

Partikkelfysikk og kosmologi

Bjarne Stugu

Institutt for fysikk og teknologi

Universitetet i Bergen

Disposisjon

- 1) Hva vi vet i partikkelfysikk (historisk oversikt).
- 2) Link til astrofysikk/kosmologi
- 3) Hvordan skal vi bidra med LHC?

Kilder

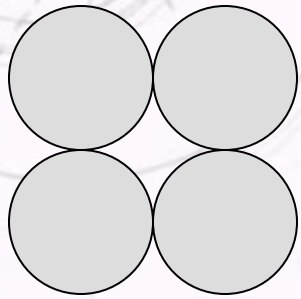
- Eget materiale, som bl.a. bygger på
 - Wikipedia
 - Andre presentasjoner (Wim deBoer...)
- Presentasjoner av Rolf Landua/Cern til lignende grupper

Del 1, En historisk oversikt

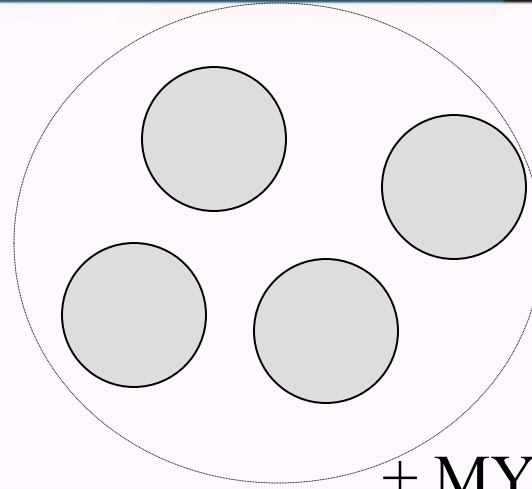


Hva er materie?

- Atomer postulert allerede av Demokrit
 - Hvis det ikke fantes noen minste byggestener, så ville alt smuldre opp (jeg har lest argumentet i 'Sofies verden')
 - *Stemmer dette for kollisjoner ved høye energier?*

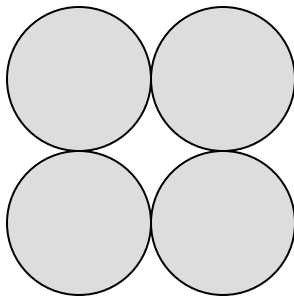


+ Energi

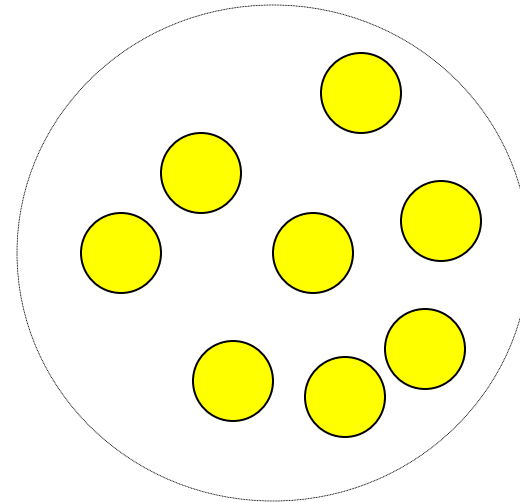
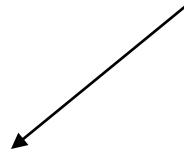


+ MYE Energi:

~~Hva skjer da?~~



+ Energi



Energiskalaer

($1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$)

- Gassmolekyl ved romtemperatur:
 - $E = kT = 0,025 \text{ eV}$ (k er Boltzmanns konstant)
- Molekylær bindingsenergi
 - *Kovalent og ionebinding: 1-10 eV*
 - *Van-der Waals krefter etc. i faste stoffer fra smelte og kokepunkter.*
- Atomær ionisasjonsenergi: 1-20 eV
- *Potensiell energi $mgh = 5 \times 10^{-6} \text{ eV}$ for jernatom i 1 meters høyde. Men mekanisk energi er ordnet. Lett å få 10^{26} jernatomer til å falle samme vei.*

Demokrit hadde rett, atomene er udelelige i naturlige jordiske fenomener

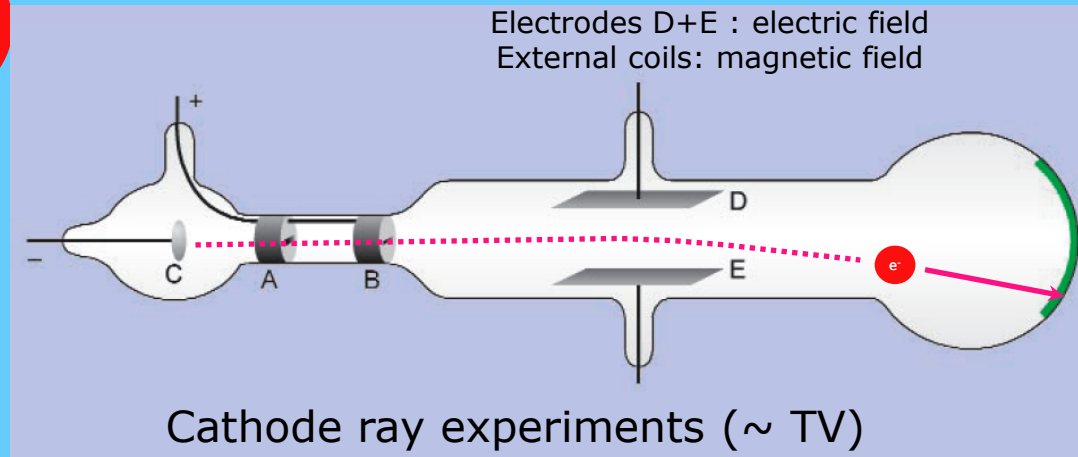
- Atomene er små, og andre teorier var plausible, så rundt ca år 1890 var atomteorien fortsatt ikke bekreftet.

