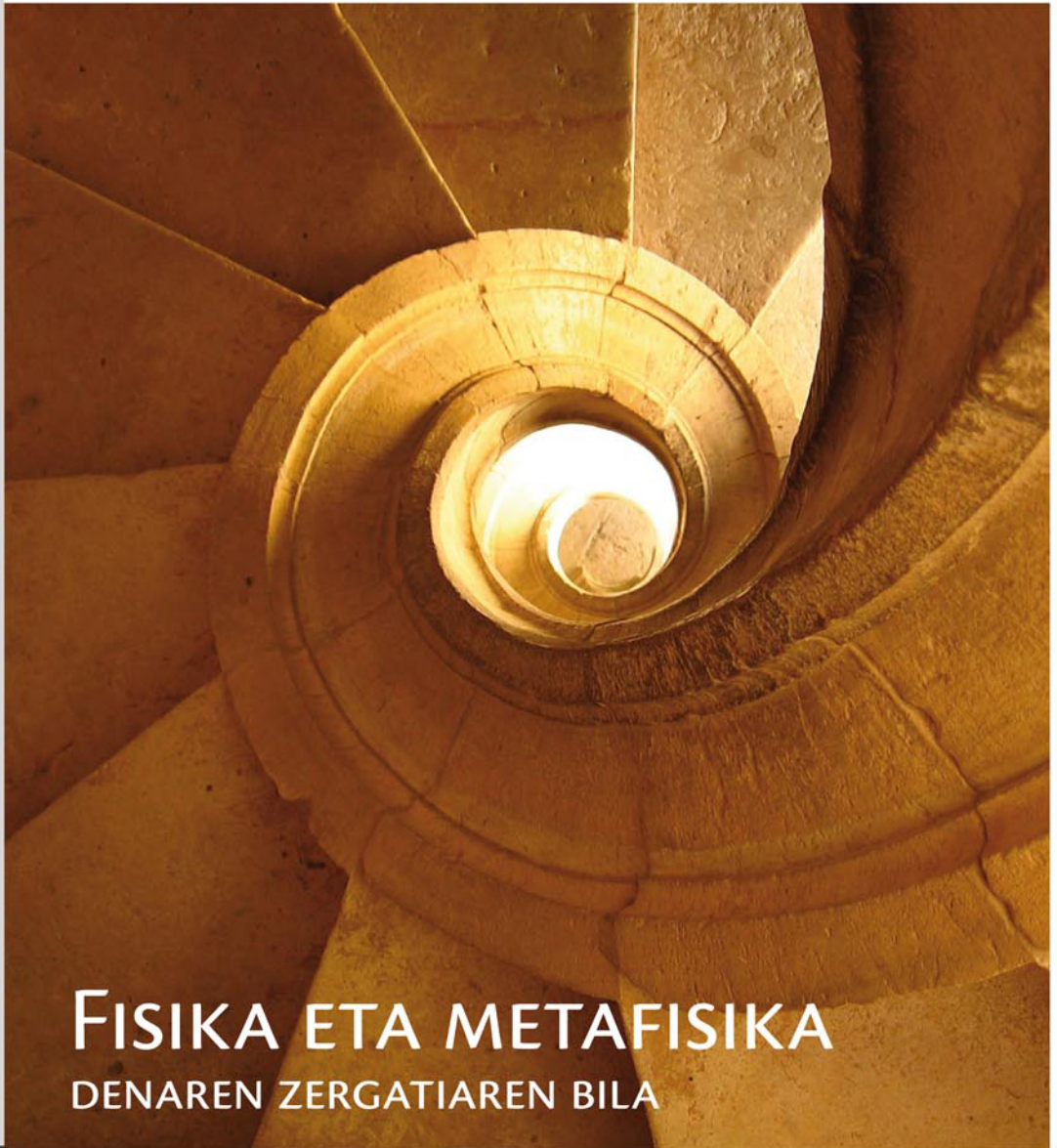


2007ko CAF-Elhuyar zientzia-  
dibulgaziorako sariaren irabazlea



# FISIKA ETA METAFISIKA

## DENAREN ZERGATIAREN BILA

Javier Navarro Los Arcos



ELHUYAR  
edizioak



**JAVIER NAVARRO LOS ARCOS**  
(Iruñea, 1961)

Javier Navarro Iruñean jaio zen 1961. urtean. 1984an EHUren Donostiako Zientzia Kimikoen Fakultatean lizentziatu zen, eta 1999an Nafarroako Unibertsitate Publikoan heterozikloen sintesiari eta QSAR ikerketari buruzko doktoretza-tesia aurkeztu zuen. Ikerlan horri loturik hainbat artikulua zientifiko argitaratu ditu.

2008ko otsailean CAF-Elhuyar zientzia-dibulgazioko sarien XIV. edizioan liburu hau idazteko beka irabazi zuen.

2009an Nafarroako Gobernuak Lizarraga Ergoieneko euskara dialektologia-liburua argitaratu zion.

Gaur egun, Nafarroako Bigarren Hezkuntzako irakaslea da.



**FISIKA**  
**ETA**  
**METAFISIKA**

**DENAREN ZERGATIAREN BILA**



Javier Navarro Los Arcos

**FISIKA**  
**ETA**  
**METAFISIKA**

**DENAREN ZERGATIAREN BILA**



**ELHUYAR**  
edit.108k



HEZKUNTZA, UNIBERTSITATE  
ETA IKERKETA SAILA

DEPARTAMENTO DE EDUCACIÓN,  
UNIVERSIDADES E INVESTIGACIÓN

Hezkuntza, Unibertsitate eta Ikerketa Sailaren  
laguntzaz argitaratzen da.

Debekatuta dago liburu hau osorik edo honen zati bat  
erreproduzitzea, sistema informatiko batean biltegitratzea  
eta edonola edo edozein euskarritan –elektronikoa,  
mekanikoa, fotokopia edo bestelakoa– transmititzea, Elhuyar  
Fundazioaren aldez aurretiko idatzizko baimenik gabe.

© Egilea: Javier Navarro Los Arcos

© Edizio honena: Elhuyar Fundazioa (2010)

Zelai Handi, 3. Osinalde industrialdea

20170 Usurbil (Gip.)

elhuyar@elhuyar.com - www.elhuyar.org

Koordinazioa: Elhuyar Edizioak

Zuzenketak: Elhuyar Hizkuntza Zerbitzuak

Diseinua eta maketa: Roberto Gutierrez

ISBN: 978-84-92457-22-9

*Cristinarendako,  
Ibarendako,  
Anderrendako,  
familiarrendako.*





### *Esker ona*

Iruñeko “Eunate” institutuan sortu zen lan honen hazia, denboraren poderioz liburu bihurtuko zena. Baliabide didaktiko gisa erabilia, nire ikasleek, eta haien estualdiek, bereziki lagundu didate azalpenak fintzen, egoerak biribiltzen, zeharkako gaiak jorratzen. Haiendako nire eskerrak.

Cris, bere argikusmena, lanaren zailtasunak leuntzeko luzuzko laguntza izan da, alderdi matematikoetan batez ere, eta beste hamaika zertzeladatan ere bai. Ordenagailuari ez diot barkatuko hainbeste orduz berarengandik bereizita egon izana. Mila esker, maitea.

Arantxa eta Pedro, lana irakurri zuten lehenak ziur aski, adiskidantzak behartuta. Eskerrik asko bihotzetik.

Elhuyar Fundazioari ere eskerrak eman behar dizkiot eskaini didan konfiantzarengatik, eta laguntzarengatik. Lurdes Ansaren profesionaltasunak gidatuta, liburu honek heldutasuna lortu du. Eta zuzentzaileak, Juanba Berasategi eta Alfontso Mujika, alderdi zientifikoa eta linguistikoa jorratu dituztenak, heldutasun horren artistak izan dira. Zorionak.



# FISIKA ETA METAFISIKA

*“esse, nosse, posse”*

*“banaiz,*

*badakit,*

*badezaket”*

*Mundu espiritualak, existitzekotan, Naturaren parte izan behar du.*

**Oliver Heaviside** (1850-1925), fisikaria, ingelesa.

*Gezurra jaunen eta morroien erlijioa da, egia gizaki askearen jainkotasuna.*

**Maksim Gorki** (1868-1936), idazlea, errusiarra.

*Beti eta toki guztietan guztiak sinetsi dutenak gezurra izateko posibilitate guztiak ditu.*

**Paul Valéry** (1875-1945), poeta, frantziarra.

*Apika hilezintasuna hitz ergela da, baina matematikari batek beste edozein gizakik baino probabilitate handiagoa du hitz horrek adierazten duena lortzeko.*

**Godfrey H. Hardy** (1877-1947), matematikaria, ingelesa.

*Fisika teorikoan zerbait lortzeko, pentsamendu filosofikoaren aurrean errespeturik ez dela eduki behar ikasi dut. Neure ikasleei jarrera hori transmititzen saiatu naiz eta arrakasta izan dudalakoan nago.*

**Max Born** (1882-1970), fisikaria, alemaniarra.

*Zientzia zientzialarien ezjakintasunean sinestea da.*

**Richard Phillips Feynman** (1918-1988), fisikaria, estatu batuarra.

*Egia-gosea, edertasunarekiko sentikortasuna eta matematikaren boterea eta dotoretasuna dira matematikarien sustatzaileak.*

**Landon T. Clay** (1937-), negozio-gizona, estatubatuarra.

*Zientziak, bere erantzunen bidez, filosofiaren galdera-eremua gero eta gehiago murrizten du.*

**Antonio García Trevijano** (1940-), politikaria, irakaslea, espainiarra.

*“Zergatik” galdetzea ogibide duten horiek –filosofoak– ez dira gauza izan teoria zientifikoaren aurrerapenaren kontuan jakinaren gainean egoteko.*

**Stephen W. Hawking** (1942-), fisikaria, kosmologoa, ingelesa.

*Zerbait erabateko ziurtasunez jakiteko aukera ematen duen giza jarduera bakarra matematika da. Artistek eta humanistek konplexutasunean eta anbiguotasunean gozatzen dute. Matematikariak, ordea, doitasunarekin —zentzuzko ametsak egiteko askatasunaren ordainarekin, ez merkea gero— tematuta bizi dira.*

**Donal B. O’Shea** (1952-), matematikaria, kanadarra.

*Erligioak beti existituko dira, sinestea askoz ere errezagoa delako ikastea baino.*

**Errotxapeako pintada bat.**

*Gizakiak gero eta gehiago gustatzen zaizkit.*

**Kanibal bat.**



Gure mundu teknologikoan zientziari buruz ezagutzen den alderdi bakarra epe motzeko aurrerakuntzetan oinarritzen bada ere, zientziaren funtsa eta gizakiok gure baitan hainbestetan egin ditugun barru-barruko galderak izaera berekoak izateak eremu sozial handi bat ere erakarri du, eta hain zuzen ere zientziaren handitasuna giza sakontasunaren ondorioa da, emankorrena.

Galdera antropologikoak zientzialari guztien gida izan dira, eta existentziaren zergatien atzetik dabilzan jakintsuek izatearen ereduak gerturatzen dizkigutenean konturatzen gara teknologia hutsetik harantzago beste ezagutza-mota bat dagoela, sakona, matematikoa bezain zehatza, espekulatiboa bezain erakargarria. Arlo horretan zientziaren ekarpenak etengabeak izan dira, eta garapen historikoa izan dute. “Metafisika” izenaren bidez aurreko guztia laburbilduta, alde batetik uxatu egiten dira hitzak izan ditzakeen alderdi magikoak eta, beste aldetik, “fisika” ezagutza-mota honen ardatza dela azpimarratzen da.

Zientziaren filosofiatik aldenduz, lan honetan historian zehar zientzialariek eraiki dituzten galderak eta erantzunak josten dira, egitura matematikoen oinarritzko eragina agertzen da, “indukzioa-dedukzioa” eta “Popper-Kuhn” eskemak gaindituta ekintza pertsonalaren balioa erakusten da, muga psikologiko, sozial eta historikoei ere behatzen zaie, dinamismoz egindako ahaleginak eta akatsak, esanak eta kontraesanak, jenialtasunak eta hurrengo belaunaldietakoen kontra-argudioak: *dramatis personae* anitzen ondorioz ikur-makurka ibili den metafisika horretan hari jarraitua gauzatzen da Babiloniatik Einsteinenganaino, Aristotelesengandik noraino eta elektroietaraino, hutsaren ideiatik infinitu harrapaezineraino.

Lan honetan, halaber, zientziaren alderdi teknologikoa, edozein arlotakoa izanik ere, alderdi metafisikoaren luzakin gisa irudikatzen da. Asmakizun, aurrerakuntza eta eguneroko bizitzan eragiten duten produktu zientifiko-tekniko guztien zerrenda historikoa ez da islatzen existentziaren ereduaren edota eredu kosmologikoen bilakaera. Metafisikaren bidean, ordea, teknologia aurrera joateko zapaltzen dugun oinarria besterik ez da, infinituari begira egoten laguntzen duena, ezinbestekoa beraz.

Liburuaren lehendabiziko lau kapituluek bilakaera historikoa adierazten dute: hastapenak (I), kosmologia zientifikoaren sorrera (Galileo, II), fisikaren kontsakrazioa (Newton, III) eta hutsaren nazkaren bigarren jaiotza (Eremuak, IV). XX. mendearen hasierak lan honen bukaera ekartzen digu, modernitate zientifikoaren zimentarriak (fisika erlatibista eta fisika kuantikoa) diren XIX. mendeko eremu-teoria ahaztuak erreskatatuta eta orduko pentsamendua merezi bezala ondratuz. Bosgarren kapituluan, berriz, liburuan zehar lurruntzen den metafisika zientifikoaren hatsa gorpuztu egiten da eta, beraren mugak finkatuz, metafisika horren argiez eta itzalez, aberastasunez eta eskasiez mintzo da, zientziaren galderak erantzunak baino gehiago direla gogoraraziz.

Estilo narratiboaren gain, tankera askotako ibilerak aurkitzen dira: deskribapen matematikoak, aipamen historikoak, heroismoz beteriko epikak, jakinduriaren gailurrean izan direnen aurreko errespetua, pasioz josiriko kritika deuseztatzaileak, bilakaera aspergarrien narratiba aspergarria, tonu pedagogikoa, ezaguna eta ezezaguna. Matematikaren pisua gehiegizkoa izan daiteke batzuen ustez, edo txikiegia besteen ustez. Alde guztietara ere, euskarri matematikoan sakondu gabe azalpenen zentzua uler daitekeelakoan nago.

Eta lan honen asmoa egiaren bilaketak sortzen duen askatasun-sentimenduari idaztea litzateke. Askatasuna adituko balitz, liburu honen asmoa garrasi bat izatea litzateke, garrasi isila sentimendu pertsonala delako. Eta askatasun intelektuala delako, askatzailetasun guztien jatorria.



# Aurkibidea

<b>1 Ezer baino lehen, ezereza</b>	
<b>Zientzia baino lehen, berriketak</b> .....	<b>1</b>
1.1 Metodo zientifikoa .....	3
1.2 Matematikaren bilakaera .....	8
1.3 Filosofia naturala .....	11
1.4 Lurraren irudikapenaren bilakaera .....	15
1.5 Zeruetako erreinua .....	18
1.5.1 Lehenbiziko kosmologiak .....	19
1.5.2 Greziatik Kopernikorenganaino .....	25
<b>2 Galileo, eppur si muove</b> .....	<b>31</b>
2.1 Galileoren ekarpenak fisikan .....	34
2.2 Galileoren ekarpenak astronomian .....	38
2.3 Galileoren garaiak .....	42
2.4 Kepler .....	48
2.5 Ondorengo filosofoak .....	54
2.6 1564-1642 bitarteko kronologia .....	57
<b>3 Newton, eta ilargia erori zen</b> .....	<b>61</b>
3.1 Kalkulua .....	64
3.2 Zerutar higidurak eta grabitatea .....	69
3.3 <i>Philosophiae Naturalis Principia Mathematicae</i> .....	76
3.3.1 Definizioak eta legeak .....	77
3.3.2 Mekanika arrazionala (I. liburua) .....	79
3.3.3 Zerutar mekanika (III. liburua) .....	86
3.3.3.1 Ilargiaren erorketa .....	87
3.3.3.2 Masa .....	91
3.3.3.3 Grabitazio unibertsalaren konstantea (G) .....	92
3.3.3.4 Orbita-higiduren analisia .....	92
3.3.4 Espazioa eta denbora .....	96
3.4 Newtonen garaiak .....	97
3.5 Metafisika newtondarra .....	98
3.6 Korrante antinewtondarren sorrera .....	100
3.6.1 Newtondartsunaren kritika .....	100
3.6.2 Lehen metafisiko antinewtondarrak .....	103
3.7 Hurrengo garaietako aurkikuntzak .....	104
3.7.1 Elektromagnetismoaren lehen pausoak .....	105
3.7.2 Newtondar korronteak elektromagnetismoan .....	106

<b>4. Huts-hutsa bai, huts-hutsik ez</b> .....	<b>109</b>
4.1. Jakintza zientifikoaren sorburu berriak .....	111
4.2. Eremu-teoriak .....	111
4.3. Faraday .....	113
4.3.1. Faradayren lehen pauso antinewtondarrak .....	113
4.3.2. Faradayren eremu-teoria .....	114
4.3.3. Elektromagnetismoa Faradayren eremu-teorian .....	116
4.3.4. Indukzio elektromagnetikoa .....	117
4.3.5. Materia Faradayren eremu-teorian .....	118
4.3.6. Faradayren metafisikaren ondorioak .....	119
4.4. W. Thomson (Lord Kelvin) .....	119
4.5. Maxwell .....	120
4.5.1. Maxwellen eredu mekanikoa .....	122
4.5.2. Indukzio elektromagnetikoa .....	124
4.5.3. Magnitude mekaniko eta elektromagnetikoak .....	125
4.5.4. Indar magnetikoa eredu mekanikoan .....	126
4.5.5. Indukzioa eredu mekanikoan .....	127
4.5.6. Karga estatikoa .....	129
4.5.7. Eredu mekanikoaren kritika .....	131
4.5.8. Azalpen operatiboa .....	132
4.5.9. Argiaren izaera elektromagnetikoa .....	134
4.5.10. Argia azalpen operatiboaren arabera .....	136
4.5.11. Maxwellen ondorengoak .....	137
4.6. Hertz .....	138
4.7. Eterraren izaera .....	140
4.7.1. Isurki perfektuen teoriak .....	140
4.7.2. Solido elastikoaren teoriak .....	141
4.8. Elektrodinamika .....	141
4.8.1. Eter-haizea .....	144
4.9. Lorentz .....	145
4.9.1. Elektroien teoria .....	146
4.9.2. Lorentz eta Fresnel .....	147
4.9.3. Lorentz eta Michelson .....	147
4.9.4. Lorentzen eter higiezina .....	148
4.9.5. Koordenatu-transformazioak .....	148
4.9.6. Lorentz eta newtondartsuna .....	152
4.9.7. Lorentzen teoria hobetua .....	153
4.10. Big Bang kulturala .....	154
<b>5. Metafisika, itxaropen arrazionala</b> .....	<b>157</b>

I.

EZER BAINO LEHEN, EZEREZA  
ZIENTZIA BAINO LEHEN, BERRIKETAK



## 1.1. Metodo zientifikoa

Historiaurretik hasita, gizakiak gauzen eta gertakizunen zergatiak bilatu ditu, eta orain ere gizakia beti azalpen bila dabil, gure esperientziak eta gure sentipenak ulertzeko azalpenak beharrezkoak direlako, gure garunaren nahitaezko funtzionamenduak horrela baldintzatzen gaituelako. Gertaera bakoitza (sua, gosea, urtarrileko merkealdiak, beste edozein) zer den jakitea ez da nahikoa, eta gure baitan beti “zergatik” galdetzen dugu.

Ikuspuntu “positibista” erabiliz, gizakiak bere historia osoan (100.000 urtekoa) gertakizunak ulertzeko erabili dituen azalpen-mota nagusien arteko desberdintasunei erreparatzeko, fenomeno arrunt bat har dezakegu kontuan, esate baterako, “telebista piztea”. Lehendabiziko bostei “azalpen mitiko” deritze, eta seigarrena “azalpen logikoa” litzateke:

### 1) Erantzun animista

Animismoaren ikuspuntutik objektu guztiak (arbolak, harriak, haizea eta dena) nola edo hala bizirik daude, badute arima, eta nolabaiteko borondatea ere bai. Telebista biziduna litzateke, bere borondate eta guzti. Bere arimaren izaeraren ondorioz, telebista hitz egiteko gauza den izakia da. Telebistaren borondatea irudiak erakustea da, eta hala “ulertzen” edo “azaltzen” da beste edozein fenomeno.

Erantzun animista hurrek eta herri primitiboek erabiltzen dute. Begibistakoa denez, mundu animista kaotikoa da (nahiz estrukturalistek kontrakoa esan), naturako objektu guztiek beren kasa jokatzen dutelako, bakoitzak bere arimaren arabera. Eta telebistak zer eginen duen aurreikustea, haur txiki baten jokaera aurreikustea bezain zaila da.

Baina hurrek eta herri primitiboek “berehala” eboluzionatzen dute. Eta munduan bizitzeko eta, ahal bada, mundua kontrolatzeko, ezinbestekoa da edozein fenomenoren ondorioak aurreikustea. Horixe da bigarren erantzun-motaren arrazoia.

### 2) Azalpen magikoa

“Telebista piztu duena mago bat da, truko sekretu bat ezagutzen duena”. Magiarekin gertakizunak gertarazten dituzte edo kontrolatzen dira sorginkeriak eta erritualak erabiliz (pase magikoak, kandela magikoak, hitz magikoak, makilatxo magikoa, sakrifizioak, helburu praktikoetarako otoitzak eta abar).

Gizaki primitiboak egoera gogorak jasan behar zituen, eta sekretu aproposekin ingurunea kontrolatzea oso ideia erakargarria zen. Baina, magia erabilia ere, gauza batzuk kontrolaezinak zirela onartu behar izan zuen, eta horregatik agertu zen hirugarren erantzun-mota.

### 3) Naturaz gaineko azalpena

Gizakiak sinesten zuen goiko izakiak edo izaki gorenak existitzen zirela, eta giza-kiendako ezinezkoa zena izaki haiek egin zezaketela: “telebista piztea mirakulua izan da”.

Erdi Aroko errege kasketatsu bat bezala, izaki antropomorfo edo zoomorfo haiek lege naturalak ezarri zituztenak ziren, baina nahi zutenean hautsi egiten zituzten, prozesu naturaletan parte hartzen zuten eta aldatu egiten zituzten.

Horregatik, gaitzaren kausa deabru bat zen eta, gaixotasunaren kontra borrokatzeko, jainko bati sakrifizioak eskaintzen zitzaizkion. Jainkoaren gizon batzuek deabruak gorputzetik kanpora botatzen zituzten, eta gaitzak sendatzea, garbikuntza eta damutzea osasunaren eta sineskeriaren osagaiak ziren. Ekaitza beste jainko baten haserrea zen, eta soroetan uzta onak izateko, herri guztiak uda baino lehen jainko partikularraren egoitzara erromerian joaten ziren (eta joaten dira) herriaren fideltasuna gogoratzerako. Beldurra (“terror mortis”) eta ezjakintasuna, deabruak eta jainkoak, edozein tokitan zeuden, eta gizaki bakoitzaren bitartean eragiten zuten.

Azalpen horren modu pasiboagoa eta diziplinatuagoa laugarren erantzun-mota da.

### 4) Azalpen teista

“Telebista piztu da, eta Jainkoaren borondatea da”. Gauza guztiak gertatzen dira Izaki Gorenak agindutako eskemaren arabera.

Azalpen magikoaren, naturaz gainekoaren eta teistaren oinarrian erantzun animistaren “dualismoa” eta “ilusio antropomorfikoa” daude, eta ikerketa zientifikoaren aukera suntsitzen dute halaberrez, antizientzia dira. Dualismoa lehen aldiz txinatarren artean agertu omen zen YIN (iparraldea, negua, hotza, gelditasuna, emea, lurra) eta YANG (hegoaldea, uda, beroa, mugimendua, arra, eguzkia) unibertsoaren orekaren oinarriak zirelakoan. Persiako filosofo mazdeisten artean ere “ormuzd-ahriman” (ontasun-gaiztotasun) binomioa azalpen unibertsal gisa hedatu zen. Antzinako grekoek “amodio-gorroto” aurkakotasuna gorputzen arteko elkarrekintza azaltzeko erabili zuten, eta platonismoarengatik kristaizibilizazioan dualismoak sustrai sendoak hartu ditu. Beste aldetik, ilusio antropomorfikoa ezezaguna gizakiaren itxurakoa delako sinesmen sakona litzateke.

### 5) Azalpen teleologikoa

Antzinako Greziako pentsalariak giza arrazoiketa formalizatzeko dedukzio logikorako arau ukaezinak sortzen ahalegindu ziren. Haien helburua gizaki zentzudun guztiek onartuko zuten hipotesi- edo axioma-sistema finkatzea zen, hortaz

baliatuta istilu guztien aterabidera ailegatzeko. Azalpen mota hori testuinguru horretan jaio zen, zientziaren aitzindari kontsideratua, baina dualismoz kutsatua.

Azalpen horren arabera, gertakizuna beti helburu zehatz batera zuzenduta dago. Objektu bakoitzak bere izaera eta joera dauzka, bere leku naturala bilatzera bultzatzen dutenak edo bere eginkizuna betetzera behartzen dutenak, baina bizitza edo arima dutela pentsatu gabe.

Eskema teleologikoan azalpen sakonagoak daude, eta gertakizunen xehetasunez mintzatzen da: “telebista piztearekin batera, bere funtzionamendua martxan jartzen da; telebistaren joera argia igortzea da, eta argia gureganaino ailegatzen da bere informazioa erakustera”.

#### 6) Azalpen zientifikoa

Ikuspuntu zientifikoa, fenomeno zergatiak ulertzeko beti eredu bat, printzipio batzuk (ereduak funtzionatzeko modua) eta zenbait lege (ikuspuntu kuantitatiboa ematen dutenak) daude: “telebistan elektroikorrante bat sartzen da (materiaren teoria atomikoan oinarriturik), korrante hori eremu magnetiko eta elektriko bidez desbideratzen da eta pantailako puntu bakoitzari elektroiek erasotzen diote (eremu elektromagnetikoaren teoria). Elektroikopuruak pantailako puntuaren argitasunaren intentsitatea finkatzen du, eta koloretako irudiak lortzen dira kolore primarioak konbinatuz (optikaren legeak). Ingurunearen ezaugarrien arabera, igortzen den argiak desbideraketak jasaten ditu (errefrakzioaren legeak), eta giza begiei erasotzen dienean erretinako zelula fotosentikorak kitzikatzen ditu (giza fisiologia). Erredox erreakzio kimikoak eragiten dituzte, eta horren ondorioz garuneraino seinale elektrikoak iristen dira, irudiak sortzen dituztenak (biokimika)”.

Zientzia, giza ahalmenaren ikur gisa, diziplina intelektual anitzen ondorioa da. Eta azalpen-mota gisa, gainerako azalpenen alternatiba garbia da. Zientzia bestelakoa da, bestelako galderak egiteko aukera ematen duelako, bestelako erantzunak eskaintzen dituelako eta bestelako jarrerak sortzen dituelako. Eta historian zeharreko lasterketa honetan bizirik sendo dirauten bi azalpen-moten arteko eztabaida ekidinezina da: erlijioa eta zientzia.

Gupidarik gabeko eztabaida horren azken mendeetako bilakaeran erlijioak jasandako porrotak gizakien ezagutzarako eta askatasunerako garaipenak izan dira. Lehenik, Kopernikok unibertso zentraltasuna ostu zion; bigarrenik, Darwinnek kreazioaren gorentasuna desegin zion; hirugarrenik, Freudek arimaren nagusitasuna ezereztu zion. XX. mendetik aurrera, mundu fisikoaren errealitatearen azalpena zientziak bereganatu du, eta errealitate barrena gizakiek gaindi dauden existentziaren azken galderetaraino gerturatzeko bidea behin betiko irabazi du. Testuinguru horretan ahots erlijiosoek beste denboretako oihartzuna daramate, mundu psikologiko transzendentalaren labirintotan murgilduta.

Erljioaren eta zientziaren arteko desberdintasunak garbiak dira. Biek nola edo hala errealitatearen irudikapen bat ematen digute. Baina erljioaren azalpen teologikoa antropozentrismoaren beste itxura bat da, eta zientziak azalpenak gizakiengandik kanpo bilatzen ditu. Erljioa ezin da aurreiritzietatik askatu, eta zientzian aurreiritzien kontrako borroka jokaera sortzaile (askatzaile) bihurtzen da.

Erljioak azalpenak Jainkoarengan edo jainkoengan bilatzen ditu, naturaz harantzago botereekin fenomenoak kontrolatzen dituzten horietan, horregatik erljioarendako misterioa hor dago, Jainkoaren izaeran eta beraren ezaugarrietan, eta mundu lurtarreko giza kontu guztietarako erantzunak ezagutzen ditu. “Errebelaturiko egia” edo “Jainkoaren hitza” Lurreko arazo guztien mamia da, arau moral pertsonal eta kolektiboak sortzekoa, edo, beharrezkoa denean, errealitatearen eredia zehaztekoa. Zoriontasunerako bidea ezagutzen duten bezala, Jainkoak bizitza nola eta zergatik kreatu zuen ere badakite, *Hasiera* liburuko esaldi batekin ulertzen dena. Zientziaren izaera, ordea, bestelakoa da, errealitate osoaren jatorria gizakiengandik kanpo bilatu behar dela baieztatzen du eta aurkitzen du, eta (gure) existentziaren jatorria orain dela 15.000 milioi urte gertatu zen ilusio antropomorfikorik gabeko “Leherketa Handi” hartan, edo lehenagoko gertaeraren batean, dagoela azaltzen du. Bide zientifikoak bestelako irizpideetan ere oinarritzen dira: galdera zehatzetatik abiatuta, zientziaren aurrerapena zientzialari-talde batek erantzunak bilatzeko egiten dituen ahaleginetan funtsatzen da. Platonen elkarrizketetan Sokratesek egiten zuen bezala arazo zehatza gainditu ondoren, zientzialariek teoria unibertsalak osatzen dituzte, edo teoria berri bat sortzen dute. Eta teoriok egiaaren deskribapen fidelak direla ziurtatzeko metodo zientifiko guztien baldintzak garbiak dira: teoria egiaztagarriak adieraztea (froga daitezkeenak) eta teorien estrapolazio ahalmena (aurreikuspena).

Erljioaren zailtasun filosofikoak garai guztietako filosofo eta teologoek ezin izan dituzte gainditu, eta kontraesan esentzialak ebazteko asmotan, bidegabekeriaz jositako bitxikeria linguistikoak ahitu dituzte. Zentzurik gabeko paradoxak amaigabeak dira, eta oraindik ez dakigu berez bere buruaren existentzia azaltzen duen eta galdera guztien azken erantzuna den Jaungoikoa beharrezkoa ote den (kontingente ez izateko), eta bere existentziaren eta kualitateen gaineko hautamen-ahalmenik ote duen. Hala ere, Elizak eta erljioak erantzun guztiak aurkitu dituzte. Zientziak, ordea, beti “zergatik” galdetzen du, eta erantzunak bilatzen ditu. Eta zientziaren galderak gero eta gehiago dira, sakonagoak eta ausartagoak.

Zientzia egia ezagutzeko tresna bikaina da, gizakien lorpen kulturalik handiena. Fe-dea ukatuz, ausardia pertsonala aurrerapen zientifikoaren bultzatzailea da. Eta doitasuna, zientzialarien jarrera moralak. Horregatik teoria zientifiko batek egia eta errealitatea deskribatzen dituela ziurtatzeko, mundu osoko komunitate zientifikoak azterketa sakonak egiten dizkio. Teoria horrek izan behar dituen ezaugarriak ondoren azaltzen dira:

- 1) Erreduzigarritasuna. Teoria zientifiko berri batek, gutxienez, aurreko teoriak bezain zehatza izan behar du. Teoria zaharra zenbait kasutan ona baldin bada, teoria berriak kasu horietan emaitza berdina edo hobea eman behar ditu.



- 2) Berritzailetasuna. Teoria berriak gertaera berriak edo gaizki aurreikusitakoak azaldu behar ditu.
- 3) Testagarritasuna. Teoria berria zuzena dela frogatzeak posible izan behar du. Teoria berriaren aurreikuspenek egiaztatgarriak izan behar dute.
- 4) Dotoretasuna. Teoria berriaren printzipioek motzak eta eduki handikoak izan behar dute.

Fenomenoen azalpenez gain, zientziak natura aldakorraren atzean gordetzen diren printzipio aldazkinak ere bilatzen ditu, naturaren sekretuak argitzen saiatzen da, munduaren aspektu ezkutatuak desestaltzen ditu. Azkenean, zientziaren helburua unibertsoaren misterioa ulertzea delako, zientzia ezezagunarekin erlazionatzea da, eta horretan oinarritzen da zientziaren eta erlijioaren antzekotasun bakarra. Ikuspegi zientifikoaren eta erlijiosoaren arabera, inguratzen gaituen munduaren atzetik kausa ezkutatuak daude, eta horren aurrean jarrera zientifikoan eta jarrera erlijiosoan liluramendua dago, baina bi ikuspegietatik kausa horietaz modu desberdinez mintzatzen da.

Zientzialarien artean teismoak modu batean baino gehiagotan hartzen dira. Elizekiko lotura handiagoa dutenen eskutik, errealitate fisikoa helburu batez inspiraturiko planifikazioaren ondorioa delako adierazpenak aditzen dira noizean behin, hala nola “Jainkoaren gogoia” unibertsoaren ezaugarri batzuetan islatzen dela dioena (Naturaren legeekiko independente diren ezaugarriak: existentzia bera, denboraren eta espazioaren dimentsionaltasuna), mundu zientifikoaren azterketak pasatu ezin dituzten argitalpenen bitartez. Beste zenbaitetan, astean sei egunetz zientzia eta zazpigarrenean erlijioa erabiltzen dutenak ere badira, haien sinesmena Tertulianoaren baieztapenetik (*credo non quod sed quia absurdum est*: sinesten dut absurdoa delako, ez absurdoa dena) gertu dutenak. Baina diziplina guztietan urtero argitaratzen diren milaka eta milaka artikuluko zientifikoetan fedearen arrastorik ez dago, eta behaturiko fenomenoaren azalpena Jainkoa delako baieztapenik aurkitzea metafisikoki ezinezkoa da, mundu zientifikoan irrigarria litzatekeelako. Errealitate fisikoa Jainkoaren arrastorik ez dago, eta Jainkoa bilatzen dutenak “beste nonbait” aurkitzen saiatzen dira. Zientzian Jainkoa hipotesi modura, teoria modura edo azalpen modura ez da sekula erabili, ez da erabiltzen eta ez da erabiliko, zientziaren metodoak berak debekatzen duelako. Beraz, Zientzia atea dela kontsideratu daiteke, edo, gutxienez, ez-erlijioso.

Bestalde, zientziaren garapenean zientzialarien apriorismoek betetzen duten papera ere garrantzitsua da, lagungarria askotan, baina fedezko aurreiritzien antzik ez dute, eta jarrera zientifikoaren barruan sartzen dira. Adibidez, Newtonek bere bigarren legearekin ( $F = m \cdot a$ ) dinamikaren fenomenoak azaldu zituen, baina oinarritzko eskeman (indarra/azelerazioa, kausa/efektua) indarren existentzia bera aurretik egiaztatu gabeko onarpena da, eta ohartzekoa da paralogismoaren arriskua gertu egon daitekeela. Bestelako eskema bat erabilita, azalpenak oso desberdin ageri dira, eta Einsteinen erlatibitatearen teoria orokorrean gertaeren existentzia definitzen duten lau dimentsioko espazio-denboraren kurbadurak dinamika berri bat sortzen du, indarren arrastorik gabe. Bilakaera horren bultzatzailea galdetzailer bat da: “zergatik”. Zergatik indarrak eta unibertso mekanikoa,

zergatik masaren ahalmena espazio-denboraren kurbadurak sortzeko, zergatik mundua, zergatik existentzia. Bilaketa horretan zientzia bidea da (gure kulturaren “Tao”), eta bide horrek bukaerarik izanen duen, inoiz den-denaren zergatia ezagutuko den, beste misterio bat da, Unibertsoaren beste enigma bat.

## 1.2. Matematikaren bilakaera

Ikerketa matematikoa antzinako jardura da, sukaldaritza, zurgintza eta metalurgia bezain zaharra.

3000. urtean gure garaiaurretik (3000 g.g.a.) Babiloniako zibilizazioetako elite erlijiosoetan ezagupen matematiko harrigarriak omen zeuden: bigarren mailako ekuazioak ebazteko metodoak ezagutzen ziren, hamartarrak ere bai, eta zenbakietan zifren kokapenen esanahia orain daukaguna bezalakoa zen (sistema posizionala). Zinematikan aurrerapen asko lortu zituzten, denak zeruko gorputzen mugimenduei loturik: abiadura irudikatzen zuten espazioaren eta denboraren arteko erlazio gisa, higidura uniformearen eta ez-jarraituaren arteko desberdintasunak ezagutzen zituzten, abiadura linealaren eta abiadura angeluarraren artekoak ere bai, eta abar. Haiengatik zirkulua  $360^\circ$ -tan neurtzen dugu, eta eguna 24 ordutan (babiloniar jatorriko ur-erlojuak, klepsidrak, XVII. mendera arte Europa osoan oso erabiliak izan ziren).

Garai haietan ere Indian oso kultura landua zegoen, zenbakiak adierazteko oinarri hamartarreko sistema posizionala ere erabiltzen zen, eta gure garaiaurreko ondorengo V. mendean (V. mendean g.g.o.) zeroa erabiltzen hasi zen. Indiarren zenbatzeko era hori (sistema posizionala, oinarri hamartarra, zeroa beste edozein zenbaki moduan tratatzea) kultura arabiarraren bidez Espainiatik barrena sartu zen European, eta XII. menderako oso zabaldua zegoen.

Zeroaren asmakizuna, mundu osoan onartua, beharbada gizakiek lorturiko arrakasta handieneko berrikuntza intelektuala, bere garaian ahalegin psikologiko galanta izan zen, eta Indian gertatu zen bertako pentsamendu erlijiosoan “ezereza” eta infinitua arruntak direlako, ezereza zerbait delako eta bere ahalmenak dituelako, hala nola unibertsoa bera sortzekoa.

Grezia zaharrean, ordea, ezereza ez zen erraz erabiltzen. Alde batetik, grekoen pentsaeran Demiurgoa munduaren ordenaren arduraduna zen, sortzailea ez, mundua ezerezetik sortu zuen juduen Jainkoa ez bezalakoa. Beste aldetik, logika giza pentsamenduaren gorena kontsideratzen zen; horren ondorioz, “ezereza” zerbait balitz bezala jotzea ezinezkoa zitzaien. Bakarrik “den horretaz” mintza zitekeen, “ez den hori” ezin zen pentsatu, eta pentsatu ezin zena ezin zen existitu. Gainera, platonismoaren arabera gure munduko gauzak “forma ideal perfektu”en adierazpen inperfektuak ziren, eta forma ideal haiek eternalak eta aldaezinak ziren. Baina ezerezarekin eskema horrek ez zuen balio: “ezerez ideal eta perfektua”ren adierazpen inperfekturik ezin da izan, ezerezean zerbait baldin badago ez baita ezereza. Horregatik nahiago izan zuten ezereza ukatu, ezinezkoa zelakoan.

Dena dela, matematikan ere greziar kulturaren eragina erabakigarria izan zen. Tale-sengandik aurrera (624-547 g.g.a., joniarra), ikuspuntu aritmetikoa erabiliz filosofo grekoek geometria landu zuten, eta lerro zuzenak, zuzen paraleloak, paralelogramoak, poliedro erregularrak (tetraedroa, kuboak, oktaedroa, dodekaedroa eta ikosaedroa, “solido platonikoak”) eta beste figura geometriko batzuk (esfera, prisma, konoa eta piramideak) ikertu zituzten. Gaurkoak bezalako eragiketa matematikoekin, greziarrek zuzenen maldak, gainazalen azalera eta gorputzen bolumenak kalkulatu zituzten. Horrek guztiak matematikarako ikuspuntu estatikoa ekarri zuen: figura geometriko bakoitzak bere itxura dauka, beti bera, gainazal bera eta bolumen bera. Eta izaera estatiko hori irudikatzen zuten matematikak ere estatikoa izan behar zuen. Greziarrek menperatzen zutenarekin aldaketa ezin zen irudikatu, eta hain zuzen ere greziarren pentsamenduan gauza eternalak (jainko eternalak, esklabutza eternala, zeruko gorputzen higidura eternala) oso garrantzitsuak ziren.

Pitagoras (569-475 g.g.a., joniarra), teorema famatuari izena eman ziona, Konfuzioaren eta Budaren garaikidea izan zen. Bere bidaietan Italia eta Grezia bisitatu zituen, siriarrak eta kaldear jakintsuekin harremanak izan zituen, Egipton Osiris jainkoak ukiturikoa zela pentsatu zuten hanka batean urre koloreko orbana zuelako, eta bertako sazerdoteek misterio sakratuetan iniziatu zuten. Babilonian preso zegoela, Zaratustraren irakatsiak eta persiar dualismoa ere ezagutu zituen. Hizlari fina zen, eta haren irakaspenek —arrazoiz eta espiritualtasunez, edo greziar filosofiaz eta ekialdeko mistizismoz beterikoak— mundu greko osoan jarraitzaile asko erakarri zituzten. Bere eskola Italian fundatu zuen, “zirkulerdia” izenez ezagutua. Bertan kide batzuk, “matematikoi”ak, elkarrekin bizi ziren ondasun pertsonalik gabe; begetarianoak ziren, eta irakaspenak Pitagorasengandik zuzen jasotzen zituzten. “Akousmatikoi”ak, ordea, kanpoan bizi ziren, eta arau bigunagoak zituzten. Zinpean gorde behar ziren inimizio-erriro sekretuak zituzten, eta arimaren hilezkortasunean eta metempsikosian (arimen transmigrazioan) sinesten zuten. Filosofia salbaidetzat hartu zuten, jainkoekin elkartu arte arima goratu zitekeelako. Ezagupen matematiko bikainak menperatu zituzten, eta zenbaki batzuei esanahi mistikoa ere eman zieten. Adibidez, zenbaki perfektuak (zatitzaileen batuketan emaitza diren horiek,  $6 = 1+2+3$ , edo  $28 = 1+2+4+7+14$ ) beneratzen zituzten; “jainkozko tetraktis”ari (10) errepetu handiena zioten, lehen lau zenbaki osoen batuketa zelako (lau dimentsioen batuketa ere bai: puntuak, zuzena –bi puntu–, planoak –triangelu bat, hiru puntu– eta espazioak –tetraedro bat, lau puntu–), eta beraren irudikapen triangeluarraren gainean zin egiten zuten; zenbaki triangeluarrak zituzten (3,6,10), karratuak (4,9,16,...), 4ak justizia eta elkartasuna adierazten zuten, eta abar. Geometriaz ikerketa matematikoa egin zituzten, eta aritmetikaren bidez matematika eta musika elkartu zituzten. Astronomiarako ere eredu matematikoa proposatu zituzten, ordura arte jainkoen menpean zeuden zeruko gorputzen jokaerari lege matematikoa aplikatuz. Pitagorikoek pentsatzen zuten, beraz, errealitate osoa, funtsean, matematika zela, eta aldaketak kaotikoak izan beharrean, matematikaren ordenaren, simetriaren, harmoniaren eta sinpletasunaren arabera gertatzen zirela.

Platonek (427-347 g.g.a., atenastarra) pitagorikoaren eragina jaso zuen, eta *Timeo* liburuan (solido erregularrak –platonikoak– bertan aipatzen dira) naturaren egitura geome-

trikoaren alde agertu zen. Bere pentsamendu magiko-teleologiko berezian zirkunferentziak eta esferak hasierarik eta bukaerarik gabeko egoera perfektua ziren, eta hurrengo milurtekoetan kristau-filosofian iraun zuen pentsaera horrek. Atenaseko Akademia fundatu ondoren, platonismoak ikarragarritzko gailur intelektualak lortu zituen. Eta gaur egun ere Platonen ikuskera dualistaren kutsua argi nabaritzen da matematikan, matematikarien lana kreaioa ala aurkikuntza ote den eztabaidatzean, prozesu matematikoaren deskribapena artistikoa (sortzailea) den ala “errealitate” matematikoa gizakiengandik kanpo existitzen den eta “behapenez” desestali behar den.

Akademiako kiderik garrantzitsuenak, Aristotelesek (384-322 g.g.a., mazedoniarra), logika formala kodifikatu zuen, eta natura-zientzia guztietan ekarpen galantak egin zituen. Bere eskola ireki zuen (Lizeoa), eta bere pentsaeran ibilbide berriak urratu zituen. Aurreko pentsalariak legeei ematen zieten garrantziaren aurrean, berak adierazi zuen ezagupenaren helburua erlazio kuantitibo egonkorrek ezagutzea izan beharrean, gertakarien kausak deduzitzea zela, gertakari zehatzen behapenetatik hasita kausa esentzialak ezagutzerainoko bidea induktiboa zelakoan, Platonen pentsamenduaren aurka. Baina Aristotelesi esker eskola pitagorikoaren lorpenak mantendu ziren, batez ere Alexandro Handiaren inbasio-kanpainetan Aristotelesen kartografoek eginiko mapetan islaturikoak, ordura arteko jakinduria matematikoa erakutsiz, eta kartografiari ere oinarri sendoa emanez.

Alexandro hil ondoren, beraren inperioa zatituta gelditu zen. Puskarik handiena beraren jenerala izan zenak, Ptolomeo I.a Soterrek, bereganatu zuen, eta Alexandrian hiriburua jarri. Poliki-poliki Alexandria munduko kulturagune bihurtzen joan zen, batez ere bi instituzio berriri esker: Museoa eta Liburutegia. Jakinduriaren arlo guztietako liburuak bildu ziren, Pitagorasen teorema eta Testamentu Zaharra altxorrek, besteak beste, han kontserbatu ziren, eta eremu askotan aurrerapen galantak lortu ziren. Han berrindartu ziren ezagupen matematikoen medioz Euklides (III. mendea g.g.a.), Arkimedes (287-212 g.g.a.), Eratostenes (275-195 g.g.a.), Klaudio Ptolomeo (85-165 g.g.o.) eta beste hainbeste jakintsu prestatu eta garatu ziren.

Euklides izan zen hurrengo milurtekoetan eragin sendoa izan zuen beste pentsalari handi bat. Gutxienez hamar liburu idatzi zituen, eta erdiak galdu dira, baina *Elementuak* izan da, beharbada, historia osoan gehien irakurri den liburua, Bibliaren eta Koranaren gainetik. Grekeratik lehenbizi arabiarra itzulita (al-Hajjaj, IX. mendean g.g.o.), gero latinera (Gerardo Cremonakoa, XII. mendean), inprenta asmatu zenean argitaratu zen lehen liburu zientifikoa izan zen, eta geometriaren “biblia” eztabaidaezina izan da XIX. menderaino. Liburu honetako hitz eta esaldi bakoitza aztertua, begiratua eta birbegiratua izan da milaka eta milaka matematikariren lanetan, eta egilearen maisutasun ikaragarriak kontzeptu sinpleetatik proposamendu sakonak eta edertasunez eraikitakoak lortzera eramaten gaitu. Ordura arteko matematika osoa kodifikatu egin zuen, greziar estiloaz baliatu zen Babiloniako eta Egiptoko matematikak berrinterpretatzeko, eta liburuaren ekarpenik handiena, egiaztapen matematikoak, babiloniar eta egiptoar enuntziatuei zentzua emateko eta kotrajarritako kalkuluei ordena emateko asmatu behar izan zituen.

*Elementuen* lehendabiziko sei kapituluak geometria lauarenak dira (gaur egun ere “geometria euklidearra” esaten zaio), hurrengo laurak zenbakien teoriarenak, eta azken hirurak gorputz solidoen geometriarenak. Hamaika definizio, nozio komun, proposizio, teorema, lema, korolario, egiaztapen eta enuntziatuez gain, Euklidesen bost axiomak edo postulatuak mugari bat izan dira XXI. mendeko matematikaraino, batez ere bosgarrena, eta axiometatik aurrera pauso motzez eta zorrotzez aparteko sakontasuneko ondorioak azaleratzen dituzten frogabideek ere hurrengo milurteetako matematika osoari estilo berri bat eman diote. *Elementuak* liburutik aurrera, egiaztapenak matematikaren oinarria dira, eta matematikariek batez ere egiaztapenetan konfidantza izaten ikasi dute, erabateko ziurtasunen eta egonkortasunen jatorria direlako. Diziplina intelektuala izateagatik matematikaren izaera etereo da, eta kimika, biologia edo fisikarenak bezalako objektu fisikorik gabe, hamabost dimentsioko forma geometrikoen ezagupenean sakontzeko, unibertso osoko atomoen kopurua baino zenbaki lehen handiagoekin lan egiteko edo beste edozein helburu matematikotarako, matematikariek egiaztapenak erabiltzen dituzte mundu matematikoko objektuei behatzen laguntzen duen seigarren zentzua balira bezala. Beste edozein zientziaren izaerak froga esperimentalak gauza fidagarri bakarrik dela ezartzen du, baina matematikaren “ethos”a oso desberdina da: hipotesi bat onartzeko (mundu matematikoko deskribapen fidela dela baieztatzeko) datu-pilaketa infinitua ez da sekula nahikoa izanen hipotesia beti betetzen dela ziurtatzen duen frogabiderik aurkitzen ez bada. Oraindik erabateko egiaztapenaren zain dagoen XIX. mendeko Riemannen hipotesiaren frogaketa, beharbada, gaurko matematikako auzirik sakonena eta konplexuena da.

Frogabide matematikoen, gainera, hurrengo ikerketak katalizatzen dituzte, eta kateaturiko garapen horretan matematikak piramide-itxura hartzen du, belaunaldi bakoitzak aurrekoen ekarpenen gainean eraikitzen segitzen duelako: matematikan bakarrik baieztatu daiteke antzinako grekoek ezarri zutenak egia izaten jarraitzen duela, beste zientzietan ez bezala. Frogapenen garrantziari esker, matematikaren lorpenak hilezkortzat jotzen dira, eta matematikariak sinetsita daude etorkizuneko ikerketek sekula ez dutela aurreko belaunaldietakoen lanen hondamendia ekarriko; hori, gainerako zientzietarako, pentsaezina da. Ikuspuntu filosofikotik ahula dirudien jarrera hori, matematikarien “sektarako” oinarritzko printzipioa da.

### 1.3. Filosofia naturala

Grezia zaharreko filosofoek ahalegin arrazionalista ikaragarria egin zuten mundua eta errealitatea ulertzeko eta zentzuzko ereduak bilatzeko. Ahalegin horren ondorioz “filosofia naturala” sortu zen, fisikaren aitzindaria, beste arrazoi sendo bat gaurko kulturaren sehaska Grezia izan zela esateko.

Pentsalari greziarrek ordura arte urratu gabe zegoen bide bati ekin zioten, naturari buruzko galdera zehatzak eginez, eta lurtar munduan behatzen diren edozein motatako aldaketen zergatien gain erantzun logikoak hausnartuz. Beraz, gaur egun kode kimikoaz, fisikoaz eta abarrez azaltzen diren gertakari arrunten (errekuntzak, materialen propietateak)

te fisikoak, bultzadak eta mugimenduak) ulermenaren abiapuntua orain dela hogeita zazpi mende sortu zen.

Dena dela filosofia naturala “fisika ez-matematikoa” zen, fisika erabat kualitatiboa zen, kualitatea eta kantitatea bi kategoria desberdinak zirelakoan eta bien arteko erlaziorik finkatzea ezinezkoa zelakoan (XIX. mendean Hegelen dialektikak ezintasun hura gezurtatu zuenean, zientziak eskertu zion). Greziako filosofoen ustetan matematikak (geometria eta gauza gutxi gehiago) eta unibertso fisikoaren ulermenak (lurtar mundua, Lurra eta gauza gutxi gehiago) ez zuten zerikusirik. Alde batetik, matematikako zenbakiek betikotasuna, perfektzioa eta edertasuna erakusten zituzten. Eta, beste aldetik, Lurra erabateko inperfekzioaren erreinua zen, gizakiei eta gertaera naturalei behatuta gure mundua perfektua ez zela begi-bistakoa baitzen: dena aldakorra zen, dena desegiten zen, dena usteltzen zen, dena hiltzen zen. Beraz, orduko medikuek ez zuten beroa neurtzen (temperatura kantitatea eta gaitza kualitatea ez ziren erlazionatzen), denbora ez zen oraingo esanahiarekin neurtzen, eta neurketak batez ere merkataritzan erabiltzen ziren, pisuak, bolumenak eta luzerak zehazteko.

Filosofia naturala behaketa eta pentsamendu hutsean oinarritzen zen, gainerako filosofia osoa bezala, perfektzioarekin erlazionatzeko gizakiak zeukan tresna bakarra pentsamendua zelakoan. Orain ezagutzen ditugunak bezalako esperimenterik egitea ere ez zitzaien burutik pasatzen, enpirismoaren kontra baitzeuden, haien helbururako kontraesankorra zelako, egia aurkitzeko alferrikakoa zelako. Jarrera hori orduko Greziako egitura sozialak eragindakoa zen, gizarte esklabista hartan zeregin guztiak esklaboek egiten zituztelako, eta greziarrek aginte politikoa, erlijiosoa eta ekonomikoa zituztelako. Greziar filosofoak “kontenplaziora” edo “bizitza kontenplatibora” emanda bizi ziren.

Eskola filosofikoek pentsamendu-lerro desberdinak adierazten zituzten. Adibidez, mundua azaltzeko, Talesen eskolako metafisika identitarioa zen, denaren osagaia ura zela uste zuten (Homerok esan omen zuen ozeanoa jainkoen eta gizakien aita zela), eta munduaren aniztasuna uraren itxura desberdinetatik sortzen zen.

Parmenidesen arabera (544-450 g.g.a., ezagutzen den obra bakarra *Naturari buruzkoa* edo *Poema*), gure mundua, aldakorra eta askotarikoa, beste errealitate ezkutu baten irudia besterik ez zen, eta azpiko errealitate hartan mundua uniformea eta aldaezina zen, eta legeak alferrikakoak ziren. Heraklitok, ordea, kontrakoa planteatu zuen (“Panta rei”), bere iritziz munduan ezer ez baitzen beti berdin-berdina mantentzen (“bi aldiz ezin da ibai berean bainatu”).

Demokritoren eskolaren ustez (*Miakros diákosmos* edo *Munduaren sistema txikia* idazkian) dena espazio hutsez eta itxura eta tamaina desberdineko atomoz osaturik zegoen. Munduko aniztasunak eta aldaketak atomoen propietate geometrikoekin eta higidurekin azaldu zitezkeela suposatzen zuten, eta atomoen arteko elkarrekintza gertaera guztien oinarria zen.

Baina filosofia naturalaren pertsonaia nagusia Aristoteles izan zen, logikaren aita, eta berak idatzitako zenbait testutako edukiek (*De Generatione et Corruptione, Physica, De Caelo –Zeruari Buruz–*) hurrengo mendeetako fisikaren ibilbidea markatu zuten. Aristoteles pentsamenduaren arabera, mundu honetako gorputz guztiak lau elementuz osaturik

zeuden: airea, lurra, sua eta ura. Gorputzen arteko desberdintasunak lau elementu horien proportzio desberdinetatik etortzen ziren: harrietan “lur” elementua proportzio handiagoan zegoen, ardoan “ur” elementua nagusia zen eta hodeiak, batez ere, “aire”zkoak ziren. Bosgarren elementu bat bazegoen, “eter”ra. Zeruko gorputz guztiak (Ilargia, izarrak, planetak, Eguzkia) eterrezkoak ziren, perfektuak denak, ustelezinak, suntsiezinak, betierekoak eta abar, Jainkoen ondoan existitzen baitziren. Hutsa ezinezkoa zelakoan, unibertso osoa eterrez beterik zegoen. Unibertsoaren bost elementuok eta platonikoen bost solido erregularrak ere nolabait erlazionatuta omen zeuden.

Higidurari buruz (orain mekanika gisa ezagutzen duguna) edozeinen bistan zeuden fenomenoak Aristotelesek behatu zituen, eta behaketatik egiara zuzenki pasatu zen:

- 1) harri bat airean aske utzita erori egiten da, hosto bat behera erortzen da baina mantsoago, eta kea gora doa.
- 2) gurdi bat mugitzeko, idiek tiratu egin behar dute; bestela, gurdia gelditu egiten da.
- 3) planetak beti berdina mugitzen dira, gutxi gorabehera.

Lurreko gorputzetarako, Aristotelesek mugimendu naturalak (eleatikoen ekarpenean oinarriturik) eta mugimendu bortitzak desberdindu zituen, eta zeruko gorputzek higidura propioa zutela adierazi zuen.

Lurtar higidurei buruz, mugimendu naturala gorputzek berez eta espontaneoki egiten zutena zen (harri bat erori, kea igo eta horrelakoak), eta norabide bertikalean gertatzen ziren. Elementu bakoitzak Lurrean berezko tokia zeukan: lurra eta ura “behean” egoteko joerakoak ziren, eta airea eta sua “goian” egotekoak. Elementuon proportzioen arabera, gorputz bakoitzak bere joera zeukan. Batez ere lurrez eta urez osaturikoak “gorputz astunak” ziren, eta beherantz erortzen ziren haien joera naturala “munduaren zentro”aren bila joatea zelako. Pisuren arabera ere joera hura sendoagoa edo arinagoa zen, eta horregatik gorputz astunagoak azkarrago erortzen ziren.

Gorputz arinak, batez ere, airez eta suz eginikoak ziren, eta haien joera naturala gora joatea zen, edo geldiago erortzea. Sugarren igoera naturala edo hosto bat geldiago erortzea horrela azaltzen ziren.

Mugimendu naturalaren kontrakoak, edo mugimendu naturalak ez zirenak, mugimendu bortitzak ziren: harriaren mugimendu naturala behera erortzea bazen, harri bat gora botatzea edo norabide horizontalean arrastatzea mugimendu bortitzak ziren.

Mugimenduen kausari buruz, garai haietan indarraren kontzeptua ez zen oraingoa, esfortzu muskularra besterik ez zen, eta higidura-mota bakoitzerako Aristotelesek kausa bat (motor bat) definitu zuen, azalpen teleologikoaren arabera.

Mugimendu naturalaren kausa gorputz bakoitzaren “physis, joera edo izaera naturala” kontsideratu zuen; higidura horren kausa gorputz bakoitzaren barruan zegoen, eta kausa hori betierekoa zen.

Mugimendu bortitzak zerbait bultzatzen zenean gertatzen ziren, eta higidura horren kausa gorputzetik kanpo zegoen, kanpotik eginiko bultzada zen (bultzatu gabe

edo gorputza ukitu gabe mugimendu bortitzik ez zegoen). Adibidez, zoruaren gainean pisu bat arrastatzeko bultzada bat egin behar zen, eta gehiago bultzatu gabe pisua gelditzen zen.

Bultzada eta gorputzaren desplazamendua proportzionalak ziren. Masa handi bat mugitzeko ehun gizakik bultzatu behar baldin bazuten, bakar batek bultzatuta masa hori pixka bat mugituko zen, nahiz nabaritu ez.

Horren guztiaren ondorioz, Aristotelesek adierazi zuen objektuen egoera naturala geldirik egotea zela, joera naturala geldineua zela, eta mugitzeko kausa bat (gorputzaren barrukoa edo kanpokoa) ez bazegoen gorputza geldirik mantenduko zela.

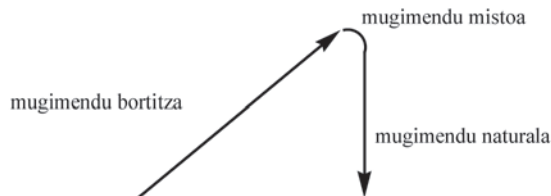
Beraz, higidura bortitza mantentzeko, kanpoko kausa hori ere mantendu behar zen, bestela norabide horizontalean gorputza geldituko zen, edo norabide bertikalean gorputzak higidura naturalari ekingo zion.

Abiadura konstantez mugitzen zen gorputzak kausa konstante baten eraginpean egon behar zuen. Eta gorputza mugitzen zen bitartean higidura sortzen zuen kausa desagertzen baldin bazen, gorputza geldituko zen.

Baina eskema horrekin fenomeno arrunt batzuk ezin ziren azaldu. Adibidez, ostiko batekin harri bat distantzia bateraino jaurtitzea ezin zen azaldu. Jaurtiketa horretan bultzada hasieran besterik ez zen gertatzen, eta gorputzak bakarrik bultzadaren aldiunean mugitu beharko zuen; hala ere, gorputzak mugitzen segitzen zuen gelditu arte.

Jaurtiketa horizontal eta bertikaletarako, Aristotelesek desplazaturiko airearen bultzada asmatu zuen. Horren arabera, bultzada bat emanda gorputza mugitzen zen, eta atzean utzitako espazioa aireak betetzen zuen; aire horrek gorputza aurrerantz bultzatzen zuen hasierako bultzadaren eragina bukatu arte, eta ondoren gorputzak bere joera naturalari jarraitzen zion, horizontalean gelditzen zen, eta bertikalean erorketa naturalez higitzen zen. Aristotelesek ez zuen azaldu hasierako bultzada hura zehazki noiz eta nola bukatzen zen, airearen eragina noiz eta nola desagertzen zen, ez zuen azaldu gorputz haiek zergatik ez ziren infinituraino mugitzen, eta hasierako bultzadaren eta azelerazioaren arteko erlazioa aipatu besterik ez zuen egin.

Jaurtiketa zeharretarako antzekoa proposatuz, higikariaren ibilbidea higidura anitzen nahasketaren ondorioa zela baieztatu zuen:



Zerutar erreinuan gertakariak beste modu batera suertatzen ziren hango osagai bakarra eterra zelakoan. Bosgarren elementu horren ezaugarrien ondorioz, zerutar gorputzak



unibertsoaren zentroaren inguruan (Lurraren inguruan) zirkulu perfektuetan eta abiadura konstantez mugitzen ziren, zeruaren ezaugarriak perfekzioa (zirkulua) eta aldaezintasuna zirelako.

Aristotelesek ideiak zenbait printzipiotan finkatu zituen:

- 1) Mugimendu guztiek, naturalek eta bortitzek, motor bat behar dute.
- 2) Mugimendu naturalen motorra higikariaren barruan dago. Mugimendu naturalak lurta munduan bertikalak dira, eta zerutar munduan zirkularrak.
- 3) Lurtar munduan gorputz guztiek zuzen eta gorantz edo beherantz mugitzeko joera dute, beren berezko tokirantz.
- 4) Mugimendu bortitza kanpoko motor baten ekintza jarraituaren ondorioa da. Distantziarako ekintza ezinezkoa da.
- 5) Hutsa ezinezkoa da, eta materia jarraitua da (Demokritoren eskolaren aurka).

