

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM

Természettudományi Kar

Kísérleti Fizikai Tanszék

A MAGLEV VONAT MEGJELENÉSE AZ ISKOLÁBAN

(OKTATÁSI SEGÉDANYAG A SZUPRAVEZETÉS TANÍTÁSÁHOZ)

TDK dolgozat

Dávid Diana

V. fizika

Témavezető: Dr. Farkas Zsuzsa főiskolai tanár, SZTE JGYTFK

Belső konzulens: Dr. Papp Katalin egyetemi docens

2006.

Tartalomjegyzék

	Bevezetés.....	3
1.	A Nobel-díjról általában.....	4
2.	Szupravezetés a Nobel-díjak tükrében.....	10
	2.1. 1913. (Kamerlingh-Onnes).....	10
	2.2. 1978. (Kapica).....	18
	2.3. 1962. (Landau).....	23
	2.4. 1972. (Bardeen, Shrieffer, Cooper).....	27
	2.5. 1973. (Josephson, Esaki, Giaever)	30
	2.6. 1987. (Müller, Bednorz)	33
	2.7. 1996. (Lee, Osheroff, Richardson)	36
	2.8. 1997. (Chu, Phillips, Cohen-Tannoudji)	39
	2.9. 2001. (Wieman, Cornell, Ketterle)	41
	2.10. 2003. (Abrikoszov, Ginzburg, Legett)	43
3.	A szupravezetők alkalmazása.....	46
4.	A téma iskolai bemutatásának lehetőségei.....	57
	4.1. Út az alacsony hőmérsékletekhez.....	57
	4.2. A Meissner-kísérlet iskolai bemutatása.....	59
	4.3. A szupravezetők alkalmazási lehetőségeinek bemutatása a tanulóknak.....	61
	Felhasznált irodalom	

Bevezetés

A szupravezetők egyik legfontosabb jellemzője az, hogy egy bizonyos, ún. T_c kritikus hőmérséklet alá hűtve őket, jelentős mértékben csökken vagy mérhetetlenül kicsi lesz az elektromos ellenállásuk. Ahhoz, hogy a jelenséget egyáltalán észlelhetni lehessen, laboratóriumi körülmények között elő kellett állítani a megfelelő alacsony hőmérsékletet, és azt meg kellett tudni mérni.

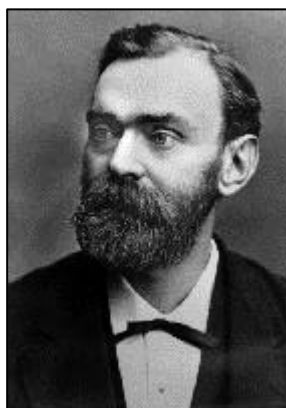
A megfelelően alacsony hőmérséklet előállításával évszázadokon át foglalkoztak a tudósok. A hőmérséklet pontos mérésére a 17. században kifejlesztették az első pontos "folyadék-üveg" hőmérőt, majd 1720-ban Gabriel Daniel Fahrenheit, 1741-ben pedig Anders Celsius megalkotta a róluk elnevezett hőmérsékleti skálát. Több mint egy évszázaddal később, 1848-ban William Thomson (a későbbi Lord Kelvin) kifejlesztette az ún. abszolút hőmérsékleti- vagy más néven Kelvin-skálát.

A negatív hőmérsékleti világcsúcsok sorában a 19. század elején Thilorier még csak a $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot érte el az ún. szárazjéggel, 1899-ben viszont már $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on (2 K-en) Dewar-nak sikerült cseppfolyósítania a hidrogént. 1908-ban Heike Kamerlingh Onnes a hélium cseppfolyósítását 4 K alatti hőmérsékleten érte el. Az 4 K alatti hőmérséklet stabil előállítása vezette el Onnest a szupravezetés jelenségének felfedezése 1911-ben. A higany sűrűségének és elektromos vezetőképességének vizsgálata közben tapasztalt jelenséggel a következő évtizedek tudósainak egy új kutatási területet nyílt meg, ami mind a mai napig tartogat még felfedezésre, magyarázatra váró dolgokat.

Dolgozatom célja az, hogy az olvasót megismertessem a szupravezetéssel azon Nobel-díjak tükrében, amelyeket a szupravezetéssel összefüggő kutatásokért adtak ki 1911 óta. A dolgozat egyben felkészülést jelenthet egy olyan fizikai szakköri, fizika fakultációs foglalkozás-sorozatra, amely a modern fizika eredményeivel ismerteti meg a középiskolás diákokat.

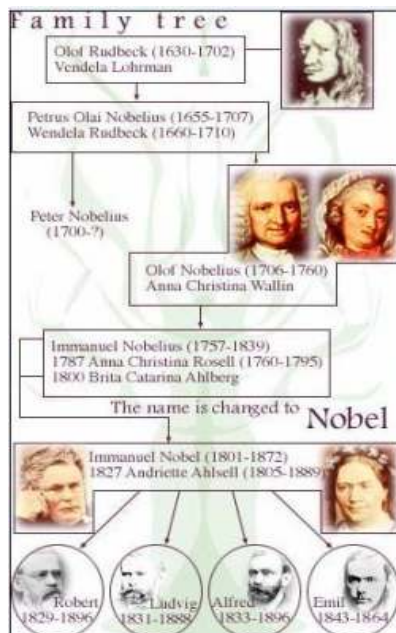
1. A Nobel-díjról általában

E jelentős díj alapítója Alfred Bernhard Nobel volt, aki 1833. október 21-én született Stockholmban.



1. ábra. Alfred Nobel

Gyermekkorában jó felfogóképességével tűnt ki, ám rossz magaviseletű volt. Apja, Immanuel Nobel 1937-ben Oroszországba ment, ahol megalapította a puskaport gyártó üzemét. Amikor Nobel 9 éves volt, az egész család Szentpétervárra költözött, ahol testvéreivel együtt magántanároktól tanult, valamint apja gyárában is dolgozott. Itt sajátította el vegyészeti képzettségének alapjait.



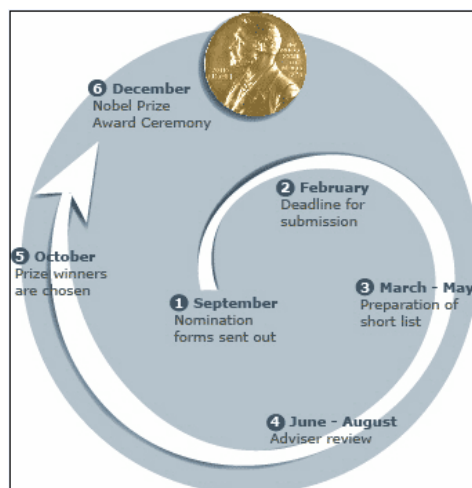
2. ábra. Alfred Nobel családfája

16 éves korától sokat utazott Európában, hogy ellessen a konkurens gyárak technikáit, a tapasztalatokat hazatérte után a családi vállalkozás alkalmazta. Egy évig Párizsban volt, majd Olaszországba és Németországba utazott, onnan pedig az Amerikai Egyesült Államokba. Sokat olvasott, főleg újtjai során, ezen kívül humanisztikus tudományokkal is foglalkozott, sőt még verseket is írt. Alfred sokat köszönhetett a család hagyományainak, a hadiiparnak, és mások kutatásainak.

A dinamit hatóanyagát, a nitroglicerint egy olasz tudós (Ascanio Sobrero) fedezte fel, de nem szabadalmaztatta, amit a szemfüles Alfred megtett 1960-ban. Nobel eleinte a nitroglicerint felrobbantásához puskaport használt, később azonban rájött, hogy higany- vagy ezüst-fulmináttal még jobb hatást lehet elérni, de a higany- és ezüst-fulminátot sem ő fedezte fel, hanem egy Hower nevű angol vegyész.

1864. szeptember 3-án felrobbant Nobelék Stockholm melletti laboratóriuma, melynek öt halálos áldozata lett. Köztük volt Emil Nobel is, Alfred öccse.

1865-ben Alfred felépítette az első nitrogliceringyárat. A következő találmánya a dinamit volt, melyet egy véletlen folytán fedezett fel, és 1867. szeptember 9-én szabadalmaztatott. Ezután Párizsba költözött. A robbanózselatin feltalásával biztonságossá tette a nitroglicerint használatát, amelynek felfedezése 1875-ben történt. 1884-ben a Svéd Akadémia tagjává választották és az uppsalai egyetem tanára lett. 1889-ben feltalálta a füstmentes puskaport. A következő évben megírta első végrendeletét, amely az orvostudományban, illetve az élettan területén kiemelkedő személyek díjazásáról szólt. 1891-ben, Franciaországban kegyvesztett lett, ezért San Remoba költözött, ahol egy laboratóriumot rendezett be magának. 1893. március 14-én visszavonta korábbi végrendeletét és az 1895. november 27-én kelt végleges végrendeletében egész vagyonát egy alapítványra hagyta. 1896. december 10-én San Remoban halt meg. Halálának napján, december 10-én adják át minden évben a Nobel-díjakat.



3. ábra. A Nobel-díj kiosztásához kapcsolódó események időrendi sorrendje

Végrendeletében szabályozta a Nobel-díjak odaítélésének feltételeit, a jogi pontatlanságok azonban sok vitára adtak később alkalmat.

A Nobel-Alapítvány alapokmányát Stockholmban, a Királyi Palotában mutatták be 1900. június 29-én, melyben többek között az állt, hogy:[3.]

„Hátramaradó vagyonom egészét a következőképpen kell kezelni: a végrendeleti végrehajtóim által biztos értékpapírokba A végrendelet fektetett tőke egésze képez egy alapot, amelynek kamatait évente azok között osszák ki díjakként, akik a megelőző évben a legnagyobb szolgálatot tették az emberiségnek. A jelzett kamatokat öt egyenlő részre kell felosztani, amelyeket azután a következőképpen kell megosztani: egy részt annak a személynek, aki a legjelentősebb felfedezést tette a fizika területén; egy részt annak a személynek, aki a legjelentősebb felfedezést tette a kémia területén; egy részt annak a személynek, aki a legjelentősebb felfedezést tette az élettan, illetve az orvostudomány területén; egy részt annak a személynek, aki az irodalom területéhez a legkiválóbb idealisztikus beállítottságú alkotással járult hozzá; egy részt pedig annak a személynek, aki a legtöbbet, illetve a legjobbat tette a nemzetek közötti barátság ügyéért, az állandó hadseregek megszüntetéséért, illetve csökkentéséért, a békekongresszusok megrendezéséért és elősegítéséért.”

A *fizikai, kémiai, élettan, ill. orvostudomány, irodalom* és a nemzetek közötti barátság, vagyis a *béke* területén elért felfedezésekért, sikerekért ítéltetők oda a díjak.

A fizikai és kémiai díjakat a Svéd Tudományos Akadémia, az élettani, ill. orvosi díjakat a Stockholmi Karolina Intézet, az irodalmi díjakat a stockholmi Akadémia, a béke előmozdításáért adandóakat pedig a Norvég Stortinget (Parlament) tagjaiból választott, öt személyből álló bizottság ítéli oda.

A végrendeletnek van olyan kikötése, hogy

* Mindig az elmúlt évi eredmények díjazhatóak, kivéve akkor, ha korábbi munkák jelentősége csak később derül ki.

* Csak nyomtatásban megjelent munkák vehetők figyelembe.

* A díjakat két vagy legfeljebb három személy között egyenlő részben elosztva is oda lehet ítélni.

* Elhunyt személy nem díjazható. Csak abban az esetben, ha a már odaítélt díj nyertese meghal, mielőtt a díjat megkaphatta volna.

Az Alapítvány Ünnepi Napján, dec. 10-én minden díjazott megkapja a díj összegének megfelelő csekket, (melynek összege évről évre változik a kamatok miatt), az oklevelet és egy, az alapító képmását ábrázoló és a megfelelő felirattal ellátott aranyérmet. Az érmet kb. 200 grammos, 23 karátos aranyból készült. A 64 mm átmérőjű érmék előlapja azonos, az érmék hátoldala pedig különböző, az egyes tudományterületeknek megfelelően más és más. Mindegyiken olvasható azonban a következő felirat:

„Inventas vitam juvat excoluisse per artes.”,

ami magyarul így hangzik:

„Szép dolog az életet találékony művészetekkel nemesíteni.”.



4. ábra. Egy Nobel-díj elő- és hátlapja

Nem ritka, hogy egy-egy évben valamilyen területen nem osztanak díjat. Ilyenkor az arra az évre szánt pénzösszeg is visszaszáll az alapítványra (ilyen év volt 1940 is, mikor egyetlen Nobel-díjat sem adtak át, egyik tudományterületen sem).

1968-ban a tudományos munkásság nobeli elismerése kiegészült a Közgazdasági Alfred Nobel-émlékdíjjal. Ezt a Svéd Bank (Sveriges Riksbanks) kezdeményezte a pénzintézet fennállásának 300. évében. Az első ízben 1969-ben kiosztásra került díj hivatalos neve, amelyet a Svéd Tudományos Akadémia ítél oda nem közgazdasági Nobel-díj, hanem: „A Svéd Bank Közgazdasági Tudományos Díja Alfred Nobel Emlékére.”

Érdekesség, hogy matematikai Nobel-díj sincs. Hogy miért, erre vonatkozólag semmiféle hiteles adat nem található. Az igazi választ talán senki sem tudja, csak legendák, találgatások szövik körbe ezt a kérdést. Mivel nem minden tudományos és művészeti terület képviselői részesülhetnek Nobel-díjban (így az említett matematikai vagy éppen képzőművészeti Nobel-díj sincs), ezért az elmúlt évszázad során több, Alfred Nobel által hagyagolt szakterület díjáról is állították, hogy egyenrangú a Nobel-díjjal.

A különböző bizottságok tagjai is minden évben kapnak egy aranyozott ezüstérmet, melynek előlapja megegyezik az adott Nobel-érem előlapjával, hátoldala pedig az adott intézményre utal. Ezen érmek 2,6 cm átmérőjűek és 13 gramm tömegűek. Ha egy bizottsági tag összegyűjt 10 érmet, akkor azt becserélheti egy aranyéremre.

1991. óta osztják az ún. Ig-Nobel díjat Bostonban, a Harvardon. Az *Annals of Improbable Research* (AIR) folyóirat szervezi azoknak, akik kedvelik a tudományt és van humorérzékük. "Megpróbáljuk megnevettetni az embereket, ugyanakkor viszont szeretnénk, ha el is gondolkoznának" – mondta Marc Abrahams, az Évkönyv szerkesztője és az Ig Nobel alapítója. Mindenki jelölhet, akár saját magát is. A díjat odaítélő testületben vannak Nobel-díjasok, szakírók, sportolók, köztisztviselők és egy véletlenszerűen kiválasztott utcai járókelő. A díjazottnak 30 másodperces tréfás előadást kell tartania. A díjat egy műanyag zacskóban lévő semmiségek alkotják: Régi címkék, filteres tea, műanyag kacska, egy tekercs ragasztószalag stb. A kitüntetettek legtöbbje elmegy a díjátadásra. Ha a díj nyertese megsértődik, akkor attól visszaveszik a kitüntetést.

Néhány példa a „legjobb” haszontalan kutatások közül:

- indiai tudósok azért a képletért kapták meg ezen érdekes díjat, amivel egy elefánt teljes felülete viszonylagos pontossággal kiszámítható,
- orvosi díjat adtak két amerikai kutatónak „A country zene hatása az öngyilkosságra” című munkájukért,
- fizikai díjat ítéltek a hullahoppozás dinamikájának vizsgálatáért és magyarázatáért,
- béke díjat kapott pl. Inoue Daisuke a karaoke kitalálásáért, mert ezzel új lehetőségeket teremtett az emberek számára egymás tolerálásának elsajátításában.
- 2000-ben az orvosi díj egy londoni orvosi egyetem kutatóié lett, akik tanulmányukban bebizonyították, hogy a londoni taxisofőrök fejlettebb aggyal rendelkeznek polgártársaiknál, amit annak tulajdonítanak, hogy a taxisoknak a főváros teljes úthálózati térképét a fejükben kell tartaniuk.

2. SZUPRAVEZETÉS A NOBEL-DÍJAK TÜKRÉBEN

2.1.

1913. (Kamerlingh-Onnes)

...,az anyagok alacsony hőmérsékleten mutatott tulajdonságaira irányuló kutatásaiért”...

Az 1880-as évek végén és az 1900-as évek elején kezdődtek a szupravezetés felfedezése szempontjából jelentős kísérletek.

Az 1853-ban született Heike Kamerlingh-Onnes, akit a „szupravezetés atyjának” tekinthetünk, egy észak hollandiai, Groningenben élő családból származott.



5. ábra.
Heike Kamerlingh-Onnes

Gyermekkorától tüdő-tuberkulózissal küszködött, ami idősebb korában egyre fokozódott, talán a laboratórium mérgező gázai miatt. Az Öreg-Rajna mellett lakott. Szép háza volt, gyönyörű kilátással, ennek ellenére az évtizedeken át tartó nélkülözésre visszagondolva, szerényen élt.

Vezető asszisztense az Öreg-Rajna túlsó partján lakott. Amikor Onnesnek valami új ötlete támadt otthon, meghúzta a háza oldalán lévő harangot és erre asszisztense átkelt a folyón, hogy meghallgassa az újdonságot. 1882-ben, 29 évesen nevezték ki Onnest a Leideni Egyetem fizika tanszékének vezetőjévé, 1892-ben pedig megalapította a leideni kísérleti fizikai laboratóriumot. Abban a korban ő volt az egyetlen, aki laboratóriumában külön

részleget akart létrehozni a termodinamika, elektromosság, mágnesség és az optikai kísérletek elvégzésére.

