



Strål
säkerhets
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Per Andersson
Fredrik Nielsen
Daniel Sunhede

Forskning

2015:13

Samband mellan anrikning av uran
och andra ämnen – en studie från
ett icke-spridningsperspektiv

SSM perspektiv

Bakgrund

Sverige har en exportlagstiftning som kontrollerar utförelse av speciellt känslig utrustning som kan användas för bl.a. tillverkning av kärnvapen. Syftet är att förhindra att någon stat eller organisation införskaffar sådana vapen. Utrustningen det är frågan om har ofta en legitim användning i civil industri men kan ha vissa speciella egenskaper som även gör den användbar för kärnvapenframställning. Det är Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM, som handlägger ärenden som rör export av kärnämne och kärnteknisk utrustning. Det är viktigt att myndigheten har tillräcklig och aktuell kunskap i ämnet för att korrekt kunna bedöma inkomna exportansökningar. Totalförsvarets forskningsinstitut, FOI, fungerar som teknisk rådgivare till SSM i exportkontrollärenden. FOI har tidigare studerat andra områden inom kärnbränslecykeln med fokus på icke-spridning och exportkontroll på uppdrag av SSM, varav de senaste berör fjärde generationens reaktorer (SSM rapport 2013:18) och upparbetning av utbränt kärnbränsle (SSM rapport 2013:32).

Syfte

SSM har sett ett behov av att kompetensen bevaras och förnyas inom exportkontrollområdet. FOI har därför fått i uppdrag att studera exportkontrollerade produkter och den här rapporten är resultatet av ett sådant projekt. FOI har genomfört en studie om olika teknologier för att separera isotoper och deras användbarhet för att även anrika uran. Den utrustning som behövs för anrikning av uran är exportkontrollerad. Samtidigt har det vuxit fram en marknad för andra isotopanrikade ämnen, till exempel för användning i elektronikindustrin eller för medicinska applikationer. Dessa ämnen kan anrikas med utrustning som helt eller delvis sammanfaller med den som används för anrikning av uran. En aktör skulle kunna köpa en anläggning eller komponenter under förespegligen att dessa ska användas för anrikning av andra ämnen än uran.

Rapporten beställdes för att öka kunskapen om isotopseparering och om eventuella risker som detta kan innebära avseende nukleär spridning och konsekvenser för svensk exportkontroll.

Resultat

Rapporten beskriver de vanligaste metoderna för att separera isotoper och analyserar deras användbarhet för att även anrika uran. Rapporten analyserar sedan vad detta innebär för svensk och internationell exportkontroll.

Vi har valt att låta rapporten vara översiktlig utan att gå in på detaljer för att inte sprida information som kan vara känslig. Därmed kan flera intressenter såsom andra myndigheter, berörd industri och intresseorganisationer få tillgång till resultatet. Förutom rapporten har projektet resulterat i att personal på FOI och SSM fått ökad insikt i processerna genom bl.a. litteraturstudier.

Projekt information

Kontaktperson SSM: Henrik Moberg
Referens: SSM 2014-2812



**Strål
säkerhets
myndigheten**

Swedish Radiation Safety Authority

Författare: Per Andersson, Fredrik Nielsen, Daniel Sunhede
Totalförsvarets forskningsinstitut, Stockholm

2015:13

Samband mellan anrikning av uran
och andra ämnen – en studie från
ett icke-spridningsperspektiv

Datum: December 2014

Rapportnummer: 2015:13 ISSN: 2000-0456

Tillgänglig på www.stralsakerhetsmyndigheten.se

Denna rapport har tagits fram på uppdrag av Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM. De slutsatser och synpunkter som presenteras i rapporten är författarens/författarnas och överensstämmer inte nödvändigtvis med SSM:s.

Innehåll

Sammanfattning	2
Summary	3
1. Inledning	4
2. Varför anrikning av stabila isotoper kan utgöra ett problem	6
3. Analys av de vanligaste anrikningsmetoderna	8
3.1. Gascentrifugering	8
3.1.1. Centrifugteori	8
3.1.2. Vibrationer.....	9
3.1.3. Effektivitet	9
3.2. Laserbaserade metoder	11
3.2.1. AVLIS	11
3.2.2. MLIS.....	16
3.3. Gasdiffusion	18
3.4. Aerodynamiska metoder.....	21
3.4.1. Separation med strålmunstycke	22
3.4.2. Separation med virvelrör	23
3.5. Kemiska separationsmetoder	24
3.6. Elektromagnetiska separationsmetoder	25
3.6.1. Calutronen	26
3.6.2. Cyklotronresonans.....	27
4. Korrosionsbeständighet	30
5. Konsekvenser för svensk exportkontroll	31
Bilaga –Terminologi	32

Sammanfattning

Även om anrikning av uran inte är strikt nödvändigt för att producera kärnvapen har alla kända kärnvapenprogram innehållit anrikning i någon form. Den utrustning som behövs för anrikning av uran är exportkontrollerad och den svenska lagstiftningen kräver tillstånd för export av all utrustning och teknik som är särskilt konstruerad eller iordningställd för anrikning av uran. Samtidigt har det vuxit fram en marknad för andra mer eller mindre isotopanrikade ämnen, till exempel för användning i elektronikindustrin eller för medicinska applikationer. Dessa ämnen kan anrikas med utrustning som helt eller delvis sammanfaller med den som används för anrikning av uran. Då exportkontrollen i sin striktaste tolkning bara gäller utrustning och teknik enbart för anrikning av uran skapar situationen en potentiell brist i skyddet mot spridning eftersom en proliferator skulle kunna köpa en anläggning eller komponenter under förespegligen att dessa ska användas för anrikning av andra ämnen än uran.

Det finns ett stort antal teknologier för att separera isotoper och dessa kan ganska godtyckligt delas upp i två grupper; de som baseras på masskillnaden mellan isotoperna och de som baseras på andra skillnader, oftast små skillnader i de elektroniska energitillstånden som i sin tur ger olika optiska och kemiska egenskaper. Till den första gruppen hör gascentrifugering, gasdiffusion, aerodynamiska metoder och de som bygger på jons rörelse i magnetfält. I den andra gruppen hittas framför allt de laserbaserade metoderna och kemisk separation.

Något förenklat kan man säga att alla metoder som bygger på masskillnader i princip kan användas för alla ämnen som man kan vilja anrika, men i praktiken finns det givetvis begränsningar. För att kunna separeras genom gascentrifugering, gasdiffusion eller med hjälp av någon aerodynamisk metod måste ämnet vara i gasfas vilket kan ställa krav på tryck och temperatur som kan vara omöjliga att uppnå med en viss utrustning. Anrikning av uran kräver dessutom utrustning som är korrosionsbeständig i alla led, ett krav som är dyrt att uppfylla och kanske inte motiverat för anrikning av andra ämnen.

De laserbaserade metoderna är i princip helt isotopspecifika då de exakta våglängderna som behövs för att excitera de olika isotoperna varierar, men detta hinder är lägre än kanske väntat då de aktuella lasersystemen är mycket flexibla och relativt enkelt kan anpassas till olika våglängder och därmed också till olika isotoper. Den kanske mest ämnesspecifika metoden, kemisk separation, är också den relativt anpassningsbar då den nödvändiga utrustningen är densamma för alla ämnen, fränsett eventuella behov av korrosionsbeständighet, och det bara är de ingående kemikalierna som skiljer sig vid anrikning av olika ämnen. Dessa kemikaler är dock förbrukningsvaror och kan köpas av olika leverantörer utan att avslöja vilket ämne som avses anrikas vid exporten av utrustningen.

Det är alltså mycket svårt att dra några generiska slutsatser om en utrustnings användbarhet för anrikning av olika ämnen utgående enbart från den metod som den bygger på utan det krävs en noggrannare studie av t.ex. de ingående materialen och andra tekniska lösningar.

Summary

Although uranium enrichment is not strictly necessary to produce nuclear weapons, all known nuclear weapons programs have contained enrichment in some form. The equipment needed for uranium enrichment is export-controlled, and Swedish law requires a permit for the export of all equipment and technology especially designed or prepared for uranium enrichment. At the same time, a market for other more or less enriched elements has emerged, such as for use in the electronics industry or for medical applications. These substances can be enriched with equipment which, completely or partially, coincides with that used for uranium enrichment. As export controls in its strictest interpretation applies only to equipment and technology exclusively for enrichment of uranium, this situation creates a potential lack of protection against proliferation as a proliferator could buy a facility or components under the pretense that it will be used for the enrichment of substances other than uranium.

There are numerous technologies for separating isotopes, and these can be quite arbitrarily divided into two groups; those based on the difference in mass between isotopic-groups, and those based on other differences, usually small differences in the electronic energy states, which in turn provide various optical and chemical properties. To the first group belong gas centrifuges, gas diffusion, aerodynamic methods, and those based on the motion of ions in a magnetic field. In the second group belong the laser-based methods and chemical separation.

Somewhat simplified, one can say that all methods based on mass differences could in principle be used for any elements that you may want to enrich, but in practice there are of course limitations. To be separated by gas centrifugation, gas diffusion or by any aerodynamic method, the substance has to be in the gas phase, which may require pressures and temperatures that may be impossible to achieve with a specific facility. Enrichment of uranium also requires equipment that is corrosion resistant in all areas, a requirement that is expensive to meet, and perhaps not justified for the enrichment of other elements.

The laser-based methods are basically isotope-specific, since the precise wavelengths needed to excite the various isotopes vary, but this barrier is lower than perhaps expected, as the current laser systems are very flexible and can relatively easily be adapted to different wavelengths and thus isotopes. Perhaps the most substance-specific method, chemical separation, is also relatively adaptable as the necessary equipment is the same for all elements, apart from the possible need for corrosion resistance, and it is only the chemicals that separate the enrichment of various substances. These chemicals are, however, consumables and can be purchased from different suppliers without revealing which element the buyer is intending to enrich during the export of the equipment.

To summarize, it is very difficult to draw generic conclusions on the usability of certain equipment for enrichment of various substances, based solely on the method it is implementing, but it requires a more careful study of e.g. the constituent materials and other technical solutions.

1. Inledning

Även om vi idag kanske mest förknippar isotopanrikning med anrikning av uran, både för civilt och militärt bruk, så inleddes forskningen om isotopanrikning långt innan andra världskriget och Manhattanprojektet. År 1919 publicerades de första artiklarna om centrifugbaserad anrikning och 1922 genomfördes de första försöken med anrikning genom fotoprocesser, föregångaren till dagens laseranrikning. I början handlade det i huvudsak om grundforskning om anrikningsmetoder och behovet av att anrika små mängder isotoper som behövdes för annan forskning. De första försöken inriktade sig på anrikning av klor, svavel och kvicksilver.

Det var först i samband med USA:s Manhattanprojekt som det blev aktuellt med anrikning i större skala, då man gick från försök på laboratorienivå till industriell produktion på mycket kort tid. Utvecklingen drevs av ett mycket speciellt behov utan normala ekonomiska begränsningar och var helt inriktad på anrikning av uran. På samma sätt drevs utvecklingen efter andra världskriget i huvudsak med en mycket smal inriktning på anrikning av de strategiska materialen uran, litium och tungt vatten, igen utan normala ekonomiska ramar. Det var först runt 1970 som behovet av anrikat uran för civil användning blev så stort att det inte kunde tillfredställas på marginalen inom de olika nationella militära anrikningsprogrammen. Samtidigt mognade centrifugteknologin efter flera genombrott under 1960-talet vilket öppnade för anrikning i stor skala på ekonomiskt sundare villkor.

Parallellt med det framväxande behovet av anrikning av uran så har det inom den övriga industrin och sjukvården uppstått ett behov av ämnen anrikade i vissa isotoper. Behovet har i viss mån drivits av möjligheten och tillgången, så man kan säga att tillgång och efterfrågan har gått hand i hand. Dock så är anrikningsindustrin helt dominerad av uranproduktion för civil användning.

Bland de framväxande användningsområdena för anrikade isotoper återfinns flera inom den ekonomiskt starka elektronikindustrin. ^{28}Si ger snabbare processorer och diamant framställd av ^{12}C ger högre värmeledningsförmåga. Reaktorindustrin börjar efterfråga ^{157}Gd och i viss mån anrikad erbium då dessa kan användas för att reglera reaktiviteteten i nyladdade härdar, så kallade ”*burnable poisons*”. Inom medicinen använder man bland annat ^{29}Si , anrikat kalcium, syre, kväve och xenon, olika isotoper för respektive ämne inom olika användningsområden. Inom den kärntekniska industrin finns det även ett ökande intresse för att separera zirkonium från hafnium med metoder hämtade från anrikningsindustrin, även om det i det fallet inte rör sig om isotopseparation i den traditionella meningen, då det inte är frågan om separation av två isotoper¹ utan två olika grundämnen även om samma metoder som vid isotopseparation används.

De allra flesta, om inte alla, anrikningsmetoder som idag förekommer i industriell skala eller på försöksstadiet har sitt ursprung inom de olika militära programmen för anrikning av uran som pågått sedan andra världskriget. Dessa program har oftast varit väldigt traditionella i den meningen att de inte har varit riskbenägna och inte velat riskera att stå utan anrikningskapacitet efter en felsatsning, samtidigt som de har drivit forskningen framåt för att så långt som möjligt få ett tekniskt och därmed också militärt övertag över fienden. Detta har lett till att många olika metoder för anrikning har utvecklats för att sedan överges då de inte visats sig ge ett tillräckligt

¹ Med isotoper menar man i striktaste mening material som har samma atomnummer (antal protoner i kärnan) men olika antal neutroner och därmed atommassa. Ordet ”isotop” beskriver alltså en relation, inte en absolut egenskap. Material A är en isotop till material B och vice versa om de har samma antal protoner i atomkärnan. I vardagligt tal används ordet för att beskriva ämnen på den detaljnivån att atommassan är viktig.

stort övertag för att motivera risken som ett metodbyte skulle innebära. Flera av dessa tidigare övergivna metoder har åter aktualiserats för anrikning av andra isotoper än uran, bland annat laseranrikning och kryogenisk separation. Den sistnämnda metoden är mycket specialiserad och inte användbar för anrikning av uran så den kommer inte att behandlas i rapporten.

