

Modul 2 – Vejen til fusion

FuseNet undervisningsmateriale til gymnasiale uddannelser

Lærervejledning

v.1.0

Introduktion

Energi er en del af fundamentet for vores moderne samfund. Antallet af teknologier og antallet af brugere af alle disse teknologier er stigende, og dette medfører, at det globale energibehov også forventes at stige kontinuert. Hvis vi ønsker at blive ved med at genere energi – og det gør vi – så vil energibehovet en dag overstige energiproduktionen. Derfor vil dette undervisningsmateriale give indsigt i en af fremtidens mulige energikilder: Fusion.

Samlet set starter undervisningsmaterialet med Modul 1 Introduktion til fusion, som giver de studerende de basale kompetencer nødvendige for at forstå og arbejde med de andre moduler. **Derfor kan dette modul – Modul 2 Vejen til fusion – bruges når indholdet fra Modul 1 allerede er blevet introduceret.**

Undervisningsmaterialet er ment til gymnasiale uddannelser: Niveau ISCED 3-4.

Hvordan modulerne kan bruges

Hovedteksten består af forskelligt undervisningsmateriale: De lyse, farvede bokse, som kaldes 'bemærkninger', giver yderligere indsigt i udvalgte emner. Det er muligt at springe disse over i undervisningen.

De farvede, mere mørke bokse indeholder opgaverne. Disse kan bruges i undervisningen for yderligere diskussion af emnerne, og de kan bruges til at sikre, at de studerende forstår materialet.

Der findes også ekstraopgaver. Disse opgaver rangeres i sværhedsgrad fra * til ***, hvor * er introduktionsopgaver, og *** svarer til mere udfordrende opgaver.

Et modul består samlet set af:

- Hovedteksten
 - Indeholder også opgaver
- Ekstraopgaverne
- En PowerPoint-præsentation
 - Indeholder også opgaverne fra hovedteksten
- Lærervejledningen
 - Hvor følgende bilag kan ses:
 - Tabel med naturkonstanter og enhedskonvertering
 - Løsninger på opgaverne fra hovedteksten / slides
 - Løsninger på ekstraopgaverne

Content of the teacher manual

Introduktion	1
Hvordan modulerne kan bruges.....	1
Kapitel 1: Læringsmål.....	3
Kapitel 2: Nærtbeslægtede emner	3
Kapitel 3: Emnerne i Modul 2 pr. kapitel.....	3
Kapitel 4: Kort resume af Modul 2	5
Kapitel 5: Undervisningsforløb.....	6
15 min introduktionslektion.....	6
1 time lektion	7
Kapitel 6: Brug af PowerPoint og andre resurser	9
Kapitel 7: Yderligere resurser til læring og sjov for Modul 2:	9
For undervisere.....	9
For undervisere og studerende.....	10
Bilag A: Tabel med naturkonstanter og enhedskonvertering.....	12
Bilag B: Løsninger til opgaverne	13
Bilag C: Løsninger til ekstraopgaverne	18

Kapitel 1: Læringsmål

Efter dette modul er den studerende i stand til at:

- Forstå det komplekse samspil mellem videnskab og samfund
- Forklare, hvordan fusion blev opdaget
- Identificere forskellige typer af basale fusionsmaskiner
- Opstille en tidslinje over de første fusionsmaskiner
- Identificere det internationale samarbejde og de konflikter, der har påvirket udviklingen af fusionsenergi
- Diskutere, hvorfor fusionsenergi har oplevet forsinkelser
- Forstå behovet for større og mere komplekse fusionsmaskiner
- Forklare, hvordan ITER-projektet startede
- Opsummere målene bag ITER-projektet

Kapitel 2: Nærtbeslægtede emner

Udover emnerne fra Modul 1 (som kan ses i lærervejledningen til Modul 1) så kan tidligere kendskab til følgende emner hjælpe de studerende med at få en bedre og mere sammenhængende forståelse af de forskellige beslutninger, opfindelser og problemer, som der diskuteres i Modul 2:

- Den kolde krig
 - De involverede lande
 - Udfaldet af Den kolde krig
- 2. Verdenskrig
 - 2. Verdenskrigs indflydelse på forholdene mellem lande generelt samt global politik
 - 2. Verdenskrigs indflydelse på forholdet mellem USA og Sovjetunionen
- Etik
 - Eksistensen af et adfærdskodeks / moralsk kompas
 - Etikens rolle i fysik, politik og krig
- Økonomi
 - Forskelle i forskellige landes velstand
- Politik
 - Indflydelsen af national politik på den alment accepterede vigtighed af emner såsom klimaforandring eller energi

Kapitel 3: Emnerne i Modul 2 pr. kapitel

Dette modul begynder med en forklaring af opdagelserne vedr. fusion i begyndelsen af 1900-tallet og slutter af med en opsummering af den nuværende status for fusionsenergi og en perspektivering til fremtiden. Modulet giver en lineær forklaring af de historiske, videnskabelige og samfundsmæssige aspekter af fusion. Alle kapitlerne omhandler til en vis grad Den kolde krig og 2. Verdenskrig. Grundet tilstedeværelsen af historiske emner i dette modul er fokus dermed ikke udelukkende på den relevante fysik. De videnskabelige emner, som modulet går mere i dybden med, er pinch-maskiner og partikeldrift – begge er vigtige emner indenfor fusionsforskning.

