

KVANTUMOS INTERFERENCIAJELENSÉGEK NANOMÉRETŰ GYŰRŰKBEN

Földi Péter
Szegedi Tudományegyetem, Elméleti Fizika Tanszék

A kör egyike a legegyszerűbb, legősbibb szimbólumoknak, nemcsak az emberiség de az egyes ember történetében is: amellet, hogy az évezredek alatt különböző, jellemzően pozitív tartalmak (teljesség, végtelenség...) kapcsolódtak hozzá, ez az egyik első felismerhető alakzat, amit tudatosan vet papírra egy kisgyermek (*1.a ábra*). A geometriai egyszerűség és az elválaszthatatlannal hozzá kapcsolódó, az ember fejében mindig jelenlévő összetett tartalom együttese okozhatja azt, hogy körökkel, gyűrűkkel foglalkozni már a szakmai kérdések felvetése előtt is érdekesnek ígérkezik.

Ha egy konkrét, körön értelmezett problémát vizsgálunk, azaz olyan függvényt keresünk, amelynek az értelmezési tartománya egy körvonal, akkor alapvető kíváncságot a megoldás egyértékűsége: egy adott pontot kiválasztva, elvárjuk, hogy ugyanazt (a függvényértéket) lássuk akkor is, ha egyszer, kétszer, sokszor körbehaladunk a kör mentén, elvégre a vizsgált pont geometriai értelemben ugyanaz. Így a „végtelenség” fogalmának a körre vonatkozó, kevésbé fennkölt, cserébe konkrét verzióját kapjuk: a periodicitást. Matematikailag ez azt jelenti, hogy a függvény Fourier-sorba fejthető, azaz, ha az *1.d ábrának* megfelelően ϕ jelöli a polárszöveget, akkor minden megoldást $\exp(in\phi)$ alakú tagok megfelelően súlyozott összegeként írhatunk fel, ahol n egész. A kör mentén mozgó kvantumos „szabad” részecskét tekintve (az idézőjel arra vonatkozik, hogy a teljesen szabad háromdimenziós mozgáshoz képest a körvonal azért komoly megszorításokat jelent) a Fourier-komponensek egyúttal a kvantummechanikai probléma energia-sajátállapotai is, azaz a periodikus $\exp(in\phi)$ függvények megoldásai a „kör alakú dobozba zárt” részecske sajátérték-problémájának. Az egész n -eknek (azaz a periodicitásnak) köszönhetően az energiaszintek diszkrétnek, az energia n^2 -tel arányos. Ez jellegében igaz marad egy töltéssel rendelkező részecskére, akár gyenge mágneses tér, vagy spinfüggő kölcsönhatások befolyása mellett is.

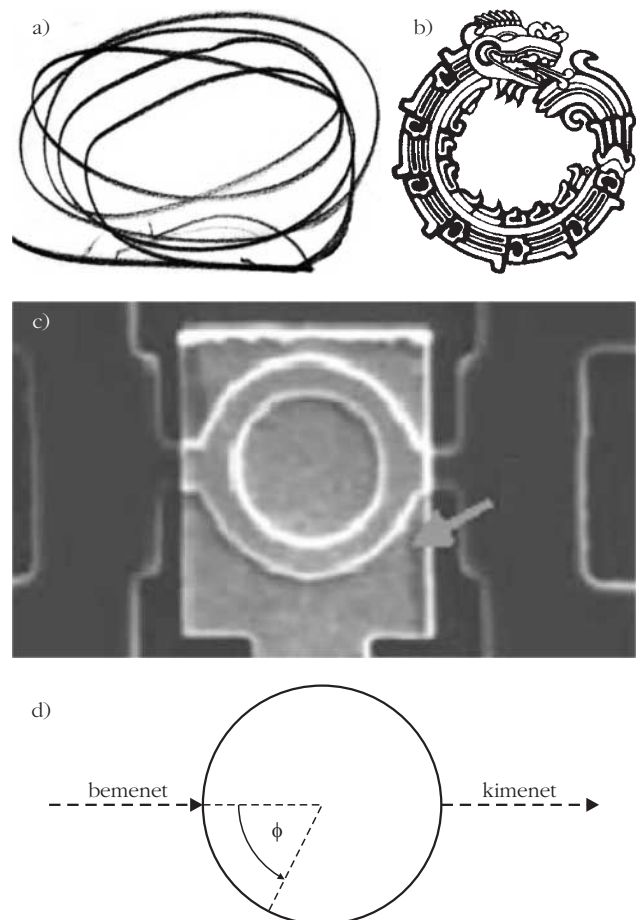
Kvantumgyűrűk, spin-pálya kölcsönhatás

Kör vagy gyűrű mentén mozgó kvantumos részecskék fizikája pontosan a tartomány alakja miatt érdekes, hiszen még ha kezdetben igen jól meghatározott helyzetű részecskét is veszünk, annak hullámfüggvénye az idő múlásával szükségképpen szétfolyik. Ekkor pedig a függvény „feje” és „farka” előbb-utóbb összeér (*1.b ábra*), és a részecske megtalálási valószínűségében is

