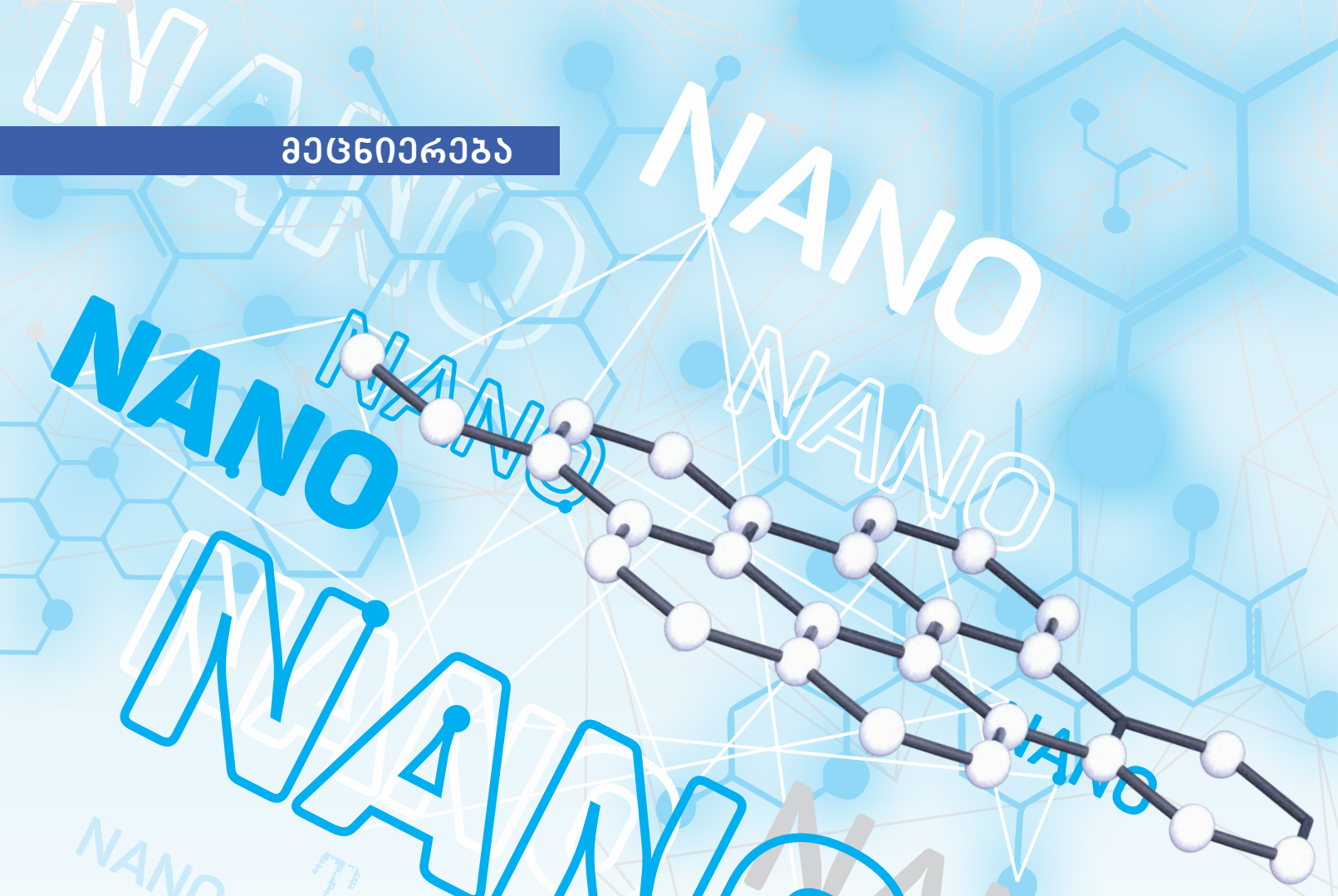


გრაფენი და ნანოტექნოლოგია

გიორგი ჯაფარიძე

როდესაც 2010 წლის 5 ოქტომბერს შვედეთის სამეფო მეცნიერებათა აკადემიამ ფიზიკის დარგში ნობელის პრემიის ახალ ლაურეატებად ანდრეი გეიმი და კონსტანტინე ნოვოსიოლოვი დაასახელა, მსოფლიოს სამეცნიერო საზოგადოება ერთსულოვანი იყო ამ გადაწყვეტილების მხარდაჭერაში.

ერთსულოვნება ორმა გარემოებამ განაპირობა: ერთი მხრივ, ეს არის ლაურეატების მიერ აღმოჩენილი ახალი მასალის – გრაფენის – უნიკალური თვისებები, ხოლო, მეორე მხრივ, ის გარემოება, რომ თავად გრაფენის აღმოჩენა თვალნათელი და უტყუარი დასტური იყო იმ ტექნოლოგიური წარმატებებისა, რაც უკანასკნელი ორი ათწლეულის განმავლობაში ნანოტექნოლოგიის განვითარებამ მოიტანა.

მასალის თვისებების დამოკიდებულება არა მარტო მის ქიმიურ შემადგენლობაზე, არამედ, რაც ბევრად უფრო უჩვეულო და საინტერესოა, დამზადებული ნიმუშის სივრცულ ზომებზე თანამედროვე მეცნიერების ინტენსიურად განვითარებადი მიმართულების – ნანოფიზიკის – მიმდინარე კვლევების მთავარი ამოცანაა.

რა არის ნანოტექნოლოგია?

სიტყვა „ნანო“ ბერძნულად ჯუჯას ნიშნავს, ნანომეტრი კი მეტრის ერთ მემილიარდედ ნაწილს შეადგენს. წყალბადის ატომის ზომა 0.1 ნანომეტრია, ხოლო ყველაზე წვრილი თმის სისქე – 50000 ნმ. ამრიგად, ნანოტექნოლოგია მატერიის იმ თვისებების შესწავლასა და გამოყენებას გულისხმობს, რომლებიც ნანოზომის ნიმუშებში ვლინდება.

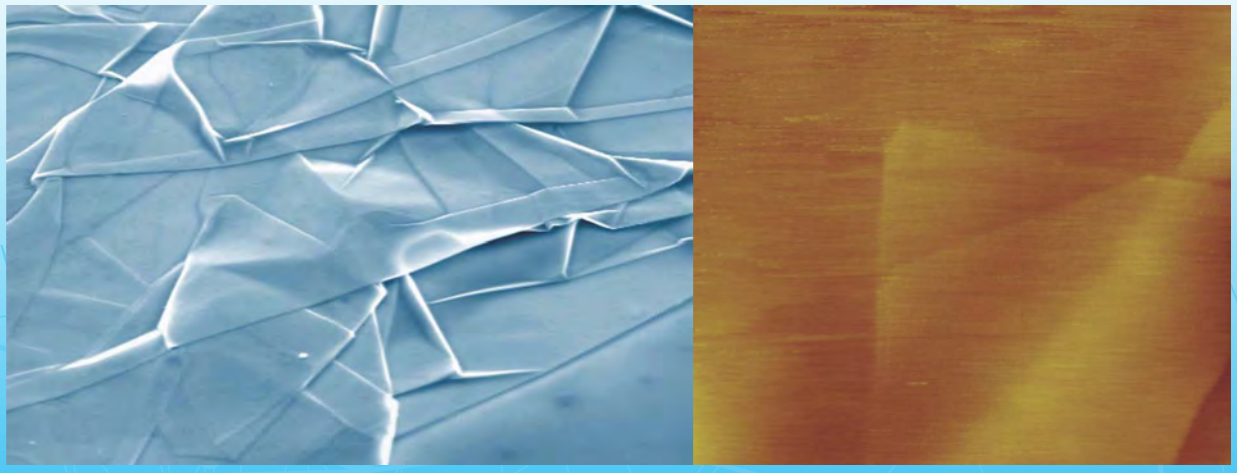
გვხვდება სხვადასხვა ტიპის ნანოზომის ნიმუშები. ეს შეიძლება იყოს ერთი ან რამდენიმე ატომური ფენისაგან შედგენილი ფირები (ორგანზომილებიანი ნანოსისტემები), ძალიან ვიწრო, ნანოზომის დია-

ანდრეი გეიმი და კონსტანტინე ნოვოსიოლოვი ნობელის პრემიით დაჯილდოებაზე, 2010

მეტრის მქონე მავთულები ან ატომური ჯაჭვები (ერთგანზომილებიანი ნანოსისტემები), ან ე.წ. ნანოკლასტერები, ატომებისგან შედგენილი გროვები, რომელთა ზომები ნანომეტრული მასშტაბისაა.

