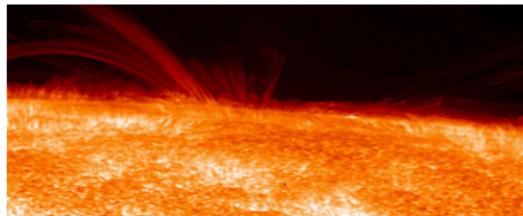


Att styra och störa strålar i plasmor



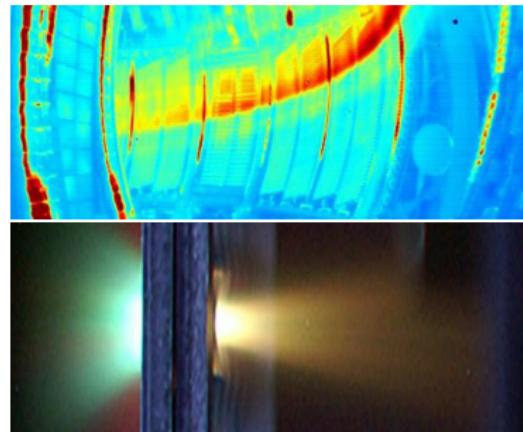
Tünde Fülöp
Plasmateori

Avdelningen för Subatomär, högenergi och plasmafysik
Institutionen för Fysik

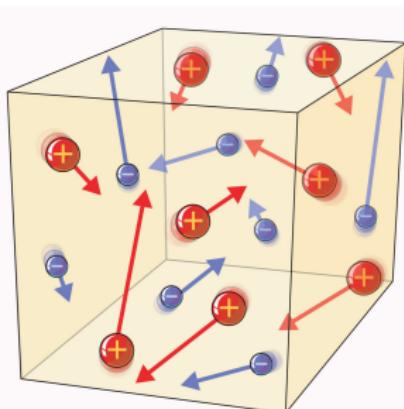
<https://ft.nephy.chalmers.se>

Styra och störa strålar

- Skenande elektroner i fusionsplasmor
- Laser-driven partikelacceleration



Plasma – materiets fjärde aggregationstillstånd



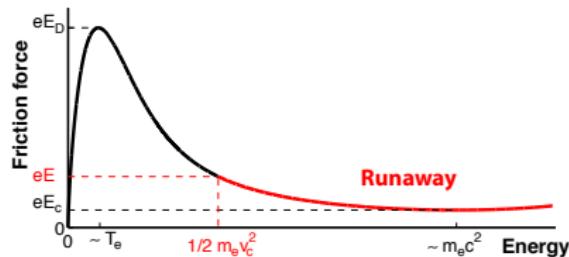
- En samling fria, laddade partiklar
- Mycket god elektrisk ledare



- Partiklar kolliderar inte som i en gas
- istället växelverkan på avstånd
mellan många partiklar samtidigt
- Ger upphov till “gemensamt
beteende” och intressanta fenomen

Skenande elektroner i plasmar

Friktion i plasmar



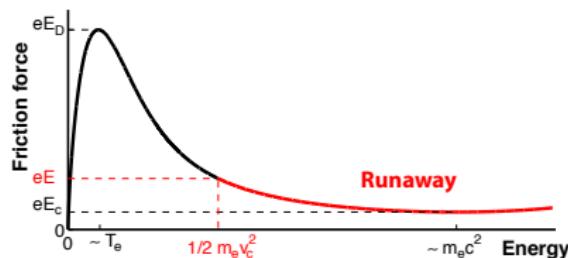
- Elektroner accelereras av ett elektriskt fält och bromsas av kollisioner.
- Över en viss hastighet, minskar friktionen med hastigheten → elektroner skenar

$$E_c(\text{V/m}) \simeq n_e(10^{21} \text{ m}^{-3})$$

$$E_D/E_c = m_e c^2 / T$$

Skenande elektroner i plasmor

Friktion i plasmor



- Elektroner accelereras av ett elektriskt fält och bromsas av kollisioner.
- Över en viss hastighet, minskar friktionen med hastigheten → elektroner skenar

$$E_c(\text{V/m}) \simeq n_e(10^{21} \text{ m}^{-3})$$

$$E_D/E_c = m_e c^2 / T$$

- I en frontalkrock kan en skenande elektron ge en bakgrundselektron så hög hastighet att den hamnar ovanför den kritiska hastigheten.
- ⇒ exponentiell tillväxt av skenande elektroner!

