

Erwin Schrödinger

VÁLOGATOTT ÍRÁSAI

Tartalom

Előszó	7
Mi a természettörvény?	61
A metafizikáról általában	73
Levelezés Einsteinnel és Jánossyval	78
A Heisenberg–Born–Jordan-féle kvantummechanika viszonya az enyémhez	122
A hullámmechanika alapgondolata	135
A kvantummechanika jelenlegi helyzete	155
Mit nevezünk elemi részecskének?	214
A 2400 éves kvantumelmélet	241
A természettudományos világkép sajátosságai	254
A hullámmechanika értelmezéséről	326
Mi a „reális”?	336

Előszó

A XX. század fizikusai közül Einstein mellett – a róla elnevezett egyenlet révén – valószínűleg Schrödinger emlegetik a leggyakrabban. Neve egyetemek és kutatóintézetek százaiban hangzik el napjában többször is. A kvantummechanikával kapcsolatban azonban nemcsak az alapegyenletet nevezték el róla, hanem az elmélet értelmezéseinek egyik próbakövét, a híres-hírhedt „macskagyilkos” gondolat kísérletet, sőt, ő vezette be a kvantumállapotokra vonatkozóan az „összefonódottság” (*Verschänkung*, entanglement) fogalmát is, amely az elmélet értelmezése mellett a mai – a kvantuminformatika megalapozását célzó – kvantumkorrelációs kísérletekben központi szerepet tölt be. Az osztrák tudós munkássága azonban túlterjed a fizikán, az életről és a világról alkotott nézetei, ezen belül természetfilozófiája is indokolja, hogy helyet kapjon *Principia Philosophiae Naturalis* sorozatunkban. A kötetünkben közölt írásai alapján az olvasó is megtapasztalhatja páratlan gondolkodói kvalitásait, ahol a páratlan jelzőt kétféle értelemben is használhatjuk: egyrészt a kiválóság, másrészt az egyediség megjelölésére.

Mielőtt rátérnénk természetfilozófiai jelentőségű írásaira, röviden vázoljuk szerzőnk életét és munkásságát, valamint a tevékenységét befolyásoló né-

hány fontosabb körülményt. Schrödinger élete 20 évvel az 1867-es kiegyezés után, a dualista Monarchiában kezdődött, ahol (az osztrák részen viszonylag gyorsan) fejlődött a kapitalizmus, de állandóak voltak a nemzeti/nemzetiségi (pl. német-cseh) konfliktusok és egyre erősebbé vált a Németországgal kötött szövetség. A Monarchia terjeszkedési törekvései a Balkán felé és az Oroszország által is támogatott nagyszerb mozgalom összeütkezése hozzájárult az I. Világháború kitöréséhez 1914-ben. Az elhúzódó háborúban a Monarchia Németország oldalán csak átmeneti sikereket ért el, viszont – a többi hadviselő félhez hasonlóan – egy idő múlva belefáradt a harcokba, amelyek majdnem másfél millió állampolgárának feláldozását követelték meg. A lakosság elégedetlenségének – és részben az orosz forradalom hatásának – következtében 1917 végén, majd 1918 elején Bécsben és más osztrák iparvárosokban (valamint Németországban és Budapesten is) gyűlésekre, hatalmas tüntetésekre és sztrájkokra került sor a béke érdekében. Bár a mozgalmakat leszerelték illetve elfojtották, a lázadás átterjedt a hadsereg bizonyos egységeire is (l. például a flottalázadást Cattaróban, amelyet Horthy vert le). 1918 őszén a Monarchia csapatai az olasz fronton vereséget szenvedtek, felbomlottak; az ország szétesett, megalakult a csehszlovák, majd a szerb-horvát-szlovén állam; Bécsben és Budapesten kitört a forradalom, kikiáltották az osztrák, majd a magyar köztársaságot.