Beroende på vilken fysikalisk egenskap som används för att särskilja de olika isotoperna kan vissa metoder användas utan anpassning för anrikning av olika grundämnen. Andra metoder måste däremot anpassas i större eller mindre utsträckning för att kunna appliceras på olika ämnen. I denna rapport ingår en beskrivning av vilka anpassningar, om några alls, som behöver göras för att metoder utvecklade för anrikning av uran ska kunna användas för anrikning av andra isotoper och vice versa.

Rapporten inleds med en diskussion om varför anrikning av andra isotoper kan utgöra en spridningsrisk och ett teknologiläckage, och vad detta kan innebära för det internationella icke-spridnings- och exportkontrollarbetet. Sedan följer en genomgång av de vanligaste anrikningsmetoderna med avseende på hur de kan användas för anrikning av uran respektive andra isotoper och vad detta kan innebära för det svenska icke-spridningsarbetet och den exportkontroll som Sverige bedriver. Rapporten avslutas med en sammanfattning. Samtliga illustrationer utan copyrightbeskrivning är återgivna med tillstånd enligt USA:s regler för konstnärligt material skapat av statstjänstemän inom tjänsten eller skapade av författarna till denna rapport.

2. Varför anrikning av stabila isotoper kan utgöra ett problem

Ett av de mer oroväckande proliferationsscenarierna som presenterats är möjligheten att en aktör, oftast en statlig men en organisation med mycket goda ekonomiska resurser är också möjlig, i hemlighet skaffar sig den teknologi och infrastruktur som behövs för att anrika uran till de nivåer som är nödvändiga för tillverkningen av kärnvapen. På grund av uranets i jämförelse med plutonium betydligt mer lätthanterliga egenskaper som vapenmaterial krävs det i detta scenario inga fullskaliga laddningstester utan världen skulle ställas inför det konstaterade faktumet att ytterligare en aktör har tillgång till kärnvapen. I fallet en fientlig stat eller organisation skulle detta kunna ske genom ett angrepp med katastrofala följder. För att minimera risken för detta har huvuddelen av världssamfundet på olika sätt anslutit sig till de riktlinjer som den internationella exportkontrollorganisationen *Nuclear Suppliers Group* (NSG) ställt upp, antingen genom medlemskap eller genom att använda de tekniska listor som NSG publicerar i den nationella lagstiftningen. Där ingår speciella villkor för export av den känsligaste teknologin, dit anrikning räknas. Dessa villkor går bortom de som ställs upp för export av till exempel reaktorer och kärnbränslehantering².

NSG:s riktlinjer för exportkontroll är uppdelade i två olika nivåer eller grupperingar; produkter och teknologier som är utvecklade eller tillverkade enbart för användning i kärnbränslecykeln, samt produkter och teknologier som kan användas i kärnbränslecykeln och framställning av kärnvapen men också för andra ändamål. De sistnämnda kallas produkter med dubbla användningsområden³ och för att kunna identifiera dessa krävs det noggranna produktbeskrivningar eller parametrar. En produkt uppfyller dessa tekniska kriterier eller inte, vilket gör bedömningen av dessa konceptuellt enkel, om inte alltid rent praktiskt.

Den första gruppen av produkter och teknologier, de som återfinns på NSG:s så kallade *Trigger List*, är svårare att identifiera då det delvis är syftet eller intentionen för dess användning som avgör om de hör hemma på listan eller inte, eftersom listan saknar närmare tekniska specifikationer. Listan bygger istället på det mer svårgripbara begreppet⁴ *Especially Designed or Prepared* (EDP) som har sitt ursprung i ickespridningsavtalet *Non-proliferation of Nuclear Weapons* (NPT)⁵ där artikel 3.2 använder detta begrepp utan någon vidare definition. Denna brist på definition har sedan dess blivit både begreppets styrka och dess svaghet. Styrkan ligger i att varje land har den suveräna rätten att på egen hand bestämma vad som ska ingå i begreppet för att det ska vara användbart i respektive land. Svagheten blir tydlig då flera länder ska enas om hur begreppet ska tolkas i olika samarbeten och vid tillämpningen av lagar och avtal.

I sin mer extrema tolkning kan begreppet EDP anses omfatta enbart produkter och teknologier som unikt och utan undantag bara används och kan användas inom kärnbränslecykeln. Detta innebär i praktiken en mycket snäv tolkning om den tillåts vara bokstavig, eftersom i princip allt kan användas till andra ändamål än de ursprungligen tänkta. En vanligare tolkning utgår från en sundhetsprincip där avsikten vid tillverkningen är avgörande. Detta förutsätter dock att avsikten är känd av alla inblandade och att tillverkare och kunder inte döljer avsikten medvetet. Bedömningen måste då ske från fall till fall och bygger på öppenhet och ärlighet.

² INFCIR/254/Part 1, rev 13.

³ I EU:s förordning 428/2009 används begreppet produkter med dubbla användningsområden även för de produkter som är utvecklade eller tillverkade enbart för kärnbränslecykeln.

⁴ Inom EU har uttrycket fått utformningen "särskilt konstruerade eller iordningställda" i svensk översättning. Det förekommer till exempel i EU-förordningen om produkter med dubbla användningsområden 428/2009 med uppdateringar.

⁵ <http://www.un.org/en/conf/npt/2005/npttreaty.html>

I början på 2000-talet väcktes frågan inom NSG om hur den då framväxande kommersiella anrikningen av andra isotoper än uran⁶ skulle hanteras. Anrikning av *andra grundämnen*, som fenomenet till slut kom att kallas, faller i den enklaste tolkningen inte under EDP-begreppet då detta bara gäller utrustning och teknologi för anrikning av uran. Samtidigt fanns det en oro för att samma utrustning som används för anrikning av andra grundämnen också kan användas för anrikning av uran och att detta skapade ett kryphål i lagstiftningen⁷.

Frågan visade sig vara svårare än väntat att lösa på grund av den spännvid som tolkningarna av EDP-begreppet som fanns. Å ena sidan kunde man argumentera för att om till exempel en centrifug kunde användas, utan modifikation, till både anrikning av svavel och uran så var den inte *Especially Designed or Prepared* för anrikning av uran eftersom den även kunde anrika svavel. Det innebar i sin tur att vid en export av centrifugen så kunde inga krav i enlighet med NSG:s Part I *Guidelines* ställas, inte ens om centrifugen faktiskt skulle användas för anrikning av uran. Det skulle helt enkelt inte finnas några EDP-centrifuger eller annan utrustning och teknologi över huvud taget om de kunde användas för anrikning av andra grundämnen.

En annan tolkning som gjordes var att det fortfarande kunde förekomma till exempel centrifuger som faller under EDP-begreppet men att dessa skiljer sig från de för anrikning av andra grundämnen, inte genom sin konstruktion eller funktion, utan genom intentionen vid tillverkningen, exporten och användningen. En tillverkare av centrifuger skulle från samma produktionslina kunna sälja både EDP-centrifuger och *dual-use*-centrifuger och det enda som skulle skilja dem åt var användningen. En tredje tolkning var att detta i alla praktiska avseenden var samma utrustning och teknologi och eftersom den kunde användas för anrikning av uran borde anses vara kopplad till EDP-begreppet och den striktare lagstiftning som följer denna och att alla andra tolkningar skulle kunna leda till ett läckage av utrustning och teknologi till proliferatorer, antingen helt öppet om den första tolkningen tillämpas, eller under falska förespeglningar om den andra tolkningen får råda.

NSG:s lösning blev en kompromiss som slogs fast 2006 vid det årliga plenarmötet. Man beslöt där att göra två tillägg i den befintliga texten som tydliggjorde att det finns ett samband mellan den utrustning och teknologi som används vid anrikning av andra grundämnen och den som används för anrikning av uran. Tilläggen inkluderar även formuleringar som uppmanar exporterande länder att uppmärksamma detta och vidta lämpliga åtgärder utan att närmare specificera vad dessa åtgärder skulle kunna innebära.

I det följande analyseras de vanligaste anrikningsmetoderna med avseende på hur de kan användas för anrikning av uran respektive andra isotoper och vad detta kan innebära för icke-spridningsarbetet och nationell och internationell exportkontroll.

⁶ I striktaste mening gäller NSG:s regelverk även utrustning för anrikning av plutonium men i praktiken är detta inte av något större intresse då inga kända fall av plutoniumanrikning har skett och den utrustning som skulle kunna vara aktuell sammanfaller i princip med den för anrikning av uran.

⁷ IAEA anser till exempel att utrustning för anrikning helt faller utanför deras jurisdiktion enligt INFIRC/153 angående *Comprehensive Safeguards Agreement* så länge inget kärnämne förekommer även om de varnar för likheten mellan de två användningsområdena, se <http://www.iaea.org/safeguards/symposium/2010/Documents/PapersRepository/262.pdf>

3. Analys av de vanligaste anrikningsmetoderna

3.1. Gascentrifugering

Principen för separation av ämnen med centrifugering var känd långt innan den började användas för isotopseparation på 1940-talet. Att tröghetskrafter, vilket centrifugalkraften är ett exempel på, är ekvivalent med gravitation föranledde studiet av centrifugering för separation av gaser med olika molekylvikt och gör att fysiken för jordens atmosfär kan användas med en anpassning för de förhållanden och den geometri som råder i en centrifug. Exempelvis fanns redan på 1600-talet ekvationer som beskriver gastycket i atmosfären som en funktion av avståndet från jordens centrum. Dessa ekvationer gäller för varje komponent i en gas var för sig och kan alltså med anpassning av geometrin användas för att bestämma partialtryck i centrifuger. Principen att centrifugalkraften gör att tyngre molekyler anrikas nära randen hos en roterande cylinder, på samma sätt som gravitationen gör att tyngre molekyler anrikas nära marken, förespeglades således flera hundra år innan det fanns något praktiskt användningsområde för isotopseparation.

De teoretiska bevisen för dessa semiempiriska ekvationer kom med den kinetiska gasteorin under 1800-talets andra hälft. Mot slutet av århundradet kom även det experimentella beviset då en roterande cylinder med känt innehåll användes för att separera väte och vätejodid. Både det teoretiska och experimentella beviset föregick följaktligen upptäckten av radioaktivitet, dvs. innan man kände till förekomsten av olika isotoper av samma ämne. Det var först långt senare som ett behov av att separera isotoper uppstod. Emellertid fanns det flera hinder för utvecklingen av centrifugteknologin. Ett sådant problem var att ämnen med liten relativ masskillnad, vilket är karaktäristiskt för isotoper av samma ämne, återblandas genom konvektion då temperaturen i centrifugen ökas. I moderna centrifuger har detta lösts genom att dessa vakuumställs och arbetar vid mycket låga tryck. Den första framgångsrika isotopseparationen med centrifuger ägde rum 1936. Under senare delen av 1930-talet genomfördes därefter ett flertal experiment som bekräftade teorierna kring centrifugseparation av isotoper. När så klyvning av urankärnor lyckades förändrades synen på centrifugseparation. Fram till den här perioden utfördes experiment huvudsakligen på lättare molekyler. Därefter har forskningen på centrifuger huvudsakligen ägnat sig åt separation av uranisotoper, och möjligheterna till isotopseparation på stor skala började tidigt undersökas. Under Manhattanprojektet gjordes ett omfattande utvecklingsarbete även om centrifugspåret sedermera lades ned till förmån för gasdiffusion för framställning av fissilt material för de första kärnladdningarna.

3.1.1. Centrifugteori

I en roterande centrifug är det masskillnaden mellan isotoperna som ger separationen, och den tyngre av isotoperna får högre koncentration i periferin. Störst separation erhålls vid jämvikt, men för att jämvikt ska inställa sig krävs emellertid att inget uttag görs ur centrifugen. Separationen är inte fullständig, det vill säga det finns inte bara atomer eller molekyler av den tyngre isotopen i periferin utan en viss andel av den lättare isotopen och vice versa. Kvoten mellan tyngre och lättare isotoper är högre i periferin, men den absoluta koncentrationen av lättare ämnen är högre i periferin än nära centrum. I centrifugens centrum råder nästan vakuum med

endast några få molekyler samt föroreningar med låg molekylvikt. Enligt ekvationerna är separationen oberoende av centrifugens radie och förhållandet mellan längd och radie, utan beror enbart på periferihastighet och längd, se avsnitt 3.1.3. Den maximala periferihastigheten hos en rotor, d.v.s. det cylindriska roterande rör där anrikningen äger rum, bestäms i sin tur av förhållandet mellan hållfasthet och densitet hos rotormaterialet

$$V^2 = \frac{\sigma}{\rho}$$

Där V är maximala periferihastigheten, σ den maximalt tillåtna spänningen i materialet och ρ densiteten. Avgörande för hur effektiva centrifuger som kan konstrueras är följaktligen hur draghållfasta material som finns att tillgå.

3.1.2. Vibrationer

Ett problem med rotation vid höga hastigheter är resonansvibrationer. Vid höga rotationshastigheter kan rotationsfrekvensen hos rotorn nå samma frekvens som de naturliga vibrationerna i systemet. Vid dessa frekvenser, ibland kallade kritiska hastigheter, kan amplituden hos rotorsvängningarna bli stora och riskera att skada rotorn. För ett givet längd-radie-förhållande finns det en serie rotorfrekvenser som är olämpliga att arbeta vid. Emellertid måste dessa frekvenser vanligtvis passeras för att nå driftfrekvensen. Utifrån dessa kritiska hastigheter utformas vanligtvis centrifuger så att längd-radie-förhållandet är sådant att de arbetar mellan två kritiska hastigheter.

En viktig komponent hos centrifuger är lagren. Lagrens uppgift är att begränsa rotorn till att rotera i jämviktsläge. Förutom lagrets styvhet, dvs. förmågan att hålla och återställa rotorn till dess ursprungsposition är lagrets motstånd en viktig parameter. En typ av lager som har låg styvhet men använder mycket lite energi är magnetlager. Tidigare användes andra typer av lager såsom nållager men magnetlager minskar effektbehovet hos varje centrifug med ungefär en faktor 1000 (från 2–3 kW till 2–3 W) och gör hela processen mycket mer energieffektiv.

3.1.3. Effektivitet

Sedan centrifuger började användas för isotopseparation i större skala har ett flertal typer utvecklats, kategoriserat efter hur strömmarna i centrifugen går och hur produktströmmen tas ut. Den effektivaste typen är motströmscentrifugen, där den tyngre isotopen anrikas i en ström längs rotorns periferi medan den lättare isotopen anrikas i en ström nära centrum. I motströmscentrifuger uppstår därmed både axiella och radiella koncentrationsgradienter. Möjligheten att lätt ta ut produkt samt den höga separationsfaktorn i varje steg har medfört att motströmscentrifugen sedan lång tid är den dominerande centrifugtypen.

