DIRAC ligningen for frie elektroner og positroner

$$i\hbar\frac{\partial\Psi}{\partial t} = -i\hbar c\sum_{i=1}^{3}\alpha_i\frac{\partial\Psi}{\partial x_i} + \beta mc^2\Psi$$

$$\Psi_i(x,t) = u_i e^{i(px-Et)/\hbar}$$

$$\Psi_i(x,t) = v_i e^{-i(px-Et)/\hbar}$$

$$\longrightarrow \qquad\qquad \longleftarrow$$

partikkel

antipartikkel som beveger seg framover i tid

Fire komponenter i bølgefunksjonen:
To med positiv energi (u_i), to med negativ energi (v_i)
Eller så kan energien være positiv, men da skifter man fortegn på tiden...
Antipartikler!

Dirac-elektronet vekselvirker med Coulombpotensialet

$$V(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{e^2}{r} = \hbar c\frac{\alpha}{r}$$

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

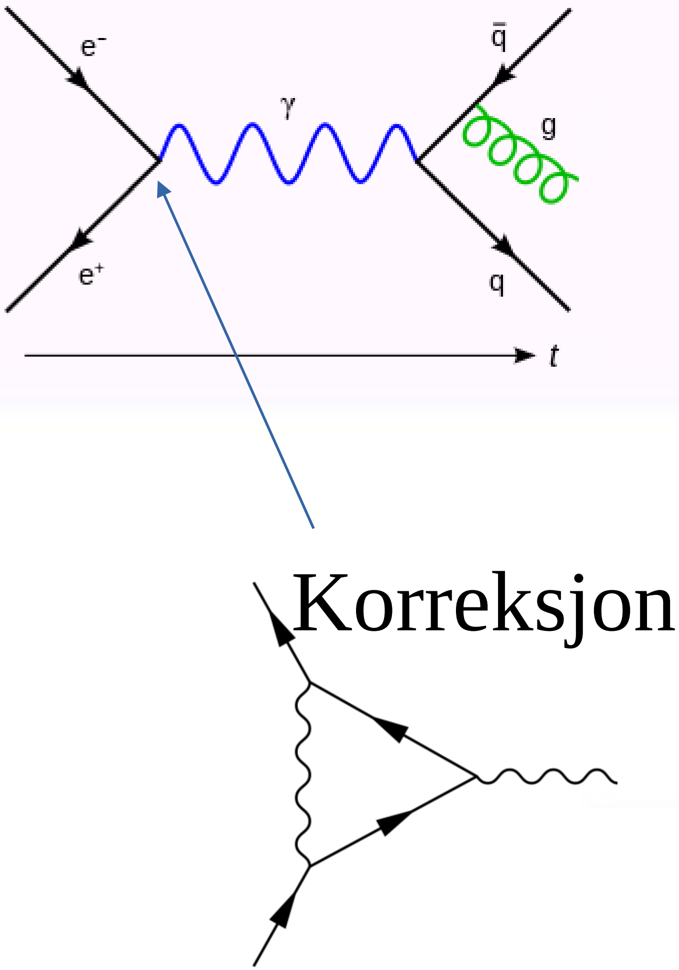
α kalles den elektromagnetiske koblingskonstanten

Kvantefelt-teori

- Gir små korreksjoner til elektromagnetismen, som er eksperimentelt etterprøvet med stor presisjon
- Kreftene beskrives gjennom utveksling av bosoner, (f.eks. fotoner) som skapes og annihileres
- Fermioner skapes bare parvis (partikkel-antipartikkel)

Feynmandiagrammene representerer en rekkeutvikling av ***vekselvirkingen*** i potenser av α

Man teller opp antall knutepunkter i diagrammene for finne diagrammets orden i α



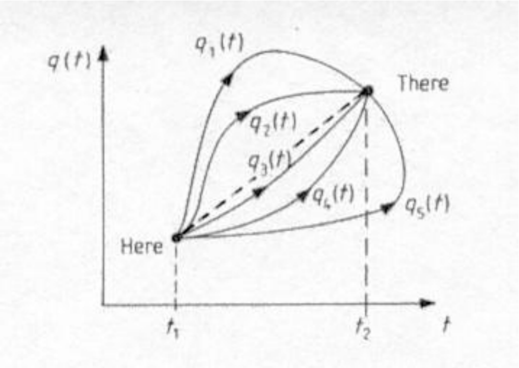
Korreksjon

Fields

1934 - 1948

R. P. Feynman

All paths are possible
(‘multiple slit experiment’)



Quantum Electrodynamics

Feynman, Tomonaga, Schwinger

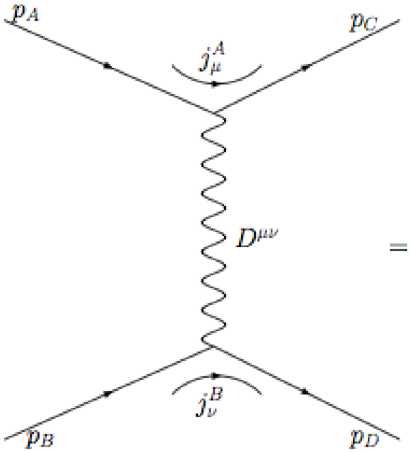
“Renormalization”

The ‘naked’ electron + vacuum fluctuations = measured electron

(“infinite” - “infinite” = “finite”)

Feynman diagrams

Precise computation rules - in graphical form



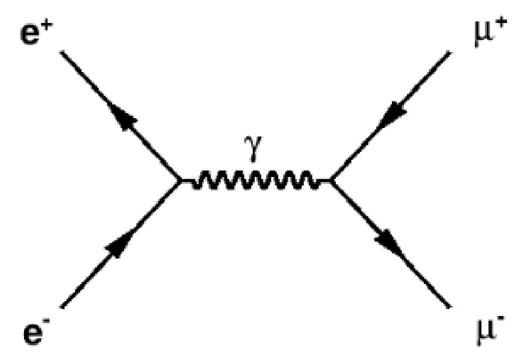
$$= -i \int \mathrm{d}^4x\, \mathrm{d}^4y\, j^A_\mu(x)\, D^{\mu\nu}(x,y)\, j^B_\nu(y)$$

*Feynman diagrams
later became a graphical way
to represent all kinds of
particle interactions*

Hva betyr disse diagrammene?

De skal beskrive vekselvirkinger mellom partikler (f.eks.) i kollisjon

- Diagrammene uttrykker tidsutviklingen av bølgefunksjonene til partikler som kolliderer
- Beskriver det(de) første leddet (leddene) i en *perturbasjonsteori* om prosessen
- Bevaringslover:
  - Leptontall,baryontall,ladning…
- Vekselvirkning ⇔ Ladning
- Noen partikler kan skapes og forsvinne
  - Fotoner, gluoner
- Noen partikler skapes bare i (fermion-antifermion) par.



Feynmandiagram

Linja med pil som går inn vertex og ut igjen representerer en *strøm*:

$$j^\mu = \overline{\psi}\gamma^\mu\psi$$

Vi ser at hver komponent av j^μ er et tall som framkommer etter en matrisemultiplikasjon. j^μ er en relativistisk 4-vektor. Når pila peker mot tiden, så brukes antipartikkelløsningene.

Feynmandiagrammet representerer to strømmer som vekselvirker gjennom en propagator (et boson) med masse m_X. Denne propagatoren skrives

$$\frac{-ig_{\mu\nu}}{q^2 - m_X^2}$$

q er overført impuls. Styrken av vekselvirkningen er gitt ved ladningen, som multipliseres med hver strøm. Diagrammet i figur 4 svarer til

$$-iM = [\overline{v}(p_2)ie\gamma^\mu u(p_1)]\,\frac{-ig_{\mu\nu}}{q^2}\,[\overline{u}(p_3)ie\gamma^\nu v(p_4)]$$

Feynmandiagram for de enkleste prosessene:

Litt for enkelt, for det må to ladninger til for å lage

vekselvirkning

Ladning representeres som konstanter i møtepunktene (vertex-faktorer)

Verdi: 1/137 (finstrukturkonstanten) for fotonutveksling

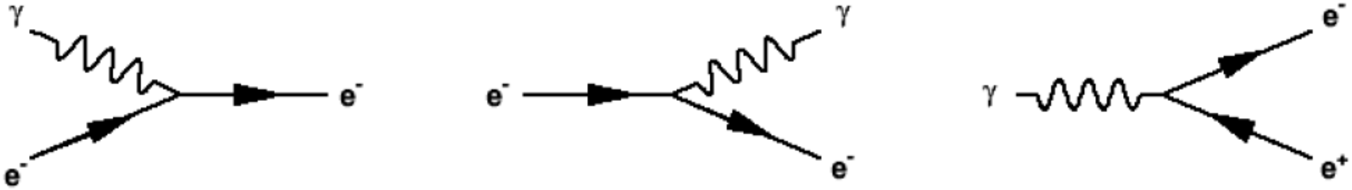


Figure 1: Feynman-diagram a) Fotoabsorbsjon, b) Bremsestråling, c) Parproduksjon. **Tiden løper fra venstre mot høyre.** Linjene sier ingen ting om bevegelsesmengder og retninger, men energi og impulsbevaring må være oppfylt. Vi skal se at dette nødvendgjør konseptet med *virtuelle* partikler

