

TEMA 35

El nucli atòmic.

Energia d'enllaç.

Radioactivitat natural i artificial.

Aplicacions de la radioactivitat.

Mesures de seguretat.

35.1 El nucli atòmic

35.1.1 Característiques bàsiques del nucli

35.1.2 Massa i Energia d'enllaç

35.1.3 Forces nuclears

35.1.4 Models del nucli

35.2 Radioactivitat

35.2.1 Radiació α

35.2.2 Radiació β

35.2.3 Radiació γ

35.2.4 Emissió de positrons

35.2.5 Captura d'electrons

35.2.6. Velocitat de desintegració radioactiva

35.2.6 Sèries Radioactives

35.3 Estabilitat nuclear

35.4 Radioactivitat Artificial

35.5 Aplicacions de la radioactivitat

35.5.1 Datació

35.5.2 Aplicacions mèdiques

35.5.3 Química analítica

35.5.4 Mecanismes de reacció

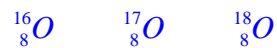
35.6 Mesures de Seguretat

35.6.1 Efectes de la radiació sobre els éssers vius

35.6.2 Legislació

35***El nucli atòmic. Energia d'enllaç. Radioactivitat natural i artificial. Aplicacions de la radioactivitat. Mesures de seguretat.*****35.1 El nucli atòmic****35.1.1 Característiques bàsiques del nucli**

Els nuclis dels àtoms estan constituïts per neutrons i protons, per la qual cosa a aquestes partícules se les anomena nucleons. Els nuclis s'identifiquen en termes de la càrrega Z i del nombre de massa A , que és la suma del nombre de neutrons i protons. Per representar un nucli s'escriu el nombre de massa a dalt a l'esquerra i el nombre atòmic a sota:



Aquí tenim 3 isòtops de l'oxigen, és a dir, nuclis amb el mateix nombre de protons, però amb un nombre diferent de neutrons.

La grandària del nucli es pot determinar aproximadament amb l'expressió:

$$R = R_0 A^{1/3} \quad R_0 = 1,33 \times 10^{-15} \text{ m}$$

La validesa d'aquesta expressió suggereix que els protons i els neutrons s'empaqueten junts com si fossin esferes rígides i fan que el volum nuclear total sigui igual a la suma dels volums dels protons i neutrons individuals. Els neutrons i protons però, no estan quiets, apilats com a taronges, però contribueixen al volum nuclear com si així fos.

Els nuclis atòmics no són necessàriament esferes perfectes, molts tenen una forma lleugerament allargada, encara que la raó entre el semieix major i el menor és inferior a 1,2. Una forma no esfèrica implica l'existència d'un moment quadrupolar detectable. Hi ha un cert nombre de nuclis que es poden considerar esferes perfectes: ${}_1\text{H}$, ${}_8\text{O}$, ${}_{20}\text{Ca}$, ${}_{28}\text{Ni}$, ${}_{50}\text{Sn}$, ${}_{82}\text{Pb}$. Els nuclis que tenen nombres atòmics propers a algú de la llista precedent són esfèrics o quasiesfèrics, mentre que la majoria dels altres nuclis son esferoides lleugerament allargats.

La unitat de massa nuclear és la unitat de massa atòmica ($1 \text{ uma} = 931,4 \text{ MeV}$), que es defineix exactament com 1/12 de la massa d'un àtom de ${}^{12}_6\text{C}$. En aquesta escala un neutró té una massa de 1.00866544, i un àtom d'hidrogen de 1.00782522. Donat que el neutró i l'àtom d'hidrogen tenen masses properes a 1 uma les masses dels isòtops dels àtoms són totes quasi valors enters.

35.1.2 Massa i Energia d'enllaç

Durant els anys 30 es va descobrir que la massa dels nuclis és sempre menor que la suma de les masses dels nucleons individuals que els componen. Per exemple, el nucli d'heli-4 té una massa de 4.00150 uma. La massa d'un protó és 1.00728 uma i la d'un neutró 1.00867 uma. Per tant, dos protons i dos neutrons tenen una massa total de 4.03190 uma. La massa dels nucleons individuals és 0.03040 uma més gran que la del nucli d'heli-4. Aquesta diferència de massa s'anomena defecte de massa. A partir de l'equació d'Einstein:

$$E = mc^2$$

deduïm que el defecte de massa prové del fet que durant la formació del nucli d'heli-4 s'allibera una certa quantitat d'energia, que s'anomena energia d'enllaç. L'energia alliberada és pot escriure com $0.03040 \times 931,4 \text{ MeV} = 28,31456 \text{ MeV}$

Un altre exemple és l'àtom $^{16}_8\text{O}$ la massa és de 15,994915 uma. La suma de la masses de 8 neutrons i 8 àtoms d'hidrogen és de 16,131925, és a dir, és superior en 0,137010 uma. L'energia d'enllaç és $0,137010 \times 931,4 \text{ MeV} = 127,6 \text{ MeV}$. Aquestes energies són enormes, només cal comparar-les per exemple amb els 5,2eV que s'alliberen quan es forma una mol·lècula d'oxigen.

