

MILLIKAN ÉS AZ ELEMI TÖLTÉS MEGHATÁROZÁSÁNAK TÖRTÉNETE – 1. RÉSZ

Buzády Andrea, Szegő Dóra¹
Pécsi Tudományegyetem TTK Fizikai Intézet

A Nemzetközi Súly- és Mértékügyi Hivatal (Comité International des Poids et Mesures, CIPM) a 2018-ban esedékes XXVI. Általános Súly- és Mértékügyi Konferenciára tűzte ki célul a Mértékegységek Nemzetközi Rendszere (Système International d'Unités, SI) revízióját [1], amelyben hét természeti állandó értékét rögzítik. Ennek következtében a hét fizikai alapmennyiség – és így minden származtatott mennyiség – definíciója is változik. A hét rögzíteni tervezett mennyiség között van az elemi töltés, ami majd az áramerősség mértékegysége, az amper definíciójául szolgál.

Az elemi töltés nagyságának megmérése *Robert Andrews Millikan* nevéhez fűződik. Millikan méréseinek eredménye, közlésének idején – az 1910-es években – nagy vihart kavart a tudományos közéletben, több tíz évig is eltartott, mire elfogadottá vált. Több mint 100 év múltán pedig olyan pontossággal tudjuk meghatározni ezt a természeti állandót, hogy értékét mértékegységrendszerünk egyik sarokkövének választjuk.

Millikan kísérletét, az elemi töltés nagyságának meghatározására szolgáló kísérlet elvét az iskolában tanítjuk, egyetemi hallgatói laboratóriumi gyakorlat keretében meg is valósítjuk. A részleteket illetően mégis több kérdés is felvetődhet, amelyeket érdemes felderíteni. Tanulságos megismernedni a kísérlet előzményeivel, buktatóival és fogadtatásával, valamint az eredeti publikációk alapján a kritikákkal is.

Előzmények

Egészen a 19. század végéig az a nézet volt meghatározó, hogy a töltés – folytonos változóként – tetszőlegesen kis értéket felvehet. A mérés technika és tudományos gondolkodás fejlődésével azonban ez az elmélet megdőlni látszott. A századfordulóra egyre több jel mutatott arra, hogy mind az anyag, mind az elektromosság atomos szerkezetű. A többek által vizsgált katódsugárcsöves kísérletek során több félvezető megállapítás után *Joseph John Thomson* szögezte le, hogy a katódsugárzásban negatív töltésű részecskék haladnak. Ezzel felfedezte az elektront, az első kísérletileg azonosítható részecskét. A mérésekből azonban nem magát a részecskékhez tartozó töltés nagyságát, hanem a fajlagos töltés értékét, azaz az e/m hányadost lehetett megadni.

Az elemi töltés nagyságának meghatározásával ebben az időben több tudós is foglalkozott, Millikan az ő eredményeikre, ötleteikre, megállapításaira támaszkodott, azokból építette tovább a maga elképzeléseit.

Jelen tudományos közleményt a szerzők a Pécsi Tudományegyetem alapításának 650. évfordulója emlékének szentelik.

¹ Egyetemi hallgató.

A töltésmennyiség mérésekben használt ködkamrát *Charles Thomson Rees Wilson* skót fizikus 1895-ben fejlesztette ki. Ő eredetileg a felhőképződés és a nedves levegő optikai jelenségeinek kutatására építette. A tartályban lévő telített vízgőz adiabatikus expanziója nyomán lehűlés és kondenzáció következik be. Amennyiben egy töltéssel rendelkező részecske, például egy ion áthalad a kamrán, a víz lecsapódik azon, így láthatóvá válik a részecske útja.

A berendezést J. J. Thomson 1897-ben arra használta, hogy meghatározza a röntgensugarak által keltett ionok hordozta töltésmennyiséget. Az ismert feszültség alá helyezett, röntgensugarakkal megvilágított gázon átfolyó áramerősséget mérte, és kiszámította a gáz egysejnyi térfogatában lévő ionok n számának, az e iontöltésnek, valamint a pozitív és negatív ionok ismert feszültség hatására elért v sebességének nev szorzatát. E cikkben Thomson *Ernest Rutherfordra* hivatkozik, aki korábban már számos gáz ionsebességét publikálta, így n meghatározásával e kikövetkeztethető.

