

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

D. A. Frank-Kameněckij
Záporná absolutní teplota

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 5 (1960), No. 6, 713--718

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138247>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1960

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

pohlceného výkonu v dielektriku můžeme též změřit i změnou velikosti útlumu cejchovaného atenuátoru.

Tato metoda měření ztrátového úhlu je méně přesná než metody rezonátorové a používá se ji zřídka. Výsledky měření jsou ovlivňovány různými, přesněji nedefinovanými jevy (vliv rozhraní dvou prostředí, odrazy, ohyb na okrajích vzorku). Vyloučení takto vzniklých chyb je třeba věnovat velkou pozornost.

Seznam použité literatury

- [1] *Izmerenija na sverchvysokich častotach*, Moskva 1952.
- [2] Valitov P. A., Sretěnskij V. M., *Radiotechnická měření při velmi vysokých kmitočtech*, SNTL 1957.
- [3] Kvasil B., *Měření komplexní dielektrické konstanty a permeability v dutinových rezonátorech*, Slaboproudý obzor 16 (1955), 5, 227—237.
- [4] Kvasil B., Husa V., *Měření vodivosti polovodičů v pásmu centimetrových vln*, Slaboproudý obzor 20 (1959), 11, 667—671.
- [5] Montgomery C. G., *Technique of Microwave Measurements*, Mc Graw-Hill, N. Y. 1947.
- [6] Malov N. N., *O priměnění volnovodů děja izučeníja električeskich svojstv veščestva pri vesma vysokich častotach*, 16, (1946), 6—7,
- [7] Fousek J., *Metoda pro měření komplexní permitivity a nelineárních vlastností dielektrik v pásmu decimetrových vln*, Čs. čas. fys. 8 (1958), 575.
- [8] Burdun, *Izmerenie dielektričeskioj pronicajemosti tverdyh dielektrikov v santimetrovom diapazoně s potočju volnovodov*, ŽTF, 20 (1950), 7, 1192—1198.

ZÁPORNÁ ABSOLUTNÍ TEPLOTA¹⁾

Prof. D. A. FRANK—KAMENĚCKIJ, Moskva

Teplota, měřená ve stupních podle Celsia, Réaumura nebo Fahrenheita, je veličina, která může být kladná i záporná (tedy také nulová). William Thomson (lord Kelvin) zavedl na podkladě termodynamických úvah tak zvanou absolutní teplotní stupnici, pod jejíž nulový bod (tak zvaná absolutní nula) nemohla podle tvůrců termodynamiky žádná teplota klesnout. Toto tvrzení mělo v minulém století tak principiální charakter, že pojem záporné absolutní teploty neměl žádný smysl.

Dnes se ve vědecké literatuře setkáváme často s pojmem záporné absolutní teploty, pojmem, který se stal velmi plodným. Tento pojem má dvojí původ. Částečně vděčí za svůj vznik rozvoji kvantové fyziky, hlavní příčina jeho zrodu je však v rozšíření pojmu teploty samého, a to na podkladě statistické fyziky, neboli — jak ji s oblibou nazývají fyzikové — „statistiky“.

Teplota v termodynamice a ve statistice

Termodynamika se nezabývala atomární a molekulární stavbou látky. Teplota v termodynamice je veličina, která určuje směr tepelného toku: od teplejšího tělesa k chladnějšímu.

V nejjednodušších případech je teplota úměrná střední energii tepelného pohybu částic látky, není to však definice teploty, ani její hlavní vlastnost. Obecnější pojem teploty dává statistická fyzika. Podle ní je teplota veličina, která charakterizuje rozložení energie na částice látky. V sebemenším kusu látky je obrovské množství atomů a molekul s velmi rozličnými energiemi. Při dané kladné teplotě je však velmi málo částic s velmi velkou energií, a to tím méně, čím nižší je teplota.

¹⁾ Проф. Д. А. Франк - Каменецкий, *Ниже абсолютного нуля*, Природа, 3 (1960).

²⁾ Věc je složitější, je-li více možných stavů částice se stejnou energií. Tím se zde však zabývat nebudeme.

