

Leysirinn 50 ára: Aðdragandi, smíði og árangur

Þorsteinn J. Halldórsson

European Aeronautic Defence and Space Company

Vefútgáfa: 02.08.2010

Ágrip — Greint er frá því hvernig tókst að þróa nýjan ljósgjafa, leysi, fyrir samheldið ljós í einum geisla, á grundvelli örvaðrar geislunar rafsegulbylgna. Rakin eru áhrif þessarar uppötunar á þróun ljósfræðinnar og annarra greina eðlis-, efna- og stjörnufræði og gefið stutt yfirlit um tæknilega notkun hennar.

1. Inngangur

Þann 16. maí 1960 tókst Theodore Maiman hjá Hughes flugvélafyrirtækinu í Kaliforníu fyrstum manna að koma af stað leysiferli (e. lasing) í manngerðum roðasteini (e. ruby) á djúprauðu öldulengdinni 694.3 nm. Leysirinn (e. laser) hefur síðan valdið þáttaskilum í ljósfræði og öllum sviðum eðlisfræði og efnafræði sem nota ljósgjafa sem rannsóknartæki og sömuleiðis hrint af stað tæknibyltingum á fjölda hagnýtra sviða svo sem mælitækni, fjarskiptum, fjölmiðlun, vélsmíði og læknisfræði. *American Physical Society* (APS), *Optical Society of America* (OSA), *International Society for Optical Engineering* (SPIE) og *Institute of Electrical and Electronics Engineering* (IEEE) eiga frumkvæðið að því að halda upp á 50 ára afmæli leysisins árið 2010 með sérstökum samkomum, hátíðafyrirlestrum og greinaflokkum um allan heim (www.laserfest.org). Í telefni afmælisins er hér rakin saga einstakra hugmynda sem leysirinn byggir á, smíði Maimans á honum lýst og yfirlit gefið yfir frekari þróun leysa og notkun þeirra.¹

2. Geislunarlögmálin

Albert Einstein (1879-1955) lagði fræðilegan grundvöll að leysinum með jöfnum um víxlverkun rafsegulbylgna við efni, sem birtust í greinum hans árin 1916 og 1917 [1,2]. Það er lærdómsríkt að rifja hér upp niðurstöður hans frá þeim tíma og skoða hvers vegna það tók samt rúmlega fjörutíu ár að koma fyrsta leysinum af stað og hver ávinningur varð af honum síðar.

Einstein dró þá ályktun af niðurstöðum Heinrichs Hertz (1857-1894) um rafsvæifugjafa, að sameindir, sem bera öll einkenni þeirra, geisli rafsegulbylgjum,

með eða án örvarunar ytra sviðs. Annars vegar verður *sjálfgeislun* (e. spontaneous emission) sameinda sem færast frá efra til lægra orkustigs á tilviljunarkenndan hátt — eins og Egon von Schweidler hafði uppgötvað árið 1905 um hegðun γ -geislunar geislavirkra efna [3]. Hins vegar getur sameind ýmist lyfst frá lægra til hærra orkustigs eða öfugt, fyrir áhrif ytra sviðs. Hún tekur við eða skilar af sér orkumismun efra og neðra stigsins í formi geislunar. Hann nefndi þetta *ástandsþrenging* sameinda við ágeislun (e. transitions), sem í dag eru kallaðar *ísog* (e. absorption) og *örvuð geislun* (e. stimulated emission).²

Einstein gekk einnig út frá þeim skilningi skammtafræðinnar að sameind getur verið í einu stöku ástandi eða orkustigi af mörgum $Z_1, Z_2, \dots, Z_n, \dots$ með tilheyrandi innri orku $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n, \dots$. Hann lýsti ástandsþrengingu frá efra ástandi, Z_m til lægra ástands Z_n á tímaeiningu dt með líkindunum:

$$dW = (A_{mn} + \rho B_{mn})dt \quad (1)$$

samsett af líkindum á sjálfgeislun A_{mn} og örvaðri geislun ρB_{mn} þar sem ρ er geislunarljóminn sem verkar á eindina og B_{mn} er stuðull örvaðrar geislunar. Líkindum ísogs orku við ástandsþrengingu lægra ástands Z_n til hærra ástands Z_m lýsti hann með:

$$dW = \rho B_{nm}dt \quad (2)$$

þar sem B_{nm} er stuðull ísogs. Hann gekk út frá því að hlutallsleg sætni W_n (e. population) á hverju orkustigi Z_n fylgi kórdræfingu (Boltzmann-dreifingu) sem fall af hitastigi T samkvæmt lögmálum safneðlisfræðinnar

$$W_n = p_n \exp(-\epsilon/kT) \quad (3)$$

¹ Frásögnin er einkum byggð á frumheimildum nokkurra einstaklinga sem komu hér við sögu (sjá heimildaskrá). Nokkrar almennar vísindasögulegar ályktanir sem eru dregnar hér eru á ábyrgð höfundar.

² Skammta-rafsegulfræðin sýndi seinna að sjálfgeislunina má einnig líta á sem örvaða geislun sem knúin er af flókti rafeinda-jaeinda-para tómsins.

þar sem, k er Boltzmann-fastinn og p_n margfeldni ástands Z_n viðkomandi sameindar. Með því að gera ráð fyrir að útgeislun og ágeislun í efni séu við hvert hitastig í jafnvægi fæst:

$$p_n B_{nm} = p_m B_{mn} \quad (4)$$

Með jafnvægis skilyrðinu leiddi hann síðan út Planck-regluna um geislunarljóma holrúms (svarthlutar):

$$\rho = \frac{A_{mn}}{B_{mn}} \frac{1}{\exp(\epsilon_m - \epsilon_n)/kT - 1} \quad (5)$$

en einnig skammtaskilyrði orkunnar:

$$\epsilon_m - \epsilon_n = h\nu \quad (6)$$

með Planck-fastanum h og ν tíðni ljóssins sem kom heim við tilgátur Bohrs og Sommerfelds um byggingu og litróf atóma [1]. Þetta samræmi við þekkt lögmál sýndi ótvírætt að örðuð geislun – sem var áður óþekkt í ljósfræði – á sér stað. Með því að beita nálgunum Rayleighs og Wiens á geislunarljómann í jöfnu (5) fæst

$$\frac{A_{mn}}{B_{mn}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \quad (7)$$

þ.e.a.s. hlutfall tilviljunarkenndrar og örvaðrar geislunar fylgir tíðninni í þriðja veldi.³

Einstein lét þessar niðurstöður ekki nægja í grein sinni, en hófst handa við að reikna úr áhrif ágeislunar og útgeislunar á hreyfingu sameindanna til að fullvissa sig um að geislunin, eins og hann hugsaði sér hana gerast, stangaðist ekki á við lögmál varmaaffræðinnar. Hér var einkum mikilvæg sú niðurstaða hans, að örvaða útgeislunin er stefnubundin og beinist í sömu átt og ágeislunin. Stuðlarnir A_{mn} og B_{mn} reyndust síðar hornsteinar skýringa á heildarferli örvunar og útgeislunar leysa og fengu því nafnið Einstein–stuðlar.

Nú er rétt að spyrja hverjar niðurstaðna Einsteins voru nauðsynlegar fyrir þróun leysisins? Í fyrsta lagi var það uppgötvun örvaðrar geislunar. Í öðru lagi að geislunin gerist ávallt á stakri bylgjutíðni. Í þriðja lagi sá eiginleiki hennar að stefna ávallt í sömu átt og með sama bylgjufasa og skautun og ágeislunin. En þetta þrennt er forsenda mögnun ljóss í efni og leiddi síðar til ensku nafngiftar leysisins: „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ eða **LASER**.

³ Þetta hlutfall Einstein–stuðlanna skýrði síðar hvers vegna auðveldara reyndist að framkalla örvaða geislun í meysi á örbylgjusviðinu með um 10^4 lægri tíðni en leysi á sýnilega og innrauða sviði rafsegulbylgna.

3. Fyrstu skrefin

Hvað skorti þá til að smíða leysi á öðrum áratug síðustu aldar?

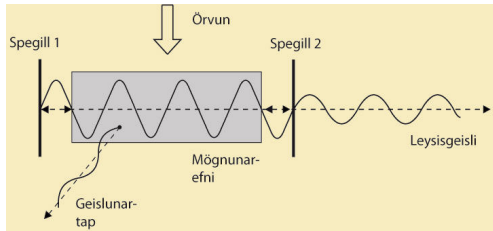
Í fyrsta lagi var nauðsynlegt að finna heppileg orkustig með hæfilegan varanda (e. lifetime) fyrir ljósmögnun. En orkuþrep frumeinda og sameinda voru ekki nægilega vel þekkt á fyrstu áratugum síðustu aldar, til þess að það tækist.

