

## Priaŭtora informo kaj nekrologo

La aŭtoro estis emerita instruisto. Ekde 1960 li forte engaĝiĝis pri historio, partoprenis sciencajn kursojn kaj poste televidan kurson de la Frankfurta Universitato. En 1978 li komencis verki lokajn historiaĵojn, kiuj instigis lin, verki historiajn skizojn. Pro siaj meritoj s-ro *Kalkhof* estis honorigita per stratnomo en la komunumo *Ilbeshausen-Hochwaldhausen*, kie li instruis....

... la supra „priaŭtora informo“ venis per letero datita 17.01.2006, sendita al mia malnova adreso (jam 6 jarojn ne plu valida) kaj mi ricevis ĝin nur post la forpaso de la skribinto. Kvazaŭ profete nun legiĝas la vortoj, ke „...urĝas finpretigi la prilaboron de mia historiaĵo pri Konstantino/Konstanteno la Granda. Certe mi konsentas pri la ŝanĝoj, faritaj de vi retpoŝte. Pri la skribado de la nomo mi konsentas kun vi, kvankam mia pripensado urĝas min al mia propra opinio...“.

Dufoje „urĝas“. Iom pli poste „por ke la afero ne prokrastiĝu, do bonvolu procedi kiel vi planas“. „La apudan tekston pri „-in“ bonvolu preni en vian koron – mi suspektas, ke historiaj aferoj estas ne bone regataj eĉ de eruditaj esperantistoj...“. Jes, mi laŭpete procedis, metis la historiaĵon en du partojn (ĉar 42-paĝa artikolo por 52-paĝa revuo estas tro longa kontribuo) kaj publikigis la „pri-in-an“ opinion legantleterforme.

La funebran sciigon, ke s-ro *Gerhard Kalkhof* mortis la 16-an de februaro 2006, mi ricevis antaŭ ol la supra letero atingis min. La 24-an de januaro nia fidela amiko festis sian 80-jariĝon en malgranda familia rondo – pli granda solenado estis planita post 4 semajnoj...

Sed la morto venis senanonce – tamen amikece. Matene de la 16-a de februaro s-ro *Kalkhof* sentis sin malbonfarta, kaj lia edzino iris al la apudaĉambra telefono por voki la ambulancon. Kiam ŝi revenis, ŝia edzo jam estis pace forpasinta.

ISAE perdas fidelan membron, Scienca Revuo perdas unu el siaj maloftaj aŭtoroj de historiaĵoj. UEA perdas aktivan Delegiton, Esperanto perdas entuziasman disĉiplon de la Internacia Lingvo kaj lia hejmurbo perdas jam per stratnomo honorigitan loĝanton. Kaj la familio perdas sian ŝatatan kaj amatan familiestron.

La estraro de ISAE kaj la redakcio de Scienca Revuo funebras kun la vidvino kaj ties 4 infanoj kaj 2 genepoj. (Prof. d-ro R. Sachs)

## Antimateria koncepto de duonkonduktanto

*Eizo OTSUKA*

### Resumo

La lastatempa laboratoria kreado de antihidrogen-atomo faris dramecan atingon en la antimateria komponado. Ne reala antimaterio, sed tamen ĝia ekvivalento estas jam longe traktita en la fiziko de duonkonduktantoj. Dinamiko, kiu implikas antimateriajn partiklojn, estas tute simile demonstraciata en duonkonduktantoj rilate al elektronoj, truoj, ekscitonoj, donantoj, akceptantoj kaj iliaj kombinoj. La koncepto de antimaterio en duonkonduktantoj ŝajnas bone bazita kaj pli ol sukcesa en la analiza fiziko.

### Enkonduko

La ekzisto de antimaterio estas unue profetita (de *Dirac*) kiel “truo en la vakuo post ellaso de elektrona partiklo“. Tiu truo estis nomata “pozitrono“, kiu estas ŝargita pluse (dume elektrono estas foje nomata “negatrono“, en kontrasto al pozitrono).

