

Föreläsning 8

Elementarpartiklar, bara kvarkar och leptoner

- Bevarandelagar i reaktioner MP 13-3
- Elementarpartiklarnas "periodiska system"
- Standard Modellen och kraftförening MP 13-4
- Vad härnäst? MP 13-5

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

Bevarandelagar i reaktioner

Vi har tidigare lärt oss att i reaktioner bevaras:

- Den totala energin, E_{tot}
- Rörelsemängden, p
- Totala impulsmomentet, J
- Laddningen, Q

Vi skall nu introducera några fler egenskaper som bevaras i partikelreaktioner.

• **Baryoner** som består av tre kvarkar, t.ex. neutronen och protonen har baryontal $B=1$. Anti-baryoner har baryontal $B=-1$.

• **Leptoner** (e, ν, μ, \dots) har leptontal $L=1$. Varje generation har sitt eget leptontal (L_e, L_μ, L_τ)

	B	L
p	1	0
\bar{p}	-1	0
π	0	0
e^-	0	1
e^+	0	-1
ν_e	0	1
$\bar{\nu}_e$	0	-1

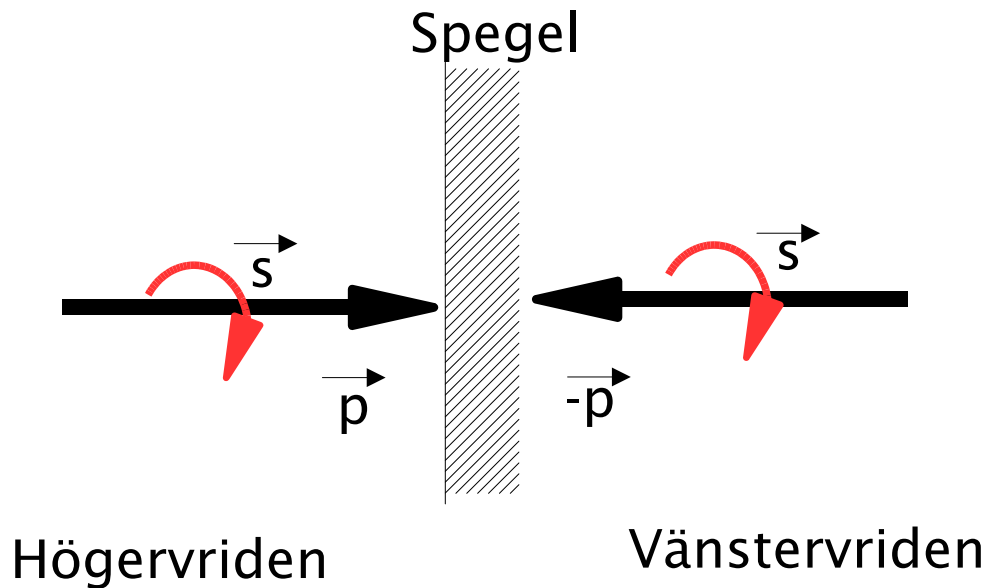
Baryontal och Leptontal bevaras i alla reaktioner

	e^-	p	\rightarrow	n	n	
Q:	-1	+1		0	0	✓
B:	0	+1		+1	+1	✗
L:	1	0		0	0	✗

	e^-	p	\rightarrow	n	ν_e	
Q:	-1	+1		0	0	✓
B:	0	+1		+1	0	✓
L:	1	0		0	1	✓

- **Paritet** har med koordinatförändringa att göra. Paritetsoperatorn speglar koordinatsystemet.

$$P \Psi(x) \rightarrow \Psi(-x)$$



Helicitet:
 högervriden = +
 vänstervriden = -

Beroende på om vågfunktionen är udda eller jämn kan man särskilja mellan positiv och udda paritet. En del partiklar har jämn vågfunktion och därmed positiv paritet andra har udda och negativ paritet.

$$\begin{aligned} \Psi(-x) &= +\Psi(x) && \text{positiv paritet (jämn)} \\ \Psi(-x) &= -\Psi(x) && \text{negativ paritet (udda)} \end{aligned}$$

Högervridna partiklar blir vänstervridna och vice versa av paritetsoperatören. Däremot behåller vågfunktionen tecken om den är jämn eller så ändras det om vågfunktionen är udda. Kraftverkan lika oavsett spinnets riktning i förhållande till rörelseriktning.

Observera att paritet är en multiplikativ variabel till skillnad från de övriga (laddning, leptonantal, energi) som är additiva.

Följande gäller för pariteten hos grundtillstånd

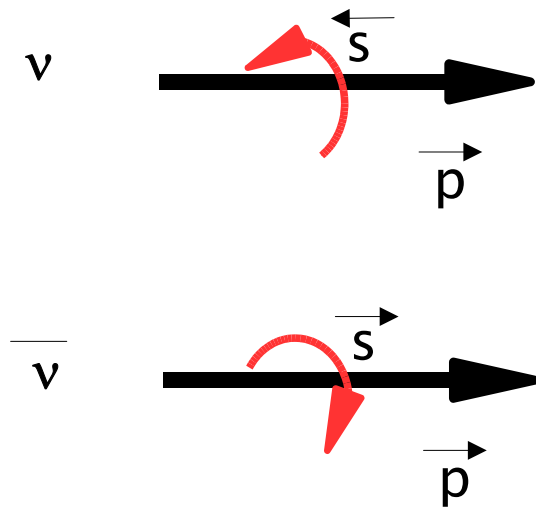
	P
Baryoner	+1
Mesoner	-1
Leptoner	+1
Foton	-1

Paritet och banimpulsmomentet L är relaterade:

$$P = (-1)^L$$

Därför kan exciterade tillstånd ha annan paritet än grundtillståndet beroende av L .