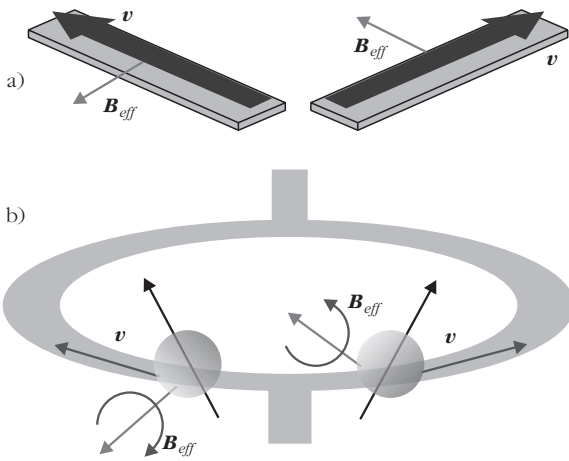
megmutatkozó interferencia lép fel. Szilárdtest gyűrűk és bennük mozgó elektronok esetében a kvantumos viselkedés így alapvető, elvi jelentőségű kísérletek elvégzését teszi lehetővé, széles körben elérhető mintákban. Másrészt, ezek a kvantumgyűrűk akár a gyakorlati alkalmazások szempontjából is lényegesek lehetnek, hiszen a sokat ígérő kvantumos információfeldolgozás [2] egy lehetséges fizikai megvalósítását adhatják.

Félvezetők felületén ma már rutinszerűen hozhatók létre [1] nanométeres tartományba eső struktúrák (*1.c ábra*). A kis méret azért játszik fontos szerepet, mert a kvantumos viselkedés igen érzékeny különféle zavaró tényezőkre (pl. a rácshibákon való szóródásra), amelyek a méret növekedésével felerősödnek. A miniatürizálás és anyagtisztaság növelése már lehetővé teszi, hogy – bár alacsony hőmérsékleten – az elektronok szabad úthossza a gyakorlatban fontos félvezetők esetén is túllépje a struktúra jellemző méretét. Ilyenkor az elektronok hullámtermészete a meghatározó. Amellet, hogy a kvantummechanikai leírás olyan effektusokra deríthet fényt, amelyek jellegében új alkalmazások alapját szol-

1. ábra. Körábrázolások (a) és (b), egy kvantumgyűrű félvezető felületén [1] (c) és az egydimenziós modell (d).



A cikkben leírt eredmények az MTA Bolyai János Kutatási Ösztöndíjának a támogatásával jöttek létre. A szerző köszöni továbbá a témával kapcsolatos eszmecsereket Kálmán Orsolyának, Molnár Balázsnak és Benedict Mibálynak.

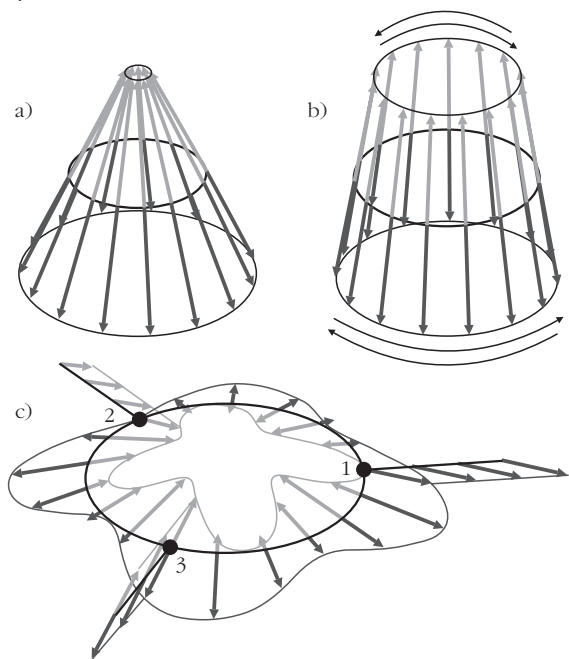


2. ábra. A különböző irányban haladó elektronok által tapasztalt B_{eff} effektív mágneses tér iránya egyenes vezetékek és gyűrű esetén. A b) ábra (J. Nitta nyomán [1]) egy-egy lehetséges spinirányt is mutat (fekete nyilak), a precesszió forgásirányával együtt.

gálhatják, érdemes megjegyezni, hogy ez a hozzáállás nemsokára szükségszerűvé is válhat, pusztán az elektronikai eszközök méretének csökkenése miatt.

