

Bevezetés a csillagászatba 1.

cg1n1bc1

Forgácsné Dr. Dajka Emese

Dr. Petrovay Kristóf

Helyünk a Világegyetemben

A Föld alakja, mérete és forgása

A fölénk boruló égbolt gömb alakúnak látszik, ezért éggömbnek nevezzük.

A csillagok éggömbön való mozgása körív alakú, ezek középpontja az éggömb északi pólus, az ezen átmenő tengely a világtengely. Az éggömb mozgása a Föld tengely körüli mozgásának tükörképe, a világtengely a Föld tengelyének meghosszabbítása. Az éggömb látszó forgása kelet-nyugat irányú, teljes megfordulás ideje egy nap.

A világtengely vízszintessel bezárt szöge helyfüggő (mivel a Földfelszín görbült). Dupla távolság dupla annyi szögváltozást eredményez $\Rightarrow$ a Föld gömb alakú. Bizonyítja még az, hogy a tengeren közlekedő hajóknak először a vitorlája tűnik fel, és persze a Világúrból is gömbnek látszik. ☺

Az első mérések a Föld méretére vonatkozólag az ókorban voltak, ezek közül Eratoszthenész mérése volt a legpontosabb (i.e. 3-2. század). A bázisvonal Alexandriában, Syene-ben volt (Asszuán).

A Föld vagy az égbolt forog? $\Rightarrow$ kinematikailag mindegy, dinamikailag nem (lásd Foucault-ingás kísérletek)

A Föld keringése a Nap körül

Pro:

- * a belső bolygók (Merkúr, Vénusz) mozgása a Napéhoz kötött, attól egy bizonyos szögnél nem lehetnek (nincsenek) messzebb: ez a legnagyobb elongáció.
- * a külső bolygók a szembenállás esetén a legfényesebbek
- * már Arisztarkhosz is felvetette a heliocentrikus rendszert
- * A pályák viszont nem lehetnek körök $\Rightarrow$ epiciklusok kellene, azokkal pedig mindkét rendszer bonyolult.

Kopernikusz mellett szóló érvek:

- * Vénusz fázisait értelmezi
- * Jupiter-holdak felfedezése (Galilei)
- * ellipszispályák Kepler szerint $\Rightarrow$ a heliocentrikus rendszert jobban leírja
- * állócsillagok parallaxisa

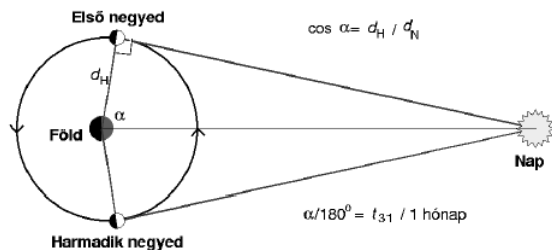
Parallaxis: a testek egymáshoz viszonyított helyzetének változása eltérő irányokból nézve. Csillagászatban az a szög, amely alatt egy szakasz egy külső pontból látszik.

Napi parallaxis: bázisvonal a földfelszín két pontja

Évi parallaxis: bázisvonal a földpálya két átellenes pontja. . Az égitestek parallaktikus szög-elmozdulását a Föld Nap körüli keringése során leírt pályája két szélső helyzetében végzett megfigyelés-ből határozzák meg. Minél távolabbi egy csillag, annál kisebb ez a szög-elmozdulás. Egy égitest parallaxisa alatt azt a szöget értik, amekkorának az adott testtől a Nap–Föld középtávolság (1 csillagászati egység) látszik.

A Naprendszer felmérése

Arisztarkhosz: ókori mérések, alapelvek feljegyzése (már korábban is alkalmazták őket)

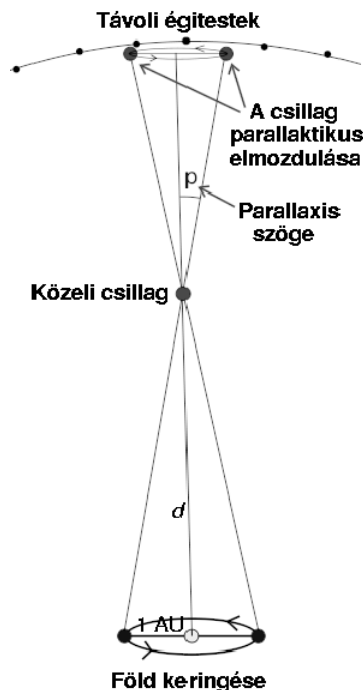


- * az újkori mérések alapja a parallaxis elve
- * 1 Csillagászati Egység (Astronomical Unit): 150 millió kilométer (Nap- Föld átlagos távolsága)

Ha a Nap egy narancs

- * a Föld egy kavics tőle 10 méterre
- * a Jupiter egy cseresznye tőle 1 háztömbnyire
- * az α egy másik narancs tőle 2000 kilométerre (Budapest-Madrid)

Távolságmérés trigonometrikus parallaxissal (évi parallaxis)



$$\text{Ha } p \text{ nagyon kicsi} \Rightarrow \tan p \approx p(\text{rad}) \Rightarrow d(\text{AU}) = \frac{1}{p}(\text{rad})$$

Azonban p minden csillag esetén jóval kisebb, mint $1''$, ezért jobb távolságegység a parszek: $d(\text{pc}) = \frac{1}{p}('')$. Egy **parszek** az a távolság, amelyről nézve az 1 CSE távolság merőleges rálátás esetén $1''$ szög alatt látszik. (kpc, Mpc, Gpc is van)

$$1 \text{ pc} = 3.26 \text{ fényév} \approx 206000 \text{ AU}$$

Egy fényév (lightyear) az a távolság, amit a fény egy év alatt tesz meg vákuumban.

$$1 \text{ fényév} = 0.3066 \text{ pc} = 63240 \text{ CSE} = 9.4605 \cdot 10^{15} \text{ m}$$

A Tejútrendszer

Kant és Herschel a 18. század végén felvetette a Tejút létezését: ez sok halvány csillag tömkelege. Látszólag 2-3 kpc átmérőjű lapos korongban oszlanak el. Föld kb. a közepén...

Shapley, 20. század eleje: a Tejútrendszer több mint 30kpc átmérőjű, mi a centrumtól kifelé félúton vagyunk.

Távolságmérés: cefeida parallaxissal: a Cefeidák pulzáló változócsillagok; abszolút fényességük és a pulzáció periódusa között összefüggés van $\Rightarrow$ valódi fényességet a látszóval összevetve a távolságuk meghatározható.

Korábbi téves kép oka a csillagközi fényelnyelés volt.

Extragalaxisok

Régóta ismert, hogy a csillagok között fénylő diffúz ködök is láthatók. Többségük világító gázfelhő a Tejútrendszerben. De: 20 század elején egyes ködökben olyan csillagokat figyeltek meg, amelyek igen távolinak tűntek... Lehet, hogy egyes ködök a Tejúton (görögül Galaxis) kívül vannak, vagyis extragalaktikusak? - Shapley-Curtis vita (1920).

Hubble, 1923: Cefeidák az Androméda-ködben $\Rightarrow$ ez egy extragalaxis. Távolsága: 750 kpc

Galaxishalmazok: galaxisok $\subset$ galaxiscsoportok / galaxishalmazok $\subset$ szuperhalmazok (Tejútrendszer $\subset$ Lokális Csoport $\subset$ Virgo Szuperhalmaz)

Még nagyobb mértékben óriási üregek fedezhetők fel, kb. 100 Mpc nagyságúak.

Hubble felfedezte, hogy a Galaxisok színekpvonalai a vörös felé tolódtak el $\Rightarrow$ ez a **Doppler-effektus** $\Rightarrow$ távolodást jelent.

Doppler-effektus

Fellép, ha mozog a hullámforrás és áll a megfigyelő.

Megfigyelő számára

- * a közeledő forrás frekvenciája nő $\Delta\lambda \equiv \lambda - \lambda_0 < 0$
- * a távolodó forrás frekvenciája csökken $\Delta\lambda \equiv \lambda - \lambda_0 > 0$

A **vöröseltolódás** mértéke $z \equiv \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$; $v \ll c$, ahol v a forrás távolodási sebessége, c a hullámterjedési sebessége.

Hubble törvény

Galaxisok színpályaival el vannak tolódva a vörös felé, melynek oka a Doppler-effektus $\Rightarrow$ távolodás (Hubble). $v = H \cdot d$; $H = 72 \text{ km} / \text{s} / \text{Mpc}$ a Hubble törvény és a Hubble-állandó.

Mit jelent az Univerzum tágulása? $\rightarrow$ Nem vagyunk kitüntetett helyzetben, minden megfigyelő, mindenütt ugyanazt látja.

Az anyag sűrűsége csökken, de minden pontban egyaránt $\rightarrow$ véges idővel ezelőtt végtelen volt a sűrűség (minden pontban), ez az Ősrobbanás elmélete; az Univerzum mindig homogén volt, kora 13.7 milliárd év.

Végtelen-e a világ? $\Rightarrow$ nem tudjuk

Kétdimenziós analógiák

- * gömbfelület: határtalan, de véges, a középpont a 4. dimenzióban
- * euklideszi sík: végtelen
- * nyeregfelület: végtelen

A csillagászat felosztása

Szférikus csillagászat: Az égitestek éggömbön elfoglalt látszó helyzetével és mozgásával kapcsolatos kérdésekkel foglalkozik.

Égi mechanika: Az égitestek valódi, térbeli mozgását vizsgálja olyan rendszerekben, ahol mozgásukat kisszámú más égitest hatása határozza meg (pl. Naprendszer, kettőscsillagok, galaxiscsoportok...)

Galaktikus csillagászat: (régőbbi neve: sztellársztronómia) Az égitestek valódi, térbeli eloszlását és mozgását vizsgálja olyan rendszerekben, ahol mozgásukat nagyszámú más égitest együttes hatása határozza meg (pl. galaxisok, csillaghalmazok, galaxishalmazok...) Szükségképpen statisztikai módszereket alkalmaz.

Asztrofizika: Az egyes égitestek mibenlétét, összetételét, szerkezetét, fejlődését vizsgálja. (Pl. csillagok fizikája, diffúz anyag fizikája, galaxisnukleuszok fizikája, csillaglégkörök fizikája, napfizika, planetológia...)

Kozmológia: Az Univerzum egészének nagyléptékű szerkezetét és fejlődését vizsgálja, észlelési és elméleti oldalról.

További, olykor előforduló elnevezések:

Asztrometria: a szférikus csillagászat és az égi mechanika gyűjtőneve

Asztrodinamika: az égi mechanika és a galaktikus csillagászat gyűjtőneve

Kozmogónia: régies kifejezés, az égitestek keletkezésének és fejlődésének tana. Ma az asztrofizika elválaszthatatlan része.

Tájékozódás az égbolton

Vannak olyan asztrometria műholdak, amelyek a csillagok pontos helyét hivatottak meghatározni.

Tematika

- * Csillagászati koordinátarendszerek
- * Csillagászati fogalmak: rektaszcenzió, deklináció, óraszög, azimut...
- * Az égitestek látszó napi mozgása
- * Cirkumpolaritás fogalma, feltétele
- * A csillagok és csillagképek hivatalos jelölési rendszere
- * Magnitúdók

Csillagászati koordinátarendszerek

Az égitestek égen elfoglalt helyzetét legegyszerűbben a különböző koordinátarendszerek segítségével lehet megadni.

Éggömb: a koordinátarendszer kezdőpontja körüli tetszőleges sugarú gömb. 2 szférikus koordináta kell.

Szükséges:

- * egy kiindulási irány
- * kiindulási iránytól az alapsíkban mérik a hosszúságot, egy előre definiált körüljárási irány mentén az égitest talppontjáig
- * a talppontot az égitesten átmenő, a póluspontokon fektetett gömbi fél-főkör metszi ki az alapkörből
- * a szélességet az alapsíktól a P póluspont felé mérik

Csoportosítás:

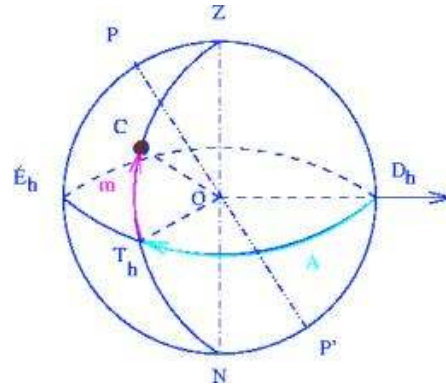
- * Topocentrikus: origó a megfigyelőnél
- * Geocentrikus: origó a Föld középpontjában
- * Heliocentrikus: Nap középpontjában az origó
- * Galaktocentrikus: Galaxis kp-hoz rögzített kezdőpont

Horizontális koordináta rendszer

Lehet: topocentrikus és geocentrikus

Fogalmak és jelölések:

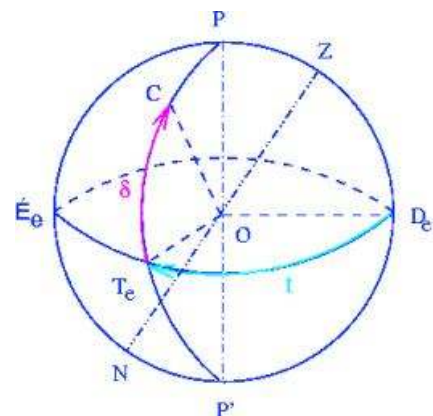
- * horizont
- * északi és déli póluspont
- * zenit
- * nadir
- * meridián
- * horizont észak- és délpontja



A horizont síkja a megfigyelőnek megfelelő pontban (mely egyúttal a koordináta-rendszer kezdőpontja is) a függőön irányára állított merőleges sík. A horizont síkja metszi ki az éggömbből a horizontot. A függőön irányát megadó egyenes két pontban metszi az éggömböt: a megfigyelő fölött helyezkedik el a zenit, míg alatta a nadir. A horizontális talppont (T_h) helyzetét az azimut (A) adjuk meg, mely a horizont délpontját (D_h) az origóval, valamint a horizontális talppontot (T_h) az origóval összekötő félegyenesek által bezárt szög. Az égitest magassága (m) az origót az égitest szférikus helyével (C) összekötő félegyenesnek az origót a horizontális talpponttal (T_h) összekötő félegyenessel bezárt szöge. Az azimutot és a magasságot fokban mérjük, $A = [0, 360^\circ]$, $m = [-90, 90^\circ]$

I. egyenlítői koordináta rendszer

- * Földközéppontú koordináta-rendszer
- * C : égitest szférikus helye
- * P, P' : forgástengely jelöli ki
- * Alapsík: Egyenlítő síkja
- * Z, N : függőön irányja határozza meg
- * OD_e : kiindulási irány
- * T_e : egyenlítői talppont
- * δ : deklináció $[-90^\circ, 90^\circ]$
- * t : óraszög 0-24h az óra járásával megegyező irányban



A deklináció állandó, óraszöge csillagidőben egyenletesen változik.

A csillagászati távcsöveket órágép forgatja a csillag irányába.

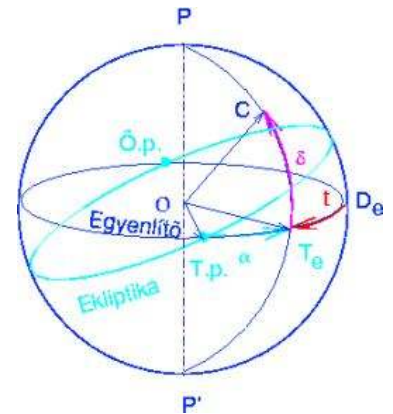
- * Ekliptika: a Nap évi útja az éggömbön; egy gömbi főkör, az égi egyenlítőt a tavasz-pontban és az ősypontban metszi.

A Napnak négy nevezetes helyzetét különböztetjük meg:

- * deklináció nulla: tavasz/őszpont $\Rightarrow$ nappal és éjszaka hossza megegyezik
- * deklináció legkisebb: télpont $\Rightarrow$ téli napforduló, legrövidebb nappal
- * deklináció legnagyobb: nyárpont $\Rightarrow$ nyári napforduló, a nappal a leghosszabb az év folyamán

II. egyenlítői koordináta rendszer

- * C: csillag szférikus helye az éggömbön
- * forgástengely: P és P'
- * égi egyenlítő: egyenlítő síkja metszi ki
- * ekliptika: Nap éves mozgása jelöli ki, tavasz- (Υ) és ősypontban (Ω) metszi az égi egyenlítőt
- * kiindulási pont: tavaszpont
- * középponttól tavaszpont felé mutató félegyenes a kiindulás iránya
- * tavaszpontból (α) rektaszценzió: origót a tavaszponttal ősypont közötti egyenes és OT_e egyenes szöge
- * deklináció δ
- * T_e a talppont
- * Függ: tavaszponttól, ennek helyzete is változik
- * Állócsillagoknak a helyzetét adják meg, mert azok csak kicsit változtatnak helyet, a Naprendszerbeli objektumok pedig nagyon.
- * Epocha: milyen időpontra adják meg a koordinátákat az égitestre



Égitestek láthatóságának feltétele

Két mennyiség határozza meg: megfigyelő földrajzi szélessége és az égitest deklinációja

Mivel a Föld nyugatról keleti irányba forog, az égitestek látszólag keletről nyugat felé olyan gömbi körökön mozognak, melyek síkjai merőlegesek a Föld forgástengelyére (és párhuzamosak az égi egyenlítő síkjával). Ha egy csillag napi pályája olyan, hogy teljes egészében a horizont fölött marad, akkor az adott csillag cirkumpoláris. A cirkumpoláris csillagok az év teljes egészében láthatók az adott földrajzi helyről. Ha a csillag pályája metszi a horizontot, akkor az adott csillag felkel és lenyugszik. Kelés akkor történik, ha a csillag horizont fölötti magassága (m) negatív értékből pozitív értékbe vált. Nyugvásról akkor beszélünk, ha az égitest horizont fölötti magassága pozitív értékből negatív értékre vált. Amikor az égitest napi pályája során eléri a legnagyobb horizont fölötti magasságot, akkor az égitest felső kulminációban van, delel. A legkisebb horizont fölötti magasság elérését alsó kulminációnak, vagy alsó delelésnek nevezzük. Ha a megfigyelő az északi sarkon tartózkodik, akkor minden csillag cirkumpoláris. Ha a megfigyelő a (földi) egyenlítőn tartózkodik, akkor minden csillag felkel és lenyugszik.

Cirkumpoláris: mindig a H felett $\delta > 90^\circ - \phi$ (északi megfigyelő)

Kelés/nyugvás: $\phi - 90^\circ < \delta < 90^\circ - \phi$

Magnitúdó skála

A fennmaradt írásos emlék alapján a csillagokat először i.e. 127-ben Hipparkhosz, görög csillagász osztályozta fényességük alapján. A csillagokat hat osztályba sorolta; a legfényesebb csillagokat az első, a szabad szemmel még láthatóakat a hatodik osztályba. Hipparkhosz lényegében a csillagok Földről látszó fényességét határozta meg, ami nyilvánvalóan a csillag távolságától is függ (hiszen, amelyik csillag kétszer messzebb van, az négyszer halványabbnak látszik). Ezért a XIX. században olyan fényesség skálát (magnitúdó skála) vezettek be, amellyel azt adják meg, hogy a csillag milyen fényesnek látszana 10 parszek távolságban, ez az abszolút fényesség. A parszek definíció szerint az a távolság, amelyből nézve a Föld Nap körüli keringésének közepes távolsága (1 csillagászati egység, 1 CSE) egy ívmásodperc szög alatt látszik.

Korábban a csillagok fényességét olyan fényrendben adták meg, ami az emberi szem fényességérzetén alapult, míg az új műszerek a fény erősségét, intenzitását adták meg. Azonban a szem egy tízszer több energiát sugározó fényforrást (intenzitása tízszeres) csak kétszer fényesebbnek érzékel. Ernst Henrich Weber és Gustav Theodor Fechner nevéhez fűződik annak, az 1840-es években tett felismerése, hogy az ember érzetei (látás, hallás, tapintás) az ingerek logaritmusaival arányosak (Weber--Fechner-féle pszichofizikai törvény). Ennek köszönhetően a szem viszonylag széles ingertartományt képes feldolgozni. Például a Nap és a még éppen látható csillagok közötti fényességkülönbség 33 fényrend, míg azok intenzitásaránya 1:10 billió. Norma Robert Pogson (fotometriai úton) az 1856-ban dolgozta ki a csillagfényességek mérésének módszerét. A csillagok látszólagos és abszolút fényességét magnitúdóban mérjük – a magnitúdó görög szó, jelentése nagyság –, ebben a mértékegységben mérve a fényes csillagok magnitúdója negatív, míg a halványaké egyre nagyobb pozitív szám. A csillag fényessége magnitúdóban mérve jó egyezést mutat a Hipparkhosz által megállapított fényrenddel, hiszen a fényesebb csillagok fényrendje nála 1 volt, míg a leghalványabbaké 6.

Etaloncsillag:

- * történelmileg a Sarkcsillag, de kiderült, hogy változtatja a fényét
- * Polsequenz: a kiválasztott etaloncsillagok halmaza
- * $m_A - m_B = -2,5 \cdot \log[F_A/F_B] \Rightarrow F$ a szemünkbe érkező fényességi fluxus

Látszólagos magnitúdó fajtái:

- * m_v vizuális magnitúdó: emberi szem által érzékelt
- * m_{ph} fotografikus magnitúdó: fotólemezen mért
- * m_{bol} bolometrikus magnitúdó: légkör abszorpciója nélküli magnitúdó, és az adott érzékelő rendszer torzítása nélküli
- * bolometrikus korrekció: m_v és m_{bol} különbsége

Abszolút magnitúdó:

Egy csillag abszolút magnitúdója megegyezik a vele fizikai és kémiai állapotában tökéletesen megegyező csillagnak a látszó magnitúdójával 10 parszek távolságból mérve

Látszó és abszolút magnitúdó kapcsolata:

- * $m - M = -5 + 5 \cdot \log r + A$, ahol
- * $m - M$ a távolsági modulus; A az intersztelláris abszorpció

A Nap I.

Helyünk a Naprendszerben

Merkúr, Vénusz, Föld, Mars, Jupiter, Szaturnusz, Uránusz, Neptunusz

A XVI. században a Napot bolygónak gondolták. A méreteit megpróbálták felmérni (8x Föld-tömeg)

(Csízió vagyis a csillagászati tudománynak rövid és értelmes leírás)

A Napot egy szűrővel ellátott távcsővel figyeljük, viszonylag élesen látható a korong.

Szélsőtétel törvénye: geometriai okok $\Rightarrow$ a Nap gömbölyű

Sötét területek: hidegebbek

$\Rightarrow$ Napkorong, miért látjuk hidegebbnek??? $\Rightarrow$ a Nap forog, és a közepén sokkal mélyebb rétegekbe látunk le

Ezt könnyű korrigálni, legtöbb felvételen meg is csinálják a korrekciót

Napfolt: közepén egy sötétebb terület, kívül picivel halványabb, a foltok szeretnek csoportba rendeződni

A Nap adatai számokban

- * Kor: $4,5 \times 10^9$ év
- * Tömeg: $1,99 \times 10^{30}$ kg
- * Sugár 696000 km
- * Felszíni (effektív) hőmérséklet: 5785°C
- * Felszíni gravitációs gyorsulás 274 m/s^2
- * Szökési seb. 628 km/s
- * Sugárzási teljesítmény $3,86 \times 10^{26} \text{ W}$
- * Tömegvesztés: 109 kg/s
- * Közepes N-F távolság $150 \times 10^6 \text{ km}$
- * Szinodikus forgási periódus (Carrington-meridiáné) 27,28 nap
- * Forgástengely dőlése az ekliptika normálisához $7,25^\circ$

Miért tanulmányozzuk?

A Nap és a földi éghajlat kapcsolata

- * fákna az évgyűrű vastagsága (hosszú távú vizsgálat esetén) segítségével kimutatható a Napciklus
- * Napciklus: a foltok okoznak fényváltozást, 11 év

Űridőjárás

- * Mágneses hatás
- * Sarki fény a napkitörés hatására
- * Napkitörést jó tudni, fluxus, irány, mert az űrben lévő berendezéseket károsíthatja (elektromos)
- * napkitörés gond lehet atomerőműveknél is (ha nagy)
- * ember az űrben $\Rightarrow$ részecskeáram árt az egészségnek

Napunk, mint csillag

- * modellezést segíti más rendszerekben
- * Legnagyobb fizikai laboratóriumunk
- * plazmafizika
- * Napon figyelik ezeket a folyamatokat

A Nap anyaga

- * ionizált gáz = plazma
- * (dekorboltan lehet „plazma”lámpákat venni)
- * az Univerzum látható anyagának zöme is plazma, belső áramlások
- * szabad töltések mozgása $\Rightarrow$ elektromos áramot jelent $\Rightarrow$ mágneses tér
- * magneto-hidrodinamika MHD
- * töltött részecskék mozgása $\Rightarrow$ E tér $\Rightarrow$ M tér $\Rightarrow$ töltések mozgására visszahat

A Nap szerkezete

A Nap belsejéről nincs optikai információnk $\Rightarrow$ elméletileg vizsgálható jelenségekörnek tartották

Elméleti megfontolások: egy ilyen méretű és tömegű gázgömbnek kiszámítható a belső nyomás-ill. hőmérséklet-rétegződése, továbbá az, hogy az adott hőmérsékleten és nyomásokon milyen fizikai folyamatok történhetnek

Hidrodinamikai modell gázgömbre: hogyan változik a nyomás, felszíni adatok alapján modellezték a belső szerkezetet

Ezek a belső struktúrák ma már empirikusan is vizsgálhatók, mivel kétfajta fluxus áthatol a nap-anyagon: a neutrínóké és a nyomáshullámoké.

neutrínó: a termonukleáris fúzió során keletkezik, nem szeret kölcsönhatni az anyaggal, akadálytalanul áramlik, könnyedén kijut, valós időben közvetítenek információt a Nap állapotáról.

Kísérleteket végeznek neutrínókkal, azok viszont nehezen detektálhatók $\Rightarrow$ nagy detektorokra van szükség.

