

Gravitatsioonilained. (seni mitte mõõdetud). Gravitatsioonilainete detektorid. Universum? See jääb järgmiseks korraks.

Universumi sünn. Suur Pauk. Tähtede evolutsioon. Universum ja tähed kui kvantfüüsika teooriate katselabor.

Galaktikad. Universumi ehitus. Universumi evolutsioon. Antroopsusprintsip.

Algul räägiksime pisut lihtsamatest asjadest. Esmalt tähtede tekkest, elust, surmast ja nende üldisest mitmekesisusest.

Seejärel Universumi praegusest olekust, mis meil on täpselt teada ning – kuidas see on teada saadud, st Universumi sünnist. Täpsemalt – mõningatest hetkedest pärast U. sünni kuni siiani. Ühtlasi ka galaktikate tekkest ja sealt – Universumi ehituseni. Seejärel – mis saab Universumist edasi. Milline on Universumi struktuur. Lahtine ja kinnine Universum, igavesti paisuv või kunagi kokkutõmbuv Universum. Universumi päris-päris algusest. Hüpoteesid alguse kohta. Miks Universum eksisteerib – antroopsusprintsip. Kõiksuse teooria (kummardus Stephen Hawkingi geeniussele).

Tähtede arengust.

Tähtede teke.

Kuidas ja millest tekivad ning on tekkinud tähed? Gaasipilvedest. Universumi sünni esimestel minutitel tekkis umbes 70% vesinikku, ligikaudu 30% heeliumi ja üsna tühisel määral muid keemilisi elemente. Praeguste hinnagute kohaselt on heeliumi 28%, 2-4% on muud. Tekkinud enamasti tähtedes, st tunduvalt pärast Universumi algust.

Kuidas tekivad tähed tänapäeval? Juba 18.sajandil püstitasid Immanuel Kant ja Laplace nn nebulaarhüpoteesi, mille kohaselt tähed tekivad suurtest gaasipilvedest. Üldiselt, kuigi väga-väga suures mastaabis loetakse aine (täpsemalt – galaktikaparvede või isegi superparvede) jaotus ühtlaseks, siis väiksemas mastaabis, näiteks meie Galaktikas, see kindlasti nii ei ole.

Molekulaarparvedes, mis koosneb gaasi ja tolmu kogumitest, on aine tihedus umbes $10^{-23} - 10^{-22} \text{ g/cm}^3$ kohta, (võrdluseks – Päikese keskmine tihedus on $1,4 \text{ g/cm}^3$, vee tihedus Maal on 1 g/cm^3). Temperatuur on 10-30K (Universumi taustakiirguse temperatuur on 2,7K), pilvede läbimõõt Linnutees on keskmiselt $1,2 \cdot 10^{15} \text{ km}$ (üks valgusaasta on $9,46 \cdot 10^{13} \text{ km}$, kaugus Päikesesüsteemile lähima täheni on 4,2 va ehk $3,97 \cdot 10^{14} \text{ km}$). Maas on 10^4 - 10^6 Päikese massi. Selliseid molekulaarpilvi on meie Galaktikas ligikaudu 4000. Jälgida saame neid peamiselt raadiolainete lainepikkuste juures.

Tähtede teket seletav teooria töötati välja peamiselt eelmise sajandi teisel poolel. Üldiselt on teooriast toodud järeldused tekkivate tähtede keskmise arvu kohta kooskõlas vaatlustega. Tähetekkel on peamiseks jõuks, mis gaasi ja tolmu kokku tõmbab gaasipilve gravitatsioonijõud. Gaasipilve kokkutõmbumine saab alata hetkel, mil gravitatsioonilise seose energia ületab pilve laiali ajavate jõudude energia. Viimasteks jõududeks on soojusliikumisest tekitatud gaasirõhu surve, pilvede pöörlemisest tingitud tsentrifugaaljõud ja magnetvälja jõud. Gravitatsiooniline tõmbumine hakkab juhul, kui pilvede algmass ületab kriitilise, nn Jeanssi massi. Kriitiline mass sõltub nii temperatuurist, pöörlemisest kui ka magnetväljadest. Üldiselt, see ulatub umbes 1000 Päikese massini. Üldjuhul ületab algse gaasipilve

mass lõplikult tekkiva tähe massi sadu kordi. Gaasipilve kokkutõmbumisel hakkab pilv fragmenteeruma. Igast fragmendist võib moodustuda uus tõmbejõudude tsenter. Tähtede tekkele aitab kaasa ka ümbritsevate tähtede kiirguse rõhk või juba tekkinud tähtede poolt tekitatud lööklained, ionisatsioonifronid jne. Samuti soodustavad gravitatsioonilist kokkutõmbumist gaasi tihenduste liikumised ja pörked. Vaatlustest on leitud, et keraarparvedes on tähed enam-vähem ühesuguste masside ja ühesuguse vanusega. See kinnitab hüpoteesi, et juba tekkinud tähed aitavad kaasa kiirenevale kokkutõmbumisele erinevates pilve fragmentides ehk prototähtedes.

