

## Sinkrotronsko svjetlo – Moćna proba materije

Slobodan Mitrović<sup>1</sup>

École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Švicarska

Tridesetih godina prošlog stoljeća znanstvenici su otkrili da je svijet elementarnih čestica mnogo bogatiji nego što se u to vrijeme znalo - svijet fizike otvorio se prema visokim energijama i počeo je lov na najelementarnije čestice materije. Da bi se proniknulo u tajne podatomske strukture, trebalo je slomiti atome visokoenergetskim česticama u dobro kontroliranim uvjetima. U tu svrhu počeli su se graditi ubrzivači elektrona koji su brzo prerasli u sofisticirane naprave koje bi u vakuumu ubrzavale elektrone u kružnim putanjama tako da skupe što više energije prije negoli se usmjere prema atomu – meti. U posebnim prstenovima, elektroni su ubrzavani sinkroniziranim pogurivanjem



Slika 1. Institut «Paul Scherrer» i kružna zgrada švicarskog sinkrotrona SLS (Swiss Light Source) (slika vlasništvo PSI, Villigen)

mikrovalovima, pa su stoga ta postrojenja ubrzo nazvana *sinkrotronima*. U jednom takvom sinkrotronu 1947. godine fizičari General Electric Company u SAD-u uočili su neobično zračenje. Želimo li održavati nabijenu česticu, poput elektrona, u kružnoj orbiti, ona će neizbježno gubiti dio svoje energije (bremsstrahlung) u obliku elektromagnetskog zračenja – *svjetla*. Fizičari visokih energija nisu bili zadovoljni ovim gubitkom energije. Ubrzavanje elektrona došlo je do svoje prirodne granice jer bi s većim ubrzanjem sve više energije bilo izračeno umjesto pohranjeno u elektronu.

S druge strane, spomenuti izvor svjetla pobudio je zanimanje jedne sasvim druge grupacije fizičara. Naime, sinkrotronsko svjetlo koje su emitirali elektroni ubrzani do gotovo brzine svjetlosti bilo je doista neobično svjetlo, a ne tipični bremsstrahlung. Raspon valnih duljina bio je impresivan: od infracrvene, preko vidljive svjetlosti pa sve do mekih i tvrdih X-zraka. Intenzitet ništa manje impresivan – i milijun puta sjajniji od Sunčeva svjetla! Fizičari koji su se bavili strukturom materije koristili su se do tada za svoje eksperimente izvorima X-zraka koji su bili i do milijardu puta manjeg intenziteta, a gotovo uvijek ograničeni samo na određenu valnu dužinu. Ubrzo su sinkrotroni dobili svoju sekundarnu zadaću – proučavanje strukture materije sinkrotronskim svjetlom. Parazitsko zračenje koje je frustriralo fizičare visokih energija postalo je moćan novi prozor u strukturu materije. Mjerne

<sup>1</sup> slobodan.mitrovic@epfl.ch

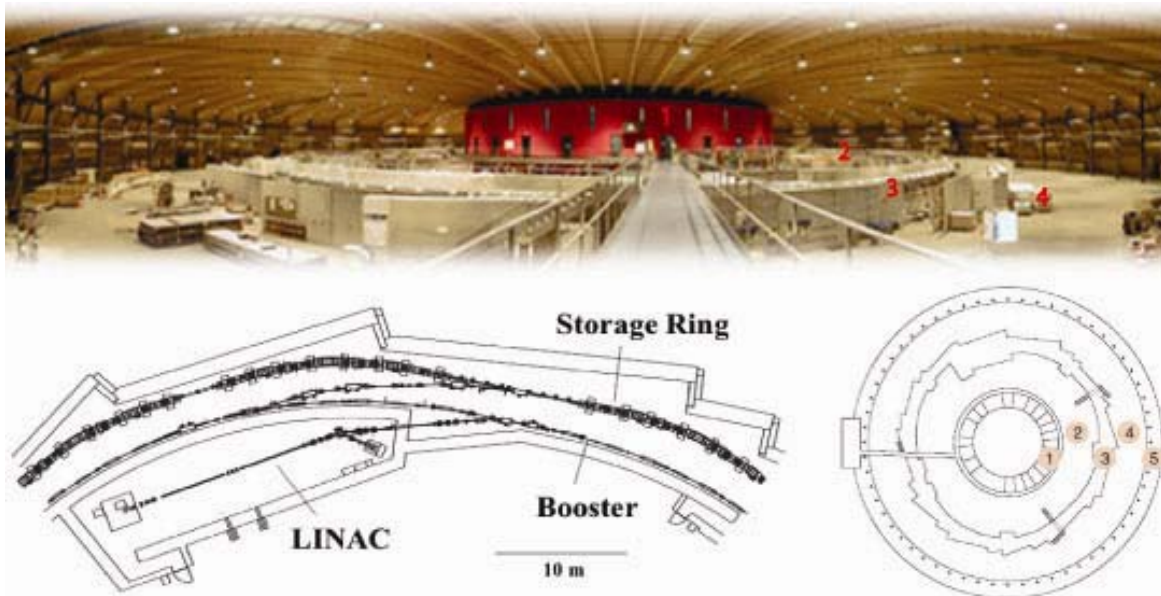
postaje koje su iskorištavale sinkrotronsko svjetlo postale su redoviti dodatak sinkrotronima. Danas te sinkrotrone nazivamo *prvim naraštajem izvora sinkrotronskog svjetla*.



