

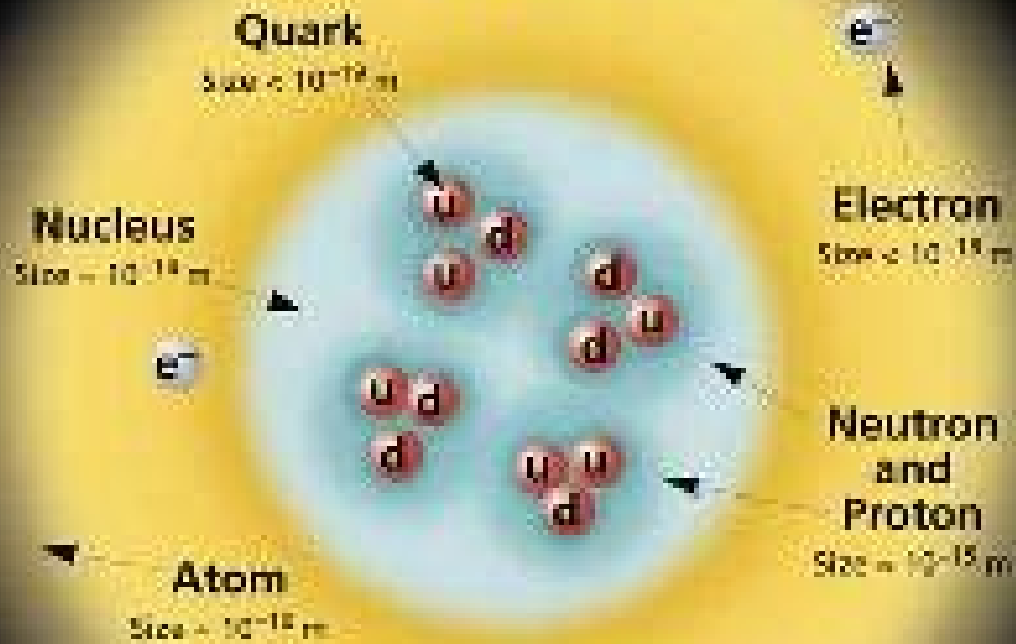
Föreläsning 6 och 7

Krafter; stark, elektromagnetisk, svag. Kraftförening

- Partikelfysik introduktion
- Antimateria, MP 13-1
- Feynman diagram
- Krafter och växelverkan, MP 13-2

Se även <http://ParticleAdventure.org/>

Structure within the Atom



If the nucleus and nucleons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

Massans innersta väsen



Mot alla konstens regler, startar med sammanfattning

| FERMIONS | | | | | |
|---------------------------|-------------------------|-----------------|------------|---------------------------------|-----------------|
| Leptons | | | Quarks | | |
| spin = 1/2 | | | spin = 1/2 | | |
| Flavor | Mass GeV/c ² | Electric charge | Flavor | Approx. Mass GeV/c ² | Electric charge |
| ν_e electron neutrino | $<1 \times 10^{-8}$ | 0 | u up | 0.003 | 2/3 |
| e electron | 0.000511 | -1 | d down | 0.006 | -1/3 |
| ν_μ muon neutrino | <0.0002 | 0 | c charm | 1.3 | 2/3 |
| μ muon | 0.106 | -1 | s strange | 0.1 | -1/3 |
| ν_τ tau neutrino | <0.02 | 0 | t top | 175 | 2/3 |
| τ tau | 1.7771 | -1 | b bottom | 4.3 | -1/3 |

En liknande tabell över fermionernas anti-partiklar ("anti-fermioner"). Dessa är identiska med fermionerna förutom att de har motsatta kvanttal (t.ex. laddning)

3 familjer/generationer

PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

| Property \ Interaction | Gravitational | Weak | Electromagnetic | Strong | |
|--|-----------------------------|--|----------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| | | (Electroweak) | | Fundamental | Residual |
| Acts on: | Mass – Energy | Flavor | Electric Charge | Color Charge | See Residual Strong Interaction Note |
| Particles experiencing: | All | Quarks, Leptons | Electrically charged | Quarks, Gluons | Hadrons |
| Particles mediating: | Graviton (not yet observed) | W ⁺ W ⁻ Z ⁰ | γ | Gluons | Mesons |
| Strength relative to electromag for two u quarks at: | 10 ⁻⁴¹ | 0.8 | 1 | 25 | Not applicable to quarks |
| for two protons in nucleus | 10 ⁻⁴¹ | 10 ⁻⁴ | 1 | 60 | |
| | 10 ⁻³⁶ | 10 ⁻⁷ | 1 | Not applicable to hadrons | |

- **Fermion:** En partikel som följer Fermi-Dirac statistik. Partiklar med spin=1/2 är fermioner (e,p,n..)
- **Boson:** En partikel som följer Bose-Einstein statistik. Partiklar med heltaligt spin är bosoner (γ , gluoner, ...)
- **Växelverkan:** utbyte av energi och rörelsemängd mellan partiklar samt möjlighet att skapa eller förintä (annihilera) partiklar.
- **Reell partikel:** En partikel med total energi E och rörelsemängd p som tillfredsställer ekvationen:

$$E = \sqrt{(pc)^2 + (m_0 c^2)^2} \quad (1)$$

- **Virtuell partikel:** en partikel som har en sannolikhet att existera inom Heisenbergs osäkerhetsrelation

$$\Delta E \Delta t \simeq \hbar$$

, men som inte uppfyller energivillkoret (1) ovan.

