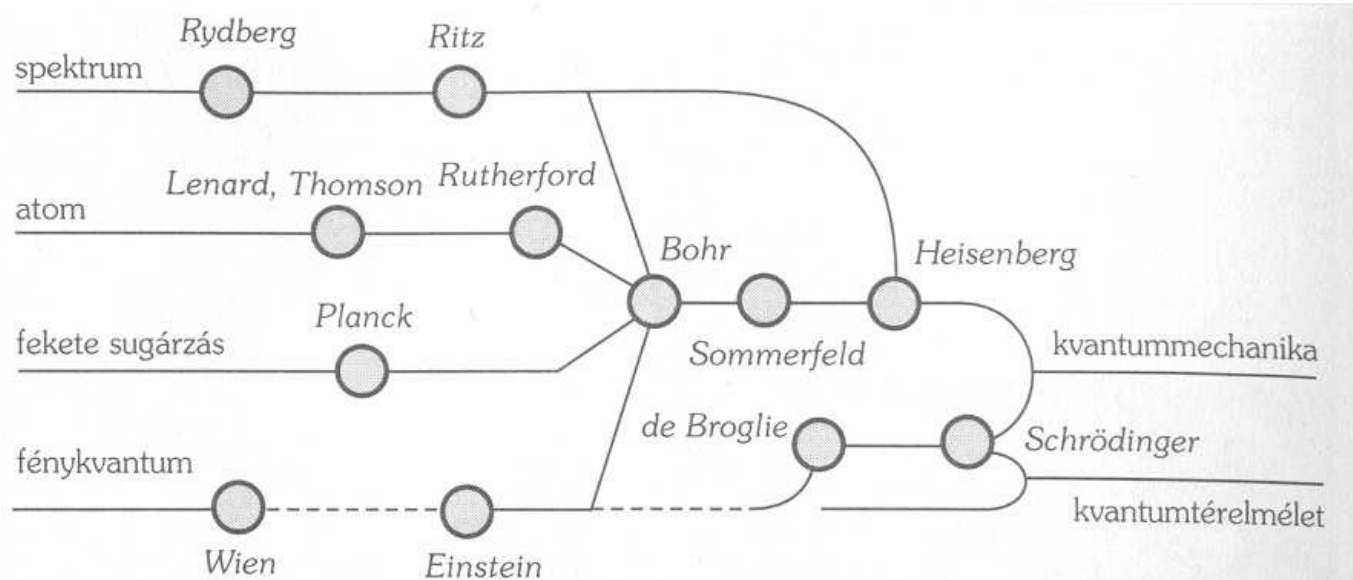


A fizika története

A fizika új minősége: a
kvantumelmélet

Miért „új minőség”?

- relativitáselmélet: a klasszikus fizika betetőzésének szokás tekinteni
- a relativitáselmélet nem változtatta meg a fizikai törvények jellegét: a jelenségeket leíró törvények itt is a jelenségek egyértelmű téridőbeli lefolyását adják meg
- kvantummechanika: a törvények már nem egyértelmű téridőbeli jóslatokat, csak valószínűségi leírást szolgáltatnak



KIRCHHOFF és a fekete test

- a diszkrét energiaállapotok szemléletes bizonyítéka: a vonalas spektrumok léte – a kvantummechanikához nem ez az út vezetett; a vonalas spektrumokat jól meghatározott frekvenciájú oszcillátorok kisugárzásával magyarázhatónak tartották mindenféle kényszerkapcsolat nélkül a frekvencia és az energia között
- GUSTAV ROBERT KIRCHHOFF (1824–1887): összefüggés a testek emisszióképessége és abszorpcióképessége között: ha az időegység alatt kibocsájtott energia e és a test időegység alatt a rá eső energia a hányadát abszorbeálja ($0 \leq a \leq 1$), akkor az $\frac{e}{a}$ hányados független a test anyagi minőségétől (1859–1860)
- módszere: a termodinamika II. főtétele – ha nem így lenne, hő lehetne átvihető a hidegebb testről a melegebb testre
- *abszolút fekete test*: a rá eső energiát teljes mértékben elnyeli ($a = 1$)

$$\frac{e_1}{a_1} = \frac{e_2}{a_2} = \dots = \frac{e_{\text{fekete}}}{1} = e_{\text{fekete}}$$

A feketetest-sugárzás tulajdonságai

- JOSEPH STEFAN (1835–1893) TYNDALL méréseit kiértékelve: a fekete test által kisugárzott összteljesítmény a hőmérséklet negyedik hatványával arányos (1879)

$$P = \sigma T^4$$

- BOLTZMANN megadta a törvény elméleti termodinamikai igazolását is \Rightarrow **Stefan–Boltzmann-törvény**
- WILHELM WIEN (1868–1928) gondolkísérlete: egy feketetest-sugárzással töltött teret tükröző dugattyúval zárunk le, majd a dugattyú adiabatikus mozgásával változtatjuk a térfogatot; a visszaverődő hullámok Doppler-eltolódást szenvednek, a bezárt térrész energiatartalma és hőmérséklete a végzett munka következtében megnő \Rightarrow **Wien-féle eltolódási törvény** (1894)

$$\lambda_m T = \text{állandó},$$

- λ_m a maximális intenzitáshoz tartozó hullámhossz

Milyen az intenzitáseloszlás alakja?

- WIEN: az eltolódási törvényből következően $u(\nu) = \nu^3 f(\nu/T)$ alakú kell, hogy legyen
- a Maxwell-féle sebességeloszlási függvényből akarta meghatározni, feltételezve, hogy a sebesség csak a frekvenciától függ \Rightarrow Wien-féle sugárzási törvény

$$u(\nu) = \alpha \nu^3 e^{-\frac{\beta \nu}{T}}$$

- MAX PLANCK (1858–1947) modellje: a feketesugárzó üreg fala ν frekvenciájú oszcillátorokból áll, amelyek sugárzását az elektrodinamika törvényei írják le; az oszcillátorokkal kölcsönhatásba lépő sugárzás elektromos tere az oszcillátorokat gerjeszti; ha az oszcillátorok átlagos energiája $U(\nu, T)$, akkor

$$u(\nu) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} U(\nu, T)$$

Milyen az intenzitáseloszlás alakja?

