

Astrofisica o energia?

Prospettive della fisica dei plasmi

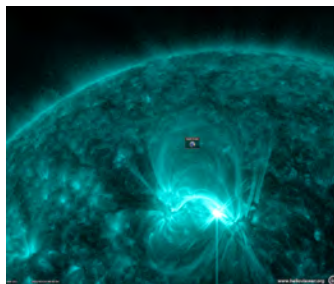
F. Pegoraro

Accademia Nazionale dei Lincei, Roma

21 aprile 2022

Il titolo è un pò riduttivo

In effetti l'ambito della fisica dei plasmi è ben più ampio, ma nella mezz' ora che ho a disposizione mi soffermerò principalmente su due aspetti: il ruolo che la fisica dei plasmi ha nell'aiutarci a comprendere



Brillamento solare 13-14 marzo 2022 <https://helioviewer.org> JET <https://ccfe.ukaea.uk/research/joint-european-torus>

le dinamiche dell'Universo e come prometta di sviluppare una fonte di energia alternativa ai combustibili fossili.

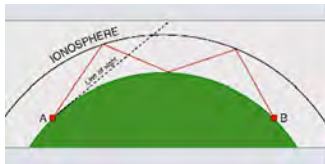
Un plasma è ...

1) un gas ionizzato cioè un gas in cui gli atomi si sono separati in ioni con carica elettrica positiva ed elettroni con carica elettrica negativa.

2) la cui dinamica è controllata dai campi elettromagnetici che queste cariche libere creano nel loro insieme. Questo comportamento “collettivo” trae origine dal fatto che l’interazioni elettromagnetiche sono a lunga distanza e quindi coinvolgono molte particelle insieme.

La formazione di un plasma richiede in generale elevate energie e/o condizioni in cui non vi è equilibrio termodinamico.

Sulla Terra in forma naturale è raro ma è presente nella ionosfera: trasmissioni radio oltre l’orizzonte, (Marconi 1901, Kennelly, Heaviside 1902, Appleton 1924 - Nobel prize 1947, radio Lussenburgo radio “pirata” anni trenta e musica pop quando ero giovane).



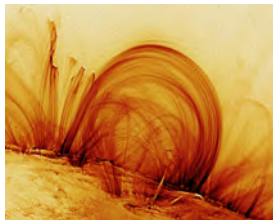
Origine del nome

Il termine “plasma” è stato introdotto un pò meno di cento anni fa da I. Langmuir, pare in analogia con il plasma sanguigno che porta globuli rossi e globuli bianchi (elettroni e ioni).

L’analogia non è poi così calzante e si preferisce derivare il nome direttamente dal greco dove $\pi\lambda\alpha\sigma\mu\alpha$ è strettamente connesso con il concetto di forma (e di cambiamento di forma) e riferirlo alla relazione tra forma e dinamica che caratterizza il comportamento del plasma.



Irving Langmuir



Archi solari di plasma modellati dal campo magnetico. Nasa Trace

Inizi delle ricerche sul plasma

Studio delle scariche elettriche nei gas, di grande importanza per la fisica atomica (J.J. Thomson premio Nobel 1906 conducibilità nei gas, elettrone),

fortemente innovativo è l'aver compreso che oltre l'atmosfera non c'è il vuoto ma un sistema di cariche e campi con una propria dinamica.

Allo studio dell'ambiente circum-terrestre (magnetosfera) ha contribuito con grande originalità H.Alfvén, premio Nobel nel 1970 per onde magnetoidrodinamiche che si propagano in un plasma immerso in un campo magnetico 1942. Concetto utilizzato nel 1949 da E. Fermi per la teoria dei raggi cosmici presupponendo l'esistenza di un campo magnetico su scala galattica. Ricordo V. Ferraro cui si deve la spiegazione di perchè il plasma della magnetosfera terrestre in una prima schematizzazione ruoti in maniera solidale con la terra (e in generale intorno a corpi conduttori rotanti).

I propose in the present note to discuss a hypothesis on the origin of cosmic rays which attempts to meet in part this objection, and according to which cosmic rays originate and are accelerated primarily in the interstellar space, although they are assumed to be prevented by magnetic fields from leaving the boundaries of the galaxy. The main process of acceleration is due to the interaction of cosmic particles with wandering magnetic fields which, according to Alfvén, occupy the interstellar spaces.



