

Új lehetőség: A krio-elektronika

Dr. Puskás Ferenc

Babes-Bolyai Tudományegyetem, Kolozsvár

A XXI. század emberének csak akkor jósolhatunk nyugodt jövőt, ha sikerül megoldania a következő négy problémát: táplálkozás, energia, információszerzés, környezetvédelem. Nyilvánvaló, hogy mind a négy kérdéskör rendkívül összetett, egymást kölcsönösen befolyásolja, és egyik megoldása sem lehetséges a másik három figyelembevétel nélkül. Ennek ellenére, ha fontossági sorrendet állítanánk fel közöttük, az információszerzésre tehetnénk a fő hangsúlyt: a tudás és a kultúra megfelelő fejlődése nélkül reménytelen dolog a másik három problémakör megoldására gondolni.

A szakemberek újabban már nem olyan borúlátók a jövőt illetően, mint néhány éve. A futurologusok kidolgozta modellek sok esélyt mutatnak fel. A nehéz idők átvészeltetők, ha kulturális bázisunk elég szilárdnak bizonyul ahhoz, hogy ne pusztítsuk el önmagunkat. A tudományos és műszaki fejlődés előtt nagyszerű távlatok nyíltak meg, mióta az elektronika közvetlen eszköze lett a haladásnak. Az emberiség fejlődésére egész története során egyetlen tudományág sem hatott olyan döntő módon (az atomfizikát is beleértve), mint az elektronika. Ha a modern *elektronika jövőbeli eredményeit próbáljuk* előre látni, nem hagyhatjuk figyelmen kívül a szupravezetők kínálta lehetőségeket, amelyeket részben már alkalmaznak vagy a közeljövőben fognak alkalmazni, részben a távolabbi jövő nagy ígéretét jelentik.

Mi a szupravezetés?

A szupravezetés jelenségét több mint fél évszázada ismerjük. A dolog úgy kezdődött, hogy Leyden világhírű intézetében, az alacsony hőmérsékletek laboratóriumában, H. Kammerlingh-Onnes a fémek elektromos vezetését vizsgálta az abszolút zéró fok közelében. Elméletileg arra számított, hogy a fémek elektromos ellenállása, amely a hőmérséklettel csökken, egy zérótól különböző véges érték felé tart, ha a hőmérséklet az abszolút zéróhoz közeledik.

Az első kísérletek nem hazudtolták meg várakozását, amely a réz, az arany, az ezüst és a platina esetében igazolódott. A higany azonban megdöbbentően viselkedett: elektromos ellenállása 4.15 Kelvin hőmérsékleten hirtelen eltűnt, s ennél kisebb hőmérsékleten zéró értékűnek adódott. Később más fémeknél, így az ólomnál, az ónnál, az alumíniumnál (napjainkig több mint huszonöt elemnél és ezer ötvözetnél) kimutatták a jelenséget, amelyet Kammerlingh-Onnes nagyon találóan szupravezetésnek nevezett el.

Azt a hőmérsékletet, amelynél a normális vezető szupravezető állapotba megy át kritikus hőmérsékletnek mondjuk (jele T_c).

A fizikusok már a szupravezetés felfedezésekor rájöttek, hogy rendkívüli jelenséggel állnak szemben, amely mind kísérleti, mind elméleti szempontból nagy újdonság. Ohm és Kirchhoff törvényei – az elektrotechnika alaptörvényei – a szupravezető áramkörökre *nem alkalmazhatók. Mivel elektromos ellenállás hiányában* Ohm és Kirchhoff törvényeivel nem írható le a szupravezetési áram eloszlása, ezeket az áramköröket az áram és annak mágneses tér közötti kapcsolattal kell jellemezni. Ezért részletesebben kezdték vizsgálni az áram és a mágneses tér közötti kapcsolatot. A kísérletek során kiderült, hogy a szupravezetés jelensége egy adott erősségű mágneses térrel megszüntethető. Azt a mágneses térerősséget, amely az adott (T_c -nél alacsonyabb) hőmérsékleten a szupravezető állapotot megszünteti, kritikus mágneses térerősségnek mondjuk: ennek rendkívüli fontossága van a szupravezetők gyakorlatában.

Kidobja magából a mágneses teret

A további vizsgálatok kiderítették, hogy a külső mágneses tér általában nem hatol be a közönséges szupravezető test belsejébe: az mintegy „kidobja magából” a mágneses erővonalakat. Ezt a jelenséget felfedezőjéről Meissner-effektusnak nevezik. A közönséges szupravezető tehát, olyan mint egy

ideális diamágneses anyag, amelynek a felületéről a mágneses tér erővonalai mintegy „visszaverődnek”.

Ha egy szupravezető lemezhez egy kis mágnesrudat közelítünk, az eltaszítja magától a mágneset, amely ott marad lebegő helyzetben a lemez fölött. A jelenség máris egy fontos gyakorlati alkalmazásra hívta fel a figyelmet: ennek alapján dolgozták ki a szupravezetők mágneses telfüggesztésének az eljárását (mágneses lebegtetés). A szupravezető elektromos gépekben a csapágy nélküli forgórészt mágneses telfüggesztéssel rögzítik az állórész belsejében. Ennél a géptípusnál az egész súrlódási veszteség gyakorlatilag kiküszöbölhető, a gép hatásfoka szinte eléri az egyet. Ilyen motorokat terveznek nagy teljesítményű és nagy fordulatszámú centrifugák működtetésére.