Discovery of the electron

1897

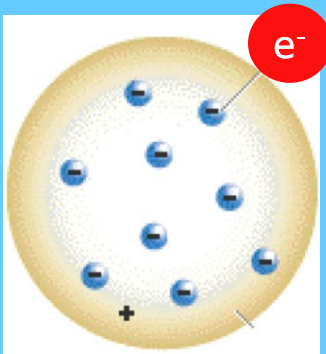


J.J. Thomson



**'Rays' are charged corpuscles*
with unique charge/mass ratio**

***later called 'electrons'**



His 'plum pudding'
model of the atom
(1904)



Electrons are sub-atomic particles!

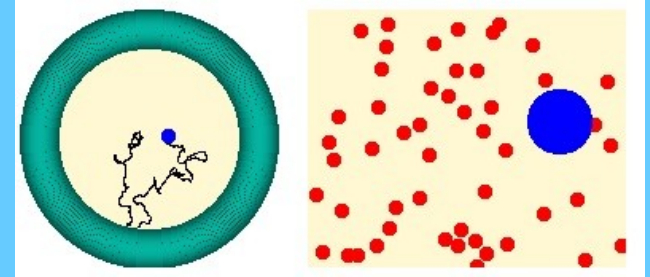
Atom

1905

Robert Brown (1827) observes random walk of small particles suspended in a fluid



Albert Einstein (1905) explains by kinetic theory that the motion is due to the bombardment by molecules



Francois Perrin (1907) uses Einstein's formula to confirm the theory and measure Avogadro's number

$$\langle x^2 \rangle = \frac{2kTt}{\alpha} = \frac{kTt}{3\pi\eta a}$$

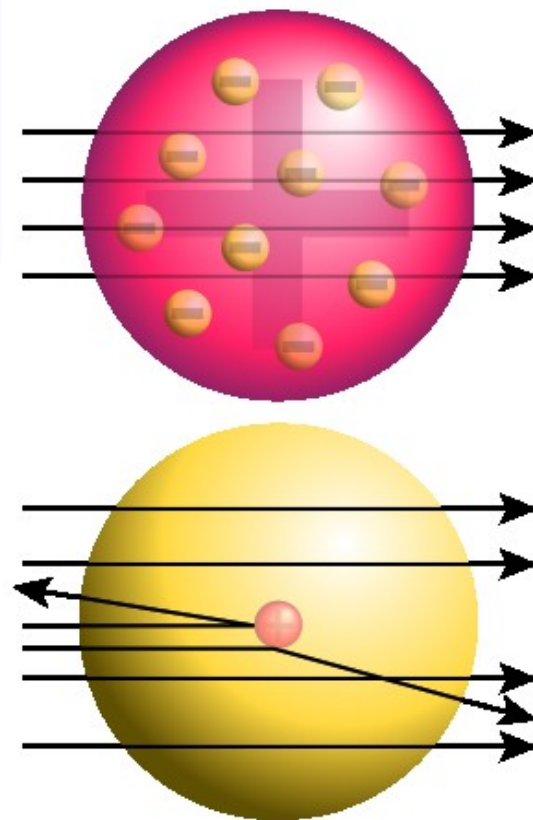


The existence of atoms was proven

Rutherford's experiment: alpha particles on gold foil

This happens if matter is like a
bun with raisins →

This is what Rutherford observed, something
that fits with heavy nuclei →



Fra "Wikimedia Commons"

Bohrs atommodell

- Atomer som mini solsystem, men tunge positive kjerner og kretsende elektroner
- Bare visse baner var tillatte
- Uakseptabel teori i lys av elektromagnetisme.

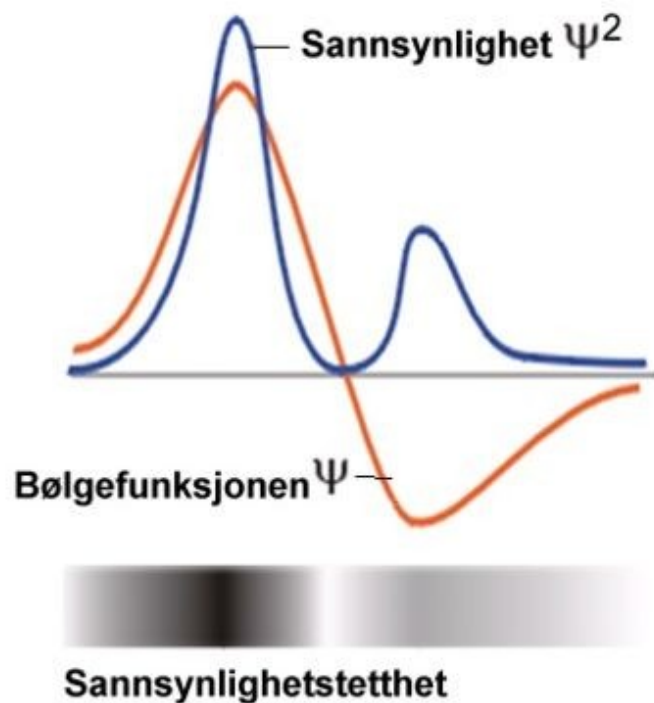
Den kvantemekaniske revolusjon

- Schrödinger energiligning.
 - ($E_{\text{tot}} = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}}$ etter visse regler)

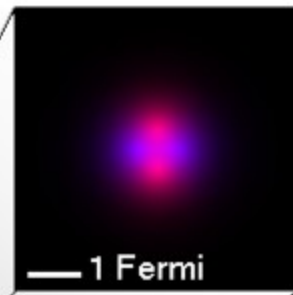
$$H\psi(\mathbf{r}, t) = (T + V)\psi(\mathbf{r}, t) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V(\mathbf{r}) \right] \psi(\mathbf{r}, t) = i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t}(\mathbf{r}, t)$$

- Finner bestemte energinivåer, men postulerer at partikkelbaner ikke kan bestemmes eksakt.
- Faststoff-fysikk, kjerne+partikkelfysikk og kjemi er basert på kvantemekanikk.
- **Har bestått alle tester**

Illustrasjon av
 bølgefunksjon (under).
 Elektron-og kjerneskyer
 for helium
 (til venstre)
 (figurer fra Wikipedia)



1 Ångstrom (= 100,000 Fermi)



I 1932 er atommodellen godt etablert

- Tunge kjerner med nøytroner og protoner
- Elektroner i "skyer" omkring, beskrevet etter kvantemekaniske prinsipper

Hvor lenge var Adam i paradiset?

