



SUGÁRZÁSOK KÖLCSÖNHATÁSA AZ ANYAGGAL ESSZÉ

**Szinkrotronsugárzás előállítása, tulajdonsága és felhasználása az
anyagtudományban**

CSOBOD JUDIT

Vegyésmérnök MSc

Anyagtudomány specializáció

1.évfolyam

Oktatók: Nagyné László Krisztina

Dr. Madas Balázs

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Fizikai Kémiai
és Anyagtudományi Tanszék

2020.04.14.



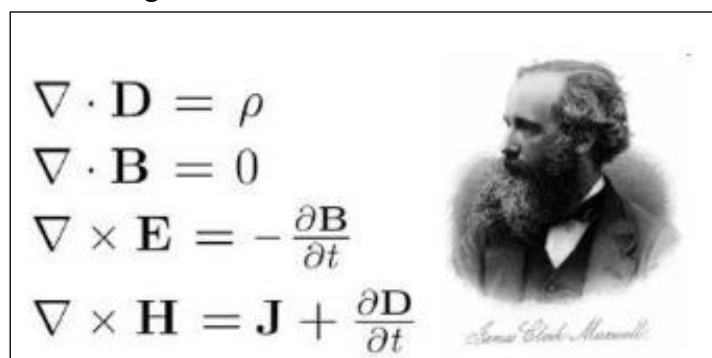
M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Bevezetés

A szinkrotronsugárzás eleinte egy nem kívánatos "melléktermék" volt, de később felismerték a benne rejlő lehetőségeket. Gyakran "fehér" sugárzásnak nevezik. A szinkrotronsugárzást alkalmazni vágyók számtalan technikai kihívással szembesültek: újszerű detektorok, monokromátorok tervezése és építése, a "hulladéksugárzás" optimalizálási technológiájának megismerése. [1]

Sokan úgy tartják, hogy 1945 a szinkrotronsugárzás történetének kezdete - ekkor észlelték, majd 1947-ben vizuálisan is megfigyelhető lett. A szakirodalomban azonban már 1908 előtt is jelezték, és elemezték ezt a sugárzást.

Az elméleti feldolgozás 1873-ban kezdődött Maxwellnél, aki nyilvánvalóvá tette, hogy a töltés sűrűsége és az elektromos áram változtatása elektromágneses mezőket eredményez, melyek kifelé sugároznak.



The image shows four Maxwell equations on the left and a portrait of James Clerk Maxwell on the right. The equations are:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}\end{aligned}$$

The portrait is of James Clerk Maxwell, with his name written below it: *James Clerk Maxwell*.

1. ábra Maxwell egyenlete

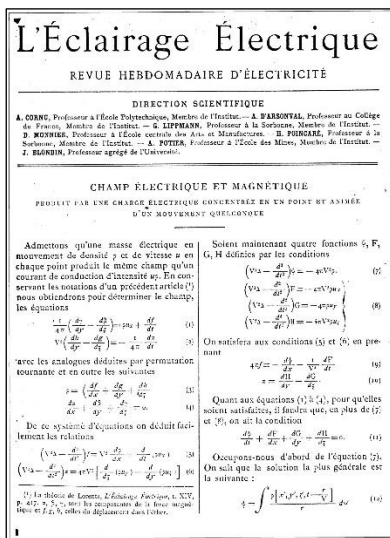
1887-ben Heinrich Hertz, Helmholtz hallgatója hasonló hullámokat mutatott be professzorának, és így megalapozta a szinkrotronsugárzás elméletét.



2. ábra Heinrich Hertz munkássága

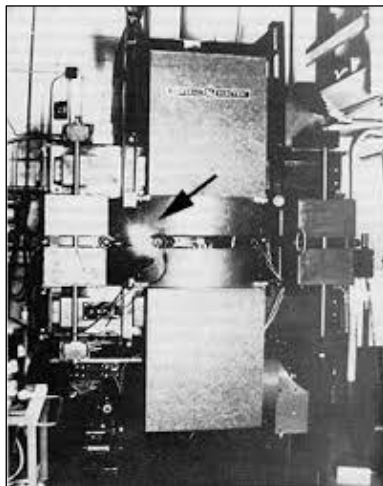
A váltakozó áramok és a gyorsult töltések által okozott sugárzás általános elmélete rendkívül bonyolultnak bizonyult, nemcsak az elméleti alap, hanem az algebrai egyenletek is egész oldalakat fedtek le. Az első nagy előrelépés, 1898-ban történt, amikor Alfred Liénard, a Párizs rangos École des Mines professzora alkalmazta a „nyugalmi potenciál” fogalmát.

Liénard tanulmányát a L'Éclairage Électrique („Elektromos világítás”) című kiadványban tették közzé (Liénard, 1898). A cikk címe: "Egy ponton koncentrált és önkényes úton haladó elektromos töltés által előállított elektromos és mágneses mező". Ebben a történelmi cikkben Liénard kidolgozta a szinkrotronsugárzás alapelveit.



3. ábra L'Éclairage Électrique kiadványban megjelent tanulmány

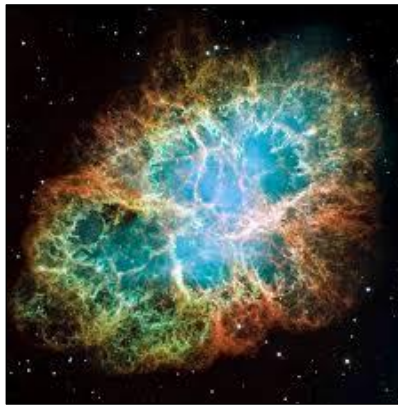
A gyorsított elektronok sugárzása a Szovjetunió érdeklődését is felkeltette. I. Pomeranchuk, a Leningrádi Állami Egyetem Fizikai Intézetének munkatársa 1939-ben vizsgálta a kozmikus sugárzás elektronjait, melyek belépnek a föld mágneses mezőjébe és azáltal veszítik el az energiájukat, hogy kibocsátják azt, amit most szinkrotronsugárzásnak hívunk. Megállapította, hogy ez a hatás csak az 1016 eV-nál nagyobb primer energiájú elektronok esetében figyelhető meg. 1942-ben feltaláltak egy elektrongyorsítót, amelyet később betatronnak neveztek el. Aztán 1940-ben Don Kerst és Bob Serber az Illinoisi Egyetemen megvizsgálta, hogy mi szükséges a mágneses mező olyan szintű átalakításához, hogy megakadályozzák a gyorsított sugár felrobbantását. Kerst egy 2,3 MeV-os modellt készített. Ez keltette fel a General Electric Company érdeklődését, itt bővítették az addig megszerzett elméleti alapokat. [2]



