

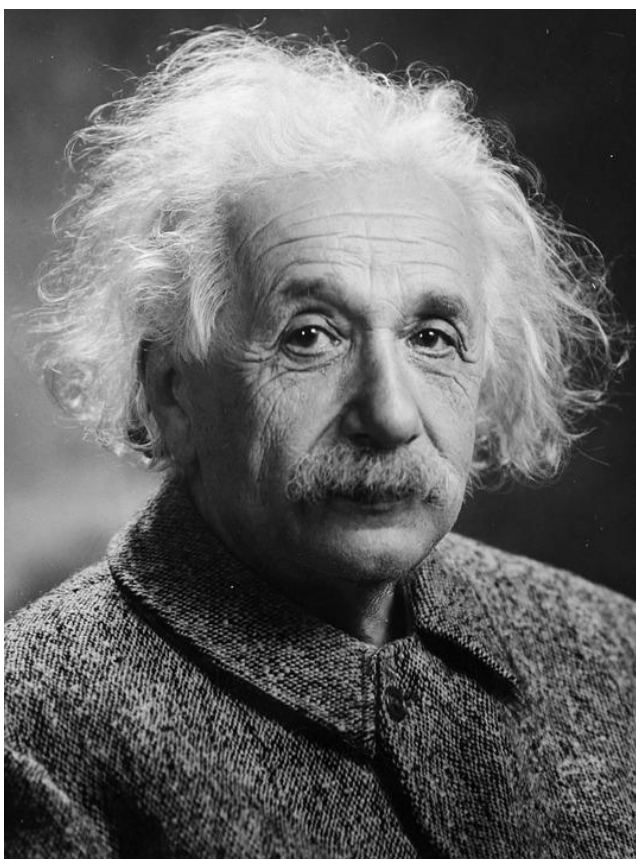
Első téma – a 20. század tudománytörténete

I.2 Fizika

A 20. századi fizikát két alapvető elmélet kidolgozása és fokozatos elfogadása határozza meg. Az egyik, a **relativitáselmélet**, a legátfogóbb fizikai makrorendszerek (tér és idő, bolygók, galaxisok), a másik, a **kvantumelmélet**, a legelemibb mikrorendszerek (atomok és szubatomi részecskék) szintjén rendezi át radikálisan mindazt, amit korábban a fizikai világról gondoltak.

Relativitáselmélet

Albert Einstein két olyan elméletet dolgozott ki, amely „relativitáselmélet” néven ismert: az első az úgynevezett *speciális relativitáselmélet*, amelyet Einstein 1905-ben tett közzé, a második az *általános relativitáselmélet*, amely 1916-ban látott napvilágot. A speciális relativitáselmélet a Galilei-féle relativitáselv kiszélesítése, és matematikai átdolgozása. Galilei relativitási elve azt mondta ki, hogy a testek newtoni mozgástörvényei mindig egy adott vonatkoztatási rendszeren,



inerciarendszeren belül érvényesülnek. A vonatkoztatási rendszer lehet az abszolút nyugalmi tér, de lehet egy ehhez képest egyenletes mozgásban lévő rendszer is. Ugyanakkor ez az elmélet nem volt érvényes sem a gyorsuló rendszerekre, sem az elektromágneses hullámjelenségekre (például a fényre). A galileánus keretben a térbeli távolságok, az események időtartama és egyidejűsége nem függ a vonatkoztatási rendszertől, a testek mérhető sebessége azonban igen. Az einsteini

relativitáselmélet kiterjed az elektromágnesességre is, egyszersmind gyökeresen átalakítja az inerciafüggőség viszonyait: a testek távolsága, a velük kapcsolatos események egyidejűsége és időbeli hossza is relatív a vonatkoztatási rendszerhez (a megfigyelő téridőbeli pozíciójához) képest, ugyanakkor bevezet egy rendszerfüggetlen, állandó sebességfogalmat, a c -vel jelölt **fénysebességét**. Az elméletből az is következik, hogy semmiféle oksági hatás sem következhet be a fénysebességnél gyorsabban. A fénysebesség a testek tömegének meghatározásában is alapvető szerephez jut a híres $E = mc^2$ összefüggés szerint.

