

EXPERIMENTELLA STUDIER AV GAMMASÖNDERFALL

Fredrik Stillesjö, 1994.

Reviderad av Mattias Lantz och Rikard Enberg (2002), av Karin Schönning och Henrik Persson (2004), av K. S. (2005, 2006), Oscar Stål (2007) and Sophie Grape (2007).
Förkortad och reviderad version av Richard Brenner (2010).

2 december 2010

Sammanfattning

I samband med radioaktivt sönderfall sänder ofta atomkärnan ut gammastrålning. Energin hos gammastrålningen är karakteristisk för den atomkärna som sönderfaller. Detta beror på att varje atomkärnas energinivåer är unika. Genom att göra spektroskopi av gammastrålning kan man bl.a. studera atomkärnans struktur. I denna laboration gör vi spektroskopiska studier av gammasönderfall.

Uppgifter: 1. Studie av γ -strålning med NaI(Tl)-detektor
2. Jämförande studie av γ -strålning med NaI(Tl)- och HPGe-detektorer

Litteratur: Utdrag ur *Introductory Nuclear Physics* av K. S. Krane (se bilaga)
Modern Physics av P. A. Tipler och R. A. Llewellyn
Physics Handbook av C. Nordling och J. Österman
Instruktioner för hantering av radioaktiva källor (inkluderat här)
Utdrag ur *Table of Isotopes* (finns vid labuppställningen) eller på nätet
<http://ie.lbl.gov/education/isotopes.htm>

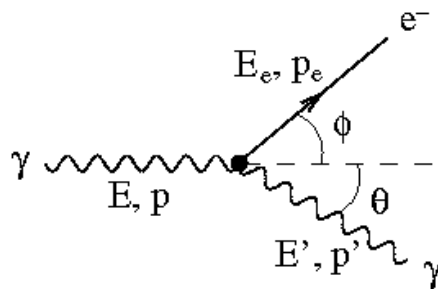
Plats: Sal Å81125, Ångströmlaboratoriet

FÖRBEREDANDE UPPGIFTER

De obligatoriska förberedande uppgifterna skall vara inlämnade senast **måndagen den 29/11 2010, kl. 09:00**.

Se till att du förstår vad du gör. Svaren på frågorna kommer att behövas under laborationen och i labrapporten.

1. Vilka olika typer av nukleära sönderfallsprocesser finns det och vilken sorts strålning orsakar de? Förklara kortfattat vad strålningen i de olika fallen består av.
2. Vad är elektromagnetisk strålning? Med vilka processer växelverkar elektromagnetisk strålning med materia? Beskriv vad som kännetecknar de olika processerna. Vilken energienhet används lämpligen när man beskriver gammastrålning från kärnsönderfall?
3. Härled ett uttryck för energin hos en Comptonspridd foton (E' i Figur 1) utgående från energins och rörelsemängdens bevarande. Plotta energin för den spridda *elektronen* (E_e) som funktion av spridningsvinkeln θ för fotonen i intervallet $0 - 180^\circ$.



Figur 1: Comptonspridning.

4. Vilket samband beskriver absorptionen av gammastrålning i olika material som funktion av materialets tjocklek x ? Förklara vad de olika parametrarna betyder. Vilken parameter i detta uttryck är karakteristisk för materialet?

Varning! Hantering av radioaktiva preparat: Under laborationens gång kommer du att hantera flera olika typer av radioaktiva preparat. De flesta är inte ”starka”, men kan ändå vara skadliga om du är vårdslös. Ha aldrig mer än ett prov ute åt gången. Läs informationen om hanteringen av radioaktiva preparat som finns på nästa sida. Fråga dina assistenter om du är osäker över något!

USING AND HANDLING RADIOACTIVE SOURCES AT ISV, A STUDENT'S MANUAL

Introduction

All gamma-ray emitting sources used in the course laboratory are of the closed type. This means that the active substance is contained in a small box sealed with resin or a similar material. **Do not open this plastic box.** During *normal* handling this ensures that no radioactive material is permitted to leave the container. The activity of the sources is in the range of a few μCi to about $10 \mu\text{Ci}$, i.e., up to about 370 kBq . For typical gamma-ray energies of about 500 keV this means that the dose rate is at most about $3 \mu\text{Sv/h}$ at a distance from the source of 0.1 m (the maximum allowed dose rate for personnel working with radioactive substances is $5 \mu\text{Sv/h}$). For comparison, the natural background radiation at sea-level gives a dose equivalent of about $0.1 \mu\text{Sv/h}$.