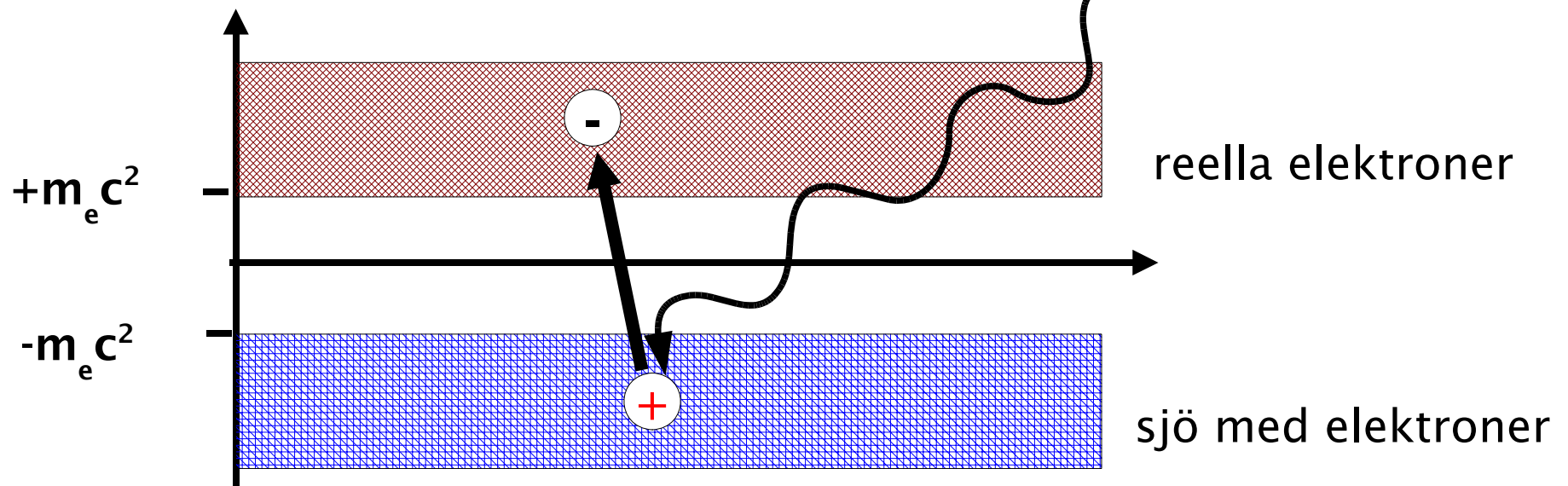
Antimateria

- Paul Dirac tolkade 1928 de negativa energier som fås vid rotutdragning av

$$E^2 = (pc)^2 + (m_0c^2)^2$$

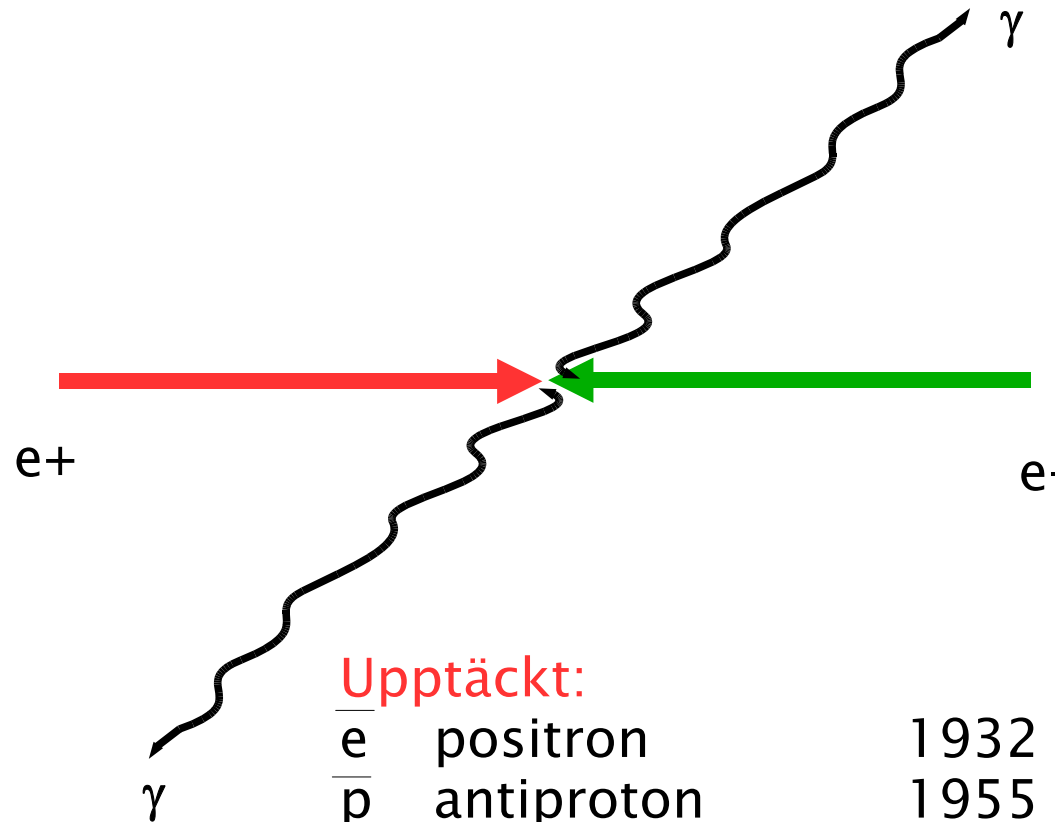
