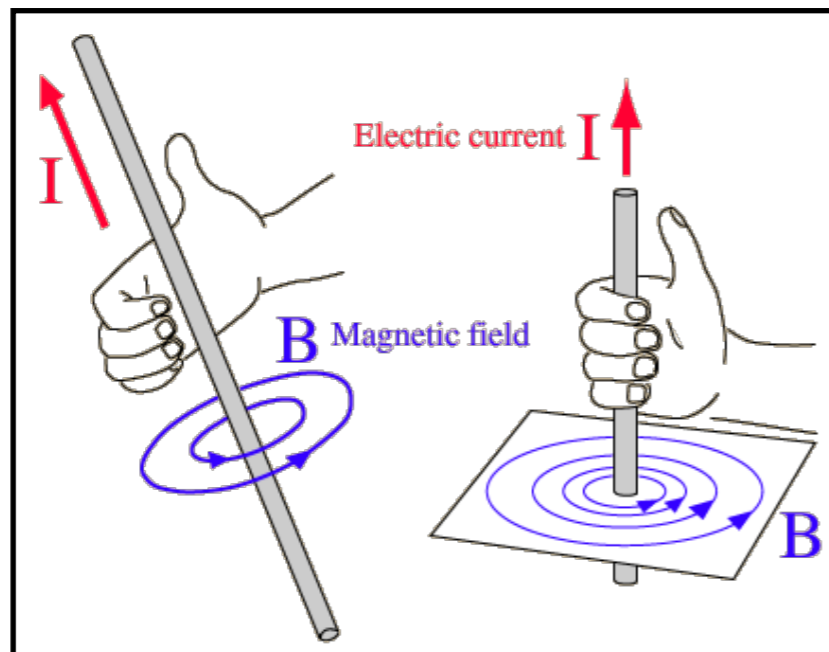


- * Elektromagnetismen og kvanteelektrodynamik
- * Radioaktivitet og svage vekselvirkninger
- * Fra atomkernen via en skov af hadroner til kvarkbilledet
- * Fermioner = stoflige partikler
- * Stærke vekselvirkninger
- * De fire naturkræfter
- * Neutrinoer og svagheden af de svage vekselvirkninger

Elektromagnetismen og kvanteelektrodynamik (QED)

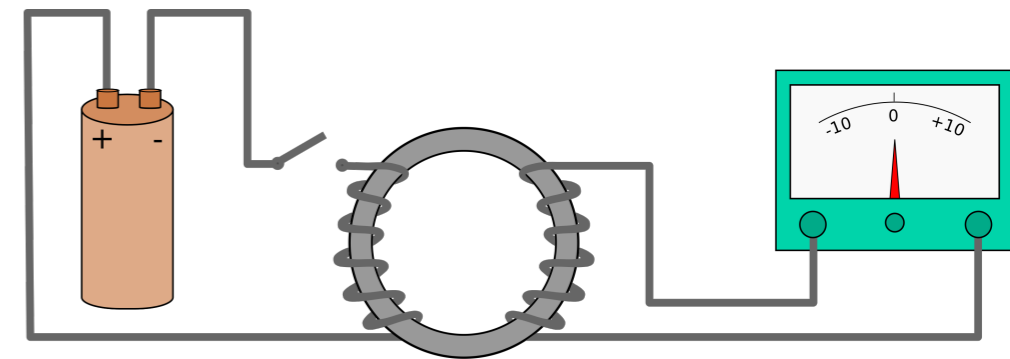
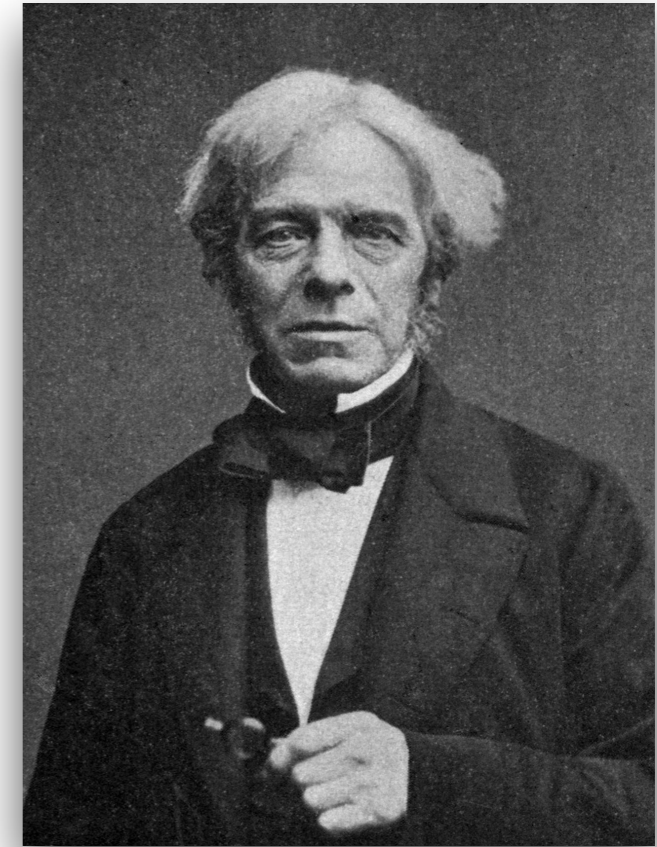
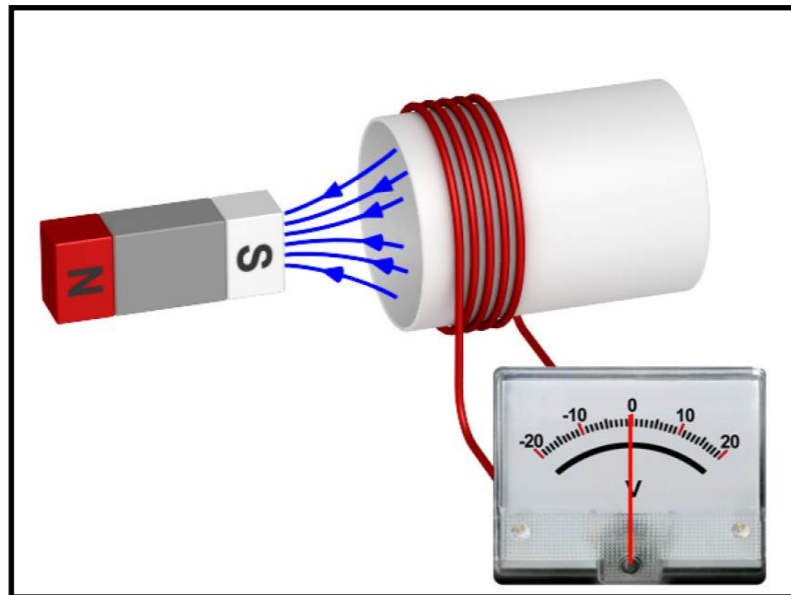
- * I 1820 påviser Ørsted en sammenhæng mellem elektricitet og magnetisme
- * En elektrisk strøm i nærheden af en magnetnål får denne til at svinge ud
- * Altså skaber en elektrisk strøm et magnetfelt

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I$$

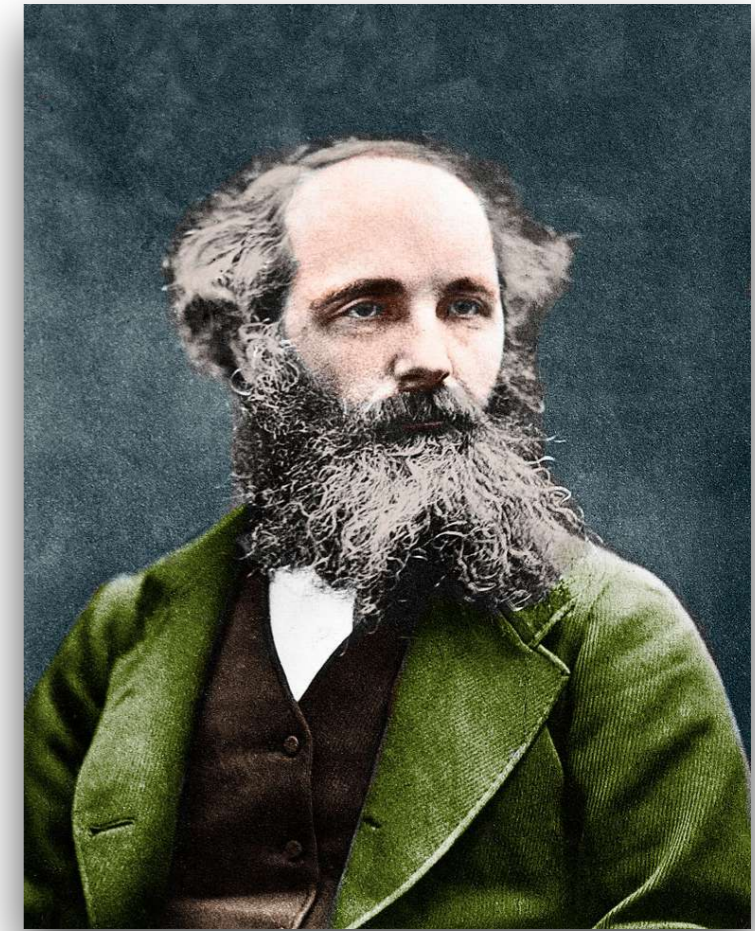


- * I 1831 påviser Faraday magnetisk induktion.
- * Ved at føre en magnet gennem en spole skabes et spændingsforskkel og dermed en strøm
- * Indfører også feltbegrebet (engelsk: field)

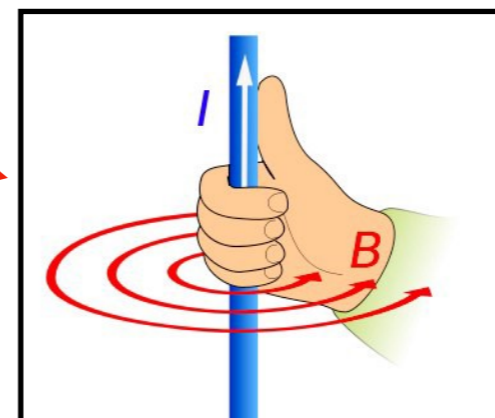
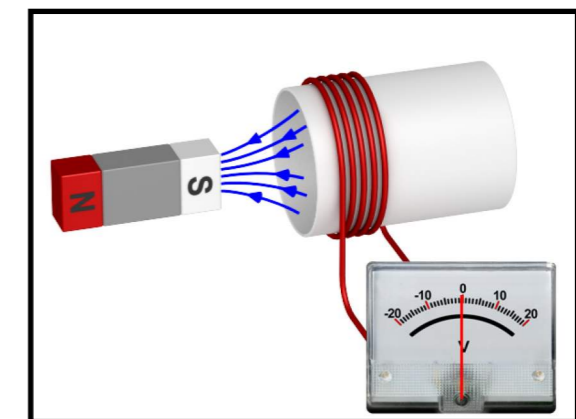
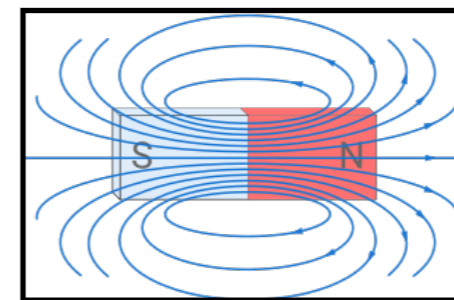
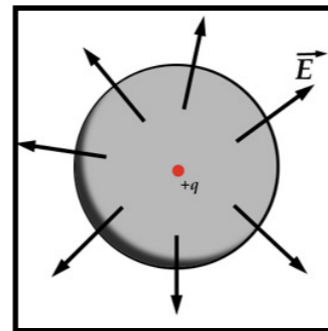
$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$



- * Tidligt i 1860'erne samlede Maxwell alt, man havde lært om sammenhængen mellem elektricitet og magnetisme, i én **forenet** matematisk teori: **Elektromagnetismen**
- * På det tidspunkt var formuleringen meget vanskelig, men siden har vi udviklet en kraftigt matematisk notation, således at sammenhængene kan skrives simpelt:



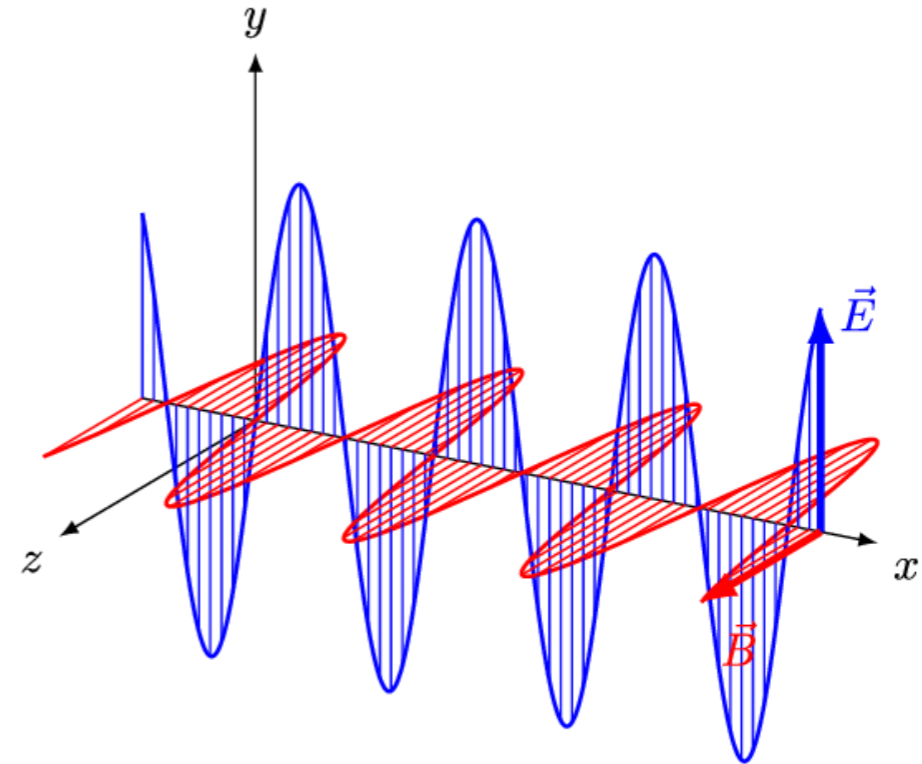
$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{j} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}\end{aligned}$$



ϵ_0 - vakuum-permittiviteten
 μ_0 - vakuum-permeabiliteten

- * I et område af rummet uden elektriske ladninger, og hvor der dermed heller ikke er nogen elektrisk strøm, reducerer Maxwells ligninger til

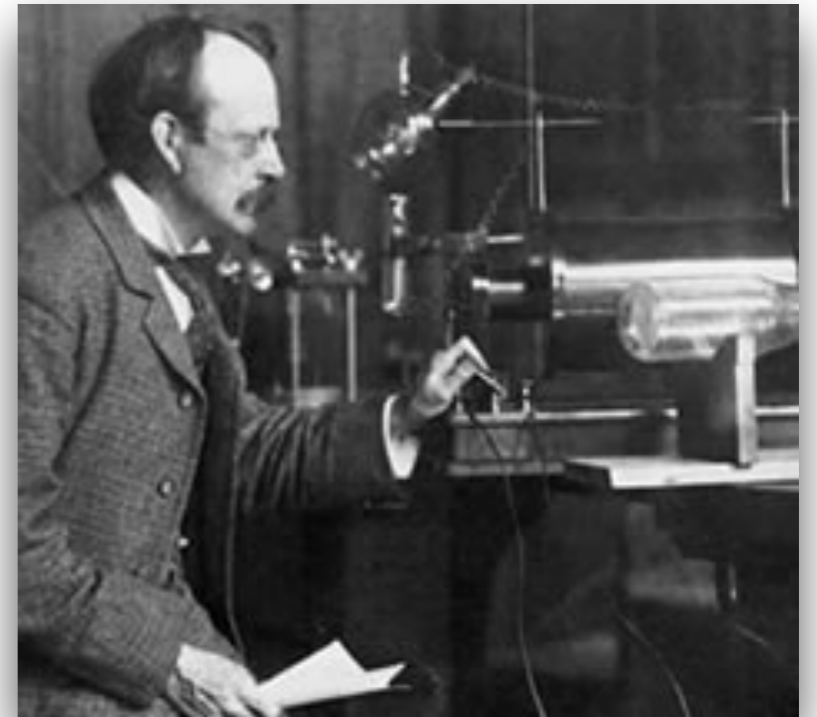
$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{E} &= 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} &= -\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}\end{aligned}$$



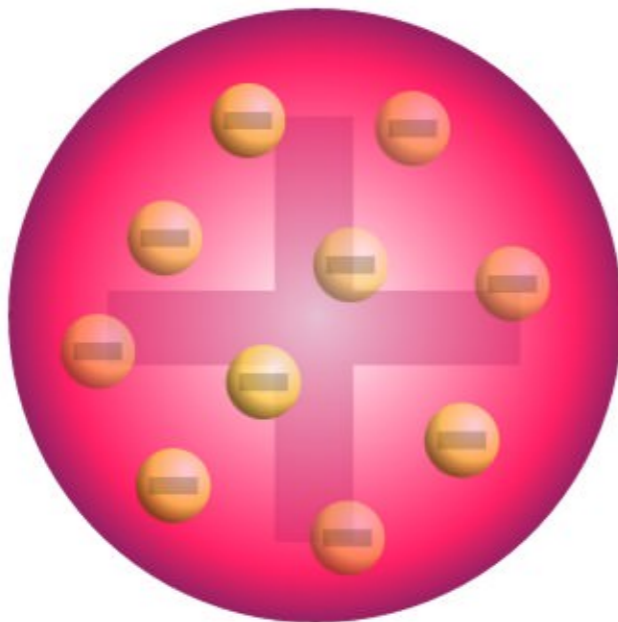
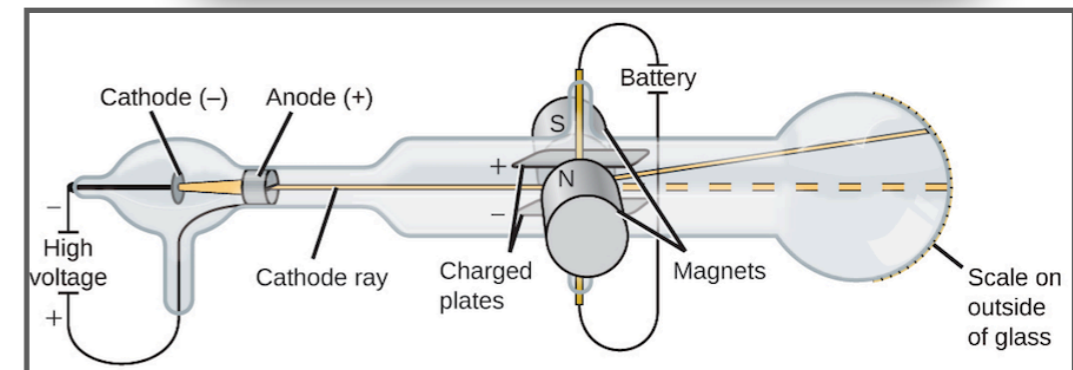
- * De to sidste ligninger beskriver to (koblede) bølgebevægelser
 - * **Elektromagnetisk bølge**
- * Udbredeshastigheden er $c = \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$
 - * Ved indsættelse af de fra laboratoriet kendte størrelser for ϵ_0 og μ_0 fandt Maxwell, at $c = 3 \times 10^8$ m/s, som er identisk med den fra Rømer kendte lyshastighed.
 - * **Lys er en elektromagnetisk bølge!**

Forening af optik og elektromagnetisme

- * I 1897 opdagede J.J.Thomson elektronen, mens han eksperimenterede med et katodestrålerør.
- * Elektronen blev målt til at have en masse på omkring 1/2000-del af det letteste grundstof, brint

