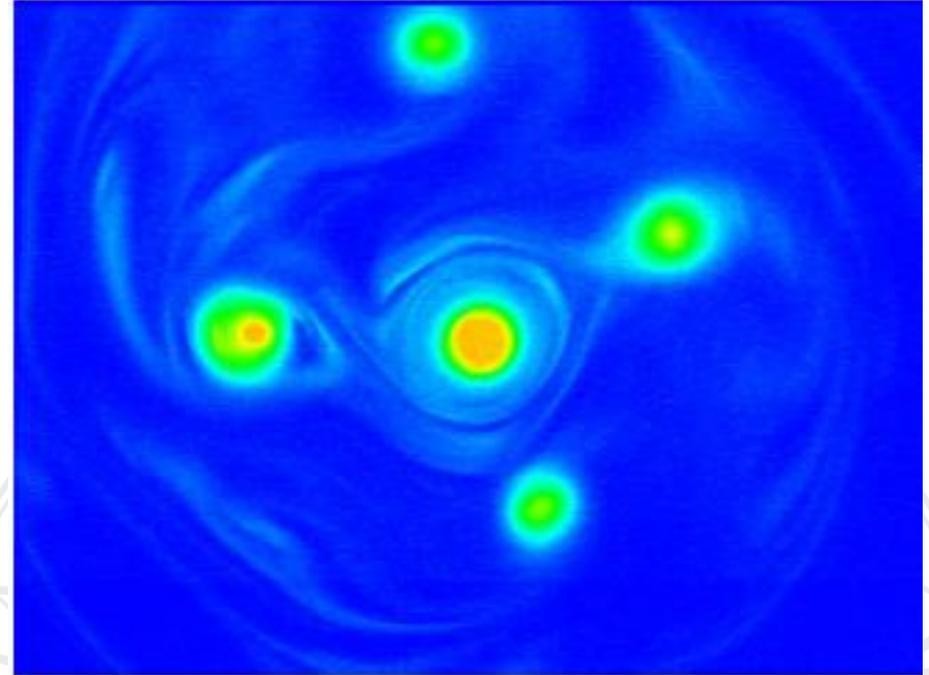


# As above, so below: Il plasma tra ordine e caos



**Giancarlo Maero**

**Università degli Studi di Milano  
Dipartimento di Fisica 'Aldo Pontremoli'**



Arte e scienza, vicine più che lontane

**P A R E N T A L**  
**A D V I S O R Y**  
**E X P L I C I T P H Y S I C S**

*«Non aveva abbastanza fantasia per fare il matematico»*  
[David Hilbert di un suo studente che aveva cambiato strada]



# Pre-scienza: filosofia ermetica, alchimia e legge di corrispondenza



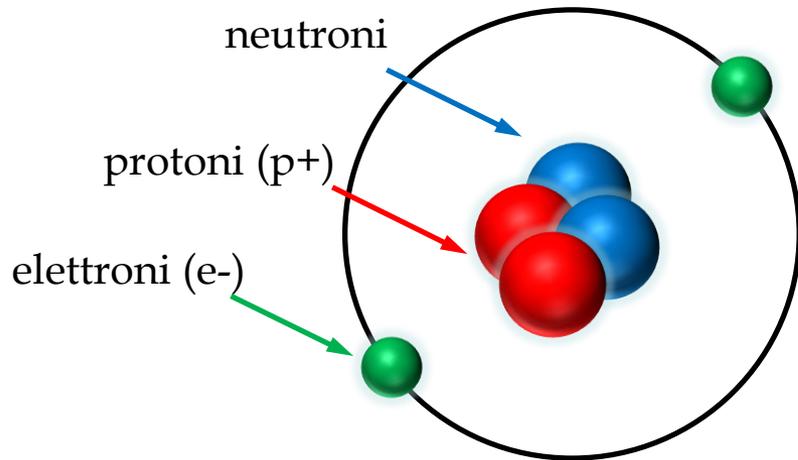
*«Quod est superius est sicut quod inferius, et quod inferius est sicut quod est superius»  
Ermes Trimegistus, Tabula Smaragdina*

Influenza della meccanica celeste sui fatti terreni

Corrispondenza (simmetria) tra macrocosmo e microcosmo



# Materia microscopica: atomi, molecole



**ATOMO:** il più piccolo frammento di un **elemento**; nucleoni (p+, n) ed elettroni

Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Period 1	1 H																	2 He
Period 2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
Period 3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
Period 4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
Period 5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
Period 6	55 Cs	56 Ba	* 71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
Period 7	87 Fr	88 Ra	* 103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
			* 57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb		
			* 89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No		

**MOLECOLA:** combinazione di atomi che forma una **sostanza**  $\text{H} + \text{H} \rightarrow \text{H}_2$

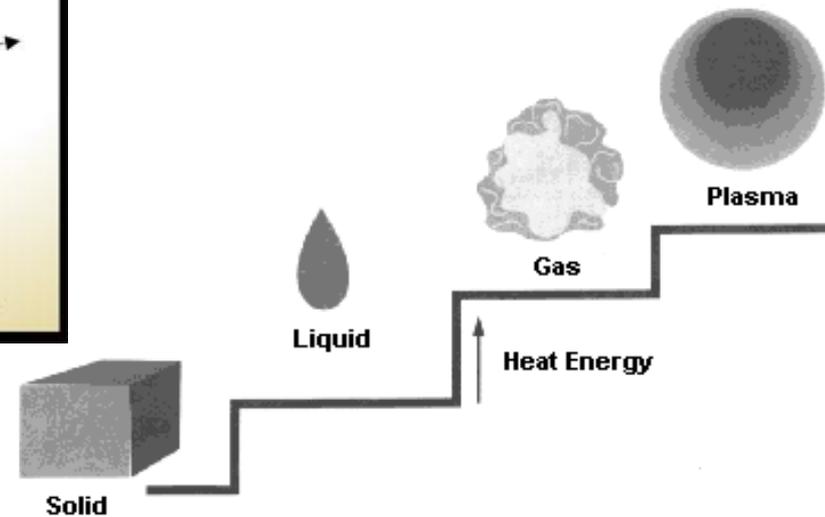
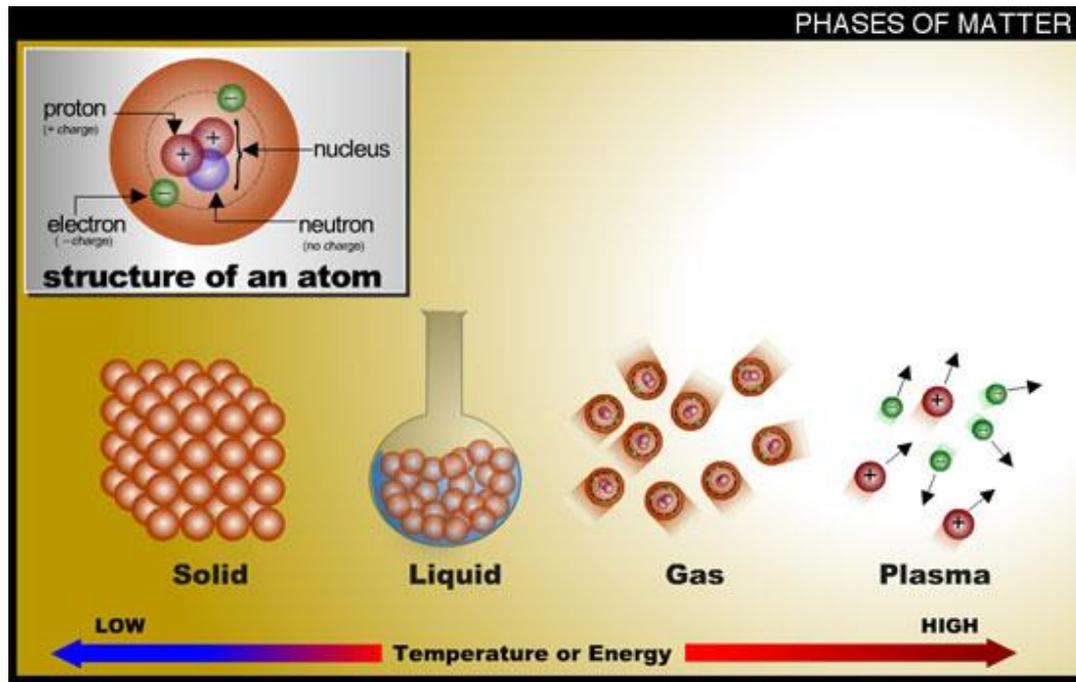


**IONE:** atomo/molecola a cui si è strappato un e- (o più) - **elettricamente carico!**



# Stati della materia (legami atomici e molecolari)

Livello macroscopico (stati della materia, determinati dai **legami tra componenti**)



Per spezzare i legami serve **energia**



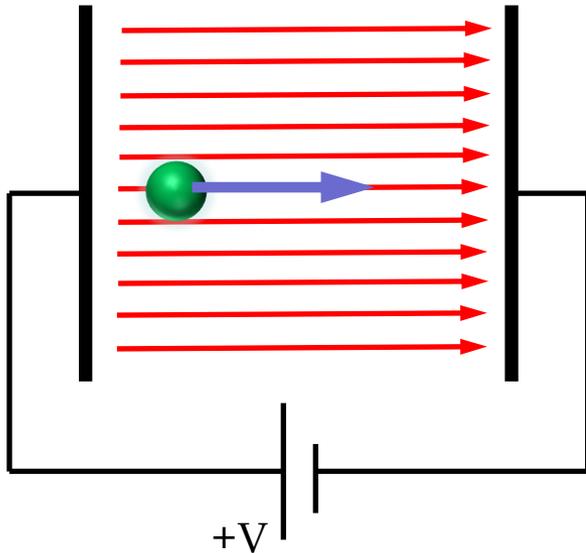
# Giovanni Pellizza da Volpedo, *Il quarto stato* (1901, 293x545 cm)

- sono tanti (la maggioranza);
- singolarmente indistinti;
- trattati come massa (insieme collettivo);
- non contano un...

