

MAX PLANCK EMLÉKÜLÉS 2008

Bencze Gyula

a fizikai tudomány doktora, KFKI RMKI
gbencze@rmki.kfki.hu

2008-ban ünnepeljük Max Planck születésének 150. évfordulóját. A kiemelkedő német tudós tiszteletére május 14-én, szerdán az MTA Nagytermében emlékülést tartott a Fizikai Tudományok Osztálya és az Eötvös Loránd Fizikai Társulat.

A megnyitó beszédet Kroó Norbert akadémikus, az MTA újraválasztott természettudományi alelnöke tartotta. Az ülésen elhangzott előadások szerkesztett változata a *Fizikai Szemle* című folyóiratban fog megjelenni, e helyütt csak rövid összefoglalását adjuk az elhangzottaknak.

Amint azt Kroó Norbert megnyitójában hangsúlyozta, Max Planck munkásságának jelentősége két dolog miatt is felbecsülhetetlen. Először is, megalapozta a kvantummechanikát mint a modern fizika egy új ágát, másodsor, sikerült meggyőznie annak idején Vilmos császárt arról, hogy egy modern társadalomban az egyetemi kutatásokkal párhuzamosan működő, független kutatóintézetek szerepe kulcsfontosságú. Így jött létre 1911-ben a Vilmos Császár Intézet Berlinben, amelynek a jogutódja az emléket nevében őrző és ma is aktívan működő kutatóhálózat, a Max Planck Társaság.

„A Max Planck Társaság kutatási teljesítménye és eredményei, legyenek azok bármilyen területen megjelent publikáció, hivatkozás, sikeres pályázat, utódnevelés, bejelentett

szabadalmak száma, a német átlagnak a dupláját nyújtják. Éppúgy, mint a Magyar Tudományos Akadémia hazánkban. Úgy gondolom, hogy ez nem lehet véletlen. Ez nem azért van így, mert akár nálunk, akár a Max Planck Társaságban zsenik ülnének, hanem mert az a szervezeti forma, amely ott működik és amelyik nálunk is meghonosult, igen kedvező a kutatás számára. Ez fontos üzenet, mely önbizalmat adhat nekünk.” – tette hozzá Akadémiánk alelnöke.

Az előadások egy része a kvantumelmélet kialakulásának történetét tekintette át, valamint Plancknak a modern fizikához való személyes hozzájárulását elemezte. Nagy Károly akadémikus szavaival élve, Max Planck „ajtót nyitott a kvantumok világára”.

Ahhoz, hogy a kvantumelmélet világképformáló hatásáról, és a korábbi fizika fogalomrendszerének radikális megváltoztatásáról képet alkothassunk, röviden fel kell idézni a fizika tizenkilencedik század végi állapotát. A newtoni klasszikus mechanika kétszáz éves egyeduralma mellé már felsorakozott a Maxwell-féle elektrodinamika, amely a korábban különálló elektromosság- és mágnességtant és optikát egységes keretbe foglalva, térelméleti alapon tárgyalja, a tapasztalattal jó egyezésben. Ismert volt az energia megmaradását kifejező energiatétel, a hőtan első két főtétele, és az anyag atomisztikus felépítését – ugyan

ekkor még feltevésként – alapul vevő kinetikus gázelmélet. Ezeknek az elméleteknek fő sajátosságuk, hogy a fizikai rendszerek állapotát jellemző mennyiségek tér- és időbeli változását meghatározó mozgástörvények, lehetővé teszik a rendszer fizikai állapotának elméleti meghatározását bármely későbbi időben, ha a kezdeti állapotot ismerjük. Az így kiszámított állapot fizikai jellemzői méreással ellenőrizhetővé váltak, és ezzel az elmélet jóslatai igazolást nyertek. Ez olyan szellemi teljesítmény, amelyhez hasonló ezt megelőzően nem létezett az emberiség kultúrtörténetében. A mechanikához és az elektrodinamikához hozzávéve a fenomenológiai termodinamikát is, elfogultság nélkül állíthatjuk, hogy ezek olyan csodálatos elméletek, és olyan széles jelenségek foglalnak magukba, hogy a fizika épülete a befejezettség érzetét keltette a kor fizikusaiiban. Ennek jellemzésére szoktuk idézni a német fizika professzort, Philipp von Jollyt, aki a hozzá tanácsért forduló fiatal Plancknak azt mondta, hogy fizikával nem érdemes már foglalkozni, mert ott lényegében minden fontosabb kérdés meg van oldva. Ugyanígy nyilatkozott az angol Lord Kelvin is, amikor 1900-ban, egy előadásában azt mondta, hogy csak néhány felhőcske zavarja meg a fizika tiszta kék égét.