1. Opdagelsen af fusion
 - Solen
 - Energiproduktion i Solen
 - Proton-proton-kæden
 - Kvantemekanisk tunnelering
 - Spredning (scattering)
2. De første maskiner
 - Pinch-maskiner
 - Z-Pinch
 - θ -Pinch
 - Stellaratorer
 - 'Pump out'
 - Tokamakker
 - Thomson-spredning
 - Elektricitet
 - Strøm
 - Elektromagnetisme
 - Spoler, solenoider
 - Magnetisk feltstyrke
 - Partikeldrift herunder gradientdrift
 - Plasma
 - Plasmaindeslutning
3. Gennembrud og nedbrud
 - Videnskabelig break-even
 - Q-faktor
 - Funding og investering
 - Behovet for energi
 - Olieembargo og Energikrisen i 1973
 - Instabiliteter
 - Ioniserende / radioaktiv stråling
 - Alfastråling
 - Betastråling
 - Gammastråling
4. ITER
 - ITER's historie og tidslinje
 - Internationale projekter
 - ISS
 - CERN
 - ITER
 - ITER's formål
 - Samfundsmæssigt
 - Videnskabeligt
 - Fremtiden for ITER og fusionsforskningen

Kapitel 4: Kort resume af Modul 2

Formålet med dette modul er at øge den studerendes viden om forholdet mellem videnskab og samfundet. Dette forhold er komplekst og kan afhænge af politik, interesser og funding.

Kapitel 1 introducerer opdagelsen af fusionsenergi. Fra Solen har vi lært, at energi frigives i kernereaktioner i en proces, der kaldes proton-proton-kæden (P-P-kæden). Denne kæde – eller serie – af kernereaktioner viser, at 4 hydrogenkerner "omdannes" til 1 heliumkerne. For at P-P-kæden skulle finde sted naturligt, så skulle temperaturen i Solen i teorien være meget større end det, som man før havde målt og estimeret den til at være. Efter opdagelsen af kvantemekanisk tunnelering reviderede man de teoretiske modeller, og konkluderede at denne kvantemekaniske effekt faktisk tillod, at fusionsreaktioner kan finde sted i Solen ved den temperatur, som man førhen havde målt i Solen. Med denne viden forsøgte man at reproducere disse fusionsreaktioner på Jorden for at producere energi. I løbet af disse tidlige eksperimenter fandt forskere dog ud af, at spredning af partiklerne var mere sandsynligt end fusionsreaktioner.

Kapitel 2 omhandler de første fusionsmaskiner, som begyndte at dukke op omkring 2. Verdenskrig og begyndelsen af Den kolde krig. I løbet af denne periode var det primært tre lande, som var involverede i fusionseksperimenter: Storbritannien, USA og Sovjetunionen. Konstruktionen og forskningen med disse maskiner begyndte for alvor at få opmærksomhed og resurser efter 1950 vha. investeringer fra landenes regeringer. For at forhindre misbrug af forskningsresultaterne til fx militære formål og spionage blev forskningen og udviklingen af disse maskiner holdt hemmelig. Tre store opdagelser fandt sted: Pinch-maskiner, stellaratorer og tokamakker. Udviklingen af hver af disse maskiner diskuteres kort. Koncepterne bag pinch-maskiner eksemplificeres i opgave 2.2. Ekstraopgave A.3 kan bruges til at give mere indsigt i partikeldrift ved at tage udgangspunkt i gradientdrift.

Kapitel 3 fokuserer på forbedringer og udfordringer i løbet af udviklingen af fusionsenergi som teknologi. Vha. nye opdagelser vedr. tokamakker og fx magneter begyndte mange lande selv at forbedre tokamak-designet af flere årsager. Hver forbedring førte dog til nye udfordringer såsom størrelsen af maskinerne og instabiliteter. For at løse disse udfordringer begyndte individuelle lande at samarbejde, og mange af disse gik sammen om et stort, fælles projekt: ITER.

Kapitel 4 – det sidste kapitel – fokuserer på ITER og fremtiden for fusionsenergi. ITER startede som et samarbejde mellem USA, Sovjetunionen, Japan og Europa under Den kolde krig. I løbet af de lange, mangeårige forhandlinger blev nye lande en del af projektet, andre meldte sig ud, og nogle meldte sig ind igen. I 2006 blev aftalen om ITER underskrevet, og projektet kunne for alvor sættes i gang. I 2025 forventer man officielt (per maj 2023), at de første eksperimenter på ITER vil finde sted; dette kan nå at ændre sig. ITER har en målsætning om at opnå $Q > 1$ (altså bedre end videnskabeligt break-even) – man sigter efter $Q = 10$ ved at producere 500 MW fusionseffekt med en opvarmningseffekt på 50 MW. Det vil være første gang, at sådanne resultater opnås i en tokamak. Husk at skelne mellem varmen fra fusionseffekten og effekten af den elektricitet, som genereres af varmen fra fusionseffekten (ligesom på ethvert andet kraftværk / motor / varmemaskine). Energiomdannelsen er ikke perfekt, og noget varme må nødvendigvis gå til spilde i omdannelsesprocessen. Så selv hvis ITER kunne producere strøm – hvilket ITER ikke kan – så ville ITER ikke kunne producere 500 MW strøm med en fusionseffekt på 500 MW.

Kapitel 5: Undervisningsforløb

Ligesom det første modul gives der her bud på undervisningsforløb for dette modul. Grundet modulets indhold beskriver vi her kun undervisningsforløb, som både gennemsnitlige og erfarne studerende kan gøre brug af samtidig. Vi har konstrueret både en 15 minutter lang introduktionslektion og en 1 time lang lektion. Formålet med disse undervisningsforløb er at inspirere underviseren, ift. hvordan en lektion kan se ud, og at minimere undervisers forberedelsestid. Du er meget velkommen til at tilpasse lektionen, så det passer i din undervisning. Bemærk dog, at dette modul er skrevet kronologisk, hvilket kan forårsage problemer med forståelse hos de studerende, hvis særlige sektioner af fx hovedteksten fravælges.

For alle undervisningsforløb er de studerendes aktiviteter: At lytte til underviser, diskussion af emnerne, at stille spørgsmål og arbejde med opgaverne.