1903-ban a gázok kondenzációját vizsgálva (a fenti vel csak névrokonságban álló) *Harold Albert Wilson* szintén ezzel a módszerrel mért töltésmennyiségeket.

Millikan *On the Charge Carried by the Negative Ion of an Ionized Gas* című első cikke a témában 1908-ban jelent meg [2]. Ebben Wilson módszerével, ám azt néhány ponton módosítva próbálta meghatározni az elemi töltést. A cikk nem kapott nagy tudományos sajtóvisszhangot. 1910-ben a *A New Modification of the Cloud Method of Determining the Elementary Electrical Charge and the Most Probable Value of that Charge* című cikkében [3] Millikan az addigi ködkamrás módszer fejlesztéseként mutatta be az azóta híressé vált porlasztós berendezés elődjét. Az eszköz lényegében ugyanez volt 1913-as *On the Elementary Electrical Charge and the Avogadro Constant* című [4] munkájában is, de akkor már tanítványa, *Harvey Fletcher* javaslatára 1911-től nagy finomságú óraolajat használtak ionizálható közegként az addigi víz vagy alkohol helyett [5].

A mérésben rejlő buktatók, a hibák kiküszöbölésére Millikan nagy gondot fordított, az elemi töltés meghatározásának sikeres kísérletéről csak a két [3, 4] cikk áttekintése után kaphatunk teljes képet. Mielőtt azonban ezek részletesebb ismertetésére rátérnénk, röviden érintjük a mérések közös elvét.

A mérés elve

A korábbi kísérletek során egy vízcseppekből álló felhő kondenzációs magvainak – Millikan mérésében az olajcseppek formájában jelen lévő közeg – mozgását figyelték meg levegőben. Mindegyik esetben valamilyen könnyen ionizálható – az egyértelműség ked-

véért a továbbiakban cseppként vagy részecskéként említett – közeg mozgásának sebességét határozták meg az eredő erő változtatása mellett. Először megmérték, hogy egy adott távolságot mennyi idő alatt tesz meg a csepp, amikor csak a nehézségi, a felhajtó és a Stokes-törvénnyel megadható közegellenállási erő hat rá. Ezután a megfigyelt térrészre elektromos teret kapcsolva a töltéssel bíró cseppet felfelé mozgatták. A felfelé és a lefelé irányuló mozgás idejét mérve, e két adatból vontak le következtetéseket.

Mozgás elektromos tér nélkül

Az ionizált részecske mozgását elektromos tér jelenléte nélkül három erő befolyásolja: a nehézségi, a felhajtó és a közellenállási erő, ezt láthatjuk az 1. ábrán. Az összefüggésekben m a csepp tömege, r a sugara, ρ a sűrűsége, v pedig a sebessége; míg ρ_k a levegő sűrűsége és η a viszkozitása.

Miközben a csepp lefelé gyorsulva esik, a sebességgel lineárisan növekvő közegellenállási erő növekszik. Amikor a közellenállási erő nagysága megegyezik a nehézségi és a felhajtóerő különbségével, a csepp egyenes sebességgel mozog. Figyelembe véve, hogy a csepp tömege felírható

$$m = V\rho = \frac{4}{3}r^3\pi\rho$$

alakban (melyben V a vizsgált csepp térfogata, ρ a cseppet alkotó közeg sűrűsége), az egyensúlyi állapot egyenlete:

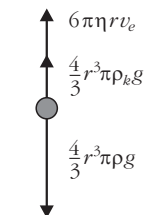
$$\frac{4}{3}r^3\pi\rho g - \frac{4}{3}r^3\pi\rho_k g - 6\pi\eta r v_g = 0,$$

ahol v_g az elért állandó sebesség. A vizsgált csepp sugarára tehát a következő adódik:

$$r = \frac{3\sqrt{2}}{2} \sqrt{\frac{v_g \eta}{g(\rho - \rho_k)}}.$$

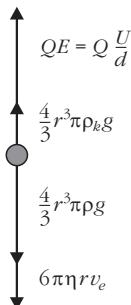
Mozgás elektromos térben

A kísérlet második részében ugyanazon cseppet homogén elektromos térben mozgatták. Az egymástól d távolságra lévő kondenzátorlemezre kapcsolt U feszültség változtatásával a térerősség $E = U/d$ nagysága változtatható. Egy ilyen térben a fenti 3 erőn felül egy $F_{\text{elektr}} = QE$ elektromos erő is hat a Q töltésre, ahogy a 2. ábrán láthatjuk. Az E változtatásával elérhető, hogy a felfelé tartó mozgás egyenletes legyen, a v_e sebességre vonatkozó egyenlet:



1. ábra. A csepp mozgását befolyásoló erők elektromos tér jelenléte nélkül.