A háború utáni békeszerződés szentesítette a Monarchia helyén megjelenő független államok

megalakulását, így az Osztrák Köztársaság elveszítette többek között tengeri kijáratát is. Korlátozták hadseregének létszámát, jóvátételt írtak elő számára, és megtiltották Németországgal való egyesülését (bár ezt az 1925-ös locarnói szerződés már nem hangsúlyozta: csupán Németország nyugati határait rögzítette, a keletieket nem). A háború utáni gazdasági fellendülés nem oldotta meg a belső társadalmi feszültségeket (l. az 1927-es bécsi munkásfelkelést), a gazdasági világválság után pedig egyre erősebb fasizálódási tendencia jelentkezett pl. a félkatonai Heimwehr szervezet növekvő befolyásának képében. A demokratikus intézmények fokozatosan visszaszorultak, a bal- és jobboldal 1934 eleji összecsapása (amely több ezer halottal járt) után pedig lényegében megszűntek. A következő években az Ausztriával szövetséges Mussolini-féle Olaszország kénytelen volt elismerni, hogy ez a németek felségterülete, így nem volt akadálya annak, hogy 1938-ban a német csapatok – az egyesülésről szóló osztrák népszavazást egy nappal megelőzve – megszállják az országot és a Harmadik Birodalomhoz csatolják. A II. Világháborút tehát Ausztria Ostmark néven Németország részeként élte meg. Az antifasiszta hatalmak azonban az Anschlusst nem ismerték el, Ausztriára a németek által leigázott államként tekintettek, így a háború után megtarthatta határait és jóvátételt sem kellett fizetnie. Az egy évtizedes szövetséges megszállás után az ország 1955-ben visszanyerte szuverenitását, kinyilvánította örökös semlegességét.

Schrödinger azonban nemcsak otthon, hanem 1920-21-ben, majd 1927-33-ban német (a jénai, a stuttgarti, a bresloui, később a berlini)¹, a két időszak között pedig svájci (a zürichi) egyetemeken is dolgozott. Svájc az I. Világháborúban megőrizte semlegességét, amit a nagyhatalmak is elismertek, így a Népszövetség – amelybe Svájc is belépett – székhelyéül Genfet választották. Az ország nem csupán elkerülte a pusztítást, hanem tulajdonképpen előnye is származott a háború során és után a bankjaiba áramló vagyonok őrzéséből és kezeléséből. Általában véve is a gazdaságban egyre nagyobb szerepet játszott a szolgáltatási szektor. Az ország a tudományos kutatás számára viszonylag jó és békés körülményeket biztosított. Ugyanez mondható el Írországról is, ahol Schrödinger 1939-től 1956-ig élt. Írország szintén semleges maradt a II. Világháborúban, bár azért néhány városát – köztük Dublint – a németek bombázták, és a tengeri blokádok ellátási nehézségeket okoztak. Teljes függetlenségét 1949-ben nyerte el, de az azután is fennálló vallási nézeteltérések Schrödingert feltehetőleg kevésbé érintették, annál is inkább, mivel vallási kérdésekben a hivatalosan puritán Írország a gyakorlatban inkább megengedőnek bizonyult.

* * *

¹ Hogy ott milyen körülmények voltak, arról röviden írtunk Planck-kötetünkben (Előszó Planck természetfilozófiai írásaihoz, in: *Planck válogatott írásai*, Typotex, Budapest 2003)

Erwin Schrödinger 1887. augusztus 12-én született Bécsben.² Anyai nagyanyja angol (tőle és a rokonoknál való nyári nyaralásból ered a fiú mind szóban, mind írásban kiváló angol stílusa), nagypapa, (a Magyaróvárról származó) Alexander Bauer bécsi műegyetemi kémia-professzor volt, akinek három lánya közül a középsőt, Georginát a vegyész egyik tanítványa, a bécsi Rudolf Schrödinger vette feleségül. Az ifjúkorában az olasz festészet iránt érdeklődő – és festegető – Rudolf a kémiaán túl főként növénytant tanult, cikkei jelentek meg növénygenetikából. Családját – feleségét és egyetlen fiát – azonban az apjától örökölt linóleumgyár révén tartotta el. Erwint nagypapa evangélikusként kereszteltette meg (a Bauer család valamilyen kompromisszumként választhatta ezt az egyházat, mert pl. anglikán közösséget nem nagyon találhattak Ausztriában), valószínűleg a katolikus családból származó de a vallást nem gyakorló apa akarata ellenére. A 11 éves kora előtt magántanártól otthon tanuló fiú átlagon felüli képességei már a gimnáziumban megnyilvánulnak: kitűnő tanuló, osztályelső; a matematikán és fizikán kívül eredményesen foglalkozik klasszikus és modern nyelvekkel (az angolon és németen kívül beszél franciául és spanyolul, fordít ógörögből és provanszálból);

