

KVAZIKRISTALI

Jurić, Marija

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of Physics / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:160:750623>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-02**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Department of Physics in Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



MARIJA JURIĆ

KVAZIKRISTALI

Završni rad

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



MARIJA JURIĆ

KVAZIKRISTALI

Završni rad

Predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
radi stjecanja zvanja prvostupnika/ce fizike

„Ovaj završni rad je izrađen u Osijeku pod vodstvom doc. dr.sc. Denisa Stanića u sklopu Sveučilišnog prediplomskog studija fizike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.“

Sadržaj

Sažetak	5
Abstract	6
1. Uvod	8
2. Otkriće i povijest kvazikristala	9
3. Struktura kvazikristala	12
4. Svojstva i primjena kvazikristala.....	15
5. Prirodni kvazikristali.....	17
6. Zaključak	18
7. Literatura.....	19

KVAZIKRISTALI

MARIJA JURIĆ

Sažetak

Kvazikristali su čvrsta tijela čije strukture mogu posjedovati kristalografski nedopuštene rotacijske simetrije, primjerice 5. reda i ne posjeduju translacijsku invarijantnost, koja je karakteristična za klasične kristale. Zbog njihove kompleksne strukture razvijeni su mnogi modeli kojima ih možemo opisati. Prema strukturi kvazikristale možemo podijeliti u dvije skupine: ikosaedarske i poligonalne. Iako su najčešće legure sastavljene od dva ili tri metala, vrlo slabo provode električnu struju i toplinu, a zbog niskog koeficijenta trenja, niske toplinske vodljivosti, čvrstoće i otpornosti na koroziju kvazikristale možemo primjeniti na kuhinjska pomagala, u motorima automobila, na operacijskim instrumentima i dr. Također od velike je važnosti i njihova potencijalna primjena u skladištenju vodika.

Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku

Ključne riječi: Kvazikristali, periodičnost, faze, simetrija

Mentor:

Ocjenjivači:

Rad prihvaćen:

University Josip Juraj Strossmayer Osijek

Department of Physics

QUASICRYSTALS

MARIJA JURIĆ

Abstract

Quasicrystals are solids whose structures may possess crystallographically impermissible rotational symmetries, for example of the 5th order, and do not possess the translational invariance that is characteristic of classical crystals. Due to their complex structure, many models have been developed by which we can describe them. According to the structure, quasicrystals can be divided into two groups: icosahedral and polygonal. Although the most common alloys are composed of two or three metals, they conduct electricity and heat very poorly, and due to low friction coefficient, low thermal conductivity, strength and corrosion resistance, quasicrystals can be applied to kitchen utensils, car engines, operating instruments, etc. Also of great importance is their potential application in hydrogen storage.

Thesis deposited in Department of Physics library

Keywords: Quasicrystals, periodic, phase, symmetry

Supervisor:

Reviewers:

Thesis accepted:

