



Lezione di Astronomia II - 4

Maurizio Tomasi (maurizio.tomasi@unimi.it)

5 aprile 2024



Caratteristiche della polvere nell'ISM



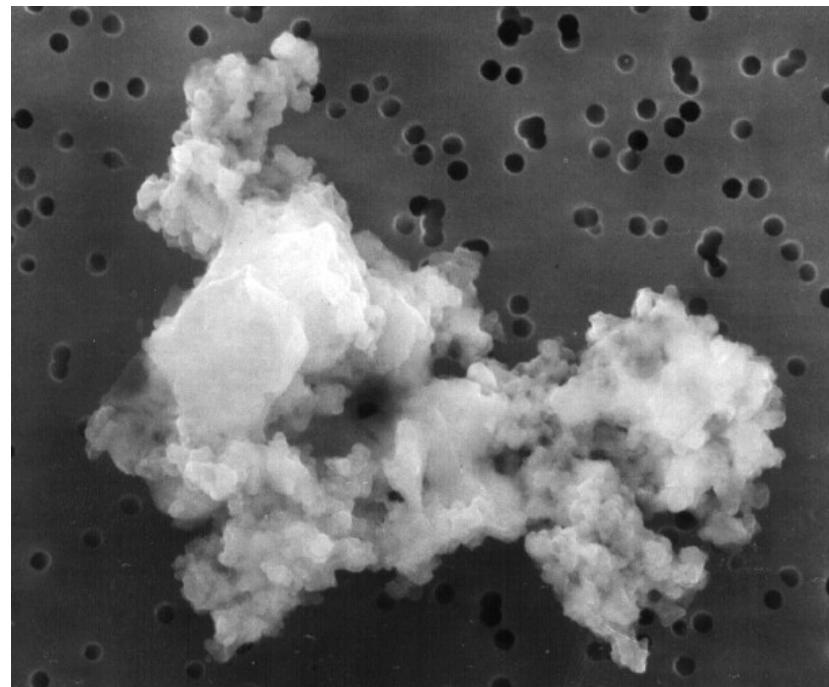
Forma dei grani di polvere

- Ieri abbiamo visto che la polarizzazione suggerisce che i grani non abbiano simmetria sferica
- Possiamo avere un'idea più precisa della loro forma?



Forma dei grani di polvere

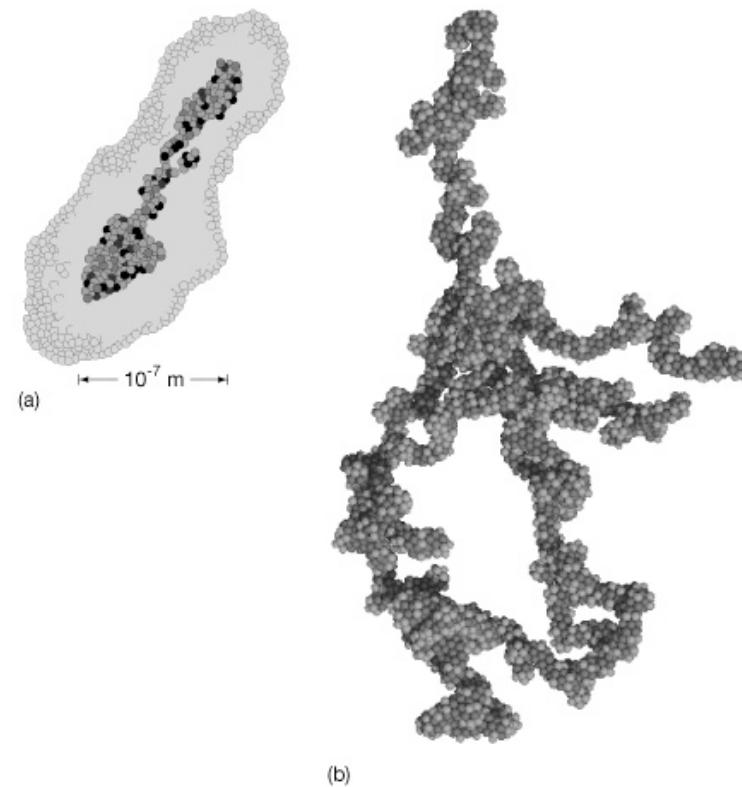
Particelle di polvere interplanetaria possono essere catturate da [aerei che volano nell'alta atmosfera](#).





Forma dei grani di polvere

I grani di polvere (a) possono collidere tra loro e aggregarsi in strutture più complesse (b).



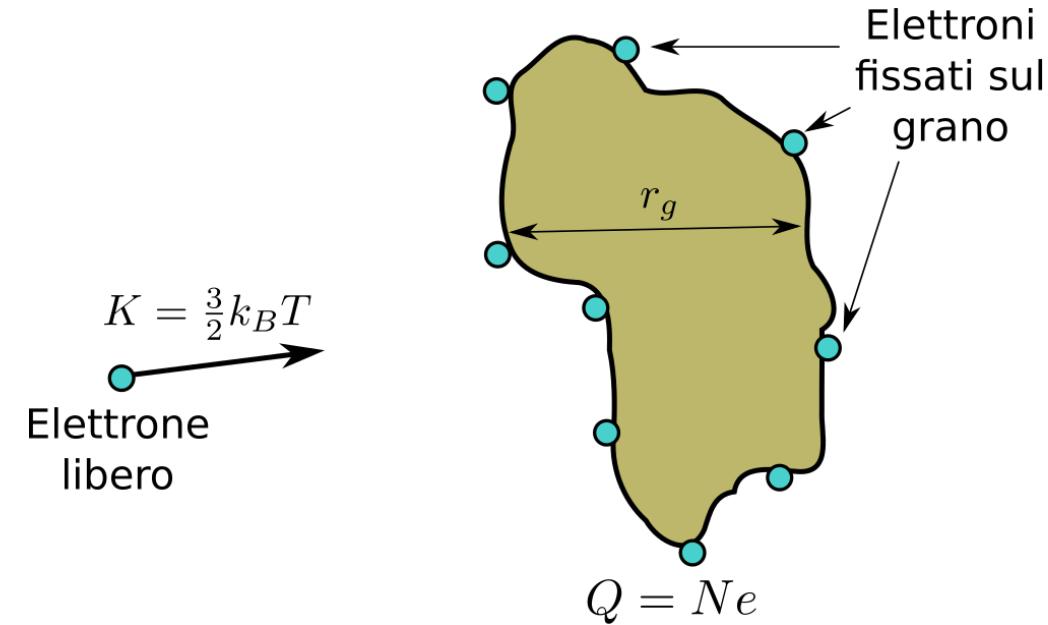


Carica elettrica dei grani

- L'interazione dei grani con campi elettromagnetici indica che non sono elettricamente neutri (ma globalmente ISM sì!).
- Ci sono due meccanismi che permettono di accumulare carica sui grani:
 1. Elettroni liberi «lenti» si fissano sulla superficie del grano;
 2. Effetto fotoelettrico causato da fotoni UV (poco importante se A_V è grande, perché in tal caso la polvere scherma i fotoni).
- Consideriamo ora il primo caso.



Carica elettrica dei grani



Per fissarsi al grano, l'energia cinetica dell'elettrone deve essere maggiore del potenziale Coulombiano del grano (con r_g circa $1\mu\text{m}$). In questo caso, T è la temperatura della nube di grani.



Carica elettrica dei grani

- Il conto non è molto diverso da quello del **raggio collisionale per gli ammassi globulari**: studiamo quando l'energia potenziale è uguale all'energia cinetica:

$$\frac{Ne^2}{4\pi\epsilon_0 r_g} = \frac{3}{2}k_B T, \quad \text{da cui}$$

$$N = 6\pi\epsilon_0 k_B T \frac{r_g}{e^2} \approx 1.$$

- La coda ad alta velocità nella distribuzione di Boltzmann per gli *e liberi* porta a $N \sim 10$.



Temperatura dei grani

- Stimiamo ora la temperatura media del *singolo* grano di polvere. Possiamo supporre che essi siano scaldati da stelle vicine.
- Supponiamo che un grano sia a una distanza d da una stella con raggio R e temperatura T , e che la luminosità della stella sia

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

(corpo nero a simmetria sferica).



Temperatura dei grani

- La frazione di potenza che colpisce il grano è

$$f = \frac{\pi r_g^2}{4\pi d^2} = \frac{1}{4} \left(\frac{r_g}{d} \right)^2.$$

- Se il grano ha albedo a , assorbe una potenza

$$P_{\text{abs}} = f L (1 - a) = (1 - a) r_g^2 \sigma T^4 \left(\frac{\pi R^2}{d^2} \right),$$

dove $\pi R^2/d^2 \equiv \Omega_*$ è l'angolo solido della stella visto dal grano.