მსგავს ობიექტებს, რასაკვირველია, ნანოტექნოლოგიური ეპოქის დადგომამდეც იკვლევდნენ როგორც ფიზიკოსები, ასევე ქიმიკოსები და ბიოლოგები. მაგალითისთვის საკმარისია მასალათა ზედაპირის სხვა ნივთიერების მონოატომური ფენით დაფარვის ქიმიური და ფიზიკური ტექნოლოგიების ან კვაზიერთგანზომილებიანი ორგანული მეტალების ფიზიკური თვისებების კვლევა. თუმცა, ჩემი აზრით, ნანომეცნიერული კვლევების ყველაზე უფრო ეფექტური და საინტერესო მაგალითები მოლეკულურ ბიოლოგიაში უნდა ვეძებოთ, სადაც გენეტიკური კოდის გადამტანი მოლეკულა დნმ-ი ტიპური ნანოობიექტია, მისი დიამეტრი 2 ნანომეტრია, ხოლო სიგრძე კი – მილიარდჯერ მეტი. უკვე 60 წელზე მეტია იგი მეცნიერთა კვლევის ერთ-ერთი მთავარი საგანია.

მაშ, რა არის ის მეცნიერული და ტექნოლოგიური სიახლე, რომელიც ტრადიციული ნანომეცნიერული კვლევების წიაღიდან წარმოიქმნა და პრინციპულად ახალი ნანოტექნოლოგიური ეპოქის დაწყებაზე მიგვითითებს? სიზუსტისთვის აქ დავესესხები პრინსტონის უნივერსიტეტის ლექსიკონს, რომლის თანახმად, ნანოტექნოლოგია არის მატერიის თვისებების კონტროლირებადი მართვის ტექნოლოგია ატომურ და მოლეკულურ დონეზე ისეთ სტრუქტურებში, რომელთა ერთი სივრცითი განზომილება მაინც 100 ნანომეტრზე ნაკლებია. ამრიგად, აქ მთავარი სიტყვაა ტექნოლოგია, ანუ უნარი ატომურ და მოლეკულურ დონეზე მიზანმიმართულად ვმართოთ ნივთიერებების თვისებები. ამასთან, თვისებების ამგვარი



გრაფენის ფენები, გადაღებული ატომურ-ძალოვანი მიკროსკოპის საშუალებით

მართვა ხომ იმავე დროს რთული მოლეკულური სისტემების ორგანიზაციის და თვისებების შესწავლის უნიკალურ შესაძლებლობებს იძლევა! ამიტომ თანამედროვე ნანოტექნოლოგია არის როგორც ფუნდამენტური მეცნიერებების (ფიზიკა, ქიმია, მოლეკულური ბიოლოგია, ბიოფიზიკა, მედიცინა, ფარმაკოლოგია), ისე თანამედროვე საინჟინრო-ტექნოლოგიური მეცნიერებების (საინფორმაციო ტექნოლოგიები, გამოყენებითი მასალათმცოდნეობა, ნანოელექტრონიკა) განვითარების ერთიანი საფუძველი.

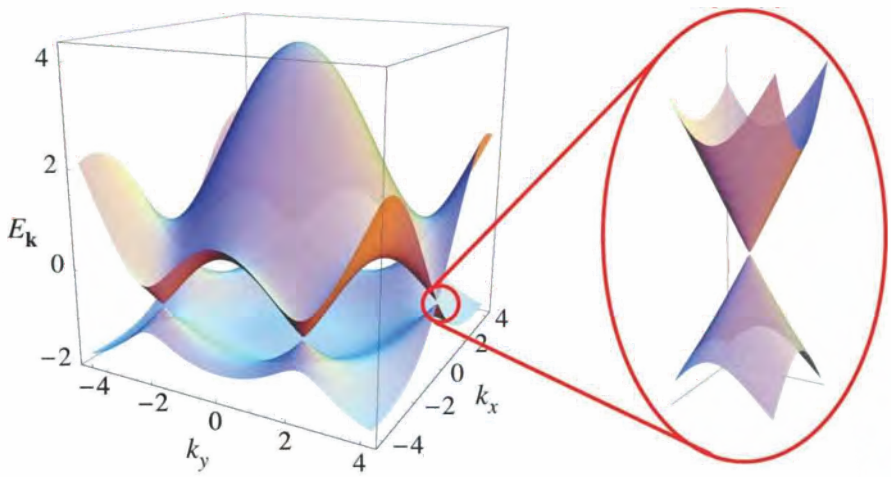
როგორც მეცნიერებისა და ტექნოლოგიების დამოუკიდებელი დარგი, ნანოტექნოლოგია ჩამოყალიბდა ბოლო ორი ათწლეულის მანძილზე, ხოლო მისი წარმოშობა უშუალოდ უკავშირდება გასული საუკუნის 60-70-იან წლებში მიკროელექტრონიკის და საინფორმაციო ტექნოლოგიების განვითარებას. ამრიგად, ნანოტექნოლოგიაზე საუბრის დაწყება ალბათ საკმაოდ შორიდან მოგვიწევს.

ჯერ იყო სიტყვა – რიჩარდ ფეინმანი

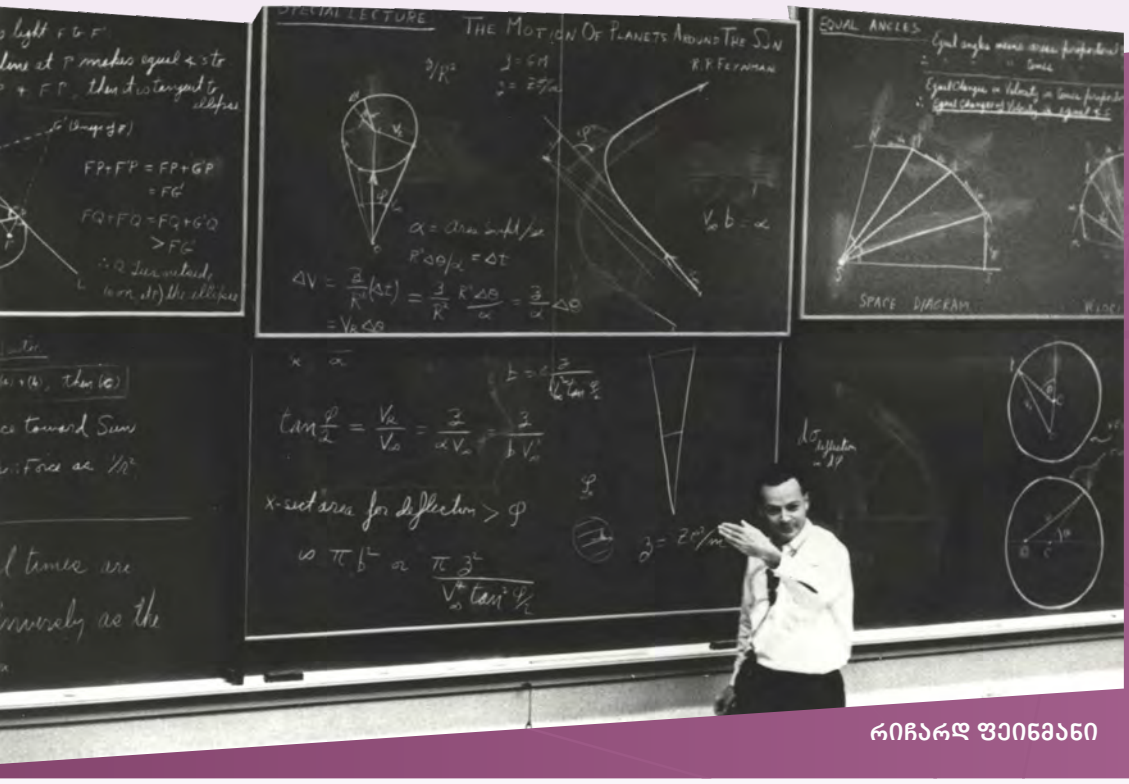
ნანოტექნოლოგიის პირველ ნაბიჯებს ხშირად უდიდესი ამერიკელი თეორეტიკოს-ფიზიკოს რიჩარდ ფეინმანის სახელს უკავშირებენ. ფეინმანი ბოლო წარმომადგენელია გენიალური ფიზიკოსების იმ ჯგუფისა, აინშტაინით დაწყებული და ლევ ლანდაუთი დასრულებული, რომელთაც შექმნეს XX საუკუნის ფიზიკა და თანამედროვე ფიზიკის თითქმის ყველა დარგს თავისი განსაკუთრებული კვალი დაამჩნიეს. ფეინმანი 25 წლის ასაკში უკვე ლოს-ალამოსში „ატომური ბომბის“ პროექტში მუშაობდა, არის კვანტური ელექტროდინამიკის ერთ-ერთი შემქმნელი, რაშიც მას 1965 წელს ნობელის პრემია მიენიჭა. მასვე ეკუთვნის ფუნდამენტური შედეგები კონდენსირებულ გარემოთა ფიზიკაშიც, კერძოდ კი, ზედენადობის თეორიაში. განსაკუთრებული პოპულარობა ფეინმანს 1962-1963 წლებში კალიფორნიის ტექნოლოგიური უნივერსიტეტის პირველი და მეორე კურსების სტუდენტებისთვის წაკითხული ზოგადი ფიზიკის ლექციათა კურსმა მოუტანა. ამ ლექციების რუსული თარგმანი საბჭოთა კავშირში 1967 წელს გამოიცა და ცოტა ხანში მასშტაბურ კულტურულ მოვლენად იქცა. ეს იმიტომ მოხდა, რომ მასალის გადმოცემით და საკითხების უნიკალური ხედვით ფეინმანის ლექციები უაღრესად ზუსტი და ამავე დროს სრულიად თავისუფალი მეცნიერული აზროვნების საუკეთესო მაგალითს წარმოადგენს. იმის მაგალითს, თუ როგორ შეიძლება, სრულიად სტანდარტული და რუტინული ხასიათის მეცნიერული შედეგებიც კი სტუდენტებს ისე გააცნო და დაანახო, რომ მათ ახლის ძიების და მეცნიერული ცოდნის შექმნისას ინტელექტუალური თავისუფლების აუცილებლობის შეგრძნება გაუღრმავდეთ.