Homestake kísérlet

- * az egyik legnagyobb kísérlet
- * (^{37}Cl kísérlet) hatalmas tartályban
- * legalább 1-2 neutrínó hatása detektálható
- * rádiókémiai kísérlet
- * a neutrínó találkozik egy klórral $\Rightarrow$ argon lesz belőle (pár atomnyi)
- * folyamatos áramoltatás egy szénszálal rendszeren, a szénszálakon fennakad az argon
- * ez észlelte először a Napból érkező neutrínókat

Gallex kísérlet

- * Galliumos kísérlet
- * teljesen európai kísérlet (helyileg Olaszországban található)
- * alacsonyabb frekvenciát észlel
- * bebizonyította, hogy a Napban proton-proton átalakulás zajlik le

Superkamiokande

- * részecskefizikára építették, a standard modell elméletének igazolására (proton egy idő múlva elbomlik...)
- * nagyobb tartály kell
- * vizes kísérletek (nehésvíz)
- * photo multiplier-ek érzékelik a neutrínók által kiváltott fényfelvillanást
- * észleli a Nap-neutrínókat is
- * olyan neutrínó detektor, amely a Magellán felhőben keletkezett neutrínókat is észlelt már (1986A jelű szupernóva)
- * a vizes kísérletek meg tudják mondani az irányfüggést

Borexino

- * még épülőben van
- * tesztfázis
- * pontosítja majd a neutrínó méréseket

Sudbury Neutrino Observatory

- * áttörést jelentett
- * kevesebb Napból érkező neutrínót detektáltak, mint amit az elmélet alapján vártak (csak az 1/3-a érkezett be)

Egy új probléma merült fel a napkutatás területén, a **Solar Neutrino Puzzle** – Napneutrínó-rejtély-

Felmerült, hogy a Standard Napmodell hibás, de ennek az elméletnek ellentmondanak a helioszeizmikus mérések.

A másik megoldás a problémára a **neutrínó-oszcilláció**: az oszcilláció csak abban az esetben következhet be, ha a neutrínók nyugalmi tömeggel rendelkeznek, ami bizonyos tulajdonságokat hordoz magában.

A neutrínókat három csoportba oszthatjuk:

- * elektron neutrínó $\leftarrow$ kísérletek erre voltak érzékenyek
 - * átalakulhat útközben a vákuumoszcilláció és az anyagdominált oszcilláció következtében
 - * tau neutrínó }
 - * müon neutrínó }
- ezek is átalakulhatnak

Hibalehetőségek kiküszöbölése: hosszabb ideig tartanak a mérések, neutronnyaláb ráállítása a detektorra (gondot okozhat a bázistávolság)

A Borexino kísérlet alkalmas lesz mindhárom neutrínó észlelésére.

A neutrínó-fluxus érzékeny a Nap-Föld távolság változására, a Föld tengely körüli forgására.

Felmerül a kérdés: Föld forgása gyengíti vagy erősíti ezt az oszcillációt??

$\Rightarrow$ A napi ingadozás is segíthet, az anyagdominált oszcillációt tekintve.

Helioszeizmológia

Az 1960as években spektroheliográf segítségével fedezték fel a Nap 5 perces oszcillációit. Tanulmányozva ezeket, világossá vált, hogy ezen oszcillációk a Nap nemradiális p-módusú sajátrezgései, amely a fotoszféra alatti üregben, mintegy „bezárva” mennek végbe. A Nap esetében megfigyelhető óriási számú, különböző sajátrezgések lehetőséget nyújtanak számunkra a Nap belső szerkezetének feltérképezésére, ugyanis a különböző sajátrezgések a Nap más és más rétegeiben érik el maximális amplitúdójukat

- * F-módus – nagyon kevés, felületi rengés
- * g- módus – magból, eddig még nem észlelték
- * Meg kell említeni, hogy Napunknak nemcsak a fentebb említett 5perces oszcillációi léteznek.

A Nap p-módusú sajátrezgéséről dopplerogramokat alkotnak.

A különböző hullámok különböző mélységig hatolnak be $\Rightarrow$ hangsebesség profil megváltozása (a modellek alapján számolt hangsebességtől való eltérés)

A g-módus az, ami igazán lehatol a mag mélységeibe.

A helioszeizmológia alapján kialakult az asztroszeizmológia $\Rightarrow$ a csillagok különböző rezgéseit vizsgálja.

A mostani műszerek érzékenysége már apró fényváltozásokat is kimutat $\Rightarrow$ Fourier-analógia $\Rightarrow$ feltérképezhető rezgési módus a csillagokon.

Helioszeizmológia eredménye: modellek egész jók, de 1-2 területnél probléma

A Nap belső felépítése

A napbelső négy régióra osztható a benne lejátszódó folyamatoknak megfelelően. A Nap energiatermelése a magban zajlik, ami a sugár 25%-áig terjed. Az energia a Nap középponti magjából kifelé a sugárzási zónán keresztül egyrészt sugárzás (főleg gamma, ill. röntgen) útján, másrészt a konvektív zónában (sugár 70%-áig) konvekciós mozgások révén jut a felszínre. A sugárzási és a konvektív zóna között egy vékony átmeneti réteg található, melyet **tachoklínának** neveznek, és amely fontos szerepet játszik a Nap mágneses terének kialakításában.

Sugárzási/radiatív zóna: mag belsejében a termonukleáris reakciók során nagy mennyiségű foton szabadul fel

A fotonok számára az anyag erősen nem átlátszó, energiát veszítenek a mozgás során, ütközések pályán haladnak. A nagyenergiájú fotonok a látható fény tartományába hűlve érik el a konvektív zónát.

Konvektív zóna: az energiátanszport úgynevezett cellákban megy végbe; a zóna alján melegebb területek kitérnek $\Rightarrow$ felhajtóerő hat rá, felfelé kezd nyomni, felhajtó erő egye inkább nő felfelé, a tömegelemek egyre gyorsabban mozognak.

A Nap szerkezete

A Nap magja

A Nap tömegének a fele középpontja körül sűrűsödik, a legbelső 1,5%-nyi térfogatban, amely a sugár 25%-áig terjed. Itt keletkezik az energia 99%-a. Ebben a középső magban folyik az alapvető fúziós (termonukleáris) reakció, amelynek során a hidrogénatomok héliummagokká olvadnak össze, és a tömegkülönbség energia formájában szabadul fel. A Nap energiasugárzása tehát tömegvesztéssel jár, a jelenlegi $3,8 \cdot 10^{26}$ W teljesítmény fenntartásához másodpercenként $5 \cdot 10^9$ kg tömegvesztés szükséges.

A fent említett reakció, melynek során a hidrogénatommagok héliummagokká kapcsolódnak össze, igen érzékeny a hőmérsékleti viszonyokra, illetve a mag sűrűségére. Ugyanis az egyes hidrogénatommagoknak akkora energiával kell ütközniük (kinetikus energia), hogy legyőzzék a köztük lévő elektrosztatikus tasztást (Coulomb-gát). A Nap középpontjában a hőmérséklet kb. 15000000°C míg a sűrűség 150 g/cm^3 . Mind a hőmérséklet, mind a sűrűség a centrumból kifelé haladva csökken. A hidrogénégés a mag külső részét elérve, a Nap sugarának 25%-ánál teljesen leáll. Ennél a pontnál a hőmérséklet már csak fele a centrális értéknek, míg a sűrűség kb. a 20 g/cm^3 értékre csökken.

Sugárzási zóna

A Nap sugárzási zónája a mag külső részétől a konvektív zóna alatt elhelyezkedő átmeneti rétegig, vagyis a tachoklínáig terjed (tehát a Nap sugarának 25%-ától 70%-áig). A radiatív vagy sugárzási zóna nevét a benne zajló sugárzási energiátanszportról kapta. A csillagok belsejében keletkező hatalmas mennyiségű energia a külső tér felé áramlik. Ezt nevezzük energiátanszportnak, melynek három alapvető formája ismert:

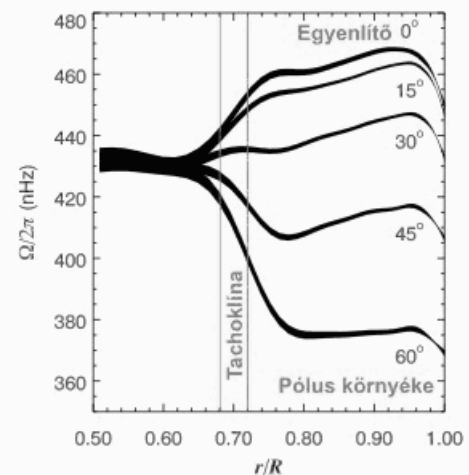
- * sugárzás (radiatív energiátanszport)
- * konvekció (áramlás)
- * kondukció (vezetés)

A három típus közül a Nap esetén csak az első kettő valósul meg. A kondukciós energiatranszport csak a degenerált állapotban lévő gázt tartalmazó fehér törpecsillagok esetén jelentős, ezért az energiatranszport e formájával nem foglalkozunk. Mint azt már korábban említettük, a napbelső négy rétegének elnevezésekor szem előtt tartották, hogy elnevezésük utaljon a bennük zajló folyamatokra. Ezért a sugárzási energiatranszportról részletesen a helyütt szólnunk, míg a konvektív energiatranszportról a konvektív zóna jellemzésénél adunk ismertetőt.

Mint azt a Nap magjának jellemzésekor írtuk, a termonukleáris reakció útján keletkező energia főleg elektromágneses sugárzás és neutrínók formájában szabadul fel. A keletkező neutrínók nagy áthatolóképességük folytán elhagyják a Nap magját. A fotonok számára azonban a mag anyaga gyakorlatilag átlátszatlan, az állandó ütközések, szóródás miatt e folyamatok nagyon lelassítják a fotonok számára a kijutást. Eközben az elnyelési és kisugárzási folyamatok során a fotonok energiája egyre csökken. Így egy foton kijutásának karakterisztikus ideje millió éves nagyságrendű. A Nap sugárzási zónájában a sűrűség 20 g/cm^3 -ról mindössze $0,2 \text{ g/cm}^3$ -ra csökken, míg a hőmérséklet 7000000°C -ról 2000000°C -ra.

Tachoklína

A Nap sugárzási és konvektív zónája között egy vékony, átmeneti réteg található, a tachoklína. A konvektív zónában megfigyelhető plazmamozgások (differenciális rotáció, részletesen lásd később) a tachoklínában lassan átmennek a sugárzási zónában megfigyelhető merev test-szerű forgásba. Ezen vékony réteg felfedezése az utóbbi évek napfizikai megfigyeléseinek köszönhetően vált lehetővé. Ugyanis korábbi napmodellekben feltételezték, hogy a konvektív zónában megfigyelhető plazmamozgások, azaz a differenciális rotáció mélyen behatol a sugárzási zónába. Azonban a jelenlegi megfigyelések szerint a differenciális rotációból merev test forgásba való átmenet ebben az igen vékony rétegben, azaz a tachoklínában megy végbe. Mai ismereteink szerint a Nap mágneses terének kialakításában is igen fontos szerepe van a tachoklíának. Emellett úgy tűnik, hogy ebben a vékony átmeneti rétegben a kémiai összetételben is hirtelen változások következnek be.



Konvektív zóna

A konvektív zóna a napbelső legkülső tartománya, kiterjedését tekintve a Nap felszínétől kb. 200000 km mélységig terjed. A konvektív zóna aljánál a hőmérséklet kb. 2000000°C . Ez a "hideg", már elegendő ahhoz, hogy a nehezebb ionok (mint például a szén, nitrogén, oxigén, kalcium és vas) megtartsák elektronjaikat, azaz a sugárzási zónában még teljesen ionizált gáz a konvektív zóna aljától kezdve "már csak" részlegesen ionizált legyen. Innen az energia már főleg konvekciós mozgások révén jut fel a felszínre. Ez tehát akkor kerül előtérbe, amikor a kifelé csökkenő hőmérséklet olyan értéket ér el, melynél a hőmozgás energiája már nem akkora, hogy az ütközések teljesen ionizált állapotban tarthatnák az anyagot. Az ionok kezdenek rekombinálódni az elektronokkal, és így alkalmassá válnak arra, hogy elnyeljék a kifelé igyekvő fotonokat.

A konvekció úgy valósul meg, hogy az energiaelnyelés eredményeképpen egyes tartományok környezetüknél jobban felmelegszenek, ezért sűrűségük a környezetüknél kisebbé válik, és a keletkező felhajtóerő kifelé mozgatja az adott tartományt, szokásos nevén konvektív cellát. A többletenergia a felszínen szétsugárzódik, a cella lehűlt anyaga pedig átadja a helyét az újabb feltörekvő, forró.

A konvektív celláknak több jellemző mérete ismert. Legmagasabban, közvetlenül a napfelszín alatt találhatók a granuláció kb. 1000km átmérőjű elemei, ez alatt helyezkednek el a szupergranuláció nagyjából 30000km átmérőjű cellái. Mélységüktől függően a különböző konvekciós elemek különbözőképpen láthatók. A granuláció szemcsés szerkezete megfelelő nagyítású távcsővel rögtön szembetűnő. A Nap látható felszínének, azaz a konvektív zóna tetejének hőmérséklete már csak 5700°C, míg a sűrűség itt már csak 0,0000002 g/cm³.

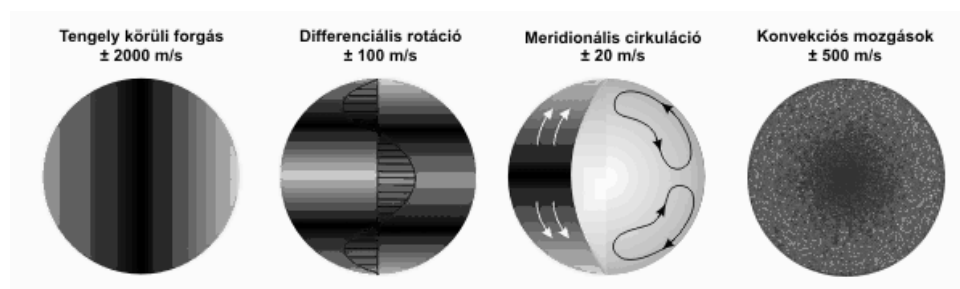
Felszíni és belső áramlások

A Nap felszínén megfigyelhető mozgás képe több sebességkomponens egyidejű jelenlétének szuperpozíciójából tevődik össze. Ezek a komponensek a következők:

- * forgás
- * konvekciós cellák mozgása
- * oszcilláció
- * meridionális cirkuláció.

A legnagyobb sebességkomponens a forgás, melynek az egyenlítőnél mért sebessége kb. 2000 m/s. Mind a konvekciós mozgásokból adódó sebesség, mind az oszcillációk nagysága kb. 300 m/s, míg végül a meridionális cirkuláció a leggyengébb, melynek nagyságrendje csupán 20 m/s.

A következő ábrán láthatjuk a sebességtér különböző komponensei által adott járulékokat, mint a tengely körüli forgás, a differenciális rotáció, a meridionális cirkuláció, és a konvektív mozgások, amelyek együttesen alakítják ki a Nap felszínén észlelt sebességeloszlást. A napfoltmozgásokból tudunk róla.



Tengely körüli forgás

Már az első távcsöves megfigyelések során kiderült, hogy a fotoszférában látható napfoltok egyik napról a másikra elmozdulnak. Galilei, geometriai megfontolások alapján bebizonyította, hogy ez csakis a Nap forgásának tulajdonítható, míg Scheiner az első rendszeres napészlelő már nagyjából megállapította a Nap forgástengelyének helyzetét, melyet 1626-ban közzé is tett. A ma használatos értéket Carrington határozta meg 1853-tól 1861-ig végzett megfigyelései alapján. Eszerint a Nap egyenlítője 7°15'-cel hajlik az ekliptika síkjához; a Nap egyenlítője felszálló csomójának ekliptikai hosszúsága az adott pillanatnyi közepes ekliptikán $\Omega=73^\circ4'$

+50".25·t. Itt t az 1850.00 óta eltelt évek száma (a második tag a Föld tengelyének precesszióját veszi figyelembe), továbbá a Nap sziderikus (állócsillagokhoz viszonyított) forgási periódusa 25,38 nap, míg az ennek megfelelő szinodikus (a Földről látszó) forgási periódus 27,275 nap. Ez utóbbi érték kismértékben változik az év folyamán a Föld egyenlőtlen keringési sebessége miatt.

A megadott elemek meghatározzák a Carrington-féle heliografikus koordinátarendszert, egyedül egy kezdő meridiánról kell még gondoskodni, mivel a Nap felszínén nincs olyan kiüntetett pont, mint a Földön Greenwich. A heliografikus koordinátarendszer kezdő meridiánjának azt tekintik, amely 1850. január 1-jén greenwichi középdélben haladt át a Nap egyenlítőjének felszálló csomóján, a hosszúságokat a Nap forgásának irányába mérik.

Differenciális rotáció

Már a XIX. században Carrington napfoltmozgások alapján felismerte, hogy a Nap felszíni forgási sebessége változik a szélességgel, azaz differenciálisan rotál - az egyenlítői részek gyorsabban forognak, míg a sarkok felé haladva a forgás egyre lassul. A modernkori helioszeizmikus mérések, melyek a Nap oszcillációs módusait vizsgálják, lehetőséget adtak a felszín alatti rétegek forgásának meghatározására. A megfigyelések alapján a szélességi differenciális rotáció a konvektív zónában nem függ a mélységtől, ugyanakkor a sugárzási zóna merev testként rotál. A két tartomány közötti vékony átmeneti réteget tachoklínának nevezzük.

Torziós oszcillációk

Az öt év alatt felhalmozódott GONG (Global Oscillation Network Group) és MDI (Michelson Doppler Imager) helioszeizmikus adatok új távlatokat nyitottak a differenciális rotáció időbeli változásának tanulmányozásában is. A Howard és LaBonte (1980) által felfedezett torziós oszcillációk a Nap különböző heliografikus szélességein az átlagos forgási sebességnél lassabban ill. gyorsabban forgó sávok. A sávok eloszlása szimmetrikus az egyenlítőre és vándorlásuk periódusa egy napciklus, azaz nagy valószínűséggel összefüggnek a napaktivitással. Kimutathatóvá vált a mozgások mélység szerinti függése, ahol azt találták, hogy az oszcillációk a Nap konvektív zónájának felső harmadára terjednek ki. A megfigyelések fényében az is világossá vált, hogy magas szélességeken létezik egy, a pólus felé terjedő hullám is, mely párhuzamba állítható a kiterjesztett napfolt/fáklya pillangódiagrammal.

Meridionális cirkuláció

A Nap meridionális cirkulációja az egyenlítőre merőleges síkban, azaz a meridiánsíkban történő áramlás. A Nap felszínén a meridionális áramlás igen gyenge, összehasonlítva a differenciális rotáció nagyságával, kb. 20 m/s. Irányát tekintve a felszínen az egyenlítő felé tartó áramlás a Nap belsejében visszafordul, és ott egy a pólustól az egyenlítő felé tartó áramlás alakul ki. A Nap belsejében, ahol a sűrűség jóval nagyobb, az áramlás már lassabb, kb. 1-2 m/s körüli érték.

Szupergranulációk

A konvekciós mozgások útján felszínre törő konvekciós celláknak több jellemző mérete ismert. A granulák mellett, melyek jellemző mérete kb. 700-1500 km, megfigyelhetők a szupergranulák is, melyek nagyjából 30000 km átmérőjű konvektív cellák. Míg a granuláció

szemcsés szerkezete megfelelő nagyítású távcsővel rögtön szembetűnő, addig a szupergranuláció csak egyes jelenségekben, úgymint a vízszintes sebességeloszlásban vagy a kromoszférikus hálózatban mutatkozik. A sebességeloszlás meghatározásából - melyet a Doppler-effektuson alapuló spektroszkópiai mérések segítségével végeztek - jól látható, hogy vannak a napkorongon olyan területek, melyek felénk közelednek (az onnan érkező fény hullámhossza a kék színek tartomány felé tolódik el), míg vannak, melyek távolodnak tőlünk (ezen területekről érkező fény hullámhossza a vörös felé tolódik). A szupergranulák átlagos élettartama 1-2 nap, bennük az áramlás sebessége kb. 500 m/s.

Helioszeizmológia legfontosabb eredményei

A Nap teljes belső tartományában meghatározott hangsebesség-profil lehetővé tette a Nap korának pontosabb becslését, és ezzel összefüggésben a kezdeti hélium- és nehézelemgyakoriság pontosítását. Jelenleg is folynak azok a vizsgálatok, amelyek a Nap nehézelemgyakoriságára vonatkoznak az 5 perces vagy hosszabb periódusú (g-módusú) oszcillációk alapján és esetlegesen figyelembe veszik a Nap belsejében a könnyebb fémek, mint például a lítium vagy berillium keveredését.

A megfigyelések alapján szükségessé vált az addigi napmodellben használt ideális gáz állapotegyenletét az elektrosztatikus korrekcióval (Debye-Hückel elmélet) módosítani. Ez természetesen nem elégséges, csak szükséges korrekciója az állapotegyenletnek. Természetesen az állapotegyenlet módosítása magával vonja az opacitás, illetve a termonukleáris reakciók rátájának korrekcióját is. A konvektív zóna mélységének meghatározása lehetővé tette az áramlás útján történő energiatranszportot leíró modellek pontosítását.

Sikerült meghatározni a túllövés mélységét, felhasználva a konvektív zóna alján a hangsebesség éles gradiensének az akusztikus frekvenciákra gyakorolt hatását. Megállapítást nyert, hogy a felszínen megfigyelt szélességi differenciális rotáció a konvektív zóna rétegeiben nem függ a mélységtől. A Nap sugárzási zónája merev testként rotál, melynek szögsebessége kb. 430-440 nHz. A két zónát egy vékony réteg választja el egymástól: az ún. tachoklina.

Felhasználva a helioszeizmológiából kapott eredményeket, lehetőség nyílt egy olyan napmodell felállítására, melyből a számított hangsebesség-profil a lehető legjobban illeszkedik a mért értékekhez. Meg kell jegyezni, hogy a modellből kapott és a mért értékek közti különbség csak néhány ezrelék, és ez a nagyon kis eltérés is mutatja, hogy a Standard Napmodell kielégítően írja le a Nap belső szerkezetét. Ilyen például mikroszkopikus szinten az állapotegyenlet, a nukleáris ráta, vagy az opacitás korrekciója, míg makroszkopikus szinten például a konvekció mechanizmusának vagy a mágneses tér kialakulásának megértése.

A Nap energiatermelése

A Nap és a csillagok energiatermelésére a csillagászat története folyamán sokféle feltevés volt. Először közönséges égésnek tulajdonították a Napban keletkező energiatermelést. Ez azonban csak ezer években mérhető ideig elegendő, ami ellentmondásban van a Nap korával. Az első fontos lépést a csillagokban zajló energiatermelő folyamatok megismeréséhez Lord Kelvin tette meg 1887-ben, a Nap energiatermeléséről tartott előadásában.

Kelvin és kortársa Herman von Helmholtz német természettudós felvetették, hogy léteznie kell egy olyan ismert energiaforrásnak, amit a Nap hasznosítani tud. Ez nem más, mint a gravitáció. Ugyanis ha egy gázgömb összehúzódik, akkor a potenciális energiája csökken. Ez az energia viszont növeli a csillag részecskéinek kinetikus energiáját, azaz a csillag anyagának hőmérsékletét. Ha a Nap ifjúkorában a Plútó pályájáig elnyúló gázködből sűrűsödött össze a

mai méretére, akkor keletkezésekor hatalmas gravitációs energia szabadulhatott fel, ami az anyag felmelegedését eredményezte. Mai ismereteink szerint a csillagok életének kezdeti szakaszában ez a folyamat eredményezi hőmérsékletük, s emiatt fényességük kezdeti növekedését. Kelvin számításai szerint, ha a Nap évente csupán 50 métert zsugorodna, akkor ez már fedezné a Nap megfigyelhető sugárzását, s akár több millió évig tündökölnhetne az égen. Azonban ahhoz, hogy a Nap a jelenlegi szinten sugározzon 25 millió év alatt ponttá kell zsugorodnia. A Nap tehát nem termelhette az energiát az elmúlt 4.5 milliárd évben a gravitációs kontrakció rovására.

Ma már tudjuk, hogy a csillagok életében csak viszonylag rövid ideig tarthat a gravitációs kontrakció szakasza, mely az éppen kialakulóban lévő csillagok esetében játszik fontos szerepet, illetve a nagytömegű csillagok életének utolsó fázisában.

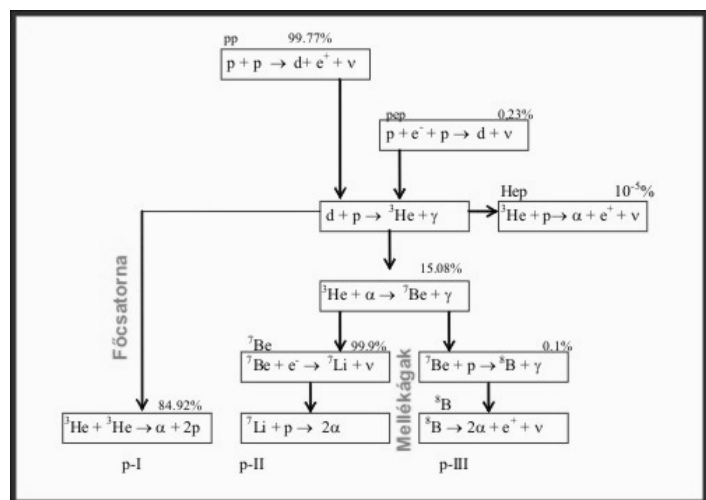
A radioaktív bomlás is felmerült lehetséges energiatermelő folyamatként, de itt is hasonló akadályba ütközünk, mint korábban, azaz a radioaktív bomlás, mint energiatermelési mód csak legfeljebb néhány millió évig képes a Nap sugárzását a jelenlegi szinten tartani.

Atkinson és Houtermans 1929-ben mutattak rá, hogy a Nap energiatermelése a magas hőmérséklet hatására létrejövő magreakciók "rovására" írható. A pontos számításokat Bethe és Critchfield (1938) végezték el, mely alapján a Nap belsejében uralkodó tízmillió fok körüli hőmérsékleten olyan fúziós reakciósorozat megy végbe, melynek végeredményeképp négy darab protonból, vagyis hidrogén-atommagból egyetlen hélium-atommag keletkezik, melynek során energia szabadul fel.

A csillagokban, mint a Napban is tehát a hidrogén-hélium fúzió termeli az energiát. Ez kétféleképpen is végbemehet: p-p és CNO ciklussal, de mindkettő lényege, hogy négy H atommagból egy He atommag keletkezik. Az, hogy a két reakció közül melyik termel több energiát, elsősorban a hőmérsékleti viszonyoktól függ. A Nap esetén a pp a domináns.

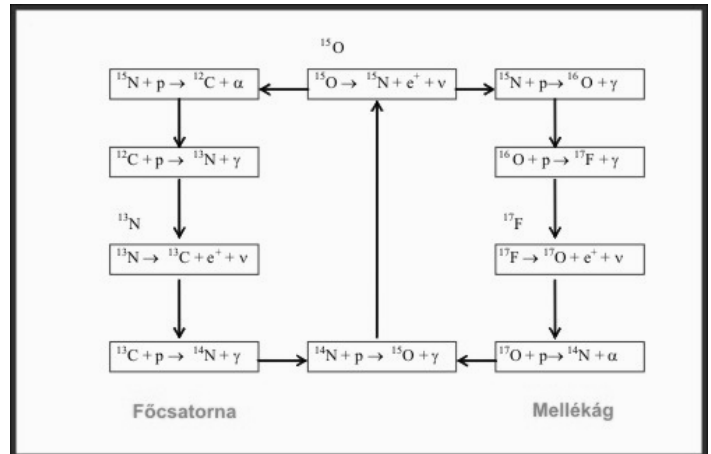
Proton-proton ciklus

A proton-proton ciklusban két proton közvetlenül egyesül egymással, s az egyik proton neutronná alakulása (β^+ -bomlás) keretében deutériummagot képeznek. Ez aztán egy további proton befogásával 3-as tömegszámú héliummaggá alakul (két proton és egy neutron van benne), mely azonban még nem stabil. Két ilyen 3-as héliumizotóp azután egyesül, melynek során egy 4-es héliummag keletkezik, továbbá két proton, melyek újra bekapcsolódnak a folyamatba.



