

Bevezetés a fúziós plazmafizikába 3.

Mágneses összetartás konfigurációk

Dr. Pokol Gergő



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BME NTI

Bevezetés a fúziós plazmafizikába

2019. szeptember 24.

Tematika, időbeosztás

Dátum	Előadó	Cím
Szeptember 10	Pokol	Energiatermelés, fúziós reaktor felépítése, Lawson-kritérium, plazma alapok.
Szeptember 17	Pokol	Töltött részecskék ütközésmentes mozgása mágneses térben.
Szeptember 24	Pokol	Mágneses összetartás: konfigurációk.
Október 1	Veres	Termodinamikai egyensúly, ionizációs és sugárzási folyamatok plazmában.
Október 8	Pokol	Bevezetés mágnesezett plazmák elméleti leírásába: kinetikus elmélet, MHD.
Október 15	Pokol	Részecskék ütközése plazmában: ellenállás, transzport.
Október 22	Földes ?	Mikrorobbantásos fúzió.
Október 29	Pokol	Mágnesesen összetartott plazma egyensúlya, instabilitások.
November 5	Zoletnik	Laboratóriumi kísérletek: plazma előállítás, fűtés, plazma-fal kapcsolat.
November 12		BME TDK Konferencia
November 19	Zoletnik	Fúziós diagnosztika.
November 26	Zoletnik	Aktuális eredmények mágneses összetartású berendezéseknél.
December 3	Veres ?	Fúziós Útiterv
December 10	Raczkevi, Kedves, Aladi	Részecskegyorsítás lézerplazmával

Előző előadáson

<i>Erő/drift</i>	<i>q függ.</i>	<i>irány</i>	<i>nagyság</i>
$E \times B$	-	$\mathbf{E} \times \mathbf{B}$	$\frac{E}{B}$
polarizációs	+	$\dot{\mathbf{E}}$	$\frac{\omega}{\omega_c} \frac{E}{B}$
grad B	+	$\nabla \mathbf{B} \times \mathbf{B}$	$W_{\perp} \frac{\nabla B}{B}$
görbületi	+	$\mathbf{R} \times \mathbf{B}$	$W_{\parallel} \frac{1}{RB}$
tükör erő	-	\mathbf{B}	$\frac{W_{\perp}}{B} \frac{\partial B_z}{\partial z}$

Óravázlat

1. Mágneses összetartás konfigurációk
2. Mágneses tükrök és egyéb nyitott rendszerek
3. Toroidális berendezések
4. Tokamakok
5. Sztellarátorok

A mágneses összetartás elve

Alapelv: A töltött részecskék a mágneses erővonalak mentén mozognak Larmor-pályákon, **egy megfelelő mágneses tér össze tudja őket tartani.**

Két alapjaiban különböző konfiguráció:

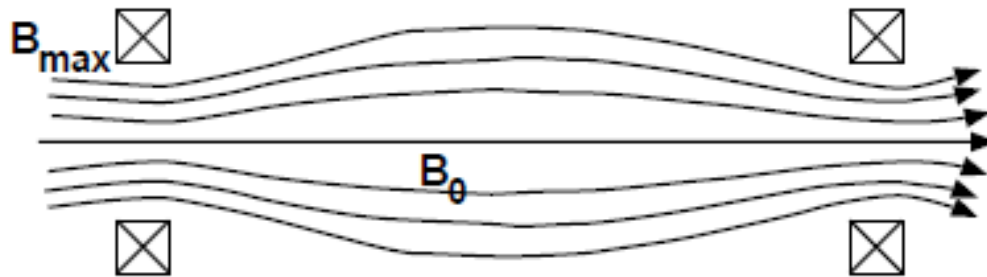
1. **Nyílt rendszerek** (a mágneses erővonalak elhagyják az összetartott tartományt)
 1. Mágneses tükrök
 2. Konkáv görbületű geometriák
2. **Zárt rendszerek** (a mágneses erővonalak az összetartott tartományon belül maradnak)
 1. Tokamakok
 2. Sztellarátorok

Mágneses tükrök

+ Közelítőleg homogén mágneses tér a tengely körül

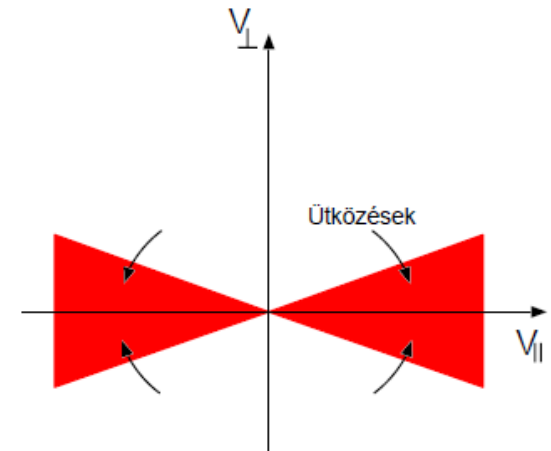
- Veszteségi kúp

- Instabil



$$\frac{B_0}{B_{\max}} = \sin^2 \Theta_m = \frac{1}{R_m}$$

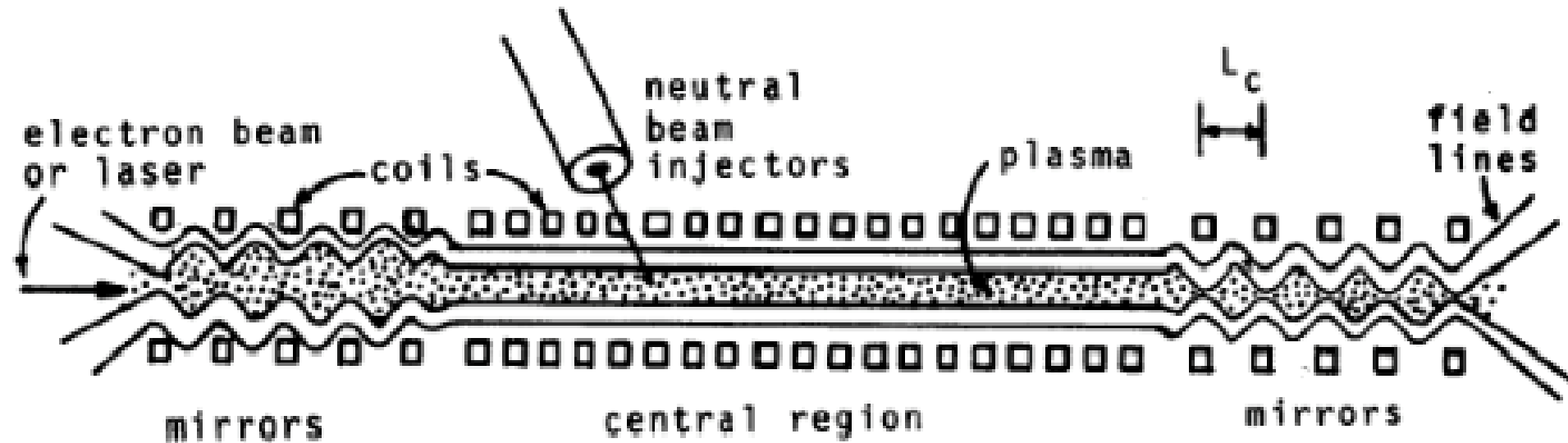
A veszteségi kúp részecskéinek összetartása:



1. Tandem tükrök
2. Többszörös tükrök

Többszörös tükrök és egyéb trükkök

1. Többszörös tükrök a végeken → az ütközések minden tükörben **kiszórják a részecskéket a veszteségi kúpból** → **diffúzív transzport** L_c skálahosszal
2. **Fűtéssel növelik a pálya szögét a mágneses térhez képest**



A stabilitás is problémás a pozitív (konvex) mágneses erővonal görbület miatt!