ამგვარი სრულიად თავისუფალი და ამავდროულად შეუვალი სიმკაცრის მეცნიერული აზროვნების საუკეთესო მაგალითია ფეინმანის მიერ 1959 წელს ამერიკის ფიზიკის საზოგადოების სხდომაზე წაკითხული მოხსენება ნანოტექნოლოგიის პერსპექტივების შესახებ. თავად ტერმინი „ნანოტექნოლოგია“ მხოლოდ 80-იანი წლების ბოლოს გაჩნდა. ატომურ მასშტაბში მატერიის თვისებებზე მიზანმიმართული ზემოქმედების შედეგად მიღებული ახალი შესაძლებლობების უნიკალური ტექნოლოგიური პერსპექტივები პირველმა ფეინმანმა დაინახა.

თავის ლექციას ფეინმანი იწყებს შემდეგი სიტყვებით: „დღეს მსურს ვისაუბრო მეცნიერე-



გრაფენში ელექტრონების სპექტრი, გამოყოფილი სპექტრის „რელატივისტური“ ნაწილი



რიჩარდ ფეინმანი

ბის იმ დარგზე, რომელშიც სადღეისოდ ჯერჯერობით ცოტა რამ არის გაკეთებული, მაგრამ, პრინციპში, უამრავი ახლის გაკეთება უნდა იყოს შესაძლებელი. ეს დარგი არ ჰგავს ჩვეულებრივ ფუნდამენტურ ფიზიკას იმ აზრით, რომ ის არ ცდილობს იპოვოს ახალი, უჩვეულო ელემენტარული ნაწილაკები. ის უფრო მყარი ტანის ფიზიკას ჰგავს, დარგს, რომელიც ალბათ კიდევ ბევრ საინტერესოს მოგვითხრობს ნივთიერების, როგორც ცნობილი ელემენტებისგან (ატომებისგან) აგებული რთული სტრუქტურის, თვისებებზე. რაც მთავარია, აქ უზარმაზარი პერსპექტივებია, განსაკუთრებით, ტექნიკური გამოყენების თვალსაზრისით. პრობლემა, რომელზეც მინდა ვილაპარაკო, გახლავთ მცირე (ატომურ, ნანო) მასშტაბებზე ნივთიერების თვისებების მართვა და ამ თვისებებით მანიპულირება არ მგონია, რომ ამის შესაძლებლობას ფიზიკის რომელიმე კანონი გვიკრძალავდეს, უბრალოდ, ჩვენ ძალიან დიდები ვართ, ატომები კი – ძალიან პატარა. ამიტომაც ეს ადვილად არ გამოგვდის". მოგვიანებით ფეინმანი დასძენს: „ვცადოთ გავიაზროთ, თუ რისი გაკეთება მოგვიწევს, თუკი შევეცდებით ბრიტანულ ენციკლოპედიაში არსებული მთელი ინფორმაცია აი, ამ ფანქრის წვერის ზომის მეხსიერების ელემენტში მოვათავსოთ. მაშინვე გაირკვევა, რომ ინფორმაციის ჩაწერა ამ შემთხვევაში ატომური მასშტაბის ობიექტებზე უნდა მოხდეს (ყოველ ასოს და სასვენ ნიშანს თავისი ატომი ან ატომების ჯგუფი უნდა მივუსადაგოთ!), ხოლო ასეთი ტექსტის წაკითხვას კი უჩვეულო – ატომური მიკროსკოპი დასჭირდება". ჩემი აზრით, ნანოტექნოლოგიას საფუძველი სწორედ მაშინ ჩაეყარა, როცა ფეინმანმა ეს სიტყვები წარმოთქვა.

უნიკალური მეცნიერული ინტუიცია და შორსმჭვრეტელობა გამოავლინა ფეინმანმა თავის ლექციაში: მან იწინასწარმეტყველა ბიომოლეკულური რობოტი, ულტრათანამედროვე ელექტრონული მიკროსკოპი, გენური ინჟინერია, წერტილოვანი მედიკამენტური მკურნალობის შესაძლებლობანი, კვანტური კომპიუტერი და მრავალი სხვა. ფეინმანის ამ ლექციაში გამოთქმულმა იდეებმა იმდენად გაუსწრო თავის დროს, რომ ამერიკის ფიზიკის საზოგადოების სხდომაზე წაკითხული მისი მოხსენება სრულიად შეუმჩნეველი დარჩა სამეცნიერო საზოგადოებისთვის და მხოლოდ 33 წლის შემდეგ, 1992 წელს, უკვე ნანოტექნოლოგიის აქტიური განვითარების ეტაპზე, მოიძიეს და დაბეჭდეს სამეცნიერო ჟურნალში.

ფეინმანის იდეების მეცნიერული მასშტაბისა და სითამამის სრულფასოვნად აღსაქმელად შეგახსენებთ, რომ მაშინ, როდესაც ფეინმანი ლექციით გამოდიოდა, ანუ გასული საუკუნის 50-იანი წლების ბოლოს, თანამედროვე ნახევარგამტარული ტექნოლოგიების უმნიშვნელოვანესი ეპოქა მხოლოდ პირველ ნაბიჯებს დგამდა. თუკი სტივენ სპილბერგის ცნობილი ფილმის „უკან მომავლისკენ" ხერხს გამოვიყენებთ და გასული საუკუნის 50-იან წლებში გადავინაცვლებთ, აღმოვაჩენთ, რომ მსოფლიოში მხოლოდ რამდენიმე (უზარმაზარი ზომის და უსაშველოდ ძვირი) მოქმედი კომპიუტერია, ტელევიზორები

ნათურებზე მუშაობს, ტრანზისტორულ ტელევიზორს SONY-ს კორპორაცია მხოლოდ ერთი წლის შემდეგ – 1960 წელს შექმნის, მიკროჩიპების წარმოება 1965 წელს დაიწყება, ხოლო მიკროპროცესორების შექმნამდე თითქმის ორი ათწლეულია დარჩენილი. პერსონალური კომპიუტერები, ვიდეოეკრანები და მობილური ტელეფონები მხოლოდ ჯეიმს ბონდის შესახებ გადაღებულ კინოფილმებში მზადდება. ბილ გეიტსი და სტივენ ჯობსი 4 წლისანი არიან, მარკ ცუკერბერგი კი მხოლდ 25 წლის შემდეგ – 1984 წელს დაიბადება...

დიდი ამერიკელი ფიზიკოსი რიჩარდ ფეინმანი 1988 წელს 70 წლის ასაკში გარდაიცვალა. მას ერგო ბედნიერება თავისი ყველაზე უფრო თამამი მეცნიერული წინასწარმეტყველებების – ნანოტექნოლოგიური ეპოქის დასაწყისს მოსწრებოდა.

