

# Física en context

Batxillerat 2n curs



cesire\*  
cdec



Generalitat de Catalunya  
Departament  
d'Ensenyament

selectivitat.io



## *Equip d'elaboració d'aquesta versió de la unitat*

Tavi Casellas  
Montserrat Enrech  
José Javier González  
Luisa Herreras  
Josep Olivella  
Octavi Plana  
Jaume Pont

Aquesta unitat és una revisió/ampliació/modificació d'edicions anteriors en les que han col·laborat altres persones

**Centre de Documentació i Experimentació en Ciències**

**Departament d'Educació**

**Barcelona 2021**



## UNITAT 8. UN VIATGE AL·LUCINANT

### Índex

Per què una unitat anomenada “Un viatge al·lucinant”?	1
<b>1 Física nuclear</b>	<b>3</b>
1.1 Radiacions ionitzants: beneficis i riscos.....	3
1.2 La radioactivitat .....	5
1.3 L'estabilitat nuclear.....	18
1.4 Apartat de síntesi .....	31
<b>2 La nova física</b>	<b>33</b>
2.1 Un model corpuscular per a la llum: els fotons ..	34
2.2 Els electrons: partícules o ones? .....	40
2.3 Els positrons: un exemple d'antimatèria .....	44
2.4 Els raigs còsmics .....	47
2.5 Apartat de síntesi .....	51
<b>3 El model estàndard</b>	<b>53</b>
3.1 Els constituents de la matèria: els fermions .....	54
3.2 Forces fonamentals i interaccions .....	57
3.3 I més enllà del model estàndard? .....	63
<b>4 Una mirada a l'univers</b>	<b>65</b>
4.1 Idees sobre cosmologia.....	65
4.2 La teoria del Big Bang.....	68
4.3 El futur .....	74
<b>5 Del més petit al més gran</b>	<b>77</b>
5.1 Objectius .....	78
5.2 Activitats i qüestions finals .....	79



## Per què una unitat anomenada “Un viatge al·lucinant”?

A finals del segle XIX hi havia l'opinió general entre els físics de que ja no quedava res per a estudiar donat que totes les lleis importants de la física havien estat descobertes. Un dels científics més preeminents de l'època, Lord Kelvin, va manifestar:

*“There is nothing new to be discovered in physics now. All that remains is more and more precise measurement”*

(Lord Kelvin, 1900)

En el període comprés entre finals del segle XIX i principis del segle XX es van dur a terme alguns descobriments sorprenents que la física clàssica no podia explicar. Aquests descobriments s'afegiren a d'altres serrells de teories i models existents que no quedaven plenament explicats. El descobriment de l'electró l'any 1897, així com el descobriment de la radioactivitat i dels raigs X, van obrir la porta a un aspecte que la ciència sempre havia perseguit: l'estudi microscòpic de l'estructura de la matèria per tal de trobar els seus constituents i entendre com es comporta. Durant el primer quart del segle XX, l'estudi microscòpic de la matèria va dur a una reformulació molt àmplia de les teories existents fins aleshores sobre l'estructura d'aquesta. Una nova teoria, la **Mecànica Quàntica**, va revolucionar el món de la física i va portar a una nova visió de la natura .

La física clàssica no fallava només en el món dels àtoms. La mesura de la velocitat absoluta de la Terra tampoc donava els resultats esperats. L'any 1905 Einstein va publicar la **Teoria de la Relativitat Especial** que formulava que la física acceptada fins aleshores deixava de ser vàlida a velocitats properes a les de la llum. Einstein també va proposar la Teoria de la **Relativitat General**, que ampliava i millorava la teoria de la gravitació de Newton que heu estudiat en aquest curs.

Per una altra banda, la ciència s'ocupava d'obrir un altre front de recerca al voltant de l'estudi de l'origen i estructura de l'univers, la **Cosmologia**, que precisa de la teoria de la relativitat i de la mecànica quàntica. Des dels anys vuitanta, l'estudi microscòpic de la matèria i l'estudi de l'origen i de l'evolució de l'univers han anat plegats a l'hora de mostrar com l'estructura interna de la matèria i l'estructura de l'univers estan íntimament lligades.

La mecànica quàntica, juntament amb la teoria de la relativitat, han estat les dues teories més importants de la física del segle XX, han revolucionat el món de la ciència i constitueixen la base de les noves tecnologies que han canviat el món (Figura 1). La nova interpretació de la natura que representen aquestes dues teories en mans del físic teòric ha permès el desenvolupament d'altres teories que donen compte de la gran varietat de partícules elementals que s'han descobert al llarg del segle XX.

Els físics de partícules es van adonar que una bona manera de comprovar les seves teories era veure si aquestes podien fer prediccions sobre la manera com l'univers ha evolucionat des dels seus orígens. Això permetria també de resoldre algunes de les dificultats que hi ha al voltant de l'evolució de l'univers després del Big Bang. Actualment, els físics tenen una teoria que explica l'evolució de l'univers des de  $10^{-35}$  s després del Big Bang fins a l'actualitat, teoria que permet fer prediccions sobre el seu futur. La teoria està molt d'acord amb els resultats experimentals obtinguts sobre la radiació de fons còsmica de microones que es va mesurar cap a mitjans dels anys seixanta.

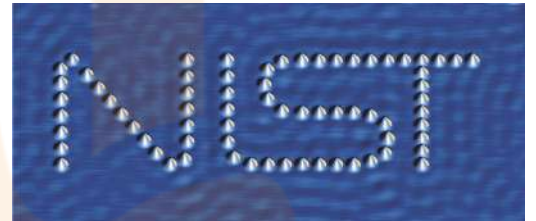


Figura 1. Logo de 40 nm del “National Institute of Standards and Technology” (NIST) fet amb àtoms de cobalt sobre una làmina de coure (Font NIST)



Figura 2. Vista aèria de la frontera entre França i Suïssa on es troba el CERN. En la fotografia es veu superimposada la traça del túnel, de 27 km de longitud i a 200 m de profunditat, on s'ha instal·lat el LHC (Font CERN)

Una altra contrastació de les teories actuals es realitza en els grans acceleradors i col·lisionadors de partícules. En aquests laboratoris s'acceleren partícules subatòmiques a velocitats properes a la de la llum fent-les xocar per a reproduir les condicions d'interacció en situacions molt extremes, molt semblants a les de l'origen de l'univers. Un exemple d'aquests grans col·lisionadors és el LHC (de l'anglès, Large Hadron Collider, gran col·lisionador d'hadrons) que s'ha de posar en funcionament en el CERN (del francès, Centre Européen pour la Recherche Nucléaire) a Ginebra (Figura 2).

Amb el LHC es pretén crear un nou tipus de matèria anomenat *plasma de quarks - gluons* que es trobava en l'inici de l'univers. El LHC també s'ha plantejat la recerca i captura del que alguns físics i mitjans de comunicació anomenen la "*partícula divina*": el bosó de Higgs. Aquesta partícula ha estat predita per alguns models que ha de permetre una comprensió més profunda de la matèria i de l'univers.

### Introducció dels principis i dels procediments físics

En aquesta unitat fareu un viatge al·lucinant partint de l'interior de la matèria per a arribar als límits de l'univers conegut, veureu com ha evolucionat fins als nostres dies i esbrinareu quin serà el seu futur d'acord amb les teories actuals.

Es començarà estudiant els diferents tipus de radiacions ionitzants com les associades a la radioactivitat (una de les primeres evidències experimentals de que l'àtom tenia estructura interna). El fenomen de la radioactivitat i l'efecte fotoelèctric entre d'altres suggeriren, a principis del segle XX, que la física clàssica no era correcta en el món microscòpic ni a velocitats properes a la de la llum. Les partícules subatòmiques amb les seves característiques i el seu comportament demostren que l'estudi de la matèria no és simple. Veureu que la matèria està formada per un gran oceà de partícules que el Model Estàndard ha permès reduir a un conjunt de 9 partícules elementals i 4 partícules portadores de les diferents forces fonamentals de la natura.

Un altre cas de radiació ionitzant la formen els raigs còsmics que arriben a la Terra provinents de l'espai exterior. Les partícules que es creen quan aquests raigs interactuen amb l'atmosfera tenen un temps de vida molt breu, tant breu que la mecànica clàssica és incapaç d'explicar com aquestes partícules arriben a la superfície de la Terra. Els conceptes de temps i d'espai absoluts de la mecànica newtoniana deixen de ser vàlids i s'ha de recórrer a la teoria de la relativitat especial.

Finalment l'estudi d'aquest ampli oceà de partícules que es duu a terme en laboratoris com el CERN permet, per un banda, obtenir respostes sobre l'evolució de l'univers des del Big Bang fins a l'actualitat i més enllà i per una altra, obtenir tot un seguit de tecnologies que són d'aplicació directa a la societat com és el desenvolupament de la World Wide Web.



# 1 Física nuclear

## Radioactius per naturalesa

La radiació la podem trobar en els llocs més insospitats. Tot i que la majoria de gent en coneix l'origen artificial, la veritat és que també s'origina en fonts naturals. Sovint s'associa la radioactivitat als efectes letals o nocius de les armes atòmiques i a l'obtenció d'energia a les centrals nuclears.

En aquest reportatge s'explica què és el gas Radó.

<https://beteve.cat/medi-ambient/ventilar-casa-gasos-contaminants-pols-rado-dioxid-carboni/>

### 1.1 Radiacions ionitzants: beneficis i riscos

Les radiacions ionitzants poden tenir usos beneficiosos com en els tractaments de càncer, però també poden ser perjudicials ja que poden originar un càncer. La diferència entre un aspecte i l'altre depèn del control que es té en el seu ús i en les seves aplicacions. En aquest apartat estudiareu els beneficis i els riscos de les radiacions ionitzants i els processos que les originen.

Les radiacions ionitzants s'utilitzen a casa, a la indústria i en la medicina. Les seves principals característiques són:

- Es detecten fàcilment. Aquesta propietat les fa útils com a traçadors en medicina i en la indústria del petroli.
- Ionitzen la matèria i són absorbides per ella. Així una alarma d'incendis sona quan les partícules alfa procedents d'un radioisòtop ionitzen l'aire en una cambra d'ionització i són absorbides pel fum.
- En el procés d'absorció s'allibera energia i l'energia de la radiació escalfa la matèria. Així és com la nau Cassini va ser propulsada fins a Saturn. La potència necessària pel funcionament de la nau va ser subministrada per uns generadors termoelectrics que funcionaven gràcies a una substància radioactiva (Figura 3).
- L'energia associada a la radiació ionitzant pot malmetre la matèria viva. Però fins i tot aquesta propietat pot ser beneficiosa ja que proporciona un bon mètode per a esterilitzar instrumental mèdic o productes alimentaris.
- La quantitat de radiació que emet una substància radioactiva decreix amb el temps d'una manera previsible, fet que permet datar objectes.

L'ús de les radiacions ionitzants pot ser beneficiós, si bé han de ser tractades amb respecte ja que comporten riscos. Reemplaçant les centrals tèrmiques que cremen combustibles fòssils per centrals nuclears es



*Figura 3. Sonda Cassini – Huygens prop de Saturn (Font NASA)*

reduiria l'efecte hivernacle, però què en es fa amb els residus nuclears? L'exposició a la radiació és una de les maneres com les mutacions genètiques poden tenir lloc. L'exposició a nivells de radiació elevats, pot produir la mort, mentre que a nivells baixos permet lluitar contra el càncer, encara que també tenen un efecte sobre les cèl·lules sanes.

Cap ús de les radiacions ionitzants té risc zero. La pregunta "són totalment segures?" no té sentit. Hom s'ha de demanar, en cada cas, si els beneficis superen els riscos, i valorar les conseqüències d'utilitzar o no utilitzar aquest tipus de radiacions.

### 1.1.1 Ionització de la matèria viva

Les radiacions ionitzants són radiacions capaces d'arrencar electrons als àtoms quan incideixen sobre la matèria. Hi ha diversos tipus de radiacions ionitzants: raigs còsmics, feixos de protons o de neutrons, raigs X, llum ultraviolada i les radiacions que provenen de les desintegracions nuclears.

Ionitzar un àtom requereix una certa quantitat d'energia, i per tant no totes les radiacions són ionitzants. En el curs anterior vareu estudiar que llum és una radiació electromagnètica que engloba un espectre de freqüències molt ampli (des de les ones de radio fins als raigs gamma). Només les radiacions de freqüències més elevades de l'espectre electromagnètic tenen suficient energia per a ionitzar la matèria. Per exemple, la llum ultraviolada és un tipus de radiació ionitzant perquè és capaç de trencar enllaços moleculars i produir radicals lliures. Quan interacciona amb la pell, aquests radicals poden originar melanomes i per tant, l'exposició al Sol augmenta el risc de contraure càncer de pell.

Per a mesurar l'energia de les radiacions els científics utilitzen una unitat anomenada electrovolt (eV) i els seus múltiples.

En interactuar amb la matèria la radiació perd energia i és absorbida. Així, un gruix adequat de matèria esdevé una bona cuirassa contra les radiacions ionitzants. Una partícula alfa amb una energia d'uns 5 MeV, provinent d'una substància radioactiva, és aturada per un full de paper o per una capa d'1 mm d'aigua. Fins i tot, en l'aire només recorreria uns 50 mm abans de ser aturada. Però si inhaleu o ingeriu una substància que emet partícules alfa, aquestes seran fàcilment absorbides pel teixit adjacent malmetent les cèl·lules i l'ADN.

Quan us fan una radiografia us irradien amb raigs X. El personal sanitari surt de l'estança sempre abans d'engegar la radiació i es col·loca en una sala adjunta en la que queda protegit de la radiació. Però i vosaltres? Per què el personal sanitari es protegeix mentre vosaltres sou irradiats? La diferència es troba en què el personal sanitari utilitza la màquina de fer radiografies molts cops al dia durant molts dies mentre que vosaltres la utilitzeu molt de tant en tant. Una exposició repetida faria que el metge rebés una dosi molt elevada de radiació, dosi que li seria perjudicial. Per a vosaltres hi ha un risc, però el benefici que n'obteniu és fonamental per al diagnòstic i per a la millora de la vostra qualitat de vida.

#### Nota d'estudi

Una partícula amb una càrrega  $q$  sotmesa a una diferència de potencial  $\Delta V$ , experimenta una variació d'energia potencial  $\Delta E$

$$\Delta E = q \cdot \Delta V$$

1 eV és l'energia que adquireix un electró (que té una càrrega elèctrica de  $-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ) quan es desplaça entre dos punts amb una diferència de potencial d'1 V, i va del punt de potencial menor al punt de potencial més gran. Així:

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

**ACTIVITAT 1 Origen de les fonts de radiació**

En aquesta activitat utilitzareu un full de càlcul per a analitzar les fonts de radiació a les què ens trobem sotmesos dia a dia.

**1.1.2 Mesura de la radiació absorbida**

En medicina, la quantitat de radiació absorbida per un ésser viu esdevé un factor important per les repercussions sobre la salut que aquesta radiació pot tenir. La mesura d'aquesta magnitud està relacionada amb la quantitat d'energia dipositada sobre el teixit viu i amb el tipus de radiació. Per a quantificar aquests efectes es defineixen dues magnituds: la dosi absorbida i la dosi equivalent.

La **dosi absorbida** és la quantitat d'energia absorbida per unitat de massa del cos irradiat. En unitats del SI aquesta magnitud es mesura en grays. Un gray (Gy) representa la radiació necessària per a dipositar 1 joule d'energia en 1 kilogram de matèria irradiada ( $1\text{Gy} = 1\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).

No obstant, amb l'energia absorbida no n'hi ha prou. Cal tenir en compte el tipus de radiació, ja que no totes són igualment ionitzants i no tots els teixits reaccionen igual davant la radiació. Per exemple, 1 Gy de radiació alfa té un efecte 20 vegades més gran que 1 Gy de raigs-X. Per això es defineix la **dosi equivalent**, que dóna una mesura dels efectes biològics de la radiació. La dosi equivalent és la magnitud que s'ha de tenir en compte quan es parla de protecció radiològica dels humans i del medi ambient. Aquesta magnitud es calcula de la següent manera

$$\text{Dosi equivalent} = \text{dosi absorbida} \times \text{factor de qualitat}$$

Els factors de qualitat d'algunes radiacions es troben a la Taula 1. La dosi equivalent es mesura en sieverts (Sv) en unitats del SI. Encara que són grays ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), el sievert correspon a la dosi de qualsevol tipus de radiació en Gy que té el mateix efecte biològic sobre un ésser viu que 1 Gy de raigs-X o de raig gamma.

**1.2 La radioactivitat**

El iode és un oligoelement essencial que s'acumula en la tiroides i amb el que aquesta glàndula fabrica un seguit d'hormones com la tiroxina. Una tiroides hiperactiva acumula més iode del que és habitual. Els metges poden diagnosticar aquest fet amb l'ús de radiacions ionitzants com a traçadors. Una manera de fer-ho és introduir en el cos una substància que conté una petita quantitat de material radioactiu, un **radiotraçador**. Aquesta substància es distribueix per l'organisme acumulant-se en certes parts del cos, però és el material radioactiu qui permet la seva detecció.

Per a fer aquest tipus de prova es necessita un material radioactiu que tingui certes característiques. Per una banda cal que el material tingui una activitat prou elevada per a ser mesurada. L'activitat és una mesura de la capacitat de desintegració d'una substància radioactiva i que estudiareu amb detall més endavant. Per una altra banda, la substància ha de restar poc temps en el cos per tal que la seva presència alteri mínimament els

Factors de qualitat de la radiació		
Radiació	Factor	Dosi equivalent d'1 gray
Alfa	20	20 Sv
Beta	1	1 Sv
Gamma	1	1 Sv
Raigs -X	1	1 Sv
Neutrons	10	10 Sv

Taula 1. Factors de qualitat i dosi equivalent d'algunes radiacions ionitzants

**Nota d'estudi**

En medicina encara s'utilitzen les unitats tradicionals del sistema d'unitats radiològic: el rad (radiation adsorbed dose) i el rem (Röntgen equivalent man). Les seves equivalències en unitats SI són

$$1\text{ rad} = 0,01\text{ Gy}$$

$$1\text{ rem} = 0,01\text{ Sv}$$

teixits. Així, per exemple, el iode-131, que perd la meitat de la seva activitat cada 8 dies, s'utilitza per a tractar el càncer de tiroides. També es fa servir el iode-123, amb una vida mitjana de 13 h, com a radiotracador per a fer gammagrafies.

## Gammagrafia

La gammagrafia és una prova diagnòstica en la que s'utilitza radiotracadors. L'article català de la wikipèdia us en dona més informació.

<http://ca.wikipedia.org/wiki/Gammagrafia>

Nombre atòmic (Z)	Nombre de protons que hi ha al nucli.
Nombre màssic (A)	Nombre de nucleons (protons més neutrons) que hi ha al nucli.
Els isòtops d'un element es representen amb el símbol de l'element X, A com a superíndex i Z com a subíndex ${}^A_ZX$ .	

### 1.2.1 Què fa que un àtom sigui radioactiu?

Per a respondre a aquesta pregunta cal fer un estudi més detallat dels elements de la taula periòdica i dels constituents del nucli atòmic. Alguns àtoms emeten partícules i es transformen en d'altres elements seguint un procés de desintegració nuclear fins que els nuclis esdevenen estables. Però anem per parts i comencem pel principi.

#### Els isòtops

Els **isòtops** d'un element són àtoms químicament idèntics, però que tenen masses diferents. Contenen exactament el mateix nombre d'electrons en l'embolcall i el mateix nombre de protons en el nucli, però es diferencien en el nombre de neutrons, per això tenen masses atòmiques una mica diferents. Els àtoms neutres contenen el mateix nombre d'electrons que de protons, de manera que els isòtops d'un mateix element tenen les mateixes propietats químiques. Només utilitzant un espectròmetre de masses es pot mesurar la massa d'àtoms individuals i es poden distingir els diferents isòtops d'un element.

Els protons i els neutrons són col·lectivament coneguts com a **nucleons**. El nombre de nucleons rep el nom de **nombre màssic** (A) i el nombre de protons es coneix com a **nombre atòmic** (Z). Quan es menciona l'isòtop d'un element s'afegeix el **nombre de nucleons** al nom de l'element. Per exemple, l'oxigen existeix a la Terra en la forma de tres isòtops estables:

oxigen-16, oxigen-17 i oxigen-18. En la Figura 4 es mostra un esquema dels isòtops de l'oxigen. Els tres isòtops són químicament idèntics ja que tots tenen el mateix nombre atòmic ( $Z = 8$ ), però canvia el nombre de neutrons,  $N$  ( $N = A - Z$ ). L'oxigen-16, o  ${}^{16}_8O$ , com també s'escriu, conté 16 nucleons dels quals 8 són protons; això vol dir que hi ha  $N = 16 - 8 = 8$  neutrons al nucli. Anàlogament, el  ${}^{17}_8O$  conté nou neutrons, i el  ${}^{18}_8O$  conté deu neutrons.

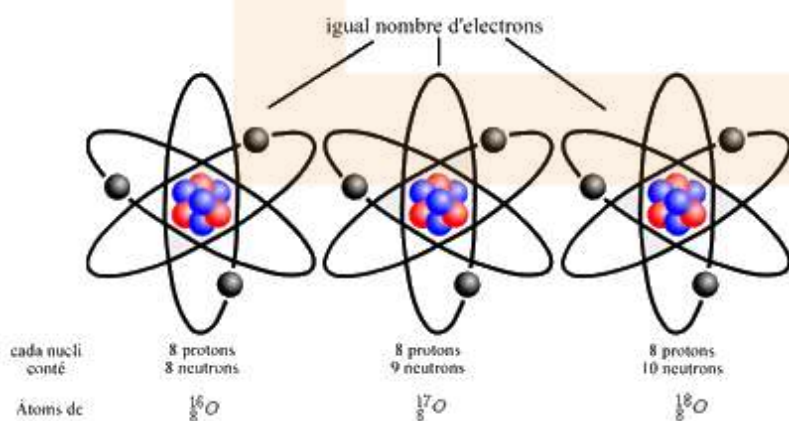


Figura 4. Representacions esquemàtiques dels isòtops de l'oxigen (Adaptació de la imatge de Halfdan [CC-BY-SA-3.0], via Wikimedia Commons)

## La taula periòdica

En el següent enllaç del edu365 es mostra una taula periòdica dels elements on apareixen els símbols de tots els elements químics i el nombre atòmic.

<https://www.edu365.cat/batxillerat/modalitat/ciencies/quimica/taula/index.html>

No tots els isòtops d'un element són estables. El iode, per exemple, té diversos isòtops, però només el iode-127 és estable. Aquest isòtop conté 53 protons i 74 neutrons en el nucli.

Isòtop	Z	N	A	Vida mitjana	Altres
I-129	53			15,7·10 <sup>6</sup> anys	radioactiu
I-131	53			8,04 dies	radioactiu
I-127	53			Estable	estable
I-123				13 h	

Taula 2 Alguns isòtops del iode. Dades per a la Qüestió 1

### Qüestions

- A la Taula 2 hi ha llistats alguns dels isòtops del iode.
  - Completeu la taula.
  - Justifiqueu quin dels isòtops és el més adequat per a ser utilitzat com a traçador en medicina.
- En les gammagrafies s'utilitza el tecneci-99. Feu un breu informe sobre les característiques d'aquest isòtop del tecneci (nombre atòmic, període de semidesintegració i aplicacions).

### 1.2.2 Desintegracions radioactives

El nucli del iode-131 amb 78 neutrons i 53 protons és inestable i per tant radioactiu. La raó és que hi ha molts neutrons al nucli en relació al nombre de protons per a mantenir el nucli unit i es transforma en un altre nucli per a esdevenir més estable, emetent partícules. Així, en el iode-131 un neutró es converteix en un protó emetent un electró i una altra partícula anomenada antineutrí ( $\bar{\nu}_e$ ) a molta velocitat.

Les transformacions nuclears d'aquest tipus s'anomenen **reaccions nuclears** i generalment impliquen canvis en el nombre atòmic i en el nombre màssic de l'isòtop radioactiu. En les reaccions nuclears els nuclis



s'escriuen amb la notació,  ${}^A_zX$ , i les partícules amb una notació similar. En el cas del iode-131, la reacció nuclear de conversió d'un neutró en les altres partícules subatòmiques es pot escriure de la forma següent



on el neutró se simbolitza per  ${}^1_0n$ , el protó per  ${}^1_1p$  i l'electró per  ${}^0_{-1}e^-$  (convencionalment l'electró té nombre atòmic  $-1$  donat que la seva càrrega és igual i de signe contrari a la del protó). Aquest procés transforma el nucli de iode-131,  ${}^{131}_{53}I$ , en el nucli d'un altre element que té un protó més i un neutró menys que el nucli original. Aquest element, de nombre atòmic  $53+1$ , és el xenó,  ${}^{131}_{54}Xe$  (Figura 5).

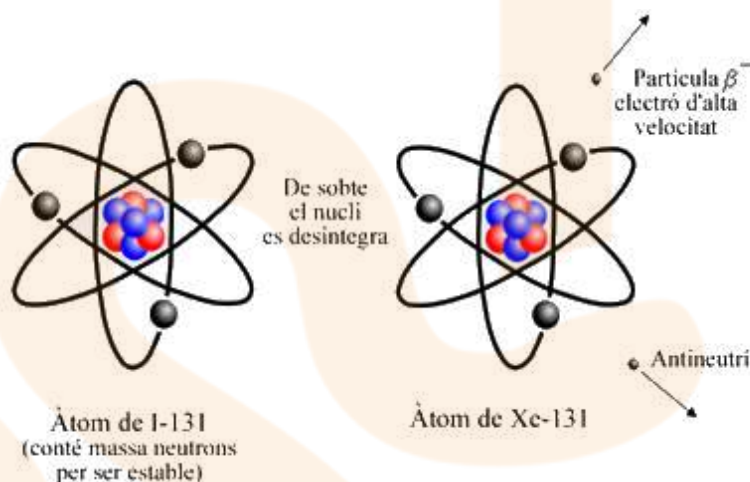


Figura 5. Desintegració  $\beta^-$  del iode -131 (Adaptació de la imatge de Halfdan [CC-BY-SA-3.0], via Wikimedia Commons)

La reacció nuclear de transformació del  ${}^{131}_{53}I$  en  ${}^{131}_{54}Xe$  també es pot escriure utilitzant els símbols dels elements.



La reacció nuclear (2) mostra que l'àtom de iode-131 es desintegra i es transforma en un àtom de xenó, amb totes les propietats químiques del xenó i sense cap de les del iode. Fixeu-vos que la càrrega elèctrica no canvia en la reacció, de manera que la suma dels subíndexs de la dreta és igual a la suma dels subíndexs de l'esquerra. El nombre total de nucleons tampoc canvia, com es demostra en sumar els superíndexs dels àtoms de la dreta i els de l'esquerra de la reacció (els protons i els neutrons es poden transformar entre ells, però ni es creen ni es destrueixen nucleons en les transformacions nuclears). Els electrons que orbiten al voltant del nucli de l'àtom que es desintegra (**nucli pare**) són afectats durant la desintegració, però finalment tornen a orbitar al voltant del nou nucli (**nucli fill**).

La transformació d'un nucli atòmic és un procés en el qual el nucli es reestructura espontàniament per tal d'aconseguir una major estabilitat emetent partícules i energia. Aquest procés s'anomena **desintegració radioactiva**. La quantitat d'energia que s'allibera en les desintegracions

radioactives és immensa si es compara amb l'energia que es desprèn en una reacció química.

L'electró emès pel nucli en l'Equació (1) es coneix com a partícula beta negativa ( $\beta^-$ ), i la reacció nuclear que té lloc en aquest procés es coneix com a **desintegració beta negativa**. En la desintegració beta negativa l'electró emès viatja a una velocitat propera a la velocitat de la llum i té suficient energia com per a ionitzar els àtoms que troba pel camí.

Hi ha un altre tipus de desintegració radioactiva anomenat **desintegració beta positiva**, en el qual un protó del nucli es transforma en un neutró i s'emeten un positró i un neutrí (Equació 3)



El positró se simbolitza per  ${}^0_1e^+$  (també es pot representar per  ${}^0_{+1}e$  i per  $e^+$ ). Té com a nombre atòmic la unitat ( $Z = 1$ ), ja que té la mateixa càrrega positiva que el protó, però el nombre màssic és 0 ( $A = 0$ ) ja que no és un nucleó. El símbol del neutrí és  ${}^0_0\nu_e$ .

El mateix resultat es produeix quan el nucli captura un dels electrons que orbiten al seu voltant i el combina amb un dels seus protons per a formar un neutró. Aquest procés s'anomena captura electrònica.

Molts nuclis són inestables perquè tenen molts protons. Aquests nuclis esdevenen més estables amb una **desintegració alfa**. Aquest tipus de desintegració radioactiva consisteix en l'emissió per part del nucli d'una partícula alfa ( $\alpha$ ), que està formada per dos protons i dos neutrons, i és idèntica a un nucli d'heli,  ${}^4_2He$ . El nucli d'urani-238 és un exemple d'emissor de partícules alfa (Figura 8). L'equació de la desintegració alfa de l'urani-238 és



De nou, la càrrega elèctrica total (nombre de protons) i el nombre de nucleons es conserven.

Un altre tipus de desintegració radioactiva és la **desintegració gamma** ( $\gamma$ ), que consisteix en l'emissió d'un fotó per part del nucli amb la finalitat de guanyar estabilitat. La radiació gamma és una radiació electromagnètica d'alta energia i, com totes les radiacions electromagnètiques, viatja a la velocitat de la llum ( $3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  en el buit). És de longitud d'ona molt curta (al voltant  $10^{-14} \text{ m}$  o inferior) i té un gran poder de penetració (Figura 6).

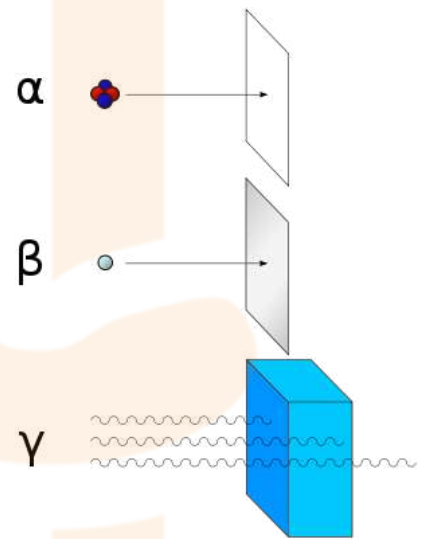


Figura 6. Poder de penetració dels diferents tipus de radiacions. Les partícules alfa són aturades per un full de paper. Per aturar la desintegració  $\beta$  calen uns quants mil·límetres d'un material sòlid (d'1 a 10 mm d'alumini, per exemple). Els raigs- $\gamma$  o els raigs-X necessiten gruixos importants de material per a ser aturats, 0,5 mm de plom o un mur de 250 mm de gruix (Imatge de Tungsten [Public Domain], via Wikimedia Commons)

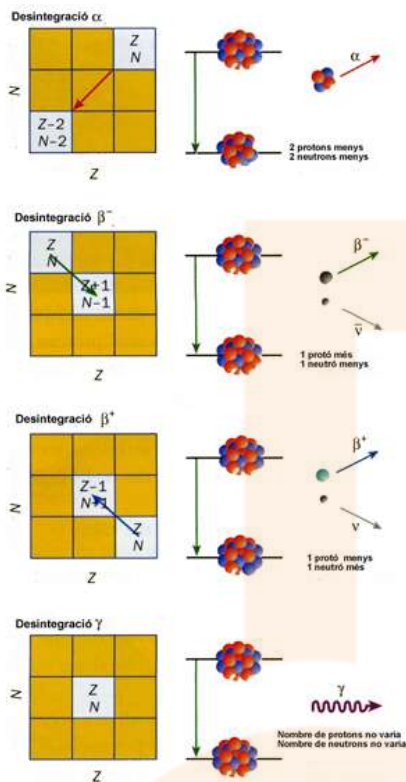


Figura 7. Processos de desintegració radioactiva (imatge adaptada de Advanced Physics, IOP)

La desintegració gamma no comporta cap canvi en el nombre de protons ni de neutrons del nucli, el nucli només perd energia. Les emissions de radiació gamma generalment acompanyen les desintegracions alfa i beta perquè aquestes sovint produeixen un nucli nou en estat excitat (amb excés d'energia). La Figura 7 mostra esquemàticament els canvis que produeixen els diferents tipus de desintegracions radioactives i la Taula 3 algunes de les partícules emeses en les desintegracions radioactives.

Partícula	Símbols	Càrrega
Protó	${}^1_1p$	$+e$
Neutró	${}^1_0n$	$0$
Electró	${}^0_1e^-$ , ${}^0_{-1}e$ , $e^-$	$-e$
Partícula alfa	$\alpha$ , ${}^4_2He$	$+2e$
Positró	${}^0_1e^+$ , ${}^0_{+1}e$ , $e^+$	$+e$
Neutrí	${}^0_0\nu_e$ , $\nu_e$	$0$
Antineutrí	${}^0_0\nu_e^-$ , $\bar{\nu}_e$	$0$

Taula 3 Partícules emeses en les desintegracions radioactives d'un nucli atòmic ("e" representa la unitat de càrrega elèctrica,  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} C$ )

Les radiacions alfa, beta i gamma són exemples de radiacions ionitzants. Si els àtoms d'un ésser viu són irradiats, els electrons poden ser arrencats dels àtoms i els enllaços químics es trenquen. La bioquímica, la química de la vida, consisteix en una sèrie de reaccions químiques molt precises. La ionització dels àtoms pot ser la raó perquè aquestes reaccions no tinguin lloc. Grans dosis de radiació poden causar la mort ràpidament. Fins i tot petites dosis de radiació poden alterar l'ADN de les cèl·lules que s'estan reproduint de manera que aquest no es replica correctament i poden esdevenir cèl·lules cancerígenes. Estem constantment irradiats per petites quantitats de radiació natural que prové de les roques i dels raigs còsmics, però hem d'evitar l'exposició innecessària a les radiacions ionitzants. Respecteu les mesures de seguretat en entorns on pot haver radioactivitat ja que les conseqüències poden ser irreversibles.



