

Лазерът на 50 години¹

Астрономия – Клер Макс, директор на Центъра за адаптивна оптика в Университета на Калифорния, Санта Круз, САЩ.

Всички знаят, че атмосферната турбуленция причинява трепкането на звездите, но тя също силно замъглява образите, получени с телескопи. Още Нютон разбира това, когато през 1730 г. пише в своята *Оптика*: "...въздухът, през който гледаме звездите, непрекъснато трепти... Единственото спасение е най-чистия и спокоен въздух, какъвто може би може да се намери на най-високите планини над Grosser Clouds".

Теоретично, телескопите с все по-големи диаметри би трябвало да са способни да разкриват все по-малки подробности на астрономичните изображения. Но замъгляването, причинено от атмосферната турбуленция е толкова силно, че дори и най-големите наземни телескопи (с 8–10 метра диаметър) не могат да дадат по-ясно изображение от един 20 сантиметров любителски телескоп. За да подобрят ситуацията, астрономите използват адаптивна оптика – една технология, която измерва моментното състояние на атмосферната турбуленция и след това коригира получените оптични изкривявания с помощта на специално деформируемо огледало (обикновено то представлява малко огледало, разположено зад главното огледало на телескопа). И тъй като турбулентността се променя непрекъснато, подобни измервания и корекции трябва да се правят стотици пъти в секунда. Първите адаптивни оптични системи използваха за измерване на турбулентността светлината от една ярка звезда. Повечето от интересните астрономични обекти обаче не се намират в съседство до ярка звезда и това силно ограничаваше използването на адаптивна оптика. След това, в началото на 80-те години, астрономите осъзнаха, че могат да използват лазера, за да направят изкуствена "звезда" като заместител. Това хрумване разшири неимоверно много областта на използване на адаптивните системи, тъй като лазерът може да се насочи към всяка наблюдавана небесна цел. През последните пет години тези лазерни адаптивно-оптични системи с "водеща звезда" наистина оправдаха надеждите, така че днес всеки голям 8–10 метров телескоп се перчи със свой собствен лазерен маяк.

Лазерите, използвани в тези маяци, имат впечатляващата мощност от 5–15 W (една типична лазерна показалка има мощност под 1 mW). Ето защо федералните правила в САЩ налагат обсерваториите да изключват лазерите, когато се приближава самолет; обсерваториите също така съгласуват предварително своите наблюдателни планове с космическото командване, за да се избегне засягането на някой чувствителен космически обект.

Използват се главно два типа лазери. Първият представлява една обикновена система, която е настроена на жълтата 589 nm резонансна линия на неутралния натрий. Чрез възбуждане на намиращите се в високата атмосфера натриеви атоми, лазерният лъч създава водеща звезда на височина от около 95 km. Вторият тип е настроен на дължината на вълната на зелената светлина и даже на ултравиолетовата светлина. Използва се релеевско разсейване от молекулите в атмосферата и се създава водеща звезда на височина 15–20 km. Преимущество на зелените и ултравиолетовите лазери е фактът, че те се намират в търговската мрежа, което ги прави много по-евтини за използване в адаптивните

¹ Статия от майската книжка на сп. *Physics World* (2010 г.), посветена на 50-годишнината от създаването на първия лазер. Авторите са водещи специалисти в шест различни области, в които намират приложение лазерите. Заглавието е на преводача.

оптични системи, отколкото системите с жълта светлина. Благодарение на използващата лазери адаптивна оптика, днес 8–10 метровите телескопи имат по-добра разделителна способност от космическия телескоп Хъбл – просто заради по-големите размери на огледалата. Планираните гигантски телескопи като Тридесет метровия телескоп, гигантския Магеланов телескоп и Европейският извънредно голям телескоп също ще използват едновременно по няколко създадени с лазери звезди. Това ще позволи на астрономите да мерят и коригират турбулентностите в целия въздушен стълб, който се намира над телескопа. Тези използващи няколко лазера системи ще използват технологията на томографите – подобно на използваната за получаване на изображения в медицината компютризирана аксиална томография. Това ще позволи да се реконструира профила на турбулентността и ще даде възможност адаптивната оптика да коригира много по-широки от досегашните полета.