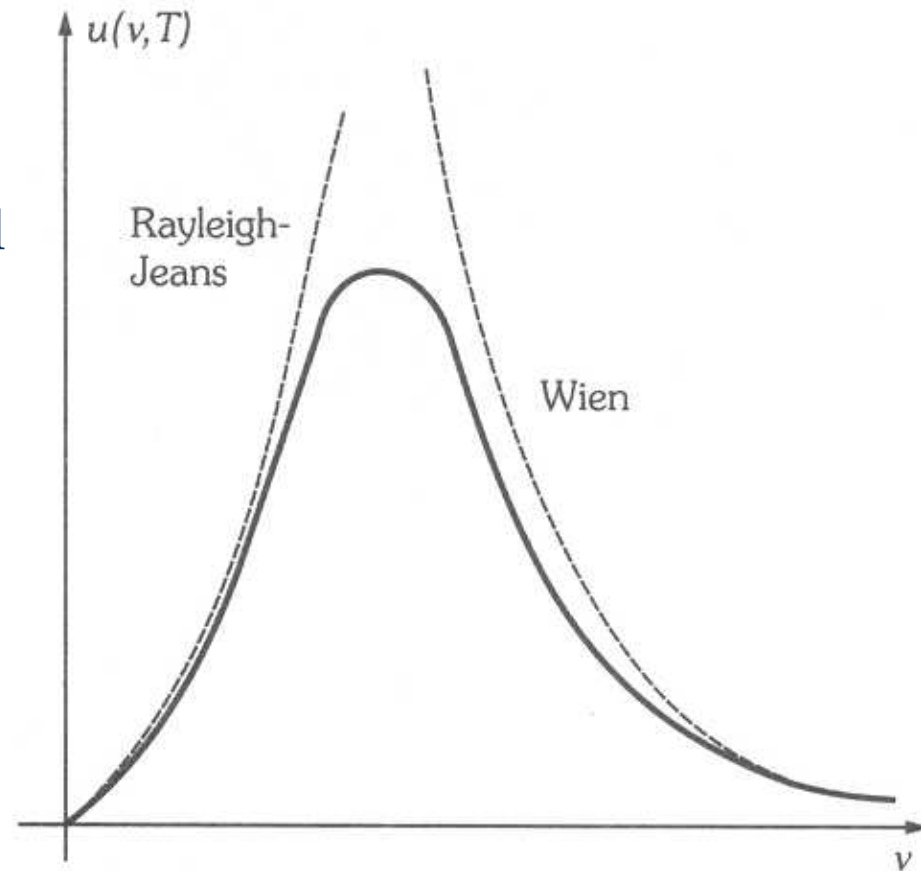
- kézenfekvőnek tűnik az $U(\nu, T)$ átlagos energiára az ekvipartíció tételének alkalmazása; figyelembe véve, hogy az oszcillátornak potenciális energiája is van, $U(\nu, T) = kT$ lenne, így

$$u(\nu) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}kT$$

- ez a **Rayleigh–Jeans-törvény**; LORD RAYLEIGH (JOHN WILLIAM STRUTT, 1842–1919) nem így jutott el hozzá 1900-ban, hanem leszámolta a ν frekvencia közvetlen közelébe eső állóhullámok számát egy üregben
- kísérleti fizikusok – OTTO LUMMER (1860–1925), PRINGSHEIM, RUBENS, KURLBAUM – széles frekvenciatartományban kimérték a sugárzási törvényt
- *sem a Wien-féle, sem a Rayleigh–Jeans-törvény nem adja vissza a tapasztalati intenzitáseloszlást a teljes tartományon*

Infravörös- és ultraibolya-katasztrófák

- Wien-törvény: csak a nagy frekvenciákon írja le helyesen a tapasztalati eloszlást; akkori szóhasználat: **infravörös-katasztrófát szenved**
- Rayleigh–Jeans-törvény: csak az alacsony frekvencián írja le jól a jelenségeket; **ultraibolya-katasztrófa**



Kapcsolat az entrópiával

- PLANCK az energiaeloszlás és az entrópia közti kapcsolatot kereste
- fontos szerepet játszik az entrópia energia szerinti második deriváltja: az egyensúlyi helyzetben az entrópiának *maximálisnak* kell lennie
- az entrópia második deriváltja segítségével kombinálta össze a Wien-féle és a Rayleigh–Jeans-féle alakot

WIEN–PLANCK	RAYLEIGH–JEANS
$u(\nu) = \alpha \nu^3 e^{-\frac{\beta \nu}{T}}$	$u(\nu) = \frac{8\pi \nu^2}{c^3} kT$
$\frac{\partial^2 S}{\partial U^2} = \frac{\text{konst}}{U}$	$\frac{\partial^2 S}{\partial U^2} = \frac{\text{konst}}{U^2}$
$\frac{\partial^2 S}{\partial U^2} = \frac{a}{U(U+b)}$	

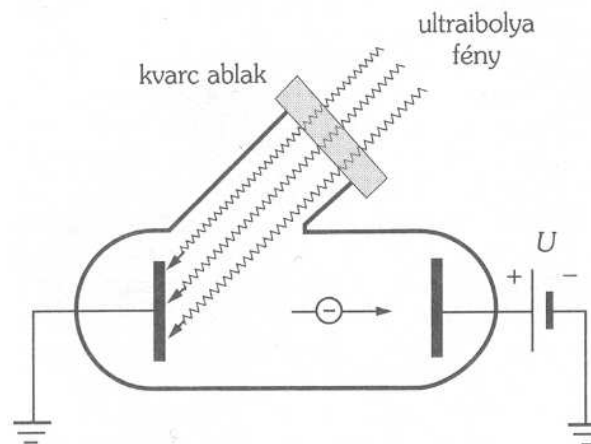
- a kombinált formából visszafejtve már egy olyan alakot kapott, amelyik a teljes tartományban jól egyezik a tapasztalattal, **ugyanakkor nincs kellő elméleti megalapozása**

