

## Nobelova nagrada za fiziku 2005. godine

Goran Pichler

Institut za fiziku, Bijenička cesta 46, HR-10000 Zagreb

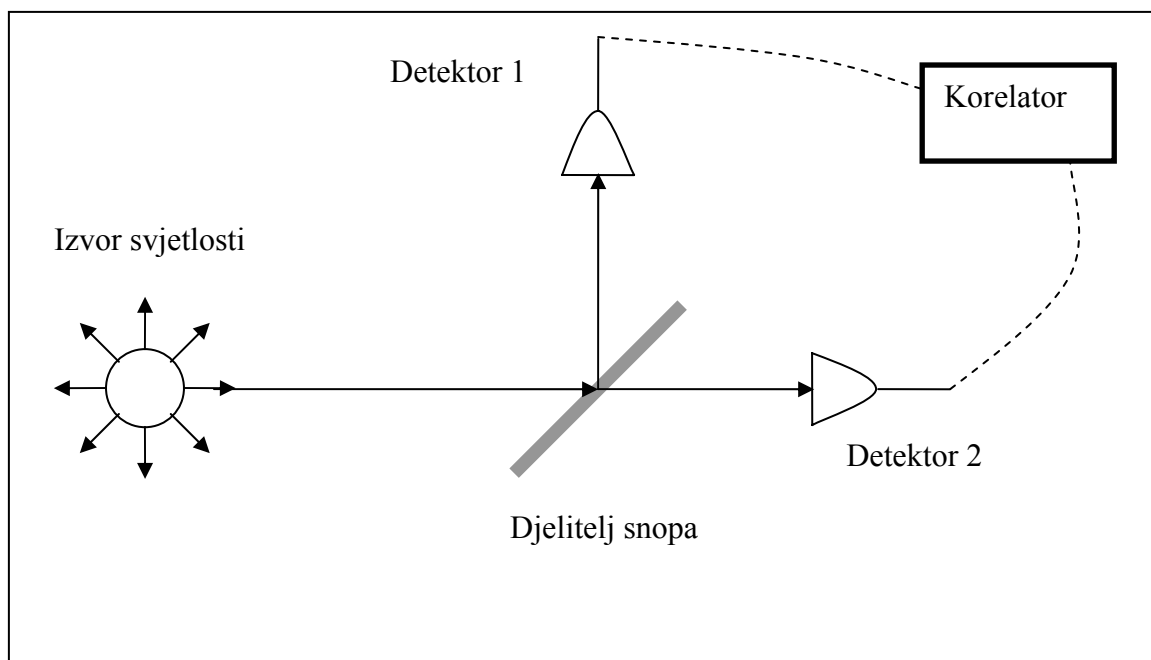
Švedska kraljevska akademija znanosti odlučila je podijeliti Nobelovu nagradu za fiziku u 2005. godini (1-4) u potpunom skladu sa Svjetskom godinom fizike ([www.wyp2005.hr](http://www.wyp2005.hr)). Dodijeljena je trojici istaknutih fizičara. Roy Glauber, profesor na Harvardskom sveučilištu, dobio je polovicu nagrade za doprinos kvantnoj teoriji i optičkoj koherenciji, to jest objašnjenju koherencije elektromagnetskih polja, gdje je uveo pojam korelacije između fotona, kvantata svjetlosti. Drugu polovicu su podijelili Jan Hall iz JILA-e u Boulderu i Theo Hänsch iz Max Planck Instituta za kvantnu optiku u Garchingu, za doprinos u razvoju najpreciznijih mjerenja fundamentalnih fizikalnih konstanti, a posebno za uvođenje tehnike koja se osniva na takozvanom frekventnom češlju, pojmu usko vezanom uz ultrakratke laserske pulseve.