Атомна физика – Уилям Д. Филипс, физик в Националния институт за стандарти и технологии (NIST) в Гейтърсбург, Мериленд, САЩ, Нобелов лауреат заедно с Коен-Тануджи и Стивън Чу за охлаждане и захващане на атоми с лазерна светлина (1997).

В началото на 70-те години бях млад студент в изследователската група на Дан Клепнер в Масачузетския институт за технологии. Работех върху тезата си за прецизни измервания с водороден мазер със силно магнитно поле (мазерите бяха предшественици на лазера, който тогава се наричаше “оптичен мазер”). Десетина години преди това Клепнер и Норман Рамзи бяха създали вариант на водородния мазер със слабо поле, а вариантът със силно поле позволяваше безпрецедентно точни измервания на магнитните моменти в атомите – своеобразен връх в тази област на атомната физика.

По това време обаче настъпи развитие, което щеше да промени посоката на работа на цялата лаборатория, на моята кариера и на атомната физика като цяло: появиха се първите непрекъснато действащи пренастройващи се лазери на багрила за търговски цели. Активната среда в тези прибори е органично багрило, което излъчва в далеч по-широк диапазон от дължини на вълната, отколкото, примерно един хелиево–неонов лазер, в който активната среда е атомарен газ. Появата на новите прибори означаваше, че дори онези, които не са специалисти в планирането и създаването на лазери, могат, чрез настройка на лазера на някой от атомно-резонансните преходи, да работят в една нова област, в която ключово средство е кохерентната светлина.

Готов да си поиграя с тези нови играчки, аз помолих Дан да предложи допълнителен експеримент с лазери за тезиса ми. Той се съгласи и предложи да изследвам ударите между оптически възбудени натриеви атоми. Започнах да строя опитната постановка. Други колеги от групата също започнаха нови опити. Всеки нов номер на списанията носеше нарастващ брой на статии, свързани с лазерите и на всяка конференция се докладваха резултати от лазерни експерименти.

Възбудата по онова време бе значителна. Нови идеи и нови експерименти се появяваха навсякъде. През 1978 г. аз бях вдъхновен от Дейв Уайнланд, който демонстрира лазерно охлаждане на йони в NIST в Боулдер, Колорадо, и от една идея на Арт Ашкин от Лабораториите на Бел за забавяне и захващане на сноп натриеви атоми. По-късно през същата година, когато отидох в лабораториите на Бюрото в Гейтърсбург, аз си взех експерименталната установка и започнах работа по охлаждане и залавяне на натриеви атоми.

За мен възбудата, която чувствах през 70-те години в лабораторията на Дан никога не избледня. Новите лазери с различни дължини на вълните, с все по-кратковременни

импулси, с все по-големи мощности, с все по-тесни спектрални широчини и с все по-добра стабилност, направиха възможни нови видове експерименти. Лазерното охлаждане на много повече типове атоми и йони, атомните часовници, работещи на оптични честоти и неklasическите състояния на светлината са само някои от пътищата, по които лазерите насочиха атомната, молекулната и оптичната физика (АМО).

Нещо повече – лазерите дадоха възможност на АМО-физиците да осъществят Бозе–Айнщайнова кондензация, да създадат оптични решетки и да изследват ултразвучни Ферми–газове. Всичко това задълбочи връзките между АМО и физиката на твърдото тяло. Може би лазерите и охладените атоми ще помогнат да се разберат някои от основните проблеми на физиката на твърдото тяло, като например произхода на високотемпературната свръхпроводимост и природата на дробните квантови Холови състояние, които са полезни за квантовите компютри.

Още от времето, когато за пръв път станаха достъпни, лазерите засилват и засилват атомната физика, и този процес не показва признаци на затихване.