2. ábra. A csepp mozgását befolyásoló erők elektromos térben.



$$Q \frac{U}{d} + \frac{4}{3}r^3\pi\rho_k g - \frac{4}{3}r^3\pi\rho g - 6\pi\eta r v_e = 0.$$

A kísérletekben egy adott térrészen való áthaladás idejét mérve határozták meg a sebességeket. A megfigyelt csepp töltésére a csepp sugarát behelyettesítve felírható a következő összefüggés:

$$Q = 9\sqrt{2}\pi \sqrt{\frac{\eta^3 v_g}{g(\rho - \rho_k)}} (v_g + v_e) \frac{d}{U}. \quad (1)$$

A mért adatokból így kiszámolható egy csepp töltése. A modell szerint ezek a töltésadatok – természetesen a mérési hibán belül – az elemi töltés egész számú többszöröseként adhatók meg.

A töltésmennyiség meghatározására szolgáló ködkamrás módszer továbbfejlesztése

Első mérésénél Millikan a Wilson-féle ködkamrás berendezés továbbfejlesztett változatát használta [3].

A vízcseppekből álló felhő kondenzációs magvainak ionizálásához – a besugárzás intenzitásának változását csökkentendő – nem röntgenlámpát, hanem rádiumot használt. Erősebb elektromos mező alkalmazásával az emelkedési és süllyedési sebességek különbsége mérhetően nagyobb lett, és a megfigyelt kisebb távolságokhoz tartozó rövidebb időtartamok alatt a párolgásból adódó pontatlanságok is csökkentek.

A teljesen más – itt nem részletezett – gondolatmenet követő Wilson a következő összefüggést használta a töltésmennyiség meghatározására:

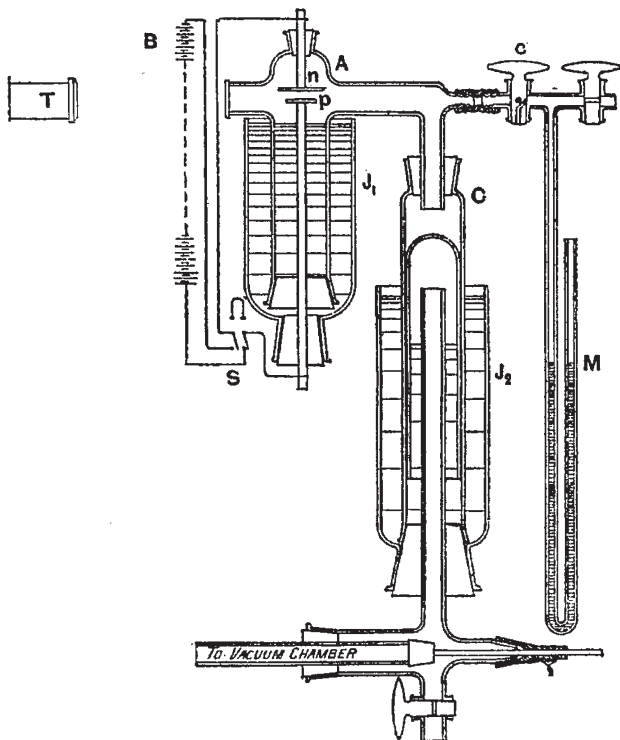
$$Q = \left[\frac{4}{3}\pi \left(\frac{9\eta}{2g} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \frac{g}{E} \frac{(v_g - v_e) \sqrt{v_e}}{\sqrt{\rho}}. \quad (2)$$

