

Fúziós berendezések

Modern fizikai kísérletek szeminárium

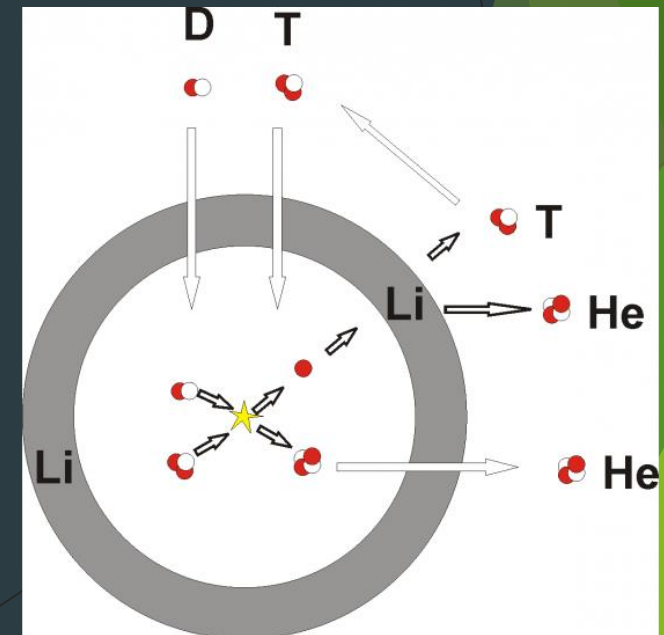
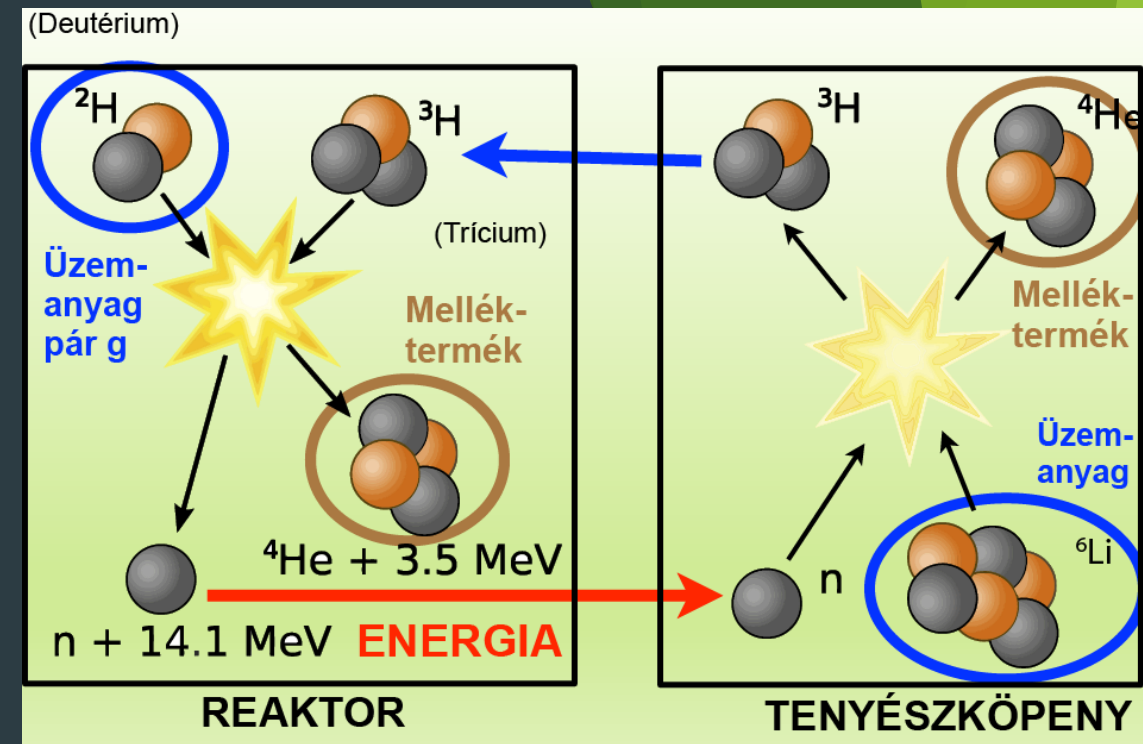
Janecskó Krisztián
Eötvös Loránd Tudományegyetem

2016.02.23.

