

K6

RADIOAKTIVT SÖNDERFALL

MÅLSÄTTNING.

Avsikten är att studera ett flertal fenomen som är viktiga inom kärnfysiken såsom; produktion av fria neutroner, kärnreaktioner, uppbromsning av snabba neutroner samt studium av ett komplext sönderfallsförlopp.

FÖRBEREDELSE.

Du skall ha läst detta laborations PM och motsvarande avsnitt i kurslitteraturen. Du skall förstå hur atomkärnan är uppbyggd, du skall också förstå sönderfallslagen, tvärsnittsbegreppet samt hur neutroner modereras.

UTFÖRANDE.

Första delen av laborationen består av att göra en bakgrundsmätning. Efter aktivering av preparaten skall halveringstiden för de två radioaktiva silverisotoperna ^{108}Ag och ^{110}Ag bestämmas.

Namn..... CTH-nummer.....
Utförd den..... Labplats.....
Godkänd den..... av.....

1 Inledning

Avsikten med denna laboration är att studera flera fenomen som är viktiga inom kärnfysiken. Vi kommer att behandla:

Produktion av fria neutroner med hjälp av en kärnreaktion samt användande av dessa fria neutroner i en ny kärnreaktion för produktion av ett radioaktivt material.

Uppbromsning av snabba neutroner. Denna teknik är mycket viktig bl a för kärnreaktorer. Den belyser också hur neutroner växelverkar med materia.

Komplext radioaktivt sönderfall, varvid halveringstiderna för de båda silverisotoperna ^{108}Ag och ^{110}Ag skall bestämmas.

2 Teori

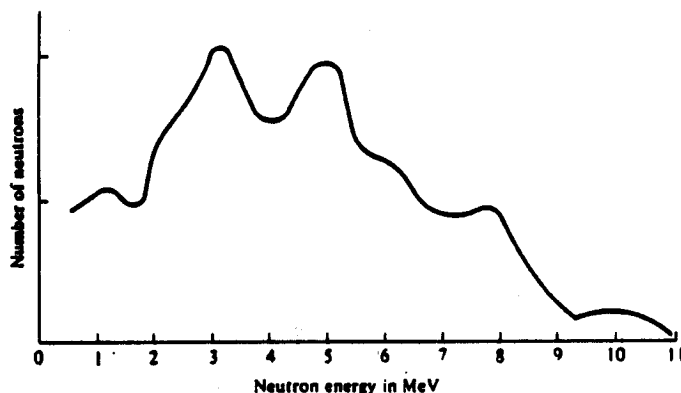
Beståndsdelarna i atomkärnan är protoner och neutroner. Protonen är identisk med kärnan för grundämnet väte och har elektrisk laddning $+1e$. Redan 1766 identifierades väte som grundämne, och i början av 1900-talet kände man till kopplingen mellan kärnladdning och kemiskt atomnummer. Neutronen är elektriskt neutral och därför svårare att upptäcka. Det dröjde ända till 1932 då Chadwick lyckades påvisa neutronens existens. En fri neutron har halveringstiden $t_{1/2}=10.25\pm 0.03$ min. Den sönderfaller genom β^- -sönderfall till en proton, en elektron och en antineutrino. Fria neutroner förekommer därför inte naturligt i naturen, utan måste produceras på konstgjord väg.

2.1 Produktion av neutroner

För att producera neutroner måste man på något vis "bryta loss" neutroner ur en atomkärna - d v s man använder sig av någon typ av kärnreaktion. Den intensivaste neutronkällan är uranreaktorn, där neutroner produceras genom fission av ^{235}U -kärnor. Man kan också använda sig av partikelacceleratorer där laddade partiklar accelereras och får träffa ett lämpligt strålmål så att en neutronproducerande kärnreaktion äger rum. Dessa två metoder har till nackdel att de är dyra och att apparaterna tar mycket plats. Man kan också producera fria neutroner utan tung och dyrbar utrustning. Strålning, främst α - eller γ -strålning från radioaktiva nuklider, kan användas för att initiera en neutronalstrande kärnreaktion. I vårt fall skall vi använda oss av samma typ av källa som Chadwick gjorde - en sk Ra-Be-källa. Den består av en blandning av pulvriserat Be och RaCl_2 . ^{226}Ra är radioaktiv och sönderfaller genom α -sönderfall. Den är den första kärnan i en sönderfallsserie som ger alfapartiklar med kinetiska energier från 5 till 8 MeV. α -partiklarna från ^{226}Ra och dess döttrar kommer att kollidera med ^9Be -kärnor i Ra-Be-källan och ger då upphov till kärnreaktionen



Halveringstiden för ^{226}Ra är 1600 år, vilket gör att aktiviteten från vår källa är praktiskt taget konstant. Energifördelningen för neutronerna från källan visas i figur 1.