L'energia d'enllaç augmenta quasi linealment amb el nombre màsic dels nuclis. Resulta però més significatiu calcular l'energia d'enllaç per nucleó. Després d'una pujada abrupta i certes oscil·lacions entre els nuclis més lleugers $A < 20$, l'energia d'unió per nucleó augmenta uniformement fins arribar a un màxim per nombres de massa propers a 60 o nombres atòmics al voltant de 25, com per exemple el ^{56}Fe . Després del màxim, l'energia va disminuint per nuclis cada vegada més pesants. Cal remarcar que llevat d'alguns nuclis molt lleugers, l'energia per nucleó es situa al voltant de 8,3 MeV.

35.1.3 Forces nuclears

Entre protons i neutrons existeix una força d'interacció anomenada força d'interacció forta, que és la responsable de mantenir unit el nucli tot i l'existència de grans forces de repulsió electromagnètiques entre els protons. Les forces d'interacció fortes són les responsables de l'elevada energia de cohesió dels nuclis atòmics, així com de la seva estabilitat. La força d'interacció forta entre protons és de l'ordre de 100 vegades superior a la força de repulsió electromagnètica. Les forces d'interacció forta són independents de la càrrega, és a dir, les interaccions neutró-neutró protó-neutró i protó-protó són de la mateixa intensitat.

Les forces d'interacció forta tenen un abast molt petit, de l'ordre de 10^{-15} m . Això es pot deduir fàcilment a partir del fet que l'energia d'enllaç per nuclis amb $A > 20$ es pot dir en primera aproximació que augmenta linealment amb A . Si les forces nuclears fossin de llarg abast cadascun dels nucleons interaccionaria amb la resta de nucleons i l'energia d'enllaç nuclear total seria proporcional a $A(A-1)$, fet que no s'observa. Per tant els nucleons, en una bona aproximació, només interaccionen amb els veïns més propers.

L'energia d'enllaç corresponent a l'interacció forta entre nucleons és de 14,1 MeV, però es redueix a 8 MeV degut a les forces de repulsió electromagnètiques. Si suposem que cada nucleó interacciona amb els 12 veïns més propers, això vol dir que hi

ha 6 enllaços per nucleó, i això ens dona una energia de $14,1/6 = 2,3 \text{ MeV}$ per cada enllaç. En el deuteri l'energia d'enllaç és de $2,2 \text{ MeV}$, per tant la suposició és una bona aproximació.

35.1.4. Models del nucli

MODEL DE LA PARTÍCULA α

El model de la partícula α es basa en la gran estabilitat de les partícules alfa i en el fet que molts dels nuclis estables tinguin nombres màsics múltiples de 4. La idea d'aquest model consisteix a suposar que els nuclis estan constituïts per partícules α que formen grups independents i poc lligats entre si. Aquest model funciona per nuclis pesants però falla per nuclis lleugers.

MODEL DE LA GOTA LÍQUIDA

Aquest model fou ideat per Bohr i Wheeler a l'any 1937. Aquest model està fonamentat en què les forces nuclears són d'un abast molt curt i que la variació de l'energia d'enllaç entre nuclis amb nombre de massa similar sigui molt petita.

Com que cada nucleó només interacciona amb els més propers, sembla que protons i neutrons s'haguessin de comportar com si fossin les molècules d'un líquid. El model explica bastant bé aquelles reaccions nuclears en les que es forma un núclid intermig entre l'estat inicial i final, així com la fissió dels nuclis pesants. Aquesta teoria falla per nuclis amb $A < 25$.

La resultant de les forces que actuen sobre les partícules interiors del nucli es suposa nula, per la qual cosa hi haurà un moviment desordenat. Els nucleons situats a la superfície són atrets cap a l'interior, el que fa que la superfície del nucli es comporti en paral·lelisme amb la tensió superficial dels líquids, com una espècie de membrana.

Quan una partícula penetra a l'interior del nucli l'energia que posseeix excita el moviment dels nucleons fins a provocar l'expulsió d'algunes partícules de la superfície, com si fos una evaporació. La fissió s'interpreta com la conseqüència d'un estat de vibració que es produeix després de l'absorció d'alguna partícula i que provoca la deformació de la gota i la seva fragmentació en dues parts.