1

Magfúzió

- ▶ Csillagok belsejében:
 - ▶ CNO-ciklus (T~MK)
 - ▶ proton-proton lánc (T~MK)
- ▶ Földi körülmények közt: (T~10⁵K)
 - ▶ $D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n + 17,6 \text{ MeV}$
 - ▶ $D + D \rightarrow {}^3\text{He} + n + 3,27 \text{ MeV}$
 - ▶ $D + D \rightarrow T + p + 4,03 \text{ MeV}$
 - ▶ $D + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p + 18,26 \text{ MeV}$
- ▶ D: Stabil izotópja H-nak; H:D = 1:6000
- ▶ T: Instabil izotópja H-nak; (T_{1/2} = 12,3 év)
 - ▶ Li a földkéreg jelentős alkotóeleme

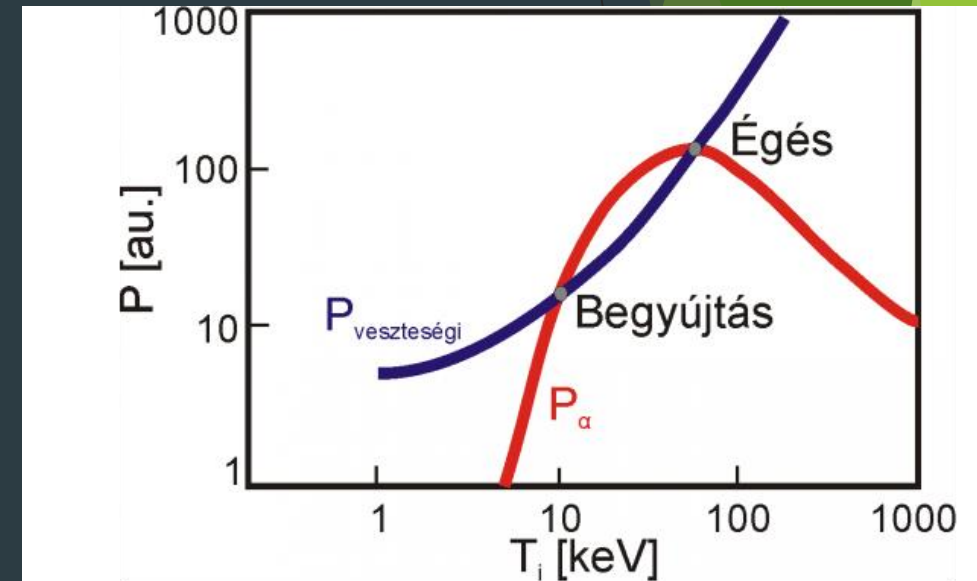


Energiatermelés fúziós reaktorban

- ▶ Fúziós reaktor energiaszorzását jellemző Q tényező:

- ▶ $Q = \frac{P_f}{P_\alpha}$ (P_f : felszabaduló fúziós teljesítmény, P_α : plazmafűtés teljesítménye)

- ▶ α -részecske fűtésnél nem kell külső plazmafűtés (begyújtás)
- ▶ Fisszióval ellentétben a folyamat nem tud megszaladni
- ▶ Égési pontban a plazma stabil állapotban van, amíg a gázösszetételt fenn tudjuk tartani



5. ábra. Az alfa fűtés és a veszteségi teljesítmény hőmérsékletfüggése. Az ábrán jelöltük a begyújtás és az égés munkapontjait.

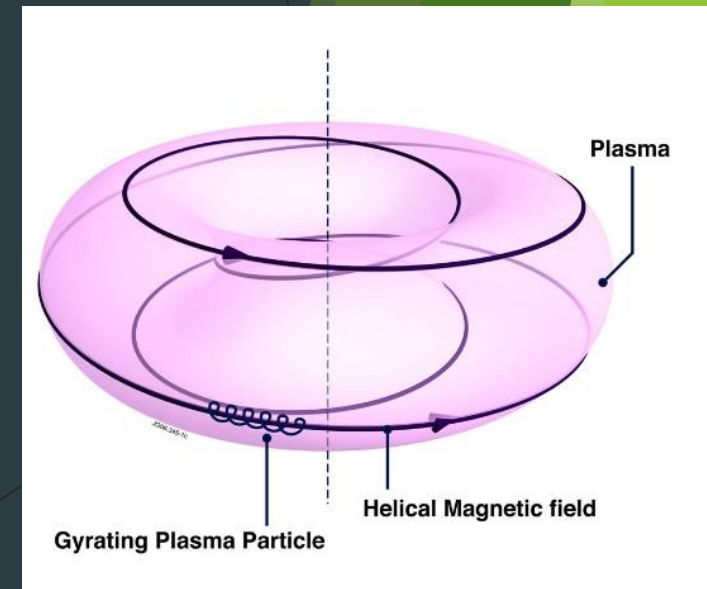
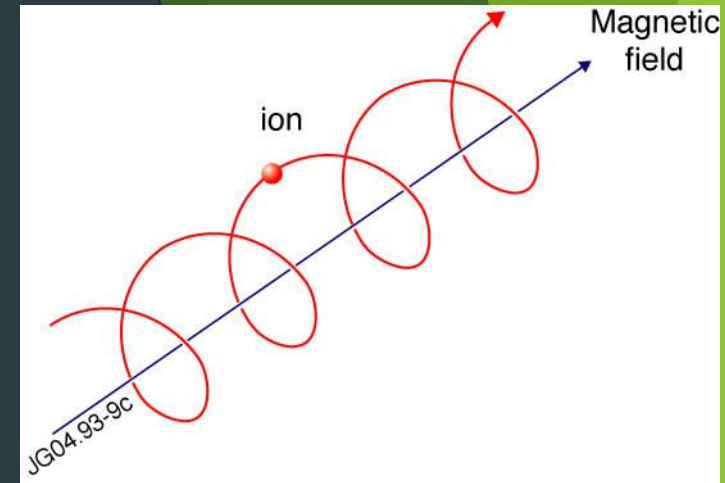
Plazma összetartása