² Schrödinger életrajzának részletesebb tanulmányozásához Walter Moore: *A Life of Erwin Schrödinger* (Cambridge University Press, Cambridge 1994) c. könyvét tudjuk ajánlani, szakemberek számára pedig ennek eredeti, bővebb változatát Walter Moore: *Schrödinger: Life and Thought* (Cambridge University Press, Cambridge 1998)

jártasságot szerez az antik kultúrában, a filozófiában, az irodalomban. Apja révén a biológiával is megismerkedett, és darwiniánussá vált, dacára annak, hogy ezt a hittanórán eretnekségnek nyilvánították. Járt ugyanis (evangélikus) hittanra is, de apja szkepticizmusa saját tapasztalatai alapján csak megerősödött benne. Inkább egyház-, mint válásellenes volt, a misztika szabadgondolkodóként is kifejezetten vonzotta. Templomban a család kizárólag esküvők és temetések alkalmából jelent meg.

Schrödinger érettségi után 1906-ban a bécsi egyetemre iratkozott be, ahol a Fizikai Intézetben tanult fizikát, matematikát, kémiát és meteorológiát. Boltzmann éppen Schrödinger belépése előtt lett öngyilkos, de szelleme, gondolatmenetei még jelen voltak az oktatásban. „Gondolkodásmódját nevezhetjük első szerelmemnek a tudomány területén. Soha semmi nem ragadott meg ennnyire, és már nem is fog.”³ Így például Schrödinger nem a kvantummechanikával kapcsolatban ismerkedett meg az indeterminizmussal (akauzalizmussal), hanem a statisztikus folyamatoknak azon a szemléletén át, amelyet elsősorban Fritz Hasenöhrl, Boltzmann utódja az Elméleti Fizika Tanszéken és Franz Exner, a Kísérleti Fizika Intézet igazgatója közvetített felé. Hasenöhrl nyolcszemeszteres (heti öt órás) elméleti fizika előadása-

³ Antrittsrede des Hrn. Schrödinger. *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften. Physikalisch-mathematische Klasse* 1929 C-CII; idézi: James Murphy: Biographical Introduction, in: Erwin C. Schrödinger: *Science Theory and Man*, Dover, New York 1957. xiv. old.

iból tanulta meg a Hamilton-formalizmust és a sajátérték-problémákat, amelyek oly fontos szerepet játszottak azután a kvantummechanikát megalapozó munkásságában. Boltzmann tiszta és világos gondolatmeneteinek rekapitulációit hallgatva az ifjú tudósnövendék eleinte azonban idegenkedett az atomfizika ellentmondásaitól, ezért kísérleti fizika tanárai, Exner és Fritz Kohlrausch hatására színelmélettel kezdett foglalkozni.

