Kako delujejo merilniki ionizirajočega sevanja

Helena Janžekovič

- Uvod
- Vrste ionizirajočega sevanja
- Interakcija delcev s snovjo
- Vrste merilnikov in fizikalne količine
- Delovanje merilnikov ionizirajočega sevanja
- Eksperiment
- Sodobni merilniki sevanja
- Zaključek

Uvod

Severni sij (Aurora borealis), Aljaska

Nabiti delci, to so primarni in sekundarni kozmični žarki, povzročajo ionizacijo v atmosferi. Tej sledi izsevanje fotonov svetlobe, ki jih zaznamo.

ionizirajoče sevanje → medij → poškodbe v snovi lahko zaznamo

http://www.destination360.com/north-america/us/alaska/aurora-borealis

Uvod

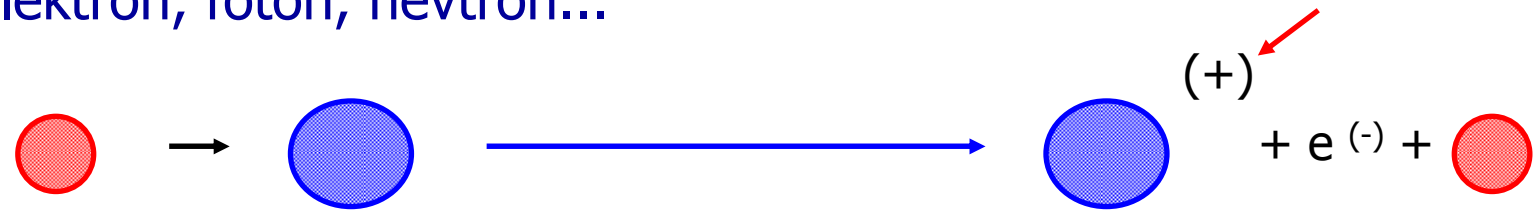
Kaj je ionizirajoče sevanje?

- Ionizirajoče sevanje povzroča ionizacijo v snovi, to pomeni nastanek ionov.

Primer:

delec + atom $\xrightarrow{\text{direktna ionizacija}}$ ion + elektron + ...

- Delcev, ki povzročajo sevanje je veliko: proton, težki ion (Li, Br...), elektron, foton, nevtron...



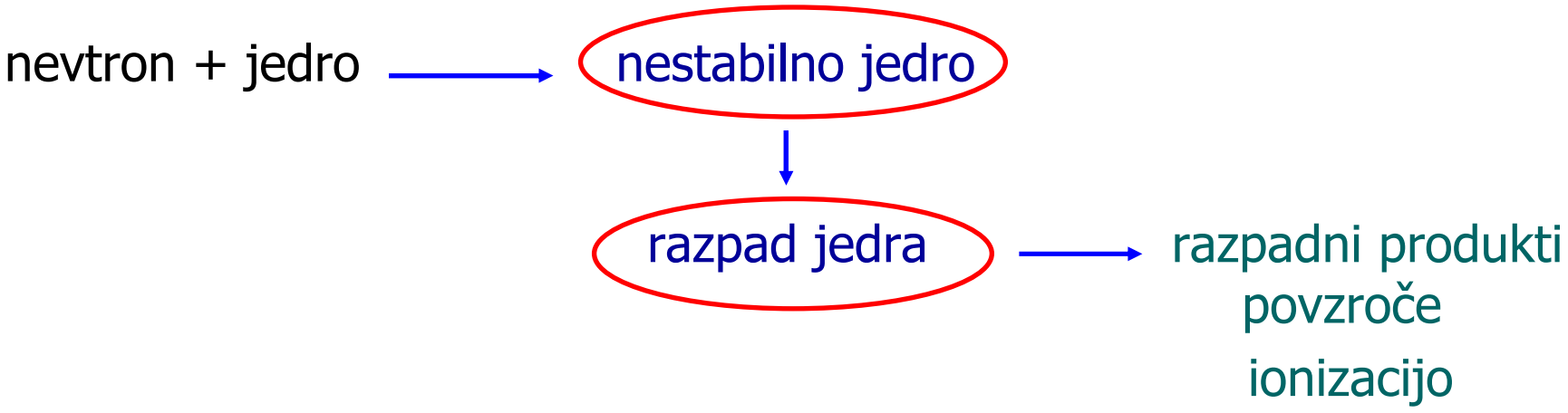
Uvod

- Ionizacija je lahko zapleten proces.

  Primera:

  - Atom lahko doživi t.i. "dvojno ionizacijo". Po procesu ionizacije je njegov naboj 2+, ker je izgubil dva elektrona.

  - Električno nevtralni delci, ki padajo na snov ne povzroče takoj nastanek ionov, temveč je lahko potrebna ena ali več vmesnih stopenj, ki vodijo do ionizacije snovi.



Uvod

Zakaj je potrebno poznati ionizirajoče sevanj?

- Ionizirajoče sevanje srečamo

  - pri osnovnih fizikalnih in drugih raziskavah
  - v vsakdanjem življenju (v medicini, industriji...)
  - pri varovanju ljudi in okolja.

- Področja se večkrat tesno prepletajo, na primer ionizirajoče sevanje uporabljamo v jedrskih reaktorjih, ti pa so tesno povezani z varovanjem ljudi in okolja.

Uvod

Osnovne raziskave

Primera

Raziskave vesolja

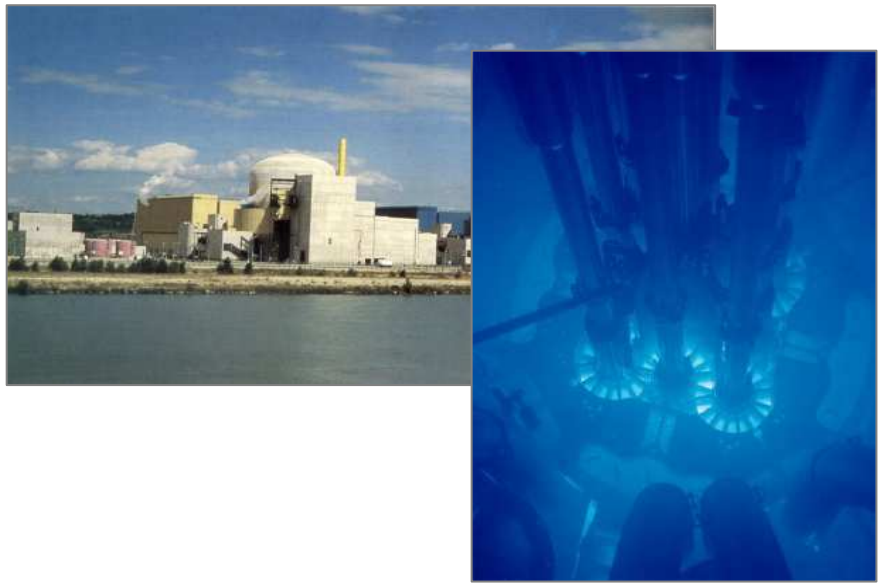
Raziskave v fiziki osnovnih delcev

Desno: http://cdsweb.cern.ch/record/984682?ln=en

Uvod

Uporaba v vsakdanjem življenju

Primera



Uporaba v energetiki

Uporaba v medicini

Uvod

Zaščita pred sevanjem

Primera

Fukushima 2011

Nadzor po nesreči

Redni nadzor

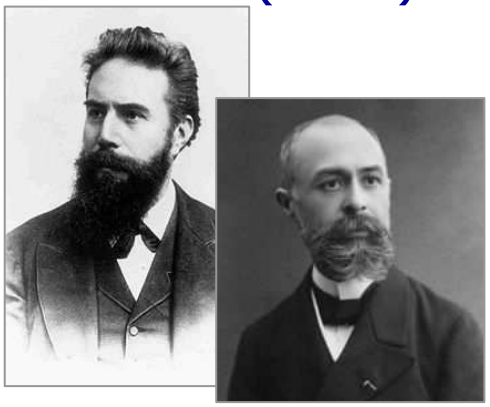
Vrste ionizirajočega sevanja

Sevanje, ki lahko povzroča ionizacijo

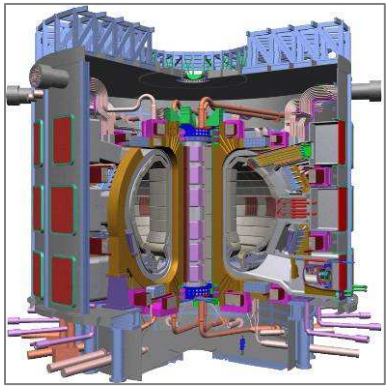
- Danes poznamo številne vrste sevanja.