Handling of radioactive sources

The sources used at the laboratory should be handled with care. This means:

- Avoid mechanical shocks of any kind.
- If possible, use tweezers when moving a source.
- Keep good order at the working bench in order to avoid that sources disappear.
- The use of alpha and beta-emitting sources needs special attention. Listen to and obey your assistant.
- It is not only *forbidden* but it is also a good habit *not to eat or drink* in the laboratory.
- You are *not* allowed to use and handle radioactive sources *without the supervision* of your assistant.
- The sources must not be taken away from the laboratory.
- If a source is missing, you *must* contact the assistant immediately.
- It is *your* responsibility that the sources you are working with are not diverted.
- *Students afflicted by alcohol or other substances are disqualified from working in the laboratory.*

Finally

Remember that the radioactive sources used in the lab are not dangerous if handled appropriately. This essentially means that you shall always plan and conduct your work in such a way that you minimise your personal dose.

In case of questions concerning the above matters, please ask the assistants.

INLEDNING

För att du skall få så stor nytta av laborationen som möjligt bör du ägna ett par timmar före laborationstillfället åt att bekanta dig med de fysikaliska fenomen och termer som behandlas i denna laboration, såsom:

- Fotoelektrisk effekt och fototoppen
- Comptonspridning, Comptonkant
- Parproduktion
- Positronannihilation
- Inre konversion
- Elektroninfångning
- Deexcitering och sönderfall (skillnad och samband)

Naturligtvis bör du noga läsa igenom denna laborationsinstruktion i förväg. Det utdelade kompendiet med kapitel 7 i Kranes "Introductory Nuclear Physics" ger utmärkta förkunskaper och är bra att ha till hands till rapportskrivandet.

Laborationen börjar med ett obligatoriskt muntligt förhör. Om någon skulle vara otillräckligt förberedd kommer han/hon att hänvisas till ett senare laborationstillfälle, och det kan inte garanteras att sådana finnes under denna termin.

Rapport

Laborationen redovisas i form av en begränsad rapport som är inriktad på att besvara frågorna i laborationskompendiet. Frågorna ska inte besvaras innan laborationstillfället, utan under eller efter det. Rapporten skall vara utformad med ett ingenjörsmässigt förhållningssätt i åtanke, koncist men precist. Detta innebär:

- att du INTE behöver förklara experimentuppställningar och tillvägagångssätt i detalj, utan endast mycket kortfattat
- att du INTE behöver redogöra detaljerat för hur någon detektor eller annan detalj fungerar, om det inte explicit efterfrågas
- att alla frågor skall besvaras med fullständiga meningar, med frågan inbakad i svaret så att det tydligt framgår i svaret vad frågan var
- att hela rapporten är skriven på dator, i t.ex. Word eller $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$. Formen skall vara professionell och underlätta genomläsningen. Rapporten och ev. revideringar inlämnas i pappersform. Den slutgiltiga versionen skickas elektroniskt till ansvarig handledare.
- att alla grafer och kurvanpassningar är gjorda i MATLAB, och att enheter och namn på axlar måste anges. Tänk särskilt på att göra tydliga och korrekta figurer.
- att den MATLAB-kod som använts bifogas rapporten
- att alla figurer och tabeller förklaras noggrant och refereras till i texten

- att alla enheter sätts ut, även i figurer
- att det noga förklaras hur värden från tabeller, grafer eller dylikt har erhållits.

Tips: Följande Matlab-kommandon är bra att känna till (använd hjälpfunktionen *help* för en förklaring av kommandona): *polyfit*, *polyval*, *linspace*, *axis*, *plot*, *xlabel*, *ylabel*.