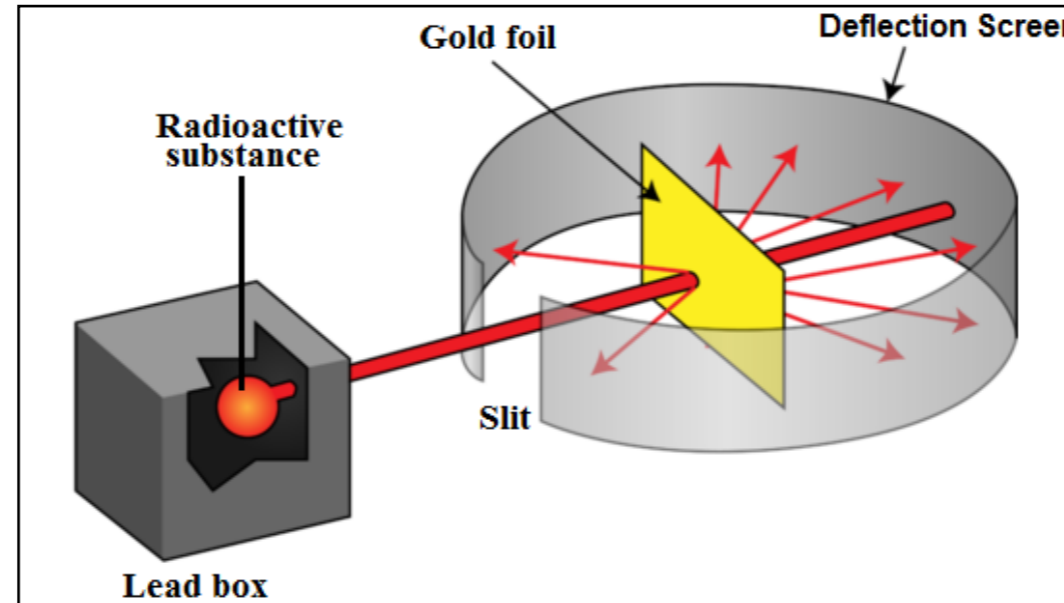
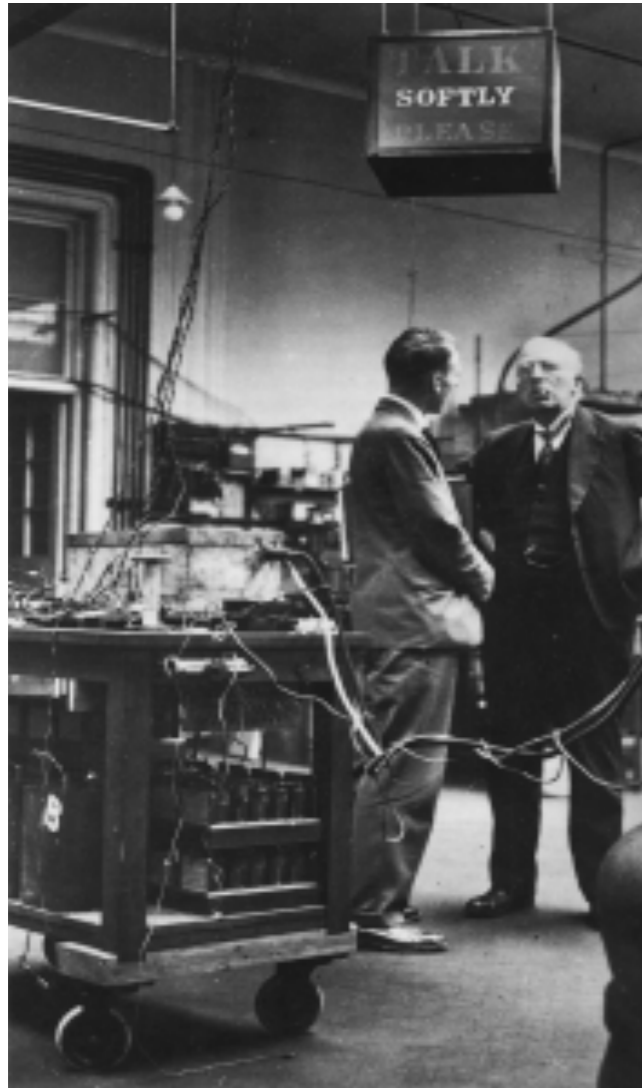


Atomet er ikke elementært !

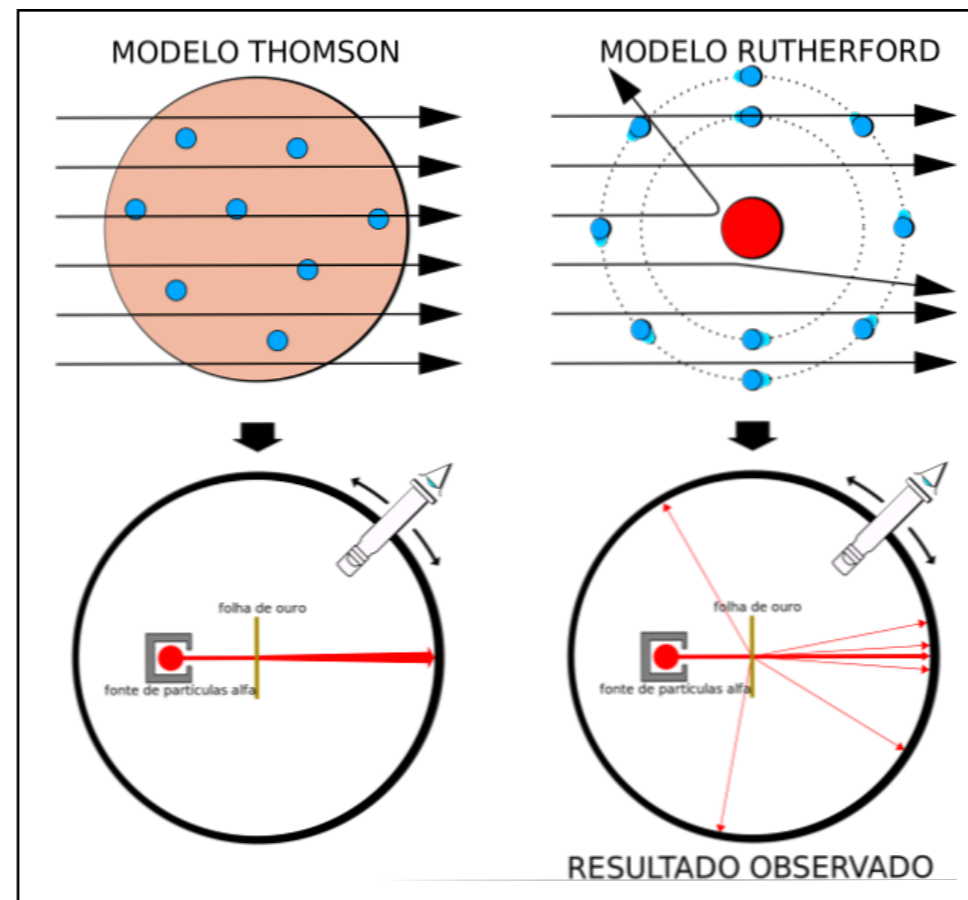


J.J.Thomson mente, at elektronerne var indlejret i en struktur af positive ladning: "Plum Pudding"

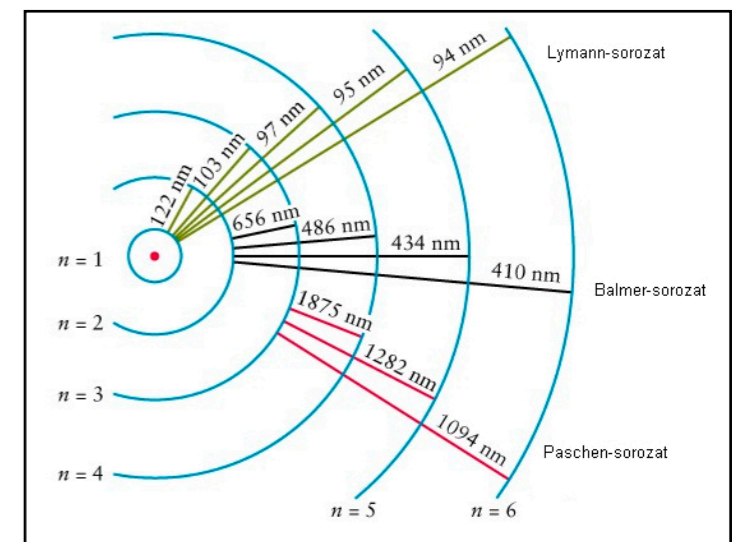




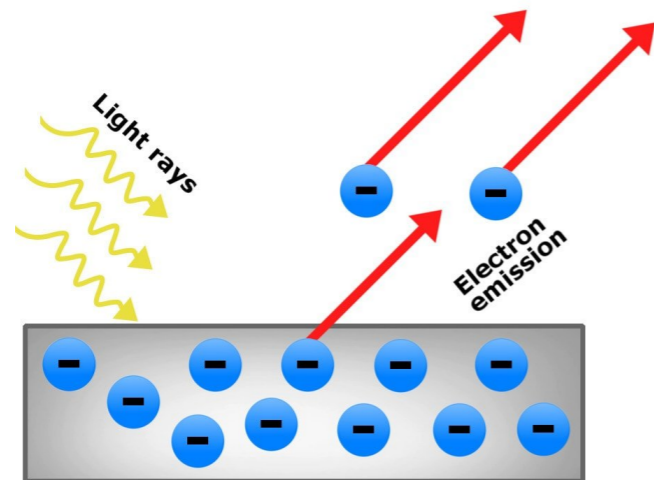
Bohr (1913): Elektroner kredser omkring kernen i baner med veldefinerede energier: Spektrallinjer



Rutherford (1912): Atomet indeholder lette elektroner, der kredser omkring en lille, tung, central kerne



Fotoelektrisk effekt



Observationer:

1. Ingen udstrålede elektroner under en vis frekvens, ν_0 , uanset intensiteten af det indstrålede lys;
2. Over ν_0 afhænger den kinetiske energi af de udstrålede elektroner af fotonfrekvensen ν .

Konklusion (Einstein, 1905, Nobelpris 1921):

- Lys har partikelnatur, fotoner
- Energi af foton: $E = h\nu$

Lys har både bølgenatur (Maxwell) og partikelnatur (Einstein)

Dualitet

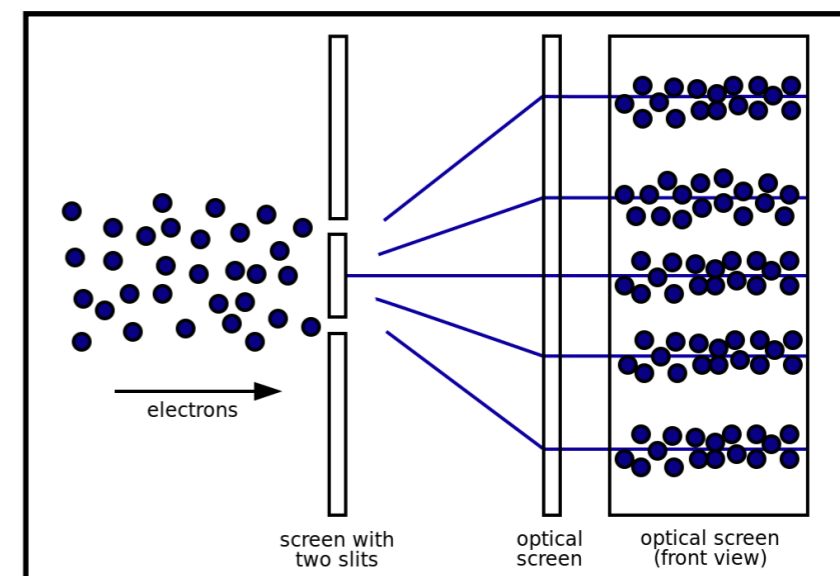
Partikler er også bølger

I sin PhD-thesis i 1924 foreslog de Broglie (Nobelpris 1929), at dualiteten ikke kun gælder for stråling men generelt for partikler

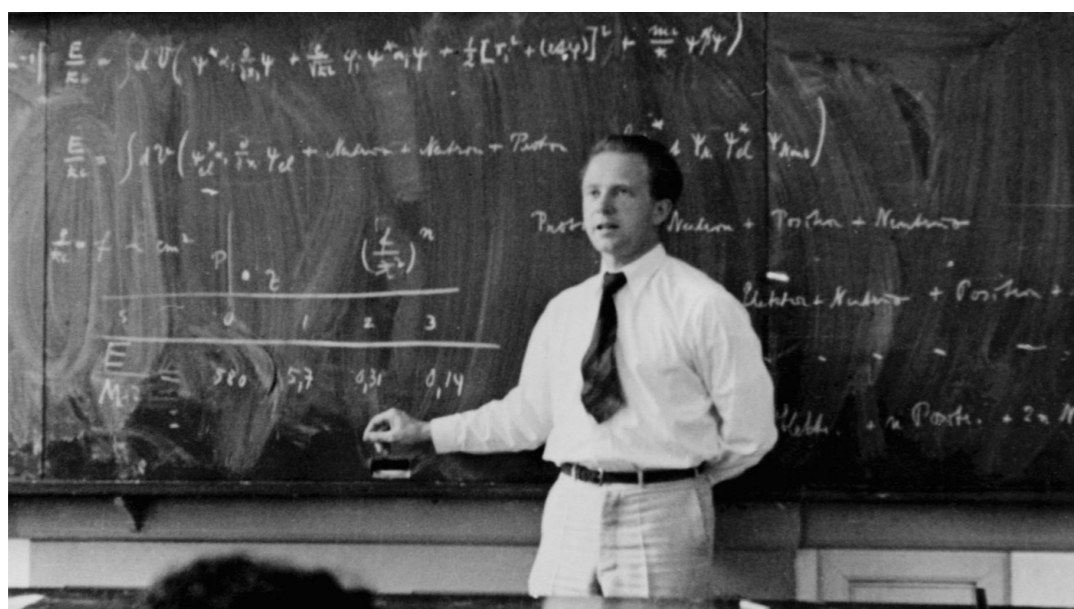
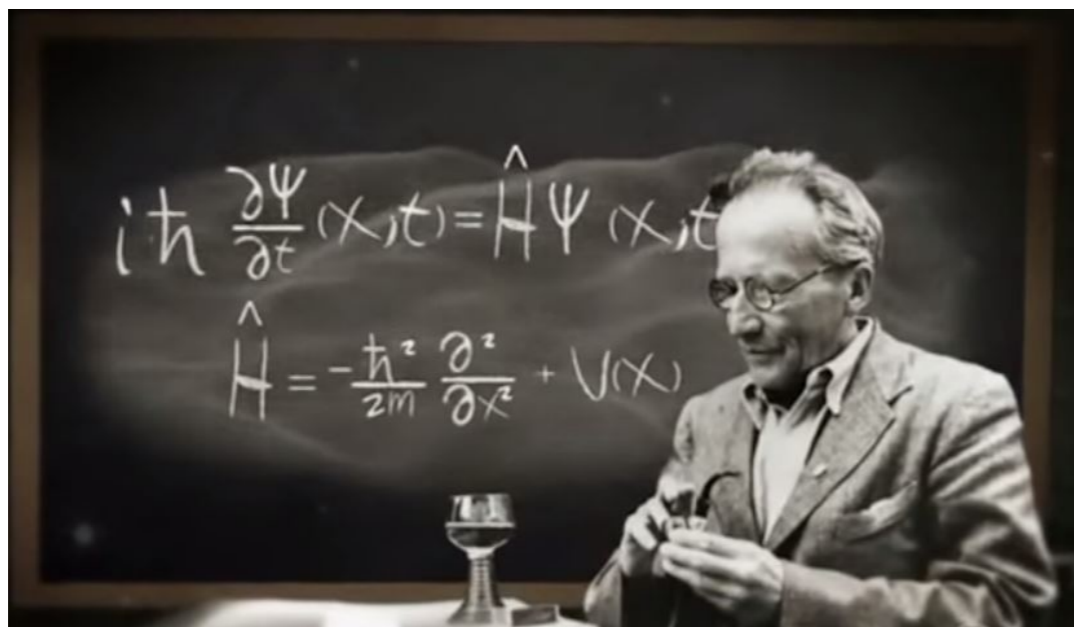


Verificeret af Davisson og Germer (1923-27)

Senere også via dobbeltspalteeksperiment



- * I årene 1925-1926 formuleredes en koherent teori for kvantemekanikken med vigtige bidrag fra de Broglie, Werner Heisenberg, Max Born, Erwin Schrödinger, Paul Dirac og Wolfgang Pauli



$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Kvantemekanikken:

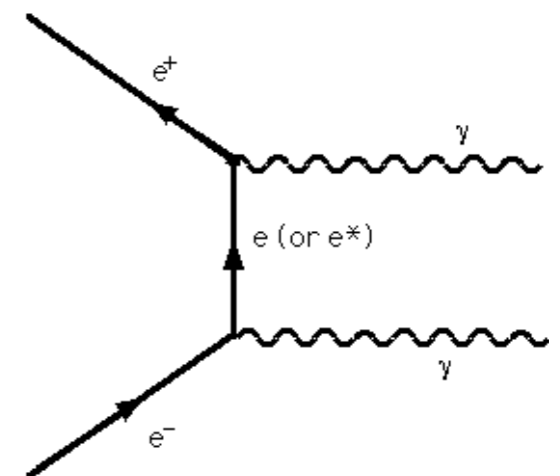
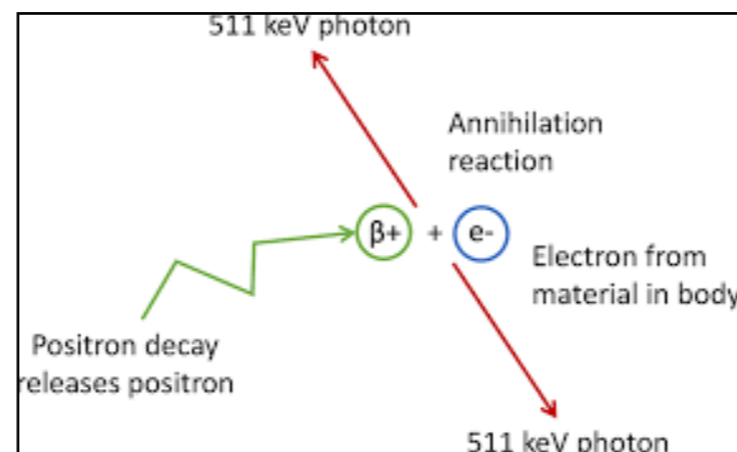
- baseret på Newtons mekanik, ikke-relativistisk
- bevarelse af masse, stof, antal partikler

- * Ligesom Newtons love, så kan ikke-relativistisk kvantemekanik ikke beskrive masseløse partikler, fx fotoner.
- * Masseløse partikler finder deres naturlige (ikke-kvantemekaniske) beskrivelse i Einsteins specielle relativitetsteori (1905):
 - * Her finder man, at masseløse partikler nødvendigvis bevæger sig med lyshastigheden
 - * Ligeledes erstattes den klassiske massebevarelse med **energibevarelse**, hvor

$$E = mc^2$$

- * Einsteins berømte sætning betyder, at masse kan omskabes til energi og omvendt
- * I den relativistiske kvantemekanik vil antallet af partikler ikke (nødvendigvis) være bevaret

