

MÒDUL 1

FUSI-ⁿ
CAT-

FuseNet
The European Fusion Education Network

ASPECTES BÀSICS DE LA FUSIÓ

Material didàctic
de FuseNet per a centres
d'educació secundària

MANUAL PER AL PROFESSORAT

L'energia té un paper fonamental dins la nostra societat actual. Amb el creixement de les tecnologies i del nombre de persones que en fan ús, s'estima que la demanda mundial d'energia anirà augmentant contínuament. Si continuem amb els processos de generació d'energia actuals, la demanda acabarà sent més gran de la que podem generar. Aquesta sèrie de lliçons pretén oferir una visió general d'una possible solució energètica per al futur: la fusió nuclear.

La sèrie consta de cinc mòduls diferents. El primer mòdul comença amb un enfocament ampli del problema energètic i els processos físics que es necessiten per a la fusió nuclear. Els quatre mòduls següents tracten quatre aspectes diferents de la fusió: «El camí cap a la fusió», «El control del plasma», «Els materials per a la fusió» i «El desplegament de la fusió». Un cop completat el mòdul 1, es pot continuar amb qualsevol dels altres.

Aquesta sèrie de lliçons està destinada a l'ensenyament preuniversitari nivell ISCED 3-4.

ÚS DELS MÒDULS

El llibre de l'alumnat consisteix en diferents materials didàctics: els requadres de colors brillants, que anomenem «Apunts», proporcionen explicacions addicionals dels temes subjacents. El seu ús a classe és opcional.

Dins els requadres de color clar hi trobareu exercicis per fer a classe. Es poden fer servir durant la classe per ampliar el debat i també són útils per comprovar si l'alumnat té una bona comprensió del material.

Al costat del mòdul també hi ha exercicis addicionals. Aquests exercicis estan classificats des de * fins a ***, on * correspon a problemes introductoris i ***, a problemes més difícils.

EL CONTINGUT COMPLET DE CADA MÒDUL CONSTA DE:

Un llibre de lectura per a l'alumnat
amb exercicis per a la classe

Exercicis addicionals

Un presentació de PowerPoint
amb exercicis per a la classe

Un manual del professorat
Inclusos els següents apèndixs

- Taula de constants i factors de conversió
- Respostes als exercicis de classe
- Respostes als exercicis addicionals

CONTINGUT DEL MANUAL DEL PROFESSORAT

CAPÍTOL 1

Objectius d'aprenentatge

En finalitzar aquest mòdul, l'alumnat serà capaç de:

- Comprendre la relació entre el canvi climàtic i el problema energètic
- Explicar els principis bàsics de la fusió
- Conèixer les equacions de la reacció de la fusió
- Explicar l'ús i el contingut d'un plasma
- Comprendre els principis bàsics del confinament magnètic
- Comprendre la geometria d'un tokamak
- Explicar la diferència entre les tres bobines de camp del tokamak
- Comprendre els principis bàsics dels camps magnètics dins el tokamak

CAPÍTOL 2

Temes o lliçons relacionats

Els continguts d'aquest mòdul poden servir com a exemples o aplicacions de coneixements prèviament apresos. No obstant això, aquests coneixements no són necessaris per poder començar el mòdul, sobretot si ja s'han impartit lliçons prèvies sobre algun dels següents temes:

- Física atòmica
- Electricitat
- Magnetisme
- Llei dels gasos ideals
- Energia i conservació de l'energia

Si ja es tenen coneixements sobre algun d'aquests temes, aquest mòdul servir per fer-ne una recapitulació.

CAPÍTOL 3

Temes del mòdul 1 per capítol

El primer mòdul comença amb un enfocament ampli del problema energètic i els seus corresponents processos físics.

1. Energia

- Problemes i solucions de la demanda energètica
 - Canvi climàtic
 - Creixement de la població
 - Ús i producció d'energia
- Fusió nuclear
- Energia cinètica

2. Astrofísica

- El Sol
- Física atòmica
 - El model atòmic de Rutherford
 - Reaccions nuclears en relació amb l'hidrogen
 - Isòtops i ions

3. El plasma: el quart estat de la matèria

- Paràmetres del gas
 - Densitat
 - Temperatura
- Interacció electrostàtica
 - Càrregues
 - Camps elèctrics
- Partícules carregades en camps magnètics
 - Camp magnètic
 - Força de Lorentz

4. Construir un dispositiu de fusió

- Electricitat
 - Corrent
 - Transformadors
 - Transformador ideal
- Electromagnetisme
 - Bobines
 - Força electromotriu
 - Flux magnètic
 - Força del camp magnètic
 - Fusió per confinament magnètic
- Geometria d'un tor
 - tokamak

CAPÍTOL 4

Breu resum del mòdul 1

L'objectiu d'aquest capítol és introduir o repassar tot un seguit de temes rellevants per entendre el concepte de la fusió nuclear i el seu context. Per tractar aquest capítol a les classes no cal tenir coneixements previs sobre els temes esmentats.

