

**MÒDUL 1**

**FUSI****n**  
**CAT**

 **FuseNet**  
The European Fusion Education Network

**ASPECTES  
BÀSICS  
DE  
LA FUSIÓ**

**MATERIAL PER L'ALUMNAT**

L'objectiu d'aquest mòdul és fer una introducció de la fusió nuclear centrant-se en què la causa i en com es produeix. Per què la fusió nuclear és interessant per a tothom i no només per als científics? Com funciona la fusió nuclear com a principi i també com a mitjà per produir energia?

Aquestes preguntes ens porten automàticament a una última qüestió. A quins obstacles s'enfronta? Per què és tan difícil produir energia a partir de la fusió?

Un cop completat aquest mòdul, coneixereu els aspectes bàsics de la fusió nuclear i podreu comparar la fusió com a font d'energia potencial amb altres fonts d'energia alternatives. Podreu debatre sobre el potencial de la fusió i entendreu per què el camí cap a l'energia de fusió està tan ple de reptes.

Si després d'aquest mòdul voleu aprofundir encara més en la fusió, podeu fer els altres mòduls, que en tractaran aspectes específics.



# L'ENERGIA I EL SEU PAPER AL MÓN ON VIVIM

## La combinació energètica

La primera pregunta important que ens fem quan pensem en la fusió és la de per què és interessant la fusió nuclear. Per respondre aquesta pregunta, primer hem d'estudiar no el procés de fusió en si mateix, sinó el concepte d'energia en general. Des de la invenció de la màquina de vapor, l'energia ha anat adquirint cada vegada més importància. Serveix per escalfar casa nostra durant els freds mesos d'hivern i per refredar-la durant els calorosos mesos d'estiu. L'energia és el que permet que les màquines, els cotxes i els dispositius funcionin: des dels mitjans de transport fins als aparells elèctrics, al món actual tot va amb energia.

I tota aquesta energia que necessitem s'ha de produir d'alguna manera. Des de la revolució industrial, la humanitat ha descobert i desenvolupat moltes maneres enginyoses de produir energia per tal que es pogués utilitzar. Són el que anomenem «fonts d'energia». Aquestes fonts d'energia es poden classificar en dues categories principals: **energies no renovables** i **energies renovables**. Per embolicar encara més la troca, també es poden classificar en **energia sostenible** o **energia no sostenible**.

Els termes «renovable» i «sostenible» se solen utilitzar indistintament, tot i que «renovable» no és ben bé el mateix que «sostenible». «Renovable» significa que es renova o reposa al llarg del temps, mentre que «sostenible» vol dir que es pot mantenir o sostenir durant un temps prolongat (sense perjudicials per al futur).

Talar arbres i plantar-ne de nous és renovable, però no sempre sostenible: les llavors acabades de plantar es convertiran en nous arbres i, un cop transcorregut un temps suficient, els vells seran substituïts pels nous i el procés podrà començar de nou. No obstant això, si els arbres vells es talen més ràpid del que es planten els nous, el procés no és sostenible, perquè al final no queden arbres. D'altra banda, els processos també poden ser no renovables però sí sostenibles: la fissió nuclear (atenció: la fissió no és el mateix que la fusió) no és renovable (els dipòsits d'urani no es renoven de manera natural), però n'hi ha prou per mantenir molts reactors en funcionament durant força temps (encara que no per sempre) i, amb una gestió responsable dels residus nuclears, sense conseqüències perjudicials per al futur. Per tant, la fissió es considera una font d'energia no renovable, però en canvi sí que pot ser sostenible.

# El problema energètic

Ara ja tenim una idea més clara de què és la combinació energètica i de la quantitat d'energia que es necessita perquè la nostra societat actual pugui continuar funcionant, però encara ens queda camí per entendre per què és important la fusió exactament. Per entendre-ho, hem d'analitzar el **problema energètic**, que es pot relacionar amb els següents fets.

**La població mundial està creixent.** Ha passat de 6.000 milions l'any 1999 a 7.800 milions l'any 2020, i s'espera que augmenti fins als 8.500 milions l'any 2030, fins als 9.700 milions l'any 2050 i fins als 10.900 milions l'any 2100 (vegeu també la figura 2).

**L'ús mitjà d'energia per persona està augmentant.** Els països cada vegada s'estan desenvolupant més, la qual cosa comporta que la seva població tingui un nivell de vida més alt. I tenir un nivell de vida més alt sol implicar un augment de les necessitats energètiques; per exemple, per desenvolupar els serveis bàsics i les infraestructures o garantir un major accés o disponibilitat d'electricitat i Internet. Com diuen les Nacions Unides a la seva declaració, tota persona té dret a un nivell de vida adequat que li garanteixi salut i benestar. Garantir que tothom tingui accés a un nivell de vida adequat és més prioritari que reduir l'ús mitjà d'energia que fa cada persona i no seria ètic negar a la gent la possibilitat d'assolir un millor nivell de vida.

La major part de l'energia continua generant-se a partir de fonts perjudicials per al medi ambient, sobretot per les **emissions de gasos d'efecte d'hivernacle** que provoca. Els combustibles fòssils són els dominadors del nostre subministrament energètic i, encara que les fonts d'energia renovables i netes estan creixent ràpidament, no ho fan prou com per arribar a substituir la nostra dependència dels combustibles fòssils abans que es produeixi un **canvi climàtic** irreversible. El canvi climàtic tindrà molts efectes nocius per al món: s'estima que l'augment de les temperatures donarà lloc a un clima més extrem (que provoqui, per exemple, incendis forestals i onades de calor), i també s'estima que el canvi climàtic tindrà un impacte negatiu per a la salut humana, la flora i la fauna i també l'economia mundial. Per tant, els combustibles fòssils no són una solució sostenible per al futur, perquè el canvi climàtic ja s'està produint i cal actuar ara de manera urgent.

La combinació d'aquests tres factors és el problema energètic al qual s'enfronta el món.

# Solucions per al problema energètic

Com davant qualsevol altre problema, aquest també hauria de tenir solució. En el cas del problema energètic, es pot pensar en moltes solucions possibles, però la majoria impliquen grans canvis en l'estil i el nivell de vida mitjà de la població, dues coses que la majoria de la gent no vol sacrificar. Hi ha dues maneres principals de resoldre el problema energètic de manera lògica:

**1. Reduint dràsticament la necessitat (mitjana) d'energia.** Això es pot aconseguir o bé fent que els processos siguin molt més eficients (un problema tecnològic) o bé fent que el consum individual d'energia disminueixi dràsticament (un problema social). Optimitzar l'eficiència energètica té els seus límits, ja que sempre hi haurà alguna forma de pèrdua d'energia; per exemple, per les pèrdues de calor dels cables elèctrics o la fricció dins d'una màquina. Al mateix temps, hi ha molts àmbits en els quals l'eficiència encara pot millorar: des d'aïllar millor els edificis fins a fer un ús més intel·ligent de l'escalfor, el transport o els recursos. D'altra banda, reduir el consum mitjà d'energia és una opció molt viable, si no necessària. El canvi climàtic afectarà dràsticament les nostres vides, ens agradi o no. Per això, és inevitable canviar l'estil de vida, sobretot si tenim en compte que actualment és una petita part rica de la població mundial la que consumeix la major part de l'energia total, mentre que el consum de la població pobre és molt inferior, ja que molta gent ni tan sols té accés a l'electricitat. No podem pretendre que els que no tenen electricitat se'n quedin sense perquè els altres en consumeixen en excés.

**2. Augmentant la producció d'energia sostenible de manera dràstica.** Si abandonéssim immediatament l'ús dels combustibles fòssils, podríem estalviar moltes emissions! Però això és més fàcil de dir que no pas de fer, perquè hi entren en joc molts aspectes polítics i econòmics: la indústria dels combustibles fòssils és enorme i no pot desaparèixer de la nit al dia. Per tant, cal substituir els combustibles fòssils per alternatives elèctriques. En alguns àmbits ja s'observen canvis ràpids (pensem, per exemple, en els cotxes elèctrics), però aquesta transició cap a alternatives elèctriques només pot anar al mateix ritme que la producció i l'augment d'aquestes alternatives. Cal temps per poder fer una transició cap a alternatives elèctriques, però alhora s'està esgotant el temps per evitar que es produeixin efectes perjudicials a causa del canvi climàtic.

Tot això deriva clarament en un problema social de proporcions majúscules que té repercussió en tota la vida del nostre planeta.

