

27-V-14 ; dm

E. PIA SABADELL

F2

FINAL tema "RADIOACTIVITAT":

REACCIONS NUCLEARS

WJWZ  
i/x

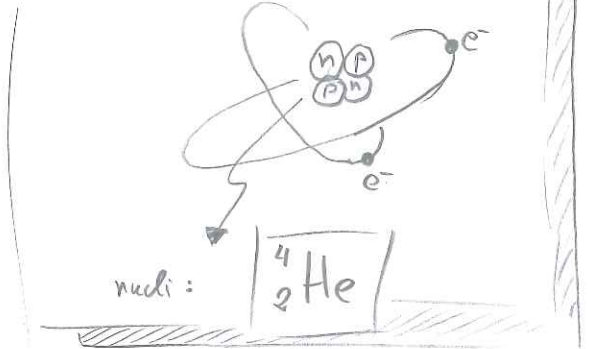
► Preliminars: Notació per a nuclis. Equivalent energètic de la massa.

• Nucli :  $\left\{ \begin{array}{l} Z \text{ protons} \\ N \text{ neutrons} \end{array} \right\} \quad A = Z + N \text{ nucleons}$

NOTACIÓ:  
 $\begin{array}{c} A \\ Z \end{array} X$

(d'un àtom de l'element químic X)

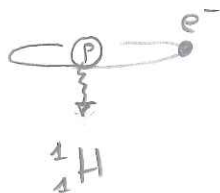
- per exemple : àtom de Heli-4 :



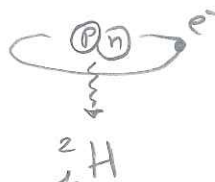
• Un element químic està format per àtoms que tenen sempre el mateix nombre de protons,  $Z$  ("nombre atòmic"), que també és el nombre que ocupa l'element sistema periòdic.

• El nombre de neutrons en el nucli, però, no és fix per a un mateix element químic (i per tant el nombre total de nucleons,  $A$ , o "nombre massic").

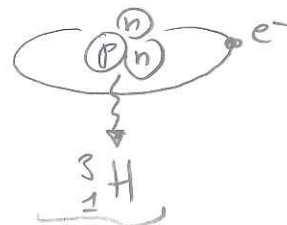
1) - per exemple : podem trobar a la natura aquests tres tipus de nuclis de l'element hidrogen:



"Hidrogen-1"



"Hidrogen-2" (o "deuteri")



"Hidrogen-3" (o "triti")

Tots tres són àtoms (i nuclis) d'hidrogen, però cada tipus rep el nom de ...

• Cadascun d'aquestes modalitats dels àtoms del mateix element químic reben el nom d'isòtops de l'element (el deuteri i triti són isòtops diferents de l'hidrogen, etc.).

## • EQUIVALENT ENERGÈTIC de la massa.

- Signi una partícula de massa  $m_0$ , que és la que apareix a les taules de partícules i no varia (i es diu "massa en repòs").

Segons la Relativitat, aquesta massa té associada una energia

$$E_0 = m_0 c^2$$

"Energia en repòs"  
d'una partícula

[També: equivalent energètic de la massa]  $(c = 10^8 \text{ m/s, veloc. de la llum})$

- Utilitat: anem a estudiar processos físics en que tenim unes partícules que es transformen i passen a tenir unes altres (reaccions nuclears). En aquestes transformacions, la quantitat de massa total inicial no coincidirà amb la quantitat de massa total final: en Relativitat i Física Nuclear, doncs, la massa no es conserva. L'energia si es conserva: el que ocorre, doncs, és que la quantitat de massa perduda s'haurà transformat en energia (en el seu equivalent energètic).

- Unitats: les unitats S.I. per a massa, velocitat i energia són el kg, el m/s i el J. En fis. Nuc., sovint usarem el eV i MeV (electron-volt i megaelectron-volt):

$$1 \text{ eV} = 1,6019 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ MeV} = 1,6019 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

$$(N_A = 6,022 \cdot 10^{23})$$



unes altres constants d'interès: si sabem en "u" la massa atòmica,  $M$ , d'una partícula, sabem en g la massa d'un mol d'aquestes partícules: 1 àtom He-4 és 4u, 1 mol d'àtoms de He-4 és 4 g. Quants g pesa un àtom? Evidentment,  $M/N_A = M(u) \cdot 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ g/u}$

