

A relativitás története

Tordai Renáta, Andréka Hajnal, Németi István

„Ha az ember a relativitáselmélet múltjára visszatekint, nem lehet kétsége aziránt, hogy 1905-ben már megérett arra, hogy színre lépjen.”

Albert Einstein

A relativitás említései sokaknak az Albert Einstein által kidolgozott relativitáselmélet jut eszébe, holott a relativitás elve – amely alapul szolgált Einstein számára előbb a speciális, később az általános relativitáselmélet megalkotásához –, több, mint kétezer éve velünk él a tudományos gondolkodásunkban. Erre a hosszú, néhol ma már talán mosolygásra készítő útra hívunk meg mindenkit abban a reményben, hogy általa ennek a gyönyörű elvnek a jelenkori reinkarnációjáról teljesebb képet alkothat az Olvasó.

Nézzük, miről is szól az említett elv. A relativitás elve röviden azt mondja ki, hogy nem létezik abszolút mozgás, vagyis nem értelmes az a kérdés, hogy valami mozog-e, amíg meg nem határozzuk, hogy mihez képest.¹

A relativitás elvének első ismert megjelenése i.e. V. századra tehető, amikor Zénon *Stadium*² című apóriájában³ kifejti, hogy ellentmondáshoz vezet, ha egy test mozgását egy álló, illetve egy – a mozgó testhez képest – ellentétes, de azonos sebességgel haladó test szempontjából vizsgáljuk.

Következő erősen kritizált megjelenése már viszonylag későbbre, i.e. 340 körülre tehető, amikor Herakleidész azt állította, hogy a bolygók Föld körüli mozgása leírható a Föld mozgásával úgy, hogy a bolygókat állónak tekintjük. Herakleidész Arisztotelész kortársa, mi több, tanuló társa volt Platón athéni

¹Ezért nem szabad meglepődnünk, hogy a relativitás története annak a vitának a történetével fonódik össze, hogy a Föld mozog-e a Nap körül, vagy fordítva.

²Röviden leírva a gondolatmenetet képzeljünk el három azonos nagyságú és pontosan négy kocsiból álló kocsisort, amelyek közül az egyik áll, a másik kettő meg az állóval párhuzamosan, egymáshoz képest ellentétes irányba, de azonos sebességgel haladnak. Zénon azt vizsgálta, hogy ha a két mozgó kocsisort onnan figyeljük, hogy mindkettő eleje az álló kocsisor felénél van, akkor mire az egyik elhalad az álló mellett, addigra kétféleképpen tekinthetünk az általa megtett útra: egyrészt mondhatjuk, hogy megtett két kocsis-hosszat, hiszen elhagyta az álló kocsisort, másrészt pedig mondhatjuk, hogy megtett négy kocsis-hosszúságú utat, hiszen a másik mozgó kocsisort is elhagyta, ami viszont négy kocsiból áll.

³apória: egy kérdés megoldásának látszólagos lehetetlensége [*Idegen szavak és kifejezések szótára*, Akadémiai Kiadó, 1978]

akadémiáján, és ez a kijelentése élénk ellenkezést váltott ki a kor gondolkodóiból. Arisztotelész például azzal próbálta meg elhárítani az ésszerűtlennek tűnő elképzelést, hogy megkérdezte: ha a Föld forog, akkor a felszínén miért nem keletkezik erős szél, amely a feldobott tárgyakat elsodorná és nem engedné, hogy ugyanoda essenek vissza, ahonnan feldobták őket?

Később Arisztotelész már teljesen kidolgozott formában cáfolta Herakleidész állítását, amikor megírta az *Egekről* című munkáját. Ebben leírta, hogy minden test négy elemből épül fel: földből, vízből, levegőből és tűzből⁴. Ezek az elemek természetüknél fogva felfelé vagy lefelé mozognak, de a több elemet tartalmazó testek – ebből van a legtöbb – annak az elemnek a tulajdonságaival bírnak, amely a legnagyobb mennyiségben található meg bennük. Mivel azonban ezek a testek a többi elem jelenléte miatt mégsem egyenértékűek a domináns elemmel, ezért Arisztotelész tökéletlennek nevezi őket, és még leírja, hogy ebből következően a Földön létező dolgok szintén mind tökéletlenek.

Mivel az elemeknek a fent leírt módon mozgást tulajdonít, ezért véleménye szerint a testek mindegyikének a természetéből adódik a mozgása minősége, tehát szerinte a mozgás nem a testek egymásrahatásának az eredménye.⁵

A kor megfigyelései alapján úgy vélte, hogy bizonyos testek egyenes vonalú mozgást végeznek, mások egy helyben állnak, megint mások pedig körpályán keringenek, amit az előbbieknél úgy magyarázott, hogy minden anyagnak saját mozgása van aszerint, hogy az anyaga mennyire tökéletes. Az égi testek anyagát tökéletesebbnek, tisztábbnak tartotta a Föld anyagánál, ezért úgy gondolta, hogy azoknak kell körpályán keringeniük az alsóbbrendű Föld körül.

Arisztotelész műve rendkívül átfogó volt és minden korabeli (sőt későbbi) megfigyelésre látszólag ésszerű magyarázatot adott, ezért egészen Kopernikusz színre lépéseig, azaz közel 1900 éven át általánosan elfogadott volt, holott Herakleidész és Arisztotelész halála után nem sokkal Arisztarkusz is cáfolni próbálta.

Arisztarkusz csillagász és matematikus volt, aki geometriai alapon próbálta meghatározni a Nap méretét. Számításai arra vezettek, hogy a Nap minden kétséget kizáróan sokkal nagyobb, mint a Föld. Mivel azt elképzelhetetlennek tartotta, hogy egy olyan hatalmas óriás, mint a Nap, szolgamódon keringjen egy hozzá képest elenyésző méretű bolygó körül, mint a Föld, ezért próbált megalkotni egy olyan modellt, amelyben a Föld kering a Nap körül. Ezzel csak egyetlen probléma adódott, hogy a megfigyelt csillagmozgásokra nem adott magyarázatot egészen addig, amíg rá nem jött, a Földnek van egy másik mozgása is: forog a tengelye körül.