*Plasma*: un insieme di particelle elettricamente cariche in cui domina l'interazione elettromagnetica; comportamento collettivo (descrizione cinetica o fluida)

# Materia e campi elettromagnetici

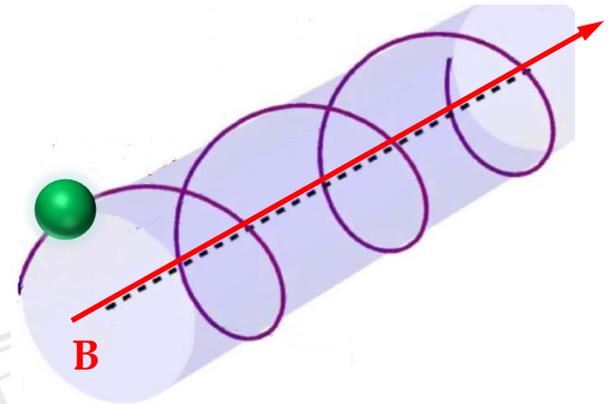
**Forza di Coulomb:** particella carica viene spinta lungo le linee del campo elettrico



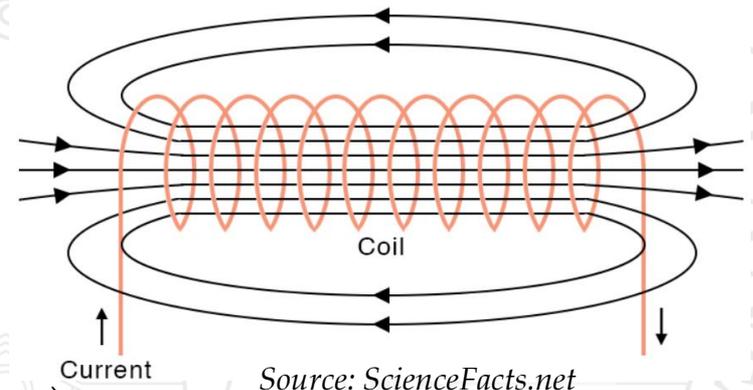
Una differenza sostanziale tra **E** e **B**:  
linee di campo aperte e chiuse

Come creare un campo magnetico:

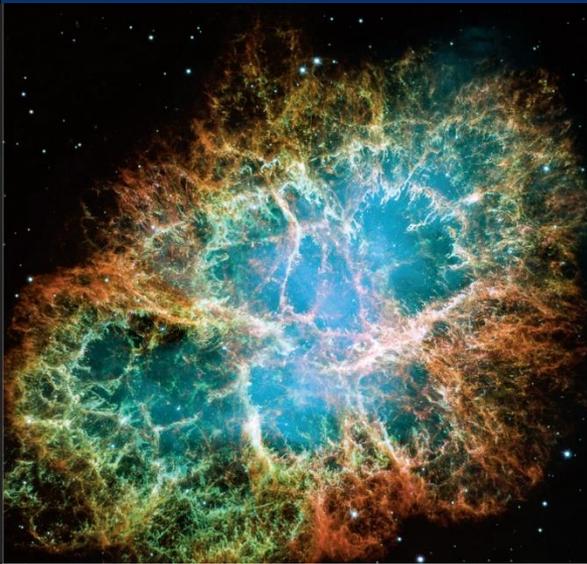
- con una calamita (magnete permanente)
- con una corrente in una bobina (elettromagnete)



**Forza di Lorentz:** particella carica ruota intorno alle linee di campo magnetico (**moto di ciclotrone**)



# Plasmi in natura

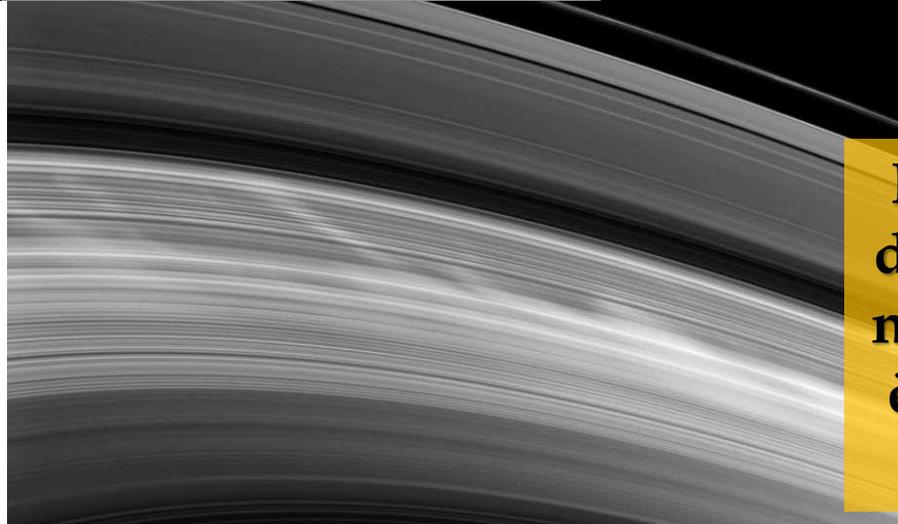


Solar eruption [NASA]

Approx. size of Earth → 



Crab nebula [NASA/Univ. Arizona State Univ.]



Saturn's rings [Cassini imaging team, ISS, JPL, ESA, NASA]

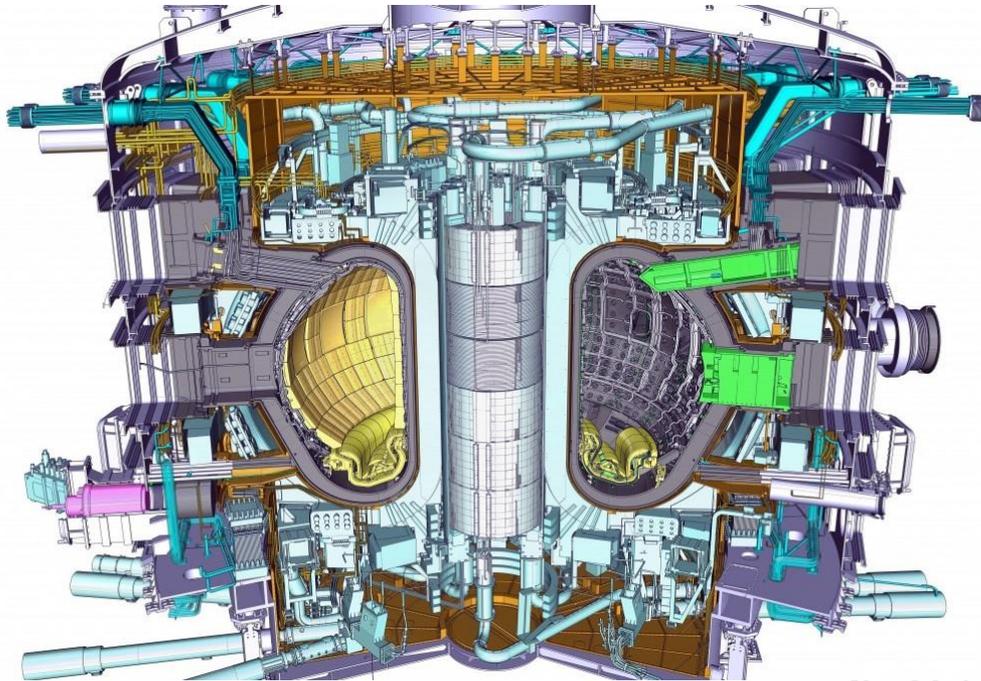
**Più del 99%  
della materia  
nell'universo  
è nello stato  
di plasma**



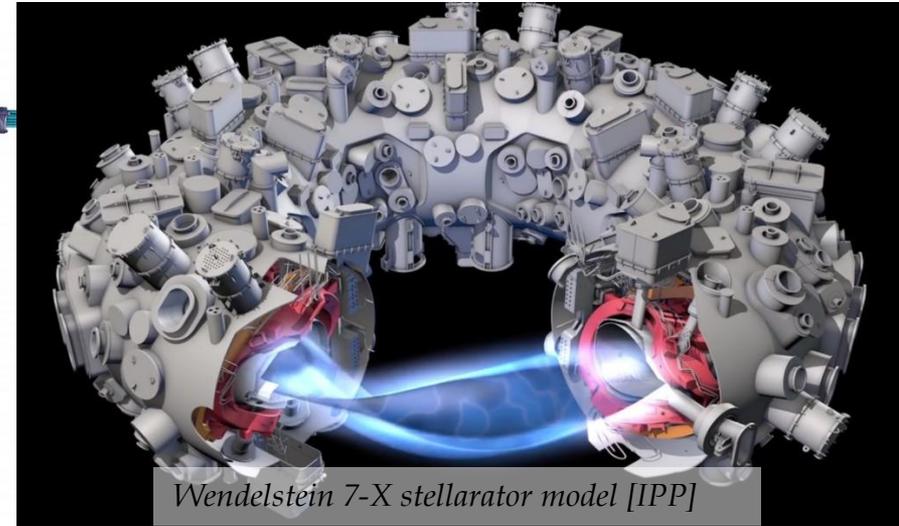
Northern lights



# Plasmi in laboratorio e applicazioni 1: fusione

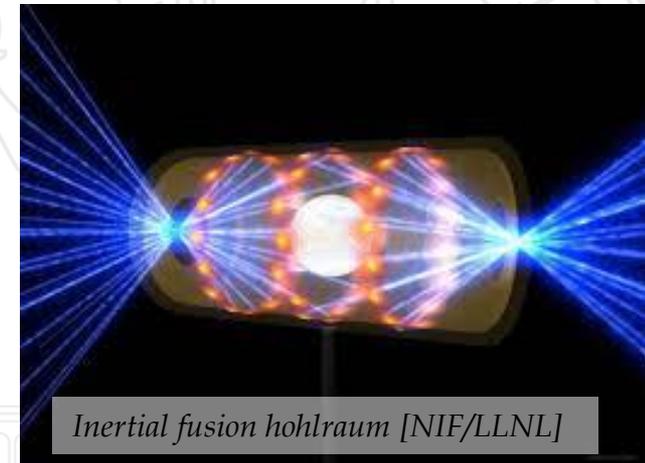


*ITER tokamak model [ITER organization]*



*Wendelstein 7-X stellarator model [IPP]*

*Energia tramite fusione termonucleare:  
un plasma confinato a lungo e caldo abbastanza da  
innescare le reazioni che producono energia nelle stelle*

