

EKSOPLANEEDID

Tõnu Viik

Uus eksoplaneet!

Selle aasta aprillis levis kulutulena teade, et Kaalude tähtkujus 20.5 valgusaasta kaugusel asuval tähel Gliese 581 on avastatud üsna Maa sarnane planeet. Planeet sai endale nimeks Gliese 581 c, kus "c" nime juures tähendab seda, et selle tähe ümber on varem kaks planeeti tiirlemas juba leitud. Avastus tehti Euroopa Lõunaobservatooriumi filiaalis Tšiilis, Atacama kõrbes paiknevas La Silla observatooriumis, kusjuures rühma juhiks oli Stephan Udry Genfi observatooriumist. Uue planeedi raadius leiti olevat vaid poolteist korda suurem Maa raadiusest ja avastajad hindasid selle planeedi temperatuuriks 0 kuni 40 kraadi Celsiuse järgi, mis annab lootust vedela vee esinemiseks planeedi pinnal. Aga vesi teadagi on meie praeguste teadmiste kohaselt vältimatu tegur elu olemasoluks.

See eksoplaneet - nii hakati kutsuma planeete väljaspool Päikesesüsteemi - on siiani avastatuist kõige väiksem, asudes oma ematähele 14 korda lähemal kui Maa Päikesele. Seega Kepleri kolmandat seadust rakendades leiame, et selle eksoplaneedi aasta kestab vaid 13 päeva. Kuigi uue planeedi ematäht on väiksem ja külmem kui meie Päike, on Gliese 581 c oma ematähe läheduse tõttu siiski eluks sobivate parameetritega piirkonnas. Juba vaibuma hakanud huvi eksoplaneetide vastu süttis taas, sest kui seal tõesti on elu, siis äkki on see arukas!

Natuke ajalugu

Tuhandeid aastaid oli inimene endalt küsinud, kas Universumis on veel meie Päikesesüsteemi taolisi planeedisüsteeme või on meie oma ainus. See ainukeseks olemine tundub kole kahtlane, sest me teame, et Universumis on keskelt läbi miljard galaktikat ja igaühes nii miljardi tähe ümber, siis oleks ju loomulik eeldada, et paljud neist omavad planeedisüsteeme. Kui oletada, et neid süsteeme on 10^{20} ja kuna Universum on 10^{10}

aastat vana ning kui veel lisaks oletada, et need süsteemid tekivad ühtlase kiirusega, siis keskelt läbi tekiks Universumis miljon planeedisüsteemi tunnis!

On aga selge, et ega artikli alguses püstitatud küsimusele muidu vastust ei saa, kui tuleb otsima hakata.

Esimese dokumenteeritud eksoplaneetide otsimise võttis ette Christian Huygens (1629 - 1695) seitsmeteistkümnenda sajandi lõpupoole. Ilmselt on olemas ka varasemaid katseid.

Kahekümnenda sajandi keskel ilmusid esimesed teated eksoplaneetide kohta. Astronoom Peter van de Kamp uuris spetsiaalselt Barnardi tähe omaliikumist. Ta leidis, et selle tähe liikumises on märgata teatud võbelemist. Pärast rehkendusi jõudis ta järeldusele, et selle võbelemise põhjustas planeet massiga umbes 1.6 Jupiteri massi, mis oli ekstsentrilisel orbiidil ümber ematähe. Järgmise paari aastakümne jooksul ta täpsustas oma rehkendusi ja sai tulemuseks, et hoopis kaks planeeti, massidega 0.7 ja 0.5 Jupiteri massi liiguvad ümber Barnardi tähe ringikujulistel orbiitidel. Neid avastusi ei kinnitanud keegi, kuid mitte sellepärast, et keegi ei proovinud. Lihtsalt teised leidsid, et see võbelemine oli põhjustatud vigadest tema vaatlusmeetodis. Peter van de Kamp suri 1995. aastal 94 aastasel, olles ikka kindel oma avastuses.

Loomulikult on kõige tähtsam teha kindlaks eksoplaneetide olemasolu otseste astronoomiliste vaatluste teel. Viimaste kümnendite jooksul on astronoomiline vaatlustehnika nii palju täiustunud, et kõne alla tuli eksoplaneetide avastamine kaudsete meetodite abil.