Centrifugering är en separationsmetod som baseras på massdifferensen hos de ämnen som ska separeras. Det maximala separativa arbetet hos en centrifug härleddes av Dirac 1941,

$$\delta U_{max} = \rho D (\Delta M V^2 / 2RT)^2 \pi Z / 2,$$

där ρ är densiteten, D diffusionskoefficienten som beskriver hur de två isotoperna återblandar sig genom diffusion, ΔM den absoluta masskillnaden för isotoperna (för

uran 0,003 kg/mol), V är periferihastigheten, R den allmänna gaskonstanten, T temperaturen och Z längden på centrifugen. Avgörande för hur effektivt två isotoper kan separeras är hur stor skillnaden är i massa och inte den absoluta massan för isotoperna i fråga.

Diracs ekvation beskriver en ideal centrifug där ingen gas tillförs eller tas bort. En mer realistisk, men fortfarande förenklad beskrivning av en riktig centrifug ges av Rätz ekvation⁸,

$$\delta U = \frac{1}{2} F \theta (1 - \theta) \left(\frac{\Delta M}{2RT} V^2 \right)^2 \left(\frac{r_2}{a} \right)^4 \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right]^2 \times \left[\left(\frac{1 + L/F}{\theta} \right) (1 - e^{-A_P Z_P}) + \left(\frac{L/F}{1 - \theta} \right) (1 - e^{-A_W (Z - Z_P)}) \right]^2.$$

Här har de från Diracs ekvation återkommande variablerna samma betydelse, F är den hastighet som gasen tillförs med mätt i kg/s och L motströmsflödet mätt i samma enhet, θ den återflödeskvot som tas ut, det vill säga hur stor andel av det totala flödet in som tas tillvara som nyttoprodukt, a är centrifugrotorns radie, r_1 och r_2 två olika radier som används för att beskriva det radiella avståndet från centrum där nyttoströmen tas ut respektive det avstånd från centrum där centrifugväggen påverkar flödet. Z_P anger var i höjddled längs rotationsaxeln som inflödet i centrifugen sker. Slutligen är A_P och A_W två relativt komplicerade funktioner av ρ , D , L , F , r_1 , r_2 och θ som beskriver diffusionen och motströmsflödet av nyttoströmmen, *product*, och avfallsströmmen, *waste*. Ingen av de ingående variablerna beror på den absoluta massan hos de isotoper som ska separeras⁹.

Eftersom ingen av de faktorer som påverkar utbytet i sin tur beror på den absoluta massan, utan det bara är den absoluta masskillnaden i kg/mol som kommer in i ekvationerna, kan man dra slutsatsen att en given centrifug som är anpassad för att separera två isotoper följaktligen även kan separera vilka två andra isotoper som helst, även om effektiviteten kanske blir sämre. För alla isotoper ger en högre periferihastighet ett större utbyte och det finns ingen undre strikt gräns i hastighet då separation inte kan ske, i alla fall inte i teorin även om det finns en praktisk gräns då processen inte längre är meningsfull. Det finns inte heller någon övre gräns än den som sätts av de material som ingår och deras dragbrotstyrka. Avgörande för vilka ämnen som går att separera är istället egenskaper som korrosions- och temperaturbeständighet hos konstruktionsmaterialen.

Uranhexafluorid förångas redan vid 56,5°C och det låga trycket i vakuumsatta centrifuger gör att kokpunkten sänks ytterligare. Kokpunkten för andra aktuella hexafluorider är av samma storleksordning. Temperaturbeständighet är alltså inte ett större problem vid val av material. UF_6 i sig är inte korrosivt för de flesta metaller. Vid kontakt med fukt, till exempel i luft bildas dock UO_2F_2 och HF vilka båda är kraftigt korrosiva. Korrosionsbeständighet är följaktligen av avgörande betydelse, se kapitel 4.

⁸ E. Rätz, Analytische Lösungen für die Trennleistung von Gaszentrifugen zur Urananreicherung, doktorsavhandling (Technical University of Berlin, 1983)

⁹ Det kan noteras att det finns en praktisk gräns för hur nära rotationsaxeln som det är meningsfullt att ta ut nyttoströmmen. Även om separationen blir bättre och bättre närmare axeln så sjunker samtidigt densiteten och därmed den mängd gas som kan tas ut snabbare. Detta medför att över en viss periferihastighet så beror inte längre utbytet på periferihastigheten till fjärde potensen utan bara den andra. En ökad hastighet ger fortfarande ett ökat utbyte men ökningstakten blir märkbart lägre. Exakt var denna brytpunkt ligger beror dels på detaljer i centrifugdesignen och dels på molmassan för ämnet som ska anrikas. Detta beroende är dock ganska svagt, kvadratroten ur molmassan. Ett lättare ämne ger en lägre brytpunkt, det vill säga en lägre periferihastighet då effekten av en ökad hastighet avtar.

3.2. Laserbaserade metoder

Gruppen laserbaserade metoder har potential att anrika både uran och andra grundämnen och har använts framgångsrikt i mindre skala i båda fallen även om det kommersiella genombrottet som många väntat på ännu inte har infunnit sig. Det finns ett antal varianter av de laserbaserade metoderna men samtliga bygger på att laserljus med en noggrant bestämd våglängd belyser en blandning av de isotoper som ska separeras och där selektivt exciterar atomer av bara den ena isotopen. Kärnan i anrikningsmetoden ligger i att hitta en elektronnivå vars excitationenergi skiljer sig åt för de olika isotoperna och sedan kunna belysa dessa på ett sådant sätt att en meningsfull mängd material kan separeras ut. Vilka dessa elektronnivåer kan vara och vilken våglängd de har varierar för olika grundämnen men principen är densamma för alla grundämnen. Utöver svårigheten att identifiera lämpliga våglängder tillkommer ett antal tekniska svårigheter som måste övervinnas. Detaljlösningarna kan variera för olika grundämnen så det krävs en noggrann analys för att kunna avgöra en konfigurations lämplighet för anrikning av ett specifikt grundämne.

Beroende på i vilken form materialet som ska anrikas förekommer, atomer eller molekyler, delas gruppen upp i två undergrupper; *Atomic Vapour Laser Isotope Separation* (AVLIS) och *Molecular Laser Isotope Separation* (MLIS). Till undergruppen MLIS räknar man även SILEX som är ett varumärke för en metod utvecklad i Australien som kan användas för separation av både uran och andra grundämnen.

3.2.1. AVLIS

Som namnet *Atomic Vapour Laser Isotope Separation* berättar bygger anrikningsmetoden AVLIS på isotopseparation av atomer, till skillnad från MLIS som arbetar med ämnena bundna i molekyler. Oavsett vilket grundämne som ska anrikas är tillvägagångssättet i huvudsak detsamma. Processen inleds med att materialet som ska anrikas på något sätt fås att övergå i gasfas. Flera av de grundämnen som anrikas kommersiellt är redan i gasfas vid normalt tryck och temperatur, NTP¹⁰, till exempel klor och xenon, så i dessa fall räcker det med att reglera gasflödet. Grundämnen med högre kokpunkt måste på något sätt upphetas över kokpunkten. Om kokpunkten är tillräckligt låg skulle det räcka med en enklare form av värmare men trots det tycks det i de flesta publicerade studier ha använts en mer avancerad form av värmning, precis som för de grundämnen som har en högre kokpunkt.

En anledning till att man har valt mer komplicerade, och därmed också dyrare, lösningar är troligen behovet av att noggrant kunna kontrollera flödet av atomer. Trycket i kammaren måste vara mycket lågt och tätheten lägre än ca 10^{15} atomer per cm^3 av skäl som diskuteras nedan. Förutom att detta starkt reducerar produktionsraten så ställer detta höga krav på den precision som uppvärmningsmekanismen måste ha. Det påverkar även hur stor effekt uppvärmningen får tillföra till olika grundämnen för att rätt täthet ska uppnås. Ett material med låg specifik värme och förångningsvärme tål mindre tillförd effekt än ett ämne med höga värden för de två egenskaperna. Utrustning anpassad för förångning av svavel kan inte utan modifiering användas för förångning av uran och tvärt om. I tabell 1 återfinns ett antal parametrar som är relevanta för förångning och kondensation av de vanligaste grundämnena som redan anrikas kommersiellt eller där det finns planer för storskalig anrikning.

¹⁰ NTP är definierat som trycket 1 atmosfär och temperaturen 293 K.

Några av de aktuella egenskaperna som kan påverka valet av utrustning och komponenter i en AVLIS-anläggning för några relevanta isotoper återfinns i tabell 1.

Tabell 1: Några parametrar som är relevanta i AVLIS-processen för ett urval av grundämnen som anrikas eller planeras anrikas kommersiellt.

Grundämne	Smältpunkt (K)	Kokpunkt (K)	Energi för kokning (kJ/mol)	Jonisationsenergi (eV)
uran	1405	4200	504	6,05
kalcium	1115	1757	179	6,11
kisel	1687	3173	332	8,15
kol	3800	4300	604	11,3
kadmium	594	1040	126	8,99
erbium	1802	3141	340	6,10
gadolinium	1585	3523	378	6,14
svavel	388	718	57	10,4
xenon	161	165	N/A	12,1
klor	171	239	N/A	13,0

Den absolut vanligaste metoden för förångning av det material som ska anrikas är bestrålning med en elektronstråle. Det är relativt enkelt att finjustera både intensiteten och partikelenergin i strålen och det går framför allt att skapa en stråle med en linjär utbredning, det vill säga den är inte punktformig utan utsträckt längs en riktning så att en betydligt större yta kan bestrålas. De förgasade atomerna stiger upp som om ett omvänt vattenfall och laserstrålen som belyser detta från kortsidan kan träffa ett betydligt större antal atomer än vad som vore fallet om källan vore punktformig och atomerna steg upp som i en fontän. Det går även att använda en laser till att hetta upp materialet men det kräver ett större antal, monterade sida vid sida, för att få samma vattenfallseffekt som från en elektronstråle. Vid utveckling och försök där det totala utbytet är mindre intressant kan dock en laser vara ett fullgott verktyg för förångning.

Ämnen som är skonsamma vid låga temperaturer och i fast form kan ibland vara mycket korrosiva i smält form eller i gasfas vid mycket höga temperaturer. Uran är ett sådant ämne och hantering av hett uran kräver speciella material som till exempel tantal, olika former av oxider och keramer eller NbTiW-legeringar. Bland ämnen som är korrosiva vid höga temperaturer hittar vi också bland annat föreningar med erbium och kalcium som är två av de grundämnen som skulle kunna vara aktuella för anrikning i större skala.

Även om oxider och keramer oftast är kemiskt mycket stabila påverkas ytornas egenskaper på sikt av att vara i kontakt med heta vätskor och gaser innehållande en av oxidens eller keramens huvudkomponenter, till exempel hett kalcium på en yta av kalciumoxid. Något generaliserat kan man säga att ytor som klarar hett uran också klarar de flesta andra ämnen, med några undantag enligt ovan, men att det omvända inte nödvändigtvis är fallet.

Eftersom det förångade materialet är gasformig far det iväg i alla riktningar i kammaren och kondenseras på alla ytor som är svalare än ämnets kokpunkt. För att inte alla ytor ska bli belagda med ett för tjockt lager av det aktuella ämnet så måste antingen anrikningen ske satsvis med avbrott för rengöring av behållaren eller så måste beläggningen föras undan kontinuerligt vilket lättast sker om alla ytor hålls vid en temperatur mellan ämnets smält- och kokpunkt. Då kan det fås att kondensera på ytorna i behållaren och rinna ner i uppsamlingskärl, på samma sätt som kondens

på en sval spegeln i ett varmt och fuktigt duschrum. Om denna metod väljs måste kammaren konstrueras så att den kan hållas vid en lämplig temperatur över en längre tid utan att utrustning såsom olika former av sensorer, vacuumpumpar och laserfönster tar skada. Den aktuella temperaturen varierar från grundämne till grundämne men kammare tillverkad för lägre temperaturer kan svårligen anpassas till högre temperaturer men anpassning åt det andra hållet är trivial.

Ett alternativ är att upphetta materialet så pass mycket att en huvuddel joniseras och med hjälp av elektriska eller magnetiska fält kollimeras till en stråle (eller ”vattenfall”) innan temperaturen sjunker så pass mycket att jonerna åter kan fånga in en elektron och blir neutrala. Den exakta fältstyrkan som behövs för att kollimera strålen beror linjärt på massan hos jonerna¹¹. Utrustning anpassad för att kollimera tunga joner kan troligtvis ganska enkelt användas även till lättare joner men det beror på hur stora fält den aktuella utrustningen kan åstadkomma om tyngre joner kan hanteras i utrustning ursprungligen anpassad för lättare joner.

Växelverkan mellan elektromagnetisk strålning (laserljuset) och materia (grundämnet som ska anrikas) delas traditionellt upp i termer där de aktuella energiskalorna beror på den exakta formen av växelverkan. Man kan se det som en hierarki med huvudnivåer och finare och finare korrektioner. Huvudnivåerna och den första nivån av korrektioner gör ingen skillnad på olika isotoper av samma grundämne utan beror bara på värdet av kärnans elektriska laddning (atomnumret) och antalet elektroner och dess fördelning runt kärnan i olika skal, två egenskaper som samma för olika isotoper av samma grundämne. Det är först korrektioner som beror på den exakta laddningsfördelningen, eller snarare fördelningen av rörelsemängdsmoment, spinn, i kärnan som skiljer olika isotoper åt. Det finns ett antal olika växelverkanformer som kopplas till det elektriska kärnspinnets (inte att förväxlas med det magnetiska kärnspinnets) men de går alla under samlingsnamnet hyperfin-växelverkan och nivåerna i absorptionsspektrumet kallas hyperfin-nivåer. Namnet hyperfin är en språklig fortsättning av namnet på de korrektioner som återfinns på nivån ovan i hierarkin som kallas finstruktur-nivåer. Energiskalan för hyperfin-växelverkan är ca en tiondel av den för finstrukturväxelverkan.

