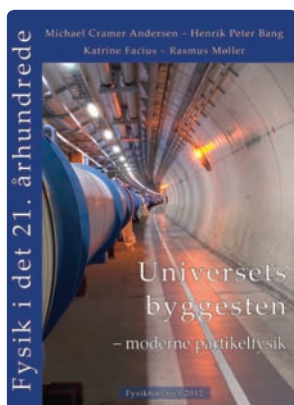


Tema i partikelfysik på fysik A

MICHAEL CRAMER ANDERSEN, Christianshavns Gymnasium og RASMUS MØLLER, Sankt Annæ Gymnasium

I anledning af, at det nye emne i *Fysik i det 21. århundrede* er "Universets byggesten" er der blevet afholdt kurser i partikelfysik i oktober i København og Aarhus. Her blev det bl.a. diskuteret, hvordan man kan læse bogen *Universets byggesten – moderne partikelfysik* og forberede eleverne på den skriftlige eksamen. Vi vil her komme med nogle få anbefalinger. Ellers henvises til konferencen på Skolekom, hvor man fx kan stille spørgsmål til bogen og emnet eller anbefale supplerende stof og ressourcer på nettet.



Stram læseplan

For at dække kernepensum og forberede eleverne til opgaverne ved den skriftlige eksamen, behøver man ikke læse hele bogen lige grundigt. En stram læsevejledning behøver ikke at omfatte mere end ca. 60 sider og kunne fx se ud som følger.

- Kapitel 1 – side 7 – 15, eksempler og opgave 1.3 – 1.9
- Kapitel 2, – side 21 – 25
- Kapitel 3, – side 27, 33 – 45 (minus boks 3.1 – 3.2)
- Kapitel 4, – inddrages efter behov
- Kapitel 5, – side 57 – 69 (minus boks 5.1, 5.3 og 5.4), eksempler og opgave 5.2, 5.4, 5.5, 5.6 og 5.7
- Kapitel 6, – side 77 – 87, alle eksempler og opgaver
- Kapitel 7, – side 89 – 93 og s. 102 – 108 (særligt opgave 7.8 er relevant)
- Kapitel 8, – inddrages efter behov

Opgaver med relativistiske formler

På kurserne blev der fra flere af deltagerne udtrykt ønske om at få nogle flere eksempler på gennemregnede opgaver, specielt i relativistiske beregninger af partikelreaktioner.

Udgangspunktet for den slags beregninger er næsten altid den relativistiske sammenhæng mellem energien E , bevægelsesmængden \vec{p} , og hvilemassen m_0 :

$$m_0^2 c^4 = E^2 - p^2 c^2$$

Sammenhængen gælder også for den samlede energi, $E_1 + E_2 + \dots$, og bevægelsesmængde, $\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots$, for et partikelsystem, hvor m_0 så kan tolkes som massen af en eventuel moderpartikel til partiklerne, hvad enten en sådan eksisterer eller ej. Størrelsen m_0 er uafhængig af, hvilket system den beregnes i og kaldes derfor ofte for den invariante masse for partikelsystemet. Invariansen kan ofte udnyttes i opgaveregning.

Eksempel 1 – Antiprotonen

Vi ønsker at bygge en protonaccelerator, som kan bruges til at frembringe antiprotoner. Hvor stor skal energien, E , være?

Svar: Den simpleste reaktion, der kan skabe antiprotoner, er $p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}$, idet både den elektriske ladning og baryontallet skal være bevaret. Ved tærskelenergien ligger de tre protoner og antiprotonen stille i det samlede hvilesystem. I dette system er den samlede bevægelsesmængde nul, og da $m_0 = 4 m_p$ har vi derfor, at $m_0^2 c^4 = (4 m_p c^2)^2 = 16 m_p^2 c^4$, hvor m_p er protonens masse.

I acceleratorens system (laboratoriesystemet) er den samlede energi af de to protoner $E + m_p c^2$. Den samlede bevægelsesmængde p , kan findes af $p^2 c^2 = E^2 - m_p^2 c^4$. Der gælder derfor også:

$$\begin{aligned} m_0^2 c^4 &= (E + m_p c^2)^2 - p^2 c^2 \\ &= (E + m_p c^2)^2 - (E^2 - m_p^2 c^4) \\ &= 2E \cdot m_p c^2 + 2m_p^2 c^4 \end{aligned}$$

Da den invariante masse er ens i de to betragtede systemer, sættes de to udtryk for $m_0^2 c^4$ lig med hinanden:

$$16 m_p^2 c^4 = 2E m_p c^2 + 2m_p^2 c^4$$

og energien bliver dermed $E = 7 m_p c^2$.