Förkortningar:

ADC	Analog-to-digital converter
Amp	Amplifier, förstärkare
FWHM	Full width at half maximum, halvvärdesbredd
HPGe	High purity Germanium detector
HV	High voltage, högspänning
MCA	Multichannel analyzer, mångkanalsanalysator
P. Gen	Pulsgenerator
PM-tube	Photomultiplier tube, fotomultiplikator

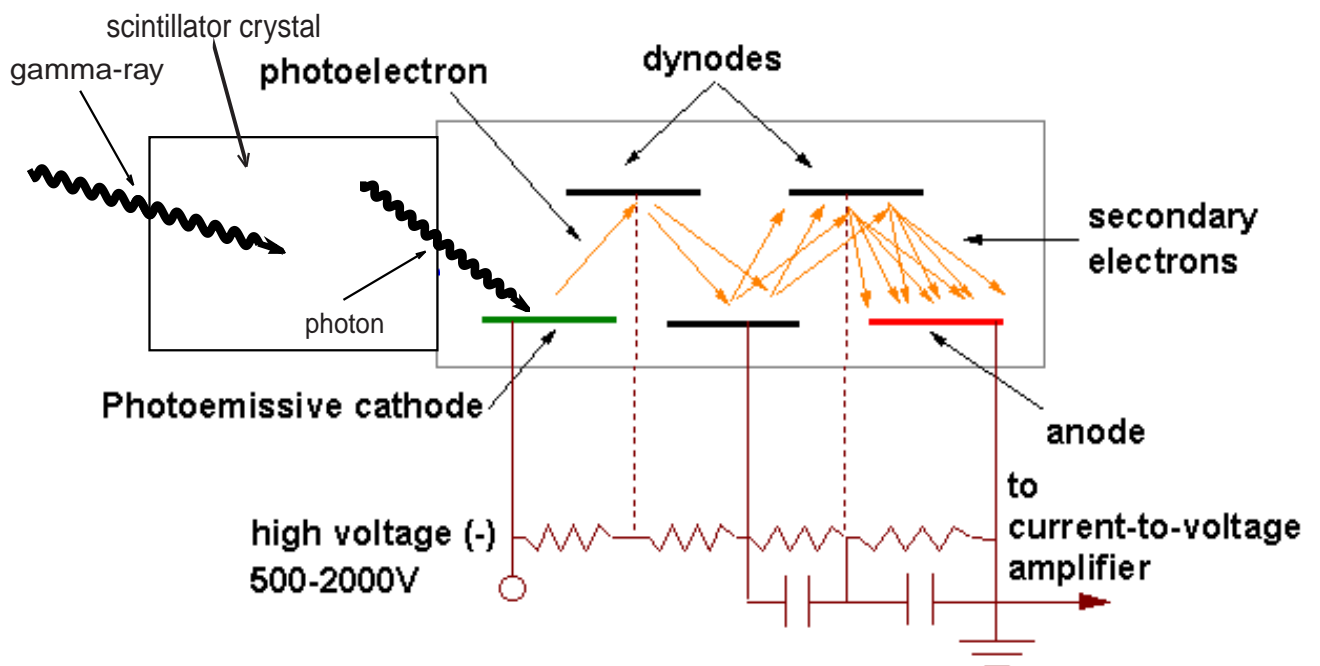
Hjälpmedel: Följande finns tillgängligt i labbet:

- Table of Isotopes — innehåller information om sönderfall och deexcitationer för olika isotoper.
- Instruktionsmanual till analysprogrammet MAESTRO.
- Tabeller för absorptionskoefficienter.

1 STUDIE AV γ -STRÅLNING MED NaI(Tl)-DETEKTOR

1.1 Scintillationsdetektorer

Elektromagnetisk strålning är något som hela tiden finns omkring oss. Våra ögon är en slags "detektorer" som vi kan använda för att registrera och identifiera den synliga delen av det elektromagnetiska spektrat. Dock kan de inte användas för att observera strålning med högre energi. Här måste vi förlita oss på andra metoder. Ett sätt är att använda ett fluorescerande material. Det som i stora drag sker vid denna process är att energin *skalas ned* genom excitation- och deexcitationsprocesser. Dessa processer är något att ta fasta på när scintillationsdetektorn nu skall förklaras. I figur 2 visas en principskiss av en scintillationsdetektor.



Figur 2: Principiell skiss av scintillationsdetektor.