Feynmandiagram for e+e- kollisjoner

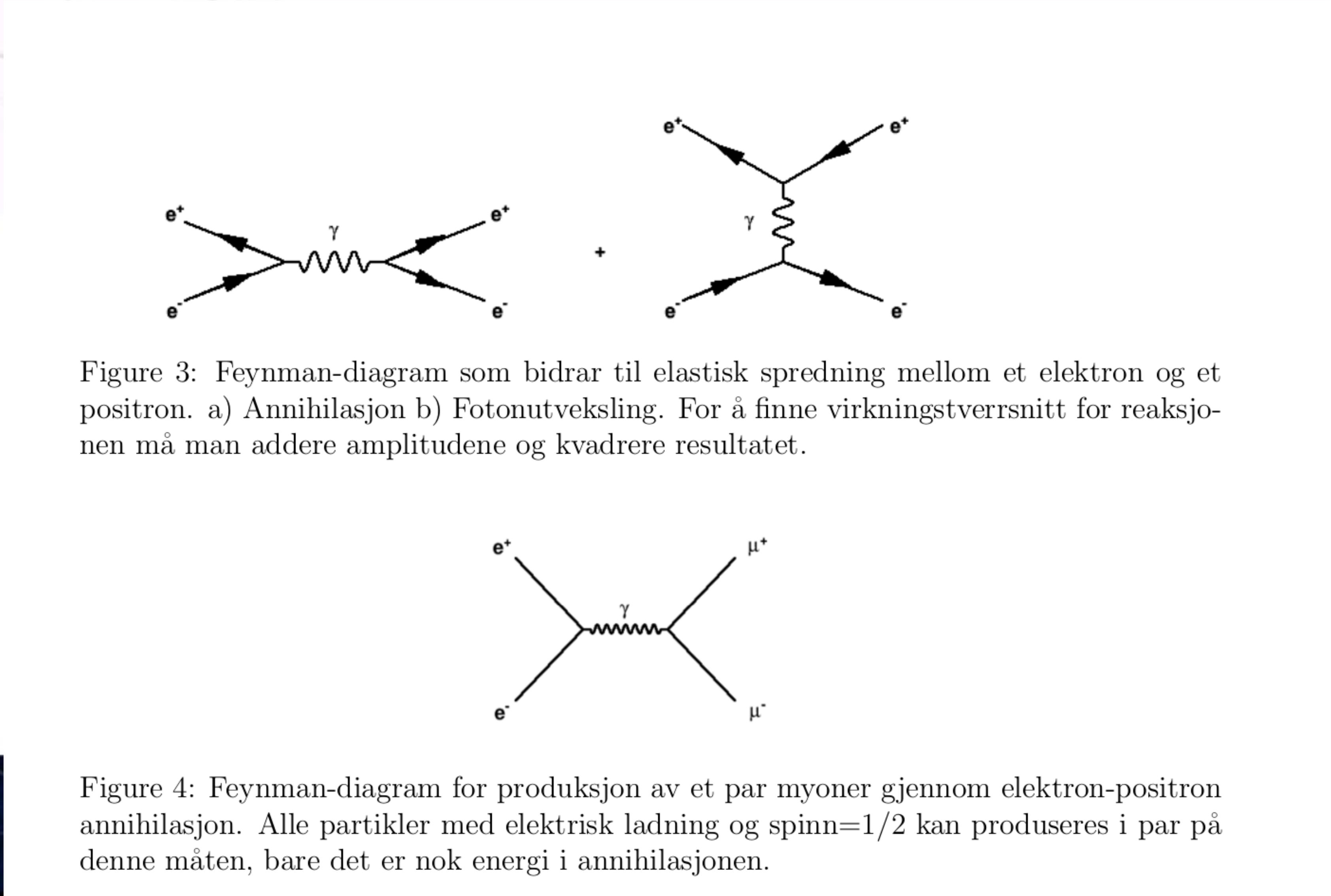


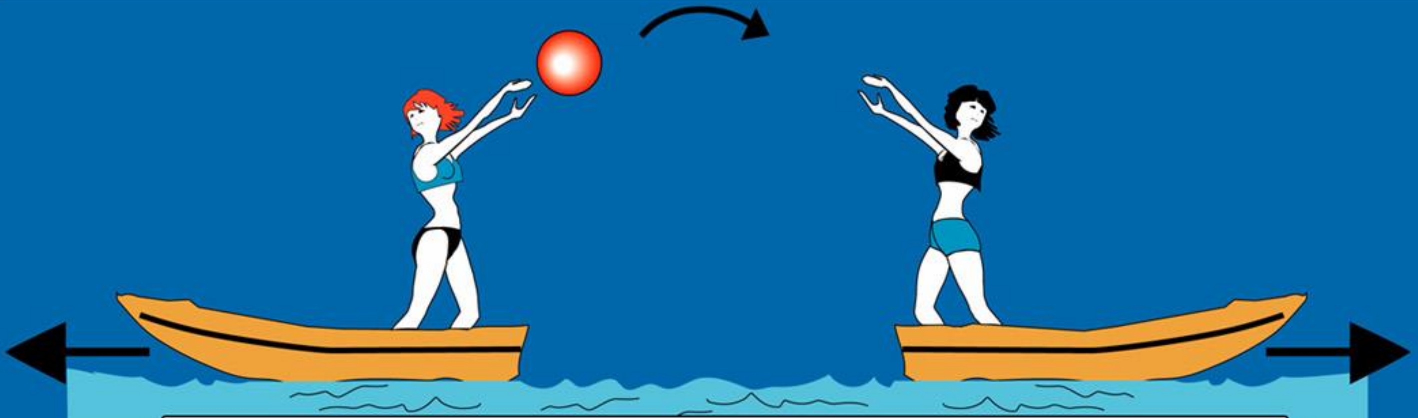
Figure 3: Feynman-diagram som bidrar til elastisk spredning mellom et elektron og et positron. a) Annihilasjon b) Fotonutveksling. For å finne virkningstverrsnitt for reaksjonen må man addere amplitudene og kvadrere resultatet.

Figure 4: Feynman-diagram for produksjon av et par myoner gjennom elektron-positron annihilasjon. Alle partikler med elektrisk ladning og spinn=1/2 kan produseres i par på denne måten, bare det er nok energi i annihilasjonen.

The forces in Nature

TYPE	INTENSITY OF FORCES (DECREASING ORDER)	BINDING PARTICLE (FIELD QUANTUM)	OCCURS IN :
STRONG NUCLEAR FORCE	~ 1	GLUONS (NO MASS)	ATOMIC NUCLEUS
ELECTRO -MAGNETIC FORCE	~ 10^{-3}	PHOTONS (NO MASS)	ATOMIC SHELL ELECTROTECHNIQUE
WEAK NUCLEAR FORCE	~ 10^{-5}	BOSONS Z^0 , W+ , W- (HEAVY)	RADIOACTIVE BETA DESINTEGRATION
GRAVITATION	~ 10^{-38}	GRAVITONS (?)	HEAVENLY BODIES

Elektro-
svak
Kraft



THE EXCHANGE OF PARTICLES IS RESPONSIBLE FOR THE FORCE

Elektronets magnetiske moment beregnes og med disse diagrammene

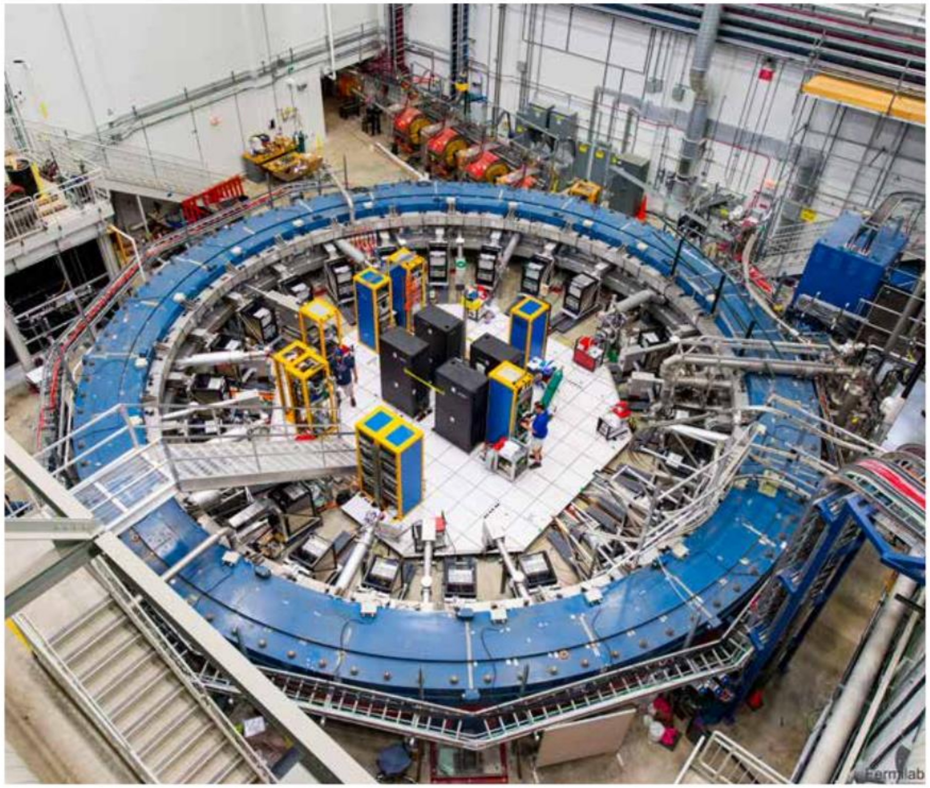
$$-g\frac{e}{2m_e}$$

Diraclignign: g=2

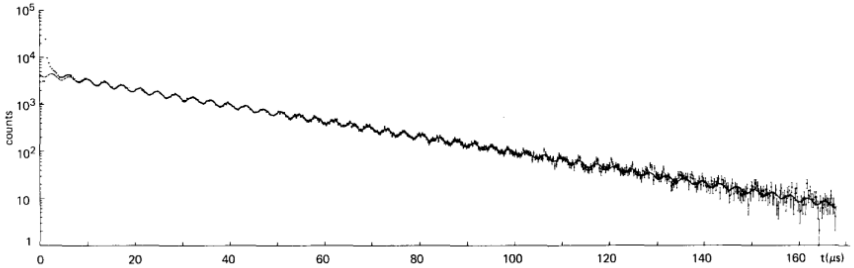
QED: Teori $$g = 2(1 + 0,0011596521816)$$

Eksperiment $$g = 2(1 + 0,0011596521807)$$

Myonets magnetiske moment? Presisjonsmålinger ved CERN på 1960 tallet



Ny måling av myonets anomale magnetiske moment

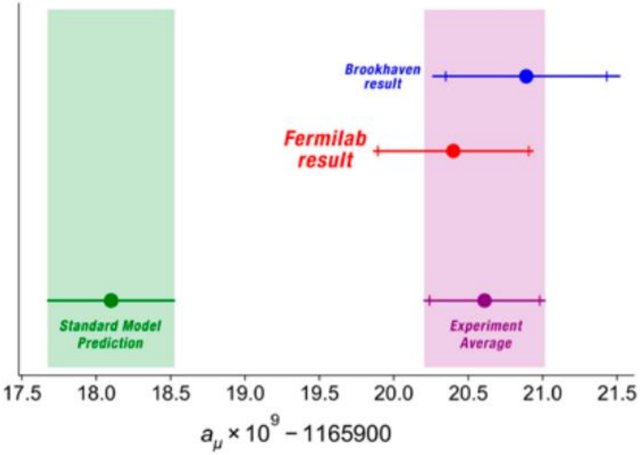


Figur 2. Tellerrate til henfalls-elektroner modulert med (g-2)-frekvensen, som observert i et av CERNs myoneksperimenter. *(Grafikk: fra referanse [3])*

Nye målinger i USA

Avvik fra teori

Hva betyr det?



Vekselvirkningspartikler kan være *virtuelle* og eksistere på lånt tid

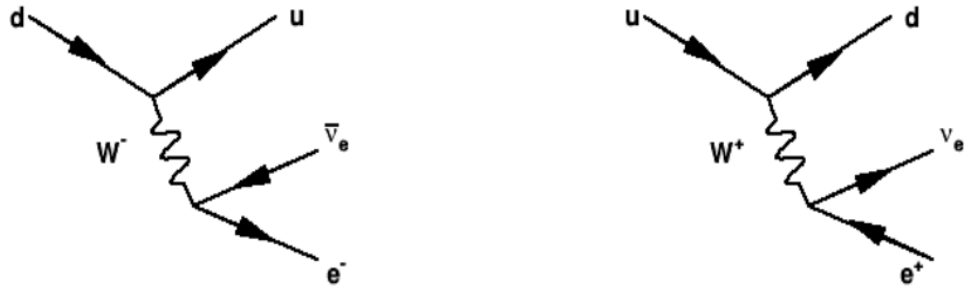


Figure 10: Feynman-diagram av: a) β^- henfall b) β^+ henfall

Beta-henfall: Den svake koblingskonstanten, ***g*** er i vertex. Hva er verdien av den??