MODEL NUCLEAR DE CAPES

La distribució dels electrons en nivells d'energia ha fet pensar en una possibilitat d'organització semblant a l'interior del nucli. Entre 1948 i 1950 diversos científics proposen que protons i neutrons estan disposats en diferents capes, a cadascuna de les quals hi correspon un nivell d'energia.

Com en el cas dels electrons, cada capa admet un nombre màxim de protons o de neutrons i quan està complert el nucli corresponent té una estructura particularment estable. Les successives capes nuclears poden contenir 2, 8, 28, 50, 82 o 126 nucleons. A més també explica el fet que els nuclis amb nombres parells de protons i neutrons siguin més estables que els que tenen un nombre imparell.

Se suposa que cada nucleó està sotmès a una acció que és el promig de les forces exercides entre ell i els restants nucleons. Com a conseqüència d'això, cada nucleó pot considerar-se afectat per un camp de forces nuclears amb el que entra en interacció. El nombre de nucleons que conté cada nivell depèn d'aquest camp, i causa de la diferència

de masses entre els protons i els neutrons els nivells d'energia dels neutrons són una mica inferiors als dels protons.

El model de capes també anomenat de partícules independents, permet descriure qualitativament diversos problemes de la física del nucli, com per exemple l'existència d'estats nuclears excitats que passen a un estat estable mitjançant l'emissió de raigs gamma, també permet predir que un determinat nucli pateixi un determinat tipus de desintegració. També explica el moment angular total del nucli.

Aquest model no permet una correcta interpretació de la fissió nuclear ni energies correctes d'enllaç.

EL MODEL COL·LECTIU DEL NUCLI

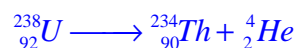
El model de capes i de la gota líquida no són mútuament excloents per la qual cosa s'ha elaborat un model que suposa que el nucli pot patir alteracions en la forma i la grandària i modifiquen la independència dels nucleons, que continuen mantenint una estructura en capes.

35.2 Radioactivitat

La immensa majoria dels nuclis que es troben a la naturalesa són estables i romanen intactes indefinidament. Els anomenats radionúclids són nuclis inestables i emeten partícules i radiació electromagnètica de manera espontània. Aquest fenomen s'anomena radioactivitat o desintegració radioactiva. Anem a veure'n diferents tipus:

35.2.1 Radiació α

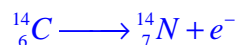
La radiació α consisteix en nuclis de heli-4 que són emesos per àtoms pesants. Un exemple important és la desintegració de l'urani-238, que esdevé tori-234:



Aquest tipus de desintegració suposa la pèrdua de quatre nucleons. El nombre atòmic queda reduït en dues unitats.

35.2.2 Radiació β

Les partícules β són electrons emesos per determinats nuclis al desintegrar-se. Un exemple important és la desintegració del carboni-14:



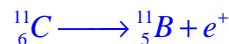
L'emissió beta equival a conversió d'un neutró en un protó, la qual cosa suposa augmentar el nombre atòmic en una unitat.

35.2.3 Radiació γ

La radiació gamma és radiació electromagnètica de molt alta energia, de l'ordre de MeV, que quasi sempre acompanya a la resta de radiacions. Representa un reajustament energètic del nucli cap a una configuració més estable.

35.2.4 Emissió de positrons

Els positrons són partícules amb la mateixa càrrega de l'electró, però de signe oposat. Un exemple n'és el carboni-11:



L'emissió d'un positró suposa la conversió d'un protó en un neutró, la qual cosa implica la pèrdua d'una unitat en el nombre atòmic. Aquest tipus de desintegració no s'ha detectat mai a la natura i només es dona en nuclis que han estat creats en el laboratori.

35.2.5 Captura d'electrons

La captura d'un electró de la capa més interna dels electrons que envolta el nucli suposa la conversió d'un protó en un neutró. El nombre atòmic disminueix en una unitat. Un exemple important és la desintegració del potasi-40:



35.2.6 Velocitat de desintegració radioactiva

L'any 1900, Rutherford va descobrir que el ritme amb que una substància emetia partícules radioactives no és constant si no que disminuïa exponencialment amb el temps. Aquesta dependència exponencial amb el temps és característica de tots els processos de radioactivitat i indica que la desintegració és un procés estadístic.