A laboratórium mellett 1901-ben létrehozott egy készüléképítő és üvegfúvó iskolát, ahonnan később a világon legjobban képzett üvegfújók kerültek ki. A laboratóriumban folyó magas színvonalú munka és a rendkívül jó felszereltség miatt a világ minden tájáról érkeztek fizikusok, hogy egy tanulmányi évet vagy legalább csak egy nyarat Leidenben tölthessenek. Még Albert Einstein is szeretett volna egy leideni állást, de levelére nem kapott választ, később azonban barátság szövődött Onnes és Einstein között.

Laboratóriumán, illetve iskoláján kívül Onnes nevéhez fűződik egy tudományos folyóirat létrehozása is, melynek címe „Communications from the Physical Laboratory of The University of Leiden”. (Magyarul: A Leideni Egyetem Fizikai Laboratóriumának Közleményei.)

1892 és 1894 között megépítettek egy olyan nagyteljesítményű kaszkádtípusú cseppfolyósító üzemet az oxigén, a nitrogén és a levegő cseppfolyósítására, mely több mint harminc éven keresztül kielégítette a leideni laboratórium igényeit.

Onnes egy nagyon jó szervező képességgel rendelkező, okos és türelmes ember volt. Mindent alaposan átgondolt, megtervezett. Ezt bizonyítja az is, hogy a cseppfolyósító üzem kiválóan működött a tízéves gondos tervezésnek köszönhetően. Voltak azonban olyan személyek, akik próbálták akadályozni munkáját. A hidrogén-cseppfolyósító tervezése alatt valaki beadvánnyal fordult a belügyminisztériumhoz, amelyben arra hivatkozott, hogy a laboratóriumban az összenyomott gázokkal folyó kísérletek veszélyesek lehetnek az emberekre és az épületekre is. Ezért egy kijelölt kormánybizottság megvizsgálta az ügyet és arra jutottak, hogy „egy összenyomott gázzal töltött henger felrobbanása esetén felszabaduló energia sokkal kisebb a 3 kg puskapor elégetésével keletkezőnél, márpedig e mennyiség birtoklása és szállítása minden fenntartás nélkül megengedett”. A kedvező „ítélet” meghozataláig azonban 2 év eltelt.

A hélium cseppfolyósításánál újabb akadályba ütközött. Nem állt elegendő hélium gáz a rendelkezésére és ezért megkérte vetélytársát, James Dewart is, hogy dolgozzanak együtt, illetve osszák meg a Dewar rendelkezésére álló héliumot, Dewar azonban elutasította Onnes kérését. A problémát testvére, Onno segítségével oldotta meg, aki a holland kormány kereskedelmi hírszerző hivatalának vezetője volt. 1905-ben Onnes az észak-carolinai kavicsbányából kedvező feltételek mellett nagyobb mennyiségű monazitomokhoz jutott, ami ritka földfémeket és héliumot tartalmaz. Négy kémikus három évig dolgozott azon, hogy a homokból kinyerjék a héliumot. 1908 júniusában minden készen állt a cseppfolyósítási

kísérlet elvégzéséhez. Különböző jóslatok voltak arra vonatkozólag, hogy a hélium gáz milyen hőmérsékleten válik cseppfolyóssá.

A van der Waals elmélet alapján Onnes 5 K-t jósolt, és az izotermák gondos mérésének eredményeként, ill. matematikai számítások alapján arra jutott, hogy a héliumnak 4-5 K-nel az abszolút zérus felett kell cseppfolyóssá válnia, és nem ennél lényegesen magasabb vagy alacsonyabb hőmérsékleten, amitől korábban tartott.

1908. július 10-én reggel 5.45-kor megkezdődtek a hélium cseppfolyósításához szükséges előkészületek. A Leideni Közlemények 108-as számában számolt be Onnes az aznapi eseményekről.

Miután minden kellék, eszköz a helyére került, 13.30-ra meggyőződtek arról is, hogy a berendezésben lévő héliumban nincs levegő. A levegő ugyanis a nagyon alacsony hőmérsékleten megszilárdulna és az üvegre rakódva meggátolná a folyékony hélium megfigyelését. Onnes annyira belemerült a munkába, hogy még enni sem volt ideje, felesége, Elisabeth etette meg falatonként.

Délután 16 óra 20 perckor a héliumot beáramoltatták a készülékbe. Este 7 órára már több egyetemi oktató, kutató és érdeklődő érkezett a laboratóriumba. Köztük volt Franciscus Schreinmakers professzor is. Mikor az utolsó palack folyékony hidrogént töltötték a berendezésbe, Onnes izgulni kezdett, hogy amennyiben ezáltal sem következik be a cseppfolyósodás, akkor sok időre lesz szükség, mire a kísérletet megismételhetik, ugyanis a készleteket ismét fel kell tölteni. A hőmérő 5 K-en stagnált és még semmi sem látszott a gyűjtőedényben.

Schreinmakers professzor ekkor felvetette, hogy a hőmérő talán azért áll az 5 K-en, mert valójában egy forrásban lévő folyadékba merül és, hogy a hélium talán már cseppfolyósodott, csak nehéz észrevenni. Onnes ekkor az edényt alulról egy lámpával megvilágította és az alulról jövő fény visszaverődése következtében láthatóvá vált az edényben a folyadék felső peremvonala. Még 2 órán át üzemeltették a berendezést és 60 cm³ folyékony héliumot kaptak. Ehhez 75 liter folyékony levegőt és 20 liter cseppfolyós hidrogént használtak fel.

A Közlemény 108. számában ezt írta Onnes: "A kísérlet és annak előkészítése maximálisan igénybe vette nemcsak a készüléket, hanem az asszisztenseimet is." Külön kiemelte Flim nevét, a készülék megépítéséhez nyújtott közreműködése miatt. Ezen kívül vetélytársát, Dewart is megemlítette, akinek a folyékony hélium több tulajdonságára vonatkozó jóslata is helyesnek bizonyult. Ilyen előrejelzés volt például a kis felületi feszültség, a rosszul láthatóság, a kritikus hőmérséklet, melyet 5 K-re becsült (4,5 K-nek

bizonyult a kísérlet alapján). A folyadéknak telített gőzhöz viszonyított sűrűségében azonban tévedett Dewar, mert 11-szerese volt, ő pedig 17-szeresnek jósolta. Ezeken kívül a folyékony héliumnak egy meglepő tulajdonságára is figyelmesek lettek, mégpedig a sűrűségére. Körülbelül nyolcszor könnyebb a víznél, és ez sokkal kevesebb volt a várt értéknél, de ennek ellenére a felületi feszültsége mégis érzékelhető volt.

A másik meglepő dolog az volt, hogy a folyékony hélium nem szilárdult meg, amikor ugyanazzal a technikával hűtötték tovább, amelyet a hidrogén megszilárdításához használt Dewar. Abban az időben ezeket a furcsa dolgokat még nem tudták megmagyarázni. Ugyanakkor azt tudta Onnes, hogy következő feladat, ami vár rá, az a folyékony hélium mágneses tulajdonságainak, elektromos vezetőképességének és más sajátosságainak megismerése, melyek alacsony hőmérsékleten jelentősen megváltoznak.

Amikor a héliumgőz kiszivattyúzásával elérte az addigi legalacsonyabb 1,04 K-es hőmérsékletet, és még nem tudta a héliumot megfagyasztani, abbahagyta a hőmérséklet további csökkentésére tett kísérleteit és elkezdte vizsgálni az anyagok különböző tulajdonságait az ultra-alacsony hőmérsékleteken. (Ilyen vizsgálatokkal Dewar és Fleming korábban már foglalkozott) Ezek közül is talán legérdekesebbnek látszott az anyagok elektromos ellenállásának hirtelen csökkenése. Az 1908-as cseppfolyósítás után Onnes egyik fő célja az elektromos ellenállás alakulásának vizsgálata, valamint a fémek mágnesezhetőségének és fajhőjének alakulása a folyékony hélium hőmérsékletén.

Azonban ismételten akadályba ütközött, mert nem tudta megfelelő edényben tárolni a héliumot, az ugyanis a legkisebb hő hatására is gázzá alakult volna. Ezt a problémát csak 1911-ben sikerült legyőznie, ugyanis akkorra készültek el a folyékony hélium tárolására alkalmas eszközök.

Az ellenállással kapcsolatban több kutató is találgatni kezdett. A berlini Walther Nerst fizikus elmélete alapján a tiszta fémek ellenállása az abszolút hőmérsékleti skála nulla pontján teljesen eltűnik. Lord Kelvin azt gondolta, hogy az abszolút zérus "az anyag halálát" jelenti, és ezen a ponton az ellenállás végtelenül nagy. Onnes a két elmélet közül néhány általa elvégzett kísérlet alapján, Kelvinét elvetette, de Nerst-tel sem értett teljes mértékig egyet, ezért megalkotta saját elméletét.

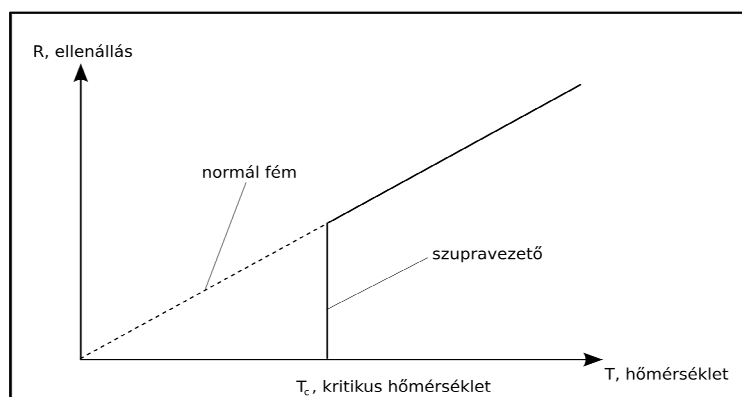
Néhány kísérletből arra a következtetésre jutott, hogy bizonyos fémek ellenállásának nagysága mintáról mintára változott és a legtisztább fémeknél volt a legalacsonyabb. Ebből arra következtetett, hogy az ellenállás elenyészően kicsivé válhat, ahogy az abszolút nullához egyre jobban közelítünk, de ennek elérését a szennyezések jelenléte megakadályozza.

Kezdetben Onnes a platinával végezte kísérleteit az ellenállással kapcsolatban, de miután rájött, hogy a szennyeződések gátolják kísérleteinek eredményességét, keresett egy tisztább fémeket, az aranyat. Majd a higany következett, amelyet még az aragnál is tisztább állapotban lehetett előállítani. Mivel a higany szobahőmérsékleten folyékony állapotú, ezért többször is lehetett desztillálni mindaddig, amíg minden lehetséges szennyeződést el nem távolítottak belőle.

Az eredményeket 1911. április 28-án jelentették be a Holland Királyi Akadémiának, amikor is Onnes beszámolt arról, hogy a higany, valamint egy nagyon tiszta aragnyminta olyan kicsi ellenállásúvá vált a hélium-hőmérsékletén, hogy azt már nem tudták a műszereik kimutatni, de ezek csak előzetes eredmények voltak.

Nyárra sikerült Onnesnek és kollégáinak kellően finomított higanyt előállítaniuk és egy olyan berendezést megalkotniuk, mely alkalmas volt az igen alacsony hőmérsékletű higany elektromos vezetőképességének mérésére.

Egy U alakú csőben volt a higany, amelynek mindkét végéből dróthuzalokat vezettek ki. Ezek segítségével tudták mérni a fém elektromos ellenállását, ugyanis, ahogy csökkentették a hőmérsékletet folyékony hélium segítségével a higany szilárd fémé fagyott. Ekkor négyen dolgoztak a kísérleten. A fagyasztókészülékkel Onnes és a már korábban említett Flim dolgozott. A tőlük több mint 50 méterre lévő másik laboratóriumban pedig Gilles Holst és Cornelius Dorsman figyelte a galvanométerről leolvasható áramerősség-értékeket. A 4,19 K hőmérsékletűre lehűlt szilárd higany elektromos ellenállása hirtelen leesett olyannyira, hogy a galvanométer már nem mutatott ki semmilyen ellenállást, vagyis 4,19 K-en a higany elektromos ellenállása egyszerűen eltűnt. Többször is megismételte a kísérletet, de mindig ugyanazt az eredményt kapta, vagyis azt, hogy 4,19 K-en nincs elektromos ellenállás.



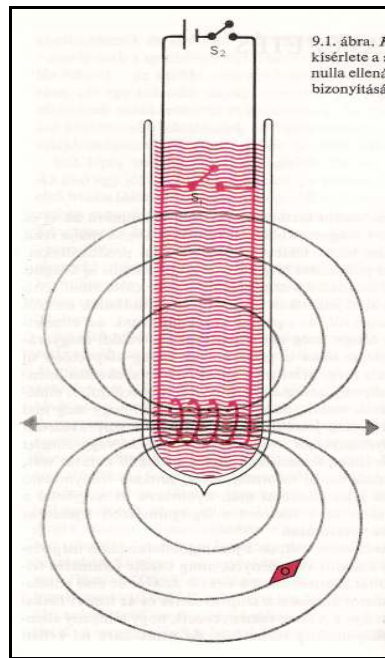
6. ábra. A normál fém és a szupravezető elektromos ellenállása a hőmérséklet függvényében

Ekkor azt gondolták, hogy a készülékben rövidzárlat lehet, és ezért az U alakút W alakú csőre cserélték, és öt pontból vezettek ki belőle elektródokat, hogy mérhessék az ellenállást, de akkor is ugyanazt az eredményt kapták. Egy műszerész, akit a készülékben uralkodó nyomás fenntartásával bíztak meg, elaludt feladata közben és ennek köszönhetően a nyomás lecsökkent és a hőmérséklet 4,2 K fölé emelkedett. Ekkor a másik laboratóriumban, ahol a galvanométerek voltak, azt észlelték, hogy az ellenállásérték hirtelen a mérhető tartományba ugrott. Ez a fordított irányú változás győzte meg Onnest arról, hogy az anyag rendkívüli alacsony hőmérsékleten jelentkező új tulajdonságát fedezte fel.

Első cikkeiben, pl. „On The Sudden Rate at Which the Resistance of Mercury Disappears” (A higany ellenállásának hirtelen eltűnéséről) címűben még meg sem nevezte a jelenséget. Arról azonban már akkor írt, hogy a tekercs fajlagos ellenállása egymilliószer kisebb, mint a legjobb vezetőké szobahőmérsékleten. Ezután egy évig nem jelent meg erre a munkára vonatkozó cikk, mert az egész év a higany furcsa viselkedésének tanulmányozásával telt.

1913. márciusában azonban a jelenség leírására vonatkozó második cikkében már használta a „szupravezetés” kifejezést, amelyet később szupervezetésre változtatott. Még az előző évben kidolgozott egy olyan kísérletet, amely az ellenállás eltűnésének bizonyítására szolgált.

Huzalból egy tekercset készített és erre egy S_1 kapcsolót szerkesztett, amellyel rövidre lehetett zárni a tekercset. Mindezt szupravezetőből állította elő. Amikor az S_1 kapcsoló nyitott állásban volt, akkor egy telepből normálvezető rézdróton át áramot táplált be szobahőmérsékleten. A rézdrótra egy S_2 kapcsolót helyezett, melynek nyitásával meg lehetett szakítani az áramot. A kísérlet úgy történt, hogy az S_2 -t zárta, míg az S_1 -et nyitva hagyta és így a telepből áram folyt a szupravezető tekercsbe, ahol mágneses teret keltett. A Dewar-edényen kívül egy iránytű volt, mely ezt kimutatta. Aztán az S_1 -et zárta és az S_2 -t nyitotta, vagyis a szupravezető tekercset rövidre zárta, ugyanakkor a telep áramát pedig kikapcsolta. Az iránytű azonban ekkor is ugyanazt az eltérülést mutatta, vagyis miután megszüntették telepből az energia-felvételt, a tekercsben még mindig ugyanakkora áram folyt.



7. ábra. Onnes kísérlete a szupravezető nulla ellenállásának bizonyítására

A különös jelenségre a tekercs megszűnő elektromos ellenállása ad magyarázatot, amely lehetővé teszi, hogy a már szupravezetővé vált áramkörben gyakorlatilag energiavesztés nélkül folyjon áram. Ez a „meg nem szűnő” áram jelensége. Ha van energiavesztés, az áramnak csökkennie kellene az idő múlásával, amit az iránytű eltérése mutatna ki, de amíg a folyékony hélium el nem párologott és a tekercs meg nem szűnt szupravezető lenni, addig nem lehetett változást észlelni a mágnesű eltéréseiben. Ez alapján arra lehetett következtetni, hogy a szupravezető ólomtekercs ellenállásának legalább 10^{11} -szer kisebbnek kell lennie, mint szobahőmérsékleten.

A meg nem szűnő áramot Onnesék két évig tudták legtovább fenntartani, de ez is csak azért szűnt meg, mert egy szállítási sztrájk miatt nem kaptak folyékony hélium utánpótlást.

Másik jelentős kísérlete úgy történt, hogy miután áramot vezetett egy gyűrű alakú szupravezető áramkörbe, eltávolította az áramforrásként szolgáló telepet. Az áramerősség értéke ennek ellenére nem változott, hanem csak „keringett” változatlanul.

Egy fizikus a következőket írta erről a kísérletről: „Hátborzongató látni, hogy ezek a „permanens” áramok hatást gyakorolnak a mágnesűre. Jóformán kitapintható, amint az elektronok gyűrűje a vezetékben lassan és szinte súrlódás nélkül csak kering és kering”.

Onnes úgy gondolta, hogy egy napon a szupravezetők segítségével az elektromos áram „szállítása” leegyszerűsödik és lecsökken a fogyasztók által fizetendő ár is. De egy kísérlet alapján rájött ennek a feltevésnek a helytelenségére.

Amikor egy anyagot folyékony héliummal szupravezetővé változtattak, és ekkor az anyag környezetében mágneses teret létesítettek, a szupravezető állapot megszűnt. Ebből arra következtetett, hogy soha nem lesznek olyan szupravezető huzalok, melyekkel meredeken lecsökkennének az elektromos energia szállításának, felhasználásának költségei.

