



**GRAFEN:
DÜZLER ÜLKESİNDEKİ MALZEMELER
KOSTYA S. NOVOSELOV**

Dr. Merve Çalışır ve Dr. Adil Denizli

Hacettepe Üniversitesi, Kimya Bölümü, Beytepe, Ankara

“DÜNYAMIZA DÜZLER ÜLKESİ DİYORUM...”

EDWIN ABBOTT ABBOTT, FLATLAND. A ROMANCE OF MANY DIMENSIONS

**“BURADA, OLDUĞUN YERDE KALABİLMEK İÇİN BİLE, YAPABİLECEĞİN
KADAR HIZLI KOŞMALISIN. BAŞKA BİR YERE GİTMEK İSTİYORSAN,
BUNUN EN AZ İKİ KATI HIZLA KOŞMALISIN!”**

LEWIS CARROLL, AYNANIN İÇİNDEN

“HER ŞEYİN BİR AHLÂKI VARDIR...”

LEWIS CARROLL, ALICE HARİKALAR DİYARINDA

1974 yılında Rusya'nın Ural Dağları'ndaki orta ölçekli bir sanayi kenti olan Nijniy Tagil'de doğdum. Annem, Tatyana Novoselova, okulda İngilizce öğretmeni idi (tüm çabalarına rağmen, doğru dürüst olmasa bile İngilizce konuşmaya ancak Hollanda'ya taşındıktan sonra başladım), babam Sergey Novoselov ise Fabrika'da mühendisti.

Fabrika adeta şehrin kendisi kadar büyük devasa bir işletmeydi ve hayatımızın merkezindeydi, hem de en temelden. Her sabah tam 07.00'de, kilometrelerce uzaklıktaki insanları uyandırabilecek kadar güçlü bir düdük sesi duyulurdu; 07.30'da evden çıkma vakti için iki düdük, 08.00'de çalışmaya başlama sinyali için üç düdük ve 16.30'da işçilerin eve dönebileceğini haber veren bir düdük daha. Fabrika; demiryolu vagonları ve tanklar üretti, efsanevi T-34'ler dahil. Fabrika, İkinci Dünya Savaşı sırasında işgal altındaki Harkov'dan buraya taşınmıştı. Bu durum, ailemize sıkıntılar getirmiş olsa da ben bundan oldukça gurur duyuyordum (Büyükbabam Gleb Komarov, Harkov'dan Fabrika ile birlikte tahliye edilen bir tank test sürücüsüydü ve 1944'te tankında geçirdiği bir kazada bacaklarını kaybetmişti).

Böyle yüksek teknolojiye sahip bir sanayinin yakınlarda olması demek, çevrede çok sayıda nitelikli mühendis ve uzman teknisyen olması demektir ve kaçınılmaz olarak hobilerimiz de oldukça tekniktir. Kros kayağı yapmanın yanı sıra karting ile ciddi biçimde ilgileniyordum; bunun başlıca nedeni, kendisi de otomobil sporlarına meraklı olan babamdı. Arabaların birçok parçasını kendi ellerimizle üretir veya değiştirirdik. Bu hobi sayesinde torna, freze ve kaynak işlerinden de parçalar öğrendim; bu becerilerimi yaz tatillerinde fabrikadaki staj dönemlerimde de kullandım.

Her zaman teknik yanım ağır basardı. Sekiz yaşındayken babam bana Alman yapımı bir model tren seti aldı. Fakat benim en çok kullandığım parça değişken doğru akım güç kaynağı oldu; elektroliz deneylerinden elektromıknatıs yapmaya kadar her işime yarardı. Annemle babam tam zamanlı çalıştığından ve benden yedi yaş küçük kız kardeşim Elena kreşe gittiğinden, okuldan sonra her gün birkaç saatlik "araştırma" zamanım olurdu; barut tarifleri aramak veya metal dökmek gibi ve ardından mutfağı temizlemek de elbette bana kalırdı.