Az általános relativitáselmélet kiterjeszti az új fizikai belátásokat a gyorsuló mozgást végző fizikai rendszerekre. A gyorsuló mozgás és a gravitációs hatás következtében bekövetkező

Ikerparadoxon

A speciális relativitáselmélet egyik következménye az *idődilatáció* jelensége: a nagyobb sebességgel mozgó fizikai rendszerben az idő „lelassul”. Tehát ha veszünk két nagyon pontos, egymáshoz hangolt órát, és az egyik nagy sebességgel megtesz egy bizonyos utat, míg a másik nyugalomban marad, akkor a kísérlet végén a mozgó óra kevesebb idő elteltét mutatja. A jelenség mind matematikailag, mind kísérletileg igazolt. Ugyanakkor hétköznapi észjárásunkhoz képest bizarr következtetésekhez vezethet. Ha egy ikerpár egyik tagja egy közel fénysebességgel haladó űrhajón megtesz egy több fényéves utat, a másik tag pedig a Földön marad, akkor a visszatérése után az utazó fiatalabb lesz, mint a vele egy napon született testvére. Az utazás hosszának és az űrhajó sebességének függvényében ez a korkülönbség akár több évtizedes is lehet.

mozgás matematikailag azonos módon reprezentálható, így a relativisztikus fizika merőben új gravitációelméletet eredményez. Eszerint a fizikai anyag eloszlása a négydimenziós téridőben megfelel a téridő geometriai tulajdonságainak, azaz a téridő „görbültségének”. Az einsteini téridő tehát nem euklidészi. A gravitációs jelenségek azért lépnek fel, mert a nagyobb tömeggel rendelkező objektumokkal a téridő nagyobb görbülete jár együtt, és a görbület mértéke meghatározza a testek gyorsulásának mértékét (amely ekvivalens a gravitációs hatással).

A relativitáselmélet sok már korábban ismert, de a

hagyományos fizika keretein belül nem érthető jelenséget magyarázott meg. A 20. század folyamán számos megfigyelési és kísérleti bizonyíték támasztotta alá az elméletet, amelynek segítségével nagy pontossággal előrejelezhetők a csillagászati léptékű események is. Ugyanakkor a relativitáselmélet olyan képet fest az univerzumból (görbült téridő, relatív egyidejűség, az időtartamok rövidülése a

sebesség arányában stb.), amely alig egyeztethető össze a térről, az időről és a tárgyak mozgásáról szóló intuícióinkkal.

Kvantumfizika

Noha a relativitáselmélet is csak tudománytörténeti egyszerűsítéssel köthető egyetlen emberhez, Albert Einsteinhez, a 20. századi fizika másik alapvető teljesítménye, a kvantumelmélet semmiképpen rendelhető egy névhez. Kollektív, és a század egész első harmadán végighúzóódó erőfeszítés eredményeképpen bontakozott ki, és végül alapjaiban változtatta meg nem pusztán a fizikai elméletet, de a világ természetének egészes elgondolását, és a mindennapi technológiai környezetünket is.

A 19. és a 20. század fordulóján Max Planck felfedezte, hogy a testek csak bizonyos energiamennyiségekkel (energiacsomagokkal) rendelkező sugárzást képesek kibocsátani,

A Planck-állandó

A részecskefizika egyik legalapvetőbb, természeti állandóként felfogott mennyisége. Jele h , értéke pedig $6,626 \times 10^{-34}$ Js (Joule-szekundum). Láthatóan ez egy roppant kicsiny szám, amely – éppen kicsinsége miatt – az érzékszerveinkkel felfogható makro-valóságban nem fejt ki kézzelfogható hatást. Atomi és szubatomi szinten azonban számos fizikai folyamatot meghatároz. Például ennek segítségével számolható ki a fotonok által hordozott energiacsomagok mennyisége a frekvenciájuk függvényében: $E = hf$ (ahol az f a frekvenciának felel meg). Ugyancsak a Planck-állandó szabja meg a Heisenberg-féle határozatlansági reláció mértékét: $\Delta p \times \Delta q = \frac{1}{2} \times \frac{h}{2\pi}$ (ahol Δ az utána következő mennyiség bizonytalanságát jelzi, a p az adott objektum impulzusát, a q pedig a helyét jelenti). Tehát például egy elektron helye és impulzusa együttesen csakis egy h -val arányos bizonytalansággal állapítható meg – minél pontosabb a hely meghatározása, az impulzus annál bizonytalanabbá válik, és *vice versa*.