Aurora boreale



Vincenzo Ferraro

E. Fermi *On the origin of Cosmic Radiation*

Inizio delle ricerche sui plasmi come sorgente di energia dalla fusione di nuclei leggeri.

1920 A.S. Eddington propone il meccanismo dei processi di fusione nucleare nelle stelle. (H. Bethe anni '30)

1952 Test di Ivy Mike ordigno termonucleare Teller-Ulam (in effetti è un ibrido fissione-fusione)

Produzione di energia pacifica da reazioni di fusione nucleare.

Subito dopo la guerra le ricerche sono segrete:

GP Thomson (figlio di JJT e anche lui Nobel) in Inghilterra,

I.Y. Tamm (Nobel interpretazione Cherenkov radiation) A.D. Sakharov (Nobel pace), Project Matterhorn a Princeton USA , Los Alamos, poi Livermore, L. Spitzer (astrofisico).

Lo studio dei plasmi da parte di una comunità aperta e internazionale inizia alla fine degli anni '50, "Second United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy" *Atoms for Peace* (1958) : sfruttamento pacifico della Fusione nucleare.

Inizi delle ricerche



Risultati "declassificati" (Snow-plow model).

Come in molti altri paesi, in quegli stessi anni parte la ricerca in fisica dei plasmi anche in Italia sotto la spinta di tre soci Lincei

Piero Caldirola (a Milano Università CNR)

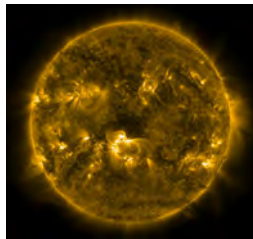
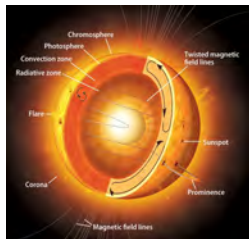
Antonio Rostagni (a Padova Università CNR)

Enrico Persico (a Roma - Frascati CNRN).

Se non sulla terra dove troviamo plasma ?

Il primo sistema fisico che viene spontaneo associare ai plasmi è il Sole e specialmente la sua fotosfera, cioè la “superficie” che vediamo del Sole, e le regioni più esterne fino alla corona.

Queste regioni sono molto meno dense e molto più calde della **superficie del sole** (un milione di gradi Kelvin nella corona contro un pò meno di sei mila gradi Kelvin per la fotosfera ed una densità della corona 10^{-12} quella della fotosfera). **Questo trasporto dal più freddo al più caldo non è riconducibile a processi termodinamici.**



Per spiegare il riscaldamento della corona si pensa ad assorbimento dell'energia trasportata dalla propagazione di turbolenza di plasma.

Questa convoglia, essenzialmente senza dissiparla, energia da scale spaziali grandi su cui avvengono i movimenti fotosferici a scale dell'ordine delle scale microscopiche nel plasma, ad esempio il raggio di girazione dei protoni nel campo magnetico del sole, dove questa energia può essere assorbita.

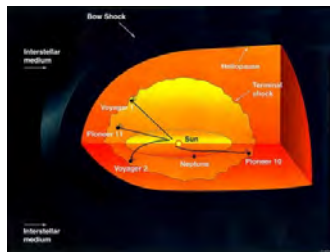
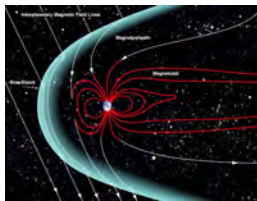
Curiosità storica il Coronium e la difficoltà a concepire condizioni fuori equilibrio termodinamico.

During the solar eclipse of August 7, 1869, both Charles Young and William Harkness first found that the spectrum of the solar corona was characterized by a conspicuous green emission line. By the beginning of the 20th century, eclipse observations revealed at least ten coronal emission lines, none of which had been observed to come from terrestrial substances. For the want of a better explanation, astronomers concluded that the solar corona consisted of some mysterious substance, which they named "coronium"; but it was strongly suspected that the large number of emission lines did not all come from the same substance.