- * **Eksempel**

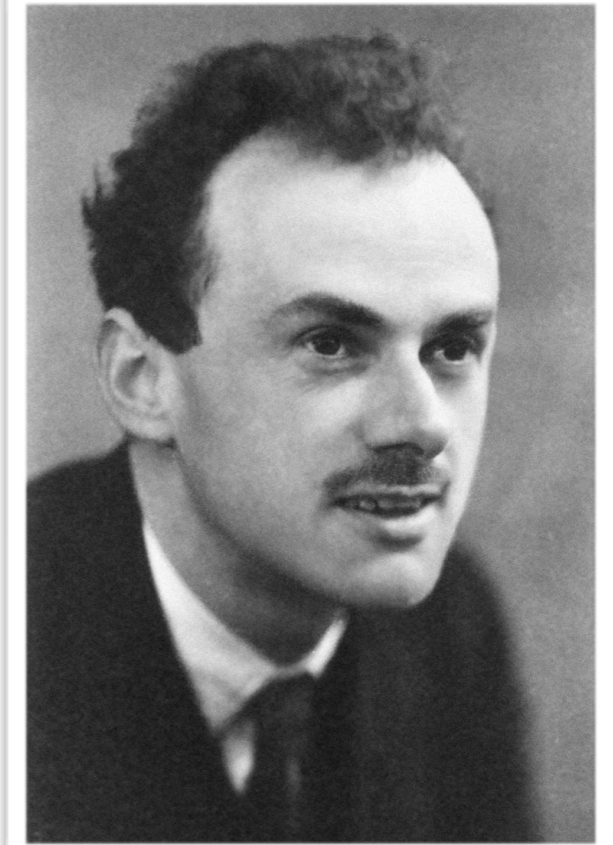
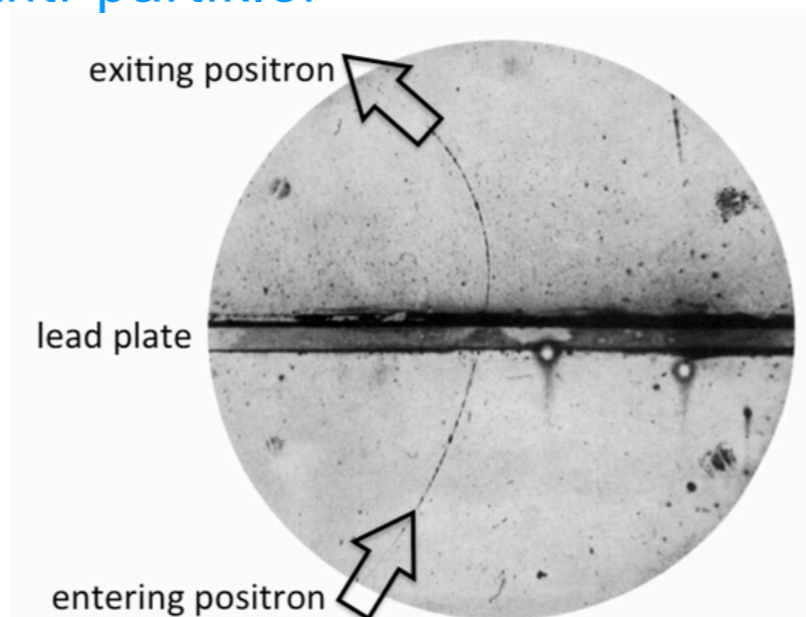


- * Dirac beskrev i 1927 den spontane emission af fotoner fra atomer:
 - * Fotonen beskrives som en eksiteret tilstand af det elektromagnetiske felt
- * I 1928-30 indser Jordan, Wigner, Heisenberg, Pauli og Fermi, at materielle partikler kan ses som eksiterede tilstande af (andre) kvantefelter:
 - * elektronfelter, protonfelter, ...
- * I 1929 indser Dirac så, at dette billede fører til eksistensen af anti-partikler

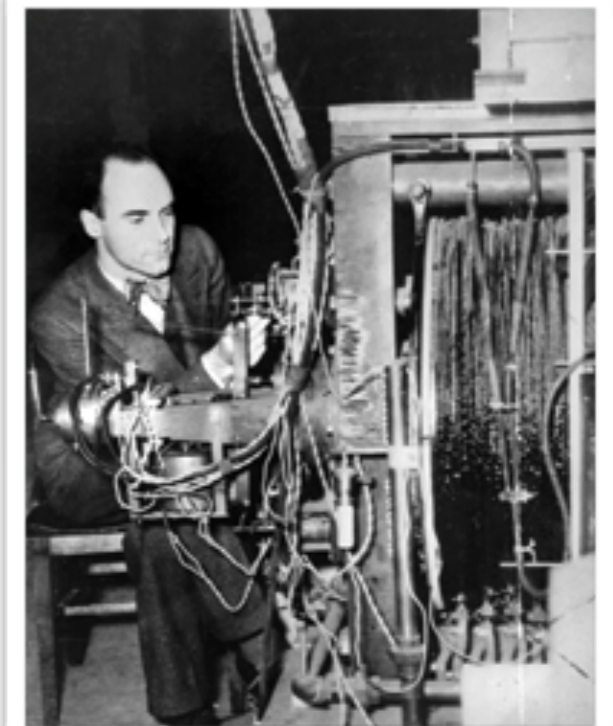
* Einstein: $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2 \Rightarrow E = \pm \sqrt{m^2c^4 + p^2c^2}$

* Negative energi-tilstande \leadsto Anti-partikler

* I 1932 opdager C.D.Anderson positronen (anti-elektron) i kosmiske stråler



Paul Dirac, Nobelpris 1933



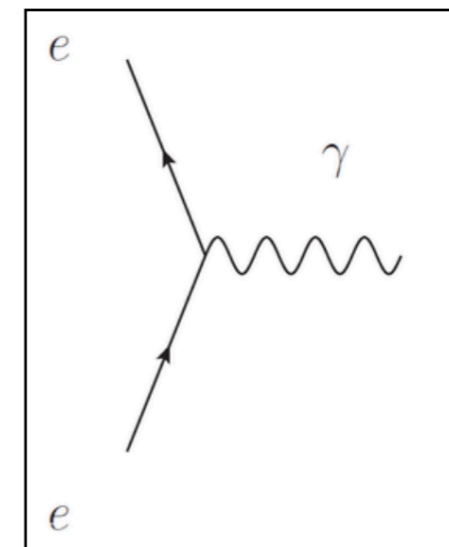
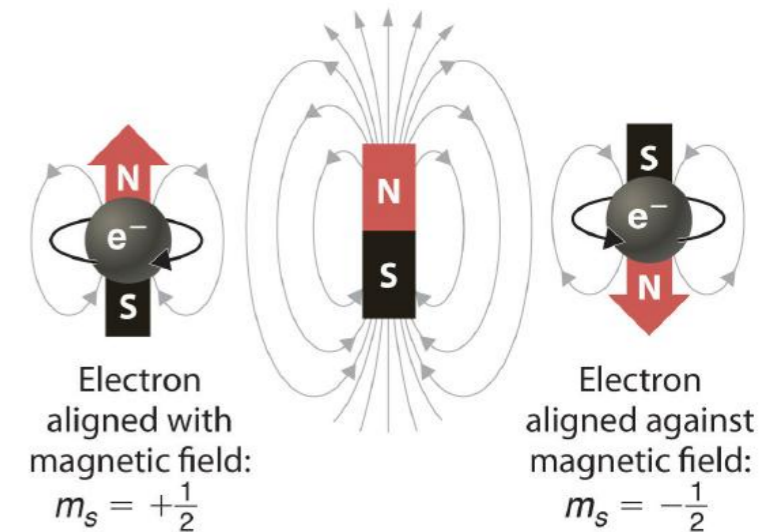
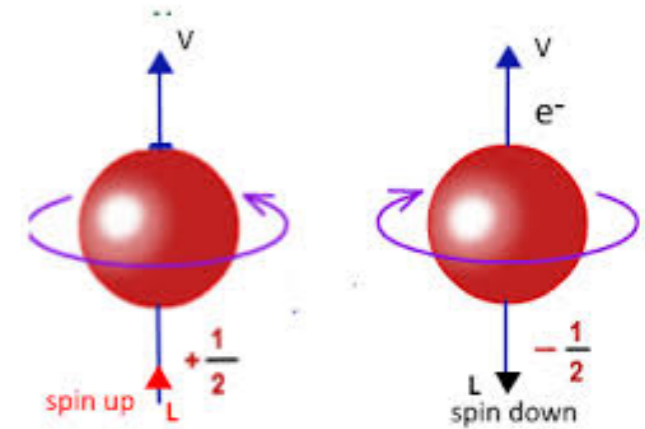
C.D.Anderson (Nobelpris 1936)

- * Elektroner, som alle andre stoflige partikler, er fermioner, de har spin-1/2
- * Kan tænke på dem som små snurretoppe, men de er punktformede, så der er ikke rigtig noget, der kan snurre/spinne: Internt kvantetal
- * Fermionerne virker som små magneter. Magnetens retning er parallel med spinretningen
- * Forholdet mellem styrken på dipolen og spinnet viser sig at være dobbelt så stærkt udregnet i kvantemekanikken, som det ville have været klassisk

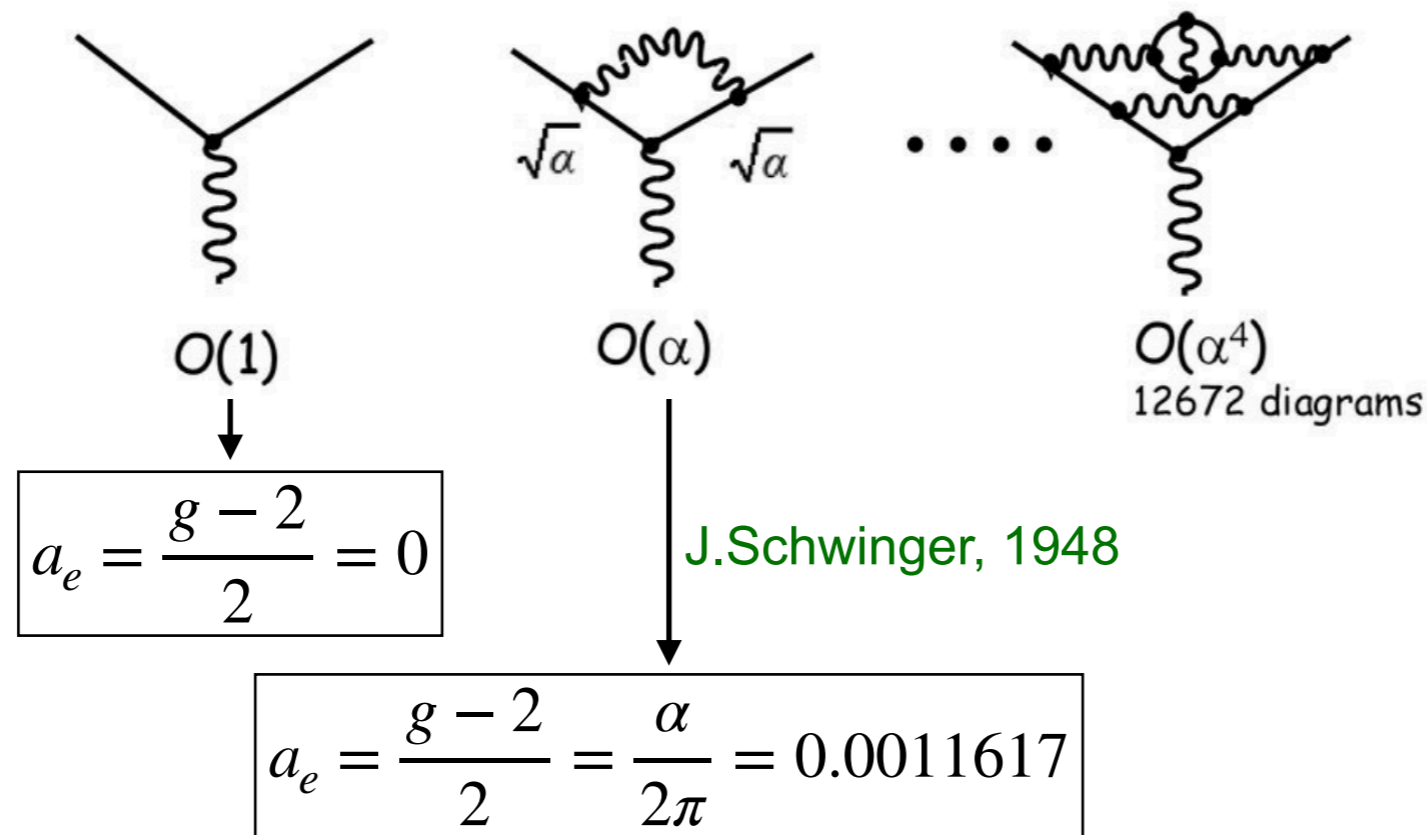
$$\mu = g \frac{q}{2m} S$$

$$g = 2$$

- * For at bestemme g beregnes dette simple Feynman diagram
- * Men der er bidrag / diagrammer af højere orden



- * Kvantemekaniske beregninger er baseret på perturbationsteori: Beregner én orden af gangen og lægger sammen:



J. Schwinger, Nobelpris 1965

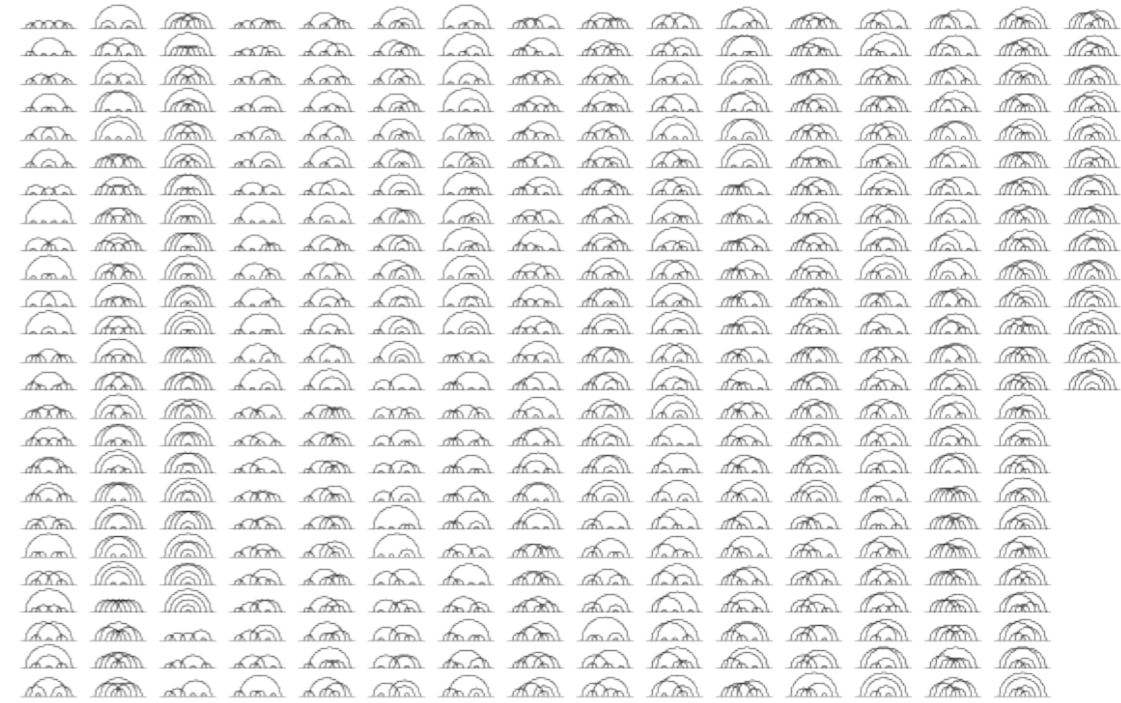
- * Her er koblingskonstanten α - også kendt som finstrukturkonstanten - relateret til den elektriske enhedsladning gennem

$$\alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{\hbar c} \simeq 1/137$$

- * Grunden til at perturbationsteori virker er, at $\alpha \ll 1$, og at højereordensleddene derfor hurtigt bliver små

- * I dag har man beregnet elektronens magnetiske moment til 10. orden
- * Samtidigt udføres uhyre præcise målinger

Målt:	$(1159652180.91 \pm 0.26) \times 10^{-12}$
Teori:	$(1159652181.64 \pm 0.76) \times 10^{-12}$
Forskkel:	$(0.73 \pm 0.80) \times 10^{-12}$



- * Tingene stemmer til 11 betydende cifre inden for én standardafvig!

.....

- * Ved hjælp of QED kan man nu beregne elektromagnetiske processer med stor præcision

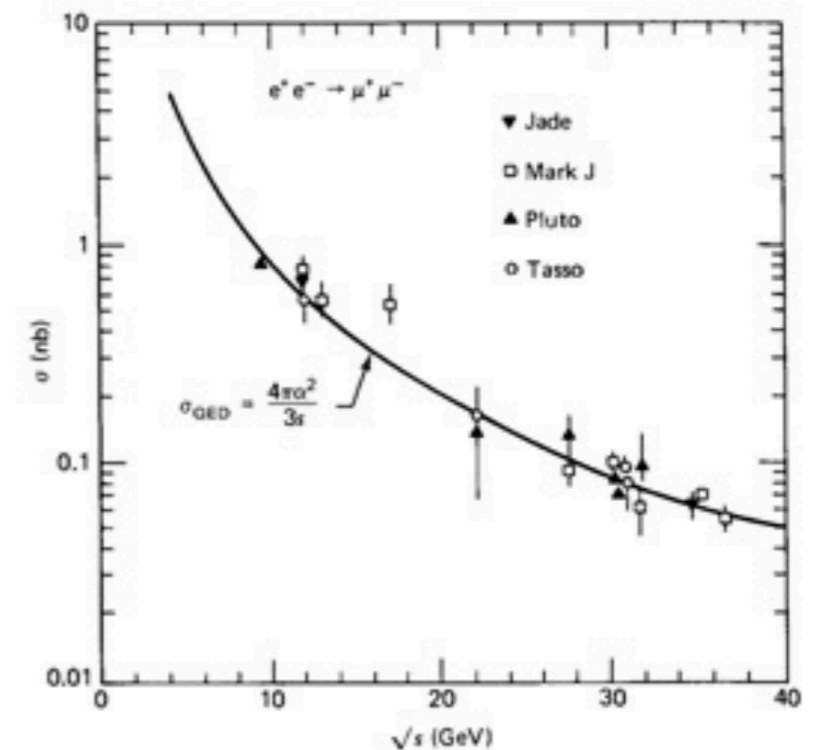
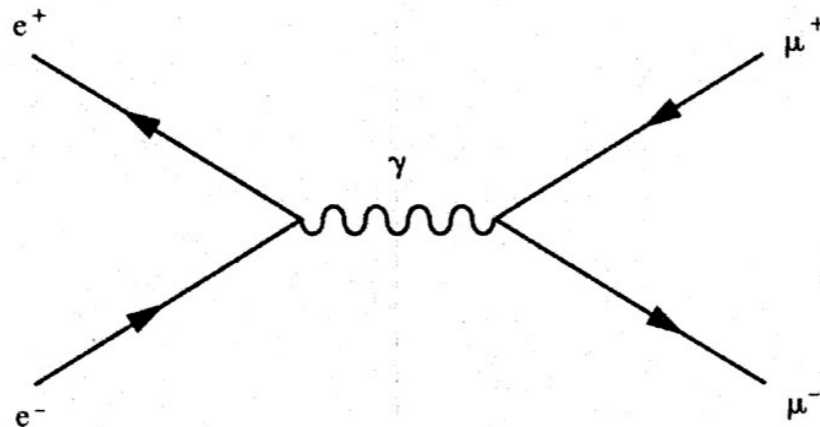
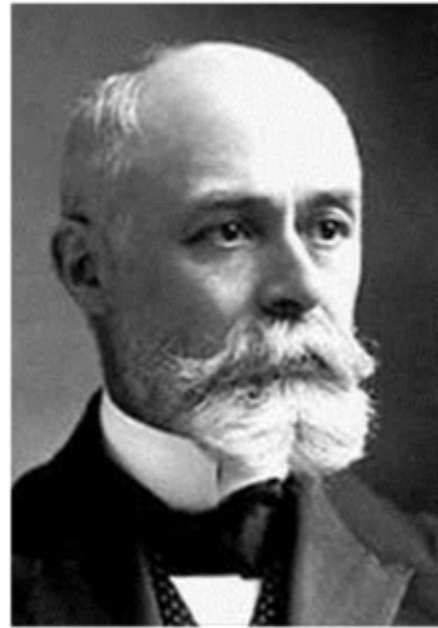


Fig. 6.6 The total cross section for $e^-e^+ \rightarrow \mu^-\mu^+$ measured at PETRA versus the center-of-mass energy.