A közlekedés szempontjából is jelentősek azok a kísérletek, amelyeket nagy sebességű távolsági vonatok kifejlesztése céljából végeznek. Ezeknél mágneses lebegtetésű lineáris motorokat alkalmaznak. A lineáris motor mozgórésze egy szupravezető test, amely az utasfülke alatt helyezkedik el, és szilárdan a fülkéhez kapcsolódik. A fülke alatti sínvezeték szupravezető kábeleket tartalmaz, melyekben nagy intenzitású váltakozó áram folyik. Az áram mágneses tere olyan erős, hogy néhány centiméter távolságra a sín fölött lebegteteti az utasfülkét, melyet a mozgórészre ható húzóerő rövid idő alatt nagy sebességre képes felgyorsítani. Japánban egy negyven kilométer hosszú kísérleti pályán szupravezető rendszerű lineáris motorral, ill. ilyen felszerelt vonattal 550 km/h sebességet sikerült elérni.

Veszteségmentes energiaszállítás

Mivel a közönséges szupravezető belsejébe nem jut be mágneses tér, már kezdetben sejtették, hogy nem juthat be az elektromos áram sem. Később kiderítették, hogy a szupravezetőben az áram általában tényleg csak egy vékony, kb. 10^{-6} cm-es felületi rétegben folyik. S akár a külső mágneses tér, az áram mágneses tere is csak e vékony felületi rétegbe tud behatolni. A szupravezető, mivel nincs ellenállása, és csak nagyon vékony felületi rétegben vezet az áramot (nagy áramsűrűség mellett), ideális áramvezető: kevés

anyag felhasználásával nagy elektromos teljesítményt szállít veszteségmentesen.

Jelenleg a világ energiatermelésének 10 %-át villamos energia formájában nyerjük, de századunk végére ez az arány 25%-ra növekszik. A számítások azt mutatják, hogy ennyi villamos energiát csak úgy lehet gazdaságosan termelni, ha óriási kapacitású erőműveket építenek. A nagy erőművekben nyert elektromos energia szállítása azonban újabb problémákat vet fel. 1 GW (milliárd watt) teljesítmény fölött az ismert klasszikus eljárásokkal (nagy feszültségű légvezeték, olajhűtésű földalatti kábel) nem lehet gazdaságosan szállítani nagy távolságra a villamos energiát – megoldásul kínálkozik viszont a szupravezető kábelek alkalmazása.

Ilyen távvezetékek számára már több szupravezető kábeltípust kifejlesztettek. A legegyszerűbb megoldású egyenáramú kábel egy rézcső, amelynek külső és belső falát mikron vastagságú nióbbiummal vonják be. A cső belsejében cseppfolyós héliumot áramoltatnak; ez biztosítja, hogy a nióbbium – amelynek kritikus hőmérséklete 9,2 K – állandóan szupravezető állapotban legyen. A rézcsövet ezután hőszigetelő burkolattal veszik körül. Egy másik kábeltípus réz mátrixba ágyazott szupravezető szálakból áll. Úgy készül, hogy egy tömör rézhengerben több száz, néhány mikron vastagságú kapilláris cső rendszerét hozzák létre, és a vékony csöveket szupravezető szálakkal töltik ki.

Bizonyos energiavesztéssel persze a szupravezető kábelnél is számolni kell. A rendszer hűtésére energiát kel fordítani, azonkívül váltakozó áram szállításánál a szigetelő részben itt is fellépnek a dielektromos veszteségek. A vizsgálatok szerint azonban egy 10 GW-ot szállító, 300 km-es távvezetés esetében a szupravezető kábel annyival jobb hatásfokot biztosít, hogy a többletköltség már a jelenleg alkalmazott technológia mellett is pár év alatt megtérülne.

Kisebb méret, jobb hatásfok

A szupravezető huzalok legrégebbi és leggyakoribb alkalmazási területe az elektromágnesek készítése. A kereskedelemben több mint húsz éve árusítják már a különböző típusú szupravezető elektromágneseket. Ezeknek

a klasszikus elektromágnessel szemben több előnyük van: erősebb mágneses teret állítanak elő, méretük jóval kisebb, és jobb a hatásfokuk.

Attól függően, hogy milyen célt szolgálnak, a szupravezető mágnesek nagyon különböző alakúak és méretűek lehetnek. Egyeseket ipari sorozatban állítanak elő, másokat egyedi példányként. Gyártanak például – néhány ezer dolláros áron – kis asztali elektromágneseket, amelyek mérete nem haladja meg egy nagyobb termosztét, és 1 T nagyságrendű mágneses indukciót lehet elérni velük. Ilyen erős mágneses mezőt – klasszikus úton – csak több mázsás elektromágnes valósíthat meg.