Twenty years work has been done on this problem by physicists whose horizon has been tacitly limited by the astronomers' conception of coronal conditions; if, where they have failed, a solution which ignores this conception proves otherwise acceptable, then astronomers will welcome the opportunity of enlarging their ideas, and solar physics will benefit accordingly. Hunter Nature 1942.

Magnetosfera terrestre e Eliosfera

Allontaniamoci dalla corona solare troviamo plasma magnetizzato e di bassa densità, turbolento, che riempie lo spazio interplanetario formando il vento solare, le magnetosfere di pianeti e comete, fino all'onda d'urto che segna il termine dell'Eliosfera dove il plasma portato dal vento solare si fonde con il plasma del mezzo interstellare.



In realtà turbolenti: Kelvin-Helmholtz, instabilità magnetiche...



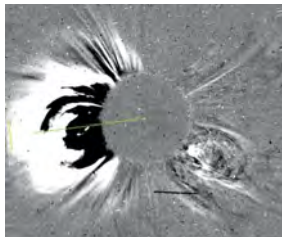
Magnetosfera e scale turbolenza

La magnetosfera terrestre esercita un ESSENZIALE schermo protettivo (space weather perturbazioni trasportate dal vento solare.)

C'è un enorme intervallo delle loro scale spaziali e temporali: la turbolenza nel vento solare si sviluppa su scale da $10^{11} m$, \sim distanza Sole Terra (\sim libero cammino medio), a scale dell'ordine di $10 m \sim$ lunghezza di pelle inerziale degli elettroni c/ω_{pe} (lunghezza caratteristica di schermaggio dei campi elettromagnetici).

Galleria del vento per lo studio turbolenza.

=====



Starlink, lancio decimato da una tempesta solare

Fino a 40 dei 49 satelliti Starlink lanciati giovedì scorso da SpaceX, fa sapere la compagnia di Elon Musk, sono stati danneggiati da una tempesta geomagnetica e stanno rientrando in atmosfera, senza però rischio di collisioni o detriti. *Mindia Inaf 10 02 22*

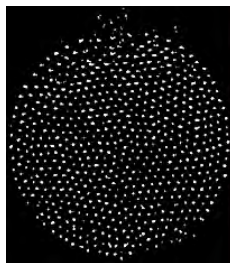
An X1 flare observed at 17/0334 UTC (April 17)
A CME was observed by SOHO at 17/0348 UTC
Solar activity is expected to be active over the next week
<https://www.swpc.noaa.gov/>

Oltre l'Eliosfera : Plasmi e polveri

Il mezzo interstellare si compone di plasma, di atomi, molecole, raggi cosmici, polvere, è estremamente disomogeneo e rarefatto (fino a 10^{-4} particelle per cm^3 nelle zone più calde e rarefatte). La radiazione ultravioletta delle stelle estrae elettroni dai grani di polvere che diventano quindi una nuova componente del plasma con una massa ben più grande ed una carica che non è fissa ma che diviene essa stessa una variabile dinamica.



Carina Nebula. Mystic Mountain. Hubble



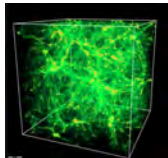
Dust Crystal ISS

In un crescendo di distanze e di energie

A distanze cosmologiche circa la metà della materia (non oscura) nell'Universo si trova nello spazio tra le galassie in una rete di filamenti di plasma con energie fino a $10^7 K$ e densità $\sim 10^{-6}-10^{-5}$ particelle per cm^3 . Origine: esplosioni di supernova, getti di materia prodotti dai nuclei galattici attivi.

Più vicino a noi troviamo plasmi con energie relativistiche nelle magnetosfere delle "pulsar": stelle di neutroni, Massa ~ 1.4 masse solari, raggio $\sim 10 Km$, densità \sim nuclei degli atomi, veloce rotazione \sim decina di millisecondi. Soci Lincei L. Woltjer 1964, e F. Pacini 1968

I campi elettrici sono così intensi da formare coppie di elettroni - positroni interazione tra il campo magnetico ultraintenso, $\sim 10^{12} - 10^{14} G$, della stella di neutroni e la radiazione degli elettroni accelerati lungo le linee di forza. *Incontriamo per la prima volta processi di Elettrodinamica Quantistica in un plasma.*



filamenti in ammassi galattici



Lobi e getti di Centaurus A dal buco nero centrale.