Radioaktivitet og svage vekselvirkninger

- * H. Becquerel og P. og M. Curie opdager 1896-1900 naturlig radioaktivitet
- * Opdeler strålingen i tre grupper
 - * α stråler: tunge ^4He kerner
 - * β stråler: lette elektroner
 - * γ stråler: højeenergetiske fotoner
- * I 1930 postulerer W.Pauli eksistensen af en ny (usynlig!) partikel, neutrinoen, for at forklare det tilsyneladende brud på energi og impulsbevarelse i β -henfald



Henri Becquerel



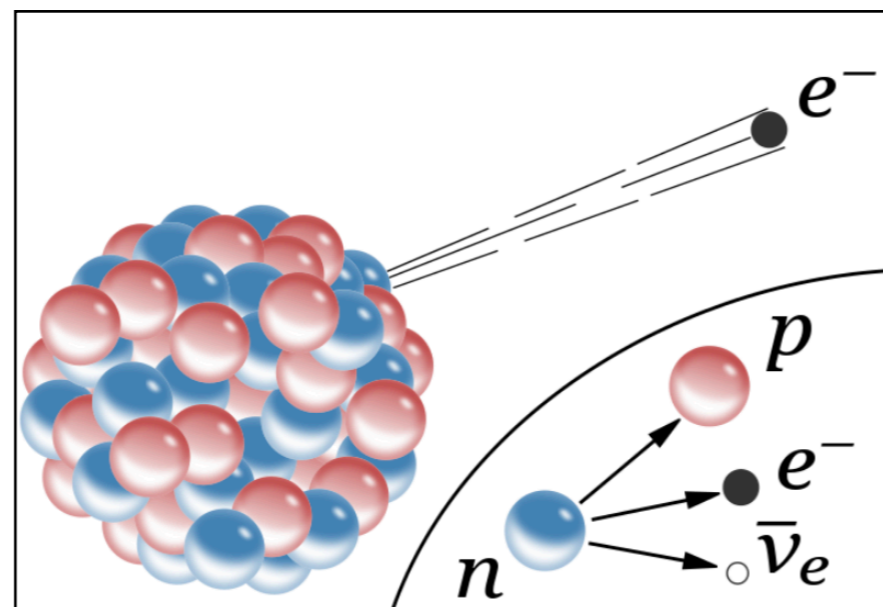
Pierre Curie



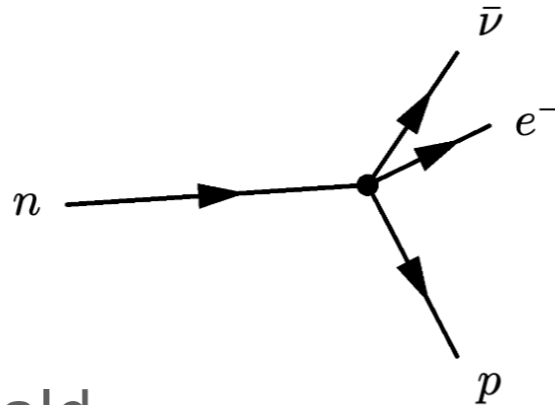
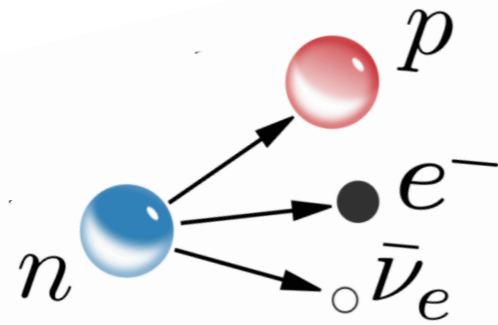
Marie Curie



Wolfgang Pauli



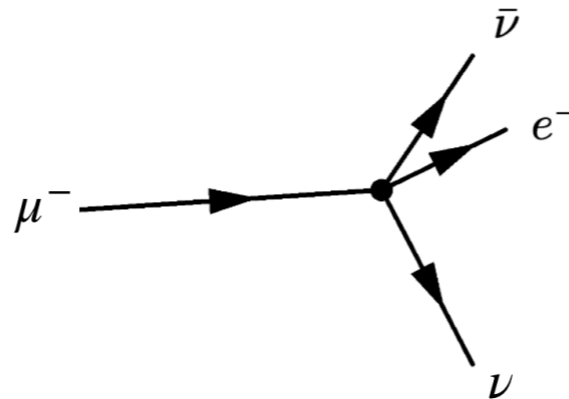
- * I 1934 beskriver Fermi β -henfald via en såkaldt 4-punkts vekselvirkning



- * Tilsvarende for muon-henfald

- * Muon levetid τ

$$1/\tau = \Gamma = \frac{G_F^2 m_\mu^5}{192\pi^3}$$

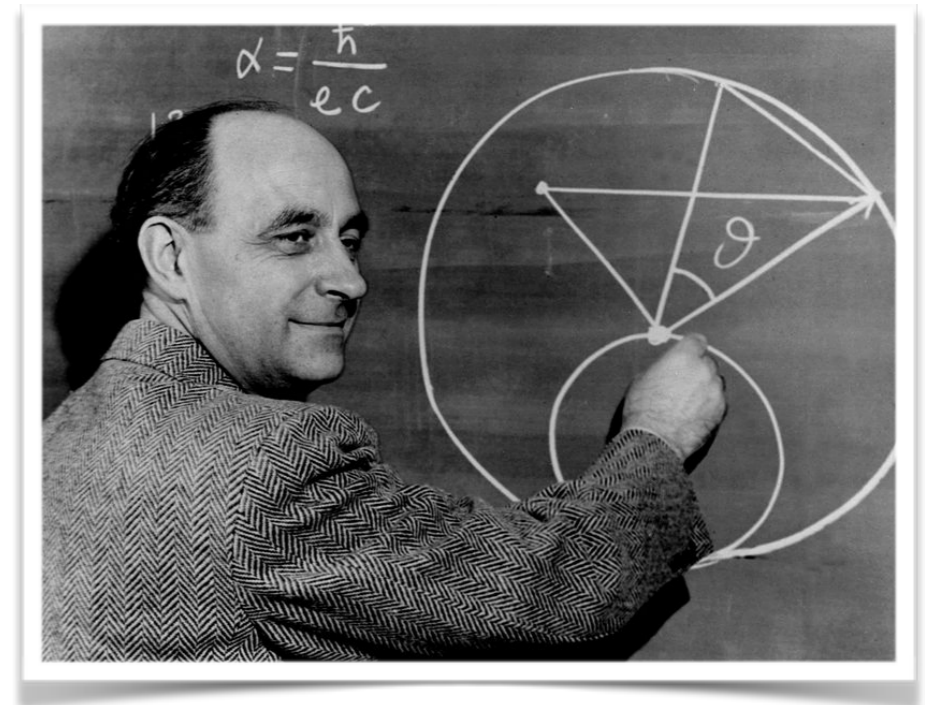


- * Fermi-konstanten

$$G_F = 1.1664 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$

- * Bemærk, at

$$1/\sqrt{G_F} = 293 \text{ GeV}$$

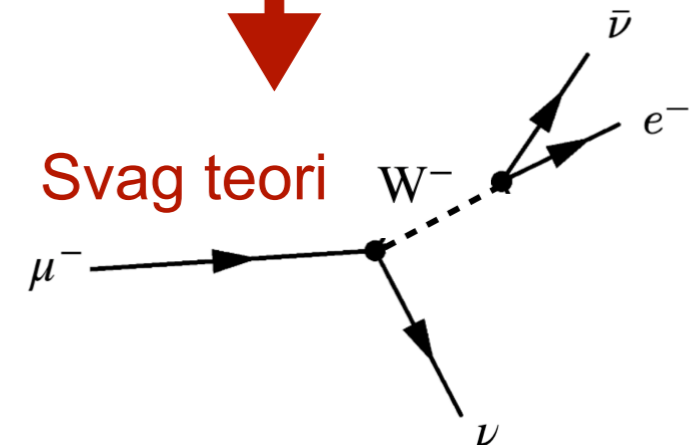
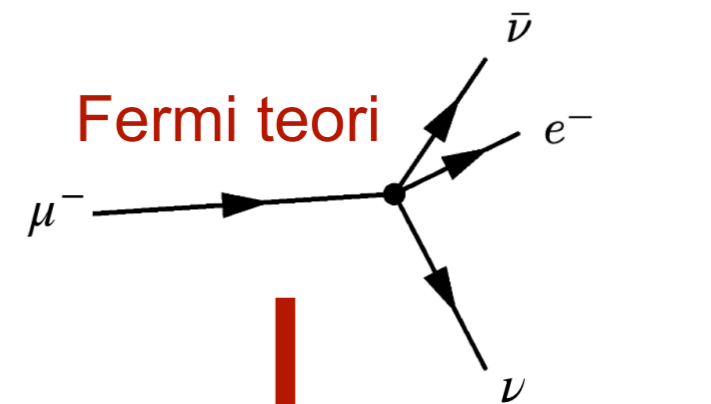
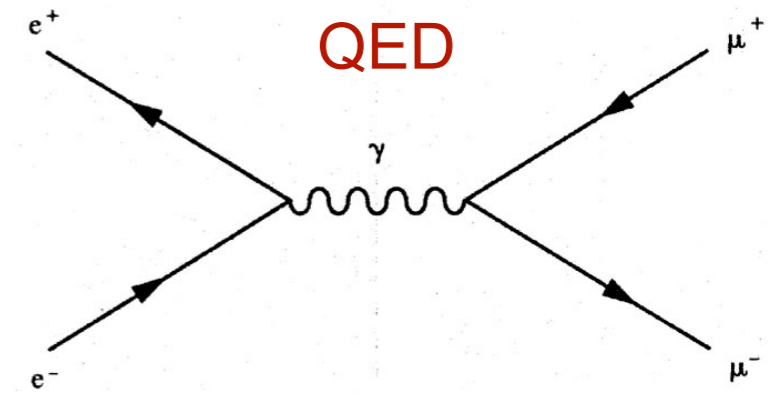
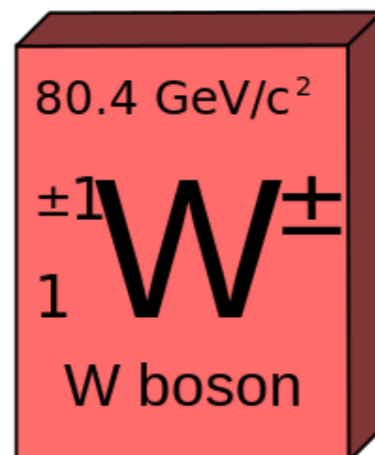


E. Fermi, Nobelpris 1938

Muonen

- * Opdaget af Anderson og Neddermeyer i 1936 i kosmisk stråling
- * Identisk med elektronen, men 200 gange tungere
- * Henfalder i løbet af 2.2 μsec
- * Uventet opdagelse: "Who ordered that" (I.I. Rabi)

- * Som i elektromagnetismen beskrives også de svage vekselvirkninger ved udveksling af en intermediær spin-1 partikel
- * **Intermediær vektor-boson**
- * Men hvor fotonen er masseløs og neutral må W-bosonen være
- * **elektrisk ladet**
- * **tung, for at kunne forklare svagheden af vekselvirkningen**
- * Og der må (selvfølgelig!) eksistere to W-bosoner W^- og W^+

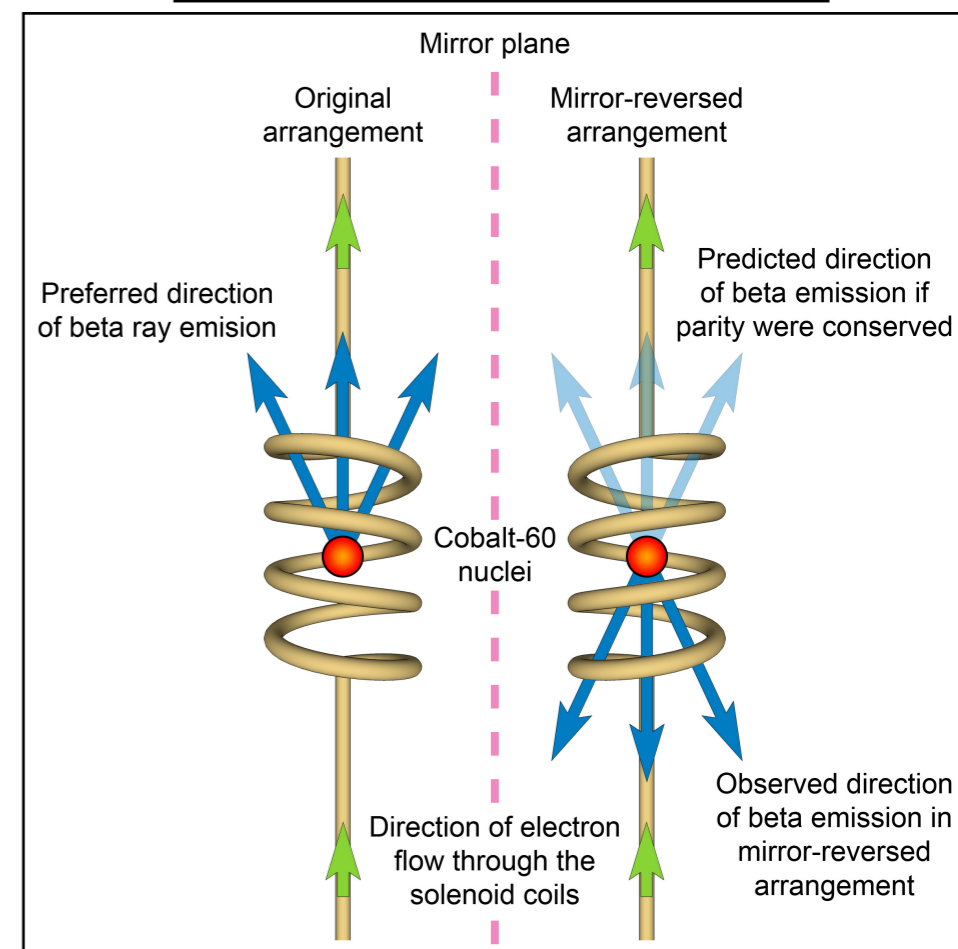


- * Efter forslag af Lee og Yang (1956) viser Wu (1957), at paritet er maksimalt brudt i de svage vekselvirkninger
- * Fermioner (spin-1/2-partikler) optræder i to inkarnationer, to **kirale** tilstande
- * Betegnes **højre-** og **venstre-håndede**
- * For høje energier er disse tilnærmelsesvist lig med de tilsvarende helicitetstilstande

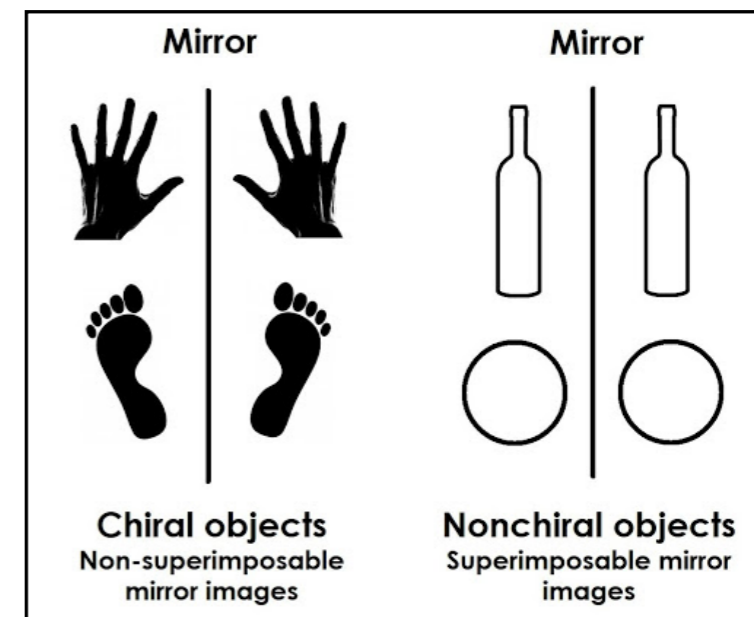


- * I de svage vekselvirkninger deltager kun
 - * **venstrehåndede partikler**
 - * **højrehåndede anti-partikler**

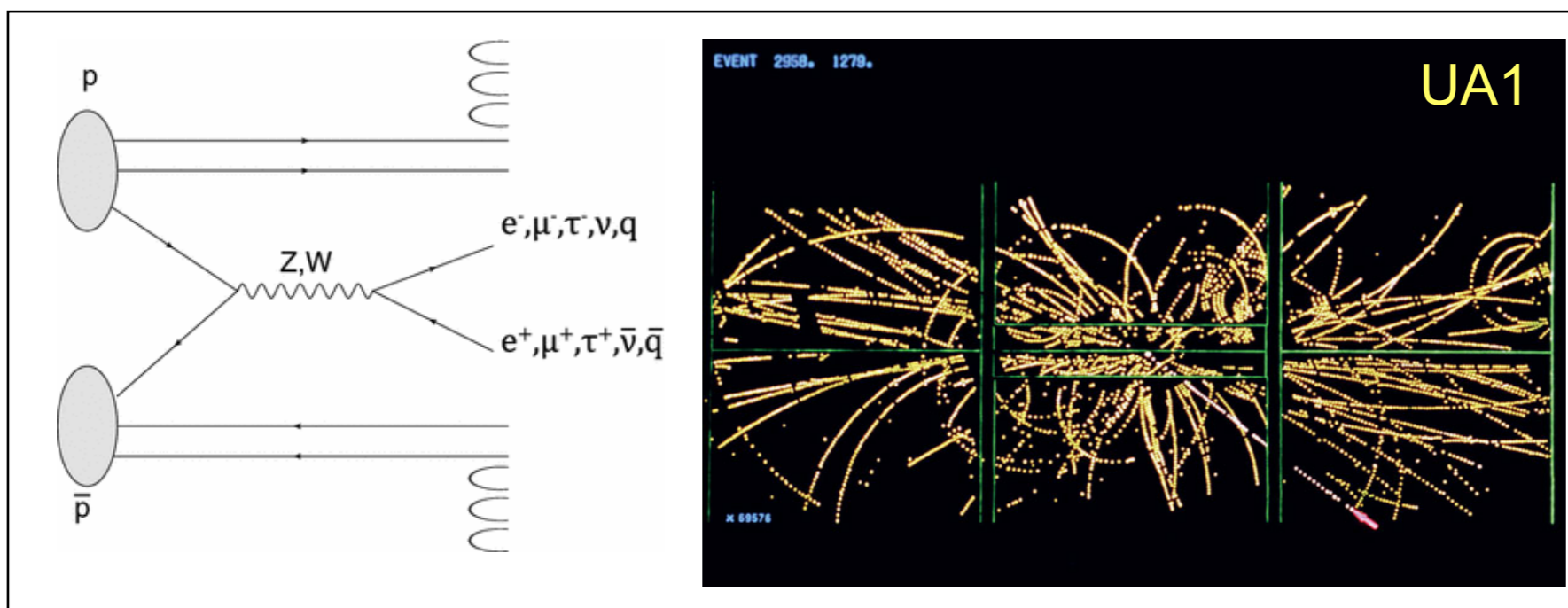
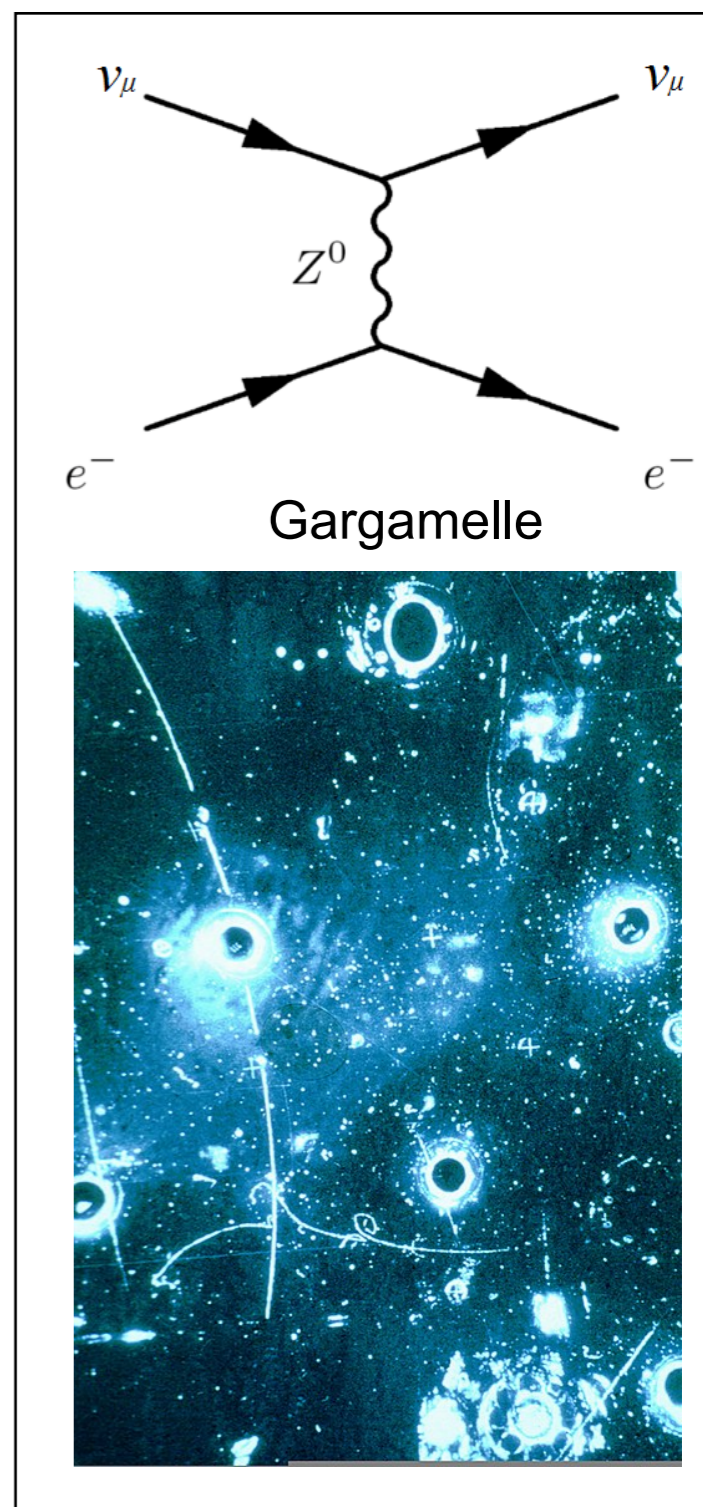
Princip i Wu's eksperiment



