

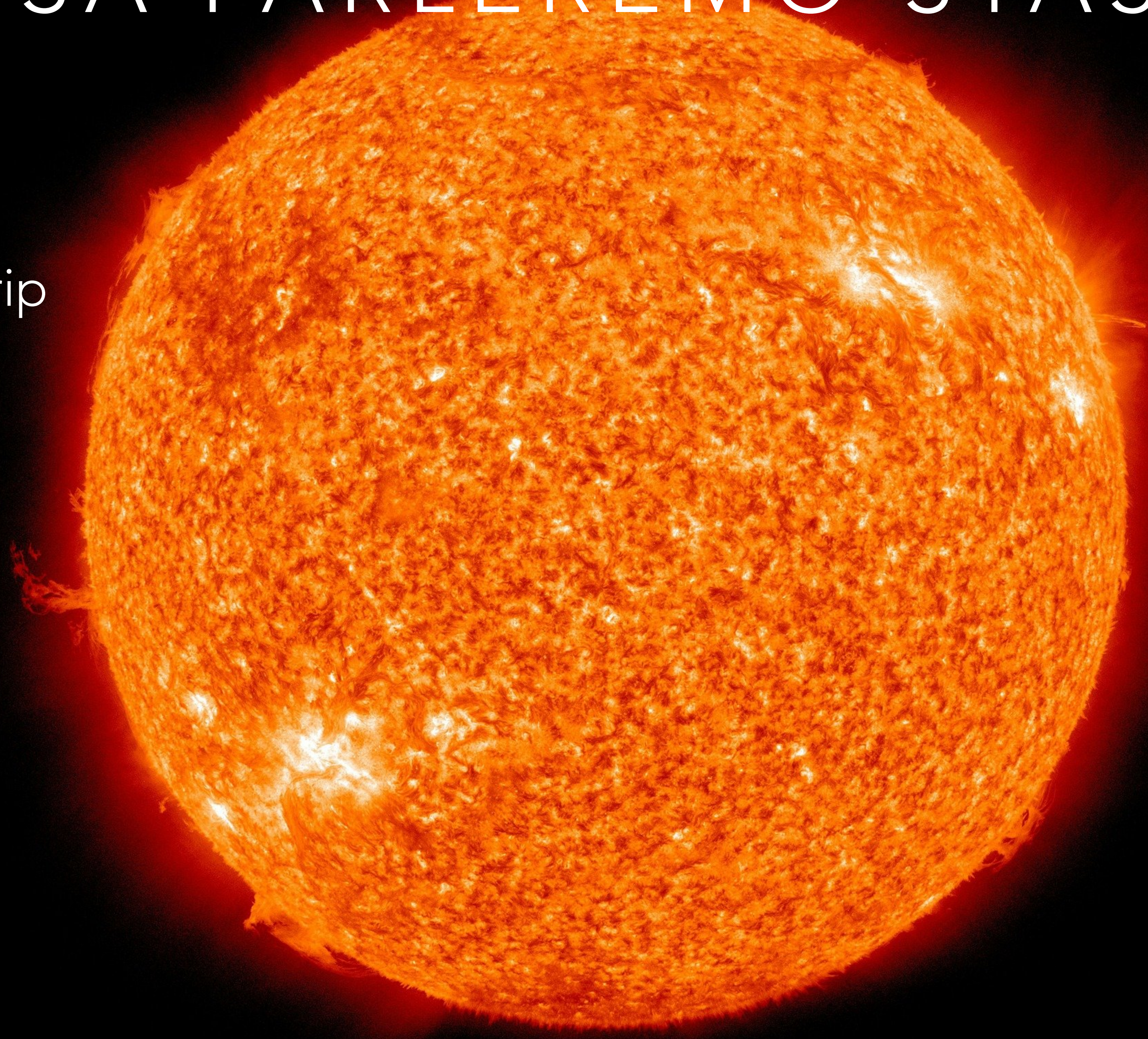
QUARTA SERATA CORSO DI ASTROFISICA

LA FISICA DELLE STELLE



ASTROSISMOLOGIA

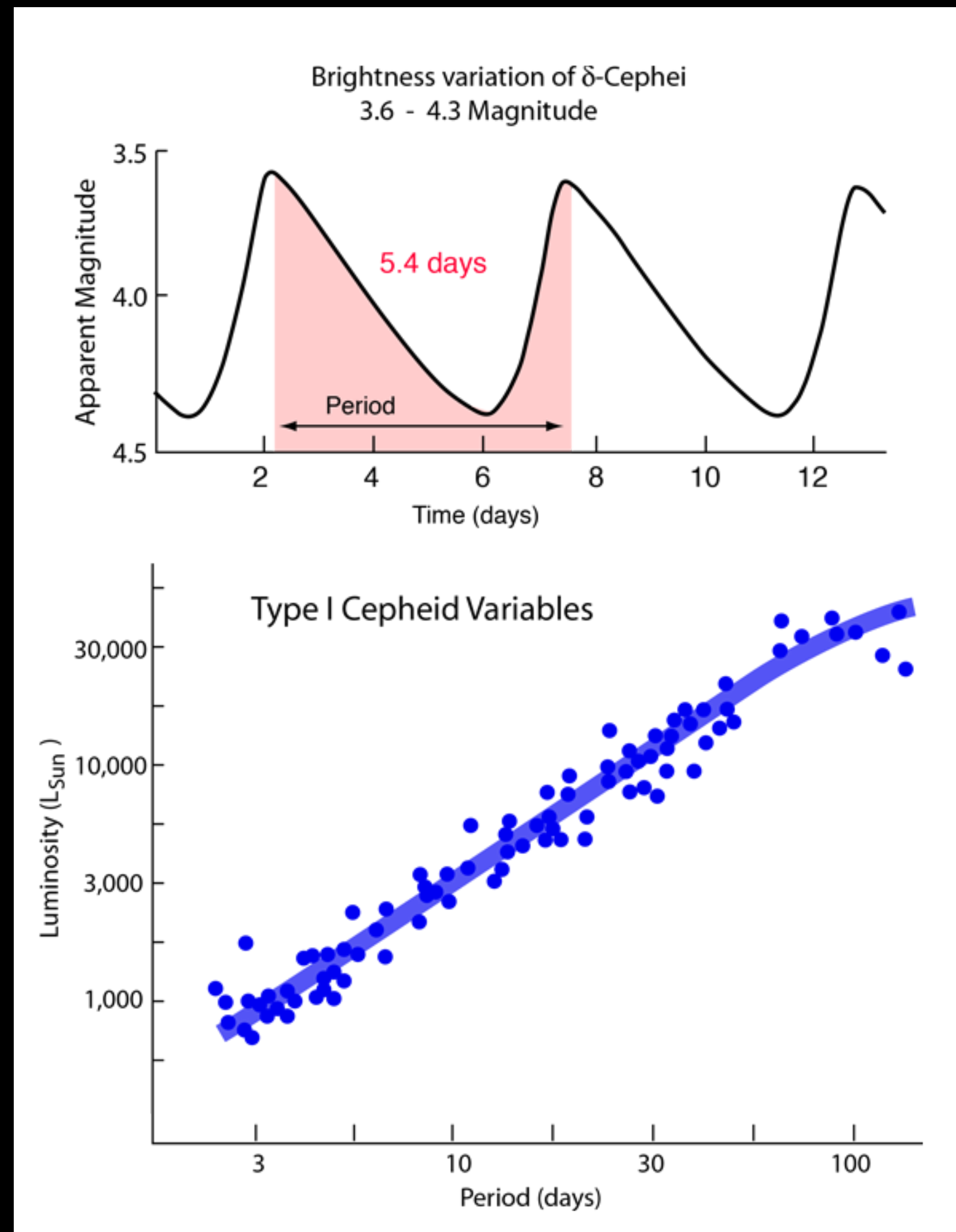
DI COSA PARLEREMO STASERA?



- Instability strip (Cefeidi)
- Onde stazionarie
- Armoniche sferiche

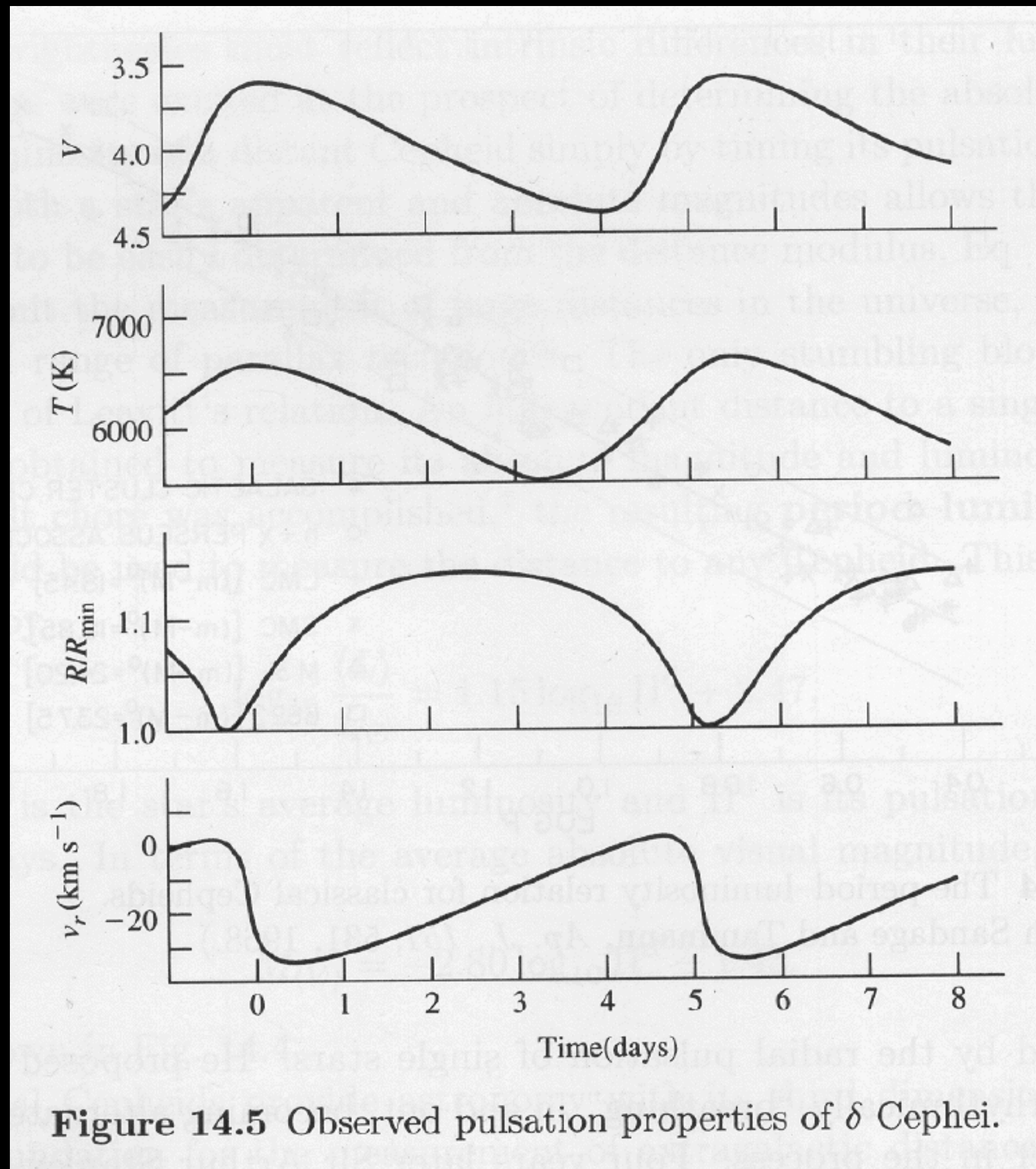
- Oscillazioni solar-like
- Alcune applicazioni
- Missioni future

LE CEFEBIDI: SCOPERTA E OSSERVAZIONI



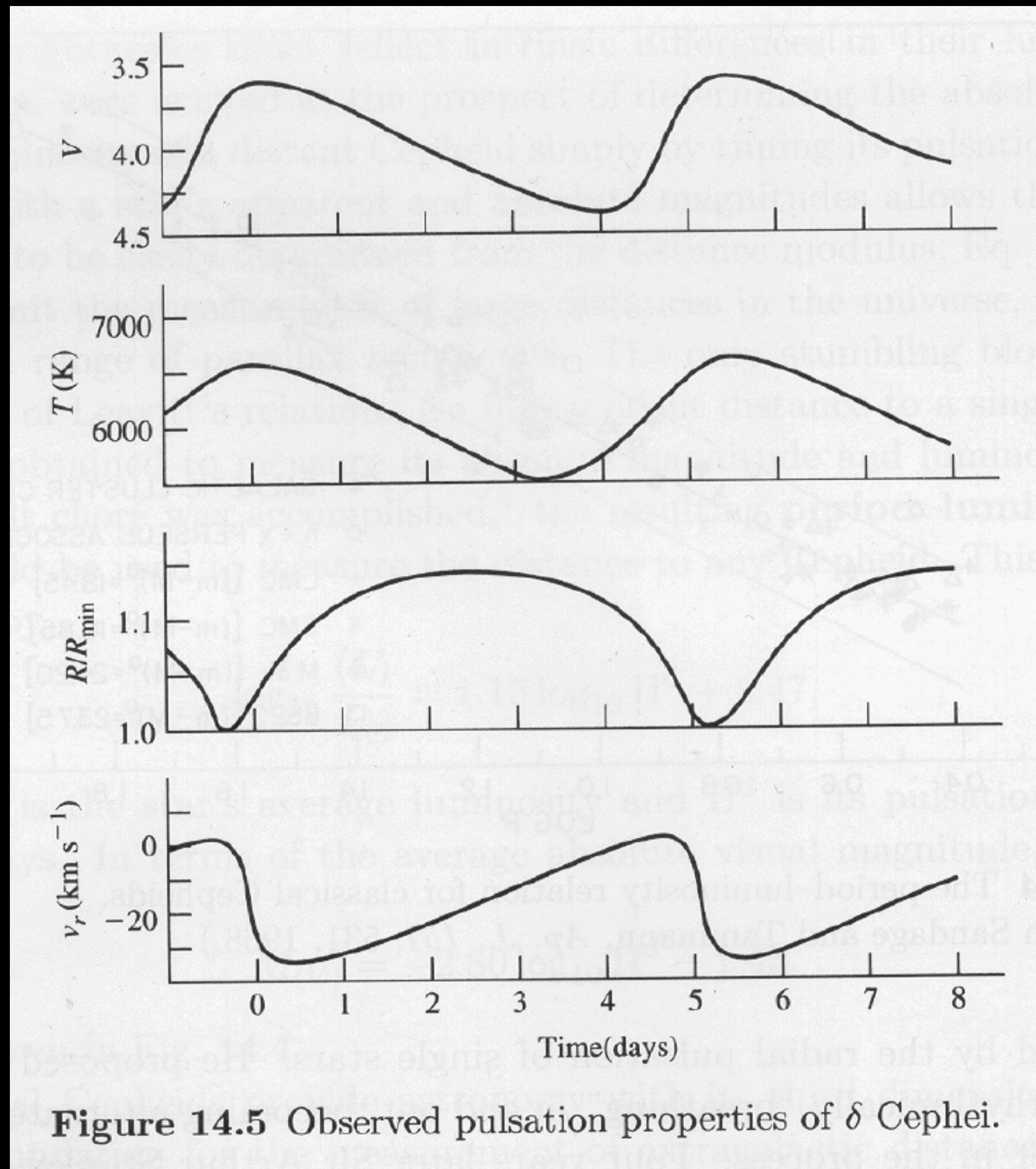
- δ Cephei è prototipo di queste stelle variabili:
 $M = 5 M_{\odot}$, $T \approx 5.4$ giorni, $L_{\text{max}}/L_{\text{min}} \approx 2.3$,
 $\Delta T \approx 1300 K$
- Variabili periodiche con una ben definita relazione tra T e L :
 $L \nearrow \longleftrightarrow T \nearrow$
- Relazione scoperta da Henrietta Leavitt nel 1908 - 1912:
candela standard per le distanze;
- Relazione più precisa se si include Z e/o il colore;
- La realtà non è così semplice:
sottocategorie di Cefeidi (relazioni $T - L$ diverse).