Egy további ok, ami bizonyos anyagú félvezető gyűrűket kimondottan érdekessé tesz, az a vezetési jelenségek spinfüggése. A mozgó elektron vonatkoztatási rendszeréből nézve egy tisztán elektromos \mathbf{E} mező részben mágnesesnek látszik, ennek a B_{eff} effektív térnek az irányát $\mathbf{E} \times \mathbf{v}$ adja meg, ahol \mathbf{v} a sebesség. Az elektron-spinhez csatolt mágneses momentum forog, precesszál B_{eff} körül. Ezzel a spin-pálya csatolásnak nevezett jelenséggel a fizika több területén is találkozhatunk, például a spektrumvonalak finomszerkezetéért is ez a kölcsönhatás felelős. Félvezetőkben [3] az effektus jelentőségét

3. ábra. A gyűrű kitüntetett irányai erős (a) és gyengébb (b) spin-pálya kölcsönhatás jelenlétében. A b) ábrán a lehetséges áramirányok is láthatók, amelyekhez tartozó hullámok interferenciája a c) mintázatot is létrehozhatja. A nyilak hossza itt az elektronsűrűséggel arányos, és a 3. számú vezeték a bemenet.



főként az adja, hogy az \mathbf{E} mező elektródákkal hangolható (erre mutat példát a nyíllal jelölt világos téglalap a 1.c ábrán). Mivel az elektron spinje, mint természetes két-állapotú rendszer a kvantumozott információfeldolgozásban [2] alapvető kvantum bit (qubit) egy lehetséges fizikai megvalósulását jelenti, a spin is erőforrásként felhasználó elektronikának (spintronikának [4]) egy olyan ága fejlődhet így ki, ami akár a jövőbeli kvantumszámítógépek szempontjából is jelentős lehet.

Félvezetőkben kialakított vezetékek esetén a tipikus elrendezés az, hogy egy masszív, viszonylag nagy lapra (szubsztrát) visznek föl más anyagi minőségű félvezetőt, ami tulajdonképpen a vezetékeket jelenti az elektronok számára. Pontosabban, az ilyen heterostrukturák esetén az áram a felület mentén, a kétféle félvezető közötti vékony határretegben folyik (éppen merőlegesen pl. a tranzistorokban megszokott irányra). Itt érdemes visszatérni a „szabad” elektronok kérdésére: ha az egyszerűség kedvéért egy egyenes félvezető csíkra gondolunk, az jó közelítéssel azt jelenti, hogy az elektronok ebbe a tartományba vannak „beszorítva”. A lényegét jól megragadja, ha egyszerűen elektromos eredetű (pl. harmonikus) potenciálokra gondolunk mind a szubsztrát síkjára merőlegesen, mind pedig a csíkra merőleges irányban. Alacsony hőmérsékleten, viszonylag kis feszültségek esetén a rendszer egy hullámvezetőhöz hasonlít [5], ahol a vezeték geometriája és a Fermi-szint viszonya határozza meg a vezetési tulajdonságokat. Vékony vezetékek alkalmazásával elérhető az egymódusú optikai szálakhoz hasonló viselkedés, ilyenkor a terjedési irányra merőlegesen lényegében csak az alapállapot betöltöttsége különbözik nullától. Mivel egyetlen olyan módus van, ami a vezeték mentén haladó hullámot ír le, így az 1.d ábra egydimenziós modellje jó közelítést jelent.

