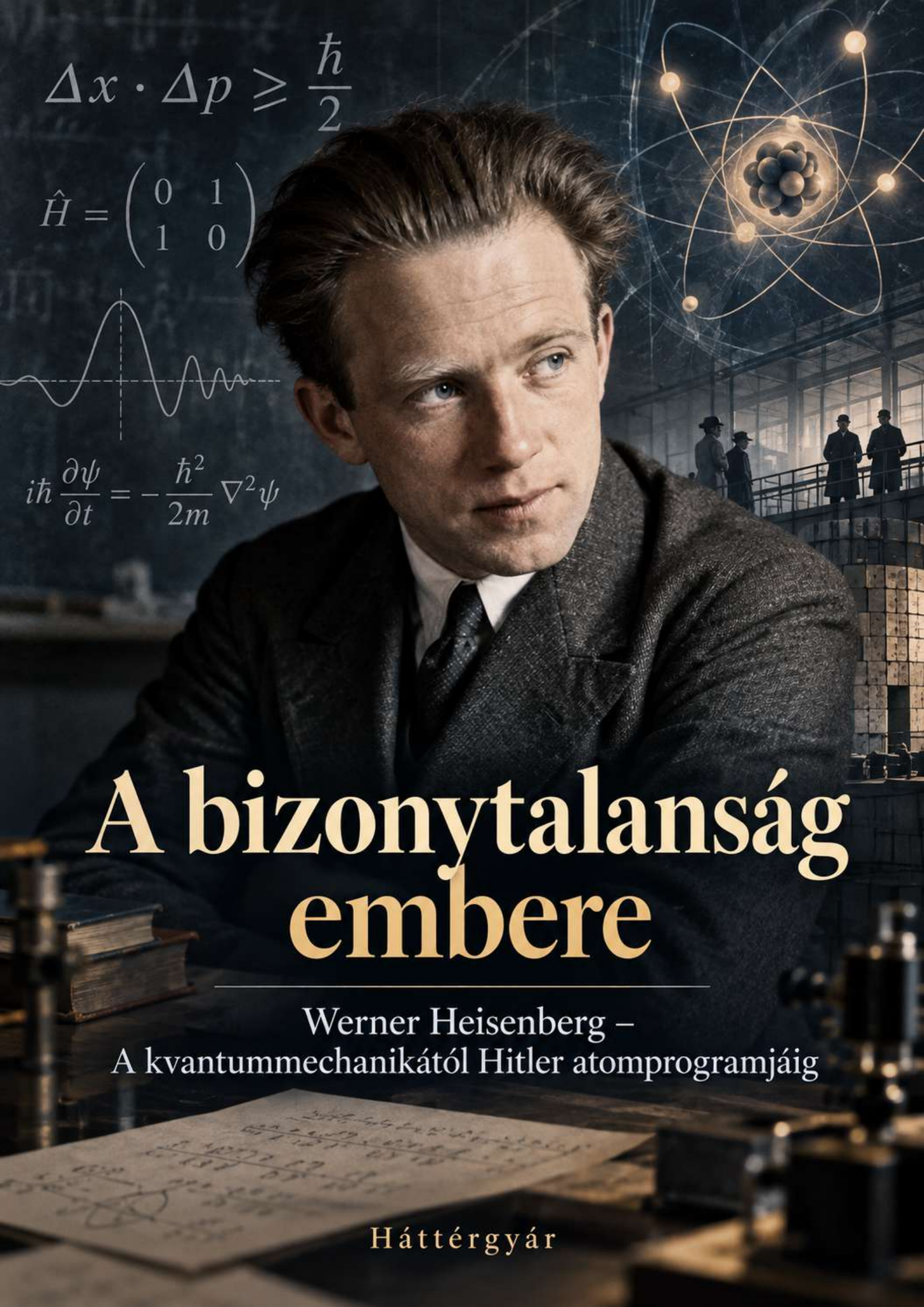


A bizonytalanság embere

Werner Heisenberg – A kvantummechanikától Hitler atomprogramjáig

Háttérgyár

A BIZONYTALANSÁG EMBERE

Werner Heisenberg – A kvantummechanikától a német atomprogramig

© Háttérgyár, 2026

Minden jog fenntartva.

Kiadó: Háttérgyár

Kiadás éve: 2026

hattergyar.hu

Ez a mű szerzői jogi védelem alatt áll. Részleteinek bármilyen formában való sokszorosítása, terjesztése vagy nyilvánosan elérhetővé tétele a kiadó előzetes írásbeli engedélye nélkül tilos.

A borító mesterséges intelligencia felhasználásával készült.

HÁTTÉRGYÁR

Tartalom

Előszó 4

1. A müncheni professzor házában 6

2. Sommerfeld műhelye 10

3. Koppenhága és a megfigyelhető világ 14

4. Göttingen: a fizika új nyelve 18

5. Helgoland, 1925: az áttörés 23

6. Hullámok, részecskék és az új mechanika 28

7. A határozatlansági reláció születése 32

8. Az Einstein-vita és a fizika értelmezése 37

9. Lipcse: a professzor és iskolája 41

10. A Nobel-díj és a német tudomány válsága 45

11. A diktatúra árnyékában: a német fizika védelme 49

12. A maghasadás és az uránkutatás kezdete 54

13. Koppenhága 1941: két régi barát elválása 59

14. Versenyfutás nélkül? Az 1942-es döntések 64

15. A reaktor felé: Berlin, Norvégia és Haigerloch 69

16. Farm Hall: a hallgatás is dokumentum 74

17. Visszatérés az összeomlott Németországba 79

18. Újjászervezés: Göttingen és a tudományos tekintély 84

19. A háború története mint vitatott örökség 89

HÁTTÉRGYÁR

20. Az atomkor német lelkiismerete: Göttingen, 1957 94

21. A végső elmélet keresése 99

22. A fizika nyelve és a filozófia határai 103

23. Család, zene és a személyes emlékezet 107

24. Werner Heisenberg helye a huszadik században 111

25. Koppenhága emlékezete: két elbeszélés ugyanarról az éjszakáról 115

26. Farm Hall: a lehallgatott beszélgetések értelmezése 120

27. A határozatlansági reláció öröksége a modern fizikában 125

28. Tudós, állampolgár, történelmi szereplő 130

Kronológia 135

Fontosabb szereplők 138

Felhasznált irodalom és források 141

Függelék: A fontosabb fizikai fogalmak 143

Függelék: Forráskritikai megjegyzések 149

HÁTTÉRGYÁR

Előszó

Werner Heisenberg neve ma egyetlen fizikai összefüggéssel forrt össze. A határozatlansági relációt gyakran idézik a fizikán kívül is, olykor olyan helyzetekben, amelyekhez valójában semmi köze. Népszerű értelmezése szerint a világ kiszámíthatatlan, és ezért az emberi tudásnak mindenütt áthághatatlan határai vannak. Az eredeti tudományos állítás ennél sokkal pontosabb. Bizonyos fizikai mennyiségek, például egy részecske helyzete és lendülete, nem rendelhetők hozzá egyidejűleg tetszőleges pontossággal ugyanahhoz a kvantumállapothoz. A különbség döntő. Heisenberg munkája nem a pontatlanság dicsérete volt, hanem egy új, számszerűen ellenőrizhető természettudományos elmélet megalkotásának része.

Az 1901-ben született fizikus életútja azonban messzire vezet az atomok világától. A császári Németország utolsó évtizedében nőtt fel, az első világháború után kialakult köztársaság egyetemein tanult, a húszas évek nemzetközi tudományos forradalmának egyik főszereplője lett, majd a nemzetiszocialista diktatúrában maradt. A második világháború idején részt vett a német uránkutatásban,

HÁTTÉRGYÁR

amelynek eredményeit és céljait máig történészi vita övezi. 1945-ben brit őrizetbe került, hazatérése után pedig a német tudományos élet újjászervezésén dolgozott. Életének egymást követő korszakai más-más kérdések elé állították, és az egyes korszakokban hozott döntéseket nem lehet egyetlen erkölcsi vagy politikai jelzővel elintézni.

E kötetben a személyes életrajzot, a tudományos gondolkodás történetét és a német huszadik század történelmét együtt vizsgáljuk. Heisenberg nagy felfedezéseinek bemutatásához az alapvető matematikai gondolatokat közérthetően kell kibontani; a háborús évek tárgyalásához viszont a visszaemlékezések mellé korabeli feljegyzések, levelek és későbbi kutatások szükségesek. A fizikai teljesítmény megértése nem kívánja a politikai magatartás felmentését, és az utóbbi bírálata sem kisebbíti önmagában a tudományos eredményeket. A két kérdés közötti feszültség adja Heisenberg történetének maradandó jelentőségét.

HÁTTÉRGYÁR

1. A müncheni professzor házában

Werner Karl Heisenberg 1901. december 5-én született Würzburgban. Apja, August Heisenberg a középkori és modern görög nyelv, illetve a bizánci kultúra kutatója volt, anyja, Annie Wecklein pedig művelt, tanári családból származott. A fiatal Werner egy olyan német polgári világba érkezett, amelyben a magasabb iskolai végzettség a társadalmi megbecsülés fontos feltétele volt. A családi légkörben a klasszikus nyelvek, a szigorú iskolai munka és az értelmiségi pálya tekintélye természetesnek számított. Ez a közeg később is hatott Heisenberg nyelvére és önképére: a tudományt nem kizárólag foglalkozásnak, hanem kulturális hivatásnak tekintette.

A család Münchenbe költözött, miután August Heisenberg egyetemi kinevezést kapott. Werner és idősebb fivére, Erwin a müncheni oktatási rendszerben nevelkedett; Werner a Maximiliansgymnasium diákja lett. A gimnázium hagyományos humanista képzést kínált, latin és görög tanulmányokkal, ugyanakkor szigorú matematikai követelményekkel. Heisenberg később saját visszaemlékezéseiben is hangsúlyozta,

HÁTTÉRGYÁR

mennyit jelentett számára az antik gondolkodás. Ezt a később kialakított önarcképet érdemes fenntartásokkal olvasni: a felnőtt tudós hajlamos volt gyermekkori élményeiben már előre felismerni azokat az eszméket, amelyekre évtizedek múltán jutott.

A család hétköznapjai a tanári hivatás szabályosságát és a teljesítményre nevelést tükrözték. A két fiú közötti versengésről szóló életrajzi beszámolók arra utalnak, hogy Werner korán hozzászokott ahhoz, hogy eredményeit másokéhoz mérje. Tanulmányaiban kiemelkedő képességet mutatott, de érdeklődése nem szorult egyetlen tantárgyra. Zongorázott, szerette a kamarazenét, és egész életében fontosnak tartotta a zenélést. A zenei forma iránti érzékenységét később gyakran állította párhuzamba a fizikai elméletek eleganciájával. A párhuzam érthető, noha egy zenemű esztétikai rendje és egy természettudományos törvény igazolása természetesen másfajta követelményeknek engedelmeskedik.

Az első világháború idején Heisenberg még iskolás volt, de a hadviselés következményei a hátországban is megváltoztatták a mindennapokat. A nélkülözés, az ellátási gondok és a politikai feszültség a polgári családok biztonságát sem hagyta érintetlenül. Az 1918-as

német vereség és a monarchia összeomlása után Münchenben forradalmi kísérletek, ellenforradalmi mozgósítások és fegyveres összecsapások következtek. A fiatal nemzedék számára a világ rendje feltűnően törékenynek bizonyult. Ez a tapasztalat szorosan összekapcsolódott azokkal az ifjúsági mozgalmakkal, amelyek egyszerre kínáltak közösséget, fegyelmet és a felnőttek politikai világától való részleges eltávolodást.

Heisenberg a német ifjúsági mozgalom világában kirándulásokat, túrákat, közös éneklést és önszerveződő társaságot talált. Ezek a közösségek eszmeileg sokfélék voltak; a természetjárás és a nemzedéki függetlenség igénye mellett olykor nacionalista, hierarchikus elképzelések is megjelentek bennük. A későbbi tudós életrajzában ezért a mozgalom egyszerre fontos személyes élmény és nehezen általánosítható történeti jelenség. Félrevezető volna az ifjúkori tagságból egyenes utat rajzolni a harmincas évek politikai döntéseihez. Annyi azonban világos, hogy a közösségi kötelesség, a német kulturális folytonosság és a személyes hűség már fiatalon erős jelentést kapott számára.

A háború végére Werner különösen jól teljesített a matematikában. Egyetemi érdeklődése kezdetben ezen a területen bontakozott ki, és a felsőbb matematika

absztrakciója nem riasztotta. Éppen ellenkezőleg: a szerkezeti összefüggések felismerése, a bonyolult feladatok egyszerűbb részekre bontása és a bizonyítás ereje vonzotta. A fizika irányába tett lépése nem annyira gyermekkori elhatározás eredménye volt, mint inkább egy olyan találkozásé, amely Münchenben a húszas évek elején különleges lehetőséget nyitott meg előtte.

HÁTTÉRGYÁR

2. Sommerfeld műhelye

Az első világháború után a német egyetemek egyszerre voltak a nemzetközi tudományosság vezető műhelyei és az ország társadalmi válságának részesei. Az infláció megtépázta az egyetemi fizetéseket, a politikai összeütközések áthatották a hallgatói életet, mégis kivételes szellemi teljesítmények születtek. Münchenben Arnold Sommerfeld dolgozott, aki az atomelmélet és a matematikai fizika egyik legelismertebb mestere volt. Tanítványai közül többen a modern fizika későbbi meghatározó alakjai lettek. Sommerfeld különös tehetsége abban állt, hogy a legnehezebb elméleti problémákat fiatal kutatókkal is meg tudta vitatni, miközben a számítások technikai fegyelmét szigorúan megkövetelte.

Heisenberg matematikai terveivel kereste fel az egyetemet, és végül Sommerfeld környezetében találta meg a helyét. Tanulmányai során hamar olyan kérdésekkel foglalkozhatott, amelyekre a kor fizikusai sem ismerték a választ. Ez a helyzet ma szokatlannak tűnhet, hiszen az egyetemi oktatást gyakran a biztos tudás fokozatos elsajátításával azonosítjuk. A húszas évek atomfizikájában azonban az alapelvek sem voltak

HÁTTÉRGYÁR

tisztázottak. A hallgató egyszerre tanulta a klasszikus mechanikát és tapasztalta meg annak határait; a tankönyvi módszer néha kitűnő eredményt adott, máskor nyilvánvaló ellentmondáshoz vezetett.

A századfordulón Max Planck a hősugárzás megmagyarázásához bevezetett egy új állandót, amely később az egész kvantumelmélet jelképévé vált. Albert Einstein 1905-ben a fény és az anyag kölcsönhatásáról tett olyan javaslatot, amely a fényenergia kvantumos jellegét emelte ki. Niels Bohr 1913-ban az atom szerkezetének modelljével ért el áttörést. A modellben az elektron csak meghatározott állapotokban lehetett, és a köztük bekövetkező átmenetekhez meghatározott frekvenciájú fény társult. Az eredmény különösen a hidrogén színképében volt meggyőző, de az elmélet sok elemében ideiglenes maradt.

A régi kvantumelmélet különös kettősséget hordozott. Az elektronokat gyakran a klasszikus mechanika szerint képzelték el, mintha kis bolygókként járnák körül az atommagot, ugyanakkor mozgásukra olyan új korlátozásokat írtak elő, amelyeket a klasszikus fizika nem indokolt. Bohr és Sommerfeld egyre kifinomultabb szabályokkal javították a számításokat. A módszer néhány esetben figyelemre méltóan működött, de az

összetettebb atomok, a színképvonalak intenzitása és számos mágneses jelenség már komoly nehézségeket okozott. A fiatal Heisenberg ebbe a nyitott vitába kapcsolódott be, és a hibákra nem a tudomány vereségeként, hanem a megoldandó probléma körvonalaként tekintett.

Sommerfeld nemcsak tanított, hanem szellemi versenyt is szervezett. Feladatokat adott, konferenciákra vitte legtehetségesebb diákjait, és kapcsolatot teremtett a németországi, dániai és más európai kutatóhelyek között. Heisenberg gyorsan megtanulta, hogy egy jó ötlet még nem elegendő: az új állításból kiszámítható következményeket kell levezetni, és az eredményt össze kell vetni a mérésekkel. Az elméleti fizika ebben a közegben intenzív társalgás volt, viták, előadások, kéziratok és levelek folytonos körforgása. A fiatal kutató nem magányos zseni módjára dolgozott; felfedezéseinek előkészítésében ez a közösségi munka alapvető szerepet játszott.

Az 1920-as évek elején a göttingeni fizikai és matematikai iskola újabb találkozások lehetőségét kínálta. Max Born és James Franck intézetei olyan szellemi közeget alkottak, ahol a kísérleti eredmények közvetlenül ösztönözték az elméleti munkát. Heisenberg

figyelme a színképek szabályosságára, a kvantumátmenetekre és az atom belső állapotairól megfogalmazható állításokra irányult. A kérdés fokozatosan azzá alakult, hogy valóban szükség van-e az elektron klasszikus pályájáról beszélni, ha azt közvetlenül semmilyen mérés nem igazolja. Ez a gondolat néhány évvel később döntő jelentőségűvé vált.

Heisenberg doktorátusának története arra is figyelmeztet, milyen összetett volt a fiatal fizikus felkészültsége. Elméleti problémákban kiemelkedő volt, kísérleti vizsgáján viszont nehézségei támadtak. A laboratóriumi részletek, a mérési eszközök és a gyakorlati módszerek ismerete nem tartozott ugyanúgy erősségei közé, mint a matematikai elemzés. A kortársak számára ez valódi hiányosságot jelentett, nem puszta életrajzi érdekességet. Későbbi tudományos pályája mégis azt mutatta, hogy a különböző képességek egyenlőtlen eloszlása egy kutatón belül nem zárja ki a nagy teljesítményt, feltéve hogy együtt tud működni a másféle tudással rendelkező kollégákkal.

HÁTTÉRGYÁR

3. Koppenhága és a megfigyelhető világ

A húszas évek fizikájának egyik legfontosabb központja Koppenhága lett. Niels Bohr intézete nemcsak magas színvonalú kutatóhely volt, hanem szokatlanul nyitott nemzetközi találkozópont is. Fiatal fizikusok érkeztek Dániába Németországból, Hollandiából, Nagy-Britanniából és más országokból, hogy közösen próbálják megérteni az atomok viselkedését. Bohr személyes stílusa fontos szerepet játszott ebben: hosszú beszélgetésekkel, ismétlődő kérdésekkel és gyakran nehézkes, de termékeny gondolati kísérletekkel ösztönözte munkatársait. Heisenberg számára a dán főváros egy másik tudományos kultúrát jelentett, amelyben a tekintély helyett a probléma körül kialakuló párbeszéd került előtérbe.

Bohr és Heisenberg kapcsolata évtizedeken át megmaradt, de természete sokszor változott. A tanítványi tisztelet mellett kezdettől jelen volt a véleménykülönbség és a versengés is. Heisenberg hajlamos volt gyorsan matematikai formába önteni a felmerülő kérdéseket, Bohr viszont rendszeresen visszatért ahhoz, mit jelent pontosan egy fizikai állítás, és milyen kísérleti helyzetben

HÁTTÉRGYÁR

lehet megvizsgálni. A különbség termékenynek bizonyult, mert a fiatalabb fizikus számításait újra meg újra szembesítette azok értelmezési feltételeivel. Egyikük sem rendelkezett kész válasszal, és a később született visszaemlékezések rendezettebbnek mutatják ezeket a vitákat, mint amilyenek valójában lehettek.

A fizika egyik legsúlyosabb nehézségét a klasszikus szemlélet atomokra történő kiterjesztése okozta. A hétköznapi világban természetesnek tartjuk, hogy egy testnek minden pillanatban meghatározott helye és sebessége van. Ha egy vasúti kocsit megfigyelünk, megadhatjuk, hol tartózkodott és hogyan mozgott, az eredmény pontosságát pedig egyre jobb eszközökkel növelhetjük. Egy elektron esetében az ilyen leírás korántsem magától értetődő. A mérési eljárások az elektron és a mérőeszköz kölcsönhatásától függenek, és a kvantumos törvények által megengedett állapotok nem felelnek meg mindenben a klasszikus pályák képének.

A fizikusok mégis ragaszkodtak a régi szemlélethez, mert annak fogalmai évszázadokon át sikeresen magyarázták a bolygók, lövedékek, ingák és folyadékok mozgását. Az új atomelmélet megalkotásának nehézsége éppen abban állt, hogy a megszokott fogalmakról csak akkor lehetett lemondani, ha helyükbe olyan leírás

HÁTTÉRGYÁR

került, amely legalább ugyanolyan pontos előrejelzéseket adott. Heisenberg fokozatosan felismerte: a színképvonalak frekvenciája és intenzitása ténylegesen mérhető, míg az elektron két kvantumátmenet közötti feltételezett pályája inkább szemléltető kép. Ha a számításokat közvetlenül a mérhető kapcsolatokra építik, talán megszűnik néhány addigi ellentmondás.

A megfigyelhetőség követelménye azonban könnyen félreérthető. A fizikában gyakran beszélünk olyan jelenségekről is, amelyeket nem látunk közvetlenül: távoli galaxisokról, elektromos terekről vagy elemi részecskékről. Létezésüket közvetett mérési következményekből ismerjük fel. Heisenberg gondolata ezért nem azt jelentette, hogy csak az létezik, ami szabad szemmel látható. Azt követelte, hogy az elméleti állításoknak ellenőrizhető kapcsolata legyen a kísérleti adatokkal, és a számítás ne támaszkodjék olyan részletekre, amelyeknek semmiféle megfigyelhető szerepük nincs. Ez a módszertani fordulat a kvantummechanika megszületése felé vezetett.

