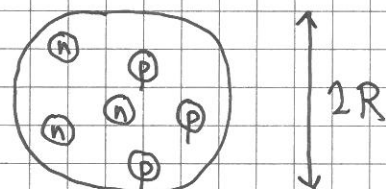


YF 43 og 44: Kjernefysikk og Partikkelfysikk.

(Et "kort" utdrag. Les resten selv i YF.)

43.1 Kjernens egenskaper

Fra spredningeksperimenter:



$$R = R_0 \cdot A^{1/3} = \text{kjernens radius}$$

p = proton
n = nøytron

med

$$R_0 \approx 1.2 \cdot 10^{-15} \text{ m} = 1.2 \text{ fm}$$

$$A = Z + N = \text{antall nukleoner}$$

$$Z = \text{antall protoner} = \text{atomnummeret}$$

$$N = \text{antall nøytroner}$$

$$\text{Volum: } V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi R_0^3 \cdot A$$

$$\text{Masse: } m \approx A \cdot u ; \quad 1u \approx 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\text{Massetetthet: } \rho = m/V = 3u/4\pi R_0^3 \approx 2.3 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

$\Rightarrow$ (praktisk talt) lik massetetthet for alle kjerner

Nuklide: gitt Z og N (og A)

Isotoper: samme Z , ulik N ; ${}_Z^A X$; $X = \text{atomsymbol}$

Eks: ${}_{6}^{12}\text{C}$, ${}_{6}^{13}\text{C}$ ("karbon-12", "karbon-13")

Spinn: Både p og n har $s = 1/2$, dvs de er fermioner

$$S = |\vec{S}| = \sqrt{s(s+1)} \hbar = \sqrt{\frac{3}{4}} \hbar$$

$$S_z = m_s \hbar = \pm \frac{1}{2} \hbar$$

Banedreieimpuls: $L = |\vec{L}| = \sqrt{l(l+1)} \hbar$; $l = 0, 1, 2, \dots$

$$L_z = m_l \hbar \quad ; \quad m_l = -l, \dots, 0, \dots, l$$

Total dreieimpuls: $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$

For kjerne med A nukleoner: $\vec{J} = \sum_{i=1}^A \vec{J}_i$

med $J = |\vec{J}| = \sqrt{j(j+1)} \hbar$ og $J_z = m_j \hbar$; $m_j = -j, \dots, 0, \dots, j$

Hvis A er partall: Heltallig j

Hvis A er oddetall: Halvtallig j

Hvis både Z og N er partall: $j = 0$

Dvs: Både protoner og nøytroner okkuperer tilstander "parvis", med motsatt dreieimpuls.
(Slik elektroner gjør det i atomer.)

Magnetisk moment (se også s. 79-81) :

Vi definerer et kjernemagneton: $\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p} \approx 5.05 \cdot 10^{-27} \text{ J/T}$

Merk at $\mu_N \ll \mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} \approx 9.27 \cdot 10^{-24} \text{ J/T}$ (Bohr magneton)

Vil forvente (siden $\mu_z \approx \mu_B$ for elektronets spinn)

μ_z (proton) $\approx \mu_N$ og μ_z (nøytron) ≈ 0 siden
protonet har ladning $+e$ og nøytronet har ladning 0 .

Ekspenimenter viser : Proton $\mu_z^p \approx 2.7928 \mu_N$
 Neutron $\mu_z^n \approx 1.9130 \mu_N$

Dette antyder en indre struktur i p og n. De er da heller ikke punktformede elementærpartikler (som elektronet), men består av tre kvarker.

For en gitt atomkjerne er $|\vec{\mu}|$ typisk noen μ_N .

NMR og MRI (Nuclear Magnetic Resonance, Magnetic Resonance Imaging) :

Kjerne med magn. moment $\vec{\mu}$ i ytre magnetfelt $\vec{B} = B\hat{z}$ har pot. energi

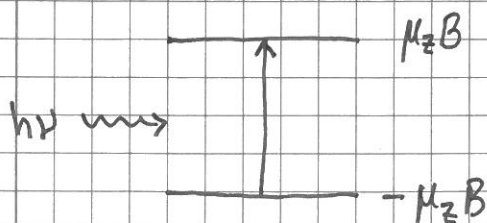
$$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} = -\mu_z B$$

som med kvantisert μ_z gir kvantiserte energinivåer.