$$E = \pm \sqrt{(pc)^2 + (m_0c^2)^2}$$

som ett "hål" i en sjö fylld av elektroner



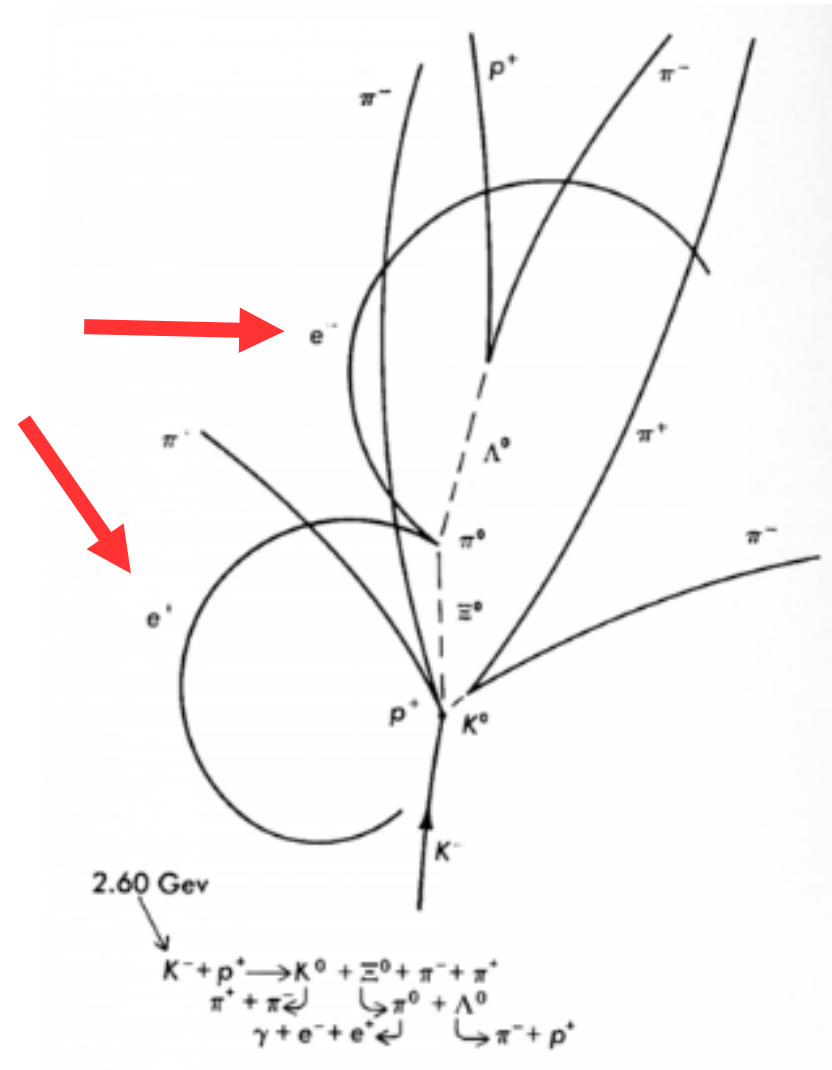
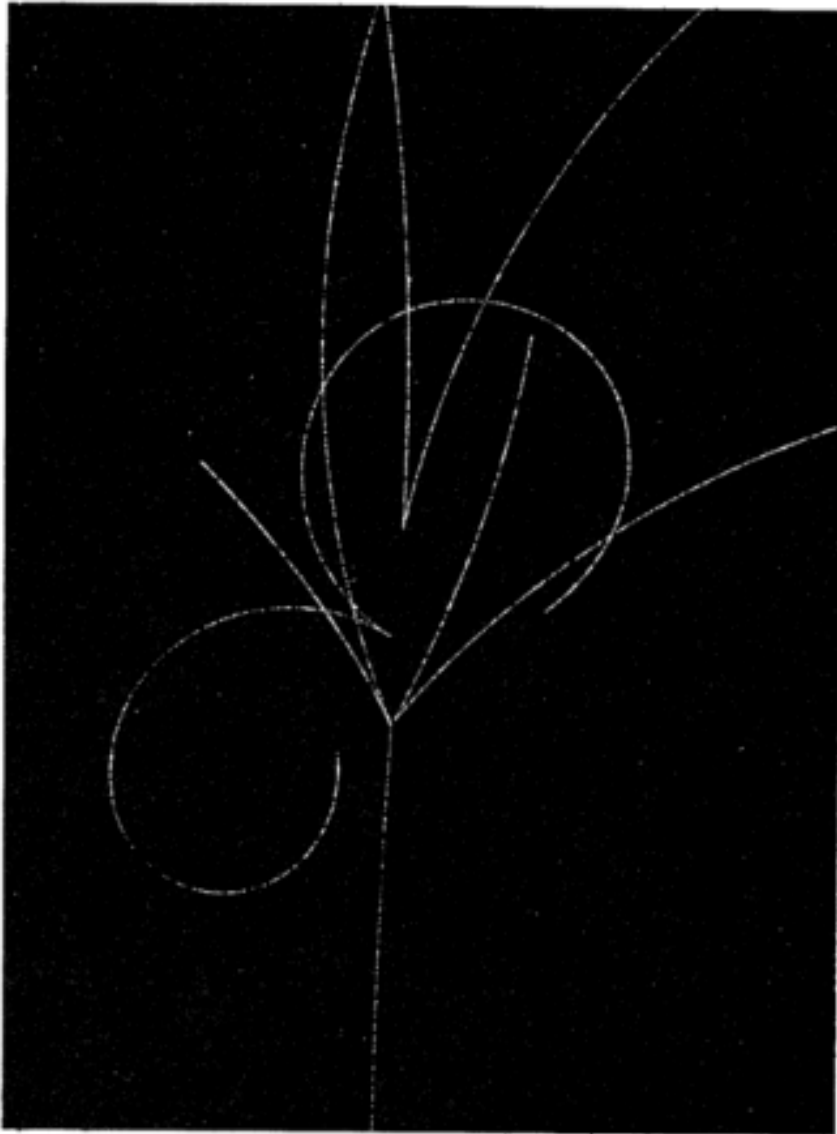
Materia och antimateria förintas i möte med varandra