Strålningsdämpning

Synkrotron:

- Produceras av snabba elektroner som färdas genom magnetfält som böjer deras bana,

$$P_{\text{syn}} \propto p_{\perp}^2$$

Bromsstrålning:

- Från inelastiska kollisioner mellan snabba och långsamma partiklar

Strålndingsdämpning

Synkrotron:

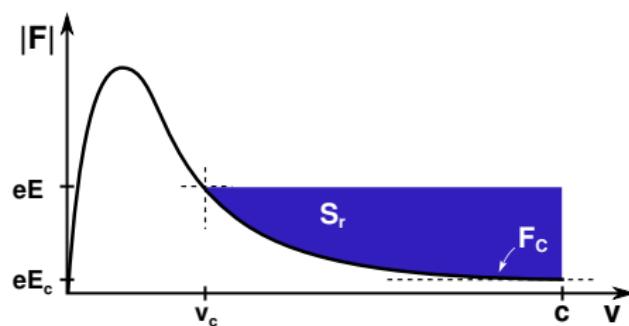
- Produceras av snabba elektroner som färdas genom magnetfält som böjer deras bana,

$$P_{\text{syn}} \propto p_{\perp}^2$$

Bromsstrålning:

- Från inelastiska kollisioner mellan snabba och långsamma partiklar

Emission av strålning bromsar partiklarna.



Strålndingsdämpning

Synkrotron:

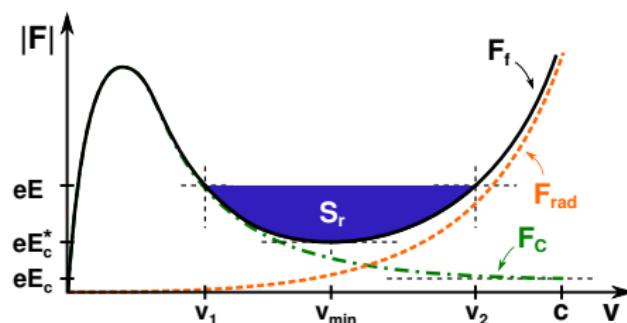
- Produceras av snabba elektroner som färdas genom magnetfält som böjer deras bana,

$$P_{\text{syn}} \propto p_{\perp}^2$$

Bromsstrålning:

- Från inelastiska kollisioner mellan snabba och långsamma partiklar

Emission av strålning bromsar partiklarna.



- Kritiska fältstyrkan blir nu E_c^* ($> E_c$)

The Acceleration of β -particles in Strong Electric Fields such as those of Thunderclouds. By Professor C. T. R. WILSON, Sidney Sussex College.

[*Read 24 November 1924.*]

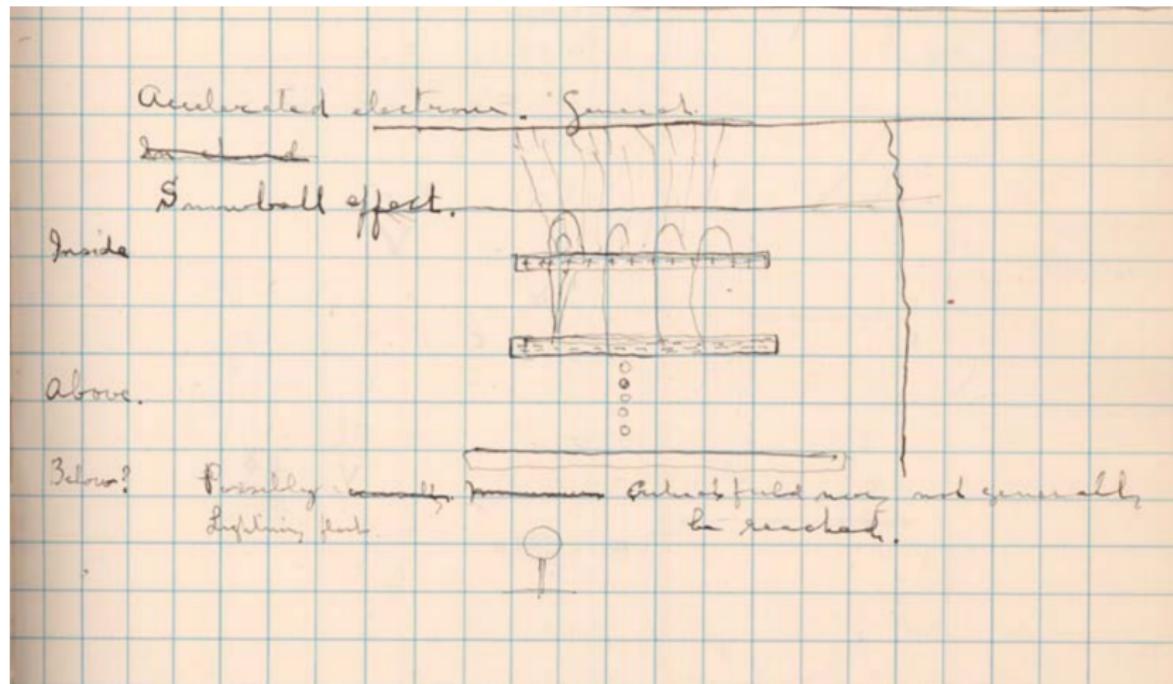
The mean rate of loss of energy of a β -particle varies, in accordance with Thomson's theory†, inversely as the square of the velocity; the rate of loss of energy per cm. by the accelerated particle will thus continually diminish, approaching however a limit of rather less than 1000 volts per cm. as the velocity becomes comparable with that of light. Thus an accelerated particle which has travelled more than a comparatively small number of centimetres under the