Figur 1. Energifördelning för neutroner från Ra-Be källan. Fördelningen är kontinuerlig och har maximala energin vid ungefär 11 MeV. Observera att de flesta neutronerna har energier mellan 2 och 6 MeV. Lägg också märke till att energier under 0.5 MeV är ytterst ovanliga.

2.2 Tvärsnittsbegreppet

Tvärsnitt är ett mått på sannolikheten att en reaktion skall inträffa, sannolikheten för reaktion anges som en effektiv yta för reaktionen. Då sannolikheten för att en reaktion skall inträffa är stor är den effektiva ytan som projektilen "ser" stor. Vid låg reaktionssannolikhet är ytan liten.

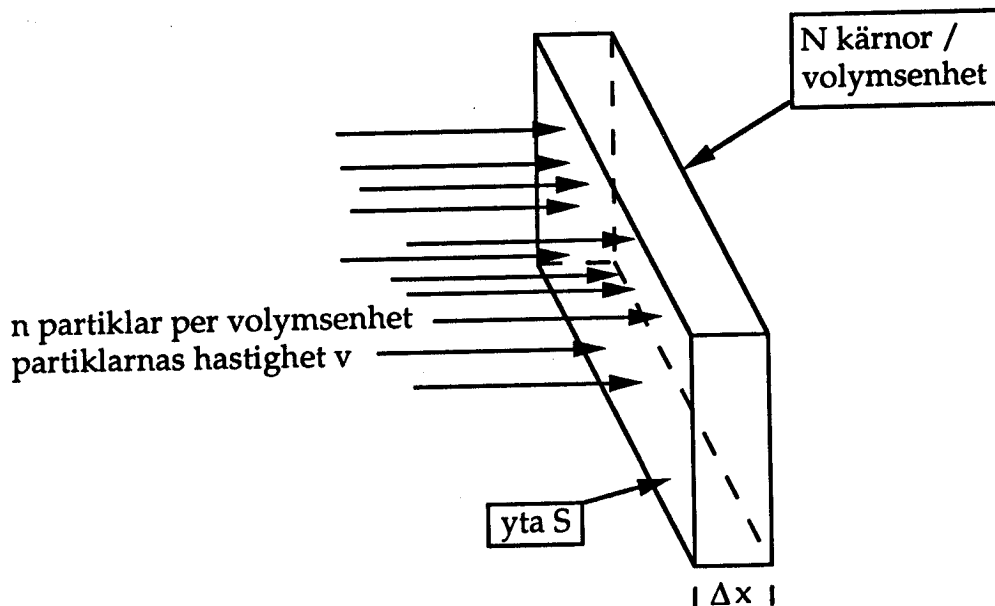
Det geometriska tvärsnittet för kollision mot en silverkärna är i storleksordningen $0.7 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2 = 0.7 \text{ barn}$. En titt i figur 3 visar att det faktiska infångningstvårsnittet för Ag är kraftigt energiberoende och har ett resonansmaximum som är ungefär 500 barn, d v s mycket större än det geometriska.

För att härleda tvärsnittet utifrån reaktionssannolikheten utgår vi från figur 2. En skiva med tjockleken Δx , ytan S och med N partiklar som kan orsaka reaktion per volymsenhet placeras i ett homogent neutronflöde. Flödestätheten är $\Phi = nv$ partiklar per ytenhet per tidsenhet, n är partikeltätheten i strålen d v s partiklar per volymsenhet och v är hastigheten (se figur 2). Skivans tjocklek Δx är tillräckligt liten för att partiklarna inte skall skugga varandra. Varje kärna tilldelas en effektiv tvärsnittsytta för reaktion σ som också kallas det mikroskopiska tvärsnittet. Sannolikheten för reaktion kan nu uttryckas:

$$P = \frac{\text{Effektiv area för reaktion}}{\text{Skivans area}} \quad (2)$$

Antalet kärnor i skivan är $NS\Delta x$ och eftersom förutsättningen är att partiklarna inte skuggar varandra blir effektiva arean för reaktion $NS\sigma\Delta x$. Reaktionssannolikheten blir då:

$$P = \frac{NS\sigma\Delta x}{S} = N\sigma\Delta x \quad (3)$$



Figur 2. Illustration till definition av tvärsnittsbegreppet.