W.C. Roentgen
(1895)

H. Becquerel
(1896)



fuzijski reaktor ITER
(2006-)



čas

Vrste ionizirajočega sevanja

Sevanje, ki lahko povzroča ionizacijo

- Število delcev, ki jih poznamo se povečuje:

  "alfa" (He jedra - ^{4}He)

  "beta" (elektroni)

  "gama" (visoko energijski fotoni)

  protoni, nevtroni

  pozitroni ..... mioni, pioni .....

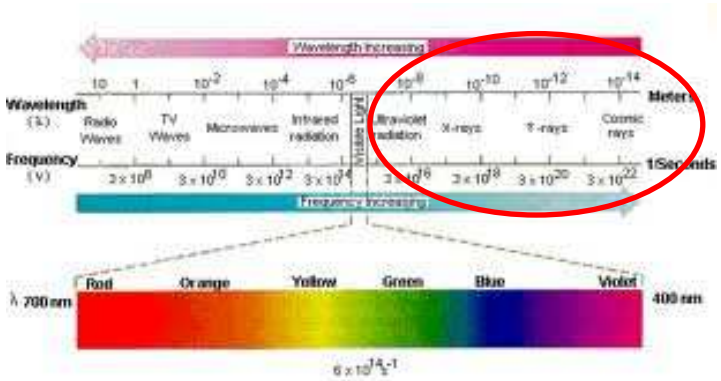
čas

- Obravnavamo interakcije treh vrst delcev v snovi, to so interakcije
  1. fotonov
  2. nabitih delcev
  3. nevtronov.

Interakcija delcev s snovjo

Interakcija fotonov

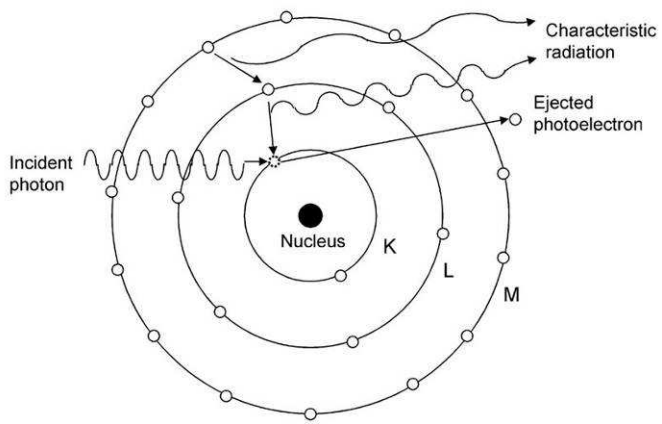
- Fotone, ki so sposobni ionizirati snov, imenujemo rentgenske žarke, če prihajajo iz atomske lupine in gama žarke, če so posledica sprememb v jedru atoma.

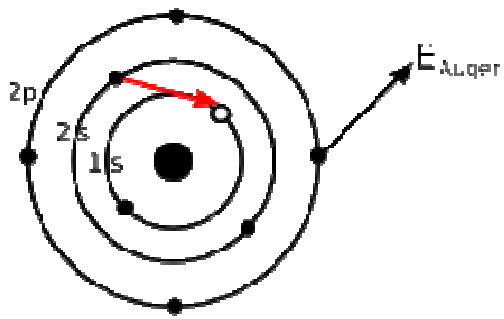


- Fotoni interagirajo v snovi predvsem preko treh procesov.

Interakcija fotonov -1

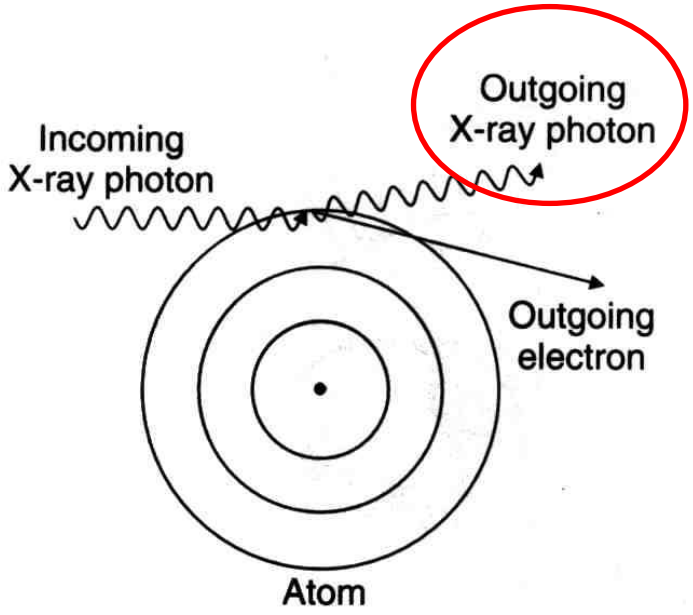
Fotoefekt (vaja FP 68: $E=h\nu - A_i$)





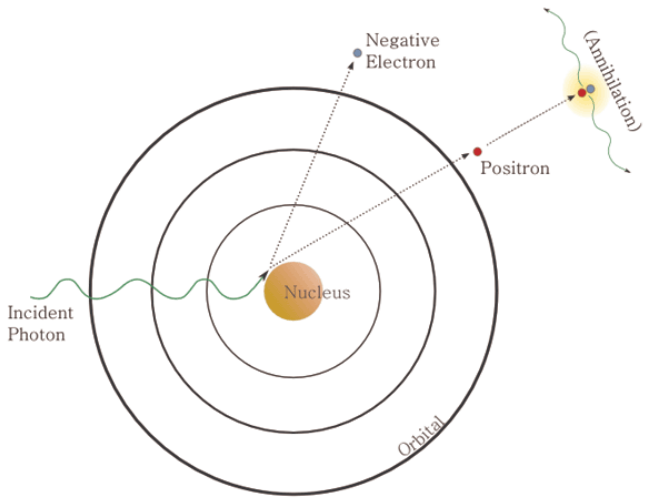
Interakcija fotonov -2

Comptonsko sipanje: Foton se siplje na slabo vezanih elektronih.



