

Løsningsforslag til øving 13

Oppgave 1

a) I følge Galileo: ($\bar{S} = \bar{S}$ iv, $S = \text{Sam}$, $T = \text{Toget}$)

$$v_{\bar{S}S}^G = v_{\bar{S}T} + v_{TS}$$

I følge Einstein:

$$v_{\bar{S}S}^E = \frac{v_{\bar{S}T} + v_{TS}}{1 + v_{\bar{S}T}v_{TS}/c^2}$$

Dermed:

$$\frac{v_{\bar{S}S}^G - v_{\bar{S}S}^E}{v_{\bar{S}S}^G} = v_{\bar{S}T}v_{TS}/c^2 = 3.4 \cdot 10^{-14} \%$$

Her har vi brukt at

$$\frac{1}{1 + v_{\bar{S}T}v_{TS}/c^2} \simeq 1 - v_{\bar{S}T}v_{TS}/c^2$$

når hastighetene $v_{\bar{S}T}$ og v_{TS} er små i forhold til c , og det er jo tilfelle her. Med andre ord: Ingen stor feil å bruke galileisk relativitet her.

b)

$$v_{\bar{S}S} = \frac{c/2 + 3c/4}{1 + (1/2) \cdot (3/4)} = \frac{10c}{11}$$

Legg merke til at \bar{S} ivs hastighet i forhold til Sam er mindre enn c . I følge Galileo ville den ha vært $5c/4$.

c) Vi bruker tipset i oppgaven og innfører dimensjonsløse størrelser $\beta = v_{\bar{S}S}/c$, $\beta_1 = v_{\bar{S}T}/c$ og $\beta_2 = v_{TS}/c$. Oppgaven blir å vise at hvis både $\beta_1 < 1$ og $\beta_2 < 1$, så er også $\beta < 1$, eventuelt $\beta^2 < 1$:

$$\begin{aligned} \beta^2 &= \left(\frac{\beta_1 + \beta_2}{1 + \beta_1\beta_2} \right)^2 \\ &= \frac{\beta_1^2 + \beta_2^2 + 2\beta_1\beta_2}{1 + \beta_1^2\beta_2^2 + 2\beta_1\beta_2} \\ &= \frac{1 + \beta_1^2\beta_2^2 + 2\beta_1\beta_2}{1 + \beta_1^2\beta_2^2 + 2\beta_1\beta_2} - \frac{1 - \beta_1^2 - \beta_2^2 + \beta_1^2\beta_2^2}{1 + \beta_1^2\beta_2^2 + 2\beta_1\beta_2} \\ &= 1 - \frac{(1 - \beta_1^2)(1 - \beta_2^2)}{(1 + \beta_1\beta_2)^2} \\ &< 1 \end{aligned}$$

Oppgave 2

Vi kjenner \bar{S} 's hastighet i forhold til Sam:

$$v_{\bar{S}S} = \frac{5c}{8}$$

Kulas hastighet i forhold til Sam:

$$v_{KS} = \frac{v_{KA} + v_{AS}}{1 + v_{KA}v_{AS}/c^2} = \frac{8c}{13}$$

(Her er hele tiden v_{ij} hastigheten til i i forhold til j , og A , K og S står for Arne, Kula og Sam.)
Altså har kula litt mindre hastighet enn \bar{S} , slik at \bar{S} iv overlever.

Vi kan bruke Einsteins regel for addisjon av hastigheter til å bestemme alle fires hastigheter i forhold til hverandre. Oppsummert i en tabell (med alle hastigheter i enheten c):

hastigheten til... → ...i forhold til ↓	S	A	K	\bar{S}
S	0	3/8	8/13	5/8
A	-3/8	0	5/16	16/49
K	-8/13	-5/16	0	1/64
\bar{S}	-5/8	-16/49	-1/64	0

Vi ser at \bar{S} iv har større hastighet enn kula, uansett hvem vi spør.

