

Sto let Braggovega načina preiskovanja kristalov

Janez Strnad

V fiziki se je stoletnic smiselno spomniti vsaj iz dveh razlogov. Obnovimo znanje o zanimivem odkritju in sprožimo razmišljanje, ali bo prihodnjih sto let prineslo podoben razvoj. William Henry Bragg in njegov sin William Lawrence Bragg sta pred sto leti razvila način za raziskovanje zgradbe kristalov z rentgensko svetlobo, ki je v naslednjih letih pripeljal do pomembnih odkritij.

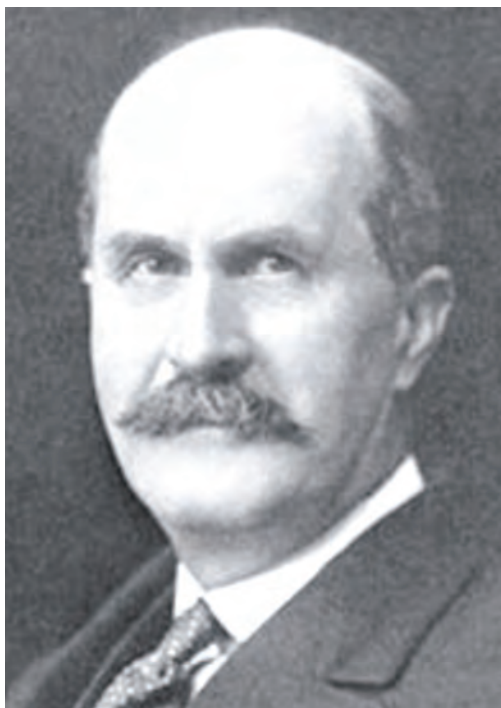
Konec leta 1895 je Conrad Wilhelm Röntgen opazil sevanje, ki ga je imenoval žarki X. Njegove poskuse so kmalu ponovili po vsem svetu in žarke hitro začeli uporabljati v medicini. Kostni jih zadržijo veliko bolj kot ostalo tkivo, zato je bilo mogoče - med drugim - na fotografsko ploščo posneti zlom kosti. Poskuse z neznanimi žarki je začel delati tudi Henry Bragg v Adelaidi v Avstraliji. Leta 1905 je z njimi ugotovil, da si je sin Lawrence pri padcu s kolesom zlomil roko. To je bil prvi posnetek te vrste v Avstraliji.

Narave novih žarkov tedaj niso poznali. Henry Bragg jih je imel za roj nevtralnih delcev. Nekateri so menili, da gre za elektromagnetno valovanje z zelo majhno valovno dolžino. Vendar tega niso mogli prepričljivo podpreti s poskusi. Leta 1909 je prišel Max Laue na univerzo v Münchnu, na kateri so veliko razpravljali o novih žarkih. Laue se je vprašal, kako bi se valovanje širilo skozi kristal. Domnevali so, da pravilna oblika kristalov odraža urejen raspored atomov po prostoru. Tudi tega še niso podprli s poskusi. Laue je povezal obe misli. Ali ne bi pri prehodu skozi kristal prišlo da podobnih pojavov kot pri prehodu svetlobe skozi uklonsko mrežico? Z mrežico enakih rež v

enakih razmikih so merili valovno dolžino svetlobe.

Nekateri münchenski profesorji so Lauejev premislek zavrnil. Mlajša sodelavca Walther Friedrich in Paul Knipping sta kljub temu bila pripravljena narediti poskus. Na kristal sta usmerila curek rentgenske svetlobe in po nekaj neuspehih na fotografski plošči za kristalom dobila urejene pege. Laue je leta 1911 zapisal tri pogoje, da se ojačijo sipana valovanja, ki izvirajo iz atomov v kristalni mreži. Pojav je primerjal z uklonom svetlobe na treh prekrizanih uklonskih mrežicah. Tako mu je uspelo pojasniti lego peg na fotografski plošči. S tem je podprl dve domnevi. Žarki X so elektromagnetno valovanje - smemo jih imenovati rentgenska svetloba. V kristalih so atomi urejeno razporejeni po prostoru. Friedrich in Knipping sta uporabila rentgensko cev, ki je sevala rentgensko svetlobo na širokem območju valovnih dolžin. Pege na fotografski plošči so ustrezale različnim valovnim dolžinam, kot da bi bile različnih barv.