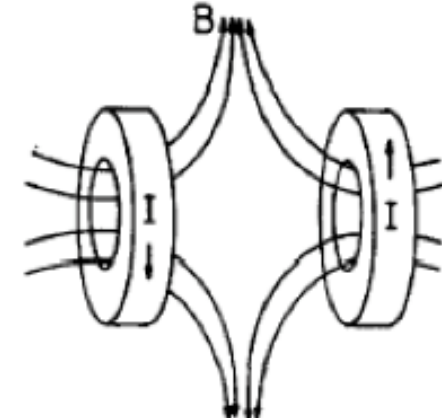
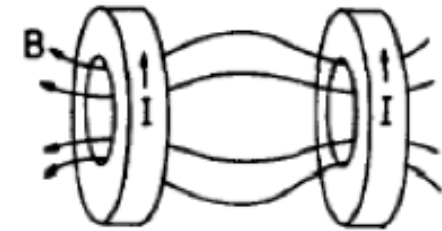
Konkáv görbületű geometriák

+ Sabil konfiguráció

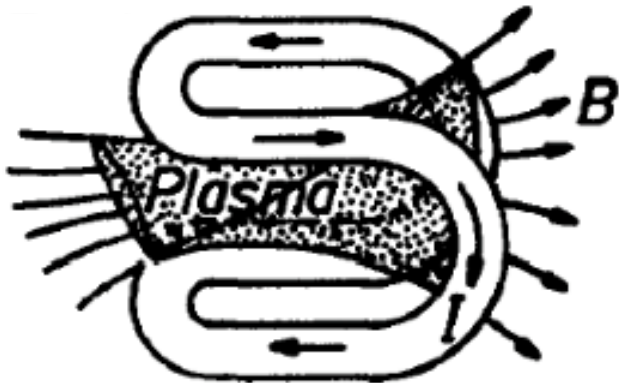
- $B=0$ tartományok

→ a mágneses momentum nem invariáns!

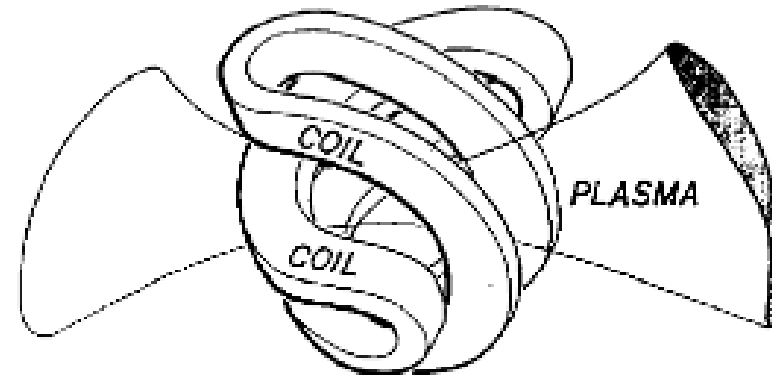
- Erővonalmenti veszteségek!



baseball tekercs



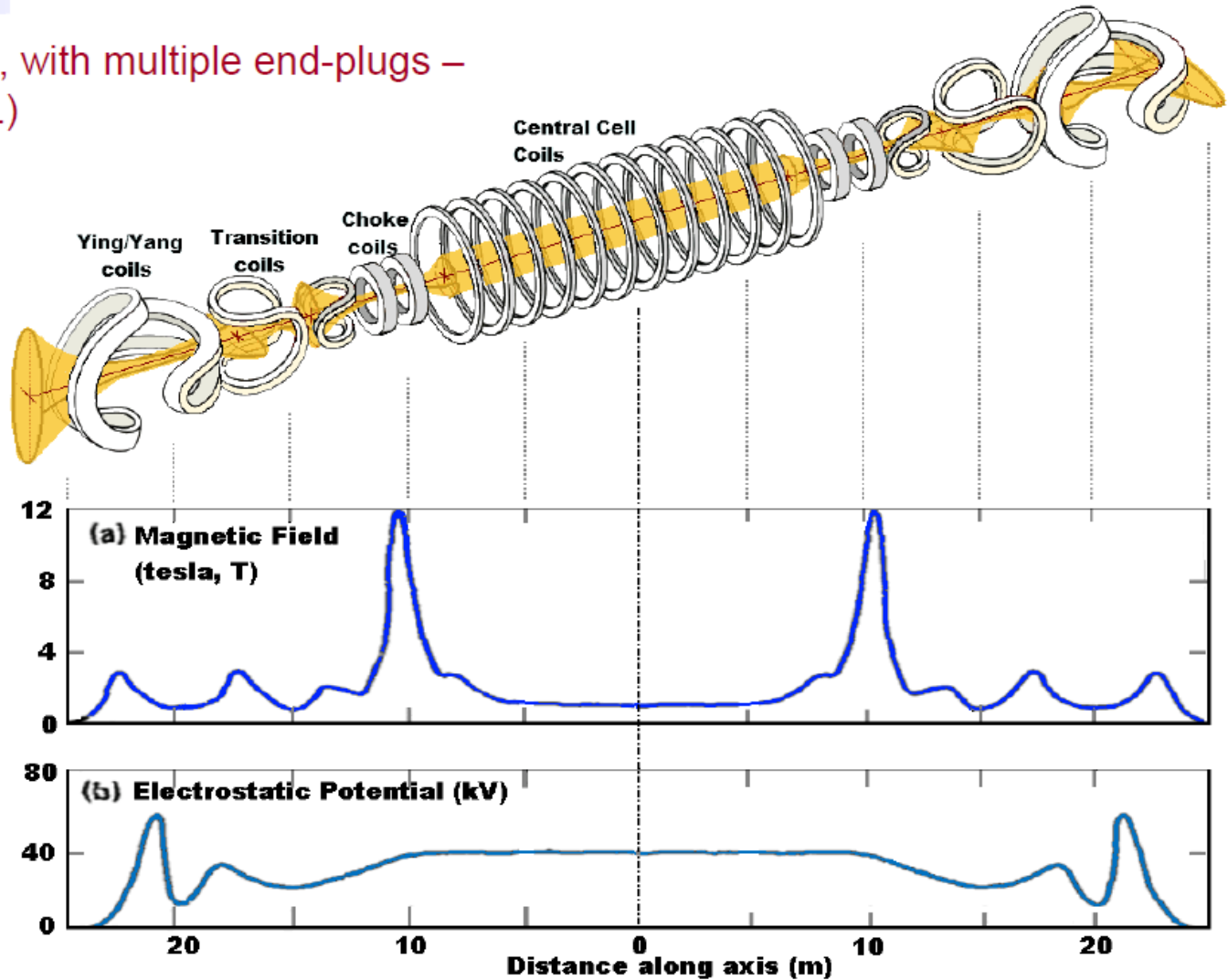
Jin-jang tekercs





Mirror machines got complicated...

