

A 2025. ÉVI FIZIKAI NOBEL-DÍJRÓL

Makk Péter[®], Csonka Szabolcs

BME Természettudományi Kar, Fizika Tanszék Budapest

E-mail: makk.peter@ttk.bme.hu

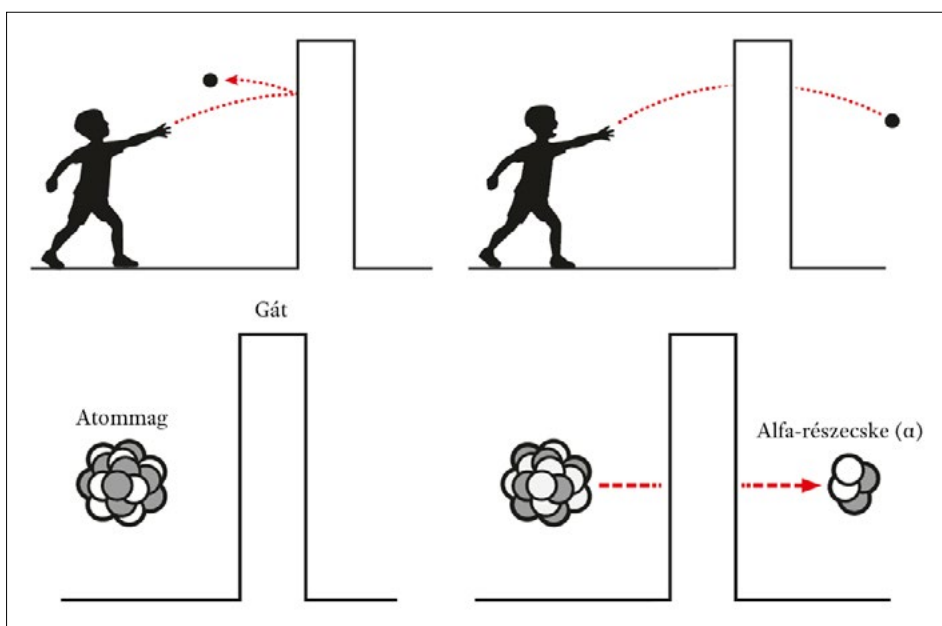
A 2025-ös fizikai Nobel-díjat három, a szupravezetéssel és kvantumszámítással foglalkozó fizikus kapta: James Clarke, Michel H. Devoret és John M. Martinis. Az indoklás szerint a „makroszkopikus kvantumalagutazás és egy elektromos áramkörben lévő kvantált energiaszintek felfedezéséért” kapták. Ebben a cikkben a Nobel-díjhoz kapcsolódó kutatásuk alapjait fogjuk végigvenni.

Az idei évben ünnepeljük a kvantummechanika felfedezésének századik évfordulóját. A kvantummechanika első sikerei az atomok kvantált energiaszintjeinek megértéséhez köthetők. Ez áttörést hozott a fizikában, és a periódusos rendszer megértése mellett a szilárd anyagok számos tulajdonságának megértéséhez vitt közelebb minket. Ebben a száz évben hozzászoktunk a kvantummechanika furcsa koncepcióihoz, még ha a klasszikus fizikai gondolataink közé nehéz is ezeket beilleszteni. De a sok-sok kísérlet, amit az elmúlt száz évben végeztek, illetve a minket körülvevő elektronikai eszközök is a kvantummechanika helyességét igazolták. Elfogadtuk, hogy egy részecske lehet ún. szuperpozícióban, két vagy több állapotban is egyszerre, és csak egy mérési folyamat során dől el, hogy ezekből az állapotokból melyikbe kerül be meghatározott valószínűségekkel.