* *Phil. Mag.* 46, p. 836, 1923.

† *Proc. Roy. Soc. A*, 104, p. 192, 1923.

‡ *Phil. Mag.* 23, p. 449, 1912.

Snöbollseffekten (CTR Wilsons anteckningar)



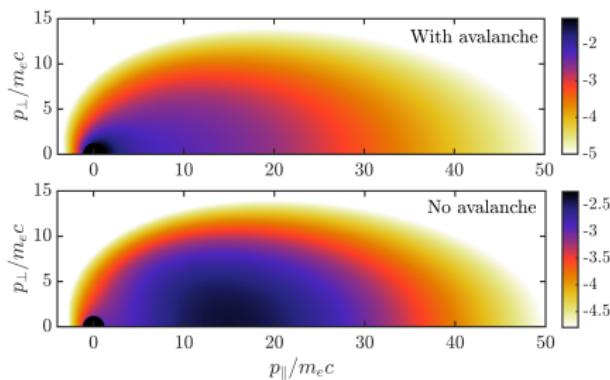
Kinetisk modellering

- Fördelningsfunktionen: generalisering av densiteten
- Betrakta ett litet volymselement $d\mathbf{r} = dx dy dz$.
- Antal partiklar i den volymselementet är $n(\mathbf{r}, t)d\mathbf{r}$, och inkluderar alla partiklar oavsett hastighet.
- Ibland vill vi veta något om en delmängd av dessa partiklar, t.ex. de som har hastighet inom ett visst intervall.
- 3D fysiska rummet $d\mathbf{r}$ ersätts med 6D fasrummet $d\mathbf{r} d\mathbf{v}$, där $d\mathbf{v} = dv_x dv_y dv_z$.
- Antal partiklar i 6D fasrummet är $f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)d\mathbf{r} d\mathbf{v}$.
- Densiteten och medelflödeshastigheten kan beräknas genom att integrera över hastighetrummet $n(\mathbf{r}, t) = \int f d\mathbf{v}$ och $\mathbf{u}(\mathbf{r}, t) = (\int \mathbf{v} f d\mathbf{v})/n$

Kinetisk modellering

Löser den kinetiska ekvationen numeriskt:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \underbrace{E_{\parallel} \frac{\partial f}{\partial p_{\parallel}}}_{\text{acceleration}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial \mathbf{p}} \cdot (\mathbf{F}_{RR} f)}_{\text{synkrotronstrålning}} = \underbrace{C_e[f]}_{\text{kollisioner}} + \underbrace{C_{\text{knock-on}}[f]}_{\text{lavin}} + \underbrace{C_{\text{brems}}[f]}_{\text{bromsstrålning}}$$



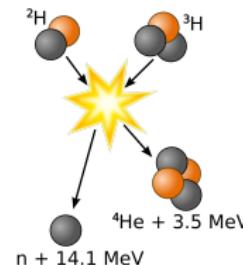
Numeriska verktyg

<http://ft.nephy.chalmers.se/retools/>

<https://github.com/chalmersplasmatheory/>

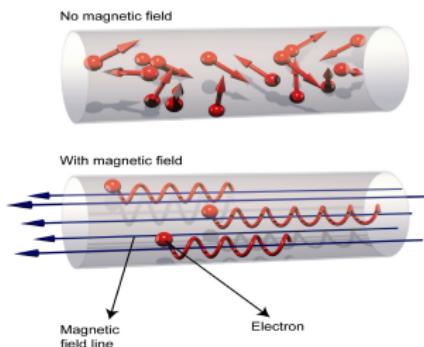
Fusion av deuterium och tritium

- Väteisotoperna behöver ha temperaturen
100-200 miljoner grader!
→ Ett plasma
- Heliumkärnan (α -partikeln)
värmer plasmat genom
kollisioner
→ kan stå för all
uppvärmning

