FIZIKATÖRTÉNET ÉS MECHANIKUS MATERIALIZMUS

BIRÓ GÁBOR

Közismert, hogy a gazdasági-társadalmi-politikai fejlődés a társadalmi mozgalmak gyakorlata és elmélete, a filozófia és a szaktudományok fejlődése összesített eredményeként jött létre a XIX. század derekán a marxizmus. Azóta a marxizmus a legkövetkezetesebb társadalmi mozgalmak politikai-ideológiai alapja; a társadalom különböző anyagi és szellemi folyamatait vizsgáló tudományok biztos iránytűje; a természetet és az embert és az emberi természetet kutató tudományágak legadekvátabb módszertani segítője és világnézeti bázisa. Mindez történeti, nem utolsósorban tudománytörténeti tény, de ne áltassuk magunkat azzal, hogy akárcsak a szocialista világ szellemi életében is általános, tudatos és tudatosan alkalmazott lenne ez a felismerés.[1]

Dolgozatunk célkitűzése, hogy adalékokat szolgáltassunk e felismeréshez, konkrétabban ahhoz, hogy a szaktudományok ismeretelméleti, módszertani alapja korunkban valóban a dialektikus materializmus. Közelebbről: a fizika és a dialektikus materializmus viszonyát kívánjuk vizsgálat tárgyává tenni *történeti* megközelítéssel. E kapcsolat finommechanizmusát elemezve arra a következtetésre jutunk, hogy a fizika történetében tovább játszik pozitív szerepet a mechanikus materializmus, mint a filozófia történetében. Úgy véljük, ha konkrét történeti tényanyagon megmutatjuk, hogy időben mi a felső korlátja a mechanikus materializmus fizikatörténeti pozitív szerepének, meggyőzőbbé tehető, hogy ugyanezen időtől kezdődően tudománytörténeti szükségszerűség a dialektikus materializmus módszereinek az alkalmazása a fizikai kutatásban.

Hallgatólagosan feltételeztük ebben az okfejtésben, hogy a fizika, illetve általában a természettudományok ideológiai alapja valamilyen *materializmus*. Gondolatmenetünk logikai teljessége kedvéért leszögezzük ennek a hallgatólagos feltételezésnek az alapját: a materializmus lényege, hogy a természetet olyannak tekinti, *amilyen*, bármi természeten kívüli feltételezése nélkül; a természettudományok feladata pedig a természet vizsgálata, szintén bármi természeten kívüli feltételezése nélkül. Tehát jogos az a kiinduló álláspontunk, hogy a természettudományoknak a materializmussal közös az alapszemlélete.

Ami a konkrét fizikatörténeti vizsgálati anyagot illeti: mivel a dialektikus materializmus a XIX. század derekán jött létre, a XIX. század második felé-

[1] Ugyanakkor látni kell azt is, hogy a kapitalista világ szellemi életében van egy vitathatatlan érdeklődés a marxizmus—leninizmus iránt. Ennek összetevőit részletesen elemzi Mátrai László „Marx Károly és a XX. századi tudomány" c. cikkében. („Magyar Tudomány", 1968/ 7—8, 405—408.)

nek fizikatörténeti fejlődésében kell megvizsgálni a mechanikus materializmus fizikával kapcsolatos hatókörét. A fizikának a XIX. század második felében a két legjellegzetesebb eredménye: a statisztikus mechanika (vagy általánosabban a molekulárkinetikára épülő „kinetikus fizika") és az elektromágneses térelmélet. Ezek kialakulástörténete lesz tehát bizonyítási eljárásunk tényanyaga.

A KINETIKUS FIZIKA KEZDETE

A hő mint mozgás

Az újkori fizikában azt a felfogást, hogy az anyag részecskékből áll (atomos) és hogy az anyag szerkezetét részecskéi mozgása útján (molekulárkinetikailag) kell és lehet értelmezni, a hőtan XIX. századi fejlődése termelte ki.

A hőjelenségek szélesebb körű kísérleti vizsgálata a XVIII. században indul meg, és ezeknek a kutatásoknak során — részben célszerűségi okokból (mérhetőség!) — feledésbe merül az az ősrégi természetfilozófiai hipotézis, hogy hő és mozgás kapcsolata elválaszthatatlan. A munkahipotézis szerepét a hőanyagelmélet veszi át, amelyben a hőanyag (a „caloric") egyike a XVIII. század inponderábilis folyadékainak.

Ezt az elméletet csak az egész fizikai szemlélet átalakulása, a természetben uralkodó egyetemes összefüggések felismerése útján lehetett túlhaladni. A hő „mechanikai elmélete" vezetett a fizika legátfogóbb elvének, az energiamegmaradás és -átalakulás elvének felfedezéséhez.

Az energiamegmaradás elve még a mechanisztikus szemlélet teljes diadalát tükrözi. A további fejlődés irányította azután a kutatók figyelmét az anyag szerkezetének mint közvetlenül adott fizikai problémának a vizsgálatára.

Tudjuk, hogy az anyag atomos felfogása olyan régi, mint maga a tudományos gondolkodás, és az elmúlt századokban éppen mechanisztikus szemlélete sorolta az atomizmust a természetfilozófia haladó irányzatai közé. Puszta spekulációból azonban elsőnek a kémiában nyert kísérleti igazolást a XIX. század elején, a fizikán belül lényegében még a newtoni fizikában is inkább csupán alkalmasnak látszó kutatási elv, mint igazolható elmélet maradt.

A newtoniánus kutatási elvet úgy lehetne összefoglalni, hogy minden jelenséget erőhatásokra, vonzó és taszító erőkre igyekeztek visszavezetni; erőtörvényeket kutattak a jelenségek egységes magyarázatául. Az erőtörvények kutatása közben azonban mintegy elsikkadt, háttérbe szorult magának az *anyagnak* a kutatása.

A döntő szemléletváltozást az energiamegmaradás és -átalakulás törvény felfedezése hozta. Az energiatörvény felfedezése egyúttal az energiafogalom tisztázódását jelentette, és kitermelte azt a szemléletet, amely szerint a különböző természeti jelenségeket az energiamegmaradás kapcsolja össze. Mivel pedig az energia az *anyag* munkavégző képessége, a természeti jelenségek magyarázatát nem a különböző elemi *erők*ben, hanem az *anyag* belső mozgásában kell keresni. Ennek a szemléletmódnak volt szerves következménye a hő molekuláris mozgásként való felfogásán alapuló anyagszerkezeti kutatás, majd az erre épülő fizikai atomelmélet. Ugyanis, ha a hő mozgás, de — mint a tapasztalat tanítja — nem a test egészének mozgása, akkor kell, hogy kis alkatrészeinek mozgása legyen. Lényegében ez a kinetikus fizika alapgondolata. A történeti részletek nyomonkövetése előtt vizsgáljuk meg röviden azt a fenti

gondolatsort, amelynek végeredménye az volt, hogy a jelenségek magyarázatát az anyag belső mozgásában kell keresni. Ez a zárótétel hiányos következtetésen alapszik. Pontosan olyan típusú következtetés ez is, mint az a hőtan fejlődésében szintén jelentős szerepet játszó következtetés, amely szerint ha a hő nem anyag, akkor mozgás.

Mindkét következtetés tartalmaz egy hallgatólagos feltételezést, amely a XIX. századi természettudományos szemléletmód alapfeltevése. Ez a következő: minden anyagi megnyilvánulás, minden anyagi jelenség a mechanika törvényei által írható le. Ebből következett az a célkitűzés, hogy meg kell keresni az anyag legkisebb, már homogén alapegységeit, és ezek mozgásegyenletei minden jelenségre magyarázatot fognak szolgáltatni. Az anyagszerkezeti kutatás egyet jelentett tehát a mozgásegyenletek megkeresésével.

Röviden összefoglalva: a mechanikai modellizálás lehetősége az a kézenfekvőnek tűnő hallgatólagos feltevés, ami a kor kutatóit átsegíti a fenti következtetések ugrásain.

Átmenet az erőtörvények kutatásától az anyagszerkezeti vizsgálatokhoz

A hő mozgásként való felfogása az ókortól kezdődően együtt járt az anyag atomos szerkezetének hipotézisével. E kérdés története — egészen a XIX. század közepéig — inkább a filozófia, mint a fizika történetéhez tartozik. Kiváló természettudósok, Boyle vagy Newton idevonatkozó nézetei is még inkább természetfilozófiai, mint természettudományos hipotézisek. Talán kevésbé áll már ez D. Bernoulli vagy Lomonoszov hőtani nézeteire, mert ők már elvégezhető kísérletekre utalnak álláspontjuk alátámasztásaként.

Az egész fizika területén harcot vív egymással egészen a XIX. század derekáig két kutatási tendencia: a régi — erőtörvényeket kutató — és az új — a hangsúlyt az anyag atomos szerkezetére tevő — kutatási irányok. Joule-nak az általunk vizsgált problémakör szempontjából fordulatot jelentő gondolata az, hogy kell léteznie az anyag egy olyan állapotának, amelyben nem hatnak molekuláris erők. Ez a gondolat szolgáltat alapot a hő kinetikus tárgyalásához.

Joule Gay-Lussac 1807-es kísérletét eleveníti fel (1845-ben). Azt ti., hogy a levegő légüres térben történő kiterjedése nem okoz hőmérsékletváltozást: e folyamat munkavégzés nélküli.[2] Eljut ahhoz az általánosításhoz, hogy az ideális gáz belső energiája független a térfogattól, ami a molekulák közti erők elhanyagolhatóságát bizonyítja. Ha pedig nem hatnak molekuláris erők, akkor kell, hogy a molekulák egyenesvonalú, egyenletes mozgást végezzenek. Joule ezen 1851-es cikke tekinthető a kinetikus gázelmélet első egzakt megalapozásának.[3]

Joule gondolatát A. K. Krönig viszi tovább — tőle függetlenül. Kiinduló hipotézisei: 1. A gázatomok szilárd, rugalmas golyók, 2. nincs közöttük semmi kölcsönhatás, 3. egyenes vonalú mozgást végeznek ütközésig.[4] Ezen meggondolásokból levezeti a Boyle—Mariotte, Gay-Lussac törvényeket, valamint az Avogadro törvényt.

