

1. Reprezentări ale Universului

Omul a privit dintotdeauna *bolta cerească* și a observat cum, ziua, Soarele „aleargă” parcă tras de cai, iar noaptea, Luna trece printre stele și luceferi.

Încă din Antichitate, s-a impus un model capabil să explice satisfăcător observațiile astronomilor legate de *mișcarea planetelor* pe bolta cerească, de *succesiunea zodiilor*, de *eclipsele* de Lună sau de Soare.

Acesta a fost *modelul geocentric* (introdus de astronomul și geograful grec Claudius Ptolemeu, care a trăit în Egipt, între anii 85 și 165): Pământul este în centrul Universului și toate celelalte corpuri cerești *se mișcă* sau *sunt fixate* pe sfere celeste succesive.

Deoarece reușea să *explice* multe fenomene bazându-se pe ideea de perfecțiune (unica mișcare acceptată era *mișcarea circulară uniformă*) și punea *omul* în *centrul Universului*, modelul geocentric a fost larg acceptat, susținut de Aristotel și adoptat de către conducătorii bisericii catolice.

Actualul *model heliocentric* (luat și el în considerare) nu s-a putut impune, pentru că astronomii nu reușeau să explice cum s-ar putea ca Pământul să *se rotească* în jurul Soarelui fără ca oamenii să *cadă*, fără ca păsările aflate în zbor să *rămână în urmă*.

Teoria heliocentrică a lui Copernic

Abia în secolul al XVI-lea, astronomul polonez Niclas Kopernik (cunoscut sub numele latinizat *Nicolaus Copernicus* și pe care noi îl numim *Copernic*) a elaborat un model revoluționar pentru vremea lui: *modelul heliocentric*.

Modelul copernican (descriș în lucrarea *Asupra mișcării de revoluție a corpurilor cerești*) presupunea că *Soarele* (și nu *Pământul*) se află în centrul sistemului format de cele *șase* planete cunoscute în acea vreme (*Mercur, Venus, Pământ, Marte, Jupiter, Saturn*), de *satelitul* natural al Pământului (*Luna*) și de *Soare* (fig. 1).

Modelul heliocentric al lui Copernic explica *variația strălucirii planetelor*: în mișcarea lor circumsolară planetele se *apropiau* sau se *depărtau* de Pământ, astfel încât, pentru un observator terestru, apăreau mai *luminoase* sau mai *puțin luminoase*.

De asemenea, Copernic a putut explica și *mișcarea retrogradă* a planetelor.

Tot în secolul al XVI-lea, astronomul danez Tycho Brache (1546-1601) a făcut numeroase *observații astronomice* asupra pozițiilor planetelor, în special asupra planetei Marte.

Tycho Brache a observat, în 1572, o *supernovă*, iar în 1577, o *cometă*. A căutat să evedențieze *paralaxa* stelelor, fără a reuși!



Copernic și sistemul său heliocentric.

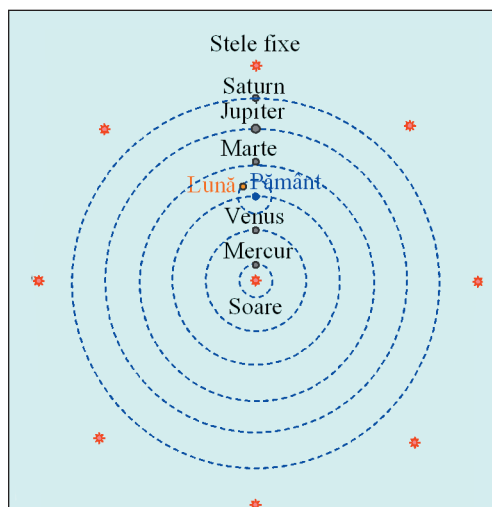


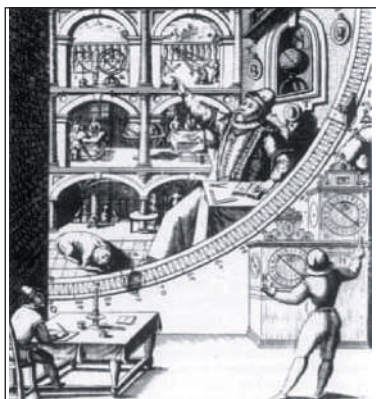
Fig. 1. Sistemul heliocentric.

Observație

- Copernic a presupus (ca și Ptolemeu) că mișcarea planetelor este circulară uniformă.

Concluzii

- Modelul copernican, fără a fi în întregime corect, a reprezentat un pas înainte necesar în istoria concepțiilor despre sistemul nostru solar.



Observatorul astronomic al lui Tycho Brahe.

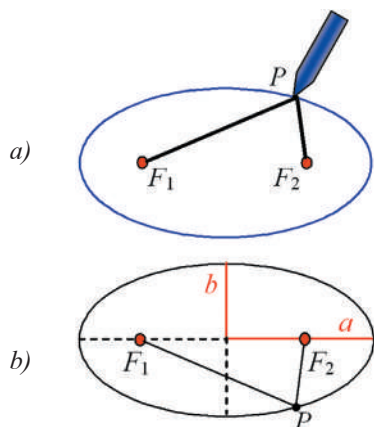


Fig. 2. Elipsa.

La scara sistemului solar, distanțele se măsoară în *unități astronomice, UA*.

O *unitate astronomică* reprezintă distanța de la Soare la Pământ, adică 150 de milioane de kilometri.

Relația dintre perioadele de revoluție și semiaxele a două planete:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^{\frac{3}{2}}$$



Sir Isaac Newton (1642-1727) fizician, matematician, astronom și chimist englez.

Legile lui Kepler

Rezultatele observațiilor meticuloase și precise ale lui Tycho Brahe au fost utilizate de matematicianul și astronomul german Johannes Kepler (1571-1630) pentru a formula *trei legi* care guvernează mișcarea planetelor sistemului nostru solar.

Experiment

- Luați un fir subțire, flexibil și inextensibil. Cu ajutorul a două piuneze, *fixați* capetele sale pe o foaie de hârtie (așezată pe o planșetă de lemn sau pe o bucată de carton) la o distanță *mai mică* decât lungimea firului.
- *Întindeți* firul cu vârful unui creion și *deplasați* vârful creionului pe hârtie, având grijă ca firul să fie mereu întins (fig. 2, a).
- *Repețați* experimentul pentru alte valori ale distanței dintre cele două piuneze.

Curbele obținute se numesc *elipse*.

O elipsă poate fi caracterizată fie de cele două *semiaxe*, a și b , fie de *focarele* F_1, F_2 și valoarea sumei $F_1P + F_2P = 2a$ (fig. 2, b).

Vectorul orientat de la un focar spre un punct de pe elipsă se numește *rază vectoroare* (de exemplu, $\vec{F_1P} = \vec{r_1}$).

Prima lege a lui Kepler

Traietoriile planetelor sunt *elipse*, iar *Soarele* se află într-unul dintre cele două *focare*.

A doua lege a lui Kepler

Raza vectoroare Soare-planetă acoperă arii egale în intervale de timp egale.

De aceea, Pământul se mișcă mai *repede* când este mai *aproape* de Soare și mai *încet*, când este mai *departe* de acesta.

A treia lege a lui Kepler

Perioadele de revoluție T ale planetelor sunt *proporționale* cu *semicuburile axelor mari* ale traiectoriilor lor eliptice: $T \sim a^{\frac{3}{2}}$.

Aceasta înseamnă că o planetă de 4 ori mai îndepărtată de Soare decât alta va avea o perioadă de revoluție de $4^{\frac{3}{2}} = 2^3 = 8$ ori mai mare decât aceasta.

Legile newtoniene ale gravitației

De ce un *măr* cade spre *Pământ* dar *Luna* nu?

Sir Isaac Newton (1564-1642), marele om de știință englez, și-a pus această întrebare.

Răspunsul său poate părea deconcertant: ca și mărul, *Luna cade spre Pământ*, deoarece ambele corpuri sunt *atrase* de acesta cu o forță care se manifestă între toate corpurile din Univers: *atracția gravitațională*.

Deși mișcarea Lunii este diferită de cea a mărului, traiectoriile ambelor corpuri sunt o consecință a acțiunii atracției gravitaționale.

Legea atracției universale

Oricare două corpuri din Univers (având masele m_1 și m_2) aflate la distanța r (măsurată între centrele lor) (fig. 3) se atrag reciproc cu forțe care acționează pe dreapta care unește centrele lor, orientate în sensuri opuse (\vec{F} și $-\vec{F}$) și având aceeași mărime F , proporțională cu masa fiecărui corp și invers proporțională cu pătratul distanței dintre centrele lor:

$$F = K \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Constanta de proporționalitate K , se numește *constanta atracției universale*; exprimată în unități ale Sistemului Internațional, are valoarea $K = 6,673 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}$.