LE CEFEBIDI: SPIEGAZIONE



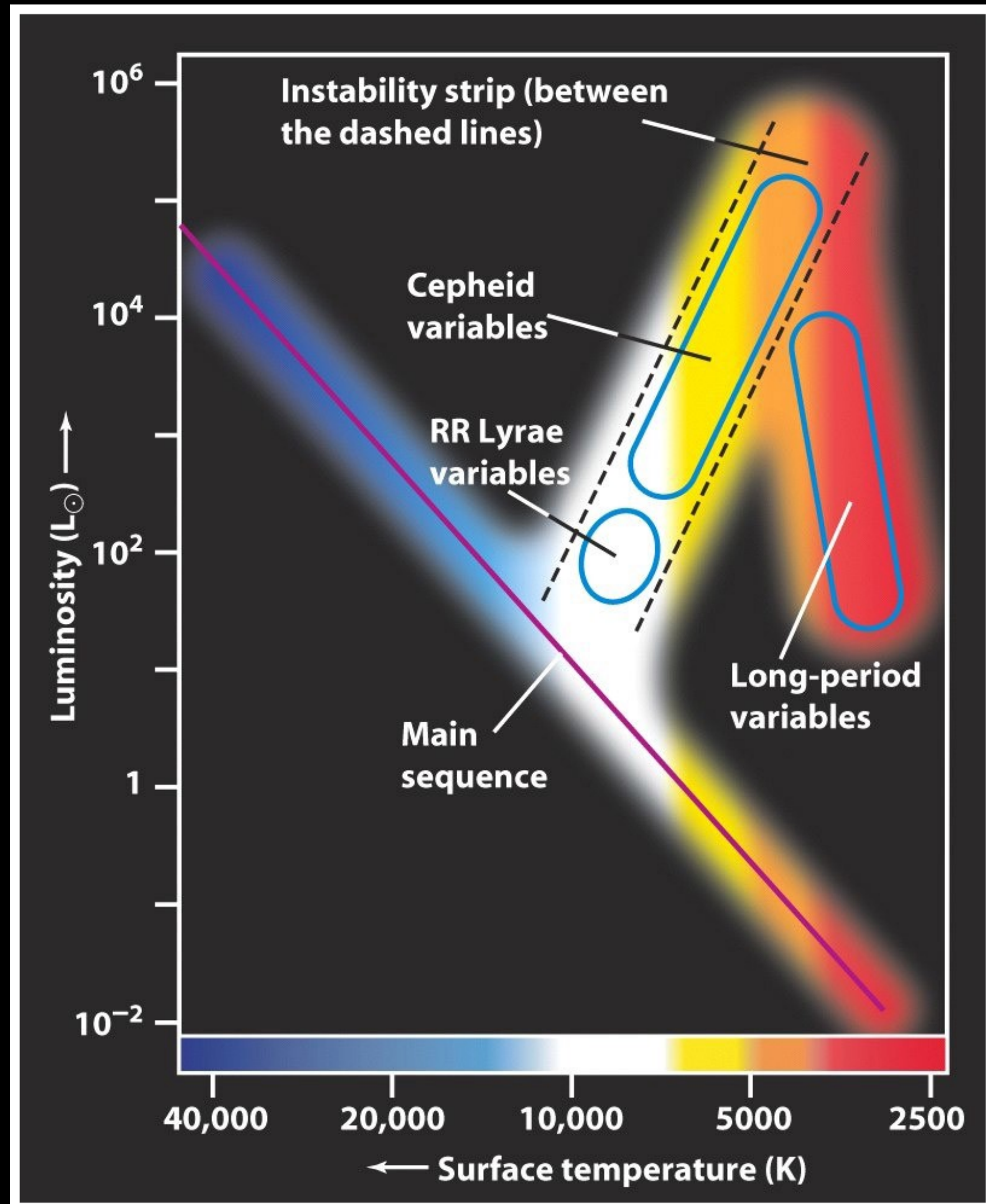
- Trattasi di **stelle post-MS** con masse intermedio-alte: prevalentemente stelle nella fase di Ramo Orizzontale;
- **Stella pulsante radialmente** in maniera periodica ($1 < T/\text{giorni} < 70$):
cambia periodicamente R (poco) e T (molto) $\rightarrow L$ varia;
- Abbiamo **onde sonore interne**: $T \approx t_{\text{suono}} \propto 1/\sqrt{\rho_{\text{media}}}$,
posso misurare la ρ_{media} della stella;
- **La relazione $T - L$ è in realtà una relazione $\rho - L$:**
 $L \nearrow \rightarrow \rho_{\text{media}} \searrow \rightarrow t_{\text{suono}} \nearrow \rightarrow T \nearrow$.

LE CEFEIDI: MOTORE DELLE PULSAZIONI



- Spiegazione proposta da Eddington nel 1917: **calore in energia meccanica** (ciclo di Carnot);
- **Strato assorbe calore quando la sua T $\nearrow$** (strato attivo, contrario di uno strato classico);
- Spiegazione principale affinata nel 1953 da Zhevakin: ci sono strati in cui $\kappa \nearrow \longleftrightarrow T \nearrow$ (**meccanismo κ da He parzialmente ionizzato**);
- **Phase-Lag**: $T_{\max}$ non coincide con $R_{\min}$ (**H parzialmente ionizzato ne è la causa**);

LA STRISCIA DI INSTABILITÀ: VARIABILI PULSANTI

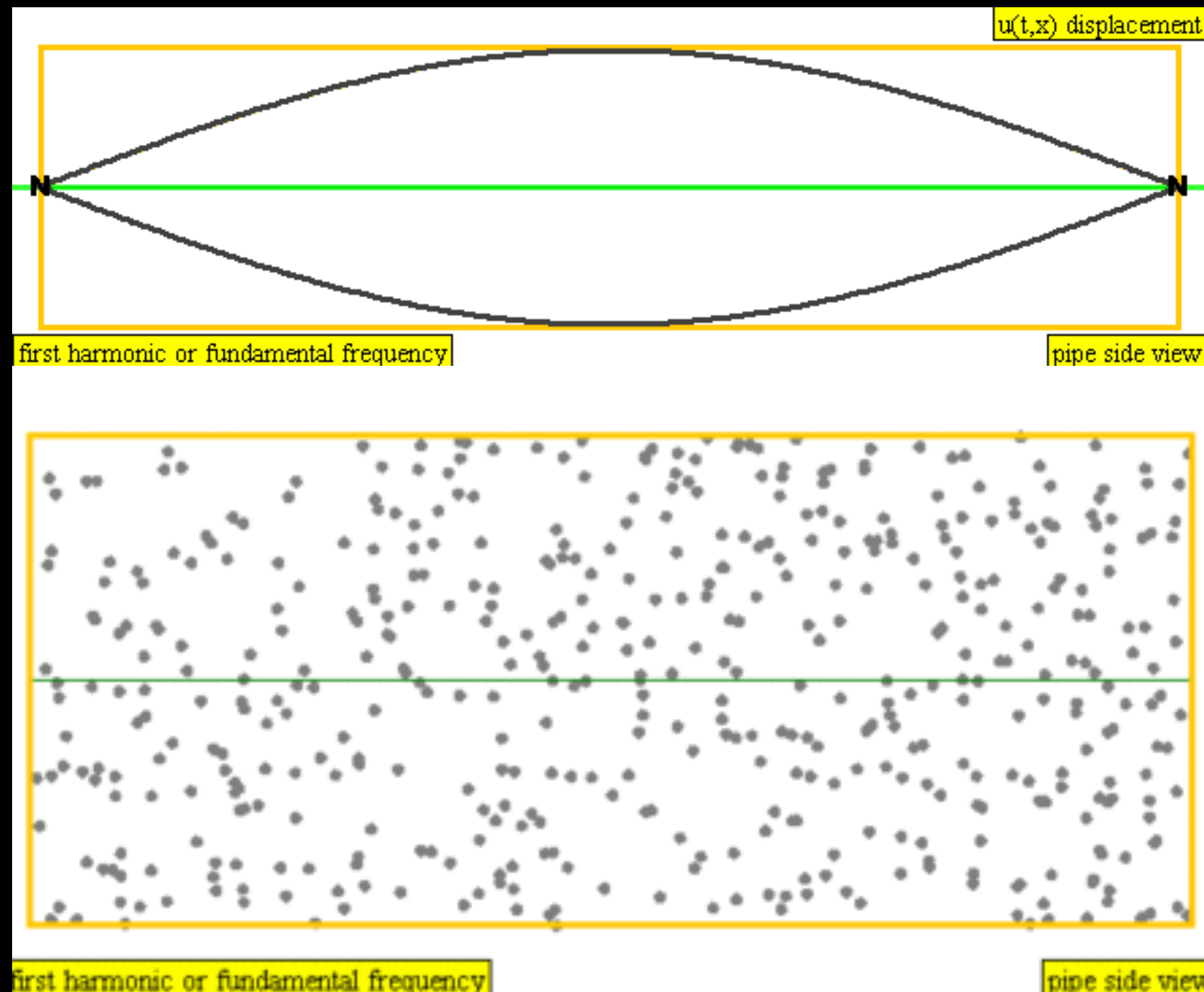


- Regione di elevata variabilità: **pulsazioni di varia natura (non solo radiali);**
- Motore principale: **Meccanismo κ (e γ);**
- Limite inferiore e superiore: **profondità degli strati di ionizzazione parziale e della convezione;**
- Esistono variabili pulsanti fuori da questa zona che hanno differenti zone di ionizzazione parziale: He-H, Fe-Ni nelle stelle di MS calde e C-O nelle nane bianche.

LE ONDE MECCANICHE

- Abbiamo **piccole perturbazioni locali** (per esempio in P e ρ) da parte di una forza: il mezzo reagisce e tende a **tornare alla condizione iniziale di equilibrio**;
- Onde meccaniche: **propagazione nel mezzo di queste perturbazioni** (trasporto di energia e impulso);
- Nascono e si **propagano in un mezzo** (corda, aria, membrana, stelle, ecc.);
- Se le onde mantengono **fisse nello spazio la posizione dei loro picchi**: si parla di **onde stazionarie**;
- Vediamo come è fatta un'onda stazionaria in un mezzo omogeneo e uniforme 1D.

ONDE STAZIONARIE IN UNA CORDA

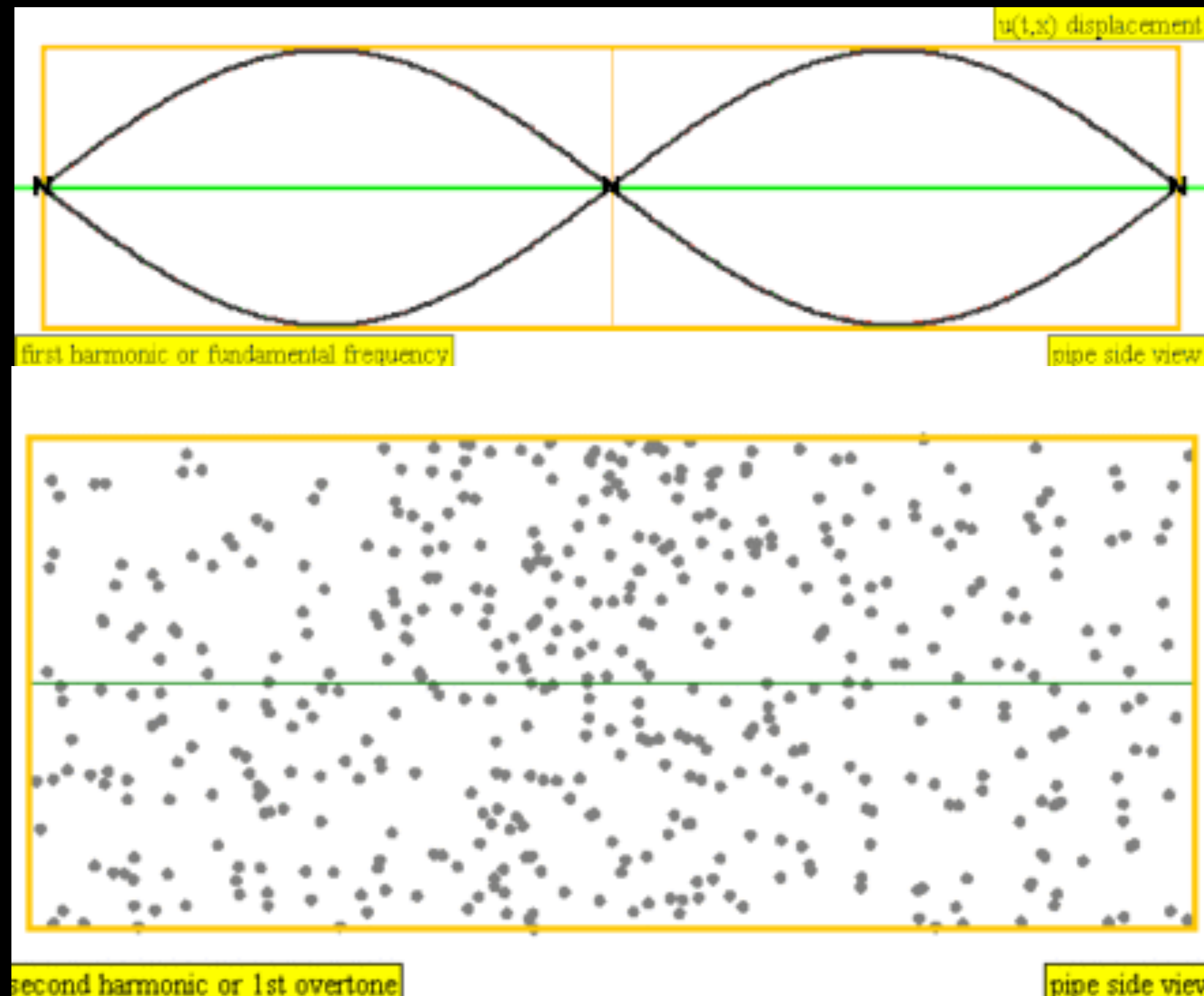


- Due estremi fissi e corda omogenea;
- **Nodi**: regioni con ampiezza di oscillazione nulla;
- **Antinodi**: regioni con la massima o minima ampiezza;
- Per un gas perfetto: $v_{\text{suono}} \propto \sqrt{T/\mu}$;
- **Frequenza fondamentale**:
l'onda stazionaria a più bassa frequenza
($\nu_0 = v_{\text{suono}}/2L_{\text{corda}}$).

