

# F0006T Labb 1 – Radioaktivitet

Apr 28, 2026, 33 min read

## Radioaktivitet

*Tjernobyli; Cs-137-nedfallet efter Tjernobyli*

ERIK ELFGREN, SVERKER FREDRIKSSON & SUNE MARKLUND · AUGUSTI 2025

INSTITUTIONEN FÖR TEKNIKVETENSKAP OCH MATEMATIK

### INTRODUKTION

#### Labbens två delar

Labben har inga farliga strålningsnivåer eller högaktiva prover.

- **Del A** — mätning av radioaktivitet i livsmedel.
- **Del B** — analys av betaspektrum från Cs-137.

Detta ska ni göra i anslutning till labben:

- **Hemuppgifter** ska göras i god tid **före** labben eftersom de kan ta ett par timmar.
- **En rapport** som ska lämnas in i Canvas senast **två veckor** efter labbtillfället. Notera att rapporten utgör den större delen av tiden för labben.

#### Bonuspoäng

Om den första versionen av rapporten är välgjord (dvs uppfyller instruktionerna under Viktigt) och lämnas in i tid kan den ge en **halv bonuspoäng** på tentan.

### Returer och försening

- Den som kommer dåligt förberedd till labben kan avvisas.
- **Normalt ges bara en retur. Aldrig mer än två.** Då får ni göra om labben en annan gång.
- Om ni inte följer instruktionerna i rapportavsnittet kan ni få retur utan kommentarer. Grovt försenad inlämning likväl som icke-åtgärdade kommentarer på returen kan leda till att ni blir underkända på laborationen.
- Den som kommer mer än 30 min för sent till labben får en extrauppgift att lämna in inom en vecka.

## HEMUPPGIFTER

### Läsanvisning

Läs labbinstruktionen och boken Young & Freedman (2015), kapitel **43.3** och **43.4**, för att lösa hemuppgifterna!

Före labben ska ni ha **läst teoriavsnitten, kollat** på experimentavsnitten och gjort uppgifterna i **H1 & H2**. Lösningarna redovisas på labben.

### H1 Moment A

#### 1) Ta med livsmedel att mäta på (frivilligt)

Lämpliga livsmedel är renkött, älgkött, svamp och insjöfisk. Köpt mat duger sällan. Provet får inte vara fryst, och ska vara i så små bitar att det går att packa tätt i en provburk på antingen 1 liter eller ca 2 deciliter. Om ni inte har med något prov får ni låna ett.

#### 2) Vad är bakgrundsstrålning?

Vad är bakgrundsstrålning? Vilka är de vanligaste källorna? Vilken är den viktigaste källan i labben? Se **A2 Utrustning**, se nedan.

#### 3) Beräkna aktiviteten för 1,0 kg Seltin

Redovisa en teoretisk beräkning av aktiviteten från "hälsosaltet" Seltin (som innehåller KCl) med utgångspunkt från att **21 %** (massandel) utgörs av naturligt kalium. Andelen K-40 i

naturligt kalium samt nuklidmassan för K-40 finns i Fysika Tk4, Elfgren (2020). Diskutera aktiviteten jämfört med Livsmedelsverkets gräns. Se I1 Moment A, nedan.

## H2 Moment B

### 4) Beräkna energin för elektronerna som kommer från inre konversion i Cs-137-sönderfall

Vilka är de teoretiska värdena för energierna hos elektronerna från inre konversion, när de kommer från **K**- respektive **L-skalet**? Läs om inre konversion i B1 Teori, nedan.

### 5) Vilka $\beta^-$ -sönderfall blir det av Cs-137?

Skriv ner reaktionsformlerna för de 2 sönderfallen. Glöm inte följsönderfall. Exempel, se ekvation (1).

### 6) Beräkna elektronernas maxenergi vid de två betasönderfallen av Cs-137

Beräkna maxenergin för det ovanligare sönderfallet ur den frigjorda energin,  $Q$ , och sedan energin för det vanligare sönderfallet med hjälp av  $\gamma$ -energin och Figur 1.

#### Sanity check

Om ni får  $Q \approx 0,66$  MeV så har ni med en elektron för mycket.

## INLEDNING

Radioaktivitet är ett viktigt område för grundforskning, tillämpningar och samhällsdebatt alltsedan den upptäcktes av Henri Becquerel och makarna Marie och Pierre Curie i slutet av 1800-talet. Strålning i för höga doser kan ge cancer men radioaktivitet är även ett viktigt hjälpmedel inom medicinen, t.ex. vid behandling av cancer. Även i rent tekniska sammanhang används radioaktivitet, t.ex. vid kontroll av tjockleken på valsad plåt eller tunna folier, eller av massaflödet i ett pappersbruk. Radioaktivitet förknippas också ofta med atombomber, men även med fredligt användande av kärnenergi i kärnkraftverk. Debatten om kärnkraftens inverkan på miljön och oss människor har varit hetsig, och inte minst de kärntekniska olyckorna i Harrisburg, Tjernobyl och Fukushima har påverkat opinionen över hela världen. Även strålning från radon är viktig. Radon är den farligaste källan till radioaktivitet i vår omgivning, men drabbar mest dem som fortfarande bor kvar i s.k. radonhus, d.v.s. hus byggda av byggmaterial med förhöjt innehåll av uran, torium och radium. Sådana material har inte

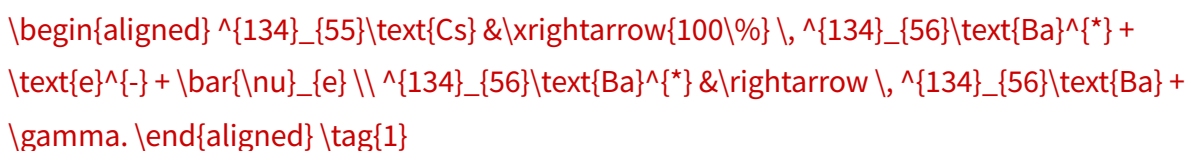
använts till nybyggnation i Sverige sedan 1972, men äldre hus behöver ibland omfattande renovering för att inte klassas som hälsofarliga.

## I1 Moment A

Radioaktiviteten i livsmedel ska bestämmas. Idag finns bara två relevanta isotoper som förekommer i livsmedel; cesium-137 från den havererade reaktorn i Tjernobyl 1986 och sovjetryska bombprov på 1960-talet samt kalium-40, som är en naturlig och mycket långlivad isotop av grundämnet kalium.