Ilyen beárnyékoló felhőcskének számított a gázok vonalas színképe, az ún. fényelektromos jelenség, a szilárd anyagok fahőjének függése a hőmérséklettől, és a hőmérsékleti sugárzás. Ezt az utóbbi témakört tekintve olyan általános sajátságok kiderítését tűzték ki célul, amelyek nem függenek a sugárzást kibocsátó test anyagi minőségétől. Leginkább az izzó testek által kibocsátott sugárzás intenzitásának a rezgésszámtól való függése volt az a probléma, amely a vezető fizikusok egy részét már évek óta foglalkoztatta. A kísérleti

vizsgálatok azt mutatták, hogy a hőmérsékleti sugárzás intenzitása a termikus egyensúlyi állapotban független a kibocsátó test anyagi minőségétől, csak a hőmérséklettől és a rezgésszámtól függ. Ebbe a kutatásba kapcsolódott be Planck. A tükröző falakkal bezárt üregben kialakult egyensúlyi sugárzás entrópiáját határozta meg. A tapasztalattal jól egyező eredményt azzal a feltevéssel kapott, hogy a sugárzást kibocsátó testnek gondolt oszcillátor (harmonikus rezgést végző tömegpont) energiáját $h\nu$ kvantumok egészszámú többszörösének tekintette. A h betű itt egy határidimenziójú univerzális állandót jelent. Planck *hatáskvantumnak* nevezte. Ma a szakirodalom Planck tiszteletére *Planck-állandónak* nevezi.¹ Következésképpen ezek az oszcillátorok a sugárzást $h\nu$ kvantumok formájában bocsátják ki, és nyelik el. A klasszikus fizika fogalomvilágához szokott fizikusok körében ez a feltevés igen merésznek tűnt, annyira, hogy Planck is hosszú ideig csak munkahipotézisnek tekintette, és úgy gondolta, hogy a valóságos folyamatokban az energia természetesen folytonosan változik, ahogy azt a klasszikus fizika tanítja. Hosszú évekig tartó nehéz munkával és töprengéssel látta be, „hogy a kvantumhipotézissel, vagyis az energia kvantumos természetével valami egészen új, eddig soha nem hallott jelentkezik, amely arra van hivatva, hogy teljesen átalakítsa a fizikai gondolkodást.”

A kvantumhipotézis fizikai jelentőségét *Albert Einstein* ismerte fel. Szerinte nemcsak a sugárzás kibocsátása és elnyelése kvantumos,

¹ Ide kívánczik egy megjegyzés: Planck zsenialitását mutatja, hogy mivel már Kirchhofftól tudjuk, hogy az intenzitás független az anyagi minőségétől, ezért olyan modelltesttel dolgozott, nevezetesen az oszcillátorral mint a sugárzást kibocsátó anyaggal, amelyre a számítás könnyen elvégezhető.