Az 1913. évi fizikai Nobel-díjat az akkor hetven éves Heike Kamerlingh-Onnes kapta „az anyagok alacsony hőmérsékleten mutatott tulajdonságaira irányuló kutatásaiért”. Ezek a kutatások többek között a hélium cseppfolyósításához vezettek. Azt a tényt, hogy Onnes felfedezte a szupravezetést, ekkor még nem említették. A díj átvételére Stockholmban került sor. Az ünnepi előadásában Onnes kitért a szupravezetésre is, illetve a hélium rendkívül alacsony sűrűségére vonatkozó megállapításaira is, és azt mondta, hogy ha ezeket a jelenségeket meg tudják magyarázni, „akkor össze lehet majd kapcsolni azokat a kvantumelmélettel”.

Onnes felismerte azt, hogy a hélium cseppfolyósítása és a szupravezetés fölfedezése a nem sokkal később „klasszikus fizika” névre keresztelt tudományterület utolsó diadalai voltak. A klasszikus fizika a tárgyakat és mozgásukat írja le, a kvantumfizika viszont az anyagot kizárólag, mint mozgást, mint hullámmozgást tárgyalja. Onnes sok kortársánál jobban megértette és elfogadta, hogy a tudósok új nemzedéke, amely a rendkívül kifinomult, komplex és józan ésszel nehezen elfogadható elméleteket tesz magáévá, már készen áll arra, hogy felváltsa azt a generációt, amelyet ő és James Dewar oly jól példázott.

Ezután néhány évnyi szünet következett az alacsony hőmérsékleti kutatás területén, ugyanis a világháború kitörésével a rendelkezésükre álló kevés héliumot katonai célokra lefoglalták a háborúban álló országok, ahol kém- és légvédelmi léghajók töltésére használták a levegőnél könnyebb héliumot.

A háború után, kb. 1923-tól Onnes kutatásai a folyékony hélium rendkívüli sűrűségének vizsgálatára irányultak.

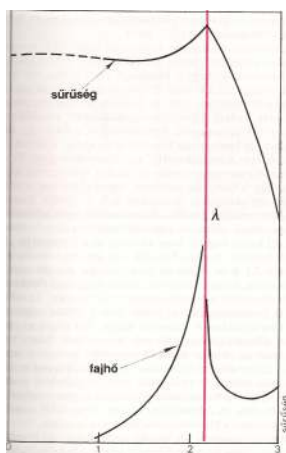
2. 2.

1978. (Kapica)

...,„alapvető felfedezéseiért és találmányaiért az alacsony hőmérsékletek fizikája területén”...

A fiatal Leo Dana, amerikai kémikus, aki doktorálása után Leidenbe érkezett egy évre, Onnes eredményeinek tanulmányozásába kezdett. Azt tapasztalta, hogy a hélium sűrűsége 4,2 K-en, a forrásponton ugrásszerűen megnőtt a magasabb hőmérsékleten mért értékekhez képest, és 2,2 K-nél elérte a maximumot, majd fokozatosan csökkent. Ezzel kapcsolatban több kérdés is felmerült: „Vajon mi lehet a csúcsérték és a sűrűségváltozás magyarázata? Össze lehet-e kapcsolni a hélium sűrűségének változását a fémekben létrejövő szupravezetéssel, illetve a mágnesnek a szupravezetésre gyakorolt hatásával?” Mivel Onnes a fokozódó tüdőtágulása miatt egyre nehezebben beszélt, laboratóriumába is ritkán ment be, inkább csak telefonon tartotta a kapcsolatot munkatársaival. Danát azzal a feladattal bízta meg, hogy vizsgálja meg a folyékony hélium párolgás közben jelentkező „látens” hőjét.

„A maximális sűrűség közelében valami történik a héliummal, ráadásul ez a változás egy szűk hőmérséklet-tartományban nem folytonos.” – állapította meg Onnes és Dana. A hélium fajhőjében is hasonló változást figyeltek meg ugyanazon az átmeneti hőmérsékleten, mint a látens hőre vonatkozó kísérletben. Azt nem tudták kimutatni, hogy miért következik be ez a jelentős változás a hélium fajhőjére vonatkozólag, de a változás kezdetének hőmérsékletét meghatározták, ez a 2,2 K volt. Egy fizikus, Paul Ehrenfest ezt „lambda-pontnak”-nak nevezte el, mert a fajhő változását ábrázoló görbe a görög lambda (λ) betűre emlékeztette.



8. ábra. A lambda-pontban a folyékony hélium sűrűsége és fajhője maximális

Onnesnek hétről hétre súlyosbodott az állapota, egyre nehezebben lélegzett, 1926. február 21.-én meghalt. Iskolateremtő munkásságáért világszerte gyászolták, Európa laboratóriumaiban mindenütt jelen voltak tanítványai, „örökösei”.

Onnes a hélium hűtésével és megfagyasztásával kapcsolatos 15 éven át tartó munkáját három héttel a halála után W. H. Keesom fejezte be. Keesom finomított a fajhőre vonatkozó adatokon, és rájött, hogy a folyékony hélium 4,2 K-nél forr, a lambda-ponton viszont megszűnik a forrás és a folyadék nyugalmi állapotba kerül. Ezért ő a folyadékot 4,2 K-től 2,2 K-ig külön fázisként kezelte, és elnevezte hélium I-nek. 2,2 K alatt egy szinte teljesen eltérő fázis jön létre, amit hélium II-re keresztelt. A hélium II-nek a hélium I-hez képest kisebb a sűrűsége, nagyobb a párolgási hője és kisebb a felületi feszültsége.

Egy berlini laboratóriumban dolgozó Walter Meissner, az addig csak lágy és alacsony olvadáspontú fémekről kimutatott szupravezető tulajdonságot a nióbium, a tantál, a tórium és a titán esetében is észlelte. Később kimutatta azt is, hogy 1 K alatti hőmérsékleten további fémek is szupravezetőkké válnak, mint az alumínium, a kadmium, a cink, az ozmium, a ruténium stb. Kezdetben azt gondolták, hogy csak bizonyos elemek lehetnek szupravezetők és mások nem. De bebizonyosodott, hogy ez nem így van, amikor az Au_2Bi vegyületben is felfedezték a szupravezetést, bár sem az arany és sem a bizmut nem szupravezető. A közönséges fehér ón szupravezető, míg a fém szürke módosulata nem. Ezeknél csupán a kristályszerkezetében van különbség. A fehér ónnál ugyanis tetragonális, a szürkénél pedig köbös a szerkezet. Ezek alapján tehát a szupravezetés okát inkább a szabad elektrongázban kell keresni és nem az atom természetében. A másik ok, ami alapján erre lehet következtetni az az, hogy a jelenség alacsony hőmérsékletre korlátozódik. Az átalakulás hőmérséklete túl kicsi ahhoz, hogy valamilyen, az atom belsejében lejátszódó folyamatról legyen szó.

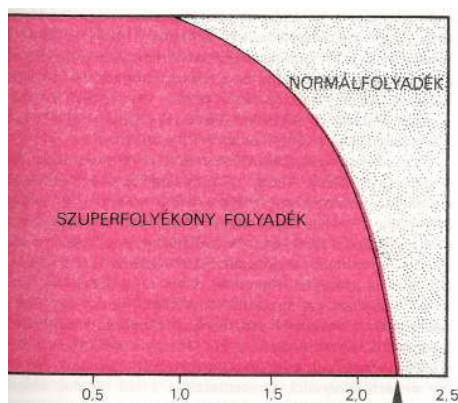
A szupravezetés és a mágnesesség összefüggését tanulmányozva, Meissner és végzős hallgatója, Robert Ochsenfeld rájöttek, hogy az ólom közönséges hőmérsékleten könnyen mágnesesíthető. Amikor a mágneses térben lehűtött ón szupravezetővé vált, kiteszította magából a mágneses teret, a felület közvetlen közelében ez alatt szupravezető áram indukálódott és a mágneses tér a felülettől távolabb, a fém belsejében zérus lett.

A szupravezetés tehát nem pusztán az anyag vezetőképességében tapasztalható rendellenesség, hanem olyan jelenség, amelynek köze van az anyag mágneses szuszceptibilitásában bekövetkező változásokhoz. Ennek a problémának, az ún. szupradiamágnességnek a megoldása sok évet vett igénybe. Számos elmélet született erre

vonatkozólag, de ezek vagy csak a szupravezetést, vagy csak a szupradiamágnességet magyarázták, a kettőt együtt nem.

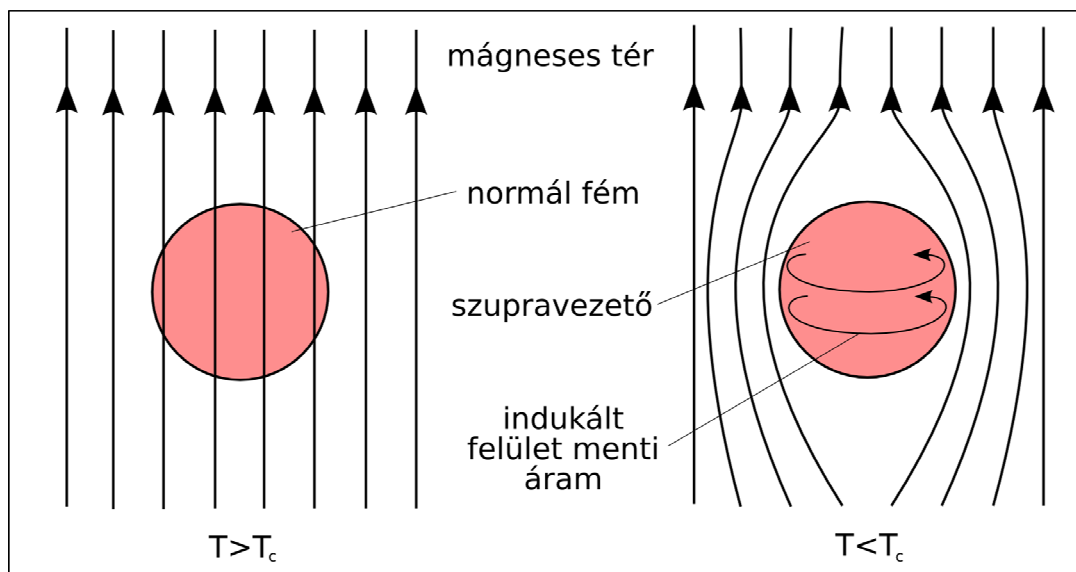
1934-ben Leidenben a szupravezetés szemléltetésére egy olyan modellt találtak ki, amelyben két „elektronfluidum” létezik egymás mellett. Egy rendezett, amely elektronokból áll, és egy kondenzált fluidum, amelynek nulla az entrópiája, így nem képes hőt szállítani. Ezt „szuperfluidum”-nak nevezték el. A hélium hőmérsékletének az átmeneti pont alá kerülésekor több elektron kerül szuperfluid állapotba, és ez okozza a szupravezetés jelenségét.

Ebből az ún. „két fluidum” elméletből indultak ki a London fivérek, Fritz és Heinz, akik németek voltak, de a háború alatt Oxfordba menekültek.



9. ábra. A kétfolyadékos modell
A vízszintes tengelyen a hőmérséklet K-ben és a λ -pont

Heinz meghatározta, hogy egy szupravezető felületén folyó áram milyen mélyre hatol a fém belsejébe. A fém felületén haladó elektromos áram mágneses teret hoz létre. Ez alapján próbálta Fritz a Meissner-effektust, vagyis a mágneses térnek a szupravezetőből való kirekesztését úgy magyarázni, hogy a szupravezető felületén folyó áram részben áthatol a felületen és ott mágneses teret kelt, a felületi erőter semlegesíti a szupravezetőben már létező erőteret, és ezért a belsejében nem lesz erőter, tehát tökéletesen diamágneses. Heinz már korábban tanulmányozta a behatolás mélységét, és kutatásai alapján meghatározta annak a görbének az alakját, amely leírja, hogyan oltódik ki a mágneses tér a szupravezető belsejében, és ezt ki is fejezte a szupravezető elektronok számának és sűrűségének függvényeként.



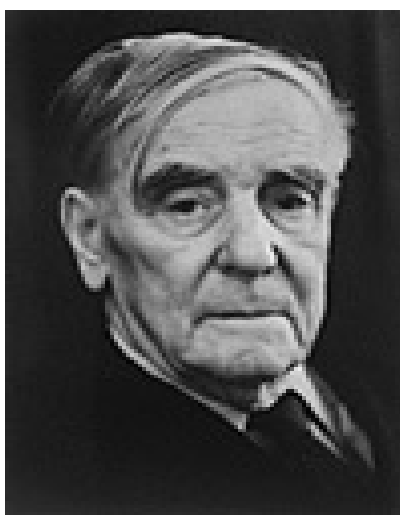
10. ábra. A mágneses erővonalak a mágneses térbe helyezett szupravezető gömb körül, a kritikus hőmérséklet felett és alatt

Ezzel egy időben egy másik tudós, Pjotr Kapica az ultra-alacsony hőmérséklettel kapcsolatban egy új, rejtélyes jelenséget fedezett fel. Kapica a Szovjetunióból emigrált és először a cambridge-i Mond Laboratórium igazgatója lett. Tanítómestere és támogatója, Ernest Rutherford mindenben a segítségére volt. Felépíttetett egy olyan berendezést, amely kizárólag Kapica számára készült. Kapicát kutatási eredményeinek, kiemelkedő munkásságának köszönhetően a Royal Society tagjává választották. Ő volt az első orosz, akivel ezt megtették. Feleségével minden évben hazautaztak látogatóba, de 1934-ben nem engedték vissza őket Nagy-Britanniába. Két év próbálkozás után annyit elértek Rutherford segítségével, hogy felesége a két gyermekükért Angliába utazhasson, majd hazamentek a Szovjetunióba, ahol Kapica egy új, szovjet laboratórium igazgatója lett. Rutherford utána küldte a Mond Laboratóriumból a kutatásaihoz szükséges berendezéseket, hogy folytathassa munkáját a „Fizikai Problémák Intézetében”, ahol kis idő múlva egy jelentős felfedezést tett. A kutatáshoz egy cikk adta a kezdő lendületet, amelyben az állt, hogy a hélium II hővezető képessége mintegy hárommilliószorosa a hélium I hővezető képességének. A hélium II tehát jobb hővezető, mint a réz vagy az ezüst, melyek közönséges hőmérsékleten a legjobb hővezetők.

A hélium II folyadék nagyon különösen viselkedett. Áthatolhatatlan falú tartályokból is kiszabadult és így más folyadékok szennyeződtek vele, sok laboratóriumban nagy problémákat okozva ezzel. Ha egy fürdőbe tartályt helyeztek és mindkettőt hélium II-vel töltötték fel, úgy, hogy a tartályban kezdetben magasabb szintig volt a folyadék, akkor a

tartályon belül és kívül fokozatosan kiegyenlítődött ez a két szint. A hélium II felkúszott és áthatolt a falakon, szembeszállt a sűrűdással és a nehézségi erővel, ellentmondva az áramlás fizikai törvényeinek.

Kapica ezt a rendkívüli viselkedést az 1938-tól megjelent cikkeiben a szuperfolyékony állapottal írta le. Ennek szemléltetésére az alábbi kísérletet tervezte: egy Dewar-palackba egy kisebb palackot helyezett és mindkettőt megtöltötte folyékony hélium II-vel. A külső Dewar-edény egyfajta hűtőként szolgált. Azért kellett, nehogy a belső palack túlságosan felmelegedjen. A kisebb palackba még egy kapillárist is tett, amelynek egyik végét lezárta, másik végét pedig szabadon hagyta, hogy a héliumgőz távozni tudjon. A kapilláris nyitott végéhez egy szélkakashoz hasonló műszert szerelt, amit a folyékony hélium láthatatlan sugárnyalábja megforgatott, ha hőt vezetett ennek az edénynek az aljához. A berendezést több órán át működtették, a „szélkakas” forgott, az edényben pedig ugyanannyi folyadék volt a kísérlet végén is, mint amennyi az elindításkor. Ebből arra következtetett, hogy a hélium II-nek nincs entrópiája, a viszkozitása pedig tízezerszer kisebb, mint a folyékony hidrogéné, vagyis szinte mérhetetlenül kicsi, elenyésző. Kapicának ezen megfigyelésével, hogy a hélium-folyadék alacsony hőmérsékleten elveszti viszkozitását, és egy csőben ellenállásmentesen áramlik, tovább bővült a jelenségkör. A szupravezetés és a szupradiamágnesség mellé csatlakozott a szuperfolyékonyság is. **Kapica a héliummal kapcsolatos felfedezéséért 1978-ban Nobel-díjat kapott.**



11. ábra. Pjotr Leonidovich Kapica

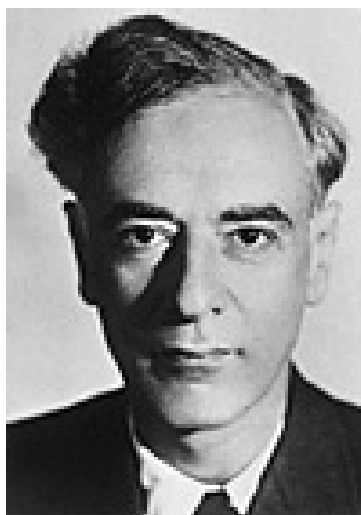
2.3.

1962. (Landau)

...,a kondenzált állapotokra vonatkozó úttörő elméletéért, különös tekintettel a folyékony héliumra”...

„Ahogy a hőmérséklet csökken – mondta Landau – az atomi részecskék energiája csökken, végeredményben megváltoznak azok a feltételek, amelyek között a klasszikus mechanika törvényei érvényesek, és a klasszikus mechanikát, mint a jelenségek megértésének eszközt a kvantummechanikával kell helyettesíteni.”