Minden igyekezete ellenére sem tudott azonban kielégítő választ adni (többek között) Arisztotelész Herakleidésznek feltett kérdésére (miszerint miért nincs állandó erős szél a Föld felszínén), ezért Arisztarkusz elmélete nem vált elfogadottá. Herakleidész véleményével együtt azonban változatlanul foglalkoztatta a rokonszenvezők elméjét.

Ptolemaiosz véget kívánt vetni az Arisztotelészi világmépítésnek, ezért

⁴A legtöbb görög gondolkodóhoz hasonlóan Arisztotelész is az ősi, mitológiai világmépet egészítette ki az elméleteivel, ezért nem meglepő, hogy annak egyik alapigazságából indul ki.

⁵Mivel a relativitás története sokáig a kozmológia történetével azonos, ezért itt nyilvánvalóan csak a természetes mozgásokkal foglalkozunk, a kényszerítettekkel nem.

megírta az *Almagest* című művét. Ebben részletesen taglalta, hogy mely nem-kívánatos és ésszerűtlen következményei vannak, ha elfogadjuk, hogy a Föld mozog. Ptolemaiosz néhány érvét kiemelve a következőket írja:

- Ha elfogadjuk, hogy a Föld – a legnehezebb elem – bárminemű mozgást végez, akkor el kell fogadnunk azt is, hogy az éter⁶, vagyis a legkönnyebb elem, mozdulatlan, ami viszont tökéletesen ellentmond az említett elemek természetének⁷.
- A keringő Föld felszínének szükségszerűen gyorsabban kéne mozognia, mint ahogy a felhők úsznak felette, amiből az következik, hogy nem szabadna látnunk a felhőket kelet felé haladni.
- Ha valaki egy hajón nagy sebességgel haladna kelet felé, és egy nyilat löne egyenesen felfelé, annak nem szabadna a hajóra visszaesni, hanem jó távolságnyira attól nyugatra.⁸

Ptolemaiosz emelett továbbfejlesztette Arisztotelész elméletét, és a kor megfigyeléseinek megfelelően tökéletesítette a bolygók epiciklikus rendszerét⁹, amely az idő haladtával szinte a követhetetlenségig bonyolódott, ahogy a bolygókat újabb és újabb epiciklusokra kényszerítették. Ennek az volt az oka, hogy a bolygók látható mozgását vizsgálva időről időre úgy találták, hogy az elméletből adódó számítások eredménye nem egyezik a megfigyeléssel, ezért úgy gondolták, hogy az elmélet jó, csak újabb epiciklusok bevezetésével pontosítani kell.

Ahogy Ptolemaiosz fenti érveinek megírása előtt, úgy utána is sokakat foglalkoztatott a téma, de az első említésre méltó írás csak Kr.u.1000 körül, Omar Khayyam perzsa matematikus és költő tollából jelent meg. Úgy tűnik azonban, hogy nem sok sikerrel, mert X. (Bölcs) Alfonz, Kasztília és León királya, 1240-ben tartott asztrológiai konferenciáján – amelyen a kor legnevesebb zsidó, arab és keresztény tudósai vettek részt – fel sem merült Khayyam kritikája a ptolemaioszi elmélet ellen. A konferencia célja az volt, hogy Ptolemaiosz rendszerét áttekinthetőbbé és táblázatok készítésére alkalmasabbá tegyék. A legenda szerint X. Alfonz a tudósok vitáját hallgatva kijelentette, hogy ha az Úristen kikérte volna a tanácsát a teremtéskor a világ szerkezetére vonatkozóan, ő lényegesen egyszerűbb tervet tudott volna neki ajánlani.

⁶Ptolemaiosz Arisztotelészhez hasonlóan szintén azokról az elemekről beszél, amelyek már a görög mitológiában is szerepeltek. Röviden összefoglalva a föld a legnehezebb elem, amely mozgásra képtelen, így a Világ középpontjában áll. Azt körülveszi a levegő, amely lényegesen könnyebb, majd ezen kívül helyezkedik el az éter, amely a legkönnyebb, így a leginkább mozgásra hajlamos.

⁷Ptolemaiosz úgy képzelte, hogy vagy a Föld mozog, vagy az éter. Ez abból következik, hogy mivel a mozgás az elemek sajátja (tulajdonsága), és a két elem – tulajdonságok tekintetében – egymás ellentettjei, ezért nem lehet, hogy mindkettő mozog vagy mindkettő áll.

⁸Ezen érvek átgondolásához segítséget jelenthet a *Hogyan jutunk el a relativitáselmélet-hez? Miért pont ilyen?* című cikk 3. oldalán levő kis kitérő néhány mozgással kapcsolatos fogalom tisztázásával.

⁹Nagyon leegyszerűsítve ez az elmélet azt mondja, hogy például egy bolygó, amelynek egy epiciklusa van, az olyan körpályán kering, aminek a középpontja maga is egy Föld középpontú körpályán halad. Ptolemaiosz azonban a legtöbb bolygót sokkal több epiciklusra kényszerült ítélni, mert a bolygók látható mozgását csak így tudta viszonylag jó közelítéssel leírni.

Khayyam után hozzávetőleg kétszáz évvel (a XIII. sz. közepe táján) Roger Bacon írta le, hogy „*Arisztotelész modellje jó matematikai leírása az Univerzumnak, de semmiféle fizikai realitása nincs*”. Ez ugyan még mindig nem volt átütő érv, amely elsöpörte volna a ptolemaioszi világképet, de úgy tűnik, mégis jó előkészítése volt a későbbieknek.

Nicola d’Oresme francia püspök és matematikus volt az, aki végül a XIV. sz. második felében döntő érveket talált a relativitás elve mellett, és azokat a *Kommentár Arisztotelész: De coelo et mundo című művéhez* című írásában foglalja össze. Rögtön az elején a következőket írja:

„Nekem azonban úgy tűnik – bár lehet, hogy tévedek –, hogy jól alátámasztható ez utóbbi vélemény, nevezetesen az, hogy a Föld, és nem az égbolt az, ami a napi mozgást végzi. Először is azt kívánom megmutatni, hogy senki sem tudná bebizonyítani az ellenkezőjét a tapasztalatra való hivatkozással, másodszer pedig, hogy okoskodással sem. És harmadszor észokokat akarok felhozni az alátámasztására.”