A szupravezető mágnesek másik fontos alkalmazási területe a nagy energiafogyasztású mágnesek helyettesítése. A magfizikában használt gyorsítók, a magfúziós reaktorok, az MHD generátorok igen nagy kiterjedésű és nagy erősségű mágneses teret igényelnek. Régebben mindezeknél klasszikus elektromágneseket alkalmaztak. Ha figyelembe vesszük, hogy egy ilyen berendezés teljesítmény-felvétele több száz MW, és egy klasszikus elektromágnesnél ennek a teljesítménye jó része hővé alakul, ugyanakkor a keletkezett hő elszállítása is külön energiát igényel, akkor belátható, hogy a szupravezető mágnes ezen a területen ki fogja szorítani klasszikus vetélytársát.

1979-ben a Szovjetunióban üzembe helyezték az első szupravezető mágnessel működő tokamak típusú magfúziós reaktort. A nyolcvanas években tervezett óriás-szinkrotronok mágnesei ugyancsak szupravezetőből készültek.

Mágneses árnyékolás

A szupravezető nem csak erős mágneses tér előállítására, hanem annak kiküszöbölésére is alkalmas. Az egyetlen ideális mágneses szigetelő. Ha építünk egy zárt szupravezető dobozt, s abból „kikanalazzuk” a belsejébe zárt földmágneses teret, egy olyan térrészt nyerünk, ahol nincs mágneses tér.

Egyes fizikai és biológiai vizsgálatoknál nagyon fontos a külső mágneses tér megszüntetése, a mágneses árnyékolás. Az amerikai Bell Laboratóriumnak van egy mágneses-

sen árnyékolt fülkéje, amelynek térfogata 75 m³; ebben a helyiségben sikerült a kívülről származó mágneses teret a földmágneses tér tízmilliomod részére csökkenteni. A fülkében főleg biológiai jellegű kutatásokat végeznek.

Régóta tudjuk, hogy van több olyan sejtípus és a magasabb rendű élőlények között is sok olyan faj, amely különösen érzékeny a külső mágneses tér változásaira. A kutatók feltételezik, hogy mágneses tér teljes hiánya esetén az élő szervezetekben súlyos rendellenességek állhatnak be, némelyik faj meg éppen kipusztulhat. Szupravezető cellákban szúnyogféléken végzett kísérletek megerősítik ezt a feltevést. Anopheles szúnyogokat tartottak mágnesesen árnyékolt cellákban: tizenkét nemzedék után a kísérleti egyedek már nagyrészt terméketlenek voltak. Feltételezhető, hogy a vizsgált szúnyogféléknél a génstruktúrához kapcsolt információs anyag átmásolásában állnak be zavarok a mágneses tér hiányában.

Egyes kutatók az őshüllőknek a kréta-korszak végén történt kipusztulását a földmágneses térerősség akkor előállt nagyfokú csökkenésével magyarázzák.

Mozgó alkatrész nélkül

Elektromos energiát annál gazdaságosabban lehet előállítani, minél nagyobb teljesítményű generátoregységet alkalmazunk. Korszerű erőművek már GW nagyságrendű turbogenerátorokkal dolgoznak. A motorokhoz hasonlóan a generátorok szerkesztéséhez is használhatunk szupravezető áramköröket: így csökkenthető a generátor mérete, ugyanakkor javítható a hatásfoka.

Teljesítmény	500 MW		1000 MW	
	súly (T)	hosszúság (m)	súly (T)	hosszúság (m)
Konvencionális	400	10	700	14
Szupravezető	210	6,4	280	7,5

Táblázatunk egy konvencionális és egy szupravezető áramkörös turbogenerátor főbb adatait tünteti fel.

A legkorszerűbb elektromosenergia-termelő a mozgó alkatrész nélküli szupravezető magnetohidrodinamikus (MHD) generátor. Ennél az energiafejlesztő alapegység – például atomreaktor – által termelt hő segítségével

gével magas hőmérsékletű plazmát állítanak elő. A plazmát, amely ionokat és elektronokat tartalmaz, mágneses térbe irányítják. A mágneses térben mozgó töltések a Lorentz-féle erő hat, amely a plazmában mozgó töltéseket előjelük szerint két különböző irányban téríti el. Ily módon a generátor két kollektorlemezére jutnak a plazma áramból különválasztott pozitív és negatív töltések. A kollektorlemezek alkotják tehát az MHD generátor két pólusát.

Mivel ez a berendezés nem tartalmaz mozgó alkatrészeket, hatásfoka nagyon jó. Ha a plazmát képező munkacsoport atomreaktor hőjével hevítik, nagy teljesítmény esetén a hőenergia villamos energiává való átalakítása az ideális Carnot-ciklusét megközelítő hatásfokkal történhet.

Az MHD generátor kétségtelenül a jövő elektromos generátora. Az USA-ban terveznek egy 1 GW-os MHD generátort, amelynek üzembe állítását 1999-re irányozták elő. Ennek a szupravezető mágneses egy 25 m hosszú és 10 m átmérőjű henger; az előállított mágneses indukció 6 T.

Számos más ország mellett Romániában is folynak kutatások MHD generátorok építése céljából. A bukaresti ICPET kutatóintézetben egy munkacsoport megtervezett és felépített két kísérleti MHD generátort. Az egyik 45 kW teljesítményt szolgáltat egyenáramú üzemben, a másik 1 MW teljesítményű. Utóbbit felszerelték egy inverterrel is; ez lehetővé teszi, hogy a generátor szolgáltatja egyenáramot váltakozó árammá alakítsák, s így a nyert energia közvetlenül betáplálható a váltakozó áramú hálózatba.