Mysleme si, že částic s normální energií je E_1 , částic s velmi velkou energií E_2 . V obyčejném stavu s kladnou teplotou — v tak zvaném stavu termodynamické rovnováhy — je E_1 hodně větší než E_2 . Poměr čísel E_1 a E_2 roste tak rychle s rostoucí teplotou, že je výhodnější pracovat s logaritmem (přirozeným) jeho hodnoty. Rozdíl energií E_1 a E_2 , dělený logaritmem jejich poměru, je z hlediska statistické fyziky právě absolutní teplota, vyjádřená ovšem v energetických jednotkách. Násobením jistým konstantním faktorem se dá však snadno přejít ke stupním Celsia. V dnešní fyzice se přijalo vyjadřování energie v elektronvoltech (eV). Fyzikové vyjadřují s oblibou v elektronvoltech také teplotu. Převodní formule je $1 \text{ eV} = 11\,600^\circ\text{C}$.

Vidíme, proč se takové teorii říká statistická teorie. Abychom našli energetické rozložení částic, musíme je počítat, přičemž — jako všude ve statistice — dojdeme k určitému vztahu jen při velkém počtu zúčastněných částic.

Mění-li se energie aritmetickou posloupností, mění se počet částic s touto energií posloupností geometrickou, a to tím rychleji, čím nižší je teplota. Je-li na příklad teplota rovna 1 eV , a zvětší-li se energie o 1 eV , zmenší se počet částic s touto novou energií 2,72krát ($2,72 \approx e =$ základ přirozených logaritmů). Při teplotě $0,52 \text{ eV}$ se zmenší počet částic 2,72²krát atd. V tom je smysl logaritmické závislosti mezi energií a počtem částic s touto energií.

Tento zákon rozložení energie platí v rovnovážném stavu. Zůstane-li těleso dostatečně dlouho stejně teplé, dojde mezi částicemi k vzájemné výměně energie, až na konec nastane rovnovážný stav.

Termodynamika se zajímala jen o rovnovážné stavy, proto záporná absolutní teplota zde neměla smyslu. Statistická fyzika rozšiřuje pojem teploty v jistém smyslu i na nerovnovážné stavy.

Teplota v klasické a v kvantové fyzice

V klasické fyzice je stav částice látky spojitou veličinou. To činilo při statistické interpretaci teploty dosti velké obtíže. Kvantová fyzika zná mnoho případů, kdy energie různých stavů se liší o konečnou veličinu — o energetické kvantum — nebo o jeho celočíselné násobky. V kvantové fyzice má smysl mluvit o částici s ohraničeným počtem možných stavů, speciálně pak o dvou možných různých energetických stavech. A právě v těchto čistě kvantových případech má zcela určitý smysl mluvit o záporné absolutní teplotě.

Záporná absolutní teplota ve statistické fyzice

Předpokládejme, že těleso je složeno z částic se dvěma energetickými stavy, nebo jak se ve fyzice říká se dvěma energetickými hladinami (hodnotami energie). Každá hladina odpovídá určitému stavu částice (nikoli tělesa). Energetické hladiny je zvykem zobrazovat graficky jako vodorovné přímky (úsečky), a to tak, že hladina s energií větší je zobrazena přímkou nad přímkou, zobrazující hladinu s energií menší. Hladina s větší energií se proto označuje jako vyšší (horní), hladina s energií menší jako nižší (dolní). V rovnovážném stavu je na vyšší hladině méně částic, než na nižší hladině, neboli — jak říkají fyzikové — populace vyšší hladiny je menší než populace nižší hladiny. To je normální závislost mezi počtem částic a jejich energiemi. Představme si nyní, že promícháme uměle částice s různými energiemi tak, aby populace vyšší hladiny byla větší, než populace nižší hladiny. Dostaneme tak stav tělesa s opačnou závislostí počtu částic na energii, a ve smyslu statistické definice teploty je tedy nutno připsat takové soustavě zápornou absolutní teplotu. V obraze 1 je věc schematicky znázorněna. Vlevo je normální stav (populace horní hladina je menší než populace dolní hladiny, $T > 0$), vpravo je stav opačný (populace horní hladiny je větší než populace dolní hladiny, $T < 0$).

A jak je to tedy s termodynamikou?

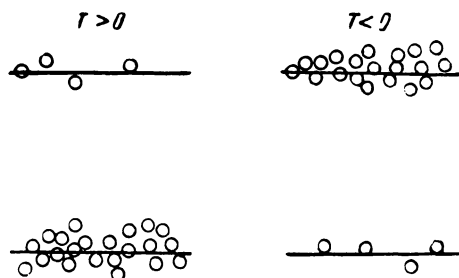
Jak sladit pojem záporné absolutní teploty s běžnými představami termodynamiky? Navykli jsme si na představu, že dodáváme-li tělesu teplo, zvyšujeme jeho teplotu. To však platí neomezeně jen tehdy, je-li nekonečně mnoho energetických hladin. Je-li počet energetických hladin konečný, je možno dodáním jen konečné energie dovést těleso do stavu, v němž populace všech energetických hladin budou stejné. Takovému stavu odpovídá nekonečně velká teplota. Možné je to ovšem jen v nerovnovážných soustavách.