Millikan és Louis Begeman az 1908-ban kiadott publikációban [2] hivatkoztak Wilson eredményeire (konkrétan erre az összefüggésre), ezt az eredeti cikk jelöléseitől eltérően a fenti gondolatmenetben használt betűértelmezésekkel közöljük. Millikan a szögletes zárójelben lévő – a levegő viszkozitását tartalmazó – kifejezésre a Wilson által megadott $3,1 \cdot 10^{-9}$ értéket használta. Ennek mértékegységét a cikkben nem közölték. Ekkor még feltételezték, hogy az ezen állandóban felmerülő hibák olyan csekélyek, hogy a végeredményt érdemben nem befolyásolják. Az elemi töltés nagyságára kapott eredmények azonban igen nagy szórást mutattak, akkori egységben $3,66 \cdot 10^{-10} - 4,37 \cdot 10^{-10}$ esu² között voltak, ez az SI mértékegységrendszerben $1,22 \cdot 10^{-19} - 1,46 \cdot 10^{-19}$ C-nak felel meg.

Millikan – Wilson módszerét elemezve – a következő öt lehetséges hibaforrást találta:

– A légáramlatok zavaró hatása miatt a felhők felső felszínét szinte lehetetlen volt torzításmentesen előállítani.

² Electrostatic unit; CGS-rendszerben Benjamin Franklin tiszteletére franklinnek is nevezik.



3. ábra. A ködkamrás berendezés rajza [3].

– Az elektromos térben eső felhők tetejének mozgását az elektromos jelenségek is befolyásolták, tovább nehezítve a pontos megfigyelést.

– A feltételezés szerint az expanzió során tökéletesen egyforma cseppeket kapunk, így v_e és v_g úgy jelenik meg az egyenletekben, mintha ugyanarról a csepről volna szó.

– A megfigyelés időtartama alatt a párolgási jelenség nem elhanyagolható, emiatt nem teljesül, hogy a felhő egyenletesen esik.

– Wilson feltételezte, hogy a levegő az expanzió, illetve a kondenzáció után egyensúlyi hőmérsékleten van. Ezt a hőmérsékletet a telített gőzök adiabatikus expanziójára vonatkozó összefüggések és ezen gőzök hőmérséklete és sűrűsége közötti – kísérleti úton meghatározott – összefüggések alapján számította ki.

Az utóbbi hibaforrás kiküszöbölése miatt Millikan különös figyelmet fordított a kamra expanzió utáni hőmérsékletére. Az ennek vizsgálatát is lehetővé tévő berendezés látható a 3. ábrán.

A körülbelül 5 cm átmérőjű A és C üvegtartályokban lévő levegő hőmérsékletét az őket körülvevő J_1 és J_2 víztartályokban lévő víz hőmérsékletének szabályozásával lehetett stabilan tartani. Az adiabatikus expanzió során bekövetkező nyomásváltozást az M higanymanométerrel mérték, ami a c csapon keresztül csatlakozott az üvegtartályok légteréhez. Az n és p kondenzátorlemezek közötti feszültséget biztosító B áramforrást egy S kapcsolóval lehetett bekapcsolni az áramkörbe. A kondenzátorlemezek között kialakuló felhő mozgásának megfigyelésére egy rövid fókusz távolságú T teleszkóp szolgált. Az expanziót valószínűleg az ábra alsó részén látható egységgel valósították meg, ennek működését azonban a cikkben nem részletezték.

1. táblázat

A levegő viszkozitásának vizsgálatából származó adatok

közeg	η	$\frac{4}{3} \pi \left(\frac{9\eta}{2g} \right)^{\frac{3}{2}}$ értéke	relatív eltérés (%)
telített vízgőz	0,0001904	$3,422 \cdot 10^{-9}$	10,39
telített alkoholgőz	0,0001878	$3,353 \cdot 10^{-9}$	8,16

Wilson és J. J. Thomson megfontolásaira hivatkozva Millikan kiszámolta a felhő expanzió nyomán bekövetkező hőmérséklet-csökkenésének mértékét. A modell alapján beállt egyensúlyi hőmérséklet $14,2$ °C-nak adódott. A szoba, illetve a víztartályok 26 °C-os hőmérsékletéhez képesti 12 °C-os különbség miatt a higanymanométerben higanyszintváltozásnak kellett volna mutatkoznia. Mivel ilyen szintváltozást nem tapasztaltak, Millikan arra a következtetésre jutott, hogy mire a felhő mozgásának megfigyelése – az expanzió után körülbelül 2-3 másodperccel – lehetségessé válik, a hőmérséklet a megfigyelhetőség határában belül nem különbözik a szoba hőmérsékletétől.