Anta f.eks. proton (dvs ^1H -kjerne) i tilstand med $l=0$, dvs $j=s=1/2$.

Da kan kjernen ha "spinn opp" eller "spinn ned", med hhv $U = -\mu_z B$ eller $U = +\mu_z B$.

$\Rightarrow$ Fotoner med energi $h\nu = \Delta E = 2\mu_z B$ kan absorberes og emitteres av slike kjerner ("resonans")



Eks: Med $B = 1.5\text{T}$ og $\mu_z = 2.7928 \mu_N$,
bestem frekvens og bølglengde på E.M. bølger
som gir resonans.

Løsn: $\nu = 2\mu_z B / h = 2 \cdot 2.7928 \cdot \left(\frac{e\hbar}{2m_p}\right) \cdot 1.5\text{T} / h$
 $= 8.3784 \cdot \frac{e}{4\pi m_p} \approx \underline{64.26 \text{ MHz}}$
 $\lambda = c/\nu \approx \underline{4.67 \text{ m}} \quad \left[\begin{array}{l} \hookrightarrow \frac{\nu}{B} \approx 42.6 \frac{\text{MHz}}{\text{T}} \end{array} \right]$

Dvs: Radiobølger (like under FM-båndet)

MRI: Protoner har ulike omgivelser i ulikt vev

$\Rightarrow$ Varierende $\vec{B}$ -felt fra vev til vev

$\Rightarrow$ Resonans ved varierende λ fra vev til vev

$\Rightarrow$ Avbildning mulig!

43.2 Binding og struktur

Kjernens bindingsenergi E_B defineres som endring i
huleenergi (mc^2) når ~~kjernen~~ ^{atomet} ${}_Z^A X$ splittes opp i

Z hydrogenatomer (${}_1^1\text{H}$; kun et proton i kjernen) og

$N = A - Z$ nøytroner:



$$E_B/c^2 = Z \cdot M_H + N \cdot m_n - M_X$$

Eks: Deuterium, ${}^2_1\text{H}$, masse 2.014102 u. $E_B = ?$

(136)

Løsn: $M_H = 1.007825 \text{ u}$, $m_n = 1.008665 \text{ u}$

$$\Rightarrow E_B = c^2 \cdot \{1.007825 + 1.008665 - 2.014102\} \cdot 1.66 \cdot 10^{-27} \\ \approx 3.6 \cdot 10^{-13} \text{ J} \approx \underline{2.2 \text{ MeV}}$$

[Vi har $c^2 \cdot 1 \text{ u} \approx 931.5 \text{ MeV}$, slik at $E_B \approx 931.5 \text{ MeV} \cdot \frac{\Delta m}{u}$]

Pr nukleon: $E_B/A \approx 1.1 \text{ MeV}$ for ${}^2_1\text{H}$

Eks: ${}^{62}_{28}\text{Ni}$, $M = 61.928349 \text{ u}$, $E_B = ?$

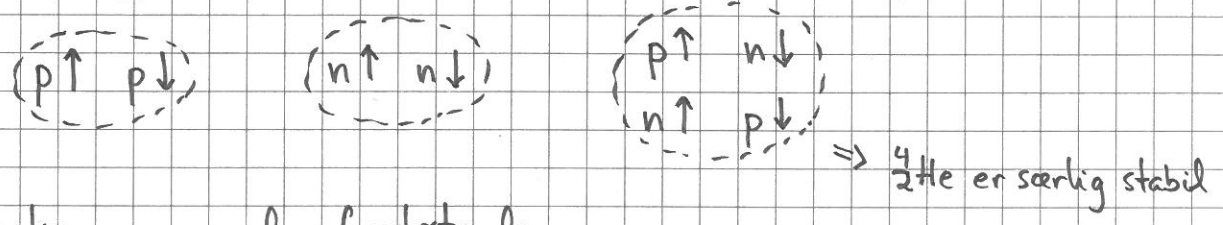
$$\text{Løsn: } E_B = 931.5 \text{ MeV} \cdot \{28 \cdot 1.007825 + 34 \cdot 1.008665 - 61.928349\} \\ = 931.5 \text{ MeV} \cdot 0.585361 \\ = \underline{545.3 \text{ MeV}}$$