## Qüestions

- 3 Quina diferència hi ha entre una partícula alfa i un àtom d'heli?
- 4 El nucli de la Terra s'escalfa degut a l'energia procedent de la desintegració radioactiva de radioisòtops naturals. El més significatiu d'aquests isòtops són l'urani-235, l'urani-238, el tori-232 i el potassi-40. Per a cada un d'aquests isòtops escriu el símbol de l'element químic al qual pertanyen i al davant d'aquest símbol el nombre màssic i el nombre atòmic, segons la notació esmentada. Utilitza una taula periòdica per a trobar els símbols dels isòtops.
- 5 Un dels processos de desintegració radioactiva normalment utilitzat per a datar les roques és la desintegració del  $^{87}_{37}\text{Rb}$  cap a  $^{87}_{38}\text{Sr}$ . Quin tipus de desintegració ha tingut lloc? Escriu l'equació de desintegració igualada d'aquest procés.
- 6 El bismut-212,  $^{212}_{83}\text{Bi}$ , es desintegra de dues maneres diferents: emitint una partícula alfa o emitint un electró. Escriu els símbols dels nuclis resultant amb la notació  $^A_Z\text{X}$  en cada cas. Dades: Els elements propers al bismut són el tal·li ( $Z = 81$ ), el plom ( $Z = 82$ ), el poloni ( $Z = 84$ ) i l'astat ( $Z = 85$ ).
- 7 El tori-227 ( $Z = 90$ ) es desintegra quatre vegades emitint una partícula alfa cada cop i el resultat és un isòtop del plom ( $Z = 82$ ). Escriu les quatre reaccions nuclears de les quatre desintegracions alfa igualades. Quants nucleons té l'isòtop final? Utilitza una taula periòdica per a trobar els símbols dels isòtops.

### 1.2.3 Compte enrere

Com en qualsevol activitat que fa ús de les radiacions ionitzants, cal tenir en compte les propietats dels isòtops radioactius, els seus beneficis i els seus riscos. Els radioisòtops que s'empren en medicina han de ser radioactius durant un temps prou llarg com per a permetre fer mesures, però prou curt per a que no alterin irreversiblement els teixits que es troben al voltant. L'anàlisi química de roques velles ens revela l'existència d'elements que originàriament no formaven part del cristall ja que són productes de la desintegració radioactiva. Mesurant les proporcions relatives dels radioisòtops en una roca, es pot saber quan de temps ha passat des que es va formar el cristall i ens permet esbrinar-ne la seva edat.

Un nucli radioactiu és un nucli inestable que es desintegra a l'atzar. És impossible predir quan es desintegrarà un nucli concret, però es pot desintegrar en qualsevol moment. El fet que es desintegri en un moment determinat ve regit per les lleis de la probabilitat. Si bé no es pot saber a priori quin nucli es desintegrarà ni quan ho farà, sí que es pot predir el comportament d'un nombre molt elevat de nuclis radioactius.

**ACTIVITAT 2 Modelitzar la desintegració radioactiva**

Utilitzeu daus, monedes o un model per ordinador per a simular el decaïment aleatori dels nuclis radioactius. Confeccioneu un gràfic mostrant com varia amb el temps el nombre de nuclis que romanen.

**Nota d'estudi**

Les equacions exponencials apareixen en situacions en les que la variació d'una quantitat és proporcional a aquesta quantitat. En aquest cas el nombre d'àtoms que es desintegren per unitat de temps es proporcional al nombre d'àtoms radioactius que hi són presents.

En l'Activitat 2 heu vist que el nombre de nuclis radioactius en la mostra,  $N$ , varia exponencialment amb el temps,  $t$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (5)$$

on  $\lambda$  és una constant anomenada **constant de desintegració** que només depèn del tipus de nucli, i la constant  $N_0$  és el nombre de nuclis radioactius inicials en la mostra.

L'Equació 5 diu que el nombre de nuclis que es desintegren,  $\Delta N$ , en un cert interval de temps,  $\Delta t$ , és a dir, la velocitat de canvi del nombre de nuclis radioactius, és proporcional al nombre de nuclis inestables,  $N$ , que queden en la mostra. Aquest fet es pot expressar matemàticament com

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} \propto N$$

Una manera de mesurar la velocitat de canvi de  $N$ , és a dir, el nombre de desintegracions per unitat de temps, i per tant el nombre de partícules alfa, beta o gamma emeses per unitat de temps, és fent ús d'un **comptador Geiger-Müller** (Figura 8). El nombre de desintegracions per unitat de temps és el que s'anomena l'**activitat**,  $A$ , d'una mostra i és proporcional al nombre de nuclis radioactius presents en la mostra. Matemàticament ho podem expressar de la següent forma

$$A = kN$$

on  $k$  és una constant de proporcionalitat. La unitat de l'activitat en el SI és el **becquerel** (Bq). Un becquerel correspon a una desintegració per segon.



Figura 8. Un comptador Geiger-Müller és un detector de partícules que mesura la radiació ionitzant (Font Boffy b [CC-BY-SA-3.0], via Wikimedia Commons)

Es pot deduir l'expressió matemàtica de l'activitat i determinar el valor de la constant  $k$ . D'acord amb la definició d'aquesta magnitud, l'activitat indica el ritme de canvi de  $N$  en el temps i s'expressa matemàticament com

$$A = -\frac{dN}{dt}$$

La raó del signe negatiu és que la variació temporal de  $N$  sempre és negativa ja que el nombre de nuclis radioactius que queden en la mostra va disminuint a mida que es desintegren. Així quan es donen valors de l'activitat d'una font radioactiva sempre es donen valors positius.

Donat que el nombre de nuclis inestables,  $N$ , decreix amb el temps de manera exponencial (Equació 5), fent la derivada s'obté

$$A = -\frac{dN}{dt} = -\frac{d}{dt}(N_0 e^{-\lambda t}) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N$$

Aquesta expressió mostra que la constant  $k$  és precisament la constant de desintegració,  $\lambda$ . Així, l'activitat de la mostra ve donada per

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (6)$$

on  $A_0 = \lambda N_0$  correspon a l'activitat inicial de la mostra. L'Equació 6 indica que l'activitat també decreix exponencialment amb el temps. És a dir, la rapidesa amb què es desintegren els nuclis inestables d'una mostra disminueix amb el temps de manera exponencial.

La desintegració radioactiva d'un isòtop es descriu normalment en termes del seu **període de semidesintegració**, és a dir, del temps necessari perquè el nombre de nuclis d'aquest isòtop presents en la mostra es redueixi a la meitat. Alguns isòtops són força inestables i tenen períodes de semidesintegració curts (uns pocs segons o fins i tot menys), mentre que molts altres isòtops tenen períodes de semidesintegració força més llargs, de fins i tot milions d'anys.

El període de semidesintegració,  $t_{1/2}$ , està relacionat amb la constant de desintegració,  $\lambda$ . A partir de la definició del període de semidesintegració, quan  $t = t_{1/2}$ ,  $N = \frac{N_0}{2}$ . Substituint aquests valors a l'Equació 5 es té

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}}$$

Dividint per  $N_0$  i fent la inversa als dos membres de l'equació

$$2 = e^{\lambda t_{1/2}}$$

Prenent logaritmes neperians als dos membres i aïllant  $t_{1/2}$  es pot obtenir finalment l'expressió per a calcular el període de semidesintegració en funció de la constant de desintegració,  $\lambda$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (7)$$

Noteu que  $t_{1/2}$  pot ésser expressat en qualsevol unitat de temps, per exemple en segons, minuts o anys. Llavors, les corresponents unitats per a  $\lambda$  seran  $s^{-1}$ ,  $\text{min}^{-1}$  o  $\text{anys}^{-1}$ .

### Nota d'estudi

Si tenim present que el nombre de partícules d'una mostra està relacionada amb la seva massa a través de dues constants, el nombre d'Avogadro i el nombre de massa, la **lei de desintegració radioactiva** també es pot escriure en termes de la massa:

$$m = m_0 e^{-\lambda t}$$

on  $m_0$  correspon a la massa radioactiva inicial de la mostra i  $m$  a la massa radioactiva que resta després d'haver transcorregut un temps  $t$ . La constant de desintegració del procés és  $\lambda$ .

### ACTIVITAT 3 Mesura del període de semidesintegració

En aquesta activitat utilitzareu una simulació per a mesurar el període de semidesintegració d'un isòtop radioactiu de vida curta. Heu de confeccionar un gràfic que mostri com l'activitat de la mostra varia amb el temps i demostrar que el decaïment radioactiu és clarament exponencial.

Sovint s'utilitza un altra constant per a caracteritzar el decaïment radioactiu: la vida mitjana o temps de vida mitjana. La **vida mitjana**,  $\tau$ , es defineix com l'invers de la constant de desintegració

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (8)$$

Així l'Equació (5) també es pot escriure com

$$N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (9)$$

Si en l'Equació (9) se substitueix  $t = \tau$ , es troba que la vida mitjana representa el temps que ha de passar per a què el nombre de nuclis inicial,  $N_0$ , es redueixi un factor "e". En una mostra radioactiva cada nucli "viu" durant un cert temps abans de desintegrar-se. La vida mitjana representa el temps que un nucli tarda en desintegrar-se com a mitja aritmètica del temps que tarden els nuclis d'una mostra suficientment gran.

### Exemple resultat

L'urani-238 ( ${}^{238}_{92}\text{U}$ ) decau per emissió alfa a tori-234 ( ${}^{234}_{90}\text{Th}$ ). La constant de desintegració del procés és  $1,54 \cdot 10^{-10}$  anys $^{-1}$ .

- (a) Si tenim 1,00 tones d'urani-238 pur, quant de temps haurà de passar perquè l'activitat de l'urani-238 es redueixi a la meitat?
- (b) Quant urani-238 quedarà després de 1.000 milions?
- (c) Quant de temps caldrà esperar perquè la massa d'urani-238 disminueixi fins a 0,80 tones?

### Resolució

(a) El temps necessari per a reduir l'activitat de l'urani-238 a la meitat (és a dir, el període de semidesintegració) no depèn de l'activitat inicial. Emprant l'Equació (7)

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

i substituint el valor de la constant de desintegració, s'obté el període de semidesintegració

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{1,54 \cdot 10^{-10}} = 4,50 \cdot 10^9 \text{ anys}$$

(b) Ara cal emprar l'Equació (5), escrita en termes de la massa,  $m$ , amb  $t = 1,00 \cdot 10^9$  anys

$$m = m_0 e^{-\lambda t}$$

$$\lambda t = 1,54 \cdot 10^{-10} \times 1,00 \cdot 10^9 = 0,154$$

(Noteu que  $\lambda t$  no té unitats)

Substituint aquest valor en l'equació s'obté

$$m = 1 \times e^{-0,154} = 0,857$$

i per tant hi haurà 0,857 tones d'urani-238 romanents.

(c) Torneu a l'Equació 5 amb  $m = 0,80m_0$

$$0,80m_0 = m_0 e^{-\lambda t}$$

Prenent logaritmes neperians a ambdues bandes i aïllant  $t$  s'obté el temps que cal esperar perquè la massa d'urani-238 disminueix un 20%

$$t = \frac{\ln(0,80)}{-\lambda} = \frac{\ln(0,80)}{-1,54 \cdot 10^{-10} \text{ anys}^{-1}} = 1,45 \cdot 10^9 \text{ anys}$$

La Taula 4 mostra una manera lleugerament diferent de relacionar l'edat d'una mostra i els seu període de semidesintegració. La "quantitat" pot ser la massa o el nombre de nuclis.

<i>Períodes de semidesintegració</i>	<i>Quantitat d'isòtop romanent</i>	
	<i>Nombre</i>	<i>Fracció</i>
0	100%	$1 = (1/2)^0$
1	50%	$1/2 = (1/2)^1$
2	25%	$1/4 = (1/2)^2$
3	12.5%	$1/8 = (1/2)^3$

*Taula 4. Quantitat d'isòtop romanent en funció del nombre de períodes de semidesintegració transcorreguts*



Figura 9. Detector de fums

## Qüestions

- 8 Escriviu una equació matemàtica que relacioni la vida mitjana amb el període de semidesintegració. Comproveu aquesta equació amb les dades del poloni-210 que té un període de semidesintegració de 138 dies i una vida mitjana 200 dies.
- 9 Si inicialment hi ha 1.000 nuclis radioactius en una mostra, després d'un període de semidesintegració queden uns ....., després de dos períodes de semidesintegració uns ..... i després de tres períodes de semidesintegració uns ..... Fixeu-vos que  $N$  i temps no són proporcionals: si en un temps igual al període de semidesintegració es desintegren la meitat dels nuclis, en el doble d'aquest temps no es desintegren els que queden!, sinó la meitat dels que restaven sense desintegrar. Quants en quedaran després de "n" períodes de semidesintegració? Aquest comportament exponencial és característic de molts fenòmens físics.
- 10 El període de semidesintegració del radi-226 és de 1.622 anys i el del carboni-14 és de 5.730 anys. Construïu un gràfic que tingui en abscisses el temps fins a 12.000 anys i en ordenades el percentatge de nuclis romanents. Dibuixeu en el mateix gràfic les línies que mostren com varia el percentatge del radi-226 i del carboni-14 amb el temps. Feu un breu comentari (2 o 3 línies) sobre el gràfic obtingut.
- 11 El fluor-18 és un radioisòtop molt important en la indústria radiofarmacèutica. Té un període de semidesintegració curt i és un gran emissor de positrons quan es desintegra. Per això és adient com a traçador en la tomografia per emissió de positrons pel diagnòstic oncològic. Calculeu el temps que ha de passar per a què una mostra de  $0,5 \mu\text{g}$  d'aquest radioisòtop es redueixi a la meitat si la constant de desintegració és  $1,052 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ .
- Solució:** 6586 s
- 12 Molts detectors de fums (Figura 9) utilitzen una petita quantitat d'americi-241 per a ionitzar l'aire contingut en la cambra d'ionització. Busqueu informació sobre:
- Com funciona un detector d'aquest tipus?
  - Quin és el període de semidesintegració d'aquest isòtop?
  - Per a què es fa servir aquest isòtop?
  - Per què no es fan servir isòtops emissor beta o gamma?
- 13 En els últims anys es parla bastant de l'emissió de gas radó a l'atmosfera. El radó-222 es desintegra emetent radiació alfa i té un període de semidesintegració de 3,82 dies. Aquest gas noble no es combina amb altres substàncies i queda lliure en l'atmosfera.
- Escriviu la reacció nuclear del procés de desintegració.
  - Trobeu quant de temps caldrà per a que la seva activitat es redueixi en un 10%.
  - Si s'emeten 3,02 g d'aquest gas a l'atmosfera, quan en quedarà després d'un mes?
- Solució:** 14,47 hores  
**Solució:** 0,014 g
- 14 L'isòtop or-198, que s'utilitza en els tractaments de càncer i en el diagnòstic de malalties del fetge, té un període de semidesintegració de 2,7 dies. Si preneu 5,6 mg d'aquest isòtop quina quantitat quedarà després d'una setmana?
- Solució:**  $0,9 \cdot 10^{-3} \text{ g}$

## Datació

La datació radiomètrica de roques (o de restes arqueològiques) implica essencialment conèixer o assumir la quantitat d'isòtop inicial present en la mostra i conèixer el temps de semidesintegració de l'isòtop. La mesura de la quantitat d'isòtop present en un moment determinat permet calcular el temps transcorregut des de que es va formar la mostra.

Molt del material que constitueix els éssers vius es basa en cadenes d'àtoms de carboni, la gran majoria dels quals són estables: àtoms de carboni-12. Tanmateix, una versió inestable del carboni, el carboni-14, que és químicament idèntic al carboni-12, també forma part del carboni del vostre cos en un mínuscul percentatge. El carboni-14 és un isòtop que presenta desintegració  $\beta^-$ . La desintegració del carboni-14 té un enorme interès científic perquè permet datar materials procedents de plantes o d'animals.

En el següent exemple resolt es detalla més la datació de matèria orgànica a partir del carboni-14. Aquest es forma de manera continua a l'atmosfera degut als raigs còsmics i les plantes l'absorbeixen de l'aire mentre viuen. Aquesta absorció es correspon amb el nivell d'aquest isòtop en l'atmosfera. En morir o ésser consumides per d'altres organismes (humans o altres animals), ja no s'incorpora més carboni-14 i la seva concentració comença a disminuir degut a la seva desintegració radioactiva. Comparant la fracció de carboni-14 romanent en una mostra a la del carboni-14 atmosfèric es pot estimar l'edat de la matèria orgànica.

### Exemple resolt

Els isòtops radioactius han resultat ser uns “rellotges” molt útils. En una excavació arqueològica es troben unes restes de fogueres. En mesurar l'activitat d'un gram de carboni d'aquestes restes s'esbrina que és de 300 comptes/s. El carboni procedent d'una mostra actual de la mateixa espècie vegetal registra 750 comptes·s<sup>-1</sup> i per gram. Sabent que el període de semidesintegració del carboni és de 5.730 anys, calculeu els anys que fa que aquestes fogueres van ser enceses.

### Resolució

Considerem l'Equació 6. Substituint els valors es té

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad \text{i} \quad 300 = 750 e^{-\lambda t}$$

El període de semidesintegració del carboni-14 és 5.730 anys i per tant la constant de desintegració es calcula a partir de l'Equació 7

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{\ln 2}{5730} = 1,21 \cdot 10^{-4} \text{ anys}^{-1}$$

Substituint la constant de desintegració a l'equació de l'activitat i prenent logaritmes neperians a ambdues bandes



$$\ln(300/750) = -1,21 \cdot 10^{-4} t$$

Aïllant  $t$  es troba l'edat de les restes

$$t = \frac{\ln(0,4)}{-1,21 \cdot 10^{-4}} = 7.572,6 \text{ anys}$$

Així doncs, les fogueres van ser enceses fa uns 7.573 anys.

### Qüestions

- 15** Per quin mecanisme assimilen les plantes el carboni-14? I els animals?
- 16** S'ha mesurat l'activitat d'una mostra de fusta presa d'una cova prehistòrica, i s'ha observat que es desintegren 320 àtoms de  $^{14}\text{C}$  per hora, mentre que en una mostra de fusta actual de la mateixa naturalesa la desintegració és de 1.145 àtoms per hora. Totes dues mostres tenen la mateixa massa. Sabent que el període de semidesintegració del carboni-14 és 5.730 anys, trobeu:
- (a) La constant de desintegració del Carboni-14.
- (b) Quan va ser tallada la fusta?

**Solució:**  $1,21 \cdot 10^{-4} \text{ anys}^{-1}$   
**Solució:** 10544,6 anys

#### ACTIVITAT 4 El Joc de la datació radioactiva

En aquesta activitat estimareu l'edat de diferents objectes (roques, ossos, ...) utilitzant la datació radiomètrica amb ajuda d'una miniaplicació.

### 1.3 L'estabilitat nuclear

L'estabilitat d'un nucli és una qüestió d'energia. Si recordeu, en la unitat de gravitació heu vist com l'energia total d'un satèl·lit que descriu una òrbita tancada és negativa. Això indica que cal subministrar-li una certa quantitat d'energia per a "arrancar-lo" de l'òrbita. En el cas del nucli podem raonar d'una manera similar i així, l'energia d'un nucli lligat ha de ser menor que l'energia dels seus constituents (protons i neutrons) considerats individualment.

Com es pot trobar l'energia d'un nucli? Considereu l'àtom estable carboni-12,  $^{12}_6\text{C}$ . D'acord amb la definició de les masses atòmiques, la massa d'aquest isòtop és exactament 12 u. Però si es construeix el nucli sumant la massa de 6 protons més la massa de 6 neutrons, més la massa dels 6 electrons, es troba que els resultats no coincideixen. Hi ha una diferència de -0,0989 u. La massa del nucli lligat és menor que la suma de



les masses dels seus constituents! En formar-se el nucli, s'ha perdut part de la massa (signe negatiu). Aquesta pèrdua de massa és l'anomenat **defecte de massa** ( $\Delta m$ ) i es calcula de la següent manera

$$\Delta m = m(\text{nucli}) - m(\text{nucleons separats}) \quad (10)$$

Donat que la massa es conserva, us podeu preguntar: on ha anat a parar la massa que falta? La resposta a aquesta pregunta la trobem en la fórmula plantejada per Einstein a principis del segle XX

$$E = \Delta mc^2 \quad (11)$$

Aquesta famosa equació mostra que **la massa i l'energia són equivalents**.

Així en el cas del nucli  ${}^{12}_6\text{C}$ , el defecte de massa s'ha transformat en energia. El nucli de  ${}^{12}_6\text{C}$  té menys massa que els seus components separats perquè té menys energia. Cal afegir aquesta energia al nucli per a separar els seus components. Aquesta energia és l'anomenada **energia d'enllaç del nucli**. A l'igual que un satèl·lit en una òrbita tancada es troba en un pou d'energia, el nucli de  ${}^{12}_6\text{C}$  es troba també "al fons" d'un pou de fondària igual a l'energia d'enllaç. Així, per a trencar el nucli, cal "salvar" aquest pou subministrant-li energia.

#### Nota d'estudi

En l'escala subatòmica, la massa s'expressa en unitats de massa atòmica (u) que correspon a la dotzena part de la massa de l'àtom de carboni-12.

$$1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg.}$$

En aquestes unitats les masses dels components dels àtoms són:

- massa del protó = 1,00728 u
- massa del neutró = 1,00866 u
- massa de l'electró = 0,000549 u

L'energia també s'acostuma a expressar en unitats d'eV. Donat que les energies implicades en els processos nuclears són tant elevades es fa servir un múltiple de l'eV, el MeV:

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

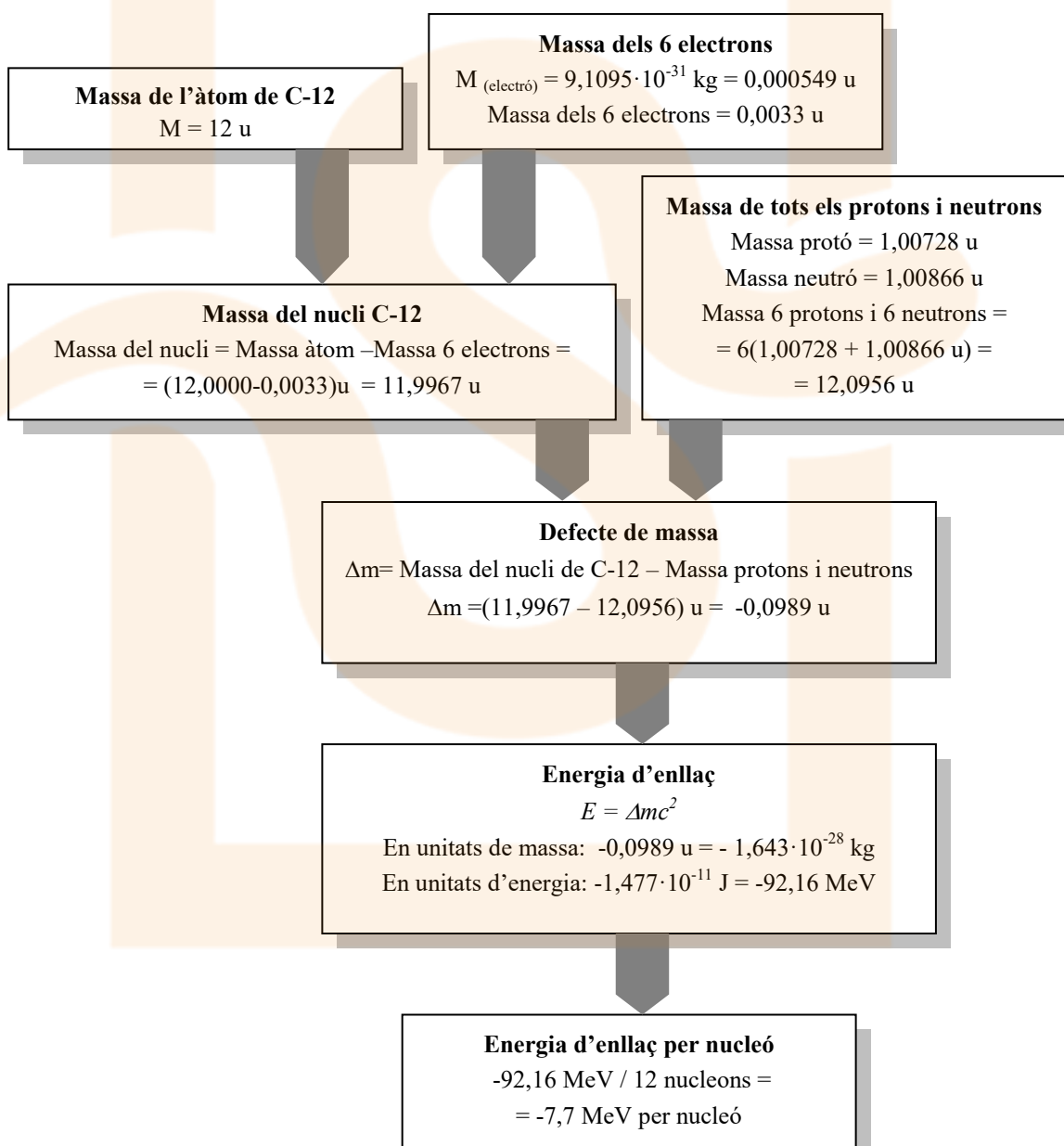
D'acord amb l'equació d'Einstein massa i energia són equivalents, a nivell subatòmic les unitats de massa i d'energia s'utilitzen indistintament. La conversió entre unes i altres unitats és

$$1 \text{ u} = 931,3 \text{ MeV}$$

## Exemple resolt

Determineu l'energia d'enllaç per nucleó del nucli de carboni-12.

**Resolució.** En primer lloc partiu dels components de l'àtom de carboni-12 i trobeu la massa del nucli. Segon trobeu el defecte de massa si un àtom de carboni-12 té una massa de 12 u. Calculeu l'energia d'enllaç emprant l'equació d'Einstein i finalment dividiu aquesta energia pel nombre de nucleons presents en el nucli. Esquemàticament:



Si calculeu l'energia d'enllaç per nucleó per a cada element de la taula periòdica,  $E/A$ , com en l'exemple resolt de l'apartat anterior, i la representeu en funció del nombre màssic  $A$ , s'obté una corba que ens indica que quan més petita (més gran negativament) és l'energia d'enllaç més lligat està el nucli i per tant més estable és (Figura 10).

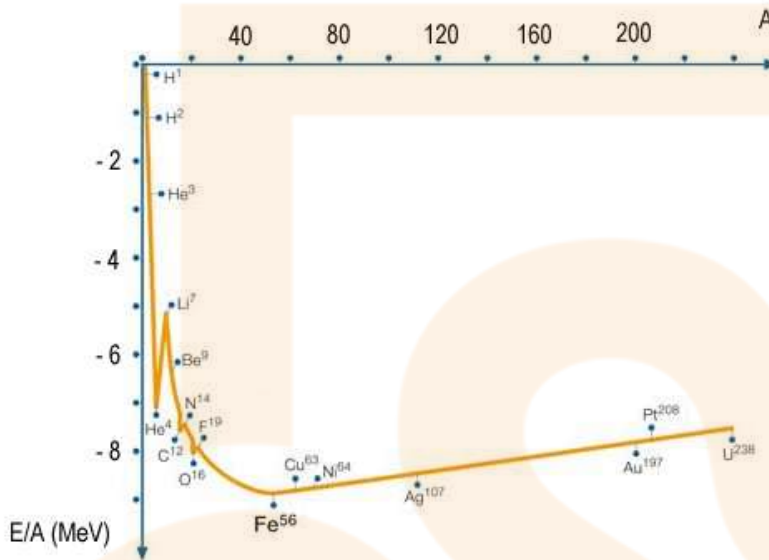


Figura 10. Representació gràfica de l'energia d'enllaç per nucleó,  $E/A$ , en funció d' $A$

Analitzant la corba podeu observar que presenta una **vall d'estabilitat** al voltant del ferro. Aquest mínim indica que és l'element més estable amb una energia d'enllaç per nucleó al voltant de -8,8 MeV. Això vol dir que cal subministrar al nucli uns 8,8 MeV per a arrancar-li un nucleó.

## Qüestions

17 Sabent que  $1 \text{ u} = 1,66056 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ , calculeu l'energia equivalent en MeV. Dada:  $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .

18 Calculeu l'energia d'enllaç en unitats del SI en la construcció d'un nucli de  ${}^{12}_6\text{C}$  a partir del defecte de massa  $\Delta m = -0,0989 \text{ u}$ .

**Solució:** - 92,2 MeV

19 Sabent que el nucli d' O-16 té 8 protons al nucli i la seva massa és 15,9949 u, calculeu:

- El seu defecte de massa.
- L'energia d'enllaç en unitats del SI.
- L'energia d'enllaç per nucleó, també en unitats SI.

Dades:  $m(\text{protó}) = 1,0073 \text{ u}$ ;  $m(\text{neutró}) = 1,0087 \text{ u}$ ;  $1 \text{ u} = 1,6606 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ;  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

**Solució:** -0,1331 u  
**Solució:** -1,9893  $\cdot 10^{-11} \text{ J}$   
**Solució:** -1,2433  $\cdot 10^{-12} \text{ J}$

## Qüestions

**20** Calculeu l'energia d'enllaç per nucleó del N-14. Doneu el resultat en Mev.

Dades:  $m(N) = 14,00307 \text{ u}$ ;  $m(p) = 1,00728 \text{ u}$ ;  $m(n) = 1,0086 \text{ u}$ ;  
 $1u = 1,6606 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ;  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .

**Solució:** -7,19 MeV

**21** Calculeu l'energia d'enllaç per nucleó dels núclids  ${}^{11}_5\text{B}$  i  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$  i raoneu quin és més estable.

Dades:  $m(\text{B}) = 11,009305 \text{ u}$ ;  $m(\text{Rn}) = 222,017574 \text{ u}$ ;  $m(p) = 1,007825 \text{ u}$ ;  $m(n) = 1,008665 \text{ u}$ ;  $1u = 1,6606 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ;  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

**Solució:** Bor:  $-1,11 \cdot 10^{-12} \text{ J/nucleó}$ ; Radó:  $-1,23 \cdot 10^{-12} \text{ J/nucleó}$

### 1.3.1 Reaccions nuclears

Els elements amb nombre màssic inferior al del ferro si es fusionen, és a dir, s'uneixen, poden formar un nucli de major nombre màssic i, per tant, més estable. Al contrari, els elements de major nombre màssic, per a estabilitzar-se han de reduir el seu nombre màssic, és a dir, s'han de trencar en fragments més petits, (**núclids fills**) cada un dels qual serà més estable que el nucli d'on parteix (**núclid pare**).

Tant en un cas com l'altre, es parla de reaccions nuclears que poden ser naturals o induïdes artificialment. En aquestes reaccions s'allibera o s'absorbeix una energia anomenada **energia de la reacció**, que ve donada per la relació d'Einstein (Equació 11). Si en la reacció nuclear s'allibera energia es diu que la reacció és **exotèrmica**. En aquest cas la massa de les partícules incidents és més gran que la de les partícules resultants i el valor de l'energia és positiu. Si la massa de les partícules incidents és més petita que la de les partícules resultants, cal subministrar energia per a que la reacció nuclear tingui lloc. En aquest cas es diu que la reacció és **endotèrmica**.

### Exemple resolt

Determineu l'energia de la reacció  ${}^1_1\text{p} + {}^7_3\text{Li} \rightarrow 2{}^4_2\text{He}$

Dades:  $m(\text{protó}) = 1,007825 \text{ u}$ ;  $m(\text{Li-7}) = 7,016004 \text{ u}$ ;  $m(\text{He-4}) = 4,002603 \text{ u}$ ;  $1 \text{ u} = 931,3 \text{ MeV}$ .

Calculem en primer lloc la massa de les partícules incidents

$$m(\text{inicial}) = m(\text{protó}) + m(\text{Li-7}) = 1,007825 + 7,016004 = 8,023829 \text{ u}$$

Tot seguit, calculem la massa final de la reacció

$$m(\text{final}) = m(\text{He-4}) + m(\text{He-4}) = 2 \times 4,002603 = 8,005206 \text{ u}$$

Observant els resultats, es pot veure que en la reacció nuclear s'ha perdut una certa quantitat de massa. Com que la massa és equivalent a l'energia, aquesta diferència de massa

$$m(\text{inicial}) - m(\text{final}) = 0,018623 \text{ u}$$

s'ha convertit en una energia de

$$E = 0,018623u \times \frac{931,3\text{MeV}}{1u} = 17,34\text{MeV}$$

Aquesta energia positiva és alliberada en el procés nuclear, de manera que la reacció ha estat exotèrmica.

## Qüestions

Les dades de les masses dels diferents isòtops les podeu trobar a <http://www.nist.gov/pml/data/comp.cfm> (cal que en la pàgina web marqueu l'opció "all isotopes").

- 22** Calculeu l'energia alliberada en la reacció
- $${}_{8}^{16}\text{O} \rightarrow {}_{14}^{28}\text{Si} + {}_{2}^{4}\text{He}.$$

Dades:  $1u = 931,3\text{ MeV}$ .

**Solució:** 9,59 MeV

- 23** Calculeu l'energia despesa en la reacció de fissió
- $${}_{92}^{235}\text{U} + {}_{0}^{1}\text{n} \rightarrow {}_{54}^{139}\text{Xe} + {}_{38}^{95}\text{Sr} + 2{}_{0}^{1}\text{n}$$

Dades:  $m({}_{0}^{1}\text{n}) = 1,008665\text{ u}$ ;  $1u = 1,6606 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$ ;  $c = 3 \cdot 10^8\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

**Solució:**  $2,946 \cdot 10^{-11}\text{ J}$

- 24** Entre els materials gasosos que poden escapar d'un reactor nuclear es troba el  ${}_{53}^{131}\text{I}$ , que és molt perillós per la facilitat amb què el iode es fixa a la glàndula tiroide.