La Crab. HST visibile, Chandra raggi X

Plasmi relativistici

Nel caso delle cosiddette “magnetars” si stimano magnetici campi fino a $10^{15} G.$, cioè fino a due ordini di grandezza oltre il valore del cosiddetto campo critico della Elettrodinamica Quantistica in presenza del quale il vuoto si “rompe” con intensa produzione spontanea di coppie di elettroni e positroni.

Il plasma intorno alla pulsar del Granchio si espande come risultato della esplosione (osservata nel 1054 da astronomi cinesi) di una supernova. Questo plasma è una sorgente molto intensa di raggi X . Nel 2010 è stata osservata (Agile M. Tavani) una fenomenologia che ci riporta ai processi incontrati nel contesto dei brillamenti solari e delle mass ejections, ma con un livello di energia completamente diverso: si tratta di brillamenti in raggi γ .

$$E_c = \frac{m_e^2 c^3}{q_e \hbar} \simeq 1.32 \times 10^{18} \text{ V/m}$$

$$B_c = \frac{m_e^2 c^2}{q_e \hbar} \simeq 4.41 \times 10^9 \text{ T,}$$

Campi critici della QED



Nebulosa del granchio

Plasmi relativistici in laboratorio

Non è facile interpretare così da lontano la dinamica nonlineare di questi regimi di plasma. Una possibilità è cercare di riprodurre questa dinamica in scala in laboratorio.

Questo non è pienamente realizzabile, anche invocando approssimate relazioni di similitudine. E' però possibile studiare in laboratorio regimi di plasma in cui siano presenti alcuni dei meccanismi fisici che riteniamo caratterizzino la dinamica del plasma in condizioni estreme di energia delle particelle e dei campi elettromagnetici.

E' ora possibile studiare il *comportamento collettivo, nonlineare* dei plasmi relativistici in laboratorio.

Sviluppo del laser ad alta potenza : Chirped Pulse Amplification (premio Nobel 2018).

Scale spaziali dell'ordine delle decine di micron, numero totale di particelle 10^{13} - 10^{14} , densità dell'ordine di 10^{21} - 10^{22} particelle per cm^3 , energie dell'ordine dei GeV per gli elettroni a di alcune decine di MeV per i protoni.

Nel periodo di tre decenni lo studio dell'interazione collettiva tra campi e.m. e la materia ha raggiunto il regime in cui l'energia cinetica degli elettroni è molto più grande della loro energia di massa e mira ad un regime in cui gli effetti della QED svolgono un ruolo dominante, a realizzare in laboratorio un plasma composto da elettroni, positroni e fotoni di alta energia (raggi γ).

Questo trasferimento di informazioni fisiche tra plasmi di laboratorio e plasmi astrofisici si pone in un contesto più ampio.

La fenomenologia del plasma nella corona solare ha ad esempio una controparte in quella negli esperimenti per la fusione in termini di sviluppo di instabilità magnetiche e processi di trasporto turbolento

chiamato trasporto anomalo nei plasmi di fusione, fisicamente diverso e molto più rapido di quello attribuibile ai processi di collisione dovuti alle interazioni tra singole coppie di particelle nel plasma.

Determinare le proprietà di trasporto di un plasma lontano dall'equilibrio termodinamico, identificare i processi fisici che causano tale trasporto e, più importante, predire (estrapolare) le proprietà di trasporto in un regime nuovo, è tutt'oggi un problema aperto.

Un esempio. Nei dischi di accrescimento in un sistema binario affinché la materia possa cadere sul compagno più massivo, il momento angolare della materia nel disco deve diffondere verso l'esterno. La viscosità dovuta alle collisioni tra particelle è assolutamente insufficiente a spiegare il tasso di trasporto di materia necessario per render conto della potenza irradiata (ci si riferisca ad esempio alla sorgente di raggi X Cygnus X-1) e si deve ipotizzare la presenza di una viscosità anomala prodotta da fluttuazioni magnetiche destabilizzate dalla rotazione differenziale del disco (cfr. la cosiddetta instabilità magneto-rotazionale).