Buscant maneres d'augmentar la quantitat d'energia que es produeix de manera sostenible, anem a parar inevitablement en les fonts d'energia renovables més conegudes: l'energia solar i l'energia eòlica. L'únic problema que tenen és que no poden funcionar de manera ininterrompuda, com sí que ho fa la nostra societat. Per tant, aquestes fonts d'energia han d'anar acompanyades de solucions adequades d'emmagatzematge d'energia. L'energia solar i l'energia eòlica varien al llarg del dia, però el principal problema radica en la seva estacionalitat i en la dependència de la seva ubicació. A l'hivern, els dies són més curts i hi ha menys llum disponible en comparació amb els dies d'estiu, mentre que els vents són més forts a l'hivern comparat amb l'estiu. Al mateix temps, depenent de la ubicació geogràfica, alguns llocs tindran vents forts tot l'any, mentre que uns altres tindran vents tranquils, i alguns rebran més llum solar que altres (pensem, per exemple, en els boscos densos, les àmplies estepes, els deserts àrids o els paisatges àrtics). Quan es comparen l'energia solar i l'eòlica amb els combustibles fòssils, és molt fàcil veure la utilitat dels combustibles fòssils pel simple fet que poden generar molta energia sense parar: poden proporcionar una **càrrega base** constant independentment del fet que la llum solar o el vent siguin menys intensos durant un determinat període de temps. Però l'ús continuat dels combustibles fòssils té un cost molt alt per al futur habitable de moltes persones.

Per tant, podem identificar dos enfocaments principals per resoldre el problema energètic: **(1) Fer un millor emmagatzematge de l'energia.** Per exemple, amb bateries millors i més potents. **(2) Trobar una manera alternativa de proporcionar aquesta càrrega base.** L'opció més coneguda és la nuclear.

Malauradament, encara que les bateries són cada vegada millors i també més barates, les combinacions d'energia sostenible com la solar o l'eòlica i l'emmagatzematge d'energia mitjançant bateries continuen sent opcions molt més cares que els combustibles fòssils. L'ús de fonts d'energia sostenible no només ha d'atrapar el de combustibles fòssils, sinó que ha de superar-lo i substituir-lo durant els propers 30 anys. I si ho aconsegueixen, tampoc no tenim la certesa absoluta que la combinació de renovables i emmagatzematge d'energia pugui proporcionar tota l'energia necessària a nivell mundial en el futur. D'altra banda, la fissió nuclear, que proporciona càrrega bàsica, tampoc no és ideal, ja que produeix residus radioactius de llarga durada.

## La fusió com a solució (de reserva)

Tenint en compte que encara hi ha moltes incerteses sobre la combinació energètica ideal del futur, explorar diverses alternatives podria servir per trobar la millor combinació energètica no només per al futur més immediat, sinó també per al més llunyà. En aquest sentit, la **fusió nuclear** podria entrar en joc com a possible font d'energia futura. La fusió nuclear és un procés que es produeix constantment, ja que és el procés que subministra energia al sol i del que depèn tota la vida al nostre planeta. L'objectiu és crear una petita estrella controlada aquí a la Terra i els científics de tot el món cada vegada hi són més a prop. No obstant això, la fusió nuclear no podrà resoldre els problemes del futur més immediat, ja que cal temps perquè l'energia de fusió sigui una realitat. Però sí que podria ser la resposta als nostres problemes energètics durant els pròxims segles.

Si l'energia de la fusió nuclear es pogués aconseguir recrear aquí a la Terra, seria una solució sostenible i intrínsecament segura, sense (gairebé) emissions. Podria proporcionar una càrrega base igual que els combustibles fòssils o la fissió nuclear. Seria una font d'energia compacta amb una abundància de combustible disponible, suficient per generar energia durant centenars, si no milers, d'anys. No obstant això, la fusió dista molt de ser ideal: és complexa i extremadament difícil, i encara no s'ha aconseguit un guany net d'energia mitjançant la fusió. Així i tot, la fusió seria una gran opció com a alternativa si les altres fonts d'energia no poguessin proporcionar prou energia sostenible per al futur. Científics de tot el món s'esforcen per resoldre el gran repte que suposa l'energia de fusió amb l'esperança de desbloquejar el gran potencial de la fusió nuclear com a font d'energia del futur.

En conclusió, no existeix una solució perfecta per resoldre el problema energètic. Cada cop queda menys temps per evitar un canvi climàtic irreversible i, com demostra la signatura de l'Acord de París l'any 2015 per part de 190 països i la Unió Europea, tot el planeta està d'acord que cal reduir les emissions globals de gasos d'efecte d'hivernacle per limitar l'augment de la temperatura global en 2° C. Per això, cal que la combinació energètica del món canviï de manera dràstica. La fusió no resoldrà els nostres problemes durant els propers 50 anys, però si aconseguim que funcioni podria resoldre els nostres problemes energètics durant moltes generacions: un objectiu encomiable per part de les moltes persones que treballen per aconseguir la fusió el més ràpid possible.

Als propers capítols d'aquest mòdul s'explicaran els fonaments de la fusió nuclear. Analitzarem la fusió dins del Sol, aprendrem què és un plasma i veurem quins són els passos bàsics per construir un dispositiu de fusió. Veurem que aconseguir la fusió no és tan difícil, però que crear energia a partir d'ella que es pugui fer servir és el gran repte que encara no s'ha resolt. Al final d'aquest mòdul, entendreu els principals processos físics que hi ha darrere d'un dispositiu de fusió nuclear.



# LA FUSIÓ DINS EL SOL

Ara que ja hem parlat del perquè, és el moment de passar a parlar del com. En primer lloc, fixem-nos en l'únic reactor de fusió que ha estat funcionant sense parar des de molt abans que la humanitat sabés què era la fusió: el Sol.

## El Sol

El Sol és un conjunt enorme de partícules que es mantenen unides per la **gravetat**. És a dir, a causa de la gravetat, qualsevol objecte amb massa atreu qualsevol altre objecte amb massa. La magnitud d'aquesta atracció (la força amb la qual els objectes s'atrauen els uns als altres) depèn del volum de la massa. La Terra, per exemple, com que el nostre planeta ja pesa molt per si mateix, ho atreu tot cap al seu centre. Això dona lloc a la gravetat que percebem, que manté els nostres peus enganxats al terra i fa que els objectes caiguin de dalt cap a baix. El Sol és molt més pesat: té unes 333.000 vegades la massa de la Terra. Per això, la força gravitatòria del Sol és molt més forta que la que sentim a la Terra. No obstant això, també hi ha d'haver una força cap a l'exterior, ja que en cas contrari el Sol es col·lapsaria fins convertir-se en un punt. Aquesta força exterior és el resultat de les reaccions de fusió que es produeixen dins el nucli del Sol.

De la mateixa manera que la **pressió** a la Terra augmenta a mesura que ens acostem cap al seu centre, la pressió a l'interior del Sol és cada vegada més gran com més ens acostem al nucli. Aquest és el mateix principi segons el qual a les profunditats dels oceans hi ha pressions molt altes: tota la massa que està per sobre nostre pressiona cap avall a causa de la gravetat. Com més massa tinguem per sobre, més alta serà la pressió. La gravetat empeny totes les partícules cap al centre, tractant de comprimir tota la massa. L'alta pressió al nucli del Sol provoca una força cap a fora que equilibra la força de gravetat cap a dintre. Com a resultat, el Sol no es col·lapsa en un punt ni s'expandeix, sinó que està en **equilibri**.

La temperatura dins el nucli del Sol és extremadament alta. Seguint un raonament lògic i tenint en compte que el Sol perd calor per la seva superfície (a través de la radiació), la temperatura és més baixa a la superfície i més alta al nucli. Al mateix temps, a causa de la compressió per les forces gravitatòries, al centre és on la densitat és més alta. Com a resultat, les condicions dins el nucli del Sol són molt extremes i, per això, existeix la possibilitat que partícules separades s'acabin unint; és a dir, que s'acabin fusionant. Quan dues partícules es fusionen, s'allibera una gran quantitat d'energia que té com a resultat una alta pressió cap a l'exterior que contraresta les forces gravitacionals i que evita que el Sol es col·lapsi.

# A l'interior de l'àtom

Mirem ara amb detall què són exactament aquestes "partícules" i què vol dir quan diem que es «fusionen».

Tots els objectes físics s'han construït a partir d'algun element. Si poguéssim anar-nos acostant cada cop més als objectes, veuríem que (gairebé) tots estan formats a partir de complexes estructures moleculars compostes de molècules individuals que, al seu torn, estan fetes d'àtoms. Cadascun d'aquests àtoms té una estructura similar: un nucli i com un núvol d'**electrons** que es mou al voltant d'aquest nucli. El nucli està format per dos tipus de partícules: **protons i neutrons**.

El nombre de protons del nucli determina quin tipus d'àtom o element és: si el nucli té un sol protó, l'anomenem **hidrogen**; si en té dos, l'anomenem heli. S'han trobat i classificat una gran quantitat d'elements diferents que podem consultar a la taula periòdica (vegeu apunt). A dins del nucli pot haver-hi un nombre diferent de neutrons, que és el que dona lloc a diferents versions d'un element concret: per exemple, un nucli format per un sol protó però sense cap neutró l'anomenem simplement hidrogen, però si té un protó i un neutró, en diem **deuteri**, que és un **isòtop** diferent de l'hidrogen. En el cas dels àtoms d'hidrogen, trobem tres possibles isòtops: l'hidrogen "normal", el deuteri i el **triti** (que té un protó i dos neutrons).