CNO-ciklus

A CNO-ciklus esetén a hidrogén és a hélium mellett a szén, a nitrogén és az oxigén játszik főszerepet. A ciklus kezdetén egy 12-es tömegszámú szénatom ütközik egy protonnal (hidrogénatommaggal). Összeolvadnak, és egy 13-as tömegszámú instabil nitrogénizotóp jön létre. A folyamatot tovább nem részletezve, végül is hasonlóan a pp-ciklushoz négy hidrogénmag egyesül egy héliummaggá. Mivel a folyamat végén visszakapunk egy szénatommagot is elmondható, hogy az valójában csupán a katalizátor szerepét játszotta a folyamatban.



Fotoszféra

A fotoszféra nevéből következően a "fény szférája", ebből származik a Nap sugárzásának döntő hányada. A legérdekesebb tulajdonsága az, hogy nagyon vékony réteg, vastagsága mindössze néhány száz kilométer. Ezért látjuk a napkorongot éles szélűnek, ami tulajdonképpen egyáltalán nem nyilvánvaló. A Nap esetén a középpontból kifelé haladva nincsen olyan ugrásszerű változás a fizikai jellemzőkben, mint pl. a Földnél, amit felszínnek tekinthetünk. A Napon minden paraméter folytonosan változik a középponttól való távolság függvényében, mégis a Nap anyagának átlátszatlansága (opacitása) úgy alakul, hogy beszélhetünk a Nap felszínéről, ez a fotoszféra.

A fotoszférában megfigyelhető jelenségek:

- * sötét napfoltok
- * fényes fáklyák
- * granulák
- * szupergranulák

Szélsőtétedés: annak a következménye, hogy a hőmérséklet a fotoszférán belül sem állandó, hanem felfelé haladva csökken. A Nap anyagának átlátszatlansága miatt viszont csak bizonyos távolságig tudunk belátni, ez a napkorong közepén nagyobb mélységet, tehát nagyobb hőmérsékletet jelent, míg a korong szélén a felszínnel majdnem párhuzamos fénysugár a magasabban lévő kisebb hőmérsékletű rétegekből jut el hozzánk.

Napfoltok

Az első feljegyzések a Napon látott sötét foltokról az i.e. IV. századból származnak, Arisztotelész egyik kedvenc tanítványának, Theophrastosnak tulajdonítják ezeket. Európában azonban nagyon kevés távcső előtti napfoltmegfigyelés maradt fent, viszont keleten, Kínában, Koreában, Japánban szerencsére jóval rendszeresebb feljegyzéseket találunk. Ezek a beszámolók különösen a naptevékenység hosszú távú változásainak szempontjából értékesek. Európában a nagyon kevés szabad szemmel történt észlelés után az első napfoltmegfigyelések a távcső csillagászati alkalmazásának kezdetén, az 1610-es évek elején történtek. Többen is írnak a Napon látható sötét területekről, közülük Galilei volt az, aki megfigyelései alapján bebizonyította, hogy a foltok valóban a Nap felületén találhatók, és vele együtt forognak, nem pedig előtte elvonuló apró bolygók.

Nemcsak foltoknak, hanem aktív vidéknek is nevezzük.

A napfoltok ritkán fordulnak elő magányosan, többnyire napfoltcsoportokba tömörülnek. Ezek általában a Nap egyenlítőjével csaknem párhuzamosan elhelyezkedő, ebben az irányban megnyúlt képződmények. A foltcsoportok többsége úgynevezett **bipoláris csoport**. Nevüket onnan kapták, hogy két fő részre oszlanak, amelyet egy-egy nagyobb folt képvisel a csoport két végén, a Nap forgásiránya szerint elnevezett **vezető** (kompaktabb) és követő részre. Látható, hogy a foltok külön-külön is két, jól elkülönülő részre oszlanak: a folt belső, jóval sötétebb, látszólag homogén része az **umbra**, ezt veszi körül a kevésbé sötét, szálas szerkezetű **penumbra**. A napfoltok tanulmányozásában egy egészen új korszakot kezdett Hale (mágneses terüket vizsgálta, a Ziemann felhasadás vonalai alapján), a Mt. Wilson Observatory alapítója. Új, általa konstruált műszerek építésével a napfoltok több, alapvető fizikai jellemzőjét sikerült meghatároznia. Kimutatta, hogy a napfoltokban erős mágneses tér található, melynek nagysága kb. ezerszerese a Föld mágneses terének. Mai tudásunk szerint a napfoltok a **fotoszférában úszó mágneses tér-koncentrációk**, melyekben a mágneses nyomás hozzáadódik a hidrodinamikai nyomáshoz, és ez kb. 1500 K helyi lehűlést eredményez. Emiatt látjuk a napfoltokat sötétnek a melegebb fotoszférában.

Fluxusfeltörés: a megfigyelések egyértelműen megmutatták, hogy a naptevékenységet a Nap felszíne alól az aktív vidékeken feltörő óriási mágneses erővonalkötegek (fluxuscsovek) okozzák. A feltörés előtt a köteg vízszintesen fekszik a konvektív zóna alján, nagyjából kelet-nyugati irányban. A mágneses térnek ezt a szélességi körökkel párhuzamos összetevőjét toroidális térnek nevezzük, ellentétben az erre merőleges, a meridiánkörök síkjában fekvő poloidális térrel. Fluxusátrendeződés – átkötés (napkitöréseknél)

Napfolt osztályozása - zürichi-típusok: alaposztályozás 3 betű

1. módosított zürichi-típus (A, B, C, D, E, F, G, H, J)
2. legnagyobb folt penumbrája alapján
3. a foltok eloszlása a csoporton belül

Napfoltok hőmérsékletére vonatkozó becslés

$$\begin{aligned}
 P_{\text{folt}} &= P_{\text{fotoszféra}} \\
 P_{\text{mágneses}} + \frac{\rho_F}{\mu} RT_{\text{folt}} &= \frac{\rho_{\text{fotoszféra}}}{\mu} RT_{\text{fotoszféra}} \\
 \rho_{\text{fotoszféra}} &= \rho_{\text{folt}} \\
 \Rightarrow T_{\text{folt}} &\ll T_{\text{fotoszféra}}
 \end{aligned}$$

Befagyás tétele:

A mágneses erővonalak egy csőben helyezkednek el, és ha az erővonalcsövet alkotó anyag elmozdul, akkor a mágneses erővonalaknak is követniük kell a cső mozgását.

A mágneses erővonalak tehát mintegy be van fagyva az anyagba. Fizikailag a befagyás tétele azt jelenti, hogy a közegnek a mágneses erővonalakra merőleges irányban történő mozgásakor a közegben olyan áramok indukálódnak, amelyek azt eredményezik, hogy az erővonalak a közeggel együtt elmozdulnak.

A befagyás tétele nem zárja ki, hogy az anyag a mágneses tér mentén áramoljon, sőt éppen azt jelenti, hogy a mágneses erővonalak helyben maradása esetén csak ilyen áramlások történhetnek.

Lokális szeizmológia – napfoltok belső szerkezetét is láthatjuk valamennyire

- * intenzitástérkép, mágneses térkép, dopplerogram, f- és p-módusú spektrum
- * legújabb eredmények – a folt mélyebb rétegeiben vannak melegebb helyek

Fáklyamezők (fáklyák alkotják)

A fáklyák a foltcsoport környezetében látható **fényesebb képződmények**, amelyek a nagy felbontású képeken apró, ívmásodperc, vagy annál kisebb méretű fényes pontokból állnak össze. Fehér fényben a **napkorong pereme felé láthatók jól**.

A fáklyákban a fotoszféra hőmérséklete kevésbé csökken a magassággal, ezért is láthatók a napkorong szélén, mert itt a fotoszféra hidegebb részeivel a kontraszt nagyobb, míg a napkorong közepén mélyebbre látunk, a forróbb rétegekig, így a fáklyák fényét ez elnyomja.

A fáklyák keletkezésében is szerepet játszik a mágneses tér, noha ez itt lényegesen gyengébb, mint a napfoltok esetén.

A fluxuscsövek szerepet játszanak a mágnesen szőnyeg kialakításában.

Granuláció

A zavartalan fotoszférában jól látható a felszín alatti konvekciós zóna következményeként a granulációs szerkezet.

Az egyes granulák látszó mérete 1"-2" körül van (kb. 700-1500 km), ez a távcsöveknek a földi légkör turbulens mozgásai által meghatározott felbontóképességéhez hasonló nagyságú.

Ezért nagy felbontású fotoszféraképeket, amelyeken az apróbb részletek is láthatóak, csak magas hegyekre telepített, vagy léggömbön magasba felbocsátott távcsövekkel lehet készíteni, továbbá űreszközökről. Azonban a szükséges távcsövek nagysága miatt ez utóbbira sokáig nem volt lehetőség. Az első fotoszféra-felvételeket a Spacelab kísérlet során a Space Shuttle űrrepülőgépen elhelyezett 30 cm átmérőjű távcsővel készítették 1985-ben. A földi távcsövek közül a **svéd Vacuum Solar Telescope** segítségével készített nagy felbontású képeket adaptív optika segítségével.

A nagy felbontású fotoszféraképek alapján a granulák **átlagos élettartamára a 10-20 perc** körüli érték jellemző. A granulákban áramló **plazma sebessége kb. 7 km/s**, mely jóval magasabb, mint a szuperszonikus sebesség.

Szupergranulációs szerkezet

A konvekciós mozgások útján felszínre törő konvekciós celláknak több jellemző mérete ismert. A granulák mellett, melyek jellemző mérete kb. 700-1500 km, megfigyelhetők a szupergranulák is, melyek nagyjából 30000 km átmérőjű konvektív cellák.

Míg a granuláció szemcsés szerkezete megfelelő nagyítású távcsővel rögtön szembetűnő, addig a szupergranuláció csak egyes jelenségekben, úgymint a vízszintes sebességeloszlásban vagy a kromoszférikus hálózatban mutatkozik.

A **sebességeloszlás meghatározásából** - melyet a Doppler-effektuson alapuló spektroszkópi-ai mérések segítségével végeztek - jól látható, hogy vannak a napkorongon olyan területek, melyek felénk közelednek (az onnan érkező fény hullámhossza a kék színtartomány felé tolódik el), míg vannak, melyek távolodnak tőlünk (ezen területekről érkező fény hullámhossza a vörös felé tolódik).

A kromoszférikus fáklyák viselkedéséből is látták a szupergranulációs szerkezetet.

A szupergranulák átlagos élettartama 1-2 nap, bennük az áramlás sebessége kb. 0,5 km/s.

A napfoltciklus és más szabályszerűségek

A napfoltok számának jellemzésére R. Wolf 1848-ban bevezette a napfolt-relatívszámot, és gondosan feldolgozva a Galilei és Scheiner óta végzett összes napmegfigyelést, 1700-ig vizsgálta követni a napfoltciklust, megállapítva annak pontosabb időtartamát, a 11,1 évet.

Napfoltciklus jellemzői:

- * maximumok magassága és a ciklus tartama erősen változó
- * a minimumtól a maximumig gyorsabb az emelkedés, többnyire 3-4 év körüli, míg a csökkenés lassúbb.

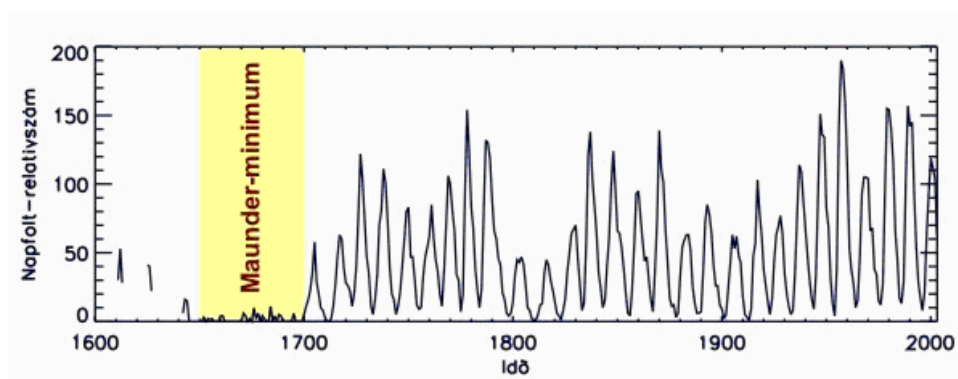
Napfolt-relatívszám

$$W = k(10g + f)$$

- * g – foltcsoportok száma
- * f – napkorongon látható összes folt száma
- * k – korrekciós tényező

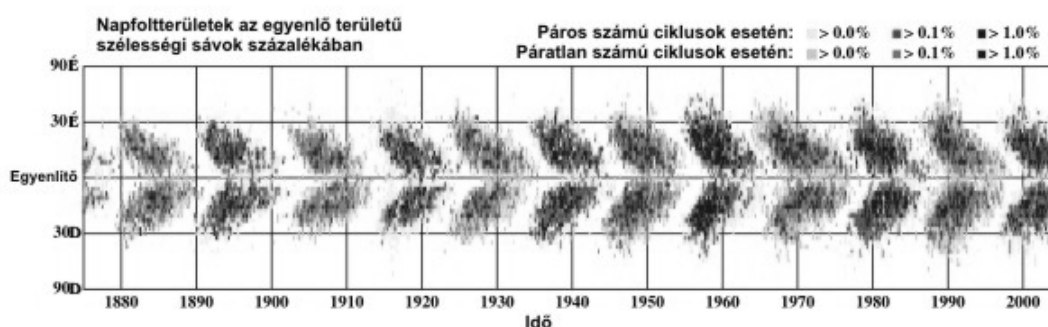
Nem fizikai mennyiség. A foltok száma és a relatívszám között van összefüggés, de nem mondható, hogy a Nap pontosan kétszer olyan aktív, ha a rendszer kétszeres.

Napfolt-relatívszám – idő



Maunder minimum – nagyon kevés folt volt a Napon.

Pillangódiagram



A napfoltminimum után az új ciklus első foltjai 30-35 fok körüli naprajzi szélességeken jelennek meg az egyenlítő két oldalán. a napciklus későbbi éveit során azután az új aktív vidékek egyre alacsonyabb szélességeken bukkannak fel. Így a napfoltcsoportok megjelenési szélességeit az idő függvényében ábrázolva egy pillangószárnyakhoz hasonló alakzatot kapunk, ez a pillangó-diagram. A „vándorlás” kifejezés itt nem az egyes objektumok mozgására utal – ezek szélessége nemigen változik – hanem a felbukkanási zóna elmozdulására.

Kiterjesztett pillangódiagram (napfolt + poláris fáklya)

A kb. 35°-nál magasabb szélességeken napfoltok nem láthatók, fáklyák azonban igen. Ezek az úgynevezett poláris fáklyák az alacsony szélességű aktivitással ellentétben egyre magasabb szélességeken jelennek meg, azaz pólus felé tartó vándorlást mutatnak.

Fáziscsúszás a foltokhoz képest.

- * **Schwabe-ciklus** (11 éves ciklus) $\Rightarrow$ számos más jellegű adatsorban is kimutatták, mint pl. geomágneses aktivitás, űridőjárás, klímaváltozás, stb.
- * **Gleissberg-ciklus** százados időskálájú ingadozás, mely a Schwabe-ciklus amplitúdójában figyelhető meg: csúcsokra lehet burkológörbét tenni, ezeknek periódusideje 100év (80-120 év)

De ha a Föld-mágneses tere valami miatt változik (Nap mágneses változása miatt), akkor torzulások lépnek fel. Ezeknek a vizsgálatából hosszabb távú kutatásokat lehet folytatni. Hosszabb időkre visszamenőleg lehet vizsgálni. Pl. lefűrnak az Antarktisz jegére, kihúznak egy jégtömböt, és ahogy vizsgálják egyre lejjebb, egyre régebbi időre jutunk vissza. Ezzel kimutathatók a szuper-szekuláris ciklusok. (kozmozgenikus izotópok adatsoraiban)

- * a 205-210 éves De Vries-ciklus
- * egy 600-700 éves változás
- * egy 2000-2400 éves változás

Nagy minimumok

Ezen reguláris változások mellett megfigyelhetők még abnormálisan alacsony szintű aktivitási időszakok is, mikor az aktivitási érőszámok jelentősen lecsökkennek, vagy szinte nullához közelítenek

- * **Maunder-minimum** – 1645-1715 évek közé esik --- kis jégkorszak is akkor volt a Földön
- * **Spörer-minimum** – 1450-1550 között
- * **Wolf-minimum** – 12. század környékére tehető
- * **Dalton-minimum** – 1790-1820 közé eső időszakban a napfoltciklus nem tűnt el teljesen, csak nagyon kis amplitúdóval volt jelen

Spörer-törvény

Az új ciklus foltjai először a 25° - 30° szélességen jelennek meg, maximum táján az egész 5° - 35° közötti foltzóna aktív, majd a foltok átlagos szélessége csökken, végül a ciklus utolsó foltjai az 5° - 10° körüli szélességeken jelentkeznek. $\Rightarrow$ Pillangódiagram

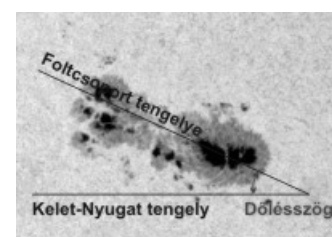
Hale-féle polaritásszabály

Tulajdonképpen szabálycsoport, a naptevékenység természetére vonatkozó legfontosabb empirikus eredmény, ami azzal kapcsolatos, hogy a foltokat mágneses terük polaritása is jellemzi. (Így jön létre a Hale-ciklus, vagy 22 éves mágneses ciklus.)

1. a foltcsoportok vezető és követő része ellentétes polaritású foltokat tartalmaz
2. egy adott ciklusban az egyik (pl. az É) félgömbön **mindig egy adott polaritás a vezető** (pl. É) a másik félgömbön pedig a másik (tehát a D félgömbön a D polaritás)
3. a következő 11 éves ciklusban pedig az említett polaritás viszonyok megfordulnak.

Joy-törvény

Ha egy egyenessel összekötjük egy adott foltcsoportban a vezető és követő foltot, akkor a foltcsoport szöget zár be az egyenlítővel. A szög mértéke változik, attól függően, hogy napfolt-maximum vagy minimum van-e; maximumkor a csoport egyenlítőhöz való dőlésszöge 11° körül van, míg minimumkor kb. 3° .



A Nap mágneses tere

Az eddig jelenségek magyarázatának kulcsa a mágneses tér. Mint azt említettük a csillagok és a Nap anyaga is ionizált gáz, azaz plazma, melyben belső áramlások folynak, a plazma áramlása során a benne lévő szabad töltések mozgása elektromos áramot jelent, ez viszont mágneses teret kelt, a mágneses tér viszont visszahat a töltések mozgására, vagyis a közeg áramlására. Mai tudásunk alapján a Nap mágneses terét, melynek felszíni megnyilvánulásai a napfoltok, a fáklyamezők, stb., a Nap belsejében „működő” **mágneses dinamó** hozza létre

A napdinamó modelljének a következő észlelési jelenségeket kell visszaadnia:

- * a napfolt-ciklus 11 éves változását
- * az aktív szélesség egyenlítő felé történő vándorlását, azaz a pillangódiagramot
- * a Hale-féle polaritásszabályt, és vele összefüggésben a 22 éves mágneses ciklust, azaz a Hale-ciklust
- * a Joy-törvényt, azaz azt, hogy a foltcsoportok szöget zárnak be az egyenlítővel
- * ha a napfoltok által kirajzolt pillangódiagramra felrajzoljuk a poláris vidékeken megfigyelhető fáklyákat, akkor kapjuk az ún. kiterjesztett pillangódiagramot, melyen megfigyelhető, hogy a poláris fáklyák ellentétben a napfoltokkal, nem az egyenlítő felé jelennek meg inkább az idő múlásával, hanem egyre magasabb szélességeken, így a **fáklyák pólus irányú vándorlást mutatnak az időben**

A fenti felsorolásból jól látható, hogy mennyire összetett problémával állunk szemben. Ennek is köszönhető, hogy a Napban működő dinamómechanizmusra vonatkozólag kielégítő modelljeink a mai napig nincsenek. A Nap-dinamó az asztrofizika nagy megoldatlan problémáinak egyike.

Akárcsak a Föld mágneses terét így a Nap sokkal erősebb terét is a dinamómechanizmus tartja fenn

Ez a magnetohidrodinamikai mechanizmus azt jelenti, hogy kellő áramlási szerkezet esetén egy plazmában a mágneses tér spontán felerősödhet, illetve az áramok disszipációja ellenére tetszőleges ideig fennmaradhat

Az így generált tér lehet állandó (Föld), vagy periodikusan ingadozó (Nap)

Napdinamó

Általánosan elfogadott, hogy a dinamó a toroidális és a poloidális mágneses térkomponensek egymásba alakulása útján működik

Mágneses komponensek

- * toroidális térkomponensnek nevezzük a szélességi körökkel párhuzamos összetevőt
- * poloidális térkomponensnek nevezzük a szélességi körökre merőleges, meridián körök síkjában fekvő összetevőt

A legáltalánosabban elfogadott dinamómodell az α - Ω dinamó.

α - Ω dinamó

Az α -effektus a poloidális mágneses térkomponens létrejöttéért felel, míg az Ω -effektus, amely a differenciális rotáció következménye, a toroidális mágneses teret generálja.

Ω -effektus: Ha egy gömb alakú vezető folyadékban, mint a Nap plazmája, ún. toroidális, azaz az egyenlítővel párhuzamos síkban zajló áramlás indul, mint a Nap esetén a differenciális rotáció, akkor miközben külső mágneses tér erővonalai járják át a plazmát, az erővonalak felcsavarodnak, és létrejön a mágneses tér toroidális térkomponense.

α -effektus: A toroidális tér erővonalkötegeiben észak-déli irányú hurkok alakulnak ki a folyadékreszecskek csavarvonalú áramlásának hatására, melyek a véges mágneses diffúzió miatt nagy hurokká olvadnak össze, kialakítva a mágneses tér poloidális térkomponensét.

Természetesen a két mozgáselem, a differenciális rotáció, illetve a csavarvonalú áramlás egyidejűleg, egymásra szuperponálódva hat, mesterséges szétválasztásuk csak a szemléletességet szolgálja.

Jelenségek a Napon

Fotoszféra

Néhány 100 km vastag, látható felszíni réteg, innen származik a nap sugárzási teljesítményének több mint 99%-a. Legjellegzetesebb struktúrája a granulációs szerkezet, mely a konvektív mozgástér felszíni megnyilvánulása. A fotoszférában láthatók a foltok és fotoszférikus fáklyák is.

Kromoszféra

A felszín fölötti, néhány ezer km vastagságú légréteg. Hőmérséklete a felszín fölötti hőmérsékleti minimum fölött rohamosan növekszik. A kromoszféra (színgömb) elnevezést onnan kapta, hogy folytonos színekben nem figyelhető meg, de egyes spektrumvonalakban (köznap szóhasználatnál egyes színekben) előtűnnek jellegzetes struktúrái.

Korona

Külső határa pontosan nem húzható meg, de általában a másfél két napátmérőnyi távolságig tekinthetjük az atmoszférát a korona részének. A hőmérséklet itt már több millió fokra, aminek az elméleti magyarázata évtizedek óta komoly kihívás – az elméleti problémát azzal a metaforával szokták érzékeltetni, hogy hogyan lehet a gyertyaláng fölötti levegő sokkal forróbb, mint maga a láng – magyarázat a korona mágneses tereinek dinamikájában. A korona anyaga igen ritka plazma, fénye a fotoszféráé mellett elenyészően halvány, csak napfogyatkozás idején van esély megfigyelni.

Napszél

A koronában kifelé haladva eljutunk egy olyan tartományig, ahol a részecskek hőmozgásának sebessége felülmúlja a szökési sebességet, ettől kezdve a korona anyagára egy kifelé tartó áramlás lesz jellemző, ezt nevezzük napszélnek. Az áramlás átlagos sebessége nyugodt Nap esetén kb. 400 km/s.

Kromoszféra

Normális körülmények között fehér fényben keresztüllátunk rajta, viszont vannak olyan műszerek, mint a spektroheliószkóp (vizuális megfigyelés); spektroheliográf (fényképezés), vagy a $H\alpha$ -monokromátor, amelyek kivágnak a Nap színekéből egy igen szűk tartományt és lehetővé teszik, hogy a Napot e kiválasztott színeképvonal fényében vizsgáljuk. Ezen műszerek segítségével a kromoszférában újabb jelenségeket figyelhetünk meg: a kromoszférikus hálózatot, amely a mágneses tér jelenlétét sejtető mintázat; kromoszférikus fáklyákat (plage); napkitöréseket (fler); sötét filamentumokat a napkorongon; illetve protuberanciákat és szpikulákat a napkorong szélénél.

A kromoszféra szintén jól megfigyelhető az ionizált kalcium ($CaII$) H- és K-vonalában. A kalcium K-vonala, mely a Nap színekévének ibolya részén található a 394,4 nanométeres hullámhossznál, a nap-típusú csillagok esetén is fontos információkat hordoz. Ugyanis így lehetőségünk nyílik ezen csillagok aktivitásának vizsgálatára is.

Hőmérsékleti eloszlását tekintve, alulról a kb. $6000^{\circ}C$ -os fotoszféra, míg felülről a kb. $20000^{\circ}C$ -os átmeneti réteg határolja. Ezen hőmérsékleten a kromoszféra sugárzásának legnagyobb része a hidrogén Balmer-sorozatának színeképvonalában, a 656,3 nanométer hullámhosszúságú élénk-vörös $H\alpha$ -vonaltörés történik. Ugyanis az adott fizikai körülmények között a hidrogén egy foton kibocsátása közben tér vissza első gerjesztett állapotából, melyet a hidrogén Balmer-sorozatának neveznek. Innen ered az elnevezése is: kromoszféra, a szín szférája.