För att kunna selektera atomer av en viss nivå krävs det att det finns hyperfin-nivåer för den ena isotopen som ligger tillräckligt långt från de för den andra isotopen eller isotoperna samtidigt som det måste finnas nivåer som elektronen kan exciteras till och där energiskillanden mellan nivåerna (hyperfin-nivåerna och nivån som elektronen ”landar” på) inte är densamma för de olika isotoperna, se figur 1.

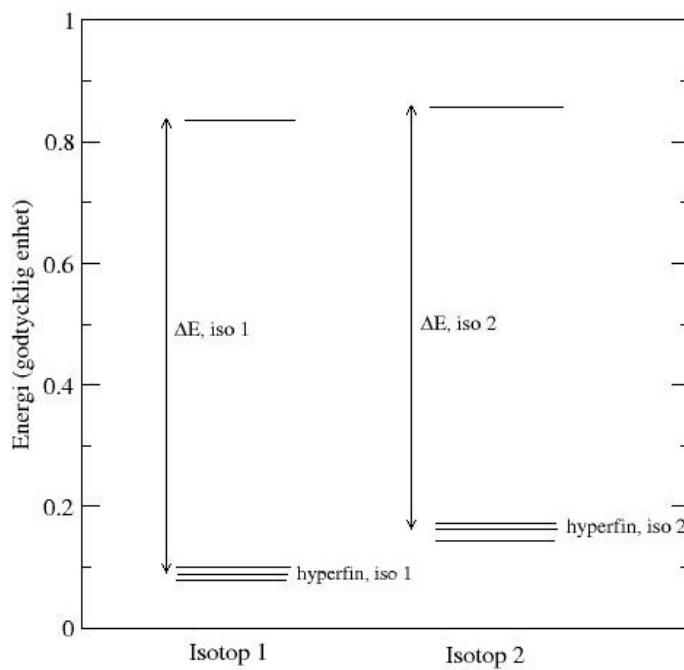
Lasern måste ha en så exakt frekvenskontroll och smalt våglängdsband att den bara exciterar en viss hyperfin-nivå och ingen annan. För de flesta grundämnena handlar det om våglängder på 250 till 600 nm vilket motsvarar en frekvens på ca 10^{15} - 10^{16} Hz. Bredden på en hyperfin-nivå motsvarar ca 10^9 Hz och avståndet mellan hyperfin-nivåerna hos två olika isotoper motsvarar strax under 10^{10} Hz. Frekvensnoggrannheten och stabiliteten måste alltså vara bättre än 1 på 10^6 över lång tid.

Lasern måste även vara pulsad¹² och kraftig nog för att ge ett meningsfullt utbyte. Det är också lämpligt med en laser som sänder ut ljus över ett smalt frekvens-

¹¹ Jonisation genom upphettning är en statistisk process där andelen joniserade atomer ökar med ökad temperatur enligt en Boltzmann-fördelning. Jonisationsenergin är till god approximation densamma för alla atomer av samma grundämne men energin hos de enskilda atomerna varierar. Dock är gapet så stort mellan första och andra jonisationstillståndet så stor för samtliga de aktuella ämnena att inget av dem riskerar att bli dubbeljoniserade i någon större utsträckning vid de temperaturer som förekommer i processen.

¹² För att få den maximala produktionsvolymen så vore det idealiskt att använda en kontinuerlig stråle men samtidigt som den exakt avstämde laserstrålen kan excitera en elektron från ett tillstånd till ett annat kan den också stimulera en elektron i det högre tillståndet att falla ner till det lägre tillståndet och sända ut en foton,

spektrum som täcker alla hyperfin-nivåer så att de önskade frekvenserna som motsvarar de olika hyperfin-nivåerna med hjälp av filter kan väljas ut. Sett över alla atomer är alla hyperfin-nivåer uppfyllda med en fördelning som bestäms av de kvantmekaniska urvalsreglerna, men elektroner i en individuell atom befinner sig i bara en nivå¹³ så för att maximera utbytet används flera laserstrålar som anpassats var för sig till de olika hyperfin-nivåerna.



Figur 1. Ett förenklat termschema för två isotoper. En laser med en exakt avstämmd våglängd motsvarande $\Delta E, \text{iso 1}$ används för att selektivt excitera elektroner från de lägre liggande hyperfin-tillstånden till det högre liggande tillståndet.

Den lasertyp som bäst uppfyller alla dessa kriterier är den så kallade färgämneslasern (*dye lasers*). Som namnet antyder används ett färgämne för att generera laserljuset och beroende på vilket färgämne som väljs fås olika våglängder, från ultraviolett till infrarött. På detta sätt kan man täcka hela det aktuella våglängdsintervallet, 250 till 600 nm, där de exciterbara hyperfin-nivåerna återfinns. En del av färgämnena är kraftigt korrosiva och i vissa fall även mycket giftiga vilket ställer höga krav på pumpar, slangar och resonanskaviteter. Det färgämne som används för anrikning av uran, rhodamin G¹⁴, hör till de mest korrosiva och kräver korrosionsbeständiga material i alla ytor som kommer i kontakt med färgämnet. Återigen kan utrustning med högre tålighet även hantera färgämnen som inte är korrosiva medan utrustning som inte är korrosionstålig snabbt förstörs av de mer korrosiva vätskorna.

Färgämneslasern måste i sin tur drivas eller pumpas av en annan laser vars våglängd måste ligga i närheten av den våglängd som färgämneslasern sänder ut så anrikning

precis som det sker i en laser. För att undvika detta måste pulsen vara så kort att sannolikheten för att detta ska ske är låg och att nästa laserpuls hinner jonisera atomen när den befinner sig i det exciterade tillståndet. Alternativet vore att förflytta atomen ur laserstrålen så snabbt att den inte hinner deexcitera men det skulle kräva orealistiskt höga flödes hastigheter.

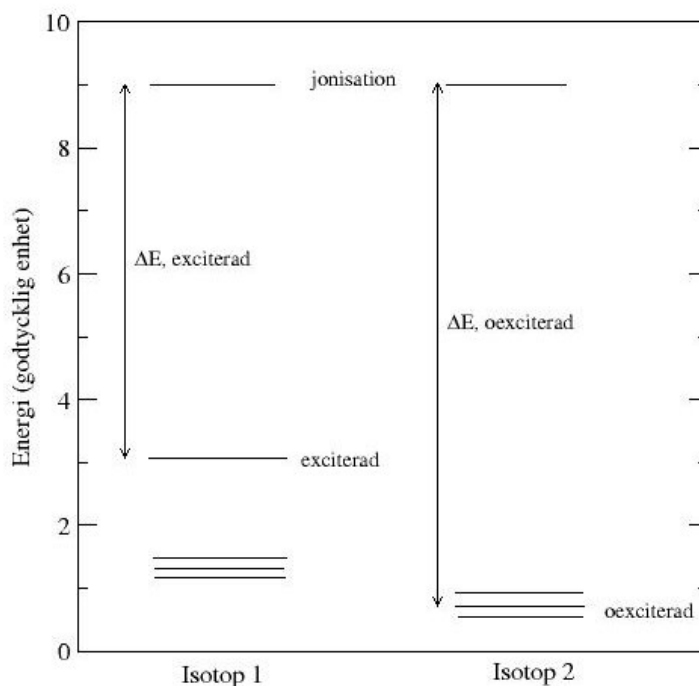
¹³ Strikt sett befinner sig inte elektroner i ett visst tillstånd utan de finns i alla möjliga tillstånd samtidigt med en viss sannolikhet att hitta dem i ett visst tillstånd vid en mätning. När laserljuset träffar atomen kommer det att växelverka med en elektron i ett bestämt tillstånd.

¹⁴ Rhodamin G är det svenska kemiska namnet men produkten säljs oftast under det engelska namnet rhodamine G.

av olika grundämnen kan kräva olika pumplasar. Vid urananrikning är koppar-ångelaser vanligast men även Nd:YAG-laser¹⁵ kan användas. För anrikning av andra grundämnen vars optimala våglängdsområde är kortare än urans 502 nm kan argonjonlaser vara lämpligt. Våglängdsmatchningen mellan pumplasn och färgämnet behöver inte vara exakt men ju sämre den är desto svagare blir kopplingen i färgämnet och den för anrikning användbara effekten blir lägre.

Beroende på de exakta detaljerna i färgämneslaserns konstruktion och valet av färgämne kan den antingen sända ut laserljus inom ett mycket smalt våglängdsområde (*single mode laser*) eller inom ett bredare intervall (*broad-band laser*). Oavsett typ går det oftast att reglera våglängden och välja ut de exakta våglängderna som önskas med hjälp av gitter och prismor. Graden av justerbarhet varierar från i princip obefintlig till intervall på flera hundra nanometer. Denna justerbarhet kombinerad med möjligheten att inom grundkonstruktionens begränsningar byta färgämne gör lasern till en mindre kritisk komponent än vad som ursprungligen kan misstänkas.

När väl den första selektionen mellan de olika isotoperna har skett så måste den eftertraktade isotopen, ²³⁵U i fallet urananrikning, skiljas från procesströmmen och det sker genom att den nu exciterade atomen joniseras, även detta med hjälp av laserljus. Joniseringen kan ske antingen i ett steg eller i flera steg men oavsett hur det görs krävs det en laser vars våglängd/våglängder matchar steget från den exciterade nivån till jonisationsnivån eller någon mellanliggande så att elektroner från den oexciterade nivån inte kan absorbera ljuset och på så sätt joniseras, se figur 2.



Figur 2: Förenklat termschema för två isotoper där isotop 1 har exciterats till ett mellanliggande tillstånd. Laserljuset måste anpassas så att energin överstiger ΔE , exciterad men understiger ΔE , oexciterad.

Om det sker i flera steg kan färgämneslasern användas till även detta processteg genom att laserljus med rätt våglängd tas ut från lasern, på samma sätt som ett antal olika våglängder kunde utnyttas för att "träffa" flera olika hyperfin-nivåer. Om

¹⁵ Laser med en kristall av $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG) dopad med neodym (Nd).

jonisationen görs i ett steg faller den nödvändiga våglängden inom området ultraviolett där det finns flera olika pulssade lasertyper att välja mellan¹⁶.

När den önskade isotopen till slut är joniserad behöver den skiljas från den övriga procesströmen vilket är relativt lätt då den är laddad till skillnad från den neutrala restströmmen. Den kan därför böjas av med hjälp av elektriska och magnetiska fält och samma villkor och begränsningar som beskrevs i frågan om kollimering av källan är applicerbara även här. Detsamma gäller den insamlingsenhet som samlar in den önskade isotopen genom kondensation (även restströmmen tas till vara på detta sätt) och som kan jämföras med de övriga ytor som finns i kammaren med avseende på tålighet för höga temperaturer och korrosion.

3.2.2. MLIS

Även om molekylbaserad laserisotopseparation, *Molecular Laser Isotope Separation* (MLIS), kan tyckas ligga nära den ovan diskuterade metoden AVLIS så skiljer metoderna sig åt avsevärt både vad det gäller teorin bakom och de tekniska lösningarna som används. MLIS bygger på excitation av vibrationsnivåer i molekyler som sönderdelas och detta sker vid låga temperaturer, jämfört med AVLIS som arbetar vid mycket höga temperaturer där atomära nivåer exciteras och atomerna joniseras. På grund av detta ser utrustningen annorlunda ut för de två metoderna.

Förenklat kan vibrationerna i en molekyl beskrivas som en harmonisk oscillation¹⁷ med frekvenserna

$$\nu_e = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\mu}},$$

där den reducerade massan μ är

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}.$$

De två massorna m_1 och m_2 motsvarar de två atomer som binds samman med någon form av elektronisk bindning med styrkan eller fjäderkonstanten k . I fleratomiga molekyler fås en (eller flera¹⁸) nivåer för varje möjlig parbindning vilket ger mer komplexa spektra¹⁹. För två olika isotoper kommer den reducerade massan att skilja sig åt och därmed också energinivåerna, vilket tillåter att vibrationsnivåerna exciteras selektivt för den önskade isotopen om våglängden för den belysande lasern kan väljas med tillräckligt hög noggrannhet. För UF₆ ligger den första²⁰ nivån av vibrationen, som kallas ν_1 och som är den som utnyttjas vid anrikning av uran, 0,078 eV över grundtillståndet vilket motsvarar en våglängd på laserljuset på 16 μm . Energiskillnaden mellan första nivån i ²³⁵U och motsvarande nivå i ²³⁸U är $1,25 \times 10^{-4}$

¹⁶ För gadolinium kan man t.ex. använda totalt tre olika våglängder; 590,7 nm för att excitera och sedan 635,2 nm samt 556,5 nm för att jonisera i två steg. Se <http://www.google.com/patents/EP0557479A4?cl=en>.

¹⁷ Detta är faktiskt en mycket bra approximation vid temperaturer skilda från de allra lägsta då kvantmekaniska effekter är viktiga, och de allra högsta där oscillationerna blir anharmoniska.

¹⁸ Fleratomiga molekyler kan både rotera och böjas men energin för dessa typer av rörelser ligger i intervall som är svåra att nå med optisk laser.

¹⁹ Oscillationerna är kollektiva och beror på vilka symmetrier som molekylerna har men antalet möjliga vibrationsmoder beror på antalet atomer i molekylerna och dess symmetrier.

²⁰ Harmoniska oscillatorer har ett energispektrum på formen $E = h\nu(n + 1/2)$, det vill säga högre och högre moder kan exciteras. I en perfekt harmonisk oscillator är energiskillnaden mellan nivåerna konstant men i en molekyl förändras kopplingskonstanten något när vibrationstillståndet exciteras varför avståndet mellan nivåerna skiljer lite ju mer exciterad moden blir.

eV så behovet av noggrannhet och stabilitet är något lägre än för AVLIS men ändå relativt stort. Den exakta våglängden som behövs för att anrika olika grundämnen beror förutom på vilket grundämne det rör sig om även på vilken typ av molekyl ämnet ingår i. Vanligast är molekyler av typen hexafluorid, XF_6 där X är det grundämne som ska anrikas, och mindre organiska molekyler²¹. Klorider kan också förekomma. Gemensamt för dessa är att i princip samtliga har vibrationsmoder som kan exciteras med ljus i den infraröda delen av spektrumet, runt 10-20 μm .