Pr nukleon: $E_B/62 \approx \underline{8.795 \text{ MeV}}$

[Se Fig. 43.2 i YF]

Sterke kjernekrefter:

- tiltrekkende
- kort rekkevidde ($\sim 10^{-15}$ m)
- uavhengig av elektrisk ladning
- hvert nukleon vekselvirker med sine naboer
- gir opphav til pardannelse og "par-av-par-dannelse":



- konkurrerer med frast\o t\end{ende Coulombkrefter (mellom protoner)

Dette empiriske grunnlaget muliggj\o r et par relativt enkle modeller for \aa beskrive binding i kjerner kvantitativt.

V\ae skedr\o pemodellen:

Baserer seg p\aa at masetettheten ρ er tiln\o rmet konstant, dvs at $R \sim A^{1/3}$ (R =kjerneradius; A =antall nukleoner).

$$E_B = C_1 A - C_2 A^{2/3} - C_3 \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - C_4 \frac{(A-2Z)^2}{A} \pm C_5 A^{-4/3}$$

(Her er de 5 koef. $C_1 - C_5$ positive, med dimensjon energi.)

Argumenter for disse fem leddene:

- ① V.v. kun med de n\o rmeste naboene $\Rightarrow$ ledd prop. med A
- ② Fradrag prop. med overflatearealet, dvs prop. med R^2 , dvs. prop. med $A^{2/3}$, fordi ~~de~~ nukleoner p\aa overflaten har f\ae rre naboer enn nukleoner "inni"

- ③ Fradrag pga frastøtende Coulombkrefter, der Z protoner v.v. med alle de $Z-1$ resterende
 $\Rightarrow$ ledd prop. med $Z(Z-1)/R \sim Z(Z-1)/A^{1/3}$
- ④ Siden "kvartetter" med $2p + 2n$ gir stabilisert kjerne (store E_B), må vi ha med et fradrag dersom det er "dårlig balanse" mellom N og Z . Kunne f.eks. ha vært prop. med $-|N-Z|$, men best samsvar med exp. oppnås med $-(N-Z)^2/A$, som med $N=A-Z$ gir $-(A-2Z)^2/A$.
- ⑤ Fradrag hvis ikke optimal pardannelse er mulig:
 Z og N partall $\Rightarrow +C_5 A^{-4/3}$
 Z og N oddetall $\Rightarrow -C_5 A^{-4/3}$
 Z eller N partall $\Rightarrow 0$
 (Best samsvar med exp. hvis eksponent $-4/3$.)

Tallverdier (MeV): $C_1 = 15.75$, $C_2 = 17.80$, $C_3 = 0.7100$,
 $C_4 = 23.69$, $C_5 = 39$

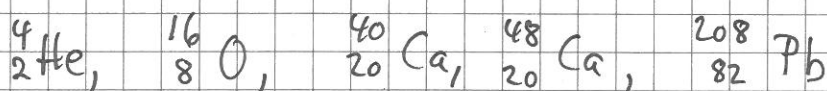
Eks: Bruk dråpemodellen og regn ut E_B , E_B/A
 og $M(^{238}\text{U}) = 92 m_H + 146 m_n - E_B/c^2$
 for uran-isotopen $^{238}_{92}\text{U}$. Sammenlign med de
 målte verdiene $(E_B/A)_{\text{exp}} = 7.57 \text{ MeV}$ og $M = 238.051 \text{ u}$.

["Fasit": Feilen i E_B/A er ca 0.8%,
 feilen i M er ca 0.006 %.]

Skallmodellen:

Analogt med at atomer med $Z = 2, 10, 18, 36, 54$ (dvs edelgassene) er spesielt stabile, er kjerner med N og/eller $Z = \underbrace{2, 8, 20, 28, 50, 82, 126}_{\text{"Magiske tall"}}$ også særlig stabile.