Aristotelesen pentsamendutik gaur egungo zientzian ez da ezer ere gelditzen (aipatu behar da jaurtiketa bertikalako azelerazio positiboak eta negatiboak desberdindu zituela, baina ezer ez gehiago, energia zinetikoaren kontzeptura gerturatu zen, bultzadaren eta azelerazioaren arteko erlaziora ere bai, baina ezer garbirik atera gabe). Hala ere, Aristotelesen printzipioak XVII. mendera arte ez ziren gainditu, Erdi Aro osoan ia aurrerapenik ez zen lortu, eta gogoratu behar da inertzia, marruskadura eta energiaren kontzeptuak ezagutu berri samarrak direla. Aristotelikoen azken ekarpena XVI. mendean izan zen: “inpetus”aren eskola. Oxforden agertu, eta Leonardo da Vinciren eskuetik Europa osoan zabaldu zen: eskola horren arabera, gorputz bat mugitzean ezaugarri bat hartzen zuen, inpetusa hain zuzen. Inpetus hura neurtzea ekarpen horren alderdi berritzailea izan zen:

$$\text{inpetusa} = \text{pisua} \cdot \text{abiadura}$$

#### 1.4. Lurraren irudikapenaren bilakaera

Antzinako txinatarrek uste zuten gizaki guztiak Txinan bizi zirela eta Lurra karratu bat zela, enperadorearen etxea (Denboraren Etxea edo Ming t'an) erdi-erdian zuena. Karratu horrek ekialdean muga berde bat zeukan, udaberriarekin mugante. Mendebaldeko muga zuria zen, eta han udazkena zegoen. Iparralde beltza negua zen, eta hegoaldea, gorria, uda zen.

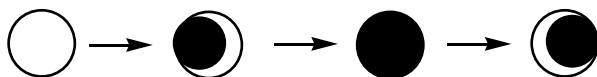
Garai aurrezientifikoetan jakintsuek, oro har, Lurra ordoki handi eta lau gisa irudikatzen zuten (Hekateo Miletokoaren arabera, 400 km-ko erradiokoa eta erdigunean Grezia zegoen), itsasoz inguratutik, ertz-ertzean amildegi erraldoiak zituen, itsasgizon askorendako oso ikaragarria zena. Inor ez zen Lurraren mugetara sekula ere ailegatu, baina itsasoak ertzetik “zergatik ez ote ziren erortzen” erantzun zehatzik gabe gelditzen zen.

Dena dela, irudikapen horrek arazo kontzeptualak ekartzen zituen, gorputz guztiak behera erortzen ziren bezala Lurrak ere erori beharko zuelako, beheranzko nora-

bidea bakarra eta finkoa izanik. Greziarrek Lurraren azpian Atlas erraldoia zegoela sinesten zuten, bizkar gainean Lurra zuena, baina azalpen hori hankamotz gelditzen zen Atlasen hankek euskarririk ez zutelako. Indian ere pentsatzen zuten Lurraren azpian lau elefante zeudela, elefanteen azpian dortoka erraldoi bat, eta dortokaren azpian suge bat.

Eskola pitagorikoak (aipatzekoa Filolao Tarentokoa, 470-385 g.g.a.) Lurra esferikoa zela planteatu zuen estreinako aldiz, arrazoi handiak emanez:

- 1) Iparra-Hegoa norabidean mugitzean, zeruertzean izar batzuk desagertu eta beste batzuk agertu egiten dira. Esate baterako hegoaldera joatean iparraldeko izarrak zeruertzerara gerturatzen dira, eta hegoaldeko zeruertzean izar berriak agertzen dira.
- 2) Itsasontzi bat edozein norabidetan urrutiratzean, portutik ikusita kaskoa desagertzen denean belak oraindik ikusten dira. Edo itsasontzi bat zeruertzetik agertzen denean, lehenbizi belak ikusten zaizkio, eta ondoren gainerakoa. Gainera, portura edozein norabidetatik etortzen diren itsasontzi guztiekin berdin gertatzen da, eta norabide guztietan berdin kurbatzen den irudi geometriko bakarra esfera da.
- 3) Astroak ez dira ateratzen eta ezkututzen ordu berean Lurreko biztanle guztien-dako.
- 4) Eklipseak ongi azaltzen dira Eguzkiak, Lurra eta Ilargiak lerro berean bat egiten dutela esanez. Eta Lurra Ilargiaren gainean proiektatzen duen itzala zirku-larra da, oso nabarmena ilargi-eklipseetan:

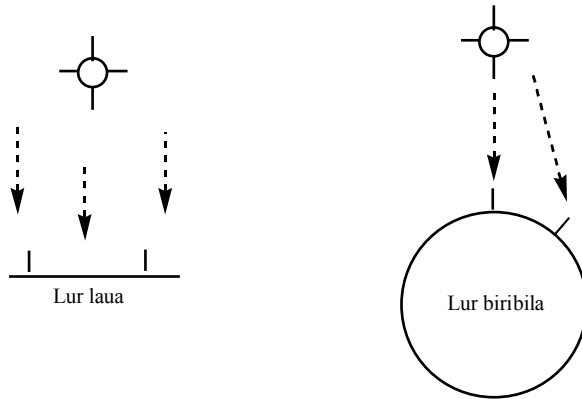


Honegatik, Lurra edozein norabidetan biribila zela suposatu zen. Eta Lurra esferikoa baldin bazen, behatzaile bakoitzarendako beheranzkoa norabide desberdina izanen zen, kasu guztietan Lurraren zentrorantz zihoana. Horrela Lurraren erorketaren arazoa ekiditen zen, Lurra ez zen erortzen bere parte guztiak Lurraren zentrotik ahalik eta gertuen zeudelako, Lurra erorita zegoelako, Lurra ezin zelako bere zentrorantz gehiago erori.

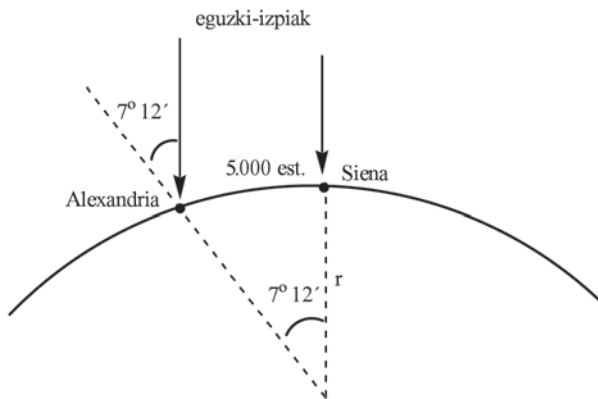
Idea hori denendako onargarria zen, eta frogarik gabe g.g.a. 350. urtean filosofo guztiak Lurraren biribiltasunaren kontzeptuarekin konforme zeuden, nahiz jende xumeak hau guztia ezagutu ez.

Lurraren esferikotasuna onartuta, hurrengo arazoa haren tamaina kalkulatzeko zen. Eratostenesek Sienan (gaurko Assuan, Nilo Garaia) udako solstizioan (ekainak 21) eguerdian Eguzkiak bertikal jotzen zuela behatu zuen (putzuen hondoak argitzen ziren, eta makila bat lurlean bertikal jarrita itzalik ez zuen egiten). Bainaaldi berean Alexandrian (iparralderago, Niloren deltan) makila bertikalek itzala egiten zuten.

Garai haietako ezagupen trigonometrikoez baliatuta, Eratostenesek eguzki-izpien inklinazioa  $7^{\circ} 12'$ -koa zela neurtu zuen. Eta fenomeno hori azaltzeko modu bakarra Lurraren esferikotasuna onartzea zela adierazi zuen, Lurra laua balitz bi hiri horietan itzal berak agertu beharko zuelako:



Sienaren eta Alexandriaren tarteko distantzia jakinik (5.000 estadio), Lurraren zirkunferentzia maximorako 39.614,4 km-ko emaitza lortu zuen, egiazko baliotik (40.008 km) oso gertu:



Eratostenesek arrazoitu zuen Espainiatik mendebalderantz abiatuta Indiaraino irits zitekeela, eta ibilbidearen mapa egin omen zuen. I. mendean g.g.a. Posidoniok aurreko kalkuluak berregin eta distantzia txikiagoak deduzitu zituen, beharbada Kolonek erabili zituenak bere bidaia Errege-erregina Katolikoei proposatzeko.

Erromatar Inperioak g.g.a. II. mendean Grezia konkistatu eta bere kultura bereganatu zuen, baina filosofia naturalean ia aurrerapenik egin gabe. Hurrengo mendeetan Eu-

ropa osoan barbaroak nagusitu zirenetik aurrera, batez ere Erdi Aroan Kristau Eliza kulturaz kargu egin zenetik aurrera, pentsamendurako oso mende ilunak etorri ziren, eta Lurra biribila zelako ideiak bazterturik gelditu ziren. Errenazimentuan munduari buelta eman ondoren (1519-1522) Karlos V enperadore espainolak Elkanori armarri bat eman zion, Lurraren globo bat grabatua zuena “*primus circumcedisti me*” esaldiarekin.

## 1.5. Zeruetako erreinua

Antzinatek hasita unibertsoaren behaketak berak interes handia piztu duelako seinale zahar asko daude. Aipatzekoa da Britainia Handiko Stonehenge behatoki astronomikoa, g.g.a. 2000. urtekoa. Egipton, Txinan eta Ameriketara ere badira jardura astronomikoen arrastoak, eta ezaguna da inkek eta maiek ilargi-eklipseak eta eguzki-eklipseak aurreikusteko eta urtaroen hasierak markatzeko eraikin aproposak egin zituztela. Mesopotamian dauden Babiloniako edo Sumeriako historiaurreko “zigurat” eraikinak, g.g.a. 3000. urtekoak (hain zuzen ere, Babelgo Dorrea zigurat bat zen nonbait), bereziki azpimarragarriak dira. Unibertsoari behatzeko eta astroen higadura-erritmoak aztertzeke eginik, zigurat bakoitzak zazpi solairu zituen, garai haietan zazpi izar mugikor zeudelako (Eguzkia, Ilargia, Merkurio, Artizarra edo Goizeko Izarra, Marte, Jupiter eta Saturno). Solairu bakoitzetik izar mugikor bat ikusten zen, eta edozein solairutatik izar finkoei behatzen zitzairen.

Oro har, nekazaritza-zibilizazio zahar haietan astronomia erabiltzen zen egutegia zehazteko, eta egutegiarekin batera eguraldiaren aldaketa ziklikoak aurreikusteko. Antzinatek ere zeruetako eta Lurreko gertaerak erlazonatu dira, horregatik zeruetan gertatzen dena aurreikusita Lurreko gertakizun batzuk ere aurreikus daitezke. Adibidez, itsasoko mareak Ilberrian eta Ilbetean altuagoak dira, edo udaberrian Eguzkia Piscis konstelaziotik Ariesera pasatzen denean euriak hasten dira. Horregatik, izarren kokapenen eskemak oso zaharrak dira gizakiaren historian.

Astronomiaren alderdi mitikoa ere zibilizazio haietan sortu zen. Lurtar munduko basoak, mendiak eta gauak jentilez eta deabruz josirik zeuden, baina jainkoen bizilekuak Eguzkian, planetetan edo izarretan zeuden, edo astroak jainkotzat zeuzkaten, Eguzkia batez ere. Jainkook bidaliriko seinaleak harrapatu eta ulertu behar ziren gaitzak eta gerrak aurreikusteko, eta izarrezko kodea argitzea diziplina magiko bihurtu zen. Faraoiengaraian, Sirius izarra (Sothis izenez ezagutua) egunsentia baino lehentxeago ikusten zenean Niloren uholdeak gertatzen zirenez, Siriusek berak eragiten zituela pentsatzen zen. Toki askotan eguzki-eklipseetan mamu batek Eguzkia irensten zuela pentsatzen zen, eta danborrak jo eta sakrifizioak egiten ziren Eguzkia berriz agertzeko. Erdi Aroan meteorito bat agertzeak aldaketak iragartzen zituen (“Nova Stella, Novus Rex”), eta orakuluek eta horoskopoez gizarteen eta gizabanakoen bizitzan eragiten zuten, pertsona xumeen kontuetatik (ezkontzak prestatu, uztak aurreikusi, bidaiak egin) pentsalari, errege eta jeneralen arazoetaraino.

Nahiz astrologia “moderno”aren sortzailea Erromako Plotino (204-269 g.g.o.) izan, neoplatoniko sutsua izan zena, antzinagoko sorrera beharbada Babilonian izan zela suposatzen da:

Lurra	⊗	Aries	♈
Ilargia	☾	Taurus	♉
Merkurio	♁	Geminis	♊
Artizarra	♀	Kantzer	♋
Eguzkia	☉	Leo	♌
Marte	♂	Virgo	♍
Jupiter	♃	Libra	♎
Saturno	♄	Scorpius	♏
		Sagitarious	♐
		Capricornius	♑
		Aquarius	♒
		Piscis	♓

### 1.5.1. Lehenbiziko kosmologiak

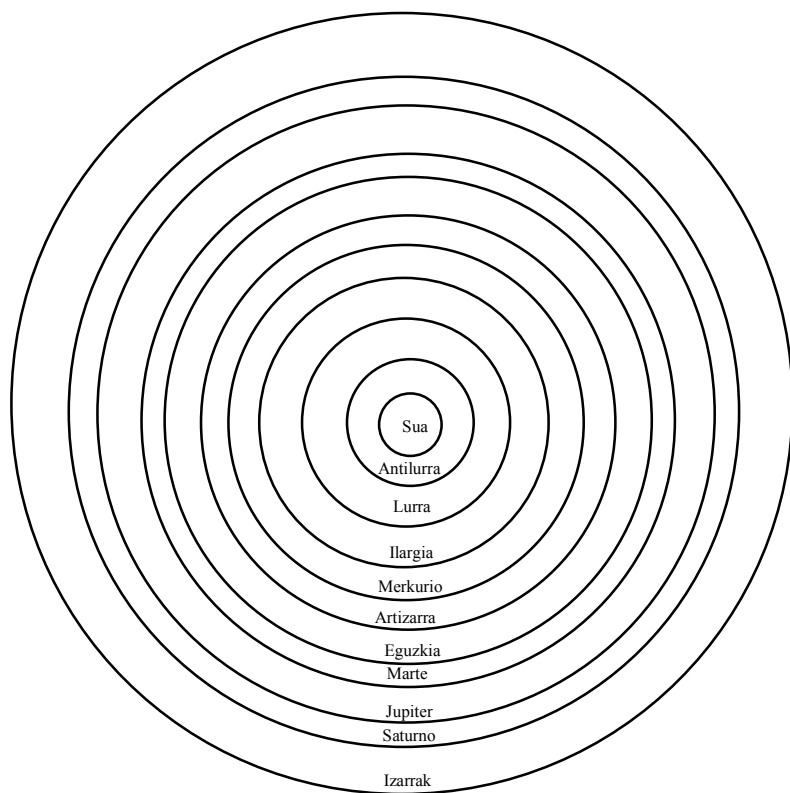
Kosmologiak unibertsoaren ezaugarri orokorrak eta propietate sistematikoak aztertzen ditu, bere osotasunaren eredia eta irudia eraikitzeko (orbis totalis). Ereduok arrazionalak dira, ikusi ez baina pentsatu egiten dira, giza adimenaren kreaioa dira, behaketa zuzenak erabiliz eraikirikoak, eta onartuak edo arbuiatuak izateko azalpen eta aurreikuspen boterearen medioz enpirikoki kontrastagarriak dira. Kosmologiak, beraz, esperientziaren mugak gainditzen ditu behaketak integratu eta antolatu egiten duelako, eta arrazoizko ordena emanez mundua ulertzen laguntzen du.

Kosmologiaren bilakaerak abentura handien antza du, bidaiari inizatikoaren modura mundu arrotzak eta aldi berean gure barruko galderak desestaltzea helburu duena. Eredu kosmologikoen eboluzioak gizakiaren kokapena munduan aldatu du, eta unibertsoaren zentroan egotetik unibertsoaren hondar infinitesimal bat izatera pasatu gara. Unibertsoaren sortzailearekin harreman estuan egotetik, Jainkoaren seme maitatuena izatetik, ezer ere ez garelako eta gure existentzia unibertso infinituko txoko galdu batean daukagula konturatuzera. Kreaioaren hoberenak garelako harrotasunetik erabateko umiltasuneraino pasatu gara. Azkenean, ezjakintasunetik zientziara aldatu gara.

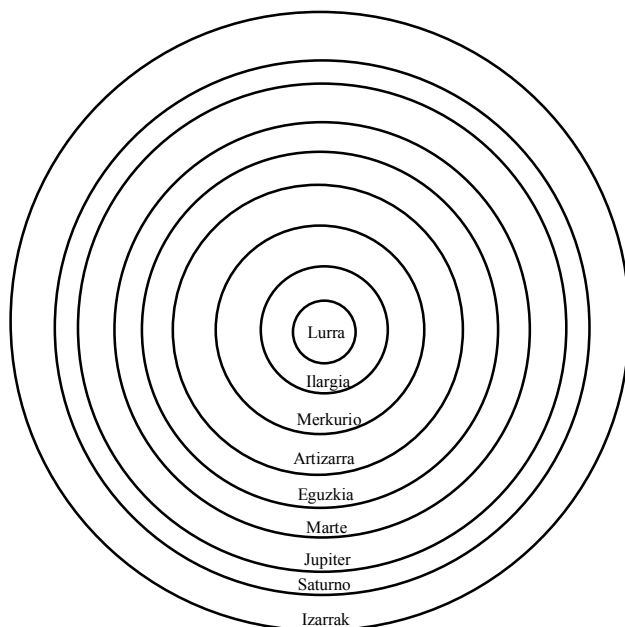
Nahiz Talesek g.g.a. 585. urtean eguzki-eklipse bat iragarri (Babiloniatik ekarritako ezagupenez baliatuta), “kosmologia” izena merezi duten lehen teoriak mende bat geroagoko pitagorikoen artean agertu ziren, batez ere pentsamendu kosmologiko laiko eraiki zuten lehenak izan zirelako. Aurreko astronomoen artean behaketa zuzeneko gertaerak (astroen ibilbide irregularren behaketak) ordenatzea jainkoen ardura zen, baina pitagorikoen ikuspuntua erabat desberdina zen. Harmonia musikaetik abiatuta, harmonia kosmikoa proposatu zuten, eta berez harmonia edo simetria gorena duten figura geometrikoak zirkunferentzia eta esfera ziren. Zeruan irregulartasunerako edo asimetriarako lekukurik ez zegoelakoan, astroen mugimenduak eta distantziak sinplifikatzeko zirkuluak eta esferak nonahi sartu zituzten. Hortaz, Lurra biribila zen bezala, pitagorikoen arabera zeruak ere beste esfera handiago bat izan behar zuen. Zeruko esfera horretan izarrak

(izar finkoak) zeuden, eta gure unibertsoaren ondoan beste mundu batzuk existitu zitezkeelako posibilitatea ere planteatu zuten. Lurraren eta izar finkoen tartean mugitzen ziren eta distira desberdinak zituzten zazpi gorputzei “planeta” (“ibiltari”) deitu zieten, eta higidura zirkular uniformeaz mugitzen ziren.

Filolaoren arabera unibertsoaren zentroan Sua zegoen, eta Lurra eta planetak Su horren inguruan mugitzen ziren. Tetraktis zenbakia osatzeko asmotan, azkenean pitagorikoek Antilurra ere gehitu zuten, astronomia, geometria eta aritmetika erlazionatuz. Zenbakien propietateek zerua ere gobernatzen zutelakoan, unibertsoaren egitura eta matematika lotu zituzten, eta zeruko gorputzei aplikaturiko “lege”aren nozioa pitagorikoen konkista izan zen.



Orduko Grezian erdiguneko kokapena Lurrak betetzea oso bertsio hedatua zen, Platonek *Timeon* adierazi bezala. Eredu horren arabera izar finkoen kokapenak egunero (gauero) errepikatzen direnez, zeruko esfera Lurraren inguruan biratzen zen, bira bat eguneko ekialdetik mendebalderantz, eta esferarekin batera izarrak ere bai. Horrela estreinatu zen kosmologia geozentrikoa. Izar finkoak kanpoko esferan itsatsita zeuden bezala, analogiaz zazpi “planetak” ere zazpi esferatan mugituko ziren, lurtar eta zerutar munduen arteko esfera bereizlea Ilargiarena izanik.



Hortik aurrera, batez ere eredu planetarioak garatu ziren planeten ibilbideak ahal zen hobekien azaltzeko, “Platonen arazoa” zeritzona. Eskola platonikoko Eudoxo (408-355 g.g.a.) eta Kalipo (IV. mendea g.g.a.) arazo horretaz aritu, eta planetarik gabeko zenbait esfera garden eta homozentriko sartu zituzten (osotara, hogeita hamalau) planeten ibilbideen behaketak eta ereduak elkartzeko, baina azalpen-sistema bakarra lortu ez, eta planeta bakoitzarendako aterabide propioa proposatu zuten. Esfera guztien errotazio-ardatzak, biraketa-erradioak eta abiadurak ere kalkulatu zituzten.

Aristotelesek ez zuen ia ekarpen berririk egin, baina bere pentsamendu kosmologikoan astronomia geometrikoa gainditu eta kosmologia fisikoa sortu zuen, bere proposamenean platonismoaren kutsua (dualismoa, idealismoa) nabarmenduz. Abiapuntua garbia zen: uni-bertso esferikoa, geozentrikoa, geostatikoa (Lurra geldirik egotea) eta esfera zentrokidez osaturikoa. Eta hortik aurrerako burutzioak azalpen teleologikoetara zuzendu zituen.

Lurtar munduan aldaketak, sorkuntzak eta usteltzea nagusi ziren, eta Lurrean gertaera inperfektuak zeuden: Lur gaineko gorputzak erortzen ziren, Lurreko mugimenduek hasiera eta bukaera zuten, abiadurak aldatzen ziren, eta abar. Zeruan, ordea, gertaera perfektuak suertatzen ziren: zeruko gorputzak ez ziren erortzen, fenomeno eta behaketa guztiak errepikatzen ziren, higidurak ez ziren sekula bukatzen, mugimenduak infinituak ziren, geldiezinak, zeruko gorputzak abiadura konstantez higitzen ziren, eta ibilbide zirkularrak (perfektuak) deskribatzen zituzten. Eterrezko izakiek, planetek eta, sekula ezertan aldatu gabe beti existitzen ziren haiek, Platonen zerutar munduko perfekzio geometrikoa irudikatzen zuten. Eterra, beraz, pisugabekoa zen, ezin sortuzkoa, suntsiezina, eta bere izaerarengatik higidura zirkularra zegokion. Zerutar gorputzak eterrezkoak izateak ondorio garbiak ekartzen zituen: kosmosa betierekoa zen bere osagai bakarra kreaiziotik

agertu ez zelako, eta aldi berean bakarra eta finitua, eta harantzago ezereza. Astroak historiarik gabeko izakiak ziren, hasiera eta bukaera gabekoak, aldaezinak. Lurraren eta izarren artean zazpi gorputz zeuden, eta kopuru hori ere aldaezina zen, sorketarako eta suntsiketarako posibilitaterik ez zegoelako.

Zeruko behaketen azalpen zehatzagoak erdiesteko berrogeita hamasei esfera zentrokide erabili zituen. Esferen arteko espazioa eterrez beterik zegoenez, unibertso osoa eterrezko “plenum” edo “continuum” bat zen, espazio hutsik gabe. Kanpoko esfera arrazoi teleologikoen arabera mugitzen zen (denborarekin “*primum mobile*” izenez ezagutua), eta beste esferen higadura zirkular uniformea ukipenez kutsatzen zien Ilargiraino iritsi arte. Abiadurak automatikoki ez errepikatzen eta Eudoxok lorturiko planeta bakoitzaren higaduraren azalpen independentea bermatzeko, planeten esferen artean beste esfera “konpentsatzaile” batzuk sartu zituen.

Baina eredu kosmologiko aristotelikoak ezin zituen astroen kokapenak iragarri erabat kualitatiboa zelako. Mugimendu postaristotelikoek, hala nola estoikoak eta epikureoak, ezin izan zuten, beraz, ekarpen kuantitatibo berririk egin, eta Aristotelesen filosofia naturalean oinarrituriko kosmologia mantendu zen azalpen bateratua ematen zuen metafisika bakarra zelako, zeruetako esfera ikusezinak erabiliz.

Dena dela greziarren behaketek garbi erakusten zuten esfera zentrokidezko unibertso horrek planeten egiazko ibilbideak ez zituela irudikatzen. Izar finkoen mugimendu periodikoa begi-bistakoa zen, baina planetak izar finkoekiko ez ziren beti abiadura konstantez mugitzen (anomalia zodiakala), Eguzkiaren ondoan (edo oposizioan) ikusten zirenean planetak gelditzen zirela edo atzera jotzen zutela zirudien (anomalia heliakoa edo eretrogradazio-mugimendua), eta, gainera, planeta bakoitzaren distirak eta itxurazko tamainak aldakorak zirenez Lurretik distantzia desberdinetara zeudela suposatu zen: horrek guztiak zerutar gorputzen higaduren uniformetasuna hausten zuen. Behaketa horien trataera matematiko aproposa Alexandrian gauzatu zen, esferazko kosmologia fisiko aristotelikotik aldenduz, espiritu pitagorikoan eta platonikoan inspiraturiko astronomia geometrikoa berrindartuz. Alexandriako geometrek eredu berriak eraiki zituzten, eta, esfera zentrokideak baztertuta, zirkuluek lehentasuna berreskuratu zuten. Apolonio Per-gakoak (240-190 g.g.a.) eta Hiparkok (190-120 g.g.a.) egindako lanak kontuan hartuta, Ptolomeok (100-170 g.g.o.) beste eskema unibertsal bat altxatu zuen.

Klaudio Ptolomeok *Astronomiaren konposizio matematiko handia* liburuan (grekoz idatzita nahiz garai haietan Alexandria Erromatar Inperioaren menpe egon, eta *Almagesto* izenez ezagutua mendebaldera ailegatu zen lehen bertsio arabiarraren izena *Al Majesti* –Handiena– zelako) bere garaiko jakinduria astronomikoa bildu (besteak beste, bi mila izar baino gehiagoko katalogoa egin zuen), sistematizatu eta perfektzionatu zuen, eta handik aurrera “sistema ptolomeikoa” izenez ezagutu zena sortu zen. Sistema geozentrikoa zen, eta geostatikoa, baina planeten ibilbide zirkularren erdigunea Lurra izan beharrean beste posibilitate batzuk proposatu zituen, hain zuzen ere Lurretik higadura perfekturik ez behatzea azalduko zutenak.



Adibidez, Eguzkiaren ibilbidearen anomaliak ulergarriak ziren Lurra biraketa-zentroan ez zegoela suposatuz gero, eta astroa beste puntu baten inguruan biratzen zela aukeratuz gero. Lurraren kokapena eta ibilbidearen zentroarena Ptolomeok geometrikoki erlazionatu zituen, baina bata bestean gainezarri gabe, eta behatzen zen Eguzkiaren ibilbiderako zirkulu eszentriko bat proposatu zuen. Hala, higidura zirkular uniformearen printzipio platonikoa eta behaketen azalpena bermatuta gelditzen ziren:



Planeta gehienetarako, beste aterabide bat proposatu zuen. Haien ibilbideak zirkulu epiziklikoak izanen ziren. Epizikloaren zentroaren ibilbidea deferentea zen (beste zentroarekiko zirkuluak deskribatzen zituen), eta deferentea eszentrikoa zen (Lurraren kokapenarekin ez zuen bat egiten). Hirugarren puntu batekiko (puntu ekuantea) abiadura angeluarra konstante mantentzen zen, perfekzio platonikoaren beste baldintza:

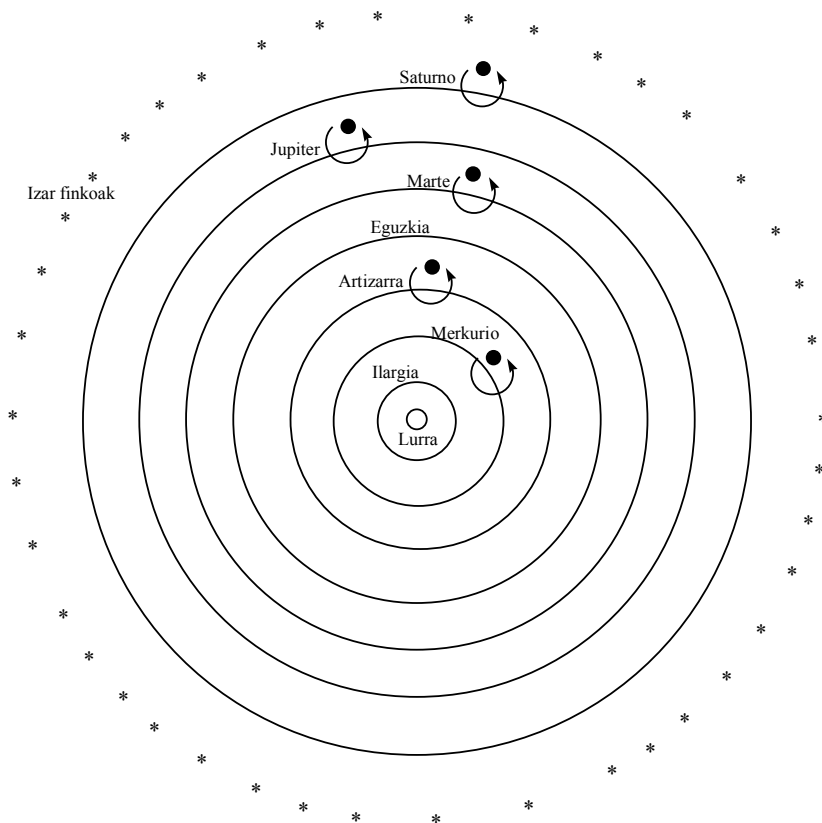


Merkuriorako eta Ilargirako ereduak korapilatsuagoak ziren, deferente eszentrikoaren zentroa higikorra zelako.

Unibertsoaren tamaina Lurraren erradioa halako hogeita mila zela kalkulatu zuen, berehala milioi kilometro gutxi gorabehera (ikus irudia hurrengo orrian).

Behaketak eta kalkuluak Ptolomeoren tresnak izan ziren, baina kosmologia fisiko aristotelikoaren eta astronomia geometriko ptolomeikoaren arteko kontraesanak gaindiezinak ziren. Eterraren mugimendu naturalaren kontra, sistema ptolomeikoan zerutar

gorputzak guregandik gerturatu eta urrutiratu egiten zirela onartzen zen, nahiz Aristotelesen arabera horrelako mugimenduak bakarrik gorputz pisudunei zegozkien. Bestalde, Aristotelesen kosmos simetrikoaren aurka, Ptolomeok biraketa-zentro anitz erabili zituen, inolako oinarri fisikorik gabe, kalkulu astronomikoetarako beharrezkoak zirelakoan. Azkenean, sistema ptolomeikoan Lurraren inguruan biratzen zen planetarik ez zen aurkitzen, bat ere ez, planeta bakoitza izaera fisikorik gabeko puntu baten inguruan mugitzen baitzen, zerutar gorputzak hutsik dagoen puntu batetik beti distantzia berera mantentzearen zergatiari buruzko irizpide fisikorik eman gabe. *Planeten hipotesiak* liburuan Ptolomeok bere ikuspuntu kosmologikoa plazaratu zuen, eta bere ekarpenak Aristotelesen munduan sartzeko asmotan zirkuluen ordeztu 41 esfera erabili zituen, esfera batzuk beste batzuen barruan sartzen zirela kontuan hartuz. Aristotelesen higiduraren “*primum mobile*” onartu ez, eta planeten mugimendua berez natural gisa definitu zuen.



Egoera horren aurrean, filosofo, matematikari eta geometren jarrerak bikoitzak izan ziren, errealistak aristotelismoari buruz, errealitatearen egiazko deskribapena zelakoan, eta instrumentalistak sistema ptolomeikoarekiko, kalkulu zehatzagoak ahalbidetzen zituelako. Bikoitzasun horren ezaugarriek mendez mende iraun dute, Erdi Aro osoan eragin nabarmena izan zuten, eta gaur egun ere giza jardueren alderdi askotan aurki ditzakegu.

Mundu grekoan ikuspuntu heterodoxoak ere sortu ziren, haien artean Aristarko Samoskoarena (310-230 g.g.a.): behaketen azalpenetan oinarrituta, heliozentrismoaren alde agertu zen. Baina geostatismoaren aldeko arrazoiak oso errotuta zeuden, Lurra espazioan zehar abiadura handiz mugitzen zela pentsatzeak zorabiatu egiten zuen, lurta eta zerutar munduetako gertaeren azalpenak geostatikoak eta geozentrikoak zirela nabaria zen, eta ptolemaiko eta aristotelikoak eredu heliozentrikoaren kontra mintzatu ziren.

### **1.5.2. Greziatik Kopernikorenganaino**

Ptolomeorengandik Kopernikoren garaietara bitartean pasaturiko hamahiru mendeetan sekula ezagutu den katastrofe kulturalik handiena gertatu zen, eta Grezia zaharrean garaturiko aberastasun zientifiko osoa galdu zen, ahaztu egin zen. Kristau-kulturak unibertsoaren gidaritza hartu zuenetik aurrera 1000 urte baino gehiago pasatu ziren ia pentsamendu askerik gabe, eta horrek badu bere zergatia, menpekotasun politikoan, ideologikoan eta erlijiosoan datzana, mendeetan zehar garatu izan dena.

Gure garaiaren hasieran, Jesukristo juduaren jarraitzaileak batez ere Grezian eta Erroman barreiatu ziren. San Paulori esker, haren irakaskuntzak helenismoz bete ziren, eta 70. urtean g.g.o. Erromak juduen altxamendua zapaldu zuenean (Titoren legioek Salomonen bigarren tenplua suntsitu zuten, juduak umiliatzeko) eta judu guztien batasuna sekula baino beharrezkoena izan zenean, kristau-sektek batasunerako deiari kasurik egin ez eta Erromaren alde jarri ziren. Kristautasuna orduan jaio zen erlijio desberdin gisa. Jesukristo judu jaio zen, bere bizitza osoan judu izan zen, eta judu hil zen, baina kristauen lehenbiziko aita santu guztiak (San Lino, San Anakleto, San Klemente I.a eta abar) erromatarrak izan ziren, juduendako arrotzak eta etsaiak.

IV. mendean g.g.o. Konstantino Erromako enperadorea Lizinio Ekialdeko erromatar enperadorearekin borrokan zebilen. Konstantinok kristauen laguntza behar zuen, Liziniok paganoen alderdiaren laguntza zuelako. Soldadu kristauak erreklutatzeke, 313. urtean kristautasuna legeztatu zuen, nahiz kristauak beste erlijioen askatasuna ukatu. 324. urtean garaipena lortu eta enperadoreak berak 325. urtean bere etxebizitzaren ondoan zegoen Nizea herrian kontzilio batera deitu zuen, gastu guztiak berak ordainduta. Kontzilio hartan bildu ziren apezpiku asko paganoen errepresioa (kartzela, torturak) jasandakoak ziren, eta Kristau Eliza bateratu eta sortu egin zuten. Konstantinok kristautasuna inperioaren batasunerako eta uniformizaziorako erabili zuen, eta enperadorea bera 337an kristautu zen, hil baino hilabete batzuk lehenago, nahiz bere zintzotasunari buruz zalantza asko egon (sekula ukatu ez zuen “Deus Sol Invictus” erlijio apaiza baitzen). Handik aurrera konbertsioak masiboak izan ziren, kristautasuna eta estatua loturik ibili ziren, estatuaren boterea eta interesak Elizarenak izan ziren (“suma potestas”), estatuaren bortizkeria eta etsaiak Elizarenak ziren, eta askatasun intelektuala erabat desagertu zen. 381. urtean kristautasuna estatu inperialaren erlijio ofizial bihurtu zen, eta 391n erlijio bakarra bakarrik ez, kristautasuna bizitzaren eta portaeraren arau bakarra eta ezarria bihurtu zen. 415ean g.g.o. Alexandrian kristau fanatikoen samalda batek Hipatiari eraso zion. Hipatia Teonen alaba zen, matematika-

ri fina, Euklidesen *Elementuak* liburuari eginiko iruzkin batzuen egilea, karismaz beteriko emakumea, diskurtso zoragarrikoa, baina politikoki kristauen aurkaria, eta bizimoduan paganoa. Jantziak erantzi zizkioten, egurra eman hil arte eta beraren gorputza puskatu zuten, San Ziriloren ardurapean. Eta kristauak izan ziren, ziurrena, Alexandriako Liburutegia behin betiko erre zutenak. 476an germaniar herriek Erromatar Inperioa suntsitu zutenean, gauzak ez ziren hobera joan; basakeriak, kaosa eta kulturagabetasuna nagusitu ziren, eta unibertsoari edo naturari buruzko ideiek atzera egin zuten, maila primitiboan gelditu arte.

Kristautasunaren eraginetik kanpo zientzia musulmanak, grekoen lekukoa gordezteaz aparte, greziar zientzian oinarria eta erreferentzia izan zuen. Bagdad, Kordoba eta gero Toledo, lehenagoko Atenasen eta Alexandriaren modura, bizitza kulturalaren gune sendoak izan ziren harik eta XIII. mendean kristau-herriak nagusitu arte, eta bertan Ptolomeoren taula astronomikoak osatu eta hobetu ziren (Toledoko Taulak). Oro har, Almagestoko eskemak ikuspuntu pragmatikoz erabili zituzten, eta, munduaren kosmologiaren azalpen bakarrerako, Aristotelesena onartu zuten. Averroes edo Ibn Rushd (Kordoba, 1126-1198) iberiar musulmana izan zen bikoiztasun horri errugabetze filosofikoa eta psikologikoa ahalbidetu ziona, “egia bikoitz”aren proposamenaren bidez. Dena dela, kristauak hedatzen zuten suntsipena 1085ean Toledora ailegatu zenean, hango distira kulturala itzali zen (aipatzekoa da konkistaz kristauturiko Toledon Gerardo Cremonakoak 1175ean Almagesto arabieratik latinera itzuli zuela).

Averroesek islamean egin nahi izan zuen modura, kristautasuna pentsamendu aurretuenaren gidari izaten saiatu zen, eta XII-XIV. mendeetan sortu ziren lehendabiziko unibertsitateetan (Bologna, Paris eta Oxford 1150 baino lehen, Cambridge, Padua eta Napoles 1200 inguruan, Praga, Krakovia eta Viena 1330ean) hurrengo mendeetan hedatuko zen kultura ptolemaikoa, aristotelikoa eta kristaua eraikitzen hasi zen, greziar pagano haiek lehendabiziko kristauak izan balira bezala. “Arte liberalak” (Quadrivium: aritmetika, geometria, musika eta astronomia; Trivium: gramatika, dialektika eta erretorika) landu ziren, baina pentsamendu-lerro guztietan teologia gidaria zen, teologiak dekretuz errealitate fisiko eta kosmologikoa ezartzen zuen, eta, oro har, kosmologiaren arazo bakarrak munduaren betekotasuna, zeruko higiduren jatorria (“primum mobile”), hutsaren existentzia eta izarretatik harantzagoko zonen gaineko burutazioak izan ziren. Garai haietan Unibertso esferikoa, geozentrikoa, zortzi (edo hamaika) esfera zentrokidez osaturikoa eta bakarra zela pentsatzen zen. XIII. mendean San Tomas Akinokoak (“Doctor Angelicus, Doctor Universalis”) eta 1563ko Trentoko Kontzilioak Aristotelesen filosofia (derrigorrezko moldaketak egin ondoren) dogma bihurtu zuten, egia bikoitzerako lekurik utzi gabe, eta pentsamendu askerako mende beltzak izan ziren, askok beltzak eta gorriak ikusi baitzituzten.

Hala ere, aldaketa ailegatu zen, parousiari itxarroteaz nazkatuta berriz ere jatorrizko bekatua munduaren jabe egin zenean, jakinduria-goseak bultzatuta gizakiek misterioaren bila mendebaldeko itsasoetara abiatu eta Atlantikoa zeharkatu zutenean, itsas nabigazioaren premia berriek izarren kokapen zehatzagoak eta kalkulu errazagoak eskatu zituztenez.

Sistema ptolomeikoa Erdi Aroan oso erabilia izan zen, eta XVI. mendera arte eredu geozentrikoa inork ez zuen zalantzan jarri, nahiz behaketak azaltzea gero eta zailagoa izan. Planeten ibilbideei buruzko datu ugariagoak lortu ahala, gero eta epiziklo gehiago jartzen ziren. Azkenean, lauogezi zirkulutik gora erabili behar izan ziren behapenak eta teoria bat etorrarazteko, baina taula luzeak erabili eta oso kalkulu zailak ebatzi behar ziren.

Mikolaj Kopernik poloniarra –Nicolaus Copernicus edo Koperniko (1473-1543)– Europako zenbait unibertsitate ezagutu zuen, baina batez ere Krakovian sistema ptolomeikoaren doitasuna eta Paduan kosmologia aristotelikoaren xehetasunak ikasi zituen. Bi ereduaren arteko kontraesanak gainditzea erabaki zuen, batez ere bi arrazoirengatik: alde batetik, kosmosaren ordena arrazionala irudikatzen zuten astronomia (Ptolomeo) eta kosmologia (Aristoteles) behin betiko elkartu behar zirelako; bestetik, zerutar gorputzen ibilbide irregularrak onartezinak zirelako. Kopernikoren helburua matematikoki iragartzea eta kosmologikoki azaltzea zen, sistema kontzeptual bakar baten bidez, eta sinetsita zegoen heliozentrismoak hori dena egiteko aukera ematen zuela. Astronomiari interpretazio platonizatzailea emanez, Kopernikoren ustez zerutar higiduren uniformetasuna (planetaren abiadura angeluar konstanteak) eta zirkulartasuna ñabardurarik gabe mantendu behar ziren, eta, horri dagokionez, sistema ptolomeikoaren ezintasunak nabariak ziren.

Sistema heliozentrikoaren lehen oztopoa geostatismoak jartzen zion. Lurraren gelditasunaren aldeko arrazoiak antzinatek ezagutzen ziren, batzuk gertakari arrunten behaketetan funtsatuta (aske erortzen diren gorputzen ibilbideak, hodeien ibilbidearen noranzkoak). Bere eredia defendatzeko, Kopernikok “ad hoc” hipotesiak erabili zituen, eta, azkenean, Lurra beste edozein planeta bezalakoa zela proposatu zuen, mugimendu natural zirkularrekoa, eta espazioan zeharreko higiduraren abiadurak ondorio katastrofikorik ekartzen ez zuela arrazoitzeke, Lurrarekin batera gaineko guztia ere abiadura berean mugitzen zela eta horregatik efektu zentrifugorik nabaritzen ez zela adierazi zuen, mundu naturalak beste modu horretara funtzionatzea nahitaezkoa baitzen. Errotazioak sortzen zituen joera zentrifugoak eterrezko gorputzetan eraginik ez zeukan bezala, Kopernikorengandik aurrera Lurrean ere horrelakorik nabarituko ez zela deduzi zitekeen.

Geozentrismoaren beste zutabea naturaren bost elementu aristotelikoen ezaugarriak ziren. Eterra pisugabea izanik, peripatetikoen iritziz gorputz pisudun guztien helmuga Lurra zen, eta Lurra zentrorra ez amiltzeko Lurra zentroan bertan egotea zen posibilitate bakarra. Horren aurrean, Kopernikok grabitate-zentroen aniztasuna proposatu zuen, eta Lur gainean gorputzak beheara erortzen ziren bezala beste astroetan ere gauza bera errepikatuko zela baieztatu zuen.

Beraz, Kopernikok filosofia naturalaren oinarriari astinaldi ikaragarriak eman zizkion, eta hurrengo belaunaldiei fisika berriaren lehen urratsak gauzatzeko bidea zabalik utzi zien, baina bere helburuak gorago zeuden, zeruko esfera hartan hain zuzen ere. Zerutar munduko gertakarien behaketek Lur geldikorraren ondoriora zuzen eramaten ez zutela Ptolomeok berak garbi zeukan, eta Kopernikok ongi asko ulertu zuen (erlatibitatearen printzipio optikoa deritzona). Dena dela, Kopernikoren kosmologiak ez zuen hoge

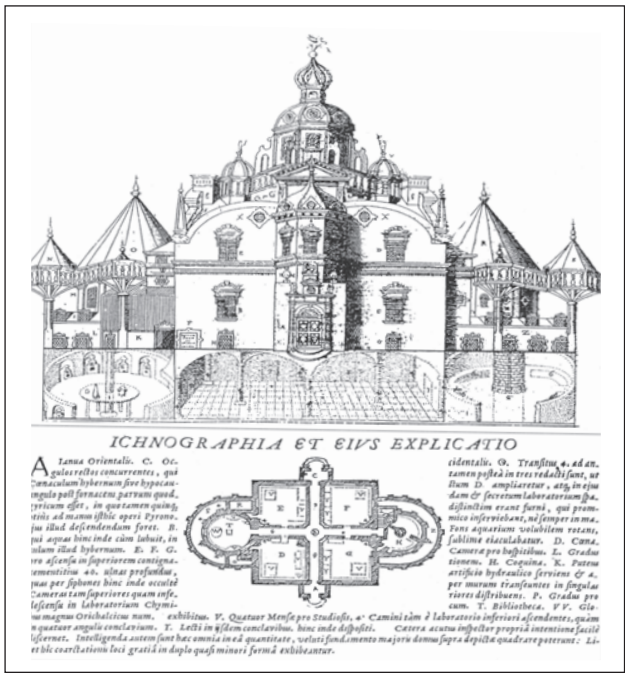
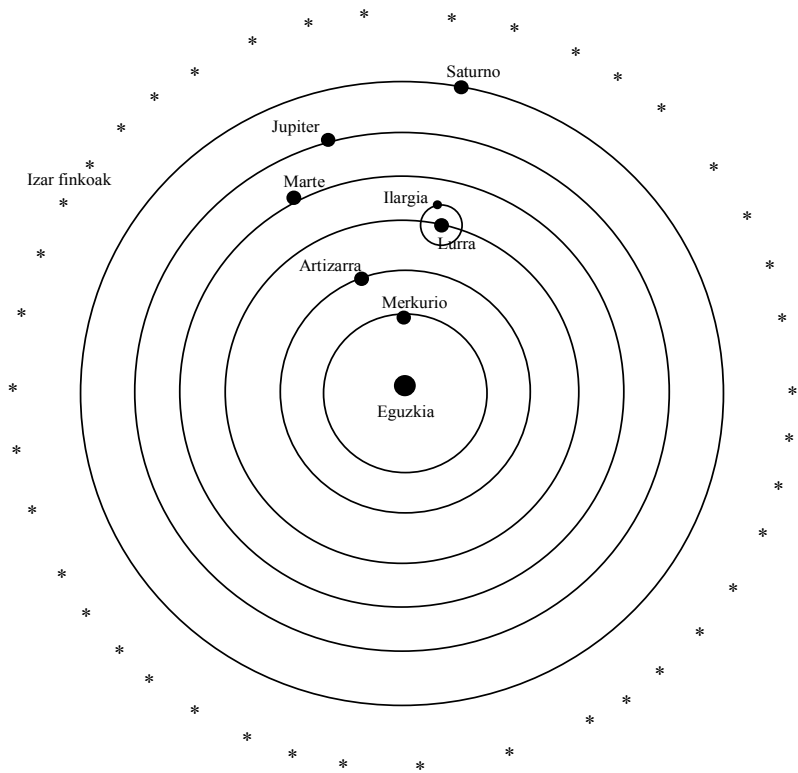
mende lehenago eraiki zen unibertsoaren oinarritzko eredu hura erabat aldatu, izar fin-koen esferatik zentroko esferarainoko kosmosa, unibertso finitua, esferikoa, bakarra eta ordenatua, baina, tradizio hermetikoak agindu bezala, erdigunean Eguzkia jarri zuen. Erabili zituen tresna geometrikoen arabera, eredu astronomiko berriak ptolomeikoa izaten segitu zuen: zirkulu epiziklikoak, deferenteak eta eszentrikoak (ekuanterik ez) nahitaezkoak ziren orbita zirkularrak mantentzeko (zirkuluen kopurua 79tik 34ra jaitsi zuen). Zirkulu guztien kokapenak, abiadurak, angeluak eta bestelako magnitudeak kalkulatu zituen (izar fin-koen esfera geldirik zegoela suposatu zuen) eta, Lurraren mugimenduak (errotazioa, translazioa eta hirugarrena, Lur-ardatzarena) kontuan hartuta, zeruko gorputzen itxurazko higidurak ilusio optikoak zirela proposatu zuen:

- izarren mendebalderanzko mugimendua
- Eguzkiaren eguneko mendebalderanzko mugimendua
- Eguzkiaren ekliptikan zeharreko urteko ekialderanzko higidura
- Ilargiaren mendebalderanzko mugimendua
- planeten erretrogradazio-mugimenduak

Sistema heliozentrikoak beste behaketa asko ere (planetan distira eta itxurazko tamaina-aldaketak, anomalia zodiakala, ekinozioen prezesioa, izarren paralajearen desplazamendua) oso mekanikoki argitu zituen, planeten orbiten tamainak eta abiadurak bir-kontsideratu behar izan zituen, eta unibertsoaren tamaina laurehun mila aldiz handitu ere bai. Baina Kopernikoren astronomia berria, batez ere, harmonikoagoa, sinpleagoa eta ikuspuntu kontzeptualaren arabera “ekonomikoagoa” zen, bere abantaila nagusiak estetiko-arrazionalak ziren, eta froga esperimentalak geroago ailegatuko ziren (ikus irudia hurrengo orrian).

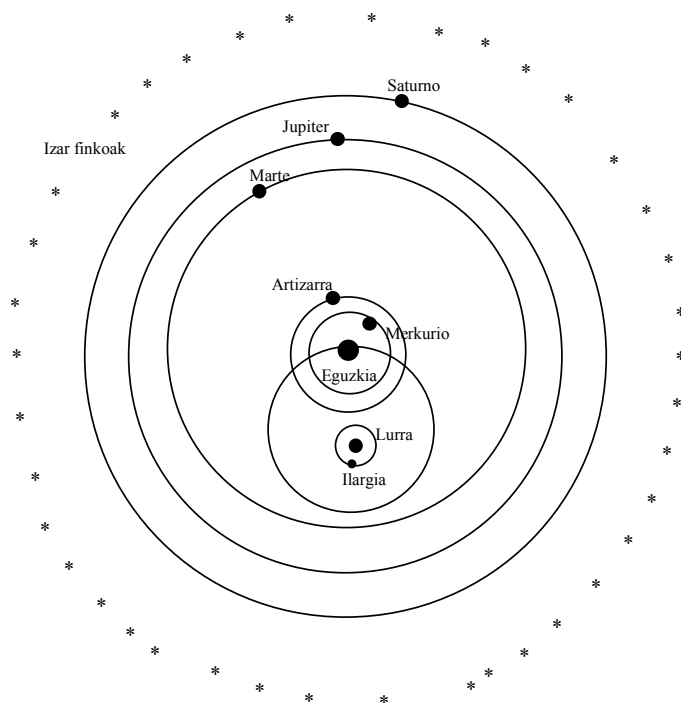
Kopernikoren ikuspuntua errealista zen, bere sistemak errealitatea irudikatzen zuela pentsatzen zuen. Hala ere, 1543an argitaraturiko *De Revolutionibus Orbium Coelestium* liburua kalkulu-arauden sorta gisa aurkeztu zen, Lurra Eguzkiaren inguruan biratzen zela kontsideratuta kalkuluak errazagoak baitziren (ikuspuntu instrumentalista). Europa Erreforma eta Kontrarreformaren prozesuaren barruan zegoen, eta teoria zientifikoak epaileengana eramaten ziren orduko lege zibilekin epaitzeko, orain ez bezala. Izan ere, Kopernikok Eliza Luteranoarekin arazoak izan zituen, Bibliaren interpretazio literala zela eta (“*ero harro honek astronomiaren zientzia osoa aldatu nahi du, baina Eskritura Santuek esaten digute Josuek Eguzkiari gelditzeko agindu ziola, eta ez Lurrari*” Lutherren hitzak, 1539an, Kopernikoren aurka), eta Eliza kristauek XVII. mendean eredu heliozentrikoa onartu bitartean sistema kopernikarra, asko jota, ikuspuntu instrumentalistaz hartu zen, kalkuluetarako asmazio baliagarria balitz bezala.

Koperniko hil eta hurrengo belaunaldian, Tycho Brahe daniarrak (1546-1601) Hveen uhartean (Kopenhagetik 25 km iparrerantz) eraiki zuen behatokian (Uraniborg, Zeruko Gaztelua) behaketa paregabeak egin zituen (besteak beste, supernoba baten leherketa Casiopeia konstelazioan 1572an, eta 1577, 1580 eta 1585eko kometa berriak), eta datu asko eta onak bildu zituen (begi-bistaz, teleskopiorik gabe) (ikus irudia hurrengo orrian).



Marteren kasurako, batez ere, beraren datuak oso zehatzak ziren. Eguzkiaren hiduraz ere ordura arte zeuden taula guztiak baino hobek argitaratu zituen, eta, horren ondorioz, Gregorio XII.a aita santuak 1582an egutegia egokitu eta aldatu egin zuen.

Braheren behapenak ez zetozen bat teoria geozentrikoarekin, ezta Kopernikoren ereduarekin ere. Eredu heliozentrikoan ez zuen sinesten, beraren ustez Lurra unibertsoaren zentroa baitzen, baina gainerako planetak Eguzkiaren inguruan biraka zebiltzan, eta aldi berean Eguzkia Lurraren inguruan biratzen zen.



Garai haietan zeruak zeharkatu zituzten kometen ibilbideei erreparatuz, Brahek ongi asko suposatu zuen zeruko esfera ezinezkoak zirela, ezin zirela existitu. Eta beraren ereduan esfera haiek ezinezkoak ziren, Eguzkiak, Merkuriok eta Artizarrak zeharkatzen zituztelako. Beraz, zeruko esfera gardenak behin betiko desagerrarazteaz gainera, Braheren ereduak estreinako aldiz espazioan hutsa bazegoela eta planetak espazioan flotatzen zeudela onartu zuen.

Tycho Braheren izaera ez zen inolaz ere gozoa; izan ere, duelu batean sudurra moztu zioten eta handik aurrera urrezko eta zilarrezko protesi metaliko bat erabili behar izan zuen. Danimarkako Federiko II.a erregea 1588an hil eta beraren ondoren Kristian IV.a koroatu zutenean Braheri erraztasun ekonomikoa bukatu zitzaion, eta Rudolf II.a enperadoreak gonbidatuta, 1597an Pragako gortera joan zen. Horri esker, Braheren eta Keplerren bideak gurutzatu ziren.



II.

GALILEO,  
EPPUR SI MUOVE



Grezian eraikitako unibertsoaren ereduak hogei mende baino gehiago iraun ondoren, Kopernikok bere eraldaketa astronomikoa hasi zuen, baina ondorio kosmologikorik edo fisikorik gabe. Eguzki zentrolean eta Lur higikorrean oinarrituriko astronomian, beraz, esferen kosmologia eta higidura naturalen fisika ez ziren zalantzan jartzen. Platonen Akademiaren eraginak –astronomia egiteko modu geometrikoan–, eta Aristotelesen pentsamendu hegemonikoak –kosmosaren ezaugarriak ulertzean– XVI. mendean bizirik ziraute. Horregatik, Errenazimentuan luterano eta katolikoek astroen ezagupen kuantitatorako hipotesi heliozentrikoaren erabilera instrumentalista izan zezaketen, termino ptolemaikoak (geozentrikoak) nahiz kopernikarrak (heliozentrikoak) erabilgarriak zirelako ikuspuntu fisiko tradizionalak kolokan jarri gabe. Tycho Braheren ereduaren erakarritasuna, hain zuzen ere, horretan funtsatu zen, aldi berean behaketa astronomikoen zuzentasuna eta Lur geldiaren lasaitasuna eskaintzen zituelako.

*De Revolutionibus* argitaratu eta bi hamarkada geroago bigarren belaunaldiko errealista kopernikarrik famatuena jaio ziren, Galileo eta Kepler, eta gauzak aldatzen hasi ziren katoliko eta protestanteen giroa aristoteliko-ptolemaikoa zen bitartean, kontuan hartuz bi pentsalarion ikerketa-lerroak oso desberdinak izan zirela. Keplerrek zerutar higidurak ulertzeko modu berria aurkeztu zuen, zerutar higiduren eta kosmosaren egituraren “legeak eta harmoniak” aurkitzen saiatu baitzen, zerutar fisika bat eraikiz.

Galileoren ekarpenak, ordea, bi mailatakoak izan ziren: alde batetik, teleskopioarekin egindako behaketa astronomikoen heliozentrismoaren aldeko jarrera hartzea bultzatu zuten, eta, bestetik, lurta gertakari fisikoak azaltzeko, geostatismoa aterabide bakarra izan ez, eta Lur higikorren fisika sortu zuen higidura inertzialaren kontzeptuan oinarrituta. Mende bat geroago, Newtonek bi munduetako fisikak, zerutarra eta lurterra, bateratzea lortu zuen.

Kopernikartasunaren ikuspuntu errealista defendatu zutenen jarrera, beraz, oso berritzailea izan zen, Lurra mugitzen baldin bazen eta Marte eta Jupiterren artean leku bat betetzen baldin bazuen, tesi fisiko eta kosmologiko aristoteliko-eskolastikoen zentzurik ez baitzuten.

Galileo Galilei Ammannati (1564-1642) Pisan jaio zen (Toscana, Florentziako errepublika), hain zuzen Shakespeare jaio zen urte berean, eta Michelangelo hil baino hiru egun lehenago (otsailaren 15ean eta 18an). Hamazazpi urterekin, Pisako Unibertsitatean medikuntza, matematika eta fisika ikasten hasi zen. Hemeretzi urterekin unibertsitate hartako ikasle zela, katedraleko lanpara bati begira gelditu zen, eta haren mugimendua-

ren erregulartasuna bere eskumuturreko pultsuarekin neurtu zuen. Etxera bueltatu eta luzera desberdineko hariz eta berunezko bolatxo osaturiko penduluekin esperimentuak egiten hasi omen zen. Bolatxoaren pisua edozein izanda ere, joan-etorri bakoitzean bolatxoek denbora bera behar zutelako behatu zuen, denbora hariaren luzerak bakarrik aldatzen baitzuen. Penduluaren historia horrela abiatu omen zen.

Txikitatik ikasteko gaitasun handia erakutsi bazuen ere, Galileok ikasle bihurria zelako ospea zuen. Besteak beste, Pisako Unibertsitatean uniforme akademikoa janzteari uko egin omen zion, lana egoki egiteko traba egiten ziola eta putetxeetan dotoregia zela argudiatuz. Ukapen hori larrutik ordaindu zuen, eta unibertsitate aldea egin behar izan zuen. Hala ere, Florentziako irakaskuntza pribatuan matematika ikasten segitu zuen, eta 1589an Pisako unibertsitateko matematikako irakasle-postua lortu zuen, 26 urte zituela.

Baina orduko mundu akademikorako heterodoxoegia zen, eta hiru urteko kontratua bukatuta Paduara (Veneziako errepublikan) joan zen. Han beste giro bat aurkitu zuen, irekia, askeagoa: fede-kontuak zirela eta, behin Aita Santuaren ordezkariak hango agintariari liburu batzuk erretzea gogor eskatu omen zieten, eta veneziarren erantzuna baiezkoa izan zen, nahi adina liburu erretzeko esan zieten, baina alde aurretik erosirikoak, noski. Gainera, bertako nabigaziorako zaletasunak asko lagundu zion bere mekanika eta astronomiari buruzko lanak egiten. Hala ere, 1610ean bere jaioterrira bueltatu zen Toscanako Duke Nagusiak (Kosimo II.a) gortetako matematikari eta filosofo izendatu zenean. Veneziatik atera ez balitz, Galileo ez zen sekula Inkisizio Santuaren atzaparretan eroriko.

Galileoren ekarpenak Aristotelesen hitza dogmatzat hartzen zuen pentsamendu ofizialarekiko kritikan oinarritu ziren, eta bere joera arkimedianoak lagunduta esperimentazioaren garrantzia frogatu zuen: beraren ustez, ezagupena fenomenoetatik hasita eraiki behar zen. Eta fisikaren matematizazioarekin batera, zientziaren sorrera ekarri zuen, behaketetan eta dedukzio matematikoetan oinarrituta naturaren ereduak proposatzekoa.

## 2.1. Galileoren ekarpenak fisikan

Garai haietako ingeniari mekanikoek jaurtigaietan eta makinetan aurkitzen zituzten arazoak ohartuta, eta Arkimedesen mekanizismoan oinarrituta, bere veneziar garaian eta 1633tik aurrera (biziarteko zigorra betetzen ari zela) Galileok zenbait arlo landu zuen ikuspuntu mekanikoa eta atomistikoa (hortaz, antiaristotelikoa) erabiliz: gasen eta likidoen estatika (ur-ponpa eta balantza hidrostatikoa eraiki zituen), penduluaren legeak, elastizitatea, fenomeno magnetiko eta termikoak, akustika, optika, eta abar. Airearen pisuduna zela aurkitu zuen, Aristotelesek uste zuen bezala, baina beste greziar pentsalari askok (Ptolomeo, Sinplizio) pentsatzen zutenaren kontra. Uretan sorturiko uhin geldikorrek ere aurkitu zituen, erresonantzia ikertu zuen eta soinuaren tonua maiztasunaren menpekota zela adierazi zuen (Aristotelesek abiaduraren menpekota zela uste zuen). Soinuaren eta argiaren abiadurak neurtzen saiatu zuen, baina emaitza onik ez zuen lortu (greziarrek, ordea, pentsatzen zuten argiaren abiadura infinitua zela, eta istantean hedatzen zela).

Gorputzak hausteko erresistentzia ikertu zuenean, hutsik zeuden zilindroek erresistentzia handiagoa zutela behatu zuen, animalien hezurak eta landare askoren enborrak barrutik hutsik egotearen arrazoia zena. Ikerketa guztietan, eta modu batera edo bestera, Galileok jokatzeko gortuz guztien osaketa uniformeak balitz bezala, Aristotelesen bost elementuzko fisika baztertua, eta hipotesi atomistaren ildo berean. Baina garai haietan, Eukaristia azaltzeko, teologoek Aristotelesen teoria hileomorfitikoa (materia eta forma) erabiltzen zuten, eta atomismoak talka egiten zuen horrekin, arrisku handiz. *Il Saggiatore* liburuan (1623), fenomeno naturalen izaera matematikoa azpimarratzeaz gain, Galileok atomismoa garbiki defendatu zuen.