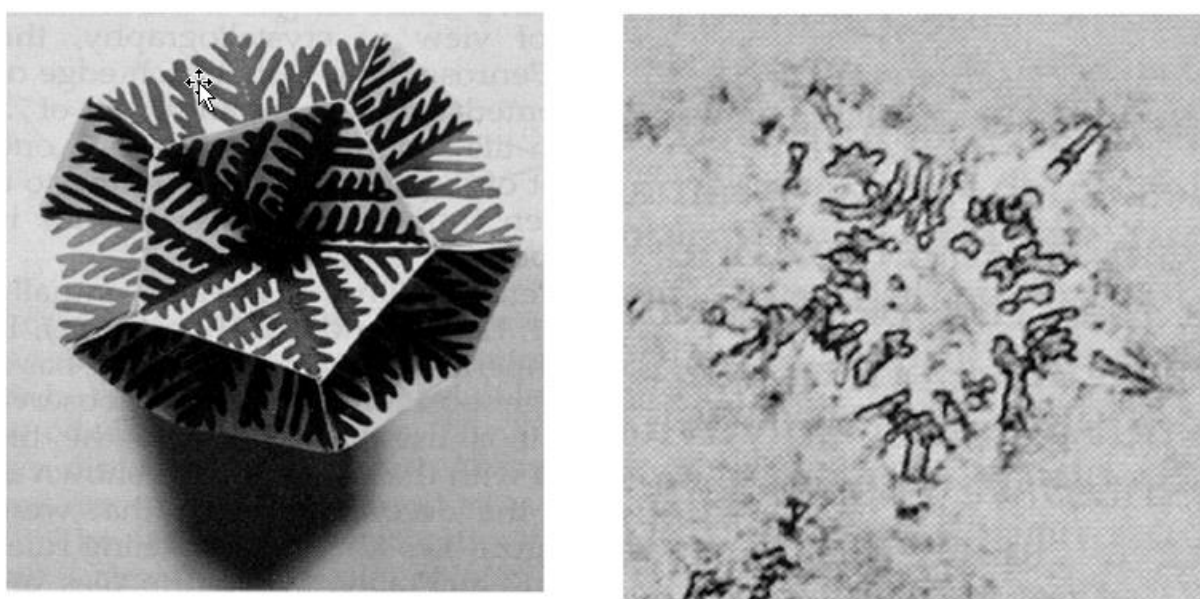
1. Uvod

Kvazikristali ili kvaziperiodični kristali pojavljuju se 1982. godine kada Dan Shechtman izvodi eksperiment difrakcije elektrona na leguri aluminija i mangana. Kako bi shvatili kvazikristale, proučiti ćemo prvo kristale. Za kristale znamo da danas čine više od 90% prirodnih i umjetnih materijala (minerali, metali, soli,..), a stoljećima su se smatrali samo kao čvrsta tijela s ravnim plohama koje se sijeku pod određenim kutom. Prve ideje o mikroskopskoj strukturi kristala pojavljuju se u 17. stoljeću u radovima znanstvenika Johnasa Keplera i Roberta Hooka, a početkom 19. stoljeća René-Just Haüy na temelju njihovih ideja uvodi novu teoriju zvana kristalografija. Danas je kristalografija kao znanost podijeljena na puno grana, ali njena osnovna bit je da su kristali čvrsta tijela čiji je raspored čestica na mikroskopskoj razini pravilan. Strukturu cijelog kristala možemo aproksimirati jednom osnovnom ćelijom (jediničnom ćelijom) koja se ponavlja u svim smjerovima i tako ispunjava prostor. Ideja da kristali imaju periodičnu pravilnu strukturu pomogla je znanstvenicima da predvide karakteristične kuteve koje zatvaraju plohe bilo kojeg kristala. Pojavom difrakcije x-zraka na kristalu, svaki rezultat eksperimenta potvrđivao je ideju da kristali postižu svoju pravilnu strukturu kroz periodičnost. Kao jedna od najpoznatijih posljedica periodičnosti je činjenica da u kristalu postoje osi rotacije 2., 3., 4. i 6. reda, a za osi n-tog reda, pri čemu je $n > 6$, nisu usklađene s periodičnosti. Zato je pojava kvazikristala u početku bila kontroverzna budući da rezultati Dana Shechtmana pokazuju kako legura koju je proučavao ima os simetrije 5. reda, ali je za svoje otkriće 2011. godine dobio Nobelovu nagradu na području kemije. Također bitno je napomenuti kako imaju jedinstvena svojstva koja se i danas još proučavaju. Jedno od najznačajnijih je to što iako su kvazikristali najčešće legure sastavljene od dva ili tri metala, vrlo slabo provode električnu struju i toplinu.

2. Otkriće i povijest kvazikristala

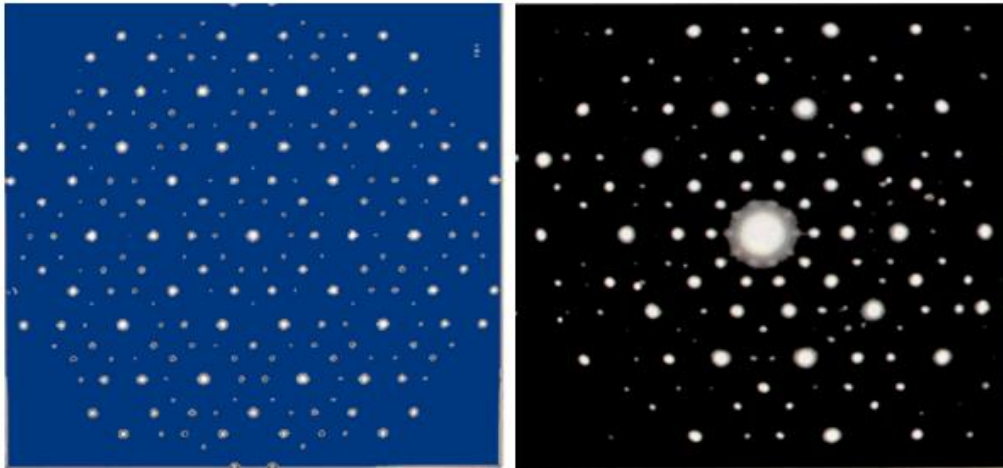
Dan Shechtman 1982. godine izvodi pokus difrakcije elektrona na leguri aluminijske i manganske. [2] Zajedno sa svojim kolegama rastaljuje aluminij i mangan te ga naglo hladi, pri čemu brzina hlađenja postiže do jedan milijun kelvina po sekundi. Ovaj nagli proces hlađenja naziva se kaljenje.