Credit:

<https://weelookang.blogspot.com/2013/10/longitudinal-sound-wave-in-pipe-model.html>

ONDE STAZIONARIE IN UNA CORDA

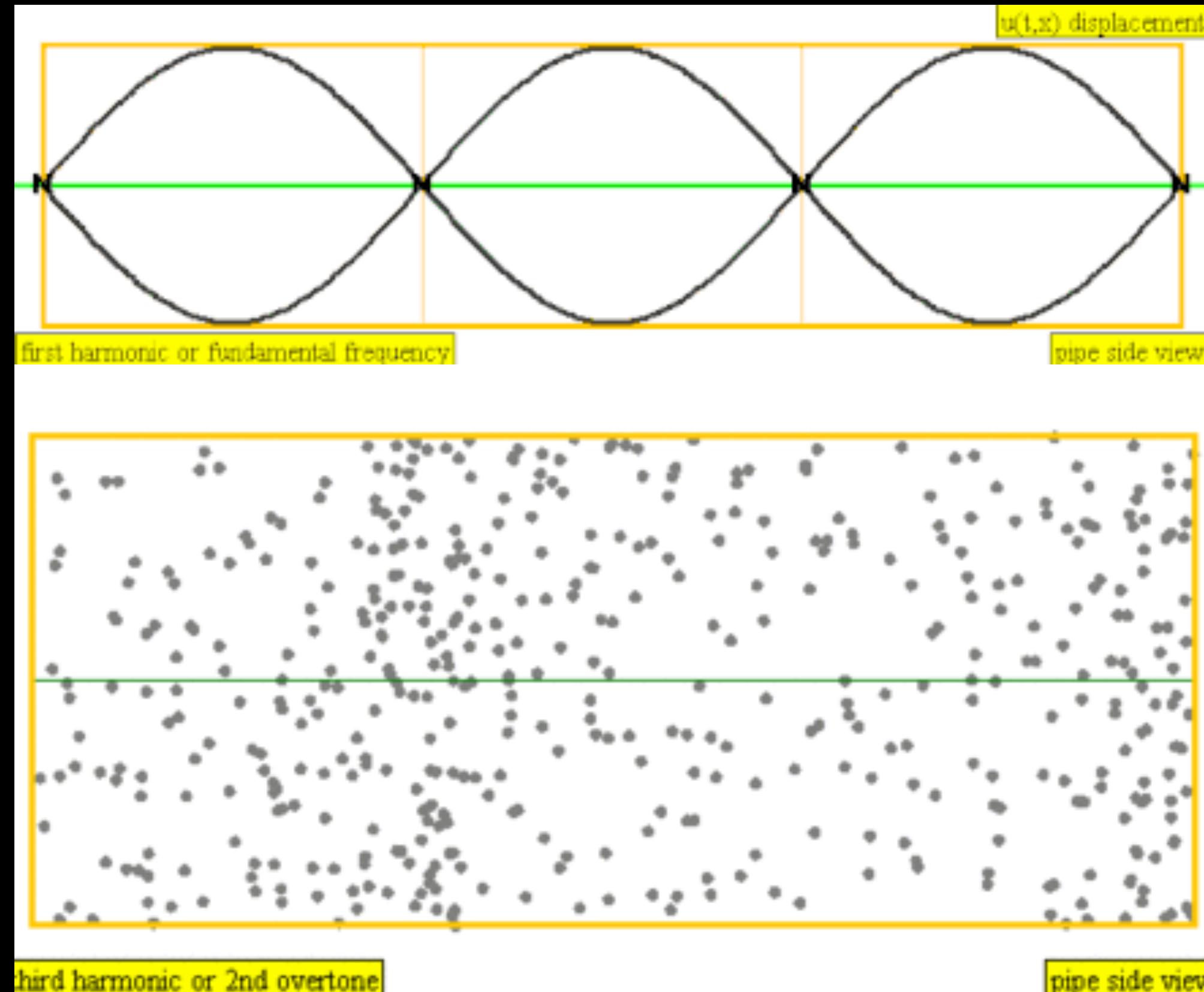


- **Ipertoni:** frequenze risonanti maggiori della frequenza fondamentale dello strumento;
- Ipertoni come **multipli interi: armoniche;**
- Gli ipertoni possono non essere essere armonici;
- **Il numero di nodi** presenti è **legato al** tipo di **ipertono;**
- **Primo ipertono:** nodo centrale con $\lambda_1 = L_{\text{corda}}$ (ovvero $\nu_1 = v_{\text{suono}}/L_{\text{corda}} = 2\nu_0$), **perciò armonico.**

Credit:

<https://weelookang.blogspot.com/2013/10/longitudinal-sound-wave-in-pipe-model.html>

ONDE STAZIONARIE IN UNA CORDA

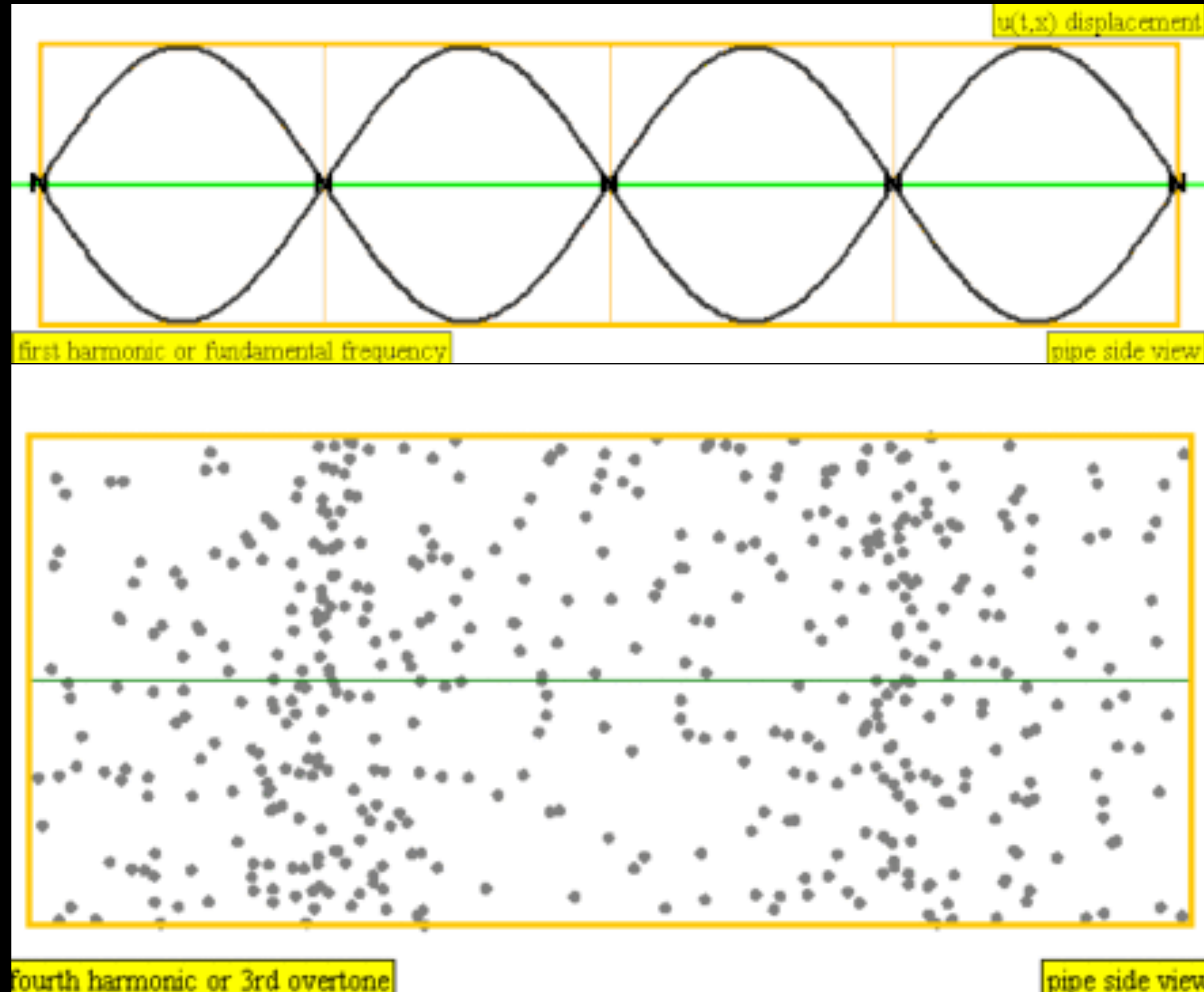


- **Secondo ipertono:**
2 nodi centrali con $\nu_2 = 3v_{\text{suono}}/2L_{\text{corda}} = 3\nu_0$;
- Anche questa è una frequenza armonica (terza armonica).

Credit:

<https://weelookang.blogspot.com/2013/10/longitudinal-sound-wave-in-pipe-model.html>

ONDE STAZIONARIE IN UNA CORDA



- **Terzo ipertono:** 3 nodi centrali con $\nu_3 = 4v_{\text{suono}}/2L_{\text{corda}} = 4\nu_0$;
- **Corda:** ipertoni sempre armonici;
- Attraverso il numero di **nodi centrali** n si riescono a **descrivere tutte le frequenze risonanti della corda**;
- Il numero n basta anche per la canna d'organo (un estremo è nodo, l'altro è antinodo).

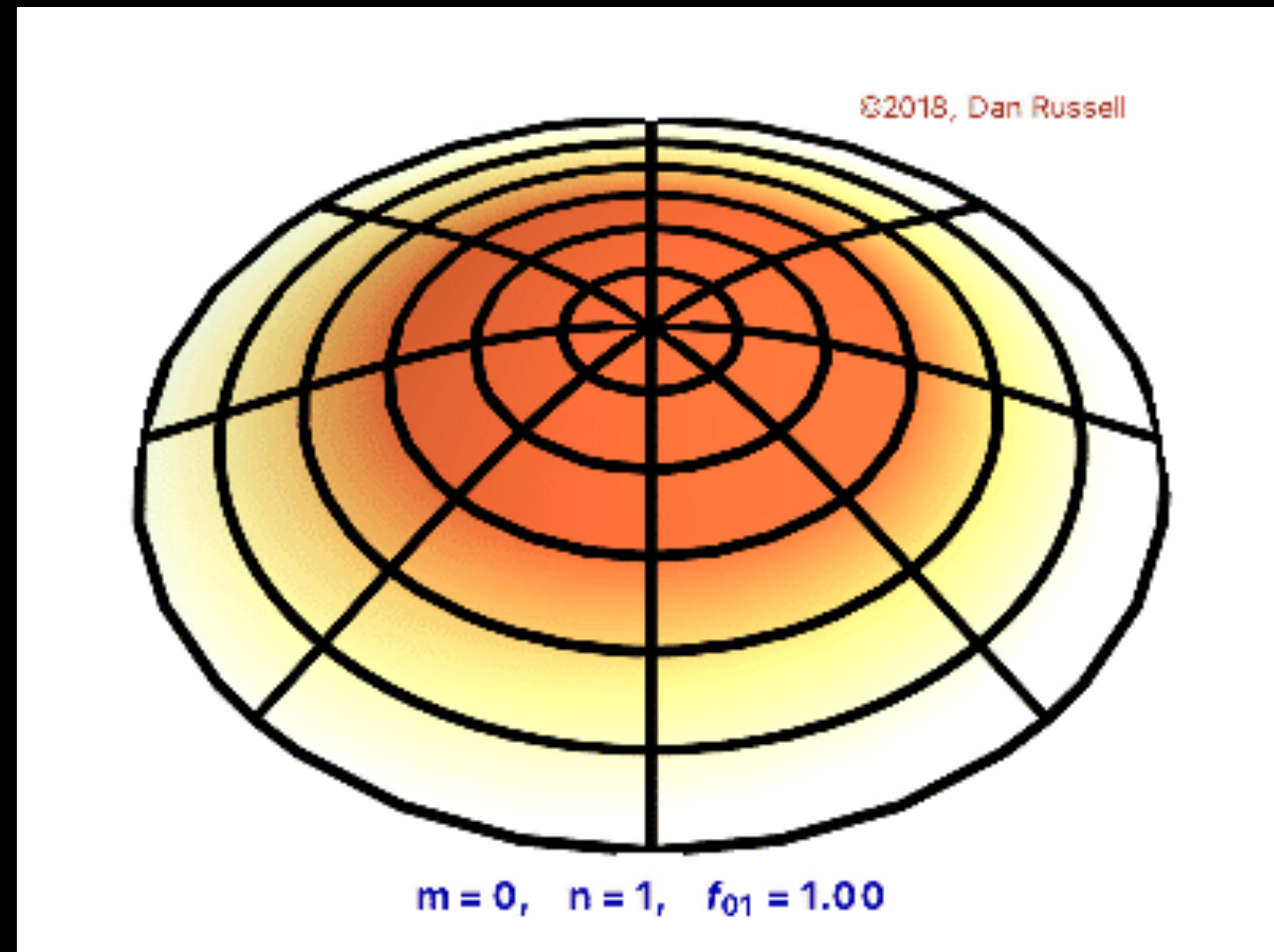
Credit:

<https://weelookang.blogspot.com/2013/10/longitudinal-sound-wave-in-pipe-model.html>

MODI RISONANTI

- **Modo di oscillazione:** maniera con cui tutte le parti dello strumento vibrano alla stessa frequenza risonante;
- Non vale il viceversa: **a fissata frequenza possiamo avere più modi diversi;**
- L'onda a fissata frequenza è caratterizzata dalla somma dei singoli modi;
- Quali modi ci siano dipende dalla forma dello strumento: **un violino non è una chitarra;**
- Nel caso 1D per definire i modi bastava il numero di nodi centrali n ;
- Quanto visto **si può generalizzare a più dimensioni:**
aumenteranno le **frequenze risonanti** e **potranno non essere armoniche;**