A csepp mozgását befolyásoló viszkozitás függ a hőmérséklettől, mivel a fenti módszerrel csak a tartályok átlagos hőmérsékletét lehetett meghatározni, Millikan az n és p kondenzátorlemezek közötti térrészben uralkodó hőmérséklet fenténél még pontosabb meghatározására törekedett. Ehhez egy $0,025$ mm-es vas és $0,075$ mm-es platinadrótokból készült bimetált használt. Az eszköz kellően kicsi hőkapacitása biztosította, hogy igen kis késéssel reagáljon az őt körülvevő gáz hőmérsékletének megváltozására. A bimetált a kondenzátor fegyverzetei közé helyezve megállapítható volt, hogy az adiabatikus expanzió miatti hőmérséklet-változás során bekövetkező mechanikus elhajlást követően az elmozdulást jelző skála tíz másodpercen belül a kezdeti helyzetbe állt vissza.

Ezen túlmenően Millikan többféle módszerrel is próbálta a hőmérsékletet meghatározni. Végső következtetése azonban minden alkalommal ugyanaz volt: a kondenzátorlemezek közötti hőmérséklet 6 másodperccel az expanzió után már nem különbözött mérhetően a szoba hőmérsékletétől.

A hőmérsékletmérések gondos kivitelezése mellett Millikan figyelmet fordított a közeg viszkozitására is. Hivatkozva mások nagyon körültekintő méréseire, a 26 °C-os száraz levegő viszkozitásának értékét átvette tőlük. A vízzel, illetve alkohollal telített gőz száraz levegőéhez viszonyított viszkozitását viszont Millikan kérésére a Ryerson laboratóriumban *Fred Allison* határozta meg kapilláris viszkoziméter segítségével. Az 1. táblázatban a 26 °C-os víz, illetve alkohol gőzével telített levegő viszkozitásának adatai – ahogy a [3]-as publikációban is – mértékegységek nélkül szerepelnek.

A harmadik oszlopban a (2)-es összefüggés szögletes zárójelében szereplő kifejezés értékét, a negyedikben pedig a száraz levegő viszkozitásával ($0,0001826$) számolható elemi töltés értékétől való eltérés relatív hibáját láthatjuk.

2. táblázat

Millikan és Begeman eredményeinek összesítése [3]

sorozat*	töltésszám	eredmény		tömegarány
		(10^{-10} esu)	(10^{-19} C)	
1.	3	4,59	1,531	7
2.	4	4,56	1,521	7
3.	2	4,64	1,548	6
4.	5	4,83	1,611	4
5.	2	4,87	1,624	1
6.	6	4,69	1,564	3
Számítási közép		4,70	1,568	
Súlyozott átlag		4,65	1,551	

* Az adatsorok az 5. sorozatnál alkoholecseppek, a többi esetben vízcseppek megfigyeléséről készültek.

Millikan a kísérletek során felismerte, hogy felhő ugyan nem, de porlasztással előállított, önálló cseppeket nagyon jól, kontrolláltan lehet az elektromos tér erősségének változtatásával egyensúlyozni. Így a kezdeti próbálkozások után ezt a módszert követte. A megfigyelőtérbe kis mennyiségű vizet porlasztva 7-8 másodpercen belül kiszámú, könnyen megfigyelhető – a berendezés sötét hátere előtt világító pontokként jól látszó – csepp formálódott. Az expanzió variálásával a csepp tömegét, a besugárzás változtatásával azok töltését is tudta változtatni, így akár többszörösen töltött részecskéket is elő tudott állítani.

A kondenzátorlemezek közötti tér keskeny sávját megvilágító vékony fénysugár melegítő hatását három vízcella alkalmazásával küszöbölték ki, ezekről még lesz szó a későbbiekben. A lemezek közötti levegőt 200 mg 20000 Bq aktivitású, a kondenzátortól 3–10 cm közötti távolságban lévő rádiumizotóp ionizálta. A sugárforrást az expanzió után 1-2 másodperccel eltávolítva vagy leárnyékolva figyelte meg a formálódó cseppek mozgását.