Hil baino lau urte lehenago, 1638an, Galileoren *Discorsi e Dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* liburu handia Italiatik klandestinoki atera eta Holandan argitaratu zenean, fisika jaio zen. Bertan esperimendu errealek egitearen garrantzia azpimarratu zuen, distantziak eta denbora-tarteak neurtu behar zirela nabarmendu zuen, *ex professo* eraikirikoa gailuen bidez emaitza teoriko batzuk egiaztatu zituen, aurretik lorturiko emaitza esperimentalak hipotesi berriak sortzeko erabili zituen eta, batez ere, inertiaren printzipio bat adierazi zuen, higiduraren mantentzaile gisa ulertua, eta hura frogatzeko baldintzak deskribatu zituen (hutsa eta marruskadurarik eza, Aristotelesen arabera fenomenoak aztertzeke baldintza ez-erreal onartezinak alegia). Bere esperimendu hipotetikoetan (Einsteinen “gedanken experiment”en aitzindariak) arrazonamendu logiko-deduktiboak eta matematika bikain erabili zituen ondorio fisiko unibertsalera ailegatzeko. Galileoren fisikaren oinarria esperientzia bakarrik ez, batez ere analisi matematikoaren zuzentasuna izan zen, hain arazo konplikatuak den gorputzen higiduretan aplikatuta. Galileok zinematikaren zientzia sortu zuen, eta gaur egungo fisikaren metodologia esperimentalak ere eraikitzen hasi zen.

Higidura naturalen ondorioen aurka, Galileok argi utzi zuen gorputz astunek eta arinek denbora bera behar zutela altuera beretik zorruraino erortzeko, eta beharbada 1590aren inguruan eta jendearen aurrean Pisako dorretik tamaina bereko bi bola zorura bota zituen, bata burdinazkoa eta bestea egurrezkoa, eta zorura biak batera ailegatzeko zirela behatu omen zuen (ez dago garbi esperimendua nork egin zuen, Galileok, bere irakaslea Girolamo Borrok, ala Simon Stevin ikerlari flandriarrak). Erorketa askean gorputzaren konposaketak eta pisuak abiadurarekin inongo zerikusirik ez zutela baieztatu zuen, ibilirikoa distantzia denborarekin erlazionaturik zegoela frogatu zuen, eta erorketan gorputz guztien azelerazioa konstantea eta bera zela aurkitu zuen (haren balioa, grabitatearena, zehatz samar kalkulatu zuen):

$t$ (s)	$e$ (m)	$a$ (m/s <sup>2</sup> )	$e = \frac{1}{2} a t^2$
0	0,0	9,8	
1	4,9	9,8	
2	19,6	9,8	
3	44,1	9,8	

Galileo azelerazioaren kontzeptu modernoaren sortzailea izan zen (azelerazioa abiaduraren aldaketa gisa kontsideraturikoa), eta abiaduran aldiune jakin batean duen

eragina ongi finkatu zuen (proportzionaltasuna, abiaduraren hazkundea denborarekiko proportzionala baita,  $v-v_0 = a \cdot t$ , “gorputz astunen erorketaren legea”). Hala, higidura uniformeak ( $a = 0$ ,  $v = kte.$ ) eta higidura uniformeki azeleratuak ( $v = a \cdot t$ ) zehaztuta gelditu ziren:

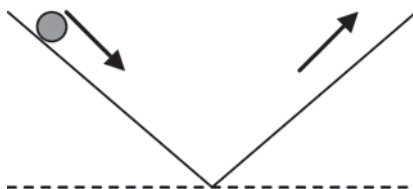
$t$ (s)	$v$ (m/s)	$a$ (m/s <sup>2</sup> )	
0	0,0 ( $v_0$ )	9,8	
1	9,8	9,8	$v = a \cdot t$
2	19,6	9,8	
3	29,4	9,8	

Indarra, ordea, ez zuen definitu, baina azelerazioaren kausa gisa erabili zuen. Galileo-ekin, eta historian lehendabiziko aldiz, indarra antropomorfismorik gabeko ideia abstraktu gisa agertu zen, inolako sentsazio muskularrik gabekoa, abstrakzio matematiko hutsa.

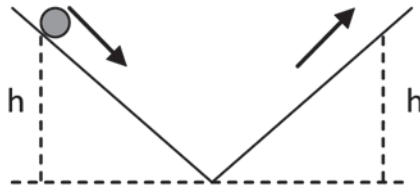
Erorketa bertikalaren ordeztu plano inklinatuak erabiltzean azelerazio txikiagoek eragiten zutela behatu zuen, planoaren inklinazioaren arabera:



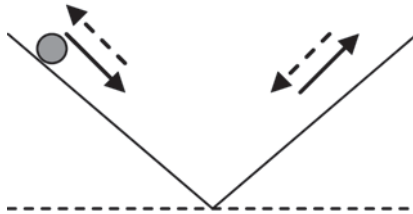
Gorputzek beheranzko planoan zehar azeleratzen zutela, eta goranzkoan gero eta mantsoago mugitzen zirela behatu zuen:



Bola altuera batetik askatuta, eta gainazala leun-leuna izanik (marruskadurarik gabekoa), bigarren planoan lorturiko altuera maximoa hasierakoa edo ia hasierakoa zela neurtu zuen:

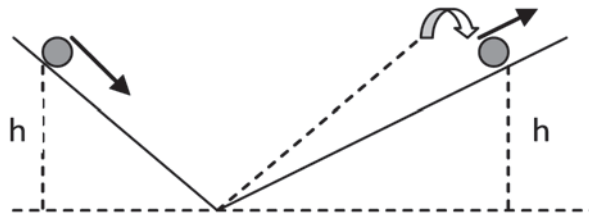


Hortaz, marruskadurarik gabeko plano inklinatuetan bola beti mugitzen ibiliko litzateke, eta egoera hori betiko mantenduko litzateke:



Gainazalaren laztasunaren eragina garbi gelditu zen, eta horrekin marruskaduraren kontzeptua sortu zen.

Bigarren planoja jaitsiz gero, hasierako altuera lortu arte bolak espazio luzeagoa ibiliko zuela deduzitu zuen:



Eta bigarren planoja horizontaleraino jaitsita, eta gainazala erabat leuna balitz, bolak infinituraino mugitzen segituko luke, bestelako motorrik gabe eta gelditzeko joerarik erakutsi gabe. Bultzada bat edo oztopo bat (azeleratzeko edo geldiarazteko arrazoi bat) agertzen ez zen bitartean bolak abiadura bera mantentzeko joera zeukala argi gelditu zen. Eta gorputzen joera naturala gelditasun aristotelikoa izan beharrean, Galileok adierazi zuen higidurak berez mantentzen zirela, motorrik gabe, aldaketarako kausarik agertzen ez zen bitartean (Galileoren inertiaren printzipioa), “inertzia” mugimendu uniformearen eta gelditasunaren kausa bakarra baitzen. Baliokidetasun mekaniko horretan funtsatuta, sistema inertzialak horiek denak izanen ziren, uniformeki mugitzen ziren edota geldirik zeuden horiek. Galileok higidura inertzialaren kontzeptua heliozentrismoaren defentsarako erabili zuen, eta hurrengo garaietan inertzia fisika osoaren oinarritzko kontzeptu bihurtu zen.

Jaurtigaien ibilbide parabolikoa zehazteko, Galileok higidura konposatuak erabili zituen. Pentsamendu aristotelikoan gorputzaren izaeraren arabera higidura bat edo beste agertzen zen, eta bi higidura mota aldi berean izatea ezinezkoa zen, baina planteamendu berriok emaitza paregabeak izan zituzten. Galileok deskribatu bezala, tiro horizontal bat egitean, kanoiaren ahoa utzi ondoren balak zuzen segitzen zuen, eta grabitateak jaurtigaia beherantz tiratzen zuen, grabitateak jaurtigaiaren aurreratze horizontala baldintzatu gabe. Bi eragin horien konposaketaren ikerketak jaurtigaiaren egiazko ibilbide parabolikoa eman zuen. Konposaketa horretan osagai horizontala uniforme zen (aurreratze-abiadura konstantea), osagai bertikala uniformeki azeleratua (azelerazio konstantea) eta bi osagaiak elkarrekiko independenteak ziren, batak bestean eraginik ez baitzuen (gaur egun higiduren gainezarmenaren printzipioa deiturikoa).

Ekarpen fisikorik handienak, erorketa askeko azelerazioa, marruskaduraren eragina eta mugimendu inertziala, Galileoren eredu mekanikoaren funtsa izan ziren, eta naturaren dinamika ulertzeko oinarrizko tresna bilakatuko ziren.

Ordurako Aristotelesen eta Galileoren ereduak erabat kontrajarrira zeuden, biak bateratzeko modurik ez zegoen, eta desberdintasunak nabariak ziren:

<b>Aristoteles</b>	<b>Galileo</b>
1) Gorputz astunak hutsean eroriko balira, higidura uniformeaz mugituko lirатеke	1) Gorputz astunak hutsean eroriko balira, higidura azeleratuaz mugituko lirатеke
2) Higikarien atzetik ixten den aireak higikariari abiadura ematen dio	2) Aireak erresistentzia kontrajartzen dio gorputzen erorketari, eta aireak higiduren abiadura gutxitzen du
3) Erorketan abiadura gorputzaren pisuarekiko proportzionala da	3) Erorketan abiadura gorputzaren pisuarekiko independentea da
4) Erorketan abiadura ibilitako espazioarekiko proportzionala da	4) Erorketan abiadura denborarekiko proportzionala da
5) Bultzada baten ekintza jarraitua ezinbestekoa da gorputz baten higidura mantentzeko	5) Gorputzak berez mugitzen mantentzen dira, eta bultzadak abiadura aldatzen du

## 2.2. Galileoren ekarpenak astronomian

Holandan 1608an Hans Lippershey betaurrekogileak 3-4 handipeneko eta bi lente ahurreko teleskopioa eraiki zuen, eta urte bat geroago jostailu moduan Parisen saltzen ziren. Galileok asmakizun horren garrantzi komertziala eta militarra sumatu zuen, hobetu egin zuen (irudi zuzenak eratzea lortu zuen, eta lente ahur bat eta beste ganbil bat konbinatuz 30 handipenekoak eraiki zituen), eta Veneziako printzeari (“Dux”) eskaini zion. Horren ondorioz, Galileok Paduako unibertsitateko irakasle-postua eskuratu zuen,



eta Veneziako Errepublikak matematikari bati sekula eman zion soldatarik handiena erdietsi zuen.

1609an teleskopioa zerura zuzendu zuen lehen aldiz, eta hilabete batzuetan ikusi zuena izan zen aurreko milaka urteetan babiloniarrek, egiptoarrek, greziarrek eta Erdi Aroko jakintsuek ikusi zutena baino askoz ere gehiago eta aberatsagoa.

1610ean *Sidereus Nuncius* (zerutar mezularia) liburuan bere behaketak argitaratu zituen eta zeruko gorputzak perfektuak, esferikoak eta leunak ez zirela agerian gelditu zenean, polemika ederra sortu zen. Ilargiko gainazalean argitasun desberdineko guneak deskribatu zituen, mendiak, lautadak eta sakanak bazeudelako seinale garbia, Lurrean bezala (lurtar munduaren eta zerutar munduaren bereizketaren kontrako azarna). Eguzkiko orbanak (“*Afrika eta Asia bezain handiak*”) behatuta, astro horren errotazio-abiadura kalkulatu zuen. Izar finkoak ez ziren askoz ere handiagoak ikusten, oso urruti zeudelako, eta Orion konstelazioaren ezpatan eta gerrikoan (ehiztari baten itxuraz irudikatzen zen) begi hutsez ikusezinak diren izarrak agertu zitzaizkion (Jainkoak zertarako jarri ote zituen zorutik nabaritzen ez ziren gauzak, gizakia Kreaioaren emaitzarik garrantzitsuena izanik?). Esne Bidea eta nebulosak ez ziren lurrun uniformeak, milaka izarrez osaturikoak baitziren, aristotelikoek pentsatzen zutenaren kontra eta begi hutsez ikusten den ez bezala.

Jupiterren inguruan 4 planeta jiraka zebiltzala egiaztatu zuen. Keplerrek lau planeta horiei “satelite” izena eman zien, eta ordutik aurrera “satelite galilear” deritze (Galileok “mediciar planetak” deitu zien, Medici familiaren ohorez, eta orain Io, Europa, Ganimeses eta Kalixto izenak dauzkate). Etsai peripatetikoen erantzuna berehala plazaratu zen: zazpi zerutar gorputz besterik ez zegoen, eta beste bakar bat aurkitzea metafisikoki ezinezkoa zen. Buruan zazpi leiho (sudurrean bi zulo, bi begi, bi belarri eta aho bat), Naturan zazpi metal (antzinatik ezagutzen ziren beruna, burdina, eztainua, kobrea, merkurioa, urrea eta zilarra), eta astean zazpi egun zeuden bezala (judutarrek, antzinako beste herriek eta europarrek ongi zekitena), zeruetan ere zazpi planeta zeuden.

Saturnoren itxura arraroa (eraztunak) eta Artizarraren faseak ere aztertu zituen. Fasoek heliozentrismoaren aldeko argudio sendoa ziren, eta, aldi berean, Artizarra gorputz opakoa zela erakusten zuten (ikus irudia hurrengo orrian).

Behaketok Galileoren jarrera kopernikarra indartu zuten. Beraren etsaiak, ordea, jesuitak eta, sistema tychonikoaren barruan azaltzen zirela sinetsita zeuden. Hala ere, erabilera instrumental hutsetik harantzago, sistema heliozentrikoak ondorio kosmologiko eta fisiko sakonak ekarriko zituelako arriskua oso nabarmena zen, eta Galileo, gainera, idatziz eta hitzez argudio teologikoen labirintoan sartu zen bere pentsamendua defendatzeko, garai haietan kopernikarra eta katolikoa aldi berean izatea ezinezkoa zela ohartu gabe.

Erromako zentsura pasatu ondoren (“sub correctione Sanctae Matris Ecclesiae”) 1632an *Dialogo di Galileo Galilei Linceo, Matematico Soprordinario dello Studio di Pisa, e Filosofo e Matematico primario del serenissimo Gr. Duca di Toscana. Dove ne i congressi di quattro giornate si discorre sopra i due Massimi Sistemi del Mondo, Tolemaico e Copernicano. Propo-*

# S I D E R E V S

## N V N C I V S

MAGNA, LONGEQVE ADMIRABILIA

Speſtacula pandens, ſuſpiciendaque proponens  
vnicuique, præſertim verò

*PHILOSOPHIS, atq; ASTRONOMIS, que à*

## G A L I L E O G A L I L E O

### P A T R I T I O F L O R E N T I N O

Patauini Gymnaſij Publico Mathematico

## P E R S P I C I L L I

Nuper à ſerepenti beneficio ſunt obſeruata in LVNÆ FACIE, FIXIS IN-  
NUMERIS, LACTEO CIRCVLO, STELLIS NEBVLOSIS,

*Apprime verò in*

## Q V A T V O R P L A N E T I S

Circa IOVIS Stellam diſparibus interuallis, atque periodis, celeri-  
tate mirabili circumuolutis; quos, nemini in hanc vſque  
diem cognitos, nouiſſimè Author depræ-  
hendit primus; atque

# M E D I C E A S I D E R A

N V N C V P A N D O S D E C R E V I T .



VENETIIS, Apud Thomam Baglionum. M D C X.

*Superiorum Permiſſa, & Præſtigiò.*

*nendo indeterminatamente le ragioni Filosofiche, e Naturali tanto per l'una, quanto per l'altra parte* liburua argitaratu zenean ideia kopernikarrak bonba bat bezala lehertu ziren pentsalarien buruetan. Braheren ekarpenaren aipamenik egin gabe, sistema heliozentrikoaren eta geozentrikoaren arteko erkaketan bien abantaila erlatiboak argitzen ziren, eta bi hipotesiak onargarriak zirela esaten zen, edozein hipotesi onartuta ere fenomeno berak modu desberdinetan azaldu zitezkeelako. Alde guztietara ere, Galileo behin eta berriz erabilera instrumentalistaren aurka agertu zen, eta sistema kopernikarraren erreialismoa defendatu zuen. Horrez gainera, Averroesen egia bikoitzaren doktrina inola ere onartu gabe, egia bakarra zela defendatu zuen, irizpide zientifikoaren lehentasuna iradokiz.

Baina datu astronomiko berriak izanda ere, Galileok garbi zeukan sistema heliozentrikoaren interpretazio zuzenak Lur higikorren kontzeptua azaldu beharko zuela. Kontrako argudioak eta “ebidentziak” antzinatek ezagutzen ziren: alde batetik, zerutar higidurak berdin-berdin behatuko ziren Lurraren higidura-egoera edozein izanda ere (erlatibitatearen printzipio optikoa), baina, beste aldetik, lurtafenomenoetan Lurraren mugimenduen eraginak nahitaez nabariak izanen ziren, eta ez ziren nabari. Horren aurrean, Galileok gorputz astunen erorketa eta jaurtigaien ibilbideak azaltzea lortu zuen Lurraren mugimenduen kontuan hartuta (errotazioarena eta translazioarena, biak oso azkarrak, lehena 460 m/s ekuatorean, bigarrena 30.000 m/s Eguzkiaren inguruan). Higidura inertzialaren kontzeptua Lur higikorren mekanikaren oinarria izan zen, eta etorkizuneko fisikarako Lurraren higidura nabariezina izatearen posibilitateak bide berriak agertu zituen.

Errotazioaren ondorioz gorputz astun guztietan agertzen den “kanporanzko joera”k (indar zentrifugoa) Lurrari aplikatuta eragin katastrofikoak ekarriko zituela argudiatzen zen, eta gure planeta horrela mugituko balitz hamaika puskatan txikitzeak bukaera logikoa zirudien. Galileoren ustez, Lurraren kohesioa mantentzen zuen azalpena grabitatea (edo Lurraren zentrorantz gerturatzeko gorputz astunek duten joera) zen. Eta kontrajarritako bi joera horien erkaketan (zentrifugoa eta grabitatea) bigarrena garaile ateratzen zela proposatuz, Galileok Lurraren errotazioak katastroferik eragingo ez zuela baieztatu zuen.

Translazioak, ordea, bestelako arazoak ekartzen zituen. Espazioan zehar hain abiadurara handiz mugituko bagina, hegaztiak oso agudo hegan egin beharko lukete gure planetatik kanpo ez geratzeko, gorputz bat airean aske erortzean nahitaez atzean gelditzen dela nabaritutako beharko litzateke, edo jaurtigaien tiramena desberdina izanen litzateke ekialderantz edo mendebalderantz botata, baina horrelakorik ez zen sekula gertatzen. Galileok argudio horiei aurre egin zien higiduraren eta gelditasunaren kontzeptu aristotelikoak berrulertuz. Aristotelesen arabera, higidura eta gelditasuna gorputzen izaerari loturiko nozioak ziren, higidura motorren ekintza zen, eta gelditasuna aurkakoa. Galileoren ustetan, ordea, higidura kokapen-aldaketa zen, eta gelditasuna kokapen-aldaketarik eza: gorputz bat mugitzen zen beste batekiko kokapenez aldatzen baldin bazen, eta bestela ez, higidura eta gelditasuna egoera erlatiboak baitziren. Lurraren higidura Eguzkiaren inguruan inertziala izanen zen, motorrik gabekoa, eta Lur gainean dauden gorputz guztiak ere Lurrearekin batera mugitzen ziren. Aske erortzen ziren gorputzek, bere higiduran osagai bertikalez gain (higidura azeleratua) beste osagai bat bazuten, gure planeta-

ren translazio higidurarena hain zuzen (higidura inertzial uniforme), eta bi osagaiok independenteak ziren, jaurtigaien ibilbide parabolikoan gertatu bezala. Higidura kokapen-aldaketa erlatiboa izanik, eta translazioan dena abiadura berberarekin mugitzen baldin bazen, behatzaileok gorputz astunen erorketak ikusiko genituzke Lurra geldirik balego bezala, bakarrik osagai bertikala nabaritzen baitzen, eta guztien osagaia zen translazio-higidura nabariezina izanen zen. Hortaz, geldiunea edo abiadura berbera izatea mekanikoki baliokideak ziren, beha zitezkeen fenomenoen arabera Lurra abiadura uniforme mugitzen ote zen ala geldirik zegoen ezin zen erabaki, eta bi egoera horietan lege mekanikoak berberak izanen ziren (erlatibitatearen printzipio mekanikoa, edo, sistema inertzial guztietarako zabalduz gero, erlatibitate klasikoaren printzipioa).

Urte batzuk geroago Descartesek eta Newtonek higidura inertziala zuzena zela adierazi zuten, ez zirkularra; hala ere, Galileoren higidura zirkular inertzial hura errotazioa azaltzen duen lege modernoaren momentu angeluarraren kontserbazioaren legearen jatorria da.

### 2.3. Galileoren garaiak

Errenazimentuko Europan erreinu txikiak, dukerriak eta jaurerriak erregearen menpe bateratu zirenean, monarkia autoritarioak sortu ziren eta Erdi Aroko administrazioa eta erakundeak eraldatu eta diziplinatu egin ziren. Espainiako kasua paradigmatikoa izan zen, eta Errege-erregina Katolikoek Europako lehen estatu modernoak sortu zuten Granada eta, azkenik, Nafarroa gehiena konkistatu ondoren. Estatu-arrazoia eta erregeen interesak identifikatzen zituen absolutismoa Makiavelok deskribatu zuen, Fernando Katalikoaren ereduaz baliatuta.

XVI. mendean Espainia munduko potentziarik sendoena izatera ailegatu zen bere indar militarri esker. Karlos I.a Espainiakoa eta V.a Alemaniakoa enperadoreak eginkizun ikaragarriak zituen: Mundu Berriaren konkista eta Europako batasun politikoa eta erlijiosoa (inperio bakar bat, erlijio bakar bat, Universitas Christiana, Vulgatako *“unus dominus, una fides, unum baptisma, unus Deus et pater omnium”* agintearen betetzailerak). Aurreko mendeetan ekialdeko gurutzadek porrot eginda, espainolak eta portugaldarrak hasieran, eta holandesak, frantsesak eta ingelesak ondoren, mendebaldera begira jarri ziren. Espainolak Ameriketako urrea eta aberastasunak ostu ondoren, Europara ekarri eta, jaioterriko garapena bultzatu beharrean, gerrak finantzatzen eta beste nazioei ondatsunak eta zerbitzuak erosten hasi ziren, eta Frantziaren, Ingalaterraren, Alemaniaren eta Holandaren garapenak erraztu zituzten. Garai haietan armadak asko handitu ziren, eta produktu komertzial, metalurgiko, militar eta zerbitzu profesionalen eskariak izugarri igo ziren: meatzaritza, labe garaiak, garabiak, ponpak, haize-errotak, ur-errotak eta abar bizi arruntean sartu ziren. Europan asmakizunen balioa asmatu zen.

Baina Europa osoan Inperioaren eta Aita Santuaren nagusitasunak talka egin zuen hirietako burgesia jaio berriaren interesekin eta giza balioekin. “Jainkoa/Kreazioa” zerurako eta “Aita Santua/Enperadorea” mundurako eskema baliorik gabe gelditzen ari zen, mundu beldurgarri, ezezagun eta mugagabearen aurrean arrisku eta iniziatiba pertsona-

leko jokaera burgesaren autonomia moralak bestelako etika bat behar baitzuen. Horrez gainera, botere inperialak eta erlijiosoak ospe onik ere ez zuten, ustelkeriez josirik baitzeuden (Aita Santuaren kontrako satira asko zabaldu ziren, adibidez “*accipe, cape, rape, sunt tria verba Papae*”: jaso, hartu, harrapatu, Aita Santuaren hiru hitzak). Burgesiarren adierazpen teologikoak Europa urratu zuen erlijio-gerrekin, kasu askotan enperadorea-rengandik askatasun handiagoa erdietsi nahi zuen nobleziak lagunduta. Eta mendebaldeko erreserba espiritualak, Espainia, Erreforma protestantearen eta nazionalismoen kontra borrokan hasi zen, nola ez.

Karlos V.a 1557an Yustera bildu zenean, Errenazimentua bukatu eta barrokoa, Galileo eta zientzia modernoa jaio ziren. Italiako “Cinquecento”ko jenio handiekin batera (Leonardo, Rafael, Michelangelo) Errenazimentuan bilatzen zen perfektzioaren ametsa ere hil zen, Europako arazo larrien aurrean (ekonomikoak, politikoak eta erlijiosoak) optimismo neoplatonikoa krisian sartu zen, eta idealismo humanista aldapan behera amildu zen garaiak ulertzeko gauza ez zelako. Barrokoaren sorrerarekin, Eliza kontrarreformistak unibertsitateak eta artea bere zerbitzura jarri zituen (teologia-katedrak hamar-koiztu ziren, eta Vatikanoko Done Petriren Basilika bezalako obra galantak egin ziren). Trentoko Kontzilioak diziplina unibertsitarioei eta artistikoei erantzukizun pedagogikoa eta etikoa ezarri zizkien, Elizaren ustetan zientziak eta arteak Jainkoaren esentzia eta dotrina katoliko ortodoxoa transmititzeko bideak baitziren (“*ad maiorem Dei gloriam*”: Jainkoaren goresmenerako) herriaren sentsibilitatea hunkituz. Galileoren bizitza osoan Europako faktore politiko, erlijioso eta sozial horiek eragin konstantea izan zuten.

1618-1648 bitartean Europako gerra handia (30 urtekoa) galdu ondoren, Austriarren politika hautsita gelditu zen, eta inperio espainol-alemanak kontinentearen errekonkista katolikoa abandonatu behar izan zuen (bitxia da Austriarren dibisa gogoratzea, “*Austriae Est Imperare Orbi Universo*” edo “*Alles Erdreich Ist Oesterreich Unterthan*” edo “*A.E.I.O.U.*”: Austriarrek mundu osoa menderatu). Galileo hil eta urte bat geroago tertzio espainolak Rocroin garaiturik atera ziren, Wetsfaliako Bakean (1648) Austriarren umiliazioa sinatu zen, eta Alemanian bi konfesio kristauen bereizketa finkatu zen. Une horretatik aurrera politika eta erlijioa bereizi ziren, eta Estatua eta Eliza ere bai: laizismoaren hazia izan zen. Nazioarteko panoramatik Espainia kanporatuta, Frantziak eta Ingalaterrak munduaren nagusitasuna eskuratzeko borrokan segitu zuten.

Europako ordena berria, ezegonkorra eta iheskorra, komertzialki eta militarki bi teknologiaren menpe zegoen: nabigazio ozeanikoa eta kanoia. Bi teknologiek zientziaren prestigio soziala ekarri zuten, eta zientzia beharrezko jarduera bihurtu zen: esperientzia pixka batekin, edozeinek balio zuen Mediterraneoan nabigatzeko, baina Atlantikoan latitudea eta luzera kartografiaren bidez kalkulatzeko ezagupen astronomiko eta matematikoa behar ziren. Gainera, kode kimikoa erabiliz lehergaien ikerketa azkartu zen.

XVI. mendean, halaber, inprentaren eta hezkuntzaren garapenari esker informazioa eta komunikazioa asko indartu ziren. Protestanteek alfabetizazio-kanpainak bultzatu zituzten Biblia irakurtzen irakasteko latinetik Europako hizkuntzetara itzuli ondoren, euskarara ere bai (“*docendi sunt christiani*” Lutherren hitzak: kristauei irakatsi behar zaie). Jesuitek esko-

lak fundatu zituzten, Moro eta Vives bezalako pentsalariak hezkuntza-eskemek garatzen hasi ziren, betaurrekoen erabilera zabaltzen hasi zen, artisauek irakurtzen hasi ziren, eta unibertsitateko erudituek jakinduriaren aplikazio praktikoez ohartu ziren.

San Paulok iragarri zuen bezala (“*scientia inflat, caritas vero aedificat*”): jakinduriak harro bihurtzen du, karitateak zintzo), jendeak pentsatzeari eman zionean arazo gehiago sortu ziren, eta Elizarendako XVI. mendea istiluz eta zismaz josirikoa izan zen: Lutherren Erreforma, Eliza protestanteen sorrera eta Eliza katolikoaren Kontrarreforma gertatu ziren. Kristau askoren kezak eta desorientazioa zuzentzeko, 1545ean Trentoko Kontzilioa hasi zen, “heresiak ezerezte, bakea eta Elizaren batasuna lortzea, kleroa eta kristau-herria eraldatzea” helburu zuena, eta pentsamendu aristoteliko tomista Elizaren filosofia ofizial bihurtu zuena.

Hainbeste erlijio-gerra izan zituen mende hartan, XIII. mendeko heresien kontra borrokatzeko jaio zen jarrera inkisitoriala zaharberritu zen. Baina Inkisizioa disidentzia heretikoen kontra borrokatzetik, bizitza intelektuala kontrolatzera pasatu zen (“*extra Ecclesiam nulla salus*”: hara gaztigaturik!). Pentsalariak izan ziren horren ondorioak sufritu zituzten lehenak, noski, eta 1600ean Giordano Bruno bizirik erre zuten beste bekatuen artean Kopernikoren ideiak defendatzeagatik (inkisidoreek jendea urkatu edo erre egiten zuten “*sine effusione sanguinis*”, odola bota gabe, odolarena gehiegizkoa iruditzen baitzitzaien).

1542tik aurrera, Paulo III.a eta Paulo IV.a aita santuen eskutik, Ofizio Santuaren ekintzak asko indartu ziren Italian. Erromatar Inkisizio berria sortu zen, eta liburu debekatuen zerrenda beltza (1559ko *Index Auctorum et Librorum Prohibitorum*) egin zen, liburuaren eta autoreen aldi bereko debekua ezarri zuena. Zerrenda horietan sartzen ziren liburuak federako eta ohitura zintzoetarako arriskutsuak ziren, azalpen moral, filosofiko edo zientifikoetan Elizaren irakaspenekin bat ez zetozelako. 1571n *Index Expurgatorius* argitaratu zen, kristauak irakurri ahal izateko liburu batzuetan zuzendu behar ziren zatien zerrendak zehaztuz. Liburu Santuetako baieztapenen kontrako teoria astronomiaren salaketa eta pertsekuzioa hasi zen, 1616an Kopernikoren *De Revolutionibus orbium coelestium* debekatu zen eta 1619an Keplerren *Epitome astronomie Copernicanae*. Kopernikoren, Keplerren eta Galileoren liburu batzuk 1835era arte debekaturik mantendu ziren, eta “Index”ak 1966ra arte ez ziren baliogabetu.

Eredu aristotelikoa perfektutasunean (esferak) eta aldaezintasunean oinarritzen zen, orduko gizarte-antolakuntza eta agintea ere perfektuak eta aldaezinak zirelakoan (“*a Deo rex, a rege lex*”: erregea Jainkoarengandik, legea erregearengandik). Eta astronomia/kosmologia kontuetan Elizaren jarrerak ez zuen zalantzarik onartzen: instrumentalismo kopernikarra eta literaltasun biblikoa. Edozein aldaketak, Galileorenak bezala, botereen susmoa esnatzen zuen, eta heliozentrismoak talka egiten zuen Erdi Aroko filosofia eta erlijioarekin. Teologoek Galileo Elizaren kontra zegoela esan zutenean, Erdi Aroko boteretsuak (Eliza kristauak, katolikoak eta protestanteak, monarkiak eta noblezia) Galileoren kontra jarri ziren. Galileo logikaren, pentsamendu askearen eta inteligentziaren ikurra zenez, botereek horren guztiaren kontra gogor egin zuten, eta askatasuna kondenatu egin zuten.

Galileok agintarekin izaniko istiluak ezagunak dira. Boterearen morroi batzuen argudioak kontuan hartzekoak izan zitezkeen; adibidez, teleskopioko lenteek ilusio optikoak besterik ez zutela sortzen, teleskopiotik ikusten zena ez zela erreala -eta, izan ere, Galileoren teleskopiok aberrazio handiak ematen zituzten (aberrazio esferikoak, kromatikoak eta astigmatismoa), detaile finak bakarrik praktika askorekin beha zitezkeen-, baina, esate baterako, Ilargia bikain ikusten zen. Hala ere, argudio gehienak zentzugabeak ziren: teleskopioarekin ikusirikoak gezurrezkoak zirela Aristotelesek ezagutzen ez zituelako, edo teoria astronomikoak heretikoak zirela Bibliako deskribapen eta kontaktizunen kontra zihoazelako.

Galileok Paulo V.a aita santuarekin erlazio onak izan zituen (zientzialariak haren aurrean ez belaunikatzeko baimena zeukan), eta Erromako Eskolan irakasten zuten jesuitek teleskopiotik ere begiratu zuten. Dena dela, zientzialariak 1613an esan zuen Bibliako hitzak interpretazioak besterik ez zirela, Biblia kontu sakratuetan hitzez hitz ulertu behar zela baina inola ere ez gauza naturalak azaltzen saiatzen zenean, eta bera sistema kopernikarraren aldekoa zela. Lagun bati (Benedetto Castelli) karta batean idatziriko hitz horietaz Inkisizioa baliatu zen 1616an beraren kontra lehendabiziko aldiz joateko (“Censura facta in Santo Officio Urbis”). Horren ondorioz, Kopernikoren liburuak Indexean jarri zituzten, zuzendu arte liburu horiek irakurtzea debekatuta gelditu zen, sistema heliozentrikoa filosofikoki absurdua eta egia teologikoaren ikuspuntutik heretikoa zela adierazi zen, Galileori kargu hartu zioten, eta berak dotrina heretiko hura abandonatuko zuela hitz eman zuen. Handik aurrera sistema heliozentrikoa hipotesi matematiko hutsa zelakoa eta antzeko *ex suppositione* adierazpenak ziren baimenduta zeuden bakarrak, baina errealitatea deskribatzen ez zuela argi utziz (Galileok eta Keplerrek elkarri bidaltzen zizkioten eskutitzak kodez idatzi behar izan zituzten).

1623an aita santu berria izendatu zen, Urbano VIII.a, eta harekin ere ongi konponzen zen Galileo. Baina 1632an *Dialogo* argitaratu eta ondoren sortu ziren eztabaida publikoak toki guztietara hedatu ziren. Liburua italieraz eta latinez idatzi zuen, trebetasun dialektiko zorrotzez eginik, eta bere egitura Platonen liburuen antzekoa zen (elkarrizketak). Liburuko pertsonaia azkarra (“Salviati”) heliozentrismoaren aldekoa zen, eta jarrera aristotelikoarekin sistema geozentrikoa defendatzen zuen “Semplicione” (ximplea) pertsonaia aita santuaren karikatura zelakoan, Urbano VIII.a Galileoren etsai bihurtu zen. Zazpi urte lehenago teoria heretikoak abandonatzea prometatutako ondoren, Galileok berriz Inkisizioaren aurrean aurkeztu behar izan zuen, ia 70 urterekin. Jakintsuaren beste hitz batzuk ere –“*Jainkoaren agerbideek ez dute miresgarritasun txikiagoa naturan, liburu santuetan baino*”– panteismotzat har zitezkeen, eta 1600ean akusazio berdintsuarengatik Giordano Bruno bizirik erre zuten.

Aita Santuaren sumina bizia zen, Espainiako enbaxadorea zen Gaspar Borgia kardinalak eta kideko fanatiko kontrarreformistek ere gogor jokatu zuten, eta jesuitak eta domingotarrak Galileoren etsaiak ziren. Baina aita santuak ez zuen erabaki Galileo hiltzea. 1633an, bere epaileen aurrean belaunikatuta, penitenteen atorra zuria jantzita, liburu santuen aurrean, zaharra eta gaixorik, Galileok bere akatsei eta heresiei uko egin zien, ez beldurrarengatik (edo ez horregatik bakarrik), oso gizon elizkoia zelako baizik. XVIII.

mendeen Frantziako entziklopedistek Galileok ez zuela atzera egin asmatu zuten, eta Lurra mugitzen zela baieztatzeko eta Elizak mehatxatutako torturari inongo beldurrik ez adierazteko, “*eppur si muove*” (hala ere, mugitu egiten da) hitzak bota zituela zabaldu zuten. Baina Galileo ez zen jaio heroi tragiko bat izateko. Galileok ez zuen bere burua defendatu, zertarako? Barkazioa eskatu zuen.

### ABJURATIO

*Nik neronek, Galileo Galileik, Florentziako Vincenzo Galilei defuntuaren semeak, hirutan hogeita hamar urtekoak, epaimahai bonen aurrean propio deituta, Errepublika Kristau Unibertsalaren Gorentasun Txit Agurgarrion aurrean belauniko, heresia kontuen gain, eskuetan dauzkadan Liburu Santuetan begiak josita, adierazten dut Erromatar Eliza Katoliko Apostoliko Santuak sinesten, predikatzen eta erakusten duen guztiaz beti sine-tsi dudala eta orain sinesten dudala eta aurrerantzean ere sinesten segituko dudala Jainkoak lagunduta.*

*Baina nabiz Ofizio Santu honek epaileen medioz agindu Eguzkia unibertsoaren erdigunean geldirik dagoela eta Lurra haren erdigunean ez dagoela eta Lurra mugitzen delako iritzi faltsua neronek abandonatzea eta dotrina hori ez agertzea, ez defendatzea eta inolaz ere ez erakustea idatziz edo hitzez, eta aipaturiko dotrina Liburu Santuen kontrakoak zelako gaztigua jasota, nik kondenaturiko dotrinaz liburu bat idatzi eta publikarazi nuen, haren aldeko eta eraginkortasun handiko argudioak emanez inongo aterabidetara ailegatu gabe. Horregatik eta sutsuki juzgatua izan naiz heresiaz susmagarri, hau da, unibertsorenen erdigune geldia Eguzkia dela eta Lurra erdigune hori ez dela eta mugitzen ari dela adierazteagatik.*

*Onorioz, biziki eta bidezketasunez nire kontra sorturiko susmo hori Berorien Gorentasunen eta kristau katoliko guztien gogotik kendu nabian, zintzotasunez eta bibotzez, eta engainu gabeko fedez, adierazten dut goian aipaturiko akatsak eta heresiak, eta orobat Eliza Katoliko Santuaren kontrako edozein akats eta sekta madarikatzen eta gorrotatzen ditudala. Eta zin egiten dut etorkizunean nire kontra borrelako susmoa eragin dezakeen konturik hitzez edo idatziz sekula ez dudala esanen edo adieraziko; aitzitik, zin egiten dut edozein heretikoren edo heresiaz edozein jende susmagarriren berri Ofizio Santu boni salatuko diodala.*

*Eta nire hitzaren eta zinaren kontra nik obratzekotan, Jainkoak ez abal du aginduko, Kanon Santuek eta beste konstituzio orokorrek eta xedapen bereziek dekretaturiko eta promulgaturiko zehapen eta zigorrei oraindanik men egiten diet. Jainkoak eta Liburu Santuek lagundu nazatela, nire eskuak baien gainean zabalik dauzkadala.*

*Nik neronek, Galileo Galileik, goian aipaturikoak, adierazi berri dudan eran eta moduan zin egiten, agintzen eta hitz ematen dut, eta konpromiso horien fedea emanez, hitzez hitz esandako nire abjurazio hau eskuz izenpetzen dut.*

*Erroman, Minervaren Komentuan, 1633. urteko ekainaren 22an.*

*Nik neronek, Galileo Galileik, adierazitako moduan borondatez abjuratu dut.*



Harrezkero erbesteraturik bizi izan zen, Toscanaren enbaxadan Erroman eta Sienako apezpikuaren etxean preso. Haren “Abjuratio” Italiako pulpitu guztietan irakurri zen, haren liburuak Indexean jarri zituzten, eta haren lagunak ez ziren defendatzera ausartu. Bisitak, elkarrizketak eta bileretan parte hartzea debekatu zioten, haren ideiak eztabaidatzea ere debekatu zen. Bere bizitzaren azken urteetan etxera bueltatzen utzi zioten, Arcetri herrira; hiltzeko lau urte falta zitzaizkiola itsu gelditu zen, eta lagunak bisitak izan zituen. Vatikanok 1992an kondena hura baliogabetu du, beranduegi.

Galileoren bizitzan garbiki islatu zen obediencia espiritualak edo ideologikoak obediencia intelektuala ekartzen dutela, eta zientzia askearen substratua kontzientzia-askatasuna dela nabaritu zen. Historia osoan dualismoa (teismoak eta ideologiak, platonismoaren seme-alabak) eta autoritarismoa zientziaren kontrako aliatuak izan dira. Eta zientziak mitoaren kontra gogor jarraitzen du.

Albert Einsteinen arabera, Galileoren arrazoibide zientifikoek eta aurkikuntzek fisikaren hasiera markatu zuten. Haren aurrekoek kaosa besterik ikusten ez zuten arloetan Galileok deskribapen matematikoak eta lege orokorrak eman zituen. Galileorekin filosofia naturalean ezagutzen ez zen ideia berri bat ezarri zen, gero eta sendoago hurrengo belaunaldietan: mundu fisikoa kalkula daitezkeen indarren eta neur daitezkeen gorputzen arteko elkarrekintza da. Eta historia unibertsalean, Galileo agertu zenetik aurrera, natura deskribatzeko fisikaren eta espekulazio filosofiko edo behaketa inkoherenteen arteko muga finkatuta gelditu da.

Ordura arte zientziak ez ziren filosofiatik desberdintzen, filosofia (bere fisikarekin, astronomiarekin eta meteoroeekin) azalpen-batasuna baitzen, filosofia dena “argitzen” baitzuen, eta eskoletan eta unibertsitateetan irakasten zen gauza bakarra pentsamendu aristoteliko tomista zen. Baina Errenazimentuko eta ondorengo iraultzek frogatu zuten gizakiaren arrazionaltasunean eta demostrazio matematikoetan oinarrituta pentsamendu zientifikoaren bidez unibertsoa ezagut daitekeela muga teologikoz kutsaturiko fedea erabili gabe, eta ezaguera arrazionala mugagabekoa dela.

Hala ere, 1550 eta 1650 bitartean jesuitak astronomiaren eta matematikaren abangoardia bilakatu ziren, filosofia instrumentalista erabiliz eta elementu kopernikarrak, galilearrak eta keplertarrak onartuz, egia bikoitzaren doktrina averroestarrean oinarrituta, zientzia eta erlijioa elkartzeko asmoz: egia arrazionala eta egia errebelatua. Aristotelismo horrek unibertsitateak menderatu zituen XVII. mendera arte, baina, pixkanaka, curriculum unibertsitarioa antolatzeko ahalmena galtzen joan zen.

Bitartean, anatomia, medikuntza klinikoa, kirurgia, kimika, botanika, astronomia eta bestelako katedrak sortzen hasi ziren, batez ere Europa protestantean eta laikoen ardurapean. Denborarekin, teologo profesionalak eta teologia klasikoa bazter ilunetan gelditu ziren, eta mundua azaltzeko laikoek garatzen zituzten kodeak hedatzen hasi ziren. Izan ere, Newtonen garaietarako jarrera zientifista nagusia zen.

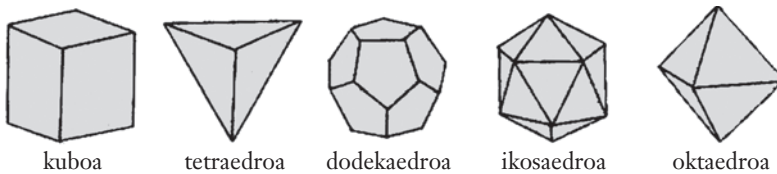
## 2.4. Kepler

Johannes Kepler (Bohemia, 1571-1630) familia luterano pobre bateko semea izan zen, eta bizitza osoan zoriontasunerako zorte txarra izan zuen. Aita zakarra, ama desorekatua, txikitan bi anaia hil zitzaizkion, bi aldiz ezkondu zen eta biak alargundu ere bai, eta hiru seme galdu zituen. Arazo ekonomikoak askotan, gerra zibilak, nekazarien matxinadak, amaren epaiketa sorgina izateagatik, lan bila hemendik hara, gizajoak latzak pasatu zituen, baina bere emaitza intelektualak galantak izan ziren.

Bere pentsamoldean instrumentalismorako lekurik ez zegoen, eta platonismoak bul-tzatuta zerutar mugimendu nahasien atzetik zegoen egiazko ordena bilatu zuen, eskema astronomiko-geometrikoz baliatuta. Keplerrek Jainkoaren aztarnak geometriaren eta harmonia matematikoen bitartez bilatu zituen, beraren ustez unibertsoaren elementu estatikoak (Eguzkia, planeten arteko espazioa eta izarrak) Trinitatearen sinboloa baitzi-ren (Aita, Semea eta Espiritu Santua). Horregatik, kosmosaren egitura geometrikoarekin tematu zen, eta behaketa astronomikoei lehentasuna eman zien.

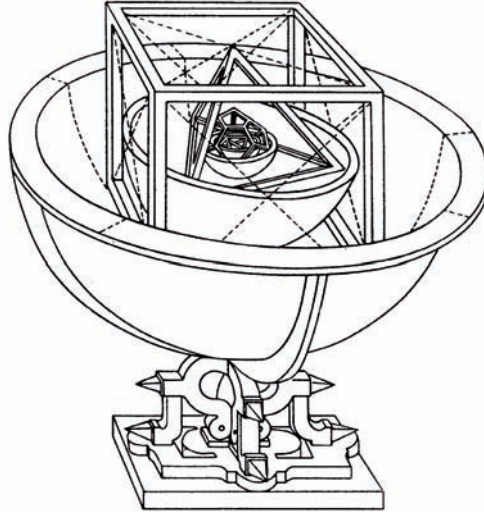
Tübingengo Unibertsitatean ikasiriko kopernikartasuna izan zen Keplerren abiapun-tua, eta bere proiektu intelektuala inspirazio platonikoz eta pitagorikoz idatziriko hiru liburuetan gauzatu zuen: *Mysterium Cosmographicum* (1596), *Astronomia Nova* (1609) eta *Harmonice Mundi* (1619). Zenbait ekarpen zientzia modernoraino iritsi dira, beraren hiru lege famatuak batez ere. Beste batzuk, ordea, Keplerrek gehien estimatu zituenak hain zuzen, bidean suertaturiko pasadizo moduan gordetzen dira.

Lehen liburuan (*Mysterium Cosmographicum*) gertaera batzuen kausa formalaren “se-kretua” argitzen zen. Gertaerak, batez ere, planeten kopurua (sei izatea) eta planeten arteko distantzia askotarikoak ziren (sistema kopernikarrean Saturno eta Jupiter oso be-reizita zeuden, eta gainerako planetak bata bestetik askoz ere gertuago). Eta erantzunak bost solido platonikoetan aurkitu zituen, bost solidoak bata bestearen barruan sartuta unibertsoaren egitura lortu zuelako:



Egitura hura eskalan eraikitako eruedetan aurkitu zuen. Planeta bakoitzaren or-bita esfera bati lotu zion, Saturnoren esferaren barruan kubo bat sartu, eta kubo horretan Jupiterren esfera jarri zuen. Jupiterren esferan tetraedro bat sartu, eta ba-ruruan Marteren esfera, eta hurrenez hurren Lurraren, Artizarraren eta Merkurioaren esferetan gainerako solido platonikoak sartu zituen, erdiguneko Eguzki mugiezine-raino ailegatu arte. Bost solido perfektu, sei esfera, sei planeta, eta horrela deduzitu-

riko distantziak on samarrak izan ziren, batez ere Artizarraren eta Marteren orbitetarako:



Ereduan planeten kopurua eta Eguzkirainoko distantziak azaldu ziren. Bestalde, orbiten tamainak desberdinak izanda, Kepler ohartu zen orbita osoa ibiltzeko planetek denbora desberdinak behar zituztela, edo orbita-periodo desberdinak zituztela (Saturnon hogeita hamar aldiz Lurreko urtea, Merkurion laurden bat, eta abar). Baina planeta guztien abiadurak ere ez ziren berdinak, eta Merkurio azkarrago zebilen orbita motzagoa ibiltzeko, eta Saturno mantsoago orbita luzeagoa osatzeko. Horren zergatia Eguzkiaren “arima” eragilean aurkitu zuen, “arima” Eguzkitik ateratzen baitzen planetetan eragiteko. Urrutiko planeten abiadurak txikiagoak ziren Eguzkiaren eragin hori ahultzen zelako, eta gertuko planetetan eraginaren sendotasuna handiagoa zen. Lehendabiziko aldiz Eguzkiak betebeharr mekanikoa izan zuen, baina indar horren izaera edo balioa Newtonen grabitazio unibertseraino ez ziren ezagutu.

Bigarren liburua jatorria (*Astronomia Nova*) Tycho Braherekin izandako egonaldia izan zen, baina gainerako zientzialari garaikideen artean (Galileo, Descartes) liburuak ez zuten harrera onik izan. Berriz ere, Newton izan zen Keplerren ekarpenak berreskuratu zituen.

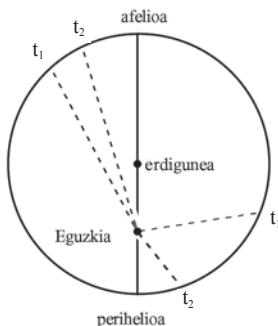
Sistema tychonikoak eraginda, Keplerrek zerutar esfera solidorik ez zegoela onartu zuen (kanpoko izarrena izan ezik, unibertsoaren muga finkatzen zuena), eta orbita planetarioak gaur egungo ibilbide espazialak bezala ulertu zituen. Braheren behaketa astronomikoen datu enpirikoen bildumaz baliatu zen sistema kopernikarrean sakontzeko, eta zerutar fisika bat eraiki zuen.

Planeten higiduren kausari buruz Keplerren funtsezko hipotesi dinamikoa Eguzkia zen (Leibnizek “dinamika” hitza mende bat geroago erabili zuen lehen aldiz). Aristotelesen kausa eragileen eremua, higidura naturalak eta bortitzak sortzen zituzten kausen eremua,

Lurrean zegoen, eta hori guztia arbuaitu zuen Keplerrek. Baina, Aristotelesek bezala, higidura konstanteak kausa baten eragin konstantea behar zuela pentsatzen zuen, eta Eguzkitik bi eragin mota igortzen zirela proposatu zuen. Planeten errotazioa azaltzeko, Keplerrek Eguzkian eta planetetan “arima” eragileen existentzia defendatu zuen. Planeten translazioa, ordea, izaera fisikoko “indar” eragile batek sorturikoa zela idatzi zuen, magnetismoa-reakin erlazonaturikoa beharbada (1600ean W. Gilbertek *De Magnete* argitaratu zuen, fenomeno magnetikoen ikerketak azalduz, Lurra iman erraldoia zela adieraziz, eta planeten errotazioa eta magnetismoa uztartuz). Indar eragile horrek zerutar gorputzen inertzia (gelditasunerako joera, Galileorena ez bezalako) gainditzen zuen, eta planetak ibilbidean zehar bultzatzen zituen, indarrak abiadura sortzen baitzuen, indarra eta abiadura proportzionalak baitziren. Gaurko ikusbidez Keplerren hipotesi dinamikoak faltsuak direla gauza jakina da; dena den, haiek izan ziren zinematikako lege famatuak aurkitzen lagundu ziotenak.

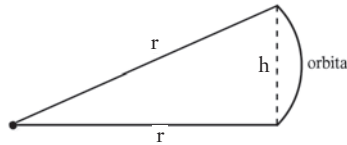
Kopernikok zerutar higiduren uniformetasuna defendatu zuen, orbita zirkularrean zehar planeta guztiek beti abiadura bera izan behar zuten eta. Baina, Keplerren ustez, Eguzkiaren eraginaren sendotasuna distantziaren arabera aldatzen zen; honegatik, planeta desberdinek abiadura desberdinak zituzten. Eta ikuspuntu berri bat sartu zuen planeta-orbita bakoitzerako printzipio horren balioa ikertzeko: orbita zirkularren erdigunea Eguzkiaren batez besteko kokapena izanda ere, planeten abiadurak eta Eguzkiraino distantziak kalkulatu zituen une bakoitzeko Eguzkiaren kokapen erreala kontuan hartuta. Planeta bakoitza batzuetan Eguzkitik gertuago zegoen (perihelioan) eta beste batzuetan urrutiago (afelioan), eta ikuspuntu berri honen arabera bi aldiune horietan abiadurak ere desberdinak zirelako hipotesia egiaztatu nahi zuen. Lurraren ibilbidea aztertuz, gure planetak perihelioan abiadura maximoa eta afelioan minimoa zeukala frogatu zuen: Eguzkitik gertu Lurra azkarrago doa, eta Eguzkitik urruti dagoenean motelago. Lurraren higidura ez zela uniforme frogatu zuen, eta abiadura aldakorren printzipio horrek gainerako planetetan ere eragiten zuela sinetsita zegoen. Planeten abiadura ez-uniformearen egiaztapenak Keplerren bigarren legea (edo “azalaren legea”) ekarri zuen.

Edozein planetaren orbitaren eremu bat behatuta, orbita-zati hori ibiltzeko denborak eta Eguzkitik jasotako eraginak proportzionalak izan behar zuten, edo, beste modu batera esanda, denborak eta Eguzkirainoko distantziak alderantziz proportzionalak izan behar zuten. Gaur egungo hizkeran adierazita, “Eguzkia eta planeta lotzen dituen erradio-bektoreak denbora-tarte berean azalera berdinak egiten ditu” (distantzien ordez azalera erabili zituen):



Printzipio platonikoaren uniformetasunak adierazten zuen denbora berean angelu bera egiten zela, ez azalera bera. Alde horretatik, Keplerren aurkikuntza iraultzailea izan zen, eta harrezkero uniformetasun angeluarra mantentzen zuten puntu ekuanteen beharra funtsik gabe gelditu zen.

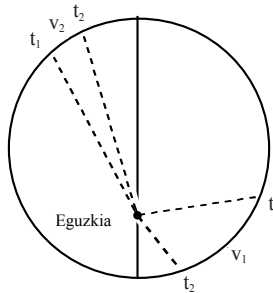
Lege horren adierazpen matematikoa erraza izan zen. Eman dezagun planetaren hasierako kokapena eta bukaerakoa oso gertu daudela. Kasu horretan ibilbide erreala (orbitaren zatia) eta eratzen den triangeluaren altuera (h) parekoak dira:



Triangelu horren altuerak ia bat etorriko litzateke planetak ibilitako espazioarekin ( $e = v \cdot t$ ). Beraz, erradio-bektoreak eginiko azalera triangeluaren azalera izanen litzateke:

$$S = \frac{1}{2} r h = \frac{1}{2} r v t$$

Bi une desberdinetako azalerak eta abiadurak ( $v_1$  eta  $v_2$ ) kontuan hartzen baditugu:



Azalerak berdinak dira; beraz:

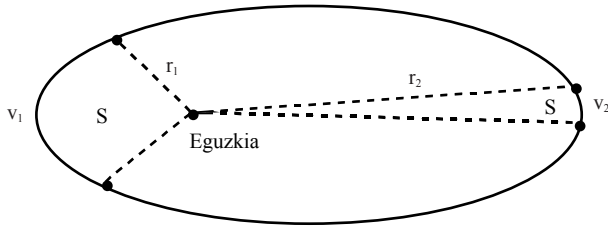
$$\frac{1}{2} r_1 v_1 t = \frac{1}{2} r_2 v_2 t$$

$$r_1 v_1 = r_2 v_2$$

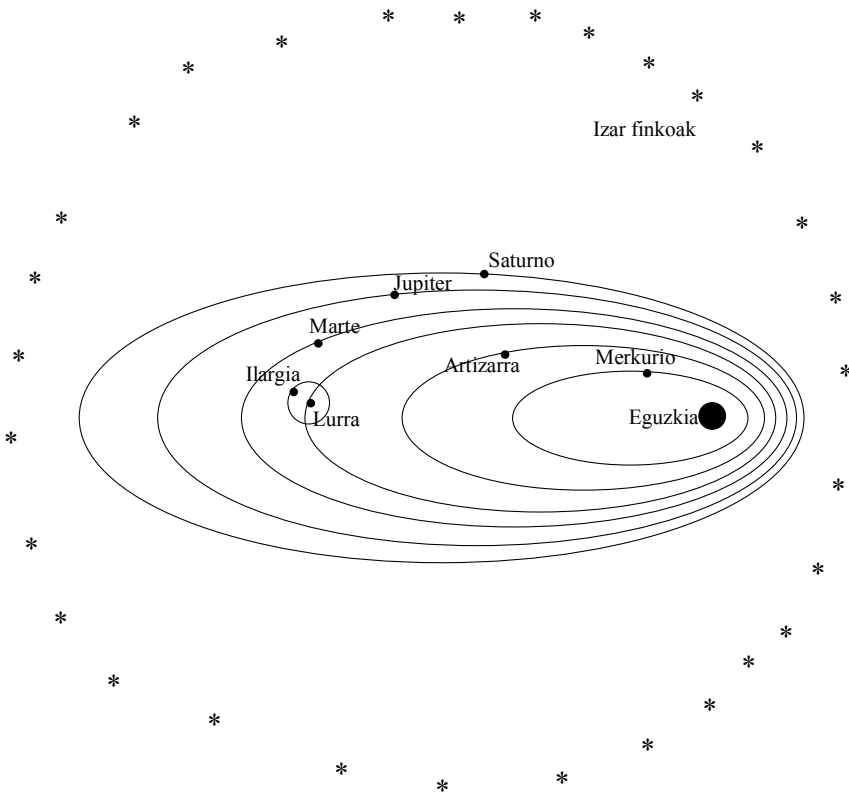
Eta azken erlazio horren arabera planetak, Eguzkitik gertuago dagoenean ( $r_1 < r_2$ ), nahitaez abiadura handiagoa izan behar du ( $v_1 > v_2$ ), behaketek agintzen zuten bezala.

Lurraren orbitarako lorturiko erlazio hori Marteren kasuan egiaztatu ahal izan zuen Braheren datuen bidez. Planeta horren orbita tresna tradizionalak (deferenteak, ekuan-

teak eta abar) erabiliz ikertu zuen, baina, azkenean, Lurraren ikerketan aurkitu ez zuena topatu zuen: orbitak eliptikoak ziren, eta Eguzkia foku batean zegoen (Lurraren orbita eszentritate txikikoa da, ia zirkulu bat). Keplerren lehen lege horrek (edo “orbita eliptikoen legea”) zirkulartasunaren printzipio platonikoa hautsi zuen, baina elipseekin Martek ere azalaren legea betetzen zuela frogatu zuen:



Zerutar higiduretarako eskema horrek sinplifikazio handia ekarri zuen, eta zirkulubildumaren ordezkari sei orbita eliptikorekin nahikoa zen unibertsoa irudikatzeko:



Hirugarren liburuan (*Harmonice Mundi*) Keplerren helburua distantziaren eta abiaduren arteko erlazioaren sekretu handia argitzea zen. Eta emaitza hirugarren legea (“harmoniaren legea”) izan zen: planeten orbita-periodoen karratuak eta batez besteko distantziaren kuboak (zehazkiago, ardatzerdi nagusien kuboak) proportzionalak dira. Horrek ekarri zuen bi magnitude horien arteko erlazioa planeta guztietarako konstantea izatea:

$$\frac{T^2}{r^3} = k = \frac{T^2_{\text{Lurra}}}{r^3_{\text{Lurra}}} = \frac{T^2_{\text{Marte}}}{r^3_{\text{Marte}}} = \text{eta abar}$$

Gaurko datuak erabilia, konstantetasuna nabaria da:

Planeta	Distantzia Eguzkitik (UA)	Periodoa (urteak)	Keplerren erlazioa
Merkurio	0,3870	0,2407	0,9996
Goizeko Izarra	0,7233	0,6152	1,0002
Lurra	1,0000	1,0000	1,0000
Marte	1,5234	1,8809	1,0007
Jupiter	5,2032	11,862	0,9989
Saturno	9,5394	29,458	0,9996

Erlazioa kontuan hartuta eta planeta bakoitzaren periodoa neurtuz, Keplerrek planeta guztien Eguzkirainoko distantziak kalkulatu zituen.

Ilargia planeta ez zela, eta Lurraren inguruan biratzen zen satelitea zela frogatzea erraza izan zen, Ilargiak erlazio desberdina zeukalako. Orain badakigu planeta baten satelite guztiak ere Keplerren erlazioa betetzen dutela, baina beste konstante bat emanez. Adibidez, Lurraren kasuan:

Satelitea	Distantzia Lurretik (mila km)	Periodoa (orduak)	Keplerren erlazioa
Ilargia	384,40	655,7	0,0076
Satelite hurbila	6,37	1,4	0,0076
Satelite geogonkorra	42,40	24,0	0,0076

Hirugarren lege horretaraino ailegatzeko bidez ez da ezer jakiten, baina testuingurua planeten musika eta harmonia unibertsala izan zen. Orkestra bat balitz bezala, eta Jainkoa zuzendaria, planeten abiadura desberdinek soinuak adierazten zituzten, planeta bakoitzak bere erregistroaren barruan, Merkurioren perihelioko nota altuenetik Saturnoren afelioko nota baxueneraino.

Zalantzarik gabe, Keplerrek zeruko higidura guztien eredu zinetikoa lortu zuen, eta horrela sistema heliozentrikoa behin betiko egiaztatu zuen. Hala ere, kosmos grekoaren

ezaugarri gehienak (unibertso bakarra, biribila, itxia, mugatua, sei planetaz osaturikoa eta erdiguneko kokapen pribilegiatua) nabariak ziren, uniformetasuna eta zirkulartasuna gaindituta, eta eskema horren oinarritzko irizpideak ere (ordena, harmonia eta erregular-tasunak) klasikoak ziren.

## 2.5. Ondorengo filosofoak

Azken aurrerapen fisiko-kosmologikoen eragina filosofian oso nabarmena izan zen, eta eragin hori jaso zuten bi filosofo ospetsu Bacon eta Descartes izan ziren.

Francis Baconek (1561-1626, “Doctor Mirabilis” deitua) dualismo zaharrari itxura berri bat eman zion. “Res Extensa” (materia) eta “Res Cogites” (espiritua) desberdinu ondoren, materia eta espiritua ezagutzeko bi bide zeudela esan zuen, eta zientzialariak Elizarekiko eta politikarekiko independenteak izan zitezkeela ere bai (1620ko *Novum Organum* liburuko metodo zientifikoaren aldeko esaldirik famatuena honako hau izan zen: “*egia akatsetik abiatuta errazago argitzen da, okertasunetik abiatuta baino*”).

Bacon zientziaren apologeta izan zen berak ekarpen zientifikorik egin gabe, eta zientziaren antolakuntza soziala bultzatu zuen, industrien ekoizpenaren garapena eta gizaki guztiendako zorientasuna ekarriko zituelakoan. Hain zuzen ere, lehen elkarre zientifikoak haren espirtuarekin jaio ziren: Florentzian Accademia del Cimento 1657an, Londresen Royal Society of Sciences 1662an, Parisen Académie Royale des Sciences 1666an, Berlingo Akademie der Wissenschaften 1700ean. Elkarre horietan arlo asko landu ziren: kimika, botanika, anatomia, geometria, astronomia, mekanika, elektrizitatea, magnetismoa, optika, hidraulika eta abar. Gai askotan lehen pauso zientifikoak gauzatzen hasi ziren: errekontza, berotasuna eta hoztasuna, eraikuntza, garraioa, haizeak, meteorooak. Eta erreminta berriak eraiki ziren: teleskopioak, mikroskopioak, barometroak, termometroak, higrometroak, errefraktometroak, automatak eta abar. Hasieran lan-metodoak ez ziren batere egokiak; adibidez, inolako irizpiderik gabe edozein gauza destilatzen jartzen ziren (meloiak, kafea, zapoak eta beste edozer), edo huts-ponpa bat eskuratzen bazuten barruan denetatik sartzen zuten (petardoak, txoriak) zer pasatzen ote zen ikusteko. Baina elkarre horiek paper garrantzitsua bete zuten sormen zientifikoa bultzatu zutelako eta aldizkari periodikoen medioz komunitate zientifikoa bultzatu zutelako eta esperimientuen emaitzak hedatu zituztelako.