La *Coulomb*-asocio de pozitrono kun elektrono produktis la koncepton de pozitronia atomo, aŭ simple pozitronio, kun la simbolo Ps, kiu estas analoga al hidrogen-atomo kun protono anstataŭinta la pozitronon. La lig-energio estas duon-*Rydberg*, aŭ 6,8 eV, pro efiko de reduktita maso. La aktuala formado de pozitronia atomo estas instigita en rara gaso kaj stabile atingita en silika-gelatenajo. Kelkaj fundamentaj kvantumaj energi-niveloj, same kiel iliaj fajnaj strukturoj, estas vere konfirmitaj tra la procedo de pozitronio-formado el metal-surfaco. Sed la dinamiko de la elementa procedo, kiu implicas Ps-atomon (ekz. elektron-kapto aŭ pozitron-disigo de Ps) estas observita neniam tiom longe kiom scias la aŭtoro.

La naturo tamen montras utilan alternativon por la okuloj de la observantoj, provizata de la ŝargstato en duonkonduktanto. "Duonkonduktanto" estis nomita la dua vakuo en la fruaj jaroj de transistoro-elektroniko. La truo en la valent-strio, ekscitita de prismo-refrakta lumo, ludas preskaŭ ekzakte la saman rolon kiel la pozitrono en la vakuo. Ĝia "antimaterio"-akompananto estas la elektrono en la kondukt-strio. Pariĝo de la kondukt-elektrono kun la valent-truo konstituigas ion similan al la materio-antimateria kvazaŭpartiklo, kiun ni nomas "ekscitono". La ekzisto de ekscitono vere estis konfirmita en la malfruaj 1950-aj jaroj. La trovo de ekscitono ja faris stabilan ekpaŝon de la antimateria koncepto en la duonkonduktoro.

### Donantoj kaj akceptantoj – prototipoj de materiaj kaj antimateriaj formoj

Antaŭ ol enirante en detalojn de ekscitonoj kaj rilataj kompleksaĵoj, ni rememorigu al ni la strukturon de pli fundamenta „materio kaj antimaterio“ en duonkonduktantoj. Kiel bone konate, grupo-V (= kvinagrupa)-donanta nepuraĵo konstituigas modelon por hidrogen-atomo en grupo-IV (= kvaragrupa)-duonkonduktoro (ekz. arsena atomo en germania kristalo aŭ fosfora atomo en silicia kristalo), kiu estas tute analoga en la skeleto de la krita-masa alproksimigo al hidrogen-atomo.

Elektrono, kiun ni eventuale nomu "donant-elektrono", iras ĉirkaŭ la donantkerno aŭ la pozitive ŝargita kvinagrupa malpuraĵa jono. Tiu ĉi malpuraĵa jono estas nature multe pli malgranda ol la meza distanco inter la kerno kaj la orbita elektrono. La elementa kvantuma meĥaniko donas diskretajn energi-niveleojn por la donant-elektrono (kiel priskribite ĉie en normaj lernolibroj pri duonkonduktantoj).

Nun envenas la plej stabila modelo por la antihidrogen-atomo. Tio estas "neŭtrala akceptanta malpuraĵo", alivorte, la truo iranta ĉirkaŭ la kerna jono de la akceptanta malpuraĵo (ekz. jonigita galio – Ga – en germania kristalo aŭ jonigita borono en silicia kristalo). Tiuj paroj faras strukturan analogojn al antihidrogen-atomo.

La kondukt-elektrono estas disigita de la neŭtrala akceptanto. Tiu fenomeno estas analoga al la elektron-disigo de la antihidrogen-atomo. Se oni ŝanĝas la signon de ĉiu ŝargo implikita, la disig-procedo fariĝas simila al la pozitrono-disigo de la hidrogen-atomo, aŭ simbole disigo  $e^-$ -H. Estas facile, tamen, gajni esence ekvivalentajn don-

itaĵojn el duonkonduktantaj materioj (2). Poste la ciklotron-resonanco, la unua brila sukceso por silicio (Si) kaj germanio (Ge), fariĝis bone establita por bonkvalitaj duonkonduktantaj materioj.