Vid Tjernobylolyckan våren 1986 spreds radioaktivt cesium och jod med vindarna över Europa. Vissa delar av Sverige drabbades svårt av nedfall i samband med regn. Efter olyckan utfördes mätningar från flygplan som systematiskt flög över hela landet på låg höjd, och gammastrålningen från cesium mättes med en scintillationsdetektor. Resultatet av dessa mätningar finns på kartor i laboratoriet. Främst drabbades ett bälte från Stockholmsområdet i söder till Västerbotten i norr. Variationerna inom detta bälte var dock avsevärda (beroende på nederbördens omfattning dygnet efter olyckan). Värst drabbades Gävle- och Sundsvallstrakterna med aktiviteter på upp till 180 kBq per m<sup>2</sup> markyta från Cs-137. Norrbotten drabbades inte nämnvärt, men här finns fortfarande cesiumspår från de sovjetiska atombombsproven på den arktiska ön Novaja Zemlja på 1960-talet.

Halveringstiden för Cs-137 är 30,08 år (Fysika, Elfgren, 2020). I nedfallet ingick också den högaktiva isotopen Cs-134 med halveringstiden 2,065 år (Elfgren, 2020) och reaktionsformel



Omedelbart efter nedfallet uppmättes Cs-134-aktiviteter som var cirka 2/3 av aktiviteten från Cs-137. De vitt skilda halveringstiderna medför att förhållandet mellan aktiviteterna är en helt annan idag. Resterna av Cs-134 från Tjernobyl och kärnvapenproven är nära nog obefintliga. När olyckan blev känd i Sverige så varnade statens strålskyddsinstitut framförallt för radioaktivt jod, vilket är vanligt i kärnavfall. Sådant jod utgjorde faktiskt en majoritet av nedfallet över Europa, men fick inte alls samma långvariga konsekvenser som cesiumet. Däremot är inte radioaktivt cesium lika farligt som jod. Jod ansamlas i sköldkörteln där det kan orsaka cancer, medan cesium sprider sig rätt jämnt i mindre känslig muskelmassa och försvinner helt ur kroppen på någon månad.

Mängden cesium i livsmedel beror naturligtvis på markbeläggningen där livsmedlet producerats, men också på hur cesium, som är en tungmetall, anrikas i näringskedjorna. Mossor och svampar tar lätt upp tungmetaller. Renkött från områden med mycket hög markbeläggning 1986 kan därför till och med idag innehålla otillåtna mängder cesium. Den biologiska halveringstiden för cesium i ren är dock endast två till tre veckor. Detta utnyttjade man, genom att före slakt flytta "smittade" renar till områden med låg markbeläggning eller genom att stödutfodra dem i hägn. Cesiumet avgår främst med urinen.

Allmänt finns cesiumet främst i olika salter. Dessa är tunga, och mycket cesium har därför följt vattnet i naturen "nedåt". I bottensedimentet i de värst drabbade områdenas sjöar och vattendrag kan därför än idag ha höga aktiviteter i sediment uppmätas, även om detta numera är rätt sällsynt. Mygglarver och andra insekter får i sig cesium i bottenslammet, och fiskarna livnär sig sedan på dessa larver. Fisk från de värst drabbade sjöarna och vattendrag kan därför än idag klassas som otjänlig och får ej försäljas. Det betyder inte att den är "oätlig", utan att den är olämplig att äta ofta och i stora mängder.

I allmänhet är högre strålningsenergi farligare. Men om ämnet strålar inne i våra kroppar så beror farligheten i lika hög grad på var ämnet hamnar och på hur fort det lämnar kroppen (eller försvinner på grund av sönderfallen). Exempelvis är strontium-90 mycket farligt eftersom det sätter sig i ryggmärgen och har en olämplig halveringstid på ca 90 år. Under de sovjetryska bombproven i norra ishavet på 1960-talet var det främst utsläppet av strontium som väckte oro hos oss i Skandinavien.

## Bestämmelser

Efter Tjernobyloolyckan fastställde Livsmedelsverket nationella gränsvärden för cesium-137 i livsmedel, Livsmedelsverket (2016). Dessa är:

### Gränsvärden Cs-137 i livsmedel

- 1 500 Bq/kg — kött av ren och vilt, insjöfisk, vilda bär och svamp samt nötter.
- 300 Bq/kg — övriga livsmedel.

Salt och andra kryddor räknas *inte* som livsmedel och har ingen lagstiftad gräns eftersom konsumtionen av dessa är begränsad.

## I2 Moment B

Ett enkelt fall av betastrålning från ett konstgjort prov av cesium-137 ska studeras i syfte att illustrera fysiken bakom betasönderfall.

I detta moment ska betastrålningen mätas från ett konstgjort prov med Cs-137 (jämför med Moment A där *gamma*strålningen från följsönderfallet mäts). Gammastrålningen kommer även att komma in *indirekt* i detta moment.

Provet består av en liten mängd Cs-137 som är inkapslad i en smal aluminiumstavs spets. Staven förvaras normalt med spetsen i en liten behållare av bly för att minska strålningen till omgivningen.

I behållaren finns även ett prov som avger alfastrålning från isotopen Am-241. Denna isotop används ofta i brandvarnare, eftersom alfapartiklar stoppas lätt av minsta hinder, t ex rök i luften. Om tiden medger kanske läraren visar en kort mätning med detta prov. Alfastrålning innebär ju att en kärna delar sig i två delar, där den ena är alfapartikel (en helium-4-kärna) och den andra är kvarvarande dotterkärna. Sådana sönderfall ger alltid en fix rörelseenergi hos både alfapartikel och dotterkärnan. Betastrålning däremot har inte konstant energi hos betapartikel (en elektron i detta fall), eftersom en tredje partikel strålar ut – en neutrino. Mer om fysiken bakom detta kommer längre fram.