1910-ben védte meg disszertációját a szigetelők felületi vezetőképességéről párás levegőben – ez a kísérleti munka a radioaktivitás és ionizáció mérésehez kapcsolódott. Egy éves krakkói tüzeitisztítói képzés után Exner a tanszékére hívta tanársegédnek. A tanítás mellett tanulmányokat publikált a mágnesség, a dielektrikumok, a légköri akusztika, a radioaktivitás, a röntgensugárzás és a Brown-mozgás témaköreiből.⁴ Nem állt távol tőle a kísérletezés, a mérés, de fokozatosan rájött, hogy igazi világa az elmélet. Ezekben az években – de már hallgató korában is – tanúja volt az egyetemen a Mach- és a Boltzmann-féle felfogás éles vitájának. Mach pozitivizmusa és gondolkodásökonomiája nem engedte meg az atomok létének elfo-

⁴ Előszavunkban Schrödinger szokatlanul kiterjedt munkásságából csak a természetfilozófiai szempontból legfontosabb kvantummechanikai cikkeit tudjuk valamennyire is érinteni, a többi legfeljebb az említés erejéig. Aki azonban ezek iránt is érdeklődik, annak William T. Scott: *Erwin Schrödinger. An Introduction to His Writings*, University of Massachusetts Press, Amherst 1967 c. könyvét tudjuk ajánlani, amely tematikus fejezetekben tárgyalja az egész életművet.

gadását, míg Boltzmann kifejezetten atomista volt, és erre alapozta a fizika (és ezen belül elsősorban a termodinamika második főtételének) statisztikus értelmezését. E háború egyik csatáját az a Planck vívta meg Mach és követői ellenében, aki eleinte idegenkedett Boltzmann felfogásától, de azután – a hőmérsékleti sugárzás problémájának megoldása során – kénytelen volt a pártjára állni.⁵ Schrödinger cikkeiben a Boltzmann-féle atomizmusból indult ki, akkor is, ha a mágnességről értekezett, akkor is, ha rugalmasan csatolt pontrendszerekről írt, és persze akkor is, ha a korábbi Boltzmann-tanítvány Marian Smoluchowski Brown-mozgás tanulmányait folytatta.⁶ Ez azonban sem számára, sem kollégái számára nem jelentette azt, hogy ne tudták volna valamilyen mértékben elfogadni Mach módszertani nézeteit. Érettebb korára azután – Planckhoz és Einsteinhez hasonlóan – eltávolodott a machi tudomány-felfogástól.⁷

⁵ L. pl. *Principia Philosophiae Naturalis* sorozatunkban Max Planck: A fizikai világkép egysége c. előadásának III. részében Boltzmann munkásságának ismertetését, valamint IV. részében Mach kritikáját, illetve az előszó erről szóló részét. In: *Planck válogatott írásai* 92–99., 103–109. ill. 27–32. old.

⁶ L. Dieter Flamm: Boltzmann's Influence on Schrödinger, in: C. W. Kilmister (ed.): *Schrödinger. Centenary Celebration of a Polymath*. Cambridge University Press, Cambridge 2008. 4–16. old.

⁷ Mint látható, feltételezünk bizonyos változásokat Schrödinger tudományfilozófiájában. Nem célunk azonban itt ennek részletes bizonyítása. Ez annál is inkább meghaladná az előszó kereteit, mert realizmusának, machizmusának stb. mértékéről távolról sincs egyetértés a tudománytörténészek és -filozófusok

Schrödinger 1914 elején kisebb nehézségekkel habilitált (elméleti cikkeit adta be, amelyek – bár matematikailag kifinomultak és elegánsak voltak – némileg nélkülöztek a realitással való kapcsolatot; másrészt volt, aki kevesellte kutatómunkáját és életkorát), majd a háború kitörésével behívták, és a déli határ erődjeibe került tüzértisztként. 1915-ben egy ideig Komáromban is szolgált. Aránylag nyugalomban vészelté át a háborús eseményeket, sőt még kutatómunkát is tudott végezni közben, publikációi jelentek meg az említett témákból, de ekkor ismerkedett meg az általános relativitás elméletével is. Súlyosan érintette viszont, hogy Hasenöhrl elesett a harcokban. 1917-ben Bécsújhelyen meteorológiát tanít légvédelmi tiszteknek, de a következő év végétől a hadsereg már nem tart igényt szolgálataira. Közben apja gyára bezárt, kereset után kellett néznie. Arról volt szó, hogy a Monarchia távoli tartományába, Bukovinába, az 1875-ben alapított német nyelvű – a fiatal, és ezért a bécsi vagy hasonló egyetemeken álláshoz nem nagyon jutó kutatók számára kiváló ugródeszkrét jelentő – csernovici