Nem érdektelen megemlíteni, hogy az energiaelőállítás költségei a klasszikus hőerőművekben egyelőre alacsonyabbak. A további műszaki fejlesztés azonban lehetővé teszi, hogy a következő típusú MHD generátoroknál már lényegesen kedvezőbb legyen a helyzet. De még a jelenlegi árstruktúra mellett is az MHD generátorok előnyösebbek. Ezek sokkal kevésbé szennyezik a környezetet, másrészt nagyon „rugalmas” szerkezetek: hamar üzembe helyezhetők, csúcspozíciókban időben gyorsan bekapcsolhatók – egy klasszikus hőerőműben viszont órákig melegítik a vizet, míg a kellő nyomású gőzt biztosítják.

Energiatárolás a (közel)jövőben

Nemcsak az energia előállítására, hanem tárolására is nagyszerű lehetőségeket kínálnak a szupravezetők. Főleg a fejlett ipari országokban fordul elő, hogy a nap bizonyos időszakában az erőművek teljes kapacitását nem használják ki. Ilyenkor le kell állítani egyes erőműveket. A csúcspozíciókban ugyanakkor nem elég a rendelkezésre álló energia. Ezt a hullámzást úgy lehet kiegyenlíteni, hogy az erőműveket mindig teljes kapacitással működtetve, a kisebb fogyasztáskor fennmaradó energiát megfelelő tárolórendszerben felhalmozzák, ahonnan az bármikor „elővehető”. Ha az energiát átalakítás nélkül, elektromos formában akarják tárolni, akkor három lehetőséggel számolhatnak:

1. akkumulátorokban tárolni, elektrokémiai energia formájában, amely kisütéskor elektromos energiává alakul vissza (ez elég jó, 80-85 százalékos hatásfokot biztosít, de az akkumulátorok súlya energiatároló képességükhöz viszonyítva nagyon nagy, élettartamuk aránylag rövid, és körülményes gondozást igényel);

2. nagy feszültségű kondenzátorokban tárolni elektrosztatikus energia formájában (ez még magasabb tárolási hatásfokot biztosít, s a kondenzátoroknak nagy az élettartamuk, hátránya viszont az, hogy érdemleges energiamennyiség befogadására óriási méretű kondenzátortelepeket kellene építeni);

3. szupravezető tekercsekben tárolni. Ebben az esetben egy nagyméretű toroidális tekercs készül, amelynek szupravezető huzalja árammal való feltöltés után zárt áramkört alkot (mintha egy transzformátor szekundér tekercsét rövidre zárnánk). A szupravezető tekercsben az áram veszteség nélkül kering: a számítások szerint több tízezer év múlva sem találunk mérhető energiavesztést. A tárolt energia ennél a megoldásnál mágneses tér-energia formájában halmozódik fel.

Jelenleg már működnek olyan berendezések, amelyek 10^4 MWh energiát képesek tárolni szupravezető tekercsekben. E berendezéseknél a legnagyobb problémát az energia betáplálásának és visszanyerésének a módzata jelenti. A ki- és bekapcsolás rövid időszakában, az ún. átmeneti folyamat alatt a szupravezető tekercs erős mechanikai rezgés-

seknek van kitéve, amelyek romboló hatása elérheti egy 5-6 fokú földrengését (a Richterskála szerint). Ezt az akadályt a tervezőknek úgy sikerült leküzdeniük, hogy a tekercset sziklába vájt üregben helyezték el. Íme egy nagyteljesítményű szupravezetős energiatároló tekercs fontosabb adatai:

A tároló tekercs teljes energia-felvétele
 $6,9 \cdot 10^{12} \text{ J}$

A maradék energia (a kisülés után) $1,1 \cdot 10^{12} \text{ J}$

A töltőáram maximális erőssége 50 KA

Maximális üzemi teljesítmény 2500 MW

A tekercs inuktivitása 37000 H

Maximális mágneses indukció a tekercs közelében 4,5 T

Munkahőmérséklet 4,85 K

A toroidális tekercs sugara 150 m

A tekercselésnél felhasznált Nb-Ti szupravezető kábel hossza 9360 km

A kábel tömege (ennek csak egy elenyésző hányada szupravezető anyag) 9570 tonna

Egy ilyen berendezésnél a tárolókapacitás fajlagos ára 32 dollár/kWh. Ez még elég sok a klasszikus energiatárolók költségeihez képest, a szakemberek mégis a jövő nagy lehetőségét látják az új módszerben. Egyrészt remélik, hogy a szupravezetők gyártási költsége már a közeljövőben lényegesen kisebb lesz, másrészt tudják, hogy a szupravezetős energiatárolók olyan műszaki tulajdonságokkal rendelkeznek, amelyek biztosítják főlányüket a többi hasonló berendezéssel szemben. A magas határfokon kívül említjük meg csupán azt, hogy az ilyen szupravezető rendszereknek nagyon kicsi az időállandójuk: impulzusüzemben kiválóan működnek. Ez azt jelenti, hogy igen rövid idő alatt óriási mennyiségű energiát képesek leadni. Ezért az ilyen energiatárolók a nagy teljesítményű lézertechnika, a magfúziós reaktorok beindítása stb. céljaira már a közeljövőben nélkülözhetetlenek lesznek.

