

BIKIEN PARADOXA

DENBORA ETA ESPAZIOA ERLATIBOAK DIRA

XIX. mendean fisikariek argiaren abiadura erlatiboa zela pentsatu zuten, hots, abiadura hau aldatu egiten zela erreferentzi sistema batetatik beste batera pasatzean. Experimentu batzu egin zituzten hau egiaztatzeko; baina experimentu hauek zera frogatu zuten, argiaren abiadura iraunkorra dela zentzu guztietan eta ez dela aldatzen argi-iturriaren higiduragatik.

Einsteinek printzipio hau onartuz eta, fisikako legeaen arauera, inertzia sistema guztiak berdinak direla onartuz, erlatibitatearen teoria argitaratu zuen.

Esandako printzipio hauek Galileoren transformakuntzak aldatzen dituzte. Transformakuntzan beste koordinatu bat sartzen dute: denbora.

Lorentz - Einsteinen transformakuntzak hauek dira:

$$\begin{cases} x' = \gamma (x - vt) \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \gamma \left(t - \frac{v}{c^2} x \right) \end{cases} \quad \begin{cases} x = \gamma (x' + vt') \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \gamma \left(t' + v \frac{x'}{c^2} \right) \end{cases} \quad \text{Hemen } \gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-1/2} \text{ izanik}$$

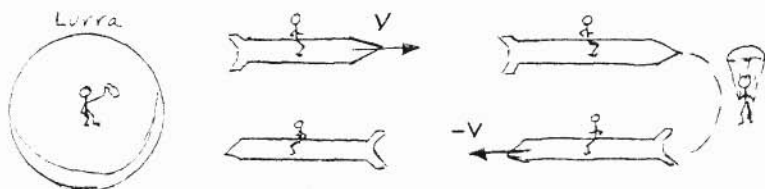
PROBLEMAREN PLANTEAMENDUA

Erlatibitatearen teoriak paradoxa askotara garamatza; hauen artean, bikien paradoxa da eztabaidatuena.

Demagun biki bi, bakoitzak erloju batez hornitua, biak ordu berean jarririk. Biki bat kohete batetan sarturik bere erlojuaz bidaia bat egitera doa, izar batetara joan-etorri bat egitera. Bestea Lurrean gelditzen da. Lurrean dagoen bikiak beste anaiaren erlojua atzeratu egiten dela neurtzen du. Elkar aurkitzen dutenean, bidaia egin duen bikia gazteago izango da. Baina kohetean egon denak, Lurrean gelditu dena gazteago dela neurtzen du. Hauxe da paradoxa.

Paradoxa hau lortzen da, biki biak egoera berdinetan kontsideraturik. Baina hau ez da egia, kohetean doan bikiak salto bat egin behar baitu bira egiten duenean, eta orduan egoerak desberdinak dira biki bientzat.

Egoera desberdinak kontsideraturik ikusi egingo dugu, zelan kohetean doan bikia gazteago heltzen den lurrera. Hau gure zentzu arrunterako oso zaila egiten zaigu, paradoxa bezala. Baina erlatibitatearen teoriak gauza horretara garamatza, ondorioz egiaztatuko dugunez.



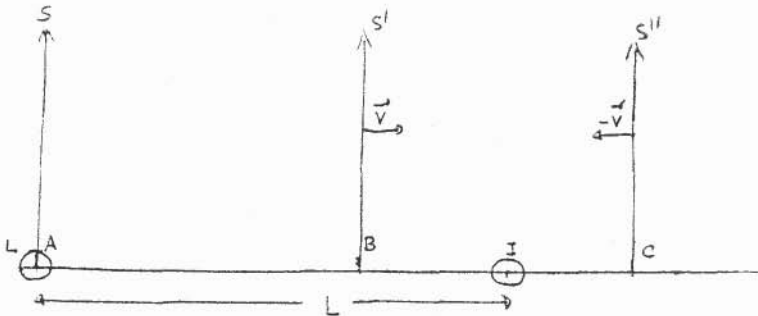
Demagun, Lurrean dagoen bikia inertiako erreferentzi sistema batetan dagoela; eta berdin kohetean doana ere. Hau egia izateko, V abiadura une arbuikor batetan hartu behar du. V abiadura hau argiaren abiaduraren antzekoa da. Higiduraren norantza aldatzen denean koheteak azelerazio bat dauka, baina guk azelerazio hau desagiteko beste inertiako erreferentzi sistema bat kontsideratuko dugu. Orduan, bira unean bidaian doan bikiak salto bat egiten du inertiako erreferentzi sistema batetatik beste batetara.

Orduan, gure hiru inertiako erreferentzi sistemak hauek dira:

- Lehenengoa: Lurrean dagoen bikiarekin lotuta dagoena.
- Bigarrena: Lurretik izarra V abiaduraz doana.
- Hirugarrena: izarretik Lurrera $-V$ abiaduraz doana.

Azken biak une hartan bertan izarrean aurkitzen dira, eta bien erlojuak ordu berdina neurtzen dute une honetan.

V abiadurak x koordinatuaren norantza darama.



I - izarra. — L - lurra. — A - biki bat. — B - beste bikia \bar{V} abiaduraz.
C - beste bikia $-\bar{V}$ abiaduraz.