Биофизика – Стивън Блок, биофизик в Станфордския университет, Калифорния, САЩ.

През последните 10 години станаха възможни биофизични експерименти, които преди това бяха само мечта. Например, аз работя в област, известна като биофизика на отделната молекула. Предизвикателството в тази област е да се изследват молекулите на живота – протеините, нуклеиновите киселини, въглеродородите и другите химични съединения, които ни изграждат, буквално молекула по молекула. Това не е лесно, тъй като всички биомолекули са твърде малки, за да се видят, например, с обикновен микроскоп. Въпреки това ние можем да работим с тях, да ги измерваме, и техниките, които се използват за тези цели често изискват лазери.

Една техника, в разработването на която моята лаборатория бе пионер, е позната като “оптични пинцети”. Идеята, върху която почиват оптичните пинцети е, че вие можете да използвате налягането, което упражнява лъчението от един инфрачервен лазер, за да хванете и работите с малки частици – включително протеини и нуклеинови киселини – и да ги местите под микроскопа. За да постигнем това, ние закачваме към молекулите микроскопични мъниста – например към ДНК. След това използваме оптичната пинцета и оптични уловки, за да ги “държим върху” тези мъниста и да прилагаме извънредно малки, контролирани сили върху ДНК-молекулите.

Лазерите, които използваме за тази цел имат някои изключителни свойства – те не са като лазерите в лазерните показалки или във вашето устройство за четене на компакт-дискове. Ние трябва да сме в състояние да държим няколко секунди лазерния лъч стабилно в пространство с размерите на водороден атом, т.е. 1 \AA . Това е необходимо, защото двойките в основата на ДНК-молекулата се намират на разстояние около $3,5 \text{ \AA}$, а едно от нещата, които ни интересуват, е как например ензимът РНК-полимераза, който “чете” генетичния код, се премества, когато се изкачва по стълбицата на ДНК двойка след двойка. Удивително е, че ние можем буквално да наблюдаваме как се случва това, а то зависи от способността да насочим лазерната светлина върху ензима и след като тя се разсее, да измерим отмествания, които са от порядъка на ангстрьом. Ние постоянно търсим лазери с по-висока мощност в отделна мода и по-добри стабилизационни свойства. Някои от новите поколения диодни лазери вече достигат точката, когато ще могат да се използват в тези експерименти, но те все още не са излезли от фазата на лабораторните разработки. Ще бъде много интересно, когато те го направят.

Отбрана – Джеф Хечт, нещатен журналист, пишещ по научни и технологични въпроси, който следи лазерните оръжия от 1980 г. насам.

Високо енергийните лазерни оръжия, които дълго време бяха предмет на научната фантастика, наскоро стигнаха повратна точка. Тя обаче не е онова, което бихте очаквали, след като сте гледали новите видеоклипове с въоръжения с лазери Боинг 747, който през февруари тази година разруши летяща ракета. Вместо това, военните в САЩ планират да се съсредоточат върху осуетяването на атаки от недалечни цели като например ракети, мини и артилерийски снаряди.

Модерните лазерни оръжия водят начало някъде откъм 1980 г., когато основна цел бе разработката на мощни лазери, способни да разрушат ракети, изстреляни от стотици или хиляди километри. Още програмата на президента Роналд Рейгън за “Звездни войни” изразходва милиарди за планове за орбитални лазерни станции. Трудните технологични проблеми и краят на студената война обаче промениха изискванията. Резултатът бе лазер, носен от самолет (Air borne Laser – ABL): един Боинг 747, снабден с мегаватов химически кислородно-йоден лазер, предназначен да сваля ракети, изстреляни от “непослушни държави”.