között. A vita leglényegesebb pontjait, illetve egy köztesnek mondható megoldást illetően l. pl.: Henk W. de Regt: Erwin Schrödinger, Anschaulichkeit, and Quantum Theory. *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics* bf 28 (4) 1997, 461–481. old.; vannak továbbá érvek amellet is, hogy álláspontja valójában nem változott meg az idők folyamán: Yemima Ben-Menahem: Struggling with Causality: Schrödinger's Case, uo. 20 (3) 1989 307–334. old. vagy Miguel Ferrero Melgar: The Philosophy of Erwin Schrödinger: A Diachronic View of Schrödinger's Thoughts, *Foundations of Physics* 18 (3) 1988 357–371. old.

egyetemre megy tanszékvezetőnek, ahol a fizikán kívül filozófiával is szeretett volna foglalkozni (Spinoza, Schopenhauer, Mach – akit a tüzéségi szolgálat alatt olvasott – és Avenarius szerepel a tervei között⁸). A birodalom szétesésével azonban a város Romániához (ma Ukrajna) került.

Így Bécsben marad, ahol bizonyára megfelelő volt a hangulat a pesszimista Schopenhauer összes művének elolvasásához. Ezeket keresztül jut el az indiai filozófiához, a hindu írásokhoz, a védántához⁹ (az upanisadokhoz), a buddhizmushoz. Nagyon tetszik neki ezek ateizmusa (a személytelen istenek) és misztikája, élete végéig jelen vannak gondolkodásában az ekkor olvasottak. A fizikában – kollégái és Mach érzetfilozófiája által motiváltan – elsősorban a színlátást tanulmányozza, amely témában rövid idő alatt a világ élvonalába dolgozza magát (pl. ő alkotta meg az ideális szín fogalmát). Közben azért a fény kettős természetével, a gázok elméletével, szilárdtestfizikával, a kristályrácsok dinamikájával is foglalkozik, aminek eredményeként állást ajánlanak neki. Ezt azonban nem tudja elfogadni, mert menyasszonya, Annamarie Bertel titkárnőként havonta keres annyit, mint amit neki

⁸ Erwin Schrödinger: Vorwort, in: *Meine Weltansicht*, Zsolnay, Hamburg 1961. 8. old.

⁹ A védánta a hindu filozófiai hagyományok központi, a mai iskolák alapját is képező rendszere. Tanának legfontosabb elemei a személyes (Átman) és az egyetemes (Brahman) lélek azonossága, valamint a lélekvándorlás. Szövegszerűen elsősorban az upanisadokra támaszkodik, amelyek az eredeti Védákhoz fűzött legrégebbi, viszonylag terjedelmes kommentárok.

egy évre ajánlanak, ezért aztán nem tudná elartani őt. Inkább egy jénai meghívásnak tesz eleget, így össze tudnak házasodni (először egy katolikus, majd egy evangélikus templomban). A házastársak a későbbiekben is kitartanak egymás mellett, de házasságuk nyitottá válik. Schrödingernek Max Wien (Wilhelm Wien testvére) Fizikai Intézetében azonban csak ideiglenes állása van, ezért fél év múlva már Stuttgartban találjuk, ahol a műegyetemen egy a mai docensi beosztásnak megfelelő állandó állást kap (itt egyik kollégája a matematikus-fizikus-filozófus, Hans Reichenbach). Újabb fél év múlva – több más ajánlat visszautasítása után – Breslauban (ma Wrocław) rendes professzor.