Prototähest täheks arenemise võib jagada kaheks faasiks. Prototäht ise koosneb südamikust ja ümbriest. Just südamik areneb päristäheks. Alguses sadestub aine südamikule, südamik tõmbub järk-järgult kokkupoole tänu gravitatsioonilisele kokkutõmbumisele. Samaaegselt tõuseb temperatuur südamikus (prototäht vaadeldav juba infrapunases lainelas). Kui tihedus on tõsunud kuni 10^{-13} g/cm^3 , siis on muutub prototäht infrapunakiirgusele läbipaistmatuks, energia needlub südamikus, temperatuur ja tihedus hakkavad kiiremini kasvama kuni südamik saavutab hüdrostaatilise tasakaalu – gravitatsioonijõud on tasakaalustatud soojusliikumise (rõhumis)jõu poolt. Samas, aine sadestumine südamikule jätkub. Pärast veel mitut kokkutõmbumist, mille korral energia läheb vesinikumolekulide lõhkumiseks ja vesiniku aatomite ioniseerimiseks, kasvavad südamiku gaasirõhk ja kiirgusrõhk juba nii suureks, et ümbri puhutakse tänu kiirgusrõhule (ja väga vähesel määral ka gaasirõhule) minema. Südamiku mass enam ei kasva, täht jätkub kokkutõmbumist. Südamiku heledus sel ajal väheneb – kiirgava pinna pindala väheneb. Kui südamiku mass ületab 0,08 Päikese massi, siis on südamiku tsentris lõpuks temperatuur tõusnud kuni $9 \cdot 10^6 \text{ K}$ -ni ning hakkavad toimuma termotuumareaktsioonid. Arvutisimulatsioonid näitavad, et prototähest tähe tekkimiseni kulub kuni 100 000 kuni sada miljonit aastat, see sõltub prototähe massist (mida suurem mass, seda kiiremini). Päikese massiga prototäht kujuneb täheks umbes 5 miljoni aasta jooksul. Tähtede massi ülempiir on umbes 120 Päikese massi, üheks piiranguks sellele on tähe ümbri ärapuhumine. Juhul, kui tähe mass jääb alla $0,08 M_{\odot}$, siis ei tõuse temperatuur termotuumareaktsioonideks piisavalt kõrgeks, täht jätkab kiirgamist tänu oma soojusenergiale. Selliseid tähti nim pruunideks kääbusteks, mis on nähtavad vaid infrapunakiirguse piirkonnas. Kui ka kogu soojusenergia on ära kiiratud, saab tähest must kääbus, mille olemasolu võime aimata vaid tänu tema gravitatsioonilisele vastasmõjule teiste astronoomiliste objektidega.

Tähtede tekke juures on täheldatud nn ahelreaktsiooni. Kui gaasi- ja tolmutilve ühes servas on tekkinud tähed, siis neist lähtuv ultraviolettkiirgus ioniseerib ümbritsevat gaasipilve, tekib nn ionisatsioonifront, mis levib edasi gaasipilve sisemistesse osadesse seal gaasi ja tolmu kokku surudes. Tekib nõ tihedusfront või tiheduslaine, mis tekitab uusi gravitatsioonikeskmeid, milles umbes miljoni aasta pärast hakkavad tekkima uued prototähed ja tähed. Uute tähtede tekkel tekitatakse uus ionisatsioonifront, mis levib üha edasi kuni gaasipilve vastasservani välja.

Tähtede 'elu'

Tähtede elutsükli pikkus ja protsessid, mis sel ajal toimuvad sõltuvad sellest, milline on tähe mass.

Tähed klassifitseeritakse vastavalt nende (pinna)temperatuurile järgmiselt. (Ühtlasi on see klassifikatsiooniks spektri, tähe värvuse järgi).

Tabel 1. Harvardi spektraalne klassifikatsioon.

Sp. klass	Temp K	Näiv värvus	Iseloomulikud spektrijooned	Näited
O	25000-50000	Sinine	Ioniseeritud He	λ Orionis
B	11000-25000	Sinine	He ja H-jooned tugevnevad	Spiika, ϵ Orionis
A	7500-11000	Sinakasvalge	H maksimaalse tugevusega, Ca-jooned	Siirius, Veega
F	6000-7500	Rohekasvalge	Ca-jooned tugevnevad, ilmuvad ka teised metallid, H nõrgenenud	Prooküon, α Persei
G	5000-6000	Kollane	Nõrk H, tugevad Ca, K, Fe jt metallide jooned	Päike, Kapella, α Kentauri
K	3500-5000	Oranž	Metallide jooned, ilmuvad TiO ribad	Aldebaran, Akrturus
M	2000-3500	Punane	TiO jt molekulide (C_2 , CN, CO, S, TiO, ZrO) jooned, nõrgad metallid	Antaares, Betelgeuse

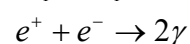
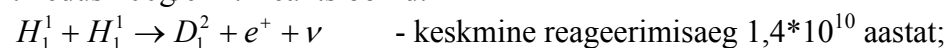
Tähe spektri täpse jaotuse, värvuste suhtelise intensiivsuse saame kindlaks teha lahutades kogu valguse spektriosadeks, kas prisma või difraktsioonivõre abil. Spektromeetri abil saame leida täpsed kiirgusjooned.