Kravet på korrosionsbeständighet hos utrustningen varierar beroende på vilken molekyl som används, från den i princip helt inaktiva koldioxidmolekylen till den väldigt korrosiva uranhexafluoriden²². Den senare kräver en korrosionsbeständighet motsvarande den för det rostfria stålet 316L eller bättre. Det kan noteras att det är mycket vanligt att bygga vacuumsystem av rostfritt stål av hög kvalitet även om de inte kommer att utsättas för korrosiva ämnen eftersom dessa stålqualiteter är lätta att rengöra och har låg utgasning vid låga tryck.

Innan molekylerna kan belysas med laser behöver de beredas i form av en stråle, eller snarare en vattenfallsliknande plym precis som i för AVLIS, med låg täthet, hög hastighet och mycket låg temperatur. Den låga tätheten krävs för att molekylerna inte ska krocka och den höga hastigheten för att lasern inte ska hinna stimulera de redan exciterade molekylerna då båda processerna leder till att molekylen deexciteras innan den hinner reagera vidare. Om temperaturen är för hög så kommer dels vibrationsnivåerna att breddas så att de överlappar för de olika isotoperna, dels kommer atomer av den oönskade isotopen att termiskt exciteras till högre liggande vibrationstillstånd. Svaret på alla dessa behov är att låta molekylerna, tillsammans med en bärgas (ofta kväve eller någon ädelgas), expandera ut genom ett expansionsmunstycke.

Om munstycket har rätt form, så kallad isentropisk konvergent-divergent form, så kommer expansionen av gasen i utloppet att leda till att gasen kyls ner och accelererar till låga temperaturer och höga hastigheter. Den temperatur som uppnås i munstycket, T , beror på flödehastigheten, här uttryckt i form av Mach-talet (hastigheten delat med ljudhastigheten i den aktuella gasen) M , kvoten mellan värmekapaciteten vid konstant tryck och konstant volym, γ , samt inloppstemperaturen, T_0 ,

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2.$$

Mach-talet kan i sin tur beräknas som

$$M = \frac{1}{v_{s0}} \sqrt{\frac{T_0 R}{m_{mol} \gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{p_u}{p_0} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right]}$$

där v_{s0} är ljudhastigheten i gasen, R den universella gaskonstanten (8 314,5 J/kmolK), m_{mol} är molekylmassan, p_0 trycket i inloppet och p_u trycket i utloppet. Det går sålunda att reglera både flöde, hastighet och temperatur för olika gaser med olika

²¹ Det underlättar om de övriga atomerna som ingår i molekylen så långt som bara möjligt är av en sådan sort att de i huvudsak bara har en naturligt förekommande isotop. Om inte så är fallet blir antalet möjliga isotopkombinationer och därmed variationer i excitationenergierna snabbt stort. Fluor, väte och kol har alla tre en isotop som totalt dominerar i förekomst.

²² Uranhexafluorid i sig är inte korrosivt men i kontakt med vatten, även i mycket små mängder, bryts molekylen ner i flera mindre beståndsdelar, bland annat den kraftigt korrosiva fluorvätesyran, HF.

värden på γ och molmassan utan att ändra form på munstycket, utan genom att ändra inloppstemperaturen och trycket.

Den laser som passar bäst in i processen, det vill säga en kontinuerlig²³ laser med hög effekt med en våglängd runt 10 μm , är koldioxidlasern. Precis som för AVLIS-anrikning är den exakta våglängden som anrikning av olika isotoper behöver ett relativt lätthanterligt problem. Våglängden från den i det närmaste monokromatiska koldioxidlasern kan manipuleras och ökas genom att låta laserstrålen passera en Ramancell²⁴ eller en etalon. Med hjälp av en sådan kan ljuset från koldioxidlasern med en våglängd på 10,6 μm töjas ut till den önskade våglängden, till exempel de 16 μm som används för anrikning av uran.

När molekylerna exciterats måste dessa på något sätt separeras från de oönskade molekylerna. De kan precis som i AVLIS-processen joniseras, men vanligare är att lagom mycket energi tillförs så att molekylerna istället bryts ner, dissocierar. Den energi som behövs för detta, några få elektronvolt i de flesta fall, motsvarar laserljus i det ultravioletta området av spektrumet. Energin kan antingen tillföras av en relativt enkel laser som arbetar i detta våglängdsområde men vanligare är att man utnyttjar en effekt i vibrationspektrumet där nivåerna "smetas ut" något av den störning som laserexcitationen utgör. Tack vare denna störning kan molekylerna absorbera många fotoner med låg energi som steg för steg höjer excitationsgraden i molekylerna tills den till slut dissocierar. Man kan alltså i detta steg av processen använda en korrekt modulerad koldioxidlaser som stegvis pumpar in energi i molekylerna.

Till slut måste resterna av den dissocierade molekylerna tas om hand. Den fraktion som innehåller den önskade isotopen fälls ut direkt eller fås att reagera med en lämplig substans så att den kan tas till vara. I urananrikning sönderfaller UF_6 -molekylerna till UF_5 och fritt fluor. Fluor är en extremt reaktiv gas som tas om hand genom att den får reagera med ett lämpligt ämne som binder fluoratomerna till sig. UF_5 har en lägre kondensationstemperatur²⁵ än UF_6 och faller ut i form av små flingor som lätt kan tas till vara. Återvinningsprocessen skiljer sig åt för olika molekyler men den ovan nämnda är tillämpbar för alla hexafluorider.

3.3. Gasdiffusion

Gasdiffusion har tillsammans med separation i centrifuger historiskt sett dominerat produktionen av anrikat uran. Metoden kräver dock upp mot en faktor 30 mer energi per separationsarbete (SWU, se bilaga) jämfört med centrifugseparation²⁶ och har därför fasats ut i takt med uppförandet av nya centrifuganläggningar. Isotopseparation via gasdiffusion bygger på det faktum att medelvärdet för rörelseenergin är densamma hos olika molekyler i en gasblandning i termisk jämvikt²⁷. En molekyl bestående av en lättare isotop rör sig därmed i genomsnitt snabbare än en

²³ Vibrationstillstånden som exciteras i MLIS har en mycket längre livslängd än de excitationer som utnyttjas i AVLIS så molekylerna hinner passera ur strålen innan de riskerar att deexcitera genom stimulerad emission. Lasern kan därför vara kontinuerlig vilket ger en betydligt högre produktionsstakt.

²⁴ Se till exempel R. Sußmann, *Optics Comm* 88 (1992) 408-414.

²⁵ UF_6 och UF_5 sublimerar inom ett stort tryckintervall, det vil säga ämnet går direkt från fast form till gasform och vice versa.

²⁶ Krass *et al.*, *Uranium Enrichment and Nuclear Weapon Proliferation*, SIPRI, Taylor & Francis Ltd (1983), s. 188.

²⁷ Fenomenet bygger på ekvipartitionsprincipen och förutsätter att alla molekyler har samma antal frihetsgrader vilket molekyler där bara isotopsammansättnings skiljer har.

molekyl bestående av en tyngre isotop²⁸. Gasdiffusion utnyttjar skillnaden i hastighet genom att separationssteget låter gasblandningen diffundera genom en tunn, solid barriär försedd med mikroskopiska porer. Diffusionen sker via slumpmässig vandring av gasmolekylerna, vilket gör att molekyler med högre hastighet oftare träffar och passerar genom en por i barriären. Gasblandningen som har passerat barriären kommer därmed att vara anrikad på den lättare isotopen. För en ideal barriär där porerna är så små att endast en molekyl kan passera i taget, så kallad effusion, erhålls följande anrikningsfaktor²⁹:

$$\alpha = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}}$$

där m_1 och m_2 är massan för den lättare respektive tyngre molekylen. Även i det ideala fallet ger ovanstående beroende på masskvoten m_2/m_1 en låg anrikningsfaktor vid separation av uranhexafluorid (1,0043) eller andra tunga molekyler.

Anrikningsfaktorn blir i praktiken dessutom betydligt lägre än i det ideala fallet beroende på två faktorer. Dels blir flödet av den lättare isotopen genom barriären mindre eftersom matarflödet utarmas under separationsprocessen. Den dominerande faktorn är dock svårigheten att tillverka en barriär som både har tillräckligt små porer och är tunn nog för släppa genom gasen, samtidigt som barriären måste kunna motstå tryckskillnaden mellan matar- och produktflödet. Vid separation av uranhexafluorid måste barriären dessutom vara korrosionsbeständig för att undvika att porerna täpps igen. Ett typiskt membran för gasdiffusion är några millimeter tunt och tillverkat av ett poröst metalliskt (sintrad nickel eller aluminium)³⁰ eller keramiskt³¹ material³².

Prestandan hos ett anrikningssteg påverkas givetvis även av gasens tryck och temperatur. Vid ökat tryck i matarflödet minskar den fria medelväglängden hos molekylerna i gasen, vilket i sin tur minskar anrikningsfaktorn eftersom det ökade antalet kollisioner vid membranets porer jämnar ut och minskar hastighetsskillnaden mellan de tunga och lätta molekylerna. Vid separation av uranhexafluorid är matartrycket typiskt mellan 0,3 och 0,5 bar. För att minimera antalet lätta gasmolekyler som diffunderar tillbaka till matarflödet behöver trycket i produktflödet vara lågt, med en typisk tryckskillnad på i storleksordningen 0,1 bar vid separation av uranhexafluorid. För att behålla önskat tryck och temperatur i matarflödena kräver detta att produktflödet först kyls i en värmeväxlare och sedan komprimeras i en kompressor innan nästa separationssteg. Även om en ökad temperatur hos matarflödet ökar molekyl- och därmed diffusionshastigheten genom membranet, innebär en hög temperatur också en ökad energiåtgång vid kompression av

²⁸ Den genomsnittliga rörelseenergin för en gasmolekyl ges av $\langle E \rangle = \frac{3}{2}k_B T$, där T är gasens temperatur och k_B är Boltzmanns konstant. Detta ger följande samband mellan hastigheterna hos två olika molekyler i gasen via det klassiska uttrycket för rörelseenergi, $E = \frac{1}{2}mv^2$:

$$\frac{\langle v_1 \rangle}{\langle v_2 \rangle} = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}}$$

där m och $\langle v \rangle$ är massan respektive det kvadratiska medelvärdet på hastigheten hos molekylerna.

²⁹ R.A. Ebel & L.P. Pasquier, Design of a Gaseous Diffusion Stage, Nuclear Engineering-Part XXIII, AIChE Symposium Series, 123(68) (1972), s. 107.

³⁰ D. Massignon, Gaseous Diffusion, Topics in Applied Physics Vol. 35, Uranium Enrichment, Springer-Verlag (1979), s. 127.

³¹ T. Wilkie, Tricastin points the road to energy independence, Nuclear Engineering International, Vol. 25, No. 305 (1980), s. 41.

³² Det bör nämnas att även polytetrafluoreten har studerats som möjligt barriärmaterial, se T. Aochi, R. Nakane and S. Takahashi, Research on and economic evaluation of uranium enrichment by gaseous diffusion in Japan, Nuclear Power and Its Fuel Cycle, Proceedings of an International Conference, Salzburg, 2-13 May 1977, Vol. 3, IAEA (1977), s. 127.

produktflödena. Detta innebär att temperaturen i praktiken behöver vara relativt låg, kring 80° C vid separation av uranhexafluorid. I detta sammanhang är även en låg temperatur fördelaktig för att minska korrosionen. Den faktiska anrikningsfaktorns relativt komplexa beroende av både gastemperatur och trycken i matar- och produktflödet, tillsammans med axialkompressorernas höga energikonsumtion, innebär att anrikningsfaktorn i praktiken behöver bestämmas experimentellt för att kunna optimera en anrikningsanläggning. Figur 3 visar en bild av gasseparationssteg för uranhexafluorid.



Figur 3. Gasseparationssteg för uranhexafluorid i symmetrisk kaskad.

Oavsett vilket ämne som ska anrikas med gasdiffusion måste det vara tillräckligt flyktigt för att kunna hållas gasfas under processen. Medan ämnen som klor och xenon redan är i gasfas vid tryck och temperaturer lämpliga för gasdiffusion, kräver anrikning av t.ex. kisel och sällsynta jordartsmetaller att ämnena ingår i en gasformig förening, typiskt hexafluorid. Fluorider har i detta sammanhang två fördelar, dels är fluor i princip helt isotoprent så att massdifferensen mellan molekylerna endast styrs av det ämne som ska anrikas. Dels kan föreningen hållas i gasform vid relativt låga temperaturer, likvärdiga med temperaturen vid urananrikning, för att minimera energiåtgången. Fluorider innebär dock att de höga kraven på korrosionsbeständighet består även vid anrikning av kisel och sällsynta jordartsmetaller.

För en effektiv separation genom membranet måste även villkoren för effusion uppfyllas, dvs. den fria medelväglängden hos gasmolekylerna måste vara större än porstorleken i materialet, vilken är i storleksordningen 10 nm vid separation av uranhexafluorid. Den fria medelväglängden l i en gas kan uppskattas med

$$l = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \pi P d^2}$$

där är k_B Boltzmanns konstant, T och P gasens temperatur respektive tryck och d är molekylernas diameter. Eftersom molekyldiametern för de ämnen som är aktuella för isotopseparation samtliga är kring 0,5 nm, kommer den fria medelväglängden inte skilja sig markant mellan olika gaser utan landar på i storleksordningen 100 nm

vid typiska temperaturer och tryck. Detta innebär att det inte finns några fysikaliska principer som hindrar att ett och samma membran kan användas för separation av flera olika ämnen, inklusive uranhexafluorid. I fallet med fluorider är den avgörande faktorn är snarare membranets korrosionsbeständighet.

En annan kritisk komponent vid isotopseparation med gasdiffusion är de kompressorer som används vilka måste ha ett utloppstryck på i storleksordningen 0,3-0,5 bar vid flöden på tusentals liter per minut. Vid separation av fluoridbaserade föreningar är givetvis även korrosionsbeständighet ett måste, vilket även gäller värmeväxlare och samtliga andra komponenter. Värmeväxlare och kompressorer måste minimera den eventuella tryckhöjning som sker om omgivande buffertgaser sipprar in i separationssystemet.