PLANCK kvantumhipotézise (1900)

- PLANCK új utat választ: továbbra is az entrópiából indul ki, de a fenomenologikus termodinamika helyett a Boltzmann-féle termodinamikai valószínűséget alkalmazza ($S = k \ln W$)
- a termodinamikai valószínűséghez a mikroállapotok számának meghatározása szükséges, ezek csak akkor megszámlálhatók, ha a teljes energiát véges számú részre osztjuk \Rightarrow **minden oszcillátor egy véges nagyságú energiaadag ($h\nu$) egész számú többszörösével rendelkezhet**
- a számolást végigvívve kiadódik a Planck-féle sugárzási formula; ez kis frekvenciákra a Rayleigh–Jeans-, nagy frekvenciákra a Wien-törvényt adja, a teljes frekvenciatartományra kiintegrálva a Stefan–Boltzmann-törvényt adja
- **egy számítást megkönnyítő munkahipotézis \Rightarrow a fizikai gondolkodást megváltoztató új elmélet**

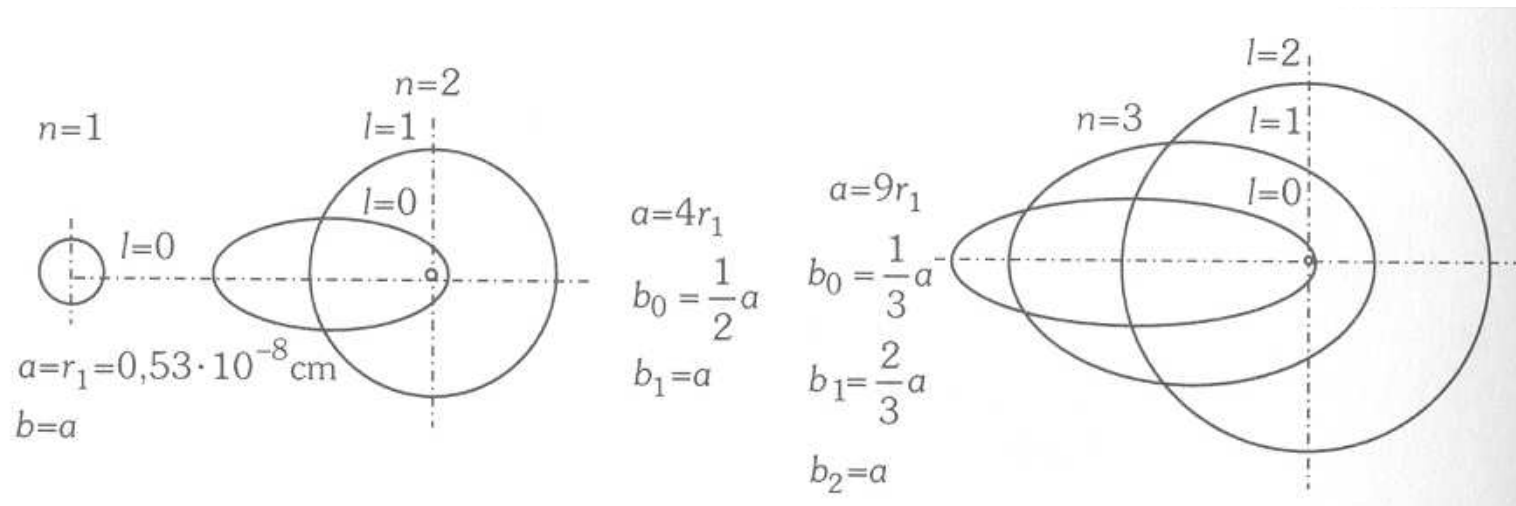
A fényelektromos egyenlet

- PHILIPP LENARD (1862–1947): fényelektromos jelenség – fény hatására egy fémből kilépő elektronok energiája *nem a fény intenzitásától, hanem hullámhosszától* függ (1902)
- ALBERT EINSTEIN (1879–1955): a fényelektromos jelenség magyarázata – a fény $h\nu$ energiakvantumú *fotonokból* áll, a fémből való kilépéskor az elektron átveszi a foton energiáját (1905) → **EINSTEIN Nobel-díja 1921-ben**
- később EINSTEIN rámutatott PLANCK „következetlenségére”: bár az oszcillátorok energiája kvantált, az oszcillátorok és az elektromágneses tér közti kapcsolatot folytonos energiaváltozásokban írta le