“Universell” koblingskonstant, ***g***

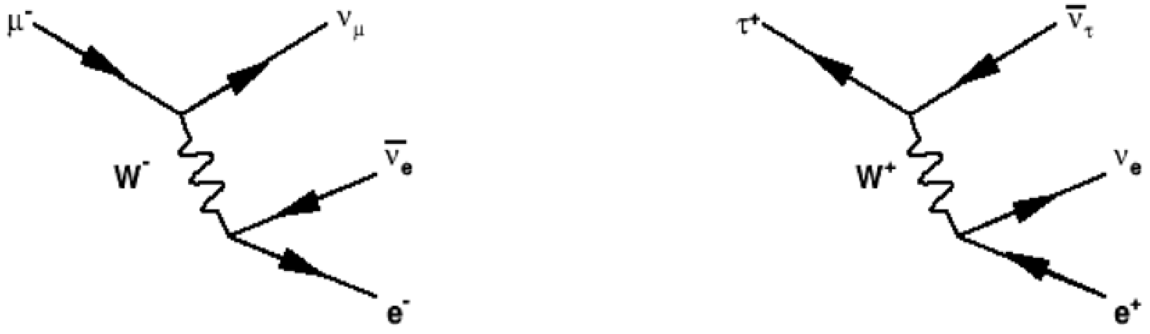


Figure 9: Feynman-diagram av: a) μ^- henfall b) τ^+ henfall. Verteksfaktorene er her *ikke* $\sqrt{\alpha}$, men den svake koblingskonstanten g_W.

Det er bare *forskjellig masse* som gir forskjellig levetid på myonet og tauonet

Fields

'Strong' interaction

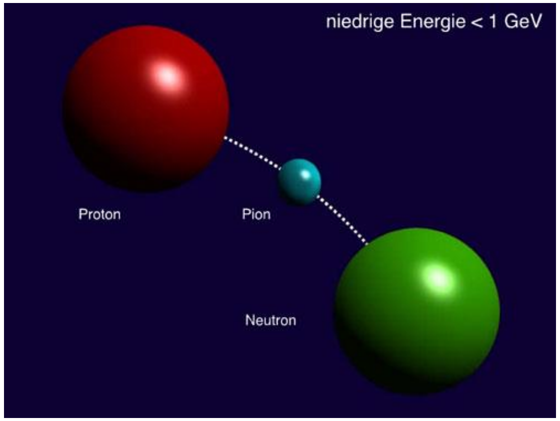
Back to the strong force: keeping protons and neutrons together

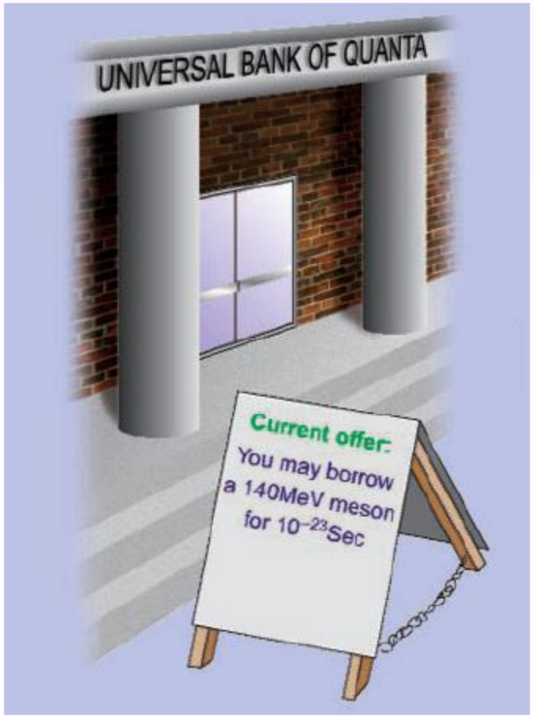
Yukawa (1934)

Exchange of massive particle
Pion

$$V(r) = -g^2 \frac{e^{-mr}}{r}$$

Modified Coulomb law



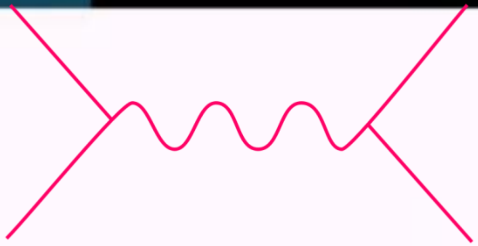


Allowed by uncertainty relation: 1.4 fm ~ 140 MeV

Potensialene

- Enklere å uttrykke seg v.h.a. energibevaring, enn å bruke kompliserte kraftvektorer
- Potensial: virkningen av en kraftkilde på en standardisert probe (enhetsladning)
- QM: sier potensial, *mener gjerne potensiell energi*

De fire kraftpotensialene



$$V_G = -G\frac{Mm}{r}$$

Newtons gravitasjon

(+korreksjoner p.g.a. Einstein)

$$V_C = -\alpha\frac{1}{r}$$

Coulombkraften

$$V_w = -g^2\frac{1}{r}e^{-m_w r/(\hbar c)}$$

Svak kjernekraft

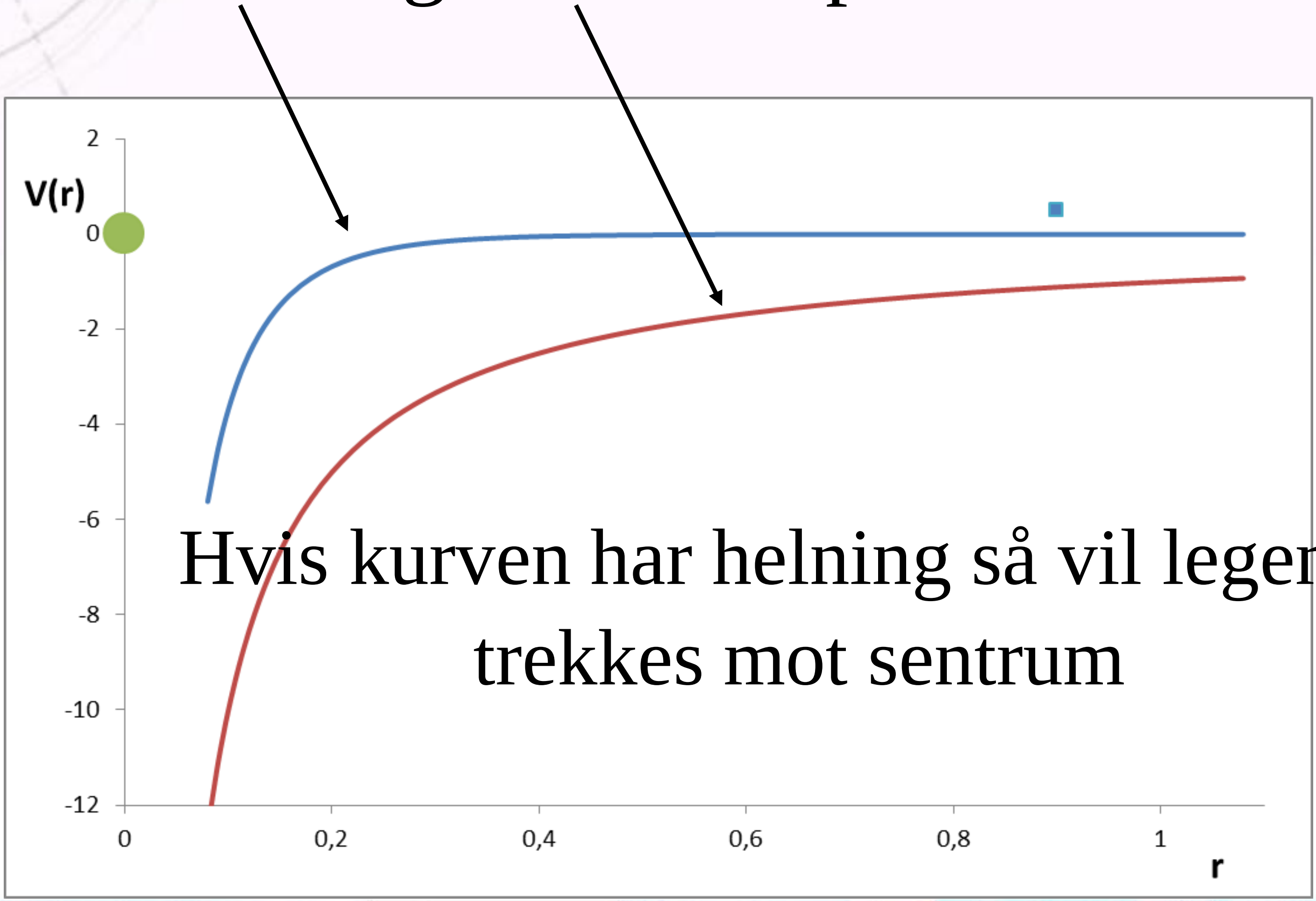
$$V_s = -\alpha_s\frac{4}{3}\frac{1}{r} + kr$$

Sterk kraft (mellom kvarker).
Nb: øker med avstand. Ikke mulig med enkle diagrammer

Hvilke sammenhenger finnes?

$$V(r) = -g^2 \frac{e^{-mr}}{r}$$

Yukawa og Coulomb potensialer



Hvis kurven har helning så vil legemer trekkes mot sentrum

Mot Standardmodellen

At the end of the 1950s V-A theory was the "standard model" of weak interactions. Its major drawback was its bad high-energy behaviour, which prompted various ideas to cure the problem of infinities. Guided by quantum electrodynamics, a gauge theory, attempts were made to construct a gauge theory of weak interactions, and in the mid-1960s the hypothesized charged intermediate vector boson (W±) was complemented with a neutral partner to achieve the required cancellations. **The invention of the Higgs mechanism solved the problem of having both a gauge theory and massive mediators of weak interactions. The progress made by Sheldon Glashow, Abdus Salam and Steven Weinberg was completed by the work of Martinus Veltman and Gerard 't Hooft,** which proved the renormalizability of the theory. **So, as 1971 turned to 1972, a viable theory of weak interactions that claimed weak neutral currents as a crucial ingredient was proposed, challenging the experimental groups to provide "yes" or "no"** as an answer to the question "do neutral currents exist?".