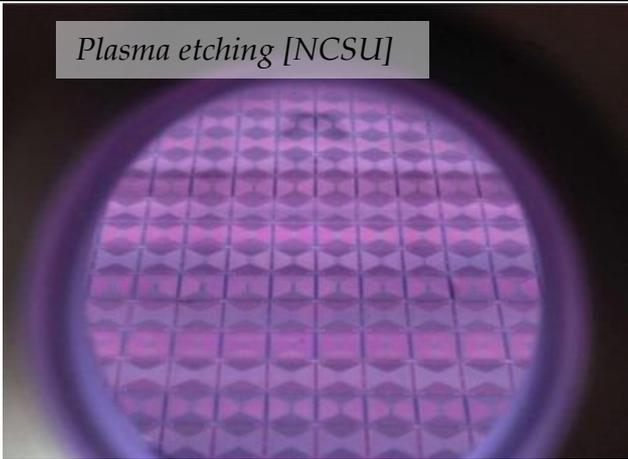


*Inertial fusion hohlraum [NIF/LLNL]*

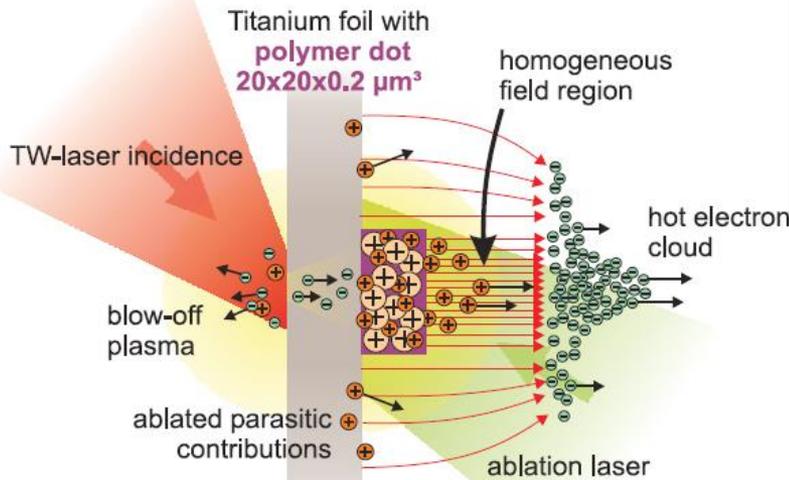
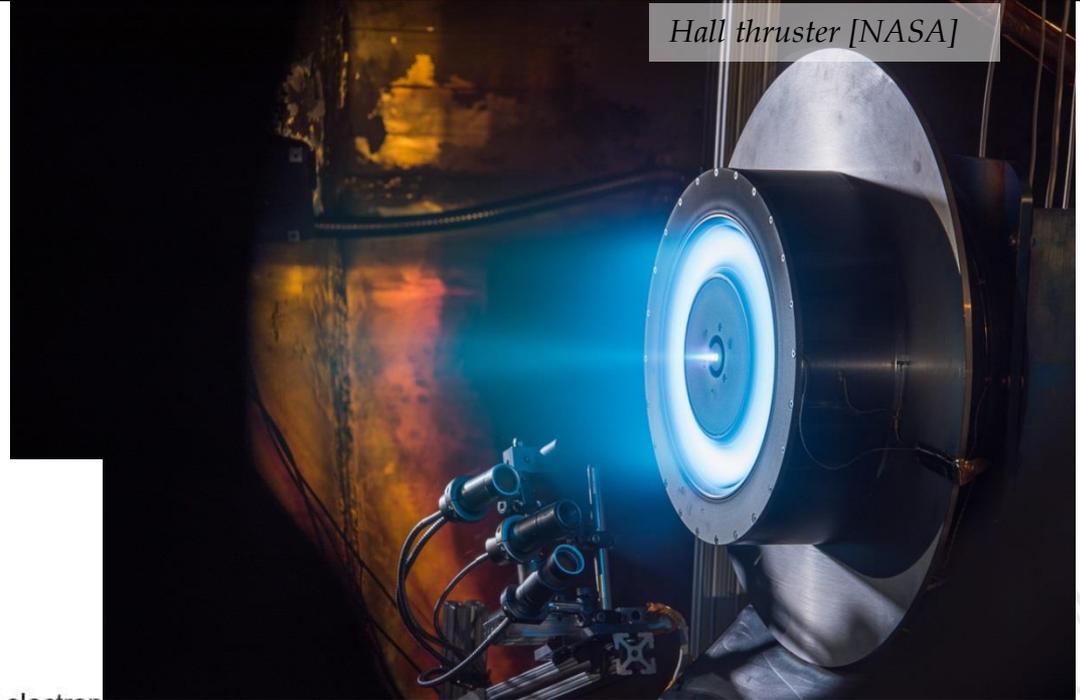


# Plasmi in laboratorio e applicazioni 2

Plasma etching [NCSU]



Hall thruster [NASA]



Applicazioni tecnologiche:  
trattamenti superficiali  
(materiali e sanitari), lavorazioni  
meccaniche, propulsione  
spaziale, sorgenti e acceleratori  
di particelle

Laser-plasma acceleration [S.M. Pfotenhauer et al., *New. J. Phys.* **10**, 033034 (2008)]



# Fisica dei plasmi – parole chiave

Temi fondamentali per i plasmi – ma non solo (il plasma come esempio di **sistema complesso**)

**Dinamica collettiva:** tanti costituenti, descritti tramite un comportamento medio (dal discreto al continuo), spesso di tipo fluido

**Linearità/nonlinearità:** linearità = proporzionalità (se due quantità sono in relazione lineare, quando raddoppia la prima raddoppia la seconda)

**Equilibrio e stabilità:** il sistema ‘non si muove’ (equilibrio); se lo perturbo, torna allo stato iniziale o no (stabilità/instabilità)?

**Turbolenza:** moto in cui avvengono variazioni caotiche di velocità; appare disordinato, una forma di «ordine» è visibile in senso statistico



# Dinamica collettiva – sistemi complessi

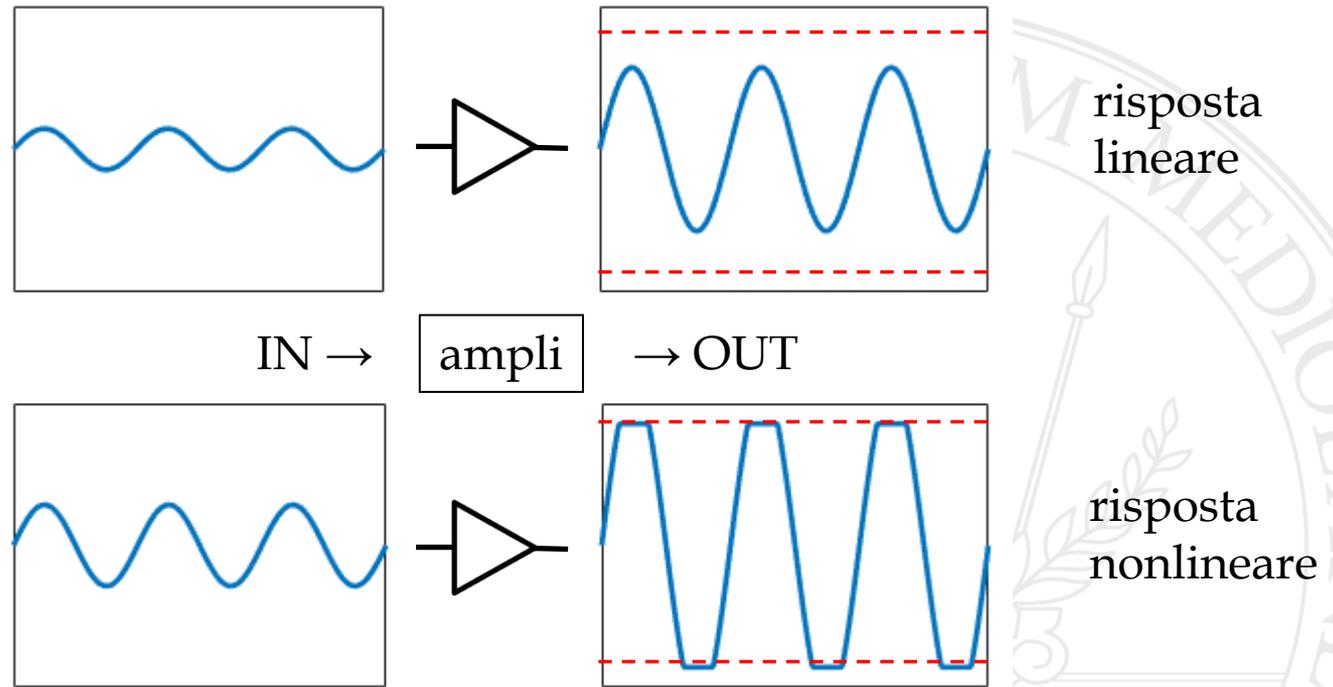
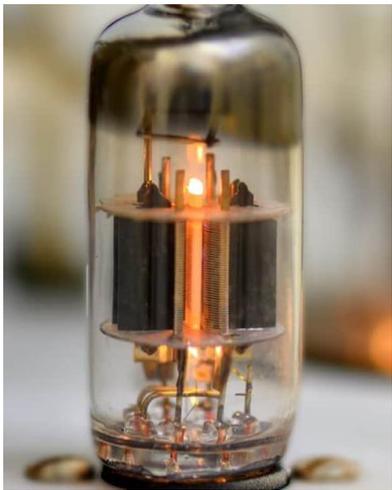
**Dinamica collettiva:** tanti costituenti, descritti tramite un comportamento medio (dal discreto al continuo)



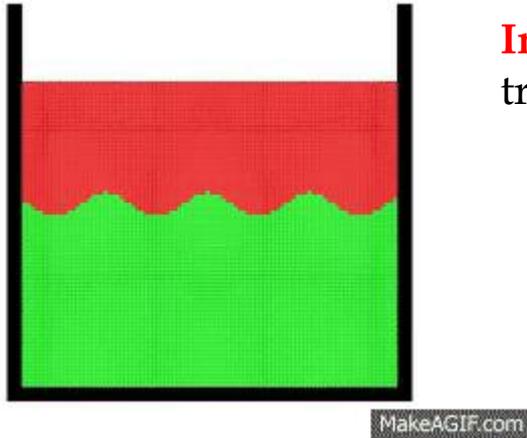
# Linearità/Nonlinearità

**Linearità/nonlinearità:** linearità = proporzionalità (se due quantità sono in relazione lineare, quando raddoppia la prima raddoppia la seconda)

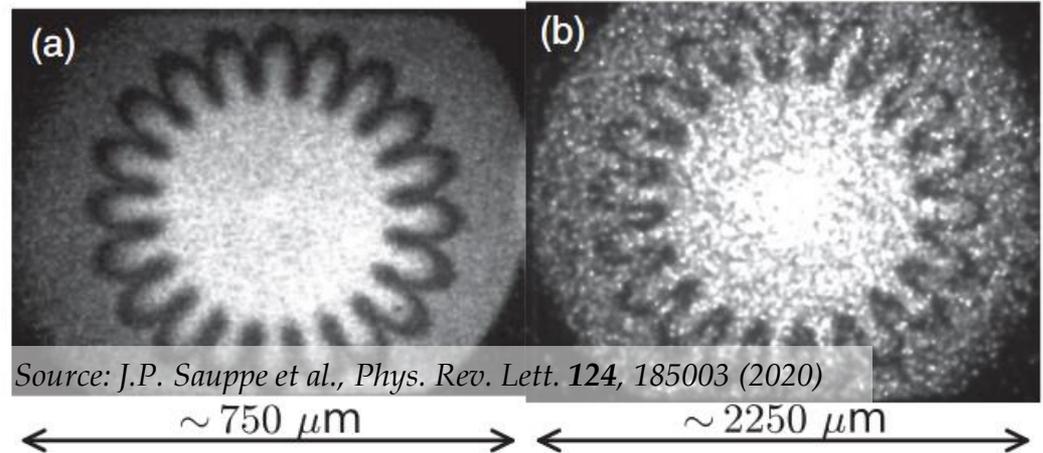
**Amplificazione audio (valvole, transistor):** l'amplificatore, oltre una certa ampiezza, 'non ce la fa' a ingrandire correttamente il segnale di ingresso → distorsione