Ellentétben a klasszikus szemlélettel

1961-ben több kutatócsoport is vizsgálta a szupravezető gyűrű viselkedését külső mágneses térben. Azt tanulmányozták, hogyan változik a gyűrű belsején áthaladó mágneses fluxus, ha a külső mágneses teret foly-

tonosan változtatják. A jóval régebben végzett elméleti számítások rendellenes viselkedést jósoltak, az ellenőrző kísérleteket azonban csak ekkor, a 60-as évek elején tudták megvalósítani, mivel addig nem rendelkeztek a megfelelő érzékenyséű magnetométerrel.

A kísérlet igazolta az elméleti megfontolásokat: azt tapasztalták, hogy a külső mágneses tér folytonos növelésekor a gyűrű belsejében (azon a térrészen, amit a gyűrű körül fog) áthaladó mágneses fluxus – azaz a mágneses erővonalak száma – nem folytonosan változik; ugrásszerű változásai figyelhetők meg. Van egy legkisebb fluxusérték, s a gyűrűn áthaladó fluxus nagysága csak ennek a legkisebb fluxusértéknek az egész számú többszörösével változhat. A legkisebb fluxusértéket a mágneses fluxus kvantumának tekinthetjük; a fizikusok fluxonnak nevezték el. A kísérletek során a fluxon értékét is sikerült nagy pontossággal meghatározni: $2 \cdot 10^{-15} \text{ Wb}$ nagyságúnak találták.

Érdekes, hogy az egyszerű elméleti modell alapján számított érték a valóságban pontosan kétszer akkora adódott. A fizikusok már kezdetben utaltak arra, hogy az elmélet és a kísérlet közötti ellentmondás csak úgy oldható fel, ha feltételezzük, hogy a szupravezető áram kialakításában az elektronok nem individuálisan vesznek részt, hanem elektronpárok formájában. Ez az elképzelés azonban szöges ellentétben áll a klasszikus fizikai szemlélettel. Két elektron ugyanis, minthogy – azonos töltése révén – taszítja egymást, nem rendeződhet párrá. Párok kialakulásához vonzó kölcsönhatás szükséges.

Magyarázat a szupravezetésre

Minden szilárd halmazállapotú fém ionrácsos szerkezetű. A fémionok közötti térben az atomokról levált elektronok a gázmolekulákhoz hasonlóan szabadon mozognak; ezért a fém belsejében levő, rendezetlen hőmozgást végző szabad elektronokat elektromos töltésnek is szokás nevezni.

Ha a fémes vezetőt áramforráshoz kapcsoljuk, a fém belsejében kialakuló elektromos tér gyorsítja az elektronokat, s azok rendezetlen hőmozgására rátevéődik egy, a tér irányával ellentétesen irányított, rendezett mozgás: az elektromos áram. Az elektronok e

rendezett mozgását fékezi az ionráccsal való ütközés; ez a fékező hatás eredményezi a fém ellenállását. Amikor a szabad elektronok rugalmatlanul ütköznek a fémrács ionjaival, energiájuk egy részét átadják a fémionoknak. Ezért melegszik fel az áramtól átjárt fém-vezető.

A fém elektromos ellenállása és az áram termelte hő közös okra vezethető vissza. Mindkét jelenség oka a szabad elektronok rugalmatlan ütközése az ionráccsal.

Felmerül a kérdés: hogyan magyarázható a szupravezetők elektromos ellenállásának az eltűnése? Milyen változás állhat elő az áramvezetést biztosító szabad elektronok mozgásában a szupravezetés beálltakor? E kérdésekre a J. Bardeen, L. Cooper és J. R. Schrieffer által kidolgozott ún. BCS-elmélet adott választ.

A kritikus hőmérsékleten alul a szabad elektronok egy része és a fémrács ionjai között egy sajátos kölcsönhatás érvényesül. A rács valamelyik ionját a közelébe kerülő elektron deformálja, s az így megzavart ion a következő hozzá közelítő elektronnal szemben már másképpen viselkedik, igyekszik azt gyorsítani. A felgyorsított elektron utoléri az előző elektront, mozgási energiájával legyőzi taszító hatását, s így az egymás közelébe kerülő elektronok együtt haladnak, elektronpárt alkotva.

Párképződés során az egyik elektron energiát ad át a másiknak. Az az energia, amely a két elektron között a rács segítségével kicserélődik, nem lehet akármilyen értékű: nagysága egy energiakvantumnak felel meg, amelyet fononoknak neveznek. A BCS-elmélet úgy magyarázza az elektronpár-képződést, hogy valamelyik szabad elektron a ráccsal való kölcsönhatás során kibocsát egy virtuális fonont, amelyet egy másik szabad elektron elnyel. A két elektron közötti fononsere vonzóerőt eredményez, amely képes legyőzni a közöttük ható elektrosztatikus taszítóerőt.

Az elmélet szerint a kialakult elektronpárok mozgása nem független egymástól. Szoros korreláció tapasztalható köztük: egy elektronpár mozgásának megváltozása csak úgy lehetséges, ha az összes többi pár mozgásában hasonló változás áll be. Az ilyen jelen-

séget a fizikában kollektív jelenségnek nevezük.

