

A RÖNTGENSUGÁRZÁS HATÁSA HÉTKÖZNAPJAINKRA

Faigel Gyula

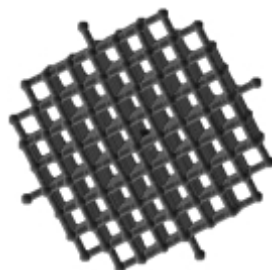
MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutató Intézet

Mindenki volt már tüdőszűrésen, és azt is jól tudjuk, hogy ha lábunkat eltörjük, akkor a csontok összeillesztéséhez röntgenfelvételt készít az orvos. Arról azonban, hogy az orvostudományon kívül mire használják a röntgensugárakat, már sokkal kevesebbet hallottunk. Pedig mindennapi életünk során használt eszközök közül nagyon sok nem létezne röntgensugárzás híján. Ilyen az elektronikus eszközök nagy része, például tv, számítógép, a gépjárművekben lévő számos alkatrész, a repülőgépek úrhajók alkotóelemeinek jó része, gyógyszereink közül igen sok, és még hosszan sorolhatnánk tovább. Mi az oka a röntgensugárzás ily széles körű alkalmazásának? Az, hogy a felsorolt eszközökben, alkatrészekben felhasznált anyagok bizonyos tulajdonságait igen pontosan be kell állítani és egyenletes szinten tartani a megfelelő működőképesség eléréséhez. Ugyanakkor ezen tulajdonságokat az alkotó atomok milyensége és térbeli elrendeződése döntően meghatározza. Mindkettő vizsgálatára szolgáló legjobb módszerek a röntgensugárzáson alapulnak. Nemrég volt a röntgensugárzás felfedezésének századik évfordulója. Ez alatt a 100 év alatt a röntgensugárzásra alapozott technikák sokasodtak és tökéletesedtek. Az egyes módszerek háttérét komoly tudományos felfedezések adják. Ezek színvonalát talán legjobban jellemzi a röntgensugárzás témában odaítélt Nobel-díjak nagy száma. A következőkben ezeket tekintjük át röviden. A hozzájuk fűzött magyarázatok egyben jelzik a tudományos kutatásban lehetséges alkalmazásokat, és bevezetik azokat a fogalmakat, melyeket a későbbi fejezetekben használunk.

1901 – *W.C. Röntgen*: a róla elnevezett sugárzás felfedezéséért. Az ismeretlen sugárzás egyik legfontosabb tulajdonsága, hogy fény számára átláthatatlan anyagokon is áthatol.

1914 – *M.T.F. von Laue*: a röntgensugár kristályokon létrejövő diffrakciójának felfedezéséért. Laue kísérletben igazolta az anyag atomjainak kristályrácsba való rendeződését és azt, hogy a röntgensugárzás elektromágneses hullám természetű (tehát a fényvel rokon, csak sokkal nagyobb frekvenciájú, azaz sokkal rövidebb hullámhosszú).

1. ábra. Példa atomok kristályrácsba történő rendeződésére. Az atomok a kockák csúcaiban helyezkednek el. Csak 8 kockát (ún. elemi cellát) mutatunk. A valóságban egy porszemnyi kristályban is nagyon sok (sok milliárd) ilyen kocka van szoros sorban elhelyezkedve. Megjegyezzük, hogy ez a legegyszerűbb elemi cella, s még nagyon sok, különböző alakú cella létezik a természetben.

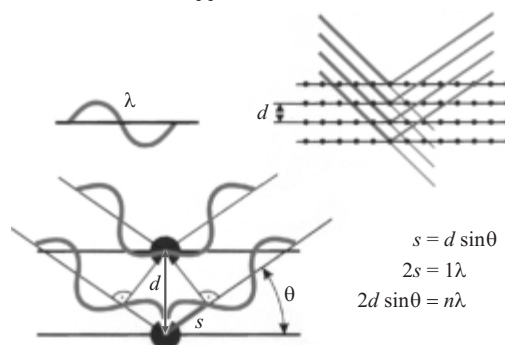


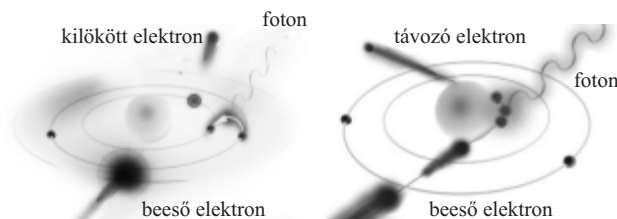
A kristályrácsba való rendeződés azt jelenti, hogy az anyagok egy jelentős részében az atomok nem véletlenszerűen helyezkednek el a térben, hanem olyan rendben, hogy egy atomtól adott irányba és távolságra lépve egy ugyanolyan atomot találunk, és ennek a környezete is azonos az eredeti atoméval. Ezt a „lépegetést” a végtelenségig folytathatjuk. Például képzeljük el kockák szoros egymás mellé pakolását és a kockák csúcaiban elhelyezkedő atomokat (*1. ábra*). A gyakorlatban persze végtelen kristályok nincsenek, de ha tekintetbe vesszük az atomok igen kicsi méretét ($\sim 1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$), akkor még egy 1 cm élhosszú kristályban is nagyon sok (10^{24}) ilyen kis „kocka” fér el. Ezt a számítások és elméleti megfontolások során végtelennek tekinthetjük. A fenti tulajdonságot térbeli periodicitásnak nevezzük, és ez a szilárdtestfizika egyik alapköve.