# Instabilità



**Instabilità di Rayleigh-Taylor:** nasce da un equilibrio instabile tra due fluidi di diversa densità



Instabilità di Rayleigh-Taylor nell'implosione di target cilindrici (CH) indotta da laser (exp.: OMEGA, NIF)

**Instabilità di Kelvin-Helmholtz:** nasce dallo scorrimento di due strati di fluido con diversa velocità

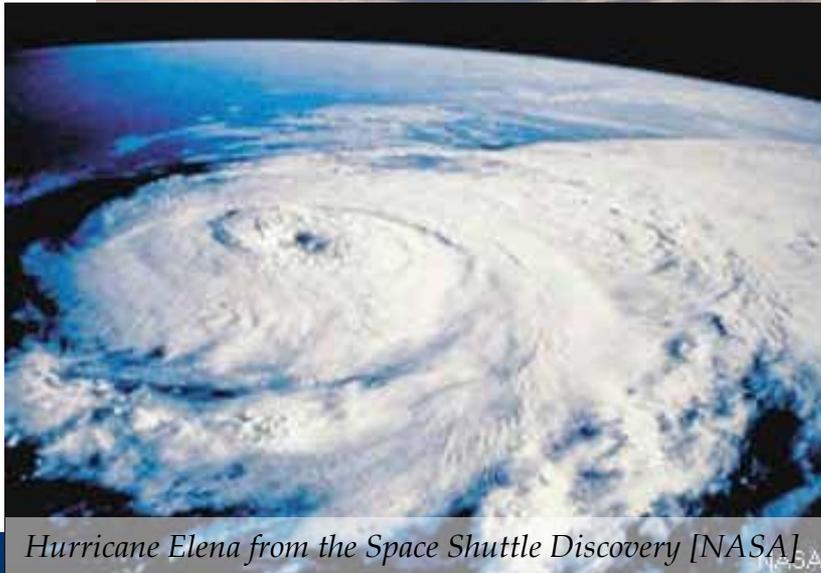


# Instabilità di Kelvin-Helmholtz

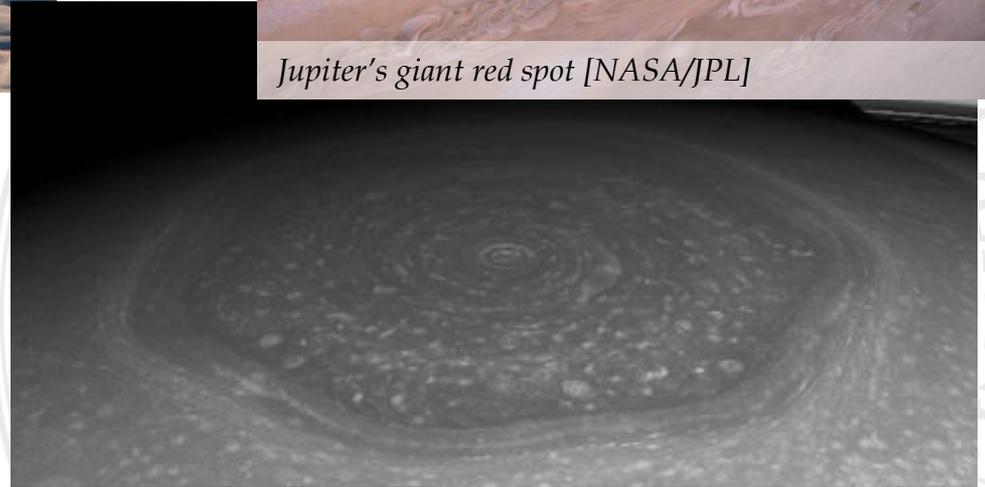
**Instabilità di Kelvin-Helmholtz:** tra strati di fluido che si muovono a diversa velocità si crea una **vorticità**



*Jupiter's giant red spot [NASA/JPL]*



*Hurricane Elena from the Space Shuttle Discovery [NASA]*

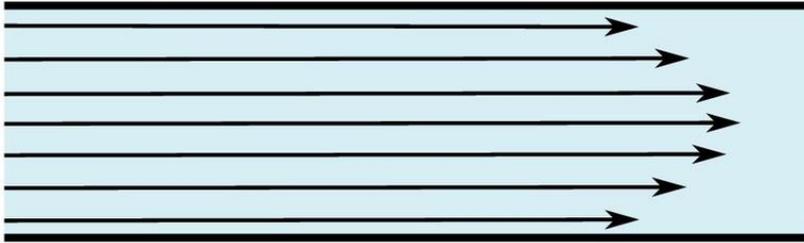


*Cassini's view of Saturn's north pole [NASA/JPL-Caltech/SSI]*



# Fluidi – flusso laminare e turbolento

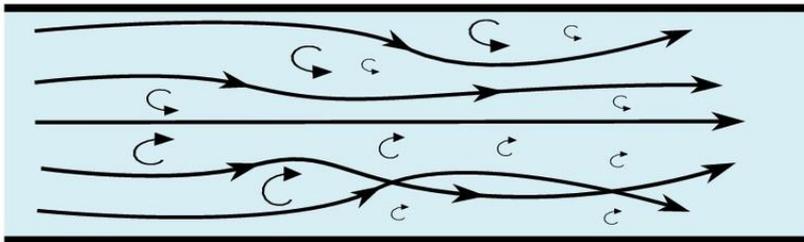
laminar flow



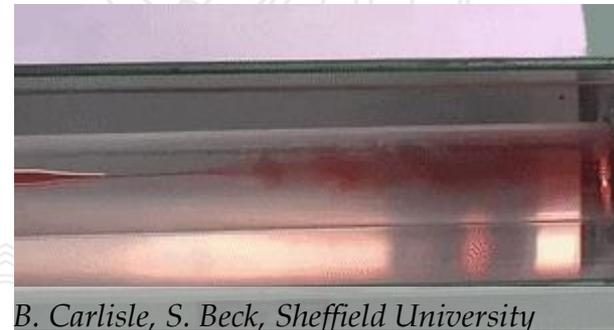
*Flusso laminare:*  
elementi di fluido adiacenti  
hanno velocità simili - **ORDINE**



turbulent flow



*Flusso turbolento:*  
elementi di fluido adiacenti hanno  
velocità scorrelate - **CAOS**

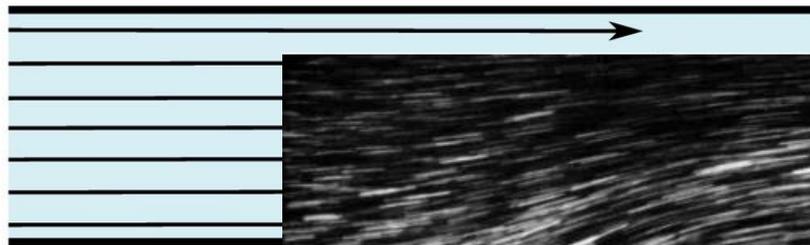


*B. Carlisle, S. Beck, Sheffield University*

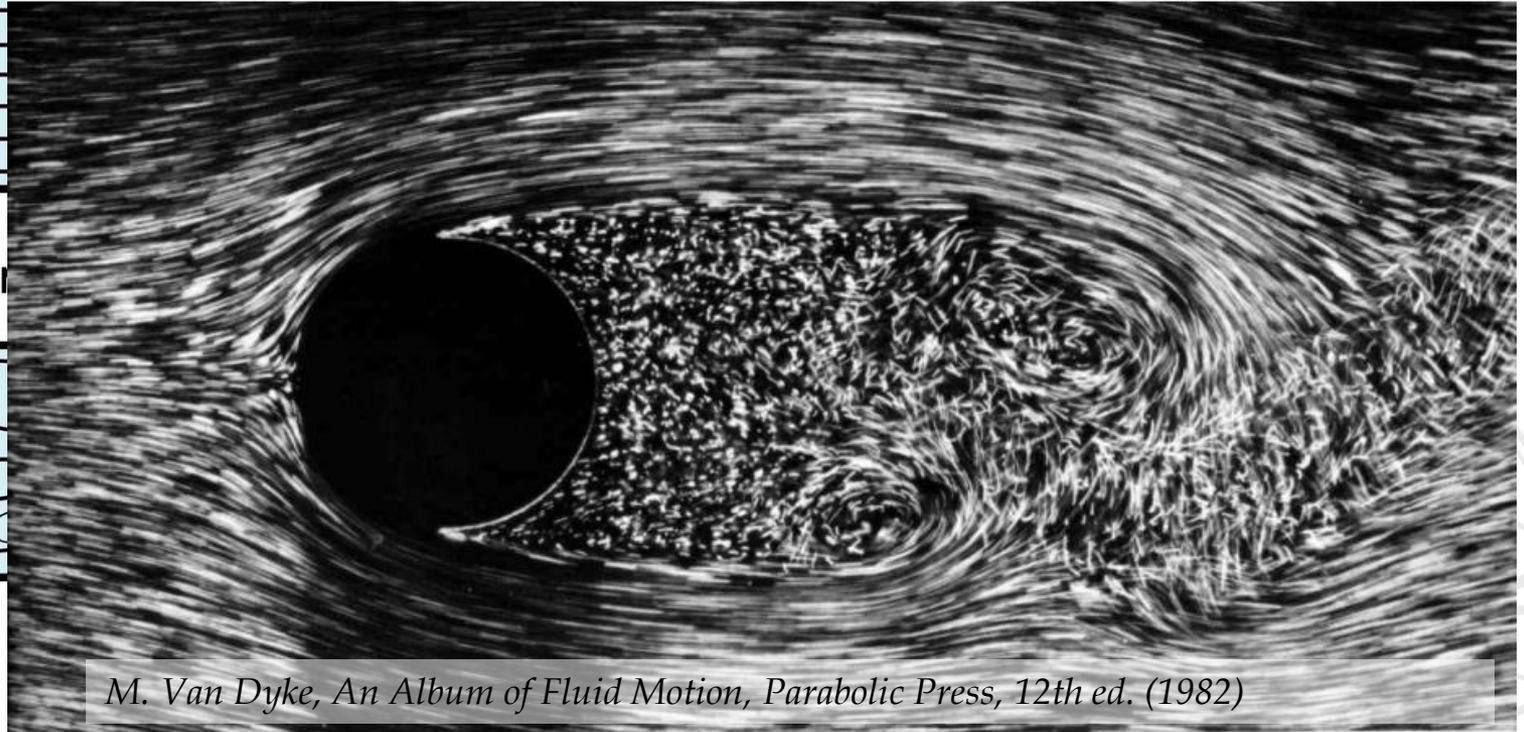
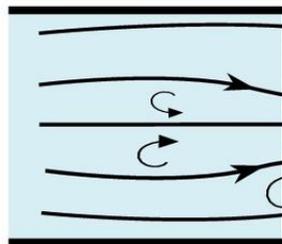


