

Природне науке • *Natural sciences* • *Естественные науки*

Фулерени: наноматеријали будућности 20 година након открића

Прогонством из Раја, буђењем свесног, први људи су се суочили са ђудима природе. Опстанак људи на Земљи зависи је управо од њиховог новонасталог односа са природом; како јој се прилагодити, разумети је и како је напослетку искористити за потребе свесног. Развојем људске цивилизације померале су се и границе могућег; оно што је некада било немогуће и плод маште (подморница у делу „20.000 Миља под морем“, Жила Верна), то је у данашње време ако немогуће, онда сигурно извесно. У ери високих технологија у свему се много напредовало, али су нека открића и решења остављена по страни, зато што нису постојали материјали за њихову реализацију. Тако је „прошао“ и биочип, изванредно достигнуће, које нажалост није могло да заживи осамдесетих година, пошто није постојао материјал који би га на прави начин пропраћивао. Али, како то обично бива, људска машта, способност, и на крају природа увек нас на неки начин демантују. Тим научника на челу са Кротом, Смолијем и Крлом 1985. године открива потпуно нову форму угљеника, за коју ови научници добијају Нобелову награду за хемију 1996. године. Убрзо по открићу, синтети-

зована је читава фамилија затворених угљеничних кластера, са симетријом која им омогућава потпуно нова физичка и хемијска својства, што отвара врата потпуно новим технологијама.

Новооткривени молекул састоји се од 60 атома угљеника организованих по површини лопте, распоређених у 12 пентагона и 20 хексагона, баш као фудбалска лопта („фудбален“). Оваква организација и симетријска уређеност овог молекула даје особину димензионалности „од“ (кристализација око тачке), па центар инверзије постаје главни симетријски елемент уређења структуре.

Изглед молекула подсетио је ове научнике на дело чувеног архитекте Бакминстера Фулера, по чијем је пројекту 1976. године у Монреалу изграђен амерички изложбени павиљон. У његову част овај молекул (C_{60}) добио је име бакминстерфулерен (БАКИ). То је у ствари најизразитији представник фулерена и, поред графита и дијаманта, трећа, кристална форма угљеника. Док прве две форме угљеника (дијамант и графит) кристалишу у оквиру 32 кристалографске групе, дотле овај молекул гради форму која је са симетријске тачке гледишта на вишем нивоу уређености. Да

Слика 2005

би се створила таква структура у систему тачкасте симетрије, којој иначе припадају и 32 кристалографске групе, морала се формирати оса петог реда, које у класичној кристалографији (транслационој симетрији) нема, а овај молекул је поседује. Поред оса петог реда, које се односе на пентагоне, он има и осе трећег реда (хексагони), и осе другог реда (дупле везе), као и инверзну тачку симетрије. До овог открића сматрало се да оса петог реда (у оквиру кристалографије) није могућа у природи. Али, како то бива, наука и пре свега природа показале су да није тако.

И док је наука славила производњу првих количина фулерена, а нарочито молекула C_{60} , показало се да су и сада, по ко зна који пут, људи само препознали оно што је у природи одвајкада и било. Наиме, новопронађена форма угљеника, за коју се мислило да је произведена само у лабораторији, пронађена је накнадно у неким стенама у Русији, као и у Колораду, САД. Али оно што је најинтересантније јесте чињеница да нам је ова форма угљеника све време била пред очима, јер се фулерени налазе и у пламену свеће док гори (открили су то научници са МИТ универзитета у Бостону). Тако су се по ко зна који пут људи уверили да ништа ново не проналазе, већ само читају невидљиве записе које је природа одавно исписала за нас. А ти записи не налазе се само око нас, већ су и дубоко у нама на несвесном нивоу (у биомолекуларним структурама које изграђују нашу свест), у прилог чему иде и чињеница да је управо овакав молекул („фудбален“) прижељкивао и јапански истраживач *Osawa* још 1971. године. Он је сматрао да би управо таква једна структура могла бити основа за суперароматични молекул (с тим што се открићем „фудбалена“ сазнало да он заправо уопште није ароматичан, не спада у хемију арома-

тичних угљеникових једињења). У чему је дакле тајна? Тајна је у могућем приступу овом молекулу и читавој фамилији угљеничних кластера, јер када нека структура једном доведе у питање научни доказ (оса петог реда не може да постоји у оквиру 32 кристалографске групе?!), онда је за проучавање таквих структура потребан потпуно нови научни приступ.

