

ITIM, în avangarda tehnologiilor cuantice



Echipa de Inginerie Cuantică a ITIM și partenerii privați Transilvania Quantum și Quarks Interactive.

Cercetarea în domeniul informației cuantice a fost demarată în Institutul pentru Tehnologii Izotopice și Moleculare (ITIM) din Cluj-Napoca încă din 2017, de un mic grup de cercetători, cu experiență vastă în domenii complementare informației cuantice, ca spintronica, teoria stării condensate, transport cuantic și chimie cuantică. Doi ani mai târziu, s-au alăturat grupului specialiști în optică, laseri și electroniști, iar, cu un an în urmă, a fost formată Echipa de Inginerie Cuantică, prima de acest fel în România. Decizia grupului de-a intra într-un nou domeniu de cercetare, abandonând direcții de cercetare pe care membrii acestuia le urmaseră cu succes până atunci, a fost inspirată de dezvoltarea spectaculoasă din ultimii câțiva ani a domeniului.

Dr. Liviu-Petru Erbo – ITIM Cluj-Napoca

Domeniul tehnologiilor cuantice trece printr-un un moment foarte similar cu cel al dezvoltării primelor aparate de zbor. Ca și atunci, în urmă cu ceva mai mult de un secol, marile puteri științifice și tehnologice se luptă pentru supremație într-un domeniu emergent. Doar că, de data aceasta este vorba de supremație cuantică și despre internetul cuantic.

Progresul accelerat al domeniului informației cuantice atât la nivel teoretic, cât și experimental, a fost consecința directă a avansului micro- și nanotehnologiilor, a nanoelectronicii și nanofotonicii și a multor alte domenii conexe care au creat premisele pentru detecția și controlul stărilor cuantice la

nivel de atom individual. Tehnicile noi de măsurare și de manipulare coerentă a sistemelor cuantice, precum și progresul înregistrat în înțelegerea și minimizarea decoerenței cuantice fac posibile tehnologiile cuantice de astăzi. Programele de cercetare-dezvoltare demarate de marii actori naționali disting patru clase de tehnologii cuantice: calcul cuantic, simulări cuantice, comunicații cuantice și metrologie și senzori cuantici.

Apariția acestor noi tehnologii marchează sfârșitul erei mezoscopice în domeniul procesării informației, era în care, miniaturizarea continuă și îmbunătățirea dispozitivelor componente ale procesoarelor și memoriilor clasice a condus la explozia științifică și tehnologică din industria IT. Practic, la fiecare

doi ani, respectând întocmai faimoasa lege a lui Moore, capacitatea de procesare pe centimetru pătrat de procesor s-a dublat. Dar, concomitent cu creșterea rolului dispozitivelor electronice în viața de zi cu zi, a apărut un set nou de provocări, specific acestei noi ere a informației, la care societatea trebuie să răspundă. Probabil cea mai importantă întrebare, legată de această eră digitală este cum poate fi păstrată integritatea sistemelor informatice, în fața exploziei amenințărilor cibernetice. O altă întrebare importantă este cum se poate reduce amprenta energetică a sistemelor de calcul actuale. Deja, centrele de date, rețelele informatice și consumatorii individuali consumă aproape 10% din energia produsă la nivel mondial și sunt șanse mari ca, până în 2030, aceasta cifră să se dubleze. Și o a treia întrebare, cu importanță pentru dezvoltarea științei și tehnologiei pe termen lung, este cum s-ar putea trece de limitele fizice ale modelului actual de procesare a informației, pentru a descătușa potențialul tehnologic al domeniului cuantic.

Aceste întrebări au stat la originea formării Echipei de Inginerie Cuantică din ITIM și a acțiunilor întreprinse de către ITIM pentru dezvoltarea acestui domeniu în România. O a patra întrebare, specifică țării noastre, a fost care este cea mai bună strategie pentru a dezvolta domeniul tehnologiilor cuantice în România? Care este viziunea pentru România?

Tehnologiile cuantice devin tehnologii de suveranitate

Pentru a putea da un răspuns acestei întrebări, este important de înțeles contextul internațional și poziția României în acest context. În primul rând, ce motivează factorul politic să susțină dezvoltarea tehnologiilor cuantice, iar în al doilea rând, care sunt industriile care au nevoie de aceste tehnologii noi și care este piața actuală. Fiecare stat dezvoltat a lansat deja programe pentru a crea și susține o industrie cuantică.