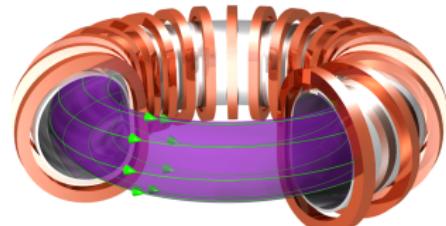


Håll plasmat i en bur gjord av magnetfält

- Laddade partiklar följer spiralbanor runt magnetfältslinjer.
- Partiklarna ”sitter fast” i sidled.



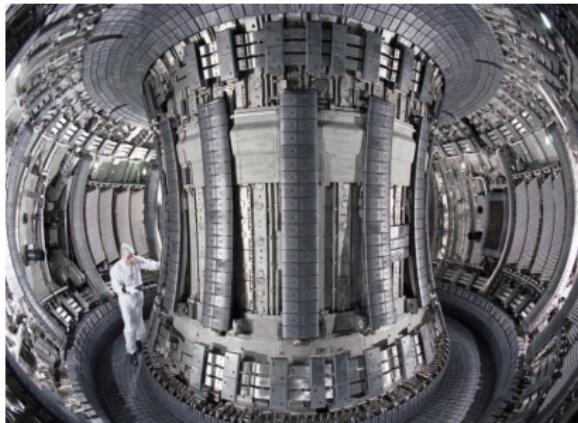
- Toroidala plasmar för att undvika ändförluster.
- Magnetfältet behöver skruvas.
- Mest utvecklad och framgångsrik koncept: tokamak
- Magnetisk inneslutning åstadkoms med en kombination av yttre spolar och en stark plasmaström.



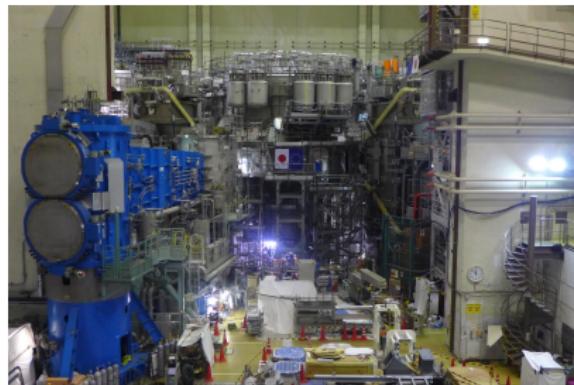
“To B or not to be” Ham III.i.56

Storskaliga fusionsexperiment idag

- JET (Joint European Torus)
1982
- JT60 Super Advanced,
Japan 2021

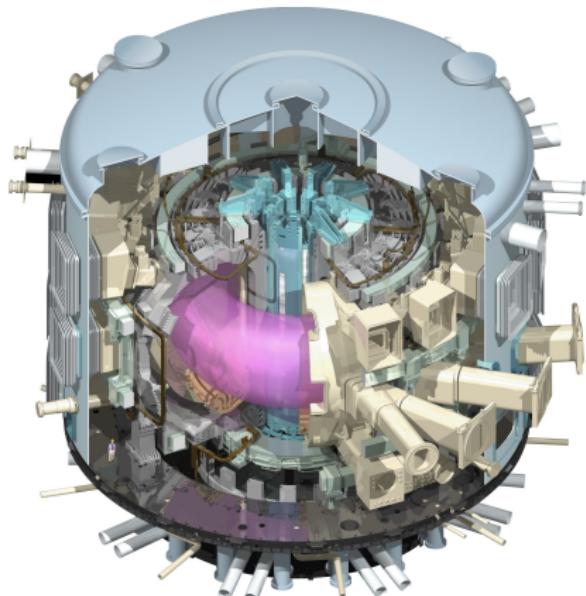


- Storradie $R = 3$ m
- Magnetfält upp till 4 T
- Volym: 80–100 m³
- Plasmaström upp till 5 MA



- Storradie $R = 3$ m
- Magnetfält 2.25 T
(supraledande)
- Volym: 132 m³
- Plasmaström 5.5 MA