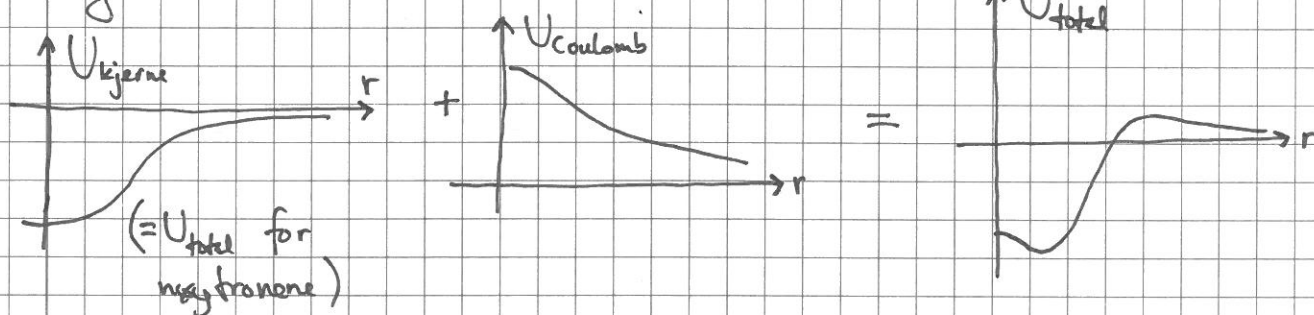
Med både N og Z magiske fås de "dobbel-magiske" kjernene



som er ekstra stabile.

Modellen tar utgangspunkt i å anta at et gitt nukleon beveger seg i et "gjennomsnittlig potensiel" fra alle de andre.

Dette potensialet er summen av et sterkt tiltrekkende kjernepotensial U_{kjerne} med kort rekkevidde, og, for protonene, et svakere frastøtende Coulombpotensial U_{Coulomb} med lang rekkevidde:



Siden TUSL for elektroner i atomer gir "skall"

(K, L, M, N... for $n=1, 2, 3, 4, \dots$, se s. 75), er det vel bare

"rett og rimelig" at $U_{\text{total}}(r)$ og TUSL for protoner og nøytroner i kjernen også gir skall. Med $U_{\text{total}}(r)$ forskjellig fra $U_{\text{Coulomb}}(r)$ fås andre magiske tall enn for elektroner i atomer!

43.3 Radioaktivitet

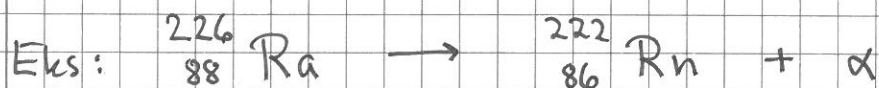
- Det fins ca 2500 kjente nuklider, mindre enn 300 av disse er stabile.

Ustabile kjerner spaltes (henfaller; "decay"), med utsending av partikler eller fotoner.

Levetider varierer mellom brøkdel av μs til milliarder av år. [Se eksempel s. 67]

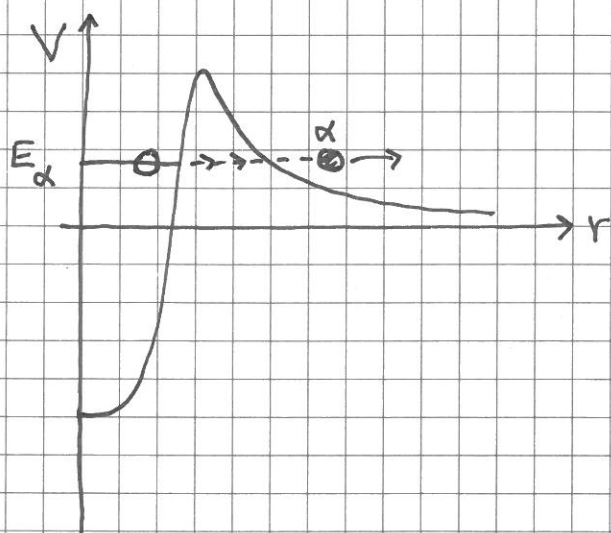
α -decay

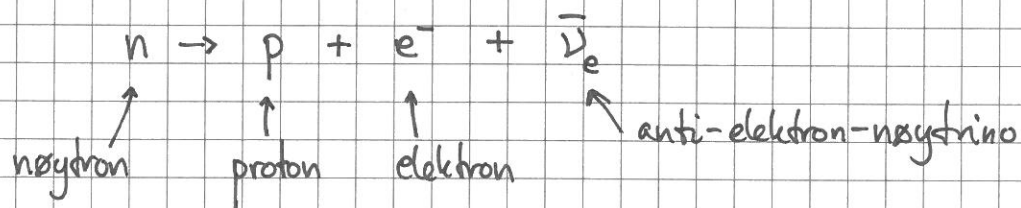
${}^4_2\text{He}$ sendes ut



Spontan α -decay mulig hvis $\Delta m < 0$ (massen reduseres) i reaksjonen; da frigjøres energi.