Plasmi di fusione a confinamento magnetico

Nello sviluppo della fisica dei plasmi la fusione ha rappresentato una delle principali motivazioni negli ultimi sessanta anni, ma lo spostarsi nel futuro del suo raggiungimento ha generato domande sulla sua realizzabilità o sulla sua effettiva convenienza.

Che ci sia stato enorme progresso nella comprensione della dinamica nonlineare dei plasmi di fusione lo dimostra il fatto che negli esperimenti di fusione si sia riusciti a raggiungere in laboratorio temperature più elevate di quelle presenti nel nucleo del Sole.

Ma un aspetto culturale molto importante è l'aver evidenziato il valore conoscitivo dello studio dei sistemi il cui comportamento collettivo non può essere riportato in maniera semplice a quello dei suoi componenti elementari:

Questo anno collo fisico è
caratterizzato dal fatto che, facendo
di legge fondamentale per alcuni sistemi, sono state
- (elettronica e meccanica) e per
- sono stati individuati che la
e l'integrazione dei fenomeni macroscopici e l'estensione
difficile. L'analisi analitica nella

E. Persico, 1959

Il paragone che viene spesso fatto tra la fusione termonucleare che alimenta le stelle ed i plasmi di fusione in laboratorio non è valido: il fatto che le stelle producano energia attraverso processi di fusione non è di per sè garanzia che la fusione sia ottenibile in laboratorio.

La reazione cui generalmente si fa riferimento è la Deuterio-Trizio:



ben più efficiente di quelle nel Sole dove la catena di reazioni parte dal processo protone-protone. Il Trizio prodotto da spallazione di Litio (${}^6\text{Li}$ e ${}^7\text{Li}$)

La produzione di potenza in un plasma di laboratorio e in una stella presenta differenze sostanziali che derivano dalla miniaturizzazione necessaria in laboratorio: una analisi in termini di ordini di grandezza delle forze magnetiche necessarie a confinare il plasma e delle temperature richieste per innescare le reazioni nucleari mostra che in queste condizioni il plasma è troppo diluito sia per poter frenare e trattenere i neutroni prodotti dalle reazioni di fusione che per riassorbire la radiazione di bremsstrahlung che esso stesso emette ed alla quale è trasparente. La perdita di potenza (per radiazione) dal plasma è proporzionale al suo volume come lo è la produzione di potenza da fusione, contrariamente a quanto accade in una stella in cui la produzione di potenza è proporzionale al suo volume mentre le perdite radiative scalano come la sua superficie dato che in questo caso il plasma è otticamente spesso.

Fusione a confinamento magnetico

La domanda che a tutti viene spontaneo formulare è a che punto siamo ora. E cosa dobbiamo ancora imparare, e quali sono i progetti ora in corso e poi che tempi ci dobbiamo aspettare perchè la fusione fornisca potenza alla rete elettrica. Ed ancora non arriverà troppo tardi, superata da richieste più impellenti o da nuove tecnologie?

Alcuni punti fermi:

- le condizioni in cui le reazioni di fusione si autosostentano (ignizione) non sono state ancora raggiunte ma in diversi esperimenti sono stati raggiunti separatamente valori dei parametri del plasma che si avvicinano a quelli richiesti (permetterebbero reattori ibridi).
- in questi decenni sarebbe stato forse preferibile seguire uno sviluppo per passi successivi che mirasse più direttamente alla verifica scientifica della possibilità di raggiungere l'ignizione in un plasma di laboratorio invece di mirare, su tempi rivelatisi poi estremamente lunghi, alla realizzazione di un esperimento di reattore a fusione che non è ancora poi un prototipo di reattore.

Fusione a confinamento magnetico

Su che cosa poi dobbiamo ancora imparare per realizzare la fusione ci sono punti di vista diversi, c'è chi ritiene che per lo meno a livello empirico i processi di fisica del plasma siano stati sufficientemente compresi per poter estrapolare a nuovi regimi con ragionevole sicurezza, magari (in questi ultimi anni) con l'appoggio di AI.