Den kinetiske energi af beampartiklerne skal så være $E_{kin} = E - m_p c^2 = 6 m_p c^2$, eller omkring 6 GeV, hvilket netop var energien af Bevatronen, som blev bygget i USA i 1954 med det formål at kunne opdage antiprotonen. Det lykkedes året efter.

Eksempel 2 – Tærskelenergi

Hvad er tærskelenergien for produktion af en ρ^0 meson i pp -kollisioner?

Svar: I det samlede hvilesystem er bevægelsesmængden nul og den samlede energi ved tærskel $E = E_p + E_p = 2m_p c^2 + m_\rho c^2$. Vi har derfor, lige som i eksempel 1:

$$\begin{aligned} (E + m_p c^2)^2 - p^2 c^2 &= (2m_p c^2 + m_\rho c^2)^2 \Leftrightarrow \\ E^2 + 2E m_p c^2 + m_p^2 c^4 - (E^2 - m_p^2 c^4) & \\ &= 4m_p^2 c^4 + 4m_p m_\rho c^4 + m_\rho^2 c^4 \Leftrightarrow \\ 2E m_p c^2 &= 2m_p^2 c^4 + 4m_p m_\rho c^4 + m_\rho^2 c^4 \Leftrightarrow \end{aligned}$$

$$E = m_p c^2 + 2m_\rho c^2 + \frac{1}{2} \frac{m_\rho^2}{m_p} c^2$$

Med $m_p = 938 \text{ MeV}/c^2$, $m_\rho = 767 \text{ MeV}/c^2$ fås $E \approx \mathbf{2790 \text{ MeV}}$. Den kinetiske energi er så ca. $\mathbf{1850 \text{ MeV}}$.

Omskrivningerne her er nok i overkanten af, hvad vi normalt forlanger af eleverne, så det er oplagt at benytte CAS-værktøjet, når den første ligning er opstillet.

Eksempel 3 – Henfald af Λ -partiklen

En Λ -partikel henfalder i hvile efter følgende skema: $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$. Bestem bevægelsesmængden og energien af π -mesonen.

Svar: Der er energibevarelse, så $E_\Lambda = m_\Lambda c^2 = E_p + E_\pi$. Endvidere er der bevarelse af bevægelsesmængden, så protonen og π -mesonen har lige store bevægelsesmængder, p . Så er

$$m_\Lambda c^2 = \sqrt{m_p^2 c^4 + p^2 c^2} + \sqrt{m_\pi^2 c^4 + p^2 c^2}$$

Den er lidt tung at reducere i hånden, men CAS-værktøjet klarer den nemt. Vi indsætter $m_\Lambda c^2 = 1116 \text{ MeV}$, $m_p c^2 = 938 \text{ MeV}$ og $m_\pi c^2 = 140 \text{ MeV}$ og får $p = \mathbf{101 \text{ MeV}/c}$.

Energien af π -mesonen er $E_\pi = \sqrt{m_\pi^2 c^4 + p^2 c^2} = \mathbf{173 \text{ MeV}}$.

Trykfejl

Siden bogen blev trykt har vi fundet enkelte meningsforstyrrende trykfejl:

- Side 15 – opgave 1.4. Det skal være en K^0 -meson, ikke en \bar{K}^0 -meson
- Side 19 – opgave 1.11 og 1.12 burde hedde opgave 1.10 og 1.11
- Side 69 – eksempel 5.2 burde starte: ”I nedenstående eksempler bemærkes, at leptonernes, kvarkernes og protonernes elektriske ladninger ikke skrives.”
- Side 73 – opgave 5.7, under svage reaktioner rettes ligning nr. 2 til: $\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e$ (stregen, der markerer anti-neutrinoen er placeret over den forkerte neutrino).
- Side 74 – anden liste, punkt 3 burde starte: ”Leptonernes hvilemasser menes at være bestemt af deres kobling til Higgs-feltet.”
- Side 87 – i eksempel 6.6 mangler der to faktorer c^2 i ligningen for E_{cms} .
- Side 116 – 1. linje, første ord skal være ”intet” (antistof).
- Side 145 – ”Ladningen Q ” skal stå under diskrete størrelser.