[2] „Philosophical Magasin", Ser. III. vol. 27, 1845.
[3] „Memoires Manchester's Society", Ser. II. Tom. IX, 1851.
[4] „Poggendorff's Annalen", XCIX. 315. 1856.

Egy ponton azonban nem egyeznek meg Krönig számításai a tapasztalattal: kisebb hőkapacitás- — pontosabban fajhő- — értéket kap, mint ami a kísérletekből adódik. A XIX. századi hőtan kiemelkedő alakja, Clausius oldja meg ezt a problémát.

Clausius ekkor már régóta a hő mozgásként való felfogása alapján áll. Ahogy ő maga írja 1857-ben: „Már az előtt, hogy 1850-ben megjelent első értekezésemet írtam a hőről, ahol is feltettem, hogy a hő mozgás, a mozgásnak erről a fajtájáról határozott elképzelést alkottam magamnak. Eddigi cikkeimben ezt az elképzelést említetlenül hagytam, mert az volt a törekvésem, hogy elválasszam a bizonyos általános elvekből levonható következtetéseket azoktól, amelyekhez a mozgás meghatározott fajtáját kell feltenni."[5] És ugyanebben a cikkében megadja a Krönig elméletében szereplő hiányosság megoldását. „A gázban levő hőmennyiség ábrázolásához a haladó mozgás eleven ereje kevés . . . Ezért szükséges még további egy vagy több mozgást feltételezni." Feltételezése szerint a gázrészecskék nemcsak haladó mozgást végeznek, hanem ütközéskor, ha az éppen nem centrális: forgó mozgás is keletkezik, és a molekulán belül az atomok még további mozgást végezhetnek (rezgőmozgást). Felteszi tehát, hogy az egyszerű gázok molekulái is több atomosak. Ezekből kiindulva a kísérletekkel egyező fajhőértéket kap a gázokra.

Ugyanebben a cikkében Clausius összefoglalóan értelmezi a szilárd és cseppfolyós halmazállapotokat, valamint a halmazállapotváltozásokat is.

Ma már szemléletes és triviálisnak tűnik a halmazállapotok molekuláris értelmezése. De hogy az új és régi milyen nehéz harcában születik meg a kinetikus felfogás, arra legjellemzőbb Krönig álláspontja a szilárd és cseppfolyós halmazállapotokról. Krönig adja — Joule mellett[6] — az első önkényes feltevésektől mentes elméletét a gázkinetikának. A szilárd és cseppfolyós halmazállapotok értelmezésénél mégis feltételez sajátos taszító erőket is. És még 1862 után is vitacikket ír saját 1856-os álláspontja védelmében.[7]

Clausius szerint a szilárd test molekulái egyensúlyi helyzet körül rezgő és forgó mozgást végeznek, hasonlóképp a molekulák részei is. A folyadékmolekulák haladó mozgást is végeznek, de nem szakadnak el egymástól, hanem külső nyomás nélkül is meghatározott térfogatot foglalnak el. A gázmolekulák a kölcsönös vonzás szférájából kikerülve egyenesvonalú pályán repülnek.

A halmazállapot*változások* vizsgálatánál már statisztikus meggondolásokkal él Clausius. A párolgás jelenségénél pl. a zárt térben történő párolgást úgy értelmezi, hogy egyensúly olyan értelemben áll elő, hogy a kilépő és a visszacsapódó molekulák száma egymást kompenzálja. Explicite is kimondja már ekkor, hogy a molekulák mozgása „szabálytalan", a középértéktől tág határok közt eltérhet az egyes molekulák viselkedése.

A halmazállapotváltozások clausiusi vizsgálata azt bizonyítja, hogy a hő kinetikus elmélete kidolgozásának nem egyetlen eszköze az atomizmusra épülő mechanikai modellizálás; a kinetikus felfogás lényegéhez tartozik a gáztörvények statisztikus jellegének felismerése is.

[5] „Pogg. Ann.", C. 353. 1857.

[6] J. J. Waterston 1845-ben beterjeszt egy molekulárkinetikai elméletet a Royal Societybe, de nem ismerik fel jelentőségét. A kéziratot Rayleigh fedezi fel 1892-ben és akkor publikálja. (Lásd Ch. Singer: „A Short History of Scientific Ideas to 1900", Oxford 1959, 423.)

[7] „Pogg. Ann.", CXXIII. 299; lásd erről F. Rosenberger: „Die Geschichte der Physik", Dritter Teil, Braunschweig 1887, 556.

A molekuláris mozgás statisztikus törvényszerűségeinek feltárása tette lehetővé egy sor molekulatulajdonság meghatározását. Ugyanakkor a molekuláris kinetika statisztikus jellegének meg nem értése volt az egyik legfőbb alapja a kinetikus hőelmélet elleni polémiáknak. Maguk a kinetikus gázelmélet megalapozói sem látják kezdettől fogva a statisztikus módszer bevezetésének szükségszerűségét.

Joule már 1851-ben kiszámolja az oxigénmolekula sebességét, de ezt egy állandó meghatározott sebességértéknek tekinti. Az oxigén-, hidrogén- és nitrogénmolekulák sebességét Clausius még 1857-ben is úgy számolja ki, hogy a molekulamozgást állandó állapotnak tartja. Jóllehet Clausius — ugyanezen dolgozatában — a halmazállapotváltozást éppen annak alapján értelmezi, hogy a molekulák mozgása egy középértéktől tág határok közt eltérhet. És bár korábbi cikkeiben is — ahol az entrópiafogalom bevezetéséhez közelít — él statisztikus megfontolásokkal: ez a koncepció azonban nem eléggé tudatos még benne ahhoz, hogy általános érvényűen használja. A kinetikus hőelmélet elleni viták érlelik meg magában Clausiusban is a statisztikus módszer alkalmazásának kifejezett szükségszerűségét.

A még jórészt az erőtörvények kutatása talaján álló Buys Ballot 1858-ban cikket ír, amelyben a gázmolekulák egyenesvonalú mozgásával szemben ellenvetéseket tesz a Joule és Clausius által számolt molekulasebességekre hivatkozva.[8] Hogy lehet — írja —, hogy a cigarettafüst a szobában percekig szinte mozdulatlanul lebeg, vagy hogy a klórgáz a szoba egyik sarkából a másikig percek alatt jut el, holott a szobát egyetlen másodperc alatt kellene befutnia?

Clausius erre a cikkre válaszul dolgozza ki a közepes szabad úthosszra vonatkozó elméletét.[9] Bevezeti a „molekula hatásgömbje" fogalmat, amelyen egy olyan, a molekulasúlypont körüli gömböt ért, amelyen belül ha találkoznak a molekulák, akkor eltérülnek eredeti pályájuktól. (Nem azonosítja ezt a molekulasugárral, sem az eltérülést az ütközéssel.) Közepes szabad úthosszon pedig azt a távolságot érti, amíg egy molekula súlypontja nem kerül egy másik molekula hatásgömbjébe. Majd azt a feladatot oldja meg, hogy mi a valószínűsége annak, hogy egy molekula adott vastagságú térrészen áthaladjon anélkül, hogy egy másik molekula hatásgömbjébe jutna. Azt az eredményt kapja, hogy a közepes szabad úthossz úgy aránylik a hatásgömb sugarához, mint a gáz által betöltött tér egésze a hatásgömbök által betöltött térrészhez. Ennek segítségével sikerült bebizonyítania, hogy a viszonylagosan nagy molekulasebesség ellenére is igen lassú lehet a gázok keveredése.

A gázok diffúziójával kapcsolatos ellenvetés mellett a másik kifogás a hő kinetikus elméletével szemben a gázok rossz hővezetése volt, ami szintén összeférhetetlennek látszott a nagy molekulasebességgel.[10] Clausius az ezen ellenvetésekre adott válaszában már egész határozottan beszél a molekuláris mozgás rendezetlenségéről, és kimutatja, hogy a gázok hővezetése döntően nem a molekulák sebességétől, hanem a közepes szabad úthossztól függ.[11]

[8] „Pogg. Ann.", CIII. 240. 1858.
[9] „Pogg. Ann.", CV. 239. 1858.
[10] R. Hoppe: „Pogg. Ann.", CIV. 279. és Jochmann: „Pogg. Ann.", CVIII. 153.
[11] „Pogg. Ann.", CXV. 1. 1862.

Felismeri Clausius a molekula*sokaság* sajátos statisztikus törvényszerűségeit az *egyes* molekulák viselkedéséhez képest.[12]

Ha anyagszerkezeti ismeretek szempontjából tekintjük át a kinetikus hőelmélet eddig tárgyalt eredményeit, akkor az állapítható meg, hogy számos empirikus törvény levezethetőnek bizonyult a kinetikus hőelmélet alapján, és ez megerősítését jelenti azon anyagszerkezeti előfeltevéseknek, amelyekre az elmélet épült. De többről is van szó. Új pozitív anyagszerkezeti ismereteket hozott az elmélet. Amit már eddig nyomon követtünk: nemcsak kvalitatíve bizonyította — saját előfeltevése megerősítéseként —, hogy az anyag molekuláris szerkezetű, és hogy a molekulák mozgásban vannak, hanem kvantitatíve is kiszámolható volt ez a mozgássebesség. Majd Maxwell 1860-ban sebességeloszlási törvényt is levezet valószínűségszámítási alapon,[13] amit nem sokkal később Bolzmann általánosít.[14]

További — a kinetikus hőelméletből származó — fontos új kvantitatív ismeret a molekulák közepes szabad úthosszának a kiszámítása. Döntő pont ez az elmélet kidolgozásában, mert ha az elmélet lényegéhez tartozik statisztikus jellege, akkor a gázmolekulák rendezetlensége középponti szerepű az elméletben; márpedig ennek meghatározott kvantitatív kifejezője a közepes szabad úthossz.