Landaut már kicsi korában csodagyerekeknek tartották. A heves vérmérsékletű, maximalista fiatal már 19 évesen kiváló kvantummechanikai cikkeket írt.



12. ábra. Lev Davidovich Landau

Az 1930-as években letartóztatták azzal a váddal, hogy Szovjetellenes tevékenységet folytat, és hogy a náci számára kémkedett, habár ő maga zsidószármazású volt. Kapica Sztálinnak írt levelében kérte Landau felmentését, de mivel a levéllel nem érte el szándékát, ezért a külügyminisztériumhoz, majd a titkosrendőrség főnökéhez fordult a fiatal szabadon engedésének ügyében, és személyesen vállalt garanciát Kapica Landauért, valamint felvetette azt is, hogy ha nem engedik szabadon munkatársát, akkor ő maga is lemond. Ez már megtette kellő hatását.

Landau, miután kiszabadult a börtönből, a Fizikai Problémák Intézetében lévő laboratóriumában egy teljesen új módon folytatta a hélium II-nek a tanulmányozását. Úgy gondolta, hogy a hélium II-t egyetlen nagy, kristályszerű molekulának kell tekinteni, amelynek az abszolút zérus hőmérsékletén teljes egészében szuperfluid állapotban kell lennie.

Ha növelnénk a hőmérsékletet, „elemi gerjesztési jelenségek” lépnek fel a szuperfolyadékban: -olyan részecskék, mint a fononok (kvantált hanghullámok) és a rotonok (az örvénymozgás kvantumai).

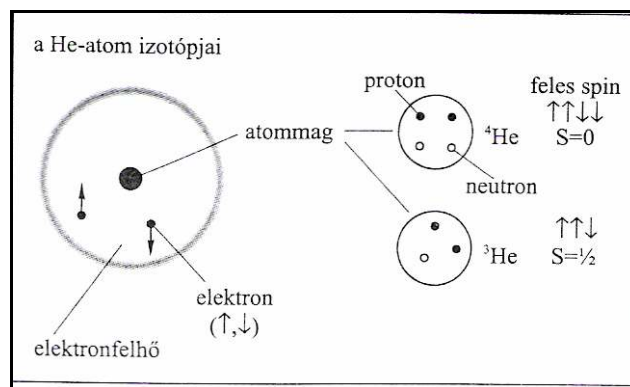
Landau szerint a közönséges folyadékban ilyen részecskék találhatók, és ezek alapján megalkotta a közönséges és szuperfolyadékok mozgását leíró egyenleteket. A viszkozitás a folyadéknak az a képessége, amely a mozgást akadályozza, a viszkozitás hiánya pedig a mozgás akadályozására való alkalmatlanság. Azt gondolta, hogyha Kapica kísérletében valamivel késleltetni lehetne a hélium II-nek a nagyobb Dewar-edényből a kapillárisba való áramlását, akkor a folyadék mozgási energiája csökkenne, a hőmérséklete pedig emelkedne, ezért a hélium I-hez hasonlóan viselkedne vagy azzá válna. A kapilláris fala azonban nem akadályozta a fononok mozgását, nem változtatta meg az energiaszintjüket, a folyadék hélium II alakban maradt, és csak melegítés után lépett ki a kapilláris felső, nyitott végén és forgatta meg a „szélkakast”. Úgy vélte, hogy a hélium II sebessége a kapillárisba való belépéskor olyan kicsi volt, hogy emiatt akadálytalanul léphetett át bizonyos válaszfalakon, és áramolhatott a gravitáció ellenében. Landau állítása tehát Kapicáénak pontosan az ellenkezője, ugyanis az ő elmélete alapján a hélium II a leglassúbb, de legállandóbb mozgású és legnehezebben feltartóztatható anyag a Föld kerekén.

A négy relatív atomtömegű hélium áramlás-elméletének részleteit tehát Landau dolgozta ki, amiért 1962-ben Nobel-díjat kapott.

Meg kell említeni, hogy Fritz London is foglalkozott a normál és szupravezető állapotú fém közötti különbséggel. Ez a különbség egyfajta „energiarésnek” felelne meg az Enrico Fermi olasz fizikusról elnevezett „Fermi-felületen”. „A Fermi-felület nem valóságos felület, hanem a szilárd anyag elektromosságot vezető elektronjai viselkedésének geometriai leírása. Ez a konstans energiájú „felület” választja el a bizonyos elektronok által betöltött energiaállapotokat a betöltetlen energiaállapotoktól. Az abszolút nulla fokon a meghatározott spinű (perdületű) részecskék egészen a Fermi-felületig az összes elérhető energiaszintet betöltik, fölötte azonban egyet sem. Ezeknek a részecskéknek a hiánya a szupravezető állapot egyik jellegzetessége, ezzel szemben a közönséges vezető állapotban lévő anyagban sokféle elektron található, ami a közönséges ellenállás alapja.”

Landau úgy vélte, hogy ha meg lehetne magyarázni a két állapotot egymástól elválasztó energiarés mikroszkopikus mechanizmusát, akkor meg lehetne magyarázni a szupravezetést és a diamágnességet is, és ehhez köze lenne a Fermi-felületen bekövetkező elektron kölcsönhatásoknak is. Ezért most kitérnék a Bose- és Fermi- részecskék közti különbség magyarázatára. A részecske lehet elektron, proton, neutron vagy más elemi

részecske, illetve összetett képződmény, például atom. A részecskék kettős természetükből fakadóan hullámként is viselkednek, a hullámot pedig az ún. hullámfüggvény írja le. Ezen kívül a részecskéknek van egy további jellemzőjük is, a spinjük. Az elektronnak, protonnak, neutronnak van perdülete, amely egy kis állandó mágnességgel is párosul. Ezeknek a részecskéknek feles a spinje. Ha feles spinű ($S = 1/2$) részecske (fermionoknak nevezzük őket) spinjének egy adott irányra vett vetületét mérjük, akkor az a kvantumelmélet szerint $1/2$, illetve $-1/2$ lehet, minden más értéket kizárva, míg az egész spinű ($S = 1$) esetben 1 , 0 , -1 értéket vehet fel. Az egész spinnel rendelkező részecskét Bose-részecskének, bozonnak nevezzük. A Bose-kondenzáción a hélium ^4He -izotópjának folyékony állapota esetében azt értjük, hogy a részecskék véges hányada pontosan ugyanazt a mozgást végzi, azaz hullámfüggvényük azonos. A ^4He -atom tehát bozon. A feles spinű részecskék esetében csak két részecskének lehet azonos a hullámállapota, és a spin-vetületüknek akkor is ellentétesnek kell lennie ($1/2$ és $-1/2$).



13. ábra. A He-atom két izotópjai, a ^4He és ^3He atommagjai, amelyek teljes spinje $S = 0$, illetve $S = 1/2$

A ^4He Bose-folyadékban a szuperfolyékony állapotot az atomok véges hányadának azonos hullámmozgása, illetve hullámfüggvénye jellemzi.

Ezek alapján az elektronok szupravezetésére megfelelő magyarázat lehetne, ha az elektronok véges hányada azonos hullámmozgást végezne, de mivel az elektron Fermi-részecske, ezért ez lehetetlen.

Ennek ellentmondva és tévesen 1950-ben egy közös dolgozatban Landau és Vitalij Ginzburg azt írták, hogy a szupravezetésben részt vevő elektronok döntő hányada azonos hullámmozgást végez. Azonban volt a dolgozatnak egy olyan része, melynek jelentőségét ők maguk nem, de később más tudósok felismerték. Ők ugyanis azt mondták, hogy mágneses térben a szupravezető és normál tulajdonságot mutató térbeli tartományokból felépített

szerkezet az energia szempontjából előnyös, mert ezeknek az egymás melletti kialakulása csökkentheti az energiát és a mágneses tér a normál tartományok mentén hatol be a mintába. Ezt a lehetőséget azonban Ginzburg és Landau elvetették.

Zavaritzkij és Abrikoszov volt az első, aki ennek jelentőségét felismerte. 1953-ban Abrikoszov a javasolt elmélet alapján elvetette a rétegszerkezetet és egy merőben új térbeli elrendezést javasolt, de erről részletesebben majd később.

Visszatérve a London által azonosított energiarésre, illetve a mágnesség, a fajhő és a viszkozitás magyarázatára, akkoriban azt mondták, hogy ezeknek az összefüggő magyarázata „olyan hatalmas feladat volt, amely a fémekben levő elektronok viselkedésének felsőfokú ismeretét, mesterfokú matematikai tudást és mindenekfölött élénk, de nem csapongó képzelőerőt követelt.”

2.4.

1972. (Bardeen, Schrieffer, Cooper)

...,a szupravezetés elméletükért, az úgynevezett BCS-elméletért”...

A John Bardeen, Leon Cooper és Robert Schrieffer alkotta hármas kis csapat 1950-ben látott hozzá ezeknek a vizsgálatához.

London már 15 évvel előtte felhívta a figyelmet az energiarésre. Eközben kifejlesztették a nukleáris technológiát az urániumizotópok szétválasztásának céljára, de próbálták egyre szélesebb körben alkalmazni.

A higany izotópjait vizsgálva egy időben két kutatócsoport is levezetett egy fontos matematikai összefüggést a szupravezetésre vonatkozólag, vagyis hogy az a hőmérséklet, amelyen egy fém szupravezetővé válik, fordított arányban áll a fém molekulasúlyának négyzetgyökével.

Maxwell, aki az Egyesült Államok Országos Szabványügyi Hivatalában és Bernard Serin, a Yale Egyeteme, voltak azok, akik eljutottak a Négyzetgyökös képlethez, és ezt publikálták is. Sevin, aki Bardeen barátja volt, telefonon tájékoztatta őt az eredményekről.

John Bardeent is csodagyereknek tartották, 15 évesen leérettségizett és az 1930-as években a Princeton's Institute for Advanced Studies egyik legfiatalabb hallgatója lett. Princetonban, majd a Harvardon a fémekben lévő elektronok viselkedésével foglalkozott és a London fivérek szupravezetéssel kapcsolatos munkáit tanulmányozta. A háború alatt a hajók által keltett mágneses tereket vizsgálta, majd a háború után a Bell Laboratóriumokban Walter Bratainnel és William Shockleyvel kifejlesztették a tranzisztort, amiért 1956-ban mindhárman Nobel-díjat kaptak.

Eközben Bardeen már foglalkozott a szupravezetéssel kapcsolatban őt foglalkoztató kérdések megoldásával is. Meghívta saját intézetébe, az Illinois Institute for Advanced Studiesbe, Leon Coopert, aki akkoriban doktorált kvantumfizikából a Columbia Egyetemen. Az intézetben lévő helyszűke miatt a végzős hallgatók és a doktorált ösztöndíjasok az ún. „Visszamaradt Kutatások Intézetében” (Institute for Retarded Studies) gyűltek össze. Bardeen 1956-ban arra kérte Coopert, hogy ossza meg irodáját a Massachusetts Institute of Technology (MIT) doktoranduszával, Robert Schriefferrel. Bardeen Schrieffert egy évnyi laboratóriumi munkára küldte a doktorátus megszerzése végett, azonban amikor Schrieffer robbanást okozott a laboratóriumban, Bardeen úgy döntött, hogy jobb lesz, ha inkább elméleti téren tevékenykedik tovább a fiatal kutató.

Cooper, aki akkor volt utolsó éves egyetemista, jött rá arra, hogy az elektronok párokba rendeződnek a szupravezetés állapotában. A szupravezetés létrejöttéhez szükséges hőmérséklettől már egy picit magasabb értéken az elektronok normálisan viselkednek, vagyis taszítják egymást, aminek egyik következménye az elektromos ellenállás. Amikor a hőmérséklet eléri az átmeneti pontot, akkor pedig a fononoknak köszönhetően egy újfajta kölcsönhatás lép fel az elektronok között. Két, ellentétes perdületű elektron egy párrá kapcsolódik össze. Ezek lesznek az ún. Cooper-párok, amelyeknek felfedezőjük, Cooper a névadójuk. Ezeknek köszönhetően jelentkezik az „extra maradék-vonzás”, amely az összes többi elektronra is hat, és így már azok sem taszítják a többit. Ez a szupravezetés. Ha a hőmérsékletet megnöveljük egy kicsit, csak annyira, hogy az átmeneti pont fölé emelkedjen, akkor a Cooper-párok felbomlanak, a szétvált elektronok ismét taszítják egymást és megint tapasztalható az elektromos ellenállás.

Ezután a három tudós megpróbálta kiterjeszteni a Cooper-párok elméletét arra, hogy miként befolyásolja az ilyen párképződés a Fermi-felület elektronjait. Az első Cooper-pár maradék-vonzást gerjeszt, melynek hatására más párok is összekapcsolódnak, és ez az egyik párról a másikra terjed, hullámszerű alakban. A párok tömegközéppontja azonos hullámmozgást végez. A párt ellentétes spinvetületű elektronok alkotják. A középpont körüli mozgás során – minden spinállás esetén – az egyedi elektronok mozgása különböző. Tehát az elektronok nem sértik meg a Fermi-részecskékre vonatkozó tiltást, amely szerint azonos hullámmozgást csak ellentétes spinállással rendelkező két elektron végezhet. „Eszerint – ahogy azt Schrieffer később megfogalmazta – tulajdonképpen arra a kvantummechanikai hullámfüggvényre volt szükség, amely a folyamatban részt vevő 10^{23} számú elektron alkotta párok „táncának koreográfiáját” leírja.”

Schrieffer már fel akarta adni az egyenlet megalkotását, de Bardeen hatására folytatta a munkát. Bardeen Stockholmban volt a Nobel-díját átvenni, amikor is sikerült Schrieffernek felírni a hullámfüggvény egyenletét. Bardeen hazatérése után hárman együtt végleges formába hozták az elméletet és megkezdték annak ellenőrzését, hogy a kísérleti eredmények alátámasztják-e minden elgondolásukat.

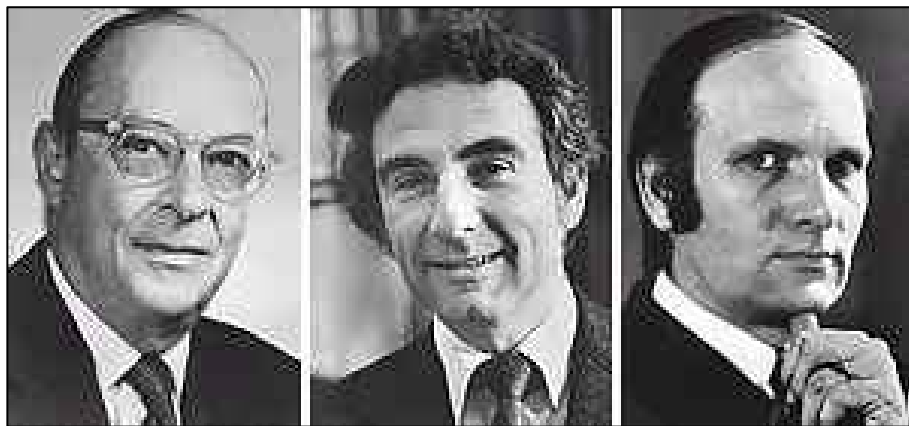
Ez lett a BSC-elmélet (B-Bardeen, S-Schrieffer, C-Cooper), ami jól magyarázta a szupravezetés hirtelen fellépését, a mágneses tér kirekesztését a szilárd testek belsejéből, a fajhőnek a z átmeneti hőmérsékleten bekövetkező növekedését, sőt még a szuperfluiditást is.

A szupravezetés és a szuperfluiditás összefüggése is egyértelmű lett. Mindkettőnél kimutatható hajtóerő nélkül is hosszú ideig fennmarad az áramlás, az elektronok, illetve héliumatomok állandó sebességű áramlása, ami a Cooper-pároknak köszönhető. Előbb egy

rövid közleményt jelentettek meg a Physical Review-ban, majd hónapokkal később jött a részletesebb cikk a szupravezetés jelenségének magyarázatára.

Egyértelmű volt, hogy ezért ők hárman Nobel-díjat érdemelnek, de a díj odaítélése bonyodalomba ütközött, mert Bardeent már egyszer kitüntették, és a szabályok szerint egy tudományágban csak egyszer lehet valakit díjazni. Így váratott magára a megérdemelt díj kiosztása.

Míg ők „váraakoztak”, az akkor még szintén egyetemista Josephsonnak is született egy mindenki számára meglepő felfedezése, ami szintén díjat érdemelt volna, de itt is akadályok léptek fel. Ha egy felfedezés ugyanis egyértelműen egy korábbin alapul, akkor a díjat csak abban az esetben ítélik oda, ha a korábbit már díjazták. Ezért végül is a Nobel-díj-bizottság megváltoztatta az addigi szabályt és így 1972-ben Bardeen, Cooper és Schrieffer megkapta a várt kitüntetést.



14. ábra.

John Bardeen

Leon Cooper

John Schrieffer

2. 5.

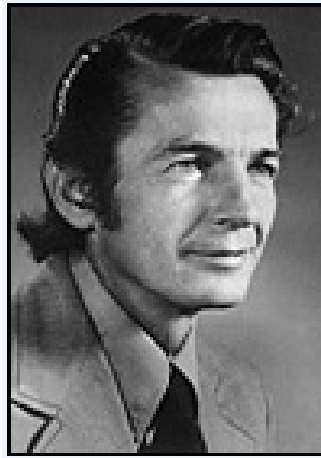
1973. (Josephson, Esaki, Giaever)

..."az alagútakadályon átfolyó szuperáram tulajdonságainak elméleti előrejelzéséért, különös tekintettel a ma általánosan Josephson-effektusnak nevezett jelenségekre"...

1973-ban Giaever és Josephson vehették kézhez a díjat, akikhez abban az évben még Eleo Esaki társult, a félvezető alagútdiódák felfedezéséért. A díjból 1/2 rész lett Josephsoné, Giaever és Esaki pedig 1/4-1/4 részt kapott.