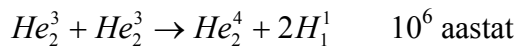
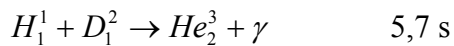
1910.ndatel uurisid seoseid tähtede suuruse, värvuse ja heleduse vahel Ejnar Hertzsprung (Taani) ja Henry Norris Russel (USA). Nad leidsid, et kui graafiku ühele teljele paigutada värvusindeks (või temperatuur) ning teisele heledus, siis paikneb enamasti tähti graafikul kitsas vahemikus, nn peajadas, mis kulgeb diagonaalselt üle diagrammi. Väiksem osa punaseid ja kollaseid tähti, on hiiud, mille heledus on suurem kui sama temperatuuriga peajada tähtede heledus. Peajadast kõrvale jäävad ka valged kääbused ja ülihiid. Näiteks Linnutee umbes 150 miljardist tähest 100 miljardit jäävad peajada alumisse otsa – nn punased kääbused, umbes 5 miljardit on läbipõlenud tähti, samapalju võib olla ka neutrontähti ja musti auke.

HR-diagramm annab võtme tähtede elu mõistmiseks. Kuivõrd enamasti paikneb peajadal, ning vaid üksikud sellest kõrvale, siis ilmselt veedab täht enamuse oma elust just peajadal. Hiiud ja ülihiid on ilmselt vaid lühikeseks etapiks tähe elus. Täpsemaks selgituseks tuleb arvestada, et täht on peaaegu pidevalt tasakaalus – nii energeetiliselt - nii palju kui tähe pinnalt kosmosesse kiirgab, nii palju ka tähe tuumas termotuumareaktsioonides energiat vabaneb; kui ka hüdrostaatilises - kiirguse ja gaasi rõhk tähe sisemistes osades tasakaalustab väliskihide gravitatsioonilise rõhu. Kui tähe sisemuses vabanev energia langeb, siis väheneb kiirguse rõhk ning väliskihid suruvad tähe rohkem kokku. Rõhu suurenedes suureneb taas temperatuur ja täht paisub endiste mõõtmeteni, st tasakaalulise olekuni.

Energia vabaneb tähe tuumas tänu termotuumareaktsioonidele. Kuigi temperatuur selle keskmises (näiteks Päikesel on umbes $20 \cdot 10^6 K$) jääb alla miljardi K, mida loetakse termotuumareaktsiooniks vajalikuks, toimuvad need tänu mitmele asjaolule. Esiteks, enamiku prootonite (H tuumad) ja deuteriumi tuumade kiirused jäävad alla piiri, mille korral need tuumad läheneksid teineteisele piisavalt lähedale, et jõuda tuumatõmbefõudude piirile, on siiski väike osa prootoneid, mille kiirus on üle selle kriitilise piiri. Kuivõrd prootoneid on tähe keskmises tohutult palju, siis piisab ka selle väikese osa prootonite ühinemisest piisava energia vabastamiseks. ,

Selline prooton-prooton-tüüpi reaktsioon algab, kui temperatuur on vähemalt $15 \cdot 10^6 K$, tihedus $100 g/cm^3$. Reaktsioonid:

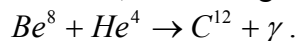




Kokku – neljast H-tuumast moodustus He-tuum. Vabanevad gammakvandid neelduvad enamasti kohe mingis aatomis, see kiirgab uuesti välja juba väiksema energiaga kvandi jne. Tähe keskosast vabaneva energia jõudmiseks pinnale kulub miljoneid aastaid.

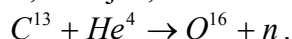
Prootonite ühinemine heeliumi aatomi tuumadeks võib toimuda ka nn CN-ahelat pidi, kus süsiniku ja lämmastiku aatomid mängivad katalüsaatori rolli. (Protsessi lõppemisel on nende aatomite arv sama). Kuid päikese tuumas mängivad sellised reaktsioonid väikest rolli, vanade tähtede tuumades ilmselt puuduvad hoopis.

Kui tähe tuumas on vesinik enamuses ära põlenud heeliumiks, siis kiirguse rõhk tähes väheneb, tuum surutakse rohkem kokku ja temperatuur tõuseb. Kui temperatuur on tõusnud juba $100 \cdot 10^6 \text{ K}$ -ni, siis hakkab heeliumi põlemine: $He^4 + He^4 \rightarrow Be^8$, mille käigus kiirgus neeldub, mitte ei eraldu – täht jahtub. Samas, ka berülliumi tuum on ebapüsiv ja laguneb kaheks heeliumi tuumaks tagasi vabastades reaktsioonis neeldunud energia. Tiheduse tõustes tähe keskmes üle 10^5 g/cm^3 tekib tasakaaluline olukord, mil on 1 Be tuum miljardi He tuuma kohta. Sellise tiheduse korral on võimalik, et enne lagunemist jõuab Be tuum neelata He tuuma:



Sellise protsessi käivitumisel tõuseb temperatuur tähe tsentris veel 100 miljoni kelvini võrra. Edasi toimuvad reaktsioonid C+He, O+He, N+He, vahepealsed tuumad saadakse prootonite lisandumise teel. Edasi Mg, Si, S, Ar, Ca, Ti... (alfa-protsess, kestus umbes 10000 aastat, toimub tuuma piiiril). Viimane algab temperatuuril umbes miljard kelvinit. Kui $T > 10^9 \text{ K}$, tihedus 10^5 kuni 10^9 g/cm^3 , muundub enamik aatomeid raua aatomiteks (e-protsess).