Teorii moderne ale Universului

Experiment

- Luați un *balon sferic de cauciuc*, umflați-l puțin, apoi (cu un marker) figurați pe suprafața lui, cât mai multe *puncte*, notate cu A, B, C etc.
- Măsurați (de preferință cu un *centimetru de croitorie*) și notați pe caiet *distanțele* dintre diverse *perechi de puncte* (puteți folosi o matrice pătrată). Umflați încă puțin balonul și repetați măsurătorile.
- Reluați operațiunea de câteva ori (fig. 4). Urmărind datele, încercați să formulați o *concluzie*. Există un punct anumit pe suprafața balonului față de care toate celelalte puncte se depărtează?

Ați observat, probabil, că sirena unei mașini care se *apropie* de dumneavoastră cu mare viteză pare că emite un sunet mai *ascuțit* decât dacă mașina ar fi stat pe loc; pe când, dacă mașina se *îndepărtează* de dumneavoastră, sunetul pare mai *grav*.

Acest fenomen se numește **efect Doppler** și constă în modificarea *frecvenței* sunetului înregistrat de observator dacă sursa sonoră se depărtează sau se apropie de acesta.

Experiment

- Loviți cu vârful unui creion (la intervale scurte de timp, dar egale între ele) un punct anume de pe suprafața liniștită a apei dintr-un vas larg (o tavă sau o cadă).
- Observați forma circulară a valurilor formate (fig. 5, a). Stabiliți o legătură între frecvența cu care loviți apa și distanța dintre crestele valurilor.

Observație

- Newton, pornind de la legile lui Kepler și ținând seama de principiile mecanicii (pe care tot el le-a fundamentat), a stabilit o lege care se aplică tuturor corpurilor din Univers.

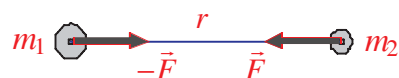


Fig. 3. Interacțiunea dintre două corpuri din Univers.

Știați că...

➤ Valoarea *constantei atracției universale* a fost determinată experimental de Henry Cavendish, cu ajutorul balanței de torsiune pe care a construit-o.

Această valoare pare extrem de *mică* la scara umană, dar este *suficientă* pentru a face să se atragă toate corpurile din Univers. La scara Universului este singura forță care contează; de ea depinde evoluția viitoare a Universului.

Observație

- Newton a arătat că, folosind legea atracției universale și aplicând *principiile* și *legile* mecanicii clasice, toate cele trei legi stabilite de Kepler pot fi *deduse* prin calcul direct, deci sunt o *consecință* a acestei legi.

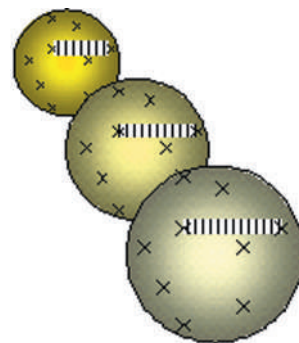


Fig. 4. Ilustrarea experimentului.

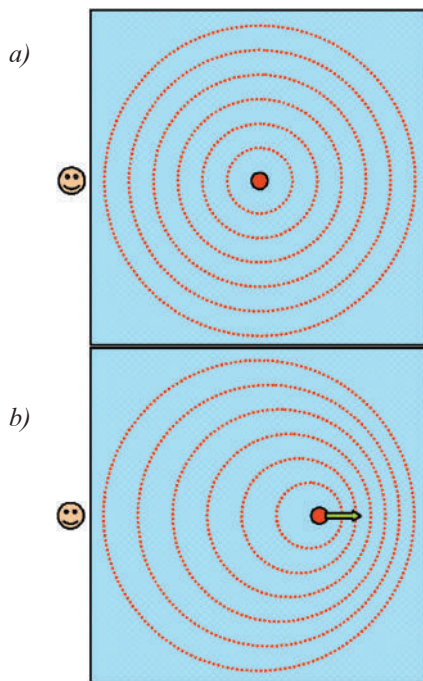


Fig. 5. Formarea valurilor pe suprafața apei, lovită într-un punct.

Aplicație

- Analizați spectrele din fig. 6. Aceste spectre aparțin Soarelui și unui obiect cosmic îndepărtat, care se depărtează de noi cu o viteză apreciabilă. Urmărind sensul deplasării liniilor întunecate, stabiliți care dintre ele aparține obiectului cosmic.

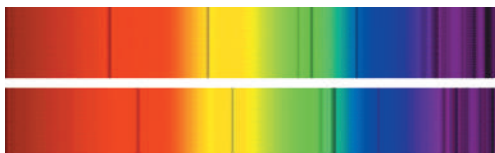


Fig. 6

Știați că...

- Diametrul sistemului solar este de: **80 U.A.**
- Steaua cea mai apropiată de Soare se află la: **4,3 a.l.**
- Diametrul Căii Lactee (galaxia din care facem parte) este de: **100.000 a.l.**
- Diametrul grupului local de galaxii este de: **1 Mpc.**
- Distanța până la cel mai depărtat obiect observat în Univers este de: **$18 \cdot 10^9$ a.l.**

- Continuați să loviți apa la intervale regulate și *depărtați* creionul, lent și uniform. Urmăriți cum valurile care vin spre voi au crestele mai *depărtate* între ele, ca și cum ați fi lovit apa cu o frecvență mai *mică* (fig. 5, b).
- Observați și descrieți ce se întâmplă când *aproptiați* creionul.

Concluzii

- O *creștere* a lungimii de undă este o dovadă a faptului că sursa se *îndepărtează* de observator, pe când o *scădere* a lungimii de undă reprezintă dovada că sursa se *aproptie* de observator.
- Fenomenul analog, observat în cazul luminii se numește efect Doppler-Fizeau și constă în modificarea lungimii de undă (adică a culorii) a luminii înregistrate de un observator dacă sursa luminoasă se deplasează în raport cu acesta. La *depărta*rea sursei, lungimea de undă înregistrată de observator *crește*, iar la *aproptie*rea sursei, *scade*.

Deplasarea spre roșu a liniilor spectrale

Conform celor arătate, dacă o sursă de lumină de o anumită culoare (din spectrul vizibil) se *depărtează* cu o viteză apreciabilă de un observator, acesta va înregistra o culoare cu lungimea de undă *mai mare*, adică mai apropiată de culoarea *roșie*. De aceea, acest fenomen a fost numit *deplasarea spre roșu*.

Expansiunea Universului

În urma unor minuțioase observații astronomice, desfășurate, pe parcursul unei decade (1919-1929) Edwin Hubble a descoperit că Universul este în expansiune: toate galaxiile se *depărtează* una de cealaltă (analog experimentului cu balonul de cauciuc). Dovada acestui fapt este *deplasarea spre roșu* a liniilor spectrale provenind de la cele aproximativ 50 de galaxii observate de Hubble și Humason; măsurătorile recente *confirmă* observațiile lor.

Hubble a stabilit că viteza de *îndepărtare* a unei galaxii este cu atât *mai mare* cu cât ea este *mai departe* de noi.

Revedeți datele obținute în experimentul făcut cu balonul de cauciuc care se umflă: observați că, alegând ca referință un punct *oarecare*, toate celelalte puncte se *îndepărtează* de el, cu viteze cu atât mai mari cu cât punctele sunt mai depărtate.

Având în vedere distanțele mari dintre corpurile cerești, pe lângă unitatea astronomică se mai folosesc și alte unități de măsură:

- **anul-lumină (a.l.):** distanța parcursă de lumină într-un an (viteza luminii este $3 \cdot 10^8$ m/s); **1 an-lumină = $9,5 \cdot 10^{15}$ m** (9,5 milioane de milioane de kilometri sau 6,3 U.A.).

- **parsecul (pc):** distanța până la un corp ceresc de unde diametrul orbitei Pământului se vede sub unghiul de o secundă de arc; **1 pc = $3,1 \cdot 10^{16}$ m** (3,3 a.l. sau $2,1 \cdot 10^5$ U.A.).

Legea lui Hubble

Viteza cu care un obiect cosmic (galaxie, quasar etc.) se îndepărtează de Pământ (măsurată pe direcția de observare) este proporțională cu distanța D dintre el și Pământ: $v = H \cdot D$.

Factorul de proporționalitate H se numește „constantă” lui Hubble, deși astrofizicienii consideră că valoarea sa nu este riguros constantă, ci scade (foarte lent) în timp datorită *gravitației* (care acționează ca o *frână*).

Valoarea curentă a acestui parametru este $H_0 \approx 70 \frac{\text{km/s}}{\text{Mpc}}$, ceea ce înseamnă că un obiect cosmic aflat la distanța de 1 Mpc (un megaparsec) se îndepărtează cu 70 km/s, iar alt obiect aflat la 5 Mpc se îndepărtează cu 350 km/s.