CASO 2D: TAMBURO

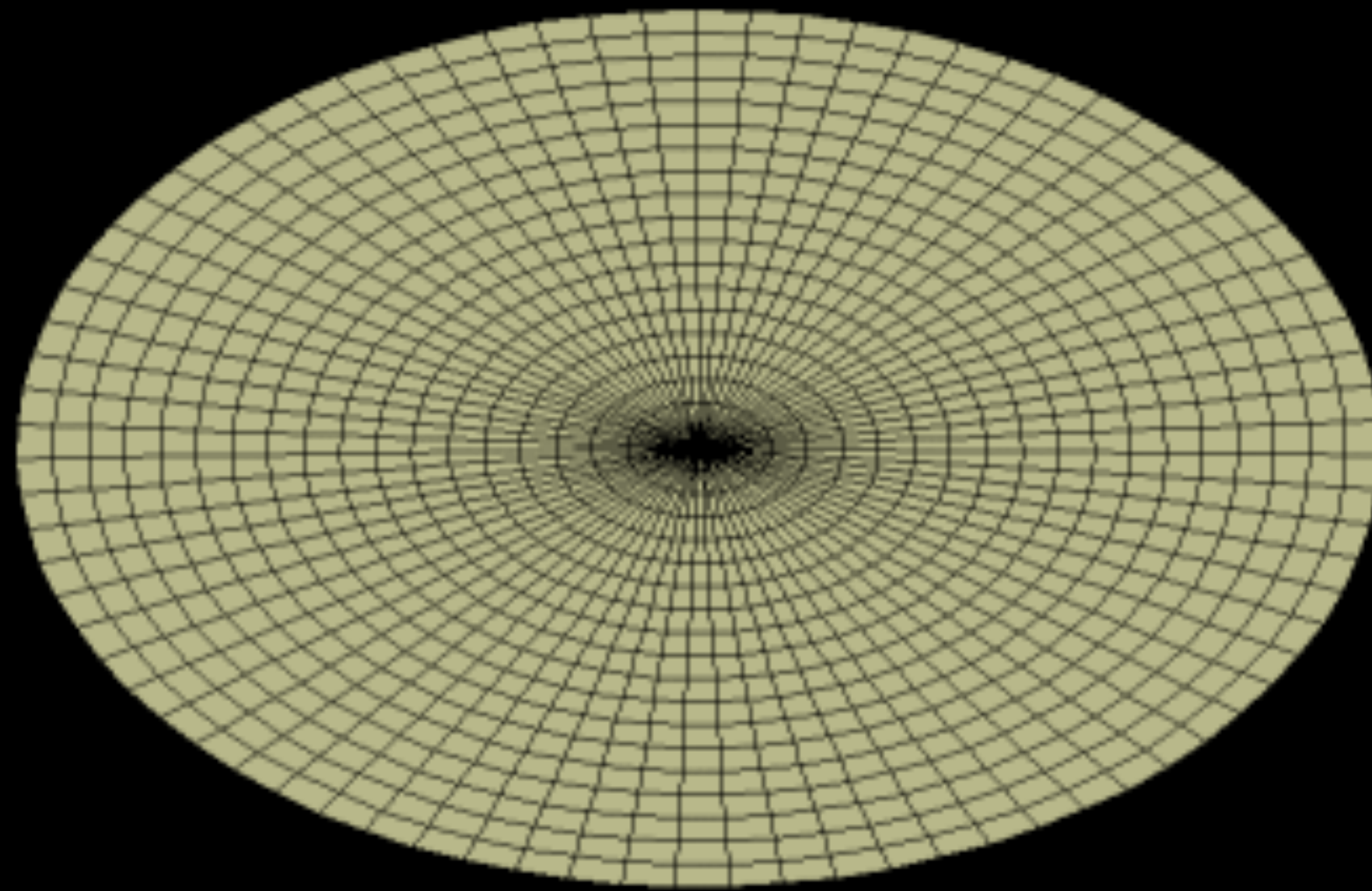


Credit:

<https://www.acs.psu.edu/drussell/demos/membranecircle/circle.html>

- Tamburo:
membrana circolare con bordo fisso;
- Servono **2 numeri interi** per descrivere quale modo stiamo guardando (**numeri quantici**);
- Questo è il **modo fondamentale**:
nessun nodo interno;
- In questo caso stiamo guardando un **modo di ordine (0,0)**.

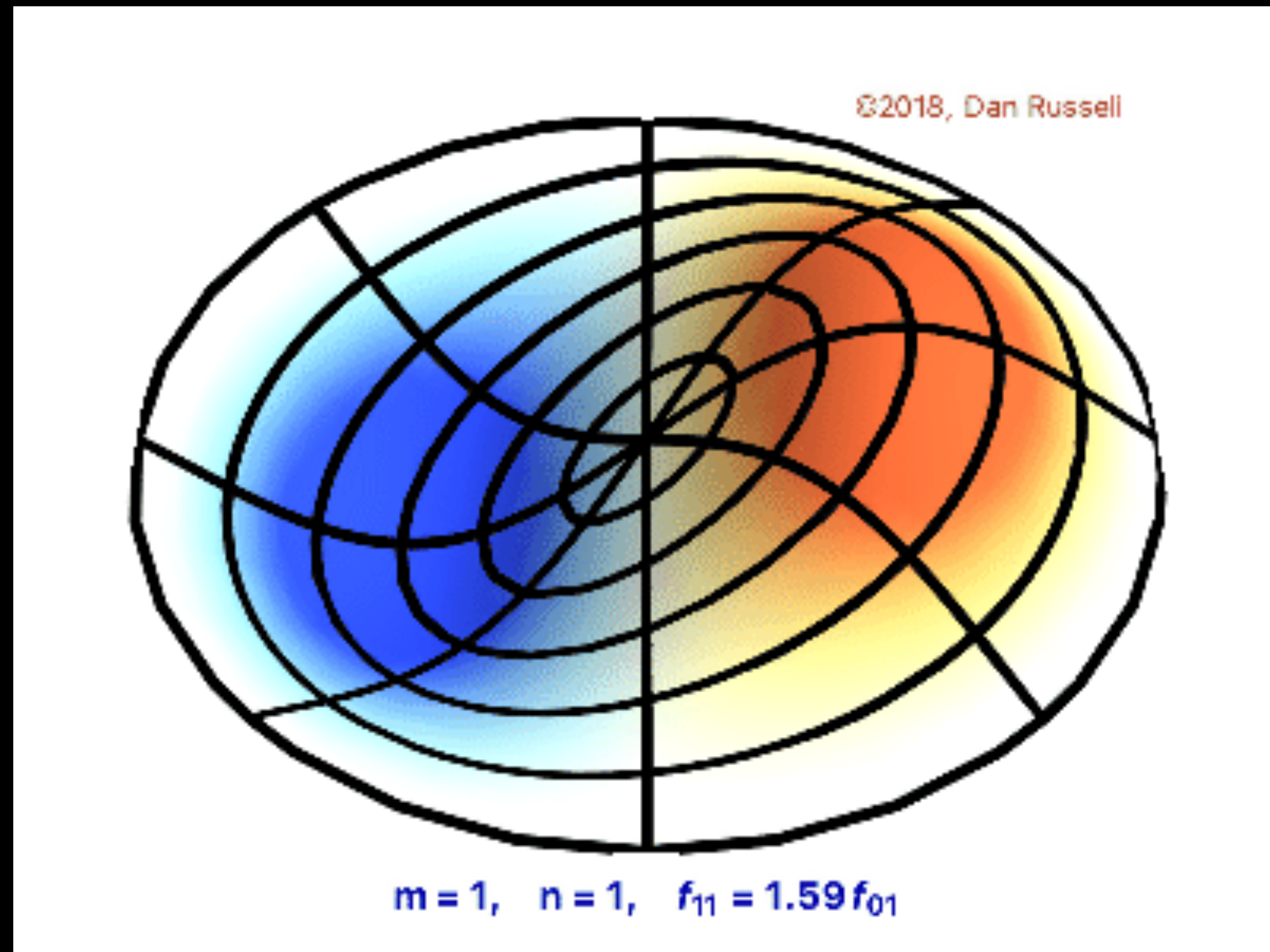
TAMBURO E IPERTONI



Credit: <https://www.asterostep.eu/Outreach.html>

- Se abbiamo **nodi circolari**:
si parla di **ipertoni radiali**;
- Ipertono radiale di ordine 4:
i nodi sono 4 circonferenze interne;
- In termini tecnici stiamo guardando
un **modo di ordine (4,0)**;
- Si tratta di rapporti non interi:
non è un'armonica.

TAMBURO E IPERTONI

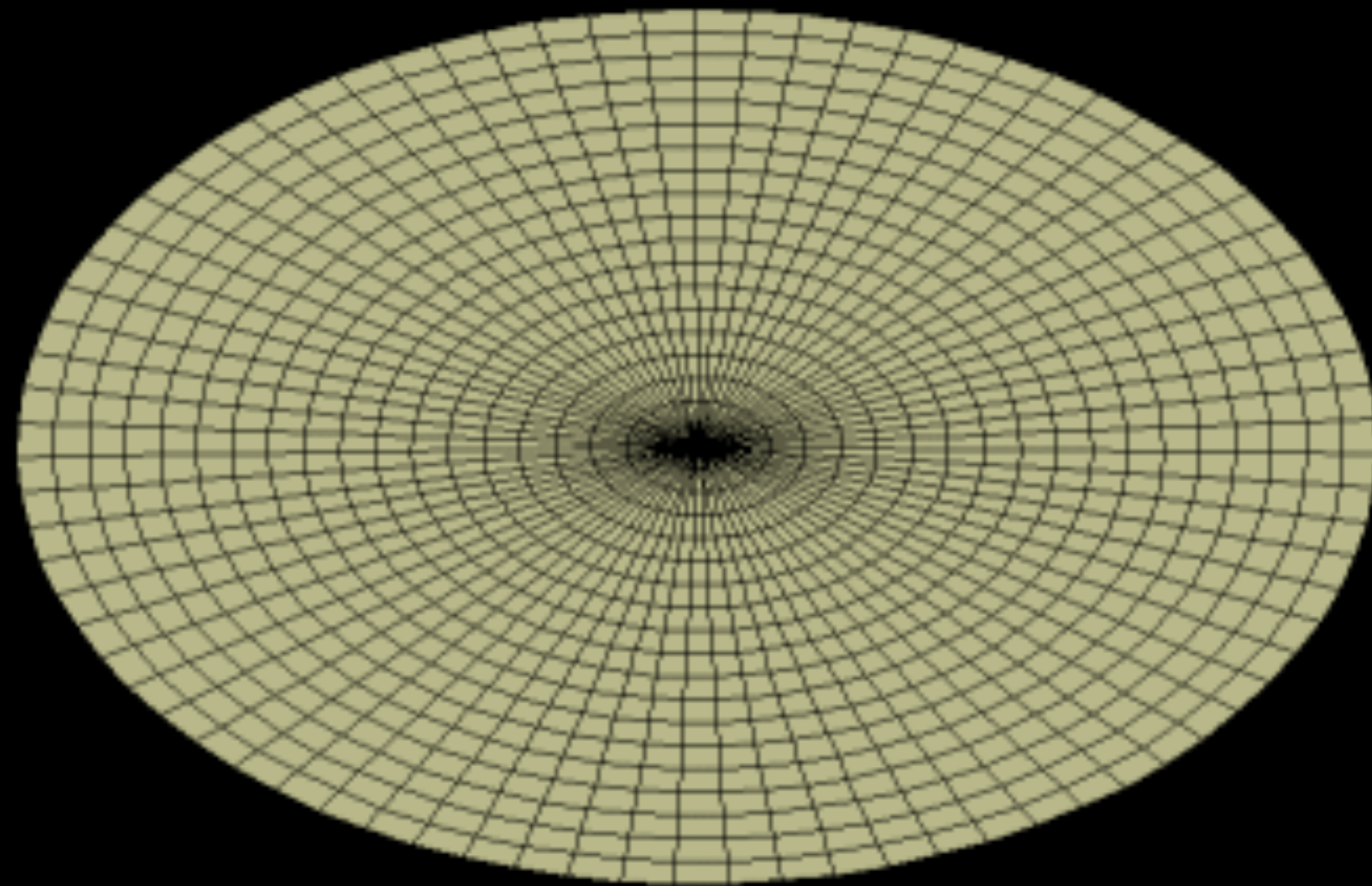


Credit:

<https://www.acs.psu.edu/drussell/demos/membranecircle/circle.html>

- Se abbiamo dei **diametri come nodi**: si parla di **ipertoni non radiali**;
- Ipercono non radiale più semplice: il **modo di dipolo**;
- Il nodo è un diametro del cerchio: è il **modo (0,1)**;
- Si tratta di rapporti non interi: **non è un'armonica**.

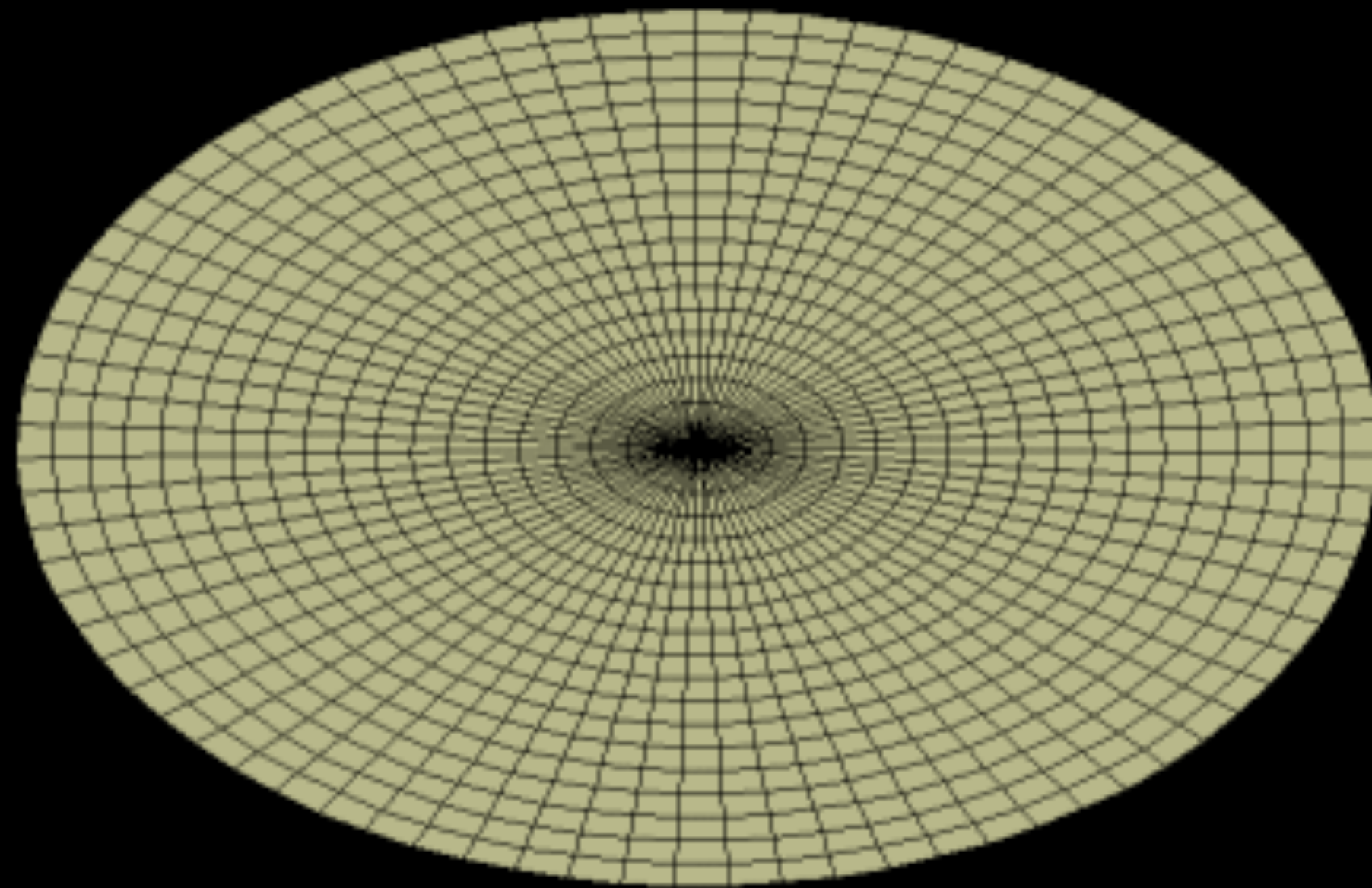
TAMBURO E IPERTONI



- Ipertono non radiale di ordine 2:
il **modo di quadruplo**;
- I nodi sono 2 diametri del cerchio:
è il **modo (0,2)**;
- Si tratta di rapporti non interi:
non è un'armonica.