- (a) Escriviu la reacció de desintegració sabent que es tracta d'un emissor  $\beta^{-}$ .
- (b) Calculeu, en unitats SI, l'energia total alliberada pel núclid en desintegrar-se.

Dades:  $m(\beta^{-}) = 5,4891 \cdot 10^{-4}\text{ u}$ ;  $1u = 1,6606 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$ ;  $c = 3 \cdot 10^8\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

**Solució:**  $7,3649 \cdot 10^{-14}\text{ J}$

## Reaccions de fissió i fusió nuclears

En la filmació es mostra una animació de com tenen lloc les reaccions nuclears de fissió i de fusió de nuclis atòmics. La web de la filmació és la següent

[https://www.youtube.com/watch?feature=player\\_embedded&v=tcYBjH45HH4](https://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=tcYBjH45HH4)

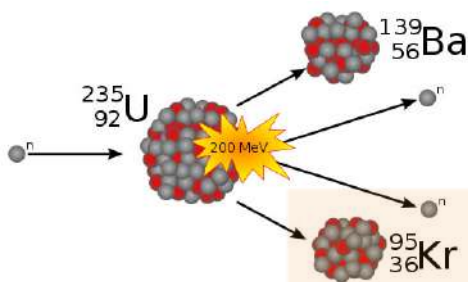
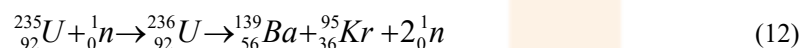


Figura 11. Reacció nuclear corresponent a l'Equació 12 (Font Stefan-XP [CC-BY-SA-3.0], via Wikimedia Commons)

### Fissió nuclear

La **fissió nuclear** té lloc en els nuclis amb un nombre màssic  $A$  superior al mínim de la vall d'estabilitat. S'aprofita la diferència d'energia que apareix quan un nucli d' $A$  gran es trenca en dos fragments més petits (amb  $A$  més petit) i més estables (més propers a la vall). En guanyar estabilitat en el procés s'allibera una gran quantitat d'energia (energia de la reacció de fissió). Per exemple, un nucli com l'urani 235 captura un neutró i esdevé urani-236 que és altament inestable. El nucli de l'urani-236 es trenca en dos nuclis més petits que es trobaran més a prop del mínim de la corba d'estabilitat. Una de les possibles reaccions que corresponen a la fissió de l'urani-235 ve donada per



Els productes de la reacció de fissió anterior són el bari-139, el cripton-95 i neutrons. Es tracta d'una reacció exotèrmica que allibera gran quantitat d'energia (la fissió d'un nucli d'urani-235 genera una energia d'uns 200 MeV). Observeu que apareixen 2 neutrons que podran ser absorbits per altres nuclis d'urani-235 iniciant-se una **reacció en cadena** (Figura 12). Les reaccions en cadena poden controlar-se absorbint part dels neutrons emesos tal com es fa en els reactors de les centrals nuclears: cal assegurar-se que els neutrons alliberats són els adients per a sostenir la reacció en un règim estacionari. En aquestes centrals l'energia alliberada per la reacció de fissió s'utilitza per a produir vapor d'aigua i generar energia elèctrica. Si pel contrari, la reacció en cadena no es controla la reacció es descontrola i la gran quantitat d'energia alliberada produeix una explosió nuclear, tal com passa en bomba atòmica.

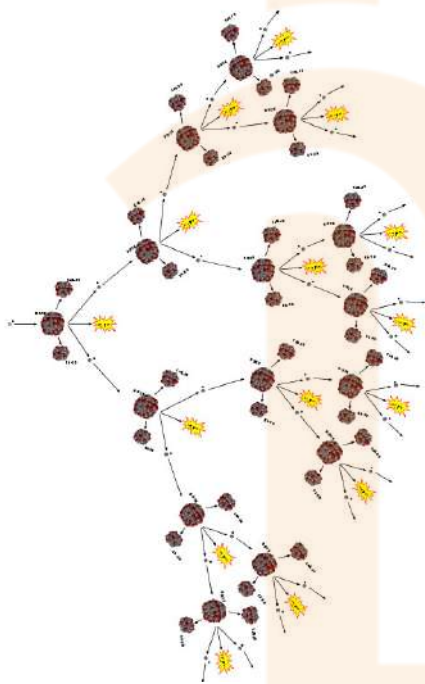


Figura 12. Reacció en cadena (Font Stefan-XP [CC-BY-SA-3.0], via Wikimedia Commons)

### ACTIVITAT 5 Fissió nuclear



En aquesta activitat estudiareu el procés de la fissió nuclear i les condicions perquè es produeixi, amb ajuda d'una miniaplicació.

[http://phet.colorado.edu/simulations/sims.php?sim=Nuclear\\_Fission](http://phet.colorado.edu/simulations/sims.php?sim=Nuclear_Fission)

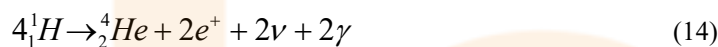
### Fusió nuclear

Torneu a la corba d'estabilitat de la Figura 10. Els elements de nombre màssic petit es troben fora del mínim d'energia d'enllaç, a l'esquerra. Si dos d'aquests elements es poguessin unir formarien un element amb un nombre màssic  $A$  major i que es trobaria més a prop del fons de la vall. En aquest procés de fusió s'obtidria un nucli més estable i, el que és més interessant, una gran quantitat d'energia generada a partir del defecte de massa. La reacció seria exotèrmica.

Aquest procés es coneix amb el nom de **fusió nuclear** i és el tipus de reacció nuclear que té lloc en l'interior de les estrelles com el Sol. El Sol està format majoritàriament per hidrogen i heli. Del gràfic de la Figura 10 es pot deduir que, quan els nuclis d'hidrogen es fusionen per a formar heli, s'allibera una energia de l'ordre d'alguns MeV per nucleó. Aquesta

energia es manifesta fonamentalment amb l'emissió de fotons d'alta energia (raigs gamma) i neutrins. Una energia de l'ordre dels MeV no és una gran quantitat d'energia, però el que el gràfic ens mostra és l'energia d'enllaç per cada nucleó. Si en 1 g d'hidrogen hi ha de l'ordre de  $6 \cdot 10^{23}$  nuclis, l'energia alliberada en la fusió d'1 g d'hidrogen és de l'ordre de bilions de joules –molt més que l'energia de qualsevol reacció química emprant la mateixa quantitat de material.

Les reaccions de fusió que tenen lloc en les estrelles depenen de la seva temperatura i de la pressió. Fins l'any 1938 els detalls de les reaccions nuclears eren desconeguts. Hans Bethe i Charles Critchfield van demostrar que en el Sol té lloc una reacció en cadena protó-protó que allibera energia (Figura 13). La cadena té diverses etapes, i l'efecte global és



Quatre protons es fusionen per a formar un nucli d'heli, dos positrons, dos neutrins, raigs gamma i energia. Els dos positrons s'anihilen amb els 2 electrons produint 2 fotons addicionals. En les estrelles com el Sol, la temperatura interna i la pressió són suficientment altes per a mantenir les reaccions nuclears, però no excessives, de manera que les reaccions tenen lloc lentament. Des de la seva formació fa uns 5.000 milions d'anys, el Sol ha transformat només la meitat de l'hidrogen inicial, així que encara brillarà durant uns altres 5.000 milions d'anys.

Seria molt interessant poder controlar les reaccions de fusió nuclear a la Terra per a generar electricitat, donat que d'hidrogen n'hi ha moltíssim (a l'aigua) i les reaccions de fusió produeixen una quantitat de residus radioactius molt més petita que les reaccions de fissió i d'una vida mitjana més baixa. Desafortunadament, per a aconseguir que els nuclis d'hidrogen es fusionin cal que aquests xoquin a gran velocitat, si no és així, la repulsió electrostàtica no permet que s'acostin suficientment com per a reaccionar. A més, perquè els nuclis d'hidrogen xoquin entre ells, la densitat d'aquestes partícules també cal que sigui molt gran.

A l'interior d'una estrella com el Sol, degut a l'enorme pressió que exerceix tot el material que el forma, s'arriba a temperatures superiors als  $10^7$  K, que és una temperatura suficientment gran per a què es doni la reacció de fusió de l'hidrogen. Aquestes temperatures es poden produir en laboratoris de la Terra (Figura 14), però és difícil mantenir-les durant molt de temps. A més hi ha el problema addicional de controlar un plasma (gas ionitzat) d'hidrogen a tan alta temperatura, ja que vaporitzaria les parets de qualsevol contenidor sòlid.

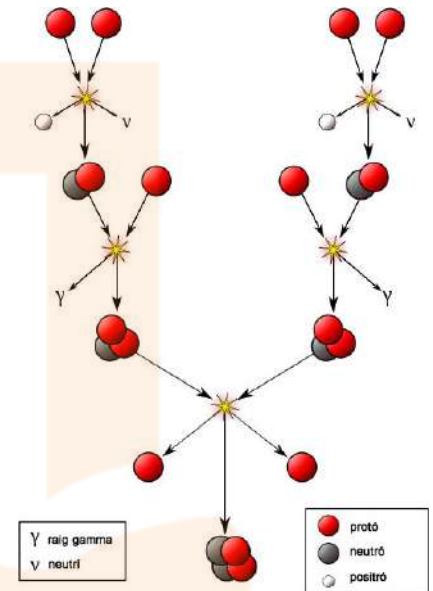


Figura 13. Cadena protó-protó (Font Borb [CC-BY-SA-3.0], via Wikimedia Commons)



Figura 14. Interior d'un prototipus de reactor nuclear de fusió (Font CRPP-EPFL [CC-BY-SA-2.5], via Wikimedia Commons)



Partícula	Massa / $10^{-27}$ kg
${}^4_2\text{He}$	6,645
${}^1_1\text{H}$	1,673
$e^+$	$9,110 \cdot 10^{-4}$
$e^-$	$9,110 \cdot 10^{-4}$
$n$	1,674

Taula 5. Massa de les partícules de la reacció en cadena protó-protó. Dades per a la Qüestió 26

## Qüestions

25 El Sol té una massa de  $1,99 \cdot 10^{30}$  kg i emet una energia a raó de  $3,84 \cdot 10^{26}$  W.

- Quina quantitat d'energia emet el Sol en 1.000 anys?
- Si aquesta energia es tornés a convertir en massa, quina seria aquesta massa?
- Quin tant per cent de la massa del Sol representa aquesta massa?
- Quin tant per cent de massa perdrà el Sol al llarg de la seva vida, si se li prediu una vida d'uns  $10^{10}$  anys?

**Solució:**  $1,21 \cdot 10^{37}$  J  
**Solució:**  $1,35 \cdot 10^{20}$  kg  
**Solució:**  $6,78 \cdot 10^{-9}$  %  
**Solució:** 0,07%

26 Reaccions de fusió.

- Escriuiu una equació que mostri l'efecte total de la reacció de fusió en cadena protó-protó. Anoteu els subíndexs i els superíndexs per a demostrar que tant la càrrega elèctrica com el nombre màssic es conserven.
- Empreu les dades de la Taula 5 per a calcular el defecte de massa associat amb la producció d'un nucli de  ${}^4_2\text{He}$  en la reacció en cadena protó-protó.
- Quanta energia s'allibera quan es produeix un nucli de  ${}^4_2\text{He}$ ? Compareu aquesta energia amb l'energia alliberada en una reacció de fusió.
- Quants nuclis d'hidrogen s'han de consumir per segon per a mantenir la lluminositat del Sol de  $3,84 \cdot 10^{26}$  W?
- La massa del Sol és  $1,99 \cdot 10^{30}$  kg. Tenint en compte que quan es va formar el Sol a partir de la nebulosa solar el 75 % de la seva massa era hidrogen i que aproximadament el 15 % d'aquest hidrogen es transformarà en heli, estimeu la vida del Sol. Expressau la resposta en anys.  
Dada: 1 any  $\approx 3 \cdot 10^7$  s

**Solució:**  $4,52 \cdot 10^{29}$  kg  
**Solució:**  $4,41 \cdot 10^{-12}$  J per nucli d'He  
**Solució:**  $3,78 \cdot 10^{38}$  nuclis d'H cada segon  
**Solució:**  $1,3 \cdot 10^{10}$  anys aproximadament.

## Reaccions nuclears naturals: cadenes radioactives

A la natura hi ha processos que de manera espontània emeten radiacions ionitzants en forma de partícules alfa, beta o raigs gamma. L'urani-238 és un element radioactiu que es desintegra en elements més estables de manera espontània seguint el que s'anomena una **cadena radioactiva**. Aquest element es transforma en un nucli fill (el tori-234) que a la seva vegada es desintegra en altres nuclis fills fins que al final d'aquesta cadena s'obté l'element plom-206 que és estable.



## ACTIVITAT 6 Cadenes radioactives



En aquesta activitat construireu algunes cadenes radioactives que tenen lloc de manera natural.

Els isòtops urani-238 i tori-232 es troben de manera natural en les roques, fet que permet datar-les. Tenen períodes de semidesintegració molt grans (el de l'urani-238 és de 4.460 milions d'anys i el del tori-232 de 14.050 milions d'anys) i s'atansen molt lentament a la vall d'estabilitat.

Tal com heu vist en l'Activitat 6, en algunes fases de la desintegració del tori-232 apareix el radó-220 que es transmuta en poloni-216 emetent una partícula alfa. En molts materials de construcció es troba el tori-232 (també cal dir que es troba en el sòl sobre el que es construeixen les cases). Així que a dins de les nostres cases hi ha una petita quantitat de radó. Si la casa no està ben ventilada, hi ha el risc d'inhalar-lo i en ser un emissor alfa pot tenir greus conseqüències per a la nostra salut si les concentracions són altes!

### 1.3.2 Reaccions nuclears sota control

A llarg de la unitat heu vist com el fenomen de la radioactivitat està present en el nostre entorn (molts fenòmens naturals són de caire radioactiu). El coneixement de la física nuclear i el domini de la tecnologia que ha permès el control de l'energia nuclear i dels fenòmens radioactius ha donat peu també a la recerca d'aplicacions pel benefici de la societat. A continuació es presenten dos dels àmbits d'aplicació de la física nuclear: les aplicacions mèdiques i l'obtenció d'energia.

## Energia nuclear

El programa "Quèquicom" us parla de l'energia nuclear, dels seus efectes i de les seves aplicacions.

<https://www.ccma.cat/tv3/alcarta/quequicom/energia-nuclear/video/3492750/>

## Medicina nuclear

La medicina nuclear utilitza isòtops radioactius per a la diagnòsi d'una malaltia o pel seu tractament. Les aplicacions mèdiques de la radioactivitat es poden classificar en tècniques de radiodiagnòstic, tècniques de radioteràpia i recerca.

La **radiodiagnòsi** es fonamenta en el fenomen de la desintegració radioactiva dels isòtops (radiofàrmacs o radiotraçadors) i de la detecció de la radiació emesa. El radiofàrmac, format per l'isòtop radioactiu i un fàrmac transportador, se subministra al pacient i es distribueix per diferents òrgans segons l'isòtop emprat. La distribució del radiotraçador es detecta mitjançant un sistema de captació d'imatges: una càmera gamma (gammagrafia) o una tomografia d'emissió de positrons (TEP), i

la informació s'emmagatzema digitalment. El processat de les dades dona les imatges de la distribució del radiofàrmac a partir de les qual es pot fer la diagnosi.

Les imatges obtingudes, a diferència de les imatges de radiologia que mostren l'anatomia del sistema examinat, són imatges que mostren el grau de funcionalitat dels òrgans explorats, és a dir, si algun òrgan té una activitat metabòlica massa alta o massa baixa. Algunes de les proves diagnòstiques més habituals són les gammagrafies òssies, l'estudi de la glàndula tiroides, les tomografies del cervell i les gammagrafies renals entre d'altres.

La **radioteràpia** utilitza les radiacions ionitzants pel tractament contra el càncer. Les radiacions ionitzants actuen sobre el tumor destruint les cèl·lules malignes i impeding que creixin i es reproduïxin. De la mateixa manera que es destrueixen cèl·lules tumorals es destrueixen també cèl·lules sanes. Un isòtop utilitzat sovint en radioteràpia és el cobalt-60 (bomba de cobalt). Una font de cobalt-60 emet raigs gamma que es dirigeixen a les zones del cos a tractar. Per a evitar danys importants en els teixits sans, s'irradia el pacient amb feixos de diversos angles que interseccen en el tumor, essent la dosi de radiació absorbida en la zona tumoral més gran que en la resta del cos. Els avenços científics de la física nuclear, l'oncologia i la tecnologia milloren la precisió, la qualitat i la indicació dels tractaments de radioteràpia.

Les proves de radiodiagnòstic i la radioteràpia es realitzen en unitats especialitzades dels hospitals. En aquestes unitats o departaments de medicina nuclear no només treballen metges oncòlegs i personal sanitari especialista en medicina nuclear, sinó que també hi ha físics nuclears, enginyers o tecnòlegs especialistes en els equips que s'utilitzen, biòlegs i radiofarmacèutics.

En l'àmbit de la **recerca** mèdica també s'utilitzen isòtops radioactius. L'ús d'aquests isòtops permet investigacions que no podrien fer-se d'altres maneres. Es pot detectar el camí que segueix un radiotraçador dins de l'organisme des de la seva administració, la proporció que va a parar a cada òrgan, el temps que tarda en arribar, etc. Per exemple, la tomografia per emissió de positrons (TEP) permet veure quines zones del cervell estan actives en cada situació (mentre es llegeix, s'escolta música o s'observa un quadre) detectant la presència d'aquestes substàncies marcades que arriben a les zones del cervell que les utilitzen en cada moment (Figura 15).

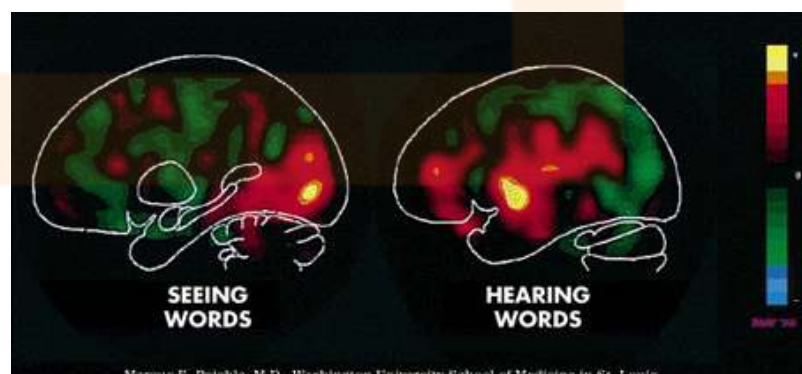


Figura 15. Imatge per TEP del cervell d'una persona que està veient paraules en un vídeo (esquerra) i que escolta paraules amb uns auriculars (dreta). Fixeu-vos que depenent de la funció que realitza el cervell les zones que s'activen són unes o altres.

## Qüestions

- 27 Quines característiques han de tenir els isòtops utilitzats en els radiofàrmacs des del punt de vista de la desintegració radioactiva?
- 28 L'esquelet pot visualitzar-se injectant a un pacient fosfonats marcats amb tecneci-99 i detectant les partícules gamma emeses (gammagrafia òssia). El període de semidesintegració del Tc-99 és de 6 hores.
- (a) Quina part de tecneci quedarà al cos del pacient al cap de 24 hores? Suposeu que el cos no n'elimina gens.
- (b) Quines diferències hi ha entre la imatge obtinguda per aquest mètode i una radiografia de raigs-X?

Solució: 1/16

- 29 Se sospita que una pacient pateix una anèmia hemolítica. Se sotmet la pacient a una prova diagnòstica marcant amb crom-51, de període 28 dies, uns glòbuls vermells de la mateixa pacient que posteriorment se li tornen a injectar. Després se li extreuen mostres de sang cada setmana i s'analitza l'activitat radioactiva. Els resultats es mostren a la Figura 16. De manera simultània a aquest procés de desintegració radioactiva, els glòbuls vermells presenten també una desaparició biològica natural. En una persona sana la meitat dels glòbuls vermells desapareixen de la circulació al cap d'uns 28 dies, mentre que entre els malalts d'anèmia hemolítica desapareixen a un ritme més ràpid. Quin diagnòstic li faries a aquesta pacient?

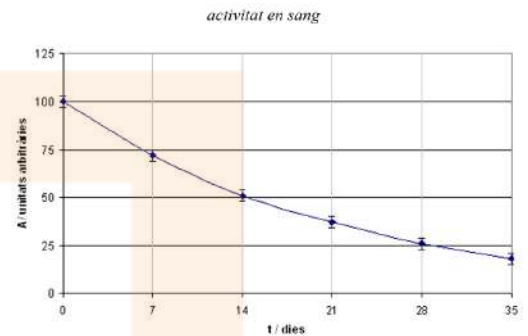


Figura 16. Gràfic per a la Qüestió 29

### ACTIVITAT 7 Medicina nuclear

Dins del camp de la medicina nuclear hi ha moltes proves diagnòstiques o de radioteràpia de les qual n'heu sentit a parlar: gammagrafies, tomografies per emissió de positrons (TEP), tomografies per emissió d'un sol fotó (SPECT, de l'anglès "Single Photon Emission Computerised Tomography"), braquiteràpia, radioteràpia externa, quimioteràpia. Feu una recerca sobre una d'aquestes tècniques i prepareu una presentació per a comunicar a la resta de la classe els seus fonaments i les seves aplicacions.

### Centrals nuclears

El 47% de l'energia bruta que es produeix a Catalunya és d'origen nuclear provinent de centrals nuclears de fissió.

### Balanços energètics a Catalunya

L'Institut Català d'Energia mostra a l'apart "Balanços energètics de Catalunya" les dades sobre consums i generació d'energia a Catalunya.

Per accedir-hi cal anar a

<http://icaen.gencat.cat/ca/energia/>

Accediu a la pestanya Estadístiques i tot seguit aneu a Estadístiques energètiques anuals de Catalunya.

La part principal d'una central nuclear és el reactor nuclear. En el nucli del reactor té lloc la reacció de fissió de l'urani-235 per l'impacte d'un neutró (Equació 12). Aquesta reacció produeix una gran quantitat d'energia (uns 200 MeV) i neutrons molt ràpids que fissionen altres nuclis, produint així una reacció en cadena. Aquesta energia alliberada s'utilitza per a produir vapor d'aigua a gran pressió, el qual acciona un sistema de turbines que, connectades a uns generadors elèctrics, produeixen energia elèctrica.

### Fuencionament d'un reactor nuclear de fissió

El CSN ens mostra com funciona un reactor nuclear de fissió.

<https://www.csn.es/documents/10182/1007670/Centrales+nucleares+%28infograf%29>

El gran problema de l'energia nuclear de fissió és la gestió dels residus radioactius que es produeixen. L'objectiu principal de la destrucció o de l'emmagatzematge d'aquests residus és protegir la humanitat i el medi ambient. Això significa que cal aïllar-los, diluir-los o transmutar-los de manera que la radiació que arribi a la biosfera sigui innòcua. Fins avui el sistema més habitual consisteix en enterrar els residus a gran profunditat en caveres preparades. La transmutació en altres radioisòtops de vida més curta també és un altre mètode proposat en la gestió d'aquest residus. També s'ha parlat d'emmagatzemar-los en l'espai.

### Centrals, residus nuclears i el seu emmagatzematge

El Consell de Seguretat nuclear (CSN) us parla de les centrals nuclears espanyoles i dels residus nuclears. Les infografies que mostra la web també us poden ser molt útils per a repassar i aprofundir en el tema.

<http://www.csn.es/index.php/ca/infografias>

#### ACTIVITAT 8 Energia nuclear sí – energia nuclear no?

*“L'ús de l'energia nuclear ha estat i és un tema de debat actual. Hi ha poques centrals nuclears a l'Estat Espanyol i la construcció de noves centrals està aturada degut a la preocupació ciutadana sobre el tema. D'una altra banda la demanda creixent de potència elèctrica per part de la societat posa els governs entre les cordes. Països com França o Japó generen la major part de la seva electricitat a partir de l'energia nuclear i van endavant. És una qüestió de que cal fer s'ha de fer? Cal que fer els deures ja, o no? “*

En aquesta activitat és pretén crear un debat a l'aula sobre els beneficis i els riscos de l'energia nuclear i com decidir si cal defensar o deixar de banda aquest tipus d'energia.

## L'energia del Sol a la Terra: el projecte ITER

L'augment de la població del planeta, la millora de les condicions de vida i del benestar de la població i la creixent activitat industrial i econòmica dels països originen una demanda de potència elèctrica que va en augment. La necessitat de reduir l'ús de combustibles fòssils degut a les seves limitacions i al seu negatiu impacte mediambiental fan necessari desenvolupar altres fonts d'energia. La fusió nuclear és una opció per al futur ja que és una font d'energia gairebé il·limitada.

El **projecte ITER** (de l'anglès International Thermonuclear Experimental Detector) és un projecte internacional a escala mundial. Aquest projecte pretén determinar la viabilitat de la producció d'electricitat en centrals nuclears de fusió. L'objectiu del projecte és produir energia elèctrica a partir d'un plasma d'hidrogen confinat magnèticament i a una temperatura de l'ordre dels 100 milions de °C.

El reactor experimental de fusió nuclear està basat en el disseny rus, anomenat **tokamak**. El tokamak és una gran bobina toroïdal (geometria de tortell) que produeix un camp magnètic que confina els feixos de plasma a molt alta temperatura sense tocar les parets del reactor (Figura 14).

### El projecte ITER

La pàgina web del projecte us parla, entre altres aspectes, del Tokamak i de la fusió.

<http://www.iter.org/>

## 1.4 Apartat de síntesi

En aquest apartat heu estudiat la física nuclear. Començant pels riscos i pels beneficis que suposen les radiacions ionitzants, s'han treballat les desintegracions radioactives que es coneixen, les seves propietats i la seva quantificació. La radioactivitat és un fenomen que depèn fonamentalment de l'estabilitat nuclear, per això s'han introduït l'energia d'enllaç dels nucleons per a formar els nuclis atòmics i les reaccions nuclears que tenen lloc. Finalment heu vist algunes de les aplicacions de la física nuclear a la medicina i per a l'obtenció d'energia.

Des del descobriment de la radioactivitat l'any 1896 per Henri Becquerel, quan estudiava les propietats de l'urani, les aportacions a l'estudi dels fenòmens radioactius més importants són degudes a Marie Curie. Amb una gran intuïció i perseverança admirables, donat que les condicions de treball no eren gaire favorables al principi de les seves investigacions, Marie Curie va aconseguir ampliar substancialment el significat i la rellevància del descobriment de Becquerel, i va descobrir dos nous elements químics: el poloni i el radi.

**ACTIVITAT 9 Marie Curie**

Marie Curie ha estat un dels personatges més cèlebres del món científic. La seva biografia reuneix tot allò que cal per fer d'ella una heroïna, una heroïna amb dos premis Nobel: un de química i un de física.

En aquesta activitat investigareu sobre la figura de Marie Curie, els descobriments de la qual foren fonamentals per a la nova física del segle XX





## 2 La nova física

Una de les proves que poden fer els metges per a estudiar com l'Alzheimer afecta al cervell és dur a terme una Tomografia per Emissió de Positrons (TEP o PET, de l'anglès Positron Emission Tomography). La tomografia per emissió de positrons és una tècnica de diagnòstic per imatge capaç de mesurar l'activitat metabòlica dels diferents teixits del cos humà, especialment del sistema nerviós central. Aquesta tècnica es basa en detectar i analitzar la distribució d'un radioisòtop administrat amb una injecció en l'interior del cos. S'injecta glucosa marcada amb un radioisòtop, per exemple l'oxigen-15, i així s'obté glucosa detectable mitjançant l'emissió d'un senyal radioactiu. Aquesta isòtop té una vida mitjana breu (uns dos minuts) i decau emetent un positró. Aquest positró dura poc: viatja una distància molt curta (1 mm o menys) ja que en el camí xoca amb un electró d'algun dels àtoms que hi ha al voltant, anihilant-se mútuament. És a dir, el positró i l'electró es desintegren i converteixen tota la seva massa en energia que s'emet com a radiació electromagnètica (dos fotons). La matèria es destrueix, però l'energia encara hi resta en forma d'un parell de fotons molt energètics (raigs gamma) que viatgen en sentits oposats (Figura 17). Els detectors que hi ha

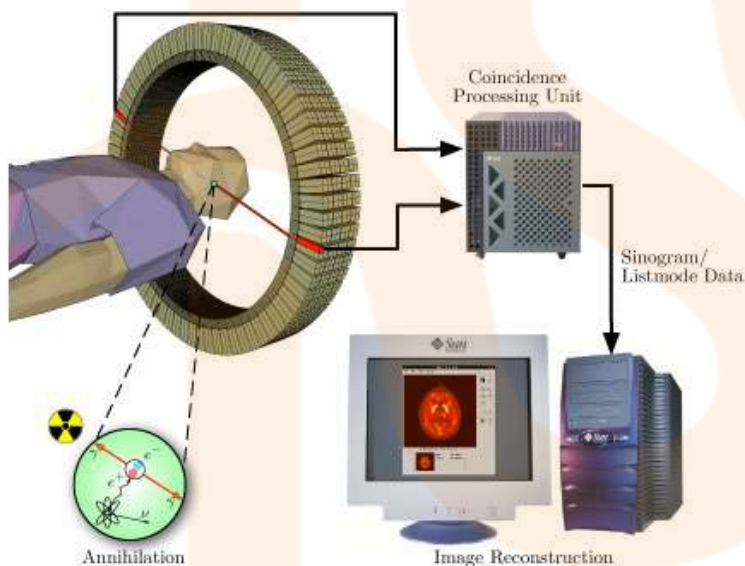


Figura 17. Esquema del procés físic de desintegració del radioisòtop, la detecció dels fotons i el processament de dades en la TEP (Font Jens Langner [Public Domain], via wikimedia commons)

al voltant del cap del pacient els detecten. Després de molts esdeveniments d'aquest tipus, un ordinador genera un mapa de "lluminositat" del cervell que ens dona la seva activitat, i així sabem quines parts del cervell absorbeixen més o menys glucosa (Figura 18).

Ni la tecnologia del sistema de detecció dels raigs gamma creats ni els fotons ni els positrons són conceptes de la física clàssica. Aquests pertanyen a un altre món, una altra escala on la física a la que Lord Kelvin es referia en la introducció de la unitat no podia arribar a donar

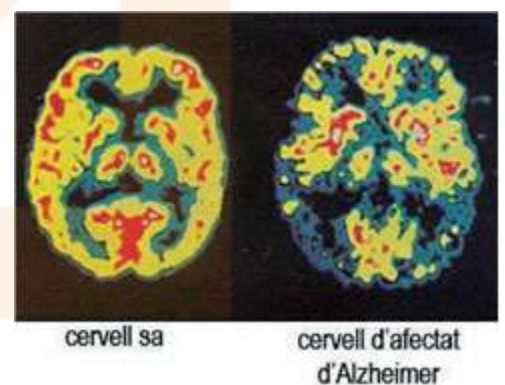


Figura 18. Imatge del cervell obtinguda per una tomografia d'emissió de positrons. Les zones blaves indiquen un baix consum de glucosa, característic en un cervell amb Alzheimer (Font <http://www.nia.nih.gov/Alzheimers/Resources/HighRes.htm> [Public Domain])

explicacions. Quan per primera vegada es descobriren els positrons ningú sabia per a què servirien i avui en dia s'utilitzen per a diagnosticar malalties amb escàners de TEP. En aquest apartat s'introduiran els fonaments de la física moderna.

## 2.1 Un model corpuscular per a la llum: els fotons

### ACTIVITAT 10 La llum: una ona o una partícula



La història de la ciència mostra com la llum ha estat considerada unes vegades com una ona i d'altres com un conjunt de corpuscles. En la lectura d'aquesta activitat es presenta un breu recorregut històric sobre com la ciència ha entès la llum. Feu una primera lectura del text i de les preguntes sobre el text i en una segona lectura trobeu la resposta de les preguntes.

Albert Einstein creia fermament en la realitat dels fotons. Segons ell, la radiació electromagnètica consisteix en uns paquets d'energia (quanta) anomenats fotons que només poden ser emesos i absorbits en unitats completes (quantització de l'energia). L'energia d'aquests fotons ve donada per l'**equació de Planck**

$$E = hf \quad (15)$$

on  $E$  és l'energia del fotó,  $f$  és la freqüència de l'ona electromagnètica i  $h$  és la constant de Planck de valor igual a  $6,62 \cdot 10^{-34}$  J·s. L'equació de Planck connecta el caràcter ondulatori de la llum amb el caràcter corpuscular: la freqüència de l'ona electromagnètica és proporcional a l'energia de la partícula.

### Qüestions

**30** Calculeu el valor de la constant de Planck en eV·s (electrovolt per segon).

**Solució:**  $4,14 \cdot 10^{-15}$  eV·s

**31** Segons el model ondulatori de la llum cada color té una freqüència assignada: *la llum violeta té una freqüència més gran que la llum vermella*, però d'acord amb el model corpuscular el color depèn de l'energia: *un fotó violeta transfereix més energia que un fotó vermell*. Utilitzeu l'equació de Planck per a relacionar els dos models i completeu la Taula 6 amb les dades característiques de cada model.

**32** La potència indica la rapidesa amb què l'energia es transfereix. Una potència d'1 W correspon a  $1 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ . El làser d'un lector de CDs té una potència de 0,2 mW i una longitud d'ona de 775 nm.

(a) Quina és la freqüència de la llum làser?

(b) Quants fotons emet el làser cada segon?

(c) Com canviarien les respostes anteriors si el làser tingués una longitud d'ona inferior, però la mateixa potència?

**Solució:**  $3,87 \cdot 10^{14}$  Hz  
**Solució:**  $7,78 \cdot 10^{14}$  fotons



## Qüestió

33 Els raigs gamma emesos en una TEP tenen una freqüència per sobre dels  $10^{19}$  Hz. Trobeu la longitud d'ona d'aquesta radiació i l'energia dels fotons gamma.