Lauejev način ni bil pripraven za merjenje. Henry Bragg je hitro sprejel misel, da so žarki X, s katerimi je tedaj delal poskuse na univerzi v Leedsu, valovanje. Lawrence Bragg je pred kratkim končal študij v Cambridgeu. Razmišljal je o sipanih valovanjih, ki izvirajo iz atomov v kristalu in se ojačijo. Med sprehodom ob reki Cam se mu je porodila misel, ki je pripeljala do Braggove enačbe. Kristal si je predstavljal sestavljen iz mrežnih ravnin, to je ravnin, na gosto zasedenih z atomi. Valovanje se na vzporednih mrežnih ravninah zrcalno odbija. S tem je že upošteval, kako so zakasnjena valovanja iz posameznih atomov. Valovanji, ki se odbijeta na sosednjih mrežnih ravninah, se



William Henry Bragg je bil rojen leta 1862 v Westwardu v severozahodnem delu Anglije. Študij na cambriški univerzi je končal leta 1884. Naslednje leto je postal profesor za matematiko in eksperimentalno fiziko v Adelaidi v Avstraliji. Po uspešnih raziskovanjih ionizacije plinov so ga leta 1907 izvolili v Kraljevo družbo. Po vmitvi v Anglijo je leta 1909 postal profesor na univerzi v Leedsu. Med prvo svetovno vojno je vodil skupino, ki je po zvoku poskušala odkriti podmornice. Leta 1920 so mu podelili naslov Sir. Poleg Nobelove nagrade je prejel več drugih pomembnih nagrad in priznanj. Umril je leta 1942 v Londonu.



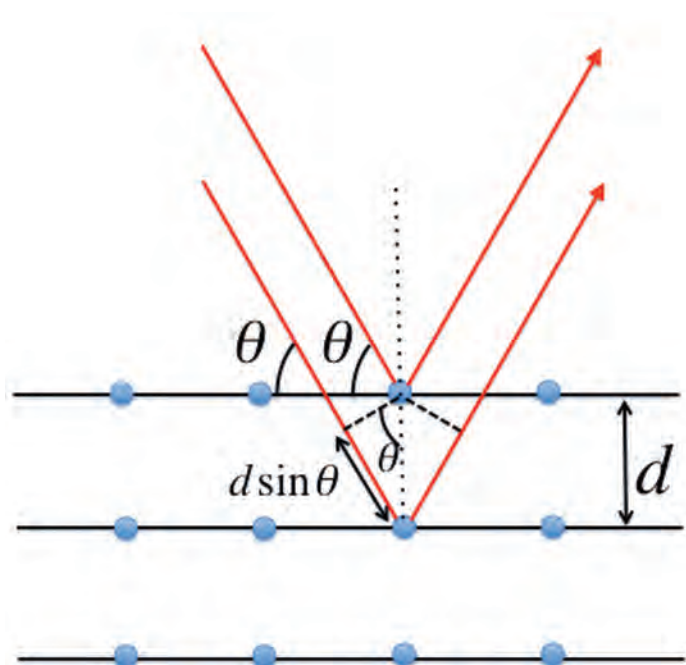
William Lawrence Bragg je bil rojen leta 1890 v Adelaidi. Na tamkajšnji univerzi je študiral matematiko, kemijo in fiziko in študij končal leta 1908. Po prihodu v Anglijo je leta 1909 nadaljeval študij v Cambridgeu in ga končal leta 1911. V Kraljevo družbo so ga izvolili leta 1921. Njegovo delo v fiziki sta prekinili prva in druga svetovna vojna. Po drugi svetovni vojni se je vrnil v Cambridge in vodil Cavendishev laboratorij. Pozneje je vodil Kraljevo ustanovo v Londonu. Leta 1941 so mu podelili naslov Sir. Poleg Nobelove nagrade je dobil več drugih nagrad in priznanj. Umril je leta 1971.

ojačita, če se njuni poti razlikujeta za valovno dolžino λ ali njen večkratnik:

$$2d\sin\theta = n\lambda, \quad n = 1, 2, 3 \dots$$

d je razmik med sosednjima mrežnima ravninama, θ kot med smerjo žarkov in mrežno ravnino, $2d\sin\theta$ pa dodatna pot enega od valovanj. Enačba je veliko preprostejša od Lauejevih enačb. Z njo je bilo po merjenjih mogoče veliko preprosteje ugotoviti, kakšna je kristalna mreža.

