

DO AS 2

UNIVERZITET U BEOGRADU

Matematički fakultet

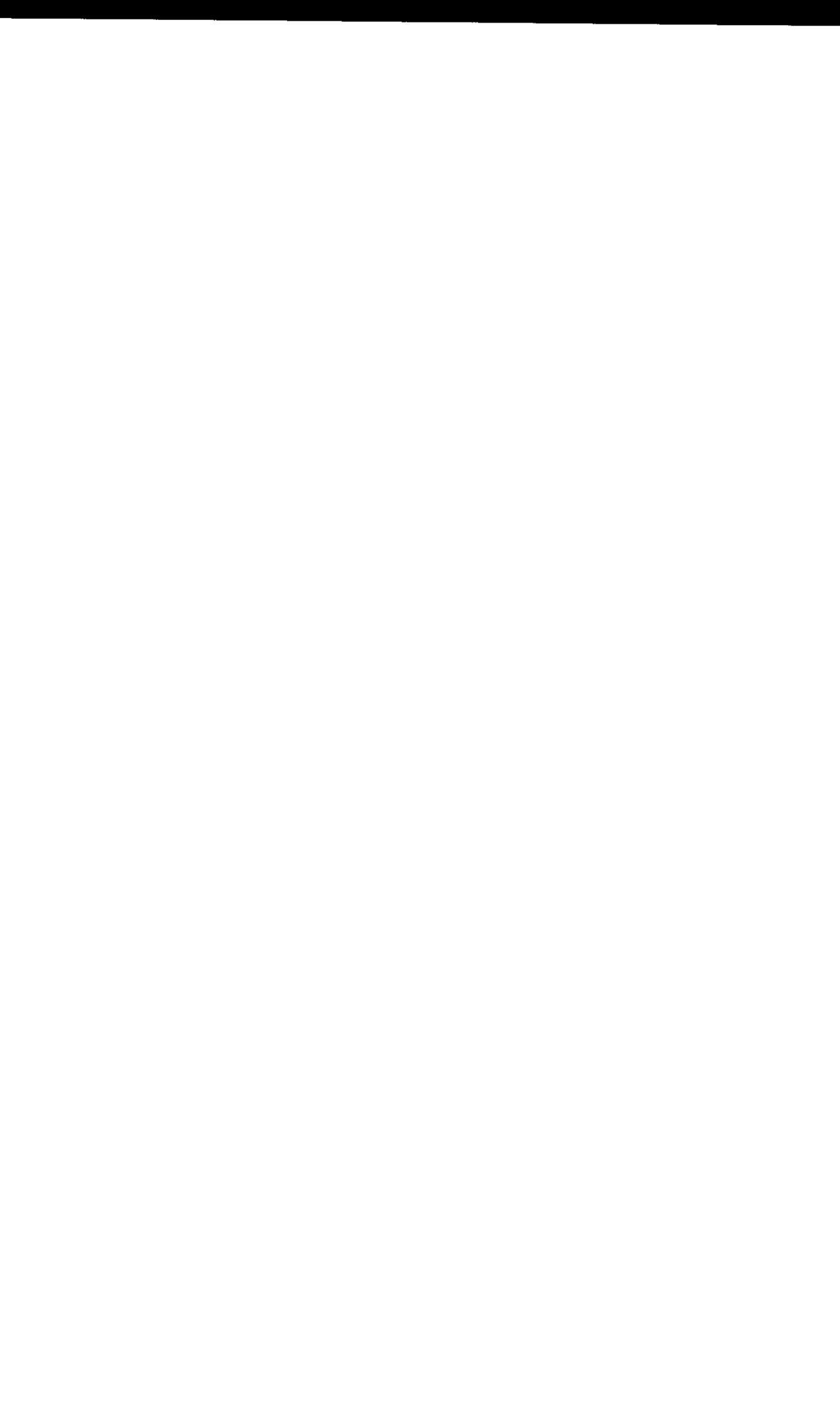
Dejan Urošević

$\Sigma - D$ RELACIJA KAO INDIKATOR POREKLA RADIO-PETLJI

Doktorska disertacija

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ
ИМ Б. СЛОХ. 20.
БИБЛИОТЕКА

Beograd, 2000.



S A D R Ž A J

1. Uvod	1
1.1. $\Sigma - D$ relacija.....	1
1.2. Radio-petlje.....	1
1.3. Teorije evolucije radio-zračenja ostataka supernovih zvezda i radio-petlje	2
1.4. Dobre i loše strane hipoteze o SNR poreklu radio-petlji	2
1.5. Druge hipoteze o poreklu radio-petlji	4
1.6. Ukratko o ovom radu.....	5
2. Teorijska $\Sigma - D$ relacija	6
2.1. Uvod	6
2.2. Teorija Šklovskog (Shklovsky, 1960a)	6
2.3. Model Lekeia (Lequeux, 1962)	11
2.4. Dopuna teoriji od strane Povede i Voltjera (Poveda & Woltjer, 1968).....	13
2.5. Dopuna teoriji od strane Kestevena (Kesteven, 1968).....	13
2.6. Teorijska interpretacija $\Sigma - D$ relacije Đurića i Sikvista (Duric & Seaquist, 1986).....	14
3. Povezanost radio-petlji sa empirijskim (galaktičkim) $\Sigma - D$ relacijama ..	17
3.1. Uvod	17
3.2. Relacija Povede i Voltjera (Poveda & Woltjer, 1968).....	21
3.3. Milnova relacija (Milne, 1970).....	22
3.4. Relacija Daunsa (Downes, 1971).....	25
3.5. Relacija Ilovačkog i Lekeia (Ilovački & Lequeux, 1972).....	26
3.6. Voltjerova relacija (Woltjer, 1972).....	27
3.7. Relacija Berkhuijsenove (Berkhuijsen, 1973).....	28
3.8. Relacija Klarka i Kasvela (Clark & Caswell, 1976).....	29
3.9. Sabadinova relacija (Sabbadin, 1977)	32
3.10. Milnova relacija (Milne, 1979)	33
3.11. Relacija Kasvela i Lerča (Caswell & Lerche, 1979)	35
3.12. Relacije Gebela sa saradnicima (Göbel et al., 1981).....	35
3.13. Relacija Lozinske (Lozinskaya, 1981)	39
3.14. Relacija Sakhibova i Smirnova (Sakhibov & Smirnov, 1982).....	40
3.15. Relacija Alahverdijeva sa saradnicima (Allakhverdiyev et al., 1983a,b)	45
3.16. Grinov kritički osvrt na $\Sigma - D$ relaciju (Green, 1984).....	46
3.17. Relacija Huanga i Tadeuša (Huang & Thaddeus, 1985)	48
3.18. Relacija Alahverdijeva sa saradnicima (Allakhverdiyev et al., 1986a,b)	49

3.19. Relacija Berkhujsenove (Berkhuijsen, 1986).....	51
3.20. Ponovni kritički osvrt na $\Sigma - D$ relaciju (Green, 1991).....	52
3.21. Relacija Kejsa i Bataćarije (Case & Bhattacharya, 1998).....	53
4. Povezanost radio-petlji sa vangalaktičkim $\Sigma - D$ relacijama	57
4.1. Uvod	57
4.2. Relacije za Magelanove oblake.....	58
4.3. Relacije za galaksiju M31.....	62
4.4. Relacije za galaksiju M33.....	64
4.5. Relacija za galaksiju M82	68
4.6. Relacije za galaktičke sa vangalaktičkim SNR-ovima	69
5. Prilog teorijskoj $\Sigma - D$ relaciji	73
5.1. Uvod	73
5.2. Model u kome termalna komponenta daje doprinos ukupnom radio-zračenju SNR-a	74
5.3. $\Sigma - D$ relacija za termalno zračenje ionizovanog gasnog oblaka (slučaj konstantne temperature i koncentracije)	78
5.4. $\Sigma - D$ relacija za sinhrotronsko zračenje zajedno sa termalnim zračenjem ionizovanog gasnog oblaka (slučaj konstantne temperature i koncentracije) ..	81
5.5. $\Sigma - D$ relacija za termalno zračenje ionizovanog gasnog oblaka (slučaj konstantne koncentracije)	84
5.6. $\Sigma - D$ relacija za sinhrotronsko zračenje zajedno sa termalnim zračenjem ionizovanog gasnog oblaka (slučaj konstantne koncentracije)	85
5.7. Teorijska $\Sigma - D$ relacija za radio-petlje	87
6. Diskusija (sa posebnim osvrtom na lokalnu međuzvezdanu sredinu)	89
6.1. Uvod	89
6.2. Modeli LISM	89
6.3. Radio-petlje kao SNR-ovi u kontekstu novijih otkrića vezanih za LISM	91
7. Zaključak	96
Zahvalnica	98
Literatura	99
Prilog	103

1. UVOD

1.1. $\Sigma - D$ relacija

Za ispitivanje evolucije radio-zračenja ostataka supernovih zvezda (SNR— supernova remnants), vrlo je pogodna veza između površinskog sjaja objekta Σ i njegovog dijametra D , tzv. $\Sigma - D$ relacija. Šklovski (Shklovsky, 1960a,b) je teorijski razmatrao širenje sfernog sinhrotronskog emitera i kao rezultat dobio funkcionalnu zavisnost između površinskog sjaja, koji je nezavisan od rastojanja, i dijametra objekta. Posle ovog pionirskog rada, posmatranja su počela da potvrduju postojanje ove zavisnosti u obliku koji je teorija Šklovskog predviđala. Kako je vreme odmicalo i teorija i njena potvrda posmatranjima trpele su promene i oštре kritike. Prvu empirijsku (dobijenu iz posmatranja) $\Sigma - D$ relaciju su uspostavili Poveda i Voltjer (Poveda & Voltjer, 1968). Još uvek neki aspekti $\Sigma - D$ relacije nisu dovoljno dobro objašnjeni, mada je za ove, skoro četiri decenije, došlo do poboljšanja relacije kako teorijske tako i empirijske.

Osim što opisuje evoluciju SNR-a, $\Sigma - D$ relacija se koristi za određivanje daljina do galaktičkih ostataka zbog toga što je površinski sjaj veličina koja se dobija iz posmatranja a ne zavisi od daljine do izvora radio-zračenja. Mada je neprecizan, ovaj metod određivanja daljina je danas nezamenjiv, jer od ukupno 220 potvrdenih ostataka (Green, 1998), daljine do oko njih 170 su određene uz pomoć $\Sigma - D$ relacije. Daljine do oko 50 SNR-ova su određene drugim, preciznijim metodama (kinematičkim, uz pomoć pulsara, identifikacijom sa optičkim objektima, istorijskim, iz apsorpcije neutralnog vodonika, iz pripadnosti određenom molekularnom oblaku itd.).

1.2. Radio-petlje

Kada se gledaju karte radio-neba, na mnogim frekvencijama, najupadljiviji detalji na visokim galaktičkim latitudama su radio-lukovi. Izviru na nekoliko stepeni iznad galaktičke ravni i protežu se skoro do galaktičkih polova. Zna se da gustina meduzvezdane materije opada približno eksponencijalno sa udaljenjem od galaktičke ravni. Lukovi predstavljaju odstupanje od ovakve raspodele, jer na latitudama na kojima bi trebalo da bude mnogo manje radio-zračenja (radio-zračenje uglavnom generišu elektroni koji su zarobljeni u magnetnim poljima), mi vidimo oblasti intenzivnijeg zračenja lučnog oblika i ogromnih dimenzija na nebu. Da li lukovi predstavljaju objekte koji pripadaju galaktičkom halou i imaju galaktičke razzmere, ili su objekti našeg bliskog susedstva, još uvek nije sasvim jasno. Trenutno, drugo objašnjenje ima više pristalica u naučnom svetu.

Da su lukovi delovi realnih objekata iz našeg bliskog susedstva pored ostalih govori i hipoteza o lukovima kao delovima ostataka supernovih zvezda koje su davno eksplodirale. To su ljudske koje se šire, i koje u zavisnosti od gustine međuzvezdane materije kroz koju ljudska (shell) prolazi menjaju početan oblik. U zavisnosti od raspodele međuzvezdane materije između Sunca i ljudske mi vidimo samo delove tih kontura. Više lukova koji približno leže na istom malom krugu nebeske sfere nazivamo petljom (loop).

1.3. Teorije evolucije radio-zračenja ostataka supernovih zvezda i radio-petlje

Postoje dve osnovne teorije evolucije radio-zračenja SNR-a: teorija Šklovskog (već navedena) i van der Lana (van der Laan, 1962a,b). Osnovna razlika između ove dve teorije je što po van der Lanu magnetno polje nastaje kompresijom međuzvezdanog magnetnog polja (usled dejstva udarnog talasa i omotača odbaćenog eksplozijom) i SNR zrači iz oblasti sa ruba, gde sa širenjem ostatka magnetno polje ostaje konstantno, dok po teoriji Šklovskog zrači cela sfera, a jačina magnetnog polja (zarobljenog u toj širećoj sferi) opada sa kvadratom radijusa koji raste sa vremenom. Na prvi pogled se vidi da bi model radio-petlji (pod pretpostavkom da su petlje lokalni SNR-ovi) trebalo da podrži teoriju van der Lana, jer po njoj ostatak je ljudskastog (shell) tipa i zbog konstantnosti magnetnog polja trebalo bi da bez problema dospe do ogromnih dimenzija. Spolstra (Spoelstra, 1972, 1973) uporeduje parametre dobijene iz svojih polarizacionih posmatranja radio-petlji (uz to pokazuje da su petlje bliski objekti) sa parametrima koje daje van der Lanova teorija i dobija kako on sam navodi "razumna" poklapanja. Teorija Šklovskog samo na prvi pogled nije valjana za objašnjenje prirode radio-petlji. Sa nekim njenim modifikacijama koje će biti prvi put uvedene u ovom radu, a odnose se na $\Sigma - D$ relaciju, petlje mogu biti objašnjene kao ostaci supernovih zvezda.

1.4. Dobre i loše strane hipoteze o SNR poreklu radio-petlji

SNR hipoteza o poreklu radio-petlji potiče iz 1960. godine kada je predviđena od strane Brauna sa saradnicima (Brown et al., 1960). U to vreme još uvek nije bilo primećeno da su neki lukovi približno na malim krugovima nebeske sfere, već se cela diskusija odnosila na Severni polarni luk (NPS-North Polar Spur), koji se jasno video i na najranijim pregledima radio-neba. Prve ideje o petljama potiču iz rada Kviglija i Haslama (Quigley & Haslam, 1965).

Prvi model radio-petlji koji podržava SNR hipotezu je model Berkhujsenove sa saradnicima (Berkhuijsen et al., 1971). On se zasniva na: geometriji radio-petlji koja je upadljivo kružna (Salter, 1970) što je kasnije potvrđeno u članku Milogradov-Turin i Urošević (1997), gradijentima sjaja koji su sa spoljne strane grebena (oblast najvećeg sjaja luka) strmiji nego sa unutrašnje, HI asocijacijama koje su pridružene spoljnim rubovima ostataka, zvezdama sa velikim brzinama i tipičnim spektralnim indeksima za netermalne objekte. Gotovo svi ovi zaključci su izvedeni iz radio-posmatranja (spektralni indeks se dobija i iz teorija sinhrotronskog mehanizma). Autori ovog rada su izneli i nedostatke ovakvog SNR modela. Osnovna nerešena pitanja su: da li su petlje ostaci normalne ili super-supernove, odakle tako visok stepen kružnosti, zašto očiglednije ne sekut galaktičku ravan, odakle varijacija intenziteta petlji sa promenom latitude.

Svi ostali SNR modeli se uglavnom odnose na Petlju I (Loop I) jer je ona najbolje proučena. Najupadljiviji deo Petlje I je Severni polarni luk. Ovaj objekt je sigurno prividno

najveći i najmarkantniji na svim dosadašnjim pregledima radio-neba. On nam umnogome pomaže razumevanju prirode ostalih petlji kod kojih ne možemo jasno primetiti određene efekte.

Razmatrajući poreklo sve četiri galaktičke petlje, Zuzak (Zuzak, 1971) predlaže model u kome jačinu udarnog talasa obnavlja objekt koji se nalazi u okolini centra ostatka i snabdева ga relativističkim elektronima neophodnim za sinhrotronsko radio-zračenje. Ne-dostatak ovakvog modela je što nema pulsara ili sličnih izvora visoko energetskih čestica u blizini centara petlji.

Pregledom u X -području, detektovano je meko X -zračenje sa unutrašnjeg ruba NPS-a (Bunner et al., 1972). Model SNR-a Šklovskog i Šefera (Shklovsky & Sheffer, 1971) predviđa ovakvo zračenje.

Berkhuijsenova (Berkhuijsen, 1973) je testirala $\Sigma - D$ relaciju Ilovajskog i Lekea (Ilovaisky & Lequeux, 1972) dodajući joj petlje. Ovaj rad će biti kasnije opširnije diskutovan.

Hejls i Dženkins (Heiles & Jenkins, 1976) su razmatrali ljudsku neutralnog vodonika (HI) vezanog za Petlju I. Oni su utvrdili da je končasta struktura ohladenog HI gasa rezultat nehomogenosti gustine u neporemećenoj sredini ispred udarnog talasa SNR-a ili turbulentije iza udarnog fronta – u sredini koju je udarni talas poremetio.

Krudes sa saradnicima (Cruddace et al., 1976) poredi rezultate svog pregleda NPS-a u X -području sa SNR modelom Ševaljea (Chevalier, 1974). Zaključuje da je Petlja I još uvek u adijabatskoj fazi evolucije.

Haikava sa saradnicima (Haykawa et al., 1977) fituje svoje podatke takođe iz X dela spektra sa svojim numeričkim modelom i zaključuje da je Petlja I u adijabatskoj fazi.

Devilar sa saradnicima (Davelaar et al., 1980) zaključuje da radio-greben Petlje I predstavlja udarni front SNR-a. Takođe iz pregleda u X -oblasti dobija da ostatak nije u izotermnoj već u adijabatskoj fazi.

Sve prethodno navedeno uglavnom ide u prilog SNR hipoteze radio-petlji. U narednom pasusu biće izneti neki nedostaci, a takođe i neke mogućnosti njihovih objašnjenja.

Problem sa SNR hipotezom je u tome što ne vidimo petlje u optičkom delu spektra (npr. Salter, 1983). Zatim vidimo malo SNR-ova, a u okolini Sunca ih imamo četiri (Shklovsky, 1968). Dalje, prema teoriji posle nekoliko miliona godina ne bi trebalo da očekujemo tako intenzivno zračenje (u radio i X području), jer bi udarni talas veoma oslabio. Trebalo bi da ostatak bude u izotermnoj fazi koja sledi nakon adijabatske (Woltjer, 1972). Ako je SNR ipak u adijabatskoj fazi, onda ne bi mogao da se formira debeo HI omotač (Chevalier, 1974), što se ponovo ne slaže sa posmatranjima. Neki od ovih problema su uglavnom rešeni tako što se pretpostavlja visoko energetska eksplozija supernove tipa II (Cruddace et al., 1976), pa čak i nekoliko bliskih eksplozija u vremenu i iz iste zvezdane asocijacije (Borken & Iwan, 1977; Weaver, 1979; Iwan, 1980). Postoji mogućnost da interakcija zvezdanih vetrova sa zvezda unutar ljudske i SNR-a može objasniti ove probleme (Heiles et al., 1980).

Noviji doprinosi SNR hipotezi radio-petlji biće navedeni u diskusiji ovog rada (šesta glava).

1.5. Druge hipoteze o poreklu radio-petlji

Pored SNR, postoje i drugacije objasnjenja porekla radio-petlji.

Medju prvim objasnjenjima porekla NPS-a je ono koje potice od strane Dzonsona (Johnson, 1957). On je pretpostavio da je NPS manifestacija sudara naše i druge spiralne galaksije. Tanmerova (Tunmer, 1958) veruje da je NPS veliki emisioni prsten normalan na galakticku ravan. Ona je predlozila da je luk u stvari efekat duge uzrokovane prostiranjem elektronske komponente kosmickih zraka koji imaju drugaciji ugao nagiba i prema magnetnom polju koje se prostire duz spiralne grane i prema usmerenosti sinhrotronske emisije. Oda i Hasegava (Oda & Hasegawa, 1962) su predlozili model u kome je supernova u lokalnoj spiralnoj grani ubacila relativisticke elektrone u strukturu koja je nalik "cigareti", a ona potice od deformacije lokalnog magnetnog polja projektovane severno od galaktickih ravni. Ova tri modela imaju više istorijski značaj jer su novijim otkrićima prilično brzo prevazidena.

Braun sa saradnicima, u radu iz 1960. godine u kome je prvi put naglašena mogućnost SNR porekla petlji, predlaže model u kome postoji lokalna grana ili "međugrana" između Orionove i Strelčeve spiralne grane. Ona je paralelna galaktičkoj ravni na visini od 300 pc iznad nje. Ovaj model može globalno objasniti NPS u radio-kontinuumu ali ne i posmatračke rezultate vezane za: X-zračenje, HI zračenje, zatim za visok stepen kružnosti Petlje I itd. Pokušaji sa "međugranom" nastavljeni su radovima Sofua (Sofue, 1973, 1976). On predlaže model u kome su lukovi "radio-obodi" koji emituju iz regiona oko spiralnih grana i "međugrana". U njegovom opisu "radio-obodi" se prostiru i izvan spiralnih grana, u halo, zbog nestabilnosti meduzvezdanog magnetnog polja koje utiče na pritisak kosmičkog zračenja. Takođe, postulira "međugranu" na $l \approx 25^\circ$ da bi objasnio NPS. Sofuv model podleže sličnim kritikama kao i prethodni model (Brown et al., 1960).

Postojao je i pokušaj da se lukovi i petlje ujedine u jedan objekt (Rougoor, 1966), i to tako što obrazuju helikoidnu strukturu čija osa leži u galaktičkoj ravni u pravcu $l = 110^\circ$. Metjuson (Mathewson, 1968) je proširoio ovu ideju. Iz svojih polarizacionih merenja je zaključio da lokalno magnetno polje ima helikoidnu strukturu. To su, kako on zaključuje, "tragovi" helikoidnog magnetnog polja lokalne spiralne grane. Snažan dokaz protiv ove hipoteze je to što se Petlja III (Loop III) produžuje i južno od galaktičke ravni, bez ikakve indikacije da se nastavi na Petlju II (Loop II) (Berkhuijsen et al., 1971), (Milogradov-Turin, 1972). Sofu i Rajh (Sofue & Reich, 1979) pokazuju da se NPS nastavlja i do vrlo niskih latituda, i značajno odstupa od helikoide predvidene od strane Metjusona.

Bingam (Bingham, 1967) razvija ideju Parkera (Parker, 1965) da nestabilnost meduzvezdanog magnetnog polja utice na pritisak kosmičkog zračenja i da na taj način petlje izviru iz galaktičke ravni. Protiv ove činjenice je već navedeno prostiranje Petlje III južno od galaktičkog ekvatora. Zatim, Petlja IV (Loop IV) je u celini severno od ekvatora. Petlja I ispunjava gotovo pun krug u HI i X posmatranjima. Sledeći model pretpostavlja distorziju lokalnog magnetnog polja (Clube, 1968). On veruje da Guldov prsten razara polje lokalne spiralne grane, uzrokujući da linije polja izviru iz galaktičke ravni približno normalno na nju i to u prvom longitudnom kvadrantu. Ove linije polja imaju radijus krivine oko 100 pc i mogu da proizvode radio sliku NPS-a. Protiv ove pretpostavke je to što NPS zaklapa oštar ugao sa galaktičkom ravni i to što nema mogućnosti za objasnjenje X-zračenja koje je uzrokovano visokom temperaturom sredine.

Vrlo zanimljivu hipotezu su predložili Brant i Maran (Brandt & Maran, 1972), da je Petlja I fosilna Stromgrenova sfera (FSS). Smatraju de je centar Petlje I u okolini Lupus petlje koja je SNR. Zračenje Petlje I je indukovano zračenjem Lupus SNR-a koje jednostavno ionizuje međuzvezdani materijal i mi vidimo sinhrotronsko zračenje tog materijala. Kafatos i Morison (Kafatos & Morrison, 1973) proširuju ovaj pristup, računaju odredene parametre i zaključuju da X -zračenje iz Petlje I nije termalne prirode već sinhrotronske, jer FSS po svojoj prirodi nema dovoljnu temperaturu za termalno X -zračenje. U ovome leži i najveći problem ovog modela. Spektar X -zračenja iz Petlje I je tipičan za vrelu plazmu, i kako posmatranja pokazuju nije sinhrotronski. Sledeća teškoća sa ovim modelom je ta što je Lupus petlja znatno udaljenija od Sunca nego centar Petlje I (Case & Bhattacharya, 1998).

Sofu (Sofue, 1977), predlaže potpuno drugačiji model Petlje I. Vezan je za ideju o formiranju šireće spiralne grane koja se nalazi na galaktocentričnoj daljini od 3.5 kpc. Iz te oblasti se diže ogromna ljkastasta struktura u galaktički halo, koja se iz naše perspektive registruje kao NPS. Ceo model se zasniva na prostiranju magnetohidrodinamičkih (MHD) talasa iz galaktičkog centra koji se šire kroz disk i halo. Po ovom modelu Petlja I ima galaktičke razmere. Osnovni problem ove pretpostavke je obiman posmatrački materijal koji pokazuje da je Petlja I lokalni objekt. Isti autor u svom radu iz 1994. godine (Sofue, 1994), objašnjava NPS ponovo kao objekt galaktičkih razmara. Uzrok nastanku NPS-a je ogromna eksplozija koja se dogodila u galaktičkom središtu. Eksplozija je svojim jakim udarnim talasom izbacila ljkstu u halo.

1.6. Ukratko o ovom radu

Glavni predmet proučavanja u ovom radu je $\Sigma - D$ relacija za ostatke supernovih zvezda i primena te relacije na radio-petlje. Cilj je eventualna potvrda SNR perekla radio-petlji, jer još uvek priroda radio-petlji nije sasvim jasna. U svoj katalog galaktičkih SNR-ova (220 ostataka) Grin (Green, 1998) nije uvrstio radio-petlje. Osnovna hipoteza ovog rada je: ako petlje evoluiraju kako to $\Sigma - D$ relacija definiše, onda su one SNR-ovi. Celoj ovoj ideji mnogo pomažu najnovija istraživanja $\Sigma - D$ relacije Kejsa i Batačarije (Case & Bhattacharya, 1998) i pregled ostataka supernovih u galaksiji M33 od strane Gordona sa saradnicima (Gordon et al., 1999). Empirijska $\Sigma - D$ relacija dobija novi smisao pridruživanjem radio-petlji. Izučava se i sama teorija $\Sigma - D$ relacije. Početnoj teoriji Šklovskog u koju ulazi samo sinhrotronski mehanizam zračenja dodaju se jednačine zakonog zračenja i njihovim sprezanjem pokušaćemo da izvedemo $\Sigma - D$ relaciju. Ceo ovaj rad se umnogome oslanja na model međuzvezdane materije Mekija i Ostrajkera (McKee & Ostriker, 1977), pomoću koga se posredno mogu objasniti problemi vezani za ekstremnost radio-petlji.

U drugoj glavi ovog rada se daje pregled teorije vezane za $\Sigma - D$ relaciju. Treća glava je ona u kojoj se obrađuju sve dosadašnje galaktičke empirijske $\Sigma - D$ relacije. Pridruživanjem petlji se testiraju te relacije i izvlače odgovarajući zaključci. Četvrta glava se bavi, na isti način kao i u trećoj glavi, testiranjem $\Sigma - D$ relacija za ostatke u drugim galaksijama. U petoj glavi se razmatra prilog teoriji Šklovskog, uvodi se termalni član i izvodi $\Sigma - D$ relacija. Sesta glava sadrži diskusiju o tematici koja je prethodno obrađena u skladu sa trenuto važećim modelima lokalne međuzvezdane sredine. U poslednjoj, sedmoj glavi, dati su najvažniji zaključci izvedeni iz ovog rada i sugestije za dalji rad.

2. TEORIJSKA $\Sigma - D$ RELACIJA

2.1. Uvod

Teorijske osnove $\Sigma - D$ relacije dao je Šklovski (Shklovsky, 1960a). On je svoju teoriju proverio na godišnjem opadanju sjaja za SNR Kasiopeja A (Cas A). U svom narednom članku (Shklovsky, 1960b) dao je i algoritam za izračunavanje daljina do SNR-ova uz pomoć ove relacije. Leke (Lequeux, 1962) pokušava da uopšti $\Sigma - D$ relaciju za slučaj ljudske, jer pomenuti SNR, Cas A, je izvor ljudskastog tipa. Njegova teorija daje bolju vrednost godišnjeg opadanja sjaja ostatka Cas A za oko 10% u odnosu na rezultat teorije Šklovskog, a u poređenju sa rezultatima dobijenim iz posmatranja. U svakom slučaju posmatranja pokazuju da sjaj ipak sporije opada nego što to teorija predviđa. Poveda i Voltjer (Poveda & Voltjer, 1968) i Kesteven (Kesteven, 1968) objavljaju dve različite dopune teorije Šklovskog. I dalje ostaje neslaganje teorije i posmatranja. Poveda i Voltjer prepostavljaju model inspirisan modelom van der Lana (van der Laan, 1962a,b), u kome jačina magnetnog polja ostaje konstantna sa širenjem ostatka i izvode $\Sigma - D$ relaciju najbližu empirijskoj. Kesteven je izveo relaciju za slučaj ljudske koja ostaje konstantne debljine za vreme širenja ostatka. Poslednje teorijsko izvođenje ove relacije za ostatke ljudskastog tipa dali su Đurić i Sikvist (Duric & Seaquist, 1986). Kostur izvođenja je isti kao kod Šklovskog, a umesto u suštini Fermijevog mehanizma ubrzanja relativističkih elektrona koji koristi Šklovski oni koriste mehanizam Bela (Bell, 1978a,b). Model magnetnog polja koji koriste je zasnovan na istraživanjima Fedorenka (Fedorenko, 1983) i Gala (Gull, 1973).

2.2. Teorija Šklovskog (Shklovsky, 1960a)

Mehanizam koji dobro objašnjava radio-emisiju galaktičkih i vangalaktičkih objekata je sinhrotronski mehanizam zračenja. Ova vrsta zračenja nastaje kretanjem relativističkih elektrona u magnetnom polju. Ovde će biti izložene samo osnovne formule sinhrotron-skog mehanizma koje su neophodne za dalja izvođenja. Detaljnije, teorija sinhrotronskog zračenja je obradena od strane mnogih autora (npr. Shu, 1991).

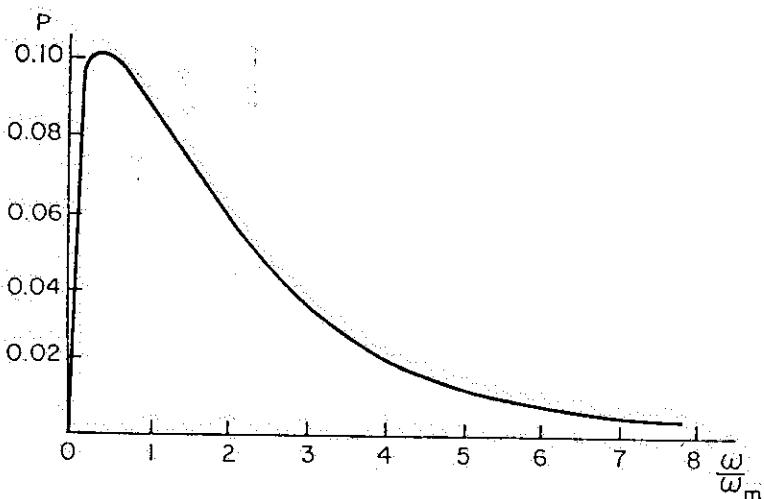
Snaga koju emitiuje jedna relativistička čestica u jediničnom frekventnom intervalu je

$$P(\nu, E) = \frac{16e^3 H}{mc^2} P\left(\frac{\omega}{\omega_m}\right), \quad (2.1)$$

gde je

$$\omega = 2\pi\nu, \quad \omega_m = \frac{eH}{mc} \left(\frac{E}{mc^2} \right)^2, \quad (2.2)$$

E – energija relativističke čestice, m – njena masa, e – nanelektrisanje, H – jačina magnetnog polja, c – brzina svetlosti u vakumu. Funkcija $P(\omega/\omega_m)$ je data tabelarno (npr. Vladimirskević, 1948), a grafički je prikazana na slici 2.1.



Slika 2.1. Zavisnost P od $\frac{\omega}{\omega_m}$ (Shklovsky, 1968).

Navedimo granične vrednosti funkcije $P(\omega/\omega_m)$: ako je $\omega/\omega_m \ll 1$, onda je $P(\omega/\omega_m) = 0.256(\omega/\omega_m)^{1/3}$, a ako je $\omega/\omega_m \gg 1$, onda je

$$P\left(\frac{\omega}{\omega_m}\right) = \frac{1}{16} \left(\frac{\pi\omega}{\omega_m}\right)^{1/2} \frac{e^2\omega^3}{\omega_m}. \quad (2.3)$$

Funkcija $P(\omega/\omega_m)$ dostiže maksimalnu vrednost za $(\omega/\omega_m) \approx 0.5$. Zbog toga za relativistički elektron dobijamo maksimum na

$$\nu_{max} = 0.5 \frac{\omega_m}{2\pi} = 1.4 \times 10^6 H_\perp \left(\frac{E}{mc^2} \right)^2 [\text{Hz}], \quad (2.4)$$

gde je H_\perp komponenta jačine magnetnog polja koja je normalna na vektor brzine čestice, pa je

$$P(\nu_{max}) = \frac{1.6e^3 H_\perp}{mc^2} = 2.15 \times 10^{-22} H_\perp \left[\frac{\text{erg}}{\text{s Hz}} \right]. \quad (2.5)$$

Ako relativističke čestice imaju raspodelu po energijama koja se može opisati stepenim zakonom.

$$n(E) = KE^{-\gamma}, \quad (2.6)$$

gde je $n(E)$ zapreminska koncentracija relativističkih čestica čije su energije između E i $E + \Delta E$, K – koeficijent proporcionalnosti, a γ – energetski indeks. Onda je snaga sinhrotronskog zračenja po jedinici zapremine i u jediničnom frekventnom intervalu:

$$\varepsilon_\nu = \int_{E > mc^2}^{\infty} P(\nu, E) n(E) dE = 12(2\pi)^{\frac{1-\gamma}{2}} \frac{e^3 H_\perp}{mc^2} \left(\frac{2eH}{m^3 c^5} \right)^{\frac{\gamma-1}{2}} U(\gamma) K \nu^{\frac{1-\gamma}{2}}, \quad (2.7)$$

Funkcija $U(\gamma)$ je jednaka 0.37, 0.125, 0.087 i 0.153 za $\gamma=1,2,3$ i 7, respektivno.

Ako su relativističke čestice elektroni ili pozitroni dobija se sledeći izraz za intenzitet sinhrotronskog zračenja:

$$I_\nu = \frac{1}{4\pi} R \varepsilon_\nu = 1.3 \times 10^{22} (2.8 \times 10^8)^{\frac{\gamma-1}{2}} U(\gamma) K H^{\frac{\gamma+1}{2}} R \lambda^{\frac{\gamma-1}{2}}, \quad (2.8)$$

gde R predstavlja radijus izvora duž koga je zapreminska emisivnost ε_ν konstantna, a λ je talasna dužina zračenja.

Dalje, za izvođenje $\Sigma - D$ relacije neophodno je uvesti nekoliko osnovnih radioastronomskih pojmljova.

Gustina fluksa radio-zračenja po definiciji je veličina

$$F_\nu = \int I_\nu d\Omega, \quad (2.9)$$

gde je $d\Omega$ element prostornog ugla izvora definisan relacijom $d\Omega = dS/r^2$ (dS je element površine, a r je rastojanje do izvora). Gustina fluksa radio-izvora se može izraziti i na sledeći način:

$$F_\nu = C \nu^{-\alpha}, \quad (2.10)$$

gde je α tzv. spektralni indeks, a $C = \text{const}$. Relacija (2.10) zapravo definiše spektralni indeks datog objekta. Ako ovu relaciju uporedimo sa (2.9), a imajući u vidu (2.8), možemo zaključiti da spektralni indeks sinhrotronskog zračenja zavisi samo od energetskog indeksa iz jednačine (2.6),

$$\alpha = \frac{\gamma - 1}{2}. \quad (2.11)$$

Cinjenica da spektar kosmičkih radio-izvora može biti opisan stepenim zakonom koji definiše jednačina (2.10) u skladu je sa stanovištem da je energetski spektar relativističkih čestica u kosmičkim zracima takođe stepenog tipa. Ovo predstavlja jak argument u korist sinhrotronskog mehanizma radio-zračenja kosmičkih izvora.

Definisaćemo, naravno, i površinski sjaj izvora. Dobro je poznato da je dugotalasna aproksimacija Plankovog zakona zračenja apsolutno crnog tela Rejli-Džinsov zakon,

$$B_\nu = \frac{2K_b T_b}{\lambda^2}, \quad (2.12)$$

gde je B_ν sjaj rasprostrnog izvora (što nije ništa drugo do intezitet I_ν za zračenje apsolutno crnog tela), T_b – temperatura po sjaju, a K_b – Bolcmanova konstanta. Ako stavimo da je

$$\Sigma_\nu = \frac{F_\nu}{\Omega} \quad (\Sigma_\nu \equiv B_\nu), \quad (2.13)$$

dobili smo veličinu koju nazivamo površinski sjaj izvora.

Ako prihvatimo da jedan sferni izvor zrači isključivo sinhrotronski, onda će sa obzirom na (2.8) gustina fluksa radio-zračenja biti odredena relacijom:

$$F_\nu \propto R^3 K H_{\perp}^{\frac{\gamma+1}{2}} \nu^{\frac{1-\gamma}{2}} (2.8 \times 10^8)^{\frac{\gamma-1}{2}}. \quad (2.14)$$

U radu Ginzburga sa saradnicima (Ginzburg et al., 1955) je razradivan statistički mehanizam Fermijevog ubrzanja čestica u širećoj maglini i dobijeno je:

$$\frac{dE}{dt} = \left(u^2 - \frac{acVl}{R} \right) \frac{1}{lc} E, \quad (2.15)$$

gde je $a \sim 1$, l je oblast duž radijusa magline u kojoj je magnetno polje približno homogeno, V – brzina širenja magline, R – njen radius i u – karakteristična turbulentna brzina. Ako izuzmemos rane stadijume širenja magline (za koje i nismo ovde zainteresovani), drugi član prethodne jednačine je uvek veći od prvog. Shodno tome relativističke čestice u širećoj maglini će kontinuirano gubiti energiju. Ovaj proces je ekvivalentan adijabatskom hlađenju širećeg gasa. Ako je

$$u^2 \ll \frac{acVl}{R}, \quad (2.16)$$

onda je

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{V}{R} E. \quad (2.17)$$

Integraljenjem prethodne jednačine dobijamo

$$E = E_0 \left(\frac{R_0}{R} \right). \quad (2.18)$$

Ovde je od suštinske važnosti da sve relativističke čestice gube energiju kontinuirano, tako da energetski spektar ostaje nepromenjen. Ako uzmemos da je $R = R_0$ energetski spektar će imati oblik

$$dn(E) = K_0 E^{-\gamma} dE. \quad (2.19)$$

Shodno prethodnom razmatranju važiće sledeći uslov:

$$R_0^3 K_0 \int_{E_1}^{E_2} E^{-\gamma} dE = R^3 K \int_{E_1(\frac{R_0}{R})}^{E_2(\frac{R_0}{R})} E^{-\gamma} dE, \quad (2.20)$$

pa integraljenjem, smatrajući da je $\gamma = \text{const}$, dobijamo da se veličina K menja po zakonu

$$K = K_0 \left(\frac{R_0}{R} \right)^{\gamma-1} \left(\frac{R_0}{R} \right)^3. \quad (2.21)$$

Što se magnetnog polja tiče Šklovski je pretpostavio da sa sfernim širenjem magline struktura polja ostaje manje više nepromenjena. Samim tim magnetni fluks mora ostati konstantan. Odatle imamo da je

$$H = H_0 \left(\frac{R_0}{R} \right)^2. \quad (2.22)$$

Takođe, ovde mora biti naglašeno da kako se maglina širi, H_{\perp} će se menjati na isti način kao i H , sa porastom radijusa R . Ovo postaje očigledno iz izraza za adijabatsku invarijantu

$$\frac{p_{\perp}^2}{H} = \frac{p^2 \sin^2 \theta}{H} = \text{const}. \quad (2.23)$$

U prethodnom izrazu p je impuls relativističke čestice i proporcionalan je energiji čestice $p \propto E$. Iz jednačine (2.22) imamo da je $H \propto R^{-2}$. Veza (2.18) daje da je $E \propto R^{-1}$. Prethodne tri veze rezultuju u $p^2 \propto H$. Zbog toga je $\sin \theta = \text{const}$. Odatle sledi

$$H_{\perp} = H \sin \theta \propto R^{-2}. \quad (2.24)$$

Ako zamenimo (2.21) i (2.24) u vezu (2.14) dobićemo da gustina fluksa zavisi od radijusa objekta na sledeći način:

$$F_{\nu} \propto R_0^{2\gamma+3} R^{-2\gamma} K_0 H_{0\perp}^{\frac{\gamma+1}{2}} \propto R^{-2\gamma}. \quad (2.25)$$

Uzimajući u obzir relacije (2.9), (2.11) i (2.12) možemo napisati kako intenzitet zračenja zavisi od R :

$$I_{\nu} \propto T_b \propto R_0^{2\gamma+3} R^{-(2\gamma+2)} K_0 H_{0\perp}^{\frac{\gamma+1}{2}} \propto R^{-(2\gamma+2)} \propto R^{-4\alpha-4}. \quad (2.26)$$

Analizirajući prethodnu vezu, a uzimajući u obzir relacije (2.12) i (2.13) možemo napisati $\Sigma - D$ relaciju u obliku:

$$\Sigma_{\nu} = AD^{-\beta}, \quad (2.27)$$

gde je D dijametar objekta i

$$\beta = 4\alpha + 4. \quad (2.28)$$

Ovaj model, najbolje opisuje ostatke supernovih zvezda u odnosu na ostale galaktičke magline. SNR-ovi su uglavnom približno sfernog (ljuskastog) oblika, zračenje im je sinhrotronske prirode, šire se jer su nastali eksplozijom. Ova teorija je proverena na čuvenom ostatku u sazvežđu Kasiopeje – Cas A. To je prividno najsjajniji izvor na nebu u radio-području. Izmereni spektralni indeks za Cas A je 0.8 (Shklovsky, 1968). Iz veze (2.11) sledi da je $2\gamma = 5.2$. Ako prihvativimo da je ostatak star oko 250 godina (odnosi se na vreme

kada je ovaj rad objavljen) i iskoristimo relaciju (2.25) dobićemo da se fluks godišnje smanji za oko 2%. Posmatranja iz tog vremena su davala da fluks opada nešto sporije, oko 1.5% godišnje. Na samom početku je primećeno da posmatranja pokazuju sporije opadanje sjaja nego što to teorija predviđa.

Za prosečni spektralni indeks SNR-ova $\alpha = 0.5$ ($\gamma = 2$) (npr. Clark & Caswell, 1976) teorija Šklovskog daje $\beta = 6$. Dobija se veoma strma $\Sigma - D$ zavisnost

$$\Sigma_\nu \propto D^{-6}. \quad (2.29)$$

2.3. Model Lekeia (Lequeux, 1962)

Ovaj model se zasniva na teoriji Šklovskog s tim što je ona dopunjena za slučaj ostatka ljkastog tipa. Označimo sa v brzinu širenja ljkse, sa R njen radius, a sa l njenu debljinu. Prihvatimo da je gustina ionizovanog gasa ρ i jačina magnetnog polja H u ljksci veća nego u okolnoj sredini. Neka je brzina širenja ljkse $v = \frac{dl}{dt} = 2a/(\Gamma - 1) \neq \text{const}$, gde je $a = H/(4\pi\rho)^{1/2}$ – Alfenova brzina. Pretpostavimo da je brzina širenja celog ostatka $V = \frac{dR}{dt} = \text{const}$. Ovde se modeluje SNR koji nije počeo da usporava svoje širenje, što odgovara slučaju Cas A. Iz uslova konstantnosti magnetnog fluksa imamo

$$H \propto (lR)^{-1}, \quad (2.30)$$

sa druge strane imamo da je

$$\rho \propto (lR^2)^{-1}, \quad (2.31)$$

odakle je

$$v = \frac{dl}{dt} \propto (lR)^{-1} (lR^2)^{\frac{1}{2}} \propto l^{-\frac{1}{2}}. \quad (2.32)$$

Integraljenjem ove jednačine dobijamo da je $l \propto t^{2/3}$. Odатле sledi

$$\frac{l}{l_0} = \left(\frac{t}{t_0} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (2.33)$$

pa diferenciranjem dobijamo

$$v = \frac{dl}{dt} = \frac{2l_0}{3t_0^{\frac{2}{3}}} t^{-\frac{1}{3}}, \quad (2.34)$$

gde je t_0 sadašnja starost magline, a l_0 – trenutna debljina ljkse. Sadašnja brzina ljkse je

$$v_0 = \frac{2}{3} \frac{l_0}{t_0}. \quad (2.35)$$

Zamenjujući (2.34) u relaciju (2.17) dobijamo

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{2l_0}{3t_0^{\frac{2}{3}}} t^{-\frac{1}{3}} \frac{t_0}{R_0 t} E, \quad (2.36)$$

što posle integraljenja daje

$$E = E_0 \exp \left(\frac{2l_0}{R_0} \left(\left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right) \right). \quad (2.37)$$

Ako pretpostavimo da relativistički elektroni imaju energetski spektar kako to relacija (2.19) definiše i uzmememo u obzir uslov (2.20), izvodimo da je

$$K = K_0 \left(\frac{R_0}{R} \right)^2 \left(\frac{l_0}{l} \right) \left(\frac{E}{E_0} \right)^{\gamma-1} = K_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{8}{3}} \exp \left(\left(\frac{2l_0}{R_0} \right) (\gamma - 1) \left(\left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right) \right). \quad (2.38)$$

Gustina fluksa zračenja ljudske na rastojanju R od centra ostatka i debljine l , analogno relaciji (2.14), će biti

$$F_\nu \propto 4\pi R^2 l K H_{\perp}^{\frac{\gamma+1}{2}}. \quad (2.39)$$

Koristeći izraz (2.23) dobija se

$$H_{\perp} \propto H^{\frac{3}{2}} E^{-1}. \quad (2.40)$$

Zamenom relacija (2.38) i (2.40) u relaciju (2.39) i izražavajući promenljive R i l u funkciji vremena dobijamo:

$$F_\nu \propto t^{-\frac{5(\gamma+1)}{4}} \exp \left(\frac{2l_0}{R_0} \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{(\gamma-3)}{2} \right). \quad (2.41)$$

Dalje, kako je $t \propto R$ to je

$$F_\nu \propto R^{-2.5\alpha-2.5} e^{f_1(R, \alpha)}, \quad (2.42)$$

i najzad:

$$\Sigma_\nu \propto D^{-2.5\alpha-4.5} e^{f_2(D, \alpha)}. \quad (2.43)$$

Za $\alpha = 0.5$ dobijamo

$$\Sigma_\nu \propto D^{-5.8} e^{f(D)}. \quad (2.44)$$

Ovaj model daje nešto sporije opadanje sjaja sa porastom dijametra ostatka. Što se tiče provere teorije na Cas A, koristeći jednačinu (2.41) sa $\gamma = 2.7$, $t_0 = 270$ godina i $l_0/R_0 = 0.3$ dobijamo da fluks opada 1.7% godišnje što je za oko 10% niže od vrednosti iz teorije Šklovskog, ali opet iznad vrednosti dobijenih iz posmatranja.

Ako u jednačinu (2.39) umesto l stavimo $\text{const.} R$, gde je $0 < \text{const.} < 1$ dobijamo vezu (2.14). Odатле možemo zaključiti da se teorija Šklovskog direktno može proširiti i na slučaj ljudskastog izvora (Kesteven, 1968) ako pretpostavimo da debljina ljudske ostaje konstantni deo radijusa u toku širenja.

2.4. Dopuna teoriji od strane Povede i Voltjera (Poveda & Voltjer, 1968)

Poveda i Voltjer su 1968. godine izveli $\Sigma - D$ relaciju, tako što su prepostavili da je magnetno polje konstantno (dobija se kompresijom međuzezdanog magnetnog polja (van der Laan, 1962a)) u toku širenja ostatka. Kada se

$$H = \text{const} \quad (2.45)$$

uvrsti u izvođenje Šklovskog dobija se rešenje koje bitno smanjuje nagib $\Sigma - D$ relacije: zamenom (2.45) u (2.14) nalazimo

$$F_\nu \propto R^{-2\alpha}, \quad \Sigma_\nu \propto R^{-2\alpha-2}. \quad (2.46)$$

Relacija (2.14) (uzimajući u obzir (2.11)) se za ovaj slučaj može napisati i na sledeći način:

$$F_\nu \propto K_0 \left(\frac{R_0}{R} \right)^{2\alpha} H_\perp^\alpha H_{\perp 0} \nu^{-\alpha}, \quad (2.47)$$

gde $H_{\perp 0}$ predstavlja početno polje čiji je fluks konstantan tokom širenja, H_\perp^α je dodatak usled kompresije međuzezdanog magnetnog polja i gde proizvod dve normalne komponente jačine magnetnog polja $H_\perp^\alpha H_{\perp 0}$ ostaje konstantna veličina.

Za prosečni spektralni indeks SNR-ova, $\alpha = 0.5$, dobijamo

$$\Sigma_\nu \propto D^{-3}. \quad (2.48)$$

Ovakva vrednost za koeficijent β je bliža empirijskim $\Sigma - D$ relacijama. Poveda i Voltjer su u ovom istom radu izveli i empirijsku relaciju, koja će biti detaljnije objašnjena u narednoj glavi. Dobili su da je $\beta \approx 8/3 \approx 2.67$. To je istorijski gledano prva empirijska $\Sigma - D$ relacija, koja je uz to dala dobro slaganje sa modelom.

2.5. Dopuna teoriji od strane Kestevena (Kesteven, 1968)

Kesteven je iste, 1968. godine dao i svoj prilog teoriji $\Sigma - D$ relacije. On je prepostavio model u kome debljina ljudske tokom širenja SNR-a ostaje konstantna. Ova hipoteza implicira da za jačinu magnetnog polja u ostatku važi

$$H = H_0 \frac{R_0}{R}. \quad (2.49)$$

Stavljujući ovu zavisnost magnetnog polja od radiusa SNR-a u relaciju (2.14), i u celini sledeći postupak izvođenja Šklovskog, dobijamo

$$\Sigma_\nu \propto D^{-3\alpha-3}. \quad (2.50)$$

Za prosečni spektralni indeks SNR-ova, $\alpha = 0.5$, relacija (2.50) postaje

$$\Sigma_\nu \propto D^{-4.5}. \quad (2.51)$$

Empirijske $\Sigma - D$ relacije iz prve polovine 70-ih godina se uglavnom objašnjavaju ovim teorijskim modelom.

2.6. Teorijska interpretacija $\Sigma - D$ relacije Đurić i Sivista (Duric & Seaquist, 1986)

Sledeći prilog teoriji, posle gotovo 20 godina empirijskog istraživanja $\Sigma - D$ relacije od strane više autora, dali su Đurić i Sivist (1986). To je za sada i poslednja teorijska interpretacija ove relacije. U suštini je i ovaj model zasnovan na teoriji Šklovskog u koju su ugrađeni savremeni rezultati istraživanja ove oblasti: koristi se adijabatska aproksimacija, ali i hidrodinamičko rešenje za širenje SNR-a (Sedov, 1959), zatim drugačiji model obogaćivanja SNR-a relativističkim elektronima kao i drugačija zavisnost magnetnog polja od radijusa ostatka.

Sa rešenjem Sedova:

$$D(t) = A_0 t^{\frac{2}{5}}, \quad (2.52)$$

gde je D dijametar, t – starost ostatka i

$$A_0 = 2.3 \left(\frac{E_0}{\rho_0} \right)^{\frac{1}{5}}, \quad (2.53)$$

a E_0 je energija ostatka oslobođena eksplozijom i ρ_0 je gustina sredine u kojoj se SNR širi, za brzinu širenja dobijamo:

$$v(t) = \frac{2}{5} A_0 t^{-\frac{3}{5}}. \quad (2.54)$$

Miln (Milne, 1970) je pokazao da je većina ljkastih ostataka u adijabatskoj fazi i da je debljina ljkse proporcionalna dijametru ostatka. Zapremina ljkse onda može biti izražena kao

$$V(D) = \frac{\pi}{6} f D^3, \quad (2.55)$$

gde je $f = 1 - (D_i/D_o)^3$, a D_o i D_i su spoljni i unutrašnji dijametar ljkse. Kombinujući jednačine (2.52) i (2.55) dobija se

$$V(t) = \frac{\pi}{6} f A_0^3 t^{\frac{6}{5}}. \quad (2.56)$$

U skladu sa rezultatima Gala (Gull, 1973), međuzezdano magnetno polje se komprese i samim tim pojačava u konvektivnoj zoni omogućujući efikasan mehanizam zračenja relativističkih elektrona. Kako se konvektivna zona širi sa širenjem čitavog SNR-a, magnetno polje H će se menjati sa dijametrom u skladu sa

$$H(D) = H_0 \left(\frac{D}{D_0} \right)^{-\delta}, \quad (2.57)$$

gde je $1.5 \leq \delta \leq 2$ (Gull, 1973; Fedorenko, 1983). Kombinujući jednačine (2.52) i (2.57) dobija se

$$H(t) = H_0 D_0^\delta A_0^{-\delta} t^{-\frac{2}{5}\delta}. \quad (2.58)$$

Bel (Bell, 1978a,b) daje analitički izraz za sinhrotronsku emisiju relativističkih elektrona u gasu preko koga je prešao udarni talas SNR-a. U zavisnosti od H i brzine udarnog talasa v (brzine širenja ostatka), emisivnost na dator frekvenciji ima oblik

$$\varepsilon(H, v) = g(\alpha)\rho_0 H^{1+\alpha} v^{4\alpha} \left(1 + \left(\frac{7 \times 10^9}{v}\right)^2\right)^\alpha v^{-\alpha}, \quad (2.59)$$

gde je

$$g(\alpha) = 0.217 \times 10^{-37\alpha} \left(\frac{\alpha}{0.75}\right) (1.435)^{-\alpha}. \quad (2.60)$$

Kombinujući jednačinu (2.59) sa jednačinama (2.54) i (2.58), za $\nu = 1\text{GHz}$, dobijamo

$$\varepsilon(t) = g(\alpha)(0.4)^{4\alpha} A_0^{4\alpha-\delta-\delta\alpha} H_0^{1+\alpha} D_0^{\delta+\delta\alpha} \rho_0 t^{-\frac{2}{5}(\delta+\delta\alpha+6\alpha)} \left(1 + \left(\frac{1.75 \times 10^9}{A_0}\right)^2 t^{\frac{6}{5}}\right)^\alpha. \quad (2.61)$$

Ako prepostavimo da se elektroni koji zrače nalaze u ljuisci, površinski sjaj će biti izražen kao:

$$\Sigma(t) = \frac{F(t)}{\pi^2 D^2(t)} = \frac{\varepsilon(t)V(t)}{\pi^2 D^2(t)}, \quad (2.62)$$

gde je $F(t)$ ukupna gustina fluksa SNR-a (snaga zračenja po celoj površini u jediničnom frekventnom intervalu). Kombinacijom (2.52), (2.56) i (2.61) dobija se

$$\Sigma(t) = h(\alpha) A_0^{4\alpha-\delta\alpha-\delta+1} H_0^{1+\alpha} D_0^{\delta+\delta\alpha} f \rho_0 t^{-\frac{2}{5}(6\alpha+\delta\alpha+\delta-1)} \left(1 + \left(\frac{1.75 \times 10^9}{A_0}\right)^2 t^{\frac{6}{5}}\right)^\alpha, \quad (2.63)$$

gde je

$$h(\alpha) = 0.1 \times 10^{-37\alpha} \left(\frac{\alpha}{0.75}\right) (1.435)^{-\alpha} (0.4)^{4\alpha}. \quad (2.64)$$

Jednačina (2.63) opisuje evoluciju sinhrotronskog površinskog sjaja SNR-a na $\nu = 1\text{GHz}$.