Denna detektortyp används framför allt till detektion av högenergetisk gammastrålning, men även fotoner med våglängder i den synliga delen av spektrat kan förstärkas. Vid detektion av synligt ljus används inte kristaller, utan endast den så kallade fotomultiplikatorn. Funktionen hos en scintillationsdetektor kan enkelt beskrivas enligt följande:

En högenergetisk foton träffar detektorn och växelverkar i det första steget med en kristall. Fotonen kan med en viss sannolikhet överföra en del eller hela sin energi till kristallen via spridningsprocesser. En elektron upptar rörelsemängd (eller energi) som är proportionell mot den spridda fotonens energi. Den spridda elektronen sprids i sin tur mot andra elektroner i kristallen som även de exciteras. I sinom tid kommer alla elektroner att deexciteras och därmed skapa ljuskvanta vars energi ligger i storleksordningen eV. På detta sätt har en foton med energi av storleksordningen 1 MeV omvandlats till tiotusentals sekundära fotoner med energier av storleksordningen eV.

Dessa fotoner leds in i fotomultiplikatorn, där de genom fotoelektrisk effekt slår ut elektroner från ett material med lågt utträdesarbete. De utslagna elektronerna kommer sedan att förstärkas eller multipliceras genom att slå ut fler elektroner när de accelereras mot sk dynoder. Antalet elektroner, dvs laddningen på den sista dynoden, är strikt proportionell mot den spridda fotonens energi. På detta sätt har en elektrisk puls uppkommit, vars amplitud svarar mot fotonenergin. För att accelerera elektronerna måste högspänning användas (500 – 3000 V). Som scintillationsmedium brukar oorganiska material såsom NaI(Tl), CsI(Tl), CsBr(Tl), BgO och CaF₂(Eu) användas.

Detektorsystemet i denna laboration består av en cylindrisk talliumaktiverad NaI-kristall monterad på en fotomultiplikator, ett högspänningsaggregat, samt elektronisk utrustning för registrering och analys av de erhållna pulserna.

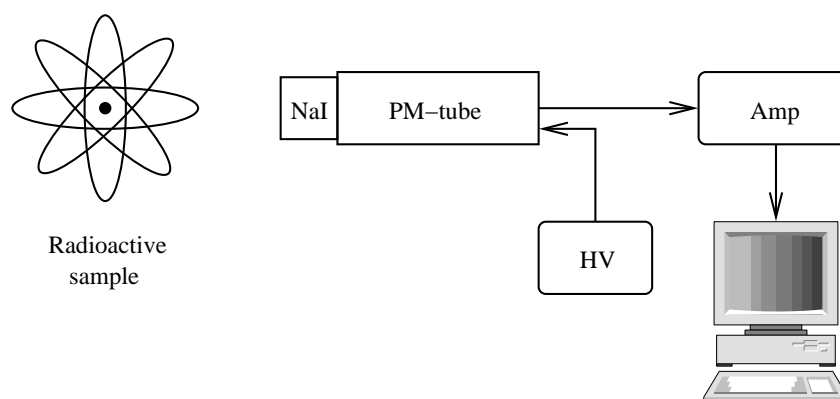
1.2 Registrering av pulshöjdsspektrum för ¹³⁷Cs-sönderfallet

Vid laborationsplatsen finns en "NIM-binne". I denna finns all den elektronik som du behöver för att genomföra denna laboration. Följande elektronikmoduler skall finnas på plats i "NIM-binnen":

- Förstärkare
- Pulsgenerator
- Högspänningsaggregat

Vid laborationsplatsen skall finnas en tabellsamling över radioaktiva sönderfall (*Table of Isotopes*). Studera och lär dig att slå i denna. Den kan vara ganska komplicerad, men din labassistent kan förklara för dig. Leta upp sönderfallsschemat för ¹³⁷Cs.

Fråga 1.1: Till vilken isotop sönderfaller ¹³⁷Cs? Vilken är deexcitationsenergin för ¹³⁷Cs-sönderfallet? Till rapporten: kom ihåg att referera till ditt spektrum!