hanem az elektromágneses sugárzás energiája $h\nu$ energiakvantumokból áll. Az energia ilyen energiakvantumok összessége. Ennek alapján adott elméleti magyarázatot 1905-ben a fényelektromos jelenségre, amelyet a fény hullámelmélete alapján nem lehetett megérteni. A jelenség abban áll, hogy ha fémlémez –különösen alkáli fémet –ultraibolya fénnel megvilágítunk, elektronok lépnek ki a fém felületéről. A kísérleti tanulmányozás azt mutatja, hogy a kilépő elektronok sebessége nem függ a megvilágító fény intenzitásától, hanem csak a rezgésszámától. A rezgésszám növelésével nő az elektronok energiája. Az intenzitás növelésével pedig az elektronok száma nő. Einstein tovább is ment, mert a fény impulzusát is kvantumossá tekintette, vagyis impulzus-kvantumok összegeként fogta fel. Eszerint az elektromágneses sugárzás (tehát a fény is) felfogható úgy, mintha $h\nu$ energiájú, és $h\nu/c$ impulzusú kvázirészecskék összessége lenne. Ez a kép hasonló ahhoz, amit az ideális gázzal elgondolunk. A kvázi előtag arra utal, hogy ezek a fénykvantumok mégsem tekinthetők a szó eredeti értelmében részecskéknek, mert mint a kvantumelmélet későbbi alakulása megmutatta, ezekhez a pálya fogalma nem rendelhető hozzá. Az energiával és impulzussal rendelkező fénykvantumot nevezzük *fotonnak*. Einstein elgondolását a fényelektromos jelenség magyarázata teljesen igazolta. Ezért kapta meg 1921-ben a fizikai Nobel-díjat.

A radioaktivitás és az elektron felfedezésével kísérletileg is igazoltá vált az anyag korpuszkuláris szerkezetére vonatkozó hipotézis, amely a tizenkilencedik században a kinetikus gázelmélet alapját képezte. Minthogy a tapasztalat szerint az anyagból elektronok és alfa részecskék jönnek ki, természetes volt a gondolat a tizenkilencedik és huszadik század

fordulóján, hogy az atomnak van valamilyen szerkezete. Az elektron felfedezése után *Ernest Rutherfordnak* volt realisabb elképzelése erről. Úgy gondolta, hogy az atom pozitív töltése egyetlen kis központi tartományba sűrűsödik össze, és ezt veszik körül az elektronok. Ő nevezte el az atom pozitív töltésű kis központi részét az atom magjának. Elgondolását 1909-től kezdve, kísérletekkel is megalapozta. A Rutherford-modell nehézségeinek kiküszöbölésére *Niels Bohr* 1913-ban módosította a modellt. Az elektronok körpályákon mozognak a mag körül az atomban, de a klasszikus mechanika szerint lehetséges pályák közül csak olyanokon, amelyeken az elektronnak a magra vonatkoztatott impulzusnyomatéka a Planck állandó 2π -ed részének egészszámszorosára egyenlő. Az így kiválasztott stacionárius pályákon keringő elektronok nem sugároznak. Sugárzás akkor lép fel, amikor az elektron egy magasabb energiájú pályáról alacsonyabb energiájúra ugrik. A két állapot közötti átmenet során kibocsátott sugárzás rezgésszámát a két energia különbsége határozza meg az $E_2 - E_1 = h\nu$ képlet szerint.

E három feltételre alapozott kvantumelméletet nevezzük Bohr-elméletnek. A hidrogénatomra egyszerű számítással meghatározhatók a stacionárius állapotok energia értékei, a megfelelő pályák sugarai, valamint a megengedett átmenetek során kibocsátott sugárzás frekvenciái. A 3. feltétel alapján számított frekvenciák a hidrogénatom vonalas színképének elméleti magyarázatát adják. A korábban empirikus úton megállapított Balmer- és egyéb sorozatok egy csapásra magyarázatot nyertek. A színképvonalak káoszában a Bohr-elmélet rendet teremtett. Ez volt az elmélet első szép sikere.

A másik ehhez fogható szép eredménye a periódusos rendszer kvalitatív értelmezése

volt a *Wolfgang Pauli* által felfedezett, és róla elnevezett Pauli-elv alapján.