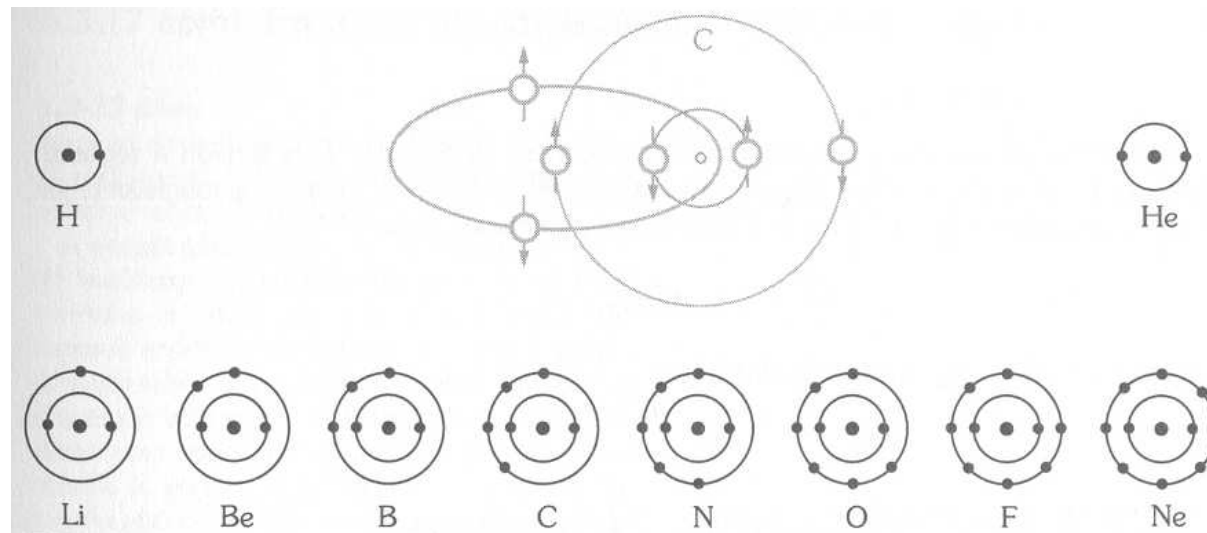
Az atom „klasszikus” kvantumelmélete

- NIELS BOHR (1885–1962): a kvantumhipotézis alkalmazása az atomi elektronpályákra (impulzusmomentum \Rightarrow *főkvantumszám, n*)
- ARNOLD SOMMERFELD (1868–1951): a Bohr-modell kiegészítése ellipszispályákkal (excentricitás \Rightarrow *mellékkvantumszám, l*)



A Bohr-modell továbbfejlesztése

- a külső mágneses térben fölvevett energia \Rightarrow *mágneses kvantumszám, m*
- GOUDSMIT–UHLENBECK, 1925: az elektron forog is, nemcsak kering, így saját perdülete, *spinje* van \Rightarrow *spinkvantumszám, s*
- WOLFGANG PAULI (1900–1958) kizárási elve (1925): egy atomban nem lehet két olyan elektron, amelynek mind a négy kvantumszáma azonos \Rightarrow **a periódusos rendszer fölépítésének magyarázata**



HEISENBERG és a mátrixmechanika

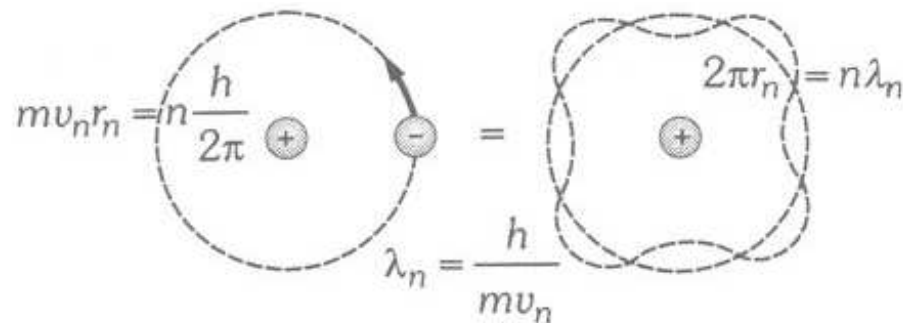
- WERNER HEISENBERG (1901–1976) BOHR elméletének elvi kritikáját adta: a kvantumos modell mögé klasszikus fogalmakkal leírható, pályával leírható elektront képzel, ez viszont méréssel nem ellenőrizhető
- HEISENBERG célkitűzése (1925): olyan atomi elmélet megalkotása, amelyben **csak megfigyelhető mennyiségek szerepelnek**
- HEISENBERG BORN és JORDAN segítségével kidolgozza a **mátrixmechanikát**; ennek kiindulása: két diszkrét állapot közötti átmenethez határozott frekvenciaértékek rendelhetők, a kiindulási és a végállapothoz egy frekvencia tartozik $\Rightarrow [v_{ij}]$ mátrix, ahol i a kiindulási-, j a végállapothoz tartozó index
- a frekvenciamátrix analógiájára a hely jellemzésére *helymátrix*, a mozgásállapot jellemzésére *impulzusmátrix* szolgál

HEISENBERG és a mátrixmechanika

- a mátrixok szorzása nem kommutatív \Rightarrow fölcserélési relációk
- DAVID HILBERT (1862–1943) tanácsa BORNnak és HEISENBERGnek: ő mátrixokkal akkor találkozott, amikor differenciálegyenletek peremérték-problémáit vizsgálta, érdemes lenne a mátrixok helyett a differenciálegyenlettel magával foglalkozni \Rightarrow *ha megfogadják, ők fedezhették volna föl a Schrödinger-egyenletet*
- **koppenhágai iskola:** BOHR, HEISENBERG, PAULI, DIRAC, EHRENFEST, GAMOW, LANDAU, KRAMERS, KLEIN
- a koppenhágai iskola ellenfelei: SCHRÖDINGER, EINSTEIN

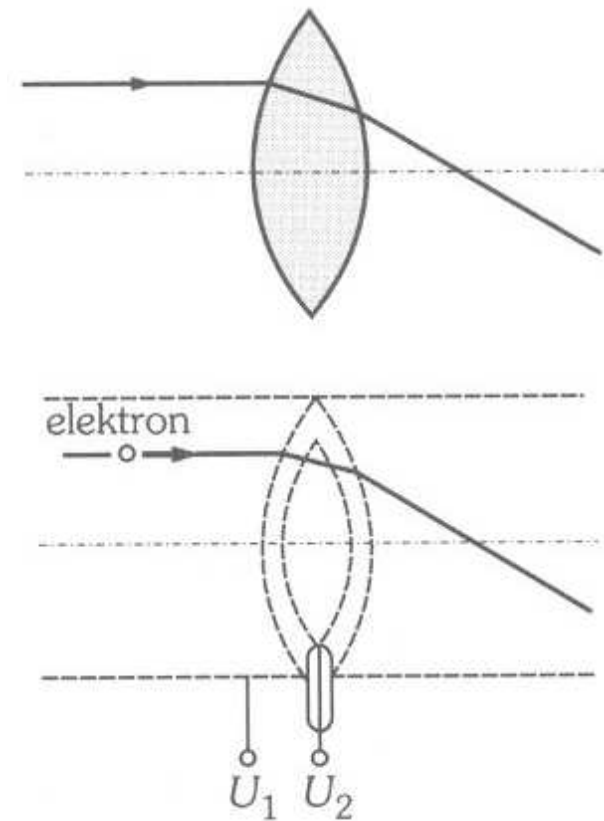
Hullámmechanika: DE BROGLIE

- LOUIS DE BROGLIE (1892–1981): a fény a hullámtermészet mellett részecsketulajdonságokkal is bír, miért ne lehetne fordítva is igaz az anyagi részecskékre
- fény: $p = mc = (mc^2)/c = E/c = h\nu/c = h/\lambda$, ennek analógiájára az anyagi részecskékre $\lambda = h/p = h/(mv)$
- akkor a Bohr-féle $mv_n r_n = \frac{h}{2\pi}$ föltétel $2\pi r_n = n\lambda_n$ alakra hozható, azaz az atomban azon pályák lehetségesek mint stacionárius pályák, amelyek kerülete a hullámhossz egész számú többszöröse