Poticaj za Svjetsku godinu fizike bio je vezan uz čudesnu godinu 1905. kada je mladi Albert Einstein objavio nekoliko članaka s dalekosežnim utjecajem. Jedan od tih radova objavljen u *Annalen der Physik* pod naslovom: „O heurističkom pogledu na stvaranje i uništavanje kvantata svjetlosti“, ima duboku vezu sa svim što je do današnjih dana ostvareno na polju kvantne optike. Roy Glauber je 1963. godine objavio tri fundamentalna znanstvena rada u kojima je kvantizirao elektromagnetsko polje zračenja i primijenio ga na običnu svjetlost. Ponukan je bio eksperimentom kojeg su izveli R. Hanbury Brown i R. Q. Twiss (HBT) pomoću Michelsonovog interferometra, u kojem nisu mjerili uobičajenu interferenciju, već korelaciju signala dobivenih iz dva različita detektora (vidi Sliku 1.). Njihova glavna namjera je bila da odrede veličinu udaljenih zvijezda, ali dobili su iznenađujući rezultat. Kada su krakovi nakon djelitelja snopa bili jednake duljine ukupni intenzitet je porastao za dva puta. Premda je 1956. E. M. Purcell dao objašnjenje pomoću klasične teorije, tek je Glauber konzistentnom primjenom kvantne elektrodinamike objasnio opažanja. Pri tome je uveo pojam koherentnih stanja elektromagnetskog polja, pomoću kojih je mogao dobro opisati termalno zračenje izvora svjetlosti, ali je mogao objasniti i ponašanje laserskog zračenja i nekih drugih neklasičnih izvora svjetlosti. Svi kasniji radovi iz kvantne optike bazirali su se na ovom osnovnom doprinosu, pa je općenito korelacija fotona postala jedan od posebnih

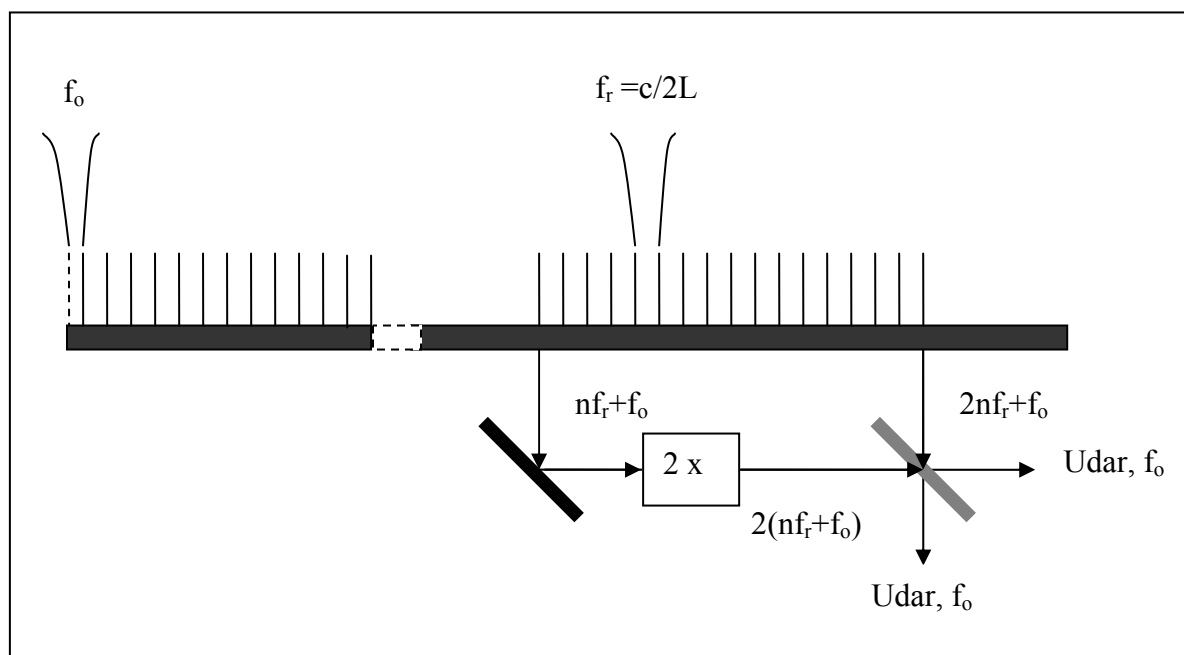
područja zanimanja kvantne optike, a korelacije viših redova su našle zanimljive primjene, posebno kod izuzetno slabih svjetlosnih intenziteta gdje fotonska priroda svjetlosti dolazi do punog izražaja i gdje takozvana kvantna buka (quantum noise) priječi dosezanje vrhunske preciznosti mjerenja. HBT eksperiment je pokazao da termalni izvori svjetlosti pretežno emitiraju parove fotona. Nasuprot tome laseri imaju posve drugačiju prirodu emisije. Postoje i takvi izvori svjetlosti, koji ne samo da ne zrače parove fotona, nego posve suprotno termalnim izvorima, ponekad ne zrače ništa (anti bouching). Razlika naravno dolazi od činjenice što termalni izvori svjetlosti zrače fotone uslijed spontane emisije, dok kod lasera i ostalih neklasičnih izvora svjetlosti stimulirana emisija igra najvažniju ulogu. Time se objašnjava osnovna razlika između vrućih izvora svjetlosti iz raznih žarulja s mnoštvom frekvencija i faza s jedne strane i svjetlosti lasera i sličnih koherentnih izvora svjetlosti sa specifičnom frekvencijom i posve određenom fazom s druge strane. Danas je moguće ostvariti izvore neklasičnog svjetla u kojima se djelomice može smanjiti kvantna buka čime se povećava preciznost mjerenja. Takvo se svjetlo opisuje takozvanim zgnječenim stanjima (squeezed states). Kod nižih razina intenziteta svjetlosti granularna fotonska struktura dolazi do punog izražaja. To se može iskoristiti u modernim kvantnim komunikacijama u kojima je sigurnost prijenosa podataka gotovo bez rizika, a sve to je od velikog značaja za razvoj kvantnog računanja.