A közepes szabad úthossz természetesen direkt nem mérhető, és a kifejezésben szereplő mennyiségek sem (a szomszédos molekulák középtávolsága és a molekula hatásgömbsugara. A molekulasebesség, illetve a sebességeloszlási törvény kísérleti ellenőrzése is jóval későbbi: 1920, illetve 1932, Stern).

A közepes szabad úthossz kiszámolását Maxwell végzi el, éspedig a gázok belső súrlódási együtthatójának kinetikus értelmezése segítségével. Levezetése szerint a belső súrlódási együttható a gázsűrűségtől, a közepes szabad úthossztól és a molekulák közepes sebességétől függ. Ezek közül a közepes sebesség már ismert, a gázsűrűség könnyen meghatározható, tehát a belső súrlódási együttható kísérleti megállapításával a közepes szabad úthossz kiszámítható.[15]

A molekulák közepes sebessége és a közepes szabad úthossz meghatározása mellett a kinetikus elméletből levezethető volt egy felső közelítés a gázmolekulák térfogatára. Loschmidt végzi ezt el 1865-ben.[16]

Mindezen adatok birtokában megadható volt az egy köbcentiméterben levő gázmolekulák száma és a szomszédos molekulák távolsága is.[17]

Ha a kinetikus gázelmélet most ismertetett eredményeihez hozzávesszük, hogy erre az időszakra esik a kritikus hőmérséklet és nyomás felfedezése (Th. Andrews 1861—71), ami a folytonos átmenetet bizonyítja a folyadék és a légnemű anyag közt; továbbá felidézzük a „permanens gázok" cseppfolyósítására vonatkozó ekkori eredményeket (Cailletet, Pictet 1870—77, S. Wroblewsky, K. Olsewsky 1882), akkor joggal mondhatjuk, hogy a kinetikus hőelmélet igen messzemutató és általános anyagszerkezeti ismeretekre vezetett. Az ato-

[12] Különösen világosan kifejezésre jut ez hőtani cikkeinek gyűjteményes kiadásához írt 1866-os jegyzeteiben. „Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie", Braunschweig 1864—67. Lásd pl. 2. Abth. 233, 277.

[13] „Phil. Mag.", 4, XIX. 19. 1859.

[14] „Wiener Sitzungsberichte", LVIII. 2. Abth. 517. 1868.

[15] „Phil. Mag.", 4. XX. 21. 1860.

[16] „Wiener Sitzungsber.", LII. 2. Abth. 395. 1866.

[17] Lásd pl. O. E. Meyer: „Theorie der Gase", Breslau 1877.

mizmust — legalábbis közvetve — kísérletileg ellenőrizhető, tehát *fizikai* elméletté szilárdította; és pozitív, kvantitatív ismereteket hozott az anyag molekuláris-atomos szerkezetére vonatkozóan.

A kutatás módszertana

Az említett anyagszerkezeti ismeretekre vezető fő kutatási elvek — mint láttuk — a mechanikai modellizálás és a statisztikus módszer alkalmazása.

A kutatási módszerek lényegét, fő vonalát mindig a kutatott tárgykör szabja meg. A kutatónak ugyanúgy fel kell fedeznie a használandó vizsgálati módszert, mint ahogy — siker esetén — felfedez eddig nem ismert természettörvényeket. A használt módszer akkor lesz csak sikeres, ha helyesen illeszkedik a vizsgált tárgy sajátságaihoz. A helyes módszer tehát — bizonyos értelemben — tükrözése már a kutatott területnek. (Ennek szemléletes illusztrációja pl. a matrixelmélet felhasználása a kvantáltság leírására.)

Világosan megmutatkozik ez a hőtan általunk vizsgált fejlődési periódusában is. Clausius, Maxwell, Boltzmann, Gibbs statisztikus módszert alkalmaztak. Helyesebben: felismerték a statisztikus módszer alkalmazásának szükségszerűségét, ami egyet jelent azzal, hogy felfedezték a vizsgált tárgykör — a molekuláris mozgás — statisztikus jellegét.

A statisztikus módszer alkalmazása azt a felismerést jelentette — Planck szavaival —, hogy „az anyag egyes alkatrészeire a dinamika törvényei érvényesek, de az összesség valószínűségi törvényeknek engedelmeskedik".[18] Végső soron a molekuláris rendezetlenség objektív ténye az, ami a statisztikus módszert kitermelte, ami rákényszerítette a fizikára a statisztikus módszert.

Az elmondottak — mutatis mutandis — érvényesek a kinetikus hőelmélet kidolgozásánál alkalmazott másik fő kutatási elvre: a mechanikai modellizálásra is.

Ahogy a statisztikus módszer a molekuláris mozgás bizonyos objektív sajátságait tükrözi vissza, ugyanúgy a mechanikai modellizálás is a valóság bizonyos törvényszerűségeinek a felismeréséhez segített.

Általában egy módszer csak akkor vezethet természettörvények feltárásához, ha a vizsgált tárgy sajátságaihoz illeszkedik. A mechanikai modellizálás is csak azért segíthette ismereteink előrehaladását, mert a benne szereplő modelleknek van valóságtartalmuk.

Mint láttuk, a XIX. századbeli anyagszerkezeti kutatásokhoz az erőfogalomnak a fizikában betöltött szerepét bizonyos revízió alá kellett venni. Az előbbiekkel összefüggésben érdemes egybevetni az akkori idők kiváló fizikatörténészének, F. Rosenbergernek és Engelsnek fejtegetéseit az erőfogalomról.

Engels „A természet dialektikája" egyik jegyzetében azt fejti ki, hogy az erőfogalom „egy olyan oksági összefüggés rövid kifejezése, amelynek még nem hatoltunk a mélyére". „Nem azért, mert a törvényt teljesen felismertük, hanem éppen mert ez *nem* az eset . . . menekszünk itt olykor az erő szóhoz." Bírálja továbbá Engels az erőfogalom használatát abból a szempontból is, hogy ezzel egyoldalúsítjuk a jelenségek leírását, nem fejezzük ki a kölcsönhatást. Ugyanakkor leszögezi, hogy ha a mozgás okát adottnak tekintjük és nem foglalkozunk eredetével, akkor az erőfogalom jól használható.[19]

[18] „Die Kultur der Gegenwart", III. 3. 732. 1915.
[19] Engels: A természet dialektikája; „Marx és Engels Művei", 20, Bp. 1963, 374.

Rosenberger fizikatörténetében a következőket írja: „A különböző anyagokhoz kötött különböző elemi erők feltételezése és a mindenoldalú átalakulásra képes energiafajták feltételezése éppoly ellenségesen állnak egymással szemben, mint amennyire az utóbbi teljesen összhangban van az egyetlen, csak különböző belső mozgásokra képes anyag feltevésével." Nem az következik ebből — folytatja Rosenberger —, hogy el kell vetni az erőfogalmat, csak „az ellen vagyunk, hogy az erőket a jelenségek végső okaiként jelöljük meg; ki kell tartanunk azon remény mellett, hogy minden eddig még tovább nem redukált erőhatást végül az anyag belső mozgására tudunk visszavezetni".[20]

Rögtön szembetűnik, hogy e két álláspont lényegét tekintve azonos. Ebből nem az következik, hogy Rosenberger dialektikus materialista lett volna. Rosenberger teljes egészében kora mechanisztikus fizikai szemléletének a hatása alatt állt. Engels és az ő véleményének lényegi egybeesése azt bizonyítja, hogy a mechanicizmus mást jelentett a XIX. században a fizikában és mást a filozófiában.

A statisztikus módszer alkalmazása a minőségileg új elem a fizikai kutatás történetében a XIX. század második felében. Láttuk, hogy a statisztikus módszer a molekulárkinetikai felfogás lényegéből ered, pontosabban a molekulárkinetika lényege annak statisztikus jellege. Nehezen is értették meg annak idején ezt a mechanikán és mechanikus materializmuson túlmutató lényeget. Statisztikus törvények léte ugyanis nem fér bele a mechanikai és mechanisztikus materialista szemléletbe, mert ellentmond a mechanikus determinista felfogásnak.

Mi sem bizonyítja jobban a kezdeti értetlenséget a molekulárkinetika statisztikus jellegét illetően — a kinetikus gázelmélettel szemben felhozott egykorú ellenvetéseken túl —, mint azok a törekvések, amelyek a XIX. század második felében a hőtant a mechanikára igyekeztek visszavezetni. Konkrétan a kutatások arra irányultak, hogy a hőtan első fő tételére (az energiamegmaradás törvényére) vezessék vissza a második fő tételt (az entrópia törvényt). Ezek a próbálkozások azért létezhettek, mert nem értették meg az entrópiatörvény statisztikus jellegét.[21]

Érdemes itt megjegyezni, hogy Clausius, akitől származik az entrópia fogalom, az entrópiát statisztikus modellezés alapján vezeti be (a részecskék elrendeződési változása útján[22]); de magát az entrópiatörvényt nem tudja statisztikusan értelmezni. Az entrópiának a termodinamikai valószínűség statisztikus mennyiséggel való függvénykapcsolatát csak Boltzmann ismeri fel,[23] a törvény konkrét alakjának ($S = k \log w$) felírása pedig Plancktól származik.