През май 2009 г. обаче държавният секретар за отбраната Робърт Гейтс заяви, че ABL е достигнал разстояние на поразяване под 140 km – далеч по-малко от планираните минимум 200 km. Така, след настоящият рунд от тестове (провеждани в един таен по-къс обсег), отново ще започнат опитите за достигане на мегаватова мощност с лазери, които използват пари на алкални метали, напомпвани с диоди. Лазери от този тип за сега излъчват десетки ватове, но евентуално биха могли да постигнат по-добро съотношение на мощността към размерите, отколкото ABL. Докато тези планове се реализират (ако това стане), новото бъдеще на лазерните оръжия ще бъдат твърдотелните лазери, които излъчват 100 kW и повече в постоянен или импулсен режим. Вече бе демонстрирано как лазер от този клас детонира не избухнал снаряд чрез осветяването му от безопасно разстояние. Надеждата е, че лазери с мощности от 100–400 kW биха могли да унищожават ракети, мини и снаряди на разстояния до няколко километра. Близкият обхват на тези цели би облекчил проблемите с разпространяването на лъча, които затрудняват ракетните отбранителни системи, използващи лазери. Нещо повече, чрез детониране на експлозиви във въздуха с лазерно нагриване вместо с изстрелване в тях на снаряди, използващите лазери оръжия биха намалили “страничните поражения” върху приятелски войски и цивилни лица.

През март 2009 г. отбранителният гигант Нортроп Груман съобщи за непрекъснато излъчване на повече от 100 kW за пет минути от един лабораторен лазер, напомпван с диоди. Този февруари Textron Systems достигнаха същата цел със собствена установка. Това са за сега най-големите достигнати мощности на непрекъснато лъчение от твърдотелен лазер. Следващата стъпка е да се създаде 100 kW лазер, който може да работи върху кораб, военен влекач и самолет. Мобилна версия на установката на Нортроп Груман ще бъде изпробвана върху влекач. Друга отбранителна агенция, DARPA, строи по-лек 150 kW твърдотелен лазер, който да се използва на бойни самолети, докато военноморските сили планират изпитания на подобни лазери в морето.

Лазерите, използвани във всички тези проекти, бележат радикална промяна в планирането на лазерни оръжия. Предишните лазери с военно предназначение използват химично гориво и командирите не ги искаха на бойното поле, тъй като пренасянето на химическите горива поставя големи логистични изисквания. Те искат лазери, които може

да се зареждат с дизелови генератори. Остават и други трудно преодолими предизвикателства, включително повреди на самия лазер, необходимостта да се действа в замърсената среда на бойното поле, както и очакваната висока цена на установките.

Поразяването на няколко тестови ракети би трябвало да бъде лесно. Построяването на мобилни лазери, които работят надеждно в обръканите условия, когато хора стрелят по тях, е много по-труден проблем. Ние вероятно ще видим прототипи, стрелящи по цели, в рамките на няколко години, но не очаквайте приложения на бойното поле преди 2020 г. – най-рано.

Лазери на свободни електрони – Джон Мейди, директор на лабораторията FEL в университета на Хавай, САЩ.

Както всички лазери, и лазерите на свободни електрони (FELs) действат на принципа на стимулираното излъчване, за да усилят светлинен лъч при преминаването му през определена област. С други думи, при преминаване на електроните от състояние с по-висока към състояние с по-ниска енергия, те излъчват фотони с една и съща дължина на вълната, движещи се в една и съща посока. За разлика от преходите между свързани състояния в другите лазери обаче, FELs използват друго ключово откритие на Айнщайн – специалната теория на относителността. Те осигуряват подаващо се на настройка електромагнитно лъчение чрез сноп релативистични свободни електрони, които преминават през напречно магнитно поле, променящо се в пространството периодично. Според теорията на относителността, електроните възприемат подобно поле като интензивна разпространяваща се в тяхната система на покой вълна, чиято дължина е намалена пропорционално на кинетичната им енергия. Дължината на вълната на фотоните, разсеяни от електроните от този импулс по посока на тяхното движение, е намалена още веднъж спрямо дължината, наблюдавана в лабораторната отправна система. В резултат, когато преминават през магнитно поле с период 2 cm, електрони с кинетична енергия от 50 MeV излъчват в близката инфрачервена област. Светлина с по-голяма или по-малка дължина може да се генерира просто чрез промяна на енергията на електроните. FELs могат лесно да осигурят лазерно лъчение, чиято мощност е около 1 % от моментната мощност на електронния сноп – мегавати и повече – а продължителността на импулсите може да се променя от части на пикосекундата до напълно непрекъснато действие. С използването на подходящи интерферометрични резонаторни системи може да се постигне изключителна фазова кохерентност.