Í öðru lagi eru líkindi á ísogi og örvun jöfn samkvæmt ályktun Einsteins. Þar fyrir utan raðast sætni á orkuþrep samkvæmt lögmáli Boltzmanns, sem kveður á um að við sérhvert hitastig er hún alltaf mest á lægri þrepum og fer síðan stigminnkandi með hærri þrepum. Af þessum sökum er örðuð geislun á heildina litið miklu sjaldgæfari en ísog og skilyrði fyrir mögnun þannig ekki fyrir hendi. Menn urðu ekki varir við ljósörvun í tilraunum fyrr en tólf árum eftir að grein Einsteins birtist.

Í þriðja lagi þarf að sjá fyrir nægilegri afturverkun (e. feedback) á örvaðri geislun til baka til efnisins til að vega upp á móti ljóstapi, sem verður vegna ísogs og geislunar í allar hugsanlegar áttir. Til að fá fram mögnun þarf að örva efnið þannig að sætni á einu efra orkustigi verði svo miklu hærri en sætni á lægra stiginu (e. inverted population) að örðuð útgeislun nái yfirhöndinni yfir ísog.

Leiðin til leysisins varð því löng. Sýna þurfti fram á tilvist örvaðrar geislunar og síðan að finna leiðir til að beita henni til mögnunar. H. Kopfermann og R. Landenburg urðu fyrstir varir við örvaða geislun í rannsóknnum sínum á afbrigðilegri gliðnun (e. anomalous dispersion) í heitu neongasi sem var örvað með rafstraumi árið 1928 [4]. Þetta var fyrsta beina staðfestingin á tilgátu Einsteins.

Rétta tækið til þess til að koma á afturverkun á geislun ljóss í efni hafði verið fundið upp árið 1897 af Frökkunum C. Fabry og A. Pérot – svokallaður *Fabry-Pérot-víxlmalir* (e. interferometer). Hann er samsettur úr tveimur samsíða speglum sem sjá til þess að ljósgeislar úr efni, sem er komið fyrir á milli þeirra og falla hornrétt á speglflötinn, endurkastast ótal sinnum. Líkindi á endurtekinni víxlverkun geislunarinnar við efnið í þessa einu stefnu aukast þá verulega. Jafnvel veik örvun í efninu getur þannig leitt til sterkar mögnunar í því. Spegiltvannan er jafnframt bylgjuhermill (e. resonator) ef tvöföld fjarlægð milli speglanna er heilt margfeldi bylgjulengdar. Hann getur því viðhaldið mögnun fyrir tilstilli örvunar í efni á ákveðinni bylgjulengd, en aðeins í eina átt; eftir ás speglanna. Með mögnun í Fabry-Pérot-hermli er hægt að láta hluta geislunarinnar sleppa út í gegnum annan speglanna sem grannan ljósgeisla, þ.e. leysisgeisla, ef hann er að hluta gegnsær eins og sýnt er á mynd 1.



Mynd 1. Fabry-Perót-hermill með mögnunarefni leysis. Hann sér til þess að örvuð útgeislun endurkastast ótal sinnum milli tveggja samsíða spegla til að auka líkindin á víxlverkun við efnið eftir einum ás. Ef tvöföld fjarlægð milli speglanna $2L$ nemur heilu margfeldi N bylgjulengdarinnar λ myndast standandi bylgja milli speglanna. Annar spegillinn – að hluta til gegnsær – hleypir leysisgeisla í gegn.

Árið 1940 benti V.A. Fabrikant á í doktorsritgerð sinni, „... að hægt er fá fram ljósmögnun í gasi með því að sjá til að sætni á efra orkustigi verði hærri en á lægra stigi“ sem mætti þá kalla „neikvætt hitastig“ í lögmáli Boltzmanns [5]. Árið 1951 fékk hann ásamt nemendum sínum einkaleyfi sem bar heitið: „Aðferð til að magna rafsegulgeislun (útfjólubláa, sýnilega, innrauða og útvarpsbylgjur)“ [6], þar sem stungið er upp á því að nota ytri geislun eða rafstraum til að koma af stað umhverfri sætni (e. population inversion) í gasi. Fabrikant var einnig ljós nauðsyn þess að beita afturverkun til að fá ljósmögnunina til að yfirvinna tapið. Tilraunir hans á ljósmögnun í sesíngasi með örvun á 388.9 nm öldulengd helíns báru þó engan árangur þar sem orkuástandsþreitingin sem hann skoðaði var ekki til þess fallin [5].

Tími leysisins var ekki heldur runninn upp á fimmta áratugnum og næstu skrefin voru ekki stigin á sviði ljósgeislunar heldur útvarpsbylgna með miklu lægri tíðni. Þar er hlutfallið milli örvaðrar og sjálfgeislunar samkvæmt jöfnu (7) miklu herra og tæknin til að beita örvun til mögnunar á þessu bylgjubili var vel þróuð á þessum árum. Skilyrði fyrir umhverfa sætni voru því hagstæðari hér og notkun afturverkunar í útvarps- og örbylgjutækni var vel þekkt.

4. Örvuð útgeislun í NMR og í meysi

Fyrstu umhverfa sætni á orkustiga (neikvætt hitastig) og örvaða útgeislun framkölðuð E.M. Purcell og R. V. Pound árið 1951 á tíðninni 50 kHz með umpólun kjarnaspuna í segulsviði [7]. Þetta reyndist upphafið að notkun kjarnspunahermunar (e. Nuclear Magnetic Resonance NMR) á fjölda sviða, m.a. í NMR-róffræði og NMR-sneiðmyndatöku í læknisfræði.⁴

⁴ Þorbjörn Sigurgeirsson á Eðlisfræðistofnun Háskólans byggði á niðurstöðum Purcell og Pound við þróun jarð-

Í heimstýrjöldinni síðari fékk radartæknin byr undir báða vængi og framleiddir hátíðnihermlar eins og klystronlampinn og annar tækjabúnaður fyrir rafsegulbylgjur með allt niður að sentímetra bylgjulengd. Nokkrir eðlisfræðingar og verkfræðingar, sem höfðu tekið þátt í þessari þróun, sneru eftir stríðið til rannsóknarstarfa við háskólastofnanir þar sem þeir urðu brautryðjendur með notkun þessarar tækni í rófræði sameinda.

Árið 1953 benti Joseph Weber (1919–2000) við Maryland háskólann á leið til að nota örvaða geislun til að búa til örbylgjumagnara með því að framkalla umhverfa sætni á orkustigum kristalla eða gastegunda og nota afturverkun til að vega upp á móti geislunartapi. Stakk hann upp á ammoníakgas til að framkvæma þetta [11]. Í október 1954 birtist grein eftir Nikolay G. Basov (1922–2001) og Alexander M. Prokhorov (1917–2002) við Lebedev Institut í Moskvu [12] þar sem er útfært, hvernig má greina sameindir í samfelldum geisla í sundur eftir orkuástandi þeirra með öjöfnu rafsviði og beina þeim orkumeiri inn í örbylgjuhermil þar sem örbylgjumögnun fæst með tilheyrandi aförvun frá efra til neðra orkustigs.

Stærsta átakið í þessum rannsóknum var síðan smíði örbylgjutækis til rófmælinga með hárrí upplausn (e. high resolution) sem Charles H. Townes (1915–) og tveimur nemendum hans við Columbia Háskóla í New York tókst í júlí 1954 [13]. Þeir sáu að tækið mátti „... ýmist nota sem magnara eða sveifflugjafa“, eins og þeir orðuðu það. Notuðu þeir ammoníakgas, en geislunin myndast þar við ástandsþreitingu milli samhverfs og andsamhverfs orkuástands sameindarinnar á bylgulengdinni 1.25 cm og mögnun hennar í örbylgjuhermli. Townes gaf tækinu síðar nafnið „meysir“: “Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation“ eða **MASER** [14]. Hann sýndi fram á að línubreidd geislunar meysisins væri

$$\delta\nu = 4\pi kT(\Delta\nu)^2/P \quad (8)$$

þar sem P er geislunarafl meysisins, $\Delta\nu$ er línubreidd orkustökks sameindarinnar, k er Boltzmannfastinn og T er hitastig örbylgjuhermilins. Þar sem $P \gg kT\Delta\nu$ gildir fyrir alla meysa dreifist aflið yfir mun styttra línubil en línubil náttúrulegrar geislun eða $\delta\nu \ll \Delta\nu$. En jafnan sýnir einnig að línubreiddin – þ.e.a.s. tíðnisuð geislunarinnar – er í beinu hlutfalli við hitastigið.

segulmælanna „Magna“ og „Móða“ [8,9] á árunum 1958–1971. Í mælunum eru allir þeir þættir að verki sem leysirinn byggir á: umhverfing sætni, hlutverk varanda í sætni, afturverkun og örvuð geislun – að vísu með tíðninni 2000 Hz í spunveltu róteinda í segulsviði jarðar [10], samanborið við leysinn með nálægt 10^{14} Hz geislunartíðni.