I detta moment ska ni även studera inre konversion (se stycket B1 Teori) vilket haft en historisk betydelse i fysiken. När Marie Curie för drygt hundra år sedan mätte betastrålning så hade hon en detektor med låg känslighet, och dessutom bara för höga betaenergier. Hon lyckades därför bara se elektronerna från den inre konversion, som inte på något sätt är typiska för de elektroner som kommer från själva atomkärnan. Hon drog därför fel slutsatser om betasönderfall från kärnor. Saken reddes inte ut förrän efter första världskrigets slut, när grundforskning åter kom i ropet och detektorerna blivit bättre. Då upptäcktes att betapartiklarna inte har samma sorts spektrum som motsvarande alfapartiklar efter alfasönderfall. De har helt enkelt inte en fix rörelseenergi – lika vid alla sönderfall. Man säger att betaspektrum är *kontinuerligt*. Denna upptäckt var en stor gåta i mer än ett decennium, och alla möjliga förklaringar lanserades av kända fysiker. Niels Bohr, som fått nobelpris i fysik för sin förklaring av atomens struktur, trodde att energin inte är en bevarad storhet på atomär nivå. Det var först i början på 1930-talet som Wolfgang Pauli föreslog att en hittills okänd, “osynlig” partikel strålar ut tillsammans med betapartikel och “stjäl” energi från processen på ett slumpmässigt sätt. Detta är **neutrino**. Neutriner är mycket svåra att detektera. För att stoppa hälften av en skur med neutriner behövs en “blydetektor” som är ett ljusår tjock! Neutrino är i själva verket universums allra vanligaste partikel. Som tur var finns de i så stora mängder att det trots allt “fastnar” några då och då i stora detektorer. Det tog ända till 1956 innan amerikanen Frederick Reines för första gången lyckades detektera neutriner i en jättestor

detektor, som ställdes alldeles utanför en kärnreaktor med mycket hög aktivitet. Även denna upptäckt gav nobelpris i fysik. Pauli hade då redan fått nobelpriset, men för något helt annat: Pauliprincipen, som förklarar det komplicerade periodiska systemet av grundämnen. Att undersöka neutronerna och deras egenskaper är fortfarande ett hett forskningsområde.

## MOMENT A

### A1 Teori

#### Cesium

Figur 1 illustrerar att betasönderfall av Cs-137 oftast (till 85,1 %) leder till att gammafotoner med energin 0,661657 MeV utsänds från den exciterade dotterkärnan, (Tuli, 1997). Det beror på att så mycket energi avges vid sönderfallet att barium-kärnan som blir kvar oftast befinner sig i ett exciterat ("upprört") tillstånd, där protoner och neutroner rör sig på ett våldsammare sätt än i det normala (stabila) tillståndet för barium-kärnan. Energierna inne i kärnan är kvantiserade, precis som för atomernas elektroner, så när kärnan efter någon minut (i genomsnitt) lugnar ner sig, så avges alltid exakt samma överskottsenergi i form av en gammafoton. Denna energi är därför typisk för just sönderfallet av Cs-137 till Ba-137\* och sedan till Ba-137 och kan användas för att identifiera Cs-137 i provet.

5,6 % av alla sönderfall går direkt till stabilt Ba-137. Sönderfall av atomkärnor är alltså en slumpprocess som ofta kan ta olika vägar, med olika sannolikheter. Det går med andra ord inte att förutsäga hur en viss atomkärna kommer att bete sig, bara i rent statistisk mening.

Kvantfysiken handlar ju om sannolikheter. **Betastrålningen från detta rätt sällsynta direktsönderfall registreras inte av detektorn, som bara släpper in gammastrålning. Det mäts däremot i Moment B.**

**Figur 1. Sönderfallsschema för Cs-137. Excitationsenergin  $E_\gamma = 0,661657$  MeV. Av det totala antalet sönderfall går 5,6 % direkt till grundtillståndet, 85,1 % går via ett exciterat tillstånd och sedan till  $\gamma$ -strålning och 9,3 % går via ett exciterat tillstånd till inre konversion (IK), se B1 Teori, nedan. Referens: Tuli (1997).**

Betasönderfall av Cs-134 till Ba-134 är mer komplicerat, eftersom energin som avges är mycket större än för fallet Cs-137. Sönderfallet kan därför excitera barium-kärnan till många olika rörelsetillstånd, och alla har specifika energier. Men inget sönderfall leder direkt till en stabil dotterkärna. Den exciterade dotterkärnan kan därför avge gammafotoner av flera olika energier, men de övergångar som starkt dominerar svarar mot energierna 0,605 MeV och 0,796

MeV, Sergeenkov (1994). I ett prov med Cs-134 är det dessa fototoppar man observerar tydligast. Som tidigare nämnts, kan dessa fototoppar inte längre registreras från resterna av Tjernobylyolyckan, på grund av den korta halveringstiden för Cs-134 jämfört med tiden från olyckan. Som mest hade en student med sig renkött med aktiviteten 35 kBq/kg i slutet av 1980-talet. Då kunde inte mindre än 11 olika fototoppar från olika sönderfall av Ba-134 ses tydligt.

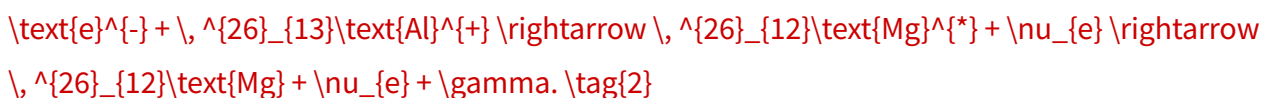
## Kalium

I naturen finns och har alltid funnits naturliga radioaktiva isotoper. En sådan är K-40. Figur 2 visar sönderfallsschemat för K-40. Finns det K-40 i ett prov, resulterar alltså detta i en topp vid 1,46 MeV i ett spektrum från en gammadetektor. Observera att bara 10,67 % av sönderfallen ger gammastrålning (Endt, 1990). EC (electron capture = elektroninfångning) innebär att kärnan fångar en elektron från ett av atomens inre skal. En proton i kärnan omvandlas därigenom till en neutron. K-40 kan alltså sönderfalla till såväl Ar-40 som Ca-40. Det går inte heller här att förutsäga hur en viss kärna kommer att sönderfalla.

### Figur 2. Sönderfallsschema för K-40, där EC är elektroninfångning (Endt, 1990).

K-40 har halveringstiden  $1,248 \cdot 10^9$  år, och utgör bara 0,0117 % av naturligt förekommande kalium (Fysika, Elfgrén 2020). Växter, djur och vi människor innehåller normalt ett par promille (massandel) kalium. Trots de små mängderna och den långa halveringstiden så är K-40 den radioaktiva isotop som dominerar strålningen från våra kroppar. Med tiden löses dock kaliumet ut i luftens vattenånga vilket gör att kaliumet gradvis försvinner från provet.

Sönderfall genom elektroninfångning förekommer för flera andra ämnen, t.ex. Al-26 som har reaktionsformeln



## A2 Utrustning

Gammastrålningen från livsmedelsproverna registreras av en scintillationsdetektor, en GDM20. När en gammafoton träffar natrium-jodidkristallen i detektorn växelverkar den med materialet på olika sätt, bl.a. genom fotoeffekt. För att få ett renodlat gammaspektrum skyddas detektorn av ett aluminiumhölje, som inte släpper igenom betastrålningen. Vid fotoeffekt avges fotonens hela energi inne i själva detektorkristallen till en elektron som då får så hög kinetisk energi att den kan jonisera och excitera mängder av atomer i sin närhet. När dessa atomer återgår till grundtillståndet utsänds ljus. Detta ljus omvandlas i detektorn, via en fotomultiplikator, till en elektrisk puls proportionell mot fotonens energi, som då kan registreras. Datorn sorterar

pulserna efter storlek (energi) i olika fack, som kallas kanaler, och ett energispektrum erhålls. Om provet utsänder fotoner av en och samma energi så uppträder alltså då en skarp topp på skärmen. Denna fototopp är av central betydelse i detta moment. Andra processer sker också i detektorn, t ex comptonspredning, men dessa studeras inte här.