1915 – *Sir W.H. Bragg* és *Sir W.L. Bragg*: a kristályszerkezet röntgensugár-módszerrel történő analizisének felfedezéséért. Egyszerű, szemléletes képet adtak a kristályokon történő diffrakcióra. Ennek alapján lehetővé vált a kristályokról szóródott röntgenfotonok térbeli eloszlásának méréséből következtetni a kristályrács paramétereire. A kép lényege, hogy a szórást úgy képzelhetjük el, mint ha a kristályban tükrök lennének elhelyezve különböző irányokban. Ezeket a tükröző síkokat a rácsba rendezett atomokon áthaladó síkseregek alkotják. Egy-egy síksereg akkor reflektál, ha a párhuzamos síkok közötti távolság a hullámhossz és a beesési szög között az úgynevezett Bragg-összefüggés teljesül ($n\lambda = 2 d \sin\theta$; $n = 1, 2, 3, \dots$). Ez szemléletesen azt jelenti, hogy két sík közé éppen egész számú hullám fér (*2. ábra*).

1927 – *A.H. Compton* és *C.T.R. Wilson*: a rugalmatlan röntgensugár-szóródás (Compton-effektus) felfedezéséért. A rugalmatlan szóródás azt jelenti, hogy a beeső fo-

2. ábra. A kristályokban való röntgendiffrakció szemléltetését látjuk. A jobb felső részen az atomokon át fektethető kristálsíkokat mutatjuk. A bal felső ábra a fotont mint hullámot jelképezi, és egy hullámhossznyit rajzoltunk fel. A bal alsó rész pedig azt mutatja, hogy akkor van erős reflexió, ha a hullámhossz éppen belefér a rácssíkok közé.





3. ábra. A röntgenső anódjának anyagában lezajló atomi folyamatok: a jobb oldali ábrán az elektronok atomokon való fékeződését és az ennek során keletkező röntgensugárzást szemléltetjük. A bal oldali ábra egy lehetséges másik atom–elektron kölcsönhatást mutat: az ionizációt, melynek során egy nagy energiával beeső elektron kiűthet egy másik, az atomon erősen kötött elektront. Ekkor az elektron helyén egy hiány, „lyuk” keletkezik és ide mintegy „beesik” egy távoli atomi pályáról egy kevésbé kötött elektron, és a fölös energia egy röntgenfoton formájában távozik.

ton valamennyi energiát átad az anyagban lévő elektronnak (mintegy meglöki azt), és így végeredményben egy kisebb energiájú foton és egy nagyobb energiájú elektront detektálhatunk. Ez a szórástípus nem hordoz szerkezeti információt, de használható az elektronok sebességeloszlásának meghatározására.

1985 – H.A. Hauptman és J. Karl: a röntgendiffrakcióból történő kristályszerkezet-meghatározó módszer (a direkt módszer) kidolgozásáért. Ez a második Nobel-díj szerkezetmeghatározásért, mutatva e kérdéskör fontosságát. Az 1915-től 1985-ig eltelt 70 évben komoly fejlődésen mentek keresztül a röntgentechnikák. Jóllehet ettől még gyorsabb volt a számítógépek, illetve számítástechnika fejlődése. Ez tette lehetővé, hogy a direkt módszer a gyakorlatban is működhessen. Lényege, hogy a mintáról való minimális előzetes ismeret (pl. összetétel, sűrűség) felhasználásával a röntgenszórás képből az operátor lényeges beavatkozása nélkül (mintegy automatikusan) meghatározhatók nem túl bonyolult kristályszerkezetek.

Milyen alkalmazásokhoz vezettek a fenti kiemelkedő tudományos eredmények? Mielőtt e kérdésre válaszolnánk, röviden ismertetnénk kettőt azok közül az eszközök közül, amelyek röntgensugárzás keltésére alkalmasak. Azért tartjuk fontosnak ezeket, mert nélkülük a fenti felfedezések sem valósulhattak volna meg. Másrészt az olvasó benyomást kap arról, hogy a mai modern nagyberendezések hogyan kapcsolódnak mindennapi életünkhöz.

Sugárforrások

Azt hiszem, nem kíván részletesebb magyarázatot, hogy az anyagról szerezhető információt döntően befolyásolja a mérőnyaláb minősége, vagyis, hogy milyen a sugárforrás. Ha csak arra gondolunk, hogy a szabad szemmel való vizsgálódásnál sem mindegy, hogy milyen megvilágítást használunk, például egy elemlámpát, vagy egy 1 KW-os higanygőz-égit, zöld fényt vagy pirosat, netalán infravöröset vagy ultrabolyt, egy éles keskeny nyalábot vagy egy minden irányban világító égit. A röntgentechnikáknál is nagyban befolyásolja a mérési lehetőségeket milyen sugárforrást használunk. A következőkben erről fogunk írni. Azért is aktuális e téma, mert az utóbbi néhány évtizedben