Figur 3: Studie av γ -strålning med mångkanalsanalysatorn

Koppla upp enligt figur 3 och placera ett ¹³⁷Cs-preparat framför detektorn. De olika elektronikenheterna sammankopplas med koaxialkablar. I de fall man behöver dela signalen för

flera elektronikmoduler så finns T-kopplingar för detta ändamål. Vid laborationsplatsen finns även en NaI-detektor ihopkopplad med ett PM-rör, ett oscilloskop samt en PC med tillhörande bruksanvisning för analysprogrammet MAESTRO. De radioaktiva preparat som kommer att användas finns i ett skåp där de kan hämtas efter behov. **Lägg tillbaka preparatet i skåpet efter varje avslutat moment om det inte skall användas direkt efteråt.**

Vrid **sakta** upp högspänningen till det värde som står angivet på detektorn (ca 500 V). När aggregatet stängs av och/eller innan detektorn kopplas ur måste spänningen också långsamt vridas ner. Använd plastinkapslade ^{137}Cs -preparat som strålningskälla och studera pulserna från detektorn med oscilloskopet.

Tag upp ett pulshöjdsspektrum och ställ in förstärkaren så att fototoppen motsvarande den högsta energin hamnar ungefär i kanal 1000 (i ett spektrum med 2048 kanaler).

Fråga 1.2: Förklara de olika delar som du observerar i spekrat.

Fråga 1.3: Vad är "Comptonkanten" för något, och hur uppstår den?

Gör en utskrift av spekrat. Ange i detta spektrum läget av Comptonkanten och andra observerade delar. Spara spekrat och bifoga det i din rapport.

Fråga 1.4: Beräkna Comptonkantens läge med hjälp av resultatet i hemuppgift 3.

Fråga 1.5: Vad händer om du ändrar avståndet mellan ^{137}Cs -preparatet och NaI-detektorn och varför? Hur beror den detekterade strålningen på avståndet till preparatet (svara med en formel)? Mät för några olika avstånd och försök att verifiera detta beroende. Om du inte uppmäter det du förväntar dig, vad kan det bero på?

1.3 Undersökning av γ -spektra med NaI-detektor och mångkanalsanalysator

1.3.1 Kalibrering av mångkanalsanalysatorn

I det upptagna gammaspektrat från ^{137}Cs angavs energiskalan i kanalnummer på x-axeln. Vi vet från *Table of Isotopes* att fototoppen motsvarar en viss energi, men energin hos de andra delarna av spekrat känner vi endast i form av kanalnummer, inte i energienheter (t ex MeV). För att på ett bekvämt sätt kunna mäta och analysera ett gammaspektra måste en kalibrering göras av MCA:ns energiskala. För detta ändamål används ett ^{22}Na -preparat, som ger mer än en kalibreringspunkt. Studera detta sönderfall i *Table of Isotopes*.

Fråga 1.6: Hur många **övergångar** dvs. deexcitationer, förväntar du dig att se, och med vilken/vilka energi(er)? Hur många **fototoppar**, dvs. processer varvid du kan detektera den totala energin från en inkommande foton, förväntar du dig att se, och vid vilken/vilka energi(er)? Förklara varför!

Använd samma uppkoppling som tidigare (figur 3). Tag upp ett pulshöjdsspektrum för ^{22}Na . Ställ in förstärkningen så att fototoppen som svarar mot den högsta energin (det finns mer än en fototopp) hamnar i mitten av spekrat (ungefär i kanal 1000). När du ställt in topparna vid 'rätt' kanaler, lät MAESTRO ta upp data till spekrat i åtminstone några minuter, så att alla toppar ser jämna och 'mjuka' ut. Använd nu de identifierade energierna för

en energikalibrering. Observera att detta enklast utförs direkt med analysprogrammet MAESTRO. Studera bruksanvisningen för detta ändamål och utför energikalibreringen. Tänk på att MAESTRO anpassar en gaussisk topp ovanpå en polynomisk bakgrund. För att en bra bakgrundsanpassning skall kunna göras måste därför HELA toppen markeras, samt lite bakgrund på bägge sidor om toppen.

Gör en utskrift av ^{22}Na -spektrat. Markera fototopparnas läge samt eventuella Comptonkanter. Rita ett sönderfallsschema där de observerade övergångarna finns med.

Som mått på energiupplösningen använder man halvvärdesbredden, FWHM (Full Width at Half Maximum). Bestäm halvvärdesbredden (i keV) för varje observerad fototopp. Gör en tabell där övergångsenergierna och FWHM redovisas (tabellen kommer strax fyllas på med fler värden). Kom ihåg att MAESTRO ibland gör otillfredsställande Anpassningar - kontrollera därför med ögat att ditt uppmätta FWHM stämmer med vad du uppskattar själv från ditt spektrum.