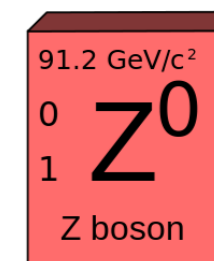
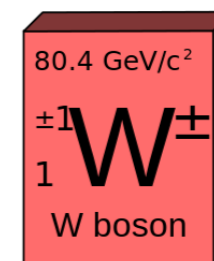
Kiralitet



- * Svage neutrale vekselvirkninger blev forudsagt af Salam, Glashow og Weinberg i 1973
- * Kort tid derefter observeret i Gargamelle boblekammeret ved CERN
- * De tre intermediære vektorbosoner W^\pm og Z^0 blev direkte eftervist ved SPS proton-antiproton-kollideren på CERN i 1983

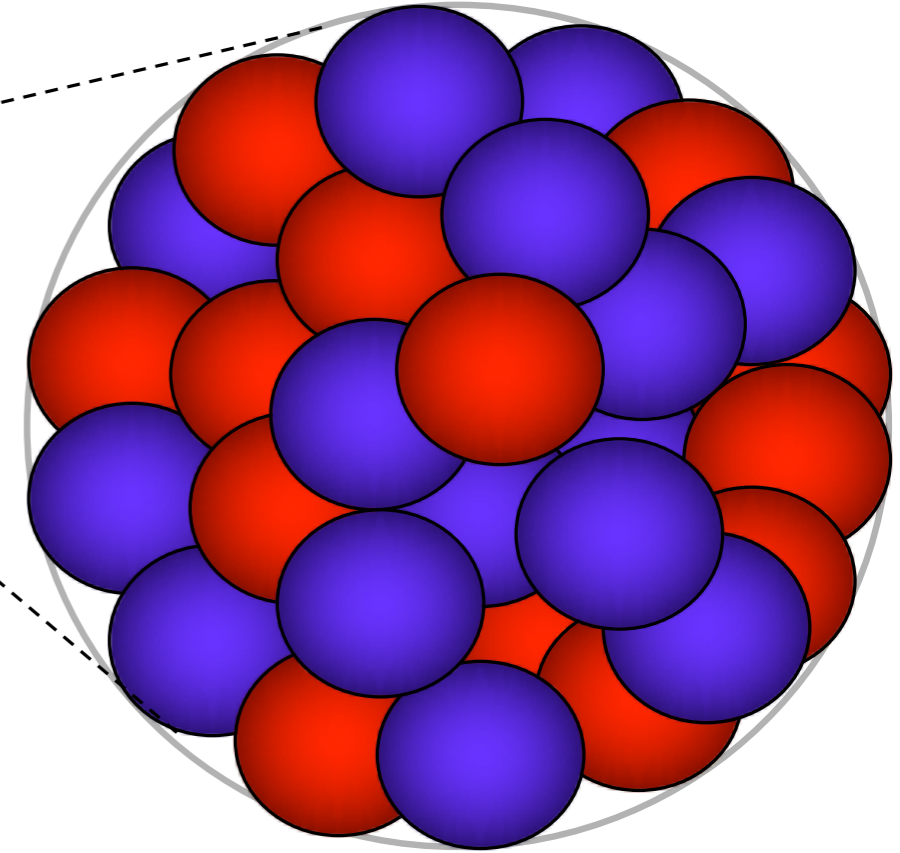
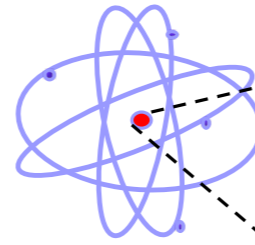


Nobel Price, 1984,
C. Rubbia, S. van der Meer



Fra atomkernen via en skov af hadroner til kvarkbilledet

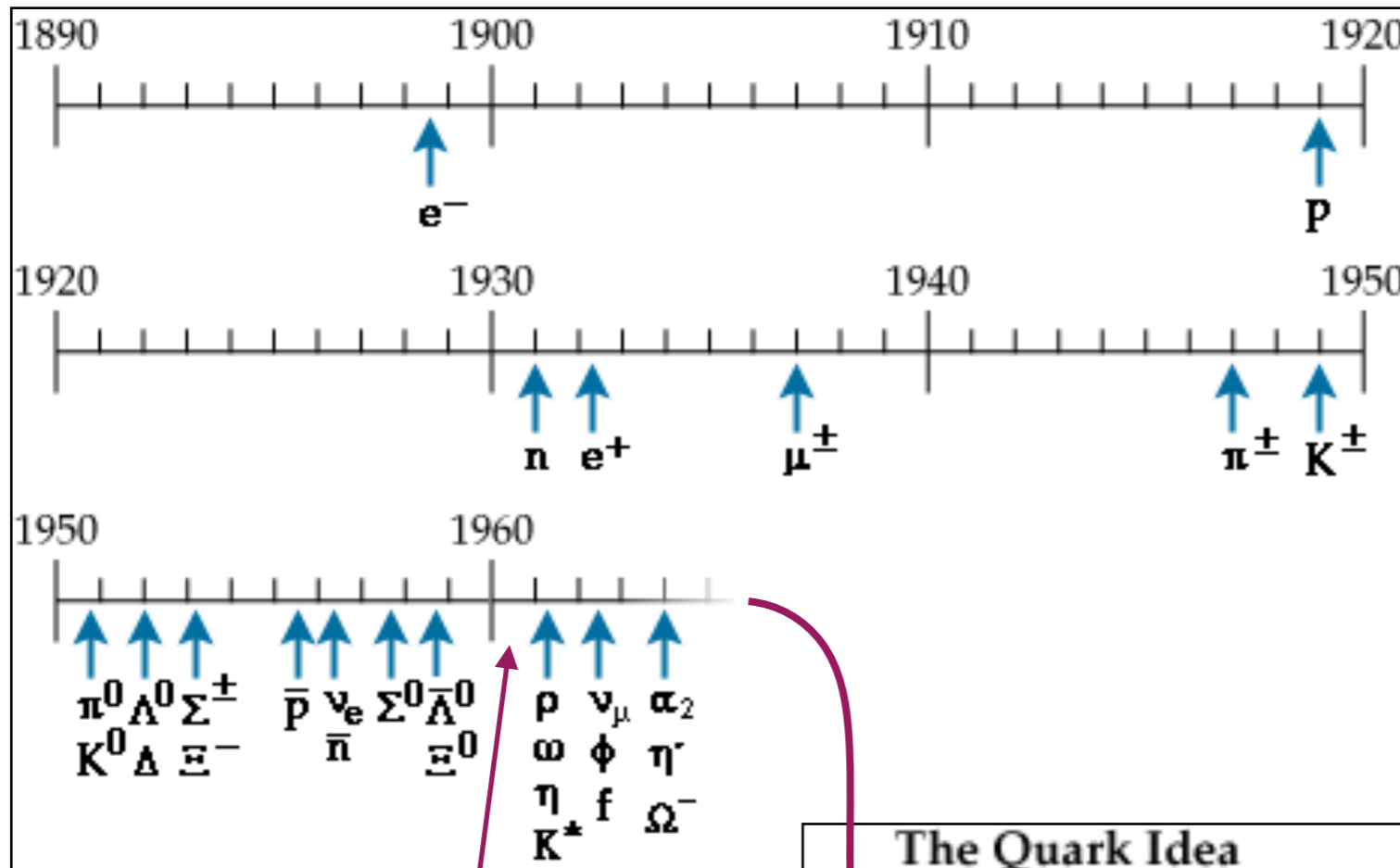
- * Atomkernen er lille og tæt; omkring en faktor 100.000 mindre end selve atomet
- * En overgang troede man, at kernen var fundamental. Men da ville der være lige så mange fundamentale kerner, som der er forskellige atomer.
- * Senere viste det sig, at kernen består af nukleoner
 - **ladede protoner**
 - brintatomets kerne er en proton
 - påvist at være til stede i andre kerner i 1917 af Rutherford
 - **neutrale neutroner**
 - opdaget i 1932 af J. Chadwick



10^{-14} m

J. Chadwick, Nobelpris 1935



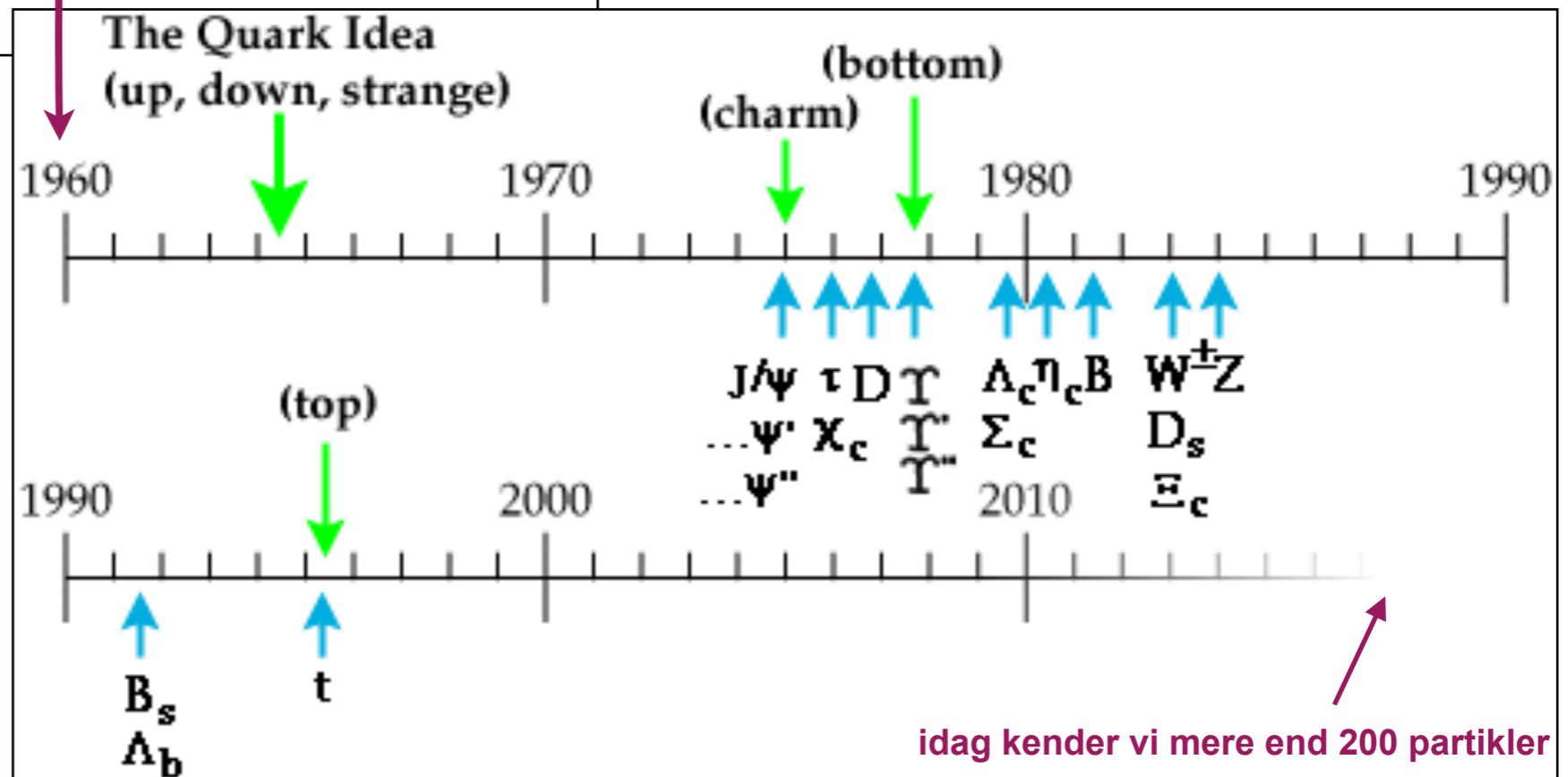


* Op gennem 1950-60 blev der eftervist en stor mængde nye "elementære" stærkt vekselvirkende partikler - hadroner

* I løbet af 1960'erne opstår kvark-modellen:

* Hadroner er ikke sammensatte med indeholder kvarker

her er der allerede opdaget ~20 partikler



idag kender vi mere end 200 partikler

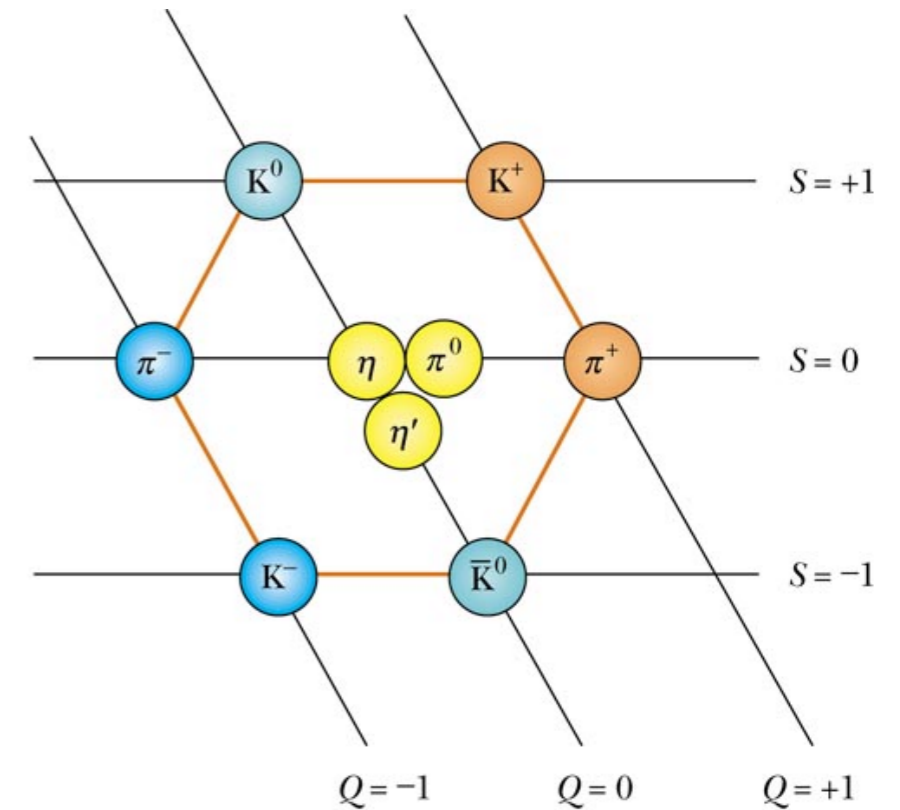


- * Opdagelse af mange partikler, de fleste med meget kort levetid
- * Partiklerne optræder i mønstre

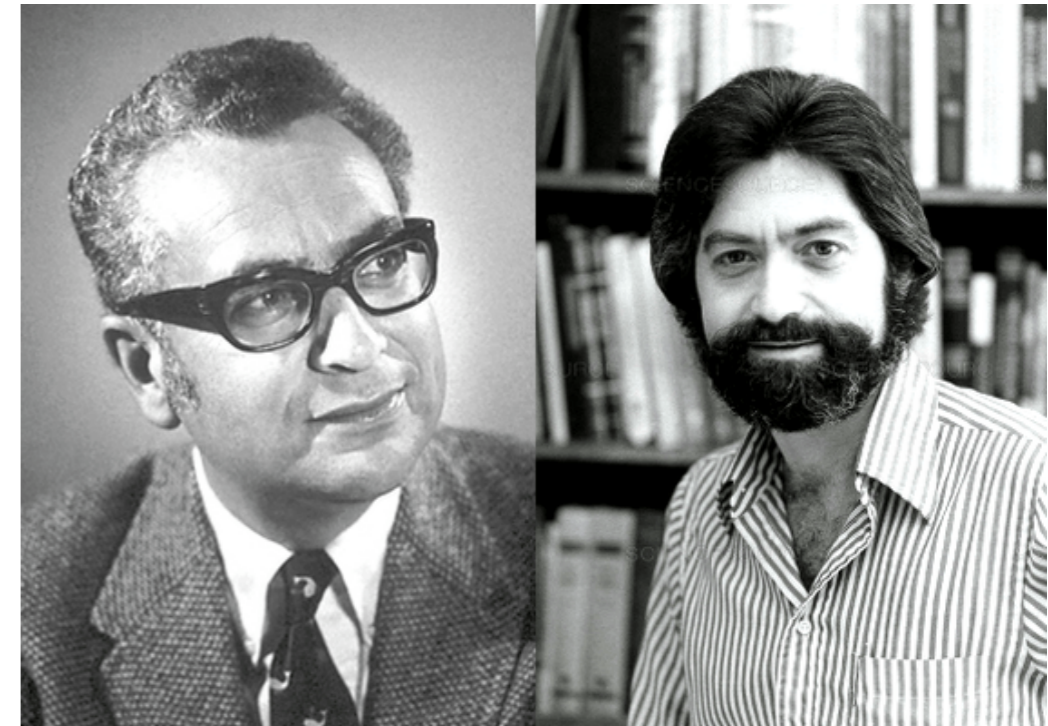
Nukleoner: n (940 MeV), p (938 MeV)

Pioner: π^+ (140 MeV), π^0 (135 MeV), π^- (140 MeV)

Kaoner: K^+ (496 MeV), K^0 (498 MeV), K^- (496 MeV)



- * I 1964 får Murray Gell-Mann og George Zweig (uafhængigt af hinanden) ideen, at man kan forklare den store zoo af partikler, ved hjælp af nye elementære bestanddele: **kvarker**