Ekki aðeins örstutt línubreidd heldur einnig stöðugleiki geislunarinnar á vissri tíðni, sem er afleiðing af óbreytileika orkuástanda sameindarinnar, reyndist afgangandi um flesta notkun meysa.

Basov og Prokhorov stungu upp á meysiferli milli þriggja orkustiga í gasi árið 1955 [15] og Nicolaas Bloembergen (1920–) við Harvardháskóla [16] setti óháð þeim fram hugmynd um meysi með meðseglandi jónum í kristalli árið 1956. Á árunum 1957 til 1958 voru smíðaðir þriggja stiga meysar á fjölmörgum tilraunastofum, á öldulengdinni 0.89 cm með Cr^{3+} jónum í manngerðum roðasteinum sem nauðsynlegt var að kæla með fljóttandi helíni. Meðal annara kom þar við sögu Theodore H. Maiman (1927–2007) hjá Hughes Atomic Physics Department í Los Angeles [17] en hann varð seinna varð fyrstur manna til að setja leysiferli á öldulengdinni 0.6943 μm af stað við stofuhita í sama kristalli.

Meysar reyndust gagnlegir sem næmir magnarar á örbylgjumerkjum í rófræði og útvarpsstjörnufræði og einnig sem hárnákvæmir sveiflugjafar til tíðni- og tímamælinga. Hins vegar reyndust meysar ekki jafn nýtsamlegir og leysar. Ástæðurnar fyrir því eru margar: bylgjulengd meysa (0.3–30 cm) er 10^3 – 10^5 sinnum lengri en leysa og geislaorka þeirra að sama skapi minni, sem veldur því að víxlverkun hennar við efni er yfirleitt veik. Ljósaflið sem tekst að framleiða í meysum er oftast mjög lítið. Efni sem geta leitt geislunina áfram eru fá og erfitt að beina henni í ákveðna átt eða safna henni saman í lítinn brennidepil.

Harold Weaver og samverkamenn hans uppgötvuðu árið 1965 [18] meysiferli í himingeimnum í Orion gasþokunni, þar sem ljósmögnun fer fram við umhverfa sætni í örþunnum sameindaþokum af OH, H_2O , SiO og fleiri gastegundum án afturverkunar, þ.e. án aðkomu hermils. Þær mikilvægu upplýsingar sem lesa má úr þessari meysigeislun um efnasamsetningu, hitastig, hreyfingu og fjarlægð stjarnþoka og annarra hluta himingeimsins hafa leitt til þess að rannsóknir meysigeislunar eru orðnar að mikilvægu sviði stjarn-eðlisfræðinnar.

5. Fyrstu gasleysarnir

Árið 1958 birtu Arthur L. Schawlow (1921–1999) og Townes hjá Bell Laboratories ítarlegar hugmyndir sínar um leiðir til að koma af stað meysiferli á styttri öldulengdum en örbylgjum – í tæki sem þeir nefndu „Infrared and Optical Maser“. Þeim var ljóst, að í stað holrúms–hermils fyrir örbylgjur meysis, var hér nauðsynlegt að nota Fabry–Pérot speglatvennu [19]. Þeir leiddu einnig út línubreidd geislunarinnar á hliðstæðan hátt og fyrir meysi (8):

$$\delta\nu = 4\pi h\nu(\Delta\nu)^2/P \quad (9)$$

þar sem P er geislunaraflíð, h er Planckfastinn, ν tíðnin og $\Delta\nu$ er breidd róflínu efnisins. Línubreidd geislunarinnar $\delta\nu$ ætti samkvæmt þessu að verða mörgum stærðarþrepum minni en róflínubreiddin (þeim yfirsást hér að $\Delta\nu$ er réttléga línubreidd Fabry–Pérot–hermilsins, sem er oftast mun minni en línubreidd orkustökksins). Ef þessi jafna er borin saman við jöfnu línubreiddar örbylgjumeysisins (8) sést að í stað hitaorkunnar kT er hér komin ljóseindaorkan $h\nu$ sem stýrir suðinu. Jafna (9) er oftast nefnd *Schawlow–Townes jafna* leysisins.

Þeir stungu upp á kalíngasi sem vænlegu mögnunarefni sem örva mætti með helín-lampa. Töldu þeir erfiðara að koma á meysiferli í föstum efnum eins og fættem kristöllum vegna of mikillar breiddar litrófslína og erfiðleika á því að finna hæfilegar bylgjulengdir í gaslömpum á markaðnum til örvarar. Árið 1958 létu þeir skrá einkaleyfi á „... meysi til að framkalla einlita geislun, eða magna samfasa geislun á innrauða, sýnilega eða útfjólubláa sviði litrófs rafsegulbylgna ... í efni á neikvæðu hitastigi milli tveggja samsíða spegla“. Sem hugsanleg meysiefni voru tilnefndar alkalímálmguður eins og kalín og sölt lantaníða. Bent var á í einkaleyfinu að slíkt tæki mætti nota til fjar-skipta [20].

Gordon Gould (1920–2005), sem var stúdent í framhaldsnámi við Colómbiaháskóla meðan Townes kenndi þar, lét skömmu síðar skrá nokkur einkaleyfi þar sem hann stakk upp á fjölda nýrra leiða til að örva efni til að geisla „ljósrænni meysigeislun“ [21].⁵ Gould stakk einnig upp á nafninu **L**ASER (**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation) árið 1959 á ráðstefnu [22] og benti á ótal möguleg notkunarsvið leysa eins og í litrófsgreiningu, ölduvíxlæmingar, radartækni og kjarnasamruna.

Ali Javan steig stórt skref með þróun fyrsta gasleysisins, helín–neon leysis. Hann skrifaði doktorsritgerð hjá Townes við Colómbiaháskóla í örbylgjurófsgreiningu og kynnst hugmyndinni að leysinum hjá Schawlow við Bell Laboratories. Hann stakk þá upp á HeNe–leysi árið 1959 [23] og byrjaði ásamt William Bennet and Don Herriot að þróa hann hjá Bell Laboratories. Þeim tókst að gangsetja leysinn á innrauðu öldulengdinni 1153 nm þann 13. desember 1960 og birtu niðurstöður sínar árið 1961 [24].

Árið 1962 tókst Alan White og Dane Ridgen við Bell [25] einnig að koma af stað leysun á öldulengdinni 632.8 nm í HeNe–leysi sem var þá fyrsti leysirinn

⁵ Þessi einkaleyfi komu af stað frægri lagaþrætu um ýmis réttindi á leysinum, sem stóð yfir í þrjátíu ár.

sem gaf frá sér samfellt sýnilegt rautt ljós – sem gaslampi knúinn rafstraumi⁶

Rannsóknir á gasleysum héldu áfram hjá Bell og töldust 150 leysilínur fundnar einkum í eðalgösum árið 1963 en flestar þeirra voru mjög afltitlar – t.d. þurfti 15 metra gaslampa til að framkalla 150 mW afl úr HeNe-leysi. C. Kumar N. Patel sem hafði unnið í leysihópnum hjá Bell áttaði sig á því að sameinda-leysar gætu framleitt meira afl þar sem örvuð orkustig þeirra eru nær grunnstiginu. Grunaði hann að CO₂ sameindin myndi vera hentug fyrir leysivirkni [26]. Þetta stóðst, og árið 1965 hafði honum tekist að framkalla 200 W afl á öldulengdinni 10.6 μ m með þessum leysi.

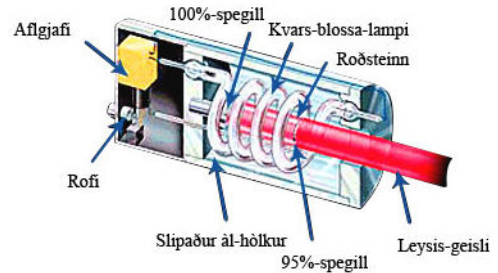
6. Roðasteinsleysisir Maimans

Theodore Harald Maiman á hins vegar tvímælalaust heiðurinn að því að hafa sett fyrsta leysinn í gang árið 1960. Í tilefni þessa afreks er nú haldið upp á 50 ára afmælið á árinu 2010 því að fyrstu greinarnar frá Bell Lab hópnun um gasleysana birtust ekki fyrr en 1961. Maiman hafði áður unnið að doktorsritgerð hjá Willis Lamb við Stanford Háskóla í Los Angeles um hið þekktu „Lamb-vik“ í helíni og fékk síðan starf hjá flugvélafrirtækinu Hughes við Atomic Physics deildina í Los Angeles, sem síðar var flutt til Malibu. Þar fékk hann það ríkisstyrkta verkefni að endursmíða roðasteins-meysi, þ.e. með Cr³⁺-jónum íbættum í safirkristal (Al₂O₃), sem var umfangsmikill og vóg um 2.5 tonn. Maiman tókst að einfalda hann verulega svo að hann vóg að lokum ekki meir en 12.5 kg, en þurfti, eins og flestir aðrir fastefnameysar, kælingu með fljótandi helíni.