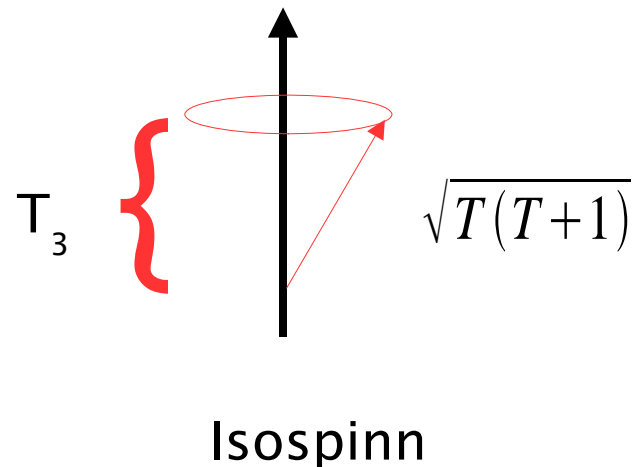
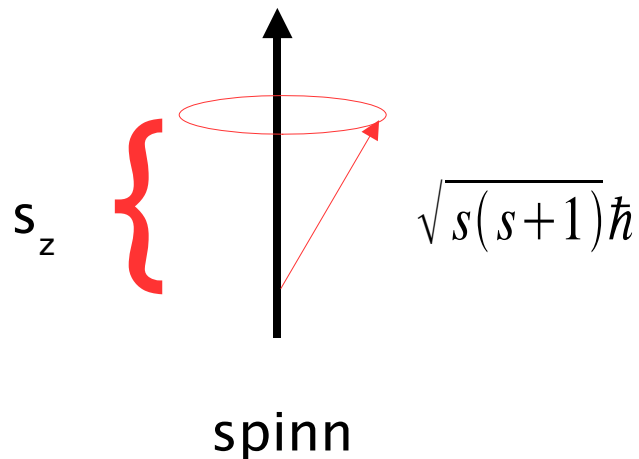
Paritet bevaras i både stark och elektromagnetisk växelverkan men EJ i svag växelverkan. (*Orsaken är att naturen är skapt utan högervridna neutriner. Kvarkar och laddade leptoner kan vara både höger och vänster vridna*)



• Isospinn T , projektion T_3

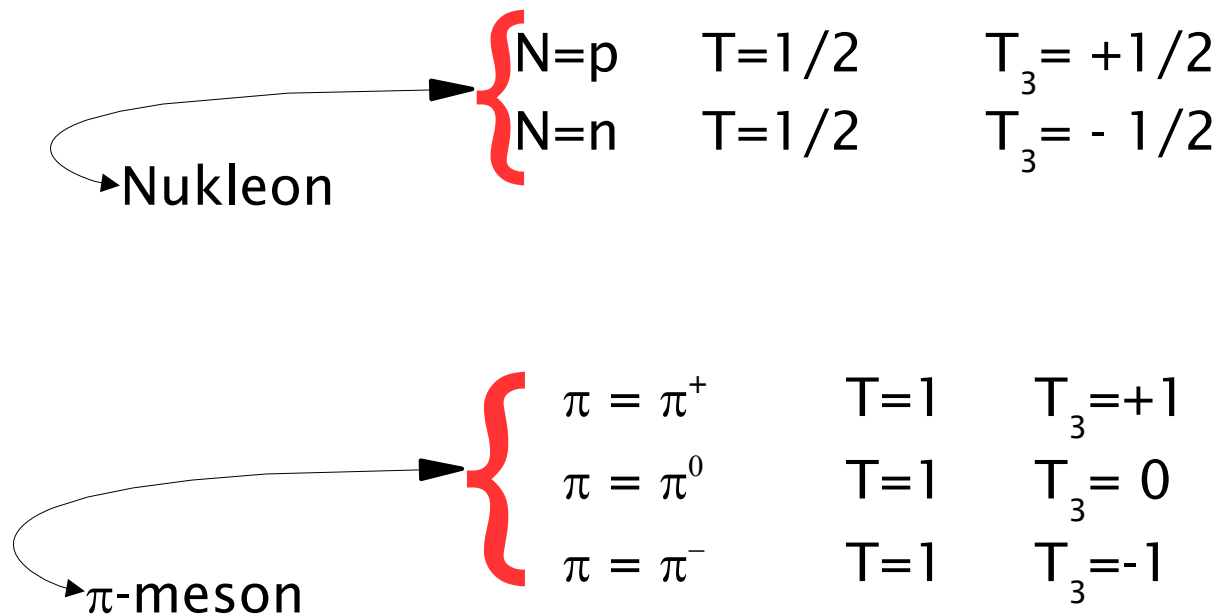
Isospinn används för att beskriva partiklars olika massa som en elektromagnetisk egenskap, formalismen är hämtad från spinn formalismen där t.ex. spinn-1/2 partiklar kan anta 2 projektion $s_z = \pm 1/2$.

$$q = eQ = e(T_3 + B/2)$$



Liksom elektrostatiska kraften mellan två elektroner är oberoende av spinnriktningen så är starka kärnkraften mellan pn, nn eller pp lika stor oberoenda av riktningen hos T_3 .

I isospinnformalismen är t.ex. n och p projektioner av samma isospinn.



Isospinn bevaras vid stark växelverkan men ej i elektromagnetisk och svag växelverkan. Isospinnprojektionen bevaras både i stark och elektromagnetisk växelverkan

Kvarkar och leptoner är uppdelade i 3 generationer. Vi har nu endast behandlat den första generationen där u- och d- kvarken samt e och ν_e ingår. För att studera reaktioner mellan kvarkar från olika generationer måste nya kvanttal införas.

T.ex. Kaonen (K-mesonen) består av en kvark ur generation I och s-kvarken ur generation II.