# Fluidi – flusso laminare e turbolento

laminar flow



tur

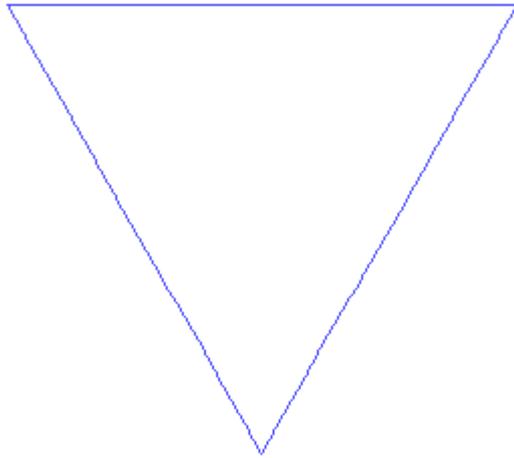


*M. Van Dyke, An Album of Fluid Motion, Parabolic Press, 12th ed. (1982)*

**Invarianza di scala: se ingrandisco, osservo lo stesso tipo di strutture**

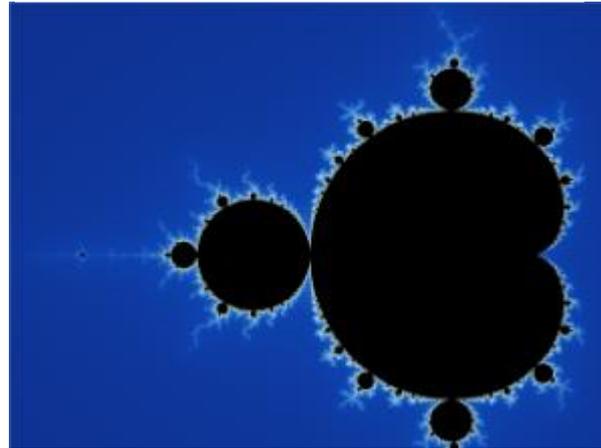


# Invarianza di scala – turbolenza, frattali

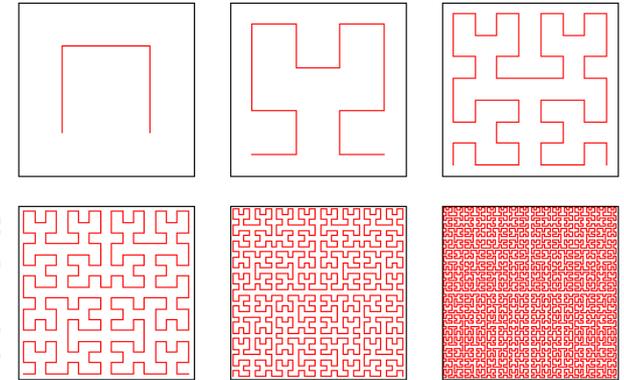


Von Koch's snowflake  
<https://sites.nova.edu/mjl/>

Mandelbrot sequence [Wikipedia]



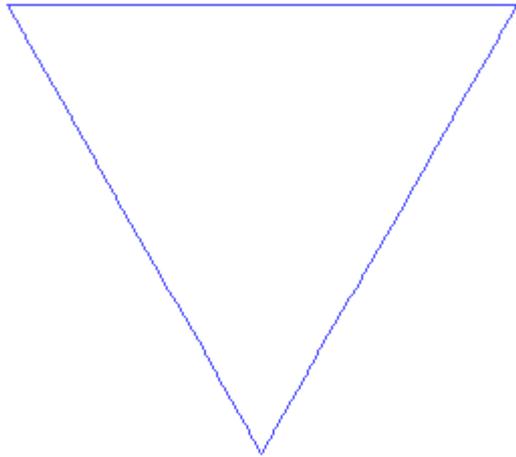
Six iterations of a Hilbert curve's construction [Wikipedia]



**Invarianza di scala:** se ingrandisco, osservo lo stesso tipo di strutture

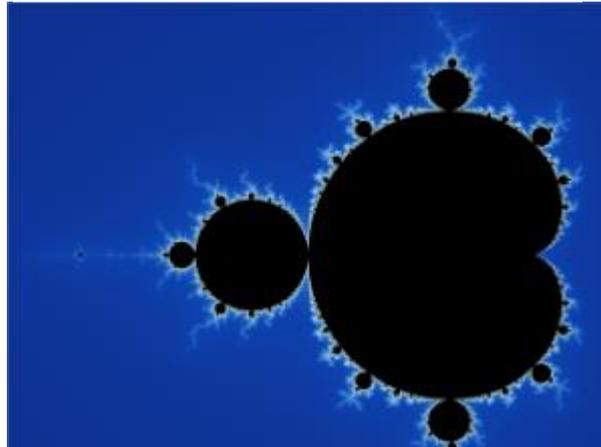


# Invarianza di scala – turbolenza, frattali



Von Koch's snowflake  
<https://sites.nova.edu/mjl/>

Mandelbrot sequence [Wikipedia]



Six iterations of a Hilbert curve's construction [Wikipedia]



Coil – The Gay Man' Guide to Safer Sex  
[Musique Pour La Dance 2019]

**Invarianza di scala: se ingrandisco, osservo lo stesso tipo di strutture**



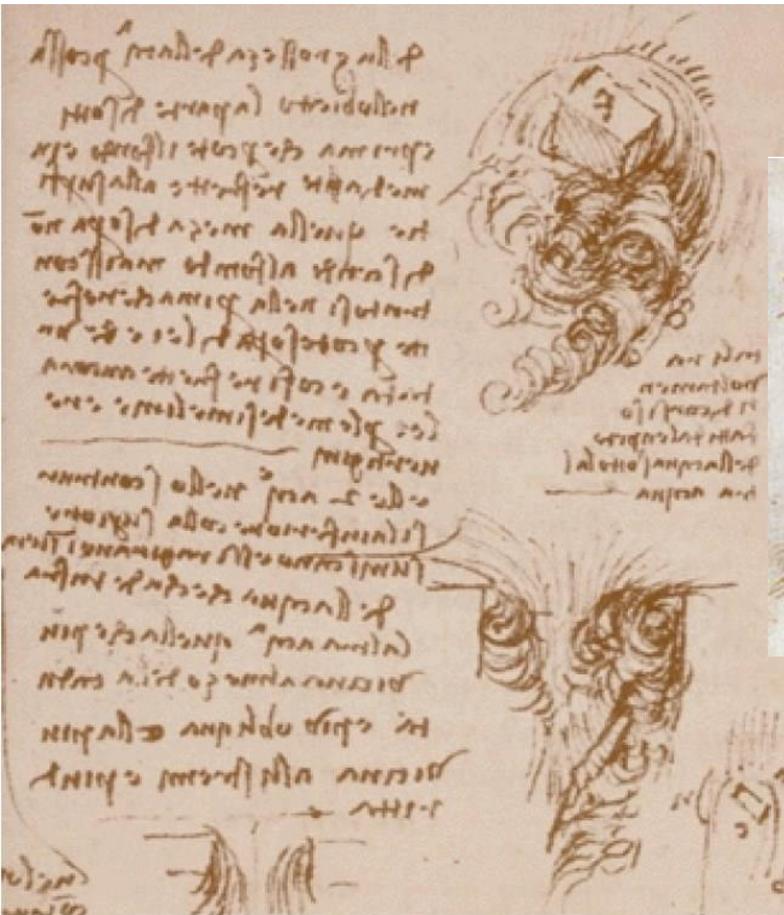
# Invarianza di scala – turbolenza, frattali



*Vincent Van Gogh, De Sterrennacht, 1889*



# Turbolenza

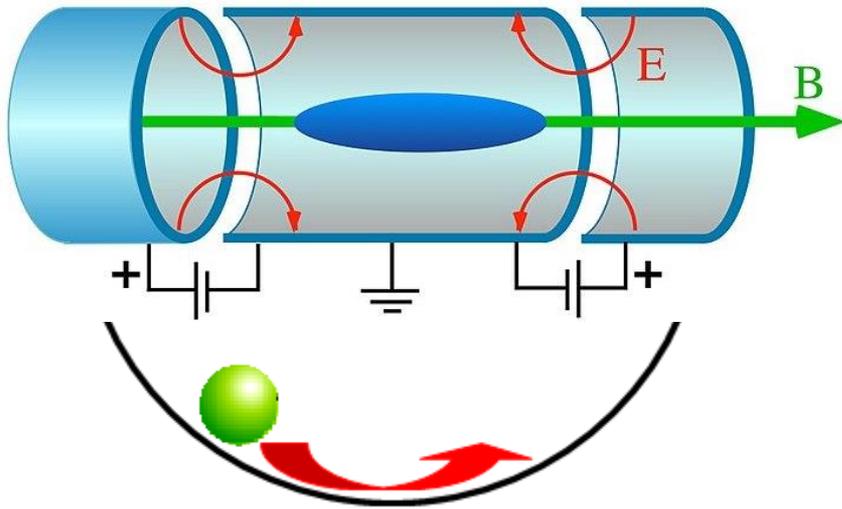


## TURBULENCE

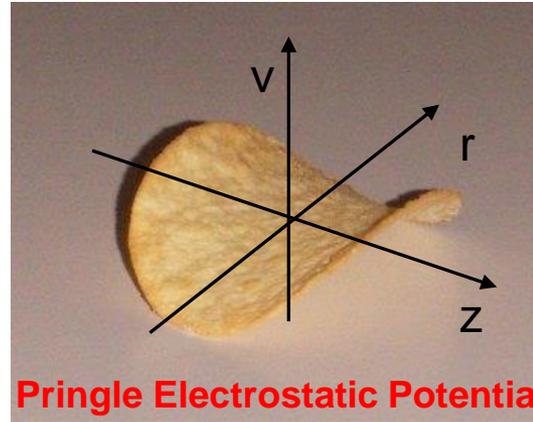
Uriel Frisch

*Horace Lamb (1849 - 1934) 'I am an old man now, and when I die and go to heaven there are two matters on which I hope for enlightenment. One is quantum electrodynamics, and the other is the turbulent motion of fluids. And about the former I am rather optimistic.'*

