

BEHATZAILE AZELERATUAK ETA HORIZONTEAK

JUAN M. AGIRREGABIRIA

FISIKA DEPARTAMENTUA. ZIENTZI FAKULTATEA
EUSKAL HERRIKO UNIBERTSITATEA. P.K. 644 - BILBO

LABURPENA. - Oinarrizko hipotesi eta tresnak erabiliz, alde batetik behatzaile inertzial eta azeleratuen arteko asimetria eta bestetik, arrazoi zinematikoak tartean direla, espazio/denbora laun batetan ere agertzen den horizonte kontzeptua adierazten dira.

SUMMARY: By making use of only elementary hypothesis and geometrical pictures, the asymmetry between inertial and accelerated observers is illustrated. Similarly the concept of horizon, which appears by kinematical reasons even in flat space-time, is exposed.

sarrera

Erlatibitate Espeziala ikasten hasten direnek, "Bikien Paradoxa" famatuaren ohizko azalpena ulertzeko (eta onartzeko) aurkitzen du ten eragozpen nagusia, behatzaile inertzialen eta azeleratuen artean dagoen funtsezko asimetriari datza. Zoritxarrez, testu-liburu gehienek ezer gutxi diote behatzaile azeleratuei buruz. Gainera, Erlatibitate Espeziala behatzaile inertzialen teoria dela, eta beraz, behatzaile azeleratuak Erlatibitate Orokorriari dagozkio la uste dezake baten batek. Baina azken hau ez da egia; ez egia osoa behintzat. Behatzaile azeleratuen propietate batzuk eta, batez ere, behatzaile inertzialekiko duten desberdintasuna, Erlatibitate Espezialaz baliatuz azter ditzakegu eta inolako erlatibitaterik aipatzeko ere! Baieztapen hau nolabait frogatzea dugu lantxo honen lehenengo helburua.

Bigarrena, horizonteen berri ematea da. Aipaturiko kontzeptuak aparteko garrantzia du zulo beltzak eta zuriak aztertzerakoan. Hemen oso kasu erraz batzuk aztertzeri mugatuko gara.

Bestaldetik, erabide grafiko

bakun batzuk, berez ulergaitz diruditen arazo batzu argitzeko eta ebazteko duten ahalmena azpimarratu nahi dugu. Era honetako adibide atsegin bat Arnold-ek (2) ematen du, eta beste bat hurrengo galderak sorturikoa da:

"Lerrozuzen berberean higituz une batetan elkarrengandik nahi bezain hurbil egotera iristen diren bi behatzailek, ez dute sekula ere elkar ikusten. Nola ote?"

"Itsuak dira", "lainca daga" eta horrelako ihardespenak ez ditugu onartuko, noski. Geroago ikusiko dugunez, eta izenburuak berak iradokitzen digunaren arabera, behatzaileén higiduraren izaeran datza benetako erantzuna.

gure hipotesiak eta tresnak.

Izan bitez, trenbide bukaezin batean higi daitezkeen eta tren bat natan doazen bi behatzaile. Bakoitzak argi-foku bat du eta bestearen argia ikus dezake eta bai bestea bere fokuz argizta ere. Gauza modernoek zaleek, espazientziak eta radarra erabil ditzakete. Guk, trenak nahiago ditugu, Einstein-en "gedanken-experiments" direlakoan kutsua, bait daukate.

Den-dena trenbidea pausagunean dagoeneko erreferentzi sistematik aztertuko dugunez gero, ez dago inolako erlatibitate-arazorik.

Egingo ditugun hipotesiak honako bi hauek izango dira:

- a) Argiaren abiadurak ez du iturriaren higidura-egoeraren dependentziarik.
- b) Tren bakoitzaren abiadurak argiarena baino txikiagoa izan behar du.

Ezaguna denez, lehenengoa Erlatibitate Espezialaren postulatu bat da eta bigarrena, aipaturiko teoriaren ondorioa. Dena dela, Erlatibitatea ezagutu ez arren esperientziak erakutsitako emaitzatzat onar ditzakegu aipaturiko hipotesiak.