Oppgave 3

Avstanden fra deg til klokke nr 201 er $200 \cdot 300000$ km. Lyset bruker 200 sekunder på denne strekningen. Følgelig *ser* du at klokke nr 201 viser 11:56:40 når klokke nr 1 viser 12:00:00.

Men du *observerer*, dvs *måler*, at klokke nr 201 er 12:00:00, fordi du vet at du må korrigere for at lyset har reist $200 \cdot 300000$ km for å nå fram til øyet ditt.

Oppgave 4

Myonets totale energi er $E_\mu = \gamma mc^2 = 2 \cdot 10^9$ eV, mens dets hvileenergi er $E_\mu^0 = mc^2 = 105.7 \cdot 10^6$ eV. Det betyr at lorentzfaktoren er

$$\gamma = \frac{E_\mu}{E_\mu^0} = 18.92$$

Myonets hastighet er dermed

$$v = c\sqrt{1 - 1/\gamma^2} = 0.9986c$$

Den oppgitte levetiden på $2.2 \mu s$ gjelder for myoner med lave hastigheter. Observert fra jorda vil dermed et myon med hastighet $0.9986c$ ha en levetid

$$\Delta t = \gamma \Delta \bar{t} = 18.92 \cdot 2.2 \mu s = 41.6 \mu s$$

På denne tiden reiser myonet en avstand

$$\Delta x = v\Delta t = 12.5 \text{ km}$$

som er av samme størrelsesorden som avstanden fra jorda og opp til de øvre deler av atmosfæren, der myonet ble dannet.

Oppgave 5

Vi starter med å skrive \mathbf{u} og $\bar{\mathbf{u}}$ på komponentform:

$$\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z) = \left(\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt} \right)$$

$$\bar{\mathbf{u}} = (\bar{u}_x, \bar{u}_y, \bar{u}_z) = \left(\frac{d\bar{x}}{d\bar{t}}, \frac{d\bar{y}}{d\bar{t}}, \frac{d\bar{z}}{d\bar{t}} \right)$$

Deretter bruker vi lorentztransformasjonene,

$$d\bar{x} = \gamma(dx - vdt)$$

$$d\bar{y} = dy$$

$$d\bar{z} = dz$$

$$d\bar{t} = \gamma(dt - vdx/c^2)$$

direkte og finner

$$\bar{u}_x = \frac{dx - vdt}{dt - vdx/c^2} = \frac{u_x - v}{1 - u_x v/c^2}$$

$$\bar{u}_y = \frac{dy}{\gamma(dt - vdx/c^2)} = \frac{u_y}{\gamma(1 - u_x v/c^2)}$$

$$\bar{u}_z = \frac{dz}{\gamma(dt - vdx/c^2)} = \frac{u_z}{\gamma(1 - u_x v/c^2)}$$

Oppgave 6

$\bar{\text{Siv}}$ reiser i alt en avstand $\Delta x = 24$ lysår. Hastigheten hennes er $v = 0.98c$. Hun må dermed ha brukt en tid $\Delta t = \Delta x/v = 24.490$ år. Sam er med andre ord ca 42 og et halvt år når $\bar{\text{Siv}}$ kommer hjem.

På grunn av tidsdilatasjon går $\bar{\text{Siv}}$ s klokke betydelig langsommere (både den klokka hun har på armen og hennes biologiske klokke). Hun måler et tidsforbruk $\Delta \bar{t} = \Delta t/\gamma = 4.873$ år. $\bar{\text{Siv}}$ er dermed snaut 23 år når hun kommer hjem.

”Paradokset”: Vil det ikke fra $\bar{\text{Siv}}$ s synsvinkel være omvendt? Dvs, slik at det er Sam som reiser med hastighet $0.98c$ mens $\bar{\text{Siv}}$ forholder seg i ro? I såfall burde $\bar{\text{Siv}}$ konkludere med at det er Sam som er den yngste av de to når hun kommer hjem.