Konačno, eliminacijom A_0 i t uz pomoć (2.54) i (2.52) dobija se

$$\Sigma(D) = h(\alpha) x^{10\alpha} E_0^{2\alpha} \rho_0^{-2\alpha+1} H_0^{1+\alpha} D_0^{\delta+\delta\alpha} f D^{-(6\alpha+\delta\alpha+\delta-1)} \left(1 + \left(\frac{3.06 \times 10^{18} \rho_0}{x^5 E_0}\right) D^3\right)^\alpha, \quad (2.65)$$

gde je $x = 2.3$. Jednačina se može uprostiti za $D [\text{pc}] \ll 1$ ili za $D \gg 1\text{pc}$. Imamo:

$$\Sigma(D) = 3.06 \times 10^{18\alpha} h(\alpha) x^{5\alpha} E_0^\alpha \rho_0^{-\alpha+1} H_0^{1+\alpha} D_0^{\delta+\delta\alpha} f D^{-(\delta+\delta\alpha+3\alpha-1)}, \quad D \gg 1\text{pc}; \quad (2.66)$$

$$\Sigma(D) = h(\alpha) x^{10\alpha} E_0^{2\alpha} \rho_0^{-2\alpha+1} H_0^{1+\alpha} D_0^{\delta+\delta\alpha} f D^{-(\delta+\delta\alpha+6\alpha-1)}, \quad D \ll 1\text{pc}. \quad (2.67)$$

Ovako izvedena $\Sigma - D$ relacija daje nam mogućnost da teorijski odredimo koeficijent A u (2.27). Uzmimo vrednosti koje je usvojio Bel (Bell, 1978a,b) za Cas A ($H_0 = 10^{-3.5}\text{Ga}$,

$D_0 = 3\text{pc}$). Stavimo da je $\delta = 2$ što je u skladu sa pojačanjem turbulentnog magnetnog polja (Fedorenko, 1983; Gull, 1973) i adijabatskim širenjem konvektivne zone. Uzećemo prosečni spektralni indeks za SNR-ove ($\alpha = 0.5$), a za parametar E_0 (čija vrednost nije sigurna) usvojićemo $E_0 = 10^{51}\text{erga}$ (Chevalier, 1977). Takođe, stavićemo da je $\rho_0 = 10^{-24}\text{g/cm}^3$ i $f = 0.5$, što odgovara debljini ljudske od $0.2D$ (Milne, 1970). Sa ovim vrednostima jednačine (2.66) i (2.67) daju sledeće relacije:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 4 \times 10^{-15} D^{-3.5}, \quad D \gg 1\text{pc}; \quad (2.68)$$

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 4 \times 10^{-14} D^{-5}, \quad D \ll 1\text{pc}. \quad (2.69)$$

Iz (2.66) i (2.67) je očigledno da koeficijent β u (2.27) zavisi od spektralnog indeksa i koeficijenta koji definiše ponašanje magnetnog polja sa širenjem ostatka. Ako kao i u svakom slučaju do sada uzmemo da je $\alpha = 0.5$, a da je $1.5 \leq \delta \leq 2$ dobijemo $2.75 \leq \beta \leq 3.5$. U problemima vezanim za SNR-ove od interesa je uglavnom aproksimacija (2.66), jer skoro svi posmatrani SNR-ovi imaju dijametre veće od 1 pc. Drugim rečima,

$$\Sigma_{1\text{GHz}} \propto D^{-(2.75 \leq \beta \leq 3.5)}. \quad (2.70)$$

Najnovije empirijske $\Sigma - D$ relacije pokazuju da sjaj opada sporije sa širenjem ostatka nego što to veza (2.70) predviđa, to jest $\beta < 2.75$. Detaljniju diskusiju o empirijskim $\Sigma - D$ relacijama ćemo ostaviti za narednu glavu.

3. POVEZANOST RADIO-PETLJI SA EMPIRIJSKIM (GALAKTIČKIM) $\Sigma - D$ RELACIJAMA

3.1. Uvod

U ovoj glavi se pokazuje kako radio-petlje utiču na promenu koeficijenata koji definišu $\Sigma - D$ relaciju, a odatle i da li petlje na još jedan način možemo objasniti kao SNR-ove. Sam Šklovski (Shklovsky, 1960b) je pokazao na koji način se može konstruisati jedna empirijska $\Sigma - D$ relacija. Ako na neki precizniji način možemo odrediti daljine do datih SNR-ova, onda znajući uglovne dijametre možemo dobiti linearne dijametre. Površinski sjaj je veličina koja se dobija iz posmatranja. Na ovaj način svaki ostatak do koga znamo daljinu predstavlja jednu tačku na $\Sigma - D$ dijagramu. Ovi ostaci predstavljaju kalibracione ostatke, jer provlačenjem najbolje prave kroz njih dobijamo koeficijente A i β jednačine (2.27). Smatrujući da na ovaj način dobijena relacija (2.27) predstavlja u srednjem najbolju relaciju za sve SNR-ove, možemo dobiti približne daljine do svih ostalih SNR-ova jer iz posmatranja znamo površinski sjaj i uglovni dijamer ostatka. Dodavanjem petlji kalibratorima možemo testirati kako se menja $\Sigma - D$ relacija, a samim tim ispitati i poreklo radio-petlji.

Prvu empirijsku $\Sigma - D$ relaciju dali su Poveda i Voltjer (Poveda & Voltjer, 1968) u radu koji je naveden u prethodnoj glavi. Sivqvist (Seaquist, 1968) je ispitivao zavisnost temperature po sjaju od dijametra ostatka. Zna se da je $\Sigma_\nu \propto T_b$ (relacije 2.12 i 2.13), pa se i ovaj rad može uzeti kao jedan od pionirskih. U njemu nisu računati nikakvi koeficijenti, jednostavno je nacrtana najbolja prava za sedam kalibracionih ostataka. Naglašeno je da na ovaj način Severni polarni luk ne može biti pridružen ostalim supernovim ostacima.

Prvi rad koji je bio posvećen isključivo empirijskoj $\Sigma - D$ relaciji je Milnov (Milne, 1970). U literaturi se često ovaj rad navodi kao početni, jer je u njemu objavljen katalog svih tada poznatih SNR-ova, sa izračunatim daljinama uz pomoć $\Sigma - D$ relacije koja je u istom radu izvedena.

Kako su godine prolazile radilo se i dalje na ovoj relaciji, težeći da se dode do što preciznije određenog seta kalibratora, a samim tim i do bolje $\Sigma - D$ relacije. Osnovni kriterijum za izbor kalibratora je pouzdana daljina do ostatka. Istraživanja tokom sedamdesetih i početka osamdesetih godina su uglavnom ovog tipa. Bolja posmatranja omogućuju tačnije određivanje daljina do kalibratora i uvećanje njihovog broja. U ovom periodu su sledeći autori odredivali galaktičku $\Sigma - D$ relaciju: Dauns (Downes, 1971), Illovački

Leke (Ilovaisky & Lequeux, 1972), Voltjer (Woltjer, 1972), Berkhujsenova (Berkhuijsen, 1973), Klark i Kasvel (Clark & Caswell, 1976), Sabadin (Sabbadin, 1977), Miln (Milne, 1979), Kasvel i Lerč (Caswell & Lerche, 1979), Gebel sa saradnicima (Göbel et al., 1981), Lozinska (Lozinskaya, 1981), Sakhibov i Smirnov (Sakhibov & Smirnov, 1982). Od rada Alahverdijeva sa saradnicima (Allakhverdiyev et al., 1983a,b) počinje kritički osvrt na ovu relaciju. Kritika se nastavlja radovima Grina (Green, 1984) i Alahverdijeva sa saradnicima (Allakhverdiyev et al., 1986a,b). Osnovni nedostatak empirijski dobijenih relacija je što su daljine do nekih kalibratora loše odredene, to jest što nema dovoljno ostataka sa tačno određenim daljinama neophodnim za izvođenje valjane $\Sigma - D$ relacije (Green, 1984). Takođe, mora se voditi računa o okolini u kojoj je supernova eksplodirala, to jest nema smisla konstruisati jedinstvenu $\Sigma - D$ relaciju za ostatke koji pripadaju, na primer, i spoljnim i unutrašnjim oblastima Galaksije u odnosu na galaktičku putanju Sunca. U istim radovima (Allakhverdiyev et al., 1983a,b; 1986a,b) je pokazano da ima smisla praviti relaciju samo za ljkaste ostatke. U ovom periodu su na $\Sigma - D$ relaciji radili Li i Viler (Li & Wheeler, 1984), Huang i Tadeuš (Huang & Thaddeus, 1985) i Berkhujsenova (Berkhuijsen, 1986). Ovi radovi uglavnom imaju neke specifičnosti koje ih opravdavaju – poglavljia 3.17 i 3.19. Zbog "napada" na $\Sigma - D$ relaciju zamire istraživanje na ovom polju čitavu jednu deceniju. Grin (Green, 1991) još jednom pokazuje da su kalibratori suviše rasuti na $\Sigma - D$ dijagramu i da se odatle ne može izvesti valjana relacija. Tako ostaje sve do radova Kejsa i Batačarije (Case & Bhattacharya, 1995; 1996; 1998). Rad iz 1998. godine je kruna njihovog istraživanja koje se zasniva na izračunavanju novih daljina do kalibratora uz pomoć novih galaktičkih konstanti. Dobijen je znatno blaži nagib $\Sigma - D$ relacije. Samim tim je još više došao do izražaja nesklad između teorije i empirije.

Vrlo je važno istaći da sve prethodno navedene galaktičke $\Sigma - D$ relacije imaju nekoliko nepovoljnih osobina vezanih za selekcione efekte. Kalibratori su uglavnom vezani za galaktičku okolinu Sunca. Samim tim niskosjajni i veliki ostaci su zapostavljeni jer sa povećanjem rastojanja od nas detektujemo sve manje niskosjajnih, a sve više visokosjajnih objekata zbog velike apsorpcije u galaktičkom disku. Samim tim relacija pre važi za sjajne nego za manje sjajne ostatke. Sa povećanjem daljine vidimo sve manje ostataka mada to nije toliki problem koliko poteškoća pravi relativna disproporcija u broju sjajnih i manje sjajnih ostataka na većim heliocentričnim daljinama. Takođe postoji selekcioni efekti koji su vezani za osjetljivost i razdvojnu moć radio-teleskopa. Postoji granica osjetljivosti instrumenata koji zbog toga nisu u stanju da pokupe dovoljno zračenja koje stiže sa niskosjajnih ostataka. Postoji oštra granica iza koje se današnjim teleskopima ne vide niskosjajni izvori velikih dijametara što ne znači da takvih izvora nema. Možda ih ima mnogo i u našoj i u drugim galaksijama. Ovaj problem je još izraženiji kod detekcije niskosjajnih objekata u drugim galaksijama, jer zbog mnogo veće daljine najmoderniji teleskopi ne uspevaju da registruju zračenje ovih objekata i ta granica je pomerena ka još višem sjaju u odnosu na galaktičke ostatke. Zbog toga su galaktičke relacije bolje. Takođe zbog ograničene razdvojne moći teleskopa teško je razdvojiti vrlo mali objekt iako je velikog sjaja. I u ovome je prednost galaktičkih relacija. Ali ove dve prednosti koje imaju relacije konstruisane od kalibratora iz naše galaksije su od manjeg značaja jer su kalibracioni ostaci iz drugih galaksija približno podjednako udaljeni od nas, pa samim tim prvi i veoma bitan selekcioni efekt, da niskosjajne objekte sve teže detektujemo sa porastom rastojanja zbog velike ap-

sorpcije u ravni Mlečnog puta, ne postoji. Dalje, vrlo je veliki problem odrediti daljine do ostataka u našoj galaksiji. Greške su velike i zbog toga relacija postaje nepouzdana. Sa druge strane, ako je neka diskolika galaksija postavljena tako da pravac vizure ne leži u ravni njenog diska svi problemi koji otežavaju detekciju zbog apsorpcije u disku, nestaju. Sa poboljšanjem posmatračke tehnike, rezultati će biti neuporedivo bolji, potpuniji i pouzdaniji naročito ako budemo uspeli da detektujemo niskosjajne objekte. Za sada su radio-petlje izgleda baš ti objekti koji nedostaju za dobru $\Sigma - D$ relaciju jer su jedino one dovoljno velike, niskosjajne, i detektovane zbog toga što su izgleda u najbližem okruženju Sunca.

U ovoj glavi biće detaljno analizirane skoro sve prethodno pomenute relacije i biće testirano njihovo ponašanje pridruživanjem radio-petlji i nekih SNR-ova sličnih petljama. Za to je neophodno znati vrednosti površinskog sjaja i dijametra radio-petlji i SNR-ova sličnih njima. Za Petlje I, II, III i IV ili glavne radio-petlje, vrednosti za Σ i D su uzete iz rada Berkhujsenove (Berkhuijsen, 1986) – prvi set objekata koje pridružujemo. Spolstra (Spoelstra, 1973) razmatra Origem, Monoceros i Lupus SNR-ove (u literaturi se često i ovi objekti zovu "petljama") kao objekte koji su slični glavnim petljama, koristeći već pomenuti model van der Lana (van der Laan, 1962a,b). U ovom radu drugi set objekata koje pridružujemo predstavljaju glavne petlje+tri prethodna SNR-a. Za Origem petlju vrednosti za Σ i D su uzeti iz rada Rajha sa saradnicim (Reich et al., 1979). Iz rada Klarka i Kasvela (Clark & Caswell, 1976) su uzete vrednosti ovih parametara za Monoceros petlju. Površinski sjaj za Lupus petlju je iz rada Klarka i Kasvela, a dijametar iz rada Alahverdijeva (Allakhverdiyev, 1983a). Sam autor je priklučio još tri SNR-a petljama i to po kriterijumu da se na $\Sigma - D$ dijagramu nalaze u istoj oblasti gde su i petlje (ova tri ostatka zajedno sa 7 prethodnih petlji čine treći set objekata koje pridružujemo). To su ekstremno niskosjajni objekti sa ogromnim dijometrima (približno kao glavne petlje). Za jedan od njih, ostatak OA184, određena je vrednost dijametra od oko 175 parseka (Routledge et al., 1986). Pored ovog tu su i ostaci S147 i G65.3+5.7. Površinski sjaj za OA184 je uzet iz Grinovog rada (Green, 1988). Za ostatak S147 Σ je iz istog Grinovog rada, a D iz rada Lozinske (Lozinskaya, 1980a). Što se ostatka G65.3+5.7 tiče, za površinski sjaj je ponovo korišćen Grinov katalog iz 1988, a dijametar je uzet iz rada Rajha sa sardnicima (Reich et al., 1979). Posmatranjima Kasvela (Caswell, 1985) nagovuštena je sumnja u postojanje Origem petlje. Jedan deo petlje predstavlja zaseban SNR. Zbog ove sumnje testira se sa i bez Origem petlje da bi se izbegla eventualna greška zbog uzimanja u obzir jednog možda nepostojećeg ostatka.

Svi površinski sjajevi i za glavne petlje i za ostale SNR-ove pridružene glavnim petljama su na frekvenciji od 1 GHZ. Dijametri su u parsecima. U slučaju da su originalne $\Sigma - D$ relacije određene za neku drugu frekvenciju, u ovom radu su svedene na 1 GHz .

Tabela 3.1. Dijametri i površinski sjajevi glavnih petlji i SNR-ova pridruženih petljama, koji se u narednim poglavljima koriste za testiranje promena koeficijenata $\Sigma - D$ relacije.

Objekt	D (pc)	$\Sigma_{1\text{GHz}}$ $(\times 10^{-22} \frac{\text{W}}{\text{Hz m}^2 \text{sr}})$
Petlja I	230	2.1
Petlja II	175	2.0
Petlja III	200	2.2
Petlja IV	210	0.6
Origem petlja	116	1.7
Monoceros petlja	74	2.7
Lupus petlja	61	3.2
OA184	175	2.6
S147	60	3.0
G65.3+5.7	75	1.0

Najveća pažnja će se posvetiti promeni koeficijenta β , pridruživanjem 10 objekata iz tabele 3.1. Namera je da se ustanovi kako 4 glavne petlje utiču na originalnu $\Sigma - D$ relaciju. Ostalih 6 ostataka su uvršteni da bi povećali broj objekata koji su SNR-ovi, a po nekim svojim osobinama podsećaju na petlje. Njihovim raznovrsnim kombinovanjem sa glavnim petljama pokušaćemo da što bolje utvrdimo ponašanje $\Sigma - D$ relacije odnosno koeficijenta β . Koeficijent A za ovaj rad nije toliko važan jer mi ne računamo daljine do glavnih petlji, već kvalitativno pokušavamo da opišemo petlje i njihove ekstremne dijametre uz pomoć ove relacije. Testiranje će se vršiti tako što će originalnim empirijskim $\Sigma - D$ relacijama biti pridruženo najpre svih 10 objekata, pa 7 i na kraju 5. Onda će se od svakog od prethodnih slučajeva odbaciti Origem petlja i pridružiti 9, 6 i na kraju nama najbitnija 4 objekta. Ako u početnoj relaciji kojoj se pridružuje ovih 10 objekata (neka u narednom tekstu to budu kalibracione petlje) postoji kalibrator koji je istovremeno i kalibraciona petlja, taj ostatak će biti izbačen iz seta kalibracionih petlji.

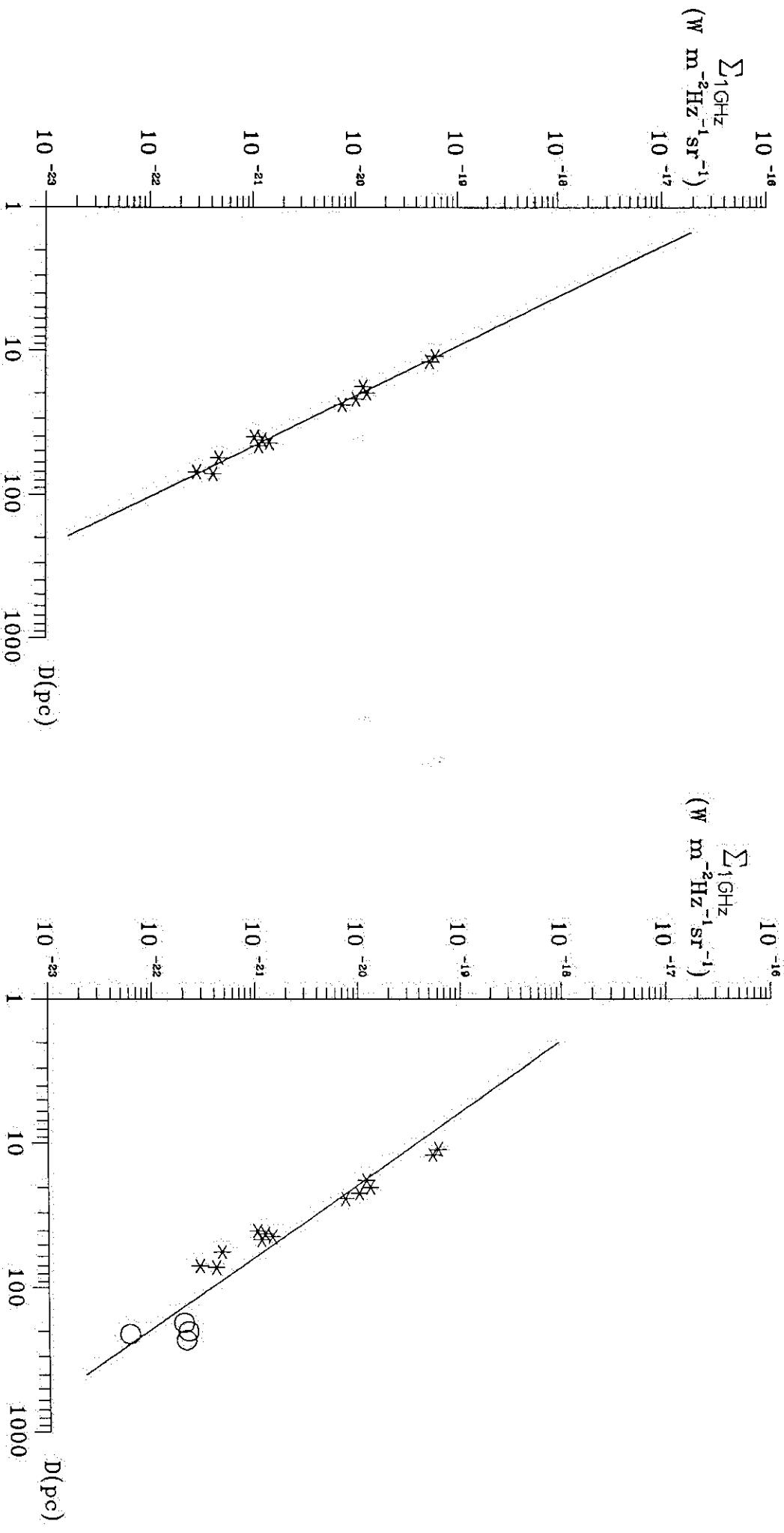
Svi testovi su vršeni metodom najmanjih kvadrata uz pomoć programa GRAPHER (verzija 1.79C, 1988, Golden Software Inc.). Najbolji fit je proveravan još jednom i programom ORIGIN (verzija 5.0, 1991-1997, Microcal Software Inc.), i dobijeni su isti rezultati. Greške koeficijenata β i A su takođe dobijene kompjuterski uz pomoć programa ORIGIN (ista verzija) i predstavljaju standardne greške metode najmanjih kvadrata. Koeficijent koji pokazuje koliko dobro prava fituje tačke je dobijen takođe upotrebom oba programa i u oba slučaja daje iste vrednosti. Vrednost ovog koeficijenta predstavlja kvalitet fita i data je u narednim tabelama u trećoj koloni.

Svi kalibratori i kalibracione petlje se uzimaju i podvrgavaju testovima pod pretpostavkom da su im jednake statističke težine.

U narednom izlaganju nailazicemo na momente u kojima ćemo morati da izračunamo površinski sjaj SNR-a iz gustine fluksa zračenja. Površinski sjaj možemo dobiti upotrebom formule

$$\Sigma_\nu = 1.505 \times 10^{-19} \frac{F_\nu}{\theta^2} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{Hz sr}} \right], \quad (3.1)$$

Slika 3.1. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D (Poveda & Wolter-P&W, 1968). Desno – P&W zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni P&W kalibratori, a kružicima petlje.





gde je gustina fluksa u janskima ($1 \text{ Jy} \equiv 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$), a θ je uglovni dijametar u lučnim minutima. Ova formula je izvedena pod pretpostavkom da SNR ima sferni oblik. Većina modernih kataloga SNR-ova u sebi ima osnovne podatke dobijene iz posmatranja – gustinu fluksa, uglovni dijametar i spektralni indeks, pa se do površinskog sjaja lako dolazi upotrebom relacije (3.1).

Za svedenje površinskog sjaja na 1 GHz koristimo vezu

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = \Sigma_\nu \left(\frac{1}{\nu} \right)^{-\alpha}, \quad (3.2)$$

gde je frekvencija ν u gigahercima. Ova veza se dobija uz pomoć jednačina (2.10) i (3.1), pod pretpostavkom da θ ne zavisi od frekvencije na kojoj je merenje izvršeno.

Na ovom mestu treba pomenuti da su za sve relacije korišćeni podaci koje su sami autori koristili za svoja izvođenja. Iz tih podataka je ponovo izvodena originalna relacija (ako nije na 1 GHz, svedena je) i na tako pripremljenu relaciju dodavane su kalibracione petlje.

U ovoj i sledećoj glavi biće prikazani $\Sigma - D$ dijagrami za originalne relacije i za slučajevе kada se originalnim relacijama pridružuju 4 glavne petlje. Ostali slučajevi pridruživanja 10, 9, 7, 6 i 5 kalibracionih petlji biće prikazani u prilogu ove disertacije.

3.2. Relacija Povede i Voltjera (Poveda & Voltjer, 1968)

Već nekoliko puta u dosadašnjem izlaganju pominjali smo i teorijsku i empirijsku $\Sigma - D$ relaciju ovih autora. Empirijska relacija je istorijski gledano prva i nije bila glavni predmet proučavanja rada (u smislu određivanja daljina do SNR-ova), već više kao oblik provere teorijskog modela. Izvedena je na frekvenciji od 400 MHz i kalibratori su bili ostaci iz priloženog kataloga koji su imali fluks $F_{400} > 50 \text{ Jy}$ i $\log \Sigma_{400} < -18.82$. Od ukupno 25 ostataka 13 ispunjava prethodni uslov. To su SNR-ovi: HB3, HB9, Sb147, Sb34, IC443, Puppis A, Vela X, Vela Y, P1548–55, W28, 3C392, HB21 i Cygnus Loop.

Rezultat provlačenja prave linije kroz ovih 13 tačaka sa vrednostima za D i Σ iz datog kataloga, Poveda i Voltjer (P&W) su dali u obliku $\Sigma_{400} \propto R^{-8/3}$. Očigledno je da koeficijent $\beta \approx 2.7$. U radu nije naglašeno kojom je metodom povučena linija fita.

Sada prelazimo na rezultate dobijene testiranjem na način koji je opisan u poglavljju 3.1. Konstrukcijom relacije sa 13 originalnih kalibratora na 400 MHz dobijena je vrednost $\beta = 2.88 \pm 0.07$ sa fenomenalnih 99% poklapanja linije i tačaka kroz koje linija prolazi (koeficijent ima vrednost 100% kada se sve tačke nalaze na liniji). Relacija (P&W) na frekvenciji od 1 GHz ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 6.13^{+2.58}_{-1.82} \times 10^{-17} D^{-2.87 \pm 0.10}, \quad (3.3)$$

sa slaganjem od 99%.

Originalnim kalibratorima pridružujemo kalibracione petlje i testiranjem (opisano u poglavljju 3.1) dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti u narednoj tabeli.

Tabela 3.2. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji relaciji Povede i Voltjera iz 1968. godine.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
10	2.03 ± 0.19	84
9	2.02 ± 0.20	84
7	2.06 ± 0.17	89
6	2.04 ± 0.18	88
5	2.03 ± 0.16	91
4	2.01 ± 0.17	90

Istaknimo za ovaj rad najvažniji slučaj pridruživanja 4 glavne petlje. Dobijena $\Sigma - D$ relacija ima oblik

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 3.76_{-1.86}^{+3.68} \times 10^{-18} D^{-2.01 \pm 0.17}. \quad (3.4)$$

Da bismo lakše analizirali promenu koeficijenta β uvedimo sledeća tri parametra i dodelimo im odgovarajuće vrednosti oslanjajući se na tabelu 3.2.

$$\Delta\beta_4 = 0.86, \quad \bar{\beta} = 2.03, \quad \Delta\beta = 0.84, \quad (3.5)$$

gde je $\Delta\beta_4$ promena koju trpi koeficijent β prilikom pridruživanja glavnih petlji, $\bar{\beta}$ – aritmetička srednja vrednost dobijena za vrednosti iz tabele 3.2 i $\Delta\beta$ – razlika između vrednosti koeficijenta β iz početne relacije (3.3) i vrednosti $\bar{\beta}$.

Očigledno je iz tabele 3.2 i veza (3.3), (3.4) i (3.5) da pridruživanje kalibracionih petlji umnogome menja nagib relacije, daleko izvan intervala datog greškom koeficijenta β iz relacije (3.3).

Na slici 3.1 dati su $\Sigma - D$ dijagrami na frekvenciji od 1 GHz samo za slučajeve koji odgovaraju relacijama (3.3) i (3.4).

Relacija Povede i Voltjera je zanimljiva po tome što je dala vrlo nisku vrednost koeficijenta β , najbližu novijim istraživanjima ove relacije. Ima ubedljivo najbolji koeficijent slaganja tačaka i fita (mada su izbačeni svi ostaci sa gustinom fluksa većom od 50 Jy zbog toga što odstupaju od najbolje prave). Ova relacija ima i nekoliko očiglednih manjih. Recimo, spektralni indeks ostatka Sb147 (S147) i Vela X su 0.0 što je neodgovarajuće SNR-ovima. U katalogu ima objekata za koje nisu odredeni spektralni indeksi, zatim neki kalibratori nemaju dovoljno dobro odredene gustine fluksa (npr. Vela X i Sb34). Daljnje do kalibratora se razlikuju od današnjih. Sve u sveinu u to vreme posmatrački podaci su bili oskudni, ali ipak je relacija sa savremenog stanovišta dobra, uprkos pomenutim nedostacima.

3.3. Milnova relacija (Milne, 1970)

Milnova relacija je već ranije pominjana. Konstruisana je da bi se nasle daljnje do svih SNR-ova, kojih u katalogu Milna (isti članak) ima 97. Zbog namene ove relacije možemo reći da je ovo prva empirijska $\Sigma - D$ relacija, što mnogi autori i čine. Relacija koja nas interesuje je izvedena sa 15 kalibratora od kojih je Miln 10 svrstao u klasu ostataka

supernovih tipa II, dok je 5 ostataka tipa I. Izveo je tri relacije. Kalibratori tipa I su: Tycho SNR, Crab SNR, SN 1006, Kepler SNR i RCW103, a tipa II su: HB3, IC443, Vela XYZ, RCW86, W49B, Cygnus Loop, Cas A, N49(LMC), N63A(LMC), N132D(LMC). Poslednja tri ostatka su iz Velikog Magelanovog oblaka (LMC). Sve tri relacije su izvedene na frekvenciji od 1 GHz.

Za sva tri slučaja Miln dobija $\beta = 4.54$. Ova vrednost se izuzetno dobro slaže sa vrednošću (relacija (2.51)) dobijenom iz modela Kestevena (Kesteven, 1968). Nije naglašeno na koji način su dobijene ove tri relacije. Najverovatnije, pošto sve tri relacije imaju isti nagib, (znači da su na $\Sigma - D$ dijagramu fitovi paralelni) da je uraden fit za kalibratore tipa II, pa za kalibratore tipa I i na kraju je povučena paralelna linija koja se nalazi između ove dve i razdvaja ova dva tipa kalibratora. Ova prava linija predstavlja krajnji rezultat za svih 15 kalibratora.

Sada prelazimo na rezultate dobijene testiranjem na način koji je opisan u poglavlju 3.1. Milnova relacija za svih 15 kalibratora glasi:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 3.38^{+9.79}_{-2.51} \times 10^{-16} D^{-3.35 \pm 0.52}, \quad (3.6)$$

sa slaganjem od 76%.

Relaciji (3.6) pridružujemo kalibracione petlje i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.2 i u tabeli 3.3. Na slici 3.2 dati su $\Sigma - D$ dijagrami na frekvenciji od 1 GHz samo za slučajeve koji odgovaraju relacijama (3.6) i (3.7).

Tabela 3.3. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji Milnovoj relaciji iz 1970. godine.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
10	2.66 ± 0.24	84
9	2.66 ± 0.25	84
7	2.65 ± 0.25	84
6	2.64 ± 0.27	84
5	2.59 ± 0.27	84
4	2.56 ± 0.28	83

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 5.87^{+9.33}_{-3.60} \times 10^{-17} D^{-2.56 \pm 0.28}. \quad (3.7)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = 0.79, \quad \bar{\beta} = 2.63, \quad \Delta\beta = 0.72. \quad (3.8)$$

Analogno prethodnom Milnova relacijs za 10 kalibratora tipa II je

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 1.20^{+3.05}_{-0.86} \times 10^{-14} D^{-4.37 \pm 0.43}, \quad (3.9)$$

sa slaganjem od 93%.

Relaciji (3.9) pridružujemo kalibracione petlje i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.3 i u tabeli 3.4. Na slici 3.3 dati su $\Sigma - D$ dijagrami samo za slučajeve koji odgovaraju relacijama (3.9) i (3.10).

Tabela 3.4. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji Milnovoj relaciji iz 1970. godine, za slučaj kalibratora tipa II.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
10	2.95 ± 0.28	86
9	2.95 ± 0.51	85
7	2.96 ± 0.29	87
6	2.95 ± 0.31	87
5	2.90 ± 0.29	88
4	2.87 ± 0.31	87

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 2.64^{+5.94}_{-1.83} \times 10^{-16} D^{-2.87 \pm 0.31} \quad (3.10)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = 1.50, \quad \bar{\beta} = 2.93, \quad \Delta\beta = 1.44. \quad (3.11)$$

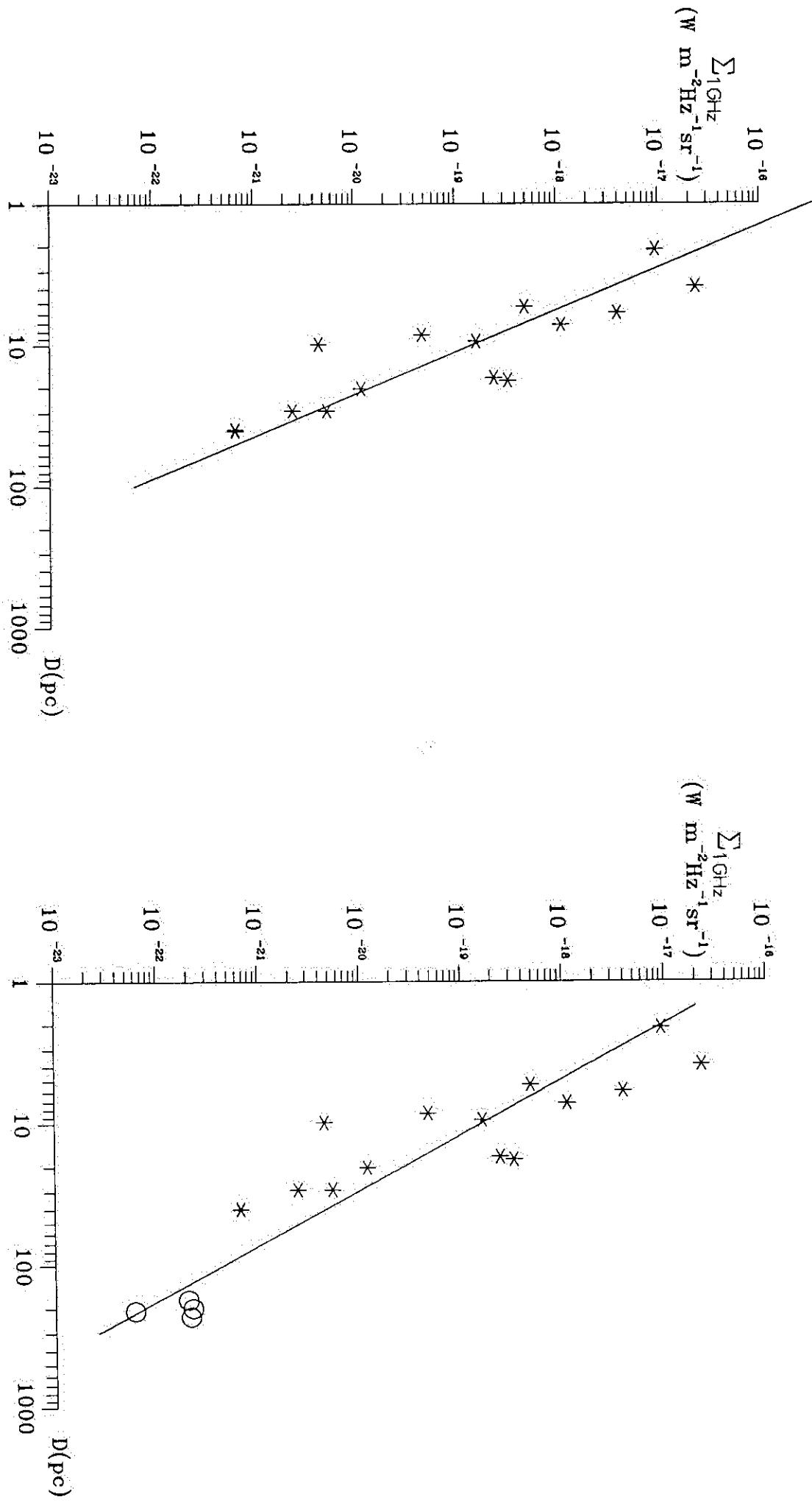
Milnova relacija za 5 kalibratora tipa I ima oblik

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 2.29^{+16.96}_{-2.02} \times 10^{-16} D^{-3.95 \pm 1.12}, \quad (3.12)$$

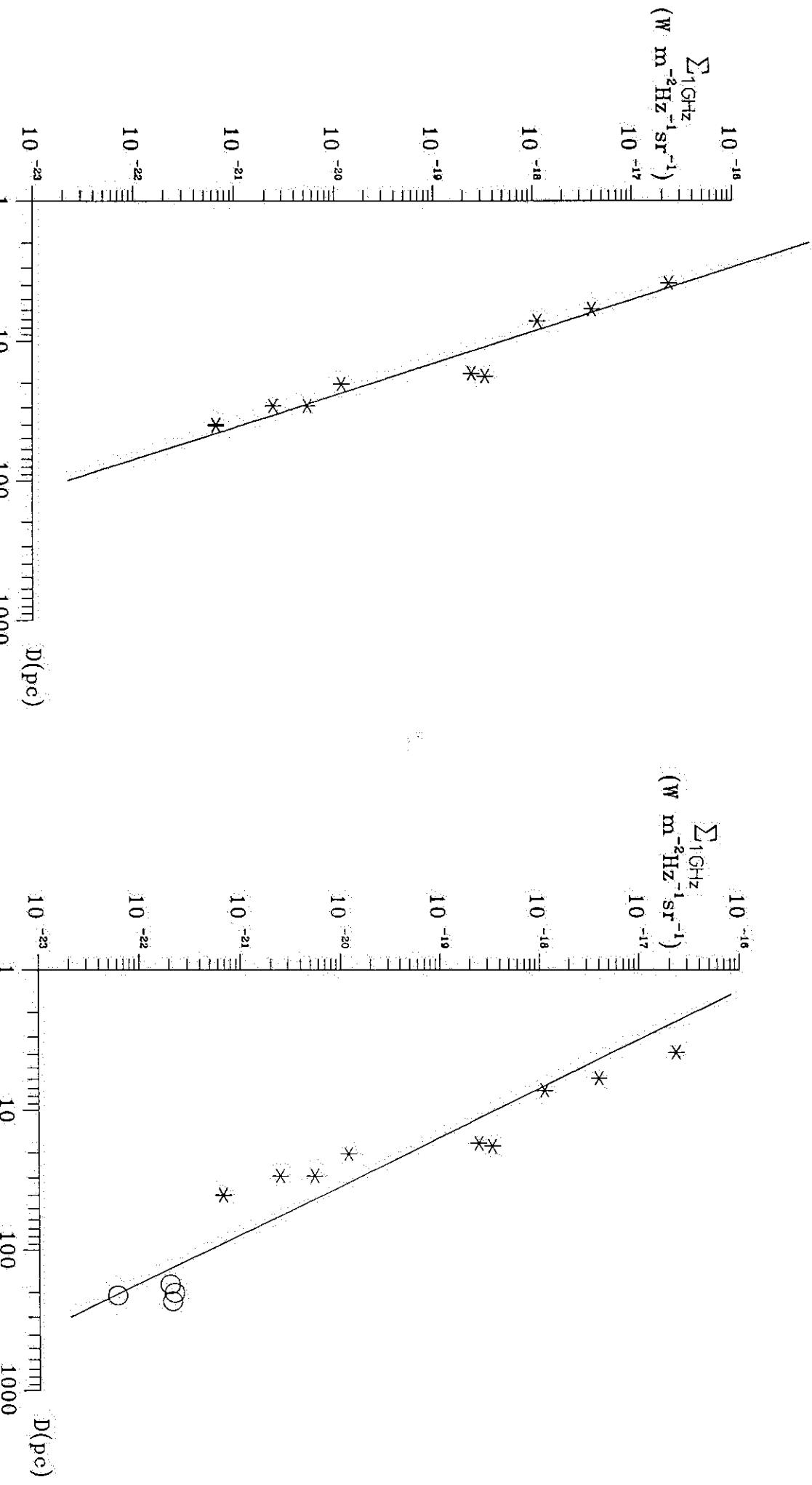
sa slaganjem od 81%.

Relaciji (3.12) pridružujemo kalibracione petlje i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.4 i u tabeli 3.5. Na slici 3.4 prikazani su $\Sigma - D$ dijagrami samo za slučajeve koji odgovaraju relacijama (3.12) i (3.13).

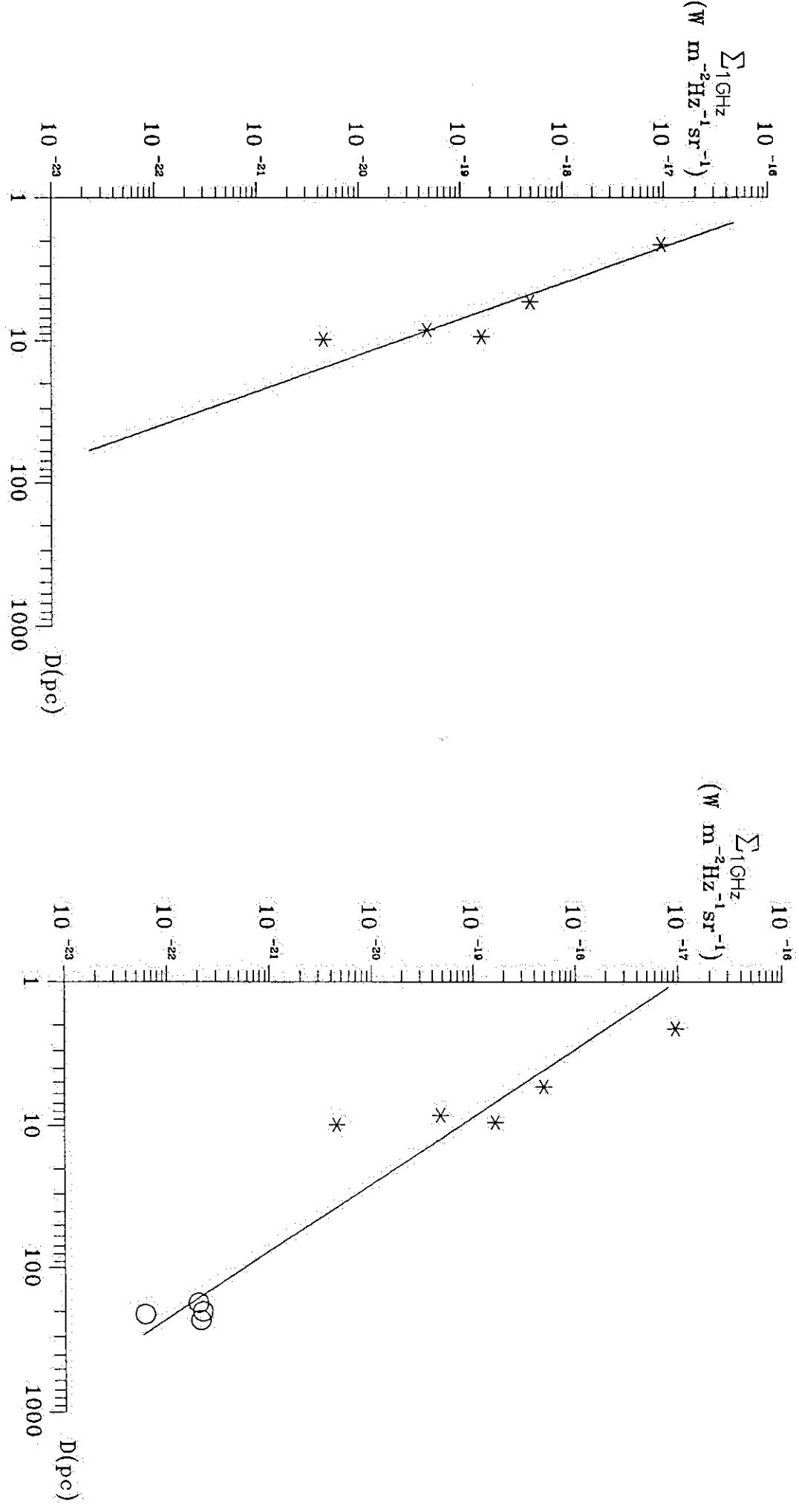
Slika 3.2. Levo – zavisnost površinskog sija Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D (Milne, 1970) za svi 15 kalibratora. Desno – Milnova zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni Milnovi kalibratori, a kružicima petlje.



Slika 3.3. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D (Milne, 1970) za 10 kalibratora tipa II. Desno – Milnova zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni Milnovi kalibratori, a kružićima petlje.



Slika 3.4. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za 5 kalibratora tipa I (Milne, 1970).
 Desno – Milnova zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni Milnovi kalibratori, a kružićima petlje.



Slika 3.5. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D (Downes, 1971). Desno – Daunsova zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni Daunsovi kalibratori, a kružićima petlje.

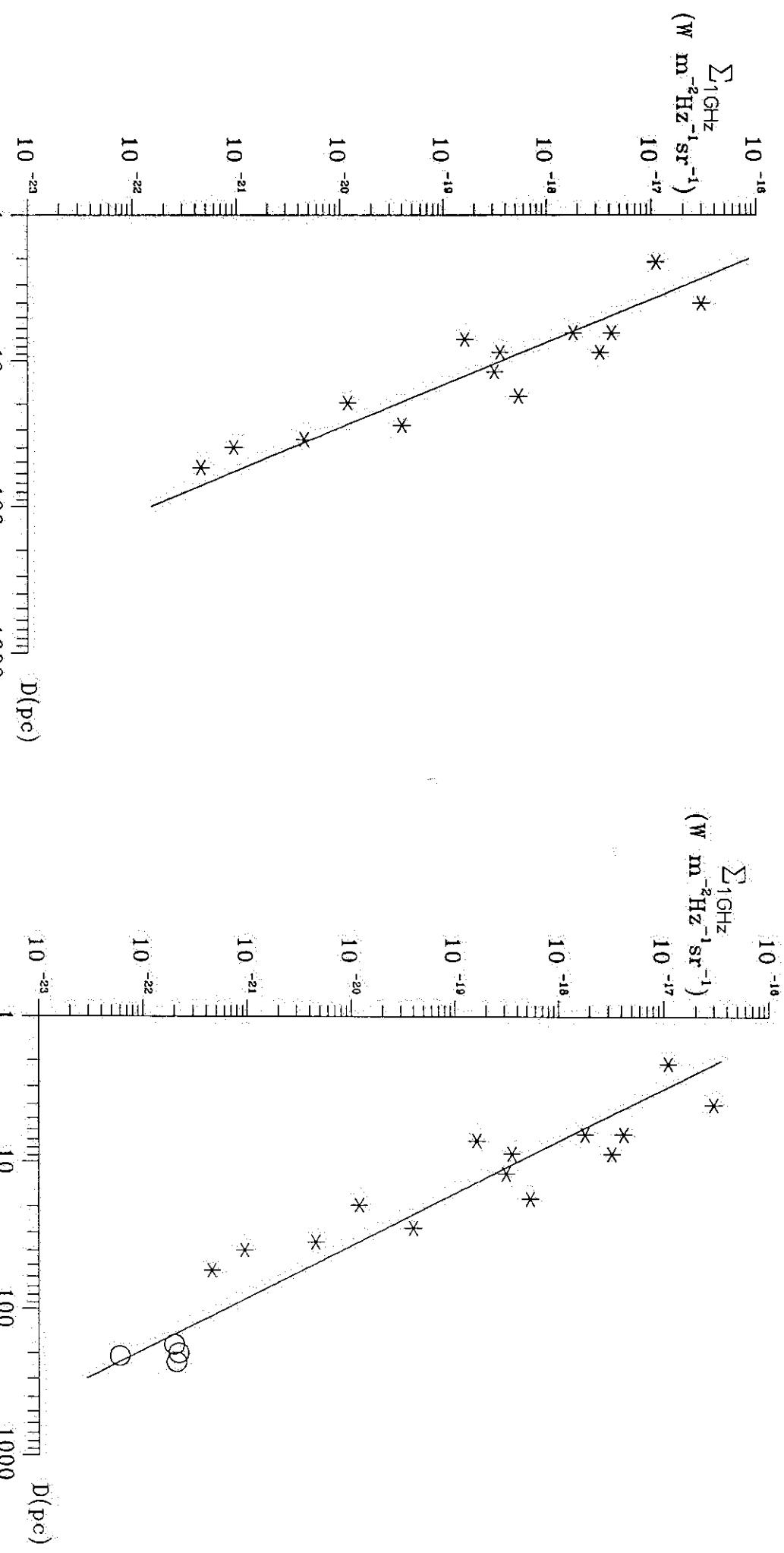


Tabela 3.5. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji Milnovoj relaciji iz 1970. godine, za slučaj kalibratora tipa I.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
10	2.22 ± 0.23	88
9	2.21 ± 0.24	88
7	2.21 ± 0.23	90
6	2.19 ± 0.25	90
5	2.16 ± 0.24	91
4	2.12 ± 0.26	91

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 9.87^{+16.37}_{-6.16} \times 10^{-18} D^{-2.12 \pm 0.26} \quad (3.13)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = 1.83, \quad \bar{\beta} = 2.18, \quad \Delta\beta = 1.76. \quad (3.14)$$

Očigledno je iz prethodne tri tabele i odgovarajućih relacija da pridruživanje kalibracionih petlji drastično menja nagibe relacija, daleko izvan intervala datih greškama koeficijenata β .

Milnova relacija je empirijska relacija sa najstrmijim nagibom. Petlje drastično menjaju nagib, mada promena pridruživanjem petlji kalibratorima tipa II je manja u odnosu na promenu prilikom pridruživanja kalibratorima tipa I. Samim tim dolazimo do blagog nagoveštaja da su petlje objekti koji više liče na ostatke supernovih tipa II.

3.4. Relacija Daunsa (Downes, 1971)

Sledeća $\Sigma - D$ relacija koju ćemo prodiskutovati je relacija koju je izveo Dauns (Downes, 1971). Relacija je konstruisana korišćenjem 14 kalibratora na frekvenciji od 400 MHz. U ovom radu je dat osvrt na celokupnu dotadašnju teoriju koja je vezana za $\Sigma - D$ relaciju. Prodiskutovana je empirijska relacija i njen odnos sa teorijskim istraživanjima. U radu je prikazan katalog sačinjen od 117 mogućih SNR-ova do kojih su izračunate i daljine. Kao kalibratori su korišćeni sledeći ostaci: Tycho SNR, HB3, Crab SNR, IC443, Vela X, Sgr A, Kepler SNR, W44, W49B, Cygnus Loop, Cas A, N132D, N49, N63A. Poslednja tri su iz Velikog Magelanovog oblaka.

Relacija dobijena od strane Daunsa ima oblik $\Sigma_{400} \propto D^{-3.6 \pm 0.5}$. Fitovanje je vršeno metodom najmanjih kvadrata.

Sada prelazimo na rezultate dobijene testiranjem na način koji je opisan u poglavljju 3.1. Koristeći 14 kalibratora Daunsa dobijena je $\Sigma - D$ zavisnost na 400 MHz u obliku $\Sigma_{400} \propto D^{-3.36 \pm 0.43}$, sa 84% slaganja. Prelaskom na površinske sjajeve na 1 GHz i fitovanjem dobija se:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 8.79^{+17.92}_{-5.90} \times 10^{-16} D^{-3.38 \pm 0.42}, \quad (3.15)$$

sa slaganjem od 84%.

Relaciji (3.15) pridružujemo kalibracione petlje i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.5 i u tabeli 3.6. Na slici 3.5 dati su $\Sigma - D$ dijagrami samo za slučajeve koji odgovaraju relacijama (3.15) i (3.16).

Tabela 3.6. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji Daunsovoj relaciji iz 1971. godine (transformisane na 1 GHz).

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
10	2.94 ± 0.22	89
9	2.93 ± 0.23	89
7	2.91 ± 0.22	90
6	2.89 ± 0.23	90
5	2.83 ± 0.22	91
4	2.80 ± 0.23	90

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{\text{1GHz}} = 2.44_{-1.34}^{+2.96} \times 10^{-16} D^{-2.80 \pm 0.23}. \quad (3.16)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = 0.58, \quad \bar{\beta} = 2.88, \quad \Delta\beta = 0.50. \quad (3.17)$$

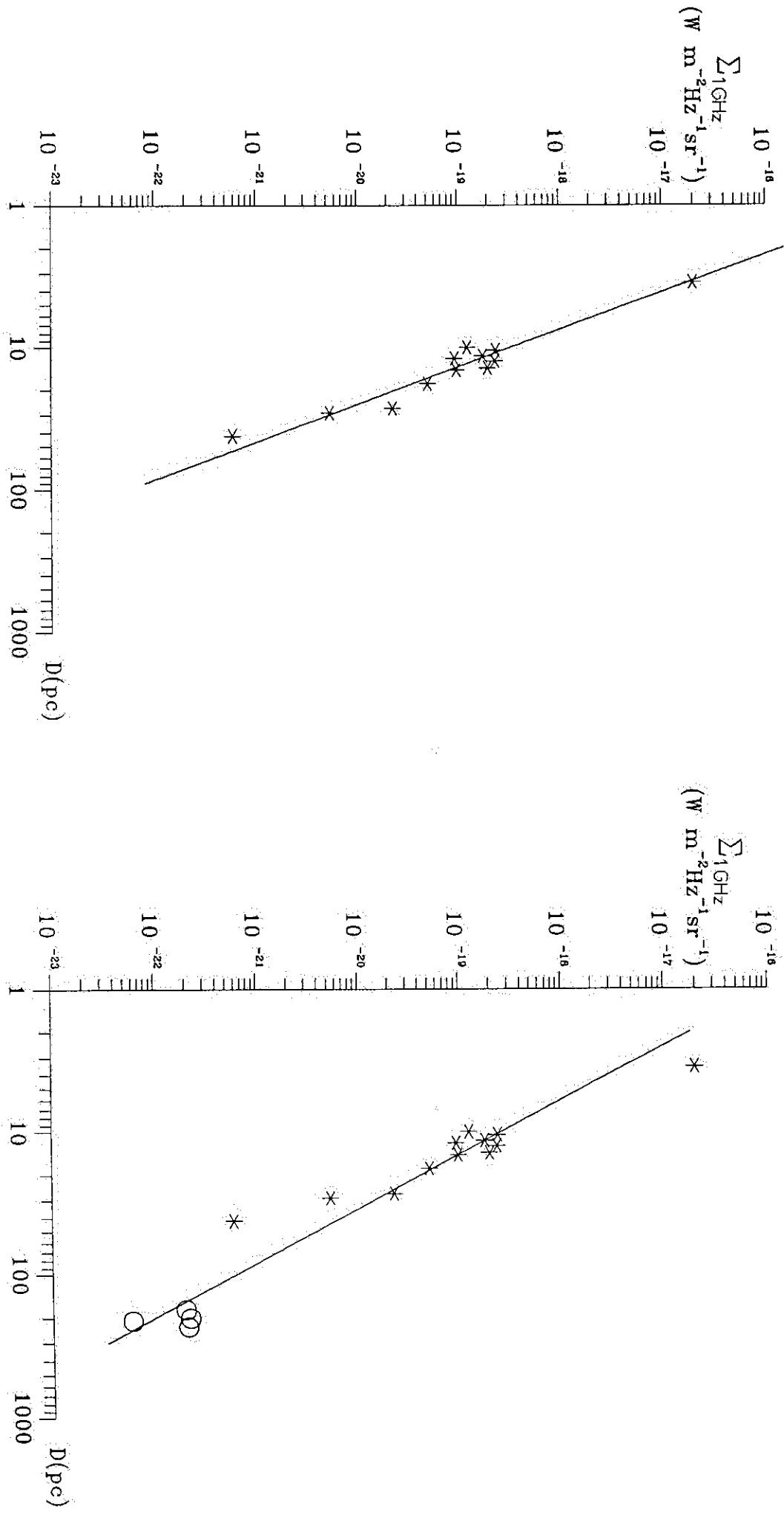
Iz prethodne tabele i odgovarajućih relacija se vidi da je promena nagiba $\Sigma - D$ relacije manja nego u dosadašnjim slučajevima. I dalje je promena veća nego što intervali grešaka za koeficijent β to dopuštaju. Zanimljivo je primetiti da dodavanjem kalibracionih petlji koeficijent slaganja raste, i iz toga je logično da greške koeficijenata opadaju. Koeficijent raste sa 84% na 90% za slučaj sa 4 glavne petlje, a greška koeficijenta β opada sa 0.42 na 0.23 za isti slučaj. Kod ostalih 5 slučajeva je slično ponašanje ova dva koeficijenta. Relacija Daunsa može blago nagovestiti SNR poreklo glavnih petlji.