Dvostruka priroda svjetlosti – valna i čestična – čine osnovu KVANTNE OPTIKE, što je zapravo primjena kvantne teorije na cijelo polje fizikalne optike. Rezimirajmo kako su mnogi istraživači bili uvjereni da fotoni interferiraju sami sa sobom. Eksperimenti s mjerenjem korelacije su to posve izmijenili i doveli točnost mjerenja do ruba kvantnog šuma.

Frekventni češalj je najnovija tehnika i tehnologija, koja je trenutno u brzom razvoju i od koje se očekuje još nebrojeno primjena, koje će zasigurno ući ne samo u pore moderne fizike nego će značiti novi vjetar u primjenama od medicine pa sve do ultrapreciznih mjerenja frekvencija i napose vremena. Važan je doprinos Johna Halla i Theodora Hänscha što su omogućili mjerenje frekvencija svjetlosti s apsolutnom točnošću od petnaest znamenaka. Oni su razvili nekoliko ultrastabilnih i neobično monokromatskih kontinuiranih lasera i primijenili tehniku frekventnog češlja s ultrabrzim laserima kako bi postigli najtočnija mjerenja frekvencije. Time je omogućeno mjerenje različitih fizikalnih konstanti i provjera njihove stabilnosti tijekom vremena. Moguće je sada razviti ultratočne atomske satove, čime se još više poboljšava sustav za opće pozicioniranje (GPS tehnologija).



Slika 1. HBT mjerenje korelacije intenziteta nakon djelitelja snopa u dva detektora.



Slika 2. Prikaz mjerenja frekvencije jednog vala svjetlosti.