Vârsta Universului

De valoarea „constantei” lui Hubble este legată *vârsta* Universului. Estimativ, timpul scurs de la nașterea Universului este *inversul* constantei lui Hubble, adică (fără mare precizie) 14 miliarde de ani.

Această valoare se corectează în funcție de precizia observațiilor astronomice.

Temperatura minimă a Universului. Radiația cosmică de fond

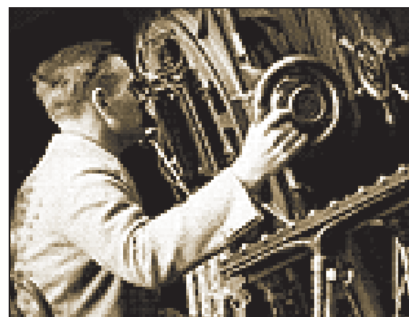
În 1964, astronomii americani Arno Allan Penzias și Robert Woodrow Wilson, în urma unor observații sistematice, au pus în evidență existența radiației cosmice (în domeniul *microundelor*, adică având lungimea de undă de ordinul unui mm) care era la fel de *intensă* din *toate direcțiile* și avea caracteristicile *radiației termice de echilibru* a unui corp *absolut negru* aflat la temperatura absolută $T_m = 2,726 \text{ K}$ (adică $t_m = -270,424^\circ\text{C}$).

Pentru simplitate, ne referim la această temperatură absolută folosind valoarea aproximativă: **3 K** (adică **-270°C**).

Teoria Marii explozii (Big Bang)

Luând în considerare observațiile astronomice și teoriile moderne apărute în fizică, fizicianul George Gamow a propus, într-un articol publicat în 1948 (împreună cu Ralph Alpher și Hans Bethe), un model teoretic al formării Universului, cunoscut sub numele de *Teoria Marii Explozii (Big Bang)*.

Acest model se bazează pe *Teoria relativității generale* (elaborată de Albert Einstein) și pe *Principiul cosmologic* (care afirmă că materia este *uniform* distribuită la *orice scară*). Pe baza acestui model, Gamov a *prevăzut* existența unei *radiații cosmice de fond* (emisă în perioada formării atomilor, moment în care Universul a devenit *transparent* pentru lumină). Șaisprezece ani mai târziu, Penzias și Wilson au descoperit această radiație de fond; existența ei este considerată o *dovadă* a validității teoriei Big Bang.

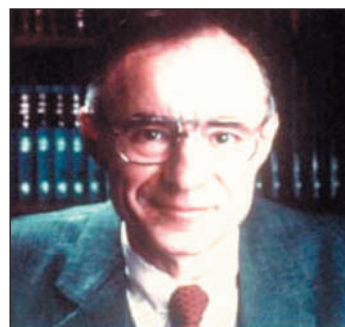


Edwin Hubble (1889-1953).

Aplicație

■ Care ar fi vârsta Universului dacă valoarea constantei Hubble ar avea o valoare cu 20% mai mare sau mai mică decât valoarea indicată, H_0 ?

R: Pentru $H_1 = (1-0,20) \cdot H_0$, $T_1 = 14:0,80 = 17,5$ miliarde de ani, iar pentru $H_2 = (1+0,20) \cdot H_0$, $T_2 = 14:1,20 = 11,7$ miliarde de ani.



Arno Penzias.



Robert Wilson.

Penzias și Wilson au primit (în 1978) Premiul Nobel pentru fizică.



Fig. 7. Evoluția Universului de la Marea Explozie și până azi.

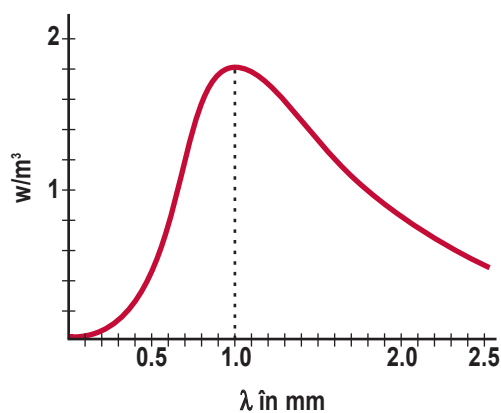


Fig. 8.

Observații

- Teoria Big Bang nu explică *structura* Universului. Pentru a explica *fluctuațiile* (extrem de mici) radiației cosmice de fond, face apel la o ipoteză suplimentară (ipoteza *inflației*). Alte probleme încă neelucidate sunt: *masa ascunsă din Univers, energia neagră, viteza de expansiune a Universului, vârsta sa precisă, forma și extinderea (finit sau infinit, curb sau plat), expansiunea accelerată, apariția vieții, existența altor forme de viață, evoluția (ciclică sau aciclică)*.
- Deși această teorie este larg acceptată de comunitatea științifică, există încă observații care, în măsura în care sunt corecte, nu sunt în deplin acord cu teoria.

Etapele evoluției Universului, conform teoriei Big Bang

Acum aproximativ 14 miliarde de ani (conform estimării valorii „constantei” lui Hubble), Universul actual nu avea dimensiuni, iar densitatea și temperatura lui erau infinite.

Atunci a avut loc o imensă *explozie (Big Bang)* și Universul a început să *se extindă* cu o viteză apropiată de viteza luminii (fig. 7).

Până la momentul $\tau = 10^{-43}$ s (valoare cunoscută sub numele de timpul Planck) cele patru forțe fundamentale (*gravitația, forța electromagnetică, forța nucleară slabă și forța nucleară tare*) erau unite (aveau același *ordin de mărime* și puteau fi descrise de aceeași *teorie*); temperatura era 100 de mii de miliarde de miliarde de miliarde de kelvini (adică 10^{32} K).

La momentul Planck, gravitația *s-a desprins* de celelalte trei forțe fundamentale (scăzând în intensitate).

■ Inflația

La 10^{-35} s, s-a separat și forța nucleară tare de celelalte două forțe (electromagnetică și nucleară slabă), a început o expansiune rapidă, temperatura a scăzut la un miliard de miliarde de miliarde de kelvini (10^{27} K).

La două secunde după momentul zero, când temperatura a scăzut la 10 miliarde de kelvini (10^{10} K), densitatea avea valoarea colosală de 100 de milioane de kg/m^3 (10^8 kg/m^3).

După 10^{-12} s, cele patru forțe fundamentale s-au separat complet; au început să se formeze protonii, neutronii și antiparticulele lor (*antiprotonul și antineutronul*).

După numai o sutime de secundă, temperatura a devenit 100 de miliarde de kelvini; energia era de natură *radiativă*.

■ Nucleosinteza

Când trecuseră trei minute de la început și temperatura era de un miliard de kelvini, au început să ia naștere (din protoni și neutroni) nucleeele de *hidrogen, heliu* și alte câteva elemente ușoare.

■ Nașterea stelelor

După 10 mii de ani, temperatura era numai 10 mii de kelvini, densitatea scăzuse la valoarea 10^{-17} kg/m^3 . Începe formarea stelelor, moment care a fost surprins de telescopul Hubble.

După 300 de mii de ani, Universul s-a *răcit* până la 3 000 de kelvini. Electronii au început să se combine cu nucleeele pentru a forma primii *atomi* (structuri *neutre*). Universul a devenit *transparent* pentru lumină și a început să radieze: a luat naștere *radiația cosmică de fond*.

După un miliard de ani, temperatura absolută a Universului era de 20 K (adică -253°C); au început să se formeze *galaxiile*.

■ Prezentul

Temperatura Universului a atins valoarea găsită de Penzias și Wilson (3K adică -270°C , corespunzător unui maxim situat în domeniul microundelor, fig. 8), iar densitatea medie a devenit numai 10^{-27} kg/m^3

(adică de aproximativ un miliard de miliarde de miliarde de ori mai mică decât densitatea aerului).

Există și *alte ipoteze* asupra formării Universului (printre altele, ipoteza *creaționistă*), dar teoria Marii Explozii este cea mai *elaborată* și este *în acord* cu cele mai multe observații (expansiunea, radiația de fond, abundența elementelor ușoare H, He, Li etc.).

Multe din problemele legate de Univers, aflate astăzi în *discuție*, își vor găsi cu siguranță *soluția* în anii care vor veni.

Stele: tipuri și evoluții

La fel ca Soarele nostru, stelele (fig. 9) sunt imense *reactoare nucleare*, care încep să funcționeze, produc și răspândesc în spațiu cantități enorme de energie, apoi își încetează activitatea, fiecare în felul său.

Nori interstelari

Într-un nor interstelar se găsesc cel puțin 10^6 particule pe m^3 .

Pentru că dimensiunile unui nor interstelar sunt *uriaeșe* (de ordinul *parsecului*), cu toate că numărul particulelor pe care le conține este *foarte mic*, masa unui nor stelar este și ea *uriașă*.

