

Introduzione all'Accelerazione Laser-Plasma

Andrea Macchi

CNR, Istituto Nazionale di Ottica, sez. Adriano Gozzini, Pisa, Italy

Dipartimento di Fisica Enrico Fermi, Università di Pisa, Italy



Formazione Scuola Lavoro @ CNR/INO, Pisa, 02/09/2026
“Tecnologie Fotoniche per lo studio della Materia in Condizioni Estreme”

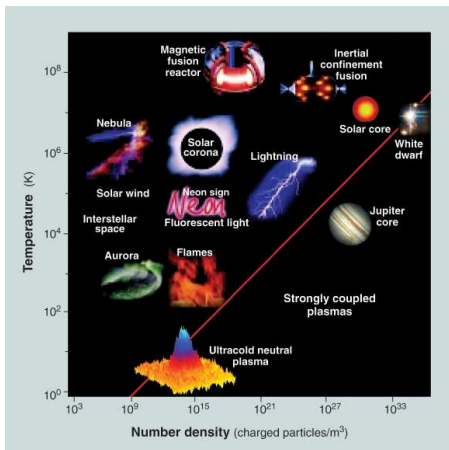
Come accelerare elettroni

Spoiler: gli elettroni fanno surf



From: T.Katsouleas, *Nature* **444** (2006) 688

Plasmi nell'Universo e sulla Terra



Plasma: “quarto stato della materia” (parzialmente o completamente ionizzata)

Varietà di condizioni:
30 ordini di grandezza in densità e 9 in temperatura*

(*) non ben definita in condizioni lontane dall'equilibrio termodinamico

Figura da T. C. Killian, *Science* **316** (2007) 705

Una definizione “operativa” di plasma

(adatta per i nostri scopi)

Plasma: mezzo formato da due fluidi interpenetrabili aventi opposta carica elettrica (**ioni** ed **elettroni**) e dominato da effetti **collettivi** o “cooperativi”: il moto sincrono e coerente delle particelle cariche genera **campi elettrici** e **magnetici** che agiscono a loro volta sulle cariche.

Il moto di ogni singolo elettrone o ione dipende dal moto di *tutte* le altre particelle (dinamica *autoconsistente*)



Giuseppe Pellizza da Volpedo, *Il Quarto Stato* (1901)

Forze elettriche

(Non c'è Elio
nei palloncini!)



Forze elettriche

In un bicchiere d'acqua da 100 cc si trovano $\approx 3 \times 10^{25}$ elettroni e protoni di carica $\mp e = 1.6 \times 10^{-19}$ C

→ quantità opposte di carica $\pm Q = \pm 3 \times 10^{25} e \approx \pm 5 \times 10^6$ C

Spostando un elettrone su 10^9
(1/miliardo) tra due bicchieri avremmo
cariche nette $\pm q = 10^{-9} Q \approx \pm 5 \times 10^{-3}$ C
A distanza $R = 1$ m i bicchieri si
attrarrebbero con la forza

$$\begin{aligned} F &= k \frac{q^2}{R^2} \approx 9 \times 10^9 \frac{(5 \times 10^{-3})^2}{1^2} \text{ N} \\ &\approx 2 \times 10^5 \text{ N} \quad (\approx 20 \text{ tonnellate}) \end{aligned}$$

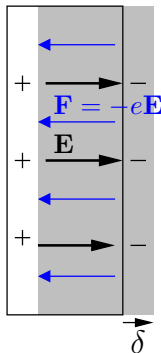


Oscillazioni di plasma

In un plasma “a riposo” le cariche negative e positive si cancellano in ogni punto $\rightarrow$ non ci sono campi elettrici
Se uno spostamento degli elettroni produce uno “sbilancio” di carica $\rightarrow$ si genera un campo elettrico $\mathbf{E}$

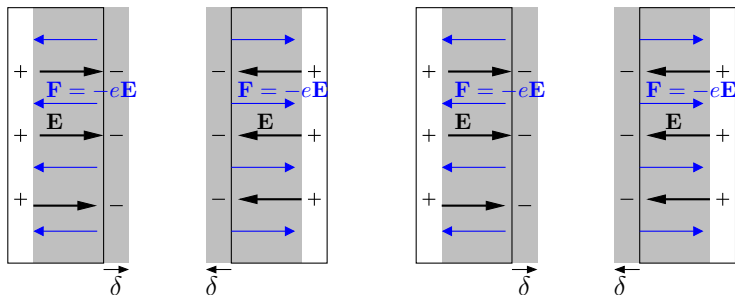
$\rightarrow$ la forza $\mathbf{F} = -e\mathbf{E}$ riporta gli elettroni verso la posizione iniziale