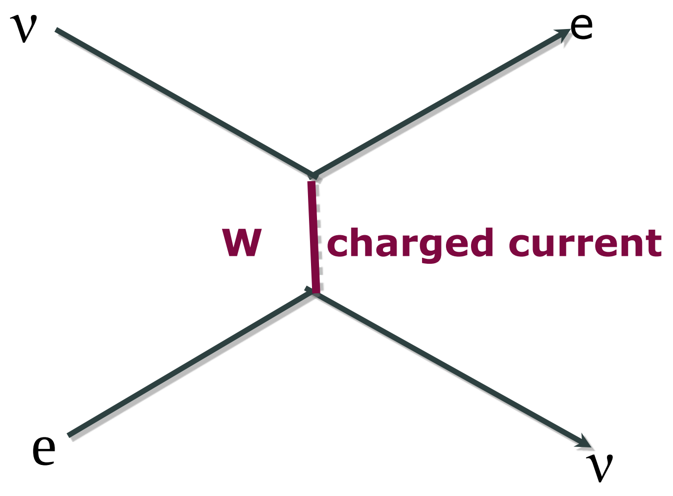
Sitat: CERN Courier 4 oktober 2004

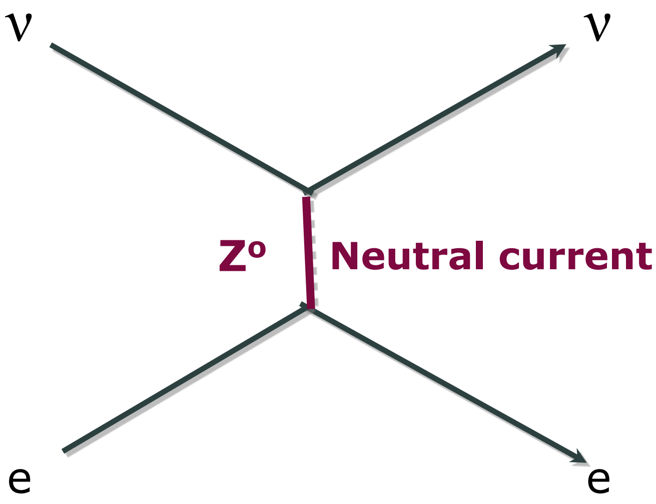
= eksistens av Z-bosonet

Electroweak Interaction

Fields

1968





Glashow, Salam, Weinberg (1968) - Electroweak Force

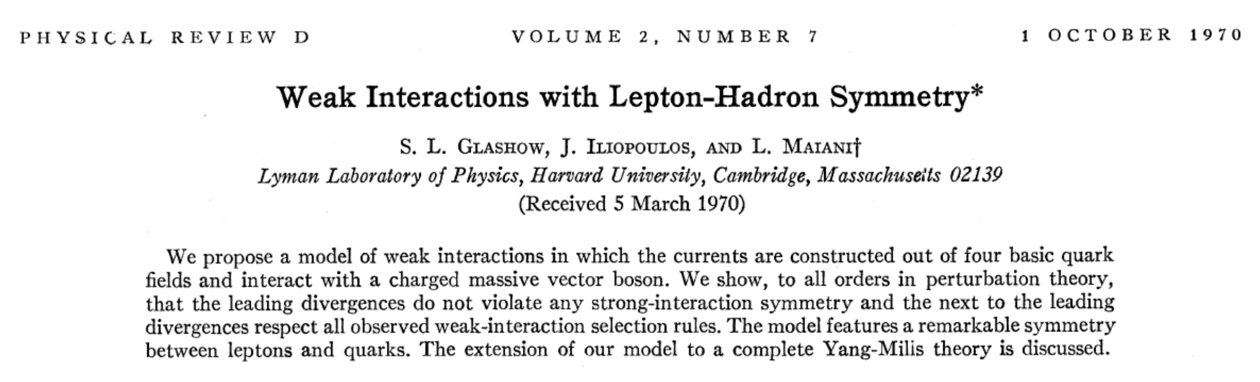
- The electromagnetic and weak interaction are different aspects of the same 'electroweak' force
- All quarks and leptons have a 'weak' charge
- There should be a 'heavy photon' (Z^o) and two charged vector boson ($W^{\pm}$) of mass ~ 50-100 GeV
- They acquire their mass by the interaction with the (new) "Higgs field" H.
- There are only 'left-handed' interactions

Fields

Electro-weak Interaction

1970

Milestone paper (Glashow, Iliopoulos, Maiani)

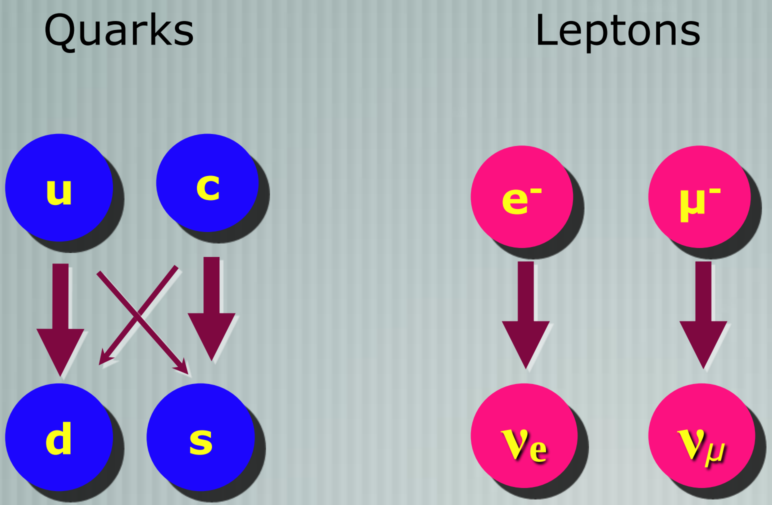


PHYSICAL REVIEW D VOLUME 2, NUMBER 7 1 OCTOBER 1970

Weak Interactions with Lepton-Hadron Symmetry*

S. L. Glashow, J. Iliopoulos, and L. Maiani†
Lyman Laboratory of Physics, Harvard University, Cambridge, Massachusetts 02139
(Received 5 March 1970)

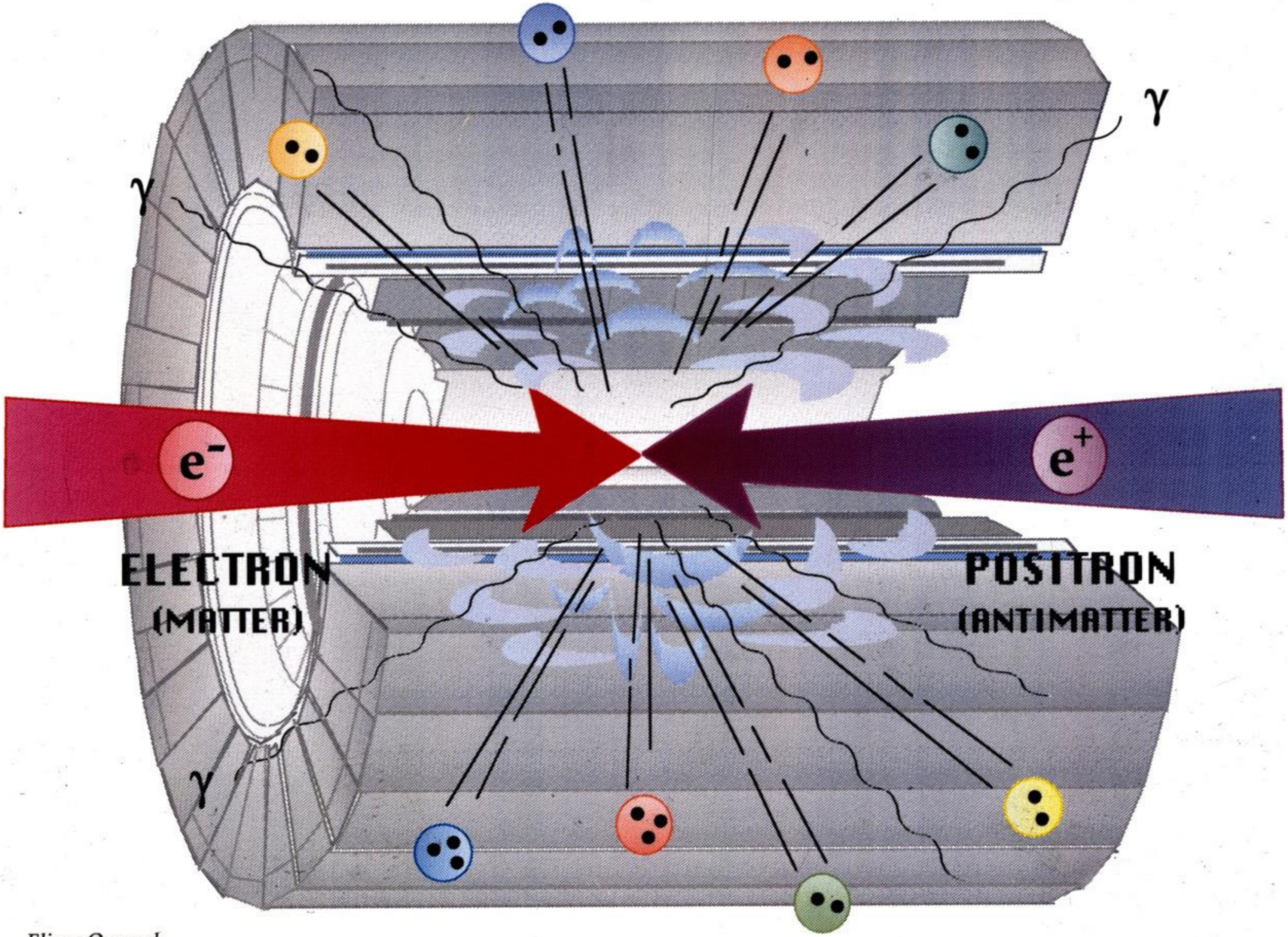
We propose a model of weak interactions in which the currents are constructed out of four basic quark fields and interact with a charged massive vector boson. We show, to all orders in perturbation theory, that the leading divergences do not violate any strong-interaction symmetry and the next to the leading divergences respect all observed weak-interaction selection rules. The model features a remarkable symmetry between leptons and quarks. The extension of our model to a complete Yang-Milis theory is discussed.



This was now called the 'Standard Model' (with two families)

Elektron-positron kollisjoner

Mange maskiner: USA, Japan, Tyskland Sovjetunionen, og til slutt også ved CERN



Eliane Onursal

Partiklers levetid

Heisenbergs usikkerhetsrelasjon

$$\Gamma\tau = \Delta E \Delta t \geq \hbar$$

Partikkel*vidde*

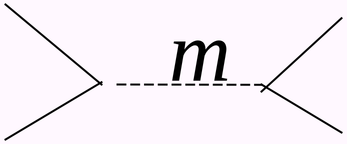
$$\Gamma_{tot} = \sum_i \Gamma_i$$

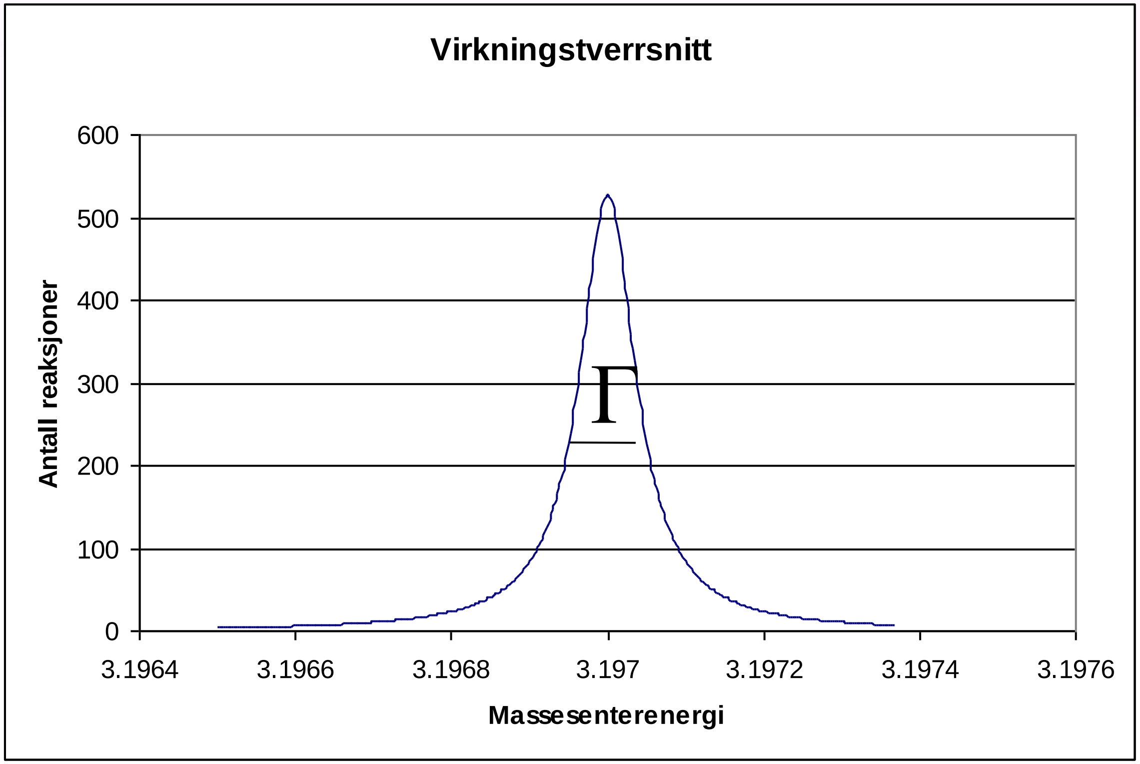
Er en sum av *delvidder* som gir sannsynlighet til henfall til forskjellige slutt-tilstander