Quina és llavors la diferència entre un protó i un neutró? Un protó és una partícula amb càrrega positiva, mentre que un neutró és una partícula neutra. La càrrega elèctrica pot ser de dos tipus: positiva i negativa. Les càrregues positives repel·leixen altres càrregues positives i atreuen les negatives, mentre que les negatives repel·leixen altres càrregues negatives i atreuen les positives. Aquest és el mateix procés que fa que els cabells se't posin de punta quan tens càrrega elèctrica: si tots els cabells del cap es carreguen de manera similar (per exemple, perquè toques alguna cosa que està carregada elèctricament), es repel·len entre ells. Com a conseqüència, tots els cabells s'allunyen tot el que poden dels altres i es posen drets!

Per tant, això vol dir que els àtoms estan carregats? Mentre que el nucli està sempre carregat positivament (ja que està format només per protons i neutrons), està envoltat d'electrons que giren al seu voltant. Els electrons són partícules carregades negativament amb exactament la mateixa càrrega que els protons, però negativa. Els àtoms són sempre neutres, per la qual cosa han de tenir el mateix nombre de partícules amb càrrega negativa i amb càrrega positiva. Per tant, un àtom sempre té el mateix nombre de protons que d'electrons.

Això no vol dir que només existeixin partícules amb el mateix nombre de protons i electrons, sinó que si un àtom perd un més d'un electró i es carrega positivament, es converteix en un **ió positiu** i si en guanya un o més d'un, es converteix en un **ió negatiu**. De l'electró que ja no forma part d'un àtom se'n diu electró lliure. Existeixen una gran varietat de ions, tant amb càrrega positiva com negativa.

## Reaccions nuclears

Tornem al procés de fusió. Ara que sabem què són els nuclis, vegem què passa quan dos nuclis es fusionen.

La temperatura del Sol és prou alta perquè dos nuclis puguin col·lidir, encara que es repel·leixin a causa de la seva càrrega positiva, i convertir-se en un nou nucli més gran. Aquest procés s'anomena **reacció de fusió nuclear fusion** o reacció de fusió, si ho volem abreujar. Les reaccions de fusió a les estrelles poden donar lloc a elements més pesats que també poden fusionar-se si la temperatura és prou alta. D'aquesta manera, es poden crear elements més pesats i s'allibera energia a les estrelles a través de les cadenes de reaccions de fusió.

Vegem la reacció de fusió més interessant, que és la més fàcil de provocar: la reacció de fusió deuteri-triti o **fusió D-T**.

### Reacció de fusió

En aquesta reacció, dos isòtops d'hidrogen, deuteri (un protó, un neutró) i triti (un protó, dos neutrons) es fusionen per formar un nucli d'heli, un neutró lliure i una gran quantitat d'energia: 17,6 MeV. MeV és el símbol de **mega-electró-volt**. L'electró-volt (eV) és una unitat d'energia, com el **joule** (J), que s'utilitza sovint als processos nuclears i atòmics.

Un electró-volt és molt petit:  $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$ , així que els 17,6 MeV poden semblar poc ( $10^{-19} = 0,00000000000000000001$ ; per tant,  $17,6 \text{ MeV} = 2,82 \times 10^{-12} \text{ J}$  o  $0,00000000000282 \text{ J}$ ), però per a dos nuclis és una quantitat d'energia enorme. Com els que nuclis són molt petits i en una petita quantitat de "combustible" nuclear n'hi ha molts, la **densitat d'energia** (l'energia per unitat de volum) és increïblement alta. Si cremem un litre de gasolina i el comparem amb la fusió d'un litre de combustible de deuteri i triti, la reacció de fusió produirà molta més energia: uns 10 milions de vegades més!

Això és vàlid per a totes les reaccions nuclears, tant de fissió com de fusió, i això és el que fa que les reaccions nuclears siguin tan extremadament útils per tal de crear energia, però malauradament també les fa adequades per a finalitats més sinistres, com va demostrar el desenvolupament de la bomba atòmica durant la Segona Guerra Mundial (un dispositiu de fissió) i el desenvolupament de la bomba H durant la dècada de 1950 (que utilitzava una combinació de fissió i fusió).

## Tornem a la Terra

Ara ja podem entendre per què el Sol pot existir: la gravetat l'empeny cap endins i l'energia que s'allibera durant les reaccions de fusió dins el nucli del Sol escalfa el nucli i el fa expandir-se, la qual cosa provoca una pressió cap a fora. L'equilibri entre la pressió cap a l'interior, per una banda, i cap a l'exterior, per altra banda, garanteix que el Sol no es col·lapsi a causa de la gravetat ni exploti a causa de l'energia alliberada durant les reaccions de fusió.

Des que la humanitat va descobrir quin era el funcionament de les estrelles, hem intentat reproduir aquest procés a la Terra per tal de generar energia. Però el problema és que la Terra és massa petita perquè la fusió es pugui produir de la mateixa manera que ho fa al Sol. Hem de trobar alternatives a la gravetat extremadament forta. Per sort, hem trobat diverses maneres de crear fusió a la Terra. La més habitual és creant el que coneixem com a **"plasma"** i fer servir imants molt forts per controlar-lo. Per poder esbrinar quina és la millor manera de crear la fusió a la Terra, primer hem de saber quines condicions són necessàries perquè es produeixi la fusió.

## Criteris per a la fusió

Al Sol, l'enorme pressió existent a causa de la gravetat permet que es produeixin reaccions de fusió. Aquesta pressió és el resultat de dos fenòmens: la temperatura i la densitat. Ambdues són importants perquè es produeixin les reaccions de fusió. Per entendre-ho millor, imaginem-nos una situació hipotètica en què tenim dues partícules de càrrega positiva atrapades dins una caixa.

Les dues partícules es repel·leixen a causa de la seva càrrega. Aquesta repulsió depèn de la distància entre les partícules: si són a prop la repulsió



és forta, però si mantenen una certa distància llavors la repulsió disminueix ràpidament de manera considerable. Naturalment, les partícules s'allunyen tant com poden les unes de les altres, però com es troben dins una caixa s'aturaran quan arribin a les parets de l'altra banda. Si les partícules s'acosten prou, tenen la capacitat de fusionar-se. Suposem que una vegada que les dues partícules es toquen, es fusionen automàticament en una nova partícula més gran. Perquè això passi, cal acostar les partícules d'alguna manera: cal superar la seva repulsió mitjançant la força. Però com que la repulsió és més forta com més s'acosten les partícules, no és fàcil aconseguir-ho. Però es pot aconseguir fent que les partícules es moguin ràpidament perquè col·lidin i es fusionin.

Tornem a les dues partícules atrapades dins la caixa. Donem una gran **velocitat** a les dues partícules i deixem que es moguin per la caixa, que d'altra banda està buida; és a dir, conferim **energia cinètica** a les partícules. Les partícules rebotaran contra les parets i es mouran aleatòriament per la caixa. Si les partícules s'arriben a acostar, la repulsió les separarà. No obstant això, si la velocitat de les partícules és prou alta, la repulsió ja no és prou forta per poder separar-les i poden col·lidir. En aquest cas, les partícules es tocaran i es fusionaran. En aquest cas, una col·lisió es pot considerar com un cas d'alta pressió molt breu: les partícules es mouen molt ràpid i un cop col·lideixen, just en el moment en què es toquen, empenyen l'altra partícula amb molta força.

Aquí és important la relació entre l'energia cinètica i la temperatura. La temperatura és una mesura del **moviment aleatori mitjà o de la vibració d'un conjunt de partícules**. En la nostra situació hipotètica amb les dues partícules, hem donat a les partícules velocitats molt altes i com a resultat, obtenim una velocitat mitjana alta i per tant la temperatura del conjunt de partícules també és alta. Si escalfem les partícules, podem augmentar-ne la velocitat mitjana i si aquesta velocitat és prou alta, hi ha la possibilitat que les partícules es fusionin.

No obstant això, si només tenim dues partícules molt petites dins d'una caixa, la possibilitat que xoquin a l'atzar i es fusionin és molt baixa. Així que hem d'aconseguir que la probabilitat que les partícules es fusionin sigui més alta, augmentant el nombre de partícules dins de la caixa. Si totes les partícules mantenen velocitats prou altes que en facin possible la fusió, augmentar el nombre de partícules dins de la caixa farà que hi hagi una major probabilitat que es produeixi la fusió. Augmentant el nombre de partícules dins la caixa (i mantenint la caixa igual), també augmentem la densitat de les partícules. Per tant, **el millor mètode per aconseguir la fusió és combinant alta densitat i alta temperatura**. Això, per exemple, es pot veure al Sol, on la densitat al centre és alta i la temperatura al centre tampoc no

és precisament baixa. Per tant, és aquesta combinació d'alta densitat i alta temperatura la que crea les condicions extremes que es necessiten perquè es produeixin reaccions de fusió dins del Sol.