Credit: <https://www.asterostep.eu/Outreach.html>

TAMBURO E IPERTONI



- Possiamo avere **combinazioni di ipertoni radiali e non radiali**;
- 3 nodi radiali e 2 non radiali: secondo ipertono di quadrupolo;
- Si tratta del **modo (3,2)**;
- **Ipertono non armonico.**

Credit: <https://www.asterostep.eu/Outreach.html>

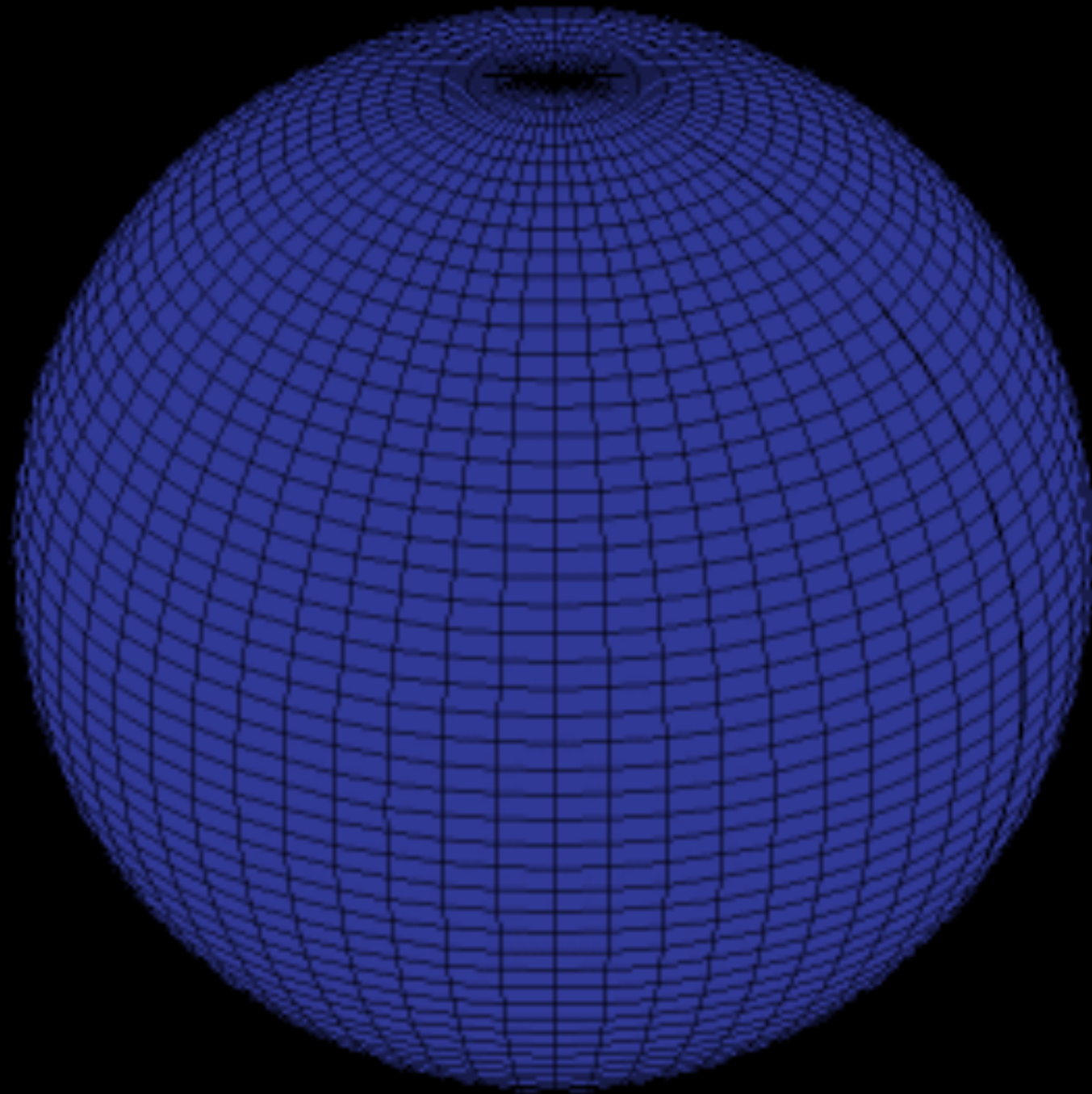
MODI RISONANTI NELLE STELLE

- Assumiamo una **struttura tridimensionale sferica non rotante**: servono **3 numeri quantici**;
- Conseguenza delle 3 direzioni ortogonali: raggio, latitudine e longitudine;
- Abbiamo **3 tipi di nodi**: gusci concentrici, coni a fissata latitudine (paralleli) e piani a fissata longitudine (meridiani);
- Le oscillazioni naturali delle stelle sono dette **autofrequenze**: **non** sono **armoniche**;
- Le **distorsioni** periodiche nelle tre direzioni **si chiamano autofunzioni**: esse dipendono dalle **armoniche sferiche**.

AUTOFUNZIONI E ARMONICHE SFERICHE

- I tre numeri interi necessari per descrivere le autofrequenze: (n, ℓ, m) ;
- n indica il **numero di nodi radiali** e viene chiamato **ipertono del modo**;
- ℓ è il grado del modo e specifica il **numero di nodi superficiali**;
- m è l'ordine azimutale del modo e specifica **quanti** dei nodi superficiali **sono linee di longitudine** (meridiani);
- Per ogni grado ℓ ci sono $2\ell + 1$ ordini azimutali nella stella non rotante: fissato n e ℓ , i $2\ell + 1$ **modi hanno tutti la stessa frequenza risonante**.

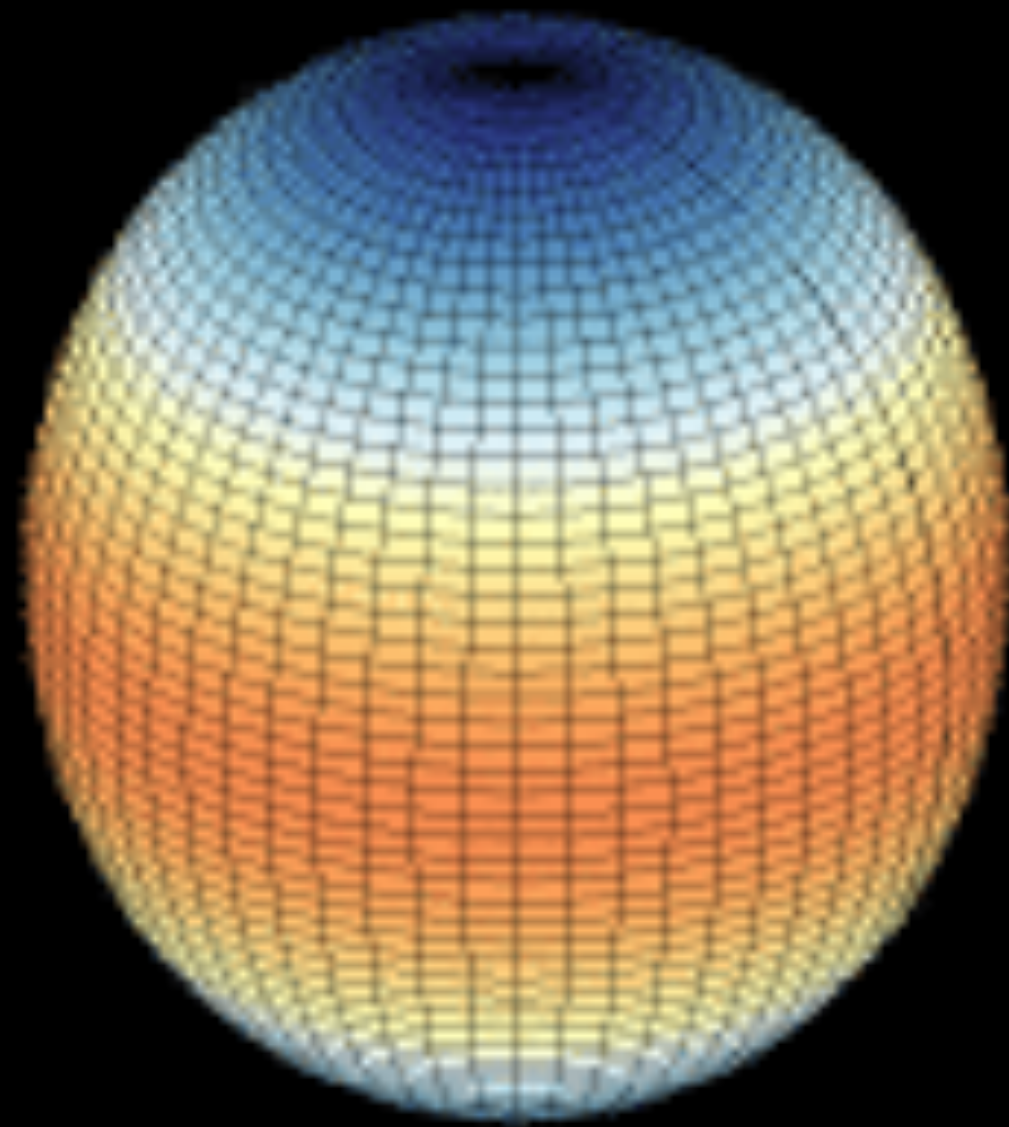
LE ARMONICHE SFERICHE: MODI RADIALI



Credit: <https://www.asterostep.eu/Outreach.html>

- Oscillazioni solo radiali ($\ell = 0$) **preservano la simmetria sferica**;
- **Dipendono solo da n** : gusci concentrici fissi;
- **Analogo 3D della canna d'organo**:
centro fisso e superficie come antinodo;
- Stella con T e μ uniformi:
rapporti armonici "identici" alla canna d'organo.
- **Modo radiale fondamentale** (Cefeide classica):
solo il centro della sfera è fisso.

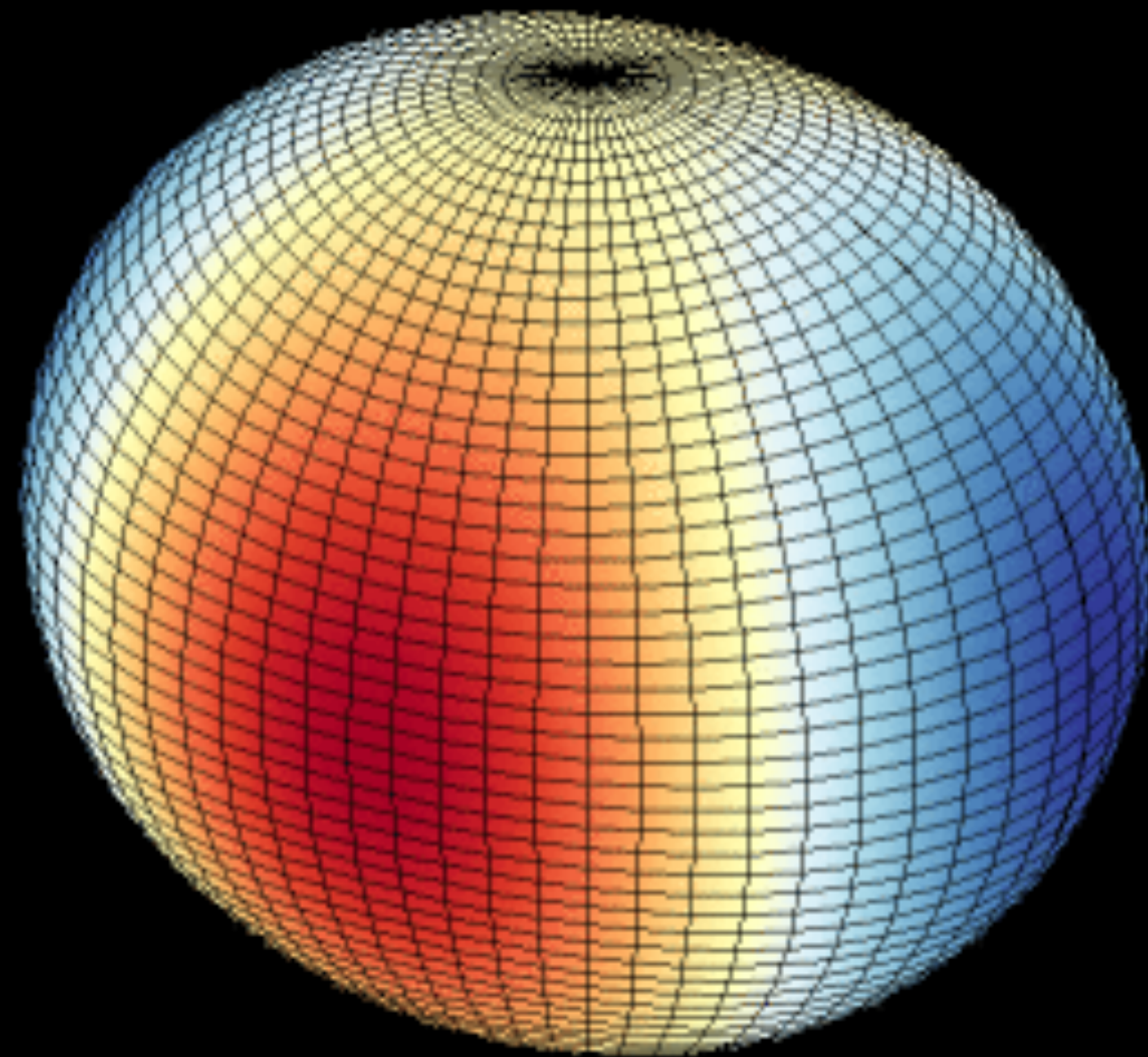
LE ARMONICHE SFERICHE: MODI NON RADIALI



Credit: <https://www.asterostep.eu/Outreach.html>

- Oscillazioni non radiali ($\ell \neq 0$) **non mantengono la simmetria sferica**;
- Dipendono da tutti e 3 i numeri quantici;
- I modi con $m = 0$: **assisimmetrici**;
- **Modo di quadrupolo** ($\ell = 2$) con $m = 0$: abbiamo 2 paralleli come nodi.