Bacon naturaren ustiapenaren alde eta estatuaren eginkizunen alde agertu zen. Bere *Atlantida Berria* (*New Atlantis*) liburuan, gizon zintzok zorientasuna eta paradisua denen eskura jartzeko helburuarekin lan egiten zuten, departamentutan bananduta baina era koordinatuan, “Salomonen Etxea”n, zeina fabrikaren, ikerketa-institutuaren eta monasterioaren hibridoa baitzen.

René Descartesek (1596-1650), zalantza sistematikoaren asmatzaileak (“de omnibus dubitandum”, “dubium sapientiae initium”), Frantzian greziar filosofoen loria eklipsatu zuen, baina fisikan hirugarren kategoriako pentsalaria izan zen. 1637an idatzi zuen “Metodoari buruzko diskurtsoa” lanean (*Discours de la Méthode pour bien conduire la raison et*



*cherber la Vérité dans les sciences*, “cogito, ergo sum; je pense, donc je suis”: pentsatzen dut; beraz, banaiz), aurkikuntzak egiteko bidea definitu zuen, baina berak ez zuen bat ere egin. Dualismo propioa garatu zuen, materiaren ikerketaz lan independentea egiteko bideak zabalduz: alde batetik, arima eta espiritua pertsonalak ziren, ez-jarraituak. Beste aldetik, materia inpersonalak ziren, eta jarraituak.

Bere ustetan munduaren oinarrizko osagaiak hedadura eta higidura ziren (hortaz fisikak nahitaez geometrikoa izan behar zuen), eta materia “azalera espazial hutsa” zen (*Les Principes de la Philosophie*, 1644). Materiaren hedadura errealitate bakarra izanik, gainerako ezaugarriak gure zentzuen asmakizuna besterik ez ziren, dena itxurazkoa zen, eta Jainkoaren bidez materialak sentzazioak ere sortzen zituen. Unibertso osoko materia bera zen, baina atomismoaren aurka eta bere ikuskera korpuskularraren arabera, materia infinituraino zatitu zitezkeen, funtsezko partikularik ez baitzegoen.

Pentsamendu aristotelikoan bezala, hutsunea ezinezkoa zela eta mundua materialaz (zatiez, elementuez, eterrez) beterik zegoela adierazi zuen: hedadura eta materia hain erlazionaturik badaude, hedadura dagoenean materia baldin badago, materialarik gabeko espaziorik ezin da izan, hutsa, beraz, ezin da existitu, dena materialaz beterik dago eta naturan jarraitutasuna da nagusi (atomismoaren kontra). Horrelako munduan mugimendu guztiak ukipeen bidez hedatzen ziren, eta “urrutiko elkarrekintza” ezinezkoa zen; adibidez, imanetatik materia ikusezina ateratzen eta itzultzen zen burdin puskak erakartzeko.

Garai haietarako makinak arruntak zirenez, teknikak naturaren kontzeptu mekanikoa induzitu zuen, makinaren mekanismoa naturaren eredu bihurtu zen. Descartesen mekanismoaren arabera, mundua erloju bat bezain mekanikoa zen, mekanikoki jokatzeko zuten partikulaz osaturikoa. Jainkoa lehenengo kausa zen, unibertsoari lehenengo bultzada eman ziona, hortik aurrera bakean uzteko (mirariak, beraz, ez ziren existitzen), unibertso infinituak makina erraldoi batek bezala funtzionatzen zuelako. Jainkoa hasierako pieza mekanikoa balitz bezala imajinatu zuen, filosofoen izaki pertsonalaren eta moralaren kontra.

Bere Jainko mekanikoak hasieran materia sortu zuen bezala (zatitu eta batu dezakegun materia, baina bakarrik Jainkoak suntsi dezakeena), berak ere higidura-kantitate bat kreatu zuen, materiaren zatiek trukatu, zatitu eta batu dezaketena, baina, oro har, beti kontserbatzen dena. Beraz, haren ustez unibertso gertaera guztiak ulertzeko giltza partikulen arteko talka mekanikoetan kontserbaturiko higidura-kantitatean zegoen, eta magiarik, inpetusik edo motor peripatetikorik ez zen erabili behar mugimenduak azaltzeko (Descartesek “higidura-kantitatea” kalkulatzeko “bolumena x abiadura” biderketa erabili zuen eta horri “indarra” deitu zion). Bakarrik baleude, partikulak geldirik mantenduko lirake, baina, talkak etengabe gertatuz gero, higidura ezinbestekoa zen. Eta haien joera berez zuzen mugitzeko baldin bazen ere (inertzia zuzenaren printzipioa), talkak berriz ere higidura zirkularrak eta antzekoak gertatzearen arrazoia ziren. Dena dela, partikulaz beteriko unibertsoan talka-kopurua ikaragarria izanik, gertaerak kuantitatiboki ikertzea ezinezkoa zen, eta bakarrik egoera idealak azter zitezkeen, bi partikula isolaturen artekoak bezala. Horrek unibertsoaren eredu osoa ematen zuen, baina ezinezkoa zen aurreikuspen zehatzik ematen zuen eredu matematikorik garatzea.

Talka mekanikoak sakonkiago azaltzen hasi zenean, Descartesek ez zuen bide enpirikoa edo esperimentalak erabili, bere intuizioek eta dedukzio intelektualek ez zuten batere ongi funtzionatu, eta berak finkatutako legeak eta ereduak baldintza faltsuz bete zituen. Descartesek egoera idealak bakarrik erabili zituen, egoera errealetarako eragiketa matematikoen zailtasunak handiegiak zirelakoan.

Descartesek talken lege mekanikoak honelakoak ziren:

- bi gorputz berdinek (A eta B) abiadura berarekin eta kontrako noranzkoekin aurrez aurre talka egitean, biek errebotatuko dute hasierako abiadurekin.
- A azkarrago bada, talkaren ondoren bi gorputzek elkartuta segituko dute, A-k bere abiaduraren zati bat B-ri eman ondoren.
- A handiagoa bada eta geldirik badago, B-k errebotatuko du bere abiaduraren zatirik ere komunikatu gabe.

Lehena kenduta, gainerakoak ez ziren betetzen; hala ere, Descartesek lege haiek gogor defendatzen zituen kasu “ez-errealak” zirelako. Urte batzuk geroago, Huygensek demostratu zuen erlatibitate klasikoaren teoria eta higidura-kantitatearen kontserbazio kartesiarra kontrajarrita zeudela, eta ikerlari horrek talken lege berriak finkatu zituen masa-zentroaren erabilera oinarrituta.

Descartesek mundu heliozentrikoan hiru eter mota zeuden. Partikula larriz osaturiko eterrak zeruko planetak osatzen zituen. Partikula xehez eta biribilezko eterrak planeten tarteko espazio osoa betetzen zuen. Planetak eter honetan flotatzen zeuden, inongo marruskadurarik gabe planeten mugimendu konstanteak azaltzeko. Hirugarren eter mota partikula arinez osaturik zegoen, eta Eguzkiaren eta izarren osagai bakarra zen, errotazioarengatik ziztu bizian ateratzen zena eta planetetara ailegatzen zena argia emanenez. Argia eterraren desitxuratzeko mekanikoak sorturiko presio gisa irudikatu zuen, baina argiaren hedapen zuzena, itzalak, islapena eta beste fenomenoak azaltzea ezinezkoa gertatu zitzaion.

Elkarrekintza grabitatorioa, magnetikoa eta elektrikoa ulertzeko, beste itxura batzuetako eterrak asmatu zituen, partikula trianguluarrez, kiribilduz eta porotsuz osaturikoak. Mundua eterrezko zurrumbiloz bete zituen, eta horrela Descartes dena azaltzen ausartu zen: Lurraren eta atmosferaren sorrera, mendi, meteor, marea, sumendi, ozeano, ibai eta iturrien sorrera, gardentasunaren eta opakotasunaren zergatia, pisua, argia, beroa, gorputzen kohesioa eta abar. Dena misteriorik eta magiarik gabe, beti partikulak, mugimenduak eta talka mekanikoak erabiliz, baina, frogak kuantitatiboak ezinezkoak zirenez, azalpen horiek ezin zuten iragarpenik egin.

Gizakia ere makina gisa imajinatu zuen, bere fisiologia eta psikologiari buruzko liburuetan agertzen den bezala (*Gizakiaren Tratatuak* eta *Arimaren Pasioak*). Baina beraren ekarpenek ez zuten funtzionatzen, dena asmaturikoa zen, fantasiaz josiriko proposamenak, eredu zehatzik eraikitzeko baliogabeak.

Oro har, Descartesek ideia tradizional asko barneratu zituen: kalitateen jatorriari buruzko interes aristotelikoa, argiari buruzko ikusmin neoplatonikoa, espazio osoan he-

daturiko eterraren ideia estoikoa. Baina, misteriotik askatu ondoren, unibertsoa birformulatu zuen eredu mekanikoa erabiliz. Azkenean, Descartesen eredu fisikoak, mekanizismoan oinarrituta, Aristotelesena ordeztu zuen, eta berari esker Errenazimentuko naturalismoa eta neoplatonismoa desagertu ziren.

Bestalde, politikan eta kontu sozialetan Descartes oso kontserbadorea zen. Bere kopernikartasuna ezkutatu zuen Galileoren kondena jakinarazi zutenean. Garai haietan elite intelektualetan zabaltzen ari zen eszeptizismo erlijiosoaren aurrean, jaingo kartesia-rra ordena geometrikoaren bermatzailea eta ebidentzia zientifiko-matematikoen jatorria zen. Eta Europako sarraskien errudunak ziren fanatismo erlijiosotik, ideologikotik eta politikotik ihes egiteko, Descartes beti Elizaren eta estatuaren alde jarri zen.

## 2.6. 1564-1642 bitarteko kronologia

XVI-XVII. mendeetan Europako gizarte-harremanen ereduak eraldaketa sakona izan zuen, eta haren uhinak kosmologiaren, zientziaren eta metafisikaren bilakaerak bereziki baldintzatu zituen, berriz ere XX. mendera arte ikusiko ez zen bezala. Hurrengo kronologiak, Galileoren bizitzak mugaturikoa, garai haien ezaugarri istilutsua birbiltzen du.

<p><b>1564</b> Galileo Galilei eta William Shakespeare jaio ziren. Michelangelo eta Joan Kalbin hil ziren. Inkisizioak Vesalio Leku Santuetara erromesaldian joatera behartu zuen, hildakoetan disezioak egiteagatik eta heriotza-zigorra ekiditeko.</p>	<p>Joana Albretekoa Nafarroa Behereko azken erreginak enkargatuta, Joanes Leizarragak Testamentu Berriaren euskarazko itzulpena argitaratu zuen.</p>
<p><b>1565</b> Ameriketako lehen patatak Espainiara ailegatu ziren. Ingalaterran tabakoa hedatzen hasi zen. Mosketea asmatu zen. Lapitz baten lehen deskribapena, Zurichen.</p>	<p><b>1572</b> Tycho Brahek supernoba bat aurkitu zuen. San Bartolomeoren gaua: Frantzia eta Nafarroa Beherean 50.000 hugonote protestante hil zituzten. Katalina Medicik Joana Nafarroakoa hil omen zuen.</p>
<p><b>1566</b> Filipe II.ak moriskoei arabieraz mintzatzea eta jantzi musulmanak jantzea debekatu zien. Joan Beriain, euskaldun idazle nafarra, Utergan jaio zen. Nostradamus hil zen.</p>	<p><b>1573</b> Veneziak turkoekin bakea egin, eta Espainiaren etsai bihurtu zen. Francis Drakek pirateriaren harrapakinik handiena eskuratu zuen: Espainiara zihoan Potosiko zilar-kargamentu bat.</p>
<p><b>1569</b> Ameriketako ekilore-haziak Espainiara ailegatu ziren. Lehen mapamundia argitaratu zen. Gaztelaniatzko lehen Biblia argitaratu zen.</p>	<p><b>1574</b> Tycho Brahek Kopenhageko Unibertsitatean <i>De disciplinis mathematicis</i> hitzaldia egin zuen, astrologiaren apologia bat. Vasarik Florentziako Uffizitarren jauregia bukatu zuen. Nicolás Morandes sevillarrak Ameriketako tabakoa medikuntzan erabiltzea defendatu zuen.</p>
<p><b>1570</b> <i>Pio V.a aita santuaren sukaldaritza-sekretuak</i> liburuan agertu zen lehen aldiz sardexkaren irudi bat. Aita Santuak Elisabete I.a Ingalaterrakoa Eliza katolikotik kanporatu zuen. Ivan "Beldurgarria"k bere ministro eta kontseilariak hilarazi zituen Moskun. Joan Austriakok Granadako moriskoen matxinada zanpatu zuen.</p>	<p><b>1575</b> Sakanan Inkisizioak sorginen kontrako prozesua hasi zuen. El Greco Espainiara ailegatu zuen.</p>
<p><b>1571</b> Johannes Kepler jaio zen. Inkisizioaren epaimahaia Mexikon ere finkatu zen. Lepanton Joan Austriakoaren tropek irabazi zuten. Iruñeko ziudadela eraikitzen hasi zen.</p>	<p><b>1576</b> Tycho Brahe Uraniborg eraikitzen hasi zen. Henrike IV.a Frantziakoa eta III.a Nafarroakoa katolizismotik abjuruatu zuen. Tiziano hil zen Venezian.</p>
	<p><b>1577</b> Brahek kometak Ilargitik harantzago daudela esan zuen.</p>

- Teresa Avilakoak *Las Moradas* idatzi zuen.  
 Petrus Paulus Rubens jaio zen.
- 1578** Espainian modan jarri zen egindako txokolatea hartzea.  
 Erromako katakonbak aurkitu ziren.
- 1580** Filipe II.a Espainiakoa Portugalgo errege aldarrikatu zuten.  
 Italian tea sartu zen.  
 Francisco de Quevedo y Lucientes jaio zen.  
 Juan de Garayk Buenos Aires fundatu zuen.
- 1581** Galileok Pisako katedralean penduluaren higiduraren erregulartasuna aurkitu zuen.  
 Lehen gizaki beltzak ailegatu ziren Ameriketara, Filipe II.ak Floridara bidalita.  
 Espainiak Portugal menderatu zuen.  
 Liburu aleman batean lehen patata-errezeta argitaratu zuen.
- 1582** Gregoriotar egutegia indarrean jarri zen.  
 Espainiaren ordenantza Espainia Berria (Mexiko): “emakume mestizoak, mulatoak edo beltzak ez daitezela indiar janzkeraz ibili; bestela, preso hartu eta karrikan 100 zigorrada jasoko dituzte.”  
 Toyotimik japoniar artxipelagoa batu zuen.
- 1583** Nafarroan argitaratu zen Nafarroa Behereko biztanleak kanpotartzat hartu behar zirela.  
 Filipe II.ak Academia Real Matemática fundatu zuen.  
 Ternuan lehen kolonia ingelesa kokatu zuen.  
 Andrea Cesalpino lehen botanika-liburua argitaratu zuen: *De plantis*.
- 1584** “Virginia” kolonia ingelesak Elisabete I.a erreginarenean izenetik (Erregina Birjina) hartu zuen izena.  
 Praketan lehen poltsikoak agertu ziren.
- 1585** Alejandro Farnesiok Anberes konkistatu zuen.  
 Simon Stevinek argitaratu zuen *De Thiende* liburuan hamartarren eragiketak azaldu zituen.
- 1586** Baxenabartarrek protesta egin zuten Nafarroan kanpotartzat hartuak izateagatik.  
 El Grecok *Orgazko kondearen ehorzketa* margotu zuen.  
 Erromako Done Petri plazan obeliskoa jarri zen.  
 Ingalaterran komuneko zisterna erabili zen lehen aldiz.  
 Marcello Donatik ultzera gastrikoa deskribatu zuen.  
 Patatak Ingalaterrara ailegatu ziren.
- 1588** Armada Garaiezinaren porrota.  
 Iruñeak 10.000 biztanle zituen.
- 1589** Galileok gorputz astunen erorketa ikertu zuen.  
 William Leek lehen josteko makina asmatu zuen.  
 Henrike III.a Frantziakoa eta Katalina Medici hil ziren.
- 1590** Zacharias Janssenek lehen mikroskopia asmatu zuen.  
 Erromako Done Petriren kupula bukatu zen.  
 Sanferminak urriaren 10etik uztailearen 7ra pasatu ziren, soroetako lanengatik eta eguraldiarengatik.
- 1591** Iruñean lehen zezen-entzierroak egin ziren.  
 Juan de la Cruz mistikoa hil zen.
- 1592** Galileo Paduako Unibertsitatean matematika eta astronomia irakatsi zuen, eta ur-termometroa asmatu zuen.  
 Domenico Fontanak Pompeiako eta Herkulanoko hondakinak aurkitu zituen.
- 1593** El Escorial monasterioaren eraikuntza bukatu zen.  
 Cancer nebulosaren ondoan Jupiter eta Saturnoren artean konjuntzio bat gertatzearekin batera, izurriteak Europa birrindu zuen.
- 1594** Shakespearek *Romeo eta Julieta* idatzi zuen.
- 1595** Filipe Neri mistikoa hil zen.  
 Zapatetan takoiak lehen aldiz erabili ziren.  
 Trigonometria hitza lehen aldiz erabili zen.
- 1596** Keplerrek *Mysterium cosmographicum* argitaratu zuen.  
 René Descartes jaio zen Hagan.  
 Ludolf Van Ceulenek  $\pi$ -ren hogeitaz dezimal lortu zituen.
- 1597** Andreas Libaviusek *Alchemia* lehen kimika liburua idatzi zuen.  
 Francis Baconek *Saiakerak* idatzi zuen.  
 Paul Henter medikuak aurkitu zuen Elisabete I.a erreginak hortzak beltz zeuzkala azukre asko jateagatik.
- 1598** Filipe II.a hil zen.  
 Gian Lorenzo Bernini jaio zen Napolesen.  
 Francisco de Zurbarán jaio zen.  
 Henrike IV.a Frantziakoa eta III.a Nafarroakoak, lehen borboiak, “Nantesko Ediktua”ren bidez erlijio-askatasuna onartu zuen.  
 Giordano Bruno munduen aniztasunaz, espazioaren infinitutasunaz, Lurrean higidurez eta atomoen idatzi eta mintzatu zen.
- 1599** Tycho Brahe Pragara bildu zen, Kepler laguntzaile izanda.  
 Diego de Silva y Velázquez jaio zen Sevillan.  
 Anton Van Dyck jaio zen Anberesen.  
 Iruñean izurriteak 276 jende hil zituen. Miguel de Donamaria zinegotziak udalbatza urtero San Lorentzo elizara joatea agindu zuen (“bost zaurien botoa”).
- 1600** Galileoren eta Maria Gambaren lehen alaba, Virginia Galilei, sor Maria Celeste, jaio zen.  
 Giordano Bruno bizirik erre zuten.

- Espainiako eta Portugalgo biztanleria 10 milioikoa zen. Italiakoa 13 milioikoa.  
William Gilbertek *De Magnete* idatzi zuen.  
Juan Palafox Mendoza, Espainia Berriko hemezortzigarren erregeordea, jaio zen Fiteron.  
Pedro Calderón de la Barca jaio zen Madrilén.  
British Royal Society fundatu zen.  
Venezian *Euridice* opera estreinatzen zen, Henrike IV.a Frantziakoa eta III.a Nafarroakoaren eta Maria Mediciren ezkontza ospatzeko.
- 1601** Galileoren bigarren alaba, Livia, jaio zen.  
Tycho Brahe hil zen.  
Kepler astronomo eta astrologo inperial bilakatu zen.  
Caravaggiok *San Pauloren konbertsioa* margotu zuen.  
Erroman Elizak liburu hebrearrak erre zituen.
- 1602** Ameriketara garia, garagarra eta oloa sartu ziren.  
Shakespearek *Ongi dago ongi bukatzen dena* argitaratu zuen
- 1603** Castel Gandolfo etxe bat eraiki zen aita santuarendako.  
Shakespearek *Hamlet* idatzi zuen.
- 1604** Ophiuchus konstelazioan "Keplerren nova" agertu zen.  
Parisen Pont Neuf zubia eraikitzen hasi zen.  
Fabriciusek *De formata foetu* enbriologia-liburua idatzi zuen.
- 1605** Anberesen munduko lehen egunkaria agertu zen.  
Espainia Berriko populazioa 1518ko 11 milioietatik milioi batera jaitsi zen.
- 1606** Rembrandt jaio zen Leidenen.  
Shakespearek *Lear Erregea* eta *Macbeth* argitaratu zituen.  
Lehen opera aire librean Erroman.
- 1607** Halley kometa azken aldiz ikusi zen izen hori izan gabe.  
Jesuitek Paraguayko gobernuaren lortu zuten.
- 1608** Indiara lehen ontzi ingelesa, "*Hector*", ailegatu zen.  
Francisco de Salesek *Deboziozko bizitarako sarrera* idatzi zuen.  
Claudio Monteverdik *Ariannaren aienea* opera idatzi zuen.
- 1609** Galileok Veneziako Dogori bere teleskopioa aurkeztu, eta zerua ikertzen hasi zen.  
Keplerren *Astronomia Nova* argitaratu zen.  
Filipe III.ak Holandaren independentzia onartu zuen, eta moriskoak Espainiatik egotzi zituen.  
Henry Hudson bere izena duen ibaiaren gora bidaiatu zuen.
- 1610** Galileok *Sidereus Nuncius* argitaratu zuen.  
Lope de Vega *Peribáñez* idatzi zuen.  
Claudio Monteverdik *Vespro della Beata Virgine* aurkeztu zuen.  
Zugarramurdirin sorginak bizirik erre zituzten.
- 1611** Erromako kardinalekin batera, Galileok Eguzkiko orbanei behatu ziren.  
Rubensek *Jaitsiera Gurutzetik* margotu zuen.  
Shakespearek *Ekaitza* idatzi zuen.
- 1612** Rudolf II.a Germaniar Erromatar Inperio Santuko enperadorea hil zen Pragan.  
Simon Mayrek Andromeda nebulosa aurkitu zuen.
- 1613** Veneziako "Suspirioen Zubia" bukatu zuten.  
Jerónimo Ayanz Behaumont nafarra, lehen itsaspekoaren asmatzailea, hil zen.  
Monteverdi Veneziako San Marko basilikako zuzendari izendatu zuten.
- 1614** John Napier (Neper) eskoziarrak *Mirifici logarithmorum canonicis descriptio* liburua argitaratu eta logaritmoak sortu zituen.  
El Greco hil zen Toledon.
- 1615** Cervantesek *On Kixoteren* lehen zatia bukatu zuen.  
Kautxua Europara ailegatu zen Hego Amerikatik.  
Txokolata Italiara ailegatu zen.
- 1616** Vatikanok Kopernikoren teoria heretikoa deklaratu, eta Galileo teoria hori ez defendatzera behartu zuen.  
Cervantes eta Shakespeare hil ziren.  
Harvey odolaren zirkulazioaz mintzatu zen.
- 1617** Madrilek 107.000 biztanle zituen.
- 1618** 30 Urteetako Gerra hasi zen.  
Velázquezek *Atsoa arrautzak frijitzen* margotu zuen.
- 1619** Descartesek filosofia absolutua eta denendako baliagarria sortzea erabaki zuen.
- 1620** Francis Baconek *Novum Organum* idatzi zuen.  
"Myflower"eko kolonoak Ipar Amerikan kokatu ziren.  
Velázquezek *Sevillako urketaria* margotu zuen.
- 1621** Nafarroan Aragoiko ardoak inportatzeko debekua gogortu zen.  
Alemanian patatak lehen aldiz landatu ziren.
- 1622** Frantzisko Xabier, Ignazio Loiolakoa, Teresa Avilakoa eta Isidro Nekazarria kanonizatu zituzten.  
Snelek optika paraxiala deskribatu zuen.  
Oughtredrek kalkulu-erregela asmatu zuen.  
Moliere jaio zen Parisen.
- 1623** Galileok *Il Saggiatore* argitaratu zuen.  
Velázquez Filipe IV.aren gorteko pintore izendatu zuten.

<p><b>1624</b> Richelieu kardinala Frantziako lehen ministroa zen. Louvreko jauregia bukatu zuten. Urbano VIII.a aita santuak tabako-hautsa hartzen zutenak eskumikatzearekin mehatxatu zituen. Nafarroako Gorteek ardatze berriak landatzea debekatu zuten. Van Helmont flandriarrak lurrunak ikertu eta "gas" hitza asmatu zuen (kaos hitzaren ahoskera nederlandaraz).</p> <p><b>1625</b> Alemaniako meategietan bolbora lehen aldiz erabili zen. Sartorio italiarrak, gorputzaren temperatura neurtzeko, termometroa erabili zuen lehen aldiz.</p> <p><b>1626</b> Quevedok <i>El Buscón</i> idatzi zuen. Francis Bacon hil zen Londresen. Holandak Manhattan uhartera 24 dolarrean erosi zien indiarrei. Parisen "Jardin des Plantes" eraiki zen. Ingalaterran patente-eskubideak ezarri ziren.</p> <p><b>1627</b> Keplerrek <i>Tabulae Rudolphinae</i> argitaratu zuen, logaritmoak erabiliz, Tycho Braheren behaketa guztiekin. Polonian azken "uroa" hil zen, gaurko behien aitzindaria.</p> <p><b>1628</b> William Harveyk <i>De Motu Cordis et Sanguinis</i> argitaratu zuen. Nafarroako erregeak jurisdikzioak, jauregi-titulak eta Gorteetako jarlekuak saldu zituen. Filipe IV.aren gortean Velázquez eta Rubens batera gertatu ziren.</p> <p><b>1629</b> Urbano VIII.a aita santuak Berniniri Done Petri basilika eta plaza bukatzeko ardura eman zion. Mexiko Hiriko uholdeetan 30.000 indiar hil ziren.</p> <p><b>1630</b> Izurrite bubonikoak Venezia jo zuen, eta 500.000 jende hil ziren. Vesubioren erupzioak 300 jende hil eta bost hiri estali zituen. Taj Mahal eraikitzen hasi zen. Kepler hil zen.</p> <p><b>1632</b> Galileok <i>Munduaren bi sistema nagusien elkarrizketak</i> argitaratu zuen. Rubensek <i>Amodioaren Lorategia</i> margotu zuen. Rotterdamek, munduko porturik handienak, 20.000 biztanle zituen. Spinoza eta Locke jaio ziren.</p>	<p><b>1633</b> Galileoren abjurazioa. Haren alaba zaharrena, Virginia, Arcetriko San Mateo komentuan sartu zen, "sor Maria Celeste" izena hartuta, bere aita ondartzeko.</p> <p><b>1634</b> Arcetrin sor Maria Celeste hil zen. Velázquezek <i>Bredaren errenditza</i> margotu zuen. Keplerren <i>Somnium</i> liburua argitaratu zuen.</p> <p><b>1635</b> Madrilen Felix Lope de Vega y Carpio hil zen. Hellibrandek polo magnetikoa deskribatu zuen.</p> <p><b>1636</b> Mersennek soinuaren abiadura neurtu zuen. Olivaresko konde-dukea Frantzian sartu eta 23 urte iraunen zuen gerra hasi zen. Holandarrek Manhattanen Harlem hiria fundatu zuten. Harvard Unibertsitatea sortu zuen.</p> <p><b>1637</b> Galileo itsutu egin zen. Descartsek <i>Metodoari buruzko diskurtsoa</i> argitaratu zuen. Fermatek bere teorema adierazi zuen.</p> <p><b>1638</b> Galileok <i>Discorsi</i> argitaratu zuen. Velázquezek <i>Kristo gurutzean</i> margotu zuen. Rubensek <i>Hiru Graziak</i> margotu zuen.</p> <p><b>1639</b> Filipe IV.ak Madrillgo "Parque del Retiro" bukatu zuen. Kininaren sendagai gisa erabil zitekeela aurkitu zen European.</p> <p><b>1640</b> Portugalek independentzia berreskuratu zuen. Koke ikatza aurkitu zen. Katalunian segalariak altxatu ziren.</p> <p><b>1641</b> Vincenzo Galileik bere aitaren pendulu-erlojuaren prototipoa diseinatu zuen. Errusian tabakoa debekatu zen. Atanasius Kircher jesuitak <i>Magnes, sive de arte magnetica opus tripartitum</i> argitaratu zuen.</p> <p><b>1642</b> Galileo hil zen Arcetrin. Isaac Newton jaio zen Lincolnshiren. Axularrek, Sarako erretoreak, <i>Gueroco guero, edo arimaren eguitecoen gueroco uzteak cenbat calle eta çorigaitz dakharquen</i> argitaratu zuen Baionan. Nafarroari tabakoaren Estanco General delakoa eta artile-zakuaren zerga onartu zitzaizkion. Calderónek <i>Zalameako alkatea</i> idatzi zuen. Pascalek batuketak egiteko makina asmatu zuen.</p>
--	--

### III.

NEWTON,  
ETA ILARGIA ERORI ZEN





Isaac Newton (Ingalaterra, 1642-1727) nolakoa zen azaltzea ez da inola ere simplea: sekulakoa, jeniala, desorekatua, misoginoa, argikuslea, gupidagabea, bakartia. Polemikoa bezain bihotz-gogorra, famatua bezain gorrotatua. Haurtzaro latza pasatu zuen, Cambridgeko Trinity Collegen lehenbizi ikasle eta ondoren irakasle izan zen, Royal Societyko lehendakaria, bere unibertsitatearen ordezkaria Parlamentuan, Diruetxeko zuzendaria (zenbait faltsutzailereri heriotza-zigorra ezarri zien), alkimista, erlijioarekin obsesionatua eta abar.

Isaac Barrow maisuaren irakaspenak oinarrizkoak izan ziren Newtonen trebakuntza geometrikorako. Eta geometria funtsezkoa izan zen hala kalkulu diferentzialaren eta integralaren garapenean, nola *Philosophiae naturalis principia mathematicae* liburuan. Bestalde, Elizaren historia, israeldarren erregeen kronologia, unitarismoaren heterodoxia kristaua, Danielen profeziak, San Joanen Apokalipsia eta horrelakoak ere beraren grinak izan ziren. Izan ere, metafisika newtondarrak Ilustrazioa argitu zuen, baina, bere zaletasunei erreparatuta, Newtonek babiloniar aztien antza izan zuen, lehen zientzialaria baino gehiago barrokoak azken magoa izan baitzen.

1665ean, Trinity Collegeko ikasturtea hastear zegoela, Ingalaterran izurrite bubonikoa zabaltzen hasi zen, eta 1667ra arte iraun zuen (Londreseko populazioaren % 10 hil zen). Newtonek Cambridge utzi eta jaioterriko landetako lasaitasunean (Woolsthorpe-n) gauzatu zituen bere aurkikuntzen ildo nagusiak, eta 25 urte bete baino lehen kalkulu infinitesimala, grabitazio unibertsalaren printzipioak eta argi zuriaren izaera konposatua aurkitu zituen. Beraren hitzetan, mirariz beteriko urteak izan ziren haiek: “1665aren hasieran segidak hurbiltzeko metodoa eta binomio baten berretzailea segidetara laburtzeko legea aurkitu nituen (binomioaren teorema). Urte bereko maiatzean Gregory eta Sulziusen ukitzaileren metodoa aurkitu nuen, eta azaroan fluxoien zuzeneko metodoak (kalkulu diferentzialaren elementuak). Hurrengo urteko urtarrilean koloreen teoria garatu nuen, eta maiatzean fluxoien atzerako metodoa (kalkulu integrala). Urte berean grabitateaz pentsatzen hasi nintzen, Ilargiaren ibilbidea buruan nuela ... eta Ilargiari bere orbitan eusteko behar den indarra Lurraren azaleko grabitazio-indarrarekin alderatu nuen ... Hori guztia 1665ean eta 1666an izan zen, asmaketetarako urte haiek nire bizitzako onenak izan baitziren. Urte haietan adina matematikaz eta filosofiaz ez naiz geroztik arduratu”. Newtonen “*annus mirabilis*” izan ziren, Einsteinendako 1905a izan zen bezala. Dena dela, *Principia* 40 urte beteta idatzi zuen (1687an) eta bertan bere jenialtasun osoa erakutsi zuen.

Newtonek unibertso osoa menderatzen duen legea aurkitu zuen ia bere etxetik atera gabe (Greenwicheko Behatokiko datuak jasotzen zituen), Kopernikoren, Galileoren eta Keplerren teoriak eta behaketak kontuan hartuta, eta matematika erabiliz. Jenioa honela mintzatu zen: *“Ez dakit munduak nola ikusten nauen, baina nire ikuspegitik hondartzan jolasean ibili den mutiko bat bezala ikusten dut neure burua, lehenbizi harri edo maskor bitxiren bat aurkitu, eta gero beste baten bila segituz, egiaren ozeano handia eta ezezaguna nire aurrean nuela”*.

### 3.1. Kalkulua

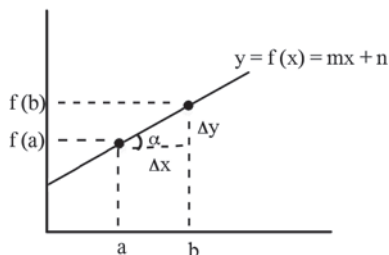
Grezia klasikoko egoera sozial estatikoak garai haietako matematika karakterizatu zuen. Eta bitarte latza pasatu ondoren, XVI. mendetik aurrera sorketa eta ikerketa matematikoaren garapena azkartzen joan zen:

- Recorde (1510-1558): “+, - eta =” ikurrak proposatu zituen.
- Napier (1550-1617): logaritmoak asmatu zituen, “nepertar” hitza haren ohorez asmatu zen.
- René Descartes (1596-1650): kurbak ikertu zituen, eta kurbaren koordena-tuak ekuazio matematikoen emaitzak zirela frogatu zuen. Geometria analitikoaren sortzailea izan zen. Haren oroimenez, koordenatu “kartesiar” izena erabiltzen da.
- Fermat (1601-1665): maximoak eta minimoak definitu zituen zuzen ukitzaille horizontaleko puntu gisa. Deribatuen aitzindaria kontsideratzen da, eta optikan argiaren ibilbidea denbora minimokoa zela adierazi zuen.

Leibnizek (alemana, 1646-1716) eta Newtonek aurreko lanak osatu ondoren, kalkulu diferentziala eta integrala garatu zuten: Leibnizek, ariketa matematikoen ebazpenen bilaketa berezi moduan; Newtonek, fisikako zenbait arazo ebazteko. Ekarpen newtondarraren ondorioz, luzerak, azalerak, bolumenak eta abar magnitude fisikoen balioen irudikapen bihurtu ziren; hala, mekanikaren eta geometriaren arteko erlazioak finkatu ziren.

Kalkuluaren funtsak limiteak, deribatuak eta integralak dira, eta lehenagoko matematikaren posibilitateak gaingitu zituen. Alde batetik, ordura arte ebatzi ezin ziren eragiketak kalkuluarekin errazak direlako; bestetik, kalkuluak matematikari ikuspuntu desberdina eman ziolako, etengabeko aldaketa adieraztea lehendabiziko aldiz posiblea izan zelako.

Kalkuluaren oinarria den deribatuaren kontzeptua erraztasun handiz sortu zuen Newtonek. Zuzen baten malda aspalditik kalkulatu zen lerro zuzeneko bi puntu hartu eta haren koordena-tuak erabiliz:



$$m = \frac{f(b) - f(a)}{b - a} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \text{tg } \alpha$$

Zuzen osoan malda konstantea da, eta horregatik “b” puntua hartu beharrean beste edozein puntu, “x”, hartuta ere, maldaren balio bera ateratzen da:

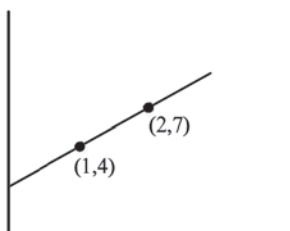
$$m = \frac{f(x) - f(a)}{x - a}$$

Beraz, malda bi punturekin kalkula daiteke, eta, malda jakinda, zuzenaren ekuazioa hau da:

$$y = f(x) \text{ baldin bada,}$$

$$y - f(a) = m(x - a)$$

Adibidez, eman dezagun (1,4) eta (2,7) puntuetatik zuzen bat pasatzen dela:



Bi puntuen koordinatuak jakinda (b= 2, a= 1, f(b)= 7, f(a)= 4), maldaren balioa hau da:

$$m = \frac{f(b) - f(a)}{b - a} = \frac{7 - 4}{2 - 1} = 3$$

Eta malda horrek zuzen osorako balio duenez, zuzenaren ekuazioa atera dezakegu:

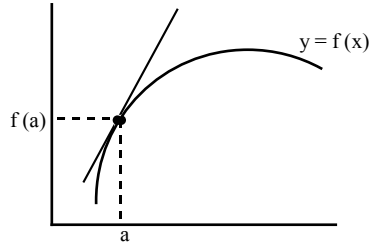
$$y - f(a) = m(x - a)$$

$$y - 4 = 3(x - 1)$$

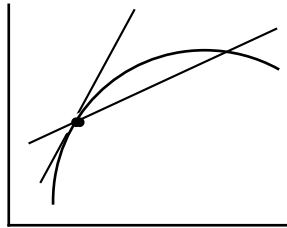
$$y = 3x + 1$$

Malda angeluaren ukitzaillea da, eta zuzen batean angelu bakar bat, ukitzaille bakar bat eta malda bakar bat dauzkagu. Horregatik zuzen baten malda konstanteak egoera estati-koa adierazten du.

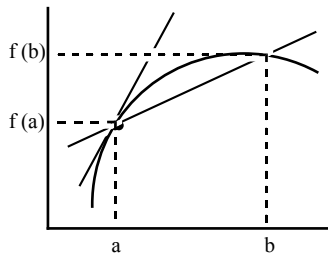
Kurba batean, ordea, infinitu ukitzaille daude; ukitzailleak aldakorrek dira, angeluak ere bai, eta egoera dinamikoagoa adierazten dute. Ordurako kurben ekuazioak ezagutzen ziren, baina puntu batean kurbaren ukitzaila kalkulatzeko, puntu hori besterik ez zegoen ( $a, f(a)$ ):



Puntu bakar bat ezagututa, malda ezin zen kalkulatu, eta ukitzaillearen ekuazioa ere ez. Arazo horri ekiteko, Newtonek ebakitzaille bat marraztu zuen:

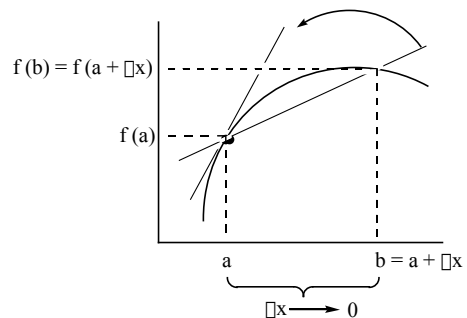


Ebakitzaille horren ekuazioa lortzeko oztoporik ez zegoen, zuzen horren bi puntu ezagutzen zirelako (kurbarenak ere bazirenak):



$$m = \frac{f(b) - f(a)}{b - a}$$

Ebakitzaila ukitzaillearekin bat egin arte jiratuko balitz, “ $ab$ ” tartea edo “ $\Delta x$ ”k zerora joko lukete:



Beraz,  $\Delta x = 0$  balitz, ukitzaillearen malda eta ekuazioa lortuko lirateke. Ebakitzaillea jiratzearrenak ikuspuntu dinamikoa ekarri zuen,  $\Delta x$  limitean zero izateak deribatuekin zerikusi handia dauka, eta deribatua ikuspuntu dinamikoaren mamia da.

Prozedura matematikoaren xehetasunak gaurko hizkerara itzulita, ukitzaillearen maldaren kalkulua honela egin zuen Newtonek. Lehendabiziko puntuaren absziszen balioa (a) eta bigarren puntuarena (b) erlazionaturik daude:

$$\Delta x = b - a$$

$$b = a + \Delta x$$

Absziszen arteko erlazioa finkatuta, ordenatuen balioak honela gelditzen dira:

$$f(b) = f(a + \Delta x)$$

Eta ukitzaillearen malda hau izanen litzateke:

$$m = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(a + \Delta x) - f(a)}{\Delta x}$$

Ekuazio hori edozein “a”tarako ( $a = x$ ) eta edozein “b”tarako ( $b = x + \Delta x$ ) orokortzen badugu, deribatuen nozioaren definizioa lortzen da:

$$m = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}$$

Kurba bat deskribatzen duen funtzioa jakinik eta malda horrela kalkulatu, kurbako puntu bateko ukitzaillearen malda eta ekuazioa lortzen dira. Adibidez eman dezagun parabola bat daukagula:  $y = x^2$ . Parabola hori infinitu puntutatik pasatuko da, baina aukera dezagun haietako bat ( $x_0$ ). Puntu horretan parabolaren ukitzaillea den zuzenaren malda hau izanen da:

$$f(x) = x^2$$

$$\begin{aligned} m &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{(x_0 + \Delta x)^2 - x_0^2}{\Delta x} = \\ &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{x_0^2 + \Delta x^2 + 2x_0\Delta x - x_0^2}{\Delta x} = \\ &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta x^2 + 2x_0\Delta x}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} (\Delta x + 2x_0) \end{aligned}$$

Eta  $\Delta x$  horrek zerora jotzen badu, maldaren balioa edo funtzioaren deribatuaren balioa hau da:

$$m = 2x_0$$

Puntu bakar bat jakinik, (3,9) adibidez, malda hau da:

$$m = 2 \cdot 3 = 6$$

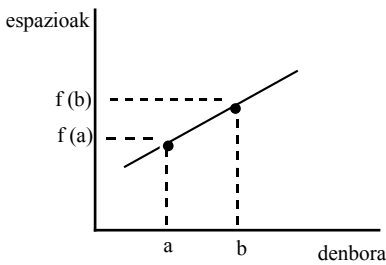
Eta ukitzailearen ekuazioa honela gelditzen da:

$$y - f(a) = m(x - a)$$

$$y - 9 = 6(x - 3)$$

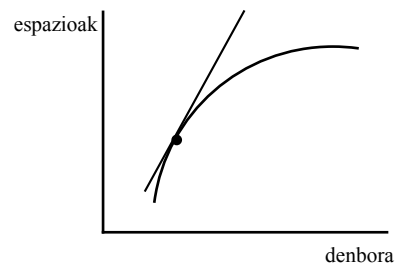
$$y = 6x - 9$$

“Fluxoien metodoan” (*Opticks*, 1736) kurben ukitzaileen arazoa Newtonek bederatzir modutan ebatzi zuen, batzuetan koordinatu bipolar eta polarrez baliatuta. Metodo horren helburua higiduren ikerketa zen, zuzen baten maldaren kalkulua eta higikari baten batez besteko abiadurarena oinarrian gauza bera zirelako, eta deribatuen kalkulua eta aldiuneko abiadurarena ere bai, batez besteko abiadura denbora-tarte batean ( $\Delta t = t_b - t_a$ ) gertaturiko espazioaren aldaketa delako ( $e_b - e_a$ ), eta uneko abiadura denbora-tarte infinitesimalki txikian ( $\Delta t \rightarrow 0$ ) gertaturiko espazioaren aldaketa delako:



$$\text{malda} = \frac{f(b) - f(a)}{b - a}$$

$$v_{\text{batazbestea}} = \frac{e_b - e_a}{t_b - t_a}$$



$$\text{malda} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x}$$

$$v_{\text{aldiunekoa}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{e_{t + \Delta t} - e_t}{\Delta t}$$

Beraz, deribatuek aldiuneko aldaketak irudikatzeko eta kalkulatzeko ahalmena dute, deribatuek aldaketaren erritmoa deskribatzen dute, hazkunde-tasa adierazten dute, eta integralak infinitu infinitesimalen batuketak dira (edo antideribazioaren eragiketak). Unibertsoa oso aldakorra denez, kalkulua ezinbestekoa da errealitatea ezagutzeko, eta Newton izan zen matematikari planteamendu berri hori eman ziona.

Hurrengo mendeetan matematikari handiak izan ziren kalkulu diferentziala garatu zutenak: Euler (1707-1783, zenbaki berezi batzuen idazkera ere  $-e, \pi, i$ - berarena da, eta haiek guztiak erlazionatzen dituen ekuazioa ere bai:  $e^{i\pi} + 1 = 0$ ), D’Alembert (1717-

1783), Lagrange (1736-1813), Gauss (1777-1855), Cauchy (1789-1857), Weierstrass (1815-1897), Riemann (1826-1866), Darboux (1842-1917) eta abar.

Gaur egun kalkulu integralaren eta diferentzialaren aplikazioak arlo guztietara hedatuta daude: funtzioen ikerketa sakonak (maximoak, minimoak, inflexio-puntuak, puntu kritikoak, ukitzailak), zinematikan (aldiuneko abiadurak, azelerazioak), dinamikan (indarrak, energiak, momentuak, eremuak), geometrian, estatistikan, kimikan, biologian, topografian, elektronikan, informatikan, ingeniartzan, soziologian, psikologian, ekonomian, politikan eta abarretan. Azken batean, fenomeno guztiak aldakorak dira, horregatik haien trataera kuantitatiboak ikuspuntu dinamikoa behar du, eta kalkulu diferentziala aplikatu behar da.

### 3.2. Zerutar higidurak eta grabitatea

Aristotelesengandik Newtonenganaino, planeten higiduraren azalpenak aldaketa asko izan zituen. Erdi Aroa gainditu arte zerutar higidurak berezkoak, bakunak eta grabitatearekin inongo erlaziorik gabekoak ziren, astroek pisurik ez zutelako. Lurrean egoera desberdina zelakoan, gorputz astunen erorketan joera bat adierazten zen, naturala eta bakuna ere bai.

Koperniko ere higidura natural zirkularretan murgildu zen bere eredu eraikitze-ko, eta Lurrari ere beste planetena bezalako joera eman zion Eguzkiaren inguruan ibiltzeko. Grabitatea gorputzen barneko ganua zen, itxura biribila hartzekoa hain zuzen, lurtar gorputzak Lurrarekin elkartzera bultzatzen zituen. Grabitatea unibertso osora zabaldu zuen, baina astro bakoitzari loturik, eguzkitar gorputzak Eguzkira edo ilargitarrak Ilargira erorarazten zituen, eta berriz ere zeruko higiduren kontutik aparte.

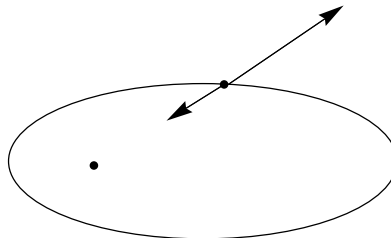
Galileoren higidura zirkular inertzialak Lurrean bakarrik eragiten zuen, azalpen kopernikarra beste planetetarako gordeta. Lurraren errotazioan indar zentrifugoak agertzen zirela onartu zuen, baina grabitatearen aldean txikiak ziren gure planetaren zurruntasuna arriskuan jartzeko.

Keplerren kasuan ere, planeten orbitak eta grabitatea bereizita erakutsi ziren. Eguzkiak planetak bultzatzen zituen haien inertzia gaindituz, eta grabitatea erakarren magnetikoa zen, Lurrean eragiten zuena baina Ilargitik harantzago ez (mareak Ilargiaren erakarpenearekin azaldu zituen).

Zurrumbiloz eta talkaz aseriko mundu kartesiarrean gorputz astunen erorketak, eta planeten Eguzkiaren inguruko desplazamenduak lehenbiziko aldiz azalpen bera merezi izan zuten. Bere inertzia zuzena gaindituz, astroak orbita itxietan mantentzen ziren eterraren presioarengatik, eta erorketak presio berarengatik gertatzen ziren, baina bakarrik Lurrean. Descartes arabera, beraz, grabitatearen jatorria ez zegoen gorputzen berezko joeran, eta hutsean (ezinezko egoera, haren ustez) gorputz astunak arin bihurtuko liriateke.

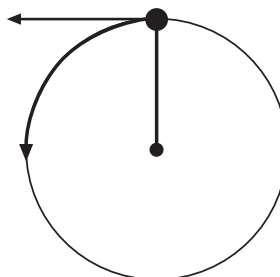
XVII. mendean jaió ziren zientzia-elkarteek pentsamendu korrante berriak sortu eta, batez ere, hedatu zituzten. Borelli *Accademia del Cimenton*, Huygens *Académie Royale des Sciencesen* eta Hooke *Royal Societyn* planeten arazoan inguruan ikuspuntu inertzial karte-siarra sartzen ausartu ziren, eta haien ekarpenen garapenean grabitatea eta izaera desberdineko indarrak uztartu zituzten.

Giovanni Alfonso Borelli (italiarra, 1608-1679) sinetsita zegoen bestelako eraginik gabe astroek higidura zuzenari ekingo ziotela. Baina haien orbita-ibilbideetan zehar nolabaiteko joera zentrifugoa (inpetusa) jasaten zuten, eta grabitate kopernikarra kontrajarrita zegoen. Orbita eliptikoak azaltzeko, grabitate konstanteak eta inpetus aldakorrak eragiten zutela jo zuen:



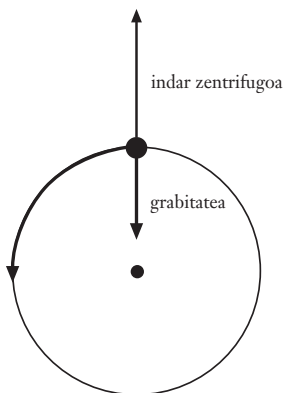
Baina azalpen horri ez zion hedapen unibertsala eman, eta oreka hori Eguzkiaren eta planeten artean bakarrik, edo planeta baten eta beraren sateliteen artean suertatzen zela proposatu zuen, horrelakorik Eguzkiaren eta sateliteen artean edo planeten artean gertatzen ez zelakoan.

Christiaan Huygensek (Haga, 1629-1695) indar zentrifugoaren matematizazioa lortu zuen penduluen higidura aztertzean. Inertzia zuzenaren arabera, gorputz batek ibilbide kurbatua abandonatzean higidura zuzen *uniformea* izanen zuela adierazi zuen, eta puntu bakoitzean gorputzaren joera zirkunferentziarekiko ukiztailea den lerro zuzenean ihes egitekoa zen:



Baina higidura zirkularra mantentzen zen bitartean kontrajarritako bi “conatus” zehar dela proposatu zuen: distantziaren menpeko conatus zentrifugoa eta modu kartesiarrean ulerturiko grabitate konstantea. Bi elementu dinamiko horien konbinazioak garrantzitsuak izanen ziren astroen arteko eraginak aztertzeko.





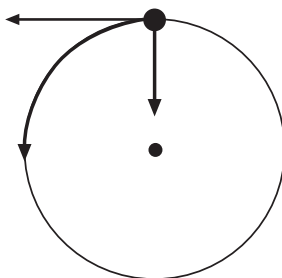
Planteamendu geometrikoen bidez eta norabide erradialeko azelerazioa erabiliz, Huygensek indar zentrifugoaren proportzionaltasunak masarekiko (masaren kontzepturik gabe, Huygensek pisua erabili zuen), abiadura linealarekiko eta angeluarrarekiko finkatu zituen:

$$F = m \frac{v^2}{r} = m r \omega^2$$

F: indarra    m: masa    r: kurbadura-erradioa

v: abiadura lineala     $\omega$ : abiadura angeluarra

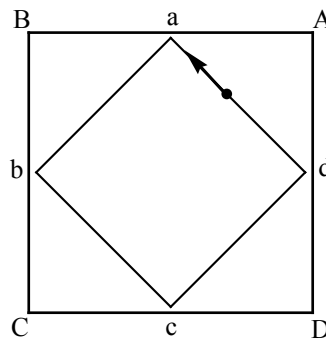
Robert Hooke (Ingalaterra, 1635-1703) Descartesen inertzia zuzenaren printzipioetik abiatu zen Eguzkiaren ezaugarri erakarle batengatik zerutar gorputzen ibilbidea kurbatzen zela proposatzeko. Ezaugarri hura unibertzala zen, eta distantziaren karratuarekin ahultzen zen:



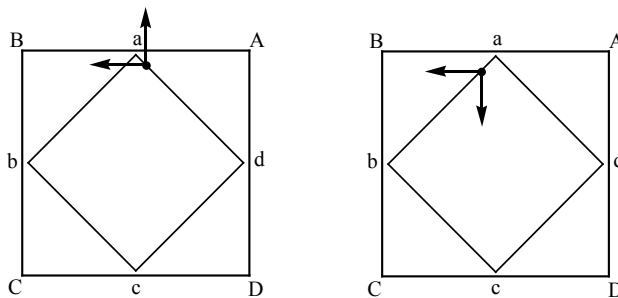
Hookek erakarpen unibertzala zehazteko elementu guztiak eskura izan zituen, baina Keplerrek ezarritako baldintza zinematikoak ezin izan zituen deribatu. Ibilbide kurbatuetatik erakarpen-indar hori kuantitatiboki ez zuen kalkulatu, edo indarraren adierazpenetik hasita orbita eliptikoak ez zituen deduzitu. Newton izan zen helburu hori lortzeko behar zen trebetasun matematikoa erakutsi zuena.

Hookek berak Newtoni idatzi zion planeten orbita-higidurak bitan deskonposatzeko iradokizuna eskainiz: alde batetik, higidura inertzial tangenziala, eta, bestetik, zentro-ranzko higidura, azken hori erdiguneko gorputzaren erakarpen ahalmenak sorturikoa. Newtonek “indar zentripetu” izena asmatu zuen (indar zentrifugoari kontrajartzeko), eta arazoa birplanteatu zuen: distantziaren karratuarekiko alderantziz proportzionala den erakarpen-indar zentral batek eragingo balu, planetek zer ibilbide-mota izanen lukete? Erantzuna *Principian* eskaini zuen.

1665ean eta 1666an Newtonek indar zentrifugo kalkulatu zuen Huygensék bere emaitzak argitaratu baino lehen eta era desberdinean lorturik. Gorputz batek karratu baten kontra (ABCD) elastikoki (Descartesén talken sailkapenaren arabera) jotzen zuela imajinatu zuen, eta horren ondorioz “abcd” ibilbidean mugitzen zela:

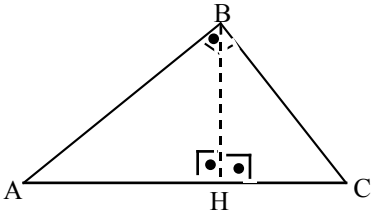


Gorputzak eta karratu handiak lau puntutan (a, b, c eta d) talka egiten zuten. Talka-puntu bakoitzean Newtonek kontsideratu zuen gorputzaren higiduraren osagai bat konstante mantentzen zela (karratu handiaren aldeekiko paraleloa den osagaia: “a” eta “c” puntuetan osagai horizontala, “b” eta “d” puntuetan osagai bertikala). Eta talka-puntu bakoitzean gorputzaren osagai normala noranzkoz aldatzen zela:

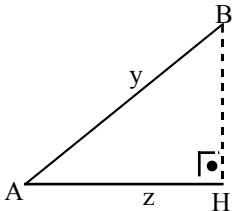
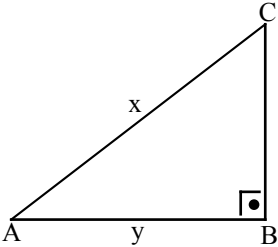


Gorputza norabidez aldarazten zuen indarra (F) karratu handiaren alde bakoitzak neurtzen zuen (karratu hori norabide-aldaketaren kausa baitzen), “AB”, “BC”, “CD” edo “DA”. Bestalde, gorputza bere ibilbidean aurrerantz bultzatzen zuen indarra edo higiduraren indarra ( $F_h = mv$ , Descartesena) karratu txikiaren aldeak neurtzen zuen, “ab”, “bc”, “cd” edo “da” (karratu hori ibilbide erreala baitzen).

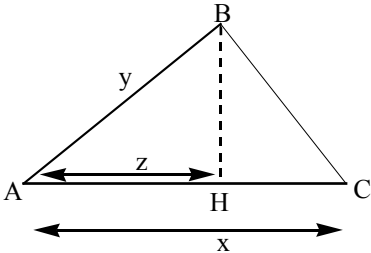
Triangelu zuzenen antzekotasunen arabera, ABC eta AHB triangeluak antzekoak dira:



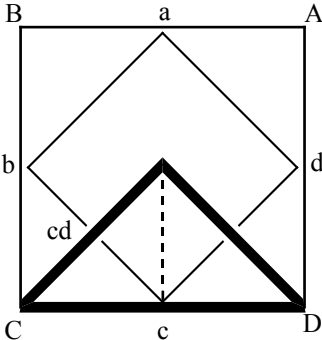
Eta aldeak proportzionalak dira ( $\overline{AC} = x, \overline{AB} = y, \overline{AH} = z$ ):



$$\frac{y}{x} = \frac{z}{y}$$



Talka elastikoen kasurako aplikatuta:



$$\frac{cd}{CD} = \frac{Cc}{cd}$$

Higiduraren indarra ( $F_h$ )  $\overline{cd}$  tarteak neurtzen zuten, eta  $\overline{CD}$  tarteak norabide-aldaketa sortzen zuten indarra (F). Newtonek erlaziook lortu zituen:

$$\frac{F_h}{F} = \frac{Cc}{cd} = \frac{cD}{cd}$$

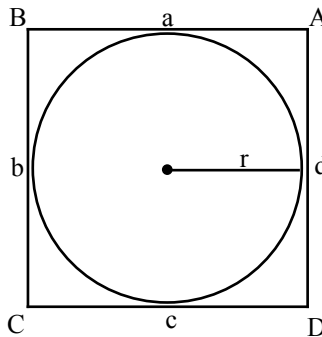
$$\frac{F}{F_h} = \frac{cd}{cD}$$

Zirkuitu osoan lau talka zeudenez, erlazioa honela osatu zuten:

$$\frac{F}{F_h} = 4 \frac{cd}{cD}$$

Horrela, indarren arteko erlazioa geometrizatuta gelditu zen ( $\frac{\text{ibilbide osoaren luzera (4 cd)}}{cD \text{ luzera}}$ ).

Ibilbide karratua kendu eta haren lekuan alde gehiagoko poligonoak jarrita, edo kasu limitean ibilbidea zirkunferentzia bat baldin bazen (ibilbidea =  $2\pi r$ ,  $cD$ = erradioa), erlazio bera mantentzen zen:



$$\frac{F}{F_h} = \frac{F}{mv} = \frac{2\pi r}{r} = 2\pi$$

$$F = m v 2\pi$$

Indarra (F) zirkunferentzia osorako kalkulatu beharrean aldiune bakoitzekoa kalkulatzean (F/t), Huygenssek lorturiko adierazpen bera agertu zitzaion:

$$v = \frac{\text{espazioa}}{\text{denbora}} = \frac{2\pi r}{t}$$

$$2\pi = \frac{vt}{r}$$

$$F = m v \frac{v}{r} = \frac{m v^2}{r}$$

$$\frac{F}{m} = \frac{v^2}{r}$$

Newton saiatu zen adierazpen honen oinarritzko esanahia planetei ere aplikatzen, haien higiduran eragiten zuen indar zentrifugoa eta  $\frac{v^2}{r}$  proportzionalak zirelakoan:

$$F \propto \frac{v^2}{r}$$

Denbora bira baten “periodoa” denean (T), higidura zirkularreko abiadura linealean (v) ibiliriko espazioa zirkunferentzia osoa izanen da ( $2\pi r$ ):

$$v = \frac{\text{espazioa}}{\text{denbora}} = \frac{2\pi r}{T}$$

Adierazpen hori proportzionaltasunean sartuz gero:

$$F \propto \frac{v^2}{r}$$

$$F \propto \frac{\left(\frac{2\pi r}{T}\right)^2}{r}$$

$$F \propto \frac{4\pi^2 r}{T^2}$$

Konstanteak ( $4\pi^2$ ) kenduta, indarra eta  $\frac{r}{T^2}$  proportzionalak zirela ateratzen zen:

$$F \propto \frac{r}{T^2}$$

Keplerren arabera, planeta bakoitzerako  $\frac{T^2}{r^3}$  erlazioa konstante mantentzen zen (“harmoniaren legea”), eta Newton horretaz baliatu zen aurreko adierazpena gehiago zehazteko. Konstante bat ( $k = \frac{T^2}{r^3}$ ) gehituta, proportzionaltasunaren esanahia hau zen:

$$F \propto \frac{r}{T^2}$$

$$F \propto \frac{r}{T^2} k$$

$$F \propto \frac{r}{T^2} \frac{T^2}{r^3}$$

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

Beraz, planetek jasaten zuten indar zentrifugoa eta erradioaren karratua alderantziz proportzionalak ziren, ikerlari askok, frogapen matematikorik eman gabe, susmatu zuten bezala. Dena den, Eguzkiaren inguruko orbitak zehazteko, indar zentrifugoa erabilera antzua zen, eta indar zentripetua izan zen bide berriak urratuko zituen kontzeptua.

### 3.3. *Philosophiae Naturalis Principia Mathematicae*

1687ko uztailaren 5ean argitaratu zen filosofia naturalaren obra galant horretan dinamika indartsu sortu zen, munduaren egitura orokorraren ulerkuntza berri bat ekarriko zuena, indar eta higiduren arteko erlazioak argituz. Nahiz fluxoi edo diferentzialen metodoa urte batzuk lehenago sortu, Newtonek prozedura guztiak modu geometrikoan eta ez analitikoan egin zituen, eta gaur egungo deribatu eta integral bidezko bertsioak ondorengo zientzialarien ekarpenak izan ziren (Laplace izan zen Newtonen lan kosmologikoa kalkulu infinitesimalerik interpretatu zuen lehenetakoa). Dena den, infinituraino egin daitezkeen eragiketak erabili zituen figura baten ezaugarrietatik beste baten ezaugarrietara hurbiltzeko; adibidez, gorputz batean eragiten zuten indar zentripetuaren eragina aztertzeko, poligono baten aldeak limiterraino biderkatu zituen zirkulura ailegatu arte.

“Definizio” eta “Higiduren Lege”en ondoren, Newtonen obraren hiru “liburuak” garatzen dira zerutar eta lurtar gertaera nagusiak matematikoki azalduz. I. liburuan, mekanika arrazionala eraikitzen da masa puntualak erabiliz marruskadurarik gabeko hutsean, Keplerren legeak dinamikoki finkatzen dituen indar zentripetuaren zereginari funtsezko garrantzia emanez. Lorturiko emaitzak planeta, satelite eta kometei aplikatzen dizkie III. liburuko zerutar mekanika gauzatzeko, mundu fisiko osoa ordenatzen duen grabitazio unibertsalaren teoria famatua eskainiz. Bestalde, II. liburuan Newtonek bere antikartesianismoa erakusten du, Descartesen eterrezko zurrumbiloen azalpena arbuiatzen du, eta Keplerren legeak betetzen ez dituztela frogatzen du.