Maiman fékk þá lága upphæð af rannsóknarfé (50000 \$) frá Hughes fyrirtækinu til að reyna sig við smíði á leysi. En eftir að grein Schawlow og Townes [19] birtist hófu fjölmargar aðrar rannsóknarstofur tilraunir á þróun leysis með opinberum styrkjum. Hann grunaði að rauð flúrljómun roðasteinsins sem birtist við örvun með útfjólubláu og grænu ljósi væri nothæf til að ná umhverfri sætni við stofuhita sem gæti síðan leitt til leysiferlis.

Í september 1959 sótti Maiman ráðstefnu [27] í New York þar sem Schawlow lýsti ýmsum leiðum til að setja leysiferli af stað, einkum með örvuðu gasi, en dró það mjög í efa að roðasteinn væri nothæfur til þess, ... þar sem umhverfing á sætni orkustiga

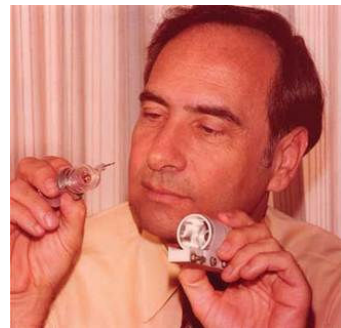
⁶ Einar Júlíusson smíðaði fyrstur HeNe-leysi á Íslandi við Rannsóknarstofnun Iðnaðarins árið 1967 með þá hugmynd að baki að stofna til iðnaðarframleiðslu á leysum á Íslandi, sem þó varð ekki úr þar sem Einar hafar skömmu seinna til frámhaldsnáms í stjarnæðlisfræði til Bandaríkjanna.



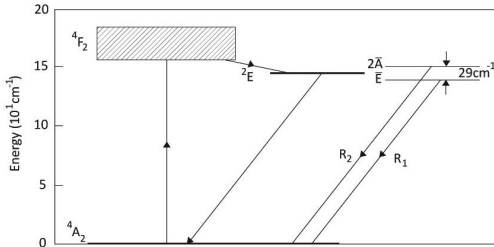
Mynd 2. Þversnið af fyrsta leysinum, teiknað eftir [17].

væri þar sérlega erfið“. Þessi ummæli Schawlows um roðasteininn urðu næstum þess valdandi, að rannsóknarfé Maimans væri dregið til baka [17]. En þá gat hann sýnt í tilraun fram á að umhverf sætni í roðasteininum væri á næsta leiti og sendi niðurstöðurnar í apríl 1960 til tímaritsins Physical Review Letters sem birti þær í júlí 1960 [28]. Maiman lauk smíði leysisins áður en greinin birtist. Hann silfraði báða enda á sívölum roðasteinskristalli með tiltölulega vægri íbót af Cr³⁺ í safir-kristallagrindina þannig að þeir mynduðu Fabry-Pérot-hermil. Annað lagið endurkastaði öllu ljósi (100%) en hitt lak 5% áfallandi geislunar út úr hermlinum og myndaði þannig leysigeisla. Hann kom kristallinum fyrir á ás gormlaga leiftur-lampa, sem þá fékkst í ljósmyndaverslunum og stakk hvoru tveggja í slípaðan málmhólk til að safna mestum hluta leifturljóssins á roðasteininn. Þetta fyrirkomulag er sýnt á mynd 2 og helstu hlutir leysisins í höndum Maimans á mynd 3

Nánar tiltekið var aðferð hans sú að lyfta Cr³⁺-jónunum frá ⁴A₂ grunnstiginu upp á efra stigið ⁴F₂ með leiftur-geislun á 550 nm öldulengd. Orkustigið ⁴F₂ er breitt og skilar af sér orku án útgeislunar á skömmum tíma í gegnum víxlverkun við hljóðeindir og fellur kerfið þá niður á efra orkustigið ²E. Önnur en miklu ólíklegri leið er slökun með geislun beint niður á grunnstigið ⁴A₂. Orkustigið ²E er hálf-stöðugt



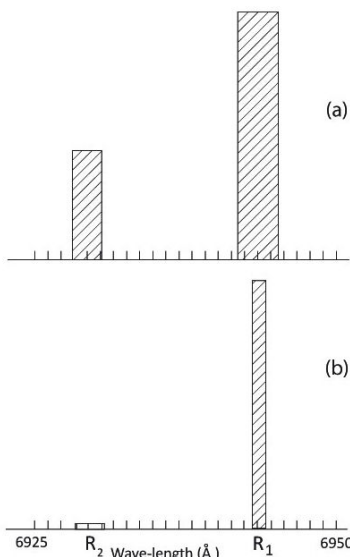
Mynd 3. Maiman með leysinn [17].



Mynd 4. Orkustig Cr^{3+} jóna í roðasteini og ástandsþrengingar tengdar leysinum, teiknað eftir [28].

með um 5 ms varanda. Það er klofið í tvístig með 29 cm^{-1} millibili og skilar orku í geislun R_2 og R_1 á tveimur róflnum með öldulengdirnar 694.3 nm og 692.9 nm eins og litrófsmælingin á mynd 5 (a) sýnir. Með þessu móti fæst fram umhverfing á sætni 2E gagnvart 4A_2 , ef örvunaraflið er nægt.

Litrófsflurnar R_2 og R_1 eru á móta sterkar ef afli leifturlampans er haldið undir vissum mörkum. Fari afl lampans yfir þessi mörk gerist það snögglega að línan R_1 á bylgjulengdinni 694.3 nm verður margfalt sterkari en R_2 við 692.5 nm og sömuleiðis skreppur breidd R_1 verulega saman. Þessa breytingu á geisluninni eftir ás kristallsins taldi Maiman mega skýra þannig að við þessi mörk hafi neikvæðu hitastigi verið náð í orkustiganum og að sjálfstæð mögnun á geislun við 694.3 nm ætti sér stað. Hann minnst þess hins vegar ekki að hafa séð leysigeislann með eigin augum,



Mynd 5. Geislunarróf roðasteinsins: (a) með litlu leifturljósaffi og (b) með miklu leifturljósaffi, teiknað eftir [28].

sem er ekki að furða, þar sem að leifturljósíð hefur vafalaust yfirgnæft daufan geislann í þessari fyrstu tilraun hans [17].

Þessar skýringar og niðurstöður tilraunarinnar, sem heppnaðist þann 16. maí 1960, fékk Maiman birtar í *Nature* [29] þann 6. ágúst 1960. En þeirri grein var áður hafnað hjá *Physical Review Letters* fyrir mistök eins ritstjórans þar. Næsta slysið sem hann henti var höfnun ítarlegrar greinar sem átti að birtast í *Journal of Applied Physics*. Afrit hennar komst í hendur ritstjóra *British Journal of Communication and Electronics* sem birtu hana í flýti [30], án þess að hafa fengið leyfi til þess frá Maiman sjálfum [17], sem varð til þess að JAP hætti við að birta greinina.

Þar sem tíminn gerðist nú naumur til að birta almenna frétt af fyrsta leysinum stóð Hughes fyrir tækið fyrir blaðamannafundi [17] og tilkynnti þar að tekist hefði í fyrsta sinn að kveikja á leysi. *New York Times* birti grein um þetta þann 8. júlí á forsiðu: „Light Amplification Claimed by Scientist“, en *Los Angeles Tribune* fregnina: „L.A. Man Discovers Science Fiction Death Ray“. Hvorug greinin var Maiman að skapi [17] eins og skiljanlegt er. Þær komu því hins vegar til leiðar að við Bell Labs var strax hafist handa að endurtaka tilraunina sem strax var jákvæðan árangur þann 28. júlí. Niðurstöður Bell Labs voru síðan birtar í *Physical Review Letters* [31], þar sem beggja greina Maimans var stuttlega getið [32]. Nokkru síðar birti Maiman ásamt samstarfsmönnum sínum hjá Hughes ítarlega grein um roðasteinsleysin í *Physical Review* [33]. Gat nú enginn lengur efast um að hann hefði orðið fyrstur til að setja leysi í gang – þó að hópurinn hjá Bell Lab eigi enn í dag erfitt með að sætta sig við það [32].

