Dalla fisica dello spazio all'ingegneria relativistica: breve viaggio tra fenomeni non elementari

F. Pegoraro

Dipartimento di Fisica "Enrico Fermi", Università di Pisa
Largo Bruno Pontecorvo 3, I-56127 Pisa,
pegoraro@df.unipi.it

25 febbraio 2015

Plasmi

- Un plasma può essere definito come un insieme di moltissime particelle cariche che interagiscono tra di loro in maniera *collettiva* mediante i campi elettromagnetici che esse stesse nel loro complesso generano.
  I plasmi sono praticamente dovunque nell'universo visibile.

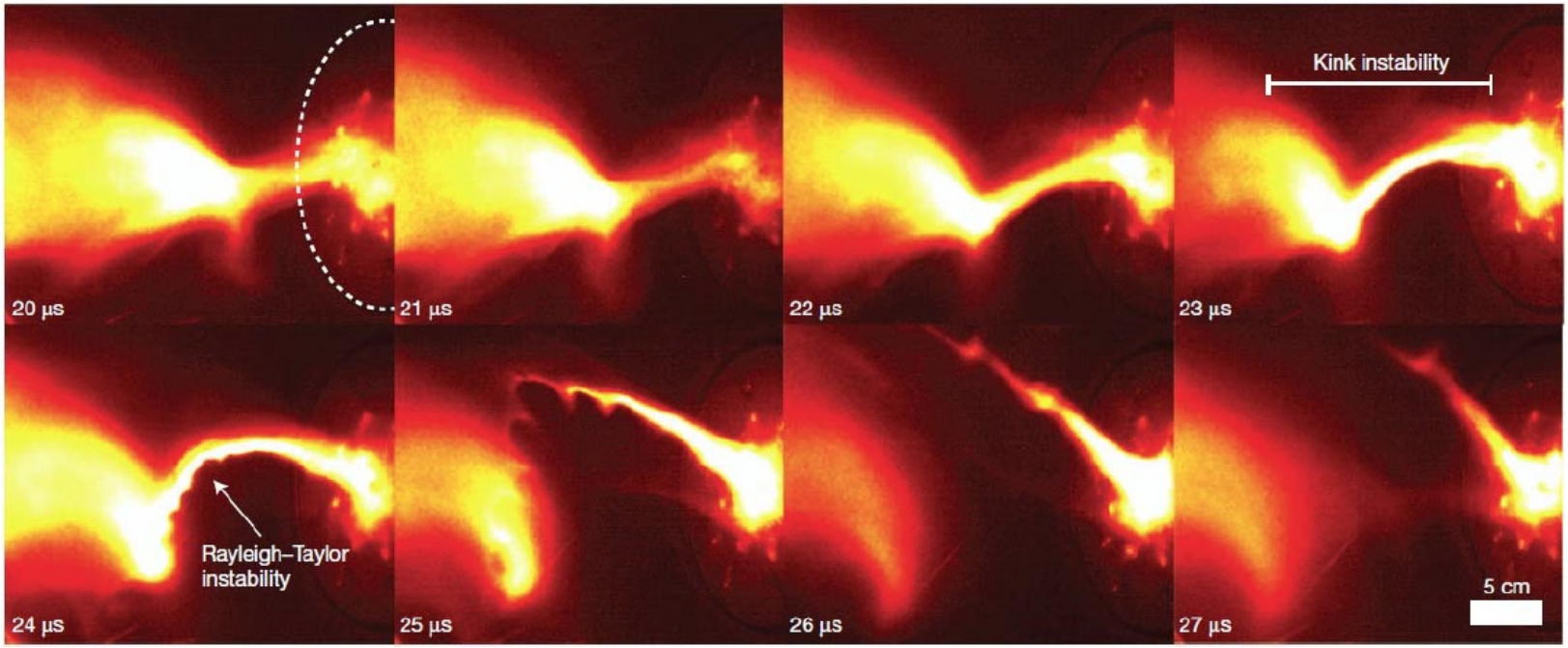
- In natura ed in laboratorio sono caratterizzati da una grande molteplicità di comportamenti fisici.
  Questa molteplicità trae origine dalla loro dinamica nonlineare e dal fatto che in generale *non soddisfano*, per svariati ordini di grandezza, *le condizioni necessarie per trovarsi in uno stato di equilibrio termodinamico*.

Plasmi

- Un plasma può essere definito come un insieme di moltissime particelle cariche che interagiscono tra di loro in maniera *collettiva* mediante i campi elettromagnetici che esse stesse nel loro complesso generano.
  I plasmi sono praticamente dovunque nell'universo visibile.

- In natura ed in laboratorio sono caratterizzati da una grande molteplicità di comportamenti fisici.
  Questa molteplicità trae origine dalla loro dinamica nonlineare e dal fatto che in generale *non soddisfano*, per svariati ordini di grandezza, *le condizioni necessarie per trovarsi in uno stato di equilibrio termodinamico*.

Dinamica di un arco di plasma in laboratorio



Auna L. Moser & Paul M. Bellan, Nature 482, 379–381, 2012

Densità di energia elettromagnetica e densità di particelle

- Nell'interazione tra i campi elettromagnetici ed un insieme di particelle cariche, è interessante esaminare la relazione tra la densità di energia e.m. nel mezzo $\mathscr{E}$ e la densità numerica n di particelle.

- In condizioni di equilibrio termodinamico in un plasma stazionario ed omogeneo la distribuzione della radiazione di corpo nero dipende essenzialmente solo dalla temperatura del plasma (Legge di Planck[1]).
  $\mathscr{E} \propto n^0$

[1] $U(T)/V \propto T^4$

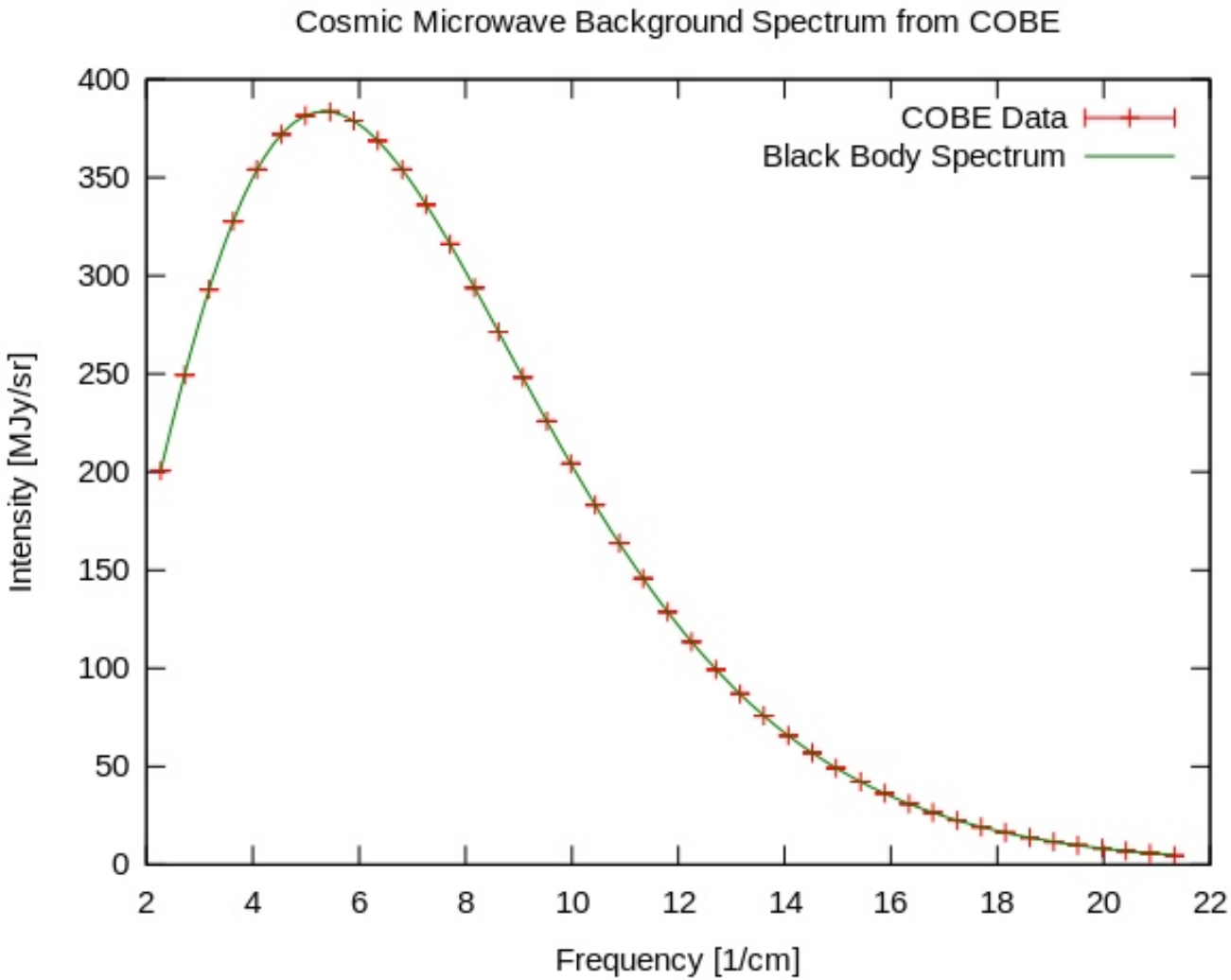
Densità di energia elettromagnetica e densità di particelle

- Nell'interazione tra i campi elettromagnetici ed un insieme di particelle cariche, è interessante esaminare la relazione tra la densità di energia e.m. nel mezzo $\mathscr{E}$ e la densità numerica n di particelle.