Nézzünk hát néhányat d’Oresme érvei közül.

Ő adott elsőként elfogadható választ adott Arisztotelész Herakleidésznek felvetett kérdésére. d’Oresme indoklása szerint

„...nem csak a Föld forog úgy, hanem vele együtt a víz és a levegő, ..., olyan módon, hogy a víz és az alsóbb légrétegek másképp mozognak, mint amikor a szél vagy egyéb okok mozgatják. A következő helyzettel hozható analógiába: ha a levegő be lenne zárva egy mozgó hajóba, azon ember számára, akit ezen levegőbe helyeznénk, úgy tűnne, hogy a levegő mozdulatlan.”

Ptolemaiosz fellőtt nyilára a következő választ adta:

„A harmadik észlelésre, amely nyomósnak tűnik, vagyis amelyik a felfelé hajított nyílra vagy kőre vonatkozik, azt lehet felelni, hogy amidőn a nyilat felfelé lőjük, ezen mozgással (egyidejűleg) gyorsan mozog kelet felé a levegővel együtt, amelyen keresztülhalad, valamit az Univerzum alsó részének fent említett összes tömegeivel együtt, minthogy mindezek napi mozgást végeznek. Ezen okból a nyíl visszatér a Föld azon helyére, ahonnan elindult.”

Az eddig leírt érveken túl, amelyek cáfolni látszottak a heliocentrikus világképet, d’Oresme leírt egy általunk eddig nem említettet:

„...saját szemünkkel látjuk, ahogy naponként kelnek és lenyugszanak a csillagok, a Nap és a Hold és néhány csillag az Északi sark körül forog; ez nyilván csak úgy lehet, ha az égbolt mozog.”

De nézzük, hogyan válaszolt rögtön:

„Továbbá úgy vélem, hogy a lokális mozgásnál csak azt érzékelhetjük, hogy az egyik test helyzete a másikhoz képest megváltozik. Ennek alátámasztására az alábbi érveket hozhatjuk fel: ha az ember egy hajón utazik – nevezzük ezt a hajót **A**-nak –, amely nagyon simán halad – egyébként akár gyorsan, akár lassan –, és ez az ember semmi mást nem lát, mint egy másik **B** nevű hajót, amely minden tekintetben azonos módon halad, mint az **A** hajó, amelyben emberünk utazik, akkor én azt állítom, hogy ezen ember számára úgy tűnik, hogy egyik hajó sem halad. És ha **A** nyugalomban van és **B** mozog, úgy jelenik meg és tűnik számára, hogy **B** mozog. Viszont ha **A** mozog és **B** nyugszik, ez is úgy tűnik számára, mint az előbb, hogy **A** nyugalomban van és **B** mozog.” „Hasonlóan, ha egy ember az égből lenne, feltéve, hogy napi mozgással lenne mozgatva, és ez az ember, aki így az éggel együtt halad, tisztán láthatná a Földet, a hegyeket, a völgyeket, folyókat, városokat és kastélyokat, úgy tűnne a számára, hogy a Föld végzi a napi mozgást úgy, ahogy nekünk látszik az égből, akik a Földön vagyunk. Hasonló módon, ha a Föld mozogna a napi mozgásával, az ég pedig nem, úgy látnánk, hogy a Föld nyugszik és az ég mozog.”¹⁰

Végül d’Oresme a filozófiára hajlókát kívánta meggyőzni a következőkkel:

„Továbbá a filozófusok azt mondják, hogy ha valamit több és hatalmasabb művelettel végez el valaki, ami elvégezhető lenne kevesebb vagy csekélyebb művelettel, akkor hiábavaló munkát végez. És Arisztotelész azt mondja könyve nyolcadik fejezetében, hogy Isten és a Természet nem cselekszik hiábavalóságot. De ha az úgy van, hogy az égből mozog a napi mozgással, szükséges, hogy a főbb testek a világban és az egekben két ellenkező fajta mozgással legyenek el látva, egyik keletről nyugatra, a többi ellenkező irányba, mint ahogy már gyakran hallottuk. Ezzel együtt szükséges az is, hogy igen nagy legyen a sebességük. Ez mindazok számára világos lesz, akik fontolóra veszik az ég magasságát vagy távolságát és körpályájának nagyságát. Ha ugyanis ilyen kört egyetlen nap alatt kell leírni, senki sem tudja felfogni, de még csak elképzelni sem, hogy milyen túlságosan és csodálatosan nagy az égből sebessége. Teljességgel elgondolhatatlan és kiszámíthatatlan. Miután mindazon hatás, amit érzékelünk, elérhető – és így minden jelenség megmenthető –, ha mi (az égből napi mozgását) egy kis tevékenységgel, nevezetesen a Föld napi mozgásával, amely nagyon kicsi az égbőléhez képest, és minthogy így kiküszöbölhetők a különböző és botrányosan nagy tevékenységek, az következik, hogy [ha az ég és nem a Föld mozog] úgy az Úristen és a Természet hiábavaló módon alkotta és rendezte a dolgokat. De ez nem méltó hozzá, mint mondva volt.”

¹⁰A későbbiekben látni fogjuk, hogy ez az idézet már igen közel áll mind nyelvezetében, mind tartalmilag a Galilei-féle relativitási elvhez, amely később még visszaköszön Einsteinnél is.

Ez utóbbi érvet – nagyjából d’Oresme előbbi idézetével egyidejűleg – William Ockham is megfogalmazta, amely végül a tudományos köztudatba úgy került be, mint *Ockham borotvája*¹¹. Ockham azonban más oldalról is támadta Arisztotelészt, Ptolemaioszt és társaikat. Ők ugyanis azt tartották, hogy minden elméletünk, amely a Természet leírására szolgál, igaz, mivel az érzékelt valóság szüli őket. Ockham volt az első, aki kimondta, hogy

„...nem igaz, hogy az ötleteink a Természetet írják le...ehelyett sokkal inkább a valóság tökéletlen árnyékát látjuk.”

d’Oresme után sokan felvették a fonalat, többek között Leonardo da Vinci is, ám közeledett az a kor, amelyben a tudomány fejlődése egyre inkább magára vonta az egyház figyelmét.

