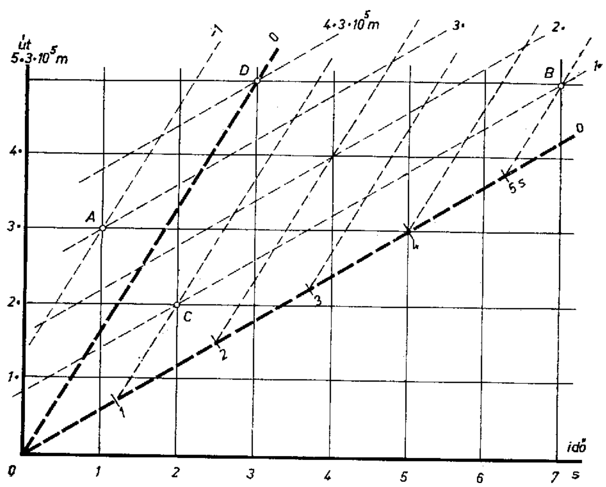
Az ember így szokott beszélni: ez a vagon 20 méter hosszú, a tanítási óra 45 percig tart stb. Mert ha a pályaudvar sínén álló vagon elejét és végét megjelöljük a földön, akkor erre a távolságra a méterrudat 20-szor lehet ráfektetni, illetve a becsengetéskor megindított stopperóra mutatója kicsengetéskor a 45-ös percnél áll. Talán reprodukálhatóbb időpélda: a 84-pólonium-218 (rádium A) radioaktív izotóp felezési ideje óránk szerint 3 perc. Megszoktuk, hogy ezek az adatok a vagonra, a radioaktív elemre állandó, változatlan jellemző számok. A folyóiratunkban megjelent két cikk alapján (l a szeptemberi és a novemberi számot) tudjuk, hogy a nagy sebességek esetében ez nincs így. Ha a vonat képes volna $0{,}6c = 180\,000$ km/s sebességgel haladni, akkor megjelölve a töltésen mozgó vagon elejének és végének egyidejű helyeit, ezek távolságát $0{,}8 \cdot 21 = 16$ méternek találnánk, és ha a vonaton utazó tudós jelezné például az ablakból egy-egy intéssel a felezés elejét és végét, akkor ezt az időközt a töltés mellett álló megfigyelők $3/0{,}8 = 3{,}75$ percnek találnák. Ha a vonat nem is, de elemi részecskék repülnek olykor a fényt megközelítő sebességgel, és ilyenkor a tapasztalat tényleg mutatja ezt a jelenséget.

Tehát a mozgó szerkezet, rendszer hossz- és időadatai az állóból mérve függenek a sebességtől. Egy néhány példán tanulmányozzuk ezeket a dolgokat. Ábránk azonos a legutóbbi cikk 3. ábrájával.



Az úttengely mentén $v = 0{,}6c$ sebességgel mozgó tárgyak idő- és távolságkoordinátáit az álló rendszerben a derékszögű, folytonos vonalak sorszámától, a mozgó rendszerben a ferde szaggatott vonalak segítségével állapíthatjuk meg. Három példát vizsgálunk.

I. Az egyenesünk mentén $3 \cdot 3 \cdot 10^5$ méternél áll az első megfigyelő és órája szerint 1 s-kor (A-pont) egy rakétát lőtt ki, a vonal mentén előre irányítva, és ez a rakéta az $5 \cdot 3 \cdot 10^5$ méternél álló barátját érte el (B-pont) 7 s-kor. A rakétában küldött levél felszólította a B embert, hogy igyék barátja egészségére, és ez meg is történt. Egyébként a rakéta sebessége $2 \cdot 3 \cdot 10^5/6 = 10^5$ m/s volt, ami a fénysebesség egyharmada és elvben nem lehetetlen. Ugyanezt az eseménysorozatot megfigyelte az egyenes pálya fölött $0{,}6c$ sebességgel repülő pilóta is. Azt látta, hogy -1 s-kor $3 \cdot 3 \cdot 10^5$ méternél egy ember akinek a sapkáján A betű volt, egy rakétát indított el, és ez $+5$ s-kor ért el az $1 \cdot 3 \cdot 10^5$ méternél álló B emberhez, aki a levelet elolvasva nagyott húzott a kulacsából. A repülő az események időközét 6 s-nak, az emberek távolságát $2 \cdot 3 \cdot 10^5$ méternek észlelte, de úgy, hogy A van elől és B hátul, a rakéta a repülőgép haladási irányával ellentétesen repült. Nem csoda, hiszen sebessége kevesebb volt. A repülő más időközt észlelt, mint az emberek és számára megfordult a térbeli helyzet. De a pilóta is úgy látta, hogy a levelet A küldte és ennek következtében kortyintott B.