No obstant això, hem passat per alt un factor important: perquè això funcioni necessitem una caixa! Si les partícules no estan confinades, no es produiran col·lisions. Ha arribat l'hora d'introduir el concepte de **temps de confinament**. Si podem mantenir un producte de densitat i temperatura prou alt durant més temps, obtindrem més potència de fusió. No obstant això, el nostre conjunt de partícules no podrà mantenir automàticament la seva alta temperatura, sinó que es refredarà ràpidament tret que el mantinguem ben aïllat. Per tant, hem de mantenir la nostra energia «confinada» dins la caixa; és a dir, el nostre reactor de fusió. En cas contrari, l'escalfor s'escaparà ràpidament del reactor. Passa el mateix que quan volem mantenir una habitació calenta: si hi ha una finestra oberta mentre intentem escalfar l'habitació i fa molt fred a fora, necessitarem escalfar molt més per mantenir l'habitació a la temperatura que volem i malgastarem molta energia. Hem de confinar l'energia a l'interior de l'habitació i assegurar-nos que la temperatura es pot mantenir alta per tal que es produeixin moltes reaccions de fusió. Si el temps de confinament és gran, això significa que l'energia roman dins de la nostra caixa durant més temps i, en conseqüència, la possibilitat que es produeixin reaccions de fusió també és més alta.

## La fusió a la Terra

Al Sol, les partícules del nucli estan molt ben confinades, però a la Terra la gravetat no ens fa la feina per nosaltres i ens cal confinar l'energia d'una altra manera per tal d'obtenir el major nombre possible de reaccions de fusió fent servir la mínima quantitat d'energia necessària per aconseguir aquestes condicions de fusió. Per sort, en cadascuna d'aquestes reaccions de fusió s'allibera molta energia. Aquesta energia no s'allibera en forma de llum, sinó que ho fa com a energia cinètica dins les partícules que es creen durant la reacció de fusió. Això vol dir que, al final d'una reacció de fusió, s'obtenen partícules encara més ràpides que ajuden a augmentar la temperatura general i poden ajudar a mantenir la reacció.

Com que no podem fer servir la gravetat per crear densitats i temperatures tan altes com les del Sol, hem de trobar una altra manera d'obtenir aquestes condicions extremes i necessitem confinar tota aquesta energia d'alguna manera. Hem de crear una combinació d'alta densitat i alta temperatura i confinar tota l'energia per tal de garantir que la probabilitat que dues partícules es fusionin sigui prou alta fins als nostres dispositius de fusió a la Terra.

# PLASMA

Com s'ha esmentat anteriorment, la forma més habitual de crear fusió en la Terra és mitjançant un plasma. En aquesta secció parlarem de què és un plasma i com s'utilitza per a la fusió.

## Escalfament del combustible

Com ja s'ha dit, la **temperatura és una unitat de mesura de l'energia**: és la velocitat mitjana amb la qual es mouen o vibren les partícules. Com més alta és la temperatura, més ràpid és el moviment o la vibració. I això és aplicable a tota la matèria en totes les fases: **sòlida, líquida i gasosa**. Quan escalfem un objecte sòlid, com per exemple un tros de metall, els àtoms comencen a vibrar amb majors oscil·lacions. En un sòlid, això no fa canviar gaire la forma de l'objecte: el tros de metall s'expandeix una mica però continua sent igual en la seva major part. Si s'escalfa prou, l'estructura macroscòpica (la que s'observa a simple vista) del tros de metall es comença a trencar. Les partícules començaran a moure's més ràpid i els objectes perdran la seva estructura; és a dir, es produirà la fusió. Quan s'escalfa encara més, l'estructura macroscòpica, ara líquida, pot trencar-se encara més i pot convertir-se en un gas. Durant aquesta transició de fase de líquid a gas, els enllaços entre els àtoms es trenquen per complet i les partícules comencen a volar lliurement. Les úniques interaccions entre les partícules de gas són les col·lisions.

Aquest procés de canvi de sòlid a líquid i a gas (o a la inversa) s'anomena **canvi de fase**. La temperatura a la qual es produeix un canvi de fase depèn del tipus d'àtoms i del tipus d'enllaços que hi ha entre ells. Alguns materials comencen a fondre's a baixes temperatures (xocolata, espelmes), mentre que d'altres, com ara els metalls, només es fonen a temperatures molt altes. Algunes formes de matèria fins i tot bullen a temperatures tan baixes que, a la natura, només es veuen en fase gasosa: per exemple, el punt d'ebullició de l'oxigen de l'aire que respirem és són uns baixíssims  $-183\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Recordem que el nostre combustible de fusió és deuteri i triti, que són dos isòtops diferents de l'hidrogen. A temperatura ambient, l'hidrogen ja és un gas. La densitat d'un material també està relacionada amb la fase en què es troba. Si fonem un material, en general hi haurà més espai entre les partícules: el volum augmenta però el nombre de partícules continua sent el mateix, la qual cosa comporta una menor densitat. En conseqüència, si el nostre combustible és un gas, generalment tindrem densitats baixes. **Per tant, per aconseguir les condicions de fusió, cal escalfar el gas a temperatures molt altes.**

# Ionització

Com hem dit, el nostre combustible és un gas i necessitem escalfar-lo a temperatures extremes. Però, què passa si seguim escalfant un gas? Un gas pot patir un procés similar a una «ebullició», com passa amb els líquids? En certa manera, sí: si els gasos s'escalfen prou, s'hi produeix una mena de **ruptura**. Aquesta ruptura no és diferent de la fusió o l'ebullició, processos durant els quals els enllaços entre àtoms i molècules es trenquen, en el sentit que ara són els enllaços dins d'un àtom els que es comencen a trencar; és a dir, els enllaços entre el nucli i els electrons.

Aquesta ruptura es produeix quan un gas s'escalfa fins al punt que l'energia de l'àtom supera un determinat llindar, l'anomenada **energia de ionització**. L'àtom es comença a trencar i els nuclis poden ser despullats d'un o més electrons: l'àtom es converteix en un ió. Aquest procés s'anomena **ionització**. Com que la majoria dels àtoms tenen diversos electrons, poden ser despullats de més d'un electró. Si es despulla de tots els electrons, el ió s'ionitza per complet, i dona lloc a un nucli positiu lliure sense electrons. Quan un gas es comença a trencar en ions i electrons, parlem de plasma. Per tant, **un plasma és un gas ionitzat format per ions positius lliures i electrons negatius lliures**. Normalment, en un plasma no tots els àtoms estan ionitzats. Si ho estan tots, parlem de plasma totalment ionitzat. A aquestes alçades, potser ja no us sorprèn saber que el Sol no és una gran bola de gas, sinó que en realitat és una gran bola de plasma.

## Diferència entre gas i plasma

Quina és la diferència entre un gas i un plasma, a part del nom? La principal diferència és que un plasma està format per ions i electrons, és a dir, per partícules carregades, mentre que un gas normal només està format per àtoms neutres. Per tant, en un plasma tenim **càrregues que es mouen lliurement**. Això significa que un plasma pot tenir **corrents i conduir electricitat**, igual que un cable metàl·lic. A més de la conductivitat, una altra qualitat important dels plasmes és que són **sensibles als camps elèctrics i magnètics**.



# Camps elèctrics i magnètics

Els **camps elèctrics** són una manera de descriure com un objecte carregat influeix en altres objectes carregats del seu entorn. Una partícula carregada atreu o repel·leix altres partícules carregades, en funció de si tenen el mateix tipus de càrrega ( $++/ --$ ) o el contrari ( $+/-/+$ ). La força de la interacció depèn de la distància entre les partícules carregades. Si tinguéssim una partícula carregada fixa a l'espai i hi col·loquéssim una partícula imaginària —**una partícula «de prova»**— a prop, ens podem imaginar que es produiria una forta interacció entre totes dues (la partícula fixa atrauria l'altra partícula o la repel·liria). Això significa que el camp elèctric de la partícula fixa és fort en el lloc on hem col·locat la partícula imaginària. Si col·loquéssim una partícula imaginària lluny, continuaria havent-hi una interacció, però molt feble: el camp elèctric de la partícula fixa és feble quan es troba lluny de l'altra partícula.

Si ens imaginem aquestes partícules «de prova» pertot arreu al voltant de la partícula fixa, podem fer-nos una idea de la força de la interacció en qualsevol lloc de l'espai. D'això en diem camp elèctric. Podem dibuixar línies des de la partícula que vagin cap a fora en totes direccions i que mai es creuin: són **les línies de camp elèctric**. D'aquesta manera, podem visualitzar el camp, ja que si les línies de camp són a prop les unes de les altres, el camp elèctric és fort i si estan allunyades les unes de les altres, el camp és feble. **La direcció de les línies de camp elèctric** és sempre de càrrega positiva a negativa.

Un **camp magnètic** es defineix de manera similar, però en lloc de ser una interacció entre càrregues positives i negatives, el camp es pot veure com una interacció entre dos «pols magnètics»: nord i sud. Dos pols similars es repel·leixen i dos pols oposats s'atreuen. Una manera més realista de visualitzar un camp magnètic és dibuixant línies de camp, ara anomenades **línies de camp magnètic**, que sempre formen espirals tancades. Si els bucles travessen un material (magnètic), el lloc on les línies de camp surten del material es pot considerar com el «pol nord» i el lloc on les línies de camp entren dins el material com el «pol sud». Quan les línies de camp es troben fora del material magnètic, aquestes van de «nord a sud». Com que els camps magnètics també poden existir en el buit, és possible que una línia de camp magnètic no travessi un material magnètic. En aquest cas, el camp magnètic no tindrà ni pol nord ni pol sud, però continuarà existint.