Podají-li se dodat tělesu ještě další energii, bude na horní hladině více částic než na dolní hladině, to jest těleso přejde do stavu se zápornou absolutní teplotou. Přejchod od kladné absolutní teploty k záporné se tedy děje „přes nekonečno“. V tomto smyslu lze říci, že záporná teplota je „větší“ než nekonečno (obr. 2). To je v soulase s termodynamickým chováním tělesa: těleso se snaží předat svou přebytečnou energii zcela nezávisle na tom, je-li ve styku s chladnějšími tělesy, schopnými tuto přebytečnou energii absorbovat. V oblasti kladných absolutních teplot je energie teplejšího tělesa předávána chladnějšímu, v oblasti záporných teplot naproti tomu se ireversibilně vyzařuje.

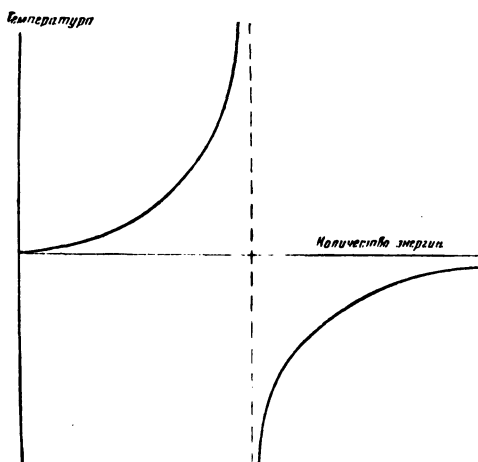
Nerovnovážný stav a přechody

Stav se zápornou absolutní teplotou je nestabilní. Trvání takového stavu je ohraničené. Dochází-li k výměně energie rychle, bude stav se zápornou absolutní teplotou trvat jen velmi krátce; jestliže se výměna energie jakýmkoli způsobem zvolní, může takový stav trvat déle.

Na konec však, nedojde-li k dodání energie zvenčí, přejde těleso v rovnovážný stav s kladnou absolutní teplotou. Na tomto přechodu v rovnovážný stav spočívá prakticky



Obr. 1.



Obr. 2.

význam stavu se zápornou absolutní teplotou. Na tomto přechodu jsou založeny nové způsoby generace a zesilování elektromagnetických vln. Při přechodu molekuly nebo atomu z vyšší energetické hladiny na nižší se emituje kvantum záření. Soustava se zápornou absolutní teplotou má zásobu energie, kterou může vyzařovat ve formě elektromagnetických vln. Taková emise může být spontánní — a máme molekulární generátor. Emise může být také vynucena impulsem záření téže frekvence — tak zvaná vynucená neboli indukovaná emise. V tom spočívá princip zesilovače s použitím záporné absolutní teploty.

Vynucená emise

Zákon vynucené neboli indukované emise je jedním z nejobecnějších důsledků kvantové teorie záření. Podle kvantové teorie lze elektromagnetické záření (světlo, rádiové vlny) pokládat za tok kvant nebo fotonů. Aby částice látky mohla interagovat se zářením, je nutné, aby mezi jejími energetickými hladinami byly dvě, jejichž diference (energetická) je rovna energii kvanta. Sráží-li se foton s částicí, která je na nižší z těchto energetických hladin, může být pohlcen. Naproti tomu částice, která je na vyšší energetické hladině, emituje při srážce s fotonem další foton. Pravděpodobnost obou těchto jevů je stejná.

Nevyhnutelnost indukované emise ukázal Einstein již v roce 1919 na podkladě obecných statistických úvah, které pak vedly indického fyzika Boseho k vypracování první varianty tak zvané Boseovy-Einsteinovy statistiky. Později došel Dirac k zákonu indukované emise z podrobného studia mechanismu interakce záření s látkou.

První molekulární generátory a zesilovače byly zkonstruovány sovětskými vědci N. G. Basovem a A. M. Prochorovem³). Jejich práce byla poctěna Leninovou cenou. V tomto

³) Viz N. G. Basov, A. M. Prochorov, *Molekulární generátory a zesilovače*, tento časopis, IV (1959), č. 4. Pozn. překl.