Esempio: uno spostamento collettivo δ di tutti gli elettroni in una “lastra” di plasma genera un campo $\mathbf{E}$ uniforme (analogo a un condensatore piano) e una forza $\mathbf{F}$ opposta allo spostamento



Oscillazioni di plasma

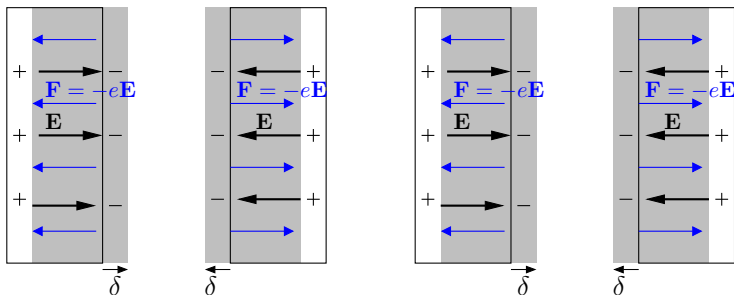
Se le forze di “attrito” sono deboli gli elettroni non si fermano nella posizione originale di equilibrio ($\delta = 0$) ma effettuano delle **oscillazioni** attorno ad essa



Oscillazioni di plasma

La pulsazione caratteristica delle oscillazioni è detta *frequenza di plasma* e dipende dalla *densità di elettroni* n_e :

$$\omega_p = \left(\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e} \right)^{1/2} = 56.4 (n_e / \text{m}^3)^{1/2} \text{ s}^{-1}$$



Da oscillazione ad accelerazione

Se galleggiamo sulla superficie del mare (*) le onde ci fanno oscillare avanti e indietro ma in media *non* ci spingono
Per poter “surfare” dobbiamo acquisire una velocità iniziale più vicina possibile alla velocità con cui si propagano i fronti d'onda (*velocità di fase*)

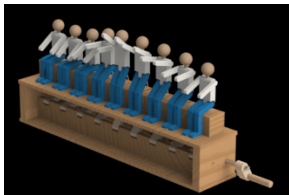
(*) non in prossimità della riva



Figura da tutorials.barefootsurftravel.com

Costruire un'onda con velocità di fase adatta

Disponendo una successione di oscillatori identici con passo Δx e sfasando oscillatori adiacenti di Δt si ottiene un'onda con velocità di fase $v_f = \frac{\Delta x}{\Delta t}$



Yam, CC BY-SA 4.0, Wikimedia Commons

(cliccare sulle immagini)



Mexican Wave at Wembley Stadium (Zoe Nicholson, YouTube)

Accelerare elettroni con campi oscillanti

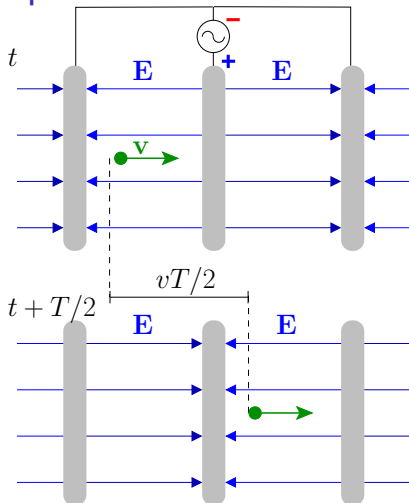
In una sequenza di cavità separate da elettrodi metallici a distanza L si applica un campo E oscillante con periodo T e con *fase opposta* ($\Delta t = T/2$) tra cavità adiacenti

$$\rightarrow v_f = \frac{L}{T/2}$$

Un elettrone di velocità $v = v_f$ trova sempre E “accelerante” (antiparallelo a v)

Per elettroni di alta energia

$$v \rightarrow c \quad \rightarrow L \simeq cT/2$$

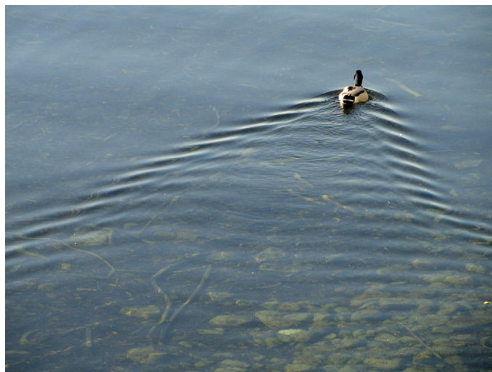


Onde di scia

Una scia di oscillazioni generate da un oggetto in moto con velocità V ha “per costruzione” velocità di fase $v_f = V$