Od kada je napravljen laser i razvijena teorija njegova rada poznato je da u rezonatoru mogu obitavati transverzalni i longitudinalni modovi. Longitudinalni modovi zadovoljavaju uvjet  $n\lambda=2L$ , gdje cijeli broj valnih duljina razapinje dvostruku veličinu rezonatora. Naravno

unutar rezonatora duljine  $L$  može istovremeno obitavati nekoliko longitudinalnih modova, pa čak u novije vrijeme i njih sto tisuća ili čak milion modova. Razmak između susjednih modova titranja je  $c/2L$  i ta razlika je postojana za sve prisutne modove u laserskom rezonatoru. Kada svi ti longitudinalni modovi titraju nasumično onda se iz takvog lasera dobije kontinuirana svjetlost. Ukoliko su svi modovi u međusobnoj konstantnoj fazi, onda se njihovim zbrajanjem dobiva ultrakratki puls. Ti pulsovi mogu trajati 10 do 100 femtosekundi (1 femtosekunda = 0,000000000000001 s). Primjer zbrajanja modova prikazana je na Slici 3. Na Web stranici [http://projekt2.ifs.hr/skenderovic/mfl\\_example.html](http://projekt2.ifs.hr/skenderovic/mfl_example.html), nalazi se ilustracija propagacije udara dva elementarna vala u disperzivnom sredstvu. Udari mogu biti još i kraći, ali se tada frekventno područje mora proširiti prema kratkovalnom spektralnom području, što je jedno od najaktivnijih poduhvata današnje atomske i optičke fizike.

Velika je zasluga Johna Halla i Theodora Hänscha što su frekventni češalj umješno iskoristili za najtočnije mjerenje frekvencija, što je u znatnoj mjeri olakšalo i pojeftinilo mjerenje fundamentalnih fizikalnih konstanti. Na Slici 2 je prikazan frekventni češalj koji se dobiva iz femtosekundnog laserskog oscilatora. Svjetlost iz takvog uređaja propušta se kroz strukturirano optičko vlakno (fotonski kristal) čime se uslijed nelinearnih procesa frekventni češalj proširuje i obuhvaća najmanje jednu oktavu frekvencija. Bilo koja frekvencija u tom intervalu može se izraziti slijedećom relacijom:

$$f = nf_r + f_0$$

gdje je  $n$  cijeli broj, a  $f_0$  ide od nule do  $f_r$ . Dvostruko veća frekvencija (na drugom kraju oktave) dana je s izrazom:

$$F = 2f = 2nf_r + f_0.$$

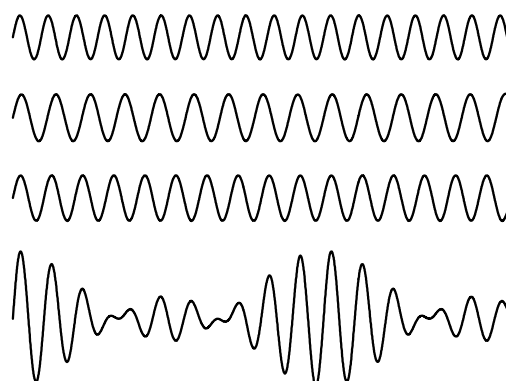
Ako se sada frekvencija  $f$  udvostruči pomoću posebnog nelinearnog kristala (kakav se koristi u zelenim laserskim pokazivačima) dobiva se:

$$2f = 2nf_r + 2f_0$$

Kada se  $F$  i  $2f$  pomiješaju u određenom elektroničkom uređaju, mogu se na izlazu dobiti razlike frekvencija  $F$  i  $2f$ :

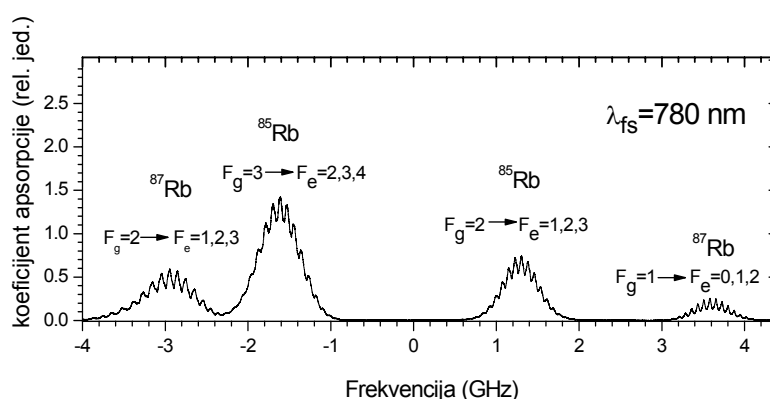
$$2f - F = 2nf_r + 2f_0 - 2nf_r - f_0 = f_0$$