27-V-14; Am]

E. OIA SABADELL

F2

FINAL TEMA

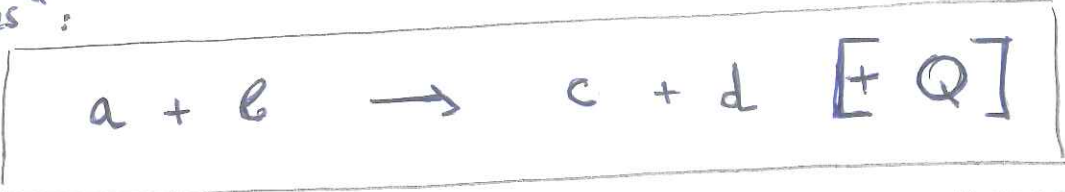
"RADIOACTIVITAT"

REACCIONS NUCLEARS

WWSK  
ii/x

# I REACCIONS NUCLEARS: balanç energètic, energia Q alliberada, defecte de massa.

- Les reaccions nuclears (i, en general, els processos estudiats en Física de Partícules) consisteixen en que tenim unes partícules inicialment, els "reactius", que interaccionen entre elles i donen lloc a unes altres partícules, els "productes":



EQUACIÓ GENÈRICA D'UNA REACCIÓ NUCLEAR.

- per exemple:



Equació del mercès de:

«núclis de nitrogen bombardejats amb partícules alfa»



el núclis de nitrogen absorbeix la partícula  $\alpha$  incident, esdevé inestable i per a "reacomodar-se" emet un protó

Oxigen-17



p

... però: QUÈ PASSA AMB la Q? ... ho veiem a la pàg. següent!

- a i b són els reactius
- c i d són els productes
- Q és l'energia alliberada (o calor de reacció).

- El domer és només un exemple: poden haver-hi reaccions amb diferents nombres de reactius i productes:
  - $a \rightarrow b + c$
  - $a + b \rightarrow c + d + e$
  - ...

- SIGNIFICAT de la Q: abans de produir-se la reacció, els reactius tenen una energia total deguda a les seves masses ( $m_a c^2$  i  $m_b c^2$ ) i a la

seua velocitat (energia cinètica):

$$E_{TOT} = \text{energia total "inicial"} = m_a c^2 + m_b c^2 + \text{energies cinètiques}$$

(o "els reactius")



energia associada a la massa del reactiu a

energia associada a la massa del reactiu b.

Anàlogament, el conjunt dels productes tenen una energia total "final" que seria:

$$E'_{TOT} = m_c c^2 + m_d c^2 + \text{energies cinètiques}$$

Fem-li, ara, dues observacions:

i) les contribucions energètiques de les masses seran sempre les mateixes per a la mateixa reacció nuclear. Les contribucions cinètiques podran variar, depenent de si els reactius a i b s'aproximen a velocitats més altes o més baixes.

ii) en una reacció nuclear l'energia sempre es conserva:

$$E_{TOT} = E'_{TOT}$$

(inicial)                      (final)

Tenint això en ment, ens plantegem quina és l'energia mínima a la que tendria lloc la reacció: reduint les velocitats dels reactius a zero (estan un al estat de l'altre quiets, interaccionen i reaccionen, transformant-se en els productes), el procés seria:

27-V-14; dm

E. PIA SABADELL

F2


FINAL TEMA  
"RADIOACTIVITAT"  
REACCIONS NUCLEARS

WIKIP  
ccc/x



$$E_{TOT} = m_a c^2 + m_b c^2 \quad (*) \quad E'_{TOT} = m_c c^2 + m_d c^2 + \text{energ. cin.}$$

conservació de l'energia


 Aquesta energia cinètica és la més petita amb la que poden sortir els productes!!