Forarbejdet til denne lektion involverer:

- Downloade PowerPoint'en
- At gøre dette modul og øvelserne tilgængelige for de studerende

Et forslag er at diskutere emnerne i undervisningen. Prøv at starte en diskussion om de sociale aspekter af fusion. Hvad kan man bruge forskning og viden om fusion til? Var hemmeligholdelsen af fusionsforskning under Den kolde krig berettiget? Er hemmeligholdelse af forskning etisk korrekt?

15 min introduktionslektion

Formålet med denne lektion er at beskrive opdagelsen af fusion for de studerende samt at understrege de spørgsmål, som opstod heraf, og at introducere konceptet med fusionsmaskiner.

Her dækkes kun det første kapitel i hovedteksten dvs. side 1 til 5 samt opgave 2.1 og ekstraopgave A.2. I forlængelse kan PowerPoint-slides 1 til 7 også anvendes.

Varighed	Undervisers aktiviteter	Stof	De studerendes aktiviteter
2 min	Introduktion til emnet	Kapitel 1 i hovedteksten PowerPoint-slide: 1 og 2	Lyt til underviser
5 min	Diskuter opgave 2.1	Kapitel 1 i hovedteksten Opgave 2.1 PowerPoint-slide: 3 til 6	Arbejd i grupper / individuelt Diskussion i klasseværelset
5 min	Diskuter fusion på Jorden og introducer begrebet 'spredning'	Kapitel 1 i hovedteksten PowerPoint-slide: 7	Lyt til underviser, stil spørgsmål
3 min	Diskuter ekstraopgave A.2	Kapitel 1 i hovedteksten Ekstraopgave A.2	Arbejd i grupper / individuelt Diskussion i klasseværelset

1 time lektion

Målet for denne lektion er at formidle hovedparten af indholdet i Modul 2 dvs. beskrive historien bag fusion og introducere vigtige fusionsmaskiner, som viser, at fusion langt fra udelukkende er et teoretisk emne.

Her dækkes kapitel 1, 2, 3 og 4 i hovedteksten dvs. side 1 til 34 samt opgave 2.1 til 2.7. I forlængelse kan PowerPoint-slides 1 til 34 også anvendes.

Varighed	Undervisers aktiviteter	Stof	De studerendes aktiviteter
2 min	Introduktion til emnet	Kapitel 1 i hovedteksten PowerPoint-slide: 1 og 2	Lyt til underviser
5 min	Diskuter opgave 2.1	Kapitel 1 i hovedteksten Opgave 2.1 PowerPoint-slide: 3 til 6	Arbejd i grupper / individuel Diskussion i klasseværelset
5 min	Diskuter fusion på Jorden og introducer begrebet 'spredning'. Præsenter begyndelsen af fusionsforskning med fokus på pinch-maskiner	Kapitel 1 i hovedteksten Kapitel 2 i hovedteksten PowerPoint-slide: 7 til 9	Lyt til underviser, stil spørgsmål
3 min	Diskuter opgave 2.2	Kapitel 2 i hovedteksten Opgave 2.2 PowerPoint-slide: 10 til 12	Arbejd i grupper / individuel Diskussion i klasseværelset
8 min	Præsenter de forskellige fusionsmaskiner. Diskuter, hvorfor fusionsforskning blev holdt hemmelig	Kapitel 2 i hovedteksten PowerPoint-slide: 13 til 16	Lyt til underviser, stil spørgsmål
4 min	Diskuter opgave 2.3	Kapitel 2 i hovedteksten Opgave 2.3 PowerPoint-slide: 17 og 18	Arbejd i grupper / individuel
5 min	Præsenter kapitel 2 og 3	Kapitel 2 i hovedteksten Kapitel 3 i hovedteksten PowerPoint-slide: 19 til 21	Lyt til underviser, stil spørgsmål
3 min	Diskuter opgave 2.4	Kapitel 3 i hovedteksten Opgave 2.4 PowerPoint-slide: 22 og 23	Arbejd i grupper / individuel
2 min	Præsenter kapitel 3	Kapitel 3 i hovedteksten PowerPoint-slide: 24	Lyt til underviser, stil spørgsmål
1 min	Præsenter kapitel 4	Kapitel 4 i hovedteksten PowerPoint-slide: 25	Lyt til underviser, stil spørgsmål
5 min	Diskuter opgave 2.5	Kapitel 4 i hovedteksten Opgave 2.5 PowerPoint-slide: 26	Diskussion i klasseværelset
2 min	Præsenter kapitel 4	Kapitel 4 i hovedteksten PowerPoint-slide: 27	Lyt til underviser, stil spørgsmål
5 min	Diskuter opgave 2.6	Kapitel 4 i hovedteksten	Arbejd i grupper / individuel

		Opgave 2.6 PowerPoint-slide: 28 og 29	
2 min	Præsenter kapitel 4	Kapitel 4 i hovedteksten PowerPoint-slide: 30	Lyt til underviser, stil spørgsmål
5 min	Diskuter opgave 2.7	Kapitel 4 i hovedteksten Opgave 2.7 PowerPoint-slide: 31	Diskussion i klasseværelset
3 min	Præsenter ITER's formål og afslut modulet	Kapitel 4 i hovedteksten PowerPoint-slide: 32 til 34	Lyt til underviser, stil spørgsmål

Kapitel 6: Brug af PowerPoint og andre resurser

Der er en PowerPoint-præsentation (for hvert modul) til rådighed på FuseNets hjemmeside.

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

Præsentationerne består af det faglige indhold i deres respektive moduler (hovedtekster), hvilket også inkluderer opgaverne og løsningerne – men ikke ekstraopgaverne. De indeholder også yderligere figurer til at illustrere stoffet. Du er velkommen til at tilpasse præsentationerne efter behov. I kapitel 7 i lærervejledningen findes en liste over hjemmesider og YouTube-videoer, som kan anvendes til at øge udbyttet af undervisningen.