3.5. Relacija Ilovajskog i Lekea (Ilovaisky & Lequeux, 1972)

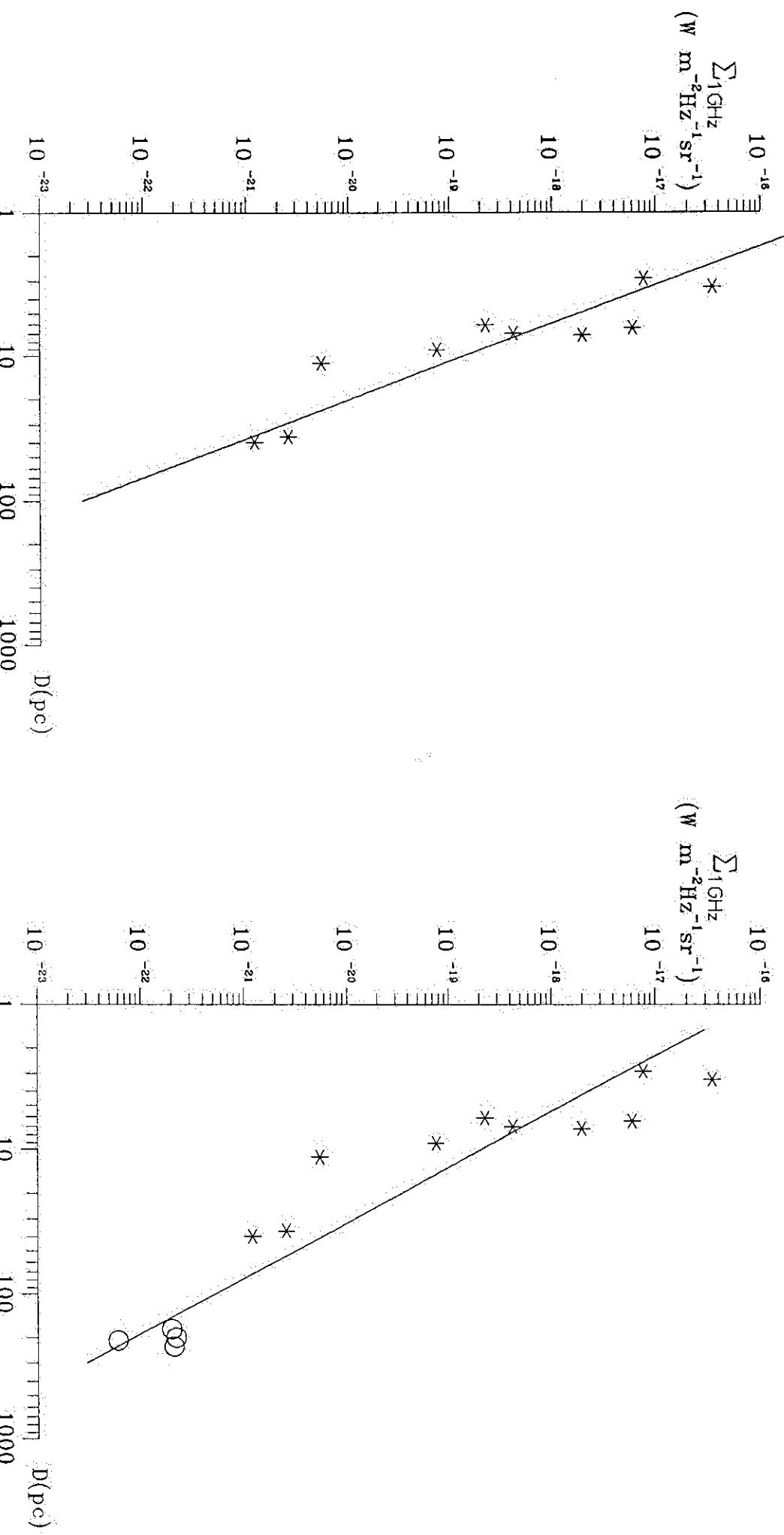
Ova relacija se odlikuje pažljivim izborom kalibratora, koji su podeljeni u 4 klase. Prvoj klasi pripadaju SNR-ovi sa najbolje određenim daljinama i ima ih 11. Drugu klasu čine kalibratori kod kojih je poznata donja i gornja granica daljina (2 ostatka). U trećoj klasi se nalaze oni SNR-ovi za koje se zna samo donja granica daljina i ima ih 7. Četvrta klasa je sa loše određenim daljinama (8 ostataka). Za izvođenje $\Sigma - D$ relacije korišćeno je 12 ostataka iz klase I i klase II. Relacija je na frekvenciji od 1 GHz. Klasi I pripadaju ostaci: Cas A, 3C391, W49B, MHR44, 3C58, Tycho SNR, 3C397, W44, Vela X, Cygnus Loop i Crab SNR (nije korišćen), a klasi II: G45.5-0.1 i G11.2-0.4.

Relacija dobijena od strane Ilovajskog i Lekea (I&L) ima oblik $\Sigma_{\text{1GHz}} \propto D^{-4.0 \pm 0.2}$. Fitovanje je vršeno metodom najmanjih kvadrata, sa dodeljivanjem odgovarajućih težina podacima (npr. ostatak Cas A je uzet sa manjom težinom).

Slika 3.6. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D (Illoaisky & Lepicoux-I&L, 1972).
 Desno - I&L zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne pčlje. Zvezdicama su označeni I&L kalibratori, a krugovima petlje.



Slika 3.7. Lewo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijamетra D (Woltjer, 1972). Desno – Voltjerova zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdanci su označeni Voltjerovi kalibratori, a kružićima petlje.



Prelazimo na testiranje koje je opisano u poglavlju 3.1. Koristeći 12 kalibratora (I&L) dobijena je $\Sigma - D$ zavisnost u obliku:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 2.09^{+2.80}_{-1.20} \times 10^{-15} D^{-3.79 \pm 0.31}, \quad (3.18)$$

sa slaganjem od 94%.

Relaciji (3.18) pridružujemo kalibracione petlje i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.6 i u tabeli 3.7. Na slici 3.6 dati su $\Sigma - D$ dijagrami samo za slučajeve koji odgovaraju relacijama (3.18) i (3.19).

Tabela 3.7. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji relaciji Ilovajskog i Lekeia iz 1972. godine.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
10	2.78 ± 0.21	90
9	2.77 ± 0.22	90
7	2.76 ± 0.19	92
6	2.74 ± 0.20	92
5	2.68 ± 0.18	94
4	2.63 ± 0.19	93

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 1.13^{+1.08}_{-0.55} \times 10^{-16} D^{-2.63 \pm 0.19}. \quad (3.19)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = 1.16, \quad \beta = 2.73, \quad \Delta\beta = 1.06. \quad (3.20)$$

Iz prethodne tabele i odgovarajućih relacija se vidi da je promena nagiba $\Sigma - D$ relacije velika. Odstupanja novodobijenih vrednosti β su daleko izvan intervala grešaka koeficijenta β iz početne relacije. Zanimljivo je primetiti da dodavanjem kalibracionih petlji koeficijent slaganja slabo opada, da bi za slučaj dodavanja 4 glavne petlje ponovo ostao gotovo isti kao u početnoj relaciji. Koeficijent je opao sa 94% na 93%. Greške koeficijenata relacije A i β su smanjene sa dodavanjem petlji.

3.6. Voltjerova relacija (Woltjer, 1972)

Pregledni članak Voltjera iz 1972. godine bavi se celokupnom problematikom vezanom za supernove ostatke. Samim tim jedan deo članka se odnosi i na $\Sigma - D$ relaciju. Voltjer dobija vrednost koeficijenta $\beta = 3.7$ iz relacije na frekvenciji od 1 GHz. Koristi 10 kalibracionih ostataka i to 8 galaktičkih koji imaju dobro određene daljine i dva iz Velikog Magelanovog oblaka. Kalibratori su: Tycho SNR, Crab SNR, Cygnus Loop, Cas A, RCW86, SN1006, RCW103, Kepler SNR, N132D (LMC), N63A (LMC).

Prelazimo na testiranje koje je opisano u poglavlju 3.1. Koristeći 10 Voltjervih kalibratora dobijena je $\Sigma - D$ zavisnost u obliku:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 7.77^{+24.03}_{-5.87} \times 10^{-16} D^{-3.74 \pm 0.61}, \quad (3.21)$$

sa slaganjem od 83%.

Relaciji (3.21) pridružujemo kalibracione petlje i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.7 i u tabeli 3.8. Na slici 3.7 dati su $\Sigma - D$ dijagrami samo za slučajeve koji odgovaraju relacijama (3.21) i (3.22).

Tabela 3.8. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji relaciji Voltjera iz 1972. godine.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
10	2.72 ± 0.24	88
9	2.71 ± 0.25	87
7	2.70 ± 0.25	89
6	2.69 ± 0.27	88
5	2.63 ± 0.26	89
4	2.60 ± 0.28	88

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 8.38^{+13.49}_{-5.17} \times 10^{-17} D^{-2.60 \pm 0.28}. \quad (3.22)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = 1.14, \quad \bar{\beta} = 2.67, \quad \Delta\beta = 1.06. \quad (3.23)$$

Iz prethodne tabele i odgovarajućih relacija se vidi da je promena nagiba $\Sigma - D$ relacije velika i da su odstupanja novodobijenih vrednosti β daleko izvan intervala određenog greškom početnog koeficijenta β . Ponovo se može zapaziti da je koeficijent slaganja povećan za svih 6 slučajeva, a samim tim su i greške za β i A smanjene i to u ovom slučaju za više od 50%. Uzrok tome je što je relativno mali broj početnih kalibratora, pa samim tim, dodavanjem približnog broja novih kalibratora možemo dobiti značajnije promene na bolje u kvalitetu fita.

3.7. Relacija Berkhujsenove (Berkhuijsen, 1973)

Relacije objavljene u radu Berkhujsenove iz 1973. godine su u sуштини na sličan način izvedene kao relacije koje se izvode u ovoj disertaciji. Berkhujsenova je dodala Petlju I i Origem petlju kalibratorima Illovajskog i Lekeia (Illovaisky & Lequeux, 1972) – 11 od 12 kalibratora jer je objekt G45.5+0.1 potvrđen kao HII region. Sličan posao je urađen u poglavljju 3.5 ove disertacije, na već objašnjen način. Berkhujsenova je dobila relaciju iz podataka kojima je dodeljivala težine u skladu sa greškama dijametara. Pošto Petlja I i Origem petlja imaju niske težine one malo utiču na početnu relaciju. Relacija Berkhujsenove ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 5.2 \times 10^{-15} D^{-4.1 \pm 0.3}. \quad (3.24)$$

Ova relacija je izuzetno bliska relaciji Ilovajskog i Lekea, ali samo zato što su dve petlje uzete sa niskim težinama. Ekstremnost dijometara petlji mora bitno da utiče na $\Sigma - D$ relaciju, a ne da se taj uticaj na bilo koji način spolja ublažuje. Inače relacija Ilovajskog i Lekea i relacija (3.24) su jedine empirijske relacije koje su radene sa podacima kojima su dodeljene odgovarajuće težine.

U istom radu je izvedena relacija sa istim kalibratorima kojima su pridružene Petlja I i Origem petlja ali s tim da svi podaci imaju iste težine (analogno postupku u ovoj disertaciji). Dobijena je relacija

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 4.5 \times 10^{-16} D^{-3.1 \pm 0.3}. \quad (3.25)$$

Očigledno je da je rezultat sličan rezultatu u poglavlju 3.5. Jednostavno, promena koeficijenta β je drastična i odatle ovo ne može biti još jedan prilog SNR poreklu radio-petlji. Berkhuisenova je izvela zaključak da je na ovaj način podržana SNR hipoteza.

3.8. Relacija Klarka i Kasvela (Clark & Caswell, 1976)

Relacija Klarka i Kasvela je verovatno najcitanija $\Sigma - D$ relacija. U neku ruku sve prethodne relacije se mogu svrstati u početne, dok sa ovom relacijom nastaje period u kome proučavanje u ovoj oblasti ulazi reklo bi se u jedan zreli period. U radu je dat katalog 120 galaktičkih SNR-ova sa izmerenim fluksevima na 408 i 5000 MHz. Određene su i $\Sigma - D$ relacije na 408 MHz: $\Sigma = 10^{-15} D^{-3}$ za $\Sigma_{408} > 3 \times 10^{-20} \text{ W m}^{-2} \text{Hz}^{-1} \text{sr}^{-1}$ i $\Sigma = 3.6 \times 10^{-5} D^{-10}$ za $\Sigma_{408} < 3 \times 10^{-20} \text{ W m}^{-2} \text{Hz}^{-1} \text{sr}^{-1}$. Na isti način, što se granične vrednosti površinskog sjaja tiče, su podeljene klase kalibratora. Prvu klasu čini 24 kalibratora sa većim površinskim sjajem: $\Sigma_{408} > 3 \times 10^{-20}$. Drugu čini 5 kalibratora za koje je $\Sigma_{408} < 3 \times 10^{-20}$. Svi kalibracioni ostaci su galaktički. Prvu klasu čine sledeći ostaci: Kes 17, MSH14-57, RCW89, Kes 24, G328.4+0.2, Kes 41, CTB37A, CTB37B, MSH17-39, Kepler SNR, Kes 67, Kes 69, 3C391, G33.6+0.1, W44, G39.2-0.3, W49B, W51, Tycho SNR, 3C58, Cas A, Crab SNR, G349.7+0.2, RCW103, dok su u drugoj klasi: Monoceros Loop, Vela SNR, RCW86, Cygnus Loop i HB3. Upotreboom 20 kalibratora klase I na 408 MHz Klark i Kasvel su dobili $\beta = 2.7$. Upotreboom istih kalibratora na 5000 MHz dobili su $\beta = 3.4$. Uporedjujući ove rezultate sa rezultatom dobijenim za ostatke iz Velikog Magelanovog oblaka odlučili su se za $\beta=3$. Ista vrednost je dobijena za Veliki Magelanov oblik (Mathewson & Clarke, 1973).

Prelazimo na testiranje koje je opisano u poglavlju 3.1. Koristeći 23 kalibratora klase I (izostavljen RCW103 SNR) dobijena je $\Sigma - D$ zavisnost $\Sigma_{408} \propto D^{-2.49 \pm 0.23}$, sa 85% slaganja. Prelaskom na 1GHz dobijamo relaciju

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 1.32^{+1.22}_{-0.64} \times 10^{-16} D^{-2.46 \pm 0.22}, \quad (3.26)$$

sa slaganjem od 85%.

Relaciji (3.26) pridružujemo kalibracione petlje i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.8 i u tabeli 3.9. Na slici 3.8 dati su $\Sigma - D$ dijagrami samo za slučajevе koji odgovaraju relacijama (3.26) i (3.27).

Tabela 3.9. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji relaciji Klarka i Kasvela iz 1976. godine za kalibratorne prve klase (u ovom radu na 1 GHz).

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
10	2.87 ± 0.17	90
9	2.84 ± 0.18	89
7	2.80 ± 0.16	92
6	2.75 ± 0.16	91
5	2.68 ± 0.13	94
4	2.62 ± 0.13	94

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 2.00^{+1.10}_{-0.71} \times 10^{-16} D^{-2.62 \pm 0.13} \quad (3.27)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = -0.16, \quad \bar{\beta} = 2.76, \quad \Delta\beta = -0.30. \quad (3.28)$$

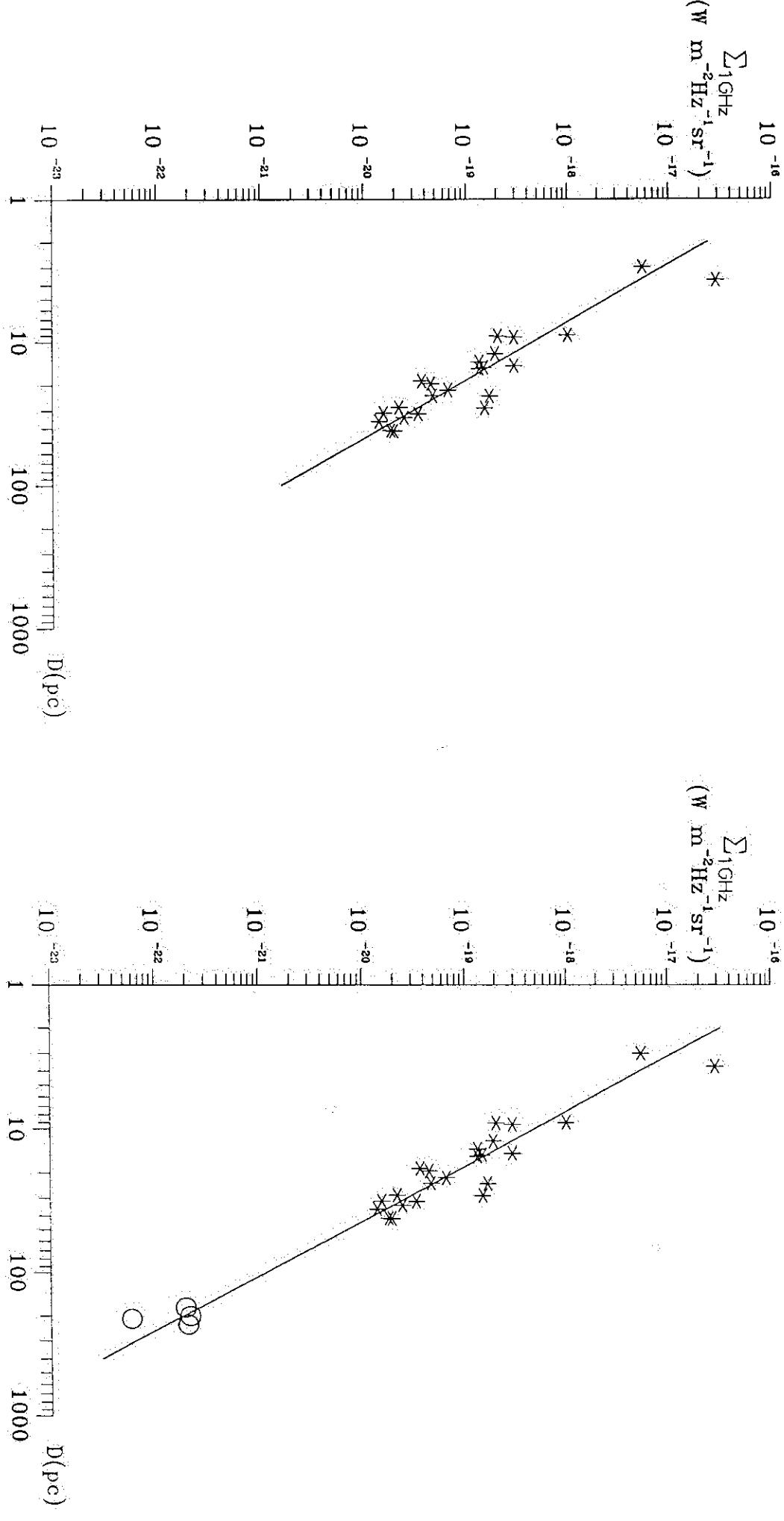
Iz prethodnog testiranja se može videti da je relacija Klarka i Kasvela prva za koju se može zaključiti da se dodavanjem glavnih petlji koeficijent β promeni i to tako što raste u odnosu na vrednost u početnoj relaciji. Međutim, odstupanje od uporedne vrednosti je u granicama greške koeficijenta β . Koeficijent slaganja raste za skoro 10%, a greške koeficijenata A i β se bitno smanjuju. Po kriterijumima uspostavljenim u ovoj disertaciji ovaj test je u korist SNR hipoteze za glavne petlje. Kao što se sa slike 3.8 vidi, Petlje II i IV su sa leve strane linije fita, što označava da za ovako definisani relacijski model ovaj definisanu relaciju ove dve petlje imaju manji dijametar nego normalan SNR koji ima na ovaj način definisani evoluciju. Negativne strane ove relacije su: nedostaju kalibracioni SNR-ovi niskih sjajeva (na $\Sigma - D$ dijagramu postoji praznina između kalibratora i kalibracionih petlji (slika 3.8)), zatim nisu odvojeni kalibratori ljkuskastog i Krab tipa – pleriona (tip ostatka čije je polje sjaja približno u unutrašnjosti i na rubu ostatka) ili kombinovani (u smislu vidljivosti ljkuske i delova u centralnoj oblasti). Dalje, ako bismo uzeli relaciju (3.27) kao početnu i oduzeli joj 4 glavne petlje promena za β bi bila izvan intervala datog greškom. U svakom slučaju ovaj test moramo prihvati, ali sa rezervom. Ipak, početni kalibratori su definisani kao visokosjajni, mi im dodajemo ekstremno niskosjajne objekte i dobijamo dobro slaganje.

Koristeći 5 kalibratora klase II dobijena je $\Sigma - D$ zavisnost $\Sigma_{408} \propto D^{-3.15 \pm 0.63}$, sa 89% slaganja. Od ovih pet kalibratora jedan je iz seta kalibracionih petlji (Monoceros Loop), te ćemo ovaj ostatak izbaciti iz skupa kalibracionih petlji. Prelaskom na 1GHz dobijamo relaciju

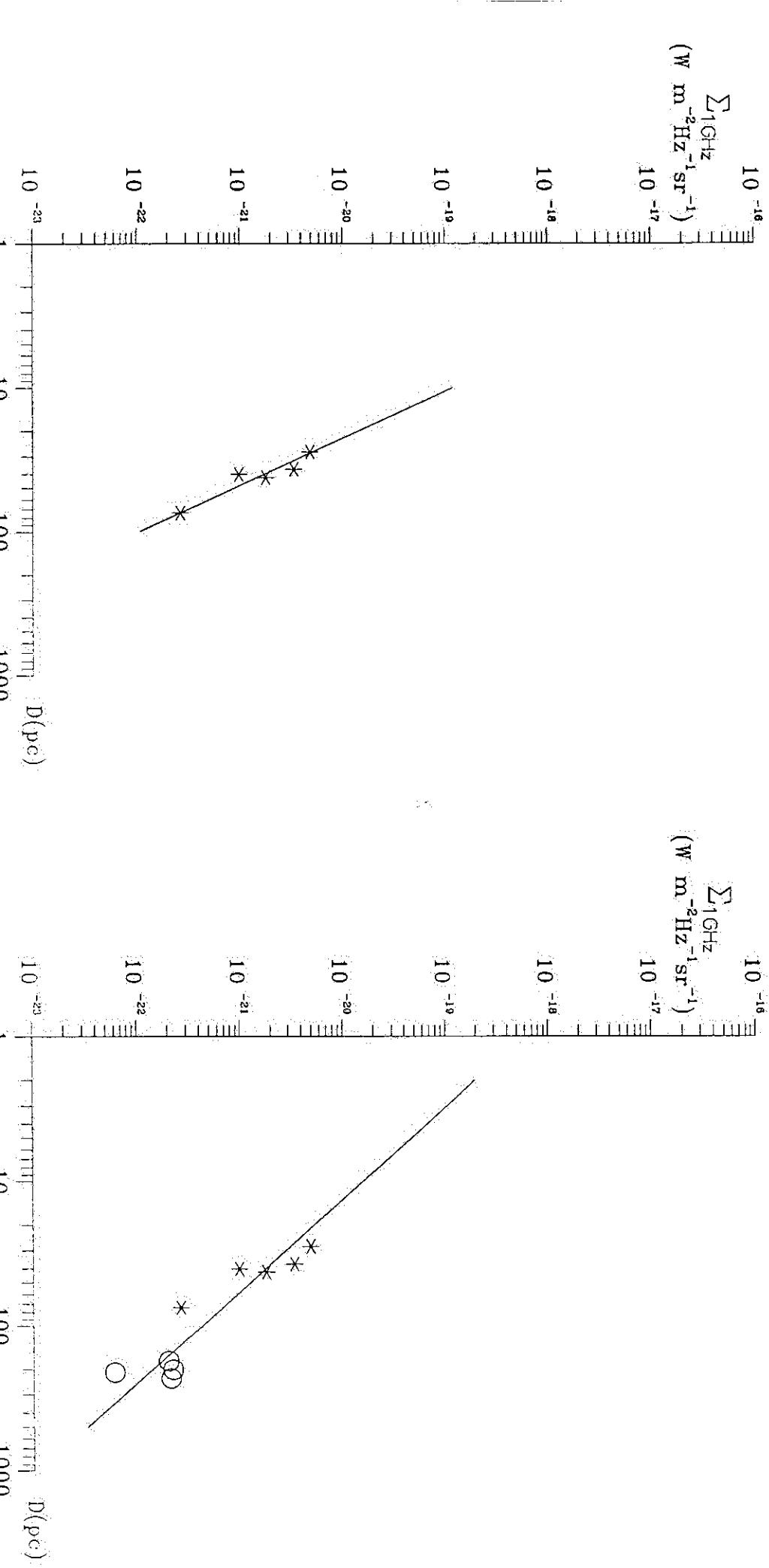
$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 1.41^{+11.96}_{-1.26} \times 10^{-16} D^{-3.07 \pm 0.60}, \quad (3.29)$$

sa slaganjem od 90%. Razlika u odnosu na $\beta = 10$ dobijeno od strane Klarka i Kasvela se može objasniti tim da oni nisu vukli pravu liniju metodom najmanjih kvadrata. Osim toga oni su vodili računa da ova linija preseče liniju zavisnosti (3.26) na vrednostima oko granične vrednosti razdvajanja klase kalibratora.

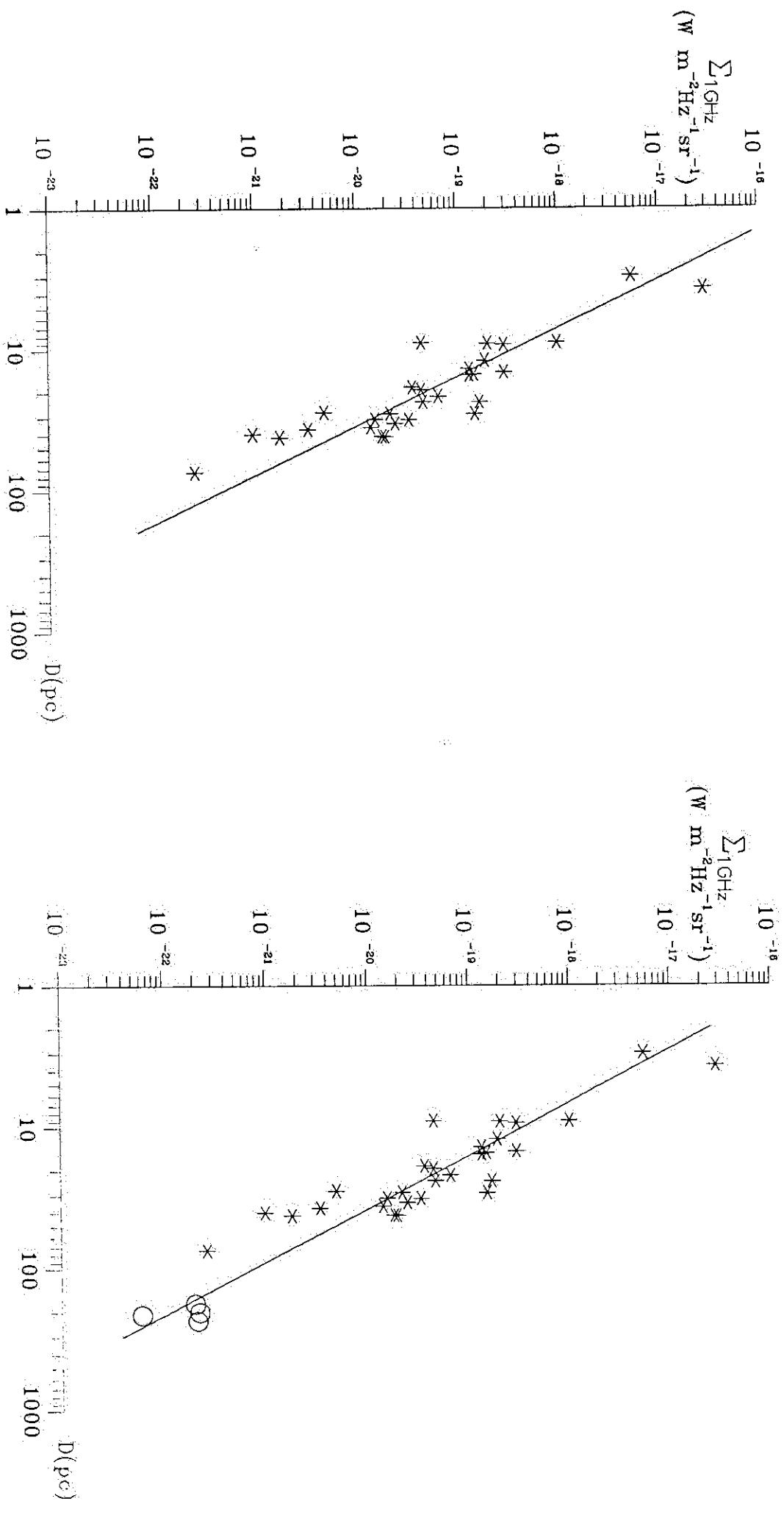
Slika 3.8. Levo - zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za 23 kalibratora klase I (Clark & Caswell-C&C, 1976). Desno - C&C zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdancima su označeni C&C kalibratori, a kružićima petlje.



Slika 3.9. Levo - zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za 5 kalibratora klase II (Clark & Caswell-C&C, 1976). Desno - C&C zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdanci su označeni C&C kalibratori, a kružićima petlje.



Slika 3.10. Isto - zavisnost površinskog sjajn Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za 29 kalibratora klase I i II (Clark & Caswell, C&C, 1976). Desno - C&C zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni C&C kalibratori, a kružićima petlje.





Relaciji (3.29) pridružujemo kalibracione petlje i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.9 i u tabeli 3.10. Na slici 3.9 dati su $\Sigma - D$ dijagrami samo za slučajeve koji odgovaraju relacijama (3.29) i (3.30).

Tabela 3.10. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji (bez Monoceros petlje) relaciji Klarka i Kasvela iz 1976. godine (prevedene na 1 GHz) za kalibratore druge klase.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
9	1.41 ± 0.31	64
8	1.40 ± 0.32	63
6	1.56 ± 0.27	78
5	1.53 ± 0.28	79
5	1.61 ± 0.26	83
4	1.58 ± 0.26	84

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 5.89_{-4.08}^{+13.32} \times 10^{-19} D^{-1.58 \pm 0.26}. \quad (3.30)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = 1.49, \quad \beta = 1.51, \quad \Delta\beta = 1.55. \quad (3.31)$$

Iz prethodne tabele i odgovarajućih relacija se vidi da je promena nagiba $\Sigma - D$ relacije velika i da su novodobijeni koeficijenti β daleko izvan intervala određenog greškom početnog koeficijenta β . Niskosajjni kalibratori zajedno sa kalibracionim petljama daju rezultate koji su daleko od dobrih. Razlog tome je mali broj niskosajnih kalibratora i veliko rasturanje podataka u donjem delu $\Sigma - D$ dijagrama (slika 3.9).

Ako spojimo svih 29 kalibratora klase I i II u jedinstven set kalibratora (ovaj slučaj Klark i Kasvel u svom članku nisu razmatrali) добићemo relaciju

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 2.95_{-1.73}^{+4.17} \times 10^{-16} D^{-2.89 \pm 0.29}, \quad (3.32)$$

sa slaganjem od 79%.

Relaciji (3.32) pridružujemo kalibracione petlje (bez Monoceros petlje) i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.10 i u tabeli 3.11. Na slici 3.10 dati su $\Sigma - D$ dijagrami samo za slučajeve koji odgovaraju relacijama (3.32) i (3.33).

Tabela 3.11. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji (bez Monoceros petlje) relaciji Klarka i Kasvela iz 1976. godine (ovde transformisane na 1 GHz) za 29 kalibratora obe klase.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
9	2.82 ± 0.19	86
8	2.80 ± 0.19	86
6	2.76 ± 0.18	87
5	2.73 ± 0.19	87
5	2.72 ± 0.18	88
4	2.68 ± 0.18	87

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{\text{1GHz}} = 1.66^{+1.46}_{-0.78} \times 10^{-16} D^{-2.68 \pm 0.18}. \quad (3.33)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = 0.21, \quad \bar{\beta} = 2.75, \quad \Delta\beta = 0.14. \quad (3.34)$$

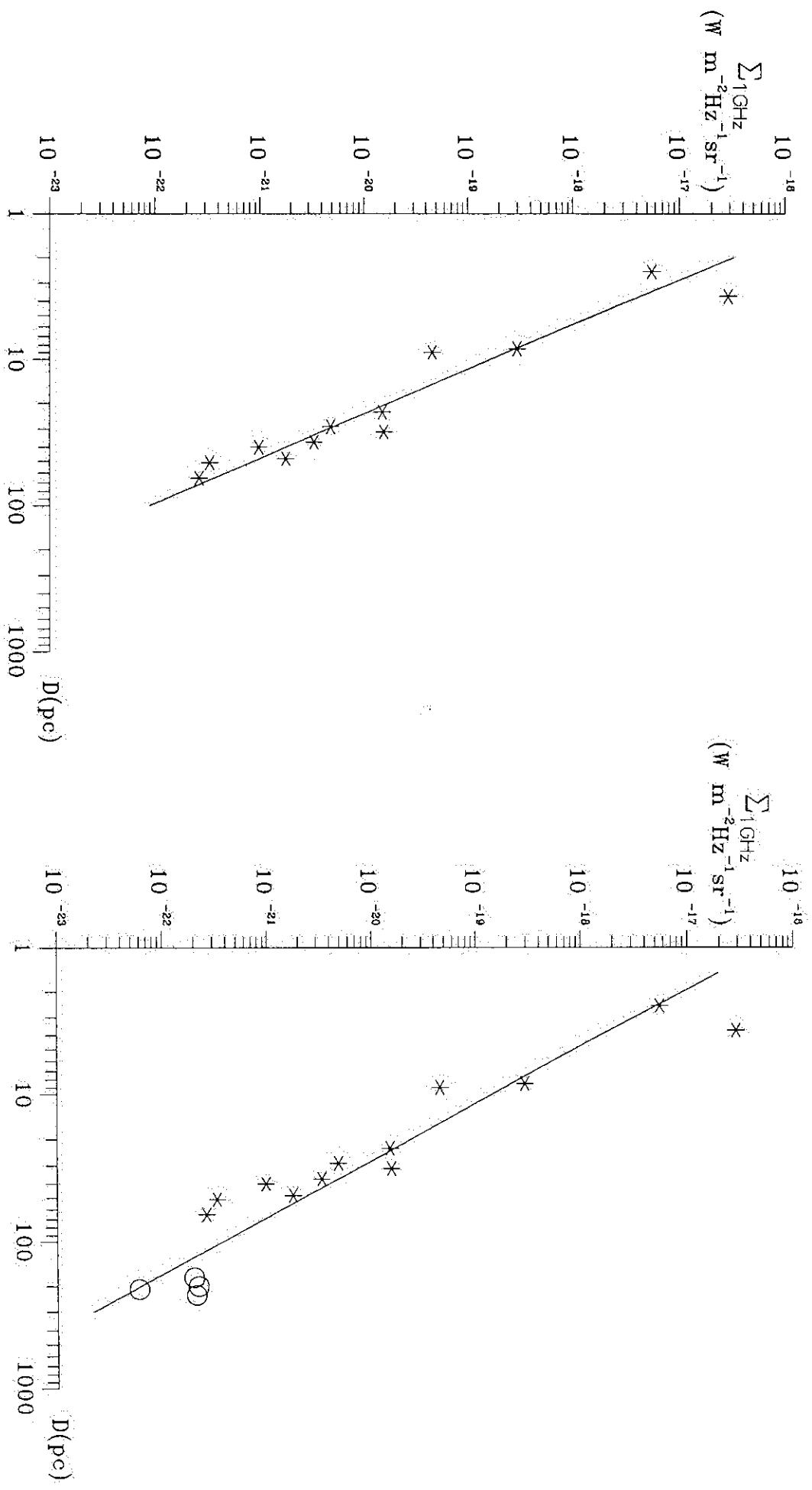
Ovakva korelacija je slična korelaciji za kalibratore tipa I s tim što ne postoji prazna oblast $\Sigma - D$ dijagrama, jer su u ovu relaciju uvršteni i niskosajjni početni kalibratori. Greške su povećane u odnosu na prvi slučaj i koeficijent slaganja je niži ali petlje tačno dopunjaju deo oblasti na $\Sigma - D$ dijagramu koji nedostaje. Dobija se uravnoteženiji $\Sigma - D$ dijagram. Istaknimo još jednom vrlo dobru vrednost za parametar $\Delta\beta = 0.14$. Dodavanje 9 kalibracionih petlji menja nagib za 0.07, i sa daljim variranjem kalibracionih petlji promena postepeno raste da bi dostigla maksimum prilikom dodavanja 4 glavne petlje (što je uglavnom slučaj u gotovo svim testovima i ovakav efekt treba očekivati). Petlja IV je za sve slučajeve osim prvog (gde je na liniji fita) levo od linije fita. Ostaje nedostatak kao u prvom slučaju da su pomešani svi tipovi SNR-ova u setu početnih kalibratora. Takođe, ako bismo uzeli relaciju (3.33) kao početnu i oduzeli joj 4 glavne petlje promena koeficijenta β bi bila izvan intervala određenog greškom. I pored ovih nedostataka rezultati ovog testa navode na SNR poreklo radio-petlji.

Po mišljenju autora ove disertacije, globalno gledano, relacija Klarka i Kasvela je za sada prva preko koje možemo nagovestiti SNR poreklo radio-petlji.

3.9. Sabadinova relacija (Sabbadin, 1977)

U članku Sabadina iz 1977. godine osim što je odredena još jedna u nizu $\Sigma - D$ relacija, izvršena je komparativna statistička analiza i zaključeno je da su dijametri izvedeni od strane Illovačkog i Lekea iz 1972. godine najprihvatljiviji, dok u katalozima Milna (1970), Daunsa (1971) i Klarka i Kasvela (1976) postoji sistematska greška u izračunatim dijametrima. U navedenom radu odredena je $\Sigma - D$ relacija na 408 MHz kao $\Sigma \propto D^{-3}$. U spisku kalibratora se nalaze sledeći ostaci: HB3, S147, Crab SNR, IC443, Monoceros Loop, Vela SNR, RCW86, RCW89, RCW103, Kepler SNR, Cygnus Loop, Cas A. Od ovih 12 ostataka, S147 i Monoceros Loop su ujedno i kalibracione petlje.

Slika 3.11. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D (Sabadin, 1977). Dесно – Sabadinova zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni Sabadinovi kalibratori, a kružićima petlje.





Prelazimo na testiranje koje je opisano u poglavlju 3.1. Koristeći 12 kalibratora dobijena je $\Sigma - D$ zavisnost na 408 MHz: $\Sigma \propto D^{-3.29 \pm 0.31}$ sa 92% slaganja. Svodenjem na 1 GHz dobijamo

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 3.14_{-1.90}^{+4.83} \times 10^{-16} D^{-3.27 \pm 0.30}, \quad (3.35)$$

sa slaganjem od 92%.

Relaciji (3.35) pridružujemo kalibracione petlje (bez S147 i Monoceros petlje) i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.11 i u tabeli 3.12. Na slici 3.11 dati su $\Sigma - D$ dijagrami samo za slučajevе koji odgovaraju relacijama (3.35) i (3.36).

Tabela 3.12. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji (bez S147 i Monoceros petlje) Sabadinovoj relaciji iz 1977. godine, posle svodenja na 1 GHz.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
8	2.60 ± 0.23	88
7	2.59 ± 0.24	88
6	2.62 ± 0.23	89
5	2.61 ± 0.24	89
5	2.60 ± 0.23	90
4	2.58 ± 0.24	89

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 5.52_{-3.30}^{+8.17} \times 10^{-17} D^{-2.58 \pm 0.24}, \quad (3.36)$$

pa

$$\Delta\beta_4 = 0.69, \quad \bar{\beta} = 2.60, \quad \Delta\beta = 0.67. \quad (3.37)$$

Iz prethodne tabele i odgovarajućih relacija se vidi da je promena nagiba $\Sigma - D$ relacije velika i da su novodobijeni koeficijenti β izvan intervala odredenog greškom početnog koeficijenta β . Koeficijent slaganja je opao, a greska koeficijenta β se smanjila.

3.10. Milnova relacija (Milne, 1979)

Kako sam autor navodi, relacija je izvedena u suštini sa podacima koje su koristili Klark i Kasvel (Clark & Caswell, 1976). Dobijena je strmija zavisnost zbog toga što su uzeti u obzir i kalibratori niskog sjaja. To je zavisnost analogna zavisnosti (3.32). Miln je dobio vrednost koeficijenta $\beta=3.8$, upotrebljavajući 22 kalibratora. To su: Kepler SNR, Kes 67, Kes 69, 3C391, W44, W498, W51 (deo), Cygnus Loop, Cas A, HB3, Crab SNR, IC443, Monoceros Loop, Vela XYZ, Kes 17, RCW86, RCW89, SN1006, RCW103, CTB37A, CTB37B, G349.7+0.2. Relacija je odredena na frekvenciji od 1 GHz.

Osim ove, izvedena je i $\Sigma - D$ relacija u kojoj je obradena zavisnost i od udaljenosti od galaktičke ravni. Pošto su kalibracione petlje objekti za koje se može smatrati da im je udaljenje od galaktičke ravni $z \approx 0$ (Berkhuijsen, 1973; Urošević, 1996) ovaj efekt

nećemo razmatrati. Nešto opširnija diskusija o zavisnosti površinskog sjaja od udaljenja od galaktičke ravni je u narednom poglavlju.

Prelazimo na testiranje koje je opisano u poglavlju 3.1. Koristeći 22 kalibratora dobijena je $\Sigma - D$ zavisnost

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 2.27_{-1.59}^{+5.33} \times 10^{-16} D^{-2.89 \pm 0.39}, \quad (3.38)$$

sa slaganjem od 73%.

Relaciji (3.38) pridružujemo kalibracione petlje (bez Monoceros petlje) i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.12 i u tabeli 3.13. Na slici 3.12 dati su $\Sigma - D$ dijagrami samo za slučajevé koji odgovaraju relacijama (3.38) i (3.39).

Tabela 3.13. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji (bez Monoceros petlje) Milnovoj relaciji iz 1979. godine.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
9	2.73 ± 0.23	83
8	2.72 ± 0.24	82
6	2.69 ± 0.24	83
5	2.66 ± 0.25	82
5	2.65 ± 0.24	83
4	2.62 ± 0.25	82

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 1.09_{-0.63}^{+1.50} \times 10^{-16} D^{-2.62 \pm 0.25}. \quad (3.39)$$

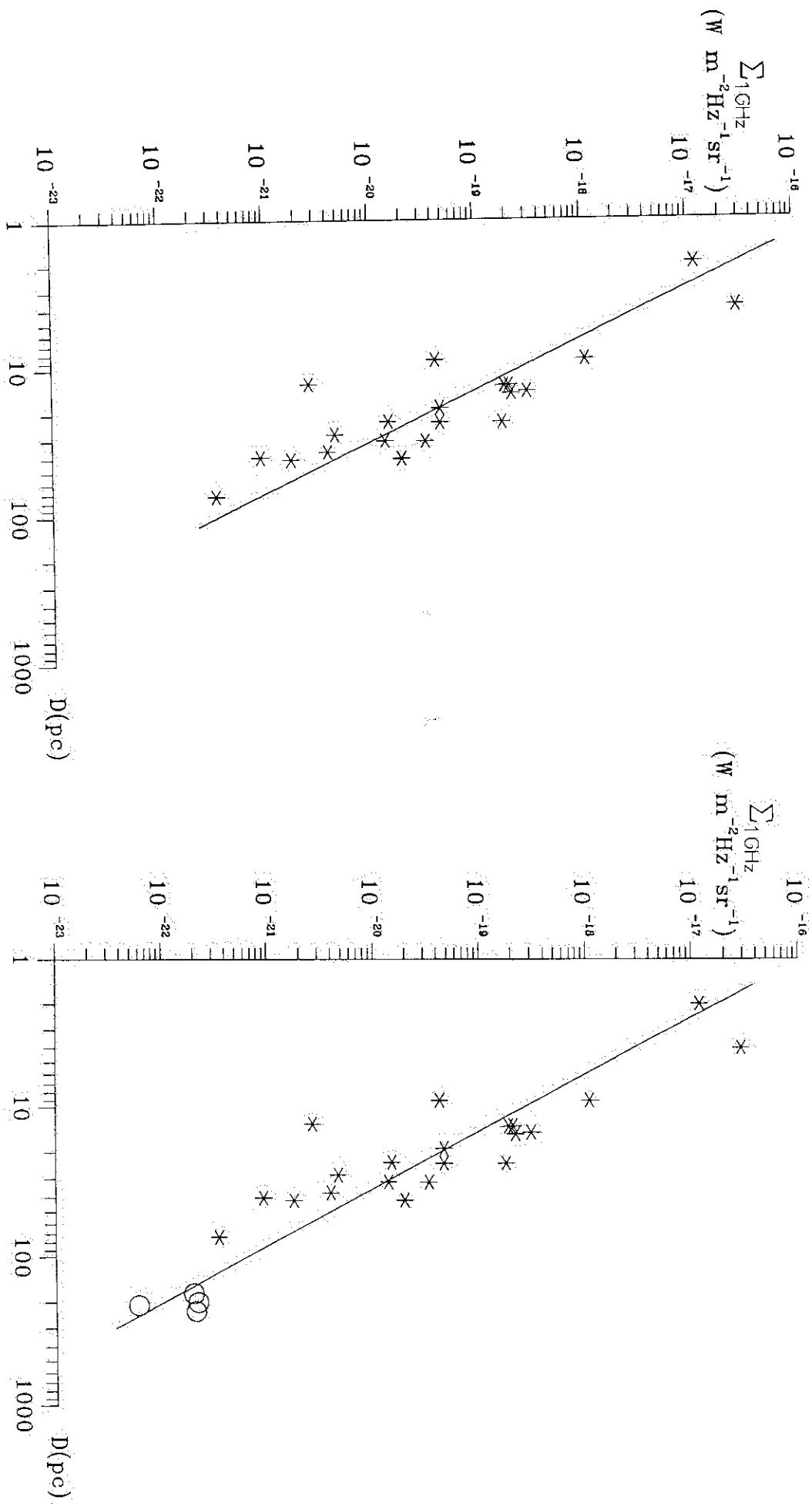
Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = 0.27, \quad \bar{\beta} = 2.68, \quad \Delta\beta = 0.21. \quad (3.40)$$

Diskusija vezana za ovu relaciju je ista (sto je i očekivano) kao i diskusija za treći slučaj poglavlja 3.8. Ova relacija predstavlja još jedan prilog SNR poreklu glavnih petlji.

Na ovom mestu se mora naglasiti to da je dodavanjem niskosjajnih kalibratora Miln dobio veliko povećanje nagiba (≈ 1.1) u odnosu na vrednost dobijenu od strane Klarka i Kasvela. Isti test je urađen u poglavlju 3.8 i povećan je nagib za ≈ 0.4 . Sa sličnim podacima i koristeći metod najmanjih kvadrata ovakva razlika ne može da se objasni. Ako na ovom mestu uporedimo koeficijente β relacija (3.32) i (3.38) videćemo da su jednaki. Veću grešku ima koeficijent relacije (3.38), zbog manjeg broja podataka. Odavde sledi da su u ovoj disertaciji rezultati međusobno konzistentni i da je veliko pitanje da li je Miln svoju relaciju izveo metodom najmanjih kvadrata, mada je napisao da jeste. Neki podaci na Milnovom $\Sigma - D$ dijagramu ne odgovaraju vrednostima iz kataloga i grafik je prilično neprecizan. Odatle autor ove disertacije sumnja u preciznost Milnove vrednosti i nema objašnjenje uzroka ovako visoke vrednosti koeficijenta β dobijenog od strane Milna, a uzimajući u obzir da je linija fita dobijena metodom najmanjih kvadrata. Eventualno,

Slika 3.12. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijometra D (Milne, 1979). Desno – Milnova zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni Milnovi kalibratori, a kružićima petlje.





dodeljivanje statističkih težina podacima bi moglo dovesti do povećanja nagiba (mada u ovom članku nije navedeno da su podacima dodeljivane statističke težine).

3.11. Relacija Kasvela i Lerča (Caswell & Lerche, 1979)

Ova relacija je u suštini proširenje relacije Klarka i Kasvela (Clark & Caswell, 1976) uvedenjem zavisnosti površinskog sjaja od normalnog rastojanja z (u parsecima) od galaktičke ravni, jer evolucija SNR-a mora da zavisi od gustine meduzvezdane materije koja se sa udaljenjem od galaktičke ravni smanjuje. Autori ovog rada su relaciju Klarka i Kasvela razmatrali kao prvu aproksimaciju koju su modifikovali jednim članom koji zavisi od parametra z . Pored toga oni razmatraju kalibratore Klarka i Kasvela kao SNR-ove za koje se bez velike greške može uzeti da je $z \approx 0$. Pošto i kalibracione petlje imaju slična udaljenja od galaktičke ravni kao i prethodni kalibratori, u ovoj disertaciji se neće testirati ovakav slučaj. Inače relacija Kasvela i Lerča ima oblik:

$$\Sigma = 10^{-15} D^{-3} \exp\left(-\frac{|z|}{175}\right). \quad (3.41)$$

Miln (Milne, 1979) je izveo relaciju koja u sebi nosi zavisnost od z (već pomenuto u prethodnom poglavlju). Metod određivanja parametra z_0 koji u relaciji (3.41) ima vrednost 175 je bio drugačiji od metoda upotrebljenog od strane Kasvela i Lerča. Kalibratori u ova rada su zasnovani na relaciji Klarka i Kasvela. Milnova relacija ima oblik:

$$\Sigma = 2.88 \times 10^{-14} D^{-4} \exp\left(-\frac{|z|}{54}\right). \quad (3.42)$$

Ovo su jedine relacije ovog tipa izvedene do sada. Većina autora koji su se kasnije bavili $\Sigma - D$ relacijom su mišljenja da se efekt zavisnosti površinskog sjaja od udaljenja od galaktičke ravni ne može pokazati sa dosadašnjim posmatračkim materijalom.

Vrlo je važno naglasiti da su Kasvel i Lerč obratili pažnju u svom radu na radio-petlje. Naveli su da se glavne petlje mogu interpretirati kao tipični SNR-ovi, osvrtom na daljine do petlji izvedenih iz veze (3.41). Suština ponovo leži u relaciji Klarka i Kasvela (poglavlje 3.8).

3.12. Relacije Gebela sa saradnicima (Göbel et al., 1981)

Ovaj rad se odnosi na relacije koje su konstruisane u zavisnosti od spektralnih indeksa kalibratora. Kalibratori su podeljeni u 3 grupe. Prvoj grupi pripadaju ostaci sa $\alpha \leq 0.37$, drugoj sa spektralnim indeksom $0.37 < \alpha \leq 0.55$ a trećoj sa $\alpha > 0.55$. Podaci vezani za kalibratore su nehomogeni, to jest uzeti su iz kataloga raznih autora. Spektralni indeksi takođe. U članku Gebela sa saradnicima je nagovušteno da koeficijent β zavisi od spektralnog indeksa α . Osnovna mana ovakvog zaključka je što je izведен iz malog uzorka nehomogenih kalibratora. Koeficijenti β su određeni na frekvenciji od 408 MHz. U spisku kalibratora su date vrednosti površinskog sjaja na 1 GHz i na 5 GHz. Koeficijent β ima sledeće vrednosti: za prvu grupu kalibratora $\beta=2.43$, za drugu $\beta=3.36$ i za treću $\beta=3.72$. U članku nije naglašeno kojom metodom su izračunati koeficijenti $\Sigma - D$ relacija. Prvu grupu kalibratora čine sledećih 9 SNR-ova: W44, W51, 3C58, Crab SNR, Vela SNR, MSH14–57, MSH15–52, MSH15–57, CTB37B. U drugoj grupi je 12 kalibratora i to

su: RCW86, Kes 67, Kes 69, 3C391, 3C396, G114.3+0.3, Kes 17, Kes 41, CTB37A, G349.7+0.2, G357.7-0.1, W49B. Treću grupu čini sledećih 9 ostataka: Kepler SNR, Kes 79, Cas A, G116.5+1.1, CTB1, Tycho SNR, HB3, Monoceros Loop i Kes 24.

Prelazimo na testiranje koje je opisano u poglavljiju 3.1. Koristeći 9 kalibratora koji pripadaju I grupi dobijena je zavisnost $\Sigma_{408} \propto D^{-2.43 \pm 0.31}$, sa 90% slaganja. Relacija na 1 GHz ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 1.34^{+2.48}_{-0.87} \times 10^{-16} D^{-2.55 \pm 0.34}, \quad (3.43)$$

sa slaganjem od 89%.

Relaciji (3.43) pridružujemo kalibracione petlje i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.13 i u tabeli 3.14. Na slici 3.13 dati su $\Sigma - D$ dijagrami samo za slučajevе koji odgovaraju relacijama (3.43) i (3.44).

Tabela 3.14. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji relaciji Gebela sa saradnicima iz 1981. godine za kalibratore koji pripadaju I grupi.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
10	2.75 ± 0.25	87
9	2.73 ± 0.26	87
7	2.73 ± 0.22	92
6	2.69 ± 0.23	91
5	2.65 ± 0.17	95
4	2.59 ± 0.16	96

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

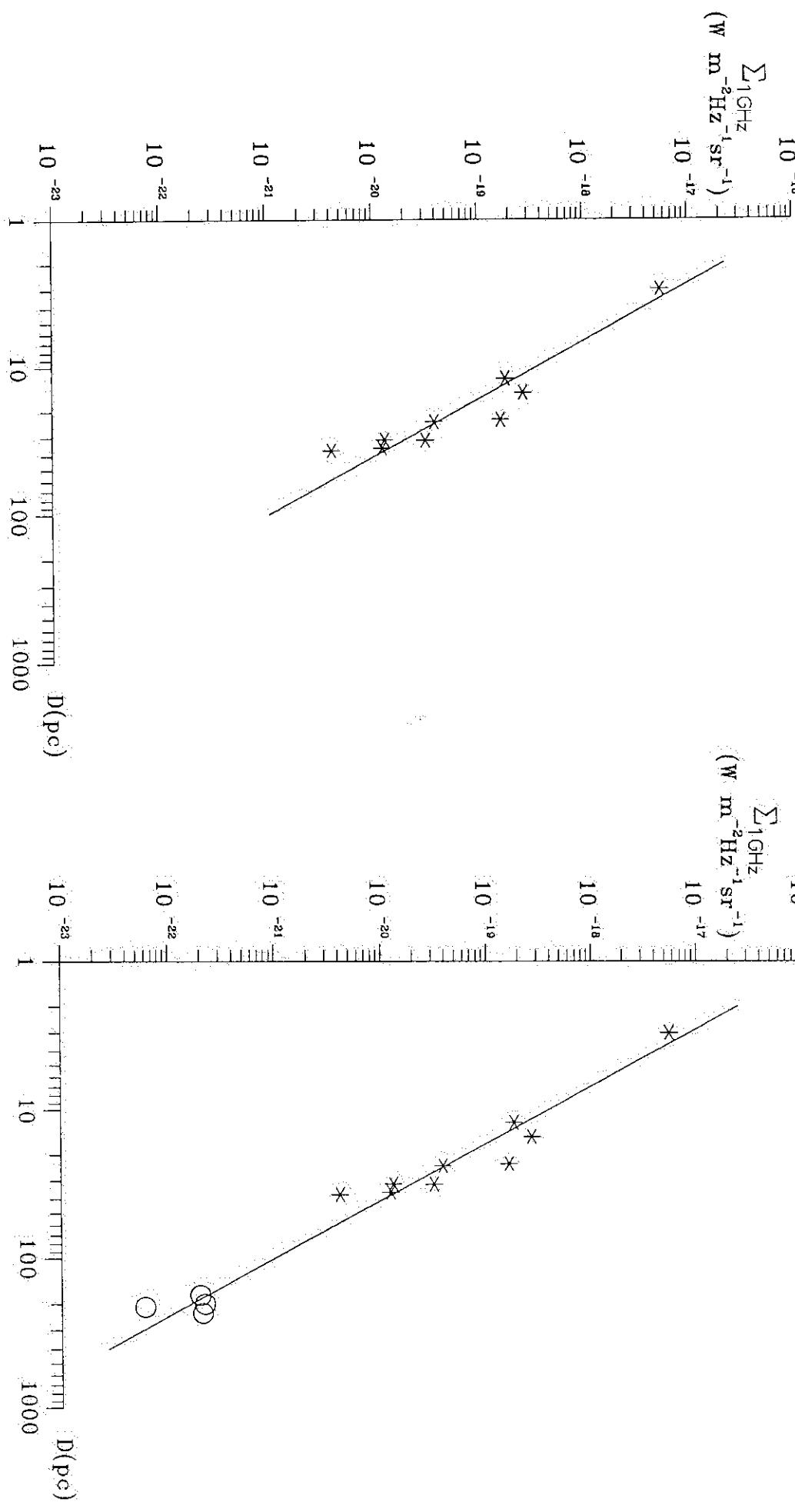
$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 1.50^{+1.25}_{-0.68} \times 10^{-16} D^{-2.59 \pm 0.16}. \quad (3.44)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = -0.04, \quad \bar{\beta} = 2.69, \quad \Delta\beta = -0.14. \quad (3.45)$$

Iz ovog testa se dobija zanemarljiva promena koeficijenta β i Petlje II i IV su levo od linije fita, koeficijent slaganja raste. Samo primenom ovog kriterijuma ovakvi rezultati bi za sada predstavljali najbolji prilog SNR hipotezi radio-petlji. Ali ova relacija poseduje nekoliko nedostataka. Prvi nedostatak je što je ovo slučaj blagih spektralnih indeksa $\alpha \leq 0.37$, a glavne petlje imaju spektralni indeks oko 0.7. Po ovoj karakteristici trebalo bi da se najbolje slažu sa kalibratorima iz treće grupe. Drugi nedostatak je što je promena $\Delta\beta$ veća (po modulu) od promene $\Delta\beta_4$ što nije prirodan put povećanja promene sa približavanjem slučaju testiranja sa 4 glavne kalibracione petlje. Treći nedostatak je taj što je zbog nehomogenosti podataka vezanih za neke kalibratore sjaj na 1000 MHz bitno veći nego na 408 MHz (npr. CTB37B za spektralni indeks $\alpha = 0.21$), što je sasvim dovoljno da utiče na β u setu od 9 kalibratora. Sve u svemu ova relacija ne bi mogla da bude od suštinske važnosti za pokazivanje SNR porekla radio-petlji uprkos tako visokom stepenu slaganja

Slika 3.13. Levo - zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za 9 kalibratora grupe I (Gobel et al.-G81, 1981). Desno - G81 zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni G81 kalibratori, a kružićima petlje.





koeficijenata, ali u svakom slučaju ponovo imamo jedan jak nagoveštaj SNR porekla radio-petlji.