Toate particulele din nor se atrag între ele cu forțe gravitaționale, care le mențin împreună; norul reprezintă o entitate cosmică, un *obiect cosmic* bine definit. Temperatura sa absolută este situată în jurul valorii de 100 K (ceea ce corespunde temperaturii de -170°C).

Un nor suficient de masiv va începe să se *contracte*, sub influența gravitației proprii și, eventual, a forțelor gravitaționale exercitate de alte formațiuni masive din vecinătate (fig. 10).

Ca urmare a contracției, vitezele particulelor norului cresc, ajungând la câțiva kilometri pe secundă și temperatura absolută a norului crește, ajungând la 50 de mii de kelvini.

La această temperatură, nu pot exista atomi, ci doar *nuclee* (în cea mai mare parte, nuclee de hidrogen) și *electroni*.

Această stare a materiei se numește *plasmă* (total ionizată); stabilitatea ei este asigurată de echilibrul între forțele de atracție între particulele cu sarcini electrice de *semne diferite* și forțele de respingere între particulele cu sarcini electrice de *același semn*.

Diametrul norului scade la aproximativ 200 de milioane de kilometri (de câteva zeci de mii de ori mai mare decât diametrul Pământului). Norul rămâne un obiect cosmic *întunecat*.

Având în vedere dimensiunile uriaeșe ale unui nor și vitezele, nu prea mari, ale particulelor, contracția norului durează câteva miliarde de ani, în funcție de masa lui (care determină vitezele particulelor).

Proto-stelele

Odată cu creșterea temperaturii norului (datorată *contracției*) el începe să lumineze, devenind un obiect strălucitor, numit *proto-stea*.

Gravitația continuă să *contracte* proto-steaua; ca urmare, temperatura continuă să *crească*, ajungând (în interior, la 150 de mii de kelvini, iar la suprafață, la aproximativ 3500 K). Datorită *suprafeței uriaeșe*, proto-steaua emite o cantitate enormă de *energie*.

Concluzii

- Legile fizicii conduc la ideea că Universul, așa cum îl cunoaștem, a luat naștere acum aproximativ 14 miliarde de ani, în urma unei explozii uriaeșe (ale cărei ecouri se regăsesc astăzi sub forma radiației cosmice de fond, fig. 8) și se află încă în expansiune (așa cum se poate deduce din legea lui Hubble). Deși, printre cele patru forțe fundamentale, gravitația universală (descoperită de Newton) este cea mai slabă, viitorul Universului depinde tocmai de această forță, singura care (acționând la distanțe astronomice) poate ține laolaltă obiectele cosmice, ale căror mase sunt uriaeșe.

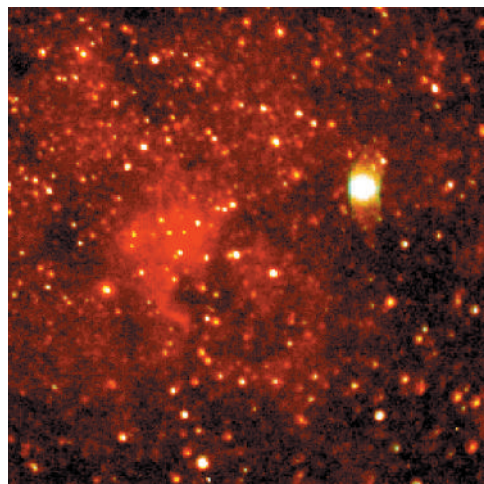


Fig. 9. Imagine cu stele.

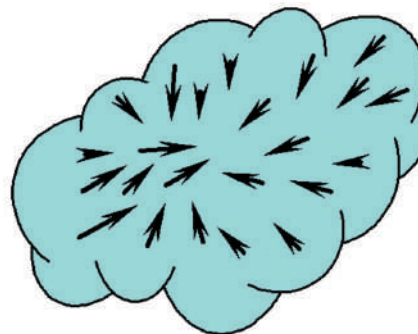


Fig. 10. Nor interstelar.

Știați că...

➤ În spațiul interstelar găsim, în principal, hidrogen și heliu. Spațiul cosmic este, în cea mai mare parte, *gol*: în unele regiuni găsim cel mult o particulă pe metru cub, iar în altele aproximativ un milion de particule pe metru cub, adică de zece miliarde de miliarde de ori mai puțin decât numărul particulelor dintr-un metru cub de aer (aflat în condiții normale), care, după cum știți, este $2,7 \cdot 10^{25} \text{ m}^{-3}$.

Observație

■ Soarta unei proto-stele depinde de *masa* ei:

- dacă are masă prea mică, proto-steaua se poate transforma într-o uriașă planetă gazoasă (ca, de exemplu, *Jupiter*; fig. 11);
- dacă masa proto-stelei este suficient de *mare* (pentru Jupiter, aceasta ar fi însemnat de câteva sute de ori mai mare decât în realitate), contracția gravitațională va *continua* și proto-steaua va deveni *stea*.



Fig. 11. Jupiter... o stea ratată!

Observație

■ O stea va trăi atâta vreme cât are din ce să producă reacții de fuziune (adică, atât timp cât are *combustibil nuclear*).

Știați că...

➤ Există o legătură între masa unei stele și durata ei de viață. În stele masive se produc reacții de fuziune cu viteză mai mare decât în cele cu masă mai mică, astfel încât combustibilul nuclear se consumă mai repede: steaua trăiește mai puțin.

Stelele

Stelele sunt caracterizate de producerea energiei pe seama *reacțiilor nucleare* din regiunea centrală.

Temperatura în centrul stelei nou născute continuă să crească, ajungând la peste 15 milioane de kelvini.

Contracția gravitațională a făcut ca nucleele să *se apropie* suficient pentru ca *forțele nucleare* (a căror *rază de acțiune* este *foarte mică*) să producă reacții de *fuziune*, în urma cărora se formează nuclee de *helium* și se eliberează cantități enorme de *energie*. Creșterea temperaturii în interior duce la mărirea agitației termice; ca urmare, contracția gravitațională este *contrabalansată*; steaua ajunge în *echilibru*.

Temperatura suprafeței unei stele determină *culoarea* stelei: cu cât temperatura este mai ridicată, cu atât steaua este mai strălucitoare (stelele cu suprafață relativ mai *rece* sunt *galbene*, iar cele cu suprafața *fierbinte* sunt *albastre*).

Galaxii și roiuri

Fiind *legate gravitațional*, stelele pot forma grupuri relativ distincte, numite *galaxii*. Galaxiile pot fi spirale, eliptice sau cu formă neregulată.

O galaxie poate conține între 10 milioane și 10 miliarde de sisteme stelare, care *gravitează* în jurul unui centru atractiv (unde astronomii cred că se află o *gaură neagră*); *perioada de rotație* este de aproximativ 100 de milioane de ani.

Diametrul unei galaxii este de ordinul zecilor sau sutelor de mii de *ani-lumină*.

Spațiul intragalactic conține gaze și pulberi, radiație și, probabil, *materie întunecată*.

Sistemul *nostru* solar face parte dintr-o galaxie numită *Calea Lactee* sau, popular, *Calea robilor* sau, simplu, *Galaxia*.

Galaxia are, practic, aceeași vârstă cu Universul însuși (fig. 12. a,b).

Sistemele stelare dintr-o galaxie se pot grupa în entități distincte, unele numite *nebuloase* iar altele, *roiuri stelare*.

Nebuloasele reprezintă aglomerări de gaze interstelare și pulberi cosmice. Ele pot da naștere unor stele noi, care formează și ele aglomerări de stele, numite *roiuri stelare*. Stelele dintr-un roi stelar au aproximativ aceeași vârstă.

Roiurile stelare pot fi *deschise* (formate din stele relativ „tinere”) sau *globulare* (compuse din aproximativ o sută de milioane de stele „bătrâne”, adică vechi de opt miliarde de ani).

Distanțele dintre galaxii sunt de ordinul milioane de ani-lumină. Totuși, deoarece forța de atracție gravitațională are *rază infinită* de acțiune, galaxiile se grupează în *grupuri* (conțin *câteva sute* de galaxii), în *roiuri* (conțin *câteva mii* de galaxii) sau în *superroiuri* (conțin *zeci de mii* de galaxii). *Calea Lactee* (fig. 12) face parte din așa-numitul *grup local*.

Un important roi de galaxii se află la granița dintre constelațiile *Fecioara* și *Cosița Berenicei*, la 50 milioane de ani-lumină de noi. Roiul conține aproximativ 3 mii de galaxii, majoritatea fiind galaxii spirale (fig. 13).

Gigantele roșii

Dacă reacțiile nucleare se produc cu o viteză mai mică, gravitația va reuși să contracte din nou steaua; ca urmare, nucleele vor ajunge din nou la distanțe mici și reacțiile de fuziune se vor întăți, după care fenomenul se poate repeta.