Afrek Maimans var fjórþætt: Í fyrsta lagi að velja roðasteinin sem leysisefni, sem var gagnstætt skoðunum flestra, sem þá unnu að rannsóknum á leysum og héldu sig við fjögurra þrepa orkustiga í gösum. Í öðru lagi var það bjargföst trú hans að þriggja þrepa leysir gæti virkað. Í þriðja lagi að nota leifturljós til örvunar á púlsaðri leysigeislun, þar sem allir aðrir rembdust við að framkalla samfellda leysigeislun með stöðugri örvun. Í fjórða lagi að honum tókst þetta á tæpu ári með rannsóknarfé, sem var ekki nema brot af því sem aðrir höfðu til umræða í sama tilgangi.

Maiman hvarf frá störfum hjá Hughes árið 1962 og vann hjá nýstofnuðu fyrirtæki Korad fram til ársins 1968 þar sem hann fékkst einkum við frekari þróun á roðasteinsleysinum þangað til fyrirtækið var selt til Union Carbide. Hann stofnaði þá fyrirtækið Maiman Associates sem stundaði ráðgjöf og síðan annað fyrirtæki Laser Video Corporation, sem fékkst við þróun á leysi-skjám frá árinu 1972 fram til ársins 1976. Þá

tók hann við starfi sem einn aðstoðarforstjóra fyrir-tækisins TRW Inc., í hátækniþróun á rafeinda- og varnarsviði til 1983 og síðan sem forstjóri Control Laser Corporation sem hann gegndi til starfsloka [17]. Theodore Maiman lést 79 ára að aldri árið 2007 í Vancouver í Kanada þar sem hann hafði búið um ára-bil.

Árið 1973 var Maiman boðið að halda hátiða-fyrirlestur á fyrstu leysiráðstefnunni í München. Þar kynntist höfundur honum lauslega. Höfundur og samstarfsmenn við flugvélafyrirtækið Messerschmitt-Bölkow-Blohm höfðu þróað öflugan Nd:YAG-leysi og tekist að leiða 50 W samfelldan geisla frá honum eftir örmjóum 2 m sveigjanlegum glerþræði. Hópurinn var með erindi um þetta á ráðstefnunni og sýndu ljósleiðarann. Hugmyndin var að lækna not-uðu þennan leysi til innvortis skurðaðgerða. Þetta vakti athygli Maimans þar sem hann taldi mikilvæg-ustu not leysa vera einmitt á þessu sviði. Upp úr 1983 gerðist hann alþjóðlegur ráðgjafi um notkun leysa í skurðlækningum.⁷

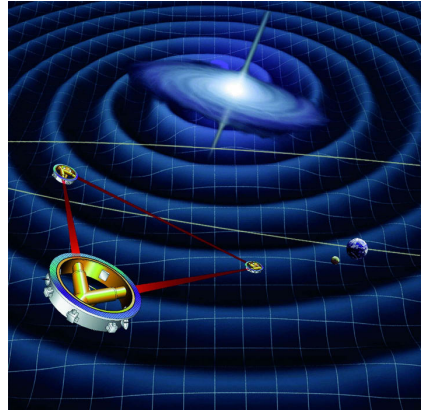
7. Eiginleikar og kostir leysisins

Hvaða árangri hafði nú verið náð árið 1960 til þró-unar leysisins – 44 árum frá því Einstein uppgötvaði tilvist örvaðrar geislunar? Leysirinn er fyrsti ljósgjaf-inn með svonefnda samheldna geislun (e. coherent radiation) þ.e. geislun á verulega þröngu tíðnibili og í grönnum geisla. Áður höfðu hiti og rafstraumur í glóþráðar- og gaslömpum verið notaðir til að fram-kalla ósamheldið (e. incoherent) ljós á breiðu tíðni-bili og geislun í allar áttir. Samheldni leysigeisla og stefnuvirkni olli þáttaskilum í ljósfræði á seinni hluta síðustu aldar.

Samheldni (e. coherency) er kennistærð sem lýsir að hve miklu leyti bylgjur haldast í takt, þ.e. viðhalda föstum fasa. Hún er annars vegar skoðuð í útbreiðslu-stefnu bylgju frá ljósgjafa og kallast þá tímasamheldni (e. temporal coherency) og hins vegar þvert á hana og nefnist þá rúmsamheldni (e. spatial coherency).

Tímabilið τ , sem samheldnin varir er í öfugu hlut-falli við línubreidd leysis $\tau = (2\pi\delta\nu)^{-1}$. Línubreiddin $\delta\nu$ fæst með Schawlow-Townes jöfnunni (9) hér að ofan. Á þessu tímabili breiðist bylgjan yfir samheldni-spöllinn $l = c\tau$, sem oftast nemur nokkrum kílómetr-um. Ef gerðar eru ölduvíxlsmælingar með leysi geta hlutöldur hans lagt að baki vegalengdarmismun sem þessu nemur, án þess að falla úr takti hver við aðra.

⁷ Árið 2000 kom hann aftur til München, en þá til að láta gera á sér innvortis-skurðaðgerð við háskólasjúkrahúsið á göðkynja blöðruhálsæxli með leysistæki okkar MediLas [34]. Fékk hann þar fullan bata [17].



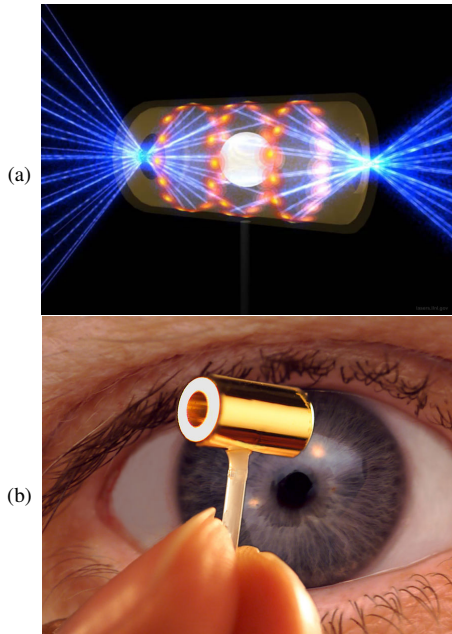
Mynd 6. LISA á braut um sólu 20° í humátt á eftir jörð-inni í 1 AU fjarlægð frá sólu. Víxlmælirinn er myndaður með þremur víxlmælatunglum á hornum jafnhliða þrí-hyrnings. Í bakgrunni sést efnishvirfill umhverfis svart-hol með efnisstrok eftir snúningsásnum. Þyngdarbylgjurnar sem kunna að berast frá svartholinu í gegnum tíma-rúmið getu orðið eitt af rannsóknarefnum LISA (myndefni frá <http://lisa.nasa.gov/>).

Sést á þessu að leysar eru vel hæfir til samliðunar-mælinga á ljósi.

Áformað er á næstu árum að koma leysivíxlmæli (**L**aser **I**nterferometer **S**pace **A**ntenna, **LISA**) á braut um sólu. Mynd 6 sýnir teikningu af víxlmælinum sem verður um 5 milljónir kílómetra að þvermáli. Mæla á þyngdaröldur utan úr himingeimnum á tíðnibilinu frá 0.03 mHz til 0.1 Hz. Þar verður samheldnispölur leysanna sem notaðir verða með 1 W afli að nema um 50000 km og tíðnisuðið að vera minna en $30 \text{ Hz/Hz}^{1/2}$ (sjá <http://lisa.nasa.gov/>).

Í leysigeisla hefur bylgjan ávallt stöðugan fasa þvert yfir geislann og er þannig fullkomlega sam-heldin í rúmi óháð tíma og einnig fjarlægð. Það auð-veldar mjög að leiða leysigeisla langar leiðir eftir fjölda af glerjum og speglum og safna því síðan sam-an í örlitinn brennidepil eins og gert er í tilraun-um á kjarnasamruna sem fara fram í Kaliforníu við Lawrence Livermore National Laboratories **LLNL** í National Ignition Facility, **NIF** um þessar mundir. Hér eru 192 samheldnir geislar með samtals 1.8 MJ orku og 16 ns púls lengd beint yfir hundrað metra og skotið samtímis úr 25 m fjarlægð á brennidepla sem eru 50 míkrometrar að þvermáli innan marks-ins (sjá mynd 7) þar sem kjarnasamruninn á að fara fram við geislunarþjöppun á tvívetni og líþíni (sjá <https://lasers.llnl.gov/>).