En el primer capítol, es parteix de la base que els estudiants han sentit parlar del canvi climàtic, encara que no cal que tinguin un coneixement profund de l'efecte d'hivernacle o del debat polític actual. S'agafa el canvi climàtic com a punt de partida i, a partir d'aquí reflexionem sobre el problema energètic global, que després es debatrà.

En el segon capítol s'expliquen els fonaments de la física atòmica. Si els alumnes ja tenen coneixements previs del tema, el capítol pot servir principalment per repassar conceptes. Si no tenen coneixements previs, aquest capítol servirà com introducció. S'expliquen les càrregues elèctriques i el paper de la càrrega elèctrica en els àtoms i els nuclis a un nivell bàsic. Aquest capítol pot servir com una introducció alternativa a la física atòmica en un nivell de centre d'educació secundària, en lloc del pla d'estudis previst. Es parla dels conceptes de temperatura i densitat.

El tercer capítol introdueix el concepte de plasma. S'assumeix que la paraula «plasma» és prou coneguda per la influència de la cultura popular i l'aparició de pantalles basades en el plasma. No obstant això, es parteix de la base que es desconex el concepte de plasma des d'un punt de vista científic. De nou, es posa l'accent en la càrrega elèctrica i la consegüent atracció i repulsió de les partícules carregades.

Un cop feta la introducció, s'aprofundeix en dos temes principals relacionats amb el tokamak: la geometria i els principals imants utilitzats per crear el camp magnètic dins del tokamak. Es tracta de les bobines de camp toroidals, el solenoide central i les bobines poloidals. La combinació d'aquestes bobines dona lloc a un camp magnètic helicoidal. En aquest capítol s'explica breument un solenoide bàsic i les possibilitats que ofereix. Si els estudiants no estan familiaritzats amb la inducció magnètica, es recomana començar amb l'apunt al respecte.

CAPÍTOL 5

Esquemes bàsics de les lliçons

Presentem quatre possibles esquemes de lliçons bàsiques. L'ús de cadascun dels esquemes dependrà del temps disponible i dels coneixements dels alumnes. S'ha optat per oferir un esquema de lliçó de 15 minuts i un esquema de lliçó d'1 hora per a una classe d'introducció a la fusió tant per a alumnes amb coneixements mitjans com avançats.

Es pot fer servir l'esquema d'iniciació quan hi ha diversos temes que són desconeguts pels alumnes, o ho són tots. Els esquemes avançats poden aplicar-se quan els temes més importants de la fusió ja són coneguts pels alumnes. Per tant, l'esquema avançat també tindrà una introducció més curta i més temps per al debat i els exercicis.

Els esquemes avançats serveixen com a exemple. Trieu lliurement els temes i/o capítols que sigui més adequats per a la vostra classe.

En tots els esquemes de lliçons, les activitats dels alumnes consisteixen a escoltar, debatre, fer preguntes i treballar en els exercicis.

Lliçó introductòria de 15 minuts per a estudiants amb coneixements mitjans

Aquesta lliçó té dos objectius: en primer lloc, oferir una breu introducció al canvi climàtic i al problema de l'energia; i en segon lloc, crear entusiasme i curiositat pel tema.

El material necessari només cobreix el primer capítol del mòdul, des de la pàgina 1 fins a la 8, incloent l'exercici de classe 1.1. A més, es poden utilitzar les diapositives 1 a 6 del PowerPoint, el vídeo «Do we need nuclear energy to stop climate change?» (Necessitem l'energia nuclear per frenar el canvi climàtic?)¹ i exercicis addicionals marcats amb un asterisc. L'apunt conté material de lectura addicional per als estudiants.

Una opció és dur a terme un debat amb tota la classe després d'introduir el tema, o fer grups i deixar que siguin els estudiants els que debatin sobre el tema i presentin les seves conclusions. Després de la introducció i/o el debat, els estudiants poden llegir el llibre de lectura per a l'alumnat, fer els exercicis o treballar en temes de la seva elecció.

¹ Consulteu el capítol 7 per veure més vídeos i experiments.

Per preparar aquesta lliçó cal:

- Descarregar-se el PowerPoint
- Posar el mòdul i els exercicis a la disposició dels estudiants
- Preparar l'exercici 1.1 a l'aula. (Això dependrà del país on viviu, vegeu l'Apèndix B)

Duració	Activitat per al professorat	Materials	Activitat per a l'alumnat
3 minuts	Introducció del tema	Capítol 1 PowerPoint: diapositives 1 i 2 I/o vídeo de Kurzgesagt - in a nutshell: «Do we need nuclear energy to stop climate change?» (Necessitem l'energia nuclear per frenar el canvi climàtic?)	Escolta
5 minuts	Parleu de l'exercici de classe. 1.1	Capítol 1 PowerPoint: diapositiva 3 i 4	Inicieu un debat entre tota la classe o en un petit grup de 4 persones.
3 minuts	Presentar el capítol 1: El problema energètic	Capítol 1 PowerPoint: diapositiva 5 i 6	Escolteu, feu preguntes
5 minuts		Mòdul 1 Exercicis addicionals A.1 a A.3	Llegiu el capítol 1, apunt inclòs. Trebal·leu els exercicis individualment o per parelles a casa o a l'aula

Lliçó introductòria de 15 minuts per a estudiants **avançats**

Aquesta lliçó té tres objectius. El primer és oferir una breu introducció al canvi climàtic i al problema de l'energia. El segon és crear entusiasme i curiositat pel tema. El tercer és repassar un o diversos temes relacionats amb els problemes energètics.