*Bodensee at Bad Schachen,
Lindau, Germania*

(Daderot, Wikipedia, public domain)



Surf sulle onde di scia



O. Hertzog, “[Wakesurfing is Making Waves, Literally: Here’s How to Get Into the \(Surprisingly Easy\) Water Sport](#)”, *Rolling Stone*, March 23, 2023

Onde di plasma nella scia di un impulso laser

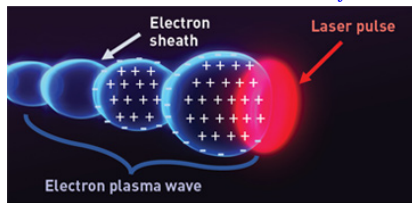
Un impulso laser breve e intenso che si propaga con velocità $V \lesssim c$ (*) in un plasma lascia una scia di oscillazioni con $v_f = V$

L'onda di plasma funziona come una serie di "cavità" dove il campo E è generato dalla separazione tra elettroni e ioni

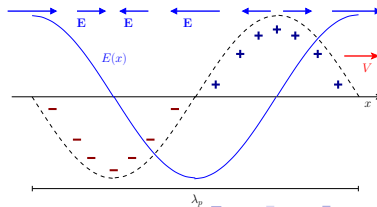
Lunghezza d'onda

$$\lambda_p = v_f T_p = V \frac{2\pi}{\omega_p}$$

T_p : periodo delle oscillazioni
(*) in un mezzo la luce si propaga a velocità minori di c



F.Albert, *Optics & Photonics News*, January 2018

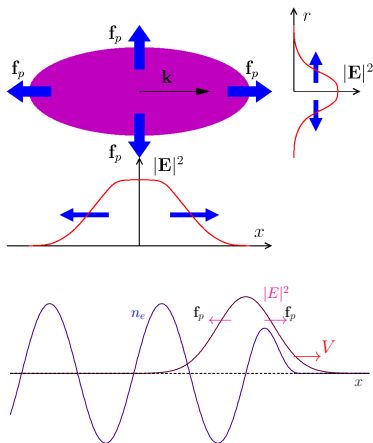


La pressione della luce spinge gli elettroni

La luce esercita una forza media f_p (*pressione di radiazione*) sugli elettroni nella direzione in cui la propria intensità decresce

→ un impulso laser focalizzato di breve durata “spinge” gli elettroni via dal proprio cammino

Gli elettroni spinti nella direzione di propagazione dell'impulso laser sono richiamati indietro dalla forza elettrica dovuta alla separazione di carica nel plasma e iniziano a oscillare



La pressione del gas di fotoni

La luce è costituita da **fotoni**:

particelle di massa nulla

con energia $\mathcal{E} = pc$

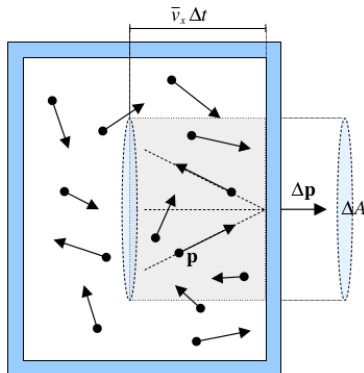
(p : quantità di moto)

Come in un gas perfetto di particelle massive gli “urti” sulle pareti di un contenitore cedono quantità di moto generando una pressione P

$$P = n \frac{\Delta p_{\perp}}{\Delta A \Delta t} = \frac{n\mathcal{E}}{3}$$

In un impulso laser di classe “ILIL@INO” la densità di fotoni

$n > 10^{38}$ fotoni/m³ (circa $> 10^{19}$ in totale)