... tot plegat, el balanç energètic de l'equació (\*) queda:

... li direm "Q"

$$m_a c^2 + m_b c^2 = m_c c^2 + m_d c^2 + Q$$

$$\Rightarrow \left[ \underbrace{(m_a + m_b)}_{\text{massa total inicial}} - \underbrace{(m_c + m_d)}_{\text{massa total final}} \right] \cdot c^2 = Q$$

FÓRMULA per a calcular la CALOR de REACCIÓ Q (o "energia alliberada").

$$\text{massa perduda en la reacció} \cdot c^2 = \text{energia alliberada en la reacció}$$

En general, a la massa perduda en la reacció se li diu "defecte de massa", i s'escriu:

$$\Delta m = \left\{ \text{massa dels reactius} \right\} - \left\{ \text{massa dels productes} \right\}$$

la qual cosa permet dir, per a una

Reacció nuclear general, que:

$$Q = \Delta m \cdot c^2$$

↔ l'energia alliberada en la reacció és l'equivalent energètic de la massa que es perd →

**BALANÇ ENERGÈTIC d'una reacció nuclear**

o Comentaris:

2) Què ocorre si la reacció no té lloc "a mínima energia" (és a dir: a i b tenen velocitats inicials diferents de zero)? → anomenarem  $K_0$  a l'energia cinètica inicial. Per a escriure l'equació de conservació de l'energia d'aquest cas general només hem de sumar  $K_0$  als dos membres de la del cas considerat abans de "mínima energia":

CAS MÍNIMA ENERGIA:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{massa total} \\ \text{dels reactius} \end{array} \right\} \cdot c^2 + K_0 = \left\{ \begin{array}{l} \text{massa total} \\ \text{dels productes} \end{array} \right\} \cdot c^2 + Q + K_0$$

CAS GENERAL:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{massa} \\ \text{reacts.} \end{array} \right\} \cdot c^2 + K_0 = \left\{ \begin{array}{l} \text{massa} \\ \text{productes.} \end{array} \right\} \cdot c^2 + (K_0 + Q)$$

↗ energia cinètica total inicial
↗ K energia cinètica total final

$$K - K_0$$

energia cinètica guanyada (o "alliberada")

$$= \left[ \left\{ \begin{array}{l} \text{massa} \\ \text{reacts.} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{massa} \\ \text{productes.} \end{array} \right\} \right] \cdot c^2$$

$\Delta m =$  massa perduda

equivalent energètic de la massa perduda

$$= Q$$

valor de reacció

[27-V-14; Am]

E. PIA SABADELL

F2

FINAL TEMA

"RADIOACTIVITAT"

REACCIONS NUCLEARS

NJN74

$\frac{E}{X}$

És a dir: la  $Q$ , que és l'equivalent energètic de la massa que es perd, continua interpretant-se com l'energia cinètica "guanyada" o "alliberada" en termes nets (quan descobrim la que ja teníem al principi).

ii) Fins ara, estem considerant que l'energia no associada a la massa que intervé en el procés és la cinètica (associada a la velocitat). També pot aportar-se amb fotons incidents (en el costat dels reactius), i alliberen-se com a fotons emesos (en el costat dels productes). En general,  $Q$  és l'energia "no

màssica" alliberada en la reacció  $\gg$  (i, tornem a dir-ho

un altre cop: per conservar-se l'energia, no queda més remei que sigui igual a l'energia perduda amb el defecte de massa).

iii) En la pràctica, si coneixem les masses de productes i reactius d'una reacció calculem la calor de reacció o energia alliberada trobant  $\Delta m$  i multiplicant per  $c^2$ :

- per exemple: sigui la reacció següent (magnesi-24 bombardejat amb una partícula  $\alpha$ ):



$$\text{si: } M({}_{12}^{24}\text{Mg}) = 23,9924 \text{ u}; \quad M({}_{13}^{27}\text{Al}) = 26,9899 \text{ u};$$

$$M({}_2^4\text{He}) = 4,0039 \text{ u}; \quad M({}_1^1\text{H}) = 1,00759 \text{ u},$$

trobar l'energia alliberada en la reacció,  $Q$ .

Resolució:

$$Q = \Delta m \cdot c^2 = [M_{Mg} + M_d - M_p - M_{Al}] \cdot c^2 =$$
$$= [23,9924 + 4,0039 - 1,0076 - 26,9899] \cdot \frac{10^{-3}}{N_A} \cdot 9 \cdot 10^{16} = (X)$$

defecte de massa en u ↑

$$m(u) \cdot \frac{10^{-3}}{N_A} = m(kg)$$

$$\frac{10^{-3}}{N_A} = 1,66 \cdot 10^{-27} (kg/u)$$



factor de conversió: una massa en u la passem a grams dividint entre  $N_A$ , i després a kg multiplicant per  $10^{-3}$

$$[X] = -1,7928 \cdot 10^{-13} \text{ J} = -1,7928 \cdot 10^{-10} \text{ J} \frac{1 \text{ MeV}}{1,6019 \cdot 10^{-13} \text{ J}} =$$
$$= -1,119 \text{ MeV} \quad \blacksquare$$

→  $Q < 0$  ?? ☹️

analitzarem tot seguint aquest signe.