Tips: Så länge du inte ändrar på detektorns högspänning, eller förstärkningsfaktorn på förstärkaren, så gäller den energiskala som du tagit fram vid energikalibreringen med ^{22}Na .

1.3.2 Studie av gammastrålning från ^{137}Cs , ^{60}Co och ^{207}Bi

Tag upp pulshöjdsspektrum i tur och ordning för ^{137}Cs , ^{60}Co och ^{207}Bi . Låt MAESTRO köra tills topparna får jämna utseenden. Studera sönderfallsscheman i *Table of Isotopes* och identifiera topparna i dessa spektra. Gör en utskrift av varje spektra. Markera i dessa fototopparnas läge samt deras energier. Rita ett sönderfallsschema för varje preparat. Bestäm halvvärdesbredden (i keV) för så många av topparna i ovannämnda spektra som möjligt och fyll på tabellen.

Tips: Växla mellan lin- och logskala för att kunna identifiera så många fototoppar som möjligt för varje preparat. Detta är speciellt viktigt för ^{207}Bi .

Fråga 1.7: Hur väl överensstämmer de observerade topparnas lägen med de förväntade? Hur skulle man kunna förbättra energikalibreringen?

1.4 Absorption av γ -strålning i olika material

Denna del av laborationen går ut på att mäta intensiteten på den detekterade strålningen efter det att fotonerna passerat igenom ett material (sambandet har ni redan härlett i er inlämningsuppgift). Efter det att mätningarna genomförts, ska ni göra en anpassning av en rät linje till era mätdata, där ni tar hänsyn till den osäkerheter ni har i detektionen av intensiteten (fundera på vad det kan vara). Detta kan ni göra efter laborationens avslutande. Ni kommer också att bestämma den materialberoende absorptionskoefficienten μ , samt osäkerheten i detta värde. Hur ni gör detta beskrivs på sista bladet i det uppkopierade Krane-häftet ni fått utdelat. Använd en kollimerad ^{137}Cs -källa för att mäta absorptionen av γ -strålning i ett material. Denna typ av strålkälla är speciellt viktig här eftersom vi vill att all strålning ska gå lika långt i materialet. Välj mellan att använda Al, Cu eller Pb som absorbatör och gör fem mätningar under 30s för Al och Cu och 60s för Pb. Använd olika tjocklekar på absorbatörerna för varje mätning och mät varje absorbatörplatta noggrant med skjutmatt.

I laborationsrapporten ska ni jämföra ert beräknade värde på μ med ett tabellerat värde. Denna tabell hittar ni på baksidan av MAESTRO-manualen. Notera enheten som anges!

Fråga 1.8: Beräkna absorptionskoefficienten strategin ovan. Redogör för de olika stegen. Bifoga kod, samtliga tabellvärden och bilder. Även mätosäkerheten i absorptionskoefficienten skall räknas fram. Jämför dina resultat med värdet du räknat fram från det tabellerade värdet. Hur god är överensstämmelsen? Kommentarer?

Fråga 1.9: Räkna ut halvvärdestjockleken $x_{1/2}$, dvs den tjockleken på materialet som gör att intensiteten halveras. Jämför även här med de värden du räknat fram från de tabellerade värdena. Räkna även fram mätosäkerheten med hjälp av felfortplantningsformeln. Vad hos ett material torde vara avgörande för dess förmåga att absorbera strålning?

Fråga 1.10: Genom vilka processer absorberas gammastrålning i detta experiment? Fundera kring de processer ni känner till samt vilka energier ni använder er av.

1.5 Identifiering av okänd isotop

Välj en av strålkällorna som är märkta "Prov 1" eller "Prov 2" och sätt igång en mätning. När ni har tagit upp ett tydligt spektrum ska ni använda det tillsammans med *Table of Isotopes* för att identifiera källan, som antingen är ^{152}Eu eller ^{154}Eu .

Fråga 1.11: Vilket prov valde ni och vad identifierade ni källan som?

Fråga 1.12: Jämför topparna med sönderfallsschemat. Hur väl stämmer kalibreringen med sönderfallsdiagrammet? Hur förhåller sig topparnas höjd till sönderfallsdiagrammet? Förklara orsakerna till skillnaderna du observerat.