Azt gondoltuk azonban, hogy a kvantummechanika csak az apró objektumok, például a részecskék és a molekulák világát írja le, makroszkopikus objektumok nem mutatnak kvan-

tumos viselkedést. A kvantumos viselkedésnek – például egy szuperpozíció megőrzésének – feltétele, hogy a mikroszkopikus rendszert jól szeparáljuk a külvilágtól, mivel a részrendszerek közötti, illetve a környezettel való kölcsönhatás során a kvantumos viselkedés elveszhet. A kétréskísérletet sikerült elektronokkal és kisebb molekulákkal elvégezni, de makroszkopikus tárgyak, mondjuk egy focilabda interferenciáját még senki se figyelte meg, mivel az ilyen makroszkopikus objektumok erősen kölcsönhatnak a környezettel.

A kvantummechanika egyik meglepő jelensége a kvantummechanikai alagutazás (1. ábra). Egy potenciálgáton a klasszikus fizika szerint akkor tud egy részecske áthaladni, ha a kinetikus energiája nagyobb, mint a gáton áthaladáshoz szükséges potenciálisenergia-szükséglet. A kvantummechanika szerint azonban egy részecske akkor



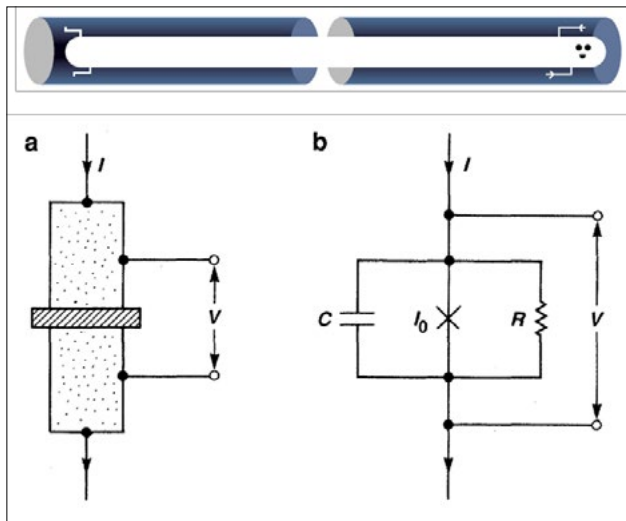
1. ábra. Kvantumos alagutazás. A felső sor a klasszikus és a kvantumos potenciálgáton való szóródás különbségét mutatja, míg az alsó sor az alfa-bomlást szemlélteti. (Forrás: Nobel-bizottság)



Makk Péter a BME Fizika Tanszék docense, tanszékvezető-helyettese, a MTA-BME „Korrelált van der Waals Heterostruktúrák” Kutatócsoport vezetője. Posztdoktori kutatásait a bázei egyetemen végezte, ami után Marie Curie-ösztöndíjasként tért haza. Sok egyéb pályázata mellett nemrégiben elnyerte az ERC Consolidator pályázatát. Kutatási területe magában foglalja a szupravezető-elektronika mellett a spintronikát és az új fázisok vizsgálatát kétdimenziós anyagokban.



Csonka Szabolcs a BME Fizika Tanszék docense és tanszékvezetője, illetve a Szupravezető Nano-elektronika Lendület Csoport vezetője. A Bázei Egyetemen töltött Marie Curie-ösztöndíjas posztdoktori kutatásai alatt kezdett foglalkozni a félvezető-szupravezető heterostruktúrákkal, majd hazatérve egy ERC Starting Grant segítségével kezdte el kiépíteni a minták készítéséhez és méréséhez szükséges infrastruktúrát. Később a Kvantuminformatika Nemzeti Laboratórium keretein belül vezette a szupravezetőqubit-kutatásokat. Az elmúlt évet az Aacheni Egyetemen töltötte Humboldt-ösztöndíj keretében.