Bu mutfak yükü, üst sınıflara geçip fizik öğretmenim Ljudmila Rastorguyeva'nın desteğiyle deneylerimi okul laboratuvarına taşıyabildiğimde azaldı. Kendisi bana laboratuvarındaki tüm cihazları özgürce kullanma imkânı tanıyordu. Aynı zamanda, matematik öğretmenlerim Valentina Filippova ve Ljudmila Başmakova ile birlikte beni Moskova Fizik ve Teknoloji Enstitüsü'nün (Phystech) Uzaktan Öğrenim Okulu'na yönlendirdiler ve çeşitli seviyelerde fizik ve matematik olimpiyatlarına katılmam için beni teşvik ettiler. O dönemde bilgi ve ilham kaynaklarım arasında Kvant adlı aylık dergi, aynı yayınevinden çıkan harika kitaplar ve Martin Gardner'ın çevrilmiş metinleri de vardı. Ancak yalnızca fizik ve matematik kitaplarıyla sınırlı değildim; sıkı bir okuyucu olarak okul yıllarımda favorilerim arasında Pasternak, Puşkin, Jack London, H.G. Wells, Jerome K. Jerome, Lewis Carroll ve Mark Twain vardı (gerçi zamanla edebî zevkim oldukça değişti).

Uzaktan Öğrenim Okulu ve olimpiyatlardaki başarılarım, 1991 yılında Phystech'e girişimi oldukça kolaylaştırdı. Fizik ve Kuantum Elektronik Fakültesi'ni seçtim ve eğitim kalitesi açısından olağanüstü olan, fakat yaşam koşulları bakımından hayli





zorlu bir ortamda kendimi buldum. Müfredat oldukça yoğun; özellikle üçüncü yılda, derlerde, uygulamalarda ve laboratuvarlarda günde on saate varan zaman geçirdiğimiz olurdu. Buna rağmen, derslerimiz alanında en önde gelen ve aktif çalışan bilim insanları tarafından verildiği için orada okuyor olmaktan büyük bir ayrıcalık ve gurur duyuyorduk.

Phystech öğrencileri çok yakın ve arkadaş canlısı bir topluluk oluştururdu; bu bağlar, Rusya'da 1991-95 yıllarının çalkantılı dönemini atlatmamıza yardımcı oldu. Sık sık yaşanan elektrik kesintilerinden birinde, özellikle kışın çok yaygındı, Sasha Zhuromski'nin bulabildiğimiz son mumla Tolkien'den bir şeyler okuduğunu ve bizim de ranzalara tünemiş bir düzine kadar insanla onu dinlediğimizi hatırlıyorum. O küçük oda bizim dört kişi için bile dardı. Sürekli para sıkıntısına rağmen eğlencelerimizden biri de Bolşoy Tiyatrosu'na yaptığımız ziyaretlerdi; orada "alkışçı" (ücretli alkışlayan) olarak çalışmamız karşılığında gösterileri izleme fırsatı bulurduk.

Elbette, bilimin dışında pek çok cazip seçenek ve takip edilecek birçok alternatif yol vardı. 1993 yılında Moskova'daki Ekim