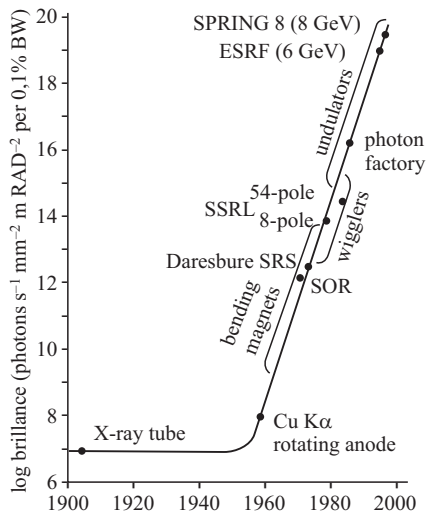


4. ábra. A világ egyik legmodernebb szinkrotronsugár-forrásának a grenoble-i Európai Szinkrotronsugár-forrás (ESRF) távlati képe.

a sugárforrásoknak egy új fajtája a szinkrotronsugár-források jelentek meg, melyek forradalmasították a röntgentechnikákat. Ahhoz, hogy megértsük, miért különlegeseek a szinkrotronsugár-források, először röviden ismertetjük a hagyományos röntgenforrások tulajdonságait, majd összevetjük a szinkrotronsugárzás jellemzőivel.

A hagyományos röntgenforrás egy vákuum alatt lezárt csőből áll, amelyben egy izzószálból elektronok lépnek ki, melyek a katód és anód közé kapcsolt nagyfeszültség hatására felgyorsulnak és becsapódnak az anódra. A becsapódó elektronok hozzák létre a röntgensugárzást két folyamat eredményeképpen: 1) az elektronok az atomokon való ütközések során fékeződnek és sugároznak, lásd 3. ábra jobb oldala (az elektrodinamikából ismert, hogy sebességüket változtató töltések sugároznak). 2) A nagyenergiájú beeső elektron kiűthet egy másik az atomon erősen kötött elektront, ekkor az elektron helyén egy hiány, „lyuk” keletkezik és ide mintegy „beesik” egy távoli atompályáról egy kevésbé kötött elektron. Mivel magasabb energiájú állapotból alacsonyabb energiájú állapotba kerül az elektron, az energiamegmaradás törvényének megfelelően egy a különbségenergiával rendelkező foton bocsát ki az atom, lásd 3. ábra bal oldala.

A szinkrotronsugár-források merőben más felépítésűek. A hagyományos forrásokkal szemben ezek már nem férnek el egy 20 cm-es üvegcsőben, hanem a méterestől a km-es átmérőjű gyűrűk (4. ábra). Ezekben közel körpályán keringenek a fényhez közeli sebességgel az elektronok (vagy pozitronok, az elektronok antirészecskéi). Mivel keringés közben változik a sebességük (pontosan, ennek iránya), sugároznak. Ez az elektromágneses sugárzás a szinkrotronsugárzás. Miért is hívják így? Az elektronok a sugárzással energiát veszítenek, lassulnak. Ezt pótolni kell, ha a sugárzást azonos szinten akarjuk tartani. Ezért a szinkronban minden egyes körülfordulással egyet „lökünk” az elektronokon. E miatt a szinkronban való energiavisszapumpálás miatt nevezzük ezeket a gyűrűket szinkrotron-tárológyűrűknek. Hasonlítsuk össze a hagyományos és a szinkrotronforrásokból származó sugárzás tulajdonságait. A legszembevetőbb az eltérés a fényességben. Ez arra jel-



5. ábra. A röntgensugár-források fényességének az évek folyamán való növekedését láthatjuk. Az ötvenes évekig nincs nagy változás, ekkor jelentek meg a szinkrotronsugár-források. Ezután rohamos növekedés vette kezdetét, ami még napjainkban is tart.

lemző, hogy milyen kis forrásból hány foton jön ki másodpercenként, és mennyire párhuzamosan egy megadott energiatartományban. A legtöbb fizikai méréshez a minél nagyobb fényesség a jobb. A sugárforrások fényességének változását mutatja az idő függvényében az 5. ábra. Jól látható, hogy a szinkrotronforrások megjelenésével erőteljes növekedés mutatkozik. Napjaink legjobb forrásai 10 nagyságrenddel (tehát 10 milliárdszorosan) is felülműlják a hagyományos társaikat. Ez új méréstípusok kialakulására és a régiek nagyarányú fejlesztésére ad lehetőséget. A fényességen kívül nézzünk még néhány fontos paramétert:

1. **Energiaspektrum.** Ez azt mondja meg, hogy különböző energiákon hány fotont szolgáltat a forrás. A hagyományos forrásoknál egy gyenge folytonos háttéren néhány adott energiájú erős keskeny vonalat látunk (6. ábra, jobb oldali grafikon). A folytonos részt a gyakorlatban nagyon ritkán használjuk, mert itt kevés a foton. Tehát méréseinket csak meghatározott energián tudjuk végezni. A szinkrotronoknál a kijövő sugárzás spektruma attól függ, hogy a gyűrű milyen részéből vesszük a mintát. A hajlító mágneseknél (amelyek az elektronokat körpályán tartják) (6. ábra, bal alsó 1. kép) és a nagy amplitúdójú, periodikus eltérítő egységeknél (*wiggler*) (6. ábra, bal alsó 2. kép) közel folytonos energiaspektrumot mérünk (6. ábra, bal felső grafikon). A kis amplitúdójú, periodikus eltérítő egységeknél (*undulator*) (6. ábra, bal alsó 3. kép) csúcsos spektrumot kapunk, de a csúcs helye változtatható. Tehát szinkrotronoknál nem vagyunk egy-egy meghatározott

energiához kötve, hanem a mérés kívánalmainak legjobban megfelelő sugárzást használhatunk.