Uspjeh tih mjernih postaja i stalno proširivanje načina na koje se sinkrotronsko svjetlo upotrebljavalo dovelo je u 70-im godinama prošlog stoljeća do izgradnje prvih postrojenja koja su bila namijenjena isključivo za proizvodnju

sinkrotronskog svjetla. Taj *drugi naraštaj sinkrotrona* postao je primjenjiv ne samo u fizici, već i u biologiji, medicini i industriji. Na njima se istražuje kristalna i elektronska struktura materijala, grade se mikroskopske naprave, određuje se struktura proteina za dizajniranje novih lijekova, sintetiziraju se novi materijali posebnih mehaničkih svojstava, izvodi se medicinska dijagnostika i terapija. Na svijetu trenutno postoji više od 40 sinkrotrona, od LNLS-a u Brazilu, preko mnogobrojnih sinkrotrona u SAD-u, Europi, Aziji do **Australian synchrotrona** u Melbourneu.

Danas se nalazimo na revolucionarnoj prekretnici u svijetu sinkrotrona. Novi, *treći naraštaj sinkrotrona* donosi ne samo nekoliko redova veličine sjajnije svjetlo, već i neke potpuno nove karakteristike koje eksperimentalcima otvaraju nove mogućnosti. Ti sinkrotroni ne održavaju jednostavno elektrone u kružnoj putanji, već se dodatno koriste posebnim napravama (eng. *insertion devices* - umetnute naprave - jer se u principu umeću prema potrebi u putanju elektrona) koje tjeraju elektrone na posebna oscilatorna gibanja i tako sažimaju, odnosno kolimiraju relativno širok snop u vrlo uzak stožac zračenja. Taj snop ima mnogo bolje karakteristike od prošlih naraštaja, uključujući *koherenciju* – najuređenije stanje u kojem se svjetlo može nalaziti. Svjetlost je elektromagnetski val. Do sada smo za različite eksperimente iskorištavali samo amplitudu tog vala, odnosno intenzitet svjetla. Koherencija sada omogućava da se koristi i *faza* vala. Trenutno postoje četiri potpuno operativna sinkrotrona trećeg naraštaja: **ESRF** (European Synchrotron Research Facility) u Grenobleu, Francuska, zatim **APS** (Advanced Photon Source), Argonne, SAD; **Spring-8**, Harima, Japan i **SLS** (Swiss Light Source) u švicarskom Villigen (vidi sliku 1). U Europi se grade još dva takva postrojenja, **Diamond** u Velikoj Britaniji i **Soleil** u Francuskoj. Nama najbliži sinkrotron nalazi se u blizini Trsta, i zove se **ELETTRA**.



Slika 2. Gore : Pogled u unutrašnjost SLS-a. Dolje lijevo: LINAC, booster i skladišni prsten unutar debelih betonskih zidova. Dolje lijevo: shema zgrade SLS-a; 1. uredi, 2. prostor za elektroniku, 3. betonski ograđeni prstenovi ubrzivača i 5. vanjski zid sinkrotrona sa sustavom za hlađenje (slike vlasništvo PSI, Villigen)