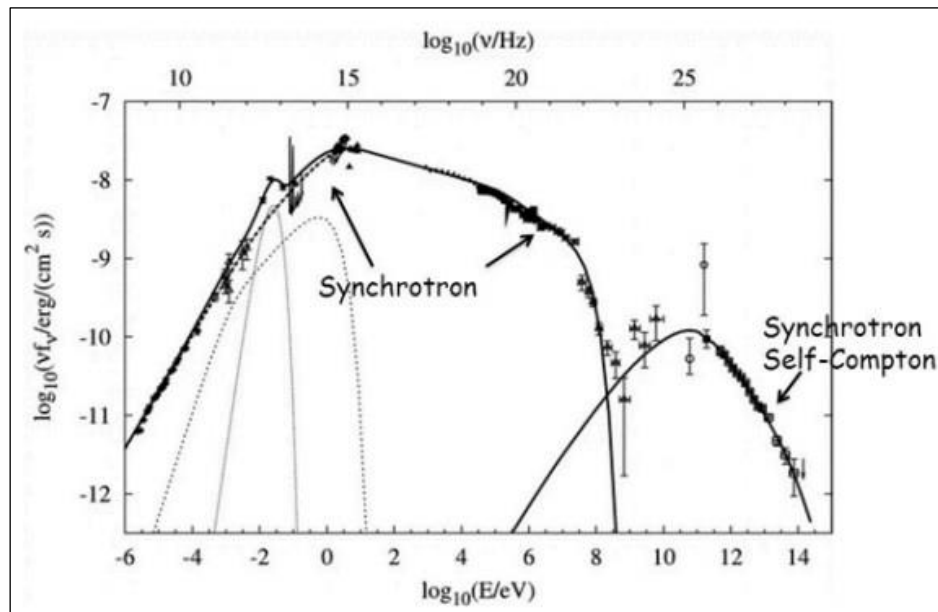
4. ábra Szinkrotronfény a General Electric laboratóriumában

A szinkrotronsugárzás jellemzése

A szinkrotronsugárzás olyan részecskék (elektronok, ionok) által kibocsátott elektromágneses energia, mely a fény sebességéhez közeli sebességgel mozog, útját a mágneses mező változtatja meg. Számos csillagászati objektum bocsát ki szinkrotronsugárzást, például a Jupiter bolygó körül a mágneses erő erővonalain át spirálisan áthaladó nagy energiájú elektronok szinkrotronsugárzást bocsátanak ki rádióhullámhosszon. Az ilyen hullámhosszon, valamint a látható és az ultraibolya félynél a szinkrotronsugárzást olyan elektronok generálják, amelyek a Rák-köd néven ismert szupernóva maradékához kapcsolódó mágneses mezőben mozognak.



5. ábra Rák-köd



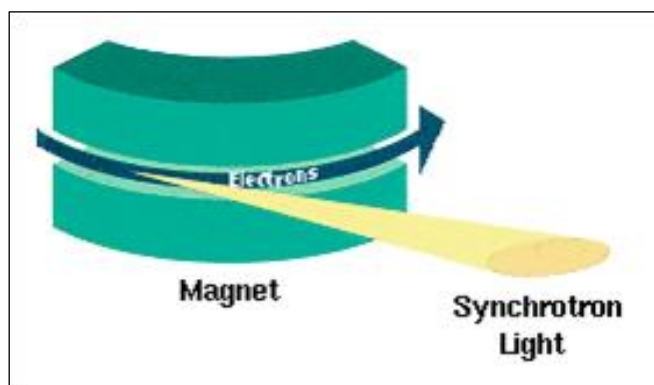
6. ábra A Rák-köd spektrális energiaeloszlása

A szinkrotronsugárzás erősen polarizált és folyamatos. Ennek intenzitása és frekvenciája közvetlenül kapcsolódik a mágneses mező erősségéhez és a mező által érintett töltött részecskék energiájához. Ennek megfelelően, minél erősebb a mágneses mező, annál nagyobb a részecskék energiája, valamint annál nagyobb a kibocsátott sugárzás intenzitása és frekvenciája.

A szinkrotronsugárzás nem függ az adott forrás hőmérsékletétől; egy viszonylag kis hőmérsékletű tárgy jelentős mennyiségű elektromágneses energiát bocsáthat ki ebben a formában. A szinkrotron sugárzást tehát gyakran nem termikus sugárzásnak nevezik. Ez a folyamat felelős a galaxisból, a szupernóva maradványaiból és az extragalaktikus rádióforrásokból származó rádiókibocsátásért. Felelős a Rák-ködben megfigyelt nem termikus optikai és röntgenkibocsátásért, valamint a kvazárok esetleges optikai és röntgenkontinentális emissziójáért is. [3]

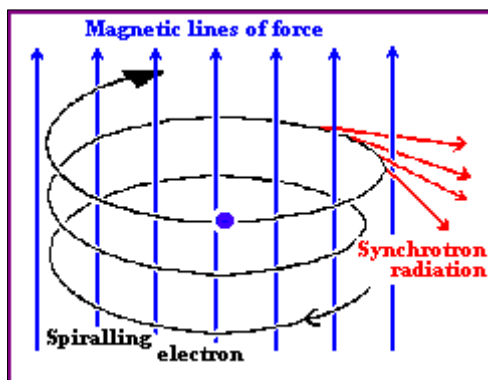
Az elektronok szinte minden szinkrotron forrásban törvény szerinti energieloszlással rendelkeznek, tehát nincsenek termodinamikai egyensúlyban. A Maxwell-féle elektron energia eloszlású szinkrotron forrás azonban hőforráson alapul, tehát a „szinkrotron” és a „nem termikus” kifejezés nem teljesen azonos.