Forze longitudinali in un'onda elettromagnetica

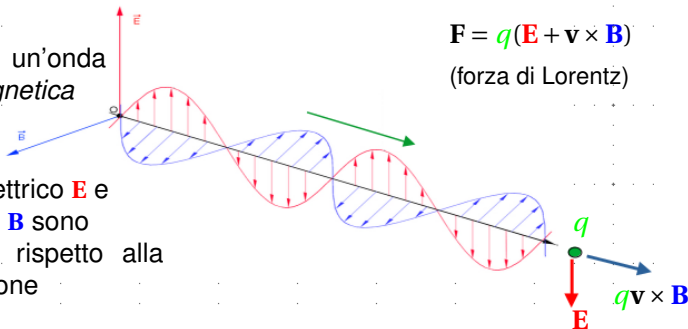
La luce è un'onda *elettromagnetica*

I campi elettrico **E** e magnetico **B** sono *trasversali* rispetto alla propagazione

I termini $q\mathbf{E}$ e $q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ della forza su una carica q agiscono in direzione rispettivamente trasversale e *longitudinale*
(in condizioni "ordinarie" il termine elettrico trasversale è largamente dominante dato che $|\mathbf{v} \times \mathbf{B}|/|\mathbf{E}| = |\mathbf{v}|/c$)

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

(forza di Lorentz)



Alcuni numeri futuristici per LWFA

(Laser WakeField Acceleration)

Considerando una densità tipica di elettroni $n_e = 10^{23} \text{ m}^{-3}$:

Massimo campo elettrico ottenibile $E_{\text{max}} \approx 4 \times 10^{13} \text{ V/m}$
($> 10^5$ volte il limite massimo in una cavità accelerante tradizionale)

Distanza di accelerazione L_{acc} per portare un elettrone
all'energia $\mathcal{E} = 2 \text{ TeV} = 2 \times 10^{12} \text{ eV}$ (*): $L_{\text{acc}} \approx \frac{\mathcal{E}}{eE_{\text{max}}} \approx 90 \text{ m}$

($\sim 1/100$ la lunghezza di un acceleratore lineare “standard”)

(*) $1 \text{ eV} = e \times 1 \text{ V} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$

SLAC
(Stanford,
USA)
lunghezza
3 km



Sfide aperte e difficoltà varie

- L'onda di plasma non può eccedere un limite di ampiezza oltre il quale si “rompe”

(quando la velocità di oscillazione dell'onda diventa uguale alla velocità di fase)



- Difficile generare onde di plasma sufficientemente “lunghe” per raggiungere l'energia massima teoricamente possibile (l'impulso laser si “allarga” per diffrazione perdendo intensità)
- Gli elettroni “surfanti” devono essere **iniettati** al posto e momento giusti per poter “prendere” l'onda in modo ottimale

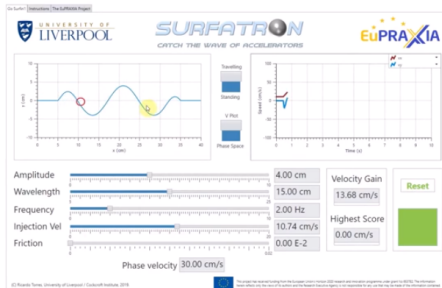
SURFATRON: il gioco dell'iniezione

SURFATRON

CATCH THE WAVE OF ACCELERATORS

www.eupraxia-project.eu/surfatron.html

Gioca online a “prendere”
l'onda!



Versione “meccanica”

Impulsi “guidati”

Indice di rifrazione del plasma

$$n = \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega_L^2} \right)^{1/2} = 1 - \frac{n_e}{n_c(\omega)}$$

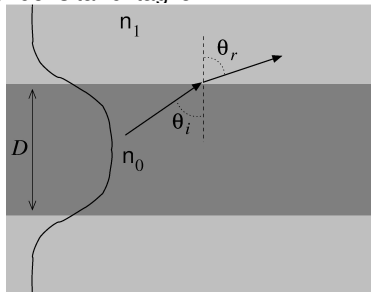
ω_L : pulsazione del laser

$n_c(\omega)$: densità “di taglio”

Formando un canale di bassa densità in un plasma l'indice di rifrazione è *maggiore* sull'asse che ai bordi

→ effetto “fibra ottica”:

la **rifrazione** guida l'impulso elettromagnetico su lunghe distanze



Analogia con la riflessione dalla ionosfera

$$n(\omega) \text{ reale} \leftrightarrow n_e < n_c \equiv \frac{\epsilon_0 m_e \omega^2}{4\pi e^2} = 1.1 \times 10^{27} \text{ m}^{-3} \left(\frac{\lambda}{1 \mu\text{m}} \right)^{-2}$$