α -partikkelen må tunnelere gjennom en potensialbarriere for å unnslippe kjernen:



β -decay β^- : frigørelse af elektron (e^-)

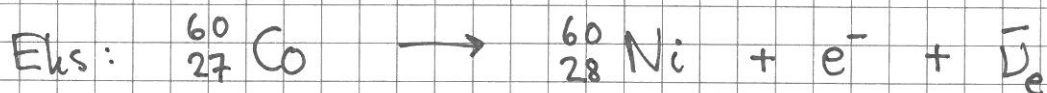
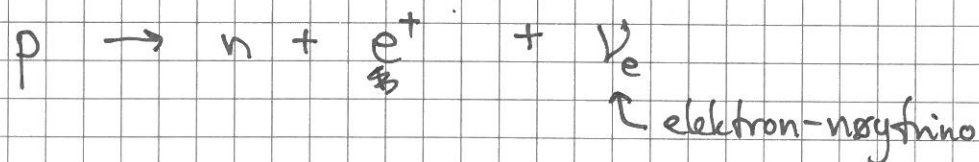
Spinnet må være bevaret $\Rightarrow \bar{\nu}_e$ må ha $s = 1/2$, siden både n, p og e^- har $s = 1/2$

Ladning må være bevaret $\Rightarrow \bar{\nu}_e$ må ha null ladning

Masse? $m(\bar{\nu}_e) \approx 0$ (men ikke eksakt null...)

Observeret i 1953.

Spontan β^- -decay fordrer $\Delta m < 0$.

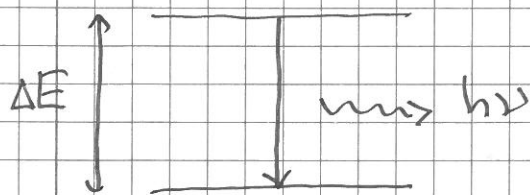
 β^+ : frigørelse af positron (e^+)

elektron-implantation:



γ -decay

Utsending av foton, ved overgang fra eksitert tilstand til grunntilstanden for kjernen.



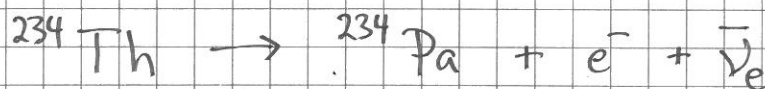
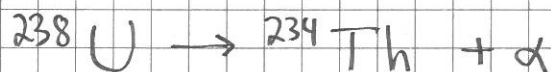
$$\Delta E \sim 10 \text{ keV til } 5 \text{ MeV}$$

Naturlig radioaktivitet:

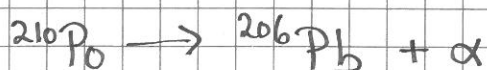
Moderkjerne $\rightarrow$ Datterkjerne + $\{\alpha, \beta \text{ eller } \gamma\}$

Kan skje via mange "mellomtrinn" før stabil kjerne oppnås.

Eks:



⋮



via 8 α -decays og 6 β^- -decays.

43.4 Aktivitet og halveringstid

143

Et enkelt, standard statistisk argument gir

$N(t)$ = antall (gjenværende) radioaktive kjerner ved tid t

dersom

λ = sannsynligheten pr tidsenhet (raten) for at en gitt kjerne spaltes

Da er

$$-dN = \lambda dt \cdot N$$

der

$-dN$ = antall kjerner som spaltes mellom t og $t+dt$

λdt = sanns. for at gitt kjerne spaltes mellom t og $t+dt$

Enkel diff. ligning,

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt,$$

med løsning

$$N(t) = N(0) e^{-\lambda t}$$

$N(0)$ = antall radioaktive kjerner ved tid $t=0$

Halveringstid $T_{1/2}$ definert ved: $\frac{N(t+T_{1/2})}{N(t)} = \frac{1}{2}$

$$\Rightarrow e^{-\lambda T_{1/2}} = 1/2 \Rightarrow T_{1/2} = \frac{1}{\lambda} \ln 2$$