# Partícules carregades dins un camp magnètic

Quan una partícula carregada entra dins un camp magnètic, la partícula carregada començarà a **girar** al voltant de les línies del camp magnètic. Aquest moviment degut al camp magnètic, anomenat **gyromotion** (moviment circular continu) és molt útil. Si volem que les partícules col·lideixin amb prou força per arribar a fusionar-se, necessitem temperatures extremadament altes. Per tant, hem de crear un plasma i escalfar-lo fins a temperatures extremes. Però llavors ens trobem davant un problema: a aquestes temperatures extremes, no hi ha materials que puguin mantenir el plasma contingut, ja que el contenidor començaria a fondre's i el plasma calent de l'interior es refredaria en tocar-lo. Aquí és on es comença a intuir la utilitat dels camps magnètics: si podem controlar el plasma amb imants, podem mantenir-lo allunyat de les parets del contenidor i mantenir-lo en suspensió, de manera que no pugui fondre el nostre dispositiu de fusió (i el nostre dispositiu de fusió no pugui refredar el plasma). **Podem confinar un plasma fent servir camps magnètics.**

# CONSTRUIR UN DISPOSITIU DE FUSIÓ

Ara ja tenim els coneixements bàsics necessaris per començar a construir un dispositiu de fusió. Coneixem les reaccions de fusió nuclear i com el Sol produeix la fusió. Hem identificat els criteris necessaris per crear reaccions de fusió: mantenir una pressió molt alta durant la major quantitat de temps possible. Aquesta alta pressió la causen una combinació de densitat i temperatura. Al Sol, l'alta pressió es produeix de manera natural a causa de la gravetat, però a la Terra necessitem un altre mètode.

L'enfocament més habitual és utilitzar camps magnètics per confinar el plasma i crear altes pressions escalfant el plasma a altes temperatures durant un temps suficient perquè es produeixin reaccions de fusió. Especialment a Europa, la majoria dels projectes de fusió que tenen com a objectiu produir energia de fusió se centren en escalfar i confinar magnèticament un plasma. Aquest enfocament de la fusió s'anomena **fusió per confinament magnètic o FCM**.

Ara que ja sabem que es poden fer servir imants per confinar un plasma, podem aprofundir en què significa això per a un dispositiu de fusió magnètica. Comencem donant un cop d'ull al tipus de dispositiu de fusió més habitual, el **tokamak**.

## El tokamak

L'origen de la paraula «tokamak» prové del rus i és l'acrònim de «cambra toroidal amb bobines magnètiques» o «cambra toroidal amb camp magnètic axial». I és precisament això el que és: una cambra en forma de dònut envoltada de bobines magnètiques que poden contenir plasma. L'interior del dònut és un buit, en el qual es pot injectar combustible de fusió (gas hidrogen), que es converteix en plasma i s'escalfa (normalment amb ones de ràdio). A continuació, aquest plasma es confina mitjançant els imants que es troben fora de la cambra en forma de dònut (i a vegades parcialment dins de la cambra, segons el tokamak).

## Geometria d'un tokamak

Abans d'endinsar-nos en els diferents sistemes d'imants d'un tokamak estàndard, donem primer un cop d'ull a la geometria d'un dispositiu en forma de dònut: un **tor**.

Una forma elegant és pensar en un tor en dues constants i dues variables de coordenades: el  $r$  radi major  $R$ , el radi menor  $a$ , l'angle poloidal ( $\theta$ ) i l'angle toroidal ( $\phi$ ). A la figura 16 es pot veure un exemple de tor que també inclou totes aquestes variables.

Els radis major i menor es poden considerar com els radis dels dos cercles diferents que hi ha en un tor: el radi des del centre del forat del dònut cap al centre del cercle més petit del dònut és el radi major  $R$ , mentre que el radi del cercle més petit del dònut és el radi menor  $a$ . En realitat, el cercle més petit del dònut sol tenir una forma més triangular o de D als tokamaks moderns. Això ajuda a millorar el rendiment del tokamak. Un exemple d'aquest tipus de bobina el trobem a la figura 17.

Les altres dues coordenades són les coordenades poloidal i toroidal o els angles poloidal i toroidal,  $\theta$  i  $\phi$ . La direcció toroidal és el «camí llarg» al voltant del tor, mentre que la direcció poloidal és el «camí curt». Com el tor és simètric, cal definir la posició on l'angle toroidal és igual a zero. En el cas de l'angle poloidal, el punt més exterior del tor sol prendre's com un angle poloidal igual a zero.

## Bobines magnètiques

Ara que ja ens hem familiaritzat amb la geometria d'un tokamak, passem a parlar dels diferents imants d'un tokamak estàndard i com s'anomenen. I després veurem per què necessitem tots aquests imants diferents per confinar el plasma dins de la cambra en forma de dònut.

En moure les partícules carregades dins d'un bucle circular, obtenim un camp magnètic en la direcció perpendicular (vegeu la figura 18). Quan les partícules carregades es mouen en un bucle tancat d'aquest tipus, parlem de corrent, la direcció del qual coincideix amb la direcció del moviment de les partícules carregades positivament. Si el corrent està format per electrons (o altres partícules negatives), la direcció de les partícules és oposada a la direcció del corrent. Per la influència d'una diferència de potencial, els electrons poden moure's a través d'un cable metàl·lic. Així doncs, fent passar un corrent per bobines (metàl·liques) i col·locant aquestes bobines correctament, es pot crear un camp magnètic en la direcció que volem.

A la figura 15 es pot veure la configuració magnètica estàndard d'un tokamak. El primer conjunt d'imants que probablement hau vist són els que



envolten la cambra de buit, que tenen una forma semblant a la d'una D majúscula. Són les **bobines de camp toroidals**. Després tenim dos sistemes de bobines més que també importants. En primer lloc, les bobines apilades al centre del forat del dònut: el **solenoid central**. En segon lloc, hi ha un parell d'ímants grans situats en la part superior i inferior de la màquina: les **bobines de camp poloidals**. Aquests tres grups d'ímants conformen el sistema magnètic principal d'un tokamak. També hi ha ímants addicionals més petits que serveixen per millorar el rendiment del tokamak, però són menys importants i no en parlarem. A les pròximes seccions veurem amb més detall les bobines de camp toroidals i el solenoide central.

## Bobines de camp toroidals

El primer pas per obtenir un dispositiu de fusió estable és el confinament del plasma en forma toroidal. Per això, primer hem de fer que el plasma es mogui en espirals en la direcció toroidal. Com que ara ja sabem com crear un camp magnètic en una direcció determinada i com una partícula carregada segueix la línia del camp magnètic (en una trajectòria helicoidal), ara tenim tot els coneixements necessaris per tal d'esbrinar com fer que les partícules carregades es moguin en un bucle en la direcció toroidal: col·locant espines tancades de bobines conductores de corrent al voltant de la trajectòria en la qual volem que vagin les partícules. Així, quan volem que les partícules donin voltes en direcció toroidal, necessitem embolicar bobines magnètiques al voltant d'aquesta forma: les bobines de camp toroidal. Quan col·loquem moltes d'aquestes bobines en forma de D al voltant de la cambra en forma de dònut, el camp magnètic comença a donar voltes en forma de bucles dins del dònut. El camp toroidal és, amb molta diferència, el camp magnètic més fort del tokamak.

Per tant, ara el plasma es mou en una direcció toroidal. Sona bé, oi? Però llavors, per què necessitem altres bobines a més de les del camp toroidal? Doncs, perquè, malauradament, si només tenim un camp magnètic en la direcció toroidal, el plasma es torna inestable. Es va descobrir que afegint un camp magnètic poloidal al camp magnètic toroidal, per obtenir un camp magnètic helicoidal, podia resoldre aquest problema.

# Solenoides central i corrent de plasma

Per tal de crear aquest camp magnètic helicoidal tan necessari, s'utilitza el solenoide central (indirectament). El solenoide central és una mica diferent, ja que el seu objectiu no és crear un camp magnètic en si mateix, sinó que fa servir la **inducció magnètica** per crear un corrent (toroidal) al plasma. Per entendre el concepte d'inducció magnètica, primer hem de tornar a les línies de camp magnètic. Com hem comentat en el capítol anterior, podem visualitzar un camp magnètic creant línies de camp magnètic que formin bucles tancats. La **intensitat del camp magnètic, B**, està directament relacionada amb la **densitat de les línies de camp magnètic**. Si les línies de camp estan molt juntes, vol dir que en aquesta zona el camp magnètic és fort. Si les línies de camp estan molt separades, vol dir que en aquesta zona el camp magnètic és feble.