I Figur 3 visas ett typiskt energispektrum för ett prov med Cs-137 som avger gammafotoner. Alla detekterade fotoner kommer från fotoner som hade energin 0,661657 MeV. Men det är bara de som svarar mot fototoppen som har blivit korrekt detekterade, dvs som helt absorberats av detektorn och avgett hela sin energi till den. De som syns till vänster om toppen (men till höger om comptonkanten) blev inte av med hela sin energi, utan blev "felregistrerade" med för lågt energivärde. Analysen bygger endast på fototoppen, men vi kompenserar för de fotoner som blivit felregistrerade (eller som helt missat detektorn) genom detektorns känslighet, se rapportavsnittet, Analys.

Detektorn omges av ett kraftigt blyskydd men all bakgrundsstrålning absorberas ej av skyddet. Det finns också radioaktiva isotoper (Pb-210) i själva blyskyddet, vilket är oundvikligt såvida man inte har råd att köpa "gammalt bly" där denna strålning har avklingat. Bakgrundsstrålningen kommer förstås att störa det intressanta spektrumet från provet om den inte subtraheras bort.


**Figur 3. Energispektrum för prov med Cs-137.**

## **A3 Experiment**

### **A3.1 Provförberedelser**

1. Väg en tom mätbehållare (inklusive lock) av samma typ som ni ska använda.
2. Om ni tagit med er ett prov: placera det i mätbehållaren och sätt på locket. Behållaren ska vara helt fylld. *Om livsmedlet är kladdigt så får ingen vätska komma utanför kärlet. I så fall får ni torka/skölja av behållaren så den blir torr och ren.*
3. Väg provbehållaren och beräkna provvikten.
4. Anteckna provets "natur" (t.ex. svamp) och ursprung (ort och datum för inköp/jakt/fiske).
5. Öppna detektorskyddet försiktigt (det är tungt!) genom att skjuta undan locket, eller lyfta bort blytackorna beroende på vilken detektor ni har.
6. Placera försiktigt ert prov ovanpå aluminiumskyddet i detektorn och stäng locket igen.

### **A3.2 Datorförberedelser**

1. Logga in på datorn och öppna programmet Windas (Startmenyn, Alla program, Nordic Real Time Systems, Windas 3.3.1. Eller: tryck  och skriv "windas"). Klicka Ok när den frågar om kommunikationsport.
2. Välj menyn ARKIV, klicka på NYTT. Klicka OK för det föreslagna antalet kanaler. *y*-axeln visar antal registrerade sönderfall inom varje energiområde som svarar mot en "kanal" (med en energibredd på ca 1–4 keV med nuvarande kalibrering av systemet). *x*-axeln visar kanalnummer, som är direkt proportionellt mot den registrerade fotonenergin.
3. Välj menyn KALIBRERA, klicka FRÅN FIL. Ladda ner filen från Canvas: vid labbinstruktionen, klicka på pilen intill er detektor (röd/blå/silvrig). Filen sparas på ert studentkonto, H:. Detta gör att *x*-axeln kalibreras till enheten MeV.

### A3.3 Mätningar


1. Välj menyn INSAMLING och klicka på START för att börja registrera gammastrålning.
2. Om spektrumet på skärmen efter någon minut inte har någon topp vid 0,66 MeV (Cs-137), tillkalla lärare. Medan ni väntar kan ni försöka besvara frågorna som ska ingå i rapporten, se stycket Diskussion och slutsatser, i rapportdelen.
3. Avsluta mätningen efter ca 10 minuter genom att välj menyn INSAMLING och klicka på STOP.
4. Spara hela spektrumet som en datafil genom att välja menyn ARKIV och klicka på SPARA. Lämpligt namn: GammaDatafil.

#### Analys i efterhand

Om något gått snett så kan ni ladda ner programmet Windas från Canvas och analysera om er datafil.

5. Dra bort bakgrundsstrålningen genom att välja menyn ARKIV och klicka på SUBTRAHERA. Välj samma fil som vid kalibreringen ovan. För att spara tid har bakgrunden mätts i förväg av lärarna (genom att låta detektorn stå tom och mäta). Egentligen ska bakgrundsstrålningen mätas omedelbart före och omedelbart efter den "riktiga" mätningen.
6. Spara spektrumet (se rutan nedan).

#### Spara skärmdump

Förminska först Windas-fönstrets storlek till ca  $\frac{1}{4}$  (av ytan). Klicka på  och sen **Snipping Tool**. Markera grafen och spara bilden med ett lämpligt namn, t.ex. `He1aGamma`.

### A3.4 Analys av Cs-137-toppen

1. Zooma in på toppen genom att klicka med musens vänsterknapp en bit till vänster om toppen och med musens högerknapp en bit till höger om toppen. Välj sedan menyn VISA och klicka på EXPANDERA.
2. Markera toppen på samma sätt som när ni zoomade in, men se nu till att klicka på rätt höjd i y-led och precis där toppen slutar i x-led, se Figur 4. Detta gör att "skräpet" inte kommer med i analysen.
3. Bestäm toppens medelenergi genom att välja menyn BERÄKNA och klicka på CENTROID. Kontrollera att energin är 0,66 MeV, i annat fall tillkalla lärare.
4. Beräkna antalet pulser i toppen genom att välja menyn BERÄKNA och klicka på SUMMA.
5. Anteckna antal pulser per sekund (i Hz) liksom mättiden (i sekunder).
6. Spara det inzoomade spektrumet, se rutan ovan, t.ex. med namnet Cs-toppen.

#### Note

Om ni vill återgå till hela spektrumet: välj menyn **VISA** och klicka på **HELA SPEKTRET**.

Figur 4. Hur man markerar en topp efter inzoomning.

### A3.5 Mätning och analys av Seltin

1. Byt ut provet mot en burk salt, väg det och mät på det i 5 minuter.
2. Gör på samma sätt som för Cs-137 (spara datafilen efter mätning och dra bort bakgrunden). Notera att K-40-toppen kan ligga lite lägre än den borde.
3. Anteckna antalet pulser per sekund, mättiden samt spara det inzoomade spektrumet, t.ex. med namnet Seltin.