El material necessari cobreix el primer capítol del mòdul, des de la pàgina 1 fins a la 8, incloent l'exercici de classe 1.1. A partir d'aquí, el material dependrà del capítol que trieu. Per exemple, capítol 3 «Plasma». A més, es poden fer servir les diapositives de la 1 a la 6 i de la 18 a la 29 de la presentació de PowerPoint, així com els exercicis addicionals marcats amb dos i tres asteriscs. Es tracta dels exercicis A.1 fins A.3, A.9 i A.10. També hi ha diversos vídeos de YouTube que podeu fer servir. Vegeu el capítol 7.

Per preparar aquesta lliçó cal:

- Descarregar-se el PowerPoint
- Posar el mòdul i els exercicis a la disposició dels estudiants
- Preparar l'exercici de classe 1.1. (Això dependrà del país on viviu, vegeu l'Apèndix B)

Les activitats dels estudiants consisteixen a escoltar, debatre i treballar en els exercicis. Després de la introducció, els estudiants poden llegir el llibre de lectura per a l'alumnat, fer els exercicis o treballar en temes de la seva elecció per tal d'ampliar coneixements. Els estudiants poden formar grups d'estudi per debatre el material del tema escollit.

Duració	Activitat per al professorat	Materials	Activitat per a l'alumnat
1 minut	Introducció del tema	Capítol 1 PowerPoint: diapositives 1 i 2	Escolteu
3 minuts	Parleu de l'exercici de classe. 1.1	Capítol 1 PowerPoint: diapositiva 3 i 4	Inicieu un debat entre tota la classe o en un petit grup de 4 persones.
2 minuts	Presentació del capítol 1: El problema energètic	Capítol 1 PowerPoint: diapositiva 5 i 6	Escolteu, feu preguntes
4 minuts	Presentació del capítol triat; per exemple, el capítol 3: «Plasma»	Capítol 3 PowerPoint: diapositiva 24 a 21	Escolteu, feu preguntes
2 minuts	Parleu de l'exercici de classe. 1.3	Capítol 3 PowerPoint: diapositiva 22 i 23	Resposta ràpida!
5 minuts	Presentació del capítol triat; per exemple, el capítol 3: «Plasma»	Capítol 3 PowerPoint: diapositiva 24 a 29	Escolteu, feu preguntes
		Mòdul 1 Exercicis addicionals: d'A.1 a A.3 i d'A.9 a A.10	Llegiu capítol Treballeu individualment o per parelles a casa o a l'aula

Lliçó d'una hora per a estudiants amb coneixements mitjans

L'objectiu de la lliçó d'una hora és despertar entusiasme i curiositat cap al tema i submergir-se en els temes físics subjacents de la fusió. En el cas d'estudiants que s'iniciïn en el tema, la lliçó s'hauria de centrar en el funcionament intern d'un àtom i en la comprensió de les reaccions nuclears, i només hauria d'incloure unes breus pinzellades sobre plasmes i els camps magnètics.

El material necessari cobreix tot el mòdul 1, centrant-se en els capítols 1, 2 i una part del capítol 4. Dels exercicis addicionals, possiblement es podrien fer servir els marcats amb un i dos asteriscs. L'apunt conté material de lectura addicional per als estudiants. Es pot fer tota la presentació de PowerPoint sencera.

Per preparar aquesta lliçó cal:

- Descarregar-se el PowerPoint
- Posar el mòdul i els exercicis a la disposició dels estudiants
- Preparar l'exercici de classe 1.1. (Això dependrà del país on viviu, vegeu l'Apèndix B)

En funció dels estudiants, es podria donar una classe sencera que inclogués tots els temes o dividir la lliçó en quatre parts diferents. Cada part inclou una introducció d'un dels capítols i temps per al debat a classe i per fer exercicis.