II. Egyenes utunk mentén $2 \cdot 3 \cdot 10^5$ méternél áll C barátunk és 2 s-kor tüsszent egy nagyot (C-pont). Másik barátunk, D az $5 \cdot 3 \cdot 10^5$ méteres helyen áll és 3 s-kor cigarettára gyújt (D pont). Mit látott az egyenes út felett repülő pilóta? Egy C jelű ember $1 \cdot 3 \cdot 10^5$ méternél állva 1 s tüsszentett. D Pedig $4 \cdot 3 \cdot 10^5$ méternél 0 s-kor gyújtott cigarettára. Számára a távolság változatlanul $3 \cdot 3 \cdot 10^5$ méter maradt, az időköz abszolút nagysága sem változott, 1 másodperc maradt, de az idősorrend megfordult! A repülő számára előbb gyújtott D cigarettára és azután tüsszentett C. Lehetséges ez? Természetesen. De a két esemény nem lehetett okozati kapcsolatban, mert az álló rendszerben $3 \cdot 3 \cdot 10^5$ m/1 s $= 3c$, háromszoros fénysebességgel kellett volna a C tüsszentését jelentő hírnek D-hez eljutnia, hogy D reagálhasson rá, például egy jókívánsággal. Ilyen sebesség nincs. D Nem szerezhetett tudomást C tettéről, tiszta véletlen, hogy akkor cigarettára gyújtott. Ebből látható, hogy az idősorrend megfordulhat ugyan, de csak egymástól független eseményeknél, az ok és az okozat nem cserélhető fel.

III. C-emberünk $2 \cdot 3 \cdot 10^5$ méternél képtelefon előtt ül és 2 s-kor tüsszent. Barátja B $5 \cdot 3 \cdot 10^5$ méternél a képernyő előtt ül és 7 s-kor azt mondja: egészségedre! A hír átvivésének akadálya, $3 \cdot 3 \cdot 10^5$ m/5 s $= 0{,}6c$ átviteli sebesség szükséges hozzá, ami lehetséges. Tehát $3 \cdot 3 \cdot 10^5$ méteres utat a hír 5 s alatt teszi meg. Ezt az eseményt vizsgálja a pilóta. És mit lát? Szerinte C és B egymás mellett állnak $1 \cdot 3 \cdot 10^5$ méternél, és az esemény időtartama $5 - 1 = 4$ s. A pilóta számára távolság nincs, csak időköz.

Amint látjuk, nagy sebességek esetében sok minden lehetséges, ami a mindennapi életünkben szokatlan. Hosszúság, időtartam, egyidejűség, idősorrend, térbeli sorrend viszonylagosak. Már régebben is megtörtént, hogy finomabb észlelések változónak mutattak olyasmit, amit állandónak képzeltünk. Pl a vas sűrűsége melegen kisebb stb. A mostani helyzet sokkal meglepőbb és nyugtalanítóbb, hiszen olyan alapfogalmakat, mint tér és idő eddig abszolútnak képzeltünk el. Épp a fizika alapvető fogalmai bizonyultak relatívnak. Azonban a folytatás megnyugtató és gyönyörű.

Minkowski, a kiváló matematikus 1908-ban egy érdekes, a relativitás elméletben rejtőzködő kapcsolatot fedezett fel. Egy síkon x_1, y_1 és x_2, y_2 derékszögű koordinátákkal adott pontok távolságát a Pythagoras-tétellel számíthatjuk ki:

$$h^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2.$$

Az egyes pontok koordinátái a legkülönbözőbbek lehetnek a koordináta-rendszer elhelyezése szerint, de a h távolság mindig ugyanannyi, ahogyan mondani szokták: invariáns. A mechanikában egy pontszerű esemény koordinátái az egyenes mentén az s távolság és t az időpont. Minkowski t helyett a $w = \sqrt{-1} \cdot c \cdot t = ict$ mennyiséget választotta, ami szintén távolságjellegű. Most már s-sel és w-vel mint távolságokkal lehet számolni. II. példánk esetében C tüsszentésének koordinátái az álló rendszerben $s_1 = 2 \cdot 3 \cdot 10^5$ m, $w_1 = i \cdot 3 \cdot 10^5 \cdot 2$ m; D cigarettára gyújtásának koordinátái $S_2 - 5 \cdot 3 \cdot 10^5$ m, $w_2 = i \cdot 3 \cdot 10^5 \cdot 3$ m. A közönséges távolságmérési eljárás szerint járunk el:

$$\begin{aligned}
I^2 &= (s_2 - s_1)^2 + (w_2 - w_1)^2,\\
I^2 &= (5-2)^2 \cdot (3 \cdot 10^5 \text{ m})^2 - (3-2)^2 \cdot (3 \cdot 10^5 \text{ m})^2 = (9-1) \cdot (3 \cdot 10^5 \text{ m})^2 =\\
&= 8 \cdot (3 \cdot 10^5 \text{ m})^2,\\
I &= \sqrt{8} \cdot 3 \cdot 10^5 \text{m}.
\end{aligned}$$