Ez a kollektív viselkedés szünteti meg végeredményben a szupravezető ellenállását. Egy már kialakult elektronpár csak akkor léphetne kölcsönhatásba a ráccsal, ha ez a kölcsönhatás olyan erős lenne, hogy nem csak az illető elektronpárra hatna, hanem a szupravezetőben levő összes többi elektronpárt is hasonló állapotváltozásra készítetné. Mivel egy rács-elektronpár ütközés nem járna akkora energia átadásával, amely elegendő lenne az összes elektronpárok mozgásállapotának befolyásolásához, a kölcsönhatás nem valósulhatna meg. Az elektronpárok a ráccsal csak teljesen rugalmasan ütközhetnek, ami elektromos szempontból nem eredményez ellenállást; és így a szupravezetési áram nem fejleszt hőt sem.

A BCS-elmélet lehetőséget nyújtott a szupravezetéssel kapcsolatos más jelenségek megmagyarázására is. Kiderült, hogy modellje a fizika más területén is felhasználható (magfizikai modell). Az elmélet szerzői 1972-ben elnyerték a fizikai Nobel-díjat.

Josephson-hatás, Josephson-generátor

Ha két fémlemez közé szigetelőréteget helyezünk, az elektromos töltések nem juthatnak át egyik fémlemezről a másikba – s így persze elektromos áram sem. I. Giaver a General Electric kutatóintézetében végzett vizsgálatai során rájött, hogy ha a közbeiktatott szigetelőréteg rendkívül vékony (kevesebb, mint 100 Å), akkor az áram áthalad rajta. Ez a jelenség a kvantummechanikai alagúthatással magyarázható.

B. D. Josephson cambridge-i fizikus a hatvanas évek elején részletes vizsgálat alá vette a szupravezető-szigetelő átmenetek közötti áramvezetést. Elméleti számításai arra utaltak, hogy a Giaver által kimutatott tunel-effektushoz, szupravezetők esetében érdekes járulékos hatásoknak kell társulniuk.

Ha a két szupravezető közé helyezett 10-20 Å vastagságú szigetelőrétegből álló, ún. szupravezető-szigetelő átmenetre egészen kicsi, mikrovolt nagyságrendű egyenfeszültséget kapcsolunk, akkor – a tuneleffektus folytán – elektronáram halad át a szigetelőrétegen, s az átmeneti réteg ugyanakkor elektromágne-

ses sugárzást bocsát ki. Ez a jelenség a Josephson-effektus. A fellépő elektromágneses sugárzás a mikrohullámú tartományba esik; frekvenciáját az átmenetre kapcsolt feszültség nagysága határozza meg.

A mikrohullámú sugárzást előállító Josephson generátor frekvenciaállandója 483,6 Mhz/ μ V. Ez azt jelenti, hogy 1 μ V nagyságú feszültség 483,6 MHz-es rezgésszámú sugárzást kelt. 10 μ V esetében tízszer akkora a rezgésszám.

A Josephson-effektus tehát, mint látjuk, egy rendkívül egyszerű felépítésű mikrohullámú generátort szolgáltatott, amelynek nagy előnye, hogy könnyen lehet a frekvenciáját változtatni a rákapcsolt feszültség segítségével. De nagy a frekvenciastabilitása is, a működését szabályozó kvantummechanikai effektus folytán pedig igen nagy koherenciájú sugárzás nyerhető vele. Egyetlen hátránya, amely felhasználási területét meglehetősen korlátozza, nagyon kicsi a teljesítménye (10^{-19} W); ezért a Josephson generátort főleg mint frekvencia-etalon alkalmazták.

Ha a Josephson-átmenetet külső mágneses mezőbe helyezzük, kölcsönhatás figyelhető meg a külső tér és az alagútáram között. A külső mágneses mezőt változtatva azt tapasztaljuk, hogy az alagútáram erőssége a térerősség periodikus függvénye. Ahogy az elméleti számítások megjósolták, a változás egy periódusa alatt az átmeneten átható mágneses fluxus egy mágneses kvantummal, egy fluxonnal nő. A mágneses tér és az alagútáram kapcsolata olyan, hogy az áramerősséget még a fluxonnál kisebb fluxusváltozás is befolyásolja. Ezért ilyen berendezéssel igen pontosan lehet mérni a mágneses térerősség kis változásait.

Nagyon kicsi mágneses térerősséget mér

Rendkívül nagy érzékenységgű mágneses térerősségmérő állítható elő két Josephson-átmenet párhuzamos kapcsolásával. Ezt úgy valósítják meg, hogy egy vékony szupravezető gyűrű két átellenes pontján egy-egy Josephson-átmenetet hoznak létre. A gyűrűt külső áramkör táplálja. A beérkező áram két részre oszlik. Az egyes átmeneteken folyó áramok a kimeneten találkoznak egymással és interferálnak. Attól függően, hogy a két áram

elektronpárjai milyen fázisban találkoznak, a kimenő áram erősödése vagy gyengülése tapasztalható. Az optikából jól ismert interferenciával mutatott analógia alapján ezt az eszközt szupravezető interferométernek tekinthetjük. Ezt jelenti angol neve: Superconducting Quantum Interference Devices, amelynek kezdőbetűiből röviden SQUID-nek szokás nevezni.