A szinkrotron sugárforrásként használt tárológyűrűkben akár több mint 10^{12} elektron csoport keringhet vákuumban, mágneses erő által irányítva. Egy 30 méter kerületű gyűrűnél a fordulatszám 100 ns, tehát minden 10^{12} elektron csoport másodpercenként 10^7 alkalommal látható, 1 A áramot adva.



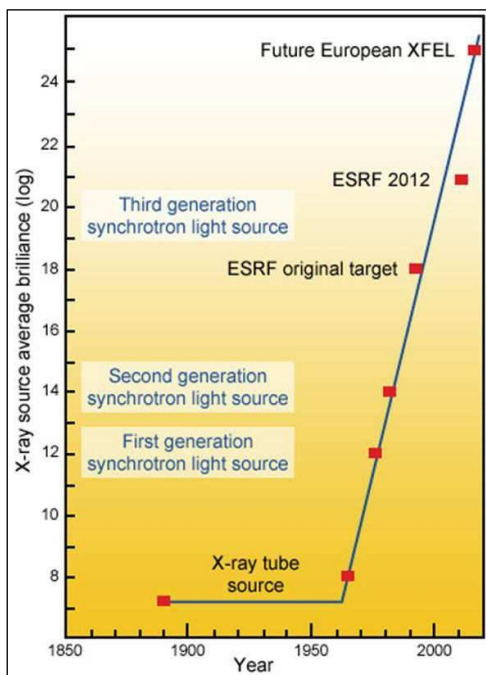
7. ábra Szinkrotronsugárzás kilépése

A kifejezetten szinkrotron sugárforrásként épített gyorsítók legfontosabb jellemzője, hogy rendelkezzenek mágneses rendszerrel, amely azt a célt szolgálja, hogy az elektronokat nagyon kis keresztmetszetű csoportokba koncentrálja, és az elektronok keresztirányú sebességét alacsonyan tartsa. A nagy intenzitás, a kis nyitási szögek és a kis forrásméret kombinációja nagyon nagy fényerőt eredményez.



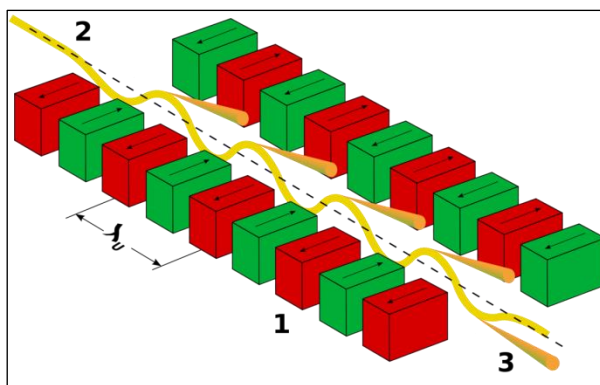
8. ábra Sugárzás kibocsátása

Első szinkrotronsugárzási forrásokként meglévő nagy energiájú gyorsítókat alkalmaztak, melyeket például nukleáris fizikai kísérletekhez terveztek. Ezeket nem optimalizálták a fényerő érdekében, és általában inkább gyorsítók voltak, mint tárológyűrűk, ami azt jelenti, hogy az elektronnyalábot folyamatosan injektálták, gyorsították és elvezették. A hatékony elektrontároló gyűrűk kifejlesztése után a hosszú távú működéshez megérett az idő az első, kifejezetten a szinkrotronsugárzásra tervezett, speciális létesítmények kifejlesztésére. 1980-as évek elején kezdték el a második generációs dedikált tárológyűrűk építését. A 2 GeV szinkrotronsugárzási forrás, az angliai Daresbury-ben volt az első úgynevezett „második generációs” szinkrotron sugárforrás közül.

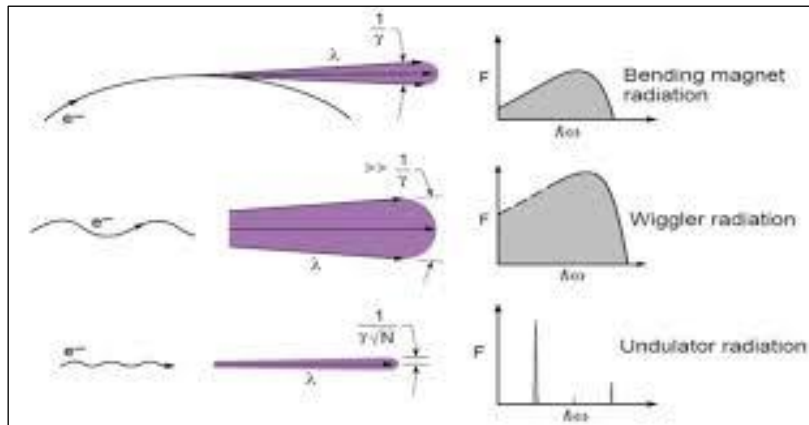


9. ábra A generációk fejlődése

Az 1990-es évek közepén egy harmadik generációs forrást építettek, ezúttal nagyrészt speciális mágnesek beillesztésével, melyek az úgynevezett undulátorok és wigglerok. A wigglerokban és undulátorokban állandó mágnesek helyezkednek el két sorban, az egymást követőek polaritása ellentétes. A töltött részecskék közöttük mozognak, sugárzás jön létre.



10. ábra Undulátor működése



11. ábra Források összehasonlítása

Az első harmadik generációs létesítmény az European Synchrotron Radiation Facility (ESRF, 6 GeV, Magyarország 2017-ben csatlakozott, ezzel lehetővé téve Magyar kutatók élvonalbeli kutatási projektekből való részvételét, különböző tudományterületek kutatóinak együttműködését; valamint a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem is partnerintézménye) kutatóintézetben található a franciaországi Grenoble-ban, amely 1994-ben kezdte meg a kísérleteket.



12. ábra ESRF

A legújabb harmadik generációs létesítmények a National Synchrotron Light Source II (NSLS II) a New York-i Upton Brookhaven Nemzeti Laboratóriumban és a svédországi Lundban található MAX IV. Az NSLS II építése 2009-ben kezdődött, a MAX IV körülbelül egy évvel később. Ezeknek a közepes energiátároló gyűrűknek a tervezett specifikációi újradefiniálják a szinkrotronok referenciaértékét - a tervek szerint 1 nm és 0,1 meV nagyságrendű térbeli és energia felbontást, míg a fényerő és az emissziós képesség 10^{21} foton/mm²/mrad²/0,1% sávszélesség és 0,5 nrad, javítja a korábbi teljesítményeket.