Имајући у виду структуру фулерена, као и чињеницу да су они изнутра празни, а да се у молекулу C_{60} , у условима собне температуре, налази вакуум (још нешто што је било „немогуће“), развила се потпуно нова подобласт у оквиру хемије, односно *суџрахемије*, такозвана *сферична хемија*. У оквиру ове нове хемије, а уз помоћ различитих хемијских модификација молекула C_{60} , дошло се до материјала који су у односу на класичне тродимензионалне материјале (3D) попримили карактеристике од (фулерени), односно 1D (*наношубе* – атоми угљеника су распоређени по површини цилиндра). С друге стране, у својој основној форми молекул C_{60} је (са симетријске тачке гледишта) идентичан са *клајрином*, протеином који улази у састав ћелијских везикула одговорних за транспорт материјала и отпуштање неуротрансмитера на синапсама. Мада то нису знали, два истраживача, независно један од другог, један у Америци (Хамероф) и један у Србији (Коруга), маштали су како од угљеника да направе „биочип“ по моделу микротубула и клатрина. Осим тога, може се повући паралела између једног ланца ДНК и нанотуба, тако да долазимо до новог појма *кодојених материјала*.

Под кодојеним наноматеријалима подразумевамо посебну врсту материјала који поред својих малих димензија, на нанометарској скали, имају и особину да кодирају информациони садржај за

оперативно функционисање дела подсистема или целог система, или да служи за структуралну изградњу *микро* и *макро* система. Један од најбоље изучених кодогенних наноматеријала који кодира структуралну изградњу система је днк. Међутим, после секвенционирања хуманог генома показало се да је само око 8% днк одговорно за производњу протеина (основних градивних елемената биолошких система), док преостали део служи за кодирање функционисања комплексног људског организма. Сматра се да овај први информациони систем днк припада *класичном* информационом каналу, док овај други, према проф. Коруги, припада *квантном* комуникационом каналу. Овакав закључак следи из чињенице да је код нижих биолошких врста овај однос обрнуто пропорционалан њиховој сложености (код парамецијума тај однос је 90% према 10%). Други значајни биолошки кодогени молекули, који учествују у функционисању ћелије (цитоскелетон) и организма (акупунктурни систем) јесу микротубуле. Сви остали биомолекули су такође нанокодогене структуре, али локалног карактера (изузетак може да буде вода, али за њу још нема чврстих научних доказа; или, можда, ми немамо довољног знања да је објаснимо).

На основу изложеног маштовити читалац може доћи до помисли да је на неки начин могуће направити машину која мисли. Ту могућност оставићемо неком новом Жилу Верну, или Артуру Кларку.

Научници су даљим развојем ове области различитим модификацијама фулерена, развијајући науку о наноматеријалима, отворили нове могућности примене у готово свим областима науке, а тиме и простор за рађање нових технологија. Будући да је пречник молекула C_{60} само један нанометар (милијардити део од метра)¹⁾, то се и нове технологије зову *нанотехнологије*.

Поставља се питање шта је био онај основни импулс тако нагло ширењу нанотехнологија на готово све сегменте савремене науке? Наноматеријали су довели до развоја нанотехнологија, које су показале одређене предности у односу на постојеће класичне технологије. То је дало нови подстрек државном и приватном финансирању пројеката у разним областима, нарочито у високоразвијеним земљама, као што су САД, Јапан и Европска Унија. Ово је довело и до преоријентације великог дела истраживача на нанотехнологије, што је посебно изражено у области науке о материјалима и њиховим применама. Међутим, велики број истраживача по инерцији „формалне логике“ под наноматеријалима подразумева све материјале који су нанометарске величине, што не одговара правој природи наноматеријала. Зато је веома важно издвојити две групе материјала: наноматеријале и квазинаноматеријале, односно *наноструктурне* материјале. Наноматеријали су оне структуре чији се димензионални раст своди на три структуралне форме од (кристализација око физичке

1) У последњих десет година у савременој науци све чешће је присутан префикс *нано*, од наноматеријала, наносистема, наномедицине и др. па све до назива *нанотехнологије*. На грчком *нано* значи *најмањи*, а у физици *нано* представља ред величине 10^{-9} (десет на минус девети) међу основним мерним јединицама у датом (и со) мерном систему. Да бисмо имали осећај о колико малим величинама је реч, довољно је направити следеће поређење: један милиметар према једном километру односи се исто као и један нанометар према једном милиметру.

тачке), 1D (кристализација око линије) и 2D (уређене структуре у форми нанофилмова). Може постојати и 3D наноматеријал, али раст основне кристалне ћелије мора бити „зауостављен“ у домену нановеличине и мора да задовољи додатне критеријуме као што су *самосличносћ* (део се понаша и има све особине као и целина) и *самоуређеносћ*. Ово значи да се једино структуре које поседују природно ограничење просторног раста на нанометарском нивоу, у једној од поменутих димензија, могу назвати наноматеријалом. Наноструктурни материјали су пак они материјали који немају овај природни лимит у расту на нанометарском нивоу, мада им структуре зрна могу бити нанометарске. Они не поседују истовремено особине самосличности и самоуређености, већ само једну од њих, а најчешће ниједну.