Pärast e-protsessi lõppu on moodustunud nn rauatuumaga täht. Raud ei ühine enam mingite teiste aatomituumadega termotuumaprotsessi käigus. Selleks, et tekiks teistsugused tuumad, on vajalik, et vesinik sattuks piirkondadesse, kus on ülekaalus kas He-He, He-C või He-N protsessid. Sel juhul hakkavad toimuma ka protsessid H-N, H-C jne, näiteks:



Kui neutroneid on sarnaste protsesside käigus piisavalt palju tekkinud, hakkavad raua klassi aatomituumad neutroneid neelama (s-protsess) muutudes üha raskemateks tuumadeks. Uutes tuumades lagunevad neutronid prootoniks kiirates elektroni (β -lagunemine). Selliselt võib tekkida enamik elemente kuni vismutini Bi^{209} välja. Protsess on aeglane, tänu sellele võivad tähe kihid aeglaselt seguneda, ümber paikneda ning täht võib pikka aega püsida sellises stabiilses tasakaalus, st võib olla hiina 10 kuni 100 miljonit aastat.

Veelgi raskemate elementide tekkel on ilmselt üks olulisemaid nn r-protsess, mis toimub tähe eluea lõpul (tähe surma korral), kui täht plahvatab supernoovana.

Täht, milles e-protsess on lõppenud, hakkab kiiresti kokku tõmbuma, sest kiirguse rõhk, mis tasakaalustaks gravitatsiooni rõhku, praktiliselt puudub. Rõhk ja temperatuur tähe tuumas kasvavad, täht on tihe ja kiirgus ei pääse välja (selline protsess võtab aega vaid sekundeid). Suure rõhu all laguneb raud taas heeliumiks neelates energiat. Samuti hakkab tänu erinevatele tuumaprotsessidele tekkima neutriinosid ja antineutriinosid, mis tähest praktiliselt vabalt välja pääsevad ja oma energia tähest välja vciivad. Ajaks, kui kogu raud tuumas otsa lõppeb, on temperatuur tõusnud 20 miljardi kelvinini, tihedus 10^{10} g/cm^3 . Temperatuuril 40 miljardit kelvinit ja rõhul $3 \cdot 10^{11} \text{ g/cm}^3$ ei pääse ka neutriinod tähest välja, tihedus tuumas on tõusnud

kuni kolmandikuni aatomituuma tihedusest, temperatuuri 100 miljardi kelvini. Sel hetkel tähe tuuma kokkutõmbumine lõppeb. Tähe väliskihid koosnevad nagu ennegu peamiselt kergete aatomite tuumadest, mis langevad tuuma poole (kiirguse ja aine rõhk vahepeal puuduvad). Jõudes kõrge temperatuuri piirkonda, hakkab taas termotuumareaktsioon, mis tänu kõrgele temperatuurile toimub väga kiiresti, täht plahvatab supernoovana. Vabaneb väga palju prootoneid ja neutroneid, mis pressitakse raskemate aatomite tuumadesse. Selliselt sünteesitakse ka raskemad keemilised elemendid, ka uraanist raskemad.

Kuidas toimub tähe areng? Tähtede elu algusjärgus jõuavad nad HR-diagrammile prototähena (termotuumareaktsioonid veel ei toimu), kui enamik vesinikust on ioniseeritud, pinnatemperatuur on ligi 2000K. Termotuumareaktsioonide alates jõuavad nad põhijadale punktis, mille määrab nende mass. Päikesesarnase tähe arengus võtab see aega kuni 50 miljonit aastat, raskematel tähtedel kulub selleks vähem aega. Peajadale jääb Päikesesarnane täht umbes 10 miljardiks aastaks, praktiliselt muutumata heledusega. Siiski, täht paisub pisut selle aja jooksul ning muutub veidi heledamaks. Näiteks 5 Päikese massine täht on Päikesest umbes 400 korda heledam. Kui H on tuuma keskelt peaaegu ära põlenud, tõmbub tuum veel rohkem kokku, H põlemine hakkab toimuma tuumale järgnevas kihis (kihtpõlemine), kiirgusvoo suurenemisel surutakse tähe väliskihid laiali, täht muutub suuremaks ja heledamaks, kuid tema pind jahedamaks (täht muutub punasemaks). Täht lahkub peajadalt punaste hiidude piirkonda. Umbes 96 miljoni aasta pärast on tuumas vaid 7% vesinikku, kokkutõmbumine kiireneb, 4 miljoni aasta jooksul pinnatemperatuur tõuseb kuni H tuumas lõppeb. Järgneva paari miljoni aasta jooksul jätkub He-tuuma kokkusurumine ja H-kihtpõlemine tuuma piiril. Tähe tuumas tõuseb temperatuur kuni 80 miljoni kraadini ja algab He põlemine tuumas. Sel ajal läheb enamus tähti tasakaalust välja. Takistused kiirguse levikul kutsuvad esile võnkumisi – tähe paisumisel pääseb rohkem kiirgust välja, täht jahtub, hakkab tagasi kokku tõmbuma, kuumebe jne kuni miljoni aasta jooksul. Samal ajal ka heledus muutub (tsefeidid). Heleduse muutumise periood sõltub ka tähe massist. He tuumapõlemise lõppedes on tähes peamiselt C ja O tuum, jätkub kihiline tuumpõlemine. Täht massiga 1-5 Päikese massi on muutunud hiiuks, 5-10 – heledaks hiiuks ja 10-15 – ülihiuks. Tähe sees on nn valge kääbus, kuid väliselt on see punane hiid, pinnatemperatuuriga 2000-2500K. Tähe edasine areng sõltub otseselt massist. Suurimate rahulikult elu lõpetavate tekib ilmselt rauatuumaga valge kääbus. Tähe elu lõppedes langeb ümbris kiirgusrõhu nõrgenedes tähe tuuma poole, kuumeneb järsult ja paiskub välja, tekib planetaarne udu. Täht langeb hiidude alalt valgete kääbuste alale ja hakkab jahtuma.