Koristeći 12 kalibratora II grupe dobijena je $\Sigma - D$ zavisnost $\Sigma_{408} \propto D^{-3.37 \pm 0.59}$, sa 76% slaganja. Na frekvenciji od 1GHz imamo

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 1.62^{+11.25}_{-1.41} \times 10^{-15} D^{-3.39 \pm 0.65}, \quad (3.46)$$

sa slaganjem od 73%.

Relaciji (3.46) pridružujemo kalibracione petlje i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.14 i u tabeli 3.15. Na slici 3.14 dati su $\Sigma - D$ dijagrami samo za slučajeve koji odgovaraju relacijama (3.46) i (3.47).

Tabela 3.15. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji relaciji Gebela sa saradnicima iz 1981. godine za kalibratori koji pripadaju II grupi.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
10	2.90 ± 0.30	82
9	2.87 ± 0.31	82
7	2.88 ± 0.29	85
6	2.84 ± 0.30	84
5	2.80 ± 0.27	88
4	2.74 ± 0.28	87

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 2.36^{+4.60}_{-1.56} \times 10^{-16} D^{-2.74 \pm 0.28}. \quad (3.47)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = 0.65, \quad \bar{\beta} = 2.84, \quad \Delta\beta = 0.55. \quad (3.48)$$

Iz prethodne tabele i odgovarajućih relacija se vidi da je promena nagiba $\Sigma - D$ relacije velika i da je koeficijent β dobijen pridruživanjem 4 glavne petlje, tačno na donjoj granici intervala odredenog greškom početnog koeficijenta β . Kada bismo smatrali relaciju (3.47) za početnu i oduzeli joj 4 glavne petlje dobili bismo promenu koja bi bila izvan intervala zadatog greškom u početnoj relaciji. Koeficijent slaganja se kontinuirano poboljšava i dospeva sa 73% na 88% (za slučaj sa 5 kal. petlji). Samim tim se smanjuju i greske koeficijenata fita. Uz slične nedostatke koji su navedeni za slučaj prve grupe kalibratora, možemo zaključiti da imamo još jedan nagoveštaj SNR porekla radio-petlji.

Koristeći 9 kalibratora III grupe dobijena je zavisnost $\Sigma_{408} \propto D^{-3.87 \pm 0.38}$, sa 94% slaganja. Na frekvenciji od 1GHz imamo

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 2.66^{+5.71}_{-1.82} \times 10^{-15} D^{-3.82 \pm 0.35}, \quad (3.49)$$

sa slaganjem od 95%.

Relaciji (3.49) pridružujemo kalibracione petlje (bez Monoceros petlje) i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.15 i u tabeli 3.16. Na slici 3.15 dati su $\Sigma - D$ dijagrami samo za slučajeve koji odgovaraju relacijama (3.49) i (3.50).

Tabela 3.16. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji (bez Monoceros petlje) relaciji Gebela sa saradnicima iz 1981. godine za kalibratore koji pripadaju III grupi.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
9	2.76 ± 0.30	84
8	2.75 ± 0.31	84
6	2.78 ± 0.29	87
5	2.77 ± 0.31	87
5	2.77 ± 0.29	88
4	2.75 ± 0.31	88

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{\text{1GHz}} = 1.34^{+3.27}_{-0.95} \times 10^{-16} D^{-2.75 \pm 0.31}, \quad (3.50)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = 1.07, \quad \beta = 2.76, \quad \Delta\beta = 1.06. \quad (3.51)$$

Iz prethodne tabele i odgovarajućih relacija se vidi da je promena nagiba $\Sigma - D$ relacije velika i da su novodobijeni koeficijenti β daleko izvan granica intervala određenog greškom početnog koeficijenta β . Iako glavne petlje sa svojim spektralnim indeksima spadaju u ovu grupu kalibratora, iz prethodnog testa ne možemo izvući zaključak o SNR poreklu radio-petlji.

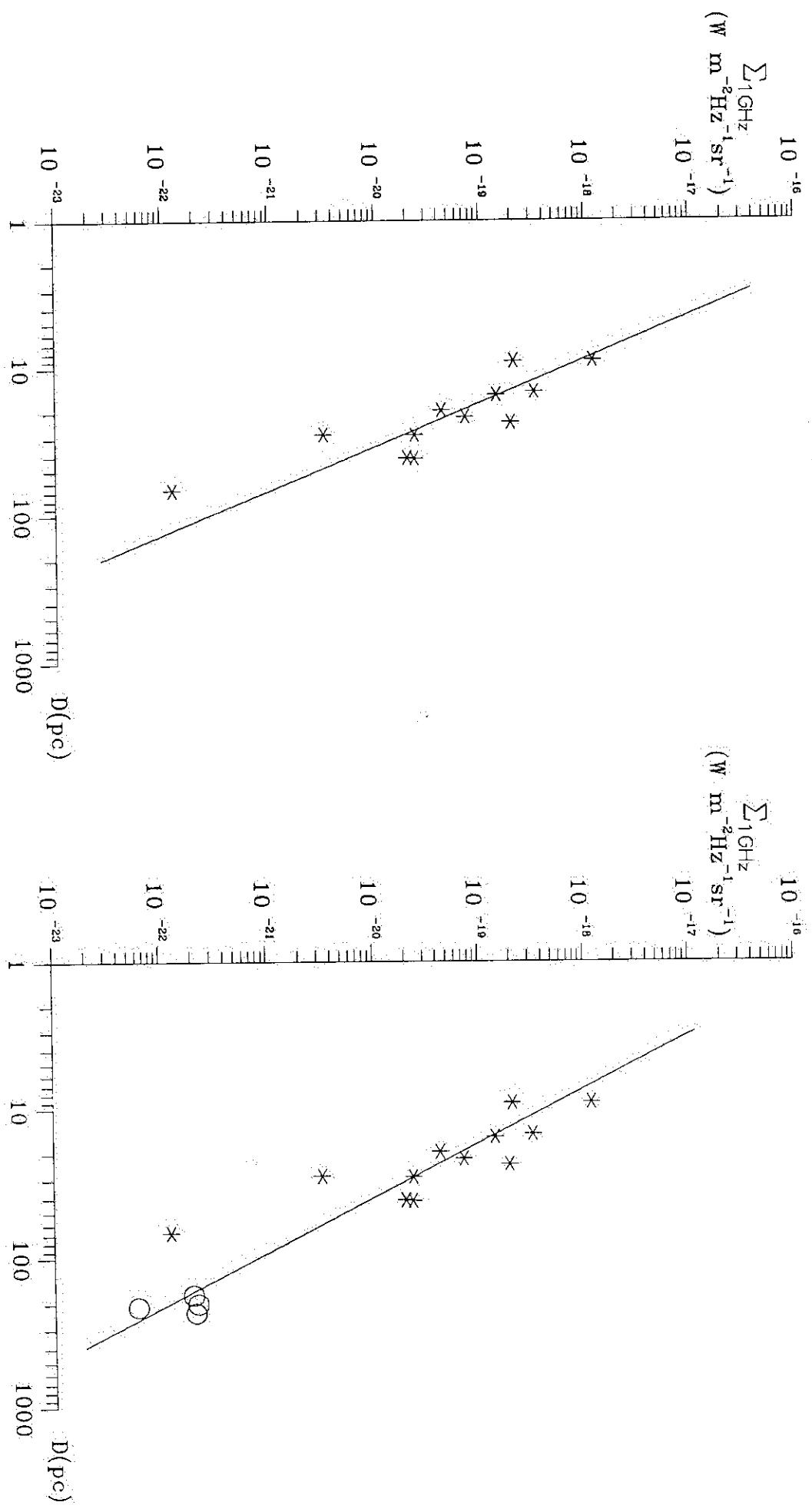
Ako spojimo svih 30 kalibratora u jedinstven set (ovaj slučaj Gebel sa saradnicima nije razmatrao) dobićemo relaciju:

$$\Sigma_{\text{1GHz}} = 1.14^{+1.67}_{-0.68} \times 10^{-15} D^{-3.36 \pm 0.28}, \quad (3.52)$$

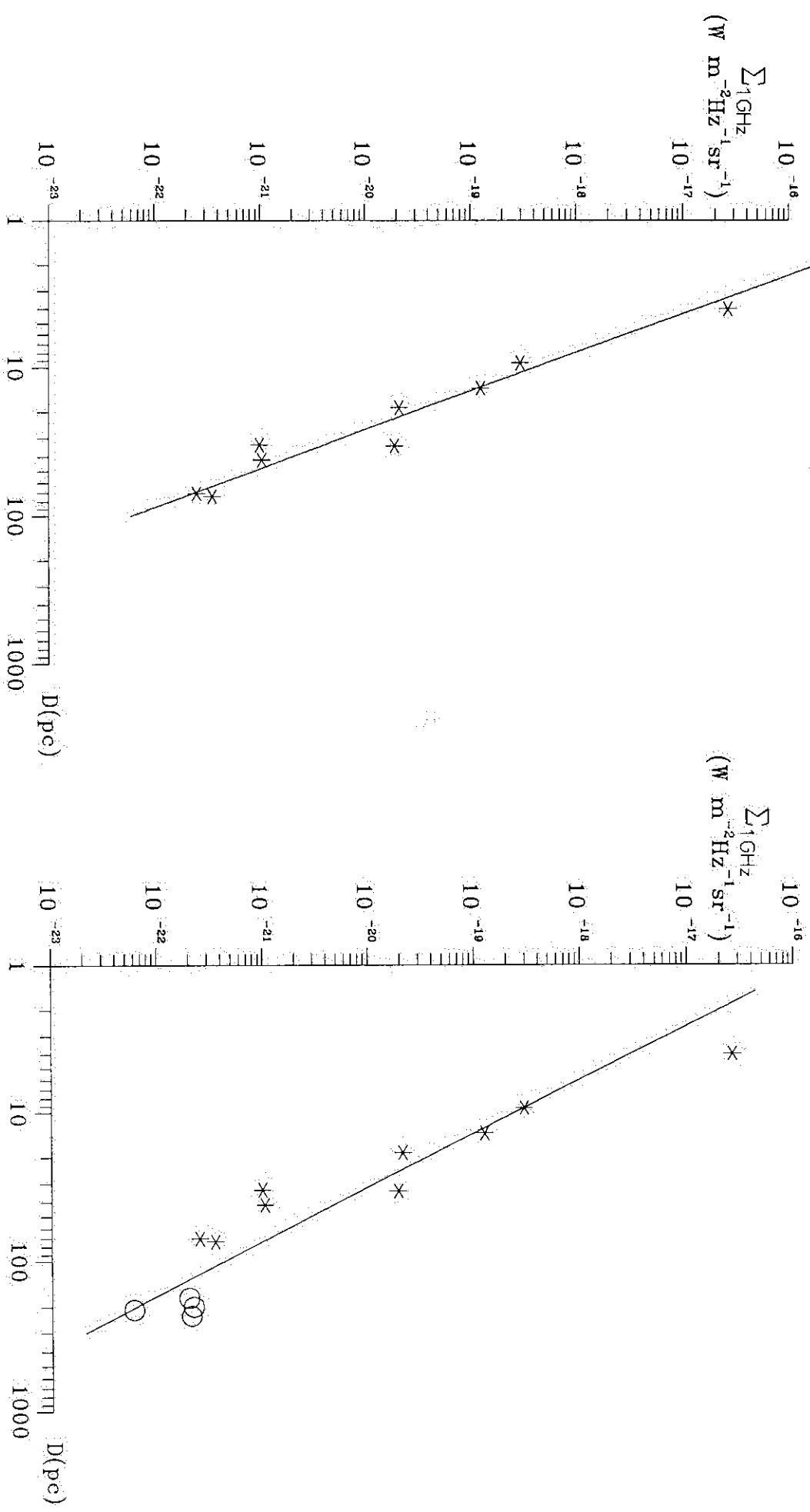
sa slaganjem od 83%.

Relaciji (3.52) pridružujemo kalibracione petlje (bez Monoceros petlje) i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.16 i u tabeli 3.17. Na slici 3.16 dati su $\Sigma - D$ dijagrami samo za slučajeve koji odgovaraju relacijama (3.52) i (3.53).

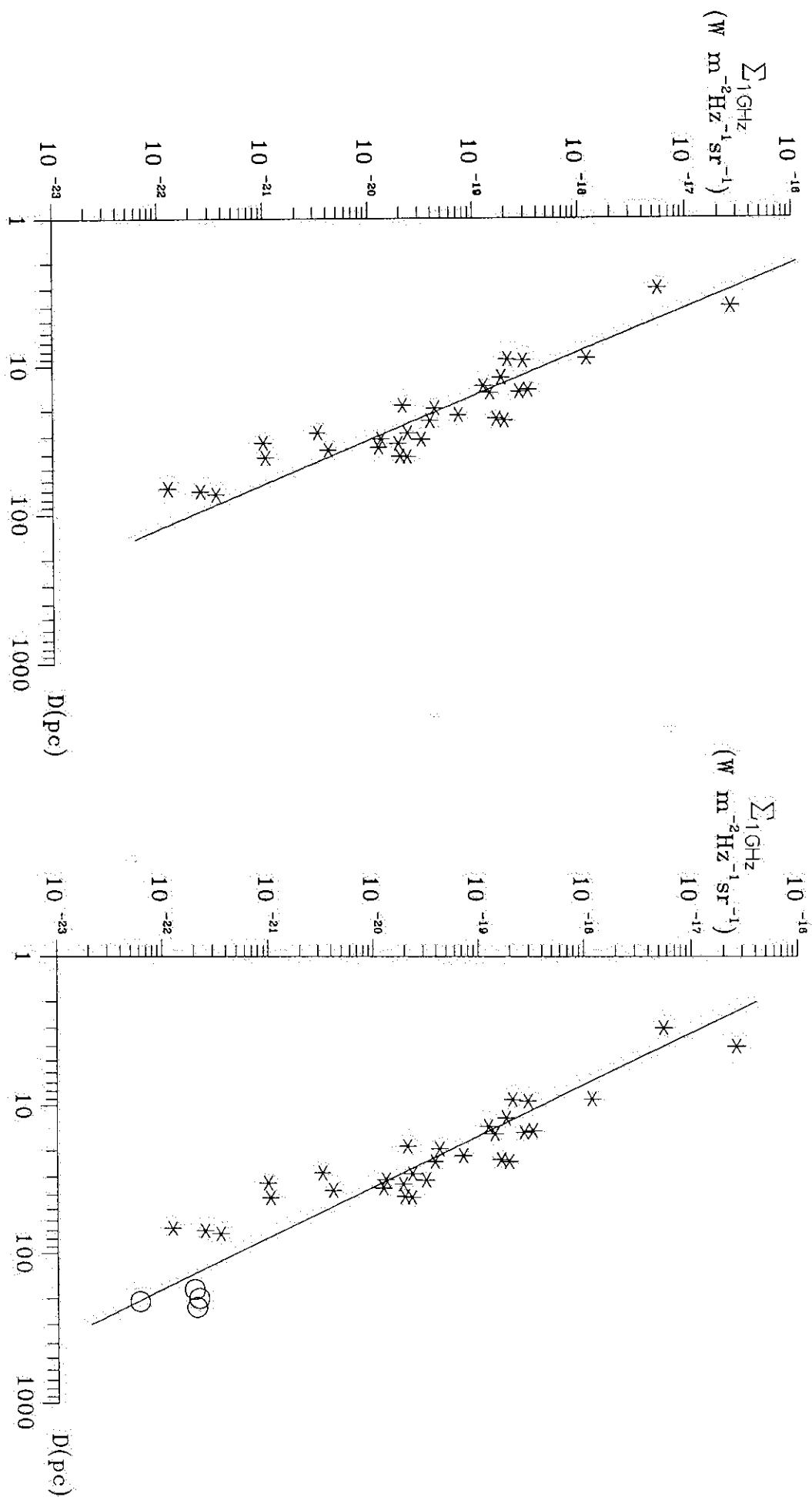
Slika 3.14. Levo - zavisnost površinskog staja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za 12 kalibratora grupe II (Gobel et al.-G81, 1981). Desno - G81 zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni G81 kalibratori, a kružićima petlje.



Slika 3.15. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za 9 kalibratora grupe III (Göbel et al., G81, 1981). Desno – G81 zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni G81 kalibratori, a kružićima petlje.



Slika 3.16. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za svih 30 kalibratora (Göbel et al., 1981, 1981). Desno – G81 zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni G81 kalibratori, a kružićima petlje.



Slika 3.17. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D (Lozinska, 1981). Desno – zavisnost Lozinske kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni kalibratori Lozinske, a kružićima petlje.

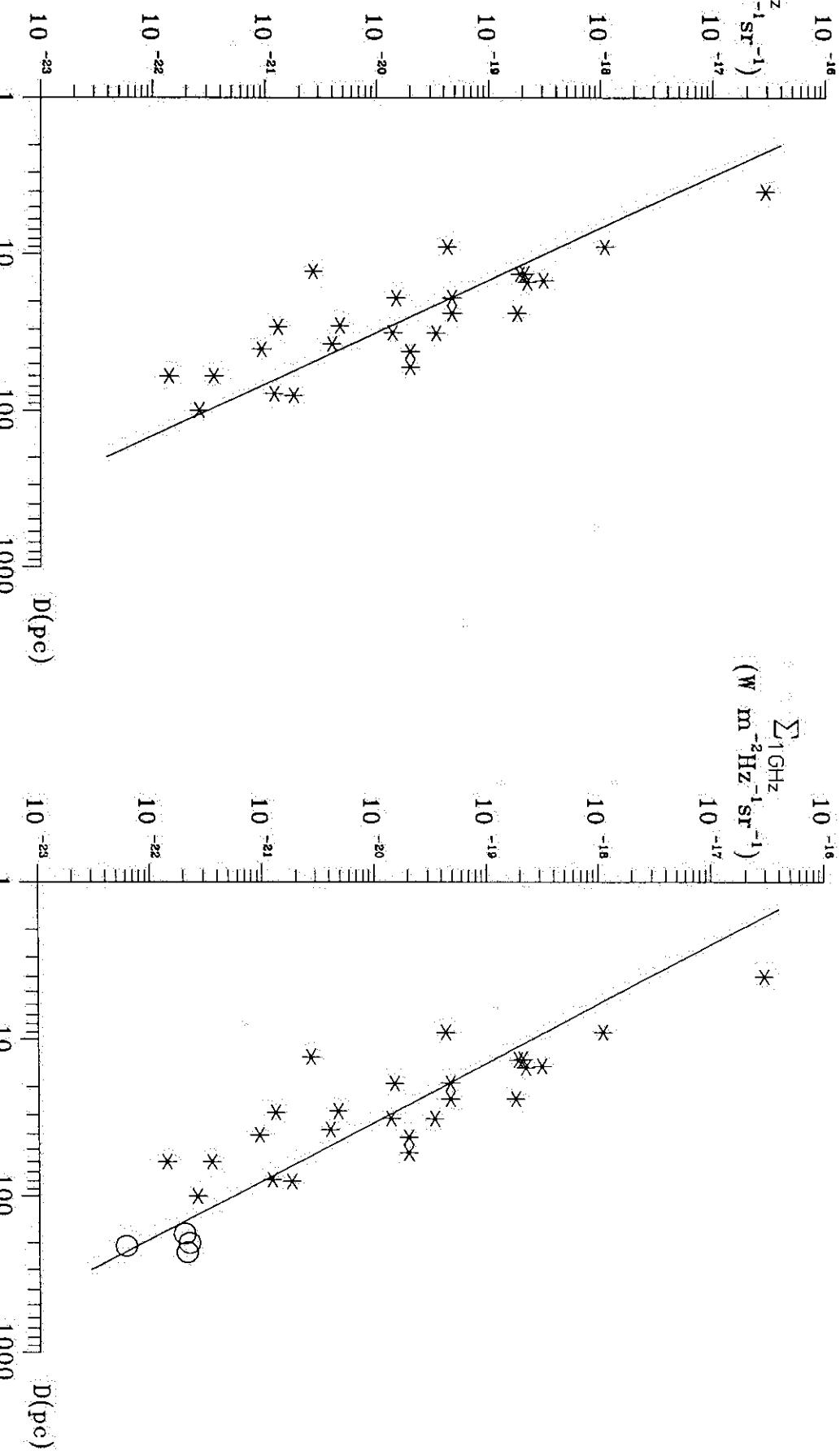


Tabela 3.17. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji (bez Monoceros petlje) relaciji Gebela sa saradnicima iz 1981. godine za 30 kalibratora iz sve tri grupe.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
9	2.98 ± 0.20	86
8	2.97 ± 0.21	85
6	2.95 ± 0.20	87
5	2.93 ± 0.21	86
5	2.92 ± 0.20	87
4	2.89 ± 0.20	86

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 3.05^{+3.19}_{-1.56} \times 10^{-16} D^{-2.89 \pm 0.20} \quad (3.53)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = 0.47, \quad \bar{\beta} = 2.94, \quad \Delta\beta = 0.42. \quad (3.54)$$

Iz prethodne tabele i odgovarajućih relacija se vidi da je promena nagiba $\Sigma - D$ relacije ne suviše velika ali i da su novodobijeni koeficijenti β izvan granica intervala određenog greškom početnog koeficijenta β . Koeficijent slaganja se povećava. Petlje popunjavaju desni donji deo $\Sigma - D$ dijagrama (koji inače nedostaje) i samim tim uravnotežavaju relaciju, zbog čega se gubi "koleno" koje se javlja u relaciji Klarka i Kasvela (Clark & Caswell, 1976).

3.13. Relacija Lozinske (Lozinskaya, 1981)

Ova relacija je zasnovana na Milnovim kalibratorima iz 1979. godine (Milne, 1979). Lozinska je odredila nove daljine do 8 ostataka. Tri ostatka od ovih 8 su već bili na spisku Milnovih kalibratora, ali sa novim daljinama ti ostaci dobijaju nove dijametre, a samim tim i novo mesto na $\Sigma - D$ dijagramu. Relacija je data na 1GHz. Iz razmatranja je izbačen Crab SNR, jer je on tipičan primer pleriona. Tri ostatka čije su daljine promenjene a nalaze se u spisku Milnovih kalibratora su: IC443, HB3, Monoceros Loop. Ostalih pet su: HB9, OA184, W28, G65.2+5.7 i CTB1. Ukupan broj kalibratora dostiže 26 ostataka, za koje je odredena $\Sigma - D$ relacija sa $\beta=3.45$. Nije naznačeno koji je metod korišćen za povlačenje linije fita.

U ovom setu od 26 kalibratora čak tri ostatka su ista kao u setu kalibracionih petlji, a to su: Monoceros petlja, OA184 i G65.2+5.7.

Kao i do sada prelazimo na testiranje. Relacija Lozinske ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 3.22^{+9.91}_{-2.43} \times 10^{-16} D^{-3.01 \pm 0.42}, \quad (3.55)$$

sa slaganjem od 68%.

Relaciji (3.55) pridružujemo kalibracione petlje (bez OA184, G65.2+5.7 i Monoceros petlje) i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.17 i u tabeli 3.18. Na slici 3.17 dati su $\Sigma - D$ dijagrami samo za slučajevе koji odgovaraju relacijama (3.55) i (3.56).

Tabela 3.18. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji (bez OA184, G65.2+5.7 i Monoceros petlje) relaciji Lozinske iz 1981. godine.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
7	2.75 ± 0.28	76
6	2.73 ± 0.29	75
6	2.72 ± 0.28	76
5	2.70 ± 0.29	75
5	2.69 ± 0.28	77
4	2.66 ± 0.29	76

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{\text{1GHz}} = 1.15^{+2.16}_{-0.75} \times 10^{-16} D^{-2.66 \pm 0.29}. \quad (3.56)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = 0.35, \quad \bar{\beta} = 2.71, \quad \Delta\beta = 0.30. \quad (3.57)$$

Početna jednacina (3.55) je izvedena uprkos priličnom rasipanju podataka u odnosu na liniju fita. Samim tim je greška koeficijenta β veća nego obično. Promena koeficijenta β zbog toga ulazi u interval koji je zadat greškom za β u početnoj relaciji. Petlja IV se nalazi sa leve strane u odnosu na liniju fita to jest u oblasti gde su ostaci sa manjim dijametrima od linijom fita definisanih prosečnih dijametara. Koeficijent slaganja raste za skoro 10%. Petlje znači ponovo uravnovežavaju relaciju. Smanjivanje broja kalibracionih petlji dovodi do povećanja promene koeficijenta β što se i očekivalo. Jedino kada bismo relaciju (3.56) uzeli za početnu dobili bismo da promena koeficijenta β ne ulazi u interval koji je zadat greškom za β u relaciji (3.56) (mada mu je prilično bliska). Ovo je sasvim logičan efekt, jer ako izbacimo tačke koje uravnovežuju relaciju, dobicemo relaciju sa većim greškama. Lozinska je u svom članku dočrtala glavne petlje na $\Sigma - D$ dijagram i u odnosu na liniju fita nisu bile mnogo dalje negoli neki rasutiji SNR-ovi. Rezultati dobijeni testiranjem relacije Lozinske mogu nagovestiti SNR poreklo radio-petlji.

3.14. Relacija Sakhibova i Smirnova (Sakhibov & Smirnov, 1982)

Tragajući za što većim brojem kalibratora, Sakhibov i Smirnov su stigli do broja 57. Relacija koju su oni izveli je sa najvećim brojem kalibratora. U to vreme još uvek nisu počeli napadi na valjanost $\Sigma - D$ relacije, i smatralo se, da se sa uvećanjem seta kalibratora mora doći do pouzdanije relacije. Oni su svoju glavnu relaciju izveli sa 57 kalibratora svih vrsta (ljuskasti ostaci, plerioni i ljuskasti ostaci sa centralnim izvorom). Od ovog članka počinje oštije razdvajanje kalibratora po vrstama i konstruisanje odgovarajućih $\Sigma - D$ relacija. Sakhibov i Smirnov su za svoju glavnu relaciju dobili $\Sigma \propto D^{-2.8 \pm 0.4}$. Za ostatke ljuskastog tipa kojih ima 41, koeficijent β je 3.4 ± 0.5 . Za plerione (njih 10) je $\beta = 2.35 \pm 0.2$. Za ljuskaste ostatke sa centralnim izvorom (njih 6) je $\beta = 2.12 \pm 0.12$. Plerioni zajedno sa ljuskastim ostacima sa centralnim izvorom daju relaciju $\Sigma \propto D^{-2.21 \pm 0.14}$. Sve relacije su radene na 1 GHz. Nije naglašeno kojom metodom su izračunati koeficijenti. Iz poslednje tri vrednosti autori zaključuju da plerioni tokom vremena evoluiraju u

ljuskaste ostatke sa centralnim izvorom. Ovakva ideja potiče od strane Lozinske (Lozinskaya, 1980b). Ljuskasti ostaci su sledeći: Kepler SNR, W28, G11.2–0.3, Kes 67, Kes 69, 3C391, Kes 78, 4C00.70, W44, 3C396, 3C397, W498, HC30, W51, G65.2–5.7, Cygnus Loop, γ Cygni, Cas A, G114.3–0.3, G116.5+1.1, CTB1, HB3, HB9, OA184, S147, IC443, Origem Loop, Monoceros loop, Puppis A, MSH11–61A, G296.1–0.7, Kes 17, G311.5–0.3, RCW86, MSH14–57, RCW89, Kes 41, G338.5+0.1, CTB37A, CTB37B i G349.7–0.1. Plerioni su: G21.5–0.9, G69.0+2.7, CTB87, 3C58, Crab SNR, Vela XYZ, MSH11–54, MSH15–56, MSH15–57 i MSH 17–39. Ljuskasti ostaci sa centralnim izvorom su: W50, Tycho SNR, R5, G321.9–0.3, SN1006 i RCW103. Od ovih 57 ostataka 4 ne postoje u katalogu Milna iz 1979. godine, odakle su za ovu relaciju korišćeni površinski sjajevi. Dijametri su izvedeni od strane samih autora.

Zbog toga, 4 ostatka (G65.2–5.7, G69.0+2.7, G114.3–0.3, G116.5+1.1) neće biti uvrštena u set početnih kalibratora. Sa 53 kalibratora svih vrsta (ljuskasti ostaci, plerioni i ljuskasti ostaci sa centralnim izvorom) počećemo sa testiranjem. Iz seta kalibracionih petlji izbacićemo ostatke OA184, S147, Origem i Monoceros petlje, jer su kalibratori početne relacije.

Relacija Sakhibova i Smirnova za 53 kalibraciona ostatka ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 1.64^{+1.57}_{-0.80} \times 10^{-17} D^{-2.10 \pm 0.21}, \quad (3.58)$$

sa slaganjem od 67%.

Relaciji (3.58) pridružujemo kalibracione petlje (bez OA184, S147, Origem i Monoceros petlje) i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.18 i u tabeli 3.19. Na slici 3.18 dati su $\Sigma - D$ dijagrami samo za slučajeve koji odgovaraju relacijama (3.58) i (3.59).

Tabela 3.19. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji (bez OA184, S147, Origem i Monoceros petlje) relaciji Sakhibova i Smirnova iz 1982. godine za kalibratore sve tri vrste.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
6	2.22 ± 0.18	74
5	2.18 ± 0.17	74
4	2.15 ± 0.17	74

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 1.89^{+1.52}_{-0.84} \times 10^{-17} D^{-2.15 \pm 0.17}. \quad (3.59)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = -0.05, \quad \bar{\beta} = 2.18, \quad \Delta\beta = -0.08. \quad (3.60)$$

Za ljuskaste ostatke se dobija

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 4.63^{+8.57}_{-3.01} \times 10^{-17} D^{-2.39 \pm 0.31}, \quad (3.61)$$

sa slaganjem od 62%.

Relaciji (3.61) pridružujemo kalibracione petlje (bez OA184, S147, Origem i Monoceros petlje) i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.19 i u tabeli 3.20. Na slici 3.19 dati su $\Sigma - D$ dijagrami samo za slučajevе koji odgovaraju relacijama (3.61) i (3.62).

Tabela 3.20. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji (bez OA184, S147, Origem i Monoceros petlje) relaciji Sakhibova i Smirnova iz 1982. godine za ljkuskaste kalibratore.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
6	2.46 ± 0.24	72
5	2.41 ± 0.24	72
4	2.37 ± 0.23	72

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 4.35^{+5.72}_{-2.47} \times 10^{-17} D^{-2.37 \pm 0.23}, \quad (3.62)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = 0.02, \quad \bar{\beta} = 2.41, \quad \Delta\beta = -0.02. \quad (3.63)$$

Relacija izvedena za 9 kalibracionih pleriona je

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 6.57^{+11.44}_{-4.17} \times 10^{-18} D^{-1.63 \pm 0.40}, \quad (3.64)$$

sa slaganjem od 70%.

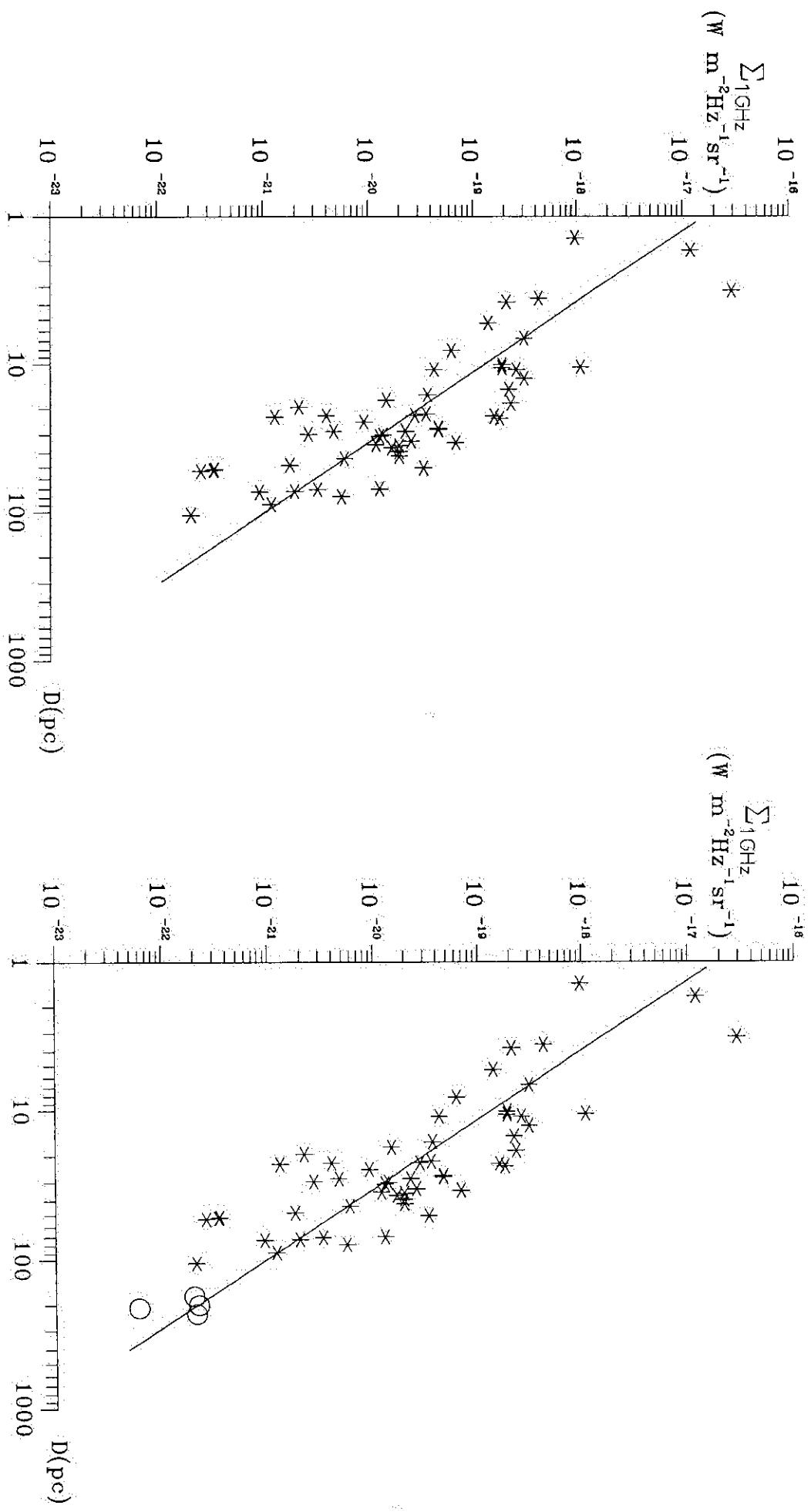
Relaciji (3.64) pridružujemo kalibracione petlje i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.20 i u tabeli 3.21. Na slici 3.20 dati su $\Sigma - D$ dijagrami samo za slučajevе koji odgovaraju relacijama (3.64) i (3.65).

Tabela 3.21. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji relaciji Sakhibova i Smirnova iz 1982. godine za plerione.

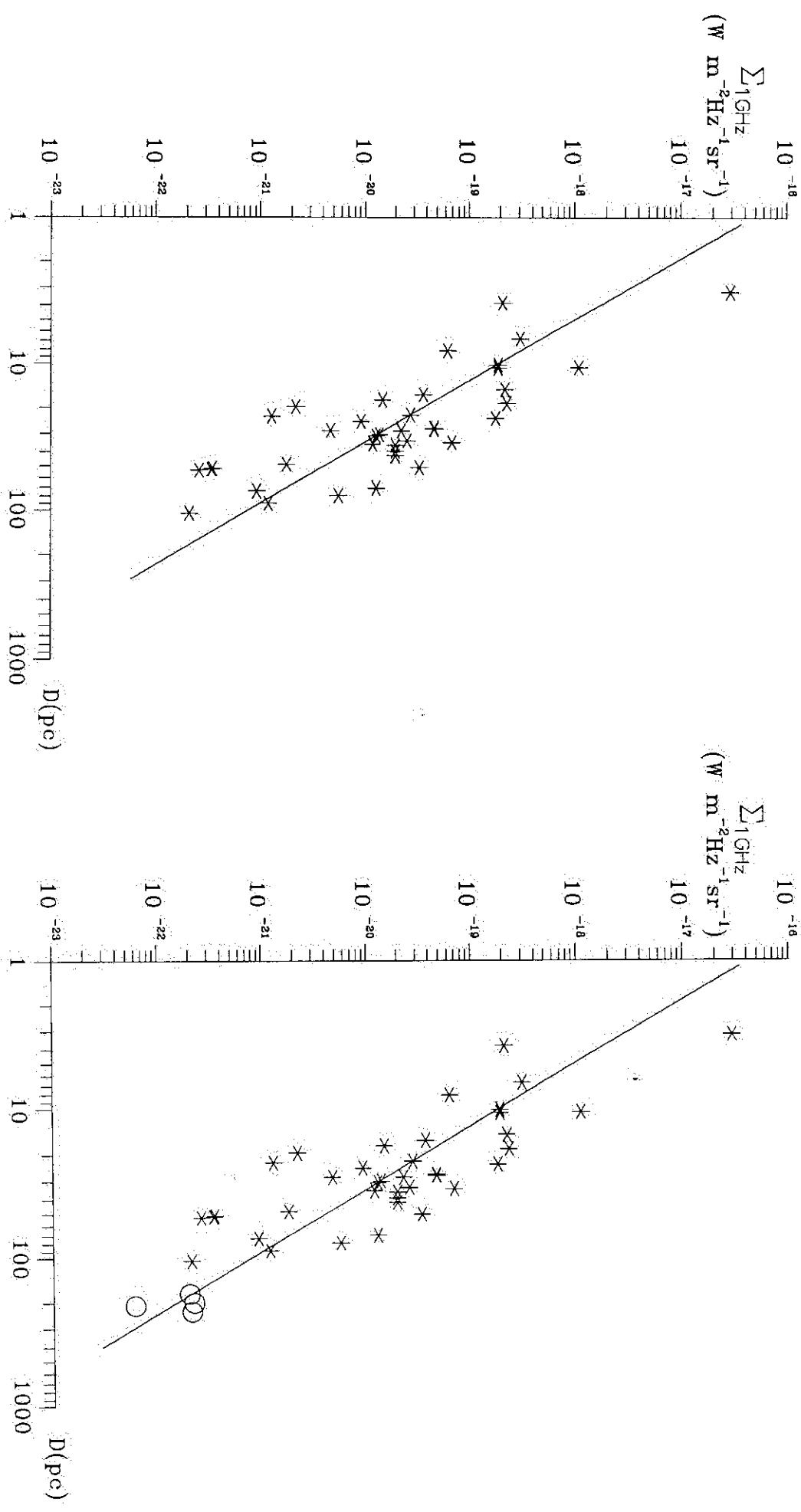
broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
10	2.25 ± 0.21	87
9	2.23 ± 0.22	87
7	2.21 ± 0.21	89
6	2.17 ± 0.22	88
5	2.13 ± 0.20	90
4	2.08 ± 0.21	90

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

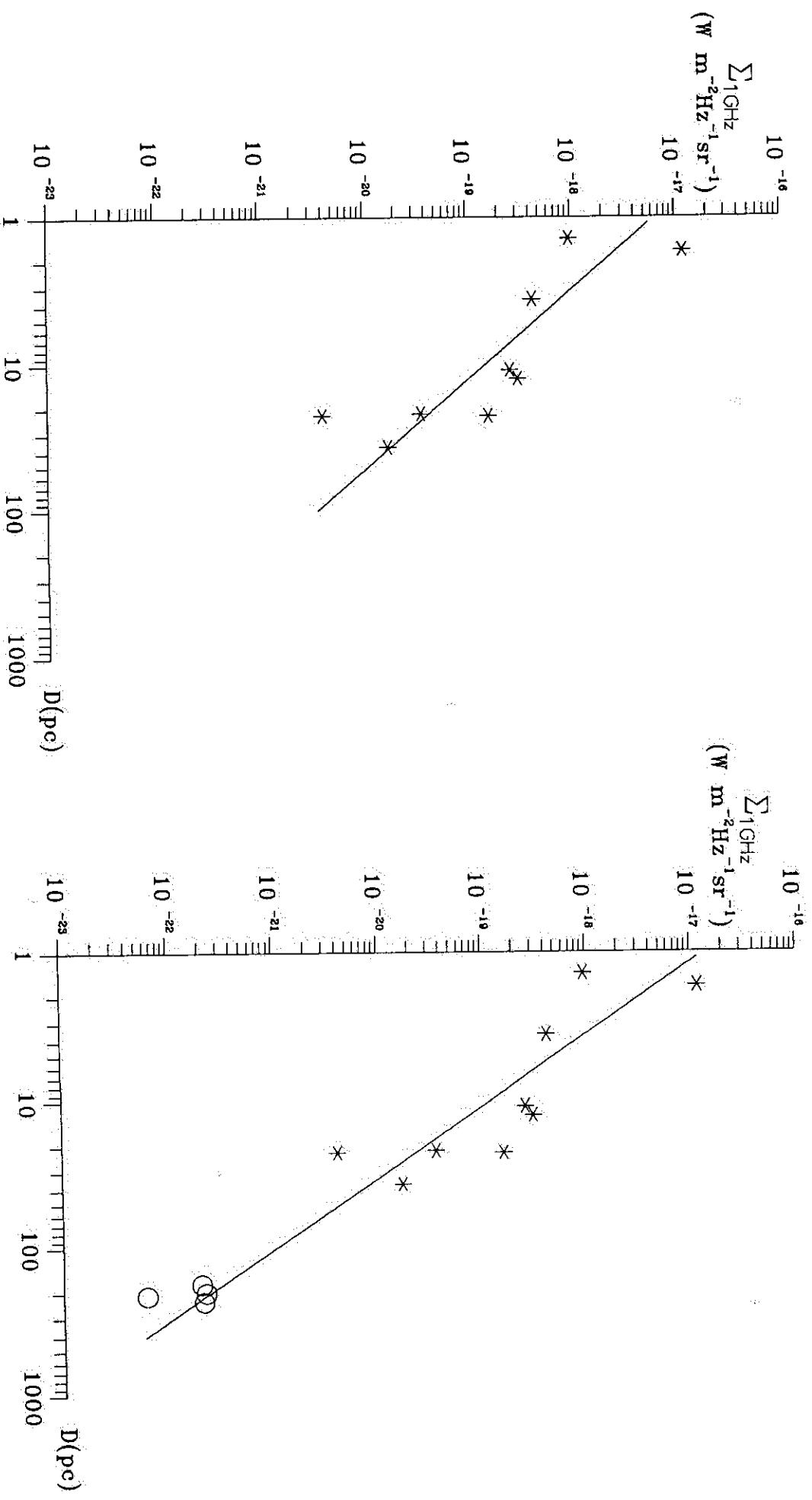
Slika 3.18. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za 53 kalibratora (Sakhnov & Smirnov-S&S, 1982). Desno – S&S zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni S&S kalibratori, a kružićima petlje.



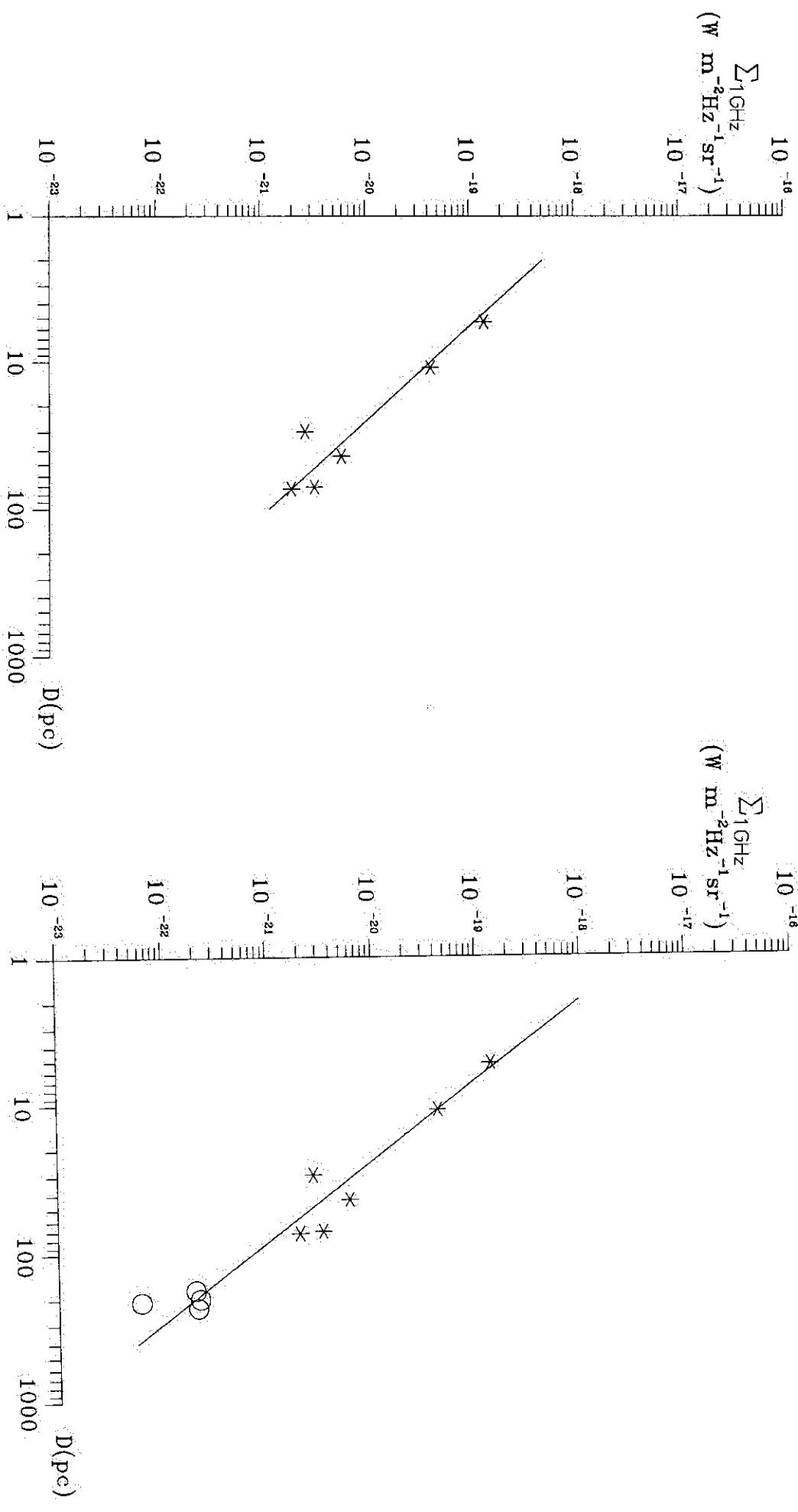
Slika 3.19. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za ljuškaste ostatke (Sakhibov & Smirnov-S&S, 1982). Desno – S&S zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni S&S kalibratori, a kružićima petlje.



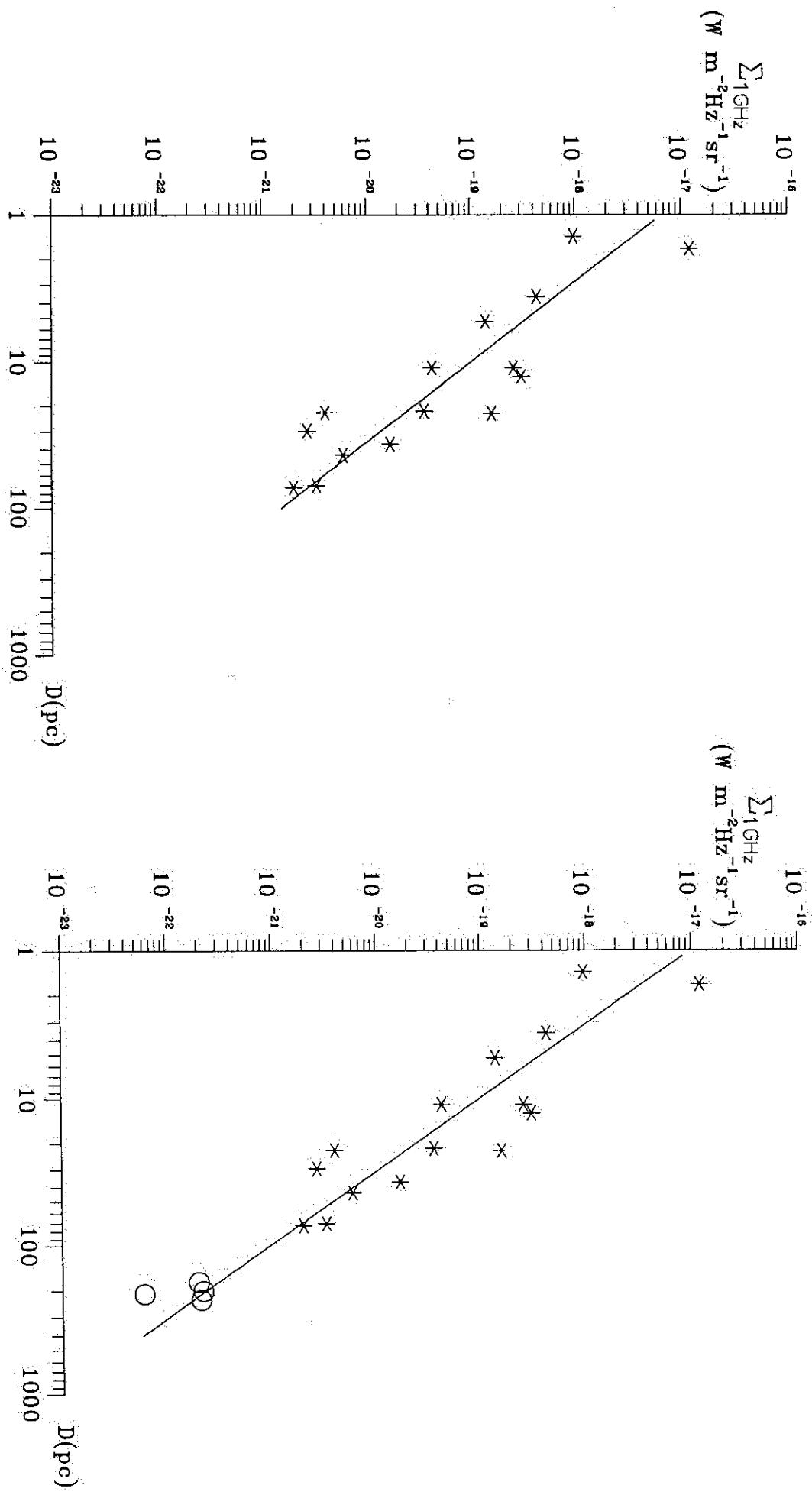
Slika 3.20. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za 9 pleriona (Sakhnov & Smirnov–S&S, 1982). Desno – S&S zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni S&S kalibratori, a kružićima petlje.



Slika 3.21. Levo - zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za 6 ljuškastih ostatka sa centralnim izvorom (Sakhibov & Smirnov-S&S, 1982). Desno - S&S zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni S&S kalibratori, a kružićima petlje.



Slika 3.22. Levo - zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za plerione i ljuškaste ostatke sa centralnim izvorom (Sakhibov & Smirnov-S&S, 1982). Desno - S&S zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni S&S kalibratori, a kružićima petlje.





$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 1.46_{-0.77}^{+1.62} \times 10^{-17} D^{-2.08 \pm 0.21}. \quad (3.65)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = -0.45, \quad \bar{\beta} = 2.18, \quad \Delta\beta = -0.55. \quad (3.66)$$

Relacija izvedena za 6 ljuskastih ostataka sa centralnim izvorom je

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 1.49_{-0.88}^{+2.16} \times 10^{-18} D^{-1.54 \pm 0.26}, \quad (3.67)$$

sa slaganjem od 90%.

Relaciji (3.67) pridružujemo kalibracione petlje i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.21 i u tabeli 3.22. Na slici 3.21 dati su $\Sigma - D$ dijagrami samo za slučajeve koji odgovaraju relacijama (3.67) i (3.68).

Tabela 3.22. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji relaciji Sakhibova i Smirnova iz 1982. godine za ljuskaste ostatke sa centralnim izvorom.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
10	1.88 ± 0.25	80
9	1.86 ± 0.26	80
7	1.90 ± 0.22	87
6	1.87 ± 0.23	87
5	1.89 ± 0.18	92
4	1.85 ± 0.17	94

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 3.57_{-1.85}^{+3.83} \times 10^{-18} D^{-1.85 \pm 0.17}. \quad (3.68)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = -0.31, \quad \bar{\beta} = 1.87, \quad \Delta\beta = -0.33. \quad (3.69)$$

Relacija izvedena za plerione i ljuskaste ostatke sa centralnim izvorom (15 ostataka) je

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 6.77_{-3.61}^{+7.75} \times 10^{-18} D^{-1.82 \pm 0.26}, \quad (3.70)$$

sa slaganjem od 79%.

Relaciji (3.70) pridružujemo kalibracione petlje i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.22 i u tabeli 3.23. Na slici 3.22 dati su $\Sigma - D$ dijagrami samo za slučajeve koji odgovaraju relacijama (3.70) i (3.71).