Solució: 0,03 nm;  $6,62 \cdot 10^{-15}$  J

Color	Longitud d'ona $\lambda$ / nm	Freqüència $f$ / Hz	Energia del fotó $E$ / J
Infraroig	> 775		
Vermell	656		
Groc	590		
Verd	486		
Blau	434		
Violeta	410		
Ultraviolat	< 389		

Taula 6. Dades per a la Qüestió 31

### 2.1.1 L'efecte fotoelèctric

El sistema de detecció de la TEP està constituït per un escintil·lador acoblat a un fotomultiplicador. Aquest és un sistema de detecció molt utilitzat quan es tenen senyals molt poc intensos. L'escintil·lador absorbeix els raigs gamma incidents i reemet part de la seva energia en forma d'un flash de llum visible. El fotomultiplicador capta aquesta llum i l'amplifica. La multiplicació del senyal resulta en un pols elèctric que pot ser mesurat i que guarda la informació rellevant sobre la partícula que inicialment va incidir sobre l'escintil·lador.

Els fotomultiplicadors són uns detectors de llum extremadament sensibles que s'utilitzen en molts dispositius de detecció en els camps de la diagnòsi i de recerca científica en general. Deuen bona part del seu funcionament a una superfície metàl·lica fotosensible (fotocàtode en la Figura 19) que experimenta l'efecte fotoelèctric. L'efecte fotoelèctric consisteix en l'emissió d'electrons des d'una superfície metàl·lica quan sobre ella incideix radiació electromagnètica d'una certa freqüència. El fotomultiplicador absorbeix la llum incident en el fotocàtode on s'arranquen electrons que són accelerats per un camp elèctric i dirigits cap a un

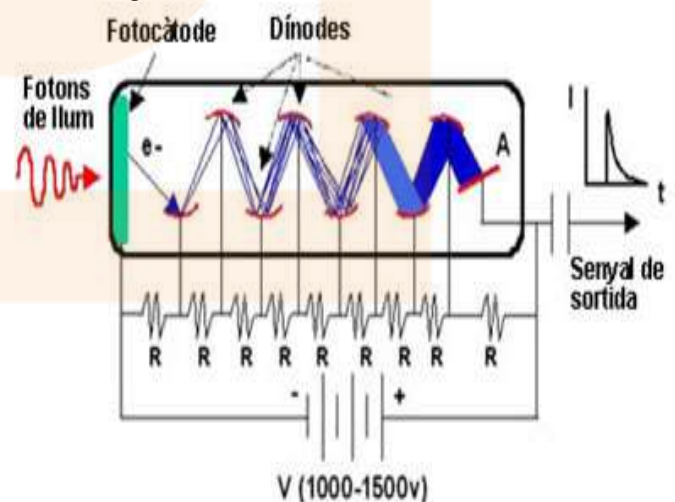


Figura 19. Estructura i funcionament d'un fotomultiplicador (Imatge adaptada de Jkrieger [Public Domain], via Wikimedia Commons)

ànode (dínode en la Figura 19). Els electrons incidents provoquen l'emissió d'altres electrons secundaris que són dirigits cap a un altre dínode. Així es multiplica el senyal fins a obtenir un senyal de sortida mesurable.

Aquest fenomen ja era conegut durant la segona meitat del segle XIX. La seva explicació s'intentava fer a partir de la visió ondulatoria de la llum, però sense resultats satisfactoris. Einstein va explicar el fenomen utilitzant els quanta que Planck havia introduït com a mètode de càlcul, i que ell considerava reals. De fet, l'explicació de l'efecte fotoelèctric és el que li va valdre el premi Nobel l'any 1921, ja que la proporcionalitat de la relació de Planck implicava un nou concepte en física: la naturalesa corpuscular de la llum.

### ACTIVITAT 11 L'efecte fotoelèctric



En aquesta activitat estudiareu, amb ajuda d'un applet, l'efecte fotoelèctric, l'explicació del qual va representar la confirmació definitiva del caràcter corpuscular de la llum quan aquesta interacciona amb la matèria.

Einstein donà l'explicació d'aquest efecte en termes del model corpuscular de la llum. Segons aquest model, un fotó de la llum incident interacciona amb un sol electró del metall. Si l'energia del fotó és prou gran, aquest electró "salta" del metall (fotoelectró) i adquireix una certa energia cinètica. Aplicant la conservació de l'energia a la interacció llum-metall, es té

Energia del fotó = Energia per a "arrencar" l'electró + Energia cinètica de l'electró

o expressat matemàticament

$$hf = W_0 + E_C \quad (16)$$

on  $W_0$ , la **funció de treball** o **treball d'extracció**, dóna compte de l'energia mínima que cal donar a l'electró per a "arrancar-lo" del material i  $E_c$  és l'energia cinètica de l'electró.

A l'Activitat 11, heu vist que per sota d'una certa freqüència, no hi ha emissió de fotoelectrons. La **freqüència llindar**,  $f_0$ , o freqüència mínima a partir de la qual hi ha emissió d'electrons permet determinar la funció de treball

$$W_0 = hf_0 \quad (17)$$

## Qüestions

**34** Quina és l'energia transferida quan un electró s'accelera en una diferència de potencial de 5000 V? Quina seria l'energia transferida en el cas d'un protó? Expressen els resultats en joules i en electrovolts.

**Solució:**  $8 \cdot 10^{-16}$  J; 5.000 eV

**35** Calculeu les velocitats de l'electró, primer, i del protó després, de la Qüestió 34, suposant que la transferència d'energia de la font d'alimentació a les partícules té un rendiment del 100 %.

**Solució:** Velocitat (electró) =  $4,2 \cdot 10^7$  m·s<sup>-1</sup>, velocitat (protó) =  $9,8 \cdot 10^5$  m·s<sup>-1</sup>

**36** Se sap que un determinat metall experimenta l'efecte fotoelèctric quan s'hi fan incidir fotons d'energia superior a 1eV. Suposeu que sobre aquest metall hi incideixen fotons de longitud d'ona  $6 \cdot 10^{-7}$  m.

(a) Quant val la freqüència dels fotons incidents?

(b) Es produeix l'efecte fotoelèctric? Per què?

**Solució:**  $5 \cdot 10^{14}$  Hz

**37** La funció de treball del sodi és 2,5 eV. Calculeu la freqüència llindar de la radiació amb què s'ha d'il·luminar un elèctrode d'aquest material perquè es generi un corrent elèctric en un fotodiode. Quina és la longitud d'ona corresponent?

**Solució:**  $6,03 \cdot 10^{14}$  Hz; 497 nm

**38** El càtode d'una cèl·lula fotoelèctrica s'il·lumina amb llum verda ( $\lambda = 550$  nm). L'emissió de fotoelectrons té lloc a partir d'una freqüència dels fotons incidents de  $4,75 \cdot 10^{14}$  Hz. Calculeu:

(a) L'energia dels fotons incidents

(b) La funció de treball

(c) L'energia cinètica dels fotoelectrons

(d) El potencial de frenada

**Solució:** 2,26 eV

**Solució:** 1,97 eV

**Solució:** 0,29 eV

**Solució:** 0,29 V

**39** Un metall emet electrons per efecte fotoelèctric quan s'irradia amb llum blava, però no n'emeta quan s'irradia amb llum ataronjada. Determineu, raonant la resposta, si emetrà electrons quan s'irradiï:

(a) Amb llum vermella.

(b) Amb llum ultraviolada.

Dades:

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{càrrega de l'electró, } e = -1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$\text{massa de l'electró, } m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$\text{massa del protó, } m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

### 2.1.2 La llum: ona, partícula o les dues coses?

La interpretació de la naturalesa discreta de la llum que Einstein dona per a explicar l'efecte fotoelèctric introdueix un nou model per a descriure el comportament de la radiació electromagnètica, un model en què la llum té comportament de partícula (**model corpuscular**). La nova interpretació permet comprendre la interacció de la llum amb la matèria i, en particular, el funcionament del fotomultiplicador. El **model ondulatori** permet descriure el comportament de la llum quan es propaga o presenta fenòmens com la polarització, les interferències o la difracció que heu estudiat en el curs de física de primer de batxillerat. Ja heu vist en l'Activitat 10 com esbrinar la veritable natura de la llum ha estat una de les grans intrigues de la ciència al llarg de la història.

Si la llum es pot representar mitjançant una ona, en alguns casos, i com un feix de partícules, en d'altres, què és en realitat la llum? Doncs les dues coses: ona i partícula. Els dos models són "correctes" perquè els dos poden explicar certs aspectes del comportament de la llum i per tant, la llum s'ha de tractar, unes vegades com a ona, i d'altres com a constituïda per partícules. Aquesta doble natura és el que s'anomena la **dualitat ona-corpúscle** de la llum. Fixeu-vos que enlloc s'ha afirmat que és una cosa o una altra, sinó les dues!

### 2.1.3 Cap a una nova física: nous models atòmics

Els físics de començaments del segle XX estaven interessats en trobar una explicació dels espectres discontinus que mostrava la radiació emesa per una substància quan s'escalfava. Aquests estudis mostraven que l'espectre era diferent per a cada element i aquest fet obria una porta a l'estudi de l'estructura de l'àtom. A la vegada, si es feia passar llum a través d'un gas s'observaven espectres d'absorció també discontinus i també característics de cada substància.

La introducció de la quantització de la radiació que era necessària per a entendre l'efecte fotoelèctric esdevindria també clau en l'explicació dels espectres d'emissió i d'absorció atòmics. Els espectres d'emissió i d'absorció atòmics ja eren conegut des del segle XIX, però no hi havia cap teoria física que els expliqués. Existien algunes lleis empíriques com la llei de Balmer que relacionava les longituds d'ona de les línies de l'espectre visible de l'hidrogen però la física existent en l'època era incapaç tant de descriure de manera unitària i global totes les línies presents en l'espectre d'un element com de resoldre el problema del seu origen.

L'estudi de l'àtom era un altre camp on la física clàssica mostrava signes de ser incapaç de descriure els fenòmens observats de manera convincent. Les observacions experimentals de Rutheford portaven a conclusions incoherents amb la teoria. Segons el **model atòmic de Rutheford**, l'àtom estava format per una part central (nucli) al voltant de la qual giraven els electrons. Ara bé, la física de l'època afirmava que una càrrega accelerada havia d'emetre radiació. Si fos així, els electrons haurien de col·lapsar cap al nucli, fet que no s'observava.

Per a resoldre aquest problema, Niels Bohr va proposar un nou model de l'àtom: va agafar la idea del quanta de llum i la va aplicar a les òrbites circulars. De la mateixa manera que un satèl·lit que orbita al voltant d'un planeta té una energia que pot prendre qualsevol valor, els electrons

també tenen una energia associada a la seva òrbita. Ara bé, d'acord amb el **model atòmic de Bohr**, no totes les òrbites estarien permeses, i per tant l'electró no podria tenir qualsevol energia: l'energia estaria quantitzada.

Segon el model de Bohr, l'energia dels electrons és sempre un múltiple enter de l'energia de l'estat fonamental (el de menor energia). El radi de les òrbites no pot augmentar (ni disminuir) gradualment, si no que ho ha de fer de manera discontinua (quàntica). A més, el radi de les òrbites permeses està determinat pel nombre quàntic principal,  $n$  (on  $n = 1, 2, \dots$ ). En aquestes òrbites l'electró no emet radiació i l'àtom esdevé estable.

Aquest model proposat per Bohr permet explicar també la formació dels espectres d'absorció i d'emissió. Cadascuna de les òrbites té un nivell energètic associat, determinat per  $n$ . L'estat fonamental és l'òrbita de radi menor i nivell d'energia menor amb  $n = 1$ , la resta de nivells correspon als estats excitats (Figura 20). Quan un electró "salta" a un nivell energètic més alt, absorbeix un fotó de llum que li subministra l'energia justa per a fer el "salt" produint-se una ratlla negra en l'espectre d'absorció. Pel contrari, quan l'electró "salta" a un nivell energètic més petit emet un fotó amb la freqüència corresponent a la diferència d'energies dels dos nivells energètics. Les transicions entre nivells d'energia amb la corresponent emissió o absorció de fotons, d'acord amb el principi de conservació de l'energia, permeten explicar els espectres d'emissió i d'absorció dels àtoms dels elements.

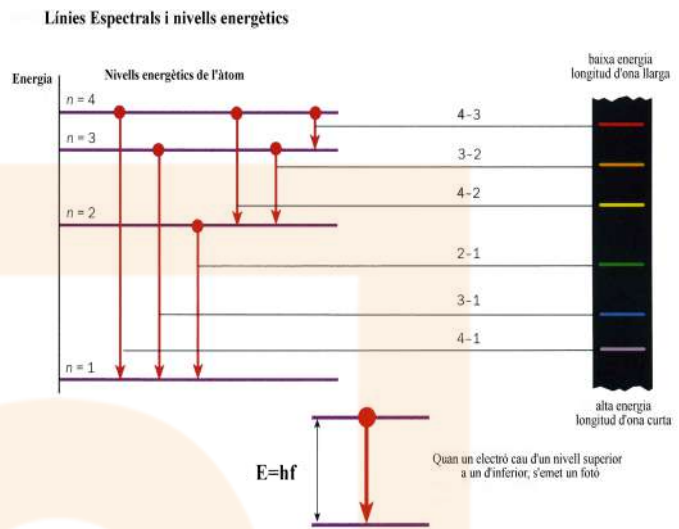


Figura 20. Línies espectrals i nivells energètics atòmics (imatge adaptada de *Advancing Physics A2*, IOP)

### ACTIVITAT 12 Els espectres



En aquesta activitat analitzareu, amb ajuda d'una miniaplicació, els espectres d'emissió i d'absorció de diferents substàncies buscant semblances i diferències entre ells. La pàgina web on trobareu la miniaplicació és

<http://jersey.uoregon.edu/elements/Elements.html>

### ACTIVITAT 13 L'àtom de Bohr i els espectres



En aquesta activitat aplicareu els diferents conceptes sobre els espectres i l'àtom de Bohr per tal de calcular les longituds d'ona d'alguna de les línies de la part visible de l'espectre de l'hidrogen. La miniaplicació la trobareu a

[https://ia800307.us.archive.org/27/items/AP\\_Physics\\_B\\_Lesson\\_52/Contentainer.html](https://ia800307.us.archive.org/27/items/AP_Physics_B_Lesson_52/Contentainer.html)

<http://ophysics.com/m1.html>

## 2.2 Els electrons: partícules o ones?

En la unitat 1 del curs de física de primer vareu estudiar que la llum és una ona transversal. Tanmateix, la hipòtesi de Planck i la interpretació d'Einstein mostren com la llum pot ser entesa des d'un punt de vista corpuscular. La radiació electromagnètica pot actuar com a ona i com a partícula: quan es propaga es comporta com una ona i quan interactua amb la matèria com una partícula.

Els electrons foren descoberts per J.J Thomson a finals del segle XIX. Els seus estudis, així com estudis posteriors, mostraven de manera clara que eren partícules amb una massa i una certa càrrega elèctrica negativa. L'any 1924 Louis De Broglie va presentar la seva tesi doctoral sobre la teoria dels quanta introduint una idea totalment innovadora: *Si la llum es pot comportar com a ona i com a partícula, per què una partícula no pot comportar-se com a ona?*

Sota aquesta premissa, De Broglie enuncià que tota partícula porta associada una ona de longitud d'ona,  $\lambda$ , que ve donada per l'expressió

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (18)$$

on  $h$  és la constant de Planck i el producte  $mv$  és el moment lineal o quantitat de moviment,  $p$ , de la partícula. Així, també es pot trobar la longitud d'ona associada a una partícula amb l'expressió

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (19)$$

D'aquesta forma es defineix la **longitud d'ona de De Broglie**.

La realitat d'aquesta hipòtesi queda demostrada quan s'observa en els electrons un fenomen tant característic de les ones com és la difracció. En la Figura 21 es mostra el patró de difracció que s'obté quan un feix d'electrons incideix damunt d'una làmina de grafit. La natura ondulatoria dels electrons, ha permès desenvolupar la tècnica de la difracció per electrons. Aquesta ha esdevingut una eina fonamental en l'estudi de nous materials ja que amb ella es pot determinar l'estructura cristal·lina dels materials així com les distàncies interatòmiques.



Figura 21. Patró de difracció dels electrons d'una superfície de grafit on es mostra com s'ordenen els àtoms de carboni (Font MaterialsScientist [CC-BY-SA-3.0], via Wikimedia Commons)

La hipòtesi de De Broglie, permet reinterpretar el model de l'àtom de Bohr. Donat que els electrons presenten propietats ondulatories, els electrons "atrapats" dins de l'àtom generen ones estacionàries, tal com heu vist que passa amb les ones estacionàries en un instrument de corda. En una òrbita circular només pot haver un nombre sencer de longituds d'ona de De Broglie. Segons aquesta visió, els nivells atòmics permesos són aquells en què l'electró defineix una ona estacionària d'una determinada freqüència. La dualitat ona-corpuscle no només s'aplica a la llum o a les radiacions en general, sinó que els electrons i la matèria també presenten aquest comportament dual d'ona – corpuscle.



## Qüestions

- 40** Quina és la longitud d'ona associada a una pilota de beisbol de 0,17 kg de massa que es mou a  $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ .  
**Solució:**  $1,4\cdot 10^{-34} \text{ m}$
- 41** Quina és la longitud d'ona d'un electró amb una energia cinètica de 10 eV?  
 Dada: massa de l'electró =  $9,11\cdot 10^{-31} \text{ kg}$   
**Solució:** 0,388 nm
- 42** Quina serà la velocitat i la longitud d'ona de De Broglie d'un electró que té una energia cinètica d'1 eV?  
**Solució:**  $5,9\cdot 10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 1,2 nm
- 43** Compareu els resultats de les Qüestions 40 i 41. Quina conclusió traieu respecte del comportament ondulatori d'una pilota de beisbol?

## Dualitat ona-corpúscle i el model atòmic de Bohr

En la següent filmació veureu com la hipòtesi de De Broglie sobre la dualitat ona-corpúscle va donar una explicació del model atòmic de Bohr. La filmació la trobareu en la web

[https://www.youtube.com/watch?feature=player\\_embedded&v=vjA15wZxJgI](https://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=vjA15wZxJgI)

### 2.2.1 Una nova visió de la natura

La idea de que els estats energètics discrets en els àtoms del model de Bohr podien explicar-se amb ones estacionàries, va portar al 1926 a Erwin Schrödinger a formular una teoria matemàtica coneguda com a mecànica ondulatoria o **Mecànica Quàntica**. D'acord amb aquesta teoria, l'electró i qualsevol partícula, es descriu per mitjà d'una funció d'ona que obeeix l'equació d'Schrödinger (Figura 22). Al mateix temps, Werner Heisenberg va proposar una formulació paral·lela d'aquesta nova teoria, en termes de matrius, equivalent a la plantejada per Schrödinger.

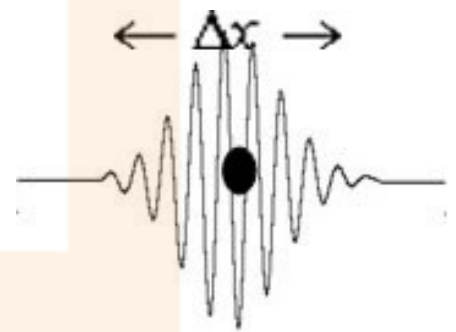


Figura 22. Ona de De Broglie associada a una partícula. La partícula "estarà" amb més probabilitat on la funció d'ona tingui una amplitud més gran.

## La funció d'ona de Schrödinger

El físic Erwin Schrödinger reflexionant sobre les idees de De Broglie va elaborar una teoria pròpia que es publicà l'any 1926: la Mecànica Quàntica Ondulatoria. En la filmació, que trobareu a la web

[https://www.youtube.com/watch?feature=player\\_embedded&v=6liE\\_Gu4Eqw](https://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=6liE_Gu4Eqw)

es presenten els fonaments d'aquesta teoria.



La mecànica quàntica és la teoria que permet descriure el comportament de la matèria i de la llum a escala microscòpica. Entendre aquest comportament ha estat fonamental per a obtenir aplicacions pràctiques i quotidianes a partir dels fenòmens de la superconductivitat, la magnetoresistència, el làser i l'efecte túnel entre d'altres. Aquesta teoria descriu el món d'una manera molt diferent a com l'entendem habitualment duent-nos sovint a uns resultats que es mostren molt estranys a la nostra comprensió, ja que la matèria a escala atòmica es comporta d'una manera molt diferent al comportament macroscòpic al qual estem acostumats.

#### ACTIVITAT 14 Els “pares” de la mecànica quàntica

Feu una petita recerca sobre alguns dels “pares” de la mecànica quàntica: Max Planck, Niels Bohr, Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg i Max Born.

Situeu en una “línia del temps” els descobriments i les aportacions més rellevants fetes per aquests i d'altres científics a la mecànica quàntica.

### 2.2.2 El principi d'indeterminació

En una ona “clàssica”, com per exemple l'ona que es propaga en una corda quan la sacsegem des d'un extrem, la funció d'ona descriu l'elongació vertical d'aquesta en funció de la posició i del temps. Què representa la funció d'ona d'una partícula en la mecànica quàntica? El quadrat d'aquesta funció d'ona descriu la probabilitat de trobar la partícula en una certa posició i en un cert instant de temps.

Quin paper juga la probabilitat en aquesta teoria? La partícula ve descrita per una funció d'ona i per tant es troba “estesa” en l'espai (la funció d'ona que descriu una partícula no ens determina la seva posició exacta). Aquest fet implica que no es pot determinar amb cap experiment quina és la posició exacta d'una partícula en un instant determinat. El resultat de la mesura pot ser qualsevol, però no tots els resultats són igual de probables. La probabilitat de trobar la partícula en una certa posició és més gran on l'amplitud de la funció d'ona sigui més gran. La probabilitat és inherent a la natura íntima de la matèria i no es pot evitar.

Aquesta nova visió de la natura porta a un resultat molt important de la mecànica quàntica: el **principi d'indeterminació** de Heisenberg . Aquest principi afirma que:

*“És impossible saber amb absoluta certesa i simultàniament la posició i la velocitat (o moment) d'una partícula”.*

Matemàticament, el principi d'indeterminació s'escriu com

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad (20)$$

on  $\Delta x$  és la indeterminació en la mesura de la posició i  $\Delta p$  la indeterminació en la mesura del moment lineal de la partícula i  $\hbar$  representa la constant de Planck dividida per  $2\pi$ .

## Principi d'indeterminació

En aquesta filmació es presenta el principi d'indeterminació de Heisenberg:

*“No es pot saber, al mateix temps, la posició d'una partícula i cap a on va ni amb quina velocitat es mou”.*

El vídeo es troba en la web següent:

[https://www.youtube.com/watch?feature=player\\_embedded&v=yPW62H Awj3c](https://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=yPW62H Awj3c)

Es pot donar una explicació de l'Equació 20. Una ona té una extensió il·limitada i una longitud d'ona ben definida. Per tant, la seva posició s'estén per tot arreu i la seva velocitat, d'acord amb la relació de De Broglie, és única. Si superposem ones amb freqüències diferents però molt properes s'obté el fenomen de les pulsacions. En aquest cas, l'ona queda delimitada a una regió de l'espai i per tant, la posició queda més ben fixada. Com més petita sigui la regió que ocupa la pulsació, més ones cal superposar. Ara bé, com que cada ona de la superposició té un moment lineal associat, el paquet d'ones resultant tindrà un moment poc definit i la indeterminació del seu moment serà gran. És a dir, es pot saber on està la partícula però no en quina direcció es mou ni amb quina velocitat.

El principi d'indeterminació de Heisenberg també es pot formular en termes d'energia i de temps. En aquest cas tenim l'expressió

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \quad (21)$$

on  $\Delta E$  representa la indeterminació en la mesura de l'energia i  $\Delta t$  la indeterminació en la de l'interval de temps.

La teoria ha generalitzat la idea de Schödinger per tal de calcular la probabilitat de que tingui lloc algun succés (moviment d'una partícula, xocs entre partícules, etc.). De nou, la teoria ens porta a situacions que s'escapen a la nostra manera habitual de pensar basada en el que s'observa en el món macroscòpic. Per exemple, quan es tracta de trobar la trajectòria d'una partícula que es desplaça d'un punt 1 a un altre punt 2, en mecànica quàntica un es demana quina és l'amplitud de probabilitat de que l'estat inicial 1 es transformi en l'estat final 2 (Figura 23). Per a fer aquest càlcul, cal tenir en compte tots els possibles camins que pot seguir la partícula en aquest succés. Cada camí té una probabilitat associada i sumant-les totes es troba la probabilitat de que la partícula arribi al punt 2. Es diu que la partícula va d'1 a 2 “per tots els camins”. El concepte clàssic de trajectòria desapareix.

La teoria, a banda de fer desaparèixer el concepte de trajectòria, també té altres efectes sobre la visió de la natura. En la mecànica de Newton, fixades unes condicions inicials, és a dir, sabent la causa, queda plenament establert el resultat final, l'efecte. Recordeu que per exemple, en estudiar un tir parabòlic, si es coneixen les condicions inicials del llançament, es pot determinar quin serà l'abast del tir o fins a quina altura

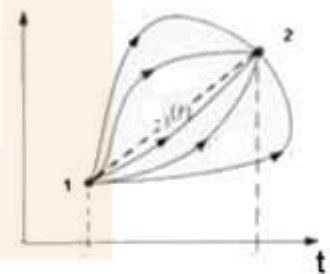


Figura 23. La partícula que va del punt 1 al 2 es “dispersa” per tots els camins possibles

arribarà l'objecte llençat. En mecànica quàntica, fixades unes condicions inicials, no hi ha manera de saber quin serà el resultat final. La mecànica quàntica només permet calcular i assignar probabilitats a cadascun dels possibles resultats.

## 2.3 Els positrons: un exemple d'antimatèria

El cos humà genera de manera natural **positrons** (uns 180 per hora en una persona de 80 kg) provinents de la desintegració del potassi-40 que s'ingereix en menjar o beure. La TEP es basa en l'ús de positrons que són el primer tipus d'antipartícula que es va descobrir experimentalment l'any 1932. Més tard foren descoberts l'antiprotó, l'any 1955, i l'antineutró al 1956.

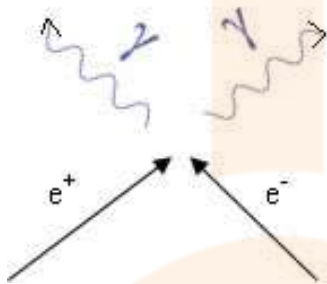


Figura 24. Diagrama de Feynman que mostra un procés d'anihilació positró-electró.

Una **antipartícula** és el mirall de la partícula homònima: totes les seves propietats són oposades excepte la massa que és la mateixa. Així, el positró és l'antielectró o l'antipartícula de l'electró i per tant té la mateixa massa que l'electró, però té càrrega elèctrica positiva. El positró, l'antiprotó i l'antineutró formen part del que els físics anomenen **antimatèria** ja que poden formar antiàtoms. Per exemple, un antiprotó i un positró poden formar un àtom d'antihidrogen, que té unes propietats quasi idèntiques a les de l'àtom d'hidrogen. Les parelles partícula-antipartícula poden anihilar-se mútuament, produint-se fotons (Figura 24). En la TEP els positrons i els electrons s'anihilen ràpidament produint parells de fotons.

En el procés d'anihilació s'han d'observar un seguit d'aspectes:

- La càrrega elèctrica s'ha de conservar.
- El moment lineal total del sistema s'ha de conservar.
- L'energia (incloent l'energia en repòs donada per la relació d'Einstein) s'ha de conservar.

En el cas del procés d'anihilació positró-electró, es creen dos parells de fotons que viatgen en sentits oposats per a conservar el moment i que porten l'energia del sistema (Figura 24). La càrrega inicial, abans d'anihilar-se, és zero així com la final, després de l'anihilació.

El procés d'anihilació sempre té lloc entre parelles de partícula – antipartícula i les lleis de conservació restringeixen el què pot passar: només els canvis en què es conserven les magnituds a dalt indicades poden tenir lloc. Les interaccions entre partícules i les transformacions que succeeixen no són arbitràries, segueixen unes certes lleis que són el camp de recerca de la física de partícules i dels acceleradors d'altres energies com el LHC.

Les mateixes lleis de conservació juntament amb el principi d'indeterminació de Heisenberg possibiliten també el procés invers, és a dir, que a partir d'un o més fotons es poden crear parelles electró – positró (Figura 25).

Figura 25. Es pot obtenir matèria (parella positró-electró) a partir d'energia (fotons). L'energia és com el "diner" de la natura: es presenta en dues monedes diferents i amb un enorme valor de canvi (el quadrat de la velocitat de la llum) (Font CERN)



## Qüestions

- 44 Feu una taula amb les propietats del protó, neutró, electró i les seves antipartícules (massa, càrrega). Afegiu alguna parella partícula –antipartícula més.
- 45 Calculeu l'energia que es desprèn quan un protó i un antiprotó s'anihilen mútuament. Quanta energia es podria obtenir de l'anihilació d'un quilogram de matèria amb un quilogram d'antimatèria? Compareu-la amb tota l'energia elèctrica produïda a Espanya durant l'any 2005 ( $1,05 \cdot 10^{18}$  J).  
Dades: massa protó (o antiprotó) =  $1,67 \cdot 10^{-27}$  kg;  $c = 3 \cdot 10^8$  m·s<sup>-1</sup>
- Solució:**  $3,0 \cdot 10^{10}$  J;  $1,8 \cdot 10^{17}$  J
- 46 En una història de ciència – ficció, un astronauta des de la seva nau en òrbita al voltant d'un "antiplaneta", es comunica (per Messenger còsmic) amb una noia de l'antiplaneta. Tant la noia com tot el seu món són fets d'antimatèria. Expliqueu perquè mai no podran trobar-se els dos enamorats.
- 47 En les pel·lícules com Star Trek el motor que impulsa la nau utilitza una barreja de matèria – antimatèria. Expliqueu la viabilitat i els inconvenients d'aquesta tecnologia.

## El CERN i l'antimatèria

El CERN us parla de l'antimatèria, el mirall de l'Univers.

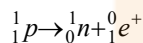
<http://home.web.cern.ch/topics/antimatter/matter-antimatter-asymmetry-problem>

### 2.3.1 Noves partícules i lleis de conservació

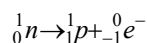
Els positrons emprats en la TEP per a diagnosticar la malaltia de l'Alzheimer provenen d'una desintegració  $\beta^+$  de l'oxigen-15 segons la reacció



En aquesta reacció un protó de l'oxigen-15 es converteix en un neutró per a formar un nucli de nitrogen-15 i s'emet un positró



Per una altra banda, en una desintegració  $\beta^-$ , un neutró del nucli inicial es converteix en un protó i s'emet un electró



Fixeu-vos com en aquests dos processos, les dues partícules, protons i neutrons, es transformen l'una en l'altra i es creen noves partícules. Aquest fet ha dut als físics a creure que són dos "estats quàntics" possibles d'una mateixa família de partícules: els **barions**.

L'anàlisi energètic acurat de l'Equació 22 mostra que no es compleix el principi de conservació de l'energia ja que experimentalment s'observa que l'energia cinètica dels positrons no és sempre la mateixa (varia des de zero fins a un valor màxim). Per a resoldre aquest problema del no compliment de les lleis de conservació, Wolfgang Pauli va introduir, l'any 1930, la idea de que hi havia una partícula que s'havia d'afegir a les equacions associades al decaïment  $\beta$  per a mantenir la conservació de l'energia i del moment. Aquesta partícula era el **neutrí electrònic** (i el corresponent antineutrí). Aquesta gran "intuïció" de Pauli va ser comprovada experimentalment 25 anys més tard. L'Activitat 15 proposa una lectura sobre la descoberta del neutrí. Aquesta nova partícula, el neutrí ( ${}^0_0\nu_e$ ), té propietats molt semblants a l'electró, per això ambdós pertanyen a la família dels **leptons**.

Així, l'Equació 22 s'escriu com



Quines són les propietats dels neutrins? Les lleis de conservació determinen les propietats d'aquesta nova partícula

- No ha de tenir càrrega elèctrica (per a conservar la càrrega)
- Massa quasi nul·la, però no zero.
- Ha de portar energia (per a conservar l'energia en el procés de desintegració)
- Ha de portar quantitat de moviment (per a conservar el moment)
- Ha d'interactuar molt dèbilment amb la matèria (molt difícil detectar).
- Ha de tenir una antipartícula associada, l'antineutrí.

### ACTIVITAT 15 El descobriment del neutrí



En aquesta activitat llegireu un text sobre la descoberta del neutrí.

### Qüestió

- 48 Busqueu informació a Internet sobre l'experiment del Super Kamiokande al Japó i contesteu les següents preguntes: Quin és l'objectiu de l'experiment? En què consisteix? Per què els neutrins són tan difícils de detectar? Per què hi ha aquest interès en l'estudi dels neutrins?



## 2.4 Els raigs còsmics

Una de les radiacions ionitzants que ens afecten de manera natural a diari és la deguda als raigs còsmics. Aquests raigs estan formats per nuclis d'àtoms que es mouen a velocitats properes a les de la llum i, per tant, tenen energies extraordinàries. El seu descobriment es va produir a principis del segle XX per mitjà d'experiments realitzats en globus que s'enlairaven a gran altura. Durant aquests vols, es va descobrir que els nivells de radiació augmentaven amb l'altura, fet que implicava que havia d'existir alguna font de radiació més enllà de l'atmosfera. Els raigs còsmics no ens arriben directament. En realitat, quan aquests arriben a les capes altes de l'atmosfera, interaccionen amb ella produint-se un munt de partícules secundàries que són les que es detecten (Figura 26).

Entre aquestes partícules hi ha positrons, electrons i fotons però moltes altres són desconegudes. En els estadis més inicials, es generen pions que es desintegren molt ràpidament en muons que a la seva vegada es desintegren en electrons, la majoria de les vegades. Aquests muons es produeixen en les capes altes de l'atmosfera. En la seva desintegració, el muó segueix la llei radioactiva de decaïment exponencial (Equació 5). El seu període de semidesintegració és d'uns  $2 \mu\text{s}$  i es mou a una velocitat de 0,9978 vegades la velocitat de la llum, de forma que cada 600 m de recorregut es desintegren la meitat dels muons. Ara bé, els muons es detecten, en quantitats apreciables, a nivell del mar. Com pot ser això? Comprendre aquesta anomalia ens obliga a introduir una nova teoria que va formular Albert Einstein l'any 1905: la Teoria de la Relativitat Especial.