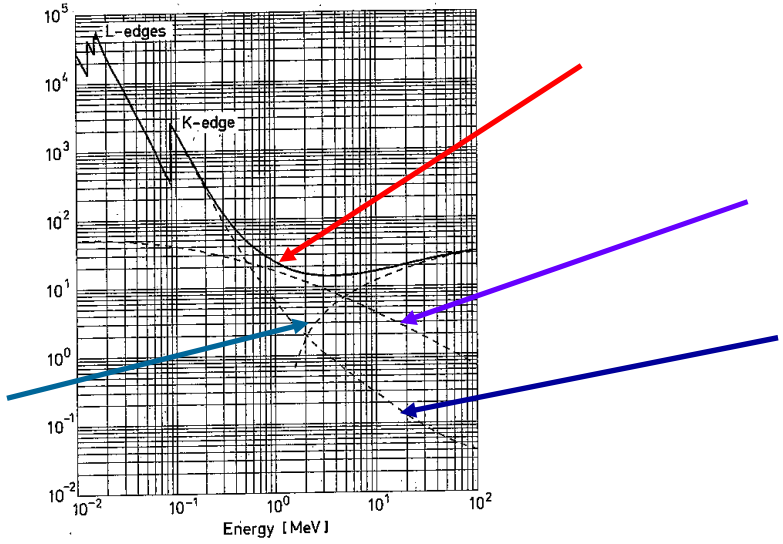
Interakcija fotonov -3

Produkcija para elektron in pozitron



Interakcija fotonov

Verjetnost za posamezno vrsto interakcije je odvisna od energije fotonov in vrste snovi.



Verjetnost za svinec.

Vir: W.R. Leo, stran 58.

Interakcija delcev s snovjo

Interakcija nabitih delcev

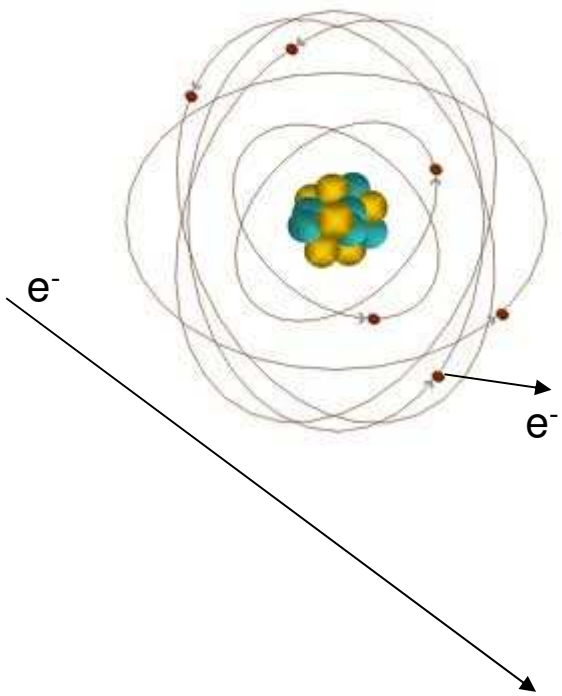
- Nabiti delci interagirajo predvsem preko štirih procesov:

  - ionizacije atomov,
  - ekscitacije atomov (vzbujanja),
  - zavornega sevanja,
  - Čerenkovega sevanja.

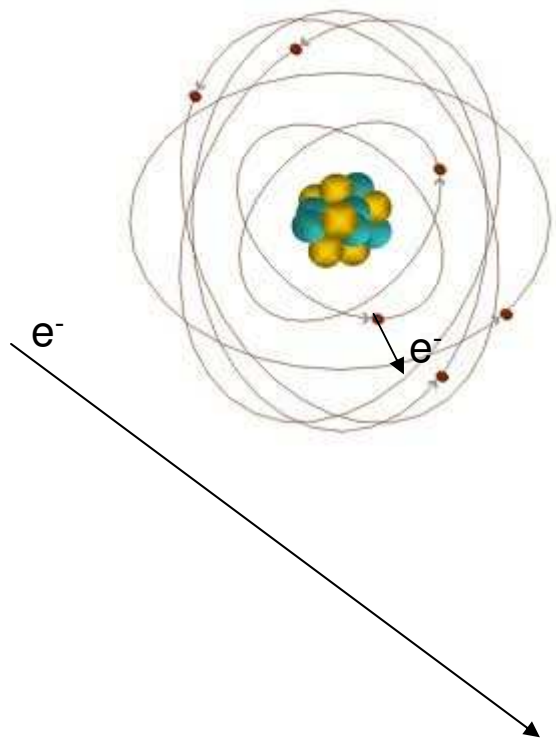
Interakcija delcev s snovjo

Interakcija nabitih delcev

ionizacija



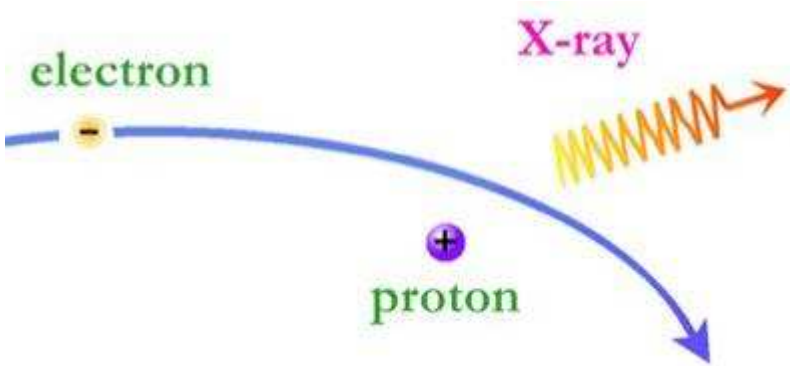
vzbujanje



Interakcija delcev s snovjo

Interakcija nabitih delcev

zavorno sevanje



Čerenkovo sevanje

$v_{delca} > v_{fotona}$

Interakcija delcev s snovjo

Interakcija nevtronov

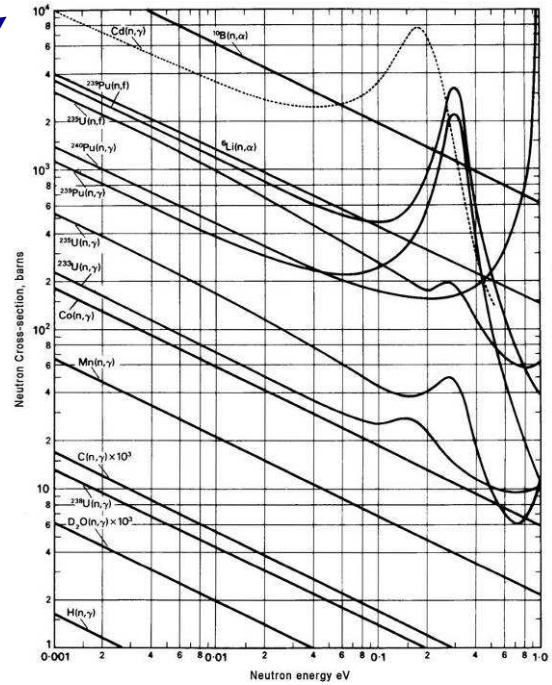
- Nevtroni so brez naboja.
- Interakcij s snovjo je veliko:
  - elastično sipanje - A(n,n)A, nevtron se ustavlja (moderira)
  - neelastično sipanje, na primer A(n,n*)A*
  - zajetje nevtrona in druge jedrske reakcije

$$n + (Z,A) \longrightarrow \text{gama} + (Z, A+1)$$

  - fisija - cepitev jeder...