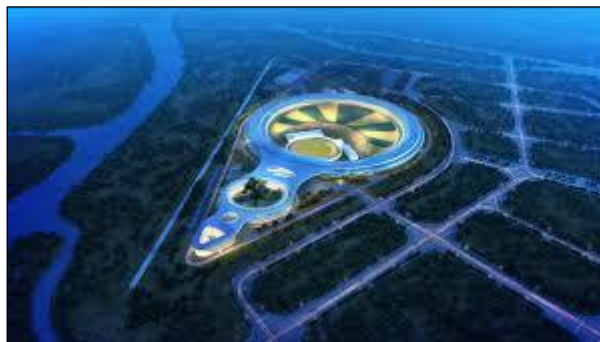


13. ábra NSLS II



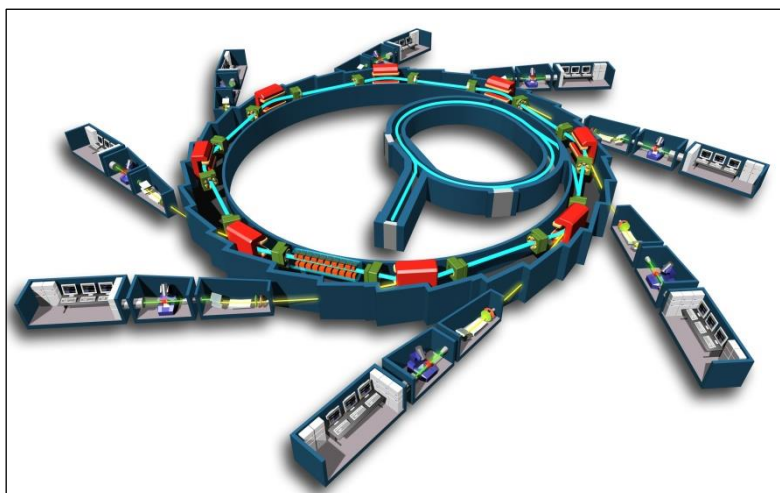
14. ábra A létesítmény berendezése

Fejlesztés alatt áll egy negyedik generációs berendezés is, amely az úgynevezett multi részecske koherens emisszió alapszik, amelyben az elektronok útja mentén fennálló koherencia vagy a hosszanti koherencia játsza a fő szerepet. Intenzitásuk sok nagyságrenddel haladja meg a most elérhetőket, időfelbontásuk pikoszekundum alatti, így a kémiai átalakulások követésére igen alkalmasnak tűnnek. [1] [4] [5] [6]

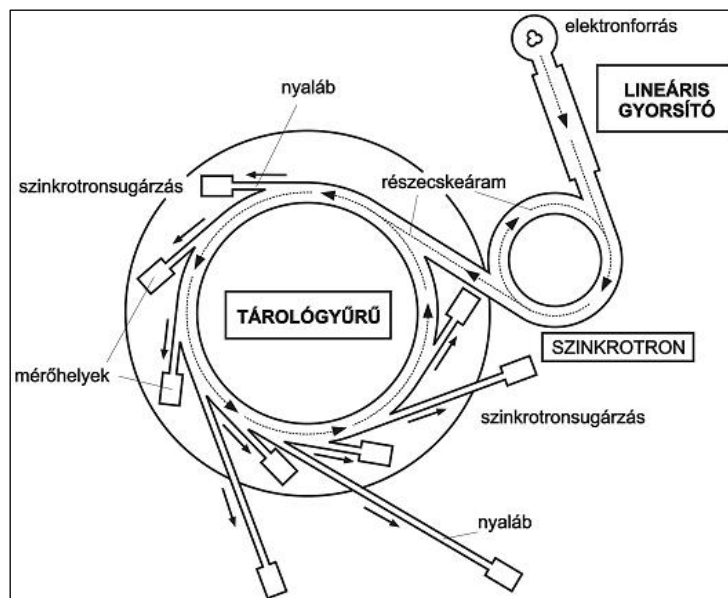


15. ábra Kína negyedik generációs létesítménye

A sugárzás előállítása



16. ábra Sugárzás létrehozása



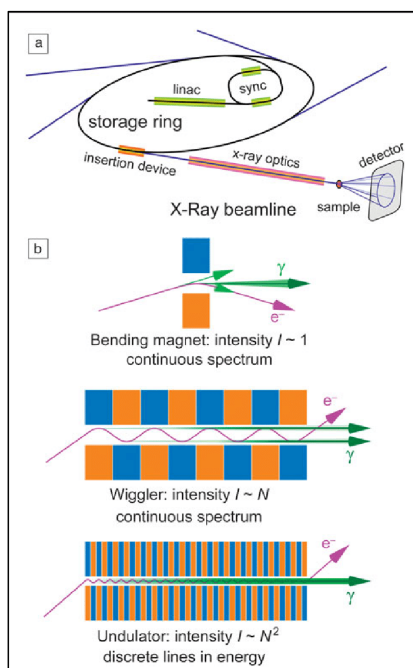
17. ábra Harmadik generációs szinkrotron felépítése

A gyorsítóba bejutott elektronok elektromágneses hullámokat bocsátanak ki. Ez a jelenség jól magyarázható a klasszikus antennával, ahol az elektronok vezetékeken haladnak, a gyorsulás nagyon gyenge, az emisszió pedig a rádiófrekvencia tartományban zajlik. Vákuumban növelhető az elektronok gyorsulása, és az emissziót az ultramagas frekvencia (UHF) tartományba lehet emelni, ekkor az elektronok energiája meglehetősen gyenge. Kör alakú, nagy energiájú elektron gyorsítóknál - több giga elektronvolt (GeV) elektronenergiával - a mágneses tér nagyon erős centripetalis gyorsulást indukál az elektronokban, $E \gg mc^2$ energiával, ahol m az elektron tömege. A gyorsulás néhány száz keV-ig terjedő elektromágneses hullám kibocsátást indukál a legintenzívebb gépekben. A sugárforrás alapvetően három részből áll: egy lineáris gyorsító, a szinkrotron és a tárológyűrű.