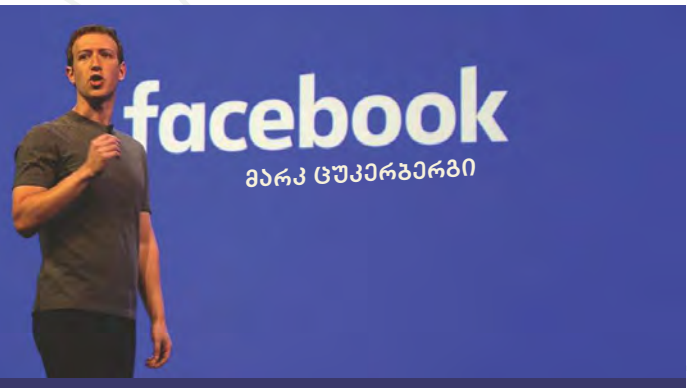
1982 წელი – ნანოტექნოლოგიური ეპოქის დასაწყისი

ნანოტექნოლოგიის ეპოქის დასაწყისად უნდა მივიჩნიოთ 1982 წელი, როდესაც შვეიცარიაში, კომპანია IBM-ის ციურიხის კვლევითი ლაბორატორიის თანამშრომლებმა გერდ ბინინგმა და ჰაინრიხ როერმა შექმნეს პირველი მასკანირებელი გვირაბული მიკროსკოპი. ეს უნიკალური მოწყობილობა საშუალებას იძლევა დავინახოთ (ამ სიტყვის პირდაპირი მნიშვნელობით) ატომები, დავადგინოთ მათი განლაგება სივრცეში. მეტიც, მიკროსკოპის თანამედროვე გაუმჯობესებული ნიმუშებით უკვე ატომის ელექტრონული გარსების გარჩევაც შეიძლება. ოდნავ მოგვიანებით იმავე ლაბორატორიაში ბინინგმა და მისმა თანამშრომლებმა დაამზადეს მასკანირებელი ატომურ-ძალოვანი მიკროსკოპიც, რაც ნანოზომის ობიექტების სრული სამგანზომილებიანი სურათების მიღების საშუალებას იძლევა. მნიშვნელოვანია, რომ ამ მიკროსკოპებით შეიძლება არა მარტო ატომების დანახვა, არამედ მათი აღება, ერთი ადგილიდან მეორეზე გადატანა, შემდეგ მის გვერდით სხვა ატომის მოთავსება და სასურველი გეომეტრიული ფორმის მქონე სტრუქტურად დალაგება!.. მარტივად რომ ვთქვათ, ფეინმანის ოცნების ასრულება – ატომებით მანიპულირება! სურვილის შესაბამისად ნივთიერების აგება და მისი თვისებების მართვა!

მასკანირებელი გვირაბული მიკროსკოპის შექმნა შესაძლებელი გახდა ფიზიკის, საინჟინრო და საინფორმაციო-ტექნოლოგიურ სფეროში მიღწეული წარმატებების ერთი ამოცანის გარშემო შეჯერებისა და შერწყმის შედეგად. ეს არის ატომური და კვანტური ფიზიკის, ზუსტი მექანიკის, პროგრამული და კომპიუტერული უზრუნველყოფის (რაც ფიზიკური გაზომვების მონაცემების ვიზუალიზაციის საშუალებას იძლევა) იმ დროისთვის მიღებული უახლესი მონაცემების წარმატებული სინთეზის შედეგი. ბინინგისა და როერის აღმოჩენის მნიშვნელობა თავიდანვე სათანადოდ შეაფასა სამეცნიერო საზოგადოებამ და 1986 წელს, პირველი შედეგების გამოქვეყნებიდან ორი წლის შემდეგ, მათ ფიზიკის დარგში ნობელის პრემია მიენიჭათ.

ბილ გეიტსი

სტივენ ჯობსი



მარკ ცუკერბერგი

მარკ ცუკერბერგი (დაბად. 14.05.1984)
სოციალურ ქსელ **Facebook**-ის დამფუძნებელი.

უილიამ ბილ გეიტსი (დაბად. 28.10.1955)
ამერიკელი ბიზნესმენი, ფილანტროპი, ინვესტორი და კომპიუტერული პროგრამისტი, კომპანია **Microsoft**-ის დამფუძნებელი.

სტივენ ჯობსი (24.02.1955–5.10.2011)
კომპიუტერული ინდუსტრიის წამყვანი ფიგურა და გამომგონებელი, **Apple**-ის თანადამფუძნებელი, თავმჯდომარე და მთავარი აღმასრულებელი დირექტორი.

გრაფენი

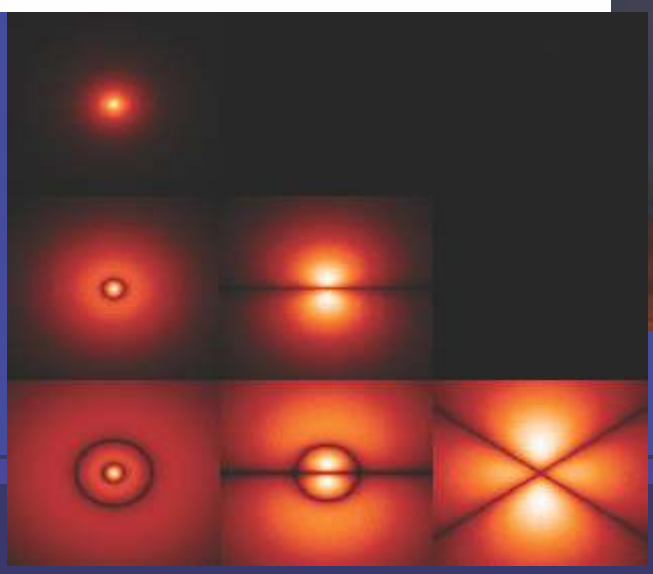
XX საუკუნის დასაწყისში ამბობდნენ, რომ კვანტურმა მექანიკამ საშუალება მოგვცა გავიგოთ და გავიაზროთ ის, რისი დანახვაც შეუძლებელია. მასკანირებელი გვირაბული მიკროსკოპის შექმნამ კი შესაძლებელი გახადა თვალნათლივ დავინახოთ და ვმართოთ ის, რაც აქამდე მხოლოდ მათემატიკური ფორმულების საშუალებით თუ გვესმოდა.

უკანასკნელი ორი ათწლეულის განმავლობაში ნანოტექნოლოგიის განვითარებამ შესაძლებელი გახადა დაბალი სივრცითი განზომილების მქონე მასალების მიღება და მათი უჩვეულო თვისებების გამოყენება ახალი ტექნოლოგიების განსავითარებლად.

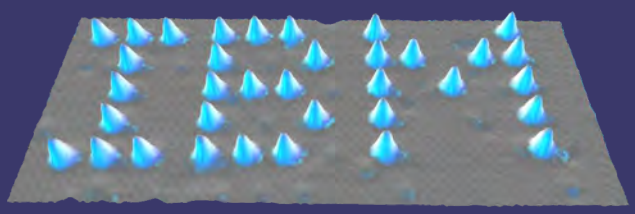
ასეთი უჩვეულო თვისებების მქონე მასალის საუკეთესო მაგალითია გრაფენი – ნახშირბადის ატომებით აგებული ორგანზომილებიანი („ბრტყელი“) კრისტალი. გრაფენი პირველად მიიღეს 2004 წელს მანჩესტერის უნივერსიტეტის მეზოსკოპიური ფიზიკის ლაბორატორიაში ლაბორატორიის ხელმძღვანელმა, პროფესორმა ანდრეი გეიმმა და იმჟამად პოსტდოქტორანტმა მკვლევარმა კონსტანტინე ნოვოსიოლოვმა. გრაფენი ნახშირბადის ახალი ალოტროპიული მდგომარეობაა. ის არის ერთი ატომის ზომის სიგანის მქონე კრისტალური ფირი, ფიჭის ტიპის კრისტალური სტრუქტურით, რომლის კვანძებში ნახშირბადის ატომებია მოთავსებული.

მანჩესტერის ჯგუფმა შეიმუშავა გრაფენის ფირების მიღების ახალი ეფექტური ტექნოლოგია. მათვე ექსპერიმენტულად დაადასტურეს მიღებული მასალის ორგანზომილებიანი ბუნება და პირველსავე ექსპერიმენტებში დაადგინეს ბევრი უნიკალური თვისება, რომელიც ორგანზომილებიანობით არის განპირობებული. აღმოჩენამ იმთავითვე მიიპყრო მკვლევართა ყურადღება და გრაფენის შესწავლის საქმეში ერთდროულად ჩაერთო ბევრი სხვა კვლევითი ჯგუფიც. გაჩნდა უამრავი პუბლიკაცია, რომელიც გრაფენის უნიკალური თვისებების დამადასტურებელ ახალ შედეგებს აჩვენებდა. დაიწყო „გრაფენის ბუმი“ – ტექნოლოგიურმა კორპორაციებმა თავიანთი ფინანსური და კვლევითი რესურსები გრაფენის კვლევებზე მიმართეს. სამეცნიერო ჟურნალისტებმა კი ცო-

გერდ ბინინგი (მარცხნივ) და **ჰაინრიხ როერი** მათ მიერ კონსტრუირებულ ატომურ-ძალოვან მიკროსკოპთან ერთად



წყალბადის ატომში ელექტრონული ორბიტალების სურათი, გადაღებული გვირაბული მიკროსკოპის საშუალებით



პირველი ჩანაწერი, განხორციელებული ქსენონის ატომების მოწესრიგებული განლაგებით ნიკელის ზედაპირზე

ტა ნაჩქარევად, მაგრამ არცთუ უსაფუძვლოდ, საზოგადოებას „გრაფენის ელექტრონიკის“ ახალი ეპოქის დადგომა აუწყეს.

