

Circulația atmosferică planetară

1 Mișcări atmosferice

Circulația globală atmosferică pe termen lung (câțiva ani de exemplu), observabilă prin mișcarea norilor și înregistrată prin intermediul imaginilor din satelit în cazul planetei noastre, sau cu ajutorul telescoapelor în cazul altor planete din sistemul nostru solar, ne apare în mod clar ca o mișcare turbulentă. Din p.d.v. deterministic (informațional), o mișcare turbulentă poate fi departajată în două tipuri de mișcări: locale și globale. Așa cum rezultă din denumirea mișcării, la nivel local (mai exact spus regional) sunt caracteristice turbioanele (mișcări coerente circulare cu durată limitată), mișcări care în cazul atmosferei noastre se numesc cicloane (respectiv anticicloane)¹. La nivel global se constată o mișcare de ansamblu a acestor cicloane (pe direcția dominantă Vest-Est pentru zona temperată și pe direcția Est-Vest pentru zona tropicală), mișcare ce constituie componenta coerentă a mișcării atmosferice globale. Totul se petrece similar cu o curgere turbulentă a unui fluid printr-o conductă, unde turbioanele caracterizează mișcarea locală, iar deplasarea acestor turbioane, (componenta coerentă globală) caracterizează mișcarea de ansamblu a masei de fluid care determină debitul prin conductă.

La curgerea prin conducte se ia în considerație o suprafață teoretică transversală S (suprafață de referință), cu o poziție fixă față de conductă, pe care se determină distribuția vitezei de curgere. La mișcarea atmosferică, suprafața teoretică de referință pentru circulația globală este dată de intersecția păturii atmosferice cu un plan meridian (ce trece prin axa de rotație a Terrei). Pe această suprafață de referință (o semicoroană circulară cu grosime H , ce corespunde grosimii efective a atmosferei), va exista de asemenea o distribuție a vitezei de mișcare a masei de aer. Determinarea experimentală a vitezei și direcției vântului este o operație strict locală, efectuată de stații meteo cu locații fixe și cunoscute, față de sistemul de referință pozițional terestru. Fie θ (latitudinea față de ecuator) și φ (longitudinea față de meridianul Greenwich) coordonatele locale ale unei stații meteo ce face determinări ale direcției și vitezei vântului la intervale fixe dt . Pe termen mediu Δt (să zicem un an), determinările acestei stații vor putea fi reprezentate matematic de o mulțime formată din $N_v = \Delta t/dt$ vectori legați $\{\bar{v}_k(e, n, \theta, \varphi, t)\}$ având punctul de aplicație fix, la locația geografică $\bar{r}(\theta, \varphi)$ a stației (vezi fig. 1.1), cu direcția egală cu direcția vântului și modulul egal cu viteza acestuia la momentul $t = kdt$ ($k \in \{N\}, k = [1, N_v]$), unde k este numărul de ordine al înregistrării datelor meteo din intervalul Δt , axa orizontală (abscisa) este axa Vest-Est cu versorul \bar{e} pozitiv în direcția E, iar axa verticală (ordonata) este axa S-N cu versorul \bar{n} pozitiv în direcția N.

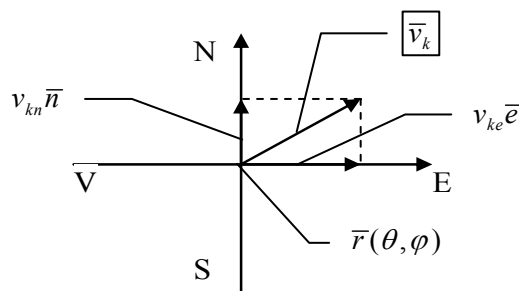


Fig. 1.1

¹ Ne referim exclusiv la circulația maselor de aer în plan orizontal, nu la mișcările verticale (de convecție).