Veldig kort levetid blir til en spredning i massen til partikkelen

Resonans

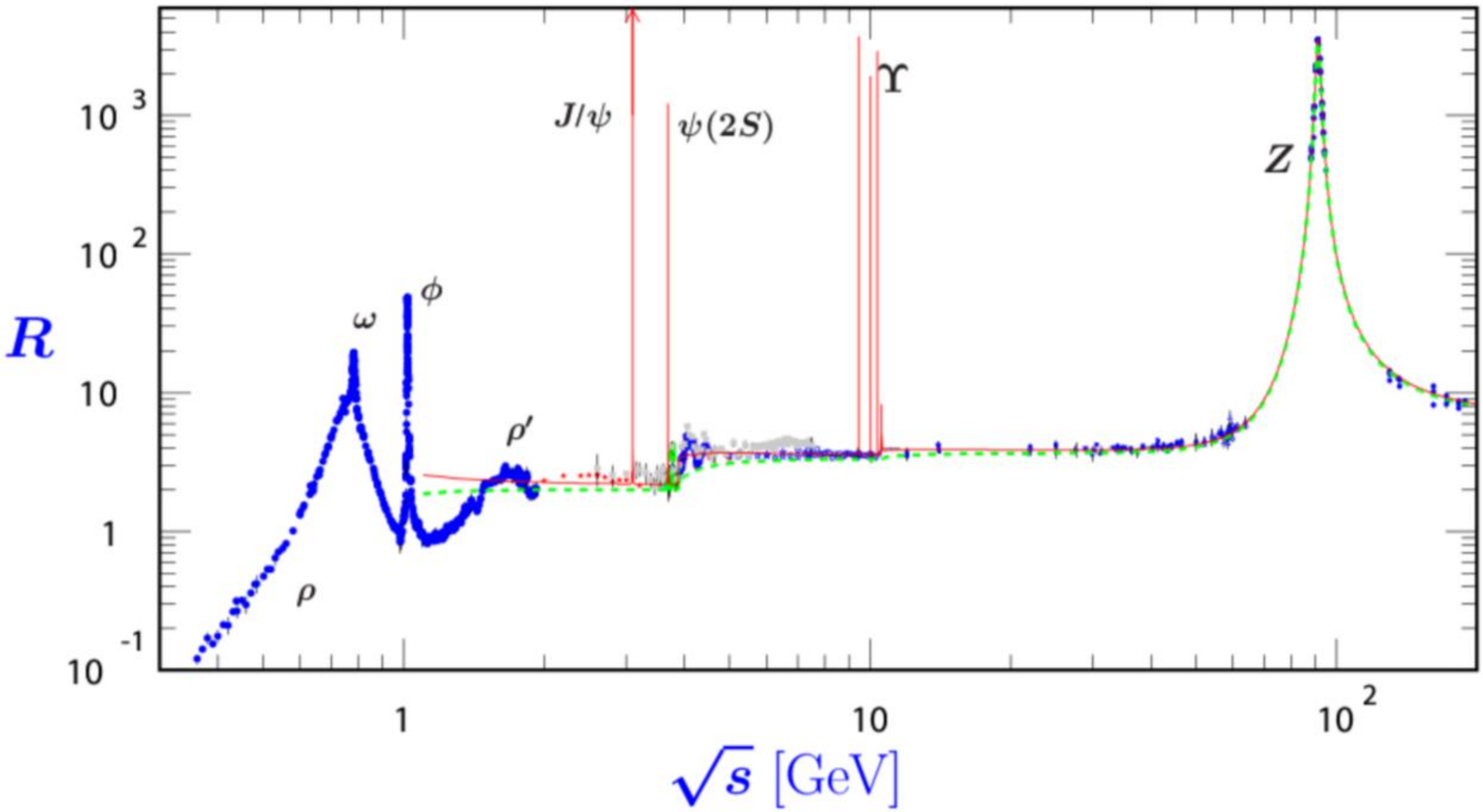
$e^+ e^- \rightarrow$ (kvarker) $\rightarrow$ hadroner





Svært smale og skarpe resonanser i virkningstverrsnittet, på grunn av nye kvarker

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow hadroner)}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}$$



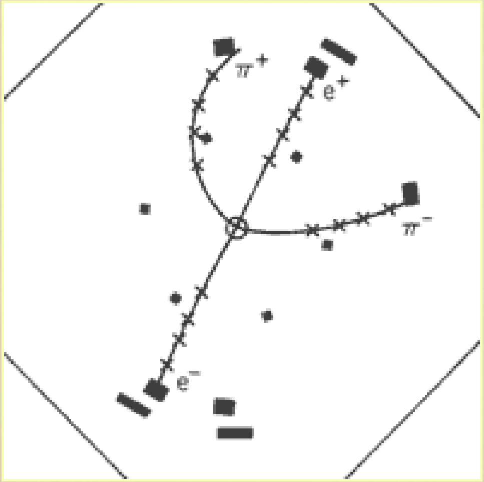
PARTICLE SPECTRUM

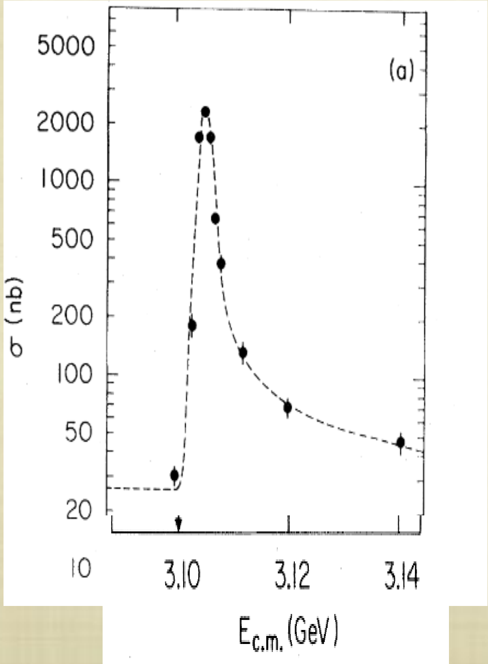
1974

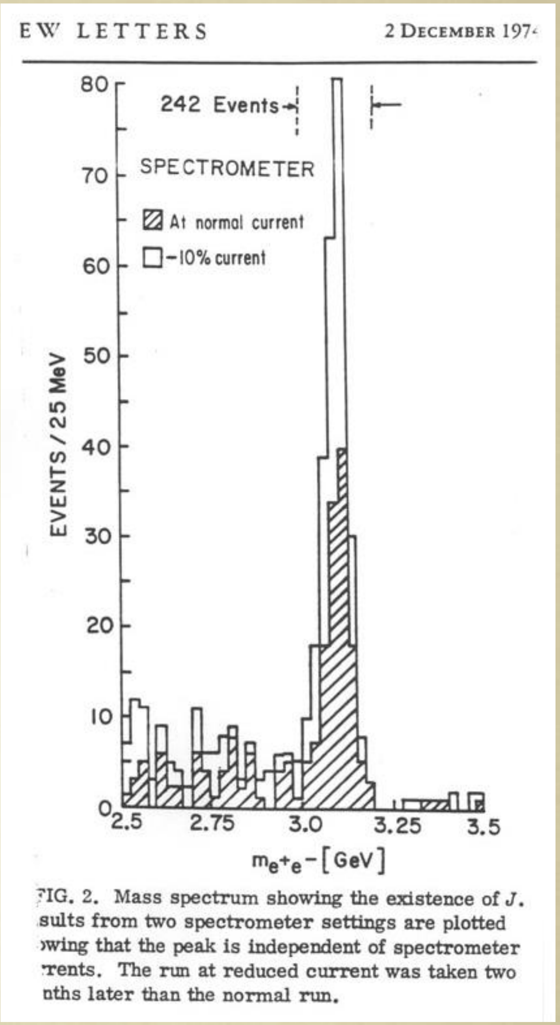
And the charm quark was to be discovered soon afterwards :

The NOVEMBER REVOLUTION (11 November 1974)

Two groups discovered ~ simultaneously a new particle, which they called **'Psi'** at SLAC (Burt Richter) and '**J**' at Brookhaven (Sam Ting).







EW LETTERS 2 DECEMBER 197

IG. 2. Mass spectrum showing the existence of J. sults from two spectrometer settings are plotted wing that the peak is independent of spectrometer rents. The run at reduced current was taken two nths later than the normal run.

The J/psi resonance was 'long-lived' (~10^{-20} sec). It could only decay by weak interactions, preferably into an s-quark. This explains the narrow peak.

Ikke *(u,d,s)*

Men

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix} \quad ; \quad \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}$$

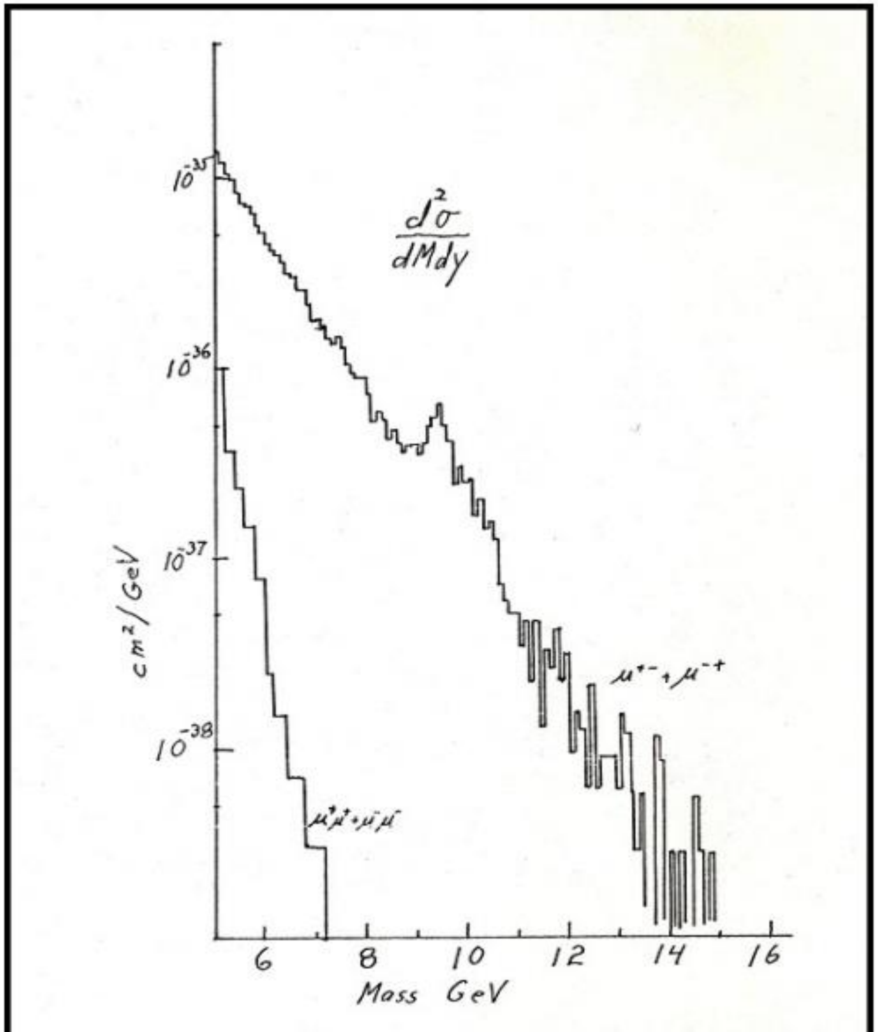
?