Temperatura dei grani

- Per calcolare la temperatura del grano all'equilibrio termico, dobbiamo considerare anche la potenza rilasciata dal grano
- Assumiamo che sia sferico (orrore!), così che

$$P_{\text{rad}} = 4\pi r_g^2 \sigma T_g^4,$$

dove usiamo la cosiddetta **temperatura effettiva** T_g , ossia la temperatura di un corpo nero che emetterebbe la stessa quantità di energia del grano.



Temperatura dei grani

Se la polvere ha raggiunto la temperatura T_g di equilibrio, la potenza emessa deve uguagliare quella assorbita:

$$P_{\text{rad}} = P_{\text{abs}}$$

$$4\pi r_g^2 \sigma T_g^4 = (1 - a) r_g^2 \sigma T^4 \left(\frac{\pi R^2}{d^2} \right)$$

$$T_g = T(1 - a)^{1/4} \sqrt{\frac{R}{2d}}.$$



Temperatura dei grani

- La formula

$$T_g = T(1 - a)^{1/4} \sqrt{\frac{R}{2d}}$$

mostra che la temperatura della polvere non dipende dalla dimensione dei grani.

- Questa è la temperatura del **singolo** grano di polvere, ma possiamo assumere che all'equilibrio coincida con la temperatura della radiazione emessa dall'intera nube di grani.



Temperatura dei grani

- Nelle regioni di formazione stellare, le distanze tra nube e stella sono dell'ordine di qualche AU ($\sim 10^{11}$ m), così $d/R \sim 10^3 \div 10^4$ e quindi $T_g \sim 10^{-2} T_*$.
- Se $T_* = 10\,000$ K, allora

$$T_g \sim 100 \text{ K}.$$

- Dalla legge di Wien ($\lambda_{\max} T = 0.29 \text{ cm K}$) si deduce che il picco dell'emissione è:
 1. $30 \mu\text{m}$ (IR) se $T = 100 \text{ K}$;
 2. 0.3 mm (sub-mm) se $T = 10 \text{ K}$.



Polvere interstellare

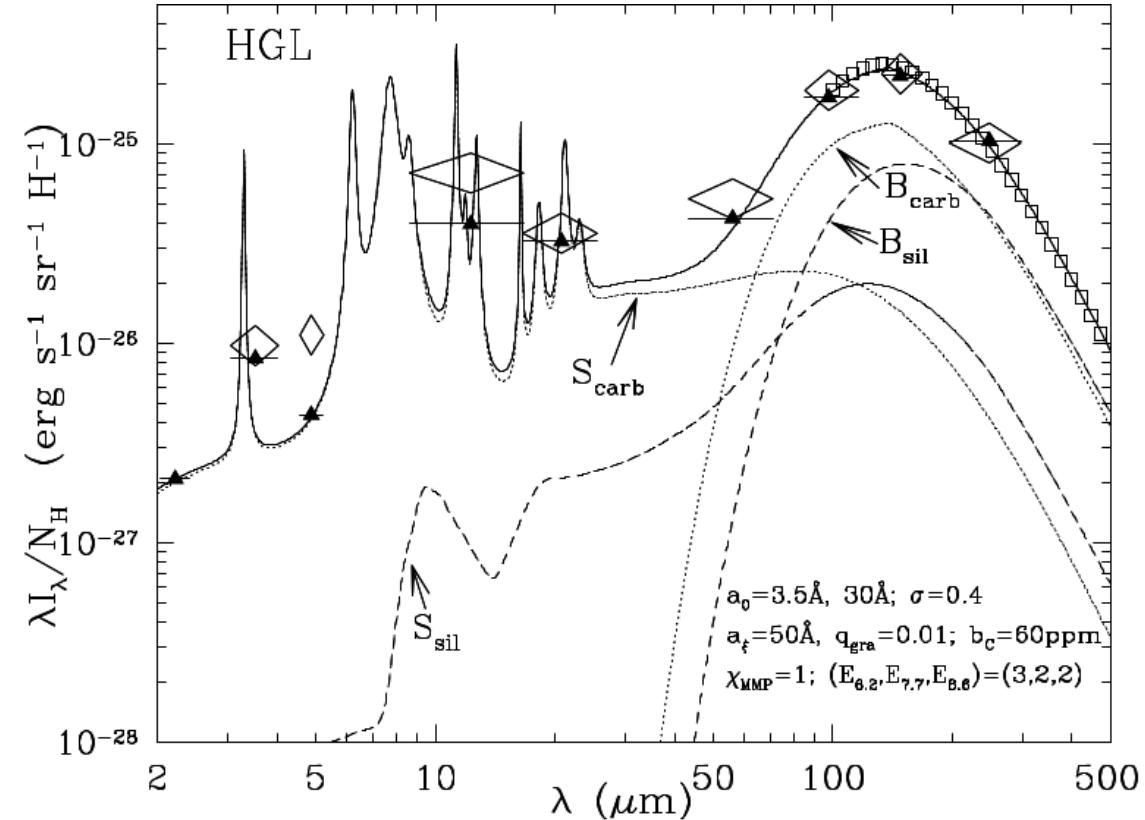
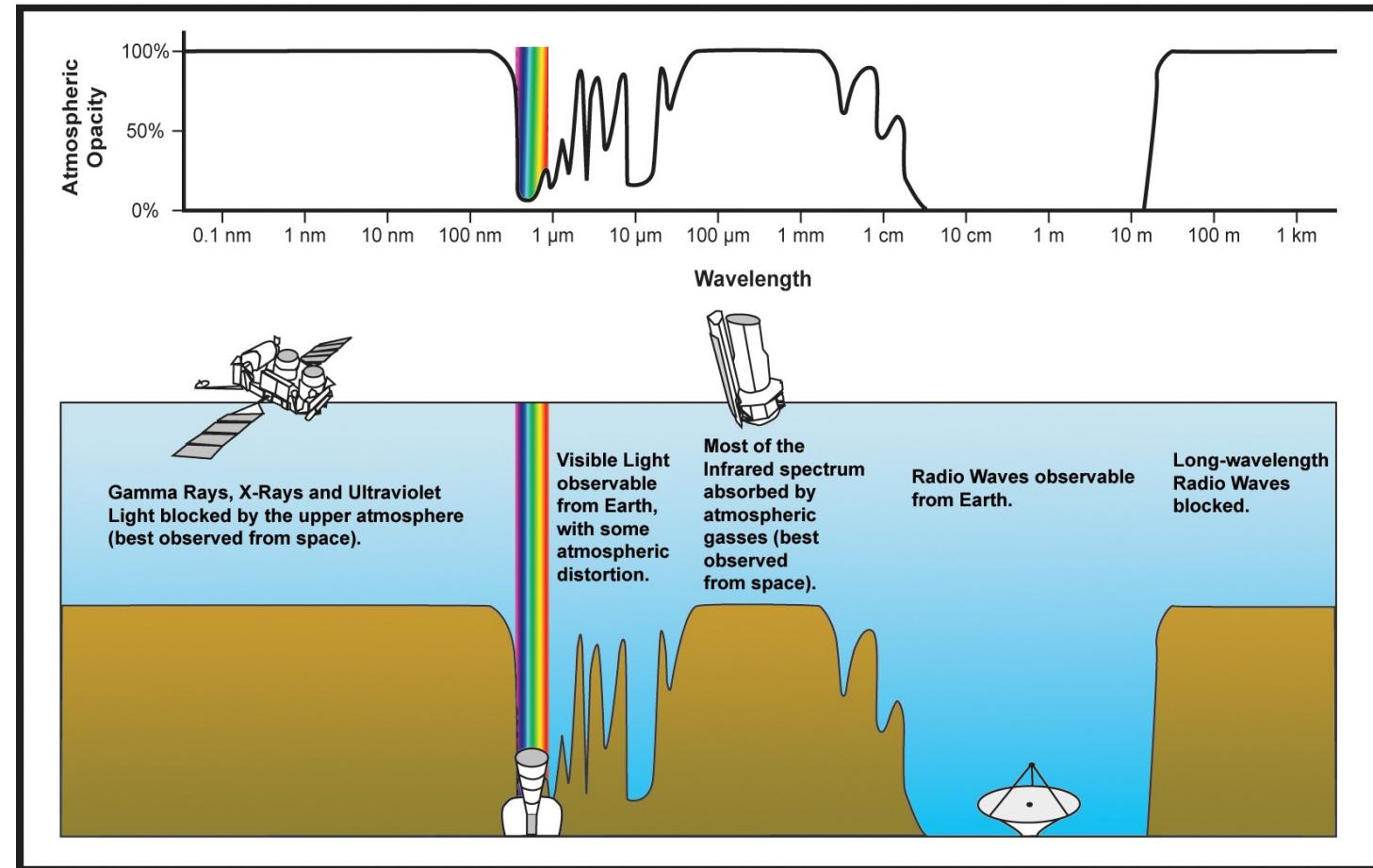
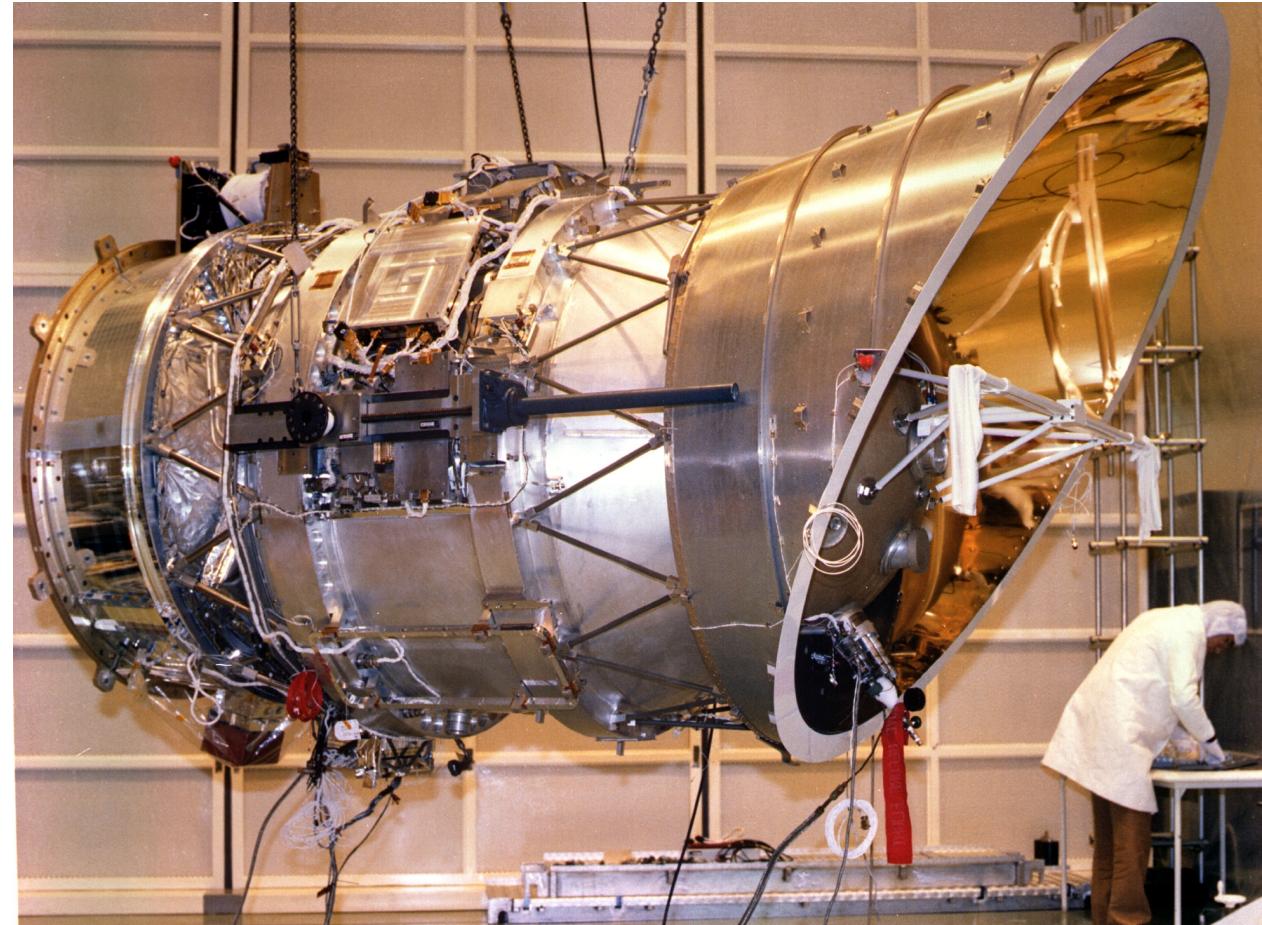