Per a una desintegració estadística, en la que la desintegració d'un nucli qualsevol individual és un esdeveniment a l'atzar, el nombre de nuclis que es desintegren en un interval de temps dt és proporcional a dt i al nombre de nuclis radioactius. Si $N(t)$ és el nombre de nuclis radioactius a l'instant t i $-dN$ és el nombre de desintegracions en l'interval de temps dt , tenim que:

$$-dN = \lambda N dt$$

on λ és la constant de desintegració del nucli. Aquesta expressió es pot reescriure com:

$$-\frac{dN}{N} = \lambda dt$$

Aquesta expressió ens diu que la fracció de nuclis que es desintegra en un interval de temps dt és constant. La integració d'aquesta expressió dona:

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \quad N = N_0 \exp[-\lambda t]$$

on N és el nombre de nuclis que queden en el temps t i N_0 és el nombre de nuclis presents en el temps zero. Es defineix també la vida mitjana, que és el temps necessari per a que es desintegri la meitat de nuclis:

$$\ln \frac{1}{2} = -\lambda t_{1/2} \quad t_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda}$$

Per tant, si es coneix la vida mitjana d'un nucli es pot calcular la constant de desintegració i a la inversa.

L'activitat o rapidesa amb la que un element es desintegra es mesura en el sistema internacional en Becquerels (Bq). 1 Bq equival a 1 desintegració per segon. Una altra unitat més antiga però que encara es fa servir és el Curie (Ci), que equival al nombre de desintegracions per segon de 1 gram de Radi. $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$.