2. ábra. Josephson-átmenetek. A felső sor a kollektív állapotot jellemző kiterjedt hullámfüggvényt szemlélteti. Az alsó sor egy Josephson-átmenet egyszerűsített és összetettebb áramköri helyettesítő képét mutatja. (Forrás: Nobel-bizottság)

is át tud haladni a potenciálgáton valamilyen valószínűséggel, ha az energiája kisebb, mint a potenciálgát magassága. Az áthaladás általában egy kis esélyű folyamat, amelyiknek a valószínűsége a potenciálgát magasságától és a szélességétől is függ. Az alagutazás jelenségén alapul az STM (pászttázó alagútmikroszkóp), ahol egy nagyon hegyes tű és egy mintafelület között alagutaznak át az elektronok a vákuumon keresztül. Ezzel a módszerrel atomi felbontású képeket lehet készíteni vezető minták felületéről. Számítógépeinkben és mobiltelefonjainkban is jelen van ez az effektus. Az alagutazás a bennük található tranzisztorok működésében jelentős problémát is okoz: olyan vékony szigetelő rész választja el a különböző tartományokat az áramkörben, hogy ezen az elektronok alagutazással át is juthatnak (a kapu elektródából a csatornába). Végül egy utolsó példa az alagutazásra a radioaktív alfa-bomlás. Itt az atom vonzó potenciáljából tud kis valószínűséggel kialagutazni egy alfa-részecske, és itt az alagutazási valószínűség határozza meg a bomlási időt.

Az idei díjazottaknak azonban egy kézzel fogható méretű szupravezető áramkörben sikerült kimutatniuk a kvantumviselkedést, többek között az alagutazás jelenségét.

A szupravezetést 1911-ben fedezték fel, amiért a felfedezője, Heike

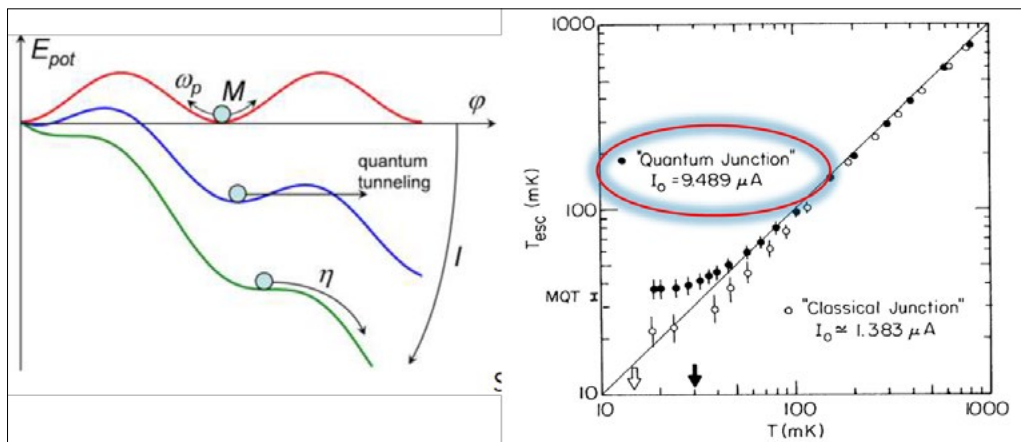
Kamerlingh Onnes 1913-ban meg is kapta a fizikai Nobel díjat. Mérései során azt mutatta meg, hogy bizonyos fémek ellenállása egy kritikus hőmérséklet alatt nullává válik, azaz úgy lehet rajtuk áramot áthajtani, hogy ehhez nem tartozik disszipáció. A szupravezetés megértéséért még három további Nobel-díjat osztottak ki (1972, 1973, 2003). A szupravezetőkben az elektromos vezetésben részt vevő elektronok párokba, ún. Cooper-párokba rendeződnek. Ezen párok feltöréséhez extra energia szükséges, és kis energiával a szupravezetőkben nem hozhatók létre gerjesztett állapotok. Ezért is lehet relatíve jól elválasztani a szupravezető rendszereket a környezetüktől.