A statisztikus módszer tehát a mechanikai modellizálás burkában születik meg, hamar szétfeszíti azonban ezt a burkot. Clausius maga is bábáskodik e módszer születésekor, azt nem elég következetesen értve meg: a második fő tételből a hőhalálelmélet kidolgozására jut el. Boltzmann, aki világosan látja a második fő tétel statisztikus tartalmát, határozottan vitatkozik Clausiusszal. Planck pedig, aki kvantitatív alakban felírja a második fő tétel statisztikus jelentését, még tovább jut. Éppen az entrópia törvény statisztikus értelmé-

[20] F. Rosenberger: „Die Geschichte der Physik", id. kiad., 530—532.

[21] Ennek részleteiről lásd Bíró Gábor: Az entrópia-fogalom kialakulásának történetéről; „Fizikai Szemle", 1963/3, 84—89.

[22] R. Clausius: „Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie", Braunschweig 1864—67, I. 127—154.

[23] E. Broda: „Boltzmann", Berlin 1957, 95.

nek mély megértése vezeti olyan gondolatsorra, amelynek eredménye nem kevesebb, mint a modern fizika korszakát megindító kvantum hipotézise. Planck a feketetest-sugárzás energiaeloszlási viszonyait vizsgálva (1900-ban) oszcillátor rendszerre alkalmazza az $S = k \log w$ formulát.[24] Keresi annak valószínűségét, hogy N oszcillátorból álló rendszer energiája adott U_N legyen. Ennek megoldásához kell feltennie, hogy U_N valamilyen energiaértékek diszkrét összege. Egyébként a Planck-féle „természetes sugárzás" feltevés — hogy ti. a harmonikus parciális rezgések teljesen inkoherensek — pontos analogonja a molekuláris rendezetlenség hipotézisének. Szerepük is azonos: az irreverzibilitás követelményét kielégítő modellizálás.

Összefoglalva: 1. a XIX. század második felében kiteljesedő „kinetikus fizika" jelentős eredménye a statisztikus törvények felfedezése.

2. A statisztikus természettörvények *felfedezésének útja* a mechanikai modellizáláson keresztül vezet, a mechanikus materializmus talajára épül.

3. A *felfedezés eredménye* ellentmond a felfedezés útjának: a statisztikus törvények léte nem illeszthető össze a merev determinizmust szükségképpen tartalmazó mechanikus materialista szemléletmóddal.

4. A fizika továbbhaladásának iránya: a hangsúlyt le kell venni a mindeddig jó eszköznek bizonyult mechanikai modellizálásról, és az általa elért eredményekre mint módszerre kell építeni a további kutatást. Konkréten: a statisztikus természettörvények felismerése és ezek kutatási módszerként való alkalmazása vezet a klasszikus fizika hatókörét elsőként áttörő kvantumhipotézisre.

Tehát: a modern fizika születését reprezentáló kvantumhipotézis statisztikus módszer alkalmazása révén jött létre; e módszer alapját a statisztikus természettörvények felismerése képezte; e felismerés útja a mechanikus modellizálás volt. Ugyanakkor maguk a statisztikus törvények létükkel azt bizonyították — az őket megértőknek —, hogy az ősi talajon nem építhető tovább a fizika épülete. Eddig (1900) bizonyult a fizika számára éltető táptalajnak a mechanikus materializmus, de mindeddig annak bizonyult, tehát kb. fél évszázaddal tovább, mint a filozófia történetében.

A mechanikus materializmusnak a fizikával kapcsolatos hatókörét a következőkben a XIX. század második felének másik jellegzetes fizikai eredménye: az elektromágneses térelmélet létrejöttében kívánjuk megvizsgálni.

AZ ELSŐ FIZIKAI TÉRELMÉLET KIALAKULÁSA

A newtoni mechanika és az elektromágnességtan

Ahogy a kinetikus fizika teljes egészében a newtoni mechanika gondolatrendszerében keletkezett, ugyanez mondható el az elektromosságtan XVIII. századi fejlődésére is.

Az elektromos és mágneses hatás erőtörvényének felfedezéséhez döntő ösztönzést a XVIII. században a Newton-féle általános tömegvonzás törvény adott.

Coulomb analógia alapján teszi fel az $1/r^2$-es erőtörvényt az elektromos töltések kölcsönhatására vonatkozóan és ennek bizonyítására végez kísérleteket. Kísérleti eredményei önmagukban nem is lennének elégségesek a -2-es kitevő

[24] M. Planck: „Physikalische Abhandlungen", Braunschweig 1958, III, 255—267.

állításához. Több mint 5%-os hibával tudja csak igazolni sejtését. Az erőhatásnak a töltésmennyiségekkel való arányossága még inkább csak analógia alapján történő sejtés. Hiszen ennek *mérése* már csak azért sem volt lehetséges Coulomb számára, mert az elektromos töltésnek ekkor még nem volt mértéke.[25]

A mágnességre vonatkozó erőtörvény bizonyítása még problematikusabb. Egyrészt a „mágneses folyadék" pontszerű pólusban való felhalmozódása, másrészt az okoz nehézséget, hogy csak póluspárra végezhetők kísérletek. Ezeken a nehézségeken a XVIII. századi kutatókat — nemcsak Coulombot — a newtoni erőtörvény példaképe segíti át.

A tudomány fejlődésének folyamata kegyetlen törvényszerűséggel érvényesül: az elektromosságtan tudománya a mechanikának köszönheti megindulását, és néhány évtized sem telik el s az elektromosságtan fordul elsőnek szembe a mechanikával.

De a tudomány fejlődése annyiban is szigorú törvényszerűséget mutat, hogy jóllehet a tudományban is az összkép, az egész a részekből épül fel, végül mégis az összkép, az egész lesz az, ami a részleteket is meghatározza. A Coulomb törvények jórészt az általános tömegvonzás analógiája alapján keletkeztek, mégis a XIX. század derekán már nem a newtoni erőtörvény megtermékenyítő hatásának tekintik a Coulomb törvények felfedezését, hanem az kerül előtérbe, hogy a természet egysége bizonyítékát látják a gravitáció, elektromosság és mágnesség azonos alakú erőtörvényében. A XIX. század közepén ugyanis már a természet egységének gondolata uralja a fizikai kutatást. Az energiaelv ennek terméke és ugyanakkor egzakt megalapozása. A XIX. század közepén már nem a newtoni erőtörvény a kutatás példaképe, hanem az energiaelvnek lesz egyre nagyobb heurisztikus jelentősége. Sőt már a XIX. század második évtizedétől felmerülnek a newtoni erőfelfogásnak ellentmondó erőtörvények is.

Mielőtt ezek áttekintését megkezdenők, idézzük fel a tudomány dialektikus fejlődésének még egy idevonatkozó mozzanatát. Még a newtoni általános tömegvonzás törvénnyel kapcsolatban kerül kimunkálásra a potenciál fogalma (Lagrange 1777) és egyáltalán a potenciálelmélet (Laplace 1782). A Coulomb törvények felállítása lehetővé teszi a potenciálelmélet elektromosságtani alkalmazását (Poisson 1811, Green 1828, Gauss 1839). Az általános gravitációs törvényt és a Coulomb törvényeket is úgy fogják fel a XVIII. században, mint amelyek távolhatást írnak le. A potenciálelmélet tehát a távolhatás-felfogás terméke és ez a potenciálelmélet fog jelentős szerepet játszani az elektromosságtannak a távolhatást túlhaladó térelméleti fejlődésében.

Az elektromosságtanban kidolgozott térelmélet másik megközelítése a folytonos testek mechanikája: Euler hidrodinamikája (1795); másrészt a rugalmas feszültség és deformáció általános matematikai megfogalmazása (Cauchy 1822). Utóbbiak tárgyi modellt, a potenciálelmélet matematikai apparátust szolgáltatnak a térelmélet kidolgozásához.

A Coulomb törvények és az $1/r^2$-erőtörvényre épülő potenciálelmélet a newtoni erőfogalommal összeférhetők, sőt annak folyományai.

Az áramok kölcsönhatására vonatkozó Ampère-féle elektrodinamikai törvény (1823) az első, amely már ellentmond a newtoni erőfelfogásnak. Ez ugyanis

[25] Az elektromos töltésnek a Coulomb törvény útján való definiálása csak Gaussnál merül fel.

olyan erőhatás felfedezése, ahol az erőhatás függ a ható testek *mozgásától* is. Az Ampère-féle elektrodinamikai erők legalábbis annyiban mozgásfüggőek, hogy az elektromosság nyugalmi állapota esetén fel sem lépnek. A mozgásállapottól való függés pedig ellentmond az erők newtoni összegezési törvényének.

A mechanika és elektromosságtan ezen ellentmondása ekkor még nem válik konfliktussá. Ampère megoldása — a kérdés ilyen kiélezett felvetésének a megkerülésével — az, hogy az áramerősséget vezeti be alapfogalomnak a töltés (mozgó töltés) helyett. A törvényt jelenségleírásnak, nem pedig újfajta erőtörvény felfedezésének tekintik.

Ebben az összefüggésben oly jellemző a dolgozat címe is, amelyben Ampère összefoglalja eredményeit: „Théorie des phénomenes électrodynamique uniquement deduite de l'experience."[26]

Történetileg nagyobb hatásúnak bizonyult W. Weber elektrodinamikai alaptörvénye, amely a Coulomb és az Ampère törvényt akarja egy általános törvénybe foglalni (1846). Célkitűzése, hogy a newtoni erőfelfogást alkalmazza következetesen az elektromos jelenségekre; levezetett alaptörvénye mégis bizonyos cáfolata annak, amennyiben explicit mozgásállapotfüggő erőhatást tartalmaz.[27]

Weber az áramot dualisztikusan pozitív és negatív elektromosság egyidejű ellentétes áramlásának fogja fel. Az Ampère formulából egy explicit sebességfüggő erőhatást kap, és a töltés mozgásának nemcsak sebességétől, hanem gyorsulásától is függ nála az erőhatás.