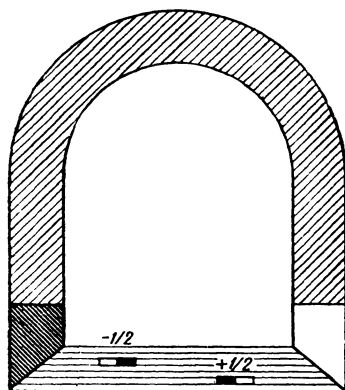
směru se pak intenzivně pracovalo v USA (projekt Microwave Amplification of Stimulated Emission of Radiation, zkratka MASER).

Původně se v zařízeních tohoto druhu použilo energetických hladin molekul (na příklad čpavku). V novějších konstrukcích doznaly širokého užití energie elektronů v pevné látce.

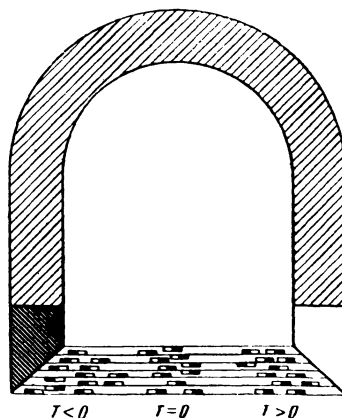
Možnosti, které dává záporná absolutní teplota se tím však zdaleka nevyčerpávají.

Spinová teplota

Nejbezprostřednějšího a jednoznačného smyslu nabývá pojem záporné absolutní teploty tehdy, má-li soustava jen dvě možné energetické hladiny. Klasická fyzika takové soustavy nezná, v kvantové fyzice však takové soustavy existují.



Obr. 3.



Obr. 4.

Nejjednodušší částice látky, elektrony, protony, neutrony, mají charakteristický rotační moment (spin), rovný v kvantových jednotkách $\frac{1}{2}$. V kvantové mechanice se dochází k závěru, že taková částice může být orientována vzhledem k jakékoli ose jen dvojnásobem: projekce spinu je buď $+\frac{1}{2}$ nebo $-\frac{1}{2}$. Tato skutečnost, ač z názorového hlediska velmi zvláštní, byla mnohokrát experimentálně potvrzena. Se spinem je spjat magnetický moment a ve vnějším magnetickém poli odpovídají dvěma orientacím spinu dvě hodnoty magnetické energie. Částice se spinem se chová jako malý magnet. Ve vnějším magnetickém poli se může tento elementární magnet uvést do dvojnásobné polohy: souhlasně s magnetickým polem nebo nesouhlasně s magnetickým polem (obr. 3)⁴). První poloha (v obraze 3 poloha $-\frac{1}{2}$) odpovídá nižší energetický stav soustavy, druhé poloze (v obraze 3 poloha $+\frac{1}{2}$) odpovídá vzhledem k odpuzování souhlasných magnetických pólů vyšší energetický stav soustavy. Za teploty rovné absolutní nule mají všechny elementární magnety polohu souhlasnou s vnějším magnetickým polem (obr. 4, $T = 0$). Za kladné absolutní teploty je část elementárních magnetů ve vyšším energetickém stavu (obr. 4, $T > 0$), avšak ať zvyšujeme teplotu jakkoli, nebude v tomto stavu více než polovina všech částic. Dostaneme-li vnějším působením větší část elementárních magnetů do vyššího energetického stavu, bude soustavně příslušet záporná absolutní teplota (obr. 4, $T < 0$).

Při spinu rovném 0, kdy elementární magnet má jen dvě možnosti orientace ve vnějším magnetickém poli, přísluší každému rozložení těchto magnetů určitá teplota, vyjádřená rozdílem energií, děleném logaritmem podílu počtu částic v obou různých stavech. Této veličině se říká spinová teplota.

⁴) Polohou souhlasnou s vnějším magnetickým polem nazveme polohu, v níž se elementární magnet v magnetickém poli ustálí, nebude-li pod účinkem vnějšího působení (v obraze 3 poloha vlevo, $-\frac{1}{2}$). Opačnou polohu elementárního magnetu označíme za nesouhlasnou s vnějším polem (v obraze 3 poloha vpravo $+\frac{1}{2}$). Pozn. překl.