Tabela 3.23. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji relaciji Sakhibova i Smirnova iz 1982. godine za plerione i ljkuskaste ostatke sa centralnim izvorom.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
10	2.18 ± 0.18	86
9	2.16 ± 0.19	86
7	2.13 ± 0.18	88
6	2.09 ± 0.18	87
5	2.06 ± 0.17	89
4	2.02 ± 0.17	89

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 1.02^{+0.85}_{-0.46} \times 10^{-17} D^{-2.02 \pm 0.17}. \quad (3.71)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = -0.20, \quad \bar{\beta} = 2.11, \quad \Delta\beta = -0.29. \quad (3.72)$$

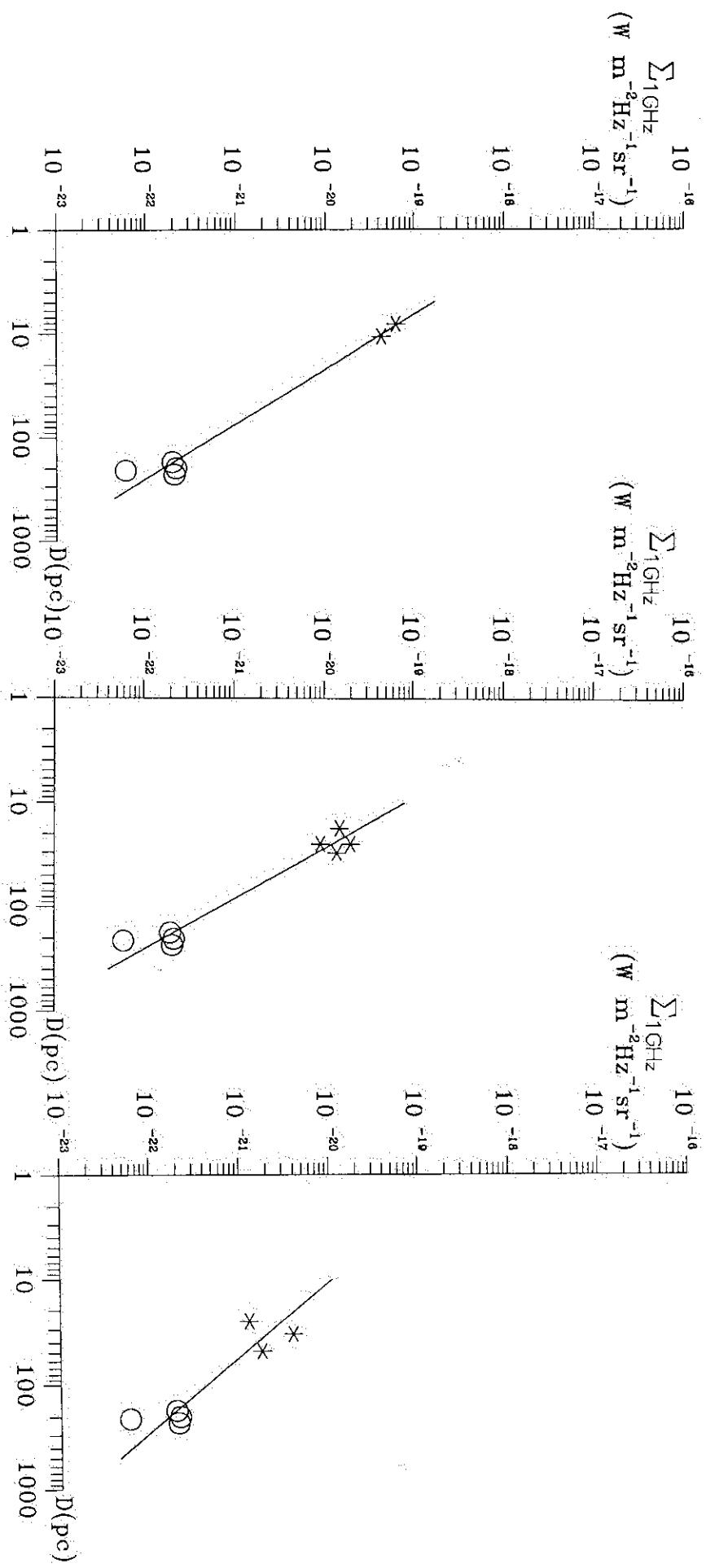
Razmatrajući promenu koeficijenta β pri testiranju relacije (3.58) zaključujemo da i ova relacija nagoveštava SNR poreklo radio-petlji (slična diskusija kao u prethodnim poglavljima). Istraživanja drugih autora koja će tek biti obradena u ovoj disertaciji će naglasiti negativne strane relacije Sakhibova i Smirnova, a i svih relacija pre ove koje su nagovestavale SNR poreklo radio-petlji. Grin (Green, 1984) tvrdi da nema ovoliko kalibratora sa dobro određenim daljinama, Alahverdijev sa saradnicima (Allakhverdiyev et al., 1983a,b; 1986a,b) tvrdi da ne mogu zajedno sve vrste (ljuskasti ostaci, plerioni i ljkuskasti ostaci sa centralnim izvorom) kalibratora definisati $\Sigma - D$ relaciju i da kalibratori za jednu relaciju moraju pripadati ili spoljnim ili unutrašnjim područjima galaksije. Kejs i Batačarija (Case & Bhattacharya, 1998) odreduju daljine koristeći nove galaktičke konstante te samim tim poboljšavaju tačnost daljina do kalibratora.

Testiranje relacije (3.61) nam daje promenu za β od 0.02. Ovako mala velicina se svakako može zanemariti. Pošto je relacija (3.61) definisana samo za ostatke ljkuskastog tipa, a promena je manja nego za slučaj relacije (3.58) sa još većom sigurnošću možemo nagovestiti SNR poreklo radio-petlji. Ova relacija u odnosu na gornje nedostatke preuzilazi samo jedan – kalibratori raznih vrsta nisu pomesani, izvedena je samo za ostatke ljkuskastog tipa. Sve ostale kritike ostaju. Konkretno za relaciju Sakhibova i Smirnova, Kejs i Batačarija (1998) navode, da nisu dobro podeljeni ostaci po vrstama. Najmanje 4 ljkuskasta ostatka su kombinovanog tipa (ljuskasti sa centralnim izvorom).

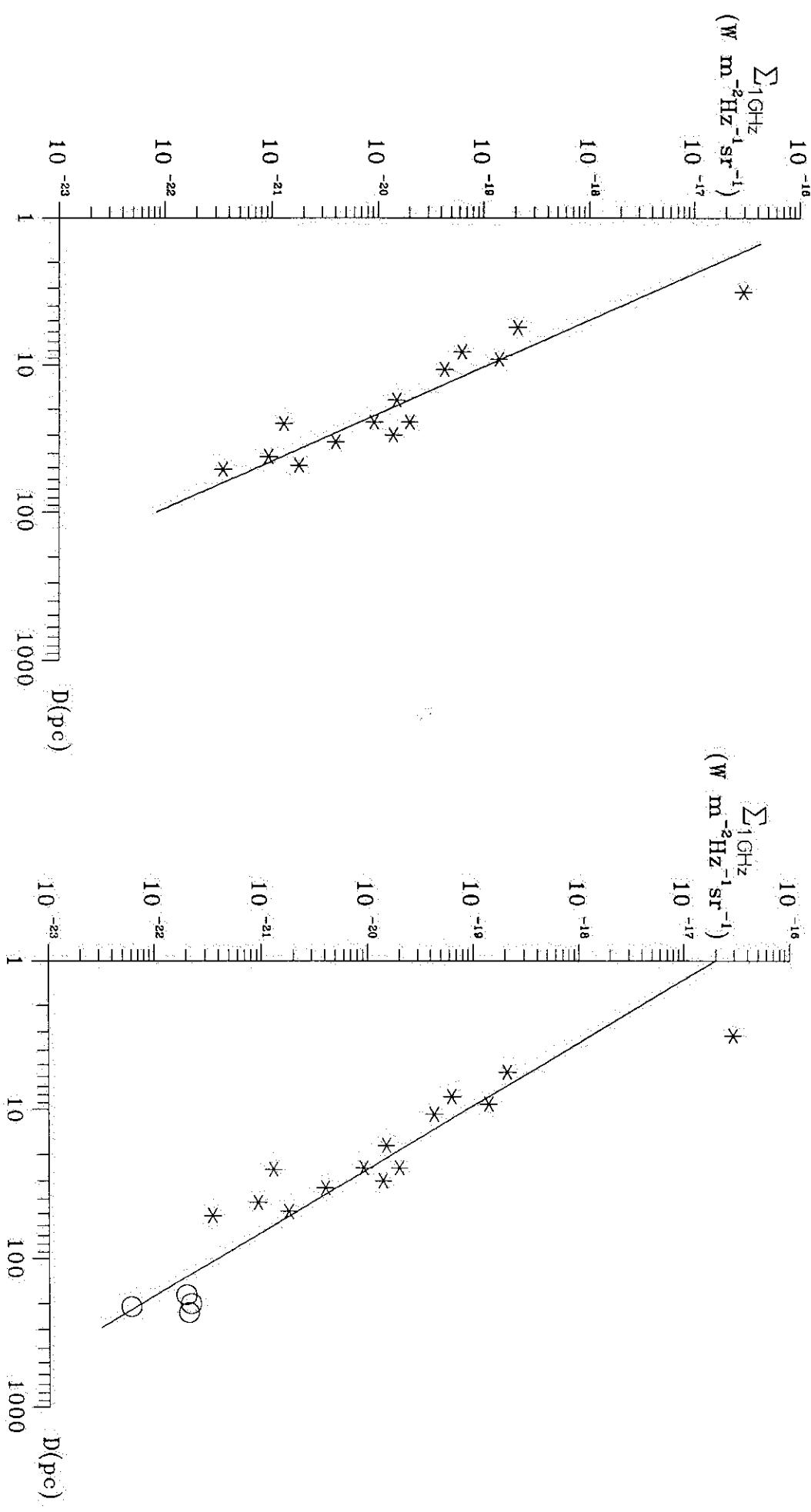
Testiranjem relacija (3.64), (3.67) i (3.70) vidimo da petlje manje odgovaraju ovakvim relacijama. Promene ne upadaju u intervale zadate greškama koeficijenata β (osim za relaciju 3.70). Koeficijenti β imaju prilično niske vrednosti. I u ovim relacijama petlje popravljaju koeficijente slaganja. Zatim, podižu vrednosti na $\beta \approx 2$. U svakom slučaju ako su petlje SNR-ovi, nisu sigurno tipa pleriona niti kombinovanog tipa (što posmatranja nedvosmisleno pokazuju) već ljkuskastog, što ovakvi testovi i nagovestavaju.

Slika 3.23. Zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D (Allakhverdiyev et al.-A83, 1983).

Levo – dva A83 kalibratora grupe I, u sredini – četiri A83 kalibratora grupe II, desno – tri A83 kalibratora grupe III, sa pridruženim glavnim petljama. Zvezdicama su označeni A83 kalibratori, a kružićima petlje.



Slika 3.24. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za 14 ljuškastih ostataka (Allakhverdiyev et al. – A83, 1983). Desno – A83 zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni A83 kalibratori, a kružićima petlje.



3.15. Relacija Alahverdijeva sa saradnicima (Allakhverdiyev et al., 1983a,b)

U dva članka Alahverdijeva sa saradnicima iz 1983. godine posvećena je maksimalna pažnja izboru kalibratora za $\Sigma - D$ relaciju. Izabrano je 14 ljkastih ostataka. Autori su vodili računa da imaju najpouzdanije daljine, da teorijska podrška bude u skladu sa dinamikom razvoja SNR-a (ispitivanje mogućih tačaka "preloma" $\Sigma - D$ relacije), uzimali su u obzir raspored galaktičke međuzvezdane materije i globalnog galaktičkog međuzvezdanog magnetnog polja. Ispitivali su individualne osobine SNR-ova, u smislu kakva bi $\Sigma - D$ relacija bila za taj jedan jedini ostatak. U skladu sa vangalaktičkim posmatranjima utvrđeno je da se supernove tipa II javljaju u spiralnim granama, te je samim tim i ovaj kriterijum primenjen na galaktičke kalibratore. Kalibratori su podeljeni u tri skupine u zavisnosti od površinskog sjaja. Prvoj grupi pripadaju ostaci kod kojih je $2.18 \times 10^{-20} \leq \Sigma \leq 10^{-19}$. Za ovaj slučaj dobijena je relacija oblika $\Sigma \propto D^{-2.3}$. Za kalibratore kod kojih je $8.76 \times 10^{-21} \leq \Sigma < 2.18 \times 10^{-20}$ dobijeno je $\beta = 2.9$. Treću grupu čine ostaci sa sjajem unutar intervala $10^{-21} \leq \Sigma < 8.76 \times 10^{-21}$. Odgovarajuća relacija je oblika $\Sigma \propto D^{-4.7}$. Σ je kao i do sada u $\text{W m}^{-2}\text{Hz}^{-1}\text{sr}^{-1}$, a D u parsecima. Sve relacije su na frekvenciji od 1 GHz. Nije navedeno na koji način su određeni koeficijenti A i β . Prvu grupu kalibratora čine 2 ostatka: MSH11-61A i RCW103, drugu grupu (4 ostatka) čine: IC443, Puppis A, W28 i RCW89 i treću grupu čine 3 ostatka: CTB1, Vela XYZ i HB3. Ostali kalibratori (njih 5) ne pripadaju ni jednom od datih intervala površinskih sjajeva.

Prelazimo na testiranje prilagođeno za ovaj slučaj.

Kada bismo povukli pravu liniju kroz dva kalibratora iz prve grupe dobili bismo $\beta = 1.39$. Naravno, slaganje bi bilo 100%. Ako bismo pridružili 4 glavne petlje dobili bismo $\beta = 1.89 \pm 0.15$, sa slaganjem od 97%.

Za kalibratore drugog tipa najbolji fit daje vrednost $\beta = 0.15$ sa 1.2% slaganja. Očigledno, na ovakav način se ne može definisati nikakva $\Sigma - D$ relacija. Dodavanjem 4 glavne petlje dobijamo $\beta = 2.07 \pm 0.19$, sa 95% slaganja, što je na kraju sasvim solidan rezultat.

Što se treće grupe kalibratora tiče, provlačenjem prave linije dobijamo $\beta = -0.37$ (suprotan nagib), sa slaganjem 4.3%, a sa glavnim petljama imamo $\beta = 1.40 \pm 0.30$, sa 82% slaganja.

Na slici 3.23 su prikazane prethodne tri relacije kojima su dodata glavne petlje.

Ako bismo uzeli svih 14 kalibratora, koji predstavljaju vrlo dobro odabrane ljkaste ostatke i izvršili standardno testiranje dobili bismo sledeću relaciju (ovaj slučaj nije obraden u člancima Alahverdijeva sa saradnicima):

$$\Sigma_{\text{1GHz}} = 1.51_{-0.99}^{+2.89} \times 10^{-16} D^{-3.13 \pm 0.36}, \quad (3.73)$$

sa slaganjem od 87%.

Relaciji (3.73) pridružujemo kalibracione petlje (bez Monoceros petlje) i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.24 i u tabeli 3.24. Na slici 3.24 dati su $\Sigma - D$ dijagrami samo za slučajevе koji odgovaraju relacijama (3.73) i (3.74).

Tabela 3.24. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji (bez Monoceros petlje) relaciji Alahverdijeva sa saradnicima iz 1983. godine za svih 14 ljkuskastih kalibratora.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
9	2.41 ± 0.22	86
8	2.40 ± 0.23	85
6	2.40 ± 0.22	87
5	2.39 ± 0.23	86
5	2.38 ± 0.22	87
4	2.36 ± 0.23	87

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 2.01_{-1.15}^{+2.69} \times 10^{-17} D^{-2.36 \pm 0.23}. \quad (3.74)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

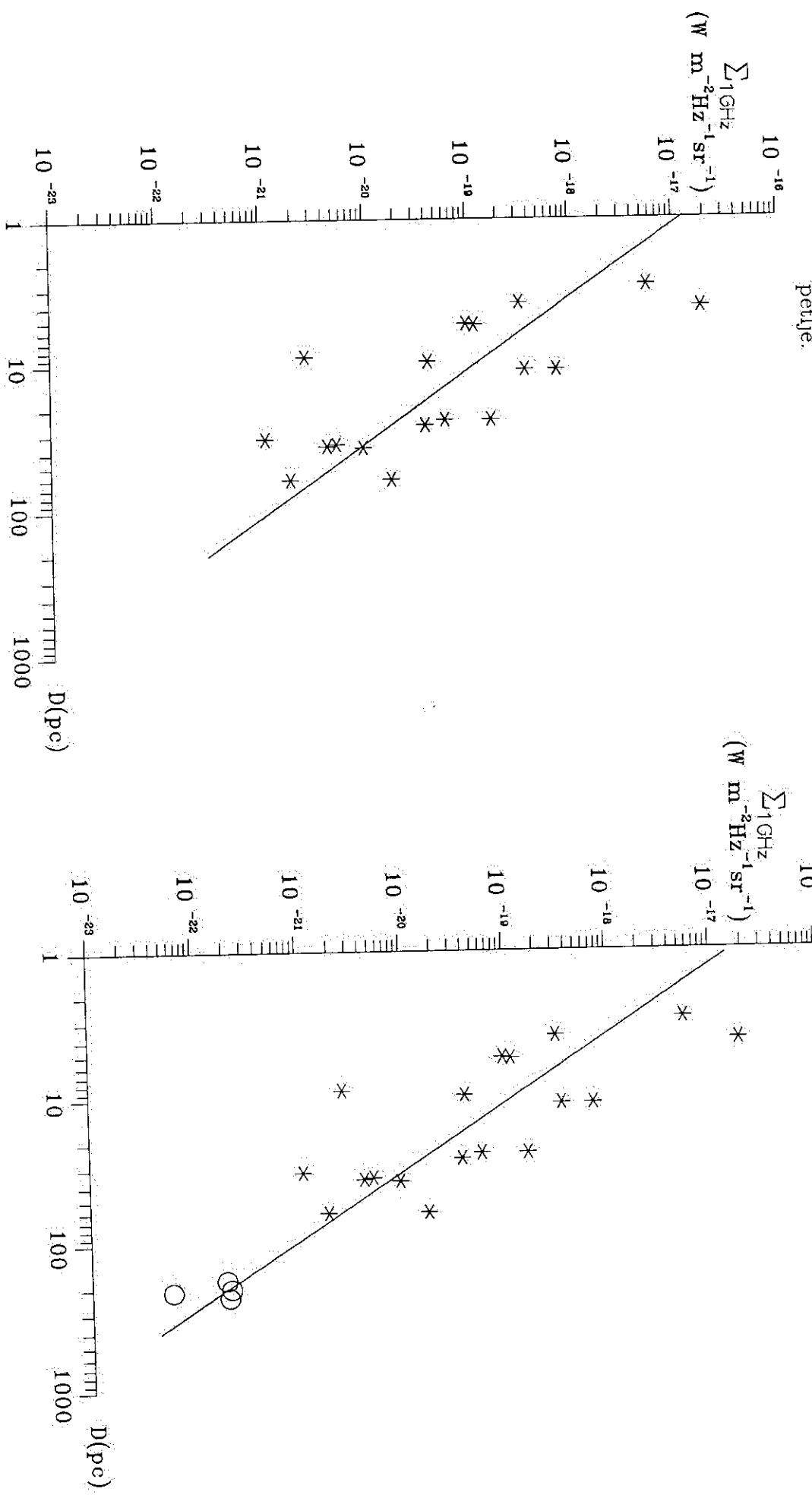
$$\Delta\beta_4 = 0.77, \quad \bar{\beta} = 2.39, \quad \Delta\beta = 0.74. \quad (3.75)$$

Prilično velika promena koeficijenta β izgleda da je posledica toga što bar 3 od 14 kalibracionih ostataka, nisu ostaci ljkuskastog već kombinovanog tipa, dok bar do jednog nije pouzdano određena daljina (Green, 1998). Sve u svemu ovakvi rezultati testova relacije Alahverdijeva sa saradnicima su prilično daleko od nagoveštaja SNR porekla radio-petlji. Autori ovih članaka iz 1983. godine su razmatrali 4 radio-petlje u smislu $\Sigma - D$ zavisnosti i zaključili da one mogu biti samo asymptotski slučaj ostataka supernovih zvezda.

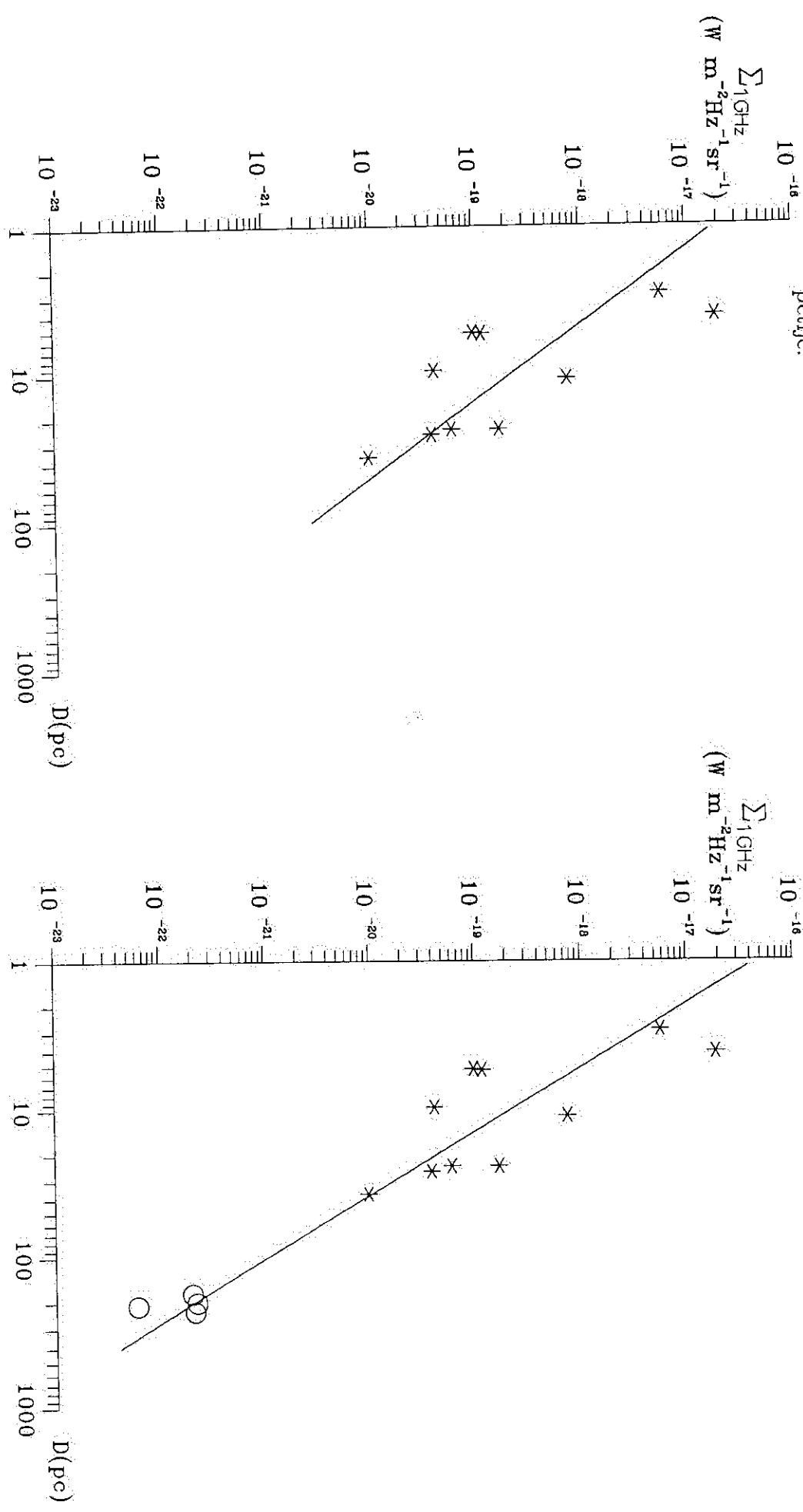
3.16. Grinov kritički osvrt na $\Sigma - D$ relaciju (Green, 1984)

Članak objavljen 1984. godine od strane Grina predstavlja prekretnicu u proučavanju empirijske $\Sigma - D$ relacije. Kao posledica ovog rada, a u spremi sa radovima Alahverdijeva sa saradnicima (Allakhverdiyev et al., 1983a,b, 1986a,b), zamrla je istraživačka delatnost na ovom polju gotovo celu deceniju. Grin je vrlo pažljivo proučio daljine do dotadašnjih kalibratora i uspostavio set od 10 kalibratora sa dobro određenim daljinama. Od ovih 10 ostataka dva su plerioni i dva su kombinovanog tipa. Odredio je još jednu grupu kalibratora sa daljinama prihvatljive tačnosti. Ovu drugu grupu čini 8 ostataka od kojih je 7 ljkuskastog, a jedan kombinovanog tipa. Nanoseći odgovarajuće podatke na $\Sigma - D$ dijagram dobio je veliko rasturanje tačaka i odatle zaključio da se na ovaj način ne može konstruisati pouzdana $\Sigma - D$ relacija. Njegova osnovna tvrdnja je da nema dovoljno dobrih kalibratora da bi se konstruisala valjana $\Sigma - D$ relacija, i da samim tim nema smisla određivati daljine do drugih ostataka uz pomoć ove relacije. Prvu grupu kalibratora sa dobro određenim daljinama čine sledeći ostaci: W44, Cas A, Tycho SNR, 3C58, Crab SNR, RCW89, RCW103, CTB37A, CTB37B i G349.7+0.2. Kalibratori druge grupe (sa prihvatljivim daljinama) su Kepler SNR, Kes 67, W49B, CTB1, HB3, Vela SNR, RCW86 i SN1006. U članku su dati površinski sjajevi na 1 GHz i dijametri za prethodnih 18 ostataka.

Slika 3.25. Levo – zavisnost površinskog sijaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra, D za svih 18 kalibratora (Green, 1984). Desno – Grinova zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicana su označeni Grinovi kalibratori, a kružićima petlje.



Slika 3.26. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za 10 kalibratora grupe I (Green, 1984). Desno – Grinova zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni Grinovi kalibratori, a kružićima petlje.



Pošto Grin u svom radu nije prikazao koeficijente "svoje" $\Sigma - D$ relacije, ovde ćemo ih odrediti i izvršiti testiranje kao i do sada. Za svih 18 kalibratora dobićemo relaciju

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 1.28^{+3.51}_{-0.94} \times 10^{-17} D^{-2.01 \pm 0.46}, \quad (3.76)$$

sa slaganjem od 54%.

Relaciji (3.76) pridružujemo kalibracione petlje i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.25 i u tabeli 3.25. Na slici 3.25 dati su $\Sigma - D$ dijagrami samo za slučajevе koji odgovaraju relacijama (3.76) i (3.77).

Tabela 3.25. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji prvoj grupi Grinovih kalibratora sa dobro određenim daljinama.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
10	2.33 ± 0.25	78
9	2.31 ± 0.25	77
7	2.28 ± 0.26	77
6	2.24 ± 0.27	76
5	2.20 ± 0.26	77
4	2.15 ± 0.27	76

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 1.79^{+2.79}_{-1.09} \times 10^{-17} D^{-2.15 \pm 0.27}. \quad (3.77)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = -0.14, \quad \beta = 2.25, \quad \Delta\beta = -0.24. \quad (3.78)$$

Za najboljih 10 kalibratora dobijamo

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 2.06^{+8.04}_{-1.64} \times 10^{-17} D^{-1.94 \pm 0.63}, \quad (3.79)$$

sa slaganjem od 54%.

Relaciji (3.79) pridružujemo kalibracione petlje i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.26 i u tabeli 3.26. Na slici 3.26 dati su $\Sigma - D$ dijagrami samo za slučajevе koji odgovaraju relacijama (3.79) i (3.80).

Tabela 3.26. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji Grinovim kalibratorima (njih 18) obeju grupa.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
10	2.54 ± 0.25	85
9	2.52 ± 0.26	85
7	2.49 ± 0.25	86
6	2.45 ± 0.27	86
5	2.40 ± 0.25	88
4	2.34 ± 0.26	87

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{\text{1GHz}} = 4.81^{+7.26}_{-2.89} \times 10^{-17} D^{-2.34 \pm 0.26}. \quad (3.80)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = 0.4, \quad \bar{\beta} = 2.46, \quad \Delta\beta = -0.52. \quad (3.81)$$

Očigledno je iz prethodno navedenog da je slaganje fita sa tačkama (Grinovi kalibratori) za oba prethodna slučaja, prilično loše (54%), odakle je Grin i izveo svoj kritički pogled na $\Sigma - D$ relaciju. Uz to dobijeni koeficijent $\beta \approx 2$ za to vreme je bio suviše nizak, te je Grinov zaključak sasvim na mestu. Ali dodavanjem petlji dobijamo relaciju za koju je koeficijent slaganja drastično povećan. Za slučaj sa 10 kalibratora za više od 30%. Ponovo dobijamo da je promena β dovoljno mala da zadovolji kriterijume koje smo mnogo puta do sada upotrebili. Zanimljivo je istaći da se (slike 3.25, 3.26) Petlja II i Petlja IV nalaze levo od linije fita, a Petlja III gotovo na liniji. Znači, test relacije dobijene upotrebom Grinovih kalibratora (iako je sam Grin kritikovao i verovatno je zbog toga nije objavio) potvrđuje SNR poreklo radio-petlji.

3.17. Relacija Huanga i Tadeuša (Huang & Thaddeus, 1985)

Relacija izvedena u ovom članku je zasnovana na jednom prilično homogenom setu kalibratora ljkuskastog tipa. Uzeto je u obzir 12 kalibracionih SNR-ova vezanih za velike molekularne oblake do kojih su daljine dobro odredene. Kalibratori su: W44, γ Cygni, G84.2–0.8, HB21, CTB109, Cas A, HB3, OA184, IC443, Puppis A, G309.8+0.0 i MSH14–63. Iz relacije na 1 GHz dobijeno je $\beta = 3.21 \pm 0.32$. Ovakav rezultat je dobijen metodom najmanjih kvadrata. Podaci su uzimani sa jednakim statističkim težinama.

Prelazimo na testiranje:

$$\Sigma_{\text{1GHz}} = 3.61^{+7.87}_{-2.47} \times 10^{-16} D^{-3.20 \pm 0.34}, \quad (3.82)$$

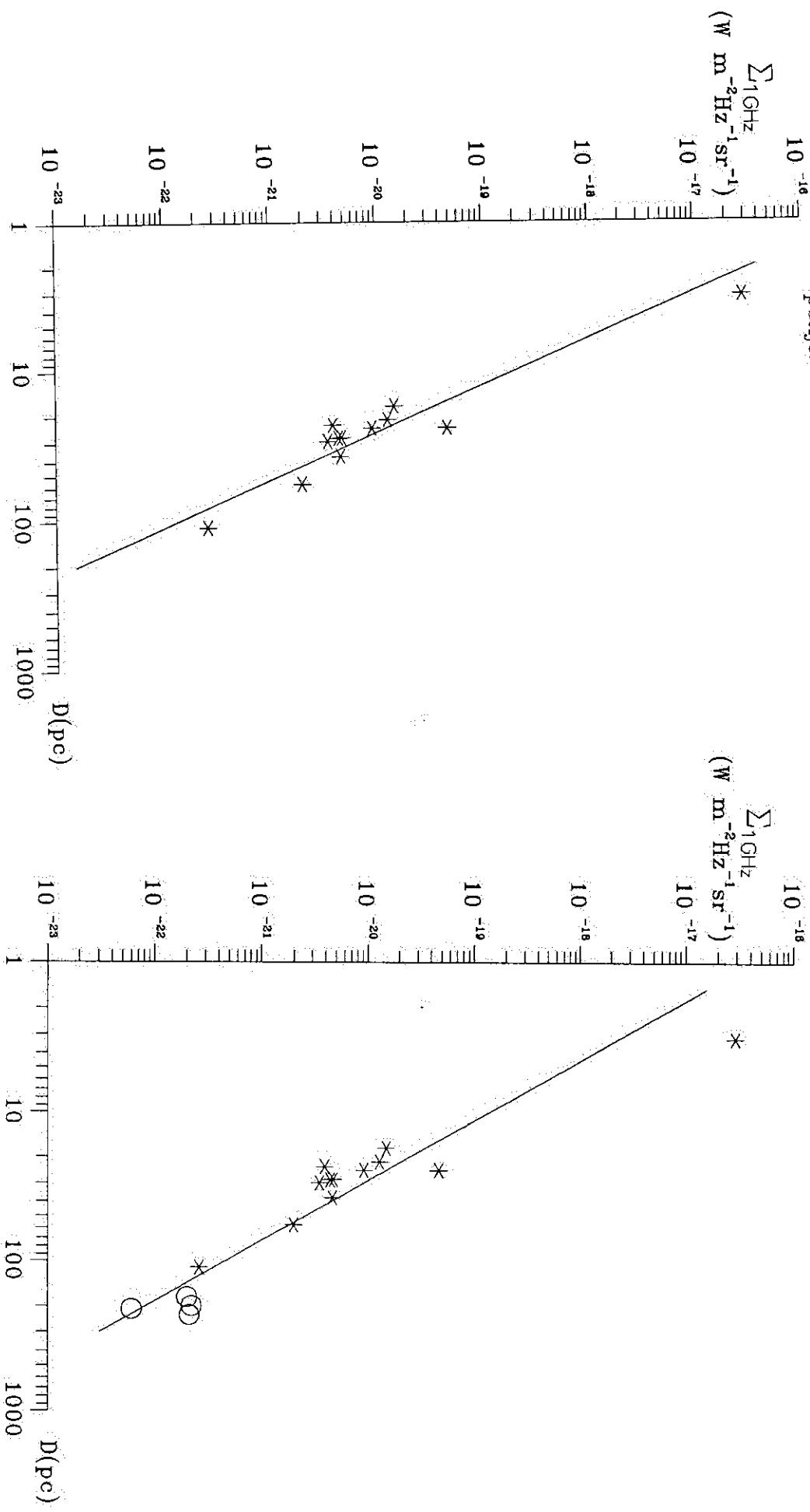
sa slaganjem od 90%.

Relaciji (3.82) pridružujemo kalibracione petlje (bez OA184) i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.27 i u tabeli 3.27. Na slici 3.27 dati su $\Sigma - D$ dijagrami samo za slučajeve koji odgovaraju relacijama (3.82) i (3.83).

Tabela 3.27. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji (bez OA184) kalibratorima Huanga i Tadeuša.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
9	2.60 ± 0.25	85
8	2.60 ± 0.26	84
7	2.55 ± 0.24	87
6	2.53 ± 0.25	87
5	2.51 ± 0.23	89
4	2.48 ± 0.24	88

Slika 3.27. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D (Huang & Thaddeus–H&T, 1985).
 Desno – H&T zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni H&T kalibratori, a kružićima petlje.





Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 4.25^{+6.71}_{-2.60} \times 10^{-17} D^{-2.48 \pm 0.24}. \quad (3.83)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = 0.72, \quad \bar{\beta} = 2.54, \quad \Delta\beta = 0.65. \quad (3.84)$$

Iz tabele (3.27) i odgovarajućih relacija se vidi da je promena koeficijenta β izvan intervala zadatog greškama u početnim relacijama. Na prvi pogled ova relacija ne podržava SNR hipotezu glavnih petlj. Dublje gledano, ovakav rezultat bi trebalo očekivati, jer je poznato da je okolina Sunca prilično razredena (npr. Kosarev et al., 1994), dok su kalibratori koji definišu početnu relaciju vezani za molekularne oblake. Ako su petlje SNR-ovi, moraju biti u okolini Sunca koje je u kavitetu niske meduzvezdane gustine. Odатле sledi da petlje evoluiraju u različitom okruženju u odnosu na evoluciju ostataka u gušćem okruženju molekularnih oblaka. Samim tim ista $\Sigma - D$ relacija ne bi trebalo da opisuje petlje i ostatke iz molekularnih oblaka. Promena koeficijenta β bi trebalo da bude naglašenija. To je našim testom i potvrđeno.

3.18. Relacija Alahverdiyeva sa saradnicima (Allakhverdiyev et al., 1986a,b)

Nastavljujući rad na ovoj tematiki, autori ova dva članka poboljšavaju pristup izboru kalibratora $\Sigma - D$ relacije u odnosu na njihove radove iz 1983. godine. U članku (a) iz 1986. godine je pokazano da samo ostaci ljkuskastog tipa koji evoluiraju u sredini približno iste gustine mogu biti kalibratori $\Sigma - D$ relacije. Članak (b) pokazuje da poznavanje rastojanja do SNR-a nije dovoljno da taj ostatak postane kalibrator. Zatim, da ni porast broja kalibratora, niti povećanje tačnosti određivanja uglovnog dijametra i gustine fluksa ne dovode do bitnijeg poboljšanja kvaliteta $\Sigma - D$ relacije. Uzimajući u obzir i sve uslove iz radova iz 1983. godine, spisak kalibratora je proširen za još tri člana. To su: G114.3+0.3, G116.5+1.1 i S147. Sada set kalibratora sadrži 17 ostataka. Za ovako strogo određene kalibratore konstruisane su dve relacije na frekvenciji od 1 GHz. Prva je za površinski sjaj $\Sigma \geq 2 \times 10^{-20} \text{ W m}^{-2} \text{Hz}^{-1} \text{sr}^{-1}$ (6 ostataka). Zavisnost ima oblik $\Sigma \propto D^{-3}$. Za sjaj $\Sigma < 2 \times 10^{-20} \text{ W m}^{-2} \text{Hz}^{-1} \text{sr}^{-1}$ (11 ostataka) koeficijent $\beta = 6$. Nije naglašeno na koji način su izračunate ove vrednosti.

Prelazimo na testiranje. Relacija za ostatke većeg sjaja ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 6.34^{+52.41}_{-5.65} \times 10^{-17} D^{-2.87 \pm 1.05}, \quad (3.85)$$

sa slaganjem od 65%.

Relaciji (3.85) pridružujemo kalibracione petlje i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.28 i u tabeli 3.28. Na slici 3.28 dati su $\Sigma - D$ dijagrami samo za slučajeve koji odgovaraju relacijama (3.85) i (3.86).

Tabela 3.28. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji relaciji Alahverdijeva sa saradnicima iz 1986. godine za slučaj ostataka većeg sjaja.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
10	2.35 ± 0.23	88
9	2.34 ± 0.24	88
7	2.34 ± 0.23	90
6	2.31 ± 0.25	90
5	2.28 ± 0.23	91
4	2.23 ± 0.25	91

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{\text{GHz}} = 1.92_{-1.16}^{+2.94} \times 10^{-17} D^{-2.23 \pm 0.25}. \quad (3.86)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = 0.64, \quad \bar{\beta} = 2.31, \quad \Delta\beta = 0.56. \quad (3.87)$$

Relacija za ostatke manjeg sjaja ima oblik:

$$\Sigma_{\text{GHz}} = 1.10_{-1.02}^{+13.84} \times 10^{-15} D^{-3.75 \pm 0.72}, \quad (3.88)$$

sa slaganjem od 75%.

Relaciji (3.88) pridružujemo kalibracione petlje (bez S147 i Monoceros petlje) i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.29 i u tabeli 3.29. Na slici 3.29 dati su $\Sigma - D$ dijagrami samo za slučajeve koji odgovaraju relacijama (3.88) i (3.89).

Tabela 3.29. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji (bez S147 i Monoceros petlje) relaciji Alahverdijeva sa saradnicima iz 1986. godine za slučaj ostataka nižeg sjaja.

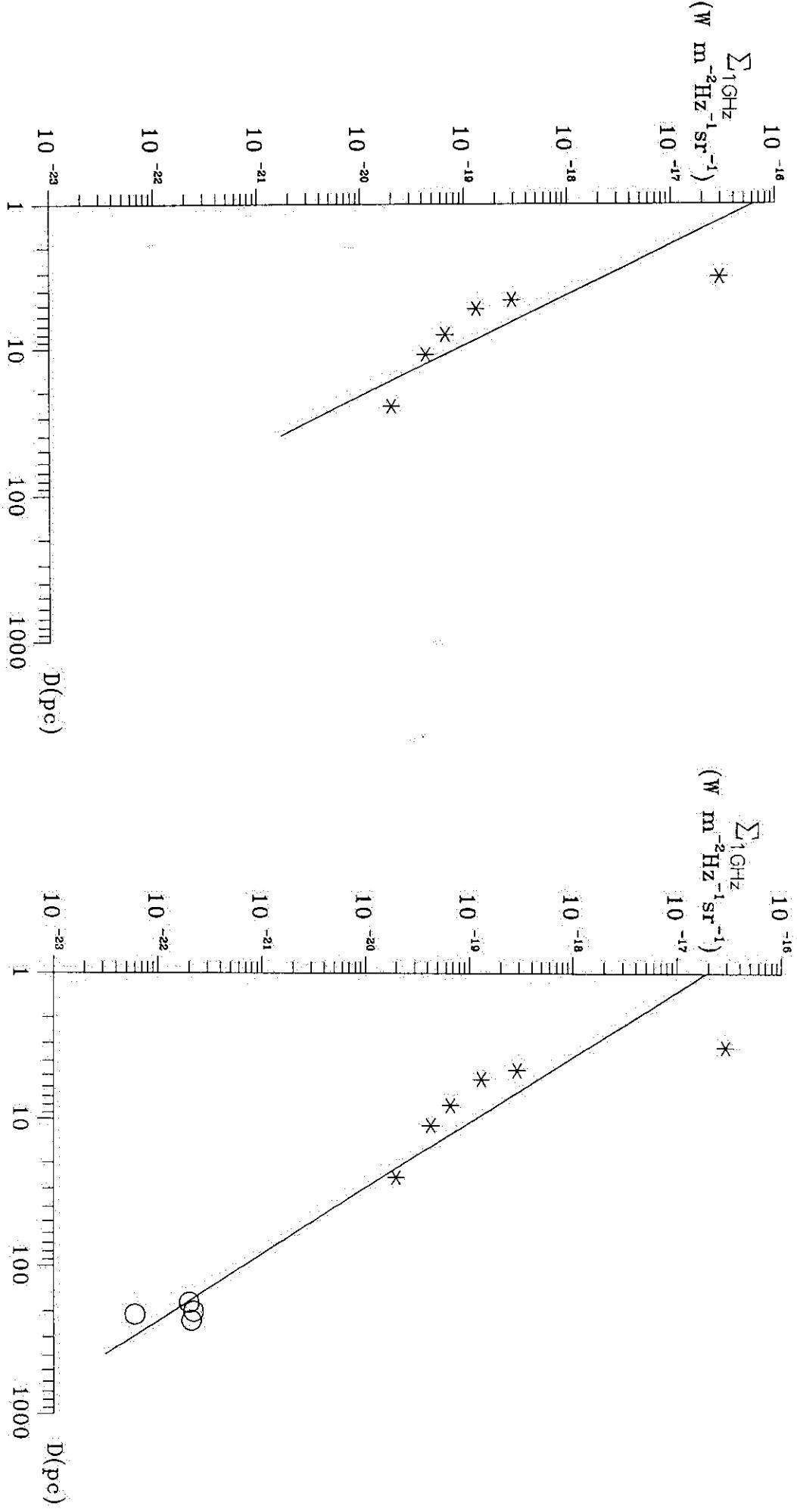
broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
8	1.68 ± 0.31	63
7	1.66 ± 0.33	62
6	1.73 ± 0.32	66
5	1.71 ± 0.34	64
5	1.73 ± 0.33	67
4	1.70 ± 0.34	65

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

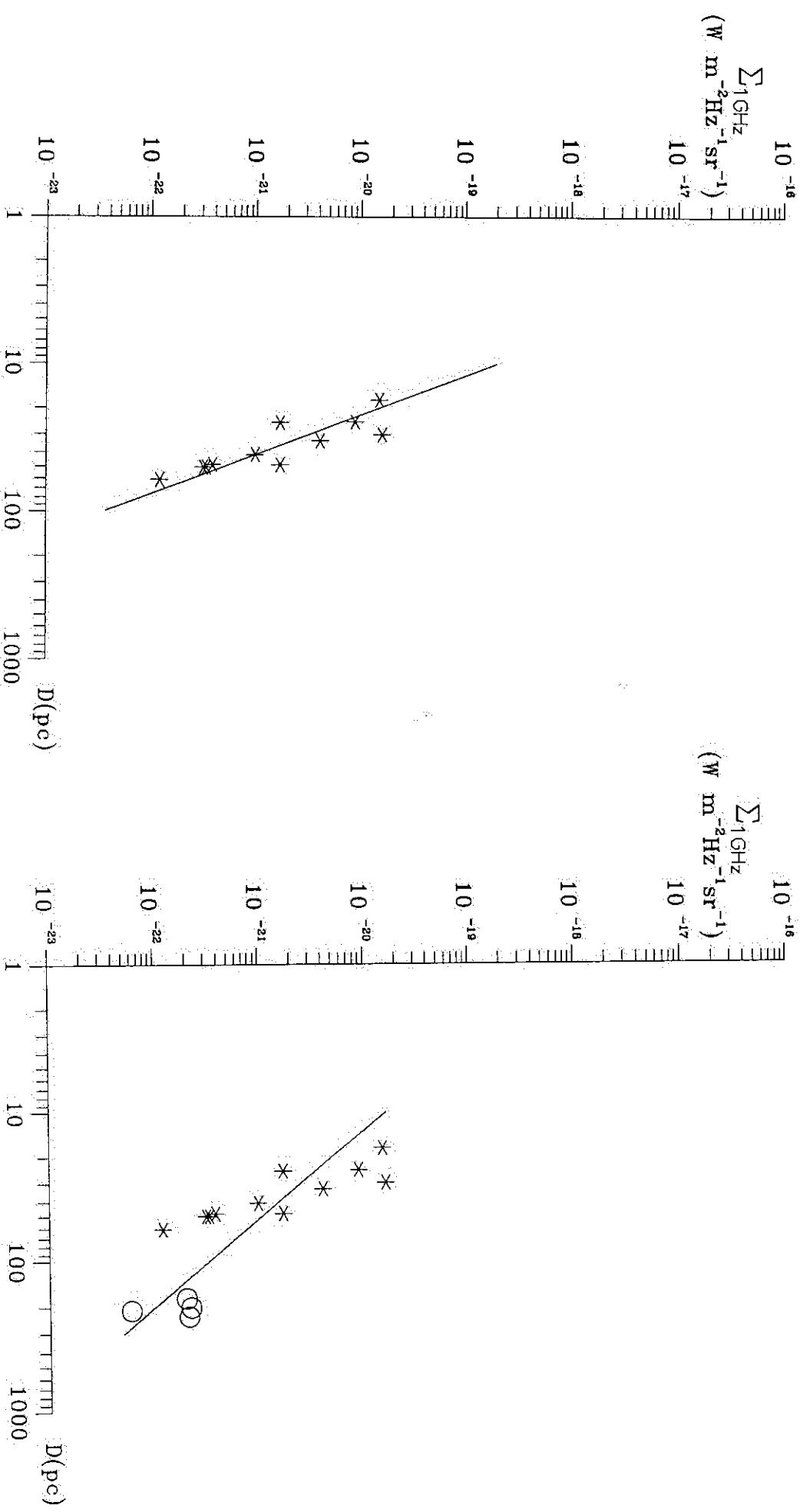
$$\Sigma_{\text{GHz}} = 8.23_{-6.25}^{+25.98} \times 10^{-19} D^{-1.70 \pm 0.34}. \quad (3.89)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

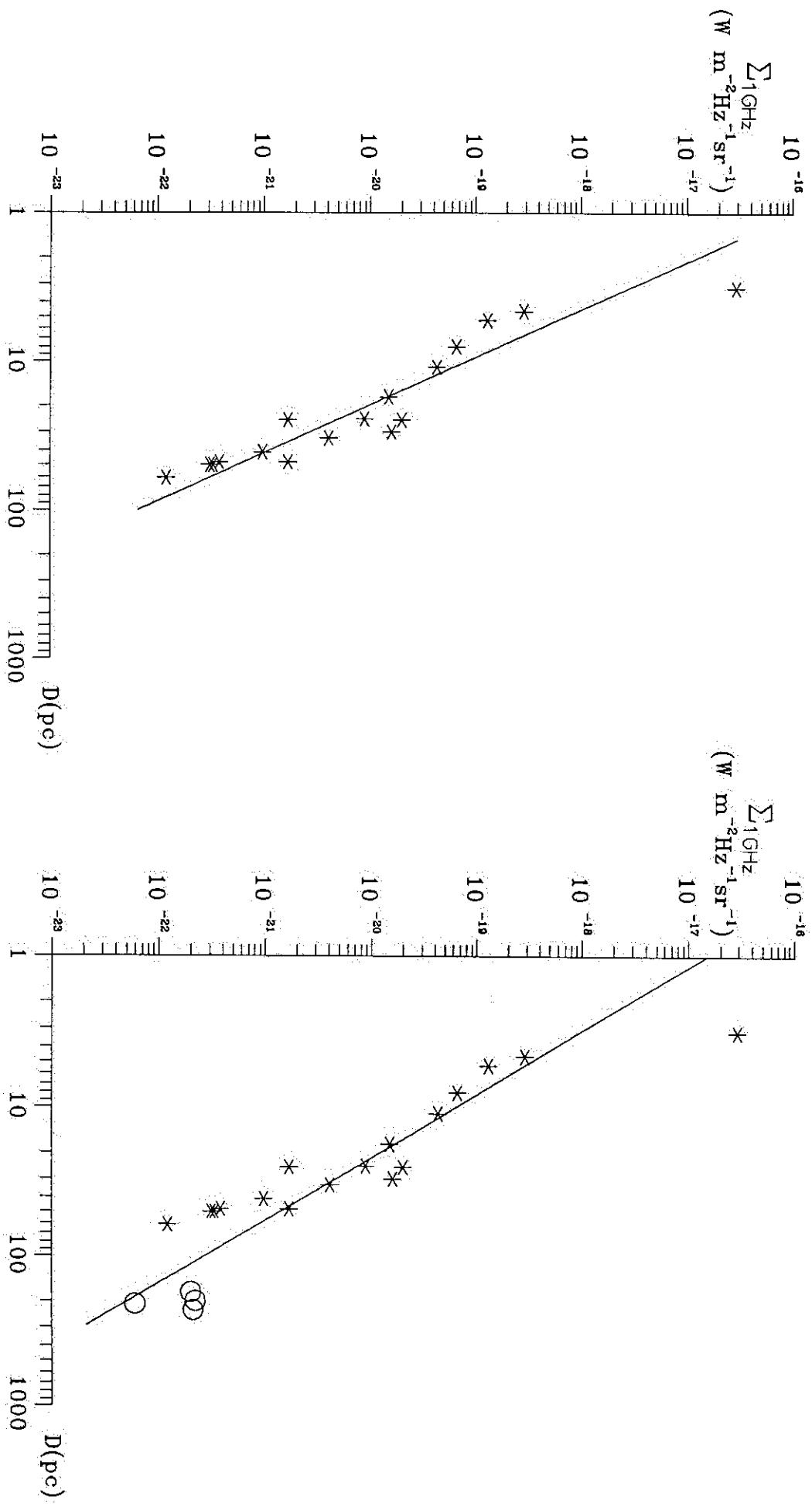
Slika 3.28. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za ostatke većih sjajeva (Allakhverdiyev et al.–A86, 1986). Desno – A86 zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni A86 kalibratori, a kružićima petlje.



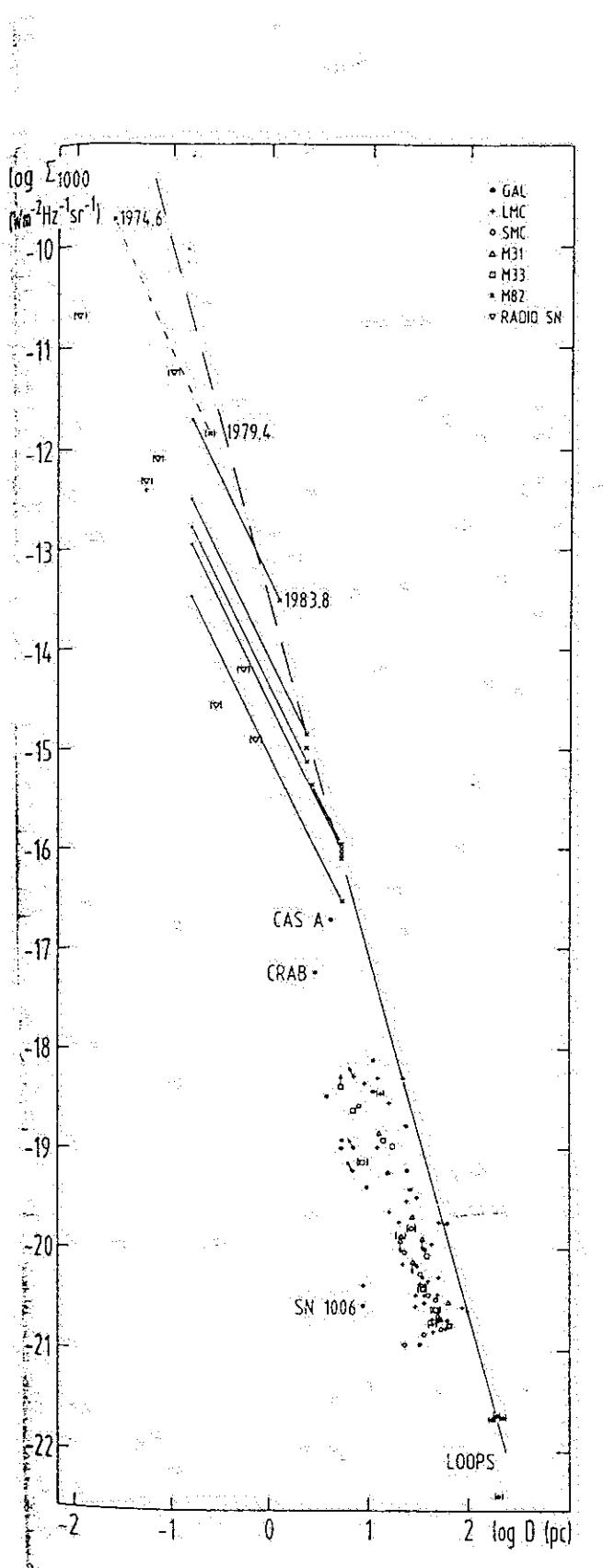
Slika 3.29. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za ostatke manjih sjajeva (Allakhverdiyev et al. – A86, 1986). Desno – A86 zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni A86 kalibratori, a kružićima a petlje.



Slika 3.30. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za svih 17 kalibratora (Allakhverdiyev et al.–A86, 1986). Desno – A86 zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni A86 kalibratori, a kružićima petlje.



Slika 3.31. $\Sigma - D$ dijagram Berkhuijsenove (Berkhuijsen, 1986)



$$\Delta\beta_4 = 2.05, \quad \bar{\beta} = 1.70, \quad \Delta\beta = 2.05. \quad (3.90)$$

Ako bismo uzeli svih 17 kalibratora koji predstavljaju vrlo dobro odabrane ljkusaste ostatke i izvršili standardno testiranje dobili bismo sledeću relaciju (ovaj slučaj nije obraden u člancima Alahverdijeva sa saradnicima):

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 1.04^{+1.71}_{-0.65} \times 10^{-16} D^{-3.10 \pm 0.31}, \quad (3.91)$$

sa slaganjem od 87%.

Relaciji (3.91) pridružujemo kalibracione petlje (bez S147 i Monoceros petlje) i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.30 i u tabeli 3.30. Na slici 3.30 dati su $\Sigma - D$ dijagrami samo za slučajeve koji odgovaraju relacijama (3.91) i (3.92).

Tabela 3.30. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji (bez S147 i Monoceros petlje) relaciji Alahverdijeva sa saradnicima iz 1986. godine za svih 17 ljkusastih kalibratora.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
8	2.36 ± 0.22	83
7	2.36 ± 0.23	83
6	2.39 ± 0.23	84
5	2.39 ± 0.24	83
5	2.38 ± 0.23	84
4	2.37 ± 0.24	83

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 1.49^{+2.15}_{-0.88} \times 10^{-17} D^{-2.37 \pm 0.24}. \quad (3.92)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = 0.73, \quad \bar{\beta} = 2.37, \quad \Delta\beta = 0.72. \quad (3.93)$$

Slični zaključci kao u poglavlju 3.15 mogu se izvesti i u ovom poglavlju. Velika greška za koeficijent β u početnoj relaciji za ostatke sa većim sjajem, ogromna promena $\Delta\beta$ za drugi slučaj i gotovo identični rezultati za svih 17 kalibratora (u odnosu na odgovarajući slučaj iz poglavlja 3.15) navode nas na zaključak da ovi rezultati testova ne mogu podržati SNR hipotezu radio-petlji.

3.19. Relacija Berkhuijsenove (Berkhuijsen, 1986)

U ovom radu je izložen katalog SNR-ova sa poznatim daljinama. Katalog čine galaktički ostaci (njih 22, svih vrsta, zajedno sa glavnim petljama), zatim 34 ostatka iz Velikog Magelanovog oblaka, 11 SNR-ova iz Malog Magelanovog oblaka, 8 iz galaksije M31, 9 iz galaksije M33, ukupno 84 ostatka sa poznatim daljinama. Berkhuijsenova je konstruisala

relaciju između površinskog sjaja i dijametra za ove ostatke, ali ne na standardan način. Povukla je liniju maksimalnih posmatranih dijimetara. Samim tim je definisala gornju granicu daljine određenog ostatka. Ova relacija je oblika:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 2.51 \times 10^{-14} D^{-3.5}. \quad (3.94)$$

Gledajući $\Sigma - D$ dijagram (slika 3.31), gotovo svi SNR-ovi su levo od linije. Petlja I je desno od linije, a Petlja III na njoj.

Zbog načina konstrukcije ovu relaciju nećemo testirati. Ona ne predstavlja najbolju relaciju za kalibracione SNR-ove već prikazuje jedan zanimljiv efekt.

Na slici 3.31 je inače prikazan originalni $\Sigma - D$ dijagram Berkhujsenove iz 1986. godine.