Mivel Webernél újra nem az áramerősség, hanem a töltés az alapmennyiség, ezért törvénye érvényes sztatikus esetben is: nyugvó töltésekre visszaadja a Coulomb törvényt.

Az Ampère és Weber törvény szerepét illetően az a különös eset fordult elő, hogy az Ampère törvénynek több az igazságtartalma, mint a Weber-félének, mégis bizonyos szempontból nagyobb a Weber törvény tudománytörténeti jelentősége. Ugyanis azt a forradalmi lépést hajtotta végre, hogy áttörte a newtoni erőfogalom általános érvényességét: az erőhatás függése a mozgásállapottól direkt ellentmond a newtoni felfogásnak.

Az erőhatás mozgásfüggése más oldalról való megközelítése a XIX. sz. második felére uralkodóvá váló kinetikus felfogásnak. A köztük levő kapcsolat felfedezése mégis nehezen történik meg. A kinetikus gázelmélet egyik megalapozója, Krönig pl. még 1864-ben is határozottan leszögezi, hogy az erőhatások csak a távolságtól függenek és nem függenek a mozgástól.[28]

A Weber törvény egyúttal érdekes történelmi példája az olyan erőfelfogásnak, amelyben az erő távolható, mégis időtől függő. Az erőhatás időtől függése tehát nem elégséges kritériuma a közelhatásnak.[29]

[26] Ampère, Memoires de l'Academie. IV. 1823.

[27] Elektrodynamische Maasbestimmungen. Abhandlungen bei Begründung der K. Sächs. Gesellschaft der Wissenschaft, 1846. 305.

[28] Krönig: „Pogg. Ann.", CXXIII. 1864. 305.

[29] És fordítva is áll: pillanatszerű hatásátvitel is tekinthető közelhatásnak. Pl. Euler éter modellje az összenyomhatatlan folyadék. Ebben a nyomásátadás pillanatszerű, mégis folytonos hatásterjedésnek tekintendő. (M. B. Hesse: „Forces and Fields", London 1961, 198.)

A Weber-féle törvény útja elvi-történeti jelentősége ellenére végső soron zsákutcának bizonyult, jóllehet a hatások sebességfüggésének gondolata — más oldalról — a relativitáselméletben beigazolódik. Ehhez azonban még a fizika haladásának létre kellett hoznia a másik, a newtoni erőfelfogásnak ellentmondó elektromosságtani irányzatot a XIX. század második felében: a Faraday—Maxwell-féle elméletet.

Faraday

Faraday kutatói alapállását kezdettől a természet egységének gondolata hatja át.[30] Már az energiaelv kidolgozása előtt éppen ezen az alapon bízik az „erőmegmaradásban". Az elektromosságtan kontakt elméletének híveivel úgy vitatkozik, hogy ha igazuk lenne, akkor az ellenállást legyőző áram, illetve a kémiai bontás semmiből létrejövő erőhatás volna, és akkor ez az erő minden egyéb természeti erőtől különböznék.[31]

Ugyanez az alapállás vezeti azon kísérletsorozathoz, amellyel kimutatja, hogy a dörzselektromosság és a galvánáram minden hatásukban azonosak. De ez a gondolat vonul végig egész életművén: gondolunk az elektromosság és kemizmus, valamint az elektromosság és mágnesség kölcsönkapcsolatára vonatkozó nagy jelentőségű munkásságára.

Mikor elektromos árammal történő kémiai bontási kísérletsorozatát (1833—34) értelmezi,[32] már akkor polemizál a távolhatás híveivel. Vitatkozik azzal a felfogással, amely szerint az áramnak pólusai lennének és a folyadékon keresztül valamilyen vonzóhatás érvényesülne. Kimutatja, hogy a leideni palack kisülése ugyanúgy felbontja a folyadékot, mint a galvánáram és hogy a folyadékban részecskék mozognak. Az áramot „erőtengely"-ként fogja fel, amely mentén a részecskékre ellentétes irányban erők hatnak, és ezáltal történik a kémiai rokonságot legyőző felbontás. Ezután tűzi ki azt a célt, hogy meg kell keresni a kémiai erő és az elektromosság közti összefüggést.[33]

A „sztatikus indukció" — így nevezte az influenciát — kísérletsorozatával először azt akarta bizonyítani, hogy a hatás itt nem egyenesvonalúan terjed; ami pedig azt jelenti, hogy nem lehet távolhatás, utóbbi alapfeltevése ugyanis az egyenesirányú terjedés. Így közelít a *közeg* vizsgálatához, amelyben az erőhatás történik.

Ehhez a kísérletsorozathoz tartozik a kondenzátor-kapacitás közegfüggésének vizsgálata. A specifikus indukcióképesség (azaz a dielektromos sajátosság)[34] vizsgálata során arra következtet, hogy szigetelő és vezető csak fokozatban különböznek egymástól, és minden vezetést kisülésnek tekint, aholis csak a kisülés sebességében vannak különbségek; abban, hogyan veszik fel az egyes anyagok a polarizációs állapotot.

[30] „A jövőben képesek leszünk mind a korpuszkuláris erőket, mind a nehézkedést, kohéziót, elektromosságot és kémiai rokonságot egymással összehasonlítani, viszonylagos ekvivalenciájukat . . . levezetni, ha ma még nem is tudjuk." „Experimental Researches in Electricity", London 1839, Vol. I. Ser. XIV. § 21. 1710.

[31] „Exp. Res.", Vol. II, London 1844. Ser. XIV., XVII. különösen § 8. 2053.

[32] „Exp. Res.", Vol. I. ser. V.; § 3. 481—492.

[33] Így jut el az elektrolízis róla elnevezett törvényeihez.

[34] A dielektrikum elnevezés is Faraday-tól származik, ahogyan az elektrolízis terminusai is.

Faraday látja, hogy a közelhatás állítása feltételezi a hatás időtől való függését.[35] Az *elektrosztatikus* indukció jelenségénél nem sikerülhetett kimutatnia az időbeliséget. Az *elektromágneses* indukció felfedezése tette nyilvánvalóvá a jelenség időtől függését. És az elektromágneses indukció kísérletileg tapasztalt törvényszerűségei érlelik meg Faraday erővonal felfogását. Bár láttuk, hogy az elektrolízissel kapcsolatban is felmerül már nála az áramnak erőtengelyként való értelmezése.

A Faraday-féle erővonal—erőtér koncepció legjobban az atomizmushoz való viszonyán keresztül érthető meg. Az atomizmus mindig együtt jár az űr elismerésével, éppen ezért Faraday nem lehet a szokásos atomizmus híve. Saját érvelése szerint, ha elfogadjuk, hogy a közegben terjed a hatás, akkor: „. . . vagy azt kell feltételezni, hogy a tér nem vezet a nem-vezetőben és vezet a vezetőben — ez ennek az elméletnek (ti. az atomizmusnak) a teljes összeomlását jelenti; vagy a tér szigetelő és a vezető testekben nem létezik; illetve vezető és a szigetelőkben nem fordul elő . . . .”[36] Vagyis Faraday szerint a szokásos atomizmus mindenképpen ellentmondásra vezet; az atomelmélet mellett felhozott tények csak erőcentrumok létét bizonyítják. Jóllehet Boscovichra hivatkozik („. . . nekem úgy tűnik, hogy a Boscovich-féle atomhipotézis a legmegbízhatóbb az összes hipotézisek közül . . . és a tudományban alig lehetünk meg ilyen nélkül . . .”), mégis nála az erőcentrum egész mást jelent, mint Boscovichnál. Ezt egyébként Faraday maga is látja: „A Boscovich-féle atom, ha jól értem, *csak* erőközpont és nem anyagi részecske . . .” „. . . Ha az általános nézet szerinti atomot, az anyagi részecskét hatása nélkül *a*-nak nevezzük, és a benne, ill. körülötte levő hatásokat *m*-nek, akkor a Boscovich-elmélet szerint *a* egy puszta anyagi pont és *m* a körülötte levő erőatmoszféra.”

Faraday a Boscovich-féle erőatmoszférára helyezi a hangsúlyt, ezt tekinti anyagnak és nem a centrumpontot. Boscovichnál a centrumpont a lényeges, de úgy, hogy az anyag elsikkad. „Nálam *a* — írja Faraday —, azaz a mag eltűnik és a lényeg az erő, azaz *m;* de valójában milyen fogalmat is alkothatunk magunknak a magról, elvonatkoztatva erőhatásától? Minden megfigyelésünk és ismeretünk az atomról, minden elképzelésünk is erőhatásaira vonatkozik . . .” Nehéz elképzelnünk erőt valami anyag nélkül, de „még nehezebb, sőt lehetetlen elgondolni anyagot erőtől függetlenül. Erőket ismerünk, tapasztalunk a Mindenség minden jelenségében, de absztrakt anyagot soha; miért tételezzük akkor fel olyannak a létezését, amit nem tapasztalunk . . . és aminek a feltételezését nem követeli semmiféle tudományos szükségszerűség?”[37]

Faraday tehát a tér betöltöttségének az álláspontján van — de nem kartéziánus módon. Az erőtér maga az anyagi szubsztancia, „ebben az értelemben az anyag nemcsak kölcsönösen áthatolható, hanem minden atom kiterjed, mondhatni, az egész naprendszerre, megtartva saját erőcentrumát”.[38]

Faraday tagadja az erők távolba hatását. Az erők erőtengely, erővonal mentén hatnak. Egy világító test erővonalai a fénysugarak, egy meleg testé a

[35] Korábban Weberrel kapcsolatban mondottuk, hogy az időtől való függés nem *elégséges* feltétele a közelhatásnak; Faraday jól látta, hogy a közelhatás *szükséges* feltétele az időtől függés.