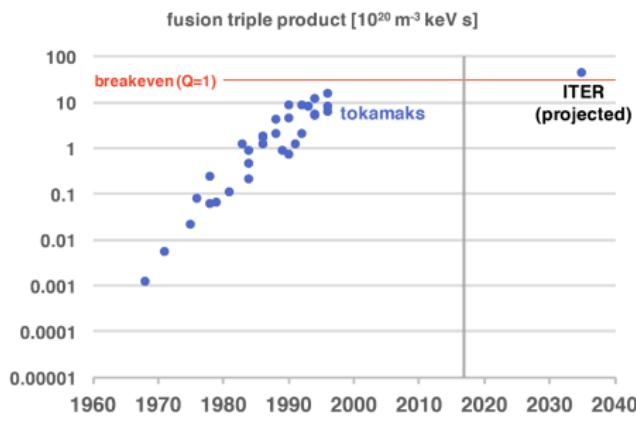
ITER



- ITER (2025)
- Storradie $R = 6.2$ m
- Magnetfält 5.3 T
(lägtemperatursupraleddare,
LTS)
- Volym: 840 m³
- 500 MW, $P_{out}/P_{in} = 10$
- **Plasmaström: 15 MA**



Enorm teknisk och vetenskaplig bas



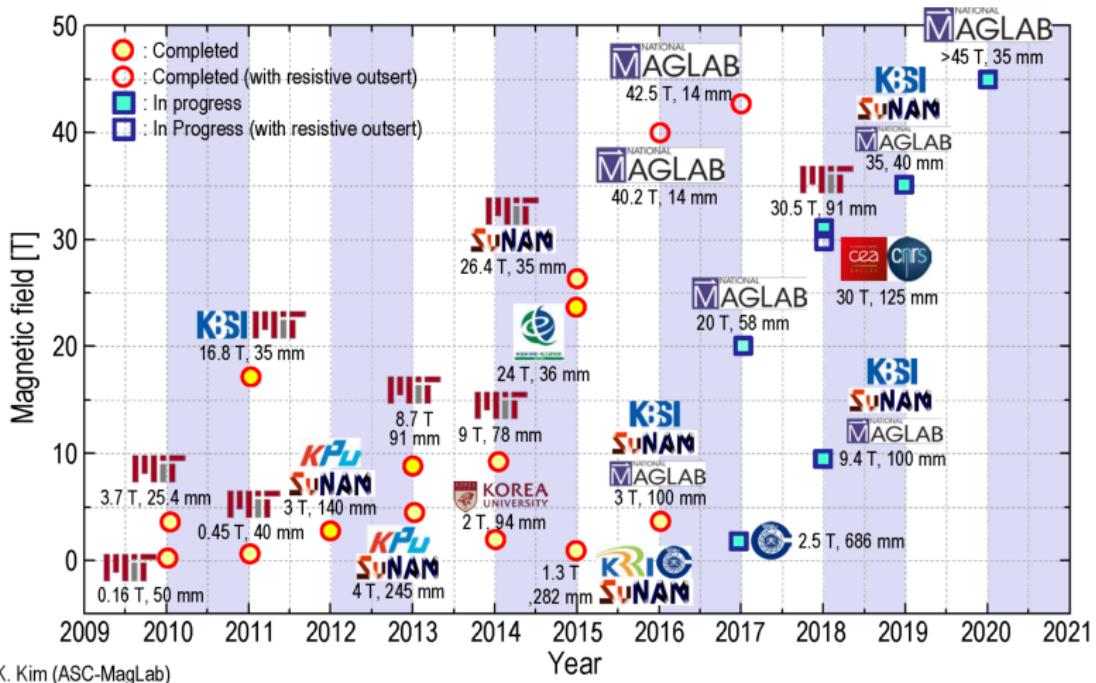
Progress Exceeded Moore's Law for 30 years



+ 160 other tokamaks across 60 years

Stagnation pga storlek och kostnad

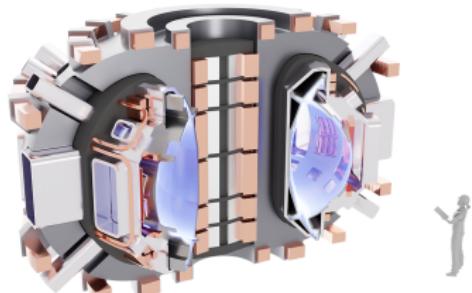
Stora framsteg inom högtemperatursupraledning (HTS)