For at introducere de forskellige emner i Modul 2 kan det være en idé at tildele de studerende en eller flere forberedelsesopgaver, som de har lavet hjemmefra. Dette kan fx være en ekstraopgave markeret med *. Det kan også være en af resurserne nævnt i hovedtekstens afsnit 'Yderligere læsning' eller i kapitel 7 i lærervejledningen.

Kapitel 7: Yderligere resurser til læring og sjov for Modul 2:

For undervisere

Det følgende indeholder generel baggrundsviden på dansk og engelsk for undervisere, der vil undervise med dette modul. Dette er ment primært til at forbedre din egen viden og forståelse af emnet. Det er muligt at anvende dette stof i undervisningen, men det skal muligvis tilpasses de studerendes niveau.

Nogle sider vil uddybe indholdet i dette modul. Andre sider indeholder opgaver (med og uden løsninger), illustrationer og ekstra information, der ikke dækkes af dette modul. Under hver URL er der en kort beskrivelse af sidens formål / indhold.

- a. FuseNet hjemmeside (engelsk) - <https://www.fusenet.eu/education/material>
Her findes de fire andre moduler i serien om fusion. Der findes også videnskabelige artikler, kurser og eksperimenter om fusion.
- b. Fusionsenergi til Alle (dansk) - <https://www.fusionsenergi.dk>
Her findes viden om fusion på dansk. Information om SRP- og SOP-forsøg på DTU, en årlig lærercamp, sommercamp for gymnasieelever og meget mere kan findes her.
- c. Transmutation Effects observed with Heavy Hydrogen – nature
<https://www.nature.com/articles/133413a0>
OLIPHANT, M., HARTECK, P. & RUTHERFORD Transmutation Effects observed with Heavy Hydrogen. *Nature* **133**, 413 (1934). <https://doi.org/10.1038/133413a0>
En ældre artikel på engelsk vedr. effekterne af at bombardere forskellige ioner med hydrogen.
- d. <https://www.nature.com/articles/4351142a>
Butler, D. Japan consoled with contracts as France snares fusion project. *Nature* **435**, 1142 (2005). <https://doi.org/10.1038/4351142a>
En kort artikel på engelsk, der omhandler forhandlingerne om ITER's placering.

For undervisere og studerende

De følgende sider kan bruges til at forklare, illustrere, eksemplificere, perspektivere og uddybe emnerne fra Modul 2. Under hver URL er der en kort beskrivelse af sidens formål / indhold.

Fusionsenergi til Alle (dansk) - <https://www.fusionsenergi.dk>

Her findes viden om fusion på dansk. Information om SRP- og SOP-forsøg på DTU, en årlig lærercamp, sommercamp for gymnasieelever og meget mere kan findes her.

Kapitel 1: Opdagelsen af fusion

- Science channel - How does fusion power the sun?
<https://www.youtube.com/watch?v=W1ZQ4JBv3-Y>
Varighed: 1:59
Fusion i Solen forklares kort i denne video.
- Business insider – Here’s what will happen when our sun dies
<https://www.youtube.com/watch?v=p24SQlhJVZo>
Varighed: 1:52
En kort video, der uddyber Solens livscyklus.
- UNSW Physics – Nucleosynthesis: The Proton-Proton Chain
https://www.youtube.com/watch?v=vCD3ca_W8z8
Varighed: 4:00
Proton-proton-kæden forklares i videoen – til erfarne studerende.
- Minute physics – What is quantum tunnelling?
<https://www.youtube.com/watch?v=cTodS8hkSDg>
Varighed: 1:04
Kort video, der introducerer idéen bag kvantemekanisk tunnelering.

Kapitel 2: De første maskiner

- Neutron Studios – Plasma compression (Z-Pinch) part 1/3
<https://www.youtube.com/watch?v=RRc7u8XN1fg>
Varighed: 4:10
En video, der viser et hjemmelavet eksperiment med en pinch-maskine. Bemærk, videoen kalder det for "Z-pinch", men dette er ikke helt korrekt, da den også indeholder elementer fra θ -pinch. Ergo en slags blandingsmaskine – men den demonstrerer pinch-effekten godt.

Kapitel 3: Gennembrud og nedbrud

- Cognito – GCSE Physics – Alpha, Beta and Gamma radiation #33
<https://www.youtube.com/watch?v=VeXpMijpazE>
Varighed: 4:36
Forklaring af de tre typer af ioniserende stråling (alfa, beta og gamma) og påvirkningen af dem samt kort om penetrationsdybde.

Kapitel 4: ITER

- ITER website
<https://www.iter.org/>

ITER's website, hvor man kan finde information, billeder og forklaringer af tokamakken, dens formål samt dens historie – og meget mere.

Bilag A: Tabel med naturkonstanter og enhedskonvertering

Størrelse	Enhed	Konvertering til SI-enheder
Energi ¹	1 kalorie (cal)	4.184 J
Energi ³	1 toe	$4.2 * 10^{10}$ J
Energi ¹	1 kWh	$3.6 * 10^6$ J
Masse ¹	1 ton	$1.0 * 10^3$ kg
Masse ¹	1 amu/u/ame	$1.66 * 10^{-27}$ kg
Temperatur ¹	0 °C	273.15 K
Tryk ¹	1 bar	$1.0 * 10^5$ Pa

Tabel A.1 Enhedskonvertering

Størrelse	Værdi
Temperatur i Solens kerne ²	$1.571 * 10^7$ K
Temperatur ved Solens overflade ¹	5780 K
Gennemsnitlig densitet i Solen ²	1408 kg/m^3
Densitet i Solens kerne ²	$1.622 * 10^5 \text{ kg/m}^3$
Tryk i Solens kerne ²	$2.477 * 10^{11}$ bar
Temperatur ved Jordens overflade ¹	295 K
Gennemsnitlig densitet i Jorden ²	5514 kg/m^3
Elektron, masse ¹	$9.109 * 10^{-31}$ kg
Elektron, ladning ¹	$-1.602 * 10^{-19}$ C
Proton, masse ¹	$1.673 * 10^{-27}$ kg
Proton, ladning ¹	$1.602 * 10^{-19}$ C
Neutron, masse ¹	$1.675 * 10^{-27}$ kg

