

Az egzotikus atommagok szerkezete

Horváth Ákos

ELTE TTK, Atomfizikai Tanszék

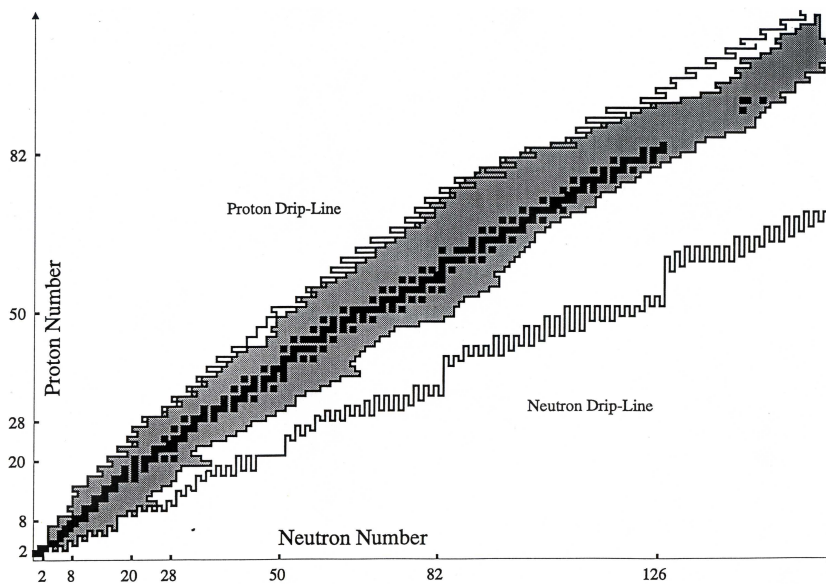
1. Felfedezetlen területek az izotópok térképén

1932-ben James Chadwick felfedezte a neutront, azóta tudjuk miből állnak a körülöttünk lévő anyag atomjainak közepén elhelyezkedő, és azok tömegének 99,99%-át tartalmazó, atommagok. A természet az atommagok felépítésére csak protonokat és neutronokat használ. Vannak más mikrorészecskék is, melyeket kísérletekben elő lehet állítani, de a természetben megtalálható atomok magjai csak protont és neutronot tartalmaznak. Az atommagban lévő protonok száma meghatározza az atomi elektronok számát, így az atom kémiai viselkedését. Megadja, hogy milyen elemről beszélünk. Az elemeket Mengyelejev a XIX. század végén periódusos rendszerbe helyezte el, melyről az elemek kémiai tulajdonságai megérthetők. Aston a XX. század elején felépített egy a korábbiaknál pontosabb tömegspektroszkópot, és megmérte a neon atomok tömegét, később sok más elem atomjainak tömegét meghatározta. Később kiderült, hogy egy-egy elem atomjának tömege nem mindig azonos. A különböző tömeget az atommagban lévő eltérő számú neutron adja. Ezeket hívjuk az adott elem izotópjainak. A körülöttünk lévő hétköznapi anyag általában olyan izotópokból áll, melyek maguktól nem alakulnak át. A radioaktivitás megértése óta tudjuk, hogy vannak olyan izotópok is melyek spontán átalakulnak egy másik atommagba. Ilyen például a ^{40}K , a ^{238}U és a ^{232}Th . Ezek felezési ideje hosszabb a Föld koránál. Ezért találhatjuk meg még mindig őket.

Érdekes kérdés, hogy a Föld atomjai hol keletkeztek. A legelső atommagok természetesen az ősrobbanásban keletkeztek, kb. 10 perccel a kezdet után. Az atommagok kialakulásának folyamata (a nukleoszintézis) a protonok és a neutronok keletkezésével indult, egy táguló és lehűlő környezetben. A nagy sebességgel mozgó részecskék ütközés során fúzióval egyre nagyobb tömegszámú izotópokat alkottak. A folyamat azonban a ^7Li atommagnál be is fejeződött. A 8-as tömegszámú atommagok ugyanis nagyon instabilak, gyorsan elbomlanak, és nem keletkezhetett az ősrobbanás hagyományos elméletében ennél nehezebb elem. A nehezebb elemek a sokkal később kialakuló csillagokban szintetizálódnak a csillag nagy tömegének gravitációs vonzása következtében előálló nagy nyomás és hőmérsékleti viszonyok segítségével, szintén fúziós reakciókban. Ez a folyamat a magfizikailag legkötöttebb izotópokig működik. Ezek a vas és a nikkell izotópjai. A nehezebb elemekhez kell egy ritka esemény, a szupernóva-robbanás. Ekkor a csillag külső részeinek anyaga nagy sebességgel dobódik szét a világűrben és a robbanáskor keletkező neutronok befogódnak az