Hullámmechanika: SCHRÖDINGER

- ERWIN SCHRÖDINGER (1887–1961) gondolatmenete: a geometriai optika szerint meghatározott fénysugár-pálya és az elektronpálya között szoros összefüggés van
- a geometriai optika a fizikai optika egy határesete, ennek analogonjaként a klasszikus mechanika lehetne egy új mechanikának, a „hullámmechanikának” a határesete
- a Schrödinger-egyenlet: 1926
- SCHRÖDINGER mutatott rá arra, hogy a mátrixmechanika és a hullámmechanika matematikailag azonos



A kvantálás mint sajátérték-probléma

- Schrödinger-egyenlet:

$$\Delta\psi + \frac{8\pi^2m}{h^2}(E - U)\psi = 0$$

- igen általános határfeltételek (pl ψ korlátos a végesben, eltűnik a végtelenben) esetén is **a hullámegyenletnek az összenergiát jelentő E paraméter meghatározott értékei esetén van megoldása \Rightarrow a Planck-féle kvantumhipotézis**
- analógiák: két végén befogott húr, rezgő membrán, &c – az egész számok kitüntetett szerepe
- a PLANCK által munkahipotézisként bevezetett energiakvantum egy fizikai alapegyenlet természetes következménye, egy sajátérték-probléma megoldása lett
- a sajátérték (E_n) és sajátfüggvény (ψ_n) értelmezése: $H\psi_n = E_n\psi_n$
- a ψ hullámfüggvény statisztikai értelmezése: MAX BORN (1882–1970) vezette be 1926-ban – maga SCHRÖDINGER harcolt ez ellen

A koppenhági értelmezés sajátosságai

- követelmény: *a mérés és a megfigyelés eredményeit a klasszikus fizika fogalmaival kell leírni* (nem filozófiai, csupán pragmatikus követelmény: a klasszikus fizika fogalmai a mindennapi élet fogalmainak finomításai, ezek nélkül nem tudnánk egymást megérteni)
- valószínűségi jelleg / határozatlanság a kvantummechanikában

pontatlanság { a mérés pontatlansága (klasszikusan is jelen van)
elvi szükségszerűség (határozatlansági reláció)

állapotfüggvény { tény
a tényre vonatkozó ismeretünk mértéke

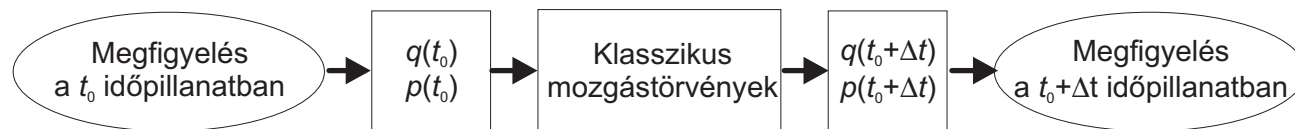
- a valószínűségi függvény **nem ábrázolja az események időbeli lefolyását**; inkább a folyamatok *lehetőségét*, a *folyamatokra vonatkozó ismereteinket* fejezi ki

A megfigyelés szerepe

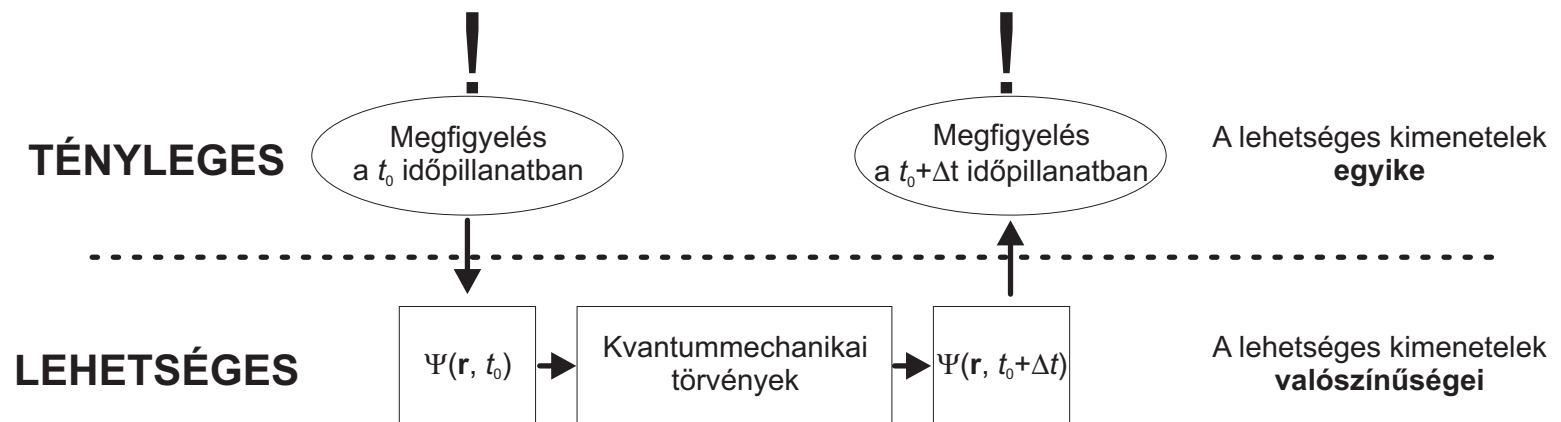
- a valószínűségi függvényt a valósággal csak akkor lehet összekapcsolni, amikor megfigyelést végzünk a rendszer egy adott tulajdonságának meghatározása céljából
- a valószínűségi függvény, bár *időfejlődését a kvantummechanikai egyenletek egyértelműen meghatározzák, nem teszi lehetővé annak téridőbeli leírását, ami két megfigyelés között történik*
- a megfigyelés téridőbeli leírást kényszerít ki, ezzel megszakítja a valószínűségi függvény számítás által meghatározott lefolyását
- mérés/megfigyelés: átmenet a lehetségesből a ténylegesbe; az összes lehetséges kimenetel közül annak kiválasztása, amelyik ténylegesen végbement
- ez az átmenet azt tükrözi, hogy a tárgy kapcsolatba lépett a mérőberendezéssel, ezáltal a világ többi részével
- a megfigyelésnek döntő szerepe van a folyamatban; a valóság attól függően más és más, hogy megfigyeljük-e, vagy sem
- klasszikus mechanika: a megfigyelés reflexió a tőle függetlennek tekintett valóságra; kvantummechanika: a megfigyelés kölcsönhatásban van a megfigyelt valósággal