- Til 1933, da ble positronet funnet.
 - Forutsagt av Dirac noen år tidligere gjennom sin relativistiske kvantemekanikk.
 - Alle partikler har sine antipartikler med motsatt ladning, mens alle andre egenskaper er beholdt. (noen nøytrale partikler er sine egne antipartikler)

Fields

e^+

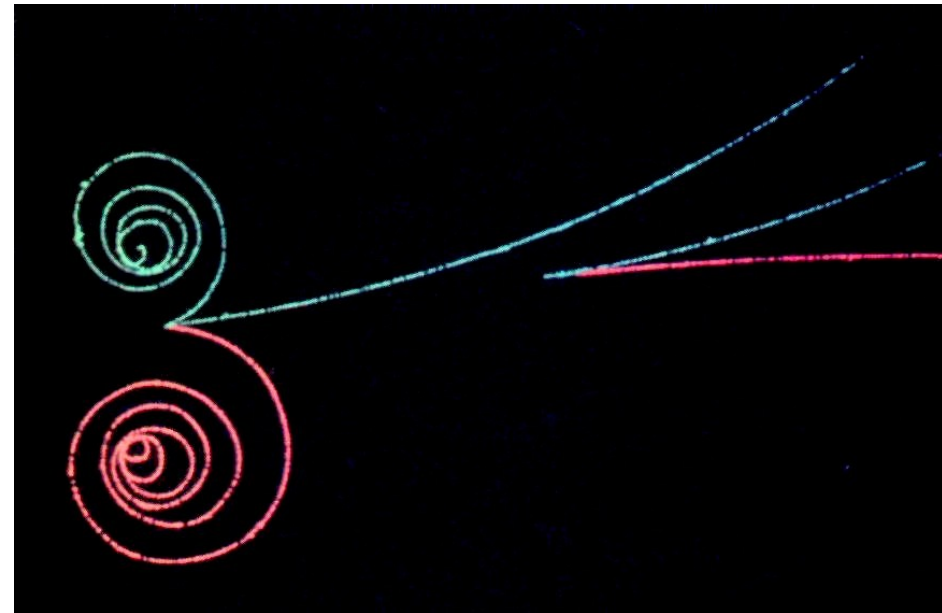
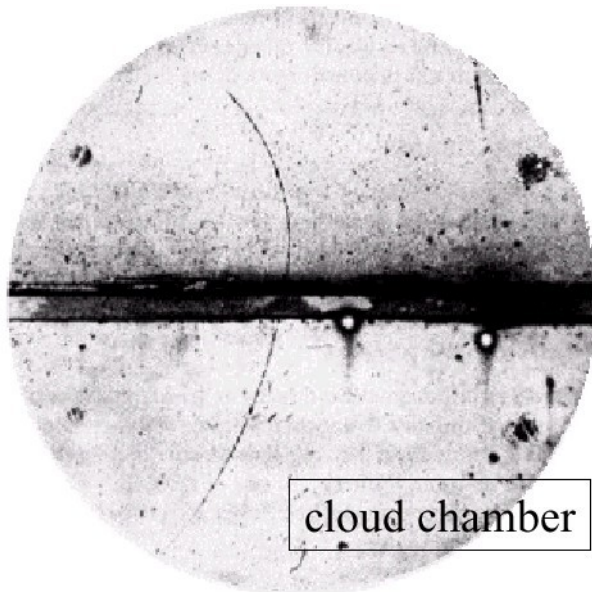
'Electromagnetic' interaction

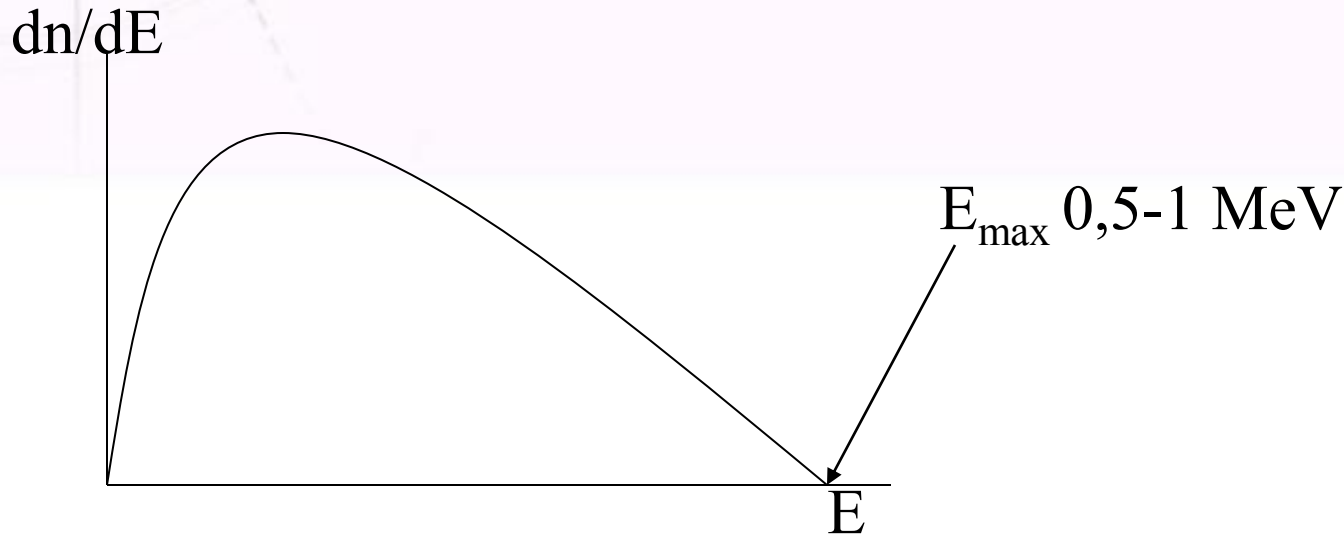
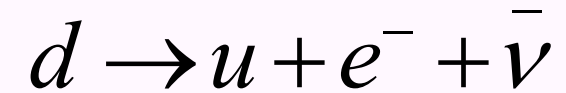