A különféle atomfizikai problémáknak a Bohr-elmélettel való tárgyalása szinte minden esetben azt mutatta, hogy a megoldásban van valami helyes eredmény is, de sohasem adott teljesen pontos leírást és magyarázatot. Ez már azt jelezte, hogy a klasszikus fizika fogalomrendszerének radikálisabb megváltoztatása kell egy új mechanika megalkotásához. Az új, merész gondolatok, elsősorban Bohr és a koppenhágai intézetében rövidebb-hosszabb időt eltöltő fiatal fizikusok körében jelentek meg, a húszas évek elején. *Werner Heisenberg* volt a legmerészebb a megszokott gondolkodástól való elszakadásban. Azt a filozófiát követte, hogy csak megfigyelhető mennyiségek szerepelhetnek az új elméletben. Az elektron pályája az atomban nem ilyen. Helyette az elektron helykoordinátáinak és impulzuskomponenseinek jellemzésére a korábban szokásostól különböző matematikai mennyiségeket használt, és meghatározta azokat az algebrai szabályokat, amelyeket ezeknek a mennyiségeknek ki kell elégíteniük ahhoz, hogy a megfigyelésekkel egyező eredményt kapjon. *Max Born* és *Pascal Jordan* mutatták meg, hogy ezek a matematikai szimbólumok mátrixok, és a nem-kommutatív algebra szabályai szerint kell őket össze-szorozni. Ez azt jelenti, hogy e két mennyiség szorzásánál a sorrend felcserélése a szorzat más eredményére vezet. Az egyenes és fordított sorrend különbségét axiómaként előírjuk, arányosnak vesszük a Planck-állandóval. A hatáskvantum tehát ebben az új elméletben is az alapvetésnél jelenik meg, azt is mondhatjuk, hogy az axiómaként szereplő alap-egyenletekbe van beépítve. Heisenberg a dolgozatot 1925 júliusában közölte. Fél évvel később *Ervin Schrödinger* osztrák elméleti

fizikus a *Louis de Broglie* által 1924-ben bevezetett anyaghullám fogalmat felhasználva, levezetett egy differenciálegyenletet, amelynek reguláris megoldásai az energia-sajátértékeket adják meg. A hidrogénatomra alkalmazva ezek megegyeznek a Bohr-elméletből kapott értékekkel, valamint a Heisenberg mátrixmechanikájából adódókkal is. Majd később *Paul Dirac* angol fizikus munkásságából kiderült, hogy a két tárgyalásmód egyenértékű egymással. A kvantumelméletnek e két változatát egyaránt használjuk, és az irodalom közös néven *kvantummechanikának* nevezi.

A kvantummechanikában egy fizikai rendszer, például valamilyen atom vagy molekula fizikai állapotát egy függvénnyel, az ún. *állapotfüggvénnyel* jellemezzük. E függvény változását a Schrödinger-egyenlet írja le, ugyanolyan determinisztikus módon, ahogy például a Maxwell-egyenletek az elektromágneses tér állapotát írják le. Ha a kezdeti állapotot ismerjük, mondjuk valamilyen mérésel meghatároztuk, akkor az egyenlet megoldásával az állapotot bármely későbbi időpontra kiszámíthatjuk. A kvantummechanikai állapotfüggvénynek azonban nincs olyan közvetlen fizikai jelentése, mint például az elektromos vagy mágneses térerősségeknek az elektromosságban. Ennek ismeretében a fizikai rendszert jellemző mennyiségeknek a valószínűségei határozhatók csak meg, nem pedig a tényleges értékük. Az állapotfüggvény valamilyen fizikai mennyiség mérésel meghatározható, ún. sajátértékeinek egy-egy állandóval súlyozott szuperpozícióját adja meg. A mérés viszi be az állapotot valamelyik saját-állapotba. Hogy melyikbe, annak csak a valószínűsége adható meg az elmélet alapján. Ezért nevezzük a kvantummechanikát statisztikus elméletnek. Az állapotfüggvény statisztikus értelmezése Max Borntól származik.

Vissza-visszatérően ezúttal is megjegyezzük, hogy az állapotfüggvényt meghatározó ún. *dinamikai egyenletben* – ami a kvantummechanika mozgásegyenlete – is szerepel a hatáskvantum.