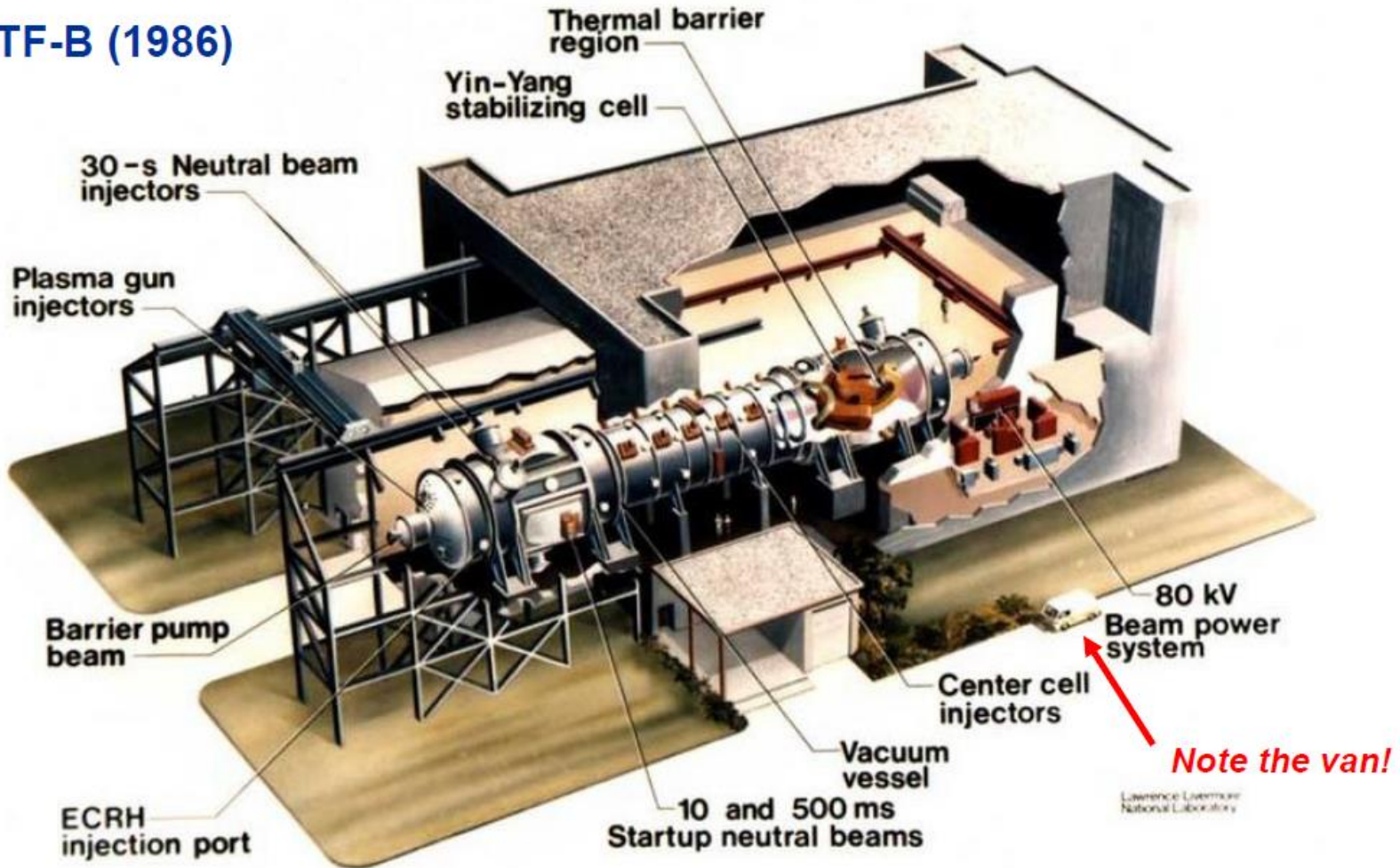
Tandem mirror, with multiple end-plugs – **MFTF-B (LLNL)**





Mirror machines got complicated...

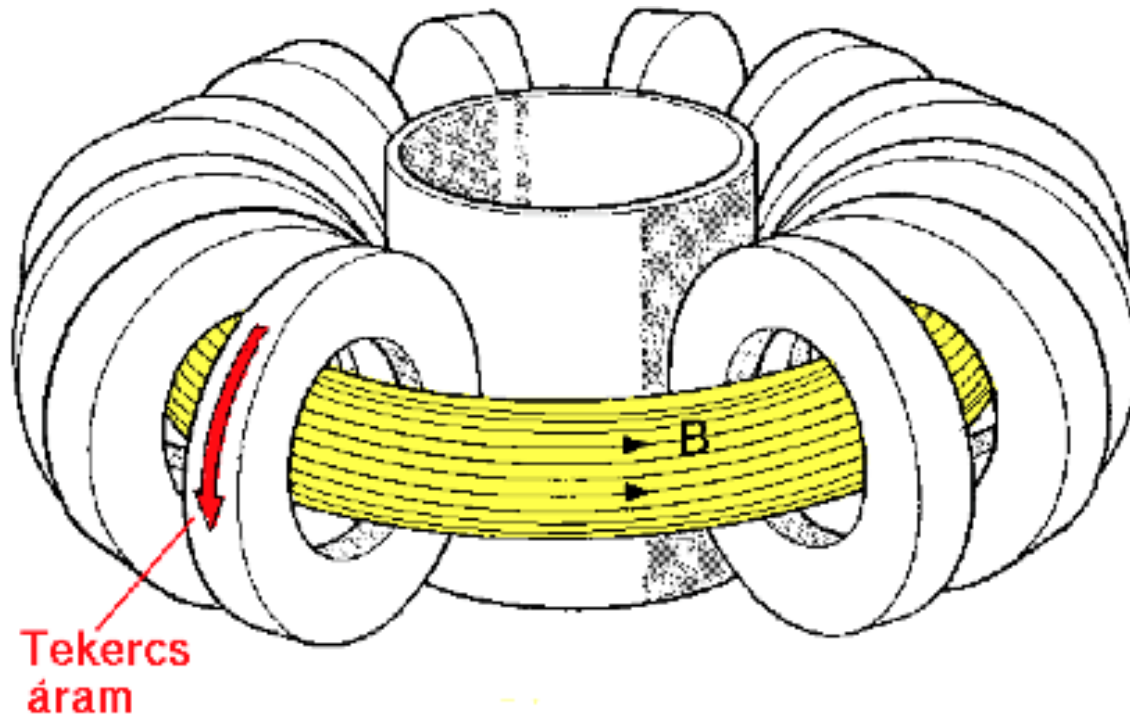
MFTF-B (1986)



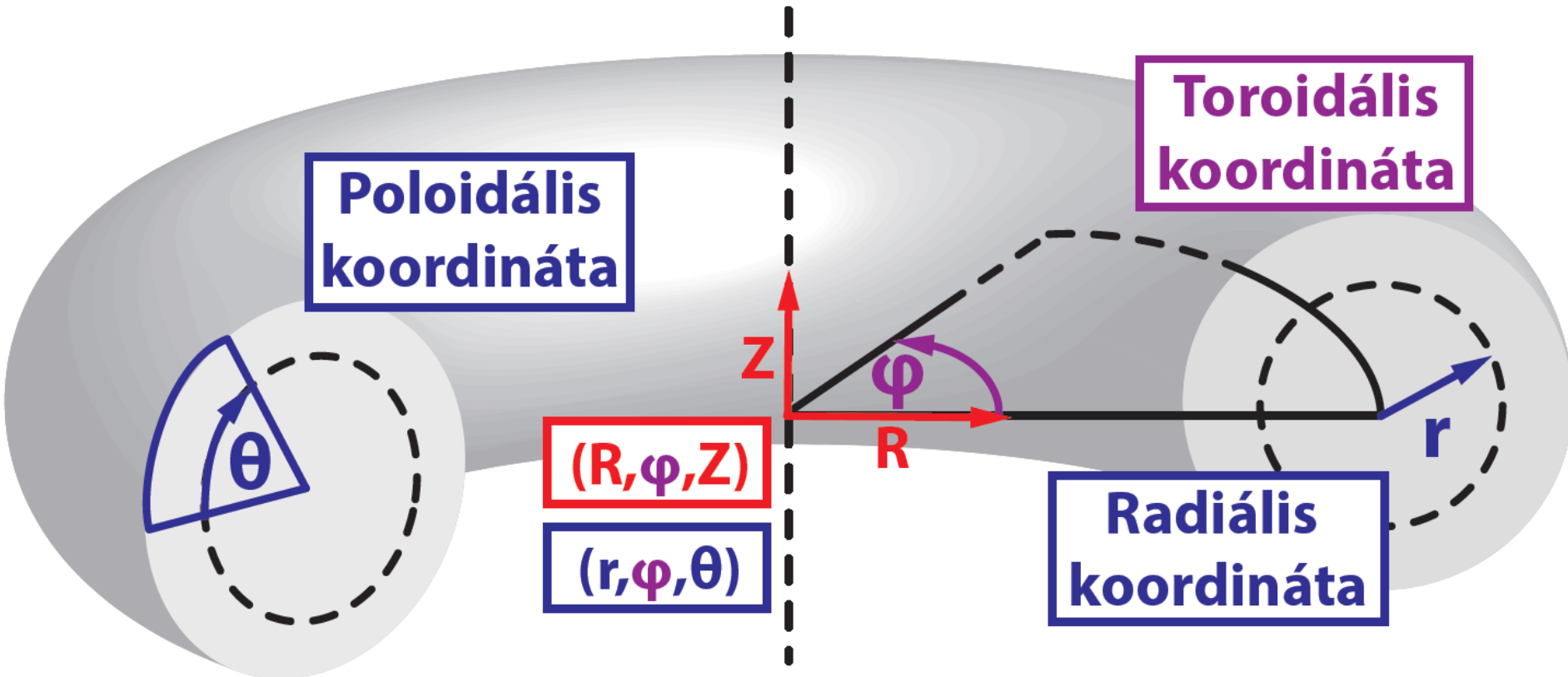
Toroidális berendezések

+ Nincsenk veszteségek az erővonalak mentén

- Nemhomogén mágneses tér!