Om vi låter skivan i figur 2 vara ett infinitesimalt volymselement med tjockleken dx och anger sannolikheten för reaktion som $-d\Phi/\Phi$, där $-d\Phi$ är ändringen i flödestätheten p g a reaktioner kan vi skriva:

$$-\frac{d\Phi}{\Phi} = N\sigma dx \quad (4)$$

Genom att integrera (4) från 0 till x fås flödestätheten som funktion av skivans tjocklek där flödestätheten vid $x=0$ betecknas Φ_0

$$\Phi = \Phi_0 e^{-N\sigma x} \quad (5)$$

Produkten $N\sigma$ brukar kallas makroskopiska tvärsnittet och betecknas Σ , vilket anger sannolikheten per längdenhet att en reaktion skall inträffa. Analogt med definitionen av halveringstid som den tid det tar för aktiviteten från en källa att halveras kan man definiera en halvvärdestjocklek $x_{1/2}$ som den sträcka efter vilken neutronflödestätheten har halverats. Insättning i ekvation (5) ger halvvärdestjockleken:

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{N\sigma} = \frac{\ln 2}{\Sigma} \quad (6)$$

2.3 Klassificering av neutroner med avseende på energi

Ett sätt att indela neutroner efter kinetisk energi är

1. Långsamma neutroner $0 < E_n < 1 \text{ keV}$

Underklasser

a) kalla neutroner $E_n < 0.002 \text{ eV}$

b) termiska neutroner $E_n \approx 0.025 \text{ eV}$

c) resonansneutroner $1 < E_n < 100 \text{ eV}$

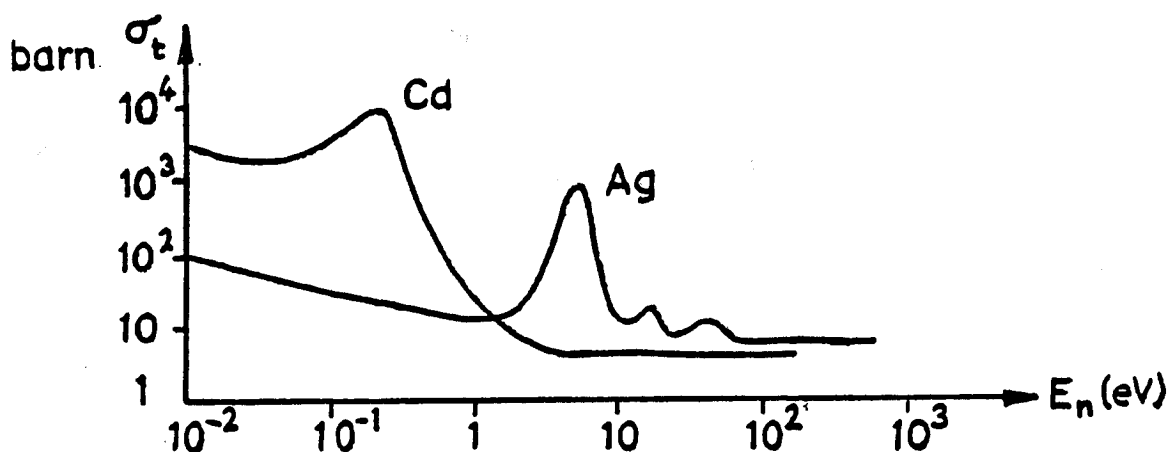
2. Intermediära neutroner $1 \text{ keV} < E_n < 1 \text{ MeV}$

3. Snabba neutroner $1 \text{ MeV} < E_n < 10 \text{ MeV}$

4. Högenergetiska neutroner $E_n > 10 \text{ MeV}$

Termiska neutroner är neutroner som är i termisk jämvikt med det medium vilket de diffunderar genom.

Resonansneutronerna har fått sitt namn av att i detta energiområde har neutrontvärsnittet markerad resonansstruktur, d v s de varierar kraftigt med neutronenergin. I figur 3 visas infångningstvårsnittet för neutroner i Ag och Cd.