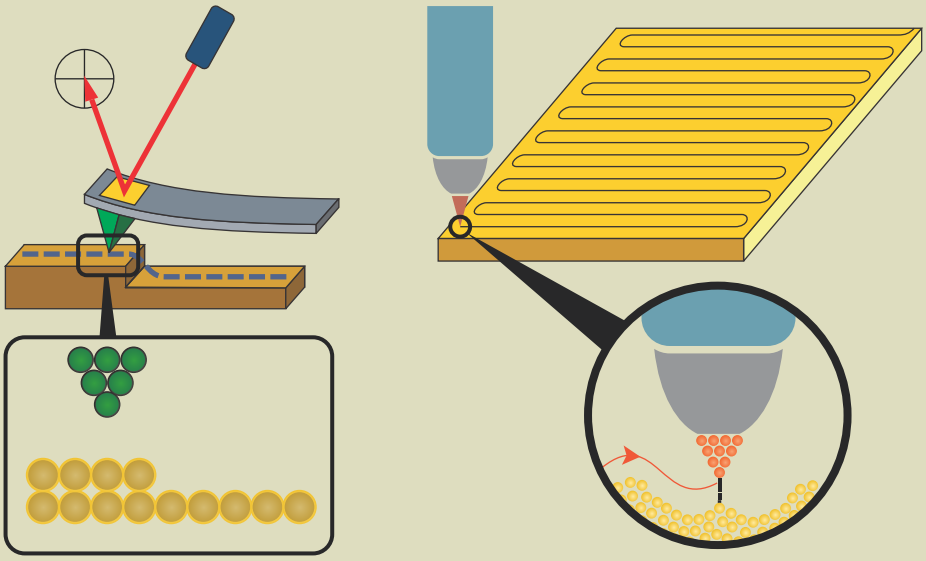
თავად სიტყვა „გრაფენი“ ახალი არ არის. ეს ტერმინი პირველად გამოიყენა გერმანელმა ქიმიკოსმა ჰანს-პეტერ ბოემმა 1962 წელს გრაფიტის შემადგენელი ძირითადი სტრუქტურული ელემენტის – ორგანზომილებიანი ნახშირბადის ფენის აღსანიშნად.

გრაფიტი ყველასათვის კარგად ცნობილი მასალაა. მისგან არის დამზადებული იმ ფანქრის გულიც, რომელსაც ხატვის ან წერის დროს ვიყენებთ. გრაფიტი სამგანზომილებიანი ფენოვანი სტრუქტურაა, რომელიც შედგება ერთმანეთთან სუსტად დაკავშირებული გრაფენის შრეებისაგან. ფანქრით წერისას ეს ფენები წყდება გრაფიტის ძირითად მასას და ქაღალდზე რჩება ფანქრის წვერის ტრაექტორიის აღმწერი კვალი. ეს კვალი, გარდა გრაფიტის სქელი ნატეხებით მონიშნული და ადვილად დასანახი უბნებისა, ასევე შეიცავს მცირე ზომის ერთი ან რამდენიმე ატომური ფენისაგან შემდგარ, თვალით და ჩვეულებრივი მიკროსკოპითაც უხილავ ნატეხებს. ამ არეების დასანახად საჭიროა უახლესი ელექტრონულ-სხივური ან მასკანირებელი გვირაბული მიკროსკოპი.

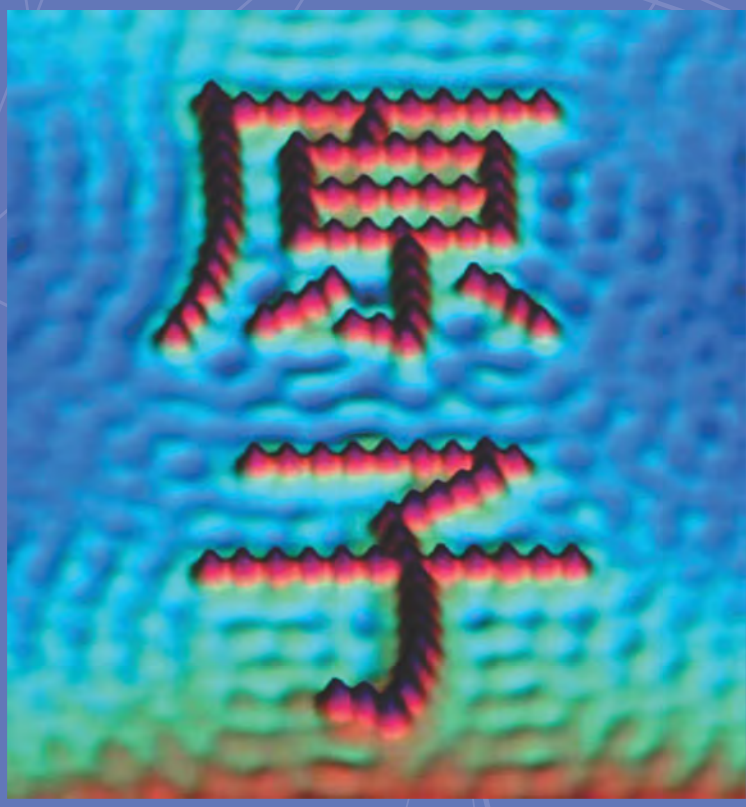
გრაფენის ტექნოლოგია ამგვარი „უხილავი“ ნაკვეთების შესწავლას და ტექნოლოგიაში მათ გამოყენებასაც გულისხმობს. უაღრესად რთული ამოცანაა, ჯერ ერთი, მოამზადო ისეთი ფენა, როგორიც საჭიროა, მერე ამ (ერთი ატომის სისქის!) ფენის მექანიკური, ელექტრული, სითბური თუ სხვა ფიზიკური თვისებები დაადგინო! მხოლოდ დღეს, ნანოტექნოლოგიის ეპოქაში, როდესაც ნანოსკოპიის უახლესი მიღწევების საფუძველზე უკვე შეგვიძლია დავინახოთ ატომები, შესაძლებელი გახდა ასეთი სრულიად ფანტასტიკური ფიზიკური ექსპერიმენტების ჩატარება.

ვიდრე გრაფენის, როგორც მასალის უნიკალური თვისებების განხილვას შევუდგებოდეთ, სასურველია დაბალგანზომილებიანი სისტემების მიღებასთან დაკავშირებული ერთი ზოგადი და ფუნდამენტური ხასიათის სირთულე აღვნიშნოთ. საქმე ისაა, რომ ბუნებას არ უყვარს (ამ სიტყვის პირდაპირი გაგებით) დაბალგანზომილებიანი სისტემები! სამყარო, რომელშიც ჩვენ ვცხოვრობთ, სამგანზომილებიანია და ბუნებაც, რომელიც ამ სამგანზომილებიან სამყაროში მოქმედებს, მხოლოდ სამგანზომილებიან მდგრად სისტემებს ქმნის. ორგანზომილებიანი კრისტალური სისტემები თავისთავად არ ჩნდება, ხოლო ხელოვნურად შექმნილები არამდგრადია და ჩვეულებრივ ან მალე იშლება მცირე ზომის კლასტერებად, ან გარდაიქმნება ჩვეულებრივ სამგანზომილებიან კრისტალურ სტრუქტურებად.

მიუხედავად ამისა, ორგანზომილებიანი ატომური ფენები, როგორც კრისტალის ზედაპირზე ხელოვნურად დაფენილი მონოატომური სტრუქტურები, უკვე ნახევარ საუკუნეზე მეტი ხანია ფიზიკოსების ინტენსიური კვლევის საგანს წარმოადგენს. ასეთი სისტემების მდგრადობას, ჩვეულებრივ, საფენი განაპირობებს.



მასკანირებელი გვირაბული მიკროსკოპის მოქმედების სურათები



ატომურ-ძალოვანი მიკროსკოპის საშუალებით სპილენძზე რკინის ატომების დალაგებით, იაპონური იეროგლიფებით დაწერილი სიტყვა „ატომი“