Leysir geislar ljósi í einum geisla en ósamheldnir ljósgjafar oftast í allar áttir. Ástæðan er að hermíllinn



Mynd 7. (a) Sívalningslaga skotmark fyrir NIF sem inniheldur tvívetni og lípín í kældri kúlu. 192 leysisgeislar á öldulengdinni 350 nm mætast í tveimur brennideplum og lýsa upp gullhúðaðan innri vegg sívalningsins (b) þar sem geislunin breytist í röntgengeislun sem þjappar síðan kúlunni saman og knýr fram kjarnasamruna (myndefni frá <https://lasers.llnl.gov/>).

knýr ljósmögnunina til að fylgja ás leysisins svo orkubéttleiki geislunarinnar nær þar hágildi og margfeldi þverskurðarradíá uppsprettu leysisgeislans w_0 og dreifihorns (e. *divergency*) hans θ_0 er:

$$w_0\theta_0 = M^2\lambda/\pi \quad (10)$$

Um geisla-gæðastuðulinn (e. *beam quality factor*) $1/M^2$ gildir; $M^2 = 1$ fyrir Gauss-sveifluhátt eða kjörhátt (e. *fundamental mode*) hermilsins, en $M^2 > 1$ fyrir aðra flóknari sveifluhátti hans. Eftirtektarvert er, að þetta margfeldi, sem nefnt er margfeldi geisla-kennistærðanna, er óháð kennistærðum hermilsins og leysiefnisins og ræðst einungis af öldulengdinni λ . Það helst óbreytt við allar hugsanlegar umbyltingar á geislaganginum, sé ekki tekið tillit til linsuskekkja á leið hans.

Takmörkun ljósorkunnar á mjóan geisla í Fabry-Pérot-hermli, sem jafna (10) lýsir, hefur reynst mjög gagnleg fyrir öll notkunarsvið leysisins. Hún gerir kleift að spegla og safna ljósaflinu saman með linsum á einn lítinn depil. Þannig má beina geislanum inn í sveigjanlegan ljósleiðara – hliðstæðan rafmagnskapli – sem leiðir ljósaffi án verulegs taps um langan veg.

Mjór geislinn leyfir einnig röð magnara í geislagangnum á eftir leysi-sveiflugjafa, eins og gert er við NIF-leysikerfið til að margfalda afl hans áður en hann kemst á leiðarenda. Líkjast slík leysikerfi sendistöðvum fyrir útvarpsbylgjur með sveiflugjafa, formagnara, aðalmagnara og sendiloftneti í einni röð.

Notkun á Fabry-Pérot-hermli til að skapa ljósmögnun eftir ákveðnum ás er ekki eina leiðin til að fá fram leysiferli. Mögnunin getur einnig farið fram í sléttum fleti (e. *plane*) sem er algengt í leysidíóðum eða á hveli (e. *sphere*) sem getur gerst hjá öðrum stefnusnaðum leysum. En þar er séð fyrir nægilegri afturverkun til leysisefnis með öðru móti, t.d. með margfaltri ljósdreifingu.

Útgeislun leysa í ýmsum efnum nær í dag yfir tíðnibilið milli innrauðrar geislunar, þar sem flestir leysar eru sameinda- og hálfleiðaraleysar, yfir sýnilega sviðið með jóna- og hálfleiðaraleysum, til útfjólubláa sviðsins með vetnisleysi og halógen-eðalgas-leysum. Eins og áður var getið sýnir jafna (7) að hlutfall Einstein-stuðlanna fyrir sjálfgeislun og örvaða geislun vex með þriðja veldi tíðni geislunarinnar svo ljósörvun verður erfiðari með styttri bylgjulengd geislunar. Þó hafa ýmsar leiðir fundist til að framkalla leysigeislun á röntgen sviðinu, t.d. með plasma-leysum og frjálsum rafeindaleysum. Einnig er unnið að þróun γ -leysa sem byggja á orkustökkum innan frumeindakjarna, sem nema um 10-100 keV. Til samburðar eru orkustökk rafeinda í frumeindum á eV bilinu [35]. Stutt öldulengd og fáar leiðir til örvunar γ -leysa, gerir smíði þeirra ákaflega erfiða.

Orkustig í öllu efni eru föst og oftast aðskilin og ber því leysigeislunin, sem verður til af stökkum milli þeirra, ávallt vissan orkuskammt með ákveðinni tíðni. Einstök leysiefni geisla þess vegna stökum strjálum leysislínunum, sem getur verið bagalegt þegar þörf er á samfelldri stillingu á tíðni, líkt og í útvarpstæki. Leysa þar sem orkustig skarast má tíðnistilla með því að stilla fjarlægð milli spegla hermilsins. Þetta á við um litefnaleysa og suma kristallaleysa eins og titan-saffir leysi og njóta þeir því sérstöðu innan leysafjölskyldunnar.

Leysigeislun er ýmist samfelld, sem er algengt um geislun gasleysa, eða í snörpum lotum (e. *pulses*), sem er títt meðal kristalla- og glerleysa. Hermill umhverfis leysiefni gerir leysinn að sjálfstæðum sveiflugjafa (e. *oscillator*). Án hermils er efni með umhverfri sætni ljósmagnari fyrir ágeislun af sömu tíðni.

Púlsun í leysi er hægt að framkalla með því að safna sterkri umhverfri sætni yfir vissst tímabil, án þess að leysirinn geisli tafarlaust, en láta hana síðan skila sér í einstökum mjög stuttum púlsum en með afar háu affi. Þetta er gert með því að stýra afturverkun

hermilsins nákvæmlega. Með þessu móti er auðvelt að fá fram leysispúlsun með tímalengd frá 10^{-8} s til 10^{-12} s í mörgum fastefnum. Með enn frekari samþjöppun hefur tekist að framkalla púlsa niður í 10^{-16} s að lengd, sem fer að nálgast umferðartíma rafeinda í atómum. Svo stuttir púlsar eru því mjög gagnlegir til að rannsaka örskjót efnahvörf á rauntíma.

8. Framhald þróunar leysa

Fyrstu sprotar leysitækninnar voru roðasteinsleysir og HeNe-gasleysir, en frá þeim kvíslast ýmsir ættbálkar af jóna-, sameinda-, kristalla-, gler-, vökva-, salt-, hálfleiðara- og glerþráðaleysa, ýmist í skápa-, borðtækja- eða lófasterð. Einnig svo smáir leysar að stærð þeirra má jafna við nokkrar eða stakar sameindir eða frumeindir: skammtapunktaleysar, og stakrafrumeinda-leysar. Þar fyrir utan með leysisferli í öðru efnisástandi eru rafeindageisla-, rafgasgeisla-, atómgeisla-, yfirborðsrafgasbylgju- og hljóðbylgju-leysar.

Fundist hefur leysigeislun utan úr himingeimnum, eins og minnst var á um meysigeislun hér að framan og gerist hún sem geislun frá staðbundinni sætnidreifingu sem ekki samsvarar varmajafnvægi (e. local non-thermal equilibrium) [36]. Þessi geislun myndast ekki í hermli heldur er einlit samheldin geislun vegna mögnunar á sjálfgeislun í gashjúpum sem fer þar fram við umhverfa sætni frumeinda, jóna eða sameinda í mjög þunnu gasi og geislar til allra átta. Þetta hefur verið nefnt, „Amplification of Spontaneous Emission, ASE“. Fyrstu geislun af þessu tagi fundu Johnson og m.a. Charles H. Townes við $10\mu\text{m}$ árið 1976. Geislunin er frá CO_2 -sameindum ofarlega í andrúmslofti plánetanna Mars og Venus og er greinilega örvuð af sólarljósi [37]. Johansson og Letokhov hafa einnig fundið leysigeislun frá járnjónum FeII við $1\mu\text{m}$ bylgjulengd [38] og óhlöðnu súrefnisatómi OI á 855.6 nm bylgjulengd í gashjúp nokkurra stjarna [38]. Þeir telja að ótal aðrir leysar af þessu tagi eigi eftir að finnast í himingeimnum og þeir eigi þeir eftir að reynast mjög gagnlegir líkt og meysar í stjarneldisfræði þegar fram líða stundir [36].

Þróunarsögu leysanna er hægt að líkja við þróunarsögu lífvera því sífellt koma fram nýjar tegundir og afbrigði af þeim. Leysar eru gerðir úr ólíkum efnum með mismunandi efnisástand, örvun, bylgjulengd, geislunartíma, orku, dreifihorn geisla, lindarstærð, rúmmál og þyngd. Sumir birtast skyndilega á markaðinum, endast ákveðið blómaskeið og ýmist hverfa fljótlega af sjónarsviðinu aftur, geta af sér afkvæmi með breyttum vænlegri eiginleikum eða víkja fyrir nýjum. Þetta fjölskrúðuga lífríki leysa, sem hefur orðið til yfir 50 ára skeið, ber engin merki stöðunar.