Promatrajući uzorak legure elektronskim mikroskopom zapazio je difrakciju elektrona uobičajenu za kristale, ali sa simetrijom koja je nedopuštena za kristale. Orijentirajući ga u različitim smjerovima otkrio je kako ima simetriju s ikosaedrom.



Slika 2.1. Shechtman et al. (1984) postojanje ikosaedarske simetrije [3]

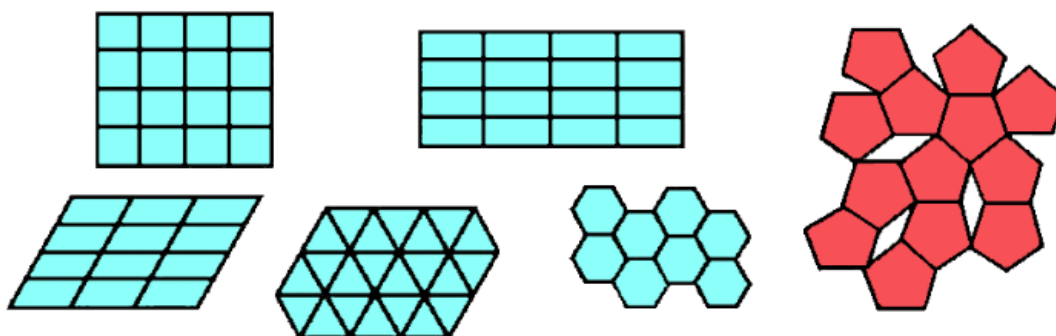
Rezultate svojega rada uspijeva objaviti tek nakon dvije godine od izvođenja pokusa. Kristal koji je otkrio, zajedno sa mnogo drugih kristala sličnih simetrija koji su otkriveni od 1982. godine nazvani su kvazikristali što je skraćeni naziv za kvaziperiodične kristale u radovima Levina i Steinhardta. [2]



Slika 2.2. Prva usporedba difrakcijskih uzoraka (1984) između eksperimenta(lijevo) i teoretske pretpostavke(desno) – D. Levine i P.J. Steinhardt (1984) [3]

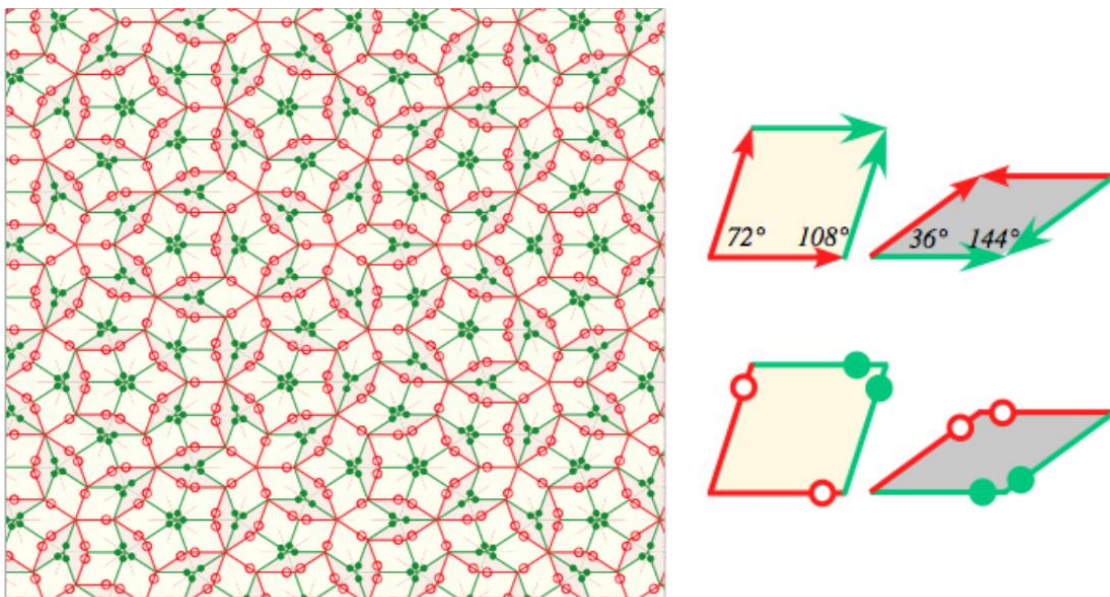
No, povijest kvazikristala počinje i prije samog njegovog otkrića kada su matematičari otkrili tzv. kvaziperiodična popločavanja. Ideja je bila ako kristale možemo matematički opisati kao periodično popločavanje prostora tako i kvaziperiodična popločavanja možemo koristiti za opis kvazikristala.