Mulțimea tuturor vectorilor $\{\bar{v}_k(e, n, \theta, \varphi, t)\}$ determinați de totalitatea stațiilor meteo de pe Terra la momentul de timp universal (TU) t și la o anumită înălțime h ($h \in [0, H]$), formează un câmp vectorial (o distribuție spațială vectorială numită în filosofia obiectuală *distribuție Euler*), câmp ce reprezintă starea globală a circulației atmosferice la momentul t și altitudinea h . Pentru a simplifica lucrurile vom lua în considerare numai datele de la $h=0$, atât pentru motivul că acestea sunt cele mai numeroase, mai facile și mai fiabile determinări, cât mai ales pentru că circulația atmosferică de la nivelul suprafeței globului terestru influențează (prin interacțiunea aer-apă) parțial circulația hidrosferică (curenții) de suprafață.

Așa cum spuneam mai sus, determinarea vitezei și direcției vântului se face față de un sistem de referință (SR) local, aparatele de măsură fiind fixe față de solul stației. Pentru studiul circulației globale atmosferice așa cum apare ea din spațiul cosmic, trebuie să ținem cont că fiecare punct de măsură se mișcă odată cu rotația planetei. Dacă R este raza medie terestră, ω este viteza unghiulară de rotație a planetei în jurul propriei axe, θ este latitudinea punctului de măsură și \bar{e} este versorul tangent la paralela θ (direcția V-E), SR local se va mișca pe direcția V-E cu viteza periferică a scoarței terestre din acel punct:

$$\bar{v}_\theta = \omega R \cos \theta \bar{e} \quad (1.2)$$

Pentru un observator extraplanetar considerat imobil (SR absolut), mișcările atmosferice vor fi corelate cu mișcarea de rotație a planetei, iar în funcție de sensul și mărimea vitezei locale a vântului $\bar{v}_k(e, n, \theta, \varphi, t)$ față de \bar{v}_θ , mișcarea absolută va apărea *progradă* (componenta \bar{v}_{ke} pozitivă) sau *retrogradă* (componenta \bar{v}_{ke} negativă). Trebuie făcută o mențiune specială: mișcarea aparent retrogradă este absolut retrogradă numai cu condiția:

$$v_{ke} > -v_\theta \quad (1.3)$$

Comentariul 1.1: În cazul Terrei, pentru $R=6378$ km și $\omega=7.29 \times 10^{-5}$ rad/s, rezultă $v_\theta = 465$ m/s la ecuator. În cazul unei latitudini $\theta = 45^\circ$, această viteză se reduce la 329 m/s. Cel mai puternic vânt de suprafață (o tornadă de gradul 5) atinge doar cca 140 m/s, așa că o mișcare absolut retrogradă nu poate avea loc.

2 Componente comune ale distribuției vectoriale

Pentru fiecare locație a unei stații meteo, ar trebui să existe la centrul de colectare a datelor o distribuție temporală $\{\bar{v}_k(e, n, \theta, \varphi, kdt)\}$ unde k , așa cum arătam în paragraful anterior este numărul de ordine al determinării vitezei și direcției vântului din lista ordonată a acestor determinări efectuate la intervale dt , pe durata Δt ($k=1 \dots N_v$, unde N_v este definit mai sus).

Așa cum am stabilit în par. 1, mulțimea $\{\bar{v}_k(e, n, \theta, \varphi, kdt)\}$ pentru un anumit θ și φ , este o mulțime de vectori legați în același punct (locația geografică a stației), așadar concurenți, fapt care permite determinarea unei componente comune $\bar{v}_c(\theta, \varphi)$ a acestora pe durate cât mai mari de timp. Pentru extragerea unei componente coerente (globale, de ansamblu) dintr-o mulțime de vectori legați, cu direcții și module aparent aleatoare, se folosește *analiza obiectuală*, o metodă a filosofiei obiectuale. Esența acestei metode este departajarea proprietăților unei mulțimi de obiecte în două clase: *proprietăți comune*, ce aparțin tuturor obiectelor mulțimii și *proprietăți specifice* (diferențiale), ce individualizează pe fiecare obiect în parte făcându-l recognoscibil față de celelalte obiecte. Conform acestei clasificări, dacă mulțimea obiectelor este formată din elementele distribuției vectoriale de care discutăm în paragraful anterior, componentele comune ale acestor vectori vor fi tocmai mișcările comune (globale) ale maselor de aer, menținute pe intervale mari de timp Δt . Pentru că este vorba de vectori, și știind că vectorii se pot compune doar dacă au o referință comună, vom defini