A középkor katolikus felfogásának terjedésével együtt ugyanis egyre inkább előtérbe kerültek a vallásos elemeket felhasználó elméletek, mint amilyen például Domenico Scandella tollából a következő: a négy klasszikus elem (föld, víz, tűz, levegő) összesűrűsödéséből őskáosz keletkezett, „*csakúgy, mint ahogy sajt lesz a tejből*”. Majd amikor „*férges jelentek meg a sajtban*”, a Legmagasságosabb Fenség Istenné és angyalokká tette őket.

Azonban ez a kor sem maradt a relativitás szempontjából eredmény nélkül, hiszen Scandella kortársa volt Kopernikusz, aki végül sikeresen elindította azt a rég várt lavinát, ami elsöpörte az – időközben az egyház által kizárólagosan elfogadottá vált – arisztotelészi-ptolemaioszi világméretet és magasabb szinten újjáélesztette Herakleidész és Arisztarkusz szemléletét, így adva lehetőséget a Tudománynak a megújulásra.

Kopernikusz 1512-ben kezdte – mai szóval élve – reklámkampányát, amikor *Commentariolus* címmel ismertetőt írt készülő művéről. Ebben a reklámozott könyvben írta le elméletét, amelyben valójában két nagyon lényeges változás történt az eddigiekhez képest. Az egyik, hogy Kopernikusz a Földet, ami eddig a Világegyetem középpontja volt, lefokozta egyszerű bolygóvá, amely a többi bolygóval együtt a Nap körül kering, a másik pedig, hogy a Hold végre elfoglalhata méltó helyét Föld körüli pályáján. Mivel a Kopernikuszi világegyetemben is körpályán mozognak a bolygók, a valóságban azonban nem, ezért a megfigyelések jó közelítéséhez még mindig szükség volt epiciklusokra, de a Föld mozgása miatt sokkal kevesebbre. A *Commentariolus*-ban a következőket írja kedvcsinálónak:

„A Merkúr mindössze hét körön száguld, a Vénusz ötön, a Föld pedig hármon: körülötte pedig a Hold négy kör segítségével rója pályáját. Végül a Mars, Jupiter, Szaturnusz mindegyike öt-öt körrel rendelkezik. Ilyen módon együttesen harmincnégy kör elegendő, hogy megmagyarázzuk az Univerzum egész szerkezetét és a bolygók teljes mozgását.”

¹¹Ockham borotvája röviden annyit mond, hogy ha valami leírható egyszerűen, akkor szükségtelen bonyolítani. Einstein ezt később továbbfejlesztette és több ízben kategorikusan kijelentette, hogy ami túl komplikált, az nem működhet.

A teljes könyv *Az égi pályák forgásáról* címmel az egyháztól való félelem miatt csak halála évében, 1543-ban jelent meg néhány száz példányban, de nem okozott akkora sokkot sem a tudományos életben, sem a társadalom elit rétegeiben, mint amekkorát sokan vártak. Voltak, akik próbáltak hasznot húzni belőle és felhasználni a naptárreformhoz, voltak, akik támadták. A kor szelleméből adódóan nagyon sok vallási felhanggal rendelkező kritika kelt szárnyra, mint például Lutheré:

„Ez az új asztronómus azt akarja bizonyítani, hogy a Föld jár körbe-körbe és nem az égbolt, a Nap és a Hold; akárcsak az az ember, aki a mozgó kocsiban ülve azt hiszi, hogy ő van nyugalomban és a mezők meg a fák haladnak el mellette. De hát így van ez manapság: ha valaki okos akar lenni, valami eredeti ötlettel kell előállnia, ami biztosan a legjobb, mert ő ötlötte ki. Ez a bolond az egész asztronómiát a feje tetejére akarja állítani: de amint a Szentírás is mondja, a Nap volt az, és nem a Föld, amelynek Józsué megparancsolta, hogy álljon meg.”¹²

A fenti érveken túl azonban születtek hasznos kritikák is, amelyek segítségével továbbrendülhetett a témával foglalkozók fantáziája. Az egyik leginkább említésre méltó talán Tycho Brahe, akinek a munkájára később Kepler is hálával gondolt a ránk maradt iratok tanúsága szerint. Brahe fő ellenérve az volt a kopernikuszi világmép ellen, hogy ha a Föld körpályán kering a Nap körül, akkor a csillagoknak az év különböző időpontjaiban különböző helyeken kéne látszania. Mivel ez nincs így, ezért feltételezni kéne, hogy rendkívül messze vannak, amiből viszont az következne, hogy elképzelhetetlenül fényesek (mert különben nem látszódnának a nagy távolságból), ez viszont ésszerűtlen. Megalkotta tehát a saját rendszerét, amelyről a következőket írta:

„A Föld ezen súlyos tömege, amely annyira alkalmatlan a mozgásra, nem végezhet háromszoros mozgást anélkül, hogy ne borítaná fel a fizika alapelveit; a Szentírás is ellene szól. . . Nekifogtam, hogy komolyan megvizsgáljam, nem találhatnék-e olyan hipotézist, amely tökéletes egyezést mutatna a jelenségekkel s a matematikai elvekkel anélkül, hogy a fizikától el kellene rugaszkodnia és a teológusok cenzúráját maga után vonná.

Ezen törekvésem reményeimet meghaladó módon sikerrel járt. Azt gondolom, hogy határozottan és minden kétség kizárásával a mozdulatlan Földet a Világ középpontjába kell helyezni, követve a régi asztronómusok és fizikusok véleményét, valamint az Írás tanúbizonyosságát. Legkevésbé sem értek egyet azonban Ptolemaiosszal és a régiekkel abban, hogy a Föld legyen a bolygók pályáinak középpontja. Azt gondolom ugyanis, hogy az égi mozgások úgy vannak elrendezve,

¹²Ezt a bibliai ellenérvet már d'Oresme is cáfolta, de az egyházi ítélőszék egybehangzóan belemagyarázónak tekintette a relativitási elv felhasználását d'Oresme érvelésében, ezért semmisnek tekintették a Szentírás tévedhetetlenségével szemben.

hogy csak a Hold, a Nap és a nyolcadik szféra¹³ – amely a legtávolabb található – mozgásának középpontja a Föld. A többi öt bolygó a Nap körül kering, mint vezérük és királyuk körül.”