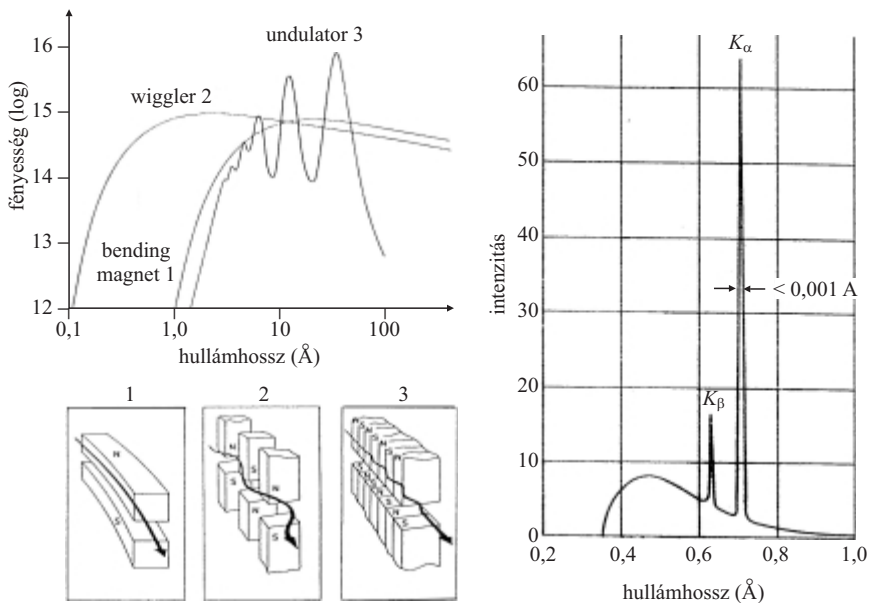
Még egy tulajdonságot emelünk ki: az *időbeli lefolyást*. Hagyományos forrásoknál a fotonok időben véletlenszerűen, folytonosan jönnek. Szinkrotronoknál egymástól időben távol elhelyezkedő (100 ns), rövid (1 ns) erős impulzusok formájában érkeznek a sugárzás.

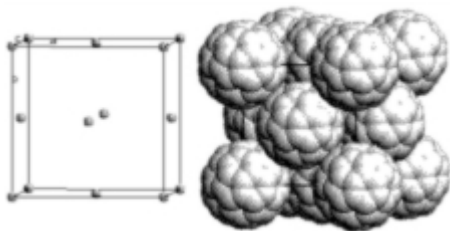
A szinkrotronsugárzás fenti tulajdonságai kombinálva a nagy fényességgel, az anyag szerkezetének és egyéb jellemzőinek mélyebb megismerését teszi lehetővé, és a gyakorlati alkalmazások körét is nagymértékben bővíti.

Mielőtt lezárnánk ezt a témát, néhány szó arról, hogy mennyibe kerül mindez az „adófizetőnek”. Egy hagyományos röntgenforrás tipikusan a 10 millió Ft-os kategóriába esik. Egy szinkrotronsugár-forrás körülbelül 100 millió dollárba (~20 milliárd Ft) kerül. Ez utóbbi soknak tűnik, de ha egy foton „árát” nézzük akkor a szinkrotronnal sokkal olcsóbban állíthatunk elő egyet.

Körülbelül 10 milliószor kevesebbe kerül egy szinkrotronnal előállított röntgenfoton, mint egy hagyományos röntgenforrásból nyert foton. Ha ehhez még hozzátesszük, hogy a szinkrotron mérőnyaláb (tehát a fotonok) minősége is sokkal jobb, mint hagyományos források esetén, világossá válik, hogy a szinkrotronok a jövő sugárforrásai. Megjegyezzük, hogy Magyarországnak sajnos nincsen szinkrotronsugár-forrása. Az eszközökben való ilyen elmaradottság majdnem egyenesen vonja maga után a kutatásban, illetve a magas technológiát kívánó iparágakban való elmaradást is. Ezt valamelyest kompenzálhatjuk, ha tagjai vagyunk nemzetközi együttműködéseknek, ahol szinkrotronforrásokat üzemeltetnek. Sajnos több évtizeden át ez nem valósult meg, azonban 2001-ben az MTA és az OMFB együttes támogatásával társult tagja lettünk az Európai Szinkrotron Laboratóriumnak (Grenoble, Franciaország). A többi szinkrotronhoz a ma-

6. ábra. Az ábrán a különböző röntgensugár-források által kibocsátott sugárzás hullámhossz szerinti eloszlását mutatjuk. Részletesebb leírást lásd a szövegben.