Josephson



Giaever



Esaki

15. ábra.

A norvég születésű Ivar Giaever, aki a New York állambeli Schenectadyben volt végzős hallgató, épp egy tanfolyamon vett részt a Rensselaer Polytech műegyetemen, amikor rádöbbsent, hogy az elektronok alagutazását fel lehetne használni a szupravezetők Fermi-felületen lévő energiasáv-intervallumának a mérésére.

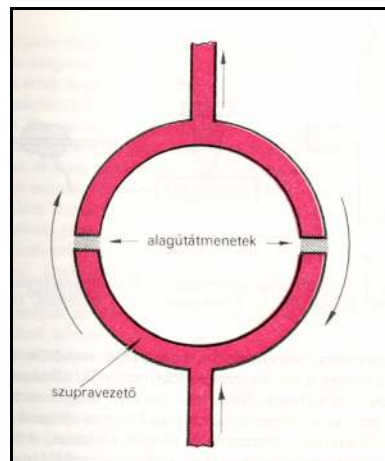
1960. április 22-én egy „fémszendvicset” készített, ami két vékony fémlemezből állt, köztük egy szigetelőréteggel. Ha a külső rétegek normál állapotban voltak, akkor az elektromos áramot vezető elektronok alagúthatás révén át tudtak hatolni a szigetelőrétegen, de ha már az egyik réteg szupravezető állapotban volt, akkor nem lépett fel az alagúthatás. Ezt mérésekkel alá tudták támasztani, de a jelenség okát még nem tudták megmagyarázni.

Brian David Josephson, a cambridge-i egyetem végzős hallgatója 1962-ben azt jósolta, hogy a Cooper-párok akkor is áthaladhatnak a fémszendvics szigetelőrétegen, ha mindkét külső réteg szupravezető állapotban van. Ha a rétegeken átfolyó áram feszültsége egy

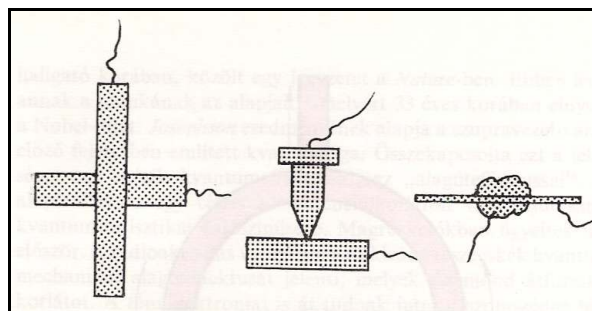
bizonyos szint alá esik, vagy ha mágneses tér zavarja meg a szupravezetést, akkor a Cooper-párok felbomlanak, és ezt a hirtelen bekövetkező jelenséget mérhető feszültségváltozás kíséri.

Josephson elméletének bizonyítására a tanára, Philip Anderson a Bell Laboratóriumokban megépített egy berendezést, melyet rövid időn belül több cég is elkezdett gyártani. A mágneses tér és az elektromos feszültség kicsiny változásainak regisztrálására szolgáló eszközt „Josephson-kapcsolónak” nevezték el, amely lehetőséget biztosít arra, hogy még a leggyengébb mágneses mezőt is ki lehessen mutatni. Ez a kapcsoló vagy csatlakozó lett az új, ún. szupravezető kvantuminterferencia-eszközök (Superconducting Quantum Interference Devices, SQUID) lelke.

A SQUID tulajdonképpen egy egyszerű eszköz, melyet egy szupravezető gyűrű alkot két alagútátmenettel és két vezetékkel. Az alagútátmenetek különböző alakúak lehetnek:



16. ábra. SQUID



17. ábra. Különböző alagútátmenetek
(Oxidált szupravezető szalagok közötti kontaktus,
pontkontaktus, nióbium lágyforrasz csöppel)

Felfedezték, hogy a szupravezető hurokban még a nagyon gyenge mágneses mező is elektromosan mérhető jelet generál. A SQUID a tudósok számára manapság elérhető

legérzékenyebb mágnességet kimutató szerkezet. A módszert több területen is felhasználják, de erről majd a későbbiekben részletesen szólunk.

A következő jelentős lépéshez, a szupravezetés jelenségének magyarázata terén Abrikoszov dolgozata járult hozzá nagymértékben. A már említett publikálásban a He-4 szuperfolyékony állapotában örvényeket javasolt, amit matematikailag Gorkov vezetett le. Ezért Abrikoszov és Ginzburg neve mellett Gorkové is szerepelt a Nobel-díjra való felterjesztésben.

Az örvényeket tartalmazó szupravezetőket, amelyek lehetnek fémes ötvözetek vagy más, bonyolultabb felépítésű kristályok (pl. kerámiák), másodfajú szupravezetőknek nevezik, szemben a mágneses teret egészében kitaszító tiszta fémekkel, az ún. elsőfajúakkal. Az ismert másodfajú szupravezetők száma napról napra nő. Abrikoszov munkája alapján az örvények rácsba rendezését láthatóvá tették. A szupravezető felületére mágneses anyagból készített port szórtak, és ekkor a mágneses térben az örvény mágnes-magja láthatóvá vált. Ez a demonstrációs kísérlet hasonló ahhoz, amit egy állandó mágnes erővonalainak bemutatására szoktak alkalmazni az iskolában.

2.6.

1987. (Müller-Bednorz)

...,a kerámiai anyagok szupravezetésének felfedezésében elért fontos áttörésükért”...

Az 1980-as évek elején az IBM zürichi laboratóriumában Karl Alex Müller és Johann Georg Bednorz a fémoxidok szupravezetővé tételével kezdett foglalkozni. Kettőjük közül Müller volt az idősebb, aki 1927-ben született. Hosszú tudományos múlt állt mögötte és korábbi eredményeinek köszönhetően az 59 „IBM fellow” egyikévé vált. Ők azok, akik gyakorlatilag szabad kezet kaptak kutatási területük megválasztásához a svájci IBM kutatóintézetben. A fiatal Bednorz 1950-ben született Németországban, ahonnan a zürichi laboratóriumba került és ott tevékenykedett Müller munkatársaként.

Az oxidok között van olyan, amelyet szigetelőként használtak, és sokuk egyáltalán nem vezeti az áramot, ők mégis az oxidokat kezdték vizsgálni, melyek közül néhányról már kiderült, hogy szupravezetővé válhat.

A két tudós különféle vegyületeket kevert össze, szárítószekrényben hevítette, majd egészen a folyékony hidrogén hőmérsékletéig lehűtötték. Munkájukat csak ketten végezték, asszisztensek nélkül. Két és fél évnyi próbálkozás után 1986. január 27-én báriumból, lantánból, rézből és oxigénből egy olyan oxidot állítottak elő, amely 35 K-en szupravezetővé vált. Erről áprilisban cikket írtak „Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system” (vagyis „Magashőmérsékletű szupravezetés lehetősége a Ba-La-Cu-O rendszerben”) címmel, ami a Zeitschrift für Physik szeptemberi számában jelent meg.

Ezzel egy új kutatási területet tártak fel, amellyel Japánban, Kínában, Angliában, Svájcban, az Egyesült Államokban igen intenzíven kezdtek foglalkozni. Olyan vegyületeket kerestek, amelyek már a nitrogén cseppfolyósíthatóságának hőmérséklete felett, 77 K-nél magasabb értéken szupravezetővé válnak.

Úgy gondolták, hogy ha a cseppfolyós nitrogénben elő lehetne idézni a szupravezetést, akkor a jelenséget korlátlanul hasznosítani tudnák azzal a vegyülettel, amelyiknek a legmagasabb a „kritikus hőmérséklete”.

Fél évnyi kutatás után az 1987. március 18-ai konferencián a tudósok beszámoltak a legújabb eredményekről. A Paul Chu vezette houstoni egyetem laboratóriumában felfedezett „1-2-3” nevű vegyülettel, amely már 93 K-en szupravezetővé vált, megnyerték a legkönnyebben előállítható és a legnagyobb kritikus hőmérsékletű anyag megtalálásáért folyó versenyt.

Az IBM egyik fizikusának lánya, aki fizika-kémia szakos tanárnő, közönséges sütőben „ostyát” sütött ebből az anyagból és egy folyékony nitrogénnel megtöltött tányérba tette, majd egy kicsiny mágneset lebegtetett felette. (Ma is ez az az alapkísérlet, amelyet akár órán is bemutathatunk az iskolásoknak ennél a tananyagnál.)

A mai világrekordot a 138 K kritikus hőmérsékletű tallium vegyülettel tartották, amelyet higany, tallium, bárium, kalcium, réz és oxigén alkot. Ezt a kerámia szupravezetőt 1994-ben Dr. Ron Gofbhard izolálta Coloradoban.

A magas hőmérsékletű szupravezetők felfedezésért Müller és Bednorz 1987-ben kapott Nobel-díjat.



18. ábra.

Alex Müller

Georg Bednorz

A felfedezés nemcsak a kutatás területén, hanem a széleskörű alkalmazásban is minden várakozást felülmúlt. A minimális energiavesztésű mágnesek helyettesíthetik a nagy terű hagyományos elektromágneseket, amelyek használata nagyon drága. Az alacsony hőmérséklet fenntartása költséges, ezért olyan szupravezető huzalokra lenne szükség, amelyek hűtéséhez nem kell cseppfolyós He-t használni, hanem cseppfolyós levegő is elegendő. Az ilyen anyagok a magas hőmérsékletű szupravezetők felfedezése után elérhetővé váltak. A várakozásokkal ellentétben azonban az alkalmazási körök rendkívül szűk az anyagok előállítása során jelentkező nehézségek miatt.

A másodfajú szupravezetőkből készült mágnesek alkalmazása szinte korlátlan. Ma már tudjuk, hogy a szupravezető oxidok viselkedését hagyományos elméletekkel nem lehet leírni. Az elméleti kutatók számára a legnagyobb gondot az elektronpárok képződési mechanizmusának megértése jelenti. A magas hőmérsékletű szupravezetés értelmezésére napjainkig számos elképzelés született, ezek matematikai igazolása, kísérleti ellenőrzése azonban a feladat bonyolultsága miatt még várat magára. A technológiák számára komoly

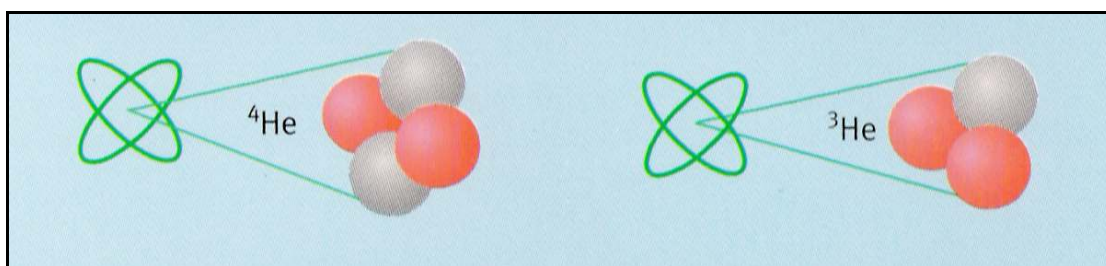
nehézségeket okoznak a szupravezető oxidok termodinamikai és kémiai tulajdonságai. Ha például az $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ szupravezető oxidot melegítjük, akkor az oxigént veszít, majd kb. 700 °C-on a kristályszerkezet átalakul, 1020 °C környékén pedig az anyag eltérő összetételű olvadék és szilárd fázissá esik szét. Ezen a hőmérsékleten a réz-oxidban gazdag olvadék kémiaiag nagyon aktív, és az ellenállónak tartott téglanyagokat (platina, arany, alumínium-oxid stb.) oldja. További nehézség származik abból, hogy a szupravezető oxidok áramszállító képessége nagyon érzékeny egyes kristályhibák jelenlétére. A jó minőségű szupravezető oxidok előállítása érdekében a csúcstechnológiából szinte mindent bevetettek. Mindezek ellenére az alkalmazás számára megfelelő tulajdonságú magashőmérsékletű szupravezető anyagok előállítása még további technológiai kutatásokat igényel.

2.7.

1996. (Lee, Osheroff, Richardson)

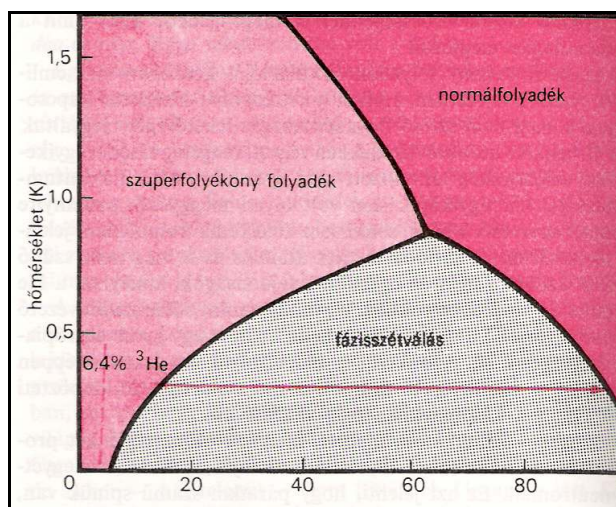
...,a hélium-3 szuperfluiditásának felfedezéséért”...

A szuperfolyékonyság területén született új eredményekért kitüntetett Nobel-díjasok felfedezéseinek számos előzménye volt. Sok kutató foglalkozott a ^4He szuperfolyékonyságával, és rájött, hogy léteznie kell egy ettől különböző szuperfolyékonyságnak is, amely a ^3He izotópjából álló folyadékokban lép fel, ahol az atom magjában eggyel kevesebb neutron van.



19. ábra. A ^4He és a ^3He izotópok atommagjainak szerkezete

Még 1951-ben London felvetette, hogy a folyékony ^3He és ^4He adiabatikus összekeverésének entrópia-növekedése észrevehető lehűlést eredményezhet. Ezután a két izotópból álló folyékony keveréket 0,8 K alá hűtötték és ekkor az megszűnt homogén folyadék lenni, és két különálló fázisra oszlott szét. Az egyik ^4He -ben gazdag, szuperfolyékony, míg a másik pedig a főleg ^3He -ből álló normál fázisú volt. Ez a fázisztválás leegyszerűsített folyamata.



20. ábra. A folyékony ^3He - ^4He keverék fázisztválását bemutató diagram az abszolút nulla közelében

A ^3He -ban a párok szerkezete bonyolultabb, hiszen a pár tagjait alkotó atomok nem lehetnek túl közel egymáshoz. A nehéz izotóptól eltérően, a ^3He fermion, nem egész spinnel. A spinek elrendeződése határozza meg a folyékony és szilárd ^3He entrópia-függvényét. 1950-ben Pomerancsuk ezeken az entrópia-függvényeken tűnődve felvetette, hogy a folyékony ^3He szilárdra alakítása adiabatikus összenyomással lehűlést eredményez. Ez a módszer azonban komoly gyakorlati nehézségekbe ütközött. Csak 15 évvel később hűtötték le először a héliumot a Pomerancsuk módszerrel. Az utóbbi években a ^3He adiabatikus megszilárdításával kb. 0,001 K hőmérsékletet értek el.

1972-ben tulajdonképpen ezzel a módszerrel mutatták ki a szuperfolyékonyságot a ^3He -ban. A Cornell Egyetem egyik csoportja, aki a Pomerancsuk-hűtéssel foglalkozott, olyan mértékben tökéletesítette a módszert, hogy a ^3He olvadási görbáját 0,002 K-nél alacsonyabb hőmérsékletig tudták követni. A csoport tagjai Robert C. Richardson, David M. Lee és a végzős diák, Douglas Osheroff voltak. Fölfedezték, hogy néhány ezred kelvinnel az abszolút zérus felett a ^3He , – amelyről korábban azt hitték, hogy szuperfluiddá válhat, de elérni nem tudták ezt az állapotot, – mégis lehet szuperfolyékony. Észrevették, hogy lehűtésekor két, 0,0026 K-nél és 0,0002 K-nél lévő átalakulási ponton haladnak keresztül, ami két új folyadékfázis jelenlétére utalt. Megállapították azt is, hogy a szuperfluid ^3He „anizotróp”, akár egy kristály: tulajdonságai különböző értékekkel jellemezhetők, attól függően, hogy melyik tengely mentén mérték azokat. Az új szuperfolyadék egyfajta kvantummikroszkópként működött, lehetővé tette az atomok közti kölcsönhatások okozta jelenségek közvetlen megfigyelését.

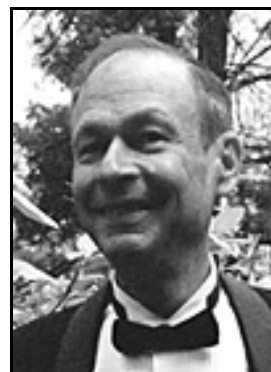
A ^3He szuperfluidummá alakításáért Douglas, Osheroff és Lee 1996-ban Nobel-díjat kapott.



Lee



Osheroff



Richardson

21. ábra.