PROBLEMAREN EBAZPENA

Lorentzen bi transformakuntza behar dugu: S eta S'-ren artean eta bai S eta S'-ren artean ere:

$$s - s' \quad \begin{cases} x = \gamma (x' + vt') \\ t = \gamma (t' + v/c^2 x') \end{cases} \quad s - s'' \quad \begin{cases} x = \gamma (x'' - vt'') + 2L \\ t = \gamma (t'' - v/c^2 x'') \end{cases}$$

Erlojuak zerotik irtetzen dira.

a) Lurrean dagoenak, A, zera neurtzen du:

Bidaierdia t_A denboran egiten da Lurrean dagoenarentzat

$$t_A = \frac{L}{V}$$

A-k neurtzen du B-rentzat denbora hau t'_B dela, izarrera heltzen denean.

$$\begin{aligned} x_A &= \gamma (x'_B + vt'_B) \Rightarrow L = \gamma (0 + vt'_B) \Rightarrow t'_B = L/\gamma v = t_B^A \\ t_A &= \gamma (t'_B + v/c^2 x'_B) \Rightarrow L/v = \gamma (t'_B + 0) \Rightarrow t'_B = L/\gamma v = t_B^A \end{aligned}$$

A-k neurtzen du etorrian, B-rentzat Lurrera heltzen denean t''_B dela:

$$t_A = \gamma (t''_B - v/c^2 x''_B) \Rightarrow L/v = \gamma (t''_B - 0) \Rightarrow t''_B = \frac{L}{\gamma v}$$

Orduan, bidaia osoa $\frac{2L}{\gamma v}$ denboran egiten da kohetean doanarentzat,

A-k neurtuta. Eta Lurrean gelditzen denarentzat, $\frac{2L}{v}$ denboran.

Baina B-k neurtuta ebazpen berdinetera helduko ginateke eta paradoxan egongo ginateke; baina ez da egia. Ondorioz zera ikusiko dugu.

b) B-k neurtuta:

B-k neurtzen du, A-rentzako bidaia erdia, izarrera heltzen denean, hauxe dela:

$$x_B = \gamma (x'_A + vt'_A) = 0 \Rightarrow x'_A = -\frac{L}{\gamma}$$

$$t'_A = \gamma \left(\frac{L}{\gamma v} + \frac{v}{c^2} x'_A \right) = \gamma \left(\frac{L}{\gamma v} - \frac{v}{c^2} \frac{L}{\gamma} \right) = \frac{L}{v} \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)$$

Eta zer pentsatzen du B-k, A-k neurtzen duenaz?

Lorentzen transformakuntzak sartuz:

$$0 = \gamma \left(x''_A - \frac{vL}{\gamma v} \right) + 2L \Rightarrow x''_A = -\frac{L}{\gamma}$$

$$t''_A = \gamma \left(t'_A - \frac{v}{c^2} x''_A \right) = \gamma \left(\frac{L}{\gamma v} - \frac{v}{c^2} x''_A \right) = \frac{L}{v} \left(1 + \frac{v^2}{c^2} \right)$$

Orduan, paradoxarik ez dago, zeren A-rentzat bidaia osoa $t_A^C + t_A^B = \frac{2L}{v}$ denboran egiten da, eta neurri hau A-k eta B-k neurtzen dute.

Denboraren salto bat dagoela ere ikusten dugu:

$$t_A^C - t_A^B = \frac{2Lv}{c^2}$$

desberdintasun hau, sistema S'tik S''ra aldatzean lortzen da.

Orduan, bidaiaren denbora osoa, Lurrean dagoenarentzat, $\frac{2L}{v}$ da.

ZENBAIT ADIBIDE

Oraindik gizonekin experimenturik ezin dugu egin, baina denboraren dilatazioa frogatuta dago, beste experimentu batzuz. Adibide bat, Rossi eta Halle-k 1941. urtean mesoiez eginiko experimentua da.

Mesoi hauek izpi kosmikoak atmosferara heltzen direnean produzitzen dituztenak dira.

Mesoi bat desintegratu egiten da, elektroik, neutrino eta antineutrinoak emanaz



Muoiaren abiadura argiaren abiaduraren antzekoa da ($\sim c$).

Neurgailu batez neur daiteke noiz heltzen den mesoia eta noiz produzitzen den elektroia.

Mendi-tontor batetan neurgailu bat ipintzen dugu, eta zenbat mesoi helzen diren eta zenbat desintegratzen neurtzen dugu.

Teoriaz L distantzia batetan eta $\sim \frac{L}{c}$ denboran zenbat mesoi galtzen diren desintegrazioagatik neurtzen dugu.

Mendiko neurgailu honek 563 mesoi orduko neurtu zuen, 2.000 metro-tako garaieran. Itsas ertzean heltzen direnean, 25 mesoi bakarrik geldituko lirakeke 6,5 mikrosegundo iragan baitira. Hala ere, beste neurgailu bat ipintzen badugu (itsas ertzean) 400 mesoi orduko neurtzen da. Zergatik? Mesoi hauek daramaten abiaduragatik, haiek neurtzen duten denbora laburtu egiten da, hots, mikrosegundo bat da, eta orduan denbora gutxiagotan mesoi gutxiago desintegratzen dira.

Experimentu honek, beste batzuk bezala, erlatibitatearen teoria ipuin bat ez dela frogatzen du, eguneroko teoria praktikoa baizik.

BEGOÑA JAUREGIZAR
BEGOÑA ZURIMENDI