[36] „Exp. Res.”, Vol. III. London 1855. Ser. XXIX. § 35. Lásd még a 39. lábjegyzetet.

[37] Uo. 448—450.

[38] Uo. 451.

hősugarak; a mágneses erővonalakat a mágnes környezetében mozgatott kis mágnestűvel érzékelteti.[39]

Az erőterjedés három típusát különbözteti meg: gravitáció, ahol nincs feltéve „fizikai vonalak" általi terjedése az erőnek; sugárzás, ahol a forrástól önállósodott léte van a terjedő vonalnak vagy sugárnak; elektromosság, ahol ugyanolyan léte van a terjedési folyamatnak, mint a sugárzásnál, de az erővonal függ a végpontoktól.

Akkor deklarálja a mágneses és elektromos erővonalak fizikai realitását, amikor megismeri W. Thomson munkásságát, aki 1854-ben kimutatta az áram, hőáramlás, elektromos és mágneses erővonal közti matematikai analógiát. Thomson maga matematikai analógiái kidolgozásakor hangsúlyozza, hogy semmi fizikai hipotézisre nem következtet folyadék- és hőáram, elektromágnesség és rugalmasság matematikai analógiájából.[40] Faraday mégis Thomsonra hivatkozik, amikor az erővonalakat fizikai realitásoknak tekinti. Faraday egyértelműen tárgyi modellekben gondolkodott. Ebben az összefüggésben mély tartalma van Maxwell szellemes mondásának: „a tudomány szerencséje, hogy Faraday nem volt igazi matematikus."[41] Faraday úgy tekinti az erővonalakat a testhez tartozónak, sőt vele egynek, hogy — Maxwell szavaival — „amikor egy test egy másik távollevőre hat, akkor nem lehet azt mondani, hogy egy test ott hat, ahol nincs jelen . . . olyan hatás ez, mint a kötéllel való húzás vagy a rúddal nyomás".[42]

A Faraday-féle erővonalkoncepció lényeges mozzanat az erőtérfogalom kialakulástörténetében. Maxwell joggal nevezhette Faraday-t az elektromosság Newtonjának. Jóllehet Faraday Boscovichra hivatkozik, felfogása — mint láttuk — alapvetően eltér a Newton—Boscovich-féle erőfelfogástól és a newtoniánusok távolhatás-koncepciójától is. Faraday a közelhatás híve, de az ő erőtengely menti közelhatása az anyagi szubsztanciaként felfogott erőatmoszférában lényegesen megkülönbözteti mind a kinetikus hőelméletben kidolgozott, mind a különböző étermodellekkel adott korábbi közelhatás-felfogásoktól.

Faraday-től közvetlen út vezet Maxwellhez, aki a mai értelemben vett erőtérfogalom és erőtérelmélet megalkotója. Faraday remek kísérletező, aki csodálatraméltó éleslátással és céltudatossággal tervezi meg kísérletsorozatait. Eredményei kvantitatív eredmények, amelyek nélkül aligha jöhetett volna létre a Maxwell-elmélet. Az erőtérről azonban teljesen kvalitatív képet tud csak adni.

Maxwell

Maxwell nagy összefoglaló műve (a „Treatise on Electricity and Magnetism") előszavában a következőképpen jellemzi saját pályakezdésének időszakát: a XIX. század derekán a matematikusok és Faraday kölcsönösen nem voltak megelégedve egymás — elektromosságtanra vonatkozó — nyelvezetével. „Mielőtt megkezdtem volna az elektromosság tanulmányozását, elhatároztam, hogy nem olvasok e tárgyra vonatkozó matematikát addig, amíg végig nem

[39] Uo. Ser XXVIII. A cikk címét is érdemes idézni: „On lines if magnetic force, their definite character and their distribation within a megnet and through space." — Poggendorff „helyhiány miatt" erről, valamint a XXIX. cikkről csak kivonatot közöl.

[40] W. Thomson: „Papers in Electrostatics and Magnetism," London 1872, 340.

[41] J. C. Maxwell: „Electrizität und Magnetismus", Braunschweig 1915, II, 216.

[42] Uo. 79, 320.

olvasom Faraday ‚Experimental Researches in Electricity' művét."[43] És, mint írja, a későbbiekben meggyőződött róla, hogy a matematikusok és Faraday kölcsönös elégedetlensége nem jelentette, hogy valamelyikük leírásmódja is rossz lett volna. Sőt arról is meggyőződött, hogy Faraday leírásmódja is matematikai, de nem a szokásos matematikai szimbólumok formájában.[44]

Korábban — írja Maxwell — szokás volt azok közt, akik a fizikai jelenségek okát keresték, minden hatást speciális éter-fluidumnak tulajdonítani... Ezek a különböző fajta éterek három-négyszeresen betöltötték a teret és tulajdonságaik olyannyira üres rejtett tulajdonságok voltak, hogy az értelmesebb kutatók inkább elfogadták a Newton-féle távolható vonzástörvényt, vagy egyenesen Cotes dogmáját, hogy a távolhatás elsődleges tulajdonsága az anyagnak és e tényen kívül erre semmi további magyarázat nem adható..."[45]

Ezen felfogások egyike sem elégítette ki Maxwellt, így jutott arra az elhatározásra, hogy a Faraday-féle koncepció talajára helyezkedjék és a Faraday-féle erővonalfelfogást összhangba hozza „a hivatásos matematikusok módszereivel".

Ahogy Faraday nézetalakulására, úgy Maxwellére is nagy hatással volt W. Thomson. A fiatal Thomson 1842—45 között több cikkben összehasonlítja az elektromos és a hőáramlás jelenségeit. Kimutatja, hogy egy vezető körül az elektrosztatikus erő eloszlása analóg egy szilárd testen belüli hőáramlással.[46]

E cikk jelentősége: a szilárd testben *érintkező* részecskék közvetítik a hőt; és Thomson a *távolhatásra* épülő elektromos jelenségeket ezzel a közelhatás analógiával hozza kapcsolatba. Maxwell később azt mondta e cikkről, hogy ez volt az első, amely az elektromosságot folytonos hatásként magyarázta. Maxwell az analógiás következtetéseket igen nagyra értékelte egész pályafutása alatt. „Gyakran előfordul a fizikában — írta —, hogy egészen különböző természeti jelenségek leírására ugyanezen fajta egyenletek alkalmazhatók... Minden ilyen esetben... ha az esetek egyikében a probléma megoldást nyert, akkor a problémát és a megoldást egy másik csoportra át lehet vinni és az eredmény ott is helyes lehet."[47]

W. Thomson, mint korábban idéztük, matematikai analógiái kidolgozásakor hangsúlyozza, hogy nem következtet tárgyi analógiára hőáram és elektromosság, valamint rugalmasság és elektromágnesség matematikai analógiáiból. Maxwell mégis Thomson analógiái által inspirálva kezdi meg elektromosságtani kutatásait. Első törekvése, hogy a Faraday-féle erővonalkoncepciót Thomson matematikai analógiáival összekapcsolja.

Maxwell abból a már Faraday-nél is szereplő analógiából indul ki, amely az erővonalaknak folyadék áramvonalait felelteti meg. 1855-ös dolgozatában analógiás következtetésekkel él, de még nem állít fel mechanikai modellt. Bár ekkor már programként kijelenti: „A szilárd test és a viszkózus folyadék mozgásának gondos tanulmányozása remélem felfedi az elektrotonikus állapot mechanikai fogalma megformálásának módszerét."[48] De érdekes módon az elkövetkezendő 6 évben nem publikál e tárgyban. 1856-ban a Faraday-féle erővonalakról címen írt ugyan egy dolgozatot, de később erről is azt írja, hogy

[43] J. C. Maxwell: „Treatise on Electricity and Magnetism", Third edition, Oxford 1892, VIII.
[44] Uo. IX.
[45] Uo. 482.
[46] W. Thomson: „Papers in Electrostatics and Magnetism", id. kiad., 15.
[47] Maxwell: „Treatise...", id. kiad., 18—19.
[48] „Scientific Papers", I. 188.

az ebben adott „mechanikai képek csak az elképzelés megkönnyítését szolgálták és nem a jelenségek magyarázatát”.[49]

1855—56-ig Maxwell módszere lényegében leíró: a Faraday-féle kísérleti eredmények matematikai megfogalmazása a fő törekvése. Hidrodinamikai hivatkozásait nem az elektromágneses jelenségek bizonyos közelítésének tekinti maga sem, hanem csak a gondolkodást megtermékenyítő analógiának. Az analógiát külsődleges, matematikai és nem tárgyi hasonlóságként fogja fel. Saját szavaival: „. . . gyakran előfordul, hogy *egészen különböző* természeti jelenségek leírására ugyanazon fajta egyenletek alkalmazhatók . . .”[50]

1861—62-ben publikálja Maxwell az elektromágneses jelenségekre vonatkozó mechanikai modelljét.[51] Thomsonra hivatkozva azokból a kísérleti tényekből indul ki, hogy az „elektrolízisben az áram az elektrolitot egyenes irányban viszi”, a mágneses erő pedig a fény polarizációs síkját rotációs jellegűen fordítja el. Ezekből következteti, hogy a mágnesség rotációs jellegű jelenség, az elektromos áram pedig transzlációs. Ezeket hozza kapcsolatba azzal a Faraday-féle elképzeléssel, amely szerint az erővonalak hosszirányban összehúzódni, oldalirányban kiterjedni törekednek. Utóbbi jelenség centrifugális erőtől származhat: felteszi, hogy az erővonalak együttese által alkotott csövet valamilyen folyadék tölti ki, amely a cső tengelye körül forgásban van. Vagyis a mágneses közeg (folyadék) a mágneses erővonal körül forog; az erővonalak egy-egy csöve különálló örvényként fogható fel.