*Principia* argitaratu zenetik aurrera mekanikaren ideia zentrala indarra da, hain zuzen ere geometria aplikatua “mekanika” bihurtzen duen elementua, eta haren oinarria mugitzen ari den gorputza izan beharrean indar bat jasotzen duena da.

### 3.3.1. Definizioak eta legeak

Liburuaren bigarren orrialdean Newtonek indarra (*vis impressa*) definitzen du gorputz baten egoera inertziala alda dezakeen ekintza estrinseko gisa. Eta hiru modutara sor daitekeela dio: talka bidez, presio bidez eta indar zentripetuaren bidez.

Indar zentripetuaren ekintza gorputzak puntu zentral baten aldera bultzatzea da. Beraz, indar hura planetak beren orbitan mantentzen dituena eta jaurtigaiak Lurrerantz erorrarazten dituena da, eta bera gabe planetak nahiz jaurtigaiak higidura zuzen uniformeaz etengabe mugituko lirateke. *Principia* osoan egiten den bidean, indar zentripetuak grabitazio unibertsaleraino eramaten gaitu, eta indar zentrifugoa erabiliz ezinezkoa zen lorpena oraingoan erdiesten da.

Definizio horietan masa eta pisua desberdintzen dira, biak proportzionalak izanik. Pisua Lurrerainoko distantziarekin aldatzen da. Masa, ordea, konstantea da, materia-kantitate gisa ulertuta. Masa inertzialak gorputzen egoera inertzialaren kontserbazioa (gelditasuna edo higidura zuzen uniforme) bermatzen du, eta indarrak aldarazten du. Gorputza geldirik dagoenean, masa inertziala mugitzen hasteari kontrajartzen zaio, eta mugitzen ari baldin bada norabidez edo abiaduraz aldatzearen aurkakoa da. Higidura mantentzeak ez dakar indar batek eragitea; aitzitik, indar baten eraginpean, gorputzak bere higidura aldatzen du, bere higidura-kantitatea aldatzen delako (zentzu bektorialean ulerturiko abiadura aldatzen baita). Indar konstante baten ondorioa, beraz, ez da higidura konstantea, abiaduraren modulua edo higiduraren norabidearen aldaketa konstantea baizik.

Newtonek higidura-kantitatea (gaurko momentu lineala,  $p$ ) birdefinitu zuen Descartesek bere fisika osoa eraikitzeko erabili zuen indarrean oinarrituta —indar hura talketarako irudikatuta zegoen eta ukipenez eta istantean eragiten zuen—:

$$p = m \cdot v$$

$p$ : higidura-kantitatea       $m$ : masa       $v$ : abiadura

Beraz, indarren eragina abiaduraren zenbait alderdi aldatzea da (azelerazioa), edo higidura-kantitatea ( $p$ ) aldatzea. Masa beti konstantea delako, indarra eta azelerazioa edo higidura-kantitatearen aldaketa proportzionalak dira, eta masa inertziala, hain zuzen, proportzionaltasun horren konstantea da. Zenbat eta indar handiagoa, hainbat handiagoa azelerazioa edo higidura-kantitatearen aldaketa. Kausa eta efektuaren artean proportzionaltasuna (masa) dago.

Newtonen hiru lege famatuaren definizioak ere *Principiaren* sarreran aurkitzen dira. Axiomak balira bezala aurkeztuak, esperientziatik ondorioztatzezinak eta deduktiboki edo induktiboki ezin lortuzkoak dira. Lehendabiziko bietan aurreko definizioen edukia adierazi besterik ez da egiten (tautologiak omen dira), baina axiometatik deribatutako proposizioak enpirikoki testagarriak dira.

Hiru legeak honela mintzatzen zaizkigu:

**Lehen legea** edo inertiaren legea: “Gorputz guztiek pausagunean edo higidura zuzen uniformean irauten dute, indarren batek egoera hori aldatzen ez duen bitartean”.

Inertiaren legea Galileok eta Huygensek susmatu zuten, Descartesek ere definitu zuten “magnitudea”ri edo “boluminositatea”ri loturik, baina neurtezina zen. Newtonen proposamenean, ordea, inertzia agertzen da materiaren berezko ezaugarri gisa, berezko indar gisa, higidura aldatzearen kontrako berezko erresistentzia gisa, eta masarekin batera neurtzen da (hain zuzen ere, inertziaz hitz egitean definitu zuten Newtonen masa lehen aldiz).

**Bigarren legea**, masa-ekintzaren legea edo kausa-efektuaren legea: “Higidura-kantitatearen aldaketa eta aplikaturiko indarra proportzionalak dira, eta higidura-aldaketa indarraren lerro zuzenean zehar gertatzen da”.

Indarrak gorputzaren egoera-aldaketa zein proportziotan sortzen duen deskribatzen da, baina, horretarako, indar, masa, abiadura eta azelerazioen artean erlazio inbariantek ezarri behar dira, eta ordura arte erabat kualitatiboa zen masa kuantifikatu behar da (bolumenaren eta dentsitatearen arteko erlazioaren bidez). Descartesengandik herederaturiko istanteko ukipen-indarra erabiltzen da, noski, baina ez hori bakarrik:

$$\mathbf{F} = \Delta (\mathbf{mv}) = \Delta \mathbf{p}$$

Planeten norabide-aldaketa konstanteak indar konstantea (eta zentripetua) eskatzen du, higidura-kantitatearen etengabeko aldaketa kontuan hartu behar da, eta horrek dakar indarraren ekintzaren denbora (t) aintzat hartu behar izatea:

$$F \Delta t = \Delta (mv)$$

$$F = m \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Limitean  $\frac{\Delta v}{\Delta t}$  erlazioa istanteko azelerazioa denez, Newtonena ez den formulatu famatua lortzen da:

$$\mathbf{F} = \mathbf{m} \mathbf{a}$$

F: indarra      m: masa      a: azelerazioa

Formula batetik bestera igarotzeko, edo higidura-kantitatearen gehikuntza diskretuak sortzen dituen istanteko indarretik (lehendabiziko formula) azelerazio jarraitua eragiten duen indar konstantera pasatzeko (bigarrena), Newtonen eraginaldien arteko denbora-tarteak gutxitu zituen limitean zerora jo arte. Estrategia bera beste zenbait alditan agertuko da, adibidez, Keplerren legeen funtsa dinamikoa garatzeko edo erakurpen-indar zentripetua gauzatzeko. Bestalde, ohartzeko da bi formulatiko proportzionaltasun-konstantea masa inertziala dela.



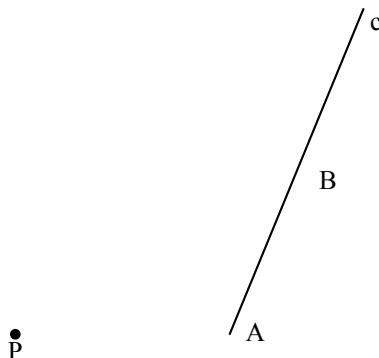
**Hirugarren legea** edo akzio-erreakzioaren legea: “Akzio bakoitzari erreakzio bat dagokio beti, berdina eta kontrakoa. Hau da, bi gorputzen arteko elkarrekintzak beti berdinak eta kontrako noranzkoetan zuzendutakoak dira”.

Talketan inspiraturiko hirugarren lege hori, beharbada garrantzitsuena, erabat Newtonena da. Akzio-erreakzioaren legeak noranzko bikoitzeko eraginak ekarriko ditu, eta metafisika newtondarrean eta antinewtondarretan elkarreraginek indarraren kontzeptua ordeztuko dute.

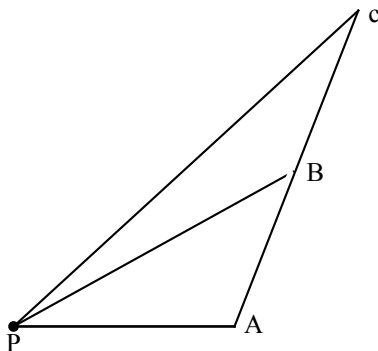
### 3.3.2. *Mekanika arrazionala (I. liburua)*

*Principiaren* kapitulu honetan higidura eta indarren arteko erlazioaren ikerketa matematiko hutsa garatzen da. Gorputzen gaineko indar zentripetuen ekintza konstantea ikertzen da, gorputzak abstraktuki kontsideraturik, haien itxura edo tamaina ahaztuta eta masa puntualtzat hartuta. Indar zentripetuek zentro geometriko baterantz orientatuta daude, baina erdigune hori Eguzkiarekin edo beste edozein astroarekin identifikatu gabe. Beraz, lehen zati honetan indar zentripetuek eragindako edozein higikariren higidura zuzen uniformearen desbideraketa analizatzen da.

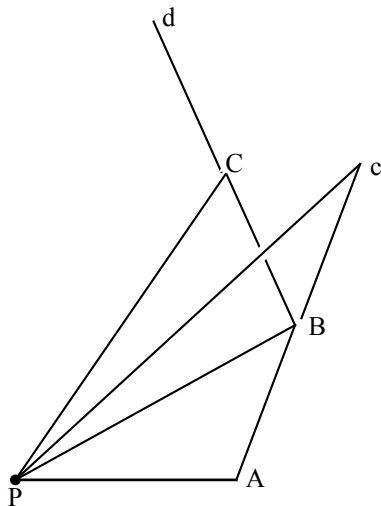
Keplerren bigarren legearen arabera, planeta bakoitza eta Eguzkia lotzen dituen erradio-bektoreak denbora-tarte berean beti azalera berdinak egiten ditu (planetak abiadura areolar konstantea dauka, eta abiadura angeluar aldakorra). Indar zentripetuen eraginean ere azaleren lege hau betetzen dela frogatzeko, Newtonek higidura zuzen uniformeaz mugitzen den higikariaren jokaera ikeretzea proposatzen du, A puntutik c punturaino doana B puntutik barrena. Denbora berean eginez gero, AB eta Bc distantziak berdinderdinak dira. (ikus ondoko irudia)



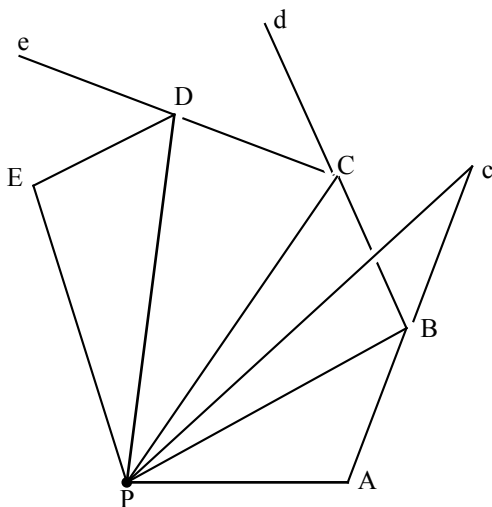
A, B eta c puntuetatik kanpoko P punturaino zuzenak marraztuta, APB eta BPC triangeluak lortzen dira, azalera bera dutenak oinarri bera eta altuera bera dituztelako:



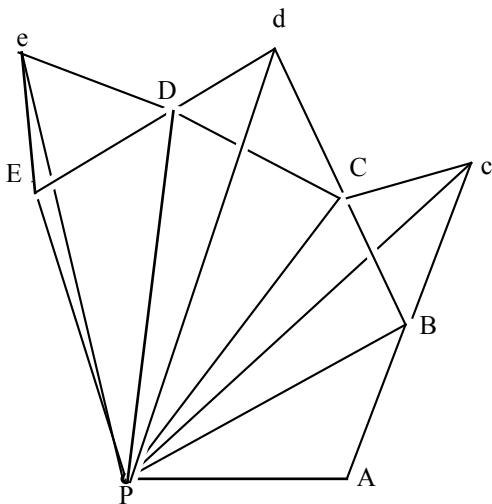
Higidura inertzialean, beraz, azale-  
ren legea betetzen da, eta abiadura  
areolarra kontserbatzen da. Eman deza-  
gun orain B puntutik pasatzean higika-  
riak P punturanzko bultzada bat jasaten  
duela. Horren ondorioz, Bc zuzenetik  
atera eta BC norabidean aurrera segitu-  
ko du:



Denbora-tarte berean higikaria d  
punturaino iritsiko litzateke, baina, as-  
tinaldia errepikatzen bada, CD norabi-  
dea hartuko du, eta horrela hurrenez  
hurren:

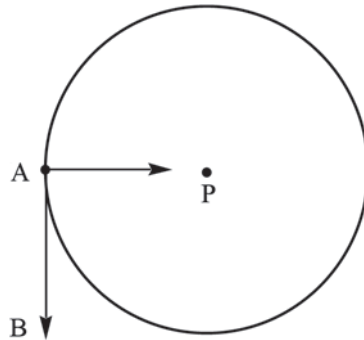


Horren ondorioz, ibilbidea AB, BC,  
CD, DE aldeak dituen poligonoa izanen  
da. Orain ere, PBC, PCD eta PDE  
triangeluak azalera berekoak dira: PB  
eta Cc paraleloak dira; hortaz, Pbc eta  
PBC triangeluak azalera bera dute, PBC  
eta PAB triangeluak ere berdinak dira,  
PCD eta PBC triangeluak bezala, edota  
PDE eta PCD:



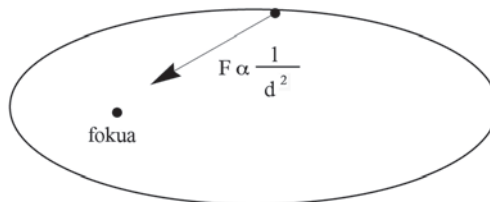
Laburbilduz, denbora-tarte berean azalera bera egiten da, hala higidura inertzialean nola indar zentripetu batek tarte erregularretan ibilbidea desbideratzean.

Denbora-tarteak gutxituz, triangeluen kopurua biderkatu egingo da eta azalera txikitu. Istanteko indarrak etengabeki eragiten badu poligonoen aldeak infinituraino gutxituko dira zirkulu batekin bat egin arte. Horrela, istanteko indar astintzailea etengabeko indar bihurtzen da, indar jarraitua. Orbita kurbatua mugitzen diren gorputzek, beraz, ukitzaitetik ateratzeko joera dute (inertzia), eta joera hori norabide erradialeko indar zentral (zentripetu) batekin orekatuta dago:



Hortaz, higidura inertziala duen higikarian indar zentripetu bat etengabeki aplikatzen baldin bada, gorputza orbita kurbatua mugituko da abiadura areolarra konstante mantenduz. Eta, alderantziz, orbita kurbatu batean abiadura areolarra kontserbatzen baldin bada, gorputzaren gainean indar zentripetu batek eragiten du. Keplerren bigarren legeak (azalaren legeak) garbi adierazten du planeten higidurak azaltzeko indar zentrala behar dela. Eta indar zentralak bigarren lege horri esanahi fisikoa, dinamikoa, ematen dio.

Newtonek frogatzen du ondorioztapen bera konika guztietarako (zirkulua, elipsea, parabola eta hiperbola) lor daitekeela. Hortaz, Keplerren lehen legea (orbita eliptikoena) betetzen duen higikarian foku baterantz zuzenduriko indar zentripetu batek eragiten duela frogatuta gelditzen da, eta indar hori distantziaren karratuarekiko alderantziz proportzionala dela ere bai:



Honen ondoren, Newtonek indar zentral horren balioa kalkulatzeari ekin zion. Indar zentrifugoaren adierazpenetik ( $F = m \frac{v^2}{r}$ ) indar zentripetuak sortzen duen azelerazioa

deduzitu zuen ( $a = \frac{v^2}{r}$ ), eta planeta-orbitak zirkularrak direla emanez:

$$v = \frac{2\pi r}{T}$$

$$a_{\text{zentripetua}} = \frac{v^2}{r} = \frac{(2\pi r)^2}{r \cdot T^2} = \frac{4\pi^2 r}{T^2}$$

$$F = m \cdot a_z = \frac{m 4\pi^2 r}{T^2}$$

Hurrengo pausoan zenbait masa puntual sartu zuen, eta orbita desberdinak. Orbita-periodoen karratuak eta ardatzerdi nagusien kuboak proportzionalak baldin badira (Keplerrek hirugarren legea betetzen bada) indar zentripetuaren balioa distantziaren karratarekin alderantziz proportzionala dela frogatu zuen:

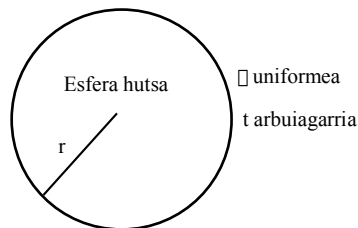
$$\frac{r^3}{T^2} = k$$

$$T^2 = \frac{r^3}{k}$$

$$F = \frac{m 4\pi^2 r}{T^2} = 4\pi^2 k \frac{m}{r^2}$$

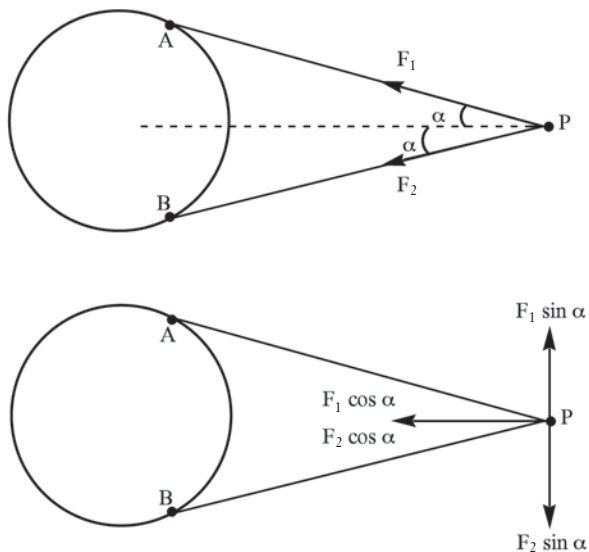
Newton arazo planetarioaren behin betiko azalpena gerturatzeko ari da, Keplerren hiru legeak betetzen dituzten masa puntualetan eragiten duen indar zentripetuaren balioa zehaztuta baitago. Distantzia ( $r$ ) masa puntualen artekoa da, baina teorema batek esfera homogeneoen kasurako zentroen arteko distantziak kontuan hartu behar direla finkatzen du.

Har dezagun esfera huts bat, dentsitate ( $\rho$ ) uniformekoa, eta lodiera ( $t$ ) txikia duena (arbuigarria) erradioaren ( $r$ ) balioaren ondoan:



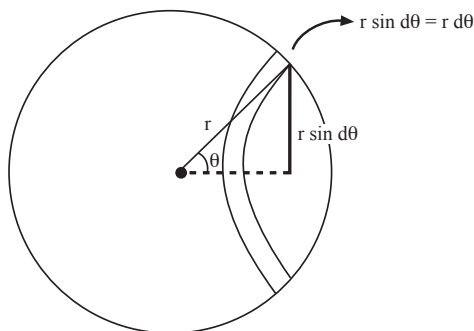
Esferako partikula bakoitzak  $P$  puntuaren gainean erakarpen-indar bat egingen du. "A" eremuko partikula batek  $F_1$  indarra egingen du, eta "B" eremukoak  $F_2$ . Bi indar horiek

ordezkari bat emanen dute, eta garbi ikusten da  $F_1$ -en eta  $F_2$ -ren osagai bertikalak (" $F_1 \sin \alpha$ " eta " $F_2 \sin \alpha$ ") deuseztatzen direla, eta osagai horizontalak (" $F_1 \cos \alpha$ " eta " $F_2 \cos \alpha$ ") batzen direla:



Esfera hutseko partikula guztiak binaka hartuta, osagai bertikal guztiak deuseztatuko dira, eta indar ordezkaria bilatzeko, osagai horizontalak bakarrik erabili beharko dira.

Esferaren masa-elementu gisa geruza zirkular bat ( $dS$ ) hartuko dugu. Geruza horren luzera " $2\pi (r \sin \theta)$ " izanen da, zabalera " $r \cdot d\theta$ ", eta lodiera " $t$ ":



Geruzaren bolumena ( $dV$ ) hau izanen da:

$$dV = 2 \pi r \sin \theta \cdot r d\theta \cdot t = 2 \pi t r^2 \sin \theta d\theta$$

Eta geruzaren masa ( $dm$ ):

$$dm = \rho \cdot dV = 2 \pi t \rho r^2 \sin \theta d\theta$$

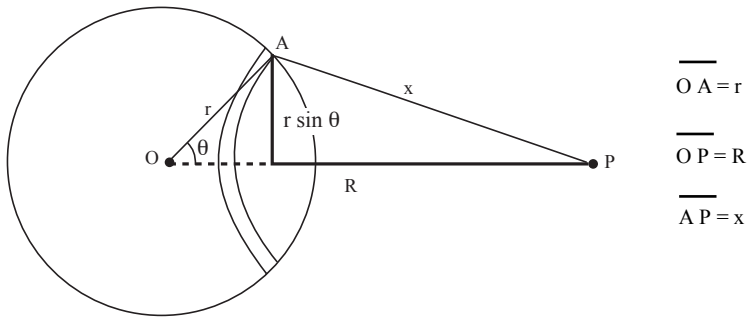
Geruzak P puntuko partikulan egiten duen indarra ( $dF$ ) horizontala da, eta distantzia “ $x$ ” batekin adieraziko dugu. Indar horren modulua hau da:

$$F = 4 \pi^2 k \frac{m}{r^2} = K \frac{m}{r^2}$$

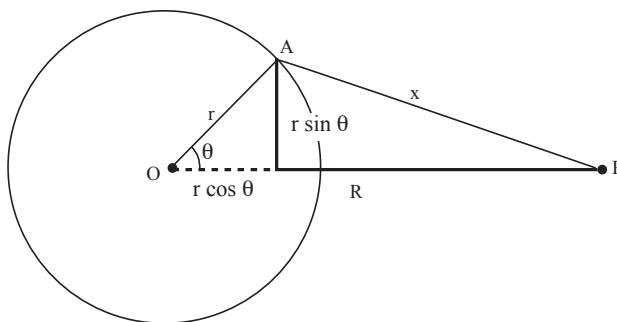
$$F \cos \alpha = K \frac{m}{r^2} \cos \alpha$$

$$dF = K \frac{dm}{x^2} \cos \alpha = 2 \pi K t \rho r^2 \frac{\sin \theta d\theta}{x^2} \cos \alpha$$

Irudian distantziak zehaztuz:



Hau deduzi dezakegu:



$$\cos \alpha = \frac{R - r \cos \theta}{x}$$

Kosinuen teoremaren arabera:

$$x^2 = R^2 + r^2 - 2 R r \cos \theta$$

$$r \cos \theta = \frac{R^2 + r^2 - x^2}{2R}$$

Eta orduan:

$$\cos \alpha = \frac{R - r \cos \theta}{x} = \frac{R - \frac{R^2 + r^2 - x^2}{2R}}{x} = \frac{R^2 - r^2 + x^2}{2Rx}$$

Kosinuaren adierazpena deribatzen badugu:

$$x^2 = R^2 + r^2 - 2Rr \cos \theta$$

$$2x dx = 2Rr \sin \theta d\theta$$

$$\sin \theta d\theta = \frac{x}{Rr} dx$$

Arrazoi trigonometriko horiek (“cos α” eta “sin θ dθ”) indarraren adierazpenean ordezten baditugu, hain zuzen ere “α” eta “θ” desagerrarazteko, P puntuan dS geruzak egiten duen indarra kalkulatuko dugu:

$$dF = 2\pi K t \rho r^2 \frac{\sin \theta d\theta}{x^2} \cos \alpha = 2\pi K t \rho r^2 \frac{\frac{x}{Rr} dx}{x^2} \frac{R^2 - r^2 + x^2}{2Rx}$$

$$dF = \frac{\pi K t \rho r}{R^2} \left( \frac{R^2 - r^2}{x^2} + 1 \right) dx$$

Esfera osoko geruza guztien indarrak batzen baditugu, esfera osoak egiten duen erakarpin-indarra kalkulatuko dugu. Kontuan hartu behar da “x” aldagaia “R - r” balio minimoetik, “R + r” balio maximoaraino aldatzen dela:

$$\int_{R-r}^{R+r} \left( \frac{R^2 - r^2}{x^2} + 1 \right) dx = 4r$$

Eta esferaren masaren baliokidetasuna gogoratuta, esfera osoak egiten duen indarra hau da:

$$F = \int_{R-r}^{R+r} dF = \frac{\pi K t \rho r}{R^2} 4r = \frac{4\pi t \rho r^2 K}{R^2}$$

$$4\pi t \rho r^2 = m \quad \text{eta} \quad K = 4\pi^2 k$$

$$\text{Beraz} \quad F = 4\pi^2 k \frac{m}{R^2}$$

Esfera hutsa izan beharrean betea balitz, esfera huts zentrokidez osaturikoa balitz bezala kontsideratu genuke, eta bukaeran indar bera aterako litzateke, indar zentripeta. Hortik aurrera, esfera homogeenok kontuan har daitezke haien masak zentroetan

kontzentratuta baleude bezala. Masa-zentroaren kontzeptua bera berritzailea izan zen, eta, grabitazio unibertsalerako bidea leuntzeaz gain, talken tratamendu analitikoak ere ahalbidetu zuen.

Mekanika arrazionala burutzeko, Newtonek kanpoko puntu geometrikoa (P) kendu eta bigarren gorputz bat sartu zuen bere hirugarren legeari bidea irekitzeko. Akzio-erreakzio legearen arabera, bigarren gorputzak ere erakartzen du, eta horrela elkarreraginean diren bi gorputzeko sistema lortzen da. Indarrak binaka agertzen dira, biak zentripetuek eta aurkakoak, gorputz bat bestearen aldera bultzatzen dutenak. Newtonek pare horri “erakarpena” deitu zion. Limiteraino eramandako prozedura baten bitartez, istanteko indar bultzatzailetik indar zentripetua sortu zuen, baina erakarpena bestelakoa da, urrutiko elkarrekintza adierazten duena, aurreko ikuspuntutik etorkizuneko ulermerako jauzi kualitatiboa.

Erakarpenaren kontzeptuaren arabera, ezinezkoa da pentsatzea gorputz bat higitzen den bitartean bestea geldirik dagoela, indar zentripetuen ondorioa orbita konikoa baita. Bi gorputzak elipseak deskribatzen ibiliko dira grabitate-zentro komun baten inguruan. Sistema horretan hirugarren gorputz bat sartuta, elkarrekintzen aniztasunen ondorioz orbitetan sorturiko perturbazioak oso arazotsuak dira, eta gaur egun ere hiru gorputzeko sistemen higiduren ezagupena nekez lortzen da.

### 3.3.3. Zerutar mekanika (III. liburua)

Indar zentripetuetatik erakarpenaren kontzeptura iragan ondoren, “liburu” honetan erakarpen grabitatorioa agertzen da unibertso osoaren indar menperatzaile moduan, planetak beren orbitetan higiarazten dituen, eta Lur gainean jaurtigaien erorketa eragiten duena. Zerua eta Lurra behin betiko bateratuta gelditzen dira, eta erakarpen grabitatorioak edozein tokitan eragiten duen bakarra izanen da.

Masa puntualetarako lorturiko emaitzak planeta, satelite eta beste zerutar gorputzei aplikatzeko unea da, eta Eguzkiak Lurrean eragiten duen indar zentripetuen adierazpena abiapuntua da:

$$F = 4 \pi^2 k \frac{m}{r^2}$$

Eguzkiak sorturiko indar zentripetua (F) Lurraren masaren menpe (m) ageri da. Eta Newtonek garbi ikusten du “ $4\pi^2k$ ” faktoreak Eguzkiarekin edo Eguzkiaren ezaugarri batekin erlazionatuta egon behar duela. Erakarpen-indarraren sortzailea Eguzkiaren “masa” dela pentsatzea aterabide bakarra da, bestelako jatorri posibleak (konposizio atomikoa edo espazioa) indarrarekiko independenteak direlako, edo indarraren beraren ondorioak direlako (abiadura edo azelerazioa). Beraz, “ $4\pi^2k$ ” faktoreak Eguzkiaren masarekiko nola edo hala proportzionala izan behar du, eta horren froga matematikorako Newtonen akzio-erreakzioaren legean oinarritzen da. Eguzkiak Lurrean indar zentripetua



(F) eragiten duen bezala, Lurrak ere Eguzkia erakartzen du (F'). Lurraren masa (m) eta Eguzkiarena (M) kontuan hartuta, bi indar zentripetuen adierazpenak hauek dira:

$$F = 4 \pi^2 k \frac{m}{r^2} \qquad F' = 4 \pi^2 k' \frac{M}{r^2}$$

Akzio-erreakzio legearen arabera, biak berdinak dira:

$$F = F'$$

Eta: 
$$4 \pi^2 k \frac{m}{r^2} = 4 \pi^2 k' \frac{M}{r^2}$$

Beraz: 
$$k m = k' M$$

Berdintasun horretan oinarrituta, konstante berri bat (K) defini daiteke:

$$\frac{k}{M} = \frac{k'}{m} = K$$

$$k = K M$$

$$F = 4 \pi^2 k \frac{m}{r^2} = 4 \pi^2 K M \frac{m}{r^2}$$

Elkarreraginaren ekintza izaera bikoitzekoa da; honegatik, erakarpena adierazten duen legea ezin da gorputz bakar batekiko ezarri, bi gorputzak kontuan hartu behar baitira (M eta m). Erakarpena bi masen biderkadurarekiko proportzionala eta distantziaren karratuarekiko alderantziz proportzionala da. Proportzionaltasun-konstante berri bat definituz:

$$G = 4 \pi^2 K$$

Eta: 
$$F = G \frac{M m}{r^2}$$

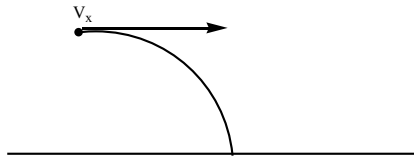
Hori da Eguzkia eta Lurra lotzen dituen erakarpen-indarraren adierazpen matematikoa, eta haren esanahia orokortuz bera da planeta guztietan Eguzkirantz (eta alderantziz) eragiten duen indarra, eta sateliteetan planetarantz (eta alderantziz) eragiten duena.

Kasu guztietan,  $\frac{1}{r^2}$  rekiko proportzionala da, eta distantziak masa-zentroen artekoak. Dena den, formula horri grabitatearekiko erlazioa eta unibertsaltasun-izaera falta zaizkio oraindik.

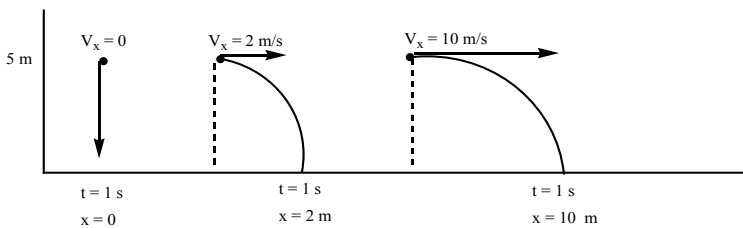
### 3.3.3.1. Ilargiaren erorketa

III. liburuko *De mundi systemate* titulupeko atalean Lurraren gainazalitik botata gorputz bat orbitan nola jar daitekeen aurreikusten da, Galileoren gainezarmen-printzipioan oina-

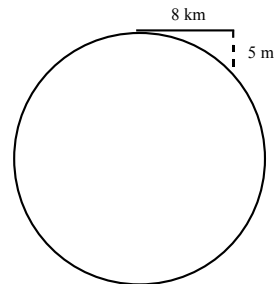
rrituta. Adibidez, altuera batetik gorputz bat hasierako abiadura horizontal batekin igorrita, grabitatearengatik ibilbide parabolikoan erortzen joango da harik eta lurreratu arte:



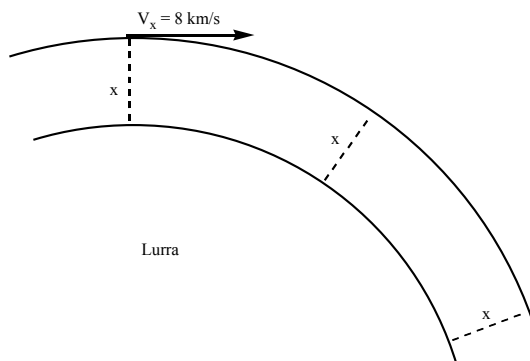
Erorketaren azelerazioaren balioa kontuan hartuta ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ), segundo bakoitzeko bertikalean ia  $5 \text{ m}$  eroriko da ( $e = \frac{1}{2} \cdot g t^2$ ), eta hasierako abiadura horizontala handituta, gorputzak horizontalean distantzia handiagoa ibiliko du lurreratu baino lehen ( $x = v_x \cdot t$ ):



Lurraren gainazala ez da leuna, eta ukitzailerekin 5 m jaisten da 8.000 metroko. (ikus ondoko irudia)

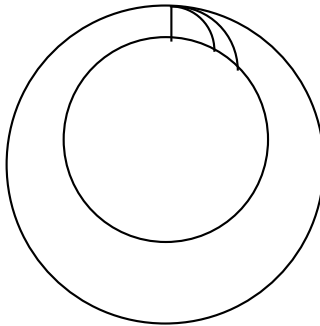


Altuera batetik eta horizontalki gorputz bat  $8 \text{ km/s}$ -ko abiaduraz botako bagenu, gorputz hori segundo bakoitzean  $5 \text{ m}$  eroriko litzateke, justu Lurraren gainazala jaisten den altuera, eta horregatik gorputza beti Lurretik altuera berea egonen litzateke eta marruskadurarik gabe beti abiadura horizontal bera izanen luke. Marruskadura egonez gero, gorputzak, “orbitan” mantentzeko, bultzada horizontal konstantea besterik ez luke beharko:



Beraz, orbitan dagoenean gorputza beti erortzen ari da, baina Lurretik beti altuera berera dago, eta ibilbide zirkularra osatzen du Lurraren inguruan. Gaur egungo espazio-ontziak edo transbordadoreak orbitan dabiltzanean erorketa askean daude; beraz, pisurik ez dute, grabitaterik eza edo mikrograbitatea dagoela esaten da, eta barruan dena flotatzen dagoela dirudi.

Altuera batetik objektu bat 8 km/s-ko abiaduraz baino azkarxeago botako balitz, objektua Lurretik gero eta urrutirago joango litzateke, gero eta mantsoago, altuera (edo distantzia) maximoraino. Ondoren erortzen (itzultzen) hasiko litzateke, gero eta azkarra-  
go, eta hasierako punturaino bueltatuko litzateke oso abiadura handiz. “Erorketak” segituko luke orbita osatu arte, eta orbiten itxura (konika bat) hasierako bultzada horizonta-  
laren menpe dago:



Landetako lasaitasunean jarrera kontenplatiboan zegoela, sagar baten erorketak Newtoni horren inspirazioa eman ziolako zurrumurrua haren lagun batzuek, Enrik Pemberton eta William Stuckeley, asmatu omen zuten eta Voltairek apaindu eta zabaldu zuten. Alde guztietara ere, Lurraren gaineko objektuak erori egiten dira, Lurrak Ilargia erakartzen du, eta Ilargiaren higiduraren osagai erradialak erorketaren esanahia izan dezake: ezinbestez, hurrengo pausoa elementuok erlazionatzea da. Grabitateak eragindako erorketa eta Ilargiaren ibilbidearen konposizioa erlazionatzeak astroen arteko erakarpe-nari beste dimentsio bat eman zion.

Newton lanean hasten da Lurraren azalean eta Ilargian Lurraren eragin bera aurkitzen dela, bi kasuetan eragin horren balioa desberdina dela eta distantziarekiko proportzionala delako hipotesiak erabiliz, Ilargian eragiten duen grabitatea Lurraren azalekoa baino askoz ere txikiagoa delakoan. Ilargiaren orbita ia zirkularra dela kontsideratzen du, eta Lurraren eta Ilargiaren arteko distantzia Lurraren erradioa ( $r$ ) halako hirurogei ( $60r$ ).

Beraz, Lurraren azalean erorketaren erritmoa hauxe da:

$$a \propto \frac{1}{r^2}$$

Eta Ilargiaren erorketarena:

$$a \propto \frac{1}{(60 r)^2}$$

$$a \propto \frac{1}{3600 r^2}$$

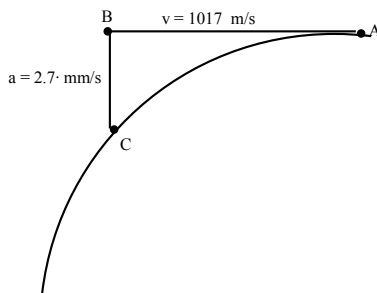
Hortaz, Lurraren azaleko gorputzak  $9,8 \text{ m/s}^2$ -ko azelerazioaz erortzen baldin badira, Ilargia  $2,7 \text{ mm/s}^2$ -ko eroritzaerarekin eroriko da.

Ilargiaren orbitaren erradioa ( $r = 6.370 \text{ km}$ ,  $60r = 382.200 \text{ km}$ ), eta beraren orbita-periodo ( $T = 27.32$  egun) jakinik, hurrengo kalkuluak errazak dira:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{27.32 \cdot 86400} = 2.66 \cdot 10^{-6} \text{ rad/s}$$

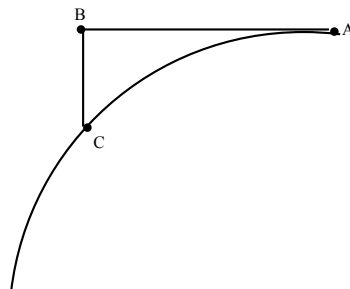
$$v = \omega \cdot r = 1017 \text{ m/s}$$

Datu horiekin Newtonek Ilargiaren higidura konposatua deduzitzen du, eta horrela ateratako Ilargiaren kokapenak behaturikoekin bikain ezkontzen dira:



Horren ondorioz, Ilargia bere orbitan mantentzen duen indarra eta Lurraren azalean gorputz astunak erorarazten dituen indar bera direla proposatzen da: hori da erakarpen-indar zentripetua eta indar grabitatorioa berdintzen diren lehen aldia. Ilargia, beraz, bere orbitan mantentzen da grabitatearen indar-rerengatik, erakarpen-indar grabitatorioarengatik, eta, estropolazioz, satellite guztiek beren planetarantz grabitatzen dute, eta planetek Eguzkirantz. Grabitateak erortzea dakar, gorputz astunak erortzen diren bezala satelliteak eta planetak ere erortzen ari dira, eta Ilargia Lurrerantz erortzen den bezala Lurra eta gainerako planetak ere etengabe Eguzkirantz erortzen dira.

Astro guztien ibilbidearen azalpena konposatua da: higidura inertziala ukitzailearen norabidean (AB norabidea), eta behearantzko higidura azeleratua (BC norabidean):



Astroak, berez, orbitatik aldenduko lirateke AB lerroari segituz, baina grabitateak (pisuak) azelerazio zentripetu konstantea sortzen du. Jaurtigaietarako Galileok antzekoa proposatu zuen, eta funtsean Ilargiaren higidura eta abiadura egokiarekin jaurtikiriko objektuena bera da. Azalpen bera antzeko fenomenoetarako. Pisua ez da lurtar gorputzen ezaugarri bat, indar unibertsal aldakorra baizik, eta munduko higidurak inertziaren eta pisuaren konbinazioaren menpe daude.

Bestalde, akziorik ez dago erreakziorik gabe, eta planeta bakoitzak, satellite bakoitzak eta partikula bakoitzak erakartzen du eta erakarria da. Horregatik, satelliteek grabitatzten duten bezala, planetek ere satelliteen inguruan grabitatzten dute, erortzen dira, eta Eguzkiak ere planeten inguruan grabitatzten du. Eguzki-sistemako gorputz guztiak elkarri eragiten diote, eta orbita egonkorretan dabilta Keplerren legeen arabera. Baina elkarre-ragin anitzek sortzen dituzten perturbazioengatik orbiten itxura ia eliptikoa da, eta azal-eren legea ia betetzen da, baina ez erabat.

Eguzkiaren garrantzia ez da oinarrizten bere kokapen pribilegiatuan, bere gelditasu-nean edo bere izaera propioan. Masaren arabera gorputz bakoitzak besteen higidurak baldintzatzen ditu, eta Eguzkiaren masa handia da astro horri berezitasun bat ematen diona. Baina beste edozein gorputzek bezala, Eguzkiak masa guztiak erakartzen ditu, eta masa guztiak Eguzkia erakartzen dute.

Kometen ibilbideak ere lege berarekin deskribatu zirenean, eta erakarpenak gure sis-tematik kanpo eragiten zuela ikusi zenean, **grabitazio unibertsalaren legea** izenez ba-taiatu zen:

$$F = G \frac{M m}{r^2}$$

Lurrean bakarrik nabaria zen grabitatea Ilargiraino iristen zela frogatu ondoren, uni-bertso osoraino zabaldu zen. Materia-zatiek beti eta salbuespenik gabe elkar erakartzen dute, eta erakarpen-indar hori bazter guztietaraino ailegutzen da. Lur gaineko gorputz guztiak, ozeanoek, planetek, satelliteek, eta Eguzkiak ere ezin dute eragin horretatik ihes egin.

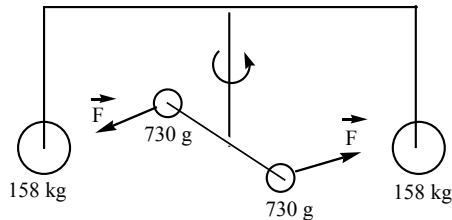
### 3.3.3.2. Masa

Newtonek, masaren kontzeptua sortu ondoren, bi egoera desberdinetarako esanahi desberdinekin erabili zuen. Masa inertziala indarraren eraginez sorturiko higidura-egoeraren aldaketaren aurkako erresistentzia zen ( $F = m \cdot a$ ). Masa grabitatorioak, berriz, erakartzeko eta erakarria izateko ahalmena adierazten zuen. Paradoxikoki, gorputz ba-koitzak ezin zuen bere higidura-egoera aldatu (inertzia gaintzeko indar estrintsekoa behar baitzen), baina besteena bai (erakarpen grabitatorioaren bidez); horregatik, lehen egoerako masa printzipio pasiboa zen, eta bigarrenekoa printzipio aktiboa. Hala ere, bi masen balioak gorputz bakoitzarendako berdinak ziren. Kontrajarritako bi izaera horiek gorputz berean aurkitzeak arazo kontzeptualak ekar zitzakeen, eta Einsteinen erlatibita-

tearen teorian higidura inertziala eta azeleratua mekanikoki baliokideak zirela frogatu arte, eta masei buruzko baliokidetasun-printzipioa adierazi arte, egoera horren esanahi sakona ezin izan zen ulertu.

### 3.3.3.3. Grabitazio unibertsalaren konstantea (G)

“G” unibertso osorako konstante bihurtu zen edozein bi gorputzetarako aplikatu zitekeen, eta Eguzkiaren masarekin hasieran zuen erlazioa erabat galdu zuen. G, beraz, independentea da, ez dago objektuen menpe, ez dago objektuen masen menpe, edo kopapenen menpe eta gutxiago ere higidura-egoeraren menpe. Haren balioa ( $G = (6,67428 \pm 0,00067) \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$ ) H. Cavendish-ek neurtu zuen 1798an, tortsio-balantza batean pisu handiko berunezko bolen artean agertzen zen erakarpen-indarra behatuz, 1784an Ch. Coulombek indar elektrikorako garatu zuen esperimentuan inspiratuta:



Konstantearen balioa jakinda, objektuen pisua eta Lurrak gorputz horretan egiten duen erakarpen-indar grabitatorioa berdina zirela behatu zen. Grabitazio unibertsalaren legean Lurraren datuak sartuz (masa =  $6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ , erradioa =  $6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$ ), pisuaren adierazpena ( $P = mg$ ) lortzen da:

$$F = m \frac{G M}{r^2} = m \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 6 \cdot 10^{24}}{6370000^2} = m \cdot 9,8 = m g = P$$

Pisua eta erakarpen grabitatorioa gauza bera izanda, Lurraren masa erraz deduzi daiteke. Hain zuzen ere, Lurra pisatu zuen lehena Cavendish izan zela esaten da:

$$m g = G M \frac{m}{R^2}$$

$$M = g \frac{R^2}{G} = 5,96 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

### 3.3.3.4. Orbita-higiduren analisisa

Fisikoki planeten orbita eliptikoen jatorria gorputzen arteko erakarpen grabitatorioa zela frogatzeko, matematikoki grabitazio unibertsalaren legetik Keplerren legeak deduzitu behar ziren. Eta, helburu horretarako, Newtonen elipseen eta bestelako sek-

zio konikoen propietate geometriko konplexuak erabili zituen, berak asmatuak kalkulaz baliatu gabe. Orduetik hona, dedukzioak apaindu dira, batzuk momentu angeluarraren kontserbazioan oinarrituta, beste batzuk kalkulu energetikoak erabilita. Dena dela, analisiaren medioz ere prozedura dotoreak lortzen dira, ondoren agertzen dena bezalakoak.

Jo dezagun eguzki-sistemako planeta baten kokapenak koordenatu polarren bidez  $(r, \theta)$  zehazten direla. Koordenatu horien jatorriak indarraren sorburuan egon behar du (Eguzkia), eta planeten higiduran eragiten duen azelerazioa bi osagaitan banatzen da: osagai erradiala ( $a_r$ ) eta zeharkako osagaia ( $a_\theta$ ):

$$a_r = \frac{d^2 r}{dt^2} - r \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2$$

$$a_\theta = \frac{1}{r} \frac{d}{dt} \left( r^2 \frac{d\theta}{dt} \right)$$

Indarra erradiala denez eta azelerazioa eta indarra proportzionalak direnez, zeharkako azelerazioa nulua da. Beraz, norabide tangenzialean planeten mugimendua uniforme dela eta norabide erradialean mugimendua azeleratua delako suposiziotik abiatzen gara:

$$a_\theta = \frac{1}{r} \frac{d}{dt} \left( r^2 \frac{d\theta}{dt} \right) = 0$$

$$\frac{d}{dt} \left( r^2 \frac{d\theta}{dt} \right) = 0$$

Hortaz, hurrengo adierazpena konstantea dela deduzitzen da. Konstantea ( $\ell$ ) koordenatu-jatorriarekikoa da eta masa-unitateko momentu zinetikoaren modulua da:

$$r^2 \frac{d\theta}{dt} = \text{konstantea} = \ell$$

Planeta  $t_1$  unetik  $t_2$  unera mugitzean erradio bektoreak betetzen duen azalera hau dela jakina da:

$$\frac{1}{2} \int r^2 \frac{d\theta}{dt}$$

Orduan:

$$\frac{1}{2} \int r^2 \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \ell \cdot (t_2 - t_1)$$

Adierazpen hori Keplerren bigarren legearen frogatzat hartzen da.

Newtonen grabitazio unibertsalaren legeak finkatzen duenez:

$$F_r = -\frac{GMm}{r^2}$$

Eta:

$$F_r = m \cdot a_r = m \left[ \frac{d^2 r}{dt^2} - r \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2 \right]$$

Hortaz:

$$a_r = \frac{d^2 r}{dt^2} - r \left( \frac{d\theta}{dt} \right)^2 = -\frac{GM}{r^2}$$

Aurreko horretan aldagai berri bat ( $\mu = \frac{1}{r}$ ) sartuz, eta momentu zinetikoaren adierazpena erabiliz:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = -\ell^2 \mu^2 \frac{d^2 \mu}{d\theta^2}$$

Azken bi ekuazioak konbinatuz:

$$\frac{d^2 \mu}{d\theta^2} + \mu = \frac{GM}{\ell^2}$$

Eta ebazpena hauxe da:

$$r = \frac{1}{\mu} = \frac{\ell^2/GM}{1 + \cos \theta} = \frac{p}{1 + \cos \theta}$$

Integrazio-konstanteak p, e eta  $\theta_0$  dira:

$$p = \frac{\ell^2}{GM} = a(1 - e^2)$$

Ebazpen horretan “e” unitatea baino txikiagoa bada ( $e < 1$ ), elipsearen eszentritatea da, eta “a” elipsearen ardatzerdi nagusia. Eta unitatea ez den beste balioetarako, gainerako sekzio konikoak lortzen dira ( $e = 1$  parabolatarako, eta  $e > 1$  hiperbolatarako), hain zuzen ere beste zerutar gorputzek deskribatzen dituzten orbitak. Horrela, planeten orbita eliptikoak, kometen orbitak eta grabitazio unibertsalaren legea erlazionatu ziren. Era horretara indar grabitatorioa zeruko orbita guztien jatorria zela frogatu zen.

Keplerren “harmoniaren legea” erraz azaltzen da orbitak zirkularrak direla emanez, eta indar zentripetua indar grabitatorioa dela proposatuz:

$$\left. \begin{array}{l} F = G \frac{Mm}{r^2} \\ F = \frac{v^2 m}{r} \end{array} \right\} G \frac{M}{r} = v^2 = \left( \frac{2\pi r}{T} \right)^2 = \frac{4\pi^2 r^2}{T^2}$$



$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} r^3$$

Eta, elipseen kasurako, hau (Keplerren hirugarren lege orokortua) betetzen dela frogatzen da, “a” elipsearen ardatzerdi nagusia izanik:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{G(M+m)} a^3$$

Adierazpenotan oinarrituta, Newtonek Eguzkiaren masa kalkulatu zuen, Lurraren orbita-erradioa ( $1,5 \cdot 10^{11}$  m) eta translazio-periodoa ( $T = 3,15 \cdot 10^7$  s) erabiliz:

$$M = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2} = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

1684an Cambridgera eginiko bisita batean Edmund Halleyk Newtonen laguntza eskatu zion distantziaren karratuarekiko alderantziz proportzionala den indarraren eraginpean planetek nolako orbita izanen zuten kalkulatzeko (alderantzizko problema). Lehenbizi, Newtonek gorputz batek orbita eliptikoa deskribatzeko behar den indarra karakterizatu zuen (problema zuzena), eta *Principian* bi problemen ebazpenak erakutsi zituen. Eter kartesiarra baztertuta, erakapen grabitatorio unibertsalak arazo zehatz horiei matematikak eskaintzen duen sendotasunaz erantzun zien, eta astroen arteko erakarpena kosmologia berri baten oinarria eta bultzatzailea izanen zen.

Lege newtondarraren erabilerak astronomiarako ekarpen paregabeak ahalbidetu zituen. Newtonek Lurraren biraketa-ardatzaren inklinazioaren aldaketa (ekinozioen prezesioa) egokiro azaldu zuen, errotazioak eragindako planeten itxura ez esferikoa ulertu zuen eta mareen zergatia Eguzkiaren eta Ilargiaren eraginetan aurkitu zuen. Ilargiaren ibilbidearen zenbait irregulartasun azaldu ziren, Halleyk bere izena duen kometa 1758an agertuko zela aurreikusi zuen, eta Lurraren, Jupiterren eta Saturnoren masak kalkulatu ziren. Grabitazio unibertsalaren legea erabilita, Urano, Neptuno eta Plutonon existentziak aurreikusi ondoren, hurrenez hurren 1781ean (Herschel), 1846an (Leverrie) eta 1930ean (zientzialari-talde bat) aurkitu ziren. 1842an Besselek gure sistematik kanpoko Sirius izarrean sateliteen existentzia ere iragarri zuen.

Newtonen ondorengo ikerlarien (Euler, Laplace, Lagrange, Legendre, Gauss, Liouville, Ostrogradski, Poisson, Jacobi, Hamilton eta abar) ekarpenek grabitazio unibertsala teoria planetarioa izatetik eguzki-sisteman bukatzen ez den unibertsoaren kosmologia berriaren oinarria izatera eraman zuten. Eguzki-sistemaren sorrerari buruzko lehen teoriak Kantek eta Laplacek bota zituzten, eta 1944-1950 bitartean Weizsäckerrek eta Kuiperrek teoria haiek osatu zituzten.

Fisika newtondarraren ideia iraultzaileekin beste zenbait arlotako itzalak ere argitu ziren: kimikan atomismoak indarra hartu zuen (Newton atomista zen, eta talken legeen

jatorria atomoen inertzia zela pentsatzen zuen), termodinamikan beroa eta partikulen mugimendua erlazionatu ziren, optikan argiaren eredu korpuskularra sendotu zen. Ondorengo mendeetan, Newtonen lege dinamikoak oinarri hartuta, ikaragarriko eraikin teoriko bateratua jaso zen, oraingo zientzia fisikoen oinarria, gaur egungo bizitza arruntan eta ingeniarietzan erabiltzen den aplikazio-unibertso ia infinitua ahalbidetu duena. Dinamika newtondarraren irudi bateratua matematikoki edertasun ikaragarrikoa da, eta mekanika analitikoaren adierazpenean bi modu desberdinetan ageri da: hamiltondar irudia eta lagrangetar irudia. XX. mendean, lehen irudiak mekanika kuantiko estandarrerako osagai esentzialak eman ditu, eta bigarrena teoria kuantiko erlatibistarako abiapuntua izan da.

Dena dela, Newtonek indar grabitatorioaren ezaugarriak ezin izan zituen beste eremuetara zabaltzeko, eta gorputzen kohesioak, indar elektrikoak, indar magnetikoak edo elkarrekintza kimikoak eskatzen zituzten azalpenak lortzeko bestelako ikerketa-lerroak urratu behar izan ziren.

### **3.3.4. Espazioa eta denbora**

Errenazimentuko pentsamendu eta mundu animismoz beterikoaren kontra, filosofia mekanizista kartesiarra erreakzio arrazional modura agertu zen, mekanizismoan materia eta higidura besterik ez zegoelako. Eta Newtonen oinarriak mekanizismo kartesiarrean hazi baziren ere, mekanika newtondarrak zisma bat ekarri zuen: kartesiarren ukipenen bidezko akzioa besterik ez zuen onartzen, eta newtondarrak urrutiko indarrak erabiltzen zituen. Eterrezko espazio kartesiarra arbuiatuta, Lurreko fenomenoak eta zerruko mekanika behin betiko bateratu ondoren, unibertso osoaren izaera bakarria zela baieztatuta, Newtonek espazio hutseko mundua zabaltzeko, eta distantziara eragiten zuten indar kosmiko immaterialek espazio hura zeharkatu zuten.

Grabitazio unibertsalaren nagusitasunak higiduraz josiriko mundua itxuratu zuen. Gelditasuna ezinezkoa zen denak denerantz grabitatzen zuelako, ezer ez zegoen geldirik, eta masari loturiko indar grabitazionalaren existentziak higidura azeleratuaren unibertsaltasuna ezartzen zuen. Kokapen pribilegiaturik ez zegoen, ez Eguzkiarendako, ezta gutxiago ere Lurrarendako, bi astrook grabitate-zentro komun baten inguruan grabitatzen baitzuten. Baina kosmologia berrian masak zuen garrantziak jarrera instrumentalista, edo erlatibista, galarazten zuen: Eguzkiaren masa Lurrarena halako ehun eta hirurogeita hamar mila aldiz izanik, grabitate-zentroaren inguruan Eguzkiak Lurrak baino ehun eta hirurogeita hamar mila aldiz gutxiago grabitatuko zuen. Alde horretatik, Newtonek baieztatu zuen Lurra Eguzkiaren inguruan mugitzen zela, eta ez Eguzkia Lurraren inguruan. Galileok eta Keplerrek Kopernikoren hipotesia garatu ondoren, Newtonek errealismo heliozentrikoa biribildu egin zuen. Eraikin geometrikoak Kopernikok emandako esanahi fisikoak, Galileok egindako higiduraren geometrizazioa eta biribiltasun platonikoari Keplerrek urratutako haustura geometrikoa bidean gelditu ziren. Newton izan zen printzipio matematikoetatik hasita egoera fisikoak sistematizatu zituen.

Newtonen ustez grabitate-zentroen higidura-egoera inertziala zen, baina, espazio absolutuarekiko kontsideraturik, zeruko espazioarekiko, planeten tarteko espazioarekiko, geldirik zegoen eta aldaezina zen espazio horrekiko. Espazio absolutuak mugimendu absolutuak definitzen zituen (erlatibitate klasikoaren erreferentzia-sistema absolutua), eta beste edozein erreferentzia-sistema (edozein gorputz, planeta, masa) higidura eta abiadura erlatiboak neurtzeko bakarrik erabil zitekeen. Higikarien egoera inertzialak (gelditasuna edo higidura zuzen uniforme) beti erlatiboak ziren, baina indar baten eraginpeko higidurek (higidura azeleratuak, errotazioak eta astroen orbita-higidurak barne) mugimendu absolutu garbiak adierazten zituzten.

Frantzian mekanizismo kartesiarra sendo garatzen zen bitartean, Cambridgeko eskola erabat neoplatonikoa zen, eta, bertako H. Moreren eta I. Barrowren pentsamenduek eraginda, Newtonek espazio absolutua kreazioa baino lehen existitzen zela eta Jainkoaren espiritu infinitua espazio osoan zabaltzen zela sinesten zuen. Denbora ere absolutua zen, infinitua, erritmo uniforme eta unibertsalekoa. Teoria newtondarrean Galileoren erlatibitate-printzipioaren arrastorik ez zen aurkitzen, eta espazioa eta denbora existentziaren ingurune absolutuak ziren. XX. mendeko erlatibitatearen teorian higidura azeleratuak izaera absolutua galdu zuten, higidura-egoera inertzialak eta ez-inertzialak erlatiboak zirela frogatu zen, eta Einsteinek erreferentzia-sistema absoluturik ez zegoela ondorioztatu zuen.

### 3.4. Newtonen garaiak

Newton baino lehen hierarkiak mundua menperatzen zuen, elizako hierarkiak, hierarkia politikoak, ekonomikoak, militarrik, sexualak eta, batez ere, psikologikoak. Mundua menperatzaileen eta menperatuen artean banatzen zen, eta horren aurrean ez zegoen ezer egiterik. Estatua, Eliza eta boterea estatikoak ziren, jendearen bizimodua beti bera zen, inolako aurrerapenik ez zegoen, pobreak pobre hiltzen ziren, boteretsuak boteretsu eta santuak santu.

Newtondertasunak garai berri bat ahalbidetu zuen; hasieran, elite intelektuaren artean soilik zabaldu zen, baina, denboraren poderioz, mendebaldeko gizarte guztiak kutsatu zituen. Newtonen sinesmen pertsonalak baztertuta, sistema newtondarra diseinatu zegoen Jainkoaren esku-hartzea ekiditeko. Urrutiko indarrak materiaren funtsezko ezaugarri gisa ulertu ziren, eta bere kabuz antolaturiko unibertsoaren irudia zabaldu zen. Joniar filosofoak eta Alexandriako Eskola desagertu zirenetik, estreinako aldiz unibertsoa ulergarria zen, eta lehendabiziko aldiz historian unibertsoa espirituarekiko edo bera ez den beste edozein kausatik independente agertu zen. Gizakien psikologian eredu arrazionalistaren eragina nabarmena izan zen: aldaketak naturaren baitan zeuden, eta partikulen mugimendu mekanikoekin eta indarrarekin uler zitezkeen. Estatikotasunarendako lekurik ez zegoen, eta Newtonek dinamismoa tresna psikologiko gisa erabiltzea ahalbidetu zuen. Urrutiko elkarrekintzen jatorrian Jainkoaren eskua ikusi zutenak ere izan ziren (XVIII. mendeko William Paley teologo britainiarraren hitzak oso ezagunak dira, Jainkoa eta erlojugileen arteko antzekotasunak “argituz”), baina, mekanizismo arra-

zionalistak bultzatuta, zientziaren garapena, Ilustrazioa, Frantziako Iraultza, demokrazia mundu anglo-saxoian sortzea eta kulturaren hedapena matxinada erradikalen fruituak izan ziren.

Frantziako entziklopedistek XVIII. mendean, eta batez ere Lagrangek eta Laplacek, lege newtondarra munduaren ardatz hartu zuten, eta unibertsoa makina zikliko erraldoi gisa imajinatu zuten, Probidentziarik gabekoa, munduaren azken kausa printzipio fisiko-kimikoetan zegoela uste zutelako. Laplacek adierazi zuen noizbait buru aurreratu batek unibertso osoko partikula guztien masak eta higidura-kantitateak zehaztuko balitu, lehenagoko egoerak azaltzeko gauza izanen litzatekeela (historia osoa azalduko luke), eta geroaldia ere erabateko zehaztasunarekin aurreikusiko lukeela. Atomistek, hala nola De la Mettrie, Maupertruis eta Robinetek, sentsazioaren azken kausa materia hutsa zela baieztatu zuten, materialismoa idealismoaren aurka.

Voltaire, Bayle, Fontenelle, Chardin, Boyer, Ockley, Swift, Gray, Charles Louis de Secondant (Montesquieu) eta beste hamaika pentsalari erlijioaren eta Elizaren agintaritzaren aurka agertu ziren, Jainkoaren existentzia ilogikoa eta irrazionala zela aldarrikatu zuten, kolonialismoaren kontra lan egin zuten, eta askatasun intelektuaren alde. Enpirismoa (behaketak eta ikerketak) errealitatea ezagutzeko metodo bakarra zela zabaldu zen, eta egia ezagutzea arrazoiaren eta zientzien bidez lortuko zelakoan zeuden, eta gaude.

Herrien psikologia objektiboki azter zitekeela baieztatu zen, eta horren ondorioz diziplina berriak (filologia, antropologia, psikologia eta abar) agertu ziren.

Iritzi guztien gainetik, egia zientifikoa erabili behar zen. Boterearen eta apezan arbitraritateen kontra, arrazionaltasunak gizakia arazo fisikoak eta moralak gainditzeko gauza zelako baikortasuna eman zuen. Irtenbide arrazionalak bilatzenetik gizakiak berdin jaio garela esatera oso tarte txikia dago, eta subiranotasuna herrian dagoela baieztatzea ere bai. Eskubideak jaio ziren, eta haiekin batera, Estatu Batuen Independentziaren Deklarazioa (“*burrengo egiak berez nabari gisa aldarrikatzen ditugu: gizaki guztiak berdin jaio direla, ...*”) eta Frantziako Iraultza.

Ilustrazioaren obra gorena *Encyclopédie, ou Dictionnaire universel des Arts et des Sciences, traduit des Dictionnaires anglais de Chambers et de Harris* izan zen, politikarien eta Vatikanoren debekuaren aurrean 1766an klandestinoki Frantzia guztian zabaldu zena. Geometria, aritmetika, konbinatoria, mekanika, dinamika, zinematika, marruskadura, astronomia, optika, elektrizitatea, metalurgia, mineralogia, kimika, medikuntza eta beste arlo asko ikuspegi kritiko eta antidogmatikoarekin landu ziren, eta garai baten ikur bihurtu zen.

### 3.5. Metafisika newtondarra

Sistema newtondarraren eskutik oinarri zientifikoko metafisika bat jaio zen, newtondartsuna kosmologian gelditu ez zelako, eta existentziaren beraren zenbait osagai ezkutu eta erabakigarriren eredu bat eman zuelako. Metafisika horretan grabitazio unibertsa-

laren legeak ez zituen bakarrik magnitudeen arteko proportzionaltasunak deskribatzen, mekanismoa ere proposatzen zuen, mundu fisikoko beste arloetara hedatzekoa zena, eta kritika antinewtondarren jatorria izanen zena.