$n_e > n_c(\omega)$: il plasma è riflettente

I metalli ($n_e \approx 10^{29} \text{ m}^{-3}$) riflettono la luce visibile ($\lambda = 0.4 - 0.8 \mu\text{m}$)

La ionosfera ($n_e \approx 10^{10} - 10^{12} \text{ m}^{-3}$) riflette le onde radio ($\lambda \gtrsim 1 \text{ m}$)

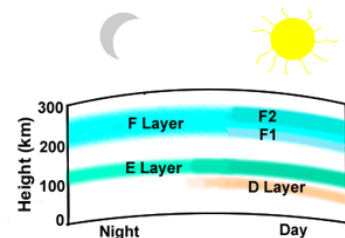
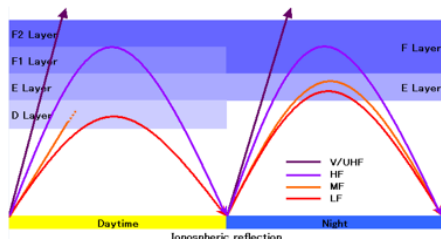


Figure from engineerstutor.com



Alcuni numeri realistici (esperimenti ILIL)

$$n_e \approx 10^{24} \text{ m}^{-3} \text{ (gas ionizzato)}$$

$$E_{\text{max}} \approx 10^{12} \text{ V/m}$$

$$\mathcal{E} \approx 100 \text{ MeV} = 2 \times 10^8 \text{ eV}$$

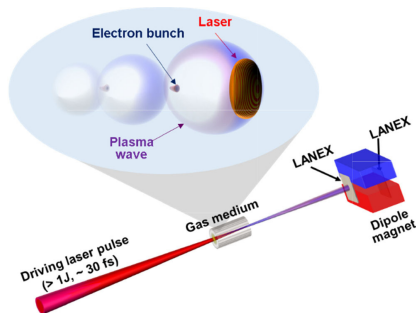
$$L_{\text{acc}} \approx 100 \text{ } \mu\text{m} = 10^{-4} \text{ m}$$

Caratteristiche uniche
rispetto a sistemi tradizionali:

- **alto numero** di elettroni per “pacchetto” ($\approx 10^9$)
- durata **ultrabreve** ($\approx 1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$) dei “pacchetti”

→ sorgente adatta per applicazioni specifiche inclusa
radioterapia “FLASH”

(lezione di Simona Piccinini)



M.Mirzaie et al *Current Optics and Photonics* **9** (2025) 581

Come accelerare ioni

Spoiler: gli ioni vanno a vela

(Disclaimer: non è l'unico approccio allo studio)

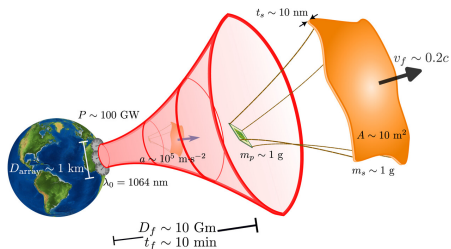


Luis Le Breton, *Piroga dei nativi dell'Isola Obalahou*

Light Sail: a vela con la luce

Vela spaziale a propulsione solare

A. Davoyan, “Extreme Solar Sailing for Breakthrough Space Exploration”, NASA



Vela spaziale a propulsione da laser terrestre

J. Y. Lin et al “Lightsails for Interstellar Travel”,
ACS Photonics **12** (2025) 4818

A vela verso Alpha Centauri?

22

NATURE

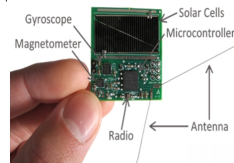
JULY 2, 1966 VOL. 211

G.Marx (1966)

INTERSTELLAR VEHICLE PROPELLED BY TERRESTRIAL LASER BEAM

By PROF. G. MARX

Institute of Theoretical Physics, Roland Eötvös University, Budapest



Breakthrough Starshot (2016)

breakthroughinitiatives.org

Per approfondire la storia del concetto da Keplero (1600) in poi:

AM, [A vela con la luce, cercando civiltà aliene](#)

Il Colle di Galileo (2026)

in corso di pubblicazione

osiris.df.unipi.it/~macchi/OUTREACH/

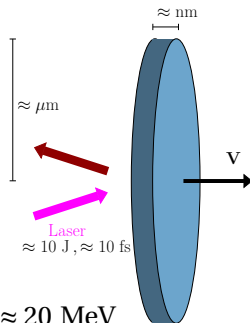


Nel nostro piccolo . . .