ott lévő atommagokba ,és így alakulnak ki a nehezebb elemek. Ezek felezési ideje általában rövid, béta-bomlással elbomlanak. Majd újabb neutronokat tudnak elnyelni. Ez a folyamat egészen az uránig képes az izotópokat előállítani. A folyamat neve asztrofizikai r-folyamat ($r = \text{rapid, gyors}$), melynek egyes részletei még nem teljesen tisztázottak, de képes az ismert anyag elemösszetételének reprodukálására. Így tehát sok rövid felezési idejű izotóp is jelentősen hozzájárult a természet anyagának szintéziséhez. A Föld anyaga is egy szupernóva-robbanásban keletkezett. Akkor még jelen voltak a rövid felezési idejű izotópok, de mára már elbomlottak.

Az összes eddig ismert atommag rendszerezésére az izotópok térképét az izotóptérképet hívhatjuk segítségül. Ennek vízszintes tengelyén a neutronok száma, függőleges tengelyén a protonok száma van felmérve. Osszuk kis négyzetekre ezt a síkot úgy, hogy az egész proton és neutronszámokhoz tartozzanak a négyzetek. Így minden izotóp egy négyzetben foglal helyet. Az izotóptérképen jelen tudásunk szerint több mint 6000 izotóp található. Egy sorban mindig egy elem izotópjai helyezkednek el, egy függőleges oszlopban az azonos neutronszámot tartalmazó atommagok (az izotonok).



1. ábra: Az izotóptérkép

A legnagyobb rendszámú elem melynek felezési ideje hosszabb a Föld életkoránál, a ^{238}U . Felfedeztek azonban már több ennél nagyobb rendszámú izotópot is. Az izotóptérkép felső végét egyre alakítják napjaink magfizikai kísérletei. Nem lehet tudni, hogy az egyre nagyobb atommagok stabilitása hogyan alakul. Előfordulhat, hogy „mágikus” okokból szokatlanul stabil szerkezetek alakulnak ki, melyek képesek a sok proton taszítását legyőzve stabilizálni ezeket a nehéz atommagokat. Ezek a szupernehéz elemek, kutatásuk iránt a hetvenes években volt kitörő lelkesedés. Ma már tudjuk, hogy stabil elemekhez nem jutottunk, számos izotópot állítottak elő részecskegyorsítók mellett elvégzett kísérletekben, melyek felezési ideje elég nagy ahhoz, hogy az atommag tulajdonságait megvizsgáljuk. Az izotóptérkép jobb-felső része tehát még felfedezetlen terület.

Az újkor nagy felfedezői a Föld felszínének feltérképezése iránt érdeklődtek, és flottákkal hódították meg az ismeretlent. Napjainkban a Föld felszínéről szinte mindent tudunk, a világűrből

A Fazekasban kezdődött...

már szinte centiméter pontossággal lefényképezhetünk bármit rajta. Ha az atommagok térképére gondolunk analógiaként, akkor korántsem ilyen jó a helyzet. A több ezer ismert atommag egyre pontosabb ismerete mellett sajnos még ma sem tudjuk, mennyien vannak még. Sőt, az ismert felezési idejű, természetesen csak mesterségesen előállítható, atommagok nagy részéről nem ismerjük pontosan a tömegüket sem. Ezen túl sok más részletbe menő tulajdonságuk is egyelőre feltáratlan a tudományos kutatás számára. Az izotóptérkép ismeretlen tájaira részecskegyorsítók segítségével jutunk el a képzeletbeli utazások során. Az felfedező túrák ezen a térképen atommagfizikai kísérletek.

Egy másik nagy kérdés, hogy egy elem izotópjából hány van. Mi a legnagyobb tömegszámú izotópja az egyes elemeknek. Például, egy szénatom legtöbbször 6 protont és 6 neutron tartalmaz. A ^{14}C egy ismert radioaktív izotópja, ebben már 8 neutron van. Kérdés, hogy a 10, 12, 13 neutron tartalmazó atommag létezhet-e. Ha igen mekkora a felezési ideje. Az biztos, hogyha túl sok neutron pakolunk az atommagba, akkor az utolsó neutron már magától leválik róla. Ez a pontja az izotóptérképnek a neutron-leválási vonal. Itt van a térképünk (jobb) széle. Ugyanez elmondható a protonban gazdag oldalról. Ott elveszük a neutronokat a széntől, ekkor túl sok proton marad, és ezek elektromos taszítását nem tudja kompenzálni a neutronok által kifejtett magerő, és ez egy proton lelöködéséhez vezet. Ha ezt az összes elemre megállapítjuk, akkor kapjuk a proton-leválási vonal. Nem tudjuk pontosan ezek a vonalak hol helyezkednek el. Az izotóptérkép szélének felfedezése még várat magára.