3.20. Ponovni kritički osvrt na $\Sigma - D$ relaciju (Green, 1991)

Od 1986. godine zamire rad na ovoj problematici skoro čitavu deceniju. Grin 1991. godine još jednom potencira da valjana $\Sigma - D$ relacija ne može biti konstruisana. On svom setu od 18 kalibratora (Green, 1984) dodaje još 6 za koje postoje pouzdano određene daljine. Nanosi 24 ostatka na $\Sigma - D$ dijagram (Σ je na 1GHz), ne vuče liniju fita i zaključuje ponovo da je rasipanje tačaka veliko da bi se definisala valjana relacija. Novi ostaci sa pouzdanim daljinama dodati setu kalibratora su: G11.2-0.3, G21.5-0.9, CTB87, G166.0+4.3, OA184 i IC443. Rastojanje do SN1006 je promenjeno u odnosu na vrednost u radu iz 1984. godine te je samim tim ovaj ostatak promenio svoje mesto na dijagramu. Rad iz 1991. godine sadrži katalog 174 galaktička SNR-a. Iz ovog kataloga su korišćeni svi podaci za naredno testiranje.

Pošto Grin u svom radu nije prikazao koeficijente "svoje" $\Sigma - D$ relacije, ovde ćemo ih odrediti i izvršiti testiranje kao i do sada.

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 1.61^{+2.28}_{-0.94} \times 10^{-17} D^{-2.16 \pm 0.30}, \quad (3.95)$$

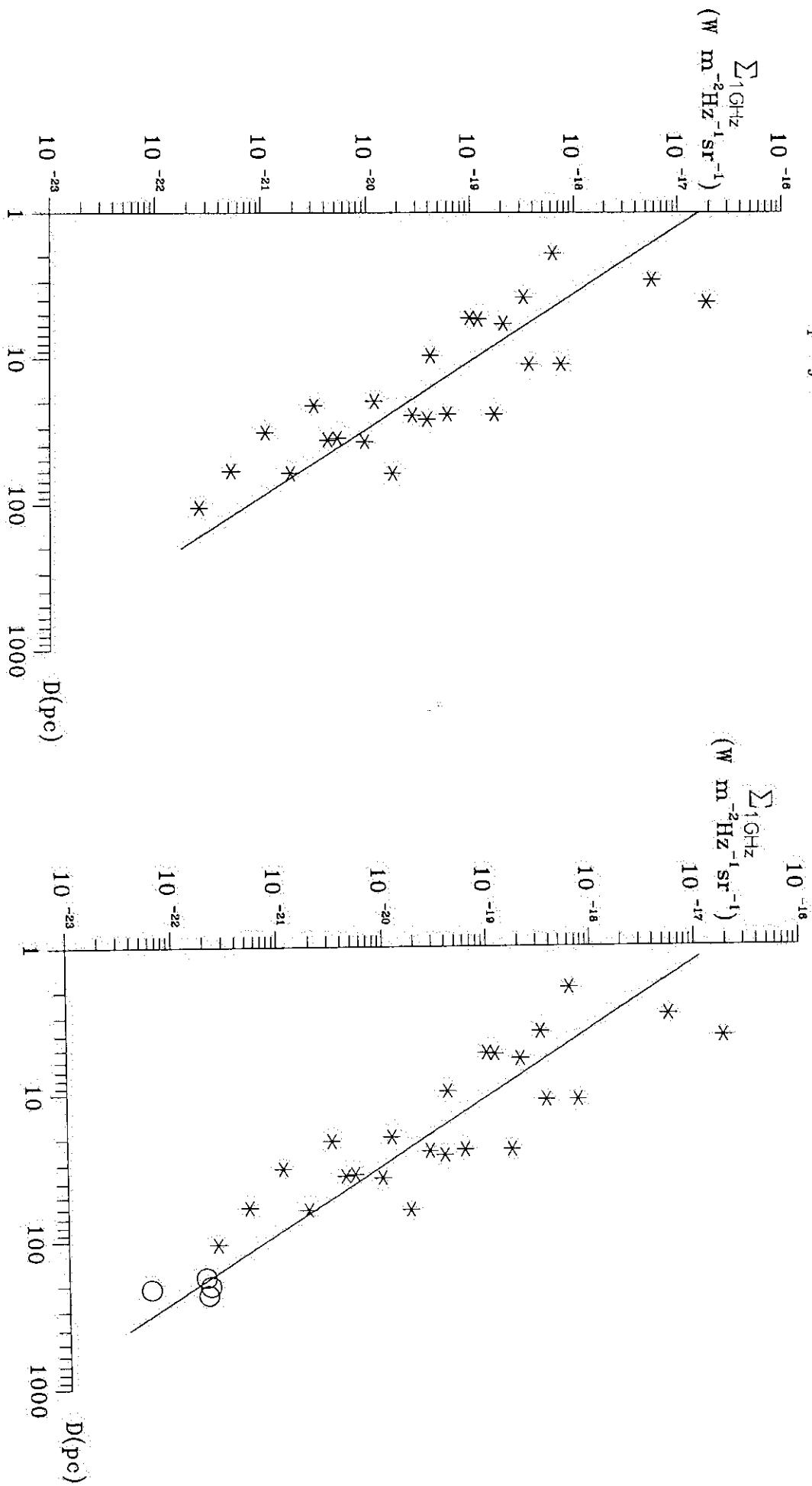
sa slaganjem od 71%. Jasno je da je ova relacija sasvim solidna jer se bitno razlikuje od relacije iz 1984. godine. Koeficijent slaganja se povećao za 17%. Rasipanje tačaka je na nivou prethodno analiziranih relacija.

Relaciji (3.95) pridružujemo kalibracione petlje (bez OA184) i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.32 i u tabeli 3.31. Na slici 3.32 dati su $\Sigma - D$ dijagrami samo za slučajeve koji odgovaraju relacijama (3.95) i (3.96).

Tabela 3.31. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji (bez OA184) Grinovim kalibratorima (Green, 1991).

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
9	2.34 ± 0.20	81
8	2.32 ± 0.21	81
7	2.27 ± 0.20	82
6	2.24 ± 0.20	81
5	2.21 ± 0.20	82
4	2.17 ± 0.21	81

Slika 3.32. Isto – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D (Green, 1991).
 Desno – Grinova zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni Grinovi kalibratori, a kružićima petlje.





Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{\text{1GHz}} = 1.66^{+1.69}_{-0.84} \times 10^{-17} D^{-2.17 \pm 0.21}. \quad (3.96)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = -0.01, \quad \bar{\beta} = 2.26, \quad \Delta\beta = -0.1. \quad (3.97)$$

Rezultati prethodnog testa su ubedljivo najbolji do sada što se potvrde SNR porekla radio-petlji tiče. Dodavanjem glavnih petlji dobijamo zanemarljive promene (vidi jednakost 3.97). Koeficijent slaganja raste za više od 10%. Petlje ponovo uravnotežavaju relaciju, to jest popunjavaju deo dijagrama koji nedostaje. Petlje II i IV su levo od linije fita, a Petlja III gotovo da je na liniji (slika 3.32). Još jednom naglašavamo da to znači da Petlje II i IV imaju dijametre manje od prosečnih, koje definišu prethodne dve $\Sigma - D$ relacije, dok je Petlja III sa gotovo prosečnim dijametrom. Greške koeficijenata A i β se smanjuju dodavanjem kalibracionih petlji.

Negativna strana rezultata je ta da sa smanjenjem broja kalibracionih petlji promena koeficijenta β opada, što ne bi trebalo da bude prirodan tok promene. Negativna strana početne relacije je ta što je izvedena sa kalibratorima sve tri vrste, a po Alahverdiyevu sa saradnicima (Allakhverdiyev et al., 1986a), može se konstruisati relacija samo za ostatke ljudskastog tipa. Uprkos ovim nedostacima početna relacija je definisana kalibratorima sa najbolje određenim daljinama.

Grin nije smatrao da je njegova relacija dovoljno dobra, mada je očigledno da empirijska $\Sigma - D$ zavisnost za SNR-ove ipak postoji i u skladu s tim i prethodnim testom, autor ove disertacije smatra da Grinova relacija pokazuje solidne efekte $\Sigma - D$ zavisnosti. Iz svega prethodnog se ipak može zaključiti da rezultati testa Grinove relacije iz 1991. godine mogu biti prilog potvrdi SNR porekla radio-petlji.

3.21. Relacija Kejsa i Batačarije (Case & Bhattacharya, 1998)

Posle pauze od desetak godina Kejs i Batačarija su obnovili istraživanja empirijske $\Sigma - D$ relacije. Već 1995. godine su nagovestili istraživanja u ovom pravcu. Zatim 1996. godine objavljaju članak u kome nastavljaju rad na problemima rasporeda SNR-ova u našoj galaksiji. Celo istraživanje je krunisano radom iz 1998. godine koji ćemo u ovom poglavljju analizirati.

Napredak radio-astronomске tehnike i instrumenata za posmatranja u X -području u poslednje dve decenije je doveo do velikog porasta broja identifikovanih supernovih ostataka i do boljeg određivanja osobina SNR-ova. Novijim posmatranjima je otkriveno više ostataka koji su malog sjaja i sa velikim dijametrima. Posebno, u današnje vreme imamo znatno više ostataka sa solidno određenim daljinama. Ipak, do ovog rada, daljine do većine ostataka su određivane kinematičkom metodom, upotrebom stare rotacione krive (bazirane na $R_\odot = 10$ kpc i $V_\odot = 250$ km/s). Kejs i Batačarija su upotrebili najnoviju rotacionu krivu (baziranu na $R_\odot = 8.5$ kpc i $V_\odot = 220$ km/s) za ponovni proračun rastojanja do kalibratora. Za kalibratore $\Sigma - D$ relacije je uspostavljen set od 36 ljudskastih ostataka (sa Cas A, 37), za koje je, gde je bila neophodna kinematička metoda, izračunata daljina

upotrebo novih galaktičkih konstanti. Koeficijent β sa Cas A ima vrednost 2.64 ± 0.26 . Bez ovog ostataka je $\beta = 2.38 \pm 0.26$. Autori ovog rada smatraju drugu vrednost za reprezentativniju jer su mišljenja da Cas A nije SNR najnormalnijih karakteristika. Nezavisan test ove relacije je izvršen i zajedno sa vangalaktičkim SNR-ovima iz Magelanovih oblaka. Dobijeno je odlično poklapanje. Relacija definisana sa prethodnih 37 kalibratora zajedno sa 41 kalibrатором из Magelanovih oblaka (katalog Berkhuijsenove iz 1986. godine) daje vrednost $\beta = 2.41$. Od početka rada na empirijskoj $\Sigma - D$ relaciji je primećeno da ostaci iz Magelanovih oblaka definišu blažu zavisnost u odnosu na nagib galaktičkih relacija. Na primer u radu Metjusona sa saradnicima (Mathewson et al., 1983) dobijena je vrednost $\beta = 2.6$. Ovo neslaganje je objašnjavano razlikom u gustini okoline SNR-ova u našoj galaksiji u odnosu na gustinu okoline u Magelanovim oblacima. Radom Kejsa i Batačarije se pokazuje da nema bitnije razlike između relacija za galaktičke ostatke i ostatke u Magelanovim oblacima. Odnosno, da su prethodne galaktičke relacije imale sistematsku grešku zbog loše određenih kalibracionih daljina, a da su relacije definisane za Magelanove oblake bile tačnije. Detaljnija diskusija o vangalaktičkim $\Sigma - D$ relacijama je u narednoj glavi.

Kejs i Batačarija su svoje relacije odredili na frekvenciji od 1 GHz. Koeficijente su dobili metodom najmanjih kvadrata. Kalibratori su isključivo ljkastci ostaci. To su: Kepler SNR, Kes 67, 3C391, Kes 79, W49B, HC30, W51, 3C400.2, HC40, Cygnus Loop, γ Cygni, G84.2+0.8, HB21, G116.5+1.1, CTB1, CTA1, Tycho SNR, HB3, G156.2+5.7, HB9, VRO42.05.01, OA184, IC443, Monoceros loop, Puppis A, PKS1209–52, Kes 17, G309.8+0.0, RCW86, SN1006, Lupus Loop, RCW103, CTB37A, CTB37B, G349.7+0.2, G359.1–0.5 i Cas A.

Kao i do sada izvršićemo testiranje relacija Kejsa i Batačarije. Relacija za svih 37 kalibratora ima oblik:

$$\Sigma_{\text{1GHz}} = 5.83^{+8.83}_{-3.51} \times 10^{-17} D^{-2.65 \pm 0.27}, \quad (3.98)$$

sa slaganjem od 74%.

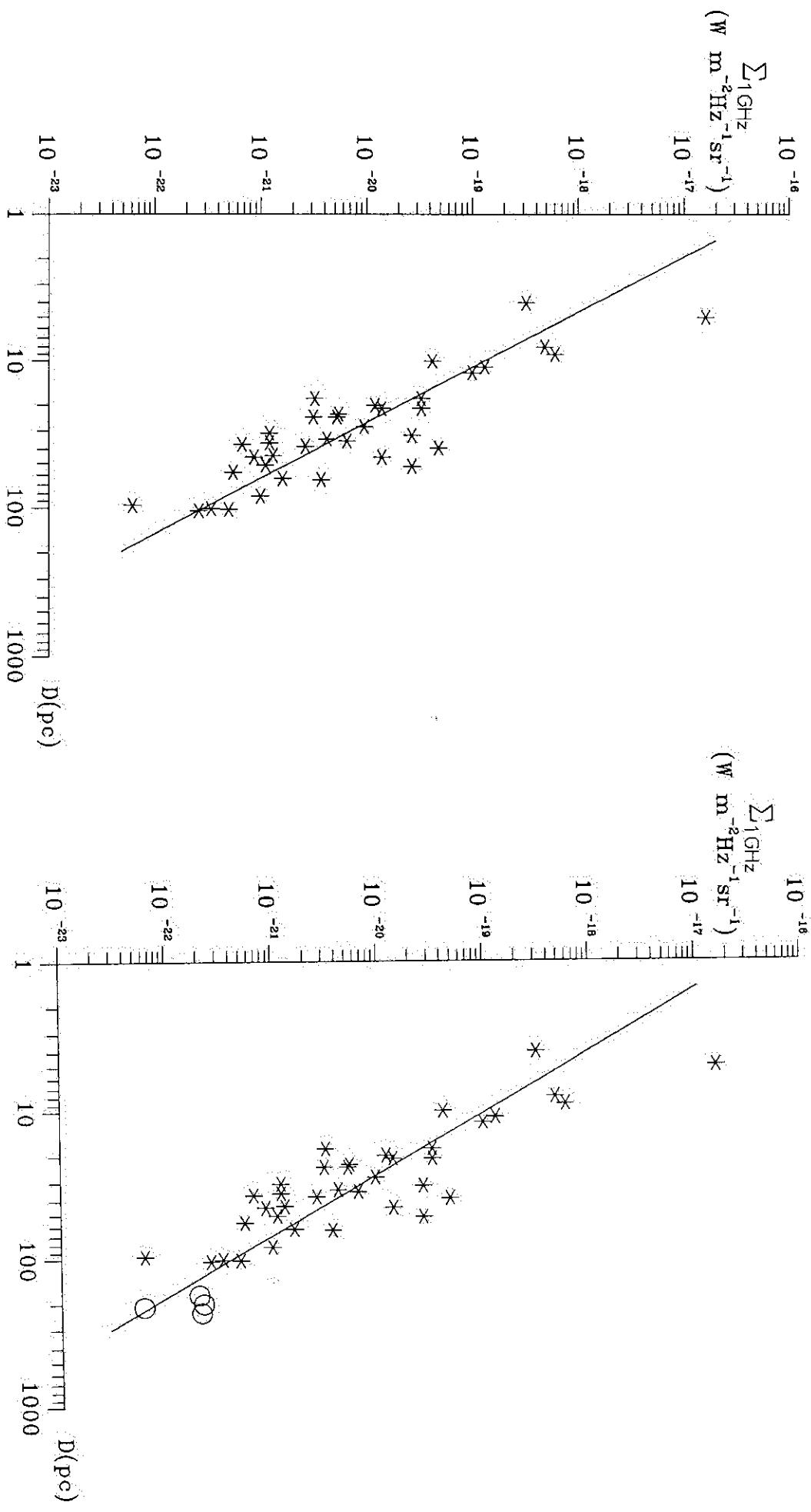
Relaciji (3.98) pridružujemo kalibracione petlje (bez OA184, Monoceros petlje i Lupus petlje) i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.33 i u tabeli 3.32. Na slici 3.33 dati su $\Sigma - D$ dijagrami samo za slučajevе koji odgovaraju relacijama (3.98) i (3.99).

Tabela 3.32. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji (bez OA184, Monoceros petlje i Lupus petlje) kalibratorima Kejsa i Batačarije (uključujući Cas A).

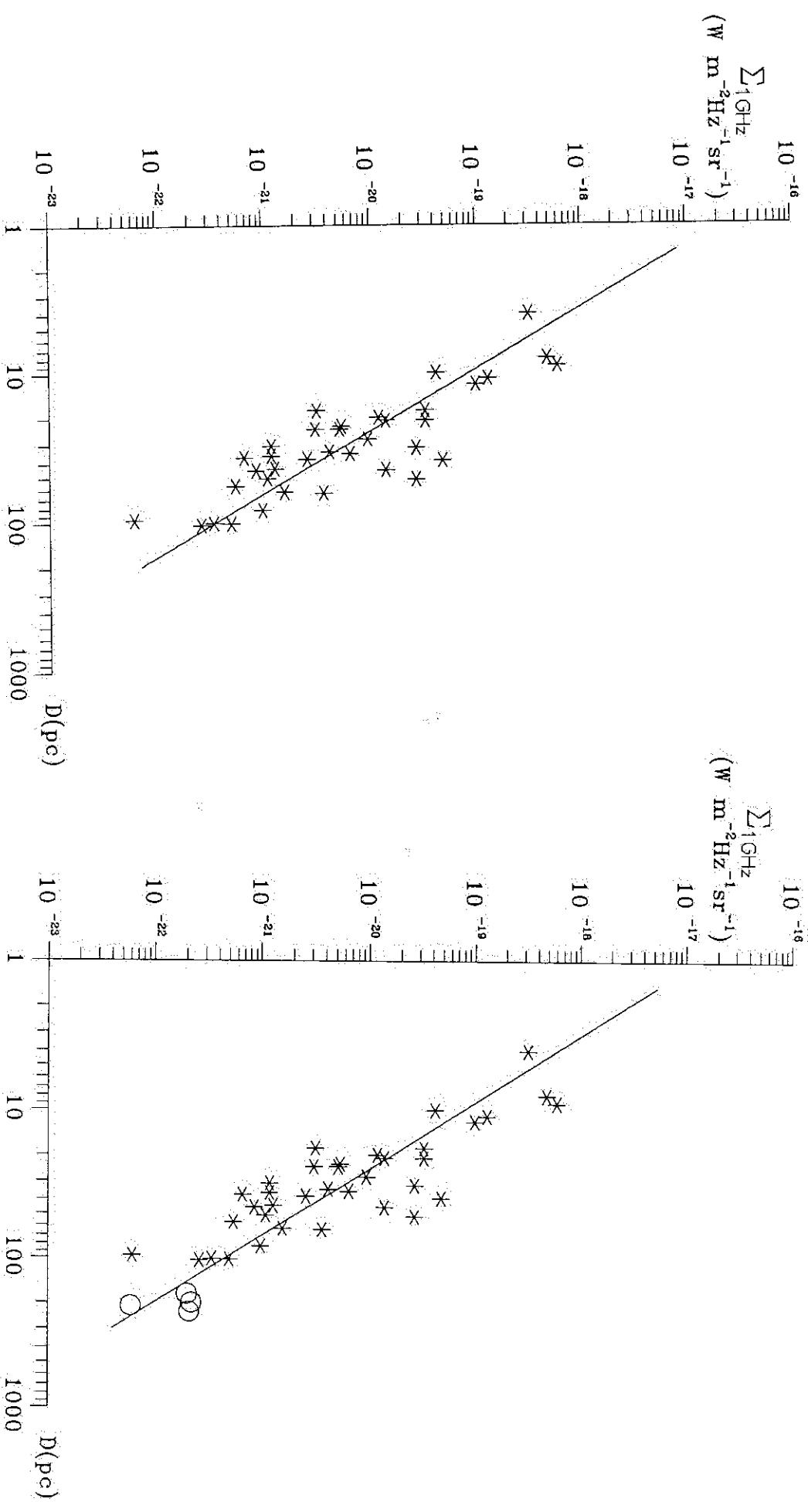
broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
7	2.49 ± 0.21	78
6	2.48 ± 0.21	77
5	2.44 ± 0.20	78
4	2.42 ± 0.21	77

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

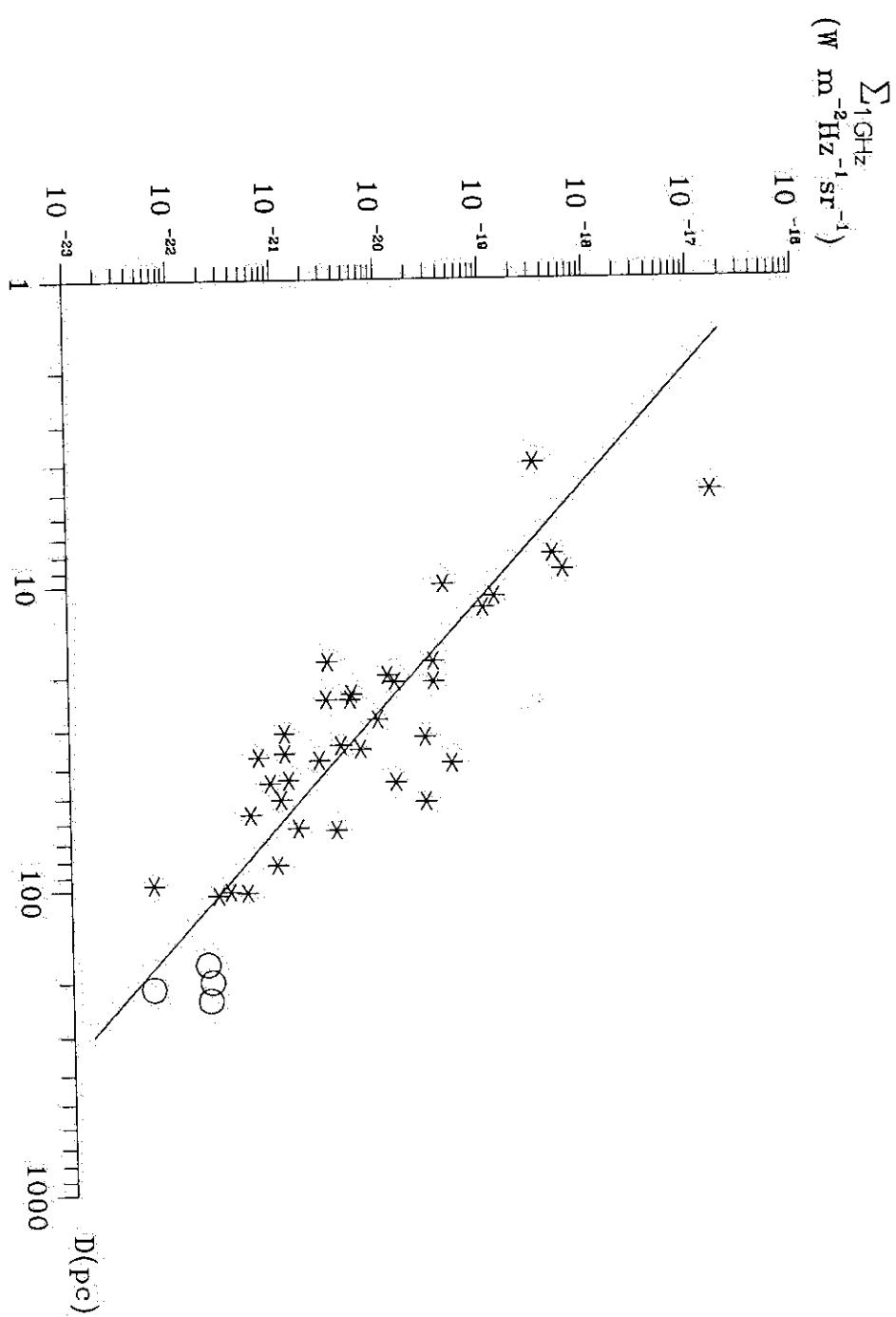
Slika 3.33. Levo - zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za 37 kalibratora (Case & Bhattacharya-C&B, 1998). Desno - C&B zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni C&B kalibratori, a kružićima petlje.



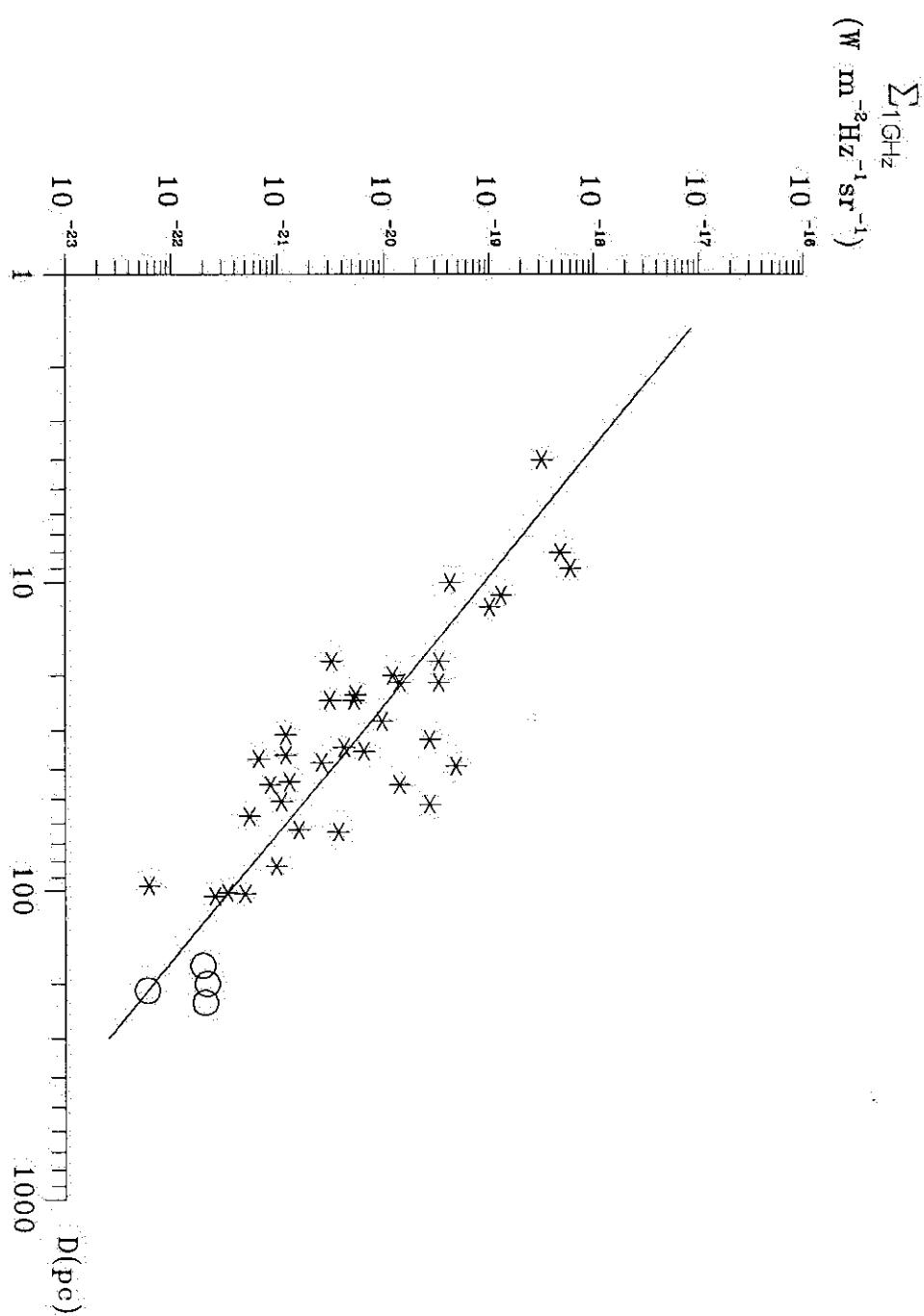
Slika 3.34. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za 36 kalibratora (bez Cas A) (Case & Bhattacharya–C&B, 1998). Desno – C&B zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni C&B kalibratori, a kružićima petlje.



Slika 3.35. Zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za 37 kalibratora (Case & Bhattacharya-C&B, 1998) sa dočitane 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni C&B kalibratori, a kružićima petlje.



Slika 3.36. Zavisnost površinskog sjaja, Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za 36 kalibratora (bez Cas A) (Case & Bhattacharya-C&B, 1998) sa dočrtane 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni C&B kalibratori, a kružićima petlje.



$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 2.88_{-1.55}^{+3.37} \times 10^{-17} D^{-2.42 \pm 0.21}. \quad (3.99)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = 0.23, \quad \bar{\beta} = 2.46, \quad \Delta\beta = 0.19. \quad (3.100)$$

Relacija za 36 kalibratora (bez Cas A) ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 2.22_{-1.34}^{+3.37} \times 10^{-17} D^{-2.40 \pm 0.26}, \quad (3.101)$$

sa slaganjem od 71%.

Relaciji (3.101) pridružujemo kalibracione petlje (bez OA184, Monoceros petlje i Lupus petlje) i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 3.34 i u tabeli 3.33. Na slici 3.34 dati su $\Sigma - D$ dijagrami samo za slučajeve koji odgovaraju relacijama (3.101) i (3.102).

Tabela 3.33. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji (bez OA184, Monoceros petlje i Lupus petlje) kalibratorima Kejsa i Batačarije (isključujući Cas A).

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
7	2.30 ± 0.20	76
6	2.29 ± 0.21	75
5	2.25 ± 0.20	77
4	2.23 ± 0.20	76

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 1.31_{-0.69}^{+1.46} \times 10^{-17} D^{-2.23 \pm 0.20}. \quad (3.102)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = 0.17, \quad \bar{\beta} = 2.27, \quad \Delta\beta = 0.13. \quad (3.103)$$

Rezultati prethodna dva testa jednostavno rečeno potvrđuju SNR poreklo radio-petlji. Sve loše strane koje pokazuju rezultati testa iz poglavlja 3.20 ovde se ne pokazuju. Koeficijenti β upadaju u intervale zadate greškama, Petlja IV je levo od linija fita (slike 3.33, 3.34).

Pošto relacija definisana bez ostatka Cas A daje najbolje rezultate, u odnosu na sve dosadašnje testove, a i Kejs i Batačarija je smatraju za najprihvatljiviju, diskutovaćemo rezultate testa samo ove relacije. Koeficijent slaganja za slučaj pridruživanja glavnih petlji raste za 5%. Petlje ponovo popunjavaju donju desnu oblast $\Sigma - D$ dijagrama (koja nedostaje) i uravnotežavaju relaciju. Greške koeficijenata A i β se smanjuju sa pridruživanjem petlji. Petlja IV ima manji dijametar u odnosu na srednji dijametar definisan relacijom (3.102). Jedino što je lošije u odnosu na test iz poglavlja 3.20 je promena koeficijenta β .

Tamo je ta promena zanemarljiva, ovde nije, ali je statistički gledano sasvim prihvatljiva (jednakosti (3.103)). Petlja II je levo od linije, ovde je desno. Ipak, po mišljenju autora ove disertacije rezultati testa relacije (3.101) predstavljaju korektniju potvrdu hipoteze o SNR poreklu radio-petlji nego rezultati iz poglavlja 3.20, jer raste promena koeficijenta β sa smanjenjem broja kalibracionih petlji, kalibratori imaju tačnije daljine i relacija je izvedena samo za ljuskaste ostatke. Na kraju krajeva, od 24 Grinova kalibratora (Green, 1991) čak njih 10 je bilo sa nedovoljno tačnim daljinama koje su Kejs i Batačarija nanovo izračunali.

U skladu sa prethodno navedenim da relacija Kejsa i Batačarije najbolje pokazuje SNR poreklo radio-petlji, na $\Sigma - D$ dijagrame koji odgovaraju relacijama (3.98) i (3.101) su samo dočrtane glavne petlje. Očigledno je sa slika 3.35 i 3.36, (prva odgovara relaciji (3.98), a druga relaciji (3.101)) da je Petlja I (dijametar 230 pc) bliža liniji od kalibratora tog istog fita Cas A. Samim tim se može zaključiti da je Petlja I normalniji ostatak supernove zvezde što se veže između površinskog sjaja i dijametra ostatka tice. Ako je Petlja I normalnija onda su i ostale tri, jer je Petlja I najekstremniji slučaj u svim dosadašnjim testovima. Sem toga nije samo Cas A ostatak koji je dalje od linije fita u odnosu na radio-petlje. Ima ih bar još tri (W51, SN1006, CTB37A). Ostatak SN1006 je dalji, ali je sa leve strane linije fita (u oblasti malih dijametara).

Za slučaj relacije (3.101) je još bolja povezanost fita i dočrtanih glavnih petlji (slika 3.36). Petlja IV je na liniji. Znači da je sasvim normalan ostatak što se $\Sigma - D$ zavisnosti tiče. U odnosu na liniju fita veće udaljenje pokazuje bar 8 kalibracionih ostataka (tri kao u prethodnom slučaju + Kes 67, CTA1, G156.2+5.7, CTB37B, G349.7+0.2) od udaljenja koje pokazuje Petlja I. To znači da za tačno definisan sjaj neki od tih ostataka imaju veće dijmetre nego što za svoj sjaj ima Petlja I. Ostaci CTA1 i G156.2+5.7 su udaljeniji, ali sa leve strane linije fita, to jest u oblasti su minimalnih dijametara.

Iz svega prethodno navedenog sledi da veliki dijametri više ni bi trebalo da predstavljaju glavni nedostatak SNR hipoteze porekla radio-petlji, a odatle i da su petlje po $\Sigma - D$ zavisnosti ostaci supernovih zvezda.

4. POVEZANOST RADIO-PETLJI SA VANGALAKTIČKIM $\Sigma - D$ RELACIJAMA

4.1. Uvod

Pri određivanju vangalaktičkih $\Sigma - D$ relacija postoji bitna olakšavajuća okolnost u odnosu na izvođenje galaktičkih relacija, jer ne postoji problem pojedinačnog određivanja daljina do kalibratora. Ako je pouzdano odredena daljina do galaksije, neophodno je samo identifikovati SNR da bi isti postao kalibrator. Pogodnosti koje za određivanje $\Sigma - D$ relacije dobijamo posmatrajući ostatke u drugim galaksijama detaljno su objašnjene u poglavlju 3.1. Sa poboljšavanjem radio-astronomskе tehnike, sve se više ostataka otkriva u drugim galaksijama. Ipak, što su veće daljine, SNR-ove je teže identifikovati. Najpovoljnije za izučavanje su nama najbliže galaksije: Veliki i Mali Magelanov oblak, pa zatim galaksije M31 i M33. Na žalost najbolji radio-teleskopi za posmatranja vangalaktičkih supernovih ostataka su na severnoj Zemljinoj polulopti, pa se njima ne mogu posmatrati Magelanovi oblaci. Zbog toga dve nama najbliže spiralne galaksije M31 i M33 u poslednje vreme zauzimaju bitno mesto u istraživanjima ovog tipa.

Prve empirijske $\Sigma - D$ relacije za vangalaktičke supernove ostatke izvedene su početkom 70-tih godina. Za ostatke u Velikom Magelanovom oblaku, Metjuson i Klarki (Mathewson & Clarke, 1973) su odredili vrednost koeficijenta $\beta = 3$. Imali su na raspolaganju 15 identifikovanih SNR-ova. U to vreme koeficijent β za galaktičke $\Sigma - D$ relacije je bio oko 4 (poglavlje 3.5). Miln sa saradnicima (Milne et al., 1980) dobija vrednost $\beta = 3.4$ za 19 ostataka iz Velikog Magelanovog oblaka. Galaktička relacija izvedena neposredno pre objavljivanja prethodne relacije daje vrednost $\beta = 3.8$ (poglavlje 3.10). Sledeći bitniji rad je već pominjani rad Metjusona sa saradnicima iz 1983. godine (Mathewson et al., 1983). Razmatrajući relaciju za ostatke iz Velikog i Malog Magelanovog oblaka zajedno, dobili su $\beta = 2.6$. U članku je objavljen katalog koji sadrži 25 ostataka iz Velikog i 6 ostataka iz Malog Magelanovog oblaka. U članku Millsa sa saradnicima (Mills et al., 1984) broj SNR-ova u Velikom Magelanovom oblaku je porastao na 27, a u Malom na 11. Vrednost koeficijenta β dobijena u ovom članku je 2.3. Berkhujsenova je 1983. godine (Berkhuijsen, 1983) izvela $\Sigma - D$ relacije za galaksije M31 i M33. Za M31 (površinski sjaj je na talasnoj dužini od 20 cm) je dobila $\beta = 2.3 \pm 0.4$, dok je za M33 (na 21 cm) dobila $\beta = 2.5 \pm 0.4$. Galaktičke relacije u to vreme daju vrednosti koeficijenta β između 3 i 4 (poglavlja od 3.13 do 3.15). Primećuje se na prvi pogled da je u vangalaktičkim relacijama nagib blaži

u odnosu na galaktičke. Tek radom Kejsa i Batačarije (Case & Bhattacharya, 1998) ovaj problem se prevazilazi, jer se dobijaju približno isti nagibi (poglavlje 3.21).

Najnovijim posmatranjima galaksije M31 na optičkim frekvencijama od strane Magniera sa saradnicima (Magnier et al., 1995) identifikovano je 178 kandidata za ostatke supernovih. U galaksiji M33 pronađeno je 98 kandidata za ostatke supernovih, takođe u optičkoj oblasti (Gordon et al., 1998).

U ovoj glavi će (na način kao i do sada (vidi poglavlje 3.1)) biti testirane relacije za ostatke u drugim galaksijama pridruživanjem kalibracionih petlji. Podaci za Veliki i Mali Magelanov oblak su uzeti iz kataloga supernovih ostataka sa poznatim daljinama Berkhujsenove (Berkhuijen, 1986). U ovom katalogu, sem 22 galaktička ostatka, se nalazi 62 ostatak iz Velikog (34 ostatka) i Malog Magelanovog oblaka (11 ostataka), galaksije M31 (8 ostataka) i M33 (9 ostataka). Katalogizirani površinski sjaj je na 1 GHz. Kalibratori za galaksiju M31 su uzeti iz rada Brauna i Volterbosa (Braun & Walterbos, 1993). Ima ih 51 sa izmerenim radio-fluksom na talasnoj dužini od 20 cm (1465 MHz). Za galaksiju M33 koristimo pregled radio-identifikovanih i optički potvrđenih ostataka Gordona sa saradnicima (Gordon et al., 1999). Sa izmerenim radio-fluksom na 20 cm ih je 51 (igrom slučaja, isti kao i za M31). Testiraće se i relacija definisana za galaksiju M82, Huang sa saradnicima (Huang et al., 1994), u kojoj je primećen veliki broj veoma mlađih i luminoznih ostataka (svi ostaci u njoj su ekstremniji po sjaju od Cas A). Na kraju će biti testirane $\Sigma - D$ relacije za neke od navedenih galaksija zajedno sa ostacima koji definišu galaktičku relaciju Kejsa i Batačarije.

4.2. Relacije za Magelanove oblake

Koristeći katalog Berkhujsenove uzeto je 30 ljkastih ostataka iz Velikog Magelanovog oblaka sa pouzdano određenim površinskim sjajem, i konstruisana je relacija oblika:

$$\Sigma_{\text{1GHz}} = 8.16^{+28.40}_{-6.34} \times 10^{-18} D^{-1.98 \pm 0.42}, \quad (4.1)$$

sa slaganjem od 44%.

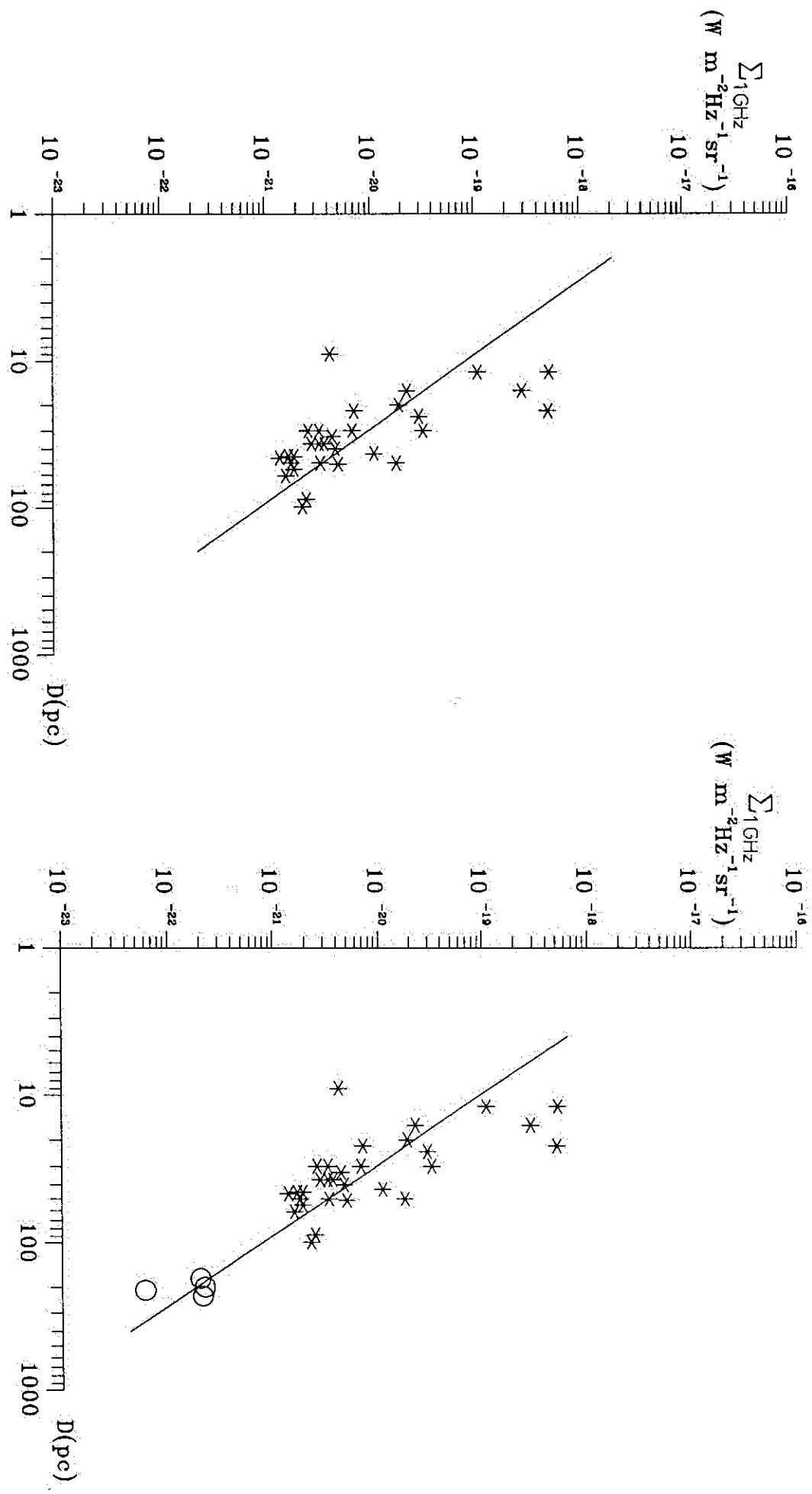
Kalibratorima relacije (4.1) pridružujemo kalibracione petlje i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 4.1 i u tabeli 4.1. Na slici 4.1 dati su $\Sigma - D$ dijagrami za slučajeve koji odgovaraju relacijama (4.1) i (4.2).

Tabela 4.1. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji relaciji određenoj korišćenjem 30 kalibracionih ljkastih ostataka iz Velikog Magelanovog oblaka.

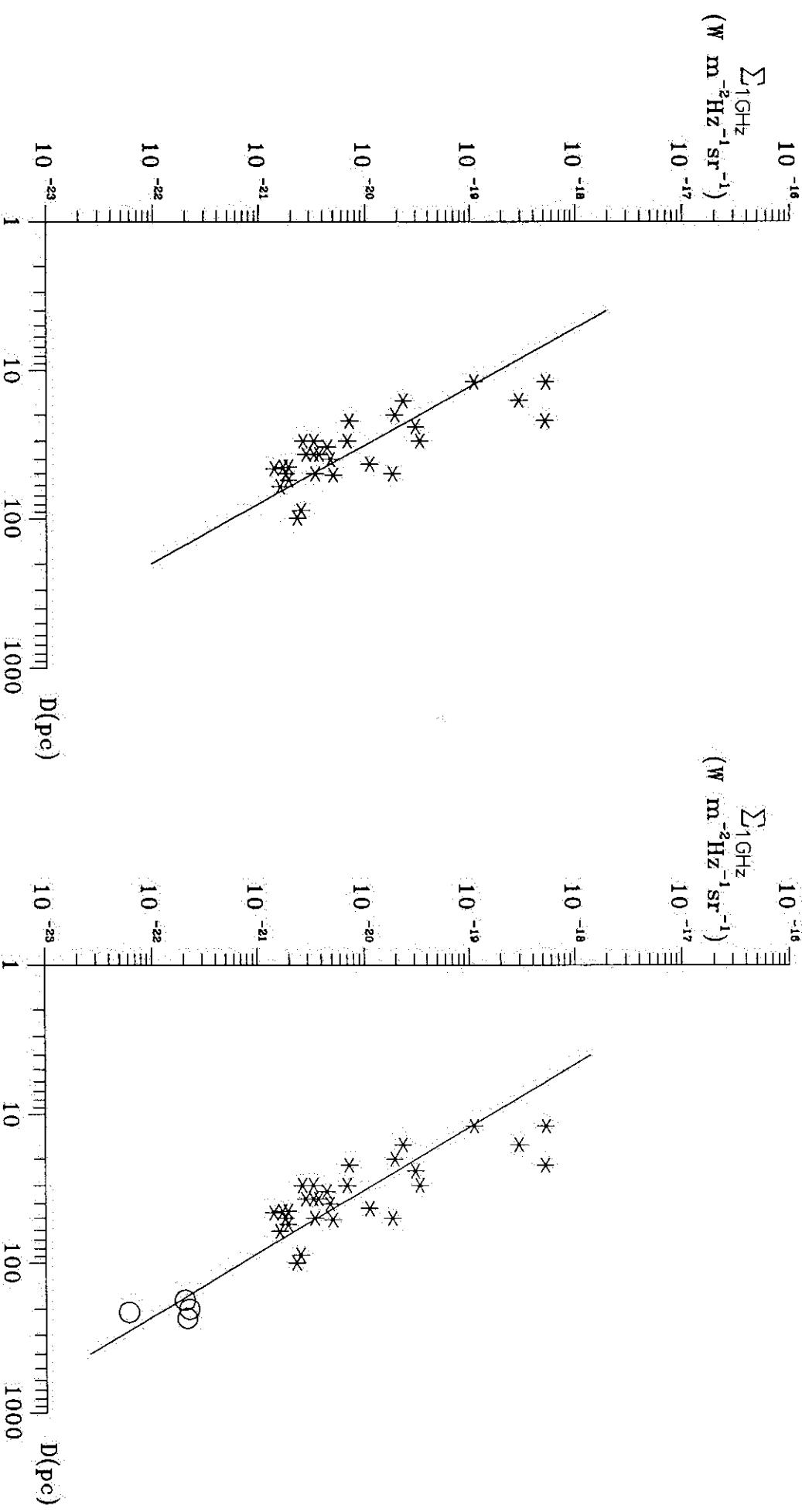
broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
10	2.26 ± 0.26	66
9	2.23 ± 0.27	65
7	2.21 ± 0.27	66
6	2.17 ± 0.27	65
5	2.14 ± 0.26	67
4	2.09 ± 0.27	65

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

Slika 4.1. Levo - zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za 30 kalibratora iz Velikog Magelanovog oblaka-LMC. Desno - zavisnost za LMC kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni LMC kalibratori, a kružićima a petlje.



Slika 4.2. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za 29 kalibratora (bez 0505-679) iz Velikog Magelanovog oblaka–LMC. Desno – zavisnost za LMC kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni LMC kalibratori, a kružićima petlje.



Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 1.18^{+2.08}_{-0.75} \times 10^{-17} D^{-2.09 \pm 0.27}. \quad (4.2)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = -0.11, \quad \bar{\beta} = 2.18, \quad \Delta\beta = -0.20. \quad (4.3)$$

Za 29 ostataka iz Velikog Magelanovog oblaka (bez ostatka 0505-679 koji drastično odstupa od fita) dobijena je relacija

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 6.58^{+21.53}_{-5.04} \times 10^{-17} D^{-2.54 \pm 0.41}, \quad (4.4)$$

sa slaganjem od 59%.

Kalibratorima relacije (4.4) pridružujemo kalibracione petlje i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 4.2 i u tabeli 4.2. Na slici 4.2 dati su $\Sigma - D$ dijagrami za slučajeve koji odgovaraju relacijama (4.4) i (4.5).

Tabela 4.2. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji relaciji određenoj korišćenjem 29 ljkuskastih kalibracionih ostataka iz Velikog Magelanovog oblaka (bez ostatka 0505-679).

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
10	2.51 ± 0.25	73
9	2.49 ± 0.26	72
7	2.48 ± 0.25	74
6	2.44 ± 0.26	73
5	2.42 ± 0.24	76
4	2.37 ± 0.25	75

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 3.67^{+5.82}_{-2.25} \times 10^{-17} D^{-2.37 \pm 0.25}. \quad (4.5)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = 0.17, \quad \bar{\beta} = 2.45, \quad \Delta\beta = 0.09. \quad (4.6)$$

U Malom Magelanovom oblaku identifikovano je 11 ljkuskastih ostataka. Relacija definisana ovim kalibratorima je

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 1.92^{+10.58}_{-1.63} \times 10^{-17} D^{-2.41 \pm 0.54}, \quad (4.7)$$

sa slaganjem od 69%.

Kalibratorima relacije (4.7) pridružujemo kalibracione petlje i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 4.3 i u tabeli 4.3. Na slici 4.3 dati su $\Sigma - D$ dijagrami za slučajevе koji odgovaraju relacijama (4.7) i (4.8).

Tabela 4.3. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji relaciji određenoj korišćenjem 11 ljuskastih kalibracionih ostataka iz Malog Magelanovog oblaka.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
10	2.02 ± 0.26	77
9	2.00 ± 0.27	76
7	2.04 ± 0.24	81
6	2.01 ± 0.25	81
5	2.01 ± 0.23	84
4	1.96 ± 0.24	84

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 4.29^{+6.91}_{-2.65} \times 10^{-18} D^{-1.96 \pm 0.24}, \quad (4.8)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = 0.45, \quad \beta = 2.01, \quad \Delta\beta = 0.40. \quad (4.9)$$

Ako uzmemeo za kalibratore 41 ljuskasti ostatak iz oba Magelanova oblaka dobićemo relaciju:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 9.22^{+22.33}_{-6.53} \times 10^{-18} D^{-2.06 \pm 0.35}, \quad (4.10)$$

sa slaganjem od 47%.

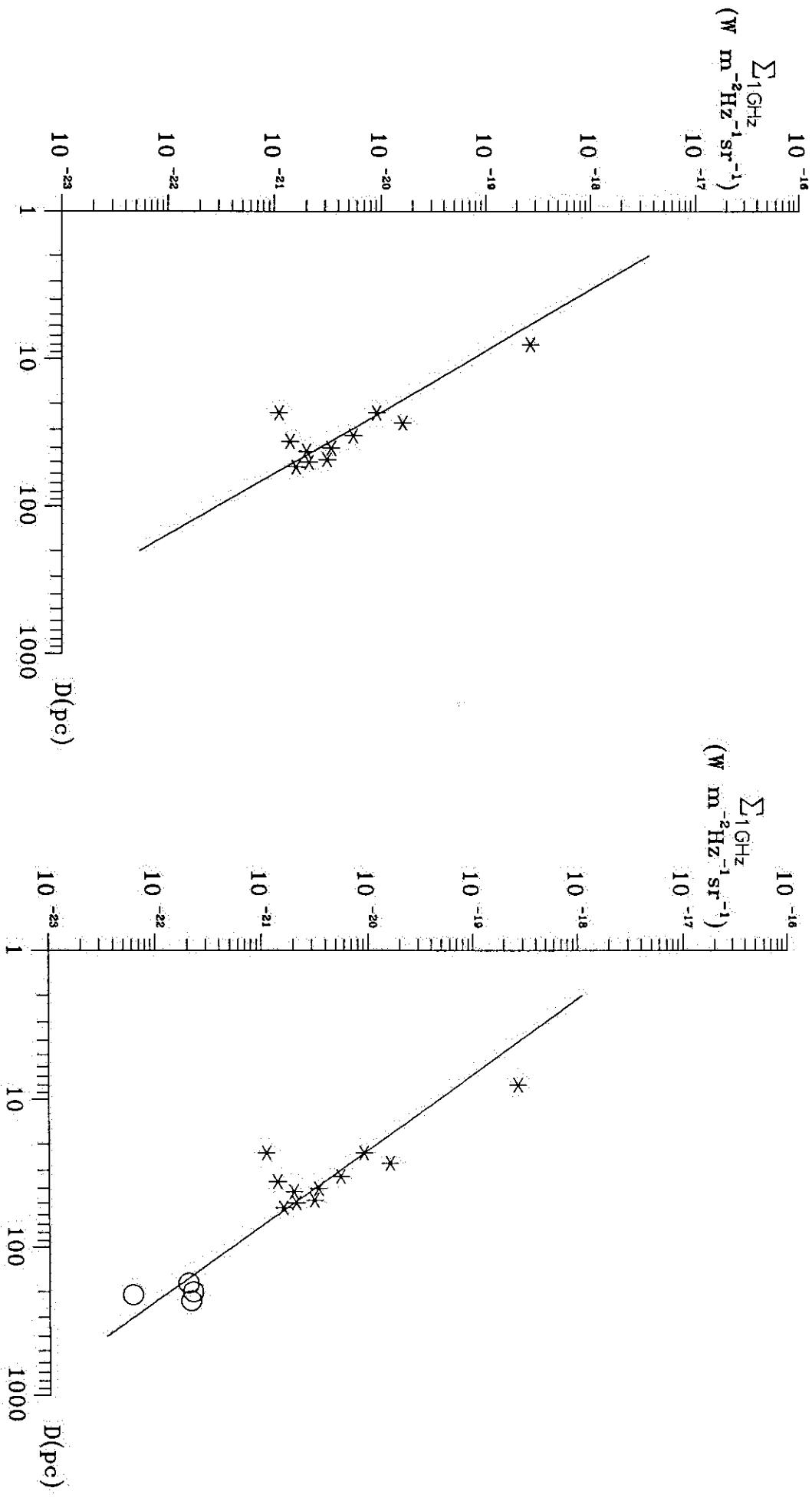
Kalibratorima relacije (4.10) pridružujemo kalibracione petlje i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 4.4 i u tabeli 4.4. Na slici 4.4 dati su $\Sigma - D$ dijagrami za slučajevе koji odgovaraju relacijama (4.10) i (4.11).

Tabela 4.4. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji relaciji određenoj korišćenjem 41 ljuskastog kalibracionog ostatka iz oba Magelanova oblaka.