Duració	Activitat per al professorat	Materials	Activitat per a l'alumnat
3 minuts	Introducció del tema	Capítol 1 PowerPoint: diapositives 1 i 2 I/o vídeo de Kurzgesagt - in a nutshell: «Do we need nuclear energy to stop climate change?» (Necessitem l'energia nuclear per frenar el canvi climàtic?)	Escolta
5 minuts	Parleu de l'exercici de classe. 1.1	Capítol 1 PowerPoint: diapositiva 3 i 4	Inicieu un debat entre tota la classe o en un petit grup de 4 persones.
3 minuts	Presentar el capítol 1: El problema energètic	Capítol 1 PowerPoint: diapositiva 5 i 6	Escolteu, feu preguntes

5 minuts		Mòdul 1 Exercici adicional A.1	Treballeu l'exercici individualment, en parelles o amb tota la classe
10-15 minuts	Presentació del capítol 2: «La fusió dins el Sol» fins a l'exercici de classe 1.2	Capítol 2 PowerPoint: diapositives 7 a 13	Escolteu, feu preguntes
5 minuts	Parleu de l'exercici de classe. 1.2	Capítol 2 PowerPoint: diapositives 14 i 15	Inicieu un debat entre tota la classe o en un petit grup de 4 persones.
2 minuts	Presentar el capítol 2: La fusió dins el Sol	Capítol 2 PowerPoint: diapositives 16 i 17	Escolteu, feu preguntes
5 minuts		Mòdul 1 Exercici adicional A.4	Treballeu l'exercici individualment, en parelles o amb tota la classe
10-15 minuts	Presentació del capítol 3:	capítol 3 PowerPoint: diapositives 18 a 21 I el vídeo de TED-Ed: «Solid, liquid, gas and ... plasma» (Sòlid, líquid, gas i... plasma)	Escolteu, feu preguntes
2 minuts	Parleu de l'exercici de classe. 1.3	capítol 3 PowerPoint: diapositives 22 i 23	Inicieu el debat un cop els alumnes hagin triat una opció
5-7 minuts		capítol 3 PowerPoint: diapositives 24 a 27	Escolteu, feu preguntes
2 minuts	Parleu de l'exercici de classe. 1.4	Capítol 3 PowerPoint: diapositives 28 i 29	Inicieu el debat un cop els alumnes hagin triat una opció

Lliçó d'una hora per a estudiants **avançats**

L'objectiu de la lliçó d'una hora és despertar entusiasme i curiositat cap al tema i submergir-se en els temes físics subjacents de la fusió. Es recomana als estudiants avançats que comencin repassant breument els temes coneguts i després se submergeixin de ple en els plasmes i els camps magnètics.

El material necessari cobreix tot el mòdul 1, centrant-se en els capítols 1, 3 i 4. L'apunt conté material de lectura addicional per als estudiants. Dels exercicis addicionals, es podrien fer servir els marcats amb dos i tres asteriscs. Es pot fer tota la presentació de PowerPoint sencera.

Per preparar aquesta lliçó cal:

- Descarregar-se el PowerPoint
- Posar el mòdul i els exercicis a la disposició dels estudiants
- Preparar l'exercici de classe 1.1. (Això dependrà del país on viviu, vegeu l'Apèndix B)

Si els temes ja són coneguts pels estudiants, una opció podria el/la professor/a i l'estudiant es canviessin els papers. El/la professor/a només fa preguntes i els estudiants han d'explicar els temes. Deixeu que els estudiants debatin entre ells si no estan d'acord. Els exercicis de classe es poden fer servir perquè els estudiants es familiaritzin amb el capítol, deixant que debatin entre ells abans d'entrar en la presentació del capítol.

Duració	Activitat per al professorat	Materials	Activitat per a l'alumnat
2 minuts	Introducció del tema	Capítol 1 PowerPoint: diapositives 1 i 2	Escolta
3 minuts	Parleu de l'exercici de classe. 1.1	Capítol 1 PowerPoint: diapositives 3 i 4	Inicieu un debat entre tota la classe o en un petit grup de 4 persones.
2 minuts	Presentació del capítol 1: El problema energètic	Capítol 1 PowerPoint: diapositiva 5 i 6	Escolteu, feu preguntes
5 minuts	Comenceu un debat sobre l'exercici de classe. 1.2	Capítol 2 PowerPoint: diapositiva 14 i 15	Inicieu un debat entre tota la classe o en un petit grup de 4 persones.
10 minuts	Canvieu-vos els papers: el/la professor/a ara serà l'estudiant i l'estudiant ara serà el/la mestre/a. Poseu només les diapositives dels temes coneguts del capítol 2: «La fusió dins el Sol» i deixeu que els estudiants l'expliquin. Escolteu/feu preguntes	Capítol 2 PowerPoint: diapositives 7 a 11	Deixeu explicar el tema i les diapositives (breument) a l'alumnat

5 minuts	Presentar el capítol 2: «La fusió dins el Sol: criteris per a la fusió»	Capítol 2 PowerPoint: diapositives 12, 13, 16 i 17	Escolteu, feu preguntes
5 minuts	Presentació del capítol 3: «Plasma» fins a l'exercici de classe	Capítol 3 PowerPoint: diapositiva 24 a 21	Escolteu, feu preguntes
3 minuts	Parleu de l'exercici de classe. 1.3	Capítol 3 PowerPoint: diapositiva 22 i 23	Inicieu el debat a la classe
5 minuts	Presentació del capítol 3: «Plasma» després de l'exercici de classe	Capítol 3 PowerPoint: diapositiva 24 a 27	Escolteu, feu preguntes
5 minuts	Parleu de l'exercici de classe. 1.4	Capítol 3 PowerPoint: diapositiva 28 i 29	Inicieu el debat a la classe
15 minuts	Presentació del capítol 4:	Capítol 4 PowerPoint: diapositives 30, 31, 36, 39 a 45, i 48	Escolteu, feu preguntes
<i>Deures</i>	<i>Exercici de classe. 1.5, 1.6 i 1.7</i>	<i>Capítol 3 PowerPoint: diapositives 32 a 35, 37, 38, 46 i 47</i>	

CAPÍTOL 6

Ús de PowerPoint i altres materials

Hi ha un PowerPoint (per a cada mòdul) disponible a la pàgina web.