Након открића фулерена, а посебно молекула C_{60} и њихове масовније производње, почело се и са њиховим хемијским трансформацијама. Једно од значајнијих открића, након фулерена, било је откриће угљеничних нанотуба од стране јапанског истраживача Ициме. Угљеничне нанотубе представљају једнодимензионалне наноструктуре (слично биолошким микротубулама), и могу бити отворене или затворене на својим крајевима. Само име нанотубе указује нам да је њихов пречник реда величине нанометра, док се затварање нанотуба врши одговарајућим „преполовљеним“ фулеренима. За сада најбољи модел формирања нанотуба дао је наш истраживач проф. Дамњановић. Посебну примену нанотубе имају у наноелектроници, као везни делови различитих нанокомпоненти, као што су полупроводници и проводници; или се користе у одређеним хемијским трансформацијама. Оно што је веома инте-

ресантно јесте чињеница да је њихова затезна чврстоћа око десет пута већа од затезне чврстоће челика, што је нашло примену у машинству (израда ужади) и текстилној индустрији. За истраживања *Београдске истраживачке групе* посебно су интересантне хелијачне нанотубе и ендокедралне нанотубе, односно нанотубе у чију је цилиндричну унутрашњост убачен инкапсулирани фулерен. Једна од реализација на овом пољу била је инкапсулација калијума у молекул C_{60} , па је такав ендокедрални комплекс унет у једнослојну нанотубу и на тај начин остварен први нанопрекидач.

Где су нас још одвеле особине наноматеријала, а посебно молекула C_{60} ? Овај молекул је због своје изузетне стабилности физичких, хемијских и електрооптичких особина отпоран на радиоактивност и хемијску корозију. Због „ π “ електронског облака, који се налази и унутар молекула C_{60} и око њега, он може примати електроне, али их истовремено може и ослобађати, па постоји теоријска могућност да се на простору од око једног нанометра кубног ускладишти 18, 36, 56 и 60 атома водоника. Експерименти су потврдили 18, 36 и 56, а на бази 56 атома водоника направљен је у децембру 1993. године у САД први прототип $Ni/C_{60}H_{56}$ батерије, која је показала боља својства од Ni/Cd батерије. Научници су 1991. године утврдили да када се на температури од $-219^{\circ}C$ унесе калијум у C_{60} , он постаје суперпроводник.

Због своје изузетне тврдоће молекули C_{60} могу послужити као микроскопски мали куглични лежачеви, односно као добро мазиво за супербрзе роторе, а може бити употребљен и као чврсто гориво, укључујући и ракетно. Када би се повезали атоми литијума и флуора унутар структурног кавеза C_{60} , који их штити од кисеоника у ваздуху, могли би се добити

супер моћни акумулатори. Због „насумичног“ ротирања електромагнетно поље C_{60} није усмерено, па је интензитет поља релативно мали. Пошто је технолошким решењима могуће контролисати смер ротације, то је могуће добити усмерено електромагнетно поље далеко већег интензитета. Стварањем макроскопског материјала од тако модификованих молекула добили би се веома употребљиви електромагнети и магнетни суперпроводници за класичне и квантне технологије.

Као што је већ поменуто, читава фамилија фулерена је структурно-енергетски компатибилна са фамилијом клатрина, што пружа могућност значајне примене фулерена у медицини и фармацији. Опште је познато да је већина медицинских истраживања усмерена ка решавању проблема лечења канцера и СИДЕ, па су амерички истраживачи на челу са проф. Вудлом креирали неколико функционализованих фулеренских деривата који су показали добра својства при лечењу ових болести. Један од примера је C_{60} дендритног типа, који је показао инхибиторско својство хив-1 протеазе, док је други фотоактивирани водорастворни монофункционализовани C_{60} показао цепање днк активности и *in vitro* на $HeLa S_3$ хелијске линије, при чему ових активности нема у одсуству светлости. У дендритне фулере не спадају и липопротеини, имајући у виду њихову структуру. Липидни билејери, који су саставни део природних мембрана, у ствари су дводимензионални системи са брзом динамиком. Липопротеини имају јединствену еластичност која доводи до многих примена у биомолекуларним реакцијама, као што су биокомпатибилизација површина, пренос лекова, биоактивних супстанци и друго.

Фулерени и њихови модификовани комплекси које граде са другим једиње-

њима показали су и могућност отклањања слободних радикала. Недавно су истраживачи при проучавању дејства молекула C_{60} на слободне радикале креирали више комплекса и дошли до веома значајних открића. Ови комплекси су показали могућност примене у медицини као антиоксиданти, инхибитори липида и липопротеина, као антипролиферативни агенти Т-лимфоидних ћелија леукемије, као „чистачи“ слободних радикала у исхемији мозга, као и другим неуролошким болестима, као што су епилепсија и Паркинсонова болест.