Esimest korda publitseeriti eksoplaneetide avastamine 1989. aastal, kui HD 114762 ja Alrai (γ Cephei) radiaalkiiruste variatsioone seletati pruuni kääbuse massist väiksema massiga kahe tähe või hiidplaneedi ($11 M_J$ ja $2-3 M_J$) gravitatsiooniliste häirituste mõjuga. Alrai oli olnud aasta varem ühe artikli objekt, kuid planetaarse kaaslaste küsimus oli jäetud lahtiseks. Järgnev töö 1992.a. näitas, et Alrai juures planeete ikka ei ole. HD 114672 planeedi küsimus jäi lahendamata.

Poola astronoom Aleksander Wolszczan väidab, et tema avastas esimesed eksoplaneetidid 1993.a., mis tiirlesid pulsari PSR 1257+12 ümber. See väide leidis hiljem ka kinnitust. Arvatakse, et need tekkisid pulsari tekitanud supernoova ebaharilikest jäänustest, planeetide moodustumise teise raundi ajal, või on need hiidplaneetide tuumad, mille supernoova plahvatus paljaks pühkis ja mis hiljem spiraleerusid praegustele orbiitidele. 1990. aastate lõpus algas tõeline eksoplaneetide avastamise buum. See osutus võimalikuks tänu parematele teleskoopidele ja tahkisvastuvõtjatele koos arvutil baseeruva pilditöötusega.

Esimesest kindlast eksoplaneedist peajada tähe ümber teatati 6. oktoobril 1995.a., kui Michel Mayor ja Didier Queloz leidsid selle 51 Pegasi ümber tiirlemas. Sellest ajast on neid avastatud kümneid ja kümneid ja kinnitati ka algsed väited avastamise kohta 1980. lõpus. Palju eksoplaneete on avastanud Geoffrey Marcy Kalifornia ülikooli Licki ja Kecki observatooriumides. Esimese planeedisüsteemina avastati *v* Andromedae. Enamus avastatud planeetidest olid väga elliptiliste orbiitidega. Kõik nad olid hästi massiivsed ja enamasti suuremad kui Jupiter.

2004.a. keskel oli leitud 108 planeedisüsteemi peajada tähtede ümber, mis sisaldasid 152 tuntud planeeti. Juulis 2004 teatati, et HST avastas veel 100 planeeti lisaks, kuid seda pole kinnitatud. Lisaks sellele viitavad paljud vaatlused miljonite komeetide olemasolule ekstrasolaarsetes süsteemides.

Kuidas eksoplaneete avastatakse?

Seisuga 31. august 2004 olid kõik eksoplaneedid avastatud kas radiaalkiiruste kaudu (sinised punktid joonisel 1), varjutuse kaudu (punased punktid) ja mikroläätsede abil (kollased punktid). Joonisel on näidatud ka avastamise piirid tulevaste kosmose- ja maapealsete määramiste jaoks.

Praegu saab rääkida kuuest meetodist eksoplaneetide avastamiseks, mis on liiga nõrgad otsesteks vaatlusteks konventsionaalsete meetoditega. Planeeritavad missioonid nagu Space Interferometry Mission, Terrestrial Planet Finder ja Darwin proovivad kõik vaadelda eksoplaneete otsesemate meetoditega.

Esimene meetod, mida kasutati eksoplaneetide otsimiseks seisnes pulsarite perioodide anomaaliate otsimises. See viis kohe esimese planeedi “avastamisele”, mille periood oli täpselt üks aasta. Hiljem muidugi selgus, et unustati maha lahutada Maa liikumine orbiidil. Kuid ikkagi viis see meetod esimeste planeetide avastamisele, seekord tõeliselt, ja samuti ka esimese planeedisüsteemi avastamisele (Aleksander Wolszczan). See viis ka kõige vanema planeedi avastamisele Steinn Sigurdssoni meeskonna poolt PSR B1620-26 ümber. See on ainuke tuntud planeet, mis tiirleb **kahe** tähe ümber.

See meetod nõuab pulsari signaali väga täpset mõõtmist, et kindlaks teha, kas pulsari perioodis on mingit anomaaliat. Tavaliselt kasutati seda meetodit pulsari kaaslaste otsimiseks, kuid see sobib ülihästi ka planeetide otsimiseks.