Erabiliko dugun tresna bakarra, irudietan marrazturiko diagrama espazio/denborala izango da. Ordenatuetan, erloju batek neurturiko denbora ipiniko dugu, segundotan adibidez. Abzisan, ordea, trenbideko puntu batetatik neurtutako distantzia jarriko dugu, argi-segundotan. Tren batean jazotako gertaera bat, beraz aipaturiko diagramako puntu batez adieraziko dugu, beraren ko-

ordenatu espazio/denboralez baliatuz.

Kontura gaitezen ezen, Minkowski-ren unibertsoaren antzekoa izan arren, diagrama hau ez dela gauza bera, ez bait dago inolako metrikarik. Hortaz, gauza sinpleagoa da eta nolabaiteko Erlatibitate erraztu bat era biltzen dugula esan dezakegu.

Argi-pultsu(fotoi) baten edota behatzaile baten zinatika, dagokion unibertso-lerroak adieraziko du.

Unitateen aukeraren arabera, honela geratzen dira egindako hipotesiak:

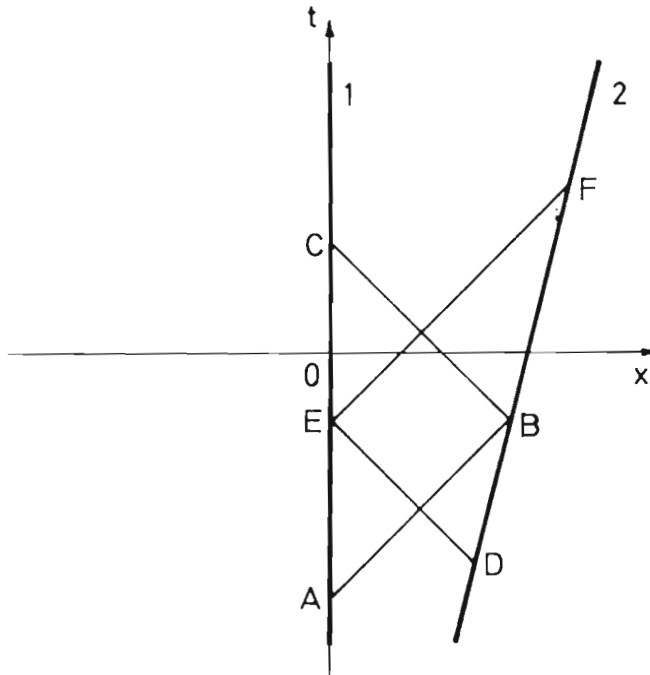
- a) Fotoi baten unibertso-lerroa 1 balio duen maldadun lerrozuzena da. Jakina, iturriaren gertaeran hasi behar du.
- b) Behatzaile baten unibertso-lerroak, puntu guztietan 1 baino malda handiagoa duen kurba bat izan behar du.

Honez gain, ohizko beste hipotesi erdi-ezkutu bat egingo dugu: trenen eta fotoien unibertso-lerroak etorkizun erantzko norantza dutela hain zuzen ere.

Horrexegatik, irudietan ez dugu unibertso-lerroen norantza adierazi.

Trenen unibertso-lerroak, le-

erro lodienez marraztu ditugu; eta lerro meharrenez, koordenatu-ardatzak eta bestelako lerro laguntzaileak. Lodiera ertaina duten unibertso-lerroak, fotoiei dagozkie.



1. irudia

Kasu honetan 1. behatzailea jatorrian eta pausagunean dago, betidanik eta betirako. 2. a, ordea, abiadura konstantez higitzen da, bi behatzaileak inertzialak direla esaten da, beraien unibertso-lerroak zuzenak bait dira.