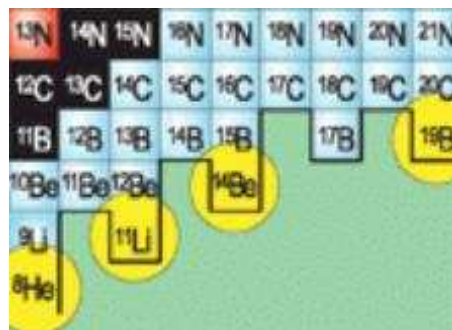
Kísérletekben sokáig csak a stabil atommagokat lehetett vizsgálni, később egyre több radioaktív izotópot állítottak elő valamilyen magreakcióval. Az első mesterséges radioaktív elemeket az 1930-as években például Enrico Fermi és a Joliot–Curie-házaspár állította elő, amikor neutronokkal bombáztak többféle céltárgyat. Napjaink egyik új technikája kezünkbe adta a lehetőséget, hogy feltérképezzük az izotóptérkép szélét, és egyre több rövid felezési idejű atommag tulajdonságait is kísérletben vizsgálhassuk. Ezek a radioaktív atommag-nyalábok.

2. Az egzotikus atommagok előállítása: radioaktív atommag-nyalábok

Az 1980-as évek elején jutott a részecskegyorsítók technikai fejlődése oda, hogy nehezebb ionokat is a fénysebesség negyede sebességre lehetett gyorsítani. A szupravezető mágnes használó ciklotronok voltak az első ilyen gyorsítók. Ez esetben a részecskék nagy tömege miatt kell nagy mágneses tér, de ilyen sebességre történő gyorsítás esetén már a relativisztikus tömegnövekedés is szerepet játszik. Ezért a ciklotron mágneses terét is gondosan kellett beállítani. Ezek nem kis technikai kihívások voltak. A nehéz ionok, amiket ilyen nagy sebességre felgyorsítottak először a nitrogén, argon stabil izotópjai voltak. Egy hagyományos magfizikai kísérlet úgy néz ki, hogy a gyorsítóban felgyorsított részecskét egy céltárgy fóliának lövik, és a keletkezett új részecskét egyszerre több részecskedetektorral vizsgálják. Vékony szilícium-detektorokkal a gyorsan mozgó nehéz ionok

tömegszáma és rendszáma megmérhető, a keletkezési pontból történő repülésük idejének méréséből pedig az energiájukat lehet kiszámolni. Így azonosíthatjuk a részecskéket. Az argon atommagokat például berillium céltárgyra irányítva az történik, hogy a két atommag centrálisan, vagy periférikusan ütközik egymással. A periférikus ütközésben a céltárgy berillium atommag lehasít néhány protont vagy neutront a gyors argonból. Ami keletkezik, az kisebb mint az argon, és radioaktív. Valamint nagy sebességgel mozog. A radioaktív nyalábok technikája akkor terjedt el, amikor az ilyen ütközésekben fragmentációval keletkező sok-sok atommag közül egy előre megadott atommagot lehetett kiválogatni. Ezt több dipólus-mágnes segítségével lehet elérni. az ilyen berendezés neve fragmentum-szeperator. A szeperatoron átjutó már kiválogatott részecskék alkotják a radioaktív nyalábot.