Di contro si ritiene con buone motivazioni che i problemi di ingegneria e tecnologia del reattore, ed in particolare gli aspetti di fisica dei materiali, siano quelli che richiedono maggior sviluppo in relazione ad esempio ad problema della deposizione di energia sulle pareti della struttura che contiene il plasma.

Interessante ricaduta tecnologica:
sviluppo di "magneti superconduttori ad alta temperatura".

Per realizzare campi magnetici intensi (l'ordine di grandezza è della decina di tesla) si pensa ad utilizzare
Rare-earth barium copper oxide (ReBCO)
Yttrium barium copper oxide (YBCO) (92 K, sopra l'azoto liquido)
Magnesium diboride MgB_2 (32 K) [Columbus Superconductors]
oltre a Nb_3Sn (18.3 K) (CERN, ITER).

Fusione a confinamento magnetico

Il progetto su cui sta confluendo la maggior parte degli sforzi della comunità internazionale è ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) in costruzione in Francia, lanciato nel 1985.

I membri sono Cina, Unione Europea, India, Giappone, Corea, Russia e Stati Uniti. "ITER sarà il primo dispositivo di fusione a produrre energia netta ... a mantenere la fusione per lunghi periodi di tempo ... a testare le tecnologie integrate, i materiali e i regimi di fisica necessari per la produzione commerciale di elettricità basata sulla fusione."

Ufficialmente il primo plasma di ITER è previsto per dicembre 2025 e l'inizio della sperimentazione in D-T dieci anni dopo.

ITER non prevede di raggiungere l'ignizione ma di ottenere un fattore di guadagno ~ 10 .

Il problema dei costi, e del loro accrescersi durante lo sviluppo del progetto, è stato in parte esacerbato anche da recente dalle difficoltà create dalla pandemia Covid-19 e ora forse politiche.

I risultati che verranno ottenuti su ITER verranno usati per la progettazione di un prototipo dimostrativo di reattore a fusione (DEMO) anche se già ora si possono intravedere difficoltà con le scadenze temporali previste.

Ci sono altri progetti (in Giappone, in Cina, In Korea, in India...) più o meno in collaborazione o in alternativa a ITER.

In Italia, a Frascati è in corso di realizzazione l'esperimento DTT (Divertor Tokamak Test) per studiare " la gestione dei grandi flussi di potenza prodotti dal plasma combustibile e i materiali da usare .."

C'è stato un fiorire di iniziative private di diversa "validità" scientifica (venture capital, ma Sparc all'MIT anche con finanziamento ENI), quasi tutte con promesse temporali improbabili. Hanno però un forte effetto stimolante che potrebbe essere molto positivo.

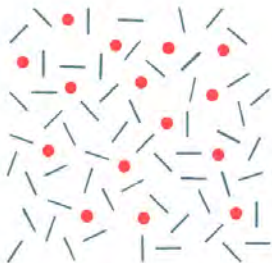
In conclusione non possiamo aspettarci che, a meno di benvenute sorprese, l'energia la fusione sia disponibile sulla rete elettrica prima, diciamo, nell'ultimo quarto di questo secolo, nonostante una recente sfortunata dichiarazione del nostro Governo.

Nonostante il suo potenziale come sorgente futura di energia, la fusione non può avere un impatto immediato sulle due attuali crisi energetiche: crisi ambientale e crisi politica.

Grazie per l'attenzione

 Consiglio Nazionale delle Ricerche

 ISTITUTO
PER LA SCIENZA
E TECNOLOGIA
DEI PLASMI



It is strongly multidisciplinary and interdisciplinary, and deals with **phenomena occurring in the Universe** (stars, solar wind, interstellar nebulae, interplanetary space, star systems and galaxies), **in laboratory** (hot and low temperature plasmas) and **in natural settings** (lightning, auroras, ionosphere).

It covers an extremely large range of scales and parameters. Spatial scales range from nanoscale to galactic scale, temporal scales from attosecond to centuries, and plasma

parameters vary over more than ten orders of magnitude.

Despite the large diversity, plasmas exhibit common physical phenomena over these enormous ranges, and share common theoretical descriptions, basic science concepts, and experimental techniques.

This synergy enables advances in both science and technology. **Plasma applications** can have a quite large impact in our life and knowledge.