Скоро след като аз и колегите ми от Станфордския университет през 1974 г. и 1976 г. съответно демонстрирахме първите FEL усилватели и осцилатори в областта на оптичните дължини на вълната, започнаха усилия за откриване на възможни техни приложения. От тогава фокусът е върху използването на FELs за неща, трудно изпълними с други средства. Вероятно най-известното приложение е генерирането на пренастройващи се, с висока моментна мощност, кохерентни фемтосекундни рентгенови импулси при енергии над 1 keV, които се използват за структурни и функционални изследвания на сложни отделни и взаимодействащи молекули. Първият подобен рентгенов FEL понастоящем действа на ускорителя SLAC в Националната ускорителна лаборатория в САЩ, а европейският рентгенов лазер на свободни електрони трябва да бъде пуснат в лабораторията DESY в Германия през 2014 г.

Дори за приложения, за които могат да се използват и други типове лазери, FELs имат преимущество, че са много гъвкави. FELs се оказаха безценни при провеждане на изследвания, при които изискванията на определено приложение все още не са изяснени,

или когато изследователският колектив няма достатъчно време или пари, за да развие специализирана лазерна система, необходима за даденото приложение. FELs от третото поколение, които се появиха през 80-те години, с техните кратки импулси с голяма моментна мощност, се оказаха подходящи за разработване на нови техники в хирургията и за изследване на енергетичните нива, зонната структура и подвижността на електроните и дупките в новите материали, използвани в електрониката и оптиката, при това без да се безпокоим за вредите, нанасяни на материалите при използване в изследванията на по-продължителните импулси.

Развитите напоследък FEL-системи с голяма средна мощност разшириха тези възможности и включиха изследването на възможни приложения на лазерите за обработка на материали, използвани в индустрията. От поне същото значение са усъвършенстванията в изследванията на климатичните промени, станали възможни заради големите възможности за пренастройване, високата пикова мощност и изключителната пространствена и времева кохерентност, предлагани от FELs във видимата и инфрачервената област.

Има обаче и няколко облачета на хоризонта на изследванията с FELs. Исторически погледнато, подобни изследвания се правеха в няколко малки и средни университетски и държавни лаборатории в САЩ, Европа и Азия. Скорошният преход към по-големи национални лаборатории дава много научни предимства, но същевременно се появява и рискът да направи както науката, така и технологиите по-малко достъпни за университетските учени, които може да се намират далеч от големите централни установки.

Накрая, съществуват опасения, че доставчиците на използващи FELs технологии – включително на микровълни с голяма мощност, свръхвисок вакуум и специални оптични материали – може да се окажат неспособни да продължат тези производствени линии, в случай на стесняване на промишлените пазари за тях. Мъдрите правителства би трябвало да предприемат необходимите стъпки, за да не се изгуби ноу-хауто, върху което почиват тези критични национални потенциални възможности.

Гравитационни вълни – Ерик Густафсон, от Калифорнийския институт за технологии, водещ в групата на гравитационната лаборатория LIGO.

Често цитирани като “вълнички на пространство–времето”, гравитационните вълни се излъчват по време на извънредно бурни астрофизични събития, при които скоростите на обекти като неутронни звезди или черни дупки се променят за много кратък интервал време със съществени части от скоростта на светлината. Регистрирането на такива вълни е голямо предизвикателство, защото, за разположените на земята детектори тези промени на скоростта стават във времеви мащаб между части от милисекундата и няколко десетки милисекунди. Измерването на тези нищожни флуктуации на кривината на пространство–времето изисква използването на много чувствителни лазерни интерферометри, в които светлинните лъчи преминават по перпендикулярните рамене на прибора, отразяват се от огледалата, разположени в края на всяко рамо, и се връщат, за да интерферират един с друг. Идеята е, че една преминаваща гравитационна вълна ще промени интерференчната картина по определен начин.