A korszak tudományos kapcsolathálózatának különös vonása volt a nemzetköziség. Német, dán, brit és holland kutatók folytattak éles vitákat, miközben a háborús tapasztalatok politikailag továbbra is elválasztották

HÁTTÉRGYÁR

országaikat. A folyóiratok, levelek és vendégkutatói utak áthidaltak olyan határokat, amelyeket a politikai élet nehezebben tudott meghaladni. Heisenberg ebből a közegből kapta legfontosabb szakmai ösztönzéseit, de később a német tudomány szolgálatának gondolatát is megőrizte. A két kötődés a harmincas években egyre nehezebben fért össze, a háború idején pedig végzetes jelentőséget kapott.

HÁTTÉRGYÁR

4. Göttingen: a fizika új nyelve

Amikor Heisenberg 1923 után mind szorosabban bekapcsolódott a göttingeni kutatásba, az ottani egyetem a matematika egyik nemzetközi fővárosa volt. David Hilbert és Richard Courant környezetében a matematikai módszereknek önálló tekintélyük volt, ugyanakkor Max Born fizikai intézetében senki sem feledkezhetett meg arról, hogy a képleteknek kísérleti eredményekkel kell találkozniuk. Ez a kettős követelmény sajátos szellemi fegyelmet jelentett. Heisenbergnek, aki Münchenben Sommerfeld mellett elsősorban az atommodellek számítási nehézségeivel foglalkozott, itt új kérdéssel kellett szembesülnie: vajon a rendelkezésre álló szabályokból kialakítható-e egy egységes elmélet, amelyben az addigi kivételek természetes következményekké válnak? A feladat nemcsak több számolást, hanem a számolás alapjául szolgáló fogalmak felülvizsgálatát követelte.

Born már jó ideje elégedetlen volt azzal, hogy az úgynevezett régi kvantumelmélet különböző atomokra és különböző jelenségekre eltérő, többé-kevésbé önkényes előírásokat használt. A hidrogén színképére felírt modell

HÁTTÉRGYÁR

figyelemre méltó sikere mögött ott maradt az a zavar, hogy egy klasszikus pályán keringő töltésnek folyamatosan sugároznia kellene. A kísérlet ezzel szemben azt mutatta, hogy az atom meghatározott energiájú állapotokban tartózkodik, és meghatározott frekvenciájú fényt bocsát ki vagy nyel el, amikor két állapot között átmenet történik. A régi és az új elem összekapcsolása sokáig elegendő volt az egyes számításokhoz, az ellentmondás azonban minden további eredménnyel láthatóbbá vált. A göttingeni iskola egyik legfontosabb erénye az volt, hogy a sikeres részmegoldásokat sem tekintette végleges elméletnek.

Heisenberg életében ekkor a személyes munkatempó és a nemzetközi kapcsolatok egymást erősítették. Koppenhágában Bohr intézetében más hangulat fogadta, mint Göttingenben: hosszú eszmecserék, fogalmi tisztázások, gyakran ugyanannak a gondolatnak újra és újra történő megvizsgálása. A két műhely között ingázva megtanulta, mikor érdemes egy következetesnek látszó képletet elvetni, és mikor kell a rosszul felvetett kérdést megváltoztatni. Hogy pontosan melyik beszélgetés milyen ötletet adott neki, azt utólag nehéz rekonstruálni, mert a visszaemlékezések egy folyamatot gyakran néhány emlékezetes jelenetté sűrítenek. Az azonban a

HÁTTÉRGYÁR

korabeli publikációkból és levelezésből is kitűnik, hogy a kvantumelmélet kialakulása közös, sokszereplős munka volt, amelyben az egyéni találékonyság a többiek eredményeire támaszkodott.

A leginkább zavarba ejtő részletek közé tartozott a színképvonalak intenzitása. A frekvencia megmondja, milyen színű vagy energiájú foton keletkezik; az intenzitás arról is tudósít, milyen valószínűséggel következik be egy átmenet. A korábbi atommodellek rendszerint egy elképzelt elektronpályából indultak ki, és az abból számított periodikus mozgást próbálták összekötni a fénykibocsátással. Ez az út hamar megnehezült, amint több lehetséges kezdeti és végső állapotot kellett követni. Heisenberg ezért egyre inkább arra figyelt, hogy a ténylegesen mért mennyiségeknek két állapothoz van közük. Egy frekvenciát nem egyetlen képzeletbeli körpályához, hanem két energiaszint különbségéhez lehetett rendelni; az intenzitás is átmenetek közötti kapcsolatokra utalt. Ez az eltolódás már a későbbi elmélet előszobája volt.

Göttingen fizikusainak munkáját a korszak társadalmi viszonyai sem tették könnyűvé. Az infláció, majd a pénzügyi stabilizáció hullámai a tudományos élet anyagi feltételeit is befolyásolták; a külföldi ösztöndíjak és

vendégségek ezért különösen sokat számítottak. A szakmai közösség ugyanakkor a politikai határoknál gyakran szélesebbnek bizonyult. A fiatal fizikusok nemzetközi találkozókon egyetlen délután alatt is több kérdést vetettek fel, mint amennyit egy helyi intézet hónapok alatt meg tudott oldani. Az ilyen környezet előnyös volt Heisenberg számára, aki gyorsan reagált mások ötleteire, és különösen akkor teljesített jól, amikor az ismert megoldási módszereket már nem lehetett tovább alkalmazni. A következő lépés mégis nagy személyes kockázatot hordozott: olyan fogalmi alapot akart feladni, amelyre a fizika évszázadokon át épült.

A későbbi sikerek fényében csábító volna a kvantummechanika megszületését szükségszerű végkifejletként ábrázolni. Valójában több párhuzamos út létezett, és a kutatók nem tudhatták, melyik vezet majd általános eredményre. A kísérletek egy része a klasszikus mechanika javítását célozta, mások új matematikai módszereket kerestek, ismét mások a sugárzás és az anyag kapcsolatát próbálták átfogalmazni. Heisenberg radikálisabb elképzelése ebben a bizonytalan közegben érlelődött. Az erénye nem az volt, hogy azonnal teljes képet nyújtott az atomról, hanem az, hogy pontosan megjelölte, miről nem érdemes az addigi módon beszélni,

HÁTTÉRGYÁR

és milyen mérhető mennyiségekből kellene új számolási rendszert építeni.

HÁTTÉRGYÁR

5. Helgoland, 1925: az áttörés

1925 nyarán Heisenberg szénanáthája miatt a német Északi-tenger egyik szigetére, Helgolandra utazott. A később sokat emlegetett epizód szinte kínálja magát az életrajzíró számára: a tengertől körülvett, a szárazföld zajától távoli helyen egy fiatal kutató néhány nap alatt felismer valamit, amit a világ vezető fizikusai évek óta hiába kerestek. A történetnek van valóságos alapja, de leegyszerűsíti a tudományos felfedezés menetét. Heisenberg nem üres lappal érkezett a szigetre. Magával vitte azokat a kérdéseket, számításokat és megoldatlan ellentmondásokat, amelyeken Münchenben, Göttingenben és Koppenhágában már hosszú ideje dolgozott. A helgolandi napok eredménye az előzményekből nőtt ki; értelmét is csak ezek ismeretében lehet felfogni.

A döntő gondolat a klasszikus elektronpályák kiküszöbölése volt. Ahelyett, hogy a fizikus leírná, miként járja körül az elektron az atommagot, majd utóbb megpróbálná levezetni, milyen fényt bocsát ki az atom, közvetlenül a megfigyelhető átmenetek adataiból kell kiindulnia. Az egyes átmenetekhez frekvenciák és amplitúdók rendelhetők. Ezeket úgy kell összekapcsolni,

hogy a számítás megőrizze a kísérletileg igazolható összefüggéseket. A változtatás látszólag az alkalmazott mennyiségek megválasztására korlátozódott, valójában azonban azt a mélyebb feltevést érintette, hogy az atomnak ugyanúgy teljes, szemléletes mozgástörténete volna, mint egy kis bolygórendszernek. Heisenberg elmélete első lépésben még nem adott kielégítő értelmezést a kvantumállapot minden sajátosságára, de világossá tette a lehetséges új leírás szerkezetét.

A tudománytörténeti visszaemlékezések gyakran szólnak arról, hogy Heisenberg a számítás során felismerte: az átmeneti mennyiségek összeszorzásakor nem mindegy a tényezők sorrendje. A klasszikus számtanban két közönséges szám szorzata felcserélhető, vagyis a szorzás sorrendje nem változtatja meg az eredményt. A kvantummechanika új matematikai mennyiségeivel azonban más a helyzet. Egy adott átmenet különböző köztes állapotokon keresztül kapcsolódhat más átmenetekhez; amikor ezek hatását egyesítjük, az első és második művelet szerepe nem azonos. A szorzás ezért általában nem felcserélhető. Ez a tulajdonság először inkább számolási következményként jelentkezett, később azonban az új fizika egyik legfontosabb ismertetőjegyévé vált.

Helgolandról visszatérve Heisenberg munkáját Bornnak mutatta meg. Born felismerte, hogy a szokatlan szorzási szabály a matematikában már ismert szerkezetre, a mátrixok szorzására emlékeztet. A fiatal elméleti fizikus megérzése így olyan formát kapott, amelyben a különböző állapotok és átmenetek szabályosan rendezhetővé váltak. Born, Heisenberg és Pascual Jordan közös munkája továbbépítette az eredményt, és néhány hónap alatt létrehozta azt a matematikai keretet, amelyet mátrixmechanikának nevezünk. Az elnevezés sok olvasó számára száraznak tűnhet, de a korszak szempontjából rendkívüli jelentőségű volt: az új elméletnek immár egységes műveleti szabályai voltak, nem kizárólag az egyes atomokra szabott javító előírásai.

Érdemes egy egyszerű hasonlatot használni, feltéve hogy nem helyettesítjük vele a fizikát. Egy könyvtárban a köteteket elhelyezhetjük polcok szerint, de feljegyezhetjük azt is, melyik olvasó melyik könyv után melyiket kérte ki. Az első leírás tárgyak feltételezett helyét hangsúlyozza, a második kapcsolatok hálózatát. A kvantummechanika természetesen nem kölcsönzési nyilvántartás; az analógia mindössze arra jó, hogy megmutassa, egy rendszer tulajdonságait olykor az

állapotok közötti átmenetek szabályai alapján lehet legjobban megragadni. Heisenberg radikális felismerésének történelmi súlya éppen ebben a hangsúlyváltásban állt. Az új matematikai tárgyak több mint a régi pályaadatokat kódolták át más jelekre, hanem másként határozták meg, mit tekintünk egyáltalán fizikai adatnak.

A mátrixmechanikát a tudományos közösség sem fogadta azonnal egyöntetű lelkesedéssel. Az új jelölések idegensége és a képszerű magyarázat hiánya még a kiváló fizikusokat is zavarta. A hagyományos mechanika nyelvében otthonosan mozgó kutatónak olyan számításokat kellett elsajátítania, amelyekben egy állapot nem azonosítható egy apró részecske pontos útvonalával. Heisenberg saját helyzete sem volt teljesen kényelmes: a megoldást kereső fiatalember bizonyos tekintetben maga is előrébb járt a fogalmi megértésnél. Az egyenletek helyes eredményeket adtak, miközben az értelmezésről tovább lehetett vitatkozni. Ez a feszültség a kvantummechanika történetének későbbi nagy vitáit is előkészítette.

Az áttörés közösségi jellege különösen fontos, amikor a tudomány történetét néhány nagy név sorozataként próbáljuk elbeszélni. A későbbi tankönyvek szerzőként

gyakran Heisenberget nevezik meg, mert az induló gondolat és az 1925-ös tanulmány az ő nevéhez kötődik. Born matematikai felismerése és Jordan alapos munkája nélkül azonban a módszer sokkal nehezebben válhatott volna általános, továbbfejleszthető elméletté. Az utókor névadási szokásai tehát egyszerre őriznek meg valós elsőbbséget és takarnak el nélkülözhetetlen közreműködőket. Heisenberg sikerének méltatása akkor pontos, ha ebben a műhelyben és ebben az együttműködésben helyezzük el.

HÁTTÉRGYÁR

6. Hullámok, részecskék és az új mechanika

Heisenberg 1925-ös eredménye után alig telt el néhány hónap, amikor Erwin Schrödinger más úton jutott el az atomvilág sikeres leírásához. A hullámmechanika olyan matematikai egyenletre épült, amely a klasszikus fizikában megszokott hullámmozgásokhoz hasonló formában írható fel. Sok fizikus számára ez a megközelítés természetesebbnek tűnt a mátrixmechanika szokatlan táblázatainál. A hullámfüggvényhez képet lehetett társítani, a differenciálegyenletek pedig ismerős matematikai környezetet adtak. A két módszer kezdetben egymás vetélytársának látszott. Nem csupán szakmai hiúságról volt szó, hanem arról a valódi kérdésről, hogyan kapcsolódik a természet leírása a szemléletes emberi képzetekhez.

Schrödinger az új eljárással olyan problémákra talált elegáns választ, amelyeket a régi kvantumelmélet nehezen kezelt. A módszer sikerét gyorsan felismerte a fizikusok jelentős része, sőt kezdetben többen úgy érezték, visszatérhetnek egy folytonos, képszerű világértelmezéshez. Heisenberg viszont azt gyanította, hogy a hullámkép túlságosan könnyen kelti a klasszikus

fizika folytonosságának illúzióját. A vita személyes hangot is kapott, bár a történelmi emlékezet ezt később olykor élesebb ellentétként őrizte meg, mint amit a tudományos érvek önmagukban indokoltak. A fizika fejlődése végül nem az egyik oldal kizárólagos győzelmével zárult. Megmutathatóvá vált, hogy a két formalizmus megfelelő értelemben ugyanannak az elméletnek két matematikai megfogalmazása.

A hullámmechanika és a mátrixmechanika egyenértékűsége mégsem jelentette azt, hogy a kvantummechanika minden értelmezési kérdése lezárult volna. Egy adott matematikai formalizmusból sokszor pontos előrejelzést lehet tenni anélkül, hogy egyetlen közmegegyezés volna arról, miként írjuk le a valóságot a mérés előtt. Az elektron hullámként és részecskeként emlegetett tulajdonságai ezt a nehézséget különösen látványossá tették. Az a kijelentés, hogy az elektron egyszerre hullám és részecske, hasznos rövidítés lehet bizonyos kísérleti tapasztalatokra, de félrevezető, ha két klasszikus tárgy mechanikus összeragasztásának tekintjük. A kvantumállapotot az egyenletek írják le, és a különböző mérési eljárások különböző oldalait teszik hozzáférhetővé.

Max Born 1926-ban döntő értelmezési lépést tett. A hullámfüggvény négyzetes abszolút értékét a mérési eredmények valószínűségi eloszlásával kapcsolta össze. Ezzel az új fizika nem kizárólag matematikai rendszert, hanem kísérleti jelentést is nyert. A kérdés többé nem az volt, hogy egy hullám csúcsa milyen apró anyaghalmazt jelölne, hanem az, milyen valószínűséggel kapunk bizonyos eredményt, ha megvizsgáljuk a rendszert. A valószínűség itt a fizikai elmélet szabályos, számszerű része lett. A klasszikus statisztikában sokszor azért használunk valószínűséget, mert nem ismerjük minden összetevő kezdeti állapotát; a kvantummechanikai valószínűség alapvetőbb módon épül be az állapot és a mérés kapcsolatának leírásába.

Heisenberg számára a valószínűségi értelmezés egyszerre jelentett segítséget és kihívást. Lehetővé tette, hogy a számítás közvetlen kapcsolatban álljon a megfigyelhető eseményekkel, de meg kellett magyarázni, miért nem rendelhetünk az állapothoz tetszőleges pontossággal minden klasszikus mennyiséget. A fizikusok mindeddig többnyire arra törekedtek, hogy a mérőeszközök hibáját csökkentsék, s a pontosság növekedésével egyre részletesebb képet kapjanak ugyanarról a mozgásról. A kvantummechanika ezzel

HÁTTÉRGYÁR

szemben azt jelezte, hogy az egyes mennyiségek lehetséges együttes meghatározottságára magának az elméletnek a szerkezete tesz korlátot. Ennek pontos megfogalmazása vezetett az 1927-es felismeréshez.

A korabeli fizikusok emberi kapcsolatai azért is érdekesek, mert a nagy eredmények nem szüntették meg a kétségeket. Bohr és Heisenberg sokat vitatkozott az új elmélet jelentéséről, Schrödinger nem mindenben fogadta el az uralkodóvá váló értelmezést, Einstein pedig alapvető kérdéseket tett fel a teljességéről. Egyikük kételyeit sem helyes úgy bemutatni, mintha a kísérleti eredményeket tagadták volna. Az eltérés inkább arról szólt, mit kell kielégítő magyarázatnak nevezni, milyen helyet foglal el a véletlen a természetben, és lehetséges-e a kvantummechanikánál mélyebb leírás. A XX. századi fizika egyik legtermékenyebb vitája abból keletkezett, hogy minden résztvevő komolyan vette ugyanazokat az adatokból fakadó nehézségeket, de másként ítélte meg a megfelelő megoldást.

HÁTTÉRGYÁR

7. A határozatlansági reláció születése

1927-ben Heisenberg megfogalmazta azt az összefüggést, amelyről a neve a tudományon kívül is ismertté vált. A határozatlansági reláció lényege, hogy bizonyos fizikai mennyiségpárok, például a hely és a lendület, egy kvantumállapotban nem lehetnek egyszerre tetszőlegesen élesen meghatározottak. A szokásos alak szerint a hely szórásának és a lendület szórásának szorzata legalább a redukált Planck-állandó felével egyenlő. Ez a kijelentés nem a műszerek általános gyatraságát fejezi ki, és nem azt jelenti, hogy egy ügyesebb megfigyelő elől a természet szándékosan elrejtené adatait. A kvantummechanikai állapot matematikai szerkezete teszi lehetetlenné, hogy a két mennyiség eloszlását egyszerre tetszőleges mértékben összeszorítsuk.

A mindennapi tapasztalat szempontjából az állítás idegen, mert a nagy testek esetében a kvantumos korlát elhanyagolható. Egy labda helyét és mozgását igen nagy pontossággal tudjuk követni, és a mérés hibáját szinte mindig gyakorlati akadálynak tekinthetjük. Az elektron esetében azonban a Planck-állandó jelentős szerepet kap.

HÁTTÉRGYÁR

Ha a helyet nagy pontossággal meghatározó állapotot készítünk elő, a lendülethez szélesebb lehetséges értéktartomány társul. Ha a lendületet szűk tartományhoz kötjük, a térbeli eloszlás válik szélesebbé. Az egyenlőtlenség pontosan számolható, és a különböző kísérleti eljárásokkal összhangban áll. Nincs szükség arra, hogy valamiféle általános filozófiai ködbe burkoljuk: az összefüggés szigorú fizikai állítás, amelynek jelentése a megfelelő mennyiségek meghatározásából következik.

Heisenberg eredeti magyarázatai között fontos szerepet kapott a gondolatkísérlet, amelyben gamma-sugárzással próbáljuk megfigyelni egy elektron helyét. A rövidebb hullámhosszú fény elvileg finomabb térbeli részletek feloldását teszi lehetővé, ugyanakkor a fény és az elektron kölcsönhatása a lendületre is hatással van. Ez a mikroszkópos kép jól érzékelteti, hogy a mérés nem független az atomvilágtól. Mégis óvatosan kell vele bánni, mert a reláció általános igazolása nem vezethető vissza pusztán arra, hogy egy foton véletlenszerűen meglök egy részecskét. A modern megfogalmazás az állapotokhoz tartozó matematikai mennyiségek, az operátorok tulajdonságaiból indul ki. A szemléletes kép történetileg tanulságos, de nem helyettesíti a tágabb elméleti összefüggést.

HÁTTÉRGYÁR

A mátrixmechanikában a hely és a lendület operátorai meghatározott kommutációs összefüggésnek tesznek eleget. Ennek a nem felcserélhető műveleti rendnek a következménye, hogy az egyidejű éles meghatározottságukra korlát adódik. A matematikai állítás a bizonytalanságot számszerűvé teszi: nem elég azt mondani, hogy valamit nehéz tudni, meg lehet adni, a két szórás szorzatának legalább mekkorának kell lennie. A klasszikus mechanikában egy pontszerű test pillanatnyi helye és lendülete elvileg egyaránt megadható; a kvantummechanikai leírásban az állapotot másféle objektum reprezentálja. Az 1927-es felismerés ezért visszamenőleg is megvilágította az 1925-ös matematikai forradalom mélyebb értelmét.

A fogalom magyar elnevezése körül is érdemes rendet tenni. A szakirodalomban a határozatlansági reláció elnevezés fejezi ki legpontosabban azt, hogy a kvantumállapotban szereplő mennyiségek eloszlásáról van szó; a bizonytalansági reláció szintén elterjedt, de a hétköznapi nyelvben könnyen összekeveredik a tudatlanság vagy pontatlan műszer miatti bizonytalansággal. A könyv címében szereplő bizonytalanság szándékosan tágabb kifejezés: Heisenberg tudományos felfedezését és életének

HÁTTÉRGYÁR

történeti, erkölcsi kérdéseit kapcsolja össze. A két jelentést azonban nem szabad azonosítani. A fizikai törvényből semmiféle közvetlen felmentés vagy ítélet nem következik egy ember politikai döntéseiről.

Bohr az elmélet értelmezésében a komplementaritás fogalmát dolgozta ki. Ennek központi gondolata szerint bizonyos kísérleti elrendezések más-más, egymást kiegészítő leírásokat tesznek szükségessé; az egyes leírások nem egyesíthetők egyszerűen a klasszikus kép egészévé. Heisenberg eredeti megfogalmazása és Bohr értelmezése nem minden ponton esett egybe. A két fizikus vitái különösen a mérés szerepéről és a gondolatkísérletek következtetéseiről szóltak. Éppen ezért pontatlan volna valamiféle teljesen egységes, egyszer s mindenkorra rögzített koppenhágai tanítást visszavetíteni 1927-re. Az elmélet értelmezése fokozatosan alakult ki, különböző hangsúlyokkal és később is élő ellentétekkel.