Az elektronokat a szinkrotronba viszonylag alacsony energiával, például több száz MeV-tal befecskendezzük be a lineáris gyorsítóból, ezután rögzített körkörös pályán gyorsulnak. Először a gyorsító sok órán keresztül felhalmozza és tárolja az elektronokat (vagy pozitronokat). A tárológyűrű részecskeforrását injektornak nevezzük. Az injektorokat két csoportba lehet sorolni, energiájuk és a tárológyűrű működési energiájának függvényében. Sok meglévő tárolótesten, a befecskendezési energia alacsonyabb, mint a tárológyűrű működési energiája. Ezekben az esetekben az elektronokat fel kell gyorsítani a működési energiára a tárológyűrű mágneses tereinek megfékezésével. A modern tárolótetekben azonban a befecskendező szelep energiája megegyezik az üzemi energiával. Ezt a sémát teljes energiabefecskendezésnek hívják.

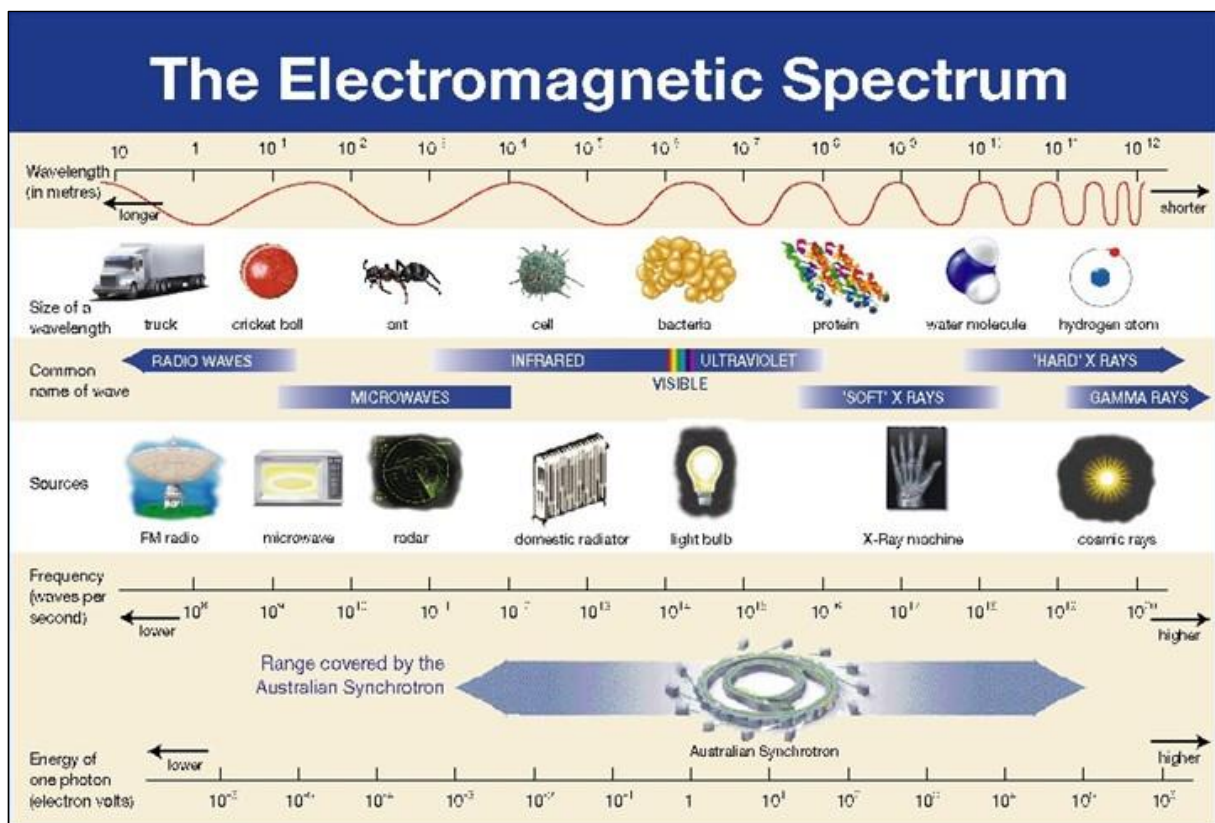
A mágneses mező végén az elektronokat impulzusmágnesek segítségével extrahálják. Ezt a ciklust rendszeres időközönként megismétlik. Az elektronszinkrotronok általában 1 Hz és 50 Hz közötti ismétlési frekvencián működnek. A szinkrotron egy sor mágnesből áll, amelyek az elektronnyaláb összpontosítására és hajlítására szolgálnak, és lineáris szakaszokból állnak, amelyek felgyorsítják a részecskéket. A mágneses tér a gyorsítás során megnő, annak érdekében, hogy az elektronok ugyanabban a körkörös úton tartózkodjanak, ahol energiájuk fokozatosan növekszik, a pálya sugara mindig állandó marad.