7. ábra. A legismertebb fullerén-molekula, a C_{60} kristályrácsát (baloldalt) és az ebben elhelyezett molekulákat (jobbaldalt) láthatjuk.

gyar kutatók továbbra is egyéni kapcsolatokra építve próbálnak eljutni és így lépést tartani a világszínvonallal.

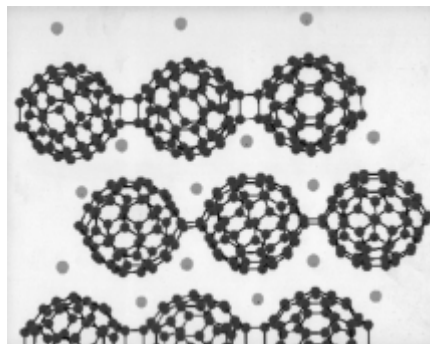
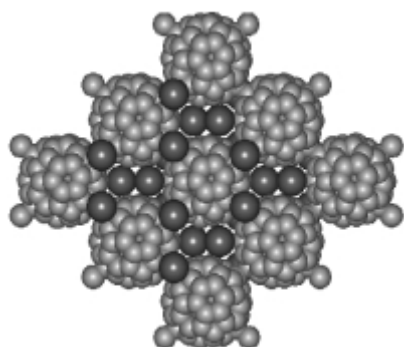
A következőkben – a teljesség igénye nélkül – a szinkrotronsugárzás alkalmazásaira mutatunk példákat. Ezek között olyat is említünk, amely hazai kutatók munkája.

Tudományos alkalmazások

A felsorolt példák a napjainkban folyó kutatások élvonalából származnak. A kutatás természetes velejárója, hogy előrébb tart, mint az ipari, illetve más gyakorlati felhasználások. Ezért a felsorolt eredményeket általában még nem alkalmazzák széles körben. Azonban az egyes felfedezések ismertetése után röviden utalunk arra, hogy milyen alkalmazások várhatók, vagy korábbi hasonló kutatások milyen „megfogható” eredményre vezetnek.

A szilárdtestfizika, illetve kémia területén az évtized egyik legérdekesebb felfedezése a fullerén-molekulák és az ezekből készíthető anyagok voltak. Ezt tükrözi a 1997-es Nobel-díj. E molekulák a kémia új ágát indították útjára.

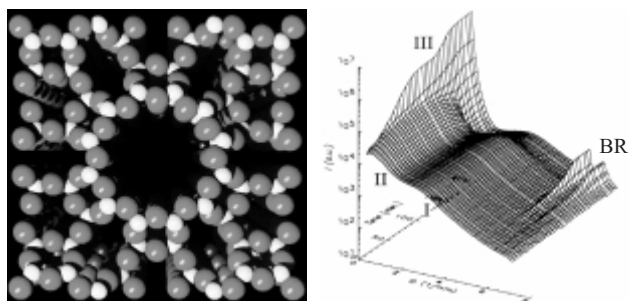
A fullerén-molekulák szénatomok alkotta zárt, héjszerű molekulák. Legismertebb közülük a hatvan szénatomot tartalmazó C_{60} (7. ábra), de e családban több szénatomból álló tagokat is találunk, mint a C_{70} , C_{82} stb. Most a C_{60} alkálifémekkel alkotott sói közül jellemzünk néhányat. Mi e sók érdekessége? Az összetételtől és előéletől függően nagyon változatos tulajdonságúak. Találhatók közöttük szigetelő fémek, sőt szupravezetők is. Ezen anyagok többségében a molekulákat gyenge Van der Waals- vagy ionos kötések kapcsolják egymáshoz (pl. A_3C_{60} , A_6C_{60} stb. $A = K, Rb, Cs$). Csoportunk az A_4C_{60} ösz-



8. ábra. Az A_4C_{60} típusú ($A = K, Rb, Cs$) egydimenziós polimer molekulaszerkezete. Jól láthatók a C_{60} molekulákból alkotott láncok és a köztük elhelyezkedő alkáliatomok.

szetételű anyagok szerkezetének felderítését tűzte ki célul. Azt találtuk, hogy ezek stabil fázisa merőben eltér a többi vegyületétől, mert ezekben erős kovalens kötésekkel kapcsolódnak egymáshoz a fullerén-molekulák. A 8. ábrán láthatjuk a szerkezet vázát és a kialakult kötéskonfigurációt. A molekulák négyes gyűrűket alkotó kötések sorozatával kapcsolódnak, és így hosszú láncokat alakítanak ki. Ezek a láncok kristályrácsba rendeződnek. Az ilyen anyagokat egydimenziós kristályos polimereknek nevezzük. Előfordulásuk a természetben még más anyagcsaládok körében sem gyakori. A szerkezetmeghatározás különlegessége, hogy úgynevezett pordiffrakcióból történt. Ez azt jelenti, hogy nem egy kis egykristályt tettünk a mérőnyaládba (mivel ilyen nem lehetett előállítani), hanem nagyon sok apró porszemcsét, minden irányban azonos valószínűséggel álló kristallitok sokaságát. Ebben az esetben a reflexiók iránybeli információja elvesz, s ezért a szerkezet meghatározása nehéz. A pontos atomi rendet csak igen jó minőségű porspektrumból (azaz, nagy részletességgel megmért intenzitáseloszlásból) kaphatjuk meg. Ilyen adatsorok felvétele csak szinkrotronsugárzás segítségével lehetséges. Tovább vizsgáltuk ezt az anyagcsaládot, mivel elméleti megfontolásaink azt jelezték, hogy léteznie kell magasabb dimenziójú polimereknek is. Tehát olyanoknak, amelyekben nemcsak egyes láncokba kapcsolódnak a C_{60} -molekulák, hanem síkokba vagy a tér minden irányába. Végül sikerült szintetizálnunk Na_4C_{60} összetétellel egy olyan anyagot, amelyben kovalens C_{60} síkok alakultak ki, tehát egy kétdimenziós polimer. Ezt a szerkezetet a 9. ábra mutatja.