vagyis a kibocsátható energia nem folytonos, hanem diszkrét, „**kvantum**os” jellegű. A kibocsátható sugárzást kvantumok nagyságát egy meghatározott számmal lehet jellemezni – ezt a számot nevezik később **Planck-állandó**nak. 1905-ben (ugyanabban az évben, amelyben a speciális relativitáselméletet megalkotta) Einstein a fotoelektromos hatást tanulmányozva arra jutott, hogy a Planck-állandó azt is meghatározza, hogy fény hatására a fémek mikor bocsátanak ki elektronokat. Tehát az energia elnyelése és kibocsátása is

kvantumos jelenségnek bizonyult. Egyúttal arra is bizonyosságot szolgáltatott, hogy a fény nem pusztán (elektromágneses) hullámként, hanem részecskeként (fotonok sokaságaként) is megnyilvánul.

Eközben fontos előrelépések történtek az atom belső szerkezetének megértésében. Az már a 19. század végének fizikájában világos volt, hogy az elektromos jelenségekért az atomokon belüli negatív töltésű szubatomi részecskék felelősek – ezeket nevezték el **elektron**oknak. Az elektron tömegét és töltését 1896-ban J. J. Thomson határozta meg. Viszont meg kellett találni az atomon belüli pozitív töltés felelőjét is (kellett, hogy legyen valami az atomon belül, aminek pozitív a töltése, hiszen másként az atom nem lehetne stabil). Ernest Rutherfordék 1914-ben azonosították a pozitív töltésű atommagot. Most a kérdés az atommag és az elektronburok egymáshoz képesti elhelyezkedése és viselkedése volt. Niels Bohr alkotta meg az atom felépítésének „bolygórendszer-modelljét”, amely szerint a központi atommag körül az elektronok meghatározott sugarú pályákon keringenek. A pályák egyben energiaszinteknek is megfelelnek, és az egyes szintek között az elektronok csakis szigorúan meghatározott energiamennyiségek hatásaképpen közlekedhetnek. Ezek az energiamennyiségek megegyeznek csak a Planck-állandó egész számú többszörösei.

1924-ben Louis de Broglie vetette fel, hogy ha a fény felfogható hullámként és részecskeként is, akkor ez a kettősség más fizikai entitásokat is jellemezhet. De Broglie kimutatta, hogy amennyiben az elektront nem csak részecskének, hanem hullámnak tekintjük, akkor a hullámhosszának és a Planck-állandónak a segítségével megadhatóak a pályae energiájának szintjei. Ezzel megnyílt az elméleti tér az előtt, hogy az alapvető fizikai entitásokat részecske- és hullámtermészetű viselkedések **komplementaritás**ában gondolják el (egyszerűbb megfogalmazásban: amiből a fizikai anyag felépül, az bizonyos tekintetben részecske, bizonyos tekintetben hullám).

Erwin Schrödinger 1925-ben alkotta meg **hullámmechaniká**ját, azaz egy olyan függvényt (a **hullámfüggvényt**), amelyből, ha az elektront magát hullámnak tekintjük, kiszámolhatóak az elektron legfontosabb fizikai tulajdonságai. Az eredmények megegyeznek a Bohr-féle elektronpályák tulajdonságaival, anélkül, hogy a bolygórendszer-modell szemléletes, ám számos tekintetben pontatlan és problematikus struktúrájára támaszkodnának. A Schrödinger-féle hullámfüggvény másik nagy előnye az volt, hogy nem csupán az elektronra, hanem bármely más mikrofizikai egységre, protonokra, neutronokra, egész atomokra, molekulákra, és az alapvető szubatomi részecskékre, például a kvarkokra is alkalmazható. Voltaképpen arról van szó, hogy a fizikai anyag reprezentálható **anyag hullámok** sűrűsödési viszonyaiként.