componenta comună a mulțimii $\{\bar{v}_k(e, n, \theta, \varphi, kdt)\}$ formată din N_v vectori concurenți, vectorul:

$$\begin{aligned}\bar{v}_c(\theta, \varphi) &= \frac{1}{N_v} \sum_{k=1}^{N_v} \bar{v}_k(e, n, \theta, \varphi, kdt) = \frac{1}{N_v} \sum_{k=1}^{N_v} \bar{v}_{kn}(\theta, \varphi, kdt) + \frac{1}{N_v} \sum_{k=1}^{N_v} \bar{v}_{ke}(\theta, \varphi, kdt) = \\ &= \bar{v}_{cn}(\theta, \varphi) + \bar{v}_{ce}(\theta, \varphi)\end{aligned}\quad (2.1)$$

Pentru că pe noi ne interesează doar mișcarea globală a maselor de aer, vom neglija componentele specifice $\bar{v}_{dk} = \bar{v}_k - \bar{v}_c$ ale mulțimii $\{\bar{v}_k(e, n, \theta, \varphi, kdt)\}$, iar dintre componentele vitezei comune ne interesează doar componenta $\bar{v}_{ce}(\theta)$, caracteristică pentru circulația atmosferică în benzi paralele cu ecuatorul.

Comentariul 2.1: Este bine cunoscută distribuția în benzi paralele cu ecuatorul a fenomenelor din atmosfera lui Jupiter sau (într-o măsură mai redusă) a celor din atmosfera lui Saturn. În această anexă se prezintă argumente privind existența și în cazul Terrei a unei circulații atmosferice în benzi paralele cu ecuatorul, dar evidențiable doar instrumental și pe termen lung (zeci de ani).

3 Estimări realizabile

Metoda expusă mai sus este sigură, științifică, dar utilă doar pentru cei care au acces la datele rețelei mondiale de stații meteo, la fonduri și la un computer performant cu care să prelucreze aceste date. Și totuși, folosind doar imaginile animate din buletinele meteo ale posturilor tv cu acoperire globală (BBC, CNN, TV5, TVE etc.), documentarele Discovery despre fenomenele atmosferice, articolele revistelor științifice și datele publice de pe internet, se poate face o estimare a circulației globale atmosferice terestre, ce evidențiază clar o structură de benzi. Aceste estimări au la bază următoarele observații valabile pe termen lung:

1. Absența apariției nucleelor cicloanelor tropicale (uragane, taifunuri etc.) la latitudini cuprinse între $\pm 10^\circ$.
2. Traseul mediat în timp (pe o durată de 50 de ani) al tuturor cicloanelor tropicale din Atlantic ne indică o mișcare aparent retrogradă, cu un punct de cotitură aflat în jurul latitudinii de 33° N, după care se revine la mișcarea progradă înainte de dispariția lor.
3. Deplasarea constantă, de ansamblu, de la Vest la Est a cicloanelor și anticicloanelor din zona temperată, deplasare observată din urmărirea tablourilor sinoptice și ale imaginilor animate ale formațiilor noroase din buletinele meteo (tot pentru zona Atlanticului de Nord și Europa).

4 Corelații geofizice

Existența estimată a unor benzi cu componente ale mișcării coerente și invariante în circulația atmosferică terestră pe termen lung, benzi dispuse între latitudini bine determinate, are o strânsă legătură cu structura stratificată a interiorului planetei.

Din estimările actuale ale elementelor de structură internă ale Terrei², avem trei mari zone: nucleul solid cu raza de 1220 km, mantaua lichidă cu raza maximă 3480 km și restul mantalei plus scoarța. Din fig. 4.1 vedem că nucleul solid are o proiecție pe suprafața terestră între latitudinile de $\pm 11^\circ$, iar mantaua lichidă are o proiecție între $\pm 11^\circ$ și $\pm 33^\circ$. Dar tocmai aceste valori sunt cele estimate în par. 3 ca fiind frontierele benzilor din circulația atmosferică globală, mai exact banda ecuatorială (între latitudinile $\pm 11^\circ$) cu circulație progradă, cele două benzi tropicale aflate între $\pm 11^\circ$ și $\pm 33^\circ$ cu circulație aparent retrogradă, și cele două benzi temperate cu circulație progradă aflate peste latitudinile de $\pm 33^\circ$. Coincidența remarcabilă dintre proiecțiile zonelor interne ale planetei și componentele coerente pe termen lung ale circulației atmosferice globale estimate în paragraful 3 ne permite formularea următoarei ipoteze:

² William Lowrie - *Fundamental of Geophysics*, Cambridge University Press 2007

Ipoteza 4.1: *Circulația atmosferică planetară are două componente fundamentale:*

1. circulația turbulentă (stochastică) determinată în principal de factori termodinamici (presiune, temperatură, densitate, vâscozitate, compoziția chimică etc.), dependenți în primul rând de distribuția intensității radiației solare pe suprafața planetei împreună cu contribuția fluxului termic intern, și

2. circulația laminară (coerentă) care este strâns corelată cu structura internă a planetei.

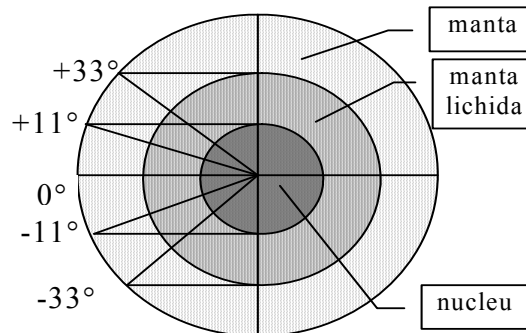


Fig. 4.1

Dacă circulația turbulentă are un grad ridicat de aleatoriu pe termen lung, în schimb circulația coerentă rămâne aceeași pe termen nelimitat, deoarece structura internă a planetei este invariantă.

5 Cazul Jupiter

Dacă în cazul Terrei am folosit ipoteza 4.1 pentru identificarea benzilor de circulație atmosferică pe termen lung, cunoscută fiind structura internă a planetei, în prezentul paragraf vom folosi aceeași ipoteză, dar în sens invers, pentru estimarea structurii interne a planetei Jupiter, cunoscute fiind benzile circulației atmosferice joviene. De menționat că structura acestor benzi este variabilă în timp, dar există componente comune rezultate din examinarea imaginilor joviene pe termen foarte lung.

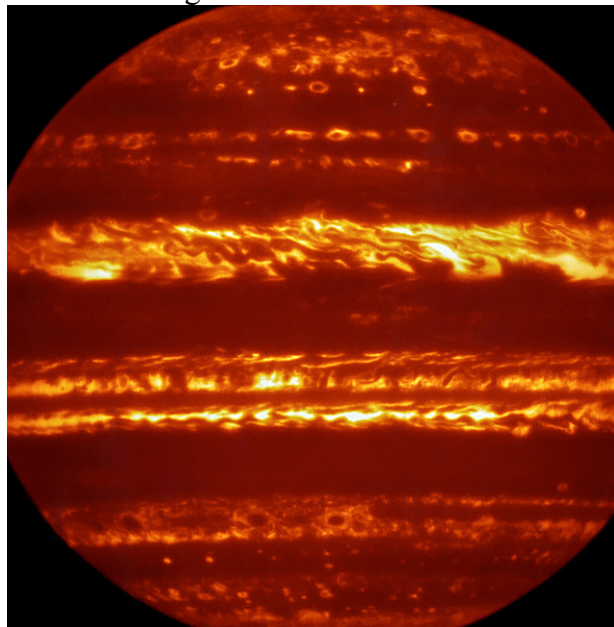


Fig. 5.1 (<https://cdn.eso.org/images/screen/es01623a.jpg>)

Ultima estimare s-a făcut după imaginea în infraroșu a atmosferei joviene furnizată de Agenția Spațială Europeană (vezi fig. 5.1):

- raza polară ce corespunde unei presiuni de 1 bar: 66700 km;
- banda ecuatorială medie: $\pm 6.5^\circ$, la care corespunde o rază polară medie de cca 7300 km;

- banda tropicală medie de la $\pm 6.5^\circ$ până la $\pm 18^\circ$ (raza polară medie cca 21000 km);
- banda temperată medie de la $\pm 18^\circ$ până la $\pm 28^\circ$ (raza polară medie cca 32000 km);

Cu aceste valori considerate ca fiind proiecțiile structurii interne joviene, putem reconstitui similar figurii 4.1 structura ipotetică a acestei planete în fig. 5.2. De precizat că desenul nu este la scară, iar alinierea sferelor concentrice este aproximativă. Pentru scopul acestei anexe important este doar ordinul de mărime și ordinea în care sunt dispuse straturile interne³.