Popločavanje je prekrivanje ravnine (bilo koja konačna dimenzija, ali najčešće 2D) geometrijskim likovima tako da se oni međusobno ne preklapaju niti između njih ima praznina. Za periodična popločavanja znamo da su proučavana još u antičkim vremenima, a popločavanje smatramo periodičnim ako posjeduje translacijsku simetriju.



Slika 2.3. Plavom bojom označena su periodična popločavanja, a crvenom nemogućnost popločavanja ravnine pravilnim peterokutom. [3]

Dakle za periodična popločavanja znamo da postoje još odavno, a tijekom 20.st. matematičari se pitaju da li je moguće s konačnim skupom pločica napraviti aperiodičko popločavanje, što je Hao Wang dokazao 1961. godine.[4] Poslije toga nađeno je mnogo aperiodičkih popločavanja, a broj pločica potrebnih za to se smanjivao. Tako je jedno od najpoznatijih aperiodičkih popločavanja otkriveno 1974. godine, a uveo ga je matematičar i fizičar Roger Penrose. Njegov model temelji se na dvije vrste pločica oblika romba. Prvi romb je „uski“ s kutevima od 36° i 144° , a drugi je „široki“ romb s kutevima od 72° i 108° koji se slažu prema određenim pravilima kako bi se spriječilo nastajanje periodičkog popločavanja. Prosječan omjer pojavljivanja dviju pločica jednak je zlatnom rezu $\tau = \frac{1+\sqrt{5}}{2} \approx 1.68$, što je upravo dokaz neperiodičnosti Penroseovog popločavanja koje pokazuje simetriju petog reda.



Slika 2.4. Penroseova popločavanja [5]

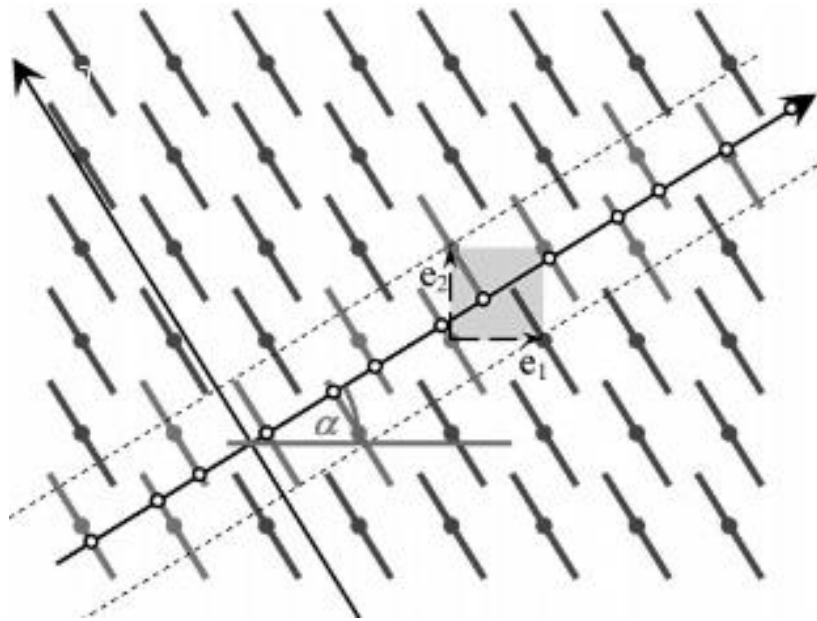
Otkrivanje aperiodičnih popločavanja mnogo je pomoglo znanstvenicima pri opisu kvaziperiodične strukture. Osim s popločavanjem kvazikristale možemo povezati i sa Fibbonacijevim nizom u kojemu se također spominje zlatni omjer. I Fibbonacijev niz i zlatni omjer su važni znanstvenicima kako bi objasnili kvazikristale na atomskom nivou dobivene pokusom difrakcije.