Kortforklaringen på at dette *ikke* er tilfelle: \bar{S} iv er ikke i ett og samme inertialsystem under hele reisen. Hun må gjennomgå en akselerasjon i det hun snur. Sam, derimot, er hele tiden i samme inertialsystem, så vi må stole på ham. Altså *er* Sam eldre enn \bar{S} iv.

Problemet kan analyseres noe mer inngående: Vi innser raskt at vi her har med *tre* inertialsystem å gjøre: S , der Sam hele tiden er i ro; \bar{S} , der romskipet og \bar{S} iv er i ro på utreisen; \hat{S} , der romskipet og \bar{S} iv er i ro på hjemreisen. Ulike hendelser, og dermed ulike lengder og tidsintervaller, i de ulike inertialsystemene vil være relatert via lorentztransformasjonene (LT). Vi velger hendelsen *avreise* (A) ved tidspunktet $t_A = \bar{t}_A = \hat{t}_A = 0$ og i posisjonen $x_A = \bar{x}_A = \hat{x}_A = 0$. Hendelsen A definerer med andre ord et felles origo for de tre inertialsystemene. Positiv retning i rommet velges fra jorda og mot Epsilon Indi (EI). Det betyr at aktuelle relative hastigheter er

$$\begin{aligned} v_{\bar{S}S} &= v = 0.98c \\ v_{\hat{S}S} &= -v = -0.98c \\ v_{\bar{S}\hat{S}} &= \frac{v_{\bar{S}S} + v_{S\hat{S}}}{1 + v_{\bar{S}S}v_{S\hat{S}}/c^2} = \frac{v + v}{1 + v^2/c^2} \simeq 0.9998c \end{aligned}$$

Vi trenger her bare å bruke de to første, som har samme lorentzfaktor

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = 5.025$$

Neste hendelse (B) er at \bar{S} iv ankommer EI. I Sams verden S er da $x_B = 12$ (lysår) og $t_B = x_B/v = 12/0.98 = 12.245$ (år). LT gir oss "koordinatene" for hendelse B i \bar{S} og \hat{S} :

$$\begin{aligned} \bar{x}_B &= \gamma(x_B - vt_B) = 0 \\ \bar{t}_B &= \gamma(t_B - vx_B/c^2) = \gamma \frac{x_B}{v} (1 - v^2/c^2) = \frac{x_B}{\gamma v} = \frac{12}{5.025 \cdot 0.98} = 2.437 \\ \hat{x}_B &= \gamma(x_B + vt_B) = 2\gamma x_B = 2 \cdot 5.025 \cdot 12 = 120.605 \\ \hat{t}_B &= \gamma(t_B + vx_B/c^2) = \gamma t_B (1 + v^2/c^2) = 120.625 \end{aligned}$$

Dette betyr at \bar{S} ivs klokke viser 2.437 umiddelbart før hun snur. Det at hun snur innebærer at hun hopper fra inertialsystemet \bar{S} til \hat{S} . Riktig klokke i \hat{S} viser 120.625. Følgelig må \bar{S} iv stille klokka si 118.188 år fram hvis hun ønsker at klokka hennes skal vise det samme som alle andre klokker i \hat{S} . Dette betyr selvsagt ikke at \bar{S} iv plutselig har blitt 118.188 år eldre. Hun er fortsatt $18 + 2.437 = 20.437$ år gammel.