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma, Q=2 \cdot 511 \text{ keV}=1.022 \text{ keV}$$



Upptäckt:

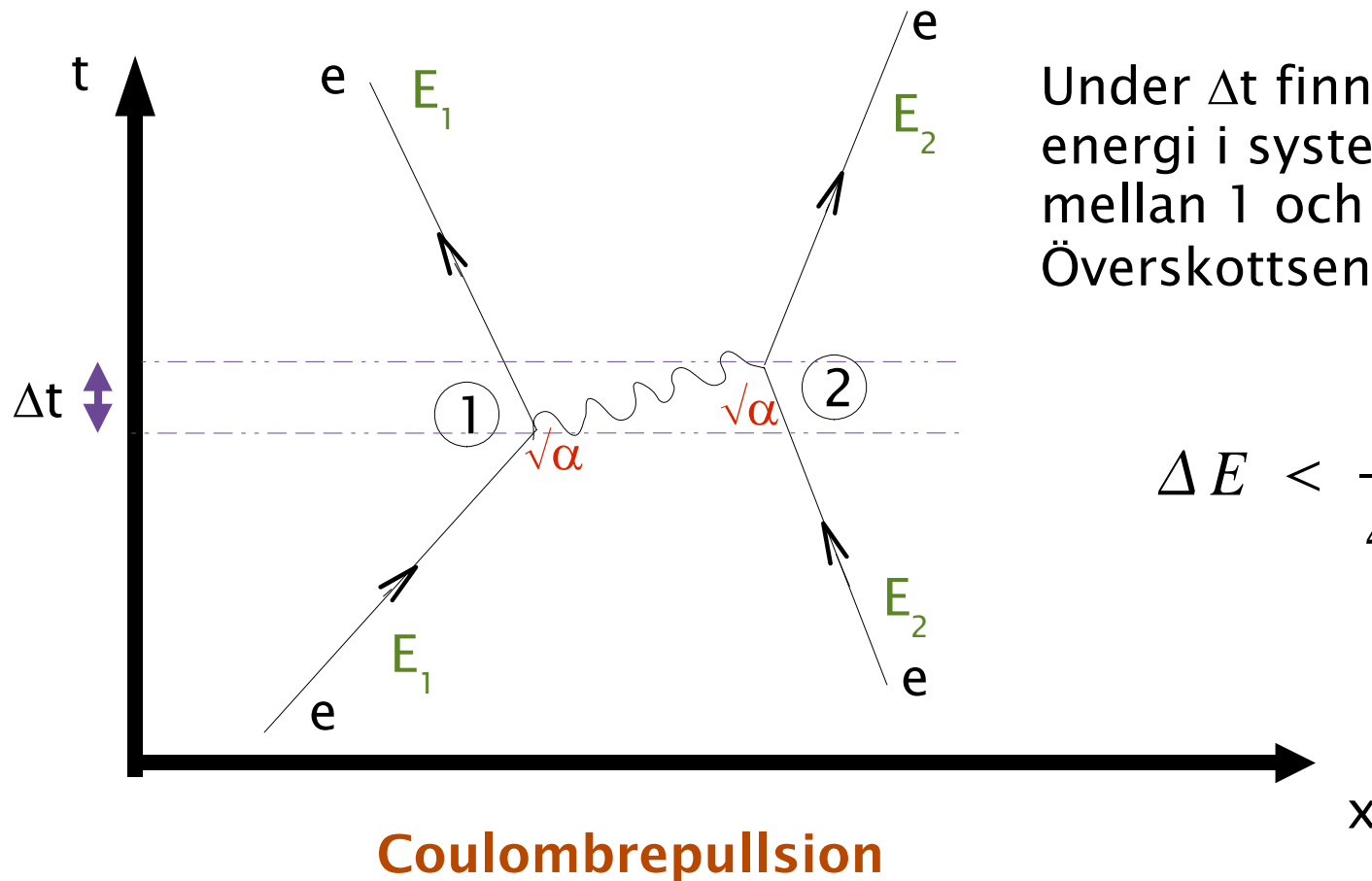
| | | | |
|---------------------|-----------------|------|-------------------|
| e^+ | positron | 1932 | Kosmisk |
| \bar{p} | antiproton | 1955 | Accelerator, USA |
| $^3\bar{\text{He}}$ | antiheliumkärna | 1972 | Accelerator. USSR |
| $\bar{\text{H}}$ | antiväteatom | 1995 | CERN. Schweiz |



Partikelkollision med vätekärna i Bubbekammare

Feynmandiagram

- Richard Feynman hitta på ett praktiskt sätt att beskriva elektromagnetisk växelverkan mellan partiklar som nu används vid visualisering av all kvantfältteori.