Már előbb pályázott a korábban Einstein majd Laue vezetése alatt álló zürichi tanszékre, de az egyetem csak 1921 közepén hozta meg kedvező döntését. Ősztől hat éven át az elméleti fizika tanára Zürichben, ahol kollégái (valójában nem az egyetemen, hanem az ETH-n) a matematikus Hermann Weyl és a fizikus-vegyész Peter Debye. Továbbra is több témakör foglalkoztatja, így az általános relativitáselmélet, a dielektrikumok elmélete, a színlátás kérdései, de végül aztán az ideális gázok statisztikus termodinamikájával kapcsolatos munkája során nem tudja elkerülni a – Stuttgartban már tanulmányozott – atomelmélet problémáit sem. Már ekkor tetten érhetők későbbi sajátos kvantummechanika értelmezésének és Bohréktől eltérő szemléletének nyomai. Bohr Kramers-szel és Slaterrel 1924-ben közösen írt cikkükben inkább feltételezte, hogy az anyag és sugárzás atomi szintű

kölcsönhatásában az energia (és az impulzus) nem marad meg, az oksági elv nem érvényes, csak hogy ne kelljen a kisugárzás és elnyelés kvantáltságából a sugárzás kvantáltságára következtetnie: „Ami a kvantumelmélet lényeges vonását képező átmenetek végbemenetelét illeti, letecsünk minden kísérletezésről a távoli atomokban végbemenő átmenetek közötti kauzális kapcsolatokkal, és különösen az energia- és impulzus-megmaradási elvek közvetlen alkalmazásával, amely oly jellemző a klasszikus elméletekre. ... Az egymástól nagyobb távolságra levő atomok közötti kölcsönhatással kapcsolatban ... feltételezzük az egyes átmeneti folyamatok függetlenségét, ami éles ellentétben áll az energia- és impulzus-megmaradás klasszikus igényével. Így feltesszük, hogy egy indukált atomi átmenetet nem közvetlenül egy távoli atomban végbemenő átmenet okoz, amelyre a kezdeti és végső stacionárius állapot közötti energiakülönbség azonos. ... Ez a függetlenség nemcsak az energia-megmaradást redukálja statisztikus törvénnyé, hanem az impulzus-megmaradást is.”¹⁰ A cikkre Schrödinger először levélben reagált: „Mélyen Tisztelt Bohr Úr! A legnagyobb érdeklődéssel olvastam a *Phil. Mag.* májusi számában gondolkodásának érdekes megváltozását. Rendkívüli módon szimpatikus számomra ez a változás. Franz Exner tanítványaként régóta kedvelem azt a gondolatot, hogy statisztikánk alapja valószínűleg nem a mikroszkopikus „szabályszerű-

¹⁰ Bohr N.; Kramers, H. A.; Slater, J. C.: The quantum theory of radiation. *Phil. Mag.* 47 1924. 791–793. old.

ség', hanem talán a 'tisztá véletlen', és hogy talán még az energia- és impulzustörvényeknek is csak statisztikus érvényességük lehet... . Az Ön új szempontja a klasszikus elmélethez való messzire vezető visszatérést jelenti, ami a sugárzást illeti. Nem egészen tudom követni, amikor mindig 'virtuális'-ként jelöli a sugárzást."¹¹

Schrödinger nemsokára egy cikket is írt az elméletről¹², amelyben üdvözi az akauzális világ első kézzelfogható megjelenését és a fénykvantumhipotézis elvetését. Kiütözik azonban eltérő véleménye a sugárzás (később a hullámok) természetével kapcsolatban: ezeket a dánnal szemben ő valóságosnak (nem pedig virtuálisnak) tekinti. A másik fontos különbség az indeterminizmus-felfogásukban van. Míg Bohr esetében ez inkább filozófiai, pozitivista kényszer-indeterminizmus, addig az osztrák fizikus számára a statisztika – (Boltzmann és) Exner nyomán – fizikai természetű, azaz például ha az energiamegmaradás törvényének sérüléséről, statisztikus jellegéről olvas, akkor azonnal a fluktuációkat kezdi számon kérni. Érdekes módon, az egyébként támogató cikknek ez a felvetése (amelyhez hasonlót Einstein is megfogalmazott) váltotta ki Bohr első kételyeit a saját elméletét illetően. Schrödinger cikkét a következőkép-

¹¹ Schrödinger levele Bohrnak 1924. május 24-én, in: Bohr, N.: *Collected Works* 5, North-Holland, Amsterdam 1984. 490. old.