Tähed massiga 0,08-5 M Päikest lõpetavad aktiivse elufaasi valgete kääbustena. Tähed massiga 0,5-5 M Päikest heidavad endalt ühe või mitu korda ära väliskihi (tingitud He kihtpõlemise ebastabiilsusest) ja on vaadeldavad planetaarududena. Päikeses saabub tasakaal ilmselt O ja S põlemisel, rauatuuma ei tekigi.

Tähed massidega 5-10 M Päikest lõpetavad oma elu supernoova plahvatusena (II tüüpi supernoova), mille käigus kogu täht võib maailmaruumi laiali lennata. Veelgi suuremate massidega tähed võivad pärast supernoova plahvatust järele jätta neutrontähe või musta augu (kui rauatuuma mass on üle 2 M Päikese).

Selleks, et kirjeldada tähe viimasel eluetapil toimuvat, ei piisa enam klassikalisest füüsikast, tuleb appi võtta kvantmehaanika. Kvantmehaanikast kuuldud Pauli printsiip väitis, et ühes ja samas kvantolekus saab korraga olla vaid üks antud liiki fermion. Fermionid olid näiteks elektronid, prootonid, neutronid, neutriinod jne. Ühes ja samas energetilises olekus saab olla vaid 2 elektroni (kvantoleku ühel tasemel saab olla 2

erinevat spinni väärtust, seega kummagi spinniga 1 elektron). Madalaima energiatasemega olekud hõivatakse kohe. Mida suurem on aine tihedus, seda kõrgematele energianivooale peavad elektronid minema, seda suurem on elektrongaasi rõhk. Sellist ainet nimetatakse mandunud elektrongaasiks. Kui rõhk on määratud vaid aine osakeste soojusliikumisega, siis on rõhk võrdeline aine tiheduse ja ruumalaga. Mandunud elektrongaasi rõhk sõltub ainult tihedusest. Lihtsustatult võiks öelda nii – kui hakkab toimuma näiteks heeliumi põlemine, siis selle korral viib suhteliselt väike temperatuuri tõus intensiivsemale põlemisele ning energiat eraldub tunduvalt rohkem. Kuni täht püsib hüdrostaatilises tasakaalus, st gravitatsiooniline rõhk tasakaalustatakse aine ja kiirguse rõhuga, siis elektrongaasi rõhk tunda ei anna. Elektrongaasi rõhk hakkab tähele „tunda andma“ alles väga kõrgel temperatuuril ja tihedusel. Sellisel juhul aga ei pruugi täht olla väga tasakaalulises seisundis, elektrongaasi rõhu äkiline tundaandmine võib tekitada väljapoole lööklaine, milles termotuumaaaine veel intensiivsemalt põleb. Toimub tähe plahvatamine supernoovaa. Seega, kui tähe termotuumakütus on lõpuks otsas, sisemised energiavarud ammendunud, hakkab täht kokku tõmbuma. Kokkutõmbumisel hakkab tähe kasvava siserõhk gravitatsioonilisele rõhule vastupanu osutama. Siserõhk on seotud nii aine, kuid esmajoones just mandunud elektrongaasi rõhuga (kiirgus on „otsas“). 1930. aastate alguses näitas Subrahmanyam Chandrasekhar, et ülemine piir, mille korral see nii juhtub on tähe jaoks massiga 1,4 M Päikest. Kui mass jääb vahemikku 1,4 kuni 3 M Päikest, siis on tasakaalustajaks neutronid (mandunud neutrongaasi rõhk). Kui tähe mass ületab 3 M Päikest, kukub täht kokku mustaks auguks.

Enamus supernoovas eraldunud energiast kantakse minema neutriinode poolt. 1970. aastatel arvutasid teoreetikud, milline peaks olema supernoova plahvatusel eralduvate neutriinode energeetiline spekter (energiajaotus). 1987. aastal jälgitud supernoovas eraldunud neutriinode energiatega mõõtmine kinnitas teoreetikute arvutusi ning lisas kindlust neutrontähe tekkimise viisile.