## A4 Checklista

#### Innan ni lämnar moment A, se till att ni har:

- Provets massa.
- Figur över hela spektrumet.
- Figur över Cs-137-toppen (inzoomad).
- Figur över K-40-toppen (inzoomad) för Seltinet och dess massa.
- Antal pulser/s för både Cs-137-toppen och K-40-toppen.

- Om ni hade ett prov med er, ta med det hem igen. *Om kött slängs i en papperskorg börjar det lukta hemskt illa.*
- Ni som lånade ett prov, återställ det.
- Ni som hade ett eget prov med er, diska behållaren.

## MOMENT B

### B1 Teori

Figur 1 visar hur Cs-137 sönderfaller till Ba-137. Dotterkärnan kan efter sönderfallet hamna direkt i grundtillståndet (i 5,6 % av sönderfallen), men oftast (94,4 %) blir dotterkärnan exciterad med excitationenergin  $E_{\gamma} = 0,661657$  MeV. Såsom framgår i figuren ovan så gör sig dotterkärnan kvitt denna överskottsenergi genom att utsända en gammafoton med energin  $E_{\gamma}$ . Detta är "normalfallet".

Ett betaspektrum karaktäriseras av att det är kontinuerligt, d.v.s. att de från kärnan utsända elektronerna kan ha alla tänkbara rörelseenergier mellan noll och ett maxvärde. Läs mer om förklaringen till varför det är så i kapitel 43.3 i Young & Freedman (2015). Betapartiklar med energi nära noll kan detektorn inte registrera noggrant. Spektrumet är därför avhugget i vänsterkanten. Spektrumet från Cs-137 domineras av betapartiklar som sänds ut vid sönderfall till det exciterade tillståndet, eftersom 94,4 % av sönderfallen går dit. Det ovanligare (5,6 %) sönderfallets maximala kinetiska energi kan beräknas med hjälp av Q-värdet. Glöm inte att Ba-137 har samma antal elektroner som Cs-137, vilket gör den till en jon.

Men sönderfallet kan också ske via *inre konversion* (inte att förväxla med sönderfall via *elektroninfångning*, som inte förekommer här – men däremot i K-40, se tidigare text om detta). Den exciterade dotterkärnan omges ju av ett elektronhölje och de innersta elektronerna befinner sig mycket nära kärnan – så nära att dotterkärnan kan göra sig av med excitationenergin genom att överföra den på någon av dessa bundna elektroner. Man kan se det som att gammafotonen ibland råkar slå loss en elektron i atomens inre elektronskal, varvid fotonen absorberas av denna elektron. Se Figur 5 nedan. Inre konversion är alltså en sällsynt (ca 9,3 % av alla sönderfall, Tuli, 1997) men konkurrerande process till gammaemission. Fenomenet är dock mycket tydligt i det energispektrum för betapartiklar som ska mätas i detta moment, och kan utnyttjas till exempelvis energikalibreringen av skalan i det uppmätta totala spektrumet.

**Figur 5. Illustration av inre konversion.**

Figur 5 visar, till vänster den exciterade dotterkärnan, och till höger dotterkärnan i grundtillståndet efter att ha gjort sig av med överskottsenergin, genom att ha överfört den på en av de innersta elektronerna. Den utsända elektronens rörelseenergi är

$$E_e = E_\gamma - E_B$$

där  $E_\gamma$  är excitationens energi (se Figur 1),  $E_B$  är elektronens bindningsenergi i elektronskalet (se Fysika Tk1, Elfgren, 2020 eller Lide, 2004) eftersom en del av energin går åt till att få loss elektronen från atomen. Elektroner från K- och L-skalet kan observeras. Dessa får olika energier, eftersom de har olika bindningsenergier i atomen. (Även M-skalet bidrar, men toppen är liten och dess energi är alltför nära L-skalets för att man ska kunna utskilja den, se Helmer & Chechev, 2007.)

## B2 Utrustning

Strålningen från betapreparatet registreras av en halvledardetektor (halvledarfysik ingår inte i denna kurs, utan i Fysik 2, se kap 42.6-7 i Young & Freedman, 2015) som är speciellt utformad för att detektera alfa- och betastrålning. Den ryms i en liten röd låda som är ansluten till en mät dator med samma mjukvara som i Moment A. Själva detektorn inne i lådan är en dopad diod tillverkad av t ex kisel. I gränssytan mellan n- och p-dopat material uppträder ett elektriskt fält. De infallande partiklarna bromsas upp och avger sin energi till elektroner som lyfts upp från valensbandet till ledningsbandet, fler ju större energi partikeln har. De kvarlämnade hålen i valensbandet bidrar också till den kortvarigt ökade ledningsförmågan. Laddningsbärarna, elektroner och hål, sveps i väg av fältet och en strömpuls uppstår. Denna strömpuls är proportionell mot den infallande partikelns energi. Datorn sorterar pulserna efter storlek (partikelenergi) i olika fack, som kallas kanaler, och ett energispektrum erhålls.

## B3 Experiment

### ⚡ Viktigt! – Säker hantering av $\beta$ -preparatet

$\beta$ -preparatet är godkänt för laborationer av statens strålskyddsinstitut. Det finns ingen anledning till oro för strålningen, om preparatet behandlas på ett korrekt sätt, d.v.s.:

- att ej beröra eller titta in i öppningen på den cylinderformade staven, där det radioaktiva preparatet är beläget, eller rikta den mot kroppen. Öppningen behövs eftersom vare sig beta- eller alfa-strålning tar sig igenom stavens aluminiumskikt.
- att ha staven i sitt strålskydd då den inte används.

### B3.1 Provförberedelser

1. Dra ut staven med Cs-137 ur strålskyddet och skjut in den i den röda detektorlådan.
2. Kontrollera att insamlingsenheten (svart låda) är påslagen och ställ detektorn i läge “ $\beta$ ”. Det betyder att det är betastrålning (elektroner) som detekteras.

### B3.2 Datorförberedelser

1. Logga in på datorn och öppna programmet Windas (Startmenyn, Program, Windas). Tryck sen på Ok.
2. Välj menyn ARKIV, klicka på NYTT. Klicka OK för det föreslagna antalet kanaler. y-axeln visar antal registrerade sönderfall inom varje energiområde som svarar mot en “kanal” (med en energibredd på ca 1-4 keV med nuvarande kalibrering av systemet). x-axeln visar kanalnummer, som är direkt proportionellt mot den registrerade fotonenergin.