Лазерите, използвани при опитите за откриване на гравитационни вълни, се променят с развитието на лазерните технологии. Първият интерферометричен експеримент, планиран да регистрира тези вълни, е направен от Роберт Форвард в Калифорния в началото на 70-те години. Той използва хелиево–неонов лазер с мощност 75

mW и размери колкото шахматна дъска. С този уред Форвард постига забележителна чувствителност, измервайки най-малките достигнати за сега с помощта на лазер премествания от $1,3 \cdot 10^{-14} \text{ m} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, което е еквивалентно на измерване на промени, по-малки от 2 nm на разстоянието от Земята до Слънцето. Обаче малките мощности на хелиево–неоновия лазер ограничават интерферометрията на гравитационните вълни до мащабите на опити, провеждани върху лабораторна маса.

През 80-те години няколко групи по света построиха интерферометри в системи с висок вакуум, в които оптиката е така окачена, че да ги изолира от околния шум. Размерите на тези експериментални установки бяха между един и няколко десетки метри и използваха лазери с йони на аргона, които излъчват вълни с дължина 514 nm при изходна мощност от няколко вата. Обикновено тези интерферометри се планират за изучаване на специфичните проблеми на гравитационно-вълновата интерферометрия, такива като сравняване на различни оптични конфигурации, намиране начини за контролиране на окачената оптика, характеризиране на шума в подсистеми като огледалата и др.

За нещастие, плазмените тръби, използвани в аргоновите лазери, заедно с необходимото им водно охлаждане, произвеждат шумове с високи нива. Нещо повече, относително краткото време на живот на тези тръби ги прави непрактични за използване в една обсерватория. Накрая, изходната мощност на лазерите, макар и по-голяма, отколкото на хелиево–неоновите лазери, бе по-малка от стотиците вати, изисквани от по-съвременните детектори, тъй като при високите честоти чувствителността на детектора е ограничена от ударния шум.

През 90-те години, когато бяха планирани и построени обсерватории с километрови размери (LIGO в САЩ, VIRGO в Италия и GEO в Германия), станаха достъпни твърдотелни лазери с диодно напompване. Тези лазери имат не само много по-ниски равнища на честотния шум отколкото лазерите с йони на аргона, но са в състояние и да произведат много по-голяма мощност. В началото тяхната максимална изходна мощност бе около 10 W, но усъвършенстваните лазери с диодно напompване и други конфигурации направиха възможни мощности от порядъка на 100 W, които правят възможно ново поколение интерферометри. Тези нови интерферометри ще бъдат използвани през следващите няколко години на LIGO и VIRGO и ще използват 200 W лазери. За разположени в космоса инструменти като LISA (Laser Interferometer Space Antenna) се подбират твърдотелни лазери с диодно напompване не заради възможностите им за големи мощности, а заради тяхната много висока ефективност и надеждност – характеристики, които са особено важни за космически мисии.

Не е точно ясно какви лазери или дължини на вълните ще са необходими за бъдещите детектори, разположени на земята. Може да се подберат малко по-дълги вълни, за които може да се използват нови огледала, непрозрачни при 1064 nm, но може да се използват и по-къси дължини на вълните, които ще позволят да се намали дебелината на огледалните покрития, за да се намали термичния шум. Възможно е след като изследователите започнат да търсят “правилната” дължина на вълната, за да оптимизират чувствителността, ние ще открием, че се нуждаем от дължини на вълните, които може да се излъчат само чрез нелинейно преобразуване на честотата на твърдотелните лазери – и така нашият избор на лазер може да продължи да еволюира.