Az eddigiek alapján jól érezhető, hogy ez a világbépe egy köztes állapotot tükröz az arisztotelészi-ptolemaioszi és a kopernikuszi világbépe között, ezért az egyház nem talált benne kivetnivalót, vagyis Brahe elérte célját, és ez az elmélet sokáig fennmaradt.

Említésre méltó még Giordano Bruno, aki Brahe kortársa volt, és Brahe-val ellentétben nem félt összetűzésbe kerülni az egyházzal. Abból a Kopernikusztól származó gondolatból, hogy a Föld is egy a bolygók közül, vagyis nem kiüntetett pontja a Világegyetemnek, Bruno arra jutott, hogy a Világegyetem végtelen és homogén. Állítólag a máglyán állva kapott egy utolsó esélyt tanai visszavonására, ezért – többek között – megkérdezték tőle, tagadja-e az elemek híres megkülönböztetését, amelyet a nagy görög gondolkodók vezettek be, amire így válaszolt:

„Nem tagadom a megkülönböztetést, mert tőlem mindenki olyan megkülönböztetést csinálhat a természeti jelenségek között, amilyen neki tetszik; de tagadom ezt a sorrendet, ezt a felosztást, vagyis azt, hogy a Földet körülveszi és átfogja a víz, a vizet a levegő, a levegőt a tűz, a tüzet az ég... az elemek és a világtestek híres és közismert sorrendje ábránd és teljesen üres képzelgés, amelyet sem a Természet nem igazol, sem az értelem nem bizonyít, s amely ebben a formában nem helyes s nem is lehetséges. Tudni kell tehát, hogy van egy végtelen mező és egy átfogó tér, amely önmagába foglalja és áthatja a mindenséget. Abban végtelen sok ehhez hasonló test van, amelyek közül egyik sincs inkább a Világegyetem közepén, mint a másik, mert a Világegyetem végtelen...”

A kopernikuszi világbépe győzelmének betetőzését (legalább a tudósok körében) később Kepler érte el, mivel törvényeinek¹⁴ segítségével az addigiakhoz képest redkívvül pontos bolygótáblázatokat lehetett készíteni. Az 1619-ben írt *A Világ harmóniája* című művének bevezetőjében a következőket írja:

„Mindenekelőtt az Olvasónak tudomásul kell vennie, hogy ma már minden asztronómus számára nyilvánvaló, hogy az összes bolygó a Nap körül kering a Hold kivételével: egyedül az ő számára jelent a Föld középpontot.”

¹³Ekkor ugyanis még végesnek tekintették az Univerzumot, amelyben a csillagok nem szét-szórva, hanem összegyűjtve állnak, mindegyik a helyén az említett nyolcadik szférában.

¹⁴Kepler 1. törvénye azt mondja ki, hogy minden bolygó olyan ellipszispályán kering, amelynek egyik fókuszában a Nap áll. Kepler 2. törvénye azt mondja, hogy a bolygót és a Napot összekötő szakasz egyenlő idők alatt egyenlő területeket sűrol, vagyis lényegében minden bolygó gyorsabban mozog, amikor közelebb jár a Naphoz. Kepler 3. törvénye pedig így szól: a bolygók keringési idejének négyzetei úgy aránylanak egymáshoz, mint pályaeállításuk félnagyengelyének köbei.

Ezzel tehát végleg romba dőlt az a régi kép, miszerint a Föld a világ közép-pontja, és Kepler levelezőtársának, Galileo Galileinek köszönhetően nem sokkal később az a kép is leomlásnak indult, hogy a tér abszolút, vagyis hogy mindenki számára ugyanazon események ugyanúgy és ugyanott zajlanak le.

Galilei a testek mozgását vizsgálta és ennek eredményeként eljutott a róla elnevezett relativitási elvíg, amely az einsteini speciális relativitáselmélet egyik legpontosabban megfogalmazott előzménye.

Galilei híres gondolat kísérletében azt mondta, hogy zárjunk be egy tudóst egy olyan hajónak az ablaktalan kabinjába, amely a nyugott vízfelszínen egyenletes sebességgel, egyenes vonalban mozog. Adjuk neki feladatul, hogy anélkül, hogy valamilyen módon kinézne a kabinból vagy felmenne a fedélzetre, állapítsa meg, hogy mozog-e a hajó a parthoz képest. Galilei azt állította, hogy ezt lehetetlen természettudományos¹⁵ kísérlettel kideríteni¹⁶, ugyanis a kísérletezéshez használt eszközök a hajóval azonos irányba és azonos sebességgel mozognak, ezért pontosan ugyanazt az eredményt fogják adni, mintha a hajó szilárdan állna a parton.

Galilei tehát azt mondta, hogy végtelen sok vonatkoztatási rendszer létezik, amelyek mindegyike egyrészt egy három dimenziós koordináta-rendszerből, másrészt pedig egy rendkívül pontos órából áll, és ezen vonatkoztatási rendszerek mindegyike egyenértékű bármely másikkal (vagyis nem létezik kitéüntetett közöttük), és mindegyik állónak tekinti saját magát.

A fenti idézetek és lábjegyzetek fényében úgy tűnik, nem irreális azt mondanunk, hogy a relativitás elve, mint gondolat már 2300 éve él kulturális életünkben illetve tudományos világgépkeresésünkben.