Metafisika newtondarra elementu hauetaz osaturik zegoen:

- 1) gorputzak (astroak, bestelako partikulak, partikula-sistemak).
- 2) hutsa, espazio hutsa.
- 3) indarrak, garai haietan filosofikoki elementu berria zena, urrutikoak, istantekoak, gorputz guztiek sortzen eta jasaten zituztenak, eta  $\frac{1}{r^2}$  rekiko proportzionalak zirenak.

Newtonek, beraz, mundu ez-jarraitua proposatu zuen, gorputz batetik inguruko espazio hutsera trantsiziorik gabe igarotzen zelako. Materiaren berezko izaeraren ondorioz, indarrak agertu ziren; inork ez zekien zehazki zer ote ziren, baina indarren efektuak neur zitezkeen. Inertzia abiadura-aldaketei kontrajartzen zitzairen, indarrek, berriz, materia kitzikatzen zuten, eta distantziara eragiten zuten (erakarren grabitatorioa). Gorputzek indarrak sortzen zituzten, eta gorputzik gabeko indarrik existitu zitezkeenik pentsatzea erabat antilogikoa zen. Hortaz, espazio hutsean ez zegoen indarrik.

Newtonen munduko bi gorputzen arteko elkarrekintzaren mekanismoa irudikatzen, indar grabitatorioaren ezaugarriak (urrutiko elkarrekintza izatea, istantekotasuna,  $1/r^2$ -rekiko proportzionaltasuna) garatu behar dira.

Newtondar ereduaren arabera, indarra gorputz batetik ateratzen da eta bigarren gorputzera ailegatzen da gorputz horretan eragiteko, bigarren gorputza erakartzeko. Bi gorputzen tartean ezer ez dagoenez, elkarrekintza horiek “urrutiko elkarrekintzak” edo “distantziatik gertatutako elkarrekintzak” dira. Baina urrutiko elkarrekintzak tarteko espazioan ez du ezer ere egiten, eta tarteko espazio hutsean indarren existentzia ere debekatuta dago. Gorputz batetik indarra atera, tartean desagertu, eta beste gorputzean berriz agertu egiten omen da. Indarrak ez du espazioan zehar bidaiatzen, eta indarra atera orduko “badaki” nora joan edo zein lekutan berriz agertu. Hori da ez-jarraitutasun espazialak elkarrekintzari ezartzen dion eskema, irudimentsua bezain onartezina.

Elkarrekintzaren bigarren ezaugarriak, istantekotasunak, mekanismorako bestelako mugak ezartzen ditu. Newtonen eskema matematikoaren arabera, bigarren gorputzaren gaineko indarra istantean agertzen da. Beraz, gorputz batetik indarra atera bezain laster, bigarren gorputzean agertzen da. Baina egoera idealak aztertzean, mekanismo horrek ere arazoak ekartzen ditu. Unibertso osoan gorputz bakar bat besterik ez balego, erakartzeko beste ezer ez existitzeagatik indarrik ere ez litzateke sortuko. Une batean sistema horretan bigarren partikula bat sartuko bagenu, lehendabiziko gorputzak indarra istantean igorriko luke. Badirudi indarraren igorpenaren erabakia gorputz igorleak har dezakeela, bigarren partikularen presentzia istantean detektatu eta istanteko erantzuna (indarraren igorpena) sortzen duelako. Indarren izaera arraroari gorputzen erabaki-ahalmen bitxi hori ere gehitu beharko zaio.

Bestalde, bigarren gorputza agertu baino lehen, beraren kokalekuan ezer ez baldin badago, han ezin da indarririk izan. Une batean bigarren gorputza hor jartzen badugu, lehenbiziko gorputzak ezerezetik indar bat kreatuko luke, eta gorputz inerteek zerbait kreatora ahalmena dutela esatea handia da gero, krazio-lana, posible izateaz gain, harri-garria ere badelako.

Eta azken ezaugarriak, distantziarekiko proportzionaltasunak, bestelako inkognitak uzten ditu. Adibidez, bi gorputz bata bestetik gertu daudenean indarrak sendoagoak dira, baina bata bestetik urrutiratzean indarrak ahultzen doaz. Gutxitzen den indarrarekin zer gerta daitekeen ezin du argitu newtondartsunak. Esate baterako, bi gorputzen arteko distantzia bikoizten bada, haien arteko indarra hasierakoaren laurdena izanen da, eta kasu horretan beste hiru laurdenekin zer gertatzen ote den ez da azaltzen. Ezerezetik krea daitekeen bezala, indarra desagertu ere egin daiteke. Baina prozesu horiek deskribatzen dituen eraikin matematikorik ez dago.

Newton bere metafisikarekiko oso kritikoa zen, eta ez zegoen batere konbentzitura ezerezean zerbaitek eragin zezakeenik, adibidez Eguzkia ez dagoen puntuetan Eguzkiak eragin zezakeenik. Hedadura materiaren berezitasun bat den bezala, erakurpen-indarra ere materiaren berezko ezaugarritzat hartzea Newtoni onargaitza iruditzen zitzaion, beste gorputz batean eragitekoa zelako (beste gorputz baten egoera aldatzekoa, erlaziozko ezaugarria beraz). Ukipen bidezko akzioak ez zion arazo kontzeptualik ematen, baina 150 milioi kilometrora dagoen Eguzkiak guregan, Lurrean eta beste planetetan eragiten zuela sinestea ez zen erraza. Newtonek urrutiko akzioaren irudikapen arrazionala bilatu zuen, baina grabitazio-indarren kausaren eztabaida zabalik utzi zuen, eta urrutiko indarren mekanismoa argitzen ez zen bitartean errealitatea hain ongi deskribatzen zuen eraikin matematikoa ontzat eman zuen. Bere hitzak, “*hypotheses non fingo*” (hipotesirik ez dut egiten), adierazgarriak izan ziren.

Hurrengo belaunaldietan elkarrekintzen ikerketa bitan banandu zen: alde batetik, urrutiko akzioaren teoriak edo teoria newtondarrak, eta, bestetik, eremuen teoriak. Lehendabiziko korrontearen arabera, partikula materialek urrutiko indarrak sortzeko ahalmena zuten, indar horiek erakurpenekoak edo aldarapenekoak izan zitezkeen eta distantziarekin nola edo hala erlazionatuta zeuden. Eremita-teorien aldekoak, edo korronte antinewtondarra, espazio huts absolutuaren kritikan oinarritzen ziren, isurkien existentzia proposatu zuten –terra adibidez–, eta isurki horiek zenbait elementu fisikoaren igorleak zirela adierazi zuten: beroa, elektrizitatea, magnetismoa, argia eta abar.

## **3.6. Korronte antinewtondarren sorrera**

### **3.6.1. Newtondartsunaren kritika**

Ikuspegi kritiko antinewtondarraren arabera, espazio absolutua Newtonen ekarpenik handienen sorburua izan zen. Mekanikaren legeak eta grabitazio unibertuala ondorio logikoak besterik ez ziren, eta espazio geldia, mugiezina, aldaezina, hutsa eta isotropoa –norabide guztietan berdina– ondorio haien beharrezko premisa zen.

Horrelako espazioan inertzia, kausa-efektua eta akzio-erreakzioa definitu ziren eran ezinbestez gertatzen ziren hasierako premisak beste aukerarik uzten ez zuelako, eta urrutiko indarren proportzionaltasuna  $\frac{1}{r^2}$  rekiko espazio horren ondorio geometrikoa zen. Newtondertasunaren eraikin matematikoa kontuan hartuta ere kritika horiek haren egiazkotasuna zalantzan jarri zuten.

Espazio newtondarraren izaerak ez zuen ahalbidetzen espazioak berak higiduran eragitea, eta mekanikaren hiru legeak ezintasun horren aipamen errepikakorra besterik ez omen ziren:

- a) Inertziaren legea: gorputz bat geldirik baldin badago, kanpoko indarririk gabe eta espazioak berak ahalmenik ez baldin badu, gorputza ez da mugitzen hasiko, mugimendurako kausarik ez dagoelako. Eta higikari bat uniformeki mugitzen ari baldin bada, azeleratzeko edo frenatzeko edo alde batera makurtzeko kausarik gabe uniformeki higitzen segituko du. Higidura aldatzea zentzugabea litzateke, ezinezkoa litzateke espazioak berak ezertarako ahalmenik ez badu.

Baina espazioa hutsa izan beharrea partikulaz beterik balego, eta partikulok etengabe mugitzen arituko balira, gorputz bat, beharbada, azeleratu egingo litzateke beste gorputz batek indarririk egin gabe, espazio soilaren eraginarengatik.

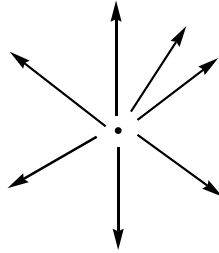
- b) Masa-ekintzaren legea: gorputz batek beste batean eragiten badu, indar bat bidaltzen badio, bigarren gorputza urrutiratu edo gerturatu egingo da indarraren norabidean, eta hori ezinbestekoa da espazio isotropoaren ideia aurretik onartuta. Espazioa norabide guztietan baliokidea bada, urrutiratzean (edo gerturatzean) gorputzak bere kabuz ezin du norabide batera alboratzea aukeratu (eskuinetara, adibidez) eta ez beste norabidera. Indar zentralaren kontzeptua, beraz, espazio absolutuaren ezinbesteko ondorioa da.

Baina espazioa zurrumbiloz beterik balego, zurrumbiloka mugitzen diren partikulaz osaturik balego, zurrumbiloek, beharbada, ekintzaren norabidea aldatuko lukete. Izar batek planeta bat bere aldera erakarriko luke, baina tarteko espazioarengatik planeta zentrorantz joan beharrea, beharbada, alde batera desbideratuko litzateke. Eta indarraren intentsitatea eta sorturiko azelerazioa proportzionalak izan beharrea, tarteko espazioaren eraginaren medioz bestelako erlazioak, zehaztu ezinekoak, lirateke.

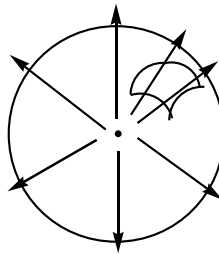
- c) Akzio-erreakzioaren legea: talketatik deduzituriko lege horretan momentu linealaren trukea proposatzen da, gorputz batek galtzen duena besteak irabaztea. Eta hori horrela gertatzen da gertaeran eragile bakarrak gorputzak direlako, espazioari zereginik gabe utziz.

Grabitazio unibertsalaren legea kritikatzeko fluxuarekin erlazionaturiko kontzeptuak erabili ziren. Erakarpen-indarrak erradioaren karratuarekin duen lotura espazioaren au-

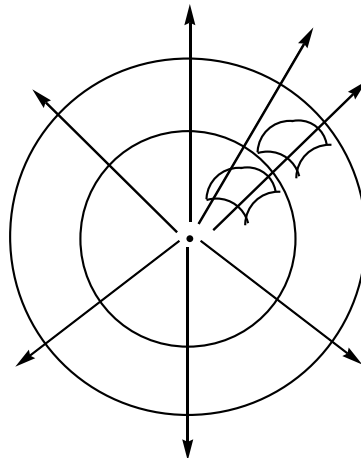
reiritziaren ondorioa dela erakusteko, eman dezagun puntu batean argi-foku bat dugula eta argia norabide guztietan igortzen duela:



Argiaren intentsitatea izpien kopuruarekin irudika dezakegu: izpi askok intentsitate altua adieraziko dute, eta izpi gutxik intentsitate txikia. Igorlearen inguruan esfera bat marrazten badugu, esferaren azalera osoan ( $4\pi r^2$ ) argiaren intentsitate osoa harrapatuko da, argi-izpi guztiak harrapatuko dira. Beraz, esferaren azalera osoa eta intentsitate osoa erlazionaturik daude. Esferaren zati bateko intentsitatea txikiagoa izanen da, noski:



Bigarren esfera bat marrazten badugu, erradio handiagokoa ( $R > r$ ), esfera horren azalera osoan ( $4\pi R^2$ ) berriz ere intentsitate osoa harrapatuko da, baina zati berean lehen esferan baino intentsitate txikiagoa egonen da:





Agerian dago erradioaren eta intentsitatearen arteko erlazioa alderantziz proportzionala dela:

$$\frac{\text{Intentsitatea bigarren esferan}}{\text{Intentsitatea lehen esferan}} = \frac{\text{Lehen esferaren azalera}}{\text{Bigarren esferaren azalera}} = \frac{4\pi r^2}{4\pi R^2} = \frac{r^2}{R^2}$$

Bigarren esferaren erradioa bikoitza bada ( $R = 2r$ ), azalera berean intentsitatea lau aldiz gutxitzen da, erradioaren karratuarekiko menpekotasun garbia adieraziz:

$$\frac{\text{Intentsitatea bigarren esferan}}{\text{Intentsitatea lehen esferan}} = \frac{r^2}{R^2} = \frac{r^2}{(2r)^2} = \frac{1}{4}$$

$$\text{Intentsitatea bigarren esferan} = \frac{1}{4} \text{ Intentsitatea lehen esferan}$$

Argiaren orde ez erakarpen-indarra jarri, eta argi-izpiak indar-lerroekin ordeztzen baditugu, distantzia bikoitzean erakarpen-indarra lau aldiz gutxitzea logikoa da. Beraz, erakarpen-indarrak eta erradio karratuaren alderantzizkoak erlazionatuta egon behar dute:

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

### 3.6.2. Lehen metafisiko antinewtondarrak

Newtondertasunaren kritika ikusita, hurrengo mendeetan planteatu ziren espazio hutsari buruzko galderek jarrera eta metafisika desberdin bat sortu zuten, teoria newtondarra gainditzea helburu zutenak, eta munduaren errealitatea hobeki irudikatzeke asmoa zutenak.

Espazio kartesiarraren garapena orduko alternatiba bakarra zen, eta horretan aritu ziren pentsalarien artean Gottfried Wilhelm von Leibniz (Alemania, 1646-1716), Ruggiero Giuseppe Boscovich (Kroazia, 1711-1787) eta Inmanuel Kant (Alemania, 1724-1804) nabarmentzekoak dira. Teorialariok oso ideia abstraktu, ulertezin eta ilunak asmatu zituzten, zehaztasun matematikoa erabili gabe ikuspuntu kualitatiboak jorratu zituzten, askotan teologiaz kutsaturikoak, baina hurrengo garaietan garatuko zen eremuen teoriar eragin handia izan zuten.

Leibnizen ustez, naturan bat-bateko aldaketarik ez zegoen, eta jarraitutasuna ezaugarri unibertsala zen. Hutsa Jainkoaren inperfekzioa zelakoan, mundua indar-puntuz osaturiko “itsaso” jarraitua zela pentsatzen zuen, errealitatearen osagai bakarria indarra zela, eta indar guztiak izaera berekoak zirela. Leibnizen asmoa hedaduradun materia kartesiarra azaltzeko teoria dinamikoa sortzea zen, eta Boscovich eta Kant programa hori betetzen saiatu ziren.

Boskovichen arabera, espazioa hedadurarik gabeko puntuz osaturik zegoen, eta puntu bakoitzak inertzia-kantitate bat edo masa bat zuen. Puntu bakoitzari elkarturik, halaber, indarrak zeuden (indar ez-newtondarrak, azelerazioaren multiplo soil kontsideraturikoak), nahiz indar horien banaketa edo kokapenak zehaztu ez. Urrutiko elkarrekintzak erabat baztertu gabe, puntu batean indar batek eragiten baldin bazuen puntu horrek mugitzeko joera hartuko zuela proposatu zuen.

Kantek baieztatu zuen mundua betetzen zuen eterrean gure pertzepzioen sorburua ziren indarrak agertzen zirela (*Opus Postumum*). Gorputz materialak erakarpen- eta aldarapen-indarren eremu jarraitua besterik ez ziren, eta materia, espazioa, denbora eta higadura indarrek sorturiko sententzioak ziren (*Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft*, Zientzia naturalaren lehen printzipio metafisikoak). Gertaera guztiak indarren bidez azaltzen zirenez, hedaduradun atomoen existentzia alferrikako kontzeptua zen, ezer azaltzen ez zuena, soberako ideia alegia.

Laburbiltzeko, teoria antinewtondarren ezaugarri orokorrak hauek ziren:

- errealitatearen oinarritzko osagaia (bakarra edo ez) indarra zen.
- espazio hutsaren ideia baztertua, espazioa betetzen zuen elementua indarra edo eter kartesiarra izan zitekeela pentsatzen zuten.
- indar guztiak, funtsean, indar bakar baten adierazpen desberdinak ziren (indarren identitatea).
- aldaketa guztien azpian konstante mantentzen zena indarra zen (indarraren kontserbazioa), nahiz indarrak itxura desberdinetan agertu.
- erakarpen-indarrek bezala, aldarapen-indarrek ere existitu behar zuten. Distantzia motzetan indarren ondorioa aldarapena izanen zen, eta distantzia handietan erakarpena. Horrekin, lotura kimikoen azalpena, gorputzen gogortasunarena, elastikotasunarena, bibrazio-higidurarena eta beste fenomeno batzuenak ere eman zituzten.
- metafisika hori defendatzeko, arrazoi teorikoak erabili ziren, zehaztasun matematikorik gabe.

### 3.7. Hurrengo garaietako aurkikuntzak

XIX. mendearen hasieran zientzia oso garai interesgarrian zegoen. Adibidez, John Daltonek (Ingalaterra, 1766-1844) gero eta froga gehiago ematen zuen teoria atomikoaren alde, eta kimikaren garapena erraztu zuen. Errekuntzetako fenomenoak aztertzeke erregaitik isurki bat aieratzen zelako hipotesia (flogistoren teoria) erabili zen, hautsak erregaia baino arinagoak izatearen azalpena, baina Antoine Laurent de Lavoisierrek (Frantzia, 1743-1794), metaletan aurkituriko emaitzetan oinarrituta, hipotesi faltsua zela frogatu zen (metal bat “erretzean” pisua irabazten denez, flogistoak pisu negatibokoa izan behar baitzuen).

Beroaren hedapena azaltzeko ere beste isurki bat proposatu zen (kalorikoaren teoria), baina Benjamin Rumfordek (AEB, 1753-1814) beroa eta partikulen mugimendua erlazioan zituen. Prescott Joulek (Ingalaterra, 1818-1889) beroaren baliokide mekanikoa ikertu zuen, eta zirkuitu elektriko batean agerturiko beroa intentsitate elektrikoaren karratuarekiko proportzionala zela aurkitu zuen (“Jouleren legea”).

Beste ikerketa-lerro desberdin batean Leibnizek adierazi zuen fisikaren oinarritzko printzipioa “vis viva”ren kontserbazioa zela (vis viva edo indar bizia,  $mv^2$ ), Descartesen momentuaren ( $mv$ ) kontserbazioaren kontra.

Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtzek (alemana, 1821-1894) egiaztatu zuen partikula-sistema batean indar bat aplikatuta, indarrak eginiko lana eta sistemak irabazitako vis vivaren erdia berdina zirela ( $F \cdot e = 1/2 \cdot mv^2$ ). Ondoren, frogatu zuen indar zentraleko sistema batek partikula batean eginiko lana eta partikularen tentsioa (oraingo energia potentziala) berdina zirela ( $F \cdot e = mgh$ ), eta tentsioaren galerak vis viva handitzea ekartzen zuela ( $\Delta(mgh) = \Delta(1/2 \cdot mv^2)$ ). Beraz, kanpoko indarrak gabe, tentsioaren eta vis vivaren erdiaren baturak konstante izan behar zuen ( $mgh + 1/2 \cdot mv^2 = \text{cte.}$ ), eta kanpotik egindako lanak batura horren gehikuntzarekin bat etorri behar zuen ( $F \cdot e = \Delta(mgh + 1/2 \cdot mv^2)$ ).

Thomas Youngek (Ingalaterra, 1773-1829) vis vivari “energia” deitu zion, eta tentsioari “energia potentzial”. William Thompson Kelvinek (britainiarra, 1824-1907) vis vivaren erdiari “energia zinetiko” izena jarri zion.

Ikerketa horiekin energiaren kontzeptua fisikan eta bizitzan sartu zen. Baina energia sistemaren ezaugarri bat zen, integral bat besterik gabe, ezin zen substantzia gisa irudikatu oso itxura desberdinak hartzen zituelako (potentziala, zinetikoa eta bestelakoak). Denborarekin, energia fisikaren arlo guztietara zabaltzen hasi zen, eta azalpen eta emaitza ezin hobeak erdietsi ziren: energiaren kontserbazioa fisikaren oinarritzko kontzeptu bilakatu zen.

### **3.7.1. Elektromagnetismoaren lehen pausoak**

XIX. mendean fenomeno elektriko eta magnetikoak kontu dibertigarriak ziren, ia jokoak. Baina ikerlari batzuen aurkikuntzek ikerketa-lerro berri bat ireki zuten fisikaren barruan. Elektrizitatearen eta bestelako fenomenoaren arteko transformazioari buruzko ikerkuntza asko egin ziren, eskema newtondarrak azaldu ezin zituenak baina Leibnizek adierazitako indar guztien batasunarekin bikain ezkontzen zirenak.

Thomas Johann Seebeckek (Alemania, 1770-1831) elektrizitatea bero bihurtzea lortu zuen. 1800an Alessandro Voltak (Italia, 1745-1827) lehen pila elektrikoa egin zuen, eta substantzia kimikoetatik elektrizitatea lor zitekeela frogatu zuen. William Nicholonek eta Anthony Carlislek (Ingalaterra, 1753-1815 eta 1768-1840) substantzia disolbatuen deskonposaketa elektrolitiko (lehen elektrolisiak) lortu ondoren, elektrizitatea energia kimiko bihurtzeko zitekeela erakutsi zuen. Humphry Davyk (ingelesa, 1778-1829) lotura kimikoen izaera elektrikoa proposatu zuen. Garai haietan, atomisten ametsa (atomoen existentziaren frogak fisikoa) elektrizitateari esker betetzeko zegoen.

Hans Christian Oersted (Danimarka, 1777-1851) erabat kantianoa zen, eta, indarren identitatean oinarrituta, indarrak mota batetik bestera eralda zitezkeela frogatzeko lanean zebilen. Hurrengo hamarkadetako ikerketa-lerro guztien garapena baldintzatuko zuen esperimentuan, Oerstedek izaera desberdineko hiru fenomeno fisiko konbinatu zituen: argia, elektrizitatea eta magnetismoa.

Benjamin Franklinek (AEB, 1706-1790) ekaitzetako tximistak korronte elektrikoak zirela frogatu ondoren, eta argiaren polarizazioa ere gertaera elektrikoak zelako ideian funtsatuta, Oerstedek proposatu zuen argia polarizazio elektrikoaren uhin desberdinez osaturik zegoela. Proposamenak bazuen ezinbesteko ondorio bat: uhin horien angeluak argi-izpiarekiko askotarikoak izanzen ziren.

Ekaitzek iparrorratzen norabidea desbideratzen zutela gauza jakina zen, eta, egoera bera laborategian errepikatzeke asmatan, 1820an korronte elektrikoak orratz magnetikoetan nola eragiten zuten (*istilu elektrikoak*, bere hitzetan) ikertu zuten.

Bere esperimentu famatuak elektrizitateak gori-gorian jarritako platinozko hari finak erabili zituen, hariak tximistek bezala jokatu zutelakoan. Harietatik ateratako argiaren polarizazioa edozein angelutan hedatuko zen, eta horregatik hariaren eragin magnetikoa eta elektrikoak hariarekiko zeharkako norabideetan ere izanzen ziren.

Oerstedek behatu zuen haria iparrorratzen gainean eta paralelo jarrita, iparrorratza alde batera desbideratzen zela perpendikular jarri arte, eta haria azpian jarrita orratz magnetikoa beste aldera desbideratzen zela perpendikular jarri arte ere bai. Korronteen intentsitatea igota, gutxiago berotzen ziren hari lodiak erabilia, edo haria gerturatuta, eragina handiagoa zela egiaztatu zuen.

Esperimentu horiek indarren identitatearen garaipen moduan interpretatu ziren. Begi-bistakoa zen eragin horiek indar zentral newtondarraren antzik ez zutela, hariaren eragina beraren ardatzarekiko zirkularki hedatzen zela zirudielako. Baina teoria newtondarrean indar zentralen hedapena zuzena zen, inola ere ez zirkularra.

Etorkizunerako abiapuntua izanzen zen esperimentu horrekin bukatu ziren Oerstedek ekarpenak. Haren emaitzak ulertzeko azalpenak oso ilunak eta isurki ezkutuz beterikoak izan ziren, baina argi gelditu zen metafisika newtondarraren arabera hain ulergaitzak ziren gertaerok bestelako tratamendua behar zutela, hain zuzen ere eremuen teoriak emanen zieten.

### **3.7.2. Newtondar korronteak elektromagnetismoan**

Fenomeno elektriko eta magnetikoen ikerketarekin batera, eredu antinewtondarrak zabaltzen hasi ziren. Hala ere, zientzialari batzuek ikerketa-lerro newtondarraren alde apustu egin zuten, eta bi korronte zientifikoen desberdintasunak sakontzen joan ziren.

André-Marie Ampère (Frantzia, 1775-1836) eta Charles de Coulomb (Frantzia, 1736-1806) erabat newtondarrak ziren. Indarren identitatea eta indarren kontserba-

zioa beharrezkoak ez zirela sinetsita zeuden, eta fenomeno desberdinetarako kausa desberdinak zeudela adierazi zuten. Adibidez, elektrizitatearen jatorria gorputzetan zirkulatzeko zuten bi isurki ziren, isurki elektriko positiboa eta isurki elektriko negatiboa, izaera ezezagunekoak. Hipotesi horretan oinarriturik, elektrizitaterako lege newtondar bat proposatu zuten, distantziaren karratuaren menpe zegoen indarra kalkulatzeko. Magnetismoa beste bi isurkirekin azaltzen zen, eta indar magnetikoaren intentsitatea ere beste lege newtondar batekin kalkulatu zuten.

Bestalde, garbi zuten izaera desberdineko fenomenoaren artean elkarrekintzak ezinezkoak zirela. Adibidez, bi korrante elektrikoaren artean elkarrekintza agertzen zen, bi imanen artean ere bai, baina elektrizitatearen eta magnetismoaren arteko elkarrekintzarik aurkitzea metafisikoki ezinezkoa zen, bi isurki desberdinez osaturik zeudelakoan, eta grabitatearen eta elektrizitatearen artean ere ez.

Gauzak horrela, Oersteden esperimenduaren emaitzak teoria newtondarra txundituta utzi zuen. Horren berri izan zuenean, Ampère ikerketa zientifikoa murgildu zen gertaera horiek newtondertasunaren barruan azaltzeko asmotan. Bi eroaleren arteko erakarpen- eta aldarapen-indarrak behatu zituen, eta solenoideen jokaera magnetikoa ere aurkitu zuen. Azkenean, egitura matematiko bat eraiki zuen korrante-elementuen arteko indar zentralak erabiliz, eta indarra distantziaren karratuarekin gutxitzen zela frogatuz, baina, hala ere, beraren azalpena teoria newtondarretik pixka bat aldentzen zen, korrante-elementuen arteko angeluak sartu behar izan zituelako, eta angeluak  $0^\circ$  edo  $180^\circ$  ez zirenean ere indarrak nabariak zirela onartu behar izan zuelako.

XIX. mendearen erditik aurrera, urrutiko indarren teoria berriak agertzen hasi ziren. Newtondar klasikoek esaten zutenaren kontra, newtondar berrion ustetan indarrak, oro har, abiaduraren eta azelerazioaren menpe zeuden (elektromagnetismoaren eremuan aurkiturikoa) eta ez bakarrik kokapenaren menpe. Teoria horiek oso baliagarriak izan ziren Hertzek uhin elektromagnetikoak aurkitu bitartean, eta urrutiko indarren teoria guztiak baliogabetu bitartean.

Wilhelm Weberrek (Alemania, 1804-1891) elektrizitate estatikoa, eroaleen erakarpena eta korronteen indukzioa bateratzen zituen teoria bat osatu zuen, teoria newtondarrean oinarriturik eta tratamendu matematiko zehatzak emanez. Materia arrunta partikula kargatuz osaturik zegoela uste zuen, eta elektrizitate estatikoko fenomenoak (gorputz kargatuen arteko erakarpenak eta aldarapenak) distantziaren karratuaren alderantzizkoaren legearekin azaldu zituen. Korrante elektrikoa partikula kargatuen fluxua zela jo zuen, Gustav Theodor Fechnerren (alemana, 1801-1887) hipotesietan oinarrituta. Korronteen arteko erakarpena eta aldarapena partikulen abiadurekin azaldu zituen, eta, fenomeno induktiboak ulertzeko, partikulen azelerazioa erabili zuen. Dena dela, mundu osoko zientzialari-taldeek elektrizitatearen ikerketan sakontzen zuten ahala fenomenologia elektromagnetikoa ere handituz zihoan, eta Weberrek ez zuen lortu elektromagnetismo osorako eredu bateraturik, korrante eta partikula kargatuen arteko elkarrekintza ez zuen azaldu, lotura

kimikoaren izaera ere ez, eta, oro har, materiaren eta eremuen arteko elkarrekintza ez zuen zehaztu.

Grabitazioan ere, faktore berriak sartzeko asmotan eta Merkurioren abiaduraz baliatuta, Weber saiatu zen planeta horren orbitaren anomaliak azaltzen, baina aintzat hartzeko emaitzarik ez zuen lortu.

## IV.

HUTS-HUTSA BAI,  
HUTS-HUTSIK EZ





#### 4.1. Jakintza zientifikoaren sorburu berriak

XVIII. mendeko despota ilustratuen mezenasgoak Europa zentraleko elkarte zientifikoak finantzatu zituen, batez ere Luis XV.ak eta Luis XVI.ak Parisen, Frederiko Handiak Berlinen eta Petri Handiak eta Katalina Handiak San Petersburgon. Hurrengo hamarkadetan elkarte horiek, unibertsitateek eta hezkuntzako instituzio berriek Ilustrazioko ideiak barreiatu zituzten. Garai haietako ideia zientifikoek filosofian eta arteetan ere munduaren ikuskera arrazionalista indusitu zuten: “*Sapere aude! Jakiten ausartu! Honatx Ilustrazioaren ezaugarria!*” idatzi zuen Kantek. Eta XIX. mendean hain konplexuak ziren ia Europa osoko gizarteetan, arrazoiarekiko eta zientziarekiko konfiantza intelektual berria nagusitu zen.

1789ko Frantziako Iraultza burututa, 1799an Napoleonek boterea eskuratu zuen, eta irakaskuntza Frantzia berriaren eraikuntzaren ardatz bihurtu zuen. Britainia Handiko industriaren eta unibertsitateen sendotasunaren aurrean, gaur egun ere famatuak diren Pariseko institutu berriak (*École Polytechnique*, *École Normale Supérieure* eta abar) fundatu ziren, eta Napoleonek zientzia jarri zuen gero eta industrializatuago zegoen estatuaren zerbitzura. Institutu haiek meritokratikoak ziren, irakaskuntza-metodo berriez hornitukoak, eta garai haietan bezala orain ere enpresa frantsesetako pertsonal exekutiboan eta maila altuko funtzionarioen portzentaje liluragarri handia hezten dute.

1810eko Alemanian, frantsesen okupazioaren garaian, Humboldt-berlingo Unibertsitatea (lehen *Königliche Friedrich-Wilhelms-Universität*, orain *Humboldt-Universität zu Berlin*) fundatu zuen, “*unibertsitate moderno guztien ama*”. Lege-, medikuntza-, filosofia- eta teologia-katedra klasikoekin batera bestelako dizipliniek ere begirune berezia merezi izan zuten, eta ideal humanistak, ez utilitaristak, eta ezagutzaren ikusmolde estetikoak lantzen hasi ziren. Unibertsitate hartan Hegel, Schopenhauer, Planck, Einstein eta beste hamaika pentsalari aritu ziren, eta dagoeneko 29 Nobel sari ekoitzi ditu. Espiritu bera Göttingengo Unibertsitateaz (1734ean jaiotakoa) eta Munichekoaz (1826koa) jabetu ondoren, lizentziatu laiko gazteen ekarpenek Alemaniako bigarren hezkuntzako zentro berriak ere, *Gymnasien*, eraldatu zituzten.

#### 4.2. Eremita-teoriak

XIX. mendeko iraultzen Europa hartan ideia abstraktu, berri eta ausarten aplikazioa posiblea zen. Makinekiko lilurak Ingalaterrako eta Frantziako giro zientifikoetan ikusmolde praktikoa, esperimental, eragin zuen; Alemanian, berriz, teoriarako grina nagusia zen. Testuinguru hartan, eta ia bi mendez eztaba daezina izan ondoren, fisika newtondarrak

erakutsitako munduaren irudikapenak zenbait arlotan, elektromagnetismoan batez ere, ez zituen fenomeno guztiak azaltzen, eta bestelako azalpenen premia oso nabaria zen.

Lehenbizi Faraday, eta ondoren W. Thomson, Maxwell, Helmholtz, Heaviside, Hertz, Lorentz eta Einstein, mundu fisikoaren izaera eta misterioak ezagutzeko beste pentsamendu-lerro bat garatzen saiatu ziren: eremuen teoriak. Hasieran elektromagnetismorako irudikatuak izan baziren ere, teoria haiek gizakien bizi modua erabat aldatu zuten teknologia elektriko eta elektronikoei esker. Urte batzuk geroago, Einsteinen erlatibitatearen teoria orokorrak (eremu-teoria batek, alegia) elkarrekintza grabitatorioa ere azaldu zuen, eta unibertsoaren irudia goitik behera astindu zuen.

Eremuetan oinarriturikoa mekanika antinewtondarra zen, eta bi mekaniken arteko desberdintasunak sakonak ziren zinez:

- Newtonen mundu ez-jarraituaren kontra, eremuen teorietan espazio hutsa ez zen existitzen, gorputzetik ateratzean beste “zerbait material” aurkitzen baitzen; Kantek eta Boskovichek irudikatu zutenaren moduko errealtate jarraitua, beraz. Hain zuzen ere, jarraitutasuna arazo metafisikoaren mamia zen.
- Newtonen metafisikak ezinbestekoak ziren urrutiko elkarrekintzak, bi gorputzen tartean zegoen espazio hutsa zeharkatzen zutenak. Eremu-teorietan, ordea, elkarrekintza guztiak elementu materialen arteko ukipenen bidez (talkak) gertatzen ziren. Fisika newtondarraren ez-jarraitutasun espazialaren kontra, teoria horien arabera indarra puntu batetik ateratzen zenetik beste puntu batera ailegatu bitartean tarteko espazioak indar horretan eragiten zuten.
- Newtonen eskema matematikoan indarra bigarren gorputzean instantean agertzen zen, baina eremu-teorien arabera ez. Gorputz batek espazioan distortsio bat sortzen zuenean, desitxuratze hori espazioan barrena partikulaz partikula hedatzen zen, eta desitxuratzea bigarren gorputzeraino iritsi bitartean denbora-tarte bat igarotzen zen. Fisika newtondarreko instantekotasunaren kontra, eremuen teorian denborazko jarraitutasuna proposatzen zen.
- Newtonen arabera indarren sortzaileak gorputzak ziren, baina eremu-teorietan elkarrekintza guztien kausa espazioa zen, espazioak bere konposizioa zuelako, bere propietateak zituelako, espazioak berak bere ahalmenak zituelako.

<b>Fisika newtondarra</b>	<b>Eremu-teoriak</b>
espazio hutsa	zerbaitetaz beteriko espazioa
naturaren izaera ez-jarraitua (gorputzak, espazio hutsa)	naturaren izaera jarraitua (gorputzak, espazio bete)
indarrak ez gorputzik gabe	eremuaren existentzia independentea gorputzekiko
urrutiko elkarrekintzak	ukipen bidezko elkarrekintzak
istanteko indarrak	elkarrekintzaren hedapen-abiadura finitua

### 4.3. Faraday

Michael Faraday (Ingalaterra, 1791-1867), Londreseko familia apal batean jaioa, garai haietako mutiko eta neskato guztiak bezala, eskolara gutxi joan zen, eta hamahiru urterekin koadernatzaile baten tailerrear laguntzaile hasi zen. Irakurketarako zaletasuna han piztu zitzaion, eta filosofia naturaleko liburuetan aurkitzen zituen esperimenduak bere kabuz errepikatzen saiatu zen.

Beta zuenean, ingeles dotorea menperatzeko ikastaroetara joaten zen, eta zientziari buruzko hitzaldi guztietara ere bai (*City Philosophical Society* elkartearen). Sir Humphrey Davy kimikariak 1812an egindako bisitak Faraday txundituta utzi zuen, eta hitzaldiko apunteak koadernatuta bidali zizkion, berarekin lan egiteko eskaera batekin. Hurrengo urtean Davyren laguntzaile izan zen, geroago beraren ikaslea, eta, orain, Faraday zientzialari nagusietakotzat jotzen da.

Zientzian aritzea eta pobretasunetik ateratzea Faradayren ametsak ziren, eta oso gizon argi, atsegin, ongi hezi eta langile bihurtu zen. Gau eta egun ikerkuntza-lanetan ibili zen, nahiz tarteka kolapso fisiko eta mental batzuk sufritu. Prestakuntza matematiko eskasekoa zelako, metafisikatik zuzen esperimenduetara jotzen zuen, irudimenaz eta sormenerako ahalmen ikaragarriaz lagunduta, baina zehaztasun matematikorik gabeko teoria ilun samarrak erabili zituen. 1862an, *Experimental Researches in Electricity* liburuan, bere esperimendu gehien azalpena argitaratu zuen.

#### 4.3.1. Faradayren lehen pauso antinewtondarrak

Faradayk metafisika newtondarraren funtsezko arazoak garbi ikusten zituen, eta elektrizitatean eta magnetismoan gauzatzen ari ziren garapenen aurreko eredu newtondarraren ezintasuna ere bai.

Ampèrerekin izandako liskar zientifikoak sonatuak izan ziren. Zeinu bereko kargen arteko aldarapena eta noranzko bereko korronteen arteko erakarpena azaltzeko Ampèrek erabiltzen zituen isurkien hipotesia, Faradayren iritziz, onartezina zen, bi fenomeno horiek nolabait kontrajarrita zeudelako eta ez zirelako modu berean azaldu behar.

Bestalde, Faradayk aurkituriko “errotazio magnetikoak” (imanak zirkularki mugitze-ko joera) Ampèrek indar zentralen bidez (lege newtondarreko indar erradialak) azaldu zituen, baina Faradayren ustetan indar magnetikoen izaera zirkularra begi-bistakoa zen, eta indar zentralen medioz ulergaitza.

Faradayren jarrera garbia zen: elektrizitatearen egiazko teoriak fenomeno elektriko guztiak azaldu behar zituen, teoria bakarra elektrizitate estatikorako eta korronteetarako, kontuan hartuta eroaleen arteko fenomenoaren oinarria eroaleen inguruko higidura zirkularrerako joera zela (oso nabarmena indukzioaren fenomenoetan).

Davyk hain ongi menperatzen zituen disoziazio elektrolitikoetan ere Faradayk euskarri sendoak aurkitu zituen (erreakzio kimiko mota horri loturiko lexikoa Faradayk berak asmatu zuen: elektrodo, elektrolito, ioi, katioi, anioi eta abar). Deskonposaketa elek-

trolitiko eta zirkuitutik pasaturiko elektrizitatearen kantitate finkoa erlazionatuz, Faradayk lotura kimikoaren izaera elektrikoa funtsatu zuen. Bestalde, disoziazio horietan elektrodo biribiletako alderdi guztietan, aurreko eta atzeko aldean, hauspeakina berdinerdin agertzen zela oso nabaria zen. Urrutiko elkarrekintza baten bidez elektrodoaren aurreko aldean hauspeakin gehiago agertzea logikoa izanen zen, baina esperimenteren emaitza indar-lerro kurbatuen existentziak bakarrik azal zezakeen. Upel elektrolitikoetako bi elektrodoen artean zetazko hari finak sartu zituenean, eta bere begien aurrean indar-lerro kurbatuen itxura hartuta hariak makurtu zirenean, Faradayk bere ideien frogak ekidinezina aurkitu zuela sinetsi zuen. Behaketa horren ondorioak handiak izan ziren, eta fisikari newtondar batzuk, hala nola Coulomb, bi kargaren arteko indarrak adierazteko indar-lerro kurbatuak erabiltzen hasi ziren.

#### **4.3.2. Faradayren eremu-teoria**

Oersteden esperimenteren emaitzaren azalpenean, Faradayk eremu-teoria bat ikusten zuen: *“istilu elektrikoa ez dago eroalearen barruan harrapatuta, inguruko espazioan barreiaturik baitago, bestela orratzean eraginik ez legoke”*.

Elektromagnetismoaren fenomenoak azaltzeko ereduak antinewtondarra izan behar zuen; horregatik, Faradayren oinarriak Leibniz, Boscovich eta Kant izan ziren. XIX. mendeko bigarren hamarkadako uneren batean Faradayk eremu-teoria berri bat, metafisika berri bat asmatu zuen, baina zehaztasun matematikorik gabekoa.

Oro har, Faradayren metafisikaren funtsezko ezaugarriak hauek ziren:

- 1) eremua, errealitatearen osagai bakarra
- 2) urrutiko elkarrekintzaren ukapena
- 3) indarren identitatea edo batasuna
- 4) indarren kontserbazioa
- 5) indarren tentsio-efektua gorputzetan

#### **1) Eremua, errealitatearen osagai bakarra**

Indar-multzoari Faradayk “eremu” deitu zion, bere metafisikako substantzia fisiko bakarra, espazio osoa betetzen zuen substantzia unibertuala. Gorputzen solidotasuna, masak eta fenomeno elektromagnetikoak itxurazkoak omen ziren, ez ziren errealak, haien funtsa indar-lerroak baitziren, eta elkarrekintza eta aldaketa guztien kausa ere eremua zen.

Indarrak beti hor nonbait zeuden, errealitatearen egiazko osagaia ziren, indarrak entitate errealak ziren, indar-lerroak espazioan existituko balira bezala, ikusezinak baina detektagarriak.

Espazioko puntu bakoitzean indarrak zeuden beti, indar bakoitza bere intentsitatearekin, norabidearekin eta noranzkoarekin. Eta puntu bakoitzean indar-lerroak modu berezi batera jarrita zeuden, banaketa espezial berezia hartzen

zuten. Gertaera guztietan (aldaketa mekanikoak, kimikoak edo beste edozein) puntu horretako indar-lerroen egoera aldatzen zen.

Azpiko errealitate horren (eremua) eta itxuren artean (gertaera mekaniko, kimiko eta elektromagnetikoak) lotura bat aurkitzea Faradayren arazo nagusia izan zen, eta lotura horren adierazpenik handienak disoziazio elektrolitikoetan eta indukzio elektromagnetikoan aurkitu zituen, eta bietan, gainera, perturbazioaren hedapen-abiadura finitua nabaria zen. Disoziazio elektrolitikoak burutzeko denbora-tarte zehatzak beharrezkoak ziren bezala, korronea eroaten zuen eroaleak bigarren kable batean induzituriko korronearen intentsitateak balio maximoa lortu arte denbora-tarte bat ere behar zuen. Horretan oinarrituta, Faradayk adierazi zuen eremuan zehar indar-lerroak abiadura finituarekin mugitzen zirela, elkarrekintzak hedapen-abiadura finitua (argiarena, agian) zeukala, edo espazioan zehar hedatzean eremuaren perturbazioek denbora bat behar zutelara, eremu-teorien egiaztapenik sendoenetakoa bihurtuko zena.

## 2) Urrutiko elkarrekintzaren ukapena

Errealitatea indar-itsaso bat bezalakoa baldin bazen, Descartesena materia-itsasoaren antzekoa, urrutiko elkarrekintzak nahitaez baztertu behar ziren, eta ezinbestez indarrek ondo-ondoko indarretan eragin behar zuten. Elkarren ondoko indar-puntuen arteko ekintza-legeek aldaketa fisiko guztiak azalduko zituzten, baina Faradayk lege horiek ez zituen sekula adierazi, elkarrekintza kimikoen mekanismorik ez zuen eman, fenomeno elektromagnetikoetan azalpen gutxi, eta elkarrekintza mekanikoaz gorputzen inertzia eta perturbazioaren hedapen-denbora berdindu besterik ez zuen egin, indar bat aplikatzen zenetik gorputzak azeleratu bitartean denbora bat pasatzen zelako.

## 3) Indarren identitatea edo batasuna

Orduan ezagutzen ziren indar guztiak, elektrikoak, magnetikoak, kimikoak eta grabitatorioak, Faradayren metafisikaren arabera oinarritzko indarraren adierazpen desberdinak ziren, indarraren banaketa espazial desberdinak, indarraren aldakuntza geometrikoak. Eta indar guztiak erakarpenekoak ziren, aldarapena erakarpen diferentzialen emaitza besterik ez baitzen.

Printzipio horren arabera, indar-mota batetik hasita beste edozein indar-mota lor zitekeen, oinarrian gauza bera zirelako. Eta Faraday magnetismoa elektrizitate bihurtzen saiatu zen (indukzio elektromagnetikoa aurkitu zuen elektroiman bat eta solenoide bat erabiliz), baina esperimendu asko egin arren elektrizitatearen eta grabitatearen arteko bihurketa ezinezkoa gertatu zitzaion: kargarik gabeko edo elektrikoki kargaturiko esferak altuera desberdinetatik bota zituen kargaren kopurua aldatzeko asmotan, baina alferrik, erortzean eta aldi berean biratzean erabili zituen eroaleetan ere emaitzarik ez zuen lortu, metalezko hariak bibra-

razi zituen, zenbait material probatu ere bai, baina ondorio positiborik ateratzetik ez zegoen.

Beraz, Faradayren helburu nagusia, indar kimiko, elektriko, magnetiko eta grabitatorioak indar-eremu bakar baten adierazpen gisa deskribatzeko eremu bateartuaren teoria bat aurkitzea, ezin izan zen bete.

#### **4) Indarren kontserbazioa**

Indarra funtsezko substantzia fisiko bakarra zelakoan zegoenez, Faradayk ez zuen uste indarrak ager eta desagertu zitezkeenik. Faradayk ezin zuen onartu indar sortailea (planeta bat, iman bat eta abar) agertzen zenean indarrak ezerezetik agertzen zirela eta indar sortailea desagertzean indarrak ezerezean desagertzen zirela, indarrek beti hor nonbait egon behar baitzuten. Hortaz, indarren kontserbazioa beraren metafisikaren ondorio logikoa zen.

Analitikoki printzipio hori batuketa bat besterik ez zen, gertakizun baten aurreko eta ondorengo indar-lerro kopurua konstante mantendu behar zelako. Hala ere, planteamendu horrek ekartzen zituen arazo batzuk argitu gabe utzi zituen Faradayk; esate baterako, indarren kontserbaziorako haien izaera bektoriala kontuan hartu behar ote zen. Edo aldaketa fisiko eta kimikoak gertatzean puntu batzuetako indarrak gutxitu eta beste puntuetakoak handitzen zirenean, aldaketa horiek gobernatzen zituzten legeak ezin izan zituen eman Faradayk.

Perturbazioen hedapen-denbora finituaz ere arazo mekanistikoak zeuden. Tokiren batean indarrak gutxitzen zirenetik besteren batean indarrak handitu arteko denbora horretan zer gertatzen zen edo zenbat irauten zuen azaltzen zuen eredurik ez zuen zehaztu. Ezta denbora horretan kontserbazioaren printzipioa mantentzen ote zen ere.

#### **5) Indarren tentsio-efektua gorputzetan**

Indar batek gorputz batean eragiten zuenean, gorputza tentsio-egoeran sartzen zen, gorputzak egoera berezia hartzen zuen, eta haren barruko indar-egitura aldatu egiten zen nolabait. Tentsio-egoera horri “egoera elektrotoniko” deitu zion, eta Faradayk egin zituen esperimentu askoren jatorria eta beste askoren azalpena izan zen.

### **4.3.3. Elektromagnetismoa Faradayren eremu-teorian**

Ampèreren ikuskera newtondarrak kargarako, korronterako, elektromagnetismorako eta elektrokimikarako teoria bateraturik ezin izan zuen lortu, eta Faraday fenomeno haien guztien azalpenak biltzen zituen metafisika sortzen ahalegindu zen. Beraren metafisika esperimentuen sorburua izan zen, eta esperimentuetan bere metafisikaren frogapena bilatu zuen, erreminta matematikorik erabili gabe.

Faradayren eremu bateratuaren teorian karga elektrikoa indar-lerroetan zeharreko tentsio gisa irudikatzen zen, indar-lerroak gogorki tenkaturik baleude bezala. Horrela, esperimentu guztietan beti karga positibo adina karga negatibo agertzea erraz azaldu zuten: indar-lerroak bi noranzkoetan tentsionatzen ziren, noranzko positiboan zein negatiboan. Noranzko bakoitzak zeinu bateko karga sortzen zuen eta, nahitaez, beti kontrako zeinuko kargen kopuru bera sortzen zen. Hori ezin zen azaldu isurkien teoriarekin. Baina erakarpen elektrikoa tentsio horren bidez ulergarria baldin bazen ere, zeinu bereko kargen arteko aldarapena eredu horrek ez zuen azaldu. Elektrolitoen disoluzioen eroale-tasunaren jatorria, ordea, aise samar aurkitu zuten, tentsio hura disoluzioan zehar partikulaz partikula hedatzen zela proposatuz.

Korrante elektrikoak indar-lerroen bibrazioen adierazpena ziren. Txinpartak eta tximistak bibrazio bidez modu “egokian” azaldu zituen; hala, elektrizitate estatikoa (kargak sorturiko tximistak) eta pila voltaikoen korrante elektrikoa, biak oso ezagunak garai haietan, oinarrian gauza bera zirela azaldu zuten. Elektrizitatea bibrazio baten ondorioa zela frogatzeko, disoluzioetan murgildutako eroaleak astinduz elektrolisia sortzen saiatu zuten, baina substantzia kimikoak ez ziren disoziatzen eta elektrizitatearen bibrazioen arrastorik ezin izan zuten aurkitu.

Magnetismoa ulertzeko, indar-lerroen beste bibrazio-mota bat proposatu zuten. Iman baten ondoan burdin puskek hartzen zuten banaketa espaziala ikusita, magnetismoan indar-lerroek kurbatuak eta itxiak izan behar zutelara adierazi zuten, eta horregatik monopolo magnetikorik lortzea ezinezkoa zen, indar-lerro itxietan mutur askerik ez zegoelako.

Karga elektrikoa eta eremu magnetikoa antzeko izaerakoak izanik (indar-lerroen egoera bereziak), haien arteko erlazioak zuzena izan behar zuten, baina eremu magnetiko batek ez zuen eraginik pausagunean zegoen karga baten gainean, eta horren azalpen teorikoa elektrizitatearen eta magnetismoaren eremu bateratuaren bideragarritasunerako behin betiko oztopoa izan zen.

#### **4.3.4. Indukzio elektromagnetikoa**

Eremu-teoriaren arabera, iman baten indar magnetikoak ondoko espazioan eragiten zuten, eta eragin horren seinaleren bat bilatzeko, Faradayk saiakuntza asko egin zituen: iman baten ondoan eroaleak jarri, haien erantzuna behatzeko; imanak upel elektrolitikoetan sartu, korrante elektrikorik agertzen zen aztertzeko; korrante-elementu desberdinekin esperimentuak errepikatu (eroale biribilak, zuzenak, biraka zebiltzanak, intentsitate gorakorreko korronteak, eta abar), baina froga onargarririk ez zuten lortzen.

Bere aurkikuntzarik handiena, indukzio elektromagnetikoa, elektroiman bat eta solenoide bat erabiliz egin zuten, elektroimana mugitzean solenoidean korrante elektriko induzitua lortu zuenean, indar magnetikoa indar elektriko bihurtu zuenean. Faradayren azalpena izan zen imanarekin batera indar-lerroak ere espazioan mugitzen zirela, urrutiratzen edo gerturatzen zirela, eta solenoideak indar-lerroak moztean indukzioaren fenomenoak sortzen zirela. Elektroimanaren zirkuitua irekitzean ere (korrontea kentzean)

solenoiden korrante txiki bat agertzen zen. Eta, gainera, induzituriko korrantearen intentsitateak balio maximoa lortu arte, denbora-tarte bat behar zuen, eremuaren perturbazioaren hedapen-abiadura finituaren ondorioa. Eremu-teoriarako indukzioa frogatikaragarria izan zen.

Faradayk argia indar-lerroen beste bibrizio berezia zela kontsideratzen zuen, eta imanek eta korrante elektriko zirkularrak erabiliz, argiaren polarizazio-planoa aldatzea lortu zuen (“argiaren errotazio magnetikoa”). Horregatik, elektrizitatea, magnetismoa eta argia erlazionaturik zeudela suposatzen zuten, eremu bateratuaren oinarritzko indarraren adierazpen desberdinak zirela. Dena dela, asko saiatuta ere, argiarekin korrante induziturik ezin izan zuten lortu.

#### **4.3.5. Materia Faradayren eremu-teorian**

Eremu bateratuaren teoriaren barruan grabitatea azaltzea oinarritzko helburua zen; horretarako, materiaren existentzia aurretik argitu behar zen. Faradayren metafisikan materiaren eta indarren artean bereizketarik ez zegoen, materia indar-lerrokoa baitzen, bibratzen ari zen indar-multzo berezia, eta partikulak indarrek bat egiten zuten puntuak ziren, lotura kimikoak gauza bakarra balira bezala, eta materialtasuna edo solidotasuna sentsazio hutsa besterik ez ziren. Beraz, indar-lerroak partikulen oinarritzko izaera ziren, eta partikulen artean ere indar-lerro gehiago zeuden, partikula guztiak indar-lerroekin konektatuta baitzeuden. Partikulak ez ziren espazio hutsean flotatzen zeuden gorputzak, partikulen eta ingurunearen artean jarraitutasuna baitzegoen, dena indarrez osaturik zegoelako.

Eskema hori baliagarria izan zen gorputzen elastizitatea eta gogortasuna interpretatzeko. Konbinazio kimikoa ere partikulen indar-lerroen zentroek puntu berean bat egitean konposatu kimikoak agertzen zirela esanez ulertu zuen. Baina, indar konbergentzetatik abiatuta, Faradayk ezin izan zuten partikulen masa deduzitu, eta are gutxiago indar grabitatorioa azaldu. Gorputz bat osatzen zuten indarrek beste gorputz bat osatzen zuten indarretan nola eragiten zuten ez zuten argitu. Eta gorputz materialen identitateari buruzko arazoak gaindiezinak izan ziren, bai gorputza osatzen zuten indar-multzoek denboran zehar gorputzaren identitatea nola demontre mantentzen zuten azaltzean, bai aldaketa mekanikoetan (higidurak, talkak eta abar) indar-lerroko gorputzen identitateaz hausnartzean.

Materia-indar batasuna zela eta, kanpoko indarrak eta materia bera izaera berekoak izateagatik, kanpoko indarrek gorputzetan eragin zezaketen. Horren ondorioz, gorputza nolabait kitzikatzen zen eta egoera elektrotonikoan sartzen zen. Egoera elektrotonikoa tentsio gisa definitu zuen, gorputzaren indar-lerroak bereiziago mantentzen zituen tentsio gisa. Hipotesi hori zenbait gertaera azaltzeko erabilgarria izan zen: korrantea eroale solidoetan, isolatzaileak, substantzia diamagnetikoen jokaera eta disoziazio elektrokimikoa. Baina egoera elektrotonikoaren beraren frogarik ez zuten aurkitu; adibidez, egoera hori aldatuko zelakoan, upel elektrolitikoko disoluzioa argi polarizatuarekin argitu zuen, baina ondoren espero zuten disoziazio elektrolitikoa ez zen gertatu.



#### 4.3.6. Faradayren metafisikaren ondorioak

Faraday izan zen elektrizitate estatikoaren, korrontearen eta indukzio magnetikoaren teoria bateratu bat egin zuen lehena, eta argiaren eta elektromagnetismoaren arteko erlazioa lehen aldiz susmatu zuena. Faradayren lehen mailako ekarpen zientifikoek zientzian eta teknologian ikaragarriko aurrerapausoak lortzen lagundu zuten, eta gure men-debaldeko zibilizazioaren oinarria den elektromagnetismoaren jatorrian bera dago.

Dena dela, Faradayren metafisikan akats asko zeuden, aurreiritziz josita zegoen, eta matematika-ekasiaz gain haren printzipioen osagabetasuna nabaria zen.

Metafisika horretan eter klasikoa (eter kartesiarra) eremuaren etorburua zen, baina bien arteko konparazioak ideia horren bilakaera seinalatzen zuten:

Eter klasikoa	Faradayren eremua
isurki ideala	indar-lerroz osaturikoa
isotropoa	ez isotropoa (argiaren zeharkako uhinak azaltzeko)
elkarrekintza newtondarraren oinarria	eremuaren zatien arteko elkarrekintza ez newtondarra
konposizio diskretua	eremu jarraitua
eterra materiaren barruan sartzen da	eremuak materia osatzen du

Faradayren metafisikan ia formulazio matematikorik ez zegoen, eta horrek bere arrastoak utzi zituen hurrengo belaunaldietako fisikarietan, haien kontzeptua matematikoki garatu gabe indarrek mekanikan zuten pisua gero eta arinagoa zelako, azken eremu teoriaran (Einsteinen erlatibitatearen teoria orokorra) indarrik gabeko eremua proposatu arte.

Bestalde, Faradayren metafisika Alemaniako “naturphilosophie” antizientifiko eta erromantizismozalearekin erlazionatu zen. Hurrengo hamarkadetan korronte hori pentsamendu filosofiko alemanean nagusitu zen, eta aldaketa guztien kausa zen indarraren kontzeptuak naziak erakarri zituen. Hara non Einstein alemana zen (eta judua ere bai), eta beraren fisikan indarren arrastorik ere ez zegoen. Gizajoak ez zuen zorte handirik izan tokatu zitzaizkion jaioterriarekin eta garaiekin.

#### 4.4. W. Thomson (Lord Kelvin)

William Thomsonek (Lord Kelvin, Britainia Handia, 1824-1907), Glasgow-eko unibertsitateko fisikako katedradunak, arlo anitzetan ekarpen garrantzitsuak egin zituen, baina, batez ere, termodinamikan eta elektromagnetismoan nabarmendu zen.

Nahiz eremu-teoriaren aldekoa izan, indarren “materialtasun”az ez zuen sines-ten, eta eremua eter baten modura irudikatu zuen. Thomsonen metafisikan elementu

kartesiarrak eta newtondarrak nahasita zeuden: haren ustetan, espazioa substantzia material batez beterik zegoen (eterra), materia eter horren aldaera zen (eter solido baten tentsioa, edo eter likido baten zurrunbiloak), eta, aldi berean, eter horrek Newtonen legeak betetzen zituen. Thomsonek eremuen teoriari trataera matematikoa eman nahi zion, Faradayk ezin izan zuena, eta horretarako estrategia berri bat martxan jarri zuen: “antzekotasun”en metodoa. Horren medioz, eremuen elementu abstraktu eta ilunei fisikako beste arlo ezagunagoetako planteamendu matematiko berak ezarri zizkien.

XIX. mendearen erdialdean beroari buruzko ikerketak oso aurreratuta zeuden. Beroaren solidoetan zeharreko fluxua (hedapena) ezagutzen zen, eta fluxu horrek analisi matematikoa ere bazeukan. Gainera, beroa eta elkarren ondoko partikulen arteko elkarrekintzak (talka mekanikoak) erlazionatzen zituen teoria eta eraikin matematikoa oso zehaztuta zeuden.

Thomsonek, beraz, beroaren fluxuaren ekuazioetan magnitude batzuk ordeztu zituen, beroarekin erlazionaturikoak kendu eta elektrizitate estatikoarenak sartu zituen. Formulazio matematikoetan “bero-iturria”ren balioa agertzen zenean, berak “karga”ren balioa sartu zuen, eta, “tenperatura”ren orde, “potentziala” jarri zuen. Azkenean, beroa eroan beharrean, indar-lerroak erotea proposatu zuen, eta elektrizitate estatikorako ekuazio dotoreak eta baliagarriak atera zitzaizkion, Coulombenak bezain onak.

Indar magnetikoak azaltzeko, indar mekaniko baten eraginpeko solido zurrunaren desplazamendua erabili zuen. Solido zurruna desplazatzen zenean eta, aldi berean, hiru koordenatu-ardatzen inguruan biratzen zenean indar magnetikoaren ekuazioak ateratzen zirela aurkitu zuen. Horregatik, Thomsonek proposatu zuen eterraren errotazioa (“zurrunbilo magnetikoak”) erabiliz magnetismoa azal zitekeela, eta, hain zuzen ere, zurrunbilo haietaz baliatuta argiaren polarizazioa nola edo hala azaldu zuen.

## 4.5. Maxwell

James Clerk Maxwell (Eskozia, 1831-1879) familia aristokratiko batean jaio zen, eta, txikitatik hasita, giro kultural sakonean murgilduta bizi izan zen. Hamalau urterekin bere lehen lan matematikoa idatzi zuen, soka bat, orratzak eta arkatza erabiliz kurba obalatuak marrazteko metodoa xehatzen zuena, eta, hartan oinarriturik, zailtasun handiko sekzio konikoei buruzko burutazio teoriko orokorrak erakutsi zituen.

Maxwell izaera arraroko gizona zen, baina serioa eta jakintsua. Bere pentsaera zehatza eta geometrikoa zen, eta horrek itzala utzi zuen beraren lan guztietan. Beroaren azalpen molekularra sakon landu zuen, eta koloreei buruzko lanak ere egin zituen, baina beraren izena elektrizitate eta magnetismoaren gaineko lanekin zabaldu zen 1864an argitaratu zuen *A dynamical theory of the Electromagnetic Field* obraren ondorioz, eta batez ere 1866an eginiko eta 1873an argitaraturiko *Treatise on Electricity and Magnetism* liburuaren bitartez. Ospea, batez ere, Erresuma Batuan lortu zuen, kontinenteko ikerlariak erabat newtondarrak zirelako. Minbiziak jota hil zen 48 urterekin.

Garai haietan elektromagnetismoaz ezagutzen ziren alderdiak hauek ziren:

- elektrizitate estatikoa
- kargen arteko erakarpen eta aldarapenak
- korronte elektrikoa
- imanen magnetismoa
- eroaleen inguruko indar magnetikoak
- eroaleen arteko erakarpen eta aldarapenak

Formulazio matematiko partzialak zeuden, matematika arlo bakan batzuk azaltzeko bakarrik erabiltzen zen, eta, hala ere, oso konplikatuak zen. Maxwellek, alde batetik, formula matematikoak sinplifikatzeko premia ikusten zuen, eta, beste aldetik, fenomeno guztiak azaltzeko eredu fisiko bakar bat behar zela ulertzen zuen.