Nehézsége még e modellnek, hogy a szomszédos örvények ellentétes irányban forognak és ebből bizonyos diszkontinuitás látszata adódik. Ezt úgy küszöböli ki, hogy az örvénycellákat (csöveket) görgők kapcsolják össze, amelyek révén csúszás nélkül gördülnek egymáson. Ha a cellák forgásba jönnek, akkor egy a hidrosztatikus nyomáshoz hasonló nyomást fejtenek ki és egy longitudinális tenziót a forgástengely irányában.

Második 1861-es cikkében az áramra alkalmazza Maxwell ezt a modellt.[52] Harmadik 1861-es cikkében[53] pedig elektrosztatikus jelenségekre. És ez lesz az a pont, ahol lényegesen tovább jut Weber, Neumann, Thomson, Helmholtz vagy bárki elődd és kortárs elméleténél. Mind a matematikai apparátus, mind különböző mechanikai modellek adottak voltak ebben az időben — jórészt külön-külön — másoknál is. De Maxwell az, aki modelljét és az arra épülő matematikai apparátust következetesen végigviszi. Természetesen ahhoz, hogy ez oly lényegesen új eredményekhez vezethessen, az kellett, hogy a Faraday által kezdeményezett úton építse fel modelljét.

Modelljének az elektrosztatikára való alkalmazásával jut Maxwell az eltolási áram fogalmához. Ha az örvénycellák közti részecske valamilyen erő által egyensúlyi helyzetéből kimozdítódik, akkor a cella rugalmas fala ellenében mozdul el. A közegnek az az állapota, amelyben az elektromos részecske eltolást szenved, az elektrosztatikus tér. Maga az eltolás nem jelent áramot, mert bizonyos értéket elérve állandó marad. Hanem az *eltolás változása* áram.

Az a felfogás, hogy az elektrosztatikus állapot valaminek az egyensúlyi

[49] „Ostwald's Klassiker 102”, Lipcse 1898, 5.

[50] J. C. Maxwell: „Treatise . . . ”, id. kiad., 18—19.

[51] E cikkeket később Boltzmann gyűjtötte össze és adta ki könyv alakban. „Ostwald's Klassiker 102.”

[52] Az „Ostwald's Klassiker 102”-ben összefoglalt 1. cikk eredeti megjelenése: „Phil. Mag.”, 21. 161. 1861. A most ismertetendő 2. cikk. pedig: „Phil. Mag.”, 21. 281. 1861.

[53] Eredeti megjelenése: „Phil. Mag.”, 21. 388. 1861.

helyzetéből való elmozdulása, nem teljesen új. Maxwell hivatkozik is Thomsonra, aki az elektromos erőt rugalmas szilárd testben való elmozdulással hasonlította össze. És Faraday-nél is szerepel hasonló gondolat. De a Maxwell-féle eltolás mindezektől lényegesen különbözik.

Faraday úgy fogta fel a dielektrikumot, mintha abban szigetelő közegbe ágyazva kis vezetők lennének,[54] és ha a dielektrikum elektromos térbe kerül, a kis vezetőkben a töltés elmozdul. Faraday azonban csak súlyos dielektrikumra alkalmazta ezt a felfogást, annak magyarázatául: miért különbözik a dielektrikum az üres étertől. Maxwellnél azonban az elektromos erő létre hoz „eltolást", ha nincsenek is jelen súlyos testek.

Ahogy az eltolási áram a modell matematikai diszkussziójából adódott, úgy az elektromágneses zavar terjedésére vonatkozó első maxwelli meggondolások is e modellből származnak.[55]

A modellből közvetlenül származó fizikai kérdésfeltevése: az örvénycella rugalmas sajátságaival milyen összefüggésben van valamely zavar közegbeni terjedése. Szintén a modellből adódik — közvetve — kérdésfeltevésének matematikai oldala: a vezetési és az eltolási áram összeadása megköveteli az elektrosztatikus és az elektromágneses mértékrendszer kapcsolatának megállapítását. A zavar terjedési sebessége és a két rendszer viszonya közt szoros összefüggést talál Maxwell.

Sikerül Maxwellnek tehát a közeg rugalmassági adatát kísérletileg ellenőrzött mennyiséggel, éppen a fénysebességgel, kapcsolatba hozni. Kérdéses még, hogy a közegben a zavar terjedési sebessége egyezik-e ezzel. Matematikailag kimutatja, hogy az örvényközegben a transzverzális hullám terjedési sebessége megegyezik a fénysebességgel. Innen vonja le a konklúziót: „Alig kerülhető el a következtetés, hogy a fény ugyanazon közeg transzverzális hullámzása, amely az elektromos és mágneses jelenségek alapja is."

Mindebből a fény elektromágneses jellegére való következtetés még nem adódik szigorú szükségszerűséggel. Maxwell óvatosan is fogalmaz. De igen kevés is a kísérleti tény, ami emellett szól. A közeg rugalmasságtani adatainak a kapcsolata a dielektromos együtthatóval és a mágneses permeabilitással adódik ugyan a modell matematikai apparátusából, de a törésmutatóval való kapcsolat kísérletileg akkor még nem ellenőrzött.[56]

Maxwell kutatási útjának következő jelentős állomása „The Dynamical Theory of the Electromagnetic Field" címen 1864-ben írt munkája.[57]

Maxwell elektromosságtani kutatásaiban kezdettől fogva Faraday álláspontját fogadja el. Elveti a távolhatást és a közeg szerepének tisztázását tartja fontosnak. Ehhez először Faraday eredményeit öltözteti matematikai formába, majd mechanikai modellt konstruál és annak összes matematikai következményeit levonva jut fontos új eredményekre: eltolási áram felfedezése, elektromágneses hullám terjedési sebességének meghatározása.

1864—65-ben már lebontja az állványzatot, amelynek segítségével elméletének építményét emelte.[58] Saját szavait idézzük említett 1865-ben megjelent

[54] „Exp. Res.", Vol. I, Ser XIV. § 1679. 1838.

[55] Idézett cikkgyűjteményben. Eredeti megjelenése: „Phil. Mag.", 23. 85. 1862.

[56] A dielektromos állandót akkor még csak lassú folyamatokra határozták meg, és mivel a törésmutató függ a fény frekvenciájától, ezért adódik látszólagos ellentmondás akkor az elmélet és kísérlet között.

[57] „Scient. Papers", I. 526. Először megjelent: „Phil. Trans.", CLV. 1865. 459.

[58] R. T. Glazerbook: „J. C. Maxwell", London—Párizs—Melbourne 1896, 178.

munkájából: „Korábban azt kíséreltem meg, hogy speciális mozgásfajta és speciális erőfajta leírását használjam fel az elektromágneses jelenségek leírására. Ebben a cikkben minden ilyen hipotézist mellőzök; ha az indukció, dielektromos polarizáció ismert jelenségeivel kapcsolatban ilyen kifejezéseket használok, mint elektromos momentum v. rugalmasság, akkor pusztán mechanikai jelenségek felé akarom irányítani az olvasó figyelmét, hogy azok segítsék az elektromos jelenségek megértését. Az ilyen kifejezéseket ebben a cikkben illusztratív és nem magyarázó jellegűnek kell tekinteni."

Nem azt jelenti ez, mintha Maxwell megszabadult volna a mechanikai példaképtől. Ugyanezen cikke bevezetőjében írja: „. . . az elektromágneses tér mechanizmusa a dinamika általános törvényei tárgyát kell képezze . . ." A Lagrange-féle általános mozgásegyenletek alkalmazhatóságát akarja kimutatni.

Ami alapvetően új Maxwell módszerében a 60-as évek közepétől, az az, hogy elhagyja egyre inkább a mechanikai modelleket és — korábban a mechanikai modellek segítségével nyert — matematikai összefüggésekre helyezi a hangsúlyt. Ez szoros kölcsönhatásban alakul ki azzal a felfogásával, hogy a tér feszültségi állapota lesz nála az alapkategória, másra vissza nem vezethető alapfogalom. Amikor idézett cikkében hangsúlyozza, hogy az itt használt momentum, rugalmasság stb. kifejezések csak a jobb megértést szolgáló képek, akkor így folytatja: „In speaking of the energy of field, however, I wish to be understood literally." És többször leszögezi, hogy „elméletünk szerint az elektromágneses energia a térben székel".

Korábban (1861—62) még inkább azt hangsúlyozta, hogy a közeg feszültségi állapota okáról *nem tud* semmit.[59] Most már inkább azt mondja, hogy a feszültségi állapot okáról *nem kell* semmit feltenni.[60]

Ez Maxwellnél nem valamilyen fenomenologista-pozitivista lemondás a jelenségszintnél mélyebben fekvő összefüggések feltárását illetően. Erre bizonyság az eddig végigkövetett maxwelli életmű. Sokkal inkább arról van szó Maxwellnél, hogy kezd számára az erőtér önmagában vett realitás lenni, amit nem kell másra, mechanikai modellre visszavezetni ahhoz, hogy fizikai realitását megértsük, elfogadjuk. Emellett bizonyságul csak azt kívánjuk még felhozni, hogy a gravitáció okáról nem szűnt meg Maxwell gondolkodni. Még „Matter and Motion" című művében is arról ír, hogy az általános gravitációs törvénynyel „magának Newtonnak a szelleme sem nyugodott meg; érezte, hogy a nehézkedést még meg kell magyarázni, . . . de se a newtoni, se a későbbi kutatások nem vezettek e téren eredményre".[61]

Az elektromágneses jelenségek esetét azért tekinti a gravitációtól különbözőnek, mert előbbinél a jelenségek magyarázatát megadja az erőtérre való visszavezetés.