Egy makroszkopikus szupravezető mintában rengeteg elektronpár található (mondhatjuk nagyvonalúan, hogy $\sim 10^{23}$). Ezen nagy mennyiségű részecske kvantummechanikai kezelése lehetetlen feladatnak tűnik. Meghökkenítő módon azonban a szupravezetőkben az elektronpárok kollektív viselkedést mutatnak, „együtt mozognak”. Így a teljes rendszert leíró kvantummechanikai objektum, a hullámfüggvény egyetlen (térben akár változó) komplex számmal, egy amplitúdóval és egy fázissal írható le. Ez a fázis akkor válik fontossá, ha például két szupravezetőt tekintünk, amit egy vékony szigetelő réteg választ el egymástól. Az így létrejött szupravezető alagútátmenetet Josephson-átmenetnek hívjuk, aminek magyarázatáért Josephson kapta meg a Nobel-díjat 1973-ban. Arra számítanánk, hogy ha két szupravezetőt egy vékony szigetelő köt össze, akkor ezen keresztül nem folyik áram, de az elektronpárok nemcsak átalagutazni képesek a két szupravezető közt, de még ellenállás se tartozik ehhez a folyamathoz – a két szupravezető közt is egy szuperáram folyik.

A Josephson-átmeneteken folyó áramot az ún. Josephson-egyenletekkel lehet jellemezni:

$$I = I_c \sin(\varphi), \quad d\varphi/dt = (2e/\hbar) V,$$

ahol φ a két szupravezető elektróda fázisának különbsége, I_c az ún. kritikus áram, azaz a maximum áram, amit



3. ábra. Balra: a potenciális energia a fázis függvényében egy Josephson-átmenetre, különböző áramú meghajtásokra. A fázisrészecskét a kék golyó szemlélteti. A kritikus áramnál kisebb meghajtás esetén a részecske alagutazással is kijuthat a potenciálgödörből. Jobbra: a kijutás gyakoriságát jellemző effektív hőmérséklet, az áramkör valódi hőmérsékletének függvényében. Az effektív hőmérséklet alacsony hőmérsékletű platója a kvantumos alagutazás bizonyítéka. (Forrás: M. H. Devoret, et al., *Phys. Rev. Lett.*, 55, (1985) 1908.)

át lehet hajtani az átmeneten feszültségesés megjelenése nélkül. A második egyenlet azt mondja, hogy ha a fázis állandó, akkor nem jelenik meg feszültség az átmeneten, avagy fordítva: időben változó fázis esetén feszültség jelenik meg az átmeneten. Ezek a Josephson-átmenetek sok területen fontos szerepet töltenek be: a foton-detektorok, jelen vannak a mágneses tér mérésében (ún. SQUID műszer), a metrológiában (voltsztenderd), illetve a kvantumszámítógépekben, ahogy a cikk végén erre ki fogunk térni. A Josephson-átmenetekben általában két alumíniumréteget választ el egy vékony alumínium-oxid szigetelő (2a. ábra). Mivel a két fémréteg nagyon közel helyezkedik el egymáshoz, nem elhanyagolható kapacitással is rendelkezik egy ilyen átmenet. Ezen Josephson-átmenetek elektronikai helyettesítő képe a 2b. ábrán látható, ahol a Josephson-egyenletekkel leírt átmenet mellett megjelenik egy párhuzamos kapacitás, illetve egy ellenállás is. Az utóbbi az I_c -nél nagyobb árammehajtás esetén jellemzi az átmenet viselkedését. A csomóponti törvényt felírva, illetve a második Josephson-egyenletet használva, egy differenciálegyenletet kapunk az átmeneten átfolyó áramra:

$$I = I_c \sin \varphi + \frac{2e}{\hbar} \frac{d\varphi}{dt} + C \frac{2e}{\hbar} \frac{d^2 \varphi}{dt^2}.$$

Ez az egyenlet egy potenciálban mozgó, súrlódó tömegpont egyenletével analóg, ahol a jobb oldal második tagja adja a súrlódást, illetve bevezethető az

$$U(\varphi, I) = \frac{\hbar I_c}{2e} \left(1 - \cos \varphi - \frac{I}{I_c} \varphi \right)$$

potenciál is. Ez a potenciál egy oszcilláló és egy lineáris függvény összege, amit a 3. ábrán ábrázoltunk három különböző külső árammehajtás esetében.