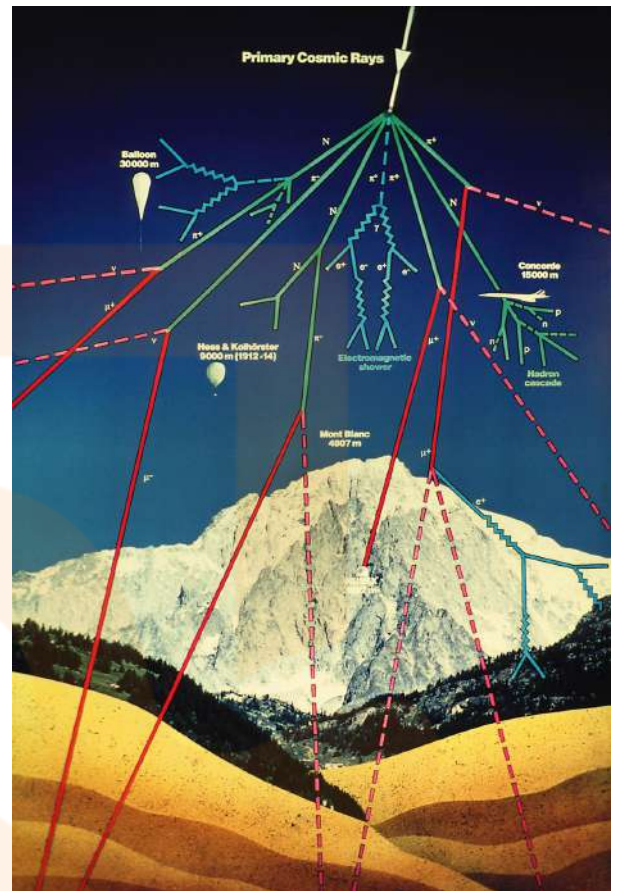


Figura 26. Pluja de raigs còsmics (Font CERN)

### ACTIVITAT 16 La cambra de boira



En aquesta activitat es proposa la construcció d'una cambra de boira per a observar els raigs còsmics o bé partícules emeses en desintegracions radioactives.

### 2.4.1 La relativitat especial.

Albert Einstein va néixer a Ulm el 14 de març de 1879. La seva infància va transcórrer a Munic i l'any 1896 ingressà en el Politècnic de Zuric (el Eidgenössische Technische Hochschule ETH) on va estudiar fins que es va llicenciar l'any 1900. La física era en aquells moments una disciplina puixant. L'any 1897 Röntgen va descobrir els raigs X, i aviat (1897) es descobrí l'electró i la radioactivitat (1898).

Entre juny i setembre de l'any 1905, Einstein publicà als prestigiosos Annalen der Physik tres articles llegendaris en els que exposava els fonaments del que seria la nova física. En el primer article defensava la realitat dels quanta de llum proposats per Planck. En el segon es

preocupava del caràcter atomista de la matèria i en el darrer article “*Sobre l’electrodinàmica dels cossos en moviment*”, posava les bases de la teoria de la relativitat especial.

El concepte de relativitat no s’origina en Einstein, sinó en la mecànica clàssica. Aquesta idea ja es troba en el treball de Galileu i més tard en el de Newton. Des del punt de vista mecànic, tots els sistemes que es mouen uniformement els uns respecte dels altres (sistemes de referència inercials) són perfectament equivalents, en el sentit que les lleis de la mecànica adopten les mateixes formes.

La situació era ben diferent pel que feia a les lleis de l’òptica i de l’electromagnetisme. La majoria de físics creien que si bé les experiències mecàniques no permetien distingir el repòs del moviment uniforme, les experiències òptiques sí que ho havien de permetre. Però tots els intents realitzats en aquest sentit van fracassar, inclosos els experiments tan acuradament duts a terme per Albert A. Michelson i Edward W. Morley a finals del segle XIX.

### Els postulats d’Einstein

L’any 1905 en l’article “*Sobre l’electrodinàmica dels cossos en moviment*”, Einstein va formular els dos postulats en els quals es fonamenta la teoria de la relativitat:

- No pot detectar-se el moviment absolut.
- La velocitat de la llum és independent del moviment de la font.

Amb el primer postulat, Einstein generalitza la idea ja existent en la mecànica de Newton que afirmava que les lleis de la mecànica eren vàlides per a qualsevol observador inercial (que està en repòs o bé té un moviment rectilini i uniforme). Einstein afirma amb aquest postulat que això és cert per a totes les lleis de la física. El segon postulat afirma que qualsevol observador mesura el mateix valor per a la velocitat de la llum.

L’aplicació d’aquests dos postulats modifica la mecànica de Newton dient que aquesta és una teoria aproximada en el sentit que només és vàlida per a velocitats molts petites comparades amb la velocitat de la llum. Això implica que les modificacions de la relativitat només són observables a velocitats properes a la de la llum, a velocitats mai assolides en la nostra vida quotidiana.

La teoria de la relativitat especial obliga a revisar els conceptes d’espai i temps, i per tant, a modificar els conceptes de distància i interval de temps. La física newtoniana utilitza la idea (molt lògica) que la distància entre dos punts, per exemple la distància entre els extrems d’un regle, sempre mesura el mateix, tant si el regle es mou com si no. La relativitat especial diu que això no és així: “els regles en moviment mesuren menys vistos per un observador que estigui en repòs, ja que un observador que es mogui amb el regle no veurà aquesta contracció”.

### El temps s’allarga

El nostre concepte de temps també es modifica ja que la teoria demostra que un rellotge en moviment és més lent, mostra intervals de temps més llargs, i s’endarrereix. De nou, un observador que es mou amb el rellotge no veurà res d’estrany.



En el cas dels muons que heu vist en la introducció, el període de semidesintegració característic del muó,  $2 \mu\text{s}$ , és un temps agafat des del seu propi sistema de referència. Aquest temps s'anomena **temps propi**,  $t_p$ . L'interval de temps que mesura un observador situat a la superfície de la Terra és diferent i es calcula amb la fórmula

$$\Delta t = \frac{t_p}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (24)$$

on  $v$  és la velocitat del muó i  $c$  la velocitat de la llum en el buit. Aquest creixement de l'interval de temps,  $\Delta t$ , s'anomena **dilatació del temps**. Fixeu-vos que en el cas dels muons que van a una velocitat propera a la de la llum,  $0,9978c$ , el quocient de dins de l'arrel és quasi bé "1", el denominador és un valor petit i el resultat de l'Equació 24 és sempre més gran que el temps propi. El temps mesurat per un observador en moviment corre més lentament.

## La dilatació del temps

Les següents miniaplicacions us ajudaran a entendre millor aquest concepte.

<http://rsefalicante.umh.es/Animaciones/Animaciones10.htm>

<http://www.phys.unsw.edu.au/einsteinlight/>

### Qüestions

**49** Quin és el període de semidesintegració del muó calculat des d'un observatori a nivell del mar?

**Solució:**  $3,02 \cdot 10^{-5}$  s

**50** Quina distància recorre el muó durant un període de semidesintegració, mesurada des de la superfície de la Terra? Quina distància recorre el muó mesurat des del seu sistema de referència?

**Solució:** 9040 m; 600 m

Des del punt de vista del muó, aquest només viu  $2 \mu\text{s}$  però (l'atmosfera està circulant al seu costat) veu que la Terra se li acosta a una velocitat de  $0,9978c$ . Per tant, la distància de 9000 m en el sistema terrestre es troba així contreta a només 600 m en el sistema del muó.

### Les longituds s'escurcen

Així, doncs, quina és la distància recorreguda pel muó? 600 m si es mesura des del sistema de referència del muó i uns 9000 m si es mesura des del sistema de referència terrestre. Les dues respostes són correctes.

A l'hora de calcular longituds, la teoria de la relativitat especial també ens dóna una fórmula semblant a la del temps

$$\Delta x = L_p \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (25)$$

on  $L_p$  és la longitud pròpia i el canvi de longitud,  $\Delta x$ , s'anomena **contracció de la longitud**. Així doncs, les longituds i les distàncies mesurades per un observador en moviment apareixen més curtes.

### Qüestions

**51** Quina és la longitud d'un regle d'1m que es mou a  $v = 0,406c$  vist per un observador en repòs?

**Solució:** 0,914 m

**52** Els astronautes d'una nau espacial que s'allunya de la Terra a una velocitat  $v = 0,6c$  decideixen anar a fer una becaina d'1h. Quina és la duració de la becaina si es mesura respecte de la Terra?

**Solució:** 1,25 hores

Fixeu-vos que les equacions de la dilatació temporal i de la contracció de la longitud no estan en contradicció amb la mecànica clàssica. Les velocitats a les quals es mouen els objectes en la mecànica newtoniana són tan extremadament petites comparades amb la velocitat de la llum,

que el terme  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$  és pràcticament la unitat. De manera que si

apliquéssim les Equacions 24 i 25 el resultat seria que l'interval de temps mesurat per un observador en moviment és el mateix que el temps propi i que la longitud mesurada per aquest mateix coincideix amb la longitud pròpia. La teoria de la relativitat és una teoria que inclou la mecànica de Newton i generalment només cal utilitzar-la quan els objectes es mouen a velocitats properes a la de la llum.

En el seu article “*Sobre l'electrodinàmica dels cossos en moviment*”, Einstein, també analitza la conservació de la quantitat de moviment tenint en compte els postulats de la teoria. En fer-ho prediu l'equivalència entre la massa,  $m$ , i l'energia,  $E$ , tal com s'expressa en l'equació

$$E = mc^2$$

on  $c$  és la velocitat de la llum en el buit, fórmula per la qual és més conegut i que heu estudiat en l'apartat de física nuclear.

### ACTIVITAT 17 Paradoxa dels bessons

El número 5 de la revista Recursos de Física presenta en la secció *El racó obscur* un problema que sorgeix al parlar de relativitat: **la paradoxa dels bessons**.

<http://www.rffisica.cat/>

## 2.5 Apartat de síntesi

Des de que Michael Faraday descobrí els raigs catòdics l'any 1838 fins a finals del segle XIX, quan Henri Becquerel descobrí la radioactivitat (1896) i Joseph John Thomson l'electró (1897) els avenços en l'estudi del món microscopi foren relativament lents. És a partir de principis del segle XX, quan Max Planck, l'any 1900, introdueix l'expressió de la quantització de l'energia (Equació de Planck) i Albert Einstein, al 1905, explica l'efecte fotoelèctric introduint la idea dels quanta de llum de Planck, quan la investigació i els esdeveniments s'acceleren fins que l'any 1925 Erwin Schrödinger desenvolupa la teoria ondulatoria de la mecànica quàntica com una aproximació per a generalitzar la hipòtesi de De Broglie de la dualitat ona-corpúscle i al mateix temps Werner Heisenberg i Max Born desenvolupen el tractament matricial d'aquesta teoria.

En l'article "*Sobre l'electrodinàmica dels cossos en moviment*" Einstein s'estableix els fonaments de la teoria de la relativitat especial, i deu anys més tard, l'any 1915 publica la teoria de la relativitat general. La primera d'aquestes teories, la més senzilla matemàticament, estableix la impossibilitat de distingir físicament entre l'estat de repòs i l'estat de moviment uniforme. La teoria de la relativitat general és una teoria de la gravitació. Actualment les dues teories funcionen molt bé per a descriure el comportament d'objectes que es mouen a velocitats properes a la de la llum i l'estructura de l'univers.

En aquest apartat s'ha donat una descripció dels inicis de la mecànica quàntica i de la relativitat especial d'Einstein que són fonamentals per a la formació dels estudiants de física de batxillerat. És l'inici de la que es pot anomenar física moderna.

**ACTIVITAT 18 Les idees clares**

Reviseu l'apartat 2 i contesteu les següents qüestions:

1. Quines teories conformaven la física clàssica de finals del segle XIX?
2. Quins eren els fenòmens que es trobaren els físics de finals del segle XIX que la física clàssica no podia resoldre?
3. Max Planck va suggerir la quantització de l'energia de la radiació electromagnètica, però amb l'explicació de quin fenomen es va consolidar aquesta idea? De quin científic és aquesta explicació? Què implicava des del punt de vista de la natura de la radiació electromagnètica l'acceptació de que l'energia està quantitzada?
4. Quins són els models atòmics que es presenten a principis del segle XX? Assenyaleu les seves semblances i les seves diferències.
5. Com explica el model de Bohr els espectres d'emissió i d'absorció?
6. Què s'entén per "*la dualitat ona-corpúscle*"? Qui va fer aquesta gran aportació a la física?
7. Basats en la hipòtesi de De Broglie, es van desenvolupar dues teories de la mecànica quàntica que més tard es va demostrar que eren equivalents. Quines són aquestes dues teories i qui les desenvolupà?
8. Quines implicacions té el principi d'indeterminació de Heisenberg?
9. Què és una llei de conservació? Quines en coneixeu? Quina relació hi ha entre les lleis de conservació i la descoberta de noves partícules?
10. Expresseu els dos postulats de la teoria de la relativitat especial.
11. Quines són les principals implicacions d'aquesta teoria?
12. Si s'accepta la teoria de la relativitat especial, significa això que la mecànica clàssica de Newton ja no és vàlida? Per què?

### 3 El model estàndard

Habitualment encara es dibuixen els àtoms com a sistemes solars en miniatura (model de Rutherford). Aquesta imatge de l'àtom desenvolupada pels científics durant les primeres dècades del segle XX encara resulta útil a molts efectes, encara que ja heu vist que segons la mecànica quàntica aquesta representació de l'àtom és errònia. Electrons, protons i neutrons van ser considerats durant bona part del segle XX **partícules fonamentals**, és a dir, que no es podien dividir en constituents més petits (Figura 27).

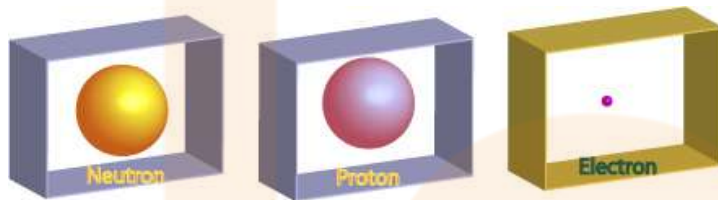


Figura 27. Partícules elementals al 1932 (Font CERN)

El descobriment de noves partícules com els neutrins, els pions, els muons, l'antimatèria, etc. deixava entreveure un sistema de partícules subatòmiques prou complex que calia "ordenar". Els físics es van començar a preguntar sobre les interaccions entre aquestes partícules i si aquestes partícules fonamentals no es podrien dividir també, tal i com havia succeït amb els àtoms. El viatge per aquesta física tan "al·lucinant" mostra la gran complexitat amb què sembla que actua la natura i, igual que els físics de l'època, un es podria preguntar si no s'està complicant la visió que fins ara es tenia de l'estructura i del comportament de la matèria.

Inicialment protons, neutrons i electrons eren considerats les partícules fonamentals. Amb aquestes partícules els físics eren capaços d'estudiar els fenòmens radioactius. Ara bé, com heu vist en l'apartat anterior, quan van analitzar amb cura la desintegració beta, van veure que calia algun altre tipus de partícula per tal de mantenir les lleis de conservació: el neutrí electrònic. El descobriment i l'estudi dels raigs còsmics també van mostrar l'existència d'altres partícules: els pions i els muons. Calia reescriure la taula de "partícules elementals"? Cap als anys 50 del segle passat, la "taula de partícules elementals" era la que es mostra en la Figura 28.

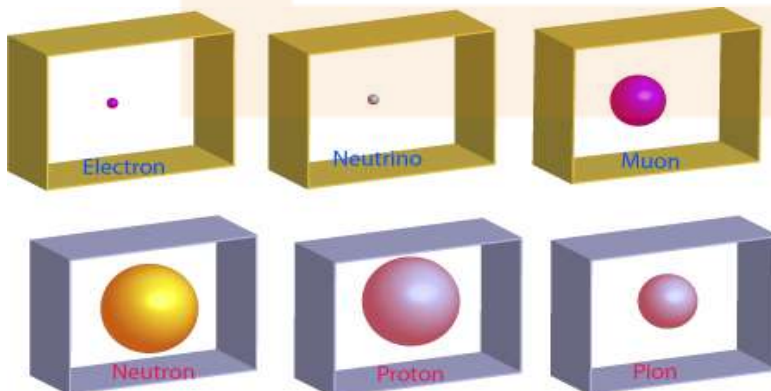


Figura 28. Partícules elementals al 1948 (Font CERN)

Una font d'estudi de les partícules i de com interactuaven entre sí fou l'ús dels acceleradors i detectors de partícules, màquines que, amb el desenvolupament tecnològic, van permetre descobrir un veritable "zoològic de partícules". Se'n van descobrir moltes i tanta diversitat de partícules representava un gran problema: com interaccionen aquestes partícules?, quina relació hi ha entre elles? Els físics tendeixen a creure que la natura és simple: hi havia d'haver una estructura més profunda que expliqués tot aquest "zoo". L'explicació la va fer possible Murray Gell-Mann (premi Nobel de física l'any 1969) que va proposar l'existència d'unes partícules encara més fonamentals: els quarks. Amb aquestes noves partícules, el "zoològic" quedava reduït dràsticament i originà la taula de partícules que s'accepta actualment en l'anomenat **Model Estàndard**.

### 3.1 Els constituents de la matèria: els fermions

Three Generations of Matter (Fermions)				
	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon
Quarks	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>d</b> down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>s</b> strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>b</b> bottom	0 0 1 <b>g</b> gluon
	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	91.2 GeV 0 1 <b>Z</b> weak force
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>e</b> electron	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>μ</b> muon	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>τ</b> tau	80.4 GeV $\pm 1$ 1 <b>W</b> weak force
Leptons				Bosons (Forces)

Figura 29. Els constituents de la matèria segons el model estàndard: leptons, quarks i bosons (portadors de força) (Font Fermi National Laboratory)

El model estàndard de partícules és, actualment, la millor teoria que descriu com funciona l'univers. Identifica 12 partícules fonamentals de les quals estaria feta tota la matèria:

- 6 tipus diferents de **quarks**, que són els constituents dels protons, dels neutrons i de moltes altres partícules.
- 6 tipus de **leptons**, un d'ells és l'electró. El terme "leptó" ve del grec i significa "lleuger" i es fa servir perquè els leptons tenen masses molt i molt petites.

Quarks i leptons formen el grup dels **fermions**, en honor a Enrico Fermi, físic italià que destacà tant per la seva contribució teòrica com experimental a la física de partícules i fou premi Nobel l'any 1938. Quarks i leptons s'uneixen entre ells per a formar la matèria gràcies a l'acció de quatre forces elementals i les corresponents partícules portadores de força, les quals es tractaran més endavant.

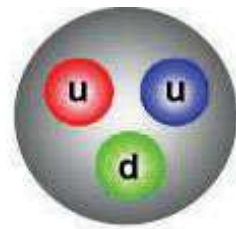
En total 12 partícules que s'agrupen en tres generacions (anomenades així perquè hi ha certes semblances entre els membres d'una generació, no perquè un grup precedeixi a un altre). Actualment només es comprèn la utilitat de la primera generació ja que és la que forma tota la matèria ordinària. La Figura 29 mostra un quadre on s'agrupen les partícules fonamentals que constitueixen la matèria i l'univers.

Els quarks tenen propietats molt peculiars: la seva càrrega és fraccionària, mai es troben aïllats i sempre s'agrupen en grups de 2 o de 3. Els 6 tipus de quarks es classifiquen segons el seu "sabor" en "up (u)", "down (d)", "charm (c)", "strange (s)", "top (t)" i "bottom (b)". Cada "sabor" està caracteritzat per la seva massa i la seva càrrega elèctrica. Per a construir protons i neutrons fan falta dos tipus de quarks els "up" i els "down". La

Figura 30 mostra que un protó està format per 3 quarks: dos “up” i un “down”.

A més de tenir càrrega elèctrica i massa, cada tipus de quark, té una propietat anomenada color (que no té res a veure amb el color que nosaltres veiem!) És un nom com un altre qualsevol per a una propietat que pot tenir tres valors diferents: vermell, verd o blau.

Hi ha sis tipus de leptons diferents que formen les tres generacions que es mostren a la Figura 29. La primera generació són els leptons electrònics: electrons i neutrins electrònics ( $\nu_e$ ), la segona són els leptons muònics: muons ( $\mu$ ) i neutrins muònics ( $\nu_\mu$ ) i la tercera el leptons tauònics: tausons ( $\tau$ ) i neutrins tauònics ( $\nu_\tau$ ). La Taula 7 mostra on els podem trobar a la natura.



protó

Figura 30. Estructura del protó

<i>Electró</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es troba en àtoms</li> <li>• Important en els corrents elèctrics</li> <li>• Produït en la radiació beta</li> </ul>
<i>Muó</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produït a les capes altes de l'atmosfera pels raigs còsmics</li> </ul>
<i>Tau</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Només vist al laboratori</li> </ul>
<i>Neutrí electrònic</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produït en la radiació beta</li> <li>• Produït en gran nombre per reactors nuclears</li> <li>• Produït en gran nombre pel Sol</li> </ul>
<i>Neutrí muònic</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produït per reactors nuclears</li> <li>• Produït a les capes altes de l'atmosfera pels raigs còsmics</li> <li>• Produït pel Sol</li> </ul>
<i>Neutrí tauònic</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Només vist al laboratori</li> </ul>

Taula 7. Leptons a la natura

## Qüestions

- 53 Busqueu informació sobre Enrico Fermi i anoteu la seves principals contribucions a la física nuclear i de partícules.
- 54 On està el Fermi National Accelerator Lab (Fermilab)? Quin és el principal projecte de recerca actualment?
- 55 Demostreu que la càrrega elèctrica d'un protó és la que li correspon a partir de les càrregues dels quarks que el formen. Dades: càrrega quark “up” = + 2/3 i càrrega quark “down” = - 1/3.
- 56 Quina combinació de quarks “up” i “down” formen un neutró?



**ACTIVITAT 19 El joc de les partícules elementals**

En aquesta activitat se us planteja un joc de cartes de “partícules elementals”. El joc presenta diferents modalitats, consulteu les instruccions.

Podeu descarregar-vos les cartes i veure les diferents modalitats de la web

[http://www.xtec.cat/rrfisica/o\\_plana\\_001/joc\\_de\\_les\\_particules.htm](http://www.xtec.cat/rrfisica/o_plana_001/joc_de_les_particules.htm)

**3.1.1 I l'antimatèria?**

Ja heu vist que el positró és una partícula idèntica en tot a l'electró, però amb càrrega elèctrica de signe oposat. Aquest antielectró va ser el primer exemple d'**antimatèria** que es va descobrir. Des de llavors s'ha trobat l'antimatèria corresponent a totes les partícules conegudes. És a dir, per cada tipus de partícula que existeix, hi ha la corresponent **antipartícula**, idèntica en tot (massa, valor de la càrrega elèctrica, etc.) a la partícula, però amb el signe de la càrrega elèctrica (si en té) oposat. I passa el mateix amb els quarks i els leptons: per cadascun dels quarks i dels leptons comentats, existeix l'antiquark i l'antileptó corresponent. Cada antipartícula es representa pel mateix símbol que la partícula corresponent, amb una petita barra a sobre (excepte en el cas del positró que en lloc de simbolitzar-lo com  $\bar{e}$  se'l representa per  $e^+$ ). Totes les antipartícules tenen cabuda en el model estàndard. De fet, els 12 fermions de la Figura 29 tenen les seves corresponents antipartícules. L'antimatèria estaria formada pels antifermions, és a dir, els antiquarks i els antileptons.

Molts relats de ciència ficció assignen a l'antimatèria propietats falses, com, per exemple, una capacitat antigravitatòria. El que sí és cert és que quan es troben una partícula i la seva antipartícula es desintegren mútuament i tota la seva massa es converteix en energia, produint un flaix de raigs gamma. Aquest és el procés físic conegut que proporciona més energia per unitat de massa. Tot i que les antipartícules són molt escasses (precisament perquè es desintegren en quant es troben amb una partícula) els físics de partícules poden crear-les i, de fet, actualment, l'antimatèria es fa servir de manera rutinària per a fer experiments en física de partícules.

S'ha especulat amb la possibilitat de que en alguna zona de l'univers abundi l'antimatèria: antiàtoms en els quals antiprotons i antineutrons estarien envoltats per positrons: no hi ha res a les lleis de la física que suggereixi que un positró girant al voltant d'un antiprotó no pugui ser tan estable com un àtom d'hidrogen convencional. Però en el nostre entorn l'antimatèria pràcticament no existeix. A *The Antimatter Factory* (la fàbrica d'antimatèria), del CERN s'han produït alguns milers d'àtoms d'antihidrogen per tal d'estudiar les seves propietats i comparar-les amb la matèria ordinària.

## Qüestions

- 57** Construïu, a partir dels antiquarks corresponents un antineutró i un antiprotó. Adjunteu també l'estructura del protó i del neutró.
- 58** Què és l'antimatèria? Com es crea? Es pot produir antimatèria? Des de quan es parla d'antimatèria? Qui va predir la seva existència? Quines aplicacions de l'antimatèria coneixeu? Consulteu la pàgina web del CERN <http://home.web.cern.ch/topics/antimatter/antimatter-cern> per a contestar a aquestes preguntes.

## 3.2 Forces fonamentals i interaccions

Els físics han identificat quatre forces fonamentals que operen a la natura. Una força és fonamental quan no pot ser explicada en termes d'una altra. Per exemple, la força de fricció no és fonamental perquè és un cas particular d'interacció elèctrica entre dos tipus d'àtoms (els que formen les superfícies que freguen). Aquestes forces fonamentals són: la força gravitatòria, la força electromagnètica, la força nuclear forta i la força nuclear feble. Qualsevol tipus de força que apareix a la natura és d'un d'aquest quatre tipus bàsics.

Aquestes forces fonamentals presenten un abast i una certa intensitat. L'**abast d'una força** indica la màxima distància que es poden separar dos objectes perquè la puguin experimentar. Per a donar idea de la intensitat d'aquestes forces, es defineix la **intensitat relativa** que és una manera de comparar com de fortes són els diferents tipus de forces actuant sobre una mateixa parella d'objectes. En la Taula 8 es recullen les principals característiques de les quatre forces fonamentals. Els valors recollits en aquesta taula corresponen a la força que experimentarien dos protons separats aproximadament uns  $10^{-15}$  m.

Força	Abast	Intensitat relativa	Actua entre ...	Permet explicar
Gravitatòria	Infinit	$10^{-34}$	Tots els objectes que tenen massa	<ul style="list-style-type: none"> <li>Moviment astres i caiguda dels cossos.</li> <li>Estructura de l'Univers (galàxies, estrelles ...)</li> </ul>
Electromagnètica	Infinit	10	Objectes carregats elèctricament	<ul style="list-style-type: none"> <li>Forces de contacte</li> <li>Existència de la química (àtoms, molècules i éssers vius)</li> </ul>
Força	$10^{-15}$ m	$10^3$	Quarks	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estabilitat del nucli atòmic</li> </ul>
Feble	$10^{-18}$ m	$10^{-10}$	Partícules fonamentals	<ul style="list-style-type: none"> <li>La transformació d'unes partícules en unes altres (desintegració <math>\beta</math>)</li> </ul>

Taula 8. Característiques de les quatre forces fonamentals de la natura

## Qüestió

59 Quina força fonamental actua en les següents situacions? Identifiqueu els cossos entre els quals actua la força.

- Un quark i un antiquark formen un mesó.
- La Terra en òrbita al voltant del Sol.
- L'agulla d'una brúixola apunta cap al Nord.
- Protons i neutrons units per a formar el nucli atòmic.
- Un salt de perxa.
- Un fotomultiplicador.
- Un neutrí electrònic és absorbit per un nucli atòmic.
- Un esquiador baixant per un pendent a gran velocitat.
- Un satèl·lit de comunicacions en òrbita al voltant de la Terra.
- Un salt de bungee.

### Unir partícules elementals mitjançant la interacció forta

No totes les forces fonamentals actuen sobre qualsevol partícula. Per exemple, la diferència entre els quarks i els leptons és que els primers experimenten la força forta i els leptons no. Tal i com s'indica a la Taula 8, entre dos quarks la interacció forta domina sobre totes les altres forces. De fet, la interacció forta és tan intensa que uneix els quarks en grups que no poden ser separats.

Les partícules formades per quarks s'anomenen **hadrons** (del grec "pesats"). Els quarks no es troben mai sols, sinó que sempre es troben agrupats formant hadrons. Existeixen dos tipus d'hadrons, és a dir, dues formes en què es poden agrupar els quarks:

- els **barions**, formats per tres quarks.
- els **mesons**, formats per un quark i un antiquark.

En la Figura 31 es mostren alguns barions i mesons i els seus constituents. Cada barió té el seu corresponent antibarió on els quarks són reemplaçats pels corresponents antiquarks. Per exemple, un protó està format per dos quarks "up" i un quark "down" (uud), l'antiprotó estarà format per dos antiquarks "up" ( $\bar{u}$ ) i un antiquark "down" ( $\bar{d}$ ) i serà ( $\bar{u} \bar{u} \bar{d}$ ), com heu fet en la Qüestió 57.

Hi ha molts tipus de barions diferents, els més coneguts són els protons i els neutrons. La matèria bariònica inclou tots els àtoms i per tant la matèria que tractem habitualment, fins i tot el nostre cos és matèria bariònica.

Els mesons, que són molt poc estables, són partícules subatòmiques que es mantenen unides gràcies a la interacció forta. Els de menor massa són més estables i per tant, són més fàcils d'observar i estudiar en acceleradors de partícules i en experiments de raigs còsmics.

En definitiva, la força forta és molt intensa i té un abast molt petit. És la responsable de mantenir units, per exemple, els protons i els neutrons i per tant de mantenir unit el nucli atòmic.

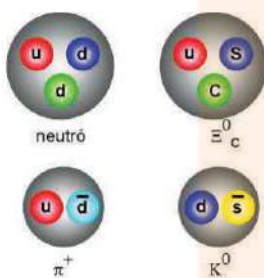


Figura 31. Barions: neutró i Xi ( $\Xi$ ) i mesons: pions ( $\pi$ ) i kaons ( $K$ )

### ACTIVITAT 20 Construir un àtom a partir de quarks i leptons



En aquesta activitat heu de construir un àtom de carboni-12 “peça a peça” a partir de quarks i electrons amb ajuda d’una miniaplicació. Connecteu-vos a la pàgina

<http://www.pbs.org/wgbh/aso/tryit/atom/>

on trobareu la miniaplicació anomenada “Atom Builder” (Constructor d’àtoms)

### Modificar la naturalesa de les partícules amb l’interacció feble

La força feble o dèbil és la responsable de que alguns tipus de partícules es converteixen en unes d’altres. És el que succeeix en la desintegració beta positiva i negativa. Tal com heu vist en el seu moment, en aquests processos es fa necessària l’aparició del positró i del neutrí electrònic, respectivament, per tal de no violar cap de lleis de conservació en el procés.

### Construir àtoms amb la força electromagnètica

L’abast de les forces electromagnètiques és prou gran per a mantenir units els àtoms i les molècules. És a dir, el seu reialme és el món de la química i de la biologia. Molts aspectes interessants dels éssers vius poden ser entesos en termes químics i aquests es poden visualitzar amb tècniques com la tomografia d’emissió de positrons que ja heu vist.

### La interacció dels astres: la força gravitatòria

La força gravitatòria és la més feble de totes, però si posem “prou” hadrons i leptons junts, la massa del conjunt serà rellevant i aleshores aquesta força començarà a ser dominant. A més a més, té un abast infinit, de manera que és la responsable que els planetes, estrelles i els la resta d’astres es mantinguin junts. També és la responsable dels moviments celestes. Es pot afirmar que és la que manté unit i en funcionament l’univers a gran escala.

### 3.2.1 Una nova manera d’entendre les interaccions

En la unitat anterior s’ha definit el concepte de camp gravitatori per tal d’explicar la interacció a distància entre els diferents planetes, estrelles i satèl·lits. De manera anàloga, en unitats posteriors es definiran, de manera molt semblant, el camp magnètic i el camp elèctric per a explicar les interaccions a distància entre imants i càrregues.

La mecànica quàntica i els processos que d’ella se’n deriven, han dut als físics a una manera totalment nova de veure els camps i la matèria. L’aplicació de la mecànica quàntica al concepte de camp clàssic va portar a desenvolupar les **teories quàntiques de camps** (TQC). Segons aquestes teories, les interaccions consisteixen en un intercanvi de partícules que són les portadores de la força i reben el nom de **bosons**. En la Figura 29 de les partícules fonamentals del model estàndard apareixen quatre partícules portadores de força: el fotó (força electromagnètica), el gluó (força forta) i els bosons Z i W (força feble), amb els seus principals

paràmetres. En aquesta figura manca la partícula portadora de la força gravitatòria: el gravitó, de la qual encara no es té evidència experimental.

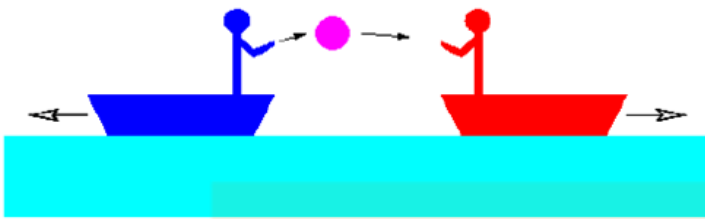


Figura 32. Intercanvi de partícules com a origen d'una interacció repulsiva: les partícules se separen

Segons les TQC, les forces atractives i repulsives s'entenen com l'intercanvi de partícules entre els objectes que interactuen. Per a entendre una força repulsiva entre partícules es pot fer l'analogia d'un amic que tira una pilota a un altre amic com mostra la Figura 32. El resultat d'aquest procés és que els dos amics intercanvien una "partícula" entre ells i s'allunyen l'un de l'altre. De manera semblant podem fer l'analogia d'una força atractiva amb el símil de dos gossos que

lluiten aferrissadament per un os (Figura 33).