Toroidális koordinátarendszerek



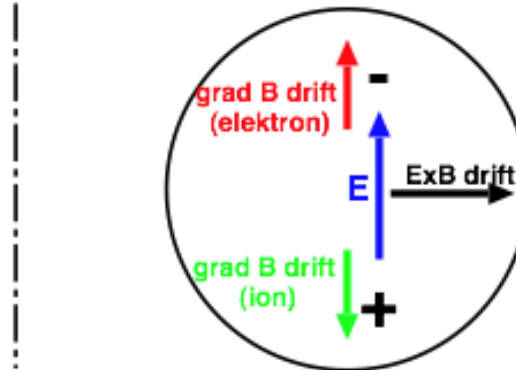
R_0 : nagy sugár

a : kis sugár

$A = R_0/a$: sugárarány

$\varepsilon = a/R_0$: inverz sugárarány

Driftek toroidális geometriában



A görbületi és gradB drift elkerülhetetlen.

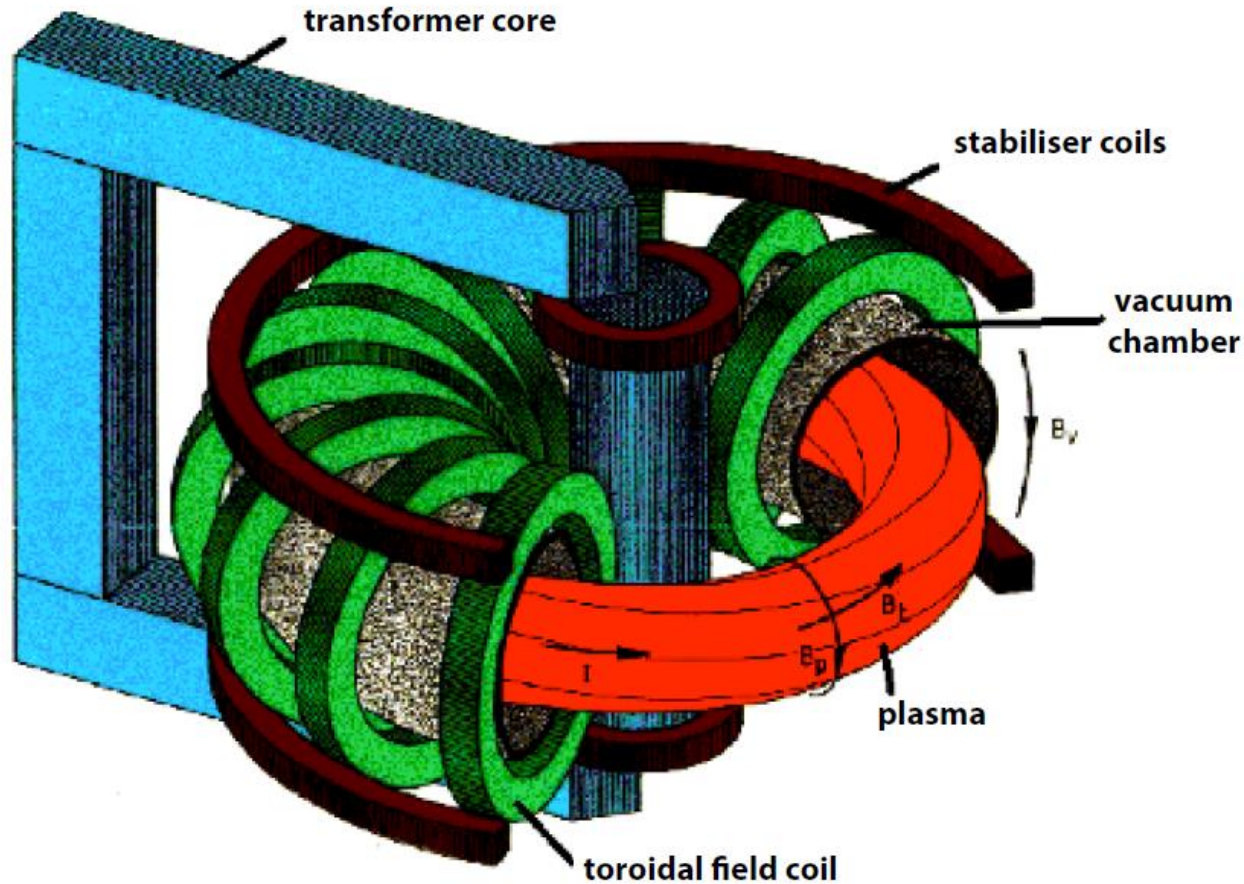
Megoldás: az **elektromos tér rövidre zárása** az alsó és felső tartomány erővonalakkal való összekötésével.

→ **Helikálisan felcsavart erővonalrendszer.**

Elérhető:

1. Külső tekercsekkel → **szteLLarátor**
2. Toroidális plazmaárammal → **tokamak**

Tokamak



Szovjet találmány: Tamm és Sakharov 1950'

Тороида**ль**ная **к**амера с **м**агнитными **к**атушками

Helikálisan felcsavart erővonalrendszer

Minden erővonal egy tórusz alakú **mágneses felületre** csavarodik.

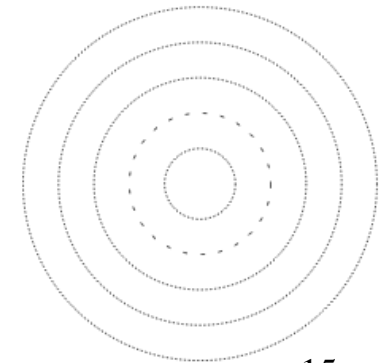
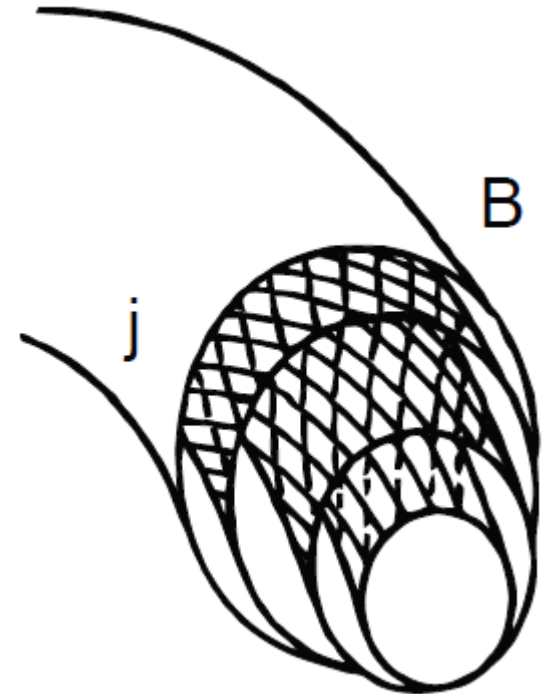
A mágneses felületek **egymásba vannak ágyazva**.

A **transzport gyors a mágneses felületeken**
 → a plazmaparaméterek kiegyenlítődnek.

Poincaré-ábrák:

Az erővonal metszéspontjait jelöli egy poloidális síkkal.

A mágneses geometriát és topológiát ábrázolja.



A helikálisan felcsavart toroidális térszerkezet jellemzése

A mágneses erővonalak helikális csavarodását egy mágneses felületen jellemezhetjük a **biztonsági tényezővel** (q) vagy a **forгатási leképezéssel** (ι).