K. Kim (ASC-MagLab)

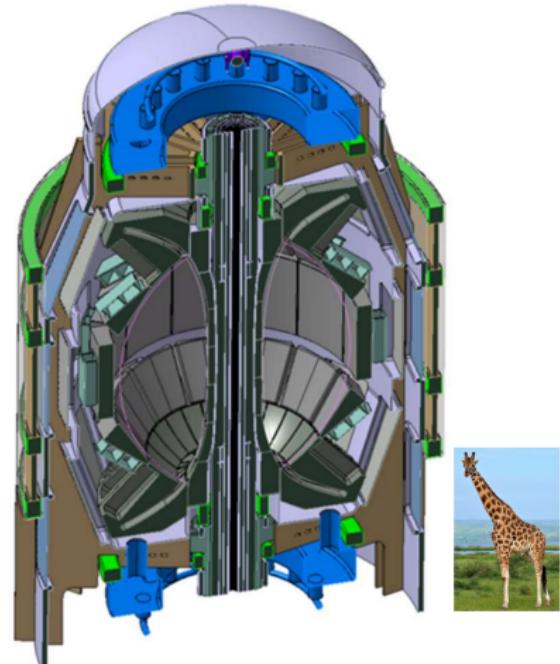
Vid högre magnetfält, fusionsreaktorer kan vara mindre

- SPARC (MIT och Commonwealth Fusion Systems, USA, 2025)
- Storradie $R = 1.85$ m
- Magnetfält 12.2 T
(högtemperatursupraleddare)
- Volym: 15 m^3
- september 2021: demonstration av HTS-magnet av samma skala som krävs för SPARC (20 T!)
- **Plasmaström: 9 MA**



STEP (Spherical Tokamak for Energy Production), UK

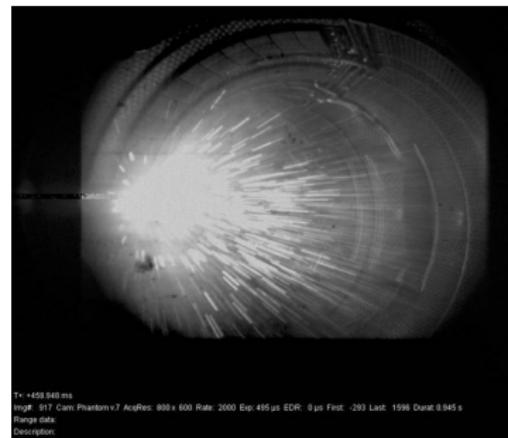
- Ambitiöst program att designa och bygga en fusionsreaktor baserat på "urkärnat äpple"-principen, till cirka 2040.
- Fördel: mindre storlek och kostnad
- Startkapital 2.5 miljarder SEK (okt 2019) för ett design till 2024.
- Exakta parametrar inte helt bestämda än, men fusionseffekt på GW-skala och storlek jämförbart med JET



Skenande elektroner i disruptioner

I en disruption:

- Plasmat kyls snabbt.
- Resistiviteten ökar.
- Ett starkt elektriskt fält uppstår.
- Fältet accelererar elektroner.
- Strömmen kan omvandlas till en elektronstråle bestående av elektroner med energier runt 10-20 MeV per elektron



T_x = +658.948 ms
Img#_ 917 Cam: Phantom v7 AcqRes: 800x 600 Rate: 2000 Exp: 495 μs EDR: 0 μs First: -293 Last: 1598 Durat: 0.945 s
Range data:
Description:

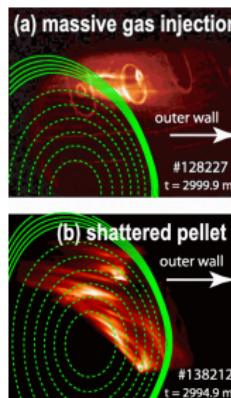
Kolpartiklar lösgörs från väggen när skenande elektroner träffar väggen i Tore Supra tokamaken.

Lavineeffekten är exponentiellt känslig för plasmaströmmen.

Undvik skadliga effekter av disruptioner

- Materialinjektion

- Lavineffekten starkare i närväro av materialinjektion
- Kan leda till multi-megaampere skenande elektronströmmar i ITER
[Vallhagen et al, JPP 2020]
- Dubbelinjektion (deuterium först, senare neon) kan fungera
[Vallhagen, MSc Thesis, 2021]



[Hollmann et al, PP 2015]

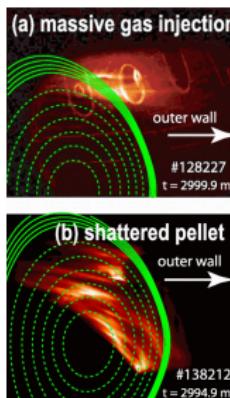
Undvik skadliga effekter av disruptioner