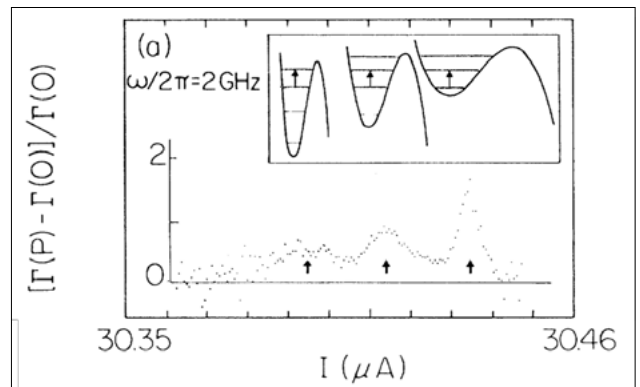
Ha a „fázisrészecske” stacionárius állapotban van, azaz a fázis időben állandó, akkor a második Josephson-egyenlet szerint az átmeneten nem esik feszültség. Ez történik nulla külső árammehajtás esetén (3. ábra, piros görbe), amikor is a részecske az egyik minimumban van. Ha a külső áramot növelni kezdjük, a potenciál megdől (kék görbe). $I = I_c$ esetén a potenciálban már nincsenek lokális minimumok, és a részecske le fog gurulni a potenciállejtőn (zöld görbe). A fázis ekkor változni fog, és a második Josephson-egyenlet szerint feszültség jelenik meg az átmeneten. A köztes helyzetben, pl. a kék görbe esetén a részecske a potenciálgödör alján van. Azonban, ha a külső hőmérséklet elég nagy, termikus gerjesztéssel át tud jutni a potenciálhegyen, és ezt követően le fog csúszni a lejtőn – ha elegendően kicsi a súrlódás, hiszen nagy súrlódás esetén megrekedhet a következő minimumban.

Itt érkeztünk el a Nobel-díjas kísérlethez. A mérés során az vizsgálták, hogy egy enyhén megdöntött potenciálból milyen valószínűséggel tud a részecske kiszabadulni. Ezt úgy vizsgálták, hogy az áramot lassan növelve azt az áramértéket keresték, amelynél nem nulla feszültség jelenik meg az átmeneten. A kísérletet többször elvégezve az átlagos kiszabadulási idő meghatározható (egy adott

áramnál), és ebből lehet egy T_{esc} effektív hőmérsékletet meghatározni, amit különböző külső (valódi) hőmérsékletek mellett mértek meg (3. ábra, jobb oldal). Látható, hogy ahogy az áramkör hőmérsékletét csökkentették, a kijutás valószínűsége csökkent, és ezzel együtt az effektív hőmérséklet is, ami jó egyezést mutatott a hűtőrendszer hőmérsékletével. Ez egészen alacsony hőmérsékletekig igaz, ott azonban azt találták, hogy hiába hűtik tovább a mintát, az effektív hőmérséklet nem csökkent. Ennek az oka, hogy ebben a tartományban már nem a termikus aktiváció, hanem a kvantumos alagutazás határozza meg a kiszabadulási rátát, amelynek a valószínűsége a hőmérséklettől független. Vegyük észre, hogy hasonlóan a korábban tárgyalt esethez, itt egy (fiktív) részecske próbál átjutni egy potenciálgáton, az átjutást a Josephson-átmeneten megjelenő feszültséggel lehet kimutatni. Itt azonban az alagutazás egy absztrakt térben történik, egy makroszkopikus áramkört leíró kvantumos mennyiség alagutazik át egy gáton. Ennek az alagutazásnak ugyanakkor a kézzelfogható méretű áramkörön jól megfigyelhető hatása van: az alagutazást megelőzően a szupravezető áramkörben megjelenik egy véges ellenállás.