Totuși, lucrurile nu se petrec aiodoma: nucleele de heliu formate (de patru ori mai masive decât nucleele de hidrogen) se vor acumula în centrul stelei, făcând ca reacțiile de fuziune să nu mai aibă loc în centrul stelei, ci în straturile adiacente.

De aceea, părțile exterioare vor începe să se dilate; temperatura suprafeței stelei va scădea la 3 000 K, astfel că steaua va fi *roșie*. Datorită suprafeței foarte mari, giganta roșie va emite foarte multă energie.

Dar regiunea centrală a stelei (unde heliul se găsește în mari cantități) se va contracta gravitațional. În regiunea centrală presiunea va fi uriașă, iar ca urmare, densitate va fi și ea extrem de mare (10^{18} kg/m³).

Temperatura regiunii centrale crește (poate atinge 100 de milioane de kelvini) și, ca urmare, nucleele de heliu încep să fuzioneze, formând nuclee mai grele (de exemplu, nuclee de carbon). Regiunea centrală devine și mai fierbinte, presiunea și temperatura cresc la valori enorme.

Explozia regiunii centrale a stelei

Deși nu au trecut decât câteva ore de la inițierea reacțiilor de fuziune a heliului, regiunea centrală a gigantei *explodează*, dar în afară nu se observă o creștere prea mare a strălucirii stelei.

Explozia duce la o răcire rapidă și la scăderea drastică a densității; totodată, se răcește și învelișul de hidrogen al gigantei. Steaua își micșorează strălucirea.

Steaua a ajuns acum la o nouă stare de echilibru: reacțiile nucleare se petrec atât în înveliș (unde temperatura este 15 milioane de kelvini și unde nucleele de hidrogen fuzionează transformându-se în nuclee de heliu) cât și în regiunea centrală (unde temperatura este 200 de milioane de kelvini și unde nucleele de heliu fuzionează formând nuclee de carbon și de oxigen).

Moartea unei stele mici

După ce combustibilul nuclear (*heliul din centrul gigantei și hidrogenul din regiunile adiacente*) s-a consumat, steaua va muri.

Ca unitate de măsură a masei stelelor vom lua chiar masa Soarelui nostru (care este aproximativ $2 \cdot 10^{30}$ kg, adică de 333 de mii de ori mai mare decât masa Pământului).

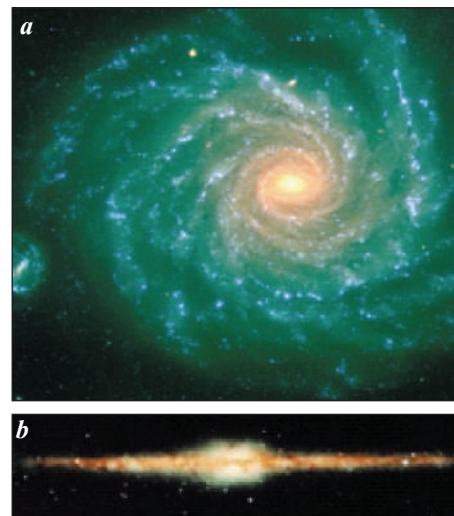


Fig. 12 a, b. Calea Lactee văzută de sus (spirală) și din profil (lenticulară).



Fig. 13. Andromeda, o altă galaxie spirală.

Observație

- Constelațiile sunt formate din stele care nu se află neapărat în aceeași regiune a Universului (unele dintre ele se pot afla chiar la distanțe foarte mari). Doar proiecția lor pe bolta cerească (formând imagini stilizate) ocupă o regiune restrânsă, fapt pentru care sunt utilizate de astronomi ca referință pentru poziția altor obiecte cosmice.

Aplicații

- Cum se împart galaxiile după formă? Puteți da exemple?
- Ce forță ține laolaltă stelele unei galaxii?
- Ce importanță prezintă nebuloasele?
- Ce vârstă are galaxia noastră?
- Ce sunt constelațiile?

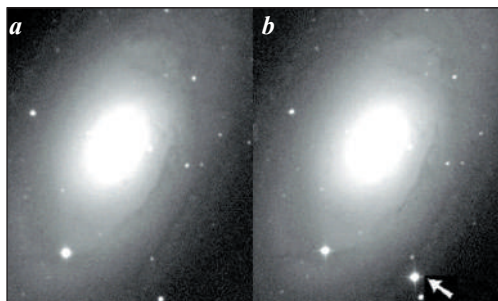


Fig. 14. O supernovă: a) 23 aprilie 1992; b) 01 aprilie 1993.

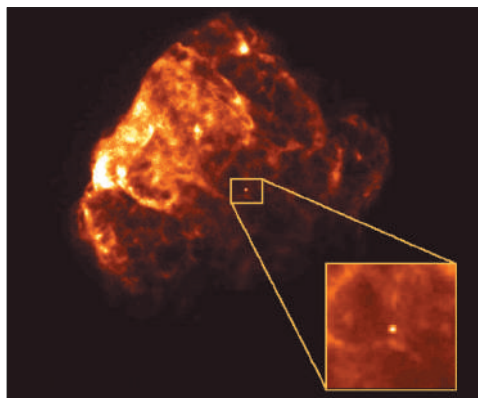


Fig. 15. Resturile unei supernove și o stea neutronică.

Observație

- Datorită periodicității remarcabile a emisiei pulsarilor, astronomii au crezut la început că au recepționat un semnal trimis de ființe inteligente *extraterestre*!
- Deoarece această energie era emisă într-o bandă largă a frecvențelor radio, energia necesară emisiei era prea mare pentru ca această ipoteză să fie valabilă.

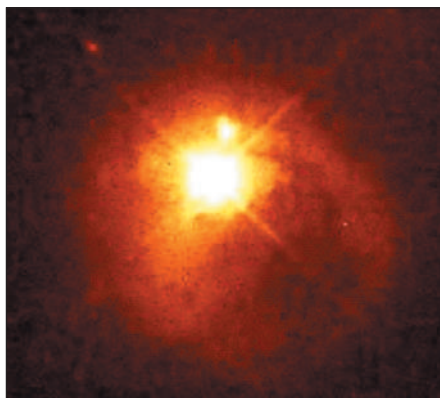


Fig. 16 – Quasarul PKS 2349.

Supernove, stele neutronice, quasari

Supernove

Stelele cu mase mai mari (de patru până la opt ori masa Soarelui) colapsează gravitațional mult mai rapid; regiunea centrală conține carbon, care (când temperatura atinge 600 de milioane de kelvini) generează nuclee de *neon*, *magneziu* și altele.

Presiunea în interiorul stelei devine uriașă și, la un moment dat, steaua explodează atât de violent încât împrăștie materie stelară în spațiul cosmic și devine atât de strălucitoare încât poate fi văzută de pe Pământ, la lumina zilei, cu ochiul liber, devenind o *supernovă* (fig. 14 a, b).

În regiunea centrală a stelelor cu mase mai mari decât opt mase solare, se produc și elemente mai grele; când se acumulează mult fier, steaua va exploda și ea, devenind *supernovă*.

Cum s-au format nucleele elementelor mai grele?

Explozia stelelor masive este atât de puternică, încât duce la scindarea nucleelor în fragmente; aceste fragmente pot fuziona, formând nuclee mai grele decât fierul, cum sunt argintul, aurul, uraniul și altele.

Stelele neutronice – pulsarii

După explozia unei supernove, partea centrală a stelei suferă o comprimare enormă, astfel încât chiar și nucleonii (*protonii* și *neutronii*) se vor contopi, formând o sferă cu diametrul de numai zece-douăzeci de kilometri și masă de același ordin de mărime cu masa Soarelui, alcătuită doar din *neutroni* și numită *stea neutronică* (fig. 15).

Densitatea unei stele neutronice este imensă: 10^{18} kg/m^3 .

O stea neutronică are și un *câmp magnetic* de foarte mare intensitate. În acest câmp se pot genera *radiații electromagnetice*, care vor fi emise într-un con îngust, în jurul direcției axei magnetice.

Dacă steaua neutronică se rotește în jurul altei axe, iar conul în care ea radiază intersectează Pământul, un observator terestru va înregistra, la intervale *absolut egale* (de ordinul sutimii de secundă), pulsuri de radiație electromagnetică. În acest caz, steaua neutronică se numește *pulsar*.

Quasarii

Astronomii au început să descopere (1959) surse de *unde radio* în puncte ale Universului unde nu se afla niciun obiect luminos. Aceste obiecte cosmice au fost numite surse radio cvasistelare (în engleză *QUASi-stellar radio source*), de unde și denumirea unui astfel de obiect: *QUASAR* (fig. 16).

Ulterior, s-au evidențiat și obiecte *luminoase* în punctele de unde proveneau semnalele radio: fie *resturile unei supernove*, fie o regiune în care *se nasc stele*, fie o *galaxie foarte îndepărtată*.