• Materialinjektion

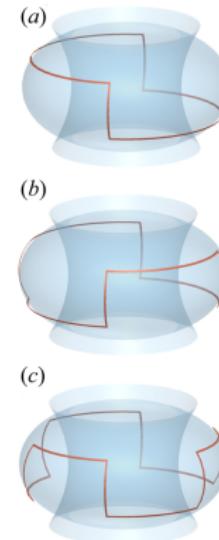
- Lavineeffekten starkare i närväro av materialinjektion
- Kan leda till multi-megaampere skenande elektronströmmar i ITER [Vallhagen et al, JPP 2020]
- Dubbelinjektion (deuterium först, senare neon) kan fungera [Vallhagen, MSc Thesis, 2021]

• Magnetiska perturbationer

- Svårt att störa magnetfältet tillräckligt djupt i ITER. [Svensson et al, JPP 2021]
- Det är möjligt i SPARC!
"Complete prevention of runaway electrons with a passive 3D coil"



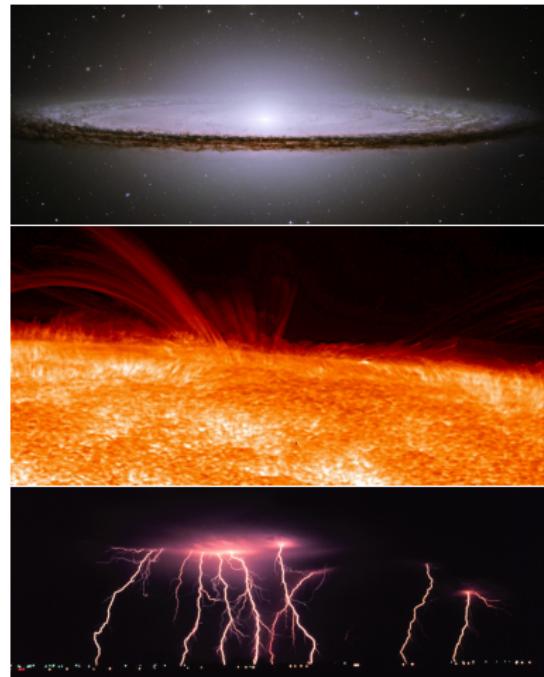
[Hollmann et al, PP 2015]



[Sweeney et al, JPP 2020]

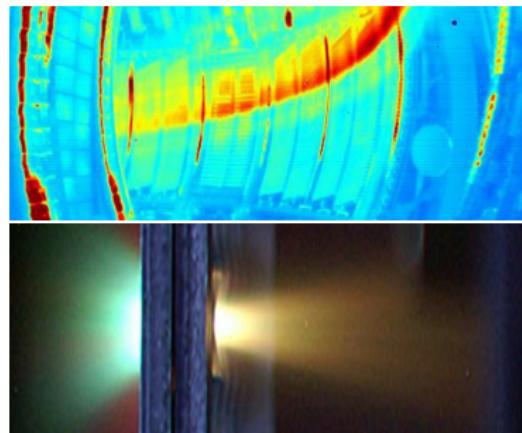
Även antipartiklar kan skena iväg!

- Positronen är elektronens antipartikel. När en partikel möter sin antipartikel förintas de i en ljusblåxt.
- Ljusblåxten energi kan räknas ut från partiklarnas massa ($m_e c^2 = 511 \text{ keV}$).
- Stora mängder positroner bör finnas i fusionsplasmor.
- Produceras i kollisioner mellan elektroner och joner om elektronens energi är större än $3m_e c^2$.



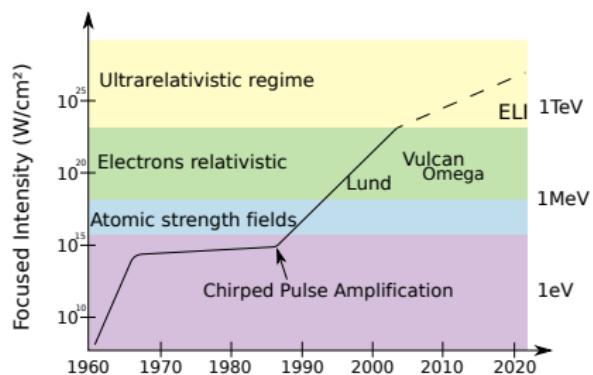
Styra och störa strålar

- Skenande elektroner i fusionsplasmor
- Laser-driven partikelacceleration



Laser-plasma interaktion

Exponentiell tillväxt i uppmätt laserintensitet sedan upptäckten av Chirped Pulse Amplification.



- Intensiteterna är redan högre än om man skulle fokusera allt solljus som når jorden på ett enda sandkorn.
- Extrema tillstånd som liknar dem i astrofysikaliska plasmar kan uppnås.
- Höga fältstyrkor kan uppnås → partiklar kan accelereras på korta avstånd.