У биомедицини се даље предлаже да се као начин лечења тумора примени метода којом би се у унутрашњост молекула убацили радиоактивни атоми, при томе би „ π “ електронска баријера и феномен релативистичког Доплеровог ефекта (због велике брзине ротације молекула) могли обезбедити да се одржи целовитост радиоизотопа после њиховог уношења у организам. Када радиоизотоп заробљен фулереном дође на малигно место, тада се кавез под дејством спољњег зрачења може отворити и радиоизотоп ће тада деловати циљано.

Фулерени су значајни и због тога што могу градити најразличитије хемијске комплексе, тако да су и многи фулеренски деривати нашли своје примене. Са становишта медицине и фармације од посебног су интереса они који су водорастворни. Посебно су дизајнирани, односно синтетисани фулеренски деривати, који се користе као антиоксиданти, адитиви за производњу хране, као супституенти за витамин ц, као агенси који успоравају старење коже и користе се за производњу крема (*anti-age* креме), тонизирајућих лосиона и других козметичких препарата. Одређеним функционализацијама, због своје величине (1 nm), молекул C_{60}

може да прође кроз ћелијску мембрану и у ћелију унесе биоактивну супстанцу или медикамент, много већи (дужи) од њега самог. *Београдска истраживачка група* је показала да је његова симетрија и енергија заснована на закону златног пресека и да је компатибилан са биомолекулима, што му омогућава да након уласка у ткиво *хармонизује рад ћелије*, тако што као највише уређена симетријска структура утиче на енергетске процесе и подиже их на природни ниво (виши симетријски ниво), чиме практично врши хармонизацију рада ћелије и враћање њених иницијалних природних способности. Ова особина молекула C_{60} највероватније утиче на лечење рана, потпомажући њихово брже и природније зарастање.

Због свог сферног облика, структурних својстава и закона електронско-вибрационо-ротационе енергије, који се базирају на закону златног пресека, могуће је од овог материјала направити високопаралелне мреже на молекуларном нивоу које би имале својства веома слична биолошким молекуларним мрежама у ћелији. На тај начин би било могуће развити посебну врсту нанотехнологије којом би се развиле будуће молекуларне информационе машине, по форми сличне, а по садржају комплементарне биомолекулима. Сматра се да би овај приступ револуционарно утицао на развој технике и биомедицине, јер би омогућио директно повезивање макроскопских електронских направа и биолошких структура одговорних за функционисање ћелије. Како време цивилизацијског часовника све више одмиче, то се све више увиђа да је техника без медицине слепа, а медицина без технике немоћна.

Лепота симетрије молекула C_{60} , као и широке могућности примене у многим областима, побудила је пажњу и истражи-

вача који се баве не само здрављем него и лепотом. Тако је међу првим патентима у области фулерена пријављен и патент познате козметичке куће *Л'Ореал*, који су фулерене применили у естетској козметици. Истраживачи ове козметичке куће су применили фулерене као пигменте и као хранљиве продукте за побољшање квалитета производа за негу косе, коже, очију и ноктију. Они су своје предности посебно показали у производњи сенила за очи, ајлајнера, маскара, пудера у праху и течних, ружева за образе и усне и пигментних крема.

Циљ нам је био да поред упознавања са физичким основама наноматеријала и нанотехнологијама представимо нове приступе у нанотехнологијама. Нове технологије, нанотехнологије биће остварљиве и достижне једино ако се њима приступи на нов „природан“ начин, поштујући природне законе, јер простим применама наноматеријала на данашњи вештачки-технички начин, наћи ћемо се опет у неким новим проблемима. Наноматеријали су померили неке до сада важеће принципе класичног приступа (физике и хемије), као што је то некада, на теоријском плану, урадила квантна теорија. Овде је важно нагласити да нам ни класична, а ни квантна теорија не могу у потпуности дати одговоре на феномене које испољавају фулерени. Слично је и са биомолекулима попут днк, клатрина и микротубула, који не функционишу у потпуности по поменути теоријама, већ иманентно поседују фракталност, елементе самосличности, просторно-временске симетрије и елементе детерминистичког хаоса, па се намеће проширење физике на *фракталну механику или информациону физику*, које ће се осим постојећим класичним законима и енергетским квантима бавити и информационим квантима,

односно везама између информације и организације, с једне стране, односно масе и енергије, са друге стране. Једном речју, фулерени, њихови деривати и на њиховим својствима засноване нанотех-

нологије већ у скорој будућности у потпуности ће променити начин и стил живота савременог човека.

Лидија Мајић (Београд)