- In condizioni di equilibrio termodinamico in un plasma stazionario ed omogeneo la distribuzione della radiazione di corpo nero dipende essenzialmente solo dalla temperatura del plasma (Legge di Planck[1]).
  $\mathscr{E} \propto n^0$

[1] $U(T)/V \propto T^4$

Esempio (fossile) di radiazione di equilibrio



Densità di energia elettromagnetica e densità di particelle

- In condizioni di equilibrio termodinamico locale il bilancio di forze tra la pressione del mezzo e le forze e.m. porta ad una relazione di proporzionalità lineare tra la densità di energia e.m. e la densità di particelle ($\mathbf{j} \times \mathbf{B}/c = \nabla p$) cioè $B^2 \propto nT$, con B il campo magnetico. $\mathscr{E} \propto n^1$
- Nel caso di emissione coerente di onde e.m. la relazione di proporzionalità è quadratica $\mathscr{E} \propto n^2$
- *La coerenza tra le condizioni di moto delle particelle cariche nel mezzo e l'assenza di equilibrio termodinamico controllano la relazione tra la densità di energia nei campi elettromagnetici e la densità di particelle.*

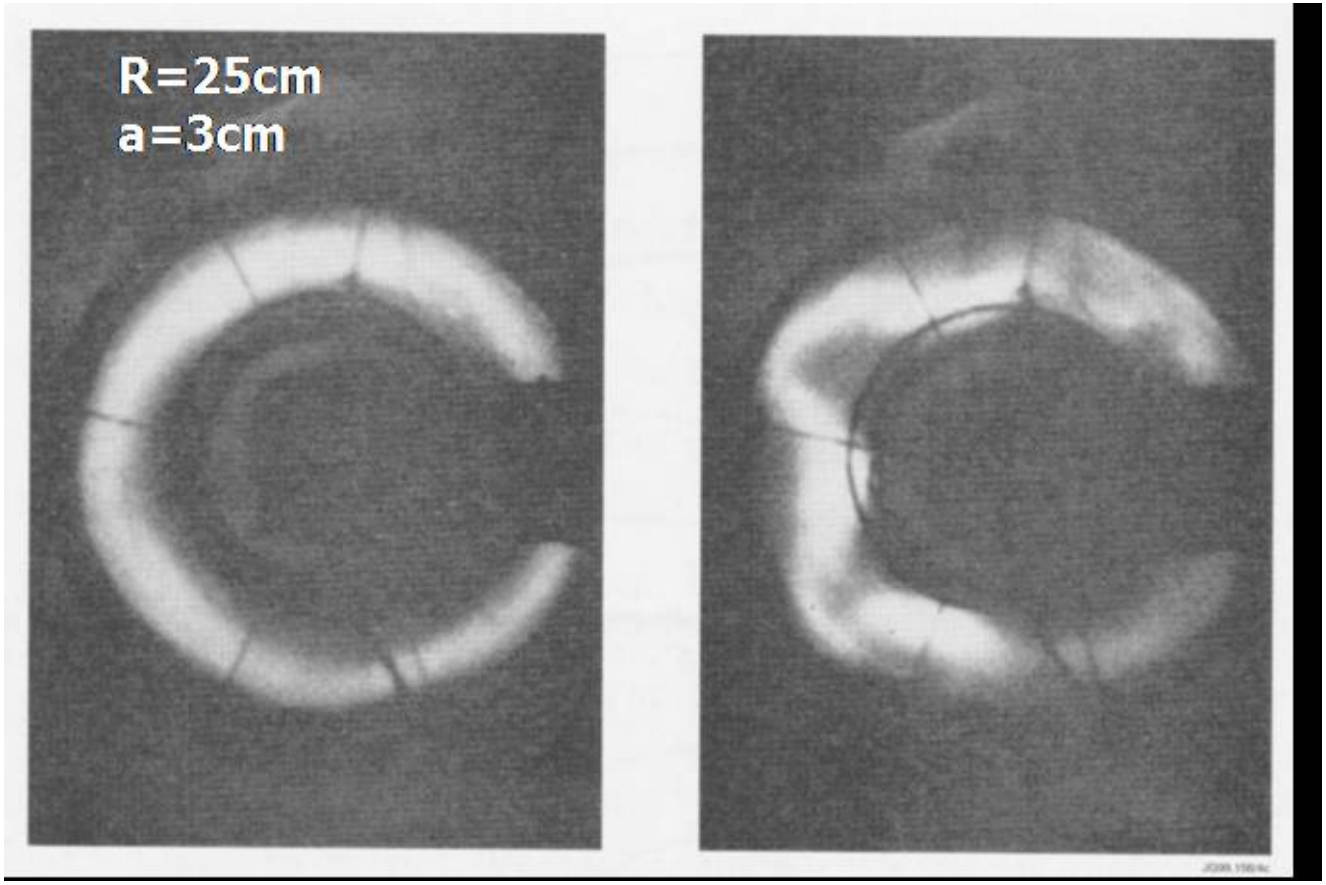
Densità di energia elettromagnetica e densità di particelle

- In condizioni di equilibrio termodinamico locale il bilancio di forze tra la pressione del mezzo e le forze e.m. porta ad una relazione di proporzionalità lineare tra la densità di energia e.m. e la densità di particelle ($\mathbf{j} \times \mathbf{B}/c = \nabla p$) cioè $B^2 \propto nT$, con B il campo magnetico. $\mathscr{E} \propto n^1$
- Nel caso di emissione coerente di onde e.m. la relazione di proporzionalità è quadratica $\mathscr{E} \propto n^2$
- *La coerenza tra le condizioni di moto delle particelle cariche nel mezzo e l'assenza di equilibrio termodinamico controllano la relazione tra la densità di energia nei campi elettromagnetici e la densità di particelle.*

Densità di energia elettromagnetica e densità di particelle

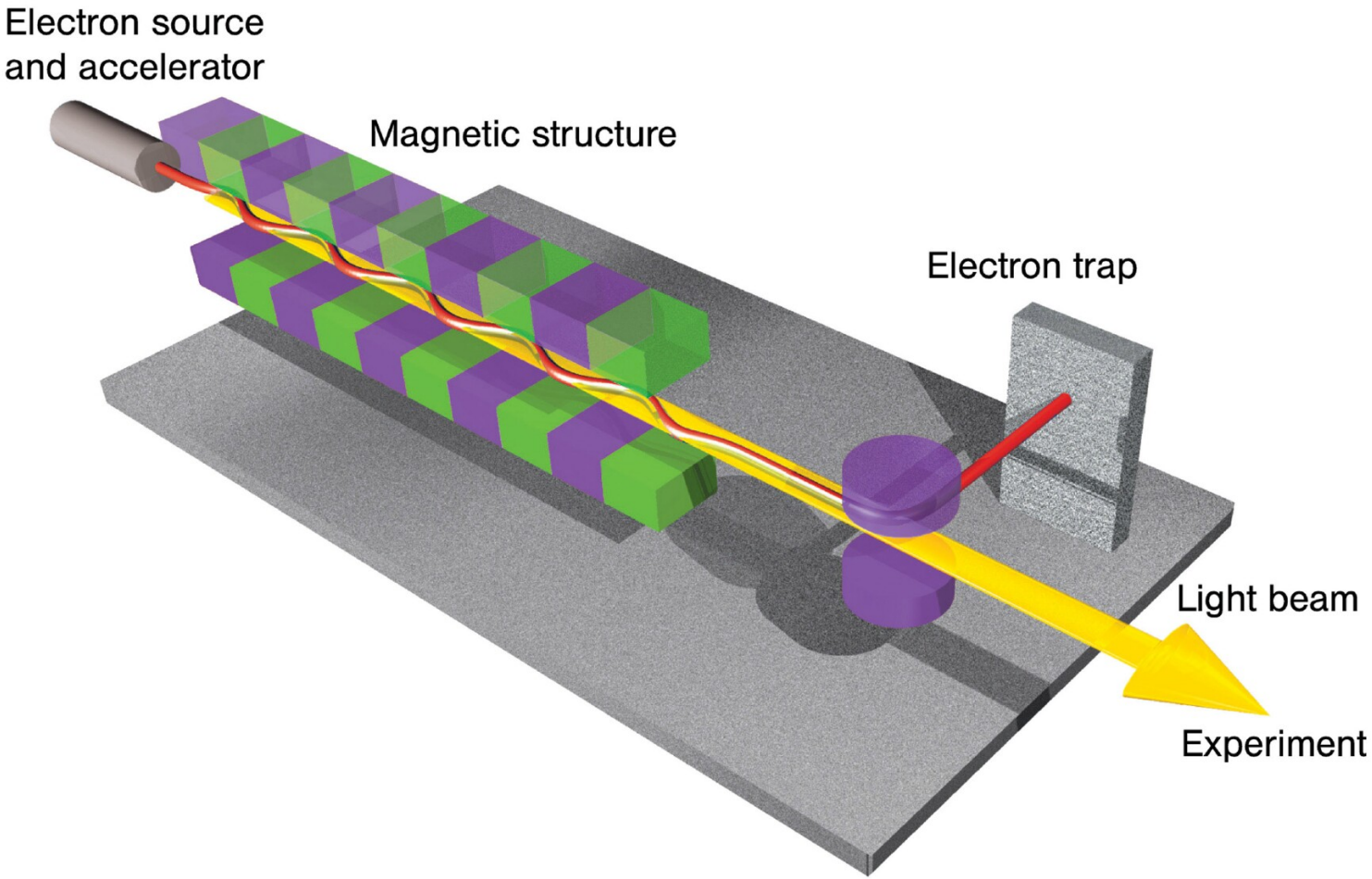
- In condizioni di equilibrio termodinamico locale il bilancio di forze tra la pressione del mezzo e le forze e.m. porta ad una relazione di proporzionalità lineare tra la densità di energia e.m. e la densità di particelle ($\mathbf{j} \times \mathbf{B}/c = \nabla p$) cioè $B^2 \propto nT$, con B il campo magnetico. $\mathscr{E} \propto n^1$
- Nel caso di emissione coerente di onde e.m. la relazione di proporzionalità è quadratica $\mathscr{E} \propto n^2$
- *La coerenza tra le condizioni di moto delle particelle cariche nel mezzo e l'assenza di equilibrio termodinamico controllano la relazione tra la densità di energia nei campi elettromagnetici e la densità di particelle.*

Equilibrio termodinamico locale: Zeta ad Aldermaston-1951-52



Ma l'equilibrio "meccanico" non era stabile....

Esempio di radiazione coerente: Laser a elettroni liberi



Densità di energia elettromagnetica e densità di particelle

- Questa osservazione suggerisce il primo punto che voglio porre in evidenza: *un plasma essendo fuori equilibrio termodinamico*[2] (anche nel limite di infiniti gradi di libertà) *è un mezzo molto efficace per produrre e manipolare campi elettromagnetici di altissima densità di energia*.

- Questa caratteristica rende lo studio della dinamica collettiva dei plasmi importante per temi che vanno dalla astrofisica, alla produzione di energia in laboratorio, alla creazione in laboratorio di sistemi macroscopici relativistici.

[2] La sezione d'urto Coulombiana decresce con il quadrato dell'energia delle particelle: $\sigma_C \propto v_{rel}^{-4} \propto T^{-2}$, con v_{rel} la velocità relativa delle particelle.

