

# Standardmodellens partikler og kræfter

Af Esben Bryndt Klinkby, Niels Bohr Institutet, Københavns Universitet.

Eksperimenter har vist at atomer i sig selv ikke er fundamentale, men består af elektroner, protoner og neutroner. Så vidt vides er elektronen fundamental, hvorimod protoner og neutroner er opbygget af kvarker. Udover de byggesten der er nødvendige for at opbygge atomer – og dermed alt stoffet omkring os – findes der også andre fundamentale partikler. Denne artikel opsummerer de fundamentale partikler vi kender til idag og kræfterne der virker imellem dem.

## Byggestenene: Kvarker og leptoner

- **Kvarker:** kan kombineres til protoner, neutroner, pioner osv.
- **Leptoner:** er partikler såsom elektroner og neutrinoer. Leptoner indgår ikke i opbygningen af protoner og neutroner, og dermed ikke i opbygningen af kernestof.

Såvidt vides er både leptoner og kvarker fundamentale, hvilket vil sige at de ikke har nogen indre struktur.

## Klassificering

Kvarker og leptoner klassificeres i tre familier ud fra deres ladning og masse:

### Kvarker

Ladning/ $ e $	1. familie	2. familie	3. familie
$+2/3$	Up (u) [1,5-3,0] MeV/c <sup>2</sup>	Charm (c) [1,2-1,3] GeV/c <sup>2</sup>	Top (t) [171-176] GeV/c <sup>2</sup>
$-1/3$	Down (d) [3-7] MeV/c <sup>2</sup>	Strange (s) [70-120] MeV/c <sup>2</sup>	Bottom (b) [4,1-4,3] GeV/c <sup>2</sup>

En elektronvolt, eV, er den energi en elektron opnår ved at gennemløbe et spændingsfald på 1V;  $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ . Da masse ifølge Einstein kan skrives:  $m = E/c^2$  bliver partikelfysikkens enhed for masse:  $\text{eV}/c^2$ . Bemærk de store forskelle i masserne: topkvarken er 100.000 gange tungere end up-kvarken.

### Leptoner

Ladning/ $ e $	1. familie	2. familie	3. familie
$-1$	Elektron (e) 0,51 MeV/c <sup>2</sup>	Myon ( $\mu$ ) 106 MeV/c <sup>2</sup>	Tau ( $\tau$ ) 1,8 GeV/c <sup>2</sup>
0	Elektron-neutrino ( $\nu_e$ ) < 2 eV/c <sup>2</sup>	Myon-neutrino ( $\nu_\mu$ ) < 2 eV/c <sup>2</sup>	Tau-neutrino ( $\nu_\tau$ ) < 2 eV/c <sup>2</sup>

Bemærk også her de store forskelle i masserne: En  $\tau$ -partikel vejer 3500 gange mere end en elektron. 2. og 3. familie er kopier af den 1. familie og afviger primært fra denne ved deres højere masse. Grunden til at vi i naturen næsten udelukkende finder partikler fra første familie, skyldes et vigtigt begreb i partikelfysikken, nemlig stabilitet. For partikler fra 2. og 3. familie eller sammensætninger af sådanne, er det energimæssigt fordelagtigt at henfalde til partikler fra

1. familie, hvilket kan indses ud fra Einsteins masse-energi relation:  $E = mc^2$ . Tunge partikler er energirige, og kan derfor henfalde til lettere partikler, hvorimod det modsatte generelt ikke finder sted i naturen. Protoner, som med kvarknotation skrives (*uud*) og elektroner er simpelthen stabile fordi de er de letteste af deres slags, og de har altså ikke noget at henfalde til, fordi visse fysiske love forhindrer dem i at henfalde til ren energi. Derfor består verden omkring os af protoner, neutroner (der er stabile når de befinder sig i en atomkerne) og elektroner og ikke af deres tungere *fætre*.

## Antipartikler

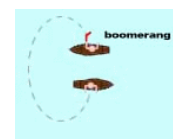
Alle partiklerne i ovenstående tabeller har en antipartikel med den samme masse, men modsat elektrisk ladning. For eksempel findes en anti-up-kvark ( $\bar{u}$ ) med ladning  $-2/3|e|$  og en anti-elektron ( $e^+$  kaldet positron) med ladning  $+1|e|$ .

## Naturens fundamentale kræfter

Hvis verden havde bestået af stofflige partikler og intet andet, ville det være et kedeligt sted: Ingen partikel ville kunne påvirke nogen anden partikel! Heldigvis er verden ikke sådan: partikler kan vekselvirke med hinanden, og på fundamentalt niveau fortolkes vekselvirkninger i forstanden: Udveksling af andre partikler – de såkaldte kraftoverførere eller bosoner. At noget begrebsmæssigt så svært tilgængeligt som kræfter kan beskrives ved noget så håndgribeligt som partikler kræver nok lidt tilvænning. Det er ikke desto mindre en særdeles attraktiv egenskab ved partikelfysikkens verdensbillede. For at forstå hvordan noget, der virker over afstand, kan beskrives ved hjælp af overførsel af en partikel, kan man tænke på følgende eksempel fra vores makroskopiske verden:



Figur 1. Kraftbærende 'partikler'.



Ved at kaste bolden til hinanden skubbes bådene fra hinanden på samme måde som hvis der havde været fysisk kontakt imellem dem eller mellem personerne på bådene. At man således kan opnå en frastødende kraft ved at udveksle en partikel er derfor forståeligt, hvorimod analogien bliver lidt mere søgt for en tiltrækkende kraft (boomerang).

Vekselvirkning	Kraftoverfører	Masse [GeV/c <sup>2</sup> ]	Styrke (i forhold til den stærke kernekraft)	Rækkevidde [m]
Tyngdekraft	Graviton	0	10 <sup>-39</sup>	∞
Svag kernekraft	Z, W <sup>±</sup>	91/80	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-18</sup>
Elektromagnetisme	Foton (γ)	0	10 <sup>-2</sup>	∞
Stærk kernekraft	Gluon (g)	0	1	10 <sup>-15</sup>

### De fire kræfter

Så vidt vides findes fire fundamentale kræfter i naturen: tyngdekraften, den svage kernekraft, elektromagnetismen og den stærke kernekraft. Alle disse beskrives i partikelfysikken ved hjælp af udveksling af en kraftoverførende partikel, som er specifik for den enkelte kraft (se tabellen ovenfor).

Bemærk at den elektromagnetiske kraft formidles ved hjælp af fotoner. Kraftoverførerne for den svage kernekraft er Z, W<sup>±</sup> bosonerne, hvorimod 8 forskellige gluoner bærer den stærke kernekraft. Tyngdekraftens bærer hedder gravitonen, men den er endnu ikke observeret eksperimentelt, så man ved strengt taget ikke om den findes.

### Litteratur

- [1] For mere information om partikelfysik på dansk:  
<http://www.nbi.dk/~klinkby/PartikelFysik.pdf>



*Esben Klinkby* er ansat som forskningsassistent ved Niels Bohr Institutet og har netop forsvaret sin ph.d. som omhandler måling af W-bosonens masse samt simulering af TRT'en ved ATLAS-eksperimentet.