Ýmsar stökkbreytingar hafa orðið í þessari þróun eins og hálfleiðaraleysar sem Basov og Javan stungu upp á árið 1962 og Robert N. Hall tókst skömmu síðar að búa til úr gallnarseniði (GaAs). Þessi tegund leysa svaf þýrnirósarsvefni fram til 1980 en hefur síðan rutt sér rúm með fjöldaframleiðslu m.a. í geislaspilurum og í fjarskiptum yfir glerþræði. Kostir þeirra eru smæð, aflnýtni og vítt bylgjulengdarbil, frá útfjólubláu til millimetrabylgna, eftir því hvaða hálfleiðarasambönd eru notuð. Ein tegund hálfleiðarleysa, svokallaðir skammtapunkta-leysar, eru ekki nema 2–10 nm að stærð og svipar örvun og útgeislun þeirra því til frumeinda og sameinda.

Önnur markverð stökkbreyting á síðustu árum var þróun glerþráðaleysa sem sveifflugjafa eða magnara. Með íbót jóna til leysunar í glerþráðum gefst vítt svigrúm á styrk íbótar, öflug kæling vegna hás hlutfalls yfirborðs og rúmmáls í grönnum glerþræði og sveigjanlegur hermili. Glerþráðaleysar örvaðir með hálfleiðaraleysum eru einkum gagnlegir til að ná háu samfelldu affi á styttri bylgjulengdum innrauða sviðsins fyrir margvísleg not t.d. í vélsmiði og fyrir geislavopn.

Notkun hugtaksins "leysir"hefur breyst á síðustu áratugum. Það takmarkast ekki lengur við ljósbylgjur einar, heldur nær nú yfir samheldnar bylgjur atómgeisla frá Bose–Einstein þéttingu, yfirborðsrafgasbylgjur í málum og jafnvel hljóðbylgjur. Leysar framkalla ekki einungis örmjóan geisla, heldur geta geislað í allar áttir eins og gerist í stjarnþokum eða í ofurdreifandi leysiefnum. Sameiginlegt öllum leysum er þó mögnun samheldinnar geislunar á bylgjum af einhverju tagi.

9. Notkunarsvið leysanna

Fyrstu árin eftir að leysirinn kom fram, var hann kallaður: „lausn í leit að vandamálum“ [17]. Það lýsir því vel hve erfitt var í fyrstu að finna hlutverk fyrir samheldna ljósgeislun. En eiginleikar hennar brutu í bága við eiginleika náttúrulegrar ósamheldinnar geislunar ljóss sem allir höfðu vanist við. Schawlow, sem var nokkuð gamansamur, lét hafa eftir sér að hann sæi helst not púls-leysa í vérlitun til að eyða prentvillum með því að skjóta bleksvertunni í bókstöfunum í burtu af hvítu pappírblaðinu.

En ekki leið á löngu þar til skriðan fór af stað. Notkun leysa er í dag orðin svo víðtæk að ógerningur er að henda reiður á öllum afbrigðum hennar. Henni má þó skipta í fræðileg og vísindaleg not annars vegar og tækni- og iðnaðarnot hins vegar. Í lokin verður minnst stuttlega á nokkur þeirra.

Leysirinn er sjálfur mikilvægt viðfangsefni rannsóknna á víxlverkun ljóss við einstakar frumeindir og sameindir t.d. í eins-atóms leysum og í

skammtadeplum. Einnig til grundvallarrannsókna á samheldni og ljóssuði. Margar tilraunir á furðum skammtafræðinnar eins og á óvissu, staðleysu og umbreytingum á samheldni í ósamheldni, fara fram með leysisljósi. Rannsóknir á Casimir-kraftinum af völdum eindaflökts tómarúmsins eru gerðar með leysum. Leysi–kælingu (e. laser cooling) er einnig beitt til að fá fram Bose–Einstein–þéttingu.

Heilmýndun (e. holography), sem byggir á samheldni leysisljóss, varð öflugt sjálfstætt svið innan ljósfræðinnar. Með því mikla ljósafla sem leysirinn færði, fæddist önnur grein innan ljósfræðinnar, ólínuleg ljósfræði (e. nonlinear optics), sem greinist nú í fjölda undirsviða. Róffræðin, einkum Raman-greiningin, sem er máttugt rannsóknartæki sameinda-eðlisfræði og –efnafræði, eflidist mikið við tilkomu leysanna. En einnig urðu til með leysinum önnur ný svið svo sem róffræði án dopplerviks (e. doppler free spectroscopy).

Örstuttir leysipúlsar hafa reynst mjög gagnlegir við rannsóknir á örskjótum efnabreytingum. Samheldnar púlsagreiddur leysa (e. laser pulse comb) eru á síðustu árum orðnar öflugur mælikvarði fyrir nákvæmstu tíðni og tímamælingar á fjölmörgum sviðum

Líffræðin eignaðist ný mikilvæg rannsóknartæki með leysi-töng (e. laser tweezer) og samdepla leysi skimunarsmásjá (e. confocal laser scanning microscope). Í stjörfræði er tif andrúmsloftsins leiðrétt fyrir sjónauka með hjálp manngerðrar leysistjörnu (e. artificial laser star) sem mynduð er í háloftunum. Víða um heim er reynt að kveikja á kjarnasamruna með geislaþrýstingi öflugra leysa. Unnið er að þróun eindahraða með því að láta eindirnar bókstaflega sigla áfram eftir plasmaveiflum sem eru myndaðar fyrir atbeina leysisljóss. Bráðlega verður hægt að smíða skápastóra rafeindageisla–leysa fyrir samheldnar röntgenbylgjur sem nota mætti til fasaandstaðu–gegnumlýsingar (e. phase contrast screening) og heilmýndunar (e. holographic imaging) í vélsmíði og læknisfræði.

Hagnýting leysa í geislaspilurum, strikamerkjaskönnun, ljósleiðarafjarskiptum og leysisýningum eru öllum kunn. Einnig hefur leysisgeislun aflmikils útfjólublás ljóss reynst ómissandi við prentun örsmárra rafrása á síðustu árum og er hún því orðinn nauðsynlegur grundvöllur frekari framfara í tölvutækni. Á grundvelli leysisins hefur þróast ljósmælitækni til nákvæmrar mælinga á fjarlægð, yfirborðsmælinga á plánetum og dreifingu efna í andrúmsloftinu. Leysar eiga mikinn þátt í sameiningu ljóstækni við rafeinda-tækni í nýju tæknisviði svonefndri rafljóstækni (e. electro-optics).

Vopnaframleiðendur nota leysa til stýringa á flugskæptum og dreymir um að beita leysisgeisla sem beinstefnuvopni (e. directed energy weapon), sem strax kom upp í huga margra þegar leysirinn birtist fyrst á sjónarsviðinu. Flestir bíla- og flugvélaframleiðendur nota leysa til að bora, skera og sjóða saman málma og gerviefni. Í læknisfræði er hann víða notaður við krabbameinsgreiningu og til ýmissra aðgerða og uppskurða en einnig til leiðréttingar á sjóngöllum og til lagmyndatöku í auga og á húð.

Fyrir þróun meysis og leysis fengu þeir Townes, Basov og Prokorov Nóbelsverðlaunin árið 1964 og Schawlow og Bloembergen árið 1981 fyrir framlag þeirra til leysirófgreiningar. Fram til ársins 2010 hafa nítján einstaklingar hlotið Nóbelsverðlaun í eðlisfræði og efnafræði fyrir afrek sem tengjast leysum og notkun þeirra. Gefur þessi fjöldi verðlaunahafa til kynna, hve umfangsmikil og varanleg vísindaleg áhrif leysisins hafa orðið – svo ekki sé minnst á öll áhrif hans á tæknilegum sviðum. Theodore Maiman var tvísvar tilnefndur til Nóbelsverðlauna, en fékk þau ekki. Í staðinn hlotnaðist honum fjöldi annarra viðurkenninga og er þá kannski „Afmælishátíð leysisins árið 2010“ sú merkasta þeirra – sem hann því miður getur ekki verið viðstaddur.

10. Lokaorð

Leysirinn varð til sem afrakstur aukinnar þekkingar í róffræði og vaxandi reynslu í notkun afturverkunar á örvun geislunar sem áður hafði leitt til kjarnspunahermunar og meysa. Það sem einkennir leysirinn best er samheldnin í geislun hans, sem áður var óþekkt í þessum mæli í ljósgeislun. En hún er grundvöllurinn að öllum notum hans.