Figur 3. Neutroninfångningstvårsnitt för Ag och Cd. Som synes har Cd ett resonansmaximum i det termiska området, Ag däremot har ett resonansmaximum vid ca 10 eV.

2.4 Nedbromsning av neutroner - moderation

Vi vet hur energifördelningen för de neutroner som produceras i vår neutronkälla ser ut (figur 1) och vi vet dessutom vid vilken energi vi har absorptionsmaximum för neutroner i silver (figur 3). Eftersom energierna för de neutroner vi har och de vi vill ha inte sammanfaller måste vi försöka bromsa ner de neutroner vi har. Att bromsa neutroner kallas att *moderera* dem - därav ordet moderator. Eftersom neutroner är elektriskt neutrala kan de inte växelverka elektromagnetiskt, och nedbromsningen måste då ske via stark växelverkan,

d v s genom upprepade stötar med moderatormaterialets atomkärnor. En bra moderator bör ha följande egenskaper:

1. lågt tvärsnitt för neutronabsorption.
2. stort innehåll av lätta atomkärnor eftersom neutronerna förlorar mera energi vid kollision mot lätta kärnor än mot tyngre.
3. de lätta moderatorkärnorna bör ha högt tvärsnitt för spridning av neutronerna.

Vid laborationen används paraffin $C_{58}H_{118}$ som moderator. Vid kollision med vätekärnor förlorar neutronerna i genomsnitt halva sin kinetiska energi. Energiförlusten vid kollision med kolkärnor är mycket mindre, varför inverkan av kolet kan försummas. Efter n kollisioner mot vätekärnor har en neutron med ursprungliga kinetiska energin E_{k0} bromsats till energin

$$E = \frac{E_{k0}}{2^n} \quad (7)$$

Neutronerna i en neutronstråle som faller in mot ett material kan avlägsnas ur strålen genom absorption eller spridning. Totala sannolikheten för att neutronerna skall ha växelverkat med absorbatormaterialet är då summan av tvärsnitten för de två processerna och totala tvärsnittet kan skrivas:

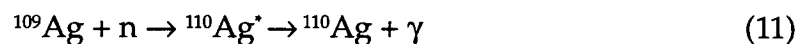
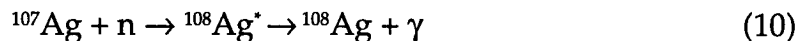
$$\sigma_t = \sigma_a + \sigma_s \quad (8)$$

Om man sätter in detta uttryck i ekv. (5) fås totala antalet partiklar per volymenhet som ej växelverkat efter att ha färdats ett avstånd d in i materialet

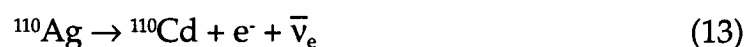
$$n = n_0 e^{-N\sigma_t d} \quad (9)$$

2.5 Aktivering av silver

Naturligt silver består av de stabila isotoperna ^{107}Ag (51.8%) och ^{109}Ag (48.2%). Radioaktivt silver kan erhållas genom neutronbestrålning av naturligt silver genom reaktionerna



Båda dessa silverisotoper sönderfaller genom β -sönderfall, reaktionsformlerna för dessa sönderfall är:



Genom att räkna elektronerna från sönderfallen kan vi bestämma halveringstiderna för de två silverisotoperna. Sannolikheten för att reaktionerna (10) och

(11) skall ske är, som tidigare nämnts, beroende av neutronernas energi, d v s tvärsnittet för reaktionerna är energiberoende (se figur 3).

2.5.1 Aktiveringstid

Hur länge skall vi då aktivera våra prover? Sönderfallslagen talar om för oss hur många sönderfall per tidsenhet vi har för ett visst antal kärnor N av en isotop med sönderfallskonstanten λ genom sambandet

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (14)$$

där

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \quad (15)$$

Lösningen (16) till ekvation (14) beskriver hur antalet radioaktiva kärnor i preparatet beror av tiden, där N_0 betecknar antalet kärnor av isotopen vid tiden $t=0$.