Általában a szinkrotron frekvenciáját idővel meg kell változtatni, hogy a részecskék és a mezők teljes mértékben szinkronizálódjanak. Az elektronszinkrotronok esetében azonban a gyűrű körüli elektronok fordulatanak ideje nem függ az energiától, mert a sebességük állandó, még viszonylag alacsony energiák esetén is. Ezért egy rögzített frekvencia elegendő az elektron szinkrotronokhoz. Ez leegyszerűsíti azok felépítését, működtetését, és megkönnyíti a magas ismétlődési sebességgel történő működtetést. A szinkrotronokat általában két osztályba sorolják; a lassú szinkrotronok és a gyors szinkrotronok. Az 1 Hz körül működő, lassú ciklusú szinkrotron egyenáramú áramköröket használ a mágneses mezők generálására, a mező hullámforma háromszög alakú. Másrésztől a gyors ciklusú szinkrotron 10-50 Hz frekvencián ismétlődik, és rezonancia áramköröket alkalmaz a mágneses mezők generálására. Ennélfogva a hullámforma szinuszos. Általánosságban elmondható, hogy a rövidebb befecskendezési idő jobb a szinkrotron sugárzás kutatására, a rendelkezésre álló idő növelésének szempontjából. A befecskendezés ideje az ismétlési sebességtől és a részecskék számától függ, amelyet az injektor képes biztosítani minden ciklusonként. Mivel korlátozott az intenzitás, amelyet egy ciklusban fel lehet gyorsítani, a gyors ciklusú szinkrotron rövidebb injekciós időt biztosít nekünk. A műszaki egyszerűség és az építési költségek szempontjából azonban a lassú ciklusú szinkrotron felülmúlhatja a gyorsciklusú szinkrotronot, mivel az előbbi legtöbb műszaki alkatrészének fenntartása költséghatékonyabb. A gyors ciklusú szinkrotronban a mágnesrendszernek szokatlan nagyteljesítményű rezonancia áramköri technikára van szüksége, míg a lassú ciklusú szinkrotronhoz használt tirisztoros egyenirányító népszerű elem az energiaellátásban. A gyors ciklusú szinkrotronok esetében bonyolult hullámozott vagy kerámia kamrákra is szükség van a gyorsan változó mágneses mező által generált örvényáramok csökkentése érdekében.



18. ábra (a) Általános felépítés, (b) Források alapelve, ahol N:pólusok száma; γ :röntgen fotonok

Végül, amikor elérték a megfelelő energiát, az elektronok átkerülnek a tárológyűrűbe. Itt a mágneses mező állandó értéken van. A tárológyűrűn vannak olyan gyorsulási szakaszok, amelyek kompenzálják a szinkrotronsugárzás miatti energiaveszteségeket. A tárológyűrű körül a tárolt elektronok sugárzása felhasználható különféle kísérletekre. Ez a fotontermelés rendkívül érdekes a spektroszkópia szempontjából. A sugárnyalábót elvezetik, s megfelelő optikai elemekkel, tükrökkel, monokromátorokkal, résekkel alakítják energiáját és méreteit, majd a kísérletek színhelyére, a mérőhelyekre vezetik.

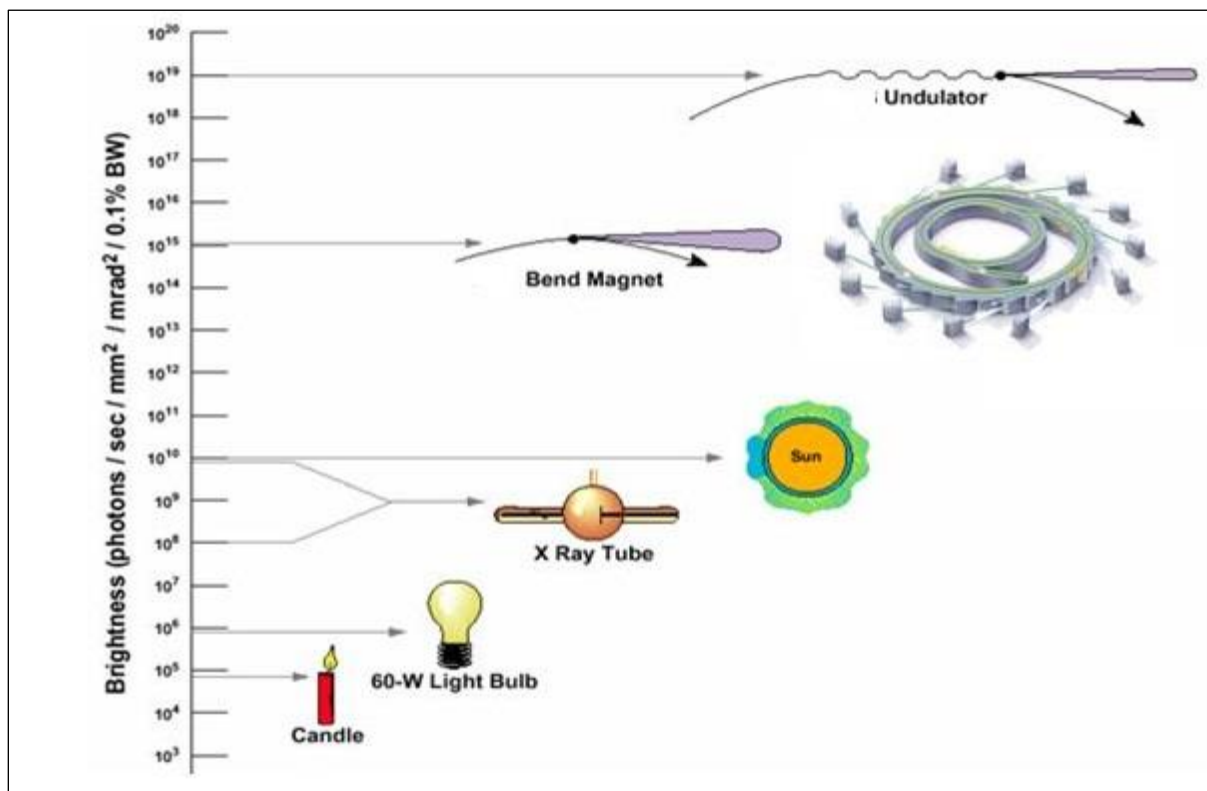


19. ábra Az elektromágneses skála

A szinkrotronsugárzásnak számos kiemelkedő tulajdonsága van: folyamatos spektrum az infravörös és a röntgen rész között; nagy intenzitású, a tárológyűrűben felhalmozódott nagy áramú elektronoknak köszönhetően; a kibocsátott sugárzás kollimációja a kibocsátó részecskék pillanatnyi repülési irányában (a szögeloszlás 1 mrad nagyságrendű), (sugárnyaláb fényoptikailag történő párhuzamosítása); lineáris polarizáció, az elektromos vektorral, a pálya síkjával párhuzamosan; kör alakú polarizáció a pálya síkja felett és alatt; a forrás nagy fényereje az elektronnyaláb kis keresztmetszete és a sugárzás magas kollimációs foka miatt; a forrás összes tulajdonságának abszolút kiszámíthatósága; a forrás tisztasága, mivel a fénykibocsátás rendkívül nagy vákuumban zajlik, ellentétben a gázkisülések vagy szikralámpák helyzetével. [7]

A szinkrotronsugárzás alkalmazhatósága

A szinkrotron sugárforrás fejlődésének legnyilvánvalóbb iránya a nagy fényerősségű sugárforrások biztosítása, és ennek következtében az alacsony elektronnyaláb emisszió. Az ilyen források vonzereje az, hogy a kis forrásból származó sugárzás fókuszálható egy rendkívül fényes besugárzott terület biztosítására a célszáron.