La liberportanta ciklotron-resonanco en Si aŭ en Ge, precipe por elektrono, faras tre klarajn liniojn en bonkvalitaj nedopitaj ("dopi" = riĉigitaj) kristaloj. Dope de malpuraĵoj, la sorb-linioj fariĝas plivastigitaj. Specifante la nepuraĵon kaj ĝian kvanton, oni povas dedukti la precizan kontribuon de la definitiva speco de la malpurecaĵa atomo, alivorte, la elektron-disigan kversekcon per ekz. As en Ge.

Specife, oni povas skribi:

$$\omega\tau = 2 Br/\Delta B$$

en kiu  $\omega\tau$  estas la ciklotron-frekvenco,  $\tau$  la kolizi-emo (aŭ la inverso de tio kio donas la kolizi-frekvencon), Br la resonanc-kampo,  $\Delta B$  la absorba lini-larĝo.

Skribante la tutan disig-kversekcon  $\sigma$ , oni ricevas la kvalitan rilaton

$$Nv\sigma = 1/\tau$$

kie v estas la elektrona rapideco, dum N estas la koncentrado de malpuraĵo, kiun oni povas decidi el DC (angle *Direct Current* = rekta kurento) mezurado.

Ni nun emfazas gravan kolizi-aranĝon. Norma eksperimento de ciklotron-resonanco estas farata ĉe malalta temperaturo, sub la iluminado de strio-breĉa lumo. La refrakta lumo produktas elektron-truajn parojn, kiuj tuj neŭtraligas ĉiujn malpuraĵojn. La atom-disigoj  $e^-$  -- H kaj  $e^+$  -- H tiam estas simulataj per disigo de elektrone neŭtrala donanta kaj akceptanto, respektive.

La ciklotron-resonanca lini-larĝo aktuale konsistas el kontribuoj ne sole el malpuraĵa disigo, sed ankaŭ el fonona disigo. En preciza eksperimento ĉiuj kontribuoj de malpuraĵoj devas esti zorgoplene subtrahitaj de la observita lini-larĝo.

En tiu ĉi traktado, kie ni interesiĝas sole pri la antimateria koncepto, ni procedu, supozante kiel akceptitan ke la nedeziritaj kontribuoj jam estas eliminataj.

Kiel jam dirite, neŭtrala akceptanto ludas la rolon de anti-hidrogeno. Tio estas falso, kompreneble. La aŭtentika antihidrogeno, tamen, lastatempe produktita ĉe CERN (3), transvivis nur 37 nanosekundojn, dum la neŭtrala akceptanto en duonkonduktanto havas "daŭran" vivon, ebligante diversajn elektronikajn ludojn pri la ele-

menta procedo. Se kiel neŭtrala akceptanto estus prenita antimaterio, tiam la materio devus esti neŭtrala donanto. Tiu ĉi estus "hidrogen-atomo". Donantoj kaj akceptantoj do estu materiaj kaj antimateriaj analogioj, respektive.

Enlaso de materioj kaj antimaterioj en limigita spaco, do, estas tre facila en la duonkonduktanta mondo. En duonkonduktanto, tamen, la kunrespondantaj paroj certe estus komparataj kun protono-antiprotonaj paroj en ŝajno. Sed okazos nenia neniiga procedo komparata al tiu de protono-antiprotono. Tio ja estas la esenca diferenco. Klare oni devas akcepti la aplik-limon de la antimateria koncepto en duonkonduktanto.

En plua rezono, tamen, oni povas trovi kelkajn perspektivojn eĉ en nereala „donanto-akceptanto neniigo“-argumento. Prenu, kiel ekzemplon, AS kaj Ga en Ge. Eligo de neŭtrono el As faras Ge, dum forsorbo de tio de Ga ankaŭ faras Ge. Forsorbo kaj eligo de neŭtrono forstrekas unu la alian. La rezultantoj sekve estas nur du germaniaj atomoj. Ili simple konsidigas nur parton de "vakuo". La malbagatela neniigo de donanto kaj akceptanto estus do akompanita de eligo kaj forsorbo de neŭtrono. Tia tipo de donanto-akceptanto-neniigo, kiu bezonas transmutojn de atomkernoj, ne okazas en ordinara „materio-antimateria“ interludo.