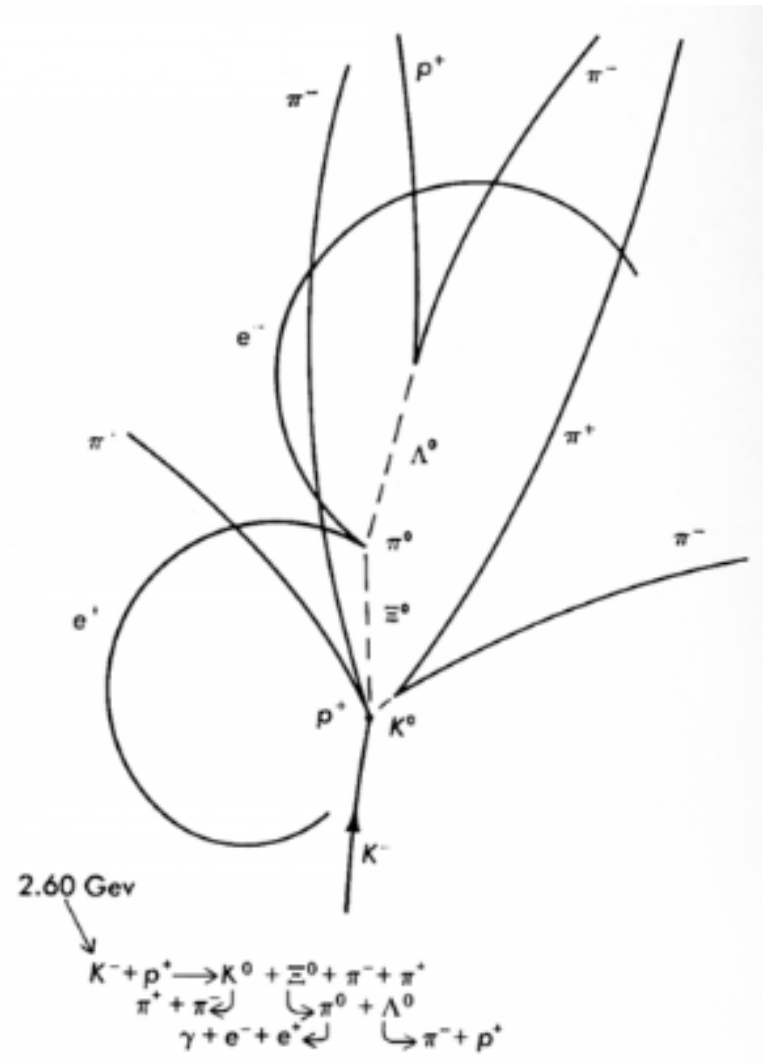
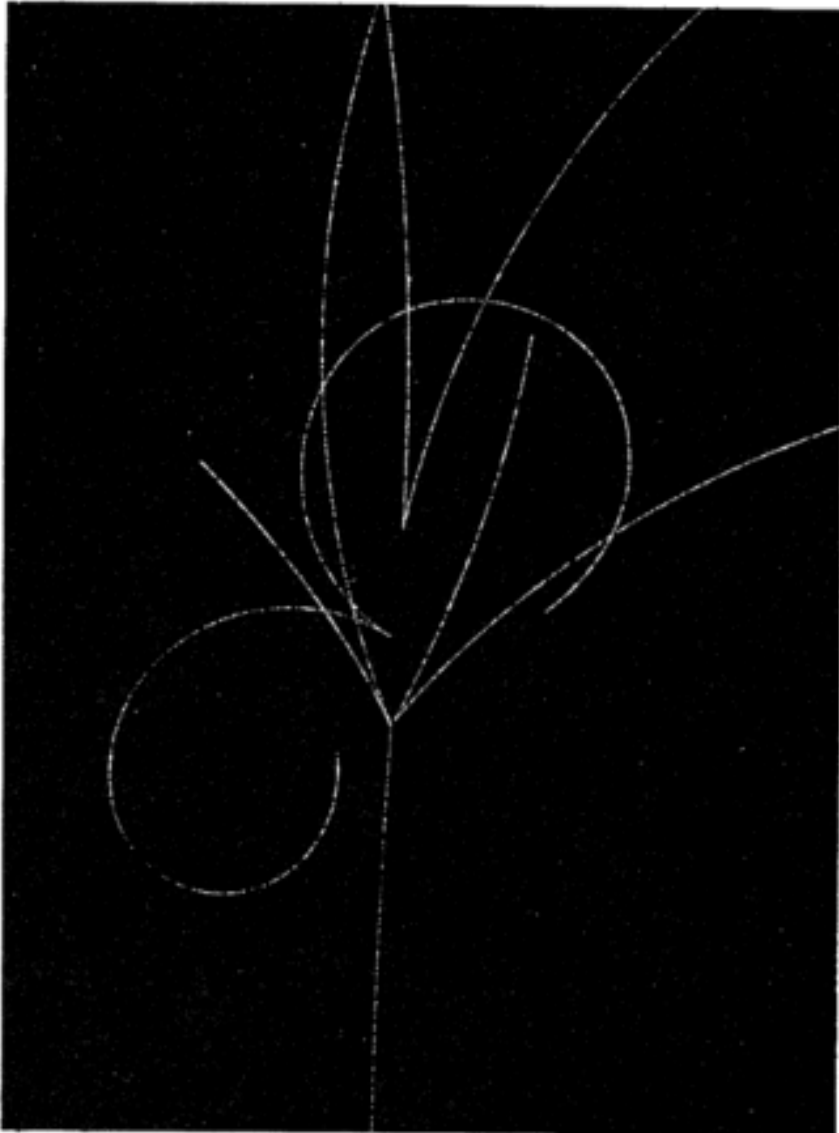
$$\begin{array}{ll}
 K^+ & u\bar{s} \\
 K^- & \bar{u}s \\
 K^0 & \bar{d}s
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} K^+ \\ K^- \\ K^0 \end{array}} \right\}
 \begin{array}{l}
 m(K^\pm) = 493 \text{ MeV} \\
 m(K^0) = 497 \text{ MeV}
 \end{array}$$

Lambda (baryonen) är en "neutron" där en d-kvark ersatts med en s-kvark.

$$\Lambda^0 \quad uds \quad m(\Lambda^0) = 1115 \text{ MeV}$$

Om stark växelverkan skulle fungera mellan generationer skulle man förvänta sig att K-meson snabbt sönderfaller till π -mesoner.

Experiment visar dock att K-mesonen tar en god tid på sig innan den sönderfaller till π -mesoner. (*Spårens längd cm i stället för 10 fm*)



Detta ledde till ett nytt kvanttal, särantal (strange) och betecknas S.
S är -1 för var s-kvark och +1 för anti-kvark

	S
K^+	+1
K^-	-1
Λ^0	-1
Ξ^0	-2
n	0
p	0
π	0

S bevaras av starka krafterna men ej av svaga krafterna

	π^-	p	\rightarrow	K^0	Λ^0	
Q	-1	+1		0	0	✓
B	0	+1		0	+1	✓
T	1	$\frac{1}{2}$		$\frac{1}{2}$	0	✗
T_3	-1	$+\frac{1}{2}$		$-\frac{1}{2}$	0	✓
S	0	0		+1	-1	✓

Processen tillåts ej av den starka kraften eftersom isospinn inte bevaras. Sönderfallet tillåts däremot genom EM kraft.

I sönderfallet

$$\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0 + \pi^0$$

bevaras även isospinn och kan således ske genom stark kraft.

	K^0	\rightarrow	π^+	π^-	
Q	0		0	0	✓
B	0		0	0	✓
T_3	-1/2		+1	-1	✗
S	+1		0	0	✗

processen tillåts EJ av den starka kraften men tillåts av den svaga.