20. ábra Sok nagyságrenddel fényesebb, mint a hagyományos források

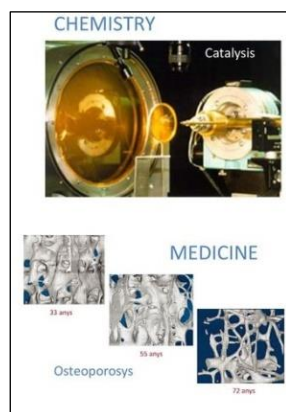
Az ilyen működés képessége különösen akkor fontos, ha a vizsgálandó anyag csak kis mennyiségben áll rendelkezésre, amint ez gyakran fordul elő az enzim-, fehérje- vagy víruskristályok esetében. A sugárzóképesség a tárológyűrű energia megválasztásától is függ. A kemény röntgenforrások iránti igény azt jelenti, hogy az elektronok energiáját növelni kell a 10-15 évvel ezelőtt épített forrásokhoz képest. Az ESRF (Grenoble, Franciaország), az Advanced Photo Source (APS, az Argonne Nemzeti Laboratórium, Chicago közelében, USA) és az SPring-8 (Nishi Harima, Japán) elektronnyaláb energiája 6, 7 és 8 GeV. A szinkrotron sugárzás felhasználóinak elvárása, hogy ezek a források legalább olyan fényesek legyenek, mint az alacsonyabb energiájú energiák, további követelményeket támaszt az alapforrás kialakításával kapcsolatban. Például egy, a Berkeley ALS-től a Grenoble ESRF-ig terjedő energia növekedésének négyszeres tényezőjét részben ellensúlyozták a hajlító mágnesek számának 36-ról 64-re történő növelésével, amely az egyes dipólok hajlító szögét 10° -ról csökkentette $5,625^\circ$ -ra. Ezeknek a forrásoknak a nagy területét részben a nagy energia határozza meg, de elsősorban a hosszú egyenes szakaszokra vonatkozó követelmény a többpólusú undulátorok és wigglerok számára.

Az elmúlt években tervezett és épített szinkrotron sugárforrások nagy hangsúlyt fektetnek ezen eszközök (többpólusú wigglers és undulátorok) beépítésére a tároló gyűrű szerves részeként, az első működési napoktól kezdve. Ez azt jelenti, hogy ezen eszközök lehető legjobb felhasználása érdekében az elektronnyaláb paramétereit a lehető legjobban kell egyensúlyba hozni a behelyezett eszköz tulajdonságaival. Az alacsony elektronnyalábsugárzás szükséges, de nem elegendő kritérium a magas hullámosság eléréséhez. Ha maximalizálni akarjuk a kimeneti fényerőt, akkor az elektronnyaláb szögbeli eltérésének legalább ugyanolyan nagyságrendűnek kell lennie, mint a sugárzási szög intervallumának. Az ESRF-et figyelembe véve az elektronok 4,7 MeV-ot veszítenek a tárológyűrűben, és további 1,5 MeV energiaveszteség történik az injektáló eszközökben.

A szinkrotronsugárzás előállítási folyamatai már egyértelműek a mai világban, ez viszont nem teljesen igaz a forrásokra. A források változtatásával kapcsolatos eredmények már a felhasználók számára kínált fonsugarak jellemzőinek jelentős javulásához vezettek. A tapasztalatok azt mutatják, hogy bár a tárológyűrű paramétereit meghatározzák a tervezési szakaszban, elengedhetetlen, hogy a kialakítás elegendő rugalmasságot engedjen meg az új és előre nem látható követelmények beépítéséhez.

A jövőben várható fejlemények a következők: Mágneses rács, amely lehetővé teszi a tárológyűrű működtetését több béta funkció üzemmódban; rádiófrekvenciás rendszerek, amelyek lehetővé teszik a sugár által indukált instabilitások vizsgálatát és kiküszöbölését, melyek korlátozzák a sugár élettartamát és az adott áramot; rövid impulzus sugárzás (= 1 ps) biztosítása az időzített kísérletekhez; lehetőség, hogy új mágneses eszközöket illesszenek az egyenes szakaszokba spektrális és/vagy polarizációs tulajdonságokkal rendelkező sugárzás előállításához; az egyes mágnesek koordinátáinak pontos vezérlése a rácson belül a vízszintes és a függőleges betatron oszcilláció összekapcsolásának ellenőrzése céljából; nemcsak az elektronnyaláb helyzetének és szögének történő változtathatósága, hanem egyéb sugárparaméterek, például a sugárkibocsátás és az alacsony amplitúdójú rezgések folyamatos ellenőrzése is lehetővé váljon; a tároló gyűrű meghibásodásának minden forrását körültekintően meg kell vizsgálni és figyelemmel kell kísérni a kísérleti program zavarainak kiküszöbölése érdekében. [8]

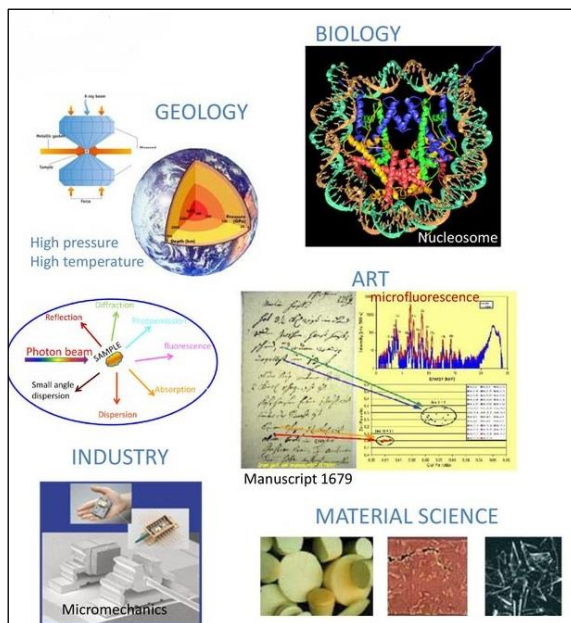
Rendkívül sok területen alkalmazható a szinkrotronsugárzás: orvosi képalkotás, anyagmérnöki, környezeti, műszaki, mezőgazdasági, gyógyszeripari területeken.