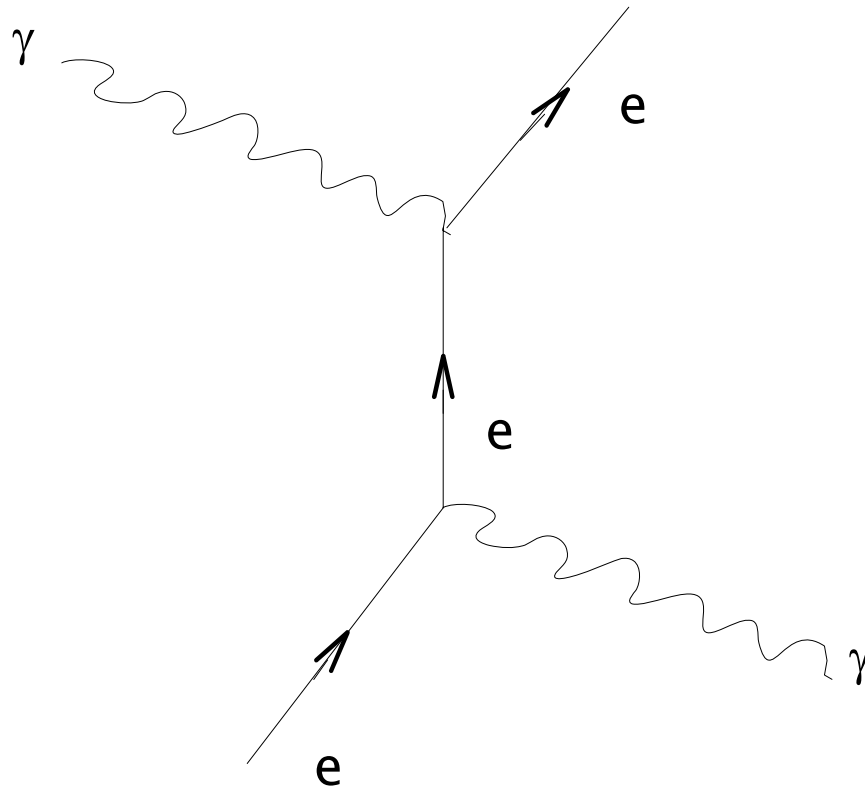
Under Δt finns överskottsenergi i systemet. Fotonen mellan 1 och 2 är virtuell. Överskottsenergin $\Delta E = E_\gamma$

$$\Delta E < \frac{\hbar}{\Delta t}$$

Punkterna 1 och 2 i diagrammet kallas vertex och sannolikheten för att processen skall ske α (kopplingskonstant) beror i första hand av vilken styrka växelverkan har.

Mellan 1 och 2 propagerar kvantat som överför den växelverkande kraften.

Ex:



Comptonspridning

Krafter

- I dag känner vi fyra fundamentala krafter
 - **Stark kraft**
 - **Elektromagnetisk kraft**
 - **Svag kraft**
 - **Gravitation**



Pressmeddelande: Nobelpriset i fysik 2004

5 oktober 2004

Kungl. Vetenskapsakademien har beslutat utdela 2004 års Nobelpris i fysik "för upptäckten av asymptotisk frihet i teorin för den starka växelverkan" gemensamt till

David J. Gross

Kavli Institute for Theoretical Physics vid University of California, Santa Barbara, USA,

H. David Politzer

California Institute of Technology (Caltech), Pasadena, USA, och

Frank Wilczek

Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, USA.

En färgstark upptäckt i kvarkarnas värld

Vad är det minsta som finns? Hur bygger dessa partiklar upp allt vi ser omkring oss? Vilka krafter verkar i naturen och hur fungerar de egentligen?

Årets Nobelpris i fysik berör dessa fundamentala frågor, som sysselsatt fysiker under hela 1900-talet och som fortfarande engagerar och utmanar såväl teoretiker som experimenter vid de stora partikelacceleratorerna.

Föreläsning 6 (k&p)

David Gross, David Politzer och Frank Wilczek har gjort en viktig teoretisk upptäckt som rör den starka kraften, eller "färgkraften" som den också kallas. Den starka kraften är den kraft som dominerar i atomkärnan, den som verkar mellan kvarkarna inuti protonen och neutronen. Det årets pristagare upptäckte var något som vid första anblicken kan tyckas helt motsägelsefullt. Tolkningen av deras matematiska formel blev nämligen att ju närmare varandra kvarkarna är, desto *svagare* blir "färgladdningen". När kvarkarna är riktigt nära varandra är kraften så svag att de nästan uppträder som fria partiklar. Detta, som beskriver vad som händer partiklarna när avstånden blir allt mindre utan att nå fram till noll, kallas asymptotisk frihet. Omvänt gäller när kvarkarna avlägsnar sig från varandra; kraften blir starkare när avståndet ökar. Egenskapen kan liknas vid ett vanligt gummiband. Ju längre man sträcker ut det, desto starkare blir kraften.

Upptäckten sammanfattades 1973 i en elegant matematisk formel som ledde till en helt ny teori, *kvantkromodynamiken*, QCD. Denna teori blev en viktig pusselbit i den s.k. standardmodellen, som beskriver all den fysik som är förknippad med den elektromagnetiska kraften (som verkar mellan laddade partiklar), den svaga kraften (som har betydelse för solens energiproduktion) och den starka kraften (som alltså verkar mellan kvarkar). Med kvantkromodynamikens hjälp kan fysikerna äntligen förklara varför kvarkarna endast uppträder som fria partiklar vid extremt höga energier. I protonen och neutronen följs de alltid åt tre och tre.

Med denna upptäckt har David Gross, David Politzer och Frank Wilczek tagit fysiken närmare uppfyllelsen av en storslagen dröm, nämligen en samlad teori som även innefattar gravitationen – en teori för allt.