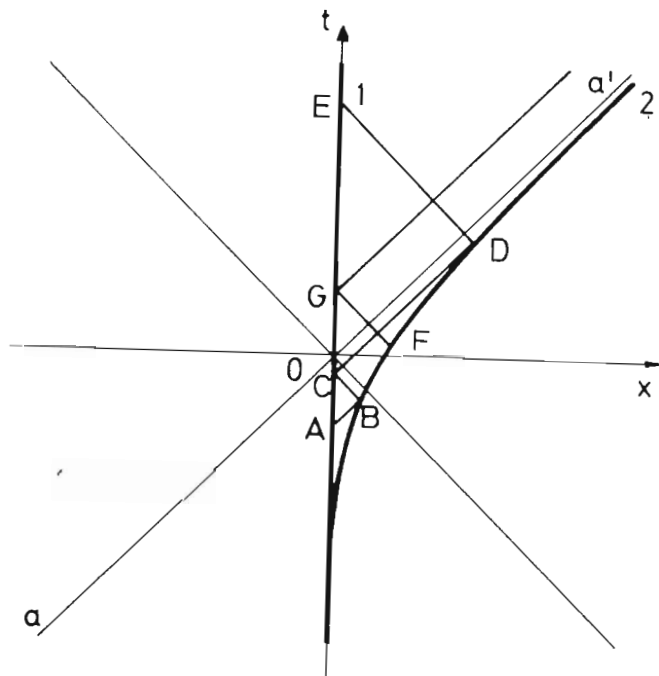
A gertaerari dagokion aldiu-nean 1. treneko fokuak igorririko argi-izpia, B gertaeran ikusten du 2. behatzaileak. Era berean D gertaeratik argi-izpia, E delakoan jasotzen dute 1. behatzailearen begiek. Horrela bada, beha

zaile bakoitzak bestearen bizi-za osoa ikusten du. Areago, edozein gertaeraren (hau da, edozein puntutan eta edozein aldiunetan jazotako gertaeraren) berri eduki lezakete bi behatzaileek, argi-izpi egoki baten bidez.

Demagun, orain, 2. treneko fokua itzalita dagoela. Hala ere, 1. behatzaileak 2.a ikus dezake bere fokuz baliatuz. Izan ere, A gertaeratik argi-izpia, B gertaeran 2. trenean isladatzen da eta

C gertaeran 1. behatzaileak ikusten du. Antzeko gauza esan daiteke 2. behatzaileari buruz, DEF unibertso-lerroa duen argi-izpia kontutan hartzen badugu. Beraz, behatzaile bakoitzak bere fokuz baliatuz, bestearen bizitza osoa ikus dezake eta baita edozein gertaeraren berri eduki ere.

Ikusten dugunez, kasu honetan ez da ezer berezirik gertatzen. Gauza bitxiak hurrengo kasuan hasten dira.



2. irudia

Kasu honetan ere 1.behatzailea jatorrian eta pausagunean dago. 2.a,ordea,bestearekin egon da al diune batetararte eta,orduan,aze leratzen hasi da.

Lehen esandakoaren arabera,1. behatzaileak gertatzen den guztia ikusiko du eta,kasu berezi gisa, bestearen bizitza osoaren berri edukiko du,azken honen argiaz edota bere fokutikoaz baliatuz.

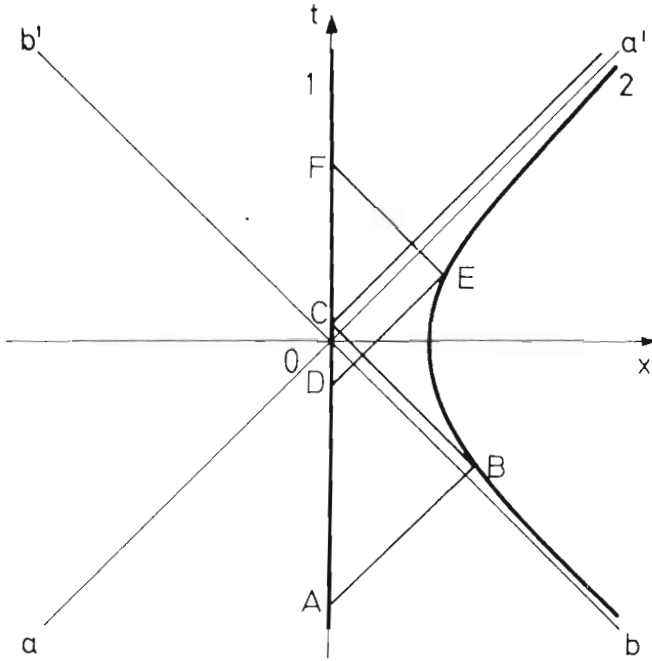
Gainera,beraren begietaraino edozein aldiunetan heltzen dira 2.trenetik igorritako argi-izpi bat eta bertan isladaturiko be te fotoi bat.Baina azken honek, 1.trenetik $t=0$ aldiunea baino le henago irten behar izan du,zeren adibidez,G gertaeratiko argi-pul tsuak ez bait du sekula ere 2. trenara harrapatzen eta,beraz,ez bait da isladatzen.