Az elméletnek egyik nagyon nevezetes eredménye, az ugyancsak Heisenbergtől származó, ún. *határozatlansági összefüggések* felfedezése. Eszerint bizonyos fizikai mennyiségpárok, mint például az elektron helye és impulzusa az atomban, nem határozhatók meg egyidejűleg tetszőleges pontossággal. Ha az egyiket nagyon pontosan megmértem, akkor a pár másik tagját már nagyon pontatlanul ismerem csak. Ebből következik, hogy a kvantummechanika szerint az atomban az elektron pályája nem értelmezhető, mert a pályafogalom newtoni meghatározása a helyének és sebességének vagy impulzusának egyidejű pontos megadását követeli meg. Hasonló határozatlansági összefüggés van az atom bármelyik állapotának átlagos élettartama és az ahhoz tartozó energia között is.

Einstein nem tudta elfogadni a kvantummechanika statisztikus értelmezését. Ugyanez mondható Schrödingerrel és Planckról is. Az igazsághoz hozzátartozik, hogy az elmélet értelmezését illetően ma is vannak olyan tudományos közlemények, amelyek vitatják az állapotfüggvény valószínűségi jelentését. Ezek a szerzők úgy vélik, hogy vannak a rendszer jellemző paraméterek, amelyek rejtve maradnak előlünk, ezért kényszerülünk a kvantummechanikában csak valószínűségi jöslatokra. Az értelmezés körüli nézetkülönbségek azonban nem rontják le a kvantummechanika nagyszerű voltát. Az atom- és molekulafizikai eredményei, valamint a természet-tudományok más területeire kifejtett, és a műszaki tudományokra vonatkozó alkalmazásaival olyan tudományos haladást ért el,

amelyre kevés példa van. Az az óriási tudományos haladás, amely Planck kvantumhipotézisével kezdődött a huszadik század hajnalán, igen nagymértékben megváltoztatta a világról alkotott tudományos képünket; ez a diadalmenetnek nevezhető fejlődés máig tart, és bámulatos eredményeivel az életvitelünket is megváltoztatja. Elég csak a számítógépekre vagy a mobiltelefonra és a digitális fényképezőgépre gondolni.

A kvantummechanika olyan új szemléletmódot hozott magával, amelyet a klasszikus fizikán nevelkedett Plancknak igen nehéz volt magáévá tenni, és az új elmélettel kapcsolatban számos kételye támadt, amelyeket Károlyházy Frigyes elemzett részletesen előadásában. Sok, Planck által felvetett kérdés hosszú évek múltán is vissza-visszatért, és ez a tény is mutatja, hogy a kvantummechanika mennyire áthatotta a fizika és a fizikusok gondolkodásmódját.

Varró Sándor előadásában azt mutatta meg, hogy Plack tevékenysége nem merült ki a kvantummechanika létrehozásában, hanem jelentős szerepe volt Einstein speciális relativitáselméletének kimunkálásában is. Ezzel kapcsolatban Simonyi Károly professzor monumentális művéből idézte a következő sorokat: „Az igazán nagyokra jellemző módon Planck azonnal felismerte a továbbfejlesztési lehetőségeket, és a továbbiakban Einstein és Planck, de Lorentz is egyre újabb és újabb eredményekkel gazdagították a relativitáselméletet a teljes lezárásig. Mint érdekességet említjük meg, hogy a relativitáselmélet továbbvitelében – egészen Minkowski már említett négydimenziós megfogalmazásáig, tehát 1908-ig talán – Planck vitte a vezető szerepet, hasonlóan ahogy Planck kvantumelméletének továbbfejlesztésében viszont Einstein játszotta a főszerepet.”