Az első nagyon izgalmas izotóp, amit így előállítottak a ^{11}Li volt. Ennek atommagjában 3 proton mellett 8 neutron helyezkedik el. Méltán nevezhetjük neutronban gazdag atommagnak. Az érdekes tény az, hogy a ^{11}Li felezési ideje 8,59 ms. Magfizikai időskálán ez nagyon hosszú idő. Egy magreakció lejátszódásának időegysége ugyanis, az az idő, ami alatt a fénysebességgel átjuthatunk egy atommag egyik oldaláról a másikra. Ez az idő kb. 10^{-23} másodperc. Ehhez képest a milliszekundum rendkívül hosszú. A ^{11}Li béta-bomlással bomlik, amit a gyenge kölcsönhatás irányít. Ez pedig gyenge az erősségét tekintve, ezért sokáig tart. Ez a körülmény segít a neutron leválási vonalhoz közeli izotópok vizsgálatához. A lítium még nehezebb izotópjait is megpróbálták előállítani, kevés sikerrel. Kimutatták, hogy pl. a ^{12}Li már azelőtt elbomlik egy ^{11}Li -ra és egy neutronra, mielőtt a detektorokig elérhetne. Igazából jóval azelőtt. A probléma ott kezdett érdekessé válni, amikor kiderült, hogy a ^{10}Li nem stabil. A ^9Li -hoz egy neutront nem lehet hozzáragasztani, de kettőt igen. A két neutron ugyanis segít egymásnak a magfizikai kötés létrehozásában. Két szabad neutron nem kötött rendszer, ezért ez a neutron-neutron vonzás gyenge, de éppen elég a ^{11}Li összetartásához. A lítium esetében tehát ismerjük a térkép szélét. Ez a 11-es izotóp. Ismerjük a héliumnál is. Ez a ^8He . Ennek magjában a két protonon kívül hat neutron foglal helyet. Háromszor több neutron, mint proton. Igen egzotikus atommag. A hidrogén legnehezebb izotópjá eddig a ^3H , de voltak kísérletek az ^5H előállítására, és detektálására eddig mindhiába.



2. ábra: Az izotóptérkép széle a könnyű, neutronban gazdag izotópok területén.

A berilliumok közül a 14-es az eddig felfedezett legnehezebb, a bór izotópjai közül a 19-es. Ezek felezési ideje mind a milliszekundumos tartományba esik. A két neutron „jótékony” hatását a ^{11}Li

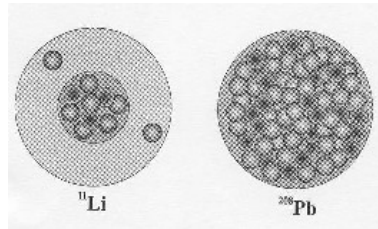
esetére már megvizsgáltuk. A 2. ábrán látható, hogy ez nem egyedi jelenség. ${}^7\text{He}$, ${}^{13}\text{Be}$, ${}^{16}\text{B}$ és ${}^{18}\text{B}$ sem létezik. Az izotóptérkép széle errefelé „cikk-cakkos”. A felsorolt nem stabil izotópokban az a közös, hogy páratlan számú neutron tartalmaznak (5, 9, 11, 13). az utolsó páratlan neutron kötésben tartására nem elég a magerő, de ha párja akad, akkor ketten alacsonyabb energiaszintet tudnak kialakítani. Ez ismert tulajdonsága az atommagot összetartó magerőknek: párkölesönhatás jellegű. A magfizikai oka az, hogy a két utolsó neutronnak is van spinkvantumszáma az atomi elektronokhoz hasonlóan. A Pauli-elv megengedi a két ellentétes spinű neutron azonos térbeli elhelyezkedésű pályán, és így relatíve erősebb kötést tudnak létrehozni. Mai ismereteink szerint létezik a ${}^{22}\text{C}$. A hat proton mellett 16 neutron helyezkedik el. Majdnem három a két részecske számának az aránya. A nagyobb rendszámú atommagok esetére még nem ismerjük a neutronleválási vonalat. A részecskegyorsítóinkban előállítható nehézion-nyalábok ütközéseiben a stabil atommagoktól távoli atommagok keletkezésének valószínűsége egyre kisebb. Felfele haladva az izotóptérképen a széle egyre távolabb van a stabilitás „völgyé”-től, és egyre kisebb valószínűséggel lehet ezeket „lecsapással” előállítani. Az egyre nagyobb intenzitású gyorsított nyalábok hozzák a sikert. Ezt azonban több folyamat is hátráltatja.