M. Gell-Mann

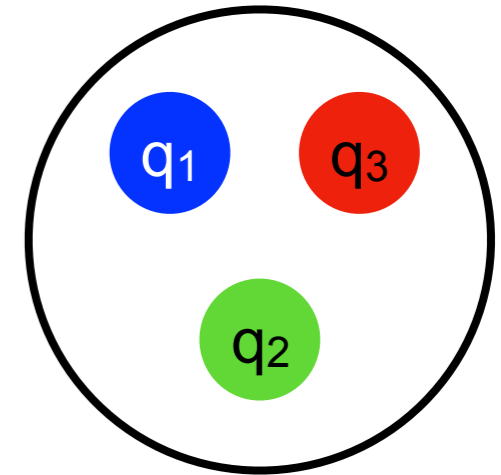
G. Zweig

* To klasser af hadroner i kvarkmodellen

* **Baryoner**

Eksempler:

$$\text{proton} \equiv uud \quad ; \quad \text{neutron} \equiv udd$$



* **Mesoner**

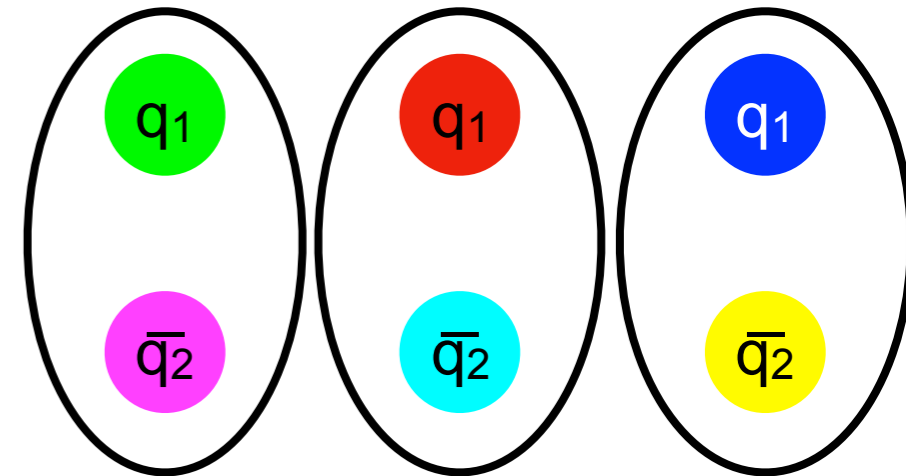
Eksempler:

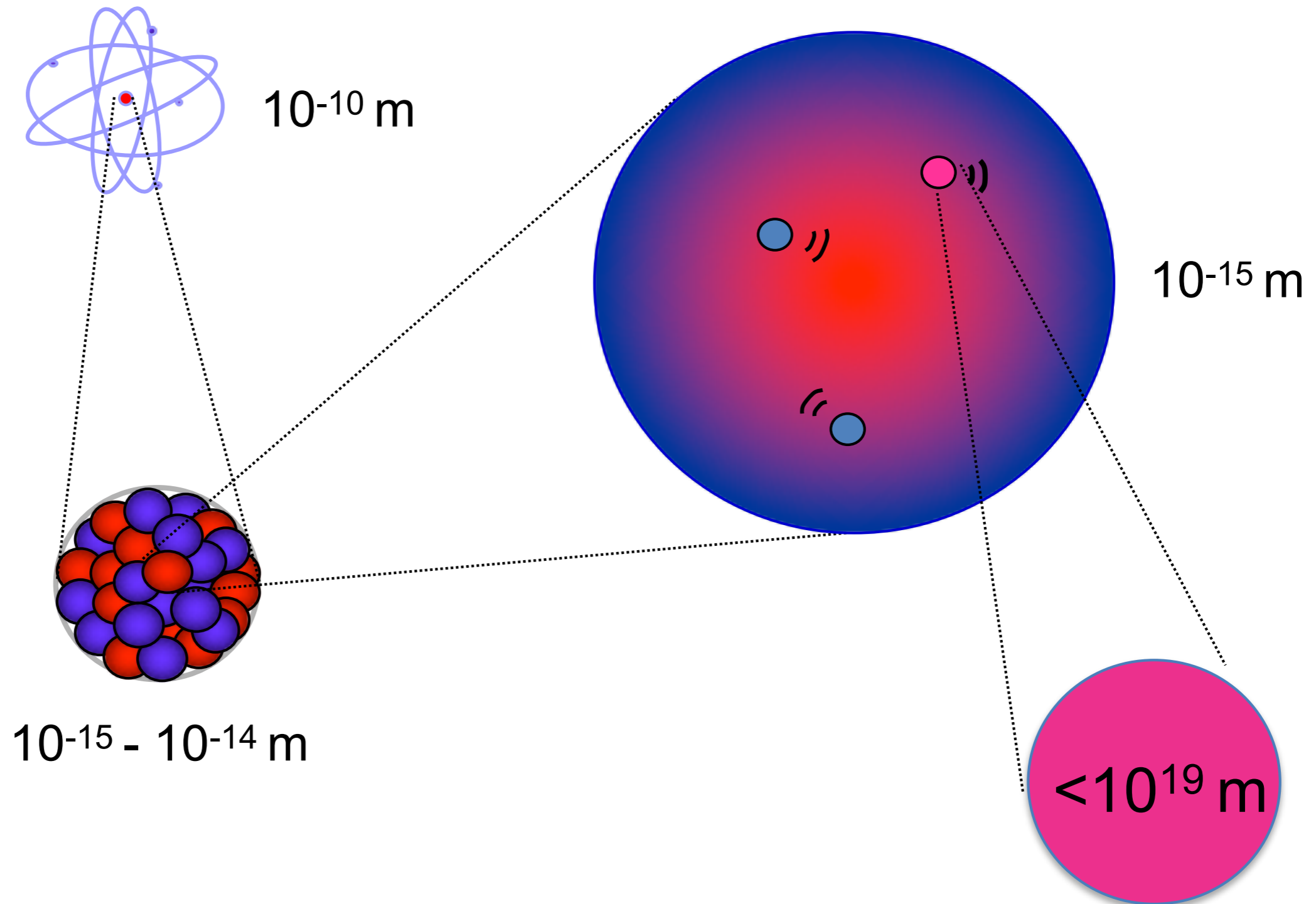
• Pioner

$$\pi^+ \equiv u\bar{d} \quad ; \quad \pi^- \equiv \bar{u}d \quad ; \quad \pi^0 \equiv (d\bar{d} - u\bar{u})/\sqrt{2}$$

• Kaoner

$$K^- \equiv s\bar{u} \quad ; \quad \bar{K}^0 \equiv s\bar{d} \quad ; \quad K^+ \equiv \bar{s}u \quad ; \quad K^0 \equiv \bar{s}d$$

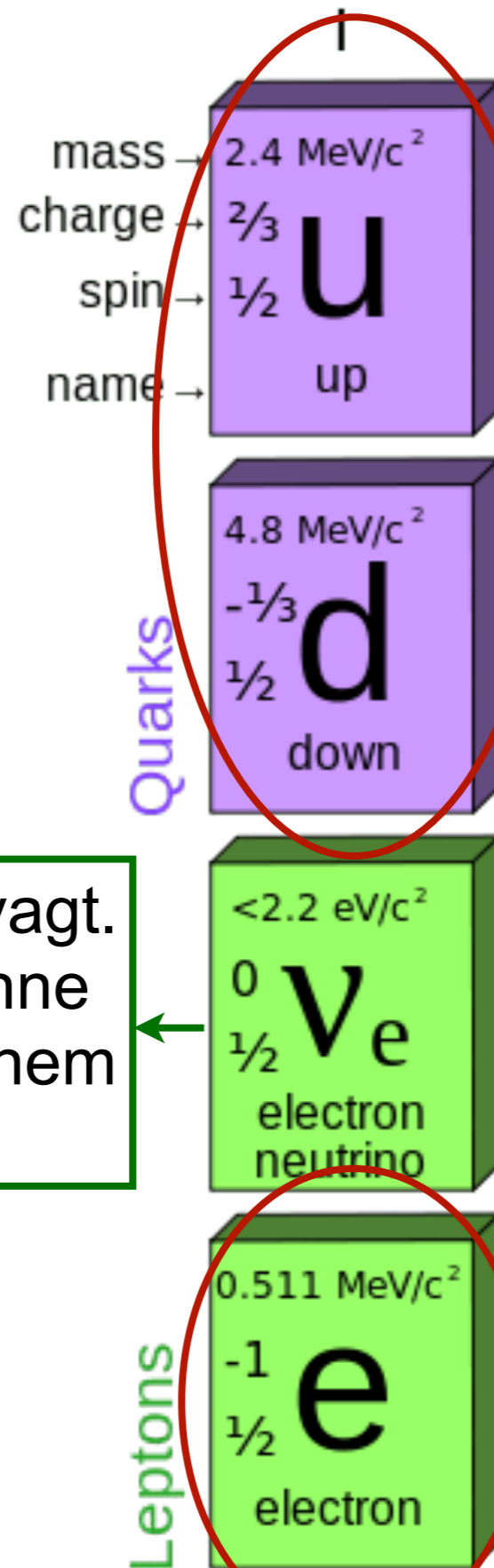




Al stof i Universet består af kun 3 stofflige partikler !

- To kvarker, u og d, danner kernen
- elektronen cirkulerer omkring kernen i "stor" afstand

Fermioner
=
stoflige partikler



Vekselvirker kun svagt.
For svagt til at danne
stof. Flyver frit gennem
Universet

All stof i Universet er
bygget af disse

	I	II	
mass →	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	1974
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
name →	u up	C charm	
	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
	d down	S strange	
	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	
	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	
	-1	-1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
	e electron	μ muon	

Muonen opdaget i 1935
Rabi: "Who ordered that"

Eneste forskel på generationer er massen af partiklerne.

Uforstået mønster.

De tungere partikler henfalder hurtigt til de lette i første generation.

Siden 1989 har vi vidst, at der er tre generationer og ikke flere.

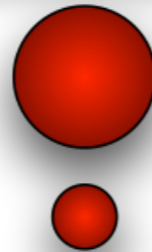
Hvorfor tre generationer?

	I	II	III	
mass →	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	1995
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
name →	u up	C charm	t top	
Quarks	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²	1977
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
	d down	S strange	b bottom	
Leptons	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	1975
	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
	v_e electron neutrino	v_μ muon neutrino	v_τ tau neutrino	
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	
	-1	-1	-1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
	e electron	μ muon	τ tau	

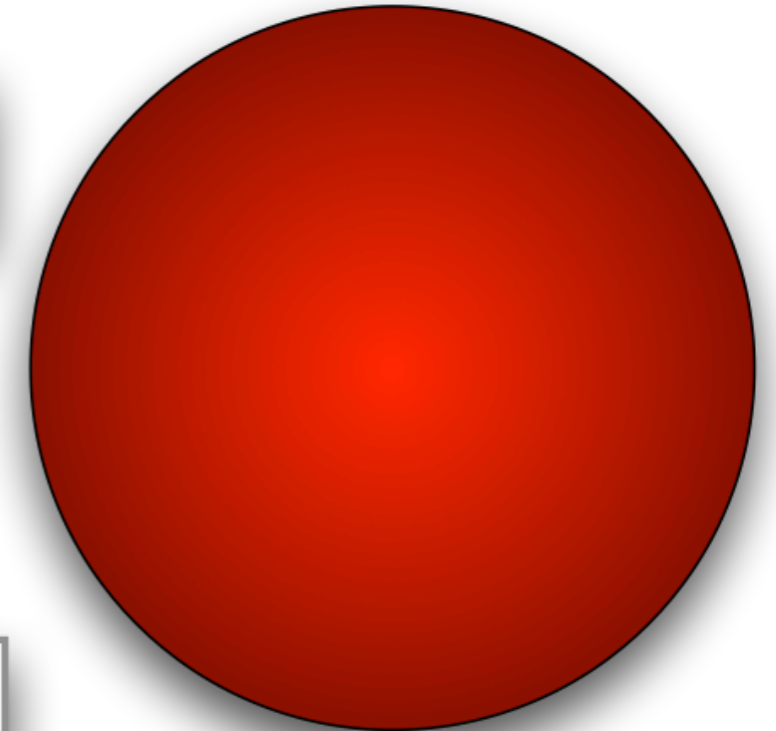
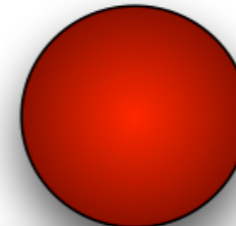
Up Quark
~ 0.002 GeV



Charm Quark
1.25 GeV



Top Quark
175 GeV



Down Quark
~ 0.005 GeV

Strange Quark
~ 0.095 GeV

Bottom Quark
4.2 GeV

These are relative masses not size – they have no measurable size

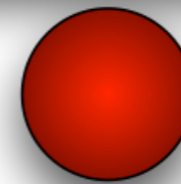
Electron
0.0005 GeV



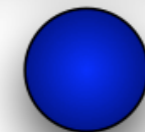
Muon
0.105 GeV



Tau
1.78 GeV



For reference:



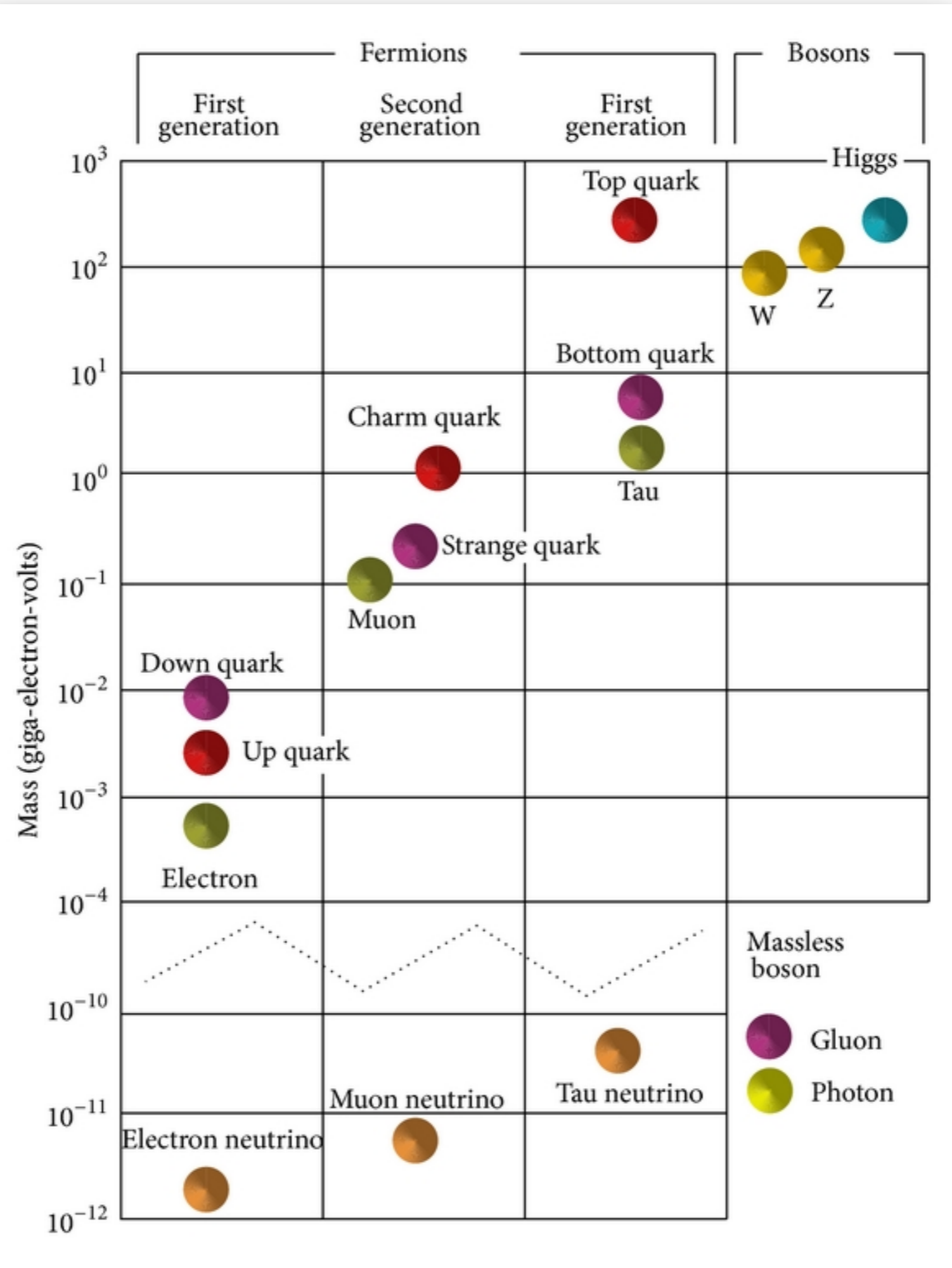
Proton
0.938 GeV

Electron Neutrino
~ 0

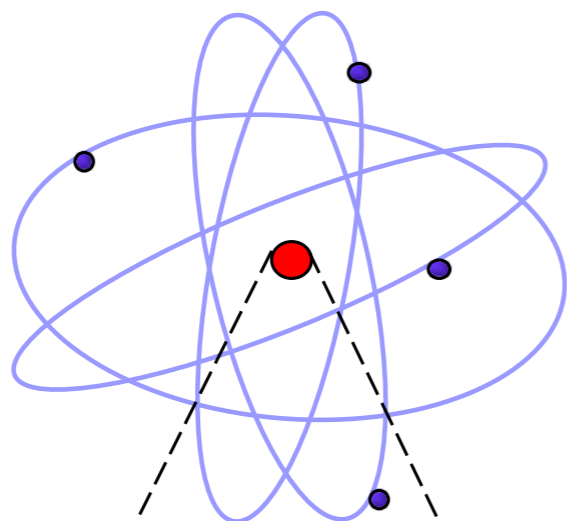
Muon Neutrino
~ 0

Tau Neutrino
~ 0

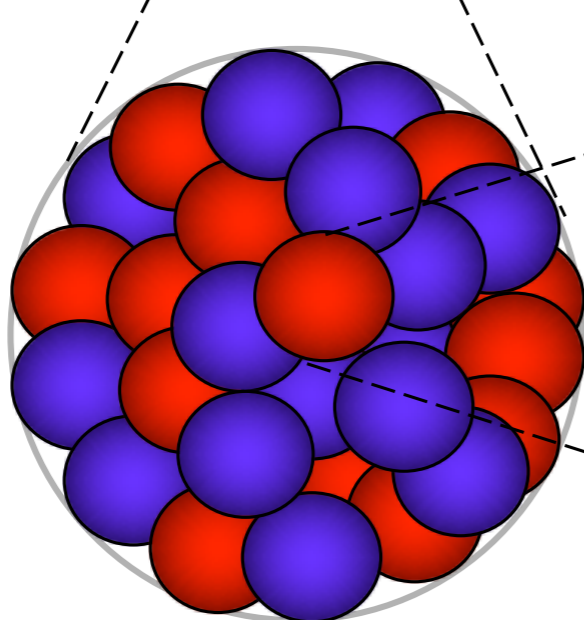
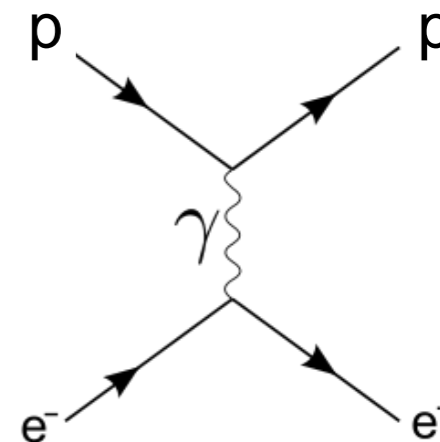
Originally thought to be massless but now not