A klasszikus és a kvantumos módszer

KLASSZIKUS TÁRGYALÁS

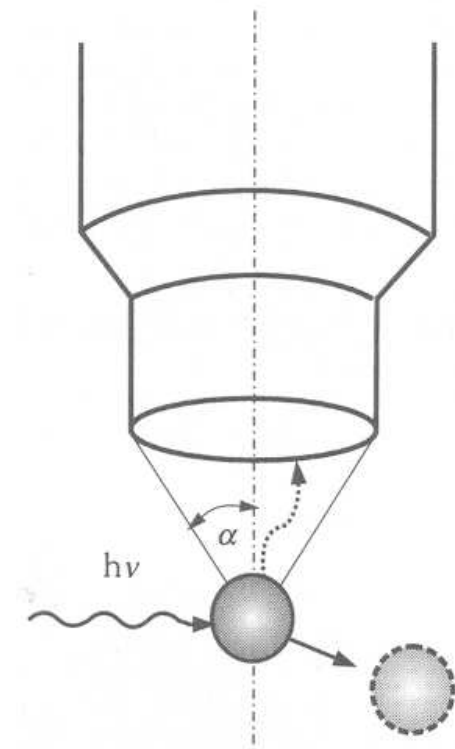


KVANTUMMECHANIKAI TÁRGYALÁS



A mérés mint beavatkozás

- klasszikusan is probléma: pl gyűszűnyi víz hőmérsékletét normál hőmérővel mérjük – a mért érték a mérendő víz és a hőmérő között kialakuló hőegyensúlyt tükrözi
- míg a klasszikus fizikában ez a hatás a végtelenségig csökkenthető (pl egyre kisebb hőmérőket veszünk), a kvantumelméletben ennek *határt szab a véges energiakvantum*
- gondolatkísérlet: az elektron atom körüli pályájának megfigyelésére alkalmas mikroszkóp – legalább egy foton szükséges a megfigyeléshez, annak *energiája viszont összemérhető az elektronnal*, így az elektron pályája észrevehetően módosul ⇒ **nem elérhető számunkra a megfigyeléstől független valóság**



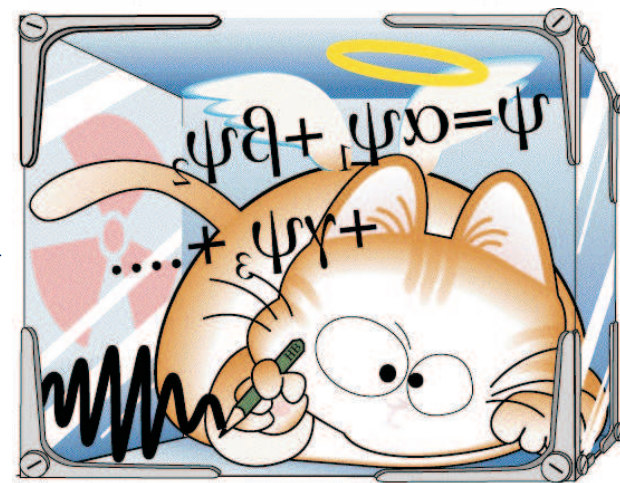
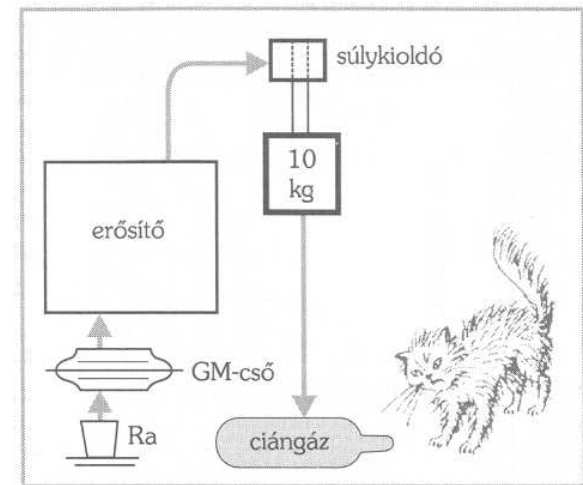
A megfigyelés filozófiai problémái

Általánosságban lehetetlen leírni, mi történik két egymásra következő megfigyelés között \Rightarrow két lehetséges értelmezés

- **ismeretelméleti probléma?** – pl az elektronnak a két megfigyelés között is lennie kellett valahol, le kellett írnia valamilyen pályát, csupán ezt nem tudjuk megfigyeléssel igazolni: *létezik köztes klasszikus állapot*
- **lételméleti probléma?** – magának a megfigyelt folyamatnak a tulajdonsága a pontról-pontra való követés elvi lehetetlensége: *a természet jellemzője, hogy a köztes klasszikus állapotra való rákérdés értelmetlen*