Flere resonanser
b-kvarker oppdaget i 1977
en ***femte*** kvark
Senere: upsilon-resonanser

GWS: Da må det være slik

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix} \quad ; \quad \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix} \quad ; \quad \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}$$

Fermilab: Produksjon av μ$^+$ μ$^-$ par i proton kollisjoner på tungt target



Og helst et lepton til

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \quad ; \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} \quad ; \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$$

Tau-leptonet ble også funnet i elektron-positron kollisjoner i 1977

Glashow-Weinberg-Salam modell (1967): Higgsmekanisme tas med i svake vekselvirkninger

Dubletter av kvarker og leptoner

En ***kvante-felt-teori***, slik som QED

Vekselvirkningspartikler med kort rekkevidde og høy masse:

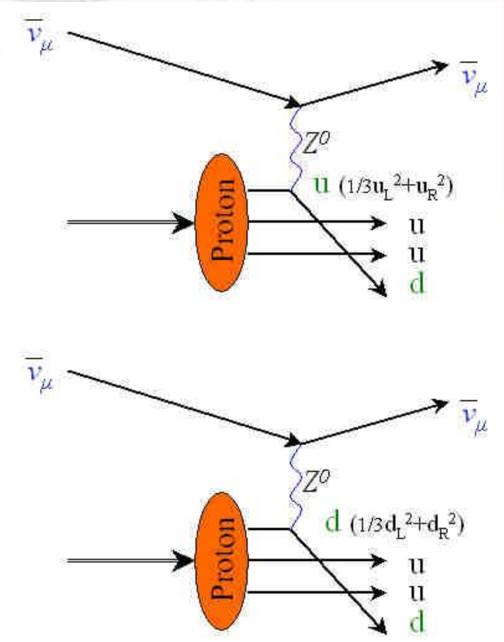
Forutsier *W og Z-bosoner*

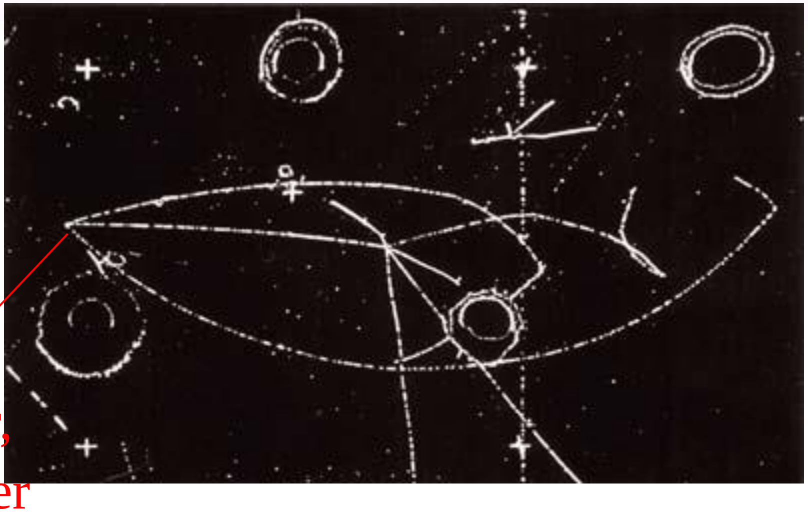
Trenger et Higgs-felt

Elektrosvak teori

Indirekte påvisning av Z^0-bosonet

Svak nøytral strøm
funnet i boblekammeret
"Gargamelle"





tre hadroner,
ingen leptoner

Cerns største triumf på 1970 tallet

Kan alt beskrives med samme teori?
Hva betyr ”samme teori”?

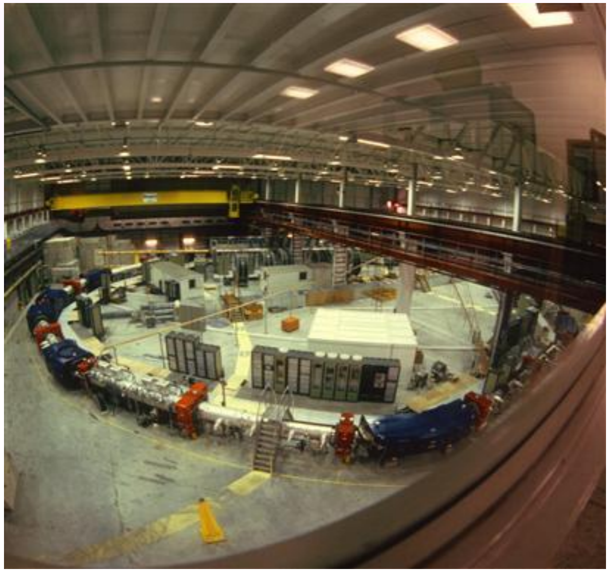
- Må ha en relasjon mellom ladningene i de forskjellige kreftene.
- Elektrosvak teori

$$g \sin \theta_W = e$$

g er svak ladning
e er elektrisk ladning
ofte brukes $\alpha = e^2/(2\varepsilon_0 hc)$
istedenfor ladning

Hvor er W og Z bosonene?

CERN kommer sterkt tilbake:
Antiproton-proton kollisjoner
i CERNs SPS gir nok energi
til at disse tunge bosonene kan
skapes.

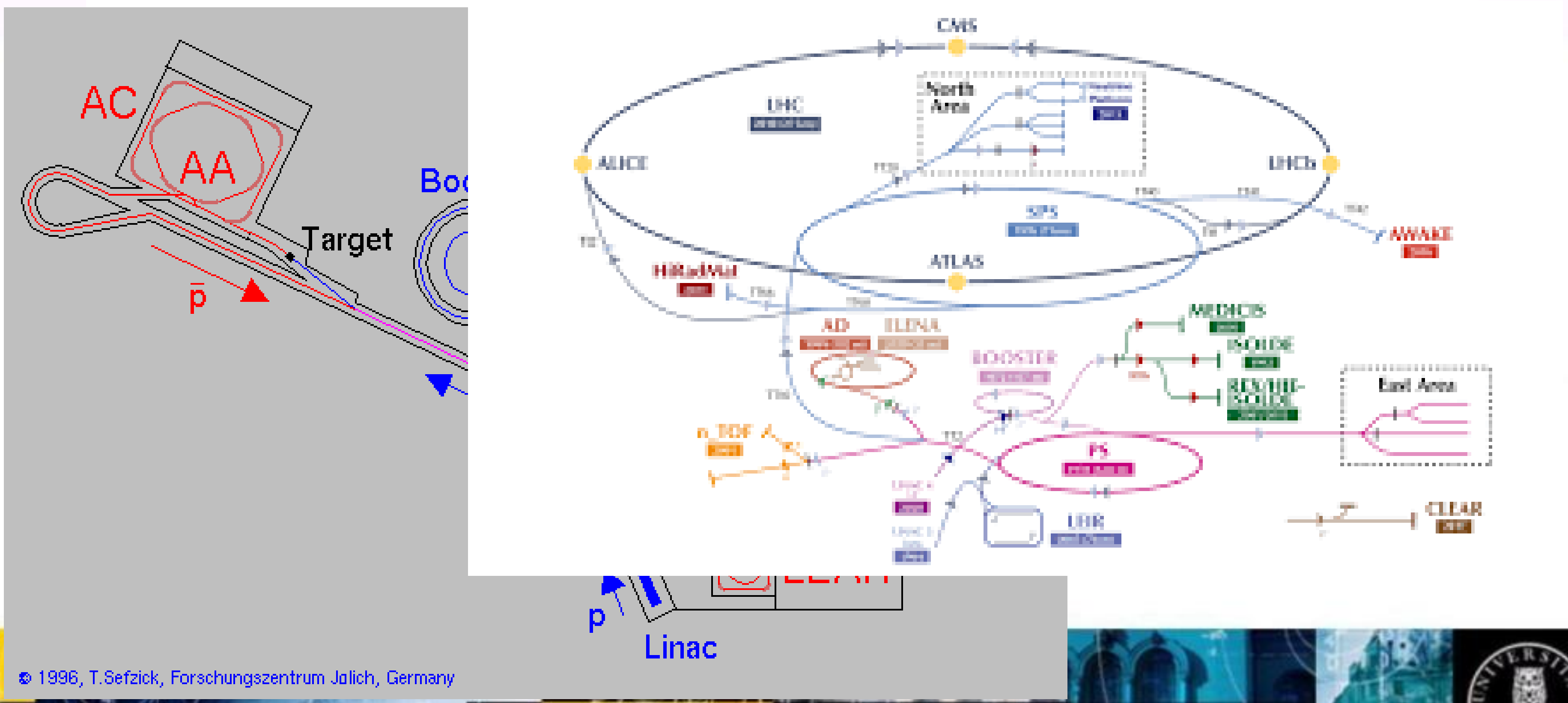


Antiproton Accumulator

Bosonene ble funnet i 1983

En teknologisk ‘*tour de force*’

Først må man lage antiprotoner
Så ble SpS redesignet slik at den kunne ta imot antiprotonene og akselerere dem i samme rør som protonene, men motsatt vei.



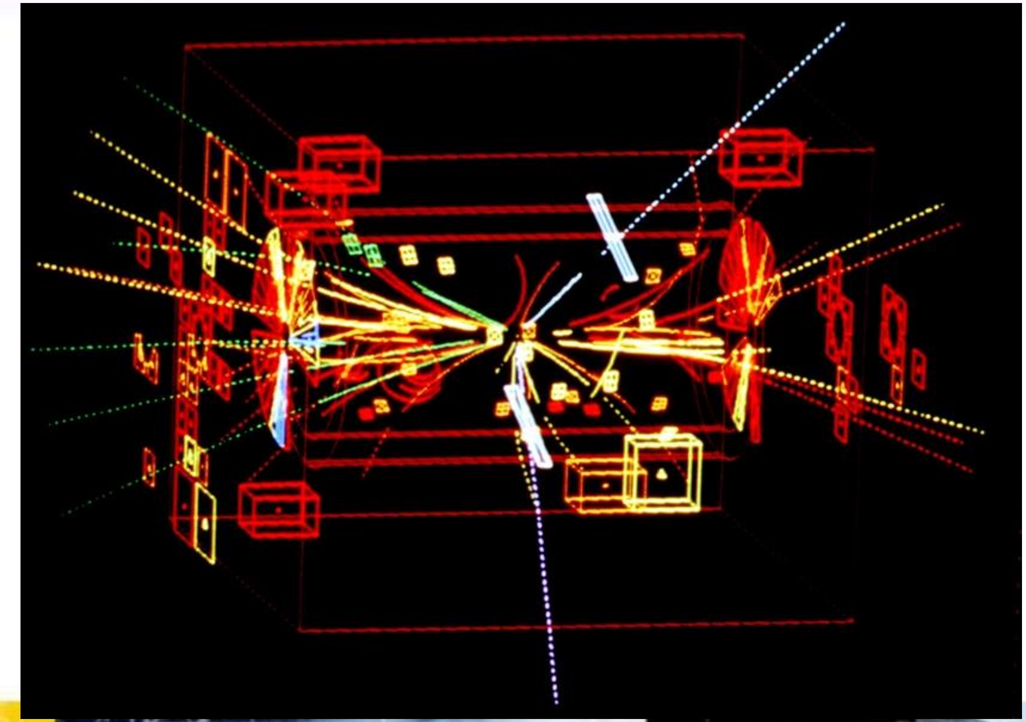
© 1996, T.Sefzick, Forschungszentrum Jülich, Germany

