

Spora svjetlost

Hrvoje Skenderović

Institut za fiziku, Bijenička cesta 46, Zagreb

Uvod

Brzina svjetlosti, c , zauzima posebno mjesto u fizikalnim zakonima. Iz Einsteinove je specijalne teorije relativnosti poznato da ništa ne može putovati brže od svjetlosti u vakuumu, $c = 299\,792\,458$ m/s. Lorentzove transformacije pokazuju i da je brzina svjetlosti ista u svim sustavima motrenja, odnosno svjetlosni signal poslan iz najbržeg zrakoplova će se širit istom brzinom i za pilota u kabini i za promatrača koji stoji na zemlji. Ako razmišljamo o svemirskim putovanjima voljeli bismo da su moguće i veće brzine od c , ali u mnogim primjenama u bliskoj budućnosti trebat će nam svjetlost sporija od tih 300 tisuća km/s, pa i potpuno zaustavljena svjetlost. Ove primjene obuhvataju optičke rutere, optičko skladištenje podataka, kvantna računala, radar¹.

Zapravo, svjetlost se u svakom sredstvu, bio to zrak, staklo, voda ili nešto četvrto, giba brzinom koja je manja od c . Točnije, brzinom c/n gdje je n indeks loma toga sredstva. Indeks loma stakla je oko 1,5 što znači se svjetlost kroz staklo giba brzinom od oko 200 tisuća km/s. Postoje optički materijali indeksa loma do $n = 5$, ali ni to ne daje dovoljno sporu svjetlost. Povrh toga, materijali s velikim indeksom loma imaju i veliku reflektivnost.

Brzina svjetlosti

Da bismo shvatili kako se svjetlost može usporediti do zemaljskih brzina pogledajmo prvo što su to fazna i grupna brzina putujućeg vala. Svjetlost je elektromagnetski val i predstavlja titranje elektromagnetskog polja koje se širi u prostoru. Frekvencija tog titranja, ν , povezana je s brzinom širenja vala, v , i valnom duljinom, λ , pomoću jednostavne relacije: $v = \lambda \cdot \nu$. Širenje monokromatskog vala (vala koji titra samo jednom frekvencijom) duž osi x opisuje se sinusoidalnom funkcijom:

$$\sin(\omega t - 2\pi x / \lambda). \quad (1)$$

ovdje je upotrebljena kružna frekvencija $\omega = 2\pi\nu$, t predstavlja vrijeme. Ukoliko argument sinusne funkcije (fazu vala) izjednačimo s nulom, dobijamo faznu brzinu v ,

kao što je gore već definirano. Brzina v se naziva faznom jer je to brzina kojom se faza vala širi prostorom. Međutim, u mnogo fizikalnijoj situaciji, jedan val se sastoji od više frekvencija. Takav val je tada dan zbrajanjem sinusoidalnih funkcija sličnih izrazu (1). Zbroj monokromatskih valova koji imaju bliske frekvencije dovodi do stvaranja niza grupa, kao što je prikazano na slici 1. za zbroj dva vala. Gibanje envelope tih grupa, određeno je grupnom brzinom, v_g . Energija vala se (najčešće) prenosi upravo grupnom brzinom, što znači da ona ima veći fizikalni značaj. Grupna brzina je jednaka faznoj brzini kada su fazne brzine za svaki monokromatski val različitih frekvencija međusobno jednake. Međutim, u slučaju da su fazne brzine različite za različite ω , tada se fazna brzina i grupna brzina razlikuju. Ova razlika može biti veoma znatna i ilustrirana je također na slici 1. Pojava da se valovi različitih frekvencija šire različitim brzinama se naziva disperzijom i sasvim je uobičajena pojava pri prolasku svjetlosti kroz sredstvo.

Apsorpcija i disperzija

Kada je disperzija velika, grupna brzina je bitno manja od fazne. Disperzija je osobito velika u blizini rezonantnih linija u spektru. Rezonantne linije u spektru nastaju kada kvant svjetlosti, foton, ima energiju koja je upravo jednaka razlici između dva kvantna stanja u atomu. Zbog dualne prirode elektromagnetskog zračenja na svjetlost, koju smo do sada predstavljali kao val, možemo gledati i kao na roj čestica, fotona. Istina, to su pomalo specifične čestice, postoje samo dok se gibaju i to brzinom svjetlosti. Bitno je da je energija fotona jednoznačno određena frekvencijom pripadajućeg elektromagnetskog polja. Energija fotona je jednostavno umnožak čuvane Planckove konstante i frekvencije, $E = h\nu$. Pošaljimo onda svjetlost koju želimo usporiti u rezonantni medij. Što će se dogoditi? Dakle, atom s dva kvantna stanja čija razlika odgovara energiji fotona može s određenom vjerojatnošću apsorbirati foton iz našeg snopa i prijeći iz donjeg kvantnog stanja u gornje. Nakon nekog vremena, atom će se vratiti u donje stanje i pri tom izračiti foton ali u nasumičnom pravcu i bez informacije o kvantnom stanju upadnog fotona. Naša upadna svjetlost koju želimo usporiti je u biti nestala. Na rezonanciji imamo potrebnu disperziju ali nam smeta apsorpcija.