Ha a SQUID átmeneteit megfelelő irányú mágneses térbe helyezik, a mágneses tér nagymértékben befolyásolja a SQUID áramerősség-eloszlását és az átmenetknél jelentkező feszültséget. Ilyen berendezéssel rendkívül kicsi mágneses fluxusértékek is elérhetők: az eddig ismert legérzékenyebb mágneses térerősségmérőnél, a protonrezonanciás magnetométernél mintegy tízszereser érzékenyebb. Mivel a SQUID hatásos felülete nagyon kicsi, a mérhető fluxusváltozás is nagyon kicsi: 10^{-20} Wb nagyságrendű. A detektálható mágneses térhez tartozó energiaérték 10^{-31} J, ami azt jelenti, hogy a SQUID a legnagyobb energiafelbontású mérőberendezés.

Geofizikai megfigyelések szerint a vulkáni kitörések, földrengések előtt a Föld mágneses terének sajátos változásai figyelhetők meg. SQUID segítségével tehát lehetővé válik bizonyos típusú szeizmikus katasztrófák előrejelzése.

Két SQUID ún. differenciálkapcsolásával nagyon érzékeny mágneses gradiométert lehet előállítani. Ez olyan berendezés, amely igen pontosan méri a mágneses tér helyi változásait, kiküszöbölve a Föld mágneses háttérváltozásaiból adódó mérési hibákat.

Ilyen mágneses gradiométerek többek között a szív- és agyáramok keltette mágneses tér vizsgálatára is alkalmasak – folyamatban van tehát a magnetokardiográfok és magnetoencefalográfok kifejlesztése. E készülékeknek, elektromos megfelelőikkel szemben az a nagy előnyük, hogy helyi diagnosztizálásra is alkalmasak. Vizsgálni lehet velük a szív vagy az agy kis területeinek viselkedését, elektródok alkalmazása nélkül. Egyes szervek vagy idegpályák mágneses térnek feltérképezéséhez ugyancsak ilyen gradiométereket használnak.

A SQUID egyik változata a SLUG elnevezésű, nagyon kis feszültségek mérésére

alkalmas eszköz. Ha egy szupravezető szálon – vagy szalagon – egy nagyon kicsi, pontszerűnek tekinthető Josephson-átmenetet hoznak létre, akkor a szálon átfolyó áramot befolyásolni lehet a szál egyik vége és az átmenet közé kapcsolt feszültséggel. A feszültség folytonos növelésekor azt tapasztaljuk, hogy az áram periodikus ingadozást mutat: a szála kapcsolt egyenfeszültség modulálja. Mivel ilyen módon 10^{-7} A nagyságrendű áramerősségváltozás már könnyen kimutatható, és a szupravezető átmenet ellenállása milliomod ohmnál kisebb, 10^{-14} V feszültség még nagy pontossággal mérhető a berendezéssel. A készüléket kis induktivitású galvanométernek is fel lehet fogni. Ennek angol neve Superconducting Low Inductance Undulating Galvanometer; kezdőbetűiből kapta a készülék a SLUG elnevezést.

Alacsony frekvenciás üzemmódban az eszköz 10^{-16} V nagyságrendű feszültségérzékenységet is elérhet. Ez az érték a mérőkészülékek feszültségfeloldó képességének a felső határa.

SQUID-memória

Az IBM egyik laboratóriumában J. Matisoo érdekes kísérletet végzett egy SQUID-áramkörrel. Mindkét Josephson-átmenethez érintőlegesen hozzáillesztett egy-egy szupravezető szálat. Ha a gyűrű tápvezetékén áram halad át, ez az áram egyenletesen oszlik meg a két átmeneten (szimmetrikus átmenetek). Matisoo azt tapasztalta, hogy ha valamelyik szála rövid áramimpulzust kapcsol, akkor az általa keltett mágneses tér kiszorítja az áramot a mellette levő Josephson-átmenetből. Így az áramimpulzus hatására a SQUID egyik félgyűrűjében nem folyik áram a másikban viszont az áram megnövekszik. Attól függően, hogy melyik átmenet melletti szála kapcsoltjuk a rövid időtartamú áramimpulzust, elérhetjük, hogy a szupravezető hurok jobb vagy bal felében folyjon az áram.

Egy ilyen szupravezető átmenet, amely két különböző fizikai állapotba hozható, megfelel egy számítógép-memóriaelem összes követelményeinek. A SQUID-áramkört ugyanakkor nagyon gyors kapcsolású billenőkörként is fel lehet használni (flip-flop). Ezeknek a rendszereknek a kapcsolási

ideje jóval rövidebb, mint az eddig alkalmazott memóriaelemeké: nem több 10^{-12} másodpercnél. Ezenkívül más előnyök is vannak. Az információ beírása és kitörlése nagyon kényelmesen oldható meg a rövid áramimpulzusokkal. A rendszer energiafelvétele egy információ-beírás során nem haladja meg a 10^{-17} J értéket. De kedvezőek a méretek is: már a jelenleg alkalmazott technológia mellett is könnyen megvalósíthatók 1–2 μ átmérőjű Josephson-átmenetek. Ez azt jelenti, hogy 1 cm^2 felületen kb. egymillió memóriaelemet lehet létrehozni, amelyeknél biztosítható az azonos működési mód, a biztonságos üzemeltetés, a hosszú élettartam és a kiváló kompatibilitás a számítógépek klasszikus alkatrészeivel.