### B3.3 Mätningar


1. Välj menyn INSAMLING och klicka på START för att börja registrera betastrålning.
2. Spektrumet ska se ut som en skidbacke med två små pucklar på slutet. Medan ni väntar kan ni försöka besvara frågorna som ska ingå i rapporten, se stycket Diskussion och slutsatser, i rapportdelen.
3. Avsluta mätningen efter ca 10 minuter genom att välj menyn INSAMLING och klicka på STOP.
4. Spara hela spektrumet som en datafil genom att välja menyn ARKIV och klicka på SPARA. Lämpligt namn: BetaDatafil.

### B3.4 Kalibrering

1. Zooma in på topparna genom att klicka med musens vänsterknapp en bit till vänster om topparna och med musens högerknapp en bit till höger om topparna. Välj sedan menyn VISA och klicka på EXPANDERA.
2. Markera K-toppen på samma sätt som när ni zoomade in, men se nu till att klicka på rätt höjd i y-led och precis där toppen slutar i x-led, se Figur 4. Detta gör att “skräpet” inte kommer med i analysen.
3. Bestäm toppens medelenergi (i enheten kanaler) genom att välja menyn BERÄKNA och klicka på CENTROID.
4. Kalibrera energiskalan genom att välja menyn KALIBRERA och klicka på ENERGI. Programmet har redan fört in centroidens kanalvärde så det räcker med att skriva in K-

- toppens teoretiska energi i MeV (som ni beräknat som hemuppgift).
5. Välj menyn KALIBRERA och klicka på ENERGI en gång till. Detta är den andra kalibreringspunkten och den anger ni att kanalnummer 0 svarar mot energin 0 MeV.
  6. Programmet frågar nu efter enhet, ange MeV.
  7. Kontrollera K-toppens medelenergi i MeV genom att välja menyn BERÄKNA och klicka på CENTROID. K-toppens medelenergi ska vara identisk med det teoretiska värdet.
  8. Spara ett inzoomat spektrum där både K- och L-toppen syns, se rutan nedan, t.ex. med namnet BetaTopparna.
  9. Zooma ut och spara hela spektrumet, se rutan nedan, t.ex. med namnet HelaBeta.

#### Spara skärmdump

Förminska först Windas-fönstrets storlek till ca  $\frac{1}{4}$  (av ytan). Klicka på  och sen **Snipping Tool**. Markera grafen och spara bilden med ett lämpligt namn, t.ex. `HelaBeta`.

### B3.5 Analys

1. Markera L-toppen på samma sätt som ni gjorde för K-toppen.
2. Bestäm L-toppens medelenergi (nu i enheten MeV) genom att välja menyn BERÄKNA och klicka på CENTROID.
3. Anteckna L-toppens medelenergi och jämför med det värde ni räknade ut som hemuppgift.
4. Om mätningen inte ger ett resultat nära det teoretiska för L-elektronerna så kan kalibreringen (eller beräkningen) ha utförts på felaktigt sätt. Då går det att nollställa kalibreringen till kanaler med "KALIBRERA – ta bort" följt av "VISA - hela spektrumet" och börja om kalibreringen.

### B4 Checklista

#### Innan ni lämnar moment B, se till att ni har:

- Figur över hela spektrumet.
- Figur över topparna från inre konversion (inzoomad).
- De uppmätta energierna för inre konversion från K- och L-skalet.

## RAPPORT

En skriftlig rapport per grupp inlämnas i Canvas, senast **två veckor** efter labben. Rapporten ska följa TVM:s rapportmall samt strukturen och anvisningarna nedan. Skriv rapporten som en **teknisk rapport**, inte som en labbrapport.

### Returer

Notera att det är mycket vanligt att få en retur på rapporten. *Fler än två returer leder till att labben måste göras om från början vid ett senare tillfälle.*

## Viktigt

Rapporten ska vara skriven på korrekt och lättläst svenska (Regeringen, 2009) och instruktionerna nedan ska följas.

1. Gör **lättlästa, numrerade tabeller och figurer med tabell/figurtext samt storhet** (t.ex. gammaenergi eller elektronenergi) **och enhet** (MeV) på  $x$ -axeln. Ändringen av  $x$ -axeln måste göras manuellt i ett ritprogram som t.ex. Microsoft Paint eller gratisprogrammet GIMP. På  $y$ -axeln ska storheten egentligen vara detekterade pulser och enheten vara antal. Det är dock brukligt att inte sätta ut enheten antal och därmed kan ni låta  $y$ -axeln vara som den är. Se figur 7 för ett exempel på en figur.
2. Lägg **figurer och ekvationer i direkt anslutning** till det förklarande textstycket.
3. Gör **snygga, numrerade formler och korrekta tal** (t.ex.  $10^9$ , ej  $10^9$ , eller  $1e9$ ). Formlerna görs i Word med Infoga→Ekvation, eller motsvarande i andra program. Se ekvation (3) för ett exempel. Var noga med enheter.
4. Redovisa era **beräkningar ordentligt**, som på en tenta.
5. **Numrera sidor, tabeller, figurer och formler.**
6. **Referera** enligt Harvard-systemet, se Referenser nedan.
7. Gör en korrekt **sammanfattning**, se nedan.

## Sammanfattning

Sammanfattningen är rapportens **viktigaste** del. Här sammanfattas **syftet, metoden** och de **viktigaste resultaten**. De ska vara kortfattade och precisa, typ:

### Exempel på sammanfattning

“Med hjälp av en ..... har vi mätt aktiviteten från isotoperna xxx och yyy i grodlår som köptes i Paris den 15/11, 2006. Aktiviteten från Cs-137 uppmättes till **0,40 kBq/kg** vilket

ligger under livsmedelsverkets gräns på **1,5 kBq/kg**. Aktiviteten från  $Ka-40$  i Seltin uppmättes till **6,5 kBq/kg**.”

**Moment B:** För L-toppens energi, redovisa experimentellt och teoretiskt värde (se hemuppgift 4 i H2 Moment B). Redovisa även experimentellt (= extrapolerat) värde på den maximala energin för det vanligaste betasönderfallet och teoretiskt värde (se hemuppgift 6 i H2 Moment B). **Totalt blir det 4 värden.**

## Inledning

### Inspiration

Titta i stycket **Inledning** för inspiration; Googla. 😊

Följande ska ingå (men inte som en lista):

1. Beskriv kort **syftet** med laborationen, t.ex. vilket allmänt intresse det kan ha att utföra det.
2. Berätta kort om **bakgrund**: om Tjernobyl och om hur isotoperna hamnade i provet samt lite historik om betastrålning.
3. Beskriv **provet**: typ, ursprung och tid samt varför just detta livsmedel valdes.
4. Beskriv **bakgrundsstrålning** i allmänhet samt specifikt för laborationen.