Elektromagnetski Inducirana Transparencija

Da bi spriječili apsorpciju, istraživači u ovom području se služe kvantomehaničkim fenomenom pod imenom elektromagnetski inducirana transparencija (EIT). EIT je prvi put postignut 1990. na Stanfordskom sveučilištu u grupi Stephena E. Harrisa². Bit ovoga fenomena je da se inače neprozirno sredstvo obasja laserskim svjetlom pažljivo odabrane frekvencije kako bi se učinilo providnim (transparentnim) za svjetlo drugoga lasera.

Neka atom posjeduje tri kvantna stanja, 1, 2 i 3. Stanje 1 je najniže energije, stanje 2 ima tek nešto veću energiju, a stanje 3 je visoko iznad, kao na slici (2). Imamo dva laserska snopa, sprežajući laser čiji su fotoni ugođeni na energetska razliku 3-2 i signalni laser ugođen na razliku 3-1. U početku su svi atomi u stanju najniže energije, stanju 1. Uključi se sprežajući laser i budući da je nerezonantan za prijelaz $1 \rightarrow 3$, a u 2 ne postoji populacija, svjetlost sprežajućeg lasera prolazi kroz sredstvo. Potom se uključi signalni laser i kako svjetlost signalnog lasera dolazi do atoma, zajedničkim djelovanjem dva lasera atomi se prebacuju u stanje kvantne superpozicije 1 i 2. Kvantna superpozicija znači da se atom istodobno nalazi i u stanju 1 i u stanju 2. Stanje 1 bi apsorbiralo signalni snop, stanje 2 sprežajući snop, ali skupa se ta dva procesa međusobno poništavaju – efekt koji se naziva kvantna interferencija. Stanje superpozicije se naziva "tamnim stanjem" jer atomi ne mogu vidjeti svjetlost niti jednoga od dva lasera, oni "ostaju u tami". Atomi postaju transparentni za svjetlost signalnog lasera jer tamno stanje ne može apsorbirati. Budući da sredstvo i dalje posjeduje visoku disperzivnost, odnosno indeks loma se naglo mijenja u ovisnosti o optičkoj frekvenciji, grupna brzina može biti veoma mala. Sve ovo vrijedi samo za mali interval frekvencija blizu rezonancije.

Usporavanje svjetlosti

Unatrag nekoliko godina, nekoliko grupa znanstvenika je uspjelo usporiti svjetlost na brzine ispod 100 m/s. U rubidijevim parama na sobnoj temperaturi signal je usporen na 90 m/s (Kash³). Grupa L. V. Hau⁴ s Rowland Isntituta iz Cambridgea u američkoj državi Massachussetts se bavi hlađenjem atoma što predstavlja jedno zanimljivo stanje materije. U jednom takvom oblačku natrijevih atoma ohlađenih na nevjerojatno niske temperature, manje od 1 mikro Kelvina iznad apsolutne nule, svjetlost je usporena na 17 m/s. To je oko 60 km/h, znači da bi jedan biciklist mogao biti brži od

svjetlosti. Napomenimo da se u ovim eksperimentima ne događa se samo usporavanje svjetlosti već i njeno prostorno sažimanje. Na početku je svjetlosni puls dug oko kilometar. Naravno, laboratorij je puno manjih dimenzija ali kada bi bilo dovoljno prostora laserska svjetlost bi zauzimala upravo toliku duljinu. Svjetlost dolazi u oblačak s brzinom oko 300 000 km/s, a unutar oblačka brzina pada na 60 km/h. Frontalni dio pulsa, već u sredstvu, putuje ekstremno sporo, a rep još juri brzinom svjetlosti kroz zrak te dolazi do gomilanja svjetlosti u sredstvu, odnosno sažimanja. Na kraju je cijeli puls stao u oblačak i duljina pulsa se smanjila s jednog kilometra na 50 mikrona!

Brzina spore svjetlosti ovisi o nekoliko parametara. Neki su fiksni i ne mogu se mijenjati jer ovise o atomu i energijama koji su izabrani za medij. Dva parametra najpogodnija za kontrolu su gustoća atoma i intenzitet sprežujućeg lasera. Brzina pulsa se može reducirati smanjenjem intenziteta sprežujućeg lasera. Krajnje usporavanje se postiže kada se sprežujući laser potpuno isključi u trenutku kada se svjetlosni puls nalazi u sredini oblačka. To dovodi do još jednog zanimljivog i obećavajućeg fenomena sa stanovišta primjene – skladištenja svjetlosti.