O svoji ugotovitvi je Lawrence prvič poročal konec leta 1912. O njej je obvestil očeta. Oče je z napravo, ki je dobila ime spektrometer za žarke X, že meril kote, pri katerih se je pojavila ojačena rentgenska svetloba. Za razliko od Friedricha in Knippinga je izkoristil rentgensko svetlobo z valovno dolžino na zelo ozkem pasu, preprosto rečeno z dano valovno dolžino. Uporabil je karakteristično rentgensko sevanje, ki ga je leta 1909 odkril Charles Glover Barkla. Ojačenega valovanja ni zaznaval s fotografsko ploščo,

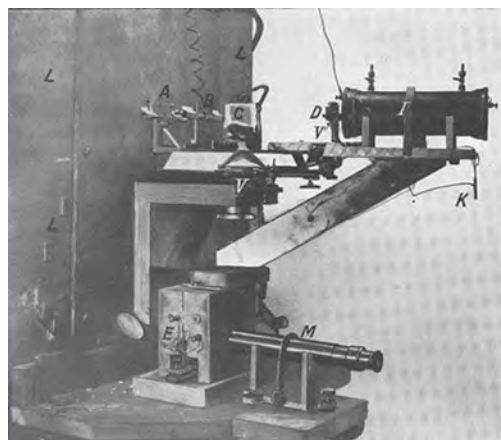


Tako je Lawrence Bragg izpeljal Braggovo enačbo. λ je valvna dolžina rentgenske svetlobe, d razmik med sosednjima mrežnima ravninama v kristalni mreži in θ kot med njimi in curkom rentgenske svetlobe. Vzamemo, da se rentgenska svetloba odbija na mrežnih ravninah. Razlika poti valovanj, ki se odbijeta na sosednjih ravninah, meri $2d\sin\theta$. Enačbo so poznali po podobnem pojavu z vidno svetlobo na tankih lističih. Razlika je le, da je lomni količnik rentgenske svetlobe 1. Braggova enačba velja tudi pri sipanju nevtronov in elektronov na kristalih.

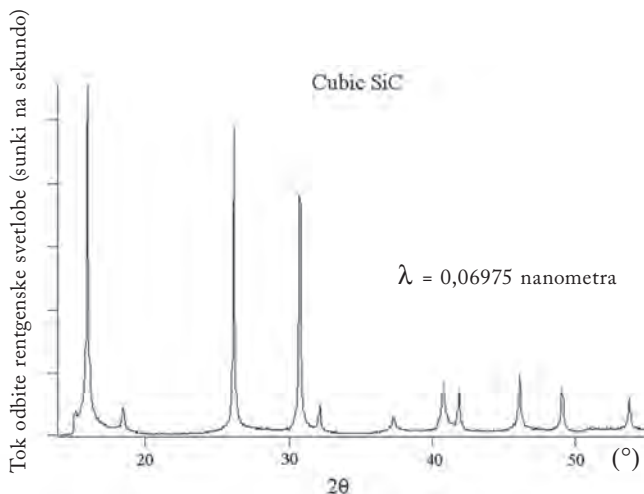
ampak neposredno z ionizacijsko celico. Henry Bragg je objavil o tem kratek članek, v katerem je sicer omenil, da je enačbo dobil od sina, a ni navedel niti njegovega imena. Med očetom in sinom je prišlo do napetosti. Odtlej menda oče nikoli ni pozabil poudariti sinove zasluge. Kot povabljeni gost je o svojih merjenjih poročal na 2. Solvayevi konferenci. Znameniti udeleženci, med njimi Albert Einstein, so potem poslali

Lawrenceu pisno čestitko. Napetost med sinom in očetom se je unesla, a nikoli ni čisto izginila. Tik pred smrtjo je Lawrence Bragg prijatelju pisal: »Upam, da je veliko stvari, pri katerih je tvoj sin zelo dober in jih ti sploh ne zmoreš, ker je to najboljši temelj za odnos oče-sin.« Nekateri pripisujejo glavno vlogo očetu, drugi sinu. Vselej je nekoristno razpravljati o razdelitvi zaslug, posebej še v krogu družine. Kaže, da se je sin razumel na teorijo, oče pa je bil spreten eksperimentator. Ena od knjig o njiju nosi naslov *William in Lawrence Bragg, oče in sin: najbolj nenavadno sodelovanje v naravoslovju*.