Măsurându-se *deplasarea spre roșu*, s-a constatat că ea are valori deosebit de *mari*. Ca urmare, s-a ajuns la concluzia că aceste obiecte sunt foarte *departe* de noi.

Astrofizicienii consideră acum că aceste obiecte se află în *centrele* unor galaxii depărtate și că energia lor *imensă* este datorată prezenței

în apropiere a unei *găuri negre* supermasive (milioane de mase solare).

Se crede că un *quasar* se poate manifesta în centrul unei galaxii doar în stadiile timpurii ale existenței ei; viața quasariilor este de ordinul miliardelor de ani.

Concluzii

- Universul, asemenea unui organism viu complex, s-a născut, s-a dezvoltat și, în zilele noastre, a atins maturitatea; viitorul său ne este încă neclar, el depinzând de parametri care, deocamdată, nu pot fi cunoscuți cu precizie.
- Dimensiunile Universului, precum și numărul obiectelor cosmice care alcătuiesc Universul cunoscut sunt impresionante.
- Procesele care duc la apariția sau la dispariția stelelor, la formarea galaxiilor ne sunt cunoscute și sunt confirmate de observațiile astronomilor.

Aplicații

- În ce galaxie se află sistemul nostru solar?
- Ce observații sprijină afirmația că Universul se extinde?
- Există stele care pot fi văzute ziua, cu ochiul liber?
- Care sunt cele mai vechi obiecte cosmice?

Relativitatea clasică și modernă, perspectivă asupra schimbării percepției despre Univers în secolul al XX-lea

După ce începând cu secolul al XVI-lea s-au pus bazele *fizicii clasice*, s-au stabilit legile fundamentale ale mecanicii, termodinamicii, electromagnetismului și opticii și s-a ajuns la o bună înțelegere a fenomenelor, la începutul secolului al XX-lea a apărut o criză a fizicii: au fost evidențiate fenomene legate de microcosmos care nu au putut fi explicate pe baza legilor stabilite.

În încercarea de a explica aceste fenomene, fizicieni remarcabili (Planck, Einstein, Bohr și mulți alții) au construit teorii noi (*mecanica cuantică, teoria relativității, electrodinamica cuantică*).

Astfel, *fizica modernă*, fizica secolului al XX-lea, a reușit să explice lumea microscopică, neînțeleasă corect de *fizica clasică*.

Important este faptul că descoperirea legilor *microcosmosului* a permis fizicienilor și astronomilor secolului al XX-lea să înțeleagă mai bine și să explice în mod corect *macrocosmosul*, adică *Universul* întreg.

Desigur, în secolul al XXI-lea, vor apărea atât *fapte noi*, cât și *teorii noi*, dar acestea nu vor face decât să rafineze cunoștințele noastre, *linia generală* a înțelegerii fenomenelor fiind *trasată*.

Observații

- În mod straniu, nu toți quasarii emit unde radio!
- Quasarii sunt studiați de astrofizicieni pentru că, privind departe în spațiu, primim de fapt, departe în trecut! Nu există quasari apropiați (adică tineri), ceea ce înseamnă că ei s-au format la începuturile Universului.

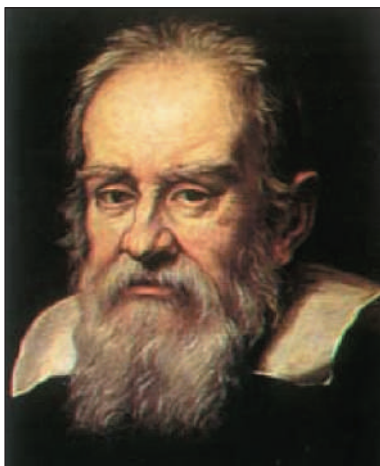
Deși, în mod evident nu avem cum să verificăm fără puțință de tăgadă cum s-a născut, cum a evoluat și cum va sfârși Universul, totuși, plecând de la *situația observată azi* și analizând evoluția Universului conform *legilor fizicii* (așa cum le cunoaștem azi) obținem o înțelegere acceptată de majoritatea savanților.

Proiecte de portofoliu Cercetare și documentare

- Organizați în clasă o dezbatere pe tema „Evoluția concepțiilor asupra sistemului solar”.
- Documentați-vă și întocmiți un referat cu tema: „Teorii moderne asupra Universului”.
- Alcătuiți un eseu pe tema: „Constelațiile – așa cum le vedem, așa cum sunt”.



Albert Einstein într-o fotografie de tinerețe.



Galileo Galilei (1564-1642)
astronom, matematician și fizician italian.

Sistemul de referință sau referențialul se obține alegând un corp de referință în raport cu care se studiază mișcarea.

Corpului de referință i se atașează un sistem de axe de coordonate și un ceasornic pentru a măsura timpul.

Observație

- Cuvântul *observator* va fi folosit pentru a desemna un personaj fictiv legat de un sistem de referință, care studiază fenomenele ce se petrec în sistemul de referință respectiv.

Știați că...

- **Principiul inerției** a fost descoperit de Galileo Galilei
- Un referențial în care se verifică **principiul inerției** se numește **referențial inerțial**.

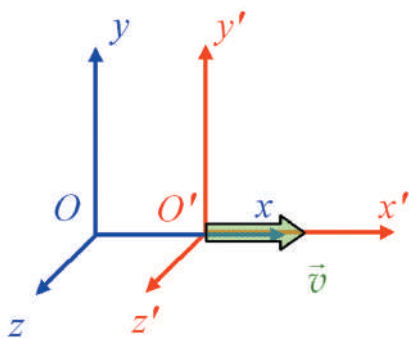


Fig. 17. Sisteme de referință inerțiale.

Relativitatea clasică (Galilei–Newton)

După cum ați învățat, descrierea mișcării unui corp, făcută de observatori care se află în mișcare unul față de celălalt, este *diferită*:

- *conducătorul* unui automobil va spune că *pasagerul din dreapta* sa este în *repaus*;

- *agentul* de circulație, aflat în intersecție, va spune că pasagerul *se deplasează* cu o viteză egală cu *viteza mașinii față de sol*;

- *șoferul* mașinii care vine din *sensul opus* va spune despre călător că se apropie de el cu o viteză având mărimea egală cu suma valorilor vitezelor vehiculelor față de sol.

Deși descrierile sunt diferite, ele prezintă același fenomen; de aceea, fiecare observator este îndreptățit să aleagă propriul său sistem de referință.

Rămâne de văzut dacă, trecând de la un referențial la altul, nu cumva se schimbă și *forma* legilor fizicii; dacă ar fi așa, ar exista un anumit referențial privilegiat, în care forma legilor fizicii ar fi cea mai simplă. Contemporanii lui Galilei credeau că un astfel de referențial ar fi Pământul, care rămâne nemișcat în centrul comun al sferelor celeste.

Pentru a decide care este situația reală, Galilei a ales două referențiale, pe care le-a considerat *referențiale inerțiale* și a studiat cum se desfășoară fenomenele față de fiecare dintre ele.

El a stabilit că desfășurarea *tuturor fenomenelor mecanice* pe care le-a putut realiza: *aruncarea unui corp pe diferite direcții, mișcarea unui leagăn, ciocnirea plastică sau elastică a două corpuri, rotația unui titirez* etc. se desfășoară pe o navă care se mișcă uniform (pe o apă liniștită) în același mod în care se desfășoară pe pământ ferm.

Generalizând rezultatele experimentelor sale, Galilei a enunțat un principiu, pe care azi îl numim *principiul relativității clasice (galileene)*:

Legile mecanicii au aceeași formă în orice referențial inerțial.

Transformările Galilei-Newton

Pentru a putea descrie corect mișcarea unui corp, văzută din referențiale inerțiale diferite, va trebui să alegem (în fiecare referențial inerțial) câte un sistem de axe de coordonate.

De aceea, Newton a folosit principiul relativității al lui Galilei pentru a scrie relațiile matematice dintre coordonatele unui mobil, reperat de doi observatori inerțiali.

Să considerăm două referențiale inerțiale \mathcal{R} și \mathcal{R}' în care alegem, respectiv, câte un sistem rectangular de axe de coordonate ($Oxyz$, și $O'x'y'z'$) și câte un sistem de măsurat timpul (t și t'), (fig. 17).

Facem următoarele ipoteze:

- \mathcal{R}' se mișcă față de \mathcal{R} cu viteza constantă \vec{v} , iar \mathcal{R} se mișcă față de \mathcal{R}' , cu viteza $\vec{v}' = -\vec{v}$;

■ duratele și distanțele se măsoară (în \mathcal{R} și în \mathcal{R}') cu etaloane *identice* din punct de vedere fizic;

■ Ox are orientarea lui \vec{v} , iar Ox, Oy, Oz și $O'x', O'y', O'z'$ sunt, respectiv, paralele și de același sens;

■ la momentele $t = t' = 0$, originile O și O' coincid.