Sammanfattningsvis kan man dra slutsatsen att ingen av de faktorer som påverkar anrikningen beror på den absoluta massan, vilket gör att ett gasseparationssteg anpassat för separera två isotoper i princip även kan separera andra isotoper av intresse, även om effektiviteten kanske blir sämre. Detta bygger på det faktum att molekylernas storlek och fria medelväglängd för de ämnen som är av intresse också håller sig inom ett sådant intervall att diffusionsprocessen i princip inte påverkas i någon större utsträckning. Då den ideala anrikningsfaktorn minskar för tyngre ämnen krävs dock fler anrikningssteg vid separation av uranhexafluorid än t.ex. kiselhexafluorid för att nå samma anrikningsgrad.

I likhet med centrifugseparation utgör heller inte temperaturbeständighet något större problem vid materialval, eftersom de ämnen och föreningar som är av intresse kan hållas i gasform vid temperaturer likvärdiga med temperaturen vid urananrikning, dvs. kring 80° C. Den avgörande faktorn är snarare korrosionsbeständigheten, se kapitel 4, som särskiljer separation av hexafluorider från andra ämnen med gasdiffusion. Den mycket höga energiförbrukningen vid gasdiffusion gör också att metoder som gascentrifugering och lasermetoder är att föredra ur ett ekonomiskt perspektiv.

3.4. Aerodynamiska metoder

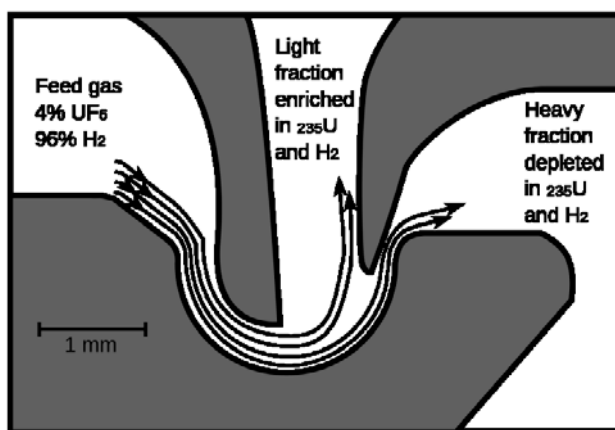
I likhet med isotopseparation i centrifuger använder även aerodynamiska separationsmetoder centrifugalkraft. Aerodynamiska metoder undviker dock rörliga delar i själva separationssteget och genererar istället en centrifugalacceleration genom att låta ett gasflöde med hög hastighet böjas av mot en krökt yta. Vid separation av uran med de metoder som diskuteras nedan utnyttjas en gasblandning av uranhexafluorid och en hög molandel väte eller helium (över 95 %), vilket möjliggör flödes hastigheter på flera hundra meter per sekund. En generell nackdel med metoderna är att de kräver komplicerade kaskadsystem för att minimera energiförbrukningen, som trots detta ändå blir hög eftersom gasen måste komprimeras mellan separationsstegen. En uppskattning av energiförbrukningen visar att denna är något högre än för gasdiffusion och förbrukar upp mot en faktor 35 mer energi per SWU jämfört med centrifugseparation³³.

³³ Krass *et al.*, Uranium Enrichment and Nuclear Weapon Proliferation, SIPRI, Taylor & Francis Ltd (1983), s. 188.

3.4.1. Separation med strålmunstycke

Figur 4 visar en schematisk bild av separation med strålmunstycke³⁴, där tryckgradienten i det krökta flödet gör att lättare molekyler böjs av mer och därmed genererar en anrikad ström som skiljs av med en flödesdelande läpp. Krökningsradien är typiskt kring 0,1 mm vilket resulterar i en centrifugalacceleration i storleksordningen 1000 gånger större än i en isotopseparerande centrifug. Vid separation av uranhexafluorid är matarflödets tryck mellan 0,25 och 0,5 bar och den trånga passagen gör att strålmunstycket typiskt utgörs av en bred kanal för att uppnå ett tillräckligt stort massflöde.

Separationsfaktorn för uranhexafluorid är ca 1,015 och för att minimera den energi som förbrukas då gasen komprimeras mellan separationsstegen, tas endast en mindre del av matarflödet ut som produkt med en typisk återflödeskvot $\theta = 0,25$.³⁵ Detta innebär att kaskaden blir mer komplex än vid t.ex. isotopseparation med centrifuger eller gasdiffusion som utnyttjar en symmetrisk återflödeskvot $\theta = 0,5$. Istället måste tre separata produktflöden föras framåt i kaskaden för att undvika att flöden med olika koncentrationer blandas.



Figur 4. Tvärsnitt av isotopseparation med strålmunstycke. Återgiven med tillstånd enligt Wikimedia Commons licensvillkor.

Oavsett vilket ämne som ska separeras i ett strålmunstycke är det av stor vikt att den genomsnittliga molekylvikten i gasen är låg, vilket resulterar i en hög ljudhastighet för gasen. Detta för att den höga flödes hastigheten inte ska överstiga ljudhastigheten, vilket skulle ge upphov till stöteffekter och turbulens i gasen och därmed störa ut separationseffekten. Vid separation av uran dras uranhexafluoridmolekylerna med de snabbt flödande väte- eller heliummolekylerna i hastigheter som inte vore möjliga i ren uranhexafluorid. Vidare gör friktionen mellan uranhexafluoriden och väte- eller heliummolekylerna att de lättare uranhexafluoridmolekylerna inte pressas lika hårt mot den krökta väggen i munstycket, vilket bidrar till att öka separationen. Båda dessa effekter är nödvändiga även vid separation av andra tyngre molekyler som t.ex. gadolinium och en hög utblandning med väte eller helium är således nödvändig även i dessa fall.

Separationen av de tunga och lätta isotoperna i ett strålmunstycke beror av flödes hastigheten in i munstycket och krökningsradien hos innerväggen. Om vi tänker oss ett fall där ett munstycke anpassat för gadolinium istället ska användas för separation av uran, som är betydligt tyngre, kommer hastigheten hos flödet behöva

³⁴ Metoden är även känd som *Becker jet nozzle process*.

³⁵ E.W. Becker, The Separation Nozzle Process for Enrichment of Uranium-235, Progress in Nuclear Energy, Vol. 1 (1977), s. 27.

ökas. Detta eftersom det krävs en högre tryckgradient i gasflödet för att uppnå likvärdig separation av en tyngre molekyl då munstyckets krökningsradie är konstant. Ifall detta är möjligt utan att problem med turbulens uppstår, beror på den specifika utformningen av munstycket. En komplicerande faktor är också att separationsvinkeln mellan det anrikade och utarmade flödet beror av masskillnaden mellan de isotoper som ska separeras, vilket påverkar placeringen av den flödesdelande läppen. Det går i princip att tänka sig en konstruktion där läppens position är justerbar, vilket skulle öka möjligheten att anpassa munstycket efter olika isotoper. En mycket stor del av kostnaden för en separationsanläggning ligger också i övriga komponenter som kompressorer och den relativt komplexa kaskaden. Det är därför inte orimligt att hela strålmunstycket byts ut för att anpassa anläggningen för anrikning av uran. Huruvida denna typ av modifikationer är möjliga eller sannolika ur både ett praktiskt och ekonomiskt perspektiv kräver dock mer detaljerad information om den specifika anläggningen och dess komponenter.

Det bör slutligen nämnas att i fallet då väte används som bärargas för en hexafluorid är det fullständigt nödvändigt att gasens temperatur inte blir för hög så att reaktionsraten mellan vätegaset och hexafluoriden är hålls försumbar, vilket annars skulle orsaka allvarliga korrosionsproblem.

3.4.2. Separation med virvelrör

En separationsmetod med virvelrör, även känd som *Helikon vortex process*, utvecklades under 1970- och 1980-talet i Sydafrika som också är det enda landet som har använt metoden i industriell skala. Förhållandevis få detaljer kring processen är kända i den öppna litteraturen, men separationssteget kan liknas vid en avsmalnande gascentrifug med fasta innerväggar. Gasen strömmar in tangentiellt mot innerväggen och virvlar med ökande vinkelhastighet längs tubens insida mot den smalare änden. Den resulterande centrifugalkraften samlar tyngre gasmolekyler mot innerväggen och flödet separeras i tubens ände. Till skillnad från separation med blåsmunstycke drivs virvelrör under övertryck upp mot 6 bar.³⁶

Separation med virvelrör kan enligt uppgift uppnå en separationsfaktor upp till 1,03 under förutsättning att endast en liten andel av matarflödet tas ut som produkt. Detta resulterar i ett ökat antal separata produktflöden som måste föras framåt i kaskaden. Med uppgifter om en mycket låg återflödeskvot $\Theta = 0,05$ innebär detta 19 separata produktflöden som måste komprimeras innan de förs vidare till kommande separationssteg. Rördragningen i en sådan kaskad blir mycket komplex och den sydafrikanska lösningen baseras sannolikt på en axialkompressor där flera produktflöden kan komprimeras parallellt utan sammanblandning. I denna typ av konstruktion grupperas separationsstegen i moduler som delar på samma kompressor samt värmväxlare för nedkylning av gasen.³⁷

Den brist på öppen information som råder kring isotopseparation i virvelrör gör att det också är svårt att göra mer än tämligen allmänna bedömningar av metoden. Gasen behöver ha samma egenskaper som i fallet med separation i strålmunstycke, eventuellt med undantag för den specifika turbulensproblematik som kan uppstå i ett strålmunstycke. I fallet då väte används är korrosionsproblematiken också i princip identisk med ovanstående fall. Skillnaden mot separation med strålmunstycke är snarare att separation med virvelrör har ännu fler likheter med gascentrifuger än

³⁶ Office of Scientific Intelligence, Central Intelligence Agency, South African Uranium Enrichment Program (augusti 1977), <http://www2.gwu.edu/~nsarchiv/NSAEBB/NSAEBB181/> (2014.11.24)

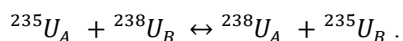
³⁷ Office of Scientific Intelligence, Central Intelligence Agency, South African Uranium Enrichment Program (augusti 1977), <http://www2.gwu.edu/~nsarchiv/NSAEBB/NSAEBB181/> (2014.11.24)

föregående metod. I likhet med gascentrifugering gäller därmed att även om ett visst virvelrör är utformat för att separera specifika isotoper kan det användas till separation av tyngre ämnen, även om effektiviteten därmed minskar. En viss justering av uttagsventilen kommer dock troligtvis att vara nödvändig i sådana fall.

3.5. Kemiska separationsmetoder

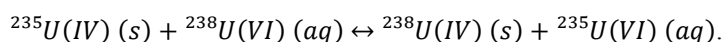
Vid kemisk isotopseparation används en kemisk förening som innehåller det ämne som ska isotopsepareras. Föreningen genomgår en kemisk reaktion där de olika isotoperna har olika reaktivitet. Vid jämvikt har de olika isotoperna något olika halt i de olika föreningarna, varpå föreningen som anrikats på den önskade isotopen kan utvinnas.

Vad gäller kemisk separation av uran finns flera olika metoder. Dels gasformiga uranföreningar eller uranföreningar i lösning som reagerar med en fast jonbytare, dels metoder baserade på interaktion mellan två lösningar. Den generella jämviktsformeln för det första reaktionssteget vid uranseparation kan skrivas



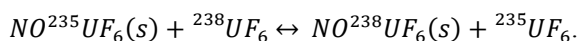
Genom att binda den ena föreningen vid en jonbytare eller överföra den till en annan vätskefas kan därmed en fraktion anrikad på den ena isotopen utvinnas. För att kemisk separation ska vara effektiv krävs förhållandevis stora relativa masskillnader mellan isotoperna. Detta har medfört att metoden bara har fungerat framgångsrikt för ett begränsat antal lätta isotoper och effektiviteten avtar snabbt med ökad atomvikt. Vidare krävs att jämvikt inställer sig någorlunda snabbt för att processen ska vara effektiv. Detta gäller både jämvikt mellan uranföreningarna och jämvikt mellan uranföreningen som ska utvinnas och jonbytare eller extraktionsmedel.

För lösningsbaserade metoder löses en uranförening vanligtvis i en syra, exempelvis saltsyra, svavelsyra eller fluorsyra, varpå uranet uppträder med två olika oxidationstal. Uran i det ena oxidationstillståndet absorberas i en jonbytare och jämvikt inställer sig mellan lösning och jonbytare,



Skillnaden i uranisotopernas reaktivitet med jonbytaren är i allmänhet försumbar, istället är det benägenheten att uppträda i ett visst oxidationstillstånd som är olika för de olika isotoperna. Detta medför i sin tur att den isotopanrikning som erhålls i de olika oxidationsstillstånden leder till en isotopanrikning hos de atomer som absorberas i jonbytaren. Vid lösning i exempelvis saltsyra ansamlas ${}^{235}\text{U}$ i oxidationstillståndet (VI), som ansamlas i jonbytaren.

För gasbaserade metoder är principen densamma men uranhexafluorid i gasfas reagerar med komplexbundet uranhexafluorid i fast fas. ${}^{235}\text{U}$ anrikas i gasfasen och utvinns genom att låta jämvikt inställa sig med en jonbytare. Ett flertal kväveoxidkomplex kan användas för den fasta fasen, såsom NOUF_6 , NOUF_7 och NO_2UF_7 . Principen är densamma som för vätskebaserade processer och jämviktsrelationen kan skrivas



De här metoderna kallas ibland jonbytarmetoder. Separationen i varje steg är förhållandevis låg, vilket gör att många separationssteg krävs. Ett annat hinder för metodens effektivitet är tiden för jämvikt att inställa sig med jonbytare. Reaktanterna måste väljas så att kinetiken inte blir orimligt långsam. En snabbare process än jonbytaranrikning är vätskeextraktion. Vid vätskeextraktion är det första steget likadant som vid jonbytaranrikning, men istället för att den anrikade fasen utvinns i en jonbytare låter man jämvikt inställa sig mellan två icke-blandbara lösningsmedel. De två uranföreningarna har olika löslighet i de olika faserna och därmed anrikas den önskade isotopen i den ena fasen och utarmas i den andra. För vätskeextraktion används vanligtvis motströmsextraktion i kolonner. Fördelen med vätskeextraktion är som redan nämnts att jämvikt inställer sig betydligt snabbare mellan två vätskefaser än mellan vätska/gas och jonbytare.