FIG. 8.—Comparison of the model to the observed emission from the diffuse ISM at high Galactic latitudes ($|b| \geq 25^\circ$). Curves labeled B_{sil} and B_{carb} show emission from “big” ($a \geq 250 \text{ \AA}$) silicate and carbonaceous grains; curves labeled S_{sil} and S_{carb} show emission from “small” ($a < 250 \text{ \AA}$) silicate and carbonaceous grains (including PAHs). Triangles show the model spectrum (solid curve) convolved with the DIRBE filters. Observational data are from DIRBE (diamonds; Arendt et al. 1998) and FIRAS (squares; Finkbeiner et al. 1999).

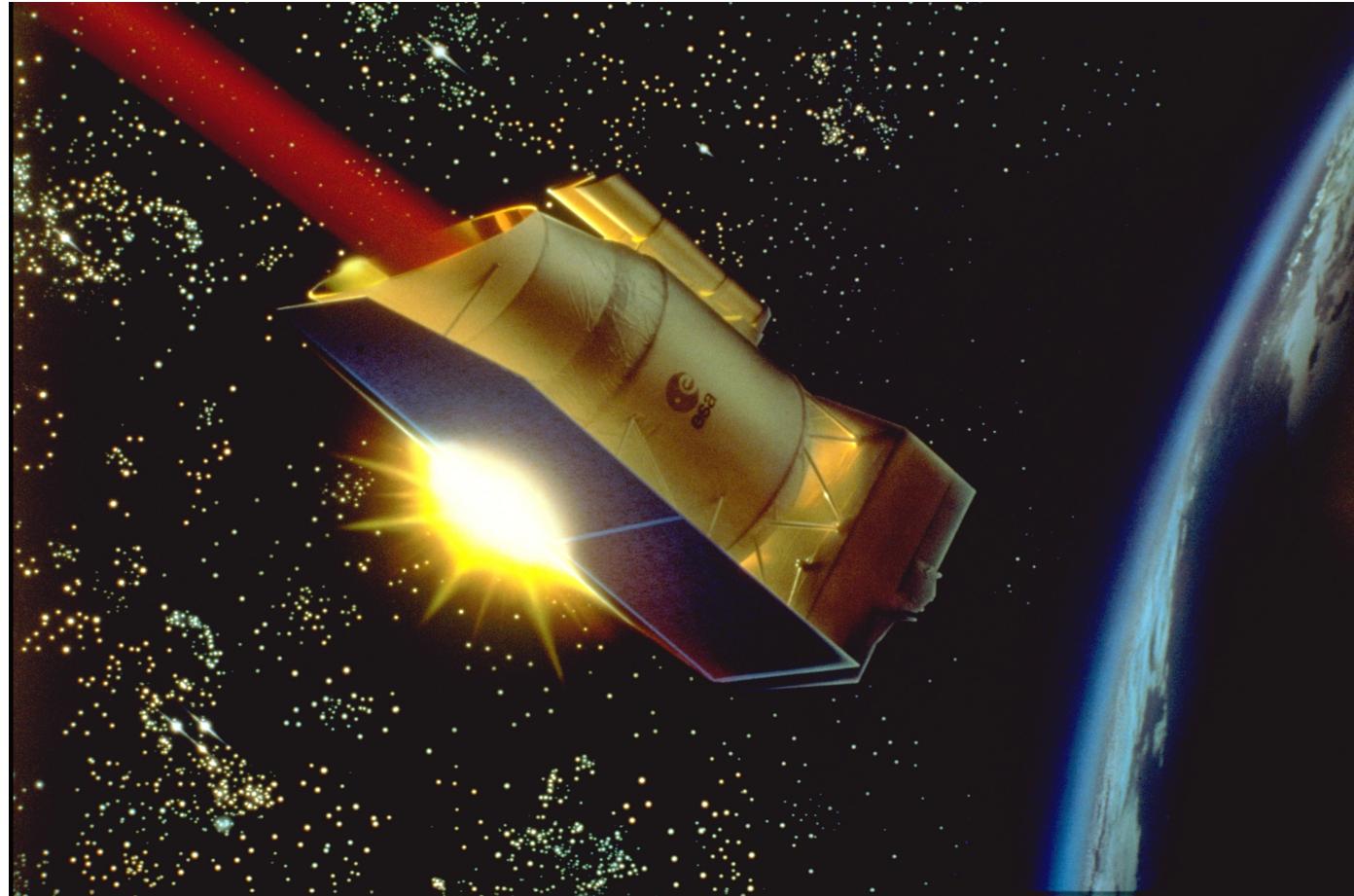


Osservazioni dallo spazio





IRAS (Infrared Astronomical Satellite), 25/1/1983: Prima survey in IR (12, 25, 60 e 100 μm) dell'intero cielo. Orbita geocentrica ($h \approx 900 \text{ km}$).