Caratteristiche della “vela”:

- **riflettente** per massimizzare la pressione del laser
- **densa** (materia solida) per “attaccare” elettrostaticamente gli ioni agli elettroni
- spessore **supersottile** ($\sim 1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) per massima leggerezza

Per velocità $\sim 0.2c \rightarrow$ energie per nucleone $\approx 20 \text{ MeV}$



PHYSICAL REVIEW LETTERS **127**, 194801 (2021)

Featured in Physics

Selective Ion Acceleration by Intense Radiation Pressure

A. McIlvenny^{1,†}, D. Doria^{1,2}, L. Romagnani^{1,3}, H. Ahmed^{1,4}, N. Booth⁴, E. J. Ditter⁵, O. C. Ettlinger⁵,
G. S. Hicks⁵, P. Martin¹, G. G. Scott⁴, S. D. R. Williamson⁶, A. Macchi^{7,8}, P. McKenna⁶, Z. Najmudin⁵, D. Neely^{4,*},
S. Kar¹ and M. Borghesi^{1,‡}

Inaspettata risonanza mediatica . . .



PARTICLE THERAPY | RESEARCH UPDATE

Intense radiation pressure enables selective acceleration of carbon ion beams

07 Dec 2021

Physics Today **75**, 1, 19 (2022); <https://doi.org/10.1063/PT.3.4916>

Mirror

Irish boffins' laser to help beat cancer

Physics

A New Trick to Make Short-Pulse Ion Beams

A new laser technique could lead to ultrashort-pulse, high-energy ion beams for medical use.

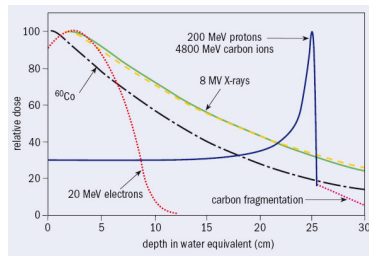
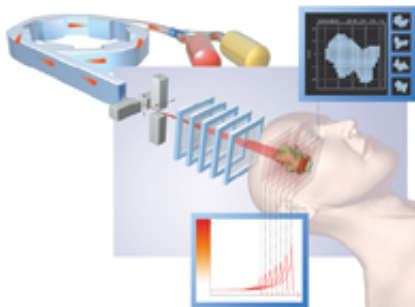
A laser selectively kicks carbon out of a foil

Experiments and simulations show how the shape of a laser's profile determines which target atoms make up the resulting ion beam.



Adronterapia “FLASH” con ioni accelerati da laser?

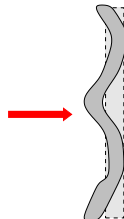
Un fascio di ioni può colpire un tumore annidato con maggiore precisione di raggi X, γ o **elettroni**



La sorgente laser-plasma “light sail” è promettente per poter fare studi radioterapici preliminari con ioni Carbonio in regime FLASH

Instabilità della Light Sail

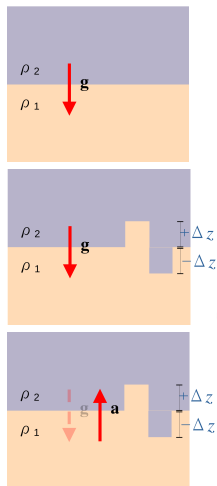
Problema: la “vela” tende a corrugarsi compromettendo l’uniformità dell’accelerazione



Si tratta di un caso di **Instabilità** di Rayleigh-Taylor osservata in natura in vari contesti

Crab Nebula (Hubble)

Instabilità di Rayleigh-Taylor



Due fluidi sovrapposti in un campo di gravità g sono in equilibrio **instabile** se il fluido superiore (2) ha densità maggiore del fluido inferiore (1)

Un piccolo “rimescolamento” tra i fluidi all’interfaccia decresce l’energia potenziale del sistema

→ i fluidi tenderanno a “scambiarsi”

Per il “principio di equivalenza” la stessa situazione si verifica se un fluido leggero “accelera” con accelerazione a verso il fluido pesante

Nel caso dell’accelerazione laser il fluido “leggero” è il laser (ovvero la ... *light*)

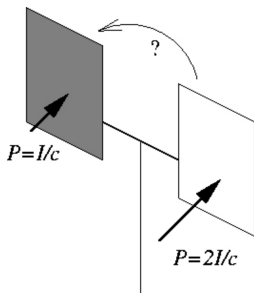
La fisica del plasma è lottare contro le instabilità . . .