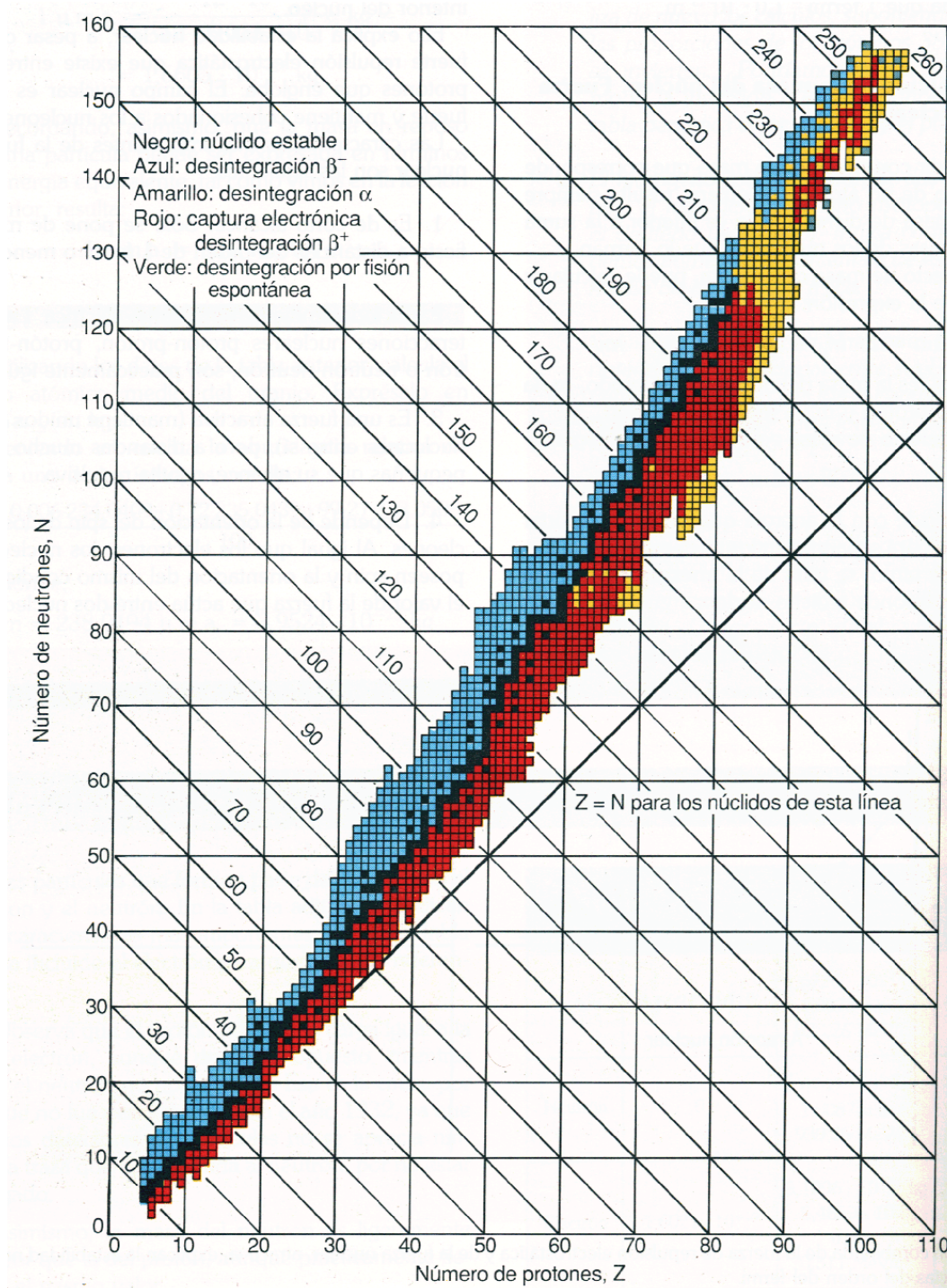
35.2.6 Sèries Radioactives

Determinats nuclis, per exemple l'urani-238 no poden adquirir estabilitat amb una única desintegració. De fet es produeixen una sèrie de reaccions nuclears que van donant lloc a isòtops radioactius més o menys inestables fins arribar a un isòtop estable. A la natura hi ha tres sèries radioactives naturals: urani-238 acaba en el plom-206, urani-235 acaba en plom 207, tori-232 acaba en el plom-208. També n'hi ha una d'artificial que comença en el plutoni-241 i acaba en el bismut-209.

Les sèries radioactives permeten explicar l'existència d'elements químics a la natura que es desintegren molt ràpidament.

35.3 Estabilitat nuclear

L'estabilitat d'un nucli en particular depèn de molts factors i no hi ha una regla única que permeti predir si un nucli específic és o no estable, i si no és estable com es desintegra. Hi ha però varies observacions empíriques que són d'utilitat per fer prediccions. Si es representa el nombre de neutrons front al nombre de protons per un gran nombre de nuclis s'observa el següent:



Els nuclis estables no es troben dispersos sinó que es situen dins d'una banda relativament estreta anomenada banda d'estabilitat. El límit superior de la banda d'estabilitat és per nombres atòmics Z inferiors o iguals a 83 (bismut). No hi ha nuclis estables per Z més grans. Alguns dels nuclis més pesants que són estables són: ${}^{206}_{82}\text{Pb}$, ${}^{207}_{82}\text{Pb}$, ${}^{208}_{82}\text{Pb}$, ${}^{209}_{83}\text{Bi}$.

Els nuclis estables de nombre atòmic baix $Z < 20$ tenen aproximadament nombres iguals de protons i neutrons. Per sobre de $Z=20$ el nombre de neutrons sempre sobrepassa el nombre de protons. La relació entre el nombre de neutrons i el nombre de protons va augmentant progressivament fins a un valor proper a 1.5 a l'extrem superior de la banda d'estabilitat.

El tipus de desintegració radioactiva que pateix un isòtop radioactiu depèn en gran mesura de la seva proporció de neutrons i protons en comparació amb la dels nuclis propers dins del cinturó d'estabilitat. Hi ha tres situacions generals:

1. Nuclis per sobre del cinturó d'estabilitat (excés de neutrons): Aquests nuclis tendeixen a reduir el nombre de neutrons mitjançant desintegració β .
2. Nuclis per sota del cinturó d'estabilitat (excés de protons): Aquests nuclis tendeixen a reduir el nombre de protons mitjançant captura electrònica o emissió de positrons. L'emissió de positrons és més comuna entre els nuclis més lleugers i la captura d'electrons és més comuna per nuclis més pesants.
3. Nuclis amb $Z > 83$: Aquests nuclis tendeixen a patir desintegració α , obtenint-se així un nucli més lleuger.

Hi ha dos observacions addicionals que són d'utilitat per predir l'estabilitat nuclear:

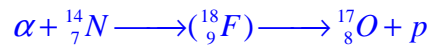
1. Els nuclis amb 2, 8, 20, 28, 50 o 82 protons i 2, 8, 20, 28, 50, 82 o 126 neutrons són més estables que els nuclis que no contenen aquest nombre de nucleons. Aquests nombres de protons i neutrons s'anomenen nombres màgics.
2. Els nuclis amb nombres parells tant de protons com de neutrons són en general més estables que els que contenen un nombre imparell de nucleons:

Nombre d'isòtops estables	Protons	Neutrons
157	Parell	Parell
53	Parell	Imparell
50	Imparell	Parell
5	Imparell	Imparell

35.4 Radioactivitat Artificial

Fins ara hem estudiat reaccions nuclears en les que el nucli es desintegra espontàniament. Una altra manera de que hi hagi canvis en un nucli és bombardejant-lo amb un neutró o algun altre nucli. Les reaccions nuclears que ocorren d'aquesta forma s'anomenen transmutacions nuclears.

La primera conversió d'un nucli en un altre el dugué a terme Rutherford l'any 1919. Va bombardejar nitrogen atmosfèric amb partícules alfa provinents del radi:

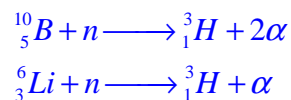


i va obtenir oxigen. Aquesta reacció demostrà que era possible induir reaccions nuclears colpejant nuclis amb partícules alfa. Aquest tipus de reaccions permeten sintetitzar molts radioisòtops en el laboratori. Per poder bombardejar els nuclis amb energies més elevades es fan servir acceleradors de partícules, del tipus ciclotró o sincrotó. Depenent de l'energia de les partícules amb les que es bombardeja els isòtops resultants són diferents.