▶ Tehetetlenségi összetartás:

- ▶ Nagy sűrűségű plazma (összenyomás: lézerekkel, RTG-sugárral, ion-nyalábokkal)
- ▶ Rövid ideig
- ▶ Csak a tehetetlenségük miatt maradnak együtt a részecskék

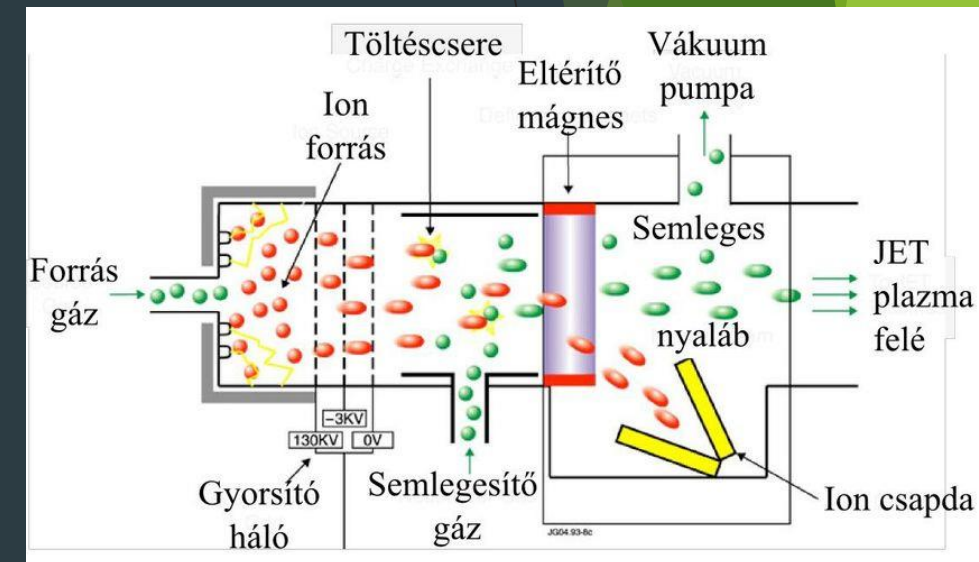
▶ Mágneses összetartás:

- ▶ Lorentz-erő csavarvonalra kényszeríti a töltött részecskéket (Larmor pálya)
- ▶ Tórusz geometria + helikális mágneses térszerkezet



Plazmafűtés

- ▶ Ohmikus fűtés:
 - ▶ Plazmaáram a plazmát elektromos ellenállása miatt felfűti
 - ▶ Plazmaáramot transzformátorral hajtják
 - ▶ Csak tokamakokban használják
- ▶ Semleges atomnyaláb fűtés:
 - ▶ Nagy energiájú semleges atomok (pl. Deutérium) belövése a plazmába
 - ▶ Technika: először ionizálják a semleges atomokat, felgyorsítják, majd újra semlegesítik
 - ▶ Fűtés mellett üzemanyag pótlás
- ▶ Nagyfrekvenciás fűtés:
 - ▶ Plazmába irányított nagyfrekvenciás EM hullámok rezonáns kölcsönhatása elektronokkal és ionokkal