Výhodné je pracovat nikoli s volnými elektrony, nýbrž s atomy. V atomu (i v molekule) je většina elektronů spárována tak, že každá dvojice sestává z opačně orientovaných magnetů, takže navenek je magneticky neutrální. Je-li pak v atomu jeden elektron liché, určuje tento elektron spin i magnetický moment celého atomu. Pro takový atom pak platí totéž, co jsme řekli o spinové teplotě.

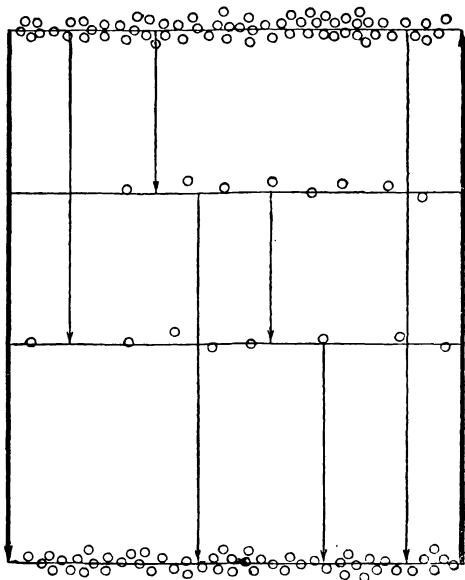
Jak dosáhnout teploty nižší než -273°K ?

Pro soustavu s dvěma energetickými hladinami je jen jedna možnost: rychlým krátko-vlnným elektromagnetickým impulsem zahnat většinu elementárních magnetů na vyšší energetickou hladinu. Elektromagnetická vlna musí mít určitou rezonanční frekvenci, která je tím větší, čím silnější je magnetické pole. Tato frekvence se určí přímo ze základního kvantového zákona: energetické kvantum vlny musí být rovno rozdílu energií obou hladin. Frekvence musí být tedy taková, jako vlastní frekvence rotace (precese) elektronu v daném magnetickém poli. U magnetických polí, která jsou v tomto směru vhodná, leží tato frekvence v oboru centimetrových vln.

V soustavě se dvěma energetickými hladinami musí být impuls velmi krátký, neboť vynucená emise vrací elementární magnety na nižší energetickou hladinu. V takové soustavě může tedy záporná absolutní teplota trvat jen velmi krátce. Má-li elementární magnet více než dvě možné orientace ve vnějším magnetickém poli, lze dosáhnout delšího „života“ soustavy pod absolutní nulou.

V takové soustavě totiž je třeba pro přechod mezi každými dvěma z možných energetických hladin zvláštní rezonanční frekvence. Mysleme si, že soustava je trvale ozařována elektromagnetickým vlněním o frekvenci, která převádí elementární magnety na nejvyšší z možných energetických hladin. V takovém případě dojde k indukované emisi jen na nejnižší energetickou hladinu, nikoli na hladiny vnitřní (ležící mezi nejnižší a nejvyšší energetickou hladinou). Za této situace mají obě krajní energetické hladiny velkou populaci, ostatní hladiny populaci malou, vznikající jen málo pravděpodobnými spontánními přechody z vyšších energetických hladin na nižší (obr. 5). Energie tak cirkuluje hlavně mezi oběma krajními hladinami (vynucenou emisí).

Je-li počet možných energetických hladin větší než dvě, nelze stav soustavy úplně charakterisovat jednou hodnotou absolutní teploty. Poměru populací každé dvojice možných hladin přísluší vlastní teplota. Tak na příklad nejvyšší energetické hladina v obraze 5 může mít vzhledem k nejnižší hladině jakkoli vysokou (podle intenzity elektromagnetického ozařování), avšak vždy kladnou teplotu. Vnitřní energetické hladiny mají vzhledem k nejnižší hladině také kladnou, velmi nízkou teplotu, avšak vzhledem k nejvyšší hladině mají teplotu silně zápornou, a to tím „zápornější“, čím intenzivněji je soustava ozařována. Jestliže se nyní vyše současně se základním ozařováním slabý signál menší frekvence, odpovídající přechodu z nejvyšší energetické hladiny na některou z vnitřních energetických hladin, bude se tento signál zesilovat.



Obr. 5.