3. Struktura kvazikristala

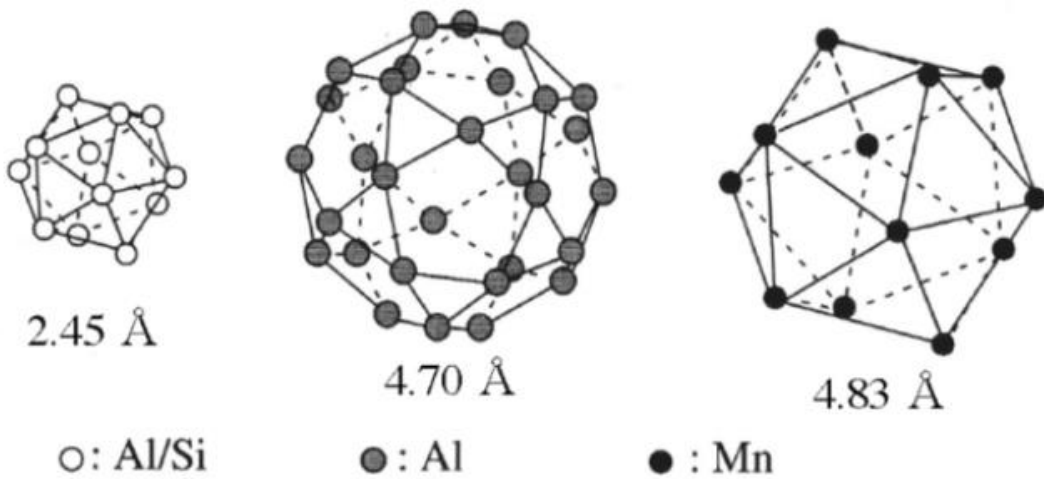
Za kristale je poznato da mogu imati rotacijske simetrije 2., 3., 4. i 6. reda, a njihovu rešetku možemo opisati određenim brojem primitivnih vektora. Važna činjenica je da je rešetka konstruirana kroz ponavljajući proces kako bi struktura bila periodična. Suprotno tome, kvazikristali su definirani kao kristalne strukture s uređenjem dugog doseg, ali nisu periodični. Konstrukciju ovakvih tipova rešetki nazivmo aperiodičnima te ih nije moguće opisati primitivnim vektorima. Najvažnija karakteristika kvazikristala je da iako im nedostaje translacijska simetrija, difrakcijske maksimume kvazikristala možemo kao i kod periodičnih kristala opisati linearnom kombinacijom jediničnih vektora baze recipročnog prostora. Baza recipročnog prostora periodičnih kristala sadrži tri vektora, dok je za opis difrakcijske slike kvazikristala potrebno više vektora (barem pet). Budući da je opisivanje kvazikristalne strukture (položaj atoma) poprilično kompleksan postupak jer kod njih ne možemo točno definirati jediničnu ćeliju kao kod periodičnih kristala, fizičari su razvili nekoliko metoda na temelju kojih možemo riješiti problem njihove strukture. Općenito se koriste dvije metode od kojih je jedna od njih višedimenzionalna analiza. U ovoj metodi kvazikristale koji imaju kristalografski nedopuštene simetrije (3D rešetka) možemo opisati kao periodične strukture ako ih prikazemo u višim dimenzijama. Na primjer, za Penroseovo popločavanje je otkriveno da je dvodimenzionalna projekcija peterodimenzionalne hiperkocke. Ovisno o kojem kvazikristalu se radi, broj potrebnih dimenzija da bude periodičan biti će različit. Višedimenzionalna analiza omogućila je kristalografima da na kvazikristalima primjenjuju teorije koje su razvijene za kristale (npr. Blochova funkcija), a jedina poteškoća je da potrebno proširiti na onoliko dimenzija koliko zahtjeva poseban slučaj. Pa je tako ikosaedarska simetrija kristalografski dopuštena u šesterodimenzionalnom prostoru pri čemu je svaka koordinatna os okomita na hiperravninu koju razapinju ostalih pet osi. Primjenom projekcijske matrice

$$M = (\tau^2 + 1)^{-\frac{1}{2}} \begin{pmatrix} 1 & \tau & 0 & -1 & \tau & 0 \\ \tau & 0 & 1 & \tau & 0 & -1 \\ 0 & 1 & \tau & 0 & -1 & \tau \end{pmatrix}$$

na hiperkocku u šesterodimenzionalnom prostoru za projekciju u trodimenzionalnom prostoru dobivamo ikosaedar. Druga metoda temelji se na traženju poznatih aproksimativnih struktura koristeći metode popločavanja koje uspoređujemo sa podacima dobivenih mikroskopom kako bi dobili realnu strukturu kvazikristala. U praksi ove dvije metode često se koriste zajedno.