Pressmeddelande: Nobelpriset i fysik 2008

7 oktober 2008

Kungl. Vetenskapsakademien har beslutat utdela Nobelpriset i fysik 2008 med ena hälften till

Yoichiro Nambu
 Enrico Fermi Institute, University of Chicago, IL, USA

"för upptäckten av mekanismen för spontan symmetribrott inom den subatomära fysiken"

och med den andra hälften gemensamt till

Makoto Kobayashi
 High Energy Accelerator Research Organization (KEK),
 Tsukuba, Japan

och

Toshihide Maskawa
 Yukawa Institute for Theoretical Physics (YITP), Kyoto
 University, och Kyoto Sangyo University, Japan

"för upptäckten av ursprunget till det symmetribrott som förutsäger att naturen måste ha minst tre familjer av kvarkar"

Passion för symmetri

Att världen inte ter sig som perfekt symmetrisk beror på avsteg från symmetrin redan på mikronivån.

Redan 1960 formulerade Yoichiro Nambu sin matematiska beskrivning av spontana symmetribrott inom elementarpartikelfysiken. Dessa spontana symmetribrott döljer naturens ordning under en till synes rörig yta. De har visat sig oerhört användbara och Nambus teorier genomsyrar partikelfysikens idag mest framgångsrika teori – standardmodellen. I den förenas alla materiens minsta byggstenar och tre av naturens fyra krafter i ett enda teoribygge.

Spontana symmetribrott som Nambu tog sig an skiljer sig från de symmetribrott som beskrivs av Makoto Kobayashi och Toshihide Maskawa. Dessa verkar höra naturen till från början och kom som en total överraskning när de först uppenbarade sig i partikelexperiment 1964. Först på senare år har man fått full bekräftelse för den förklaring som Kobayashi och Maskawa gav 1972 och som de nu får Nobelpriset för. De inordnade symmetribrottet i ramarna för standardmodellen, men villkoret för detta var att modellen måste utökas till tre kvarkfamiljer. De spekulativa nya kvarkarna dök mycket riktigt upp så småningom i fysikernas experiment. Och så sent som 2001 fann de två partikeldetektorerna BaBar i Stanford, USA och Belle i Tsukuba, Japan, oberoende av varandra, symmetribrott exakt såsom Kobayashi och Maskawa förutspådde nästan tre decennier tidigare.

Ett liknande symmetribrott ligger bakom hela världsalltets uppkomst i big bang för 14 miljarder år sedan. Om det då fanns lika mycket materia som antimateria borde de ha utplånat varandra helt. Så blev det inte, ett litet avsteg från symmetrin med en enda partikel materia extra på tio miljarder antimateriepartiklar fick vår värld att leva vidare. Exakt hur det gick till är fortfarande ett mysterium. Kanske kommer den nya partikelacceleratorn LHC vid CERN i Genève att ge avgörande ledtrådar till gåtans lösning.

Stark kraft

- Den starka växelverkan sker mellan kvarkar och är därmed orsaken till att nukleonen hålls ihop. Kvantat för den starka kraften heter gluon. Partiklar som växelverkar genom stark kraft kallas Hadroner (och består därför av kvarkar).

- Partiklar som består av två kvarkar kallas Mesoner: $q_1 \bar{q}_2$

$$\text{Ex. } \pi^+ : u\bar{d}, \pi^- : \bar{u}d, \pi^0 : (u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2}$$