Ezzel a kijelentéssel arra szeretnénk utalni, hogy Herakleidész és Arisztarkusz azért fogalmazta meg kevésbé világosan a relativitási elvet, mint d’Oresme és Galilei, mert a mozgással kapcsolatos fogalmaik kevésbé voltak kifinomultak, mint d’Oresme-nek és főleg Galileinek. Tehát nem arról van szó, hogy Herakleidészék kevésbé értették/látták volna „relativitás elvének lényegét”, hanem arról, hogy az elv maradéktalan megfogalmazásához szükséges segédfogalmak, tehát a mozgással kapcsolatos olyan fogalmak, mint például gyorsulás, tehetetlen tömeg, még nem álltak (megfelelő mértékben) a görögök rendelkezésére. Bár látták és közelítőleg megfogalmazták a relativitás gondolatát, kifogástalan és támadhatatlan újrafogalmazására d’Oresme-ig kellett várni.

Galilei relativitási elvét később Isaac Newton fejlesztette tovább, és megalakította az azóta is használt mechanikai rendszerét, melynek alappillérei az iskolában is tanított három törvény¹⁷. Ezek közül az első segítségével definiálta az

¹⁵Sokszor említik a Galilei-féle relativitási elvet, mint ami csak mechanikai kísérletre vonatkozik, majd Einsteinnek tulajdonítják a természettudományos kísérletekre való kiterjesztését. Einstein maga azonban a kiterjesztett változatot Galileinek tulajdonítja, így talán érdemes ehhez hűen idézni. (ld. pl. A. Einstein *A relativitás elmélete* 5. fejezet)

¹⁶Emlékezzünk vissza d’Oresme gondolatmenetére, aki azt mondta, hogy akkor sem tudjuk megállapítani, hogy mi magunk mozgásban vagyunk-e, ha látunk egy másik hajót ugyanazon a tavon, de a partot nem!

¹⁷Newton 1. törvénye szerint minden test megtartja egyenes vonalú egyenletes mozgását, vagy nyugalomban marad mindaddig, amíg erő nem hat rá. Newton 2. törvénye azt mondja, hogy adott testre ható erő és az általa létrehozott gyorsulás arányos. Newton 3. törvénye arról

inerciális vonatkoztatási rendszert a következőképpen:

Inerciális vonatkoztatási rendszer olyan vonatkoztatási rendszer, amelyben a magára hagyott testek egyenes vonalú egyenletes mozgást végeznek.

Newton elméletében már nagyon lényeges szerepet játszottak a vonatkoztatási rendszerek (sőt, ezeket egyenrangúnak is tartotta), de ettől függetlenül feltételezett abszolút teret és időt. A saját szavaival élve:

„Az abszolút tér a maga természete szerint anélkül, hogy kölcsönhatásba lépne bármivel, megmarad mindig hasonlóknak és mozdíthatatlannak.”

„... az abszolút és a matematikai idő magában és a maga természete szerint egyenletesen telik anélkül, hogy kölcsönhatásba lépne bármivel, vagy más néven időtartamnak is hívható.”¹⁸

Mivel Newton elmélete rendkívül pontos előrejelzéseket adott, ezért egészen a XIX. századig, az elektromágneses hullámok – mint például a fény – vizsgálatáig nem kérdőjelezte meg senki. Ekkor viszont viharos gyorsasággal indult meg a Tudomány a relativitás elmélete felé.

A XIX. sz. elejétől elkezdődött az elektromosság és a mágnesesség alapos kutatása, amelyeket sokáig egymástól független jelenségekként könyveltek el. Később, 1820-tól kezdődően azonban meglepő sebességgel és egyre határozottabban kezdett alakot öltetni az elektromágnesesség elmélete.

Hans Christian Ørsted ekkor végzett elsőként kísérletet egy iránytűvel és egy áramjárta huzallal. Feljegyezte, hogy az iránytű elhajlik, vagyis mágneses tér indukálódik

Még ebben az évben J. B. Biot és F. Savart újabb kísérleteket végeztek, majd Laplace segítségével a jelenségeket matematikailag is felírták. Velük párhuzamosan – szintén 1820-ban – Ampère szintén kísérleteket végzett az egyenáram jobb megismerése érdekében, majd Newton mechanikájában használt logikára építve megalkotta az egyenáramjárta vezetők közötti erőtvényeket. Kísérletezései közepette az a sejtése támadt, hogy ha két egymás mellé helyezett áramkör egyikébe áramot vezet, akkor ez a másikban is áramot fog indukálni. Ezt Ampère-nek nem sikerült bebizonyítania, viszont később Faraday hosszabb kísérletezéssel megállapította, hogy ez a jelenség valóban létezik, de nem az áramjárta vezető elektromos töltése hat közvetlenül a másik vezetőre, hanem annak a mágneses terében történt változás¹⁹.

Ezek alapján egyértelműnek látszott, hogy az elektromosság és a mágnesesség között rendkívül szoros kapcsolat van az addigi feltételezéssel ellentétben. Ez viszont felvet egy igen súlyos kérdést. Képzelnünk el két nagyon kis tudóst,

szól, hogy ha az egyik test erőt fejt ki a másikra, akkor a másik is erőt fejt ki az előzőre, tehát az erők mindig párosával lépnek fel. Ezek az erők egyenlő nagyságúak és ellentétes irányúak. Az erő és az ellenerő mindig más-más testre hat.

¹⁸Részlet a *Principia* axiómáihoz csatolt *Scholium*-ból.

¹⁹Ez a Faraday-indukció törvénye, amely végső formában 1831-ben látott napvilágot.

akik beleférnek egy-egy huzalba, amelybe áramot vezettünk. Kérjük meg az egyiküket, hogy meglövigolva egy áramot alkotó elektront, haladjon az árammal, a másikat pedig, hogy csak álljon, majd adjuk mindkettőjüknek feladatul, hogy írják le, mit tapasztalnak mágnesesség szempontjából. d’Oresme és Galilei relativitási elvével összhangban nyilván csak az a tudós fog áramot és általa indukált mágnesességet tapasztalni, aki áll az elektronokhoz képest, míg a másik biztosan nem (hiszen hozzá képest állnak az elektronok az együtthaladás miatt, álló elektron pedig nem kelt mágneses mezőt). Ez viszont nem értelmezhető egyetlen abszolút koordináta-rendszerben, amelyben a newtoni világkép szerint a világ ’zajlik’²⁰. De nem ez volt az egyetlen felvetődő probléma. . .