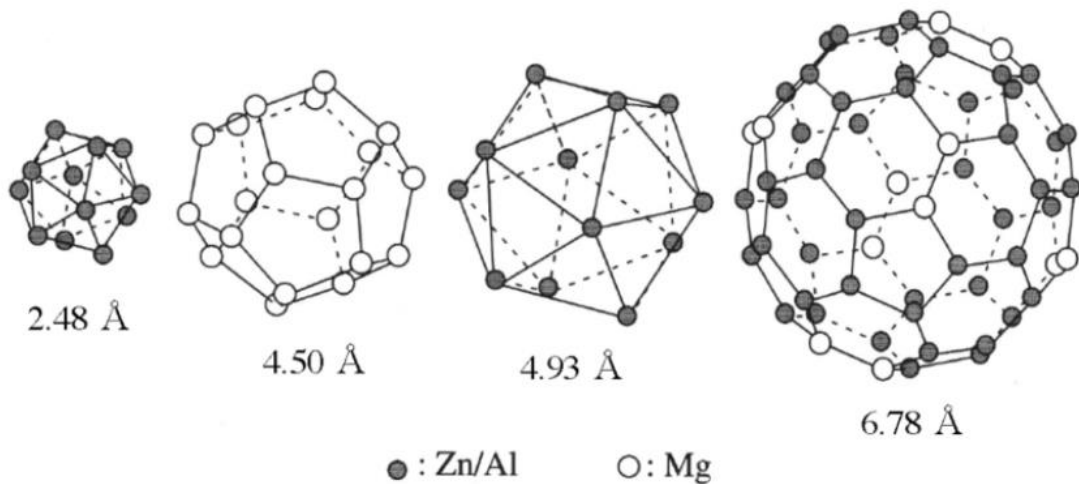


Slika 3.1. Primjer jednodimenzionalnog kvaziperiodičnog niza (Fibonaccijev niz) dobivenog projekcijom dvodimenzionalne jednostavne kubične rešetke na pravac [6].



Slika 3.2. Makayev tip grozda [8]

Prema strukturi kvazikristale možemo podijeliti u dvije skupine: ikosaedarske i poligonalne. U skupinu poligonalnih kvazikristala pripadaju kvazikristali koji imaju osi simetrije osmog, desetog i dvanaestog reda, te se stoga nazivaju oktagonalnim, dekaagonalnim i dodekaagonalnim kvazikristalima. Tipovi ovakvih kvazikristala periodični su duž jedne osi, a kvaziperiodični u ravninama okomitim na os. Kod ikosaedarskih kvazikristala je aperiodičnost prisutna u sve tri dimenzije. Atomi su poslagani u grozdove ikosaedarske simetrije, tj. imaju 12 osi rotacije petog reda, 20 osi trećeg reda i 15 osi drugog reda. Neki od najčešćih grozdova su Bergmanov i Mackayev, a sastoje se od nekoliko slojeva. Grozdovi koji grade kvazikristal mogu se međusobno prožimati tvoreći aperiodičnu složenu strukturu.



Slika 3.3. Bergmanov tip grozda [8]

4. Svojstva i primjena kvazikristala

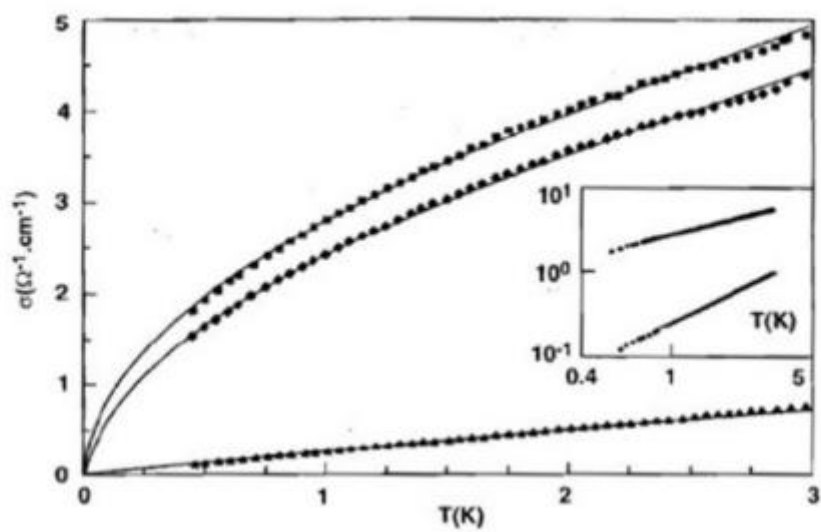
Kvazikristali su i danas predmet intenzivnog istraživanja. Do danas je izvedeno mnogo pokusa kako bi se razumijela njihova svojstva. Pokusi u kojima se koristi neutronska raspršenja te analizom fonona na uzorku do sada su pokazala kako je toplinska vodljivost u kvazikristalima vrlo niska. Maksimalna vrijednost vodljivosti (Dulong-Petitovo pravilo) postiže se pri temperaturi oko 70K, kada se svi fononi nalaze u uzbuđenom stanju. Osim toplinske vodljivosti još jedno bitno svojstvo je električna vodljivost. Pokusi su pokazali da su kvazikristalne legure loši vodiči električne struje te ne pripadaju familiji vodiča, niti su tipični izolatori, a također nisu poluvodiči niti polumetali. Dakle, kvazikristalni materijali predstavljaju nešto jedinstveno i različito. Također imaju i druga zanimljiva svojstva poput: niskog koeficijenta trenja, visoku čvrstoću, otporniji su na koroziju, smanjuju propusnost vode, itd. ... Iako su izgledom nalik metalima vrlo su tvrdi pri temperaturama od nekoliko stotina stupnjeva Celzija, a iznad postaju meki i plastični. [7]