El següent concepte important és de **flux magnètic**. El flux magnètic és una mesura que es defineix per a una superfície determinada. És igual a la intensitat del camp magnètic (és a dir, la densitat de línies de camp magnètic) multiplicat per l'àrea (perpendicular) per la qual flueixen aquestes línies de camp. Per tant, podem considerar el flux magnètic com una mesura de l'energia magnètica que «flueix» al llarg de les línies de camp a través d'una zona determinada. Podem formular la relació entre el flux magnètic, la magnitud del camp magnètic i l'àrea com

$$\Phi = B A \cos(\alpha),$$

on  $\Phi$  (phi majúscula) és el flux magnètic, B és la magnitud del camp magnètic, A és l'àrea d'interès i  $\alpha$  és l'angle entre la normal de la superfície i la direcció de la línia de camp magnètic.

Si tenim una bobina fixa, podem crear un camp magnètic fent passar corrent per ella. Si aquest corrent que passa a través de la bobina és constant, les línies de camp magnètic es queden al mateix lloc i mantenen la mateixa densitat de línies de camp; és a dir, el camp magnètic roman constant. Això vol dir que, per a una determinada zona (fixa) pròxima a la bobina, el flux magnètic també és constant.

Per altra banda, si anem augmentant la quantitat de corrent que passa pel bucle, el camp magnètic va canviant a poc a poc a mesura que canvia el corrent: els corrents més alts tenen com a resultat camps magnètics més forts i, per tant, majors densitats de línies de camp. Ara, el nombre de línies de camp augmenta per a una determinada zona pròxima a l'ímant o bobina; és a dir, el flux magnètic augmenta.

Però a la natura no li agraden els canvis en el flux magnètic. Cada vegada que es produeix un canvi en el flux magnètic, **s'indueix** automàticament l'anomenada **força electromotriu o FEM**. Aquesta FEM mira de contrarestar el canvi de flux magnètic creant una tensió que dona lloc a un corrent (que crea un camp magnètic oposat).

Si agafem una bobina com a exemple, quan augmentem el corrent a través de la bobina, el camp magnètic augmenta i, com a resultat, el flux magnètic dins del bucle de fil augmenta. Aquest canvi de flux magnètic crea llavors una FEM que intenta resistir el canvi de flux magnètic creant un corrent en la direcció oposada que, al seu torn, crea un camp magnètic que s'oposa al camp creixent original. Aquesta resistència a un canvi de flux magnètic es produeix en qualsevol mitjà conductor que es trobi prop de la bobina. És molt important entendre aquí que la magnitud de la FEM depèn de la taxa de canvi del flux magnètic i no de la força del camp magnètic.

Per tant, si tenim dues bobines a prop una de l'altra i es fa passar un corrent canviant per una d'elles, el flux magnètic canvia dins de totes dues. Això es deu al fet que el camp magnètic de la primera bobina és percebut per la segona. Per tant, també es produeix un canvi en el flux magnètic de la segona bobina i s'hi indueix corrent. Aquest procés s'anomena **inducció (electro)magnètica** i permet induir corrents i camps magnètics en espines que no estan connectades.

Augmentant el nombre d'enrotllaments d'una bobina es pot augmentar la FEM induïda: cada enrotllament percep el canvi de flux magnètic i tots els enrotllaments es connecten, fent que el canvi total de flux magnètic se sumi per a la bobina. La FEM total s'obté multiplicant el canvi de flux magnètic pel nombre total d'enrotllaments de la bobina. Per poder aplicar aquest principi en benefici nostre, s'han inventat els transformadors.

Un transformador està format per dues bobines desconnectades, una de primària i una altra de secundària, i s'utilitza amb corrents alterns que donen lloc a un flux magnètic que canvia constantment a les bobines. En un **transformador ideal**, durant el procés d'inducció no es perd potència i, per tant, la potència a la bobina primària i secundària ha de ser la mateixa:

$$I_p V_p = I_s V_s$$

on  $I_p$  and  $I_s$  són els corrents que passen a través de la bobina primària (p) i secundària (s) i  $V_p$  i  $V_s$  les tensions que hi circulen. Com que la FEM total percebuda per la bobina depèn del seu nombre de debanaments, obtenim

$$V_p / V_s = N_p / N_s,$$

on  $N_p$  és el nombre d'enrotllaments de la bobina primària i  $N_s$ , el nombre d'enrotllaments de la bobina secundària. Per tant, si variem els enrotllaments de la bobina, podem convertir els corrents i les tensions de la manera que vulguem.

Ara tornem al tokamak. El solenoide central dins del tokamak és una enorme bobina primària amb molts enrotllaments. Com que el plasma és conductor, també pot transportar corrent: el plasma actua essencialment com una espira de cable únic i converteix el nostre tokamak en un enorme transformador amb una bobina primària amb molts enrotllaments i una bobina secundària feta d'un bucle de plasma. En crear un corrent canviant dins el solenoide central, es forma un camp magnètic variable que indueix un corrent al centre del plasma. Aquest corrent de plasma crea el camp magnètic poloidal que necessitem. Com a resultat, ara tenim tant un camp magnètic toroidal com un de poloidal, la qual cosa ens porta cap al nostre tan necessari camp magnètic helicoidal per a un confinament estable.

## **Bobines de camp poloidals**

El corrent de plasma crea el camp magnètic poloidal que necessitem. Es podria esperar que les bobines de camp poloidal generessin un camp magnètic poloidal, però en realitat la funció principal de les bobines de camp poloidals és ajudar a controlar la forma i la posició del plasma. El camp creat per les bobines de camp poloidal és molt més feble que el camp toroidal o el camp poloidal generat pel corrent de plasma.

A més de les bobines de camp toroidal, el solenoide central i les bobines de camp poloidal, en un tokamak normal hi ha moltes més bobines que s'utilitzen per a finalitats de control més avançades. No obstant això, com que aquestes bobines addicionals no aporten informació rellevant per comprendre els aspectes bàsics de la fusió nuclear, no les tractarem als mòduls.

# Confinament magnètic

Ara ja hem après com podem crear un sistema magnètic estable en el qual el plasma estigui confinat: fent servir bobines de camp toroidal per crear un camp magnètic toroidal i combinant-ho amb un corrent de plasma que afegeix un camp poloidal (i que és generat pel solenoide central) es crea un camp magnètic helicoidal.

Ens queda un últim aspecte sobre el qual parlar: **l'equilibri de la pressió** dins el tokamak. Dins un tokamak hi ha una pressió cap a fora i una altra cap a dins. Si són iguals, el plasma és estable. És el que passa en un pneumàtic de bicicleta: l'aire de dins el pneumàtic ha de pressionar amb prou força cap a l'exterior per tal de contrarestar la pressió del terra. Si la pressió de l'aire és massa baixa, el terra «guanya» i el pneumàtic es queda planer.

En un tokamak, tenim la pressió cap a fora provinent del plasma, per la qual cosa s'expandirà tret que hi hagi una força que l'empenyi cap endarrere. I quina és la força que empeny el plasma cap endarrere? Només pot ser una: la força de Lorentz! El plasma condueix corrent, i aquest corrent sent una força provocada pel camp magnètic. El resultat és una força sobre el plasma que es dirigeix cap a l'interior. Així, doncs, aquesta és la força que manté el plasma unit: el **confinament magnètic**.

Al llarg del primer mòdul ja hem après molt sobre la fusió: coneixeu el problema de l'energia, sabeu que al Sol hi té lloc un procés de fusió, sabeu quan es produeix la fusió i també com podem crear aquestes condicions aquí a la Terra en el dispositiu de fusió més habitual, el tokamak. En els propers mòduls, podreu aprofundir més en la fusió nuclear, des de quatre perspectives diferents.

# LECTURES COMPLEMENTÀRIES

Per aprendre més sobre la fusió nuclear, hi ha quatre mòduls disponibles que analitzen la fusió des d'una perspectiva determinada. Són aquests:

## **Mòdul 2: El camí cap a la fusió**

En aquest mòdul s'analitza la història de la fusió i la seva evolució, destacant els diferents dissenys i intents de reactors. S'hi expliquen tots els passos importants que s'han fet per arribar fins aquí i fins a l'estat actual de la fusió.

## **Mòdul 3: El control del plasma**

En aquest mòdul s'explica com s'escalfa, controla i mesura un plasma de fusió. Hi ha diverses maneres d'escalfar el plasma i, a causa de la seva temperatura extrema, es requereixen tècniques especials per mesurar-lo. En base a diferents mesuraments del plasma, és possible mantenir el reactor de fusió sota control.

## **Mòdul 4: Els materials de fusió**

En aquest mòdul s'expliquen els reptes materials de la fusió. La paret del reactor de fusió ha d'estar feta de materials molt especials que puguin suportar les dures condicions de la fusió. Cada component del dispositiu de fusió té el seu propi objectiu i diferents requisits de materials, des de parar els neutrons fins a ser refredat per crear un fort camp magnètic.

## **Mòdul 5: Desplegament**

En aquest mòdul, es posa en perspectiva l'energia de fusió observant el mercat de l'electricitat i comparant la fusió amb altres fonts d'energia. A més de les xifres, la política energètica també influeix en l'èxit de la fusió com a font d'energia.