Cu aceste precizări putem să analizăm distribuția radială a interiorului jovian conform ipotezei 4.1. Banda ecuatorială cu circulație progradă și turbulență redusă, ne indică la fel ca în cazul Terrei un nucleu solid cu dimensiunea puțin mai mare decât cea a Pământului. Banda tropicală cu circulație aparent retrogradă și intens turbulentă (în care este inclus cicloul permanent numit pata roșie) corespunde unei pături lichide (similar cu mantaua lichidă terestră). Banda temperată cu circulație progradă și turbulență mai redusă, corespunde unei pături interne solide (echivalentul mantalei terestre) cu raza polară de peste 32000 km, de la care începe un gigantic ocean planetar (format din gaze lichefiate), iar la suprafața sa o gigantică atmosferă. La fel ca în cazul terestru, păturile interne intens ionizate (aflate în stare de incandescență) contribuie la magnetismul planetar (câmp magnetic mult mai intens decât câmpul terestru), proporțional cu dimensiunile acestor medii și cu viteza de rotație a acestora.

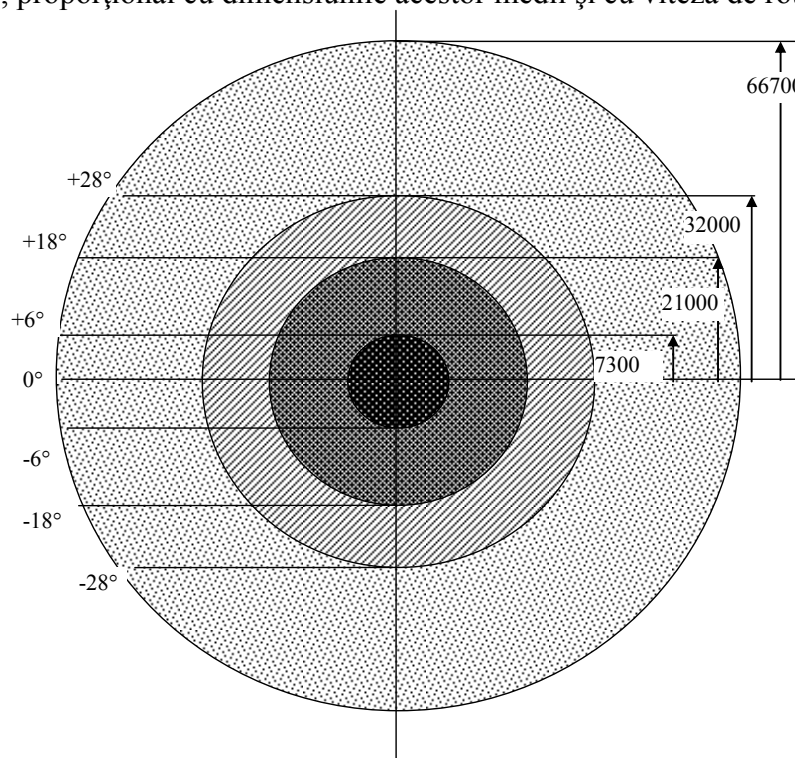


Fig. 5.2

Estimarea structurii interne a planetelor din sistemul nostru solar prezisă în literatura științifică actuală este făcută pe baze pur teoretice, cu un grad destul de ridicat de aproximare,

³ Precizăm încă odată că valorile numerice ale parametrilor benzilor variază în funcție de sursa de informație așa că pe noi ne interesează doar valorile medii (componentele comune). În viitor aceste valori pot fi corectate. De asemenea, se constată o evidentă asimetrie între cele două emisfere (nordică și sudică), asimetrie ce nu poate fi explicată deocamdată, motiv pentru care sunt luate în calcul doar valori medii.