Leta 1913 so s kristalnim spektrometrom naredili veliko merjenj. Lepo raščeni kristal so vpeli in nanj skozi zaslone z majhnimi odprtini usmerili curek rentgenske



Kristalni spektrometer Henryja Bragga: LLL svinčeni zabor, A, B, D ozke reže, C kristal, I ionizacijska celica, V in V' nonijski skali za merjenje zasuka kristala in ionizacijske celice, K ozemljitev, E elektroskop, M mikroskop.



Diagram, kakršnega sta Bragga dobila pri raziskovanju kristala z rentgensko svetlobo. Na vodoravno os je nanesen sipalni kot 2θ , za katerega je sipano valovanje odklonjeno glede na vpadno valovanje, na navpično pa odziv merilnika, denimo polprevodniškega števca. Spekter silicijevega karbida (SiC) so dobili s sinhrotronskim sevanjem elektronov z veliko energijo, ki krožijo po evakuirani cevi v magnetnem polju v sinhrotronu. Curek je ožji in ima natančneje določeno valovno dolžino (0,06975 nanometra) kot pri Braggih.

svetlobe. Kristal so počasi vrteli okoli osi, pravokotne na curek in ročico, na katero so pritrdili ionizacijsko cev. Ročico so vrteli dvakrat hitreje kot kristal. Najprej so ugotovili kristalno zgradbo cinkove svetlice, kamene soli, diamanta, nato so prišli na vrsto še drugi kristali.

Objave Henryja in Lawrencea Bragga

Henry Bragg: *Žarki X in kristali*. N 1912.

Lawrence Bragg: *Zrcalni odboj žarkov X*. N 1912.

Lawrence Bragg: *Uklon kratkih elektromagnetnih valov na kristalih*. PC 1913.

Henry Bragg: *Žarki X in kristali*. N 1913.

Henry in Lawrence Bragg: *Odboj žarkov X na kristalih I*. P 1913.

Henry Bragg: *Odboj žarkov X na kristalih II*. P 1913.

Lawrence Bragg: *Zgradba nekaterih kristalov, kot jo nakaže uklon žarkov X*. P 1913.

Henry in Lawrence Bragg: *Zgradba diamanta*. P 1913.

Henry Bragg: *Vpliv gradnikov na obliko spektra žarkov X*. P 1914.

Lawrence Bragg: *Raziskovanje kristalov s spektrometrom za žarke X*. P 1914.

Henry Bragg: *Spektra žarkov X, ki ju kažeta žveplo in kremen*. P 1914.

Henry in Lawrence Bragg: *Žarki X in zgradba kristalov*. 1915 – knjiga.

Lawrence Bragg: *Razvoj raziskovanja kristalov z žarki X*. P 1961.

N - pismo v *Nature*, PC - *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, P - *Proceedings of the Royal Society*.

Leta 1915 sta William Henry Bragg in William Lawrence Bragg dobila Nobelovo nagrado za fiziko. Lawrence je bil s petindvajsetimi leti najmlajši Nobelov nagrajenec. Obvestilo ga je dohitelo v vojski. Po prihodu iz Avstralije se je prostovoljno udeleževal vojaških vaj in ob začetku prve svetovne vojne so ga kot častnika razporedili v skupino, ki je imela opraviti z zemljevidi. Nato so ga premestili v manjšo skupino, ki je z mikrofoni ugotavljala lego sovražnih topov. Skupino so pohvalili, da je bila zaslužna za nekaj angleških zmag. Zaradi vojne tedaj ni bilo svečane podelitve nagrad. Lawrence je imel Nobelovo predavanje *Uklon žarkov X na kristalih* šele leta 1922. Malo pred obvestilom o nagradi je zvedel, da je brat Robert padel pri Galipoliju.