Astromeetriline meetod on vanim eksoplaneetide otsimise meetod, mida on kasutatud

juba 1943. aastast alates. On leitud palju kandidaate, kuid kinnitust neile pole ja enamasti astronoomide on selle meetodi maha jätnud. Meetod seisneb tähe omaliikumise mõõtmises, et näha, kas seal paistab planeetide mõju, kuid õnnetuseks on planeetide mõju nii väike, et isegi parim tänapäevane varustus ei suuda anda usaldatavaid tulemusi. Meetod nõuab lisaks veel, et orbiit oleks peaaegu risti vaatekiirega, aga nii avastatud planeetide olemasolu ei saa kinnitada teiste meetoditega.

Kaugelt kõige edukam eksoplaneetide avastamise meetod seisneb kiiruste muutuse mõõtmises Doppleri efekti abil. Asi on selles, et kuigi me räägime planeedi liikumisest oma ematähe ümber, siis tegelikult liiguvad nii planeet kui ematäht ümber süsteemi ühise massikeskme. Ainult et tähe liikumine on tavaliselt tühine planeedi liikumisega võrreldes, sest planeet ja täht on ikka väga erinevates kaalukategooriates. Astronoomias mõõdetakse liikumiskiirust tähe spektrijoonte nihkega, mida põhjustab Doppleri efekt. Praegu suudetakse registreerida kiirusi kuni 1 meetri sekundis.

Kahjuks töötab see meetod vaid suhteliselt lähedaste tähtede puhul (kuni 160 valgusaastat). Meetod leiab kergesti planeedid tähe lähedal, kuid ei suuda leida kaugemaid planeete.

Ka mikroläätse efekti on võimalik kasutada eksoplaneetide leidmiseks. See efekt ilmneb siis, kui tähe ja planeedi raskusväli suurendab kaugel nende taga asuva tähe näivat heledust. Et efekt töötaks, peavad nii täht kui planeet mõlemad minema täpselt kaugel tähe eest mööda. Kuna sellised juhtumid on haruldased, siis tuleb pidevalt seirata suurt hulka kauged tähti, et avastada planeete mõistliku kiirusega. Selle meetodi põhieelis on selles, et ta lubab avastada ka väikese massiga (näiteks Maa massiga) planeete. Negatiivne külg on selles, et katset ei saa enam korrata, sest sellist joondumist enam ei tule. Kui aga me saame vaadelda väga palju taustatähti väga suure täpsusega, siis see meetod ütleb, kui tavalised on Maa-sarnased planeedid Galaktikas.

Varjutusmeetod avastab planeedi varju, kui planeet täheketta eest mööda läheb. Meetod töötab vaid vähesel hulgal planeetide jaoks, sest pole palju selliseid süsteeme, mis on meie jaoks sobivalt orienteeritud - orbiidi tasand vaatekiirel või selle suhtes väikese nurga all.

Kepleri missioon on kosmoseteleskoop, mis saadetakse üles 2007.a. See on spetsiaalselt konstrueeritud suure hulga Maa-suuruste planeetide avastamiseks varjutusmeetodiga.

Üsna uus meetod on tolmutilvede uurimine. Paljud planeedisüsteemid sisaldavad suure hulga tolmu, mis tekib komeetide, asteroidide ja planeetide põrgetes. Tolm moodustab

ketta tähe ümber, neelates tähe valgust ja kiirates seda ümber infrapunases piirkonnas. Need tolmutpilved võivad anda väärtuslikku informatsiooni ketaste tiheduse ja nende kuju moonutuste kaudu, mida on põhjendanud orbiitlev tolmutkoguv planeet või selle gravitatsiooniline mõju kettale.

Kahjuks saab seda meetodit kasutada vaid atmosfääriväliselt, sest Maa atmosfäär neelab enamuse infrapuna kiirgusest, tehes maapealse vaatluse võimatuks.

Meie oma Päikesesüsteem sisaldab niipalju tolmu, et see teeb kokku 1/10 Kuu massist. Hoolimata oma suhteliselt tühisest massist on selle pindala siiski nii suur, et selle IP kiirgus on kõikide planeetide omast umbes 100 korda suurem.