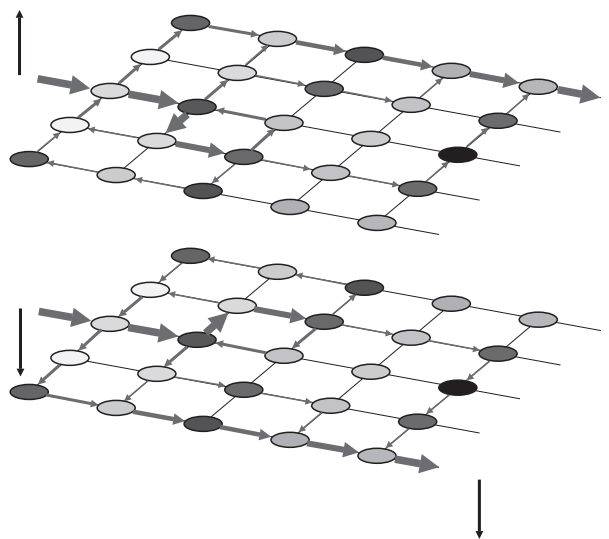
A 2. ábrán az effektív mágneses tér iránya látható egyenes vezetékek esetén. Mivel a vezetékben haladó elektron spinje elforgat B_{eff} körül, általában pontról pontra változik az iránya. Összesen két, egymással ellentétes kitüntetett spinirány található (a spin-pálya kölcsönhatást is tartalmazó Hamilton-operátor [6] sajátállapotai), amelyek nem mutatnak precessziót. Görbült vezeték – mint a gyűrű – esetén a helyzet annyiban más, hogy az effektív mágneses tér iránya pontról pontra változik, így a kitüntetett irányok is helyfüggést mutatnak. A 3.a–b ábráknak megfelelően ezek a spinirányok egy kúp felületén helyezkednek el, aminek nyílásszöge attól függ, hogy mennyire erős a spin-pálya kölcsönhatás. Fontos ismételt hangsúlyozni, hogy ez a kölcsönhatás-erősség arányos az elektronok által érzett elektromos térrel, így külső, a szubsztrátra helyezett elektródákkal befolyásolható (1.d ábra).

Az egyik legalapvetőbb fizikai mérés egy nanoméretű félvezető eszközzel kapcsolatban a vezetőképesség meghatározása. Az ilyen jellegű kísérletek leírásakor nem egy önmagában álló gyűrűre gondolunk, hanem tekintünk két, hozzá csatlakozó vezetéket is (a szaggatott vonalak az 1.d ábrán). Érdeemes megjegyezni, hogy ideálisan illesztett vezetékek esetén a gyűrű lehetséges energiái már nem alkotnak diszkrét

sorozatot. (A folytonos spektrum létrejötte hasonló ahhoz, ami akkor történik, ha egy optikai – de akár [többmódusú] mechanikai – oszcillátort gondolatban fokozatosan „kinyitunk”, egyre inkább kölcsönhatásba hozunk a környezettel: az energiaszintek eltolódnak, kiszélesednek, végül pedig összefolynak.) Gyűrű esetén a legegyszerűbb esetben a vezetékek úgy csatlakoznak az eszközhöz, hogy az egyikben jellemzően befelé, a másikon pedig kifelé folyik az áram. (A visszaverődés miatt elképzelhető, hogy a bemenő vezetékben „visszafelé” is folyik áram, akár pont ugyanannyi, mint befelé: ekkor az eszköz teljesen átlátszatlan az elektronok számára.) Szemléletesen azt gondolhatjuk, hogy a belépő elektron hullámfüggvénye kettéválk, majd önmagával találkozik, interferál. A jelenség hasonlít a klasszikus kétréses kísérletre, csak most ernyő helyett a gyűrű mentén alakul ki az interferenciamentázat, ami az összeállítás vezetőképességének meghatározásával válik mérhetővé: ha a kimenő vezeték egy minimumnál csatlakozik a gyűrűhöz, akkor nem folyik áram, nulla a vezetőképesség, míg az interferenciamaximumok a vezetőképességben is csúcst jelentenek. Mindez persze akkor lenne jól látható, ha a kimenő vezeték helyzete változtatható lenne, de a geometria az eszköz elkészítésének módja miatt adott, a későbbiekben már nem módosítható. Így a kimenő vezeték az interferenciakép egyetlen pontjából vesz mintát. A vezetőképesség oszcillációi azonban fontos információt hordoznak, segítségükkel megbecsülhető például az, hogy mennyire kvantumos a viselkedés, és így milyen effektusok megjelenésére van esély. Egy lehetséges ötlet ilyen oszcillációk kimutatására az Aharonov–Bohm-effektus [7] felhasználása, azonban mágneses tér alkalmazása elektronikai eszközökben eléggé nehézkes. A kapufeszültségekkel változtatható erősségű spin-pálya csatolás sokkal praktikusabb lehetőséget kínál. Ez a kölcsönhatás érzékeny a spin irányára, így az interferenciajelenségek is szükségképpen spinfüggőek lesznek. A 3.a ábrán látható kúpfelületből az ellentétes spinirányokhoz (sötét és világos nyilak) tartozó, egymással szembe haladó áramokat leíró hullámok találkozására eredményeként például a 3.c ábra virágsziromra hasonlító interferenciaképe is kialakulhat. A spin-pálya kölcsönhatás erősségének változtatásával nemcsak a kitüntetett spinirányok, hanem a hozzájuk rendelhető hullámhossz és így a teljes interferenciakép is megváltozik. A kimeneten (és így a vezetőképességben) ezért periodikusan láthatunk interferenciaminimumokat, illetve -maximumokat.