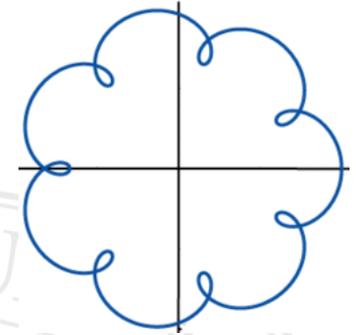
# Trappole di Penning-Malmberg e confinamento di plasmi non neutri (nnp)



oscillazione assiale



moto trasversale



Principio di confinamento:

- #  $\geq 3$  cilindri a potenziale (confinamento assiale)
- + campo magnetico assiale (confinamento radiale)

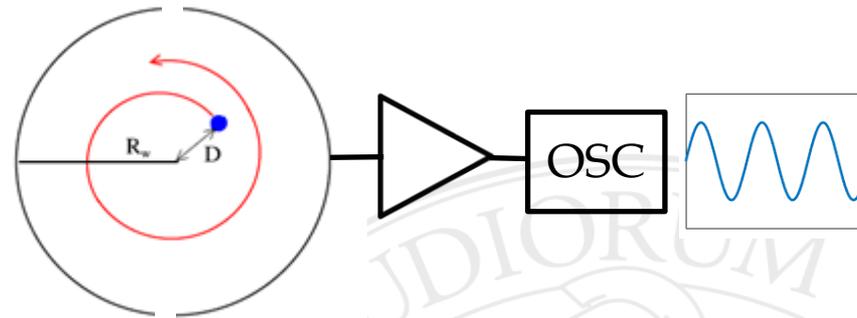
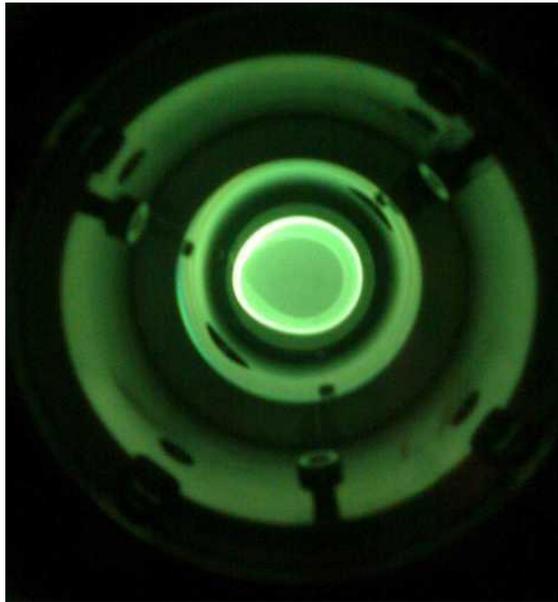
Risultato: sovrapposizione di moti oscillatori assiali e trasversali

*Visione collettiva: l'equilibrio naturale è una singola colonna (vortice) a simmetria circolare, centrata in **equilibrio rotazionale***

*In altre parole, un bel salsicciotto...*



# 'Vedere' un plasma di elettroni



$$\omega_1 = \frac{\omega_d}{1 - D^2 / R_w^2}$$

*Come si osserva la dinamica del salsicciotto?*

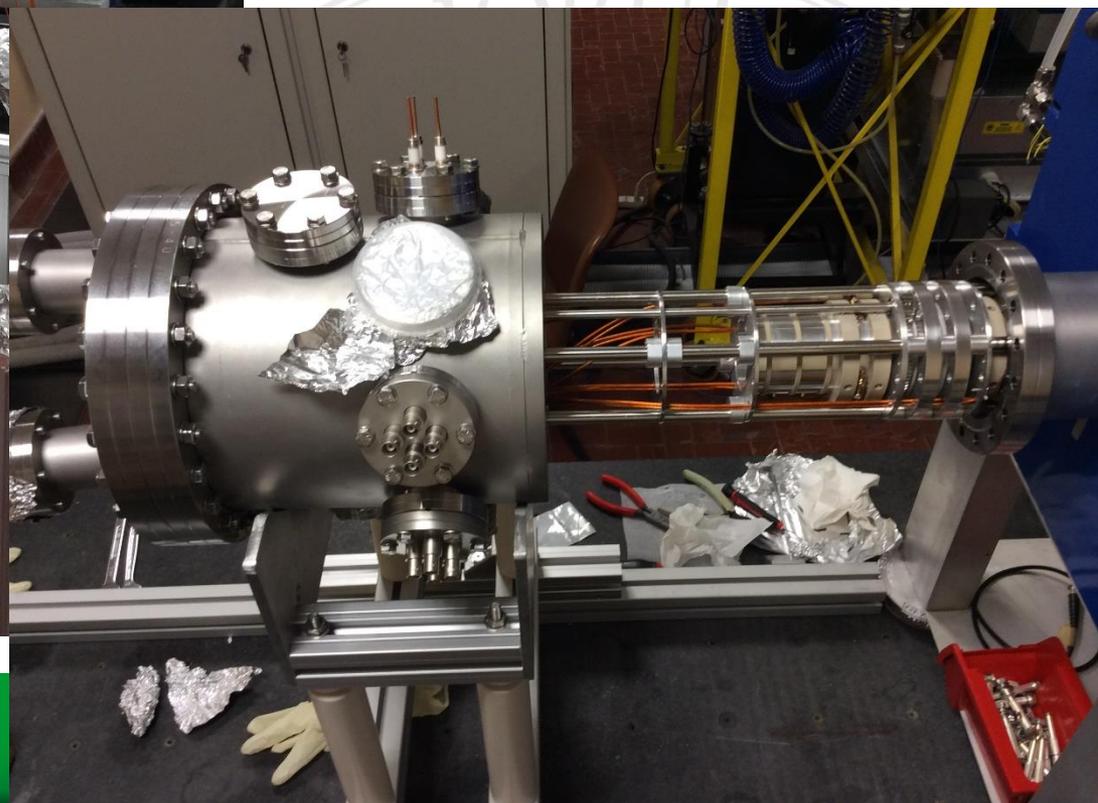
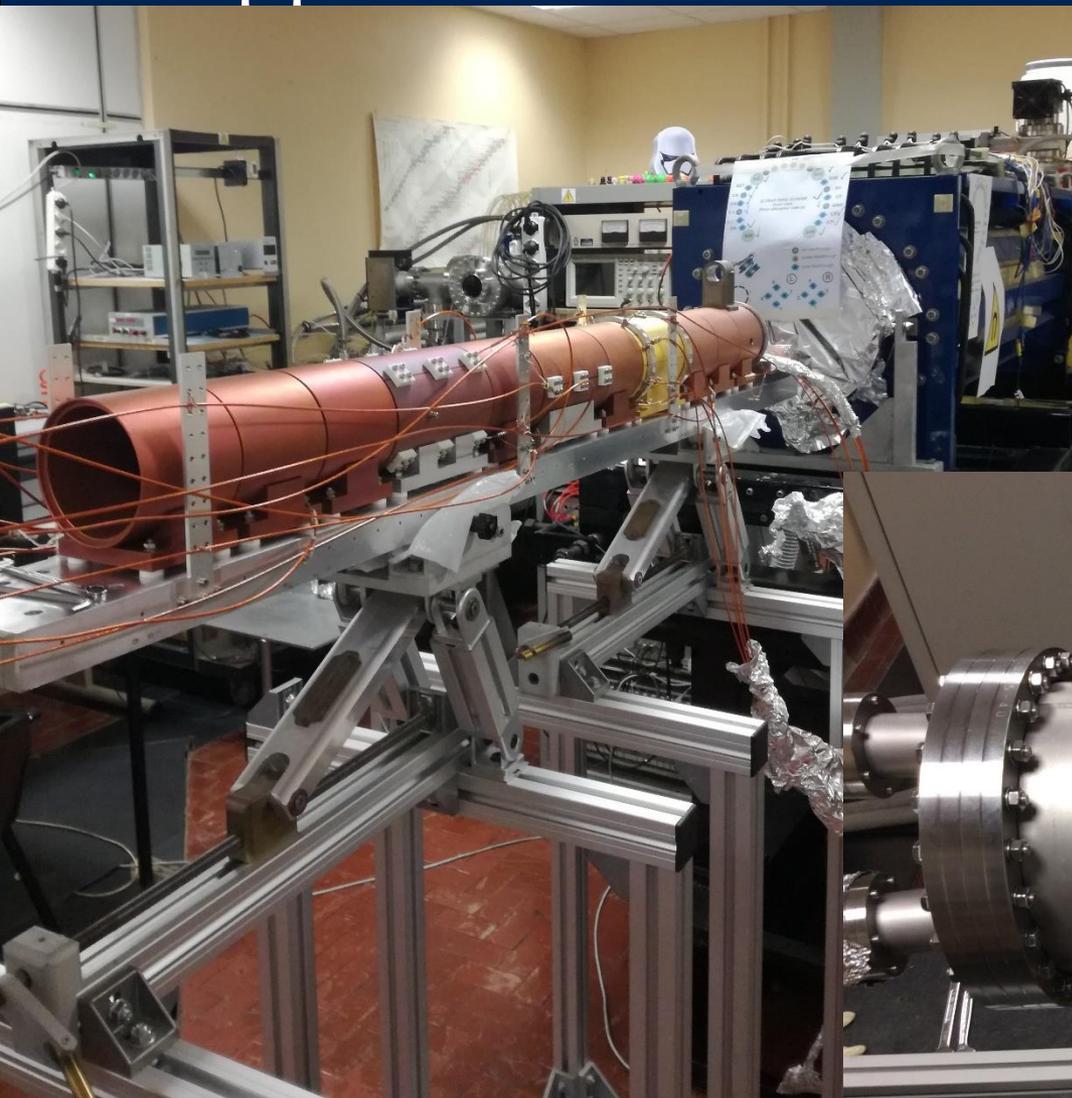
- \* coi segnali elettrici indotti sui conduttori dal moto collettivo stesso nel piano trasversale
- \* facendo uscire gli elettroni da una parte e mettendoci uno schermo al fosforo