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (16)$$

Vi definierar nu preparatets aktivitet A

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (17)$$

Insättning av N enligt (16) ger då

$$A = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad (18)$$

Men $\lambda N_0 = A_0$, aktiviteten vid tiden $t=0$, vilket ger sambandet för aktivitetens tidsförlopp

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (19)$$

Vi skall utvidga problemställningen till produktion av en radioaktiv substans. Antag att en viss radioaktiv nuklid produceras genom en kärnreaktion med ett visst utbyte U per tidsenhet. Per tidsenhet sönderfaller λN kärnor av dem som produceras. Vi kan då skriva:

$$\frac{dN}{dt} = U - \lambda N \quad (20)$$

Lösningen till ekvation (20) är

$$N = \frac{U}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (21)$$

och aktiviteten blir enligt (17)

$$A = \lambda N = U(1 - e^{-\lambda t}) \quad (22)$$

Om vi betraktar sambandet (22) inser vi att tiden man behöver aktivera sitt prov för att uppnå en viss aktivitet är beroende av halveringstiden för den skapade radioaktiva isotopen. Om man använder ekvation (15) i ekvation (22) så ser man att efter endast en halveringstids aktivering har man uppnått 50% av det totalt möjliga utbytet, efter två halveringstider 75% osv.

Den längsta halveringstid vi skall mäta är kortare än tre minuter vilket gör att en aktiveringstid på 10 minuter är fullt tillräcklig.

3 Experimentuppställning

Neutronkällan befinner sig i centrum av ett cylinderformat paraffinblock. På avståndet 2.5 cm från källans centrum finns möjlighet att placera silverbleck för aktivering med neutroner som inte har passerat någon moderator. På avstånden 5.5 respektive 8.5 cm från källans centrum kan silverblecket aktiveras med 3 cm respektive 6 cm paraffin som moderator. Silverblecken kan omges med Cd-skydd för eliminering av termiska neutroner.

För att registrera β -partiklar från sönderfallen av de aktiverade preparaten finns GM-rör med tillhörande elektronik för spänningsförsörjning och räkning av pulser.

4 Utförande

OBSERVERA! Ta inte i Cd-blecket med fingrarna. Kadmium är giftigt!

Från början skall ni ha gjort en bakgrundsmätning med oaktiverat preparat i mätposition under 10 min. För in resultatet av denna mätning på arbetsbladet.

Provet aktiveras i 10 minuter, i positionen där det är 3 cm paraffin mellan källan och provet. (Om man undersöker utbytet som funktion av avståndet till källan i den här geometrin finner man att utbytet blir störst på detta vis. Det beror på att rymdvinkeln blir så mycket mindre vid nästa position, även om denna position är mer fördelaktig energimässigt.) Vi skall inte använda Cd-blecken varken vid aktiveringen eller mätningen.

Vid aktiveringens slut startas tidtagaruret då provet lyfts upp. Provet stoppas in i hålet i "mätburken" och räknaren startas vid tiden 20 sekunder (se tabellen). Märk att tidtagaruret går hela tiden och att det enda ni stoppar och startar är räknaren. Märk också att tiden ni mäter ändras eftersom aktiviteten blir lägre då tiden går. Om man skulle missa en mätpunkt så hoppa över den, det är viktigare att resten av mätningen blir korrekt.