Plage

A fotoszférus fáklyákon kívül a kromoszféra képeken is láthatunk hasonló fényes képződményeket a napfoltok környezetében, melyeket kromoszférikus fáklyáknak, nemzetközi elnevezéssel plázsoknak (angolul plage) nevezünk. Mivel a kromoszférikus fáklyák szoros összefüggésben vannak a mágneses terekkel, az egy fáklyamezőben, azaz plázsban található foltokat tekintik egy aktív vidéknek. A hidrogén élénk-vörös emissziós vonalában ($H\alpha$ vonal) készített felvételeken felbukkanó fényes kromoszférikus fáklyák szorosabban kapcsolódnak az aktív vidékek mágneses teréhez, míg a kalcium ibolyántúli vonalában ($CaII$ K vonala) készült képen látható kromoszférikus hálózat, a szupergranuláció nem tűnik elő.

Protuberancák és Filamentumok

A napkitörésekkel némileg rokonságban vannak, de nem tévesztendő össze velük a protuberanciák. A latin szó eredetileg nyúlványt, kitüremkedést jelent. Első megfigyeléseik még spektroszkóppal történtek, ahol a megfigyelők észrevették, hogy a képeken a hidrogén élénk-vörös emissziós vonala ($H\alpha$ vonal) nem szűnik meg a napkorong szélénél, hanem fényes vonalként helyenként és időnként a napkorongtól kisebb-nagyobb távolságban is megfigyelhető. Mint helyesen feltételezték, a Nap anyagának, pontosabban a kromoszféra volt ezek a felszín felett lebegő darabjai, innen az elnevezés.

A későbbi spektroheliogramokon a protuberanciákat már nemcsak a napkorong peremén túl, hanem magán a korongon is lehetett látni, csak a fényes háttéren, mint sötét, fonálszerű képződmények jelentkeztek, melyet filamentumoknak neveznek. Tehát a filamentum és a protuberancia egy és ugyanazon képződmény a Napon.

Fizikailag úgy magyarázható, hogy a kromoszféra felett lebegő gázfelhő elnyeli a kromoszféra sugárzását, és utána újból kisugározza, de minden irányba, így visszafelé is. Az

összes sugárzás erőssége így gyengébb, mint a háttér, de sötét háttér előtt (mint a világűr a napkorong peremén) épp eléggé fényes.

A protuberanciákat már sokan és sokféleképp próbálták osztályozni, de alapvetően két típusuk van: a nyugodt és az aktív (eruptív) protuberancia. A nyugodt protuberanciák akár hónapokig élélhetnek, miközben alakjuk lassan, de nem lényegesen változik az időben. Természetesen a nyugodt protuberanciák is aktivizálódhatnak valamilyen ok miatt. Vagy a közelben lezajló napkitörés, vagy a mágneses tér változásai miatt előfordulhat olyan helyzet, hogy a protuberanciát fenntartó tér "kinyílik", és ezzel a protuberancia anyaga kifelé dobódik a Naptól. A nyugodt protuberanciák aktivizálódása már átmenet az eruptív protuberanciák és napkitörések felé. Tehát előfordulhat, hogy nagyobb napkitörés során egy meglévő protuberancia anyaga dobódik ki, vagy egy napkitörésből indul ki egy aktív (eruptív) protuberancia.

A protuberanciát tartó tér kinyílik és ezzel a protuberancia anyaga felfelé elszáll, néhány száz km/s sebességgel.

Hurokprotuberancia-rendszer: a nagy flerek utolsó stádiumában látható, néhány km/s sebességgel felfelé táguló hurkok rendszere.

Szpikulák

A kromoszféra felső határa egyáltalán nem sima, hanem belőle dárdaszerű képződmények, szpikulák nyúlnak fel a koronába. Ezek nagyjából 1000 km vastagságú, 6000-10000 km magasságú jet-szerű anyagkidobódások, kb. 20-30 km/s sebességgel, amelyek 5-10 perc alatt fölemelkednek, majd visszaereszkednek. Különösen jól láthatók a napkorong szélén.

A kromoszféra-korona átmeneti réteg

Az átmeneti réteg egy rendkívül vékony és nagyon rendhagyó rétege a Nap légkörének, mely az igen forró korona és a jóval hidegebb kromoszféra között helyezkedik el. Az átmeneti rétegben tehát a kromoszféra 20000°C-os hőmérséklete néhány száz kilométeren átvált a napkorona millió fokos hőmérsékletére. Ezen a hőmérsékleten a hidrogén ionizálódik, ezért igen nehéz megfigyelni. A hidrogén helyett, az átmeneti réteg megfigyelésére más ionizált elemek emisszióját használják, ilyen például a szén (CIV), az oxigén (OIV) és a szilícium (SiIV). Ezen elemek színeképvonalai a Nap színekévének ibolyántúli tartományában találhatók, ezért ezek megfigyelése csak a légkörön túlról, az űrből lehetséges.

Az átmeneti réteget az utóbbi években számos űreszköz segítségével tanulmányozták, ilyen például: a Solar Maximum Mission (SMM), amely 1980. február 14-én indult. (Érdekességgént megemlítjük, hogy ez volt az első űreszköz, amit meghibásodása után a világűrben megjavítottak, 1984-ben, a Challenger űrrepülőgép második repülése során. A Solar Max-nak becézett SMM így még további öt évig üzemelt, s végül 1989. december 2-án égett el Földünk légkörében.) Az SMM-en elhelyezett Ultraviolet Spectrometer and Polarimeter (UVSP) műszert később a Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) (a felbocsájtás időpontja: 1995. december 2.) űreszköznél elhelyezett The Transition Region and Coronal Explorer (TRACE) berendezés követte, mely a mai napig folyamatosan ontja a feldolgozandó adatokat.

Napkorona

A teljes napfogyatkozások alkalmával, mikor a Hold már eltakarta mind a fotoszférát, mind a kromoszféra fényes rétegeit, láthatóvá válik a napkorona gyöngyházfényben világító rétege. Ez a szigorú értelemben vett naplégkör legkülső része, mely folyamatosan megy át a napszél-

be és a bolygóközi térbe. A korona tanulmányozására hosszú időn keresztül csak a teljes napfogyatkozások adtak alkalmat, ezért egészen a XX. század közepéig a napfizikusok költséget és fáradtságot nem kímélve expedíciókat szerveztek távoli vidékekre, ahol a napfogyatkozás totalitási zónája húzódott, esetleg csak annyi eredménnyel, hogy a megfelelő pár percben a felhőzet megghiúsítsa a megfigyelést.

Azonban az utóbbi évtizedekben két új lehetőség is nyílt a napkorona fogyatkozásokon kívüli megfigyelésére: a koronográf és a Föld légkörén kívüli űreszközökről történő megfigyelések.

A napkorona fényének tanulmányozásából kiderült, hogy hőmérséklete igen magas, millió fokban. Emiatt az atomok erősen ionizált állapotban vannak jelen, és sok a szabad elektron. A napkorona fénye több komponensből áll, melyek eredete különböző: ezeket K-, E-, illetve F-korona néven emlegetik.

A **K-korona**, amely folytonos színeképéről kapta az elnevezését, visszavert fényben világít. Ez a fény a napkoronában lévő szabad elektronokon szórt fotoszférafény.

Az **E-koronát** a színeképében látható fényes (emissziós) vonalakról nevezték el.

Az **F-korona** a színeképében megfigyelhető Fraunhofer-vonalakról (sötét, elnyelési vonalak, melyek felfedezőjükről kapták nevüket) kapta az elnevezését. Az F-korona tulajdonképpen már nem tartozik szorosan a Nap légköréhez, hanem a bolygóközi térben lebegő porszemeken visszaverődő fény.

A korona tanulmányozásában a másik jelentős újdonság, amit a légkörön kívüli észlelések hoztak, a röntgenmegfigyelések voltak. Ezért a koronát az utóbbi évtizedekben oly módon is tárgyalják, hogy a korábbi K-n és E-n kívül az **X-koronát** is bevonják a felosztásba.

A K-korona (A fehér korona)

Mint azt már korábban említettük, teljes napfogyatkozások alkalmával láthatóvá válik a gyöngyházfényben ragyogó korona. A régóta tartó megfigyeléseknek köszönhetően kiderült, hogy a korona formája az egyes fogyatkozások alkalmával más és más, és szoros összefüggésbe hozható a naptevékenységi ciklussal. Maximum idején (amikor a naptevékenység a legerősebb) a korona csaknem teljesen körszimmetrikus, míg minimumkor nagyfokú lapultság lép fel, hosszú, az egyenlítővel párhuzamos sugárnyalábokkal, és rövid radiális bojtokkal a pólusoknál.

Az E-korona (Az emissziós korona)

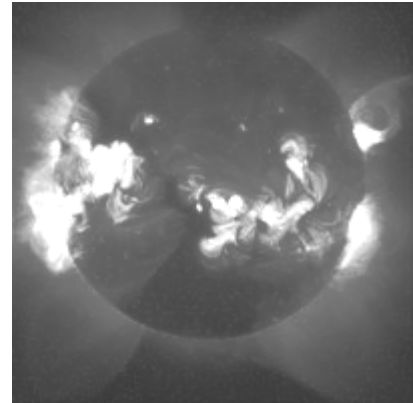
Mint azt említettük, az E-koronát a színeképében látható fényes, emissziós vonalakról nevezték el. A színeképelemzés kezdeti sikerei, különösen a hélium felfedezése után, a napkorona nehezen azonosítható színeképvonalait is egy hipotetikus új elemnek, a koróniumnak tulajdonították. A periódusos rendszer betelítéssel azonban a koróniumnak nem maradt hely, ezért feltételezték, hogy "normális" elemek valamiféle vonalai lehetnek.

Végül B. Edlén svéd asztrofizikusnak sikerült 1942-ben majdnem az összes koronavonalat azonosítania, és kiderült, hogy valóban, már jól ismert elemektől származnak, csak nagyon magas ionizáltsági fokú ionjaiktól. Így például a három legismertebb koronavonal közül a zöld a tizenháromszorosan ionizált vastól (Fe XIV) ered, a sárga a kalcium tizennégyszeresen ionizált (Ca XV) vonala, míg a vörös a kilenceszeresen ionizált vas (Fe X) ionoktól származik.

Nem csoda, hogy e vonalak nehezen voltak azonosíthatók, hiszen létrehozásukhoz a napkorona millió fokban hőmérséklete szükséges, és ehhez hasonló földi laboratóriumban hosszú ideig nem tudtak előállítani. Ezen ionok felfedezése utalt először a napkorona igen magas hőmérsékletére.

Az X-korona (A röntgen korona)

A korona tanulmányozásában újabb előrelépést jelentett a röntgenmegfigyelés. Röntgen tartományban a kb. 6000°C-os fotoszféra gyakorlatilag semmit sem sugároz, így ha ebben a tartományban készítünk felvételeket, megfigyelhetjük a napkoronát a Nap korongján is. Az 1970-es évek elején a Skylab űrállomás röntgenfényben készült megfigyelései alapján fedezték fel a koronalyukakat, melyek ezen felvételeken mint a környezetnél jóval sötétebb részek voltak láthatóak. Mint később kiderítették a koronalyukakra az jellemző, hogy bennük a mágneses tér szerkezete nyitott.



Az utóbbi évtizedben a Yohkoh műhold szolgáltatott folyamatos adatokat a koronáról, míg napjainkban a Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) űreszközön elhelyezett The Transition Region and Coronal Explorer (TRACE) berendezés adja az új és izgalmas megfigyelési adatokat.

A napkorona színeképében megfigyelhető spektrumvonalak azonosítása után nyilvánvalóvá vált, hogy a korona hőmérséklete eléri a millió fokok nagyságrendet. Hosszú ideig fejtörést okozott, hogy mi fűti a Nap légkörének felső rétegeit, azaz a Nap légköre a fotoszféra néhány ezer fokok hőmérsékletéről hogy vált át az átmeneti rétegen keresztül a korona millió fokok hőmérsékletére, mivel a sugárzás vagy a konvekció ezt nem tudná megvalósítani.

Az elméleti problémát azzal a metaforával szokták érzékeltetni, hogy hogyan lehet a gyertyaláng fölötti levegő sokkal forróbb, mint maga a láng. A magyarázatot a korona mágneses tereinek dinamikájában véljük megtalálni, de máig nem tisztázott pontosan a korona fűtésének mechanizmusa.

Sisakszerű képződmények (Helmet Streamer)

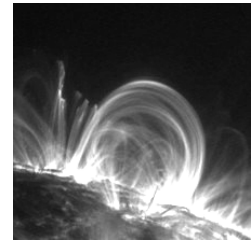
A korona szerkezetében hatalmas sisakszerű képződmények figyelhetők meg, melyek csúcsai egybeesnek a napkorongon aktuálisan fellelhető aktív vidékekkel. A megfigyelések azt mutatják, hogy a protuberanciák, illetve filamentumok gyakran ezen képződmények "talpazatánál" találhatóak. A zárt mágneses térszerkezetnek köszönhetően a korona elektromosan töltött anyaga mintegy besűrűsödik, ezért teljes napfogyatkozás alkalmával egy kis távcsővel is megfigyelhető a korona ezen szerkezete. A helmet streamer-ek csúcsait valószínűleg a Napból kiinduló nagy sebességű gázáramlás, a napszél alakítja ki.

Poláris Szálak (Polar Plume)

A koronaképeken az északi és déli pólusoknál megfigyelhető hosszú, vékony kiáramlások, melyek talppontjai gyakran egybeesnek a koronaképeken feltűnő fényes pontokkal. Ezen fényes pontok a fotoszférában lévő kisebb mágneses területekkel azonosíthatók. A poláris szálakban a mágneses tér nyitott, ezért kialakításukban nagy valószínűséggel a Napból kiinduló nagy sebességű gázáramlás, a napszél játszik szerepet, hasonlóan a helmet streamer-ek csúcsainak kialakításához.

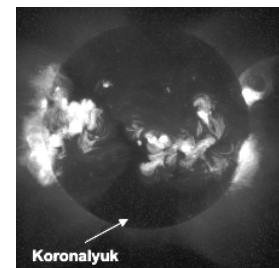
Koronahurkok

Koronahurkokat az aktív területek környezetében találunk. Ezen alakzatok kialakulásában a zárt mágneses tér játszik szerepet. A képen is jól látható, hogy a koronahurkok az aktív vidékekből a koronába felnyúló ívek, melyek lábai a viszonylag "hidegebb" rétegekben, a fotoszférához közel figyelhetők meg. A koronahurkok néhány napig vagy hétig élnek, de ezalatt nagyon gyorsan változnak. A napkitörések közelében található koronahurkok természetesen jóval rövidebb ideig figyelhetők meg a napkorongon.



Koronalyukak

Az 1970-es évek elején a Skylab űrállomás röntgenfényben készült megfigyelései alapján fedezték fel a koronalyukakat, melyek ezeken a felvételeken, mint a környezetnél jóval sötétebb részek voltak láthatóak. A koronalyukakra a nyitott mágneses tér jellemző, ezért nagyon gyakran a pólusok környékén jelennek meg, ahol a Nap mágneses tere nyitott. A Napból kiinduló nagy sebességű gázáramlás, a napszél nagy sebességű komponense és a koronalyukak helyzete jól korrelál egymással.



Napkitörések (flerek)

Míg a napfoltokat már több ezer éve ismeri az emberiség, addig az első napkitörést csak a XIX. század közepén figyelte meg Carrington angol csillagász, és az ugyancsak angol Hodgson. Carrington éppen a napfoltok rajzolásával volt elfoglalva, mikor az egyik foltcsoportban két fényes foltot pillantott meg. Ezek annyira fényesek voltak, hogy arra gondolt kilyukadt az árnyékoló ernyő, és közvetlen napfény jutott a kivetítő ernyőre, de a távcső mozgatásával meggyőződött arról, hogy a jelenség valóban a Nap felszínén van. A foltok fényessége gyorsan növekedett, de egy-két perc múlva a jelenség már elhalványult. A "különös jelenséget" leírva Carrington azt is megemlítette, hogy utána kb. fél napra sarki fény volt megfigyelhető. A Carrington és Hodgson által megfigyelt esemény az ún. fehér fler nagyon ritka. Eddig több mint egy évszázad alatt alig hatvan alkalommal sikerült fehér flert észlelni.

A napkitörések tanulmányozásában a következő előrelépést a Hale által kifejlesztett spektroheliográf és spektroheliószkóp tette lehetővé, amelyekkel a Napot a hidrogén élénkörös emissziós vonalának (H_α vonal) a fényében lehet megfigyelni.

A H_α vonalban végzett megfigyelésekből hamarosan kiderült, hogy a flerek nem is olyan ritkák. A naptevékenység maximuma idején napi 30-40, sőt akár 100 különböző nagyságú fler is megfigyelhető. Látható tehát, hogy a flerek általában optikai tartományban csak kis változásokat okoznak, csak igen ritka esetben fordul elő, hogy fehér fényben is megfigyelhetők. A rövidhullámú (ultraibolya- és röntgen-) tartományban viszont jóval nagyobb fényességnövekedések figyelhetők meg.

Egy-egy nagyobb napkitörés során a Nap ibolyántúli sugárzása többszörösére, röntgensugárzása pedig több nagyságrenddel is megnövekedhet. Az optikai tartományban a fler viszonylag "hidegebb", kb. 10000°C hőmérsékletű részeit látjuk, míg a röntgenmegfigyelések szerint egyes flerek legforróbb részében akár 70 millió °C hőmérsékletek is előfordulhatnak, tehát magasabbak, mint a Nap központjában.

Természetesen a termonukleáris fúzió beindulásához nem elégséges csupán a magas hőmérséklet, nagyon-nagy nyomásra is szükség van.

Mióta számos űreszköz segítségével figyelik a Napot, a Napból érkező röntgensugárzást is rendszeresen mérik. A National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) rendszeresen figyelemmel követi a Napból érkező röntgensugárzást, melyet a Today's Space Weather weboldalon közzé is tesznek.

Összegezve tehát elmondhatjuk, hogy a flerek igen látványos jelenségek, melyek során rövid idő - maximum egy-másfél óra - alatt igen nagy energia szabadul fel. A legnagyobb napkitörések közben egy-két óra alatt akár 10^{20} J energia is felszabadulhat.

Flerek csakis aktív vidékek fölött jelennek meg, ezért a flerek és a mágneses terek kapcsolata szembeötlő. Lényegesen gyakoribbak és nagyobbak a napkitörések a mágnesesen bonyolult szerkezetű foltcsoportokban, és ott is akkor, amikor nagy a mágneses gradiens, azaz egymáshoz nagyon közel találhatók ellentétes polaritású umbrák.

A flerekre vonatkozó elméletek jelenlegi elképzelései szerint az ellentétes mágneses terek találkozásánál, valahol fent a napkoronában egy instabilitás alakul ki, ahol az ellentétes irányú mágneses terek megsemmisítik egymást, és a folyamat során felszabaduló energia pedig az adott térrészben lévő töltött részecskék, protonok és elektronok mozgási energiájává alakul át. A részecskék egy része kifelé elszabadul, létrehozva a fler részecskesugárzását, más részük a mágneses erővonalak mentén lezúdul a kromoszférába, és felhevíti azt. Ha a Nap felszíne felé tartó részecskeáram elér a fotoszféráig, akkor figyelhetjük meg az ún. fehér flert.

CME-k

A flerek látványos kísérőjelensége lehet a CME - Coronal Mass Ejection, magyarul koronaanyagkidobódás, régebbi nevén koronatranziens. A flerek folyamán végbement erővonalátrendeződésnek olyan következménye is lehet, hogy az aktív vidék fölötti mágneses fluxuskötegek elszakadnak a felszínhez közeli részeiktől és szabaddá válva óriásira (a napátmérő sokszorosára) fúvódnak fel majd nagy sebességgel eltávoznak a Naptól.

A CME-k a naprendszer legnagyobb összefüggő alakzatainak tekinthetők. A felfúvódásnak az az oka, hogy az elszakadás után a fluxuskötegekben uralkodó mágneses nyomással és az erővonalak görbültsége miatti feszültséggel immár semmi nem tart egyensúlyt.

Az alakzat egy olyan gigantikus buborékként képzelhető el, melynek összetartó ereje nem a felületi feszültség, hanem a mágneses tér. Egy átlagos CME-vel kidobott anyag tömege kb. egymilliárd tonna lehet (a nyugodt Nap ennyit bocsát ki a napszél révén kb. negyedóra alatt), sebessége 20 km/s-től 1200 km/s-ig terjedhet.

Mozgások a Naprendszerben

Kepler törvényei

Kepler első törvénye

I. A bolygók ellipszispályán keringenek, melynek egyik fókuszpontjában a Nap áll.

Mai, általánosabb és precízebb megfogalmazás: A Naprendszer égitestjei kúpszeletpályán keringenek, melynek egyik fókuszpontjában a vonzócentrum és az égitest közös tömegközéppontja áll.

Vonzócentrum: Nap, vagy a holdak esetében egy másik égitest.

A kúpszelet lehet

- * ellipszis $e < 1$
- * parabola $e = 1$
- * hiperbola $e > 1$

Szóhasználat: a pálya jeles pontjai

Vonzócentrum	peri - nál, -nél, körül	apo - tól, től
Általánosan	pericentrum, periapszis	apocentrum, apoapszis
Nap	perihélium	aphélium
Föld	perigeum	apogeum
Csillag	periasztron	apoasztron

Szóhasználat: mozgásirányok

Az Ekliptika északi pólusa felől tekintve

- * a pozitív (óramutatóval ellentétes irány) – prográd, direkt, előretartó
- * a negatív (óramutatóval egyező irány) – retrográd, hátráló

Kepler második törvénye

II. A bolygót a Nappal összekötő rádiuszvektor (vezérsugár) egyenlő idők alatt egyenlő területeket sűrol.

Mai, általánosabb és precízebb megfogalmazás: Az égitestet a közös tömegközépponttal összekötő rádiuszvektor (vezérsugár) egyenlő idők alatt egyenlő területeket sűrol.

Értelmezés: Ha az idő infinitezimális dt , akkor a sűrolt terület egy keskeny háromszög, melynek nagysága $rv_{\varphi} \frac{dt}{2}$, ahol v_{φ} a sebesség érintőleges (tangenciális) komponense.

Tehát a törvény szerint $rv_{\varphi} = \text{állandó}$. Viszont $mr v_{\varphi}$ a test impulzusmomentuma, tehát ez a perdület megmaradásának törvénye is.

Kepler harmadik törvénye

III. A bolygópályák fél nagytengelyeinek köbei úgy viszonyulnak egymáshoz, mint a keringésidők négyzetei.

$$\frac{a_1^3}{a_2^3} = \frac{T_1^2}{T_2^2}, \text{ vagyis } \frac{a^3}{T^2} = \text{állandó}. \text{ Az állandó értéke 1, ha } [a] = AU \text{ és } [T] = \text{év}.$$

Mai, általánosabb és precízebb megfogalmazás: Két, közös tömegközéppontjuk körül keringő test esetén $\frac{a^3}{T^2} = \frac{G}{4\pi^2} (M_1 + M_2)$.

Ha $M_1 \gg M_2$, akkor minden M_1 körül keringő égitestre megegyezik $\frac{a^3}{T^2}$.

(például a Nap körül keringő bolygók esetében is; így mérhető a Föld tömege)

Kozmikus sebességek

Körsebesség: az M tömegű tömegpont körül r sugarú körpályán keringő kicsiny test sebessége.

$$\text{Gravitáció} = \text{centrifugális erő: } G \frac{M}{r^2} = \frac{v_{kör}^2}{r}, \text{ amiből } v_{kör} = \sqrt{\frac{GM}{r}}.$$

Ha $M = M_{\oplus}$ és $r = R_{\oplus}$, akkor megkapjuk az I. kozmikus sebességet, melynek értéke $v_I = 7,9 \frac{km}{s}$.

A keringésidő $P = \frac{2\pi}{v_{kör}} = \frac{2\pi}{\sqrt{GM}} r^{\frac{3}{2}}$, ami Kepler II. törvényét adja.

Geoszinkron pálya: a periódusidő 1 nap, a keringés iránya megegyezik a Föld forgásával.

Geostacionárius pálya: geoszinkron körpálya az Egyenlítő síkjában. Magassága 36ezer km.

Égi mechanikai paradoxon: ha a műholdat gyorsítjuk, akkor a centrifugális erő nagyobb lesz, mint a gravitáció, ekkor a műhold magasabb pályára áll, a sebessége pedig csökken (visszafelé is igaz).

Szökési sebesség: az M tömegű tömegponttól tetszőleges messze történő eltávolodáshoz szükséges kezdősebesség.

$$\text{Mozgási energia} = - \text{Potenciális energia} \quad \frac{v_{esc}^2}{2} = \frac{GM}{r} \Rightarrow v_{esc} = \sqrt{2} v_{kör}$$

Ha $M = M_{\oplus}$ és $r = R_{\oplus}$, akkor megkapjuk a II. kozmikus sebességet, melynek értéke: $v_{II} = 11,2 \frac{km}{s}$.

III. kozmikus sebesség: A Naprendszer elhagyó űrszonda indításához szükséges sebesség a Földről.

Ha $M = M_{\oplus}$ és $r = 1AU$, akkor megkapjuk a II. kozmikus sebességet, melynek értéke: $v_{esc} = 42,1 \frac{km}{s}$

De a Föld pálya menti sebessége $29,8 \frac{km}{s}$, ezért csak $v_m = 12,3 \frac{km}{s}$ kell.

De a szondát a Föld gravitációs teréből is ki kell juttatni. ezért a teljes szükséges energia $\frac{v_{III}^2}{2} = \frac{v_{II}^2 + v_m^2}{2} \Rightarrow v_{III} = 16,6 \frac{km}{s}$ a harmadik kozmikus sebesség.

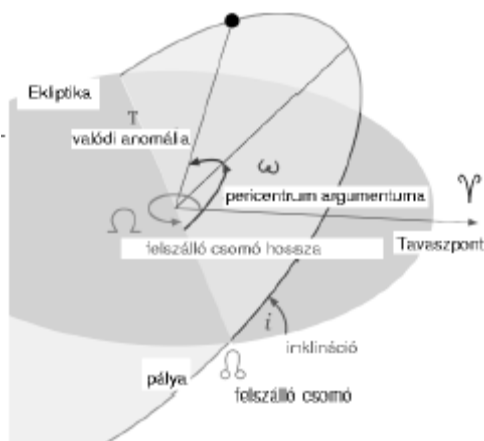
Kepler-pályák pályaelemei

A mechanikában a tömegpont mozgása kiszámítható, ha a kezdeti helykoordinátái (3 adat) és sebességkomponensei (3 adat) ismertek, ez 6 adatot jelent. Eszerint a pályát 5 pályaelem rögzíti; az égitest pályán elfoglalt helyzetének megadásához még egy időadat kell.