<https://fusenet.eu/education/material>.

El PowerPoint consta de tot el mòdul, inclosos els exercicis de classe i les respostes, i pot utilitzar-se directament a l'aula. S'utilitzen algunes imatges addicionals per explicar els temes. Si hi ha algun vídeo de PhET a YouTube que es pugui fer servir per explicar un tema, es recomana al capítol 7. Per tenir una vista general del material extra, consulteu el capítol 7. Podeu adaptar el PowerPoint als temes que es tracteu a l'aula.

Per introduir els diferents temes del mòdul 1, es pot donar als estudiants un exercici de preparació a casa per cada tema. Poden ser un o diversos exercicis dels exercicis addicionals. Per a la preparació també es poden utilitzar alguns temes de «Més referències per estudiar i divertir-se».

CAPÍTOL 7

Més referències per estudiar i divertir-se per al mòdul 1

Per al professorat

A continuació s'ofereix informació general (en anglès) per als professors d'aquest mòdul. Està pensada únicament per al seu propi coneixement i comprensió del tema. És possible utilitzar aquest contingut a l'aula, però llavors caldrà adaptar-lo al nivell dels estudiants. Alguns llocs web ofereixen informació sobre els temes tractats o relacionats amb aquest mòdul. D'altres també ofereixen imatges, exercicis (amb o sense respostes) i notes de classe addicionals. Sota cada URL hi ha una breu introducció del que s'hi pot trobar.

1. Pàgina web de FuseNet

<https://www.fusetnet.eu/education/material>

Aquí podeu trobar els altres quatre mòduls. A més, també hi ha documents teòrics, cursos i experiments de temes relacionats amb aquesta sèrie de lliçons.

2. MIT Open Course Ware

<https://ocw.mit.edu/courses/simulations-applets-and-visualizations/#materials-science-and-engineering>

En aquest lloc web es poden trobar anotacions de classe, exàmens antics i exercicis sobre física nuclear i ressonància magnètica nuclear dins la secció «Ciència i enginyeria nuclear»..

3. EUROFusion

<https://www.euro-fusion.org/>

Hi ha una pàgina especial per a estudiants i professorat. El professorat trobarà més informació sobre els aspectes bàsics dels temes i també hi ha una secció de preguntes i respostes sobre la fusió. També hi ha diapositives i presentacions en PowerPoint d'ús gratuït. Els estudiants poden trobar el mateix tipus de contingut al lloc web, però la informació és més directa i apropiada per a ells. Poden utilitzar-la tant estudiants amb coneixements mitjans com avançats.

4. Fusion for energy

<https://fusionforenergy.europa.eu/>

Aquest lloc web inclou boniques animacions sobre la fusió i els seus aspectes bàsics. Explica de manera clara els diferents temes del mòdul 1 i també d'ITER. No obstant això, a causa de l'animació, el lloc web pot resultar lent.

Per a professorat i alumnat

Aquestes pàgines web poden utilitzar-se per explicar, aprofundir, descobrir o ampliar els temes del mòdul 1. Algunes es poden fer servir en lloc d'una presentació o per complementar la presentació d'un o diversos capítols. Per a totes les simulacions de PhET, que poden emprar-se sense necessitat de registrar-se, es recomana utilitzar un ordinador amb Windows. Cada referència s'haurà de col·locar dins del capítol corresponent. Després de cada URL es proporcionarà informació sobre el contingut i el seu possible ús.

Capítol 1: L'energia i el seu paper al món on vivim

Kurzgesagt - in a nutshell: «Do we need nuclear energy to stop climate change?» (Necessitem l'energia nuclear per frenar el canvi climàtic?)

<https://www.youtube.com/watch?v=EhAemzlv7dQ>

Duració: 10 minuts.

La primera part del vídeo es pot utilitzar com a introducció del mòdul; fins al minut 2.49 o 6.00 es pot utilitzar com a introducció i part d'explicació del capítol 1.

Capítol 2: La fusió dins el Sol

PhET: àtoms, ions i càrrega

https://phet.colorado.edu/sims/html/build-an-atom/latest/build-an-atom_en.html

Aquesta simulació PhET es pot utilitzar, en primer lloc, per veure la relació dels blocs de construcció i el nom atòmic. També es poden determinar els ions i la càrrega afegint electrons/protons al model. És una simulació molt bàsica i la poden fer servir estudiants amb coneixements mitjans.