Üzemanyag-utánpótlás

▶ Gázbeeresztés

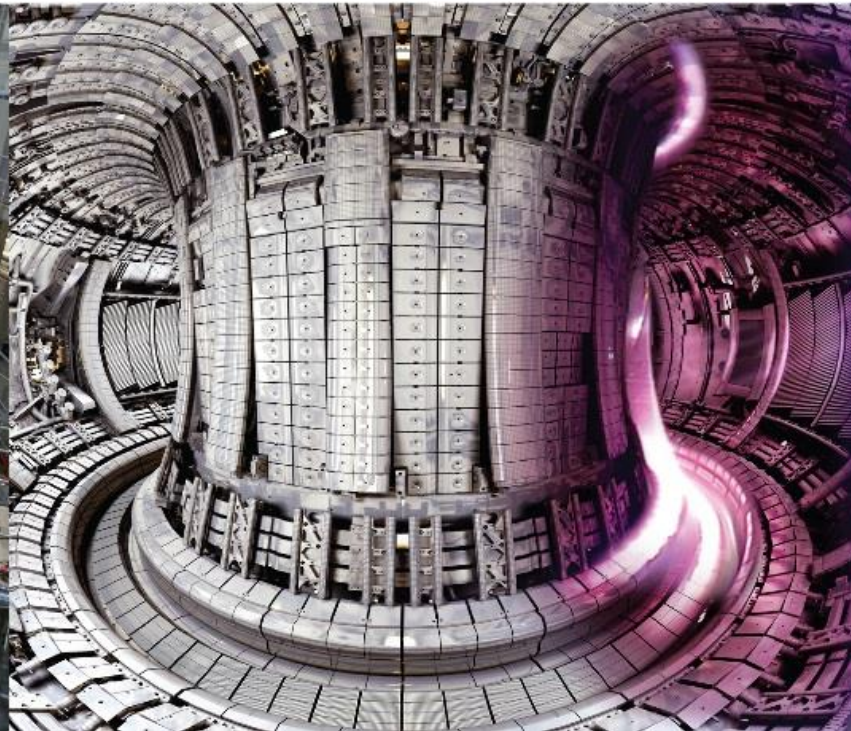
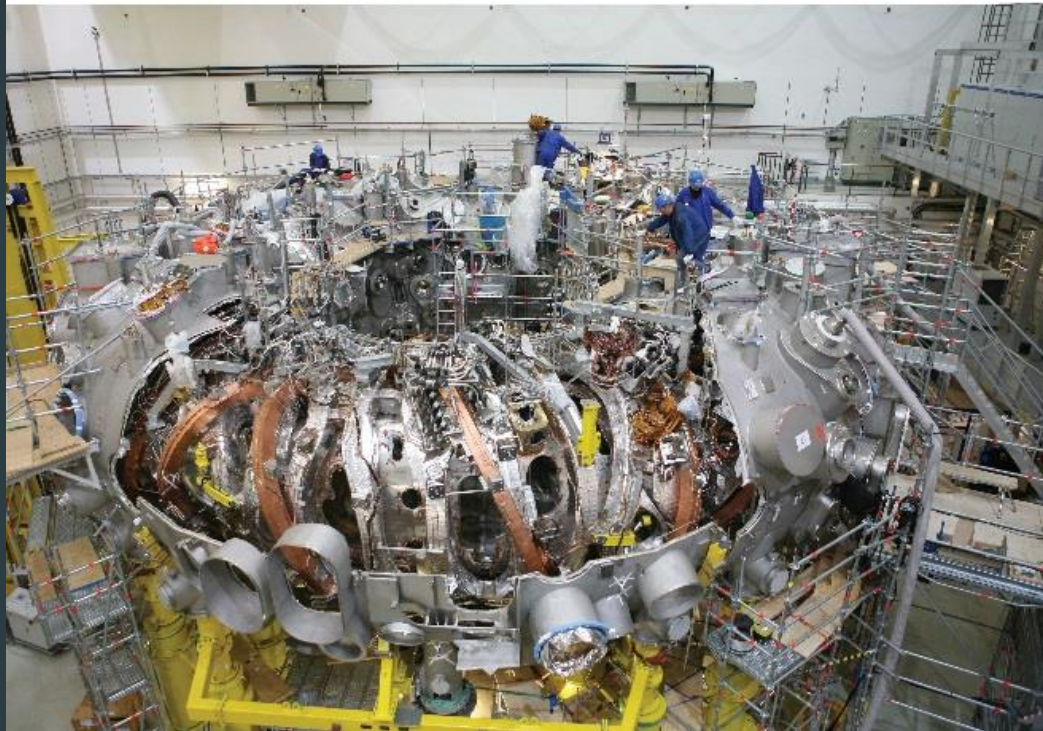
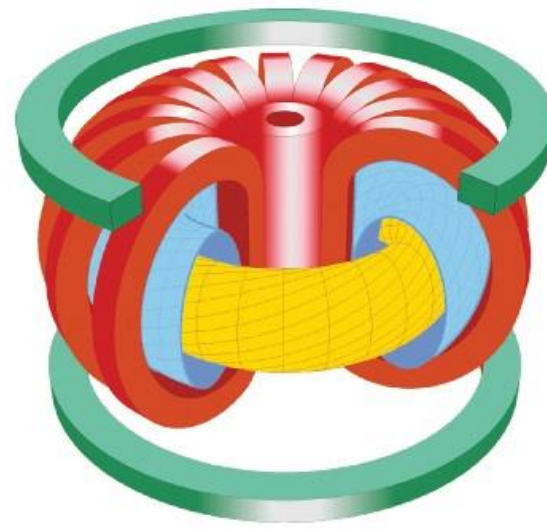
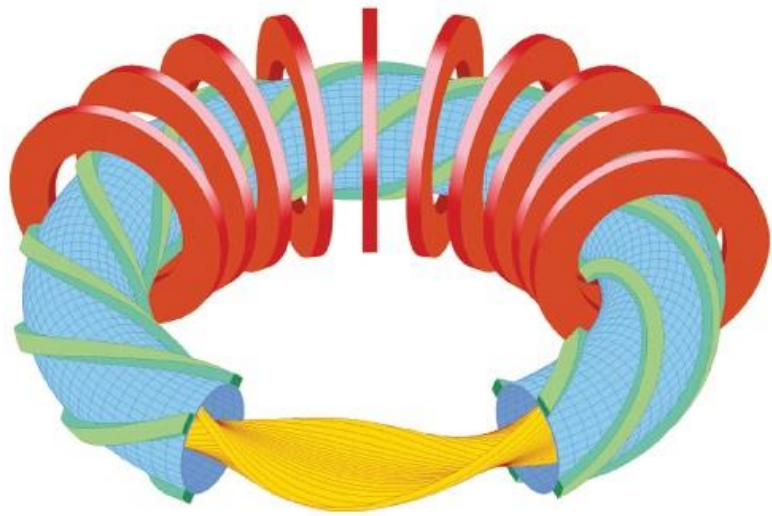
- ▶ A vákuumkamrába egy szelepen a plazma anyagával megegyező gázt eresztenek be
- ▶ A beengedett gáz a plazma szélénél ionizálódik, a belsejébe nem
- ▶ Csak a plazma felületén növeli meg a sűrűséget