Napjainkban is fejlődnek a részecskegyorsítók. A radioaktív-nyalábok létrehozásának két mód-szere van. Az egyik a fragmentáció, amikor két nehézion periférikusan ütközik. A másik az ún. ISOL technika. Jelentése Isotope Separation On Line. Ebben az esetben egy másik fajta gyorsító használunk. Protonokat gyorsítunk, de sokkal nagyobb energiára. Néhány gigaelektronvolt energiájú protonok csapódnak egy vastag céltárgyba, és rengeteg ütközés zajlik le, sok új izotóp keletkezik. Ezen izotópokat kémiai és más gyorsítós módszerekkel „kirántják” a céltárgyból, és egy másik gyorsítóba vezetik be. A protonnyaláb nagy intenzitása segít, de az izotópok kiszedése nehéz. A legutóbbi évek egyik legjobban működő megoldása a két ciklotron egymás utáni összekapcsolása lett. Itt az első ciklotronba nagy intenzitással lehet az ionokat bejuttatni, mert nem az összes elektront szakítják le az atomokról. Ezeket gyorsítja az első ciklotron, majd felgyorsítva már sokkal könnyebb megszabadítani az utolsó elektrontól is az atommagot, hogy a kísérletekben használt teljesen ionizált atommagot állítsuk elő. A jövő gyorsítói is komplex rendszerek lesznek, keverednek majd bennük a két módszer és az összekapcsolt ciklotronok előnyös tulajdonságai. Az USA-ban már létezik egy ilyen nagy gyorsítókomplexumra a terv, neve RIA (Rare Isotope Accelerator = Ritka Izotópok Gyorsítója). A RIA gyorsítóval az izotóptérkép széle a közepes tömegű ($A \approx 100$) izotópokig feltérképezhető lesz.

3. Atommagszerkezetek az izotóptérkép szélén.

Az első megrázó kísérletet a ${}^{11}\text{Li}$ -gyel végezték el a kutatók. A szokásos céltárgy bombázás során a ${}^{11}\text{Li}$ egy ${}^9\text{Li}$ -ra és két neutronra esett szét. A folyamatban a neutronok detektálása nehéz technikai munkát igényel, a töltött ${}^9\text{Li}$ detektálása könnyebb és pontos. Isao Tanihata és munkatársai végezték az első olyan mérést, ami a ${}^{11}\text{Li}$ méretét kívánta meghatározni. A mérés elve a következő. A kiütött ${}^9\text{Li}$ mag bombázó iránnyal párhuzamos lendület-komponensét határozták meg a kirepülés

irányának és a lendületvektor nagyságának detektálása után. Ezt a ^{11}Li eredeti sebességével mozgó koordináta-rendszerbe transzformálva a tömegközépponti impulzus eloszlását mérték meg. Ez a 0 körüli Gauss-görbe alakú eloszlás volt. Megmutatta, hogy a ^9Li atommag a ^{11}Li -ban milyen longitudinális sebességeloszlással rendelkezik. A ^{11}Li -ban a ^9Li mellett elhelyezkedő két neutron összes lendülete a ^9Li lendületének természetesen a mínusz egy-szerese. A neutronok lendületének bizonytalansága abból adódik, hogy be vannak zárva az atommagba, és a Heisenberg-féle határozatlansági reláció miatt a hely bizonytalansága lendület-bizonytalansággal jár: $\Delta p_x \cdot \Delta x \approx h/2$. A lendület eloszlásának szélessége ílymódon mutatja meg a ^{11}Li méretét. Az eredmény meglepő. A ^{11}Li mérete a ^{208}Pb méretéhez közel esik.



A nagy méret magyarázata az, hogy a szokásos méretű ^9Li középpont körül a két neutron kis sűrűséggel „elkenve” helyezkedik el. A kérdésnek van kvantummechanikai magyarázata is. A két-neutron leválasztás energiája ebben az esetben 200 keV, a magfizikai kötésekhez képest nagyon kicsi érték. A két-neutron hullámfüggvénye a ^9Li vonzó potenciálgödrén kívüli térészben, ahol már nincs vonzás, egy (radiálisan) exponenciális lecsengésű hullámfüggvény a Schrödinger-egyenlet szerint. A lecsengés mértéke a neutronok kötési energiájától függ. Kis kötési energia esetén lassan cseng le az exponenciális. Jelen esetben az izotóptérkép szélén a kötés már olyan gyenge, hogy a neutronok sűrűségeloszlásának exponenciális lecsengése nagy térrészre terjed ki. Az ilyen neutronszerkezetet neutron-glóriának hívják.

A magfizikai kutatások a neutron-glóriában elhelyezkedő neutronok pályáinak tulajdonságait (pl. alakját) is fel szeretnék deríteni. A két lehetőség közül az egyik a gömbszimmetrikus és a középpont felé egyre sűrűsödő s -típusú sűrűségeloszlás (1 neutron sűrűségeloszlása!), vagy a másik a középpontban 0 valószínűséggel megtalálható p -típusú pálya. Ez utóbbin a neutron nagyobb sebességgel mozog az atommag közepe körül. A glória-neutronok sebességét meg lehet vizsgálni kísérletileg is. Ezt a neutronot ki kell ütni, gyorsan és határozottan úgy, hogy a belső mozgását még megtartsa. Az így kilökött neutronok sebességeloszlása megadja a pálya típusát. A kísérletek azt mutatták, hogy a ^{11}Li -ban például, a külső neutronok egy ideig gömbszimmetrikusan keringenek, de esetenként p -pályákra állnak. A pálya egy keverék állapot tulajdonságait mutatja.