Huygens XVII. századi elméletének folytatásaként, miszerint a fény valamilyen hullám és nem részecske, ahogy azt Newton állította, 1802-ben Thomas Young ismét felvetette, hogy a fény hullám, de ezt bizonyítani nem tudta.²¹

1815-ben csatlakozott a fény mibenlétét kutató kísérletezéshez J. A. Fresnel, aki matematikai leírást is adott a kísérletekhez, ám mégis 1855-ig kellett várni, míg stabil alapokra kerülhetett a fény hullámtermészete.

Ekkor jelenik meg ugyanis az – Ørsted és Faraday kutatásainak az összegzésésként is felfogható – négy darabból álló egyenletsorozat, amely Maxwell nevéhez fűződik.²²

Miért is olyan fontosak nekünk ezek az egyenletek, hogy mindenütt lehet rólok hallani a relativitás elméletével kapcsolatban? Elsőként azért, mert nagyon egyszerűek, tehát könnyű velük dolgozni²³. Másodsorban nagy pontossággal írják le az elektromágnesesség jelenségét egészen atomi méretekig. Harmadsorban pedig az egyenleteknek vannak olyan megoldásai, amelyek megadják a hullámok terjedési sebességét – beleértve a fénvét is. Maxwell ez utóbbit így kommentálta:

„Aligha tudnánk elkerülni a következtetést, hogy a fény ugyanannak a közegnek a keresztirányú [transzverzális] hullámaiból áll, amely az elektromosságot és a mágnesességet közvetíti.”

Ráadásaként a Maxwell-egyenletek által tartalmazott c fénysebességről az egyenletek nem mondják meg, hogy mihez képest mozog a fény az adott sebességgel.

A háttérben rejlő gondok ekkor váltak sürgetővé. Ez volt az a pont, amikor halogatás nélkül dönteni kellett: vagy a Galilei-féle relativitási elvet fogadják el vagy a newtoni világképet.

²⁰Ennek részletesen magyarázata meghaladja ezen írás kereteit. Részletes magyarázat található Jay Orear: *Modern Fizika* 11.1. fejezetben, illetve Blészer–Gnädig–Varga: *Benne van-e az elektrodinamika törvényeiben a relativitáselmélet?* [Fizikai szemle 51,4 (2001) 117-123. old.] című cikkben.

²¹Young kísérlete, amiben egy fénysugarat keskeny résen vetített át, azt mutatta, hogy a fény elhajlik az egyenes iránytól és „megtörik” a várhatóan árnyékos rész felé. Erre a – Newton szerint – részecskékből álló fény nem ad magyarázatot, ellenben a hullám természetű fény igen.

²²A Maxwell-egyenletek ma ismert formájukban 1873-ban láttak napvilágot, de Maxwell 1855 körül már publikált az elektromágnesességről, amely továbbléndítette a kutatásokat.

²³Ez persze nem azt jelenti, hogy ezek az egyenletek feltétlenül szükségesek a későbbiekben ismertett ellentmondás levezetéséhez. Már a század elején született kísérleti eredmények elegendőek lennének hozzá, ám mi ebben a műben a rekonstruálhatóan megtörtént utat kívánjuk bemutatni.

Galilei relativitási elve szerint ugyanis a sebességek összeadódnak a következők alapján. Einstein kedvenc vonatós példájával élve, ha valaki vonaton utazik mondjuk 2km/h sebességgel, és elgurít egy labdát a vonat padlóján 1km/h sebességgel, akkor egy ember, aki a töltésről nézi végig a játékot, azt fogja látni, hogy a labda hozzá – vagyis az álló töltéshez – képest $1+2=3$ km/h sebességgel mozog. Tehát a fénysebesség sem lehet azonos mindenki számára, függetlenül attól, hogy milyen sebességgel és milyen irányba mozog.

Newton szerint az egyenletek által megadott fénysebesség könnyedén értelmezhető az előbb már említett abszolút koordináta-rendszerben levő fénysebességként. Így hát a döntés ezúttal a newtoni világnak kedvezett.

De ne feledkezzünk meg a Maxwell-egyenletek másik jelentéséről sem, miszerint a fény hullám.

Ha viszont a fény hullám, akkor a hanghoz hasonlóan közegre van szüksége, hogy terjedhessen. Mivel nem találtak megfelelő, addig ismert közegyet, amelyben terjedhetne a fény, ezért feltételeztek egy anyagi részecskékből álló étert²⁴ a célra, amely – anyagi voltától teljesen függetlenül – valójában a newtoni világnak az abszolút koordináta-rendszer szerepét játszotta.

Az éter tulajdonságait tekintve igen érdekes anyag, ha végiggondoljuk az alábbiakat. Mivel nagyon távoli csillagok fénye is elér hozzánk, ezért szükség-szerű, hogy betöltse a Világegyetemet minden kis zugát. Ha viszont így van, akkor az is feltétlenül szükséges, hogy nagyon ritka legyen, hiszen mivel anyagi részecskékből áll, a benne keringő Földet lelassítaná, ha sűrű.

Az is feltételezhető, hogy ha létezik olyan éter, akkor a Föld felszínén mérni lehetne pont a Föld előbb említett mozgásából adódó éterszeletet. Hasonlatképpen képzeljük el a következő szituációt. Ha motorral gyorsan megyünk, és magunk mögé ültetjük egy barátunkat, aki folyamatosan beszél, nem fogjuk hallani, amit mond, mert a menetszél hátrafelé fogja sodorni a hangját. Ellenben ha mi beszélünk, akkor azt a barátunk fogja hallani, mert ő mögöttünk ül, és a mi hangunkat is hátrafelé sodorja menetszél. Analóg módon a tudósok is azt kezdték el vizsgálni, hogy a távoli csillagok látható iránya változik-e, ahogy az év különböző időpontjaiban a Föld különböző irányban halad az éterhez képest (az éterszél ekkor ugyanis különböző irányokba térítené el a fényt, ahogy a szél a hangot). Nagy örömeinkre azt találták, hogy a csillagok látszólag valóban vándorolnak!