Az 1927-es munka filozófiai következményei messzire nyúltak. A determinisztikus okság kérdése, a megfigyelő szerepe, a tudományos fogalmak érvényességi köre és a mérési eredmények értelmezése mind új fényt kaptak. Mégsem vezethető le belőle, hogy az emberi döntések szükségszerűen kiszámíthatatlanok, vagy hogy a

történelemben ne volnának megismerhető oksági kapcsolatok. Az efféle népszerű átvitelek gyakran többet mondanak a huszadik századi kultúra szorongásairól, mint a kvantummechanika törvényeiről. Heisenberg maga is sokat írt a modern fizika filozófiai jelentőségéről, de az életrajzíró feladata különbséget tenni a pontosan igazolt természettudományos eredmény és a hozzá kapcsolódó tágabb világnézeti értelmezések között.

A reláció századik évfordulója 2027-ben újra alkalmat ad arra, hogy Heisenberg tudományos örökségét a népszerű félreértésektől megtisztítva mutassuk be. A mai kvantumtechnológiák fejlődése szempontjából is alapvető, hogy a kvantumos állapotok mérésének és előkészítésének határait megértsük. Ez azonban nem jelenti, hogy minden új technikai eredményt közvetlenül Heisenberg egyetlen 1927-es cikkéből kellene levezetni. A kvantumelmélet sok nemzedék közös munkájává vált, és a mai alkalmazások mögött egész tudományágak állnak. A centenárium történeti jelentősége éppen ezért abban van, hogy felidézi a fordulat kezdetét, miközben érzékelteti a folytatás gazdagságát.

HÁTTÉRGYÁR

8. Az Einstein-vita és a fizika értelmezése

Az 1927-es brüsszeli Solvay-konferenciát a kvantumelmélet történetének egyik emblematikus találkozójaként tartják számon. A résztvevők között a kor több vezető fizikusa jelen volt, és a fényről, az elektronokról, valamint az új mechanika értelmezéséről heves eszmecsere folyt. A későbbi elbeszélések gyakran úgy állítják szembe a feleket, mintha Einstein a régi fizika képviselőjeként kétségbeesetten védekezett volna a fiatal kvantumfizikusokkal szemben. Ez a kép aligha méltányos. Einstein a kvantumelmélet egyik megteremtője volt, és kifogásai nem a kísérletek semmibevételéből, hanem az elmélet mélyebb szerkezetének vizsgálatából fakadtak. Úgy vélte, egy sikeres számítási módszer mellett is fel kell tenni a kérdést, hogy a természet leírása teljes-e.

Bohr és Einstein vitájában a gondolatkísérletek különös jelentőséget kaptak. Einstein olyan elképzelt mérési helyzeteket vázolt, amelyekről azt remélte, hogy próbára teszik a kvantumelmélet korlátait. Bohr alaposan elemezte a lehetséges elrendezéseket, és azt igyekezett megmutatni, hogy a mérés feltételeinek következetes

HÁTTÉRGYÁR

figyelembevétele megőrzi a kvantummechanikai összefüggéseket. Az eszmecserék egy része csak visszaemlékezésekből ismerhető, így a pontos sorrend és a ténylegesen elhangzott mondatok nem mindig rekonstruálhatók. Az utókor számára inkább az érvek fejlődése a fontos: a vita arra kényszerítette az elmélet híveit, hogy saját megfogalmazásaikat szigorúbban ellenőrizzék, és az ellenzőket is pontosabb alternatívák felé terelte.

Heisenberg az Einstein-vita idején már jelentős tudományos tekintélyre tett szert, noha még fiatal ember volt. Az új mechanika egyik megalkotójaként nem maradhatott kívül az értelmezési kérdéseken. Számára alapvető jelentőségű volt, hogy a fizikai állításnak kísérleti jelentése legyen, Einstein azonban azt hangsúlyozta, hogy a megfigyelhető eredményekből kiinduló elmélet sem feltétlenül mondja ki mindazt, amit a valóság szerkezetéről szeretnénk tudni. A vita két gondolkodási hagyomány találkozása is volt. Az egyik az adott kísérleti adatokból kiindulva szigorú, működő elméletet kívánt felépíteni; a másik azt vizsgálta, megenged-e az elmélet teljes, okságilag értelmezhető világképet.

HÁTTÉRGYÁR

A „nem játszik kockát” fordulat, amelyet Einstein nevével szoktak összekapcsolni, sokszor önmagában kerül elő. Pedig az eredeti nézetkülönbség lényegét nem ragadhatjuk meg egyetlen jól hangzó mondattal. Einstein nem utasította el a valószínűségszámítás használatát a fizikában; arra kérdezett rá, vajon a valószínűségi szabályok a világ teljes leírását adják-e, vagy egy mélyebb összefüggés felszíni megnyilvánulásai. Bohr más szempontból gondolta kielégítőnek az elméletet, mert számára a fizikában alkalmazott fogalmakat a kísérleti elrendezésekhez kellett kötni. Heisenberg mindkét megközelítésből tanult, bár saját elmélete iránti elkötelezettsége miatt sokszor Bohr álláspontjához állt közelebb.

A későbbi évtizedek megmutatták, milyen termékenynek bizonyult Einstein kétely e. Az 1935-ös Einstein–Podolsky–Rosen-tanulmány új módon vetette fel a kvantummechanika teljességének és a távolban elhelyezkedő rendszerek kapcsolatának problémáját. A gondolatmenetből sokkal később új kísérleti kérdések születtek, amelyek a kvantumösszefonódás modern vizsgálatához vezettek. Az 1920-as évek vitáit tehát hiba volna a győztesek és vesztesek egyszerű történeteként kezelni. Az alapvető matematikai elmélet rendkívüli

HÁTTÉRGYÁR

sikere nem tette fölöslegessé annak pontos vizsgálatát, milyen megfigyelések következnek belőle, és milyen alternatív értelmezések képzelhetők el.

A személyes tekintély kérdése itt is összetett. Einstein már életében világhírű volt, Heisenberg viszont még pályája emelkedő szakaszában járt. A fiatal fizikus számára különös élmény lehetett, hogy saját munkája egy korábban megkérdőjelezhetetlennek látszó nemzedéki és elméleti tekintéllyel szemben is megállja a helyét. Ugyanakkor a személyes tisztelet és a tudományos nézetkülönbség nem zárták ki egymást. A korai kvantumelmélet történetében gyakran előfordult, hogy egy kutató valaki más eredményét kivételesnek tartotta, de az abból levont filozófiai következtetéseit vitatta. Ennek a magatartásnak az emléke különösen fontos Heisenberg későbbi életrajzában, amikor a politikai környezet már az együttműködés és a lojalitás egészen más kérdéseit vetette fel.

HÁTTÉRGYÁR

9. Lipcse: a professzor és iskolája

Heisenberg 1927-ben, mindössze huszonöt évesen kapott professzori kinevezést a lipcsei egyetemen. A gyors előmenetel a korszakban is feltűnő volt, és a frissen kialakult kvantummechanika jelentőségét jelezte. Egy ilyen kinevezés azonban új feladatokat hozott. Az elméleti kutatónak immár előadásokat kellett tartania, hallgatókat vezetnie, tudományos irányokat kijelölnie, és intézményi felelősséget vállalnia. A fiatal professzor egyszerre lett saját felfedezéseinek gondozója és olyan műhely vezetője, amelyben másoknak kellett eredményeket elérniük. A tudomány személyes oldalát a korábbi években elsősorban tanítványként tapasztalta meg; most megfordult a helyzete, és neki kellett továbbadnia azt a szabadságot, amelyet mestereitől kapott.

A lipcsei években több olyan fiatal fizikus dolgozott Heisenberg környezetében, aki később önálló tudományos pályát futott be. Az intézet nem a tekintélyelvű oktatás egyszerű mintáját követte. A közös szemináriumokon a bizonytalanságok feltárása és az új problémák megfogalmazása legalább akkora szerepet

HÁTTÉRGYÁR

kapott, mint az ismert eredmények bemutatása. Heisenbergnek saját kutatásait is folytatnia kellett: a kvantummechanika kezdeti sikerei után újabb területek, köztük a mágnesség, a szilárdtestfizika és a részecskék közötti kölcsönhatások kerültek előtérbe. A húszas évek második felétől a modern fizika egyre inkább olyan átfogó elméleti közeggé vált, amelyben egyetlen alapelv sok különböző jelenséget világíthatott meg.

A tudományos siker társadalmi tekintélyt is hozott. A lipcsei professzori szék, a nemzetközi meghívások és a gyorsan növekvő publikációs lista olyan életpályát rajzoltak ki, amelyről néhány évvel korábban aligha lehetett biztosan álmodni. Heisenberg ugyanakkor sok korábbi szokását megőrizte: továbbra is fontosnak tartotta a zenét, a kirándulásokat és a személyes baráti kapcsolatokat. A klasszikus német műveltséghez való kötődése nem halványult el attól, hogy a fizikai elméletben radikális újítóvá vált. Ez az ellentmondás csak első pillantásra szokatlan. A tudományos forradalmakban gyakran vesznek részt olyan kutatók, akik politikai és kulturális életük más területein a folytonosságot értékelik a legnagyobbra.

A harmincas évek elejére a gazdasági világválság súlyos társadalmi következményei Németországban is

érződtek. A tömeges munkanélküliség és a köztársaság politikai válsága az egyetemek környékén is radikalizálódást hozott. A tudományos intézetek belső életében ekkor még sok minden őrizte a húszas évek nemzetközi együttműködésének hagyományait, a külvilág azonban gyorsan változott. Heisenberg professzorként olyan állam polgára volt, amelyben egyre kevésbé lehetett biztosra venni a jogrend és az egyetemi autonómia fennmaradását. Az elkövetkező években a tudományos kinevezéshez kapcsolódó kötelességek már nemcsak adminisztratív, hanem súlyos erkölcsi jelentést is kaptak.

A lipcsei műhely érdemeit csak akkor érthetjük meg, ha nem tekintjük az 1925-ös felfedezést egyetlen lezárt csúcspontnak. A kvantummechanika gyakorlati alkalmazásai és elméleti továbbfejlesztése folyamatos munkát igényelt. Az új fogalmakat az anyag szerkezetének tanulmányozására, különböző fizikai állapotok elemzésére és később a nukleáris jelenségek értelmezésére alkalmazták. A tanítási tevékenység maga is a kutatás egyik formája lett: amikor a professzor egy problémát világos rendben akart előadni, sokszor új kérdésekre bukkant, a hallgatók pedig olyan részletekre mutathattak rá, amelyek mellett a vezető kutató elsiklott.

HÁTTÉRGYÁR

A műhely jelentősége a következő nemzedékek felkészítésében is megmutatkozott.

HÁTTÉRGYÁR

10. A Nobel-díj és a német tudomány válsága

A Svéd Királyi Tudományos Akadémia Heisenbergnek ítélte az 1932. évi fizikai Nobel-díjat, amelyet 1933-ban adtak át. Ez a pontos megkülönböztetés fontos, mert a díj és a politikai fordulat a történelmi emlékezetben gyakran egyetlen évbe olvad. A kitüntetés az új kvantummechanika megteremtésében játszott szerepét ismerte el, és megerősítette helyét a modern fizika vezető alakjai között. A díj körüli elismerés azonban nem jelentette, hogy a tudományos közösség minden tagja ugyanúgy értékelte volna a különböző közreműködők munkáját. Born, Jordan és más kutatók nélkül az elmélet története egészen másként alakult volna; a Nobel-díjak szükségképpen személyekhez és meghatározott eredményekhez kötődnek, miközben a felfedezés általában nagyobb hálózatban születik.

1933 elején Adolf Hitler hatalomra jutásával gyökeresen átalakult a német állam. A diktatúra megszilárdulása politikai erőszakot, jogfosztást és az állami intézmények gyors átalakítását hozta. Az egyetemek sem maradtak kívül ezen a folyamaton. A zsidó származású vagy politikailag nemkívánatos oktatók

és kutatók állásukat veszítették el, sokan emigrációba kényszerültek, és a korábban nemzetközileg nyitott tudományos közeg súlyos veszteségeket szenvedett. A náci fajelmélet intézményes alkalmazása különösen pusztító volt olyan kutatási területeken, ahol német és zsidó származású tudósok korábban évtizedeken át együtt dolgoztak. A politikai rendszer a tudományos minőséget származási és ideológiai feltételek alá rendelte.

Heisenberg maga nem lépett be a náci pártba, és több alkalommal védelmébe vette a modern elméleti fizikát a politikai támadásokkal szemben. Mindez lényeges tény, de nem oldja meg a magatartásával kapcsolatos kérdéseket. Németországban maradt, tovább tanított, és a tudományos intézmények fennmaradásának ügyét egyre inkább a politikai rendszer keretei között próbálta szolgálni. A választása mögött több indíték állhatott: a hazához való kötődés, a német tudományos hagyomány iránti felelősség, saját intézetének és tanítványainak védelme, továbbá az a meggyőződés, hogy a rendszer politikai jellege nem teszi lehetetlenné a tisztességes szakmai munkát. Az indítékokat részben saját későbbi nyilatkozataiból ismerjük, amelyeknek értelmezése óvatosságot kíván.

HÁTTÉRGYÁR

Az elméleti fizikával szembeni náci támadásoknak különös történeti iróniája volt. Az a kvantummechanika, amelyet Heisenberg és munkatársai a húszas években megteremtettek, a korszerű természettudomány egyik legpontosabb eszközévé vált. A politikai agitáció mégis megpróbálta a relativitáselméletet és a kvantumfizikát idegen, „zsidó” gondolkodásként megbélyegezni. Philipp Lenard és Johannes Stark a „német fizika” jelszavával a modern elméleti irányzatok ellen léptek fel. Az antiszemita küzdelemhez szakmai rivalizálás, tudománypolitikai ambíció és intézményi érdekek is kapcsolódtak. Heisenberg vitái ezzel az irányzattal valósak voltak, de a modern fizika védelméből nem következik automatikusan az egész diktatúrával szembeni politikai ellenállás.

A német tudományos életben maradni sokféle magatartást lehetett jelenteni. Egyes kutatók nyíltan csatlakoztak a rendszerhez, mások hallgattak, néhányan elszántan szembefordultak vele, sokan pedig kompromisszumok sorozatát kötötték meg. Az utólagos ítélethez ezért a konkrét döntések kronológiáját kell felállítani. Mikor és milyen intézményes üldözés zajlott? Melyik döntésről mennyit tudhatott az érintett? Milyen lehetőségeket mérlegelt, és milyen következménnyel járt

a választása mások számára? Ezeket a kérdéseket nem pótolja az a kijelentés, hogy Heisenberg hazafias ember volt, ahogyan az sem, hogy a tudományos pályája folytatódott. A háborús uránkutatás történetének megértéséhez az 1933 után kialakult kompromisszumokat és intézményi kötődéseket egyaránt figyelembe kell venni.

A Nobel-díj így különös határkőnek bizonyult Heisenberg életében. Tudományos értelemben egy páratlanul sikeres korszak elismerése volt; történelmi értelemben közvetlenül egy olyan időszak kezdetéhez kapcsolódott, amelyben a szakmai tekintély és az erkölcsi felelősség új módon ütközött össze. Az a világszintű tudományos közösség, amely néhány évvel korábban még közös nyelvet adott számára, lassan szétszakadt. Az emigráció, a háborús készülődés és a bizalmatlanság különböző oldalra sodorta egykori kollégáit. Heisenberg életútja ettől kezdve nem választható el Németország politikai történetétől, és a későbbi önigazolások értelmezéséhez is tudnunk kell, milyen döntések előzték meg a világháborút.

HÁTTÉRGYÁR

11. A diktatúra árnyékában: a német fizika védelme

1933 után Heisenbergnek azzal a felismeréssel kellett együtt élnie, hogy nemzetközi tekintélye hazájában nem jelent feltétlen védelmet. A lipcsei professzor nem volt a nemzetiszocialista mozgalom embere, munkáját azonban olyan állami intézményrendszerben végezte, amely az egyetemi alkalmazottak kinevezését, előmenetelét és megszólalási lehetőségeit politikai ellenőrzés alá vonta. A helyzet azután vált igazán veszélyessé, hogy a modern elméleti fizika körüli szakmai ellentéteket a rendszer hívei ideológiai küzdelemmé alakították. Einstein neve a náci propagandában a gyűlölet tárgyává vált, és a relativitáselmélet támadásaival együtt a kvantumfizika művelőit is egyre erősebb nyomás érte. Heisenberg megpróbálta megőrizni a tudományos teljesítmény elsőbbségét az előítéletekkel szemben. Hogy e védekezés politikailag milyen messzire terjedt, egészen más kérdés, mint hogy szakmailag miért volt igaza.

A „német fizika” köré csoportosuló mozgalomban Philipp Lenard és Johannes Stark játszott vezető szerepet. Mindketten jelentős korábbi tudományos munkássággal rendelkeztek, és Nobel-díjuk tekintélyét

HÁTTÉRGYÁR

felhasználva az elméleti fizika „idegen” irányzatai ellen fordultak. A vita tárgya látszólag módszertani volt: mennyi értéke van az elvont matematikai szerkezeteknek a közvetlenül érzékelhető tapasztalathoz képest? Az évek során azonban világossá vált, hogy az érvelés mögött faji és politikai szempontok működnek. Egy elméletet eredete vagy megalkotójának származása alapján akartak elfogadhatónak vagy elfogadhatatlannak nyilvánítani. A fizika történetében a szigorú ellenőrizhetőség követelménye ezért különös jelentőséget kapott: ugyanazokat a kísérleti adatokat kellett megmagyaráznia a németnek, a dánnak és az amerikainak is. Az atomok tulajdonságai nem igazodtak semmilyen politikai programhoz.

Heisenberg a korábbi években joggal bízhatott volna abban, hogy tudományos érdemei megvédik. A tudományos elismerés és az állami hatalom kapcsolata azonban a diktatúrában más szabályok szerint alakult. A támadások legélesebb hulláma 1937-ben érte el, amikor Stark a Das Schwarze Korps című SS-lapban „fehér zsidóként” bélyegezte meg. A vád egyik lényege az volt, hogy egy nem zsidó származású tudós a modern fizika védelmével szerintük a nemzetiszocialista világképpel szemben álló gondolkodást szolgálja. Ez a kifejezés a kor

HÁTTÉRGYÁR

politikai nyelvének fenyegető jelzése volt, ezért az ügy túlmutatott az egyetemi sértegetésen. Heisenberg szakmai pályája, sőt bizonyos körülmények között személyes biztonsága is veszélybe kerülhetett. Válasza mégsem az ellenzéki politikai fellépés, hanem a hatalom belső csatornáin keresztül történő védekezés lett.

Az ügy végül Heinrich Himmler közreműködésével rendeződött. Heisenberg családi kapcsolatai lehetővé tették, hogy panaszai eljussanak az SS vezetőjéhez, és hosszú vizsgálat után biztosítékot kapott arra, hogy kutatói munkáját folytathatja. Ennek a történetnek a megítélésekor az okokat és a következményeket külön kell választani. Az, hogy valaki egy jogtalanul ellene indított támadásból a rendelkezésére álló befolyásos kapcsolatok útján próbál kikerülni, érthető önvédelmi stratégia lehet. Ugyanakkor a Himmlerhez fordulás azt is jelezte, milyen messzire jutott a német tudományos világ intézményi alárendeltsége: egy fizikai elmélet elfogadhatóságának kérdésében végső soron a terrorapparátus egyik vezetője dönthetett. Heisenberg helyzete javult, miközben a rendszer alapvető erőszakossága és a tudósok tömeges kirekesztése változatlan maradt.

HÁTTÉRGYÁR

Az emigráció lehetősége nem puszta elvont választásként jelent meg. Amerikai és európai kollégák biztatták a külföldi munkavállalásra, és az 1930-as évek végén olyan légkör alakult ki, amelyben a távozás sokak szemében egyre indokoltabbnak látszott. Aki kiment, nem kizárólag állást változtatott: családi, nyelvi, kulturális és szakmai kapcsolatok egész hálózatát szakította meg, gyakran bizonytalan jövőért cserébe. Heisenberg Németország mellett döntött. Indítékai közt fontos volt a német kultúrához való kötődése és az az elképzelés, hogy a diktatúra elmúltával is szükség lesz működő kutatási intézményekre. Utólag nehéz megmondani, mit tartott a rendszer jövőjéről valószínűnek, különösen mivel későbbi önértelmezése több alkalommal saját döntéseit kedvezőbb fénybe állította. A történelmi jelentőséget azonban nem csökkenti a tény: a maradás a későbbi háborús együttműködés intézményi előfeltétele lett.

Az a kérdés, hogy a tudomány megtarthatja-e önállóságát egy diktatúrában, Heisenberg számára a harmincas években még elsősorban a szakmai munka szabadságát jelentette. Az intézet működése, a diákok képzése és a fizikatanítás folytonossága olyan értéknek tűnt, amelyet a politikai romlás ellenére is védeni kell.

HÁTTÉRGYÁR

Ebben volt igazság, de a mérleg másik serpenyőjében ott álltak azok a kutatók, akik származásuk vagy meggyőződésük miatt már semmilyen kompromisszum útján nem maradhattak. Aki az intézményes folytonosságot választotta, az akkor is részese lett az új rend mindennapjainak, ha közben nem osztotta annak minden elvét. Ebből nem következik, hogy Heisenberg náci ideológus lett volna; abból viszont, hogy nem volt az, még nem lehet arra következtetni, hogy későbbi tevékenysége mentesült a politikai felelősség alól. Az életrajz egyik legnehezebb problémája pontosan e két állítás együttes érvényessége.