nefiind posibile măsurători geofizice la fel ca în cazul Terrei. Pentru Jupiter este estimată o structură internă stratificată formată din următoarele elemente:

1. Stratul de nori cu o grosime de cca 50 km la limita superioară a atmosferei;
2. Atmosfera propriu zisă formată dintr-un amestec de hidrogen și heliu aflate inițial în stare gazoasă (până pe la 1000 km în adâncime) apoi lichidă cu o grosime de cca 15000...25000 km, presiune cca 2...4 MPa și temperatura de cca 15000 K;
3. Mantaua formată din același amestec H+He, dar în stare metalică (?) (nu este precizată faza în care se află acest amestec);
4. Miezul (nucleul) solid, cu o rază de cca 13000 km, aflat la o presiune de cca 4200 GPa și o temperatură de peste 20000 K, format din "rocky" într-o variantă⁴, sau din "rocky and ice" (?) în altă variantă⁵.

Se observă că modelul conform ipotezei 4.1 este destul de apropiat de modelele teoretice existente în prezent, mai ales în privința nucleului, dar deosebirea majoră fiind predicția unei mantale lichide căreia îi corespunde banda turbulentă tropicală joviană.

6 Concluzii

Pornim de la observația fundamentală că orice curgere turbulentă are o componentă coerentă (laminară) cu viteza \bar{v}_c căreia îi corespunde viteza de transfer a mediului turbulent printr-o secțiune fixă, normală pe viteza de curgere, viteză ce determină intensitatea curgerii (debitul) respectivului mediu turbulent. În cazul atmosferei terestre vorbim de circulația maselor de aer printr-o secțiune de forma unei semicoroane circulare $\theta \in \left[-\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2}\right]$ de grosime H (grosimea troposferei), coplanare cu un plan meridian aflat la longitudinea φ , descrisă la începutul acestui articol. Calculul \bar{v}_c conform relației 2.1 se face pornind de la șirul determinărilor experimentale ale vitezei și direcției vântului $\{\bar{v}_k(e, n, \theta, \varphi, t)\}$ de către stațiile meteo locale, determinări pe o durată cât mai mare (zeci de ani).

Comentariul 6.1: Deoarece viteza comună \bar{v}_c în cazul terestru se estimează a fi (mult) mai mică decât viteza locală \bar{v}_k , apare stringentă condiția preciziei determinărilor experimentale. Pentru uzanțe normale privind estimările meteo nu este necesară o precizie prea mare. Direcția vântului este indicată de obicei folosind așa numita "roză a vânturilor" ce presupune o toleranță de câteva grade unghiulare. Viteza vântului este în majoritatea cazurilor determinată cu anemometre de medie precizie, suficiente pentru cerințele curente. Pentru calculul riguros al $\bar{v}_{ce}(\theta)$ și estimarea circulației atmosferice în benzi este necesară o mai mare precizie a determinărilor, mai ales a direcției vântului, precizie asigurată în prezent doar de câteva tipuri de anemometre (cum ar fi de exemplu cele ultrasonice), asta însemnând costuri suplimentare ce pot fi justificate doar prin sintagma magică - *cercetare fundamentală*.

Evidențierea unei circulații în benzi pentru Terra în urma unei analize obiectuale a datelor $\{\bar{v}_k(e, n, \theta, \varphi, t)\}$ (obținute în condițiile menționate în comentariul 6.1), benzi corelate cu structura internă a planetei noastre, deschide perspectiva estimării mai precise, pe baze geofizice, a structurii interne și a altor planete posesoare de atmosfere cu circulație în benzi (Jupiter și Saturn).

Comentariul 6.2: Există o circulație atmosferică planetară și pentru Venus, a cărei structură internă se presupune a fi similară cu cea terestră, dar din cauza vitezei reduse de rotație nu are loc diferențierea benzii de circulație tropicale, bandă ce ar corespunde mantalei lichide a planetei.

⁴ John W. McAnally - *Jupiter and how to observe it*, Springer 2008

⁵ Linda T. Elkins-Tanton - *Jupiter and Saturn*, Chelsea House, 2006