Anderson (1932)

Discovery of the positron

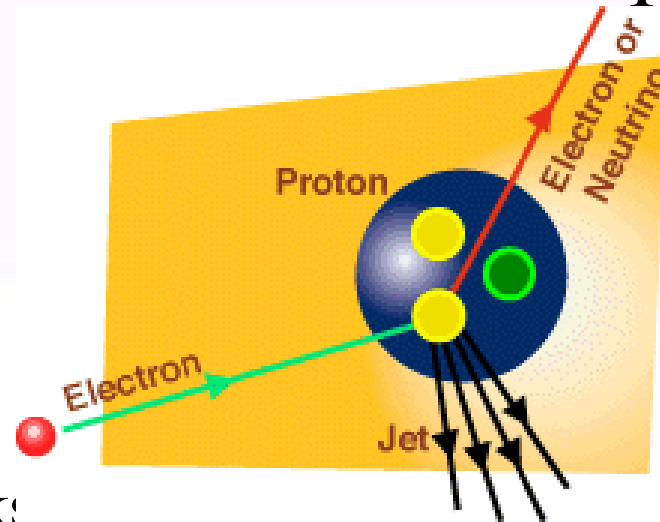
Dirac was right!



β -stråling

Kontinuerlig energispektrum, midlere $E = 1/3 E_{\max}$
Er energien bevart? Bare hvis en postulerer en ny
partikkel, *nøytrinoet*.

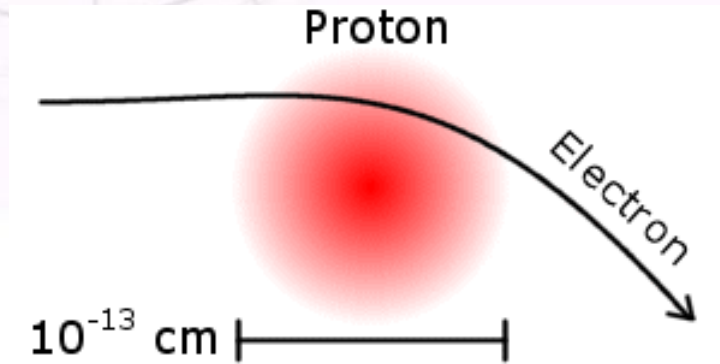
Er protonet en elementæpartikkel?



- Rutherford's eksperiment på nytt, men med høyere energi. Hva skjer?
 - Mange nye partikler, bl. a særpartikler.
 - Protonet har utstrekning
 - Protonet har struktur
 - Kvarkemodell (1964)

Discovery of quarks

Electron-Proton scattering

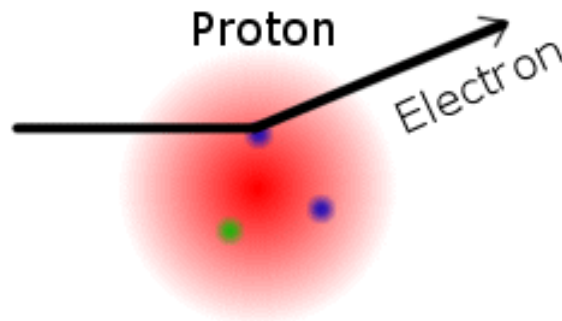


1956 Hofstadter: measured finite proton radius



Stanford Linear Accelerator Centre

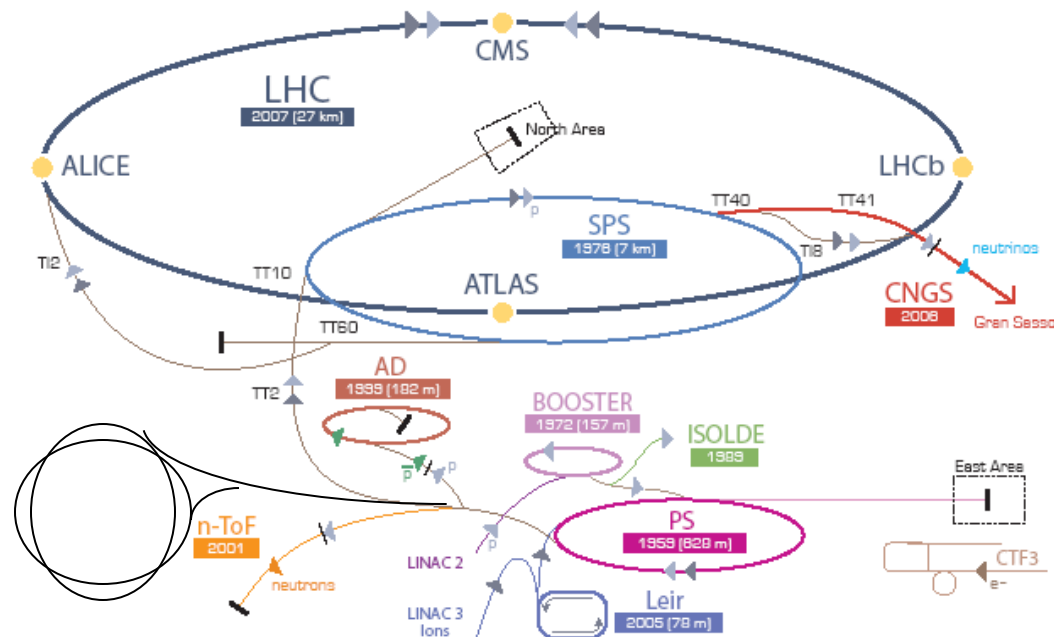
1967 Friedmann, Kendall, Taylor (SLAC):
 'hard scattering' of electron on three 'point-like particles'



Measured cross-sections perfectly compatible with presence of 2 up- and 1 down-quark in proton

CERNs ISR.