HÁTTÉRGYÁR

12. A maghasadás és az uránkutatás kezdete

1938 végén Otto Hahn és Fritz Strassmann berlini kísérletei olyan eredményhez vezettek, amely a magfizika addigi képét alapvetően megváltoztatta. Az urán neutronbesugárzásának termékei között báriumot azonosítottak, és a felismerés a korábbi elképzelésekkel nehezen volt összeegyeztethető. Lise Meitner, aki a zsidóüldözés miatt korábban elmenekült Németországból, unokaöccsével, Otto Frisch-sel értelmezte a jelenséget: a nehéz atommag két kisebb részre hasadhat. Az új magyarázat az energiafelszabadulást Einstein tömeg és energia kapcsolatára építve tette érthetővé. A folyamat megfogalmazása és ellenőrzése több kutató közös eredménye volt, és a tudományos értesülések a nemzetközi fizikusvilágban rendkívül gyorsan terjedtek. Ez különösen jelentős körülmény, hiszen a felfedezés idején az európai politikai viszonyok már a háború felé haladtak.

A maghasadás felfedezése még nem jelentett azonnali kész tervet atombomba előállítására. A felszabaduló energia nagyságrendje ígéretes volt, de ahhoz, hogy

HÁTTÉRGYÁR

egyetlen atommagban történő eseményből nagy léptékű reakció legyen, meg kellett érteni a neutronok szerepét és veszteségeit. Ha a hasadás során további neutronok keletkeznek, ezek újabb magokat hasíthatnak szét, és megfelelő körülmények között láncreakció indulhat. A reakció fenntartásához azonban megfelelő anyagösszetétel, geometria és neutronháztartás szükséges. A hasadóképes urán-235 ritka izotópja külön problémát jelentett, mert a természetes uránban sokkal nagyobb mennyiségben található urán-238-tól kémiai módszerekkel nem lehet egyszerűen elválasztani. A tudományos lehetőség és a megvalósítás közötti távolság tehát óriásinak bizonyult, és 1939 elején kevesen tudhatták, milyen gyorsan fog ez a távolság lerövidülni.

Németországban az első uránkutatási kezdeményezések már 1939 tavaszán megjelentek, a háború kitörése után pedig a hadsereg fegyverügyi hivatala szervezett programot indított. A kutatók egy része közvetlen behívással vagy állami megbízással kapcsolódott be a munkába. A később Uránklubként emlegetett közeg nem egyetlen, fegyelmezetten irányított laboratóriumot jelentett, hanem több intézet és kutatócsoport változó együttműködését. A feladatok közt szerepelt a neutronfizika mérése, a lehetséges

HÁTTÉRGYÁR

moderátorok vizsgálata, az izotópszétválasztás és egy működő reaktor feltételeinek keresése. A német tudomány már rendelkezett komoly elméleti és kísérleti hagyományokkal, az új feladat azonban ipari léptékű szervezést is követelt. A háború éveiben éppen a kutatói teljesítmény, az állami erőforrások és a vállalt műszaki célok kapcsolata vált állandó viták tárgyává.

Heisenberg 1939 őszétől a program meghatározó elméleti szereplői közé tartozott. A láncreakció vizsgálatában azt a kérdést igyekezett tisztázni, milyen módon tartható fenn a folyamat természetes urán felhasználásával. Egy ilyen berendezésben a neutronok lassítása döntő lehet, mert a megfelelő energiájú neutronok nagyobb valószínűséggel idézhetnek elő további hasadásokat. A nehézvíz és a grafit különböző okokból kínálkozott moderátorként. A választás nem egyszerű technikai részlet volt: az anyagigény és a beszerzési lehetőségek évekig meghatározták a projekt haladását. A különböző laboratóriumok mérései, a grafit tisztaságával kapcsolatos problémák és a rendelkezésre álló nehézvíz korlátozott mennyisége együttesen formálták a német kísérletek irányát. A később sokat emlegetett tévedéseket csak a korabeli adatokkal együtt lehet tisztességesen megítélni.

HÁTTÉRGYÁR

A kutató számára a reaktor és a bomba elválasztása ma egyértelműbb, mint a maghasadás utáni első években volt. A szabályozható láncreakciót fenntartó reaktor más feltételekkel működik, mint a nagyon rövid idő alatt nagymértékű energiát felszabadító nukleáris robbanószerkezet. A két út mégis összekapcsolódott, mert egy működő reaktor olyan új hasadóanyagot is előállíthat, amely később fegyver alapjául szolgálhat. Carl Friedrich von Weizsäcker és más német fizikusok már a háború korai szakaszában figyeltek az uránból létrejövő nehezebb elemekre. Történeti szempontból ezért pontatlan lenne azt állítani, hogy az egész program kizárólag békés energiatermelési célból folyt volna. Ugyanakkor az sem volna helyes, ha a teljes uránkutatást egy egységesen megtervezett és nagy erőkkel végrehajtott bombagyártási programmal azonosítanánk. A célok és az erőforrások idővel változtak.

A német és a későbbi amerikai fejlesztés közti különbség már az indulásnál szervezeti természetű volt. Az Amerikai Egyesült Államokban és Nagy-Britanniában az atomfegyver lehetőségét vizsgáló kutatások fokozatosan olyan politikai és katonai jelentőséget kaptak, amely végül rendkívüli ipari beruházásokat tett lehetővé. Németországban a vezetés hosszú ideig több

más katonai fejlesztést részesített előnyben, miközben a kutatócsoportok egymással is vetélkedtek anyagokért, emberekért és intézményi támogatásért. Az összehasonlítás azonban csak akkor korrekt, ha nem vetítjük vissza 1939-re az 1945-ben már ismert eredményeket. Egyetlen kormányzat sem láthatta előre teljes bizonyossággal, mennyi munka és mennyi idő kell majd a fegyver előállításához. Éppen a bizonytalanságok értelmezése tette a politikai döntéseket döntővé, és jelentős felelősséget helyezett azokra a tudósokra, akik a vezetők elé állították a különböző lehetőségeket.

HÁTTÉRGYÁR

13. Koppenhága 1941: két régi barát elválása

1941 szeptemberében Heisenberg a német megszállás alatt álló Koppenhágába látogatott. A város korábbi tudományos életének egyik meghatározó alakja Niels Bohr volt, akinek intézetében a fiatal német fizikus egykor a legfontosabb szellemi ösztönzéseket kapta. A találkozás mindkettejük életében különös helyet foglal el, mert az addig szoros szakmai és személyes kapcsolatot a háború politikai valósága alapvetően átalakította. Bohr hazája megszállás alatt állt, Heisenberg pedig olyan állam kutatójaként érkezett, amely a megszállást végrehajtotta. Az a közös nyelv, amelyen korábban a fizikáról vitatkoztak, a háborús években már nem garantálhatta a bizalmat. A beszélgetés tartalmát később mindkét fél másként idézte fel, ezért a történésznek különös gonddal kell bánnia az utólag elmondott jelenetekkel.

Heisenberg későbbi értelmezése szerint meg akarta tudni, hogyan gondolkodnak más országok fizikusai a nukleáris fegyver fejlesztésének erkölcsi kérdéséről. Ennek fényében úgy beszélt a látogatásról, mint egyfajta óvatos próbálkozásról, amelynek során az atomkutatók

HÁTTÉRGYÁR

egymás közti megértése mérsékelhette volna a fegyverkezés veszélyét. Bohr fennmaradt, elküldetlen levéltervezetei viszont más hangsúlyokat mutatnak. A dán tudós emlékezetében Heisenberg a német győzelem lehetőségéről és az atomenergia katonai alkalmazásáról is olyan módon beszélt, amely őt felháborította és megriasztotta. A két emlékezet közötti különbség nem oldható fel azzal, hogy valamelyik későbbi elbeszélést automatikusan teljes egészében elfogadjuk. A forráskritika egyik tanulsága itt az, hogy az utólagos védekezés és a korabeli félelem eltérő nyelven beszélhet ugyanarról a találkozásról.

A fennmaradt dokumentumok alapján a beszélgetés pontos mondatait nem lehet helyreállítani. Nem maradt hiteles jegyzőkönyv, és az emlékezések részletei között lényeges ellentmondások vannak. A találkozás körülményei azonban önmagukban is magyarázzák, miért lehetett különösen nehéz a kommunikáció. Egy megszállt országban a házigazdának számolnia kellett a megfigyelés és a megtorlás lehetőségével, a vendég pedig nem tudhatta, mely kijelentéseket értelmezik politikai nyilatkozatként. Bohr a tudomány nemzetközi közösségét képviselte, de ekkor elsősorban olyan dán állampolgár volt, akinek országa elvesztette szabadságát.

HÁTTÉRGYÁR

Heisenberg továbbra is a személyes barátság nyelvén próbálhatott megszólalni, miközben közreműködött a német állam uránkutatásában. E két helyzet egymással nehezen volt összeegyeztethető.

A történet irodalmi és színházi feldolgozásai gyakran egyetlen erkölcsi kérdés köré szervezik a jelenetet: vajon Heisenberg a bombáról akart figyelmeztetni, vagy éppen azt kutatta, meddig jutottak a szövetségesek? A fennmaradt bizonyítékok alapján egyik egyszerű válasz sem tekinthető kétséget kizárónak. Azt azonban tudjuk, hogy a látogatás Bohr számára súlyosan megrendítő volt, és nem hozta vissza a korábbi bizalmas viszonyt. Az 1941-es beszélgetés értelmezésében ezért nemcsak a kimondott szavak feltételezett jelentése számít, hanem a következmény is. A fizikusok közössége a háború során elvesztette azt a magától értetődő lehetőséget, hogy minden lényeges kutatási eredményt nyíltan megosszon. A titoktartás, a katonai szolgálat és a politikai hovatartozás a szakmai barátságokba is belépett.

Bohr helyzetének megváltozása később a szövetséges atomprogram szempontjából is jelentős lett. 1943-ban Dániából Svédországba, onnan pedig Nagy-Britanniába menekült, majd az amerikai atomkutatásban is szerepet vállalt. Heisenberg Németországban maradt, és tovább

dolgozott az uránreaktor feltételein. A két pálya külső körülményei egyre inkább különböztek. Bohr a nukleáris fegyverkezés hosszú távú politikai következményeit is végiggondolta, miközben a szövetséges fejlesztésben közreműködött; Heisenberg saját munkájának lehetőségeit egy vesztes háború felé haladó állam keretei között mérte fel. A háború utáni vitákban később mindkettőjük magatartását egyszerű erkölcsi képletté próbálták alakítani. A források inkább arról tanúskodnak, hogy az elméleti fizika legnagyobb alakjai is különböző történeti helyzetben, részleges információk birtokában hozták meg döntéseiket.

A koppenhágai találkozás tanulságát az életrajzban nem szükséges egy kitalált drámai párbeszéddel megvilágítani. Elegendő felidézni azokat a körülményeket, amelyeket mindkét fél ismert. Harminc évvel korábban a fiatal európai tudomány nemzedékei még nagyjából akadálytalanul járhattak egyetemtől egyetemig; 1941-ben ugyanaz az útvonal egy megszálló hatalom képviselőjének útját jelentette. Az atomfizika belső kérdései a politikai hatalom és az emberek életének kérdéseivé váltak. Ami az egyik tudósnak gondolatkísérletként vagy elvi aggályként jelent meg, a másik számára fenyegető katonai program lehetőségét

HÁTTÉRGYÁR

jelenthette. A kapcsolat megszakadása ennek a történelmi változásnak személyes bizonyítéka lett.

HÁTTÉRGYÁR

14. Versenyfutás nélkül? Az 1942-es döntések

1942 a német uránprogram történetében fordulópontnak számít, de nem azért, mert egyetlen napon minden szereplő azonos módon döntött volna. A korai katonai érdeklődést fokozatosan felváltotta egy olyan kutatás finanszírozása, amelynek rövid távú fegyveres eredményét már nem tartották valószínűnek. A folyamat egyik jelképes eseménye a júniusi berlini tanácskozás, amelyen Albert Speer fegyverkezési miniszter és magas rangú katonai tisztviselők tájékozódtak az atomenergia hasznosításának lehetőségeiről. Heisenberg részt vett a szakmai tájékoztatásban, és a politikai vezetők számára döntő jelentőségű volt, milyen időtávot és milyen erőforrásigényt jeleznek a fizikusok. A háború közepén a német hadigazdaság más fejlesztésekre is óriási igényt támasztott. Egy bizonytalan kimenetelű, sokéves program előterjesztéséhez rendkívül meggyőző tudományos és szervezési érvelésre lett volna szükség.

A program valódi céljairól később eltérő történetek terjedtek el. Heisenberg háború utáni megszólalásaiban hangsúlyozta, hogy a rendelkezésre álló erőforrások nem

HÁTTÉRGYÁR

tették lehetővé az atombomba időben történő elkészítését, így a kutatások lényegében a reaktor létrehozására összpontosítottak. Ez a leírás részben megfelel az intézményi és technikai történéseknek, de kérdéses, mennyiben írja le pontosan az 1939 és 1942 közötti elképzeléseket is. A bombával kapcsolatos lehetőségeket ugyanis vizsgálták, és a reaktorprogramnak is lehettek katonai következményei. A történész ezért nem fogadhatja el kritikátlanul azt a későbbi választóvonalat, amely szerint a német tudósok eleve csak békés céllal dolgoztak, szemben az amerikaiakkal. A kutatás iránya és a kutatás erkölcsi célja két eltérő kérdés.

Thomas Powers a háborús magatartás elemzésében jelentős szerepet tulajdonít Heisenberg óvatosságának és annak a lehetőségnek, hogy a tudós tudatosan nem törekedett gyors bombafejlesztésre. Paul Lawrence Rose ezzel szemben élesen bírálja a későbbi önigazoló elbeszéléseket, és nagyobb súllyal tárgyalja Heisenberg háborús számításainak, illetve elképzeléseinek korlátait. A két álláspont között nem az a kérdés, hogy voltak-e kísérletek, jelentések és vezetői döntések; azok létezése dokumentálható. A vitát az okozza, hogy a tudósok milyen szándékkal dolgoztak, mennyit értettek a

HÁTTÉRGYÁR

bombához szükséges fizikai és műszaki feltételekből, és pontosan mi magyarázza a projekt kudarcát. Az eltérő értelmezések egymás mellé helyezése segít megérteni, hogy ugyanazon dokumentum különböző összefüggésekben egészen más jelentést kaphat.

A kritikus tömeg kérdése e vita egyik központi eleme. Egy hasadóanyag-darab akkor képes meghatározott feltételek mellett önfenntartó gyors láncreakcióra, ha a neutronok vesztesége és utánpótlása megfelelő arányt alkot. A szükséges anyagmennyiség becslése a neutronok viselkedésének pontos ismeretét feltételezi, és a háború első éveiben a rendelkezésre álló adatok bizonytalanok voltak. A Farm Hallban később rögzített beszélgetések alapján több történész arra következtetett, hogy Heisenberg a háború alatt nem rendelkezett a bomba méretének következetesen helyes és részletes számításával. Más kutatók arra figyelmeztettek, hogy a későbbi beszélgetések önmagukban nem tükrözik az összes korábbi elméleti tudást, és a kutatók szándékait különösen nehéz ezekből visszafejteni. A fennmaradt technikai anyagok összevetése ezért elengedhetetlen.

A német program intézményi korlátainak értékelésénél fontos különbséget tenni a lehetetlen és a meg nem valósított között. A legnagyobb akadályt nem

egyetlen téves feltevés jelentette: a szétaprózott szervezeti keretek, a laboratóriumi anyaghiány, a nehézvíz beszerzésének nehézségei, a hadigazdaság változó prioritásai és a későbbi bombázások együttesen lassították a munkát. A szövetséges Manhattan-tervvel összevetve a német erőfeszítés nagyságrendekkel kisebb ipari hátteret kapott. Ez azonban nem menti fel automatikusan a program szereplőit, és nem bizonyítja azt sem, hogy egy korábbi döntési pillanatban semmilyen más pálya nem lett volna elképzelhető. A történelmi magyarázatnak egyszerre kell számot adnia a tudományos korlátokról, az intézményes mulasztásokról és az állami döntések logikájáról.

Speer későbbi emlékiratait ugyanilyen körültekintéssel kell kezelni. A háborús vezetők közül sokan igyekeztek saját döntéseiket józan mérlegelés eredményeként bemutatni, és ez a törekvés az uránkutatásról szóló elbeszélésekben is megjelent. A döntés idején a hadvezetés számára a gyorsan felhasználható fegyverek tűntek fontosabbnak, ezért a sokéves bizonytalanságot jelentő kutatás korlátozott támogatást kapott. Visszatekintve könnyű ezt elkerülhetetlennek látni, de egy történelmi szereplő tudása és a későbbi kutató ismeretei között nagy

HÁTTÉRGYÁR

különbség van. Heisenberg tudományos tekintélye e helyzetben egyszerre lehetett előny és veszély: ha józanul korlátozta a várakozásokat, a vezetés mérsékelhette a programot; ha tévesen ítélte meg a feladat nehézségét, az állam a hibás szakmai becslések szerint döntött. A szándékok bizonyítása továbbra is nyitott történeti feladat marad.

HÁTTÉRGYÁR

15. A reaktor felé: Berlin, Norvégia és Haigerloch

A német atomkutatás háborús éveinek legkézzelfoghatóbb műszaki célja a szabályozott láncreakció megvalósítása lett. A kutatók uránt és moderáló anyagot különféle elrendezésekben helyeztek el, majd a neutronok viselkedését mérték. Egy működő reaktorban a neutronokból elegendőnek kell a következő hasadási eseményt előidéznie ahhoz, hogy a folyamat fennmaradjon. A kezdeti kísérletek eredményeit ezért gyakran a neutronok szaporodásának vagy fogyásának arányában lehetett összefoglalni. Heisenberg elméleti munkája és Karl Wirtz kísérleti tevékenysége több alkalommal találkozott ebben a programban. A látszólag egyszerű feladat mögött sok gyakorlati nehézség húzódott meg: elegendő urán, megfelelő tisztaságú moderátor, pontos mérőeszközök és védhető laboratóriumi helyszín kellett a továbblépéshez.

A nehézvíz különösen jelentős lett, mivel a kutatók alkalmas moderátornak tartották. A legfontosabb európai termelési kapacitás a norvégiai Vemork környékén működött, amelynek sorsa a háború során katonai ügy lett. A német megszállás, a szövetséges hírszerzés és a

norvég ellenállás akciói együtt alakították a termelés történetét. A létesítmény ellen intézett szabotázsakciók és támadások jelentősen megnehezítették a német beszerzést. A nehézvízről szóló történetek olykor azt sugallják, hogy egyetlen felrobbantott üzem megakadályozta Hitler atombombájának megszületését. A valóság összetettebb: a német kutatás egyéb korlátokba is ütközött, és a reaktorprogram nem azonos egy kész, rövid távon megvalósítható fegyverfejlesztéssel. A norvég akciók fontossága ettől még nem kisebb, csak pontosabban kijelölhető.

A grafit kérdése szintén hosszú vitát váltott ki. A grafit megfelelő tisztaság esetén hatékony moderátor lehet, ám a neutronokat elnyelő szennyeződések súlyosan ronthatják teljesítményét. Walther Bothe méréseinek értelmezése és a később rendelkezésre álló adatok megmutatták, milyen érzékeny eredményt adhat egy kísérlet a felhasznált anyag minőségére. Az Egyesült Államokban a Fermi vezette csoport 1942 decemberében Chicagóban létrehozta az első önfenntartó szabályozott nukleáris láncreakciót. A német program ezzel szemben a háború végéig sem ért el ugyanilyen eredményt. Az eltérésnek műszaki oka is volt, de a rendelkezésre álló ipari és szervezeti kapacitás különbségét sem hagyhatjuk

figyelmen kívül. Heisenberg és kollégái a háború után gyakran egymás hibáinak szerepét hangsúlyozták, a felelősség ilyen egyszerű áthelyezése azonban nem helyettesíti a teljes folyamat magyarázatát.

A bombázások erősödésével a kutatóhelyek működtetése egyre nehezebbé vált. A fontos laboratóriumok költözése, az anyagok elrejtése és az intézetek közötti kapcsolattartás megnehezülése mindinkább a háború összeomló mindennapjait tükrözte. A tudományos munka ekkor már a frontok mozgásától és az állami infrastruktúra állapotától függött. A Berlin környéki kutatócsoportok egy része végül dél-német helyszíneken folytatta tevékenységét. Ezzel párhuzamosan más német csoportok, köztük Kurt Diebner környezete, eltérő reaktorelrendezésekkel kísérleteztek. A szereplők közötti versengés hatással volt az erőforrások elosztására; a program ezért még az utolsó szakaszában sem alakult teljesen összehangolt vállalkozássá. A német kutatás számára a folytonosság megőrzése is egyre komolyabb eredménynek számított.

Haigerloch kisvárosában, egy sziklába vájt helyiségben zajlott a háború végének legismertebb német reaktorkísérlete. A kísérleti berendezést gyakran B–VIII jelöléssel említik. Uránkockákat helyeztek

nehézvízbe, és neutronmérésekkel vizsgálták a rendszer viselkedését. A láncreakció önfenntartó állapotát végül nem érték el, bár a mérések a neutronok számának növekedését jelezték. A berendezés fennmaradt tárgyi emlékei és a helyszín későbbi múzeumi bemutatása gyakran felkeltik a látogatók érdeklődését, de fontos megjegyezni, hogy a reaktorkísérlet nem volt bomba. A fizikai működés, az elérendő cél és a katonai felhasználás lehetősége három külön elem. A történelmi pontosság érdekében a laboratóriumot nem érdemes úgy bemutatni, mintha a németek egy majdnem kész nukleáris fegyvert rejtettek volna el a hegyoldalban.

A szövetségesek ALSOS nevű hírszerzési küldetése 1945-ben arra törekedett, hogy feltárja a német atomkutatás eredményeit, megszerezze a dokumentumokat és a kutatásban részt vevő kulcsszereplőket. A kutatók sorsát immár katonai megszállási és hírszerzési megfontolások alakították. A haigerlochi kísérlet története ebből a szempontból jelképes: a német program a végén sem jutott el az önfenntartó reaktorig, miközben az amerikai fejlesztés már jóval előrébb tartott. A fizikusok személyes meggyőződései ugyanakkor ettől nem váltak egyértelműbbé. A háború vége olyan helyzetet teremtett,

amelyben a szereplőknek egyszerre kellett magyarázatot találniuk a tudományos kudarcra, a politikai rendszer összeomlására és saját szerepükre. A következő hónapokban mindhárom kérdés összekapcsolódott egy angliai vidéki házban.