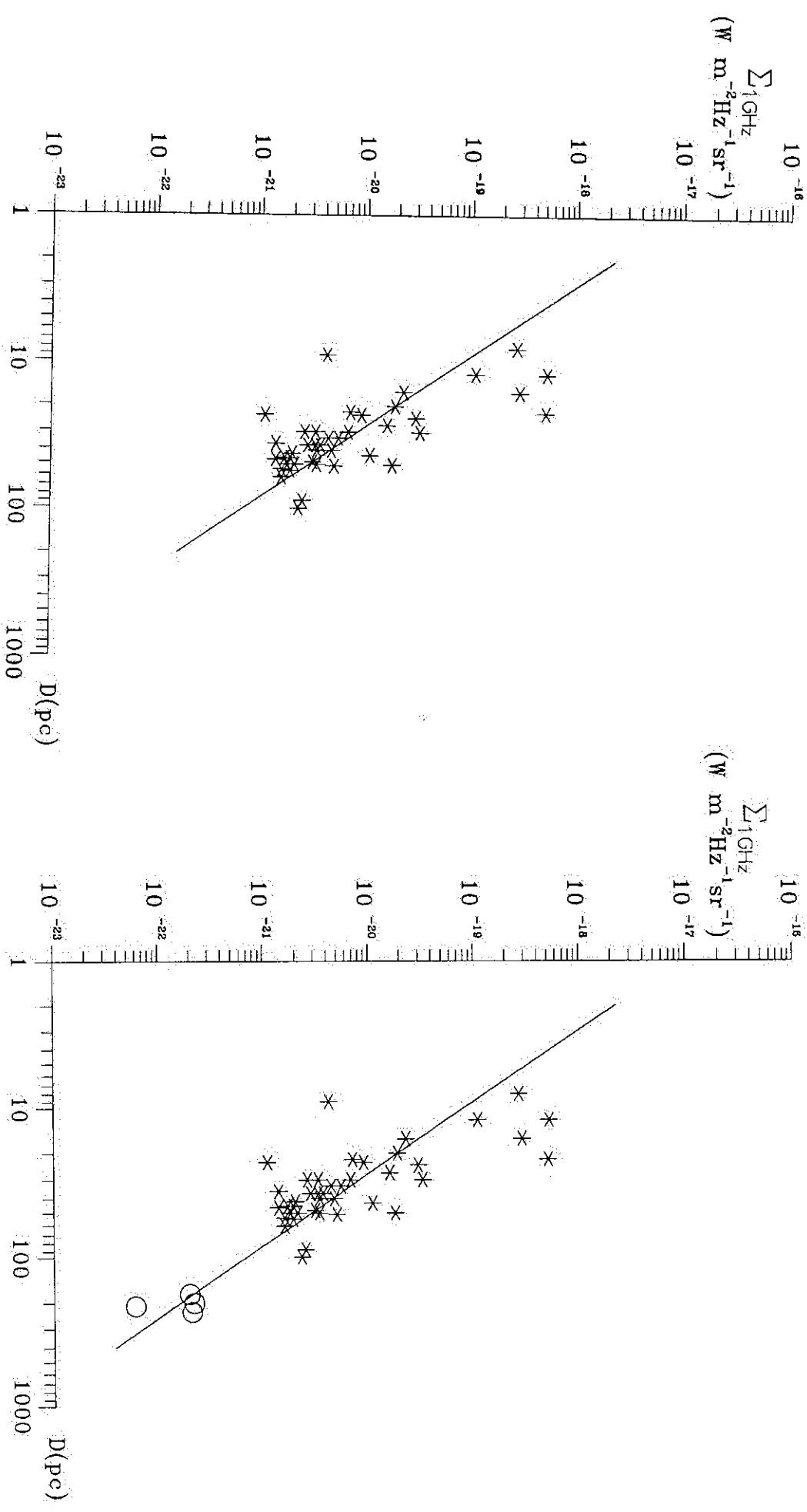
broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
10	2.23 ± 0.23	66
9	2.20 ± 0.23	65
7	2.18 ± 0.23	66
6	2.14 ± 0.24	64
5	2.12 ± 0.23	65
4	2.07 ± 0.24	64

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

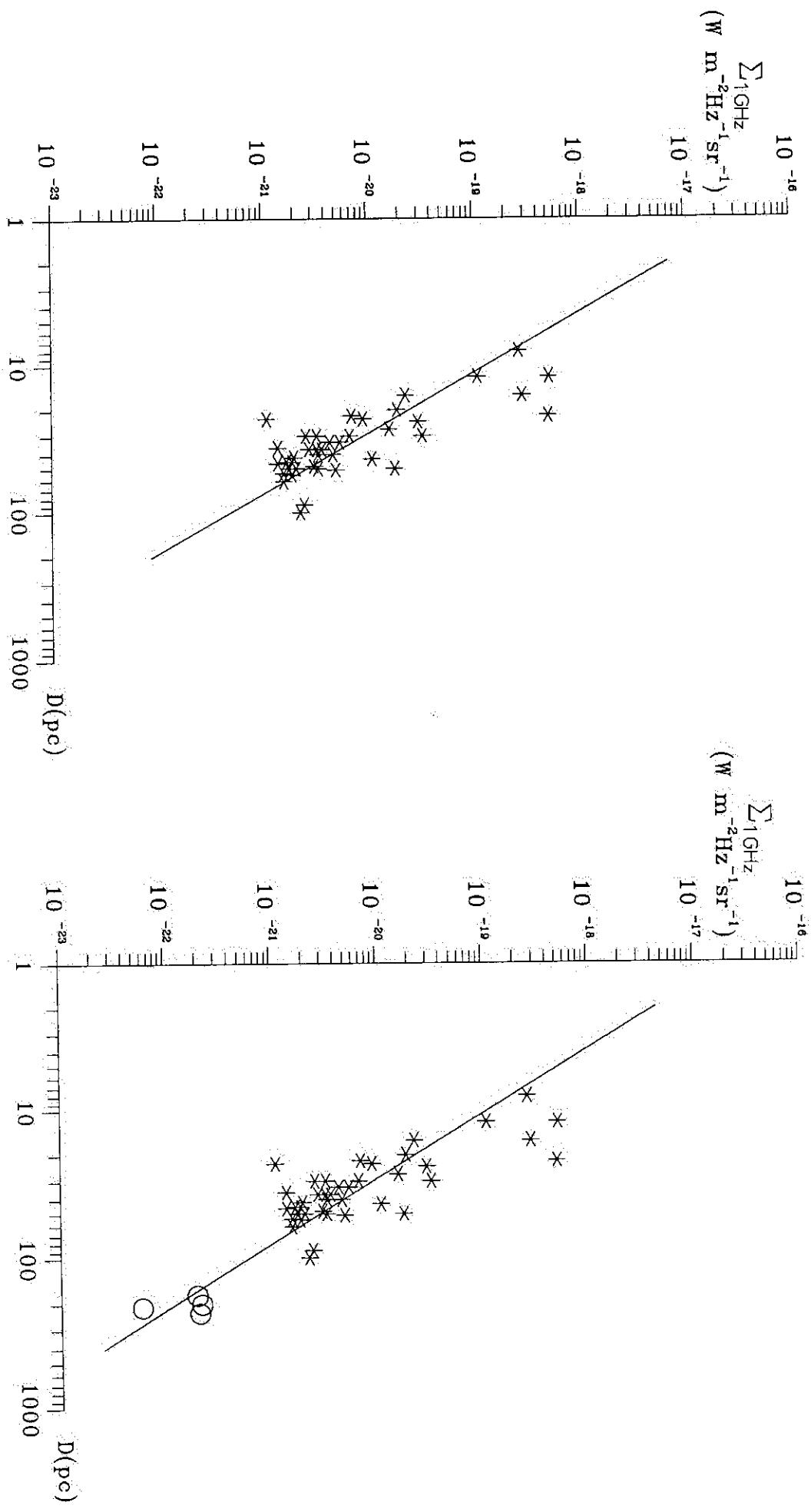
Slika 4.3. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za 11 kalibratora iz Malog Magelanovog oblaka–SMC. Desno – zavisnost za SMC kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni SMC kalibratori, a kružićima na petljama.



Slika 4.4. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za 41 kalibrator iz oba Magelanova oblaka. Desno – zavisnost za ova oblaka kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni kalibratori iz oba oblaka, a kružićima petlje.



Slika 4.5. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za 40 kalibratora (bez 0505-679) iz oba Magelanova oblaka. Desno – zavisnost za oba oblaka kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni kalibratori iz oba oblaka, a kružićima petlje.





$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 9.53^{+13.57}_{-5.60} \times 10^{-18} D^{-2.07 \pm 0.24}. \quad (4.11)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = 0.01, \quad \bar{\beta} = 2.16, \quad \Delta\beta = 0.10. \quad (4.12)$$

Ako uzmemo za kalibratore 40 ljkuskastih ostataka (bez 0505-679) iz oba Magelanova oblaka dobćemo relaciju

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 3.89^{+13.01}_{-2.73} \times 10^{-17} D^{-2.45 \pm 0.34}, \quad (4.13)$$

sa slaganjem od 58%.

Kalibratorima relacije (4.13) pridružujemo kalibracione petlje i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 4.5 i u tabeli 4.5. Na slici 4.5 dati su $\Sigma - D$ dijagrami za slučajeve koji odgovaraju relacijama (4.13) i (4.14).

Tabela 4.5. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji relaciji određenoj korišćenjem 40 ljkuskastih kalibracionih ostataka (bez 0505-679) iz oba Magelanova oblaka.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
10	2.42 ± 0.22	71
9	2.39 ± 0.23	70
7	2.38 ± 0.22	72
6	2.35 ± 0.23	70
5	2.32 ± 0.22	72
4	2.28 ± 0.23	64

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 2.20^{+2.95}_{-1.26} \times 10^{-17} D^{-2.28 \pm 0.23}. \quad (4.14)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = 0.17, \quad \bar{\beta} = 2.36, \quad \Delta\beta = 0.09. \quad (4.15)$$

Prvo što se može primetiti iz prethodnih 5 testova je da su za ostatke u Magelanovim oblacima $\Sigma - D$ relacije sa vrlo lošim koeficijentom slaganja, a naročito slučajevi sa ostatom 0505-679 iz Velikog Magelanovog oblaka. Izbacivanjem ovog SNR-a koeficijent se popravlja za oko 15%. Ipak i onda su koeficijenti slaganja oko 60% što je lošija vrednost nego za galaktičke ostatke. Nešto je bolje definisana relacija za Mali Magelanov oblak ali za taj slučaj je promena koeficijenta β prilična, mada upada u interval zadat greškom istog koeficijenta u početnoj relaciji (relacija (4.7), jednakosti (4.9)). Osim što je koeficijent slaganja u početnim relacijama niži, testovi relacija u čijem setu kalibratora nije ostatak 0505-679, daju vrlo slične rezultate kao test relacije Kejsa i Batačarije (poglavlje 3.21), te su i zaključci vezani za SNR poreklo radio petlji ovim testovima potvrđeni i na relacijama

za Magelanove oblake. Koeficijenti β ovih relacija su slični, promene ovog koeficijenta iste. Bitno se povećava koeficijent slaganja dodavanjem kalibracionih petlji. Sa prethodnih slika u ovoj glavi se može primetiti da posmatračka tehnologija još uvek nije u stanju da identificuje ostatke niskog sjaja jer je primetan prazan prostor na $\Sigma - D$ dijagramu između početnih kalibratora i kalibracionih petlji. Autor ove disertacije je mišljenja da je ovaj nedostatak niskosjajnih SNR-ova na $\Sigma - D$ dijagramima za Magelanove oblake uzrok relativno lošem koeficijentu slaganja podataka sa linijom fita i da će se otkrićem novih niskosjajnih SNR-ova relacija uravnotežiti.

4.3. Relacije za galaksiju M31

Koristeći katalog Brauna i Volterbosa (Braun & Walterbos, 1993) analiziraju se tri relacije u zavisnosti od kvaliteta identifikacije za 51 detektovan SNR iz velike spiralne galaksije u Andromedi (M31). Pošto katalog ne sadrži merene spektralne indekse, a merene gustine fluksa su na 1465 MHz, koristićemo srednju vrednost spektralnog indeksa $\alpha = 0.5$ da bismo prešli na površinski sjaj na 1 GHz. Za dijametre su uzete vrednosti dobijene iz optičkih merenja jer katalog ne sadrži radio-dijametre.

Prvu grupu najbolje identifikovanih kalibratora (klasa 1 – odnos signal- šum za gustinu fluksa je veći od 5) čine 24 ostatka. Na 1465 MHz se dobija $\Sigma \propto D^{-1.68 \pm 0.26}$ sa slaganjem od 66%. Na 1 GHz relacija ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 2.14^{+3.12}_{-1.27} \times 10^{-18} D^{-1.68 \pm 0.26}, \quad (4.16)$$

sa slaganjem od 66%.

Kalibratorima relacije (4.16) pridružujemo kalibracione petlje i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 4.6 i u tabeli 4.6. Na slici 4.6 dati su $\Sigma - D$ dijagrami za slučajeve koji odgovaraju relacijama (4.16) i (4.17).

Tabela 4.6. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji relaciji određenoj korišćenjem 24 kalibraciona ostatka klase 1 iz galaksije M31.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
10	2.02 ± 0.19	78
9	1.99 ± 0.19	77
7	1.97 ± 0.18	81
6	1.93 ± 0.18	80
5	1.91 ± 0.17	83
4	1.86 ± 0.17	83

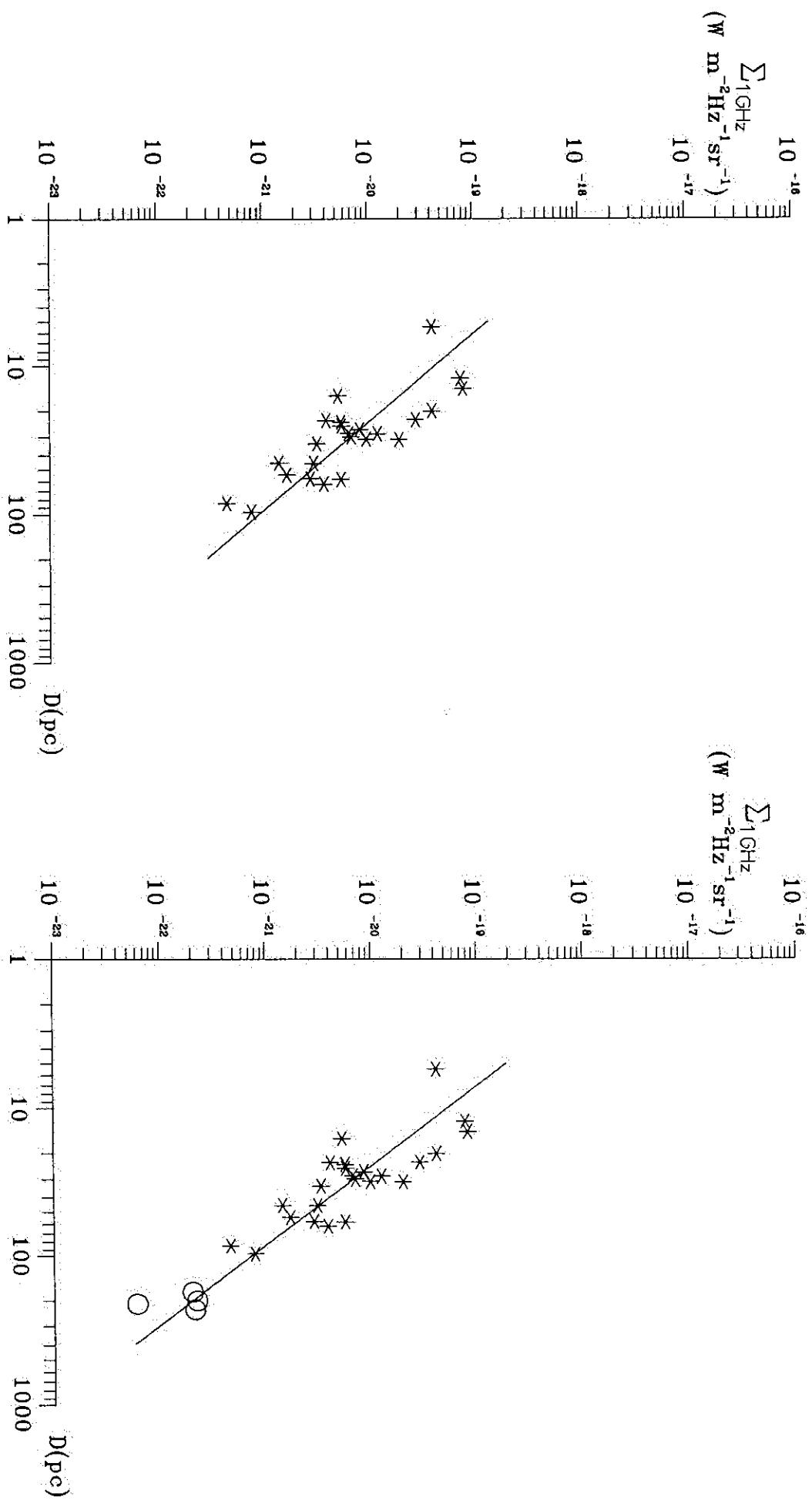
Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 3.83^{+3.38}_{-1.79} \times 10^{-18} D^{-1.86 \pm 0.17}. \quad (4.17)$$

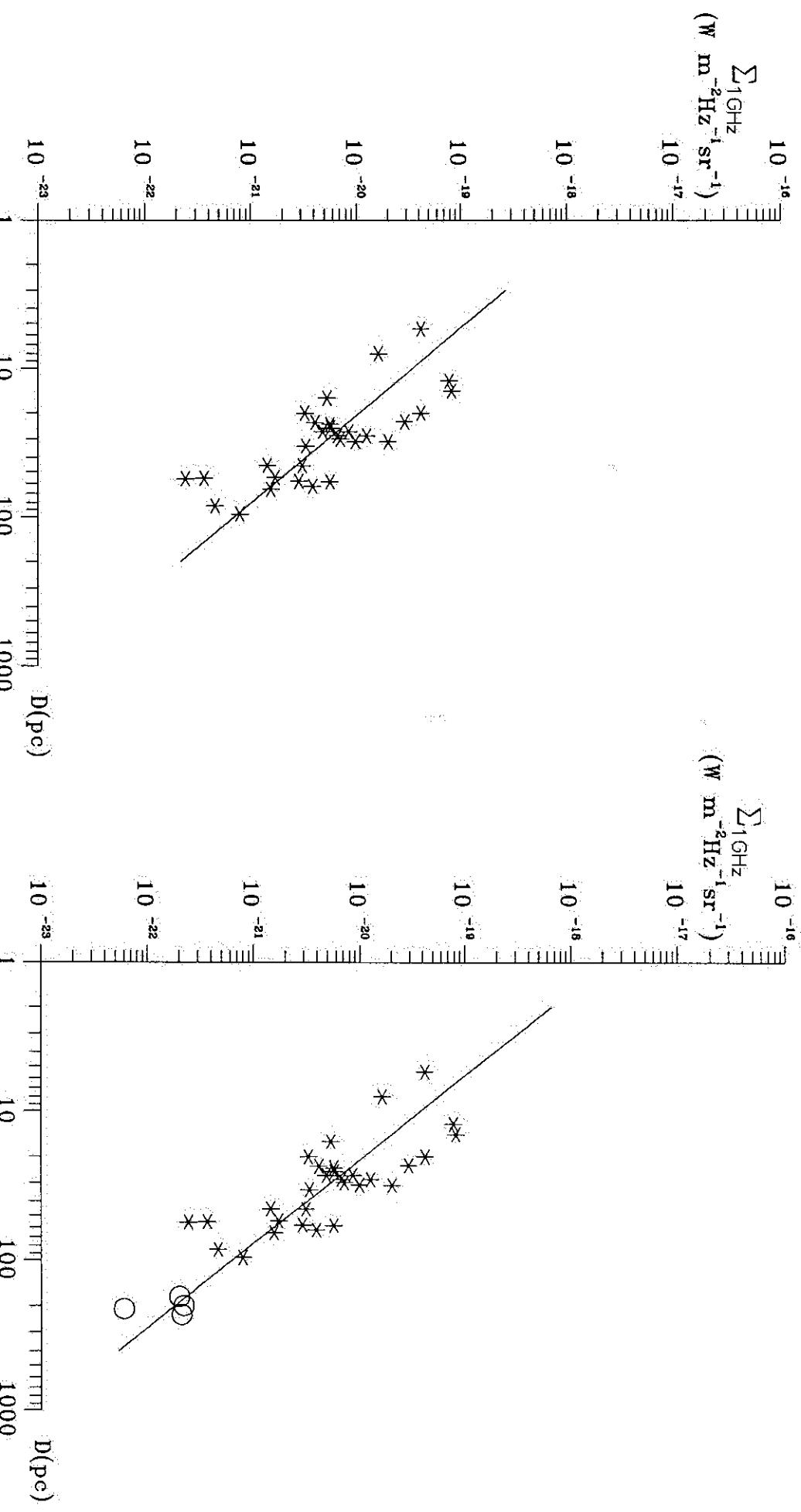
Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = -0.18, \quad \bar{\beta} = 1.95, \quad \Delta\beta = -0.27. \quad (4.18)$$

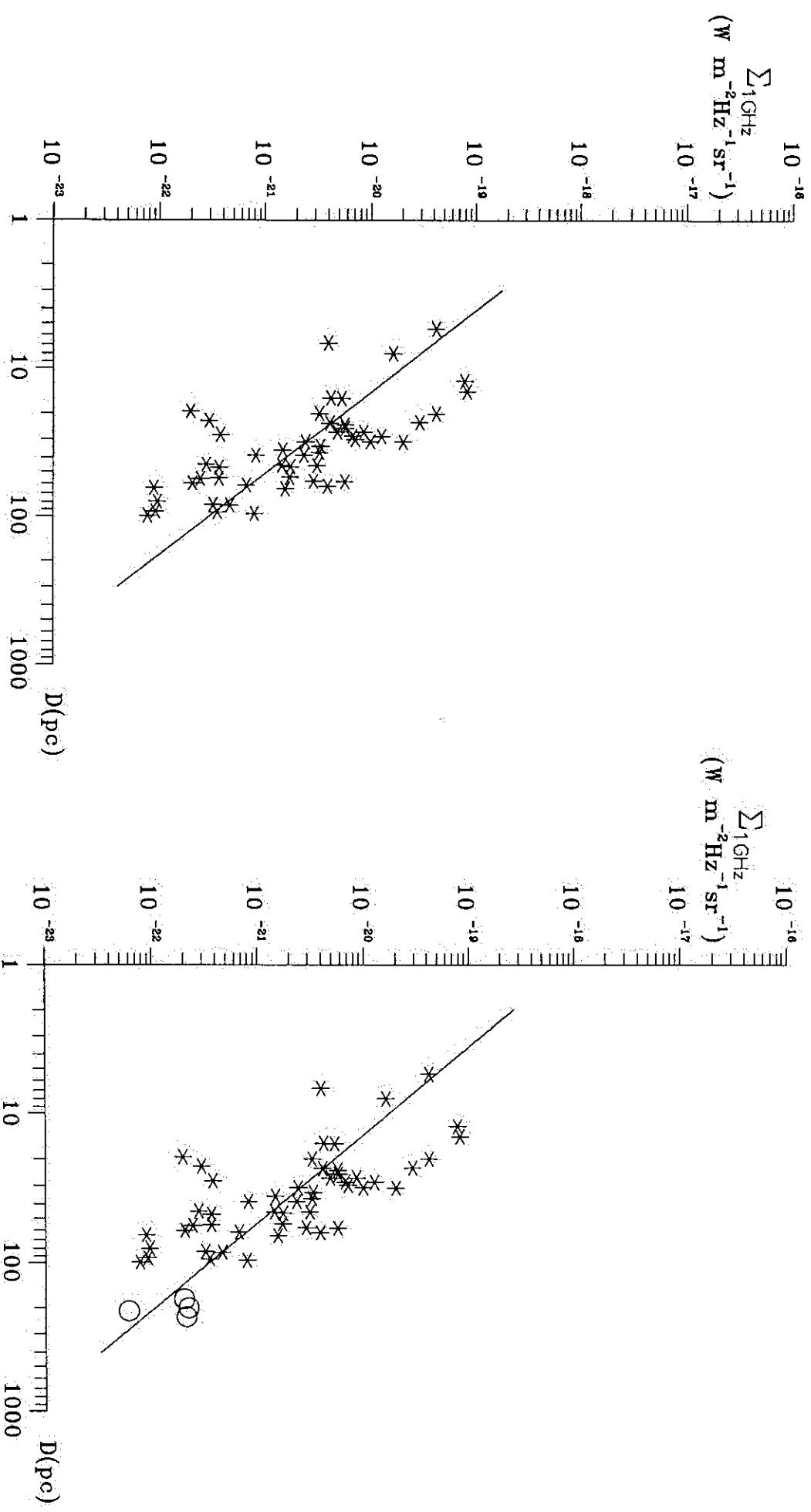
Slika 4.6. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za 24 najbolje razdvojena ostatka iz galaksije M31 (Braun & Walterbos, 1993). Desno – prethodna zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni kalibratori iz galaksije M31, a kružićima petlje.



Slika 4.7. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za 24 najbolje + 6 lošije razdvojenih ostatka iz galaksije M31 (Braun & Walterbos, 1993). Desno – prethodna zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni kalibratori iz galaksije M31, a kružićima petlje.



Slika 4.8. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za 24 najbolje + 6 lošije + 21 nerazzvojen ostatak iz galaksije M31 (Braun & Walterbos, 1993). Desno – prethodna zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni kalibratori iz galaksije M31, a kružićima petlje.





Drugu grupu kalibratora klase 1 + klase 2 (klasa 2 – 6 ostataka) – nizak kvalitet identifikacije, $5 >$ odnos signal-šum za gustinu fluksa > 3) čine 30 ostatka. Na 1465 MHz se dobija $\Sigma \propto D^{-1.69 \pm 0.27}$ sa slaganjem od 59%. Na 1 GHz relacija ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 1.72_{-1.04}^{+2.64} \times 10^{-18} D^{-1.69 \pm 0.27}, \quad (4.19)$$

sa slaganjem od 59%.

Kalibratorima relacije (4.19) pridružujemo kalibracione petlje i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 4.7 i u tabeli 4.7. Na slici 4.7 dati su $\Sigma - D$ dijagrami za slučajeve koji odgovaraju relacijama (4.19) i (4.20).

Tabela 4.7. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji relaciji određenoj korišćenjem 30 kalibracionih ostataka klase 1 + klase 2 iz galaksije M31.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
10	1.91 ± 0.18	74
9	1.89 ± 0.19	73
7	1.87 ± 0.18	75
6	1.84 ± 0.19	74
5	1.82 ± 0.18	76
4	1.78 ± 0.18	75

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 2.26_{-1.12}^{+2.20} \times 10^{-18} D^{-1.78 \pm 0.18}. \quad (4.20)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = -0.09, \quad \bar{\beta} = 1.85, \quad \Delta\beta = -0.16. \quad (4.21)$$

Treću grupu kalibratora klase 1 + klase 2 + klase 3 (klasa 3 – 21 ostatak) – nema signala (postoji samo gornja granica gustine fluksa) čini 51 ostatak. Na 1465 MHz se dobija $\Sigma \propto D^{-1.82 \pm 0.28}$ sa slaganjem od 47%. Na 1 GHz relacija ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 1.30_{-0.83}^{+2.25} \times 10^{-18} D^{-1.82 \pm 0.28}, \quad (4.22)$$

sa slaganjem od 47%.

Kalibratorima relacije (4.22) pridružujemo kalibracione petlje i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 4.8 i u tabeli 4.8. Na slici 4.8 dati su $\Sigma - D$ dijagrami za slučajeve koji odgovaraju relacijama (4.22) i (4.23).

Tabela 4.8. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji relaciji određenoj korišćenjem 51 kalibracionog ostatka klase 1 + klase 2 + klase 3 iz galaksije M31.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
10	1.74 ± 0.20	55
9	1.73 ± 0.21	54
7	1.74 ± 0.21	55
6	1.73 ± 0.22	54
5	1.72 ± 0.22	54
4	1.70 ± 0.22	53

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{\text{GHz}} = 8.78_{-4.95}^{+11.34} \times 10^{-19} D^{-1.70 \pm 0.22}. \quad (4.23)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = 0.12, \quad \bar{\beta} = 1.73, \quad \Delta\beta = 0.09. \quad (4.24)$$

Vrlo zanimljivi zaključci se mogu izvući iz prethodna tri testa. Najbolji je test prve relacije. Po do sada uspostavljenom kriterijumu petlje se vrlo dobro uklapaju i u prvu i u drugu relaciju. Petlje II i IV su čak manjeg dijametra u odnosu na prosečan ostatak određenog sjaja definisan ovim relacijama. Petlja III se u testu prve relacije nalazi na liniji fita. U testu prve relacije koja ima i najbolje slaganje podataka sa linijom fita (u odnosu na drugu i treću) dodavanjem glavnih petlji slaganje raste za 17%. Samim tim petlje očigledno uravnotežavaju relaciju. One su izgleda prototipovi takvih ostataka koji nedostaju na $\Sigma - D$ dijagramima. Vrlo zanimljivo je to što se početne relacije vrlo blagog nagiba $\beta < 2$ dodavanjem petlji transformišu u relacije sa $\beta \approx 2$. Ovi testovi predstavljaju jak prilog potvrđi SNR porekla radio-petlji.

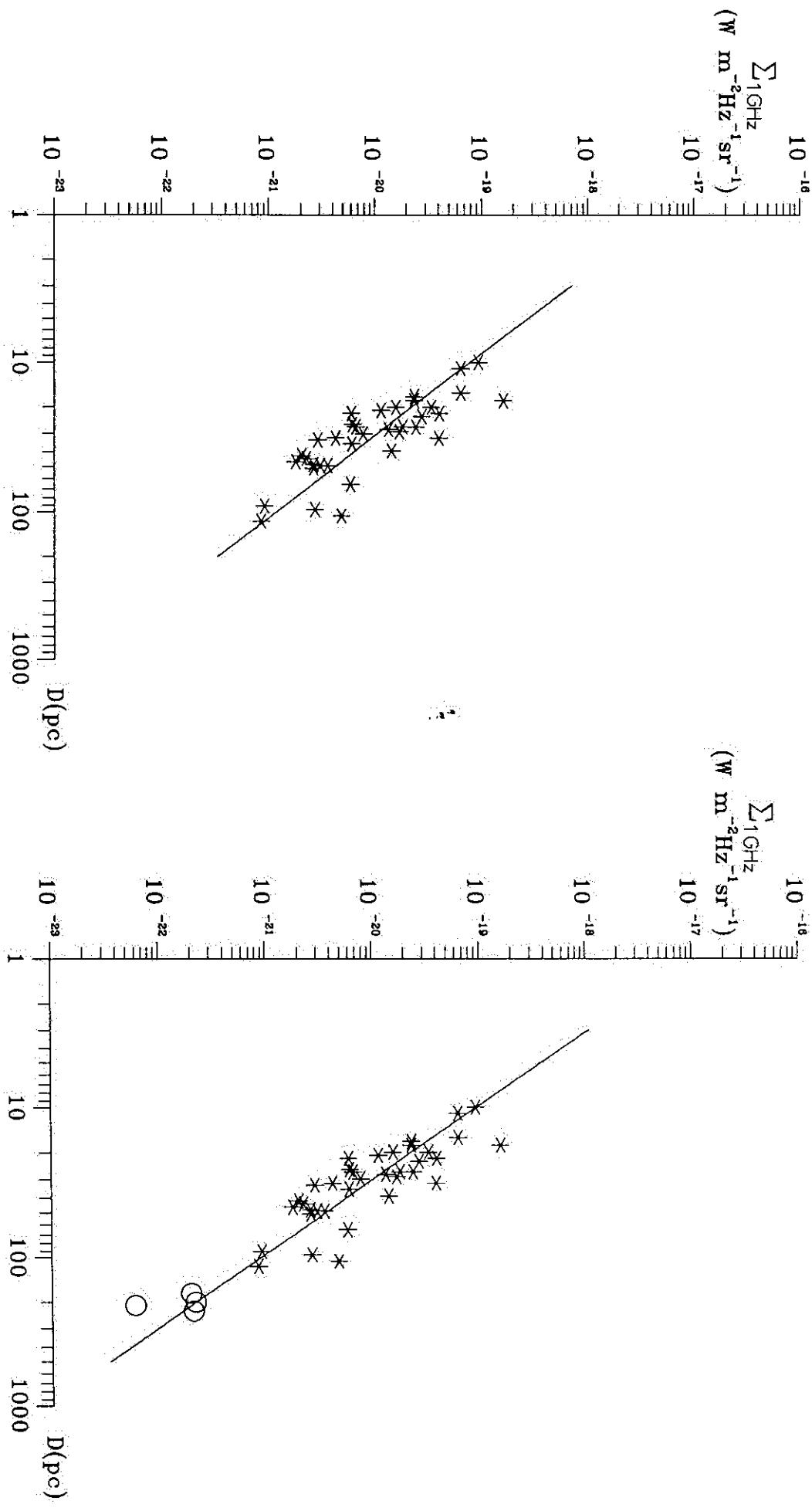
Treća relacija ima veliko rasipanje. Sa slike 4.8 se vide ostaci u M33 koji su jako niskog sjaja (manjeg od prve tri petlje) i sa otprilike dva puta manjim dijametrima. Autor ove disetacije smatra da objekti klase 3 nisu dovoljno dobro definisani SNR-ovi u radio-oblasti pa samim tim ne mogu da se koriste za bilo kakvu analizu gde su neophodni podaci iz radio-merenja. Njihovi radio-fluksevi nisu tačno određeni. Za vrednost je uzeta donja granica gustine fluksa jer signal nije detektovan.

U svim narednim analizama koristićemo SNR-ove klase 1 i klase 2 zbog toga što testovi i prve i druge relacije daju približno iste rezultate, mada je prvi test po mišljenju autora bolji.

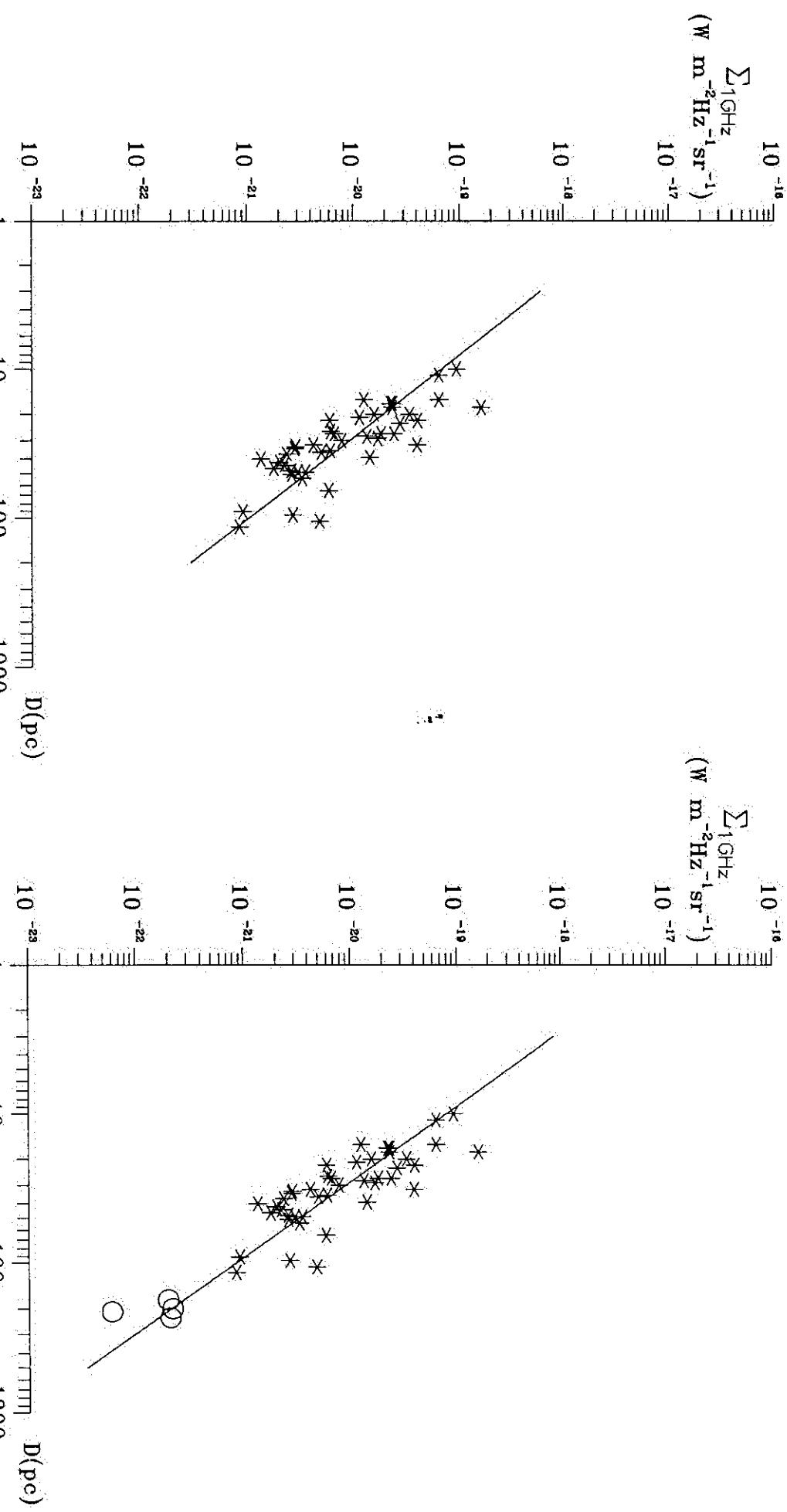
4.4. Relacije za galaksiju M33

Koristeći pregled radio-identifikovanih i optički potvrđenih ostataka supernovih Gordon sa saradnicima (Gordon et al., 1999), analiziraju se tri relacije za 51 detektovan SNR na 1465 MHz u galaksiji M33. Za ostatke za koje nije određen spektralni indeks uzima se da je $\alpha = 0.5$. Za dijametre su uzete vrednosti dobijene iz optičkih merenja jer katalog ne sadrži radio-dijametre.

Slika 4.9. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za 36 najbolje potvrđenih ostataka iz galaksije M33 (Gordon et al. 1999). Desno – prethodna zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni kalibratori iz galaksije M33, a kružićima petlje.



Slika 4.10. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za 36 najbolje potvrđenih + 7 ostataka za koje nije određen spektralni indeks, iz galaksije M33 (Gordon et al. 1999). Desno – prethodna zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni kalibratori iz galaksije M33, a kružićima petlje.



Za 36 ostataka sa pouzdano određenim dijametrima i iz rezultata posmatranja izračunatim spektralnim indeksima, dobija se na 1465 MHz relacija oblika $\Sigma \propto D^{-1.80 \pm 0.21}$ sa slaganjem od 67%. Na 1 GHz relacija ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 5.13_{-2.77}^{+6.02} \times 10^{-18} D^{-1.82 \pm 0.22}, \quad (4.25)$$

sa slaganjem od 67%.

Kalibratorima relacije (4.25) pridružujemo kalibracione petlje i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 4.9 i u tabeli 4.9. Na slici 4.9 dati su $\Sigma - D$ dijagrami za slučajevе koji odgovaraju relacijama (4.25) i (4.26).

Tabela 4.9. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji relaciji određenoj korišćenjem 36 kalibracionih ostataka sa pouzdano određenim dijametrima i iz posmatranja izračunatim spektralnim indeksima iz galaksije M33.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
10	2.21 ± 0.18	78
9	2.18 ± 0.18	77
7	2.15 ± 0.17	80
6	2.10 ± 0.17	79
5	2.08 ± 0.16	82
4	2.02 ± 0.16	82

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 1.00_{-0.44}^{+0.79} \times 10^{-17} D^{-2.02 \pm 0.16}. \quad (4.26)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = -0.20, \quad \bar{\beta} = 2.12, \quad \Delta\beta = -0.30. \quad (4.27)$$

Za 36 ostataka sa pouzdano određenim dijametrima i iz rezultata posmatranja izračunatim spektralnim indeksima zajedno sa 7 ostataka za koje nije određen spektralni indeks, dobija se na 1465 MHz relacija oblika $\Sigma \propto D^{-1.79 \pm 0.21}$ sa slaganjem od 64%. Na 1 GHz relacija ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 4.33_{-2.29}^{+4.87} \times 10^{-18} D^{-1.81 \pm 0.21}, \quad (4.28)$$

sa slaganjem od 63%.

Kalibratorima relacije (4.28) pridružujemo kalibracione petlje i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 4.10 i u tabeli 4.10. Na slici 4.10 dati su $\Sigma - D$ dijagrami za slučajevе koji odgovaraju relacijama (4.28) i (4.29).

Tabela 4.10. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji relaciji određenoj korišćenjem 36 kalibracionih ostataka sa pouzdano određenim dijametrima zajedno sa 7 ostatak za koje nije određen spektralni indeks iz galaksije M33.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
10	2.16 ± 0.17	76
9	2.13 ± 0.17	75
7	2.10 ± 0.16	78
6	2.05 ± 0.16	77
5	2.03 ± 0.15	79
4	1.97 ± 0.15	79

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{\text{GHz}} = 7.54^{+5.74}_{-3.26} \times 10^{-18} D^{-1.97 \pm 0.15}. \quad (4.29)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = -0.16, \quad \bar{\beta} = 2.07, \quad \Delta\beta = -0.26. \quad (4.30)$$

Setu od 43 ostatka iz prethodnog testa pridružićemo 8 ostatak za koje je dijametar nepouzdan. Na 1465 MHz relacija ima oblik $\Sigma \propto D^{-1.74 \pm 0.19}$ sa slaganjem od 64%. Na 1 GHz relacija ima oblik:

$$\Sigma_{\text{GHz}} = 3.50^{+3.48}_{-1.74} \times 10^{-18} D^{-1.76 \pm 0.19}, \quad (4.31)$$

sa slaganjem od 62%.

Kalibratorima relacije (4.31) pridružujemo kalibracione petlje i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 4.11 i u tabeli 4.11. Na slici 4.11 dati su $\Sigma - D$ dijagrami za slučajeve koji odgovaraju relacijama (4.31) i (4.32).

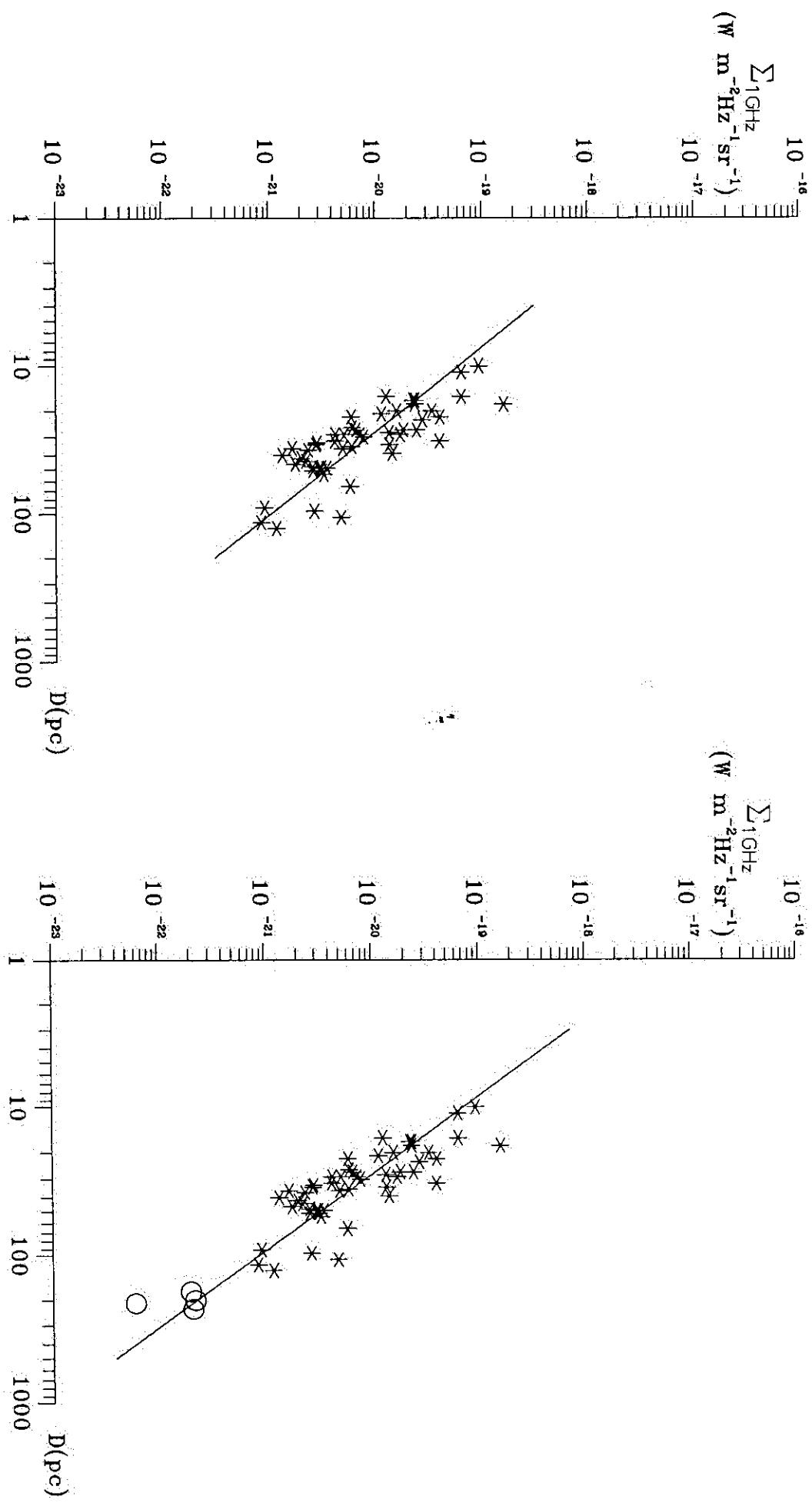
Tabela 4.11. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji relaciji određenoj korišćenjem 51 kalibracionog ostatka (43 iz prethodnog testa + 8 sa nepouzdanom određenim dijametrima) iz galaksije M33.

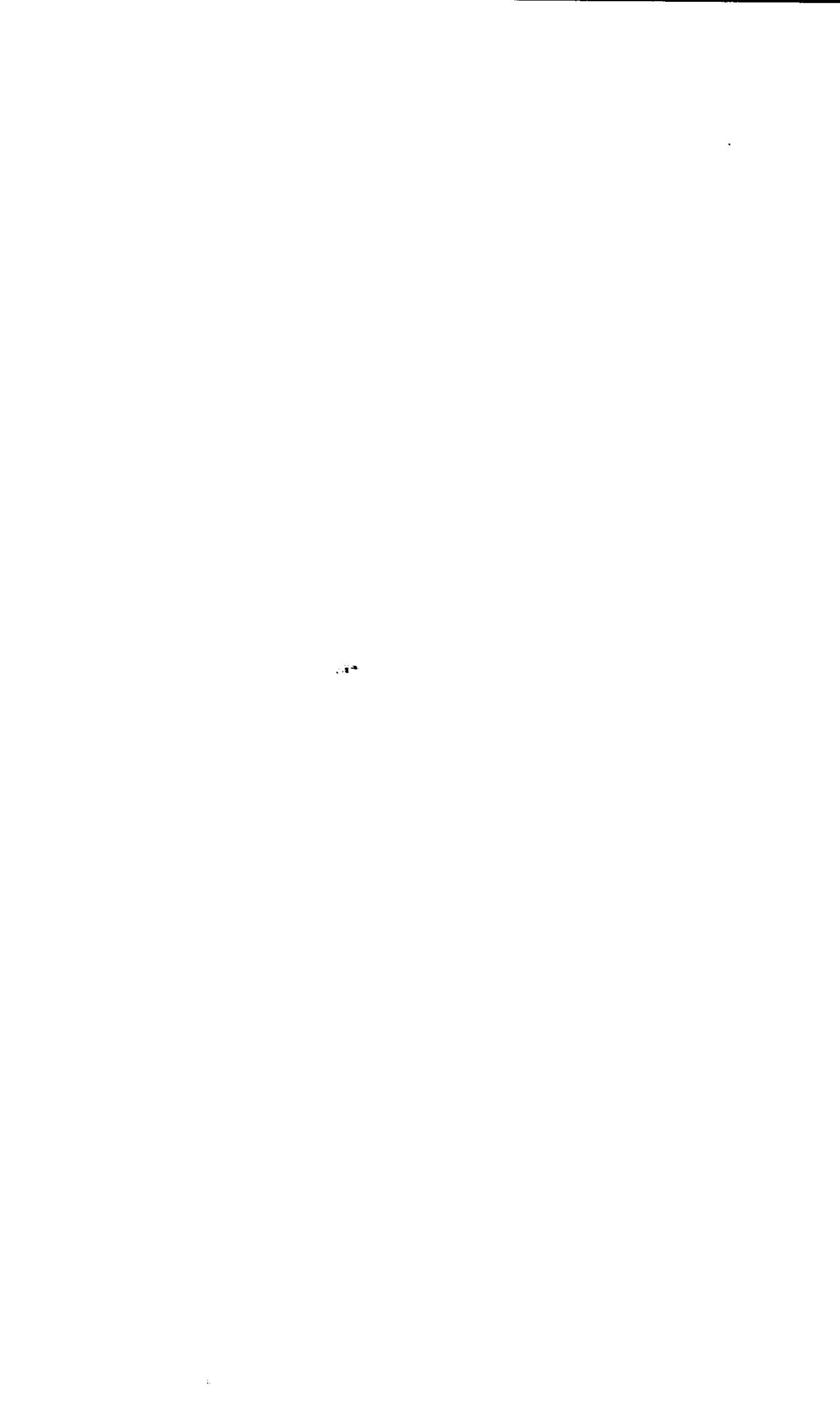
broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
10	2.10 ± 0.16	75
9	2.07 ± 0.16	74
7	2.04 ± 0.15	76
6	1.99 ± 0.16	75
5	1.97 ± 0.15	77
4	1.92 ± 0.15	77

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{\text{GHz}} = 6.08^{+4.35}_{-2.54} \times 10^{-18} D^{-1.92 \pm 0.15}. \quad (4.32)$$

Slika 4.11. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za 36 najbolje potvrđenih + 7 ostataka za koje nije određen spektralni indeks + 8 ostataka sa nepouzdano određenim dijametrima, iz galaksije M33 (Gordon et al. 1999). Desno – prethodna zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni kalibratori iz galaksije M33, a kružicima petlje.





Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = -0.16, \quad \bar{\beta} = 2.01, \quad \Delta\beta = -0.25. \quad (4.33)$$

Izuzetno su zanimljivi rezultati testova za galaksiju M33. Važe svi komentari kao i za M31 s tim što je pregled galaksije M33 mnogo ujednačeniji i nema sumnjivih ostataka kao u trećem testu za galaksiju M31. Sva tri testa za M33 su medusobno slična. Zbog toga je mišljenje autora da je set kalibratora iz M33 izuzetno homogen i dobar za dalje analize. On prevazilazi kvalitet gotovo svih setova kalibratora u ovoj disertaciji.

Po do sada uspostavljenom kriterijumu petlje se vrlo dobro uklapaju u sve tri relacije. Petlje II i IV su manjeg dijametra u odnosu na prosečan ostatak određenog sjaja definisan svim trima relacijama. Petlja III se u testovima sve tri relacije nalazi na liniji fita u slučajevima pridruživanja 4 glavne petlje. Na slikama od 4.9 do 4.11 se jasno vidi praznina između početnih kalibratora i radio-petlji. Očigledno je da nedostaju niskosjajni a veliki ostaci zbog ograničene osetljivosti instrumenta kojim se posmatralo. Izgleda da tu baš nedostaju neke "petlje" iz galaksije M33. Takođe, zbog nedostataka instrumenta nedostaju mali i visokosjajni objekti (slike 4.9 – 4.11).

U sva tri slučaja slaganje podataka sa linijom fita, dodavanjem glavnih petlji raste za oko 15%. Samim tim petlje očigledno uravnotežavaju relaciju. Kao i za galaksiju M31 i ovde se još pouzdanije može zaključiti da su petlje izgleda prototipovi ostataka koji nedostaju na $\Sigma - D$ dijagramima. Kao i u prethodnom poglavljju početne relacije vrlo blagog nagiba $\beta < 2$ dodavanjem petlji se transformišu u relacije sa $\beta \approx 2$. Kod galaktičkih relacija dodavanjem petlji smo smanjivali nagib i ponovo se približavali vrednosti $\beta \approx 2$. Izgleda da su baš ostaci niskog sjaja i velikog dijametra, koje je vrlo teško detektovati, oni koji će $\Sigma - D$ relaciju svesti na $\beta = 2$. Ova vrednost predstavlja trivijalno rešenje za sferno širenje pri kojem luminoznost ostaje konstanta sa porastom radijusa objekta. U svakom slučaju, osim što su ovi testovi vrlo jak prilog potvrđi SNR porekla radio-petlji, oni pokazuju jedan novi aspekt razumevanja empirijske $\Sigma - D$ relacije.

Još jedan zanimljiv zaključak možda može biti izведен iz ovih testova. U setu kalibratora iz galaksije M33 postoji 6 ostataka sa dijametrima iznad 60 pc. Ti ostaci su prilično rasuti na $\Sigma - D$ dijagramu. U setu od 36 kalibratora (prvi test) ima njih 5. Kada se njih 5 izbacici iz seta kalibratora i odredi relacija dobije se $\beta = 2.4 \pm 0.3$, gotovo identična vrednost kao u našoj galaksiji (poglavlje 3.21). Za slučaj 51 kalibratora iz M33 (treći test) izbacujemo 6 velikih ostataka ($D > 60$ pc) i dobijamo $\beta = 2.34 \pm 0.25$. Promena je ogromna $\Delta\beta \approx 0.6$ u oba slučaja. Izgleda da su ovim pregledom detektovani ostaci koji se šire u gušćim sredinama pa samim tim imaju i veći sjaj za isti dijametar. U našoj galaksiji ima 7 kalibratora sa pouzdano određenim daljinama, a da su im dijametri veći od 60 pc (videti poglavljje 3.21). Od njih 7 dva su vezana za molekularne oblake. Jedan od ta dva ostatka, OA184 (u narednom poglavljju biće više diskusije o njemu) najverovatnije ima vrlo veliki dijametar (175 pc) te za njega nema odgovarajućeg ostatka u M33. Drugi veliki galaktički ostatak povezan sa molekularnim oblakom je HB9 ($D = 83$ pc, $\Sigma = 9.9 \times 10^{-22}$ (SI)). Za njega postoji gotovo identičan parnjak u skupu od 6 velikih ostataka iz M33 ($D=91$ pc, $\Sigma = 9.2 \times 10^{-22}$ (SI)). Svi ostali ostaci iz naše galaksije koji imaju $D > 60$ pc imaju i bitno manji sjaj u odnosu na odgovarajuće ostatke iz galaksije M33.

Ostaci nižeg sjaja (šire se u retkoj sredini) za sada ne mogu biti detektovani i samim tim relacija dobija bitno blaži nagib nego što bi trebalo. Ako u budućnosti sa poboljšanjem instrumenata буду detektovani niskosjajni objekti (koji se šire u retkim sredinama), kao što su petlje, nagib bi se sigurno povećao do $\beta = 2$ (što smo dodavanjem petlji pokazali), a možda i do vrednosti koje su dobijene za našu galaksiju $\beta = 2.16 \pm 0.30$ (poglavlje 3.20), $\beta = 2.40 \pm 0.26$ (poglavlje 3.21).

4.5. Relacija za galaksiju M82

Galaksija M82 je vrlo zanimljiva jer je u njoj primećen veliki broj ostataka supernovih eksplozija (starburst galaksija). Ostaci su mladi i visoko luminozni. Identifikovano je 50 objekata koji su vrlo dobri kandidati za SNR-ove (Huang et al., 1994). Ni jedan nije većeg dijametra od 6 pc. Isti autori su konstruisali (metodom najmanjih kvadrata) $\Sigma - D$ relaciju za ostatke iz ove galaksije na 8.4 GHz i dobili vrednost $\beta = 3 \pm 0.3$. Uzeli su 39 ostataka za koje su precizno određeni uglovni dijametri i gustine fluksa. Konstruisali su još jednu relaciju sa 28 kalibratora koji su pripadali grupi kod kojih je ugaoni dijometar bio manji ili jednak ugaonoj širini snopa instrumenta i dobili $\beta = 3.6 \pm 0.4$. Autor ove disertacije je izabrao 11 kalibratora od kojih 10 pripadaju skupu uglovno manjih ostataka i 1 skupu sa većom uglovnom veličinom, a da imaju izračunate spektralne indekse u (opsegu $0 < \alpha < 1$). Za ovih 11 kalibratora dobijena je relacija na 8.4 GHz oblika $\Sigma \propto D^{-3.61 \pm 0.30}$ sa 94% slaganja. Ista relacija na 1 GHz je

$$\Sigma_{\text{1GHz}} = 2.86^{+0.84}_{-0.65} \times 10^{-16} D^{-4.08 \pm 0.39}, \quad (4.34)$$

sa slaganjem od 92%.

Kalibratorima relacije (4.34) pridružujemo kalibracione petlje i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 4.12 i u tabeli 4.12. Na slici 4.12 dati su $\Sigma - D$ dijagrami za slučajeve koji odgovaraju relacijama (4.34) i (4.35).

Tabela 4.12. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji relaciji određenoj korišćenjem 11 kalibracionih ostataka iz galaksije M82.