List of plasma instabilities [edit]

- Buneman instability,^[3]
 - Farley-Buneman instability,^{[4][5]}
 - Jeans-Buneman instability,^{[6][7]}
 - Relativistic Buneman instability,^[8]
- Cherenkov instability,^[9]
- Coalescence instability,^[10]
 - Non-linear coalescence instability
- Chute instability,
- Collapse instability,
- Cyclotron instabilities, including:
 - Alfvén cyclotron instability
 - Cyclotron maser instability,^[11]
 - Electron cyclotron instability
 - Electrostatic ion cyclotron instability
 - Ion cyclotron instability
 - Magnetoacoustic cyclotron instability
 - Proton cyclotron instability
 - Non-resonant beam-type cyclotron instability
 - Relativistic ion cyclotron instability
 - Whistler cyclotron instability
- Dlocotron instability,^[12] (similar to the Kelvin-Helmholtz fluid instability).
- Disruptive instability (in tokamaks)^[13]
- Double emission instability,
 - Edge-localized modes,^{[14][15]}
 - Explosive instability (or Ballooning instability),^[16]
- Double plasma resonance instability,^[17]
- Drift instability^[18] (a.k.a. drift-wave instability,^[19] or universal instability^[20])
- Firehose instability (a.k.a. hose instability), not to be confused with the similarly named Firehose instability in galactic dynamics
- Fish instability,
- Free electron maser instability,
- Gyrotron instability,
- Helical (Helix) instability,
- Jeans instability,^{[23][24]}
- Magnetic buoyancy instability
 - Interchange instability (a.k.a. flute instability),^[25]
 - Parker instability^[26] (a.k.a. undular instability or magnetic Rayleigh-Taylor instability)
 - Mixed instability (a.k.a. quasi-interchange instability)
- Magnetorotational instability (in accretion disks)
- Magnetothermal instability (Laser-plasmas),^[27]
- Modulational instability
- Non-Abelian instability,
- Pair instability (in supernovae)
- Peratt instability (stacked toroids)
- Pinch instability (a.k.a. Bennett pinch instability),^{[28][29]}
 - Sausage instability ($m=0$)
 - Kink instability ($m=1$)
 - Helical kink instability (a.k.a. helical instability)
- Rayleigh-Taylor instability (RTI, a.k.a. gravitational instability)
- Rotating instability,^[30]
- Tearing mode instability (or resistive tearing instability,^[31])
- Two-stream instability (a.k.a. beam-plasma instability, counter-streaming instability)
 - Beam acoustic instability

EXTRA SLIDES

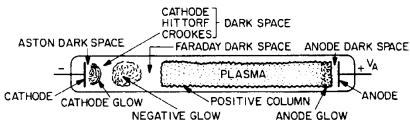
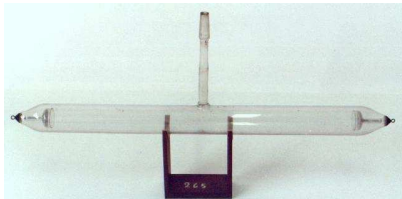
Mulino ottico (aka radiometro solare)



La pressione della luce è maggiore sulla faccia bianca (riflettente) che su quella nera (assorbente) ...ma il mulino gira in senso *opposto* alla coppia generata!

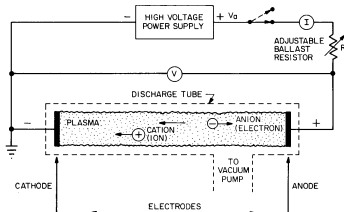
Effetti termici dovuti al riscaldamento maggiore della faccia assorbente e alla maggiore pressione del gas nel bulbo (il vuoto è imperfetto) dominano sulla pressione luminosa

In principio fu il tubo di scarica



“La colonna positiva [...] è ciò che Irving Langmuir aveva in mente dando la definizione di plasma”

[J. Reece Roth, *Industrial Plasma Engineering* (IoP Publishing, 2004)]