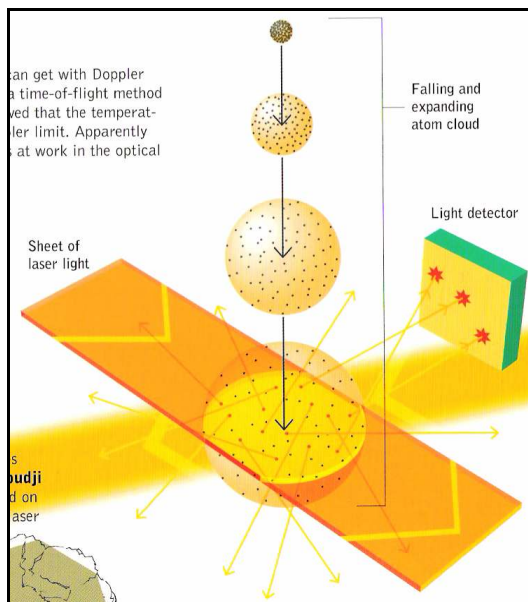
Nem sokkal fölfedezésük után a csillagászok az ő adataik alapján arra a belátásra jutottak, hogy a ^3He szuperfolyadékká alakulása analóg azzal a folyamattal, amelynek során az űrben „ kozmikus gyöngysoroknak” nevezett struktúrák képződtek az „ősrobbanást” követő néhány mikroszekundum alatt, valamint, hogy a szuperfluiditás, mint az anyag egyik állapota jelen lehet a Földtől több ezer fényévre lévő forgó neutroncsillagokban. Ez is alátámasztja azt a tényt, hogy a különböző tudományterületek rendkívüli módon épülnek egymásra.

2.8.

1997. (Chu, Phillips, Cohen-Tannoudji)

...,az atomok lézerfényrel történő hűtési és csapdába ejtési módszerének kifejlesztéséért”...

1975-ben a fizikusok egy új módszert dolgoztak ki az atomok tanulmányozására. Nem gyorsították, hanem lassították az atomokat és közben folyamatosan hűtötték is őket. 1985-ben Steven Chu, a Bell Laboratórium kutatója „optikai csapdát” hozott létre hat irányból jövő lézersugárral, amelyben az atomok néhány centiméter/másodperc sebességre lassultak le. Ebben a csapdában több ezer atom gyűlt össze, és a hőmérséklet mindössze 240 milliomod fokkal volt az abszolút zérus felett.



22. ábra.
Fénnyel való hűtés elve



Chu



Cohen-Tannoudji



Phillips

23. ábra.

Ezt a módszert William D. Phillips, az Egyesült Államok Szabványügyi és Technológiai Intézetének kutatója továbbfejlesztette egy jobb mágneses csapdát szerkesztve. Elméleti magyarázattal Chu, Phillips, valamint a párizsi École Normale Supérieure kutatója, Claude Cohen-Tannoudji szolgált, aki az abszolút zérust immár egymilliomod foknyira meg tudta közelíteni.

Chu, Phillips és Cohen-Tannoudji 1997-ben a fénnel való hűtésért Nobel-díjat kapott.

2.9.

2001. (Wieman, Cornell, Ketterle)

...,a Bose-Einstein-kondenzációnak híg alkáliatomgázokban való eléréséért és a kondenzátumok tulajdonságainak alapvető tanulmányozásáért”...

Az ultraalacsony hőmérsékletnek az anyagszerkezeti alap kutatásokban hatalmas szerepe van. 1995 júniusában az 1951-ben született Carl E. Wieman és az 1961-ben született Eric A. Cornell által vezetett kutatócsoport az USA Országos Szabványügyi és Technológiai Intézetében és a Colorado Egyetemen fontos megfigyelést tett. Az elérhető legalacsonyabb hőmérsékleten végzett kísérletük során egy, még soha nem látott anyagcsepp keletkezett egy olyan anyagból, amelynek létezését Einstein már az 1920-as években megjósolta, de csak ekkor, több mint 70 évvel később bizonyosodott be feltevésének igaza. Ez az anyag az ún. Bose-Einstein-kondenzátum (BEC) volt. A 170 milliárdod K-en létrejött kondenzátumot közvetlenül nem lehetett látni, mivel egy lézersugárnyaláb azonnal szétroncsolta, de képe a számítógép monitorján megmaradt.

A hőmérsékletet a későbbiekben 2 milliárdod K-re csökkentették, ami egymilliószor volt hidegebb, mint a csillagközi tér. Ez több szempontból is jelentős esemény volt: a hőmérsékletet elképesztően lecsökkentették, és az anyagnak egy olyan formáját sikerült előállítani, amelyről nem is gondolták, hogy a Földön is létezhet. Néhány hónap alatt több helyen is sikerült a kutatóknak újabb Bose-Einstein kondenzátumot előállítani.

Cornell azt nyilatkozta egy újságírónak, hogy „Ha szabadjára engedi fantáziáját, akkor elképzelhet egy atomokból álló sugárnyalábot, a lézersugárhoz hasonló, amellyel egyedi atomokat lehet elmozdítani vagy valahová lerakni, s így módon molekuláris méretű szerkezeteket felépíteni.”

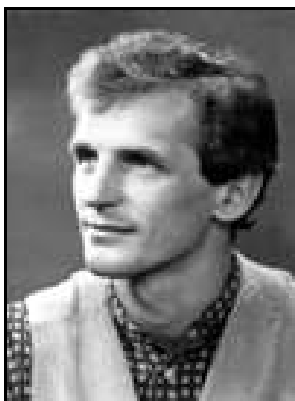
1997 januárjában a MIT egyik kutatócsoportja az 1957-ben született Wolfgang Ketterle vezetésével Bose-Einstein kondenzátumból „atommézeret” állított elő. Ezzel az atommézerrel 1998-ban az atomok elmozdításával komplex molekulákat tudtak felépíteni, mint ahogy azt Cornell megjósolta.

1999 februárjában a Harvard Egyetemen egy kutatócsoport Lene Vestergaard Hau vezetésével Bose-Einstein-kondenzátum és lézeres hűtési technikák alkalmazásával 50 milliárdod K-re tudta csökkenteni a hőmérsékletet, és 61 km/h sebességre lassította a fényt.

2001-ben Cornell, Ketterle és Wieman Nobel-díjat kapott a Bose-Einstein kondenzációval kapcsolatos felfedezéseikért.



Cornell



24. ábra.

Ketterle



Wieman

2.10.

2003. (Abrikoszov, Ginzburg, Legett)

...,a szupravezetők és szuperfolyadékok elméletével kapcsolatos úttörő munkájukért”...

A szupravezetéssel és szuperfolyékonysággal kapcsolatban az utolsó Nobel-díjat 2003-ban kapta megosztva Alekszej A. Abrikoszov, Vitalij L. Ginzburg és Anthony J. Legett.



A. Abrikoszov



*25. ábra.
V. Ginzburg*



A. Legett

Abrikoszov 1928-ban született orosz származású amerikai tudós, Ginzburg 1916-ban született Moszkvában, Legett pedig 1938-ban Londonban, de később Amerikába költözött és ott tevékenykedett.

Abrikoszov jelenleg az Argonne Nemzeti Laboratórium kutatója Illinois államban, Ginzburg a Moszkvai Lebegyev Intézetben dolgozik, míg Legett az Illinious Egyetem professzora az USA-ban.

A két orosz származású tudós a szupravezetés, Legett pedig a szuperfolyékonyság elméletének kidolgozásához járult hozzá.

Legett nevéhez fűződik a spin és pályamozgás összekapcsolása, amelyben Josephson korábban említett elmélete is szerepet játszik.

A kvantummechanika alapján világos volt, hogy két párhuzamos beállású spinnel rendelkező ^3He atomnak keringenie kell egymás körül, szemben a BCS-elméletben leírt Cooper-párokkal. A szuperfolyékony állapotban a spinek és a forgómozgás síkjai egyaránt rendeződnek, ami különböző a két fázisban. A két mennyiség csak igen gyengén, a spinek és pályák közötti kölcsönhatás útján csatolódik. A spinekkel összenőtt kis mágnesek közötti kölcsönhatás erősen függ viszonylagos térbeli helyzetüktől. Ez szabja meg a spinek és a

forgómozgás síkjának a viszonylagos beállítását. Ennek a beállási szögnek a meghatározása Legett nevéhez fűződik.

A szuperfolyékony folyadékban a fáziskülönbség határozza meg az egyik folyadékból a másikba való igen gyenge átáramlást, amihez szintén nem szükséges energia-befektetés. Mágneses térben viszont a felfelé és lefelé álló spinű párok energiája mágnességük következtében felhasad. A kétfajta pár között átmenet valósítható meg rádiófrekvenciás tér besugárzásával.

Legett érezte, hogy a felfedezéséért ő is Nobel-díj várományosa. Az 1996-os karácsonyi üdvözlőlapján a következő olvasható:

„Valószínűleg svéd bélyeg lesz a borítékon, mert Stockholmból írom, ahol hármunk egy hetet tölt a Nobel-díj ünnepségen, mint az 1996. évi Nobel-kitüntetettek vendége. Az ünnepség nagyon élvezetes volt, de még a vendégek számára is kimerítő programot látva nem vagyok teljesen biztos abban, hogy akarnék Nobel-díjat nyerni, még ha kaphatnék is.”

Abrikoszov és Ginzburg munkásságáról már korábban olvashattunk.

Zawadowski Alfréd a Természet Világa 2004. évfolyam márciusi számában megjelent cikkében néhány személyes élményt is leírt a három tudósról:

„Ginzburg a Lebegyev Intézetben száz-kétszáz fős szemináriumot vezetett, amelyen a legkülönbözőbb témák fordultak elő. Mindenkit ismert. Harsány hangjával betöltötte a termet, mikrofonra sohasem volt szüksége. Dolgozataiban nem találtam sok technikai részletet, csak a lényeg érdekelt. Utoljára akkor beszélgettem vele, amikor egy másik orosz fizikussal betértünk a nyaralójába (azon a telepen, ahol az akademikusok töltik szabadságuk egy részét). Ömlött az eső, és néhány napja szünetelt az áramszolgáltatás, így dideregve, nagy bőrkabátban üldögélt a sötétben. Legfőbb problémája az volt, mit lehetne tenni annak érdekében, hogy a tehetséges fiatal fizikusok ne legyenek vallásosak.

Abrikoszov nagyapja Moszkva legismertebb csokoládégyárosa volt, apja pedig a forradalom utáni idők egyik leghíresebb orvosa. Így nem csoda, hogy Abrikoszov azon kevés orosz fizikus egyike, aki több idegen nyelvet beszél folyékonyan fiatal kora óta. Rendkívül közlékeny, mindig kész arra, hogy valamilyen történetet – minden részletre figyelve – előadjon, ahogy az orosz fizikusoktól tanulta. Minden érdekli, korábban szenvedélyes mozirajongó volt, s ebben az sem gátolta, ha az adott nyelvet történetesen nem ismerte. Komoly hegymászóként is tekintélyt szerzett.

Több hónapot töltött Budapesten. Felfedező körútjai elvezették a katolikus templomokba is, ahol egyszer figyelemmel végighallgatott egy prédikációt. Esztergomba kirándulva Szentendrén meglátta és fejbiccentéssel köszöntötte az illető papot, aki véletlenül

ugyanakkor saját vendégét kísérte. Az út menti csárdában, ahol ebédeltünk, ismét véletlenül találkoztunk. Már üdvözölték egymást, majd a Keresztény Múzeumban újra egymásra találva hosszasan elbeszélgettek, és Abrikoszov azzal a hírrel lepett meg minket, hogy beszélgetőtársa az egyik legtekintélyesebb egyházi méltóság várományos.

Hihetetlen munkabírású és tudományos munkái is minden részletre kiterjednek. Tony Leggett rendkívül barátságos, szintén nagy teherbírású. Szomszédja arról panaszkodik, hogy ha reggeli közben átnéz az ablakon, Tony már dolgozik.

Egyszer Urbanában olyan egyetemistákat tanítottam, akik az ő diákjai voltak az előző félévben. Félve megkérdeztem, nem volt-e problémájuk az akcentusommal– Nem, mi Tony Leggettet is hallgattuk – mondták.

—Értették?

—Nem, egy szót sem.

—De hiszen ő angol.

—De hadar.

—Akkor hogyan követték az előadást?

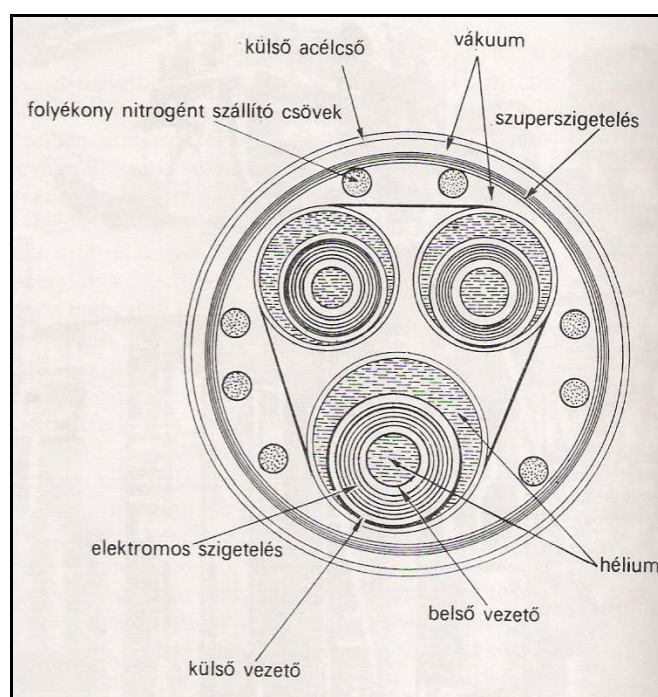
—Meggértük, hogy írásban adja oda a szöveget.

Gondolva Tony apró betűire (levelezőlapjait otthon gyakran nagyítóval a kézben olvastuk), csodálkozva megkérdeztem, hogy ez segített-e. –Nem – válaszolták–, de megkértük, hogy inkább gépelje le. Szó nélkül legépelte, és a szöveget minden előadása előtt kiosztotta.”

A fentiekből kiderült, hogy a Nobel-díjak odaítélése sokszor milyen körülményes és az elismerés gyakran évtizedekig késik, ami Ginzburg és Abrikoszov esetében körülbelül ötven év volt.

3. A szupravezetők alkalmazása

A szupravezetők legtermészetesebb alkalmazása az lehetne, hogy kihasználjuk, hogy a szupravezető drótban ellenállás nélkül folyik az áram, a drót nem melegszik föl, nincs hőtermelés, nincs veszteség. De távvezetékként nyilván nem használhatunk szupravezetőt, hiszen azt folyamatosan hűteni kellene, s az ehhez szükséges energia nagyobb lenne, mint a vezetékben bekövetkező veszteség. Lehetséges azonban, hogy tároljuk az energiát (a szupravezető gyűrűben elindított áram évmillióig nem csökkenne), s szükség esetén az áram onnan újra a hálózatba küldhető.



26. ábra.

*Szupravezető elektromos kábel héliumhűtéssel
és folyékony nitrogén árnyékolással*

Az áram erősségének a gyűrűben található mágneses tér erősségétől való függését kihasználhatjuk a mágneses tér mérésre. Ezen alapszik a SQUID, ami legegyszerűbb változatában nem más, mint két párhuzamosan kapcsolt Josephson-átmenet. Az alacsony hőmérsékleten működő voltmérőkhöz használják, így többek között a mesterséges holdakban is, továbbá olyan nagy érzékenységű magnetométerekben, amelyekkel mérhető pl. egy elhaladó tengeralattjáró, az emberi agy, a szív vagy akár egyetlen neuron mágneses tere, és hasznukat veszik a számítógépek nagy sebességű logikai elemeinek és memóriasejtjeinek gyártásában is. Az 1980-as években megszerkesztettek egy kísérleti Josephson-kapcsolós

számítógépet, amelynek egyes alkotórészeit ultrahideg folyadékba merítették, s amely százszor olyan gyors volt, mint a hagyományos számítógépek.

A szuperfolyékonnyá alakított ^3He is sok új felhasználási területet nyújtott. A hidegtechnológián alapuló szuperérzékeny készülékek alkalmassá váltak a teljes elektromágneses színek mérésére, az égitestek által kisugárzott hő regisztrálására az infravörös, a milliméteres és a mikrohullámú tartományokban, valamint a gravitációs és mágneses terek feltérképezésére. Mindezt fel lehetett használni a világegyetem korai napjaiból származó maradványok azonosítására. A világűrben föllelt részecskék között akadtak olyanok is, amelyek az egységnyi elektromos töltés tötrészét hordozták, köztük a kvarkokat. A vulkánkitörések maradványaiban talált ^3He -ről kiderült, hogy a Föld kialakulásának idejéből származik.

Már régóta tudták, hogy erősebb lesz a mágneses tér, ha a mágnes köré tekert huzalba elektromos áramot bocsátunk. Amikor már szupravezető huzalokat is elő tudtak állítani, a tekercsben folyó áram még inkább fokozta a mágnes erejét. Az ilyen szupravezető mágnesek segítségével növelni lehetett a mágneses rezonancián alapuló képalkotó orvosi vizsgálatok érzékenységét és hatásfokát. Ezt a módszert, az NMR-(mag-mágneses rezonancia) tomográfiát azoknak a lágyrész-elváltozásoknak, pl. daganatoknak a kimutatására használják, amelyeket röntgensugarakkal nehezebb kimutatni.



27. ábra.
NMR-tomográfias módszerrel készült felvétel

Ezek a mágnesek fontos alkotórészeik lettek a mézereknek, a lézerek mikrohullámú elődjeinek is, amelyeket a távközlésben alkalmaztak, és a távoli csillagászati események felderítésében ma is hasznosítanak.

A nagy energiájú fizikában a szupravezető mágneseket beépítették az új lineáris gyorsítókba is, hogy növeljék az egymásnak ütköző részecskesugarak sebességét. Ezekkel a gyorsítókkal, pl. az Illinois állambeli Fermi Nemzeti Gyorsítólaboratórium Tevatronjával fontos felfedezéseket tettek a szubatomi részecskék területén. A szupravezető mágneses ütköztetők olyan ígéretesnek mutatkoztak, hogy az Egyesült Államok és az európai országok

kormányai több milliárd dolláros „szupravezető szuperütköztetők” (superconducting collider, SSC) építésébe fogtak.