CERN Accelerator Complex



p-p kollisjoner
i 8 punkter

▶ ion ▶ neutrons ▶ \bar{p} [antiproton] ↔ proton/antiproton conversion ▶ neutrinos ▶ electron

LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron

AD Antiproton Decelerator CTF3 Clio Test Facility CNGS Cern Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice

LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LInear ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight



Kjell Johnsen
1921-2007

1. **Progress report on the development of a method to detect fractional charges in water and its application to a search for quarks at the ISR**

Von Dardel, G; Henning, S; Malmenryd, G

CERN-ISRC-70-33-Add-1.- Geneva : CERN, 1 Oct 1971 . - 4 p [Fulltext](#)

[Detailed record](#) - [Similar records](#)

2. **Search at the ISR for quarks produced at small angles** - Rome-CERN Collaboration.

CERN-ISRC-70-30.- Geneva : CERN, 7 Dec 1970 . - 2 p [Fulltext](#)

Alb

Kvarker er aldri frie
partikler

4. **The use of a special gate to search for quarks at the ISR in events of favourable topology** - Pisa-Stony Brook Collaboration.

CERN-ISRC-69-12-Add-1.- Geneva : CERN, 8 Dec 1970 . - 14 p [Fulltext](#)

[Detailed record](#) - [Similar records](#)

5. **Search for quarks at the ISR** - Saclay-Strasbourg Collaboration.

CERN-ISRC-69-11-Add-5.- Geneva : CERN, 7 Jan 1971 . - 3 p [Fulltext](#)

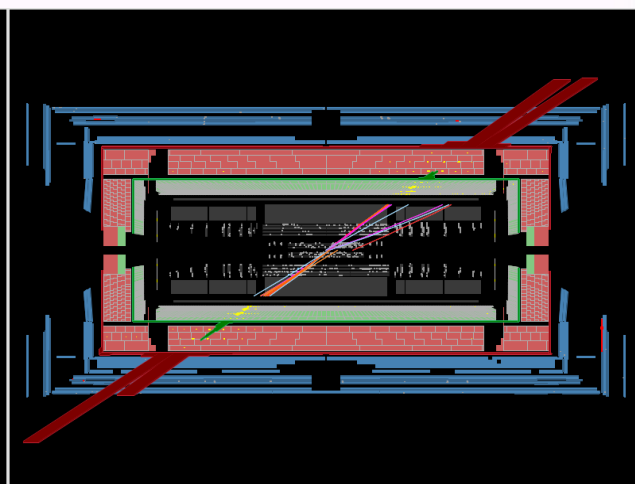
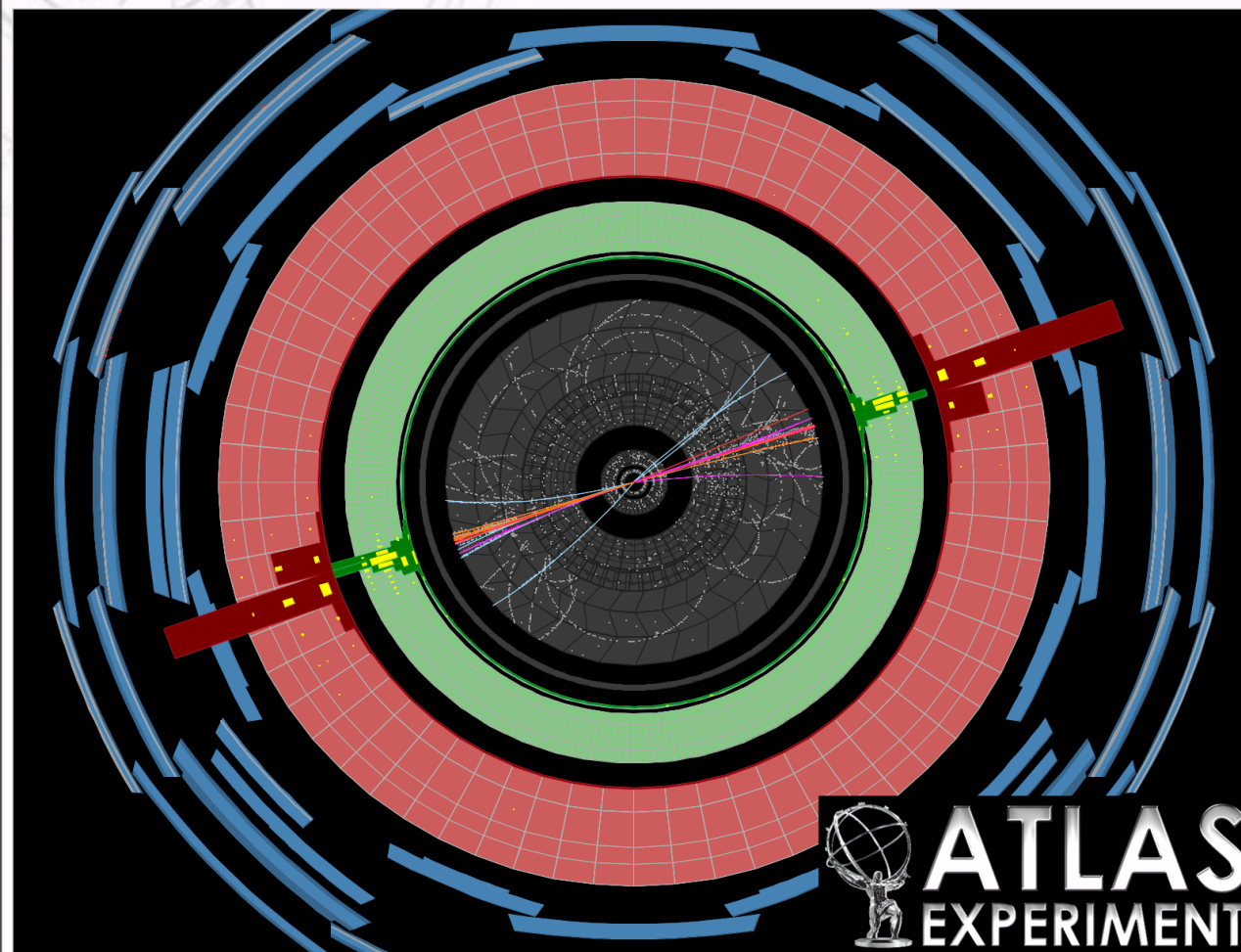
[Detailed record](#) - [Similar records](#)