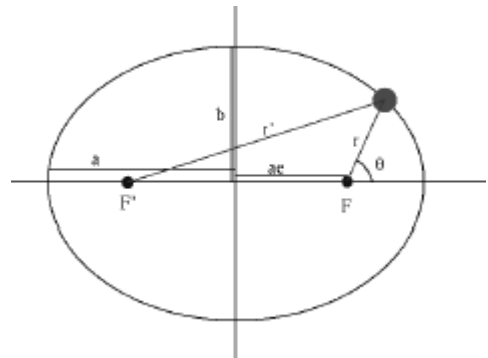
- * t_0 a pericentrum-átmenet időpontja

A pálya mérete és alakja:

- * a fél nagytengely
- * e excentricitás.
- * i *inklináció* (pályahajlás): a pályasík és az ekliptika szöge;
ha prográd, akkor pozitív, ha retrográd, akkor negatív



A pályasík helyzete a térben



- * Ω felszálló csomó hossza
csomóvonal: a pályasík és az ekliptika metszévonal
csomópontok: a csomóvonal és az éggömb metszéspontjai a vonzócentrumból nézve.

felszálló csomó: ahol az égitest az ekliptika déli oldaláról átlép az északra

Ω a felszálló csomó ekliptikus hosszúsága a vonzócentrumból nézve

- * ω a pericentrum argumentuma: a felszálló csomótól a pericentrumig mért szög a pályasíkban, a vonzócentrumból nézve.

A bolygók látszó mozgása

Belső bolygók: $a < 1AU$

Külső bolygók: $a > 1AU$

Elongáció: $\epsilon = \lambda - \lambda_{\odot}$

Fényszögek:

konjunkció: $\epsilon = 0$

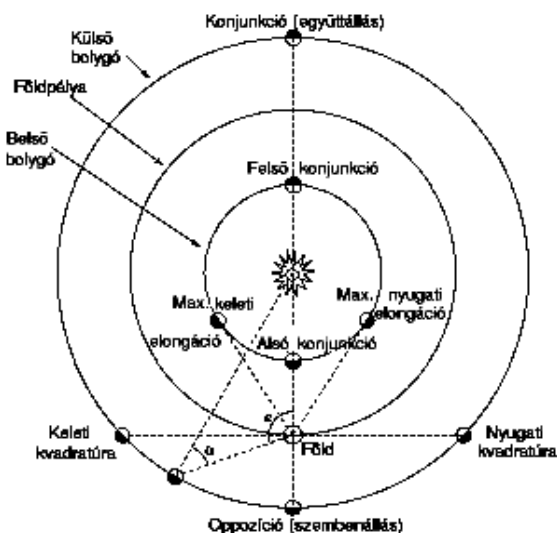
oppozíció: $\epsilon = 180^\circ$

kvadratura: $\epsilon = 90^\circ$ vagy 270°

Retrográd mozgások:

belső bolygók alsó konjunkcióknál

külső bolygók oppozícióknál



Szóhasználat: periódusok

Sziderikus keringés: a vonzócentrumból nézve, az állócsillagokhoz képest

(*siderus latin*): csillagzat)

Szinodikus keringés: a Földről nézve, a Naphoz képest. Ugyanazon fényszögtől ugyanazon fényszögig.

$$\frac{1}{P_{syn}} = \left| \frac{1}{P_{sid}} - \frac{1}{1 \text{ év}} \right|$$

A sziderikus és a szinodikus tengelyforgásra ugyanez érvényes, csak a Nap, az égitest, és a Föld helyett rendre az égitest középpontja, a felszín egy pontja, illetve a Nap értendő.

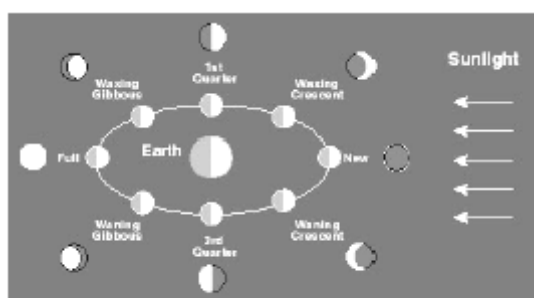
Szóhasználat: a bolygókorongok jellemzői

Centrálmeridián: a bolygókorong középpontján átmenő délkör

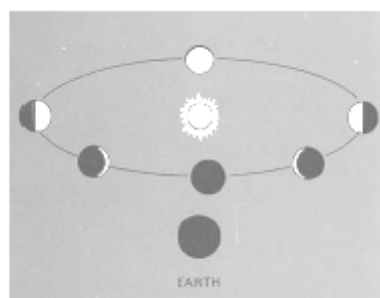
Terminátor: a bolygó nappali és éjszakai féltékáját elválasztó vonal

Fázis: a bolygókorong megvilágított hányada

Albedó: fényvisszaverő képesség, 0 és 1 közötti érték



Holdfázisok



A Vénusz fázisai

Perturbációk és rezonanciák

A harmadik test zavaró (perturbáló) hatással van: a pályaelemek változnak.

- * a periodikus perturbációk egy átlagérték körül ingadoznak
- * a szekuláris perturbációk monoton módon változnak (saeculum (lt): évszázad)

Rezonancia: ha két periódus aránya kis egész számok arányával egyezik meg

- * ugyanazon helyzet gyakran ismétlődik, és a kis zavarok hatása nagyon felerősödik
- * az ilyen pályák stabilizálódnak, de erős perturbációknak vannak kitéve
- * az ütközések miatt néptelen zónákban benépesednek, népes zónákban elnéptelenednek

Példák:

- * Neptunusz – Pluto 2:3 rezonancia
- * Jupiter – Szaturnusz 2:5 rezonancia
- * Kisbolygók és Jupiter

Kirkwood-űrök a 4:1, 3:1, 5:2, 2:1, stb. rezonanciáknál

különösen sok kisbolygó a 3:2 rezonanciánál: Hilda-csoport

Titius-Bode szabály (1766)

$$a[AU] = 0,4 + 0,3 \cdot 2^n, \text{ ahol}$$

Jóslat: új bolygók lehetnek $n=3$ -nál (2,8AU). és $n=6$ -nál (19,6AU).

1781, Uránusz $a=19,2AU$ és 1800, Ceres $a=2,8AU$

a Neptunuszra viszont már nem igaz

n	Bolygó
$-\infty$	Merkúr
0	Vénusz
1	Föld
2	Mars
4	Jupiter
5	Szaturnusz

Mai felfogás: a szabály csak annyit mond, hogy a bolygók naptávolsága kb. exponenciálisan nő, vagyis $\log a$ egyenletesen nő.

Ebben az értelemben a szabály a holdrendszerekre is igaz.

Mi az oka? Újabb felfogás szerint a bolygópályák a Naprendszer életének első néhány száz-millió évében még változtak, vándoroltak (migráltak).

$\Rightarrow$ rezonanciákba álltak be (csupa 1:2 rezonancia esetén pontosan $a \sim 2^{\frac{2n}{3}}$).

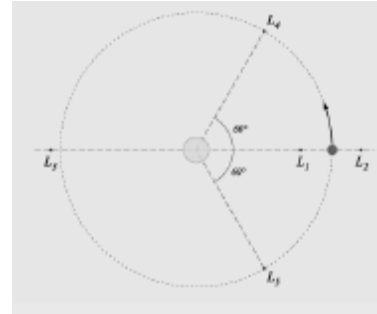
Háromtest probléma és a Lagrange-pontok

Korlátozott háromtest probléma: adott két, egymás körül, körpályán keringő test (M_1, M_2)

Hogyan mozog egy kicsiny ($M \ll M_1, M_2$) harmadik test?

Célszerű forgó vonatkoztatási rendszerben vizsgálni, ahol M_1, M_2 áll.

Nevezetes megoldások a Lagrange-féle librációs pontok – ezekben M megmarad.



$\frac{M_1}{M_2} \geq 25$ esetén L_4, L_5 stabil $\Rightarrow$ a gyakorlatban gyakran van itt égitest

- * Nap-Jupiter rendszer: Trójai kisbolygók
- * Koorbitális holdak

Szaturnusz + Tethys: Telesto, Calypso

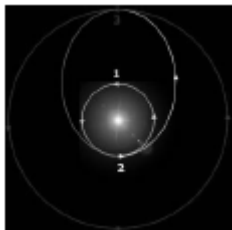
Szaturnusz + Dione: Helene

$L_1 - L_3$ pontok instabilak, de körülöttük stabil, úgynevezett halo pályák vannak, ide telepíthetők műholdak.

- * Nap-Föld rendszer L_1 pontja körül SOHO, WIND, GENESIS
- * Nap-Föld rendszer L_2 pontja körül WMAP

„Fapados” bolygóközi utazás

1. Hohmann-ellipszispályák



Eddig főleg ezt használták

2. Interplanetáris Transzporthálózat

Lagrange-pontok körül kicsiny erőlkéssel egészen más pályára terelhető a szonda

pl: Hiten (Japán, 1991), SMART-1

A Naprendszer égitestjei

Planetáris testek: csillag vagy más planéta körül keringenek, és tömegük $< 13M_J$

Lehetnek fő planetáris testek vagy holdak (szatelliták, mellék planetáris testek)

Holdak: más planéta körül keringenek, közös tömegközéppont a másik belsejében

Bolygó (IAU 2006)

Közel gömb alakú fő planetáris test, átmérője $\geq 800\text{km}$, és kitakarította pályája környezetét; vagyis pályája környékén csak nála sokkal kisebb égitestek keringenek

Törpebolygó (IAU 2006)

Olyan égitest, amely a Nap körül kering (azaz nem egy másik bolygó holdja), elegendően nagy tömegű ahhoz, hogy kialakuljon a hidrosztatikai egyensúlyt tükröző közel gömb alak és nem söpörte tisztára a pályáját övező térséget. Átmérője $\leq 800\text{km}$. Összesen körülbelül tizenvalahányat ismerünk most. A Naprendszerben 8 bolygó: Merkúr, Vénusz, Föld, Mars, Jupiter, Szaturnusz, Uránusz, Neptunusz.

Kis naprendszerbeli test (KNT; IAU2006): az összes többi fő planetáris test

Kisbolygó: átmérője $\geq 1\text{ km}$ (az üstökösök nem) KNT. Szilárd anyagú égitest, mely csillag körül kering. A legtöbb kisbolygó feltehetően a protoplanetáris korongból származik, melyek nem álltak össze bolygóvá a csillagrendszer kialakulásakor. Néhányuk saját holddal is rendelkezik.

- * **aszteroida:** közet kisbolygó (többi jég)
 - * **üstökös:** Napot megközelítő ($\leq 5\text{AU}$) jég kisbolygó
- Jupiter pályáján belülre került jég kisbolygó

A kisbolygók sorszámot kapnak, és a felfedezőtől nevet.

A törpebolygók is kapnak kisbolygószámot, az üstökösök viszont nem.

Pluto 10000-es a kisbolygókatalógusban.

Kisbolygók zöme két övezetben található meg:

- * A kisbolygó-öv (aszteroida öv) a Naprendszerben a Mars és a Jupiter pályája közötti, nagy mennyiségű kisbolygót tartalmazó területe. $\sim 2\text{-}4\text{AU}$, 1 törpebolygó (Ceres) és $\sim 10^5$ db aszteroida
- * A Kuiper-öv a Neptunusz pályáján kívül található kisbolygó-öv $\sim 40\text{-}100\text{AU}$. Gerard Kuiper csillagász tiszteletére nevezték el. Objektumai: több tucatnyi törpebolygó, pl. Eris, Pluto-Charon kettős törpebolygó, és 10^3 kisbolygó

Meteoroid $\sim 0,1\text{mm}$ – 1km KNT. A meteoroid egy viszonylag kicsi (homokszem és szikladarab közötti méretű) kispánszerbeli test, amely túl kicsi ahhoz, hogy kisbolygónak tekinthessük. Amikor egy bolygó légkörébe lép, a meteoroid a súrlódás hatására felhevül és részben vagy teljesen elpárolog. A meteoroid útján ekkor a gáz ionizálódik és felizzik.

- * **meteor:** a földi légkörbe jutott, izzó meteoroid, zömük $\sim \text{mm}$ méretű
- * **meteorit:** a földre hullott meteoroid, csak a nagyobbak jutnak le (legalább néhány tíz centiméteresek)

Föld típusú bolygók, kőzetbolygók: Merkúr, Vénusz, Föld, Mars.

Óriásbolygók:

Jupiter típusú bolygók, gázóriások: Jupiter és Szaturnusz; Uránusz-típusú bolygók, vízbolygók: Uránusz és Neptunusz, melyeket főleg víz alkot, viszont lehet szilárd magjuk.

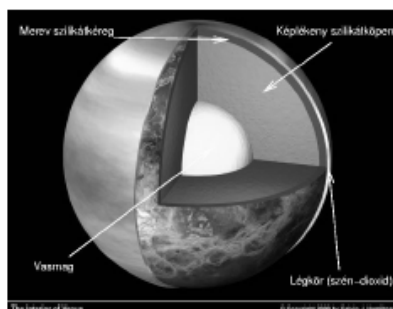
Méret (Mm)	Fő planetáris testek		Holdak	
100	Jupiter Szaturnusz	Bolygók (főbolygók)	J3 Ganymedes, S6 Titan, J4 Callisto J1 Io, Hold, J2 Europa, N1 Triton	Óriásholdak (mellékbolygók)
50	Uránusz, Neptunusz			
10	Föld, Vénusz, Mars			
5	Merkúr			
3	Senki földje			
2	Eris, Pluto	Törpebolygók	Senki földje	
1	Charon, (Sedna, Orcus, Icion, Quaoar) Ceres (Varuna)		U3 Titania, S5 Rhea, U8 Uberon, S8 Iapetus, U2 Umbriel, U1 Ariel, S4 Dione, S3 Tethys, S2 Enceladus	„Törpeholdak”
0,5	Pallas, Vesta, Hygea Davida, Interamnia, Europa, Chariklo	KNT	U5 Miranda, S1 Mimas, N8 Proteus, N2 Nereid, S7 Hyperion, S9 Phoebe + több száz ismert 200kmnél kisebb hold	„Kisholdak”
0,3	+ több mint 100ezer ismert kisbolygó és üstökös			
1 km	Meteoroidok		Gyűrűk és cirkumplanetáris törmelékanyag	
01 mm	Bolygóközi por			

Vegyi differenciálódás a Naprendszerben

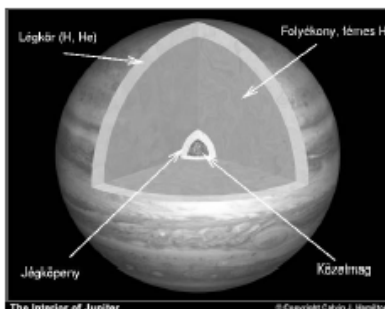
Kémiai differenciálódás: anyagok elkülönülése olvadás/forráspont és sűrűség szerint

- * pl. hűlő magmában
- * pl.: Föld, vasmag, szilikát köpeny és kéreg, kéregben alul bazalt, felül gránit

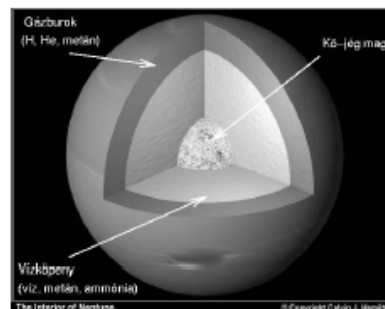
Nagyobb planetáris testek többsége differenciált: valaha legalább részben megolvadtak.



Vénusz



Jupiter



Neptun

Honnét tudjuk, milyen a szerkezetük? Elméleti modellekből az adatok alapján választottunk.

Adatok $\bar{\rho} > \rho_{\text{felszín}}$, gravitációs tér $\Rightarrow$ sűrűségeloszlás

A Naprendszer egésze is ilyen differenciálódást mutat

- * vas,/szilikát arány a Merkúrban maximális,;kifelé csökken
- * hóhatár, kb. $r > 4\text{-}5\text{AU}$ -n túl a jég megmarad az égitestek felszínén, innentől az égitestek főleg jégből állnak
- * $\geq 30\text{AU}$ -tól már a metánjég is megmarad
- * illó anyagok: szobahőmérsékleten gáz vagy folyadék (H_2O , CH_4 , NH_3 , CO_2 , CO , CN)
- * jegek: illó anyagok szilárd fázisa

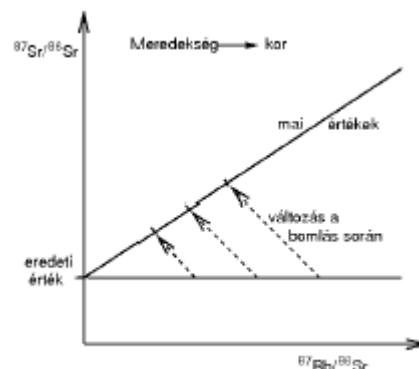
A Naprendszer kora

- * kőzetmintáink vannak, a Földről, Holdról,(meteoritok) sok aszteroidáról, Marsról

Radioaktív datálás

A rubídium-stroncium sugármérési módszer a tízmillió évesnél régebbi kőzetek korának meghatározására szolgál.

Azon alapszik, hogy a rubídium 87-es tömegszámú radioaktív izotópja ismert felezési idő alatt alakul át az stroncium 87-es tömegszámú izotópjává. Így a kőzetben vagy ásványban lévő izotópok arányából megállapítható az adott képződmény abszolút, években kifejezett kora.



Rendes stroncium a 86-os, beépülését kémiai jellemzői határozzák meg

- * eredetileg a $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ minden ásványi szemcsében ugyanannyi volt
- * megszilárdulás óta eltelt idő meghatározható

Ólom-ólom módszer: hasonló, még pontosabb

^{238}U és ^{235}U bomlástermékeinek összevetésén alapszik

Használják még a ^{12}C kormeghatározást is.

Eredmény: a Naprendszer kb. 4,57 milliárd éves.

Legősibb kőzetei (egyes meteoritokban talált zárványok) 4567 ± 1 éve szilárdultak meg.

- * meteorok kétharmada ezután kb. 20 millió éven belül kialakult és megszilárdult
- * legősibb holdkőzetek 4,5 milliárd évesek
- * legősibb ismert földi szilárd anyagok 4,4 milliárd évesek

Preszoláris szupernóva

Radioaktív módszerből az izotópok eredeti gyakorisága is meghatározható.

Kiderül: keletkezése idején a Naprendszer igen sok rövid életű, (<pár millió év) radioaktív izotópot tartalmazott.

Ezek csak egy nagytömegű csillag belsejében jöhettek létre, mely azután felrobbant, és szétszórta anyagát a csillagközi térben.

A Naprendszer eredete

Megfigyelési tény: A fő planetáris testek túlnyomó része kb. egy síkban, egy irányban, közel körpályán keringenek, annak ellenére, hogy erre semmi „oka nem lenne”.

A Naprendszer ma ütközésmentes, az ütközések közötti idő sokkal nagyobb, mint a keringés-idő, tehát ütközéses anyagból kellett keletkeznie.

A Naprendszer égitestjei a Nap körüli gáz- és/vagy porkorongból alakultak ki (protoplanetáris korong).

A protoplanetáris korong eredete (diszk → proplid)

Nebuláris elmélet (Kant 1755, Laplace 1796)

Kant-Laplace nebuláris elmélete: A galaxis köd- és porfelhőjében ütközések révén sűrűsödések alakultak ki - ezek környezetében tömegvonzás lépett fel – a sűrűsödés forgást eredményezett – a forgás miatt a tömeg lapulttá vált – gyűrűk szakadtak le belőle – a gyűrűk anyaga ütközés és sűrűsödés révén bolygókká alakult. A folyamat kb. 15 milliárd évvel ezelőttől 5 milliárd évvel ezelőttig tartott.

A Nappal együtt, vele egyidőben alakult ki egy kiterjedt, ritka, lassan forgó felhőből. Gravitáció és a perdületmegmaradás miatt a felhő zsugorodott, és egyre gyorsabban forgott.

Közepe a Nap lett, széle a proplid.

Történeti kitérő: a nebuláris elmélet alternatívái

(elvakultak, a 20sz elején dívtak a perdületprobléma miatt)

Katasztrófaelmélet (árapály-elmélet): egy másik csillag megközelítette a Napot $\Rightarrow$ a Napból anyag szakad ki $\Rightarrow$ bolygórendszer kialakulása.

Befogási elmélet (Smidt 1941): a Nap csillagközi anyagot fogott be, ebből lett a proplid.

Ezek kis valószínűségű folyamatok, és így a bolygórendszerek ritkák lennének; ma már azonban kizárhatók, ugyanis a csillagok körül igen gyakoriak a bolygórendszerek. Megfigyelési tény: néhány millió évnél fiatalabb csillagok körül gyakran látható gáz és porkorong.

A Nap proplidját szoláris ködnek nevezzük.

A perdületprobléma

	Nap	Bolygók
Tömeg	99,8%	0,02%
Impulzusmomentum	0,5%	99,5%

Hogy lehet ez, ha egy anyagból keletkezik?

Válasz: perdületátadás kifelé.

Lehetséges mechanizmusok a perdületátadásra, a 20. század közepén:

- * turbulencia $\Rightarrow$ sok ütközés az anyagsomók között (Weizsäcker, Kuiper)
- * befagyott mágneses tér merev forgás felé tereli az anyagon (Alfvén, Hoyle)

Mai kép:

(1) A felhőben eredetileg sem volt egyenletes a perdületeloszlás (pl. tengelyen 0).

De így csak 0,01M tud közvetlenül beesni, a többi a korongba kerül.

Ezután:

(2) Akkréciós korong [lat. accretio: gyarapodás, begyűjtés]

Benne az anyag lassan befelé spirálozik, melyek oka Kepler III. törvénye. Belül a gáz gyorsabban kering, és a belső súrlódás révén perdületet ad át kifelé.

A súrlódás főleg turbulens jellegű, de a mágneses térnek is lehet némi szerepe, így a Nap már "meghízhat", de még mindig igen gyorsan forog, közel felbomlási sebességgel (egyenlítői körsebesség).

(3) Mágneses fékeződés: A Nap forgása idővel lelassul, mivel a napszél tömegéhez képest nagyon sok impulzusmomentumot visz el (Alfvén-mechanizmus).

Bizonyíték: Naphoz hasonló, de fiatalabb csillagok gyorsabban forognak.

Szoláris ködtől a bolygókig

A szoláris köd kezdetben forró volt, több ezer fokos, az akkréció és az Ős-Nap sugárzása miatt $T(r)$ csökken (természetesen).

Mekkora volt a tömege? – 3 verzió van rá:

- * minimális tömeg; planetáris testek tömegét a Nap összetételére kiegészítve $\sim 0,02 M_{\odot}$
- * maximális tömeg $\sim M_{\odot}$
- * $\sim 0,1 M_{\odot}$, ma ezt tartják legvalószínűbbnek

Bolygóképződés – két lehetőség

(1) Forró/Kollapszos/összeomlásos keletkezési elmélet (Kuiper, Cameron)

- * a bolygók a forró gázködből közvetlenül jöttek létre, gravitáció kollapszussal
- * előnye: nagyon gyors folyamat kb. 1000év
- * hátrányai: csak maximális tömegű ködben lehetséges; minden bolygó forró gázóriás-ként kezdte volna $\Rightarrow$ közetbolygókból hová tűntek a nemesgázok?; kis égitestekre nem ad magyarázatot

(2) Hideg/összeállásos/akkréciós elmélet (Szafronov, Wetherill)

- * szoláris köd lehűlt, belőle porszemek csapódtak ki
- * a porból lassan egyre nagyobb darabok álltak össze
- * előnye: magyarázza a Naprendszer vegyi differenciálódását
- * a maradék gázt a fiatal Nap erős szele egy idő után elfújta $\Rightarrow$ beljebb csak a magasabb olvadáspontú anyagok csapódtak ki
- * ráadásul a hóhatáron belül a jég sohasem tudott volna kicsapódni
- * hátránya: időskála túl lassú, óriásbolygókkal problémák.

A kondenzációs sorozat -A szoláris köd ásványsora

Kondenzációs hőmérséklet [K]	Főbb ásványcsoportok	Melyik égitestnél állt meg itt a kondenzáció?
1500	Ca, Al, Ti oxidjai	ősi zárványok meteoritokban (CAI)
1400	vas, nikkel	Merkur
1300	szilikátok	Vénusz, Föld
700	vas oxidálódik, szulfidálódik	Mars
600	szén, szénvegyületek	aszteroida-öv
200	vízjég	Jupiter, Szaturnusz
100	ammónia- és metánjég	Uránusz, Neptunusz, Kuiper-öv

Az óriásbolygók keletkezése

Problémák merülnek fel

(1) Holdrendszerek kvázi miniatűr naprendszerek

- * a korongból keletkezhetnek, kollapszussal (?)
- * alternatív magyarázat: az árapály erők csökkentik az excentricitást és az inklinációt

(2) Időskála probléma

- * Kepler III alapján az összeállás időskálája kint sokkal hosszabb
- * de a proplidok pár millió év alatt eltűnnek; emellett a Jupiter már kellett az aszteroida-övhöz
- * Levonhatjuk a következtetést, hogy az óriásbolygók nem keletkeztek CSAK összeállással
- * a Neptunusz képződése $\sim 10^8$ éves időskálán zajlott volna

Mai, általánosabb elképzelés

(1) Nukleáció avagy magakkréció (Mizuno)

- * összeállással $10M_{\oplus}$ tömegű jég-kő mag keletkezett, majd erre omlott rá a gázburok
- * Uránusz és Neptunusz lassabban jöttek létre, addigra már kevesebb volt a gáz
- * Holdrendszerek így kollapszusos eredetűek lehetnek
- * de egyes holdak később is befogódhattak vagy elveszhettek

Az időskála még így is feszített, csak nagy anyagsűrűség esetén jó.

- * így a Jupiterhez 3, a Neptunuszhoz minimum 20-30 millió év kell

(2) Vándorló nagybolygók

Az óriásbolygók pályafejlődése a jég-kisbolygókkal való kölcsönhatások miatt egy új modellben $\Rightarrow$ nizzai modell.

(3) Újabban hibrid modell (Boss, Durizen)

A szoláris köd hideg, külső részein gravitációs instabilitás lép fel. Nem bolygókhoz vezet, hanem spirális sűrűség hullámokhoz. Ezek rezonáns perturbációinak hatására a belső részeken sűrűbb gyűrűk alakulnak ki, melyekben kedvező feltételek teremthetnek az óriásbolygók képződéséhez.

A Hold

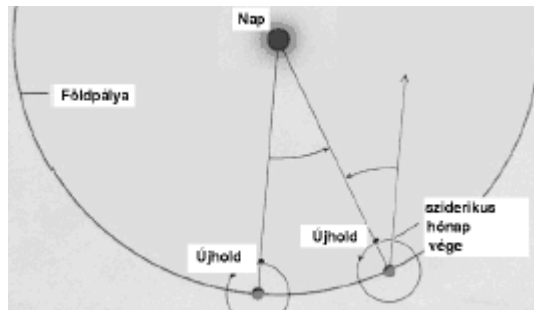
A Hold mozgása

Sziderikus hónap: 27,32 nap, az állócsillagokhoz képest.