Särtalet kan beräknas ur andra kvanttal enligt:

$$S = 2(Q - T_3) - B$$

proton $S = 2(1 - 1/2) - 1 = 0$

neutron $S = 2(0 + 1/2) - 1 = 0$

K^+ $S = 2(1 - 1/2) - 0 = +1$

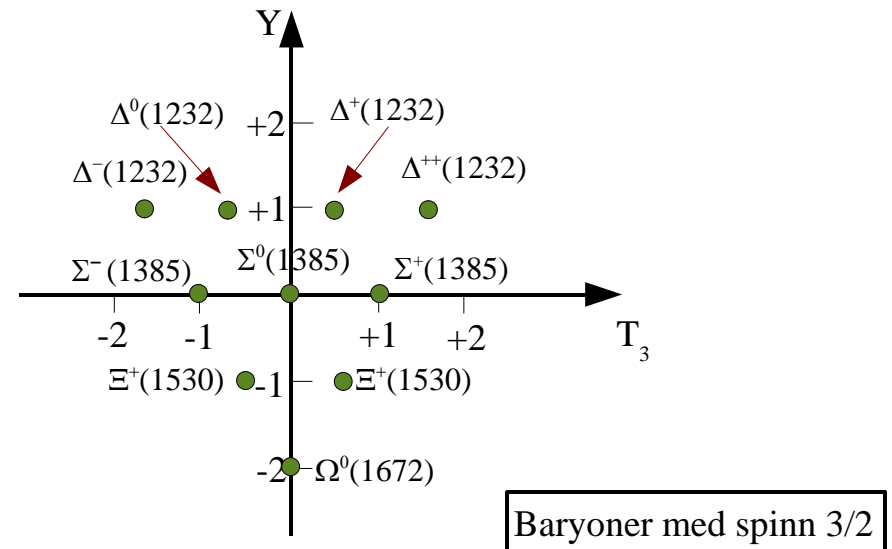
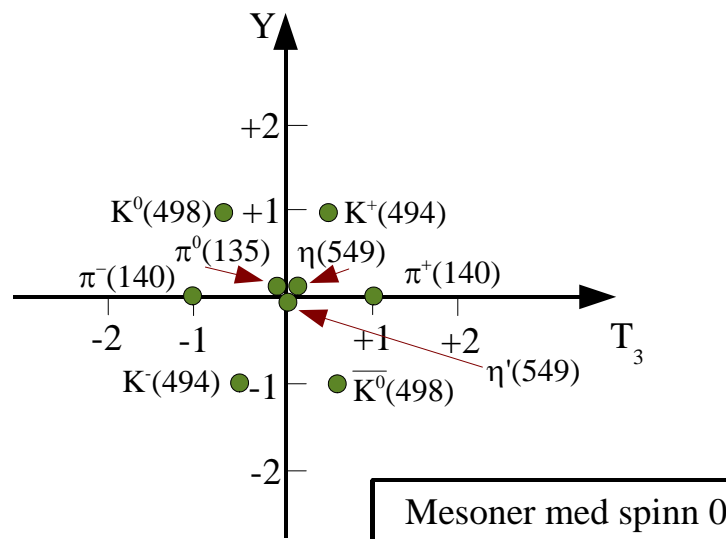
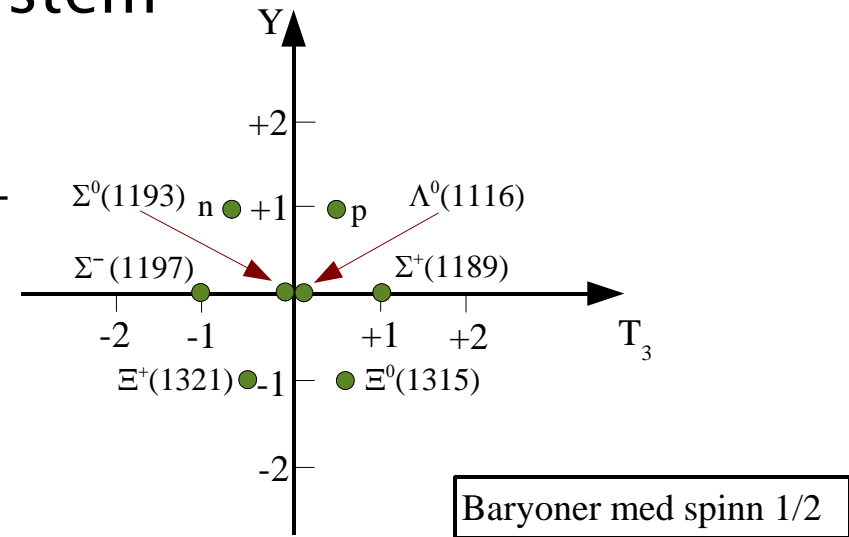
K^0 $S = 2(0 + 1/2) - 0 = +1$

Eftersom Q, B, T_3 och S korrelerar med varandra kan vi definiera ett kvanttal Hyperladdning Y:

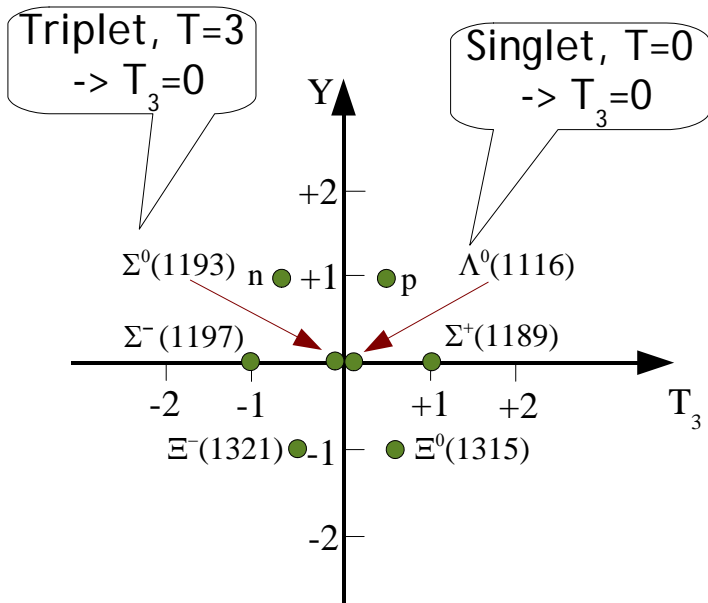
$$Y = S + B = 2(Q - T_3)$$

Elementarpartiklarnas periodiska system

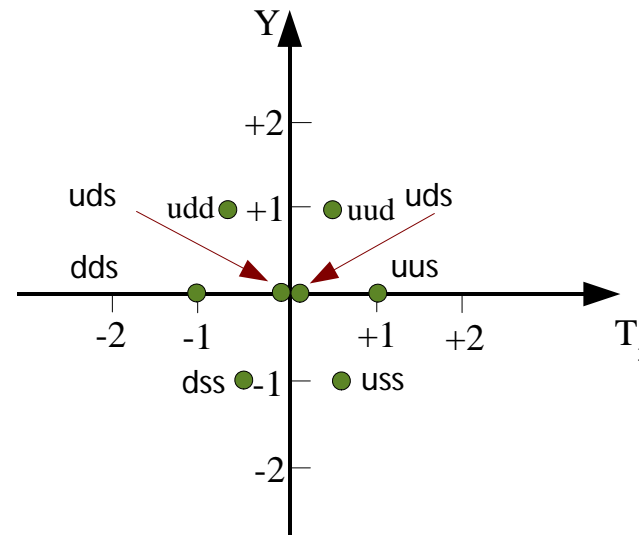
Om man presenterar hyperladdning mot iso-spinn i en graf så upptäcker man att det finns en struktur! Denna struktur är en följd av den matematiska grupp-teorin som elementarpartikelfysiken bygger på. Graferna bygger på SU(3) grupp teori där Isospinn och hyperladdning utgör 4 av totalt 8 komponenter i 3 x 3 Lie grupp. SU(3) leder till multipletter om (1,3,8,10....)