Pogledajmo pojednostavljeno kako radi sinkrotron i na koji način korisnik dobiva njegovo svjetlo za upotrebu u svome eksperimentalnom uređaju. Kao konkretan primjer uzet ćemo podatke švicarskog SLS-a. Sinkrotronsko svjetlo proizvode elektroni. Dakle, prvi je korak proizvodnja elektrona koja se događa u elektronskom topu. Elektronski top izbacuje elektrone dalje u prostor koji je uvijek u ultravisokom vakuumu. Na taj se način elektroni mogu nesputano kretati u svojim putanjama. Drugi je korak ubrzavanje elektrona. Prvo ubrzanje daje linearni ubrzivač *linac*. Kako samo ime kaže u njemu se elektroni predubrzavaju u linearnoj putanji. U SLS-u je *linac* odvojen od ostatka postrojenja. Na izlazu prema sljedećem koraku ubrzanja, elektroni će imati energiju od 100 MeV i već će biti ubrzani na brzine usporedive s brzinom svjetla. Sljedeći je korak sam po sebi mali sinkrotron, i naziva se *booster*. Riječ je o prstenu opsega 270 metara, svega nešto manjeg od samoga glavnog prstena. Ukupno 237 različitih magneta kontrolira putanju elektrona i tri puta u sekundi ubrzava određenu količinu elektrona prije negoli ih ubaci u glavni prsten sinkrotrona. Na kraju procesa u glavni prsten bit će ubačeno nekoliko trilijuna elektrona koji će imati energiju od 2.4 GeV. Booster je vrlo važan dio cijelog procesa, jer omogućava dobivanje vrlo kvalitetnog snopa koji se može periodički ubacivati u glavni prsten i tako održavati struju elektrona konstantnom cijelo vrijeme, za razliku od većine sinkrotrona u kojima struja opada s vremenom te je potrebno zaustaviti proces (engl. *dump beam*) i ponoviti proizvodnju ispočetka. Glavni, skladišni prsten u kojemu su pohranjeni elektroni (engl. *storage ring*) i booster koncentrično su postavljeni u istome prostoru, zatvoreni debelim betonskim blokovima koji sprečavaju slobodno širenje zračenja u širi prostor sinkrotronske zgrade (slika 2).

Skladišni prsten ima opseg od 288 metara i opremljen je svom modernom tehnologijom sinkrotrona trećeg naraštaja. Putanja elektrona zakreće se kao i u

starijim sinkrotronima tzv. zakretnim magnetima (engl. *bending magnets*). No prsten nije potpuno okrugao, već postoji nekoliko ravnih dijelova duljine od 4 do 11 metara. U te su dijelove postavljene posebne magnetske naprave (već spomenute *umetnute naprave*) koje tjeraju elektrone da oscilatorno mijenjaju svoju putanju i time proizvode karakteristično svjetlo trećeg naraštaja. Te se naprave prema potrebi mogu uključivati i isključivati. Jedna vrsta tih naprava ljulja elektrone (engl. naziv je *wiggler*). Efekt je isti kao u zakretnim magnetima: svaka promjena smjera isijava svjetlost, samo u ovom slučaju mnogo više puta na manjem prostoru i tako pojačava ukupno svjetlo. Druga vrsta naprava su ondulatori (engl. *undulators*) koji iskorištavaju efekte Einsteinove specijalne teorije relativnosti. Upravo se te naprave koriste u skladišnom prstenu SLS-a. Relativistički efekti proizvode svjetlo nalik na laser: zraka dobivenog svjetla čak na 30 metara od ondulatora široka je samo nekoliko milimetara. Također, više ne dobivamo kontinuiran spektar frekvencija nego diskretan. Intenzitet je pojačan 1000 puta u odnosu na onaj koji se dobiva samo zakretnim magnetom. Krajnji je rezultat svjetlo visoke stabilnosti u položaju same zrake, malih dimenzija i velike sjajnosti. Cijena: pogon od oko 600 sofisticiranih magneti, 300 pumpi koje održavaju vakuum, 600 metara cijevi pod vakuumom, 5 rezonantnih šupljina, 150 dijagnostičkih postaja, 50 kilometara naponskih kabela i oko 500 kilometara kabela za signale. Ukupno 2.5 MW potrošnje električne energije.

Nakon što je svjetlo proizvedeno, treba ga dovesti do krajnjeg korisnika i njegove postaje (engl. *end-user station*). Na tom putu nalazi se neka vrsta umetnute naprave (*wiggler* ili *ondulator*), zatim optički dijelovi poput zrcala te monokromator koji služi za odabir željene valne duljine (ovaj sustav obično se naziva linijom zrake, engl. *beamline*). Tu su i razni sigurnosni elementi te mnoštvo elektronike i dijagnostike. Linija zrake uvijek je postavljena tangencijalno na skladišni prsten. Tek nakon tog koraka svjetlo stiže do same postaje korisnika koja najčešće ima dva osnovna dijela – dio u kojem se postavlja uzorak koji će biti obasjan svjetlošću i detektor koji prikuplja podatke nakon što se dogodila određena interakcija između svjetla i materije, bilo da je to samo svjetlo nakon interakcije ili neki proizvod interakcije poput elektrona.