Levetid: $\tau = 1/\lambda$

$$(\Rightarrow T_{1/2} = \tau \cdot \ln 2)$$

Enheter for radioaktivitet:

1 Bq (becquerel) = 1 spalting pr sekund

1 Ci (curie) = $3.70 \cdot 10^{10}$ spaltinger pr sekund

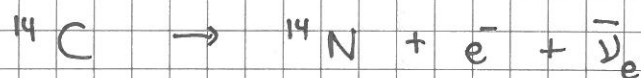
[omtrentlig decay-raten for 1g radium (Ra)]

Radiologisk datering:

Levende organismer puster inn og ut CO_2 fra og til atmosfæren

$\Rightarrow$ atmosfærens isotop-fordeling av karbon den samme som i levende organismer

Opptak av CO_2 stanser når organismen dør, og andelen av f.eks. ^{14}C øktar pga β -decay,



med en halveringstid $T_{1/2} = 5730$ år.

$\Rightarrow$ Hvis vi kjenner $[^{14}\text{C}]$ i atmosfæren (over tid), kan forløpt tid fra organismens død beregnes.

43.5 Biologiske effekter av stråling

Svært viktig tema i biofysikk / medisinsk fysikk,
Her: Lesestoff.

43.6 Kjernerreaksjoner

"Generell" kjernerreaksjon: $A + B \rightarrow C + D$

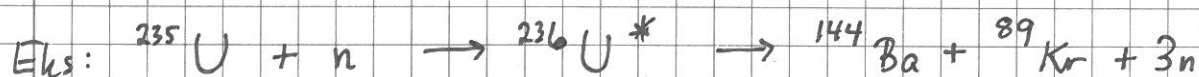
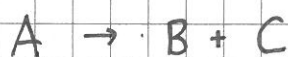
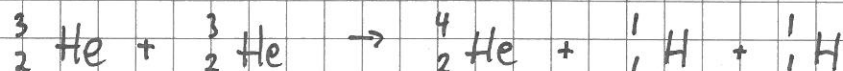
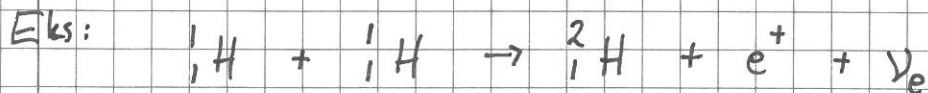
Reaksjonsenergi: $Q = (M_A + M_B - M_C - M_D) c^2$

~~Fortegn~~Fortegnssvalg: $Q > 0 \hat{=}$ eksoterm reaksjon; masse omdannes til kinetisk energi

$Q < 0 \hat{=}$ endoterm reaksjon; kin. energi omdannes til masse (hvileenergi)

Terskelenergi:

For å få en gitt endoterm reaksjon til å skje, må initiell kin. energi K_i være minst like stor som $|Q|$.

43.7 Fisjon43.8 Fusjon

44.3 Partikler og vekselvirkninger

V.v.	Relativ styrke	Rekkevidde	Utrekingspartikkel			
			Namn	Masse	Ladning	Spin
Sterk	1	Kort ($\sim 1 \text{ fm}$)	Gluon	0	0	1
E.M.	$1/137$	Lang ($\sim \frac{1}{r^2}$)	Foton	0	0	1
Svak	10^{-9}	Kort ($\sim 10^{-18} \text{ m}$)	$W^{\pm}, Z^0$	$80.4 \frac{\text{GeV}}{c^2}$ $91.2 \frac{\text{GeV}}{c^2}$	$\pm e, 0$	1
Gravitasjon	10^{-38}	Lang ($\sim \frac{1}{r^2}$)	Graviton	0	0	2

Graviton : Ikke exp. påvist

Gluon, foton : Stabile

$W^{\pm}, Z^0$: Exp. påvist ved CERN ~~1983~~ 1983 ; Rubbia og van der Meer, Nobelpris 1984

Antipartikler :