Szinodikus hónap: 29,53 nap, újholdtól újholdig

$$a = 38400\text{km}; e = 0,055; i = 5^\circ$$

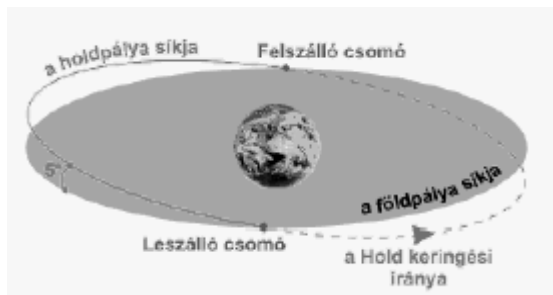
Tengelyforgása kötött, a libráció miatt azonban a Földről 59%-a megfigyelhető. A tengelyforgási periódusa megegyezik a periódusával.



Ha a Holdon és a Földön kívül más nem lenne, és pontszerűnek tekintenénk őket, akkor kepleri rendszerben mozognának, de a Nap gravitációs hatása és kiterjedésük miatt a mozgásuk nem egyenletes.

A legjelentősebb pályaelemváltozás a csomóregresszió, ami $P = 18,6\text{év}$.

A csomóvonal retrográd irányban fordul körbe, ez a csomóregresszió. Ennek következményeként bevezethetjük a hónap egy harmadik formáját, ez a drakonikus hónap, ez idő alatt a Hold az egyik csomóból visszatér a másik csomóba, ennek ideje 27,21 nap. Ha nem lenne csomóregresszió, akkor a drakonikus hónap megegyezne a sziderikus hónappal.

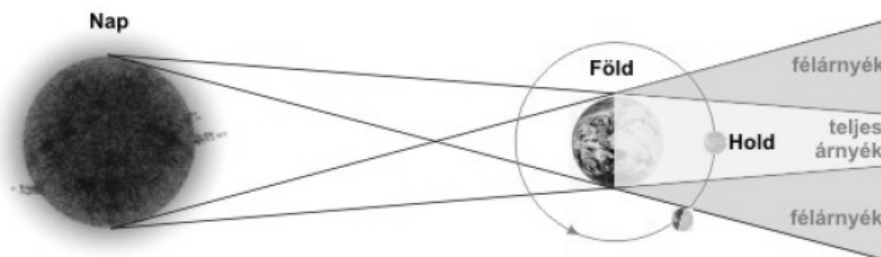


A csomóregresszió és a Nap ekliptikája miatt nincs minden újholdkor fogyatkozás, hanem csak 346,62 naponta.

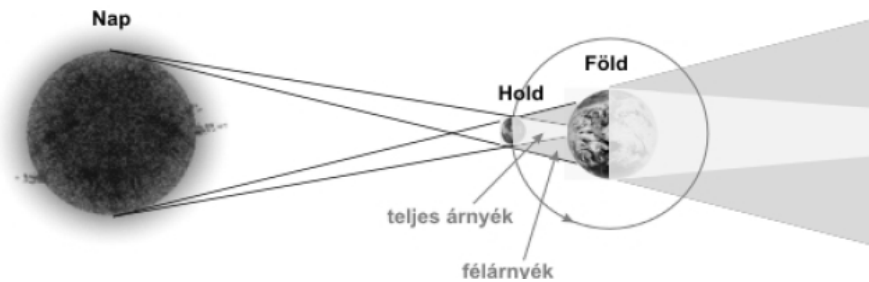
A csomóregresszióknak még egy érdekes következménye van: a Holdpálya és az Egyenlítő által bezárt szög 18,5 és 28,5 fok között ingadozik.

Fogyatkozások

Holdfogyatkozás teliholdkor, napfogyatkozás újholdkor.



- * A Hold egésze teljes árnyékban: teljes holdfogyatkozás
- * A Hold egy része a teljes árnyékban: részleges holdfogyatkozás.
- * Hold félárnyékban: penumbrális holdfogyatkozás: alig észrevehető, a telihold korongja valamivel halványabb.



- * Megfigyelő a teljes árnyékban: teljes napfogyatkozás
- * Megfigyelő félárnyékban: részleges napfogyatkozás
- * Megfigyelő az árnyékon túl, amikor a Hold földtávolban van: gyűrűs napfogyatkozás

Általában fél fogyatkozási évente van legalább egy nap- és egy holdfogyatkozás (ebbe beleértve a részleges és penumbrális fogyatkozásokat is).

A fogyatkozások bizonyos rendszer szerint ismétlődnek.

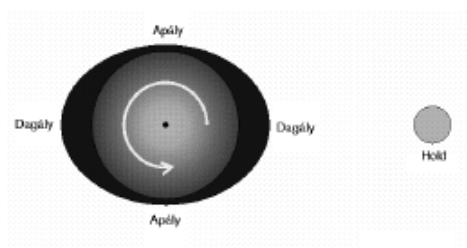
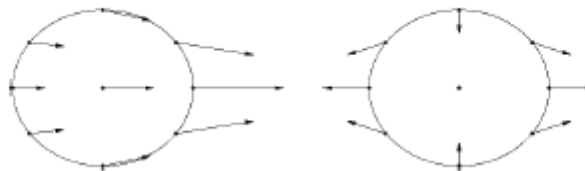
Szárosz: fogyatkozási ciklus, ami 223 szinodikus hónap, ami kb. 6585 1/3 nap, ami kb. 19 fogyatkozási év, kb. 242 drakonikus hónap, kb. 239 anomalisztikus hónap. Ugyanaz a fogyatkozás visszatér, de az 1/3 miatt 120°-kal nyugatabbra. Három szárosz alatt majdnem ugyanoda tér vissza, de 300 km-rel délebbre. Egy szárosz-sorozat kb. 1200-1500 év alatt az északi sarktól a délig vándorol. Ezeket a sorozatokat számozzák, pl. a 2006. márciusi a 139. (1501-2763).

Az árapály-erők

Árapálykeltő erő: két pont között a gravitációs erő különbsége.

Inerciarendszerben:

Tömegközépponti rendszerben:



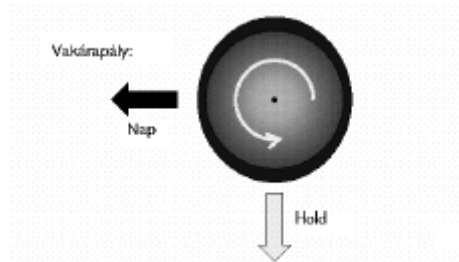
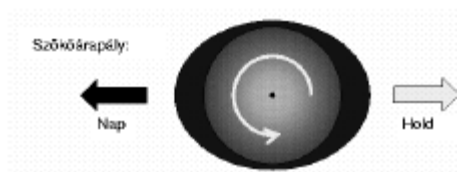
Ennek eredménye az árapály, az árapály amplitúdója az óceánon kb. 1m, a szárazföldön kb. 20cm. A földrajzi viszonyok nagy helyi eltéréseket okoznak, pl. Nova Scotia-ban 15m; Vietnámban pedig csak napi 1 dagály van.

Az árapályerő számítása:

$$F_t = GMm \left[\frac{1}{(r-R)^2} - \frac{1}{(r+R)^2} \right], \text{ amiből } \frac{F_t}{GMm} = \frac{(r+R)^2 - (r-R)^2}{(r+R)^2(r-R)^2} = \frac{4Rr}{(r^2 - R^2)^2}$$

$$= \frac{4Rr}{r^4 \left[1 - 2\frac{R^2}{r^2} + \frac{R^4}{r^4} \right]} \approx \frac{4R}{r^3} \left(\text{mert } 2\frac{R^2}{r^2} + \frac{R^4}{r^4} \text{ elhanyagolható, ha } R \ll r \right)$$

$$\text{Vagyis } F_t \propto \frac{R}{r^3} \Rightarrow \text{a Naphatása kb. fele a Holdénak: } \frac{M_{\odot}}{M_c} \left(\frac{d_c}{1AU} \right)^3 \approx 0,45$$



Újholdkor és Teliholdkor a Hold és Nap hatása erősíti egymást: szűköárpály; amikor kb. merőlegesen állnak egymáshoz képest, akkor pedig gyengítik egymást: vakárpály.

A Roche-féle határ

Ha a keringő égitest elég közel van a vonzó centrumhoz, az árapály erők nagyobbak lehetnek, mint a bolygó saját gravitációja.

A bolygótól mért azon kritikus távolság, amelyen belül az odakerülő természetes holdat a megnövekedett árapályerők darabokra tépik ($F_t > F_g$). Roche határozta meg (1847), sűrűségtől függően a bolygó sugarának körülbelül 2 - 2,5 szerese.

$$GMm \frac{4R}{r^3} > G \frac{m^2}{4R^2} \Rightarrow r_R = \sqrt{\frac{12}{\pi}} \sqrt{\frac{M}{\rho}} \approx 2,5 \sqrt{\frac{M}{\rho}}$$

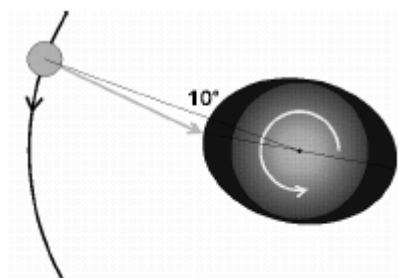
Konstans értéke valójában kisebb ennél, ugyanis függ az alaktól és a szakítászilárdságtól is.

A Roche-határon belülré kerülő holdak szétesnek, ez a gyűrűk keletkezésére a magyarázat.

Az árapályerők hatásai

Az árapály-fékezés miatt (A Föld forog, és „viszi magával” az óceánjait, a dagálykúp 10°-kal a Hold előtt van, nem egészen felé mutat) a Föld forgása évszázadonként 0,0023 másodperccel lassul, és a Hold 3,8 centimétert távolodik évente. Ez akkor igaz, ha a forgás gyorsabb, mint a keringés, és a hold arra kering, amerre a bolygó forog.

Más a helyzet azonban, ha a hold szinkronpályán belül van, például a Phobos esetében; illetve ha a hold retrográd keringésű, például a Triton és a Phoebe. Az ilyen holdak lassan zuhannak, beesnek a Roche-határon belülré, majd szétszakadnak, tehát befogásos eredetűek, pl. a Phobos egy aszteroida volt, amit a Mars befogott.



Rezonanciák a forgás és keringés között

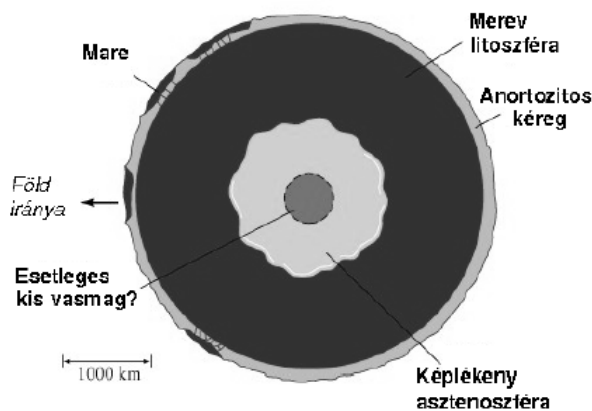
A Merkúr esetén 2:3-as rezonancia. A Hold és a Plútó-Charon rendszer kötött (szinkron) tengelyforgást végez, ez az 1:1-es rezonancia.

Árapály-fűtés

Az árapálymozgások miatt belső súrlódás lép fel, amely fűtést okoz. Ennek feltétele, hogy az excentricitás nem lehet nulla, vagy a forgás nem lehet kötött.

Ez hosszú távon csak más égitestek perturbáló hatására marad fenn. Például az Io esetében a keringési rezonanciák tartják fent: Io-Europa 1:2 és Io-Ganymedes 1:4.

A Hold felépítése



$$R_C = 1738 \text{ km}; M_C = \frac{M_{\oplus}}{81} \Rightarrow \bar{\rho} = 3,3 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

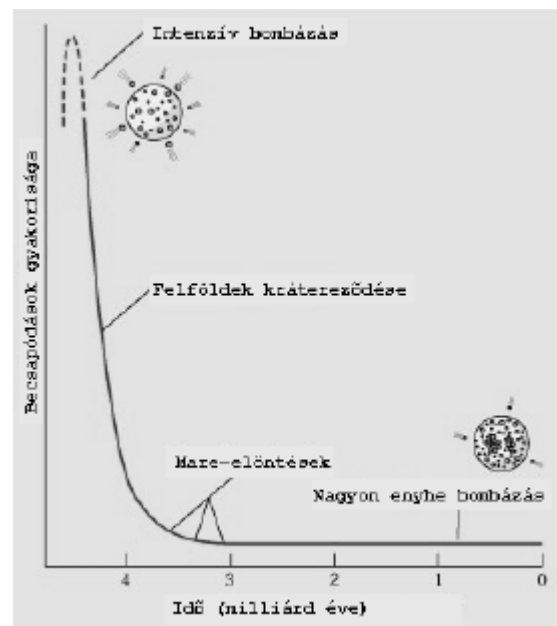
A Holdnak nincs vasmagja, vagy csak nagyon kicsi. A Holdra már telepítettek szeizmográfot, így szeizmikus mérésekkel információkat szereztek a belső szerkezetéről.

Megfigyelve a felszínt, észrevehetjük, hogy vannak sötétebb és világosabb részek. A *mare* latinul tengert jelent, Galilei idejében tengernek hitték ezeket a mélyebben fekvő medenceterületeket. A magasan fekvő, felföldek pedig a *terrák*.

A Hold nagyon világosnak látszik, de az albedója csak 0,08, tehát sötét színű kőzetek alkotják, alapvetően bazaltosak. Sötét mare területek főleg a Föld-felőli oldalon találhatók.

Kráterek

A kráterek becsapódásos eredetűek. Ha nagyobbak, akkor szerkezetük is összetettebb. Először megjelenik a kráter közepén egy központi csúcs. Még nagyobbánál a kráter szerkezete egy peremszerkezetet mutat, még nagyobbánál pedig még több sánc látható. Ennek oka, hogy a becsapódáskor az anyag megolvad, így a becsapódó anyag folyadékcseppként viselkedik, és nagyobb energiánál később dermed meg. A becsapódás után először egy medence keletkezik, majd az anyagban elindul egy hullám, mely több felszíni hullámot vált ki, ami koncentrikusan terjed kifelé. A gödörkráter kisebb, mint 20km, a központi csúcsos kráter 20 és 250km közötti, a központi gyűrűs kráter 250 és 400km közötti, míg a többszörös gyűrűs medence nagyobb, mint 400km. A fő felszínformáló erők tehát a becsapódások voltak.



Vannak területek, ahol kráter van kráter hátán, illetve olyan is, ahol alig van valami felszíni hiba. A kráttersűrűség alapján tehát lehetséges a kormeghatározás. A kráterdúsabb területek idősebbek.

Kormeghatározás lehetséges radioaktív módszerrel is. A holdkéreg, azaz a felföldek területei 10^8 évvel a Naprendszer keletkezése után szilárdultak meg, a medencék aljzata csak 3,6~3,1 milliárd éve, tehát ezeket későbbi lávaelőntés töltötte ki. Maguk a medencék is nagy becsapódások nyomai. Koruk a kidobott anyag alapján 3,9~3,8 milliárd év, melyet az úgynevezett késői erős bombázás okozott (holdbéli kataklizma).

Holdközetek

A Hold az egyetlen égitest, ahonnan tudatosan hoztak eddig kőzeteket. A regolit, azaz holdpor az a több méter vastag porréteg, ami a Holdon alakult ki, a meteorbombázás és a hőmérsékletingadozás miatt. A breccia nem más, mint a becsapódás alkalmával összetört és egybeolvadt kőzetegyveleg. Ez a Földön vulkáni környezetben ismert (Etna környékén vannak ilyen jellegű kőzetek).

A medencék anyaga bazalt, az úgynevezett mare-bazalt, ami kiömlési kőzet, azaz gyorsan hűlt le; megkülönböztethető a földi kőzetektől. A felföldek anyaga is bazaltos kőzetű, de ennek anyaga gabbró, ezen belül főleg anortozit, ami mélységi kőzet, tehát lassan hűlt le. Az anortozit a Földön is ismert, itt azonban igen ritka ásvány.

Kőzetmintákat csak néhány helyről gyűjtöttek, de a műholdak röntgen- és gamma-spektroszkópiás mérései alapján ismerjük a Hold általános elemösszetételét. Sok titán, alumínium, kalcium, kevés alkálifém és illó anyag, a többi pedig a földköpeny anyagaihoz hasonló, pl.: szilícium, vas, magnézium.

A mascon szó tömegkoncentrációt jelent (mass concentration). A holdi masconokat P. Müller és W. Sjogren, fedezték föl 1968-ban. A Hold körül keringő űrszondák pályája a bolygótest egyenetlen tömegeloszlása miatt kissé megváltozik. A mért pályaváltozásokból határozták meg a holdi tömegeloszlást. Az izosztázia a litoszféra és az asztenoszféra közötti gravitációs egyensúlyi állapot (kéregegyensúly), mely a Hold esetében nem áll fent.

A Hold története

A Hold eredete: nincs vasmagja, vagy kicsi; sok a magas olvadáspontú anyag, pl. titán, kevés alacsony olvadáspontú anyag található rajt, pl. alkálifém és illóanyagok. Az oxigén (17+18)/16-os izotóparánya minden bolygóra más, viszont a Föld és Hold esetén ugyanaz; a Hold nem keletkezhetett befogással.

A ma legelfogadottabb elmélet az, hogy egy Mars nagyságú ősbolygó, a Theia becsapódott a Földbe és kiszakított egy darabot a Földből. A kidobott forró kőzetanyagból az illó anyagok elszöktek, vas már nem voltak benne. Ez megmagyarázza a Hold kémiai összetételét.

A magmaóceán

Az ősi kéregben sok a földpát, ami az anortozit 90%-a, és ez mélységi jellegű. A később feltört mare-bazaltban már több nehezebb ásvány található, tehát a Holdat kezdetben több 100km vastag olvadt kőzetréteg borította. A lehűléskor a földpátok felúsztak, a többi anyag lesüllyedt. A felszíni olvadás lehetséges oka az intenzív meteorbombázás, illetve az, hogy az erős napszél a kőzetben elektromos áramot indukál, ami fűti a kőzetet.

Holdtörténeti korszakok		
Korszak neve	Időhatárok (milliárd éve)	Események
Prenektaris	4,5-4,1	Ősi kéreg képződése, intenzív meteorbombázás
Nektaris	4,1-3,8	Nagy medencék kialakulása, kései erős bombázás
Imbrium	3,8-3,2	Medencék lávaeltöntése
Eratosthenes	3,2-1,2	Régi, lepusztultabb kráterek képződése
Copernicus	1,2-től	Fiatal, sugársávok kráterek képződése

A földtörténeti ókor, a kambrium csak 0,6Géve kezdődött.

A kőzetbolygók

Tulajdonképpen a Hold is a kőzetbolygók közé tartozik, ha planetológiai szempontból tekintjük (mérete alapján).

Ide sorolható még a Jupiter 2 belső Galilei holdja, az Io és az Europa.

A főbolygók közül a Merkúr, Vénusz, Föld és a Mars kőzetbolygók. A Merkúr nem sokkal nagyobb a fent említett holdaknál.

Mik az okai a bolygók közötti különbségeknek?

Különböző távolságra vannak a Naptól, különböző rajtuk a hőmérséklet. A Naprendszer keletkezésekor a Naphoz közeli tartományokban olyan meleg volt, hogy sosem csapódtak ki az alacsony olvadáspontú elemek.

Másik oka a szisztematikus különbségeknek a méretük. A nagyobbaknak nagyobb a gravitációjuk, meg tudták tartani a gázburkukat. Ez nem az ősi szoláris ködből származik, mivel az elillant. A nehezebb molekulákból álló légkört a nagyobb bolygók meg tudják tartani.

A méret más szempontból is fontos; a vulkáni aktivitás is függ ettől. A bolygók forrón keletkeztek, becsapódtak más kis égitestek, amik megolvasztották őket. Azóta méretükkel fordított arányban folyamatosan hűlnek. A sugárzásos hűlés a felszín méretével egyenesen arányos, a felszín a sugár négyzetével arányos.

A Jupiter holdjainál az árapályfűtés vulkáni aktivitást eredményez. Ezek a kisméretű égitestek belső hővel rendelkeznek, az Io még a Földnél is sokkal aktívabb.

A Merkúr

A Naptól való távolsága 0,4 Csillagászati Egység, viszonylag excentrikus pályán, excentricitása 0,2. Sugara kevesebb, mint fele a Föld sugarának, $R = 2440\text{km}$, a tömege kb. egy tizenyolcad része. Sűrűsége $5,4\text{ g/cm}^3$.

Méretéhez képest meglepően nagy vasmagja van. Ennek oka lehet, hogy a Naphoz közel jött létre. Új magyarázat: nagyobb bolygó volt, a vasmagjához megfelelő méretű köpennyel, ami a becsapódások során azonban elillant.

Meglepően erős mágneses tere van, a Földének kb. 150ed része. Van saját magnetoszférája, innen a mágneses tér kiszorítja a napszelet.

A Merkúrt először 1974-ben látogatta meg űrszonda, a Meriner10. A bolygó felszíne hasonló a Holdéhoz, kráterezett, öreg, geológiailag halott.

A Vénusz

A Naptól való távolsága 0,72AU. Excentricitása 0,07, az inklináció 3° . Ez a bolygó kering legközelebb a földpályához. Egy egységnyi területre eső napsugárzási teljesítménye kétszerese a Földének. Azt képzelték, hogy buja, trópusi világ található ott. Retrográd, lassú forgású, a sziderikus forgási ideje 243 nap, ami kb. 0,66 év. Elképzelhető, hogy ez valamilyen rezonanciajelenség. A Földhöz való hasonlóság tovább fokozódik, sugara 6051km, a tömege 81%-a a Földének, a sűrűsége $5,3\text{ g/cm}^3$. Van vasmagja, viszont nincs magnetoszférája, mágneses tere pedig ezrede a Földének.

A Vénusz légköre

A legnagyobb különbség a Földhöz képest az eltérő légkör. A felszíni nyomás 94-szerese a földfelszíni nyomásnak, a hőmérséklete 750K. A légkör 96,5% széndioxidból áll. Ez egy üvegházhatású gáz, ami globális felmelegedést okozott. A légkörben van még 3% nitrogén, néhány tízed % víz, illetve nyomokban tartalmaz argont, kéndioxidot és szénmonoxidot.

A Vénusz felszíne

Rendkívül száraz bolygó, forró, sivatagos felszínnel.

Átlátszatlan felhőréteg borítja. Látható fényben nem figyelhetők meg felszíni alakzatok, 50km magas kénsavcseppekből és kénkristályokból álló réteg takarja. Ebből eső is eshet, de soha nem éri el a felszínt, előbb elpárolog. A légkör sokkal gyorsabban körüljárja a bolygót (4-5 nap), mint ahogy megfordul a bolygó a tengelye körül (243 nap). Szuperrotációnak hívják ezt a jelenséget. A vastag légkör miatt az égbolt narancssárga színben látható. Ennek oka a Nap fényének szóródása. Olyan, mint a Földön a naplemente.

Kevés űrszonda (6) szállt le a felszínére. Mindegyik orosz (szovjet) volt. A szélsőséges körülményeket ezek sem bírták sokáig, de tudtak felvételeket készíteni. Kevés a becsapódási kráter figyelhető meg, tehát a felszín fiatalabb, mint néhány száz millió év. Főleg hullámszó síkságok (*planitia*) borítják. Felszínéről radarral készíthetünk képeket, rádiótartományban.

Van még három nagyobb felföldje (*terra*) és több vulkáni hátsága (*regio*).

Legnagyobb felföld az Aphrodite Terra, kb. akkora, mint Európa. A második az Ishtar Terra, kb. Ausztrália nagyságú. A harmadik a Lada Terra, a déli sarkon, ez még kisebb. Ezeket mitológiai nőalakokról nevezték el. A Vénusz legmagasabb hegylánca a Maxwell Hegység, ami a földi lánchegységekhez hasonló, kb. tízezer méter magas. A régiók pajzsvulkán eredetűek. Lemeztektonika nincsen. Sok különös, a Földön ismeretlen geológiai formáció figyelhető meg, pl. anemónák, arachnoidák, palacsinták.

A Vénusz története

Feltevés: A Föld és a Vénusz hasonló CO₂ és H₂O készlettel indultak, de ennek zöme a Vénuszon páráként volt jelen $\Rightarrow$ a Nap fényesedésével runaway üvegházhatás miatt a víz oxidálta a forró felszíni kőzeteket, az oxigén megkötődött, a hidrogén elszökött.

A földi víz viszont folyékony volt, a benne élő kéalgák fotoszintézise során CO₂-ból az oxigén felszabadult, a szén pedig megkötődött a mészkőben, kb. kétmillió éve. Erre bizonyítéka deutérium-hidrogén arány, ami a Vénuszon százszor magasabb a földinél.

A Mars

A Naptól való távolsága 1,52AU. Excentricitása 0,09 (elég nagy), inklinációja 2°. Tengelyforgása hasonló a Földéhez. Majdnem 24 óra alatt fordul meg (24 óra 37 perc), tengelyferdesége 24°. Vannak vörös és sötétebb színű területek, a vörösek lettek a *mare*-k, a holdi elnevezést átvéve. A sötét területek, csatornák nagy része nem is hasonlít csatornához. A sarkvidékeken sarki sapkák találhatók, illetve felhők a légkörben.

Sugara 3394km, tömege tizede a Földének, sűrűsége 3,95g/cm³. Átmenet a Föld/Vénusz és a Hold/Merkúr között. Mágneses tér csak helyenként van, ez a remanens mágneses tér. A mágneses erőssége háromezer részre a földinek. Részleges a magnetoszférája.

A Mars szerkezete

Belül kicsi vasmag, kb. a sugár 15%-a, vagy valamivel nagyobb, 25% FeS mag. A mag a Naprendszer keletkezése után 10-15 millió éven belül kialakult.

Bizonyíték, hogy a Földön talált, Marsról származó fiatal meteoritekben elég sok a wolfram. De a wolframnak a magba kellett kerülnie, tehát a differenciálódás után keletkeztek ezek a kőzetek. $^{182}\text{Hf} \rightarrow ^{182}\text{W}$; $t_{1/2} = 9 \text{ millió év}$.

A wolfram bomlással keletkezett, amikor még volt hafnium. Hasonló meggondolások alapján a kéreg is kb. 50 millió éven belül levált a köpenyről (megszilárdult a magmaóceán).

A Mars légköre

A légnyomás 6-11 millibar, ez évszakfüggő. A hőmérséklet átlagosan 213K. A légkör 95,3%-a CO₂, 2,7%-a N₂, 1,6%-a argon, 0,13%-a oxigén, 0,07%-a szénmonoxid és 0,03%-a víz. A légkör annyira ritka, hogy a fényesebb csillagok nappal is láthatóak.