A kvantummechanika Heisenberg, Schrödinger, Pauli és Dirac által kimunkált formalizmusa rendkívüli sikereket ért el az anyag mikroszkópikus tulajdonságainak leírásában. Az elmélet azonban csak a kvantum szóráselmélet megszületésével teljeseedett ki, amelyet Bencze Gyula vázolt előadásában. A szóráselmélet eszköztárának kimunkálásából kivette a részét a méltánytalanul háttárba szorított Max Born is. Az elmúlt fél évszázad legjelentősebb eseménye azonban e téren L. D. Fagyejev munkája volt, aki elsőként dolgozta ki a kvantum háromtest probléma egzakt matematikai elméletét. Fagyejev elmélete nyomán alakult ki a kvantum N-test szórásp probléma szigorú, de a gyakorlatban is alkalmazható formalizmusa, amelynek kidolgozásában magyar kutatóknak is jelentős szerep jutott.

Max Planck munkássága nemcsak a mikroszkópikus méretek fizikájában, hanem az univerzum tulajdonságainak a tanulmányozásában is megtermékenyítően hatott. A relativitáselmélet és a kvantumelmélet törvényszerűségei jelentősen befolyásolják az univerzum fizikai tulajdonságait is, amelyeknek vizsgálata napjainkban nagy intenzitással folyik. Király Péter előadásában a kozmikus háttérsugárzás kutatásának történetét és lehetőségeit tekintette át. Ez nyilván egy olyan új tudományterület, amelyen a közeljövőben jelentős új eredmények várhatók.

Patkós András előadásában azt ismertette, hogy a termodinamika törvényeinek alkalmazása az univerzum tulajdonságainak leírására milyen új eszközöket adhat a kozmológia tudományát művelőinek kezébe.

A kvantummechanika sikeres évszázada után még mindig gondot okoznak egyes tulajdonságainak interpretálása, valamint a kvantumostól a klasszikus leírásba történő átmenet sajátosságai. Geszti Tamás ezt a témát

járta körül előadásában. Az alapvető probléma abban rejlik, hogy a jól ismert „korrespondencia-elv” nem teljesen igaz, mivel a klasszikus-szerű mozgás nem nagy kvantumszámmal, hanem koherens állapotokkal társítható. Az ezzel kapcsolatos kutatások kemény problémákat vetnek fel, ezért érdemes idézni Geszti Tamás előadásának konklúzióját:

- A kvantum–klasszikus határ megismerése keményebb dió, mint atyáink gondolták.
- Ideje lenne már megtalálni a biztonságos átjárást kvantum és klasszikus között.
- Lessük a kísérleteket a senkiföldje-tömegek világából.
- Addig is gyártjuk az elméleteket.

E rövid áttekintésből is látszik, hogy milyen széles spektrumot ölelt át a konferencia tematikája, és Max Planck munkássága mekkora hatással volt a modern fizikai kutatások témaválasztására.

Az ünnepi ülészakról szóló beszámolóhoz tartozik még, hogy Max Planck személye és munkássága ezévből Németországban kiterjedt ünneppsorozatnak és kiállításoknak a tárgya. Tiszteletére a Német Nemzeti Bank tízeuros ezüstérmet adott ki, melyet az MTA ünnepi konferenciájának minden előadója megkapott ajándékba.

*

A KONFERENCIA ELŐADÁSAI

Nagy Károly, az MTA rendes tagja, (ELTE):
A kvantumelmélet kialakulása Plancktól Diracig

Király Péter tudományos munkatárs, (KFKI RMKI): *A kozmikus háttérsugárzás kutatásának története és kilátásai*

Patkós András, az MTA rendes tagja (ELTE):
Entrópia, Planck, Univerzum

Károlyházy Frigyes, a fizikai tudomány doktora (ELTE): *Max Planck kétségei*

Varró Sándor, az MTA doktora (KFKI SZFKI):

Planck és a speciális relativitáselmélet

Bencze Gyula, a fizikai tudomány doktora

(KFKI RMKI): *A kvantummechanika kiteljesedése: a kvantum szóráselmélet megszületése*

Geszti Tamás, a fizikai tudomány doktora (ELTE): *Kvantum és klasszikus határán*

Kulcsszavak: *a kvantumelmélet megalapozója, „ajtót nyitott a kvantumok világára”, szerepe a kvantumelmélet és a relativitáselmélet kimunkálásában*