Kinetiken för kemisk anrikning innehåller alltså två termer, dels själva reaktionen mellan uranföreningarna, dels interaktionen med jonbytare eller extraktionsmedel. Som redan nämnts finns problem med metoden som gör att den inte är konkurrenskraftig för urananrikning. Ett problem är att separationen är väldigt låg i varje steg, ett annat att jämvikt tar lång tid att inställa sig för de komponenter som ingår i systemet. Ytterligare en nackdel är att effektiviteten avtar kraftigt med minskande massdifferens mellan isotoperna vilket gör metoden mer lämpad för separation av lätta ämnen. Kemiska separationsmetoder har heller inte fått något genombrott på stor skala. Det längst gångna storskaliga projektet är franska Chemex som är en extraktionsmetod som utvecklades under sent 1960-tal och prövades i ett par försöksanläggningar under 1970-talet. I Chemex utnyttjas jämviktsreaktionen mellan trevärt och fyrvärt uran, där ^{235}U föredrar det fyrvärda tillståndet. I pulsade motströmskolonner möts en organisk fas och en vattenfas där det fyrvärda uranet har högre löslighet i den organiska fasen. Efter ett anrikningssteg kan faserna antingen behandlas kemiskt för att återanvändas, eller föras in i nästa steg för ytterligare anrikning. Den låga separationsfaktorn i varje steg gör att en Chemex-kaskad består av flera tusen kaskadsteg.

Eftersom varje steg har låg separationsfaktor och tar lång tid lämpar sig kemisk separation främst för anrikning av uran till måttliga anrikningsgrader. För anrikning till vapenkvalitet skulle extremt långa kaskadkonfigurationer krävas, och med tiden det tar för varje steg skulle det förmodligen ta år innan tillräckligt höga halter uppnås. I detta avseende är separationsmetoden att betrakta som mindre spridningskänslig.

För kemisk separation är det svårt att bedöma huruvida det går att anrika uran i en anläggning byggd och optimerad för separation av andra isotoper. Den nödvändiga hårdvaran i form av kontaktkolonner av olika slag, jonbytare, pumpar, behållare och rörsystem är i princip helt generisk och liknar den som används i övrig kemisk industri. Den stora skillnaden ligger i de kemikalier som används men dessa är förbrukningsvaror och går att köpa separat från helt separata leverantörer på ett sådant sätt att syftet inte framgår. Den enda egenskap som skulle kunna avslöja eventuella proliferationsnyften är om en anläggning konstrueras och byggs för att vara kriticitetssäker även om inga fissila isotoper enligt den officiella planen ska separeras.

3.6. Elektromagnetiska separationsmetoder

En mycket hög anrikningsfaktor kan uppnås genom att styra och separera joner med hjälp av ett elektromagnetiskt fält. Elektromagnetiska separationsmetoder utnyttjar

således ett joniserat matarflöde och vi hänvisar till kapitlet om isotopseparation med laser för detaljer kring jonkällor. Den höga anrikningsfaktorn hos elektromagnetiska separationsmetoder gör att endast ett fåtal steg krävs i en kaskad, men den låga densiteten hos matarflödet leder till en relativt låg produktionsrat.

3.6.1. Calutronen

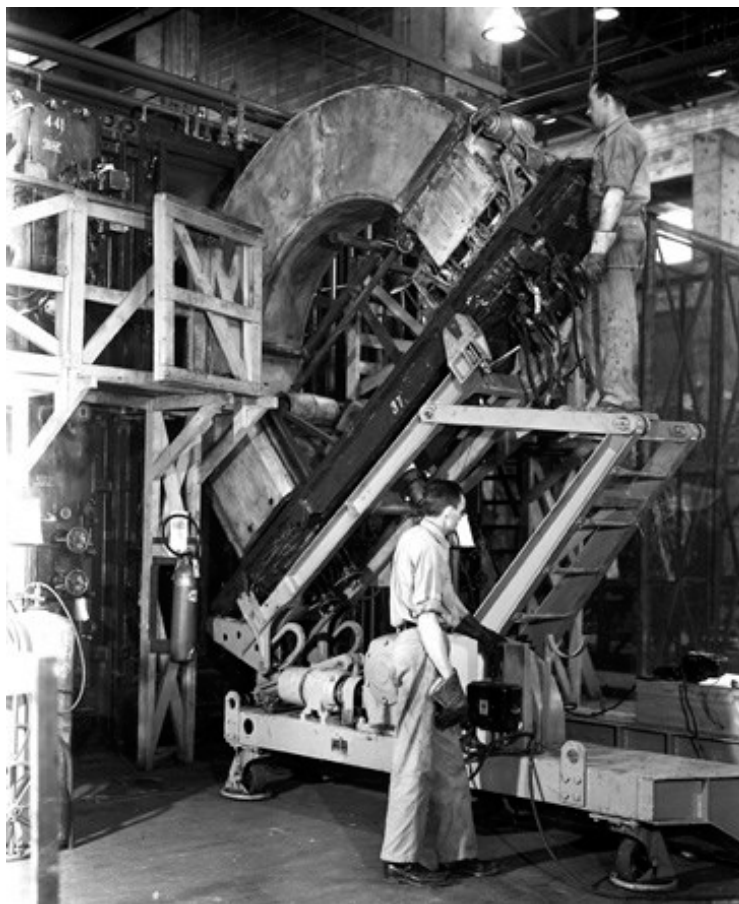
Calutronen utvecklades under Manhattanprojektet och utnyttjar principen bakom masspektrometri. Jonerna accelereras i ett elektriskt fält och det fokuserade matarflödet skjuts in i en vakuumkammare med ett homogent magnetfält som är vinkelrät mot jonernas hastighet. Den resulterande kraften från magnetfältet får jonerna att böja av i en cirkulär bana vars radie ges av:

$$r = \frac{\sqrt{2mV/q}}{B}$$

där m och q är jonens massa respektive laddning, V den elektriska spänning som accelererat jonerna och B magnetfältets styrka. Krökningsradiens massberoende är en direkt konsekvens av Newtons andra lag enligt vilken en lättare isotop utsätts för en större acceleration än en tyngre isotop om dessa påverkas av samma kraft. Joner med olika massor kommer således att följa banor med olika radie. För typiska värden vid separation av uran är banradien ca 1,2 m och skiljer sig endast 15 mm mellan ^{235}U och ^{238}U , vilket dock är tillräckligt för att en slitsad jonkollector ska kunna samla in ett produktflöde med en anrikningsfaktor α mellan 20 och 40. Avsevärt högre anrikningsfaktorer är möjliga men på bekostnad av en kraftigt reducerad produktionsrat, varför ovanstående anrikningsfaktor får betraktas som en praktisk övre gräns då stora mängder material ska separeras.

Trots den höga anrikningsfaktorn är Calutronen en ineffektiv isotopseparator för mer än mikroskopiska mängder. För att undvika att jonerna repellerar varandra och stör banan måste strömmen i matarflödet vara relativt låg, i storleksordningen 0,1 A, vilket innebär att massflödet blir mycket lågt. De Calutroner som användes under Manhattanprojektet producerade endast ca 100 mg ^{235}U per dag, och över tusen enheter kördes parallellt.

Som ekvationen ovan visar så beror krökningsradien på jonens massa vilket ger olika radie för olika isotoper. Radien kan variera avsevärt och en anläggning anpassad för uran med en krökningsradie på 1,2 m skulle om den istället användes för anrikning av litium ge en radie på något över 20 cm. Dock så är det relativt enkelt att anpassa radien med hjälp av magnetfältet B . En anläggning byggd för anrikning av lättare isotoper än uran skulle kräva kraftigare magneter om den skulle användas för separation av uran. Om det skulle gå att uppgradera magneterna beror på detaljer i konstruktionen. Eftersom ökningen i magnetfält, för en konstant radie, beror på roten ur isotopmassan blir ökningen inte så överväldigande stor. Att gå från anrikning av gadolinium till uran kräver en ökning av magnetfältet på 23 %. I fallet permanentmagneter kan det finnas geometriska begränsningar som gör att magneter av effektivare magnetiska material måste användas, men om anläggningen använder elektromagneter räcker det med att öka strömstyrkan med motsvarande procenttal så länge som magneten och dess upphängning tål det ökade magnetfältet.



Figur 5. Isotopseparation i Calutron.

På samma sätt som i fallet AVLIS måste de separerade jonerna tas om hand på något sätt. Är flödena mycket små, vilket de ofta är i Calutroner, så skulle de efter det att de gjorts neutrala få kondensera på en uppsamlingsyta som byts satsvis och den anrikade isotopen tas om hand. Vid större flöden krävs det en kontinuerlig uppsamlingsprocess på samma sätt som för AVLIS, med samma behov och begränsningar. Dock så är materialstrålen i en Calutron så väl sammanhållen att beläggningar på utrustningens insida är ett mindre problem och behovet av heta ytor där beläggningen kontinuerligt kan rinna bort minskar eller utgår helt.

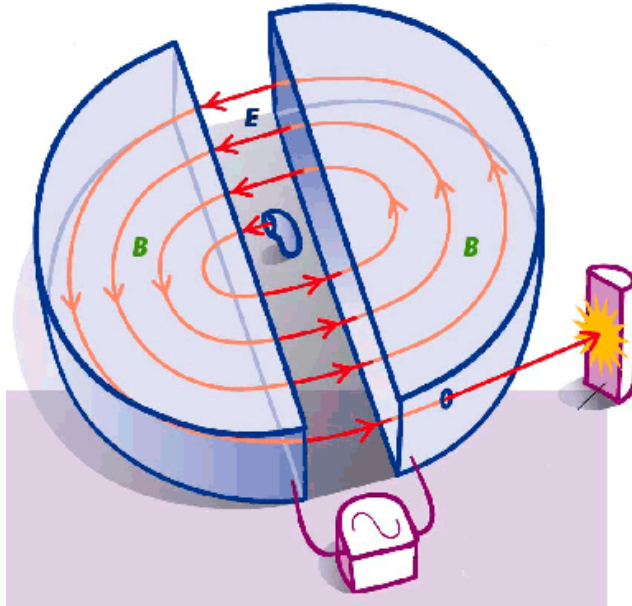
3.6.2. Cyklotronresonans

Även isotopseparation via cyklotronresonans nyttjar den cirkulära bana som uppstår då en laddad partikel färdas i ett homogent magnetfält. Frekvensen på den cirkulära banan ges av cyklotronfrekvensen:

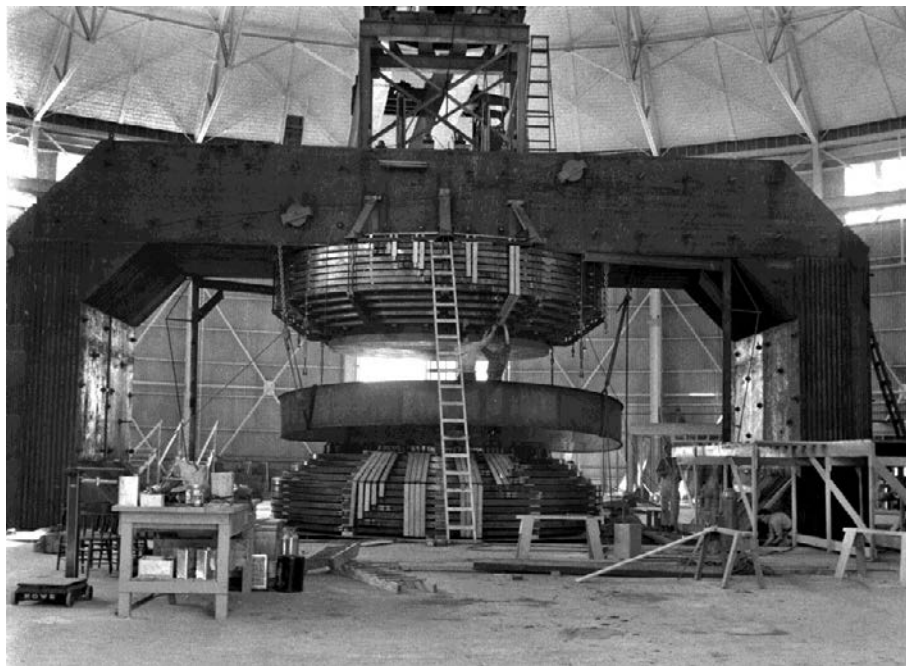
$$f_c = \frac{qB}{2\pi m}$$

vilken är oberoende av partikelns hastighet v . En ökad hastighet hos partikeln innebär även att cirkelbanans radie ökar enligt ekvationen i avsnitt 3.6.1, vilket är den underliggande mekanismen bakom isotopseparation med cyklotronresonans, där ett plasma drivs genom ett starkt, uniformt magnetfält skapat av en omgivande solenoid. En jons spiralrörelse genom plasmat svarar mot cyklotronfrekvensen vilket

innebär att en lättare isotop har en något högre frekvens. Genom att generera ett varierande elektriskt fält parallellt med jonernas cirkelrörelse, där frekvensen på det elektriska fältet sammanfaller med cyklotronfrekvensen för den åtråvärda isotopen, accelereras den utvalda isotopen och radien på dess cirkelbana ökar, se figur 6. Figur 7 visar en tidig anläggning för isotopseparation via cyklotronresonans.



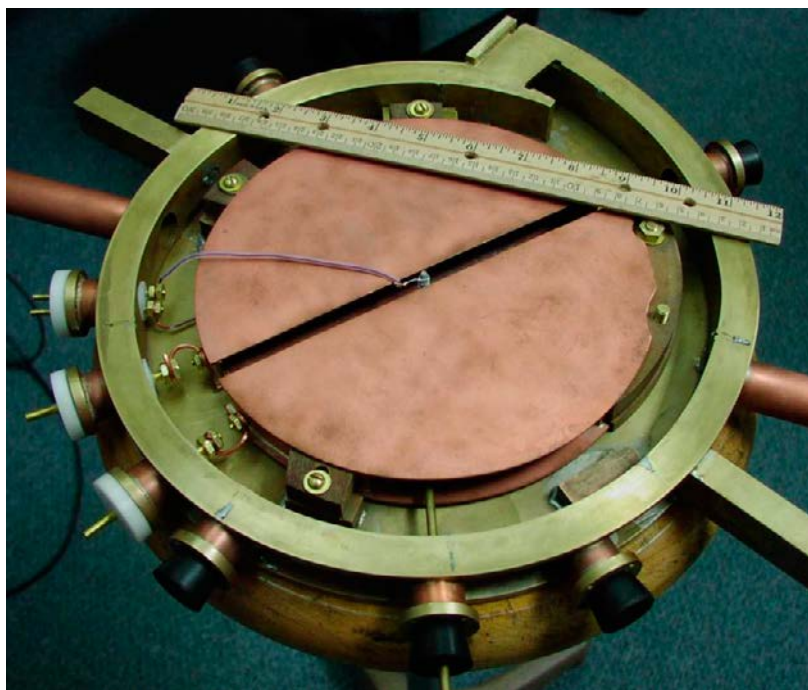
Figur 6. Acceleration av en jon via cyklotronresonans.