▶ Pelletbelövés

- ▶ Deutériumból pellet létrehozása
- ▶ Pellet előállítás: a gázt kifagyasztják egy hideg felületre, a kapott anyagot 1-2 mm átmérőjű rúddá préselik, a rudakat felszeletelik, centrifugával felgyorsítják, majd egy csövön belövik a plazmába

Tokamak és sztellarátor

- ▶ Jelenleg két ígéretesnek tűnő típusok
- ▶ Lényegi eltérés:
 - ▶ Tokamakban áram hajtotta plazmával csavarják meg a mágneses teret a plazma összetartásához
 - ▶ Sztellarátorokban bonyolult mágneses tekercsrendszer csavar a mágneses téren



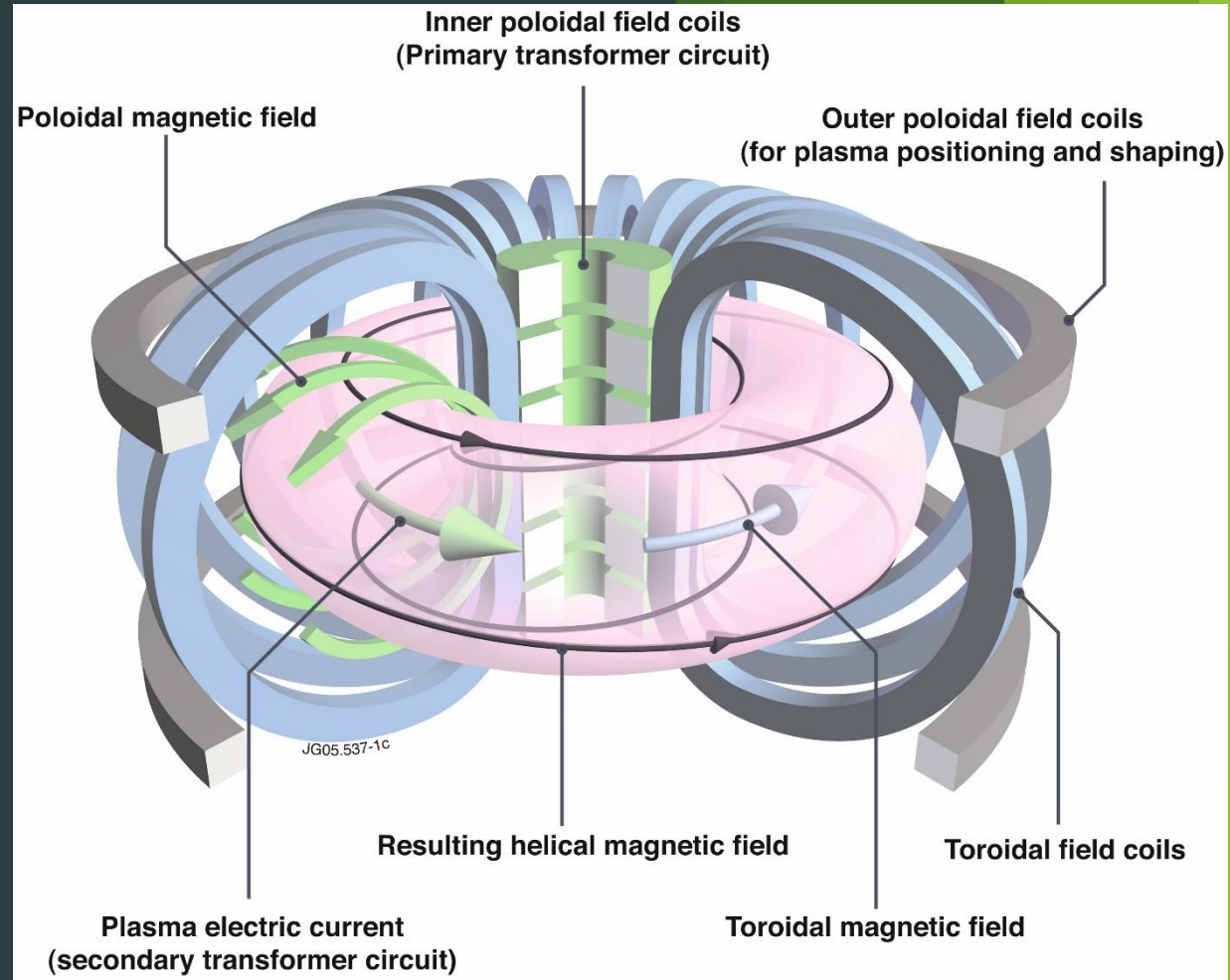
Tokamakok elődje

▶ Pinchek:

- ▶ Pinch-effektus folyékony fémekben: ha áram folyik a fémben, a fém-folyadékban sugár irányú összehúzó erők hatnak
- ▶ Plazmán átfolyatott áram is radiálisan összetartja a plazmát
- ▶ Tórusz geometria a végeken levő veszteségek elkerülésére
- ▶ Alapból instabil, de toroidális mágneses térrel stabilizálható
- ▶ Elképzelés: helikális tér előállítása külső toroidális tér és a plazma közepén egy dróton átküldött áram szuperpozíciójával
- ▶ Nagy sűrűségű plazma

Tokamak

- ▶ Az áram hajtása magában a plazmában
- ▶ Híg plazma
- ▶ A plazmaáram által keltett poloidális mágneses tér és a külső tekercsek által keltett toroidális mágneses tér eredője adja a helikális teret
- ▶ Plazmaáram révén Ohmikus-fűtés
- ▶ Hátrány: plazmaáram nem tartható fenn akármeddig, ugyanis ahhoz a transzformátor primer tekercsében az áramot végtelenségig növelni kéne