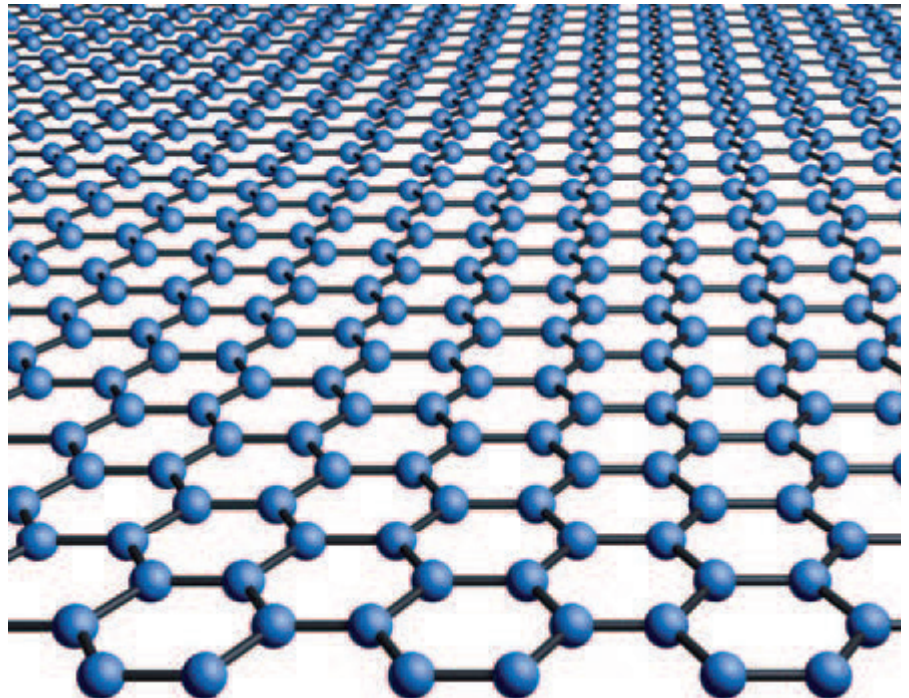
Darbesi'ne katıldım ve bu oldukça ilginç bir deneyimdi. Bana silah vermeyi reddetmelerine hâlâ şanslı olduğumu düşünürüm, oysa çok ısrar etmiştim. Bu olayın ardından, devrimlerimi fizikte yapmaya karar verdim, kesinlikle siyasette değil; hatta siyasetten olabildiğince uzak durmaya karar verdim. İş hayatıyla olan ilişkim ise biraz daha uzun sürdü: yaklaşık üç yıl boyunca, eğitimimle paralel olarak bir inşaat şirketinde yoğun şekilde çalıştım (neyse ki işin büyük kısmı yaz tatillerine denk geliyordu) ve bir süreliğine farklı bir meslek öğrenmek, yeni insanlarla tanışmak ve iyi para kazanmak oldukça eğlenceliydi. Fakat bir süre sonra sıkıldım ve bilim mi iş mi sorusu ortaya çıktığında bilimi seçtim; çünkü "yarı zamanlı bilim" yapmak kesinlikle imkânsızdı ve kariyerimin çok erken bir aşamasında bunun farkına vardığım için kendimi şanslı hissediyorum.

Phystech, diğer Rus üniversitelerinden oldukça farklıdır. Ülkedeki bilimsel faaliyet geleneksel olarak araştırma enstitülerinde yoğunlaşmıştır ve Phystech öğrencilerinin uzmanlık derslerini takip etmeleri ve araştırma projelerine katılabilmeleri için bu enstitüleri "üs" olarak kullanır. Genellikle öğrenciler üçüncü sınıflarında haftada bir günlerini bir "üs"te geçirirler; bu oran altıncı yıllarında %100'e ulaşır. İlk üs olarak

Astrofizika Devlet Araştırma Merkezi'ni seçmiştim; burası güçlü lazer sistemleri ve bunların askeri uygulamaları üzerine araştırmalara odaklanmıştı. Ancak bir yıl içinde bunun bana göre olmadığına karar verdim ve Chernogolovka'daki Mikroelektronik Teknoloji Enstitüsü'ne geçtim.

Chernogolovka, Moskova'nın doğusunda, ormanın ortasında yer alan, yaklaşık 20.000 nüfuslu ve bir düzine araştırma enstitüsüne ev sahipliği yapan çok küçük bir kasabadır. Orada her şeyi sevdim: özellikle kışın muhteşem görünürdü (enstitüye ulaşmak için her gün yarım saat ormanın içinden yürümem gerekirdi), insanlar bilime tutkunduydu ve bize sunulan derslerin yelpazesi mükemmeldi. Ayrıca dersler Katiyal Fizik Enstitüsü, Landau Kuramsal Fizik Enstitüsü ve Mikroelektronik Teknoloji Enstitüsü'nün önde gelen bilim insanları tarafından veriliyordu; sadece birkaç isim vermek gerekirse: Vsevolod Gantmakher, Vladislav Timofeev ve Mikhail Trunin.