6. **Search for quarks in the British-Scandinavian large angle spectrometer** - British-Scandinavian Collaboration.

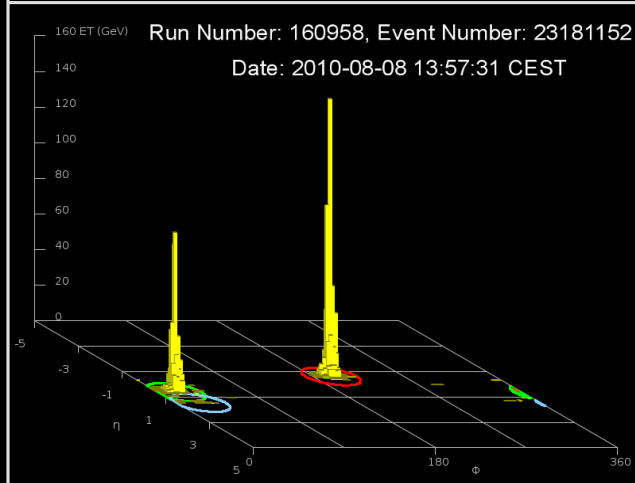
CERN-ISRC-71-9.- Geneva : CERN, 1971 . - 15 p [Fulltext](#)

Ikke frie kvarker, men

- Baryoner, som består av tre kvarker
- Mesoner, som består av en kvark og en antikvark.
- Leptoner, som elektronet, som er en ”punktpartikkel”



 **ATLAS**
EXPERIMENT



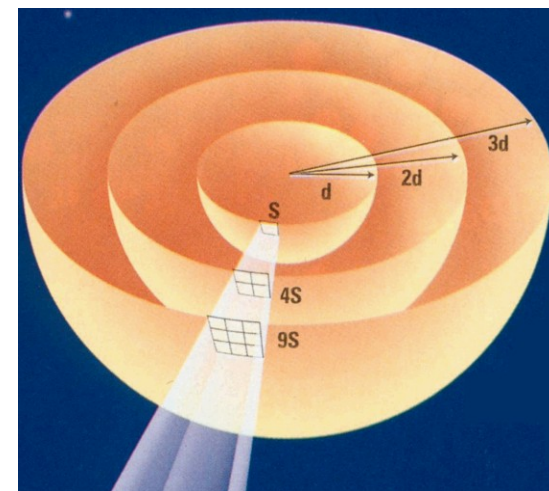
Vekselvirkninger

(krefter, felter, potensialer)

- Coulomb kraft:
- Gravitasjonskraft:
- $1/r^2 \rightarrow$ Kan tegne feltlinjer

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$F = G_N \frac{m_1 m_2}{r^2}$$



Potensialene

- Enklere å uttrykke seg v.h.a. energi og potensialer (\sim kraft \times vei)
- Dessuten uttrykker vi potensialet som virkningen av en kraftkilde på en standardisert probe (enhetsladning)

De fire kraftpotensialene

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

Newtons Gravitasjon

+korreksjoner p.g.a. Einstein

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

Coulombkraften

$$V_s = -\alpha_s \frac{1}{r} + Kr$$

Sterk kraft (mellom kvarker).

Nb: øker med avstand

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

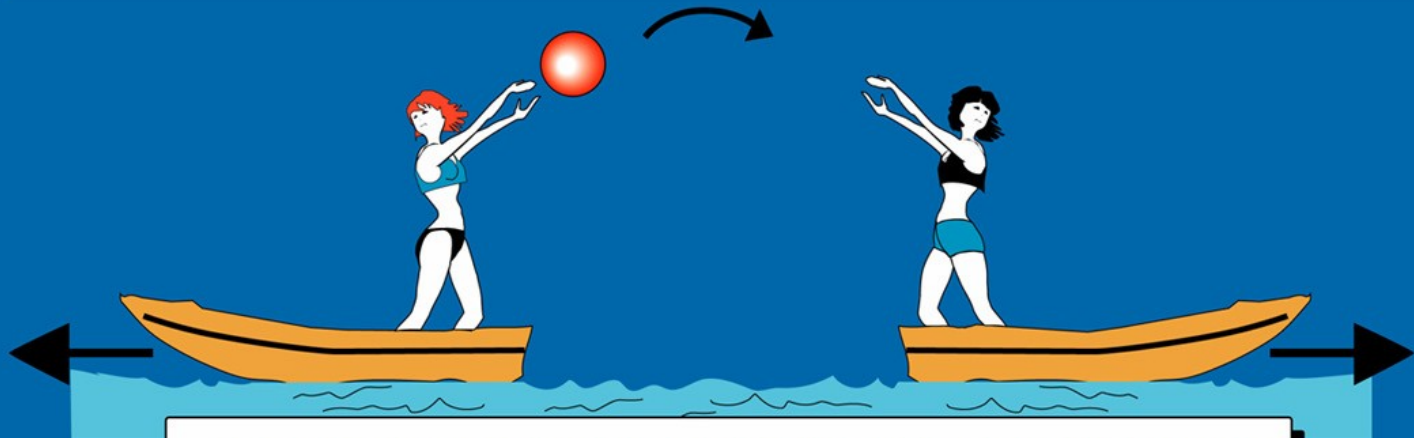
Svak kjernekraft

Hvorfor tror vi det er sånn? Hvilke sammenhenger finnes?