10. ábra. A bal oldalon egy zeolit atomi szerkezetét látjuk. A világos golyók az oxigént, míg a sötétebbek a Si-ot ábrázolják. A jobb oldalon a röntgendiffrakciós kép időbeli változását mutatja.



A fullerének gyakorlati alkalmazása még nem jellemző, hiszen még nagyon „új” anyagok. Azonban vannak elképzelések kenőanyagként, igen finom szűrőként, képernyőkben világító elemként vagy orvosságokban és még sok más helyen történő felhasználásra.

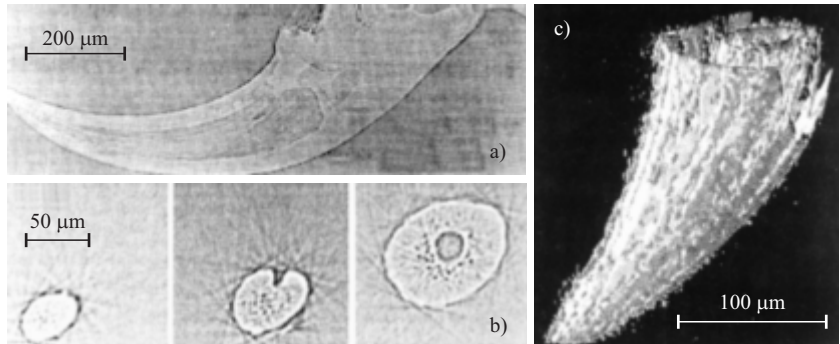
A következőkben a kémia területéről mutatok példát. Szintézis során az anyagok minősítésének tipikus módja a kezdő és végtermékek milyenségének (tehát szerkezet, összetétel) meghatározása. Sok esetben azonban jó lenne tudni egy folyamat közbeni állapotokat, hiszen ez lehetővé tenné a végtermék tulajdonságának finomhangolását. Ezt gyakran úgy próbálják elérni, hogy egy-egy pontban „megállítják” a reakciót, és a termékeket vizsgálják. Ilyen esetben nem triviális, hogy ugyanazokat a paramétereket mérjük, mint amilyenek a valódi szintézis körülményei között vannak, hiszen megbontottuk a rendszer egyensúlyát. Ezt kiküszöbölhetjük, ha képesek vagyunk a reakció közben, annak zavarása nélkül minősíteni az anyagot. Ilyen példát mutat a 10. ábra. Itt a széles körben használt zeolitok kialakulását követték az idő függvényében, egyszerre több módszerrel is alkalmazva, az ultrakisszögű szórástól a nagyszögű diffrakcióig. Kiderült, hogy a reakció alapvetően két lépésből áll. Az első során az úgynevezett elsődleges egységek (~2,8 nm) és ezek aggregátumai (~10 nm), a másodikban pedig nukleáció, majd a makroszkopikus kristályos anyag alakul ki. Ezen reakció időskálájának pontos ismerete elősegítheti, hogy olyan formában, tulajdonságokkal állítsuk elő a zeolitokat, amilyenben szükségünk van rá.

A zeolitokat legtöbbször katalizátorként alkalmazzák. Tehát vegyi üzemekben, amelyek termékeit gyakran használjuk mindennapi életünk során. Katalizátorok vannak az autók kipufogójában is, hogy ne szennyezzék a levegőt.

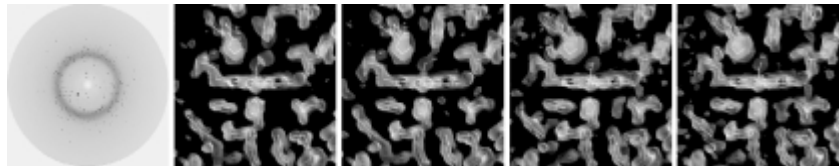
A kémia után lássunk két példát a szinkrotronsugárzásnak biológiai kutatások területén való felhasználásra.

Először a mikrotomografikus leképzési technikák alkalmazására mutatunk példát. A 11. ábrán egy pók csápjának fáziskontraszt-képét láthatjuk. 500 különböző szögből készült felvételtől a csáp 3D képét is megkaphatjuk. Ezt mutatja az 11. ábra jobb oldala. A balra lent pedig a keresztirányú metszeteket láthatjuk.