¹² E. Schrödinger: Bohrs neue Strahlungshypothese und der Energiesatz, *Naturwiss.* 12 1924. 720-724. old.

pen fejezi be: „... a világ eseményeinek bizonyos stabilitása *sub specie aeternitatis* csak az egyes elkülönült rendszereknek a világ összes többi részével való *kapcsolatán* keresztül létezhet. Az egység szempontjából az elkülönült egyetlen rendszer kaotikus lenne. Ezt a kapcsolatot mint folyamatos *szabályzót* kívánja meg, amely nélkül energiája véletlenszerűen ide-oda kószalna.”

1925-ben Schrödinger 38 éves. Kis könyvecskére való filozófiai gondolatait szedi össze *Világnézetem* címmel. Ehhez – más fizikusokkal összehasonlítva – még túl fiatalnak tűnik. Nem is publikálja a 10 fejezetet, csak jóval később. A műben felvetett metafizikai problémák megoldását leginkább a védántában találja meg. A keleti bölcsélet középpontba állításának motivációit valószínűleg a háborús élményekben, a háború utáni körülményekben (éhség, fagyoskodás stb.), a Nyugat feltételezett alkonyában (Spengler könyve 1918-ban jelent meg), szülei halálában, tüdőbetegségében, házasságának válságában (a gyermek hiányában) lelhetjük fel. A fizika ehhez nem igazán járult hozzá (tudományfilozófiájában ekkor is a két egymással ellentétes hatás, Boltzmanné és Maché keveredett). Éppen ellenkezőleg: a védántában jelen lévő egység és folytonosság, a némely kommentátoroknál hangsúlyozott hullámmás hatással Schrödinger fizikájára. Maga is inkább ezt a fajta kapcsolatot várja el a tudomány és a metafizika között. A könyv nemcsak a fizikát, hanem a biológiát is érinti, ami tükrözi szerzőjének az evolúció és az öröklés (világnézeti jellegű) problémái iránti érdeklődését. Míg fi-

lozófiai tapasztalatainak összefoglalásához fiatalnak mondható, ahhoz viszont túl öregnek, hogy most lásson neki élete fő elméleti fizikai művének. Persze eddig is sokat tett le az asztalra, válogathat az állásajánlatok közül (de marad Zürichben). Az időnként betegeskedő, sokszor hetekig-hónapokig szabadságon lévő fizikus előtt egy olyan intenzitású év áll, amely nemcsak az ő életében, hanem a tudománytörténetben is párját ritkítja.

Ősszel Debye azt javasolja neki, hogy a két intézmény közös szemináriumán ismertesse Louis de Broglie előző évben megvédett disszertációját. Az ebben található gondolatokat – nevezetesen, hogy az elektron hullámtulajdonsággal is rendelkezik, továbbá, hogy a geometriai optika Fermat-elve és a hullámoptika viszonyával analóg módon a klasszikus mechanika legkisebb hatás elvéhez is kell tartoznia egy elméletnek, amely beszámol az elektron dinamikájáról – nem sokan vették komolyan azok közül, akiknek de Broglie (és témavezetője, Langevin) elküldte. Einstein a kevés kivétel közé tartozott, de ő maga nem akart részletesen foglalkozni a dologgal (egyszerűen elfogadta a részecskék hullámtermészetét egy gázelméleti cikkében), ezért kérte meg Debye-t a véleménynyilvánításra, aki viszont nem nagyon értette a disszertációt. Így kerülhetett a dolgozat Schrödingerhez, aki egyrészt sokkal kevésbé viselkedett előítéletekkel de Broglie-val szemben, mint a Koppenhága–Göttingen–München-vonal (a francia fizikusnak az utóbbiakkal való összeütközésére csak egyetlen példa a hafniummal kapcsolatos