Chernogolovka'da, bugün memnuniyetle "nanoteknoloji" diye adlandıracağımız mikroelektronik teknolojisini Sergey Dubonos'tan öğrenmeye başladım ve merhum Yura Dubrovskii'nin laboratuvarında Zhenia Vdovin, Yura Khanin ve Sergey Morozov ile birlikte tünelleme spektroskopisi üze-



rine çalıştım. Bu insanlardan, temel insani iletişim becerilerinden en karmaşık deneysel tekniklere kadar çok şey öğrendim. Özellikle Yura Khanin ve Zhenia Vdovin'in en küçük numuneleri bile inanılmaz ustalıkla işlemlerini o kadar kıskanıyordum ki, ellerimin tıraş sırasında daha dengeli olması için yakın bir arkadaşım olan Marina Dvinianina'dan bana açık ağızlı jilet almasını rica ettim oldukça acılı ve kanlı bir deneyimdi ama kısa sürede daha az tehlikeli bir uzmanlık seviyesine ulaştım.

1997'de aynı laboratuvar da doktora yapıyordum (ve hâlâ aynı jilet tıraş oluyorum), bu sırada Hollanda'nın Nijmegen kentine gidip Andre Geim ile çalışma fırsatı doğdu. Andre, o zamanlar bile yenilikçi ve yaratıcı bir deneyci olarak tanınıyordu, bu yüzden hiç tereddüt etmedim. 1999 baharında, bir deneme süreci olarak birkaç ay Nijmegen'de kaldım ve Andre'yi hayal kırıklığına uğratmak için elimden geleni yaptım: bir keresinde helyum dewarının kapağını kapatmayı unuttuğum (hayatımda o zamana kadar da o zamandan sonra da hiç olmamıştı) ve bir gazeteciye onun e-posta hesabından yazarken "last opportunity" yerine yanlışlıkla "lust opportunity" yazmıştım. Yine de, tüm bu "sabote etme çabalarım" rağmen, Ağustos 1999'da Profesör Jan Kees Maan'ın yüksek manyetik alan laboratuvarında Andre ile doktora çalışmaya başladım.