Heimildir

- [1] A. Einstein, Strahlung–Emission und –Absorption nach der Quantentheorie, *Deutsche Physikalische Gesellschaft, Verhandlungen* Nr. 13/14, 318-323, (1916)
- [2] A. Einstein, Zur Quantentheorie der Strahlung, *Physikalische Zeitschrift*, **18**, 121-128, (1917).
- [3] E.v. Schweidler, *Über Schwankungen der radioaktiven Umwandlung*, Comptes Rendus du Premier Congres International pour L'etude de la Radiologie et de Ionisation, Liege, 12.-14. September 1905.
- [4] H. Kopfermann and R. Ladenburg, Untersuchungen über anomale Dispersion angeregter Gase II. Teil Anomale Dispersion im angeregten Neon. Einfluß von Strom und Druck, Bildung und Vernichtung angeregter Atome, *Zeitschrift f. Physik* **48**, 26-50, (1928).
- [5] F.A. Butayeva and V.A. Fabrikant, *Investigations in Experimental and Theoretical Physics, a Memorial to G.S. Landsberg*, U.S.S.R., Acad. Sci. Publ., Moscow, 1959 62-70.

- [6] V.A. Fabrikant, M.M. Vudynskii and F. Butayeva, U.S.S.R. Patent No 123209, subm. 18 June 1951, publ. 1959. Supplemented by U.S.S.R. Patent No, 148441,
- [7] E.M. Purcell and R.V. Pound, A Nuclear Spin System at Negative Temperature, *Phys. Rev.*, **81**, 279-280, (1951).
- [8] Örn Garðarson og Þorbjörn Sigurgeirsson, *Proton Precession Magnetometer for Geomagnetic Measurements*, Proceedings of the Fifth International Instruments and Measurements Conference, Sept. 13-16 (1960) Stockholm.
- [9] Þorbjörn Sigurgeirsson, *A Continuously Operating Proton Precession Magnetometer for Geomagnetic Measurements*, Science in Iceland, 998-1001 (1971).
- [10] Lárus Thorlacius, *Magni og Móði*, Í hlutarins eðli, Afmælisrit um Þorbjörn Sigurgeirsson, Ritstj. Þorsteinn I. Sigfússon, 1987.
- [11] J. Weber, *Amplification of Microwave Radiation by Substances not in thermal Equilibrium*, Transactions of the IRE PGED-3, 1 (1953).
- [12] N.G. Basov and A.M. Prokhorov, Application of molecular beams for radiospectroscopic investigation of rotational spectra in molecules, *Zh. Eksperim. I Teor. Fiz.*, **27**, 431-438, (1954).
- [13] J.P. Gordon, H.J. Zeiger and C.H. Townes, Molecular Microwave Oscillator and New Hyperfine Structure in the Microwave Spectrum of NH₃, *Phys. Rev.*, **95**, 282-284, (1954).
- [14] J.P. Gordon, H.J. Zeiger and C.H. Townes, The Maser – New Type of Microwave Amplifier, Frequency Standard and Spectrometer, *Phys. Rev.*, **99**, 1264-1274 (1955).
- [15] N.G. Basov and A.M. Prokhorov, About possible methods for obtaining active molecules for a molecular oscillator, *Zh. Eksperim. Teor.Fiz.*, **28**, 249-250 (1955).
- [16] N. Bloembergen, Proposal for a New Type of a Solid State Maser, *Phys. Rev.*, **104**, 324-327, (1956).
- [17] T.H. Maiman, *The Laser Odyssey*, ISBN 0-97-029270-8, Oct. 2000.
- [18] H. Weaver, D.R.W. Williams, N.H. Dieter and W.T. Lum, Observation of a Strong Unidentified Microwave Line and of Emission from the OH Molecule, *Nature*, **208**, 29-31, (1965).
- [19] A.L. Schawlow and C.H. Townes, Infrared and Optical Masers, *Phys. Rev.*, **112**, 1940, (1958).
- [20] A.L. Schawlow and C.H. Townes, *A medium in which a condition of population inversion exists*, U.S. Patent No. 2929922, Appl. Date: 30 July 1958.
- [21] G. Gould, Brit. Patent Specs. 953721 to 953727, published 2. April 1964.
- [22] G. Gould, *The LASER, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, in: The Ann Arbor Conference on Optical Pumping, the U. of Michigan, 15–18 June 1959, ed: P.A. Franken and R.H. Sands, pp 128.
- [23] A. Javan, Possibility of Production of Negative Temperature in Gas Discharge, *Phys. Rev. Lett.* **3**, 87-89, (1959).
- [24] A. Javan, D. Herriott, W. Bennet, Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing a HeNe mixture, *Phys. Rev. Lett.*, **6**, 106-110, (1961).
- [25] A.D. White and J.D. Ridgen, *Continuous gas maser operation in the visible*, Proceedings IRE 50, 1697 (1962).
- [26] C.K.N. Patel, Continuous-wave laser action on vibrational-rotational transitions of CO₂, *Phys. Rev.*, **136**, A1187, (1964).
- [27] A.L. Schawlow, *Infrared and optical masers*, in Conference on Quantum Electronics-Resonance Phenomena, Shawanga Lodge, High View, New York, Sept. 14-16, 1959, Proceedings ed. C.H. Townes, p. 553. New York: Columbia University.
- [28] T.H. Maiman, Optical and Microwave-Optical Experiments in Ruby, *Phys. Rev. Lett.*, **4**, 565-566, (1960).
- [29] T.H. Maiman, Stimulated Optical Radiation in Ruby, *Nature*, **187**, 493-494, (1959).
- [30] T.H. Maiman, Optical maser action in Ruby, *British Journal of Communication and Electronics*, **7**, 674, (1960).
- [31] R.J. Collins, D.F. Nelson, A.L. Schawlow, W. Bond, C.G.B. Garrett and W. Kaiser, Coherence, Narrowing, Directionality and Relaxation Oscillation in the Light Emission from Ruby, *Phys.Rev. Lett.*, **5**, 303-305, (1960).
- [32] D.F. Nelson, R.J. Collins and W. Kaiser, Bell Labs and the ruby laser, *Physics Today*, 40-45 Jan. 2010.
- [33] T.H. Maiman, R.H. Hoskins, I.J. D'Haenens, C.K. Asawa and V. Evtuhov, Stimulated Optical Emission in Fluorescent Solids. II. Spectroscopy and Stimulated Emission in Ruby, *Phys. Rev.*, **123**, 1151-1157, (1961).
- [34] Þorsteinn J. Halldórsson, Biophysikalische und apparative Grundlagen der endovesikalen Nd:YAG-Laserapplikation, *Urologe A*, **20**, 293-299 (1981).
- [35] J. Odeurs, et al., Towards more relaxed conditions for a gamma-ray laser: Methods to realize induced transparency for nuclear resonant gamma radiation, *Laser & Photon. Rev.*, **4**, 1-20, (2010).
- [36] S. Johansson, V.S. Letokhov, Astrophysical lasers and nonlinear optical effects in space, *New Astronomy Reviews*, **51**, 443-523, (2007).
- [37] M.A. Johnson et al., Nonthermal 10 micron CO₂-emission lines in the atmospheres of Mars and Venus, *Astrophysical Journal*, **208**, L145-L148 (1976).
- [38] S. Johansson, V. Letokov, Laser action in gas condensation in the vicinity of hot stars. *Pis ma Yh. Eksp.Teor. Fiy.*, **75**, 591-594, (2002).
- [39] S. Johansson, V. Letokov, Astrophysical laser operating in the OI 0.8446 μm line in the Weigelt blobs of η Carinae, *MNRAS*, **364**, 731-737, (2005).

Summary: The theoretical foundation of the laser can be traced back to Einsteins discovery of the stimulated emission of light in 1916. The reason why it took 44 years to built the first laser is the slow accumulation of profound knowledge in spectroscopy of atoms and molecules needed. The design principles of a laser had to be invented as well. Since the ratio of stimulated to spontaneous emission increases very rapidly with wavelength, NMR and masers became the precursors of lasers in the fifties. The basic principles of the laser were formulated clearly by Townes and Schawlow in the Phys. Rev. paper: "Infrared and Optical Masers" in 1958, but Maiman was the first person to demonstrate the laser process in ruby described in the paper "Stimulated Optical Radiation in Ruby" published in 1960 in Nature – an event which marks the 50th anniversary in 2010.

Due to the high spatial and temporal coherency of the laser, it has become a valuable tool in physics, chemistry, astronomy and biology. Its technical applications on the other hand are widespread in such different disciplines as medicine, meteorology, metrology, communication, information storage and material processing. In future the further developments of lasers will not only take place along traditional lines, but will also lead to totally new devices, based on new mediums such as material waves of Bose-Einstein-Condensations and electron surface waves in plasmonics.

Um höfundinn: Þorsteinn J. Halldórsson eðlisfræðingur er eftirlaunaþegi frá European Aeronautic, Defence and Space Company, EADS, en starfaði auk þess hjá fyrirtækjunum Daimler, Deutsche Aerospace og Messerschmitt-Bölkow-Blohm í München frá árinu 1970 við rannsóknir og þróun, m.a. á leysum og rafljóskerfum tengdum þeim.

thorsteinn.halldorsson@t-online.de

Móttakin: 20.04.2010