Interakcija delcev s snovjo

Interakcija nevtronov

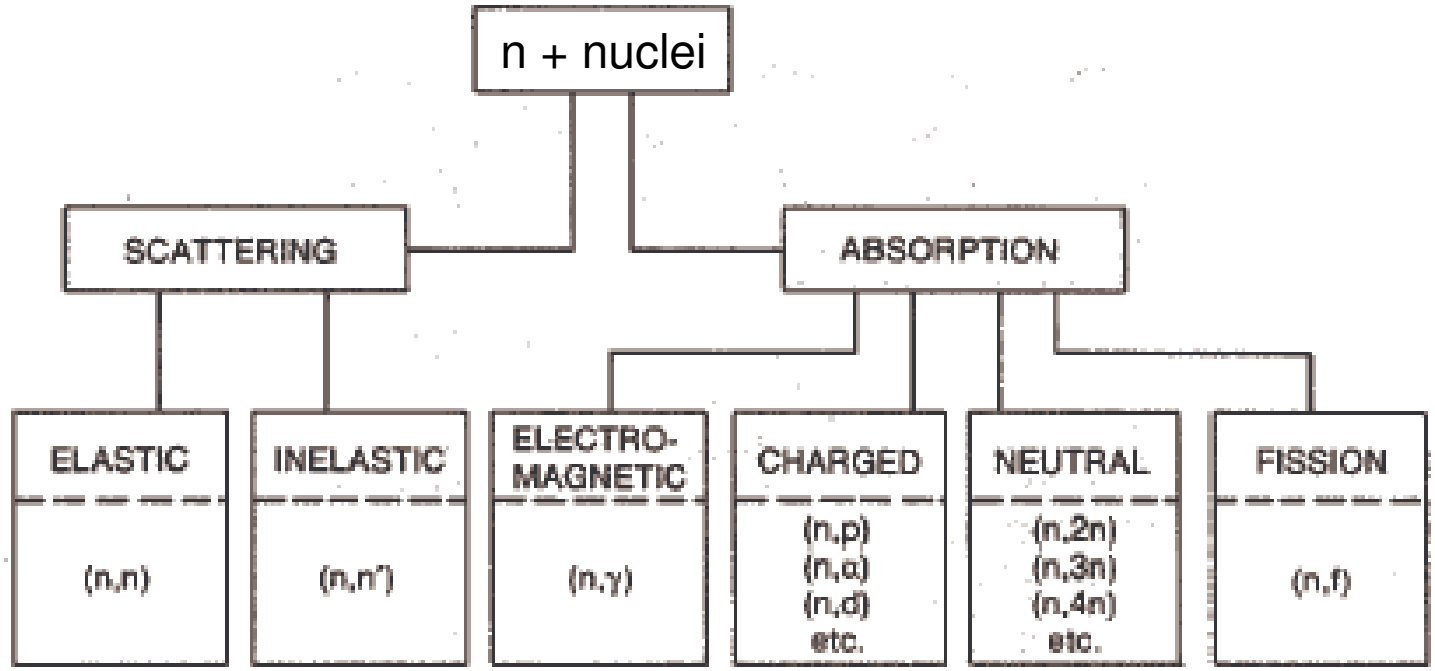


Primer: presek za reakcijo (n, *a*), zajetje in presek za fisijo v snoveh v področju termičnih nevtronov.

http://www.kayelaby.npl.co.uk/atomic_and_nuclear_physics/4_7/4_7_2a.html

Interakcija delcev s snovjo

Interakcija nevtronov



(http://www.google.si/webhp?sourceid=toolbarinstant&hl=sl&ion=1&qscrl=1&nord=1&rlz=1T4ADFA_slSI461SI461#sclient=psyab&hl=sl&qscrl=1&nord=1&rlz=1T4ADFA_slSI461SI461&site=webhp&source=hp&q=Knoll%20fission%20chamber%20&oq=&aq=&aqi=&aql=&gs_l=&pbx=1&fp=5e0a3829128cfefb&ion=1&bav=on.2,or.r_gc.r_pw.,cf.osb&biw=1024&bih=618)

Vrste merilnikov in fizikalne količine

- Merilnike ionizirajočega sevanja lahko razvrstimo v dve skupini:
  1. aktivne merilnike
  2. pasivne merilnike.
- Z aktivni merilniki sevanja izmerimo fizikalno količino neposredno in brez znatnega časovnega zamika.

  Primer:

  GM števno cev namestimo v polje sevanja in "rezultat" odčitamo.
- S pasivnimi merilniki spremembe v materialu merilnika zaradi sevanja zaradi ionizirajočega sevanja lahko povežemo s fizikalno količino šele po naknadni obdelavi tega materiala.

  Primer:

  Dozimeter na podlagi termoluminiscence je potrebno segrevati, da izseva svetlobo, ki jo nato povežemo s prejeto "dozo".

Vrste merilnikov in fizikalne količine

Fizikalne količine

- Z merilniki izmerimo ali določamo:
  - vrsto delcev (na primer: alfa delec, p, n, e^-, foton),
  - energijo delcev (na primer: eV - MeV),
  - aktivnost vira (število razpadov v sekundi (v s^{-1}=Bq),
  - "absorbirno dozo", to je energija, ki jo absorbira snov

    dE/dm (v J/kg = Gy),

    oziroma ustrezno "dozo" v tkivu (v Sv, Gy),
  - "intenziteto" sevanja (hitrost "doze" v Sv/h ali Gy/h),
  - poškodbe v snovi ...

Vrste merilnikov in fizikalne količine

Fizikalne količine

- Definicije fizikalnih količin morajo biti natančno določene in umerjanje merilnika na fizikalno količino, ki jo meri, opravljeno v znanih poljih sevanja.

  Primer: IJS ima laboratorij za sekundarne standarde.

  http://ol.ijs.si/?module=1&lan=1&id=13&mid=7_11_13/

- Napake meritev so pogojene s statistiko procesov, ki jih opazujemo (na primer razpadov jedra) kot tudi s statistiko pojavov v detektorjih.
- Merilniki so običajno ne odzivajo na vse vrste sevanja.

Vrste merilnikov in fizikalne količine

Primer "Litvinenko" (2006)

- V Veliki Britanji je bil A. Litvinenko kontaminiran s ^{210}Po v "Pine bar" v Londonu, ko je s čajem spil približno 20 µg tega radioizotopa.
- Zdravstvene težave so se pojavile v nekaj urah in smrt, ki je bila neizogibna, je nastopila v 22 dneh.
- Razpolovna doba ^{210}Po, ki je čisti alfa sevalec, je 138 dni.
- Ker je bolnišnica uporabljala le merilnike za fotone, je bil izotop odkrit šele po 21 dneh.

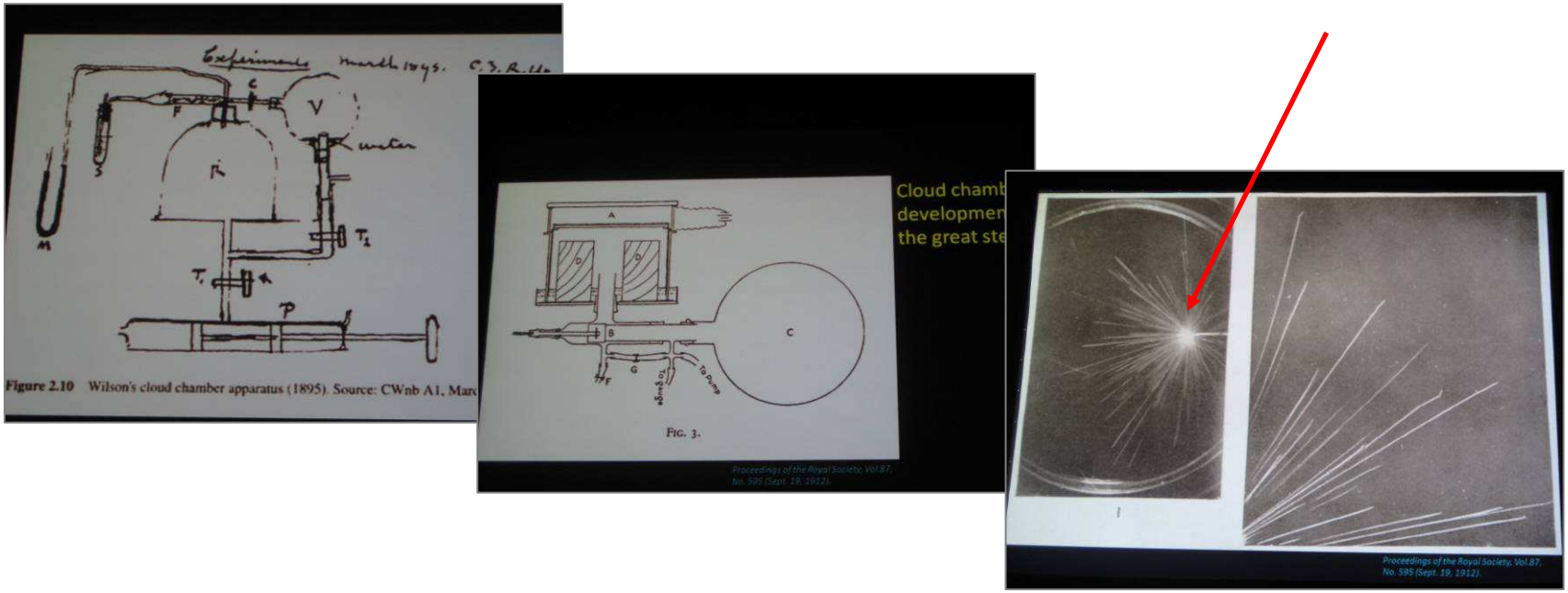
Delovanje merilnikov ionizirajočega sevanja