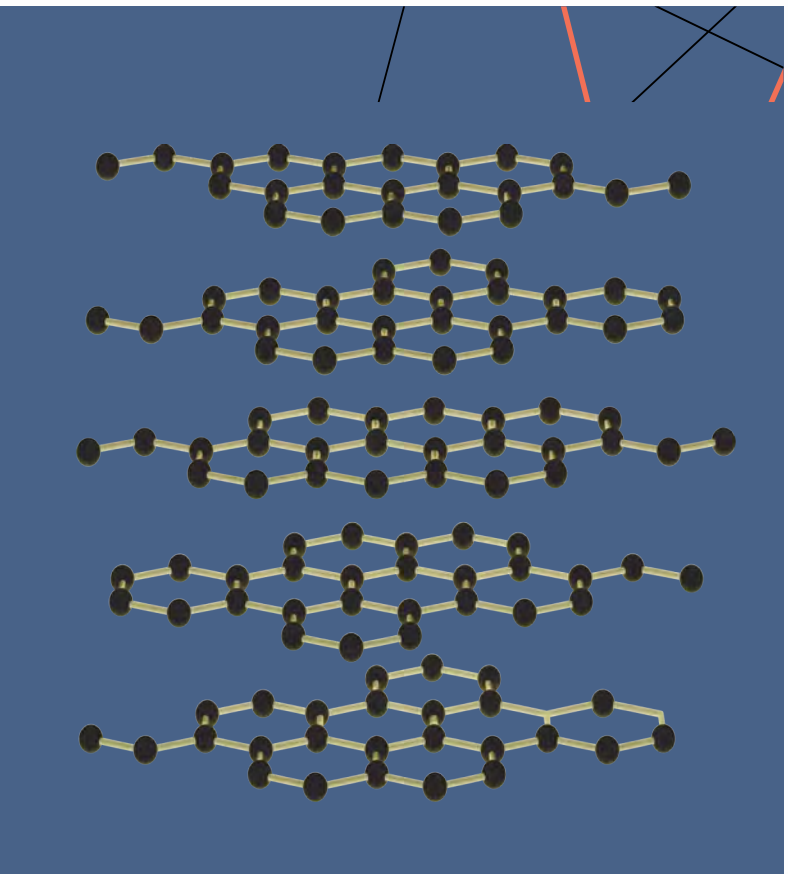
გრაფენის აღმოჩენამდე იდეალური ორგანზომილებიანი სისტემების მიმართ ინტერესს მხოლოდ თეორეტიკოსი ფიზიკოსები იჩენდნენ. ორგანზომილებიანი სამყარო მათ თავისი უჩვეულო თვისებების სიმდიდრით იზიდავდა. ამ თვალსაზრისით არც გრაფენი, როგორც ორგანზომილებიანი სტრუქტურის კერძო მაგალითი, წარმოადგენდა გამონაკლისს და მისი, ახლა უკვე ექსპერიმენტულად დადგენილი, რამდენიმე განსაკუთრებული თვისება ნაწინასწარმეტყველებიც კი აღმოჩნდა ადრეულ თეორიულ გამოკვლევებში. ამ თეორიულმა გამოკვლევებმა უაღრესად მნიშვნელოვანი როლი ითამაშა, ვინაიდან ექსპერიმენტული შედეგების და თეორიული გათვლების შესანიშნავი თანხვედრა აღმოჩნდა ის მთავარი არგუმენტი, რომელიც ადასტურებს გრაფენის, როგორც ახალი მასალის, უნიკალურ ორგანზომილებიან ბუნებას. დავძენ, რომ ყოველივე თქმული კიდევ ერთი შესანიშნავი დადასტურებაა ზოგადი დებულებისა – ლამაზი მათემატიკური კონსტრუქციები და მოდელები, რაოდენ ფორმალურადაც არ უნდა გამოიყურებოდეს თავიდან, საბოლოოდ მაინც პოვებს რეალიზაციას ბუნებაში.

გრაფენის, როგორც მასალის, განსაკუთრებულობა ნახშირბადის ატომების უნიკალურ ქიმიურ თვისებებში იმალება. სხვა ატომებისგან აგებული ანალოგიური ფირების მიღება ჯერ ვერ ხერხდება. ნახშირბადის ატომის გამორჩეულობა უკვე გრაფიტის თვისებებშიც ჩანს. გრაფიტში ნახშირბადის ატომები ძალიან მჭიდროდ არის დაკავშირებული იმავე ფენაში მდებარე მეზობლებთან და ბევრად უფრო სუსტად არის შეჭიდული მეზობელ ფენაში მდებარე ნახშირბადის ატომებთან. ამის შედეგია ის, რომ ფენები ადვილად სრიალებს ერთმანეთის მიმართ, რასაც ფანქრით წერის დროს ჩვენც ვიყენებთ. შესაბამისად, საკმაოდ ადვილია გრაფენიდან ფენების გამოცალკევებაც. ეს უკიდურესად მარტივი მეთოდი გამოიყენეს გეიმმა და ნოვოსიოლოვმა გრაფენის მისაღებად. გრაფიტის დიდი ზედაპირიდან ნაწილის ასატკეცად მათ აიღეს ყველასთვის „სკოჩის“ სახელით ცნობილი წებოვანი ფირი. შემდეგ ატკეცილი ნაწილი იმავე პროცედურით ისევ გაყვეს შუაში და ასეთი თანმიმდევრობით განაგრძეს მოქმედება მანამ, სანამ (ჰოი, საკვირველებავ!) „სკოჩით“ განცალკევების არცთუ ისე ბევრი პროცედურის შემდეგ ზედაპირზე მიღებული ნარჩენების შესაბამისი მიკროსკოპის საშუალებით შესწავლით გრაფენის ერთი, ორი ან რამდენიმე ფენისაგან შედგენილი საკმაოდ ფართო არეები არ დაინახეს.

ერთ-ერთ ადრეულ ინტერვიუში კონსტანტინე ნოვოსიოლოვი გრაფენის აღმოჩენის ისტორიის კიდევ უფრო საინტერესო და იუმორით სავსე დეტალებსაც იხსენებდა. მანჩესტერის უნივერსიტეტში, ინგლისის უნივერსიტეტების უმრავლესობის მსგავსად, მიღებულია პარასკევს საღამოს, 5 საათზე, მთელი ჯგუფის შეკრება, ჩაის სმა, სამუშაო კვირის შედეგების შეჯამება და მომავალი კვირის გეგმების განხილვა. ვინაიდან გეიმის ლაბორატორიის თანამშრომელთა უმრავლესობა რუსეთის, ჩინეთისა და ინდოეთის მოქალაქეები იყვნენ, რომლებიც ჩვეულებრივ შაბათ-კვირასაც მუშაობდნენ, ლაბორატორიაში ეს „რიტუალი“ ფორმალურ ხასიათს ატარებდა. პარასკეობით სავალდებულო ჩაის სმისთვის მინიმალური შემოქმედებითი დატვირთვა მაინც რომ მიეცა, გეიმმა ამ შეხვედრებს „ჩაის სმის პროცესში ფანტასტიკური იდეების განსახილველად მოწვეული სემინარი“ დაარქვა. ის თავის ახალგაზრდა თანამშრომლებს მოუწოდებდა ყოფილიყვნენ მაქსიმალურად თავისუფალი, შემოქმედებითი, გზა მიეცათ ფანტაზიისათვის და სემინარებზე განსახილველად შემოეტანათ უჩვეულო და, რაც მთავარია, ორდღიანი (მომავალ შაბათ-კვირაზე გათვლილი) კვლევითი პროექტები. 2004 წლის ზამთრის ერთ-ერთ

წვიმიან პარასკევს სემინარზე დაგვიანებით შემოსულ ერთ-ერთ კოლეგას, რომელიც ლაბორატორიაში გრაფიტს იკვლევდა და მისი ზედაპირის მტვრისგან გასაწმენდად ხშირად „სკოჩს“ იყენებდა, ხელში ეჭირა გადასაგდებად გამზადებული უკვე გამოყენებული „სკოჩის“ ფირი. პარასკევის ამოცანაც ნოვოსიოლოვმა იქვე დასვა: „შევისწავლოთ გადასაგდებად გამზადებული „სკოჩის“ ზედაპირზე მოხვედრილი ატკეცილი ნახშირბადის სტრუქტურები“. ამბობენ, პირველივე გამოკვლევების შედეგები იმდენად საინტერესო იყო, რომ ორშაბათიდან მთელი ლაბორატორია უკვე გრაფენის თემატიკაზე იყო გადართული. ასე დაიწყო XXI საუკუნის ტექნოლოგიაში ახალი – გრაფენის ეპოქა.

რომ დავასრულოთ საუბარი გრაფენის მიღების წესზე, უნდა აღვნიშნოთ, რომ „სკოჩის“ ზედაპირზე დამაგრებული გრაფენი ჯერ კიდევ არ წარმოადგენს ორგანზომილებიან სისტემას.



გრაფენის ფენები გრაფიტში

მსგავსი, ატკეცით მიღებული ან/და ხელოვნურად სხვა კრისტალების ზედაპირებზე დაფენილი, ორგანზომილებიანი სტრუქტურის მდგრადობას დაფენილი ატომების საფენის ატომებთან ურთიერთქმედება უზრუნველყოფს. თუ ეს კავშირი ძლიერია, მაშინ შეგვიძლია მივიღოთ მაღალი ხარისხის მონოფენა, მაგრამ აქ სხვა წინააღმდეგობა ჩნდება – საფენის ზემოქმედება ძლიერად ცვლის თავად დაფენილი ატომური ფენის თვისებებსაც, რის შედეგადაც სისტემის ორგანზომილებიანი თვისებები იკარგება. ამ დილემიდან გამოსავალია მომზადებული მონოფენის საფენიდან „ფრთხილად“ აცლა, ჩვენს შემთხვევაში –„სკოჩის“ ზედაპირიდან. „ფრთხილად“ ნიშნავს ქიმიური გზით, რისთვისაც გრაფენის დაფენილ ფენას თავის საფენთან ერთად ისეთ ქიმიურ ნაერთში ათავსებენ, რომელშიც საფენი („სკოჩის“ ფირი) გაიხსნება, ხოლო დაფენილი ნახშირბადის ატომები – არა. ამის შედეგად საფენი ქრება და სითხეში რჩება შეწონილი გრაფენის ფენები, რაც შემდგომ უკვე შეიძლება სხვა ზედაპირზე დავაფინოთ.