Arrazoi berberagatik,2.behatzaileak,edozein aldiunetan argi-pulatsuak jaso arren,1.aren bizitzaren erdia($t < 0$ baldintzari dagokiona alegia) baino ez du ikusiko;eta hau,bai bestearen fokutiko argiaz baliatuz eta baita berak igorritako izpiak erabiliz ere.

Kontsidera dezagun,orain, aa'

erdikaria.2.unibertso-lerroaren asintota da eta gure espazio/den bora bi planoerditan banatzen du.Experientziak frogatzen digu nez,informazioaren hedapenak eta partikula guztiek eduki dezaketen abiadurarik handiena argiarena dela onartzen baldin badugu, erraz ikus dezakegu 2.behatzaileak ez duela aa' erdikariaren ezker aldeko planoerdiko gertaeraren berririk izango,eta bertan jazotakoak ez duela aipaturiko behatzailearengan inolako eraginik izango.Horrexegatik,ai paturiko aa' lerrozuzena 2.behatzailearen "gertaera-horizontea" dela esaten da.Begi bistan dagoenez,behatzaile batekiko de finitzen den kontzeptu zinematiko koa dugu gertaera-horizontea. Horrelakorik ager dadin,behatzaileak denbora-tarte bukaezin batean zehar egon behar du azeleaturik.Erlatibitate Orokorrean,ordea,espazio/denbora launa ez denez gero,horizonte geometrikoak ager daitezke.Esaterako,zu lo beltz baten horizontea gertaera-horizontea da kanpoan dagoen edozein behatzailearekiko.

Ikus 3.irudia.



3. irudia

Berriro ere 1. behatzailea pau sagunean dago, eta 2.aren bizitza osoa ikusten du. 2. trenetik igorririko edota isladaturiko argi-pultsu guztiak, $t > 0$ denboratartean jasotzen ditu, izpi isladatuak $t < 0$ tartean igorri dituelarik.

2. behatzailea aldiune orotan dago azeleraturik eta "higidura hiperbolikoa" egiten duela esaten da, nahiz eta beraren higidura espaziala zuzena izan. Erlatio

bitate Espezialean, aipaturiko higidura, berezko azelerazio konstanteari dagokio.

Aurreko kasuan bezalaxe, aa' erdikaria behatzaile honekiko gertaera-horizontea da eta 1. behatzailearen bizitzaren erdia baino ez du ikusiko; eta hori, azken behatzaile honek igorririko argi-izpiez baliatuz. 1. treneko fokua itzalirik badago, 2. behatzaileak bere fokutiko argiaz baliatu behar du, baina aipatu-

riko argia (adibidez, BC izpia) ez da inoiz 2. trena dagoen lekura itzuliko. Beraz, bere fokua era biliz, 2. behatzaileak ez du 1. a ikusiko. Izan ere, bere fokutiko argiaz ikus ditzakeen gertaerak, a'Ob kuadrantean daudenak dira, erraz ikusten den bezala.

Goazen orain, bb' erdikaria aztertzeraz. 2. trenetik abiatu den argi-pultsu batek (hala nola BC delakoak) ez du aipaturiko lerro zuzena ebakitzen. Hortaz, bb' erdi kariak espazio/denbora bi zatitan banatzen du: lehenengoa, haren ezker aldekoa alegia, behatzailearen eragin-barrutitik kanpoan dago. Guzti hau adierazteko, bb' lerro-zuzena 2. behatzailearekiko "partikula-horizontea" dela esan ohi da.

Agerian dagoenez, partikula-horizontea ere, behatzaile batekiko definitu behar den kontzeptu zinematikoa dugu gure espazio/denboran. Erlatibitate Orokorrean, aldiz, zulo beltz baten horizontea geometrikoa da eta barruan dagoen edozein behatzailearekiko partikula-horizontea da.