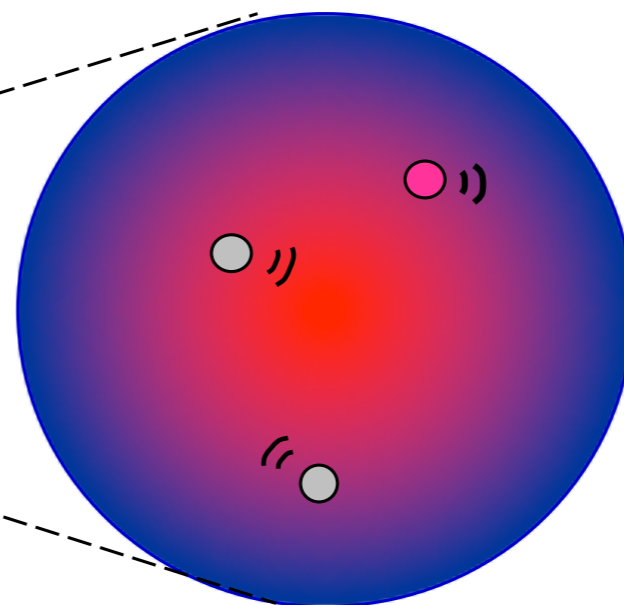
Stærke vekselvirkninger



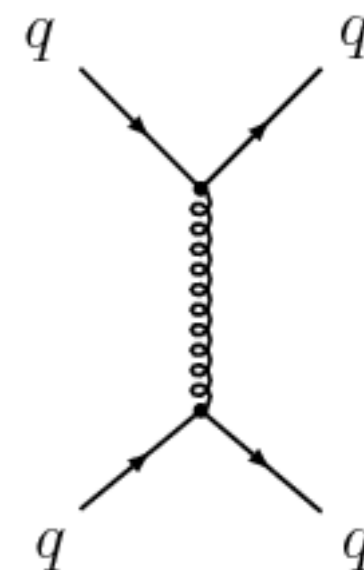
Den elektromagnetiske kraft med tiltrækning mellem den positivt ladede kerne og de negativt ladede elektroner holder sammen på atomet



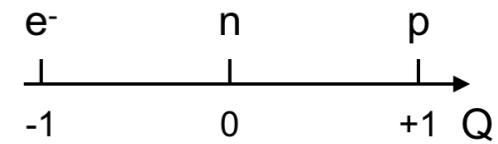
Den stærke kraft er også ansvarlig for at binde nukleonerne sammen til kerner



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**



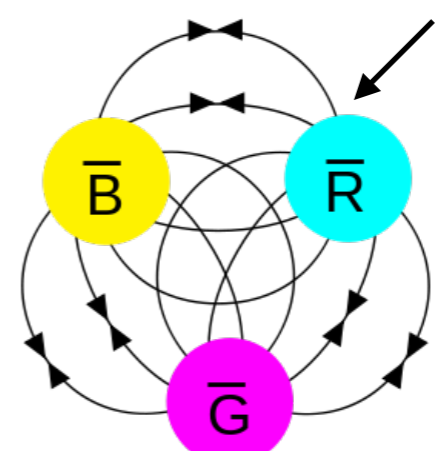
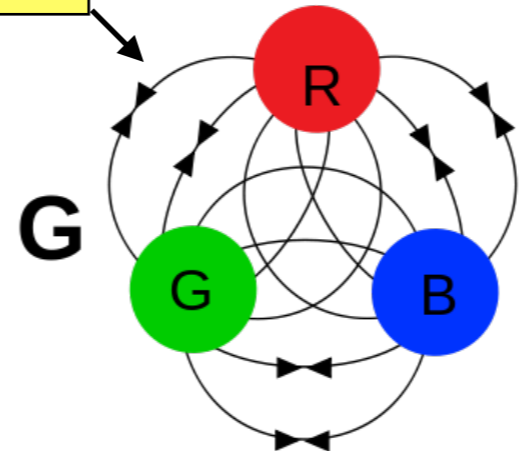
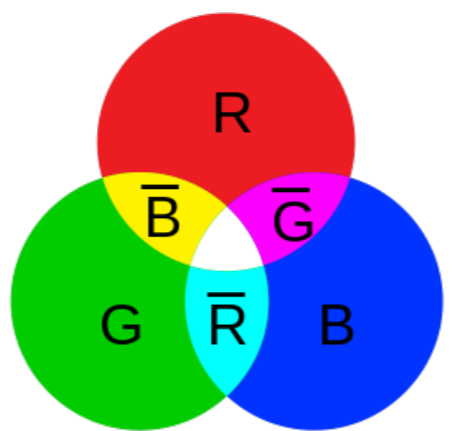
Alle hadroner er farveløse

Baryon: Tre kvarker R, G, B

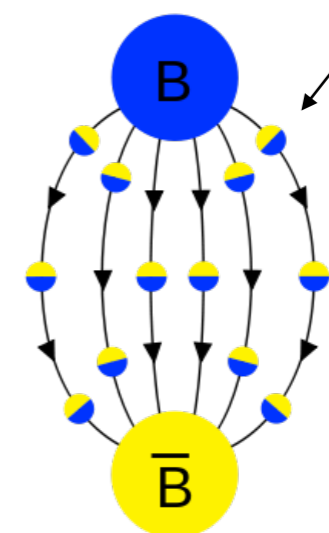
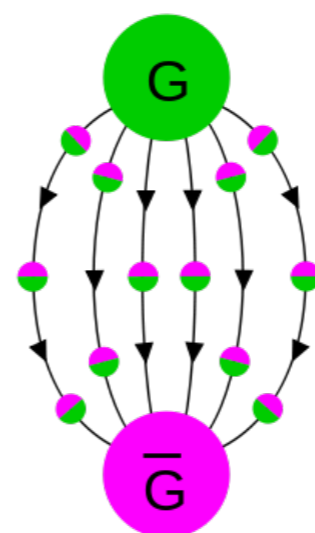
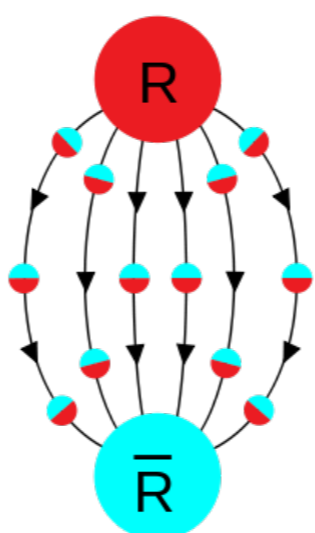
Anti-baryon: Tre anti-kvarker \bar{R} , \bar{G} , \bar{B}

Kvarker har én af tre farver, R, G, B

Anti-kvarker har én af tre anti-farver



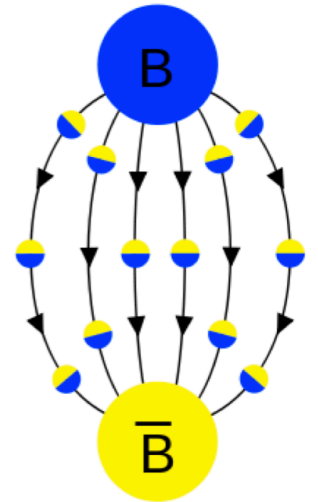
Gluoner



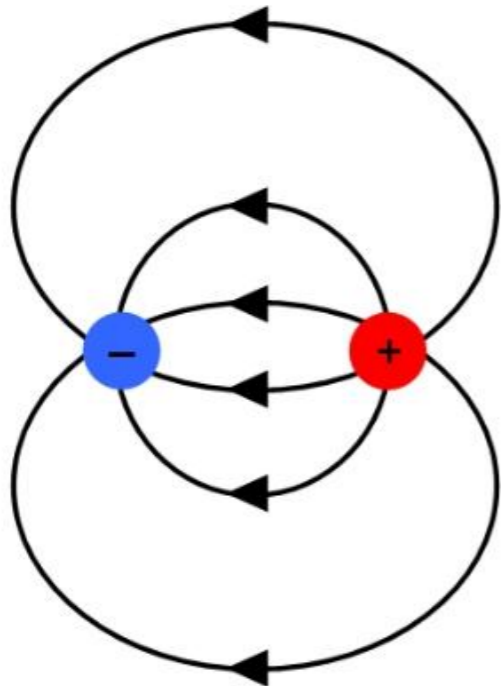
Meson: kvark-antikvark-par med matchende farve-antifarve



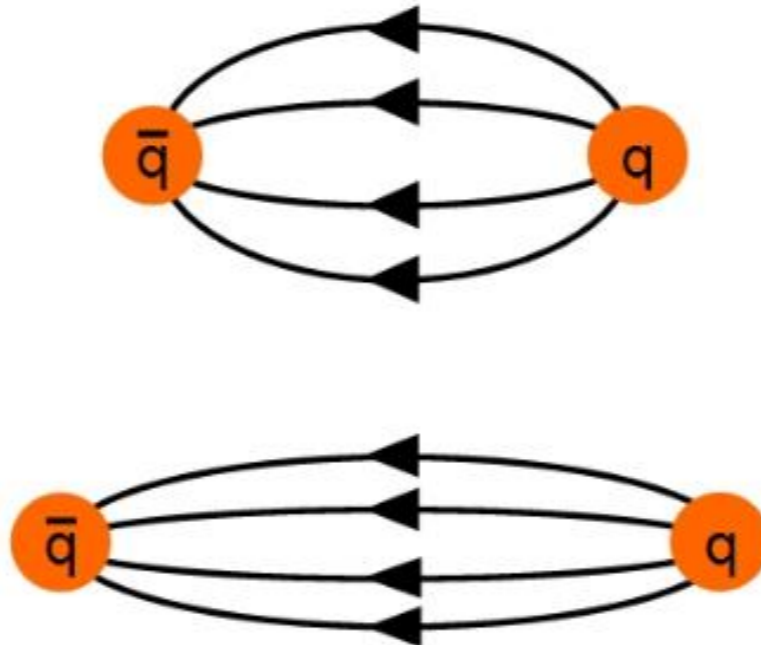
- * Vi observerer elektrisk ladede partikler
- * Ingen har nogensinde observeret en fri partikel, som bærer farveladning
- * Alle frie partikler er farveløse - dermed ingen frie kvarker
- * Hvorfor den store forskel?
- * Gluonerne bærer selv den ladning de kobler til
- * Dermed "klistrer" de sammen og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



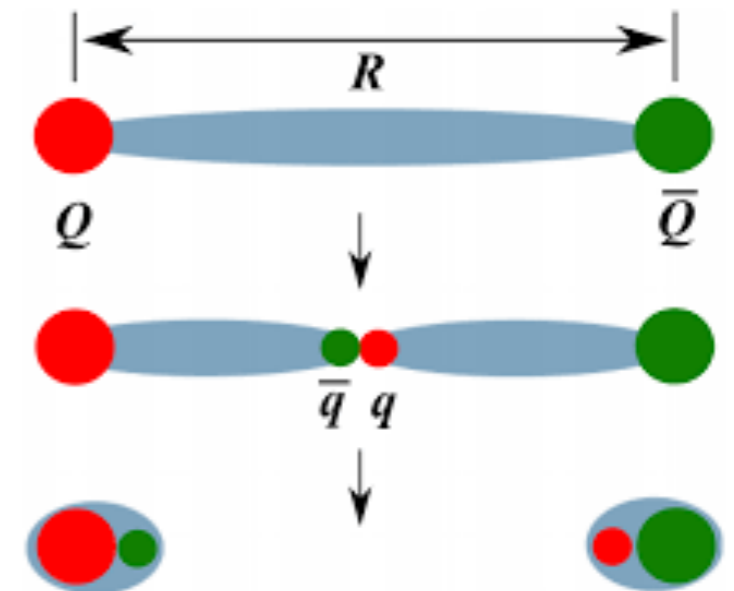
Elektromagnetisk kraft:
Fotonen er elektrisk neutral;
feltlinjerne spredes ud



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

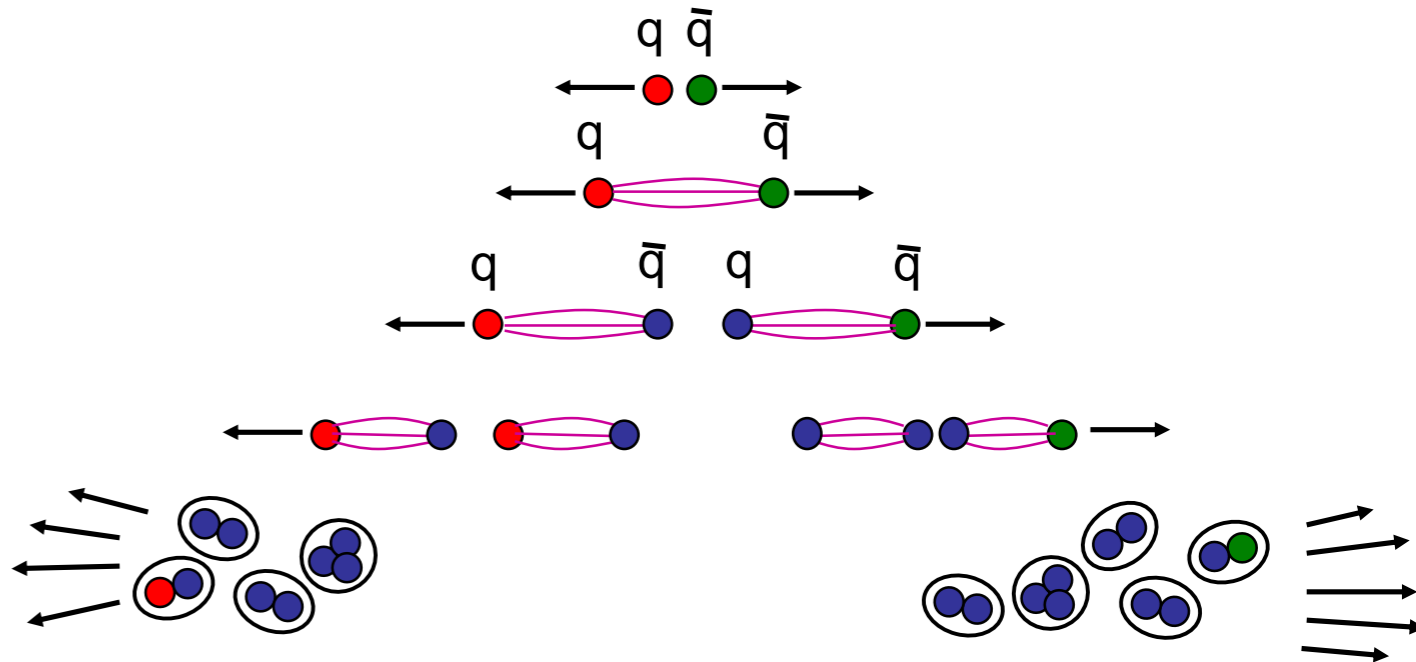


Forsøger vi at adskille to kvarker, bliver energien i "strengen" så stor, at det er favorabelt ($E = mc^2$) at skabe to nye kvarker



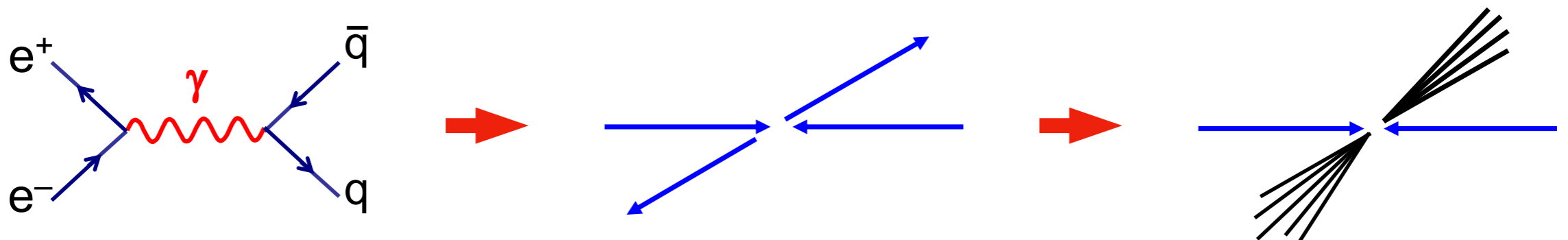
* Betragt højenergetisk kvark-antikvark-par, der separerer:

- 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



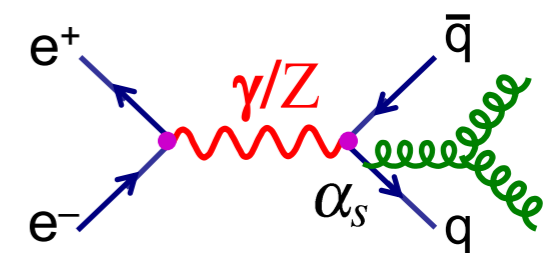
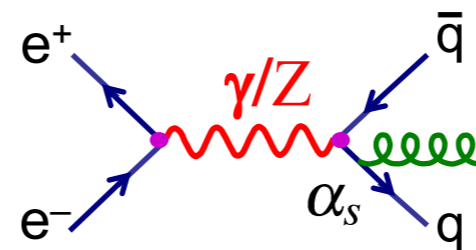
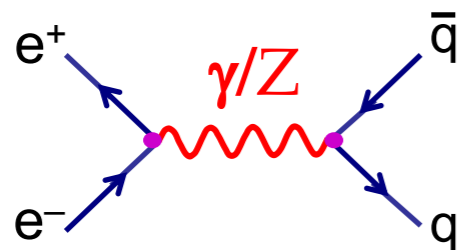
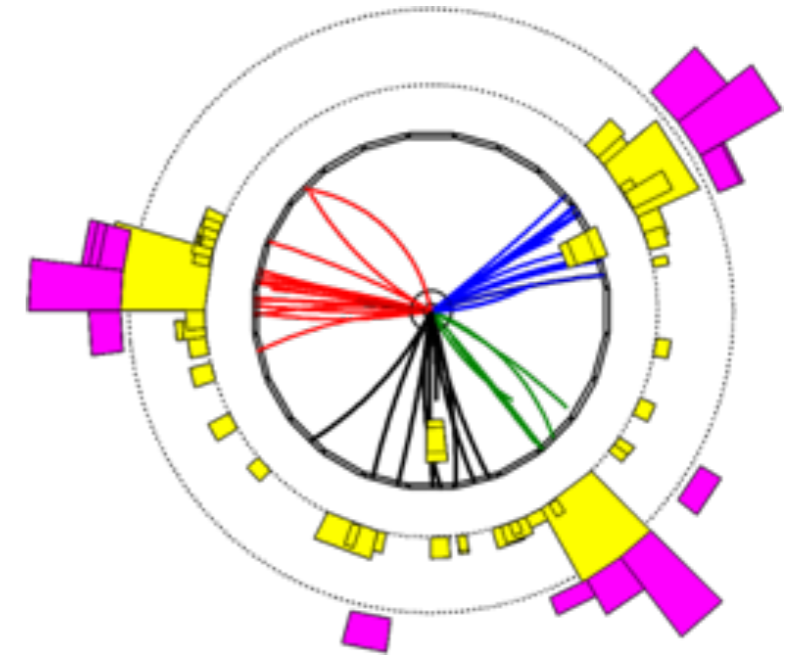
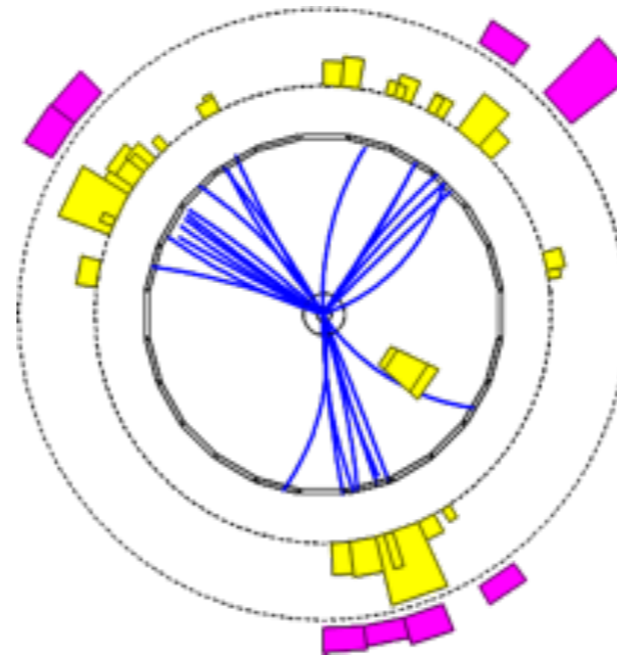
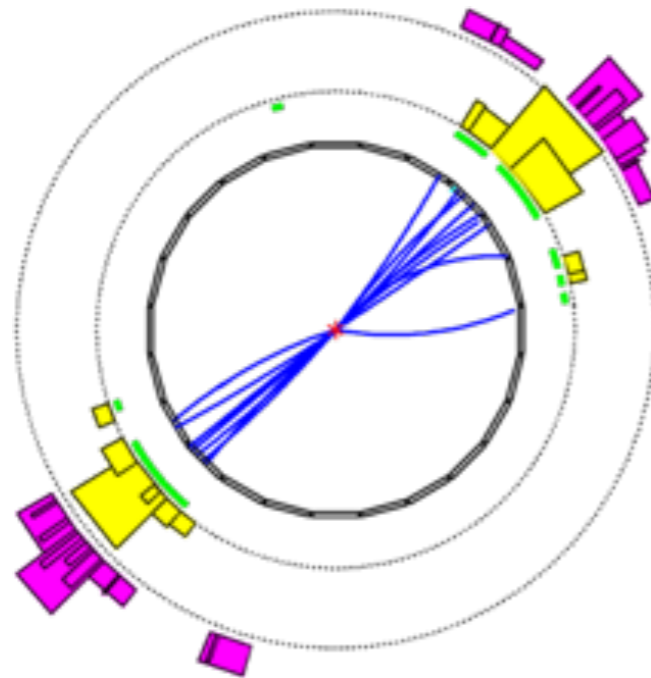
* Elektron-positron-sammenstød har bragt mange resultater i fysikken