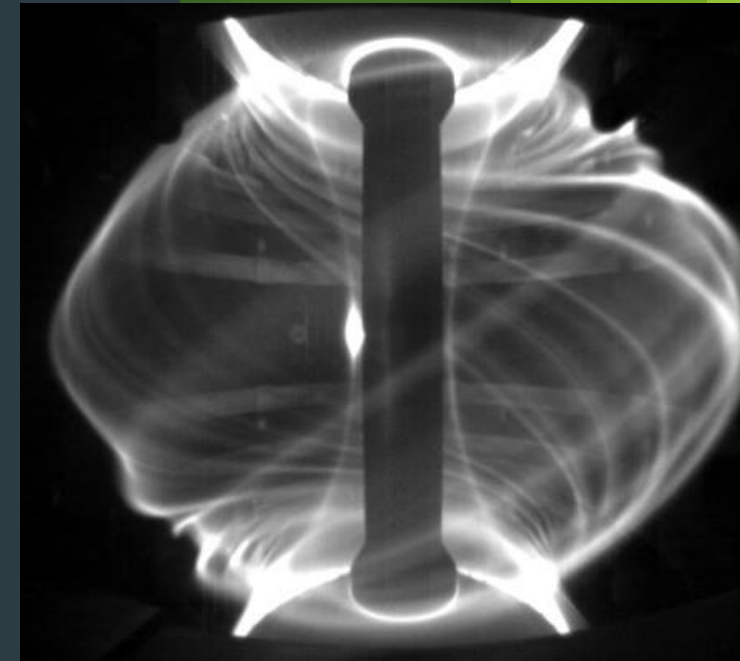
ASDEX Upgrade

- ▶ Németország, 1991-
- ▶ $R = 1,65 \text{ m}$; $a = (0,5 - 0,8) \text{ m}$
- ▶ $B = 3,1 \text{ T}$
- ▶ Először megfigyelt H-mód (nagy összetartású mód)
- ▶ Először megfigyelt ELM-ek (plazmaszéli módusok)
- ▶ Tapasztalat: az ELM-ek ismétlődési frekvenciája fordítottan arányos az ELM során a plazmából kilépő anyag mennyiségével



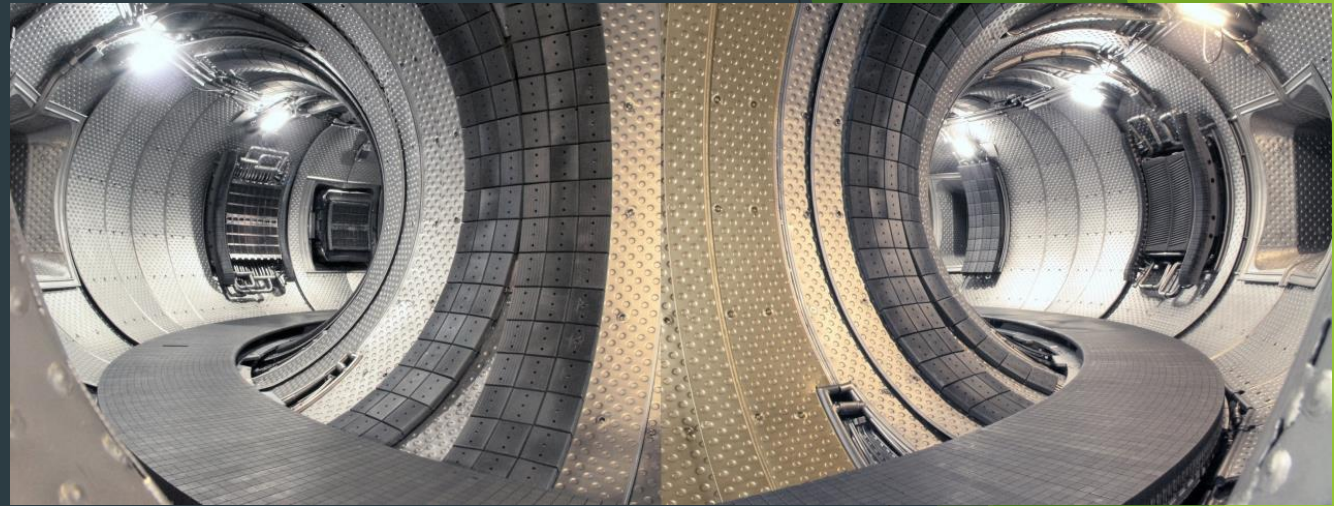
MAST

- ▶ UK, 1999-2013
- ▶ $R = 0,9 \text{ m}; a = 0,6 \text{ m}$
- ▶ $B = 0,55 \text{ T}$
- ▶ ST (szférikus tokamak) kísérleti eszköz
- ▶ A tórusz kis és nagysugarának aránya kicsi
- ▶ Közel gömb alakú plazma
- ▶ Ugyanazon B tér mellett nagyobb plazmanyomás, mint tórusz alakú tokamakban
- ▶ Jó plazmadiagnosztikai felszereltség