Visok stupanj čvrstoće je vrlo korisno svojstvo u materijalima. Pokazano je da kvazikristali mogu podnijeti tlak reda veličine 10GPa, ali pri sobnim temperaturama općenito su vrlo lomljivi. Zbog toga njihova primjena je ograničena.

Propuštanje vode kroz površinu kvazikristala potječe od dva vrlo važna svojstva: anti-adhezije i niskog koeficijenta trenja. Iako je ovo svojstva trenutno predmet istraživanja vrlo ga je teško proučavati zbog lomljivosti materijala.

Zbog svojstva otpornosti na koroziju, kvazikristalne materijale možemo usporediti s nehrđajućim čelikom.

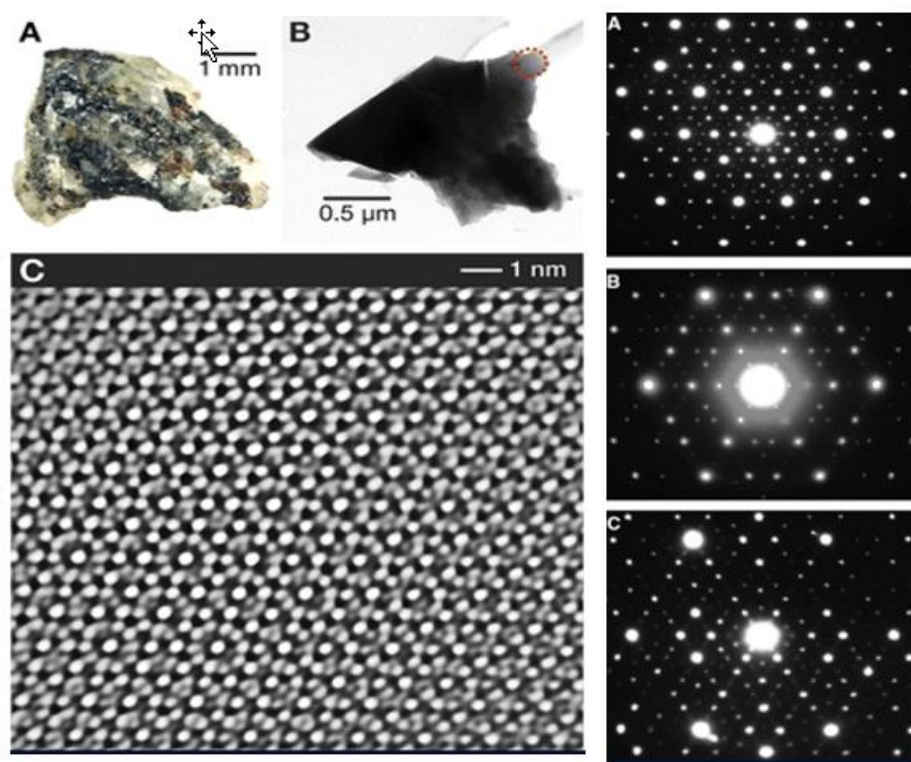
Kombinacija navedenih svojstava vodi na mnoge korisne primjene kvazikristala. Npr. zbog niskog koeficijenta trenja, niske toplinske vodljivosti, čvrstoće i otpornosti na koroziju kvazikristale možemo primjeniti na kuhinjske tave, posude te na drugim kuhinjskim pomagalicama. Osim toga primjenjivo je u motorima automobila pri čemu bi se smanjila zagađenost zraka te povećala trajnost motora, ali i na operacijskim instrumentima. Također od velike je važnosti i njihova potencijalna primjena u skladištenju vodika.