prioritás-vita Dauviller és de Broglie illetve Hevesy, Coster és Bohr között); másrészt – mint jegyzetfüzetei tanúsítják – néhány évvel korábban talán még részletesebben foglalkozott az optikai-mechanikai analógiával, mint maga de Broglie. Egy harmadik tényező, amely miatt pont Schrödinger lehetett de Broglie elméletének továbbfejlesztője, az volt, hogy a relativitáselmélet és a kvantumfeltételek kapcsolatát vizsgálva még 1922-ben fogalmilag és formálisan is igen közel jutott a fázishullámokhoz.¹³ Így aztán az osztrák fizikus hajlandó volt tanulmányozni de Broglie elméletét és be is számolt róla. Debye az előadás után megjegyezte, hogy ha hullámokról van szó, akkor hullámegyenletnek is kellene lennie. Néhány hét múlva a szemináriumon Schrödinger bejelentette, hogy talált ilyen egyenletet. Ezt azonban nem publikálta, mert tovább szeretett volna lépni egy relativisztikus egyenlet felé. Próbálkozásai sikertelenek voltak (úgy tűnik, rátalált ugyan a relativisztikus Klein–Gordon-egyenletre, de azt a hidrogénatomra alkalmazva az eredmények nem látszottak megfelelőnek, ugyanis a spint – amellyel ebben az időben éppen csak hogy elkezdtek foglalkozni – nem tartalmazta¹⁴), ezért

¹³ Részletesebben ezekről a tényezőkről l. pl.: V. V. Raman és Paul Forman: Why Was It Schrödinger Who Developed de Broglie's Ideas? *Historical Studies in the Physical Sciences* I 1969. 291–303. old.

¹⁴ Ez a felfedezés történetének egyik legrosszabbul dokumentált része. A meglévő forrásokat és az ezek alapján kialakított elméleteket l. pl. Helge Kragh: On the History of Early Wave Mechanics, with special emphasis on the role of relati-

visszatért a nem-relativisztikus tárgyaláshoz.

1926 januárjától fél év alatt öt cikket küldött be az *Annalen der Physik*nek és egyet a *Die Naturwissenschaften*nek, amelyekkel meglepő módon Heisenbergtól teljesen függetlenül, hozzá semmilyen módon nem kapcsolódva, kis késéssel megalapozza a kvantummechanikát.¹⁵ „Elméletem kidolgozására az ösztönzést L. de Broglie disszertációja ... és A. Einstein rövid, de végtelenül messzire tekintő megjegyzései adták ... Nem tudok arról, hogy elméletem Heisenbergével bármiféle genetikus kapcsolatban állna. Elméletéről természetesen tudomásom volt, az azonban a transzcendens algebra igen nehézkesnek látszó módszerei és a szemléletesség hiánya folytán elriasztó, hogy azt ne mondjam: visszaszítító hatást tett rám.”¹⁶ A cikkek többsége a „A kvantálás mint sajátérték-probléma” címet viselte,

vity, *TEXTER fra IMFUEA, Roskilde Universitetscenter, Text Nr 23*, 1979.

¹⁵ Erről a fizika szempontjából nagyon fontos történetről itt természetesen csak vázlatyszerűen tudunk beszámolni. A lehető legrészletesebben foglalkozik a kérdéssel Jagdish Mehra-Helmut Rechenberg: *The Historical Development of Quantum Theory Vol. 5. Erwin Schrödinger and the Rise of Wave Mechanics*. Springer, New York 1987, beleértve például a bécsi kulturális élet bemutatását, Schrödinger korai cikkeinek elemzését vagy a zürichi kollegáknak a de Broglie cikk vándorútjáról szóló – némileg eltérő – visszaemlékezéseit stb. Egy koncentráltabb összefoglaló pl. Linda Wessels: Schrödinger's Route to Wave Mechanics, *Studies in History and Philosophy of Science* 10 1979 311-340. old.

¹⁶ Erwin Schrödinger: A Heisenberg-Born-Jordan-féle kvantummechanika viszonya az enyémhez, I. kötetünkben (4. lábjegyzet.)