Investițiile în aceste programe au început încă din anii 2000, dar, în ultimii trei ani, au fost demarate programe totalizând miliarde de dolari. SUA a semnat în 2018 *National Quantum Initiative* (peste 1 miliard de dolari) iar Uniunea Europeană a lansat *Quantum Flagship* (1 miliard de euro) și *EuroQCI* (2 miliarde de euro), ultimul cu scopul de-a construi o rețea de comunicații cuantice pan-europeană, care să devină, mai târziu, internetul cuantic. Aproape toate țările UE au programe de tehnologii cuantice, cu investiții de la zeci de milioane de euro (Ungaria) până la 1,8 și 2 miliarde de euro (Franța și Germania, respectiv), investiții începând cu 2021. Însă nu doar țările NATO investesc masiv în acest domeniu. Programele Rusiei și Indiei prevăd investiții în cercetare de peste 1 miliard de dolari, fiecare. Probabil cel mai puternic program de cercetare-dezvoltare în domeniu este cel al Chinei, care investește masiv, atât în calcul cuantic, cât și în comunicații cuantice, investițiile fiind estimate la peste 10 miliarde de dolari.

Dar, chiar și fără aceste investiții publice, tehnologiile cuantice sunt deja pe piață și există deja un ecosistem cuantic, care este principala premisă pentru dezvoltarea domeniului. Piața de tehnologii cuantice este dominată de companiile din America de Nord (SUA și Canada), fiind urmate de companiile din Asia de Sud-Est și de cele britanice și europene. Aceste companii produc procesoare cuantice, software cuantic, echipamente pentru comunicații cuantice, senzori cuantici și oferă servicii cum ar fi accesul la calculatoare și simulatoare cuantice, modelarea piețelor financiare, inteligența artificială bazată pe algoritmi cuantici, securitate cibernetică cuantică, modelare moleculară pentru medicamente, instalare de rețele cuantice, securizarea cuantică a rețelelor de telefonie mobilă, etc.

Printre companiile care produc procesoare cuantice se află startup-ri ca Rigetti, IonQ, D-Wave, PsiQuantum, dar și giganti IT ca Google, IBM, Intel, Microsoft sau Amazon. Clienții

acestor companii sunt atât companii software, cât și companii din sectoare ca aviația, cum sunt Lockheed și Boeing, producători de automobile, ca Volkswagen, companii din industria chimică și farmaceutică ca Pfizer, Novartis, Biogen, sau din sectorul bancar, cum este Goldman-Sachs.

Începând cu 2003, când DARPA a instalat prima rețea de comunicații cuantice, sunt dezvoltate astfel de rețele în țările avansate tehnologice, cum sunt SUA, Marea Britanie, Germania, Austria, Japonia, în scopul testării echipamentelor și sistemelor de comunicații cuantice. Aceste echipamente și sisteme sunt dezvoltate de universități și institute de cercetare, startup-uri ca KetsQuantum, sau mari companii ca Toshiba, Huawei sau IDQuantique și sunt instalate, de obicei, cu ajutorul marilor operatori telecom. De exemplu, Coreea de Sud a reușit să-și securizeze întreaga rețea 5G folosind sisteme de distribuție de chei cuantice. China este, însă, cel mai mare investitor în domeniu și urmărește să devină impenetrabilă informatic în următorii cinci-zece ani. Rețeaua cuantică chineză totalizează 4600 km, conectează marile orașe între Beijing și Shanghai, are sute de noduri intra-city, două conexiuni prin satelit, iar investiția este estimată la un miliard de dolari.