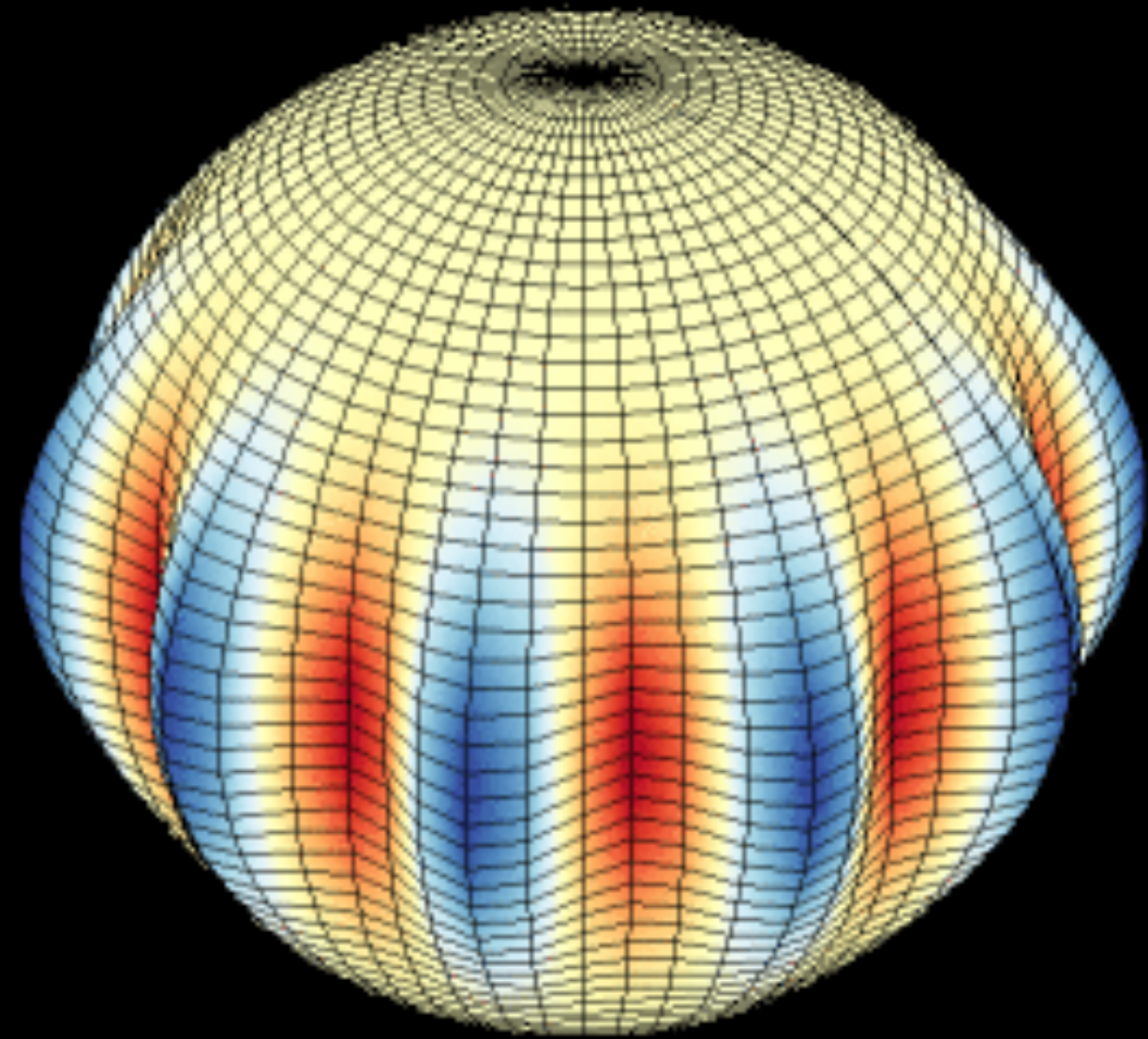
LE ARMONICHE SFERICHE: MODI NON RADIALI



Credit: <https://www.asterostep.eu/Outreach.html>

- I modi con $m = l$: **settoriali**;
- Sono "**running waves**":
la perturbazione si sposta lungo la superficie;
- Se c'è rotazione della stella:
splitting delle frequenze;
- Modo settoriale di quadrupolo
($\ell = 2, m = 2$):
ha 2 meridiani come nodi.

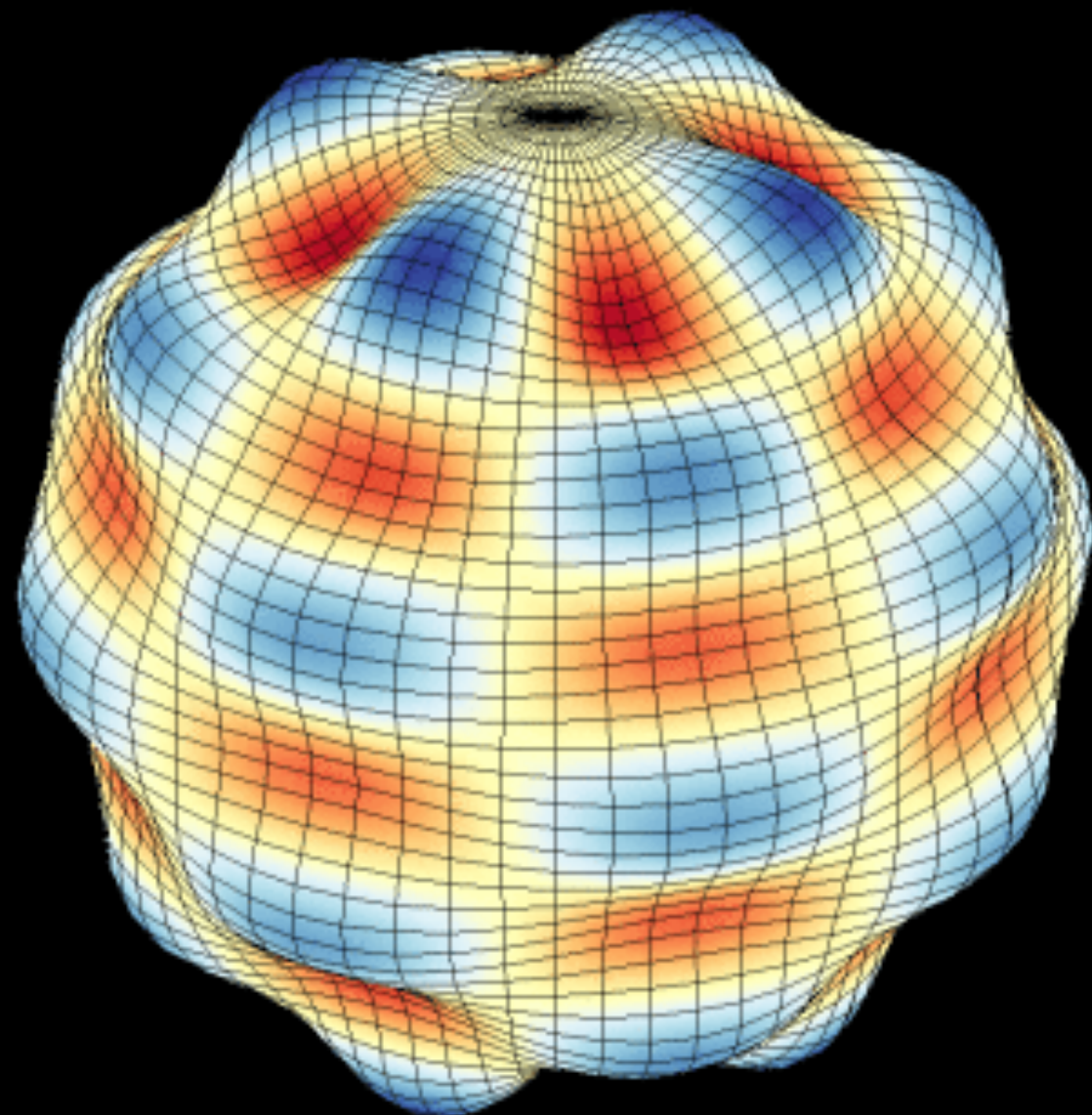
LE ARMONICHE SFERICHE: MODI NON RADIALI



- Modo settoriale di grado 10 ($\ell = 10, m = 10$):
ha 10 meridiani come nodi;
- Si vede ancora meglio che la stella non sta ruotando
- Le **regioni distorte sono piccole**;

Credit: <https://www.asterostep.eu/Outreach.html>

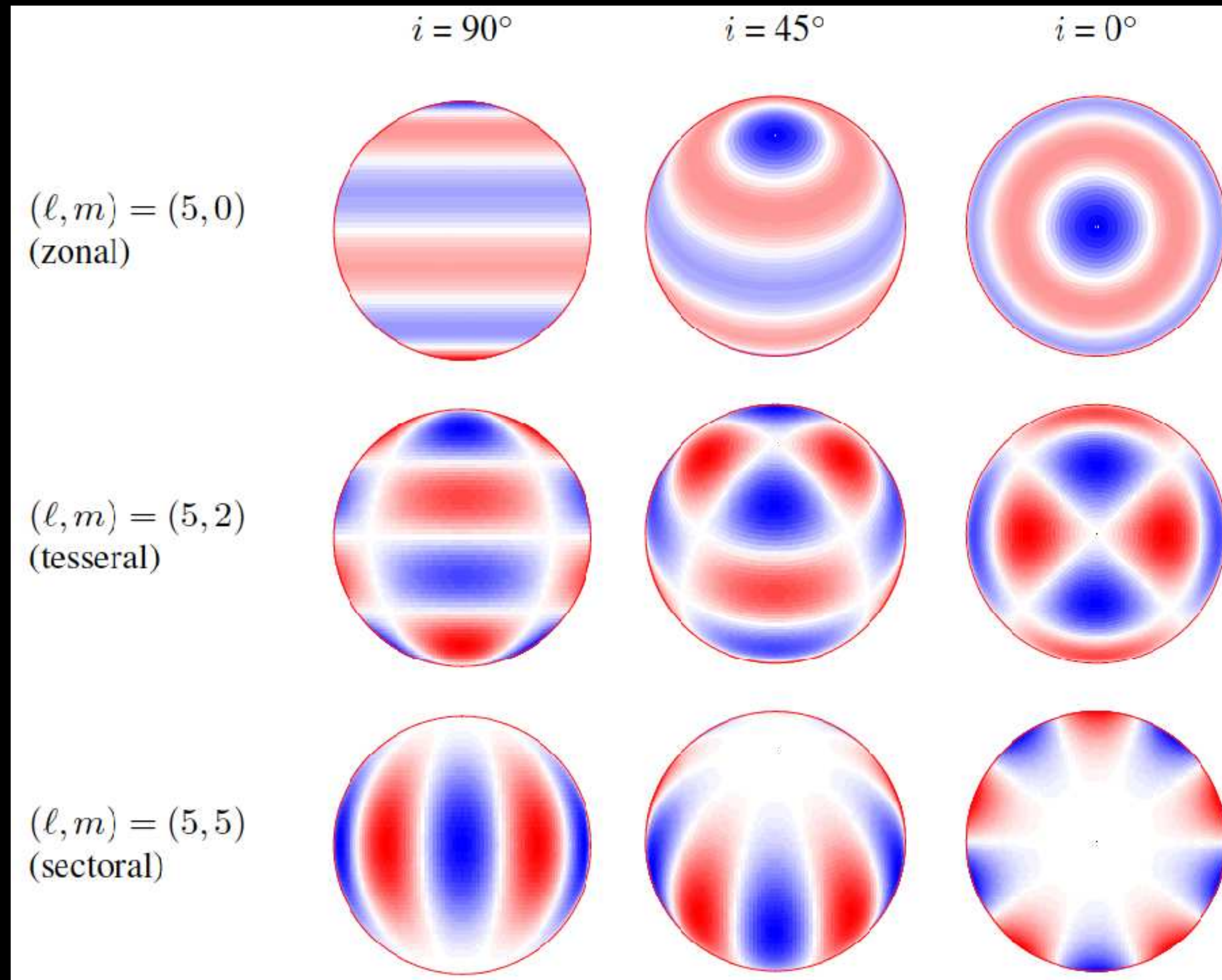
LE ARMONICHE SFERICHE: MODI NON RADIALI



- I modi con gli altri m si dicono **tesserali**;
- Modo tesserale di grado 10 ($\ell = 10, m = 4$):
ha 4 meridiani e 6 paralleli come nodi;
- Le **regioni distorte sono piccole**;

Credit: <https://www.asterostep.eu/Outreach.html>

ARMONICHE SFERICHE E INCLINAZIONE



- Inclinazioni di un modo di grado 5 con 3 diversi valori di m ;
- Gli antinodi sono a coppie: **contributo integrato nullo**;
- Per questo nelle stelle **si riesce ad osservare solo fino a $\ell = 3$** .

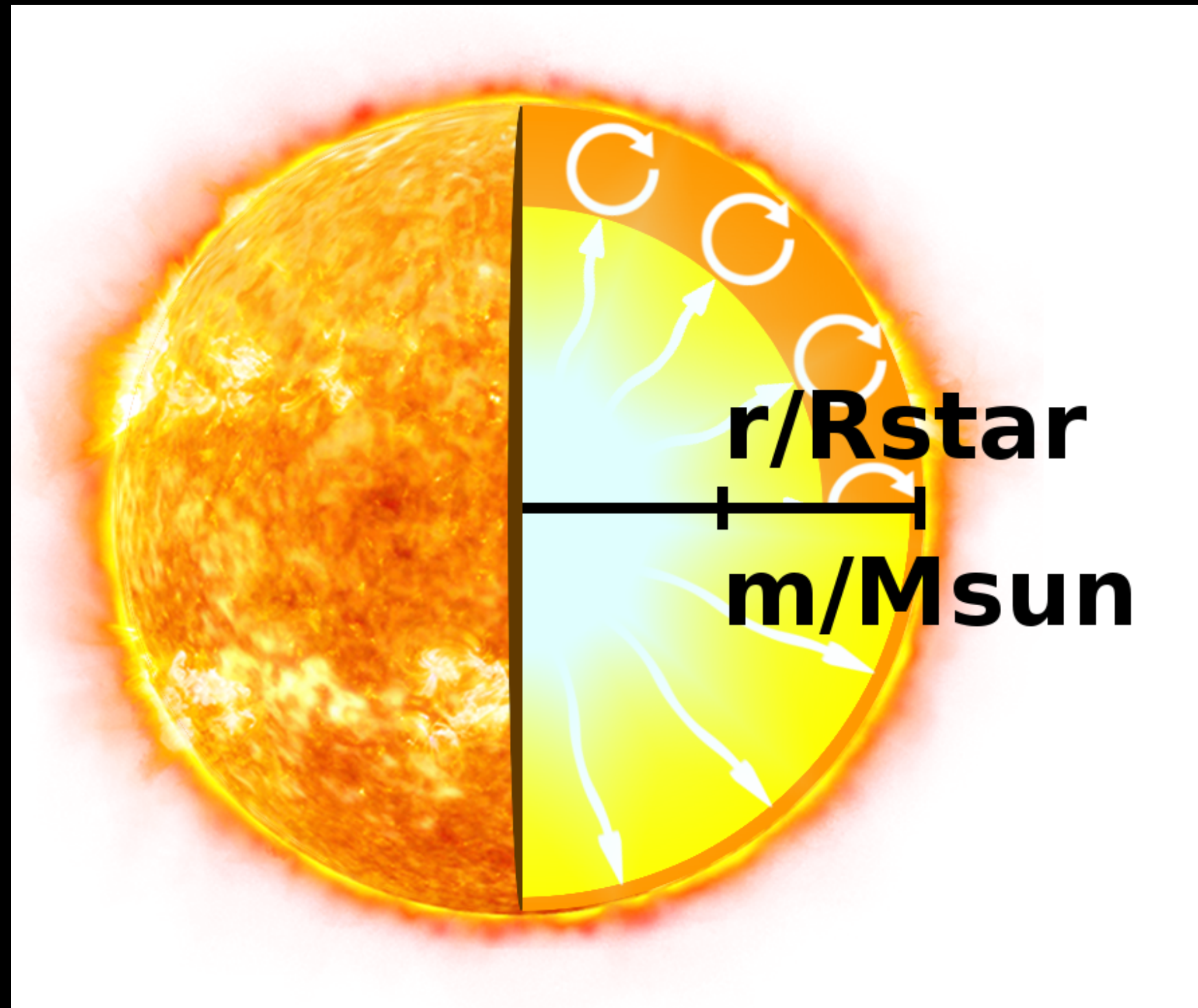
Credit:

<https://www.semanticscholar.org/paper/Asteroseismology-and-mass-loss-in-Be-stars.-Study-Nebot-David/a8293454023536e6b77f88a00ac050da73c5681d>

I MODI RISONANTI NELLE OSSERVAZIONI

- Queste oscillazioni stellari **si possono vedere** principalmente in due modi: **curve di luce** ed **effetto Doppler**;
- Curva di luce\fotometria: variazioni nella luce media della stella;
- Effetto Doppler\spettroscopia:
velocità radiale dall'espansione della stella (pensate alle Cefeidi);
- Almeno mesi di osservazioni per vedere i singoli modi (**ampiezze piccole**):
missioni spaziali come Kepler/K2, TESS e COROT sono fondamentali.