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	$\sim 10^{-3}$	PHOTONS (NO MASS)	ATOMIC SHELL ELECTROTECHNIQUE
WEAK NUCLEAR FORCE	$\sim 10^{-5}$	BOSONS Z^0, W^+, W^- (HEAVY)	RADIOACTIVE BETA DESINTEGRATION
GRAVITATION	$\sim 10^{-38}$	GRAVITONS (?)	HEAVENLY BODIES

Elektro-
svak
Kraft



THE EXCHANGE OF PARTICLES IS RESPONSIBLE FOR THE FORCE

Kvantefelt-teori

- Gir små korreksjoner til elektromagnetismen, som er eksperimentelt etterprøvet med stor presisjon
- Krefte beskriveres gjennom utveksling av partikler, (fotoner for elektromagnetisme)

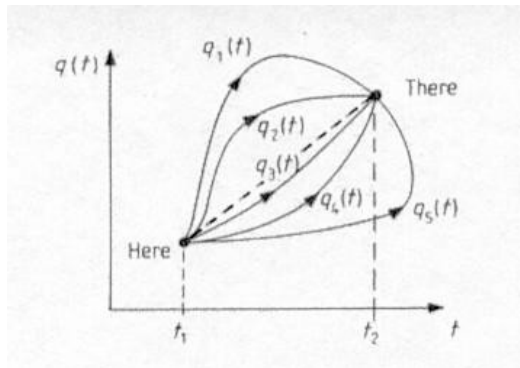
Fields

1934 - 1948



R. P. Feynman

All paths are possible
(‘multiple slit experiment’)



Quantum Electrodynamics

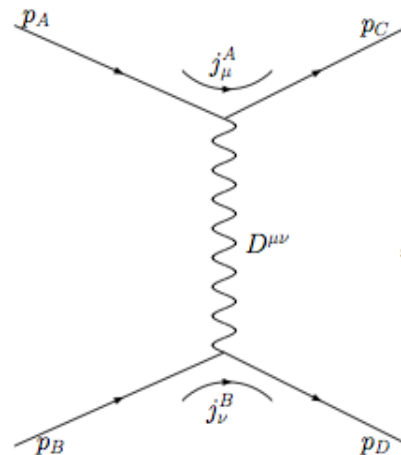
Feynman, Tomonaga, Schwinger

“Renormalization”

The ‘naked’ electron + vacuum fluctuations = measured electron
(“infinite” - “infinite” = “finite”)

Feynman diagrams

Precise computation rules - in graphical form



$$= -i \int d^4x d^4y j_\mu^A(x) D^{\mu\nu}(x, y) j_\nu^B(y)$$

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

Fields

'Strong' interaction

Back to the strong force: keeping protons and neutrons together



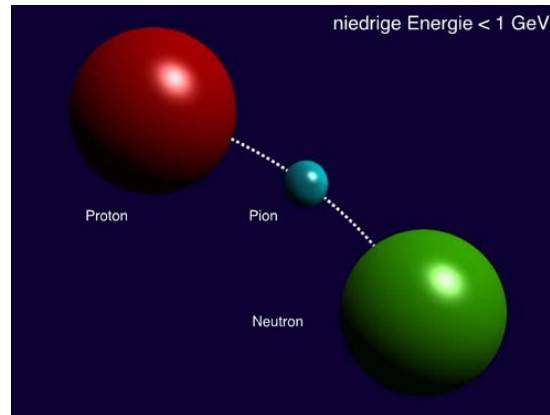
Yukawa (1934)

Exchange of massive particle

Pion

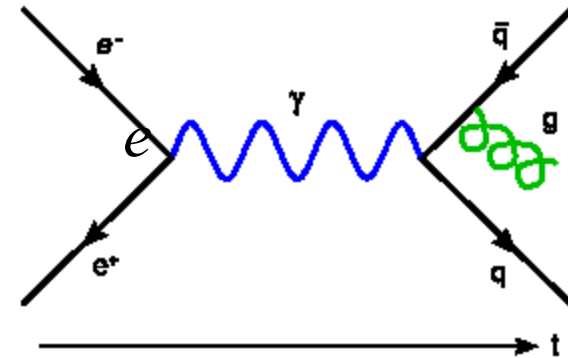
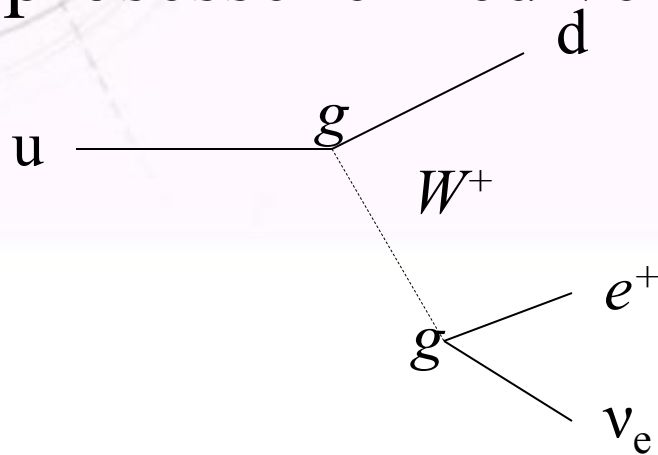
$$V(r) = -g^2 \frac{e^{-mr}}{r}$$