Med partikler med høy energi må Schrödingerlign. erstattes av den relativistiske Diracligningen. Diracligningen gir både positive energier,

$$E = +\sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

og negative energier,

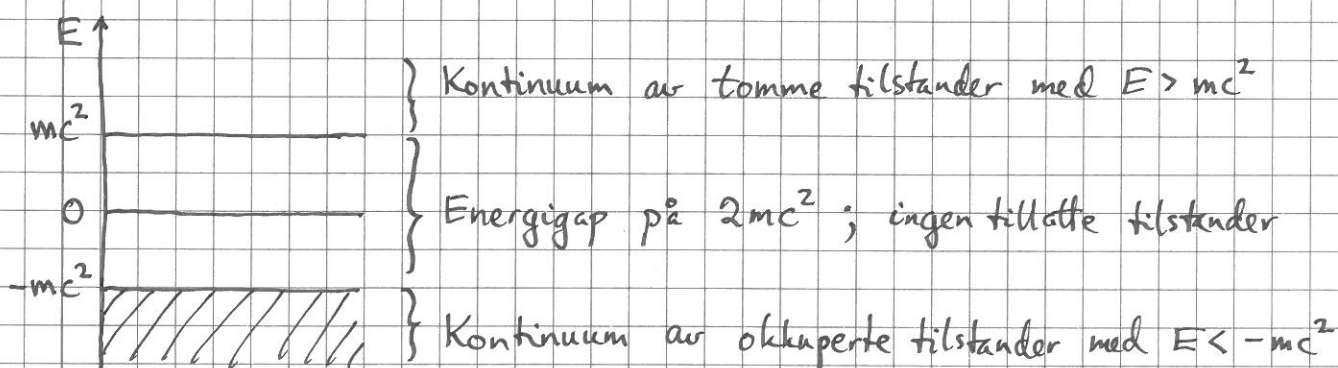
$$E = -\sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

som mulige løsninger, for frie partikler med masse m og impuls $\vec{p}$.

Dirac foreslo at tilstandene med $E < 0$ (egentlig: $E < -mc^2$) alle er okkupert av elektroner, ett i hver tilstand, siden de er fermioner som oppfyller Pauli-prinsippet.

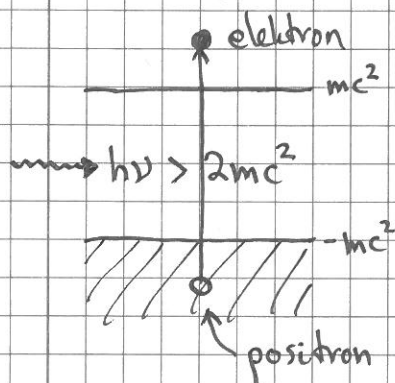
Denne "sjøen" med uendelig mange elektroner er en slags uniform bakgrunn som vi ikke "ser", omtrent som at et fullt valensbånd i en krystall ikke gir noe bidrag til elektrisk strøm.

Grunntilstanden ("Vakuüm") kan dermed beskrives slik:

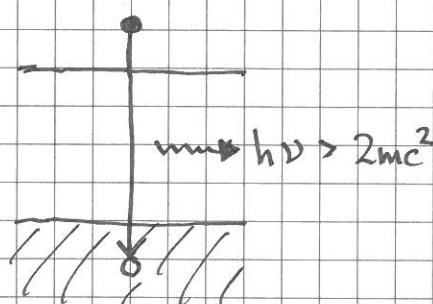


Dette forklarer både parproduksjon, parannihilasjon, og eksistensen av antipartikler (positronet i elektronets tilfelle, påvist av Carl Anderson i 1932):

Parproduksjon:



Parannihilasjon:



[Sammenlign med hull og elektroner i faststoff-fysikk]

Partikkel og dens antipartikkel har lik masse, men motsatt ladning. Hvis den ene har spinn $\vec{S}$ og magnetisk moment $\vec{\mu}$ i samme retning, har den andre $\vec{S}$ og $\vec{\mu}$ i motsatt retning. (Men lik $S = |\vec{S}|$!)

Kvantefeltteori (QED og QCD) viser at alle partikler har sin antipartikkel. Antiprotonet $\bar{p}$ ble oppdaget i 1955, antineutronet $\bar{n}$ i 1956.

Klassifisering av partikler:

(148)

Leptoner: Partikler uten sterk v.v.