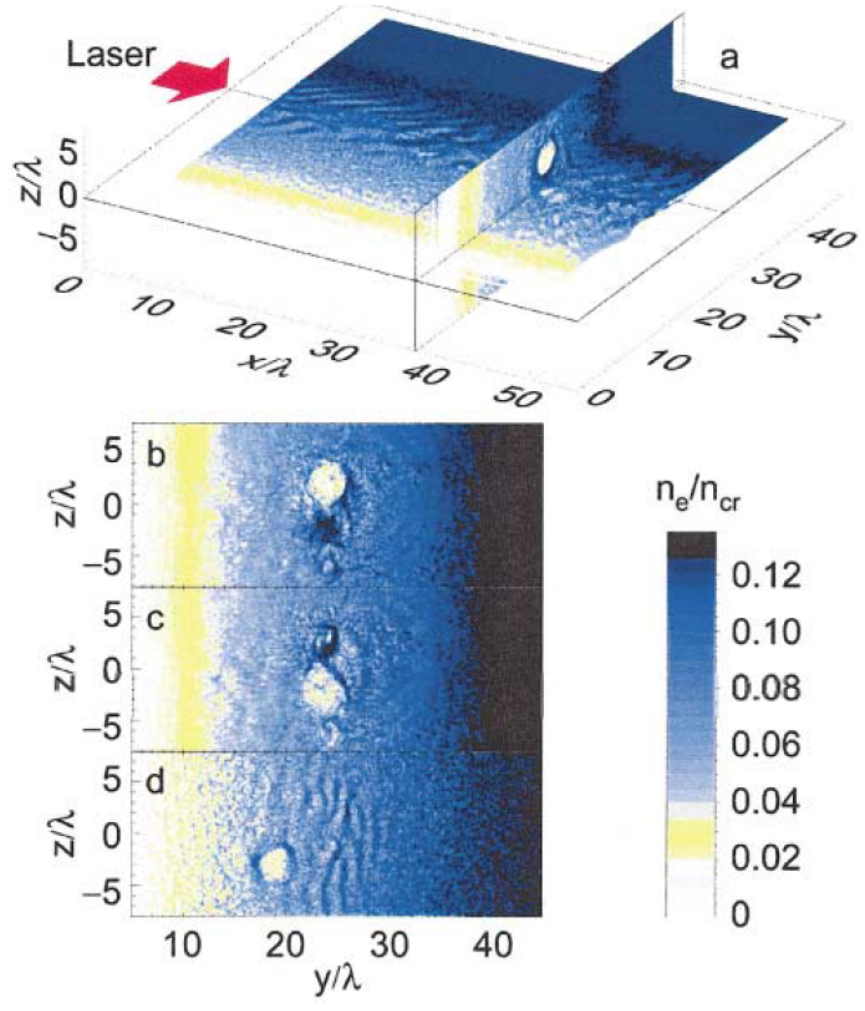
Densità di energia elettromagnetica e densità di particelle

- Questa osservazione suggerisce il primo punto che voglio porre in evidenza: *un plasma essendo fuori equilibrio termodinamico*[2] (anche nel limite di infiniti gradi di libertà) *è un mezzo molto efficace per produrre e manipolare campi elettromagnetici di altissima densità di energia*.

- Questa caratteristica rende lo studio della dinamica collettiva dei plasmi importante per temi che vanno dalla astrofisica, alla produzione di energia in laboratorio, alla creazione in laboratorio di sistemi macroscopici relativistici.

[2] La sezione d'urto Coulombiana decresce con il quadrato dell'energia delle particelle: $\sigma_C \propto v_{rel}^{-4} \propto T^{-2}$, con v_{rel} la velocità relativa delle particelle.

Solitone elettromagnetico alla deriva, elettroni relativistici, plasma non omogeneo



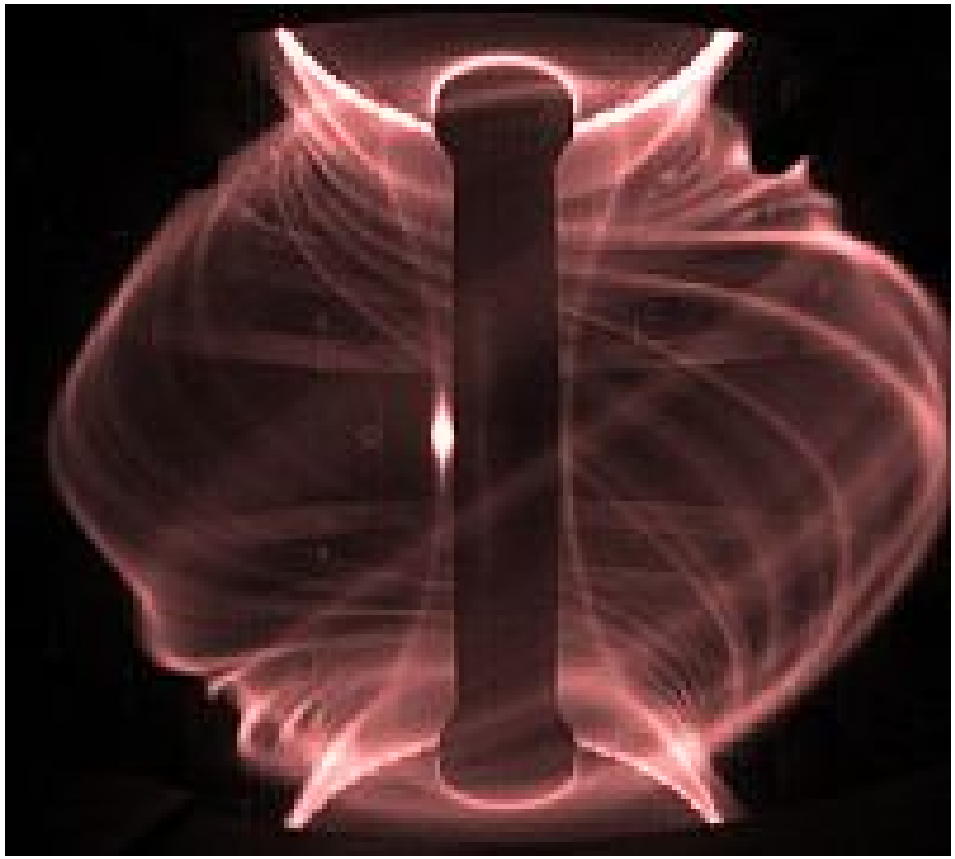
Fusione termonucleare

- La capacità di mantenere valori elevati del rapporto densità di energia su densità di massa è alla base dell'uso dei plasmi per ottenere energia da fusione termonucleare in forma controllata in laboratorio.
- Tuttavia proprio questo efficiente trasferimento di energia dalle particelle del plasma alle eccitazioni e.m. coerenti ha come conseguenza che in un plasma *siano i processi collettivi a determinarne le caratteristiche macroscopiche* e non i processi binari tipo urti coulombiani che giocano generalmente un ruolo secondario.

Fusione termonucleare

- La capacità di mantenere valori elevati del rapporto densità di energia su densità di massa è alla base dell'uso dei plasmi per ottenere energia da fusione termonucleare in forma controllata in laboratorio.
- Tuttavia proprio questo efficiente trasferimento di energia dalle particelle del plasma alle eccitazioni e.m. coerenti ha come conseguenza che in un plasma *siano i processi collettivi a determinarne le caratteristiche macroscopiche* e non i processi binari tipo urti coulombiani che giocano generalmente un ruolo secondario.

Instabilità lungo il campo magnetico nel plasma di MAST, il plasma più freddo emette nel visibile



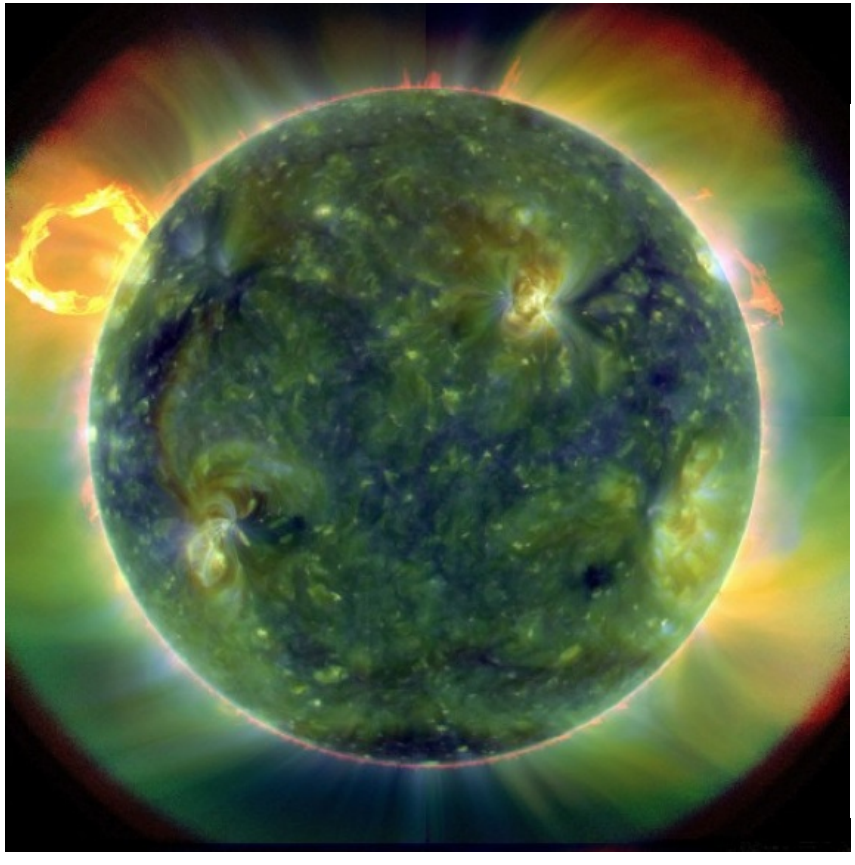
Fusione termonucleare

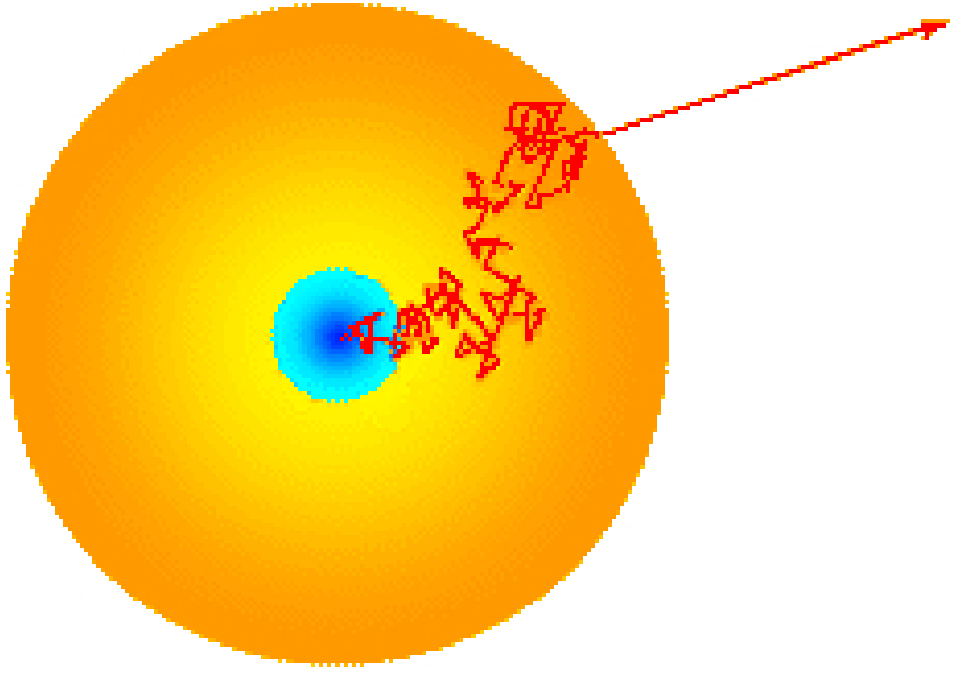
- Situazione completamente diversa dall'interno di una stella che pur si sostiene con processi termonucleari (diversi da quelli richiesti in laboratorio e a temperatura più bassa).
  La miniaturizzazione necessaria per passare dai sistemi stellari ad un plasma di fusione in laboratorio cambia totalmente la fisica della produzione di energia da fusione.
- Si passa da un sistema opaco alla propria radiazione e.m. (perdite di superficie) e controllato da processi termodinamici ad un sistema trasparente (perdite di volume) e caratterizzato da proprietà di trasporto dell'energia che dipendono dalla dinamica collettiva del sistema.