A szóban forgó „Az elektromágneses tér dinamikai elmélete" c. művében már nem visz be kívülről, a rugalmasságtanból adatokat az elméletbe. Az eltolási árammal kiegészített egyenleteiből következik, hogy a közegben ter-

[59] Über physikalische Kraftlinien; „Ostwald's Klassiker 102.", 24.

[60] „Treatise . . . ", id. kiad., I. 132. — Az első kiadás 1873-ból, vagyis a tárgyaltnál későbbi időszakból való; számunkra azonban most csak az a fontos, hogy 1865 utáni kijelentését idéztük Maxwellnek.

[61] „Matter and Motion", német ford.: „Substanz und Bewegung", Braunschweig, 1881, 137—138.

jedő transzverzális hullámok sebessége a két mértékrendszer viszonyával egyenlő. „A konklúzió amire a cikkben jutunk — írja — független minden hipotézistől; háromfajta kísérleti tényből van dedukálva . . . " És itt az indukált áram keletkezését, valamint az elektromos és mágneses influencia jelenséget említi.

Ezt a módszert fejleszti tovább nagy 1873-ból való összefoglaló művében: „A Treatise on Electricity and Magnetism"-ben. A „Treatise" előadásmódja már igen hasonló a ma is szokásos elektrodinamika tankönyvéhez; kísérleti tényekből lehető általános egyenletek felírása és a kapott alaptörvényekből való levezetése további jelenségeknek.

Maxwell kutatói módszere

Ha nem akarjuk a valóságosnál modernebbre színezni Maxwell szépítésre egyáltalán nem szoruló kutatói magatartását, akkor el kell ismerni: ha alapkategóriává is vált lényegében Maxwellnél az erőtér, a tér feszültségi állapota, azért szeme előtt lebegett mindig egy „általános dinamika". Ebben az értelemben mondta a „Treatise"-ben, hogy „csak az első lépést tettük meg a közegben történő hatásterjedés elmélete felé . . . ".[62]

Nem lehet teljesen egyetérteni M. B. Hessével, aki a távolhatás történetéről írt monográfiájában azt állítja, hogy Maxwell-lel elveszti a jelentőségét a távolhatás problémája, „legalábbis azok számára, akik inkább tudnak matematikai modellben gondolkodni".[63] Amikor túljut Mawxell 1865 utánra a mechanikai modellizálás korszakán, akkor sem jelentenek számára a matematikai modellek végső szót. A „Treatise"-ben olvasható: „Lagrange célja az volt, hogy a dinamikát az analízisnek rendelje alá . . . A mi célunk a dinamikai gondolat tökéletesítése. Amikor mi matematikai munkák felé fordulunk, akkor lefordítjuk annak eredményeit a matematika nyelvéről a dinamika nyelvére; nem azért, hogy matematikai tételeket ábrázoljunk gondolatilag, hanem azért, hogy a mozgó test bizonyos sajátságait ábrázoljuk."[64]

Az elektromágneses tér maxwelli felfogása tárgyi modell; ezt pusztán matematikainak tekinteni a mechanisztikus szemlélet folyománya, amely szemlélet leszűkíti a tárgyiságot a mechanikai modellekre. Maxwell ennél messzebbre jutott a mechanicizmus túlhaladásában.

Igaza van Poincaré-nak, amikor azt mondja: Maxwell nem adta meg az elektromosság és mágnesség mechanikai magyarázatát, csak meg akarta mutatni egy ilyen magyarázat lehetőségét.[65] Ehhez talán csak azt kellene hozzátenni, hogy Maxwell nem csupán meg akarta mutatni egy mechanikai magyarázat lehetőségét, hanem a mechanikai modellalkotás segítette egy adott periódusban felfedezései létrejöttét. Ahogy Boltzmann írta Maxwell 1861—62-es cikkei gyűjteményes kiadásához 1898-ban: „Ma már senki sem, se Maxwell, se más, nem ezen az úton vezetné le a Maxwell-egyenleteket, de a felfedezés a mechanikai feltevés útját járta."[66]

[62] „Treatise . . . ", id. kiad., I. 133.
[63] M. B. Hesse: „Forces and Fields", New York 1961, 290.
[64] „Treatise . . . ", id. kiad., I. 412—413.
[65] Idézi Glaserbook: id. mű, 217.
[66] J. C. Maxwell: „Über physikalische Kraftlinien", Lipcse 1898, 86.

Összefoglalva Maxwellnek az erőtérfogalom megalkotásáig vívő kutatói útját:

1. Első időszak: Faraday kísérleti eredményeinek matematikai általánosítása. Célkitűzése sem több ennél, módszere lényegében fenomenológiai (1855—56).

2. Az első időszakból származó matematikai összefüggések mechanikai modelljének megkonstruálása és a mechanikai modellből adódó összes matematikai következtetések levonása és azok fizikai értelmezése.[67] Ebben a modellizálási időszakban a matematikai modelljei a legszorosabban épülnek a korábbi, a fenomenológiai periódusból származó matematikai eredményekre, de főleg a jelen időszakban kidolgozott mechanikai tárgyi modellre (1861—62).

3. Az összes eddigi (fenomenológiai módszerrel és modellalkotással nyert) eredmények felhasználásával zárt matematikai alakú elmélet felállítása. Ebben a mechanikai modell helyét a matematikai modell foglalja el, de úgy, hogy közben kialakul egy új tárgyi modell: az elektromágneses erőtér mechanikai modellre vissza nem vezetett maxwelli fogalma. Az elektromágneses erőtérről mint önálló realitásról nem teljesen következetes Maxwell álláspontja: mechanikai tárgyi modellre nem akarja visszavezetni, de nem szűnik meg hangoztatni az általános dinamika felállításának szükségességét.

Maxwell az elektromágneses térelmélet kidolgozásával objektíve túllépett a mechanikai példaképű fizika határain, de ezt nemcsak ő nem látta meg, hanem senki sem a fizikus kortársak közül.

Hangsúlyozzuk, hogy a *fizikus* kortársak nem látták az elektromágnességtan önállósulását a mechanikától. A dialektikus materializmus ekkor már néhány évtizede feltárta a mechanikai, illetve a mechanikai példakép korlátozottságát.

*

Vázlatosan végigkövettük a XIX. század második fele két legjelentősebb fizikai eredményének kialakulástörténetét: a statisztikus mechanika létrejöttének csíráit láttuk a „kinetikus fizika" kezdetében és a Faraday—Maxwell-féle kutatói úton nyomon követtük az első fizikai térelmélet megalkotását. A ma fizikája az anyagi kölcsönhatások tényleges közvetítőjeként az erőteret ismeri el; és a kvantumelmélet kidolgozása óta tudjuk, hogy a természet, az anyag „finomszerkezetének" a lényege: statisztikus jellege. A klasszikus fizika két olyan eredményének keletkezését rekonstruáltuk tehát, amely eredmények középponti szerepűek a modern fizikában, a ma fizikája számára is.

A felelevenített történelemből levonható konklúziók:

1. A fizika a XIX. század második felében is mechanikai példakép alapján fejlődik, mechanikai modellek útján jönnek létre legjelentősebb eredményei. A mechanikai modellekben való gondolkodás a mechanikus materializmus lényegi ismérve. Joggal állítható tehát, hogy a XIX. század második felében a mechanikus materializmus volt a talaja a fizika fejlődésének, vagyis a fizikában a mechanikus materializmus kb. fél évszázaddal tovább játszik pozitív szerepet, mint a filozófia történetében.

[67] Kuznyecov megfogalmazásában Maxwell módszere: a fizikai mennyiségek matematikai jellemzésének és a matematikai szimbólumok fizikai interpretálásának szintézise. (B. G. Kuznyecov: „Razvityie fizicseszkih igyej." Moszkva 1963, 318.) Maxwell kutatási útja második szakaszának valóban helyes jellemzése ez, de talán sikerült megmutatnunk, hogy Maxwell módszere ennél árnyaltabban is rekonstruálható.

2. A XIX. század második felében a mechanikus materializmus alapján olyan eredmények születnek a fizikában, amelyeket mélyen megérteni és alkotóan alkalmazni csak a klasszikus fizikával és a *mechanikus* materializmussal való szakítás útján lehet. A statisztikus természettörvények és az önálló fizikai realitással bíró erőtér mögül el kellett hagyni a felismerésükhöz segítő mechanikai tárgyi modelleket, mint amelyek durván és inkább csak analógiás módon tükrözik a valóságot. A durva mechanikai modellek elhagyása egyúttal a rugalmasabb, hajlékonyabb fogalmakkal való manipulálás útja. (A gázrészecskék nem rugalmas, kiterjedésnélküli golyócskák; az elektromágneses erőtérnek nincs görgőkből stb. álló hordozója és így tovább . . .) Mindez azt jelenti, hogy ha fél évszázad késéssel is, de a fizika is eljutott a dialektikus materialista koncepció nélkülözhetetlenségéhez. Már nem kielégítő a fizika számára sem a mechanikus determinizmus (statisztikus törvények); nem elégséges a mechanikus materializmus anyagfogalma (az erőtér is egyfajta anyag) és így tovább. A fizika számára is szükségszerűvé vált a dialektikus materializmus rugalmas fogalomalkotásának és módszereinek az alkalmazása.

Korunkban ennek az objektív tudománytörténeti ténynek a szubjektív megértése olyan szerepű, mint egy évszázaddal ezelőtt a statisztikus mechanika és az önálló realitású erőtér lényegének a felismerése. A fizika fejlődésének jelenkori valóságos tendenciái enélkül nem érthetők meg.