#### iv) Interpretació del signe de Q:

$Q > 0$  : reacció exoenergètica → realment pot produir-se a partir dels reactius en repòs, i Q és l'energia neta [no massica] alliberada.

$Q < 0$  : reacció endoenergètica → la reacció no pot produir-se amb els reactius

quiets (perquè  $\Delta m > 0$ , els productes tenen més massa que els reactius, i aquesta energia ha de sortir d'algun lloc). ← |Q| és l'energia mínima [no massica,

o sigui aportada amb energia cinètica dels reactius i/o fotons incidents] per a que es produeixi la reacció → (en aquest cas, els prod. queden en repòs).

$Q = 0$  :

dispensió elàstica

↓  
ni s'allibera  
ni s'hi ha  
d'aportar energia.



27-V-14; dm

E. PIA SABADELL

F2

FINAL TEMA  
"RADIOACTIVITAT"  
REACCIONS NUCLEARS

WWSX  
5/X

5) Si una reacció és endoenergètica així:  $a+b \rightarrow c+d$ ,  
en sentit contrari " $\leftarrow$ ", o sigui:  $c+d \rightarrow a+b$   
si és exoenergètica.

## II

### NUCLIS: ENERGIA D'ENLLAÇ. ESTABILITAT.

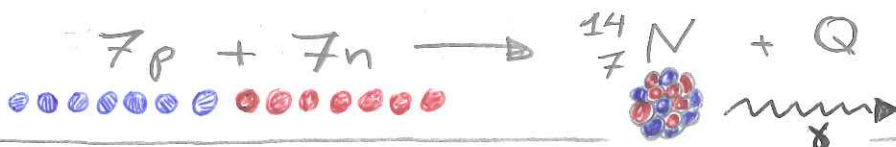
- Un nucli  ${}^A_ZX$  és un agregat de  $A$  partícules anomenades genèricament nucleons, que poden ser de dos tipus:
  - protons: n'hi ha  $Z$   $\rightarrow$  el seu nombre total determina de quin element químic es tracta.
  - neutrons: n'hi ha  $A-Z$ , de vegades hom defineix  $N=A-Z$  (procusat).

$\rightarrow$  per a una  $Z$  fixa (un element), la  $A$  ens determina de quin isòtop es tracta.

- Energia d'enllaç: si tenim un nucli  ${}^A_ZX$ , amb  $Z$  protons ( $p$ ) i  $N=A-Z$  neutrons ( $n$ ), podem escriure així la reacció amb que tal nucli es va formar (en una explosió de supernova, diguem-ne):



per exemple: hipotètica equació de la formació d'un nucli de  ${}^{14}_7N$ :



En l'exemple hem representat l'energia alliberada  $Q$  com un fotó emès en el procés de fusió del nucli: així es, hem suposat la reacció exoenergètica, i per tant  $Q > 0$ . És fàcil entendre per què, senzillament pensant en el procés contrari " $\leftarrow$ ", que descriuria el trencament del nucli i separació de totes les partícules que el formen: si " $\rightarrow$ " és exoenergètica (allibera energia), " $\leftarrow$ " és endoenergètica (necessita energia, que hem d'aportar per a que es produeixi). És a dir:  $\leftarrow$  si no aportem l'energia  $Q$  al nucli  ${}^A_Z X$ , no es trenca  $\gg$ . I  $\leftarrow Q$  és l'energia que ens costa trencar-lo: per així es diu "energia d'enllaç  $\gg$ ":

$$Q_{en} = \Delta m \cdot c^2 = \left( \left\{ \begin{array}{l} \text{massa de tots els} \\ \text{nucleons} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{massa} \\ \text{del nucli} \end{array} \right\} \right) \cdot c^2 =$$

$$= \left[ (Z m_p + N m_n) - M_{nucli} \right] \cdot c^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q_{en} = \left[ (Z m_p + (A-Z) m_n) - M_{nucli} \right] \cdot c^2$$

$\leftarrow$  Energia d'enllaç [del nucli  ${}^A_Z X$  de massa  $M_{nucli}$ ]  $\gg$

COMENTARI: com que  $Q_{en} > 0$ , llavors  $Z m_p + (A-Z) m_n > M_{nucli}$

És a dir: la suma de les masses dels nucleons lliures és més gran que la massa del nucli que formen. Això és un fenomen purament relativista, que no ocorre en física newtoniana.