Fermioner, $s = 1/2$

6 stk: e^- , ν_e (elektron, elektron-nøytrino)

μ^- , ν_μ (myon, myon - " -)

τ^- , ν_τ (tau, tau - " -)

Masser: $m_e = 0.511 \text{ MeV}/c^2$

$m_\mu = 105.7$ " -

$m_\tau = 1777$ " -

($m_\nu \approx 0$)

Bevaringslov: Leptontallene L_e , L_μ , L_τ er alle bevart.

e^- , ν_e : $L_e = 1$; e^+ , $\bar{\nu}_e$: $L_e = -1$
(og tilsv. for μ og τ)

Ekst: $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$

Før: $L_\mu = 1$, $L_e = 0$

Etter: $L_\mu = 1$, $L_e = 1 - 1 = 0$ } ok!

Hadroner: Partikler med sterk v.v.

Underklasser: Mesoner, Baryoner

Mesoner: Bosoner med $s = 0$

Ustabile

π , K og η

Baryoner: Fermioner med $s = 1/2$

p er stabil, n har lang levetid, resten er ustabile ($\Lambda, \Sigma, \Xi, \Delta, \Omega, \dots$)

Konservierungslov: Baryontallet B er bevart.

Baryon $\Rightarrow B = +1$

Antibaryon $\Rightarrow B = -1$

Eks: $n + p \rightarrow n + p + p + \bar{p}$

Før: $B = 1 + 1 = 2$

Etter: $B = 1 + 1 + 1 - 1 = 2$ } OK

44.4 Kvarker

Leptonene er fundamentale (udelelige) elementærpartikler

Hadroner består av 2 eller 3 kvarker.

Kvarker er fermioner med $s = 1/2$ og ladning $-\frac{1}{3}$ eller $+\frac{2}{3}$.

Meson = kvark + antikvark par

Baryon = 3 kvarker; Antibaryon = 3 antikvarker

6 ulike kvarker: u (up), d (down), s (strange), c (charm), b (bottom), t (top)

Hver kvark har sin antikvark, og alle kommer i tre ulike farger, "rød", "grønn" og "blå".

$\Rightarrow$ i alt $6 \cdot 2 \cdot 3 = 36$ varianter!

Eks: Proton, $p = uud$, $Q_u = +\frac{2}{3}$, $Q_d = -\frac{1}{3} \Rightarrow Q_p = \frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = \underline{\underline{+1}}$

Nøytron, $n = udd \Rightarrow Q_n = \frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = \underline{\underline{0}}$

All materie bygd opp av 3 typer elementærpartikler:
Leptoner, Kvarker og Utvekslingspartiklene.

De 6 leptonene klassifiseres etter ladning (Q), elektron-tall (L_e), myon-tall (L_μ) og tau-tall (L_τ):

	Q	L_e	L_μ	L_τ
e	-1	1	0	0
ν_e	0	1	0	0
μ	-1	0	1	0
ν_μ	0	0	1	0
τ	-1	0	0	1
ν_τ	0	0	0	1

(For de 6 antileptonene snus alle fortegn.)

De 6 kvarkene klassifiseres etter ladning (Q), "strangeness" (S), "charm" (C), "beauty" (B), "truth" (T), "upness" (U), "downness" (D):

	Q	D	U	S	C	B	T
d	$-1/3$	-1	0	0	0	0	0
u	$2/3$	0	1	0	0	0	0
s	$-1/3$	0	0	-1	0	0	0
c	$2/3$	0	0	0	1	0	0
b	$-1/3$	0	0	0	0	-1	0
t	$2/3$	0	0	0	0	0	1

(Alle fortegn snus for antikvarkene)

Utrekslingspartiklene:

Fotonet (for E.M. v.r.)

W^+ , W^- og Z (for svake kjernekraft)

Gravitonet (antas; for gravitasjon)

8 stk gluoner (for sterk kjernekraft)

⇒ I alt 12 (evt. 13 hvis gravitonet regnes med)

I tillegg: Higgs-partikkelen! (CERN, LHC, 4/7 - 2012)

Gir i alt minst 61 (62) elementærpartikler:

12 lepton-/antileptoner

36 kvarker/antikvarker

13 (14) utrekslingspartikler

44.6 og 44.7 Kosmologi

Lesestoff