Az erős szél felkavarja a vörös port, ettől a légkör rózsaszínes árnyalatú. A porviharok főleg nyáron keletkeznek, a déli féltekén. Szinte az egész bolygót elboríthatják.

A Mars felszíne

A felszíne kráterezett. Három fő rétegtani egység jelenik meg, három korszakot képviselnek.

Korszak neve	Időhatárok (milliárd éve)	Események
Noachis	4,6–3,7	Erősen kráterezett déli felföldek
Hesperia	3,7–3,0	Vulkáni hátságok (Tharsis, Elysium...)
Amazonis	3,0–	Üledékek, erózió a víz, jég és szél hatására

Déli felföldek

A déli felföldeket az erózió alakította ki. A kráterek így lepusztultabbak, mint a Holdon; nem telítettségi kráterek.

A remanens mágneses tér vizsgálatából kiderült, hogy akkor még működött a dinamó és volt magnetoszféra. A mágneses térben csíkszerű mintázat figyelhető meg, tehát valamikor egy ideig működött lemeztectonika is, hasonló a földi óceánaljzathoz.

Megfigyelhetők ősi becsapódási medencék.

Vulkáni hátságok

A legnagyobb vulkáni hátság a 3,8 millió éves Tharsis-hátság.

Pajzsvulkánok alakultak ki. A vastag litoszféra miatt nincs izosztázia és lemeztektonika, ezért egy nagy, stabil vulkán jött létre, mint például Hawaii. A földiekkel ellentétben itt a pajzsvulkánok nem alkotnak láncolatokat. A legnagyobb vulkán az Olympus Mons. Ez az ismert világ legmagasabb hegye, 26km magas.

Később a Mars lassan hűlt, de az utolsó nagy kitörések a pajzsvulkánokon kb. 150 millió éve történtek, és néhány millió évente még ma is megfigyelhető vulkáni aktivitás (kráterszámlálások, meteoritok kora alapján).

Víz a Marson

A késő noachis, kora hesperia időszakban az északi síkságokat valószínűleg óceán borította. Erre bizonyíték, hogy az ősi partvonal még ma is látható. A D/H a Marson ötszöröse a földinek, de sok hidrogén elszökött a légkörből, ami eredhetett vízből is. Valaha több tized bar nyomású volt a légkör, így lehetett folyékony víz a bolygón.

Ugyanebben az időben voltak láthatók a kiterjedt folyók, vízrendszerek; folyóvölgyek. 3-1,5 milliárd éve a légkör lassan elszökött, a kis gravitáció és a napszél disszociációja miatt. A víz zöme megfagyott, talajjég formájában található meg, alatta pedig talajvíz van. Az időnkénti olvadások (vulkanizmus, becsapódások) miatt alkalmi, nagy áradások voltak, ennek is megfigyelhetők a nyomai.

Mára a talajjég nagyon vastag, kb. 5-10km, krioszférának nevezik. Csak néha keletkezhetnek kisebb vízmosások és gleccserek. A pályaelem ingadozások éghajlatváltozást okoznak, mint a Földön is megfigyelhető. Lehetséges, hogy jégkorszak van épp a Marson.

A Marsfelszín ásványai

A kőzetek változatosabbak, mint a Holdéi. Vulkáni és metamorf kőzetek, üledékek figyelhetők meg. Fő ágens a víz, melynek sokféle hatása van.

Hidratált szilikátok, agyagásványok vannak itt, olyanok, mint a földi montmorillonit és troktolit, csak alumínium helyett vas található bennük.

Vasoxidok, mint a magnetit és hematit, valamint karbonátok is megfigyelhetők.

A marspor az erózió miatt alakult ki.

Élet a Marson

Egy marsi meteoritban 1996-ban nanofossziliákat találtak. Ezt más (nem biológiai) folyamatok is okozhatták.

A Mars holdjai

A holdak befogott aszteroidák. A Phobos átmérője 22km, a Deimos átmérője 12km.

Mindketten szabálytalan alakúak.

Az óriásbolygók

Jupiter, Szaturnusz, Uránusz, Neptunusz.

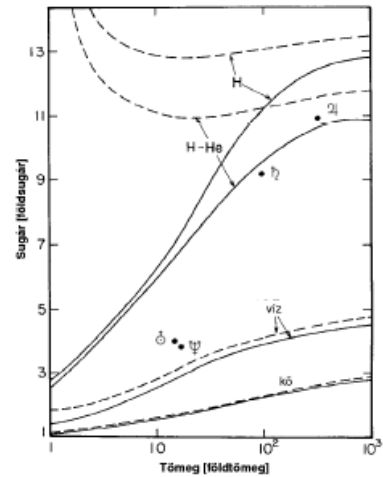
Légkörük hasonlít a Napéhoz, hidrogén és hélium sok van, nehezebb elemek csak 1-2% (ammónia, metán, vízgőz).

A Naphoz hasonlóan hidrosztatikai egyensúlyban vannak.

Az adott anyagból álló gömbök szerkezete számítható.

Az egyensúlyi sugár hidrosztatikai egyensúlyra számítható.

A Jupitert és Szaturnuszt szinte teljesen hidrogén és hélium alkotja, az Uránusz és Neptunusz főleg vízből áll.

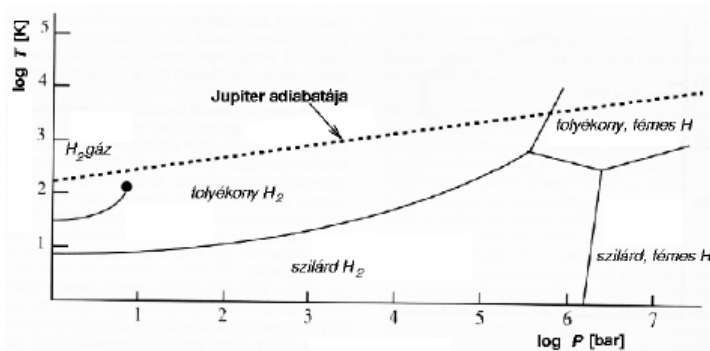


	Jupiter	Szaturnusz
tömeg	$350M_{\oplus} \ 10^{-3}M_{\odot}$	$3M_{\oplus}$
közepes távolság	5,2 AU	9,5 AU
tengelyforgás	10 óra	11 óra
tengelyferdeség	$3^{\circ} \rightarrow$ nincsenek évszakok	$27^{\circ} \rightarrow$ vannak évszakok
mágneses tér	4,3 Gauss $\sim 10B_{\oplus}$	0,2 Gauss $\sim 0,2B_{\oplus}$
	kiterjedt magnetoszféra	

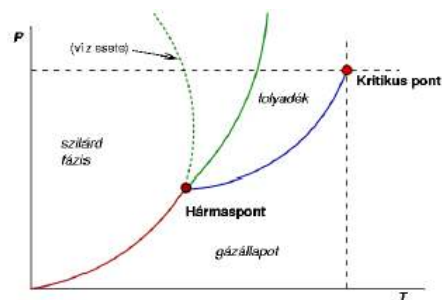
Nincs éles felszínük, a hidrogén is folyékony állapotban található meg rajtuk.

A kritikus pont nem terjed akármennyig fel. Van egy maximális nyomás és hőmérséklet, amely felett a gáz és folyadék között folyamatos az átmenet, de nincs határozott fázisátmenet. Ez valósul meg a Jupiter belsejében, a ránehezedő anyag súlya miatt.

Fázisdiagram a Jupiter esetén



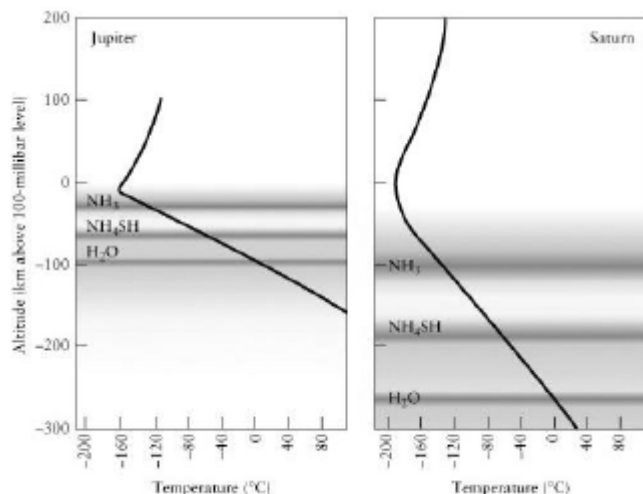
Fázisdiagram



A folyékony hidrogén molekulákból áll. A fémes hidrogén esetén a molekulák elektronjai delokalizálódnak, és a hidrogén vezetővé válik. A folyékony fémes hidrogén áramlása kelti a Jupiter mágneses terét. Legfelül lehet egy jégköpennyel borított közetmag.

Átlagos sűrűsége $\rho = 1,3 \frac{g}{cm^3}$, míg a Szaturnuszé $0,6 \frac{g}{cm^3}$. Összetételük a Napéhoz hasonló.

A mélyebb rétegekben, befelé nő a hőmérséklet. A Jupiternek saját luminozitása van. Mivel képződéshő még nem sugárzott el, hőtöbblettel rendelkezik. Több hőt sugárzik ki, mint amennyit a Naptól felvesz, a hőtöbbletet a belsejében tárolja el; konvektív áramlásokkal jut a felszínre.



A Szaturnusz már jobban kihűlt, mint a Jupiter. A felső ammóniumkristály réteg összefüggő, ezért a felhőmintázata sokkal fátyolosabb, mint a Jupiteré.

Felhők

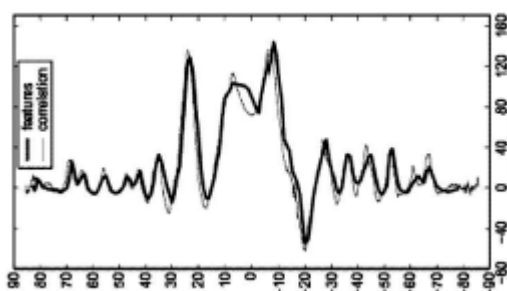
A Jupiter világos zónáiban konvektív feláramlások történnek. NH_3 (ammónia) kristályfelhők figyelhetők meg nagy magasságban.

A sötét sávok konvektív leáramlásokat jelentenek, nincsenek ammóniumkristály felhők, lelátunk az ammónium-hidroszulfidig. Mélyebbre látunk. (NH_4SH)

Még lejjebb valószínűleg víz-kristály felhők vannak.

A Jupiter esetén megfigyelhető a differenciális rotáció, amit a zonális áramlások okoznak.

A zonális szelek sebessége a planetológiai szélesség függvényében:



Ezeket a konvektív áramlások és a Coriolis-erő közösen okozza (hasonló a Földhöz és a Vénuszhoz); ez összefüggésben van a sáv-zóna mintázattal.

Megfigyelhetők örvények is. Ezek a földi hurrikánokhoz/ciklonokhoz hasonlóak, viszont hosszabb életűek.

Ciklon az északi féltekén pozitív irányban jár körbe; ezen képződmények kaotikus régiókat alkotnak.

Az anticiklonok a déli félteke pozitív irányba örvénylő foltjai.

A Nagy Vörös Foltot 1664 óta ismerik. Nagyon stabil anticiklon a déli féltekén. Kiterjedése nagyobb, mint az egész Föld. Szerkezete kismértékben változik.

	Uránusz	Neptunusz
távolság	20 AU	30 AU
keringési idő	84 év	165 év
tömeg	$16M_{\oplus} \sim 1/22 M_{Jupiter}$	$19M_{\oplus} \sim 1/18 M_{Jupiter}$
felfedezés	Herschel, 1781	Galle, 1846
tengelyforgás	17 óra	16 óra
tengelyferdeség	$98^{\circ} \rightarrow$ sarkkörök az Egyenlítő, térítők a pólusok közelében	$29^{\circ} \rightarrow$ évszakok
mágneses tér	$\sim B_{\oplus}$	$\sim B_{\oplus}$
sugár	$4 R_{\oplus}$	$4 R_{\oplus}$
átlagsűrűség	$1,3 \frac{g}{cm^3}$	$1,7 \frac{g}{cm^3}$

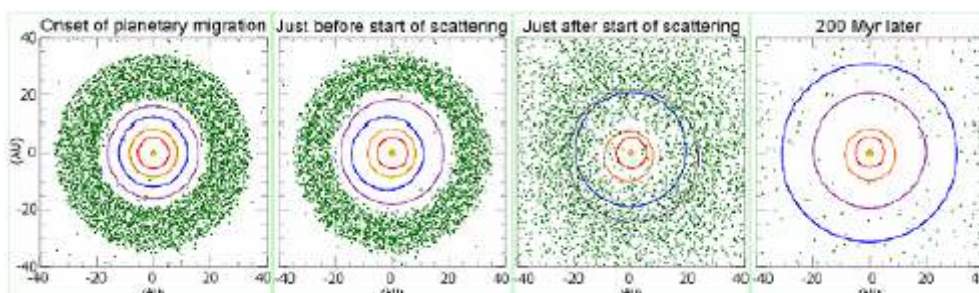
Felhők

Elméleti számítások alapján a sztatoszférában C_2H_2 , CH_4 , a troposzférában hidrogén, víz, ammónia, foszfor található.

Az Uránusz felhőtakarója strukturálatlan, a Neptunuszon felhősávok és foltok figyelhetők meg.

Migráció

Hosszú dinamikai időskálákon nézve a keletkezésük túl lassú. Az új elmélet szerint a Naphoz közelebb, kb. 15AU-ra keletkeztek. A Jupiter perturbációja miatt a többi óriás kifelé vándorolt. A Szaturnusz és Jupiter 2:1-es rezonanciája miatt az Uránusz és Neptunusz erősen perturbálódott; majd helyet cserélt, és a Neptunusz kijebb került. Kisbolygók szóródtak tömegesen ki- és be a Kuiper- és az Aszteroida övből; ez a kései bombázás, vagy „Hold-katakizma”.



Gyűrűk

A Szaturnusz gyűrűi

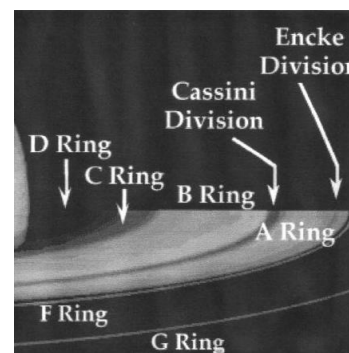
A gyűrűk sok, Kepler pályán keringő apró darabkából állnak. A gyűrűn osztások figyelhetők meg. A Cassini-féle osztás A és B gyűrűre osztja a gyűrűket. Fátyolgyűrűk a C és D gyűrű, a B-n belül, egészen a felszínig leér. Az F gyűrű az A-n kívül található, egészen picike gyűrű. Főleg centiméter, méter nagyságú jégdarabokból állnak, kb. pár 100m vastagok.

A nagy albedójuk miatt nem lehetnek túl öregek, legfeljebb néhány száz millió évesek. Össztömegük egy kisebb holdé, tehát egy Roche- határon belülre került, széttört jéghold maradványai. A Cassini-osztásra a Mimas 2:1-es rezonanciája a magyarázat.

Az éles peremek és a vékonyságuk oka, hogy a pásztorholdak „visszaterelgetik” a jégdarabkákat. Az A gyűrű külső szélén az Atlas; az F gyűrűnél a Prometheus és a Pandora őröködik. Az E gyűrűt az Enceladus gejzírejei által kidobott apró jégkristályok alkotják.

A többi bolygó gyűrűi

A Jupiternek híg, diffúz porgyűrűje van. Anyaga 2-3 10^5 évente cserélődik, az utánpótlást a belső holdak (főleg Io) biztosítják. Az Uránusznak tucatnyi vékony csűrűje, 10 méteres, sötét darabokból, köztük por található. A Neptunusz körül három vékony porgyűrű figyelhető meg, melyek közül az egyik nem összefüggő.



Holdrendszerek

	Jupiter	Szturnusz	Uránusz	Neptunusz
Óriáshold	Galilei féle holdak	Titan	-	Triton
Törpeholdak	0	4	4	0
Összes ismert hold	48	35	27	8

Minden nagyobb hold a bolygó egyenlítői síkjában, kis excentricitású pályán kering, 0° tengelyferdeséggel, kivéve a Triton.

Galilei-féle holdak

Io, Europa: Méretük a Holdéhoz hasonló, átlagos sűrűségük $\geq 3 \frac{g}{cm^3}$.

Ha a Nap körül keringenének, bolygók volnának (közetholdak). Bolygóközelségük árapály-fűtést kelt, tehát vulkáni aktivitás figyelhető meg.

Ganymedes, Callisto: Merkúr méretű, 2-nél kisebb sűrűségű jég-holdak. Távolabb találhatók a bolygótól, enyhébb a vulkáni aktivitás figyelhető meg rajtuk.

Callisto:

Öreg, kráterezett felszíne van. Hasonló a Holdhoz és a Merkúrhoz. Valójában „fagyott sár”. Gyűrűs medencék figyelhetők meg.

Ganymedes:

Hasonlóan kráterezett, de nyoma van a tektonikus aktivitásnak, barázdarendszerek figyelhetők meg. Kriovulkáni aktivitás jellemzi, kriomagma tör fel, ami valójában közönséges víz; a jég kőkemény, kőzetalkotó anyag. Saját mágneses tere van, egyedülként a holdak közül; van magnetoszférája.

Europa:

Közethold, bár befagyott óceán borítja; a jég réteg 100 km-nél kisebb (alatta víz?). A felszínen kevés a kráter (fiatal); rianások hálózák be: a kriomagma (víz) olykor feltör a jég alól, és egyengeti a felszínt.

Io:

A legvulkanikusabb ismert égitest; évente közel 1mm a hamulerakódás. A kéreg megszilárdult láva; anyaga kénben gazdag szilikát, ez adja sárgás színét. Helyenként SO_2 hó figyelhető meg. Az aktivitásnak három típusa van.

- * alkalmi erős kitörések nagy vulkánokból, pl.: Pele
- * folyamatosan kitörő kisebb vulkánok, pl.: Prometheus
- * folyamatosan füstölgő repedések és olvadt kén tavak (paterák {gödrök} és catenák {hasadékok}), pl.: Loki Patera.

A paterákból olykor nagy kitörések mennek végbe.

A kitöréseket a kéndioxid gáznyomása lövi fel magasra (hasonló a gejzírekhez).

Az aktivitás oka az erős árapály-fűtés.

A Déli sarkvidéken nagy, nem vulkanikus eredetű hegyek figyelhetők meg. A legnagyobb része olvadt állapotban van. Alapvetően kén, amit szilikát fed.

Titan (Szaturnusz): Huygens fedezte fel 1655-ben. Méretét tekintve a Merkúrhoz, Ganymedes-hez hasonló. Vastag légköre 98,4%-ban nitrogénből áll (az első hold, aminek légköre van). A légköre vastagabb, mint a Földé. Sűrű, ködszerű felhőréteg borítja, ami komplex szénhidrogén molekulákból áll.

A felszíni nyomás 1,5bar, a hőmérséklet 92K, amik a metán hármaspontjához közel álló értékek. A hold főként metánból állhat. Felépítése: szilikát mag, nagynyomású jégkéreg, folyékony vízkéreg, jégkéreg, atmoszféra.

2005. januárban az ESA Huygens szondája leszállt a Titanra. A sötét területek kavicsos „homokból”, metánjégből vannak. Az árapály keltette erő szelek dűnéket fújtak rá. Megfigyelhetők a folyékony metán nyomai a sarkvidékeken.

Triton (Neptunusz)

Átmérője 2700km, a Hold és az Eris között félúton található.

Átlagos sűrűsége $\bar{\rho} = 2,05 \frac{g}{cm^3}$, tehát jégbolygó, jelentős kőzetmaggal.

Befogott Kuiper-objektum, eredetileg a Nap körül keringhetett, ezt retrográd, inklinált pályája magyarázza. Ritka légköre van, 1,5mikrobar a felszíni nyomás, a felszíni hőmérséklet kb. 40K. A légkör 99,9%-ban nitrogénből áll.

Csak a déli félteke ismert, itt óriási metán-nitrogén sarki sapka figyelhető meg.

Albedója 0,7; ami az egyik legnagyobb a Naprendszerben. Kriovulkanikus aktivitás figyelhető meg: gejzírek.

Kis égitestek a Naprendszerben

Kis naprendszerbeli testek nomenklatúrája (IAU 1994)

Van-e kómája (ködfolt körülötte)	nincs ⇒ kisbolygó katalógus	van ⇒ üstökös-katalógus
Ideiglenes szám (# a sorszám)	[év][felfedezés][#] (# ha a felfedezés többszörös) pl.: 1983 TE1	[év][félhónap betűjele][#] pl.: 1989 N2
Pályaszámítás ⇒ megerősítés végleges név és szám	[#][név] (a nevet a felfedező adja) pl.: 9007 James Bond	[előtag][ideiglenes kód]([felfedező]) pl.: C/1996 B2 (Hyakutake) P előtag esetén #[előtag]/[felfedező][#] 93P/Lovas

Az üstökös esetében az előtag lehet:

- * P – periodikus (a periódus kevesebb, mint 200 év, vagy már másodszor van napközelen)
- * C- parabolikus (vagy nem periodikus)
- * X – nem tudni (főleg régi megnevezéseknél)
- * D – szétesett vagy elveszett, pl.: 3D/Biela
- * A – aszteroida, amit tévesen soroltak be üstökösnek

Transzneptun objektumok

Kuiper (1951):

A Naprendszer peremén eredetileg lehettek maradvány bolygókezdemények ez a Kuiper-öv.

1992 óta kb. 1000 transzneptun objektum ismert. Összesen ~70000 lehet, a 100km fölötti mérettartományban.

Össztömegük 2-3 Holdnyi. $\Rightarrow$ nincsenek sűrűn, nagyok a távolságok (10AU) közöttük.

Tömeghiány-probléma: a nagy Kuiper-objektumok összeállításához sokkal több anyag kellett, hogy legyen a szoláris köd ezen részén, mint ma. Hová lett?

Méreteloszlásuk hatványtörvényt követ: $[D, D + dD]$ intervallumba esők száma $dN \propto D^{-4} dD$

A legnagyobbak az Eris (2400km) és a Pluto (2320km)

Pluto

Átmérője 2320km, a Naptól való átlagos távolsága 39,8AU, excentricitása 0,25, inklinációja $17,1^\circ$, távolsága aphéliumban 49,9AU, a perihélium 29,7AU. Holdjával, a Charonnal „kettős törpebolygónak” is tekintjük. Pályája miatt keringése nagy részét a Kuiper-övezetben tölti.

Eris

2003-ban fedezték fel, ez okozta a vitát arról, hogy a Pluto bolygó-e valójában. Átmérője 2400km, a Naptól való átlagos távolsága 67AU, excentricitása 0,45, inklinációja $17,2^\circ$. Aphéliuma 97AU a távolsága, míg perihéliuma 36AU. Holdja a Dysnomia 250km átmérőjű.

Csoportjaik

- * Klasszikus Kuiper-öv

Naptól való távolsága 30-47AU, ezen túl meredek levágás (a Neptunusszal 2:1 rezonáns pályánál {?}). A levágás okát nem ismerjük.

Mérsékelt inklináció és excentricitás.

Pl.: Varuna, Quaoar

- * Szórt korong objektumok

Óriásbolygók, főleg a Neptunusz perturbációnak hatására a távolság, az excentricitás és az inklináció megnőtt, mint például az Eris esetében.

- * Plutínók (és már rezonáns Kuiper-objektumok)

3:2-es rezonanciában vannak a Neptunusszal. Aránytalanul sokan vannak és elég nagy az inklináció és az excentricitás $\Rightarrow$ a Neptunusz kifelé migrálhatott, és közben sok jég kisbolygót „kisöpört” a rezonanciájával. Pl.: Pluto, Ixion, Orcus.

- * Elkülönülők

2-3 ismert, nagyon távoli, 500AU távolságban lévő objektum.

Aphéliumuk 1000AU. Közülük a legnagyobb a Sedna, ez kb. 1500km átmérőjű.

Sedna

Átmérője 1500km. 486AU távolságban kering, 76AU perihéliuma, és 895AU aphéliuma van. Excentricitása 0,84, inklinációja $11,9^\circ$. Keringésideje 10000év.

Üstökösök

Az jég-kisbolygók 5 csillagászati egységen belül.

Az üstökös magja az üstökös, ami nem más, mint egy „piszkos hógolyó”. Napközben, a párolgás következtében a mag körül gáz- és porfelhő alakul ki, amit kómának (üstök) nevezünk. Főleg víz és annak bomlástermékei alkotják, valamint pár % szén di- és monoxid.

A napszél és a napfény sugárnyomása elfújja a kómát, gáz- és porcsóvát kelt. (a hidrogénre egyik sem hat nagyon $\Rightarrow$ hidrogénburok). A por csóva mindig a Nappal átellenes irányba mutat.

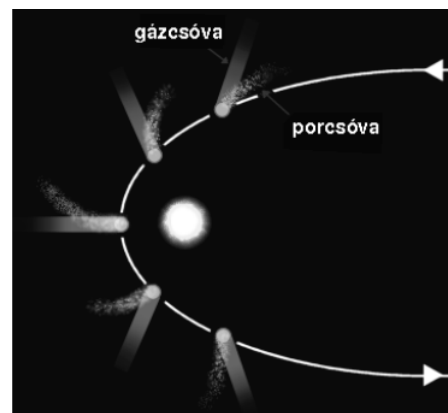
Az üstökösök magja, az eddig megfigyelték alapján kb. 1-40km átmérőjű, szabálytalan alakú. Felületük inhomogén, és csak helyenként aktív. Ennek oka a kéregképződés.

A kéregképződésre két mechanizmust ismerünk:

Szublimációs (párolgásos) kéreg: a jég elillan, így a kövek felgyűlnek a felszínen. Ez csak perihéliumban működik.

Irradiációs (besugárzásos) kéreg: Kozmikus sugarak (nagy energiájú atommagok) feltépik a jegekben a nukleáris kötéseket, ezért a hidrogén elillan, a szén és oxigén pedig felgyűlik. Így bonyolult szerves molekulákból álló, sötét, vöröses árnyalatú kéreg jön létre.

Ennek időskálája kb. 10^8 év. Tehát a nagy albedójú, fehér jégfelszínek nem lehetnek öregek (pl. Szaturnusz gyűrűi, Triton felszíne).



A periodikus (rövid periódusú) üstökösök és eredetük

Excentricitásuk kisebb, mint egy; inklinációjuk nagy, de az Ekliptika és a direkt keringés statisztikailag preferált.

Naptávolponjtaik eloszlásában csúcsok találhatók $\Rightarrow$ üstököscsaládok.