i time se vrlo precizno određuje mala veličina  $f_0$ . Bilo koja frekvencija se tada može s vrlo visokom točnošću odrediti, korištenjem sličnog uređaja za miješanje raznih frekvencija. Kada se sve poveže s najtočnijim frekvencijama cezijeveg atomskog sata, postiže se jednostavna povezanost mikrovalnog i vidljivog spektralnog područja s istom točnošću, koja time doseže fantastičnih 15 znamenaka. Današnja je potreba da ta točnost bude i za još dodatnih tri reda veličine veća.



Slika 3. Prikaz zbrajanja titranja tri longitudinalna moda u femtosekundnom laseru

U posljednjih nekoliko godina primjena tehnike frekventnog češlja širi se velikom brzinom ponajviše zahvaljujući relativno dostupnijim femtosekundnim laserskim oscilatorima na osnovi kristala titanom dopiranih safira ili erbijumom dopiranih optičkih vlakna. Osnovna konfiguracija je sve jeftinija i konkurencija proizvođača raste, tako da dostupnost i manjim laboratorijima omogućuje razbuktavanje mašte istraživača širom svijeta. Na Slici 4. prikazan je utjecaj frekventnog češlja na profile apsorpcijskih linija hiperfine strukture izotopa rubidija. Kako je repeticija ultrabrzih pulsova od 80 MHz jednaka razmaku susjednih longitudinalnih modova, struktura ovih spektralnih linija dobiva „bodljasti“ izgled. U suštini se mijenjaju brzine atoma rubidija i grupiraju se na određenim mjestima. Mi se nadamo da bi ovakvo grupiranje moglo imati, u krajnjoj liniji, utjecaj na razvoj novih metoda hlađenja atoma i molekula do ultraniskih temperatura.



Slika 4. Prikaz utjecaja frekventnog češlja na profil hiperfinskih spektralnih linija dva izotopa rubidija. Razmak između susjednih „bodlji“ odgovara razmaku susjednih longitudinalnih modova u Ti:Safirnem laserskom oscilatoru (80 MHz), što je ujedno i repeticija femtosekundnih pulsova.

**Roy Glauber** rođen je 1925. godine i još uvijek je vrlo aktivan profesor na Harvardskom sveučilištu, gdje je znatno ranije završio studij fizike i doktorat pod vodstvom nobelovca Juliana Schwingera. Dvije godine proveo je u Institutu za napredne studije u Princetonu, pola godine je radio s Wolfgangom Paulijem u Zürichu, a proveo je i godinu dana u Caltechu u Kaliforniji. Roy Glauber kao izvrstan profesor opće fizike u svakom svom predavanju održava tonus znatiželje na najvišem nivou. Posebno su zanimljivi njegovi pokusi iz optike, kada se dvorana mora zamračiti, ali to je ujedno i prirodni refleks da se studenti ili još više zainteresiraju ili da se još više uspravaju. Tako je jednom za svog posjeta Max Planck Institutu za Kvantnu optiku u Garchingu prikazao film o optičkim vlaknima. Svojstvo vođenja svjetlosti kroz vlakna prikazao je tako da je stakleni cilindar napunjen vodom pri dnu odčepio i tako napravio mlaz vode. Sa suprotne strane otvora svjetlost je obasjavala mlaz pri izlazu iz posude. Zbog totalne refleksije unutar tankog mlaza, svjetlost je ostala u tom prozirnog snopu vode i sakupljala se u vedru za vodu. Kada je istekla sva voda iz staklenog cilindra prof. Glauber je zavirio u vedro vode koje je svjetlucalo i rekao: pa naravno kako smo zahvatili vodu tako smo i svjetlost pohranili u toj istoj vodi. Nastao je tajac, jer svi znaju da se svjetlost ne može samo tako pohraniti, jer je neuhvatljiva! Tajna se kasnije razotkrila priznanjem da je u vedru za hvatanje vode već na početku eksperimenta na dnu bila postavljena upaljena džepna svjetiljka.