[27-V-14; Am]

E. P. A. SABADELL

F2

FINAL TEMA  
"RADIOACTIVITAT"  
REACCIONS NUCLEARS

WIKI

50 / X

• Energia d'enllaç per nucleó,  $E_1$ : per a un nucleó

$\sum_{Z, A}^A$ : d'energia d'enllaç  $Q_{en}$  definita

$$E_1 = \frac{Q_{en}}{A}$$

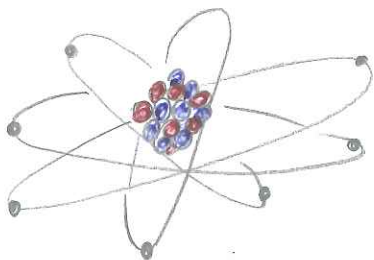
Interpretació: seria l'energia que hauriem de subministrar al nucleó per a alliberar un nucleó.

Per tant,  $\nwarrow$  nucleis amb més alta  $E_1$  són més estables  $\searrow$

per exemple: a partir de les dades següents, trobem  $Q_{en}$  i  $E_1$  del nucleó  ${}^{14}_7\text{N}$  que ja hem esmentat abans:

$$M_{\text{àtom N}} \approx 14,00307 \text{ u}; \quad m_p = 1,007277 \text{ u};$$

$$m_n = 1,008665 \text{ u}; \quad m_e = 0,00055 \text{ u}$$



$\Rightarrow$

$$M_{\text{nuclei}} = M_{\text{àtom}} - 7 m_e$$

càlcul previ: (COMPTA!)

$$= (14,00307 - 7 \cdot 0,00055) \text{ u}$$

restem les masses dels 7 electrons

$$\Rightarrow Q_{en} = [7 \cdot 1,007277 + 7 \cdot 1,008665 - (14,00307 - 7 \cdot 0,00055)] \text{ u}$$

$$\frac{10^{-3} \text{ kg}}{6,022 \cdot 10^{23} \text{ u}} \cdot \underbrace{(9 \cdot 10^{16})}_{c^2} \cdot \frac{1 \text{ MeV}}{1,6019 \cdot 10^{13} \text{ J}} =$$

$$= 104,8 \text{ MeV} \Rightarrow Q_1 = \frac{Q_{en}}{A} = \frac{104,8}{14} = 7,49 \text{ MeV/nucleó}$$

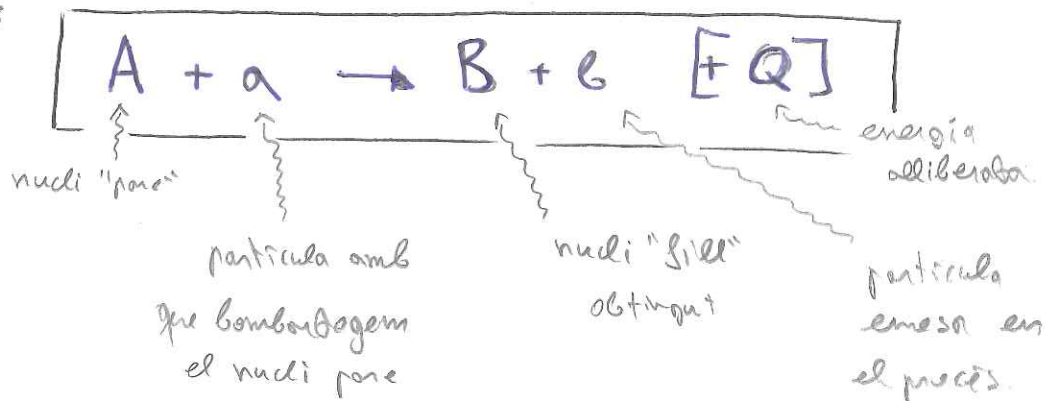
# III

## ESTUDI de les REACCIONS NUCLEARS més comunes.

### a. NOTACIÓ i LEIS de CONSERVACIÓ a CONSIDERAR:







- De manera genèrica, ens referirem amb
  - lletres majúscules: A, B, C... → els nuclis
  - lletres minúscules: a, b, c... → altres partícules que, de vegades, no podran considerar-se estrictament nuclis.
- Per exemple, una reacció nuclear genèrica podria

ser:



- Catàleg de partícules corresponents a les que

habitualment designem amb les lletres minúscules:

- partícules  $\alpha$ :  ${}^4_2\text{He}$   (nuclis de heli-2).
- protons p:  ${}^1_1\text{H}$   (nuclis de hidrog-1)
- deuterons d:  ${}^2_1\text{H}$   (nuclis de deuteri, o hidrog-2)
- neutróns n:  ${}^1_0\text{n}$   (no poden mai ser nuclis)
- partícules  $\beta^-$ :  ${}^0_{-1}\text{e}$   (" " " " " ")
- partícules  $\beta^+$ :  ${}^0_1\text{e}$   (" " " " " ").

NOTA: veiem que hem generalitzat la notació  ${}^A_Z\text{X}$  als nuclis per a incloure també  $n$ ,  $\beta^-$  ( $e^-$ ) i  $\beta^+$  ( $e^+$ , positrons). Es fa així per a poder aplicar a les equacions de reacció les lleis de conservació de Z i A. Per als  $e^-$ , de fet, fem Z = -1, negativa.

[27- V - 14; Am]

E. PIA SABADELL

F2

FINAL TEMA  
RADIOACTIVITAT  
REACCIONS NUCLEARS

20/20+1/4  
Vici X

- **Fotons:** els fotons són les partícules que formen la radiació electromagnètica, no tenen càrrega ni massa i -conseqüentment- viatgen sempre a la velocitat de la llum,  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s; els caracteritza la seva freqüència  $f$ , amb la qual calculem la corresponent energia del fotó així:

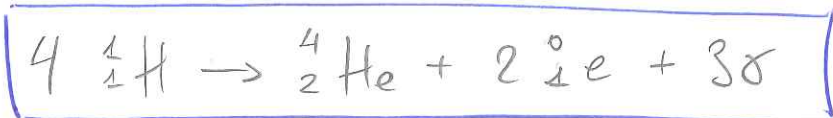
$$|E_\gamma = hf|, \quad \text{sent } h: h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

la constant de Planck.

Se solen incloure entre els reactius o productes com una  $\gamma$ , sense índex  $A$ ,  $Z$ , doncs no intervien en les lleis de conservació de  $A$  i  $Z$ .

- **Repetició de partícules:** semblantment al que es fa en química amb els coeficients estequiomètrics, quan un nucli o partícula apareix més d'una vegada entre els reactius o productes s'indica ficant davant del seu símbol el número de vegades que es repeteix.

- per exemple: reacció (neta) de fusió de nuclis d'hidrogen per a formar nuclis d'heli - 4:



## • LLEIS de CONSERVACIÓ:

- CONSERV:  $A_{TOTAL}$  :  $A_T = A_T'$

$\uparrow$                        $\uparrow$   
 suma dels A            suma dels  
 dels reactius            A dels productes

- CONSERV:  $Z_{TOTAL}$  :  $Z_T = Z_T'$  ← (això ve a ser la conservació de la càrrega elèctrica).

- CONSERV:  $E_{TOTAL}$  :  $E_T = E_T'$ , però en la pràctica aquesta ja la fem servir amb la de l'energia alliberada:  $Q = \Delta m \cdot c^2$ .

## 6. REACCIONS de BOMBARDEIG de nuclis amb partícules lleugeres.

- Descripció: un nucli "blanc" A és bombardejat amb una partícula "projectil" a (que de vegades seria fins i tot un  $\gamma$ ) i es transforma en un altre nucli B i una altra partícula ("emesa") b. De vegades se'n emet més d'una.