Märtsis 2005 saime teada, et ka otsesed vaatlused vivad anda uut informatsiooni eksoplaneetide olemasolu kohta. Nimelt avastasid Spitzeri teleskoopi kasutavad teadlased kahe eksoplaneedi signaali spektri infrapunases osas. Kaks meeskonda, üks Harvard-Smithsoni Astrofüüsika Keskusest D. Charbonneau juhtimisel ja teine Goddardi Kosmoselendude Keskusest L.D. Demingi juhtimisel uurisid planeete HD209458b ja TrES-1. Nad suutsid mõõta planeetide temperatuure, vastavalt 1130 K ja 1060 K.

Sama aasta aprillis saadi ESOs Tšiilis VLTd kasutades esimese eksoplaneedi foto, see oli 400 valgusaasta kaugusel asuva tähe GQ Lupi ümber tiirlevast planeedist. GQ Lupi on T Tauri täht massiga 0.7 Päikese massi ja verinoor - ainult 1 miljon aastat vana!

Mõned planeedisüsteemi tekkeprobleemid

Üks küsimus, mis eksoplaneetide avastamisega kohe tekkis, on see, miks nii palju avastatud planeete on gaashiiud, mis erinevalt Päikesesüsteemist on nii ootamatult ematähe lähedal?

Näiteks τ Bootise juures on planeet, mille mass on 4.1 Jupiteri massi ja mis tiirleb tähe ümber vähem kui veerandi AU kaugusel. See on lähemal kui Merkuur Päikesele.

Tähe HD 114762 juures on planeet 11 Jupiteri massiga, mis tiirleb vähem kui poole AU kaugusel tähest.

Üks võimalik vastus on see, et kuna astromeetria avastab eksoplaneete nende gravitatsioonilise mõju kaudu, siis praegune tehnoloogia lihtsalt lubab selliste planeetide avastamist - mis on massiivsed ja lähedal ematähele. Teistsuguseid planeete me praegu ei suudagi avastada.

Natuke avastamise aparatuurist

Üks edukamaid eksoplaneetide avastajaid on olnud projekt ELODIE, mis toimub kolme observatooriumi koostöös - Genf, Haute-Provence ja Marseille. Sisuliselt on ELODIE ristdispersiooniga ešell-spektrograaf, installeeritud 1993.a. juunis Haute-Provence'i observatooriumis Prantsusmaal 1.93 m teleskoobi Cassegraini fookuses. Valgus viiakse ELODIEsse kahe optilise kiu kimbuga. Spektri töötlus on täiesti automatiseeritud, lubades mõõta radiaalkiirusi täpsusega kuni 15 m/s.

Teine samuti edukas programm on CORALIE, mille eesmärgiks on Šveitsi 1.2 m Leonard Euleri teleskoobiga La Silla observatooriumis Tšiilis avastada eksoplaneete lõunapoolsetel Päikese tüüpi tähtedel. Aega selleks antakse lahkesti 150-200 ööd aastas. Lainepikkuste vahemik on sama, mis ELODIEl, kuid spektraalne lahutus on märksa parem. Ja muidugi on palju parem ka detektor, mis lubab radiaalkiiruste mõõtmistäpsuseks kuni 3 m/s.

Võidujooks eksoplaneetide avastamiseks nõuab aina paremat aparatuuri. Selles kontekstis on ESO praegu heas positsioonis, kuna ESO La Silla observatooriumi 3.6 m teleskoobi külge on paigutatud HARPSi spektrograaf (High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher). ESO uurijad said ta kätte 2003. aasta oktoobris. See instrument on optimeeritud eksoplaneete avastama väga täpse radiaalkiiruste mõõtmise kaudu - ainult 1 m/s!

HARPS ehitati Euroopa Konsortsiumi poolt koostöös ESOga. Kohe algusest on ta demonstreerinud suurepärasest efektiivsust. Võrdluses CORALIEga Euleri teleskoobi taga on vaatlusaeg lühenenud umbes 100 korda ja mõõtmiste täpsus on kasvanud 10 korda.

Mõned tähelepanuväärsed eksoplaneedid

1992.a. publitseerisid Wolszczan ja Frail ajakirjas "Nature" oma vaatluste tulemused, kus näidati, et pulsari PSR B1257+12 ümber tiirleb planeet. Selle millisekund pulsari oli Wolszczan avastanud 1990.a. Arecibo raadioobservatooriumis. See oli esimene eksoplaneet, mille olemasolu kinnitati.