გრაფენის განსაკუთრებულობა სწორედ მისი ძალიან მდგრადი სტრუქტურაა. სითხეში შეწონილ მდგომარეობაში ის დიდხანს არ იშლება კლასტერებად, რაც სხვა სასურველ მასალაზე მისი დაფენის საშუალებას იძლევა. ამ გზით პირველად მიღებული გრაფენის ფირის ზომები მილიმეტრის მეასედსაც კი არ აღემატებოდა. ამის შემდეგ, რამდენიმე წლის განმავლობაში, გრაფენის მიღების ტექნოლოგია იმდენად დაიხვეწა, რომ დღეს ფაქტობრივად ნებისმიერი ზომის ფირების წარმოებაა შესაძლებელი.

რა არის გრაფენის უნიკალური თვისებები?

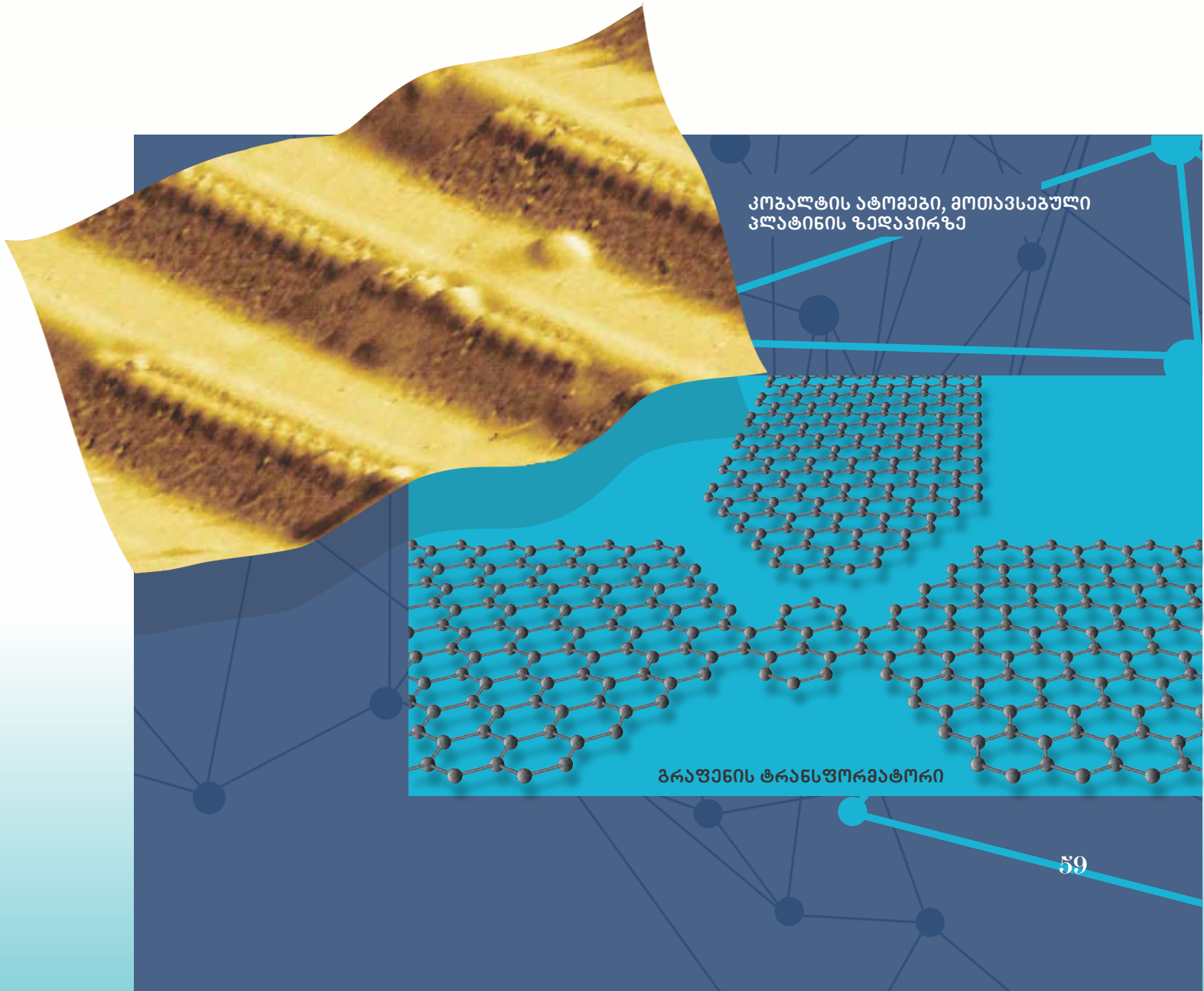
პირველ რიგში, ეს არის ზომები: გრაფენი ნახშირბადის მონოატომური ფენაა და ის ჩვენთვის ცნობილ მასალათა შორის ყველაზე თხელია – მისი სისქე თმის ღერის სისქეზე მილიონჯერ უფრო მცირეა.

მიუხედავად ამისა, გრაფენი უაღრესად მტკიცე მასალაა: გაჭიმვის დეფორმაციის მიმართ ის იმავე ზომის ფოლადზე 200-ჯერ უფრო მტკიცეა. ამავე დროს გრაფენი ელასტიკურიცაა და ადვილად იღუნება. რაც კიდევ უფრო საკვირველია, ის მყიფეც აღმოჩნდა! თუკი გრაფენის ფენას თანაბრად დავაწვებით, ის მინასავით მცირე ნამსხვრევებად დაიშლება. ასეთი მრავალნაირი და ურთიერთგამომრიცხავი მექანიკური თვისებების გამო გრაფენი მიმზიდველი კომპონენტი ხდება ახალი კომპოზიტური მასალების მისაღებად.

გრაფენი შესანიშნავი გამტარია, მასში გამავალი დენის მაქსიმალური სიმკვრივე ათი ათასჯერ უფრო მაღალია, ვიდრე სპილენძში. გარდა ამისა, განსხვავებით ჩვეულებრივი მეტალებისაგან, გრაფენში დენის გადამტან ეფექტურ ნაწილაკებს (მყარი ტანის ფიზიკაში მათ კვაზინაწილაკებს უწოდებენ) უჩვეულო, რელატივისტური ტიპის სპექტრი ახასიათებთ, რაც გრაფენის სრულიად უჩვეულო ელექტრულ თვისებებს განაპირობებს. უპირველეს ყოვლისა, გრაფენში დენის გადამტანი კვაზინაწილაკები თითქმის არ განიბნევიან მინარევებზე, რაც არსებითად აუმჯობესებს სისტემის გამტარობას. გარდა ამისა, კვაზინაწილაკებს არ გააჩნიათ ინერტულობა, რაც მნიშვნელოვნად ზრდის გრაფენის, როგორც გადამრთველის, მოქმედების სიხშირეს.

მეორე მნიშვნელოვანი განსაკუთრებულობა ის არის, რომ გრაფენზე გარე ელექტრული პოტენციალის ზემოქმედებით, რომელიც გრაფენის ფენაში ელექტრონების რიცხვს ცვლის, შესაძლებელია დენის გადამტანი კვაზინაწილაკების ბუნების შეცვლაც. თუ ელექტრონების რიცხვს გავზრდით, მაშინ დენის გადამტანი უარყოფითად დამუხტული ნაწილაკები იქნება, ხოლო თუ შევამცირებთ – დადებითად დამუხტული ნაწილაკები. ეს გრაფენზე დაფუძნებული ელექტრონიკის განვითარების ახალ, უნიკალურ შესაძლებლობებს იძლევა.

გრაფენის ელექტრული თვისებები უკვე გახდა ელექტრონიკისა და საინფორმაციო ტექნოლოგიების მიმართულებით მომუშავე ჯგუფების ინტენსიური კვლევის საგანი. 2009 წელს მილანის პოლიტექნიკური უნივერსიტეტის ჯგუფმა შექმნა ელემენტარული კომპიუტერული სქემა, რომლის შემადგენელი ნაწილია



გრაფენის ტრანზისტორი. უკვე 2010 წელს კი კორპორაცია IBM-ის ქ. იორკთაუნში (აშშ) განლაგებული კვლევითი ცენტრის თანამშრომლებმა 100 გიგაჰერცი სიხშირის და 240 ნანომეტრის ზომის გრაფენის ტრანზისტორის (ერთ მილიმეტრში 4000 ასეთი ტრანზისტორი მოთავსდება!) შექმნის შესახებ განაცხადეს.