Lehetséges alkalmazások

A kvantumos információfeldolgozás esélyével kapcsolatban lehet hasznos, hogy a spin-pálya kölcsönhatás erősségének változtatása a spin irányát is befolyásolja a kimenő vezetékben. Ha az elektron spinjét tekintjük az alapvető információhordozó egységnek, akkor három, legendően hosszú ideig fennálló felté-



4. ábra. Kvantumgyűrűk rendszere, mint a Stern–Gerlach-berendezés megfelelője. A szürke különböző árnyalatai a spin-pálya kölcsönhatás relatív erősségét kódolják, a gyűrűk közti nyilak vastagsága pedig az ott folyó árammal arányos.

tel együttese szükséges ahhoz, hogy működő kvantumszámítógépünk legyen: képesnek kell lennünk spinpolarizált áramok létrehozására, el kell tudnunk forgatni a polarizáció irányát és létre kell hoznunk legalább egyféle, stabilan működő kétqubit logikai kaput (amilyen pl. a NAND kapu klasszikus bitek és elektronika esetében). Jelenleg az első két lépés kivitelezhetőnek tűnik – akár gyűrűk segítségével is – a harmadik összetettebb probléma, aminek megoldására azonban van esély.

Felidézve, hogy a spin-pálya kölcsönhatás erősségének (azaz a megfelelő kapufeszültségnek) függvényében változik a kimeneten a spin iránya, nem meglepő, hogy egy adott méretű gyűrűt véve különböző módokon is elforgathatjuk a bemenő spin irányát. Ami érdekes, az az, hogy – elvileg – tervezhető módon készíthetők így kvantumos logikai kapuk, azzal a nem elhanyagolható pozitívummal, hogy a visszaverődés valószínűsége is alacsonyan tartható [8]. Ez azért kiemelkedő jelentőségű kérdés, mert egy nagyobb hálózatban a sok visszaverődés akár azzal is járhat, hogy a rendszer végül lényegében már nem vezet az áramot (holott anyagát tekintve kellene).

Spinpolarizált áramok létrehozása szintén lehetséges egy kvantumgyűrű segítségével, csak ebben az esetben a bemenet mellett két kimenő vezetékre van szükség. A bemenő elektronokat polarizálatlanak gondoljuk, azaz mindenféle polarizációs irány azonos valószínűséggel van jelen (elektromágneses hullámokra gondolva ilyen pl. a napfény). Az állapot leírható például úgy, hogy 50% valószínűséggel a bemeneti ponthoz a gyűrűben tartozó egyik kitüntetett spinirány (a 3. ábrán világosszürke nyilak), 50% valószínűséggel pedig az ellentétes (az ábrán sötétszürkével jelölt) irány. Ha a gyűrű méretét és a spin-pálya erősséget megfelelően választjuk, akkor elérhető, hogy a 3.c ábrán például az 1. kimeneten a világgal jelölt spinirányhoz nulla megtalálási valószínűség tartozzon, így

azon a ponton keresztül csak a sötét nyilaknak megfelelő spinek lépjenek ki. (A másik kimeneten a szerepek felcserélődnek.) Így végeredményben a sötét és világos nyilaknak megfelelően irányított, polarizált spinek lépnek ki a gyűrűből [9].

Ez a fajta polarizáló működés még sarkítottabban jelentkezik, ha nem egyetlen gyűrűt, hanem gyűrűk rendszerét tekintjük [10]. Ha feltesszük, hogy az egyes gyűrűkben függetlenül változtatható a spin-pálya kölcsönhatás erőssége, akkor ezek megfelelő választásával elérhető az is, hogy egymással ellentétes irányú bemenetek más-más kimeneten keresztül hagyják el a hálózatot, méghozzá úgy, hogy irányuk megegyezik a bemenetével, és lényegében visszaverődés sincsen (4. ábra). Érdeemes megjegyezni, hogy ez a javasolt eszköz a Stern–Gerlach-berendezéshez teljesen hasonló, azzal a különbséggel, hogy a számítások szerint működik, míg – amint már *Bohr* is megmutatta – a hagyományos, inhomogén téren alapuló berendezés elektron spinpolarizációjára elvben sem alkalmas.