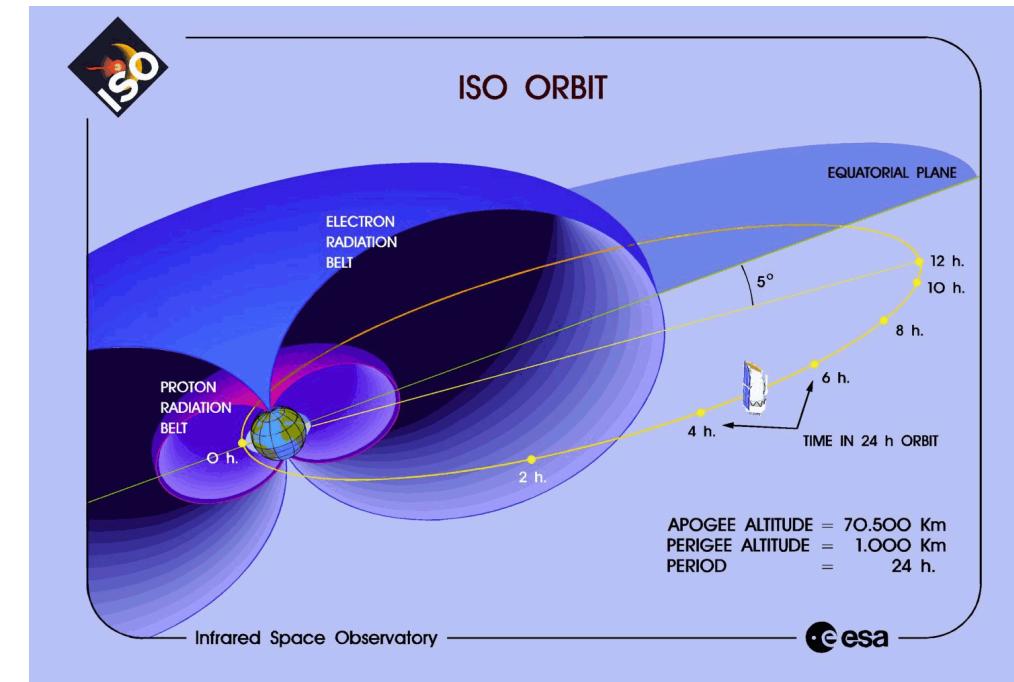


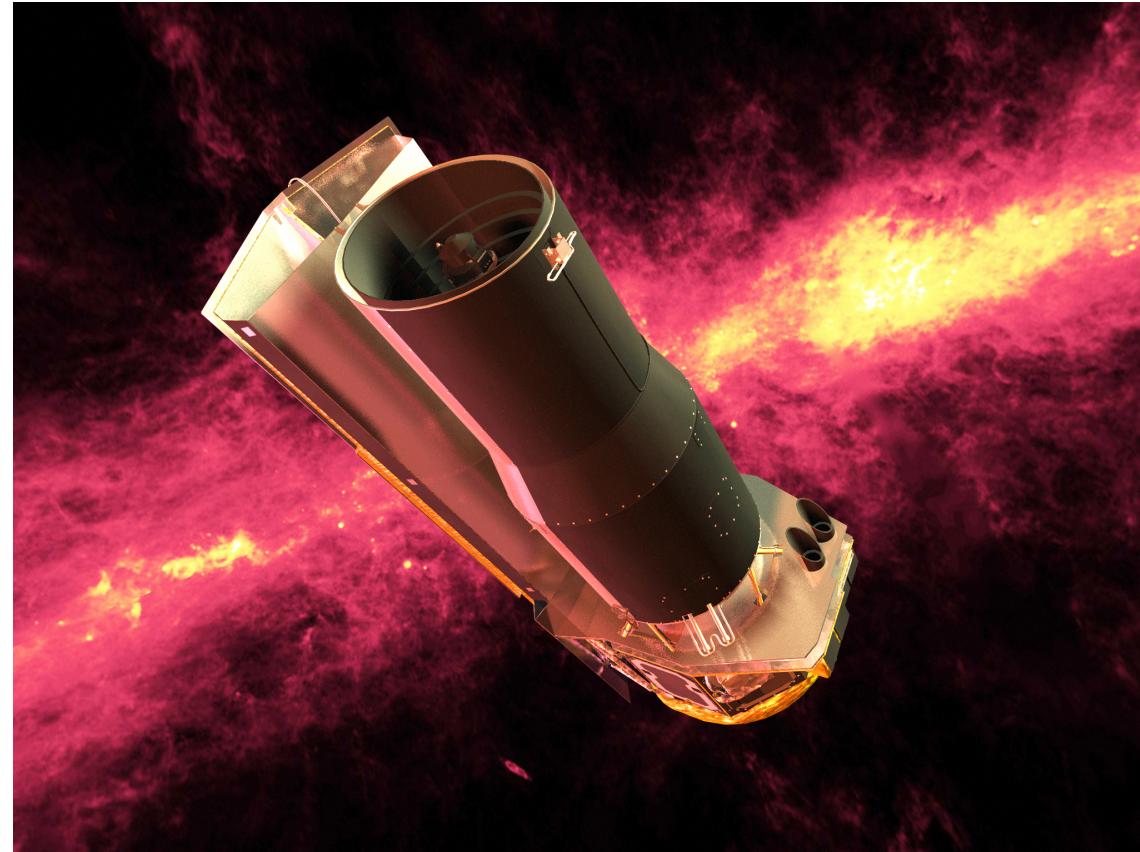
ISO (Infrared Space Observatory), 17/11/1995. Orbita molto eccentrica (1000 km ÷ 70 000 km).



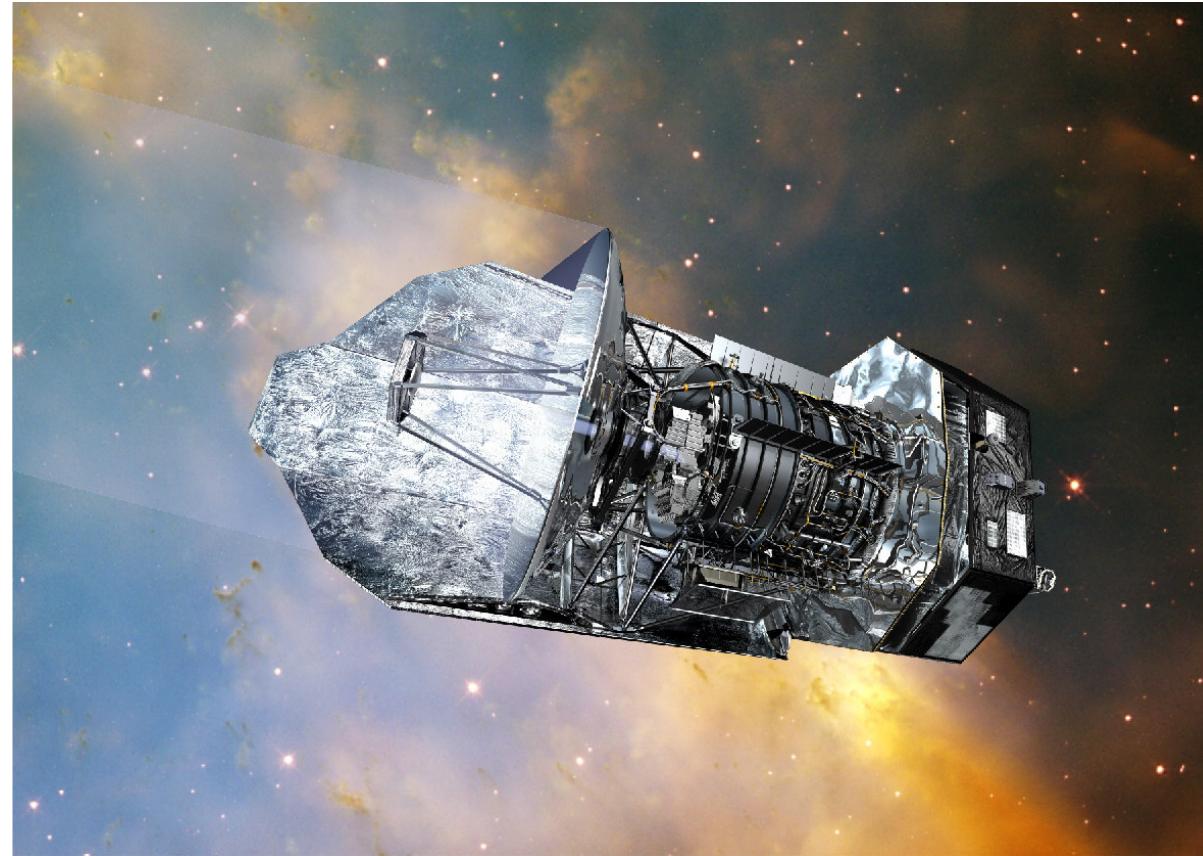
Uso di orbite eccentriche

- All'apogeo (massima distanza dalla Terra) il satellite si muove molto lentamente: più facile fare lunghe osservazioni
- Le fasce di radiazione sono importanti vicino al perigeo (minima distanza dalla Terra): ISO spegneva gli strumenti 7 ore ogni giorno.