Seega, pärast tähe plahvatamist supernoovana, jääb sellest alles umbes Päikese massiga neutrontäht, mis pöörleb väga kiiresti (impulssmomendi jäävus) ning millel on väga tugev magnetväli. Neutrontähe raadius on umbes 10 km. Tihedus on Päikese tihedusega võrreldes kohutavalt suur (kui kogu inimkonna 6 miljardit inimest keskmise massiga 60 kg suruda kokku 1 cm³). Neutrontähtede idee pakuti välja juba 1930. aastate lõpus Fritz Zwicky ja Walter Baade poolt. Neutrontähed avastati 1968. a. tänu nende võimsale magnetväljale. Piki magnetvälja jõujooni pooluste kohalt välja voolav plasma tekitab 2 koonusekujulist raadiokiirguse voogu. Kui neutrontähe pöörlemistelg ja magnetpooluste telg ei lange kokku, siis keerutab neutrontäht raadiokiirguse koonust üle taeva. Kui Maa jääb sellele kimbule ette, tabab Maad perioodiliselt raadiokiirguse impulss – tegemist on pulsariga. Praeguseks on avastatud üle 700 pulsari. Pulsarite pöörlemissagedus on millisekundite suurusjärgus.

Universumi teke.

Suur Pauk. Esimestest minutitest kuni galaktikate tekkeni. Struktuurid Universumis, galaktikad, täheparved, galaktikaparved.

Praeguseks üldiselt tunnustatud ning vaatlustega kinnitust leidnud teooria põhjal on meil tegemist paisuva Universumiga. Mida see tähendab? St, et kõik suuremad struktuuritükid eemalduvad üksteisest – Universumi koguruumala suureneb. See on sarnane näiteks õhupalli paisumisega. Õhupall on kinnine kumer pind. Selle täispuhumisel pindala suureneb, suvalised kaks punkti sellel pallil eemalduvad üksteisest. Sama on ka Universumiga. Kuigi, juurde tuleb tegelikult küsimus – kas Universum on ruumiliselt kinnine (sarnane palliga) või lahtine (lõpmatu tasapind või sadulpind 2D-pinnana). Lahtise Universumi korral ei saa rääkida ruumala suurenemisest (see on lõpmatu), kuid galaktikaparved eemalduvad üksteisest küll.

Miks me selles nii kindlad võime olla? Kui Einsteini ÜRT eelmise sajandi teisel ja kolmandal aastakümnel rakendama hakati, tundus, et see on rohkem teoreetikute mäng. Kui Friedman 1920.ndatel näitas, et Einsteini ÜRT võrranditest järeldub, et Universum ei saa olla statsionaarne, st tähed, galaktikad, galaktikaparved ei saa seista üksteisest konstantsetel kaugustel, vaid peavad üksteisest eemalduma, ei võetud seda tõsiselt. Einstein isegi modifitseeris oma võrrandeid, et Universumi paisumine välistada.

Vaatluslikult kinnitas Universumi paisumist 1930.ndatel Edwin Hubble. Vaadeldes galaktikaid, tegi Hubble kindlaks, et mida kaugemal on galaktikad, seda suurem on eemaldumiskiirus (kiiruse saab kindlaks määrata Doppleri punanihke abil, kauguse kindlaksmääramine on keerulisem). Siiski ei usutud eriti, et Universum võis alguse saada väga väikestest mõõtmetest, mahtuda ära nõõpnõelapeasse, ja nüüd olla paisunud nii suureks. Siiski, mõõtmiste kordamisel ja täpsustamisel oli ka Einstein sunnitud oma statsionaarse Universumi ideest loobuma.

Hubble'i avastus - kehtib lihtne seos $v = H_0 r$ – galaktikate eemaldumiskiirus üksteisest on võrdeline nendevahelise kaugusega. H_0 on konstant, tegelikult küll sõltub ajast, aga igas ruumpunktis peaks samal ajal ühesugune olema. Universumi alguses oli see suurem, st Universum paisus kiiremini. Praegu arvatakse erinevate hinnagute kohaselt, et Universum sai alguse 10-12 miljardit aastat tagasi.

Selline hüpotees, et kunagi oli kogu Universumi ruumala äärmiselt tilluke, tähendab, et sel ajal pidi ka aine ja energiatihedus olema tunduvalt suurem. 1946.a. ennustasid George Gamow, Ralph Alpher ja Hans Bethe, et sellisel juhul peaks Universumi algetapilt olema pärit kosmiline reliktkiirus, mille temperatuur on ligikaudu 3K. Ka seda peeti rohkem ulme ja puht-teoreetiliste hüpoteeside valdkonda kuuluvaks. Aastal 1964. avastasid Arno Penzias ja Robert Wilson (Nobeli preemia 1978a.) kogemata, üritades mõõta vesiniku hulka (vesiniku kiirusjoonte abil) meie Galaktikas ühtlase müratausta, mis oligi just 2,7K-lise temperatuuriga reliktkiirus. Kiirus ei sõltu ruumisuunast, on isotroopne. Antud avastus langes kokku teoreetiliste ennustustega. Kiirguse isotroopsus aga kinnitas teooriat, et Universumi algetapil, kui galaktikaid ja tähti polnud, koosnes Universum kuumast 'ürgsupist'. Tõsi, samas oli isotroopsus vastuolus sellega, et kogu Universumis paikneb aine äärmiselt ebahomogeenselt, ühtlasest aine jaotusest ei saa rääkidagi, kui seal on tähed, galaktikad ja galaktikaparved. Hilisemad täpsemad mõõtmised on näidanud, et tegelikult eksisteerib äärmiselt väike ebahomogeensus, mis on tingitud sellest, et juba 100-300000 aastat pärast Suurt Pauku, kui Universumi temperatuur oli umbes 100000K, pidid hakkama tekkima esimesed anisotroopiad, et hiljem saaksid hakata moodustuma esimesed struktuurid – galaktikaparved. COBE eksperimendiga