HÁTTÉRGYÁR

16. Farm Hall: a hallgatás is dokumentum

1945 nyarán a brit hatóságok tíz német atomkutatót egy angliai vidéki birtokon, Farm Hallban tartottak fogva. A fogság látszólag kényelmes körülményeket biztosított, de egy sajátos hírszerzési művelet része volt: a beszélgetéseket titokban lehallgatták és rögzítették. A tudósok között ott volt Werner Heisenberg, Otto Hahn, Carl Friedrich von Weizsäcker és több olyan kutató, aki a német uránprogram különböző területein dolgozott. A művelet eredményeként keletkezett jegyzőkönyvek a tudománytörténet különös forrásai. Ritka eset, amikor a kutatók nem közönségnek vagy utókornak szánt előadásban, hanem egymás között, egy váratlan fejleményre reagálva beszélnek a munkájukról. A dokumentumok azonban így sem áttetsző ablakok a gondolkodásukra: a beszélgetéseket a fogság helyzete, a csoporton belüli tekintély és a résztvevők személyes érdekei is befolyásolhatták.

1945. augusztus 6-án a foglyok értesültek a Hirosimára ledobott amerikai atombombáról. A feljegyzett reakciók megdöbbenésről, hitetlenkedésről és élénk szakmai vitáról tanúskodnak. Többen nem tudták

elképzelni, miként oldhatták meg az amerikaiak a hasadóanyag előállítását és a fegyver megépítését. A hírek ugyanakkor új megvilágításba helyezték saját munkájukat: amit évekig elméletileg és kísérletileg vizsgáltak, azt egy másik ország már megvalósította, és pusztító katonai eszközként bevetette. A rögzített beszélgetések alapján a német kutatók tudásszintje és várakozásai nem voltak egységesek. A legfontosabb tanulság talán az, hogy nem elegendő a háború után megjelent visszaemlékezések alapján rekonstruálni, mit tudhattak a bombáról a háború éveiben.

Heisenberg első becslései különösen sok vitát váltottak ki. A Farm Hall-i beszélgetések egyik lehetséges értelmezése szerint a tudós ekkor nem rendelkezett olyan pontos kritikustömeg-számítással, amely alapján a tényleges amerikai fegyver működését azonnal átlátta volna. Néhány nappal később részletesebb fizikai elemzést mutatott be társainak, ami egyes történészek szerint arra utal, hogy a korábbi tudása hiányos volt, de gyorsan pótolta a hiányzó lépéseket. Mások a megdöbbenést és az első kijelentések pontatlanságát kevésbé tartják bizonyító erejűnek; szerintük a háborús titkolózás és a gyakorlati problémáktól való távolság is befolyásolhatta reakcióit. A

vitatott részletekben megkerülhetetlenek az eredeti jegyzőkönyvek, a háborús kutatási jelentések és a későbbi történészi elemzések. Egyetlen kiragadott mondat egyik álláspontot sem döntheti el.

A fizikai kérdések mögött hamar megjelent a történelmi felelősség problémája. A foglyoknak szembesülniük kellett azzal, hogy a német háborús atomkutatás kudarca immár nem kizárólag technikai eredménytelenségként kerül a nyilvánosság elé. A világban hamar felmerülhetett a kérdés: ha sikerrel járnak, kinek a kezébe került volna az új fegyver? A megbeszélések során alakot öltöttek azok az érvek, amelyek szerint Németországban az ipari erőforrások hiánya vagy a vezetés korlátozott támogatása tette lehetetlenné a bomba megépítését. Ezzel párhuzamosan a kutatók erkölcsi önképük megőrzésével is foglalkoztak. A német program 1945 utáni története ezért egyszerre a háborús műszaki munka rekonstrukciója és az önigazolási kísérletek története.

Rose értelmezésében a Farm Hall-i beszélgetések különösen erős bizonyítékul szolgálnak Heisenberg egyes korábbi tudományos elképzeléseinek hiányosságaira és a későbbi történeti önkép problematikus kialakulására. Powers nagyobb súlyt ad a lehetséges erkölcsi

visszafogottság kérdésének és a szándékok bizonytalanságának. Cassidy életrajzi megközelítése az életút szélesebb összefüggéseihez kapcsolja az epizódot. E három megközelítés különbsége hasznos, mert megmutatja, miért nem lehet a híres kérdést — tudtak-e, akartak-e, vagy képesek lettek volna-e atombombát építeni? — egyetlen igennel vagy nemmel megválaszolni. A tudományos lehetőség, az ipari kapacitás, a katonai megrendelés és az egyéni szándék különálló változók, még akkor is, ha a történet szereplői később hajlamosak voltak ezeket összekeverni.

Farm Hall jelentőségét tovább növeli, hogy a lehallgatások ténye hosszú időn át nem volt nyilvánosan ismert, a jegyzőkönyvek csak jóval később váltak szélesebb körben hozzáférhetővé. Mire a történészek teljesebben megvizsgálhatták őket, Heisenberg és társai már évtizedek óta részt vettek a történet saját változatának alakításában. A dokumentumok ezért olyan forráskritikai próbát kínáltak, amelyet a tudománytörténet viszonylag ritkán tapasztalhatott. A szereplők utólagos emlékezete összevethetővé vált a korábbi, nem publikálásra szánt kijelentéseikkel. Az összevetés nem tesz fölöslegessé minden értelmezést, de szigorúbb feltételeket szab annak, aki kész erkölcsi

HÁTTÉRGYÁR

magyarázattal szeretné lezárni a vitát. A fogság heteinek legfontosabb eredménye történészi szempontból nem egy titok leleplezése, hanem az ellentmondások pontosabb láthatóvá válása.

HÁTTÉRGYÁR

17. Visszatérés az összeomlott Németországba

Heisenberg 1946 elején térhetett vissza Németországba. Az ország fizikai pusztulása, politikai megszállása és intézményi szétesése a korábbi évtizedek tudományos életét is alapjaiban változtatta meg. A háború előtti rangos kutatóközpontok jelentős része megrongálódott vagy elvesztette korábbi személyi állományát; a nemzetközi együttműködés új alapokra helyezése elengedhetetlenné vált. Heisenberg számára a hazatérés egyszerre jelentett személyes megkönnyebbülést és új intézményi feladatot. A német tudomány újjászervezését olyan körülmények között kellett előmozdítani, amikor a világháború előtti tudományos tekintély önmagában már nem volt elegendő a nemzetközi bizalomhoz. Az újrakezdés kérdése nem választható el attól sem, hogy a német kutatók milyen formában voltak hajlandók szembenézni a náci korszakban hozott döntéseikkel.

A Kaiser Wilhelm Társaság intézeteinek utóélete és a későbbi Max Planck Társaság megszervezése a nyugatnémet tudományosság egyik meghatározó folyamata lett. Heisenberg a göttingeni környezetben

HÁTTÉRGYÁR

folytatta munkáját, és vezető szerepet játszott az elméleti és atomfizikai kutatások újjáépítésében. A nemzetközi kapcsolatok helyreállítása lassan haladt, mert a politikai és személyes bizalmatlanság a tudományos tárgyalásokban is jelen volt. Ugyanakkor a fizika belső fejlődése nem állt meg a háború alatt: új kísérleti módszerek, részecskefizikai eredmények és egyre bonyolultabb elméleti feladatok jelentek meg. Heisenberg korábbi tekintélye továbbra is jelentős maradt, de a kutatás vezető irányai mindinkább olyan területeken formálódtak, amelyekben már egy új nemzedék játszotta a legfontosabb szerepet.

A háború utáni német atompolitika sajátos kettősséget hozott. A nukleáris energia békés felhasználása a gazdasági modernizáció és a technikai újjáépítés jelképévé vált, miközben az atomfegyver megjelenése a biztonságpolitika új korszakát nyitotta meg. A szövetségi köztársaság kialakulása után a tudósoknak azt is mérlegelniük kellett, milyen feladatot vállaljanak a katonai és politikai döntéshozók mellett. Heisenberg nem távolodott el teljesen a közélettől: a nukleáris kutatás intézményi lehetőségei és a fegyverkezés erkölcsi következményei újra napirendre kerültek. A harmincas és negyvenes években hozott döntések története ebben a

HÁTTÉRGYÁR

környezetben új értelmezési keretet kapott. Korábbi óvatossága vagy együttműködése immár a demokratikus rendszerben vállalt nyilvános felelősség fényében is vizsgálhatóvá vált.

Az 1957-es göttingeni nyilatkozat fontos állomás volt a német atomtudósok közéleti szerepében. A nyilatkozatot tizennyolc jelentős nyugatnémet tudós írta alá, köztük Heisenberg, és állást foglaltak az ellen, hogy a Bundeswehrt nukleáris fegyverekkel szereljék fel. A vita hátterében a hidegháború, a nyugatnémet újrafelfegyverzés és az atomfegyverek európai telepítésének kérdése állt. Heisenberg aláírása fontos nyilvános cselekedet volt, de nem változtatta meg visszamenőleg a háború alatt hozott döntéseket. A két korszak összevetése éppen azért tanulságos, mert a tudós hasonló erkölcsi témákról egészen különböző politikai feltételek között beszélt. A demokratikus nyilvánosságban a véleménynyilvánítás lehetősége és a szakmai felelősség megfogalmazása más esélyeket adott, mint a diktatúra idején.

Heisenberg a háború után számos filozófiai és ismeretterjesztő előadásban vizsgálta a modern fizika fogalmi következményeit. A természet leírásában játszott matematikai szerep, a megfigyelő és a mérés viszonya,

továbbá a klasszikus gondolkodás érvényességi határai továbbra is foglalkoztatták. Ezek a munkák a nagyközönség körében is jelentős hatást gyakoroltak, bár a fizikatörténészek és filozófusok nem minden következtetésével értettek egyet. Visszaemlékező könyvében személyes beszélgetések formájában rajzolta meg a modern atomfizika születésének történetét. Az eljárás közérthetővé tette az elvont kérdéseket, de sajátos veszélyt is hordozott: a több évtizeddel korábban elhangzott dialógusok későbbi, irodalmi rekonstrukciói nem tekinthetők szó szerinti dokumentumoknak. Az életrajz olvasójának ezért a művet egyszerre kell fontos önvallomásként és kritikusan kezelendő emlékezésként értékelnie.

Heisenberg pályájának utolsó szakasza azt is megmutatja, hogy egy korszakalkotó felfedezés alkotójának tudományos helyzete idővel átalakul. A húszas évek fiatal forradalmárából intézményvezető és a német tudományos hagyomány egyik megtestesítője lett. A részecskefizika egységes elméletének keresésében később is ambiciózus elképzeléseket fogalmazott meg, ám ezek nem értek el a mátrixmechanikáéhoz mérhető sikert. A tudományos alkotóerő azonban nem kizárólag az új nagy felfedezések számával mérhető: tanítványok,

HÁTTÉRGYÁR

kutatóintézetek és nemzetközi kapcsolatok alakítása is része egy tudós örökségének. Heisenberg 1976-ban bekövetkezett halálakor a kvantummechanika már az egész modern fizika és technika alapvető nyelve volt. Nevének története ugyanakkor továbbra is viták tárgya maradt, mert a természeti törvények megértésében tanúsított rendkívüli tehetség nem ad automatikus választ a politikai felelősség kérdéseire.

HÁTTÉRGYÁR

18. Újjászervezés: Göttingen és a tudományos tekintély

A háború vége után Heisenberg ismét olyan helyzetbe került, amelyben tudományos tekintélye intézményes hatalommá válhatott. A korábbi évtizedek Németországa már nem létezett. A tudományt finanszírozó állam összeomlott, az egyetemek közül több súlyosan megrongálódott, a kutatóintézetek vezetőinek múltját az amerikai és brit megszálló hatóságok vizsgálták. A nemzetközi tudományos kapcsolatok helyreállítása politikai feltételekhez kötődött. Ebben a környezetben a híres fizikus hazatérése egyszerre jelentett folytonosságot és problémát. A külföldi kollégák közül sokan még mindig tisztelték az 1925-ös áttörés szerzőjét, mások viszont pontosan emlékeztek háborús előadásaira és az uránkutatásban játszott szerepére.

Heisenberg az intézményi újjáépítés során arra törekedett, hogy a német elméleti fizika megőrizze nemzetközi súlyát. A göttingeni környezet, amely már a húszas években a kvantummechanika egyik központja volt, különleges szimbolikus erővel bírt. Visszatérni ide azt jelentette, hogy a megszakadt történet újraindítható. A kutatók számára azonban nem volt elegendő új

épületet, műszert és könyvtárat találni. Meg kellett határozniuk, hogy a német intézmények milyen viszonyban állnak azzal az állammal, amelynek intézkedései évtizedeken át alakították a személyi állományt, a kutatási feltételeket és az erkölcsi mozgásteret.

A Kaiser Wilhelm Társaság intézeteiből kibontakozó Max Planck Társaság 1948-ban létrejött szervezete a folytonosság és a megújulás közötti kompromisszum egyik legismertebb példája lett. A névváltoztatás, a kutatások újraindítása és a nemzetközi kapcsolatok felélesztése fontos lépések voltak, de a korábbi vezetői döntések következményeit nem törölték el. A német tudomány helyreállításának története emiatt elválaszthatatlan a személyes felelősség kérdésétől. A kutatás szabadságát követelő tudósoknak magyarázatot kellett adniuk arra is, hogyan viselkedtek akkor, amikor egy diktatúra diktálta az intézmények feltételeit.

Heisenberg ennek a folyamatnak az egyik legbefolyásosabb alakja lett. Intézetvezetőként, előadóként és tudománypolitikai tárgyalópartnerként olyan feladatokat látott el, amelyek messze túlmentek saját számításain és elméleti érdeklődésén. A német fizika nemzetközi elszigeteltsége ellen küzdött, fiatalabb

kutatók számára állásokat és kutatási lehetőségeket igyekezett biztosítani, és a tudomány állami támogatásának szükségességét hangsúlyozta. A korai hidegháborúban mindez stratégiai jelentőséget is nyert: a modern fizika presztízse egyre szorosabban összekapcsolódott a katonai és ipari lehetőségekkel.

A személyes kapcsolatokban lassabban zajlott a kiengesztelődés. Az egykori barátok között ott voltak azok, akik emigrálni kényszerültek, s nem felejtették el, hogy Németországban egyes kollégáik megtarthatták állásaikat. Heisenberg nemzeti hűségről alkotott fogalmai a háború utáni levelezésekben gyakran ütköztek a száműzetés tapasztalatával. Akik kívülről figyelték a németországi eseményeket, sokszor úgy látták, hogy az ott maradt tudósok a saját szakmai nehézségeiket könnyebben nevezték meg, mint a kizárt és üldözött emberek veszteségeit. Ez a különbség egyes személyes barátságok helyreállítását is megnehezítette.

A tudományos közösség megosztottsága nem rendezhető el egyszerűen azzal a kérdéssel, hogy ki volt kiváló fizikus. A kutatói teljesítmény nem tesz érvénytelenné egy politikai döntést, ugyanakkor a morális ítélet sem teszi semmissé egy érvényes fizikai felfedezés jelentőségét. Heisenberg háború utáni

helyzetének megértéséhez éppen a két szempont együttes vizsgálata szükséges. A műveiről és előadásairól folytatott vita az új Németország önképéről is szólt: képes-e a társadalom elismerni saját tudományos hagyományait úgy, hogy közben szembenéz az intézmények és egyének múltjával.

Heisenberg munkatársai számára eközben nagyon is gyakorlati kérdéseket kellett megoldani. A háború előtt természetesnek tűnő utazás és könyvcsere engedélyezési eljárásokon múlt, a legújabb amerikai szakirodalom nem minden esetben volt elérhető, a kutatók pedig gyakran a mindennapi megélhetés gondjaival küszködtek. Az elméleti fizika viszonylag kevés műszert igényelhetett, de élő tudományos vitához könyvek, kollégák és tanítványok kellettek. Heisenberg megőrzött tekintélye ebben a szűkös világban kézzelfogható előnyt jelentett, mert segített ajtókat nyitni a megszálló hatóságok és külföldi intézetek felé.

Az újjáépítés éveinek egyik különös vonása, hogy a fiatalabb tudósok már egészen más világba érkeztek. Számukra az 1920-as évek kvantummechanikai vitái történelmi eseménynek számítottak, miközben a természet új kérdései vártak magyarázatra. Heisenbergnek elfogadnia kellett, hogy saját

korszakalkotó teljesítménye immár a tankönyvek része, a jövő fizikai kutatásai azonban tőle független irányokba haladhatnak. Ezt a változást tudománypolitikai szerepe részben elfedte, de szakmai pályájának későbbi megítélésében alapvető jelentősége lett.

HÁTTÉRGYÁR

19. A háború története mint vitatott örökség

A német uránprogram háború utáni értelmezését már az első nyilvános megszólalásokban meghatározta a védekezés igénye. A Farm Hallban fogva tartott kutatók 1945 augusztusában, Hirosima hírének hatása alatt szembesültek azzal, hogy az Egyesült Államok olyan technológiai és szervezési teljesítményt ért el, amelyet a német programnak még megközelítenie sem sikerült. A meglepetés, a keserűség, a megkönnyebbülés és a szakmai büszkeség különös módon fonódott össze. Az amerikai bomba egyszerre tette nyilvánvalóvá a tudomány pusztító erejét és a német kísérletek korlátait.

A titkos lehallgatások később nyilvánossá vált jegyzőkönyvei azért számítanak különleges forrásnak, mert a résztvevők nem egy későbbi közönség számára készítették őket. A feljegyzések ugyanakkor nem adnak közvetlen hozzáférést a gondolataikhoz. A beszélgetések részlegesek voltak, a lehallgatók értelmezték és kivonatolták őket, ráadásul a tudósok saját kollégáik előtt is igyekeztek fenntartani tekintélyüket. A dokumentumok mégis megmutatják, hogyan reagáltak az új információkra, milyen technikai kérdéseket tettek fel, és

miként beszéltek a feladatuk erkölcsi oldaláról.

Az egyik legismertebb kérdés az urán-235 kritikus tömegének megítélése. A háború idején írt német jelentések és a Farm Hall-i beszélgetések között olyan feszültségek mutatkoznak, amelyekből eltérő történészi következtetések születtek. Paul Lawrence Rose különösen nagy hangsúlyt helyezett arra az állításra, hogy Heisenberg tudományos elképzelései az atombomba megvalósíthatóságáról lényegesen hibásak voltak. Thomas Powers ellenben a személyes döntések és a kutatás tudatos fékezésének lehetőségét is részletesen megvizsgálta. A két értelmezés közötti vita egyik tanulsága, hogy a sikertelen programból utólag nehéz egyetlen szándékot vagy egyetlen hibát rekonstruálni.

A korabeli dokumentumok több, egymástól elkülönülő feladatra utalnak. A fisszió elvi felismerése nem azonos a robbanóeszköz megtervezésével, a reaktorfizikai kutatás pedig nem jelent önmagában kész fegyverprogramot. A láncreakció működésének feltételeit, a megfelelő anyag előállítását és a nagyüzemi ipari megvalósítást külön kellett kidolgozni. Az amerikai Manhattan-terv sikerét hatalmas pénzügyi, mérnöki és szervezési kapacitás tette lehetővé. A német kutatás kisebb léptéke, széttagoltsága, a hadigazdaság más prioritásai és a háború romló

körülményei együttesen járultak hozzá a kudarchoz.

A tudósok utólagos nyilatkozataiban időnként úgy jelenik meg a történet, mintha a német kutatók erkölcsi megfontolásból hagyták volna el a fegyver irányába vezető utat. Más visszaemlékezések inkább arra utalnak, hogy a vezetőknek nem tudtak rövid időn belül megvalósítható eredményt ígérni. A két magyarázat nem egyenértékű. Ha egy kutató a rendelkezésre álló ipari kapacitások miatt kivitelezhetetlennek ítél egy fegyvert, abból nem következik, hogy megfelelő feltételek mellett is visszautasította volna a munkát. Fordítva sem bizonyítható pusztán a projektben való részvételből, hogy minden résztvevő ugyanazt a katonai célt kívánta elérni.

Heisenberg maga a háború után többször hangsúlyozta, hogy a német tudósoknak végül nem kellett a fegyver megépítéséről dönteniük. Ez az érvelés jelentősen befolyásolta közéleti arcképét, és ellenfelei számára is támadási pontot kínált. A felelősség azonban már a kutatásban való részvételnél kezdődhetett: a fizikusok olyan állami intézményekkel működtek együtt, amelyek a náci háborús erőfeszítéseket szolgálták. Ennek erkölcsi jelentőségét az sem szünteti meg, hogy az atomfegyver végül nem készült el Németországban.

A német és az amerikai atomprogram összehasonlítása további nehézségeket vet fel. Az Egyesült Államokban a fegyvert olyan tudósok is készítették, akik a náci Németországból menekültek el, és kezdetben attól tartottak, hogy Hitler előbb jut atomfegyverhez. Amikor a német vereség bekövetkezett, a program folytatásának erkölcsi indokai megváltoztak, az elvégzett munka és a politikai döntéshozatal azonban nem állt meg. Hirosima és Nagaszaki a győztes oldalon is tartós vitát indított a tudósok felelősségéről. A német kutatók esetében ezt a vitát a diktatúra szolgálatának kérdése súlyosbította.

A történésznek óvakodnia kell attól, hogy az eseményeket kizárólag az 1945 után ismert eredményből magyarázza. A résztvevők korábban nem tudhatták biztosan, mekkora erőforrásra lesz szükség, mennyire gyorsan haladnak az ellenfelek, és milyen döntést hoznak a politikai vezetők. A valós időben meghozott döntések bizonytalansága még nem ment fel a felelősség alól. Arra viszont figyelmeztet, hogy minden szándékot korabeli levéllel, jelentéssel, naplóval vagy egymástól független tanúvallomásokkal kell alátámasztani.