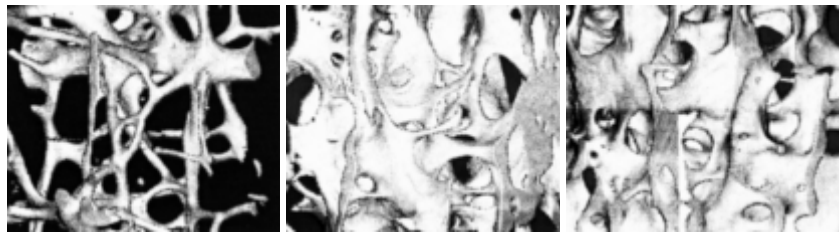
Egészen más terület a biológián belül a makromolekuláris krisztallográfia. Azt hiszem, nem kell hangsúlyozni, milyen fontos a fehérjék és az élő szervezetet felépítő egyéb alkotók pontos atomi szerkezetének ismerete. Evvel foglalkozik a makromolekuláris krisztallográfia.



11. ábra. a) Egy pók csápjának röntgen-fáziskontrasztképét láthatjuk a felső képen. Balra lent a b) képen a keresztirányú metszetek láthatók. Sok szögből felvéve a csapot, annak háromdimenziós, c) képe is előállítható.



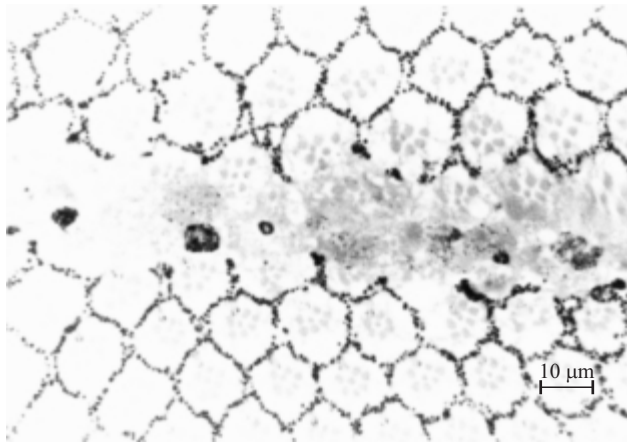
12. ábra. A bal oldali ábra a mioglobin egykristály-diffrakciós képét mutatja 100 ps-mal a beeső fényimpulzus után. A négy jobb oldali ábra az oxigénfelvétel következtében létrejövő szerkezetváltozás időbeli lefutását ábrázolja.



13. ábra. Egy nő különböző korban vett csontmintáinak háromdimenziós röntgen-mikrotomográfiai képei (balra 33 éves, középen 55 éves, jobbra 72 éves).

Most olyan példát szeretnék e területről mutatni, amely a hagyományos szinkrotrons krisztallográfia keretein túl lép, és nem egy statikus szerkezetet, hanem egy folyamat során változó szerkezetet vizsgál. Mint tudjuk, az élő szervezetben a hemoglobin felelős az oxigéntranszportért. A mioglobin pedig tárolja az oxigént, hogy az izmok azt fel tudják a későbbiekben használni energiatermelés céljából. A mioglobin szerkezetét már a 60-as években meghatározták, azonban nem volt világos, hogyan fér hozzá az aktív helyekhez, illetve hogyan távozik onnan az oxigén. Néhány 100 ps-os felbontással vettek fel diffrakciós képeket erről a folyamatról, és így sikerült a fenti problémát megoldani. A kísérletekben az oxigént szén-monoxidral helyettesítették. Egy tipikus diffrakciós képet mutat a 12. ábra bal oldali része, míg az időbeli fejlődést a négy jobboldali ábra mutatja.

Hogyan használhatjuk a fenti típusú ismereteket a gyakorlatban? A rovarokon végzett mikrotomografikus mérések kifejlesztése elősegítheti az emberi szervezet részeinek leképezésére alkalmas módszerek megvalósítását (ahogy azt a következők orvosi példán majd látjuk is). Ezen túl, a rovarok szerveinek részletes ismerete segíthet a kártevők elleni védekezésben is. Mivel a krisztallográfiai vizsgálatok lehetővé teszik az élő szervezet alkotói szerkezetének atomi szinten való ismeretét, illetve működ-



14. ábra. Muslica szemén végzett sugárkezelés eredményeként létrejött nagyon keskeny roncsolt terület.

désük során történő atomi átrendeződések követését, így elősegíti különböző betegségek okának mélyebb megismerését, ezen keresztül új, hatásosabb gyógyszerek kifejlesztését. Végső soron életünk meghosszabbítását és az életminőség javítását várhatjuk a szinkrotronsugárzással szerzett biológiai ismeretektől.

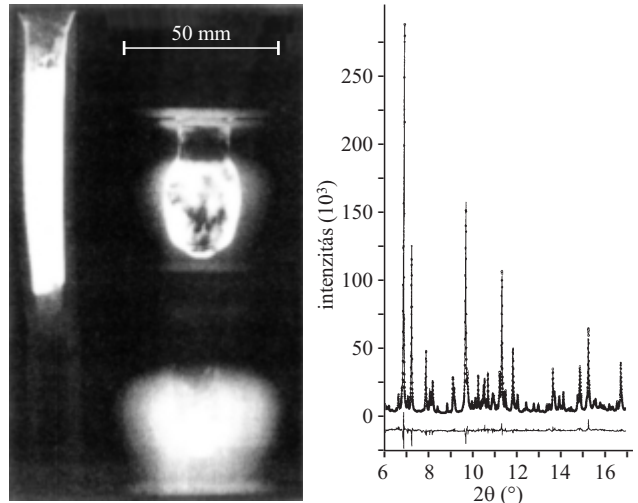
Végül az orvostudománybeli alkalmazásokra mutatok két példát.