Perspektivy

Příklad, na němž jsme se pokusili vysvětlit pojem záporné absolutní teploty, je právě jen příklad a to nejjednodušší a nejnázornější. Aplikace záporné absolutní teploty nejsou

nijak vázány jen na spinovou teplotu. Spinová teplota ovšem doznává velkého užití také na příklad v otázce zesilování rádiových signálů použitím energetických hladin lichých elektronů v pevné látce, na příklad v umělém rubínu — krystalu kysličníku hliníku — s příměsí atomů chromu, jež mají liché elektrony. Není však nijak vyloučena možnost využít výše popsané myšlenky i jinde než v rádiové oblasti. Kdyby se na příklad podařilo dosáhnout záporné absolutní teploty u elektronů, bude možné zesilovat viditelné světlo. Je možné, že v tomto směru pomohou některé vlastnosti plasmy výboje v plynech, a že se bude moci realizovat soustava, znázorněná v obraze 5. Světlo, které by vyvolávalo přechody z nejvyšší energetické hladiny na hladiny vnitřní, by se v plasmě dalo zesilovat. Pokusy v tomto směru nebyly ještě provedeny.

Myšlenka záporné absolutní teploty vyvstala teprve v posledních letech. Práce s ní spojené jsou v počátcích a slibují mnoho nového a zajímavého.

Zkráceně a volně přeložil dr. Josef Veselka

HISTORIE VZNIKU ELEKTRETU

Ing. J. NERUDA

Nápadná formální analogie mezi magnetickými a elektrickými jevy, existence vzájemných spojitostí mezi mechanickým působením zelektrovaných a zmagnetovaných těles a vzájemná podobnost mezi charakteristickými vlastnostmi magnetických materiálů a dielektrik vedla fysiky na myšlenku existence permanentně polarisovaných dielektrik, které by obdobně, jako magnety kolem sebe vytvářejí pole magnetické, vytvářely ve svém okolí pole elektrické. Myšlenku o možnosti existence permanentně polarisovaných dielektrik prvně veřejně vyslovil již Oliver Heaviside a permanentně polarisované dielektrikum nazval elektret, obdobně názvu magnet pro permanentně zmagnetované feromagnetikum. Po dlouhou dobu zůstalo však pouze při myšlence.

Zprávu o prvním uskutečnění této myšlenky, o prvním skutečně vyrobeném elektretu podal Eguchi, který vyrobil elektret víceméně náhodou. Při zkoumání vodivosti voskových a pryskyřnatých dielektrik za tepla si povšiml, že jisté směsi dielektrik (vosk kar-naubský, včelí a pryskyřice) po ztuhnutí v elektrostatickém poli ponechávají si trvale v poli získanou polarisaci. Důsledkem této polarisace byla produkce elektrostatického pole, které bylo možno v blízkosti takového dielektrika běžným způsobem indikovat. Eguchi se tímto jevem začal podrobněji zabývat i u jiných látek a výsledky svých pozorování zveřejnil v roce 1925. Tak vznikla první souborná práce o elektretech.

Od objevu až do druhé světové války nepřekročily pokusy s elektrety, provedené řadou dalších experimentátorů rámec laboratorních prací, ačkoli bylo uveřejněno i patentováno několik návrhů na praktické využití elektretů. Rozšíření elektretů v technické praxi bylo tehdy brzděno nevhodnými mechanickými vlastnostmi materiálů, z nichž byly elektrety vyráběny.

Teprve ve válečných a potom hlavně poválečných letech probudil se teoretický i praktický zájem o elektrety s novou silou. Moderní chemie a technologie přinesly nové hmoty výborných dielektrických vlastností, vhodné pro pokusy s elektrety. Byla uveřejněna celá řada dalších prací zabývajících se elektretovým jevem u novodobých hmot a popisujících nové možnosti praktického využití elektretů. I dnes však mnoho pracovníků, zabývajících se pokusy s elektrety, používá materiálů typu vosk a pryskyřice, a to z důvodu jejich snadnějšího zpracování.

Přesto, že za 37 let existence elektretu (byl prakticky objeven v roce 1921) bylo uveřejněno kolem osmdesáti rozsáhlejších prací, týkajících se elektretového jevu, nebyly dosud precisně prostudovány mechanismy vzniku a zániku permanentní polarisace v dielektrikách. To lze vysvětlit tím, že materiály, ze kterých byly elektrety dříve vyráběny, jsou velice neurčitě složení a o elektretech z novodobých syntetických hmot není dosud dostatek experimentálních poznatků.

Ačkoli podstata elektretového jevu není natolik známou, jak by zasluhovala, je potěšitelné konstatovat, že v poslední době nabývá problematika využití elektretů konkrétních