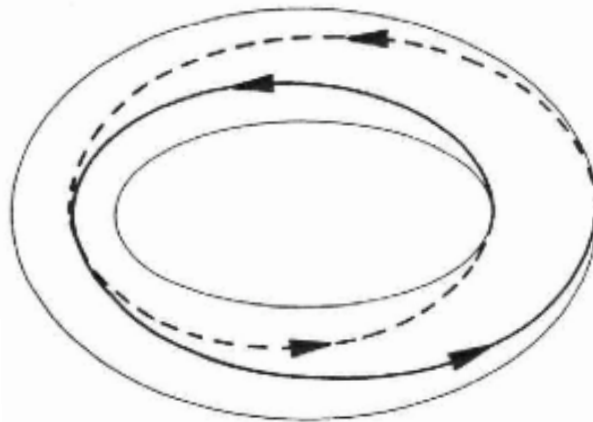
Biztonsági tényező: Egy teljes poloidális körbeforduláshoz szükséges toroidális körbefordulások száma (lehet tört is).

$$q = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum \phi_n}{\sum \vartheta_n}$$

Forгатási leképezés: ι = poloidális elfordulás egy toroidális körbefordulás alatt, $\iota = \iota / 2\pi$

Nagy sugárányú
cirkuláris tokamakra:

$$q(r) \simeq \frac{r}{R_0} \frac{B_\phi}{B_\theta}$$

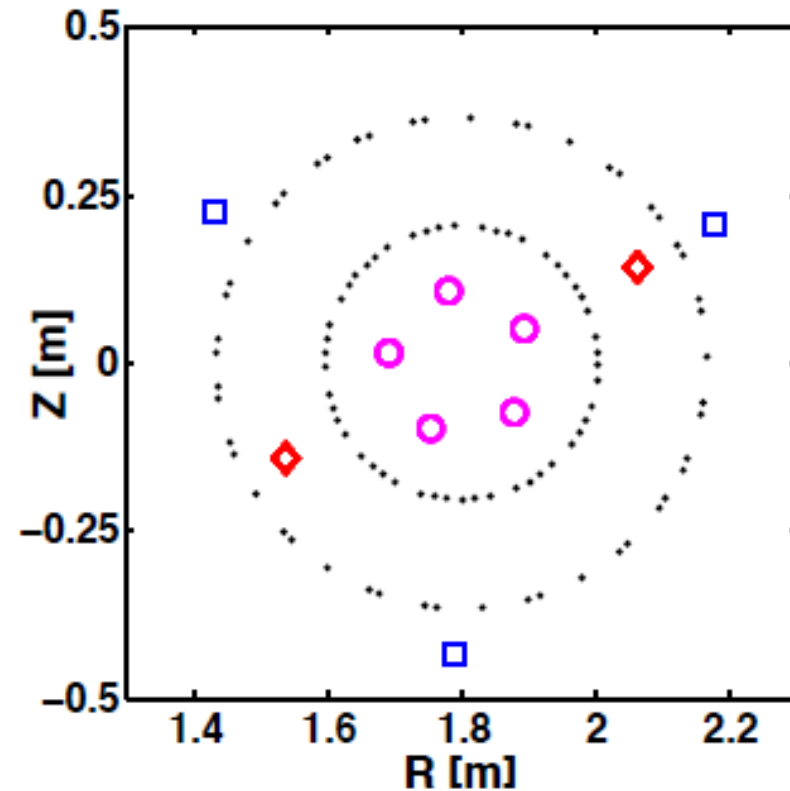
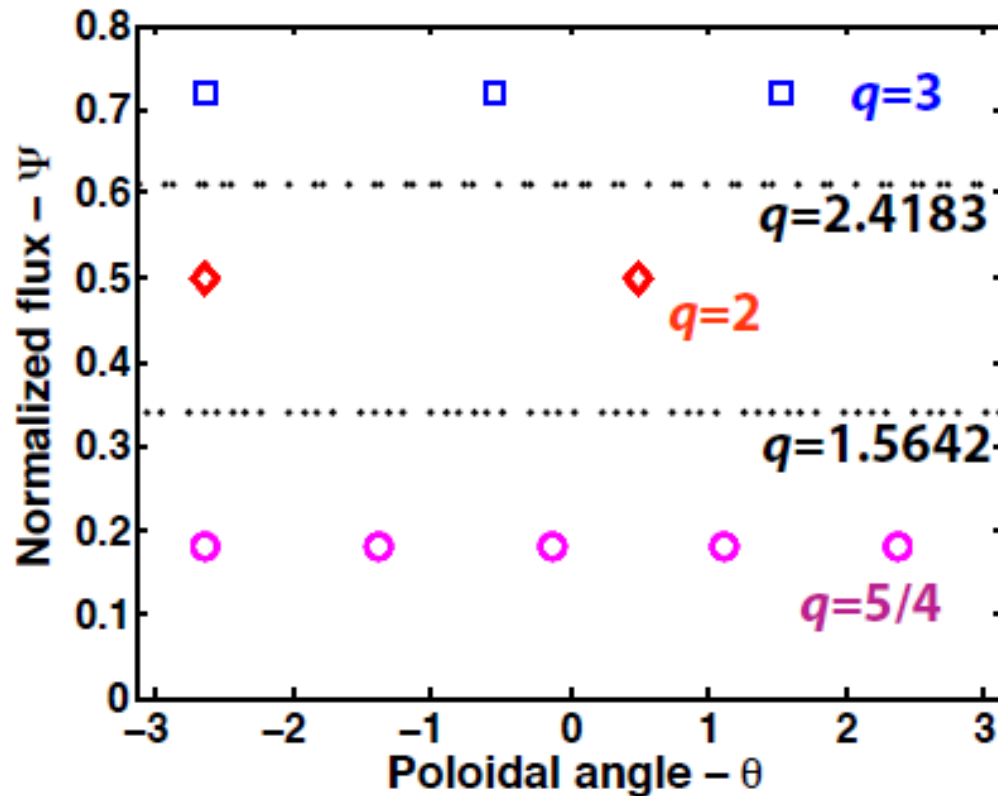


$$q \cdot \iota = 1$$

Poincaré-ábrák

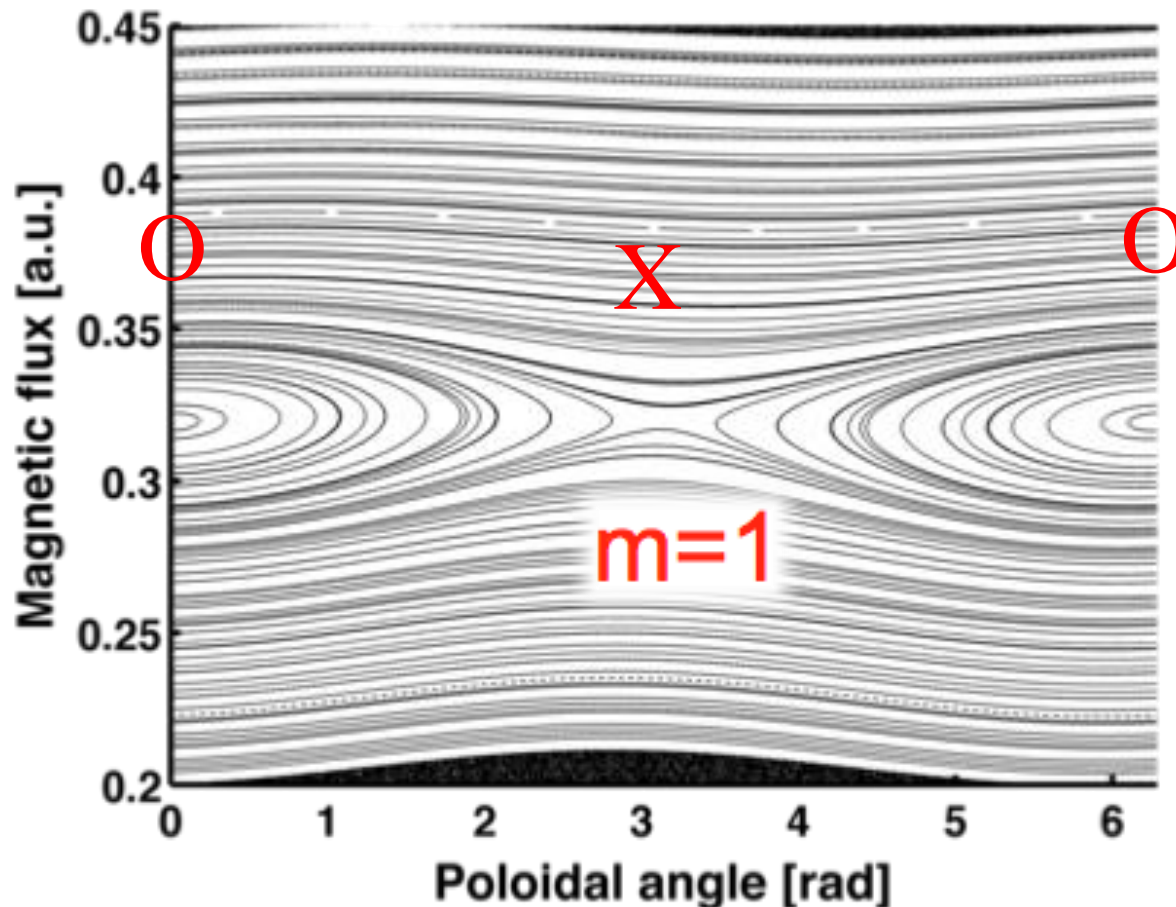
A mágneses geometria és topológia, valamint a racionális felületek ábrázolására használt legáltalánosabb eszköz.