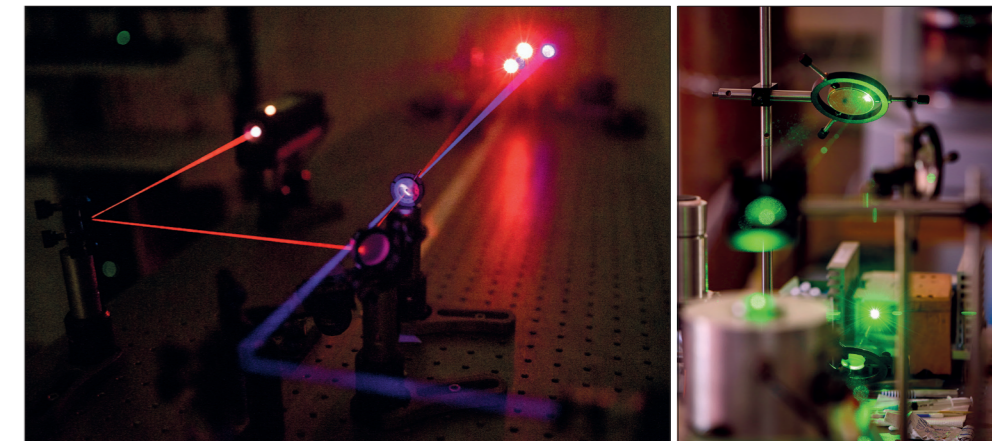
Însă, toate acestea, nu explică de ce România nu ar aștepta până când tehnologiile cuantice sunt standardizate și ferm stabilite pe piață, pentru a le importa mai târziu. Răspunsul este că **tehnologiile cuantice sunt tehnologii de suveranitate, iar motivația principală pentru investițiile masive care se fac în prezent, la nivel de stat, este strategică.** Procesoarele cuantice sunt speciale pentru că pot rezolva anumite probleme de complexitate exponențială, care nu sunt accesibile calculatoarelor clasice. Printre aceste probleme este factorizarea numerelor întregi, care stă la baza protocoalelor criptografice, utilizate pe scara largă în rețelele informatice. Este de așteptat

ca în următorii 5-20 de ani să existe procesoare cuantice suficient de puternice pentru a decodifica majoritatea comunicațiilor și este de așteptat ca prima țară care reușește să dezvolte astfel de procesoare să aibă un avantaj strategic major. Ca răspuns la această amenințare emergentă a calculatoarelor cuantice și la explozia criminalității cibernetice, care produce pagube anuale de aproape un trilion de dolari, se investește masiv în comunicații cuantice. Ca și calculul cuantic, și acesta e un domeniu de suveranitate, și există o competiție acerbă între marile puteri ale lumii pentru dezvoltarea de rețele securizate cuantic. În condițiile unei economii digitale, vulnerabilitatea sistemului financiar, rețelelor de distribuție de utilități, sistemelor de management al traficului, comunicațiilor guvernamentale și militare, în fața atacurilor cibernetice pot fi fatale, mai ales în cazul unor conflicte cu alte state.

Cu alte cuvinte, România trebuie să investească masiv pentru a asimila și a implementa tehnologii cuantice, în special cele de comunicații cuantice, pentru a putea contracara amenințările la adresa intereselor sale strategice. Pentru aceasta, trebuie implementată o viziune a ceea ce ar trebui să fie cercetarea și dezvoltarea în domeniul tehnologiilor cuantice.

La frontiera cercetării în domeniul tehnologiilor cuantice

Chiar dacă, atunci când a fost demarat proiectul ITIM de tehnologii cuantice, nu era foarte clar ce anume și cum ar trebui făcut, pe parcurs s-a conturat o viziune proprie a institutului. În această viziune, domeniile prioritare sunt comunicațiile cuantice și calculul cuantic. Pornind de la această idee, s-au conturat trei direcții de cercetare-dezvoltare majore: calcul cuantic cu qubiti supracon-



Laboratorul de optică cuantică al ITIM, un prim pas pentru construcția unei capabilități naționale în domeniul comunicațiilor cuantice.

ductori, comunicații cuantice și software cuantic. Pentru a dezvolta aceste direcții de cercetare, ITIM a format atât parteneriate cu instituții publice, cât și parteneriate public-private. Printre rezultatele acestor acțiuni se numără un proiect național realizat în consorțiu și primul proiect internațional în domeniul tehnologiilor cuantice câștigat de o instituție din România.