21. ábra Orvosi alkalmazhatóság

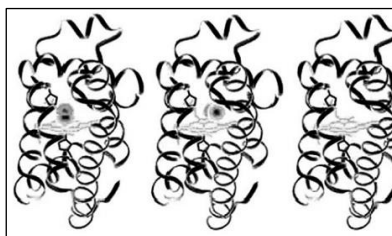
A fehérje-krisztallográfia teljesítményét nagymértékben fokozza a szinkrotronsugárzás alkalmazása, mely lényegesen rövid expozíciós idő mellett gazdag információt szolgáltat kevésbé stabil, gyenge minőségű kristályokról, melyek a hagyományos módszerekkel nem vizsgálhatók. [9]

A szinkrotronsugárzás használata az eddigi laboratóriumban is hozzáférhető módszereket lényegesen hatékonyabbá teszi, bővíti a módszerek alkalmazhatóságát a korábbinál kisebb és a sugárzással gyengébben kölcsönható minták vizsgálata felé.



22. ábra További felhasználási lehetőségek

Fő alkalmazhatóságuk a diffrakció és a képalkotás területén található. A nagy intenzitás, lerövidült mérési idő lehetővé teszi stabil fázisok vizsgálatát, az átalakulások követését, így például röntgendiffrakcióval monitorozták az S4N4 - (SN)_x polimerizációs reakciót és a cement vízfelvételét. A pulzált időszerkezetnek köszönhetően lefényképezhetőek a kémiai átalakulások lépései. A molekuláris biológiai változások is megfigyelhetőek.



23. ábra A szénmonoxid mioglobinnal alkotott komplexének bomlása (molekuláris biológia)

A nagy intenzitásnak és a kollimált nyalábnak köszönhetően a sűrű beeséses diffrakció, felületvizsgálati technika is vizsgálható. A felülettel csaknem párhuzamosan haladó röntgensugárzás nagyon kis mélységig (nanométer) hatol be az anyagba. A behatolási mélység változik a behatolási szög változtatásával, mellyel mélységszelektív szerkezeti elemzés kapható.

A röntgenholográfia, mely közvetlenül felderíti az atomok relatív elhelyezkedését és a sugárzás fázisát is alkalmazza.

További lehetőségek: mikronyaláb-analízis, mágneses cirkuláris dikroizmus (XMCD - X-ray Magnetic Circular Dichroism).

Koherencián alapuló alkalmazási lehetőségek: fáziskontraszt-tomográfia, ahol a törésmutatót megváltoztatják, szórt hullám valamint az eredeti hullám interferenciájából a fázishatárok képe összeáll a detektoron. [1]

Konklúzió

Az elmúlt évtizedekben folyamatosan fejlődtek a fejlett szinkrotron alapú technikák, különösen az anyagkutatás területén. Jelenleg számos létesítmény kerül kialakításra, korszerűsítésre és felújításra szerte a világon. A harmadik generációs források első 10–20 évében szerzett ismeretek és tapasztalatok alapján új berendezéseket telepítenek speciális célokra, például akkumulátor kutatásra, kereskedelmi társaságok számára. Ezen létesítmények készülékei, számos különféle szórás, diffrakciós és képalkotó technikákat kombinálnak. Ugyanakkor, a szinkrotron forrásokat, beleértve a szabad elektron lézereket, szintén továbbfejlesztették, hogy a szélsőségesebb körülmények legyenek elérhetőek, diffrakciós, koherens sugarakkal és ultrahang mérési skálákkal. Olyan speciális mintakörnyezeteket fejlesztettek ki, mint a nagynyomású készülékek, kémiai reaktorok, hőmechanikai processzorok, melyeket automatizált, intelligens és átfogó teljesítmények és algoritmusok egészítenek ki az adatok elemzésére. Az alkalmazások jövőbeni kutatási trendjeinek ki kell használniuk azok komplementaritását, például a neutron- és szinkrotronsugárzást a szerkezeti vizsgálatokhoz, a neutronokat és a muonokat a mágnesesség vizsgálatához, a fényszórást, a szinkrotronokat és a neutronokat az anyagok, a pozitronok és a szinkrotron dinamikájának tanulmányozásához, röntgensugár az állapotok, az ionok és a diffrakció elektronikai sűrűségének mérésére, a kristályhibák, az elektronok, a röntgen és a neutronok textúrájának elemzésére. Arra számítok, hogy ennek a területnek még fényesebb jövője lesz. [10]

Irodalomjegyzék

- [1] Vankó György, Vértes Attila, Szinkrotronsugárzás a kémiai szerkezetkutatásban, Fizikai szemle, 2002
- [2] Blewett, J. P., Synchrotron Radiation – Early History, Journal of Synchrotron Radiation, 1998, 135-139
- [3] http://abyss.uoregon.edu/~js/glossary/synchrotron_radiation.html
megtekintve: 2020.04.03.
- [4] Hulbert, S. L., Williams, G. P., Synchrotron radiation sources, Vacuum Ultraviolet Spectroscopy, 2000, 1–25
- [5] Philip Willmott, An Introduction to Synchrotron Radiation, Techniques and Applications, Wiley, 2011, 10-14
- [6] Radiation Approach, Springer, 2006, 59-69
- [7] H. Saisho, Y. Gohshi, Applications of Synchrotron Radiation to Materials Analysis, Analytical Spectroscopy Library – Volume 7, 1996, 2-15
- [8] Philip John Duke, Synchrotron Radiation Production and Properties, Oxford University Press, 2000, 231-238
- [9] Hermeicz István , Szinkrotronok a gyógyszerkutatásban - lehetőségek, Fizikai Szemle, 1998/3, 90
- [10] Kai Chen, Synchrotron radiation research in materials science, Materials Research Society, 2016, 437-440