Különböző koordinátarendszerekben ábrázolható.



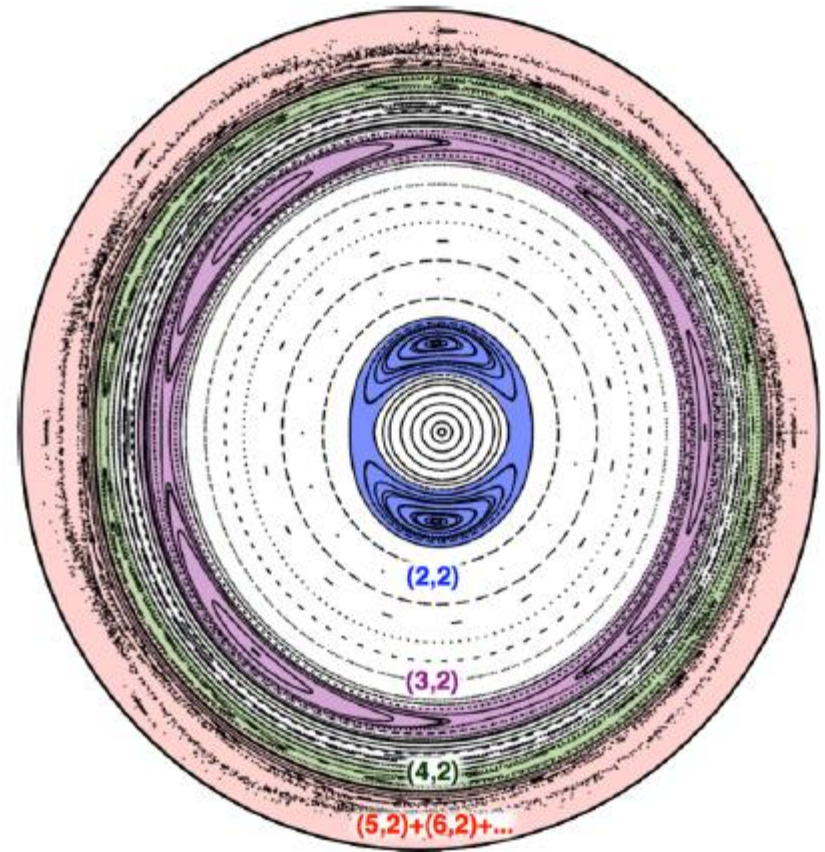
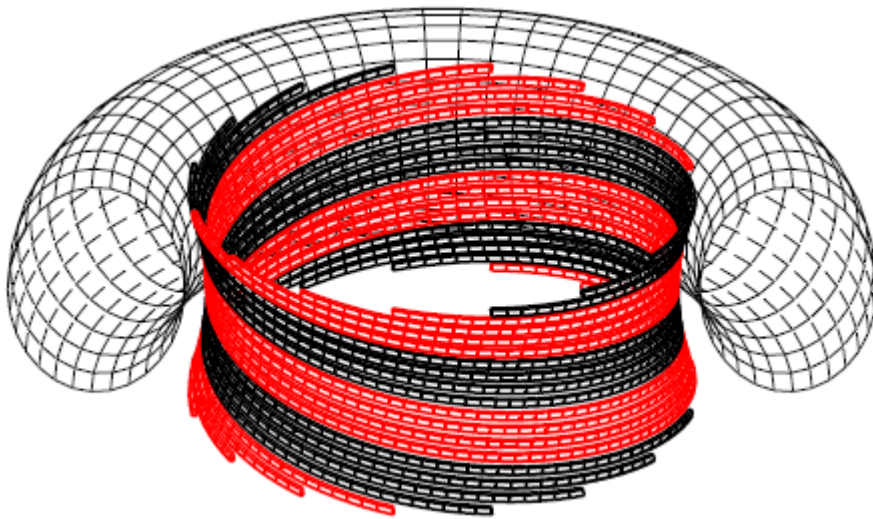
Mágneses szigetek

Racionális felületeken rezonáns perturbációk mágneses szigeteket okozhatnak a következő térbeli szerkezettel: $\sim \sin(m\vartheta + n\varphi)$, ahol $\frac{m}{n} = q(r_0)$.



TEXTOR DED

A Dinamikus Ergodikus Divertor a plazma szélén ergodikus tartományt hoz létre.



Mágneses nyírás

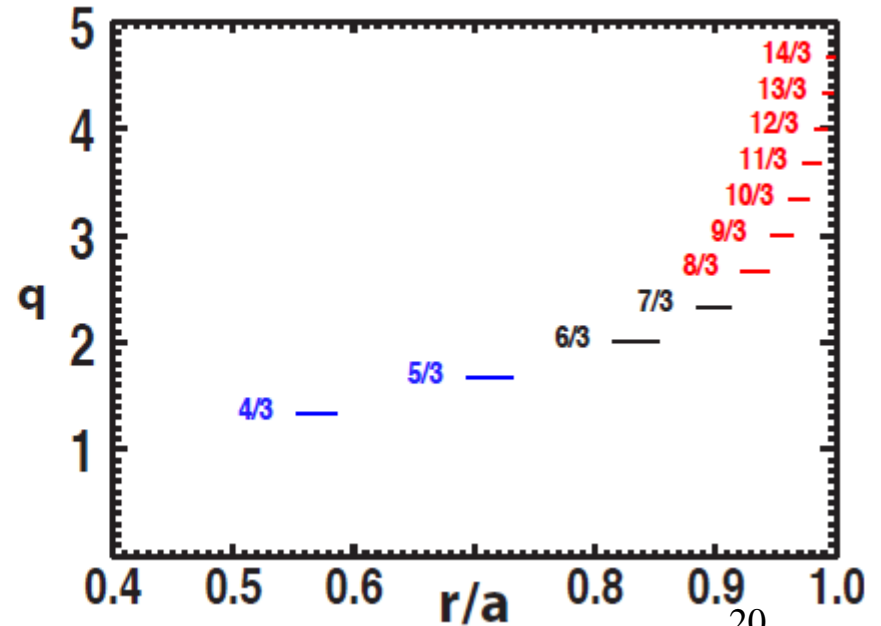
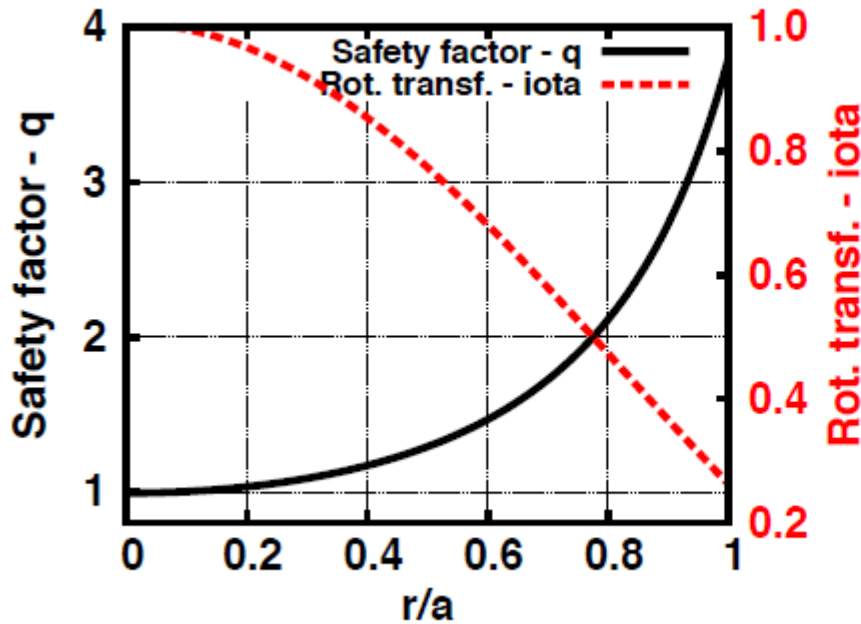
A sziget szélessége a mágneses nyírástól függ:

$$B_p = \frac{\mu_0}{2\pi r} \int_0^r j(r') 2\pi r' dr'$$

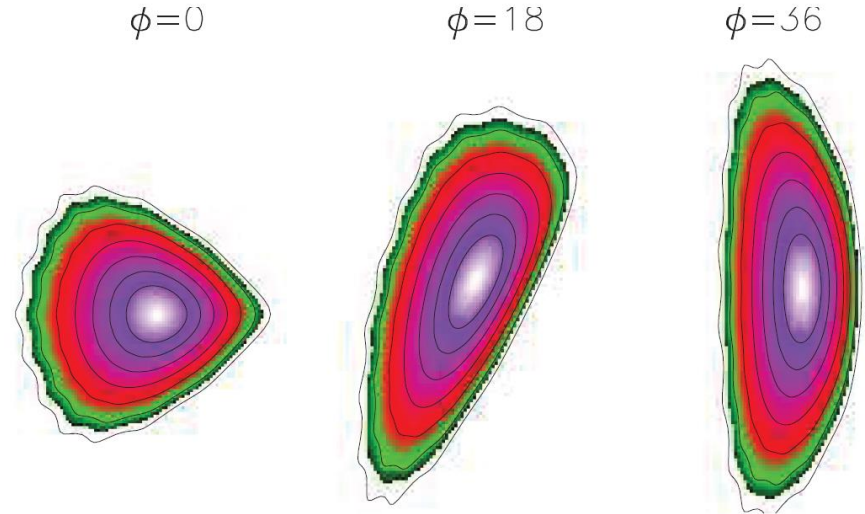
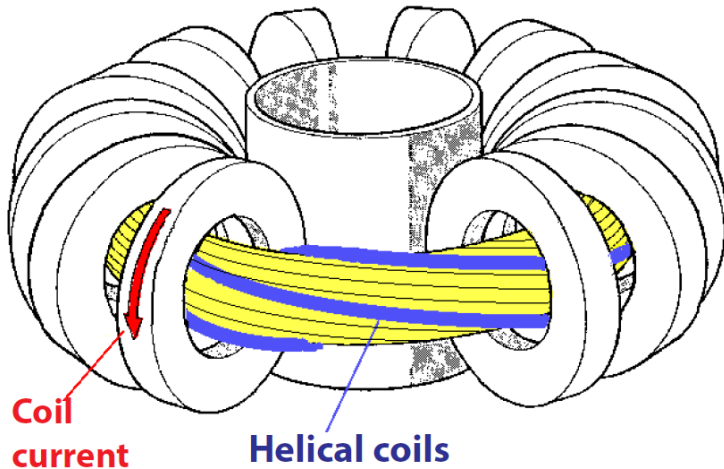
$$\delta r \approx \frac{B'}{dB_p/dr}$$

Ha különböző szigetek átfednek, **ergodikus tartomány** jön létre.

A szigetek és ergodikus tartományok **transzport rövidzárként működnek.**



Sztellarátor



Amerikai találmány: L. Spitzer, 1954

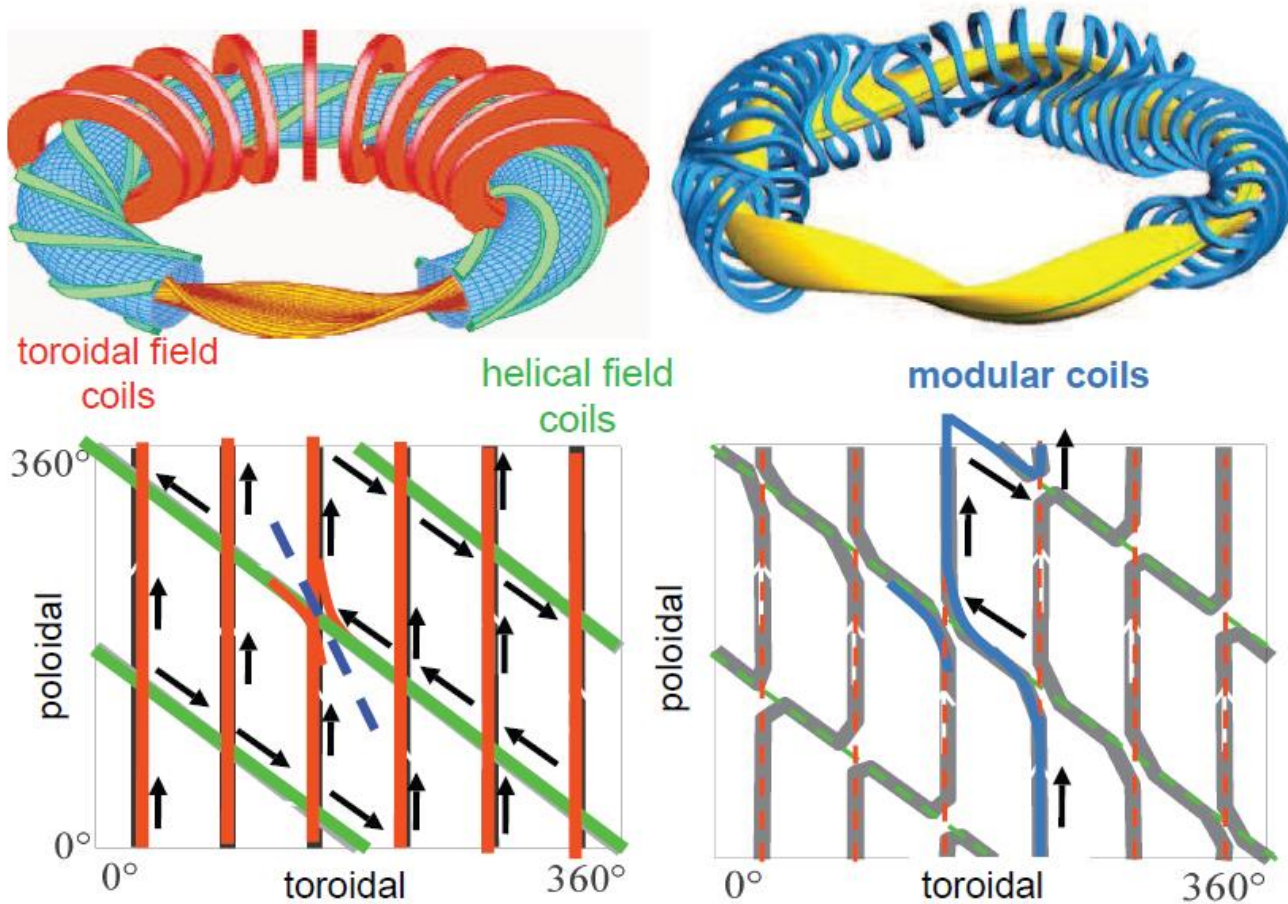
A helikális szerkezetet **helikális tekercsekkel** érik el.

A plazma alakja változik – **nincs toroidális szimmetria!**

A zárt mágneses felületek léte nem garantált.

A mágneses geometriát (döntően) a külső tekercsek határozzák meg.