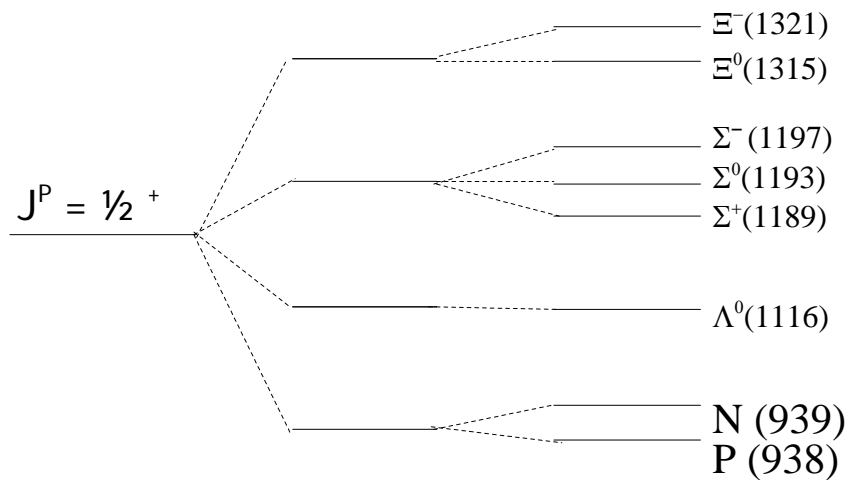
Baryoner med spinn 1/2



Baryoner och deras vilooenergi



Baryoner och deras kvarksammansättning



Energiniå diagram liknande atomens/atomkärnans!

Bevarandelagar:

Bevarad kvantitet	Stark	EM	Svag
Energi	Ja	Ja	Ja
Rörelsemängd	Ja	Ja	Ja
Laddning	Ja	Ja	Ja
Baryontal	Ja	Ja	Ja
Leptontal	Ja	Ja	Ja
Isospin	Ja	Nej	Nej
Hyperladdning	Ja	Ja	Nej
Särtal	Ja	Ja	Nej
Paritet	Ja	Ja	Nej

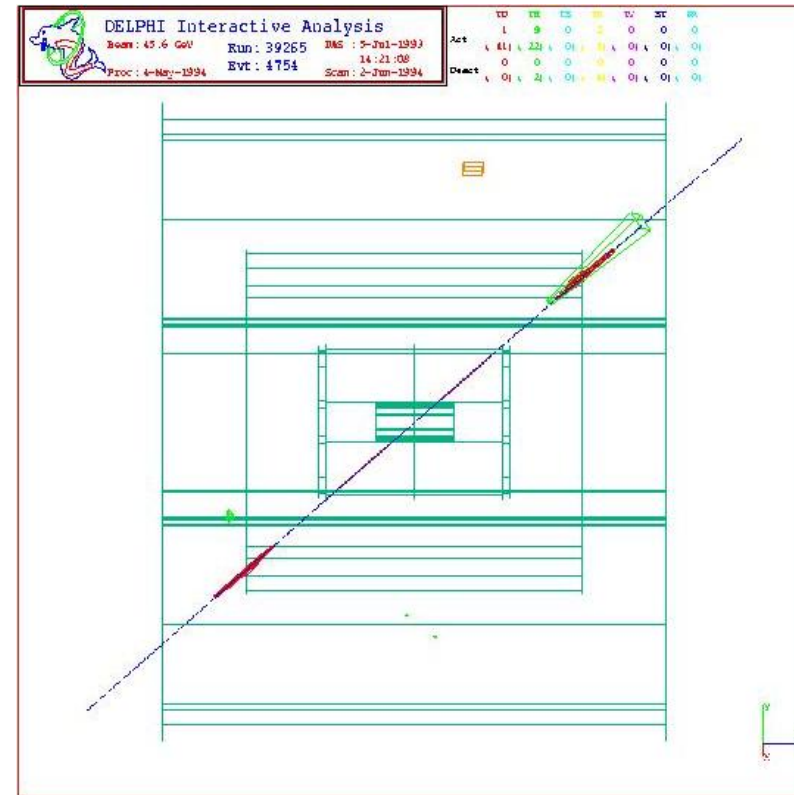
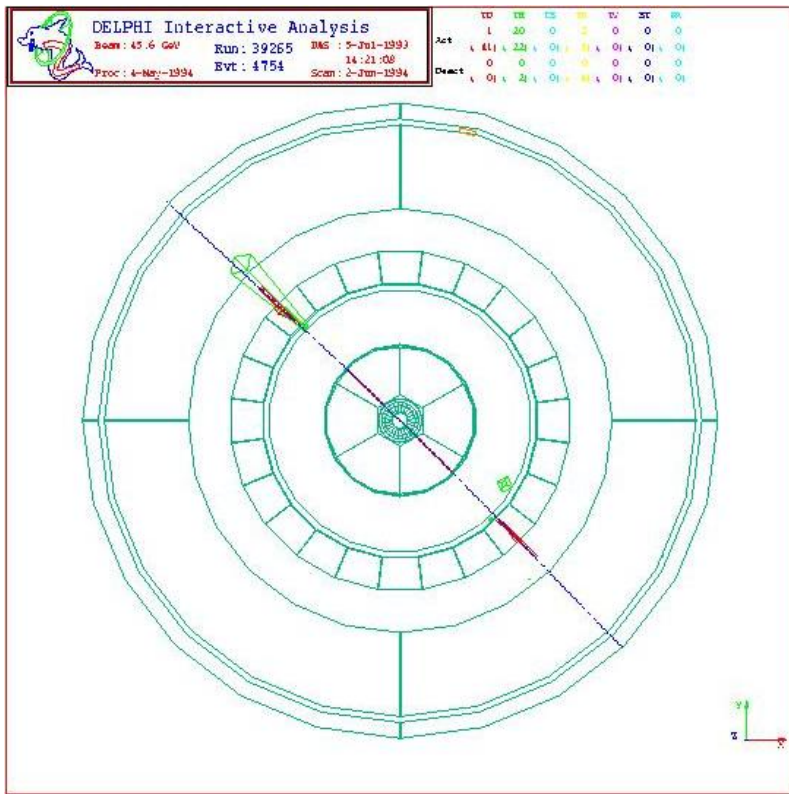
Egenskaper för Hadroner och leptoner m.m hittas i PH T-7.2 (s.125-129)