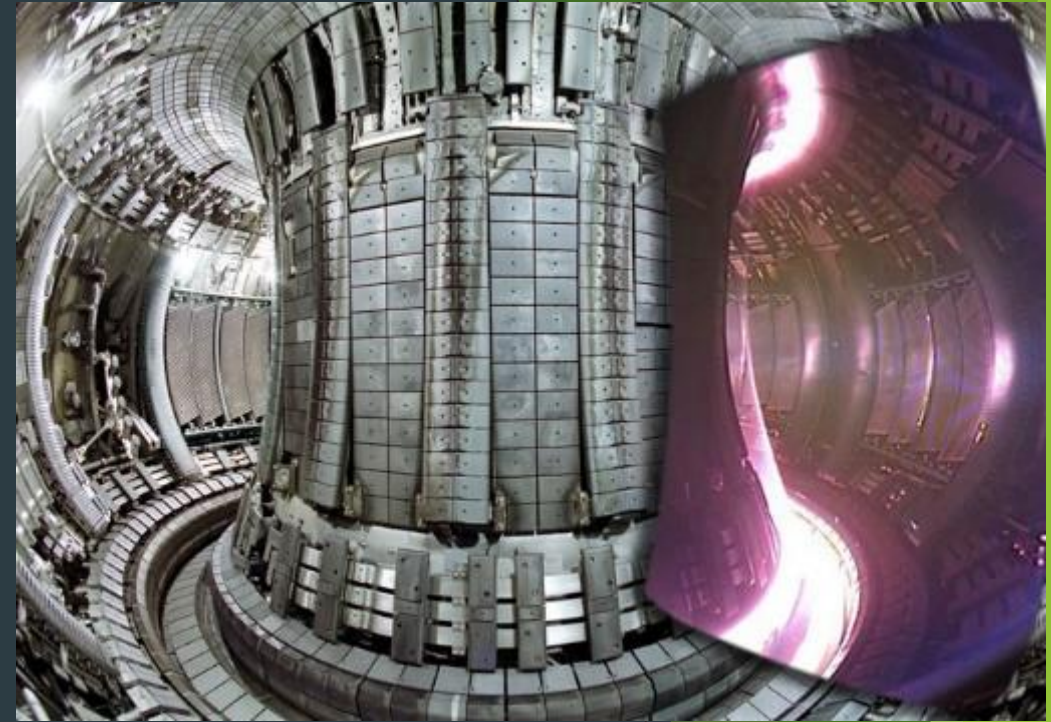
Tore Supra

- ▶ Franciaország, 1988-
- ▶ $R=2,25$ m; $a=0,7$ m
- ▶ $B=4,5$ T
- ▶ Toroidális tértekercsek szupravezető anyagból
- ▶ Célja: minél hosszabb plazmakisülések produkálása
- ▶ Világrekord: 6,5 perces kisülés (2003)



JET

- ▶ UK, 1984-
- ▶ $R = 2,96 \text{ m}$; $a = (1,25 - 2,1) \text{ m}$
- ▶ $B = 3,45 \text{ T}$
- ▶ Jelenleg a Földön működő legnagyobb tokamak
- ▶ Nemzetközi összefogással
- ▶ A kor legjobb diagnosztikai eszközeivel felszerelve



JET



▶ Kísérleti célok:

▶ Plazmaösszetartás vizsgálata

- ▶ Korábbi megfigyelés, hogy a fűtési teljesítmény növelésével a plazma összetartási-ideje csökkent

▶ Instabilitások vizsgálata

▶ Plazma-fal kölcsönhatás vizsgálata

▶ Fúziós energiatermelés:

- ▶ Több kísérlet minél nagyobb Q energiaszorzási tényező elérésére
- ▶ Maximálisan elért érték: $Q = 0,6$ ($t = (1 - 2)$ s ideig sikerült megtartani)

Sztellarátorok

- ▶ Nincs áramhajtás a plazmában
- ▶ Plazma összetartásához megcsavart mágneses tér
- ▶ Pontosan megtervezett mágneses tekercsrendszer kell
- ▶ Lineáris berendezésekből fejlődtek ki
 - ▶ Mágneses tükör erőnek köszönhetően a nagyobb mágneses terű tartományokból a kisebbek felé terelődnek a töltött részecskék
- ▶ Már az első berendezés felkeltette a németek figyelmét
- ▶ 1961-ben megindult a német Wendelstein-projekt



Wendelstein 7-X

- ▶ Németország, 2015-
- ▶ $R = 5,5 \text{ m}$; $a = 0,53 \text{ m}$
- ▶ $B = 3 \text{ T}$
- ▶ A Földön működő legnagyobb sztellarátor
- ▶ 5-fogású szimmetria
- ▶ He plazma a berendezés előkészítésekor
- ▶ H és D plazmák tesztelése, 10s -os kisülésekkel
- ▶ Terv:
 - ▶ 4 év után újabb fejlesztés, felkészítve 30min -es kisülésekre