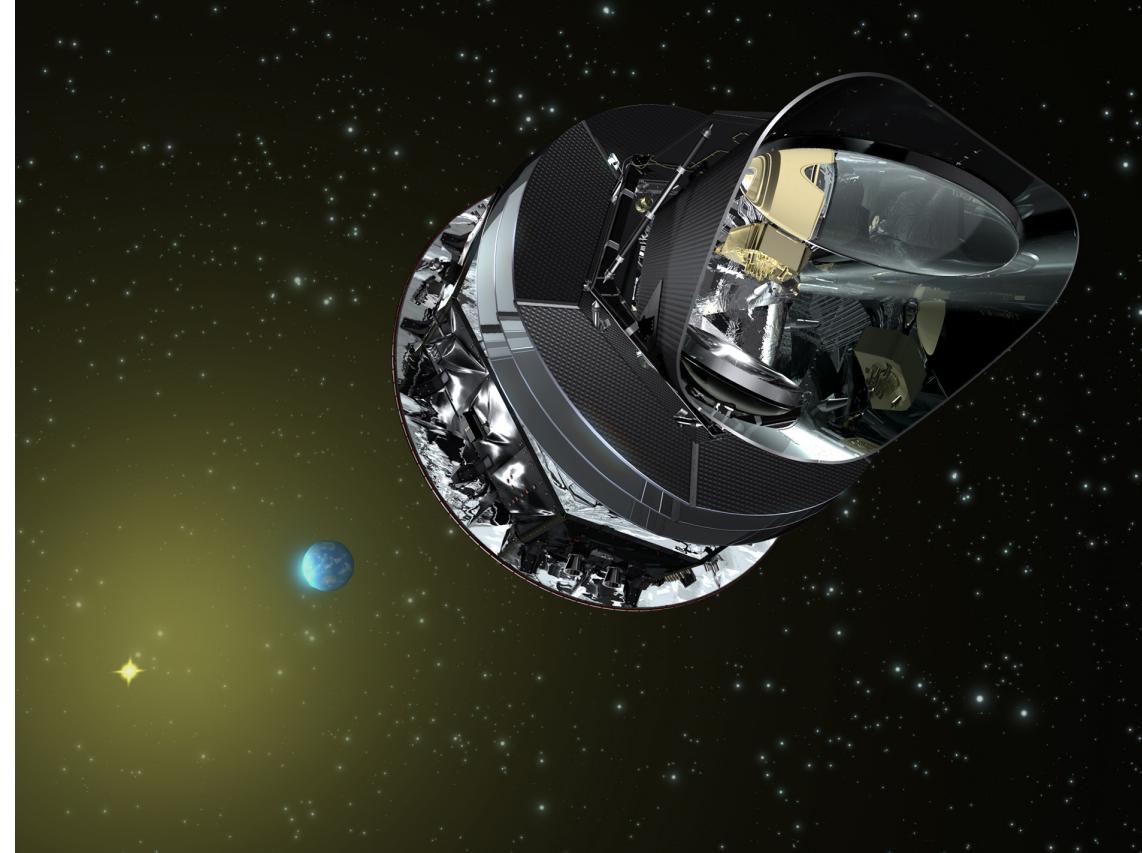




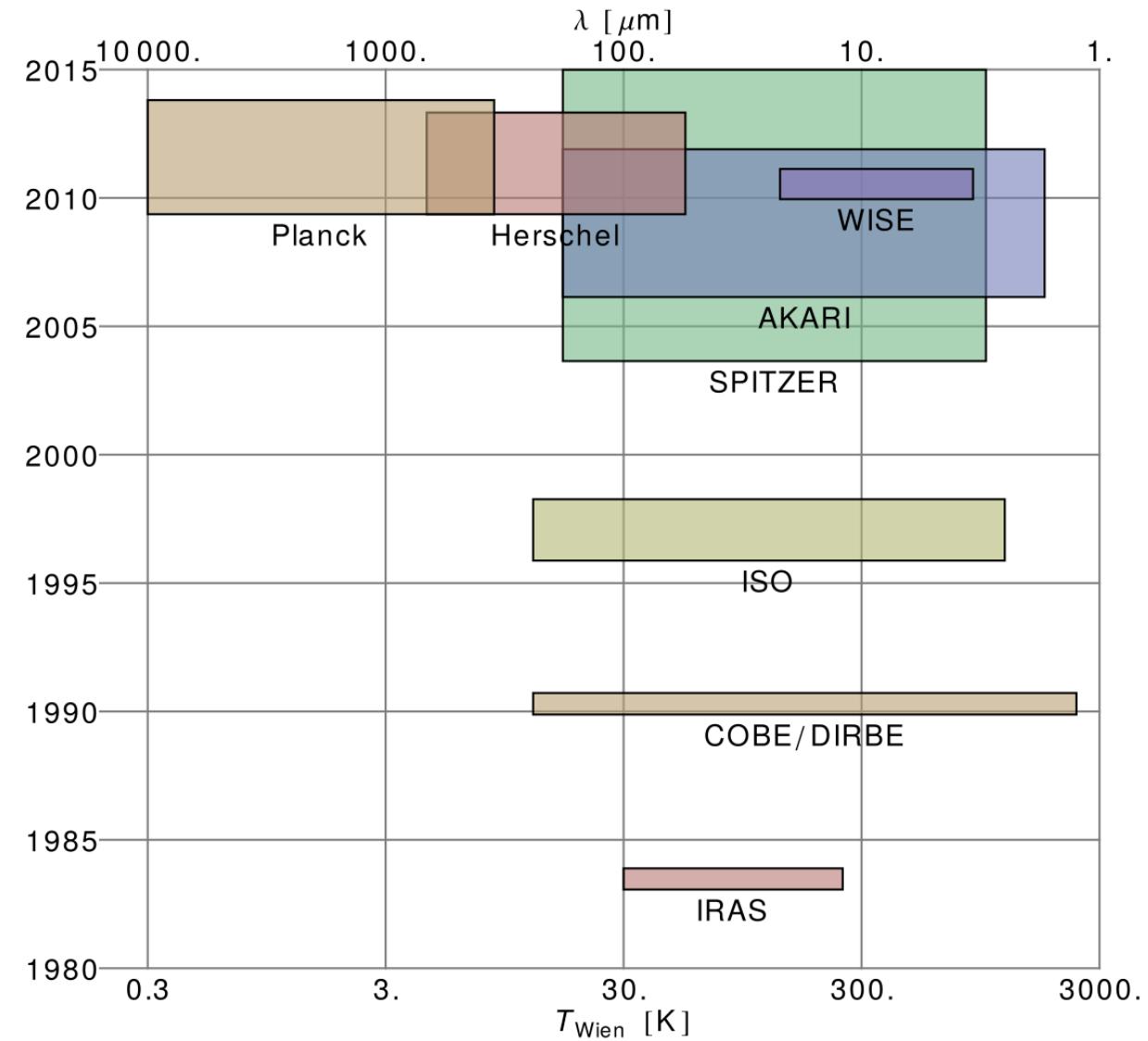
Spitzer Space Telescope (USA), 25/8/2003. Orbita eliocentrica ([IRrelevant astronomy](#))



Herschel (ESA), 14/5/2009. Orbita eliocentrica su L_2 ($d = 1.5 \times 10^9$ m).



Planck (ESA), 14/5/2009. Orbita eliocentrica su L_2 ($d = 1.5 \times 10^9$ m).
Principalmente mm, ma canali fino a 350 μ m.





Proprietà dei grani: riassunto

Caratteristica	Fonte	Risultato
Forma	Polarizzazione stelle, polvere interplanetaria	Asimmetrica
Dimensione	Andamento di $A(\lambda)$	$\text{nm} < r_g < \mu\text{m}$
Composizione	Spettro, forma di $A(\lambda)$	Silicati, carbonati, ghiaccio, ferrite, idrocarburi
Carica elettrica	Polarizzazione stelle, conservazione energia	$N = \frac{3}{2}k_B T \frac{r_g}{e^2} \sim 10$
Temperatura	Illuminazione da stelle	$T_g = T_* \sqrt{\frac{R}{2d}} \sim 10 \div 100 \text{ K}$



Rotazione dei grani ed emissione anomala



Rotazione dei grani

Perché i grani tendono ad allineare il loro asse di rotazione?