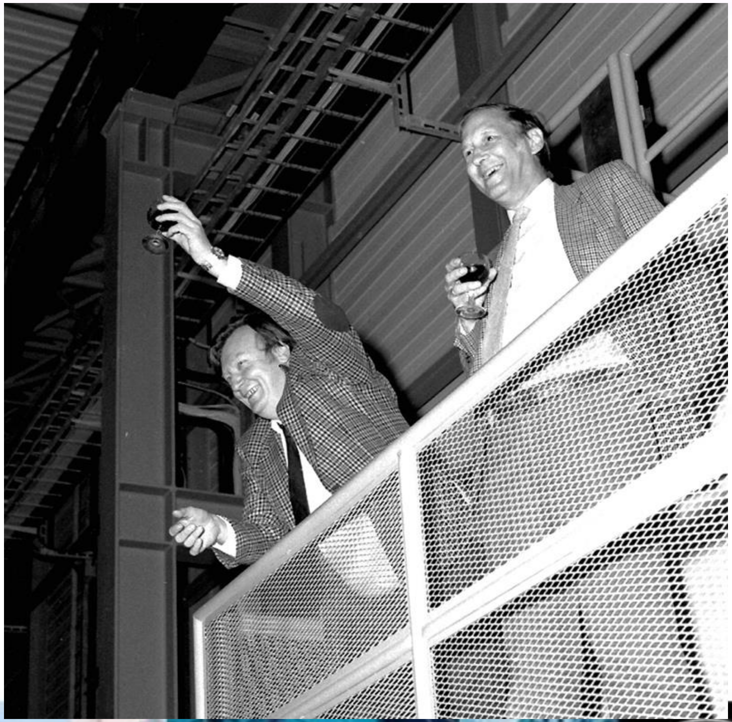
Fields

Electroweak Interaction 1983

Discovery of the W, Z bosons at CERN (1983)

(Carlo Rubbia - leader of UA1 collaboration, and proponent of proton-antiproton collider in SpS)
(Simon van der Meer - inventor of stochastic beam cooling)





Nobelpris til CERNs Carlo Rubbia og Simon van der Meer i 1984

Artikkel: When CERN saw the end of the alphabet

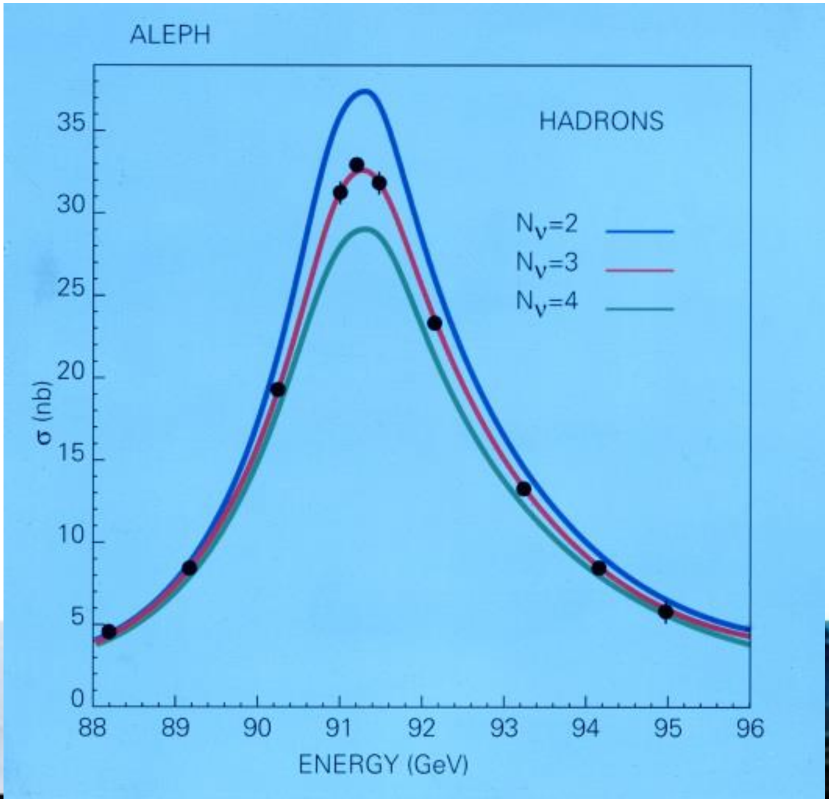
http://cerncourier.com/cws/article/cern/28849

Hvor mange generasjoner av kvarker og leptoner?

LEP eksperimentene måler Z^0 bosonets totale vidde

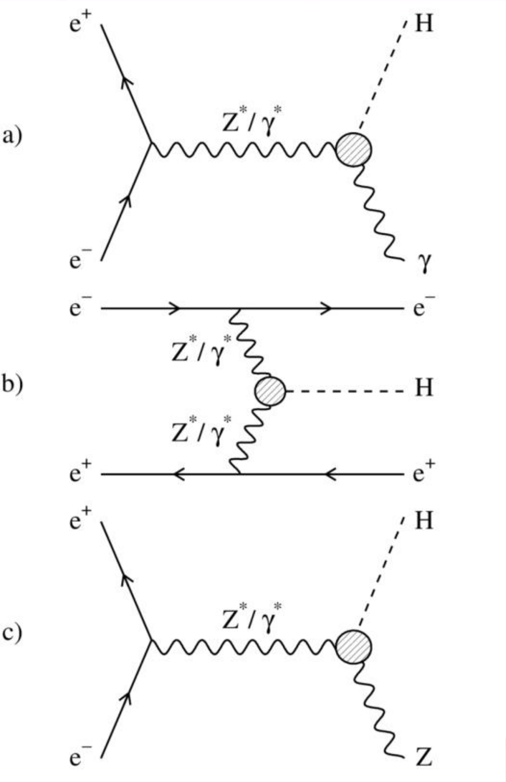
$$\Gamma_Z = N_{\bar{u}u}\Gamma_{\bar{u}u} + N_{\bar{d}d}\Gamma_{\bar{d}d} + N_{\bar{l}l}\Gamma_{\bar{l}l} + N_{\bar{\nu}\nu}\Gamma_{\bar{\nu}\nu}$$

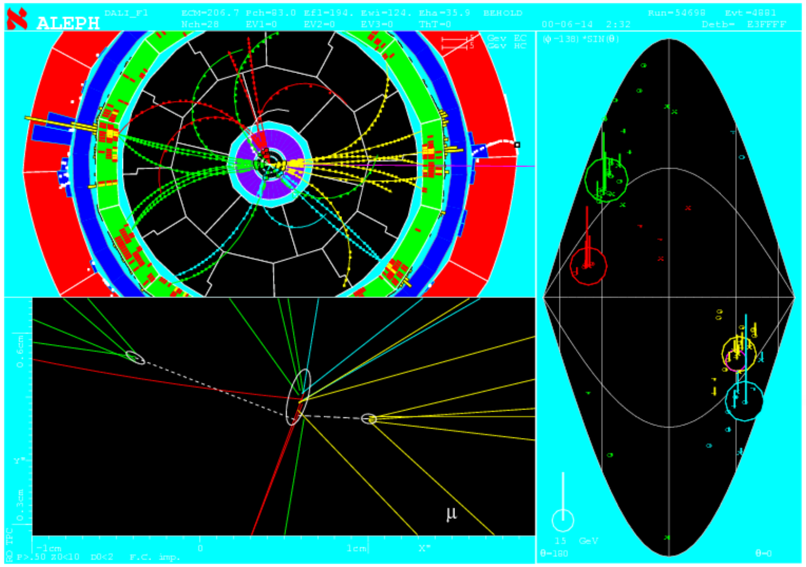
Tester også koblingenes *universalitet*



LEP-2 lette også etter Higgspartikkelen

$M_H > 114{,}4$ GeV

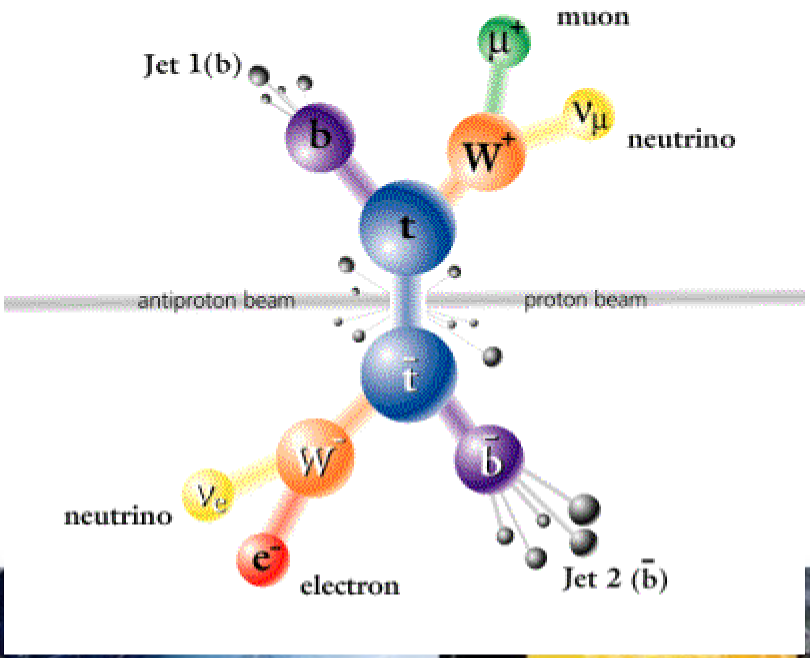




Oppdagelsen av topp-kvarken ved Fermilab USA i 1995
antiproton-proton kollisjoner med energi 1 TeV