Fusione termonucleare

- Situazione completamente diversa dall'interno di una stella che pur si sostiene con processi termonucleari (diversi da quelli richiesti in laboratorio e a temperatura più bassa).
  La miniaturizzazione necessaria per passare dai sistemi stellari ad un plasma di fusione in laboratorio cambia totalmente la fisica della produzione di energia da fusione.
- Si passa da un sistema opaco alla propria radiazione e.m. (perdite di superficie) e controllato da processi termodinamici ad un sistema trasparente (perdite di volume) e caratterizzato da proprietà di trasporto dell'energia che dipendono dalla dinamica collettiva del sistema.

Il sole come sistema opaco alla radiazione e.m. prodotta



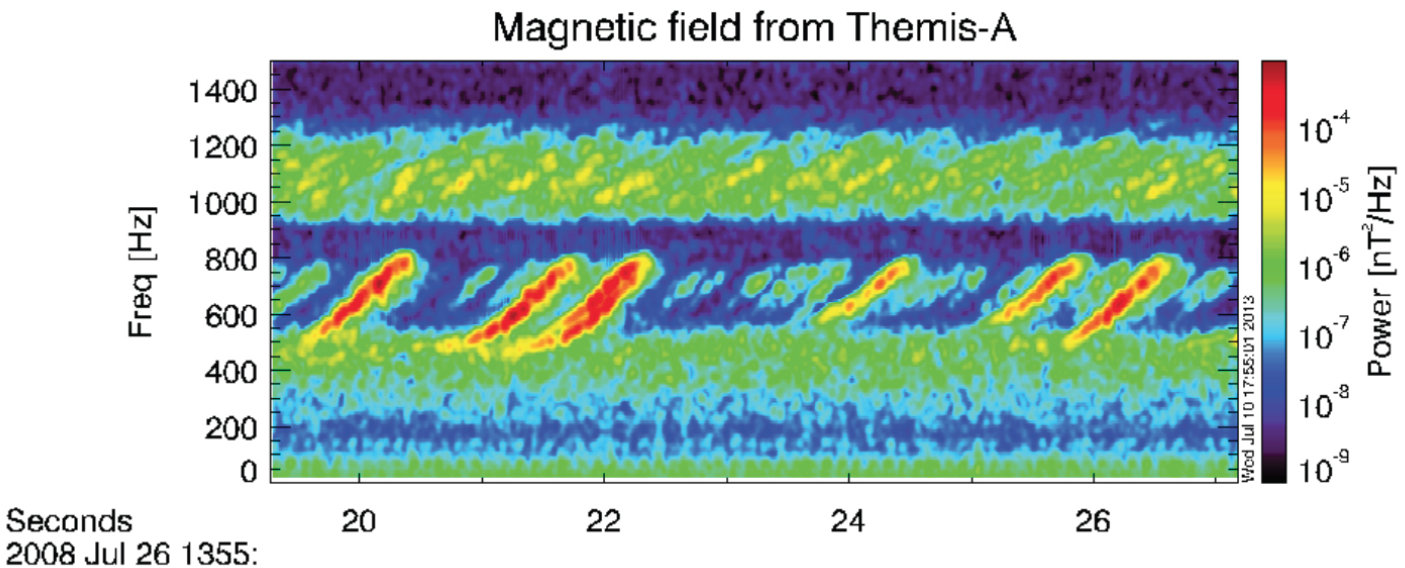


Fisica dello spazio

- E questa non è una patologia dei plasmi di laboratorio, *in natura è essenzialmente la norma* :
  simili processi collettivi e nonlineari in condizioni di completa assenza di equilibrio termodinamico si incontrano ad esempio nelle corone stellari, nel vento solare e nelle magnetosfere planetarie etc..

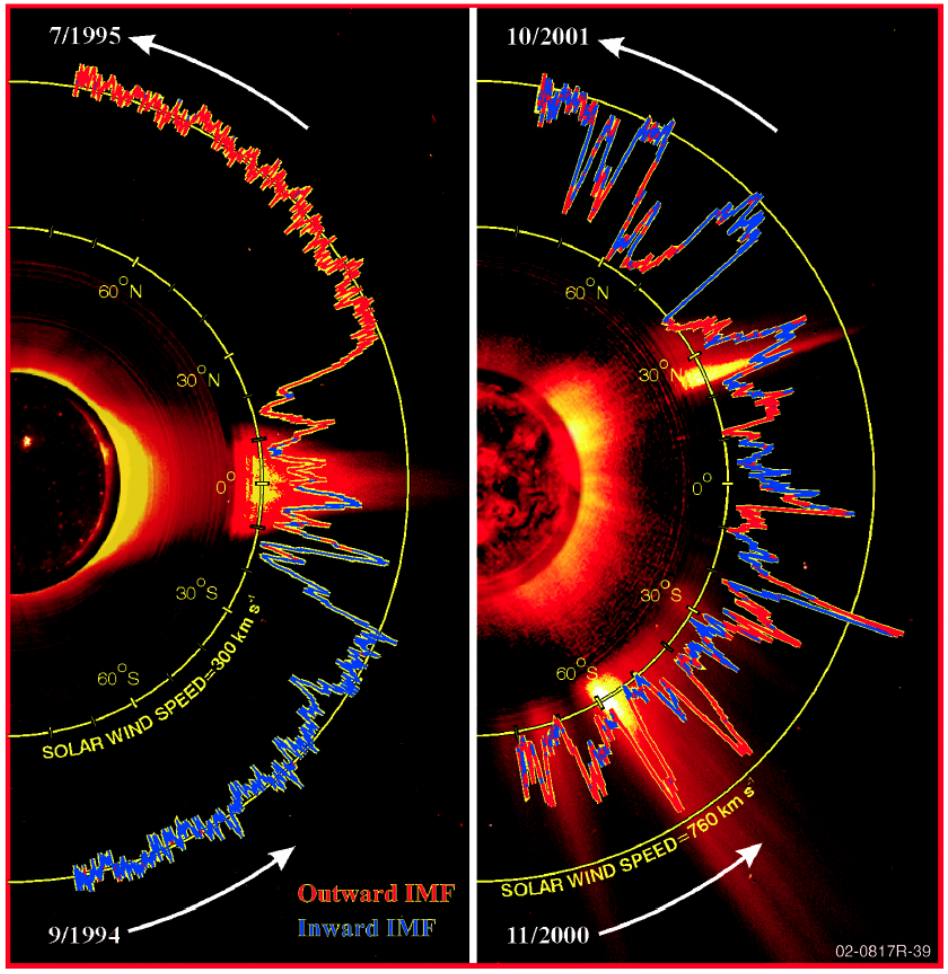
Cori nella magnetosfera terrestre

The plot below shows an example of whistler-mode chorus. The plot is a spectrogram: a plot of the wave power (represented as a colour) as a function of time (on the x-axis) and frequency (on the y-axis). The data used here is magnetic field data from the SCM (Search Coil Magnetometer) instrument on the satellite Themis-A. Note the intense rising-tone chirps from about 400-800 Hz. These are "lower-band" chorus: chorus emissions below half of the gyrofrequency (which at this time was ~1800 Hz). The weaker rising-tone features from about 900-1200 Hz are "upper-band" chorus (between half the gyrofrequency and the gyrofrequency). There is a gap in the emissions at half the cyclotron frequency (i.e. 900 Hz), which is very common.



Whistler-mode chorus: Spectrogram of magnetic field data from Themis-A. Recorded near the equatorial plane at a distance of about 8 Earth radii, in a direction roughly toward the sun from the Earth (MLT=15).

Il vento solare, in due diverse fasi di attività del sole



Come agiscono i processi collettivi?

- Problema concreto: *la "termalizzazione" di un plasma anisotropo* (cioè con energie cinetiche medie $\mathscr{E}$ delle particelle diverse in direzioni diverse) *e la generazione di campi magnetici*[3].
- **Modello euristico: macchina "termica"** Pensiamo ai gradi di libertà degli elettroni nel plasma corrispondenti a $\mathscr{E}_{||}$ e a $\mathscr{E}_{\perp}$ come a due corpi a "temperatura" differente: possono equalizzare la loro temperatura se messi in contatto dai processi di collisione (processi binari) o possono far lavoro (processi collettivi) oltre a scambiare energia termica.
  In questo caso il lavoro corrisponde alla generazione di correnti e campi induttivi coerenti nel plasma che trasformano parte dell'energia cinetica in energia magnetica.

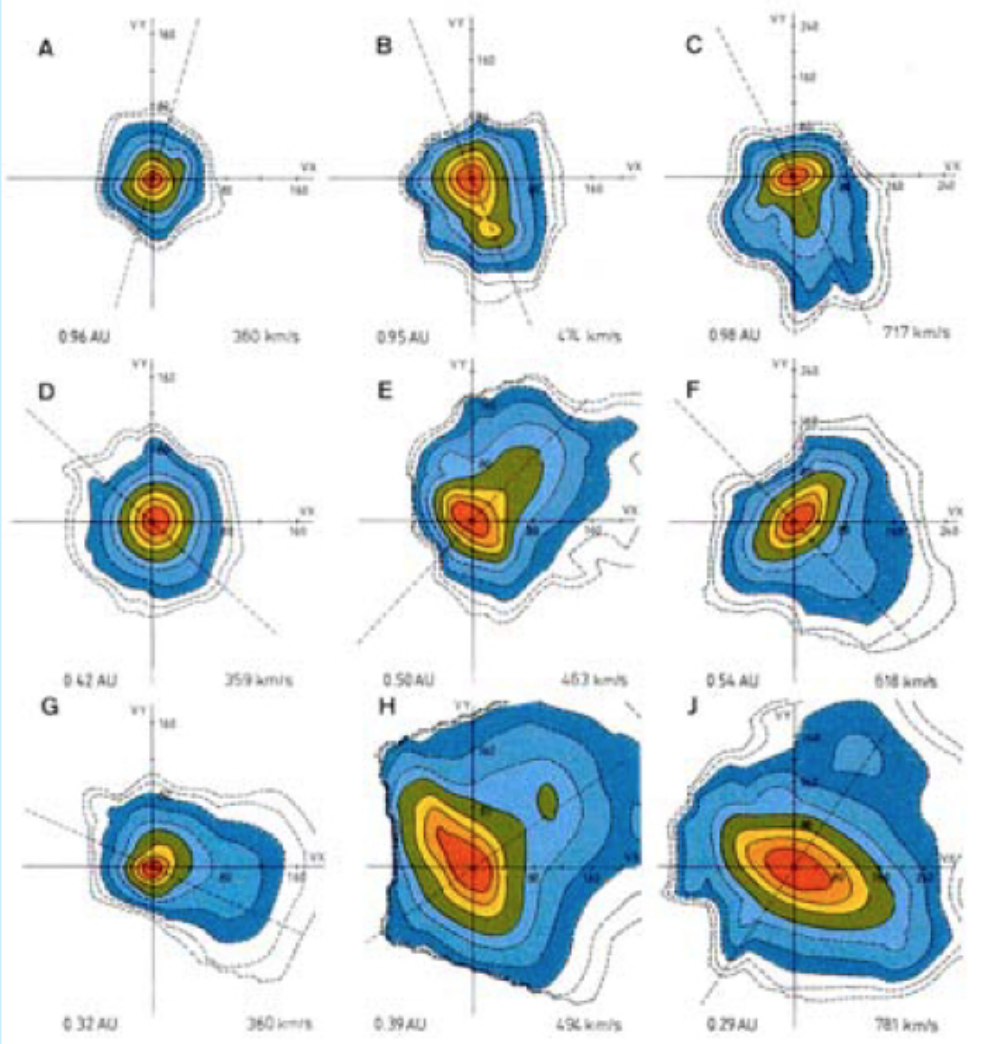
[3] E. Weibel, Phys. Rev. Lett. **2**, 83, (1959)

Come agiscono i processi collettivi?