Newtonen metafisikari buruz Maxwellek ideia garbiak zituen. Distantziako elkarrekintzaren arabera gorputz bati eragiten zion indarraren kausa beste gorputz bat zen, eta, azken horren kokapena jakinik, indarraren balioa kalkula zitekeen. Baina esperimendu elektromagnetikoetan horrelakorik ezin zen planteatu, gorputz batek jasotzen zuen erradiazio elektromagnetikoaren kausa iraganean aurkitzen baitzen, orainaldian existitzen ez zen gorputz batek erradiazio hura igorri zuelako. Hortaz, elkarrekintza elektromagnetikoaren kausak eremua izan behar zuen. Horregatik, Maxwell atomo materialez eta espazio hutsez osaturiko munduaren kontra zegoen, Faraday bezala, eta, alde horretatik, antinewtondarra zen. Baina Maxwellek ez zuen uste eremua indar-lerroz eginik zegoenik, eta “materia-indar” berdintasunean ez zuen sekula sinetsi, materia eta eremua errealtate desberdinak zirela pentsatzen baitzuen. Faradayren metafisika gero eta baztertuago gelditzen ari zen.

W. Thomsonen bezala, Maxwellek ere eter klasikoan sinesten zuen, eta mekanika newtondarra betetzen zuen eter horren eredu matematikoak bilatu zituen, antzekotasunen metodoa erabiliz (bola elektrikoak korronterako, zurrunbiloak magnetismorako eta zurrunbiloen elastikotasuna karga estatikorako). Elektrizitatearen, magnetismoaren eta argiaren teoria bateratua lortzeko asmotan, eredu horretatik lege matematiko ikaragarriak deduzitu zituen. Dena den, buruan oso garbi zeukan beraren hipotesi asko faltsuak zirela, eterra erabat ezagutu arte egiazko eredurik ez zela aterako, baina bitarte horretan beraren proposamenek egia ulertzen lagunduko zutela.

Oso eredu abstraktuak eraiki zituen, baina matematikoki ongi oinarriturikoak eta esperimendu askorekin egiazta zitezkeenak (Faradayk lortu ez zuena). Maxwellen arazorik handienak eremuaren ezaugarri mekanikoetatik (eterraren masa eta elastikotasuna) elektromagnetismoaren balioak deduzitzea (kargak, korronteak, indarrak, eremuen intentsitateak) eta abiadura finituak azaltzea izan ziren.

Alde guztietara ere, oinarritzko kontzeptu batzuetan alde ilunak utzi zituen: karga elektrikoaren izaera ez zen argi gelditu (irudizko isurki baten iturria batzuetan, alegiazko bola elektrikoek ustezko zurrunbiloetan eginiko presioa besteetan, eta zurrunbilo horien

desitxuratzea bukaeran), korrontearen eta kargaren arteko erlazioa ez zuen erabat itxi, eta, azkenean, korrontea isurki elektriko baten fluxua ala indar-lerroen bibrazioa ote zen ez zuen erabaki.

Dena dela, haren teoriaren emaitzei esker, aurreramendu ikaragarriak egin ziren: irradi-uhinak, argiaren teoria elektromagnetikoa, telegrafoa, telefonoa eta abar. Eta ondorio horiek ailegatu ziren eremu elektromagnetikoa azaltzeko Maxwellek erabili zuen metafisikarengatik. Askotan, teoriaren bukaerako emaitzak hasiera-hasieratik Maxwellek ezagutzen zituela zirudien, eta emaitza horietara iristeko bitarteko ereduak propio asmatu zituela. Eredu onartezin horietatik hain emaitza onak nola atera ote zituen harrigarria izan zen.

#### **4.5.1. Maxwellen eredu mekanikoa**

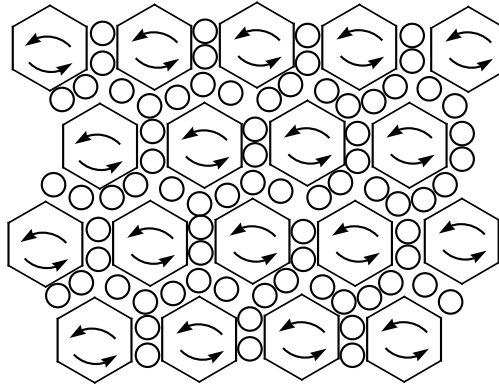
1855-56 urteetan argitaraturiko *On Faraday's Lines of Force* eta 1861-62 urteetako *On Physical Lines of Force* artikulu zientifikoetan Maxwellek bere eredu mekanikoa garatu zuen. Bertan, Faradayren hipotesi batzuei –indar-lerroen banaketa eta egoera elektrotornikoa– antzekotasunez baliatuta trataera matematikoa eman zien.

Dimentsio bakarreko lerroak izan beharrean, indar-lerroak hodi finak balira bezala irudikatu zituen. Haren ereduaren arabera, hodi horietan isurki konprimaekin bat zebilen, inertziaz ez zuena, erabat irudizkoa zena. Karga positiboak isurki horren “iturriak” ziren, gelditu gabe isurkia botatzen zutenak, emari handiagoa edo txikiagoa kargaren intentsitatearen menpe. Karga negatiboak “hobiak” ziren, kargaren intentsitatearen arabera isurkia xurgatzen zutenak. Definizioz, gorputz neutroetan beti karga positibo adina karga negatibo zegoen. Eta dielektrikoetan isurki horrek mugitzeko zailtasunak aurkitzen zituen, ingurunearen marruskadura zela eta. Maxwellen ustetan, elektrizitatea eredu horretan oinarritzen zen, eta partikula kargatuen mugimenduren batekin ez zuen inola ere erlazionatzen.

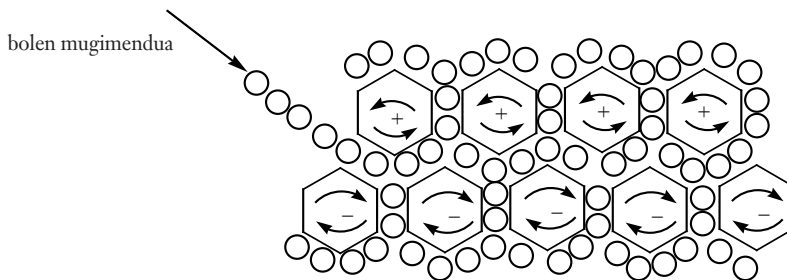
Indar elektrostatikokoaren modulua isurki horren emariaren araberakoa zen. Isurki konprimaekina izateagatik edozein puntutan haren bolumenak denboran zehar konstante iraun behar zuen. Isurkia iturritik urrutiratu ahala bolumena konstante izateko emariak gero eta txikiagoa izan behar zuela jo zuen, abiadura moteldu egiten zen, eta bi magnitude horiek (indarra eta emaria) distantziaren karratuaren alderantzizkoaren legeaz gutxitzen ziren. Hala, indarraren eta distantziaren arteko erlazioa azaldu zuen. Potentzial elektriko ere isurkiak hodian egiten zuen presio gisa imajinatu zuen.

Indar-lerroak beste bi elementu berrirekin nahasi zituen: zurrunbiloak eta bola elektrikoak. Zurrunbiloak gorputz eta toki guztietan zeuden, espazio osoa betetzen zuten, eta, zurrunbilo guztiak nolabait elkartzeko, haien inguruan bola elektrikoak zeudela jo zuen. Fenomenologia elektromagnetikoa azaltzeko erabili zituen elementuak hiru horiek izan ziren.

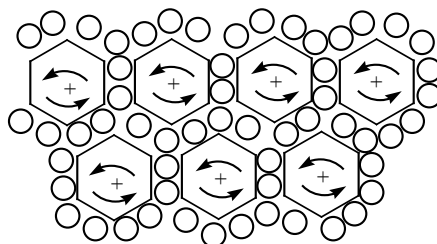
Thomsonek bezala, Maxwelllek pentsatzen zuten elkarrekintza magnetikoaren oinarria zurrumbilo magnetikoen biraketa koordinatua zela:



Indar magnetikoa zurrumbiloen indar zentrifugoa zen, eta korrante elektrikoa bolatxozen translazioa. Bola batek, mugitzean, ondoko zurrumbiloaren pareta igurtzen zuen (energia galdu gabe) eta zurrumbiloa biraka hasten zen (irudian goiko zurrumbiloen biraketa-noranzkoa alde batera, eta behekoena beste aldera). Zurrumbilo horien biraketak ondoko bolak mugiarazten zituen, bola horiek hurrengo zurrumbiloak birarazten zituzten, eta, hala, partikula elektriko batek eroalearen ondoan eremu magnetikoa sortzen zuen. Bolatxoek, batzuetan, saltoak egiten zituzten, energia galtzen zuten, eta korranteak beroa sortzen zuten. Era horretara, Maxwelllek korrantearen eremu-teoria bat sortu zuen:



Dielektrikoetan eta korronterik eroaten ez zuten eroaleetan partikula elektrikoak ez ziren lekualdatzen, bi aldeetako zurrumbiloak noranzko berean biratzen zirelako. Dielektrikoetan egoera hori aldaezina zen, eta eroaleetan kanpoko ekintza baten medioz biraketa-noranzkoa alda zitekeen:



#### 4.5.2. Indukzio elektromagnetikoa

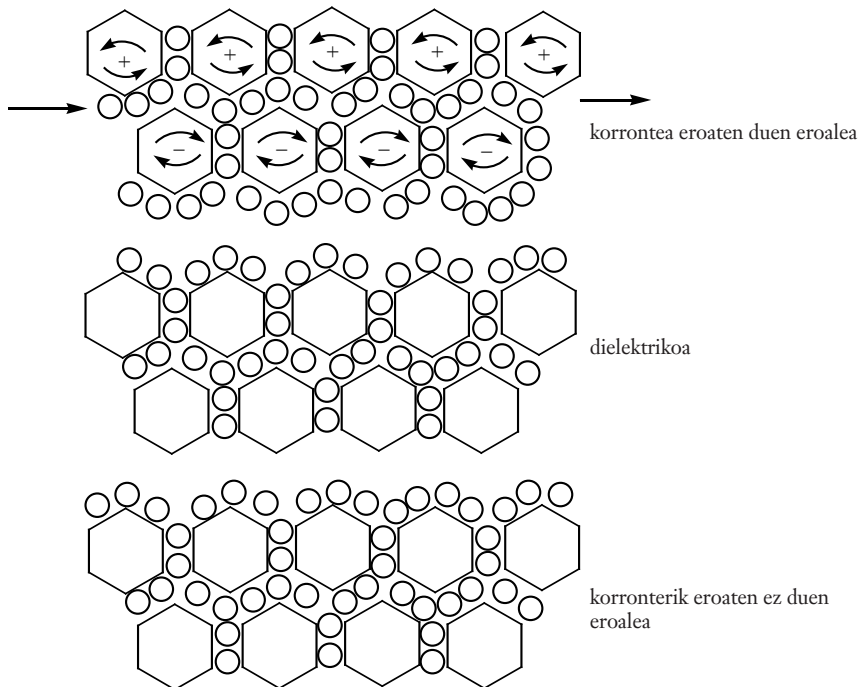
Maxwellen metafisikaren oinarrian indukzioaren fenomenoak zeuden. Fenomeno horiek azaltzeko fisikariak bi irudi (indar-lerroak eta zurrunbiloak/bola elektrikoak) erabili zituen:

- a) Egoera elektrotonikoa indar-lerroen kopuruarekin erlazionatu zuen. Egoera elektrotonikoaren intentsitaterako adierazpen matematikoa aurkitu zuen (“potenzial bektoriala”), intentsitate hori azaltzeko Faradayk proposatu zuen indar-lerroen tentsioa aintzat hartu gabe.

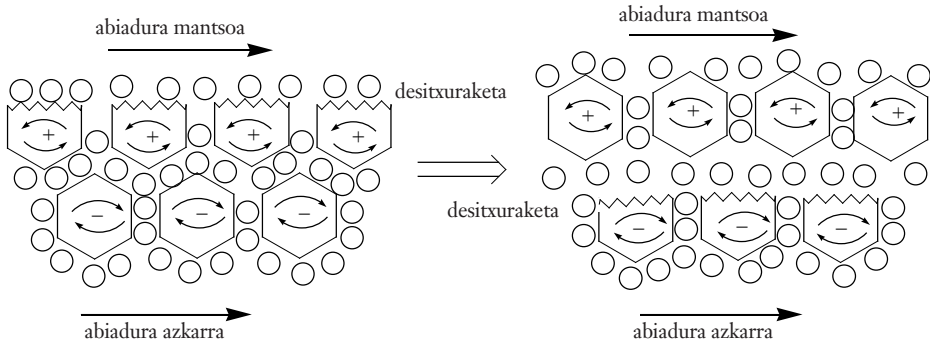
Zirkuitu bat zeharkatzen zuen indar-lerro kopurua aldatzean (egoera elektrotonikoa aldatzean) indukzio elektromagnetikoaren fenomenoak behatzen zirela eta indar elektroeragilea agertzen zela pentsatzen zuen. Beraz, haren ustez, indar elektroeragileak egoera elektrotonikoaren aldaketaren menpe egon behar zuen, eta horren adierazpen matematikoa ere aurkitu zuen.

- b) Zurrunbiloak abiaduraz aldatzean ere indukzio elektromagnetikoa agertzen zen, eta zurrunbiloak konektatzen zituen mekanismoan agertzen zen tentsioak indar elektroeragilea sortzen zuen.

Horren azalpen mekanistikorako eman dezagun bi eroale ditugula, dielektriko batez bereizita. Lehen eroaletik korronteak zirkulatzen du, eta bigarrenetik ez. Lehen eroalean bola elektrikoak higitu egiten dira, eta zurrunbiloak biratzen dira. Dielektrikoko eta bigarren eroaleko bolak ez dira higitzen, eta zurrunbiloak noranzko berean abiadura berarekin biratzen dira.



Lehen eroaleko korrontea gutxitzen bada, zurrunbiloen alde bateko bolak motelago mugituko dira, eta beste aldekoek lehenago abiadurarekin segituko dute. Horrek zurrunbiloen desitxuratze elastikoa ekarriko du. Desitxuratze horrek bola azkarrak mantsotzea ekarriko du, eta urrutixeagoko zurrunbiloak desitxuratzen eta geldiago biratzen hasiko dira:



Zurrunbiloen abiadura txikiagoak eremu magnetiko ahula dakarrenez (eta alderantziz), mekanismo horren bidez espazio osoan eremu magnetiko aldakorra hedatuko da.

Bestalde, zurrunbiloen desitxuratzeak geldirik dauden partikulak mugitzen hasiatek erartzen du, nahiz dielektrikoan edo bigarren eroalean egon. Horregatik, lehenbiziko eroaletik bigarreneaninola bola elektrikoaren desplazamenduaren uhin bat hedatuko da. Eta uhinak bigarren eroaleraino ailegatzen denean, eroale horretan korrante elektrikoa agertuko da (korrante induzitua) debora-tarte bat pasatu ondoren.

### 4.5.3. Magnitude mekaniko eta elektromagnetikoak

Antzekotasunetan oinarriturik, Maxwellek egitura matematiko sendoko eredu mekanikoa eraiki zuen. Hasierako hipotesia izan zen zurrunbiloen energia zinetikoa (masaren eta abiaduraren menpekoea) eremu magnetikoaren energia zela (indar magnetikoaren eta ingurunearen iragazkortasun magnetikoaren menpekoea). Ideia horretatik antzekotasun hauek eratortzen ziren:

- zurrunbiloaren abiadura-aldaketaren ( $\Delta v$ ) eta indar magnetikoaren (edo  $H$  intentsitate magnetikoaren) arteko erlazioa.
- zurrunbiloaren masaren ( $m$ ) eta ingurunearen iragazkortasun magnetikoaren ( $\mu$ ) artekoa:

$$m = \frac{\mu \Delta v}{4}$$

- eremu magnetikoaren energiaren eta zurrunbiloen energia zinetikoaren artekoa:

$$\text{eremuaren energia} \propto \mu H^2$$

$$\text{zurrunbiloen energia} \propto mv^2$$

Antzekotasunen bidean, indukzio elektromagnetikoaren trataera matematikorako Maxwellek aurrerapauso hauek erabili zituen:

- ondo-ondoko bi zurrunbilok abiadura desberdinak baldin bazituzten, bien tarteko boletan indarra eginen zuten eta azelerazio tangenziala agertuko zen. Indar hori induzituriko indar elektroeragilearekin ( $E$ ) erlazionatu zuen.
- aurreko indar tangenzialarengatik zurrunbiloak elastikoki desitxuratzen ziren. Maxwellek kontsideratu zuen desitxuratzea (desplazamendua,  $D$ ) eta indar elektroeragilea ( $E$ ) proportzionalak zirela, eta proportzionaltasun-konstantea ingurunearen konstante dielektrikoa edo ahalmen inдукtibo espezifikoa ( $\epsilon$ ) zela:

$$D = \epsilon E$$

- eremu elektrikoaren energia desitxuraturiko zurrunbiloen energia elastikoa zen, eta energia horrek zurrunbiloak desitxuratzeko lana (desplazamendua bider indarra) izan behar zuen:

$$\text{eremu elektrikoaren energia} = \text{lana} = DE = \epsilon E^2$$

- zurrunbiloen momentua egoera elektrotonikoarekin edo potentzial bektorialarekin ( $A$ ) erlazionatuta zegoen. Hortaz, indar elektroeragilea ( $E$ ) zurrunbiloen momentuaren aldaketaren funtzioa zen, oro har indarrak momentuen aldaketak ziren bezala.

Korronterako eta karga elektrikorako ere antzekotasunak tresna matematiko bihurtu ziren:

- korrontearen intentsitatea ( $j$ ), puntu bakoitzetik segundoko pasatzen den bola kopuruarekin erlazionatu zuen.
- mekanismo horretatik kanpoko kausaren batengatik bolek dielektrikoan presioa edo tentsioa sortzen ahal zuten, eta horren ondorioz karga elektrikoa agertzen zen. Presioa ( $\Psi$ ) potentzial elektrikoaren baliokidea zen. Elektrizitate estatikoan bola elektrikoaren bi aldeetan presio desberdinak zeuden, eta egoera horrek indar elektroeragilea handitzen zuen.

Bere ekuazioak Maxwellek hiru alditan deduzitu zituen. Lehen aldian, zurrunbiloen eta indar-lerroen hipotesia erabili zuen indar magnetikoak azaltzeko (4.5.4 atala). Bigarrenean, bola elektrikoaren hipotesiarekin korrontearen eta magnetismoaren arteko erlazioa argitu zuen, indukzioa barne (4.5.5 atala). Azkenean, zurrunbiloen elastikotasunean oinarritu zen karga estatikoaren fenomenoak azaltzeko (4.5.6 atala). Bere obraren bukaeran, Maxwellek goia jo zuen: argiaren teoria elektromagnetikoa (4.5.9 eta 4.5.10 atalak).

#### **4.5.4. Indar magnetikoa eredu mekanikoan**

Faradayk adierazi zuen indar-lerroetan zehar tentsioa eta indar-lerroen artean presioa zegoela. Ideia horretan oinarriturik, Maxwellek esan zuen zurrunbiloen biraketak



eraginda indar-lerroetan zehar presioa bazegoela, eta presio horren ondorioz espazioko edozein puntutan tentsio bat edo indar bat ager zitekeela.

Tentsioa ingurunearen menpe eta zurrumbiloen abiaduraren menpe omen zegoen, eta bi osagai zituen, biak biraketa-ardatzarekiko perpendikularrak: osagai bat ( $p_1$ ) indar-lerroen norabidean, eta beste osagaia ( $p_2$ ), txikiagoa, beste norabideetan. Eredu horren ondorioz, Maxwellek adierazpen matematiko hauek lortu zituen:

$$p_1 = \frac{\mu H^2}{4\pi} \qquad p_2 = \frac{\mu H^2}{8\pi}$$

Indar-lerroetan zehar agertzen zen presio-diferentzia eremu magnetiko batek espazioko edozein puntutan egiten zuen indarra (H) zen:

$$p_1 - p_2 = \frac{\mu H^2}{8\pi} = H$$

Indar magnetikoa ezagututa, eremu magnetiko baten barruan jarritako edozein gorputz paramagnetikoren edo diamagnetikoren portaera mekanikoa (mugimendua, ibilbidea, abiadura, azelerazioa) aurreikusi zuen. Eta korronterik gabeko ingurune uniformeetan (iragazkortasun magnetiko,  $\mu$ , konstanteko inguruneetan) kalkulaturiko indar magnetiko hark distantziaren karratuaren alderantzizkoaren legea betetzen zuela frogatu zuen:

$$F = \frac{1}{\square} \frac{p_1 p_2}{d^2}$$

#### 4.5.5. Indukzioa eredu mekanikoan

Korronte elektrikoa eta eremu magnetikoa erlazionatzeko, bola elektrikoaren mugimendua eta zurrumbiloen errotazioa zehaztu behar ziren. Bola elektrikoaren translazio-abiadurarako ( $v$ ), haien ondoko zurrumbiloen abiadurak erabili zituen:

$$v = \frac{V_{\text{zurrumbilo bat}} \square V_{\text{ondoko zurrumbiloa}}}{2}$$

Bolen higadura eta zurrumbiloen abiaduren aldaketa erlazionatuta zeudenez, korronte elektrikoaren ( $j$ ) eta intentsitate magnetikoaren (H) arteko lotura finkatuta gelditu zen. Bi magnitude horiek matematikoki erlazionatzeko erabili zuen funtzioari “errotazional” (rot) deritzo (isurkien dinamikan maiz erabilia, haien fluxuari oso lotua). Ekuazio horrek eroale baten inguruko indar-lerroen banaketa zirkularra ere bikain azaldu zuen:

$$j = \frac{\text{rot } H}{4\pi}$$

Eredu horren bitartez indukzio-fenomenoak azaltzeko, oso teoria zailak eta latzak bururatu zitzaizkion Maxwelli, irizpide energetikoez baliatuta. Hasteko, biraka zebiltzan zurrumbiloen energia zinetikoa (dentsitatea) hau zela frogatu zuen:

$$E_z = \frac{\mu H^2}{8 \pi}$$

Eremu magnetiko aldakor baten barruan eroale bat zegoela joz gero, eremu horrek eroalean indarra eta korrante elektrikoa sortuko zituen, eta eroaleko zurrumbiloek energia irabaziko zuten ( $W$ ), energia zinetikoa edo indar magnetikoa ( $H$ ), biak baliokideak zirelako. Prozesu horretan bola elektrikoek zurrumbiloetan indarra ( $F$ ) egiten zuten. Eta zurrumbiloek irabazten zuten energiak haien abiadura azkartzen zuen ( $\Delta v$ ). Beraz, zurrumbiloek energia hau irabazten zuten segundoko ( $t$ ):

$$\frac{W}{t} = F \Delta v$$

Akzio-erreakzioaren printzipioarengatik zurrumbiloek boletan egiten zuten indarra ( $E$ , indar elektroeragilea) eta bolek zurrumbiloetan egiten dutena ( $F$ ) modulu eta norabide berekoak ziren, baina kontrako noranzkokoak. Horretan funtsatuta, Maxwellek indar magnetikoa ( $H$ ) eta indar elektroeragilea ( $E$ ) elkartzen zituen ekuazioa aurkitu zuen; hala, magnetismoa eta indukzioa matematikoki erlazionatu zituen:

$$\text{rot } E = -\frac{dH}{dt}$$

Zurrumbiloen abiadura-aldaketak eta indar elektroeragileak ere elkarri eragiten zioten. Desplazamendu elektrikoa aldatuko balitz (zurrumbiloen desitxuratzea), eremu magnetiko bat agertuko litzateke, korrante arrunt bat balego bezala, eta eremu magnetiko hori ere denborarekin aldatuko litzateke. Indar magnetiko aldakorrek indar elektroeragile induzituak sortuko lituzke, indar elektroeragile horiek desplazamendu berria sortuko lukete, eta dena berriz ere errepikatuko litzateke. Maxwellen eredu mekanikoaren arabera, aldaketa batek bestea ekarriko luke.

Maxwellek seinalatu zuen egoera elektrotonikoa ( $A$ ) zurrumbiloen “momentu laburtua” izan zitekeela:

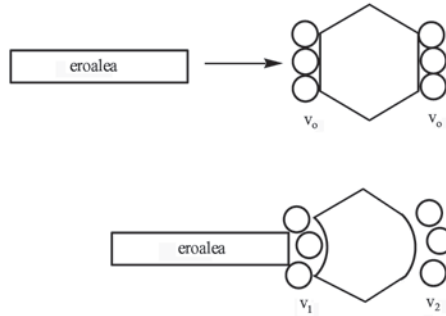
$$\mu H = \text{rot } A$$

Indar elektroeragilea egoera elektrotonikoaren aldaketa gisa definitua gelditu zen:

$$E = \frac{dA}{dt}$$

Magnetismoari buruzko ikerketa amaitzeko, eremu magnetiko aldakor baten barruko eroalearen kasua aztertu ondoren, kokapenez aldatzen zen (mugitzen ari zen) eroaleak eremu magnetiko batean zuen eragina landu zuen. Maxwellek imajinatu zuen eremu magneti-

ko baten barruan eroale bat higitzen zenean eroaleak zurrunbiloak desitxuratzen zituela, alde bateko bolen abiadurak mantsotuz ( $v_1$ ), eta beste aldeko bolen abiadurak azkartuz ( $v_2$ ):



Abiadura-diferentzia horrek eroalearen barruko boletan indar bat sortzen zuen, bola elektrikoak mugiarazten zituen, eroalean korrante elektrikoa agerrarazten zuena. Eta biderketa bektorial baten bidez eremu magnetiko batean mugitzen zen eroalearen gaineko indarra (indar elektroeragilea) kalkulatu zuen:

$$\vec{E} = \vec{v} \times \vec{H}$$

#### 4.5.6. Karga estatikoa

Maxwellek lehenbizi karga eta gero korrantea azaldu beharrean, atzekoz aurrera egin zuen, lehenbizi korrantea eta ondoren “polarizazio elektrikoa” (gorputz kargatuen egoera, karga elektrikoa beraz) azaltzen saiatu zen. Kargari oinarritzko garrantzia eman beharrean, korronteari eta magnetismoari eman zien, eta elektrizitatearen eta magnetismoaren teoria bateratua lortu zuen karga elektrikoa funtsezko kontzeptua izan gabe.

Maxwellen eredu mekanikoan lantzeko falta zen gauza bakarra zurrunbilo magnetikoen elastikotasuna zen, eta, ezaugarri horretaz baliatuta, indar elektroeragilearen teoria osatzea, karga estatikoaren existentzia azaltzea eta eremu elektromagnetikoaren perturbazioak argiaren abiaduraz hedatzen zirela erakustea ziren Maxwelleen asmoak.

Zurrunbiloen desplazamendua (desitxuratzea,  $D$ ), eta zurrunbiloetan aplikatzen zen indarra (eta baita  $E$  indar elektroeragilea ere) proportzionalak zirela jo zuen:

$$D = \frac{1}{4} \pi c^2 E$$

$c$ : zurrunbiloen konstante elastikoa       $\frac{\pi c^2}{4}$ : ingurunearen ahalmen inдукtiboan,  $\epsilon$

Bola elektrikoak mugitzeko (korrante elektrikoa agertzeko), bi arrazoi kontuan hartu zituen: egoera elektrotonikoaren aldaketa eta eroalearen eremu magnetikoan zeharreko mugimendua. Karga elektrikoari loturik, hirugarren arrazoi bat gehitu zuen. Eman de-

zagun indar elektroeragilearen eraginarengatik (korronte elektriko batengatik) dielektriko batean (edo gorputz neutro batean) zurrunbiloak desitxuratuta daudela. Desitxuratze hori polarizazio elektrikoa litzateke, karga elektrikoa adieraziko luke. Zurrunbilo haiek onera bueltatzean, ondo-ondoko bola elektrikoak kontrako noranzkoetan mugituko lirateke, eta korrontea agertuko litzateke. Efektu hori beste zurrunbiloetara hedatzean, korrontearekin batera eremu magnetikoa ere sortuko litzateke. Hori matematikoki adierazi zuen korronte elektrikoari (j) “desplazamendu-korronte” bat (dD/dt) gehituz eta intentsitate magnetikoarekin (H) erlazionatuz:

$$4 \pi j + \frac{dD}{dt} = \text{rot } H$$

Indukzioan ere desplazamendu-korrontearen eraginak ezinbestekoa izan behar zuen, baina Maxwellek arbuia egin zuen, eta bakarrik gorputz kargatuen arteko indarrak azaltzeko erabili zuen. Maxwellen ustez, karga (zurrunbiloen desitxuratzea) bola elektrikoak mugitzeko beste kausa bat besterik ez zen, indukzioaren mekanismotik apartekoa.

Korrontearen (j) eta kargaren (e) arteko erlazioa aurkitu zuen:

$$\text{div } j + \frac{de}{dt} = 0$$

Eta azken bi ekuaziook konbinatuz, karga baten inguruko desplazamendua nolakoa zen deskribatu zuen:

$$e = \text{div } D$$

Horrela, Maxwellek indar elektroeragilean eragiten zuten hiru osagaiak finkatu zituen:

- a) eroalearen mugimenduak sorturiko indar elektroeragilea.
- b) egoera elektrotonikoaren aldaketak sorturiko indar elektroeragilea
- c) eta karga estatikoak induzituriko indar elektroeragilea

Hiru osagaion adierazpen matematikoa hau zen:

$$\vec{E} = \vec{\nabla} \Psi - \frac{d\vec{A}}{dt} - \text{grad } \Psi$$

Bestalde, bi karga elektrikoren arteko indarra ere deduzitu egin zuen, eta, kalkulu energetikoetatik abiatuta, distantziaren karratuaren lege bat lortu zuen:

$$F = c^2 \frac{e_1 e_2}{r^2}$$

Konstantea (c) ingurunearen ahalmen induktibo espezifikoarekin erlazionatuta egonik:

$$\epsilon = \frac{1}{4} \pi c^2$$

#### 4.5.7. Eredu mekanikoaren kritika

Maxwellek aldi berean eremu-teorian eta lege newtondarrean fede ikaragarria zeukan, eta horregatik Thomsonena bezalako ikuskera izan zuen: lege newtondarra betetzen zuten eter batekin dena azaltzea. Izan ere, Maxwellek bere ereduari jarri zion muga bakarra elektrizitate estatikoan eta magnetismoan distantziaren karratuaren alderantzizkoaren legea betetzea izan zen.

Polo magnetikoen arteko indarra:

$$F = \frac{1}{\square} \frac{p_1 p_2}{r^2}$$

Polo elektrikoen arteko indarra:

$$F = c^2 \frac{e_1 e_2}{r^2}$$

Hortik aurrera, Maxwellen eredu mekanikoa oso irudimentsua izan zen, baina sines-tezina ere bai. Ekuazioen dedukzioak nahasiak eta harrigarriak ziren, eta, hala ere, ekuazio horiekin ezagutzen ziren fenomeno elektromagnetiko eta esperimentu guztiak deskribatu ziren. Korrante elektrikoa, magnetismoa eta indukzioa bateratzen zituen eter-eredu bakarra lortu zuen, eta eredu horrek errealitatetik gertu egon behar zuela pentsatzea ondorio logikoa zen.

Dena dela, eredu mekanikoa kontraesanek jositik zegoen, eta alde asko oso ilun gelditu ziren. Adibidez:

- 1) zurrumbiloak munduaren eredu kartesiarrean primeran sartzen ziren, baina Maxwellek sinesten zuen eremuaren osagaiek Newtonen legeak obeditzen zizutela. Maxwellen ereduan, gainera, zurrumbilo eta bolen tarteko espazio hutsaren existentzia ere onartzen zen.
- 2) ereduan efektu grabitatoriorik kontuan hartu ez zenez, materia arrunta desberdina zela onartu behar izan zuen. Beraz, ereduan materia mota asko agertzen ziren: materia arrunta, masadun zurrumbilo malguak eta masarik gabeko bola elektriko zurrunkak. Ikuspuntu metafisikotik aniztasun hori onartezina zen.
- 3) eterraren izaeraren gain erantzun gabeko galderak asko ziren: masarik gabeko bola elektrikoak zurrumbiloen barruan zergatik ezin ziren sartu, zurrumbiloek bolak sartzeari erresistentzia kontrajartzen ote zioten, eta abar. Maila mikroskopikoan ere, eremuaren eta materiaren arteko elkarrekintza oso eztabaidatsua zen: masadun zurrumbiloak eroaleen barruan nola sartzen ziren bola elektrikoak mugiarazteko, prozesu horretan marruskaduraren eragina zenbaterainokoa izan zitekeen, zurrumbiloek eroalearen masa arruntean elkarrenergirik izan zezaketen, gorputz neutroak espazioan zehar mugitzean zergatik ez ziren zurrumbiloekin topatzen edo zergatik ez zuten inolako oztoporik aurkitzen, eta abar.
- 4) zurrumbiloen itxura ere eztabaidagarria zen. Zilindrikoak baldin baziren, toki batzuetan boleak zurrumbiloak bultzatuko zituzten, eta beste toki batzuetan ezta ukitu ere. Gainera, bolak alde alde mugituko ziren energia galtzen. Oztopo horiek ekiditeko, Maxwellek hexagono gisa marraztu zituen, baina zurrumbiloen indar zentrifugoa zirkularki mugitzen zen isurkia balira bezala kalkulatu zuen.

- 5) mugitzen zen karga baten inguruko eremu magnetikoa ezin izan zuen kalkulatatu, eta korrante aldakorreko eroale baten inguruko eremu magnetikoa ere ez. Eterrean zehar materia, imanak, gorputz kargatuak eta korronteak mugitzen zirenean eremuan gerta zitezkeen aldaketak ez zituen deskribatu. Adibidez, Lurra eterrean zehar mugitzeagatik argiaren hedapenean eraginik nabarituriko ote zen ez zuen azaldu, kontuan harturik Lurrak eragindako eterraren desitxuratzeak fenomeno elektromagnetikoetan –argian, adibidez– eragina izan behar zuela.
- 6) Maxwellen ekuazioetan, desplazamendu-korrontearen eta eroletasun-korrontearen arteko erlazioa misterio bat zen. Biek indar magnetikoa sortzen zuten, baina horren zergatia jakin ez.
- 7) eredu mekanikoan dielektrikoen ezaugarriak eta lotura kimikoen izaera ez ziren argitu.

Maxwellek teoria korapilatsua sortu zuen, baina emaitza matematikoak bikainak ziren. Haren eredu metafisikoki lakarra zen, baina esperimendu eta fenomeno guztiak azaltzen zituen. Argi ikusten zuen zurrumbilo eta bolen existentzia frogatuko balitz bere metafisikaren akatsak argitu beharko liratekeela, eta bere eredu gehiago garatu beharko lukeela elektromagnetismoaren teoria erabat mekanikoa lortu arte. Baina zurrumbilo eta bolen arrastorik ez zen aurkitzen, eta ereduaren kontraesanak gaindiezinak ziren. Azalpen operatiboa izan zen Maxwellek eskura zuen aterabide bakarra.

#### **4.5.8. Azalpen operatiboa**

Eremuaren ezaugarri mekanikoak ez ziren sekula detektatu, inongo frogarik ez zen aurkitu. Zurrumbiloen masa, abiadura, momentu angeluarra eta eremuaren beste ezaugarri posibleak ezin ziren neurtu, baina karga elektrikoa, korrontearen intentsitatea eta indar magnetikoa bai.

Maxwellek magnitude elektromagnetikoak ezaugarri mekanikoetatik independente kontsideratu behar izan zituen, eta mekanismoari buruzko aipamenik egin gabe bere formulak berriz ere enuntziatzea erabaki zuen. Hori Maxwellen metafisikaren “azalpen operatiboa” izan zen.

Hainbeste garaipen zientifiko ekarri zituzten ekuazio matematikoak jatorri deduktiborik gabe gelditu ziren, Maxwellen hitzetan, zer gertatzen zen ulertzeko, mekanismoa irudi mentalak besterik ez baitzen; eremua eta bere energia mekanikoa, ordea, errealak ziren. Energia mekanikoa eremuan zegoen, eta, energiarengatik, polarizazio elektrikoa eta polarizazio magnetikoa sortzen ziren, elektrizitatea eta magnetismoa agertzen ziren, biak eremuaren (edo ingurunearen) mugimenduan eta tentsioan oinarrituta. Maxwellek bestelako zehaztapenik ez zuen erabili bere azalpen operatiboa adierazteko. Bola elektrikoak eta zurrumbiloak desagertuta, bestelako mekanismorik gabe eremuak materialen eragiten zuen. Faradayren helburuak ahaztuz (gaindituz), Maxwellek materialen eta eremuaren teoria bateratzaileak baztertu zituen.

Mekanismo guztietatik askatu ondoren, Maxwellen ekuazioak honela gelditu ziren:

Korronte osoaren ekuazioa:

$$\mathbf{T} = \mathbf{j} + \frac{d\mathbf{D}}{dt}$$

T: korronte osoa  
j: eroletasun-korrontea  
D: desplazamendua

Indar magnetikoaren ekuazioa:

$$\mu\mathbf{H} = \text{rot } \mathbf{A}$$

H: indar magnetikoa  
A: egoera elektrotonikoa edo potentzial bektorea  
 $\mu$ : iragazkortasun magnetikoa

Korronte elektrikoaren ekuazioa:

$$\text{rot } \mathbf{H} = 4\pi \mathbf{T}$$

Indar elektroeragilearen ekuazioa:

$$\mathbf{E} = \mathbf{v} \wedge \mu\mathbf{H} - \frac{d\mathbf{A}}{dt} - \text{grad } \Psi$$

E: indar elektrikoa  
v: eroalearen abiadura  
 $\Psi$ : potentzial elektrostatikoa

Elastikotasun elektrikoaren ekuazioa:

$$\mathbf{E} = k\mathbf{D}$$

k: konstante dielektrikoaren alderantzizkoa

Erresistentzia elektrikoaren ekuazioa:

$$\mathbf{E} = -r\mathbf{j}$$

r: eroalearen erresistentzia

Elektrizitate askearen ekuazioa:

$$\rho + \text{div } \mathbf{D} = 0$$

$\rho$ : karga-dentsitatea

Jarraitutasunaren ekuazioa:

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} + \text{div } \mathbf{j} = 0$$

p: karga elektrikoa

Azken biak kenduta, gainerako formula guztietan dimentsio espazial bakoitzerako Maxwellen ekuazio bana planteatu zuen, hiruna ekuazio formula bakoitzerako.

Eredu mekanikoan eremu elektrikoak eta magnetikoak materiaren mugimendutik sortzen ziren. Azalpen operatiboan, ordea, indar magnetiko aldakorrek indar elektrikoak sortzen zituzten, eta alderantziz, baina desberdinak ziren. Azalpen operatiboan eremu elektriko eta eremu magnetikoa independenteak ziren, gurutzatu egin zitezkeen, gainezarri egin zitezkeen eta elkarri eragiten zioten, baina ez ziren egoera beretik deduzitzen.

Oliver Heavisidek (Ingalaterra, 1850-1925), zirkuituen teoria modernoa sortu zuena, Maxwellen ekuazioak sinplifikatu zituen. Potentzial bektoriala kendu, eta bakarrik indar elektrikoa eta indar magnetikoa erlazionatzen zituzten ekuazioak erabili zituen formula berriak ateratzeko. Ekuazio berriei "Duplex metodoa" deitu zien, indar elektrikoaren eta indar magnetikoaren adierazpen berriak simetrikoak zirelako:

$$\text{div } \mathbf{D} = \rho$$

$$\text{div } \mathbf{B} = \sigma$$

$$\mathbf{J} = \mathbf{C} + \mathbf{D} + \rho \mathbf{v}$$

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J}$$

$$-\text{rot } \mathbf{E} = \mathbf{G}$$

$$\mathbf{G} = \mathbf{K} + \mathbf{B} + \sigma \mathbf{w}$$

Ekuazio horietako berritasunak ziren:

- “ $\sigma$ ”: alegiazko karga magnetikoaren dentsitatea, simetria-arrazoiengatik gehituta.
- “C” eta “ $\rho v$ ”: eroaletasun-korrontea eta konbekzio-korrontea, hurrenez hurren. Lorentzek eta J. J. Thomsonek bi korronte horiek gauza bera zirela frogatu zuten.

Orduko fisikariek (Maxwellek berak ere bai) berrikuntza horiek aise onartu zituzten, eta ondorengo garapen teorikoetarako bultzada ikaragarria izan ziren.

Gaur egun erabiltzen diren ekuazioak antzekoak dira:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{edo Gaussen legea})$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{edo Gaussen legea eremu magnetikorako})$$

$$\nabla \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (\text{edo Faradayren legea})$$

$$\nabla \times \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{j} \quad (\text{edo Ampèreren lege orokortua})$$

#### 4.5.9. Argiaren izaera elektromagnetikoa

Faradayren garaietatik aurrera, oso garbi zegoen magnetismoaren eta argiaren arteko erlazioa sakona zela. Espazioan zeharreko hedapen-abiadura ( $3 \cdot 10^{10}$  m/s) ezagutzen zen, eta haren uhin-izaera ere zalantza guztietatik kanpo zegoen, espazioa betetzen zuen eter luminiferoaren zeharkako uhina alegia. Maxwellek kontsideratu zuen eter luminifero hura eta bere ereduko eter elektromagnetikoa bat zirela, bi eter desberdin egoteko arrazoirik ez baitzegoen.

Eredu mekaniko maxwelldarrean biraketa-ardatzarekiko perpendikularrak ziren indar elektroeragileek zurrumbilok desitxuratzen zituzten, eta zurrumbilok norabide perpendikularrean ere bolen mugimendua sorrarazten zuten. Hortaz, eredu mekanikoan perturbazioak zeharkako norabideetan bakarrik hedatzen ziren, edo elkarrekintzaren hedapenean zeharkako norabideak bakarrik onar zitezkeen. Luzetarako uhinik sortzeko posibilitaterik gabe, Maxwellena izan zen zeharkako uhinak bakarrik onartzen zituen lehen eter-eredua.

Newtonen teorian oinarrituta, zeharkako uhinen abiadura ingurunearen ezaugarriekin formula honen arabera erlazionatzen zen, “r” ingurunearen zurruntasuna eta “d” dentsitatea izanik:

$$v^2 = \frac{r}{d}$$

Eterraren zurruntasuna eta dentsitatea kalkulatzeko, Maxwellek hipotesi batzuk erabili zituen. Bolak erabat zurrunak eta masarik gabekoak zirela jo zuen, eta haien jokaera



“solido perfektu”ena zela. Ingurunearen zurruntasuna (edo bola elektrikoaren zurruntasuna) “ $\pi c^2$ ” magnitudearekin neurtu zuen, “ $c$ ” ingurunearen ahalmen inductibo espezifikoaren izanik:

$$r = \pi c^2$$

Ingurunearen masa eta elastikotasun osoa zurrunbiloetan omen zeuden, eta haien dentsitatea eta ingurunearen iragazkortasun magnetikoa erlazionatuta omen zeuden:

$$d = \pi \mu$$

Horrela uhinen abiaduraren ekuazioa lortu zuen:

$$v^2 = \frac{r}{d} = \frac{\pi c^2}{\pi \mu} = \frac{c^2}{\mu}$$

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu}}$$

Argiaren abiadura neurtzeko, iragazkortasun magnetikoak ( $\mu$ ) eta ahalmen inductibo espezifikoak ( $c$ ) unitate baliokideetan egon behar zuten, baina eterraren bi konstante horien balioak neurtzeko modurik ez zegoen, ezta haien unitateen arteko baliokidetasuna finkatzeko ere.

Bestalde, polo magnetikoen arteko indarra kalkulatzeko, Maxwellek lortu zuen lege newtondarrean ( $F = \frac{1}{\square} \frac{p_1 p_2}{r^2}$ ) unitate aproposak erabiliz, hutseko iragazkortasun magnetikoaren balioak nahitaez unitatea izan behar zuela frogatu zuen. Horrela, argiaren abiaduraren ekuazioa sinplifikatzen zen:

$$v = c$$

Azken konstante “ $c$ ” horren esanahia korapilatsua zen. Alde batetik, ingurunearen konstante dielektrikoarekin ( $k$ ) erlazionaturik zegoen:

$$k = \frac{1}{4 \pi c}$$

Beste aldetik, “ $c$ ” unitate elektrostatisiko eta unitate elektromagnetikoen arteko erlazioa zen; konstante horrek adierazten zuen unitate elektromagnetiko ( $u_{em}$ ) bakoitzeko zenbat unitate elektrostatisiko ( $u_{es}$ ) zeuden:

$$c = \frac{u_{es}}{u_{em}}$$

Wilhelm Eduard Weberrek (Alemania, 1804-1891) eta Rudolf Hermann Arndt Kohlrauschek (Alemania, 1809-1858), beste unitate-sistema bat erabiliz, “ $c$ ”ren balioa kalkulatu zuten ( $c = 3 \cdot 10^{10}$  m/s atera zitzairen) eta argiaren abiadurarekin bat zetorren. Orduan, Maxwellek eremuan zehar elkarrekintza elektromagnetikoa heda zitekeela,

uhin elektromagnetikoak existitzen zirela eta haien abiadura argiarena zela deduzitu zen: argiaren teoria elektromagnetikoa jaio zen.

Hurrengo pausoak teoria elektromagnetikoaren bidez argiaren ezaugarriak azaltzera zuzendu ziren. Maxwellek errefrakzio-ahalmenaren, konstante dielektrikoaren eta konstante magnetikoaren arteko erlazioa aurkitu zuen. Uhin elektromagnetikoek presio bat egiten zutela ere frogatu zuen, nahiz XX. mendera arte presio hori neurtu ez.

Maxwellen ustez, uhin elektromagnetikoak eroale baten barruan sartzen zirenean desplazamendu elektrikoak eta eroletasun-korronteak agertzen ziren. Energia elektrikoak, pixkanaka, bero bihurtzen zen, eta horrela uhina moteltzen zihoan. Horren guztia-  
ren arabera, eroaleek argi gehiago harrapatuko zuten, eta eroaleak opakoagoak eta dielektrikoak gardenagoak izanen ziren, baina errealitatean hori ez zen betetzen. Hala ere, Maxwellek, alferrik, gardentasuna eta erresistentzia elektrikoak lotzen zituen ekuazio bat deduzitu zuen.

#### 4.5.10. Argia azalpen operatiboaren arabera

Uhin elektromagnetikoen abiadura argiarena zela frogatu ondoren, azalpen operatiboaren medioz argiaren izaera elektromagnetikoa mekanismotik askatzeak Maxwellen teoriarako erabateko garaipena ekarri zuen.

Korronterik eta eroalerik gabeko guneeetarako “korronte osoaren ekuazioa” eta “indar elektroeragilearena” honela gelditzen ziren:

$$T = \frac{dD}{dt}$$

$$E = - \frac{dA}{dt} - \text{grad } \Psi$$

Bi emaitza horiek “elastikotasun elektrikoaren ekuazioa”rekin konbinatuz, korronte osoaren beste adierazpen bat lortzen zen:

$$T = \frac{1}{k} \left( - \frac{d^2 A}{dt^2} - \frac{d \text{grad } \Psi}{dt} \right)$$

“Indar magnetikoaren ekuazioa” eta “korronte elektrikoarena” kontuan hartuz:

$$\text{rot rot } A = 4 \pi \mu T = \text{grad div } A - \nabla^2 A$$

Eta korronte osoaren adierazpen berria aurreko azken ekuazioan ordeztuz gero:

$$k (\text{grad div } A - \nabla^2 A) + 4 \pi \mu \left( \frac{d^2 A}{dt^2} + \frac{d \text{grad } \Psi}{dt} \right) = 0$$

Berriz “indar magnetikoaren ekuazioa” erabiliz eta sinplifikazioak sartuz:

$$\nabla^2 \mu H = \frac{4 \pi \mu}{k} \frac{d^2 \mu H}{d t^2}$$

Horrelako ekuazioak XIX. mendean oso ezagunak ziren, eta gauza jakina zen emaitzak uhinak zirela. Uhin planoen kasuan, abiaduraren emaitza klasikoa hau zen:

$$v = \sqrt{\frac{k}{4 \pi \mu}}$$

Maxwellek, berriz ere, hutsean “ $k = 4\pi c^2$ ” zela frogatu zuen, eta hutsean “ $\mu = 1$ ” zenez, uhin elektromagnetikoen abiadura matematikoki lortu zuen, inolako mekanismorik gabe:

$$v = \sqrt{\frac{k}{4 \pi \mu}} = \sqrt{\frac{4 \pi c^2}{4 \pi \mu}} = \sqrt{\frac{c^2}{\mu}} = c$$

Uhin horietan desplazamendu elektriko eta desplazamendu magnetikoa elkarrekin hedatzen zirela frogatu zuen, eta biak elkarrekiko perpendikularrak zirela ere bai, baita uhin polarizatueta ere. Osagai elektrikoaren eta magnetikoaren energiak kalkulatu zituen, eta energia osoaren erdia elektriko zela, eta beste erdia magnetikoa zela aurkitu zuen. Beraz, azalpen operatiboaren barruan uhin elektromagnetikoak zeharkakoak zirela deduzitu zuen. Ekuazioetatik abiatuta uhinen propietate guztiak eratorri zirenean, optika eta elektromagnetismoa bateratzen zituen eredu gauzatu zen.

#### 4.5.11. *Maxwellen ondorengoak*

Maxwellen aurretik eremu teoriak (Descartes, Leibniz, Faraday) iritzi metafisikoen arabera baztertzen edo onartzen ziren, eremu-teoria frogatzen zuen esperimenterik proposatzeko modurik ez zegoelako. Maxwellen teoriatik, ordea, argiaren izaera elektromagnetikoa matematikoki deduzitzen zen eta beste fenomeno elektromagnetikoak ere egiazta zitezkeen.

1870etik aurrera, teorialari maxwelldarrak eredu mekanikoak garatzen saiatu ziren elektromagnetismoaren arazoak argitzeko, baina ez zuten Maxwellena gainditu, eta eterraren eredu berriak porrot galantak (eta irudimentsuak) izan ziren. Indar elektrikoak eta magnetikoak mekanikoki azaltzeko alferrikako ahalegin asko egin ziren, eta matematikoki oso korapilatsuak. Ereditu berriek konpondu gabeko arazoei ez zieten aterabiderik eman: dielektrikoen egitura, elektrokimika, lotura kimikoa, beroaren eta erradiazioaren arteko erlazioa, eta abar. Saiakera guztietan materiaren eta eremuaren arteko erlazioa izan zen oztoporik latzena, biak ezin ziren teoria berean bateratu eta partikula bat zergatik mantentzen zen lotuta ez zuten azaltzen. Orduan gainditu ezin izan zen oztopo hori gaur egun beste ikuskera baten barruan behatzen da: erlatibitatearen teoria einsteindarren barruan.

Eredu berrien artean aurrerapausorik handienak ekarri zituen Joseph John Thomsonena (Ingalaterra, 1856-1940) izan zen. Faradayren indar-lerroetan oinarrituta, fisikari horrek “indar-hodi elektrikoak” erabili zituen, Maxwollen eredu mekanikoko hodian antzera. Bere ekarpenak garrantzitsuak izan ziren:

- mugitzen ziren kargak Maxwollen ereduan sar zitezkeela frogatu zuen. Hori izan zen materiaren eta eremuaren arteko erlazioa finkatzeko lehen pausoa.
- eroaletasun-korrontea eta desplazamendu-korrontea, biak indar magnetikoaren sortzaileak zirenak, erabat erlazionatuta gelditu ziren.
- eremuaren energia magnetikoa hodian energia zinetikotzat hartuta, energia zinetikoaren deribatua abiadurarekiko hodian “momentua” zen, geroago “Poyntingen bektorea” deitu izan zena. Mekanika berriaren garapenean eremuari momentu bat ematea, denborarekin, oinarritzko ideia bihurtu zen.

Newtonzaleen artean ere Maxwollen eragina oso nabarmena izan zen, eta Newtonen teoriaren alderdi batzuk abandonatu behar izan zituzten. Adibidez, Hermann Grassmanek (Alemania, 1809-1877) indar zentralen eredu eraldatu zuen, eta Rudolf Clausiusen ereduan (Alemania, 1822-1888) akzio-erreakzioaren printzipioa desagertu zen. Merkurioaren orbitaren bitxikeriak ideia berriekin azaltzen saiatu zirenean, fisikari newtondarrak grabitazio unibertsalaren legearen kontra jo behar izan zuten, gutxienez distantziako elkarrekintzaren hipotesia salbatzeko asmotan.

Beste ikerlari newtondar batzuen eruedetan, elkarrekintza magnetikoa denboraz hedatzen zela proposatu zen. Bernhard Riemannek (Alemania, 1826-1866) “potenzial atzeratu”en teoria agertu zuen, puntu batean potentziala istantean agertzen ez zela adieraziz, magnitude hori espazioan zehar “c” abiaduraz hedatzen baitzen. Walter Ritzek (Suitza, 1878-1909) potentzial atzeratuen teoria berritua proposatu zuen argiaren izaera korpuskularrean oinarrituta, eta John Archibald Wheelerrek (AEB, 1911-2008) eta Richard Feynmanek (AEB, 1918-1988) potentzial atzeratuak eta Einsteinen erlatibitate berezia elkartu zituzten.

## 4.6. Hertz

XIX. mendearen bukaeran, elektromagnetismoan saltsa handia zegoen. Behaturiko fenomenoak eta oso teoria eztabaidagarriak, dena nahasita zegoen. Teoria newtondar eta teoria maxwellarren arteko lehian erabateko garailerik ez zegoen, erabaki argia ematen zuten esperimenterik ez zen aurkitzen. Gainera, Ingalaterrako fisikariak erabat maxwelldarrak ziren, kontinentekoak erabat newtondarrak, eta elkar aditzerik ez zegoen.

Ingalaterrako maxwelldar korronteetan, elektrizitate estatikoa, kargen arteko indarra eta indukzioa bateratzen zituzten eredu berrien arabera (Weberren teorian, batez ere) partikula elektrikoaren arteko indarrak kokapen, abiadura eta azelerazioen menpe zeuden.

Kontinentean, aldiz, Herman Ludwig Ferdinand von Helmholtzek (Alemania, 1821-1894) newtondartsuna eta energiaren kontserbazioaren printzipioa (Oliver Joseph

Lodgek, Ingalaterra 1851-1940, enuntziaturikoa) bateratu zituen. Printzipio hori betetzen zuen edozein partikula-sistematan indar zentralek eragin behar zutela, eta indar zentral horiek bakarrik partikulen kokapenen menpe egon behar zutela frogatu zuen.

Newtondertasunaren iraupena zalantzan zegoen garai haietan, Helmholtzen ikerkuntza-programak Weberren ekarpenen aurka zuzen jotzen zuen, batez ere elektromagnetismoa eta dielektrikoen polarizazioa erlazionatzen zituen teoretan sakonduz, eta, oro har, elektrizitatearen teoria newtondarrak bilatuz. Berak elektrizitaterako eredu bat argitaratu zuen “distantziara” eragiten zuten elementuz osaturiko eterra erabiliz, “ondo-ondoko elkarrekintzako mekanismo”rik gabe.

1887an bere dizipulu batek, Heinrich Hertz (Alemania, 1857-1894), bi zirkuituko muntaia prestatu zuen eta, bata bestearen ondoan jarrita, batetik korronea pasatzean beste zirkuituan indukzioz korronte elektrikoa agertzen zela behatu zuen. Korronte irekiak erabiliz (zirkuituaren bi muturren artean txinpartak sortzen zituztenak), bigarren zirkuituan deskarga elektrikoak indutitzea ere lortu zuen, eta deskarga horiek oszilazio periodikoen gisakoak zirela frogatu zuen. Bitartean, George Francis Fitzgeralde (Irlanda, 1851-1901) periodikoki oszilatzen zuen zirkuitu zirkular batek irradiazioa igorriko zuela matematikoki erakutsi zuen. Horregatik, Hertzek jo zuen bere muntaietan gertatzen ziren gertaeren jatorria argiaren abiaduraz hedatzen ziren uhin elektromagnetikoak izan zitezkeela.

Zirkuituetatik ateratzen ziren txinpartei erreparatuz islapen- eta interferentzia-fenomenoak sortzeko muntaia bereziak eraiki zituen, eta emaitza positiboak behatu zituen (muntaien ondoan zegoen burdinazko estufa batek esperimenduek bilatzen zituzten ondorioak oztopatzen zituela ohartu ondoren).

Hertzek erresonantziaren fenomenoak erabili zuen alde batetik bi zirkuituen oszilazioak berdintzeko (bi zirkuituak sintonizatzeko), eta bestetik bigarren zirkuituaren intentsitatea handitzeko. Garbi behatu zuen bigarren zirkuitua urrutiratuta ere indukzioaren eraginak oso nabarmenak zirela, txinpartek intentsitate berarekin saltatzen segitzen zutela, eta uhin haiek ez zutela energiarik galtzen.

Muntaietan sortzen ziren seinale elektromagnetiko haiek detektatzeko, nahikoa zen uhinen ibilbidean eroale bat jartzea. Seinalearen eremu elektromagnetikoaren ondorioz eroaleko elektroiak kitzikatuta, korronte elektriko bat sortzen zen, eta korronea detektatu eta neurtzen zuen. Horrela, uhin elektromagnetikoen uhin-luzera desberdinak neurtu zituen, eta uhin geldikorak ere ekoitzi zituen (nodoetan txinpartarik ez zegoen, eta sazeletan intentsitate maximoa neurtu zuen).

Zirkuitua argi ultramorearekin edo Eguzkiko argiarekin argituta, txinparten intentsitatea askoz ere handiagoa zela behatu zuen, baina gertaera hori askoz ere geroago arte ez zen azaldu, Einsteinek efektu fotoelektrikoaren azalpena eman zuenean.

Maxwellen teoriarekin Hertzen osziladorearen erradiazioa erraz azaldu zen, eta, horitik aurrera, Maxwellen izena mundu osoan zabaldu zen. Uhin elektromagnetikoak aurkitzeak eremuaren existentzia “egiaztatu” zuen, eta gainera efektu elektromagnetikoen

hedapenak abiadura finitua zuela frogatu zen: eremu-teoriendako garaipen osoa izan zen. Hura izan zen eremu-teoriaren bidez bakarrik azal zitekeen lehen fenomeno, urrutiko elkarrekintzen ezintasunaren aurrean. Maxwellen teoria elektromagnetismoari buruzko lan guztien abiapuntu bilakatu zen, Ingalaterrako ikerkuntza programak garaile atera ziren, eta uhin elektromagnetikoetan oinarrituriko teknologia hedatu egin zen: mikrofonoak, telegrafoa, irratia, telebista eta abar.

## 4.7. Eterraren izaera

Hertzen uhin elektromagnetikoen berri izan ondoren, mundu guztiko fisikariek eterraren izaera eta konposizioa bilatzeari ekin zioten. Eta bilaketa horretan bi teoria-mota erabili ziren, nahiz denak oso emaitza eskasekoak izan: eterra isurki perfektua zelako teoriak, eta eterrak solido elastikoaren ezaugarriak zituelakoak.

### 4.7.1. Isurki perfektuen teoriak

Teoria horietan materia eta eremua (eterra) desberdinak ziren. Eterra isurki bat bezalakoa zen, eta gorputz kargatuen arteko erakarpen- eta aldarapen-elkarrekintzak isurki horretan murgildutako partikula batzuen bibrazioak erabiliz azaltzen zituzten.

Adibidez, James Challisen (Ingalaterra, 1803-1882) eredu an eterran murgildutako partikula haiek guztiak uhin-igorleak ziren. Partikula batek uhinak igortzean eta uhin horiek bigarren partikula batera ailegatzean, bi partikulen artean elkarrekintza agertzen zen, erakarpena edo aldarapena. Uhin-luzera bigarren partikularen tamaina baino txikiagoa baldin bazen, bigarren partikula hori uhinaren hedapenaren alde mugitzen zen, eta aldarapen-elkarrekintza agertzen zen. Baina uhin-luzera handiagoa baldin bazen, uhin-igorlerantz mugitzen zen, eta bi partikulak gerturatzen ziren. Eredu hori uretan gutxi gorabehera egiazta zitekeen, eta matematikoki oinarrituta zegoen, baina haren ekuazioak uhin elektromagnetikoen kasu errealetarako ezin ziren ebatzi.

Carl Anton Bjerknesek (Norvegia, 1825-1903) eta, geroago, W. Thomsonek proposatu zuten eterra isurki konprimaezina zela eta haren barruko partikula esferikoak maiztasun unibertsal zehatz batekin bibratzen ari zirela. Pultsazioak fasean baldin bazeuden, esferen artean erakarpena agertzen zen, eta, desfasaturik baldin bazeuden, aldarapena, eta bi elkarrekintzotan distantziaren karratuaren alderantzizkoaren legea betetzen zen. Bitarteko kasuetako partikulak neutroak ziren.

Eredu horiek eskasak ziren, magnetismorako eta argirako azalpenik ez zuten eskaintzen, eta uhin elektromagnetikoen errealitatea azaltzeko arazo serioak zituzten. Alde batetik, eredu matematikoetan uhinen hedapen-abiadura infinitua izateko joera agertzen zen, eta ekidin behar zen. Beste aldetik, eredu matematiko horien arabera bibrazioek etengabe energia galtzen zuten, eta oszilazioak mantentzeko energia ezerezetik (“ex nihilo”) sortu beharko zen.

W. Thomsonek beste eredu propio bat asmatu zuen, eterra isurki konprimaezin eta ez-itsaskor gisa irudikatzen zuena. Materia eta atomoak eterrezko zurrunbiloak ziren, isurki horretan murgildutakoak, betierekoak, errealitate fisikoa zurrunbilozko “esponja” bat balitz bezala. Zurrunbiloak elkartzen zirenean, itxura desberdina hartzen zuten, eta atomoen artean lotura kimikoa agertzen zen. Bi atomok talka egiten zutenean, zurrunbiloak bibratzen hasten ziren, eta argi-uhinak igortzen zituzten. Mekanikako translazioak erraz azaldu zituen, eta uhin mekanikoen existentzia ere bai.

Baina eredu hori ez zen egonkorra. Indar zentrifugoarengatik zurrunbiloek gero eta handiagoak egingo ziren, eta zurrunbilo bakoitzean gero eta isurki gehiago mugituko zen. Energia osoa kontserbatu behar zenez, zurrunbiloak gero eta geldiago mugituko ziren, eta tamaina handitzen eta abiaduraz moteltzen ari ziren zurrunbilo (atomo) haie-tan materiaren identitatea mantentzea nekez azal zitekeen. Hala ere, eredu hori zenbait aurrerapenatarako erabilgarria izan zen, eta J. J. Thomsonek izpi katodikoaren teoria bat eraiki zuen zurrunbiloen arteko loturetan oinarrituta (“vortex model”). Teoria horri esker elektroiak aurkitu ziren.

#### **4.7.2. Solido elastikoaren teoriak**

Errefrakzio eta islapenen ondorioz solido elastiko arruntetan zeharkako uhin mekanikoak, azkenean, luzetarako uhin bihurtzen ziren, eta argian luzetarako uhinik ez zen sekula behatu. Horregatik, teoria horiek ezin ziren asko garatu, eta eter berezia asmatu behar izan zen solido elastikoen ezaugarriren bat kontuan hartzeko: eter “moldagarria”. Ingurune horretan luzetarako uhinik ez agertzeko, eter horren oinarritzko osagaia kubo gisa irudikatzen zen, puntu guztietan tentsio negatiboak edo kanporanzko tentsioak jasaten zituen kubo gisa.