- Merilniki ionizirajočega sevanja:
  - plinski merilniki (ionizacijska celica, proporcionalni števec, GM cev)
  - scintilacijski merilniki s trdimi ali tekočinskimi scintilatorji
  - polprevodniški merilniki (z Ge, Si...)
  - nevtronski merilniki
  - detektorji sledi delcev
  - termoluminiscenčni dozimetri, filmski dozimetri...
  - Wilsonova meglična celica, mehurčna celica ...
- Vsi ti merilniki potrebujejo medij, v katerem pride do ionizacije.
- Poleg detektorskega dela ima aktivni merilnik tudi

  visokonapetostni del - elektroniko - prikazovalni del.

Delovanje merilnikov ionizirajočega sevanja

- Merilniki ionizirajočega sevanja se stalno izpopolnjujejo.



Wilsonova meglična celica temelji na opazovanju sledi delcev v zraku nasičenem z vodno paro (levo - prva skica, na sredi izpopolnjen model, prikaz delovanja YouTube cloud chamber)

Delovanje merilnikov ionizirajočega sevanja

Plinski merilnik - GM števec -1

- Najbolj znan detektor je Geiger Müllerjeva števna cev (GM cev).
- Detektor šteje dogodke, pri katerih je prišlo do ionizacije v plinu.
- Detektor se je razvil iz t.i. "ionizacijske celice" leta 1928 in tvori s "proporcionalnim števcem" skupino t.i. "plinskih" števcev.
- Števec tvorijo anoda in katoda ter medij - plin.

Delec povzroči nastanek ionskega para v plinu

↓

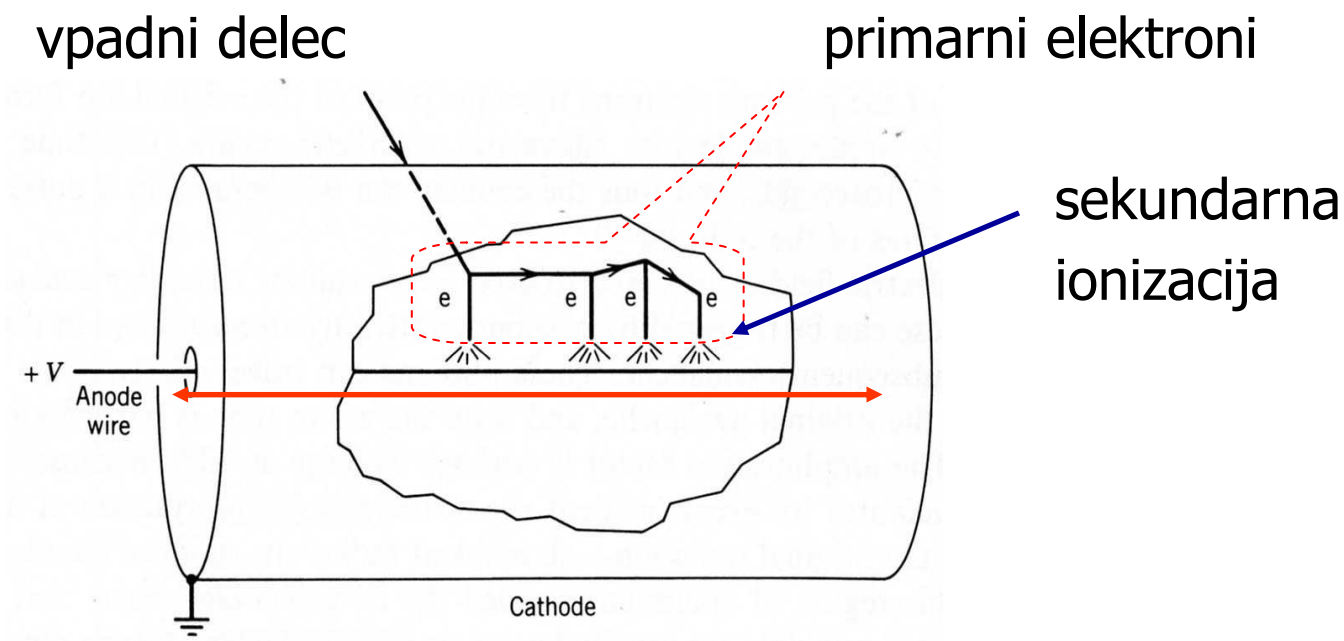
Ker se plin nahaja v močnem električnem polju, ionski par povzroči plaz intenzivne sekundarne ionizacije.

↓

Delci povzroče tokovni sunek med anodo in katodo, merimo tokovni sunek na delovnem uporu.

Delovanje merilnikov ionizirajočega sevanja

Plinski merilnik - GM števec -2



Vir: REF1

Delovanje merilnikov ionizirajočega sevanja

Plinski merilnik - GM števec -3

- Običajno je števec napolnjen z žlahtnim plinom (Ar, He, Ne) z dodatki organskih par ali halogenov.
- Tlak v števcu je praviloma nekoliko manjši od zračnega tlaka.
- Običajno vsak delec povzroči 10^9-10^{10} ionskih parov, amplituda pulzov je reda velikosti 1 V.
- Delovna napetost med anodo in katodo je v območju 500 - 2000 V.
- Števec uporabljamo v več izvedbah, na primer, če preprečimo, da v detektor pridejo elektroni, lahko merimo le gama žarke. Enota: cps.

Delovanje merilnikov ionizirajočega sevanja

Scintilacijski merilnik -1

- Scintilacijski merilniki temelji na pojavu fotonov vidne svetlobe, to je "scintilaciji" v mediju. Ta nastane po deekscitaciiji elektronov, ko se elektroni vračajo na nižji energetski nivo.
- Medij, v katerem nastane ionizacija, je običajno NaI(Tl), CsI (Tl), CsI (Na)za delce gama in ZnS(Ag), scintilacijska tekočina ali plastični prozorni material za nabite delce.

Delec povzroči ekscitacijo elektronov v materialu.

↓

Temu sledi deekscitacija z izsevanjem vidne svetlobe, ki jo scintilacijski material prepušča.