Comunicațiile cuantice sunt cel mai nou domeniu de interes în ITIM. Folosind resurse proprii, ITIM a dezvoltat propriul său laborator de optică cuantică, cu scopul de-a pregăti terenul pentru fabricarea de dispozitive și echipamente pentru comunicații cuantice. Dispozitivele țintă sunt generatoare de numere aleatoare și sisteme de distribuție de chei criptografice cuantice. Primele generează numere aleatoare utilizând o proprietate omniprezentă în lumea cuantica: superpoziția. Celelalte distribuie chei cuantice generate aleator, care nu pot fi interceptate, folosind fotoni entanglați. Pentru a construi aceste dispozitive, ITIM a intrat în parteneriat cu Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca (UTCN), care are o experiență vastă în domeniul electronicii și al rețelelor de comunicații. Viziunea comună este de-a construi împreună dispozitive și rețele cuantice test, care vor sta la baza rețelelor cuantice naționale, care vor fi construite în cadrul EuroQCI, la care România este partener.

Calculul cuantic este prima temă largă de cercetare abordată în ITIM. Echipa ITIM este interesată, în primul rând, de hardware-ul specific procesoarelor cuantice. În informația clasică, se folosesc biți, care pot fi 0 și 1, ei reprezentând două stări distincte ale unui dispozitiv, cum este, de exemplu tranzistorul, pentru care stările închis/deschis înseamnă 0 și 1. Dispozitivele cuantice pot și ele avea stările 0 și 1, dar sunt posibile și stări de superpoziție, în care 0 și 1 intră cu anumite ponderi. Mai mult, aceste stări pot fi entanglate, sau inseparabile, două astfel de dispozitive putând fi simultan într-o stare 00 suprapusă unei stări 11, care este inaccesibilă în sisteme clasice. Aceste unități de informație cuantică se numesc qubiți și sunt implementați în mai multe tipuri de sisteme, cum sunt circuite supraconductoare, capcane ionice, atomi reci în rețele optice, etc. Interesul echipei ITIM este legat de construcția de astfel de qubiți, fizica materialelor care intră în nanodispozitivele componente ale acestora și configurațiile pentru care acești qubiți sunt robusți la zgomot și pot fi manipulați mai ușor.

Primele proiecte naționale și internaționale

Cercetarea din acest domeniu a fost făcută în cadrul a două proiecte. Primul proiect a fost un proiect complex realizat în consorțiu, primul de acest fel realizat în România. Participanții au fost IFIN-HH, INF-LPR, IMT, UPB și ITIM. Obiectivul ambițios al proiectului era dezvoltarea tehnologiilor cuantice în România. Dincolo de cercetare, ale cărei rezultate au fost mult peste ceea ce prevăzuseră partenerii, proiectul a fost atât ocazia de-a cristaliza prima colaborare din țară, cât și de-a contura o viziune comună pentru viitorul tehnologiilor cuantice în România.

În cadrul acestui prim proiect, echipa ITIM a investigat sisteme de qubiți topologici. Deși aceste sisteme sunt promițătoare și mari companii precum Microsoft investesc în dezvoltarea lor, datorită rezilienței lor la zgomot, implementarea lor în procesoare cuantice este complicată de fizica complexă care împiedică detecția și manipularea stărilor acestora. Activitatea ITIM în cadrul proiectului s-a concretizat prin propunerea de metode noi de detecție a stărilor qubiților topologici.