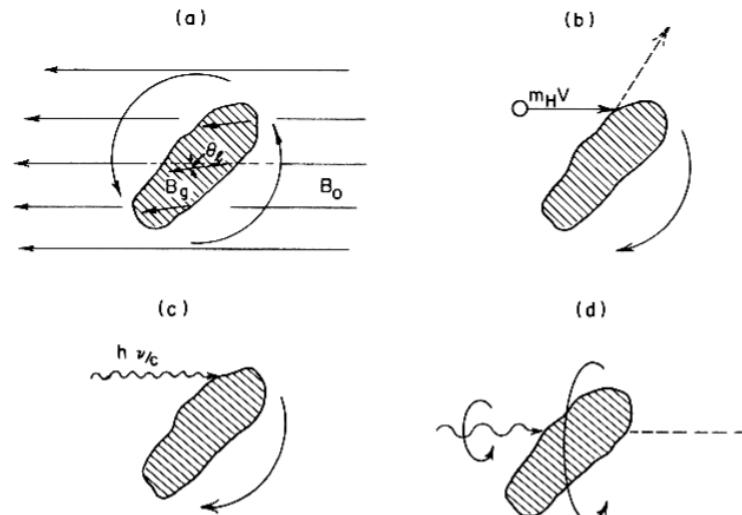


Fig. 9.14. Alignment mechanisms for interstellar grains: (a) process of paramagnetic relaxation; (b) alignment by streaming through gas, or (c) through a photon field. In process (c) the photon's linear momentum causes the grain to spin; in process (d) the photon's intrinsic spin angular momentum is of importance (see text).

Harwit, *Astrophysical concepts* (4th edition), Springer (2006)



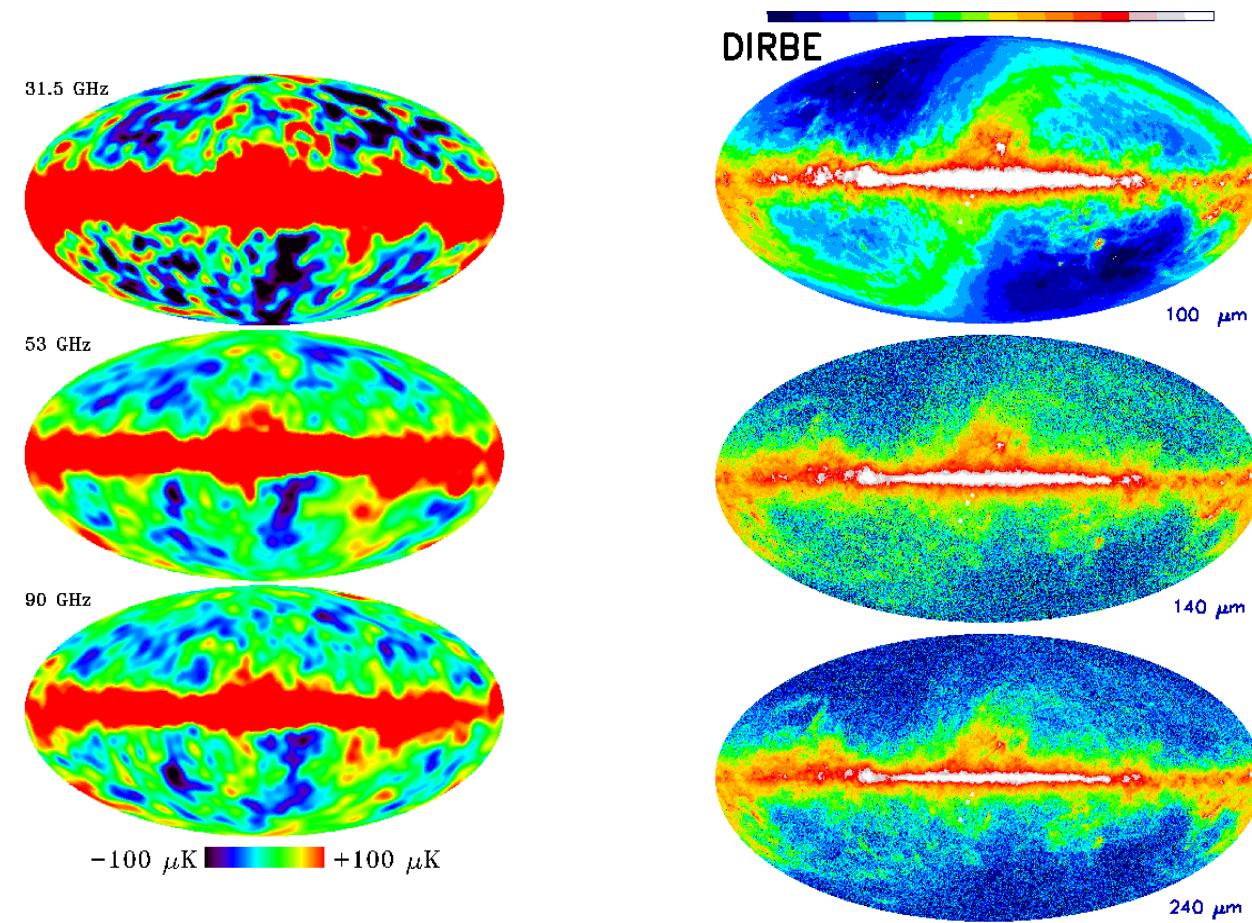
Rotazione dei grani

- Se il grano è paramagnetico, il campo Galattico \vec{B}_{Gal} induce un momento magnetico $\vec{\mu}_B \propto \vec{B}_{\text{Gal}}$ parallelo a questo, che causa un momento meccanico $\vec{\tau} = \vec{\mu}_B \times \vec{B}_{\text{Gal}}$. Allora:
 1. Se il grano ruota come nel caso *a* della fig. precedente, la rotazione porta \vec{B}_{Gal} e $\vec{\mu}_B$ a disallinearsi. Per riallinearsi, $\vec{\mu}_B$ induce un momento torcente in opposizione.
 2. Se l'asse di rotazione è parallelo a \vec{B}_{Gal} , non c'è momento torcente.
- Quindi l'asse di rotazione tende ad allinearsi con \vec{B}_{Gal} (**rilassamento paramagnetico**).



Emissione anomala

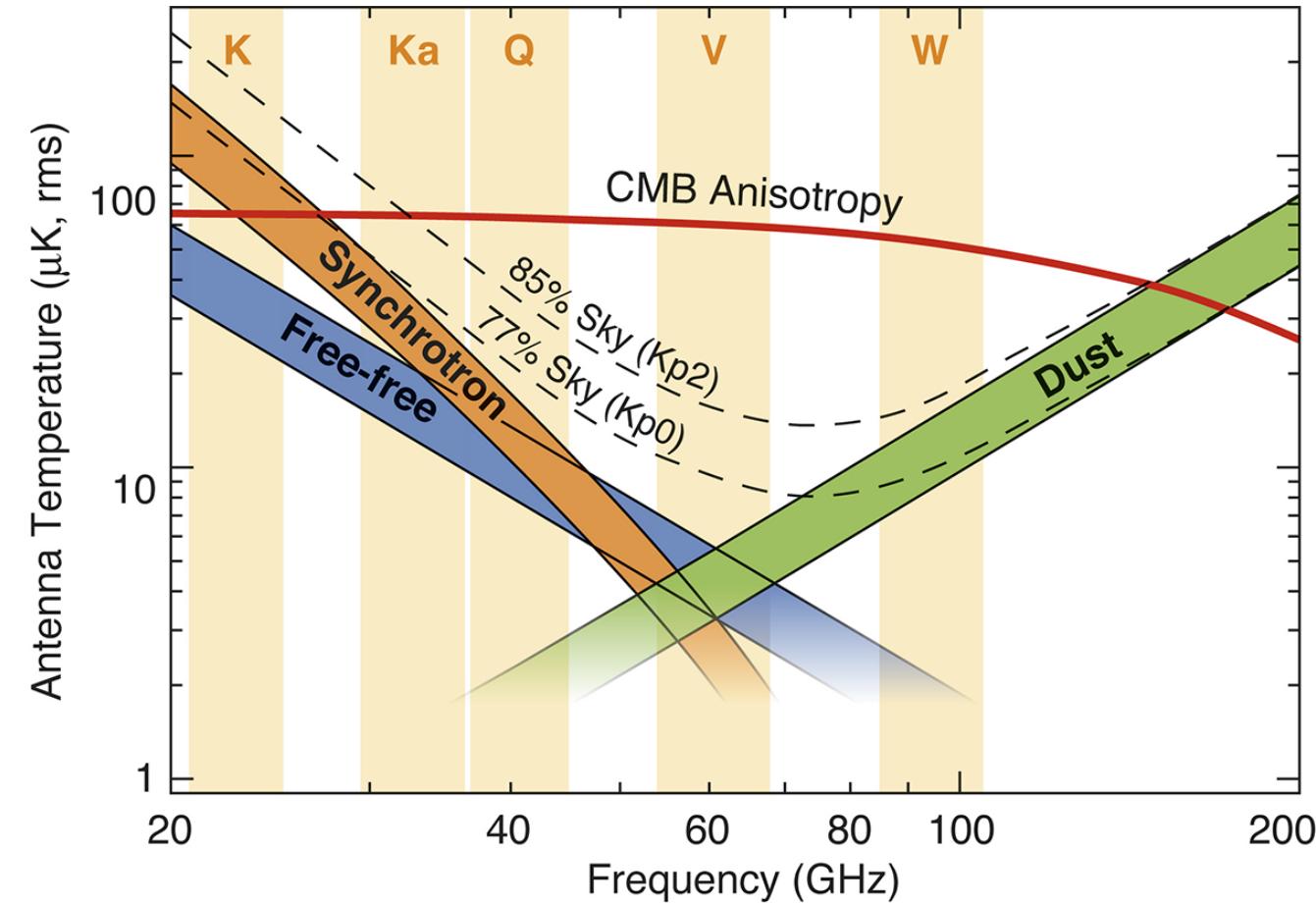
- Nel 1995, Kogut *et al.* pubblicarono un articolo in cui si misurava la correlazione tra l'emissione del cielo a $140\text{ }\mu\text{m}$ (misurata da COBE-DIRBE) e a 31.5 GHz (misurata da COBE-DMR).
- Questi studi cercavano di caratterizzare il contributo relativo di diverse emissioni intorno alla regione delle microonde, in modo da isolare meglio il segnale della CMB (che vedremo meglio nell'ultima parte del corso).