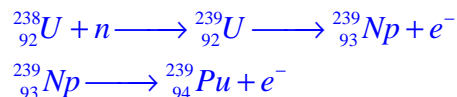
Quasi tots els isòtops que es fan servir en medicina i en biologia es fabriquen utilitzant neutrons com a projectils. Els neutrons necessaris es produeixen per reaccions que es duen a terme en reactors nuclears. Per exemple, el cobalt-60 que s'utilitza en la teràpia de radiació contra el càncer s'obté bombardejant Ferro-58 amb neutrons:



El triti, que té una vida mitja de 12,3 anys, també es pot obtenir bombardejant bor o liti amb neutrons:



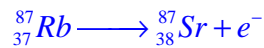
L'ús d'aquestes tècniques ha permès sintetitzar elements químics amb nombre atòmic superior a 92. Aquests nous elements s'anomenen transurànids. L'element 93 (neptuni) i el 94 (plutoni) es van descobrir l'any 1940. Es van produir bombardejant urani-238 amb neutrons lents:



Els elements amb nombres atòmics superiors es poden produir en petites quantitats en acceleradors de partícules

35.5 Aplicacions de la radioactivitat**35.5.1 Datació****EXEMPLE: DATACIÓ DE LA MICA I EL FELDESPAT**

El rubidi que existeix a la naturalesa conté un 28% de ^{87}Rb , que es desintegra a ^{87}Sr per emissió d'una partícula β :



La vida mitjana del ^{87}Rb és $4,7 \times 10^9$ anys, comparable amb l'edat de la terra. Suposem que estem datant mica. Podem suposar que quan es va solidificar la mica no contenia ^{87}Sr i que en el temps transcorregut des de la seva solidificació tot el ^{87}Sr format per desintegració del ^{87}Rb ha quedat atrapat a la xarxa cristal·lina rígida de la mica. Si suposem també que no hi ha hagut posteriors incorporacions de ^{87}Sr , aleshores, mesurant la relació de ^{87}Sr a ^{87}Rb , i coneixent la vida mitjana o constant de desintegració del ^{87}Rb , es pot calcular el temps transcorregut des que la mica es va solidificar.

Sigui P el nombre de nuclis "pares" de ^{87}Rb i sigui D el nombre de nuclis fills del ^{87}Sr . Aleshores, sempre es verifica que:

$$D + P = P_0$$

on P_0 és el nombre inicial de nuclis de rubidi-87. La llei de desintegració ens diu que:

$$\ln \frac{P}{P_0} = -\lambda t \quad t = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{P}{D+P} = \frac{1}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{D}{P} \right)$$

La constant de desintegració $\lambda = 0,693 / t_{1/2} = 1,47 \times 10^{-11} \text{ anys}^{-1}$. Coneixent D/P es pot conèixer l'antiguitat de la mostra.

EDAT D'ALTRES ROQUES I DE FÒSSILS

Hi ha altres parells de nuclis que es poden utilitzar per a dur a terme datacions:

Vida mitjana (anys)	Nuclis pares	Nuclis Fills
$4,51 \times 10^9$	${}^{238}\text{U}$	${}^{206}\text{Pb}$
$0,713 \times 10^9$	${}^{235}\text{U}$	${}^{207}\text{Pb}$
$1,30 \times 10^9$	${}^{40}\text{K}$	${}^{40}\text{Ar}$
$4,7 \times 10^9$	${}^{87}\text{Rb}$	${}^{87}\text{Sr}$
5730	${}^{14}\text{C}$	${}^{14}\text{N}$

El mètode argó-potasi és força important degut a que el potassi és abundant i es troba distribuït per tota la superfície terrestre. L'isòtop ^{40}K es desintegra de dues maneres diferents: 89% dels nuclis formen ^{40}Ca per desintegració β i 11% forma ^{40}Ar per una captura d'electró. El ^{40}Ca és molt comú i no es pot fer servir. Molts minerals però atrapen el ^{40}Ar fruit de la radiació, però no permeten l'entrada d'argó de l'atmosfera.

Per datar fòssils formats més recentment, es pot utilitzar la tècnica del ^{14}C . En l'atmosfera, el nitrogen és bombardejat per neutrons còsmics:



Aquest carboni s'oxida per donar CO_2 . El CO_2 s'incorpora a les plantes i posteriorment als animals. El ^{14}C es desintegra emetent una partícula β de baixa energia. Degut a un balanç natural entre la ingestió del ^{14}C i la desintegració radioactiva, els organismes vius arriben a un nivell estacionari de radioactivitat de 15,3 desintegracions per minut per gram de carboni. Quan un ésser viu mor, la ingestió del ^{14}C s'atura i la radioactivitat disminueix amb una vida mitjana de 5730 anys. Es poden datar objectes amb una antiguitat que va des de 2.000 fins a 50.000 anys.