Ĉe enlaso de la antimateria koncepto, oni sekure povas trakti la prototipan elektron-disigon de malpuraĵoj. La unua ekzemplo estis la elektron-disigo de jonigitaj malpuraĵoj. Tiu ĉi estis traktita, simulan la kazon per *Rutherford*-tipa disigo de ŝarĝita kernkorpuskuloj. Sekvante aperis la elektron-disigo de neŭtralaj malpurecaĵoj. Tiam la simulado de neŭtrala donanto al hidrogen-atomo ebligis al ni uzi la rezulton de  $e^- - H$  disig-kalkulo. La temo de elektron-disigo de neŭtralaj akceptantoj ne venis en kalkulo, ĉar homoj pensis, ke la du tipoj de disigo devas esti ju pli aŭ des pli sama, kaj la elektron-disigo de neŭtralaj malpuraĵoj, efektive, ne estos tiom grava en la eksperimento de ciklotron-resonanco, ĉar la eksperimento bezonas fotolumigadon sur la specimeno por produkti liberajn ŝargoportantojn, kiuj eventuale neŭtraligas ĉiujn malpuraĵojn kaj sekve la efektivaj disigoj por liberaj portantoj estas kaŭzataj de neŭtralaj malpuraĵoj kaj fononoj.

Plua grava afero estas la granda diferenco de kversekco inter neŭtrala donanto kaj neŭtrala akceptanto por konduktelektrono. Tial oni devas enlasi la antimaterian koncepton, aŭ  $e^+ - H$  disigan kalkulon

en la transportanalizo de la duonkonduktanto. Laŭ grandeco, la disiga kversekco de elektron-donanta kolizio estas ĉirkaŭ dekoble pli granda ol tiu de elektron-akceptanto-kolizio en Ge (2). En silicio, la diferencfaktoro fariĝas pli ol 40. Kaj en komponaj duonkonduktoroj, ekz. en GaAs, la faktoro superas 100 (4). Tia granda diferenco laŭ disigaj kversekcoj vere trudas nin trakti tre zorge la neŭtralan malpuraĵan problemon.

La malpuraĵo-disiga analizo en duonkonduktanto rilate al la antimateria koncepto etendiĝas preter la antihidrogen-atoma analogio. Plej interesa ekzemplo estas la kazo de zinko-dopita germanio (2). Zinko estas grupo II (= duagrupa) akceptanta malpuraĵo en kristalo de germanio, kiu estas antihelio analoga. Elektron-disigo de neŭtrala zinko-malpuraĵo tiam estas io simila al pozitron-disigo de neŭtrala helia atomo. Feliĉe la kversekco por tiu disigo estas kalkulita (6) kaj komparita kun ciklotronresonancaj donitaĵoj por elektrono en Zn-dopita Ge.

Aktuale kelkaj komplikaj ekzistas en la kazo. Tio estas pro la eksciton-kapto de neŭtrala zinko-malpuraĵo. Ĉar la truo en la ekscitono estas la kerno pli proksima ol la elektrono, la ŝajno de disigcentro fariĝas simila al neŭtrala donanto (t.e. la elektrono iranta ĉirkaŭ Zn). Tia kompleksa centro igas la disig-kversekon tre granda, ĉar ĝi havos konsiderinde grandan formfaktoron.

Nia sperto montras, ke apliko de unuaksa premo al la specimeno eligas la ekscitonon el la centro, tiel ke la antaŭdirita elektron-disigo de neŭtrala zinko, kiu estus similigata al pozitron-disigo de antihelia atomo, estas atendata. La disig-kversekco trovas pluan ordon pli malgrandan ol la  $e^+ - H$ -tipa disigo. Por detaloj, legantoj estas petataj konsulti la literaturaĵojn.