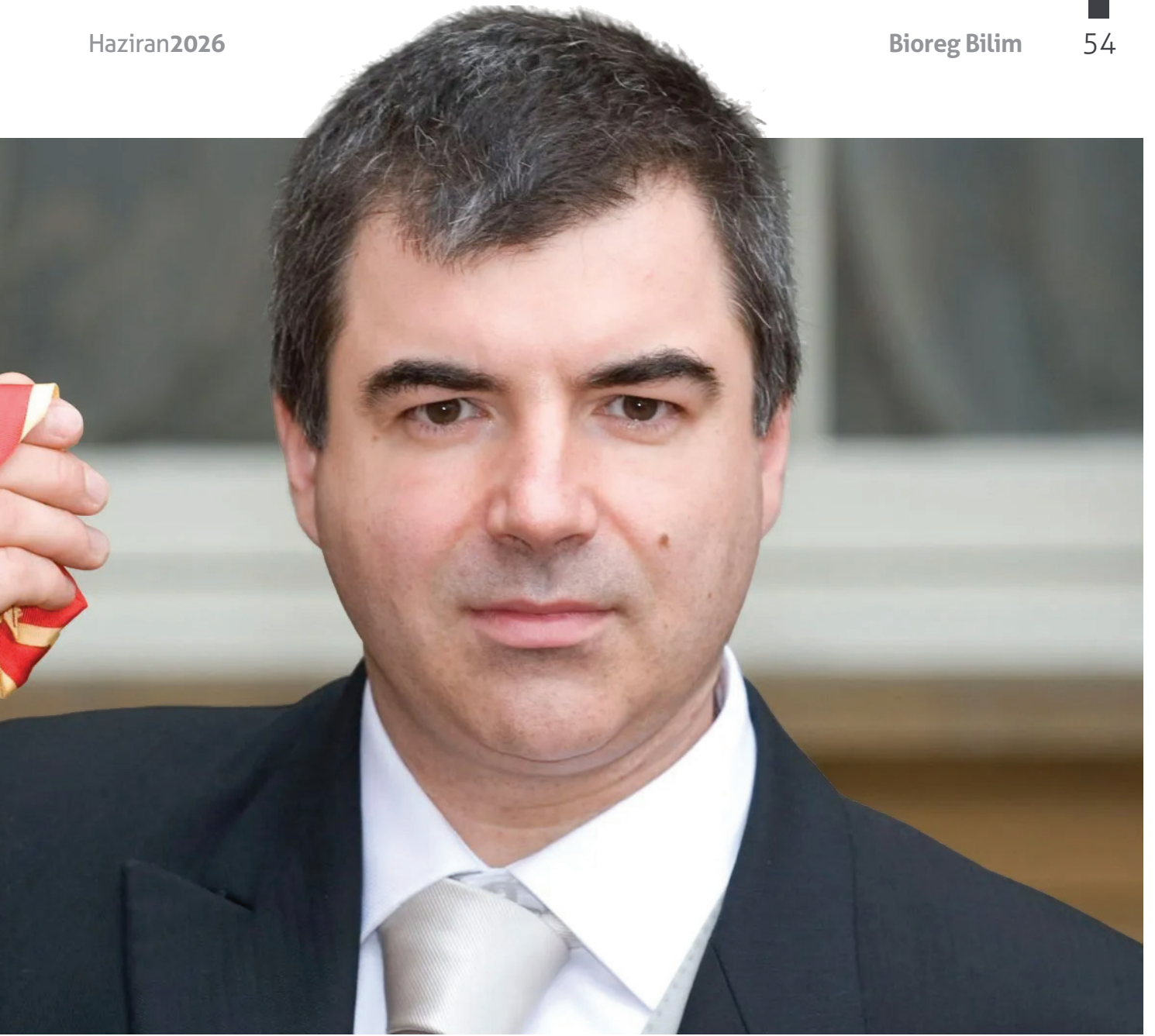
Bu benim için oldukça farklı bir deneyimdi. Laboratuvar büyüktü, uluslararasıydı, aynı anda çok çeşitli projeler yürütülüyordu ve yüksek manyetik alan cihazında ölçümler yapmak için sürekli ziyaretçiler gelirdi. Bu, bilimsel ufkumu genişletti fakat ne yazık ki Hollandaca açısından pek fayda sağlamadı: topluluğumuz o kadar uluslararasıydı ki (en yakın arkadaşlarım Igor Shklyarevskii, Fabio Pulizzi ve Cecilia Possanzini idi) konuştuğumuz dil, İngilizce'nin garip bir lehçesi, içine serpiştirilmiş İtalyanca, Fransızca, Hollandaca ve Rusça kelimeler ve Lock, Stock ile Snatch gibi Guy Ritchie filmlelerinden alınmış dilbilgisi yapılarının karışımıydı (A. Keen ve A. Quinn, bunları büyük sabırla bize açıkladı).

2001'de birçok kişi doktora ve doktora sonrası çalışmalarını tamamladıkça topluluk dağılmaya başladı. Andre'nin kendisi o yılın başlarında Manchester'a taşındı ve beni davet ettiğinde bir an bile tereddüt etmedim. Bu üst üste ikinci kez doktora mı yarım bırakmam anlamına geliyordu. Manchester'a vardığımda, beni boş bir oda karşıladı. İçinde bir lock-in amplifikatör, bir turbo pompa ve kısa süreliğine Andre'yi ziyaret ederek "manyetik su" ölçen Sergey Morozov vardı. Üç yıl içinde üçüncü laboratuvarımdı ve yine bambaşka bir deneyimdi: her şey sıfırdan kurulmalıydı hem burada hem de temiz odalarda (gerçi temiz odalarda daha az görev alıyordum). Fakat bu durum işin eğlenceli olmasını sağlıyordu



çünkü her şey tamamen bizim ihtiyaçlarımıza göre tasarlanıyordu.