Tabel A.2 Naturkonstanter

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

² Sun Fact Sheet. (2018). Retrieved 13 July 2021, from <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/sunfact.html>

³ IEA Unit converter and glossary, for common energy units. From <https://www.iea.org/reports/unit-converter-and-glossary>

Bilag B: Løsninger til opgaverne

Opgave 2.1

- a. Solen har en masse på omkring $1.989 \cdot 10^{30}$ kg. En proton har massen 1.007 amu. Antag, at Solen udelukkende består af protoner. Hvor mange protoner er der i Solen? Husk, at 1 amu er lig $1.661 \cdot 10^{-27}$ kg.

Der er $1.19 \cdot 10^{57}$ protoner i Solen, se nedenfor.

Solens masse er ca. $1.989 \cdot 10^{30}$ kg. Protonmassen er 1.007 amu, og omregnet til kg er den $1.007 \text{ amu} \cdot 1.661 \cdot 10^{-27} \text{ kg/amu} \approx 1.673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, i overensstemmelse med tabellen fra bilag A. Ergo er der $1.989 \cdot 10^{30} \text{ kg} / 1.673 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \approx 1.19 \cdot 10^{57}$ protoner i Solen, hvis Solen kun består af protoner. Naturligvis består Solen fx også af elektroner. Hvordan vil du korrigere for dette i beregningerne? En idé kunne være at antage, at Solen er elektrisk neutral. Overvej at diskutere dette med de studerende.

- b. P-P-kæden frigiver energien 26.73 MeV pr. heliumkerne produceret. Hvor meget energi frigives, hvis alle protonerne fra (a) i Solen fusionerer og bliver til heliumkerner? Husk, at 1 MeV er lig $1.602 \cdot 10^{-13}$ J.

Der frigives $1.28 \cdot 10^{45}$ J, se nedenfor.

Husk, at i P-P-kæden "omdannes" fire hydrogenkerner / protoner til en heliumkerne. Eftersom vi før estimerede, at Solen består af $1.19 \cdot 10^{57}$ protoner, kan disse fusionere og blive til maksimalt $\frac{1.19 \cdot 10^{57}}{4} \approx 2.98 \cdot 10^{56}$ heliumkerner. Derfor frigives der $2.98 \cdot 10^{56} \cdot 26.73 \text{ MeV} \approx 7.97 \cdot 10^{57} \text{ MeV}$, hvis alle protonerne i Solen fusionerer til helium. Dette svarer til $7.97 \cdot 10^{57} \text{ MeV} \cdot 1.602 \cdot 10^{-13} \text{ J/MeV} \approx 1.28 \cdot 10^{45} \text{ J}$

- c. Hvor lang tid kan Solen skinne, hvis den udsender stråling med den konstante effekt $3.828 \cdot 10^{26}$ W?

$3.3 \cdot 10^{18}$ sekunder eller $1.1 \cdot 10^{11}$ år.

Vi antager, at Solen stopper med at skinne, når den "løber tør for energi" – altså når de $1.28 \cdot 10^{45}$ J, vi fandt i sidste delopgave, alle er blevet brugt på at udsende stråling. Solen kan således skinne i

$$t = \frac{1.28 \cdot 10^{45} \text{ J}}{3.828 \cdot 10^{26} \text{ W}} \approx 3.3 \cdot 10^{18} \text{ s. Dette svarer til } 1.1 \cdot 10^{11} \text{ år.}$$

- d. Astrofysikere forventer, at Solen kun vil være i stand til at fusionere 10% af sine protoner, før den vil gå til den næste fase i sin livscyklus. Hvorfor tror du, at Solen ikke vil være stand til at fusionere alle protonerne?

Flere svarmuligheder kan anses for korrekte, fx:

- Bl.a. pga. fusion af protoner til helium kan man forestille sig, at plasmametre såsom tryk, tæthed og temperatur ændrer sig i løbet af Solens levetid. Hvis disse ændrer sig ufordelagtigt, hvilket igen ikke fremkommer usandsynligt, så kan omstændighederne mht. fusion i Solen blive værre, og de resterende protoner kan ikke fusionere.

- Hvis alle protonerne skal fusionere, kræver det, at alle protoner finder mindst en partner at fusionere med. Hvis man har en stjerne, der består næsten udelukkende af heliumkerner og meget få protoner, ville det være meget usandsynligt, at de sidste protoner fandt hinanden.
 - Det er kun i Solens kerne, at fusion finder sted, da overfladen bl.a. er for kold. Generelt fortæller fx diffusion os, at så længe der er protoner i Solen, så vil nogle af disse befinde sig i kernen og andre på overfladen. Det er altså ikke alle protoner, der hele tiden kan fusionere.
- e. Hvor lang tid tror du, at Solen faktisk kan skinne? Diskuter med personen ved siden af dig.

Vi estimerede, at Solen kan skinne i $1.1 \cdot 10^{11}$ år, men Solen har en levetid på meget groft 10^{10} år – ca. 10% af vores estimat. En af årsagerne er bl.a., at Solen ikke udelukkende består af protoner, og at alle protonerne ikke kan nå at fusionere. Desuden kan Solen også miste energi på andre måder end ved at udsende stråling fx via solvind.