### Komplikado de ekscitono

Enlaso de la koncepto de ekscitono faris la priskribon de optika proprietaĵo tre facila kaj reala. Rigore dirite, du tipoj de priskribo ekzistas por ekscitono. Unu estas la t.n. *Frenkel*-ekscitono (FE) kaj la alia estas la t.n. *Wannier*-ekscitono (WE). La FE donas la impreson de lokita desegno, ekscitita elektrono kombinita kun pozitiva truo kreita en la atomkerno, dum la WE ŝajnas reprezenti pli kuraĝan bildon de la materi-antimateria paro kiel kvazaŭ-partiklo. En kelkaj jo-

naj kristaloj, la ideo de FE ŝajnas multe pli reganta. En tiu ĉi artikolo, la vorto „ekscitono“ signifas la WE, se ne alie specifita.

Ni jam menciis en la dua ĉapitro la implikon de ekscitono por la kazo de zinko-dopita germanio, kie la kapto de ekscitono ŝanĝas la karakteron de la antihelia disigo al tiu de hidrogen-disigo. La interpretado de la elektron-disigo per akcepto de la antimateria koncepto simple sed klare eksplikas la kaŭzon de plivastiĝo de ciklotronresonanca linio kaj mallarĝiĝo post apliko de unuaksa premo. Simila situacio okazas por boro-dopita silicio. La triagrupa akceptanto boro certe kondukas kiel antihidrogenio. Sed kaptinte ekscitonon ĝi iĝas „kvazaŭ-neŭtrala donanto“.

La elektron-donanta disigo produktas grandan kversekcon. Tial la resonanca linilarĝo fariĝas tre granda, kontraŭe al nia antaŭpenso, ke la  $e^+$  -- H-tipa disigo produktos mallarĝan linion. La inklino de linio-larĝiĝo kreskas, kiam oni malaltigas la temperaturon, ĉar la kaptita ekscitono fariĝas pli stabila ĉe malalta temperaturo. Apliko de unuaksa premo estas simpla: liberigi la ekscitonon el la malpuraĵa atomo, kaj sekve la centro fariĝas antihidrogenia kun akra resonanc-linio (2).

Tia linio-larĝiĝo pro la kapto de ekscitono ne okazas ĉe germanio dopita de triagrupaj akceptantoj. La kialo kaŝiĝas en la multe pli malgranda lig-energio ĉe la akceptanto, kompare kun tiu de silicio. Kiel kompleksa tio ŝajnas, simila konduto okazas ankaŭ por germanio, kiam ĝi enhavas duagrupa malpuraĵon, kiel zinko.

La kapto de ekscitono de malpuraĵoj estas tiom ordinara okazaĵo en duonkonduktanto, ke oni fakte forgesas la antimaterian koncepton komplikan, kvankam la elektrono-truo-rekombiniĝo ĉiam okazas laŭ la maniero de elektrono-pozitrono-rekombiniĝo. Ne necese ordinara, tamen, estas la t.n. ligita multekscitona kompleksaĵo (BMEC, angle *Bound Multiexcite Complex*).

Rimarkinde en p-tipa silicio, almenaŭ kelkaj ekscitonoj povas esti kaptitaj de neŭtrala akceptanta centro. Tia kompleksaĵo estis unue konfirmita en la eksperimento de akceptanta centro kaj unue konfirmita en la eksperimento pri fotoluminesko (7).

Tio ja estas rimarkinda kunekzisto de materio kaj antimaterio-tipaj partikloj farantaj strukturon. Ĉe la ekstremeca kunekzisto de elektronoj kaj truoj stariĝas la t.n. elektrono-truo-plasmo kaj same elektrono-truo-guto (EHD, angle *Electron-Hole Drop*).

streĉon, agofunkciadon k.t.p. (9). La elektrono-truo-rekombiniĝo, aŭ la analogio de materio-antimaterio-neniĝo nature limigas la vivodaŭron de la guto en la ordo de kelkaj milisekundoj.