## Teori

Följande ska ingå (men inte som en lista):

1. Beskriv **teorin** för sönderfall av  $Cs-137$  och  $K-40$ .
2. Redovisa alla **reaktionsformler** för betasönderfall av  $Cs-137$  och  $K-40$  (se exempel i inledningen och teoridelen), inklusive sannolikheterna. Redovisa era beräkningar av maximal kinetisk energi hos betapartiklarna för de två cesiumsönderfallen (hemuppgift 6). Kom ihåg att referera.
3. Redovisa era beräkningar av **energin** för elektronerna som kommer från inre konversion, från K- respektive L-skalet (hemuppgift 4). Kom ihåg att referera.

## Metod

Skriv kort om detektorn och dess funktion.

## Referenser

Titta i stycket A2 Utrustning samt B2 Utrustning.

Beskriv mätrutinerna och eventuella problem kortfattat. Beskriv likheter och skillnader mellan mätningen på betaenergi och mätningen på gammaenergi. Beskriv hur kalibreringen gjordes för de två mätningarna. Datorkommandona behöver *inte* återges.

## Resultat

### Mätningar

Detta stycke kan delas upp i ett stycke för betamätningen och ett för gammamätningen. Redovisa mätdata och mätresultat, gärna i tabellform. Där kan även ingå viktiga data om provets massa, utrustningens känslighet, sönderfallens teoretiska delningsförhållanden, se stycket Analys, nedan.

Figuren över hela gammaspektrumet passar också här. Markera i spektrumet vilka nuklider som motsvarar vilka toppar. Glöm inte att manuellt lägga in storheten "Gammaenergi" vid x-axeln i figuren.

Figuren över hela betaspektrumet passar också här. Markera i spektrumet vilken topp som kommer från inre konversion från K- respektive L-skalet.

### Analys

Detta stycke kan delas upp i ett stycke för betamätningen och ett för gammamätningen. Här återges alla beräkningar som gjorts med hjälp av mätdata. Följande beräkningar ska ingå (hur aktiviteterna beräknas förklaras nedan):

1. Aktiviteten i provet från Cs-137 per provmassa,  $a_{\text{Cs}} = A_{\text{Cs}}/m$ . Figuren på den inzoomade cesiumtoppen bör ligga i början av dessa beräkningar.
2. Antalet Cs-137-atomer i provet,  $N_{\text{Cs}}$ .
3. Aktiviteten i Seltinet från K-40 per provmassa,  $a_{\text{K}} = A_{\text{K}}/m_{\text{seltin}}$ . Figuren på Seltinmätningen bör ligga i början av dessa beräkningar.
4. Antalet K-40-atomer i Seltin-provet,  $N_{\text{K}}$ .
5. Uppskatta med hjälp av ert betaspektrum den maximala energin för sönderfall till det exciterade tillståndet i Ba-137. Detta görs genom att extrapolera den högra kanten av den breda kontinuerliga fördelningen ner till energi-axeln. Till detta behövs ett ritprogram,

t.ex. Microsoft Paint eller gratisprogrammet GIMP. Visa extrapoleringen (gärna i rött) i en figur.

### Tip

Använd **aktivitetslagen** för att beräkna antalet atomer i provet.

### Beräkning av aktiviteterna:

Av den totala aktiviteten från cesium-137,  $A_{Cs}$ , kommer en del av sönderfallen att bara ge beta-strålning (se Figur 1) som inte detekteras av gamma-detektorn. Av de kvarvarande gammasönderfallen,  $A_{Cs-\gamma}$ , kommer bara ett fåtal detekteras,  $f_{Cs}$ , eftersom de flesta utsända gammafotoner missar detektorn. Detta illustreras i figur 6.

**Figur 6. Sönderfall för Cs-137.**  $f_{Cs}$  är de detekterade gammapulserna per sekund,  $f_{Cs-miss}$  är de missade gammapulserna per sekund,  $A_{Cs-\gamma}$  är det totala antalet gammasönderfall per sekund (efter att Cs-137 sönderfallit till exciterat Ba-137),  $A_{Cs-\beta}$  är antalet betasönderfall till icke-exciterat Ba-137 per sekund, och  $A_{Cs}$  är den totala aktiviteten.

Andelen sönderfall som är  $\gamma$ -sönderfall kallas för delningsförhållandet och definieras som

$$D_{Cs-\gamma} = \frac{A_{Cs-\gamma}}{A_{Cs}} \quad (3)$$

där  $A_{Cs-\gamma}$  är det totala antalet gammasönderfall per sekund, och  $A_{Cs}$  är den totala aktiviteten för Cs-137.

Förhållandet mellan de gammafotoner som registreras och det totala antalet gammafotoner kallas för känsligheten och definieras som

$$K_{Cs} = \frac{f_{Cs}}{A_{Cs-\gamma}} \quad (4)$$

där  $f_{Cs}$  är de detekterade gammapulserna och  $A_{Cs-\gamma}$  är det totala antalet gammasönderfall per sekund.

Känsligheten beror dels på burken, dels på vilken energi som gammafotonen har.

Känslighetskurvorna för detektorn GDM20 (som används i vår labb) för mätbehållaren ni använt (liten burk) finns i figur 7.

Känsligheten har i förväg mätts upp med hjälp av ett väl bestämt kalibreringsprov av Eu-152, som innehåller flera toppar över ett brett energiintervall. Laboratoriet som tillverkade Eu-provet har mätt upp dess totala aktivitet, och dessutom vet man den statistiska fördelningen mellan de olika sönderfallen. Vid kalibreringen av utrustningen behövde vi bara räkna ut “dagens” aktivitet i Eu-provet med hjälp av sönderfallslagen, och uppgiften om vilket datum provet uppmättes vid ursprungslaboratoriet.

### ⚠ Värdesiffror

Notera att **känsligheten** hos utrustningen är den sämst kända storheten i denna mätning. Tänk på detta när ni redovisar era resultat så att det blir ett rimligt antal värdesiffror.

Det gäller alltså att successivt “översätta” registrerade elektriska gammapulser per sekund,  $f_{Cs}$ , till den faktiska aktiviteten,  $A_{Cs}$ .

Samma metod används för att bestämma den faktiska aktiviteten för kalium-40,  $A_K$ , fast delningsförhållandet,  $D_{K-\gamma}$ , är annorlunda och även känsligheten,  $K_K$ . Känsligheten beror på behållaren och detektorn (vilka är desamma som för Cs-137) och gammaenergin (som inte är samma).