Modified Coulomb law



Allowed by uncertainty relation: 1.4 fm ~ 140 MeV

Feynman diagrammer for å beskrive prosessene med vekselvirkningspartikler



$$u \rightarrow d + e^+ + \nu_e$$

$$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$$

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 $\alpha = e^2 / (2\epsilon_0 hc)$

istedenfor ladning

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, Fritzsche, Gell-Mann)

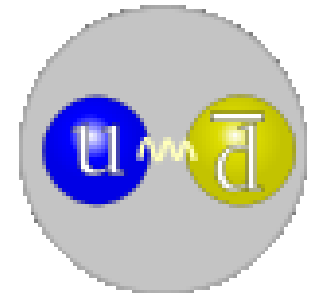
Only colour-neutral bound states are allowed

MESONS = Quark-Antiquark

BARYONS = 3-Quark states

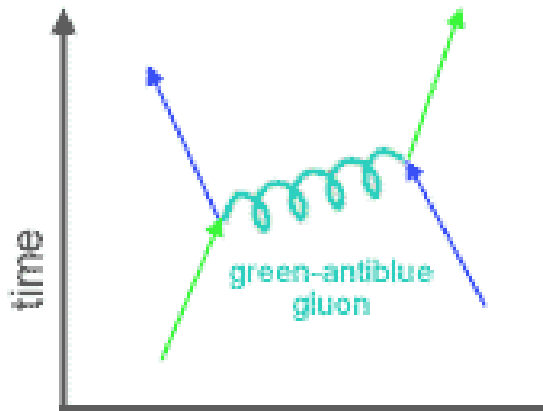
Colour-force transmitted by (eight) gluons

GLUONS CARRY COLOUR CHARGE - SELF-INTERACTION !



Positive pion

Gluons



Gluons are massless carriers of the strong force

There are $3 \times 3 - 1 = 8$ different gluons

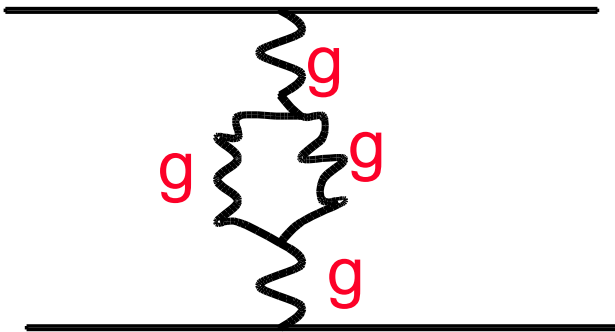
Gluons carry colour charge \rightarrow self-interaction

Self-interaction of gluons

Potential rises linearly with distance (for large r)

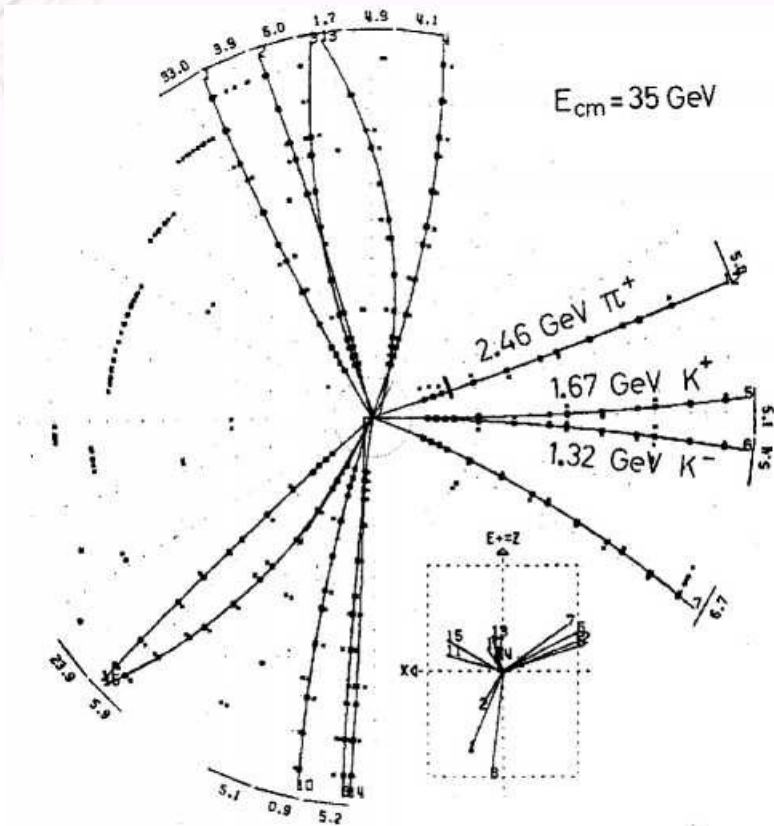
$$V_{QCD} = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + kr$$

Small distances: asymptotic freedom



1973

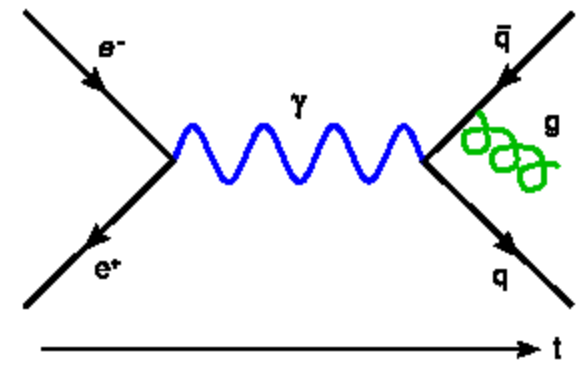
Discovery of Gluons



22.9.80



Bjørn Wiik (1937-1999)



PETRA Storage Ring (DESY - Hamburg)

Tre av kreftene beskrives godt som kvantefeltteorier. Dette kalles 'Standardmodellen'.

- Ingen relasjon mellom sterk og elektrosvak ladning.
- Hva med gravitasjon?
- Kvarker, leptoner, fotoner, gluoner....
- Mer om dette i morgen.