La guto en silicio estas sub pli malfacilaj kondiĉoj por transvivado, esence, pro sia malgranda *Bohr*-radiuso de ekscitono. Kvankam la kondiĉo por transvivo estas pli kritika por guto en silicio ol en germanio, la aktuala ekzisto de densaj kvazaŭaj materi-antimaterioj same kiel la plasmio certe allogas fizikistojn. La diferenco de guto, tamen, ne estas supera al ĉiuj duonkonduktantoj. Nur sub certaj kondiĉoj la elektrono-truo-plasmo kondensiĝas en likvaĵo. Unu kondiĉo estas ke la duonkonduktanto estu nedirekta, kio postulas la asocion de fonono en la rekombiniĝo. Tiu kondiĉo ne havas rilaton al la elektrono-pozitrona plasmio en la vakuo, kiu povus esti grava en la komenca sceno de la universo, eble estu serĉata en la direkta duonkonduktanto, tia kia GaAs aŭ InSb.

### Apliklimo de la antimateria koncepto

La ŝajna beleco de la antimateria koncepto en duonkonduktanto estas nature limigita. Unue el ĉio, inter realaj materioj kaj antimaterioj ekzistas neniu masdiferenco en la paro, dum la elektrono kaj truo en duonkonduktanto ĉiam havas diferencajn masojn. La dispersa rilato inter energio kaj ond-nombro ne reale estas parabola. Specife, la neparaboleco estas multe pli evidenta por la truo ol por elektrono, pro la distordita naturo de la valent-strioj. Alivorte, la ond-funkcioj por elektrono kaj truo havas esence diferencajn formojn. La malsimileco inter la donanta kaj la akceptanta jonoj plue estas pli rimarkinda ol tiu inter protono kaj antiprotono.

Tamen, oni miras pri la akordo inter la teoria pozitron-hidrogenia atom-disigo kaj la eksperimenta “elektron-neŭtrala akceptanto“-disigo. Oni povas konsideri, ke la taŭgeco de la koncepto estas bonorda. Eĉ malsimileco inter la donanta kaj la akceptanta jonoj plue estas pli rimarkinda ol tiu inter protono kaj antiprotono. Tamen, oni miras pri la akordo inter la teoria “pozitron-hidrogenia atomo“-disigo kaj la eksperimenta „elektron-neŭtrala akceptanto“-disigo.

Oni povas konsideri, ke la taŭgeco de la koncepto estas bonorda. Eĉ la pli grandan diferencon inter elektrono-donanto- kaj elektrono-akceptanto-disigo en silicio ol en germanio oni povas kompreni per larĝigita masdiferenco inter elektrono kaj truo, sen ŝanĝado de esenca kon-

cepto. Sama estas la kazo por III–V-kombino, kiel ekzemple por GaAs.

Marĝena kaj eble dubinda apliko de la antimateria koncepto sekvas plue: nome, se duagrupa elemento en kvargrupa duonkonduktanto kondukas kiel antihelio (kiel zinko en germania kristalo), kia estus tiu konduto de unuagrupa elemento? La preskaŭ nekredbla sukceso de la antihidrogena koncepto de triagrupa malpuraĵo aŭ antihelia koncepto de certa duagrupa malpuraĵo vere allogas nin plue etendi la antimaterian koncepton. Tiom longe kiom la malpuraĵo estas enlasita anstataŭe en la kristala materio, la provo vere havas pruvojn. La aktuala situacio, tamen, estas nek simpla nek reala.

Preĝu ekz. litian atomon en silicia kristalo. La litia atomo estos metita en la kristalo kiel “intersticia” malpuraĵo kaj ĝi kondukas kiel simpla donanto, la plej ekstera elektrono, aŭ la valent-elektrono por la atomo, fariĝante normala donant-elektrono kun malprofunda energinivelo. Litia atomo en germania kristalo, interalie, estas stabila nur ĉe malalta temperaturo. Likve-nitrogene malvarmigita Li-dopita Ge-kristalo estas uzata kiel efika solidstata detektilo (SSD, angle *Solid State Detector*) de nukleaj fizikistoj. Ĝiaj detalaj fizikaj proprajtoj, tamen, estas neniam studintaj de duonkonduktanto-fizikistoj.