# Ciao ciao Iron Man

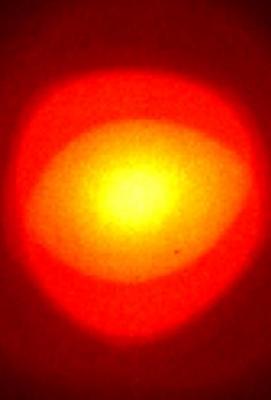
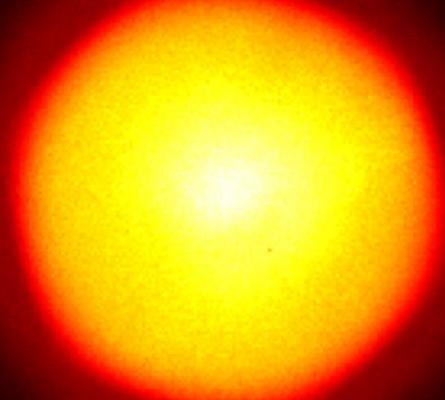
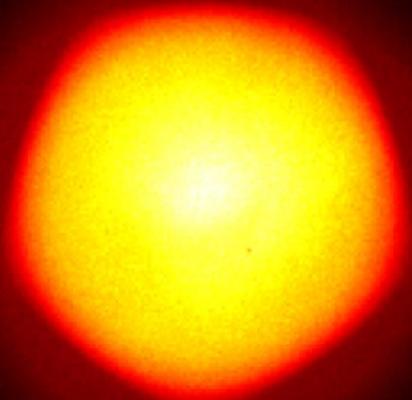
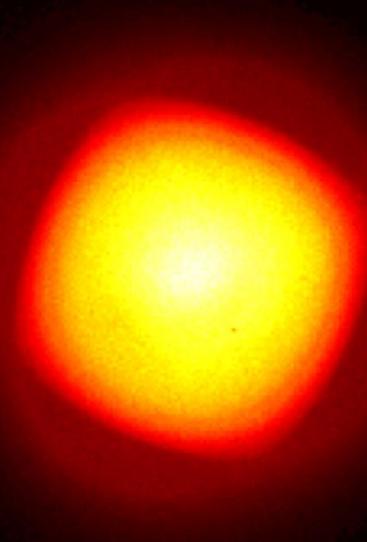
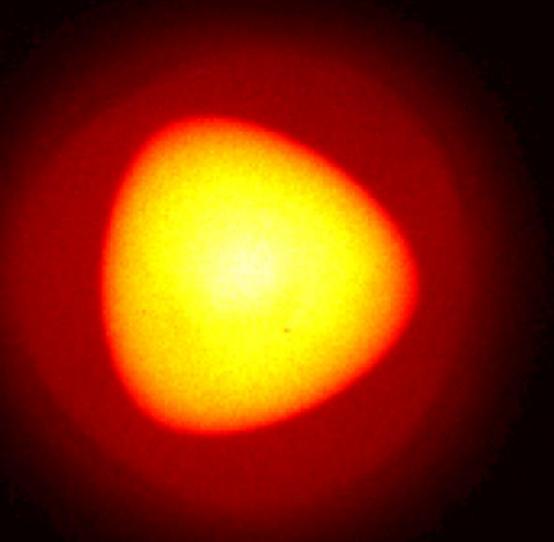
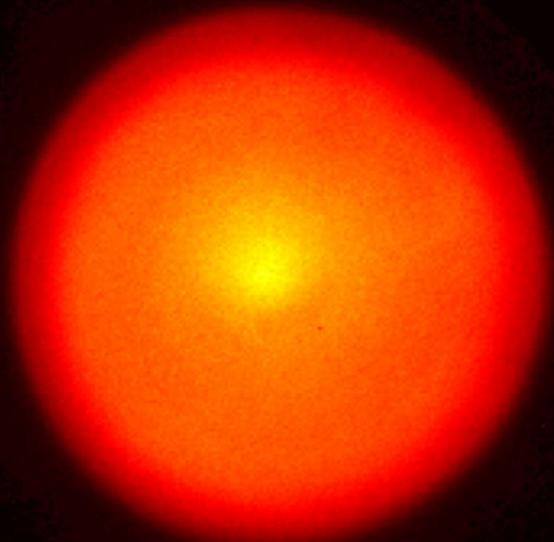


# Trappole in UNIMI: ELTRAP/ELTRAPPINO

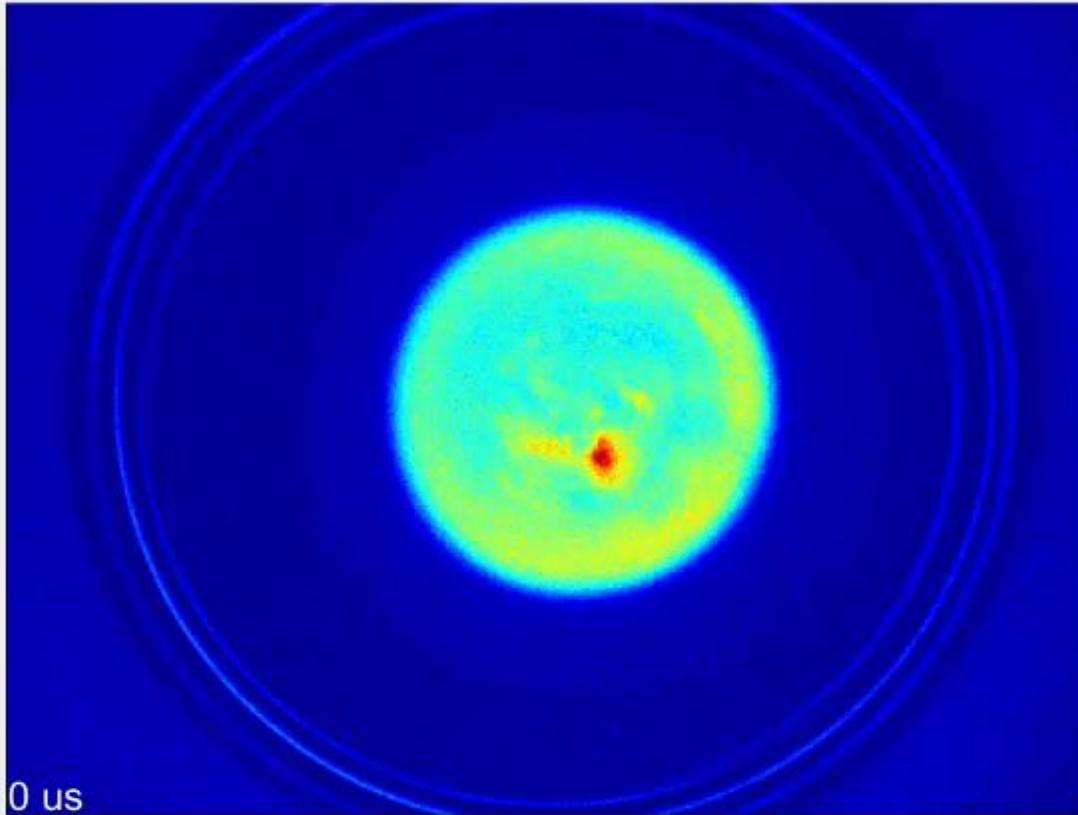


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO  
DIPARTIMENTO DI FISICA

# Eccitazione con campi elettrici rotanti



# Evoluzione, strutture: nnp come fluidi 2D



*plasma*

$$\begin{cases} \frac{\partial n}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla n = 0 \\ \bar{v} = -\frac{\nabla \Phi \times \hat{e}_z}{B} \\ \nabla^2 \Phi = \frac{en}{\epsilon_0} \end{cases}$$

*fluido*

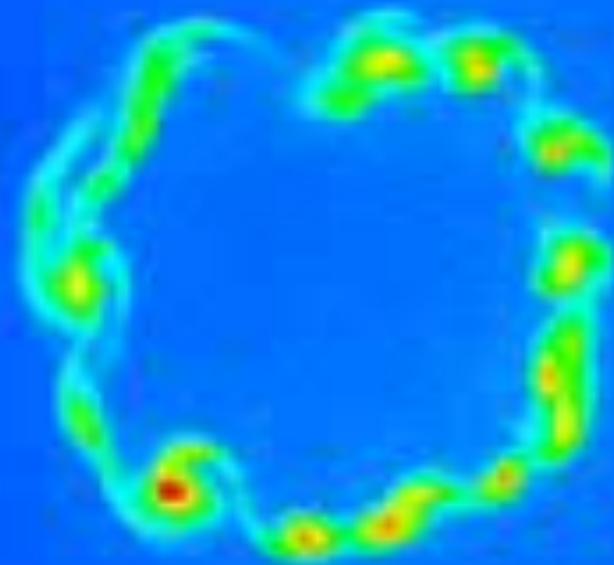
$$\begin{cases} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla \zeta = 0 \\ \bar{v} = -\nabla \psi \times \hat{e}_z \\ \nabla^2 \psi = \zeta \end{cases}$$

$$\frac{en}{\epsilon_0} \sim \zeta = (\nabla \times \bar{v})_z \quad \frac{\Phi}{B} \sim \psi$$