Ez az oka annak, hogy a Heisenbergről folytatott vita a mai napig nem redukálható egyetlen mondatra. Az a kérdés, hogy miért nem épült meg a német bomba,

műszaki, intézményi és politikai tényezőket fog össze. Az a kérdés pedig, hogy mit tett és mit akart tenni Heisenberg, személyes bizonyítékok és későbbi önigazolások nehéz mérlegelését követeli. A két problémát egymásra vetíteni csábító, de történetileg félrevezető volna.

HÁTTÉRGYÁR

20. Az atomkor német lelkiismerete: Göttingen, 1957

A nyugatnémet politika az ötvenes években egyre sürgetőbben találkozott az újrafegyverkezés kérdésével. A Német Szövetségi Köztársaság megalakulása, a hidegháborús szembenállás és a NATO-hoz való csatlakozás a tudományos közösséget is érintette. Az atomfegyverek megjelenése megváltoztatta a katonai stratégia nyelvét: a korábban elképzelhetetlen pusztító erővel rendelkező eszközök alkalmazása immár nem elvont fizikai lehetőség, hanem kormányzati döntések tárgya volt. A német társadalomban különösen érzékeny kérdésnek számított, hogy az ország milyen szerepet vállalhat egy újabb európai háború előkészületeiben.

Konrad Adenauer kancellár és kormányának több tagja a nukleáris fegyvereket a korszerű hadviselés rendszerében értelmezte, miközben a szövetségi rendszer részeként Nyugat-Németország biztonsági érdekeire hivatkozott. A tudósok egy része számára ez a nyelvezet elfedte a fegyverek tényleges hatását. Attól tartottak, hogy a taktikai vagy korlátozott alkalmazás ígérete hamis biztonságérzetet kelthet a politikai

HÁTTÉRGYÁR

vezetésben és a közvéleményben. Az atomháború következményei nem hasonlíthatók össze egyszerűen a hagyományos fegyverekével, hiszen a robbanás, a sugárzás és a hosszabb távú társadalmi károk együtt hatnak.

1957 áprilisában tizennyolc nyugatnémet atomtudós nyilatkozatban emelt szót az atomfegyverek nyugatnémet beszerzése és alkalmazásának előkészítése ellen. Az úgynevezett göttingeni nyilatkozat aláírói között Heisenberg és Otto Hahn mellett számos tekintélyes fizikus szerepelt. A dokumentum az atomtudósok különleges ismereteire építette álláspontját, hangsúlyozva, hogy a fegyverek hatása olyan mértékű, amelyet a politikai közbeszéd nem mindig érzékeltet megfelelően. A nyilatkozat fontos közéleti eseménnyé vált, és hozzájárult a nukleáris politika demokratikus vitájához.

Heisenberg szerepét különös történeti feszültség jellemezte. Ugyanaz a fizikus szólalt fel a német atomfegyverkezés ellen, aki 1939 és 1945 között a háborús uránkutatás egyik vezető kutatójaként működött. Számára a két korszak között volt folytonosság: azt hangsúlyozta, hogy a tudósoknak felelősséget kell érezniük kutatásaik társadalmi

következményeiért. Kritikusai számára viszont nyitva maradt a kérdés, hogy miért nem fogalmazta meg ugyanezt az elvet hasonló egyértelműséggel a diktatúra éveiben. Az ötvenes évek közéleti szerepvállalása tehát sem egyszerű felmentést, sem automatikus képmutatási bizonyítékot nem jelent.

A göttingeni nyilatkozat története azt is megmutatja, hogy a tudományos tekintély korlátozott politikai hatalom. Az aláírók tudományos kérdésekben különleges kompetenciával rendelkeztek, ám a stratégiai döntések, a szövetségi kötelezettségek és a demokratikus ellenőrzés kérdéseit nem dönthették el pusztán szakmai tekintélyükkel. Fellépésük jelentősége éppen abban állt, hogy a fizikai ismeretek következményeit közérthető politikai problémává alakították. A döntés jogát nem vonták el a választott intézményektől, hanem olyan információt tettek hozzáférhetővé, amely nélkül a vita szegényesebb maradt volna.

Az atomenergia békés felhasználásával kapcsolatban Heisenberg álláspontja más hangsúlyt kapott. Támogatta a német nukleáris kutatás kiépítését, és úgy tekintett a reaktorokra, mint a korszerű ipari társadalom fontos technológiai lehetőségére. A fegyverkezéssel szembeni fenntartása nem jelentette a magfizika kutatásának

elutasítását. Ebben az időben számos ország politikusai és mérnökei egyaránt a nukleáris energiatermelésben látták az olcsó, nagy mennyiségben előállítható villamos energia egyik ígéretét. A későbbi balesetek, hulladékkezelési problémák és gazdaságossági viták még nem alakították át olyan mértékben a közvéleményt, mint a következő évtizedekben.

A kétféle cél között természetesen nem húzódott éles tudományos határ. A reaktorfizika, az izotópelválasztás és a nukleáris anyagok előállítása olyan ismereteket is teremtett, amelyek katonai rendszerekhez kapcsolódhattak. Heisenberg esetében ezért különösen jelentős, hogy a békés felhasználás eszméje intézményi és politikai kereteket igényelt. A tudós önmagában nem tudja garantálni, hogy felfedezését mire használják. A nyilvános vita, a nemzetközi ellenőrzés és a kormányzati felelősség kérdéseit a fizikán kívül kell rendezni.

Az 1957-es fellépés Heisenberg életrajzának egyik legerősebb ellenpontja. A fiatalember, aki a húszas években azt kutatta, mely mennyiségeket lehet egyáltalán meghatározni a természetben, idősödő tudósként azt kérdezte, milyen következményeket engedhet meg magának egy politikai közösség. A két kérdés között nincs közvetlen logikai levezetés, mégis

ugyanannak az életnek a részei. Heisenberg személyes történetében a megismerés határairól szóló tudományos felismerés a cselekvés határairól folytatott nyilvános gondolkodással találkozott.

HÁTTÉRGYÁR

21. A végső elmélet keresése

Heisenberg neve a kvantummechanika alapításával forrt össze, de életének későbbi évtizedeiben érdeklődése egyre inkább az elemi részecskék mélyebb leírása felé fordult. A sikeres fizikusok számára különösen vonzó feladat lehet egy olyan elmélet megtalálása, amely sokféle jelenséget közös alapra vezet vissza. A huszadik század első felében az elektromosság, a mágnesség és a fény egységes elméletének példája, valamint Einstein gravitációs elmélete különösen erős ösztönzést adott az egységesítésre. A kvantummechanika létrehozóinak pedig azt kellett megérteniük, hogyan függ össze a részecskék viselkedése az újabb kísérleti megfigyelésekkel.

A második világháború után a részecskefizika gyorsan változott. Az új gyorsítók és detektorok sok olyan részecskét tártak fel, amelyeket a húszas évek elméleti rendszerei még nem kezeltek. A jelenségek gazdagsága izgalmas, de zavarba ejtő helyzetet teremtett: a fizikusok hosszú listákat készíthettek a részecskékről, miközben azt keresték, van-e mögöttük egyszerűbb szerkezet. A később kialakuló kvarkmodell és a részecskefizika standard modellje más úton adott választ ezekre a

HÁTTÉRGYÁR

problémákra, mint Heisenberg egyes késői elképzelései.

Heisenberg különböző időszakokban nemlineáris mezőelméleti megközelítésekkel kísérletezett. Remélte, hogy egy kellően általános matematikai keretben a részecskék és kölcsönhatások tulajdonságai belső következményként jelenhetnek meg. Ez a terv ambiciózus volt, és bizonyos kortársak érdeklődését is felkeltette. A fizikai elméletek értékét azonban nem az ígéretük, hanem a koherens számítások, az ellenőrizhető előrejelzések és a mérésekkel való összhang határozza meg. Heisenberg késői egységesítési programja nem vált a modern részecskefizika általánosan elfogadott alapjává.

Az eltérő siker megértéséhez érdemes felidézni az 1925-ös áttörés körülményeit. Akkor a régi kvantumelmélet válságában már sok pontos spektrális adat állt rendelkezésre. Heisenberg merész döntése az volt, hogy az elmélet szerkezetét közvetlenül a megfigyelhető mennyiségek kapcsolatából próbálta felépíteni. A későbbi egységesítési törekvésekben ezzel szemben az átfogó matematikai kép gyakran előbbre került, mint a biztos kísérleti ellenőrzés. A két módszer közötti különbség nem a kreativitás hiánya, hanem a rendelkezésre álló bizonyítékok eltérő szerepe miatt

HÁTTÉRGYÁR

lényeges.

A nagy elméletet kereső tudós gyakran saját pályájának korábbi sikerét is újraértelmezi. Aki egyszer megtalálta az addig hiányzó alapelvet, joggal hiheti, hogy a következő válság is egy hasonló gondolati fordulattal oldható meg. Ez a meggyőződés ösztönözhet bátor kutatásokat, ugyanakkor hajlamosíthat arra, hogy az elmélet eleganciáját túlértékelje a kísérletekkel szemben. Heisenberg életének utolsó tudományos korszakában mindkét oldal megfigyelhető: a rendszerezés iránti szenvedély és a saját elképzelésekhez való makacs ragaszkodás.

A részecskefizika fejlődésében eközben egyre hangsúlyosabb szerepet kaptak azok a fogalmak, amelyeket a kvantumtérelmélet, a szimmetriák és a mértékelméletek nyelve tett pontosabbá. A kutatások jelentős része már nem egyetlen kiemelkedő tudós köré szerveződött, hanem nagy nemzetközi együttműködésekben zajlott. Heisenberg rangját senki sem vonhatta kétségbe a kvantummechanika történetében, de a fizika élvonalának napi irányát egyre inkább más kutatók eredményei szabták meg. Ez a helyzet tudománytörténetileg igen gyakori, az érintettek számára mégis nehezen elfogadható.

A késői elméletekkel kapcsolatban érdemes kerülni két szélsőséges ítéletet. Nem helyes a hiányzó végső siker miatt az egész programot értéktelennek minősíteni, hiszen egy sikertelen elmélet is segíthet megvilágítani, milyen kérdések foglalkoztatták a korszakot. Ugyanilyen hibás volna azért tekintélyt tulajdonítani neki, mert szerzője korábban megalkotta a mátrixmechanikát. A fizikai elképzelések tudományos érvényessége újra és újra bizonyításra szorul. A szakma fejlődése éppen attól lehetséges, hogy a múlt nagy nevei sem rendelkeznek örök vétójoggal.

Heisenberg késői pályája ezért fontos kiegészítése a zseniális fiatalkor történetének. Megmutatja, hogyan alakul át a tudós szerepe, amikor korábbi munkáját az új nemzedékek már magától értetődő kiindulópontnak tekintik. A kutatói életpálya nem egyetlen nagy pillanatból áll: intézményvezetésből, tanításból, vitákból, bizonytalan próbálkozásokból és időnként be nem váltott reményekből épül fel. A tudomány történetéhez a kudarcok is hozzátartoznak, ha megértjük, milyen kérdésekre keresték velük a választ.

HÁTTÉRGYÁR

22. A fizika nyelve és a filozófia határai

Heisenberg nem érte be azzal, hogy a modern fizika új számítási módszereket adott a kutatók kezébe. A húszas évektől kezdve foglalkoztatta, milyen jelentése van az új elméletnek a természet megismerésére nézve. A klasszikus fizika mindennapi intuíciókhoz közel álló fogalmakat használt: helyet, sebességet, időbeli pályát, erőket. A kvantummechanikában ezek a fogalmak új matematikai kapcsolatok között kaptak szerepet, és több korábban természetesnek vett elképzelés érvényessége megkérdőjeleződött. A fizikusoknak ezért nemcsak pontosabb egyenletekre, hanem az egyenletek jelentéséről folytatott vitára is szükségük volt.

A határozatlansági relációt a népszerű ismertetések gyakran félreértik. Nem arról van szó, hogy a laboratóriumi műszerek átmenetileg tökéletlenek, és később egy ügyesebb berendezéssel megszüntethető a korlátozás. A kvantumelmélet matematikai szerkezetében bizonyos fizikai mennyiségek, például a hely és az impulzus, olyan viszonyban állnak egymással, amely korlátozza a közös pontos meghatározhatóságukat. A különböző kísérleti elrendezések és állapotok között

HÁTTÉRGYÁR

van mozgástér, de az alapvető összefüggés nem tűnik el. Az elmélet ezért a természet leírásának szintjén kérdőjelezi meg a teljes klasszikus meghatározhatóság elképzelését.

Fontos azonban különbséget tenni a matematikai állítás és a filozófiai általánosítás között. Abból, hogy egy mikroszkopikus rendszer bizonyos mérési eredményei valószínűségi törvényeket követnek, nem következik automatikusan, hogy a társadalmi életben minden bizonytalan vagy hogy az embernek ne lehetne felelősséget tulajdonítani tetteiért. A tudományos fogalmak átvitele politikai vagy erkölcsi vitákba rendszerint hasonlatként működik, nem bizonyításként. Heisenberg saját filozófiai előadásaiban is olyan tágabb kérdések felé fordult, amelyekben a fizika részletes eredményei és a személyes világlátás már összekeveredhettek.

Niels Bohr komplementaritásfogalma különösen nagy hatást gyakorolt Heisenbergre. Bohr arra hívta fel a figyelmet, hogy a különböző kísérleti elrendezésekhez kötődő leírások egymást kizárhatják, miközben együtt szükségesek a kvantumjelenségek megértéséhez. Ez nem azt jelenti, hogy a logikai ellentmondások szabadon megengedhetők, hanem azt, hogy az egyes mérési

helyzetekhez tartozó fogalmi feltételeket pontosan kell tisztázni. A kvantummechanikai formalizmus eredményei közösek lehetnek akkor is, ha a fizikusok különbözően fogalmazzák meg, mit mondanak azok a valóságról.

Albert Einstein ebben a vitában következetesen fontos ellenvetéseket fogalmazott meg. Nem vitatta a kvantummechanika hatalmas kísérleti sikereit, de kételkedett abban, hogy a kialakult elmélet végső leírása volna a fizikai valóságnak. A híres gondolatkísérletek célja az volt, hogy megmutassák a megfigyelések és az elméleti teljesség közötti feszültségeket. A későbbi Bell-egyenlőtlenségekkel kapcsolatos kutatások és a modern kísérletek új megvilágításba helyezték ezeket az érveket, ám a húszas-harmincas évek résztvevői még más bizonyítékkészletből indultak ki.

Heisenberg népszerű könyveiben újra meg újra visszatért a klasszikus nyelv korlátaihoz. Egy mérési eredményről mindig valamilyen közösen érthető nyelven kell beszámolni, de az atomi világ leírásában a hétköznapi képek könnyen félrevezetővé válnak. A tudományos kommunikáció ezért gyakran két szinten zajlik: szigorú matematikai összefüggésekben és a jelenségeket szemléltető, szükségképpen pontatlanabb szavakkal. Jó ismeretterjesztés akkor születik, ha a

HÁTTÉRGYÁR

szemléltetés nem tünteti el ezt a különbséget.

A filozófiai érdeklődés Heisenberg számára személyes és kulturális kérdés is volt. A német klasszikus filozófia, a görög gondolkodás és a modern természettudomány története egyaránt részt vett abban, ahogyan saját munkáját értelmezte. A későbbi beszélgetéskötetekben olykor gondosan megkomponált párbeszédek formájában idézett fel régi vitákat. Ezek a szövegek értékes forrásai önértelmezésének, de nem tekinthetők gyorsírásos jegyzőkönyveknek. A történeti kutatásnak külön kell megvizsgálnia, mi hangozhatott el a korabeli beszélgetésben, és hogyan akarta azt évtizedek múltán felidézni.

A fizika és a filozófia határvidéke Heisenberg munkásságában továbbra is termékeny, mert arra figyelmeztet, hogy a tudomány fogalmai változnak. A pontos elmélet nem szünteti meg az értelmezés iránti igényt, az értelmezés pedig nem helyettesítheti a pontos elméletet. Heisenberg legmaradandóbb eredményei ott születtek, ahol merész fogalmi kérdéseit kemény matematikai munkával és megfigyelési adatokkal kapcsolta össze. Késői írásainak olvasásakor is ez a mérce segít elkülöníteni a fizikai felismerést a tágabb kulturális elmélkedéstől.

HÁTTÉRGYÁR

23. Család, zene és a személyes emlékezet

A nagy tudományos életrajzokban könnyen háttérbe szorulnak a hétköznapi emberi kapcsolatok. Werner Heisenberg esetében ez azért különösen veszélyes, mert az életéről kialakult kép két szélsőség között mozog. Egyfelől a fiatal zseni legendája, aki huszonévesen új matematikai nyelvet adott a fizikának, másfelől a náci atomprogramban dolgozó tudós képe áll. Egyik sem mond el eleget arról, hogyan élt a családjával, miként viszonyult a barátaihoz, és milyen szerepet játszottak életében azok a tevékenységek, amelyek nem közvetlenül a fizikához kapcsolódtak.

Heisenberg már gyermekkorában erős kötődést alakított ki a zenéhez. A zongorázás egész életében fontos maradt számára, különösen a klasszikus repertoár. A kamarazenélés társas tevékenység volt: rendszeres próbát, egymásra figyelést és a közös forma érzékelését követelte. A fizikus számára a zene kulturális otthont is jelentett, amely túlélte a háború és a politikai változások korszakait. A zenei élményből azonban nem kell tudományos magyarázatot gyártani. Aki jól játszik Bachot vagy Mozartot, attól még nem következik, hogy a

HÁTTÉRGYÁR

kvantummechanikához valamiféle titkos zenei kulcsot talált.

1937-ben Heisenberg feleségül vette Elisabeth Schumachert. Házasságukból hét gyermek született, és a nagy család mindennapi működtetése jelentős részben a feleségre hárult. A háború éveiben a családi életet a légitámadások, a költözések és az ellátási nehézségek is befolyásolták. Heisenberg tudományos munkája és intézményi kötelezettségei mellett a magánéleti biztonság megőrzése külön feladatot jelentett. A fennmaradt levelezések és visszaemlékezések az emberi kapcsolatokat is láthatóvá teszik, bár a családi forrásokat éppúgy kritikával kell vizsgálni, mint a politikaiakat.

A természetjárás és a hegyi utak szintén végigkísérték Heisenberg életét. Fiatalon a német ifjúsági mozgalmak világában ismerte meg az együtt vándorlás és táborozás szokásait, később pedig rendszeresen kereste a természet nyugalmát. A hegyvidéki táj a megterhelő intézményi feladatok között különösen fontos ellenpontot jelentett. Az ilyen részletek segítenek megérteni, miért volt számára annyira fontos a német kulturális és táji kötődés, amelyre háborús döntéseinek magyarázatában is gyakran hivatkozott.

HÁTTÉRGYÁR

A nemzeti kötődés és a személyes jóindulat összeférhetett olyan döntésekkel, amelyek kívülről súlyosan vitathatók voltak. A családjáért aggódó férfi, a zenét szerető barát és a diktatúra intézményeivel együttműködő kutató ugyanaz az ember volt. Ez a tény kellemetlenebb, mint egy egyszerűen gonosz vagy egyszerűen hősies alak portréja. A történeti életrajz éppen akkor válik pontosabbá, ha az emberi vonásokat nem felmentő körülményként, hanem az összetett személyiség részeként kezeli.

A családtagok emlékezete természetesen más szempontokat őriz meg, mint a kollégáké. Számukra a nagy történelmi események gyakran költözések, elválások, hiányzó levelek és családi beszélgetések formájában válnak személyessé. Heisenberg gyermekeinek generációja már abban a Németországban nőtt fel, amelyben a háborús múltról folytatott vita fokozatosan az oktatás és a közélet egyik központi témájává vált. A családi emlékezet így maga is történetileg változó jelenség: a fiatalabb nemzedék kérdései nem szükségképpen azonosak azokkal, amelyeket a szülők maguktól megfogalmaztak volna.

Heisenberg barátságainak vizsgálata különösen tanulságos. A kvantummechanika megszületése idején a

különböző országok fiatal fizikusai rendkívül szoros nemzetközi hálózatot alkottak. A nácizmus és a háború ezt a közösséget szétszakította, a résztvevőket emigrációra, katonai szolgálatra vagy politikai alkalmazkodásra kényszerítette. A tudományos bizalom ugyan részben helyreállítható volt, a személyes sérelmek sok esetben tartósabbnak bizonyultak. A legnehezebb kérdések nem feltétlenül a laboratóriumi eredmények körül merültek fel, hanem azokban a levelekben, amelyekben régi barátok próbálták megérteni egymás döntéseit.

A magánélet ezért nem díszítő elem a könyv végén. A tudós családi és kulturális világa segít megmagyarázni, milyen értékekhez ragaszkodott, milyen közösségekhez érezte magát tartozónak, és miért hozhatott olyan döntéseket, amelyeket mások érthetetlennek tartottak. A személyes kapcsolatok ismerete nem teszi az erkölcsi mérlegelést fölöslegessé, hanem pontosabbá teszi annak tárgyát. Heisenbergről így lehet egyszerre emberi és történetileg felelős életrajzot írni.

HÁTTÉRGYÁR

24. Werner Heisenberg helye a huszadik században

Werner Heisenberg 1976-ban, hetvennégy éves korában halt meg Münchenben. Halálakor a kvantummechanika már a fizikai oktatás és a technológiai fejlődés alapvető részét alkotta. A félvezetők, a modern kémia elméleti módszerei és számos mérési eljárás működése aligha lett volna elképzelhető a kvantumelmélet nélkül. A világ, amelyben Heisenberg fiatalkori felfedezése megszületett, még az atomról alkotott régi képek problémáival küszködött. Élete végén az egykori forradalmi gondolat a természettudomány egyik legszilárdabban igazolt keretrendszerévé vált.