En la Taula 9 es resumeixen les teories que tracten les diferents interaccions fonamentals i les partícules mediadores o portadores de força.



Figura 33. Intercanvi de partícules com a origen d'una interacció atractiva: les partícules queden unides

Interacció	Teoria descriptiva	Mediadors
Gravitatòria	Relativitat General	Gravitons
Electromagnètica	Electrodinàmica Quàntica (QED)	Fotons
Feble	Teoria Electrofeble	Bosons W i Z
Forta	Cromodinàmica Quàntica (QCD)	Gluons

Taula 9. Teories i partícules portadores en les quatre interaccions: gravitons, fotons, bosons W i Z i gluons

El camp electromagnètic clàssic (anàleg al camp gravitatori estudiat), esdevé, en la visió quàntica, un creador i destructor de fotons. En el primer apartat de la unitat heu vist que és possible crear parelles electró – positró a partir de fotons i d'anihilar parelles partícula – antipartícula per a crear fotons. La **teoria de l'electrodinàmica quàntica** és una teoria quàntica de camps relativista aplicada a la interacció de les partícules carregades elèctricament. La teoria descriu com interaccionen la llum i la matèria mitjançant l'intercanvi de fotons (que són els portadors de la força).

Aquestes teories són d'una gran complexitat matemàtica. Per a representar aquestes interaccions s'utilitza un mètode desenvolupat per Richard Feynman (premi Nobel de Física l'any 1965): els diagrames de Feynman (Figura 34). La electrodinàmica quàntica permet calcular la probabilitat de que es doni un resultat o un altre en fer un experiment, idea totalment d'acord amb la interpretació probabilística de la mecànica quàntica. Les prediccions de la teoria i els resultats experimentals estan en gran acord, la qual cosa fa que aquesta teoria sigui una de les teories físiques més precises desenvolupades fins avui en dia.

La **cromodinàmica quàntica** és una altra teoria quàntica de camps, la de la interacció nuclear forta. A la interacció forta li correspon la força fonamental forta que descriu la interacció entre quarks i gluons i que fa

que existeixin els hadrons. Les partícules portadores de la força són els gluons, que són els quanta del camp que mantenen units els quarks i fan que no es puguin trobar aïllats. En la Figura 34 (b) es mostra el diagrama de Feynman corresponen a l'intercanvi de gluons entre dos quarks.

La **teoria de la interacció electrofeble** és la teoria que descriu la unificació de dues de les interaccions fonamentals: la força electromagnètica i la força nuclear feble. Encara que aquestes dues forces semblen molt diferents a baixes energies, les energies habituals del dia a dia, la teoria les presenta com dos aspectes diferents de la mateixa força. Per sobre dels 100 GeV, l'energia d'unificació, esdevenen una única força: la força electrofeble. Aquesta energia correspon a una temperatura de l'univers d'aproximadament  $10^{15}$  K, la temperatura una mica després del Big Bang. La interacció feble és deguda a l'intercanvi de bosons Z i W que actuen sobre partícules elementals (Figura 34 c).

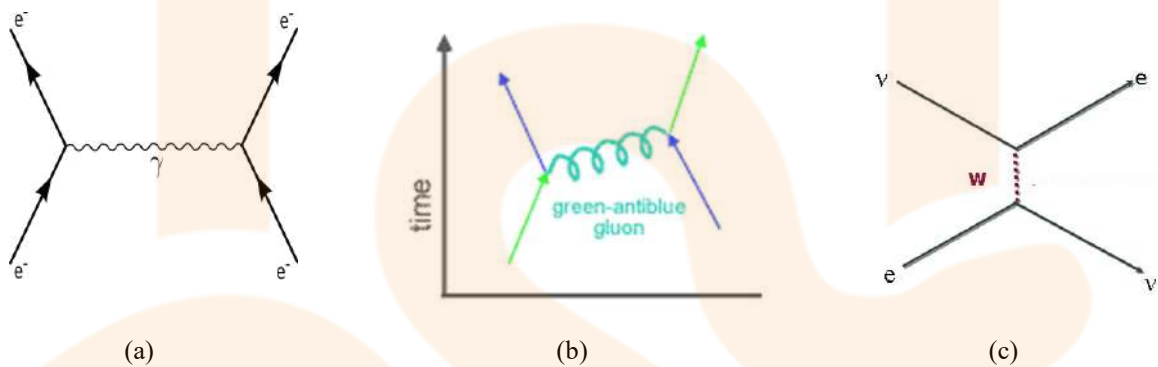


Figura 34. Diagrames de Feynman de la interacció (a) entre dos electrons: un electró interactua amb un altre emetent un fotó que és absorbit pel segon, (b) dos quarks: un quark verd emet un gluó verd-antiblau i es transforma en un quark blau i (c) intercanvi d'un bosó W entre un neutrí electrònic i un electró

Per simetria, els físics esperen que la interacció gravitatòria es produeixi per l'intercanvi d'unes partícules anomenades gravitons, però qualsevol intent de detectar-los ha estat, fins al moment, fallit.

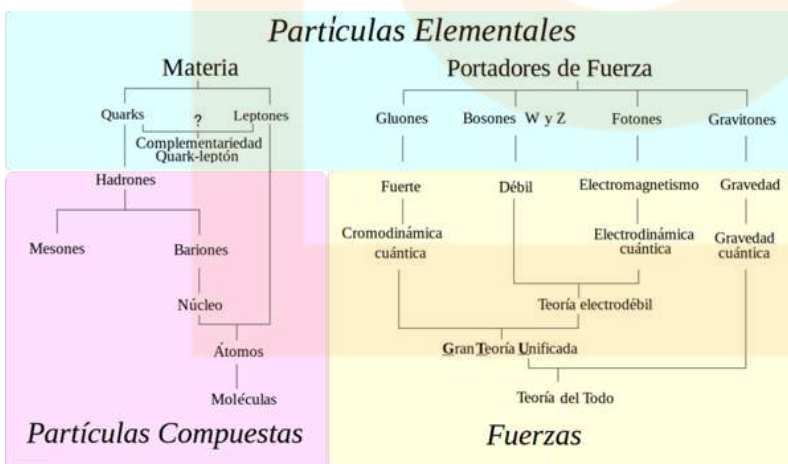


Figura 35. Resum de les partícules elementals i les diferents teories quàntiques (Imatge adaptada per Jakeukalane [CC-BY-SA-3.0], via Wikimedia Commons)



### 3.2.2 Les teories de gran unificació

Els models matemàtics així, com els experiments duts a terme fins a l'actualitat, mostren que les quatre forces fonamentals no són tan diferents entre si. Quan les energies involucrades són prou grans, algunes d'aquestes forces s'unifiquen. Així, per exemple, ja heu vist que la interacció feble i l'electromagnètica, són manifestacions diferents d'una mateixa interacció: la interacció electrofeble.

A energies encara més altes, la interacció electrofeble i la interacció forta s'unificarien en una única força, en la Teoria de Gran Unificació (GUT, de l'anglès Grand Unified Theory). Segons les GUTs totes les partícules s'originarien a partir d'un únic tipus d'interacció. Dissortadament, cap de les teories de gran unificació ha pogut comprovar-se en experiments ja que les energies de les partícules són molt elevades –molt més del que es pot aconseguir actualment en els experiments. Partícules amb aquestes energies haurien existit a l'inici de l'univers quan tota la matèria i l'energia estaven comprimides en un punt. És per això que les teories de gran unificació estan relacionades amb l'origen de l'univers.

El model estàndard no és una teoria completa de les interaccions fonamentals ja que la interacció gravitatòria s'escapa totalment d'aquest esquema. Actualment s'estan desenvolupant diverses teories quàntiques de la gravetat, com per exemple la teoria de cordes, però cap d'elles és acceptada per la majoria de la comunitat científica, així que encara no hi ha formulada una teoria quàntica de la gravetat.

La Figura 36 mostra un esquema de la unificació de les diferents interaccions, excepte la gravitació. Des de que Newton desenvolupà la teoria de la gravitació universal unificant les lleis “del que passava a la Terra” i les lleis “del que passava al cel”, els científics encara persegueixen la *teoria del tot*.

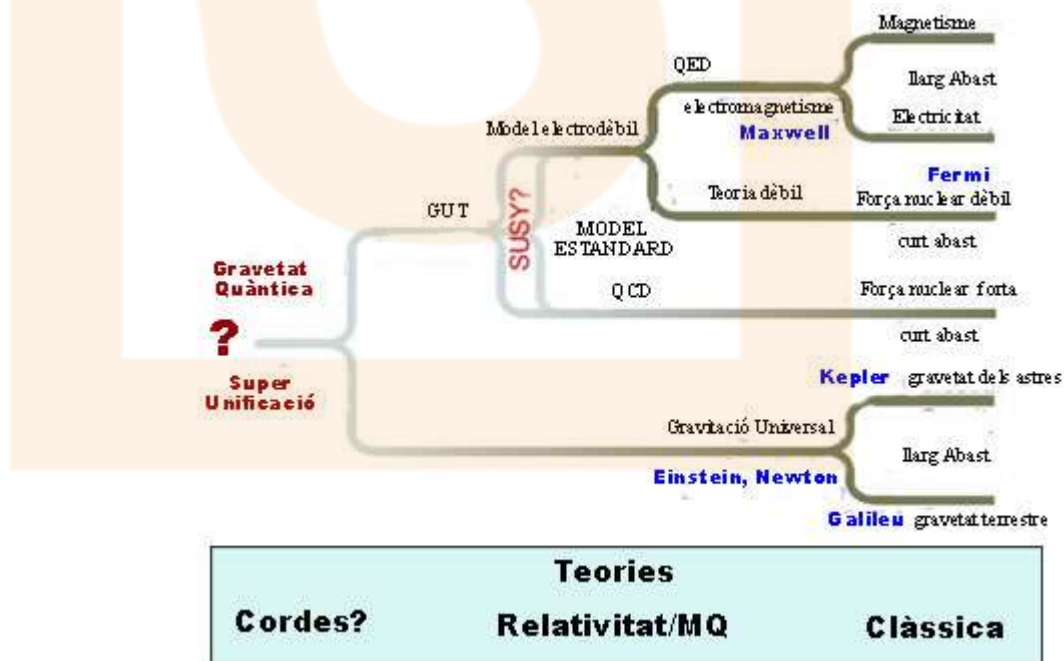


Figura 36. Unificació de les diferents interaccions



### 3.3 I més enllà del model estàndard?

Des de mitjans del segle XX molts experiments confirmen les prediccions del model estàndard. El model descriu de manera molt acurada la matèria i les forces conegudes amb una precisió molt gran, però no deixa de ser una teoria “efectista”. Amb aquest qualificatiu, es vol dir que el model funciona, però no explica per què funciona. Deixa preguntes per a resoldre, com per exemple:

- Per què les partícules tenen la massa que tenen?
- Si l'antimatèria es crea en igualtat de condicions que la matèria, perquè s'ha trencat aquesta simetria?

La resposta a aquestes i d'altres preguntes es troba en mans dels grans acceleradors i detectors de partícules com el LHC que s'acaba de construir al CERN. Aquest accelerador és el més potent que ha construït mai la humanitat. La idea del funcionament del LHC és fer xocar frontalment feixos de partícules (bàsicament protons) a altes energies (velocitats). Quanta més energia tingui la col·lisió, més petits seran els trossos que s'obtidran i aquests fragments seran estudiats per quatre grans detectors (ATLAS, CMS, LHCb i ALICE).

Els experiments d'ATLAS i de CMS competeixen per a trobar la partícula que la teoria prediu que és l'origen de la massa dels objectes: el **bosó de Higgs**, o com l'anomenen alguns autors, la “partícula divina” (Figura 37). El LHCb intentarà explicar l'origen de l'asimetria entre la quantitat de matèria i d'antimatèria. L'ALICE pretén estudiar l'estat en que es trobava la matèria en un estat molt inicial de l'univers, vol estudiar la sopa de quarks primigènia.

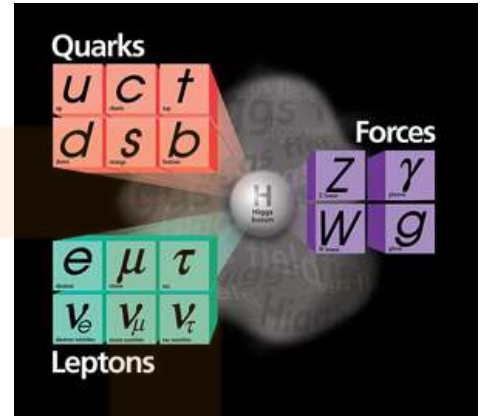


Figura 37. El bosó de Higgs és la partícula que ha de permetre explicar la massa de les diferents partícules elementals (Font Fermi National Accelerator Laboratory [Public Domain])

#### El bosó de Higgs



Durant el mes de juliol de 2012 s'ha donat a conèixer per part del CERN el descobriment d'una nova partícula que sembla ser el bosó de Higgs. *La Vanguardia* en parla en uns articles.

#### ACTIVITAT 21 La física de partícules avui

Consulteu les pàgines webs dels principals laboratoris experimentals de física d'ales energies: [Brookhaven National Laboratory](#), [Budker Institute of Nuclear Physics](#), [CERN](#), [DESY](#), [Fermilab](#), [IHEP](#), [KEK](#) i [SLAC](#), per a trobar informació actualitzada sobre els principals experiments en física de partícules que s'estan portant a terme actualment i/o els previstos. On es troben aquests laboratoris? Com es financien aquestes institucions i la recerca que porten a terme?

En petits grups discutiu les vostres opinions sobre com s'organitza i es finança la investigació en aquest camp.



## 4 Una mirada a l'univers

El model estàndard diu que tota la matèria està construïda a partir de quarks i leptons que interactuen per mitjà de partícules portadores de força. Quan l'agregat de matèria ha crescut prou i la massa del sistema comença a ser rellevant, una nova interacció fa acte de presència i comença a esdevenir dominant: la gravetat.

Aquesta interacció és la responsable de que els objectes caiguin, de que els planetes, els satèl·lits, les estrelles ... hagin pogut crear-se (per aglomeració de fragments). D'igual forma explica per què existeix el Sistema Solar i sistemes més grans com són les galàxies, cúmuls de galàxies i supercúmuls galàctics.

Newton en estudiar la gravetat pensava en ella com una força que permetia la interacció instantània entre els cossos que formen l'univers. Com ja sabeu, la relativitat especial diu que això no és possible ja que la velocitat de la llum és un límit. Així, quan Einstein va incloure els postulats de la relativitat especial a la gravetat va arribar a una nova teoria sobre la gravetat: la **Relativitat General**.

### La relativitat general

Com s'imagina Einstein la gravetat? El següent vídeo us ho mostra:

[https://www.youtube.com/watch?feature=player\\_embedded&v=3dPi5hIWLkM](https://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=3dPi5hIWLkM)

### 4.1 Idees sobre cosmologia

La cosmologia és la ciència que es dedica a l'estudi de l'origen i l'evolució de l'univers en la seva globalitat. En aquest estudi cal la col·laboració d'astrònoms, astrofísics i físics de partícules.

Quan hom mira al cel veu un munt de punts lluminosos, alguns de fixes (estrelles) i d'altres en moviment (planetes o satèl·lits artificials). Recordeu que segons el model heliocèntric de l'univers el Sol ocupava el centre de l'univers, al seu voltant giraven la Terra i els altres planetes i les estrelles fixes estaven més enllà del darrer planeta.

Molt aviat es va veure que la distància a les estrelles devia ser molt gran. Si es podien veure des de distàncies tan grans és perquè devien ser molt brillants, tant o més que el nostre Sol. Els científics es van adonar que el Sol no era el centre de l'univers, sinó només una estrella més entre molts milers. Actualment la mesura de les distàncies a les estrelles es fa de manera sistemàtica amb ajuda de satèl·lits.



Figura 38. Galàxia espiral M74. La nostra galàxia, la Via Làctia, és d'aquest tipus (Font NASA)

## Potències de 10

El programa *Digits* ens permet fer un viatge des del més petit fins al més gran.

[https://www.youtube.com/watch?feature=player\\_embedded&v=9JUpl4ncWg](https://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=9JUpl4ncWg)

La Figura 38 mostra un tipus de galàxia anomenada espiral degut a la forma que té. Els astrònoms han descobert un nombre molt gran de galàxies (amb formes com la de la fotografia o d'altres), i cadascuna està formada per milers de milions d'estrelles. Si uns objectes tant brillants els veiem tan febles, és un senyal clar que estan molt lluny. De fet, el nostre sistema solar està situat en un dels braços de l'espiral de la "nostra galàxia", la Via Làctia (Figura 39). Des de la Terra no es pot veure la galàxia des de fora, però sí que es pot veure, en nits fosques, la zona central de la Via Làctia, on més abunden les estrelles, com una banda lleument il·luminada.

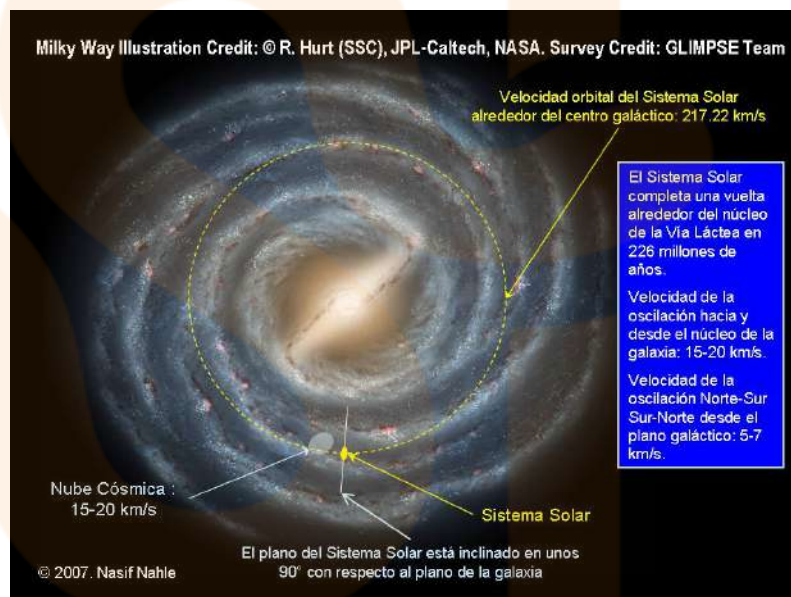


Figura 39. Posició del Sistema Solar en la Via Làctia (Font NASA)

## Una mirada a l'univers

El telescopi espacial Hubble és un telescopi que es va posar en òrbita a l'abril de l'any 1990 com un projecte conjunt de la NASA i de l'ESA. Situat fora de l'atmosfera de la Terra a uns 600 km d'altura sobre el nivell del mar obté imatges extremadament clares.

<http://hubblesite.org/gallery/album/>

### 4.1.1 Desplaçament cap al vermell

Cap a l'any 1929, Edwin Hubble, que treballava al telescopi de Mount Wilson (EUA), ja s'havia adonat que les nebuloses de les que parlaven els astrònoms fins aquells moments no es trobaven en la nostra galàxia, sinó que eren noves galàxies que resultaven ser una de les estructures fonamentals de l'univers. Estudiant la llum que ens arriba d'un cos podem arribar a conèixer la seva composició. En estudiar l'espectre d'emissió de les galàxies, els astrònoms es van trobar que les ratlles fosques que apareixien es trobaven desplaçades. Aquest fenomen es va anomenar desplaçament cap al vermell, perquè les línies es desplaçaven cap a l'extrem vermell de l'espectre visible, la zona amb menors freqüències (Figura 40).

El desplaçament cap al vermell es pot explicar amb l'anomenat "efecte Doppler" i es produeix quan un emissor de llum (o d'altres ones) s'allunya a gran velocitat de l'observador. Hubble va mesurar el desplaçament cap al vermell de 24 galàxies i va descobrir que les galàxies s'allunyen més ràpidament quan es troben més lluny de nosaltres. Hubble va observar que la velocitat amb que s'allunya una galàxia de l'observador (en la Terra) és directament proporcional a la distància a la que es troba de la Terra. Així, la llei de Hubble s'expressa matemàticament com

$$v = H_0 d \quad (26)$$

on  $v$  és la velocitat d'allunyament de la galàxia respecte un observador a la Terra,  $d$  és la distància que separa la galàxia i l'observador i  $H_0$  és la constant de Hubble. El seu valor és molt difícil d'avaluar perquè depèn d'una mesura molt acurada de les distàncies implicades. A més a més, els darrers models semblen indicar que el seu valor ha anat variant amb el temps. Actualment el valor de la constant de Hubble acceptat és  $H_0 = 2,3 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$ . El descobriment de Hubble implica que l'univers no està en repòs, tal com es pensava fins a les hores, sinó que s'està expandint. Fins i tot Einstein en formular la teoria de la relativitat general havia imposat la condició de repòs de l'univers, però estava equivocat.

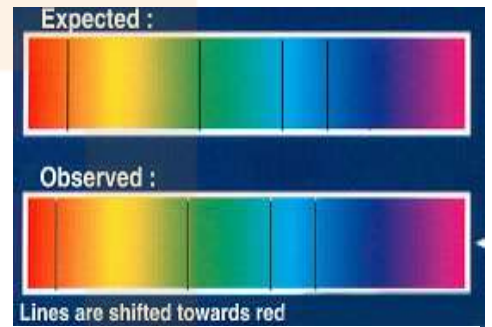


Figura 40. Desplaçament de les línies espectrals cap al vermell (Font NASA)

#### Qüestions

- 60** En astronomia es treballa amb distàncies molt grans. És per això que s'utilitzen unes unitats de mesura que no són les del SI. Les unitats per a mesurar distàncies són diverses però les més habituals són l'any-llum, la unitat astronòmica i el parsec.
- Com es defineixen aquestes tres unitats i quines són les seves abreviacions?
  - Trobeu la seva equivalència en la unitat corresponent del SI.
- 61** El Sol és l'estrella més propera a la Terra. Expressau la distància del Sol a la Terra en quilòmetres, en anys-llum, en unitats astronòmiques i en parsecs. Esbrineu quina és la segona estrella més propera a la Terra i indiqueu la distància a la que es troba en les unitats anteriors.

**ACTIVITAT 22 L'Univers de goma**

Amb un retolador feu unes 5 marques a intervals d'2 cm cadascuna sobre un globus desinflat.. Cada marca representa una galàxia (marqueu-les com a 1, 2, 3...). Dibuixeu un observador (representat per un ull, per exemple) a una de les galàxies. Infleu el globus per a simular l'expansió de l'univers.

L'Activitat 22 mostra un fet fonamental: l'univers s'expandeix en totes les direccions no perquè les galàxies es moguin cap a "l'exterior", sinó perquè l'espai entre elles s'està expandint.

**La paradoxa d'Olbers**

Si hi ha milers de milions d'estrelles com és que quan el Sol no ens il·lumina el cel es torna fosc?

<http://www.nostranau.net/paradoxa-dolbers>

**4.2 La teoria del Big Bang**

Si acceptem que l'univers s'expandeix, apareix una conclusió interessant sobre el passat: en el passat, les distàncies entre les diferents galàxies devien ser més petites que ara i l'univers havia de ser més petit que en l'actualitat. Duent el temps prou endarrere, es podria parlar d'un moment en què tot l'univers es concentrava en un punt.

**Inici i final de l'univers**

*Al començament, no existia l'espai, ni el temps ni el buit... Així comença un dels capítols de la sèrie Nostranau.*

<http://www.nostranau.net/inici-i-final-de-tot>

**4.2.1 Al principi**

La teoria sobre l'origen de l'univers més acceptada és la teoria del Big Bang o de la gran explosió. La idea és que l'univers va aparèixer fa uns 13700 milions d'anys a partir d'un estat de densitat d'energia i temperatura infinits (Hawking i altres autors es refereixen a aquest estat com la **singularitat primordial**) a partir del qual va aparèixer l'espai – temps que defineix la teoria de la relativitat i que ha donat lloc a l'univers tal i com és actualment. El Big Bang representa l'origen de l'espai i del temps i des d'aquest punt de vista no té sentit demanar-se on va tenir lloc, ni què hi havia abans. Mentre l'univers s'anava expandint la temperatura anava disminuint i la matèria es va poder anant condensant formant galàxies, estrelles i planetes.

A l'hora d'estudiar l'origen i l'evolució de l'univers, la física de partícules i per tant el model estàndard juga un paper fonamental. Les energies involucrades en l'inici eren tan grans que la matèria tal com es



coneix encara no existia. En aquells moments, totes les forces estaven unificades i per tant les teories de gran unificació (GUTs), que encara no han pogut ser comprovades experimentalment, esdevenen imprescindibles. En aquells moments tot era radiació (energia) i partícules fonamentals.

Aquest fet porta a la paradoxa de que si es vol estudiar l'univers (el sistema més gran que existeix) s'ha de conèixer molt bé el món més petit (les partícules fonamentals). Quan la física de partícules estudia amb un accelerador com el LHC les intimitats de la matèria en realitat està fent un viatge en el temps i està estudiant l'evolució de l'univers (Figura 41). Els acceleradors com el LHC permeten recrear en un laboratori el Big Bang.

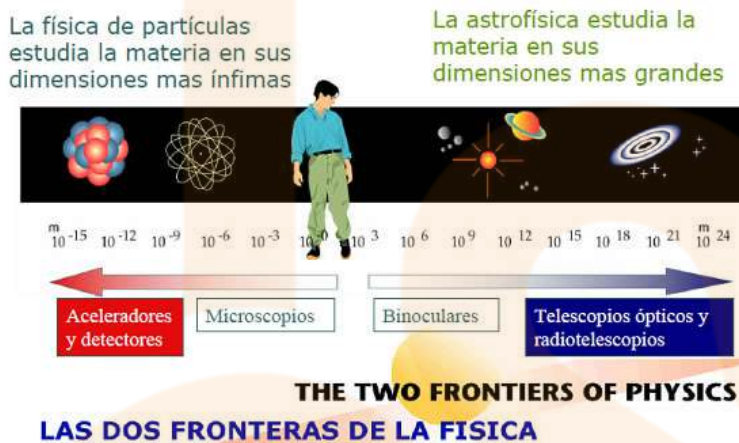


Figura 41. Les dues fronteres de la física: com la física de partícules explica l'evolució de l'univers (Font CERN)

Un físic de partícules anomenat Alan Guth va ser el primer en aplicar idees de la física de partícules per a explicar l'evolució de l'univers uns instants després del Big Bang. Els seus càlculs mostraven que l'expansió de l'univers no havia tingut lloc de manera gradual, a un ritme constant, com tothom suposava. L'univers hauria augmentat la seva grandària a una velocitat enorme durant un interval de temps molt breu: en uns  $10^{-35}$  s l'univers s'hauria fet  $10^{50}$  vegades més gran. Aquest fenomen, anomenat inflació de l'univers, ocupa un lloc fonamental en la teoria del Big Bang.

#### 4.2.2 La història de l'univers

En aquest apartat de la unitat es tracta l'origen de l'univers i en l'anterior es van tractar les partícules elementals. Ara aquests dos temes s'uneixen per a explicar l'evolució de l'univers.

La temperatura és una magnitud que es relaciona amb la concentració d'energia. Per aquest motiu s'entén que, quan l'univers s'expandeix, la matèria i l'energia es van diluint i conseqüentment es produeix un refredament. Tot i que les estrelles es troben molt calentes, el satèl·lit COBE (Cosmic Background Explorer, l'explorador de la radiació còsmica de fons) ha trobat que la temperatura exterior de l'espai buit (on essencialment no hi ha matèria, només radiació), és de 2,7 K. Amb aquesta temperatura es pot afirmar que actualment a l'espai fa fred.

D'acord amb la teoria del Big Bang, quan l'univers era molt més jove que ara, l'energia estava concentrada en un volum molt més petit, i per tant la temperatura era molt alta. A temperatures altes les partícules de la matèria tenien energies molt grans, i xocaven i interaccionaven molt més violentament. Aquestes són les condicions que els físics intenten reproduir en els acceleradors de partícules avui en dia. Aquestes temperatures són massa altes perquè existeixin molècules o àtoms ja que es trencarien en les seves parts en xocar entre elles.

La història de l'univers es pot resumir així:

- Al principi hi havia un univers minúscul, calent i dens: la matèria estava en forma de quarks, hadrons i leptons.
- Actualment l'univers és extens i fred: la matèria es troba molt estesa en forma d'àtoms i molècules.

La Figura 42 mostra més detalladament com s'ha anat refredant l'univers al llarg del temps i les diferents eres que es poden distingir.

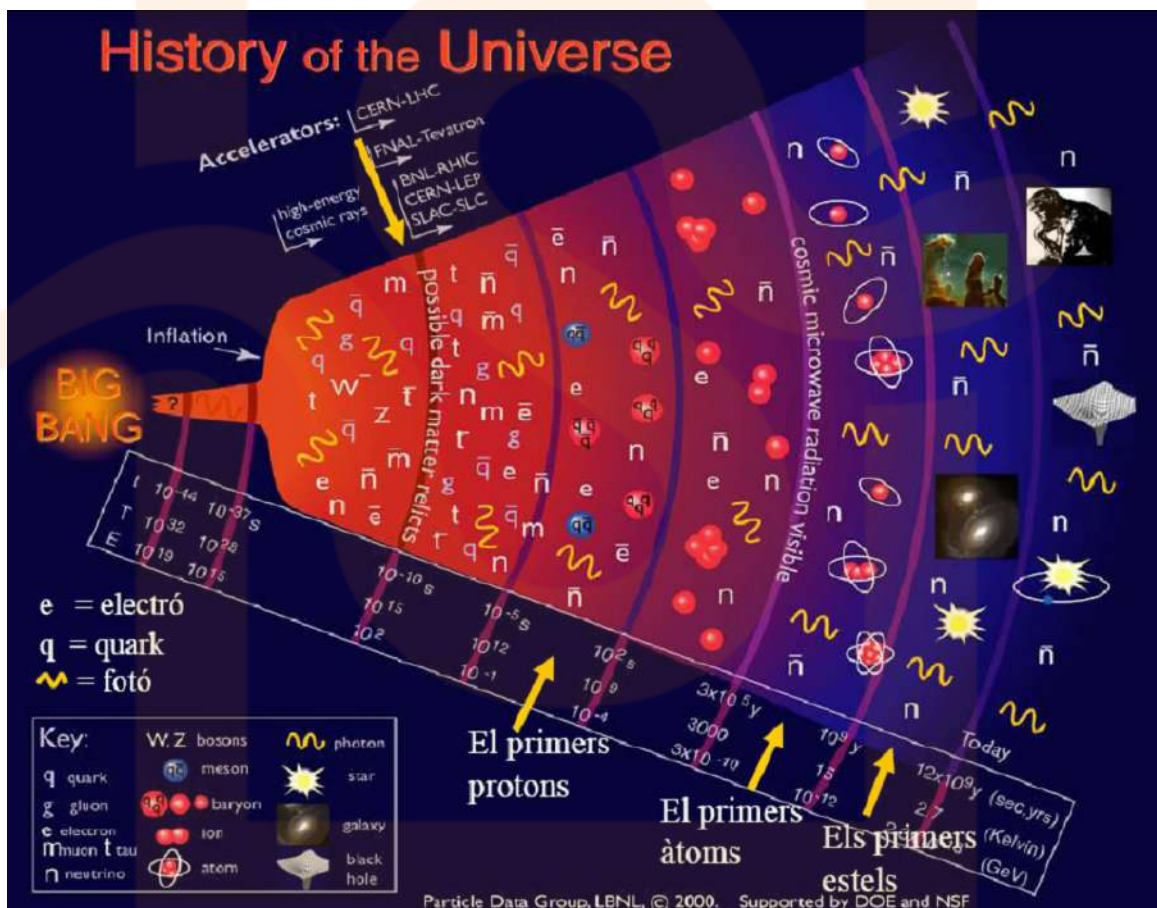


Figura 42. Les eres de la història de l'univers. Fixeu-vos en les escales de temps, temperatura i energia: a mida que passa el temps la temperatura disminueix i la densitat d'energia es dilueix (Imatge adaptada de Particle Data Group)

## La història pas a pas

### *El temps de Planck*

La física actual marca com a límit del coneixement en l'evolució de l'univers el temps de  $10^{-43}$  s. Des de  $t = 0$  fins a aquest instant, que s'anomena temps de Planck, les teories actuals no donen cap explicació. És un interval de temps en què les quatre interaccions fonamentals estarien unificades en una teoria quàntica que encara ningú no coneix i que la teoria de cordes intenta descriure (Figura 36).

### *L'era de la Gran Unificació*

Les teories de gran unificació (GUT) prediuen, encara que experimentalment no s'ha pogut comprovar, que la força electrofeble i la força nuclear forta s'acoblen en una superforça a una temperatura de  $10^{25}$  K, temperatura que l'univers tenia als  $10^{-37}$  s d'edat. En aquesta era l'univers consistia en un plasma dens format per radiació (fotons) i partícules elementals (quarks, neutrins) amb les seves corresponents antipartícules.

Quan en la seva expansió, la temperatura de l'univers va baixar dels  $10^{25}$  K, va tenir lloc la ruptura de la gran unificació. Aquesta ruptura va tenir dues conseqüències interessants. Per una banda, d'acord amb el model estandard el final de la gran unificació va originar un lleuger excés de matèria "normal" respecte a l'antimatèria, fet que explicaria perquè tots els cossos estan fets de matèria ordinària. On va anar a parar l'antimatèria primigènica? Aquest és un problema sense resoldre que intriga els físics des de fa dècades. Però fos com fos, poc després d'aquesta ruptura va desaparèixer l'antimatèria. El trencament d'aquesta simetria és un problema obert al que intenta donar resposta un dels detectors del LHC, concretament el LHCb.

Per una altra banda, la ruptura va provocar la inflació una breu expansió exponencial, és a dir, molt ràpida, durant un període de temps molt curt.