(La correlazione si ha tra la mappa a 31.5 GHz e la mappa a 140 μm).



Tipi di emissione





Origine della correlazione

- Il segnale di sincrotrone viene generato dai raggi cosmici, che non dovrebbero essere correlati con la polvere.
- Eppure questo è ciò che si osserva! Tre possibilità:
 1. La polvere emette anche alle frequenze del sincrotrone;
 2. I raggi cosmici emettono anche alle frequenze della polvere;
 3. Qualcos'altro (cosa?) emette sia alle frequenze del sincrotrone che della polvere.



Grani in rotazione

- Una spiegazione proposta nel 1998 da A. Lazarian e B. T. Draine è che siano i grani degli idrocarburi aromatici policiclici (PAH) a emettere nella regione spettrale intorno ai 30 GHz, a causa della loro rotazione.
- Il modello fisico è semplice, anche se i dettagli sono estremamente complicati!



Grani in rotazione

- Supponiamo che i grani abbiano un momento elettrico di dipolo $\vec{\mu} = q\vec{r}$ e che siano in rotazione con velocità angolare ω
- Ci aspettiamo allora che emettano fotoni con frequenza $\nu = \omega/2\pi$.
- Se i grani sono in equilibrio termico, abbiano momento angolare $L \gg h$ e siano messi in rotazione principalmente da urti, allora

$$\frac{1}{2}I\langle\omega^2\rangle \approx \frac{3}{2}k_B T, \quad \text{con } I = \frac{2}{5}Ma^2 = \frac{8}{15}\pi\rho a^5.$$



Avvertenze

- L'ipotesi che tutta l'energia dell'urto sia convertita in energia rotazionale è un'approssimazione: in realtà si stima che parte dell'energia (10–20 %) venga convertita in modi vibrazionali.
- L'ipotesi che il momento angolare L sia molto maggiore di h consente di usare la fisica classica, dove il momento angolare non è quantizzato: questo è sempre vero, perché i grani più piccoli hanno $L/h \sim 70$.



Grani in rotazione

La soluzione si può scrivere in questa forma:

$$\nu = \frac{\sqrt{\langle \omega^2 \rangle}}{2\pi} = 32 \text{ GHz} \times \left(\frac{T}{100 \text{ K}} \right)^{1/2} \times \\ \times \left(\frac{2 \text{ g/cm}^3}{\rho} \right)^{1/2} \times \left(\frac{5 \text{ \AA}}{a} \right)^{5/2}.$$

(Solo i grani con $a \lesssim 10 \text{ \AA}$, contribuiscono a questa emissione, vedi Fig. 7 di Draine & Lazarian, 1998). Il picco di emissione previsto è intorno ai 30 GHz: incoraggiante!



Grani in rotazione

Per avere un modello realistico, bisogna anche tenere conto di altri effetti:

1. Collisioni con ioni (forze Coulombiane);
2. Accoppiamento tra $\vec{\mu}$ e il campo elettromagnetico;
3. Assorbimento/emissione di fotoni (a causa del loro momento angolare);
4. Formazione di H₂;
5. Etc.



Grani in rotazione

- Un modello più dettagliato prevede che

$$\langle \omega^2 \rangle \lesssim 3k_B \frac{T}{I}.$$

Il risultato è comunque che lo spettro previsto ha un picco di emissione intorno a qualche decina di GHz.

- Ovviamente, i modelli dettagliati stimano anche l'**intensità**, in modo da paragonarla con quella misurata. (Un modello completo deve quindi tenere conto della superficie media dei grani, della loro emissività, della loro forma, etc.)



THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 508:157–179, 1998 November 20

© 1998. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

ELECTRIC DIPOLE RADIATION FROM SPINNING DUST GRAINS

B. T. DRAINE AND A. LAZARIAN

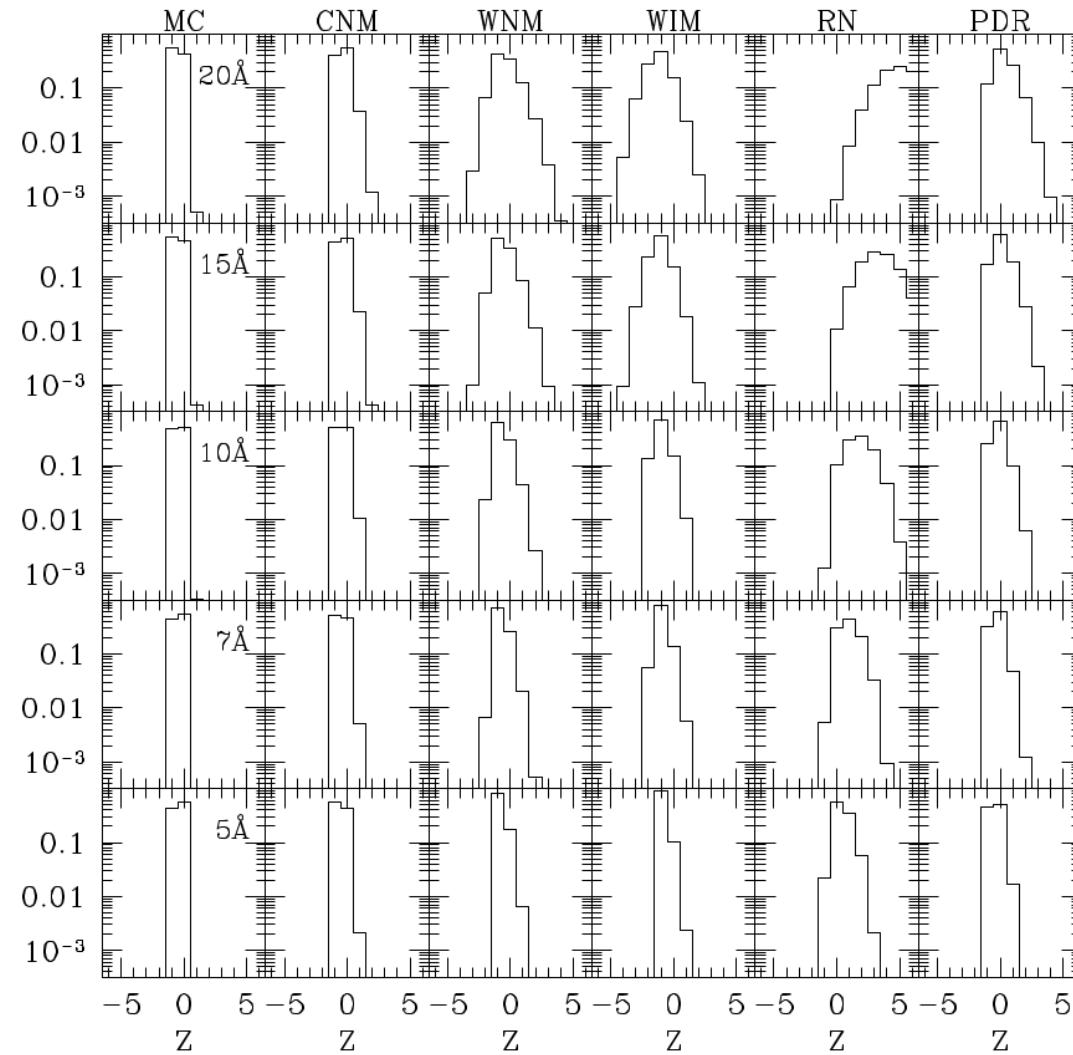
Princeton University Observatory, Peyton Hall, Princeton, NJ 08544

Received 1998 February 18; accepted 1998 June 25

ABSTRACT

We discuss the rotational excitation of small interstellar grains and the resulting electric dipole radiation from spinning dust. Attention is given to excitation and damping of grain rotation by collisions with neutrals, collisions with ions, “plasma drag,” emission of infrared radiation, emission of electric dipole radiation, photoelectric emission, and formation of H₂ on the grain surface. Electrostatic “focusing” can substantially enhance the rate of rotational excitation of grains colliding with ions. Under some conditions, “plasma drag”—due to interaction of the electric dipole moment of the grain with the electric field produced by passing ions—dominates both rotational damping and rotational excitation. Emissivities are estimated for dust in different phases of the interstellar medium, including diffuse H I clouds, warm H I, low-density photoionized gas, and cold molecular gas. Spinning dust grains could explain much, and perhaps all, of the 14–50 GHz background component recently observed by Kogut et al., de Oliveira-Costa et al., and Leitch et al. Future sensitive measurements of angular structure in the microwave sky brightness from the ground and from space should detect this emission from high-latitude H I clouds. It should be possible to detect rotational emission from small grains by ground-based pointed observations of molecular clouds, unless these grains are less abundant there than is currently believed.