A jövő számítógépének felépítésében tehát a félvezetők mellett a szupravezetők is részt kérnek.

Szupravezetés magasabb hőmérsékleten – Keramikus szupravezetők

A szupravezetők gyors elterjedését lényegében egyetlen tényező akadályozza: az, hogy az eddig alkalmazott szupravezető anyagok nagyon alacsony hőfokon, a cseppfolyós hélium hőmérsékletén működnek. A cseppfolyós hélium előállítás és fenntartása elég bonyolult berendezést igényel. Maga a hélium is értékes és egyre nehezebben hozzáférhető anyag. Ezért lázas kutatás folyik világszerte olyan szupravezetők után, melyeknek magas a kritikus hőmérsékletük.

1974-ben nagy szenzációnak számított, amikor előállították az első olyan szupravezető ötvözetet, a Nb_3Ge -ot, amelynek kritikus hőmérséklete 22,3 K volt. Ez a hőmérséklet ugyanis már cseppfolyós hidrogénnel is biztosítható.

Már régebben több fizikus is felvetette azt a gondolatot, hogy a szupravezetés jelensége nemcsak fémes szerkezet esetében képzelhető el. 1963-ban W.A.Little-nek eszébe jutott, hogy a szupravezetés BCS-elméletét általánosítani lehet. Eszerint nemfémes rendszerekben is létrejöhet szupravezetés bizonyos formája. Little feltételezi, hogy a fémes ionrácsa biztosította kölcsönhatást más kölcsönhatások helyettesíthetik, melyek ugyan csak elektronpár képződést eredményeznek.

Így például elképzelhető, hogy molekuláris rendszerekben lokális elektromos polarizáció folytán, elektronok a polarizációs tér kvantumaival, a poláronokkal lépjenek kölcsönhatásba. Ez az elektron-poláron kölcsönhatás is eredményezhet párképződést, amely a szupravezetés létrejöttének alapfeltétele. Little feltételezése szerint komplikált molekuláris struktúráknál a kritikus hőmérséklet igen magas, akár több száz Kelvin értéket is elérhet.

1986-ban döntő fordulatot jelentett a szupravezetés történetében J.G. Bednorz és K.A. Müller közleménye, mely szerint sikerült előállítaniuk La-Ba-Cu-O összetételű vegyületből, magasabb kritikus hőmérsékletű ($T_k = 30$ K) szupravezető anyagot. Ez az anyag egy keramikai sajátságú szinterizált fémoxid, amely nem tartozik a fémek vezető csoportjába. Másrészt bebizonyosodott, hogy ez a hatás magasabb hőmérsékleten is létrejöhethet. Már a következő évben a laboratóriumok egész sora jelentette, hogy sikerült, hasonló szerkezetű, más vegyületeken is kimutatni a szupravezető hatást, ugyanakkor a kritikus hőmérséklet egyre feljebb emelkedett. Így $YBa_2Cu_3O_7$ összetételű vegyület esetén elérték a 90-100 K körüli kritikus hőmérsékletet.

Bi, Tl, Sr tartalmú keramikai fémoxidokkal jelenleg 120 K körüli kritikus hőmérsékletig jutottak. A felfedezés jelentőségére utal, hogy Bednorz és Müller a felfedezés közzététele után egy évre már megkapták a

Nobel-díjat, amely egyedülálló esemény a Nobel-díjazottak történetében.

A keramikai anyagoknál tapasztalt szupravezetés nem magyarázható az eddig ismert elméletek (BCS-modell) segítségével. Nyilvánvalónak tűnik, hogy ebben az esetben nem egyszerű elektron-fonon kölcsönhatás hozza létre a párképződés folyamatát. Ez a megállapítás viszont további lehetőségekkel kecsegteti a fizikusokat. Úgy tűnik, hogy Little elképzelése helyes volt. A szupravezetést a fonon-elektron kölcsönhatáson kívül más kölcsönhatások is létrehozhatják. Tehát az elméleti alapok is azzal biztatnak, hogy érdemes újabb lehetőségek után kutatni, talán egészen más vegyülettípusoknál is el lehet érni ezt a hatást, esetleg egészen magas kritikus hőmérsékleten.

Számos laboratóriumban folytatnak kutatást új típusú szupravezetők feltalálása érdekében. A végső cél olyan szupravezető anyagok felfedezése, amelyek olcsón előállíthatók, magas a kritikus hőmérsékletük és a kritikus mágneses terük, ugyanakkor jó mechanikai tulajdonságokkal is rendelkeznek.

Ezzel párhuzamosan haladnak a szupravezetők gyakorlati alkalmazásaira vonatkozó kutatások, ezeknek jelentősége napjainkban talán még fel sem mérhető, de máris úgy tűnik, hogy a félvezetőkhöz hasonlóan egy új fejezetet nyitnak meg a modern technika történetében.