Slika 4.1. Električna vodljivost $\sigma(T)$ na niskim temperaturama AlPdRe kvazikristala pokazuje kako je σ proporcionalan s T kod savršene ikosaedarske faze (niža krivulja) kao i proporcionalnost s $T^{1/2}$ za nešto manje savršen uzorak (dvije gornje krivulje). [9]

5. Prirodni kvazikristali

Od njihovog otkrića 1982. godine, postoje već tisuće sintetičkih kvazikristala dobivenih u laboratorijima, pa se postavlja pitanje o mogućnosti da je kvazikristal formiran u prirodnim uvjetima unutar stijena kao šta su i kristalni minerali. Prema tome prvi kvazikristal nije sintetički uzorak dobiven prošlog stoljeća, već mineral formiran eonima prije. Godine 1999. započinje jedno desetljeće duga potraga za prirodnim kvazikristalima. Nakon niza neuspješnih traganja, napokon u Prirodoslovnom muzeju u Firenzi dolazi se do značajnog napretka. Luca Bindi testiranjem minerala čiji je sastav sličan već poznatim sintetičkim kvazikristalima, nailazi na mineral khatyrkit. Sastavljen je od aluminijskih bakara i željeza, a u prirodnim uvjetima ovaj mineral se može naći u istočnom dijelu Rusije. [11]



Slika 5.1. (A) originalni khatyrkit uzorak korišten prilikom istraživanja. Svjetlije obojani materijali na vanjštini sadrže smjesu magnezijeva aluminata (spinel - $(MgAl_2O_4)$), augita $(Al, Si)_2O_6$ i olivina $(Mg, Fe)_2SiO_4$. Tamniji materijal sadrži dominantne khatyrkite ($CuAl_2$) i kupalita ($CuAl$) ali također i granule, kao što je na slici (B), sa kompozicijom $Al_{63}Cu_{24}Fe_{13}$. Difrakcijski uzorak na slici dobiven iz tanke regije granule daje indiciju crvenim iscrtkanim krugom, područjem od $0.1 \mu m$ okolo. (C) Inverzna Fourierova transformacija HRTEM slike dobivena iz podregije oko 15 nm preko prikaza homogene, kvaziperiodične, simetrije petog reda. Desno: Difrakcijski uzorak dobiven iz prirodnog kvazikristalnog zrna. [10]

6. Zaključak

Kvazikristali su čvrsta tijela čije strukture mogu posjedovati kristalografski nedopuštene rotacijske simetrije. Matematički je opis kvaziperiodičnosti prethodio otkriću kvazikristala, te je time bitno olakšao proučavanje i tumačenje njihovih struktura i svojstava. Od otkrića pa sve do danas, kvazikristale možemo svrstati kao zanimljiv predmet istraživanja. Pogledamo li povijest kristalografije, možemo shvatiti zašto je njihovo otkriće bilo kontroverzno. Strukturu im smatramo aperiodičnom pa se koncepti koji se primjenjuju na kristale kao npr. Brillouinove zone ne mogu direktno primjeniti na kvazikristale. Dok se njihova kompleksna struktura još uvijek istražuje, kako eksperimentalno tako i teorijski, već postoje brojni modeli kojima možemo opisati njihovu strukturu. Kvazikristali imaju specifična fizikalna i kemijska svojstva te zbog toga imaju veliki potencijal za primjenu u različitim područjima.

7. Literatura

- [1] <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2011/press-release/>
- [2] <https://www.tau.ac.il/~ronlif/quasicrystals.html>
- [3] <http://www.physics.princeton.edu/~steinh/QuasiIntro.ppt>
- [4] <https://en.wikipedia.org/wiki/Quasicrystal>
- [5] <http://www.math.utah.edu/~treiberg/PenroseSlides.pdf>
- [6] PETAR POPČEVIĆ, Anizotropija transportnih svojstava aproksimata dekadonalnih kvazikristala, doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, 2010.
http://bib.irb.hr/datoteka/488296.Petar_Popevi_Doktorat.pdf
- [7] PETAR POPČEVIĆ, Osvrt na Nobelovu nagradu za otkriće kvazikristala
<https://bib.irb.hr/datoteka/572715.Popcevic-MFL-Kvazikristali.pdf>
- [8] https://www.researchgate.net/figure/Local-structural-units-included-in-quasicrystals-a-Tsai-type-b-Mackay-type-and-c_fig1_281114552
- [9] Ezequiel Rodriguez, Quasicrystals, From their discovery to their topological properties
- [10] https://www.researchgate.net/publication/26268382_Natural_Quasicrystals#pf2
- [11] <http://www.physics.princeton.edu/~steinh/Lincei.pdf>
- [12] https://www.degruyter.com/view/journals/zkri/219/7/article-p391.xml?fbclid=IwAR3rLndTKX_bIISyDzdeDBizD1f5DhrLCpEYK2L7ri5NVQHQzuLv93HNqnk