A mért adatok értelmezése során Millikan részletes megfontolásokat közölt arról, hogy a cseppek 35-60 másodperces élettartama alatt – szigorúan véve – nem lehet biztosítani az egyenletes mozgást, többek között a nem elhanyagolható párolgás miatt. Mivel a megfigyelésekből származó adatsorok rendre egy-egy cseppről készültek, a (2) egyenletben nem fordulhatott elő átlagszámításból fakadó eltérés. Millikan arra jutott, hogy a probléma a közegellenállási erő hatását figyelembe vevő modellben rejlik, azaz a Stokes-törvény nem érvényes eredeti formájában. Az 1913-as kísérletnél [4] láthatjuk majd, hogy ennek különösen az igen kis méretű cseppek esetén van jelentősége.

Millikan a kísérletek során különböző töltésű és különböző – egymáshoz viszonyított tömegű – cseppek mozgását megfigyelve elemezte, hogyan teljesülnek a modell feltételei a kísérleti megvalósítás során. A 2. táblázatban az adatsorok az 5. sorozatnál alkoholecseppek, a többi esetben vízcseppek megfigyeléséről készültek. Ezekben a mérésekben tehát Milli-

3. táblázat

Millikan 1910-es eredményei, néhány kortársával összehasonlítva

név	eredmény		relatív eltérés (%)
	(10^{-10} esu)	(10^{-19} C)	
Millikan	4,65	1,551	
Planck	4,69	1,564	-0,838
Rutherford és Geiger	4,65	1,551	0
Regener	4,79	1,598	-3,030
Begeman	4,67	1,558	-0,451
Ehrenhaft	4,6	1,534	1,096
de Broglie	4,5	1,501	3,223

kan már porlasztással előállított cseppek mozgását figyelte meg, de a cseppek még könnyen párolgó folyadékból származtak.

Millikan ebben az 1910-es cikkében [3] öt kortársa – kísérleti úton nyert, illetve elméleti megfontolásokból származó – eredményeivel (3. táblázat) vetette össze sajátját, majd az ezen adatokból számolt átlagot tekintette az elemi elektromos töltés nagyságának. Ez korabeli mértékegységben $4,69 \cdot 10^{-10}$ esu, ma használatosban $1,564 \cdot 10^{-19}$ C volt.

Az eredmények nagy port kavartak a korabeli tudományos életben: Niels Bohr elfogadta Millikan e értékét, és felhasználta 1913-as cikkében (*On the Constitution of Atoms and Molecules*); mások azonban kételkedve fogadták.

A következő rész a híres olajcseppek kísérlet kivitelezésének és kiértékelésének részletes bemutatásával foglalkozik. Továbbá elemezzük Millikan eredményeinek akkori és mostani megítélését is.

Irodalom

1. Bureau International des Poids et Mesures: Resolution 1 of the 25th CGPM (2014). <http://www.bipm.org/en/news/full-stories/si-roadmap.html>
2. R. A. Millikan, L. Begeman: On the Charge Carried by the Negative Ion of an Ionized Gas. *Physical Review* 26/2 (1908) 197–198.
3. R. A. Millikan: A New Modification of the Cloud Method of Determining the Elementary Electrical Charge and the Most Probable Value of that Charge. *Philosophical Magazine and Journal of Science* 6/110 (1910) 209–228.
4. R. A. Millikan: On the Elementary Electrical Charge and the Avogadro Constant. *The Physical Review* 2/2 (1913) 109–143.
5. H. Fletcher: My work with Millikan on the oil-drop experiment. *Physics Today* 35 (1982) 43–47.
6. F. Ehrenhaft: Über die kleinsten messbaren Elektrizitätsmengen. Zweite vorläufige Mitteilung der Methode zur Bestimmung des elektrischen Elementarquantums. *Anzeiger Akademie der Wissenschaften in Wien. Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse* 4 (1910) 118–119.
7. F. Ehrenhaft: Über die Messung von Elektrizitätsmengen, die Ladung des einwertigen Wasserstoffions oder Elektrons zu unterschreiten scheinen. Zweite vorläufige Mitteilung seiner Methode zur Bestimmung des elektrischen Elementarquantums. *Anzeiger Akademie der Wissenschaften in Wien. Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse* 5 (1910) 215.
8. G. Holton: Subelectrons, Presuppositions, and the Millikan-Ehrenhaft Dispute. *Historical Studies in the Physical Sciences* 9 (1978) 161–224.