Considerăm un eveniment care se petrece într-un punct anume, la un anumit moment de timp și să-l numim *eveniment spațio-temporal*; el va fi reperat față de \mathcal{R} și \mathcal{R}' prin coordonatele (x, y, z, t) , respectiv, (x', y', z', t') .

Urmărind figura 17 și ținând seama de ipoteza timpului absolut, se stabilesc ușor relațiile dintre aceste coordonate (de la \mathcal{R} la \mathcal{R}' și *invers*, de la \mathcal{R}' la \mathcal{R}), cunoscute sub numele de **transformările Galilei**:

$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = t \end{cases} \quad \text{și, invers:} \quad \begin{cases} x = x' + vt' \\ y = y' \\ z = z' \\ t = t' \end{cases}$$

În consecință, conform acestor relații de transformare a coordonatelor, *distanța* dintre două puncte și *durata* unui fenomen nu se schimbă prin trecerea de la un referențial inerțial la altul adică *rămân invariante*.

Teoria relativității restrânse

La sfârșitul secolului al XIX-lea, apăruse o problemă care a zdruncinat temeliile *fizicii clasice*: principiul relativității galileene se părea că nu poate fi extins asupra *tuturor* fenomenelor fizicii (în particular asupra fenomenelor *electromagnetice*).

Albert Michelson și Edward Morley au căutat în zadar să pună în evidență, printr-un experiment de *optică*, mișcarea Pământului față de un referențial pe care îl credeau absolut: „eterul” electromagnetic.

Rezultatul experimentului lui Michelson și Morley (repetat de mai multe ori pe parcursul a zece ani) a fost *negativ*.

Explicația rezultatului negativ a dus la considerarea mai multor ipoteze, dar cea care a reușit să explice corect fenomenul a fost ipoteza formulată de Einstein, care a construit o nouă teorie, *Teoria Relativității Restrânse*, bazată pe *două postulate*.

Aceste postulate *nu* conțin ipoteza *timpului absolut* și pleacă de la premisa că nu există un *observator privilegiat*, altfel spus, *timpul* și *spațiul* sunt *relative* (depind de observator).

Postulatele Teoriei Relativității Restrânse (Einstein)

Aceste postulate au fost publicate de Albert Einstein în articolul *Asupra electrodinamicii corpurilor în mișcare*, apărut în 1905.

Primul postulat:

Legile fizicii au aceeași formă în orice referențial inerțial.

Al doilea postulat:

Viteza luminii în vid are aceeași valoare în orice referențial inerțial.

Observații

- Newton era adeptul ipotezei timpului *absolut* (*timpul* nu depinde de referențialul ales); în consecință, Newton nu a inclus în ecuațiile transformărilor și *coordonata temporală*; noi vom face acest lucru, pentru a putea compara aceste relații cu cele scrise în cadrul *teoriei relativității einsteiniene*.
- O consecință a ipotezei *timpului absolut* este că interacțiunile s-ar putea transmite cu viteză *infinită*.



Albert Abraham Michelson
(1852-1931).



Edward Williams Morley
(1838-1923).

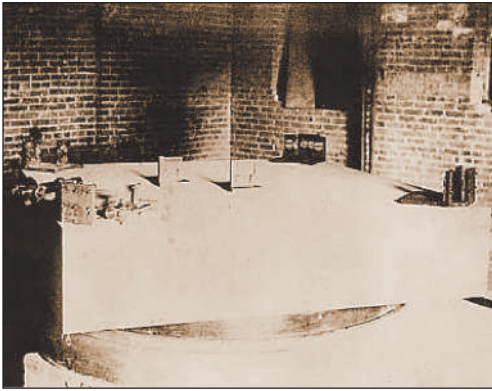


Fig. 18. Experimentul Michelson-Morley.

Experimentul a fost efectuat în anul 1881. Schema de principiu este următoarea: o rază de lumină monocromatică emisă de o sursă monocromatică S, cade pe o oglindă semitransparentă, unde se desparte în două raze: una este transmisă pe o oglindă, iar alta, reflectată, cade pe o altă oglindă. După reflexiile pe cele două oglinzi, oglinda semitransparentă permite ca cele două raze să ajungă interferate la ochiul observatorului.

Observație

- Conform celui de al doilea postulat, valoarea vitezei luminii în vid (c) este aceeași în orice referențial inerțial, așa că se poate alege axa temporală $x_0 = ct$ în \mathcal{R} și $x'_0 = ct'$ în \mathcal{R}' .



Antoon Hendrik Lorentz.

Introducerea primului postulat a fost necesară pentru a explica, fără alte ipoteze suplimentare, lipsite de suport fizic, rezultatul negativ al experimentului lui Michelson și Morley (fig. 18) și reprezintă o *extindere* firească a principiului relativității clasice, de la *fenomenele mecanice* la toate *fenomenele fizice*.

Al doilea postulat a fost introdus ca o consecință a faptului că interacțiunile se transmit cu *viteză finită*; cea mai mare valoare a vitezei cu care poate fi transmis un semnal fiind tocmai valoarea vitezei luminii în vid, adică 300 de mii de kilometri pe secundă.

Sincronizarea ceasurilor a doi observatori inerțiali aflați în mișcare relativă trebuie făcută cu ajutorul unui semnal luminos, ținând seama că rezultatul trebuie să satisfacă primul postulat (nu există un observator privilegiat: contează *numai* mișcarea relativă).

Conform acestui postulat, un observator față de care o sursă de lumină *se deplasează*, va înregistra *aceeași* valoare a vitezei luminii în vid ca și în cazul în care sursa *este în repaus*.

Desigur, acest lucru este neașteptat, dar toate experimentele realizate până acum confirmă acest comportament special al luminii.

Transformările Lorentz

Considerăm două referențiale inerțiale \mathcal{R} și \mathcal{R}' în care stabilim câte un sistem rectangular de axe de coordonate ($Oxyz$, respectiv $O'x'y'z'$) și câte un sistem de măsurat timpul (t , respectiv t'), fig. 17;

- cele două referențiale se deplasează unul față de altul cu viteză constantă: \mathcal{R}' se deplasează față de \mathcal{R} cu viteza \bar{v} , iar \mathcal{R} față de \mathcal{R}' cu viteza $\bar{v}' = -\bar{v}$;

- în referențialele \mathcal{R} și \mathcal{R}' , duratele și distanțele se măsoară cu etaloane (de timp, respectiv de lungime) identice din punct de vedere fizic;

- axa Ox' are orientarea lui \bar{v} , iar Ox , Oy , Oz și $O'x'$, $O'y'$, $O'z'$ sunt, respectiv, paralele și de același sens;

- la momentele $t = t' = 0$, cele două origini (O și O') coincid;

- un eveniment spațio-temporal este reperat față de \mathcal{R} și \mathcal{R}' prin coordonatele (x, y, z, t) și, respectiv, (x', y', z', t') ;

Relațiile între (x, y, z, t) și (x', y', z', t') , numite **transformările Lorentz**, sunt:

$$\left\{ \begin{array}{l} x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma(x - \beta ct) \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \frac{t - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma\left(t - \frac{\beta x}{c}\right) \end{array} \right. \quad \text{și, invers:} \quad \left\{ \begin{array}{l} x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma(x' + \beta ct') \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \frac{t' + \frac{vx'}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma\left(t' + \frac{\beta x'}{c}\right) \end{array} \right.$$

unde:

$$\beta = \frac{v}{c}, \quad |\beta| < 1 \text{ (raport întotdeauna subunitar) și } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

(factorul relativist, întotdeauna supraunitar).

Spațiul Minkovsky

Un punct în spațiul Minkovski reprezintă un *eveniment* ale cărui coordonate sunt tocmai cele care intră în transformările Lorentz: (x, y, z, t) .

De exemplu, un eveniment care are loc în originea sistemului de axe, la momentul $t = 0$, este evenimentul origine, $O(0,0,0,0)$.

Deplasarea unui punct material va fi reprezentată de o linie, numită *linie de univers*.

Paradoxuri relativiste

Consecințele celor două postulate ale *Teoriei relativității restrânse* pot fi stabilite prin raționament sau prin calcul direct (folosind transformările Lorentz).

Să analizăm unele dintre aceste consecințe.

■ **Relativitatea simultaneității** a două evenimente care *nu se petrec în același loc*.

De exemplu, dacă în \mathcal{R}' două evenimente care se desfășoară în locuri diferite se petrec *în același timp*, atunci în \mathcal{R} ele se vor petrece *successiv* (și reciproc).

■ **Relativitatea duratei** unui fenomen care se produce într-un anumit loc.