PhET: relació entre la pressió, el volum i la temperatura

https://phet.colorado.edu/sims/html/gas-properties/latest/gas-properties_en.html

Trieu la primera PhET ideal per veure la relació entre la pressió i la temperatura. En aquesta PhE, les quantitats es poden canviar durant el procés. Per a aquest mòdul es recomana establir el volum com una constant.

Capítol 3: Plasma i camps elèctrics

PhET: efecte de les càrregues dins un camp

https://phet.colorado.edu/sims/html/charges-and-fields/latest/charges-and-fields_en.html

Els estudiants poden col·locar una o més càrregues dins un camp

<https://phet> i apareixeran les línies de camp elèctric. A mesura que es vagin afegint més càrregues, el camp respondrà a aquests canvis.

PhET: hoquei de camp elèctric

<https://phet.colorado.edu/sims/cheerpj/electric-hockey/latest/electric-hockey.html?simulation=electric-hockey>

Diversió per als estudiants: el joc de hoquei de camp elèctric té tres nivells. Cal anar col·locant càrregues per introduir el disc a la porteria.

TED-Ed: «Solid, liquid, gas and ... plasma» (Sòlid, líquid, gas i... plasma), de Michale Murrillo

<https://www.youtube.com/watch?v=tJplytSR-ww>

Duració: 3:15 minuts

Un breu vídeo de YouTube on s'explica què és un plasma. De manera molt clara i entenedora. Pot ser utilitzat per estudiants amb coneixements mitjans, amb algunes explicacions del professorat, i per estudiants avançats.

Capítol 4: «Construir un dispositiu de fusió»

Kurzgesagt - in a nutshell: «Fusion power explained» (L'energia de fusió)

<https://www.youtube.com/watch?v=mZsaaturR6E>

Duració: 6:15 minuts

Vídeo de YouTube que explica el confinament inercial i el confinament magnètic i ofereix unes pinzellades del que és un dispositiu de fusió i de les seves possibilitats. Aquest vídeo es pot fer servir com una breu recapitulació/introducció de tot el mòdul.

TSG Physics - «Lenz's law with copper pipe» (Llei de Lenz amb tub de coure)

<https://www.youtube.com/watch?v=N7tli71-AjA>

Duració: 1:39 minuts

Aquest vídeo de YouTube sense so mostra el resultat de la inducció magnètica. Se compara com una petita bola de ferro i un imant esfèric baixen per un tub de coure. Després de l'experiment, s'explica breument el resultat.

Simon Lloyd - «Demonstrating Lenz's law with a copper tube and a neodymium magnet» (Demostració de la Llei de Lenz amb un tub de coure i un imant de neodimi)

<https://www.youtube.com/watch?v=nrkOZsECrZI>

Duració: 2:40 minuts

Un vídeo de YouTube més llarg que també mostra el resultat de la inducció magnètica. Aquest vídeo explica amb més detall el funcionament de la inducció magnètica i, per tant, el poden fer servir estudiants de nivell mitjà.

Apèndix A: Taula de constants i factors de conversió

Quantitat	Quantitat	Factor de conversió a unitats SI
Energia ¹	1 caloria	4,184 J
Energia ³	1 tep*	$4,2 \cdot 10^{10}$ J
Energia ¹	1 kWh*	$3,6 \cdot 10^6$ J
Massa ¹	1 tona	$1,0 \cdot 10^3$ kg
Massa ¹	1 amu/u/ame	$1,66 \cdot 10^{-27}$ kg
Temperatura ¹	0 °C	273,15 K
Pressió ¹	1 bar	$1,0 \cdot 10^5$ Pa

Taula A.1 Factors de conversió

* Els estudiants els hauran de buscar a l'exercici A.2

Quantitat	
Temperatura del nucli solar ²	$1,571 \cdot 10^7$ K
Temperatura de la superfície solar ¹	5.780 K
Densitat mitjana del Sol ²	1.408 kg/m ³
Densitat del nucli ²	$1,622 \cdot 10^5$ kg/m ³
Pressió del nucli solar ²	$2,477 \cdot 10^{11}$ bars
Temperatura de la superfície terrestre ¹	295 K
Densitat (mitjana) de la Terra ²	5.514 kg/m ³
Massa d'un electró ¹	$9,109 \cdot 10^{-31}$ kg
Càrrega d'un electró ¹	$1,602 \cdot 10^{-19}$ C
Massa d'un protó ¹	$1,673 \cdot 10^{-27}$ kg
Càrrega d'un protó ¹	$1,602 \cdot 10^{-19}$ C
Massa d'un neutró ¹	$1,675 \cdot 10^{-27}$ kg

Taula A.2. Constants

¹ Noordhoff uitgevers & NVON (2021). *Binas HAVO/VWO Informatieboek 6de editie (6e havo/vwo) (01 ed.)*. Groningen, Països Baixos: Noordhoff Uitgevers.

² Sun Fact Sheet. (2018). Dades extretes el 13 de juliol de 2021 de <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html>.