Érdekes kérdés volt a ^8He szerkezete is. A ^6He és a ^{11}Li kétneutronos glóriával rendelkezik. A ^8He szerkezete is lehet, hogy egy ^6He körül keringő kétneutronos glória, de lehet, hogy más. A kísérletekben a ^8He -ot ólom atommag mellett elszárgulva az elektromágneses térrel részecskére szedték, és kimutatható volt, hogy a ^8He -ben egy alfa-részecske körül 4 neutron egymáshoz hasonló pályát elfoglalva helyezkedik el, tehát a várakozástól eltérő szerkezetet mutat.

A Fazekasban kezdődött...

4. Rövid felezési idejű izotópok neutronbefogása.

Az első fejezetben leírt r-folyamat felelős a vasnál nehezebb elemek létrehozásáért. Ez szupernova-robanásban történik. A szupernova-robbanás elméletét napjainkban dolgozzák ki a kutatók. A részletes számítógépes modellek egyre több hatást vesznek figyelembe, de még mindig nem írják le teljesen jól a folyamatot. A szupernova-robbanás során létrejövő magreakciók pontos leírásához az ott jelen lévő atommagok neutronbefogási valószínűségeit kellene kísérletekből jól ismerni. De a kérdéses atommagok rövid felezési idejű izotópok. Nem lehet őket hagyományosan neutronokkal bombázni, mert a belőlük képzett céltárgy a kísérlet első percében elbomlik. Megfordíthatnánk a szerepeket, a neutron legyen inkább a céltárgy és a rövid felezési idejű izotópokkal bombázzuk őket. Tiszta neutron céltárgy nincs. De a rövid felezési idejű izotópokat már elő tudjuk állítani, fel is tudjuk őket gyorsítani a radioaktív-nyaláb technika segítségével. A tiszta neutron céltárgyat neutronnal dúsított céltárggyal lehet helyettesíteni. Ilyenkor hidrogénben gazdag szilárd anyagokat dúsítanak fel deutériummal, amiben egy neutron helyezkedik el eléggé szabadon. A baj csak az, hogy ez nem egy szabad neutron, hanem 2,2 MeV-tal kötött, és hozzá van kötve egy proton is. Ezen effektusokat korrekcióba kell venni, és módosítani az eredményeket. Ez nehéz feladat, és nagy lesz a mérési eredmények bizonytalansága ilyenkor. A nehéz elemek keletkezése kutatása mégis lehetséges. Elvégezhetjük ugyanis az $A+n \rightarrow Y+\gamma$ neutronbefogás helyett az $Y+\gamma \rightarrow X+n$ inverz reakciót. Ilyenkor egy másik, szintén radioaktív nyalábot kell gyorsítani és gamma-foton céltárgyra kell ütköztetni őket. Gamma-fotonokból álló céltárgy sem hétköznapi dolog. A relativisztikus effektusok segítenek. Egy ólom atommag elektrosztatikus tere centrális, és jó erős. Ha egy ilyen objektumot a fénysebesség negyede sebességgel közelítünk meg, akkor a mozgó rendszerben az elektromágneses tér másnak tűnik. Felbonthatjuk a mozgó rendszerben a teret elektromágneses síkhullámok összegére, és ezek a síkhullámok felfoghatók úgy is, mint fotonok. Igazából ezeket virtuális fotonoknak szokás hívni. Egy átlagos nehézion-ütközés energiái mellett a virtuális fotonok energiája eléri a néhány MeV energiát. Így kapunk gamma-fotonokból álló virtuális céltárgyat. Ez a neutronbefogási valószínűségek (hatáskeresztmetszetek) meghatározásának módja. A közeljövőben számos (egyre nehezebb) ilyen gyorsan bomló részecske neutronbefogását lehet meghatározni.