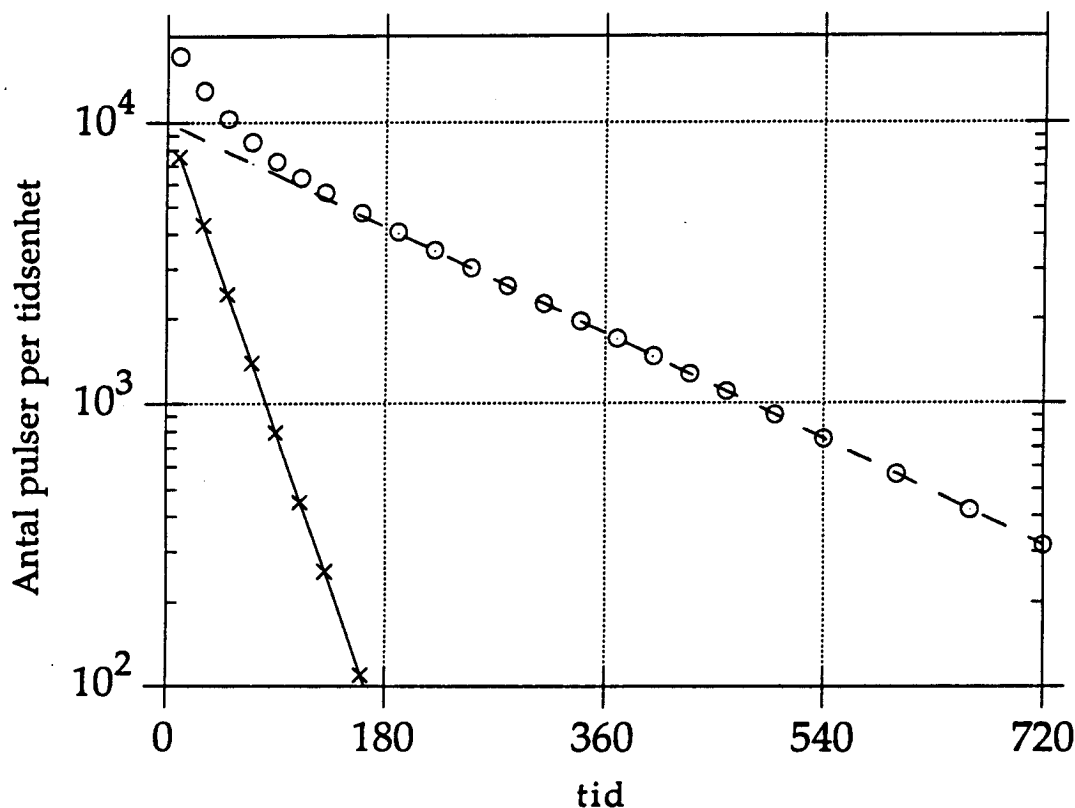
För in mätdata i tabellen och dra bort bakgrund och fyll i resten av tabellen.

5 Utvärdering av experimentet

Vid experimentet har du tagit upp en sönderfallskurva som innehåller aktiviteter från två olika isotoper med olika halveringstid. För att analysera mätdata plottas räknehastighet, d v s antalet pulser per tidsenhet mot tiden på ett lin-log papper. Den kurva som erhålles kan delas upp i två räta linjer som representerar de två olika aktiviteterna. Den totala aktiviteten är:

$$A = A_{01}e^{-\lambda_1 t} + A_{02}e^{-\lambda_2 t} \quad (23)$$

Här är $\lambda(^{110}\text{Ag}) \gg \lambda(^{108}\text{Ag})$, och slutet av kurvan kommer alltså i praktiken endast att representera sönderfall av ^{108}Ag eftersom A_{01} och A_{02} är ungefär lika stora. Början av kurvan däremot innehåller sönderfall från båda isotoperna. För att separera de båda linjerna dras linjen som motsvarar den långlivade isotopen (se figur 4). Lutningen hos denna linje ger halveringstiden för den mer långlivade silverisotopen. För att ta reda på halveringstiden för den kortlivade isotopen måste aktiviteten som härrör från den långlivade subtraheras från den totala aktiviteten. Denna läses av från linjen vid korta tider och subtraheras från den totala aktiviteten. Skillnaden plottas in i diagrammet och den korta halveringstiden kan bestämmas.



Figur 4. Komplex sönderfallskurva. Mätpunkterna är utsatta som ringar och skillnaden mellan den totala aktiviteten och den långlivade har ritats in som kryss. Den heldragna linjengenom dessa kryss ger aktiviteten för den kortlivade Ag-isotopen medan den långlivade isotopen representeras av den heldragna linjen. I verkligheten är mätningen behäftad med ett statistiskt fel, om antalet registrerade pulser vid en viss tid t är N stycken är det statistiska felet i den punkten $\pm\sqrt{N}$.

6 Mätdata - Arbetsblad

Bakgrundsmätningen gav resultat:.....pulser /10 min

vilket motsvarar:.....pulser/min.

Tabell 1. Mätresultat

Min.	sek.	#pulser	#pulser/min	#pulser/min -bakgrund
0	20-30			
	40-50			
1	0-10			
	20-30			
	40-50			
2	0-10			
	20-30			
	40-50			
3	0-10			
	20-30			
	40-50			
4	0-20			
	30-50			
5	0-20			
	30-50			
6	0-20			
	30-50			
7	0-20			
	30-50			
8	0-50			
9	0-50			
10	0-50			
11	0-50			
12	0-50			

Halveringstiderna blir: ^{108}Ag :.....

^{110}Ag :.....