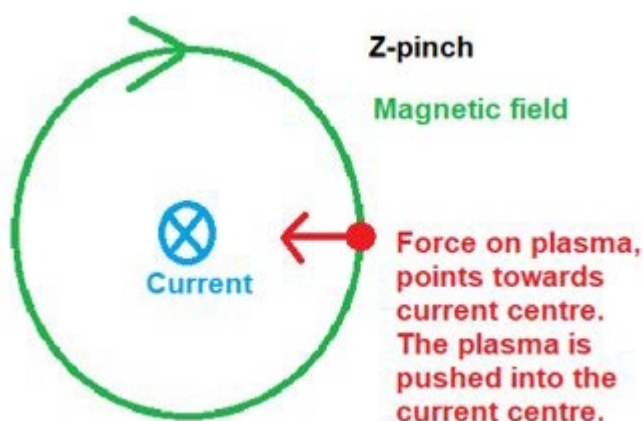
Opgave 2.2

- a. Hvilken kraft presser plasmaet sammen i pinch-maskiner?

Lorentzkraften.

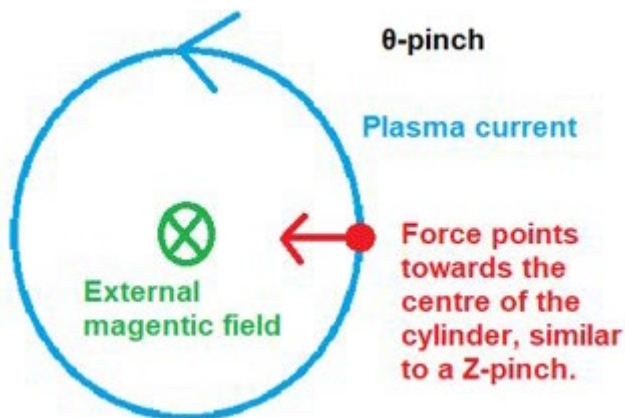
I pinch-maskiner findes både magnetfelt og strøm. Retningen af Lorentzkraften er givet ved krydsproduktet $\vec{J} \times \vec{B}$, hvor \vec{J} er strømtætheden (retningen af denne er givet ved strømmens retning) og \vec{B} er magnetfeltet. Husk, at strømtætheden peger i samme retning som bevægelsesretningen af positive partikler men peger antiparallelt med bevægelsesretningen af negative partikler. Så selv om elektroner bevæger sig i den modsatte retning af ionerne, så fordi deres ladning er negativ, så peger strømmen i samme retning – og det gør Lorentzkraften hermed også. Dette kan også indses ud fra den magnetiske kraft i Lorentzkraften $\vec{F}_{\text{mag}} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$. Når q skifter fortegn, så gør hastigheden det også, og Lorentzkraften er identisk for ioner og elektroner. Altså er Lorentzkraftens retning givet ved $\vec{J} \times \vec{B}$.

- b. For Z-pinch antag, at plasmastrømmen peger ind i papiret. Tegn så retningen af magnetfeltet fra plasmastrømmen. Tegn nu retningen af Lorentzkraften. Hvad er effekten af Lorentzkraften?



For Z-pinch genereres et plasma ved at indeslutte en gas mellem to elektroder med et spændingsfald mellem dem. Der vil herefter blive dannet en plasmastrøm mellem elektroderne. Bekræft retningen af magnetfeltet fra plasmastrømmen i ovenstående tegning vha. højrehåndsreglen. Igen vha. højrehåndsreglen bekræft nu, at Lorentzkraften peger radiale indad overalt. Hermed presser plasmaet sig selv sammen.

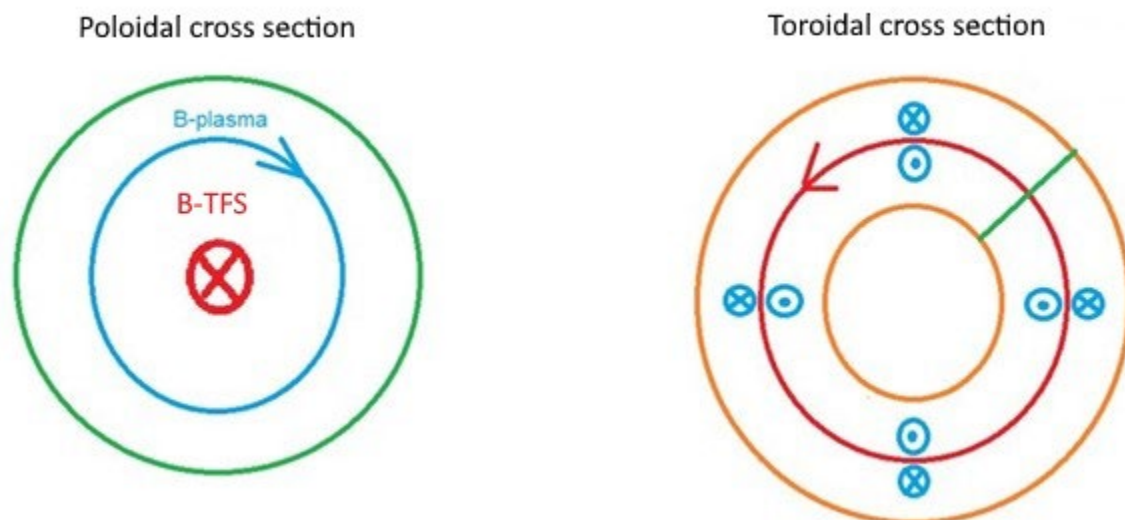
- c. For θ -pinch skal man bruge et eksternt magnetfelt. Tegn en cirkel og en strøm, der løber mod urets retning. Hvilken retning skal det eksterne magnetfelt have, sådan at Lorentzkraften peger indad? Hvilken retning har magnetfeltet fra den cirkulære plasmastrøm? Hvad siger det om styrken af det eksterne magnetfelt?



Bekræft med højrehåndsreglen at Lorentzkraften overalt peger radiale indad, når det eksterne magnetfelt peger ind i papiret. Magnetfeltet fra plasmastrømmen er ikke tegnet i ovenstående, men bekræft vha. højrehåndsreglen, at dette magnetfelt peger ud af papiret – altså modsatrettet det eksterne magnetfelt! Derfor skal det eksterne magnetfelt være kraftigere end magnetfeltet fra plasmastrømmen! Dette er nødvendigt, for at plasmaet presses sammen.