Neste hendelse (C) er at \bar{S} iv kommer hjem. I Sams verden S har denne hendelsen koordinatene $x_C = 0$ og $t_C = 2t_B = 24.490$. LT gir oss igjen de tilsvarende koordinatene i \bar{S} og \hat{S} :

$$\begin{aligned} \bar{x}_C &= \gamma(x_C - vt_C) = -120.601 \\ \bar{t}_C &= \gamma(t_C - vx_C/c^2) = \gamma t_C = 123.062 \\ \hat{x}_C &= \gamma(x_C + vt_C) = \gamma vt_C = 120.601 \\ \hat{t}_C &= \gamma(t_C + vx_C/c^2) = \gamma t_C = 123.062 \end{aligned}$$

Her må vi holde tunga rett i munnen: Turen hjem, målt med \bar{S} ivs klokke, varte $\hat{t}_C - \hat{t}_B = 123.062 - 120.625 = 2.437$ år (enten hun stilte klokka eller ikke). Ikke overraskende tok det like lang tid begge veier. \bar{S} iv konkluderer med at hun har blitt 4.874 år eldre siden avreise (hendelse

A). Altså er Sam og \bar{S} iv enige om \bar{S} ivs alder, 22.874 år, ved hjemkomst (hendelse C).

Det gjenstår da kun å kontrollere at de også er enige om Sams alder ved hjemkomst. \bar{S} iv må nå forholde seg til inertialsystemene \hat{S} og S . Hele reisen, fra hendelse A til hendelse C tok en tid $\hat{t}_C - \hat{t}_A = 123.062$ år. Sett fra \hat{S} har inertialsystemet S hele tiden hatt konstant hastighet $v = 0.98c$. En observatør i \hat{S} (og det er jo nettopp det \bar{S} iv er ved hjemkomst!) vil da, med rette, hevde at en tidsmåling i S mellom hendelsene A og C må vise

$$\frac{\hat{t}_C - \hat{t}_A}{\gamma} = \frac{123.062}{5.025} = 24.490$$

Og det er nettopp hva Sam selv hevder han har målt, så Sam og \bar{S} iv er også enige om Sams alder ved hjemkomst, 42.490 år.

Oppgave 7

a) Da pionet ligger i ro ($v_\pi = 0$), er total energi

$$E_{\text{tot}} = m_\pi c^2,$$

dvs pionets hvileenergi. Energibevarelse gir dermed

$$m_\pi c^2 = E_\mu + E_\nu,$$

der E_μ og E_ν er hhv myonets og nøytrinoets energi. Nøytrinoets masse antas å være omtrent lik null, slik at

$$E_\nu = p_\nu c,$$

der p_ν er nøytrinoets impuls. Myonets energi er

$$E_\mu = \sqrt{p_\mu^2 c^2 + m_\mu^2 c^4}.$$

Systemets totale impuls er lik null (siden pionet lå i ro), så impulsbevarelse gir

$$\mathbf{p}_\nu + \mathbf{p}_\mu = 0.$$

Altså er myonets og nøytrinoets impulser like store i absoluttverdi,

$$p_\nu = p_\mu = p.$$

Vi har videre

$$E_\nu = pc = \sqrt{E_\mu^2 - m_\mu^2 c^4},$$

slik at

$$m_\pi c^2 = E_\mu + \sqrt{E_\mu^2 - m_\mu^2 c^4}.$$

Løser vi denne ligningen mhp E_μ , finner vi

$$E_\mu = \frac{(m_\pi^2 + m_\mu^2) c^2}{2m_\pi}$$

b) Vi har

$$p = E_\nu/c = \frac{1}{c} (m_\pi c^2 - E_\mu) = \frac{c}{2} \left(m_\pi - \frac{m_\mu^2}{m_\pi} \right)$$

Sammenhengen mellom myonets impuls p og hastighet v_μ er

$$p = \frac{m_\mu v_\mu}{\sqrt{1 - v_\mu^2/c^2}}.$$

Kombinasjon av disse to ligningene gir

$$\frac{m_\mu v_\mu}{\sqrt{1 - v_\mu^2/c^2}} = \frac{c}{2} \left(m_\pi - \frac{m_\mu^2}{m_\pi} \right),$$

og løsning av denne ligningen mhp v_μ gir

$$v_\mu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{m_\pi^2 + m_\mu^2} c$$

Tallverdier: $E_\mu = 109.78$ MeV, $v_\mu/c = 0.27$.