**Jan Hall** je rođen 1934. godine, a doktorirao je na Carnegie Institutu Tehnologije u Pittsburghu, Pennsylvania. U početku je radio na stabilizaciji mikrovalnih izvora zračenja, a onda se preselio u Colorado, gdje je u Boulderu nastavio karijeru u NIST-u (Nacionalni institut za standarde i tehnologiju) na razvoju ultrastabilnih lasera i preciznih mjerenja. Nešto kasnije nastavio je rad na JILA-i (Joint Institute for Laboratory Astrophysics), a postao je i naslovni profesor na ondašnjem Sveučilištu. Otišao je u penziju 2004. godine, no to nije prava penzija, jer je iza sebe ostavio prepune laboratorije svojih instrumentalnih i tehničkih inovacija uz lijepi broj svjetski poznatih fizičara, koji danas nastavljaju njegovim putem.

**Theodor Hänsch** je rođen 1941. godine. Doktorirao je 1969. godine na Sveučilištu u Heidelbergu, a voditelj mu je bio Peter Toschek. Nakon dvije godine poslijedoktorske specijalizacije u Stanfordu, California, Prof. Arthur Schawlow mu je predložio da tamo i ostane. Tako je nakon par godina tamo postao profesor s ovećom grupom doktoranada, od kojih je kasnije Carl Wieman također postao Nobelovac (2000.godine) za Bose-Einsteinovu

kondenzaciju izvedenu 1995. godine. Theodor Hänsch je poznat širom svijeta po svojem ustrajnom naporu da što točnije izmjeri spektar vodika, najjednostavnijeg atoma u prirodi. Posebno se istakao razvojem novih lasera i laserskih tehnologija, kojima je vremenom povećavao točnost svojih mjerenja do nevjerojatnih petnaestak znamenaka. U svojim plenarnim predavanjima na velikim konferencijama znao je plijeniti pažnju s briljantnim prikazima svojih eksperimentalnih inovacija. Uvijek je znao zaokupiti pažnju slušača i gledalaca time što je tvrdio da se samo povećanjem točnosti mjerenja mogu otkrivati horizonti nove fizike. To svakako znači na rubu poznatog i u kontaktu s nepoznatim ozbiljno prokrčiti putove novih spoznaja.

U kojoj mjeri će velebni doprinosi ove trojice Nobelovaca utjecati na današnje mlade naraštaje teško je ovog trenutka predvidjeti, ali mi smo ionako ograničeni samo svojom vlastitom maštovitošću, a donekle i materijalnom podlogom.

Kada bi se postavilo pitanje što nakon svih onih zanimljivih i veselih manifestacija Svjetske godine fizike gdje su sudjelovali svi naraštaji onda je jedini pravi odgovor kako se sve naprosto treba nastaviti i u 2006 godini i tako dalje u nadolazećim godinama. Nedavne prognoze već nagovješćuju kako će 2006. godina biti godina primjene „spore svjetlosti“ i „kvantnih komunikacija“ u području kvantnog računanja.

#### Reference:

1. <http://nobelprize.org/physics/laureates/2005/index.html>
2. <http://nobelprize.org/physics/laureates/2005/press.html>
3. <http://nobelprize.org/physics/laureates/2005/phyadv05.pdf>
4. <http://nobelprize.org/physics/laureates/2005/info.pdf>