Ellenérv: SCHRÖDINGER macskája

- radioaktív atom 50%-os valószínűséggel bomlik, bomlás esetén áttételeken keresztül összetörik egy ciánkapszula, és a dobozban lévő macska meghal
- a kvantummechanikai értelmezés szerint a macska az élő és holt állapotok szuperpozíciójában leledzik a doboz fedelének fölnyitásáig
- SCHRÖDINGER érvelése: a doboz kinyitásakor látjuk, hogy a macska él-e vagy holt, és ez nyilvánvalóan nem a dobozba pillantásunk eredménye; a macska például egészen biztosan tudja közben is magáról, hogy élő vagy halott



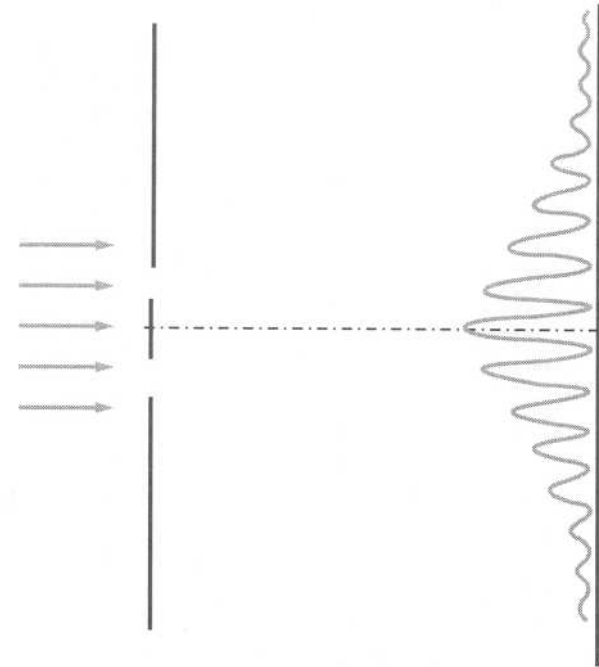
JPS

SCHRÖDINGER macskája



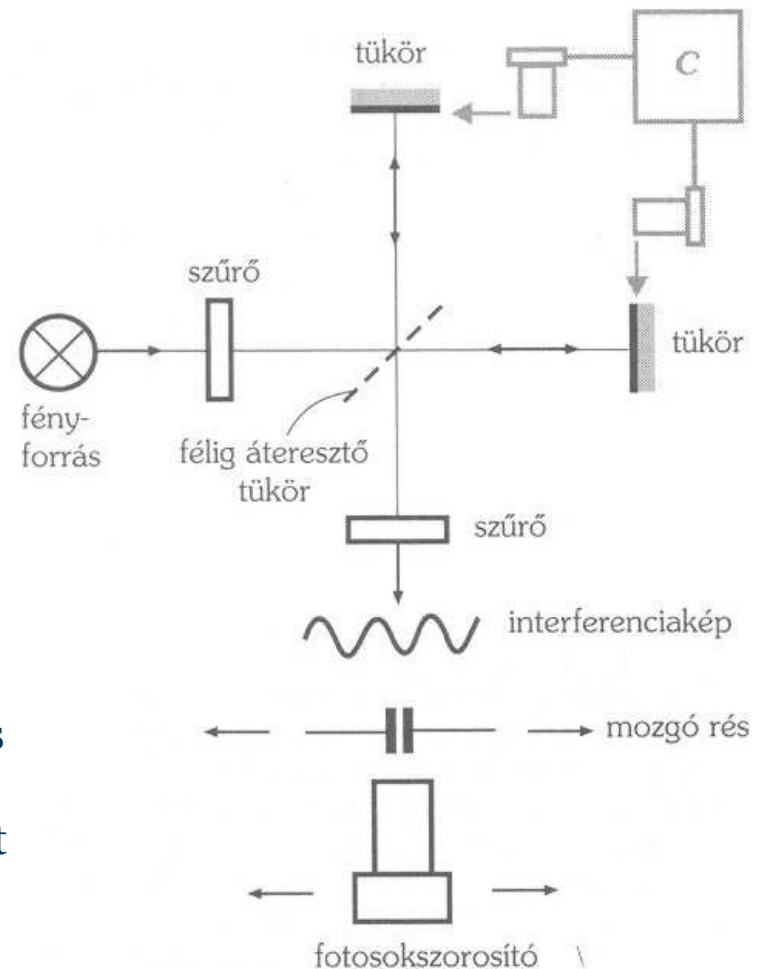
Egyfotonos interferencia

- a két résen elhajló fény interferál egymással a fényképezőlemezen
- mi a helyzet egy foton esetén?
- ha föltételezzük, hogy az egyik nyíláson ment át, ugyanaz a valószínűségi eloszlás, mint ha csak az az egy nyílás lett volna; ugyanez igaz a másik nyíláson való áthaladásra
- ha mindkét nyílás nyitva van, a kísérlet többszöri elvégzése után a kétféle eloszlás összegét kellene látnunk, ugyanakkor kísérleti bizonyosság van arra, hogy interferenciaképet kapunk
- következtetés: nem tehetünk semmiféle determinisztikus állítást a két megfigyelés közötti állapotra – minden ilyen állítás ellentmondásra vezet



JÁNOSSY LAJOS kísérlete

- Michelson-interferométerben
- interferencia megfigyelése: a fotonok impulzusát mérjük
- koincidenzába kapcsolt (csak egyidejű észlelés esetén jelző) foton számlálók: a foton helyét mérjük
- elérhető olyan intenzitás, amikor egyetlen foton van: **ekkor is van interferencia** – „félfotonok”?
- a számlálók ekkor sosem jeleznek koincidenzákat
- a koppenhágai értelmezés számára természetes: az interferométer az impulzust méri, ekkor helyről nincs értelme beszélni, a foton számlálók helyét mérnek, ekkor a fényről mint hullámról nem tudunk beszélni



A kvantummechanika betetőzése

- PAUL DIRAC (1902–1984): operátoros fölfogás – a fizikai mennyiségeknek operátorok felelnek meg; sajátos formalizmus, *bra* ($\langle \psi |$) és *ket* ($|\psi\rangle$), pl