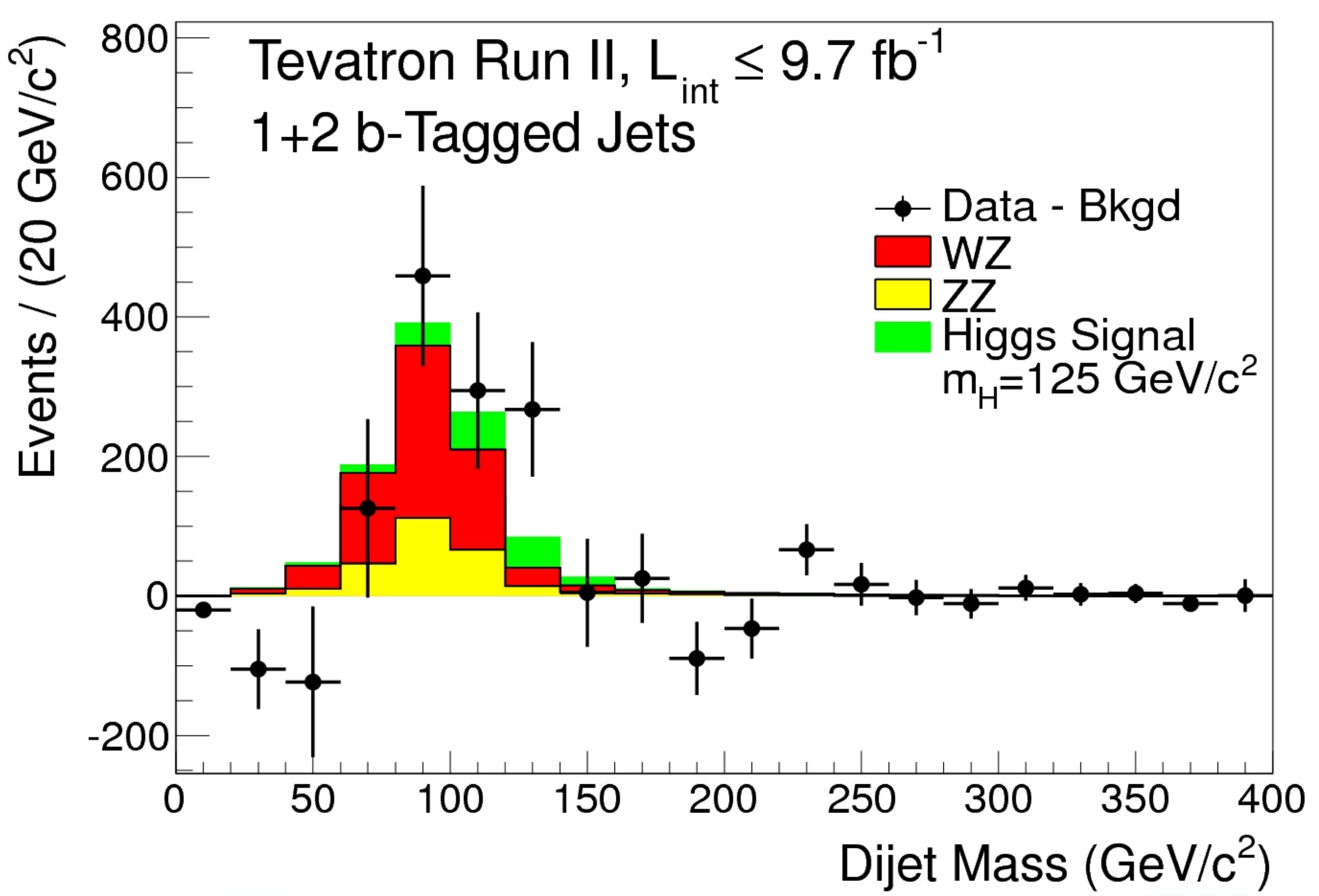
$m_t = 173{,}5$ GeV

Mye tyngre enn de andre kvarkene
Svært ustabil..henfaller med en gang
til et W boson og en b-kvark

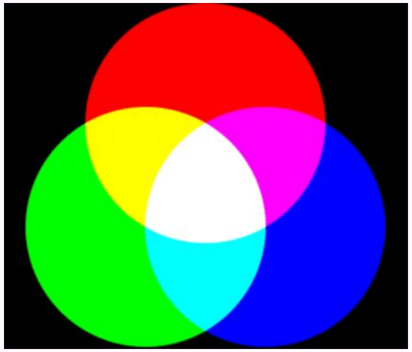


Bilde fra D0 sine websider

Fermilab-eksperimentene så også hint om Higgs-partikkelen



1973



Colour charge

Δ^{++} three up-quarks with parallel spin, in a symmetric state

(u,u,u) *But: three fermions not allowed to be in identical states (Pauli exclusion principle)*

The three quarks must be different in one quantum number: "colour"

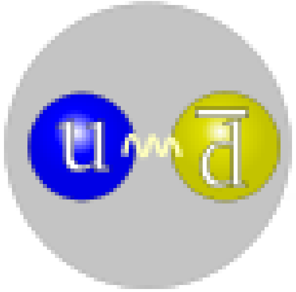
(Bardeen, Fritzsch, Gell-Mann)

Only colour-neutral bound states are allowed

MESONS = Quark-Antiquark

BARYONS = 3-Quark states

Colour-force transmitted by (eight) gluons

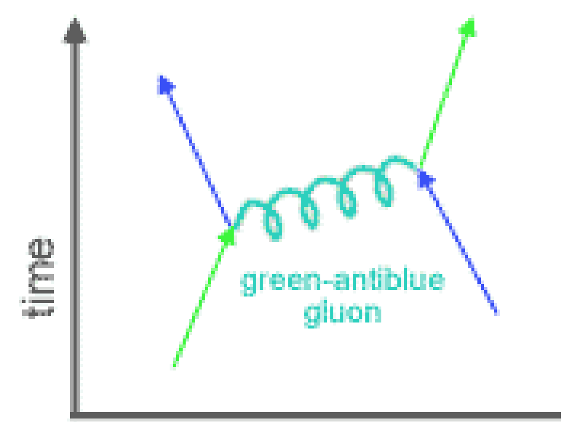


Positive pion

GLUONS CARRY COLOUR CHARGE - SELF-INTERACTION !

1973

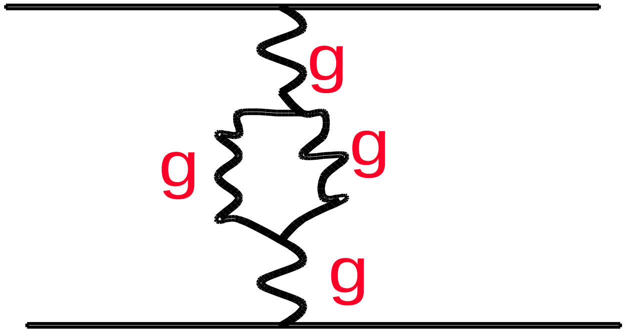
Gluons



Gluons are massless carriers of the strong force

There are 3 x 3 - 1 = 8 different gluons

Gluons carry colour charge -> self-interaction



Self-interaction of gluons

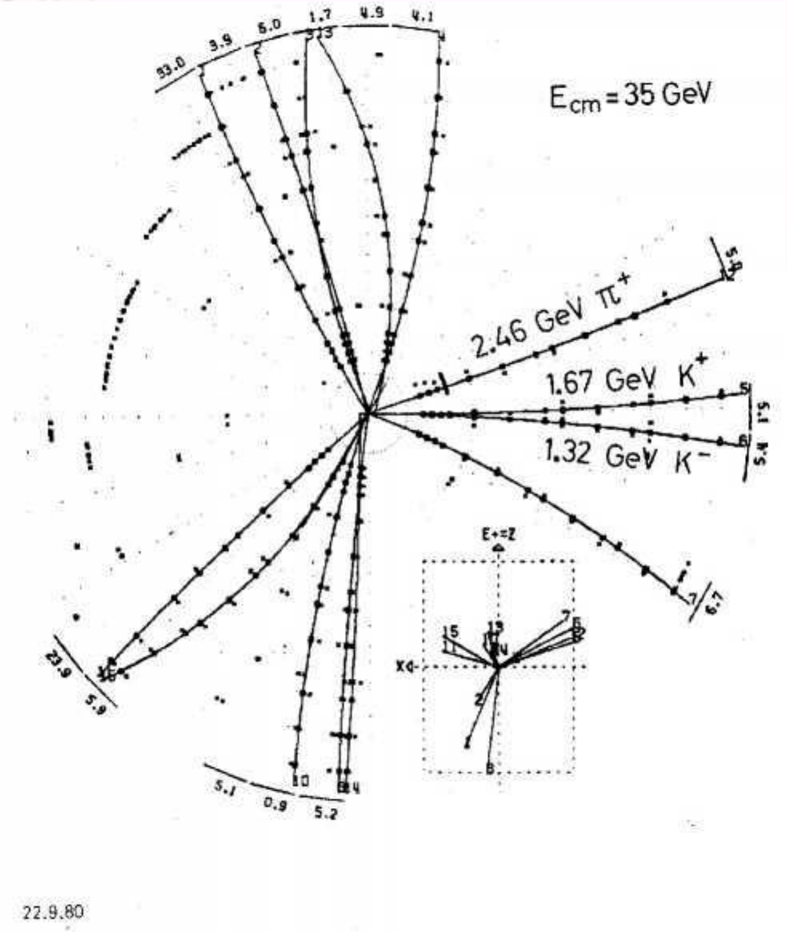
Potential rises linearly with distance (for large r)

$$V_{QCD} = -\frac{4}{3}\frac{\alpha_s}{r} + kr$$

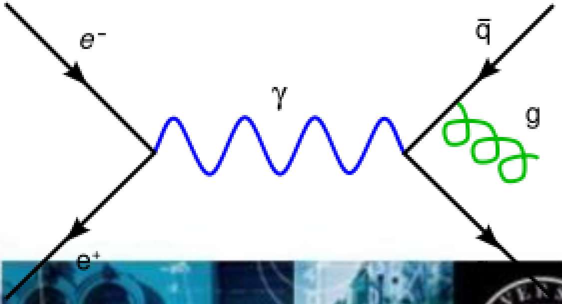
Small distances: asymptotic freedom

1973

Discovery of Gluons



Bjørn Wiik (1937-1999)



PETRA Storage Ring 1979 DESY (Hamburg)

Tre av kreftene beskrives godt som kvantefelt-teorier. Dette kalles 'Standardmodellen'.

- Forening av svake og elektromagnetiske vekselvirkninger
- Ingen relasjon mellom sterk og elektrosvak ladning.
- Hva med gravitasjon?
- Kvarker,leptoner,fotoner,gluoner….

Standardmodellen (SM) oppsummert

- Tre *og bare tre* generasjoner kvarker og leptoner.
- Forening av elektromagnetisme og svake kjernekrefter.
- Litt asymmetri mellom materie og antimaterie (CP brudd) på en selvkonsistent måte
- Higgs-mekanisme for å gi partiklene masse
- Ingen jordiske observasjoner bryter med SM, Standardmodellen er en stor suksess!

En stor suksess!!!

Matter particles
All ordinary particles belong to this group

These particles existed just after the Big Bang. Now they are found only in cosmic rays and accelerators

	LEPTONS		QUARKS	
FIRST FAMILY	**Electron** Responsible for electricity and chemical reactions; it has a charge of -1	**Electron neutrino** Particle with no electric charge, and possibly no mass; billions fly through your body every second	**Up** Has an electric charge of plus two-thirds; protons contain two, neutrons contain one	**Down** Has an electric charge of minus one-third; protons contain one, neutrons contain two
SECOND FAMILY	**Muon** A heavier relative of the electron; it lives for two-millionths of a second	**Muon neutrino** Created along with muons when some particles decay	**Charm** A heavier relative of the up; found in 1974	**Strange** A heavier relative of the down; found in 1964
THIRD FAMILY	**Tau** Heavier still; it is extremely unstable. It was discovered in 1975	**Tau neutrino** not yet discovered but believed to exist	**Top** Heavier still	**Bottom** Heavier still; measuring bottom quarks is an important test of electroweak theory

Force particles
These particles transmit the four fundamental forces of nature although gravitons have so far not been discovered

Gluons
Carriers of the strong force between quarks

Felt by:
quarks

The explosive release of nuclear energy is the result of the strong force

Photons
Particles that make up light; they carry the electromagnetic force

Felt by:
quarks and charged leptons

Electricity, magnetism and chemistry are all the results of electro-magnetic force

Intermediate vector bosons
Carriers of the weak force

Felt by:
quarks and leptons

Some forms of radio-activity are the result of the weak force

Gravitons
Carriers of gravity

Felt by:
all particles with mass

All the weight we experience is the result of the gravitational force

Ubesvarte spørsmål

- Mekanismen for å gi partiklene masse er bekreftet, men vi må studere higgspartikkelen.
- S.M. kan ikke forutsi verdier av massene.
- Hvorfor er elektron og protonladningene like?
- Hvorfor ingen antipartikler i universet? (CP-bruddet vi observerer er for lite til å forklare)
- Kan vi få med gravitasjon i en enhetlig felt-teori?
- Hva består den mørk materien i universet av?
- Hvordan kan vi forklare universets ekspansjonshastighet?