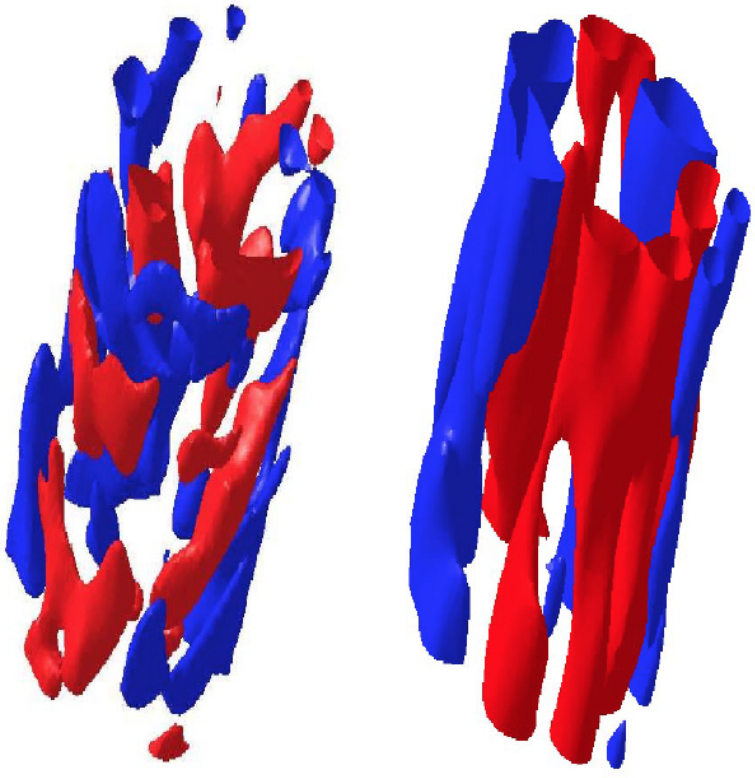
- Problema concreto: *la "termalizzazione" di un plasma anisotropo* (cioè con energie cinetiche medie $\mathscr{E}$ delle particelle diverse in direzioni diverse) *e la generazione di campi magnetici*[3].
- **Modello euristico: macchina "termica"** Pensiamo ai gradi di libertà degli elettroni nel plasma corrispondenti a $\mathscr{E}_{||}$ e a $\mathscr{E}_{\perp}$ come a due corpi a "temperatura" differente: possono equalizzare la loro temperatura se messi in contatto dai processi di collisione (processi binari) o possono far lavoro (processi collettivi) oltre a scambiare energia termica.
  In questo caso il lavoro corrisponde alla generazione di correnti e campi induttivi coerenti nel plasma che trasformano parte dell'energia cinetica in energia magnetica.

[3] E. Weibel, Phys. Rev. Lett. **2**, 83, (1959)

Anisotropia dei protoni nel vento solare



Weibel- filamenti - interazione laser plasma



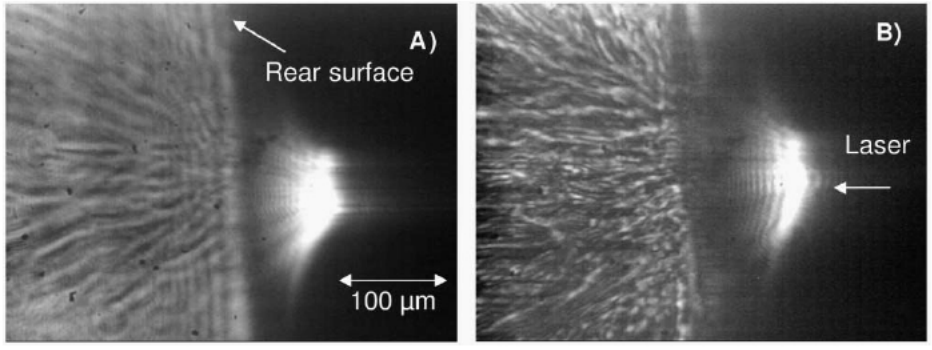


FIG. 2. Shadowgraphy of rear side of solid/gas target during high intensity laser interaction. Probing time is synchronous with main beam interaction and the laser is incident from the right. The bright region is self-generated second harmonic emission (527 nm) at the front surface. Argon was used behind Mylar targets. (a) $I \sim 10^{19}$ W/cm^2, (b) $I \sim 2 \times 10^{19}$ W/cm^2.

Alcune parole di cautela

- L' indagine teorica (figura di sinistra) di questi processi che sto illustrando euristicamente *richiede lo studio*, con metodi analitici e numerici, *del sistema integro-differenziale nonlineare (campi auto-consistenti) di Vlasov-Maxwell*[4] in uno spazio 6-dimensionale (tre coordinate spaziali e tre di impulso) più il tempo in presenza di una gamma di scale spaziali e temporali estesa su svariati ordini di grandezza.
- In questi anni cominciamo ad avere gli strumenti numerici e le strutture di calcolo per rispondere in maniera sempre più complata alle domande che l'evoluzione nonlineare di un plasma descritto dal sistema Vlasov-Maxwell ci pone.

[4] L'equazione di Vlasov per la funzione di distribuzione delle diverse specie di particelle nel plasma corrisponde all'equazione di Liouville, conservazione del volume nello spazio delle fasi, in presenza di un funzionale Hamiltoniano auto-consistente, cioè in cui potenziali elettromagnetici sono determinati dalle equazioni di Maxwell che hanno come sorgenti le densità di carica e di corrente che si ottengono a partire dalla funzione di distribuzione incognita stessa. L'equazione di Vlasov differisce dall'equazione di Boltzmann per l'assenza dei termini collisionali (dominanti in Boltzmann) e per la sua intrinseca nonlinearità (potenziali autoconsistenti).

Alcune parole di cautela

- L' indagine teorica (figura di sinistra) di questi processi che sto illustrando euristicamente *richiede lo studio*, con metodi analitici e numerici, *del sistema integro-differenziale nonlineare (campi auto-consistenti) di Vlasov-Maxwell*[4] in uno spazio 6-dimensionale (tre coordinate spaziali e tre di impulso) più il tempo in presenza di una gamma di scale spaziali e temporali estesa su svariati ordini di grandezza.
- In questi anni cominciamo ad avere gli strumenti numerici e le strutture di calcolo per rispondere in maniera sempre più complata alle domande che l'evoluzione nonlineare di un plasma descritto dal sistema Vlasov-Maxwell ci pone.

[4] L'equazione di Vlasov per la funzione di distribuzione delle diverse specie di particelle nel plasma corrisponde all'equazione di Liouville, conservazione del volume nello spazio delle fasi, in presenza di un funzionale Hamiltoniano auto-consistente, cioè in cui potenziali elettromagnetici sono determinati dalle equazioni di Maxwell che hanno come sorgenti le densità di carica e di corrente che si ottengono a partire dalla funzione di distribuzione incognita stessa. L'equazione di Vlasov differisce dall'equazione di Boltzmann per l'assenza dei termini collisionali (dominanti in Boltzmann) e per la sua intrinseca nonlinearità (potenziali autoconsistenti).

Come si manipola con un plasma l'energia e.m.

- In un plasma è possibile realizzare condizioni tali che le particelle che lo compongono rispondano in maniera coerente di modo che i campi e.m. possano sommarsi in modo costruttivo. In aggiunta gli effetti delle nonlinearità relativistiche[5] permettono in un plasma di alta energia di concentrare ulteriormente l'energia e.m. : esempio l'autofocheggiamento relativistico di un fascio di radiazione e.m. e la la amplificazione di un impulso laser da riflessione su uno specchio relativistico.
- L' autofocheggiamento relativistico permette di propagare un impulso laser senza che si disperda per diffrazione.[6]

[5] in particolare le nonlinearità cinematiche dovute alla relazione non lineare tra velocità ed impulso: una particella in moto relativistico si comporta come se fosse più pesante

[6] La costante dielettrica del plasma $1 - \omega_{pe}^2/\omega^2$, che è minore di uno per impulsi che si propagano nel plasma (cioè con $\omega > \omega_{pe}$), diventa più vicina a uno (quindi la velocità di fase dell'impulso laser diventa meno superluminosa) dove l'ampiezza dei campi è maggiore e dove quindi gli elettroni si comportano come più pesanti riducendo il valore effettivo di ω_{pe} e creando di fatto una "fibra ottica" nonlineare che rifocalizza l'impulso contrastando la diffrazione.

Come si manipola con un plasma l'energia e.m.

- In un plasma è possibile realizzare condizioni tali che le particelle che lo compongono rispondano in maniera coerente di modo che i campi e.m. possano sommarsi in modo costruttivo. In aggiunta gli effetti delle nonlinearità relativistiche[5] permettono in un plasma di alta energia di concentrare ulteriormente l'energia e.m. : esempio l'autofocheggiamento relativistico di un fascio di radiazione e.m. e la la amplificazione di un impulso laser da riflessione su uno specchio relativistico.
- L' autofocheggiamento relativistico permette di propagare un impulso laser senza che si disperda per diffrazione.[6]

---

[5] in particolare le nonlinearità cinematiche dovute alla relazione non lineare tra velocità ed impulso: una particella in moto relativistico si comporta come se fosse più pesante

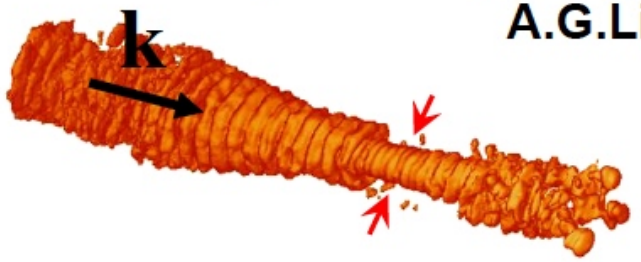
[6] La costante dielettrica del plasma $1 - \omega_{pe}^2/\omega^2$, che è minore di uno per impulsi che si propagano nel plasma (cioè con $\omega > \omega_{pe}$), diventa più vicina a uno (quindi la velocità di fase dell'impulso laser diventa meno superluminosa) dove l'ampiezza dei campi è maggiore e dove quindi gli elettroni si comportano come più pesanti riducendo il valore effettivo di ω_{pe} e creando di fatto una "fibra ottica" nonlineare che rifocalizza l'impulso contrastando la diffrazione.