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

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

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

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

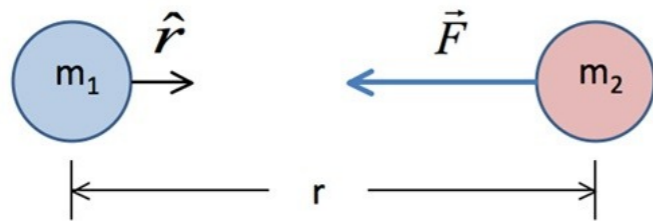
4-jet-begivenheder giver adgang til at påvise (og måle) gluonens kobling til sig selv

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	

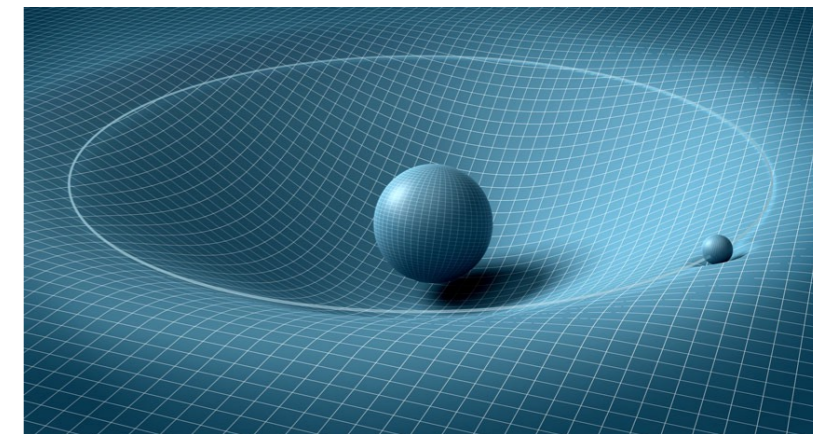
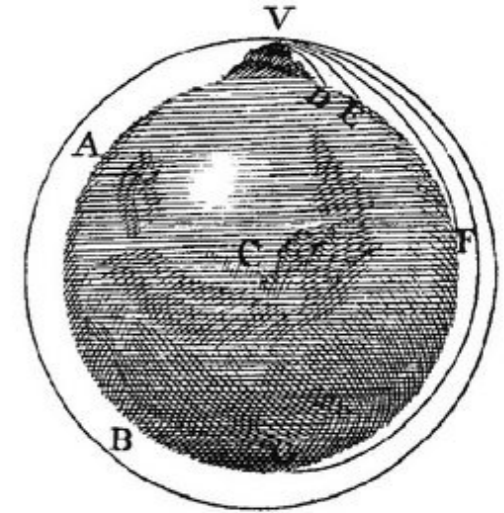
NB. Tyngdekraften er uhyre svag sammenlignet med de andre kræfter. Ubetydelig i partikelfysikken. Men den er kumulativ, og dermed vigtig over store afstande

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



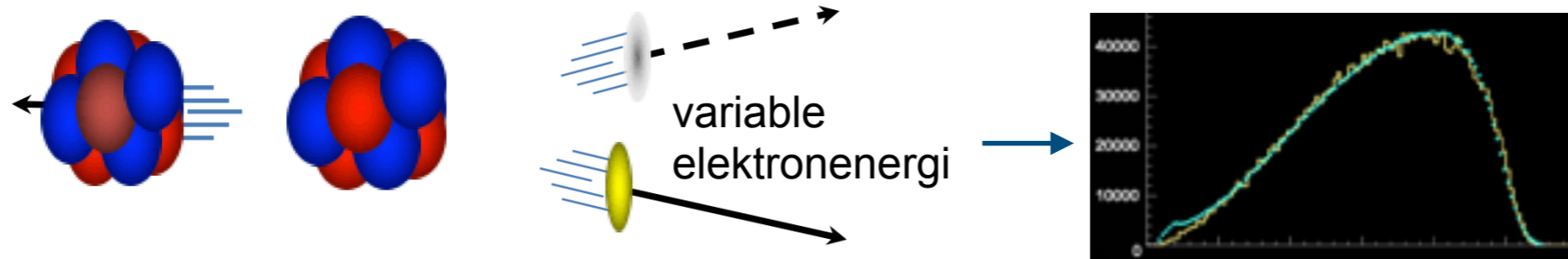
$$\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r}$$

- * 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



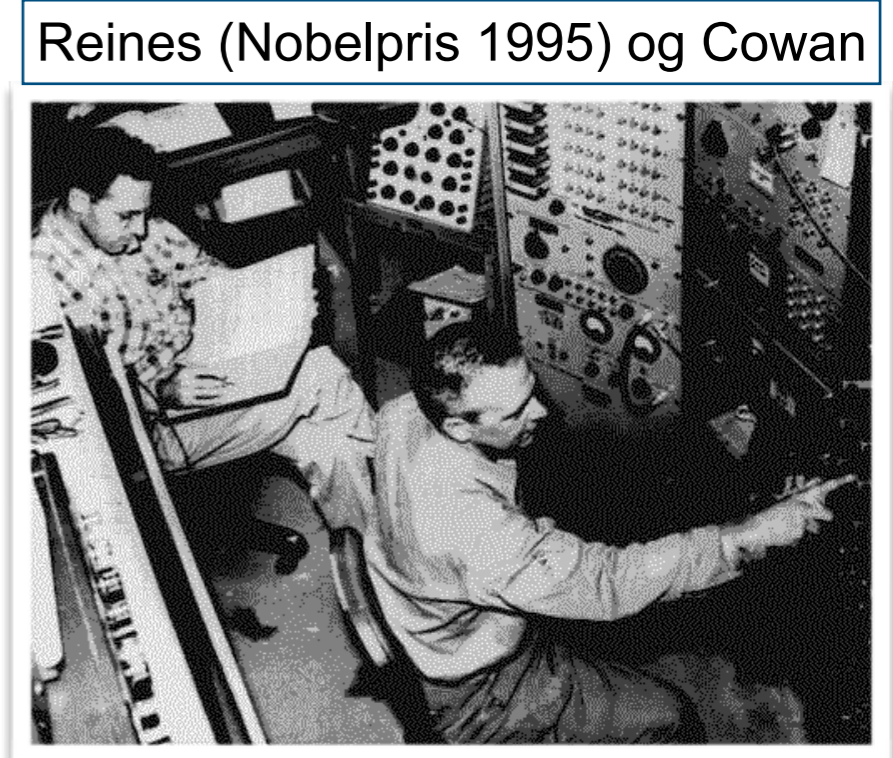
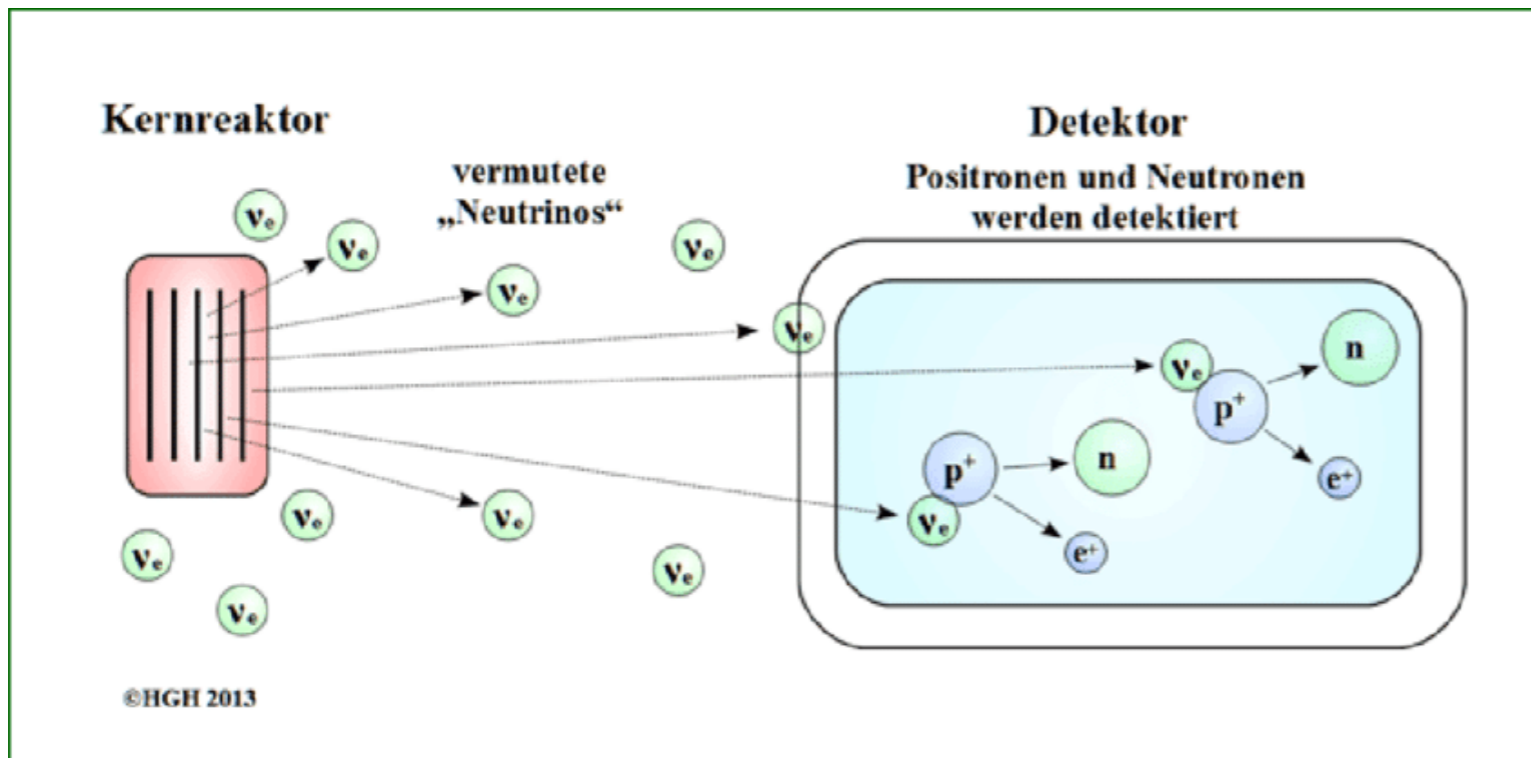
Neutrinoer og svagheden af de svage kræfter

- * "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

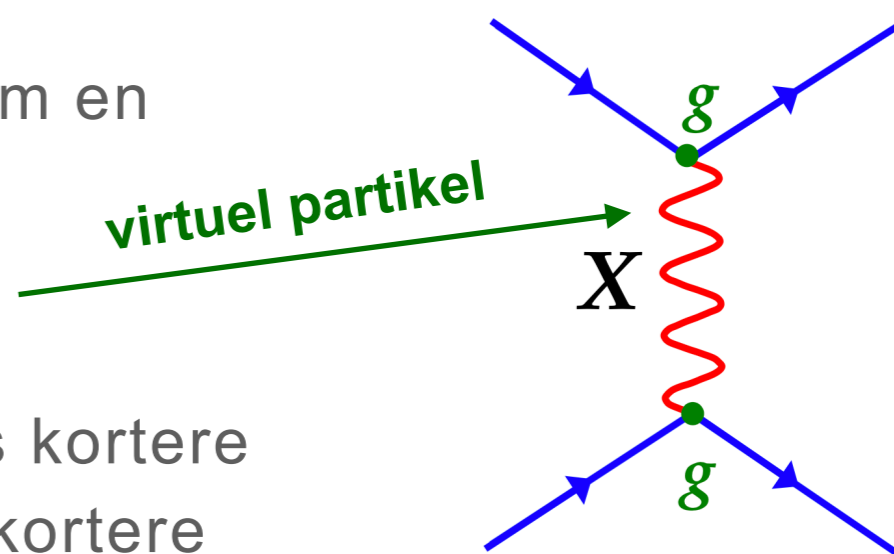
- * Dette tillader igen *kortvarige* brud med den fundamentale Einstein'ske sammenhæng mellem en partikels energi, masse og impuls, således at

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

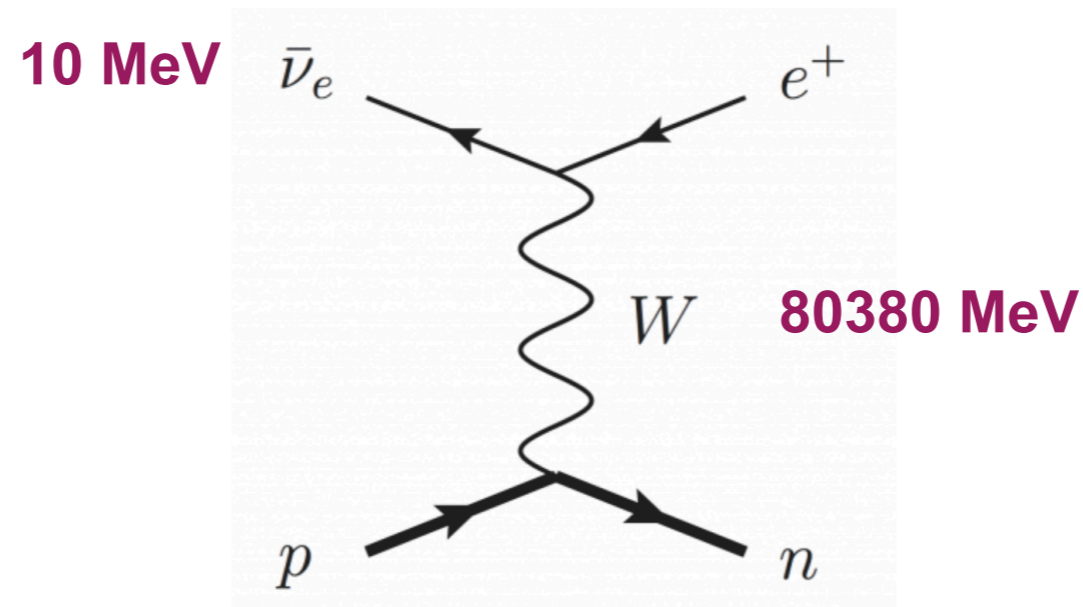
- * Des mere virtuel en partikel er (større ΔE), des kortere tid kan partiklen eksistere (mindre Δt), og des kortere kan partiklen bevæge sig: Kortere rækkevidde af kraften



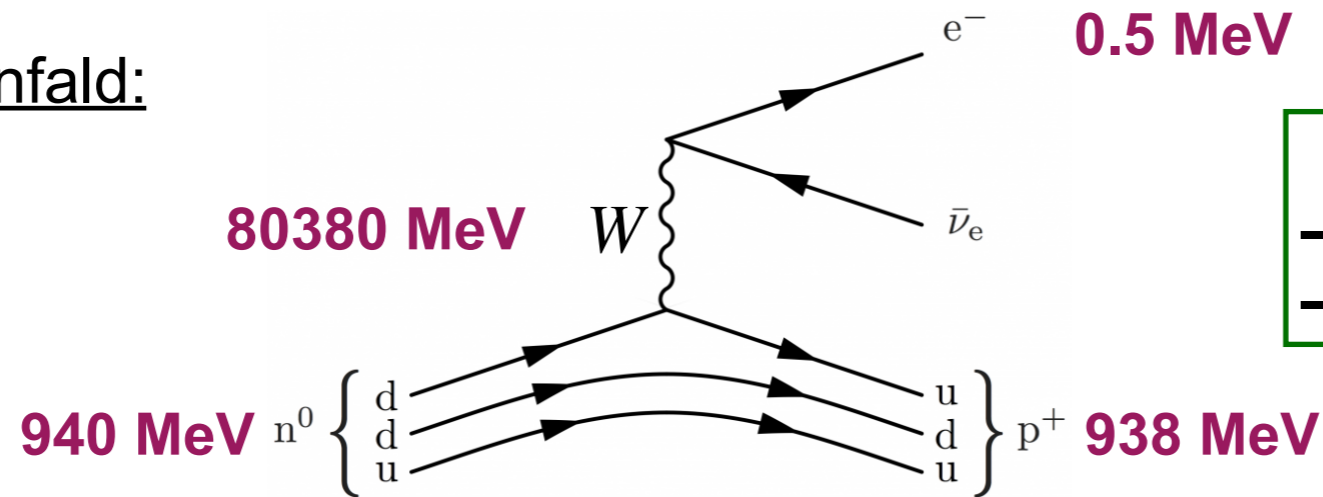
W. Heisenberg, Nobelpris 1932



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

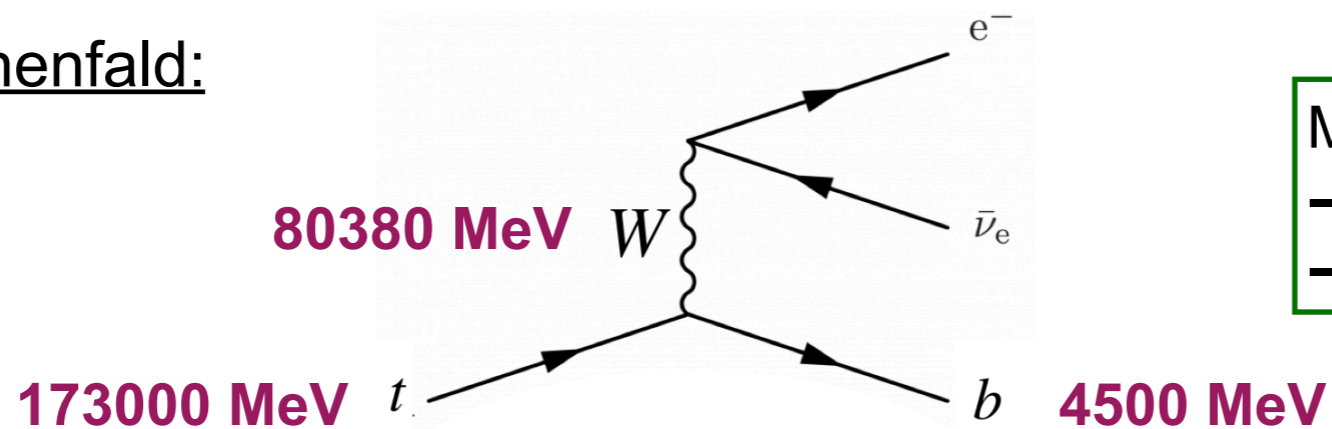


- * For at vekselvirkningen kan foregå, må Naturen “købe” en W -boson. Denne har en pålydende værdi (masse) på 80380 MeV
- * Men en typisk neutrino fra Solen har kun (en energi på) 10 MeV til rådighed: Den må da nøjes med at “købe” en meget virtuel W -bosonen
 - * Denne kan da højest bevæge sig omkring 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 ekstrem 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

Opsumming