James Macullaghek (Irlanda, 1809-1847) proposaturiko “eter errotazionalki elastikoa”n konpresiorako erresistentziarik ez zegoen, eta tortsioak elastikoki jasaten zituen. Beste irlandar baten arabera (G. F. Fitzgerald), eter horrek argiaren teoria elektromagnetikoa onartuko zuen baldin eta indar elektrikoa eterraren tortsioa bazen, eta indar magnetikoak tortsioa jasan ondorengo berreskuratze-abiadura irudikatzen bazuen. Bukatzeko, Joseph Larmorrek (Irlanda, 1857-1942) adierazi zuen elektroiak eterraren tortsio berezia izan zitezkeela.

### **4.8. Elektrodinamika**

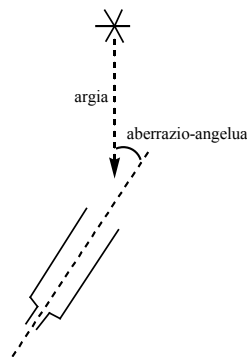
Elektromagnetismoaren fenomeno guztiak azaltzeko (erakarpenak, aldarapenak, indukzioa, argia) XIX. mendeko eredu metafisiko nagusietan eterraren hipotesia oso baliagarria izan zen. Fisikariak, gainera, lotura kimikoaren izaera ezagutzeko gertu zeuden, eta aldaketa kimikoaren giltzak (kimika) eskura omen zituzten.

Baina fenomeno mekanikoetan eterra erabiltzeak buruhausteak ekartzen zituen, Maxwellen azalpen operatiboa erabilita ere arazo batzuk ezin ziren ekidin, eta materia-

ren eta eremuaren arteko kontraesanez beteriko erlazioa mekanikarako oztopo handia izan zen. Elektromagnetismoarekin hainbeste denbora eta estualdi pasatu ondoren, fisikaren mamia, berriz ere, mekanika izan zen, eta fisikarien begirada izarren kokapenetara zuzendu zen.

Espazioa eter materialez beterik egonez gero, partikula aske guztiak (planetak, esate baterako) energia eta abiadura galtzen ibiliko ziren, izarren kontra talka egin arte. Hortaz, eterrarekin nekez azal zitezkeen planetena bezalako egoera egonkorak, eta Newtonen teoria grabitatorioa eterraren metafisikan sartzeko biderik ez zegoen. Korapilo hori askatzeko ikerketa-lerroari “mugitzen diren gorputzen elektrodinamika” deitu zitzaion, eta fisikaren atal honek, denborarekin, zientzia osoa irauli zuen.

Urtean zehar Lurra noranzko desberdinetan mugitzen da izarrekiko, eta, horren ondorioz, izarren itxurazko kokapena ere urtean zehar aldatzen da. 1728an James Bradleyk aurkituriko gertaera horri “izarren aberrazioa” deritzo. Beraz, izar bat udan behatzeko teleskopioa angelu batekin orientatu behar dugu, eta neguan kontrako angeluarekin, Lurraren kokapen desberdinek eskatzen dituzten aldaketak (“paralaje-zuzenketak”) egin ondoren.

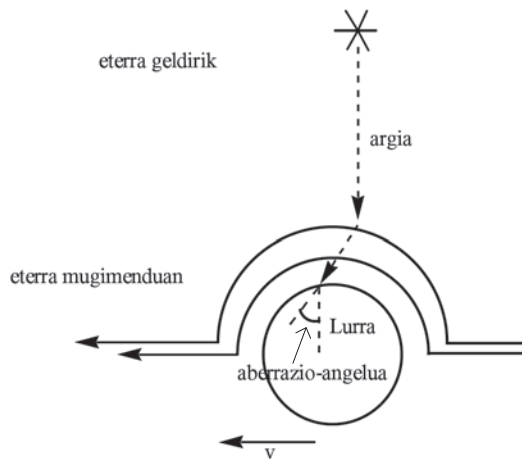


Izarra teleskopioaren erdi-erdian ikusteko, teleskopioa justu aberrazio-angelua makurtu behar da. Eta sei hilabete geroago, kontrako aldera makurtu beharko da.

Fenomeno hori ulertzeko, Newtonen teorian (argiaren izaera korpuskularra eta mekanika newtondarra) azalpen sinplea aurkitzen zen, matematikoki lagunduta gainera, teleskopioaren argiarekiko mugimendu erlatiboan oinarrituta. Eremu-teorietan, ordea, gertaera hori eterraren eraginaren bidez ulertu behar zen, eta, zeruetako gorputzak eterrarean zehar mugitzean sortzen zen fenomeno bakarra zelakoan, aberrazio-angeluaren azalpen zientifikoa lortzeak sekulako garrantzia hartu zuen. Elektrodinamikaren helburua, eta aldi berean garai haietako fisikan argitu gabe gelditzen ziren arazo guztietatik handiena, haien ibilbidean planetek eterra arrastatzen ote zuten eta arrastatzearen ondorioak zein ote ziren aurkitzea zen. Aberrazio-angeluaren arazoari loturik, arrastatzearen aldeko eta kontrako iritziak plazaratu ziren, eta angelua bera eta beraren balioak azaltzeko asmotan, zenbait eter-motaren ezaugarri mekanikoetan oinarrituriko planteamendu matematikoak garatu ziren.



George Gabriel Stokes fisikariak (Irlanda, 1819-1903) jo zuen eterrarekiko materia iragazgaitza zela eta espazioan zehar mugitzean planetek eterra arrastatzen zutela (eter higikorra). Gainazaleko eterra Lurrarekin batera mugituko zen, abiadura berarekin biak, eta kanporagoko espazioan eterra geldirik egonen zen. Argiaren uhin-frontearen eta eterraren abiaduren batuketaren ondorioz, argiaren ibilbidea makurtuko zen:



Agustin Fresnelen (Frantzia, 1788-1827) ustez, Lurra eta materia eterrarekiko iragazkorak zirenez Lurrak ez zuen eterra mugiarazten (eter higiezina), eta, argiaren uhin-teoria erabiliz, teoria newtondarrarenak bezain emaitza onak lortu zituen aberrazio-angelua matematikoki azaltzerakoan.

François Aragok (Frantzia, 1786-1853) esperimentu zehatz bat prestatu zuen Fresnelen ereduaren kontraesanak bilatzeko, eta aurkitu zituen. Aragok prisma baten barrutik argi-izpiak pasarazi zituen Lurraren higiduraren noranzko berean eta kontrakoan. Bi noranzkoetan ibiltzean Lurrak aberrazio-angelua sortzen zuen moduan, prismatik ere fenomeno bera behatu beharko zen. Baina, errefrakzio-angeluen neurketak ikusita, prismatik aberraziorik eragiten ez zuela ondorioztatu zuen.

Aragoren esperimentua azaltzeko, Fresnelek atzera egin zuen, eta proposatu zuen prismaren gainean eter pixka bat kondentsatzen zenez prismatik argia arrastatu eta argiaren abiadura aldatzen zuela. Kondentsaturiko eter kantitatea (errefrakzio-indizearekiko proportzionala) justu argiaren aberrazioa berdintzekoa zenez (!), Aragoren esperimentuaren emaitza nulua zen.

Prismaren barruan argiak hartzen zuen abiadura kalkulatzeko, Fresnelek argiaren abiadurari prismatik emaniko bultzada (prismaren abiadurarekiko proportzionala) gehitu zion:

$$v_{\text{prisma}} = v_{\text{argia}} + k \cdot v_{\text{prisma}}$$

Aragoren esperimentuan aberraziorik ez ikusteko, konstantearen balioa (Fresnelen arrastatze-koefizientea,  $k$ ) errefrakzio-indizearen menpekoa ( $n$ ) atera zitzaion:

$$k = \left( 1 - \frac{1}{n^2} \right)$$

Armand Hippolyte Louis Fizeauk (Frantzia, 1819-1896) koefizientearen baliagarritasuna egiaztatu zuen uretan eta kontrako noranzkoetan igorritako argi-izpien interferentziak behatuta: Fresnelen koefizienteak iragartzen zuen modura urak argia arrastatzen zuen.

#### **4.8.1. Eter-haizea**

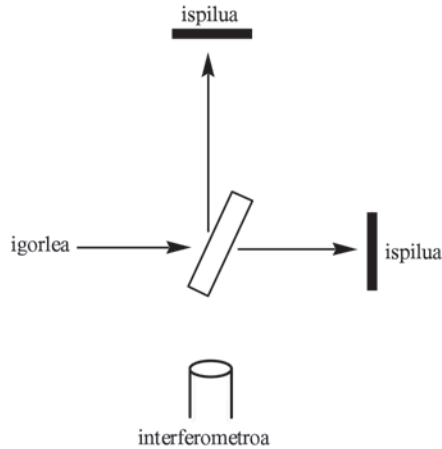
XIX. mendearen bukaeran, eter iheskor hura detektatzeko eta beraren eraginak neurtzeko, izaera optikoko eta elektrikoko saiakera batzuk egin ziren. Fresnelen koefizientearen hipotesiaren ildoan, eter higiezinaren efektu nabarmenak neurtu beharko ziren, “eter-haize”aren existentziak eragindakoak alegia. Haizerik gabeko egunetan azkar gabiltzanean airearen kolpea nabari den bezala, eter higiezinarekin antzera gertatu beharko zuen, eterrean zehar mugitzean edozein objektuk kontrako noranzkoko eter-haizea sortu beharko zuen. Eguzkiaren inguruan Lurraren abiadura 30 km/s izanik, eter-haizearen abiadura kontrako noranzkoan 30 km/s izanen zen, eta inolako oztoporik topatu gabe eter horrek Lurreko atomo guztien tartetik pasatu beharko zuen.

Maxwellek 1875ean proposaturiko esperimentu baten arabera, Lurraren higidura absolutua neurtzeko (eter higiezinarekiko), argiaren abiadura norabide desberdinetan neurtzea nahikoa izanen zen. Eter-haizearengatik argia norabideren batean azkarrago mugituko zen, eta, norabide desberdinetako abiadurak alderatuta, Lurraren abiadura eta norabide absolutuak kalkulatzeko posible izanen zen. Eterarekiko norabide paraleloan eta perpendikularrean argiak lortzen zituen abiadura zehatzak Maxwellek ez zituen oso garbi ikusten, baina desberdinak izan behar zutelakoan zegoen.

Albert Abraham Michelson (AEB, 1852-1931) 1887an interferentzia optikoetan oinarrituriko esperimentu bat diseinatu zuen. Igorle berak sorturiko bi argi-izpi norabide perpendikularretan bidali zituen, eta distantzia berdina ibili ondoren islatu eta biak batera puntu berean bildu zituen. Puntu horretan sorturiko interferentziak ikertuz (“interferometro” izeneko aparatuarekin), bi argi-izpien faseak alderatzen zituen (ikus irudia hurrengo orrian).

Argi-izpien orientazioaren arabera, eterrak izpi bat gehiago bultzatuko zuen, eta ibilbidea osoa egin arte argi-izpi batek besteak baino denbora gutxiago beharko zuen. Hortaz, aparatu osoa biratuz eta argi-izpien norabideak aldatuz, noizbait argi-izpi bat atzeratuko zela eta interferentzia aldatuko zela behatu behar zen.

Baina Edward Morleyren (AEB, 1838-1923) laguntzarekin esperimentua hamaika aldiz errepikatuta ere (“Michelson-Morley esperimentua”), eta mila modutara saiaturik ere (azkenean, gailua 1,5 m luzeko eta 30 cm lodiko harri-koskor baten gainean muntatu



zuten, merkurio likidoan flotatzen bibrazio guztiak ekiditeko, blokea horizontal mantentzeko eta aldi berean biraketa ez oztopatzeko, eta gailu horretan argiak zortzi joan-etorri egiten zituen), interferentziaren aldaketarik ez zen behatu eta eter-haizearen arrastorik ere ez.

1964 arte zenbait teknologia optiko erabiliz (“maser” erloju atomikoak barne) antzeko saiakera asko egin ziren, baina emaitza beti negatiboa izan zen.

Eter-haizea bilatzeko bestelako esperimentuak ere, izaera elektrikokoak, egin ziren. Maxwellen ekuazioen eta Heavisideren teoriaren arabera, karga baten inguruko indar-lerroak elipseak ziren. Karga horren gainean eremu elektromagnetikoak eginiko indarra aurreko indar-lerroekiko perpendikularra izanen zen, eta horren ondorioz indar-parea agertuko zen. Horretan oinarriturik, Frederick Thomas Troutonek (Ingalaterra, 1863-1922) eginiko ikerketan (Trouton-Nobleren esperimentua, 1903an buruturikoa) eter-haizearen norabidearekiko  $45^\circ$  makurtutako kondentsadore elektriko batean errotaziorako joeraren bat bilatu zuen, baina momenturik ez zuen neurtu. O. J. Lodgek ere biraka zebilen elektrizaturiko edo imanduriko gorputz baten inguruko argi-izpien ibilbideak analizatu zituen argien desbideraketaren bat bilatzeko, baina fase-diferentziarik ez zuen aurkitu.

Garai haietan, beraz, fisikako kontraesanak gehiegizkoak ziren: Stokesen eter higikorak ez zuen Fresnelen koefizientea azaltzen, eta Fresnelen eter higiezinak Michelsonen esperimentua ere ez. Bestalde, eterra detektaezina zen, zergatik inork ez zekiela.

#### 4.9. Lorentz

Hendrik Antoon Lorentz (Holanda, 1853-1928) konturatzen zen fisikaren egoera kritikoa zela, eta teoria elektromagnetiko batek Fresnelen arrastatze-koefizientea eta eterra detektatzeko ezintasuna azaldu behar zituela. Horregatik, ikuspuntu berria eta elektroietan oinarritutako eredu mekaniko berria eraiki zuen. Harrigarria badirudi ere, elektroia

ez zen proposatu materiaren egitura kimikoa eta fisikoa ulertzeko, elektromagnetismoaren arazo teoriko bat gainditzeko baizik. Lorentzek bere eredu 1892an argitaratu eta handik bost urtera elektroia aurkitu zen.

#### 4.9.1. Elektroien teoria

Lorentzen metafisikako eremuan partikula kargatuak eta “c” abiaduraz hedatzen ziren fenomeno elektromagnetikoak besterik ez zegoen. Partikulen presentzia soilak eta haien mugimenduak ere eterrean indarrak sortzen zituzten, eta eremua indarren multzoa zen, entitate materialik gabe. Metafisika horrek fenomeno optiko, elektromagnetiko eta mekanikoak azaltzeko balio izan zuen, eta baita eterrari buruzko zenbait oztupo gainditzeko ere.

Materiaren egituraren barruan sartuta partikula mikroskopiko kargatuak omen zeuden, batzuk positiboak eta besteak negatiboak. Gorputz kargatuetan korpuskulu negatiboak edo positiboak nagusi ziren. Weberren teoria newtondarrean elektrizitatearen jatorria urrutiko elkarrekintzen menpeko partikula kargatuak zirela adierazten zen, eta Lorentz kontzeptu horretatik abiatu zen bere eredu mekanikoa garatzeko, baina partikulen jokaerarako eta eremuaren eraginerako Maxwellen teoria kontuan hartuz. Beraz, Lorentzek korrante elektrikoa zeinu bereko kargen fluxu gisa irudikatu zuen, korpuskulu haiek eterrarekiko iragazkorak izanik (ez zuten eter-arrastatzerik eragiten).

Alde guztietara ere, partikula kargatuen ideia oso eztabaidagarria zen. Elektroia puntuala balitz ( $r = 0$ ), Maxwellen ekuazioen arabera energia infinitua izanen luke, eta hori onartezina zen. Baina elektroia puntuala izan beharrean erradio finitukoa balitz, elektroio bakoitzean nolabaiteko guneak leudeke, gune guztien artean aldarapen-indarra agertuko litzateke, eta, beste elkarrekintza-mota batek elektroia baturik mantentzen ez baldin bazuen, elektroioaren suntsipena lehenago edo beranduago gertatuko litzateke. Arazo hori gaur egun ere argitu gabe dago.

Elektroien izaeraren gaineko eztabaidetan sartu gabe (berriz ere, interpretazio operatiboa erabiliz) Lorentzek korpuskulu horiei Maxwellen ekuazioak aplikatu zizkien, eta ekuazio haien adierazpen berria deduzitu zuen:

$$\text{div } d = \rho$$

$$\text{rot } d = -\frac{1}{c} \dot{h}$$

$$\text{div } h = 0$$

$$\text{rot } h = \frac{1}{c} (\dot{d} + \rho v)$$

$$f = d + \frac{1}{c} v \wedge h$$

d: indar elektrikoa

$\rho$ : karga-dentsitatea

h: indar magnetikoa

v: kargaren abiadura

f: Lorentzen indarra

Eredu horren lehenbiziko lau ekuazioak, eremua deskribatzen zituztenak, Maxwellenak ziren, Heavisidek sinplifikaturikoak eta Fitzgeralden gehituriko “ $\rho$ - $v$ ” konbekzio-gaia adierazita. Bosgarren ekuazioa erabat Lorentzena zen, Maxwellen ekuazio batetik deduziturikoa. Ekuazio horrek mugitzen zen kargaren gainean eragiten zuen eterraren (edo eremuaren) indarra deskribatzen zuen (“Lorentzen indarra” delakoa), eta abiaduraren menpekota zen.

Lorentzek elektroien teoria argitaratu ondoren (“elektroi” izena G. J. Stoney irlandarrak 1891n proposatu zuen), Faradayren “deskarga erradiatzaile”aren esperimentuak errepikatuz 1897an William Crookesek elektroia detektatu zuen. Deskarga-hodiak erabiliz, halaber, 1886an Eugen Goldsteinek protoia aurkitu zuen, eta 1932an James Chadwick (Ingalaterra, 1891-1974, Fisikako Nobel saria 1935ean) neutroia. Nahiz atomoaren existentziaren proposamena 1808an John Daltonek egin, J. J. Thomsonek 1902an atomoaren lehen eredu plazaratu zuen, eta 1913an Niels Böhren (Danimarka, 1885-1962, Fisikako Nobel saria 1922an) atomoaren irudi modernoa enuntziatu zuen.

#### **4.9.2. Lorentz eta Fresnel**

Fresnelen koefizientearen azalpena bere metafisikan aurkitzeko, Lorentzek proposatu zuen dielektrikoetan partikula positibo eta negatiboak zeudela, eta kontrako zeinuko partikula-pare bakoitza elastikoki loturik zegoela. Uhin elektromagnetikoak (eta argia) gorputzaren barrutik pasatzean, karga-pare bakoitza periodikoki gerturatu eta urrutiratu egiten zen, pare loturik mantentzen zuen indar elastikoa hain zuzen indar elektrikoa zelako, eta argiaren indar elektrikoa norabidez periodikoki aldatzen zelako.

Pareen bibrazioa indar elastikoaren menpe edo gorputzaren konstante dielektrikoaren menpe zegoen, eta pare oszilator bakoitzak osziladore hertziano moduan jokatzen zuen bere uhin propioak igorri. Izpi erasotzaileak eta partikula-pareek igorriko uhinak interferitzean, argiaren abiadura gutxitzen zen, argiak gorputz garden bat zeharkatzean behatzen zen bezala. Horrela Lorentzek errefrakzio-indizea eta konstante dielektrikoa matematikoki erlazionatzea lortu zuen.

Hurrengo pausoa Fresnelen koefizientea eredu metafisikotik deduzitzea izan zen, eta baita lortu ere. Mugitzen ari zen objektu garden batean argiak jotzen baldin bazuen, argiaren eraginez pare bibrakor batzuk polarizatzen omen ziren, eta mugimenduaren ondorioz pare polarizatu haiek eremu magnetikoa sortzen zuten. Eremu magnetikoak pareen bibrazioa aldatzen zuen, pareek sorturiko uhinak ere aldatzen ziren, eta, azkenean, argi-fronte erasotzailearen abiadura aldatzen zen. Lorentzek abiadura-aldaketa hura kalkulatu zuen, eta Fresnelen koefizienteak aurreikusiriko kopuru bera ateratu zitzaion. Argiaren dispersioaren maiztasun desberdinak kontuan harturik, Fresnelena baino koefiziente zehatzagoak ere lortu zituen.

#### **4.9.3. Lorentz eta Michelson**

Michelsonen esperimentuaren emaitza negatiboak buruhauste galantak eman zituzten Lorentzi. Azkenean, holandarrak 1892an erabaki gogorra hartu behar izan zuen, hurrengo garaietarako eta belaunaldiendako erabatekoa izan zena. Haren hitzetan: “Den-

*bora luzez esperimentu honekin burua nahasita ibili naiz, eta azkenean Fresnelen teoria eta esperimentuaren emaitza bateratzeko modu bakar bat bururatu zait. Lurraren mugimenduaren norabidean mugitzen den gorputz solido baten bi punturen arteko distantzia, eta gorputza 90° biratuko balitz bi puntu horien artekoa, desberdinak liratekeela suposatu behar izan dut”.*

Horrela mintzatzeko arrazoiak eman zituen, fundamentuzkoak nahiz arbitrarioak. Gorputz solido baten tamaina eta itxura indar molekularren sendotasunaren menpe zeuden, eta sendotasun hori aldatzen zuen edozein kausak tamainan eta itxuran ere eragingo zuela pentsatzen zuen. Lorentz konbentziturik zegoen (zientziak hala baieztatzen zuen) indar elektrikoek eta magnetikoek eterraren bidez eragiten zutela. Hortaz, bi partikula elkartzen zituen indar molekularraren intentsitatea desberdina izanen litzateke bi partikula horiek eterrarekiko paralelo edo perpendikular mugituko balira. Michelsonen esperimentuaren emaitza nulua izateko, eredu horren aparatu matematikoak interferometroaren beso bat zenbat gutxituko zen kalkulatzeko zuten:

$$\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

Beraz, interferometroaren bi besoak luzera berekoak egin ondoren, eter-haizearen norabidean apuntatzen zuten besoa bestea baino  $[1 - (v/c)^2]^{1/2}$  aldiz txikiagoa egiten zen, bere kabuz, eterrak eraginda. Eta gainera, uzkurketa hori neurtezina zen, beste edozein neurketa-aparaturik uzkurketa bera gertatuko zitzaiolako.

#### **4.9.4. Lorentzen eter higiezina**

Michelsonen esperimentua Fresnelen eter higiezinaren bidez argitu ondoren, Lorentz gainerako fenomeno elektromagnetiko eta optiko guztiak azaltzeko lanetan murgildu zen: bi kargaren arteko elkarrekintza estatikoa, bi korronteren arteko indukzioa, Faradayren errotazioa, izarren aberrazioa, islapen arrunta, errefrakzioa, interferentziak eta abar. Eter higikorren teoriak hori dena azaltzen zuten, Michelsonena kenduta.

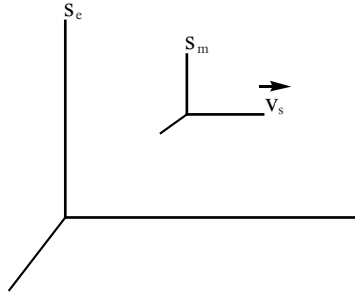
Bere teoria orokortzeko, Lorentz estrategiaz aldatu zen. Eter higikorraren teorietan (Maxwellena, adibidez) eterra Lurrarekin batera mugitzen zen, eta Lurreko objektuak eterrarekiko geldirik zeuden. Lorentzen teorian eterra geldirik zegoen, eta Lurra eterrarekiko mugitzen zen. Gertaera elektromagnetiko bakoitzerako azalpen bat bilatu beharrean, Lorentzek frogatu nahi izan zuen (eterrarekiko) mugitzen zen sistemak eta (eterrarekiko) geldirik zegoen sistemak modu berean jokatzen zutela, mugitzen zen sistemako fenomenoak eta geldirik zegoen sistemakoak baliokideak zirela, azkenean bere ekuazioak eta Maxwellen ekuazioak baliokideak zirela. Eta hori lortzeko bidea “koordinatu-transformazioak” ziren.

#### **4.9.5. Koordinatu-transformazioak**

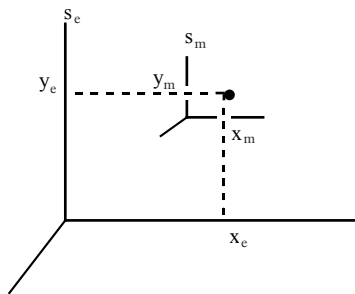
Huygensengandik aurrera, eta arrazoi matematiko hutsengatik, mugitzen ari ziren koordinatu-sistema desberdinak erabiltzea oso arrunta zen. Eta koordinatu-sistemen

arteko baliokidetasunak ebazteko, “Galileoren transformazioak” (erlatibitate klasikoarenak) aproposak ziren.

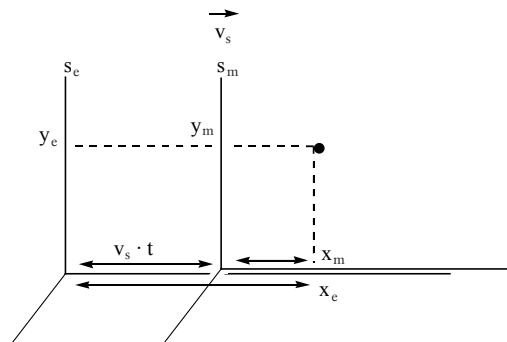
Eman dezagun sistema egonkor batekiko ( $s_e$ ) beste sistema bat ( $s_m$ ) “ $v_s$ ” abiaduraz mugitzen dela “ $x$ ” ardatzaren norabidean:



Une batean edozein puntuk bi sistemekiko koordinatu desberdinak izanen ditu:



Sistema mugikorra “ $x$ ” ardatzaren gainean mugitzen bada, eta hasieran bi koordinatu-jatorriek bat egiten badute, une batean bi koordinatu-jatorrien arteko distantzia “ $v_s \cdot t$ ” izanen da:



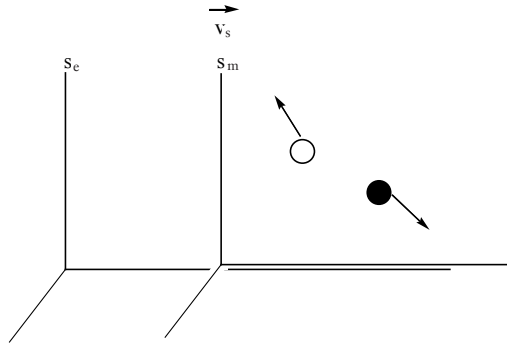
Begi-bistan dagoen bezala:

$$z_m = z_e$$

$$y_m = y_e$$

$$x_m = x_e - v_s t$$

Eman dezagun sistema mugikor bat daukagula (itsasontzi bat, adibidez), sistema egonkor batekiko mugitzen ari dena (portutik urrutiratzen ari da), eta sistema mugikorraren barruan fenomeno dinamiko bat gertatzen dela (bi bolaren arteko talka, esate baterako):



Newtonen teoriarekin talkaren ondorengo ibilbideak sistema egonkorrarekiko ( $s_e$ ) kalkula daitezke. Eta Galileoren transformazioa erabiliz, sistema egonkorreko emaitzak ( $x_e$  eta  $y_e$ ) sistema mugikorrera pasa daitezke ( $x_m$  eta  $y_m$ ).

Bi sistemen arabera aurreikusten diren ibilbideak berdinak dira, baldin eta sistema mugikorra abiadura konstantez mugitzen bada. Mekanika newtondarraren legeak sistema baten abiadura konstantearekiko independenteak izatea erlatibitate klasikoaren printzipioaren funtsezko ezaugarria da.

Dena dela, printzipio horretan Lorentzek konfiantza gutxi zuen, eta pentsatzen zuen gertaera elektromagnetiko eta optikoetarako ez zuela funtzionatuko. Horregatik, Galileoren transformazioak erabili beharrean beste transformazio batzuk deduzitu beharko zituen, eta 1895eko *Mugitzen diren gorputzen fenomeno elektriko eta optikoen teoria batenantz* (*Versuch einer Theorie der Electricischen und Optischen Erscheinungen in Bewegten Körpern*) artikulu zientifikoan lortu zuen.

Sistema mugikorra higiduraren norabidean  $[1-(v/c)^2]^{1/2}$  aldiz laburtzen denez (“Lorentz-Fitzgeralden uzkurketa” deiturikoa), transformazio berriak honako hauek dira:

$$z_m = z_e$$

$$y_m = y_e$$

$$x_m \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} = x_e - v t$$

v: sistema mugikorraren abiadura, c: argiaren abiadura.

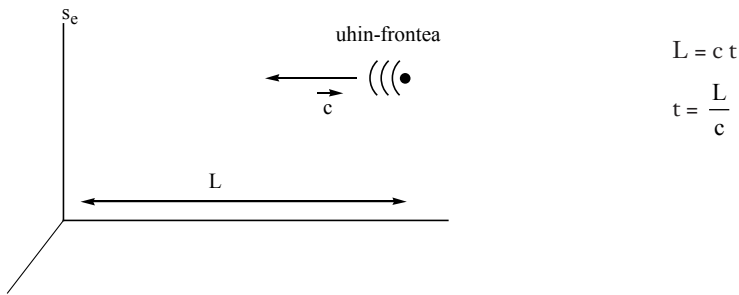


Ekuazio horiei “Lorentzen transformatu” deritze, eta XX. mendean fisika berriaren abiapuntu bihurtu ziren. Fenomeno elektromagnetikoak deskribatzerakoan, transformatu horiek erabiliz Maxwellen ekuazioak eta Lorentzen teoria (ekuazioak eta transformazioak) balioak zirela behatu zen, eta bi ikuspuntuen arteko desberdintasunak gutxi

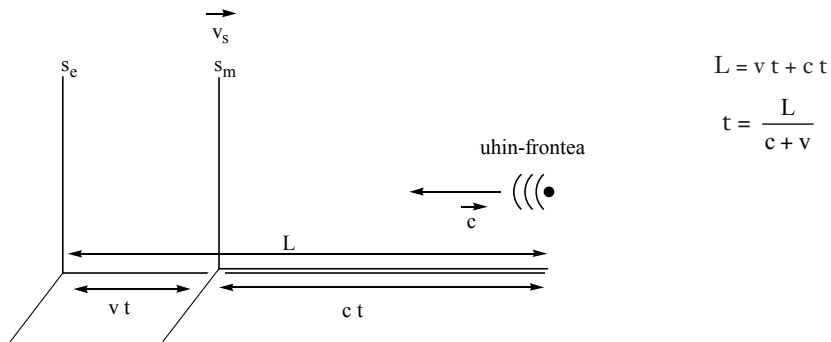
gorabehera  $\left(\frac{v}{c}\right)^2$  mailakoak (bigarren mailakoak) atera ziren. Horregatik, Lurraren eterrarekiko mugimenduak ( $v$ ) eragin nabarmenik ez zeukala deduzitu zen  $\left(\left(\frac{v}{c}\right)^2 \approx 10^{-8}\right)$ .

Eredu horrek karga estatikoetarako bikain funtzionatu zuen. Baina erradiazioa igortzen zuten elektroien azeleratuen kasua funtsezkoa zen, fenomeno optiko guztiak horren menpe zeudelako, eta Lorentzek egoera horri heldu zion.

Jo dezagun elektroien erradiatzaile bat mugitzen ari dela. Elektroien igorritako uhin-frontearen sistema egonkorra ailegatzea “ $L/c$ ” denbora kostatuko zaio:



Sistema mugikorra uhin-fronterantz gerturatzen bada, uhin-frontearen sistema horretara ailegatzea gutxiago kostatuko zaio,  $\frac{L}{c+v}$  denbora, hain zuzen ere:



Sistema mugikorren behatzaile batek uhina lehenago nabaritu du sistema egonkorrekoak baino, sistema mugikorrean gertaerak lehenago suertatuko balira bezala.

“L” handiagoa balitz, sistema mugikorreko gertaerak are lehenago suertatuko lirateke. Honegatik, sistema mugikorrari Lorentzek “denbora berezi bat” eman zion, eta denbora berri horri “lekuzko denbora” edo “denbora lokala” deitu zion.

Bi denbora egonik, sistema egonkorrena (eterrarena edo Maxwellen ekuazioena) eta sistema mugikorrarena (Lurrarena edo Lorentzen ekuazioena), Lorentzek denborarako transformazio berezi bat deduzitu zuen:

$$t_m = t_e - \left( \frac{v}{c} \right)^2 x$$

Azken transformazio hori kontuan hartuz gero, elektroi azeleratuen gertakizunetarako Maxwellen emaitzak eta Lorentzenak oso antzekoak atera ziren, gutxienez  $10^{-4}$  mailaraino.

Bestalde, Lorentzen transformatu horien arabera, sistema geldikorretik ikusita mugitzen zen elektroiak sortzen zituen eremu elektrikoa eta magnetikoa nabarituko lirateke. Baina elektroiarekin batera mugitzen zen sistema mugikorraren arabera, eremu elektrikoa besterik ez litzateke detektatuko. Arazo hori gaingiditzaek newtondartsunari azken agurra ematea ekarri zuen.

#### **4.9.6. Lorentz eta newtondartsuna**

Maxwellek bazuen nolabaiteko fedea newtondartsunean, eta beraren eredu mekanikoan Newtonen legeek gobernatzen zuten eterraren bilakaera. Lorentzen ekarpenean, Maxwellen eta Weberren alderdi ez-newtondar guztiak barneratuta zeuden: abiaduraren menpeko indarrak (Lorentzen indarra, hain zuzen ere), Maxwellen teoriaren denboratzerapenak, indar magnetikoa (indar ez zentral bat) oinarrizkotzat jotzea eta abar. Eta Lorentzen teoria erabat antinewtondarra zen.

Lorentzek garbi zeukan eter higiezinaren irudiak errealitatea ongi baino hobeki deskribatzen zuela, baina hipotesi horren koherentzia sendotzeko ordura arte mantentzen zen newtondartsunaren apurra abandonatu behar izan zuen: eterrak uhin elektromagnetikoak eta argia sor zitzakeen, baina argi-uhinak pasatzean eterrak ez zuen ezer nabaritzen, eterrak material eragin zezakeen baina materialak eterrean inolaz ere ez. Horrela, Newtonen akzio-erreakzioaren printzipioa arbuia zuen.

Bestalde, Lorentzen eter higiezinaren hipotesiaren ondorioz fenomeno elektromagnetiko eta optikoak ezin ziren ulertu eterraren osagaien gertaera zinetiko edo dinamikoaren bidez, eter higiezinaren horrelako gertaerarik ez zegoelako. Hortaz, gertaera elektromagnetikoen azalpen mekanikorako aukerarik ez zegoen, eter higiezinaren hipotesiak azalpen mekanistikoa debekatzen baitzuen. Horrek mekanizismo newtondarra eta distantziako elkarrekintza behin-betiko desagertzea suposatu zuen. Une horretan, eta historia osoan lehendabiziko aldiz, newtondartsuna bere osotasunean ordeztea planteatu zen.

Hala ere, eterraren izaera arazotsua zen. Isurki perfektu eta solido elastikoen hipotesiak baztertuta, Lorentzen arabera eterra indar magnetiko eta elektrikoen substratua

besterik ez zen. Eterra ia ezaugarririk gabe gelditzen ari zen, eta horrek susmo txarrak ematen zituen, erabat desagertu baino lehen Newtonen espazio absolutuari gauza bera gertatu zitzaiolako.

#### **4.9.7. Lorentzen teoria hobetua**

Lorentzen teoria nagusi bihurtu zen eter higikorren teoriak baino gertaera gehiago azaltzea lortu zuelako. Lorentzi esker fenomeno elektromagnetiko eta optiko gehienak ulertu ziren, nahiz gertaera fotoelektrikoetarako eta gorputz beroen erradiaziorako azalpenik egon ez; hori, denborarekin, fisika kuantikoak lortuko zuen.

Lorentzen ereduak iritzi kritikoen azterketak ere gainditu behar izan zituen. Aurrena Helmholtzena, Maxwellen tentsioek eterra mugiarazten zutela 1892an argitaratu zuenean, eterraren mugimenduaren ekuazio zehatzak eman eta eter higiezinaren kontzeptuaren beraren aurka jo baitzuen. Dena dela, segituan, Heavisidek frogatu zuen ekuazio haien balioa potentzial magnetiko edo elektriko baten presentziaren menpe zegoela, eta potentzialik gabe edo erradiazioaren eraginpean ekuazio haiek ez zutela ezertarako balio.

Henri Poincarèk (Frantzia, 1854-1912) oso argi seinalatu zuen Lorentzen teoriak akzio-erreakzioaren printzipioa hausteaz gain momentu linealaren kontserbazioa ere mila puska eginda uzten zuela. Haren ustetan, mugitzen zen elektroiak irradiatzen zutenean beraren abiadura eta momentua gutxitzen ziren. Irradiazioak beste elektroietan jo, eta elektro horiek abiadura eta momentua irabaziko zuten, baina, irradiazioaren hedapen-abiadura finitua ( $c$ ) izanik, bitarteko denboran ez zegoen kontserbazioaren printzipioa mantentzerik. Gainera, irradiazioaren parte bat sakabanatu eta galdu egiten zen. Handik gutxira, Max Abrahamek (Alemania, 1875-1922) kontserbazioaren arazoari atarabidea eman zion: erradiazioak berak momentua garraiatzen zuela adierazi zuen, Poynting bektoreekin lorturiko kalkuluak erabiliz.

Trouton-Nobleren esperimentuak (1903) eter higiezinaren arrastorik ez zuen eman; halaber, Rayleigh-Braceren esperimentu optikoak (1904) gezurtatu egin zuen Lorentz-Fitzgeralden uzkurketak (eter higiezinak eragindako "x" ardatzaren gaineko uzkurketa) gorputz gardenak birrefringente bihurtuko zituelako aurreikuspena (ez baitzuten errefrakzio bikoitzik detektatu gorputz gardenetan). Bi arrazoi enpiriko horietan oinarrituta, Poincarèk matematikoki frogatu zuen Lorentz-Fitzgeralden hipotesia eta Lorentzen transformatu berrien balioa ere oso eztabaidagarriak zirela. Poincarèren arabera, fenomeno elektromagnetiko guztiak, salbuespenik gabe, mugimenduarekiko independenteak ziren, mugimenduak ez baitzuen eragiten gertaera elektromagnetikoetan, eta, sistema inertzial guztien jokaerak baliokideak zirela berriz ere baieztatuz, Lorentzen teoria eta erlatibitatearen printzipio klasikoa bateratu behar ziren.

Azken ekarpenen berri jakin ondoren, Lorentzek bere teoria hobetu zuen  $(v/c)^2$  edo maila handiagoko ordenetan ere eterraren abiadura detektaezina zela egiaztatzeko helburuarekin. Hiru printzipio berrietan oinarrituta berreraiki zuen bere teoria:

- 1) mugimenduaren norabidean elektroiak  $[1-(v/c)^2]^{1/2}$  aldiz uzkurten dira.

Horrek esan nahi zuen elektroiak nolabaiteko biguntasuna zuela eta elektroia baturik mantentzeko bestelako indar edo energia ez-elektromagnetikoak behar zirela. Kontu horrek oraindik airean segitzen du.

- 2) kargatu gabeko edo kargaturiko partikulen arteko indarrak translazioaren menpe daude, sistema elektrostatiakoetan indar elektrikoak ere horren menpe dauden bezala.

Poincarèren jarreraren kontrako adierazpena izan zen hori.

- 3) elektroiak ez du masa materialik, eta kargaturiko partikulen masa bezala kargatu gabeko partikulen masa ere aldatzen da.

Honen arabera egiazko masarik ez zegoen, eta elektroian eta gainerako partikula guztietan masa osoaren jatorria elektromagnetikoa zen. Printzipio hori Wilhelm Wienek (Alemania, 1864-1928) eginiko lanetan oinarritzen zen. Fisikari horren arabera, partikulen masa kontzeptu elektromagnetiko hutsen bidez uler zitekeen: *“Kargaturiko partikula batek, mugitzean, eremu magnetikoa sortzen du. Partikula azeleratzen edo dezeleratzen dugunean, partikulak berak indar-lerro magnetikoak mozten ditu, eta horren ondorioz partikulan eragiten duen indar bat agertzen da (“autoindukzioa” deituriko fenomeno). Faradayren garaietatik aurrera jakina den bezala, autoindukzioa beti korronteari kontrajartzen zaio, eta, kasu honetan, partikularen mugimenduari. Beraz, autoindukzioa azelerazioari kontrajartzen zaio, partikulak masa inertziala bahu bezala.*

*Zeharkako masa eta luzetarako desberdinak lirateke, bi norabideetan indar-lerroen banaketak desberdinak direlako.*

*Elektroiaren erradioa egokia izanez gero, elektroia masa osoa indukzioaren ondorioa litzateke.”*

Printzipio berri horiekin Lorentzek Lorentz-Fitzgeralden uzkurketa matematikoki deduzitu zuen, eta denborarako transformatu berritua aurkeztu zuen:

$$t_m = t_e \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}$$

Zeharkako eta luzetarako masa desberdinak erabiliz, eterraren edozein abiaduratarako Michelsonen emaitzak negatiboa izan behar zuela frogatu zuen, eta Rayleigh-Brace eta Trouton-Noble esperimientuen azalpenak ere eman zituen.

#### 4.10. Big Bang kulturala

XIX. mendeko eremu-teorien alderdi teknologikoaren eta metafisikoaren emankortasunak, elektroien aurkikuntzatik espazio hutsaren ahalmenerraino, garai berri bat zabaldu

zuen. Gainera, hurrengo mendeko lehen hamarkadetan, maila goreneko autoritate zientifikoaren zerrenda paregabea bildu zen, historikoa: Albert Einstein, Neils Bohr, Marie Sklodowska (zientzia-arloko bi Nobel sari lortu dituen bakarra), Ernest Rutherford, Enrico Fermi, Paul Dirac, Max Planck, Werner Heisenberg, Louis-Victor de Broglie, Erwin Schrödinger, Wolfgang Pauli, Max Born, David Bohm ... Eta XX. mendeak, denetan pribilegiatuak, eremuen berrikuspen iraultzailearen jaiotza (Einsteinen erlatibitate orokorraren teoria) eta mundu ezezagun baten agerpena (Bohrren fisika kuantikoa) ikusi zituen, biak ere irudimen arrazionalaren pauso erabakigarriak, eta lan honen mugak ere bai. *Big Bang* kultural bat izan balitz bezala, harrezkero unibertso zientifikoa konplexutasun teknikorantz joan da, eta metafisikaren edukia gainez egin arte bete du. Haren *backgrounda*, jarrera zientifikoaren zorrotasuna, kulturako bazter guztietaraino igorri du, historia, soziologia, psikologia edo hizkuntzalaritzatik hasita Jorge Oteizaren estetika zientifistaraino edo boterearen kritika zientifikoetaraino bertaraino, gaur egungo egoera kulturala markatuz, eta zabaltze azkarra, eta beharbada infinitua, aginduz.



V.

METAFISIKA,  
ITXAROPEN ARRAZIONALA





## Metafisika eta filosofia

Androniko Rodaskoa “metafisika” hitza erabili zuen lehendabizikoa izan zen, Aristotelesen obra ordenatzean fisikari buruzko tratatuaren atzetik titulurik gabeko 14 liburu aurkitu zituenean, g.g.a. I. mendean. Metafisikaren esanahia berehala sublimatu zen, eta azken kontuez hausnarketak egiten dituen jakintza gorena izatera pasatu zen: munduaren zergatia, azpiko ordena ezkutua, materiaren eta espirituaren arteko erlazioa, Jainkoaren existentzia eta ezaugarriak, zergatik izatea ezerezaren orde, aukeramena eta abar.

Kantek “animalia metafisikoa” sortuta, eta filosofoak enpirikoki ikertu ezin ziren arloez jabetzean, metafisikaren eta filosofiaren arteko mugak desitxuratuz joan ziren, betiere bikoiztasun genetikoa, klasikoa eta erlijiosoa, gorderik. Metafisika filosofiko horren garapenetan, zahar zein modernoetan, balio absolutuak (egia, transzendentzia, infinitua, ezereza eta neoplatonismoak biziaren ditzakeen besteak) modu laikoan jorratzen dira, dedukzioaren lasterbideak gidatuta, nahiz, batzuetan, zailtasunaren prestigio soilak iluntasunaren eta sakontasunaren arteko aldea deuseztatzen duen, eta pentsaeraren garbitasuna eta ulergarritasuna ahazturik gelditzen diren.

Jaiotzez botereari loturik, Europa ilustratuan “Ancien Règime”ko buru errealak moztu zirenean eta haien lekuan nazioen buru abstraktuak ezarri zirenean, filosofiaren baliabide metafisikoei (borondate orokorra, herriaren gorpuztea) monarkia absolutuen koartada erlijiosoa (erregeak gorpuzten zuten subiranotasuna) ordeztu zuten, eta metafisika burgesiaren estetika bihurtu zen, menderatze oligarkiko berria bula filosofikoz estalirik. Mende bat geroago, ideologia berdintzaileen iraultzen garaian, historiak berak giza maila berezi bat helburu historikoak betetzera behartu zuenean, metafisika utopikoaren zeregina historiaren beraren garapena izan zen. Baina jarrera zientifikorik gabe, obediencia/askatasun binomioari erantzun askatzailerik eman gabe, boterearen printzipio arautzaileak aldatu gabe, historia mitoaren aurpegi ilustratu bihurtuta, kontzeptu metafisiko haiek bertute nazionalaren terrorismora eraman zuten (Robespierre, Stalin, Hitler, Franco), eta boterea usurpatzen zuten sindikatuen legitimizazioari, edo engainu ideologikoari, lagundu zioten, laguntzen diote. Gaur egungo filosofiaren, zientziaren eta gizartearen arteko harremanen jatorria.

Bestelako metafisika bat bilaketa zientifikoa agertzen diren auzi filosofikoei buruz (metodologikoak, epistemologikoak, etikoak) lan egiten duen “zientziaren filosofia”n aurkitzen da, bilakaera zientifikoa kode filosofikoa ulertzeko helburua duena (Popper,

Lakatos, Kuhn eta abar). Doktrina postrazionalistok zientziarekiko jarrera teknologiko eta instrumentalistak erabiltzen dituzte, zientziaren balio bakarra tekniko, pragmatiko eta funtzionala balitz bezala, interes teoriko eta metafisikorik gabekoa, hain zuzen ere Bellarmino kardinalak (Giordano Brunoren kasuko inkisidore bat izan zen) eta Berkeley apezpikuak Galileoren eta Newtonen kontra egia aurkitzeko zientziaren balioa ukatzeko erabili zutena. Lege zientifikoei buruz eztabaidatu beharrean, “legeen legeak” ezartzen saiatuz, haien ereduak, paradigmen aniztasunak eta esperimendu erabakigarriak ez dute, zientziaren garapenean, toki errealek irabazi. Era berean logizismoak ezin izan zuen matematika lengoaiaren uztarria lotu.

## Zientziaren izaera

Filosofiak egindako bidea zientzia berridazten ari da, senda propioetan ibiliz eta zimenduetatik hasita eraikin bat jaso, naturaren behaketatik abiatuta baina den-dena ulertzeko grinak jota. Zientziak ulertu du naturak nolabait hitz egiten digula, eta elkarrizketa lortu dugu, naturaren kodearen zati bat argitu dugu, munduaren sekretu batzuk ulertu ditugu, eta gure arrazoaren bidez existentziaren aspektu ezkuetara gerturatzen gara, gelditu gabe, egun batean bizigai bilakatu zen izarren hautsa garen *Homo Sapiens* hauek, dimentsio kosmikoekin nolabaiteko lotura –lotura ukaezina, oso esanguratsua, eta misteriozua– dugun animalioak.

Alde guztietara ere, naturaren behaketa, zentzu zabalean, funtsatzen diren zientziak (geologia, kimika, astrofisika, ...) ez dira bakarrak, eta gizakien baitan eragiten duten faktoreen ikerketa zientifikoa (biologia molekularra, neurozientzia, ...) azkar hazten ari da. Bestalde, eduki matematikoen garrantzia era askotakoa da: fisika kuantikoan eta erlatibistan matematikaren eta fisikaren arteko mugak meharrak dira, baina beste askotan (biologia, kimika, ...) erabilera instrumentalista hutsa da.

Ikerketa zientifikoa inspirazioa, irudimena eta askatasuna oinarritzko osagaiak badi-ra ere, azpimarratzekoa da edertasunak daukan papera, irizpide estetikoak aldi berean aurkikuntzetarako bultzada eta egiarako gida direlako. Dirac, Schrödinger, Einstein eta Feynman fisikarien obren edertasunak lehen mailako obra artistikoek adina hunkitzen dute. Eta Von Neumannek, mekanika kuantikoaren formalismo matematikoaren sortzaileak, matematika arte soilaren bilaketa estetizante huts bihurtu daitekeelako beldurra adierazten digu.

Zientzia bakoitzaren osagaiak diren teoria zientifikoak aurkezten dira, eta garatzen dira, ebatzi behar diren arazo zehatzak azalduz eta eztabaidatuz. Eztabaida kritikoen funtsa izaten da, batez ere, teoria batek arazok ongi argitzen dituen, teoria aurkarietako abantailarik duen, arazo eta aterabide berririk planteatzen ote duen eta abar. Komunitate zientifikoak jartzen dituen askotariko analisiak gainditu ondoren, teoria egiazkotzat hartzen da, tentu handiz, alde batetik arazoak kritika daitekeenak errealtasunaren itxaropena ematen digulako, eta bestetik hainbeste aurrerapen ekarri duenak sinesgarritasunaren argia eskaintzen digulako. Prozedura horren bitartez garaipen kontaezinak lortzen

ari dira, eta astero jakintzarako garrantzitsuak diren ekarpenak nonahi agertzen dira. Dena den, eraikin zientifikoaren sendotasuna bermatzen duena koherentzia da, sakona, zientzia bakoitzaren barruan eta zientzia desberdinen artean.

Zientziaren aurrerakuntza teknologikoak beste diziplinetarako ere aberasgarriak diren bezala, zentzu zabalean ulerturiko analisi zientifikoak, jarrera zientifikoak edo espiritu zientifikoak gaur egungo egoera kulturala (historian, soziologian, psikologian, estetikian eta abarretan) bereizten du, dualismoa eta mitoa, poesiaren seme-alabak, zientzia eta arrazoa ordezteko gauza ez direla ohartuta (*“Amicus Plato, amicus Aristoteles, magis amica veritas”* Newtonen hitzak). XX. mendera bitartean naturaren azalpen arrazionala eraikitzean zientziak aurkitu zituen aurkariak berez erreakzionarioak ziren, zientzialariak iraultzaile politikoak izan gabe. Eta gure garaiotan jarrera zientifikoa, berez askea izan gabe, mitoaren aurkako borroketan gogortuta, jarrera askatzaile bihurtu da.

## Fisika eta matematika

Errealitatearen oinarritzko egitura, azken kausak eta alderdi ezkutuak argitzen saiatzen den gaurko fisika (astrofisika, fisika erlatibista, fisika kuantikoa, ...) errealitatea arrazionala delako hipotesian oinarritzen da, ulermena eta azalpen arrazionala gauza desberdinak izan daitezkeela kontuan hartuta. Existentziaren ulergarritasunaren zergatiak bi ezaugarritan oinarritzen dira: ez-linealtasun matematikoa (gertaeren izaera kontingente indeterminista deskribatzen duena) eta lokaltasun fisikoa (gertaeren espazio-denborazko kokapena finkatzen duena), ulermenik gabeko arrazionaltasuna (dimentsio anizkoitzeko unibertso erlatibistak, eta ez-lokaltasun kuantikoak) oraingoz eremu metafisikoetan itxita.

Fisikak, matematikaren medioz, argudio inductiboak eta arrazoiketa logikoduktiboen mugak gainditzen ditu, eta eraikin matematikoen atzetik egon daitezkeen eredu kontzeptual ulergarriak finkatzen saiatzen da. Existentziaren funtsezko osagaien ikerketatik hasita, giza gertaeren muinetatik barrena osotasun kosmikoaren eredu garrapenataraino, fisika modernoak erakusten duen liluragarritzko boterea ezin baloratu da matematikaren oinarritzko elementuak ezagutu gabe, XXI. mendeko matematika, irudi mekaniko ez-gizatiarra gaindituz eta erreplikanteen diseinatzaile maltzurra delako susmo faltua ahaztuta, askatasunaren, ezintasunaren, kaosaren eta infinituaren ikerketan murgilduta bizi delako.

## Fisika eta metafisika

Fisikak oinarri matematikoko errealitatea adierazten du; metafisika, berriz, oinarri fisikoko espekulazio hutsa da. Ezagutzaren mugetan fisikak finkatzen dituen lubakietatik harantzagoko eremuetan, ezezagunean, metafisika aritzen da, eredu kontzeptual zientifiko bidez ezezagunaren eremu zabalagoak argitzen saiatuz, arrazoiketa kritikoa eta logika matematikoa medioz zientzia eremu horietara eramateko bidea prestatuz.

Metafisikak fisikaren gabeziak eta mugak agertzen ditu, eta etorkizunean fisikak izanen duen bilakaeraz mintzatzen zaigu. Esate baterako, konstante fisiko unibertsalen existentzia eta balioak aurreikusten dituen teoria zientifikorik oraindik ez da sortu, eta haien jatorriaz metafisikoki bakarrik espekula daiteke. Teoria argitzailerik agertu bitartean, diren bezala direla onartu behar dugu:

- grabitazio unibertsalaren konstantea ( $G = (6,67428 \pm 0,00067) 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ )
- elektroien karga eta masa, edo oinarrizko quarkenak ( $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ ,  $q_e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ )
- argiak hutsean duen abiadura ( $c = 299.792,458 \text{ km/s}$ )
- Planck-en konstantea ( $h = 4,13566743(35) \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$ )
- egitura finaren konstantea ( $\alpha = 137,03599911^{-1}$ )

Mundu fisikoak erakusten dituen simetria-erlazioen sorburua ere ilunpetan dago oraindik, eta, oro har, errealitatea ezagutzeko matematikak erakusten duen bikaintasuna (zehaztasuna, zolitasuna, sofistikazioa, edertasuna) nondik heldu den erabat misteriotsua da. Egoki antolaturiko materiak (zerebroak) ezagupen kontzientea nola sor dezakeen harrizten gaitu, ezagupen zientifikoaren oinarria den logikaren jatorria zein den ere ez dakigu, eta zientziak den-dena argitu ote dezakeen ere ez. Metafisikak, oraingoz, beti misterioren bat geldituko ote den ezin du aurreikusi, ororen azalpena, osoa eta autokonsistentea, lortuko ote den ere ez, ezta galdera hauek egitea zentzuduna den ere.

Gaur egungo fisikak eta metafisikak baieztatzen dute unibertsoaren osagai guztiak, bere dimentsionaltasunetik hasita lege fisikoetaraino bertaraino, kontingenteak direla, desberdinak izan zitezkeela, eta existentzia den bezalakoa izatea kosmosaren hasierako baldintzen ondorioa dela. Beharrezkotasuna (ezaugarri independenteak izatea, berdin mantenduko litzatekeena nahiz gainerako guztia aldatu, bere funtsaren zergatia bere baitan bertan izatea) errealitatean ez da inon ere eta inolaz ere aurkitzen. Beraz, dena kontingentea eta ulergarria delako uste metafisiko sendoa daukagu, eta ulergarritasunaren bidean pauso berriak urratzeko errealitatearen deskribapenek, oraingoz, fisika kuantikoarekiko eta fisika erlatibistarekiko koherenteak izan behar dutela dirudi. Horrela “azken azalpenetarantz” metafisikoki gerturatzen ari gara.

Errealitatearen zenbait alderdi giza arrazoiaren ahalmenetik kanpo izatea metafisikoki posiblea da alderdi horiek, berez, irrazionalak izan gabe. Gaurko metafisikak gaztigatzen digu arrazoi edo intuizioa erabiliz ulertezinak diren enuntziatu matematikoak existi daitezkeela, edo kontrol matematikorako menperaezinak diren ekintza fisikoak izan daitezkeela, edo egitura fisikoetan errotuta ez dauden errealitatearen edo adimenaren aspektuak hor nonbait, ezezagunaren altzoan estalita, egon daitezkeela. Nork daki.

Beharbada zenbait gertaera, nahiz fisikoki azalgarriak izan, guk ezin izanen ditugu sekula ere ulertu. Agian *Homo Sapiens*endako “ororen zergati”etaraino ailegatzea metafisikoki ezinezkoa da. Apika arrazionaltasunezko oasi batean bizi gara, baina eskalaren batean errealitatea irrazionala eta absurdua da. Ez dakigu. Garbi dago ikerketa arrazionalaren bidean segitu behar dugula eta biziki interesgarria dela, bere azken mugetaraino

jorratu behar dugula eta muga horiek non dauden oraingoz ez dakigula, ikerketa zientifikoak noraino eramán gaitzakeen ez dakigula. Horregatik, zientziak ez du ukatzen gaurko ezagutzatik harantzago izan daitekeen ezer ere. Baina zientziak hain ongi funtzionaltzeak zer edo zer esan nahi duela nabarmendu behar da, zientzia existentziaren sakontasun esanguratsuekin estuki erlazionatuta dagoela dirudi.

Metafisika newtondarrak bezala, zientziaren lehen garaietako metafisika guztiek (forma geometriko perfektuak adierazten zituen unibertsoa, edo kosmosa erlojugintza-mekanismo erraldoitzat hartzea, edo ordenagailu erraldoiaren irudi modernoagoa) mundua ulertzeko modu errealistagoak eta existentziaren ikuskera zehatzagoak ekarri zituzten. Baina XXI. mendeko metafisikaren panorama zinez liluragarria da. Kosmologia kuantikoak “izatea”ri eta “ez izatea”ri buruz hitz egiten digu, eta beraren irudizko denborek ezezagunaren barrura irensten gaituzte. Supersoken teoriak oinarritzko indarrak, korpuskuluak eta espazio-denbora bera ere eskema matematiko bateratuan sar daitezkeela agintzen digu. Sistema estokastikoak eta autoantolatzaileak aurreikusi ezin diren eragin aleatorioei buruz mintzatzen zaizkigu. Kaosaren teoriak aldakortasunaren eta betikotasunaren arteko erlazioa, izatearen eta bilakaeraren artekoa, dirudiena baino askoz ere konplexuagoa dela frogatzen digute. Eta metafisika espekulatiboek FLRW kosmologiak, FAPP errealitate fisikoaren filosofia, mundu kuantikoaren espazio-denborazko historia alternatibo gainezarriak eta twistoreen teoriak aurkezten dizkigute.


Zazpi dimentsioko esferetan egitura diferentzial erabat berriak aurkitzen direnean (geometria diferentziala), eta gertaera batzuk ulertzeko ezagutzen ditugun lau dimentsioei beste zazpi gehitu behar zaizkienean (supersoken teoria), gure munduan gertaera behaezinak, eta beharbada ulertezinak, suerta daitezkeela onartu behar dugu: metafisikak esaten digu ezezaguna gure inguruan, gure barruan, maila mikroskopikoan edota maila kosmikoan dagoela, eta ezezagunaren ezaugarri batzuk eskaintzen dizkigu. Zoritxarrez desestaltzen den mundu horretan ontasunik, gaiztotasunik edo errukitasunik ez dago, ezta arrastorik ere. Ezezaguna, itxaroten diguna, entropia eta entalpia bezain hotza izan daitekeelako seinaleak garbiak dira, eta oraingoz gelditzen zaigun itxaropen bakarra ezezaguna ulertezina delako susmoa da, edo etorkizunak ekarriko dituen zientzia, metafisika eta ikuskera berriek bestelako itxaropena emanen digutelakoa.

Zoritxarrez ere metafisikoki hain korapilatsuak diren giza etikaren eta giza moralaren kontuak argitzea gaurko fisikaren testuinguruan ez da posible izanen. Errealitate fisikoa askoz ere gehiago ezagutu arte, adimenaren izaeraren ulermen sakona eskuratzeko posibilitate txikiak daude, eta horretarako gure ulermen fisikoan iraultza garrantzitsuek gertatu behar dute. Gaur egun zientifikoki adierazi ezin diren bestelako dimentsioak –eta, batez ere, subjektibitatea– adierazteko, fisikak aldatu beharko du. Eta bitartean optimistegia da sinestea prozesu mentalen egiazko izaeraren ulermenean aurrerapen handiak izatea espero dezakegula. Kontzientziari buruzko ikerketak oraindik haurtzaroan daude, funtzionalismo konputazionala eta mentalitate kontzientek estu loturik daudela sinesten dutenak badira, eta fisiologikoki mikrotubulu neuronal A-erretikularretan fenomenologia kuantikoa aurkitu daitezkeela pentsatzen dutenak ere bai. Geroak esanen digu nora jo.



## Bibliografía

- A. Einstein, *The evolution of Physics*, 1939, Simon & Schuster, NY.
- L. M. Bandres, *Zientziaren Historiografia*, 1992, Gaiak argitaldaria. Donostia.
- J. A. Billalabeitia, *Fisikaren Historia*, 1982, U.E.U.
- R. Núñez, J. Armentia, *Galileo, Mensajero de las estrellas*, 2002, Museos Científicos Coruñeses y Planetario de Pamplona.
- J. Altshuler, *A propósito de Galileo*, 2002, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Mexico.
- S. W. Hawking, *Historia del Tiempo*, 1988, Editorial Crítica, Bartzelona.
- J. Gribbin, *Historia de la Ciencia, 1543-2001*, 2003, Editorial Crítica, Bartzelona.
- W. Berkson, *Las Teorías de los Campos de Fuerza*, 1985, Alianza Universidad, Madril.
- A. Rioja, J. Ordóñez, *Teorías del universo*, 1999, Editorial Síntesis, Madril.
- D. O'Shea, *La conjetura de Poincaré, en busca de la forma del universo*, 2008, Tusquets, Bartzelona.



Zientziaren bilakaera gizaki eta gizarteen ezaugarrien menpe baldin badago ere, ekarpen zientifikoek garrantzia giza gertaeren muinetaraino ailegatzen da, eta baldintzatzen ditu. Teknologia, zientziaren ondorioz famatuena, bizitza arruntaren osagai bihurtu da, baita etorkizunaren zutabe ere. Metafisika zientifikoak, ordea, gizakion mundu sinbolikoan jotzen du, eta berak ekarritako uholdeek garai historiko berriak ireki dituzte.

Liburu honek eskaintzen duen metafisikaren ibilbide historikoan, erakusten da gizakiei duintasuna ematen dieten handitasunak (askatasuna, egiaren bilaketa, edertasuna) zientziaren beraren ardatzak direla. Baina, batez ere, jarrera zientifikoa erreminta askatzaile gisa proposatzen da, oinarrizkoa askapena lortzeko, eta ezinbestekoa askatasuna eraikitzeko.

Historia honetan izan dira pentsamendu zientifikoari, egiaren garaipenari eta askatasunaren kausari modu berezian lagundu dieten pertsonaiak. Haiek egindako opariak ordainezinak dira, eta, aldi berean, denon ondasuna. Haiek irabazi zituzten mitoaren eta gezurraren kontrako borrokarik latzenak. Eta, enbor beretik sortuak, beste asko dira borroka berean dirautenak.