Ez a siker nem egyetlen ember érdeme volt. Max Planck, Albert Einstein, Niels Bohr, Arnold Sommerfeld, Max Born, Pascual Jordan, Erwin Schrödinger, Paul Dirac és sok más kutató különböző módokon járult hozzá az új fizika kialakításához. Heisenberg sajátos teljesítménye az volt, hogy 1925-ben olyan matematikai szerkezet felé indult el, amely a klasszikus pályaképektől függetlenül leírta a megfigyelhető mennyiségek kapcsolatát. A hozzá kapcsolódó mátrixmechanika és a

HÁTTÉRGYÁR

később megfogalmazott határozatlansági reláció tartósan beépült a modern fizika nyelvébe.

A tudományos hatás mértékét nem célszerű a népszerűségből vagy a gyakran idézett anekdotákból meghatározni. A fizikai eredmény fontossága abban mérhető, hogy új problémák megoldását tette lehetővé, kísérleti következményeket adott, és más elméletekkel összhangba hozható matematikai eszközöket teremtett. Heisenberg korai munkássága mindhárom feltételnek megfelelt. Késői egységesítési kísérletei már nem értek el hasonló elfogadottságot, ami jól mutatja, hogy egy tudós életművén belül is különbséget kell tenni a maradandó eredmények és a be nem igazolódott programok között.

A történelmi megítélés más kérdéseket tesz fel. Az 1933 után Németországban maradó Heisenberg bonyolult viszonyt alakított ki a náci állammal. Nem volt a nemzetiszocialista ideológia feltétlen híve, és a fizika védelmében konfliktusai is támadtak a rendszer képviselőivel. Ugyanakkor állami intézményekben dolgozott, külföldi előadásaival a német tudományosság hivatalos jelenlétéhez is hozzájárult, a háborúban pedig részt vett az uránkutatásban. E tények együtt alkotják a történeti képet; egyik sem tehető meg a többi kizárólagos

HÁTTÉRGYÁR

magyarázatává.

A koppenhágai találkozó és a Farm Hall-i fogság ezért maradnak a Heisenberg-életrajz fontos próbakövei. Az első történetben két régi barát a megszállás és a titkos katonai kutatás árnyékában már nem tudott közös nyelvet találni. A másodikban a német fizikusok egy számukra váratlan technológiai sikerrel szembesültek, majd saját szerepükről és lehetőségeikről próbáltak beszámolót alkotni. Mindkét eseményről eltérő emlékezések és értelmezések születtek. A történész feladata nem az, hogy egyetlen drámai jelenetből kiolvassa az egész élet titkát, hanem hogy az eltérő dokumentumokat egymáshoz viszonyítva rekonstruálja a lehetséges történéseket.

Heisenberg személyes sorsában a huszadik század tudományának kettőssége rajzolódik ki. A kvantummechanika az emberi megismerés egyik legnagyobb teljesítménye, a nukleáris fegyverek pedig annak a kornak a félelmetes lehetőségeit jelzik, amelyben a fizika a politikai és katonai hatalom számára is stratégiai jelentőségűvé vált. A tudósok nem egyforma módon reagáltak erre a helyzetre, és saját választásaikat gyakran később is eltérően magyarázták. Heisenberg története ezért a tudomány és a politikai felelősség

HÁTTÉRGYÁR

kapcsolatának egyik legvitatottabb példája maradt.

A határozatlansági relációt olykor könnyedén alkalmazzák Heisenberg politikai magatartására. Ez irodalmi párhuzamnak hatásos, de a fizikai elv nem mondja ki, hogy egy történelmi személy szándékairól elvileg sem szerezhető tudás. A történész bizonytalansága más természetű: hiányos forrásokból, egymásnak ellentmondó tanúságokból, torzított emlékezésekből és a korabeli döntések összetettségéből fakad. Ezeket az akadályokat új dokumentumok, pontos elemzések és összehasonlító kutatások részben csökkenthetik. Az elbeszélés címében szereplő bizonytalanság ezért metafora, amelyet nem szabad összekeverni az 1927-es fizikai tétellel.

A könyv egészének mérlege két különálló, mégis egymással érintkező történetet őriz. Az egyik a fiatal fizikusé, aki új utat nyitott az atomi világ megértésében. A másik a német tudósé, aki egy diktatúra évtizedeiben folytatta munkáját, a háború után részt vett a tudományos újjáépítésben, és egész életében küzdött saját múltja értelmezésével. A kettő ugyanahhoz az emberhez tartozik. Egy történelmileg hiteles Heisenberg-portré akkor lehet teljes, ha nem próbálja az egyiket a másikkal eltüntetni.

HÁTTÉRGYÁR

25. Koppenhága emlékezete: két elbeszélés ugyanarról az éjszakáról

Az 1941. szeptemberi koppenhágai látogatás jelentősége messze túlnőtt az esemény időtartamán. Werner Heisenberg a Németország által megszállt Dániába érkezett, ahol egykori mestere és barátja, Niels Bohr élt. Mindketten pontosan tudták, hogy a fizikusok közötti régi, bizalmas beszédmódot a háború körülményei már nem teszik lehetővé. Heisenberg a német tudományos élet egyik legismertebb képviselője volt, és ekkor részt vett az uránkutatási programban. Bohr viszont olyan ország polgáraként fogadta, amelynek szuverenitását a Wehrmacht megsértette. A két férfi közös múltja megmaradt, de más intézményeket és más politikai valóságot képviseltek. Ebből a helyzetből született az a beszélgetés, amelyről később egymástól eltérő emlékek maradtak fenn.

A találkozót a későbbi történetírás gyakran egyetlen kérdés köré rendezte: akart-e Heisenberg atomfegyvert készíteni Hitlernek, és próbálta-e Bohrt arra rávenni, hogy az atombomba építésében részt vevő tudósok valamiféle közös korlátozást fogadjanak el? A feltételezés

vonzereje érthető. Egy elbeszélhető, személyes pillanattá sűríti az atomkor erkölcsi dilemmáját, miközben a német projekt befejezetlenségének is szándékos magyarázatot kínál. A rendelkezésre álló dokumentumok azonban nem jogosítanak fel arra, hogy e történetet változtatás nélkül elfogadjuk. A találkozóról nem készült hiteles, mindkét résztvevő által jóváhagyott jegyzőkönyv; a későbbi visszaemlékezések egymásnak ellentmondó hangsúlyokat adnak.

Heisenberg háború utáni magyarázatában több elem keveredett. Egyrészt azt hangsúlyozta, hogy a német fizikusok felismerték az atomfegyver elvi lehetőségét, de a német gazdaság és ipar nem tudta volna a háború idején megteremteni a szükséges feltételeket. Másrészt azt igyekezett megmutatni, hogy a tudományos munkának erkölcsi oldala is foglalkoztatta őket. Amikor saját szerepét Bohrhoz kötötte, a régi barátság és a dán fizikus tekintélye óhatatlanul hitelesítő erőt kapott. Ez önmagában még nem bizonyít tudatos félrevezetést, de megköveteli, hogy a visszaemlékező szándékát és közönségét figyelembe vegyük.

Bohr fennmaradt, el nem küldött levélfogalmazványai más hangulatot tükröznek. A dán tudós később felidézte, hogy Heisenberg szavaiból a németek atomfegyverrel

kapcsolatos érdeklődése és a fegyver megvalósíthatóságába vetett meggyőződése rajzolódott ki. Nem emlékezett olyan világos, kölcsönösen vállalt erkölcsi megállapodási javaslatra, amelyet a találkozó utólagos legendája sugallt. Bohr választervezeteinek különleges súlyt ad, hogy nem egy nyilvános vita kedvéért fogalmazták őket; ugyanakkor töredékes, megszerkesztetlen iratok, amelyek önmagukban szintén nem adják vissza a teljes beszélgetést. A történész ezért egyszerre tekintheti őket fontos ellenbizonyítéknak és hiányos forrásnak.

A félreértéseknek nyelvi és helyzeti okai is voltak. A német megszállás alatt egy külföldi látogató minden szava politikai jelentést hordozhatott. Bohr joggal tarthatott attól, hogy a német kutatásra utaló kijelentések fenyegetésnek vagy tudományos hírszerzésnek bizonyulnak. Heisenberg másfelől olyan környezetben mozgott, amelyben a haditechnikai információk nyílt közlése veszélyes volt, és beszélgetőpartnere szemében még a tudományos kérdésfeltevés is gyanússá válhatott. Nem csoda, hogy a két férfi egymásra nézve egészen mást hallhatott ugyanabban a mondatban. A barátság korábbi bizalma nem tudta felszámolni az egyenlőtlen háborús helyzetet.

HÁTTÉRGYÁR

Thomas Powers Heisenberg háborús történetét olyan olvasatban tárgyalta, amelyben a tudós tudatos vagy legalábbis szándékosan visszafogott magatartása fontos tényező. Paul Lawrence Rose ennél sokkal kritikusabb; szerinte a német projekt kudarcát nem lehet egy ember erkölcsi önkorlátozásának bizonyítékává emelni, és Heisenberg több kérdésben utólag szebb képet rajzolt saját tudásáról. David C. Cassidy életrajza szélesebb életúti keretbe helyezi a dilemmát. A nézetek összevetése nem azt jelenti, hogy az igazságot számtani középen kell keresni. Azt jelenti, hogy minden egyes állítást a korabeli feljegyzésekhez, a tudományos lehetőségekhez és a szereplők későbbi érdekeihez kell mérni.

Egyes népszerű feldolgozások a találkozót szinte színpadi jelenetként kezelik, amelyben a két tudós döntése elvben az egész emberiség sorsát befolyásolhatta volna. A történelmi valóság összetettebb. Az amerikai és brit atomprogram ekkor már több tudományos, katonai és politikai szereplő munkájától függött, és a német program sem Heisenberg egyszemélyes vállalkozása volt. A Bohr és Heisenberg közötti bizalomvesztés önmagában is fontos esemény: megmutatja, miként bomlasztott fel egy megszálló háború olyan nemzetközi tudományos közösséget, amely

HÁTTÉRGYÁR

korábban természetesnek tartotta a gondolatok áramlását.

Amikor Bohr 1943-ban elhagyta Dániát, később kapcsolatba került a szövetséges atomkutatással. A háború befejezése után sem tért vissza teljes egészében az egykori tudományos világ. A régi kollégáknak már a politikai felelősség, a hallgatás, a közreműködés és a tudás határai felől is számot kellett adniuk. Koppenhága 1941-es emléke ezért maradt meg olyan erősen. Nem azért, mert minden részletét ismerjük, hanem azért, mert a történetben a tudományos tekintély és az erkölcsi hitelesség közötti különbség vált láthatóvá.

HÁTTÉRGYÁR

26. Farm Hall: a lehallgatott beszélgetések értelmezése

Az 1945-ös Farm Hall-i internálás rendkívüli történeti forrást hagyott hátra. Tíz német atomkutatással foglalkozó tudóst tartottak fogva egy angliai vidéki házban, miközben a szövetséges hatóságok rejtett mikrofonokkal rögzítették beszélgetéseiket. A foglyok nem tudták, hogy vitáik később történészek kezébe kerülnek. Ez a körülmény különösen értékessé teszi a feljegyzéseket, mert számos spontán reakciót őriznek; egyúttal arra is figyelmeztet, hogy a lehallgatási átirat egyáltalán nem a teljes belső gondolkodásuk lenyomata. Amit elmondtak, azt társaiknak mondták, akik előtt presztízsük volt, akikkel szövetséget kötöttek vagy éppen vitatkoztak.

Amikor 1945. augusztus 6-án megérkezett a hirosimai atomtámadás híre, a német tudósok reakcióiban döbbenet, kétkedés, szakmai érdeklődés és személyes aggodalom keveredett. A nyugati szövetségesek ipari és tudományos teljesítményét korábban sokan alábecsülték. Most szembesültek azzal, hogy olyan fegyver született meg, amelyhez a német kutatás nem jutott közel. Ez a pillanat önmagában cáfolja azt az utólag kényelmes

elképzelést, hogy a német szakemberek valamennyien pontosan ismerték az atombomba megépítésének útját, csak valamiféle titkos közös döntés miatt nem valósították meg. Az átiratokból azonban az sem következik, hogy a német fizika minden szereplője egyformán tájékozatlan lett volna.

Heisenberg kezdeti becsléseit és későbbi számításait különösen sokat vizsgálták. A vita egyik központi tárgya a hasadóanyag kritikus tömegének kérdése: mekkora mennyiség és milyen fizikai feltételek mellett tudna rendkívül gyors láncreakciót előidézni? A háború után egyszerűnek tűnhet azt mondani, hogy az alapelvek minden jó fizikus előtt ismertek voltak. A gyakorlati fegyver kidolgozásához azonban pontos adatokra, kísérletekre, anyagokra, ipari eljárásokra és az eltérő folyamatok gondos megkülönböztetésére volt szükség. Egy magreaktor felépítését leíró gondolatmenetből nem adódik automatikusan működő fegyver terve.

A fogság idején Heisenberg idővel olyan számítási előadást tartott társainak, amely már a bomba tényleges nagyságrendjéhez közelebb álló megfontolásokat tartalmazott. A történeti kérdés éppen az, hogy mikor és milyen formában jutott ezekre a felismerésekre. A Farm Hall-i iratok létezése miatt a kutató nem elégedhet meg

későbbi kijelentésekkel arról, hogy az alapvető eredmények már korábban is teljesen világosak voltak. Ugyanakkor a háborús technikai jelentések között is el kell választani a sejtést, a lehetséges elvi megoldást és az ellenőrzött számítást. E három szint összemosása mindkét irányban hibás következtetéshez vezet.

A német program szervezeti szerkezete sem hasonlított az amerikai Manhattan-terv hatalmas ipari vállalkozásához. Több kutatócsoport dolgozott részben párhuzamos feladatokon, az illetékességek változtak, a források korlátozottak voltak, a háború előrehaladtával pedig a bombázások és az ellátási nehézségek tovább akadályozták a kutatást. A német fizikusok között szakmai rivalizálás, bizonytalanság és kölcsönös bizalmatlanság alakult ki. A Farm Hall-i beszélgetésekben megfigyelhető utólagos magyarázkodás ebből a környezetből is érthető. A felelősséget könnyű volt olyan riválisokra vagy intézményekre hárítani, amelyek nem ültek ugyanabban a szobában.

A legkényesebb forráskritikai kérdés az utólagos önfelmentés. A tudósoknak alig néhány napjuk volt arra, hogy feldolgozzák a hírt, amely tudományos és erkölcsi szempontból egyszerre kérdőjelezte meg a háborús

munkájukat. Beszélgetéseik során megjelent az a gondolat, hogy a német kutatás végül nem gyártott tömegpusztító fegyvert, míg az amerikai program igen. E ténynek természetesen óriási jelentősége volt, de nem bizonyította önmagában a résztvevők erkölcsi fölényét. A felelősséget a döntések idején rendelkezésre álló tudás, a vállalt tevékenység és annak célja alapján kell mérlegelni, nem kizárólag az eredmény szerint.

Otto Hahn viselkedése a hírek hallatán külön figyelmet érdemel. A maghasadás felfedezésében meghatározó szerepet játszó kémikus másként tekinthetett saját tudományos hozzájárulására, amikor a felfedezés katonai következményeivel szembesült. A személyes megrendülés emberileg hiteles lehetett, még ha önmagában nem is pótolta a háború alatti tudományos és politikai döntések elemzését. A tudománytörténeti beszámolóban ezért a szereplők érzelmi reakcióit nem szabad utólagos felmentő ítéletnek tekinteni, de cinikus színjátékként sem indokolt eleve elutasítani.

Samuel Goudsmit, az Alsos-misszió tudományos vezetője a háború után határozottan bírálta a német kutatók állításait. Egyes részleteket ő maga sem értelmezett hibátlanul, amire később ellenfelei joggal mutathattak rá. A kritika tévedései azonban nem

bizonyítják az ellenkező álláspont egészét. Ugyanez igaz Heisenberg önéletrajzi magyarázataira: egy-egy helyes technikai megállapítás nem igazolja automatikusan a háborús motivációiról alkotott kedvező képet. A történésznek minden állítást külön kell megvizsgálnia, és ellen kell állnia annak a csábításnak, hogy egyetlen dokumentummal lezárjon évtizedes vitákat.

A Farm Hall-i anyag legnagyobb tanulsága éppen a különböző bizonytalanságok szétválasztása. Van olyan kérdés, amelyre a korszak iratai elegendő választ adnak: Németország 1945 tavaszáig nem állított elő működő atomfegyvert vagy önfenntartó nukleáris reaktort. Más kérdések, például egy meghatározott tudós belső szándéka, kevésbé lezárhatók. A feljegyzések emberi hangja értékes, de a gondolatok és célok teljes hozzáférhetőségét nem ígérik. Éppen ezért lehetnek a modern történeti forráskritika mintapéldái.

HÁTTÉRGYÁR

27. A határozatlansági reláció öröksége a modern fizikában

Heisenberg nevét a legtöbb olvasó egyetlen, 1927-ben megfogalmazott összefüggéssel azonosítja. A határozatlansági reláció ma a kvantummechanika alaptételei közé tartozik, de történetének van egy fontos, gyakran elvesző részlete: megértése és pontos matematikai formája a kvantumelmélet fejlődésével együtt változott. A népszerű ismertetések sokszor úgy magyarázzák, hogy a mérőeszköz óhatatlanul megzavarja a vizsgált részecskét. Ez szemléletes kiindulópont lehet, ám a korszerű állítás ennél mélyebb. A kvantumállapot leírásában bizonyos fizikai mennyiségek eloszlásának szórása között alapvető összefüggés van, amely nem tűnik el pusztán a mérőberendezés tökéletesítésével.

A hely és az impulzus közötti viszony az alapvető példa. A klasszikus mechanikában egy pontszerű test pillanatnyi helyét és sebességét elvben tetszőleges pontossággal ismerhető mennyiségeknek tekintették. A kvantummechanikában egy jól körülhatárolt helyzethez rendszerint sokféle impulzusösszetevő tartozik, míg a meghatározott impulzusú állapot térben nem lokalizálható ugyanígy. Matematikailag ennek hátterében

az áll, hogy a megfelelő operátorok felcserélésének sorrendje nem közömbös. Az összefüggés nem a műszerek ügyetlenségéről, hanem az állapotok leírásának szerkezetéről szól.

A modern tankönyvek többnyire a szórások szorzatának alsó korlátját adják meg, amelyben a redukált Planck-állandó szerepel. A pontos alak azért fontos, mert megkülönbözteti a bizonytalanságot a köznyelvi kétértelműségtől. A fizikai mennyiségek nem kizárólag azért bizonytalanok, mert a kutató nem szerezte meg a megfelelő adatokat. Egy kvantumállapot előkészítése már eleve korlátot szab arra, hogy a helyzet és az impulzus milyen statisztikai élességgel jellemezhető egyszerre. Ez a szempont később elválaszthatóvá vált a mérés konkrét zavaró hatásának önálló vizsgálatától.

A különbségtétel mögött évtizedes munka állt. A kvantumelmélet mérésének problémáját Bohr, von Neumann és sok későbbi fizikus eltérő módszerekkel vizsgálta. A laboratóriumi technikák fejlődésével a mérési hibát és a megzavarást sokkal pontosabban lehetett elemezni, mint a húszas években. Ez nem érvénytelenítette Heisenberg felfedezését, hanem megmutatta, hogy egy történetileg megszületett fizikai

tétel jelentése miként válik árnyaltabbá. A kvantummechanika sajátossága nem egyetlen híres szemléltető kísérletbe sűrűsödik, hanem az elméleti állítás és a megfigyelhető eredmények közötti következetes kapcsolatban áll.

Heisenberg munkájának maradandósága azért is különleges, mert a kvantummechanika értelmezésében máig nincsen teljes egyetértés. Egyes megközelítések a mérés és a tudományos leírás viszonyát emelik ki, mások a hullámfüggvény ontológiai státusára vagy az egymással kölcsönható rendszerek kapcsolatára összpontosítanak. A különféle értelmezések közül sok ugyanazokat a megszokott mérési eredményeket jósolja. A határozatlansági reláció tehát nem valamely filozófiai iskola kizárólagos tulajdona. Olyan matematikai tulajdonságot fejez ki, amellyel a különböző értelmezéseknek egyaránt számot kell vetniük.

A kvantumfizika technikai alkalmazásait gyakran közvetlenül Heisenberg tételére vezetik vissza. Ez túlzott leegyszerűsítés volna: a félvezetők, a lézerek, a mágneses rezonancia vagy az atomórák létrejöttéhez számos további elméleti és kísérleti felismerés kellett. A hely és impulzus határozatlanságának, valamint általában a nem felcserélhető mennyiségeknek a

gondolata azonban alapvető része annak a nyelvnek, amellyel a modern fizika az atomi rendszereket leírja. A tétel és az alkalmazások közötti kapcsolat nem egyenes feltalálástörténet, hanem egy egész tudományág közös építménye.

A kvantumtechnológiák újabb hulláma ismét láthatóvá teszi ezt az örökséget. Amikor különösen gyenge jeleket próbálnak mérni, amikor az optikai és atomi állapotok zaját alakítják, vagy amikor egymással összefonódott kvantumrendszerek tulajdonságait vizsgálják, a kutatók ugyanannak az elméleti szerkezetnek a következményeivel dolgoznak. Ilyen helyzetekben a hétköznapi értelemben vett „pontosabb eszköz” nem minden esetben elegendő: az állapot előkészítésének és a megfigyelhető mennyiségek választásának is szerepe van. A történeti folytonosság mégis óvatosságra int, mert a mai eredményeket nem szabad utólag a húszas évek fizikusainak szándékaiként feltüntetni.