35.5.2 Aplicacions mèdiques

RADIOTRAÇADORS

Els radiotraçadors són radioisòtops que tenen la capacitat de concentrar-se en un determinat òrgan objecte d'estudi. Un primer exemple és el iode-131, que s'utilitza per estudiar la glàndula tiroides. Aquesta glàndula és l'únic usuari important d'iode en tot el cos. El pacient veu una solució de NaI que conté iode-131. Només es fa servir una quantitat molt petita per a que el pacient no pateixi efectes secundaris. Un comptador Geiger col·locat prop de les tiroides, a la regió del coll, determina la capacitat de la glàndula incorporar el iode. Unes tiroides normals necessita unes quantes hores per concentrar-ne el 12% .

TOMOGRAFIA D'EMISSIÓ DE POSITRONS (TEP)

En aquest mètode, s'injecten al pacient compostos que contenen radionúclids que es desintegren per emissió de positrons. Amb aquesta tècnica es poden estudiar el fluxe de la sang, les taxes metabòliques d'oxigen i de glucosa i altres funcions biològiques. Alguns dels isòtops que s'utilitzen són aquests:

Núclid	Vida Mitjana	Àrea del cos estudiada
Iode-131	8,1 dies	Tiroides
Ferro-59	45,1 dies	Glòbuls vermells
Fòsfor-32	14,3 dies	Ulls, Fetge, tumors
Tecneci-99	6,0 hores	Cor, Ossos, Fetge, Pulmons
Sodi-23	14,8 hores	Sistema circulatori
Carboni-11	20,4 minuts	Metabolisme de la Glucosa

Amb el carboni-11, quan s'incorpora al cos com a glucosa, es pot estudiar l'activitat de cada àrea del cervell, per exemple i determinar l'existència d'algunes malalties.

TERÀPIA PER RADIACIÓ

La radiació pot danyar o destruir cèl·lules sanes. Ara bé, el càncer es produeix pel creixement sense control de cèl·lules anormals que formen tumors malignes. Els tumors malignes poden tenir com a causa l'exposició a radiació d'alta energia,. Ara bé, les cèl·lules canceroses són molt més sensibles que les cèl·lules normals a la radiació, degut a que aquestes cèl·lules s'estan reproduint ràpidament.

Es fan servir una gran varietat de radionúclids per a dur a terme radioteràpia. La font de radiació es pot situar dins o fora del cos. En quasi tots els casos la teràpia utilitza la radiació gamma. Les radiacions alfa i beta es poden bloquejar fàcilment. Com a exemple tenim el ^{192}Ir que es sol administrar en forma de "llavors" que es componen de l'isòtop radioactiu recobert d'una capa de 0.1mm de platí metàl·lic. Les llavors radioactives es poden implantar quirúrgicament en un tumor.

Un altre exemple és el ^{131}I , que s'utilitza per tractar el càncer de tiroides. Quan no és possible implantar una llavor s'utilitza un "canó" de ^{60}Co que dispara un feix de raigs gamma cap al tumor.

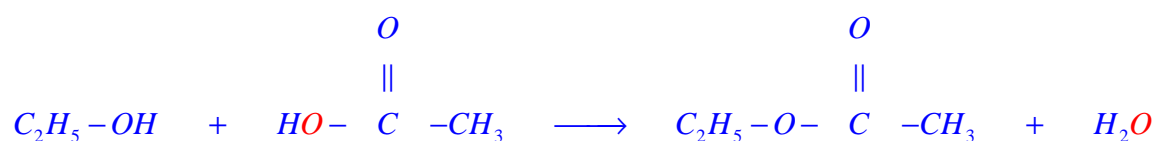
Degut al fort poder de penetració de la radiació gamma, és quasi impossible evitar danyar cèl·lules sanes durant la teràpia per radiació. Quasi tots els pacients de càncer pateixen efectes secundaris desagradables.

35.5.3 Química analítica

Una tècnica que es pot utilitzar per a l'anàlisi de substàncies és la tècnica coneguda com "anàlisi de l'activitat del neutró". Aquesta tècnica es basa en el fet de que si bombardegem una mostra amb neutrons, els elements químics normalment absorbiran neutrons i produiran radiacions gamma. L'espectre d'emissió gamma és diferent per cada nucli, i permet determinar la presència de qualsevol element. A més, a partir de l'intensitat de la radiació emesa és possible determinar la concentració de cada element. En alguns casos s'han mesurat concentracions de l'ordre de $10^{-9}\%$. Aquesta tècnica no és destructiva, donat que el nombre de nuclis que han de ser activats és molt petita i la major part de la mostra no resulta afectada.