Opgave 2.3

- Tegn retningen af magnetfeltet fra de toroidale feltspoler (TFS) i et poloidalt tværsnit. Tegn også retningen af magnetfeltet fra plasmastrømmen i samme tegning.
- Gør nu det samme for et toroidalt tværsnit.



Opgave 2.4

Se den tilhørende opgavetekst i hovedteksten.

Indsæt værdierne i formlen i SI-enheder og få $t_{puls} = \frac{250 - 12.5 \cdot 10^{-6} \cdot 16 \cdot 10^6}{0.1} = 500$ sekunder. Dette er ca. 8.3 minutter. Hermed kan ITER operere i meget kortere tid ad gangen end stellaratorer.

Opgave 2.5

ITER er et godt eksempel på fordelene og ulemperne, når mange parter arbejder med det samme projekt. Diskuter følgende i små grupper:

- Hvad forventer I er fordelene?
- Hvad forventer I er ulemperne?

Der er flere mulige svar, fx:

- En fordel er, at de forskellige landes kompetencer indenfor fx forskning, teknologi eller produktion kan udnyttes til at modvirke individuelle landes svagheder.
- Flere resurser er generelt til rådighed, hvilket kan øge udbyttet af forskningsprojektet.
- En ulempe er, at alle involverede parter ønsker noget at have sagt i udviklingen af projektet, og dette kan føre til lange forhandlinger og meget kompliceret bureaukrati.
- Politik og kulturforskelle kan både gavne og være en udfordring for projektet.

Opgave 2.6

Vi har tidligere nævnt, at ITER er en stor maskine – men hvor stor? På ITER's hjemmeside kan man finde meget brugbar og interessant information. Besøg <https://www.iter.org/factsfigures>. Her kan du se, at inde i ITER, i kammeret hvor plasmaet befinder sig, kan der være 840 m^3 . Hvor stort er dette volumen egentlig?

- a. Et menneske fylder ca. 65 liter. Hvor mange mennesker kan der være i ITER?

$$\frac{840m^3}{65 \cdot 10^{-3}m^3} \approx 12923 \text{ mennesker i ITER.}$$

- b. En elefant fylder ca. 5 m³. Hvor mange elefanter kan der være i ITER?

$$\frac{840m^3}{5m^3} \approx 168 \text{ elefanter i ITER.}$$

Opgave 2.7

Man passerede en anden vigtig milepæl i 2012. Det år blev ITER godkendt til at fungere som en 'Basic Nuclear Installation' (løst oversat: En "basal atomreaktor"). Reaktionsprodukterne af D-T-reaktionen er helium-4 og en neutron. Ingen af disse er radioaktive.

Hvorfor skulle ITER så godkendes ligesom fissionskraftværker, hvor radioaktivt affald er et problem?

Tritium er radioaktivt – dog med en halveringstid på kun 12 år ca. Et andet argument er, at nogle materialer kan blive radioaktive grundet reaktioner med de frie neutroner, som dannes under fusionsreaktionen. Dette har også indflydelse på hvilke materialer, der kan bruges i en fusionsreaktor. Mere information om dette emne kan findes i Modul 4.

Bilag C: Løsninger til ekstraopgaverne

Ekstraopgave A.1

Hvor mange gange skal hver reaktion finde sted, således det samlede resultat for grenen bliver $4 p + 2 e^- \rightarrow {}^4_2\text{He}^{2+} + A \gamma + B \nu_e$? **A** og **B** er ukendte. Hvad er værdierne af **A** og **B**?

De første tre reaktioner skal ske to gange, og den sidste reaktion skal kun ske en gang.

At den sidste reaktion kun skal finde sted en gang, giver sig selv, og dette kræver, at reaktion 3 finder sted to gange. I forlængelse kræver dette, at reaktion 1 finder sted to gange. De to positroner, der herved dannes, ses ikke i det endelige resultat og må derfor forsvinde på et tidspunkt. Hermed konkluderer vi, at reaktion 2 ligeledes skal finde sted to gange. Sammenlign produkter og reaktanter i en tabel:

Reaktanter	Produkter
$4 p$ $2 e^+ + 2 e^-$ $2 {}^2_1\text{D}^+ + 2 p$ $2 {}^3_2\text{He}^{2+}$	$2 {}^2_1\text{D}^+ + 2 \nu_e + 2 e^+$ 4γ $2 {}^3_2\text{He}^{2+} + 2 \gamma$ ${}^4_2\text{He}^{2+} + 2 p$

Står et produkt også som reaktant kan det trækkes fra:

Reaktanter	Produkter
$4 p$ $2 e^+ + 2 e^-$ $2 {}^2_1\text{D}^+ + 2 p$ $2 {}^3_2\text{He}^{2+}$	$2 {}^2_1\text{D}^+ + 2 \nu_e + 2 e^+$ 4γ $2 {}^3_2\text{He}^{2+} + 2 \gamma$ ${}^4_2\text{He}^{2+} + 2 p$

Og den endelige reaktion bliver $4 p + 2 e^- \rightarrow 6 \gamma + 2 \nu_e$, hvorved vi ser **A** = 6 og **B** = 2.

Ekstraopgave A.2

De første menneskeskabte fusionsreaktioner på Jorden fandt sted ved at bombardere hydrogen-isotoper med andre hydrogen-isotoper ved at bruge partikelacceleratorer. Denne metode bruges ikke længere i fusionsforskning, eftersom spredning kraftigt forværrer effektiviteten af denne metode. Kan du forklare, hvorfor spredning har denne effekt?