Concentrare l'energia e.m.

Relativistic self-focusing threshold

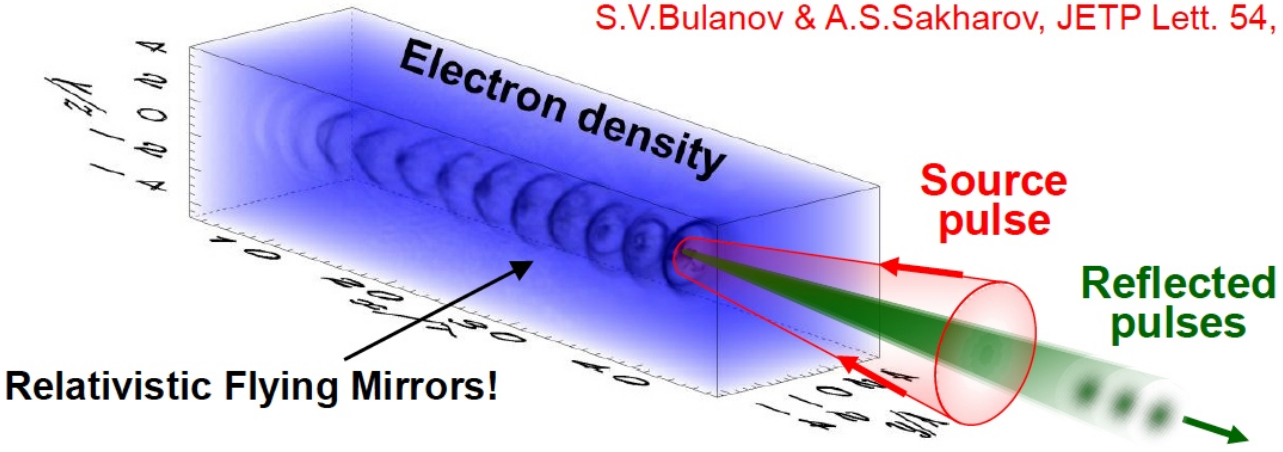
$$\mathcal{P}_{cr} \approx 17\left(n_{cr}/n_e\right)\ \mathrm{GW}$$

A.G.Litvak, 1969



Due to dependence of wave frequency on amplitude, density shells are parabolic.

S.V.Bulanov & A.S.Sakharov, JETP Lett. 54, 203 (1991).



Specchi relativistici per manipolare gli impulsi

- Un impulso laser ultraintenso, che si propaga nelle opportune condizioni di densità di plasma e di durata dell'impulso, crea un'onda di Langmuir di scia di grande ampiezza.
- Quandola velocità di oscillazione degli elettroni diventa più grande della velocità di fase dell'onda l'onda si rompe.
  Quando un secondo impulso inviato in direzione opposta incontra gli elettroni accelerati dalla rottura dell'onda di Langmuir viene riflesso e la sua frequenza diviene
  $\omega = \omega_o(1+\beta)/(1-\beta) \quad \rightarrow 4\gamma^2\omega_o \quad \text{per} \quad \beta \rightarrow 1.$
- Questo schema può in linea di principio raggiungere valori del campo elettrico dell'impulso riflesso vicini al valor limite di Schwinger $E_{crit} = m_e^2 c^3/(e\hbar) =\sim 1.3 \times 10^{18} V/m$
  Non è la prima volta in cui si usano colliding beams per raggiungere densità di energia altrimenti non ottenibili, ma è la prima volta in cui si pensa di sfruttare l'effetto di coerenza delle *eccitazioni collettive di un plasma relativistico*.

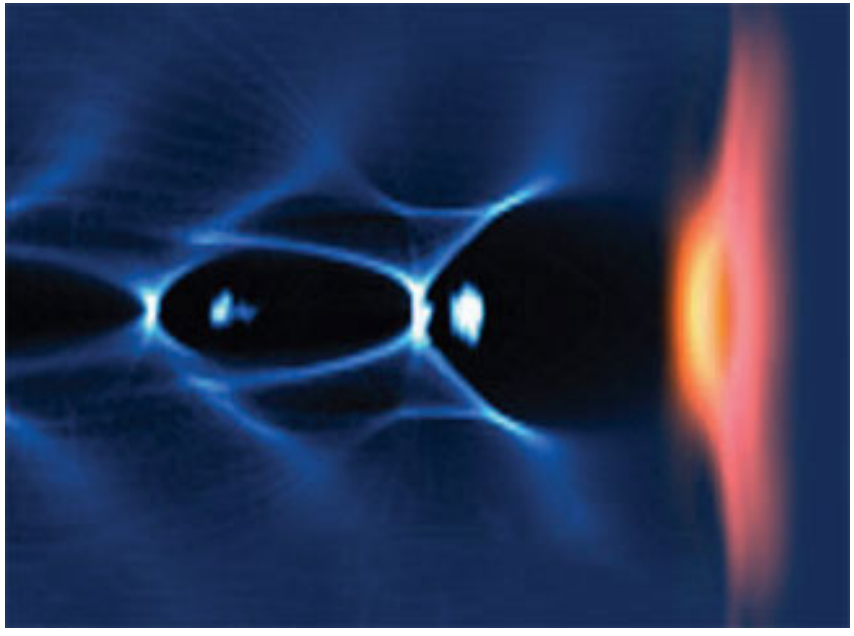
Specchi relativistici per manipolare gli impulsi

- Un impulso laser ultraintenso, che si propaga nelle opportune condizioni di densità di plasma e di durata dell'impulso, crea un'onda di Langmuir di scia di grande ampiezza.
- Quandola velocità di oscillazione degli elettroni diventa più grande della velocità di fase dell'onda l'onda si rompe.
  Quando un secondo impulso inviato in direzione opposta incontra gli elettroni accelerati dalla rottura dell'onda di Langmuir viene riflesso e la sua frequenza diviene
  $\omega = \omega_o(1+\beta)/(1-\beta) \quad \to 4\gamma^2\omega_o \quad \text{per} \quad \beta \to 1.$
- Questo schema può in linea di principio raggiungere valori del campo elettrico dell'impulso riflesso vicini al valor limite di Schwinger $E_{crit} = m_e^2 c^3/(e\hbar) = \sim 1.3 \times 10^{18} V/m$
  Non è la prima volta in cui si usano colliding beams per raggiungere densità di energia altrimenti non ottenibili, ma è la prima volta in cui si pensa di sfruttare l'effetto di coerenza delle *eccitazioni collettive di un plasma relativistico*.

Specchi relativistici per manipolare gli impulsi

- Un impulso laser ultraintenso, che si propaga nelle opportune condizioni di densità di plasma e di durata dell'impulso, crea un'onda di Langmuir di scia di grande ampiezza.
- Quandola velocità di oscillazione degli elettroni diventa più grande della velocità di fase dell'onda l'onda si rompe.
  Quando un secondo impulso inviato in direzione opposta incontra gli elettroni accelerati dalla rottura dell'onda di Langmuir viene riflesso e la sua frequenza diviene
  $\omega = \omega_o(1+\beta)/(1-\beta) \quad \to 4\gamma^2\omega_o \quad \text{per} \quad \beta \to 1.$
- Questo schema può in linea di principio raggiungere valori del campo elettrico dell'impulso riflesso vicini al valor limite di Schwinger $E_{crit} = m_e^2 c^3/(e\hbar) = \sim 1.3 \times 10^{18} V/m$
  Non è la prima volta in cui si usano colliding beams per raggiungere densità di energia altrimenti non ottenibili, ma è la prima volta in cui si pensa di sfruttare l'effetto di coerenza delle *eccitazioni collettive di un plasma relativistico*.

Onde di scia



Concentrare l'energia e.m.

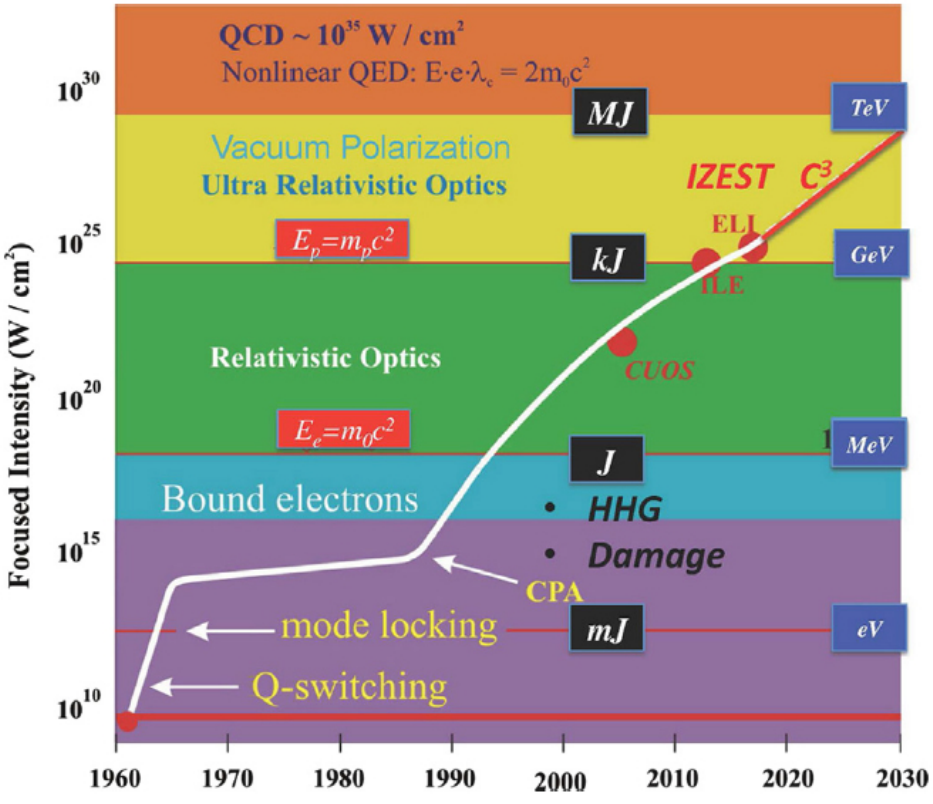
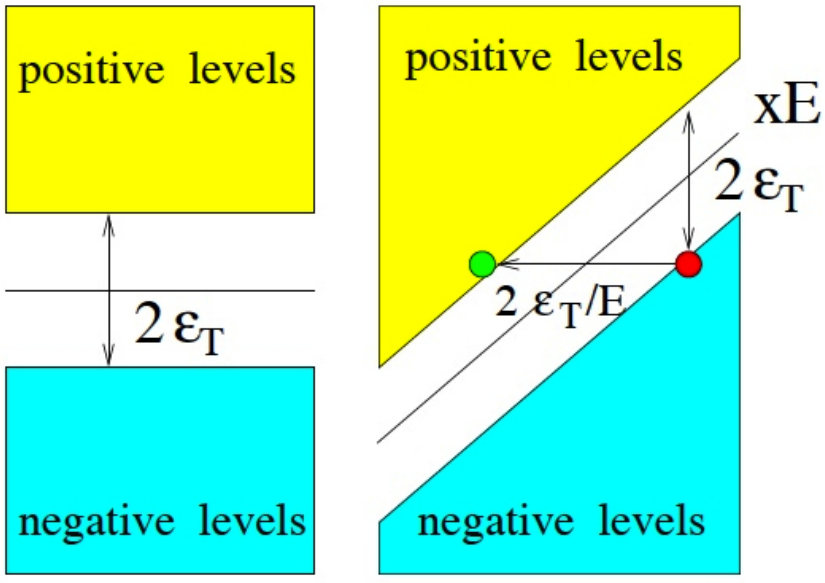


Fig. 1. The evolution of laser intensity in relation to electron energy regimes.