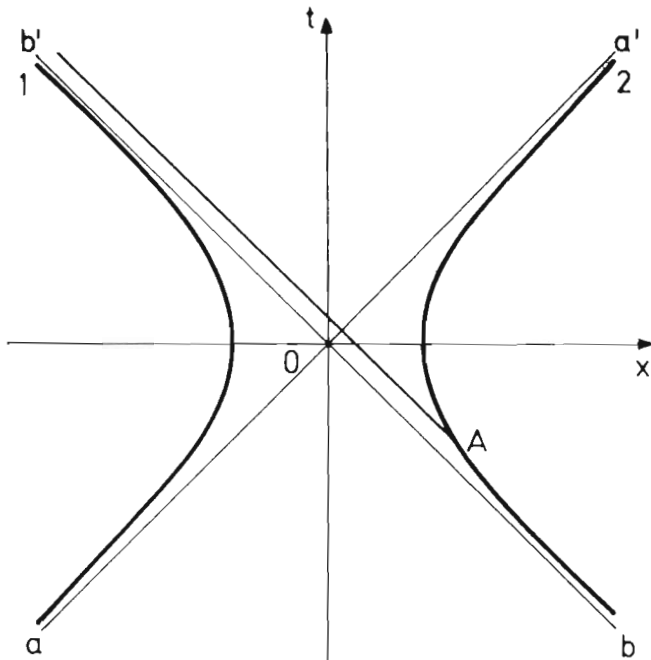
Adibide honetan, 2. behatzaileak bi horizonte-motak ditu, baina ho-

rizonte bakoitza bakarrik ere ager daiteke. Izan ere, gertaera-horizontea bakarrik agertzen zen 2. irudiko kasuan, eta partikula horizontea baino ez duen adibide bat ikusteko, aski da 2. irudian denbora-ardatzaren norantza alderantztea.

Ikus 4. irudia.

Honetan, bi behatzaileak azeleraturik daude aldiune orotan bien higidura hiperbolikoa bait da. Ondorioz, aa' erdikaria 1. behatzailearen partikula-horizontea izateaz gainera, 2. aren gertaera-horizontea ere bada. bb' delakoa, 1. behatzailearen gertaera-horizontea da eta 2. aren partikula-horizontea.

Gainera, irudian ikusten denez, bakoitza bestearen partikula-horizontearen eta gertaera-horizontearen beste aldean dago. Beraz, bakoitzak ez du bestea sekula ere ikusten eta ez bestearen eraginik pairatzen ere; hau da, batak igorritako informazioak edota eraginak (hala nola A gertaeratiko fotoiak) ez du bestearen unibertso-lerroa ebakitzen. Betidanik eta betirako guztiz inkomunikaturik (ia-ia bi unibertso desberdinetan) daudela esan dezakegu.



4. irudia

Eta, kasu honetan, nolakoa da trenen higidura espaziala? Ar- gi denez, bi behatzaileak elka- rrenganantz hurbilduz datoz betidanik eta $t=0$ aldiunerarte; une honetan abiadurarik gabe daude, bueltatú egiten dira eta betirako elkarrengandik urrun- tzen hasten dira. Hurbilen dau- deneko aldiunea, $t=0$ delakoa da eta, hiperbolak nahi bezain zo- rrotzak egin ditzakegunez gero trenen arteko aldiuneko distan- tziazirik laburrena nahi bezain

txikia egin dezakegu. Hementxe dugu, ba, sarreran egindako gal- deraren erantzuna: "4. irudiko hi- gidura hiperbolikoan ari dira, behatzaileak".

Jakina, berau ez da erantzun bakarra zeren eta, elkarren arteko eraginik ez egoteko aski bait da behatzaile baten uniber- tso-lerroa aOb' kuadrantean egon da bestearena bOa' delakoan ego- tea. Baina, honetarako, ezinbeste- koa da denbora-tarte bukaezin ba

tetan bi behatzaileak azeleraturik egotea eta, ondorioz, argiarenaren hurbila den abiadura izan behar dute tarte bukaezin bate-tan.

Horrexegatik, praktikan ez da

horrelakorik gertatzen, ez tre-nen kasuan eta ez espaziuntzi azkarrenenean ere!

Agian, adibide sinesgarriago (!?) bat, lainoa dagoela suposatuz lor daiteke. Baina irakurle-ari uzten diogu horrelako adibi-dearen azterketa.

;

OHARRAK:

- (1) Lantxo hau, U.E.U.n 1981.eko Uztailaren 30ean emandako hitzaldiaren hedapena da.
- (2) V.Arnold: "Equations différentielles ordinaires" Mir, Moscou (1974). 12. orr.