**Figur 7. Känsligheten (= “antal registrerade pulser” delat med “antal gamma som provet avger”) för detektorn GDM20, se ekvation (4).**

## Diskussion och slutsatser

Besvara punktvis följande frågor. **Glöm inte att referera**, d.v.s. ange källan till informationen:

### 1) Varför mättes inte betastrålningen från flygplanen?

Gammastrålningen från marken detekterades från lågflygande flygplan efter Tjernobylyolyckan. Gammastrålning ger bättre identifiering av radioaktiva ämnen, men det finns ett starkare skäl.

### 2) Varför var inte I-131 ett problem i Sverige?

I samband med Tjernobylyolyckan skedde betydande utsläpp av radioaktivt jod (I-131). Detta utsläpp innebar ett mindre problem för oss i Sverige än i sydligare delar av Europa. *Tips: Olyckan skedde i april och det snabbaste sättet för radioaktiva ämnen att nå oss är via mjölken.*

### 3) Varför är I-131 farligt?

Ta reda på varför I-131 är speciellt farligt och varför jodtabletter är lämpligt att äta i en nukleär risksituation.

#### 4) Varför är $\beta$ -spektrumet kontinuerligt?

*Tips: läs om betasönderfall i kapitel 43.3 i Young & Freedman (2015).*

#### 5) Varifrån kommer elektronerna med hög energi i $\beta$ -spektrumet?

Förklara den lilla "svansen" med elektroner som har högre energi än L-toppen ( $>0,7 \text{ MeV}$ ). *Tips: tänk på hemuppgifterna 5 och 6.*

#### 6) Vad är den maximala elektronhastigheten?

Uttryck svaret i ljushastigheten,  $c$ . Redovisa svaret här och varje steg i beräkningen i bilaga.

Dessutom ska ni ha med (men inte som lista):

1. Diskutera om aktiviteten är förvånande med tanke på markbeläggningen (Livsmedelsverket, 2011) i det området där livsmedelsprovet kommer ifrån. Diskutera resultatens precision/noggrannhet.
2. Jämför aktiviteten för hälsosaltet Seltin med det teoretiska värdet från hemuppgiften. Den fullständiga beräkningen för Seltinet ska läggas i en bilaga.
3. Jämför livsmedelsprovets Cs-aktivitet per massa med bestämmelser från Livsmedelsverket, se Bestämmelser i Inledning. Är det tillåtet att sälja livsmedlet? Glöm inte att referera.
4. För energin för L-toppen, jämför och kommentera hur väl mätresultaten stämmer med den teoretiska beräkningen. Dessa två värden ska vara med i sammanfattningen. (Notera att K-toppen användes för att kalibrera energiskalan, vilket innebär att K-toppens energi inte är ett resultat.)
5. För den maximala energin för  $\beta$ -sönderfallet till det exciterade tillståndet i Ba-137, jämför och diskutera hur väl mätresultaten stämmer med det teoretiska värdet som ni beräknat i hemuppgiften. Dessa två värden ska vara med i sammanfattningen.
6. Diskutera resultatens precision/noggrannhet. Hur påverkar mättiden?
7. Reflektera; motsvarade resultaten era förväntningar? Var det intressant? Gav det någon ny inblick i naturen, universum, vardagen etc?
8. En kort genusdiskussion (minst 3 rader) utgående från t.ex. könsdiskrimineringen av Marie Curie eller Lise Meitner. Syftet är att skapa en medvetenhet omkring könsroller och betydelsen av dessa. Syftet är inte att tvinga fram politisk korrekthet. Mer underlag finns i Anslaget i Canvas.

## Referenser

Källhänvisningar i löpande text och referenslistan ska följa Karolinska institutets tolkning av APA-manualen (Karolinska institutet, u.å.). Det är en variant på Harvard-systemet där man hänvisar med efternamn och årtal, t.ex. Elfgren (2020). Se exempel i denna instruktion. I referenslistan ska webbsidor ha datum då ni såg sidan (och helst författare), se referenslistan (som ska vara sorterad på efternamn) nedan. Ni ska helst hänvisa till originalreferenserna. Denna labbhanledning kan hänvisas till som om det vore en "Läro- och kursplan".

## Checklista

### ☑ Innan ni lämnar in rapporten, kolla att ni har:

- fullständig sammanfattning, korrekta referenser.
- följt anvisningarna i stycket Viktigt.
- figurer med läsbar storhet (**gamma- respektive elektronenergi, vilket måste läggas till manuellt**) och rätt enhet på x-axeln.

## REFERENSLISTA

Elfgren, E. (2020), *Fysika*, upplaga 6, Luleå tekniska universitet.

Endt, P. M., (1990). Nuclear Physics A521,1. Hämtad 2023-05-10 från <https://atom.kaeri.re.kr/cgi-bin/decay?K-40%20EC> <https://atom.kaeri.re.kr/cgi-bin/decay?K-40%20B->

Helmer, R. G., Chechev, V. P. (2007). *LNE – LNHB/CEA – Table de Radionucléides*. Hämtad 2023-05-10 från <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2015.11.009>

Karolinska institutet (u.å.). *Referensguide för APA*. Hämtad 2017-01-12 från: <https://kib.ki.se/skriva-referera/skriva-referenser-apa-vancouver/referensguider/referensguide-apa-7>

Lide, D., (2004). *CRC handbook of chemistry and physics*. Boca Raton, Florida: CRC Press.

Livsmedelsverket (2011). *Tjernobylolyckan – läget efter 25 år*. Hämtad 2019-01-19 från <https://www.livsmedelsverket.se/globalassets/livsmedel-innehall/oonskade-amnen/radioaktivitet/tjernobylolyckan—laget-efter-25-ar.pdf>

Livsmedelsverket, (2016). *Radioaktiva ämnen*. Hämtad 2017-01-12 från <http://www.livsmedelsverket.se/livsmedel-och-innehall/oonskade-amnen/radioaktivitet-och-bestraling/radioaktiva-amnen>

Regeringen (2009). *Myndigheternas skrivregler*. Hämtad 2017-01-12 från <https://www.regeringen.se/rattsligadokument/departementsserien-och-promemorior/2009/09/ds200938>

Sergeenkov, Y. V., (1994). Nuclear Data Sheet 71, 557. Hämtad 2023-05-10 från <https://atom.kaeri.re.kr/cgi-bin/decay?Cs-134%20B->

Tuli, J. K., (1997). Nuclear Data Sheet 81, 579. Hämtad 2023-05-10 från <https://atom.kaeri.re.kr/cgi-bin/decay?Cs-137%20B->

Young, H. & Freedman, R., (2019). *University Physics*. 15<sup>th</sup> edition. San Francisco: Pearson Addison-Wesley.

---