Po prvi svetovni vojni je Henry Bragg delal na Univerzitetnem kolidžu v Londonu, kjer je dobil mesto leta 1915. Tam se je še naprej ukvarjal z raziskovanjem kristalov z rentgensko svetlobo. Leta 1923 je postal vodja Kraljeve ustanove, ki so jo pred tem vodili znani raziskovalci, na primer Humphrey

Davy in Michael Faraday. Pod Braggovim vodstvom so člani ustanove, ki so jo v letih 1929 in 1930 izdatno obnovili, objavili številna tehtna dela. Že leta 1920 je Henry postal podpredsednik Kraljeve družbe in je bil od leta 1933 do 1940 njen predsednik. Lawrence Bragg je od leta 1919 do 1937 deloval na univerzi v Manchestru. V letih 1937 in 1938 je vodil Državni fizikalni laboratorij in nato Cavendishev laboratorij v Cambridgeu. Ves čas se je ukvarjal z raziskovanjem kristalov z rentgensko svetlobo. V Cavendishevem laboratoriju ga je začela zanimati zgradba beljakovin. V tem laboratoriju so odkrili zgradbo deoksiribonukleinske kisline DNA in hemoglobina. (Napisal je predgovor k uspešnici Jamesa Watsona *Dvojna vijačnica*.) Leta 1954 je prešel na Kraljevo ustanovo, na kateri so tudi naredili pomembna odkritja o zgradbi snovi z rentgensko svetlobo. Upokojil se je leta 1966. Merilni način Braggov je pripeljal do številnih odkritij o zgradbi kristalov.

Nobelove nagrade, povezane z Röntgenovimi žarki

Fizika

1901 **Wilhelm Conrad Röntgen:** kot priznanje za izredne zasluge, ki si jih je pridobil z odkritjem nenavadnih žarkov, pozneje imenovanih po njem.

1914 **Max von Laue:** za odkritje uklona žarkov X.

1915 **William Henry Bragg in William Lawrence Bragg:** za zasluge pri raziskovanju zgradbe kristalov z žarki X.

1917 **Charles Glover Barkla:** za odkritje karakterističnega Röntgenovega sevanja elementov.

1924 **Karl Manne Siegbahn:** za odkritja in raziskovanje na polju spektroskopije žarkov X.

1927 **Arthur Holly Compton:** za odkritje pojava, ki se imenuje po njem.

1981 (polovica nagrade) **Kai Manne Siegbahn:** za prispevek k razvoju elektronske spektroskopije z visoko ločljivostjo.

Kemija

1936 **Peter J. W. Debye:** za prispevke k poznavanju dipolnih momentov in uklona žarkov X in elektronov v plinih.

1962 **Max F. Perutz in John C. Kendrew:** za raziskovanje zgradbe globularnih beljakovin.

1964 **Dorothy Crowfoot Hodgkin:** za določitev s tehniko žarkov X zgradbe pomembnih biokemijskih snovi.

1976 **William N. Lipscomb:** za raziskovanje zgradbe boranov, ki osvetljuje problem kemijske vezi.

1985 **Herbert A. Hauptmann in Jerome Karle:** za izredne dosežke pri razvoju neposrednih načinov za ugotovitev kristalov.

1988 **Johann Deisenhofer, Robert Huber in Hartmut Michel:** za ugotovitev tridimenzionalne zgradbe fotoreceptorskega reakcijskega centra.

Medicina in fiziologija

1946 **Hermann J. Muller:** za odkritje nastanka mutacij z obsevanjem z žarki X.

1962 **Francis H. C. Crick, James D. Watson in Maurice H. F. Wilkins:** za odkritja, ki zadevajo molekulsko zgradbo nukleinskih kislin in njihov pomen za prenos podatkov v živi snovi.

1979 **Allan M. Cormack in Godfrey N. Hounsfield:** za razvoj računalniške tomografije.

Pomembna stvar v naravoslovju ni toliko, da se dokoplje do novih dejstev, kot to, da odkrije nove načine mišljenja o njih.

William Lawrence Bragg

Literatura:

Discoveries in the Field of X-rays-Nobelprize.org.

Nobel Lectures. Physics 1901-1921, 1967: Amsterdam:

Elsevier. 368-384.