35.5.4 Mecanismes de reacció

Un exemple és la reacció d'un alcohol i un àcid per donar un éster:



Utilitzant un isòtop radioactiu de l'oxigen, ^{18}O s'ha descobert que és l'oxigen de l'àcid el que acaba formant part de la molècula d'aigua.

S'han fet experiments semblants utilitzant àtoms marcats per ajudar a aclarir un gran nombre de mecanismes de reacció, incloent processos biològics i bioquímics. Per exemple, és possible afegir aigua marcada al sistema reticular d'una planta i seguir la seva progressió per la tija i finalment fins a les fulles. S'han fet experiments també amb CO₂ marcat amb carboni-14 per seguir el curs del carboni a la fotosíntesi del carboni a les plantes. A partir de l'anàlisi de les substàncies que han acumulat carboni-14 ha estat possible trobar la seqüència de les reaccions de fotosíntesi.

35.6 Mesures de Seguretat

35.6.1 Efectes de la radiació sobre els éssers vius

Contínuament estem rebent radiació provinent tant de fonts naturals com de fonts artificials.

En general la radiació provoca la ionització de molècules. Quan s'irradia un teixit viu, la major part de l'energia de la radiació és absorbida per molècules d'aigua. Quan la radiació ionitzant interacciona amb les molècules d'aigua es formen ions H₂O⁺ que són molt reactius. Aquest ió pot reaccionar amb una altra molècula d'aigua per donar lloc a una molècula neutra de OH:



La molècula de OH és molt inestable i reactiva, degut a que conté un electró desparellat. La molècula de OH poden atacar una gran varietat de biomolècules per produir nous radicals lliures, els quals, a la seva vegada ataquen més compostos. Així doncs, la formació d'un radical lliure pot alterar sensiblement el bon funcionament d'una cèl·lula.

El dany que produeix la radiació dependrà de l'activitat, energia de la radiació, durada de l'exposició i si la font de radiació és a l'interior o a l'exterior del cos. Si parlem de fonts externes de radiació, tant les radiacions alfa (que no poden penetrar la pell) com les radiacions beta (que amb prou feines travessa un gruix d'un cm) són inofensives. En canvi les radiacions gamma són molt penetrants i per tant molt perilloses. Si parlem de fonts internes, aleshores totes són perilloses, especialment les radiacions alfa, doncs transfereixen energia als teixits circumdants molt ràpidament.

També hi ha teixits que són més sensibles que d'altres. En el cos humà són especialment sensibles la medul·la òssia, els ganglis limfàtics i els òrgans reproductors, doncs contenen cèl·lules que es multipliquen ràpidament i de forma constant.

La principal malaltia que sorgeix com a conseqüència a una exposició petita però continua de radiació és el càncer, en especial un tipus de càncer anomenat leucèmia.

A l'hora d'establir normes, els científics suposen que el dany produït per la radiació són proporcionals a l'exposició, inclús en dosis petites. Això implica que no hi ha dosis innòcues de radiació i que per tant fins i tot la radioactivitat del medi natural és responsable d'un tant per cent dels càncers que es produeixen.

Per mesurar la quantitat d'exposició en el S.I. es fa servir el Gray ($1\text{Gy} = 1\text{J/kg}$), També es fa servir el rad ($1\text{Gy} = 100\text{ rad}$).

No totes les formes de radiació produeixen un dany equivalent per una mateixa dosi en els teixits. La radiació alfa produeix més danys que la radiació beta, per exemple. Per a tenir en compte aquestes diferències defineix una unitat anomenada rem, que s'obté multiplicant la dosi en rads per un factor RBE (relative biological effectiveness). La unitat del sistema internacional és el Sievert ($1\text{Sv}=100\text{rem}$)

35.6.2 Legislació

La legislació sobre radiacions de diferents països està basada en les recomanacions de la ICRP (International Commission on Radiological Protection).

Tots estem sotmesos a radiacions naturals, que son de l'ordre de $0,1\text{ rem/any}$. Aquesta radiació es pren com a punt de partida per a l'establiment de normes.

Es distingeix entre la "Dosi Màxima Permissible" per a professionals exposats a la radiació i la "Dosi límit" per a la població en general. La Dosi Màxima Permissible és de 5 rem/any i la Dosi límit és de $0,5\text{ rem /any}$. Aquesta diferència es justifica sota l'argument que els treballadors exposats a radiació estaran sempre sota control mèdic adequat.