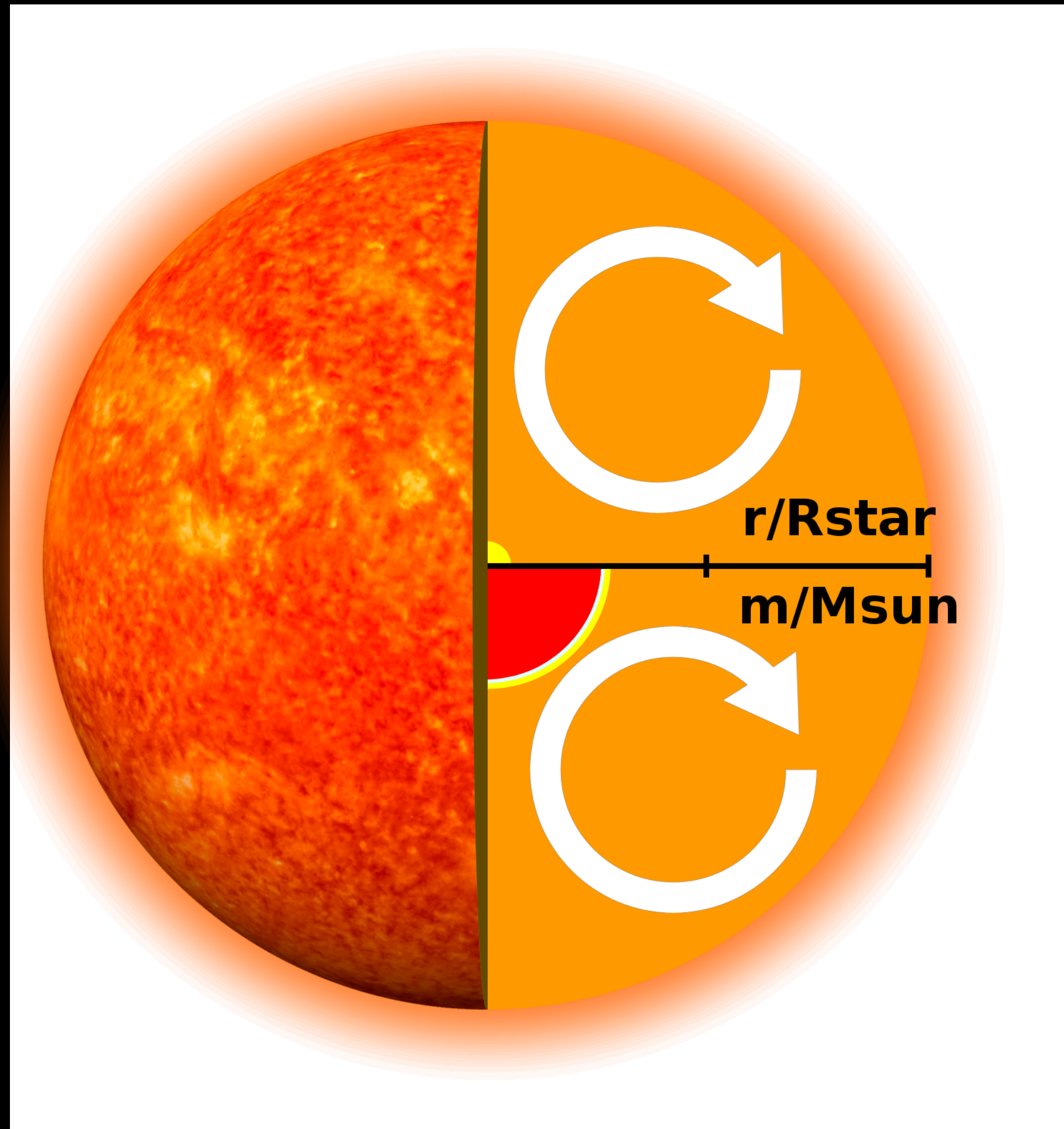
OSCILLAZIONI NEL SOLE



Credit: <https://www.asterostep.eu/Outreach.html>

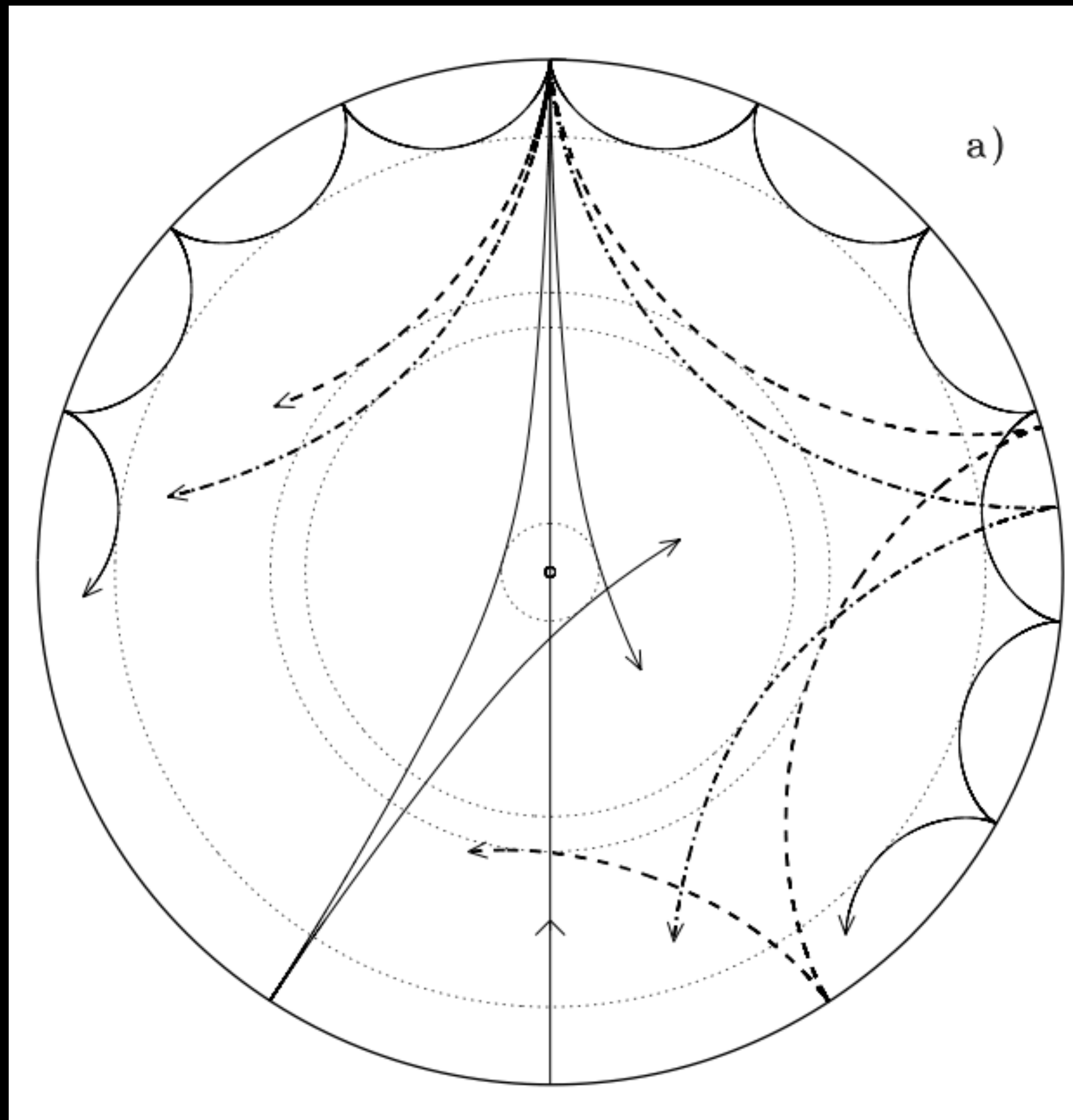
- **Oscillazioni di tipo solare:**
generate nella zona convettiva superficiale
(moto turbolento);
- Sono onde generate casualmente e smorzate;
- Hanno **oscillazioni molto piccole:**
Sole, 4 ppm in L o 5 cm/s nella velocità radiale;
- Nel Sole i modi con la massima ampiezza
hanno $T \approx 5 \text{ min}$ ($\nu_{\text{max}} \approx 3 \text{ mHz}$).

OSCILLAZIONI DI TIPO SOLARE



- Motore presente in stelle con strutture esterne convettive;
- ν_{max} diminuisce all'aumentare dell'età (cambia R e la struttura della stella);
- Permette di studiare nel dettaglio le giganti rosse:
si vede che il nucleo non brucia He-4.

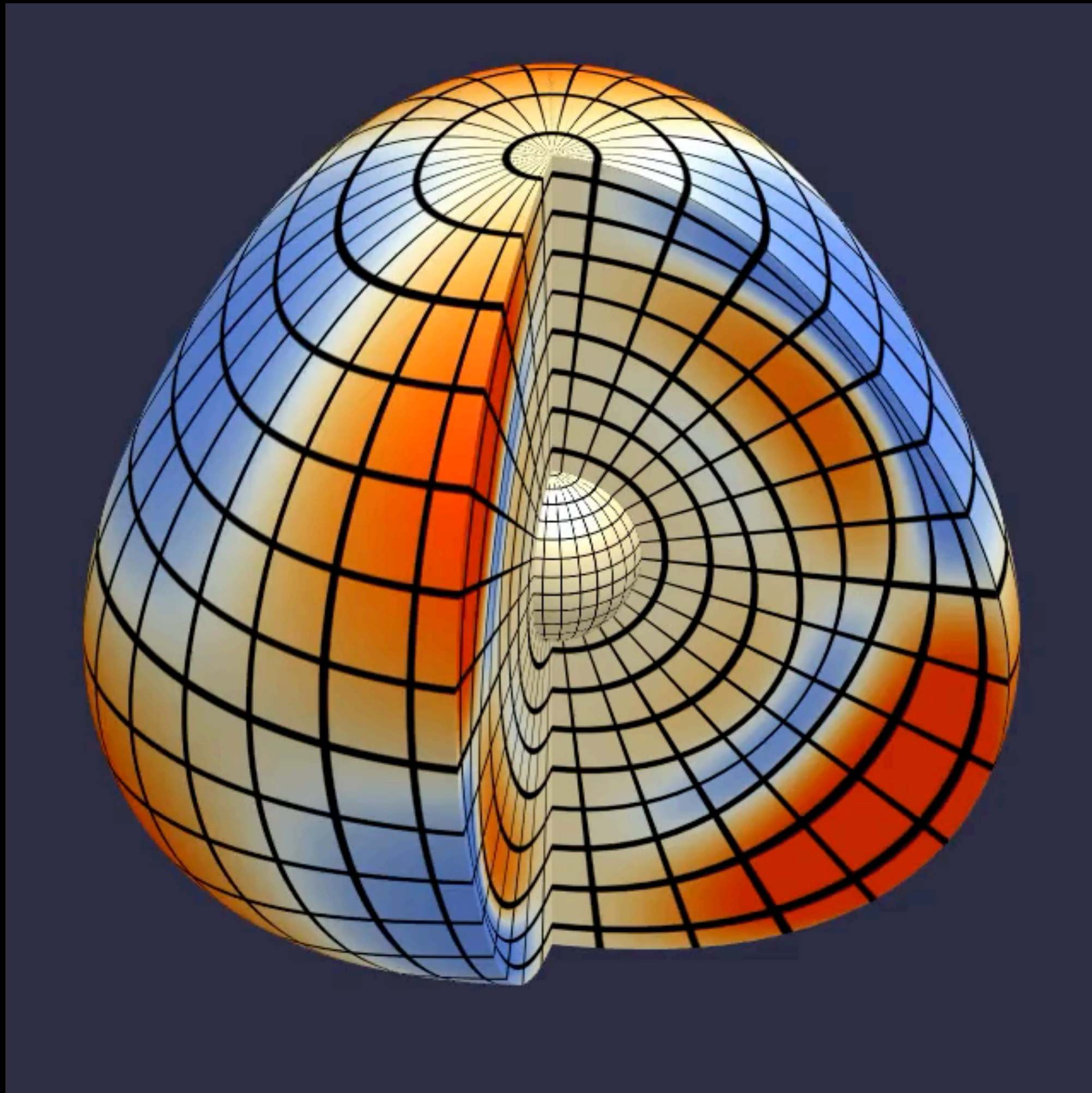
MODI P



Credit: Cunha et al. (2007)