Itt mind terápiára, mind diagnosztikára alkalmazható a szinkrotronsugárzás. Tekintsük először a diagnosztikát.

Egy újabban kidolgozott technikára, a csontok vizsgálatára alkalmas 3D mikrotomográfiára mutatunk egy példát. A 13. ábra felső részén egy 33, a középsőn egy 55 és az alsón egy 72 éves nő csontjának finomszerkezetét láthatjuk. A különbség önmagáért beszél. A tomográfia kombinálható elemanalízissel is, így még az is meghatározható, hogy a csontok különböző részein milyen anyagok dúsulnak fel, illetve hiányoznak. A fenti vizsgálatok eredményei lehetővé teszik a csonttritkulás folyamatának részletes megismerését, és így elősegítik megelőző terápiák kidolgozását.

Megemlíjtjük, hogy hasonló eljárást alkalmaznak a szív koszorúereinek feltérképezésére. Az élő működő szívről olyan felvételek készíthetők, melyek felbontása néhány-szor 10 mikron. Ezek a vizsgálatok a manapság egyre gyakoribb szívbetegségek korai felismerésére és kialakulásának felderítésére adnak lehetőséget. Ilyen ismeretek birtokában jó esélyünk van a megelőzésre, illetve a hatásosabb gyógyításra.

Végül egy sugárterápiás kísérletet mutatunk. Hagyományos sugárkezelés esetén gyakori az egészséges szövetek károsodása is. Ezt úgy kerülhetjük el, hogyha az egészséges területen áthaladó sugárnyaláb olyan keskeny, hogy a megmaradó épp sejtek normális javító mechanizmusa ezt a vékony területet át tudja hidalni. A 14. ábra egy ilyen vékony nyaláb nyomát mutatja. Egy muslica szemén végeztek sugárkezelést. Ezt a kis területet a környező sejtek idővel meg tudják gyógyítani. Még sok kísérletre van szükség, hogy hasonló terápiát embereken is biztonságosan lehessen alkalmazni. Ilyen módszerek kifejlesztése azonban olyan gyógyító eljárásokat eredményez-



15. ábra. Az ókori egyiptomiak által használt kozmetikumokról és gyógykenőcsökről készült radiogram (baloldalt) és pordiffrakciós felvétel (jobboldalt).

het, amelyben elkerülhető a hagyományos sebészi beavatkozás, és sok műtét „vér nélküli” kezeléssel váltható fel.

Utolsóként, érdekességképpen a szinkrotronsugárzás humán tudományokban való felhasználásának lehetősége mutatunk rá. Nehéz elképzelni, hogy a történelemtudósokat hogyan segítheti a szinkrotronsugárzás. A 15. ábrán egy az ókori egyiptomi sírokból előkerült tárolóedény röntgenvizsgálatának eredményét mutatjuk be. Mivel a röntgensugárzás az edény falán áthatol, az értékes lelet szétbontása nélkül megtudhatjuk, mi található benne. Sőt a pordiffraktogram részletes elemzése nemcsak azt mutatja meg, milyen anyag van az edényben, hanem azt is, hogy hogyan készítették azt. Esetünkben például kiderült, hogy az ókori egyiptomiak már ismerték a PbS , $PbCO_3$, $PbOHCl$ és a $Pb_2Cl_2CO_3$ előállításának technikáját, és ezeket nemcsak kozmetikumokként, hanem gyógyászati célokra is használták.

Ezzel befejeztük „körutunkat” a tudományok területén. Sajnos csak egy nagyon kis töredéket tudtunk bemutatni azon tudományos alkalmazásokból, amelyeket a röntgensugárzás és speciálisan a szinkrotron-tárológyűrűk lehetővé tesznek. Nem beszélünk például a mágneses anyagok vizsgálatáról, a litográfiáról (a félvezetőgyártásban alapvető jelentőségű), a topográfiáról (egykristályok hibáinak felderítésére alkalmas) stb. A lehetséges gyakorlati alkalmazások közül is csak nagyon kevés szó esett. Nem írtunk a szuperötvezetek repülő-, illetve autóalkatrészekben való felhasználásról, de a modern félvezető elemek, folyadékkristály kijelzők, mágneses vékonyrétegek elektronikus iparban – számítógép-memóriaként, lapos képernyőként vagy nagykapacitású merevlemez tárolóként – való alkalmazásairól sem.

Reméljük, hogy ennek ellenére az olvasó általános benyomást szerzett arról, hogy a röntgensugárzás nagyon széles körben segíti életünk kellemesebbé tételét, és a drágának látszó nagyberendezések, mint például a szinkrotron-tárológyűrűk sokszorosan visszafizetik a rájuk költötteteket.