Alia ekzemplo de intereso estas Cu-dopita Ge. Tiu materio certe estas p-tipa, kaj la elektron-disiga kversekco por ĉiu malpuraĵo estas pli malgranda ol tiu por triagrupaj elementoj. La dopitan kristalon oni uzas kiel detektilon por infraruĝa radio. Ekzistas tamen raportoj pri-skribantaj kupron kiel donanton sidantan en la intersticia loko. Tamen la plejparto de la donantoj kondukas kiel kvazaŭ-antilitiaj akceptantoj, ĉar tri energi-niveloj de truoj estas konfirmitaj. Malfeliĉe, neniu teoria kalkulo por pozitron-litio-disigo troviĝas laŭ nia scio.

Nuntempe, muono estas enlasata en duonkonduktantoj, kie ĝi kunmetas muonion aŭ muonon plus altirita elektrono. La distriĝtempo de muonio estas mezurita por n- kaj p-tipaj silicioj. La rezulto estas, ke la distriĝtempo de muonio estas pli malgranda por n-tipa ol por p-tipa materio, je du ordoj de grandeco (10). Interpreto de la diferenco estas facila rilate al la ĝisnuna argumento klariganta la diferencon inter elektron-donantaj kaj elektron-akceptantaj disigoj. Sendube la distriĝo de muonio okazos ĉe kolizio de liberaj portantoj en n-tipa materio de elektronoj, dume en p-tipa materio de truoj. La kolizio de elektrono kaj muonio estas sama kiel  $e^- - H$  disigo, dum tiu de truo al muonio estas kiel  $e^+ - H$  disigo. La masdiferenco inter protono kaj

muono estas negrava, ĉar ambaŭ – protono kaj muono – havas masojn multe pli grandajn ol tiuj de elektrono aŭ pozitrono. Tial muonio en silicio bombardita de elektronoj havas pli grandan kolizio-kversekon, aŭ pli mallongan vivodaŭron, aŭ pli mallongan distriĝtempo (11). Oni povas vidi ĉi tie la aplikeblon de la antimateria koncepto ankaŭ por ekzotikaj atomoj en la duonkonduktantoj.

## Referencoj

- (1) C. Schwartz: *Phys. Rev.* 124 (1961) 1468.
- (2) Por scioj, oni konsultu E. Otsuka: *Jpn. J. Appl. Phys.* 25 (1986) 303.
- (3) G. Baur k.a.: *Phys. Lett.* B 368 (1996) 231.
- (4) H. Kobori, T. Ohyama & E. Otsuka: *Solid State Commun.* 63 (1987) 123.
- (5) N.R. Kestner, J.J. Morrel, M.H. Cohen & A.R. Stuart: *Phys. Rev.* 31 (1965) A 56.
- (6) R. Sauer: *Phys. Rev.* 140 (1973) 376.
- (7) T. Tomaru, T. Ohyama & E. Otsuka: *Mod. Phys. Lett.* 7 (1993) 501.
- (8) M.L.W. Thewalt: *Can. J. Phys.* 55 (1977) 1463.
- (9) J.C. Hensel, T.G. Phillips & G.A. Thomas: *Solid State Physics* 32 (H. Ehrenreich, F. Seitz & D. Turnbull eds.): *Academic Press, New York* (1987) 87.
- (10) A. Weidinger, G. Paltzer, H. Graf, E. Reznagel & Th. Wiehert: *Phys. Rev.* B 39 (1989) 4680.

## Adreso de la aŭtoro

Prof. Eizo OTSUKA  
Ueno Nishi 3-5-3, Toyonaka-ŝi  
Osaka-fu 560-0011  
JAPANIO

## Priaŭtora informo

La aŭtoro estas emerita profesoro kaj docento de *Graduate School of Science, Osaka University, Machikane yamacho 1-1, Toyonaka, Japanio 560-0043*