Pair creation as barrier penetration in a strong constant field



La relatività come strumento

- A questi fenomeni di ottica nonlineare relativistica è stato dato il nome di **relativistic engineering**: potenziale applicativo: nuove sorgenti di radiazione elettromagnetica negli X e nuove sorgenti di fasci di particelle relativistiche (ad esempio fasci di protoni per applicazioni mediche), impulsi elettromagnetici di durata dell'ordine degli attosecondi .....
- A livello teorico la possibilità di questi processi è nota da tempo ma acquista un interesse completamente diverso quando diventano disponibili gli strumenti per realizzarli in laboratorio. *In questi ultimi anni è divenuto possibile produrre quantità mesoscopiche*[7] *di materia relativistica in laboratorio e studiarne la dinamica collettiva*.

[7] Mesoscopico: in questo caso la scala spaziale caratteristica è la decina di micron, il numero di particelle è intorno a 10^{13}, 10^{14}. Densità elevata: 10^{21}, 10^{22} particelle per cm^3. Energie dell'ordine del GeV per elettrone e, per ora, di decine di MeV per nucleone.
Questo sviluppo trae origine da una fisica diversa da quella dei plasmi e si basa sulle nuove capacità che sono state sviluppate di decomprimere, amplificare e quindi ricomprimere un impulso laser

La relatività come strumento

- A questi fenomeni di ottica nonlineare relativistica è stato dato il nome di **relativistic engineering**: potenziale applicativo: nuove sorgenti di radiazione elettromagnetica negli X e nuove sorgenti di fasci di particelle relativistiche (ad esempio fasci di protoni per applicazioni mediche), impulsi elettromagnetici di durata dell'ordine degli attosecondi .....
- A livello teorico la possibilità di questi processi è nota da tempo ma acquista un interesse completamente diverso quando diventano disponibili gli strumenti per realizzarli in laboratorio. *In questi ultimi anni è divenuto possibile produrre quantità mesoscopiche*[7] *di materia relativistica in laboratorio e studiarne la dinamica collettiva*.

[7] Mesoscopico: in questo caso la scala spaziale caratteristica è la decina di micron, il numero di particelle è intorno a 10^{13}, 10^{14}. Densità elevata: 10^{21}, 10^{22} particelle per cm^3. Energie dell'ordine del GeV per elettrone e, per ora, di decine di MeV per nucleone.
Questo sviluppo trae origine da una fisica diversa da quella dei plasmi e si basa sulle nuove capacità che sono state sviluppate di decomprimere, amplificare e quindi ricomprimere un impulso laser.

Accelerare lo specchio

- Si può anche usare il processo inverso ed accelerare ad energie relativistiche un foglio di plasma con la pressione di radiazione[8]
- Questo processo inverso tuttavia è soggetto all'instaurarsi di una instabilità che si manifesta universalmente in tutti i casi in cui il mezzo che dà la spinta (il pistone) è più "leggero" della materia che viene accelerata[9] .
  Questa fisica ci riporta alla problematica della luminosità di Eddington di una stella o della espansione dei gusci di materia prodotti dalla esplosione delle supernovae che possono essere soggetti allo stesso tipo di instabilità, vedi ad esempio i filamenti della nebulosa del Granchio.

[8] La pressione di radiazione agisce sugli elettroni del plasma che trasferiscono agli ioni l'impulso ricevuto dalla radiazione attraverso un campo elettrico dovuto alla separazione di carica.

[9] Instabilità di Rayleigh-Taylor che nella sua forma più semplice rende conto di perchè non sia possibile tenere un fluido più pesante sopra uno più leggero.

Accelerare lo specchio

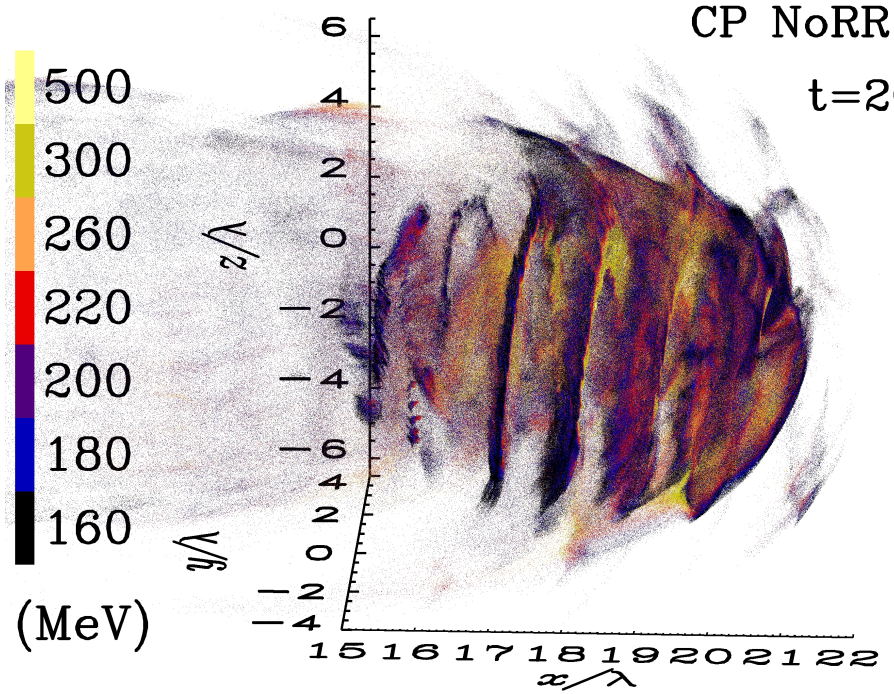
- Si può anche usare il processo inverso ed accelerare ad energie relativistiche un foglio di plasma con la pressione di radiazione[8]
- Questo processo inverso tuttavia è soggetto all'instaurarsi di una instabilità che si manifesta universalmente in tutti i casi in cui il mezzo che dà la spinta (il pistone) è più "leggero" della materia che viene accelerata[9] .
  Questa fisica ci riporta alla problematica della luminosità di Eddington di una stella o della espansione dei gusci di materia prodotti dalla esplosione delle supernovae che possono essere soggetti allo stesso tipo di instabilità, vedi ad esempio i filamenti della nebulosa del Granchio.

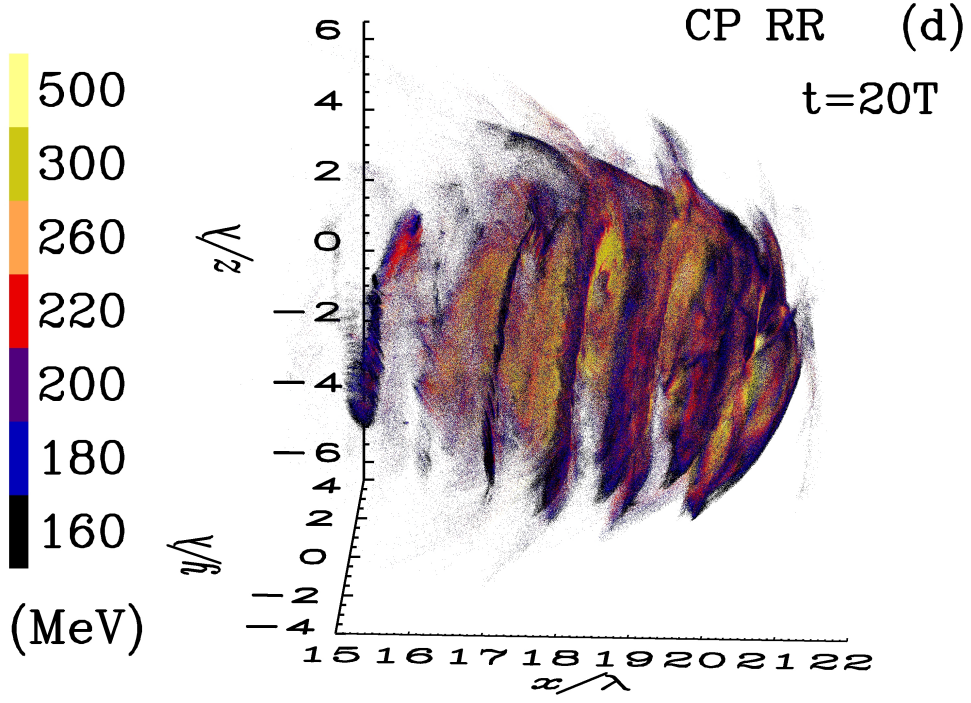
---

[8] La pressione di radiazione agisce sugli elettroni del plasma che trasferiscono agli ioni l'impulso ricevuto dalla radiazione attraverso un campo elettrico dovuto alla separazione di carica.

[9] Instabilità di Rayleigh-Taylor che nella sua forma più semplice rende conto di perchè non sia possibile tenere un fluido più pesante sopra uno più leggero.