↑ *densità del plasma*
← *vorticità del fluido*

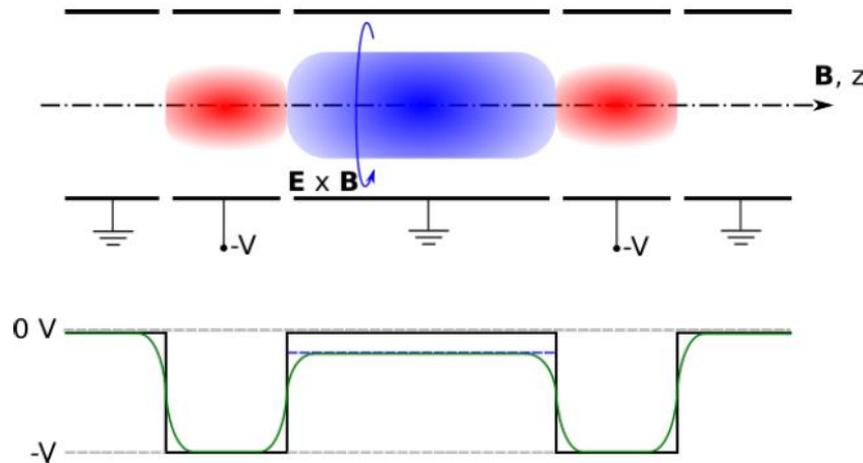


# Cristalli di vortici

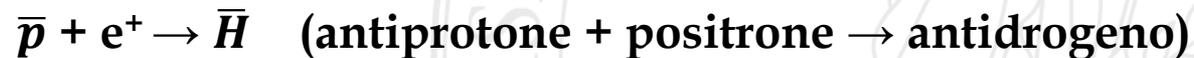


# Antimateria (trappole al CERN)

**Nested traps (trappole 'annidate')**: specie di diverso segno vanno in 'valli' e 'colline' di potenziale



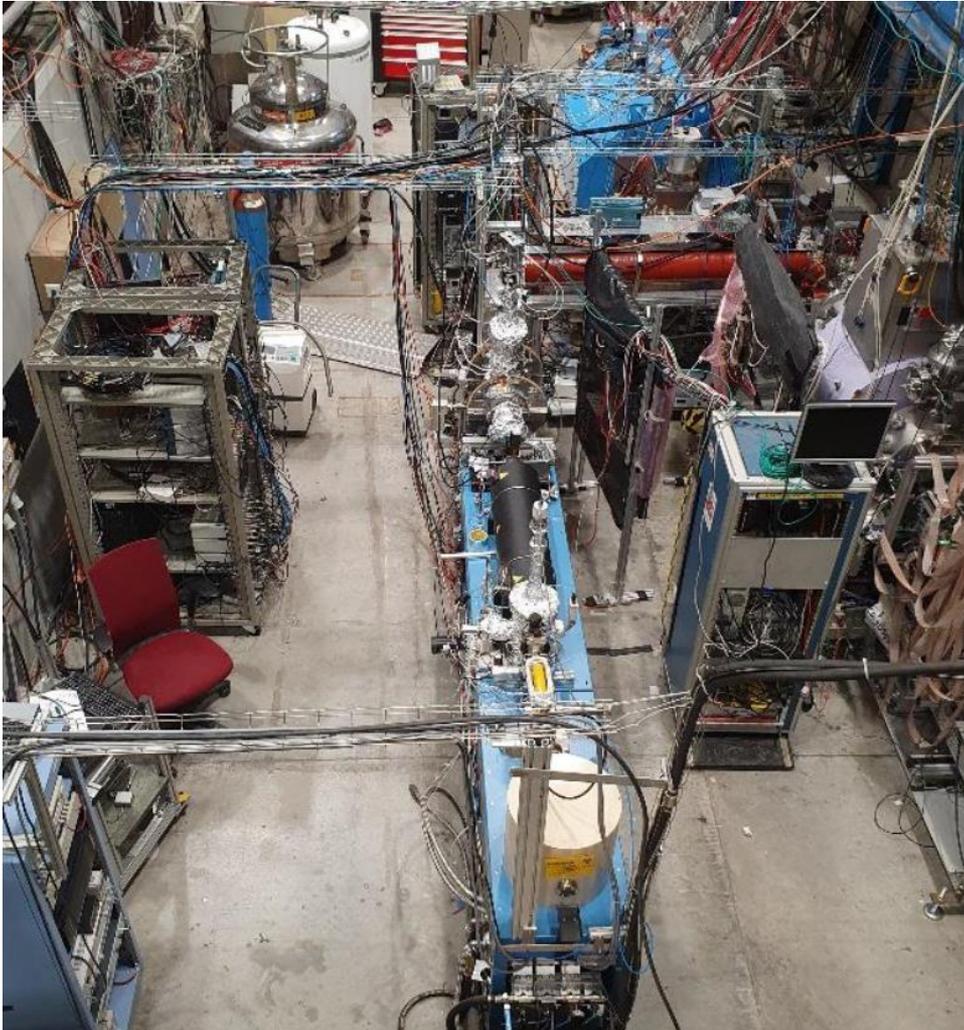
Perché fermarsi ai plasmi 'normali'? Facciamoli di antiparticelle → **formiamo antimateria**



[A che serve studiare l'antimateria? Per verificare **le simmetrie nella costruzione dell'universo**]



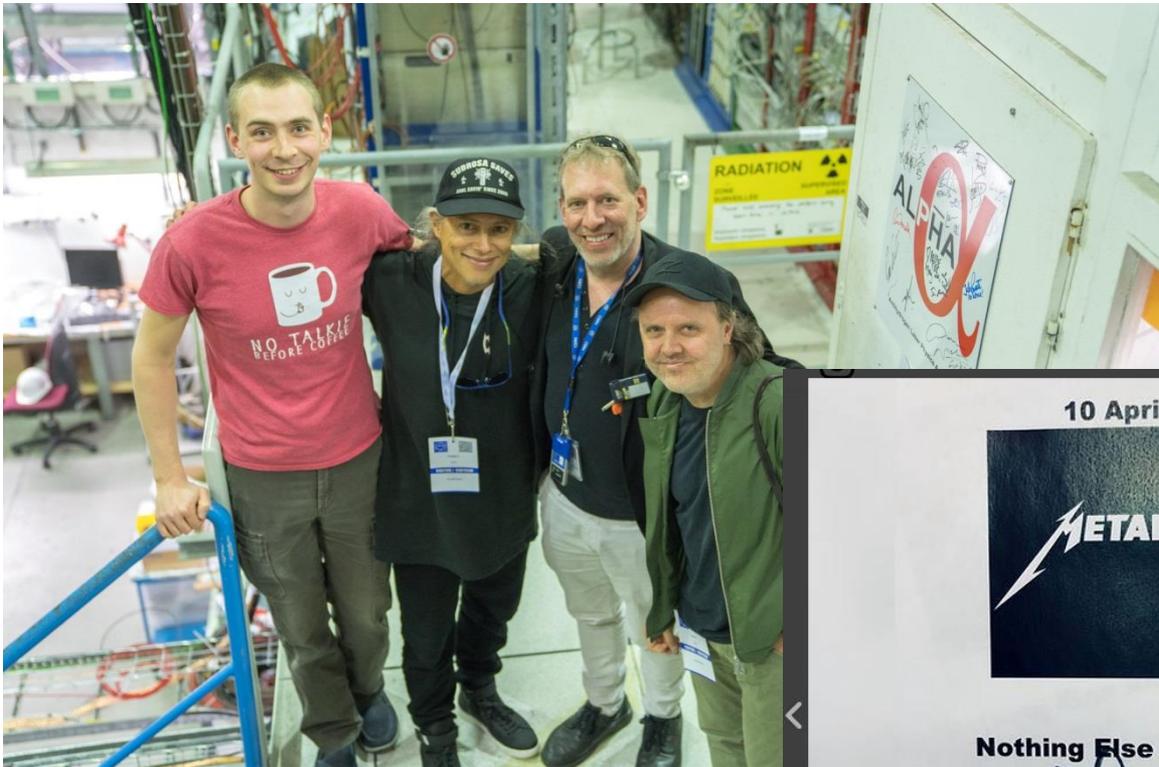
# Antimateria (trappole al CERN)



*Source: ASACUSA collaboration*



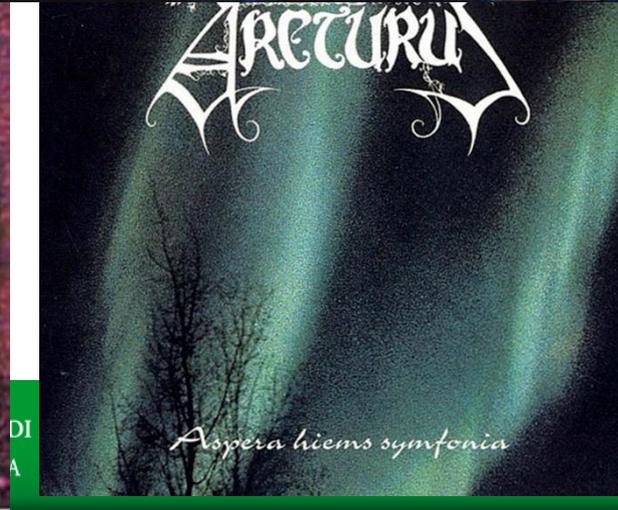
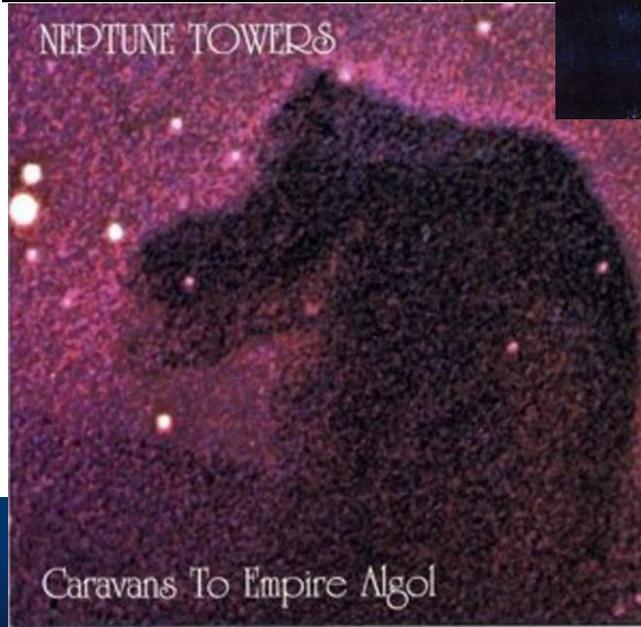
# Metallica e antimateria (trappole al CERN)



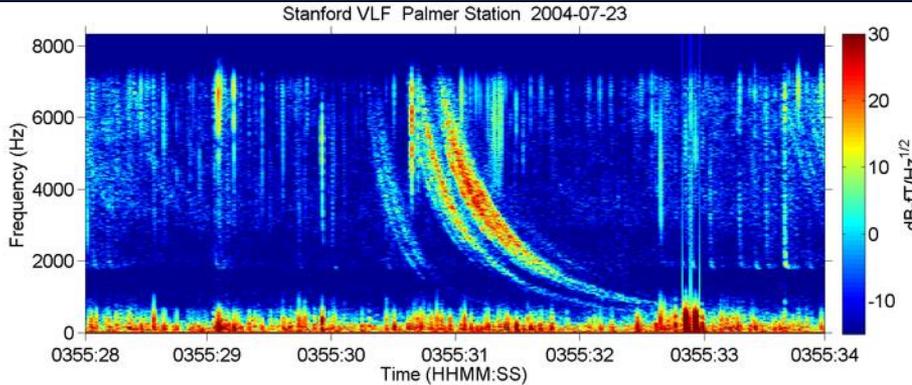
*The ALPHA collaboration*



# Plasma, scienza e musica



# Plasmi 'che si sentono'



Sound credits: NASA/University of Iowa

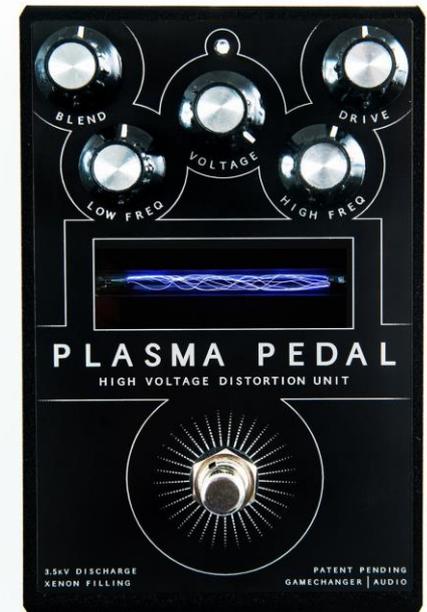
Whistler: onda elettromagnetica in plasmi atmosferici/astrofisici (fulmini)



Plasma di elettroni che ruota in una trappola ('il canarino')

Scarica in un tubo allo Xeno = distorsione bestiale

*Created and manufactured by Gamechanger Audio*



# Dove trovarci (noi, oltre ai plasmi)

**<http://plasma.fisica.unimi.it>**

**[massimiliano.rome@unimi.it](mailto:massimiliano.rome@unimi.it)**

**[giancarlo.maero@unimi.it](mailto:giancarlo.maero@unimi.it)**