I likhet med särkvarkens kvanttal finns det kvanttal för de övriga kvarkana i generation II och III

Standard Modellen i ett nötskal

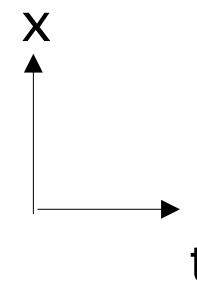
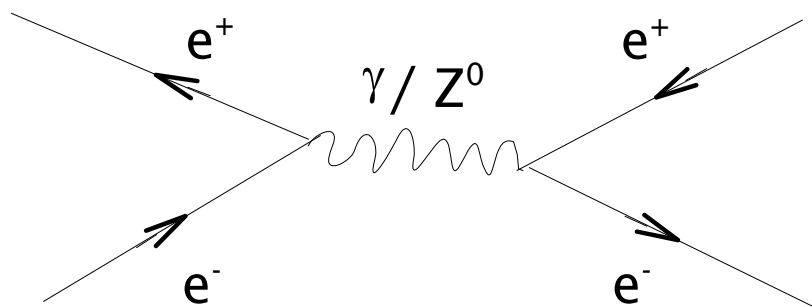
- Standard Modellen (från 1978) beskriver elementarpartiklarna och fundamentala krafter. Standard Modellens hörnstenar är kvant kromodynamiken (QCD) som beskriver den starka kraften och den elektrosvaga teorin (*utvecklad av Weinberg, Salam och Glashow på sent 60-tal*) som sammanbinder den svaga och elektromagnetiska kraften till en och samma kraft .
- Standard Modellen har tre generationer av spinn-1/2 kvarkar och leptoner som bygger upp all materia.
- Kraft överförs av spinn-1 bosoner där 8 st gluoner bär den starka kraften och fyra bosoner överför den elektro-svaga kraften (γ , Z^0 , W^+ och W^-). Fotonen har ingen massa och överför den elektromagnetiska kraften medan de tre övriga är massiva och överför "elektro-svag" ström.
- Standard Modellen har ännu inte lyckats besvara frågan varför hadroner och leptoner har massa (och orsaken till att massorna skiljer sig mellan generationer). Forskare hoppas finna Higgs bosonen som bekräftar att det finns ett Higgs-kraftfält. Partiklarna får sin massa genom att växelverka med Higgs-fältet.