Her ne kadar laboratuvar da sadece Andre, Irina Grigorieva, ben ve birkaç doktora sonrası araştırmacı ve ziyaretçi bulunuyor olsa da proje sayısı Nijmegen'de uğraştığım projelere kıyasla azalmamıştı; belki tersine artmıştı. İrina'nın kriyojenik Bitter dekorasyonu ve Andre ile birlikte çalıştığımız garnetlerdeki manyetik alan duvarlarının hareketi gibi ana projelerin yanında "manyetik su", mezoskopik süperiletkenlik, gekko bandı, taramalı tünelleme mikroskobu (STM) gibi projelerde de yer alıyorduk... liste uzayıp gidiyordu. Bu projelerin arasında, Nijmegen'de olan Irina Barbolina'yı telefonla evlenmeye ikna etmeyi de başardım;



kendisi mikrobiyoloji doktorasıyla gruba birkaç ay katıldı ve biyolojik deneylere yardım etti. Mikroskop altında maya ve diğer mikroorganizmaların çalkantılı yaşamını izlemekten hepimiz büyük keyif alıyorduk; bu projeye “yaşayan bir hücrenin son osuruğu” adını vermiştik.

Andre’nin başlattığı projelerden biri, metalik bir alan etkili transistör (FET) yapma girişimiydi. Malzeme seçimi doğal olarak grafitte yöneldi; bunun başlıca nedeni düşük taşıyıcı yoğunluğuydu. Projenin ilk aşamasının ayrıntılı tarifini atlıyorum; Andre Geim bunu dersinde anlatıyor. Ancak şunu söyleyeyim ki, Andre’nin doktora öğrencisi Da Jiang pahalı bir grafit parçasını büyük bir hevesle toza dönüştürdüğünde projeyi

tamamen bırakmak zorunda kalacağımızı düşünmüştük. Sorun için beklenmedik çözüm, Oleg Shklyarevskii’nin yürüttüğü taramalı tünelleme mikroskobu projesinden geldi.

O sırada manyetik alan taramalarının bir gün veya daha uzun sürdüğü alan duvarı ölçümleri yapıyordum, dolayısıyla soğuk STM çevresinde çok vakit geçiriyordum. Oleg ilk taramalarını yapıyordu ve grafiti, Scotch bantla sıyrarak temizleme yöntemini bana gösterdi. Çöpten bizzat aldığım Scotch bant üzerindeki grafit pullarıyla, bir saatten kısa sürede bir cihaz üretmeyi başardım ve bu cihaz derhal küçük de olsa bir alan etkisi gösterdi. Etki ne kadar küçük olursa olsun-çok büyük bir şeye rastladık-

ğımız açıldı (gerçi o sırada bunun ne kadar ileri gideceğini hayal edebildiğimi sanmıyorum). Bunun üzerine yoğunlaştık ve birkaç ay içinde ilk grafen aygıtımızı (numune ZYH-K51) elde ettik.

Elde ettiğimiz sonuçlar oldukça şaşırtıcıydı ve itiraf etmek gerekir ki teorisyenlerden büyük destek aldık. O sıralar grup seminerlerini ben düzenliyordum ve Cambridge’den Dima Khmelnsky’yi bizi ziyaret etmesi için davet ettim. Seminer 15.00’te başlayacaktı, Dima ise akşam 19.00’da geldi; Manchester’a 3,5 saatlik mesafede olduğunu hesapladığını söyledi. Elbette semineri iptal etmek zorunda kaldık ama akşamın geri kalanını son sonuçlarımız hakkında sohbet ederek geçirdik. Grafiti

duyduğunda Dima, doğrusal enerji spektrumundan söz etti ve (ezbere) böyle bir spektrum için Landau seviye kantizasyonunun harici alanda elektron için Dirac denklemi paragrafının ilgili probleminde - Landau & Lifshitz serisinin Kuantum Elektrodinamiği (Rusça baskı, 4. kitap) 148. sayfasında - ele alındığını işaret etti. Bu bilgi tam zamanında gelmişti. Ertesi sabah Dima'dan başka bir faydalı bilgi daha aldım: teorisinin doğru olduğunu doğrulamak için 04.00'te Manchester'dan çıkıp Cambridge'e 3,5 saatte vardığını haber veriyordu.