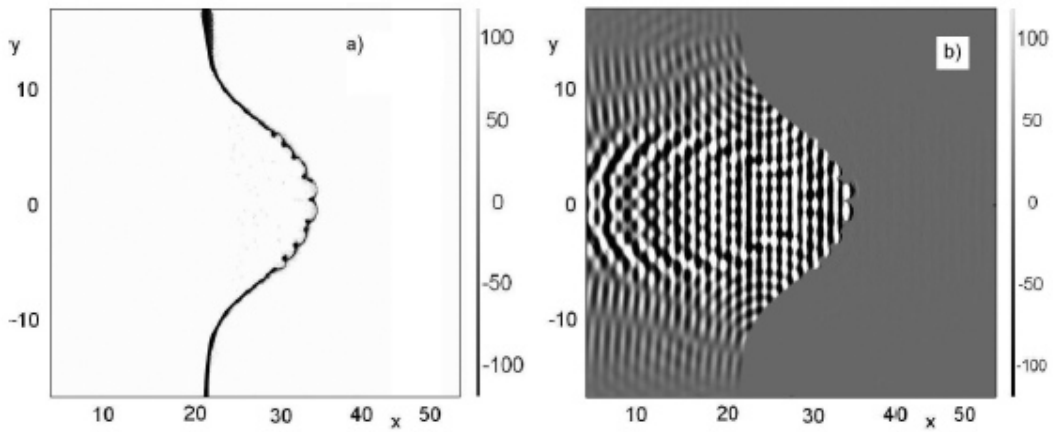
Elettroni in un impulso con polarizzazione circolare in presenza di frenamento di radiazione

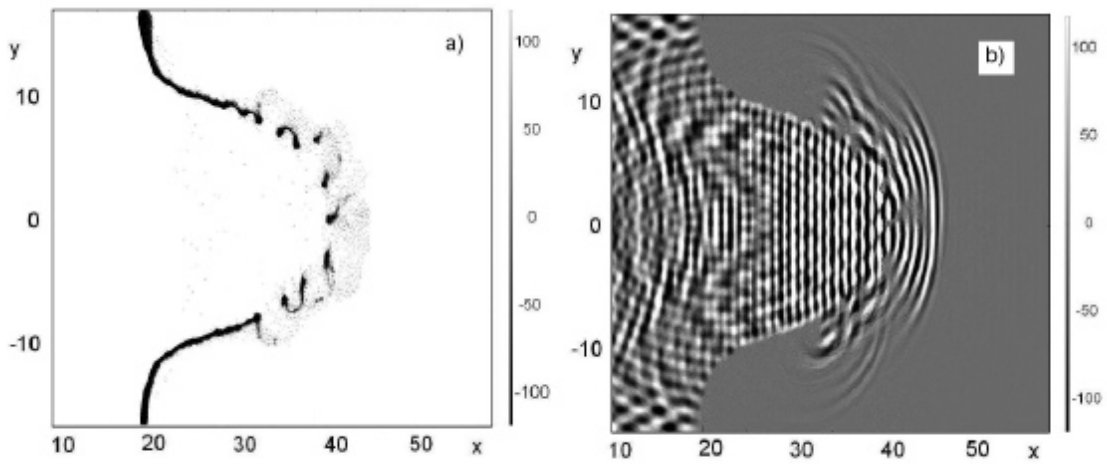




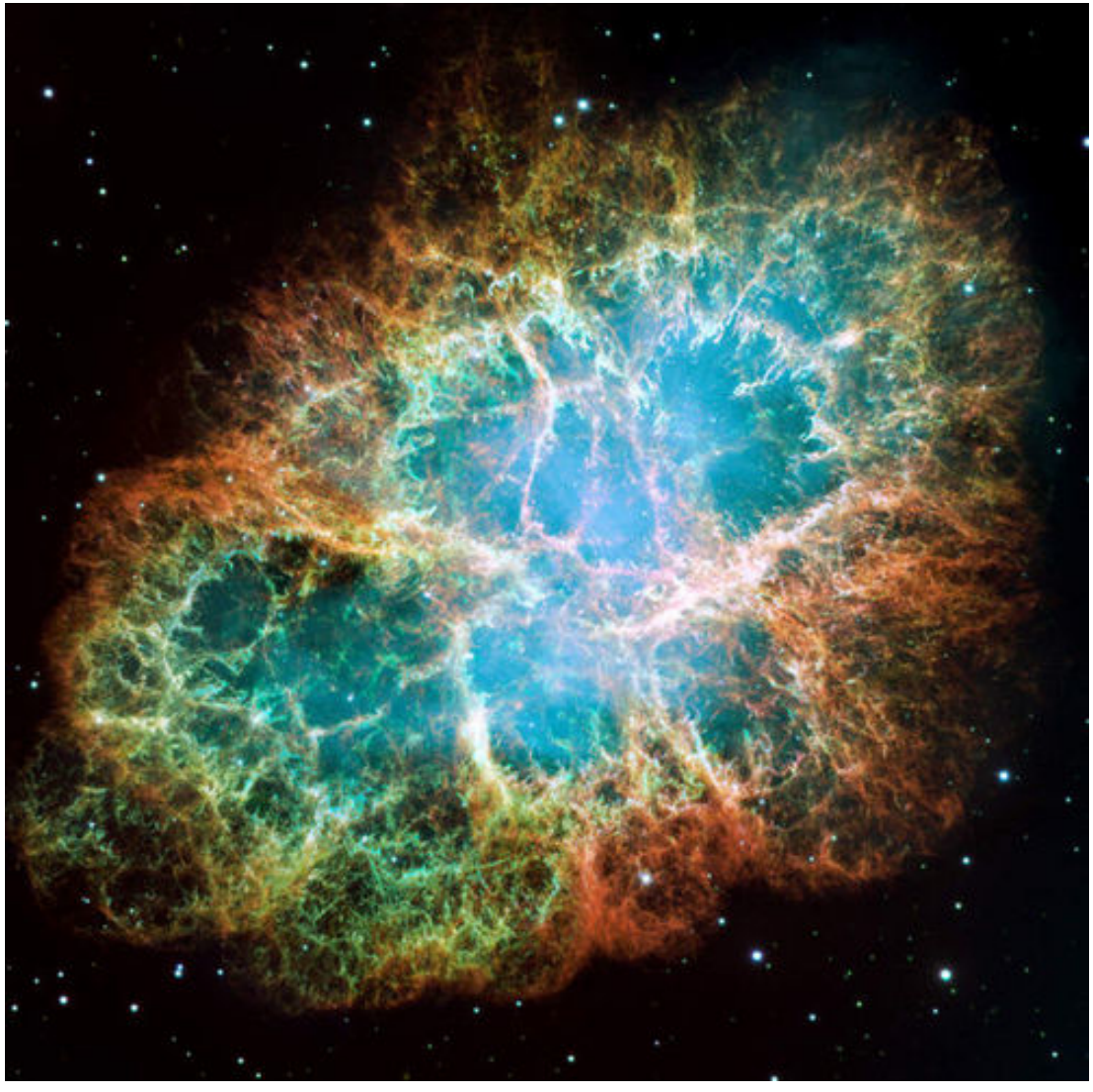
Accelerazione di uno specchio relativistico con la pressione di radiazione

Instabilità di Rayleigh-Taylor simulazioni 2-D





RT nella nebulosa del Granchio



Verso la nebulosa del Granchio

- E questo apre nuovi orizzonti di ricerca in plasmi di elettroni-positroni (nella magnetosfera della pulsar) e in plasmi in cui processi come la Radiazione di Frenamento o la produzione di coppie diventano importanti ed in cui si potranno studiare fenomeni collettivi di QED.
- Inoltre già ora la nebulosa del Granchio propone rivisitazioni in ambienti relativistici di fenomeni studiati in regimi di più bassa energia quali i brillamenti del solari. Di recente è stato visto che la nebulosa del Granchio è soggetta a brillamenti con spettri di energia e.m. emessa che richiedono processi di accelerazione di particelle qualitativamente non dissimili da quelli studiati per gli specchi relativistici.

Verso la nebulosa del Granchio

- E questo apre nuovi orizzonti di ricerca in plasmi di elettroni-positroni (nella magnetosfera della pulsar) e in plasmi in cui processi come la Radiazione di Frenamento o la produzione di coppie diventano importanti ed in cui si potranno studiare fenomeni collettivi di QED.
- Inoltre già ora la nebulosa del Granchio propone rivisitazioni in ambienti relativistici di fenomeni studiati in regimi di più bassa energia quali i brillamenti del solari. Di recente è stato visto che la nebulosa del Granchio è soggetta a brillamenti con spettri di energia e.m. emessa che richiedono processi di accelerazione di particelle qualitativamente non dissimili da quelli studiati per gli specchi relativistici.

Brillamenti nella nebulosa del Granchio

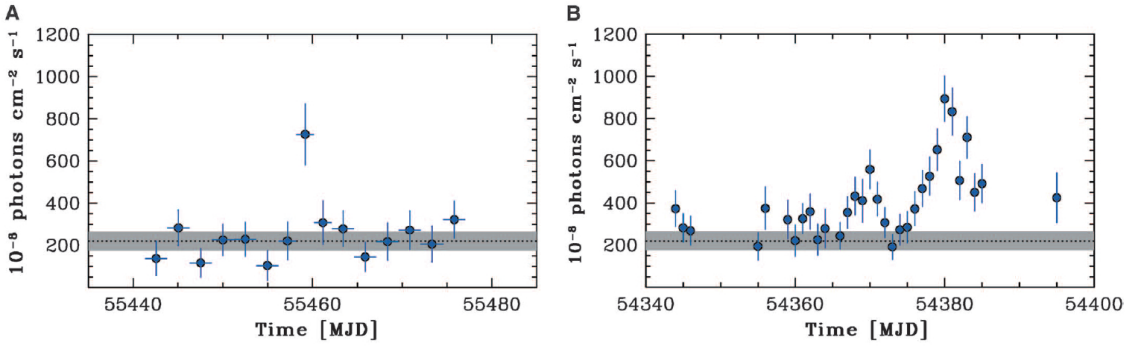
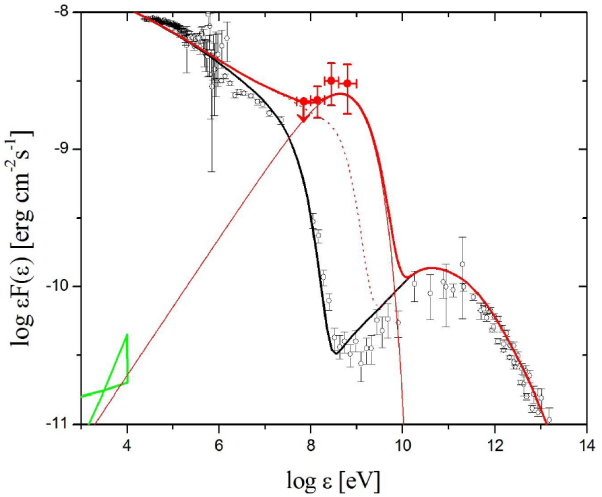


Fig. 1. Crab Nebula light curves of the total flux detected by AGILE in the energy range of 100 MeV to 5 GeV during the gamma-ray flaring periods in 2007 and 2010 (units of 10^{-8} photons cm^{-2} s^{-1}). (**A**) The "spinning" AGILE photon flux light curve during the period 2 September to 8 October 2010. Time bins are 2.5 days except near the flare peak (2-day binning). Errors are 1 SD, and time is given in Modified Julian Day (MJD). The dotted line and gray band show the average Crab flux and the 3 SD uncertainty range. (**B**) The AGILE light curve during the period 27 September to 12 October 2007 (1-day binning) with the satellite in pointing mode. Errors are 1 SD. Time is given in MJD. The dotted line and gray band show the average Crab flux and the 3 SD uncertainty range.

Crab Nebula super-flare spectrum (Apr. 16, 2011)
(Striani et al, Astrophys. J. Letters, 2011)



Vedere e comprendere i fenomeni nel loro insieme, prima di stingerli in parti minute

Ci sono fenomeni in fisica la cui ricchezza risiede nella loro totalità e che è difficile, o non utile, interpretare semplicemente come somma di processi elementari.

Che anzi, quanto più ogni cosa viene divisa
in parti minute, tanto più puoi vedere il colore
svanire a poco a poco e stingersi;
come avviene quando in piccole parti si lacera la porpora:
il colore purpureo e lo scarlatto, di gran lunga il più lucente,
quando è stato sminuzzolato filo a filo, tutto si disperde;
sì che di qui puoi conoscere che le particelle perdono
tutto il colore prima di ridursi allo stato di atomi.

Lucrezio, “De Rerum Natura” libro secondo