Z⁰ bosonen sönderfaller till leptoner, sedd i DELPHI detektorn

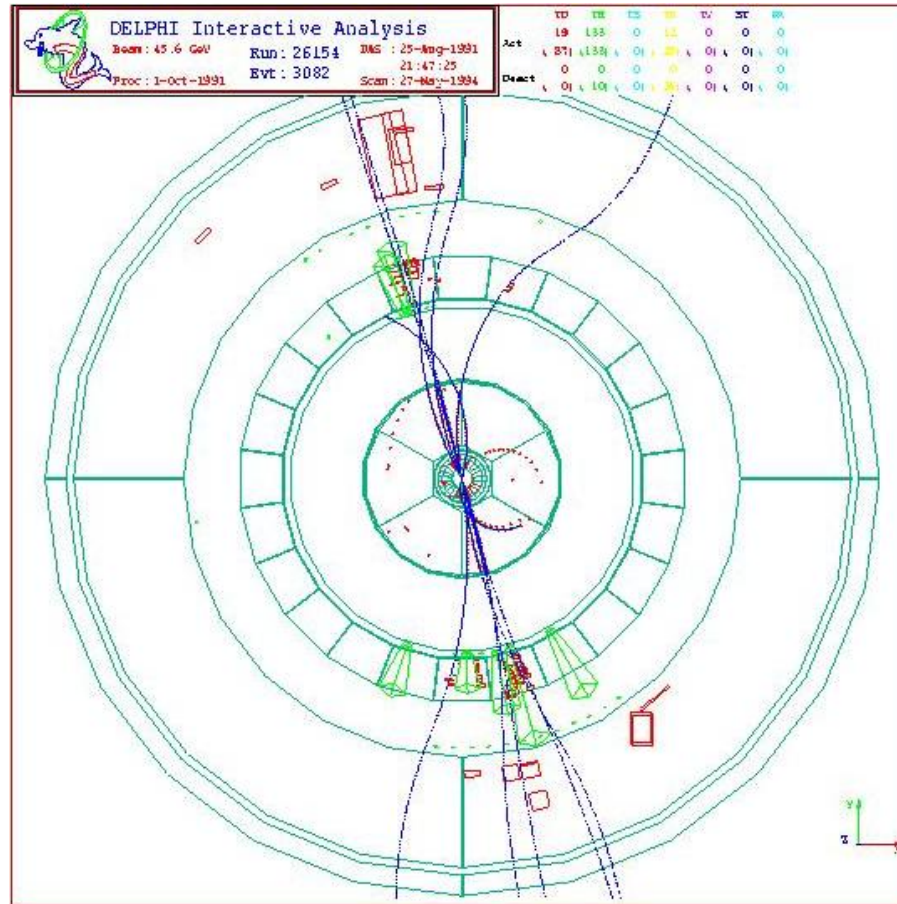


xy-projektion

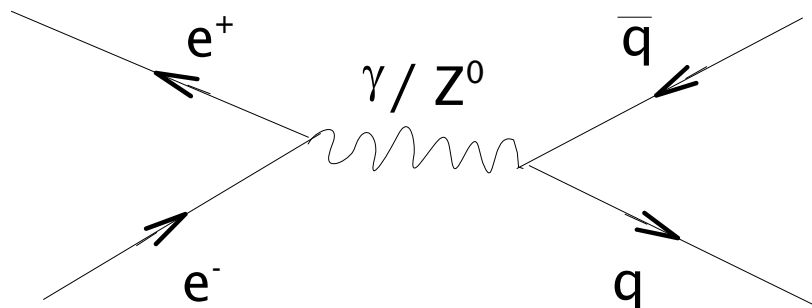
z-projektion



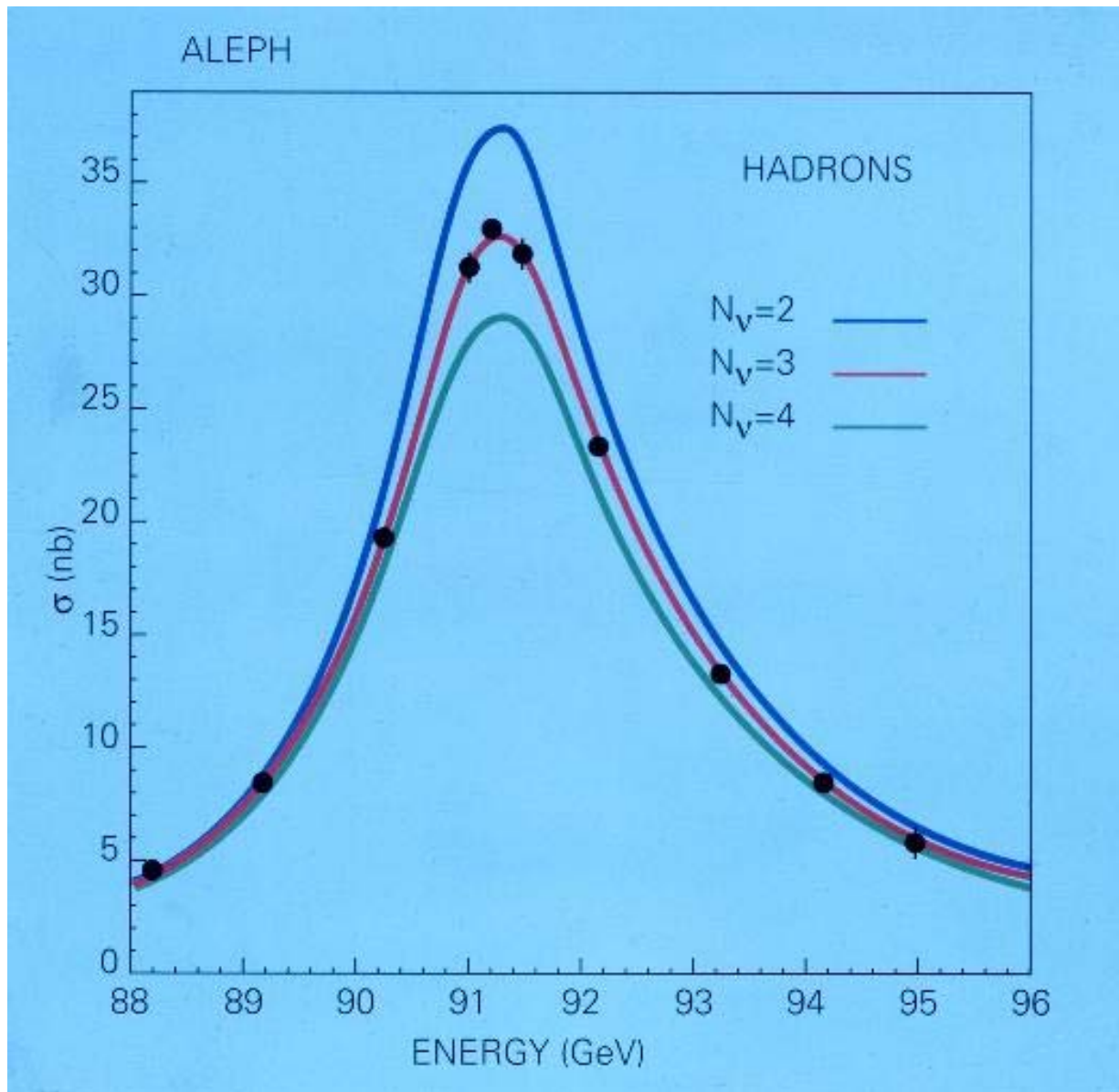
Z^0 bosonen sönderfaller till kvarkar



xy-projektion



Bevis för 3 generationer



Genom att beräkna tvärsnittet för alla reaktionersom tillåts av SM och jämföradetta med experimentellt data kan man visa att SM endast har plats för 3 generationer

Sammanfattning i repris

FERMIONS matter constituents spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...					
Leptons spin = 1/2			Quarks 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

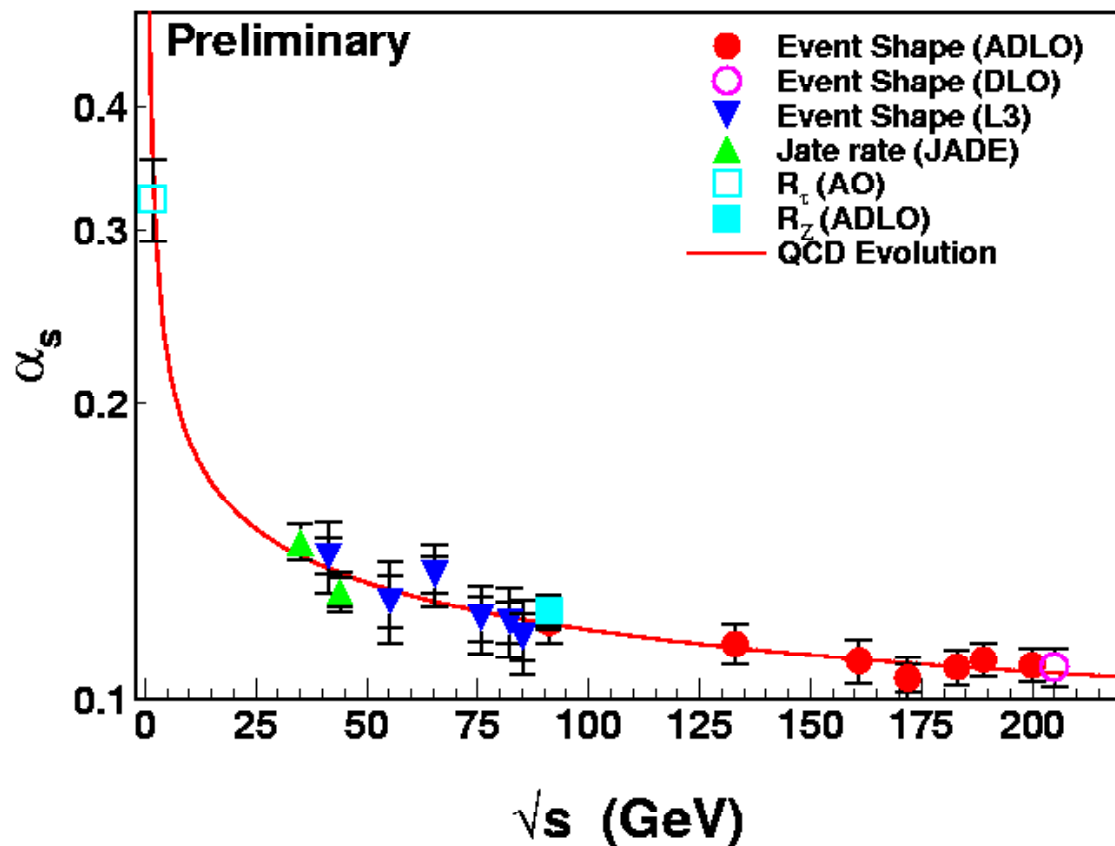
PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