A határozatlansági reláció a köznyelvben többnyire a tudás általános korlátjának metaforájává vált. Politikai és erkölcsi döntések magyarázatára azonban nem használható tudományos igazolásként. A kvantummechanikai szórásokra vonatkozó tételből nem következik, hogy egy történelmi szereplő felelőssége

szükségszerűen meghatározhatatlan, vagy hogy minden értelmezés azonos értékű. Heisenberg saját élettörténetének megítélésében különösen csábító a szóvicc: a bizonytalanság felfedezőjének múltja is bizonytalan. A fizikai eredmény értékét és a történelmi bizonyítás módszerét éppen akkor becsüljük meg, ha ezt a kényelmes analógiát nem keverjük össze a tényleges érveléssel.

A centenárium közeledtével Heisenberg tudományos örökségét ezért egyszerre érdemes pontosan és történeti távlatból bemutatni. Az 1927-es tétel a modern természettudomány egyik alapköve maradt, de megértését több nemzedék fizikusai csiszolták. A nagy felfedező munkája ebben az értelemben nem lezárt emlékmű, hanem olyan gondolati eszközkészlet része, amely ma is új kísérleteket tesz lehetővé.

HÁTTÉRGYÁR

28. Tudós, állampolgár, történelmi szereplő

A huszadik század tudománytörténete számos olyan alakot ismer, aki ugyanabban az életben mutatott kiemelkedő szellemi teljesítményt és nehezen védhető politikai ítélőképességet. Werner Heisenberg esete azért vált különösen fontossá, mert a kvantummechanika egyik megalkotója a náci Németországban maradt, és az állam haditechnikai szempontból fontos kutatási programjában dolgozott. A két életrajzi tény közötti kapcsolatot nem lehet egyetlen erkölcsi jelzővel elintézni. A tudományos nagyság nem ment fel az állampolgári felelősség alól, a politikai kompromisszum pedig önmagában nem törli el egy matematikai vagy fizikai felismerés érvényét.

Heisenberg döntéseit családi kapcsolatai, a német akadémiai hagyományokhoz való kötődése, pályája intézményi körülményei és hazafias érzése egyaránt befolyásolhatták. Az emigráció mellett nem döntött, noha nemzetközi tekintélyével és kapcsolataival más lehetőségei is lettek volna. A maradás nem jelentett mindenben azonosulást a nemzetiszocializmussal; a német fizika ideológiai támadásaitól való távolságtartása és a tudományos hagyomány védelmében tett fellépése

dokumentálható. Ugyanakkor a politikai rendszerrel való együttműködés és a tudományos intézmények fennmaradásáért vállalt kompromisszum nem választható el a rendszer által folytatott háborútól. Azt a kérdést, hogy mi lett volna a helyes magatartás, a történész nem oldhatja meg a szereplő szándékainak megszépítésével.

A tudósok háborús tevékenységének mérlegelésekor az egyéni döntési szabadság határait sem szabad eltúlozni. A diktatúra szűkítette az intézményi autonómiát, veszélyeztette a bírálókat, és a kutatás jelentős részét katonai érdekeknek rendelte alá. A személyes kockázat azonban nem minden szereplő esetében volt azonos, és a nehéz körülmények említése nem pótolja annak megvizsgálását, hogy ki milyen feladatot vállalt, milyen erőforrásokat kért, milyen jelentéseket készített vagy milyen kezdeményezéseket támogatott. A történeti ítélet fokozatokból áll; az általános bűnösség és az általános felmentés egyaránt megakadályozza a különbségek felismerését.

A háború utáni Németországban Heisenberg tekintélye intézményépítő erővé vált. A tudományos élet újjászervezése közben azonban a múlt értelmezése a személyes és nemzeti helyreállítás egyik eszköze lett. A

kutatók nyilvános beszámolói olykor hangsúlyozták a háborús kutatások korlátozott eredményét és a fegyverkészítés gyakorlati akadályait, miközben kevésbé részletezték a program katonai céljait. E jelenség vizsgálatában az utólagos önigazolás fogalma hasznos, de csak akkor, ha pontos állításokhoz és dokumentumokhoz kötjük. Máskülönben maga is olyan általánosító ítéletté válik, amely ellenőrizhetetlen.

Az atomfegyverek körüli morális vita a háború után új helyzetbe került. A német tudósok már nem készíthettek ilyen fegyvert, de szembesültek azzal, hogy a világ a nukleáris elrettentés logikája szerint szerveződik. Az 1957-es göttingeni nyilatkozat fontos politikai szerepvállalás volt, különösen a nyugatnémet atomfegyverkezés vitájában. Nem volna indokolt úgy tekinteni rá, mintha önmagában megválaszolná az 1939 és 1945 közötti döntések kérdéseit. Egy későbbi, helyesnek tartott állásfoglalás a korábbi magatartást megvilágíthatja, de visszamenőlegesen nem változtatja meg.

Heisenberg a tudomány és politika kapcsolatáról írt szövegeiben gyakran hangsúlyozta a kutatók szakmai felelősségét és a természettudományos gondolkodás kulturális jelentőségét. A nyilvánosság előtt így részben

olyan értelmiségi szerepet képviselt, amelynek feltételei Németországban az ő fiatalkora óta gyökeresen megváltoztak. A császárkor egyetemi világából induló fizikus két világháborút, diktatúrát, országának megosztottságát és a hidegháborús szövetségi rendszereket élte át. Nem lehetett visszatérni ahhoz az elképzeléshez, hogy a tudomány a politikától teljesen elkülönült, védett intézmény maradhat.

Az életút tanulsága túlmutat a német történelem egyetlen évtizedén. A modern kutató tudása olyan intézményekben jön létre, amelyek pénzügyi, katonai, gazdasági és politikai kapcsolatokkal rendelkeznek. Az egyéni kutatónak különféle szintű befolyása lehet arra, hogyan használják fel az eredményeit, és sokszor éppen a tényleges lehetőségeinek korlátozottsága teszi nehézzé a döntést. E korlátozottságot azonban nem szabad azonosítani a felelősség hiányával. A döntés erkölcsi értékelése a rendelkezésre álló alternatívák és az előrelátható következmények megvizsgálásából indulhat ki.

Heisenberg példája a tudományos tekintély kezelésére is figyelmeztet. A kivételes elméleti tehetségből nem következik kivételes politikai bölcsesség, és egy Nobel-díj nem bizonyítja a személyes visszaemlékezés

hibátlanságát. Fordítva is igaz: egy vitatott közéleti szerepvállalás nem teszi érvénytelenné a tudományos eredményeket. A közösségnek mindkét területen külön mércére van szüksége. A fizikai állítás kísérletekkel és matematikai következetességgel, a történeti állítás forrásokkal és kritikai összehasonlítással igazolható.

A száz évvel korábbi kvantumforradalom története így azzal a kérdéssel ér véget, amelyet a fizikai elmélet maga nem tud eldönteni: milyen felelősség terheli azt, akinek a tudása nagy hatalmat biztosít a társadalom számára? Heisenberg életében nincs egyetlen mozdulat, amely minden ellentmondást feloldana. Fiatalon új tudományos nyelv kialakításához járult hozzá, érett korában egy diktatúra tudományos rendszerében dolgozott, majd a háború után a német fizika újjáépítésének meghatározó alakja lett. E történet értékét éppen az adja, hogy egyik korszakot sem kell a másik kedvéért elhallgatni.

HÁTTÉRGYÁR

Kronológia

1901. december 5.

Werner Heisenberg megszületik Würzburgban.

1910

A család Münchenbe költözik.

1920

Heisenberg megkezdi fizikatanulmányait a müncheni egyetemen.

1923

Doktori fokozatot szerez; Göttingenben is dolgozik.

1924

Habilitáció; tudományos kapcsolata szorosabbá válik Niels Bohrral.

1925. június

Helgolandon kialakítja a mátrixmechanika alapjául szolgáló eljárást.

1925–1926

Born és Jordan részvételével kibontakozik az új kvantummechanika.

HÁTTÉRGYÁR

1927

Megjelenik a határozatlansági relációról szóló munkája.

1927

A lipcsei egyetem professzora lesz.

1932

Megkapja az 1932. évi fizikai Nobel-díjat; az átadás 1933-ban történik.

1933

Hitler hatalomra jut, megkezdődik a német tudományos élet átalakítása.

1937

Feleségül veszi Elisabeth Schumachert.

1938. december

Hahn és Strassmann maghasadáshoz vezető kísérleti eredményei.

1939

Heisenberg bekapcsolódik a német uránkutatásba.

1941. szeptember

Heisenberg meglátogatja Bohrt a megszállt Koppenhágában.

HÁTTÉRGYÁR

1942. június

Berlinben magas szintű egyeztetés zajlik a német atomkutatás kilátásairól.

1945. tavasz

A haigerlochi reaktorkísérlet nem éri el az önfenntartó láncreakciót.

1945. augusztus

A Farm Hallban fogva tartott német tudósok értesülnek Hirosimáról.

1946

Heisenberg visszatér a német tudományos intézményrendszer újjászervezéséhez.

1957

Aláírja a göttingeni tizennyolcak atomfegyverkezést ellenző nyilatkozatát.

1960-as évek

Folytatja tudományfilozófiai és egységes térelméleti munkáit.

1976. február 1.

Heisenberg Münchenben meghal.

HÁTTÉRGYÁR

Fontosabb szereplők

Niels Bohr

Dán fizikus, Heisenberg mestere és vitapartnere, az atom szerkezetének és a kvantumelméletnek meghatározó kutatója.

Max Born

Göttingeni fizikus; a mátrixmechanika matematikai értelmezésének és a kvantummechanika valószínűségi olvasatának alakítója.

Pascual Jordan

Born és Heisenberg munkatársa a kvantummechanika korai matematikai kidolgozásában.

Arnold Sommerfeld

Müncheni elméleti fizikus, Heisenberg tanára; több későbbi Nobel-díjas kutató mestere.

Erwin Schrödinger

A hullámmechanika megalkotója; eredményei új formában kapcsolódtak a mátrixmechanikához.

Albert Einstein

A relativitáselmélet megalkotója, a kvantumelmélet egyik kezdeményezője és kritikus vitapartnere.

HÁTTÉRGYÁR

Wolfgang Pauli

Heisenberg közeli kollégája és szigorú szellemi kritikusa.

Otto Hahn

Kémikus, az uránmag hasadásának kísérleti felfedezésében meghatározó szereplő.

Lise Meitner

Osztrák–svéd fizikus, a maghasadás elméleti megértésének központi alakja.

Fritz Strassmann

Kémikus, Hahn munkatársa az 1938-as maghasadási kísérletekben.

Carl Friedrich von Weizsäcker

Fizikus és filozófus; a német uránprogram résztvevője és Heisenberg közeli munkatársa.

Kurt Diebner

A német katonai atomkutatás egyik vezetője, saját kutatócsoporttal.

Walther Bothe

Német fizikus; a neutronvizsgálatok és a moderátoranyagok kérdésének kutatója.

HÁTTÉRGYÁR

Karl Wirtz

A német uránreaktor-kísérletek egyik fontos munkatársa.

Samuel Goudsmit

Holland származású amerikai fizikus, az Alsos-misszió tudományos vezetője; a német atomprogram háború utáni kritikusa.

Albert Speer

A náci Németország fegyverkezési minisztere, aki az atomprogram erőforrás-kérdéseiről is döntött.

Elisabeth Heisenberg

Werner Heisenberg felesége, a családi élet és az emlékezet egyik fontos tanúja.

HÁTTÉRGYÁR

Felhasznált irodalom és források

David C. Cassidy: Uncertainty: The Life and Science of Werner Heisenberg. W. H. Freeman, 1992; későbbi kiadások.

Werner Heisenberg: Der Teil und das Ganze: Gespräche im Umkreis der Atomphysik. Piper, 1969.

Thomas Powers: Heisenberg’s War: The Secret History of the German Bomb. Knopf, 1993.

Paul Lawrence Rose: Heisenberg and the Nazi Atomic Bomb Project, 1939–1945: A Study in German Culture. University of California Press, 1998.

Operation Epsilon: The Farm Hall Transcripts. Charles Frank szerkesztésében, University of California Press, 1993.

Werner Heisenberg: „Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik.” Zeitschrift für Physik 43 (1927), 172–198.

Werner Heisenberg: „Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen.” Zeitschrift für Physik 33 (1925), 879–893.

HÁTTÉRGYÁR

Niels Bohr Archive: a Bohr–Heisenberg-találkozóval kapcsolatos, közzétett, el nem küldött levéltervezetek.

Max Born és Pascual Jordan, valamint Born–Heisenberg–Jordan: a mátrixmechanika korai közleményei, 1925–1926.

Mark Walker: German National Socialism and the Quest for Nuclear Power, 1939–1949. Cambridge University Press, 1989.

HÁTTÉRGYÁR

Függelék: A fontosabb fizikai fogalmak

Kvantum.

A kvantum elnevezés a fizikai mennyiségek bizonyos rendszerekben fellépő diszkrét értékeire utal. Az atom által kibocsátott vagy elnyelt sugárzás energiája meghatározott átmenetekhez kötött; a modern elmélet az állapotokat és az átmenetek valószínűségét írja le. A kvantum szó nem jelenti azt, hogy a természetben minden elképzelhető mennyiség csak egész lépésekben változhat.

Állapot és hullámfüggvény.

A kvantumállapot egy rendszer mérhető tulajdonságairól lehetséges előrejelzéseket hordozza. A hullámfüggvény az állapot egyik matematikai leírása; abszolútértékének négyzete megfelelő értelmezésben valószínűségi sűrűséget ad. Az állapotot nem érdemes olyan kicsiny tárgyként elképzelni, amelynek valamennyi klasszikus tulajdonsága előre rögzített.

HÁTTÉRGYÁR

Mátrixmechanika.

A Heisenberg, Born és Jordan által 1925-ben kidolgozott módszer a megfigyelhető átmenetek mennyiségeivel számol. A klasszikus számok helyén nem felcserélhető szorzású matematikai objektumok jelennek meg. Ez a tulajdonság kulcsfontosságú az energiaállapotok és a mérési eredmények viszonyának megértésében.

Hullámmechanika.

Schrödinger 1926-ban megfogalmazott módszere a kvantumállapot fejlődését differenciálegyenlettel írja le. Matematikai formája a mátrixmechanikáétól különbözött, de a két leírás alapvető fizikai tartalma megfelelő feltételek mellett egyenértékű. Az eltérő matematikai nyelvek körül kialakult vita a korabeli kutatók fogalmi bizonytalanságát is jelzi.

Kommutátor.

Két operátor kommutátora a két lehetséges szorzási sorrend különbsége. A hely- és impulzusoperátor kommutációs összefüggése a határozatlansági reláció matematikai háttere. A sorrend fontossága távol áll a klasszikus számtani szorzás megszokott szabályaitól.

HÁTTÉRGYÁR

Határozatlansági reláció.

A hely és az impulzus szórásának szorzata egy kvantumállapotban nem lehet kisebb a redukált Planck-állandó felénél. A korlát a kvantumállapotok felépítéséből következik; nem vezethető vissza pusztán az ügyetlen mérőeszközök zavaró hatására. A hétköznapi bizonytalanságról szóló metaforák nem helyettesítik ezt a pontos állítást.

Komplementaritás.

Bohr értelmezési elve szerint egyes kísérleti elrendezések különböző, egymással össze nem vonható megfigyelési helyzeteket teremtenek. A hullám- és részecskekép bizonyos jelenségek leírásakor eltérő szerephez jut. A komplementaritás fogalmi értelmezés, nem a határozatlansági relációval azonos képlet.

Maghasadás.

A nehéz atommag két könnyebb magra bomlásakor jelentős energia szabadulhat fel. Az urán maghasadásának kísérleti felismerésében Otto Hahn és Fritz Strassmann, a magyarázat kidolgozásában Lise Meitner és Otto Frisch játszott döntő szerepet. A felfedezés tudományos és katonai alkalmazásainak története egymástól elválaszthatatlan, de kronológiailag elkülöníthető.

HÁTTÉRGYÁR

Láncreakció.

Ha egy hasadásból származó neutronok újabb hasadásokat idéznek elő, a folyamat önfenntartóvá válhat. Az eredmény függ a hasadóanyag összetételétől, geometriájától és a neutronok veszteségeitől. A szabályozott reaktorműködés és a robbanásszerű energiafelszabadulás fizikai feltételei lényegesen különböznek.

Moderátor.

A moderátoranyag a neutronok egy részét lelassítja, ami bizonyos hasadóanyag-összetételekben kedvez a további hasadásoknak. A német uránkutatásban a nehézvíz és a grafit alkalmassága fontos kutatási és ipari kérdés volt. Az anyagok tisztasága, beszerzése és a kísérleti hibák egyszerre befolyásolták az eredményeket.

Urán-235 és urán-238.

A természetes urán főként urán-238-at tartalmaz, és jóval kisebb részben urán-235-öt. A két izotóp eltérő neutronfizikai tulajdonságai miatt az izotópdúsítás központi technológiai kérdéssé vált. Az atomreaktor és a magfegyver történeti fejlődését ezért nem lehet összemosni.

HÁTTÉRGYÁR

Kritikusság.

Egy reaktor akkor kritikus, amikor a láncreakció átlagosan fenntartja önmagát, vagyis a neutronok következő nemzedéke nem fogyatkozik el. A köznyelvben a kritikus szó vészhelyzetet jelenthet, a reaktorfizikában azonban meghatározott működési állapotot jelöl. A haigerlochi kísérleti berendezés a háború végéig nem ért el ilyen állapotot.

Kritikus tömeg.

A kifejezés meghatározott fizikai feltételekhez kötött, és nem tekinthető minden helyzetben változatlan anyagmennyiségnek. A második világháborús német atomkutatás megítélésében fontos, hogy mely korabeli számítások álltak rendelkezésre, milyen anyagra vonatkoztak, és mikor születtek. A később megszerzett tudást nem szabad automatikusan visszavetíteni 1939–1942-re.

HÁTTÉRGYÁR

Egységes térelmélet.

Heisenberg késői munkáiban olyan alapvető elméleti leírásra törekedett, amely többféle részecskét és kölcsönhatást közös matematikai keretbe foglalhat. Ezek a próbálkozások nem váltak a későbbi részecskefizika elfogadott alapelméletévé. Tudománytörténeti jelentőségük mégis van: megmutatják, miként gondolkodott az elméletalkotás lehetőségeiről egy nagy hatású kutató.

HÁTTÉRGYÁR

Függelék: Forráskritikai megjegyzések

A négy alapmunka eltérő műfajú. David C. Cassidy munkája átfogó tudományos életrajz; Heisenberg Der Teil und das Ganze című könyve személyes visszatekintés; Thomas Powers és Paul Lawrence Rose könyvei a háborús időszak különböző értelmezéseit képviselik. A személyes emlékezés utólagos szerkesztés eredménye. A historikus műveknél a kutatói következtetést és a tényleges korabeli dokumentumot érdemes elkülöníteni.

A koppenhágai beszélgetés nem rekonstruálható szó szerinti pontossággal. Heisenberg 1941 szeptemberében találkozott Bohrral a megszállt Dániában. A találkozó céljáról és tartalmáról később eltérő emlékezések születtek. Bohr fennmaradt, el nem küldött levéltervezetei értékes ellenpontot jelentenek, de ezek sem helyettesítik az eseményről készült egyidejű, részletes jegyzőkönyvet. A könyvben a szándékok és a ki nem mondott mondatok ezért csak feltételesen tárgyalhatók.

A Farm Hall-i felvételek elsődleges dokumentumok, de nem teljes életútmagyarázatok.

HÁTTÉRGYÁR

A tíz internált német tudós beszélgetéseit 1945-ben titokban rögzítették. A hirosimai hírre adott reakciók, az egymás közötti viták és a későbbi számítások fontos adatok az akkori ismeretekről. Az egyes megszólalások értelmezésekor azonban figyelembe kell venni az adott napot, a beszélgetőpartnereket és azt, hogy a résztvevők nem egységes kutatócsoportként gondolkodtak.

A német atomprogram sikertelensége többtényezős folyamat volt. A német kutatás szervezeti megosztottsága, az ipari erőforrások korlátai, a háborús prioritások, a nyersanyagellátás és a műszaki következtetések mind szerepet játszhattak. Az az állítás, hogy egyetlen ember tudatosan megakadályozta az atomfegyver elkészítését, a rendelkezésre álló történeti bizonyítékokból nem következik egyértelműen. Ugyanígy túlzott leegyszerűsítés volna a kudarcot kizárólag egyetlen téves számításra visszavezetni.

Az erkölcsi és a technikai kérdések különböző természetűek. Azt, hogy a német kutatók milyen számításokat végeztek el, fennmaradt iratokkal és kísérleti eredményekkel lehet vizsgálni. Azt, hogy milyen szándék vezette őket, részben vallomásokból, levelekből és cselekedeteik körülményeiből következtethetjük ki. A két szintet meg kell különböztetni: a műszaki

sikertelenség önmagában nem bizonyít erkölcsi ellenállást, az állami kutatási részvétel pedig nem tesz minden egyéni motivációt azonossá.

A szöveg általános olvasóknak készült. Az elméleti fizikai fejtegetések a történeti megértést szolgálják. A függelék rövid fogalommagyarázatai nem helyettesítik a szakkönyvi levezetéseket, ahogy a forrásjegyzék sem teljes levéltári repertórium. A könyv történeti megállapításainál a források egyező tényei élveznek elsőbbséget az utólagos önértelmezésekkel szemben.

HÁTTÉRGYÁR



A bizonytalanság embere

Werner Heisenberg a 20. századi fizika egyik legnagyobb alakja volt: a kvantummechanika úttörője, a határozatlansági reláció megfogalmazója, Nobel-díjas tudós. Életének története azonban nemcsak tudománytörténet, hanem erkölcsi és politikai dráma is.

Ez a könyv végigköveti pályáját a müncheni gyermekkortól a koppenhágai vitákon, a náci korszak dilemmáin és a német atomprogram történetén át a háború utáni önértelmezésig.

Tudomány, történelem és felelősség egyetlen, rendkívüli életút tükrében.

Háttérgyár

A borító mesterséges intelligencia felhasználásával készült.