## **Recursos en línia**

A més dels diferents mòduls de lliçons sobre la fusió, hi ha molta informació i contingut educatiu que es pot trobar en línia. En cada mòdul es poden trobar llibres, articles o enllaços interessants.

Un exemple divertit de contingut sobre la fusió d'ús gratuït és l'app Operation Tokamak, que es pot descarregar gratuïtament a l'AppStore (iOS) i a la Play Store (Android):



<https://apps.apple.com/us/app/operation-tokamak/id808190835>

<https://play.google.com/store/apps/details?id=dk.markfilm.operationtokamak&hl=nl&gl=US>

En aquesta app, es pot fer funcionar un tokamak controlant la força dels imants i el sistema d'escalfament. Mantenint el reactor en les condicions adequades i suprimint les inestabilitats quan sorgeixin, podeu mantenir la reacció i aspirar a crear la major quantitat de fusió possible.

# APUNTS

## Energia verda o neta

A la nostra vida quotidiana sentim parlar sovint d'energia verda o energia neta. «Verda» i «neta» són etiquetes que qualifiquen l'impacte mediambiental d'una font d'energia: indiquen que una font no produeix emissions nocives (de carboni/efecte d'hivernacle) en el seu procés de producció. Podem debatre àmpliament què és el que defineix una font d'energia com a veritablement neta, ja que la producció d'una font d'energia neta pot continuar produint emissions durant la seva construcció o durant el transport. L'energia sostenible sol implicar que pot ser «sostinguda» durant un temps prolongat sense conseqüències perjudicials (conegudes) per al futur. Atès que aquesta definició és més clara que no pas la d'energia verda o neta, aquí parlarem d'«energia sostenible».

## Notació atòmica

Ara que sabem què són els àtoms i els isòtops, donem un cop d'ull a la notació amb la qual es representen. Com que el nombre de protons d'un àtom determina quin tipus d'àtom o element és, aquest és el primer identificador: el nombre atòmic. Per a l'hidrogen (H) és l'1, per al carboni (C) és el 6. Tots els àtoms d'hidrogen tenen el nombre atòmic 1 i tots els àtoms de carboni tenen el nombre atòmic 6, independentment de l'isòtop.

La quantitat total de protons i neutrons dona la massa atòmica total: el nombre de massa. Com que els protons i els neutrons tenen aproximadament la mateixa massa, se sol utilitzar la unitat de massa atòmica (amu), que és aproximadament 1 per a un protó (1,007276 amu) i també per a un neutró (1,008665 amu). Els electrons són molt més lleugers, per la qual cosa, per a la massa total d'un àtom, no se solen tenir en compte. Així, per a l'hidrogen normal el nombre màssic és 1 (només un protó i un electró), per al deuteri és 2 (protó + neutró + electró) i per al triti és 3 (protó + neutró + electró).

Això genera una notació estàndard per als isòtops atòmics, amb el nombre màssic (a la part superior) i el nombre atòmic (a la part inferior) que es mostren al costat de la lletra (al costat esquerre) corresponent al tipus d'àtom. Com la lletra conté la mateixa informació que el nombre atòmic, també podem optar per ometre el nombre atòmic. Al llarg d'aquests capítols s'utilitzarà la notació amb una lletra juntament amb el número màssic i el nombre atòmic.

## Electrons-volt

Els electrons-volt semblen un tipus d'unitat estrany, però són molt útils per als processos atòmics. Atès que els processos atòmics tenen lloc a una escala molt petita, parlem de quantitats d'energia molt petites. Per això, és molt més fàcil fer servir una unitat més petita (escriure-ho tot en joules és molt complicat). A l'hora de triar una unitat més petita, el millor és triar-ne una que es pugui mesurar amb facilitat i precisió, i que al mateix temps estigui relacionada amb els processos per als quals necessitem una unitat adequada.

Com que l'energia de les partícules atòmiques està relacionada principalment amb el seu moviment, l'energia que guanya una partícula quan l'accelerem és una elecció natural. Les partícules carregades són les més fàcils d'accelerar (mitjançant una diferència de potencial) i els electrons tenen un paper molt important en els processos atòmics. Així, un electró-volt (eV) es defineix com l'energia guanyada per un electró, quan és accelerat per una diferència de potencial d'un volt (V) (partint del repòs en el buit). Així doncs, un electró amb càrrega  $e$ , accelerat per una diferència de potencial d'1 V dona lloc a 1 eV.

Per a posar-ho en perspectiva, si fessin servir una pila AA (que proporciona uns 1,5 V) per accelerar un electró (en el buit, partint del repòs) obtindríem un electró amb una energia de: càrrega  $\times$  tensió =  $1 e \times 1,5 V = 1,5 eV$ .

## Llamps

Els llamps es poden explicar per la conductivitat del plasma: un llamp és un enorme corrent elèctric entre un núvol carregat i la superfície de la Terra. A causa de la diferència de càrrega entre el núvol i la superfície, el gas pròxim al núvol comença a descompondre's i es forma un plasma que pot conduir la càrrega. Una vegada que la càrrega es transfereix del núvol a la Terra, la conducció es para i el llamp desapareix. I tot això passa en un tres i no res, en un llampec.

# EXERCICIS DE CLASSE

## >1.1

**(a)** Fes una estimació de quin percentatge de l'energia del teu país prové de fonts d'energia renovables, com la solar, l'eòlica, la hidràulica, etc. Explica com has fet la teva estimació. Has fet alguna hipòtesi?

**(b)** Compara la teva estimació com a mínim amb la d'un/a altre/a company/a de classe. Són molt diferents les vostres estimacions? Compareu els vostres raonaments: heu partit de diferents hipòtesis?

**(c)** Busca la combinació energètica del teu país. Compara les teves estimacions amb les dades reals. T'hi has acostat?

*Consulta també els exercicis A.1, A.2 i A.3*

---

## >1.2

El concepte de «densitat energètica» és important en física i, encara que d'entrada sembli complex, bàsicament es pot resumir en «la quantitat d'energia que hi ha dins d'un determinat volum de matèria». Si cremem un litre de gasolina, mesurem la quantitat d'energia alliberada (en forma de calor) i la dividim pel volum cremat, n'obtidrem la densitat energètica. Es pot determinar la densitat energètica de tots els combustibles.

**(a)** Dels combustibles que s'indiquen a continuació, quin creus que té la major densitat energètica? Quin diries que té la menor densitat energètica? Ordena'ls de major a menor densitat energètica.

**(b)** Compara la teva llista com a mínim amb la d'un/a altre/a company/a de classe. Explica per què els has col·locat en aquest ordre.

**(c)** Busca les densitats energètiques. Compara la teva llista amb les dades reals. T'hi has acostat?

**Gasolina – petroli – carbó – fusta – hidrogen (gas) – etanol – deuteri – urani**

*Consulta també els exercicis A.4, A.5, A.6, A.7 i A.8.*

---

## >1.3

Així, doncs, la diferència entre un plasma i un gas radica en la proporció de partícules carregades elèctricament i partícules neutres. No obstant això,

podem observar que la majoria dels plasmes brillen, mentre que els gasos solen ser incoloros i no brillen. Per què brillen els plasmes?

[Resposta múltiple]

**(a)** Si la temperatura és prou elevada, tot comença a irradiar energia, de manera els plasmes brillen de manera natural a causa de l'alta temperatura.

**(b)** Les partícules carregades es mouen lliurement i quan es produeix una col·lisió entre un electró lliure i un ió existeix la possibilitat que es recombinin. Durant aquest procés de recombinació, es partícules carregades es combinen formant una partícula neutra. És en aquest moment quan es produeix l'emissió de llum. Si la llum que s'emet es troba dins l'espectre visible, el plasma començarà a brillar.

**(c)** En algunes reaccions nuclears, es produeix emissió de llum. Si la llum que s'emet es troba dins l'espectre visible, el plasma començarà a brillar.

---

## >1.4

La direcció del camp magnètic (és a dir, la direcció de les línies de camp magnètic) depèn de la direcció de les càrregues en moviment. Dibuixa la direcció del camp magnètic traçant diverses línies de camp magnètic per a les següents situacions:

**(a)** Un fil recte pel qual circula corrent.

**(b)** Un fil circular pel qual circula corrent en sentit contrari a les agulles del rellotge.

**(c)** Un electró que es mou en cercle (en el sentit de les agulles del rellotge) i un protó que es mou en cercle (en el sentit contrari). Compara-ho amb les direccions de la pregunta b. Què veus?

**(d)** Què pots explicar sobre la direcció del camp magnètic en comparació amb la direcció del moviment en general?

*Consulta també els exercicis A.9 i A.10.*

---

## >1.5

Els diferents tokamaks i dispositius de fusió toroidals tenen diferents **relacions d'aspecte**: la relació entre el radi major  $R$  i el radi menor  $a$ . Com a resultat, les formes d'aquests tors poden variar força. Vegem aquestes diferents formes amb més detall.