• Equació genèrica:  $A + a \rightarrow B + b \quad [Q]$

- Tipus típics (a, b) en aquestes reaccions

("projectil", "emesa"):

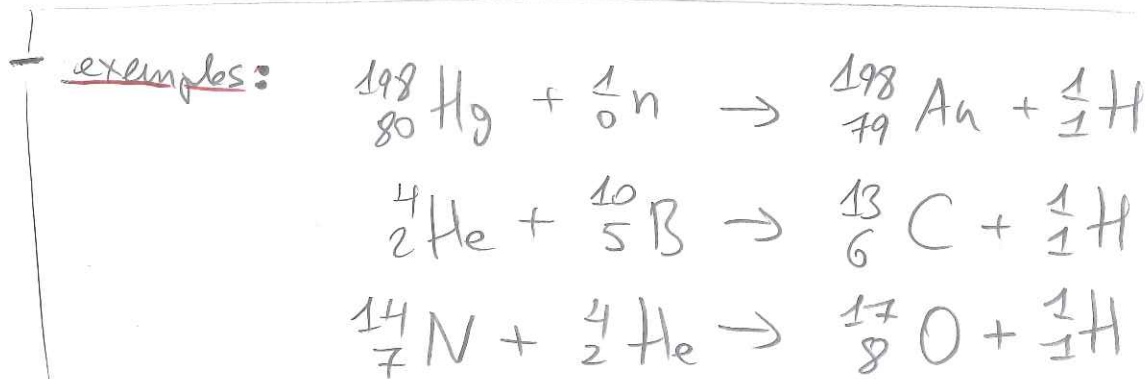
$(\alpha, n), (\alpha, p), (p, \alpha), (p, n), (p, \gamma), (d, \alpha), (d, p),$   
 $(d, n), (d, 2n), (n, \alpha), (n, p), (n, 2n),$   
 $(\gamma, p), (\gamma, n).$

[27-V-14; Am]  
E. DIA SABADELL

F2

FINAL TEMA  
"RADIOACTIVITAT"  
REACCIONS NUCLEARS.

WJW 8/14  
STII  
X.



### C.- REACCIONS de DESINTEGRACIÓ NUCLEAR.

Radioactivitat natural.

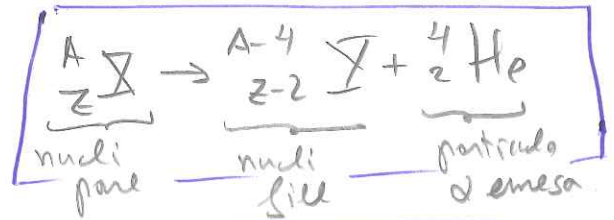
- Descripció: la "radioactivitat natural" és la propietat que tenen els nuclis d'alguns isòtops dels elements químics (omomentats, respectivament, "radionucleïds" i "radioisòtops") de transformar-se en un altre mitjançant l'emissió d'una partícula  $\alpha$ ,  $\beta$  o  $\gamma$ . [Nota: les emissions  $\gamma$  no van mai soles: acompanyen de vegades a les desintegracions  $\alpha$  i de vegades a les  $\beta$ ; nosaltres no les estudiarem amb detall].

Quan ha tingut lloc una emissió d'aquest tipus, diem que el nucli original ("pare") s'ha desintegrat. Cada radionucleïd es caracteritza per una constant de desintegració pròpia  $\lambda$ , que ens informa del ritme al qual

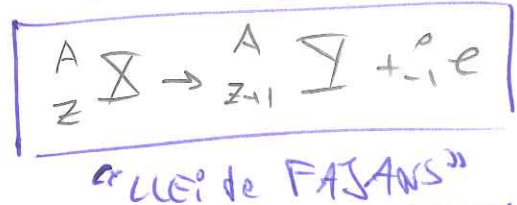
van tenint lloc les desintegracions (en una mostra del radionucleïd en qüestió) mitjançant la coneguda llei de desintegració exponencial:

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

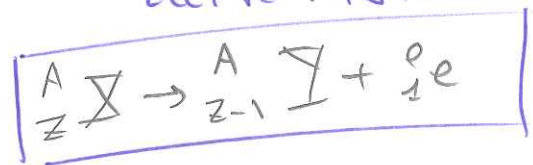
• Eq. genèrica de l'emissió  $\alpha$ :



• Eq. genèrica de l'emissió  $\beta^-$  (o " $\beta^-$ ")

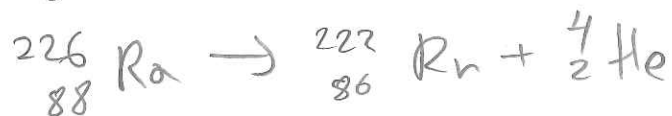


• Eq. genèrica d'emissió  $\beta^+$ :



una partícula  $\beta^+$  és un positró,  $e^+ = \begin{array}{c} 0 \\ +1 \end{array} e$ .  
 Si no és clar res més, entenem que  $\beta = \beta^-$   
 i que  $\beta^+$  és "romès" - quan s'especifica.