Figur 7. Anläggning för isotopseparation via cyklotronresonans.

Joner vars cyklotronfrekvens inte stämmer överens med frekvensen på det oscillerande elektriska fältet kommer växelvis att accelereras och bromsas upp och därmed inte få något nettobidrag i rörelseenergi. En överensstämmande cyklotronfrekvens innebär dock att resonans uppstår och jonens cirkelradie ökar i takt med

den tillförda rörelseenergin från det elektriska fältet. Vid separation av uran kan jonernas cirkelradie öka från i storleksordningen någon millimeter till flera centimeter vilket möjliggör en uppsamling i slutet på kammaren, se figur 8.



Figur 8. Exempel på cyklotron med insamlingsenhet i övre delen av bilden.

Precis som i en calutron kan magnetfältet varieras för att anpassas till isotoper med olika massor, med förbehållet att cyklotroner är betydligt mer komplicerade system än Calutroner, med varierande elektriska fält som ska anpassas till resonansfrekvensen. En generell faktor att ta hänsyn till är också att ett plasma har starkt skärmande egenskaper, vilka försvårar för det elektriska fältet att penetrera plasmata. För att cyclotronresonans ska uppstå hos den isotop som ska anrikas måste det elektromagnetiska fältet vara precis inställt, motsvarande en noggrannhet på 1 % vid separation av uran. Detta utgör inget större tekniskt hinder gällande det elektriska fältet, men ställer höga krav om homogeniteten hos det magnetfält som genereras av solenoiden. Sammanfattningsvis innebär detta i praktiken att en anpassning till olika isotoper är betydligt mer komplicerad än i fallet med en calutron och därmed kräver en individuell bedömning från fall till fall.

Det bör slutligen nämnas att cyklotronfrekvensen även kan nyttjas för isotopseparation i en så kallad plasmacentrifug. Genom att alstra elektriska urladdningar vinkelrät mot ett starkt magnetfält, typiskt genererat via supraleddande magneter, kan ett mycket snabbt roterande plasma skapas. Cyklotronfrekvensens massberoende innebär att olika isotoper har olika rotationshastighet och därmed rör sig olika fort vid en given radie och kolliderar. Vid en kollision tenderar tyngre joner att öka hastigheten medan lättare joner saktar ner. Detta gör att tyngre isotoper kommer att driva mot ytterkanten av plasmata och koncentrationen av den lättare isotopen ökar närmare centrum. På detta sätt liknar plasmacentrifuger anrikning i gascentrifuger, men processen är långt mer komplex och svårkontrollerad, mycket beroende på de utmaningar som fortfarande finns inom plasmafysiken. Detta innebär även att det är svårt att göra några generella uppskattningar utöver de som diskuterats ovan och en individuell bedömning krävs från fall till fall.

4. Korrosionsbeständighet

Som det framgår av analysen av de olika anrikningsmetoderna är det ofta endast korrosionsbeständigheten i de olika konstruktionsmaterialen som avgör vilka isotoper som kan anrikas. I de fall då man använder isotoper i en gas- eller vätskeform som inte är korrosiv, till exempel vid anrikning av xenon (ädelgas) eller kol i form av koldioxid, spelar korrosionsbeständigheten hos materialen mindre roll, men om man vill anrika uran³⁸ får beständigheten stor betydelse. För alla de metoder där det ämne som ska anrikas måste vara i gasform (till exempel centrifugering, MLIS och aerodynamiska metoder) är det i princip bara uranhexafluorid, UF₆, som går att använda. Även andra föreningar och molekyler som förekommer vid anrikning kan vara korrosiva men ytterst få kommer upp i den korrosivitet som UF₆ utsätter konstruktionsmaterialen för. Det krävs en detaljerad analys från fall till fall för att avgöra lämpligheten för kombinationen av material och användning.

UF₆ i sig korroderar inte något av de aktuella konstruktionsmaterialen men i kontakt med vatten, till exempel i form av fukt från luften, sker en häftig kemisk reaktion där framför allt vätefluorid, HF, bildas. Tillsammans med vatten bildas i sin tur fluorvätesyra som är en av de mest korrosiva kemikalier som finns. Inget material är helt opåverkat av korrosion utan den avgörande frågan är hur mycket korrosion som kan tillåtas, eller omvänt hur länge en komponent måste hålla innan den byts. Till de konstruktionsmaterial som räknas som tillräckligt beständiga hör koppar och kopparlegeringar med hög kopparhalt, aluminium och aluminiumlegeringar med hög aluminiumhalt, nickel och nickellegeringar med mer än 60 % Ni, fluoriderade polymerer (till exempel Viton) samt vissa former av rostfritt stål. Återigen finns det ingen absolut gräns för vilka stålsorter som kan användas, men som en enkel tumregel bör stål med en korrosionsbeständighet motsvarande stålqualiteten 304 eller sämre helst inte användas. Stålqualiteten 316 och bättre räknas oftast som beständig nog och 316L som fullgod. Av dessa material är det endast vissa aluminiumlegeringar och några få mycket speciella ställegeringar som samtidigt är korrosionsbeständiga och starka nog för att kunna användas i centrifuger.

I de fall då konstruktionsmaterialet i sig inte är beständigt nog kan det beläggas med en mer beständig yta. Bland möjliga beläggningsmaterial återfinns polyuretan, teflon och vissa hartser. Beläggningen måste förstås passa till applikationen och får inte nötas bort för fort. Till exempel så kan man i en centrifug inte använda för styva hartser då de kan skadas när centrifugen vibrerar. Polyuretan passar inte för användning vid mycket låga temperaturer. Slutligen måste givetvis även beläggningen fästa vid konstruktionsmaterialet. Det finns så många möjliga kombinationer av användningsområden, konstruktionsmaterial och beläggningar så en detaljerad analys måste göras från fall till fall.

Även uran i metallisk form utsätter sin omgivning för stora påfrestningar, framför allt vid de höga temperaturer som förekommer i AVLIS. Den enda metall som tål flytande uran och uranånga över en längre tid är tantal. Tantal har en smältpunkt på 3290 K så ämnet kan användas för anrikning av alla isotoper som är aktuella för anrikning med AVLIS, se tabell 1 i avsnitt 3.2.1. Dock är tantal i sin rena form relativt mjukt så metallen används som foder för att skydda ytan på ett underliggande starkare konstruktionsmaterial. Fodret kan även vara tillverkat av tantalkarbid, -nitrid eller -borid. För tillverkning av mindre komponenter som måste vara både beständiga, starka och tåla höga temperaturer kan keramer användas. Bland de vanligaste är CaF₂, CaZrO₃, Ce₂S₃, Er₂O₃, HfO₂, MgO, Y₂O₃ och ZrO₂.

³⁸ Samma problem uppkommer vid anrikning av svavel eftersom man då använder svavelhexafluorid och motsvarande för vissa lantanider (jordartsmetaller).

5. Konsekvenser för svensk exportkontroll

Det juridiska läget i frågan om hanteringen av utrustning och teknologi för anrikning av andra ämnen än uran är inte helt klart. På det globala planet, för de stater som följer NSG:s exportkontrollistor, finns det viss vägledning men NSG:s riktlinjer och noter är bara rådgivande. I detta fall uppmanar de enbart det exporterande landet att uppmärksamma de risker som kan finnas. Detta kan tolkas på flera olika sätt som framgår av kapitel 2. Inom EU finns inte ens dessa noter vilket i lagens striktaste tolkning skulle kunna göra det möjligt för en tillverkare eller förmedlare att sälja och exportera en anläggning för anrikning av andra grundämnen än uran utan att kontakta de licensierande myndigheterna. Dock har detta aldrig testats i domstol och det finns ingen vägledande praxis. Då produkterna formellt inte är listade i förordningen 428/2009 (eller dess uppdateringar) så skulle en riskexport troligen hanteras som ett så kallat "catch-all"-ärende. Det kan exempelvis innebära att licensieringsmyndigheterna kan kräva att en licens utfärdas (eller att en licens nekas) även för produkter som inte finns med i exportkontrollförordningen. Då måste myndigheterna kunna visa att det finns en risk för proliferation om produkten skulle exporteras. I detta fall skulle det troligen behöva visas att utrustningen kan användas även för anrikning av uran.

Som vi har sett ovan så beror det på vilken metod som används och denna rapport får från det perspektivet mer ses som en vägledning. Vid ett konkret exportkontrollärende måste möjligheten analyseras i detalj men vissa viktiga frågeställningar kan redan nu lyftas fram:

- Bygger den aktuella metoden på bara skillnader i massa mellan isotoperna eller på någon annan fysikalisk eller kemisk egenskap unik för olika grundämnen?
- Använder man samma typ av medium (bärgas, kemisk förening o.s.v.) för anrikning av det förmentade ämnet som för anrikning av uran för denna metod?
- Är anläggningen byggd för att arbeta med samma miljöparametrar (t.ex. tryck och temperatur) som krävs vid anrikning av uran?
- Är anläggningen så korrosionsbeständig som urananrikning oftast kräver?
- Är det meningsfullt att anrika det förmentade grundämnet med den aktuella metoden?

Den sista frågan är väldigt öppen då det finns flera olika perspektiv att beakta. Bedrivs anrikningen med strikt ekonomiska motiv? Kan en ekonomiskt oförsvarbar anläggning motiveras med legitima säkerhetsskäl? Vill aktören göra sig oberoende av en eventuellt osäker världsmarknad? Finns det mer svårdefinierade men legitima motiv så som nationell stolthet bakom beslut? Många av de metoder som beskrivits ovan kan användas, ibland med mindre eller större anpassningar, för anrikning av många olika grundämnen, men med varierad effektivitet beroende på grundämnenas egenskaper. Det som kan vara en oacceptabelt dålig effektivitet för en kommersiell aktör kan vara fullt tillräcklig för en proliferatör. Frågorna som till slut måste besvaras är om det över huvud taget är möjligt att använda metoden för anrikning av uran och om så är fallet, hur stora anpassningar måste i så fall göras. De två frågorna är troligen mycket svåra att ge ett exakt svar på, utan även andra, icke-tekniska, faktorer måste troligen vägas in för att ett eventuellt exportkontrollärende ska kunna avgöras.

Bilaga – Terminologi

Inom området isotopseparation förekommer en del begrepp som återkommer i den här rapporten. För att tydliggöra dessa begrepp och undvika upprepningar har en förklaring av dessa begrepp samlats här.

Separativt arbete: Separativt arbete mäts i enheten SWU (Separative Work Unit) och är ett mått på hur mycket separativt arbete som krävs för att anrika en viss mängd material från en halt till en annan. Det kan även vara ett mått på effektiviteten hos en separationsanläggning. Om en viss anläggning klarar att anrika en viss mängd material från en anrikning till en annan under en viss tid kan anläggningen sägas ha så många SWU per tidsenhet. Enheten SWU/år kan även användas om ett separationssteg eller t ex enskilda centrifuger. Antalet SWU/år är emellertid inte en inneboende egenskap hos exempelvis en centrifug utan beror på tillgänglighet, driftsbetingelser, mellan vilka halter materialet anrikats, etc.

Stage enrichment factor: Stage enrichment factor, α , är definierad som kvoten mellan relativa isotopkvoten produktströmmen och matarströmmen. Isotopkvoten, R , är i sin tur definierad utifrån isotophalten, N :

$$R = \frac{N}{1 - N}$$

Stage enrichment factor blir då:

$$\alpha = \frac{R'}{R} = \frac{N'(1 - N)}{N(1 - N')}$$

De flesta separationsmetoder bygger på kaskader där separationen i varje steg är låg. Kvoten mellan isotopkvoten i produktflödet och matarflödet blir då ett värde strax över 1.

Enrichment gain: För vissa beräkningar används en variant av stage enrichment factor som kallas enrichment gain och är definierad enligt:

$$\varepsilon = \alpha - 1$$

Eftersom α normalt är nära ett är ε ett mycket litet tal.

Återflödeskvot: Återflödeskvot, eller *cut*, är kvoten mellan produktflödet och matarflödet:

$$\theta = \frac{L'}{L}$$

Hur stor återflödeskvoten är påverkar hur en kaskad ska konfigureras för att strömmar med olika halter inte ska blandas.



2015:13

Strålsäkerhetsmyndigheten har ett samlat ansvar för att samhället är strålsäkert. Vi arbetar för att uppnå strålsäkerhet inom en rad områden: kärnkraft, sjukvård samt kommersiella produkter och tjänster. Dessutom arbetar vi med skydd mot naturlig strålning och för att höja strålsäkerheten internationellt.

Myndigheten verkar pådrivande och förebyggande för att skydda människor och miljö från oönskade effekter av strålning, nu och i framtiden. Vi ger ut föreskrifter och kontrollerar genom tillsyn att de efterlevs, vi stödjer forskning, utbildar, informerar och ger råd. Verksamheter med strålning kräver i många fall tillstånd från myndigheten. Vi har krisberedskap dygnet runt för att kunna begränsa effekterna av olyckor med strålning och av avsiktlig spridning av radioaktiva ämnen. Vi deltar i internationella samarbeten för att öka strålsäkerheten och finansierar projekt som syftar till att höja strålsäkerheten i vissa östeuropeiska länder.

Strålsäkerhetsmyndigheten sorterar under Miljödepartementet. Hos oss arbetar drygt 250 personer med kompetens inom teknik, naturvetenskap, beteendevetenskap, juridik, ekonomi och kommunikation. Myndigheten är certifierad inom kvalitet, miljö och arbetsmiljö.

Strålsäkerhetsmyndigheten
Swedish Radiation Safety Authority

SE-17116 Stockholm
Solna strandväg 96

Tel: +46 8 799 40 00
Fax: +46 8 799 40 10

E-mail: registrator@ssm.se
Web: stralsakerhetsmyndigheten.se