**(a)** Fes un dibuix d'un tor amb un radi major gran, però amb un radi menor petit. Quin aspecte té?

**(b)** Ara dibuixa un tor amb un radi major petit i un radi menor gran. Per què costa més de dibuixar?

**(c)** Què passaria si fem que el radi major sigui cada vegada més petit mantenint un radi menor gran? Quina forma obtenim?

Observa ara les relacions d'aspecte dels dos esbossos d'**(a)** i **(b)**.

**(d)** Què passa si canvia la relació d'aspecte?

**(e)** Quina és la menor relació d'aspecte possible per a un tor?

---

## >1.6

Com hem vist, hi ha dues direccions principals en un tor: la direcció **toroidal** i la **poloidal**. Com que pot ser una mica complicat d'entendre, donem-hi un cop d'ull.

**(a)** Fes un esquema de les dues possibles seccions d'un tor.

**(b)** Quina secció és la secció poloidal? Quina és la secció toroidal? Què observes a la direcció toroidal/poloidal i les seves seccions corresponents?

---

## > 1.7

Donem un cop d'ull a un tokamak estàndard, centrant-nos en els seus tres sistemes magnètics principals.

**(a)** Quins imants es veu que es troben dins la secció poloidal? Com s'anomenen aquests imants? Té sentit el nom que reben?

**(b)** Digues els noms dels altres dos grups d'imants.

---

## >1.8

L'ús de la inducció per generar un corrent de plasma que creï el nostre camp poloidal té un gran inconvenient: converteix un tokamak en un dispositiu de funcionament polsant.

**(a)** Com és que la inducció magnètica implica un funcionament polsant?

**(b)** Per què això suposa un problema per a un reactor de fusió?

*Consulta també l'exercici A.11.*



# LLEGENDES DE LES FIGURES

**Figura 1.** Diagrama circular del mix energètic mundial de 2019 dividit per recursos. La major part, amb diferència, l'ocupa el petroli, seguit del carbó i el gas natural. La hidroelectricitat, les energies renovables i l'energia nuclear els segueixen a una certa distància. Font: Revisió Estadística de l'Energia Mundial de BP, 2020.

**Figura 2.** La taxa de creixement de la població mundial ha disminuït des de la dècada de 1970. Això es pot veure a la línia de tendència de color taronja. Com a resultat, la població total —representada en negre— s'està movent constantment cap a un valor constant d'uns 11.000 milions d'habitants en tot el món. La zona verda representa la incertesa del model utilitzat. Font: Nacions Unides, Departament d'Afers Econòmics i Socials, Divisió de Població (2019). Perspectives de la població mundial 2019: aspectes destacats. ST/ESA/SER.A/423.

**Figura 3.** Comparada amb el Sol, la Terra és increïblement petita. Un punt blau pàl·lid, com va dir Carl Sagan. El seu radi és cent vegades menor que el del Sol, mentre que el seu volum és un milió de vegades inferior. Adaptat de: NASA/Solar Dynamics Observatory.

**Figura 4.** Representació esquemàtica d'un àtom. Al centre hi ha el nucli, format per protons (amb càrrega positiva) i neutrons (sense càrrega). Al voltant del nucli hi ha un núvol d'electrons (amb càrrega negativa).

**Figura 5.** Taula periòdica dels elements. Font: Wikimedia user Double Sharp (CC BY-SA 4.0)

**Figura 6.** Dues partícules carregades positivament amb una gran velocitat dins d'una caixa. Si la velocitat és prou alta, les partícules poden superar la repulsió i col·lidir.

**Figura 7.** Una caixa plena de moltes partícules carregades positivament, cadascuna de les quals es mou a una gran velocitat. Si la velocitat és prou alta, les partícules poden superar la repulsió i col·lidir. Com més partícules hi hagi, més probable és que es produeixin col·lisions.

**Figura 8.** Representació esquemàtica de les tres fases de la matèria i d'un plasma. Totes les partícules es mouen o vibren: la velocitat mitjana depèn de la temperatura de la matèria. El moviment mitjà de les partícules augmenta quan la matèria s'escalfa. En un sòlid, el moviment de les partícules està molt limitat. En un líquid, les partícules ja es poden moure més lliurement, i en un gas les partícules es poden moure de manera (gairebé) totalment lliure. Quan un gas s'escalfa a temperatures prou altes, es comença a descompondre: es forma un plasma, que es compon de partícules carregades separades.

**Figura 9.** Exemples de plasmes. De dalt a baix i d'esquerra a dreta veiem una aurora boreal, un cartell de neó, un llampec, una descàrrega de plasma experimental, el Sol i una descàrrega dins del tokamak esfèric MAST. Crèdits: NASA, Pixabay/Pexels, Pixabay/FelixMittermeier, Plasmalab TU Eindhoven/J.P.K.W. Frankemölle, NASA/Solar Dynamics Observatory i CCFE.

**Figura 10.** Representació esquemàtica d'un camp elèctric entre una partícula amb càrrega positiva i una partícula amb càrrega negativa. Hi ha dibuixades diverses línies de camp elèctric. Observeu que les línies de camp van en una direcció, de positiu a negatiu. Adaptat de: Wikimedia Commons/Geek3.

**Figura 11.** Representació esquemàtica d'un camp magnètic entre dos «pols magnètics». Hi ha dibuixades diverses línies de camp magnètic. Observeu que les línies de camp van en una direcció, de «nord» a «sud». En realitat, les línies de camp magnètic passen pels «pols magnètics» i formen bucles tancats. Adaptat de: Wikimedia Commons/Geek3.

**Figura 12.** Moviment d'una partícula carregada (negativa o positivament) en un camp magnètic. Si la partícula es mou perpendicularment al camp magnètic, es començarà a moure en cercles al voltant de la línia de camp magnètic. Si la partícula també té velocitat en la direcció del camp magnètic, seguirà una trajectòria helicoidal al voltant de la línia de camp magnètic. Aquest moviment circular/helicoidal al voltant de la línia de camp magnètic s'anomena gyromotion.

**Figura 13.** Esquema del tokamak ITER, actualment en construcció al sud de França. A l'esquema es poden veure les bobines de camp toroidal (blau fosc), les bobines del camp poloidal (lila fosc) i el solenoide central (blau clar, al centre). Crèdits: ITER Organization, <https://www.iter.org>.

**Figura 14.** Esquema de la geometria d'un tor. S'indiquen el radi major ( $R$ ) i el radi menor ( $a$ ) del tor. També hi ha dibuixades les direccions toroidal ( ) i poloidal ( ). Crèdits: Jens Peter Frankemölle/TU Eindhoven.

**Figura 15.** Aquest és el TF12, el primer dels divuit imants de camp toroidal en forma de D col·locats al voltant de la cambra de buit de l'ITER. Fabricat al Japó, aquest gegant de 17 m d'alçada i 9 m d'amplada es trobava a l'interior de la sala de muntatge de l'ITER el 9 de juny de 2021. Font: ITER Organization, <https://www.iter.org>.

**Figura 16.** Un transformador amb un nucli de ferro. Un corrent altern en el debanament primari induïx un camp magnètic variable en el nucli de ferro. El nucli de ferro transporta aquest camp al debanament secundari, on el canvi en el flux magnètic induïx un corrent en els debanaments secundaris. En un tokamak col·loquem el debanament primari dins del secundari: Wikimedia Commons/BillC

## CRÈDITS

«Aspectes bàsics de la fusió» és el primer de cinc mòduls que parlen sobre els conceptes bàsics de la fusió nuclear a nivell de centres d'educació secundària. Tots els mòduls estan disponibles gratuïtament a la pàgina web de FuseNet: <https://fusenet.eu>.

### Autor

Sander Korteweg

### Editors

Sander Korteweg i Sjoukje  
Tijmensen–Hoekstra

### Disseny gràfic

[www.lacuinagrafica.com](http://www.lacuinagrafica.com)

### Imatge de la coberta

NASA/Solar Dynamics Observatory

### Publicat per

FuseNet

### Suport econòmic

Aquest projecte no hauria estat possible sense el suport econòmic d'EUROfusion.

## AGRAÏMENTS

**CAT:** El projecte FusionCAT amb número d'expedient 001-P-001722 ha estat cofinançat en un 50% amb 1.960.963,66€ pel Fons Europeu de Desenvolupament Regional de la Unió Europea en el marc de el Programa Operatiu FEDER de Catalunya 2014-2020, amb el suport de la Generalitat de Catalunya.

**ES:** El proyecto FusionCAT con número de expediente 001-P-001722 ha sido cofinanciado en un 50% con 1.960.963,66€ por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional de la Unión Europea en el marco del Programa Operativo FEDER de Cataluña 2014-2020, con el soporte de la Generalitat de Cataluña.

**EN:** The FusionCAT project (001-P-001722) has been 50% co-financed with €1.960.963,66 by the European Fund for Regional Development of the European Union within the framework of the 2014-2020 ERDF Operational Program of Catalonia, with the support of the Generalitat of Catalonia.



Generalitat de Catalunya  
**Departament de Recerca  
i Universitats**



**Unió Europea**  
**Fons Europeu  
de Desenvolupament Regional**