A texasi Waxahachie mellett épült meg az SSC 54 mérföldesre tervezett alagútjának első néhány mérföldes szakasza. Hidrogénionok sikeres ütköztetésével próbálták ki az elsőt a hat gyorsítófázis közül. Az 1990-es évek elején azonban a Kongresszus leállította a program finanszírozását arra hivatkozva, hogy már 2 milliárd dollárt elköltöttek, és az eredmény csekély. Ezért a program leállítása után több száz tudós és mérnök az Egyesült Államokból Európába jött, és így a részecskefizika kutatásának központja a Genf melletti CERN lett. A másodfajú szupravezetőkből készült mágnesek teszik lehetővé, hogy a nagy részecskegyorsítóknak, mint a CERN-ben épülő Nagy Hadron Ütköztetőjében (Large Hadron Collider) vagy az Egyesült Államokban Brookhaven mellett már működő Relativisztikus Nehézion Ütköztetőben (RHIC) olyan energiákat érjenek el, amelyek segítségével az univerzum keletkezésének titkait lehet kísérletileg vizsgálni.



28. ábra. A CERN-i részecskegyorsító

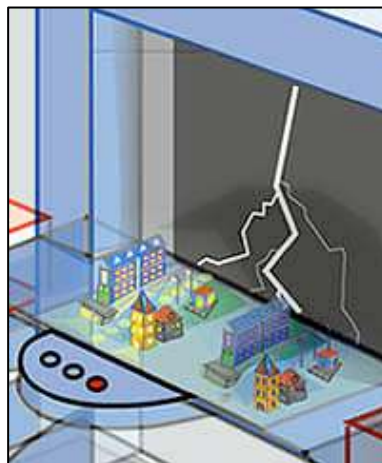
A szubatomi részecskék tanulmányozásában bekövetkező fellendülés mellett a szupravezetés kutatásában is jelentős eredmények születtek. A folyékony héliumnál magasabb hőmérsékleten szupravezetővé váló anyagok a legmagasabb kormánykörök figyelmét is felkeltették több kontinens országaiban, mivel a cseppfolyós nitrogén hőmérsékletén elérhető szupravezetésnek kulcsszerepet tulajdonítottak a rakétavédelmi rendszerek és a szupergyors számítógépek fejlesztésében, valamint az elektromos energia árának csökkenését lehetővé tevő új energiatároló és energiaszállító rendszerek kidolgozásában.

A szupravezető huzalok gyakorlati hasznosításának megkezdése fontos fejlemény volt. Genfben az elektromos műveknek az országos energiahálózathoz kapott áram feszültségének csökkentésére volt már egy egy magas hőmérsékleten szupravezető anyagból készült dróthuzallal

tekercselt transzformátora. Az új transzformátort olaj nélkül tudták üzemeltetni, ezáltal nagymértékben csökkent a tűz- és szennyezés-veszély.

2000-ben készült el a detroiti városi elektromos művek részére egy 120 méter hosszú szupravezető kábel, amely 110 kg tömegű. A szupravezető huzal ugyanannyi áramot szállít, amennyit a korábbi, több mint 8 tonna össztömegű rézhuzal. A 110 kg szupravezető huzal előállításához sokkal kevesebb erőforrást kell felhasználni, mint 8 tonna rézhuzaléhoz, tehát a környezetvédelemmel kapcsolatos költségek szempontjából is az újabb technológiával előállított huzal nyert.

Észak-Karolinában alkalmazták először a szupravezető mágneses tárolót a váratlan energiaingadozások kiküszöbölésére, melyek nem szakítják meg az áramellátást, hanem megfelelő korlátok közé kényszerítik.



29. ábra
A szupravezető áramkorlátozó modellje

Az energiatárolás másik módja az ún. energiatároló lendkerék. A szupravezető lendkerék a villamos energiát forgási energiában tárolja, és lehetővé teszi az energia folyamatos és egyenletes áramlását. A kompakt energiatároló lendkerekek a vállalatok és a lakosság folyamatos energiaellátását is biztosítani tudják. Használatukkal a lámpák nem alszanak ki és a számítógépek nem állnak le vihar vagy egyéb nem várt zavar esetén sem. A képen látható lendkerék modell 2 kg tömegű és 6000 fordulatot tesz meg percenként.

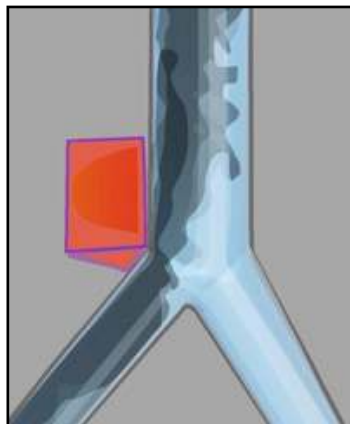


30. ábra.
Energiatároló lendkerék

Az Egyesült Államok Energiaügyi minisztériumának becslése szerint, ha minden közművet szupravezető átviteli és elosztóvezetésekre kapcsolnának, akkor 50%-kal lehetne növelni működésük hatásfokát. A jövőben a városokban és a városok közelében lévő áramfejlesztőket felváltják majd a fogyasztóktól távolabb lévők, illetve a napenergiát vagy geotermikus energiát hasznosító erőművek, ahonnan olcsón, jó hatásfokkal lehet majd szállítani az energiát a lakossági központok számára. A minél hatékonyabb áramszállítás sem mellékes szempont, mert ez csökkentené a környezetszennyezést.

Az elektronikus készülékek fejlesztésében is nagy szerepe van a magas hőmérsékletű szupravezetőknek, ugyanis alkalmasak például zajszűrésre, amit a rádiótelefonok vételi lehetőségeinek javítására ki is használnak a fejlesztők, ezen kívül a mágneses rezonancián alapuló képalkotás esetében gyorsítják a leképezést és javítják a felbontást.

A szupravezetők még a csatorna- és víztisztító berendezésekben is hasznosíthatók. A szennyvízbe vasvegyületet szórnak, ami megköti a nemkívánatos baktériumokat és vírusokat, és így a mikroorganizmusok a nagyon erős szupravezető mágnesekkel, melyek tere meghaladhatja a hagyományos mágnesek 15-szörösét, eltávolíthatók. Ez az erős mágneses tér képes kiválasztani a szennyezőanyagokat a vízből és a levegőből, sőt még a vízsugarat is képes meghajlítani, amint a képen is látszik az elhajlított tiszta és szennyezett vízsugár.



31. ábra.
Mágneses szeparátor

Hasonló „mágneses szétválasztási” eljárást alkalmaznak azokban a készülékekben is, amelyeket a szennyezett talaj megtisztítására (például az aktinidák közé tartozó radioaktív elemek eltávolítására) alkalmaznak.

A szupravezetés egyéb „high-tech” alkalmazásai ma még csak a tervezés fázisában vannak, de pl. a kontaktusmentes szállítószalagot már több helyen is alkalmazzák, ugyanis a szupravezető-mágnes pár stabil mágneses lebegése felhasználható nagytisztaságú szállítószalag készítéséhez is. A nagy tisztaság sok helyen nagyon fontos. Például, ahol csíramentes környezet szükséges, ott csak a szállítószalag lebegő része található, a szállítás így semmilyen szennyeződéssel nem jár.

A szupravezető mágnesek fejlesztésében az 1998-as év fontos áttöréseket hozott. Japánban megnyitották egy új „MAGLEV” vasútvonal első szakaszát, amely 18,4 km hosszú volt. A MAGLEV név az angol *magnetically levitated vehicle*, azaz mágnesesen lebegtetett jármű kifejezésből ered.

A mágneses mező felett lebegő jármű ötlete már közel száz éves. Az első mágneses lebegtetésű közlekedési eszköz gondolatáról a Scientific American 1909. novemberében adott hírt. Robert Goddard, a rakétatervezés úttörője vetette fel az ötletet, hogy Boston és New York között építsenek egy alagutat, amelyben a részleges vákuumban haladó autókat a „mágnesség varázslatos ereje” tartaná a pálya felett.

Pár évvel később, 1912-ben Emile Bachelet, francia mérnök szabadalmaztatott egy olyan tervet, amely már hasonlított a mai MAGLEV-hez. Elkészített egy 15 kg-os modellt, mely a laboratóriumának a falát is áttörte egy alkalommal. A modellt egy sor váltakozó árammal táplált elektromágnes tartotta lebegésben. Azonban ez nem bizonyult jó

megoldásnak, mert túl sok energiát fogyasztott ahhoz, hogy egy 40 tonnás jármű esetében is szoba jöhessen.

Közel 50 éves szünet után egy nukleáris reaktorokat tervező mérnök, James R. Powell működőképes megoldással állt elő. Egyszer hatalmas közlekedési dugóba került. „Négy órámba került, amíg átverekedtem magam a hídon átvezető 3 kilométeres szakaszon, s ez alatt egyfolytában csak azon gondolkoztam, hogyan lehetne megoldást találni a távolsági közlekedés megkönnyítésére. Ekkor vetődött fel bennem a MAGLEV gondolata” – mondta Powell.

A Brookhaven Kutatóintézet fizikusával, Gordon T. Danbyvel közösen Powell egy olyan javaslattal állt elő, hogy a sínbe épített fémtekercsekben a járműre szerelt mágnes segítségével keltsenek áramot. Mivel az áram a járművön elhelyezett elektromágnesével azonos polaritású mágneses mezőt hoz létre, a két mező taszítja egymást. Powell és Danby legfontosabb meglátása az volt, hogy a megfelelő ellenerőt csak úgy tudnák elérni, ha szupravezető mágneseket alkalmaznak. Ahhoz, hogy egy 40-50 tonna tömegű jármű felemeléséhez elegendően erős mágneses mezőt nyerjenek, folyékony héliummal 4 K-re lehűtött szupravezető tekercseket kell elhelyezni a jármű alján vagy oldalán. A mágnesek és a tekercsek kölcsönhatása stabilizálja a járművet. De a jármű felemelése csak az első lépés volt, meg kellett még oldani az előre-hátra mozgást is. Ezt lineáris szinkronmotorok végzik. A sínben elhelyezett tekercsek a hagyományos forgó villanymotor gyűrű alakú állórészének felelnek meg. A bennük folyó áram által keltett váltakozó polaritású mezők először vonzzák, majd taszítják a lebegtetéshez használt mágneseket. A sebességet és a gyorsulást az áramerősség és a frekvencia változtatásával szabályozzák. A két kutató 1966-ban ismertette ötletét.

1965-ben Amerikában törvényt hoztak a földi szállítás korszerűsítésére. A legeredetibb ötlettel Henry H. Kolm és Richard D. Thorton álltak elő, ez a mágneses sikló volt. 1975-ben azonban a létrehozása akadályba ütközött, mert berekesztették a megvalósításhoz szükséges anyagi támogatás folyósítását. A japánok és a németek ekkor lekörözték az amerikaiakat.

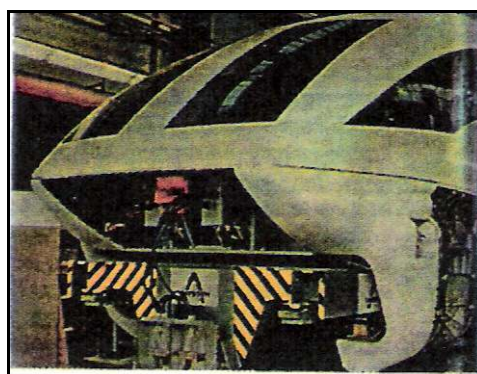
1970-ben a Japán Államvasutak egy olyan tervet fogadott el, amely nagyjából azonos volt Powell és Danby elképzelésével. A japán program keretében egész sor járművet építettek meg és próbáltak ki a Japán délnyugati részén fekvő Mijazaki tartomány 7 km-es kísérleti szakaszán. 1991 októberében a japánok legkorszerűbb MAGLEV prototípusa, az MLU-002 a tűz martaléka lett. A gyulladást a kerekek egyik magnéziumötvözetből készült alkatrésze okozta. A tüzeset a mágnesek rendkívüli tartósságának bizonyítására „jó” volt. Egy órával a

lángok eloltása után a központi mágnes még olyan aktív volt, hogy kitepte az egyik tűzoltó kezéből a tűzoltószekercét.



32. ábra. MLU-002

1977-ben a német közlekedési minisztérium több tervezet közül Hermann Kemper német tudós húszas években készült Transrapid-07 nevű MAGLEV terve mellett döntött. Kempler járműve nem a pálya fölött lebeg, hanem fölülről ölel körül egy T-alakú sít, és a sín alá hajló részébe hagyományos elektromágneseket helyeztek el. Az alulról felfüggesztett mágnes a sítől, melybe acélszalakat helyeztek el, nem egészen 3 centiméteres magasságba emeli a járművet. A japán MAGLEV-hez hasonlóan a szerelvényt itt is lineáris szinkronmotor hajtja, amelyben váltakozó áramot használnak a járművel együtt haladó mágneses tér létrehozására. Az időben váltakozó mágneses mezők kölcsönhatásba lépnek a járművön elhelyezett mágnesekkel, és így vonzzák és taszítják a vonatot.



33. ábra. Transrapid-07

Mialatt a németek további támogatókat kerestek saját MAGLEV-programjukhoz, addig az Egyesült Államokban már egy nyilvános vonal építésére készültek. Az amerikai MAGLEV-en dolgozó egyik munkacsoportot a New York-i Grumman cég vezette. Ennek a cégnek az volt az elképzelése, hogy a japán és a német modellt ötvözi. A jármű aljába

illeszkedő vezetősín a német típushoz hasonló, melynek feladata a MAGLEV kisiklásának megakadályozása. A „vonat” minden sebességtartományban a pálya felett lebeg, és így az induláshoz, a japán prototípussal ellentétben kerekre sincs szükség. A mágneses térerőt itt is a járműbe szerelt mágnesek és a vezetősín fémtartalma árnyékolja le. A Grumman-modell megpróbálta a német rendszer néhány fogyatékoságát is kiküszöbölni.

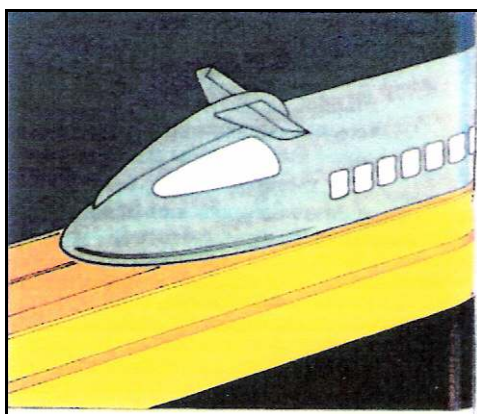
A német Transrapid csak akkora mágneses erőteret használt, hogy a vonat és a vezetősín között 1-2 cm-es légrés maradjon. Ezért a vezetősín minden egyes szakaszát tükörsimára kell csiszolni, nehogy a jármű felhorzsolja a fémet, nagy sebességnél ez ugyanis balesetveszélyes lenne. A légrés nagysága a szél, a hőmérséklet-változások vagy a rezgések hatására elállítható, s emiatt gyakori és költséges korrekcióra van szükség.

Ezek kiküszöbölésére a Grumman azt javasolta, hogy a kis méretű hagyományos mágnesek mellett építsenek be a japán modellben alkalmazott szupravezető mágneseket is. Az elektromos áram erőssége a nem szupravezető mágnesekben egy digitális vezérlőrendszerrel változtatható, ezáltal a jármű és a vezetősín közötti távolság is szabályozható. A szupravezető mágnesek nagy fluxusa lehetővé teszi, hogy az 5 centiméteres távolságot állandóan fenntarthassák, és ezzel a gyakori utána-állítás elkerülhető.

Egyes szakértők úgy gondolták, hogy ha az utasokat meg akarják kímélni a centrifugális erők okozta kényelmetlenségektől, akkor a kanyarokban vagy a pályát, vagy a vonatot kell megdőnteni. Ennek a problémának a megoldására Kolm mágneses siklója nyújtotta a legjobb ötletet. A megoldás a repülőgépek fordulási manőverén alapszik, ahol a csűrő- és oldalkormányt összehangoltan térítik ki ahhoz, hogy a gép a kívánt mértékben mozduljon el a hossz- és függőleges tengelye mentén, és ne sodródjon ki fordulás közben. A vezetősínen haladó jármű így akár a 45°-os dőlésszöget is elbírja.