Svaku krajnju postaju održava poseban tim znanstvenika i tehničara. Korisnici sinkrotrona zapravo su korisnici određene linije, ovisno o vrsti znanosti kojom se bave. Gotovo uvijek su to znanstvenici iz cijelog svijeta, a ne samo zemlje u kojoj se sinkrotron nalazi. Oni se svojim projektima često moraju izboriti za samo nekoliko dana do najviše tjedan - dva mjerenja u godini!

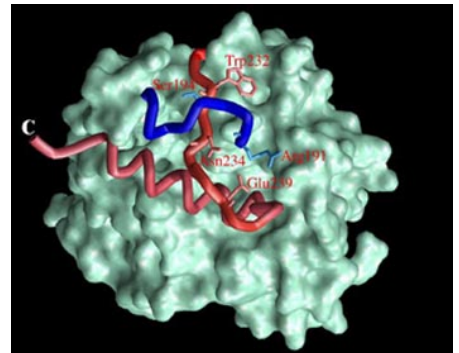
Pogledajmo sada neke primjere korištenja sinkrotronskog svjetla. Za početak, jedna od najstarijih primjena X-zraka jest određivanje kristalne strukture. Ovdje ćemo pokazati jedan mnogo sofisticiraniji eksperiment – određivanje strukture proteina. Slika 3 prikazuje rezultat rada znanstvenika iz Argonne National Laboratory te University of Toronto na postrojenju u APS-u u Argonneu, Illinois [1]. Proučavajući

najstariju jednostaničnu bakteriju, archaebacterium, odredili su strukturu proteina koji je, na njihovo iznenađenje, bio zavezan u čvor – jedan od veoma rijetkih oblika. Proučavana bakterija od koristi je industriji jer razgrađuje otpad i pretvara ga u plin metan. Znanstvenici, naravno, žele shvatiti i koji su sve mogući oblici proteina te vezu strukture i uloge proteina. Poznavanje strukture, posebno virusnih proteina, pomoglo je u stvaranju boljih lijekova.

Dimenzije zrake sinkrotronskog svjetla omogućuju i prvi pogled u neke uistinu male strukture poput stanice. No omogućuju i manipuliranje materijom na malim skalama. Litografija X-zrakama sinkrotrona omogućuje stvaranje pravih malih mikrostrojeva (vidi sliku desno – referenca 2). Kao primjer pogledajmo jedan takav stroj – mikromotor koji je primjenjiv u mikrorobotici i svemirskoj tehnologiji, no moguće primjene sežu sve do medicinskih. Zamislimo mikronske medicinske implantate koji bi obavljali terapijske funkcije unutar organizma!

Koherencija svjetlosti koristi se također u medicinske svrhe. Zamislimo da imamo rendgen koji, osim same apsorpcije na mjestu gdje se nalazi gušća prepreka, ima i mogućnost korištenja efekata difrakcije i refrakcije! Koherentno svjetlo omogućuje upravo to. Rezultat su rendgenske slike ne samo kostiju već i mnogo mekših tkiva poput krvnih žila ili mozga! Zamislimo sada da imamo mogućnost detektiranja tih efekata u zadanom volumenu kao što to radi CT-skener. Na sreću, to više ne moramo zamišljati. Tehnologija modernih sinkrotrona i velika moć današnjih računala omogućuje potpuno 3D vizualiziranje ne samo krvnih žila već gotovo neograničenog broja vrlo malih, mikronskih i manjih struktura. Pa čak i kad se radi o relativno istim okolinama koje se moraju razlučiti jedna od druge jer faza svjetlosti ih prepoznaje, iako je apsorpcija identična.

Primjene sinkrotrona time nisu ni blizu iscrpljene. Čak se nismo dotaknuli primjena u izučavanju materijala i njihovih svojstava. Nove tehnike i nove karakteristike ovih izvora svjetlosti obećavaju znanosti i primjeni svijetlu budućnost. Čak milijun puta svjetliju od Sunca!



*Reference, literatura i web stranice*

[1] T. I. Zarembinski et al., "Deep Trefoil Knot Implicated in RNA Binding Found in an Archaeobacterial Protein," *PROTEINS: Structure, Function, and Genetics* 50:177 to 183 (2003); slika uz tekst preuzeta iz članka

[2] Slika vlasništvo Dr. Henry Guckel, University of Wisconsin, Madison

Stranica SLS-a : <http://sls.web.psi.ch>

Sinkrotroni diljem svijeta: <http://srdweb2.dl.ac.uk/srs/srworld>