5. Meddig élnek a szupernehéz elemek?

Az uránál nagyobb rendszámú elemek felezési ideje kisebb a Föld koránál, de számos olyan atommag létezik ebben a tartományban is melynek felezési ideje akár több év is lehet. Atomreaktorban előállítható több olyan atommag, melynek rendszáma nagyobb, mint 92 (ez az urán rendszáma). A Mengyelejev-féle periódusos rendszerben a rádiumnál indul az aktinidák sora. Ezen elemek atomhéjában az f elektronpálya töltődik, és ide 15 elektron fér el. Az urán a 4. aktinida. Egyre nagyobb rendszámok fele haladva a transzurán elemek következnek. A következő 11 transzurán elem szintén aktinidák sorába tartozik, 104-es rendszámú rutherfordium (Rf) azonban a rádium mellett a d-mezőben a periódusos rendszer 7. sorát folytatja. A Rf, és az utána következő még

nehezebb elemek a transzaktinidák. Ezek mind szupernehéz elemek. Szupernehéznek hívjuk a 250-nél nagyobb tömegszámú elemeket.

A nehézion-ütközések technikai megvalósítása óta egyre nagyobb intenzitással keresik a szupernehéz elemeket. Az atommagok leírásának héjmodellje ugyanis meghatározza, hogy vannak olyan magszerkezetek, melyek a nemesgázok elektronszerkezetének analógjai. Lezárt pályákat tartalmaznak, és ezek stabilitása a szokásosnál jóval nagyobb. Az ilyen lezárt pályákat tartalmazó atommagokat mágikus atommagoknak nevezzük. A ^{207}Pb duplán mágikus atommag (a protonok és a neutronok is lezárt héjakat alkotnak). Ha elég sok protont és neutronot tudunk behelyezni az atommagba, akkor elérjük, hogy a következő héj is betöltődik, és ez nagy stabilitást ad az ilyen magnak. Kérdés, hogy a protonok taszítását ez ellensúlyozni tudja-e. Az ilyen mágikus számú atommagok környékén nagyobb felezési idejű szupernehéz elemeket várunk. Ezért keresik nagy izgalommal a kutatók az egyre nehezebb és nehezebb elemeket.

A transzaktinidák előállításának egyetlen napjainkban ismert módja, hogy két atommagot összeolvunk, lehetőleg teljesen centrálisan, és az szeretnénk, hogy ezek teljesen olvadjanak össze, fúzióváljanak. Néhány neutron keletkezhet a reakcióban. Ha túl nagy sebességgel ütköztetünk, akkor a fúzió helyett fragmentáció következik be, amikor több részre szétesnek a kezdeti atommagok, nem lesz szupernehéz elem. Ezért óvatosan kell gyorsítani. Az atommagok egymást a pozitív töltésük miatt taszítják, csak ezt a taszítást kell legyőzni, ennél kicsit több mozgási energia már elegendő. Az ilyen reakciókban kb. 150 MeV-ra kell felgyorsítani a nyalábrészecskéket. A fúziós reakciók valószínűsége igen kicsi, a fragmentáció sokkal többször következik be, ezért több hétig is eltart egy ilyen kísérlet. A világon több helyen is alkalmazzák ezt a technikát: Németországban Darmstadtban a GSI gyorsítónál, a francia GANIL intézetben, a kaliforniai Berkeley Nemzeti Laboratóriumban, a Moszkva melletti Dubnában és Tokyo-ban a RIKEN kutatóintézetben. A dubnai gyorsítónál ^{48}Ca ionokat gyorsítanak és urán, tórium és ^{249}Cf céltárgyra bombázzák ezeket. A ^{48}Ca duplán mágikus és nagyon sok neutronot tartalmaz, de sajnos drága az előállítása. Ezekben a reakciókban az összeolvadás során néhány (3-5) neutron elhagyja a reakciót. Ha több, mint 1 neutron keletkezik, „forró” fúzióról beszélünk, ha csak 1 vagy egy sem, akkor „hideg” fúzióról. (Természetesen ezek a terminológiák, csak a szupernehéz elemekre vonatkoznak most.) Így forró fúzióval kicsivel kisebb tömegszámú elemeket tudunk előállítani, mind a tiszta fúzió engedné. A jelenlegi világcsúcsot Dubnában sikerült elérni a 118-as rendszámú elem is létrehozásával. Más laboratóriumban elvégzett hitelesítő kísérletekre azonban még várni kell egy keveset.