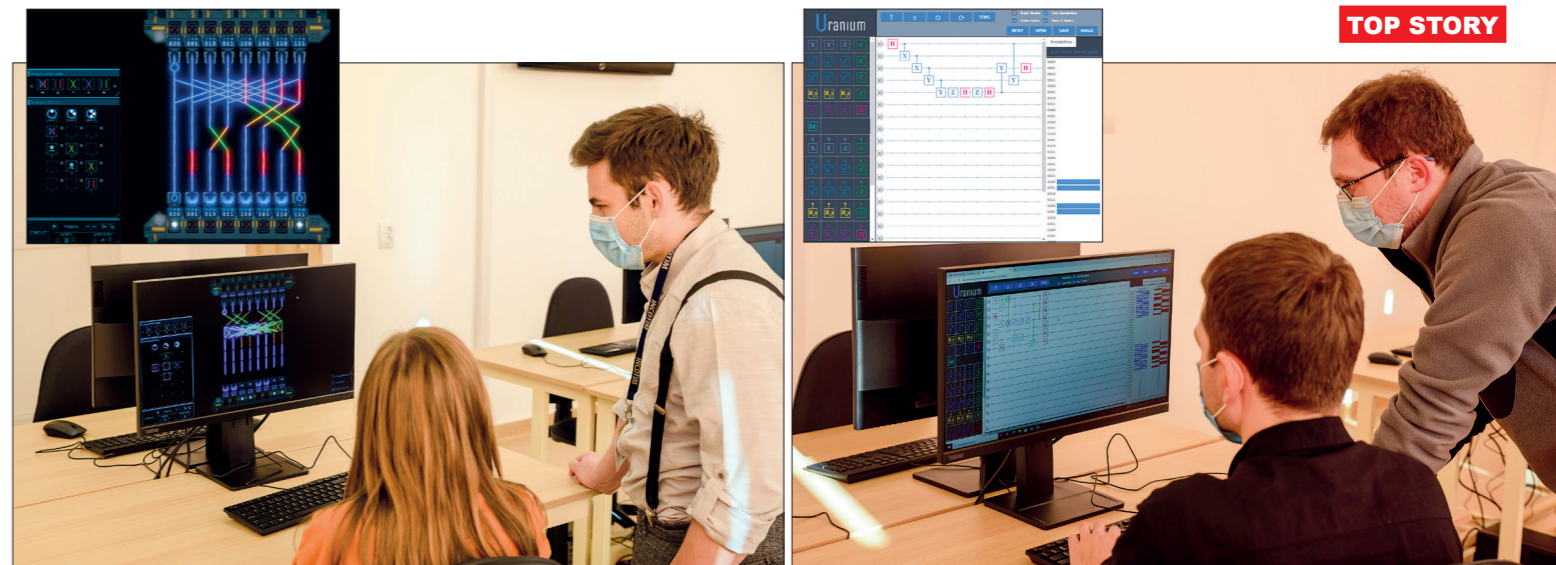
La puțin timp după demararea acestui prim proiect, ITIM a început colaborarea cu două centre de cercetare, Institutul de Tehnologie din Karlsruhe (KIT) și Universitatea Sherbrooke din Canada. Scopul colaborării

este îmbunătățirea funcționării qubiților realizați în circuite supraconductoare, fabricați la KIT. Qubiți din această clasă sunt folosiți în procesoare cuantice cum sunt cele fabricate de Google și IBM. La început, echipa ITIM, care avea o experiență de câteva decenii în domeniul simulării *ab initio* a proprietății materialelor, a propus investigarea aluminiului granular folosit ca material pentru superinductanțele din componența circuitelor qubiților. Această direcție de cercetare este astăzi finanțată prin primul proiect internațional în domeniul tehnologiilor cuantice, la care participă o instituție din România. Acest proiect, realizat în colaborare cu parteneri din Germania (KIT), Franța și Israel, este un proiect de tip QUANTERA, parte din Flagship-ul Cuantic al Comisiei Europene. De asemenea, echipa ITIM a început să construiască instrumente teoretice pentru modelarea experimentelor cuantice realizate pe qubiți supraconductori.

Dar, cercetarea fundamentală nu este singura activitate a echipei de inginerie cuantică. Începând cu 2019, echipa de inginerie cuantică a intrat în parteneriat cu Transilvania Quantum, un grup privat, care dezvoltă o platformă software Uranium pentru calcul cuantic. Platforma Uranium, găzduită de serverele ITIM, este în stadiul final de dezvoltare. Ea permite dezvoltarea de algoritmi cuantici și testarea lor pe un simulator cuantic, care are capacitatea mai mare



Data Center-ul ITIM, este gazda platformei Uranium și a unui simulator cuantic cu 33 qubiți. În imagine, membrii echipei ITIM și partenerii Quarks Interactive și Transilvania Quantum.



Quantum Odyssey (dreapta) și Platforma de calcul cuantic Uranium, ca instrumente de învățare a informației cuantice la nivel de curs universitar.

decât a altor simulatoare comerciale oferite de companiile din Europa și America.

Un alt parteneriat public-privat este cel cu Quarks Interactive, un start-up românesc care dezvoltă Quantum Odyssey, un software utilizat pentru dezvoltarea de software cuantic. ITIM folosește acest software ca instrument didactic pentru cursurile de informație cuantică.