Kao odgovor na postupno slabljenje sprežujućeg polja, svjetlosni signal se još više usporava i konačno dolazi do zaustavljanja svjetlosti signalnog lasera, zapravo njenog nestanka. Međutim, informacija koju je nosio signal nije izgubljena, ona je kopirana u kvantna stanja atoma. Informacija je zamrznuta kao da efektivno imamo hologram pulsa zapisan u atomima i može se ponovno regenerirati pažljivim uključivanjem sprežujućeg lasera. Kao nekom magijom, signal se ponovno pojavljuje i nastavlja svoj put sporom brzinom. Vrijeme skladištenja "svjetlosti" je ograničeno jer hologram s vremenom blijedi, odnosno atomi gube koherenciju. Grupa profesora Lukina⁵ s Harvarda je postigla vrijeme uskladištenja svjetlosti od oko pola milisekunde u rubidijevim parama na 70-90 °C. To se može činiti kratkim vremenom, ali ne zaboravimo da za to vrijeme "obična" svjetlost prijeđe 150 kilometara.

Nakon ovih inicijalnih demonstracija spore svjetlosti, mnoge grupe su se okrenule postizanju usporavanja i skladištenju svjetlosti u manje egzotičnim sredstvima od ultrahladnih atoma ili atomskih para. Za praktičnu primjenu ovog fenomena moraju se koristiti optička vlakna ili neki slični materijal, dostupan i robustan.

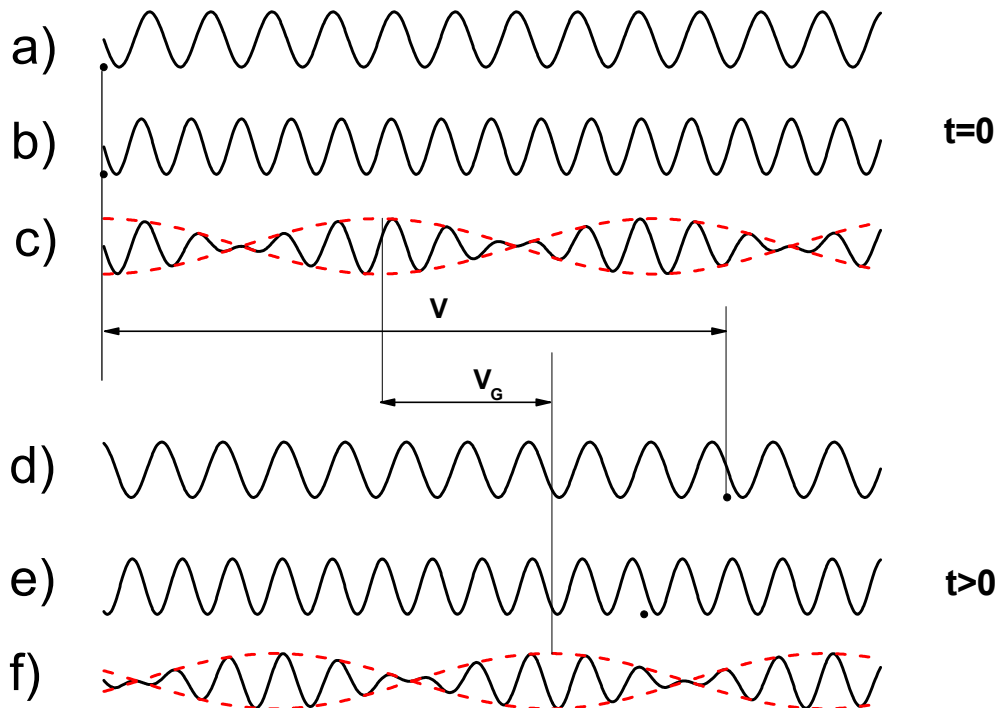
Upravo tragom tih zahtjeva je grupa s Ecole Polytechnique iz Lozane⁶ sredinom 2005. demonstrirala metodu za fiksibilnu vanjsku kontrolu grupne brzine signala koji se

prostire optičkim vlaknom. Metoda se temelji na stimuliranom Brillouinovom raspršenju (SBS), odnosno međudjelovanju dva ususret propagirajuća snopa, snažnog pumpnog vala i slabog signalnog. Putem SBS-a formira se akustički val frekvencije f_A koja je jednaka razlici frekvencija pumpnog, f_P , i signalnog lasera, f_S . S praktične strane gledišta, SBS se može shvatiti kao uskopojasno pojačalo u kojemu kontinuirani pumpni val generira pojačanje u uskom intervalu frekvencija (30-50 MHz) oko frekvencije $f_P - f_A$. U tome intervalu ponovno imamo usporavanje grupne brzine i to po jednostavnom pravilu da za 1 decibel pojačanja dobivamo usporavanje od 1 nanosekunde. Postignute maksimalne veličine indeksa loma za sada iznose oko $n = 4,26$, što je malo u odnosu na ranije opisane metode ali ima veliku prednost u jednostavnosti eksperimentalnog postava. Daljnjim razvojem očekuju se još niže grupne brzine signala.