Esimene peajada tähe - 51 Pegasi B - ümber tiirlev planeet avastati (ja hiljem kinnitati) 1995.a. Avastajaiks olid Michel Mayor ja Didier Queloz.

Esimene mikroläätserefektiga avastatud eksoplaneet oli kvasari Q0957+561 ümber, vaatlejaks R. E. Schild. See avastus viis vastuolulisele ja kontrollimata spekulatsioonile, et 3 Maa massiga planeet asub tundmatus mikroläätsendivas galaktikas just kvasari ja Maa vahel. See oleks olnud kaugeim eksoplaneet, punanihkega 0.39 ehk 2.4 Gpc kaugusel,

juhul kui see tulemus oleks kinnitatud.

1999.a. oli esimeseks eksoplaneediks, mida nähti varjutamas ematähte HD 209458.

2001.a. HST kasutanud astronoomid teatasid, et nad avastasid atmosfääri planeedil tähe HD 209458 ümber. Nüüd on see planeet tuntud nime all HD 209458b ja seda nimetatakse ka Osiriseks.

Samal aastal leiti täht, millel olid ühe või enama planeedi jäänused täheatmosfääri sees, ilmselt oli planeet enamjaolt aurustunud. Oletati, et võib olla planeete, mis tiirlevad nii lähedal ematähele, et enamuse nende massist on kuumuse käes aurustunud. Ajutiselt anti sellistele planeedidele nimeks - Ktonose planeedid.

10.07.2003 avastasid HST informatsiooni kasutanud astronoomid vanima eksoplaneedi. Sellele anti nimeks Metuusala, piiblist tuntud väga vanaks elanud inimese järgi. See asub 5600 valgusaastat meist eemal, mass on sel kaks Jupiteri massi ja see hinnati 13 miljardi aasta vanuseks. Planeet asub keraarves M4 Skorpioni tähtkujus.

15.04.2004 erinevad meeskonnad teatasid kolme planeedi avastamisest väljaspool Päikesesüsteemi. Üks neist oli 17 000 valgusaastat eemal, kolm korda kaugemal kui ükski selle ajani avastatud planeet. Kasutati mikroläätsendust, kusjuures taustatäht oli 24 000 valgusaastat eemal. Uue eksoplaneedi massiks hinnati 1.5 Jupiteri massi ja see paistis olevat samuti gaasiline. Planeet tiirles ematähe ümber 3 AU kaugusel (Jupiter on 5.2 AU kaugusel Päikesest).

Samal päeval Genfi observatooriumi eksoplaneetide kütid teatasid kahe hiidplaneedi avastamisest varjutusmeetodil. Mõlemaid kutsuti "kuumadeks Jupiterideks", umbes Jupiteri massiga, kuid tiirlemisperioodiga kaks päeva - nii lähedal olid nad tähele.

Augustis 2004 avastati ESO HARPSiga planeet tiirlemas μ Arae ümber, massiga umbes 14 Maa massi. See on kergeim eksoplaneet peajada tähe ümber ja võib-olla on ta esimene Maa-tüüpi planeet. Samas kuus leiti varjutusmeetodil 10 cm (!) teleskoobiga planeet, mis oli esimene nn TrES (Trans-Atlantic Exoplanet Survey) ülevaates ja mis tiirleb tähe GSC 02652-01324 ümber. Avastust kinnitas Kecki teleskoop. Meeskonda juhtisid D. Charbonneau (CfA/Caltech), T. Brown NCARist (National Center for Atmospheric Research) ja E. Dunham Lowelli observatooriumist.

10.09.2004 teatas Euroopa ja USA astronoomide meeskond, et nad on esmakordselt vaadelnud optiliselt eksoplaneeti, mis tiirleb pruuni kääbuse 2M1207 ümber, 230 valgusaastat eemal. Selle planeedi spekter näitab vee olemasolu. See ja veel teised karakteristikud kinnitavad, et tegu on planeediga, kuid vaja on veel vaatlusi, et kindlaks teha, kas planeet ikka tiirleb selle tähe ümber, mida pildistati. Planeet arvatakse olevat noor gaashiid 5 Jupiteri massiga ja orbitaalraadiusega 55 AU. See on ematähest seni kõige

kaugemal leitud planeet.