Dacă observatorul inerțial din \mathcal{R} măsoară durata unui fenomen (de exemplu perioada de oscilație a unei unde luminoase) care se desfășoară într-un punct fix din \mathcal{R}' și găsește valoarea $\Delta t = \tau_0$, atunci, pentru observatorul inerțial din \mathcal{R} (aflat deci, în mișcare față de punctul în care se desfășoară fenomenul) durata acestuia τ va fi *mai mare*:

$$\Delta t = \tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \gamma \tau_0 > \tau_0 \text{ și reciproc.}$$

Conform postulatelor lui Einstein, *ambii* observatori înregistrează o *creștere* a duratei unui anumit fenomen.

Observație

■ Această consecință este cunoscută sub numele de *dilatarea duratelor* și a dat naștere unui paradox, cunoscut sub numele de *paradoxul gemenilor* care a stat la baza multor scrieri sau filme științifico-fantastice.

■ **Relativitatea lungimilor** segmentelor paralele cu direcția vitezei relative a celor două referențiale inerțiale.



Hermann Minkowski (1864-1909).

Paradoxul gemenilor

Să presupunem că doi frați gemeni A și B (presupuși *identici* din punct de vedere biologic) se despart: A rămâne acasă, iar B pleacă cu o navă care se îndepărtează de casă cu o viteză \bar{v} suficient de mare pentru ca efectul dilatării timpului să poată fi pus în evidență (desigur, din punctul de vedere al lui B , fratele său A se îndepărtează de navă cu viteza $-\bar{v}$).

Conform teoriei relativității, fiecare dintre ei va înregistra o durată a unei bătaii de inimă a celuilalt frate *mai mare* decât a sa (*dilatarea duratelor*). Dacă s-ar putea reîntâlni (B revine acasă), ar putea stabili care dintre ei are dreptate, deși conform teoriei amândoi sunt la fel de îndreptățiți să susțină că fratele său este mai tânăr.

Soluția paradoxului rezidă în faptul că, în timpul accelerării (la plecare și la reîntâlnire), sistemul de referință al lui B *nu mai este inerțial*, deci *nu se mai pot folosi* consecințele teoriei relativității restrânse (teorie aplicabilă doar în referențiale inerțiale). Este interesant să precizăm că, în acord cu *Teoria relativității generale* (elaborate tot de către Einstein), fratele B rămâne într-adevăr mai tânăr, deoarece el a suferit accelerarea sau frânarea și ceasul său biologic *rămâne* într-adevăr *în urmă*.

Observații

- Această consecință este cunoscută sub numele de *contractia lungimilor*.
- Cei doi observatori *nu* vor observa însă nici o modificare a lungimilor obiectelor liniare care sunt *perpendiculare* pe viteza relativă.

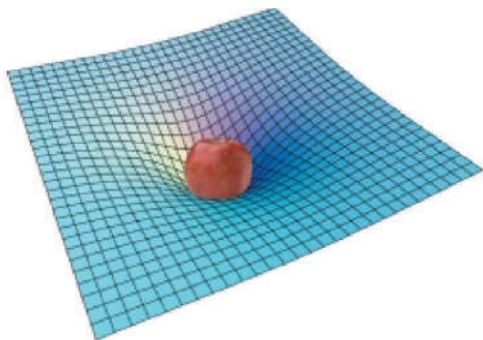


Fig. 19. Curbarea spațiului de către un corp masiv.



Fig. 20. Eclipsa totală de Soare din 1919.



Fig. 21. O lentilă gravitațională.

Dacă observatorul inerțial din \mathcal{R}' măsurând lungimea unui segment liniar (de exemplu, lungimea de undă a unei anumite radiații luminoase), aflat în repaus față de el și așezat pe direcția vitezei relative, găsește valoarea $l_0 = |x'_2 - x'_1|$, atunci, observatorul inerțial din \mathcal{R} (aflat deci, în mișcare față de obiect) va înregistra o lungime *mai mică*:

$$l = |x_2(t) - x_1(t)| = l_0 \sqrt{1 - \beta^2} = \frac{l_0}{\gamma} < l_0 \text{ și reciproc.}$$

Conform postulatelor lui Einstein, *ambii* observatori înregistrează o *micșorare* a lungimii unui anumit segment dispus pe direcția vitezei relative).

Concluzii

- *Teoria relativității restrânse* se aplică în *orice* referențial inerțial, dar consecințele ei nu pot fi puse în evidență decât pentru valori ale vitezelor comparabile cu valoarea vitezei luminii în vid, deoarece, pentru valori ale vitezelor mult mai mici decât mărimea vitezei luminii în vid ($c = 300$ de mii de kilometri pe secundă), transformările Lorentz se reduc la transformările Galilei.
- Conform celui de al doilea postulat al *Teoriei relativității restrânse*, valoarea vitezei luminii în vid este *constantă* pentru orice observator inerțial (*independent de starea sa de mișcare în raport cu sursa de lumină*); această afirmație (care a suscitat multe discuții și puncte de vedere contrare) este o *consecință* directă a procedurii de *sincronizare* a ceasurilor a doi observatori inerțiali propus de Einstein.

Relativitatea generală

Deși *Teoria relativității restrânse* descrie precis imensa majoritate a fenomenelor din natură, totuși, pentru a explica unele mici neconcordanțe, ea a trebuit să fie generalizată.

Tot Einstein este autorul *Teoriei relativității generale*, care arată că proprietățile spațiului și timpului se modifică în prezența unor *corpuri masive*; or, în Univers există într-adevăr corpuri cu mase uriașe, care pot chiar curba mersul unei raze de lumină.

În cadrul acestei teorii, Einstein a încercat să interpreteze atracția gravitațională prin *curbarea spațiului* de către corpurile masive din Univers (fig. 19).

Previziunile *Teoriei relativității generale* au fost confirmate prima oară în 1919 (în timpul unei eclipse de Soare) prin observarea curbării de către Soare a razelor care veneau de la o stea (fig. 20).

O altă confirmare este observarea (1925) *lentilelor gravitaționale* (vezi figura 21): curbarea razelor de lumină provenite de la un obiect cosmic îndepărtat, duce la formarea unor imagini multiple ale acestuia.

Aplicații

- Prin ce se deosebește primul postulat al Teoriei relativității restrânse de principiul relativității introdus de Galilei?
- Ce devin transformările Lorentz în cazul în care viteza relativă de deplasare a celor două referențiale inerțiale este cu mult mai mică decât valoarea vitezei luminii în vid?
- În ce constă fenomenul numit dilatarea duratelor?
- În ce constă fenomenul numit contracția lungimilor?
- Există confirmări ale teoriei relativității restrânse? Dar ale teoriei relativității generale?
- Explicați în ce constă paradoxul gemenilor.

Proiecte de portofoliu

Cercetare și documentare

- Organizați în clasă o dezbatere pe tema „Relativitate newtoniană, relativitate einsteiniană”.
- Împărțiți clasa pe grupe de elevi și fiecare grupă să prezinte cu argumente câte o consecință a Postulatelor Teoriei relativității restrânse.
- Întocmiți un referat pe tema: „Confirmări ale Teoriei relativității generale”.
- Întocmiți un referat pe tema: „Einstein – savant care a revoluționat bazele fizicii”.

TEST DE EVALUARE

I. Completați spațiile goale cu termenii potriviți:

Copernic, asemenea lui Ptolemeu considera că planetele execută mișcări uniforme. Modelul copernican al sistemului solar putea explica ușor variația planetelor.

În modelul lui Kepler, traiectoriile planetelor sunt având Soarele într-un focar; raza vectoare măsură egale în intervale de timp, iar pătratele perioadelor de revoluție ale planetelor sunt proporționale cu semiaxelor mari ale orbitelor.

Forța newtoniană de atracție gravitațională dintre două corpuri din Univers este direct proporțională cu fiecărui corp și proporțională cu distanței care le separă.

II. Enunțați:

1. Legile lui Kepler.
2. Legea atracției universale.
3. Legea lui Hubble.
4. Principiul relativității galileene.
5. Postulatele teoriei relativității restrânse.

III. Alegeți răspunsul pe care îl considerați corect:

1. Lungimea de undă a unei radiații emise de un obiect luminos care se apropie de observator este mai mare/mică decât în cazul în care obiectul ar fi fost nemișcat.
2. Un an-lumină are $9,5 \cdot 10^{15}$ km/ $9,5 \cdot 10^{12}$ km.
3. Elementele grele se pot forma în supernove prin **fisiune/fuziune** din nucleeele rezultate în urma exploziei stelei.

IV. Calculați:

1. Forța de atracție gravitațională dintre două corpuri sferice de mici dimensiuni, cu masele de un kilogram fiecare, dacă distanța dintre centrele lor este un metru.
2. Semiaxa mare a unei elipse, dacă suma distanțelor de la un punct oarecare de pe elipsă până la cele două focare este nouăsprezece unități astronomice.
3. Perioada de revoluție a planetei Saturn, dacă ea se află la aproximativ nouă unități astronomice de Soare.