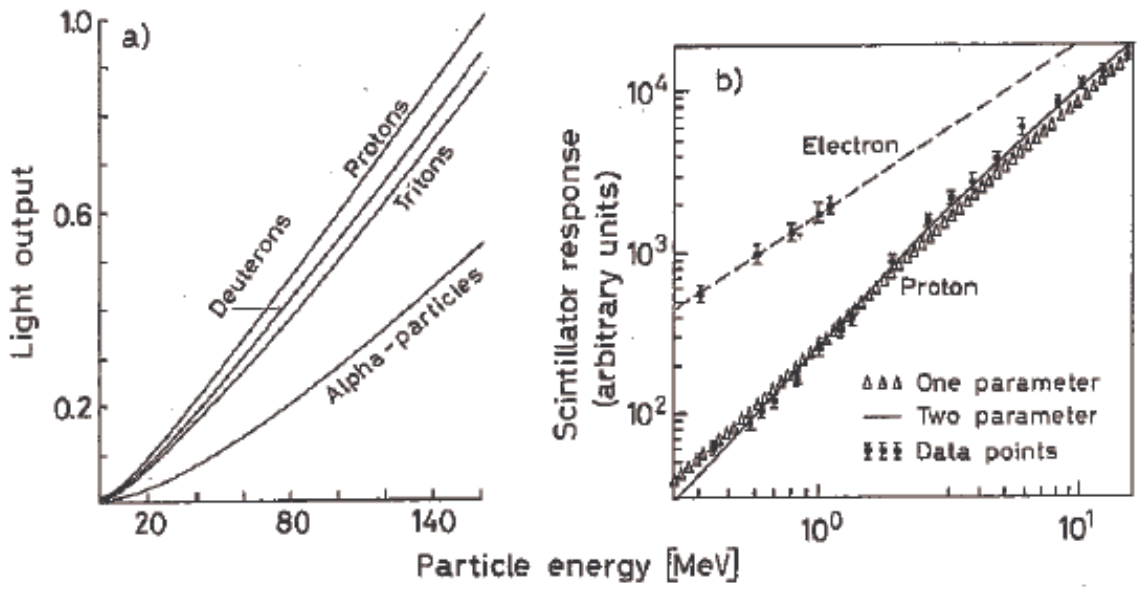
↓

Svetlobo pretvorimo preko fotopomnoževalke v ojačen napetostni sunek, ki ga vodimo v prikazni del detektorja.

Delovanje merilnikov ionizirajočega sevanja

Scintilacijski merilniki -2

- Scintilacijski merilniki praviloma omogočajo spektrometrijo, to je merjenje energije delcev, ki povzročajo ionizacijo.



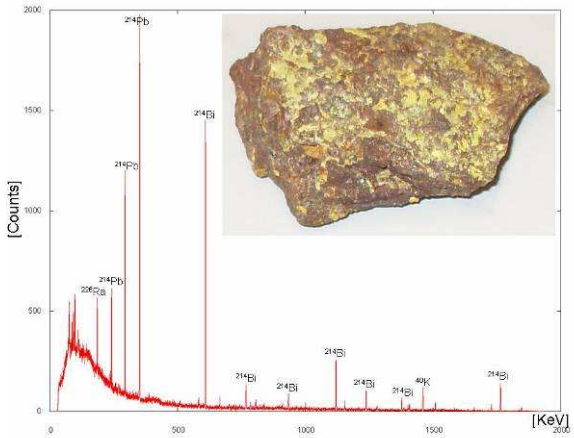
Odziv scintilacijskih detektorjev na nabite delce.

Vir: W.R. Leo, stran 160.

Delovanje merilnikov ionizirajočega sevanja

Scintilacijski merilniki -3

- Energijski spekter sevanja pomeni izjemen napredek pri razvoju detektorjev. Naslednja razvojna stopnja so polprevodniški detektorji, ki omogočajo boljšo energijsko ločljivost.



Spekter fotonov, ki ga izmeri polprevodniški, merilnik omogoča identifikacijo radionuklidov v vzorcu urana.

Vir: http://en.wikipedia.org/wiki/Gamma_spectroscopy

Delovanje merilnikov ionizirajočega sevanja

Nevtronski merilniki -1

- Temelje na nuklearni reakciji, katere rezultat je nabit delec. Ta nato povzroči ionizacijo, ki jo zazna običajni detektor.
- Reakcije nevtronov so odvisne od njegove energije:
  - termični nevtroni (počasni nevtroni), E<1 eV
  - epi-termični nevtroni, 1 eV<E< 10 keV
  - hitri nevtroni, E>10 keV.
- Značilne reakcije: $^{10}B(n, \alpha)$, $^{9}Li(n, \alpha)$, $^{3}He(n, p)$, fisijski detektorji.

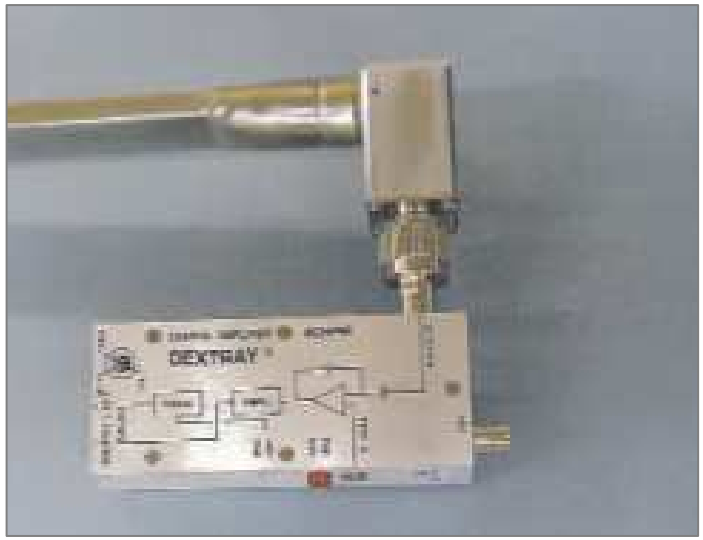
Primer:

$^{3}He(n, p)$ detektor temelji na reakciji počasnih nevtronov s He plinom.

$$n + {}^{3}He \longrightarrow p + {}^{3}H$$

Delovanje merilnikov ionizirajočega sevanja

Nevtronski merilniki -2



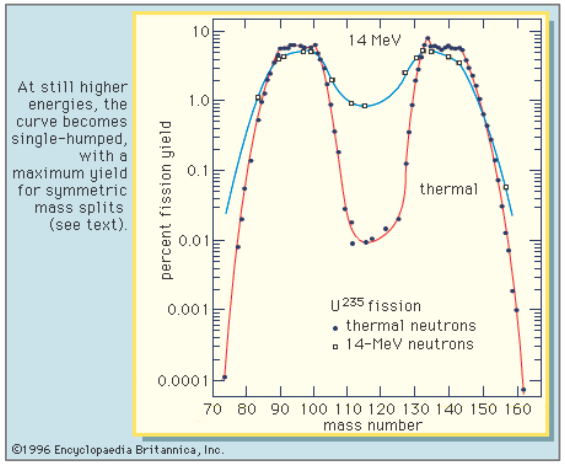
^{3}He

Vir: REF1.