Educație și outreach

O parte a viziunii ITIM este educarea forței de muncă în domeniul tehnologiilor cuantice. ITIM a format un parteneriat cu Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca (UTCN) pentru a dezvolta curricula și cursuri în acest domeniu. Un prim curs a demarat în primul semestru al anului universitar 2021-2022 la Facultatea de Automatică și Calculatoare a UTCN, iar al doilea va fi oferit în al doilea semestru al 2021-2022 la studenții masteranzi de la Facultatea de Electronică și Telecomunicații. Cursurile sunt adaptate nevoilor studenților de la aceste două secții ale UTCN, adică cursul de la Automatică și Calculatoare este focalizat pe calcul cuantic și algoritmi cuantici, iar cel de la Comunicații este focalizat pe comunicații cuantice. Accesul la înțelegerea fundamentelor informației cuantice este oferit studenților folosind instrumente de software cuantic, cum sunt platforma Uranium și Quantum Odyssey, ambele dezvoltate de partenerii privați ai ITIM. Adicional, accesul studenților la noul înființat laborator de optică cuantică le permite acestora să vadă conceptele de informație cuantică transpuse în laborator.

De-a lungul ultimilor trei ani, ITIM a întreprins numeroase acțiuni cum ar fi apariții la

televiziune și radio, lecții ținute la școlile de vară, prezentări publice, pentru popularizarea tehnologiilor cuantice și sensibilizarea publicului și a factorilor de decizie în ceea ce privește importanța acestui domeniu pentru România. Dintre aceste manifestări, menționăm World Quantum Day, o manifestare internațională, inițiată de mai multe instituții din lume, printre care și ITIM, care e membru în comitetul de organizare, din partea României. Începând cu 2021, această manifestare are loc în fiecare an în 14 aprilie. Anul acesta, manifestările au fost organizate de ITIM, împreună cu partenerii săi, Transilvania Quantum, Quarks Interactive și Universitatea Transilvania din Brașov.

De asemenea, este de menționat aici că ITIM participă activ la eforturile Flagship-ului Cuantic al Comisiei Europene, având un membru în Quantum Community Network, o rețea europeană academică, al cărei scop este interfațarea cu sectoarele public și privat pentru a facilita accesul acestora la proiectele din cadrul Flagship-ului. Împreună cu ceilalți colaboratori din Europa de Est, reprezentantul României a reușit să convingă reprezentanții Comisiei Europene să includă în cerințele Flagship-ului condiții care să faciliteze participarea țărilor din Europa de Est la proiectele din cadrul acestuia.

Perspective de viitor

În ciuda activității susținute a ITIM și a membrilor comunității cuantice din România, crearea unui ecosistem cuantic național, care să permită României accesul la proiectele UE, cum sunt Flagship-ul Cuantic și EuroQCI, sunt îndepărtate. Investițiile naționale în domenii emergente sunt relativ

mici comparativ cu ceea ce este necesar pentru dezvoltarea de tehnologii cuantice. Un laborator de supraconductivitate, dotat pentru a produce procesoare cuantice, cum este cel de la Aalto, din Finlanda, necesită echipamente cu valoarea aproximativă de 30 de milioane de dolari. Un cost comparabil ar fi implicat de dezvoltarea unui centru de comunicații cuantice capabil să construiască dispozitive de comunicații cuantice *state of the art*.

Dar, **pentru a aduce cu adevărat tehnologiile cuantice în România, expertiza în domeniu trebuie concentrată în centre/institute cuantice, care ar trebui să fie entități de sine stătătoare**, după modelul celor 5 institute cuantice înființate în Statele Unite, în jurul marilor laboratoare naționale. Acești poli de competență pot multiplica, cu impact clar cuantificabil la nivel național, ceea ce face ITIM în acest moment: cercetare-dezvoltare cu parteneri naționali și internaționali, parteneriate public-private, educația forței de muncă și dezvoltarea unui ecosistem cuantic.

ITIM a pornit pe drumul greu al construcției unui astfel de centru de tehnologii cuantice. Acesta s-ar constitui într-o capacitate națională menită să accelereze asimilarea și adoptarea tehnologiilor cuantice critice pentru securitatea națională: comunicațiile cuantice și calculul cuantic. În același timp ar fi un integrator de tehnologie, el permițând entităților de cercetare românești să integreze materiale și componente produse de acestea în dispozitive cuantice dezvoltate în ITIM. Nu în ultimul rând, acest centru poate juca un rol central în construcția primelor rețele cuantice românești cu dispozitive produse integral în România. ■