Subject headings: atomic processes — diffuse radiation — dust, extinction — ISM: clouds — plasmas — radiation mechanisms: thermal



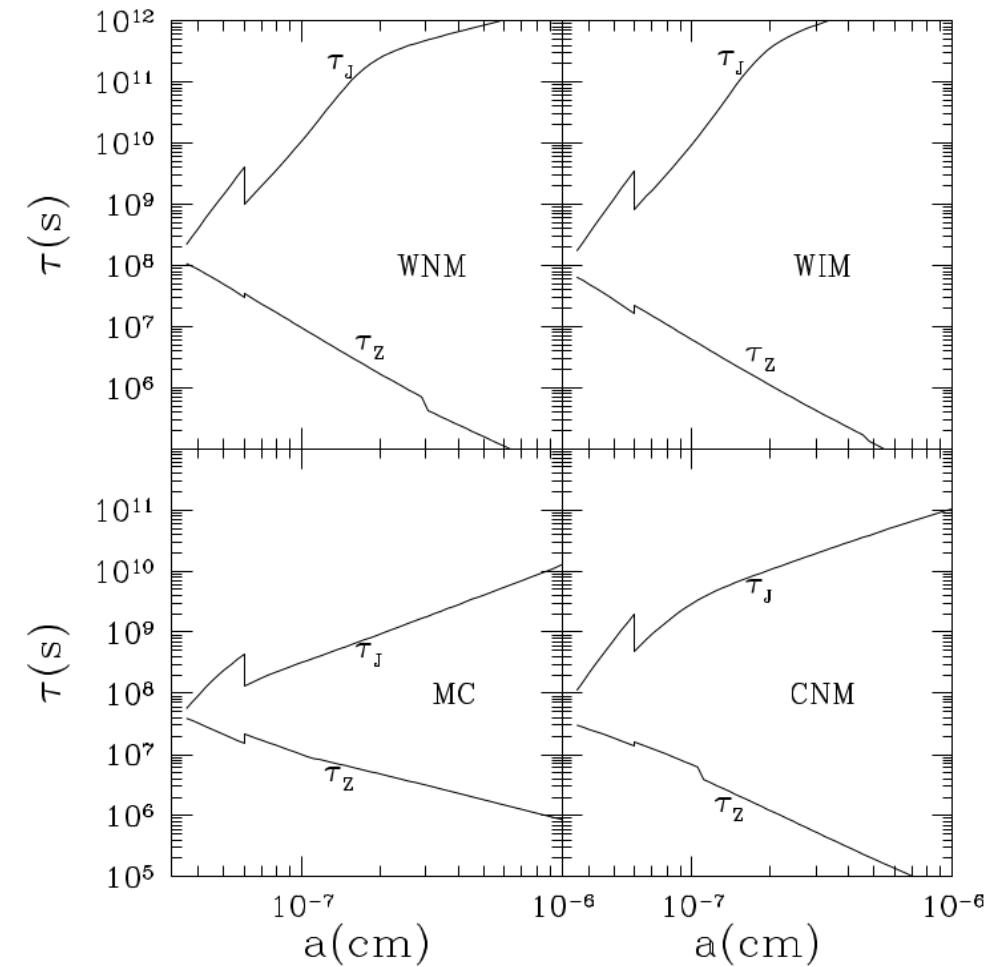
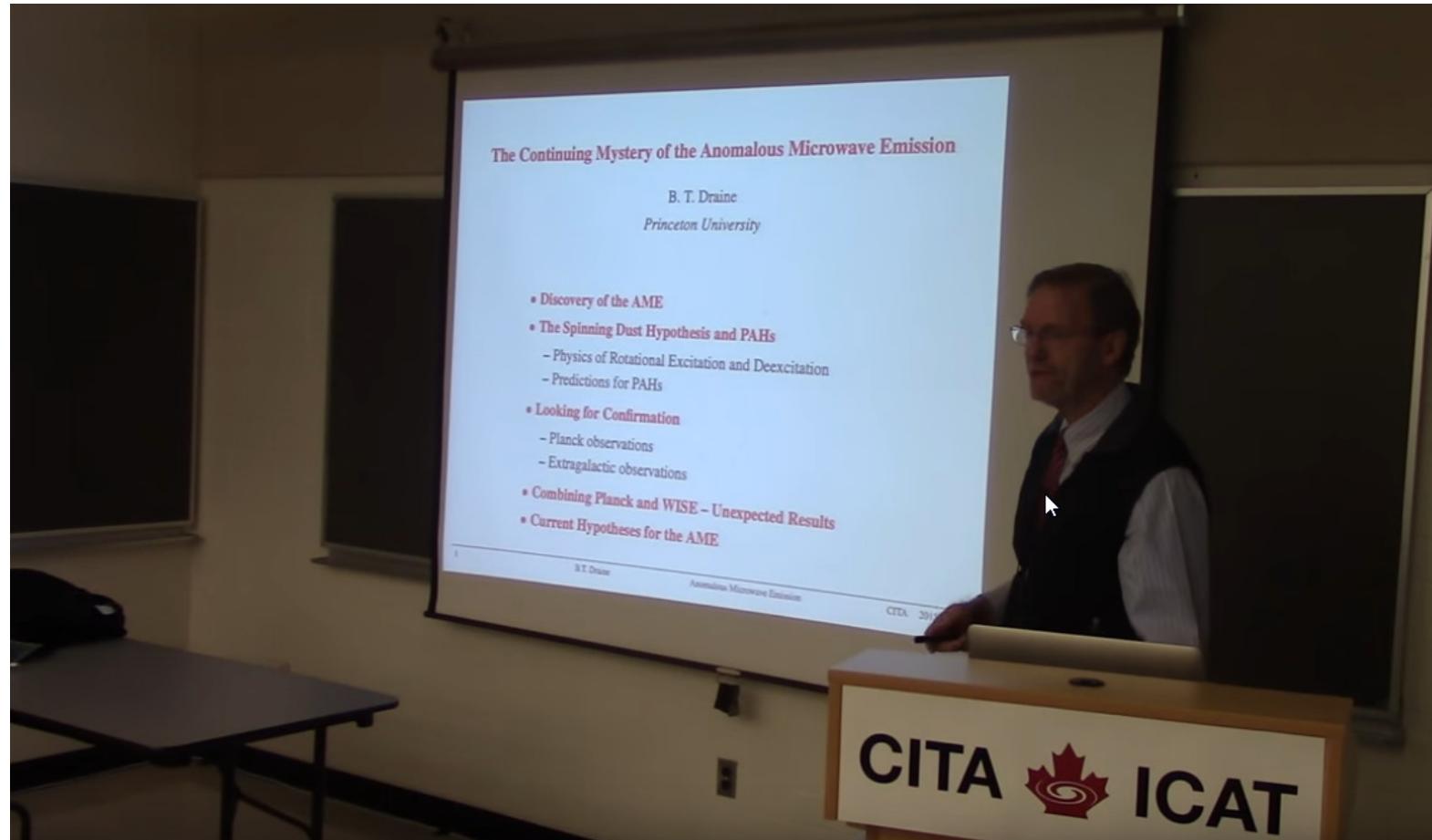


FIG. 3.—Characteristic timescale τ_Z (see eq. [5]) for changes in the grain charge Ze . Also shown is the characteristic rotational damping time τ_J (see eq. [58]) for a grain with charge $Z_m e$. It is apparent that the approximation $\tau_Z \ll \tau_J$ is excellent for all except the smallest ($a < 4 \text{ \AA}$) grains.



The continuing mystery of the Anomalous Microwave Emission è un seminario tenuto da B. Draine nel 2015, molto chiaro ed interessante.



Emissione anomala