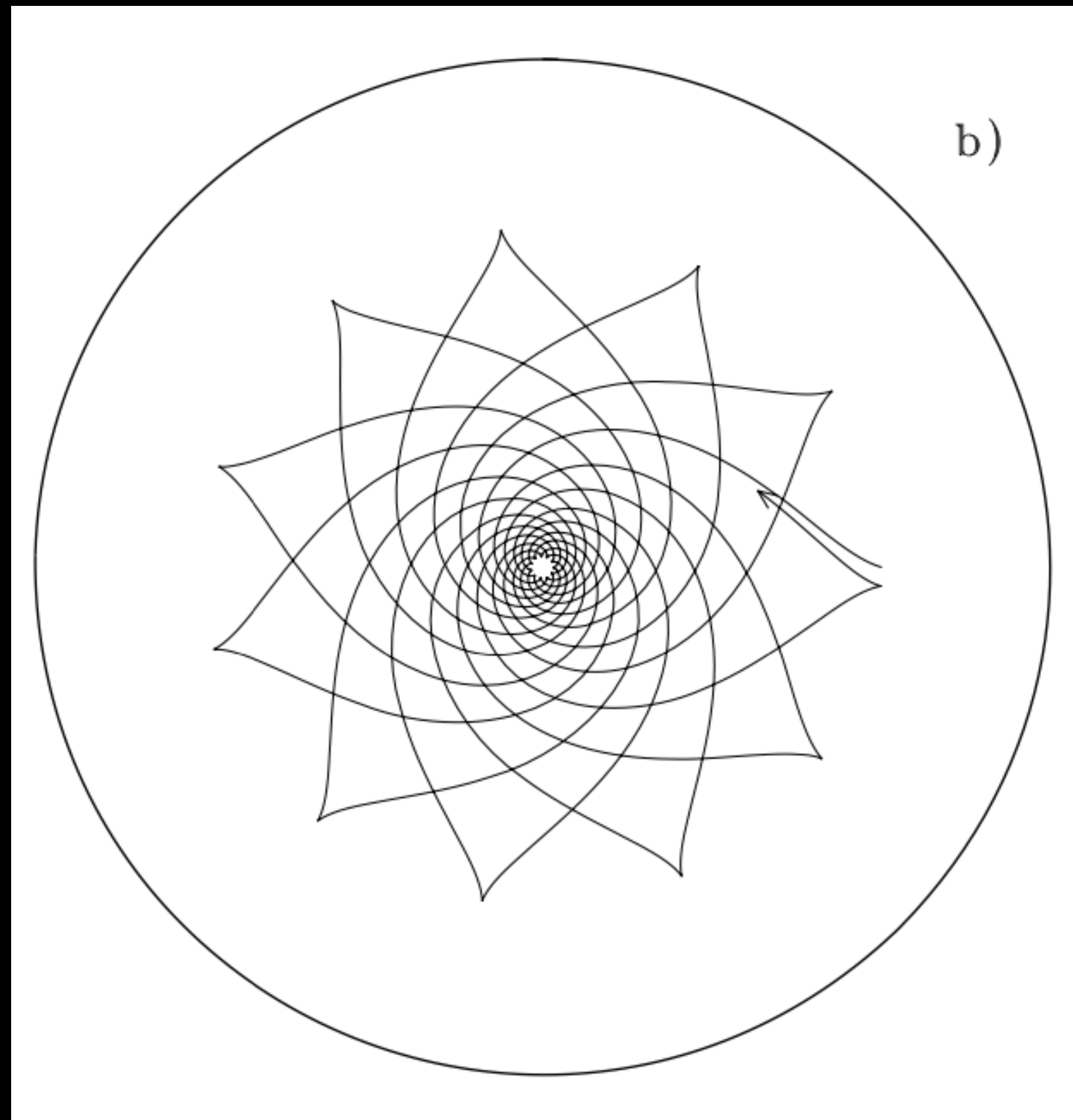
- Onde di pressione: onde sonore;
- $\ell \nearrow \rightarrow$ la profondità dell'onda $\searrow$;
- $n \nearrow \rightarrow$ autofrequenza $\nearrow$;
- Ci permette di ricavare $v_{\text{suono}}(r)$:
ricavo $T(r)$;
- Da essi deduco età e massa della Stella;
- Sono i modi che osserviamo nel Sole.

MODI P



- Modo P con $\ell = 3$ e $m = 2$;
- Nucleo è zona evanescente: l'onda non lo raggiunge;
- Ci permette di studiare bene le zone esterne della stella.

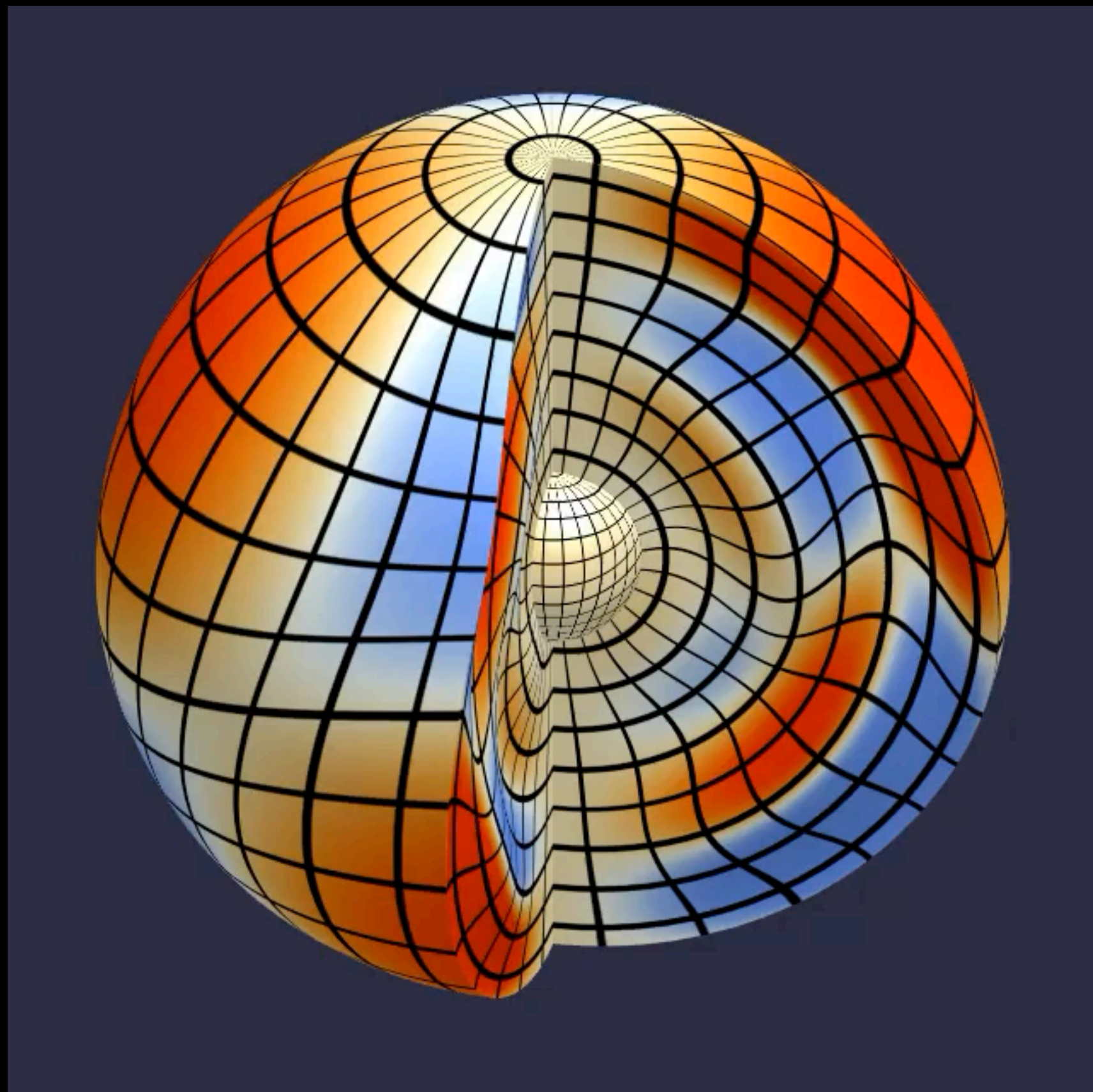
MODI G



Credit: Cunha et al. (2007)

- Onde di gravità: spinta di Archimede;
- Si sviluppano prevalentemente in orizzontale;
- Sono **onde intrappolate**: si sviluppano in una regione fissa;
- $n \nearrow \longrightarrow$ autofrequenza $\searrow$;
- Hanno **ampiezze molto** più **piccole** rispetto ai modi P: spesso non si vedono;

MODI G



- Modo G con $\ell = 3$ e $m = 2$;
- Nucleo partecipa alle oscillazioni;
- Ci permette di studiare bene le zone nucleari della stella;
- Risentono molto dei gradienti di composizione chimica.

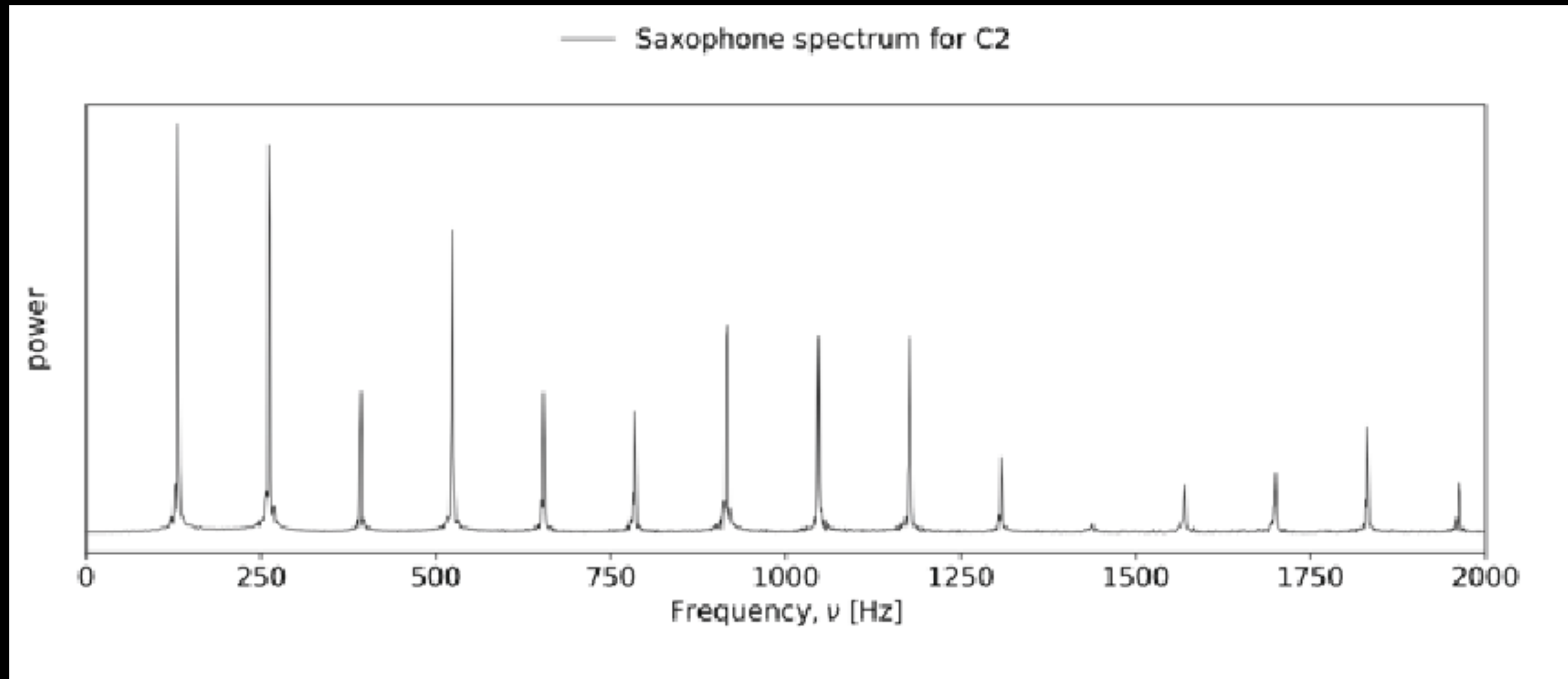
SOMMARIO DI ALCUNI RISULTATI

- Le stelle sono come una grande cassa di risonanza:
la musica che ne deriva ci permette di capire quanto siano grandi;
- Misuriamo la massa e l'età della stella con alta precisione (errori $< 10\%$);
- Vediamo la rotazione della stella ed il trasferimento di momento angolare:
si è capito che spesso il nucleo ruota più lentamente dell'involuppo;
- Vediamo il campo magnetico della stella;
- Vediamo la metallicità interna della stella;
- Possiamo studiare l'overshooting, le dimensioni del core che brucia, l'**evolutionary weather** (importanti sono i modi misti);
- Utilizzabile per capire la fisica degli assioni, dei neutrini, delle stelle binarie, ecc.

IL FUTURO: SATELLITE PLATO

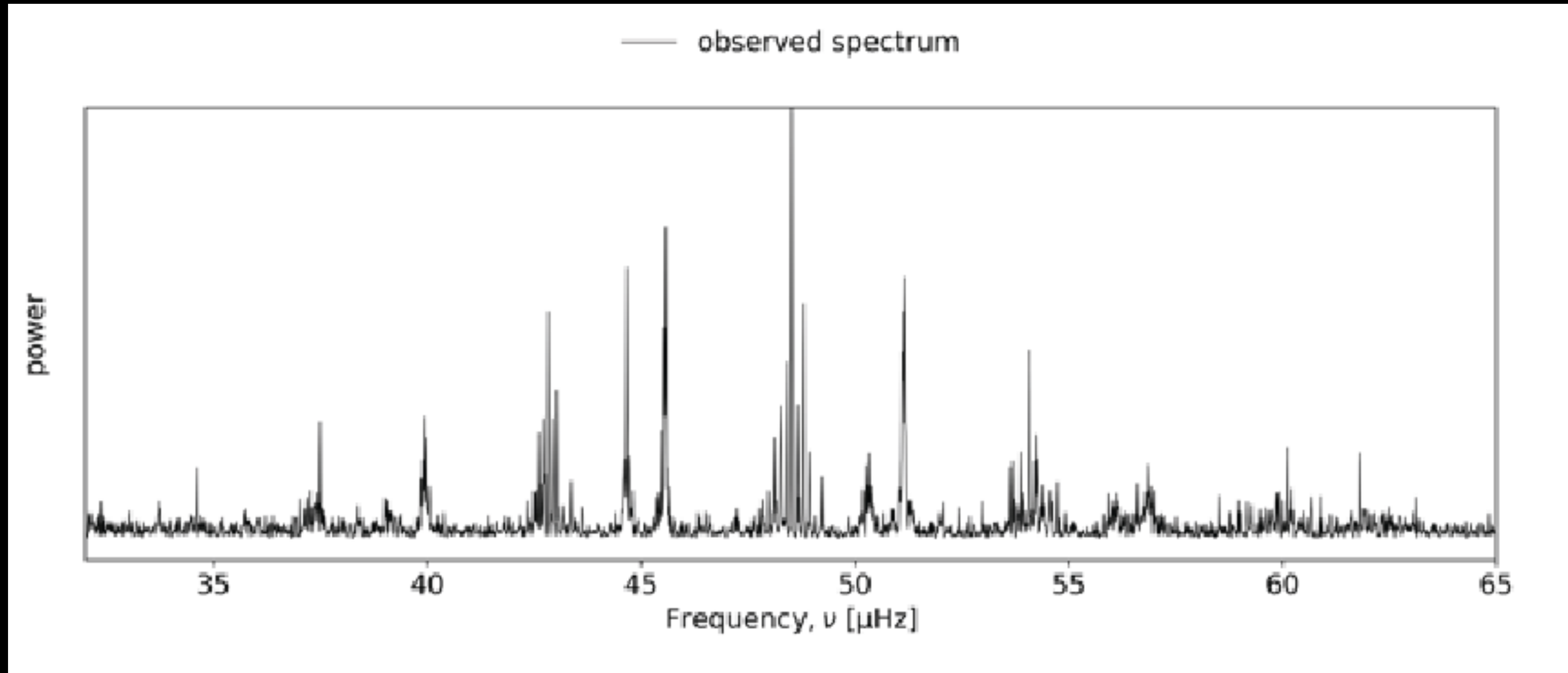
- Previsto per il 2026:
aprirà un nuovo mondo nello studio della formazione ed evoluzione della Via Lattea;
- Studiare con grande precisione l'età di molte stelle nella Via Lattea;
- Ci aiuterà a capire l'evoluzione chimica e dinamica di ammassi e galassie Nane.

ANALISI DI UN SASSOFONO



Credit: <https://www.aip.de/en/news/exploring-the-history-of-the-early-milky-way-with-sound/>

SPETTRO DI POTENZA DI UNA STELLA



Credit: <https://www.aip.de/en/news/exploring-the-history-of-the-early-milky-way-with-sound/>