exemples:





[27-V-14; dm]

E. PIA SABADELL

[F2]

FINAL TEMA  
RADIOACTIVITAT

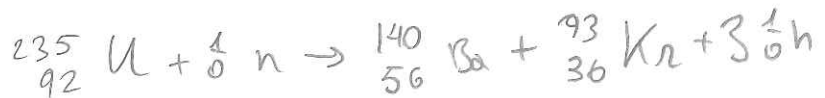
NOTA  
EX

REACCIONS NUCLEARS

### d.- REACCIONS NUCLEARS de FISSIÓ.

- Descripció: una reacció nuclear és de fissió quan un nucli pesant es divideix en dos més lleugers en ser bombardejat amb un neutró. En el procés s'alliberen més neutrons i molta energia.

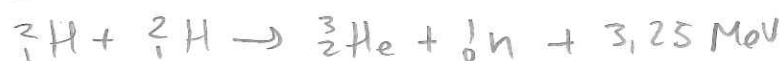
exemples:



### e.- REACCIONS NUCLEARS de FUSIÓ.

- Descripció: una reacció nuclear és de fusió quan dos nuclis lleugers s'uneixen per a formar-ne un de més pesant. Són les que tenen lloc a les estrelles com el Sol.

exemples:



# IV

## MATÈRIA : ANTIMATÈRIA. Creació i anihilació de parells.

Els processos nuclears estudiats no només necessiten ser tractats amb l'enfocament de la Relativitat, sinó també necessiten, per a ser entesos millor, l'ús de teories de Física Moderna que han d'incorporar obligatòriament les aportacions de la teoria quàntica. És amb aquest llenguatge sofisticat que es parla de les interaccions que regeixen les reaccions establertes (bàsicament, les dues conegudes com a "interacció nuclear dèbil" i "interacció nuclear forta").

Amb aquest llenguatge es tracten de manera semblant uns altres processos que no impliquen necessàriament els nuclis atòmics com a part dels reactius o productes. És el cas de la creació (o anihilació) de parells de matèria-antimatèria.

- Antipartícules: per a qualsevol partícula  $a$  hi existeix una altra partícula  $\bar{a}$  que té les mateixes característiques (mateixa massa, per exemple), excepte la càrrega, que canvia de signe. Altem,  $\bar{a}$  és l'antipartícula de  $a$ . Quan una partícula troba la seva antipartícula, s'aniquilen mútuament i produeixen dos fotons d'igual freqüència:



Per a trobar l'energia mínima d'aquests fotons, fem un balanç energètic.

27-V-14; dm

E. PIA SABADELL

F2

FINAL TEMA  
"RADIOACTIVITAT"  
REACCIONS NUCLEARS

WJWXP14



semblant al que fem per a les reaccions nuclears:

$$E = E' \Rightarrow m_a c^2 + m_{\bar{a}} c^2 = h f_1 + h f_2$$

però  $m_a = m_{\bar{a}}$  i  $E_{\gamma_1} = E_{\gamma_2} \Rightarrow f_1 = f_2 (= f)$ , per

tant:

$$2 m_a c^2 = 2 h f \Rightarrow$$

$$f = \frac{m_a c^2}{h}$$

exemple d'anihilació (electrons - positrons):  
 $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$   $f = \frac{m_e c^2}{h} = 1,24 \cdot 10^{20} \text{ Hz}$

freqüència dels  $\gamma$   
emesos.

- Creació de parells: També pot donar-se un procés en què un  $\gamma$  xogui contra un nucli  $A$ , i el  $\gamma$  es desintegri deixant com a resultat un parell partícula-antipartícula. Suposant que la partícula i la antipartícula queden en repòs després de la interacció, i que el nucli no absorbeix energia del fotó, trobarem l'energia mínima que ha de tenir el fotó per a desintegrar-se i crear el parell:

$$\underbrace{E(\gamma)}_{hf} = (m_a + m_{\bar{a}}) \cdot c^2 = 2 m_a c^2 \Rightarrow$$

$\Rightarrow$

$$f = 2 \frac{m_a c^2}{h}$$

$f$  corresponent a l'energia mínima per a crear el parell partícula-antipartícula.