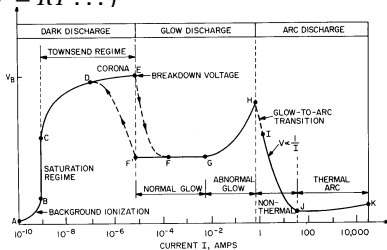


I. Langmuir: premio Nobel,
Chimica (1932)

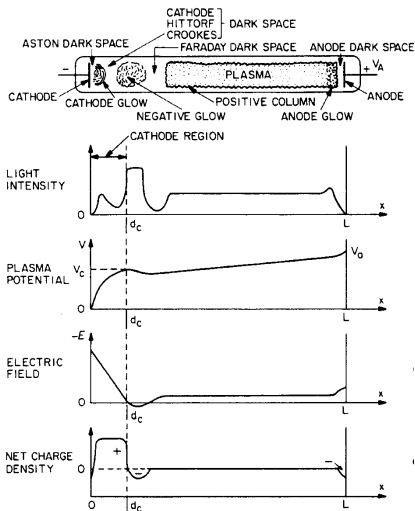


La complessa fisica del tubo

- regioni di diversa luminosità
- relazione complicata tra tensione V e corrente I (confrontare con la legge di Ohm $V = RI \dots$)

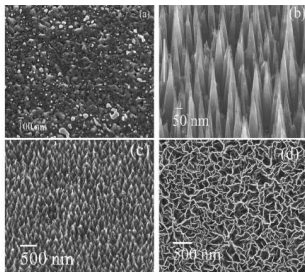


“Ci sono più cose tra catodo e anodo di quante ne possa sognare la tua filosofia” (H. Raether)



Roth Industrial Plasma Engineering, 2004)

Plasmi che funzionano - 1

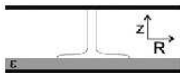
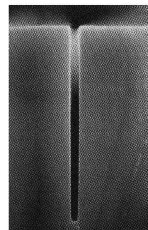
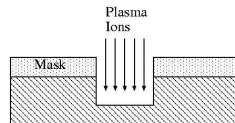


Incisione al plasma
→ produzione di
microprocessori

M.A.Lieberman & J.L.Lichtenberg
*Principles of Plasma Discharges
& Materials Processing* (2005)

Nanofabbricazione

K.Ostrikov *Rev.Mod.Phys.* **77** (2005) 489



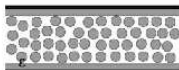
(a)



(c)



(b)



(d)

Scariche a barriera dielettrica
per schermi, attuatori,
trattamento di superfici, ...

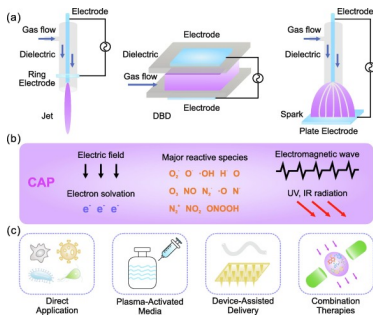
V.I.Gibalov & G.J.Pietsch *J.Phys.D:Appl.Phys.* **33** (2000) 2618

Plasmi che funzionano - 2

Plasma medicine

Z. Chen & Z. Gu

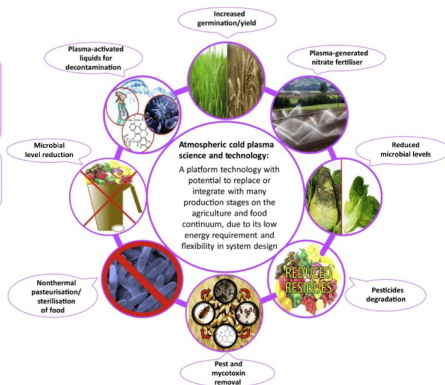
Materials Today **54** (2022) 153-188



Plasma agriculture

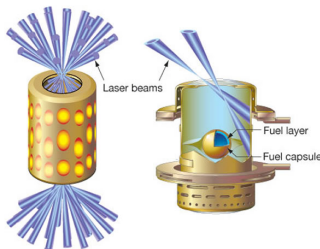
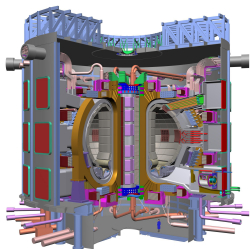
M. Veerana et al.

Plasma Chemistry & Plasma Processing **44** (2024) 2263



Plasmi che funzioneranno (speriamo)

Molta della Fisica del Plasma di laboratorio si è sviluppata intorno alle ricerche sulla **Fusione Termonucleare Controllata** per la produzione di energia



“C'è di mezzo il plasma? Non può funzionare”
(Edward Teller)