Klasszikus és moduláris sztellarátorok

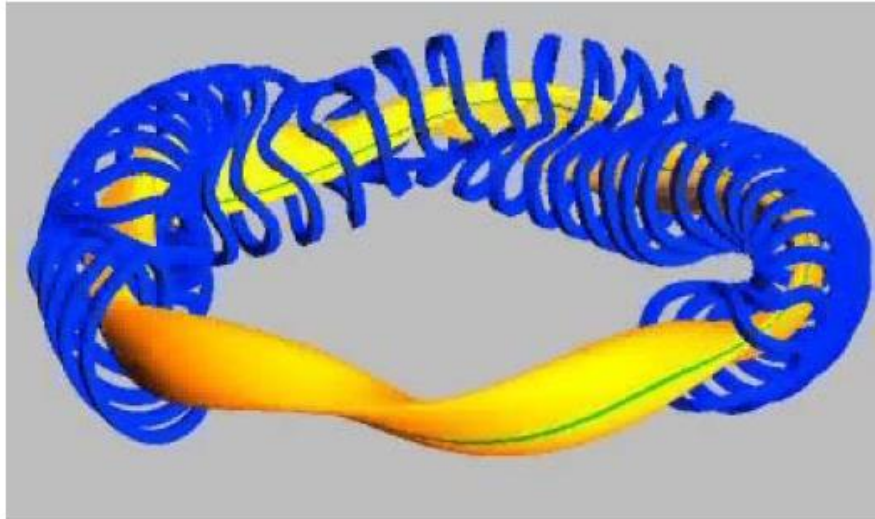


+ Moduláris tekercsekkel szabadabban lehet optimalizálni.

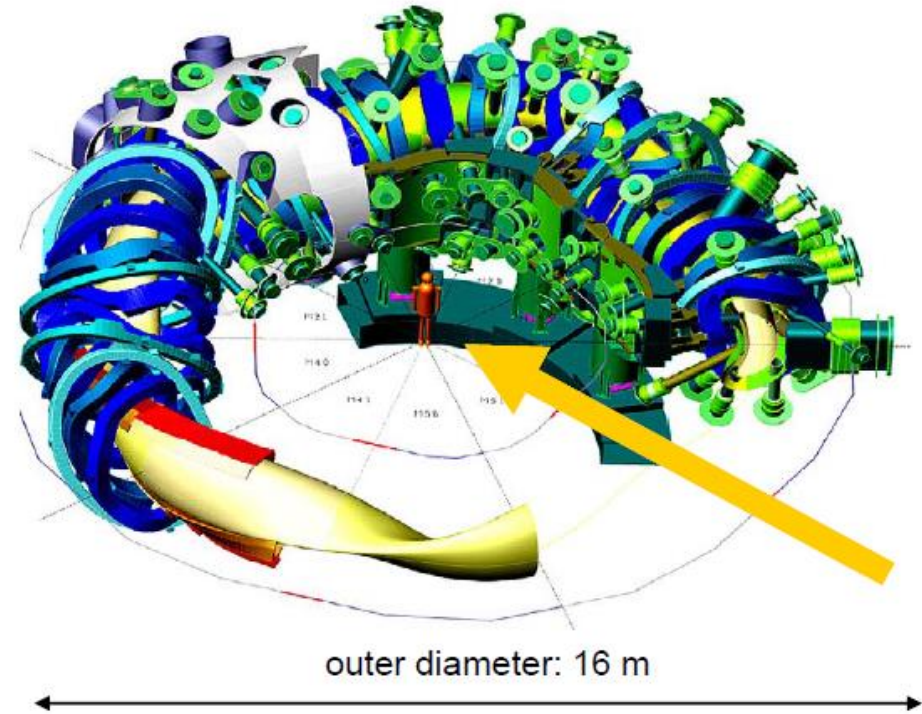
- Pontos 3D modellezés szükséges!

Moduláris sztelarátorok

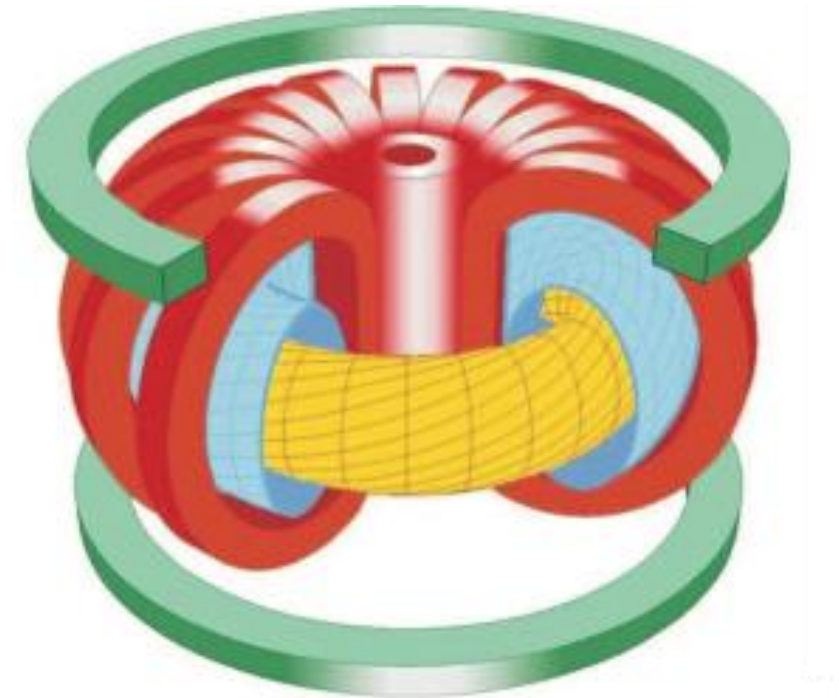
Physicists' dream



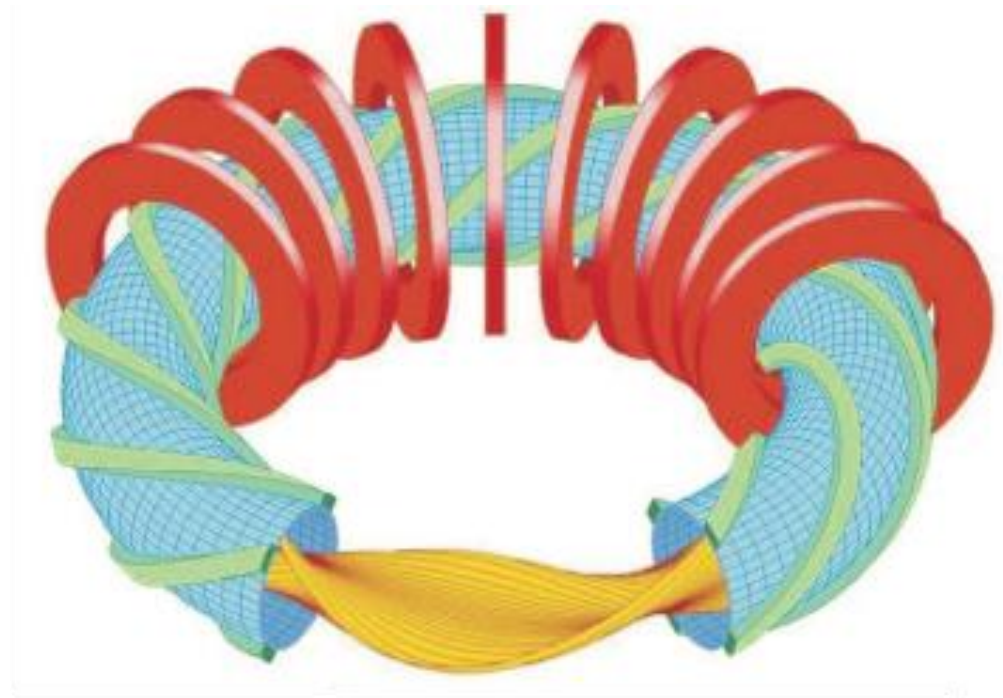
Engineers' nightmare



Tokamak és sztellarátor



- + Szimmetrikus 2D geometria
- + Érettebb technológia
- Alapvetően impulzus üzem
- Áram okozta instabilitások



- + Folytonos üzem
- + Nincsenek áram okozta instab.
- Komplex 3D geometria
- Kísérleti technológia