Üstököscsaládok:

- * Jupiter-család
- * Szaturnusz-család
- * Uránusz-család
- * Neptunusz-család
- * Halley-család (transzneptun-család)

Valószínűleg a Kuiper-övből kerültek be, a Kuiper-objektumok ütközései folytán. A Halley-család esetén ez evidens. A többinél viszont az óriásbolygók perturbáló hatása hozta beljebb az aphéliumot.

Rokon eredetű csoport a Kentaurok. Ezek jég kisbolygók a Jupiter és a Neptunusz között, 5-30AU távolságban (perihélium>5AU). Kb. 50-et ismerünk, méretük 10-400km. Némelyikük perihéliumban kis kómát fejleszt. Ezeknek üstökösszámuk is van; pályájuk csak 10^6 évig stabil, később periodikus üstökös lesz belőlük (pl. Jupiter-család). Színük kevésbé vörös, albedójuk nagyobb, mint a Kuiper-objektumoké. Ennek oka lehet, hogy töredékek, és aktívak $\Rightarrow$ fiatal a jégfelszínük.

A 29P/Schwassmann-Wachmann üstökös, kentauro-szerű pályán mozog a Jupiter és a Szaturnusz között. 1996-ban több darabra esett szét.

Parabolikus üstökösök és eredetük

A parabolikus vagy hosszú periódusú üstökösök excentricitása közel egy ($\pm 1 - 2\%$).

Az inklináció eloszlása izotrop (felük retrográd pályán kering).

Oort-felhő (1950 óta, előtte Öpik {1932})

Naptávolpontjaik eloszlásában erős csúcs figyelhető meg 50000AU körül. Többségük először jár a belső Naprendszerben, ugyanis több keringés alatt már elpárologtak volna, valamint az óriásbolygók lerövidítik az aphéliumukat. $\Rightarrow$ nagy, gömbszimmetrikus rezervoárt alkotnak, a Naptól 50-100000AU távolságban. Extraszoláris perturbációk hatnak rájuk (elhaladó csillagok és a Tejút árapályereje miatt) $\Rightarrow$ a felhőből olykor üstökösök zavaródnak be.

Feltételezik, hogy a naprendszer keletkezése idején az óriásbolygók övezetéből a perturbációk által kidobott jég bolygókezdemények. Hiperbolikus pályájúak, a Jupiter perturbációja miatt. Nem extraszolárisak, különben excentricitásuk 1-nél nagyobb lenne.

Hills (1981) számolásai szerint az Oort-felhőt a Naprendszer kora alatt a perturbációk már feloszlatták volna. Hipotézise szerint van egy még népesebb belső Oort-felhő (Hills-felhő), ahonnan a külső Oort-felhő pótlódik. A Sedna akár lehet a belső Oort-felhő szélén is.

Az üstökösök pusztulása

Az üstökösöknek több lehetséges végállapota van. Az egyik, hogy a jég elpárolgása után, a kavicsok és a por felszabadulásával az üstökös egyre nagyobb raj kíséri $\Rightarrow$ meteorraj. A másik esetben aszteroida maradhat a raj mellett vagy helyett, a kéregképződés folytán, vagy az üstökös magjaként. Üstökösszerű pályán mozgó aszteroidák pl. a 944Hidalgo, a 2201Oljato és a 3400Phaethon, amihez meteorraj is tartozik. A Damokloidák a Halley-családhoz hasonló pályán keringő aszteroidák, közel 20 ismert. A Shoemaker-Levy9 1998-ban a Jupiterbe csapódott.

Aszteroidák

Kb. 135000 aszteroida pályája ismert és számozott. Ma már nem mind kap nevet, kb. csak a tizedük, és felfedezőjük nevezi el őket. Pl.: 434Hungaria, 28196Szeged.

Nagyobb, mint 1km mérettartományban lehet kb. 1-2 millió. Össztömegük a Hold tömegének 25-öd része, ennek egyharmada a Ceresben található. Szabálytalan alakúak, felszínük poros.

Sok aszteroidának több holdja is van. Pl.: 243Ida és holdja a Dactyl.

Pályájuk

A Jupiter-rezonancia jelentős szereppel bír. A Hirayama-féle pályacsaládok közös pályán keringő aszteroidák, egy nagyobb aszteroida töredékei.

Legfontosabb típusai, színek szerint

- * C szén, szénvegyületek alkotják, az összes 75%-a
- * S szilikátok alkotják, az összes 17%-a, az öv belső peremén találhatók
- * Emellett altípusok és további ritkább típusok is vannak, pl.: M fémes.

1Ceres: Átmérője 975km, távolsága 2,77AU, excentricitása 0,09, inklinációja 10,6°. A C csoportba tartozik.

4Vesta: Átmérője 578km, távolsága 2,36AU. excentricitása 0.09, inklinációja 7,1°. Ez a második legmasszívabb aszteroida. S csoport speciális, piroxigéngazdag altípusa (V). Töredékei külön pályacsaládot, a Vesta-családot alkotják, a főövbéliek 6%-a ide tartozik.

Meteorok

Két fő típusra oszthatók: sporadikus meteorok (egész évben egyenletes háttér) és rajmeteorok (az év bizonyos napjain egy irányból jönnek). A rajok oka, hogy a Föld keresztezi egy szét-esett üstökös pályáját. (radiáns = sugárzáspon; a metszéspontban a pálya érintője)

Fontosabb meteorzáporok, melyeket a radiáns csillagképükről neveztek el:			
Raj neve	Hullás maximuma	Hullás tartama	Anyatest
Quadrantidák	január 3	5 nap	-
η Aquaridák	május 6	6 hét	1P/Halley
Perseidák	augusztus 12	5 hét	109P/Swift-Tuttle
Draconidák	október 8	4 nap	21P/Giacobini-Zinner
Leonidák	november 17	1 hét	55P/Tempel-Tuttle
Geminidák	december 14	10 nap	3200 Phaethon (aszteroida)

Meteoritok

Túlnyomóan sporadikus meteorokból erednek, a rajokban csak kisebb szemcsék vannak. A beesés irányából és sebességéből a pálya rekonstruálható ⇒ forrásuk elsősorban az Aszteroida-öv.

Kevéssé differenciált meteoritok: a kondritok

Az összes meteorit 85%-a. Bennük kondrulák (görög: szemcse), azaz pár milliméteres üveges gömböcskék találhatók, melyek kb. 2 millió évvel a legősibb zárványok után keletkeztek.

Fontos csoportjuk a szenes kondritok. Ezek a legöregebbek, melyeknek aránya csak 5%, valószínűleg azért, mert könnyen elégnék hullás közben. A legősibb meteorokban (C1 típus) nincsenek kondrulák, vannak viszont szerves molekulák, aminosavak.

A kondrulák lehetnek megolvadt, majd hirtelen (a világűrben) megdermedt kőzetcsappék. Az olvadás oka lehet a becsapódáskor kifröccsent anyag, lökéshullám a szoláris ködben.

Más elmélet szerint az űs-Nap flerei olvasztották meg, mely után a korongon kívüli a napszél fújta őket kijebb.

Erősen differenciált meteoritok

A differenciált égitestek különböző rétegeiből származnak. Vasmeteoritok (4%) a vasmagból, kő-vasmeteoritok (1%) a mag-köpeny határról, valamint akondritok (10%) a kéregből, melyek olyanok, mint a földi, mélységi kőzetek. A vasmeteoritok öregebbek a kondruláknál.

A mai elképzelés szerint a differenciált meteoritok anyatestjei a Merkúr-Mars térség bolygó-kezdeményei voltak. A gyors összeállás és az erős ütközések következtében átolvadtak, differenciálódtak, fragmentálódtak.

A töredékek egy része a kőzetbolygók perturbációi miatt később az Aszteroida-öv belső részére került, ahol ezért kémiai gradiens figyelhető meg. Az akondritok fontos alcsoportjai a Vesta, a Mars és a Hold töredékei.

Meteorbecsapódások földi hatásai

Néhány nagy becsapódás		
Helyszín	Idő	Test mérete, jellemzői
Tunguzka	1908	50m, kondrit(?)
Arizona	20 ezer éve	100m, vas
Chicxulub	60 millió éve	10km, kő

A Köves-Tunguzka folyónál, Szibériában a szemtanúk különbözőképp látták a becsapódást közelről és távolról (~gombafelhő). A légi felderítés kimutatta, hogy a becsapódás 2150km² tajgát letart. Ez egyet jelent egy nagy hidrogénbomba erejű robbanással, a felszín felett.

Meteoritot azonban nem találtak. Egy elmélet szerint lehetséges, hogy üstökösma volt.

Újabb vizsgálatok rámutattak, hogy mégis inkább kondrit-szerű lehetett, ugyanis az üstökösma túl magasan robban, valamint apró meteoritikus kőzetszemcséket találtak a fákba bevágódva.

A nagy kihalásokat okozhatta meteor becsapódás. A Kréta-Tercier határán, 60 millió éve, kihaltak a dinoszauruszok. Ebből a korból világszerte nagy irídium tartalmú üledék maradt fenn (földi kőzetekben ritka) ⇒ becsapódásos eredet. 1993-ban a Yucatán-félszigeten, Chicxulubnál megtalálták a krátert, ami ma már csak egy eltemetett sánc. (majául a chucxulub jelentése ördögfarok)

Bolygóközi por

A bolygóközi por az ekliptika síkjában kering, össztömege kb. egy kis aszteroidányi. 2·10⁵ év alatt lecserélődik, mivel a fény kifűjja, illetve behull a Napba. Ha infravörösben figyeljük meg, detektálható saját hőmérsékleti sugárzása. Az optikai hullámhosszokon visszaveri a Nap fényét, ez az állatövi fény (napkelte előtt, napnyugta után); és ellenfény (a Nappal átellenes oldalon, csak műszerrel mutatható ki).

A csillagászat rövid története

Csillagászat az ókorban

A csillagos égbolton látható sokféle változás és a nagymérvű meteorológiai jelenségek közötti párhuzamot az emberiség hamar észrevette → naptárak készítése

A földművelő népek életében a csillagászati megfigyelések életbevágó fontosságúak lettek. A régi korok embere az égitesteknek túlvilági, isteni nevet adott.

Mezopotámia

Mezopotámia népei kezdték el az égitestek rendszeres megfigyelését, bámulatba ejtő pontossággal ismerték és használták a periódusokat. A szinodikus holdhónap – két azonos holdfázisok között eltelt idő – hosszát az i.e. 6. század táján már egy másodpercen belüli pontossággal ismerték.

Hosszú időn át folytatott megfigyelésekből állapították meg a szárosz-ciklus hosszát – 18 év, 10 illetve 11 nap – ennyi idő múlva ismétlődnek meg a nap- és holdfogyatkozások.

Mezopotámia első kultúrnépe, a sumér, hatos számrendszert használt, míg az őket leigázó akkádok a tízest, így alakult ki a hatvanas számrendszer.

- * fokok és órák beosztása
- * a teljes kör 360 részre való osztása: eredete az évhossz első közelítésű napszámában keresendő
- * napok 12 részre osztása

Az idő mérésére az Asszír-Babilóniában Nap- és vízórákat használtak, főként az égi szög-mérés céljára. Nagyobb pontossággal állapították meg a Hold látszó méretét, mint a görögök.

A csillagászati megfigyelőhelyek többnyire hétemeletes, lépcsőzetes toronytemplomok, zikkuratok voltak.

A görögök és a rómaiak közvetítésével sok csillagászati hagyomány került át az európai csillagászatba, mint például az állatövi csillagképek felosztásának és nevének legtöbbje.

Egyiptom

Egyiptom az ókorban csupán a Nílus keskeny völgyében adott életlehetőségeket az embereknek ⇒ az évenkénti szabályos és nagymérvű áradások vize öntözte csak a földeket, ezért a csillagok járásának figyelemmel kísérésére szorította az ókori egyiptomiakat. Az áradás kezdetét a Sirius heliakus – Napéval egy időben bekövetkező – kelésével hozták összefüggésbe.

Közismertek a nagy piramisok csillagászati vonatkozásai is.

Valószínű, hogy az egyiptomiak láttak először napfoltot a napkorongon ⇒ erre utalhat a Nap jele ☉, melyet a csillagászatban ma is használunk

Görög források szerint, az egyiptomiak felismerték, hogy a Merkúr és a Vénusz a Nap, és nem a Föld körül kering.

Az eredetileg a denderai templom mennyezetét díszítő dombormű az északi égbolt csillagképeit ábrázolja, rajta felismerhető a ma is ismert és használt alakjában a 12 állatövi csillagkép, ez a denderai-állatöv.

Kína

Kína csillagászai az ókorban elsősorban asztrológiai célokból vizsgálták az égitestek járását.

Már az i.e. 3 évezred elején fejlett naptárral rendelkeztek. Az i.e. 12 századtól kezdve több mérési adat maradt ránk az ekliptika ferdeségéről, melyeket Laplace is felhasznált.

A kínaiak már igen régen 12 részre osztották az égi egyenlítőt, és ezeket a szakaszokat megfelelve, és az ekliptikára vetítve 24 részre osztották a Nap járását $\Rightarrow$ az évben 24 hónap.

Gondosan figyelték az időszakos csillagászati jelenségeket, üstökösöket, meteorokat, növőket, szupernóvákat, napfoltokat. Észrevették a földtengely precessziós mozgásának következményeit, a napéjegyenlőségi pontok eltolódását.

Az i.e. 2. századból maradt ránk a híres leírás Hi és Ho csillagászok kivégzéséről, mert nem jeleztek előre egy napfogyatkozást.

A megfigyelőállomások magas toronyszerű építmények voltak, tetején állandóan öt csillagász észlelt, közülük négy a fő égtájak, az ötödik a zenit irányába figyelt.

Kína világnézetét sugallja neve is, a *Csung Kuo* Középső Országot jelent

A 2. században Csang Heng szakított a Föld laposságának eszméjével, kimondta, hogy a Föld gömb alakú, valamint, hogy a térben és időben végtelen világ közepén lebeg.

India

India csillagászata is elsősorban az asztrológia céljaira alakult ki, az i.e. 12. században. Első világképünkben a Föld lapos korong, közepén Meru hegye, melyen az égbolt van, amit Varunának hívnak. (innen származtatják Urania, Uranosz elnevezését is)

Későbbi elképzelés volt, hogy a Föld félgömb alakú, és négy elefánt tartja a hátán; ezek egy teknős hátán állnak, ami az örökkévalóság óceánján úszik.

Az i.e. 4. században állapították meg, hogy öt 366 naposra bővített év folyamán a Hold 67 teljes kört ír le, valamint 62 alkalommal telik és fogy. Meghatározták a sziderikus (27,31 nap) és szinodikus (29,52 nap) holdhónap hosszát.

A csillagászat virágkorában, az i.sz. 3. századtól kezdve tankönyvek Surya Siddhanta által.

Tőlük kaptuk számjegyeinket, köztük a nullát is. Innen származik a bot-napóra is.

Indiai kör: függőleges pálca, körülötte körök $\Rightarrow$ pálca hegyének árnyékából meghatározható a pontos észak-déli irány.

Amerika

Amerika őslakóinak igen fejlett csillagászatuk volt, pontos megfigyelési eredményekkel rendelkeztek.

A dél-amerikai preinka kultúrák csillagászati megfigyelőhelyei nagy, sík vidékeken, kavicsokból kirakott, hosszú irányzó vonalak és vonalrendszerek voltak, segítségükkel a Nap, Hold és néhány fényesebb csillag kelési és nyugvási irányát kijelölve, meghatározhatták a napév fontosabb időpontjait. Hasonló célokra emeltek épületeket, tornyokat, a fontosabb irányok pontosan kijelölhetők voltak.

A közép-amerikai népek különösen az azték és maja indiánok életében a naptár kiemelkedő szerepet töltött be. A húszas számrendszert használták; az egységek napokban kifejezve: 1, 20, 360, 7200, 144000, stb.

- * k'in: nap
- * uinal: 20 nap (hónap)
- * tun: 360 nap (év)
- * katun: 7200 nap
- * baktun: 144000 nap

Nagyon pontosan meghatározták a 365,242129 napos évet is. A Nap, Vénusz, Hold különösen tisztelt volt számukra.

Európa

Európa kő- és bronzkori csillagászati kultúrájára kevés adatunk van. Az ún. Merliere-i kő a legrégebbi csillagtérkép, az i.e. 9000-8000 környékéről, amelyen a téli és nyári napforduló idején kelő és nyugvó Nap irányát is feltüntették.

Nagyobb szabású emlékek, Anglia (Stonehenge), Franciaország (Carnac) és Spanyolország területén találhatók.

- * menhir: durván faragott oszlop
- * dolmen: vízszintesen fektetett kőgerenda
- * kromlech: ezek kőgerendák, szögletes vagy kör alapú rendszere

Ókor

Thalész: i.e. 6. században élt, ión iskola vezetője, természetvizsgálat új módszere; utazásai során rengeteg tapasztalati anyagot hozott Egyiptomból és Mezopotámiából, melyek utódai objektív vizsgálatának tárgyát képezték.

Anaximandrosz: az ión iskola filozófusa, szerinte a Föld szabadon lebeg a világűrben, alakja henger, magassága harmada átmérőjének; a felső, korong alakú fele lakott.

Később a pithagoreus iskolában felvetették a Föld gömbalakúságát, bár nem csillagászati megállapításként, hanem elméleti meggondolásként, mivel azt tartották a legtökéletesebb testnek.

Parmenidész: Föld gömb alakú (először ő mondta)

Arisztotelész: i.e. 4. század, érvei voltak a Föld gömbalakúsága mellett: parthoz közeledő hajó, csillagok magassága a földrajzi szélességgel változik, holdfogyatkozás (Föld holdra vetett árnyéka mindig kör alakú). Számítása szerint a Föld kerülete 40ezer stádium; a valósnak kb. 1,5-szerese.

A következő évszázadokban többen is megmérték a Föld nagyságát

A mérés elve a Nap, vagy valamelyik fényes égitest delelési magassága azonos délkörön, de egymástól észak-déli irányban ismert távolságra lévő helyekről különböző.

A Föld területére végzett mérések

- * Arkhimédész előtt 300000 stadion
- * Eratoszthenész 252000 stadion
- * Hipparkhosz 278000 stadion $\Rightarrow$ legpontosabb
- * Marcianus Heracleota 25900 stadion
- * Poszeidonosz 240000 stadion

Az égitesteket keringési idejük szerint helyezték sorrendbe, a görög világképben (Kopernikuszig így vélték): Föld, Hold, Merkúr, Vénusz, Mars, Jupiter, Szaturnusz, csillagok.

Philolaosz világképe:

- * Központi hely, Hesztia- központi tűz
- * Égitestek sorrendje:
 1. Antichton – Ellenföld
 2. Föld – 24 óránként teljes kör
 3. Hold
 4. Nap
 5. az öt, akkor ismert bolygó

Az égitesteket gömb alakúnak vélte, Földet nem mozduatlannak.

Eudoxosz: az égitestek bonyolult, egymáshoz képest különböző sebességgel forgó, más-más tengelyű gömbök egyenlítőinek egy-egy pontjához vannak rögzítve. 27 átlátszó kristálygömbbel ábrázolt minden égi mozgást, beleértve a bolygók retrográd mozgását is.

Arisztotelész: 56 kristályszféra jellemezte a világképét. Szinte bizonyos, hogy Eudoxosz és az ő világrendszerében a kristályszférák csak munkahipotézisként szerepelnek $\Rightarrow$ az égitestek mozgásait könnyebben magyarázó égi gömbökként.

Hipparkhosz, Apollóniusz: Legfejlettebb, geocentrikus világkép. A bolygók mozgását két körmozgás összetevőjére bontották. A Földet mozduatlannak képzelték. Hipparkhosz csillagkatalógust készített, megmérte az ekliptika ferdeségét. Napórát, gnómont is használt. Gnómon: A Nap magassági szögét a pálca árnyékának hosszából számíthatjuk ki.

Arisztarkhosz: A heliocentrikus világkép első hirdetője. Megállapította, hogy a Nap jóval nagyobb a Földnél, és messzebb van a Holdnál. Megmérte a Hold távolságát. Holdfogyatkozások alkalmával megállapítható, hogy a Hold átmérője hányszor kisebb a Föld által vetett árnyéknál. Mérései alapján, a Hold átmérője harmada a Földének és harmincszor a földátmérő távolságában kell lennie. A Nap távolságát is akarta számolni. Elgondolása azon alapult, hogy az első negyed idején a Föld, Hold és Nap egy derékszögű háromszög csúcsaiban vannak; 19-szeres távolság jött ki (a helyes kb. 400-szoros). Valószínűsítette heliocentrikus nézetének igazát. Abszolút dinamizmust vitt a rendszerbe: Föld a Nap körül kering, és forog a tengelye körül. Istentagadással vádolták, száműzték.

Görög csillagászat tetőfoka: Ptolemaiosz kora

Ptolemaiosz munkái: Megalé Szüntaxisz (arab fordításban maradt fent: Almageszt). Feljegyzett 1022 csillagot és látszó fényességüket. Világképében a Föld mozduatlan, gömb alakú, egy pont a Világegyetemhez képest, amelynek a közepe. Megállapításai Kopernikusz koráig megszabták a tudományos csillagászat útját.

Arab csillagászat

Az arab csillagászat sok szakkifejezést hagyott ránk. Korábbi ismeretek az ő fordításai révén maradtak fent. Fontos volt számukra a földmérés. A ptolemaioszi geocentrikus világméretet hirdették, de voltak elégedetlenkedők is, akik a Hold mozgásával érveltek a geocentrikus világméret ellen. Fontos csillagászati táblázatokat jegyeztek fel, megmérték ekliptika hajlásszögét $\Rightarrow$ a szög változik.

Csillagászati műszereik még nem alkalmaztak optikát. Asztrolábium: számok és égitestek jelzései, kampók, égitestek helyét határozták meg. Szextáns: A navigációhoz használt kéttük-rös szögmérő, amellyel égitestek helyzetét lehet mérni egymáshoz vagy a horizonthoz viszonyítva; 40m sugarú is volt.

Ulugh Beg megmérte a Ptolemaiosz által is feljegyzett csillagok helyzetét.

Középkori Európa

Keresztény Európában a csillagászat lehanyatlott a görögök előtti szintre. A Föld ismét lapos, félgömb alakú, végtelen tengeren úszó része volt a világnak. A világrendszer keresztényesített változatát megtaláljuk *Dante Divina Commediájában* is.

Kopernikusz

De revolutionibus orbium coelestium című művének megjelenését tekintjük az újkor csillagászat kezdetének (1543).

Kopernikusz bebizonyította, hogy a Föld gömb alakú, és a világ heliocentrikus. Megfigyelésekkel, számításokkal alapozta meg állítását. A mű elé Osiander teológus írt előszót, amely a világméret matematikai fikciónak állítja be.

Gömb alakú Föld évente egy keringést tesz a Nap körül; naponta megfordul a tengelye körül. A bolygók is a Nap körül keringenek.

Megengedte, hogy nem minden bolygópálya középpontja a Nap, és mivel volt olyan excentrikus pálya, amit nem tudott leírni, epiciklusok felvételéhez folyamodott. Epiciklus: az a képzelet kör, amelyen a naprendszerben történő mozgásokat szemléltető modellen az égitest egyenletes sebességgel mozog.

Nem volt bizonyítéka világrendszerére $\Rightarrow$ csillagok túl messze vannak a földpálya átmérőjéhez képest, azokra nem tudott pontos leírást adni.

Vénusz távolságviszonyait is meghatározta. A Vénusz látszó legnagyobb szögtávolsága a Naptól 48° , Nap, Föld, Vénusz derékszögű háromszögben van...

Giordano Bruno

Filozófus, egyházi személyiség volt, Európát behálózó utjai során rengeteg ismerettel gazdagodott. Kopernikusz eszméit hirdette. A Világegyetem végtelenségének, a lakott világok sokaságának eszméjét hirdette. Az inkvizíció elevenen elégette.

Galileo Galilei

Elsőként figyelte az eget távcsővel. Megfigyelte a Hold hegyeit és krátereit, felfedezte a Jupiter négy legnagyobb holdját, Vénusz fázisait, a Mars átmérőjének változását, a Szaturnusz különös alakját, a napfoltokat, a Nap tengelyforgását. Felfedezte a Tejút és csillaghalmozatok szabad szemmel nem látható csillagait. Kiállt a heliocentrikus világméret mellett. Az idős Galileit inkvizíció elé állították, visszavonta tanait.

Kepler

Galilei kortársa, kidolgozta a kopernikuszi világkép geometriáját. Három törvényét az *Astronomia Nova* és a *Harmonices Mundi* című munkáiban fektette le. Ticho Brahe megfigyelési anyagát használta fel. (T.B. maga Ptolemaiosz eszméit követte)

A Mars ellipszispályáját is bebizonyította a Föld-Mars oppozíciójának felhasználásával.

A Föld pályája kör, a Nap ennek a középpontjától a sugár 0,018-ad részével eltolt helyzetben van. Meghatározta a Mars pályaalakját, melynek egyik gyújtópontjában a Nap áll; a keringési idők és az ellipszispályák fél nagytengelyei között összefüggést állított fel.

Newton

Felderítette az égi mozgások okait. A Hold mozgásának elemzése útján felismerte a tömegvonzási erőt, a tömegek és a köztük lévő távolságok közötti kapcsolatot.

Tanulmányozta az elméleti és gyakorlati optika kérdéseit, ő szerkesztette és építette meg az első tükrös távcsövet.

Az égi mechanikát a 18. században különösen D’Alambert, Euler, Lagrange, és az ő eszméiket egységbe foglaló Laplace dolgozta ki.

E. Halley

Felismerte a róla elnevezett üstökös periodicitást, megállapította a csillagok sajátmozgását, régi görög adatok segítségével. (1718)

O. Römer

A Jupiter-holdak fogyatkozásainak figyelemmel kísérése közben és révén felfedezte, hogy a fény véges sebességgel terjed. (1675)

J. Bradley

Felfedezte a fénysebesség véges értékének következményét, aberrációt, amely egyben a Föld keringő mozgásának első bizonyítéka is. Az aberráció akkor lép fel, ha a megfigyelő mozog a fényforráshoz képest. (1728)

W. Herschel

Igen nagyméretű bronztükröket készített, a legnagyobb 122 centiméteres volt. Felfedezte az Uránuszt, kategorizálta a ködöket és halmazokat; felismerte, hogy a Tejútrendszer belsejében vagyunk.

F. Bessel

Első csillagparallaxis, csillagtávolság meghatározása fűződik a nevéhez.

J. Fraunhofer

Megfigyelte a színeképvonalakat a Napban. Felfedezése beindította az asztrofizikát (más csillagok vizsgálatának lehetőségeit adta meg a színeképvizsgálattal).

További fontos történések az újkorból

Doppler-effektus kimutatása, a cefeida változócsillagok felfedezése, Hubble-összefüggés extragalaxisokra, relativitáselmélet, a termonukleáris fúzió felismerése (1930), rádió és radar-csillagászat (a második világháborút követően), űrkutatás (1957-től).