Tillämpningar: undersöka materialegenskaper, producera högupplösta bilder av biologiska och kemiska prov, att diagnosticera och behandla cancer och andra sjukdomar.

Laser-drivna partikelacceleratorer kan vara kompakta

- Konventionella acceleratorer är uppbyggda av metallkammare över vilka man lägger ett elektriskt fält.
- Fundamental begränsning pga risken för överslag.

RF Cavity



1 m => 100 MeV Gain
Electric field < 100 MV/m

Laser-drivna partikelacceleratorer kan vara kompakta

- Konventionella acceleratorer är uppbyggda av metallkammare över vilka man lägger ett elektriskt fält.
 - Fundamental begränsning pga risken för överslag.
-
- I plasmar 1000 gånger högre fältstyrkor kan uppnås → accelerationssträckan kan minskas med motsvarande faktor.
 - Partiklar kan accelereras till höga energier på korta avstånd.

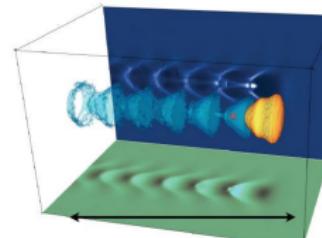
RF Cavity



1 m => 100 MeV Gain

Electric field < 100 MV/m

Plasma Cavity



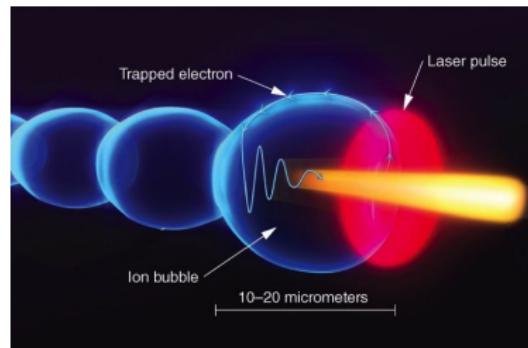
1 mm => 100 MeV

Electric field > 100 GV/m

Korta elektronstrålar

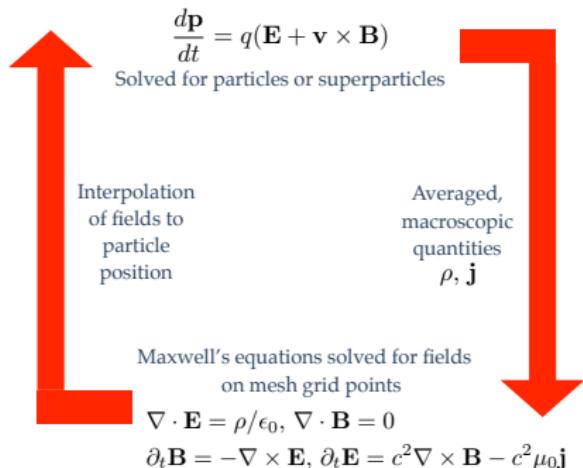
Nytt projekt: Lund-Chalmers samarbete 2021-2025 om extremt korta ljuspulser och elektronstrålar.

- Utnyttjar de starka fält som skapas i kölvägen bakom en laserpuls.
- Laserpulsen knuffar undan elektroner likt en plog.
- Ett område med enbart joner (en "bubbla") följer efter laserpulsen.
- Laddningsseparationen skapar starka elektriska fält (100 GV/m).
- Om en elektron fastnar i bubblan kommer den accelereras. Kommer snabbt upp i hastigheter nära ljusets (på några millimeter).



Numerisk modellering

- Particle-in-Cell koder representerar fördelningsfunktionen som summan av många kvasi-partiklar (eller super-partiklar)
- Relativistiska elektromagnetiska koder
 - Smilei (Simulating Matter Irradiated by Light at Extreme Intensities)
 - EPOCH (Extendable PIC Open Collaboration)



Studentprojekt

- Projektkurs i fysik: FUF060 (7.5hp), FUF090 (15hp)
- Exjobb (30hp, 60hp)
- Projekten handlar ofta om att
 - söka svar på aktuella frågor med hjälp av några av våra numeriska verktyg, eller
 - utöka modellerna som används i våra verktyg med "mer fysik" – eller för att kunna tillämpas på andra problem.

Plasmafysik är hett!

- Teoretisk plasmafysik kommer att spela en viktig roll i närmaste framtiden.
- Stor efterfrågan pga nya intressanta experiment
 - Magnetisk fusion
 - Högintensitetslasrar
 - Rymdsonderna *Parker Solar Probe* (2018) och *Solar Orbiter* (2020) möjliggör en revolution i förmågan att göra viktiga solobservationer.