kaardistati suur osa taevast ja reliktkiirguse temperatuur mõõdeti täpsusega $29 \pm 1 \mu\text{K}$. Mõõtmistulemused kinnitasid ennustatud anisotroopia olemasolu. Seega, teooria, et Universum sai alguse suurest kosmilisest plahvatuses, Suurest Paugust, on leidnud vaatlusikku kinnitust. Teooriat on juba selle algusest üritanud ümber lükata üks suuremaid teoreetikuid-kosmolooge Fred Hoyle, aga ka tema nõustus 1990.ndatel selle teooria paikapidevuses. Samal ajal, tema teoreetilised tööd Suure paugu teooria ümberlükkamiseks (koos ebaõnnestumisega) on kosmoloogiat üsna tugevalt edasi arendanud.

Kuidas meie Universum siis alguse on saanud?

Alguses, vähim aeg – 10^{-43}s , Universumi raadius 10^{-50}cm . Meile tundmatud osakesed, supergravitatsioon laguneb gravitatsiooniks ja suureks ühendinteraktsiooniks.

Vastavalt meie teadmiste elementaarosakeste füüsikas ja osalt kindlasti ka hüpoteesidele, etapil $10^{-35} - 10^{-30}\text{s}$, U. mõõtmed $10^{-33} - 10^{-15}\text{cm}$, mil mateeria oli ülitihed, ülikuum, valitsevateks osakesteks nn väga suurte seisumassidega skalaarsed bosonid, mille vahel valitsevad ülisuured tõukejõud panidki aluse Universumi eksponentsiaalsele paisumisele. See on Alan Guthi klassikaline inflatsioonilise Universumi mudel. Nende tõukejõudude mõjul tekib positiivse paisumisen energiaga võrdne negatiivse potentsiaalse energiaga mateeria. Kuivõrd ruumi enda paisumine on eksponentsiaalne, siis alguses lähestikku ja põhjuslikult seotud ruumi piirkonnad eemalduvad üksteisest äärmiselt kaugele, samas, tänu sellele on ka ruumiliselt praegu üksteisest väga kaugel paiknevad piirkonnad suurtes mastaapides sarnased – ühesugused aine tihedused. Osakese horisont 10^{29} korda suurem meie praegusest. Suur ühendinteraktsioon laguneb tugevaks ja nõrgaks interaktsiooniks.

Etapil $10^{-30} - 10^{-5}\text{s}$ on Universum paisunud juba $0,8\text{ cm}$ raadiuseni. Temperatuur langenud 10^{15}K -ni, elektronõrk vastasmõju jaguneb nõrgaks ja elektromagnetiliseks vastasmõjuks. Universum on kvarkide, elektronide, positronide, footonite, neutriinode, gluonite ja teiste osakeste nõ supp – nad on soojuslikus tasakaalus, kõigi osakeste liikide keskmised kineetilised energiad on keskestlābi võrdsed. Kõiki liiki osakesi on ligikaudu ühepalju. Puhtast kiirgusest – kahe footoni kokupõrkel, võib tekkida elektroni-positroni või kvargi-antikvargi paar ja vastupidi. Temperatuuri edasisel langemisel hakkavad tekkima juba hadronid, st prootonid, neutronid, piionid jne. Osakesi ja antiosakesi on endiselt ühepalju. Temperatuuri langemisel alla 10^{13}K -ni (prootonite ja neutronite lāvitemperatuur, st temperatuur, mil puhtast kiirgusest saab tekkida prootoni-antiprootoni paar) hakkavad prootoni-antiprootoni ning neutroni-antineutroni paarid annihileeruma. Tänu piionite lagunemise ebasümmeetrilisusele jääb ainet pisut üle. See ebasümmeetrilisus on küll nõrk, prootonite arv on umbes 10^{-7} footonite arvust, kuid sellest piisab, et ülejāndu ainest saaks hiljem moodustuda tähed, galaktikad.

10^{11}K , $0,02\text{s}$ – neutronid hakkavad vaikselt lagunema prootoniteks, elektronideks ja antineutriinodeks. Nukleonidest on 62% prootoneid ja 38% neutroneid. Umbes 2 sekundi möödumisel Suurest Paugust ($T=6 \cdot 10^{10}\text{K}$) kaotavad neutriinod soojusliku tasakaalu teiste osakestega, st ei põrku enam teiste osakestega, Universum on nende jaoks 'lābipaistev'. Tekivad nn reliktneutriinod, mida on umbes 330 1/cm^3 , temperatuuriga $1,9\text{K}$. Nende energia on paraku liiga vāike, et praeguste vahenditega vaadelda ja sedasi SP teooriat kinnitada.

Temperatuuril $3 \cdot 10^{10}\text{K}$, umbes 14 s SP-st on temperatuur langenud ka alla elektronide-positronide lāvitemperatuuri, hakkab nende annihileerumine.

3 minuti möödumisel SP-st, temp 10^9 K (üle 20 korra kõrgem kui Päikese keskmes) hakkab toimuma esmane tuumasüntees, osa prootonitest ja neutronitest ühineb heeliumiks. Umbes 35 minutit pärast SP – temperatuur $3 \cdot 10^8$ K, liigsed elektronid-positronid annihileerunud, footonite temperatuur umbes 40% kõrgem elektronide temperatuurist. Heeliumi on aineest umbes 22-28%. Aine temperatuur endiselt liiga kõrge, et saaks aatomid tekkima hakata.