Primjena spore svjetlosti

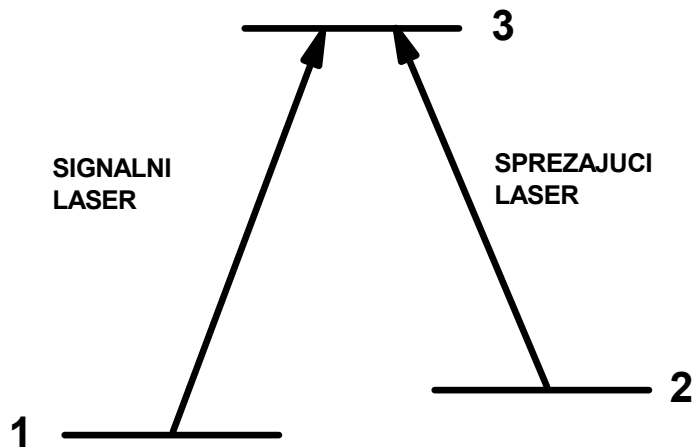
Kao što smo rekli postoji veliki komercijalni interes za sporom svjetlošću i "usklađivanju" svjetlosti u telekomunikacijama, i u budućnosti u kvantnim računalima. Podatci koji putuju internetom velikim dijelom se prenose optičkim putem, ali na svakom čvorištu se moraju pretvoriti u električni signal i poslije ponovno u optički. To predstavlja usko grlo mreže i kada bi se ti ruteri mogli izvesti kao isključivo optički uređaji brzina interneta bi se znatno povećala. Takav uređaj zahtjeva optičku memoriju. To se trenutno rješava pomoću snopova optičkih vlakana koji imaju fiksnu duljinu i uvode fiksno kašnjenje. Vrijeme pristupa ovim memorijama je približno jednako vremenima pristupa čvrstog disku, dakle ne baš najbrže. Pomoću spore svjetlosti kašnjenje optičkog signala bi se jednostavno kontroliralo mijenjanjem grupne brzine.

Što se tiče kvantnih računala, do njih je još daleko, a ovdje nemamo ni prostora da objasnimo sam koncept. Ipak, jedan primjer će možda ilustrirati značaj ove tehnologije. Klasičan problem u informatici, faktorizirati neki broj na prim brojeve – za broj od 300 znamenki klasičan algoritam daje rješenje u 5×10^{24} koraka što na terahertznoj brzini traje 150 000 godina. Kvantni algoritam nudi rješenje u 5×10^{10} koraka što na istoj brzini traje manje od sekunde! Za to se isplati potruditi.



Slika (1).

Ilustracija grupne brzine. Na slici a) i b) su dva ravna vala različitih frekvencija u trenutku $t=0$. Na slici c) je njihova superpozicija. Jasno se uočava grupiranje vala na pojedinim mjestima. Slike d) i e) predstavljaju ista dva ravna vala u nekom kasnijem trenutku $t > 0$. Pomak faze možemo uočiti ako pratimo koliko se pomaknula točkica. Uočimo da dva ravna vala imaju različite fazne brzine. Pomak faze je srazmjeran faznoj brzini v . Na slici f) je prikazana superpozicija valova u trenutku $t > 0$. Grupa se pomaknula puno manje nego faza pojedinih valova. Grupna brzina, v_G , je srazmjerna pomaku maksimuma envelope.



Slika (2)

Energetski dijagram tri kvanta stanja sa signalnim i sprežajućim laserom.

¹ M. O Scully and G. R. Welch, Slow, Stopped and Stored Light, Physics World, October (2004).

² K.-J. Boller, A Imamoglu, and S. E. Harris, Observation of Electromagnetically Induced Transparency, Phys. Rev. Lett. **66**, 2593 (1991).

³ M. M. Kash, Phys. Rev. Lett. **82**, 5229 (1999).

⁴ L. V. Hau, Frozen Light, Scientific American, 44 (2003).

⁵ D. F. Phillips, A. Fleischhauer, A. Mair, R. L. Walsworth, and M. D. Lukin, Storage of Light in Atomic Vapor, Phys. Rev. Lett. **86**, 783 (2001).

⁶ M. González-Herráez, K-Y Song, and Luc Thévenaz, Optically controlled slow and fast light in optical fibers using stimulated Brillouin scattering, Appl. Phys. Lett. **87**, 081113 (2005).