Spredning betyder her, at en partikel med høj fart kolliderer med en stationær partikel, men i stedet for fusion finder en stødproces sted. Denne proces kan resultere i overførsel af kinetisk energi til den stationære partikel, hvor denne energi manifesterer sig selv som en lille temperaturstigning. Altså mister de hurtigere partikler fart under spredningen og stopper med at bevæge sig til sidst, hvorved fusion ikke længere er en mulighed naturligvis. Den lille temperaturændring er langt fra høj nok til at danne grundlag for fusion. Desuden kan de hurtige partiklers retning ændre sig under spredningen, hvilket kan resultere i, at de faktisk begynder at bevæge sig væk fra de stationære partikler og evt. rammer en væg eller lign. Alt i alt medfører spredning et uønsket energitab og retningsændring, som kraftigt nedsætter fusionseffekten.

Ekstraopgave A.3

- Er magnetfeltet stærkere tæt på den venstre eller den højre partikel? Hvorfor?

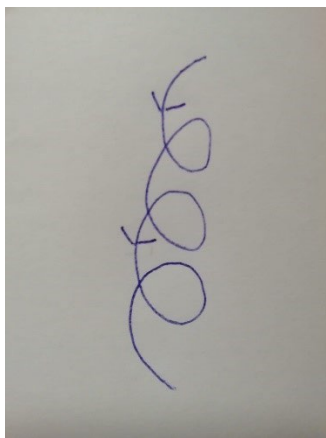
Magnetfeltet er stærkere tæt på den højre partikel. Vi ved fra jævne cirkelbevægelser, at hvis man holder partikelhastigheden konstant men øger centripetalkraften, så vil radius af cirkelbevægelsen falde. Derfor må styrken af magnetfeltet være større tæt på partiklen med mindst radius, da centripetalkraften stiger, i takt med styrken af magnetfeltet stiger, da det er magnetfeltet, som forårsager rotationen.

- b. Baseret på forrige delopgave stiger eller falder styrken af magnetfeltet, når man bevæger sig fra venstre mod højre?

Vi har konkluderet feltet er kraftigere til højre. Derfor stiger styrken af magnetfeltet, når man bevæger sig fra venstre mod højre.

- c. Hvordan forventer du, at en partikels bevægelse ville se ud, hvis du nu skal tage højde for, at styrken af magnetfeltet ændrer sig i løbet af cirkelbevægelsen? Dette har vi set bort fra indtil nu. Er bevægelsen stadig en lukket cirkel? Driver ionerne i en bestemt retning?

Bevægelsen vil nu mere ligne en spiral og altså ikke en lukket cirkel. Ionerne vil stadig rotere mod uret men på venstre halvdel af cirkelbevægelsen er radius større end på højresiden af bevægelsen. Derfor når partiklen at bevæge sig mere nedad i løbet af venstre halvdel af bevægelsen, end den når at bevæge sig opad i løbet af den højre halvdel. Ergo bevæger partiklen sig samlet set nedad, og vi siger, at partiklen driver nedad. Bemærk, at driftsretningen er vinkelret på både retningen af magnetfeltet og venstre-højre-retningen (retningen magnetfeldtsstyrken ændrer sig i)!



Ekstraopgave A.4

Skriv i første række navnene på de tre designs, som blev forklaret i kapitel 2. I den anden række skriv navnene på de lande, hvor designet primært blev opfundet. I den tredje række skriv navne på opfinderne for hvert design. I den sidste række skriv navnene på de maskiner, som blev nævnt i kapitel 2, der er bygget ud fra hvert design.

Design	Pinch	Stellarator	Tokamak
Oprindelsesland	Storbritannien	USA	Sovjetunionen

Opfinder(e)	-	Lyman Spitzer	Andrei Sakharov & Igor Tamm
Maskinnavne	Zeta, Scylla	Model A, Model B, Model C	T-1, T-2, T-3

Ekstraopgave A.5

- a. Hvad er denne vigtige forskel?

Tokamakken er afhængig af en plasmastrøm forårsaget af den centrale solenoide til at modvirke partikeldrift. Stellaratoren har derimod ikke en central solenoide men har fået formet og placeret sine spoler i en kompleks geometri, sådan at det samlede magnetfelt modvirker partikeldrift.

- b. Hvad er en vigtig konsekvens af forskellen?

Eftersom plasmastrømmen i en tokamak er genereret vha. magnetisk induktion, og der en begrænsning på, hvor meget strøm man kan føre igennem den centrale solenoide, så er plasmastrømmen og hermed hele tokamakken tidsbegrænset. Tokamakken kan altså ikke køre uafbrudt – udelukkende på baggrund af dette. Stellaratoren bruger ikke en plasmastrøm og kan derfor køre i længere tid ad gangen end en tokamak.

Ekstraopgave A.6

- a. Hvad er Q-faktoren, og hvorfor er $Q > 1$ så vigtig?

Q-faktoren er givet ved fusionseffekten divideret med opvarmningseffekten. $Q > 1$ ville essentielt set medføre, at vi genererer mere energi, end vi bruger.

- b. Hvis vi lige nu kunne opnå $Q > 1$, kunne vi så med det samme begynde at bygge fusionskraftværker og producere bæredygtig elektricitet?

Ikke nødvendigvis desværre. For det første bruger tokamakken energi på andet end blot opvarmning. For det andet er der et energitab, når fusionsenergien – mere eller mindre varmenergi – skal konverteres til elektricitet.

Ekstraopgave A.7 og A.8

Svarene til disse opgaver varierer fra person til person, samt hvilke lande man betragter. Diskuter evt. de studerendes svar med resten af klassen.

This material has been created and distributed by FuseNet for educational purposes. This work has been carried out within the framework of the EUROfusion Consortium, funded by the European Union via the Euratom Research and Training Programme (Grant Agreement No 101052200 — EUROfusion). Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Commission. Neither the European Union nor the European Commission can be held responsible for them. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.