A szupernehéz elemek előállításának másik módja, hogy nem a neutronban leggazdagabb atommagot ütköztetjük, hanem egy nehezebb nagyon stabil atommag neutronban gazdag izotópját az ólommal, amely duplán mágikus. Ilyenkor kevesebb neutronot veszítünk a fúzió során. Így állították elő korábban például a ^{271}Ds (darmstadtium) atommagot (felezési ideje 51 ms) a $^{64}\text{Ni}+^{207}\text{Pb}$ reakcióban, és a $^{64}\text{Ni}+^{209}\text{Bi}$ reakcióban a 111-es rendszámú ^{272}Rg atommagot (felezési ideje 1,6 ms). Mindkettőt a GSI gyorsítónál. A röntgenium (vagy roentgenium) az az elem, melynek a legnagyobb a rendszáma azok közül, melyek nevét a nemzetközi fizikus szervezet a IUPAP már elfogadta.

A szupernehéz atommagok felezési ideje a másodperc vagy ezredmásodperc nagyságrendjébe

esik. A $^{290}_{114}$ -es atommag felezési ideje például 21 másodperc az eddigi mérések szerint. Ez a leghosszabb a 112-nél nagyobb rendszámú és már ismert elemek esetére. A szupernehéz atommagok legvalószínűbb bomlási módjai az alfa-bomlás és a spontán hasadás. Ezek során a mag pozitív töltése csökken, ezzel csökkentve a sok proton egymás közti taszítását. A szupernehéz elemek alfa-bomlási láncokban csökkentik a töltésüket, és a végén alacsonyabb rendszámú transzurán vagy egy spontán hasadó atommag keletkezik. Ezeket az alfákat időben könnyen lehet követni, ha a fúzió után a vizsgálni kívánt atommagot elektromágnesekkel elkülönítjük a többi keletkezett, de számunkra nem érdekes atommagtól. Ilyen megoldás például a SHIP (Separator for Heavy Ion reaction Products) Darmstadtban. Az egymást követő alfa-bomlások alapján lehet őket azonosítani, ha a lánc egy már ismert atommag alfa-bomlásában ér véget. Más esetben elektromos vagy mágneses térben történő eltérítés alapján direktben is megmérhető a tömegük és a kötési energiájuk is.

Látszik, hogy még több neutron valószínűleg még jobban stabilizálná a jelenlegi tudásunk szerinti legnehezebb magokat. Ezt alátámasztja az a kísérleti tapasztalat, hogy az egyre nagyobb neutronszámú izotópjai az új elemeknek egyre hosszabb felezési időt mutatnak átlagosan. Az eddig ismert rutherfordiumok közül például a ^{268}Rf felezési ideje a leghosszabb: 6 óra. De igaz ez a $Z=112, 114, 116$ -os elemekre is. A $Z=118$ -ból egyelőre csak egyet ismerünk. Ez azt mutatja, hogy a nagyobb neutronszámú régióban egyre stabilabb elemeket várhatunk, újabb szupernehéz elemek felfedezése várható az előállítási technikák, és a gyorsítók fejlődésével.

Érdekes kísérleteket végeztek már el a szupernehéz elemekkel, melyek a kémiai tulajdonságaikat – tehát az elektronfelhő szerkezetét – vizsgálták. Az On-Line kémiai kísérletekben az a kérdés például, hogy milyen hőmérsékleten ragad ki egy atom a környező fémre. Előállították már a szupernehéz elemek molekuláit is. Például a periódusos rendszerben az ozmium alatt elhelyezkedő Hs ($Z=108$) hassium ugyanolyan HsO_4 molekulát képez, mint az ozmium. Az Rg az arany alatt elhelyezkedő szupernehéz elem elektronszerkezete azonban a számolások előrejelzései szerint más elektronkonfigurációt vesz fel. Az elektronpályák energiájának sorrendje ugyanis megváltozhat. A $Z=112$ -es elem esetén az a váratlan, hogy a higany alatt elhelyezkedő atom olyan inaktív lesz, hogy nemesgáz tulajdonságokat mutathat a radonhoz hasonlóan.

A közepes energiájú részecskegyorsítók mellett alkalmazott radioaktív atommag-nyalábokkal fel lehet deríteni az izotóptérkép még ismeretlen területeit. Napjainkban ezek a területek a stabilitástól távoli rendszám és neutronszám tartományokban vannak. A nagy neutronfelesleggel rendelkező atommagok szerkezete és a szupernehéz elemek léte az újdonság. Radioaktív nyalábokkal lehet vizsgálni olyan atommagokat és reakciókat, melyek a Föld anyagának keletkezésekor mentek végbe, és napjainkban még nem ismerjük őket pontosan.

A Fazekasban kezdődött...