Kvantumgyűrűk hálózata emellett még számos ígéretes alkalmazást tehet lehetővé [11], de ezek szempontjából alapvető kérdés, hogy a működőképességet mennyire befolyásolja (rontja el), ha a hőmérséklet növekszik, vagy a szabad úthossz a hálózat alkotóele-

meinek gyarapodása miatt összemérhető vagy kisebb lesz, mint a rendszer mérete. Számításaink szerint a működőképesség ugyan megéri ezeket a külső zavarokat, de a mai kísérleti eszközökkel is elérhető az a tartomány, ahol még mérhetőek a jósolt jelenségek [12]. Ennek alapján a kvantumgyűrűk és a spinfüggő interferenciát mutató hálózatok mind elméleti, mind kísérleti szempontból sok lehetőséget tartogatnak még.

Irodalom

1. J. Nitta, *NTT Technical Review* 2 (2004) 31.
2. Geszti T., *Fizikai Szemle* 56 (2006) 216.
3. E. I. Rashba, *Fiz. Tverd. Tela (Leningrad)* 2 (1960) 1224. [*Sov. Phys. Solid State* 2 (1960) 1109.]
4. J. Cserti, *Természet Világa* 136 (2005) 389.
5. S. Datta: *Electronic transport in mesoscopic systems*. Cambridge University Press, Cambridge, 1995.
6. B. Molnár, F. M. Peeters, P. Vasilopoulos, *Phys. Rev. B* 69 (2004) 155335.
7. M. Benedict, *Fizikai Szemle* 44 (1994) 190.
8. P. Földi, B. Molnár, M. G. Benedict, F. M. Peeters, *Phys. Rev. B* 71 (2005) 033309.
9. P. Földi, O. Kálmán, M. G. Benedict, F. M. Peeters, *Phys. Rev. B* 73 (2006) 155325.
10. P. Földi, O. Kálmán, M. G. Benedict, F. M. Peeters, *Nano. Lett.* 8 (2008) 2556.
11. O. Kálmán, T. Kiss, P. Földi, *Phys. Rev. B* 80 (2009) 035327.
12. P. Földi, M. G. Benedict, O. Kálmán, F. M. Peeters, *Phys. Rev. B* 80 (2009) 165303.

MERRE TART AZ EURÓPAI UNIÓ A NUKLEÁRIS HULLADÉKOK KEZELÉSE TERÜLETÉN?

Ormai Péter, Hegyháti József

Radioaktív Hulladékokat Kezelő Közhasznú Nonprofit Kft.

Az elmúlt évtizedben jelentős műszaki haladás történt az Európai Unióban a kis és közepes aktivitású hulladékok elhelyezése terén. Az igazi kihívás továbbra is a nukleáris fűtőelemciklus lezárása. Néhány országban a geológiai tárolók az építésre vonatkozó döntés közelébe jutottak. Az EU legújabb kutatási keretprogramjának fő célkitűzése megvalósítás-célú programok ösztönzése minden eddig még le nem zárt fontos kérdésben annak érdekében, hogy masszív tudományos és műszaki alapot lehessen teremteni a geológiai elhelyezés biztonsága és a technológiák demonstrálhatósága érdekében, ezzel kialakítva egy közös európai álláspontot a fő kérdésekben. A geológiai tárolók kifejlesztése mellett az elemszeparáció és transzmutáció (P&T) a másik fő fejlesztési irány.

Kis és közepes aktivitású hulladékok elhelyezése

Az elmúlt évtizedben – a nemzeti programok keretében végzett munkának köszönhetően – jelentős tudományos és műszaki haladás történt az Európai Unióban a rövid életű kis és közepes aktivitású hulladékok

biztonságos végleges elhelyezése területén. Az ilyen típusú hulladékok elhelyezésére korszerű felszín közeli és felszín alatti tárolók épültek. Európában az atomerőművel rendelkező országok majd mindegyike üzemeltet hulladéktárolót, vagy pedig folyamatban lévő programja van a létesítésre. Kivételt képez Hollandia és Olaszország [1].

Kis és közepes aktivitású hulladékok elhelyezése Pakson a speciális szállítójárműre (foto NRHT).