$$K^+ : u\bar{s}, D^- : \bar{c}d, D_s^+ : c\bar{s}, B^- : \bar{u}b$$

- Partiklar som består av tre kvarkar kallas Baryoner: $q_1 q_2 q_3$

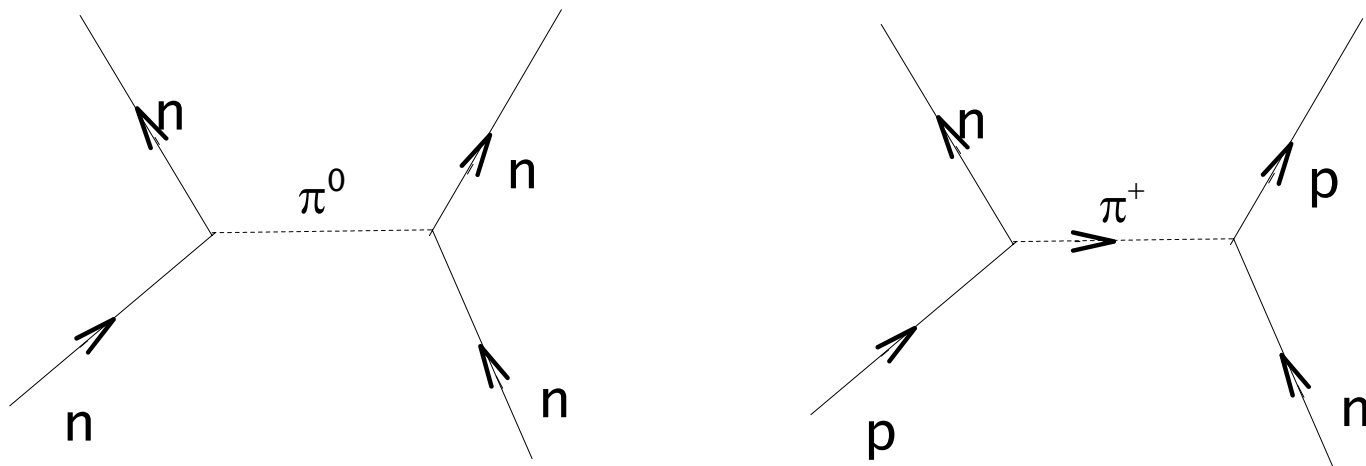
Nukleonerna (n och p) är baryoner

$$\text{Ex. } p : uud, n : udd, \bar{p} : \bar{u}\bar{u}\bar{d}$$

$$\Sigma^+ : uus, \Sigma^0 : uds, \Sigma^- : dds$$

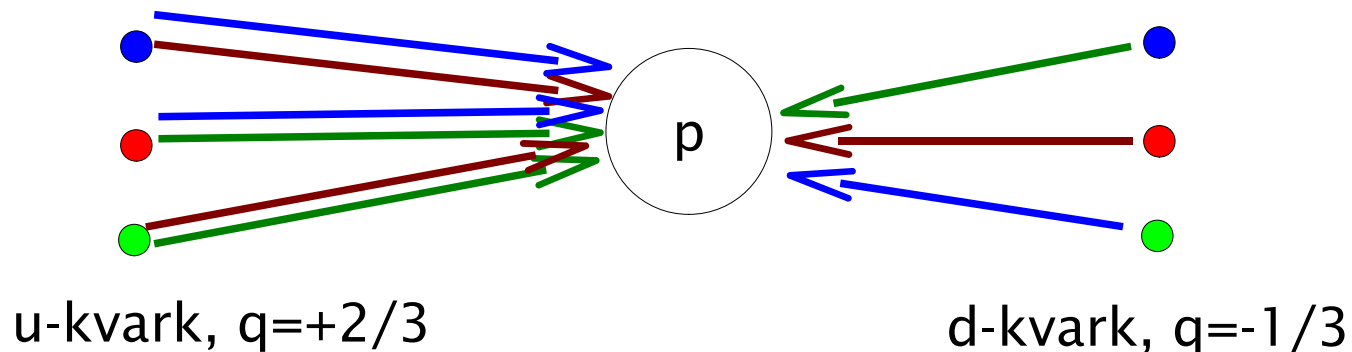
$$\Xi^0 : uss, \Omega^- : sss, \Lambda_c^+ : udc, \Lambda_b^0 : udb$$

- Även den starka kärnkraften som sker mellan nukleoner är stark växelverkan. π -mesonen förmedlar kraften under den korta tid Heisenbergs osäkerhetsrelation tillåter.
- Starka kraften har kopplingskonstanten α_s . (Relativ styrka = 1)



- Kvanttalet för stark växelverkan heter färg (color). Alla kvarkar kan anta en av tre färg kvanttal (röd, blå och grön). På samma sätt som uteslutningsprincipen säger att spin-1/2 partiklar inte kan besätta samma kvanttillstånd så kan inte samma färg ingå två gånger i en Hadron. Alla partiklar som existerar i naturen är färglösa. Detta är en av hörnstenarna i Kvant Kromodynamiken (QCD)

ex. Proton



Elektromagnetisk kraft

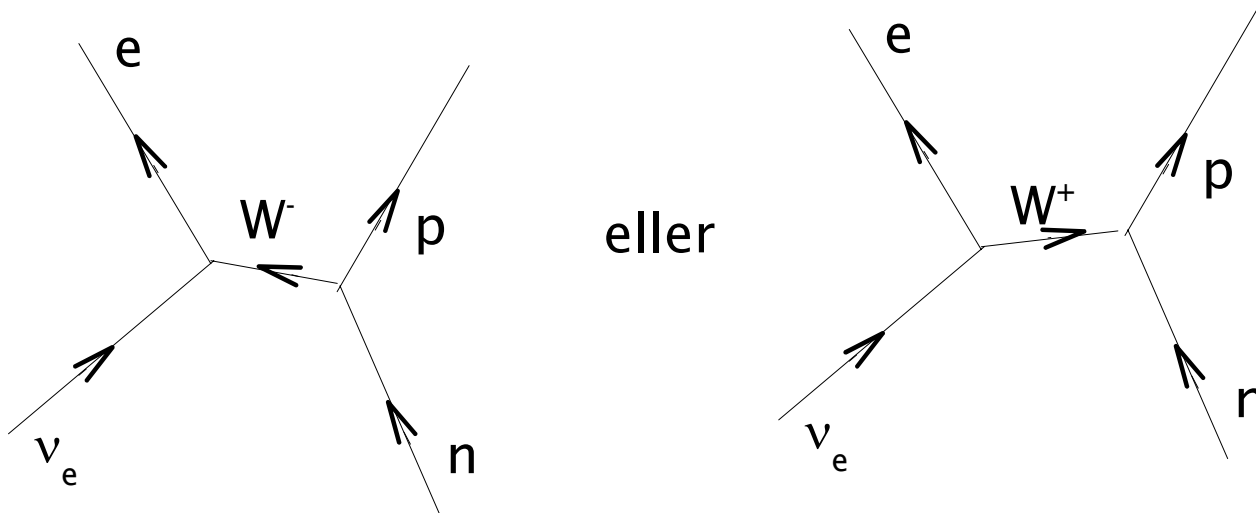
- Den elektromagnetiska växelverkan sker mellan laddade partiklar. Partikeln som förmedlar den elektromagnetiska kraften är fotonen. Räckvidden för den elektromagnetiska växelverkan är oändlig. Kvant elektrodynamiken (QED) beskriver den elektromagnetiska kraften och är antagligen den mest testade teori i världen.
- Elektromagnetiska kraften har kopplingskonstanten α_{EM} . (*Relativ styrka = 1/137*)

$$\alpha_{EM} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$$

Svag kraft

- Neutriner växelverkar enbart via svag växelverkan som är för svag att märkas då laddade partiklar växelverkar. Vid neutrino-växelverkan är endast svag växelverkan möjlig. Kraften förmedlas av W^+ , W^- och Z^0 bosonerna som är mycket tunga.

$$\begin{array}{ll} W^\pm: & m_W c^2 = 82 \text{ GeV} \\ Z^0: & m_Z c^2 = 91 \text{ GeV} \end{array} \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} W^\pm \\ Z^0 \end{array}} \right\} \text{ upptäcktes av C. Rubbia} \\ \text{CERN 1981}$$



Svaga krafterna p.g.a. bosonernas höga massa en mycket kort räckvidd.