Aprillis 2005 sai Euroopa meeskond esimese eksoplaneedi otsekujutise. Planeet on peajada tähe GQ Lupi juures 400 valgusaasta kaugusel. Selle orbitaalraadius on umbes 100 AU.

CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) saatis koos paljude teiste riikidega 27. detsembril 2006.a. polaarorbiidile 896 km kõrgusele missiooni COROT (CONvection, ROTation and planetary Transit), mis on varustatud afokaalse teleskoobi ja nelja CCD (2048×2048) detektoriga. Missioonil on kaks põhieesmärki: tähtede seismoloogia uurimine ja telluursete eksoplaneetide avastamine. Ja juba on käes ka esimesed tulemused - 3. mail 2007 avastati esimene eksoplaneet.

Tõestuseks sellele, et eksoplaneedid on väga kuum temaatika, on 11. mail 2007 Spitzeri kosmoseteleskoobiga avastatud Saturnist massiivsem eksoplaneet, mille temperatuur pildavat olema umbes 2000 C!

Tulevikuperspektiiv

Seisuga 18.05.2007 on meil teada 209 eksoplaneeti. See on innustanud astronoomide üha suurematele avastuskampaaniatele. Üks selliseid on SIM PlanetQuest (enne Space Interferometry Mission), mida planeeritakse üles lasta 2011. aastal ja mille ülesandeks on määrata tähtede positsioonid ja kaugused mitusada korda täpsemalt kui siiani on seda tehtud (kuni 1 mikrokaaresekundini). See täpsus võimaldab määrata tähtede kaugused Galaktikas ja sondeerida lähemalasuvaid tähti Maa-suurusega planeetide esinemise suhtes.

See läbimurre saab võimalikuks seetõttu, et SIM kasutab optilist interferomeetriat. Pioneer sel alal oli Albert Michelson, kes sai esimese ameeriklasena Nobeli preemia füüsikas 1907.a. Optiline interferomeetria saab oma koguvõimsuse rakendada väljaspool Maa atmosfääri segavat mõju. SIMi baasjoone pikkuseks on vaid 10 m ja teleskoopide aperatuur 30 cm. Missiooni kestvuseks planeeritakse 5 aastat.

Selle projektiga võistleb GAIA, mis planeerib mõõta miljardi tähe positsiooni samuti 1 mikrokaaresekundi täpsusega. Kui plaan teoks saab, võib GAIA avastada 25 000 Jupiteri massiga planeeti 200 pc raadiuses. ESAs on vaatluse all veel missioon IRSI, mis koosneb viiest 1.5 m peegliga teleskoobist, mis lastakse umbes 5 AU kaugusele, et vältida Päikesesüsteemi sodiaagivalguse segavat mõju.

On selge, et uusi eksoplaneete avastatakse lähemal ajal kümnetes kui mitte sadades ja meie arusaamad Päikesesüsteemi tekkimisest ning arengust muutuvad palju täpsemateks.

Jooniste allkirjad

Jooniste nimetustes on TeXi omapärast tingitult allkriipsud asendatud sidekriipsudega.

a-hist - Avastatud eksoplaneetide arvu sõltuvus nende orbiitide pooltelgedest

atmosphere-artist - Kunstniku maalitud pilt eksoplaneedi atmosfäärist

corecomparison - Eksoplaneedi HD149026b ja Jupiteri siseshituste võrdlus

ecc-vs-a - Eksoplaneetide orbiitide ekstsentrilisuse sõltuvus orbiitide pooltelgedest

ellipses-ex - Eksoplaneetide orbiidid

exoplanet-corot - 03.05.07 COROT' avastatud planeedi ematahe heleduskõver

fe-bargraph-public - Eksoplaneetide esinemine sõltuvalt ematahe rauasisaldusest

hires-echelle - See pole telliskivimüür, vaid järkude kaupa paigutatud tähespekter.
Siit loetakse välja peaaegu kõik tähe omadused

stellar-wobble - Doppleri efekti selgituseks

weekend - Eksoplaneedi HD149026b orbiidi selgituseks

yleminek - Kunstniku maalitud pilt planeedi üleminekust ematahe kettast

Mõned lingid:

<http://exoplanets.org/science.html>

<http://exoplanets.org>

<http://www.hao.ucar.edu/public/research/stare/stare.html>

<http://www.mpifr-bonn.mpg.de/berlin04/presentations/perryman.pdf>
jne.