2004 yılına gelindiğinde ilk doktora sonrası araştırma (postdoc) dönemim sona ermek üzereydi ve Manchester'da devam edebilmem için aktif şekilde fon arıyordum. Leverhulme Trust'tan bir burs kazandım ancak onlar küçük yazılarda talihsiz bir ayrıntıyı işaret ettiler: Bursu alacak kişinin bir doktora derecesi olmalıydı. Yakında projem bitiyor ve ülkeden atılmak üzereyken, üç ay içinde bana derece verebilecek bir kurum bulma umuduyla başsız tavuk gibi koşturuyordum. İnternette sözde "yaşam tecrübesi"ne dayalı bir doktora satın almaya çok yaklaştım fakat koşullar bir araya geldi ve Nijmegen'den doktora unvanı aldım. Yine de işler son ana kadar pamuk ipliğine bağlıydı; uçtuğum havayolu şirketi batmış ve pasaportum Dışişleri Bakanlığı'nda sıkışıp kalmıştı. Sonunda aylar süren kaosun ardından Leverhulme Trust'ı gururla arayıp sertifikamı nereye göndermem gerektiğini sordum. Bana şöyle cevap verdiler: "Görmek istemiyoruz. Eğer aldım diyorsanız, almışsınızdır." Bu yaklaşıma tam anlamıyla hayran kalmıştım.

2009 yılında Irina ile yaptığımız biyomekanik deneyler meyvesini verdi ve son derece iyi görünen iki örnek ürettik: Sophia ve Victoria. Umarım çok ama çok uzun yıllar boyunca çalışmalarına devam ederler.

Son olarak, söz verilen ders niteliğindeki sonuç: Dördümüz (Andre Geim, Volodia Falko, Boris Altshuler ve ben) Lancaster'da bir seminer odasında, grafende zayıf yerelleşme üzerine son deneylerimizi tartışıyorduk. Volodia, hiç zayıf yerelleşme olmamasının pek mümkün olmadığını söylüyor, bizim daha iyi ölçmemiz gerektiğini iddia ediyordu. Biz ise bunların gerçekler olduğunu savunuyor ve herkesin gerçek fiziksel durumu tartışıp anlamaya çalışmasını teşvik ediyorduk. Gerçek her zamanki gibi ortalarda bir yerdeydi fakat tartışma oldukça hararetlendi ve hatta kişiselleşti (Andre ile Volodia arasında sık olduğu gibi). En sonunda Boris yerinden fırladı, koşarak uzaklaştı ve Stark'ın kötü fotokopi edilmiş bir makalesini getirdi. Bu makale gerçekten çok tuhaf "Fizikte Pragmatik ve Dogmatik Ruh" üzerine. Bilimin nasıl yapılması gerektiğine dair muhtemelen gelmiş geçmiş en özlü açıklamayla başlıyor ve her kelimenin altına imza atmaya hazırsınız... ta ki sayfayı çevirene kadar. Sonrasında... diyelim ki Volodia kötü adam çıktı (Einstein, Schrödinger ve Heisenberg gibi şanlı bir grubun içinde).

Çıkarılacak ders şudur: Bilimin ruhu bir ders kitabından ya da makaleden öğrenilemez. Üniversite bize fizik, kimya ve daha birçok disiplini öğretebilir ancak bilimi "nasıl yapmak gerektiğine" dair içgüdüyü geliştirmek bize kalmıştır. Ben, Andre Geim ile çalışmış ve ondan öğrenmiş olduğum için son derece şanslıyım. Kendisi inanılmaz derecede yenilikçi ve geniş perspektifli olmasının yanı sıra, aynı zamanda gerçeğe çok bağlıdır; kendisine karşı da son derece eleştireldir ve en ince ayrıntılara takıntılı derecede dikkat eder. Büyük resmi kaybetmek ya da "güzel teorinize" kapılıp gerçeklerden uzaklaşmak çok kolaydır; Andre bu iki uç arasındaki dar yolu bulma konusunda ustadır ve hayatımda gurur duyduğum bir şey varsa, o da bu tarzdan biraz olsun öğrenmiş olmamdır.