A fény vizsgálatok ugyanazt a gondolatmenetet követték, ezért elvégezték egy kísérletet, amelyben az éterszél hatását kívánták mérni²⁵. Egy forgatható asztalra szereltek egy fényforrást és egy üveget, és úgy lötték ki a fénysugarat, hogy az előbb a levegőben, majd az üvegben haladjon tovább. A fentiekből következően azt várták, hogy amikor a Föld forgásának irányába végezték el a mérést, akkor nagyobb értéket kapjanak, mint a Föld forgásával ellentétesen. Ám nagy meglepetéssel szolgált a kísérlet, mert nem csak ebben a két irányban,

²⁴Ez az éter a nevéől eltekintve semmiben sem egyezik azzal, amit a görögök neveztek éternek. Érdekességként talán említésre méltó, hogy a XIX. században többen is alkalmazták ezt a gondolatmenetet, többek között Cauchy, Stokes, Thomson és Planck, így a század végére a fénynek, a hőnek, az elektromosságnak és a mágnességnek mind saját étere lett.

²⁵Arago kísérlete (1850 körül)

de bármilyen más irányban is azonos eredmény adódott a kísérletekből. Ekkor Fresnel előállt egy magyarázattal, miszerint az átlátszó anyagok magukba fogadnak az éterből valamennyit, amit azután magukkal hurcolnak a természetes mozgásuk során, és ez pont elég ahhoz, hogy a fenti kísérlet ne mutasson ki eltérést az irányok között.

Tudták, hogy a fény sebessége az üvegben más és más a fény színétől függően, a kísérlet eredménye mégsem változott a különböző színek hatására, ezért feltételezték, hogy az üveg által csapdába ejtett éter mennyisége aszerint változik, hogy milyen színű fényel dolgoznak, ezért nem változott a kísérlet kimenetele.

Ennek az elméletnek a megerősítésére Fizeau alkotott egy kísérletet, amelyben vizet használt üveg helyett. Feltételezte, hogy a víz is „befog” valamennyi étert, amely aztán módosítja a fény sebességét. Az eredmény biztató volt, és valóban alátámasztotta Fresnel magyarázatát. Ez viszont nem könnyítette meg a tudósok dolgát, hiszen volt két egymásnak ellentmondó feltételezés: egyrészt a csillagok látszólagos vándorlása sem a Földnek, sem az azt körülvevő levegőnek nem teszi lehetővé, hogy étert fogadjon magába, ugyanakkor Fizeau kísérlete szerint az áttetsző anyagok igenis foglyul ejtenek étert, ráadásul a fény színétől függően különböző mennyiséget.

Végül a Michaelson–Morley kísérlet verte az utolsó szeget az éter koporsójába. A két tudós a Föld keringési sebességét kívánta megmérni az éterhez képest, és ehhez szintén a fényt használták fel. Az a kísérlet lényege, hogy egy fényforrásból kilőtt fénysugár egy féligáteresztő tükörrre vetül, amely két, egymáshoz képest derékszögben továbbhaladó fénysugárra bontja. Ezek aztán egy-egy tükörnek ütköznek, majd visszatérve a féligáteresztő tükörhöz ott ismét egyesülnek, és így érik el az érzékelőt. Michaelson és Morley azt akarta kihasználni, hogy az egymással derékszögben haladó fénysugarak az éterszél miatt biztosan nem tehetik meg az azonos távolságú utakat azonos idő alatt, így a két sebesség különbségéből lehet következtetni a Föld éterhez viszonyított sebességére. Mindenki nagy meglepetésére azonban azt találták, hogy a Föld áll, vagyis nem volt különbség a két fénysugár sebessége között! A kísérletet sokszor, különböző helyeken és irányokban végezték el (többek között állítólag egy magas dombra is felmentek), mégsem mutatkozott soha semmi különbség.

Az itt csak részben említett kísérletsorozat ezen utolsó állomásához érve a Tudomány megállni látszott, hiszen a kísérletekből nyert tapasztalatok hatására a feltett kérdések száma nemhogy csökkent, hanem egyre nőtt, és a kérdések egyre nagyobb része vonatkozott a múltbeli döntések igazságtartalmára.

A felmerült kérdések nagy részét végül Einstein 1905-ben megjelent speciális relativitáselmélete meg tudta válaszolni, sőt Einstein 1915-ben az általános relativitáselmélettel addig nem várt távlatokat nyitott a Tudománynak.

Rövid időrendi összefoglalás a szereplők szerint

- i.e. 350 körül Herakleidész, majd Arisztarkusz felveti a relativitás elvének első, naiv formáját
- i.sz. 140 körül Ptolemaiosz az *Almagest* című művében elveti
- i.sz. 1350 körül Nicola d'Oresme felhasználva az ekkorra már kialakult segédfogalmakat, igényesebben újrafogalmazza/visszaállítja
- i.sz. 1543 Kopernikusz bemutatja a heliocentrikus világméretet a relativitás elve alapján
- i.sz. 1600 körül Galilei általánosan elfogadja a relativitás elvét és kidolgozza a mechanika alapjait
- i.sz. 1687 Newton pontosítja a Galilei által elkezdett mechanikát és kidolgozza az inerciarendszer fogalmát a *Principia*-ban a relativitás érvényben hagyása mellett
- i.sz. 1820–1873 Ørsted, Maxwell elektromágneses kutatásainak eredményeként a relativitási elvet elvetik
- i.sz. 1887 A Michaelson–Morley kísérlet sejteti a relativitási elv visszaállításának közelgő kényszerét
- i.sz. 1905 Einstein publikálja a speciális relativitáselméletet és ezáltal végleg visszaállítja a relativitás elvét
- i.sz. 1915 Einstein kiadja az általános relativitáselméletet, ezáltal általánosítja, erősíti a relativitás elvét

Rövid időrendi összefoglalás a relativitási elv helyzete szerint

i.e. 500 körül	Első, naiv felvetése
i.sz. 140 körül	Elvetik
i.sz. 1350 körül	Újrafogalmazás, visszaállítás
i.sz. 1600 körül	Az elv megerősítése
i.sz. 1870 körül	Ismételt elvetés
i.sz. 1905	Végleges visszaállítás