³ Conversor d'unitat i glossari de l'AIE, per les unitats d'energia més habituals. De <https://www.iea.org/reports/unit-convert-and-glossary>

SOLUCIONS DELS EXERCICIS DE CLASSE

>1.1

La resposta varia en funció del país!

Per a informació general, consulteu <https://ourworldindata.org/energy-mix>.

Per a informació sobre països concrets, consulteu <https://ourworldindata.org/energy#energy-country-profiles>.

Per a informació sobre els Països Baixos, consulteu <https://ourworldindata.org/energy/country/netherlands#energy-mix>.

En aquests llocs web es pot trobar el mix energètic de molts països diferents, entre d'altres informacions. Aquest lloc web també ofereix informació sobre les diferents fonts d'energia, els avanços en la descarbonització i el consum energètic. Hi ha moltes dades.

>1.2

Les densitats energètiques de major a menor:

Deuteri – Urani – Carbó – Petroli – Gasolina – Etanol – Fusta – Hidrogen (gas)

La densitat energètica del deuteri depèn de les condicions de reacció. No obstant això, les reaccions de fusió tenen la major densitat energètica de tots els combustibles, fins i tot més que les reaccions de fissió. L'energia alliberada en una reacció de fusió és menor que l'energia alliberada en una reacció de fissió, perquè els àtoms fissionables són molt més grans que els petits àtoms que s'utilitzen en la fusió. No obstant això, l'energia per unitat de massa (per nucleó) és molt més gran en la fusió. D'aquesta manera, si omplíssim un determinat volum només amb nuclis de deuteri i aquests es fessin fusionar hipotèticament tots alhora, s'obtidria més energia que en un mateix volum només ple de nuclis d'urani sotmesos a fissió. Els tres combustibles fòssils (carbó, petroli i gasolina) tenen densitats energètiques relativament properes. En aquest cas, els límits superiors s'han extret de les dades que apareixen a continuació:

Urani: 1 539 842 000 MJ/L, font: https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density

Carbó: 34-42 MJ/L (antracita), o 26-49 MJ/L (material bituminós) font: ídem

Petroli: 37 MJ/L, font: ídem

Gasolina: 34.2 MJ/L, font: ídem

Etanol: 24 MJ/L, font: ídem

Fusta: 2.56-21.84 MJ/L, font: https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_content_of_biofuel

Hidrogen (gas): 0.01005-0.01188 MJ/L, font: https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density / https://es.wikipedia.org/wiki/Densidad_de_energ%C3%ADa

>1.3

Resposta B

A causa de les reaccions de recombinació, els electrons i ions lliures poden recombinar-se en un àtom neutre (partícula de gas), procés durant el qual s'emet llum. En funció dels tipus de ions, poden tenir lloc diferents reaccions de recombinació. Atès que els ions (i els àtoms) tenen nivells d'energia específics, durant aquesta recombinació poden produir-se determinades transicions per a determinats ions. Com a conseqüència, el color del plasma depèn dels tipus de partícules.

A causa de la recombinació, un plasma sol ser inestable ja que les partícules del plasma es recombinen en partícules neutres (gas). Les partícules de gas necessiten ser ionitzades contínuament per poder mantenir el plasma estable. Si una partícula neutra recentment formada xoca amb una partícula ionitzada, existeix la possibilitat que la neutra es torni a ionitzar.

Respecte a la resposta A: no tots els plasmes tenen una temperatura elevada; també hi ha plasmes freds. La calor és una de les maneres de ionitzar un gas, però n'hi ha més que no es tracten en aquest mòdul. Els plasmes freds poden continuar brillant.

Respecte a la resposta C: Les reaccions nuclears no es produeixen de manera natural en els plasmes, excepte en el cas de les estrelles. La majoria de les reaccions nuclears no emeten llum; per exemple, les fusions D-D o D-T no emeten fotons.

>1.4

(a) El corrent surt del paper

El camp magnètic es corba en sentit contrari a les agulles del rellotge

Si fem servir la regla de la mà dreta, veiem que si la direcció del corrent es troba fora del paper, el camp magnètic es corba al voltant del cable en sentit contrari a les agulles del rellotge. Si la direcció del corrent és cap a l'interior del paper, el camp magnètic es corba al voltant del cable en el sentit de les agulles del rellotge.

(b) El camp magnètic dins de l'espira està fora del paper

El camp magnètic fora de l'espira està dins del paper.

Si dibuixem un fil circular amb un corrent en el sentit contrari a les agulles del rellotge, veiem que, fent servir la regla de la mà dreta, la direcció del camp magnètic dins del fil circular es dirigeix cap a fora del paper, mentre que la direcció del camp magnètic fora del bucle de filferro es dirigeix cap a dins del paper.

(c) A causa de la càrrega i el moviment oposat, el camp magnètic té la mateixa direcció per a totes dues partícules

Si dibuixem la trajectòria circular de l'electró sobre el paper, amb l'electró movent-se en el sentit de les agulles del rellotge, llavors el camp magnètic dins del cercle es dirigeix cap a fora del paper i el de fora del cercle es dirigeix cap a dins del paper.