Végezzük el ezt a számítást a mozgó repülőgép koordináta - rendszerében is. Itt $S_1 = 1 \cdot 3 \cdot 10^5$ m, $W_1 = i \cdot 3 \cdot 10^5 \cdot 1$ m; $S_2 = 4 \cdot 3 \cdot 10^5$ m, $W_2 = 0$ tehát:

$$\begin{aligned}
I^2 &= (S_2 - S_1)^2 + (W_2 - W_1)^2 =\\
&= (4-1)^2 \cdot (3 \cdot 10^5 \text{ m})^2 - (0-1)^2 \cdot (3 \cdot 10^5 \text{ m})^2 = 8 \cdot (3 \cdot 10^5 \text{ m})^2\\
I &= \sqrt{8} \cdot 3 \cdot 10^5 \text{ m}.
\end{aligned}$$

Ugyanazt kaptuk. Általánosságban meg fogjuk mutatni, hogy ha a távolságszámítás mintájára a jelenség távolság- és időadataiból egy egyesített mennyiséget számolunk ki, ez nem függ a koordináta-rendszerek sebességétől, mindig ugyanannyi, invariáns. A távolságból és az időkből ilyen módon számított mennyiség neve: intervallum. Példánkban a tüsszentés és cigarettára gyújtás közötti intervallum $\sqrt{8} \cdot 3 \cdot 10^5$ méter. Ez sem nem távolság, sem időtartam, hanem ez a kettő együtt. (Önkény, hogy méterben kaptuk, megfelelő átszámítással másodperc is lehetett volna.)

Természetesen egyetlen numerikus példa nem döntő. Az intervallum állandóságát bizonyítani kell. Az első esemény legyen az origóban, $S_1 = 0$, $W_1 = 0$, a másodikra nézve pedig $S_2 = S$, $W_2 = W = icT$. Az intervallum négyzete a mozgó rendszerben:

$$I^2 = S^2 + W^2 = S^2 - c^2T^2.$$

A Lorentz-transzformáció ismert képleteivel, amelyekkel az 1176. számú feladatlapban is találkozunk:

$$\begin{aligned}
I^2 &= \left(\frac{s - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}\right)^2 - c^2 \left(\frac{t - vs/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}\right)^2 =\\
&= \frac{(s - vt)^2 - c^2(t - vs/c^2)^2}{1 - v^2/c^2} = \frac{s^2c^2 + c^2v^2t^2 - c^2t^2 - v^2s^2}{c^2 - v^2} =\\
&= \frac{s^2(c^2 - v^2) - c^2t^2(c^2 - v^2)}{c^2 - v^2} = s^2 - c^2t^2 = s^2 + (ict)^2.
\end{aligned}$$

Ez pedig a v sebességtől függetlenül az álló rendszerben számított intervallum. A valóságban a három térbeli és egy időbeli koordináta négytagú négyzetösszeggel adja az intervallum négyzetét, ekkor az ábra rajzolása nehézkesebb.

Minkowski felfedezése igen nagy jelentőségű: összeolvasztja a teret és az időt. Ha a távolság és időtartam szintézisét jelentő intervallummal számolunk, akkor az eredmény független a megfigyelő sebességétől. Külön számolva csak távolsággal vagy csak idővel ezekre kisebb, nagyobb értékeket kaphatunk, az egyik alkalmas koordináta-rendszerről nézve el is tűnhet. Például a III. példánkban csak az idő maradt meg, a távolság 0 lett. Felcserélődhetnek a sorrendek is. Külön vizsgálva a teret és az időt mindig csak az igazi jelenség egy-egy nézetét, vetületét kapjuk aszerint, hogy hogyan történik a vetítés, de nem a teljeset. Egy hasonlat: ha a levegőben egy tojás lóg és két megfigyelő csak az árnyékát látja, de magát a tárgyat nem, akkor az egyik esetleg 10 cm^2 területű kört, a másik 15 cm^2 területű oválist észlelhet. Ezek mint vetületek igazak, de a valóság a térbeli tojás, amelynek köbtartalma van. Ilyen változékony képeket figyelünk meg, ha egy mozgásjelenséghez csak méterrúddal vagy csak órával közeledünk. A valóság az összeolvadt tér és idő: *a téridő.*