Egy másik kísérletük a rendszer kvantumos természetének egy másik aspektusát is megmutatta. Ugyanis egy potenciálgödörbe zárt részecske esetén a potenciálgödörben kvantált energiaszintek jelennek meg (4. ábra). Itt is ez történik, a fázispotenciálban kvantált energiaszintek jelennek meg, azaz a rendszer egy mesterséges atomként viselkedik. Így egy jól meghatározott frekvenciájú elektromágneses sugárzással besugározva az átmenetet a fázisrészecske egy magasabb energiájú állapotba gerjeszthető. A magasabb energiájú állapothoz nagyobb alagutazási valószínűség tartozik. Így az alagutazási eseményeket vizsgálva, a kvantált energiaszintek meghatározhatók voltak.

A későbbi kísérletek során az is világossá vált, hogy a fázis mint a térbeli koordináta analógiája egy igen jó kép. Hasonlóan a kvantummechanikában ismert határozatlansági relációhoz, ami azt mondja meg, hogy egyide-



4. ábra. A potenciálgödörből való kiszökési ráta az árammehajtás függvényében (ami a potenciál alakját hangolja) 2 GHz-es besugárzás jelenlétében. A betétábrán az látható, hogy a sugárzás bizonyos áramok esetén a potenciálban átmeneteket tud gerjesztetni. A gerjesztés után a részecske „kisebb potenciálgátat” lát, és nagyobb rátával tud kialagutazni. (Forrás: John M. Martinis, et al., *Phys. Rev. Lett.*, 55, (1985) 1543.)

júleg nem lehet tetszőleges pontossággal meghatározni egy részecske pozícióját és impulzusát, egy szupravezetőnél a fázis és a részecskeszám (a Cooper-párok száma) tölt be hasonló szerepet.

A most Nobel-díjjal kitüntetett kísérletek komoly fejlesztéseket igényeltek. A méréseket millikelvines hőmérsékleten kellett végezni úgy, hogy mindenféle zavaró hőmérsékleti sugárzástól és egyéb zajforrástól megvédjék a rendszert. A lemenő kábelek zajszűrésére egy új eljárást dolgoztak ki (rézporos szűrők), amit ma is használnak a legtöbb kvantumtechnológiával foglalkozó laborban.

James Clarke, Michel H. Devoret és John M. Martinis eredményei messze túlmutatnak ezeken a kísérleteken. A Josephson-átmenetek a mai kvantumbitek egyik meghatározó platformjának, a szupravezető qubiteknek alapjaivá váltak. Az egyik első kvantumbit-architektúra pont a potenciálvölgyben megjelenő kvantált energiaszintekből használta az alsó kettőt a kvantumbit létrehozására. Ezt fázisqubitnek nevezik. A későbbi qubitarchitektúrákban a Josephson-átmenetet más áramköri elemekkel is kiegészítették, például egy szupravezető szigettel vagy egy extra kapacitással vagy induktivitással. Ezekről a

Fizikai Szemle 2025/7–8. tematikus számában lehet részletesen olvasni. Ezek a qubitek hatalmas fejlődésen mentek keresztül, és ma már a nagy techcégek (Google, IBM stb.) a terület vezetői. Az idei díjazottak közül Martinis és Devoret is a Google kvantumos kutatásaiban vett, illetve vesz vezető részt.

A kvantumtechnológiai kutatások Magyarországon is aktívak. A BME Kvantumelektronika Csoportja – melynek vezetői a jelen cikk szerzői – vizsgált például olyan Josephson-átmeneteket, ahol egy grafénréteg adja az átmenetet a két szupravezető közt, és itt is megfigyelték a makroszkopikus kvantumos alagutazás jelenségét. A Josephson-átmenetekhez hasonlóan viselkednek a vékony szupravezető vezetékek is, ahol szintén megfigyeltük a kvantumos alagutazást (T. Elailaly et al., *ACS Nano*, 17(6), (2023), 5528–5535.). Ezekről a kutatásokról is a *Fizikai szemle* 2025/7–8. számában lehet olvasni.

Végül, a BME Fizikai Intézete immáron sokadik éve rendezi meg a Nobel-díjas kísérletek szakkörét (<https://felvi.ttk.bme.hu/hu/nobeldijas>), ahol például a szupravezetés jelenségét is lehet vizsgálni. Ezekre az alkalmazkra szeretettel várunk minden középiskolást!