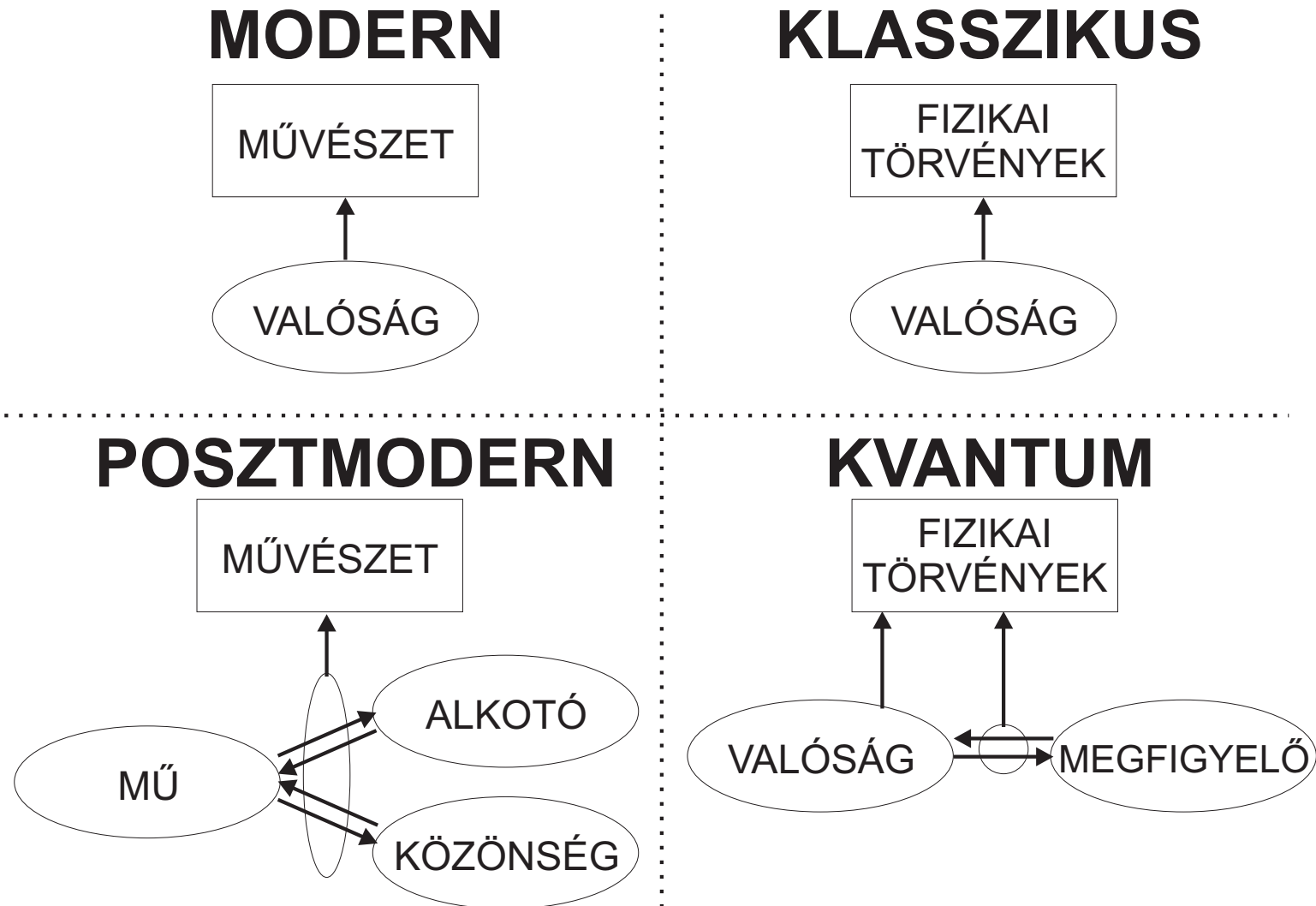
$$A |\psi\rangle = a |\psi\rangle$$

- a mérés definit értéke nem, csak a lehetséges értékek valószínűségei, a mért mennyiség várható értéke adható meg $E(M) = \langle \psi, M\psi \rangle$
- NEUMANN JÁNOS (1903–1957): a kvantummechanika matematikai alapjainak föltárása
- DIRAC: a relativisztikusan invariáns kvantummechanikai alapegyenlet föllállítása (1928)

Kvantummechanika és posztmodern

- a posztmodern a művészeti ábrázolás szemszögéből
 - ◆ korábban a művészet egy rajta kívül álló valóság ábrázolása, majd önmagában álló, zárt egész
 - ◆ *a posztmodernben a művészet tárgya önnön léte, a mű és alkotója, a mű és közönsége közötti viszony*
- kvantummechanikai párhuzam
 - ◆ a megfigyelés klasszikusan egy rajta kívül álló valóság leképezése
 - ◆ *a kvantummechanikában a megfigyelés kölcsönhatásban áll a megfigyelt valósággal, az elméletnek a megfigyelés hatásaira is ki kell terjednie, a megfigyelést is tárgyává kell tennie*

Kvantummechanika és posztmodern



Kvantummechanika és identitás

*„Hiába fürösztöd önmagadban,
Csak másban moshatod meg arcodat.”*

József Attila: Nem én kiáltok

- pszichoanalízis
 - ◆ a posztmodern előtt: az identitás az egyén szerves része, tulajdonsága
 - ◆ a posztmodernben: *az identitás a szemlélő szemében születik meg – azáltal jön létre, hogy az egyén kölcsönhatásba lép a környezetével*
- kvantummechanikai párhuzam: *a megfigyelt mennyiség konkrét értéke a megfigyelés révén „jön létre”, a megfigyelés választja ki a lehetőségek halmazából*

Fölhasznált irodalom

- SIMONYI KÁROLY: *A fizika kultúrtörténete*. Budapest, 1998, Akadémiai Kiadó
- GEORGE GAMOW: *Fizika*. Budapest, 1973, Gondolat
- NORMAN N HOLLAND: Postmodern psychoanalysis. In Ihab Hassan and Sally Hassan (eds.): *Innovation/Renovation: New Perspectives on the Humanities*. Madison (WI), 1983, University of Wisconsin Press, 291–309. p.