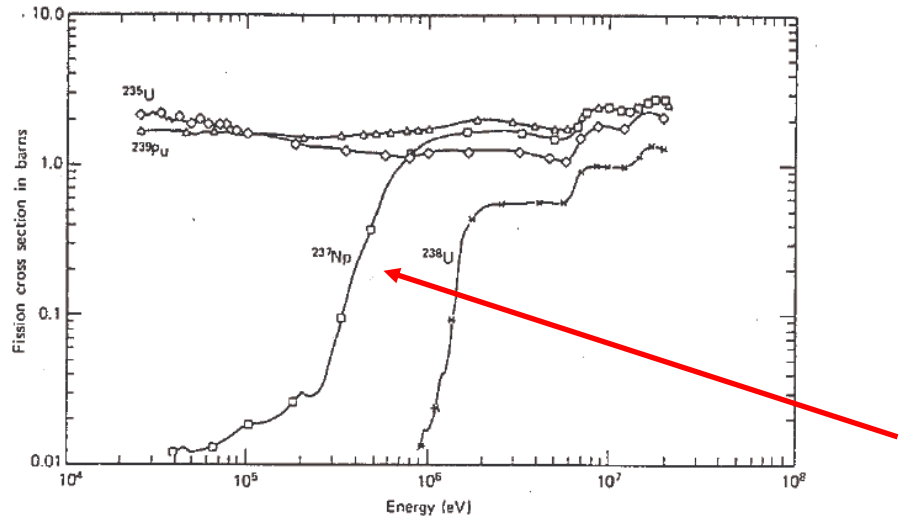
Delovanje merilnikov ionizirajočega sevanja

Nevtronski merilniki -3

- "Fisijski detektorji" temelje na cepitvi jeder, ki jo povzročajo nevtroni. Nastali delci povzročajo ionizacijo v detektorju s plinom.
- "Fisijski detektorji" ločijo tako hitre in počasne nevtrone.



Binarna cepitev ^{235}U



Preseki za fisijo

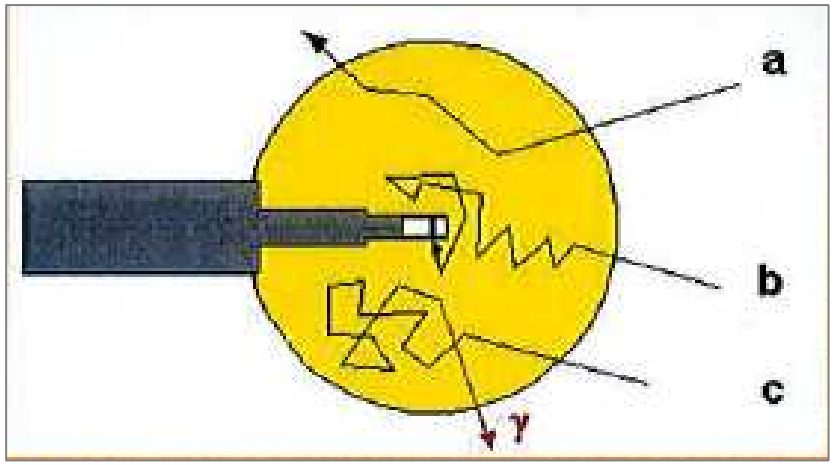
http://www.britannica.com/EBchecked/topic/421629/nuclear-fission#

Vir: desno G.F. Knoll, stran 522.

Delovanje merilnikov ionizirajočega sevanja

Nevtronski merilniki -4

- Hitre nevtrone lahko pred samo detekcijo upočasnimo s t.i. Bonnerjevimi sferami.
- Nevtronski detektor je obdan s sfero iz polietilena, ki omogoča upočasnitev nevtronov. Z različnimi sferami lahko določimo energijo nevtronov.



Vir: levo http://eurados.org/conrad/Bologna/08-10-07-Bedogni.pdf

Delovanje merilnikov ionizirajočega sevanja

Sodobni merilniki

- Danes so v uporabi t.i.

  - modularni merilniki, to pomeni, da lahko več merilnih sond uporablja isto števno elektroniko,

  - kombinirani merilniki, to so merilniki, ki vsebujejo več vrst detektorjev v enem ohišju, na primer GM števno cev, ^{3}He za meritve nevtronov, NaI za izvajanje spektrometrije sevanja gama.

Delovanje merilnikov ionizirajočega sevanja

Pasivni merilniki -1

- Pasivne merilnike izpostavimo sevanju za določen čas in ob tem nastanejo v merilniku poškodbe (ekscitacija elektronov, ionizacija...).
- Po fizični obdelavi merilnika, na primer segrevanju ali jedkanju, detektor odda signal, ki je sorazmeren s prejeto dozo ali pa so poškodbe v njem trajne in jih lahko vidimo.

obsevanje - poškodba - obdelava - analiza

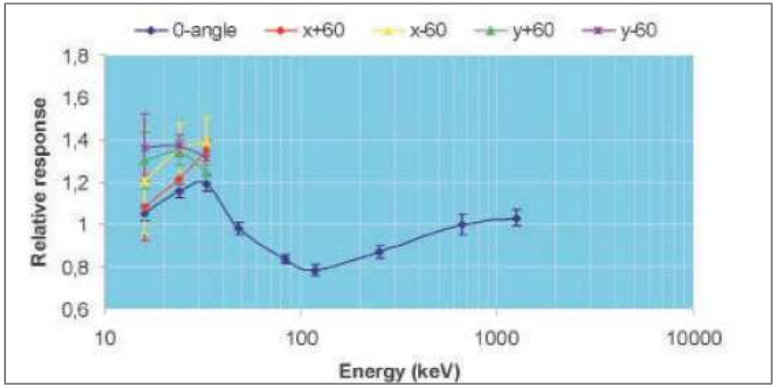
- Tipični merilniki temelje na:

  - termoluminiscenci
  - optoluminiscenci (predstavitev YouTube Landauer OSL)
  - radioluminiscenci
  - nastanku sledi delcev v snovi
  - izpostavitvi filma sevanju.

Delovanje merilnikov ionizirajočega sevanja

Pasivni merilniki -2

- Termoluminiscenčni dozimetri so sestavljeni iz tablet termoluminiscenčnega materiala v t.i. "sestavljenem" ovoju.
- Po obsevanju pa v laboratoriju segrejemo tableto v čitalcu po predpisanem postopku in izmerimo količino izsevane svetlobe, ki je sorazmerna s prejeto dozo sevanja.

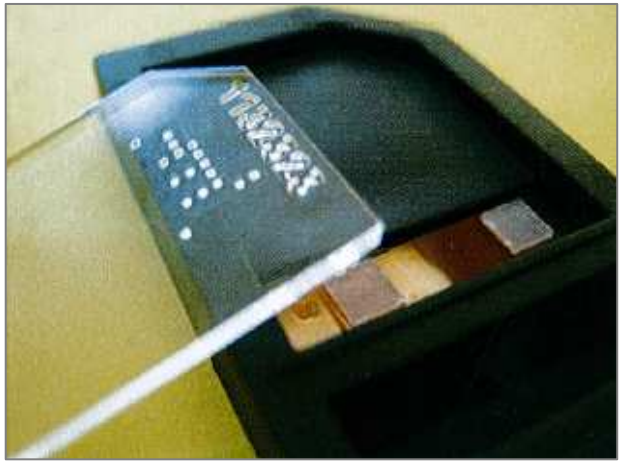


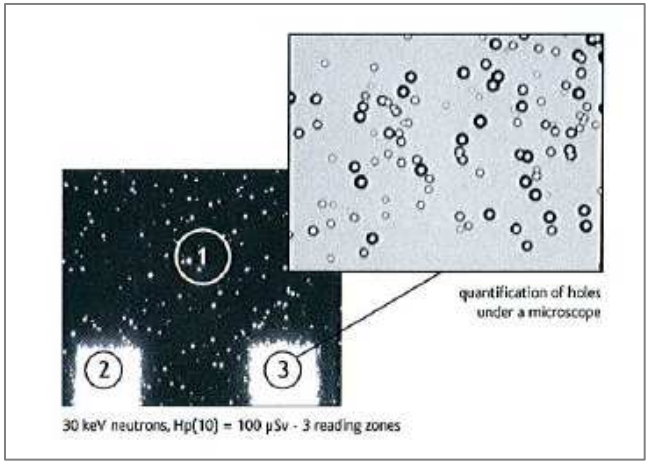
http://www.radpro-int.com/tld-reader/re-200a/index.php

Delovanje merilnikov ionizirajočega sevanja

Pasivni merilniki -3

- V "detektorjih jedrskih sledi" nastanejo pri obsevanju z delci trajne poškodbe v obliki sledi.
- Te poškodbe po uporabi detektorja povečamo s kemijsko obdelavo detektorja.
- Nastale poškodbe nato pod mikroskopom analiziramo in štejemo. Gostota sledi je sorazmerna s prejeto dozo.