Temperatuuri langemisel alla 3000K, 700000 a pärast SP hakkab aine rekombineerumine, elektronid saavad võtta sisse oma koha aatomituumade ümber. Aine ja kiirgus pole enam soojuslikus tasakaalus, Universum on kiirgusele läbipaistev, aine ja kiirguse temperatuurid langevad erinevalt. Sealt ongi pärit nn reliktkiirgus.

Sellest, kuidas täpselt on tekkinud galaktikad, päris kindlat seisukohta pole. Ühelt poolt – reliktkiirguse uurimine näitab, et aine ja kiirgus oli Universumi algstaadiumis väga homogeenne. Struktuuride tekkeks peab hakkama aine gravitatsiooniliselt mingitesse klompidesse kokku tõmbuma. Teisalt – aine ja kiirguse rõhk hakkab seda jälle laiali suruma. Suurte struktuuride teke sai alata ilmselt alles pärast Universumi muutumist kiirgusele läbipaistvaks. Arvutisimulatsioonid ja teoreetilised arutlused on toetanud Jaan ja Maret Einasto teooriat, et need suured aineklombid ei paikne Universumis mitte väga juhuslikult, vaid teatavates ribades või rakkudes (rakuseintes). Nendeks struktuurideks pole mitte lihtsalt galaktikad, vaid galaktikate superparved. Keeruliseks teeb selle struktuuri uurimise ja mudelite koostamise see, et neid tuleb teha 3D-ruumis. 1976 ja 1980. ndatel näitasid Eesti teadlased, et vaatlused tõestavad rakulise struktuuri olemasolu – suurtes mastaapides paiknevad galaktikaparved ribade või kihtidena, kus ribasid ühendavad teised parved ning suuremad tühikud (rakud).

Sellised enam-vähem konstantse suurusega rakud tekivad siis, kui häirituse lainepikkus vastab parasjagu rakkude suurusele. Kuivõrd varajases Universumis levis erineva lainepikkusega laineid, võis üks ka sellise lainepikkusega olla. Küsimus, miks just selle lainepikkusega lainete amplituud oli nii suur, et tekitada aine tiheduse fluktuatsioone.

Galaktikate teke. Tihedushäiritused, galaktikate dünaamiline hõõre, pidurdavad lööklained. Tähed keraparves, Suures ja Väikses Magalheasi pilves. Spiraalsus võib olla tingitud pealelangevatest ja liituvatest tähestruktuuridest. Galaktikate tühikud. Protogalaktikas esimesed tähed, pealelangevad ainepilved annavad osa oma energiast tähtedele, pöörlemisenergia läheb Galaktika pöörlemapanemisele. Liikumine kiireneb. Galaktikate pörked, galaktikate kannibalism.

Kuidas ilmnevad varjatud aine, varjatud mass?

Universumi ehitus ja algus.

Universumi geomeetria. Kõverus, Universumi avatus või suletus. Universumi areng. Kriitiline tihedus, praegu vaadeldav on selle ligi, kusjuures vaadeldava aine mass on 5-10% tegelikust (isegi väiksem võib olla). Mis on varjatud aine? Neutriinod, mustad augud, pruunid kääbused, gaasi- ja tolmutpilved.

Kriitiline tihedus ja Universumi tuelviku sõltuvus sellest. Minevik? Tulevik – taaskokkutõmbumine või soojussurm. Kosmoloogiline konstant ja Universumi paisumine. Kuidas teha kindlaks, kas Universum on lahtine või kinnine?

1970, Brandon Carter Cambridge'st:

Antroopsusprintsiiip: See, mida meie ka vaadelda saame, peab olema piiratud tingimustega, mis on paratamatud meie kui vaatleja olemaoluks.

St U-s ei tohi olla midagi taolist, mis meie olemasolu ei mõjutaks. Pole võimalikud sellised asjad, mis välistaksid meie kui vaatlejate olemasolu.

Nõrk AP. Meie asukoht Universumis on paratamatult määratud sellega, et ta peab olema kokkusobiv meie kui vaatlejate eksistentsiga.

Loogiline – nt Galaktika keskmele lähemal on ultraviolettkiirguse osa teistelt tähtedelt nii suur, et elu Maal poleks saanud kuidagi tekkida. Gammakiirgusepursked – nende võimsus, mis saaks siis, kui need toimuksid meie Galaktikas nii võimsatena kui me näeme?

Tugev AP. Universum peab olema selline, et lubada vaatlejate teket mingis maailma arengustaadiumis.

Meie Universum on äärmiselt ebatõenäoline. Konstantide väike muutus ei võimalda nukleonide või aatomituumade teket, aatomite teket, aine kogunemist tähtedeks, galaktikateks, aine kogunemist rakkudeks. Hüpotees (raske tõestada), et tegelikult on univervsumeid palju ja meie saame viibida vaid selles, mis seda võimaldab. Teistes vaatlejad vähemalt sel kujul nagu meie, vilets orgaanika, puuduvad.

Mis võis olla Universumi algushetkedel. Stephen Hawkingi teooria. Kõiksuse teooria loomine.