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	20

Kraftförening

- Flera framstående fysiker har kämpat för att hitta en "teori om allting". Standard Modellen beskriver väl den fysik vi kan experimentellt uppnå men den är fortfarande långt ifrån en "teori om allting". I SM ingår t.ex. inte gravitation.
- En gåta som gäcker forskarna är varför vi har fyra olika krafter? Maxwell visade redan 1865 att magnetism och elektrostatiska krafter kunde sammanbindas i en teori där ett vektorfält växelverkade med ström och laddning. I teorin ingick en godtycklig konstant c som kallades ljusets hastighet vars värde inte kunde förutspås av teorin utan måste experimentellt uppmätas.
- Standard Modellen förenar elektromagnetiska krafter med den svaga krafter i en teori. Denna teori har också en del parametrar som inte förutspås av teorin utan måste uppmätas.
- Naturligt är att önska sig att de krafter vi har i dag egentligen är olika former av samma grundkraft.

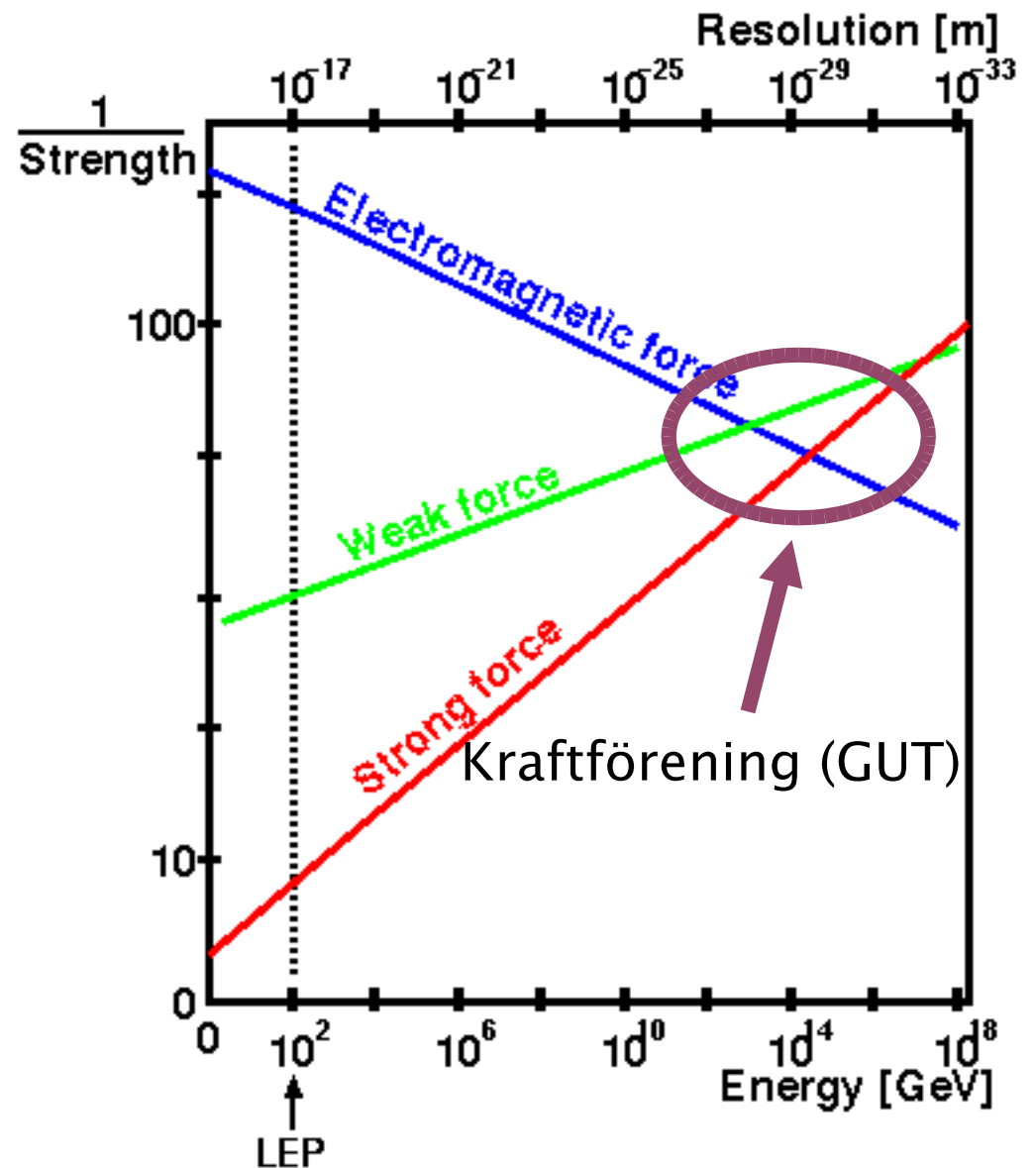
Starka kraften & asympnotisk frihet



Kopplingskonstante
rnas ($\alpha_s, \alpha_w, \alpha_{em}$)
styrka är i själva
verket inte
konstanta utan de
varierar med energi.

Den elektromagnetiska växelverkan ökar med energi medan den svaga och starka minskar med energi.
Vid tillräckligt hög energi blir den starka växelverkan så svag att kvarkarna kan ses som fria partiklar, detta kallas asympnotisk frihet.

Kopplingskonstanten α 's styrka är olika vid olika energier. Experimentella mätningar visar att med ökad energi minskar skillnaden i styrka mellan de olika krafterna. Om man extrapolerar de olika krafterna så ser de ut att sammanfalla vid ca. 10^{15} GeV. Vägen till Grand Unification Theory är dock lång men tidigare erfarenhet säger att mycket spännande kommer att inträffa på vägen.



Mera partikelfysik?

- För hugade personer fins möjlighet att ansöka om sommar student jobb på CERN i Geneve. Information hittar ni här:

humanresources.web.cern.ch/HumanResources/external/recruitment/students/summ/summ.asp