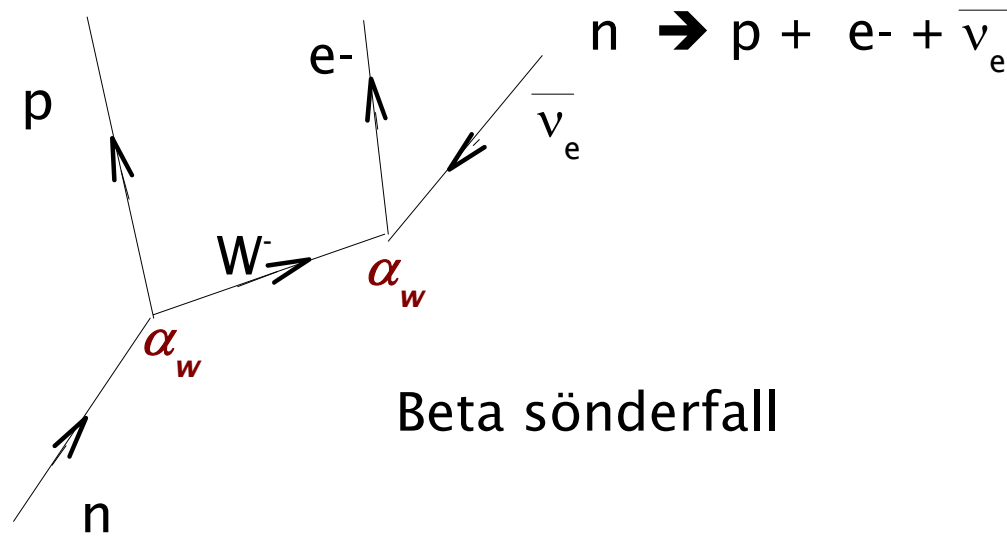
$$E = E_K + m_W c^2$$

$$\Delta t < \frac{\hbar}{E} = \frac{\hbar}{E_K + m_W c^2} < \frac{\hbar}{m_W c^2}$$

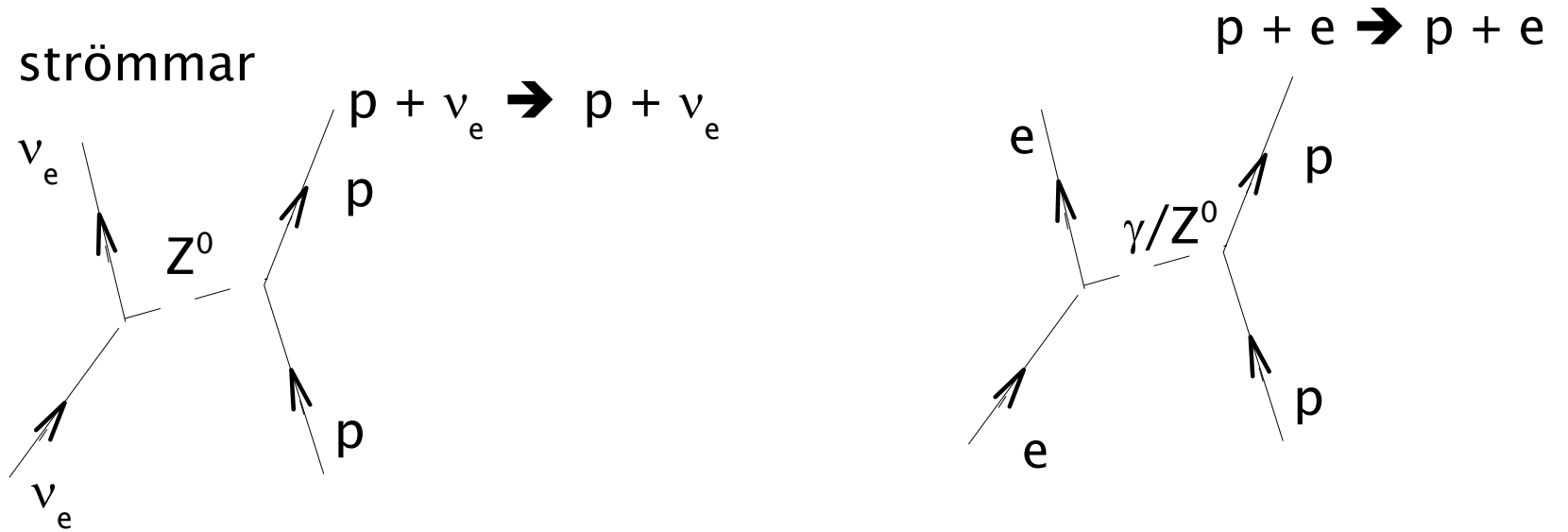
$$\Delta s = c \Delta t < \frac{\hbar c}{m_W} = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ fm}$$

400 ggr mindre än protonens storlek

Svaga kopplingskonstanten α_w . (Relativ styrka $\sim 10^{-5}$)



•Neutrala strömmar



Växelverkan mellan e och p sker genom en kombination av elektromagnetisk kraft + svag kraft = elektrosvag växelverkan

Gravitation

- Alla partiklar med massa växelverkar via gravitation. Gravitationen förmedlas av kvantat graviton som antas vara masslös. I likhet med den elektromagnetiska växelverkan är gravitationens utbredning oändlig. Gravitationen är mycket svag i förhållande till de övriga krafterna med relativ styrka 10^{-38} .