### *L'era del plasma de quarks i gluons*

Just després del període inflacionari la temperatura de l'univers era molt elevada. Això feia que la radiació fos tant energètica que es creaven contínuament parelles de partícules – antipartícules. La gran energia de la radiació també impedia que els quarks s'unissin per a formar partícules més estables. Al voltant dels  $10^{-5}$  s, quan la temperatura havia baixat fins als  $10^{12}$  K, el camp de radiació (els fotons) ja no tenia prou energia per a crear noves parelles partícula – antipartícula ni per a impedir la unió dels quarks.

Quan la temperatura és d'uns  $10^{15}$  K i l'edat de l'univers és de  $10^{-10}$  s, té lloc la ruptura de la força electrofeble i apareixen com a interaccions diferents la força nuclear dèbil i la nuclear forta. En el LHC s'assolirà una energia tal que es podrà estudiar l'univers en aquesta època tan primerenca.

### *L'era dels hadrons o de la recombinació*

Va dels  $10^{-5}$  s fins als 3 minuts. La temperatura ha baixat prou perquè els fotons ja no puguin trencar les unions dels quarks, amb la qual cosa van

començar a aparèixer els primers hadrons (protons i neutrons principalment). Tanmateix la radiació electromagnètica era prou energètica per a impedir la formació dels nuclis atòmics.

Entre els 3 i 13 minuts després del Big Bang va començar la nucleosíntesi: els neutrons i els protons es van començar a unir per a formar nuclis de deuteri i heli. Al final d'aquesta fase ja no quedaven neutrons lliures a l'univers i hi havia un 78% d'hidrogen i un 22% d'heli, gairebé la mateixa proporció actual

### *L'era del plasma*

Durant els 300.000 anys següents l'univers va estar constituït bàsicament de nuclis d'hidrogen, nuclis d'heli, leptons i fotons. La temperatura continuava essent massa alta per a que els electrons i els nuclis formessin àtoms. L'univers estava fet d'un gas ionitzat, estat al qual els físics anomenen plasma.

Al final d'aquests 300.000 anys, la temperatura havia disminuït el suficient com per permetre que els electrons s'enllacessin amb els nuclis, formant-se els primers àtoms. Aquest va ser un moment crucial: fins aleshores la força electromagnètica havia estat molt important, ja que tots els objectes estaven carregats. Després d'això, amb àtoms neutres, la gravitació va esdevenir la més important de les forces fonamentals a l'univers. L'equilibri entre la radiació electromagnètica i la matèria es trenca. En formar-se els àtoms, l'univers esdevingué "transparent" i els fotons començaren a viatjar lliurement per l'univers.

### *La formació de les primeres estructures*

Un cop formats els àtoms, aquests es van poder anar unint formant agregats de matèria cada vegada més grans. Així es van anar formant les estrelles i les galàxies. Al voltant d'algunes estrelles es formaren planetes i, com a mínim en un d'ells, es va donar el pas radical de desenvolupar la vida i evolucionar les seves formes. Després d'alguns temps, una forma complexa de vida va començar a fer-se preguntes sobre l'univers i, fins aquí hem arribat ... fa uns 13.700 milions d'anys.

## Qüestions

- 62** Completeu el quadre de la Taula 10 sobre les etapes de l'evolució de l'univers.
- 63** Com és possible que puguin tenir importància en l'univers actual eres que van durar tan poc i que van acabar fa tant de temps?
- 64** Com canvia la temperatura al llarg de la història de l'univers? I les dimensions? I la densitat?

<i>Era</i>	<i>Durada</i>	<i>Partícules i objectes presents</i>	<i>Forces més importants</i>
Després de la inflació			
Era del plasma de quarks i de gluons			
Era dels hadrons			
Nucleosíntesi			
Era del plasma			
Era actual			

*Taula 10. Taula per a la Qüestió 62*

### 4.2.3 La radiació de fons

La teoria del Big Bang fa una predicció molt específica. En el moment del naixement s'hauria produït un immens nombre de fotons d'altres energies provinents de les anihilacions entre la matèria i l'antimatèria. Part de la radiació hauria estat reabsorbida, però encara avui hi hauria de quedar un rastre en forma de fotons de baixa energia (i per tant de baixa freqüència). Els fotons procedeixen d'un medi que es va expandint i per tant experimenten l'efecte Doppler. Així aquests fotons romanents de l'era del plasma perden energia ja que experimenten un desplaçament cap al vermell.

La teoria prediu que en l'actualitat aquests fotons tenen una energia que equival a una temperatura de 2,7 °K. Aquesta radiació de fons còsmica de microones fou detectada per Arno Penzias i Robert Wilson l'any 1965 i van rebre el premi Nobel l'any 1978 per aquest descobriment.

**ACTIVITAT 23 La radiació de fons**

Busqueu informació sobre qui eren, en què treballaven i què pretenien Arno Penzias i Robert Wilson, quan van descobrir la radiació còsmica de fons i redacteu un informe.

**Estudi de la radiació de fons**

Els satèl·lits COBE i WMAP (de l'anglès, Cosmic Background Explorer i Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) han mostrat proves irrefutables de l'existència d'aquesta radiació així com d'algunes inhomogeneïtats en ella .

<http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/>

<http://map.gsfc.nasa.gov/>

**4.3 El futur**

L'univers s'està expandint, però què passarà en el futur? La resposta està en saber quina és la densitat de matèria (i per tant d'energia) de l'univers. Aquest valor defineix també la geometria de l'univers.

Es pren com a valor de referència un valor de crític de la densitat pel qual l'univers seria pla (euclidià). Amb aquest valor de referència, apareixen les tres possibilitats següents:

- Densitat subcrítica: Densitat menor al valor crític. L'univers és tancat i es col·lapsa. Des del Big Bang, l'univers s'expandeix i més tard comença a colapsar fins arribar al Big Crunch. Així continuaria successivament de gran explosió inicial a gran colapso final.
- Densitat crítica: Univers pla en eterna expansió. Densitat supercrítica: Densitat superior al valor crític. L'Univers és obert en una eterna expansió desaccelerada.

La teoria de la relativitat general permet obtenir un valor per a la densitat crítica. Ara bé, la determinació de la densitat real de l'univers representa una gran dificultat. Una manera de donar un valor és analitzar amb cura les inhomogeneïtats que s'observen en la radiació de fons.

Tot i això, apareix un problema més gran a l'hora de calcular la densitat. Resulta que les observacions indiquen que hi hauria d'haver més matèria a l'univers que l'observada. Les forces gravitatòries entre algunes estructures estel·lars no es poden entendre només amb la matèria observable amb els telescopis (òptics i radiotelescopis). Es fa necessària una certa quantitat de matèria fosca, matèria que caldrà tenir en compte a l'hora de calcular la densitat real de l'univers. Aquesta matèria fosca podria estar en forats negres i núvols de pols estel·lar no observats fins ara o bé podria trobar-se en els neutrins. Segons el model estàndard els neutrins són partícules sense massa i per això interactuen molt poc amb la matèria. Observacions recents en grans detectors semblen indicar que



poden tenir una massa, molt petita, però suficient com per a donar compte d'una part de la matèria fosca.

Les darreres observacions cosmològiques han dut una nova sorpresa. L'univers s'està accelerant en la seva expansió. Si només actués la gravetat, aquesta expansió mai podria ser accelerada. Això implica que existeix algun "tipus de força repulsiva" que origina aquest fet. La resposta de la ciència actual es suposar que a l'univers a part de matèria, energia i matèria fosca hi ha "alguna cosa més": energia fosca, que seria la responsable d'aquesta repulsió.

La Figura 43 mostra la composició actual de l'univers segons les últimes teories.

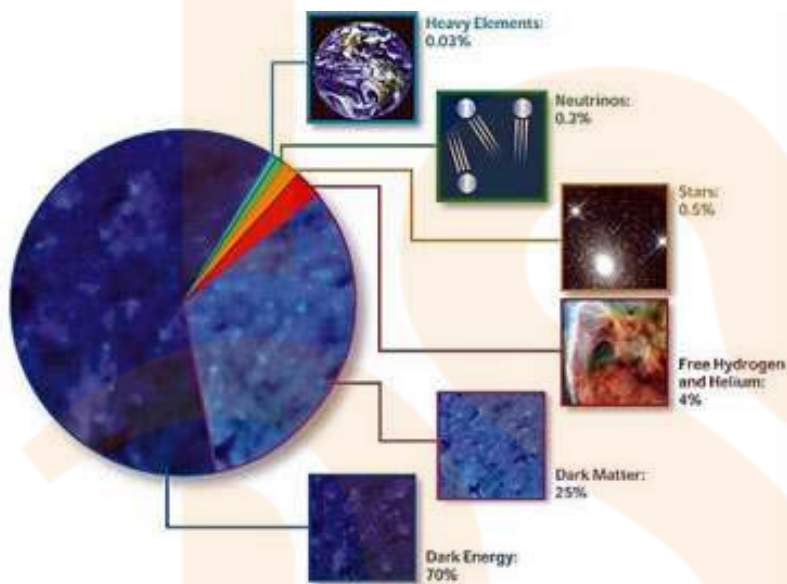


Figura 43. Composició de l'univers



## 5 *Del més petit al més gran*

Aquest apartat final té com a finalitat ajudar-vos a revisar el conjunt de la unitat i a consolidar els coneixements i la comprensió dels temes tractats. Heu estudiat l'univers des de l'escala més petita del món de les partícules elementals fins a l'escala més gran de les galàxies i els límits de l'univers conegut.

La unitat va començar amb les radiacions ionitzants, les primeres evidències de que l'àtom no era indivisible. Heu estudiat la física nuclear: les desintegracions radioactives, l'energia d'enllaç, la fusió i la fissió i algunes de les seves aplicacions.

En el segon apartat, a partir de la tomografia de positrons per emissió s'introdueix l'efecte fotoelèctric i l'equació de Planck. L'equació de Planck i la interpretació que Einstein fa d'aquesta equació van ser l'inici de la física moderna, la física de la mecànica quàntica. D'una altra banda la relativitat d'Einstein demostra que ni el temps ni l'espai són absoluts i que a velocitats properes a la de la llum els rellotges va més lents i les distàncies s'escurcen.

La unitat s'endinsa en el món de les partícules subatòmiques en el tercer apartat. El model estàndard mostra com amb dotze partícules elementals i quatre forces fonamentals es pot explicar la natura de la matèria i totes les interaccions conegudes de l'univers.

Finalment, en l'últim apartat l'estudi del més petit i l'estudi del més gran de l'univers es troben. La temperatura es relaciona amb la concentració d'energia. Per això s'entén que quan l'univers s'expandeix, la matèria i l'energia es dilueixen (l'univers es refreda). Actualment, la teoria del Big Bang inflacionari és el model més àmpliament acceptat per a explicar l'origen i l'evolució de l'univers.

### **ACTIVITAT 24 Àtom: interrogant la matèria**

Hadrons, neutrons, quarks o gluons són conceptes de física atòmica relacionats amb un gran interrogant: què és la matèria? "Quèquicom" ho explica de manera clara, concisa i entenedora.

El CERN és un laboratori construït a 100 metres sota terra, a Ginebra, Suïssa, que investiga les propietats d'algunes partícules subatòmiques com els hadrons fent-les col·lisionar mitjançant un accelerador anomenat LHC (Large Hadron Collider).

<http://www.cma.cat/tv3/alacarta/quequicom/atom-interrogant-la-materia/video/2542259/>

## 5.1 Objectius

En acabar aquesta unitat heu de ser capaços de

- Tenir present els riscos que suposen les radiacions ionitzants i els beneficis que es poden obtenir d'elles.
- Conèixer les magnituds que determinen la mesura de la quantitat de radiació absorbida per un ésser viu.
- Descriure el fenomen de la radioactivitat i les tres desintegracions radioactives principals que donen lloc a les radiacions alfa, beta i gamma. Conèixer la notació dels isòtops i l'escriptura de les reaccions nuclears, així com, construir les cadenes radioactives, característiques del decaïment radioactiu, d'alguns isòtops radioactius.
- Conèixer la llei de desintegració radioactiva, una llei exponencial, en què el nombre de nuclis que es desintegren és proporcional al nombre de nuclis radioactius que hi són presents.
- Definir les magnituds de l'activitat i el període de semidesintegració.
- Relacionar els conceptes d'energia d'enllaç i de defecte de massa i adonar-se de l'equivalència entre massa i energia.
- Descriure en què consisteix la fusió nuclear i la fissió nuclear.
- Interpretar el gràfic de l'energia per nucleó en funció del nombre màssic i relacionar-lo amb les reaccions de fusió i de fissió nuclears.
- Explicar algunes de les aplicacions de la física nuclear, així com, opinar de manera argumentada sobre la conveniència o no d'utilitzar l'energia nuclear o les aplicacions mèdiques de radiodiagnòstic i radioteràpia, per part de la societat.
- Descriure alguns dels fenòmens que la física clàssica no era capaç de resoldre a finals del segle XIX.
- Explicar els trets principals de les dues teories de principis del segle XX que constitueixen la física moderna: la quantització de l'energia, la dualitat ona-còrpuscle, la controvèrsia sobre la natura de la llum, el principi de Heisenberg, els postulats d'Einstein i les seves implicacions sobre el temps i sobre les distàncies.
- Classificar i descriure les partícules constituents de la matèria i les interaccions de la natura que fa el model estàndard.
- Explicar què és la cosmologia i com els models cosmològics han arribat a relacionar el món subatòmic i el món de les galàxies i de l'univers.
- Descriure quines són les principals qüestions que la cosmologia pretén resoldre: quin és l'origen de l'univers, com ha evolucionat des de llavors fins avui i quines són les prediccions sobre el seu futur.
- Explicar la teoria del Big Bang inflacionari, el model cosmològic més àmpliament acceptat en l'actualitat, conèixer les prediccions que fa el model sobre la radiació de fons còsmica de microones i els resultats obtinguts pels satèl·lits COBE i WMAP.

## 5.2 Activitats i qüestions finals

### ACTIVITAT 25 Un viatge al·lucinant

Reviseu la unitat. Fixeu-vos en els quatre apartats de la unitat, anoteu en la Taula 11 quin és l'element de context i quins són els conceptes (termes en negreta en el text) que es treballen en cada apartat.

Assegureu-vos que enteneu cadascun dels termes que estan en negreta en el text i anoteu una breu definició de cadascun d'aquests termes.

<i>Apartat</i>	<i>Context</i>	<i>Conceptes</i>
Física nuclear		
La nova física		
El model Estàndard		
Una mirada a l'univers		

Taula 11. Taula per a l'Activitat 25

### Qüestions Selectivitat

**65** Una font lluminosa emet llum monocroma de 550 nm amb una potència de 2mW. Aquesta llum es fa incidir sobre un metall produint-se efecte fotoelèctric. L'energia d'extracció mínima dels electrons del metall és de 2,10 eV. Calculeu:

- (a) L'energia cinètica màxima dels electrons extrets.  
 (b) El nombre de fotons que emet la font lluminosa en un minut.

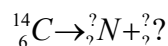
Dades:  $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ;  $1\text{eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ;  $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$

**Solució:**  $2,54 \cdot 10^{-20} \text{ J}$

**Solució:**  $3,32 \cdot 10^{17}$  fotons per min

**66** S'ha mesurat l'activitat d'una mostra d'un os trobat en un jaciment arqueològic i s'ha obtingut un valor de  $15,0 \cdot 10^3$  desintegracions per dia. Aquest fet es fa servir per a saber l'antiguitat de l'os, ja que el  $^{14}\text{C}$  és un isòtop que emet partícules  $\beta^-$  amb un període de semidesintegració de  $5,73 \cdot 10^3$  anys. Un os actual de la mateixa massa que el os trobat en el jaciment té una activitat de  $22,1 \cdot 10^3$  desintegracions per dia.

- (a) Completeu l'equació de desintegració del  $^{14}\text{C}$ .



- (b) Calculeu l'antiguitat de l'os.

**Solució:** 3.202,7 anys

## Qüestions selectivitat

**67** Fem incidir radiació electromagnètica d'una freqüència determinada sobre un metall que té una freqüència llindar de  $6,00 \cdot 10^{16}$  Hz. Observem que l'energia cinètica màxima dels electrons emesos és  $6,62 \cdot 10^{-17}$  J. Calculeu:

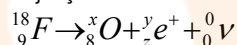
- (a) La freqüència de la radiació electromagnètica incident.  
 (b) La longitud d'ona dels fotons incidents i la dels electrons emesos amb la màxima energia cinètica.

Dades:  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  J·s;  $c = 3,00 \cdot 10^8$  m·s<sup>-1</sup>;  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$  kg.

**Solució:**  $1,60 \cdot 10^{17}$  Hz  
 $1,88 \cdot 10^{-9}$  m;  $6,01 \cdot 10^{-11}$  m

**68** La tècnica de diagnòstic a partir de la imatge que s'obté mitjançant tomografia per emissió de positrons (PET, positron emission tomography) es fonamenta en l'anihilació entre la matèria i l'antimatèria. Els positrons, emesos pels nuclis de fluor,  $^{18}\text{F}$ , injectats al pacient com a radiofàrmac, s'anihilen en entrar en contacte amb els electrons dels teixits del cos i de cadascuna d'aquestes anihilacions es creen fotons, a partir dels quals s'obté la imatge.

La desintegració d'un nucli de fluor,  $^{18}\text{F}$ , es pot escriure mitjançant la reacció nuclear següent:



- (a) Digueu quants neutrons i quants protons té aquest isòtop artificial de fluor,  $^{18}\text{F}$ . Completeu la reacció nuclear, és a dir, determineu x, y i z.  
 (b) El període de semidesintegració del  $^{18}\text{F}$  és 109,77 s. Calculeu el temps que ha de passar perquè quedi una vuitena part de la quantitat inicial de  $^{18}\text{F}$ . Quin percentatge de partícules quedaran al cap d'una hora? Tenint en compte aquest resultat, digueu si podríem emmagatzemar gaire temps aquest radiofàrmac i justifiqueu-ho.

**Solució:** 329,31 s;  $1,3 \cdot 10^{-8}$  %

**69** Per a estudiar el procés de desintegració d'una mostra radioactiva que inicialment tenia  $6,00 \cdot 10^{23}$  àtoms radioactius, hem mesurat en intervals d'un segon el nombre d'àtoms que encara no s'havien desintegrat. Els resultats obtinguts es representen en la gràfica de la Figura 44:

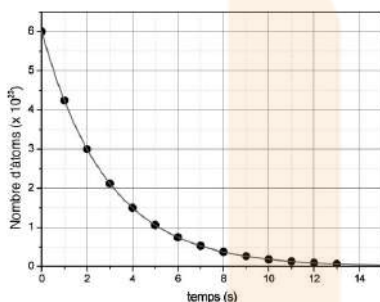


Figura 44. Gràfica per a la Qüestió 69

- (a) Quant val el període de semidesintegració d'aquesta mostra? Quants àtoms de la mostra inicial s'hauran desintegrat quan hagi transcorregut un temps de 15 s?  
 (b) Quant temps haurà de transcórrer perquè només quedi sense desintegrar un 5% de la mostra inicial.

**Solució:** 2 s;  $5,97 \cdot 10^{23}$  àtoms  
**Solució:** 8,63 s

**70** La gràfica de la Figura 45 mostra la variació de la massa d'una mostra de iode 131, que és un isòtop radioactiu, al llarg del temps.

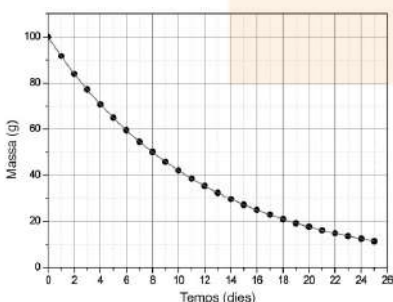


Figura 45. Gràfica per a la Qüestió 70

- (a) Trobeu el període de semidesintegració de l'isòtop i digueu quina quantitat de la mostra tindrem al cap de quaranta dies.  
 (b) El iode 131, en desintegrar-se, emet una partícula beta i es transforma en un ió positiu de xenó 131. Calculeu l'energia que s'allibera quan es desintegra un àtom de iode 131.

Dades:  $m(^{131}\text{I}) = 130,906125$  u;  $m(^{131}\text{Xe}^+) = 130,904533$  u;  $m(\text{electró}) = 5,486 \cdot 10^{-4}$  u;  $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27}$  kg;  $c = 3,00 \cdot 10^8$  m·s<sup>-1</sup>.  
**Solució:** 8 dies; 3,1 g  
**Solució:**  $1,559 \cdot 10^{-13}$  J



## Qüestions selectivitat

**71** Una radiació ultraviolada de  $\lambda = 200 \text{ nm}$  incideix sobre una placa de plom, de manera que salten electrons amb una energia cinètica màxima d'1,97 eV. Calculeu:

- (a) La funció de treball (és a dir, l'energia mínima d'extracció d'electrons) del plom.  
 (b) La longitud d'ona associada als electrons emesos amb l'energia cinètica màxima.

Dades:  $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ;  $m(\text{electró}) = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ ;  $q(\text{electró}) = -1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ;  $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ;  $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .

**Solució:** 4,24 eV  
**Solució:**  $8,75 \cdot 10^{-10} \text{ m}$

**72** Quina és l'energia en repòs d'un electró? Quina energia mínima ha de tenir un fotó per a materialitzar-se en un parell electró-positró? Quines són la freqüència i la longitud d'ona corresponents a aquesta energia?

Dades:  $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ;  $m(\text{electró}) = m(\text{positró}) = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ ;  $q(\text{electró}) = -1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ;  $q(\text{positró}) = +1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

**Solució:**  $8,20 \cdot 10^{-14} \text{ J}$ ;  $1,64 \cdot 10^{13} \text{ J}$ ;  $2,47 \cdot 10^{20} \text{ Hz}$ ;  $1,21 \cdot 10^{-12} \text{ m}$

**73** El triti és un isòtop radioactiu de l'hidrogen. El nucli del triti té dos neutrons.

El triti es genera de manera natural a l'atmosfera quan els àtoms de nitrogen xoquen amb una certa partícula que anomenarem "X". La reacció és:  ${}^{14}_7\text{N} + {}^x_y\text{X} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^z_1\text{T}$

També es pot produir en reactors nuclears, amb la reacció següent:  ${}^j_k\text{Li} + {}^x_y\text{X} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^z_1\text{T}$

- (a) Determineu els valors dels índexs  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $j$  i  $k$ .  
 (b) El període de semidesintegració del triti és, aproximadament, de dotze anys. Elaboreu una gràfica amb les variables de massa i temps en què s'observi com varia la quantitat de triti d'una mostra que inicialment és de 120 g durant els seixanta anys següents.

**74** Una antena de telefonia mòbil instal·lada al terrat d'un edifici emet ones electromagnètiques de 900 MHz de freqüència amb una potència de 4W.

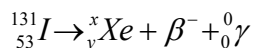
- (a) Calculeu quants fotons emet l'antena en un minut.  
 (b) Valoreu si els fotons que emet l'antena poden produir efecte fotoelèctric en un metall que és a prop, tenint en compte que l'energia d'extracció mínima dels electrons del metall és 4,1eV. En cas afirmatiu, calculeu l'energia cinètica dels electrons extrets. Si l'antena emet amb una potència de 8W, com variarà l'efecte fotoelèctric que es pugui produir en el metall?

Dades:  $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ;  $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .

**Solució:**  $4,03 \cdot 10^{26}$  fotons

## Qüestions selectivitat

**75** El iode 131 és un isòtop radioactiu que emet  $\beta^-$  i  $\gamma$ , té un període de semidesintegració de vuit dies i es fa servir per a tractar el càncer i altres malalties de la glàndula tiroide. La reacció de descomposició és la següent:



- (a) Determineu el valor dels nombres màssic i atòmic del xenó ( $x$  i  $y$  en la reacció, respectivament). Si les partícules  $\beta^-$  s'emeten a una velocitat de  $2 \cdot 10^5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , calculeu-ne la longitud d'ona associada.
- (b) Un pacient rep un tractament amb iode 131. Quants dies han de transcórrer per a què la quantitat de iode 131 al cos del pacient es redueixi fins al 12,5 % del valor inicial?

Dades:  $m(\beta^-) = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ ;  $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ .

**Solució:**  $3,63 \cdot 10^{-12} \text{ m}$

**Solució:** 24 dies

**76** L'any 2011 ha estat declarat Any Internacional de la Química, per a commemorar, entre altres fets, que fa cent anys Marie Curie va ser guardonada amb el Premi Nobel de Química pel descobriment del radi, entre altres mèrits. El període de semidesintegració del radi és  $1,59 \cdot 10^3$  anys. Si el 1911 es va guardar una mostra d'1,00 g de radi, calculeu:

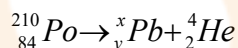
- (a) La quantitat de radi de la mostra que queda a l'any 2011.
- (b) L'activitat radioactiva inicial de la mostra d'1,00 g de radi, i l'activitat radioactiva del radi que queda de la mostra avui.

Dades:  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ;  $m(\text{Ra}) = 226 \text{ u}$ .

**Solució:** 0,96 g

**Solució:**  $3,68 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$ ;  $3,53 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$

**77** El poloni 210 té un període de semidesintegració de 138,4 dies i es desintegra, per emissió de partícules alfa, en un isòtop estable del plom. El procés és el següent:



- (a) Determineu els índexs  $x$  i  $y$  i el temps necessari perquè la massa del poloni es redueixi al 30 % de la massa inicial.
- (b) Calculeu l'energia que es desprèn en la desintegració d'un nucli de poloni, expressada en J i en MeV.

Dades:  $m(\text{Po-210}) = 209,983 \text{ u}$ ;  $m(\text{Pb-x}) = 205,974 \text{ u}$ ;  $m(\text{He-4}) = 4,003 \text{ u}$ ;  $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ;  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ;  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

**Solució:** 240,4 dies

**Solució:**  $8,96 \cdot 10^{-13} \text{ J}$ ; 5,6 MeV

## Qüestions Selectivitat

**78** En una experiència de laboratori, es mesura l'energia cinètica màxima dels electrons que salten quan es fan incidir radiacions de freqüència diferent sobre una placa d'un material. Els resultats obtinguts es mostren en la Taula 12, en què  $E_c$  representa l'energia cinètica, i  $f$ , la freqüència. La representació gràfica dels resultats es pot veure en la Figura 46.

Determineu:

- (a) El valor de la constant de Planck a partir de les dades d'aquest experiment.
- (b) La funció de treball; és a dir, l'energia mínima d'extracció d'electrons.

Expresseu els resultats en unitats del sistema internacional (SI).

Dades:  $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ;  $1 \text{ PHz} = 10^{15} \text{ Hz}$ .

Solució:  $6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$   
Solució:  $6,62 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

$E_c$ (eV)	$f$ (PHz)
0	0,50
0	1,00
2,07	1,50
4,14	2,00

Taula 12. Taula per a la Qüestió 78

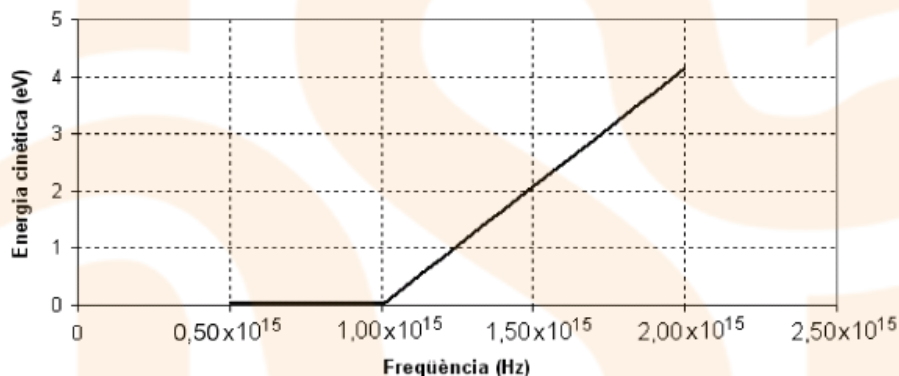
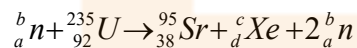


Figura 46. Gràfica per a la Qüestió 78

## Qüestions selectivitat

**79** L'urani 235 té uns quaranta modes possibles de desintegració per absorció d'un neutró.

- (a) Completeu la reacció nuclear següent, que s'esdevé quan un nucli d'urani 235 absorbeix un neutró:



Indiqueu també quants neutrons i protons té aquest nucli d'urani.

- (b) Calculeu l'energia produïda en la fissió d'un nucli d'urani 235, d'acord amb la reacció anterior.

Dades:  $m_{\text{neutró}} = 1,00866 \text{ u}$ ;  $m(235\text{U}) = 235,124 \text{ u}$ ;  $m(95\text{Sr}) = 94,9194 \text{ u}$ ;  $m(139\text{Xe}) = 138,919 \text{ u}$ ;  $c = 2,99792 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $1 \text{ u} = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ .

Solució:  $4,13309 \cdot 10^{-11} \text{ J}$

Símbol	Z
Hg	80
Tl	81
Pb	82
Bi	83
Po	84
At	85
Rn	86

Taula 13. Taula per a la Qüestió 80

### Qüestions selectivitat

**80** Hem observat una mostra d'un isòtop radioactiu. El gràfic de la Figura 47 mostra l'evolució del nombre d'àtoms de l'isòtop durant 200 dies.

- (a) Determineu el període de semidesintegració de l'isòtop. Quants àtoms quedaran al cap de tres períodes de semidesintegració?
- (b) Sospitem que es tracta de poloni 210 ( $Z = 84$ ), un element emissor de radiació alfa. Escriviu la reacció nuclear de l'emissió alfa d'aquest isòtop.

DADES: Nombres atòmics i símbols d'alguns elements (Taula 13).

**Solució:** 140 dies;  $1,25 \cdot 10^{15}$  àtoms

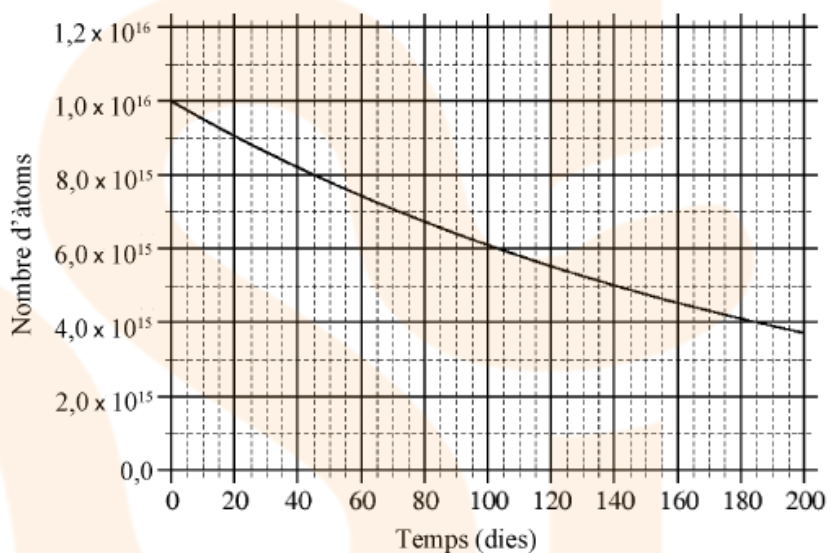


Figura 47. Gràfica per a la Qüestió 80

### Qüestions selectivitat

**81** Un dels problemes principals de la producció d'energia elèctrica en les centrals nuclears és l'emmagatzematge dels residus radioactius. El plutoni és un d'aquests residus: té un període de semidesintegració de  $6,58 \cdot 10^3$  anys i és un potent emissor de partícules  $\alpha$ .

- (a) Si avui s'emmagatzema una quantitat determinada d'aquest plutoni, quin percentatge d'aquest isòtop quedarà sense desintegrar-se d'aquí a un segle?
- (b) Sabent que les partícules  $\alpha$  s'emeten amb una energia cinètica d' $1,00 \cdot 10^{-13}$  J, calculeu-ne la longitud d'ona de De Broglie associada.

Dades:  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  J · s;  $m_\alpha = 6,68 \cdot 10^{-27}$  kg.

**Solució:** 99%  
**Solució:**  $1,81 \cdot 10^{-14}$  m

## Qüestions selectivitat

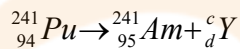
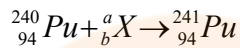
**82** Una gammagrafia òssia és una prova diagnòstica que consisteix a injectar per via intravenosa una substància que conté un cert isòtop radioactiu que es diposita en els ossos i que emet raigs gamma. La radiació emesa es detecta amb una gamma-càmera que escaneja el cos i pren imatges de la quantitat de l'isòtop acumulada en els ossos. En aquest tipus de gammagrafies s'utilitza el tecneci 99 com a radioisòtop.

- (a) Quant s'haurà reduït el nombre de nuclis de l'isòtop injectat al cap d'un dia?
- (b) El  ${}^{99}_{43}\text{Tc}$  prové de la desintegració beta d'un altre element. Indiqueu el nombre de protons i neutrons del nucli del qual prové.

Dades:  $t_{1/2}({}^{99}\text{Tc}) = 6,00 \text{ h}$ .

**Solució:** 0,06  
**Solució:** 57 n; 42 p

**83** L'americi (Am) es l'element de nombre atòmic 95. Els primers àtoms d'americi 241 van ser produïts el 1944 per Glenn Theodore Seaborg i els seus col·laboradors fent servir un seguit de reaccions nuclears a partir del plutoni (Pu). A continuació, es mostren, incompletes, les dues últimes etapes del procés:



- (a) Determineu els valors dels coeficients a, b, c i d. Quin nom té la partícula que el Pu-240 ha capturat en la primera reacció? Com s'anomena la desintegració descrita en la segona reacció?
- (b) Calculeu el percentatge de nuclis de Am-241 que s'han desintegrat des del 1944 fins l'any 2013

Dada: Període de semidesintegració de l'americi 241,  $t_{1/2} = 432$  anys

**Solució:** 1, 0, 0, -1  
**Solució:** 10,5%

## Qüestions selectivitat

**84** La radioactivitat es un mitjà fiable per a calcular l'edat de les roques i minerals que contenen isòtops radioactius concrets. Aquest sistema de datació radiomètrica ens permet mesurar el temps geològic. Un d'aquests mètodes es basa en la desintegració de l'isotop  ${}^{40}_{19}\text{K}$  (potassi) en  ${}^{40}_{18}\text{Ar}$  (argo). El rellotge potassi-argo comença a funcionar quan els minerals que contenen potassi cristal·litzen a partir d'un magma o dins una roca. En aquest moment, els nous minerals contenen  ${}^{40}_{19}\text{K}$  i no contenen  ${}^{40}_{18}\text{Ar}$ . A mesura que passa el temps, el  ${}^{40}_{19}\text{K}$  es desintegra i tots els atòms de  ${}^{40}_{18}\text{Ar}$  que trobem en el mineral en un temps posterior a la formació provenen de la descomposició del  ${}^{40}_{19}\text{K}$ .