Si dibuixem la trajectòria circular del protó sobre el paper, amb el protó movent-se en

el sentit contrari a les agulles del rellotge, llavors el camp magnètic és exactament el mateix que el de l'electró. El camp magnètic dins de l'espira està fora del paper, mentre que el camp magnètic fora de l'espira està dins del paper. Això es deu al fet que el protó té càrrega oposada: si un electró i un protó es moguessin de la mateixa manera, generarien camps magnètics oposats. Si invertim la direcció i la càrrega, arribem a la mateixa situació que abans.

Les direccions són exactament les mateixes que per al fil circular amb un corrent en el sentit contrari a les agulles del rellotge també! Si la direcció del corrent és la mateixa que la direcció del moviment del protó (una partícula positiva), llavors el camp magnètic va exactament en la mateixa direcció. Un corrent en un fil circular és exactament igual a les partícules carregades que es mouen en una trajectòria circular, per la qual cosa els camps magnètics tenen la mateixa direcció.

(d) La direcció del camp magnètic és sempre perpendicular a la direcció del corrent.

La direcció del camp magnètic és sempre perpendicular a la direcció del moviment de les càrregues (i per tant també sempre perpendicular a la direcció del corrent).

>1.5

(a) Fes un dibuix d'un tor amb un radi major gran, però amb un radi menor petit. Quin aspecte té? [Un dònut](#)

(b) Ara dibuixa un tor amb un radi major petit i un radi menor gran. Per què costa més de dibuixar? [El dònut agafa una forma més esfèrica en què el radi menor no pot ser més gran que el radi major \(si no, ja no és un tor\).](#)

(c) Què passaria si fem que el radi major sigui cada vegada més petit mantenint un radi menor gran? Quina forma obtenim? [Si permetem que el radi menor sigui més gran que el major i prenem el cas límit, obtenim una esfera.](#)

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

(d) Què passa si canvia la relació d'aspecte? [El tor canvia de forma.](#)

(e) Quina és la menor relació d'aspecte possible per a un tor? [El radi menor no pot ser més gran que el radi major. Si són iguals vol dir que la relació d'aspecte és mínima; per tant, la relació d'aspecte = 1.](#)

>1.6



A. Secció toroidal:



B. Secció poloidal:



C. Vista en 3D:

- Un vist des de dalt: un dònut amb forma rodona
- Un vist com una intersecció del dònut: dos cercles
- La direcció poloidal és perpendicular a la secció poloidal. La direcció toroidal és perpendicular a la secció toroidal.

Compareu-ho prenent les seccions d'un cilindre: si prenem una secció en la direcció z (de dalt a baix), obtenim un pla rectangular perpendicular a la direcció z. Si prenem una secció al llarg de l'altra direcció (ja sigui la poloidal o la radial, ja en aquest cas totes dues donen com a resultat la mateixa secció), acabem amb una secció transversal circular que és perpendicular a la direcció poloidal.

Els imants del camp toroidal se situen al voltant de la forma del tor en la direcció poloidal. Per tant, els imants formen espirals en la secció transversal poloidal, creant un circuit de corrent en la direcció poloidal, la qual cosa té com a resultat un camp magnètic en la direcció toroidal. És per això que s'anomenen imants de camp toroidals.

De la mateixa manera, els imants de camp poloidals es troben en les direccions toroidals a la part superior i inferior del tor. El corrent en aquests imants segueix un bucle toroidal, i dona lloc a un camp magnètic en la direcció poloidal.

>1.7

(a) Les bobines de camp toroidals es troben dins la secció poloidal del tokamak

Els imants d'orientació poloidal creen un camp magnètic en una direcció perpendicular a la secció poloidal; és a dir, en la direcció toroidal. Per tant, aquests imants creen un camp magnètic en la direcció toroidal => bobines de camp toroidals (encara que estiguin en el pla poloidal)

(b) Les bobines de camp poloidals es troben a la part superior i inferior del tor. El solenoide central es troba dins el forat del dònut.

Les bobines de camp poloidals es troben a la part superior i inferior del tor, però la direcció del camp magnètic és poloidal. El solenoide central es troba en el centre del tokamak. I és un solenoide.

>1.8

(a) La inducció depèn d'una càrrega del flux magnètic, però el flux magnètic no pot estar canviant contínuament, perquè en algun moment els imants arriben al seu límit. Per això, el solenoide central funciona per impulsos.

La inducció magnètica és el resultat d'un canvi en el flux magnètic. No és possible anar canviant el flux magnètic eternament, perquè hi ha un límit: comencem amb un corrent determinat i podem augmentar-lo fins a un altre corrent determinat. Mentre puguem anar augmentant (o disminuint) aquest corrent, es produirà la inducció i el tokamak podrà continuar funcionant. Si no podem continuar canviant el flux magnètic, la inducció es para i el camp poloidal desapareix.

(b) Si es fan servir impulsos, hi ha moments en els quals no es genera energia, però el que volem és un reactor de fusió que funcioni contínuament. Per això, els impulsos no són la solució ideal.