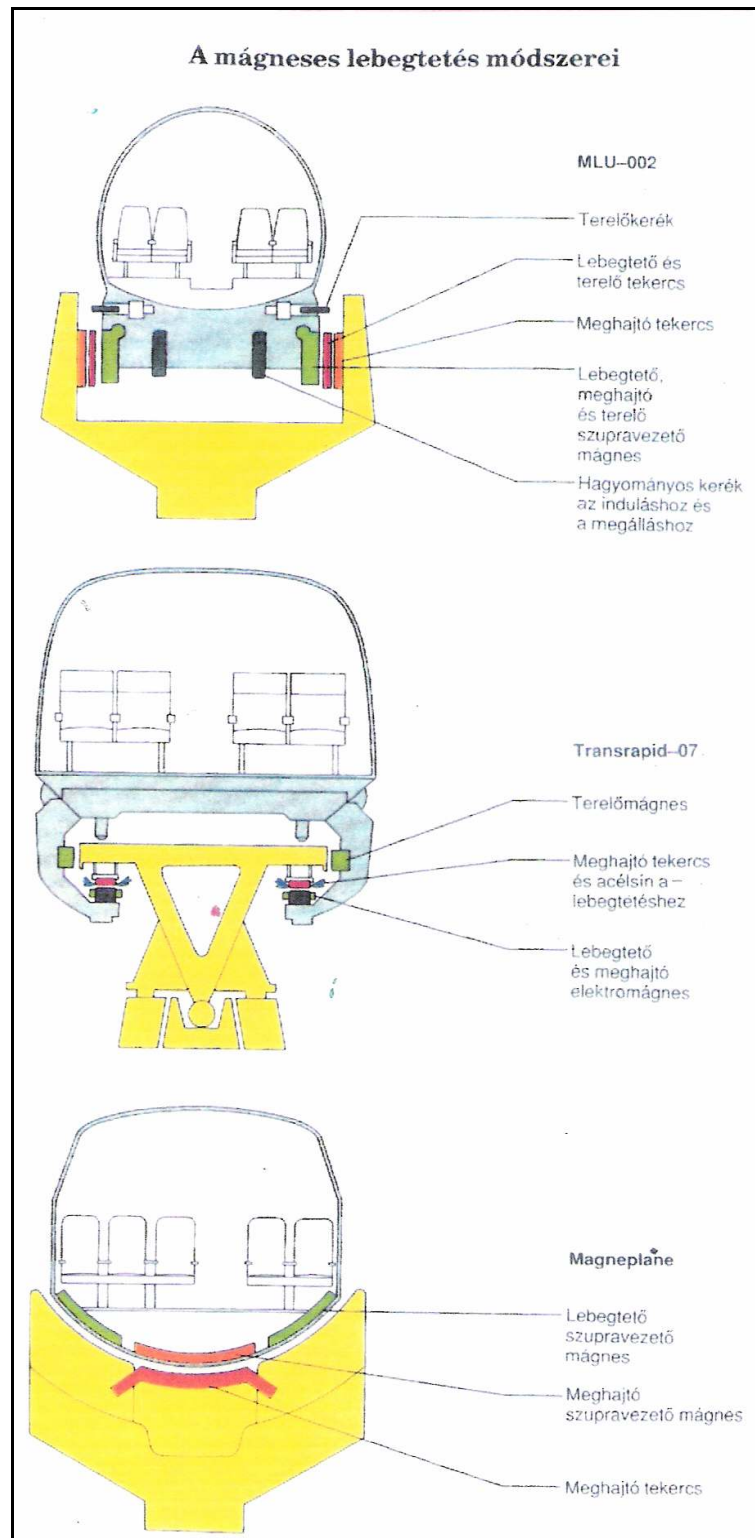
Egy másik probléma az, hogy a MAGLEV-vonatok meglehetősen nagy zajjal közlekednek. A körülbelül 500 km/h sebességgel robogó MAGLEV zaja a vezetősínektől 25 méterre eléri a 100 decibelt, amely az emberi hallásra ártalmas. Ennek a szintnek a lecsökkentésén még ma is dolgoznak.

A tervezők, akik arra törekedtek, hogy nagyobb távolság legyen a vezetősín és a jármű között, megalkották a MEGAPLANE tervét.



34. ábra. MEGAPLANE

A MEGAPLANE szupravezető mágnesi taszító mágneses erőket indukálnak a vezetősínbe épített tekercsekben, így a jármű 15 centiméteres magasságban tud lebegni. A teknő alakú vezetősín 45° -os dőlésszögű kanyarok kialakítását is lehetővé teszi.



35. ábra. A mágneses lebegtetés módszerei a három vonattípusnál

A világ első mágneses lebegtetésű (MAGLEV) vonata 2003. január 1-én kezdte meg működését Sanghajban. A tesztek során a vonat elérte az 500 kilométeres óránkénti sebességet, az utasszállító csúcsebessége pedig 400 km/h fölött volt. A Transrapid 08 a

Pudong nemzetközi repülőtér és Sanghaj pénzügyi negyede között szállítja az utasokat, 30 kilométeres távon. Ezt az utat mindössze 7 perc alatt teljesítette. "Ez lesz a világ leggyorsabb kereskedelmi vonata", nyilatkozta a gyártó német Transrapid cég szóvivője egy újságnak.

A vonatot a berlini székhelyű Transrapid építette, míg a hozzá szükséges sínpálya a Shanghai MAGLEV Transportation Corporation munkáját dicséri. Az 500 km/h sebességet a német tesztpályán sikerült elérnie, ami megfelel a Japán Vasúttechnikai Kutató Intézet által kifejlesztett kísérleti MAGLEV vonat sebességének. A francia gyártmányú villanymotorokkal meghajtott, hagyományos kereken gördülő TGV vonatok is elérték ezt a tempót, esetükben azonban a legnagyobb utazási sebesség csak 300 km/h.

A Transrapid 1999. novemberében állapodott meg a kínai tudományos minisztériummal a rendszer kifejlesztéséről, amit 18 hónap alatt végeztek el, becsült költsége 1,57 milliárd dollár volt. Egy retúrjegy 12,5 dollárnak felel meg, ami az elemzők szerint költségesnek tűnik az átlag utazóközönség számára.

2003. december 2-án hírül adták, hogy a MAGLEV japán gyorsvasút új sebességi rekordot állított fel: 581 km/órás sebességgel száguldott a szupervonat. Erre a vonatra nem azért fognak felülni az emberek, hogy utazás közben a tájban gyönyörködjenek!



36. ábra. Maglev

4. A téma iskolai bemutatásának lehetőségei

Az utóbbi években a tanulók fizika tantárgy iránti érdeklődése egyre inkább csökken. Szerte a világban, így hazánkban is keresik a lehetőségeket a tanulók érdeklődésének felkeltésére, a kedvezőtlen tendencia megállítására.

A téma, a modern technika már önmagában is számíthat a tanulói érdeklődésre, de ezen belül több lehetőség adódik, hogy a szupravezetők „megjelenjenek” az iskolai tanításban. Az alábbiakban röviden erre mutatok be példákat.

4.1. Út az alacsony hőmérsékletekhez

A minél alacsonyabb, illetve minél magasabb hőmérséklet eléréséért folyó küzdelem során az alacsonyabb hőmérséklet előállítása bizonyult nehezebb feladatnak. A szupravezetés jelenségéhez szükséges alacsony hőmérséklet eléréséhez vezető út hosszú és akadályokkal teli volt. Az alacsony hőmérsékletek fizikája lehetőséget adott számos, addig ismeretlen jelenség laboratóriumi létrehozásához, megfigyeléséhez.

Az 1500-as évek végén még „nem tudtak” mit kezdeni a hideggel, nem tudták azt hasznosítani. Az élelmiszereket nem a hideg segítségével tárolták, hanem egyéb módszereket alkalmaztak a tartósításra (szárítás, sózás, füstölés, olajba merítés, stb.), egészen addig, amíg rá nem jöttek, hogy a hó alkalmas a hús tartósítására, ami a hideg egyik alkalmazási módja lett. A természetes jég hasznosítása több embernek is nagy hasznot hozott a kereskedelemben. A jeget szalmával bélelt ládákban szállították, és bár jelentős része elolvadt, mire elérték úticéljukat, mégis voltak, akik ebből gazdagodtak meg.

A 17. században a hideget legkiterjedtebben Robert Boyle kutatta. Egy alkalommal kitett az ajtó elé több edényt, melyekben különböző hőmérsékletű víz volt (forró, langyos, hideg) és azt tapasztalta, hogy az edények tartalma egyforma ütemben fagyott meg, függetlenül a kezdeti hőmérsékletüktől. Arra is rájött, hogy ha a víz jéggé fagy, megváltozik a kiterjedése. Ezt egy szabadban hagyott vizes hordó segítségével fedezte ezt fel, ugyanis amikor a víz megfagyott, a hordó vasabroncsa széttört. Ekkor még csak ismerkedtek a hideg tulajdonságaival, az igazi felhasználása csak ezután kezdődött.

1620-ban a Westminster-apátság légkondicionálásával kísérleteztek, mert az akkor uralkodó Jakab királynak a nyári melegben felfokozódott a bőrbetegsége és ezért azt szerette volna, ha valaki hideget „varázsol” a palotájába. Ezt egy Drebbel nevű tudós meg is

valósította amit sokan boszorkányságnak, mágiának tartották. Arról, hogy hogyan „állított elő” hideget, nem maradt fenn semmilyen feljegyzés.

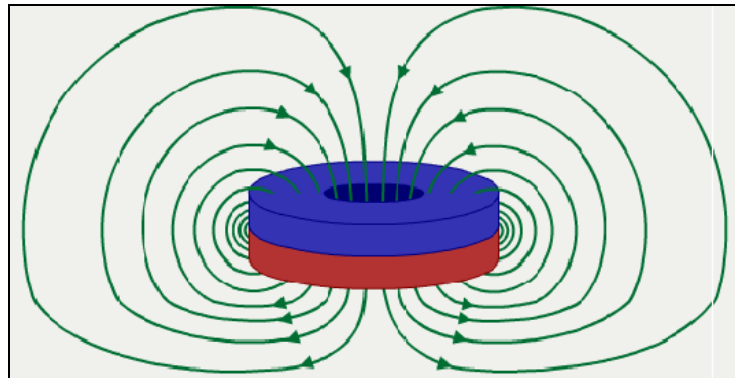
Több mint egy évszázadot kellett várni, hogy laboratóriumi méretekben megvalósították a mesterséges hűtést. Az ammónia jóval fagypont alatti hőmérsékleten való cseppfolyósításával egy újabb lavina indult el a kutatók körében, és egyre alacsonyabb hőmérsékleteket tudtak elérni.

1877-ben cseppfolyósították az oxigént és a nitrogént. Az utóbbinak $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ a forráspontja, és ez a folyadék Dewar-edényben vagy termoszban „tárolható”, szállítható, amit légmentesen lezárni nem szabad, a nitrogén ugyanis az edényben állandó, lassú forrásban van.

A szupravezetés iskolai bemutatásához is szükség van cseppfolyós nitrogénre, amellyel lehűtünk egy kis szupravezető anyagot (általában szupravezető kerámiát) és ráhelyezünk egy kis mágneset, ami lebegni fog felette. Ezzel a látványos kísérlettel felkelthetjük a tanulók érdeklődését, és így könnyebben magyarázhatjuk meg a jelenség fizikai hátterét.

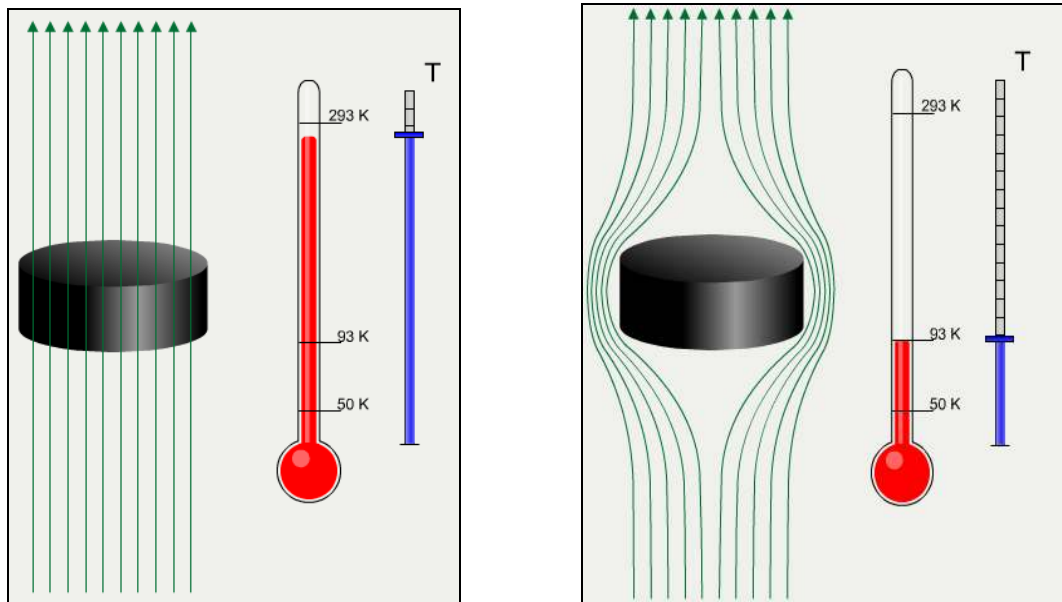
4.2. A Meissner-kísérlet iskolai bemutatása

Az előzőekben már ismertettem a Meissner-kísérletet, amely szerint a mágneses térben lehűtött anyag szupravezetővé vált és kitaszította magából a mágneses teret. Ez alatt a felület közvetlen közelében szupravezető áram indukálódott, a mágneses tér pedig a felülettől távolabb, a fém belsejében zérus.



37. ábra.

A mágnes körül keletkező erővonalak szemléltetése

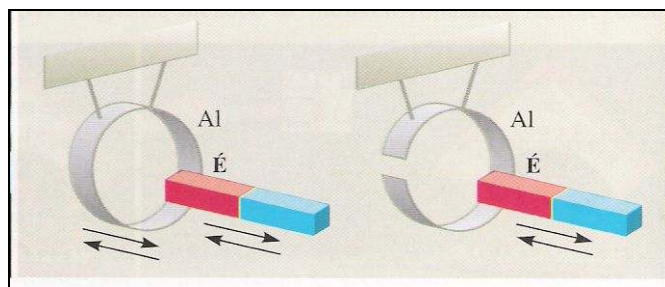


38. ábra.

Meissner-effektus erővonalakkal szemléltetve

Az iskolai tananyagban szereplő Lenz törvénye kimondja, hogy *az indukált áram mindig olyan irányú, hogy az indukciót létesítő változást akadályozza, illetve „akadályozni törekszik”*.

Az indukált áram irányának szemléltetésére elegendő egy felfüggesztett alumíniumgyűrű és mágnes. Ha az alumíniumkarikához közelítünk a mágnessel, akkor taszítást, ha távolodunk, akkor pedig vonzást tapasztalhatunk. Abban az esetben, ha a gyűrűn egy kis szakadás van, nem következik be ez a mozgás. A jelenség tehát az indukált áram következménye. Az indukált áram hatására az alumíniumgyűrű olyan mágneses dipólussá változik, amely a közeledő mágnessel taszító, a távolodó mágnessel viszont vonzó kölcsönhatásba lép.



39. ábra.

Lenz törvényének kísérleti bemutatása

A Meissner-kísérlet segítségével a Lenz szabály tágabb, nem szokványos értelmezésére nyílik lehetőség.

Egy elektromágnes segítségével az alumíniumkarika „röptetését” is megvalósíthatjuk, sőt még azt is el lehet érni, hogy az alumíniumkarika lebegjen a mágneses teret létrehozó vasmag fölött, mindez még szemléletesebben mutatja az analógiát a Meissner-kísérlet és Lenz felfedezése között.

4.3. A szupravezetők alkalmazási lehetőségeinek bemutatása a tanulóknak

A modern technika alkalmazásai iránti érdeklődést kihasználva olyan tanulók is lelkesedhetnek a téma iránt, akiket inkább az orvostudomány, a környezetvédelem vagy akár az informatika érdekel inkább. A széleskörű alkalmazási területek között szerepel:

- SQUID
- NMR-tomográf
- Lineáris gyorsítók
- Szupravezetős áramkorlátozó
- Energiatároló lendkerék
- Rádiótelefonok zajszűrése
- Csatorna- és víztisztításban
- Maglev vonatok stb.

Az új anyag feldolgozó órán az elektromosság, mágnesség tanításánál beiktatható a szupravezetés témaköre, amelyben minden tanuló találhat olyan részt, amely közel áll hozzá. Speciális tantervű osztályoknál, fakultáción, szakkörön különösen jó alkalom nyílik ennek feldolgozására.

A téma különösen jó a projekt munka alkalmazására a fizika tanításában. Például a tanulóknak csoportokban megosztjuk a feladatokat történetiség, fizikai háttér, alkalmazás alapján. Ehhez több helyről is gyűjthetnek szakirodalmat. Néhány internetes forrás:

www.sulinet.hu/fizika

www.supertech.bme.hu

<http://superconductors.org/History.htm>

www.kfki.hu

Ezen kívül rendelkezésemre állt egy olyan CD, amelyet a diákok is használhatnak a szupravezetéssel kapcsolatos felfedezések tanulmányozásánál, és a tanárok is kiválóan alkalmazhatják. A CD tartalmaz interaktív szimulációkat, kvíz-kérdéseket, a témakörhöz kapcsolódó tudást mérő feladatsorokat, szemléletes ábrákat, kísérlet bemutatásokat.

Felhasznált irodalom

1. Tom Shachtman: Abszolút zérus és a hideg meghódítása, Magyar Könyvklub, 2002. Budapest
2. Kurt Mendelsson: Az abszolút zérus fok, Gondolat Kiadó, 1983. Budapest
3. Vészits Ferencné: A Nobel-díjasok kislexikona, Gondolat Kiadó, 1985. Budapest
4. Hargittai István: Út Stockholmba, Galenus Kiadó, 2004. Budapest
5. Mihály László: Szupravezetés: egy év története, Természet Világa 119. évf. 1988.
6. Mihály László: Szuper szupravezetők, Élet és Tudomány 13. szám, 1988.
7. Zawadowski Alfréd: Szupravezetés és szuperfolyékonyság a Nobel-díjak tükrében, Természet Világa, 2004. március
8. Szabó György: Magashőmérsékletű szupravezetés, Fizikai szemle 1. szám, 1989.
9. Mihály László: Fizikai Nobel-díj a magas hőmérsékletű szupravezetésért, Fizikai szemle 1. szám, 1988.
10. Fazekas Patrik: Szingulett spinpárok kvantumfolyadék, Fém, szigetelő vagy szupravezető?, Fizikai szemle 1. szám, 1988.
11. Hevesi Imre: Elektromosság, Nemzeti Tankönyvkiadó, 1998. Budapest
12. Dr. Jurisits József - Dr. Szűcs József: Fizika 10, Mozaik Kiadó, 2004. Szeged
13. Dr. Puskás Ferenc: A szupravezetés, Firka 1. szám, 1991.
14. Vajda István – Szalay András – Porjesz Tamás: Szupravezetők a mindennapokban: a XXI. Század technológiája, Fizikai szemle 10. szám, 2004.
15. Gary Stix: Mágnespárnás légvasutak, Tudomány, 1992. október
16. www.sulinet.hu/fizika
17. www.supertech.bme.hu
18. <http://superconductors.org/History.htm>
19. www.kfki.hu
20. <http://nobeldijasok.lap.hu>