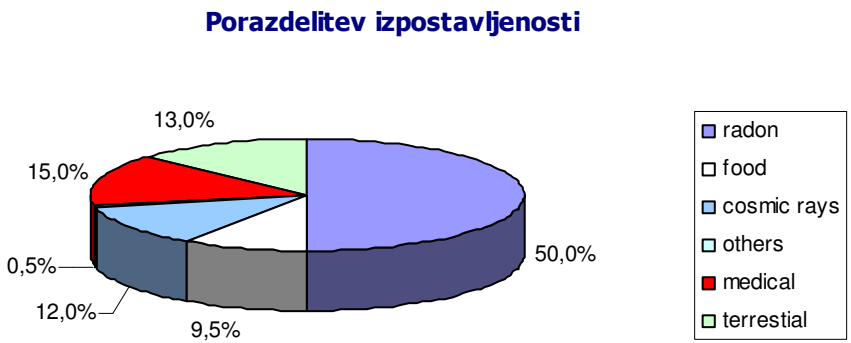




Eksperiment

Meritve radonovih potomcev v zraku

- Radon (^{222}Rn) je žlahtni radioaktivni plin, ki obstaja v naravi.
- ^{222}Rn nastane kot posledica razpada ^{226}Ra v razpadni verigi ^{238}U.
- ^{222}Rn ima razpolovno dobo 3,82 dni, njegovi kratkoživi potomci pa povzročajo znatno obsevanje ljudi preko inhalacije.
- Radon predstavlja največji vir izpostavljenosti naravnemu sevanju.



Izpostavljenost v S Evropi.

Eksperiment

Meritve radonovih potomcev v zraku

- Razpadna vrsta ^{238}U.

from	by	to	Half-life	100 Bq per m^3 corresponds to nuclides per m^3
U-238	α	Th-234	4.47 E9 year	
Th-234	β^-	Pa-234	24.1 day	
Pa-234	β^-	U-234	6.7 h	
U-234	α	Th-230	2.45 E5 year	
Th-230	α	Ra-226	7.5 E4 year	
Ra-226	α	Rn-222	1.6 E3 year	
Rn-222	**α**	**Po-218**	**3.82 day**	**4.76×10^7**
Po-218	**α**	**Pb-214**	**3.1 min**	**2.68×10^4**
Pb-214	**β^-**	**Bi-214**	**26.8 min**	**2.32×10^5**
Bi-214	**β^-**	**Po-214**	**19.9 min**	**1.72×10^5**
Po-214	**α**	**Pb-210**	**164 μs**	**~0**
Pb-210	β^-	Bi-210	22.2 year	
Bi-210	β^-	Po-210	5.012 day	
Po-210	α	Pb-206	138.4 day	

- Obstajajo trije izotopi radona, poleg ^{222}Rn tudi ^{219}Rn in ^{220}Rn. Slednja z vidika izpostavljenosti sevanju praviloma ne predstavljata velike obremenitve. ^{219}Rn nastaja v razpadni vrsti ^{235}U in ^{220}Rn v vrsti ^{232}Th.

Eksperiment

Eksperiment

I.

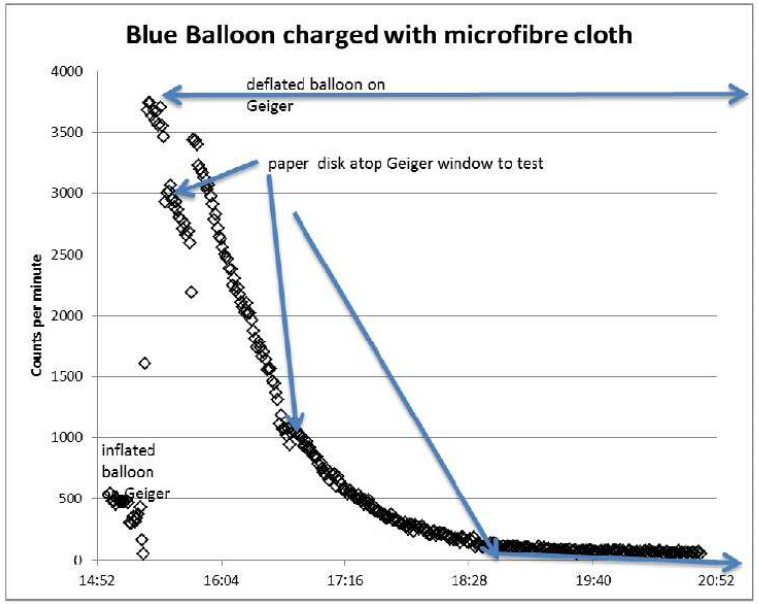
- Napihnemo balon, ki ima površino S ter ga naelektrimo.
- Na zunanji površini balona se usedejo radonovi potomci. Z merilnikom za površinsko kontaminacijo lahko zaznamo radonove potomce.

II.

- Zrak iz balona izpustimo in površina balona se zmanjša na S*.
- Z merilnikom za površinsko kontaminacijo lahko zaznamo radonove potomce.

Eksperiment

Eksperiment



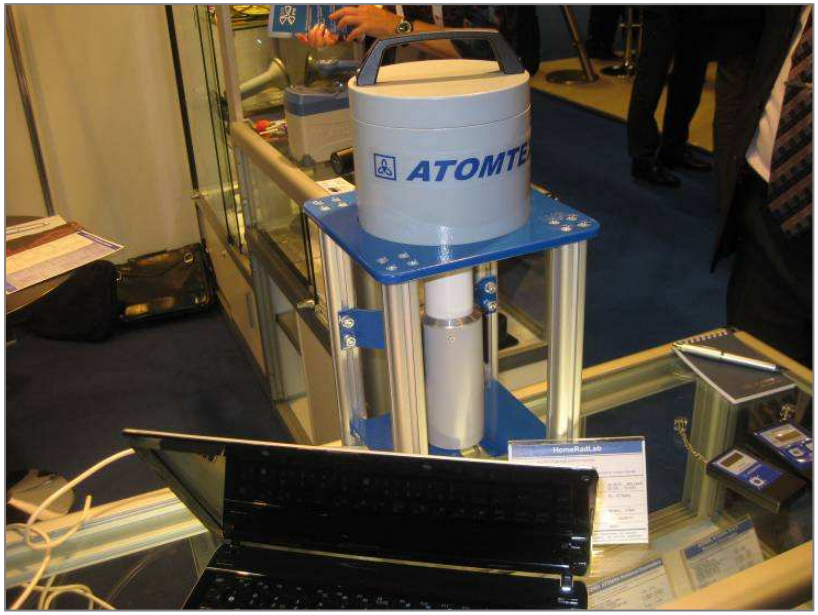
http://media.cns-snc.ca/uploads/teachers/balloon_exp_addendum.pdf

Sodobni merilniki sevanja

Meritve kontaminacije oseb

Sodobni merilniki sevanja

Meritve kontaminacije okolja in hrane



Sodobni merilniki sevanja

Zaščita pred sevanjem

Zaključek

- Ionizirajočega sevanja ne moremo zaznati neposredno.
- Merilniki sevanja temelje na temeljitem poznavanju fizikalnih pojavov, ki potekajo v obsevani snovi v detektorju.

E $\longrightarrow$ signal