- (a) Escriviu la reacció nuclear de l'emissió de partícules  $\beta$  de l'isotop  ${}^{40}_{19}\text{K}$ .
- (b) En una roca s'han trobat 10,0 g de  ${}^{40}_{19}\text{K}$  i 10,0 g de  ${}^{40}_{18}\text{Ar}$ . Quina quantitat de  ${}^{40}_{19}\text{K}$  hi haurà quan hauran transcorregut  $5,00 \cdot 10^9$  anys? Fent servir la datació radiomètrica basada en el potassi-argo, digueu quina edat té la roca. Considereu que el  ${}^{40}_{19}\text{K}$  es desintegra només en  ${}^{40}_{18}\text{Ar}$ .

Dada: Període de semidesintegració del  ${}^{40}_{19}\text{K}$ ,  $t_{1/2} = 1,25 \cdot 10^9$  anys

**Solució:** 0,625 g  
**Solució:**  $1,25 \cdot 10^9$  anys

**85** En una experiència, enviem radiació ultraviolada contra una placa de plom i produïm efecte fotoelèctric. Els electrons que es desprenen de la placa són frenats totalment per una diferència de potencial elèctric que depèn de la longitud d'ona de la radiació ultraviolada incident. A partir de les mesures efectuades sabem que quan la longitud d'ona és  $1,50 \cdot 10^{-7}$  m, la diferència de potencial que frena els electrons és de 4,01 V, i quan la longitud d'ona és  $1,00 \cdot 10^{-7}$  m, la diferència de potencial de frenada és de 8,15 V. Calculeu:

- (a) Per a cada longitud d'ona, la velocitat màxima amb que els electrons són extrets de la placa de plom.
- (b) L'energia mínima (funció de treball) necessària per a extreure un electró de la placa de plom. Determineu la constant de Planck a partir d'aquestes dades.

Dades:  $Q(\text{electró}) = -1,60 \cdot 10^{-19}$  C;  $c = 3,00 \cdot 10^8$  m·s<sup>-1</sup>;  $m(\text{electró}) = 9,11 \cdot 10^{-31}$  kg

**Solució:**  $1,19 \cdot 10^6$  m·s<sup>-1</sup>;  $1,69 \cdot 10^6$  m·s<sup>-1</sup>  
**Solució:**  $6,82 \cdot 10^{-19}$  J;  $6,62 \cdot 10^{-34}$  J·s



### Qüestions selectivitat

**86** El poloni 210 es un emissor de partícules  $\alpha$  que es troba a la natura i que també es pot obtenir en laboratoris nuclears a partir del bombardeig del bismut 209 amb neutrons. El període de semidesintegració son 138 dies.

- (a) Escriviu la reacció de desintegració del poloni 210 si sabem que, en desintegrar-se, produeix un isòtop del plom. Quina es la constant de desintegració del poloni 210?
- (b) Si una mostra conte 5 mg de poloni 210, quina quantitat de poloni 210 quedarà després de 20 dies?

Dades: Nombres atòmics i símbols químics del poloni  $Z(\text{Po}) = 84$  i del plom  $Z(\text{Pb}) = 82$

**Solució:**  $5,81 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$   
**Solució:** 4,52 mg

**87** Disposem d' un tub de buit com el de la Figura 87. L'elèctrode A es fet de potassi, que te  $W_0 = 2,29 \text{ eV}$  com a valor de treball d'extracció.

- (a) Determineu la velocitat amb que surten els electrons arrancats de l'elèctrode A quan l'il·luminem amb llum de color violat de 400 nm de longitud d'ona.
- (b) A continuació canviem l'elèctrode A per un altre que es fet d'un material desconegut. Per tal de determinar de quin material es tracta, l'il·luminem un altre cop amb la mateixa llum d'abans, i determinem que el potencial de frenada dels electrons de l'elèctrode A és  $V_f = 0,17 \text{ V}$ . Determineu el treball d'extracció del material i indiqueu de quin element es fet a partir de la Taula 14.

Dades: Massa de l'electró,  $m_{\text{electró}} = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ ; Constant de Planck,  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ; Velocitat de la llum,  $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

**Solució:**  $5,36 \cdot 10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$   
**Solució:** 2,94 eV

**88** El iode pot ser un radiofarmac. L' isòtop  $^{123}_{53}\text{I}$  es una font de raigs gamma. S'injecta al pacient per poder obtenir imatges gammagràfiques. Aquest radioisòtop te un període de semidesintegració de 13,2 h.

- (a) Quina fracció de  $^{123}_{53}\text{I}$  resta al cos 24,0 hores després d'injectar el fàrmac?
- (b) En un altre procés, el  $^{123}_{53}\text{I}$  també pot produir  $^{123}_{54}\text{Xe}$ . Escriviu l'esquema del procés nuclear. Quina partícula s'emet?

**Solució:** 28%

Element	$W_0$ (eV)
Ba	2,70
Li	2,93
Mg	3,66
As	3,75
Al	4,08
Bi	4,34
Cr	4,50
Ag	4,73
Be	4,98

Taula 14. Taula per a la Qüestió 87

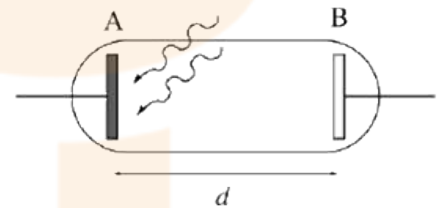


Figura 48. Imatge per a la Qüestió 87



Figura 49. Exemple de gammagrafia

partícula	Massa (kg)
Protó	$1,6726 \cdot 10^{-27}$
Neutró	$1,6749 \cdot 10^{-27}$
Electró	$9,1093 \cdot 10^{-31}$
Àtom de C-14	$2,3253 \cdot 10^{-26}$

*Taula 15. Taula per a la Qüestió 90*



*Figura 50. Aleksandr Litvinenko*

## Qüestions selectivitat

**89** A l'espectroscòpia de fotoemissió ultraviolada (UV), il·luminem les mostres amb un feix de radiació UV i analitzem l'energia dels electrons emesos.

- (a) Hem il·luminat una mostra amb radiació de longitud d'ona  $\lambda = 23,7$  nm i els fotoelectrons analitzats tenen una energia cinètica màxima de 47,7 eV. Calculeu la funció de treball del material analitzat en J i en eV.
- (b) Determineu el llindar de longitud d'ona per a aquest material. Com canviaria aquest llindar de longitud d'ona si es duplicués la potència del feix de radiació UV?

Dades:  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J·s;  $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19}$  J;  $c = 3,00 \cdot 10^8$  m·s<sup>-1</sup>

**Solució:**  $7,60 \cdot 10^{-19}$  J; 4,75 eV  
**Solució:**  $2,62 \cdot 10^{-7}$  m

**90** En un jaciment arqueològic es troben unes restes òssies antigues d'animals. Un gram d'aquestes restes conté  $9,5 \cdot 10^3$  àtoms de carboni 14. L'anàlisi d'una mostra actual, de la mateixa massa i de característiques similars, revela que, en el moment de la mort dels animals, els ossos tenien  $6,9 \cdot 10^9$  àtoms de C-14/gram.

- (a) Determineu l'antiguitat de les restes si sabem que el període de semidesintegració del C-14 és de 5760 anys.
- (b) Escriviu l'equació nuclear de la desintegració (amb emissió de  $\beta^-$ ) del C-14 i incloeu-hi els antineutrins. Calculeu el defecte de massa per nucleó de C-14.

Dades:  $c = 3,00 \cdot 10^8$  m·s<sup>-1</sup>; Nombres atòmics: Be, 4; B, 5; C, 6; N, 7; O, 8; F, 9

**Solució:**  $1,65 \cdot 10^4$  anys  
**Solució:**  $1,338 \cdot 10^{-29}$  kg

**91** L'any 2006, l'exespia rus del KGB Aleksandr Litvinenko va ser víctima d'un enverinament amb poloni 210 i es va convertir en la primera víctima confirmada que moria per la síndrome de radiació aguda. El poloni 210 és un emissor de partícules  $\alpha$  que es troba a la natura i que també es pot obtenir en laboratoris nuclears.

- (a) Escriviu la reacció de desintegració del poloni 210, si sabem que en desintegrar-se produeix un isòtop del plom.
- (b) El període de semidesintegració efectiu en el cos humà del poloni 210 és de 37 dies. Si suposem que la dosi que van subministrar a Litvinenko va ser de 5 mg, quina quantitat de poloni 210 hi havia en el seu organisme quan va morir, 20 dies després de l'enverinament, Aleksandr Litvinenko

Dades: Símbols químics i nombres atòmics del poloni  $Z(\text{Po}) = 84$  i del plom  $Z(\text{Pb}) = 82$

**Solució:** 3,4 mg

### Qüestions selectivitat

**92** Una porta s'obre i es tanca mitjançant un dispositiu fotoelèctric. La longitud d'ona de la radiació electromagnètica utilitzada és de 850 nm i l'energia mínima d'extracció del material fotodetector és d'1,20 eV. Calculeu:

- (a) L'energia cinètica dels fotoelectrons emesos i la longitud d'ona de De Broglie associada a aquests electrons.
- (b) La longitud d'ona que hauria de tenir una radiació electromagnètica incident per a duplicar l'energia cinètica dels fotoelectrons emesos de l'aparat a.

Dades: melectró =  $9,11 \cdot 10^{-31}$  kg; Qelectró =  $-1,60 \cdot 10^{-19}$  C;  $h=6,63 \cdot 10^{-34}$  J·s ;  $c=3,00 \cdot 10^8$  m·s<sup>-1</sup>

**Solució:**  $4,2 \cdot 10^{-20}$  J;  $2,40 \cdot 10^{-9}$  m  
**Solució:**  $7,21 \cdot 10^{-7}$  m

**93** Il·luminem una superfície de coure amb llum de diverses freqüències i quan s'alliberen electrons del metall, en mesurem l'energia cinètica. Amb les dades obtingudes de l'experiment dibuixem la gràfica que apareix a la Figura 51:

- (a) Expliqueu breument què és el llindar de freqüència de l'efecte fotoelèctric i calculeu quin valor té en aquest cas.
- (b) Calculeu el valor de la constant de Planck i la velocitat que assolixen els electrons emesos quan la longitud d'ona de la llum incident és  $1,2 \cdot 10^{-7}$  m.

Dades:  $c= 3,00 \cdot 10^8$  m·s<sup>-1</sup>; melectro =  $9,11 \cdot 10^{-31}$  kg;  $1eV=1,60 \cdot 10^{-19}$  J

**Solució:**  $1,10 \cdot 10^{15}$  Hz  
**Solució:**  $6,62 \cdot 10^{-34}$  J·s;  $1,43 \cdot 10^6$  m·s<sup>-1</sup>

**94** Un tub de buit com el de la Figura 52 té l'ànode A fet de coure i la distància entre els elèctrodes és  $d = 30$  cm. Establim un camp elèctric uniforme de A a B que genera una diferència de potencial de 3 V i il·luminem l'ànode amb radiacions que tenen fotons incidents amb una energia de 10 eV. Observem que al càtode B arriben electrons amb una energia cinètica de 2,3 eV.

- (a) Quina és la freqüència i la longitud d'ona de la radiació incident (expressada en nm)? Quin és el valor del camp elèctric E?
- (b) Amb quina energia cinètica surten emesos els electrons arrencats de l'ànode A? Quin és el treball d'extracció del coure en eV?

Dades:  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  J·s; Qelectró =  $-1,602 \cdot 10^{-19}$  C;  $c=3 \cdot 10^8$  m·s<sup>-1</sup>  
 $1eV=1,602 \cdot 10^{-19}$  J

**Solució:**  $2,418 \cdot 10^{15}$  Hz; 124,1 nm; 10 N·C<sup>-1</sup>  
**Solució:** 5,3 eV; 4,7 eV

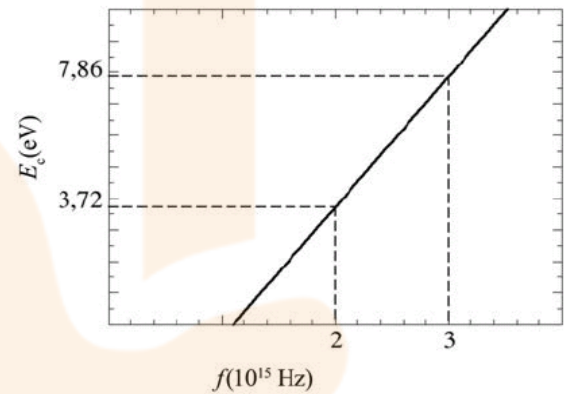


Figura 51. Imatge per a la Qüestió 93

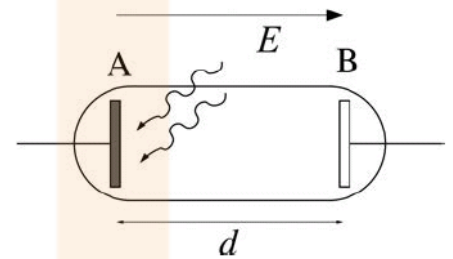


Figura 52. Imatge per a la Qüestió 94

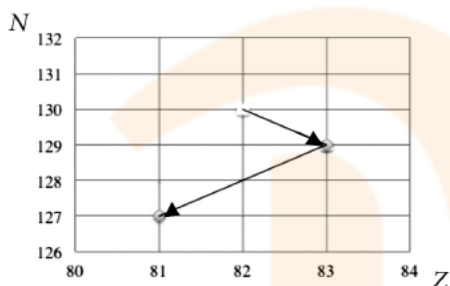


Figura 53. Imatge per a la Qüestió 97

## Qüestions Selectivitat

**95** El període de semidesintegració de l'isòtop  $^{235}\text{U}$  és de  $7,00 \cdot 10^8$  anys. Per a una mostra d'1,000 g, calculeu:

- L'activitat inicial en becquerels (Bq).
- La massa de  $^{235}\text{U}$  quan hagin passat 108 anys.

Dades: Nombre d'Avogadro,  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$  nuclis  $\cdot \text{mol}^{-1}$  1 Bq = 1 desintegració  $\cdot \text{s}^{-1}$ ; Massa molar de  $^{235}\text{U}$ ,  $M = 235$  g  $\cdot \text{mol}^{-1}$

**Solució:**  $8,04 \cdot 10^4$  Bq  
**Solució:** 0,906 g

**96** Una cèl·lula fotoelèctrica és il·luminada amb llum blava de  $4,750 \text{ \AA}$ . La freqüència llindar de la cèl·lula és de  $4,75 \cdot 10^{14}$  Hz. Calculeu:

- L'energia dels fotons incidents i el treball d'extracció característic del metall de la cèl·lula.
- L'energia cinètica màxima dels electrons emesos i el seu potencial de frenada.

Dades: Velocitat de la llum,  $c = 3,00 \cdot 10^8$  m  $\cdot \text{s}^{-1}$  Constant de Planck,  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J  $\cdot \text{s}$  Càrrega de l'electró,  $q_{\text{electró}} = -1,602 \cdot 10^{-19}$  C  $1 \text{ \AA} = 10^{-10}$  m

**Solució:**  $4,19 \cdot 10^{-19}$  J;  $3,15 \cdot 10^{-19}$  J  
**Solució:**  $1,05 \cdot 10^{-19}$  J; 0,655 V

**97** En un nucli atòmic radioactiu s'esdevenen dues desintegracions radioactives successives, representades en la gràfica de la Figura 53. En l'eix de les abscisses s'indica el nombre de protons (Z) i en l'eix de les ordenades, el nombre de neutrons (N) dels elements químics que intervenen en el procés.

- Escriviu les equacions de les dues desintegracions radioactives que es produeixen i digueu com s'anomena cadascuna. Indiqueu el nom, el nombre atòmic i el nombre màssic de tots els elements i de totes les partícules que hi intervenen.
- Si inicialment tenim N nuclis del primer element i el seu període de semidesintegració és de 10,64 hores, calculeu el temps que haurà de passar perquè es desintegri un 10,0 % dels nuclis.

Dades: Nombres atòmics d'alguns elements químics: or (Au), 79; mercuri (Hg), 80; tal·li (Tl), 81; plom (Pb), 82; bismut (Bi), 83; poloni (Po), 84; àstat (At), 85.

**Solució:** 1,62 hores

**98** El radó  $^{222}\text{Rn}$ , de símbol Rn, és un gas noble responsable de bona part de l'exposició de les persones a les radiacions ionitzants. El  $^{222}\text{Rn}$  es forma al subsòl a partir del radi (Ra) i a causa del seu estat gasós es difon cap a l'atmosfera.

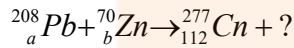
- Quan el  $^{222}\text{Rn}$  es desintegra emet partícules  $\alpha$ . Escriviu l'equació nuclear d'aquest procés de desintegració.
- A més de la radiació  $\alpha$ , durant el procés de desintegració també s'emeten raigs  $\gamma$  (no cal que els inclogueu en l'equació de l'apartat anterior). Calculeu la freqüència i la longitud d'ona d'un fotó  $\gamma$  d'energia 5,50 MeV.

Dades: Nombres atòmics: Bi, 83; Po, 84; At, 85; Rn, 86; Fr, 87; Ra, 88; Ac, 89.  $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19}$  J; Constant de Planck,  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J  $\cdot \text{s}$  Velocitat de la llum,  $c = 3,00 \cdot 10^8$  m  $\cdot \text{s}^{-1}$

**Solució:**  $1,33 \cdot 10^{21}$  Hz;  $2,26 \cdot 10^{-13}$  m

### Qüestions Selectivitat

99 El copernici  ${}_{112}^{277}\text{Cn}$  va ser sintetitzat al laboratori del Centre per a la Recerca d'Ions Pesants (GSI) de Darmstadt (Alemanya) el 9 de febrer del 1999. El nom oficial data del febrer del 2010, en honor de Nicolau Copèrnic. Per a obtenir-lo, es bombardeja una diana de plom amb projectils d'àtoms de zinc. La reacció es pot escriure així:



El  ${}_{112}^{277}\text{Cn}$  es desintegra segons la seqüència que mostra la Figura

55. El  ${}_{112}^{277}\text{Cn}$  té un període de semidesintegració de 0,17 ms

- (a) Completeu la reacció d'obtenció del  ${}_{112}^{277}\text{Cn}$  a partir de plom i de zinc. Quin tant per cent de  ${}_{112}^{277}\text{Cn}$  roman sense desintegrar al cap d'un minut d'haver-se produït la reacció d'obtenció d'aquest isòtop?
- (b) Escriviu la seqüència o sèrie radioactiva (amb tots els símbols dels elements fins arribar al fermi

Solució: 0%

100 Al laboratori es mesura l'energia cinètica màxima dels electrons emesos quan es fa incidir llum de freqüències diferents sobre una superfície metàl·lica. Els resultats obtinguts es mostren en la gràfica adjunta.

- (a) Determineu el valor de la constant de Planck a partir de la gràfica de la Figura 56
- (b) Calculeu l'energia mínima d'extracció dels electrons (en eV).

Dada:  $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .

Solució:  $6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J}$   
Solució: 4,14 eV

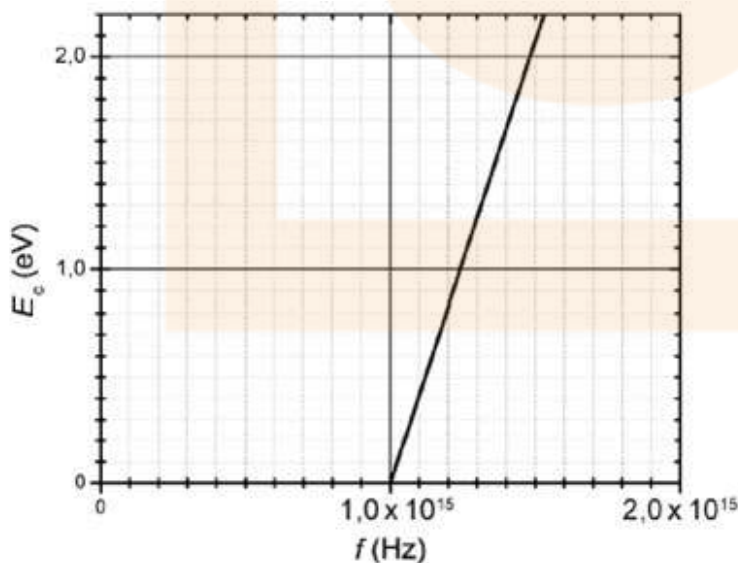


Figura 56. Imatge per a la Qüestió 100

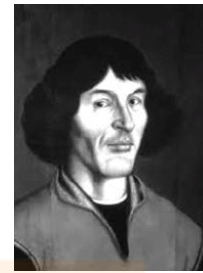


Figura 54. Nicolau Copèrnic

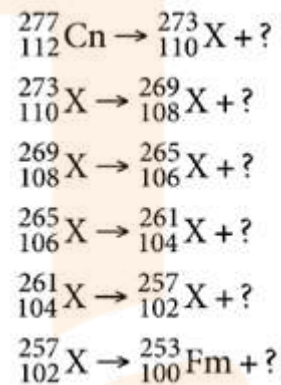


Figura 55. Imatge per a la Qüestió 99

${}_{82}\text{Pb}$	Plom
${}_{110}\text{Ds}$	Darmstadt
${}_{108}\text{Hs}$	Hassi
${}_{106}\text{Sg}$	Seaborgi
${}_{104}\text{Rf}$	Ruthefordi
${}_{102}\text{No}$	Nobeli
${}_{100}\text{Fm}$	Fermi
${}_{30}\text{Zn}$	zinc
<i>Taula 16 Dades per a la Qüestió 99</i>	

## Qüestions Selectivitat

**101** El potassi  $^{40}\text{K}$  és un isòtop inestable. Es pot transformar en calci (Ca) mitjançant una desintegració  $\beta^-$  o en argó (Ar) mitjançant una desintegració  $\beta^+$ . El nombre atòmic del calci és 20.

- (a) Escriviu les equacions nuclears que corresponen a aquests processos, incloent-hi els neutrins i els antineutrins.
- (b) També és possible que el potassi 40 capturi un electró de la seva escorça i emeti un fotó gamma de 1460 MeV. Calculeu la longitud d'ona i la freqüència d'aquests raigs gamma. Calculeu també la disminució de la massa de l'àtom de potassi 40 deguda a l'energia que s'endú el fotó.

Dades: Constant de Planck,  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ;  $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .  
Velocitat de la llum,  $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .

**Solució:**  $3,52 \cdot 10^{23} \text{ Hz}$ ;  $8,51 \cdot 10^{-16} \text{ m}$ ;  $2,50 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

**102** Il·lumina el càtode d'una cèl·lula fotoelèctrica amb un feix de llum verda de 560 nm de longitud d'ona i observem que s'origina un corrent elèctric. Comprovem que el corrent desapareix quan apliquem una tensió de 0,950 V (potencial de frenada).

- (a) Calculeu el treball d'extracció (funció de treball) i el llindar de freqüència del metall del càtode.
- (b) Expliqueu raonadament si es produirà efecte fotoelèctric quan un feix de llum de longitud d'ona més gran que el llindar de longitud d'ona incideixi sobre el metall. I si la freqüència del feix incident és més gran que el llindar de freqüència del metall?

Dades:  $m_{\text{electró}} = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ ;  $q_{\text{electró}} = -1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .  $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ . Constant de Planck,  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ . Velocitat de la llum,  $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

**Solució:**  $2,03 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ;  $3,06 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$   
**Solució:** No; Si

**103** Una substància radioactiva es desintegra segons l'equació següent (en el sistema internacional, SI):

$$N = N_0 e^{-0,0050t}$$

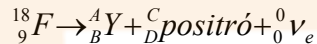
- (a) Expliqueu el significat de les magnituds que intervenen en aquesta equació i indiqueu el període de semidesintegració de la substància. Justifiqueu la resposta.
- (b) Si en un moment determinat la mostra conté  $1,0 \cdot 10^{28}$  nuclis d'aquesta substància, calculeu l'activitat que tindrà al cap de 4,0 hores.

**Solució:** 140 s  
**Solució:**  $2,7 \cdot 10^6$  nuclis /segon



## Qüestions selectivitat

**104** L'isòtop radioactiu fluor 18 es fa servir com a radiofàrmac en tomografies per emissió de positrons (TEP). Quan es desintegra radioactivament, aquest isòtop desprèn un positró que s'anihila ràpidament amb un electró de l'entorn i produeix dos fotons gamma amb la mateixa energia. Aquests fotons, detectats per l'aparell mèdic, permeten obtenir imatges útils per a la diagnòsi. El període de semidesintegració del fluor 18 és de 109,77 minuts i podem escriure l'equació de la desintegració de la manera següent:



en què Y és el nucli fill i  $v_e$  és un neutrí electrònic.

- Indiqueu quants protons i quants neutrons té el nucli de fluor 18. Calculeu els coeficients A, B, C i D de l'equació i la freqüència dels fotons gamma detectats per l'aparell de la tomografia.
- Calculeu el temps que ha de transcórrer perquè el nombre de nuclis de fluor 18 que queden sense desintegrar en el cos del pacient sigui l'1 % dels que hi havia a l'inici de la prova.

Dades: Velocitat de la llum,  $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . electró =  $9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ . Constant de Planck,  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ .

**Solució:** 9p, 9n; A=18; B=8; C=0 D=1;  $1,24 \cdot 10^{20} \text{ Hz}$   
**Solució:** 729,30 min

**105** La irradiància solar que arriba a la superfície de la Terra (potència incident per unitat de superfície) és aproximadament de  $1400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Suposem que l'energia mitjana dels fotons que hi arriben és de 2,20 eV.

- Quina és la longitud d'ona mitjana (en nm) dels fotons que arriben a la Terra?
- Calculeu el nombre de fotons que incideixen sobre una superfície d' $1,00 \text{ cm}^2$  cada segon.

Dades: Velocitat de la llum,  $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Constant de Planck,  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ .  $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .

**Solució:** 564 nm  
**Solució:**  $3,98 \cdot 10^{17}$  fotons

**106** La presència de l'isòtop ferro 60 ( ${}^{60}\text{Fe}$ ) en algunes roques lunars i en alguns sediments oceànics indica, segons alguns astrofísics, que una supernova va esclatar a les proximitats del Sistema Solar en una època relativament recent (a escala còsmica) i va fer arribar aquest isòtop fins a la Terra. El  ${}^{60}\text{Fe}$  té un període de semidesintegració de 2,6 milions d'anys.

- Si hi hagués hagut  ${}^{60}\text{Fe}$  quan la Terra es va formar, fa 4.400 milions d'anys, quin percentatge d'aquest  ${}^{60}\text{Fe}$  primordial quedaria ara? Si el  ${}^{60}\text{Fe}$  es va originar en l'explosió d'una supernova fa 13 milions d'anys, quin percentatge d'aquest  ${}^{60}\text{Fe}$  hauria de quedar encara?
- El  ${}^{60}\text{Fe}$  es transforma, mitjançant una desintegració  $\beta^-$ , en un isòtop de cobalt (Co) de vida breu, el qual torna a patir una nova desintegració  $\beta^-$  i produeix un isòtop estable de níquel (Ni). Escriviu les equacions nuclears de les dues desintegracions, incloent-hi els antineutrins.

Dada: Nombre atòmic del ferro (Fe): 26.

**Solució:** 0; 3,1%



Figura 57. Imatge per a la Qüestió 104



Figura 58. Imatge per a la Qüestió 108

## Qüestions selectivitat

**107** El període de semidesintegració d'un nucli radioactiu és de 600 s. Disposem d'una mostra que inicialment té  $10^{10}$  d'aquests nuclis.

- Calculeu la constant de desintegració i el nombre de nuclis que queden després d'una hora.
- Calculeu l'activitat de la mostra dues hores després de l'instant inicial.

**Solució:**  $1,155 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ;  $1,56 \cdot 10^8$  nuclis  
**Solució:**  $2,82 \cdot 10^3 \text{ Bq}$

**108** Per a fer observacions, els microscopis òptics fan servir fotons i els microscopis electrònics utilitzen electrons. El poder de resolució d'un microscopi és la capacitat que té per a diferenciar com a punts separats dos punts molt propers i està determinat (en part) per la longitud d'ona de la radiació emprada, de tal manera que com més petita és la longitud d'ona de la radiació, més gran és la resolució del microscopi.

- Calculeu l'energia dels fotons utilitzats en un microscopi òptic de llum visible de 400nm de longitud d'ona. Quina és la quantitat de moviment d'aquests fotons?
- Fem servir un microscopi electrònic en què els electrons que ens permeten fer l'observació són accelerats per una diferència de potencial, de manera que assoleixen una quantitat de moviment de  $3,31 \cdot 10^{-25} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Calculeu la relació que hi ha entre el poder de resolució d'aquest microscopi electrònic i el del microscopi òptic de l'apartat anterior. Quin dels dos microscopis té més poder de resolució?

Dades: Velocitat de la llum,  $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; Constant de Planck,  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ .

**Solució:**  $4,97 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ;  $1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$   
**Solució:** 200

**109** La desintegració del tori, Th-232 fins arribar al plom, Pb-208, passa per diferents isòtops i elements tal com indica la Figura 59

- Completeu les reaccions que permeten arribar al  $^{208}\text{Pb}$  a partir del  $^{232}\text{Th}$ .
- Tenint en compte que el període de semidesintegració del  $^{232}\text{Th}$  és d' $1,4 \cdot 10^{10}$  anys, quin tant per cent de  $^{232}\text{Th}$  roman sense desintegrar-se al cap de  $2,0 \cdot 10^{10}$  anys?

**Solució:** 37%

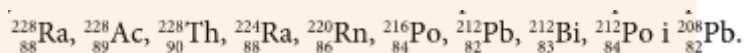


Figura 59. Imatge per a la Qüestió 109

## Qüestions Selectivitat

**110** Dues mostres radioactives tenen, en un moment donat,  $1,00 \cdot 10^{-1}$  mol cadascuna. Les mostres són de dos isòtops diferents de l'element radó (Rn): en concret, de radó 222 ( $^{222}\text{Rn}$ ) i de radó 224 ( $^{224}\text{Rn}$ ). Els dos isòtops són radioactius i tenen, respectivament, períodes de semidesintegració de 3,82 dies i 1,80 hores. El primer presenta una desintegració de tipus  $\alpha$  i el nucli fill és un isòtop del poloni (Po), mentre que el segon presenta una desintegració de tipus  $\beta^-$  i el nucli fill és un isòtop del franci (Fr).

- (a) Escriviu les equacions nuclears de les dues desintegracions radioactives amb totes les partícules que hi intervenen i els seus nombres atòmics i màssics. Calculeu quants àtoms de  $^{224}\text{Rn}$  no s'hauran desintegrat encara quan restin  $9,00 \cdot 10^{-2}$  mol de la mostra de  $^{222}\text{Rn}$  per desintegrar-se.
- (b) L'energia que es desprèn per cada desintegració d'un nucli de  $^{222}\text{Rn}$  és de 5,590 MeV. Calculeu el defecte de massa d'aquesta reacció nuclear.

Dades: Nombre d'Avogadro,  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ; Velocitat de la llum,  $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $1\text{eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ . Nombre atòmic del radó = 86.

**Solució:**  $2,81 \cdot 10^{20}$  àtoms  
**Solució:**  $8,94 \cdot 10^{13} \text{ J}$ ;  $9,93 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$

**111** El iode 131 ( $^{131}\text{I}$ ), descobert per Glenn Seaborg i John Livingood el 1938, és un important radioisòtop que s'utilitza en la radioteràpia posterior a la tiroïdectomia en els casos de càncer de tiroide. Té un període de semidesintegració de 8,02 dies i es transforma en xenó (Xe) mitjançant una emissió primària  $\beta^-$ , seguida d'una emissió  $\gamma$  de 364 keV.

- (a) Escriviu les equacions nuclears corresponents als processos esmentats i calculeu el percentatge que quedarà d'una determinada quantitat inicial de  $^{131}\text{I}$  després de 24,06 dies.
- (b) Calculeu la longitud d'ona dels fotons  $\gamma$ .

Dades: Constant de Planck,  $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ . Massa de l'electró =  $9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ . Velocitat de la llum,  $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .  $1\text{eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ . Nombre atòmic del iode = 53

**Solució:** 12,5 %  
**Solució:**  $3,41 \cdot 10^{-12} \text{ m}$

**112** El poloni,  $^{210}\text{Po}$ , és un emissor natural de partícules  $\alpha$ .

- (a) Escriviu la reacció de desintegració del  $^{210}\text{Po}$  sabent que quan es desintegra genera un isòtop del plom (Pb).
- (b) Sabent que el període de semidesintegració del  $^{210}\text{Po}$  és de 138 dies, quina quantitat de  $^{210}\text{Po}$  queda en una mostra de 10,0 g després de 69 dies des de l'inici de l'activitat?

Dades: Nombre atòmic del poloni,  $Z(\text{Po}) = 84$ .

**Solució:** 7,07 g

### Qüestions Selectivitat

**113** Sobre un metall alcalí incideix llum de longitud d'ona  $\lambda = 3,00 \cdot 10^2$  nm. Si els fotoelectrons emesos tenen una energia cinètica màxima de 2,00 eV, calculeu:

- (a) L'energia (en eV) d'un fotó de la llum incident.
- (b) El treball d'extracció (en eV) corresponent a aquest metall.

Dades:  $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ . Constant de Planck,  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ .  
Velocitat de la llum,  $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

**Solució:** 4,14 eV  
**Solució:** 2,14 eV