Ugyanakkor a hullámtulajdonságok fókuszba emelése Schrödingernél nem fordított hangsúlyt a komplementer tagok másik elemére, arra, hogy a mikrofizikai entitások bizonyos körülmények között kifejezetten részecskeként viselkednek. Ezt pótolta Bohr és Max Born, akik értelmezésében Schrödinger hullámfüggvénye azt írja le, hogy egy adott részecske milyen *valószínűséggel* figyelhető meg a téridő valamely pontjában. A valószínűségi értelmezést maga Schrödinger elutasította, ám a későbbiekben ez vált a kvantumjelenségek legalapvetőbb egységesítő elgondolásának, a **koppenhágai interpretáció**nak az alapjává.

Időközben Werner Heisenberg – aki egyébként Schrödingerrel egyidőben kidolgozta a kvantumjelenségek alternatív, de a hullámmechanikával azonos eredményeket produkáló matematikai megközelítését, a **mátrixmechanikát** – megállapította az úgynevezett **bizonytalansági relációt**. Ez

azt mondja ki, hogy az elemi részecskék bizonyos komplementer tulajdonságai – amilyen például a részecske térbeli elhelyezkedése és impulzusa – nem mérhetőek meg *egyszerre* tetszőleges pontossággal. Minél pontosabb mérést hajtunk végre az egyik mennyiségen, a másik mennyiség mérhetősége annál bizonytalanabb lesz,



még hozzá a Planck-állandóval arányos mértékben. Heisenberg és Bohr szerint azonban ez nem a mérőműszerek tökéletlenségének, hanem magának a kvantumvilágnak a következménye. Szerintük ugyanis értelmetlen arról beszélni, hogy milyen tulajdonságai vannak a részecskéknek a méréstől függetlenül; még az sem mondható ki, hogy az alapvető fizikai entitásoknak *önmagukban* volnának valamilyen fizikai tulajdonságaik, csupán azt jelenthetjük ki, hogy ezek a tulajdonságok valamilyen meghatározható valószínűséggel vonatkoznak rájuk, és ha nem figyeljük meg éppen őket, akkor ezeknek a valószínűségeknek a szuperpozíciója, azaz együttes és egymást ki nem záró jelenléte jellemzi őket.

A koppenhágai interpretáció értelmében tehát a fizikai valóság legelemibb szintjén a következők érvényesek:

- hullám – részecske
komplementeritás: az elemi fizikai

Szegedi Tudományegyetem

Cím: 6720 Szeged, Dugonics tér 13.

www.u-szeged.hu

www.szechenyi2020.hu

egységek bizonyos fizikai megközelítésben hullámként, más megközelítésben részecskeként viselkednek, de nincs olyan elrendezés, amelyben mindkét aspektusuk érvényesülne;

- valószínűségi elrendeződés: egy fizikai rendszer esetében az állapítható meg, hogy milyen valószínűséggel mutat fel bizonyos fizikai tulajdonságokat, és amíg ezeket a tulajdonságokat nem mérik meg, addig a rendszer az összes lehetőség egymással interferáló valószínűségében létezik;
- bizonytalanság: az alapvető fizikai tulajdonságok egymással komplementer párokat alkotnak, amelyeknek megfigyelése és mérése nem élesíthető tetszőleges pontossággal.

Ez a megközelítés összeférhetetlen a klasszikus fizika determinisztikus világképével, amelyben a folyamatok megállapítható oksági törvényeknek engedelmeskednek, azaz meghatározottak és nem képeznek elvi akadályt megfigyelésük és előrejelzésük előtt. Sokan, például Einstein és Schrödinger, nem is fogadták el, és egész életükben megpróbálták oly módon kiegészíteni, hogy visszailleszthető legyen a klasszikus fizikába. Nem jártak sikerrel.

Különös, kontraintuitív – és időnként logikailag bizzar – sajátosságai ellenére a kvantumfizika rendkívül *siker*es tudományos terület. Ez azt jelenti, hogy számításai és előrejelzései nagy pontossággal illeszkednek a megfigyelt mikrofizikai tényekhez, és nélkülözhetetlen szerepet játszanak a 20. század technológiai fejlődésének gyakorlatilag minden fontos területén. Kvantumfizikai összefüggések felhasználása nélkül nem volna sem televízió, sem mikrochip, sem számítógép, sem mobiltelefon, sem mikrohullámú sütő – és a sort hosszan folytathatnánk.