გრაფენის გამოყენების კიდევ ერთი პერსპექტიული მიმართულებაა დისპლეები და ელასტიკური ეკრანები. როგორც ვთქვით, გრაფენი კარგი გამტარია, მაგრამ ის ამავე დროს გამჭვირვალეცაა. ეს კი უკვე სრულიად ახალ პერსპექტივებს იძლევა გრაფენის გამჭვირვალე ელექტროდის გამოყენებისთვის ისეთ დისპლეებში, რომელთა მოქმედება კონტაქტური წესით (მაგალითად, ხელის დაკარებით) ხდება.

მოკლედ რომ ვთქვათ, 2004 წლის ერთი წვიმიანი პარასკევის საღამოს მანჩესტერში დაწყებული საქმე, რომელიც 6 წლის შემდეგ ნობელის პრემიით აღინიშნა, მასალათმცოდნეობასა და ნანოტექნოლოგიებში დიდი – გრაფენის ეპოქის დასაწყისად უნდა განვიხილოთ.

სოციალური განვითარების ისტორიას თუ დავაკვირდებით, აღმოვაჩენთ, რომ ახალი ეპოქის დასაწყისისა და საზოგადოების ცხოვრებაში უმნიშვნელოვანესი ეკონომიკური და სოციალური წინსვლის ფაქტორს ხშირად სამეცნიერო-ტექნოლოგიური ხასიათის აღმოჩენები წარმოადგენს. ერთ-ერთი არსებითი ტექნოლოგიური მახასიათებელი, რომელიც კარგად მიჯნავს ერთმანეთისგან განვითარების სხვადასხვა დონეზე არსებულ ეპოქებს, არის მატერიის თვისებებზე ზემოქმედებისა და კონტროლის უნარი. ამის საუკეთესო მაგალითს უძველესი ხანის ისტორიის პერიოდიზაცია გვაძლევს – ქვის ხანიდან ბრინჯაოს ხანაში, ხოლო შემდეგ – ბრინჯაოს ხანიდან რკინის ხანაში. ასეთი მაგალითებით განსაკუთრებით მდიდარია განვითარებული ბუნებისმეტყველების ეპოქა – XV საუკუნიდან მოყოლებული პერიოდი. XIX საუკუნეში ტექნოლო-

„სკოჩის“ ფირის დახმარებით გრაფენის მიღება

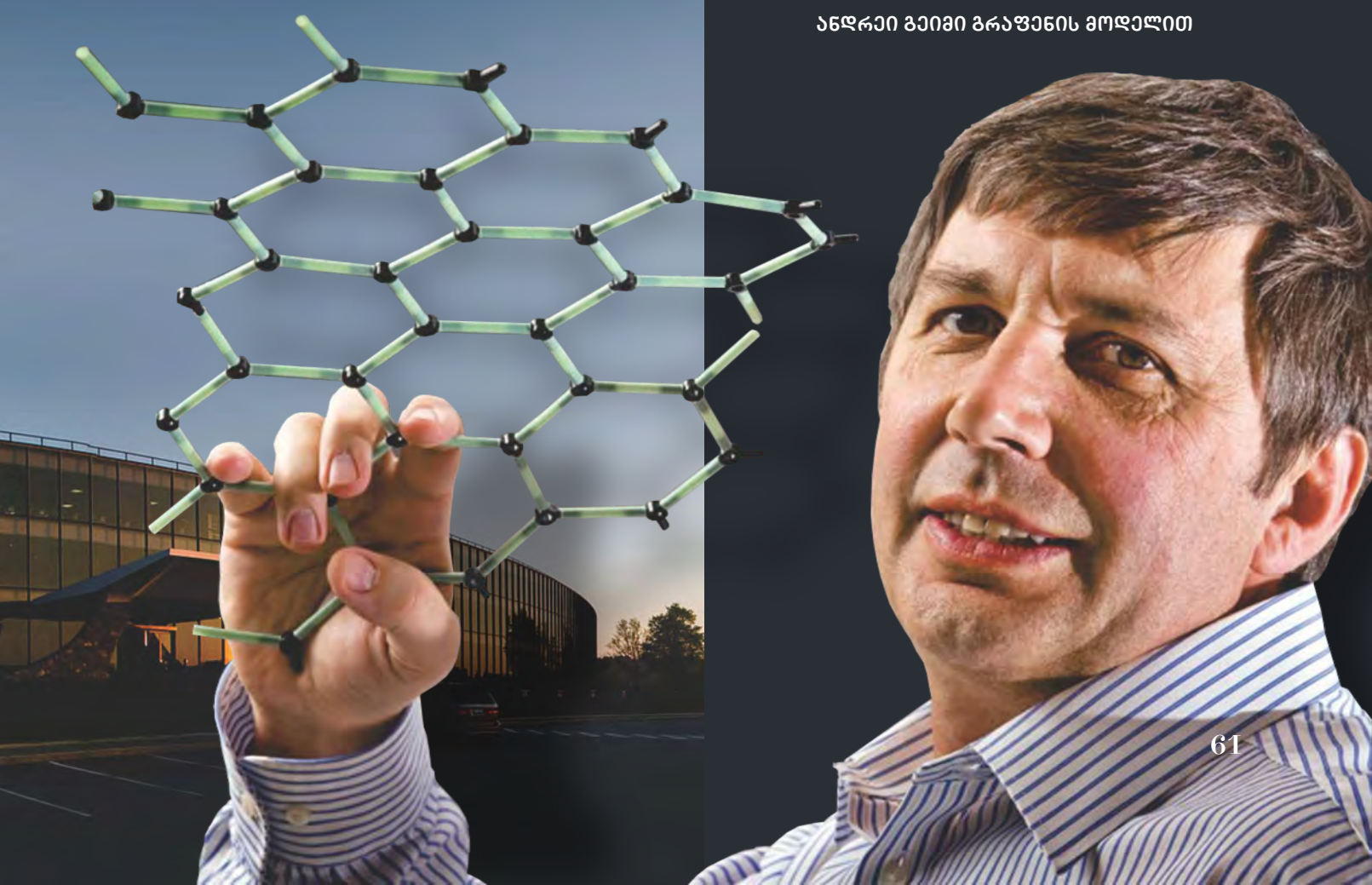
IBM-ის ოფისი იორკთაუნში

გიური წინსვლა, უპირველეს ყოვლისა, დაკავშირებული იყო ქიმიის განვითარებასთან, ახალი ელემენტების აღმოჩენასთან, ცოტა მოგვიანებით კი – რადიაციულობის მოვლენის დამზერასთან. XX საუკუნეში ტექნოლოგიებში გარღვევები განაპირობა კვანტური მექანიკის ჩამოყალიბებამ, ატომური ფიზიკის და კვანტური ქიმიის წარმატებებმა, კონდენსირებულ გარემოთა კვანტური ფიზიკის განვითარებამ, რასაც მოჰყვა თანამედროვე კვანტური მასალათმცოდნეობის შექმნა.

უეჭველია, რომ XX საუკუნის ბოლო ათწლეული და XXI საუკუნის დასაწყისი ახალი საინფორმაციო ტექნოლოგიების ეპოქის დასაწყისია, ნანოტექნოლოგიები კი – ამ ახალი ეპოქის ჩამოყალიბების თანამდევი პროცესი. ჩვენი მოთხრობილი ამბავი ატომური მიკროსკოპების შექმნის და მისი საშუალებით გრაფენის აღმოჩენის შესახებ მაგალითია იმისა, რომ გამოყენებით კვლევებზე ორიენტირებულ ლაბორატორიაში მიიღება ფუნდამენტური მნიშვნელობის ისეთი შედეგები, რომელთაც განსაზღვრეს მთელი თანამედროვე საბუნებისმეტყველო მეცნიერების განვითარების შემდგომი ათწლეულები.

თანამედროვე ფუნდამენტური და გამოყენებითი მეცნიერების ერთიანობის დასტურს იძლევა უკანასკნელი სამი ათწლეულის განმავლობაში ფიზიკაში გაცემული ნობელის პრემიების ჩამონათვალიც. მინიჭებული 30 პრემიიდან 15 არის კონდენსირებულ გარემოთა ფიზიკაში, ხოლო აქედან 12 – უშუალოდ ნანოტექნოლოგიასთან დაკავშირებული კვლევებისთვის, რომლებიც ბოლო 30 წლის განმავლობაში ჩატარდა.

დიდი ბედნიერებაა, რომ ჩვენი ახალგაზრდა მკითხველი ამ საინტერესო და შინაგანი დრამატიზმით სავსე პროცესებით დატვირთული ეპოქის თანამედროვეა და აქვს შესაძლებლობა თავად გახდეს ახალი ტექნოლოგიური ეპოქის შექმნის არა მარტო დამკვირვებელი, არამედ მონაწილეც კი.



ანდრეი გეიმი გრაფენის მოდელით