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
10	3.33 ± 0.13	97
9	3.33 ± 0.13	97
7	3.28 ± 0.12	98
6	3.26 ± 0.12	98
5	3.17 ± 0.10	99
4	3.12 ± 0.10	99

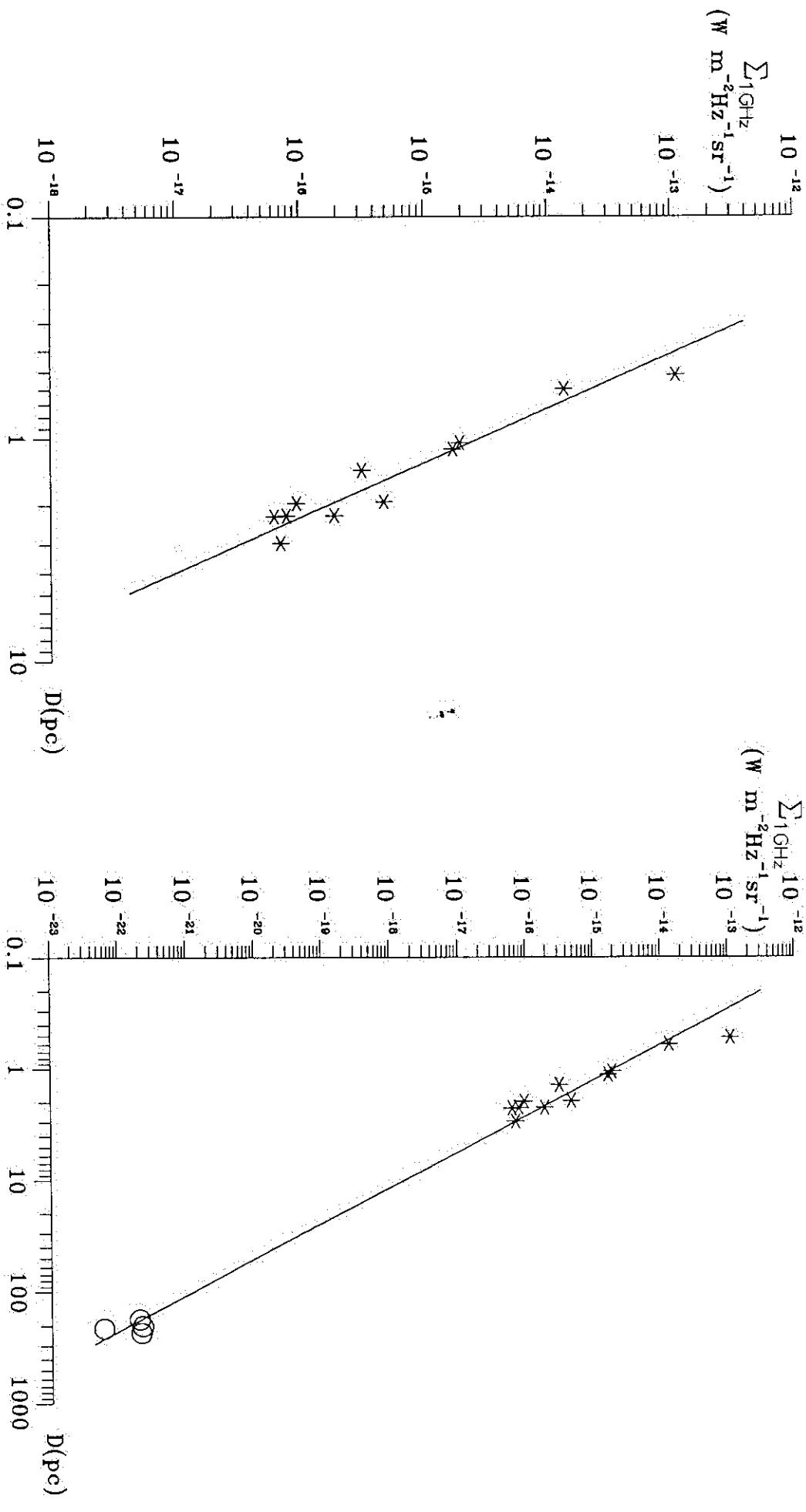
Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

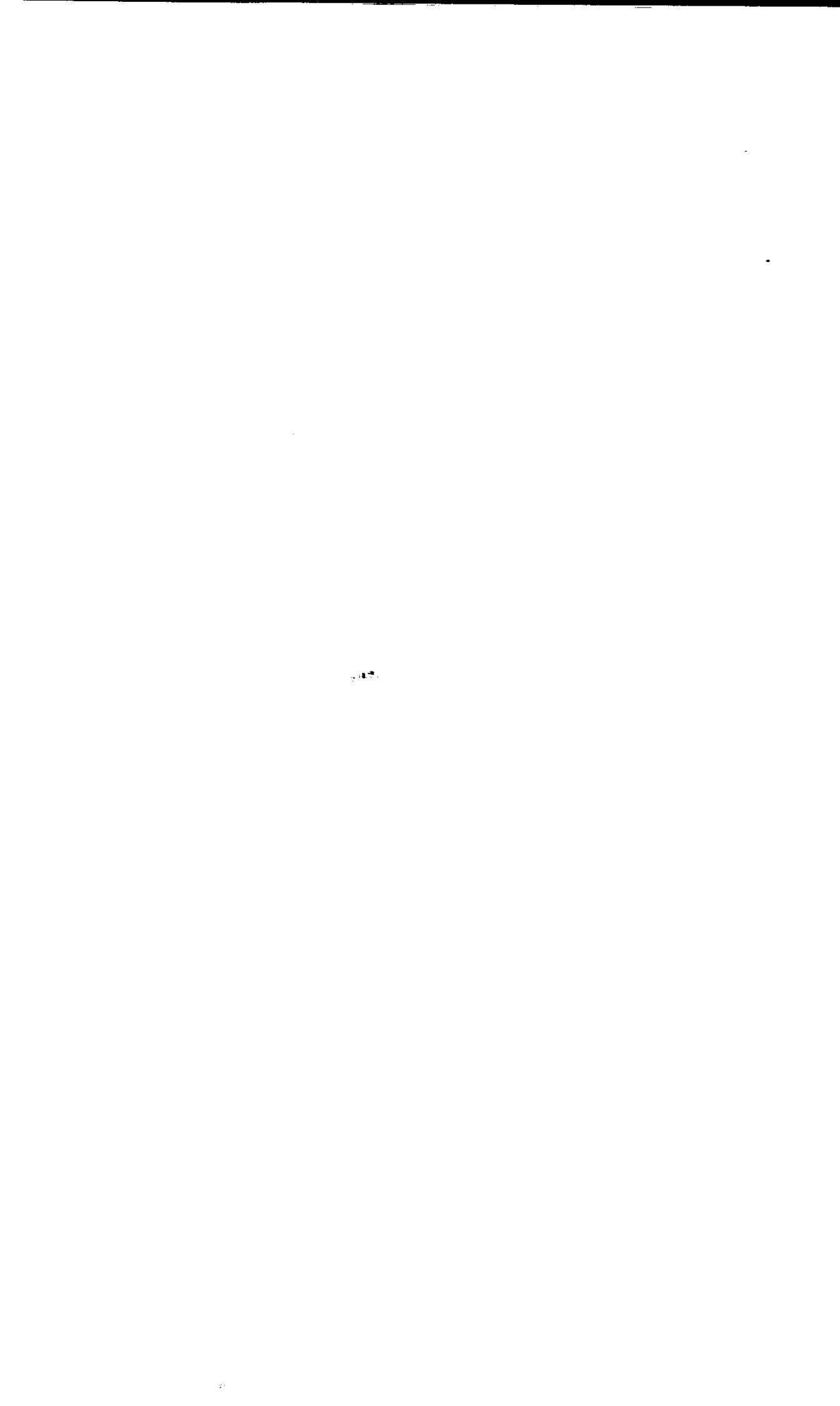
$$\Sigma_{\text{1GHz}} = 2.11^{+0.65}_{-0.49} \times 10^{-15} D^{-3.12 \pm 0.10} \quad (4.35)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = 0.96, \quad \beta = 3.25, \quad \Delta\beta = 0.83. \quad (4.36)$$

Slika 4.1.2. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za 11 kalibratora iz galaksije M82.
 Desno – zavisnost za galaksiju M82 kojoj su pridružene 4 glavne petlje. Zvezdicama su označeni kalibratori iz galaksije M82, a kružićima petlje.





Iz prethodne tabele i odgovarajućih relacija se vidi da je promena koeficijenta β velika i da petlje statistički ne pripadaju ovakvom uzorku početnih kalibratora. To je rezultat koji je očekivan jer su ostaci u galaksiji M82 veoma luminozni i vrlo mlađi. Dijametri 11 kalibratora ne prelaze 3 pc, a dva ostatka imaju dijametre ispod 1 pc. Svih 11 ostataka su sjajniji i manjeg dijama od Kasiopeje A ($D=5\text{pc}$), koja je ekstremno visoko sjajan SNR za našu galaksiju. Huang sa saradnicima ističe da se ostaci u galaksiji M82 šire u vrlo gustoj međuzvezdanoj sredini. Svi ovi ostaci se nalaze u centralnoj galaktičkoj oblasti. Odavde sledi da ako su glavne petlje SNR-ovi koji se šire u jako retkoj sredini (opširnije objašnjenje je u glavi 6) i ogromnih su dijametara ne bi trebalo da su slični ostacima iz galaksije M82 što prethodni test i potvrđuje. Ova analiza navodi da je Cas A po svojim osobinama bliža mlađim ostacima iz galaksije M82. Koeficijent β dobijen za galaksiju M82 je u odnosu na novije koeficijente određene za našu galaksiju, najpričutniji vrednosti dobijenoj od strane Huang-a i Tadeuša (Huang & Thaddeus, 1985 – poglavljje 3.17) za ostatke u molekularnim oblacima (gušća sredina). U svakom slučaju izgleda da je evolucija mlađih SNR-ova brža (Duric & Seaquist, 1986 – poglavljje 2.6), što strmiji nagib $\Sigma - D$ relacije za ovaj slučaj i pokazuje. Makslov sa saradnicima (Muxlow et al., 1994) smatra da se ostaci u galaksiji M82 ne nalaze u adijabatskoj fazi već da su u početnoj fazi slobodnog širenja (free-expansion phase).

4.6. Relacije za galaktičke sa vangalaktičkim SNR-ovima

Galaktičkim kalibratorima Kejsa i Batačarije (Case & Bhattacharya, 1998) dodaćemo prvo kalibratore iz Magelanovih oblaka, zatim iz galaksija M31 i M33 i na kraju iz galaksije M82.

Relacija za galaktičke ostatke (36 ostataka – bez Cas A) zajedno sa 40 ostataka iz Magelanovih oblaka (29 iz Velikog (bez ostatka 0505-679) i 11 iz Malog) ima sledeći oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 2.70^{+2.87}_{-1.39} \times 10^{-17} D^{-2.40 \pm 0.20}, \quad (4.37)$$

sa slaganjem od 65%.

Kalibratorima relacije (4.37) pridružujemo kalibracione petlje (bez OA184, Monoceros petlje i Lupus petlje) i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 4.13 i u tabeli 4.13. Na slici 4.13 dati su $\Sigma - D$ dijagrami za slučajeve koji odgovaraju relacijama (4.37) i (4.38).

Tabela 4.13. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji (bez OA184, Monoceros petlje i Lupus petlje) relaciji određenoj korišćenjem 76 kalibracionih ljudskastih ostataka (galaktičkih + iz Magelanovih oblaka).

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
7	2.36 ± 0.17	71
6	2.35 ± 0.17	70
5	2.31 ± 0.17	71
4	2.29 ± 0.17	70

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{\text{GHz}} = 1.94^{+1.67}_{-0.90} \times 10^{-17} D^{-2.29 \pm 0.17}. \quad (4.38)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = 0.11, \quad \bar{\beta} = 2.33, \quad \Delta\beta = 0.07. \quad (4.39)$$

Vrlo je zanimljivo primetiti da koeficijent β ima istu vrednost za slučaj kalibratora iz naše galaksije (relacija 3.101) i zajedno sa kalibratorima iz Magelanovih oblaka (relacija 4.37).

Ako konstruišemo relaciju sa 36 galaktičkih kalibratora, 40 iz Magelanovih oblaka, 30 iz galaksije M31 i 51 iz galaksije M33 dobijamo

$$\Sigma_{\text{GHz}} = 8.59^{+5.13}_{-3.21} \times 10^{-18} D^{-2.07 \pm 0.13} \quad (4.40)$$

sa slaganjem od 61%.

Kalibratorima relacije (4.40) pridružujemo kalibracione petlje (bez OA184, Monoceros petlje i Lupus petlje) i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 4.14 i u tabeli 4.14. Na slici 4.14 dati su $\Sigma - D$ dijagrami za slučajeve koji odgovaraju relacijama (4.40) i (4.41).

Tabela 4.14. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji (bez OA184, Monoceros petlje i Lupus petlje) relaciji određenoj korišćenjem 157 kalibracionih ostataka (galaktičkih + iz Magelanovih oblaka + iz galaksija M31 i M33).

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
7	2.12 ± 0.12	66
6	2.10 ± 0.12	65
5	2.08 ± 0.12	66
4	2.06 ± 0.12	65

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{\text{GHz}} = 8.43^{+4.49}_{-2.93} \times 10^{-18} D^{-2.06 \pm 0.12}. \quad (4.41)$$

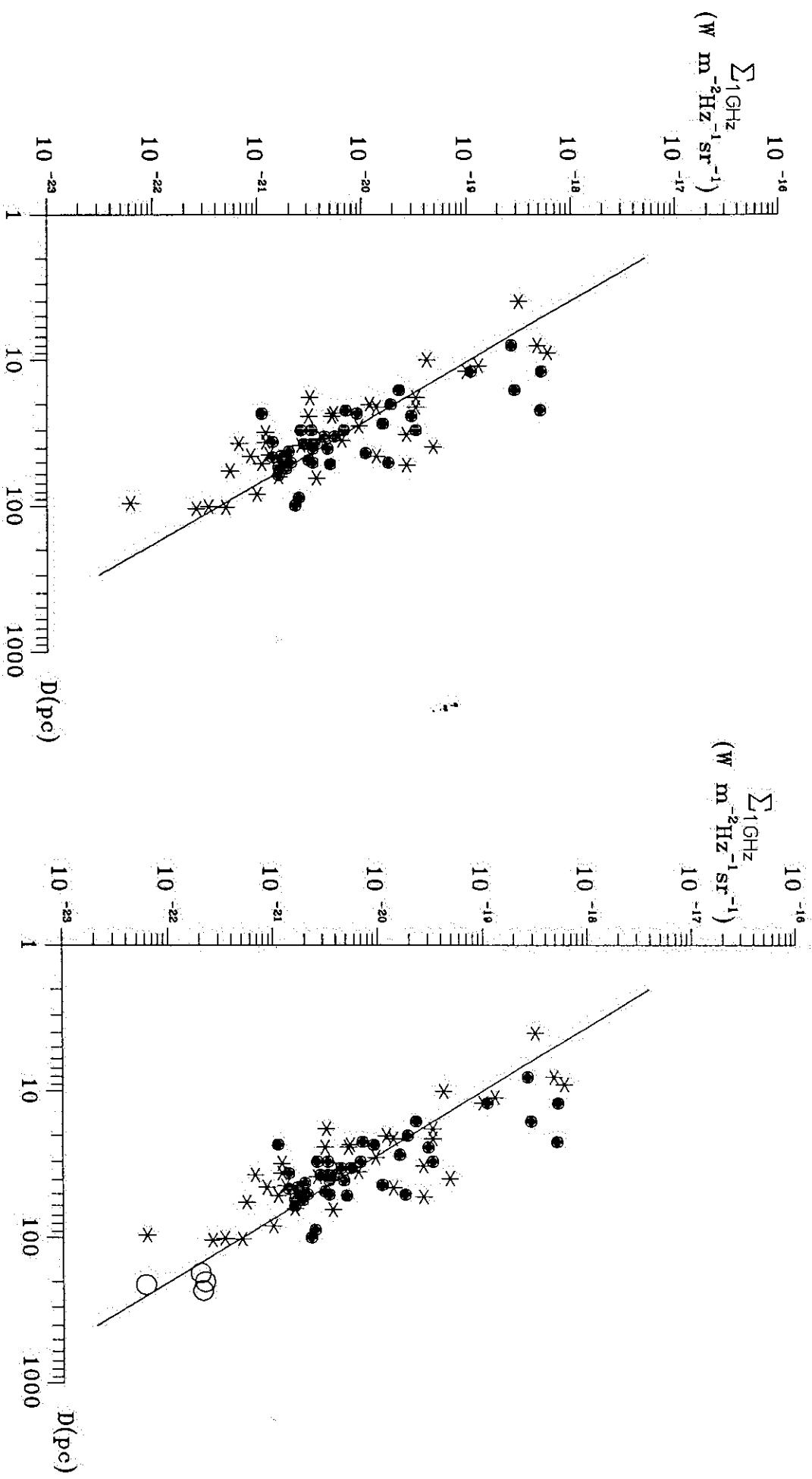
Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = 0.01, \quad \bar{\beta} = 2.09, \quad \Delta\beta = -0.02. \quad (4.42)$$

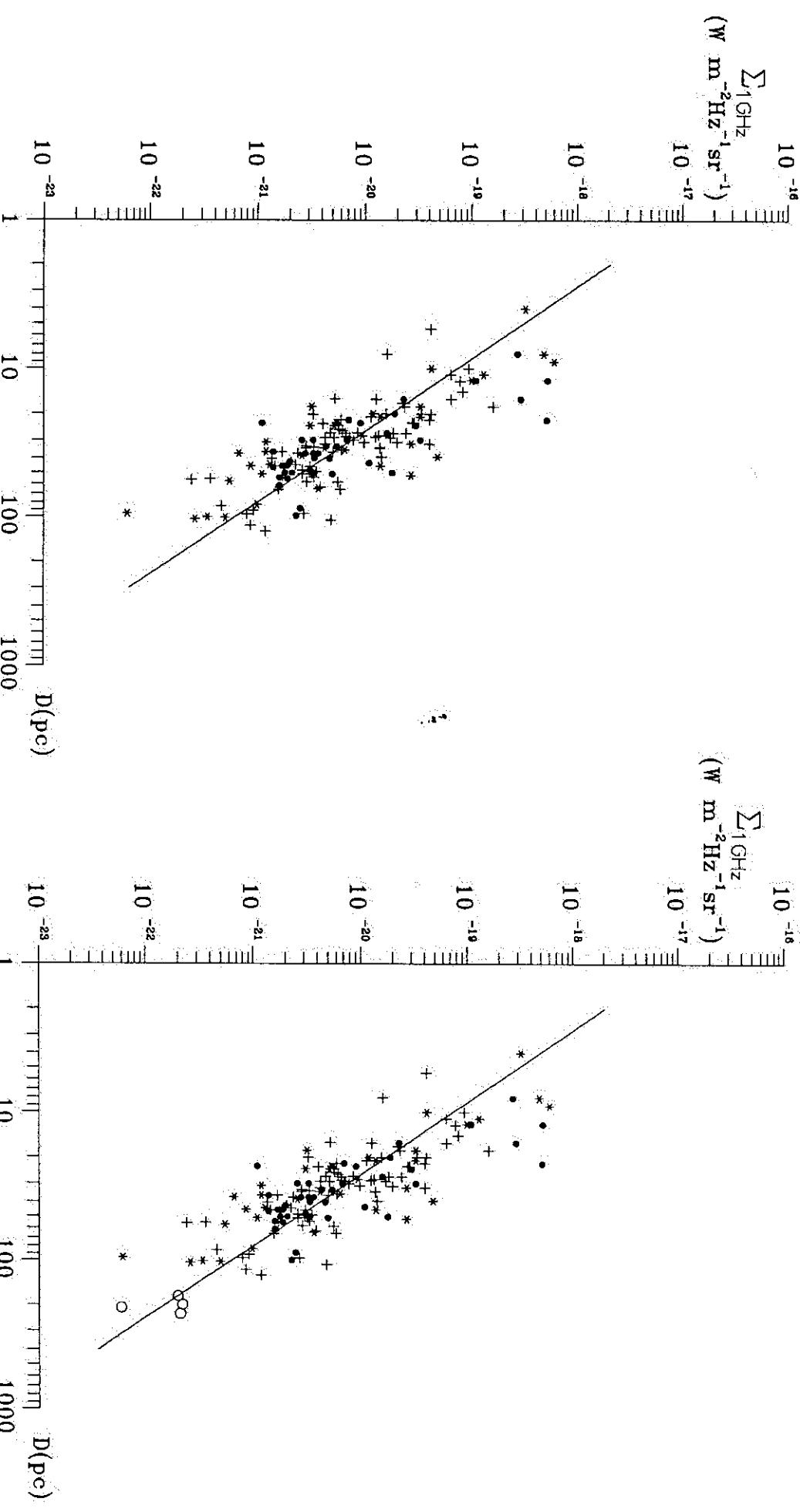
Dobija se zanemarljiva promena za β . Po utvrđenom kriterijumu petlje su za ovako definisani relacijsku najnormalniji ostaci. Petlja IV je levo od linije fita dok je Petlja II na liniji.

Očigledno je da više od polovine ostataka pripada galaksijama M31 i M33. Zbog toga ovi ostaci smanjuju nagib relacije na $\beta \approx 2$. Ostaci iz naše galaksije zajedno sa ostacima iz Magelanovih oblaka (njih 76) daju relaciju sa $\beta = 2.4$ (relacija 4.37), dok 81 ostatak iz M31 i M33 definiše relaciju sa $\beta \approx 1.8$ (poglavlja 4.3 i 4.4). Sasvim je za očekivanje da

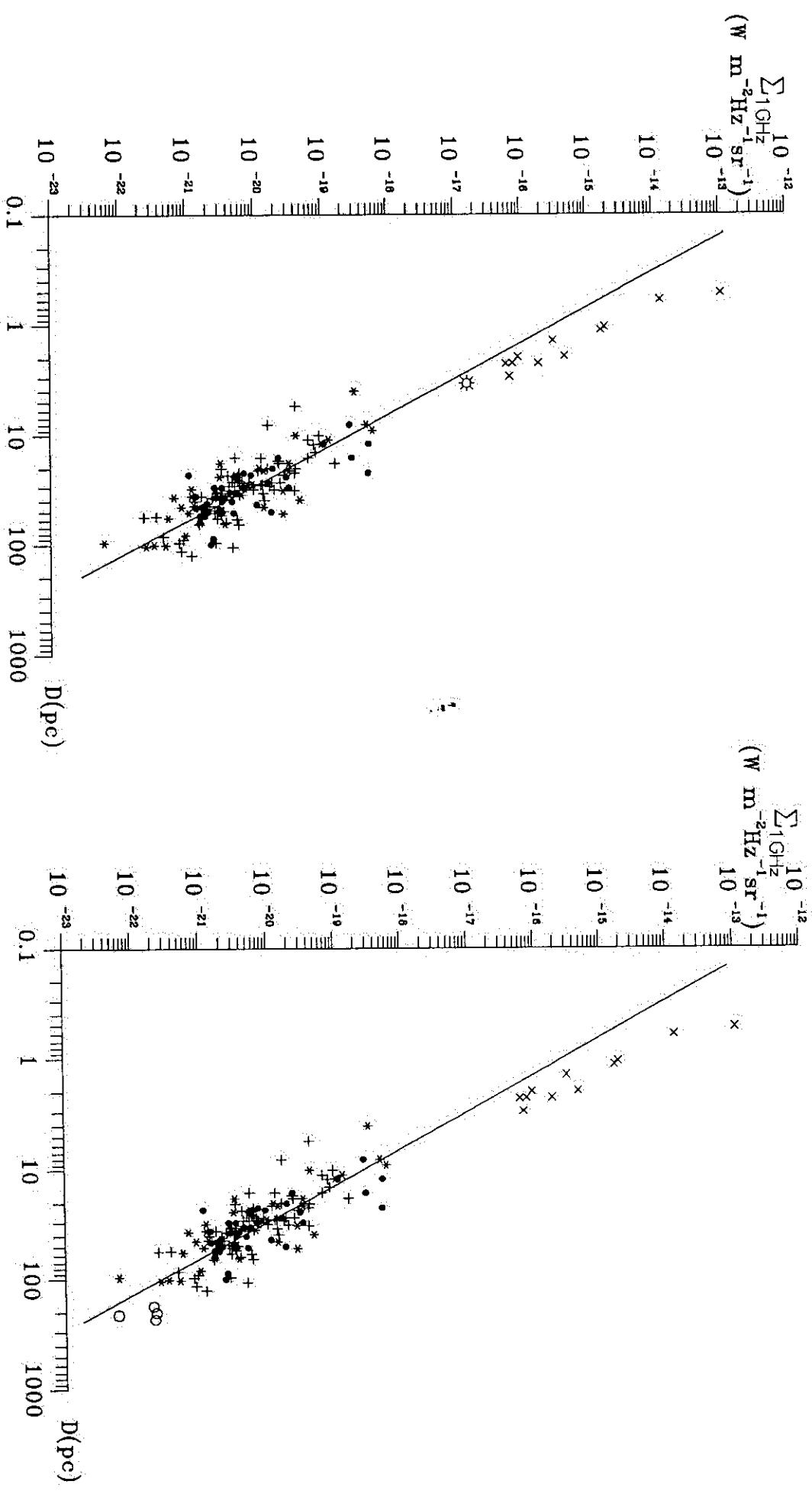
Slika 4.13. Levo – zavisnost površinskog sjaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za: 36 (bez Cas A) C&B kalibratora (zvezdice), 29 (bez 0505-679) kalibratora iz LMC-a i 11 kalibratora iz SMC-a (puni kružići). Desno – C&B+LMC+SMC zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje (krugovi).

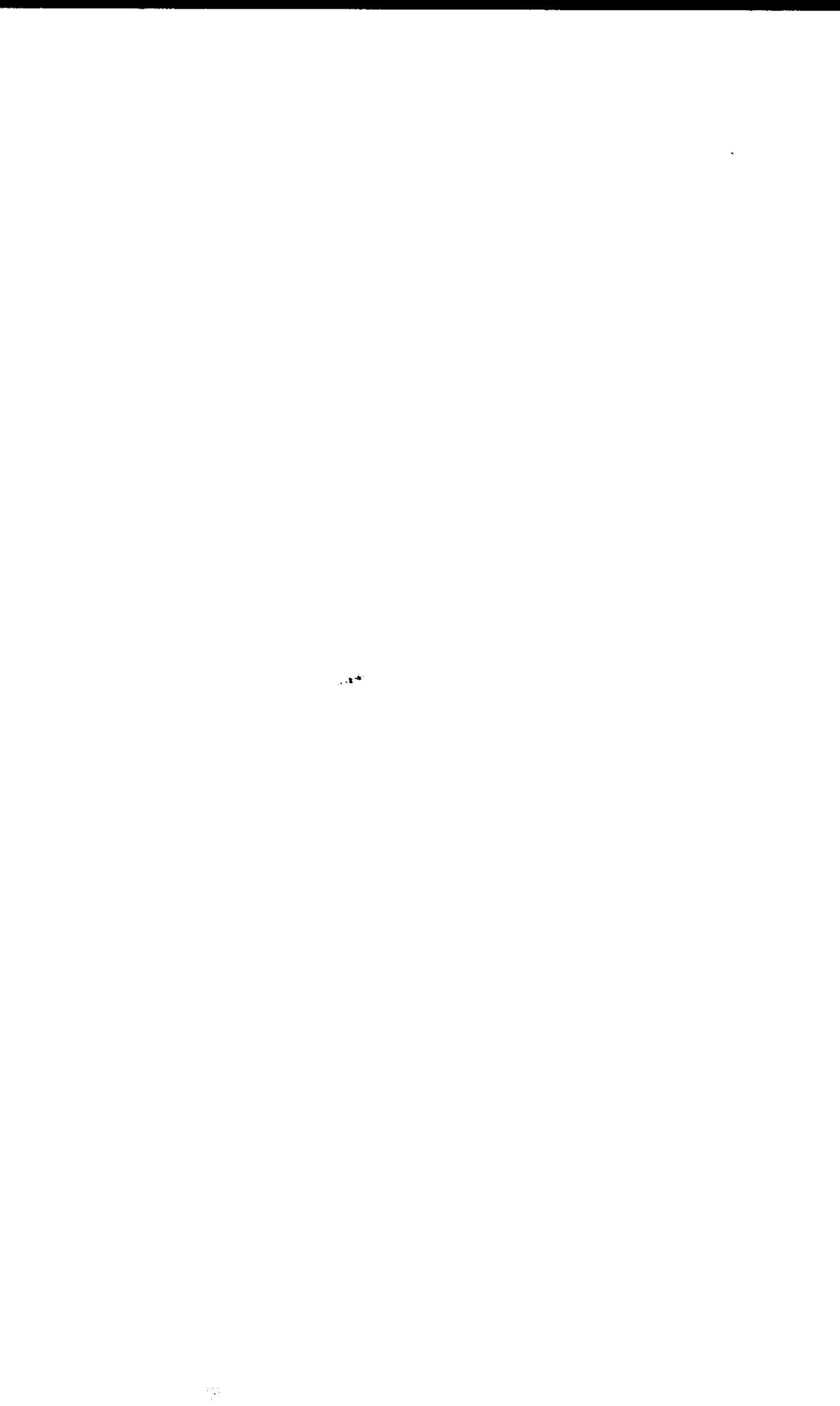


Slika 4.14. Levo – zavisnost površinskog sijaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za: 36 C&B kalibratora (zvezdice), 40 LMC+SMC kalibratora (puni kružici), 30 iz M31 i 51 kalibrator iz galaksije M33 (plusevi). Desno – C&B+LMC+SMC+M31+M33 zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje (krugovi).



Slika 4.15. Levo – zavisnost površinskog sijaja Σ (na frekvenci od 1 GHz) od dijametra D za: 36 C&B kalibratora (zvezdice), 40 LMC+SMC kalibratora (puni kružići), 81 M31+M33 kalibrator (plusici) i 11 kalibratora iz galaksije M82 (krstići). Dočrtana je Cas A. Desno – C&B+LMC+SMC+M31+M33+M82 zavisnost kojoj su pridružene 4 glavne petlje (krugovi).





relacija rezultira vrednošću $\beta \approx 2$ (relacija 4.40). Cela diskusija ovog testa se svodi na diskusiju u poglavlju 4.4.

Ako konstruišemo relaciju sa: 36 galaktičkih kalibratora, 40 iz Magelanovih oblaka, 81 iz galaksija M31 i M33 i 11 iz galaksije M82 dobijamo:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 3.47_{-1.01}^{+1.42} \times 10^{-16} D^{-3.10 \pm 0.10}, \quad (4.43)$$

sa slaganjem od 85%.

Kalibratorima relacije (4.43) pridružujemo kalibracione petlje (bez OA184, Monoceros petlje i Lupus petlje) i testiranjem dobijamo rezultate koje ćemo predstaviti na slici 4.15 i u tabeli 4.15. Na slici 4.15 dati su $\Sigma - D$ dijagrami za slučajeve koji odgovaraju relacijama (4.43) i (4.44).

Tabela 4.15. Vrednosti za β dobijene pridruživanjem kalibracionih petlji (bez OA184, Monoceros petlje i Lupus petlje) relaciji određenoj korišćenjem 168 kalibracionih ostataka (galaktičkih + iz Magelanovih oblaka + iz galaksija M31 i M33 + iz galaksije M82).

broj kal. petlji	β	kvalitet fita (%)
7	3.03 ± 0.10	85
6	3.03 ± 0.10	85
5	3.02 ± 0.10	85
4	3.02 ± 0.10	85

Dobijena $\Sigma - D$ relacija sa 4 pridružene glavne petlje ima oblik:

$$\Sigma_{1\text{GHz}} = 2.76_{-0.79}^{+1.10} \times 10^{-16} D^{-3.02 \pm 0.10}. \quad (4.44)$$

Iz prethodno navedenog sledi da je

$$\Delta\beta_4 = 0.08, \quad \bar{\beta} = 3.025, \quad \Delta\beta = 0.075. \quad (4.45)$$

Očigledno je da set mlađih ostataka u galaksiji M82 bitno uvećava koeficijent β (relacija (4.43)). Promena koeficijenta β prilikom dodavanja glavnih petlji je mala ali ipak dovoljno dobra da uđe unutar intervala zadatog njegovom greskom, te i ovaj test može biti prilog SNR poreklu radio-petlji.

Uopšteno gledano, sva tri testa u ovom poglavlju daju vrlo dobre rezultate koji potvrđuju SNR poreklo radio-petlji. Pridruživanjem kalibracionih petlji dobijamo nešto manju promenu za β u sva tri slučaja (u odnosu na test relacije Kejsa i Batačarije), što znači da su još bolje podržani zaključci poglavlja 3.21. Početna relacija (3.101) se gotovo ne menja dodavanjem kalibratora iz Magelanovih oblaka. Kalibratori iz galaksija M31 i M33 utiču na $\Sigma - D$ relaciju i redukuju joj nagib na $\beta \approx 2$ (relacija 4.40). Kalibratori iz galaksije M82 bitno utiču na koeficijente $\Sigma - D$ relacije. Shodno diskusiji u poglavlju 4.5 ovakvi rezultati trećeg testa u ovom poglavlju su i očekivani.

Na kraju možemo zaključiti da rezultati treće i ove glave potvrđuju SNR poreklo radio-petlji. Zanimljivi rezultati testova za galaksiju M31, a naročito za galaksiju M33 daju novi aspekt empirijskoj $\Sigma - D$ relaciji čiji nagib dodavanjem petlji dobija vrednost $\beta \approx 2$. Uz to shodno diskusiji u poglavljiju 4.4 trebalo bi krenuti u jedno široko istraživanje niskosjajnih vangalaktičkih SNR-ova koji se šire u retkoj sredini.

5. PRILOG TEORIJSKOJ $\Sigma - D$ RELACIJI

5.1. Uvod

Od 1977. godine i rada Mekija i Ostrajkera (McKee & Ostriker, 1977) se menja shvatanje o međuzvezdanoj sredini. Ovim radom se pokazuje da supernove eksplozije imaju veliki uticaj na strukturu međuzvezdane materije. Pod dejstvom udarnog talasa SNR-a isparavaju omotači malih međuzvezdanih oblaka. Udarni talas ostavlja iza sebe kavitet razredenog, homogenog i vrelog gasa (koncentracije $n = 10^{-2.5} \text{ cm}^{-3}$ i temperaturu $T = 10^{5.7} \text{ K}$). Efekat isparavanja omotača međuzvezdanih oblaka koji su u celini uronjeni u vreli gas u kojem se SNR širi (vreli gas popunjava najveći deo zapremine međuzvezdanog prostora) dovodi do toga da se gustina gasa unutar ostatka neznatno poveća (samim tim će temperatura biti neznatno niža) i sredina postaje homogenija i ostaje vrela. Omotači ispare i gas koji je sačinjavao omotače se rasprostire po unutrašnjosti ostatka. Tako se stvori mehur ispunjen vrelim, homogenijim gasom niske gustine. Po modelu Mekija i Ostrajkera SNR se širi u razređenoj sredini. Mehur na ovaj način dobijen ovičen je oblacima u kojima je gustina veća (slika 5.4). Zbog toga i liči na mehur koji je u unutrašnjosti redak, a spolja gušći u smislu postojanja oblaka. Po ovom modelu prosečni SNR-ovi mogu da ostanu u adijabatskoj fazi, a da dosegnu dijametre i do 360 pc. Autori ovog rada opisuju evoluciju SNR-ova u ranoj adijabatskoj fazi i pokazuju da ova faza traje dok se ostatak ne proširi do dijametra od oko 200 pc. Posle ove faze počinje kasnija adijabatska faza (za $D > 200 \text{ pc}$). U svakom slučaju radio-petlje bi po ovom modelu trebalo da budu SNR-ovi u adijabatskoj fazi, negde na granici između rane i pozne faze. Pošto se radio-petlje izgleda šire u već razređenoj homogenoj sredini, od strane zvezdanih vetrova ili ranijih SNR-ova, ovaj model je idealan za njihov opis. Za dalju analizu radio-zračenja supernovih ostataka prihvatićemo model Mekija i Ostrajkera – ostatak velikog dijametra, sa vremenom unutrašnjošću kod koga će se formirati gušća hladnija ljska tek u kasnijim fazama evolucije. Iz ovakvog SNR-a mora se očekivati fluks zračenja termalnog porekla. Termalno zračenje razređene sredine je u stvari zakočno zračenje (Bremsstrahlung) – zračenje ionizovanog gasnog oblaka bez magnetnog polja.

U drugoj glavi ove disertacije, $\Sigma - D$ relacije su izvedene iz teorije sinhrotronskog mehanizma zračenja. Zanemarena je termalna komponenta zračenja koja sigurno postoji i koja bi možda imala uticaj na $\Sigma - D$ relaciju. U ovoj glavi će biti pokazano kako bi termalna komponenta mogla uticati na $\Sigma - D$ relaciju.

5.2. Model u kome termalna komponenta daje doprinos ukupnom radio-zračenju SNR-a

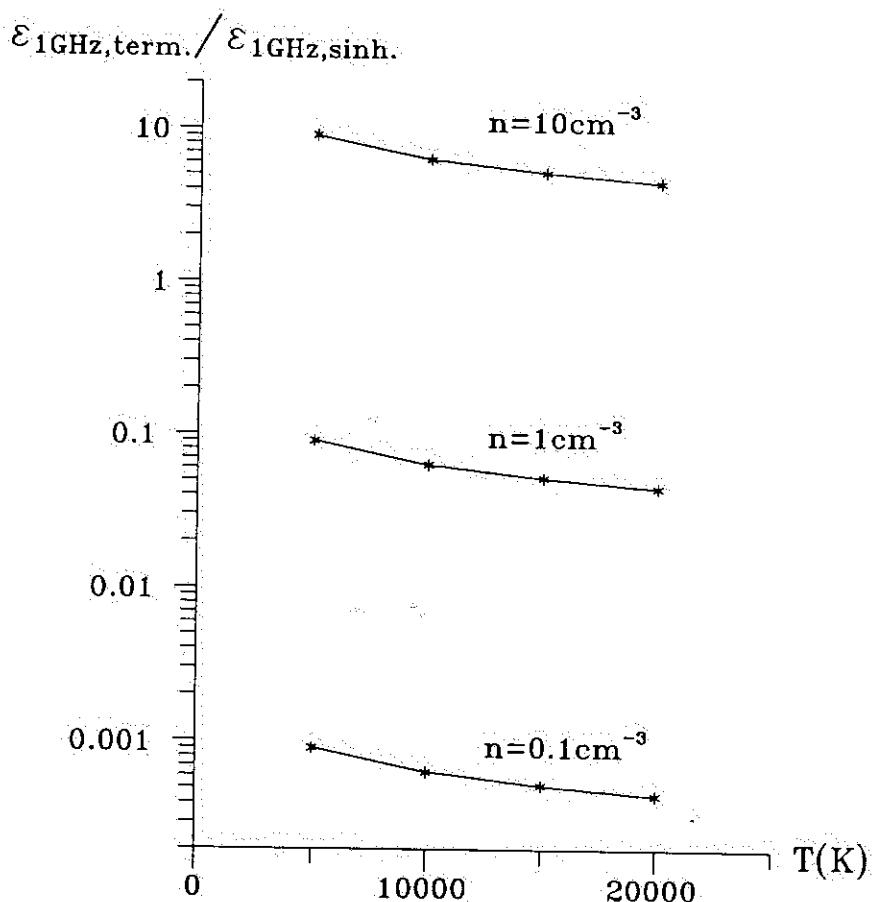
U ovom poglavlju se po prvi put detaljno razmatra mogućnost da SNR može stvoriti značajne količine zračenja termalnog porekla. Kod starih, evoluiranih ostataka možemo očekivati fluks termalne komponente, jer sa slabljenjem udarnog talasa smanjuje se temperatura ljeske, kao i sloja koji generiše X -zračenje (koje je inače termalne prirode). Što je temperatura niža, efikasnost zakočnog zračenja u radio-oblasti je veća (relacija 5.1). Gas koji zrači u X -području bi trebalo da zrači i u radio-oblasti (naročito kada mu se temperatura smanji) jer se u oba slučaja zračenje generiše istim termalnim mehanizmom – mehanizmom zakočnog zračenja. Inače, mnogo je jača zavisnost emitovanog zračenja od koncentracije nego od temperature ionizovanog gasa. Što je gustina sredine u kojoj se SNR širi veća to će i efikasnost termalnog mehanizma biti veća (relacija 5.1). Znači, da bi proizvodio značajniju količinu energije zakočnim zračenjem, SNR treba da se širi u gušćoj sredini i da mu temperatura bude niža (ali uvek iznad temperature na kojoj će početi rekombinacija).

Razmatraćemo stari ostatak sličan petljama, i analizirati mogućnosti stvaranja značajnije količine energije termalnim mehanizmom. Neka ostatak ima dijametar $D = 200$ pc i debljinu sinhrotronske ljeske 5% veličine dijametra (10 pc) – vidi sliku 5.5. Debljina ljeske je približno tolika i za glavne petlje (Spoelstra, 1972) i za ostatak OA184 (Routledge et al., 1986). Ovih pet ostataka imaju $D \approx 200$ pc (tabela 3.1).

Ako pogledamo tabelu 3.1 primetićemo da stari ostaci imaju površinski sjaj na frekvenciji od 1 GHz od oko $10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1} \text{ sr}^{-1}$. Ostatak sa dijametrom $D = 200$ pc i debljinom ljeske od 10 pc koji ima površinski sjaj 10^{-22} (SI) na 1 GHz imaće emisivnost (snaga na 1 GHz po jediničnoj zapremini) $\epsilon_{1\text{GHz}} = 1.1 \times 10^{-38} \frac{\text{erg}}{\text{cm}^{-3} \text{s}}$. Ako ovu vrednost pomnožimo sa zapreminom ljeske dobijemo ukupnu snagu zračenja ostatka na 1 GHz, $L_{1\text{GHz}} = 3.8 \times 10^{23} \frac{\text{erg}}{\text{s}}$. Integraleći po čitavom radio-opsegu (od 10^7 do 10^{11} Hz) i uzimajući za spektralni indeks $\alpha = 0.5$ (prosečna vrednost za SNR-ove), dobijamo luminost $L = 7.5 \times 10^{33} \frac{\text{erg}}{\text{s}}$. Ako prepostavimo da se celokupno zračenje ovakvog ostatka stvara sinhrotronskim mehanizmom onda upotrebom "računa jednakog učešća" (equipartition calculation) možemo dobiti minimalnu vrednost magnetnog polja i minimalnu vrednost ukupne energije datog SNR-a. Metodom "jednakog učešća" se može izračunati minimalna jačina magnetnog polja jednog sinhrotronskog emitera ako je energija koju za ovaj mehanizam zračenja obezbeđuje magnetno polje jednak ukupnoj energiji koju nose relativističke čestice neophodne za sinhrotronsko zračenje. Upotrebom ovog računa (Pacholczyk, 1970) dobijamo da je za naš SNR $H_{\min} = 1.3 \times 10^{-5}$ Ga, a minimalna ukupna energija (energija magnetnog polja + energija relativističkih e^- + energija "teških" čestica) kojom je naš sinhrotronski emiter snabdeven – $E_{\min} = 1.9 \times 10^{50}$ erg. Još jednom ćemo naglasiti da su ove vrednosti minimalne i da su samim tim u skladu sa vrednostima za velike ostatke tipa petlji koje imaju najverovatnije $E \geq 10^{51}$ erg (npr. Kosarev et al., 1994).

Sada ćemo analizirati zakočno zračenje našeg ostatka. Kako već za koncentracije od $n \approx 1 \text{ cm}^{-3}$ i temperature $T \approx 10^4 \text{ K}$ zakočno zračenje na frekvenciji od 1 GHz obezbeđuje oko 10% energije ($\epsilon_{1\text{GHz}} \approx 10^{-39} \frac{\text{erg}}{\text{cm}^{-3} \text{s}}$) sinhrotronskog mehanizma na istoj frekvenciji za stari SNR kod koga je magnetno polje $H \sim 10^{-5}$ Ga, može se opravdano prepostaviti da bi termalni mehanizam trebalo da ostavi nekakav otisak na ukupno zračenje SNR-

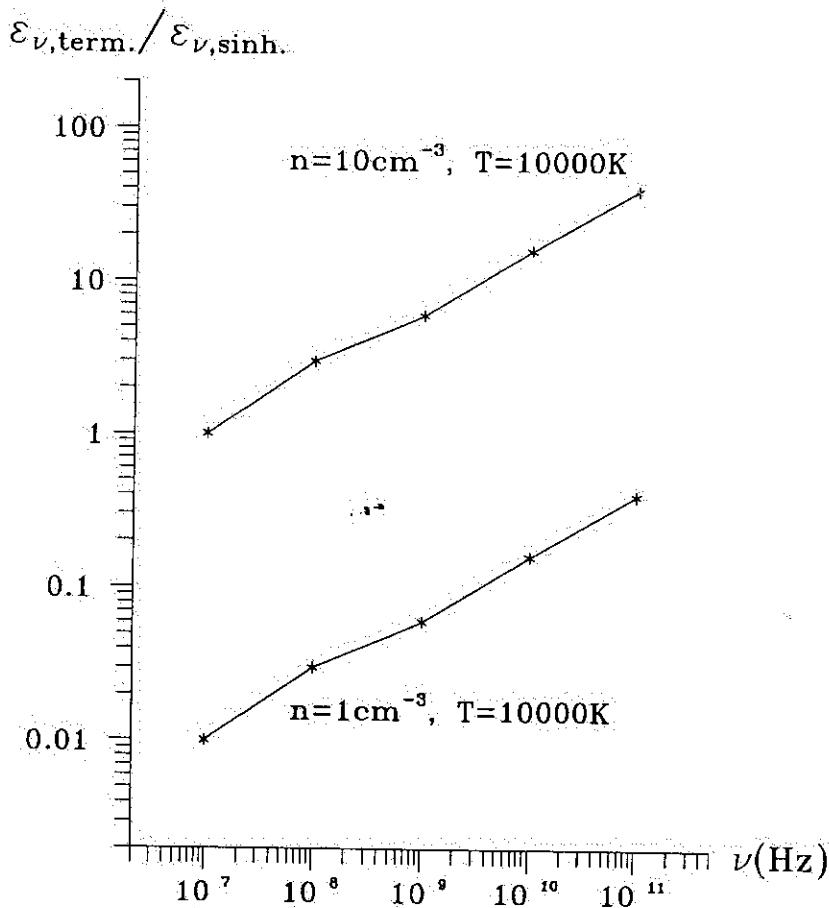
a (slika 5.1). Snaga zakočnog zračenja našeg SNR-a na 1 GHz je $L_{1\text{GHz}} = 3.4 \times 10^{22} \frac{\text{erg}}{\text{s}}$. Integraleći po čitavom radio-opsegu (jer je ljuška našeg ostatka sa $n \sim 1 \text{ cm}^{-3}$ i $T \sim 10^4 \text{ K}$ optički retka duž celog radio-opsega – relacija 5.4 daje za $\nu_0 \sim 10^7 \text{ Hz}$) od 10^7 do 10^{11} Hz i uzimajući za spektralni indeks $\alpha = 0.5$ (prosečna vrednost za SNR-ove), dobijamo luminoznost $L = 2.4 \times 10^{33} \frac{\text{erg}}{\text{s}}$. Odavde sledi da je luminoznost zakočnog zračenja starog ostatka koji se širi kroz nešto gušću sredinu ($n \sim 1 \text{ cm}^{-3}$) tri puta manja od luminoznosti sinhrotronskog zračenja istog ostatka. Samim tim za ovakav ostatak možemo da očekujemo uticaj termalnog mehanizma na ukupno zračenje.



Slika 5.1. Zavisnost odnosa emisivnosti termalne i netermalne komponente zračenja na frekvenciji od 1 GHz od temperature (slučaj tople sredine), a za konstantne koncentracije: $n = 0.1, 1 \text{ i } 10 \text{ cm}^{-3}$.

Kako idemo ka višim frekvencijama smanjuje se količina radio-zračenja nastalog sinhrotronskim mehanizmom i termalna komponenta uzima sve veću ulogu (slika 5.2). Na graničnoj frekvenciji radio-oblasti (100 GHz) i zakočnim i sinhrotronskim zračenjem se emituje približno ista količina energije u jedinici vremena iz jedinične zapremine ($\varepsilon_{100\text{GHz}} \sim$

$10^{-39} \frac{\text{erg}}{\text{cm}^{-3}\text{s}}$). Odavde je jasno zbog čega se luminoznosti dobijene i za jedan i drugi mehanizam zračenja manje razlikuje nego zapreminske emisivnosti na 1 GHz. Kako idemo ka višim frekvencijama zakočno zračenje preuzima sve veću ulogu u ukupnoj izračenoj energiji. Prema tome, ako definišemo $\Sigma - D$ relaciju na 100 GHz ona bi trebalo značajno "da oseti" uticaj termalne komponente jer oko polovine zračenja starog SNR-a koji se širi kroz nešto gušću sredinu ($n \sim 1 \text{ cm}^{-3}$) je termalnog porekla.



Slika 5.2. Zavisnost odnosa emisivnosti termalne i netermalne komponente zračenja od frekvencije (radio-oblast). Sredina je na temperaturi $T = 10^4 \text{ K}$, a koncentracije su: $n = 1$ i 10 cm^{-3} .

Pričinu dobar kandidat za SNR koji bi trebalo da ima značajan termalni fluks je OA184. Po svojim karakteristikama vrlo je blizak modelu ostatka koji je prethodno analiziran. Celokupna naredna diskusija je vezana za članak Rutlidža sa saradnicima (Rutledge et al., 1986). U ovom radu ostatak OA184 se analizira uz pomoć posmatranja neutralnog vodonika (HI). Ostatak je vezan za molekularni oblak, znači da evoluira u gušćoj sredini. Dijametar mu je 175 pc, a debljina ljske je 5% dijametra. Otkrivene su velike

asocijacije HI i to na mestima gde je SNR najsvetlij i u radio i u optičkom području. Proračunato je da je koncentracija tog HI gasa 10 cm^{-3} i da se nalazi unutar ostatka. U optičkom delu linijskog spektra je primećeno da ostatak lici više na HII region nego na SNR, što nam daje odličan nagoveštaj da je i u radio-području zakočno zračenje značajno jer je to mehanizam zračenja HII regiona u radio-oblasti spektra. Autori ovog članka ističu da je to SNR u poznoj fazi evolucije i da je zbog toga atipičan. Veliku količinu HI unutar SNR-a objašnjavaju: 1. već započetom rekombinacijom starog SNR-a uprkos ionizaciji udarnim talasom i fotoionizaciji i 2. zbog oslabljenog udarnog talasa odredene količine HI ne bivaju ionizovane i ostaju unutar ostatka u neutralnom obliku. Ostatak je po autorima u poznoj adijabatskoj fazi. Pošto ostatak zrači i u radio i u optičkoj oblasti, sigurno poseduje velike količine ionizovanog gasa te samim tim iz ovakvog SNR-a možemo očekivati termalni radio-fluks. Procenjena koncentracija je više nego dovoljna za jak termalni fluks u radio-području. HI asocijacija za koju je izračunata ova koncentracija nije toliko dobro pridružena radio-ljusci SNR-a, mada se iz nje detektuje radio-zračenje. Ostatak OA 184 je sličan petljama, osim što evoluira u gušćoj sredini, i za sada je najbolji primer ostatka sa jakim termalnim radio-fluksom.

Sada ćemo se ponovo vratiti $\Sigma - D$ relaciji.

Vrlo je očigledno (glave 2, 3 i 4) da su vrednosti koeficijenta β iz empirijskih relacija manje od vrednosti dobijenih iz teorije. Možda baš to, što je do sada zanemarivan uticaj termalne komponente, dovodi do neslaganja empirije sa teorijom.

Ako bismo pokušali da sinhrotronsku emisivnost oblika $\epsilon_{\nu, \text{sinh.}} \propto R^{-\theta_1}$ saberemo sa emisivnošću termalne komponente koja ima oblik $\epsilon_{\nu, \text{term.}} \propto R^{\theta_2}$ gde su θ_1 i θ_2 konstante, videli bismo da ne bismo mogli da dobijemo ukupni eksponent $\theta = -\theta_1 + \theta_2$ nekim strogo analitičkim izvođenjem. Razmatranjem ponašanja zbira emisivnosti $\epsilon_{\nu} = \epsilon_{\nu, \text{sinh.}} + \epsilon_{\nu, \text{term.}}$ u raznim modelima SNR-a u širenju, pri dovoljno velikim vrednostima radijusa, se vidi da se jedan od dva člana zbira uvek zanemaruje i rešenje svodi ili na sinhrotronsko ili na termalno koje se ni najmanje ne slaže sa empirijom. Zbog toga što strogo analitički ne možemo doći do rešenja, pokušaćemo da na neki drugi aproksimativan način opišemo sprezanje ova dva mehanizma i samim tim promenu koeficijenta β u $\Sigma - D$ relaciji.

Kako je površinski sjaj $\Sigma \propto R \epsilon_{\nu}$ (veza 2.8), sprezanje možemo primeniti na površinski sjaj koji je aditivna veličina kao i emisivnost – energija po jedinici vremena iz jedinične zapremine u jediničnom frekventnom intervalu.

Ako izvedemo $\Sigma - D$ relaciju za termalno zakočno zračenje ionizovanog gasnog oblaka (mehanizam zračenja slobodnih elektrona koji se kreću u polju pozitivno naielktrisanih jezgara) i na neki način ovu relaciju pridružimo relacijama dobijenim za sinhrotronski mehanizam, možemo dobiti $\Sigma - D$ relaciju sa osetno smanjenim koeficijentom β . Ova ideja je u skladu sa prethodnom diskusijom. Stari ostatak, na početku pozne adijabatske faze, koji se širi u gušćoj sredini treba da ima osetan fluks termalnog porekla.

Sprezanje dve $\Sigma - D$ relacije za različite mehanizme zračenja, izvršićemo metodom konvolucije. Ovaj metod u suštini predstavlja dejstvo jedne funkcionalne zavisnosti na neku drugu gde na kraju dobijamo rezultat koji predstavlja spregu ove dve zavisnosti. Ovde moramo naglasiti da konvolucija dve $\Sigma - D$ zavisnosti predstavlja samo jedan aproksimativan analitički postupak preko koga se može naznačiti trend smanjenja nagiba teorijske

$\Sigma - D$ relacije. Do tačnijih rezultata se najverovatnije može doći rešavanjem ovog problema primenom numeričkih metoda. Njih nećemo koristiti u ovoj disertaciji već u budućim istraživanjima.

5.3. $\Sigma - D$ relacija za termalno zračenje ionizovanog gasnog oblaka (slučaj konstantne temperature i koncentracije)

Za izvođenje $\Sigma - D$ relacije za termalno zračenje ionizovanog gasnog međuzvezdanog oblaka iskoristićemo algoritam koji je upotrebio Šklovski za izvođenje svoje relacije za sinhrotronski mehanizam. Teorija zakočnog zračenja primenjena na ionizovani gasni oblak daje zapreminske koeficijente emisije (npr. Rohlfs & Wilson, 1996) u obliku

$$\varepsilon_\nu = \frac{4}{3} \frac{Z^2 e^6}{c^3} \frac{N_i N_e}{m^2} \left(\frac{2m}{\pi k T} \right)^{\frac{1}{2}} \ln \frac{p_2}{p_1}, \quad (5.1)$$

gde je T termodinamička temperatura sredine, a N_i i N_e – koncentracije jona i elektrona u ionizovanom oblaku. Masa i nanelektrisanje elektrona su m i e , Z predstavlja redni broj (broj protona) određenog jona, dok je c brzina svetlosti u vakuumu. Boltmanova konstanta je obeležena sa k . Sudarni parametar p predstavlja najmanje rastojanje između elektrona i jona, koje elektron dosegne prilikom svog ubrzanog kretanja u polju jona. Interval (p_1, p_2) obuhvata vrednosti koje sudarni parametar može da ima. Za p_2 bi gornja granica trebalo da bude srednja vrednost rastojanja između jona (Debajev radijus) dok za granične vrednosti parametra p_1 su potrebna kvantna mehanička razmatranja. Prethodna jednačina je izvedena za velike vrednosti sudarnog parametra p . Samim tim interakcija između čestica je energetski slaba. Zbog toga je cela ova teorija izvedena za pravolinijsko kretanje elektrona u polju jona gde parametar p predstavlja jedinstveno najmanje rastojanje između interagujućih čestica. Ovako izvedena relacija je dobra za jako razredene sredine gde su čestice daleko jedna od druge i gde je promena energije ubrzane čestice mala.

Intenzitet zračenja sfernog ionizovanog oblaka (pod pretpostavkom konstantne zapreminske emisivnosti) napišimo u obliku

$$I_\nu = \frac{1}{4\pi} R \varepsilon_\nu, \quad (5.2)$$

gde je R radijus oblaka.

Prepostavimo da se temperatura i koncentracija čestica objekta (vidi relaciju 5.1) ne menjaju sa rastojanjem od centra objekta (model Mekija i Ostrajkera) i da samim tim i sudarni parametar ne zavisi od radikalnog rastojanja. Shodno relaciji (5.2), dobijamo

$$\Sigma_\nu \propto R. \quad (5.3)$$

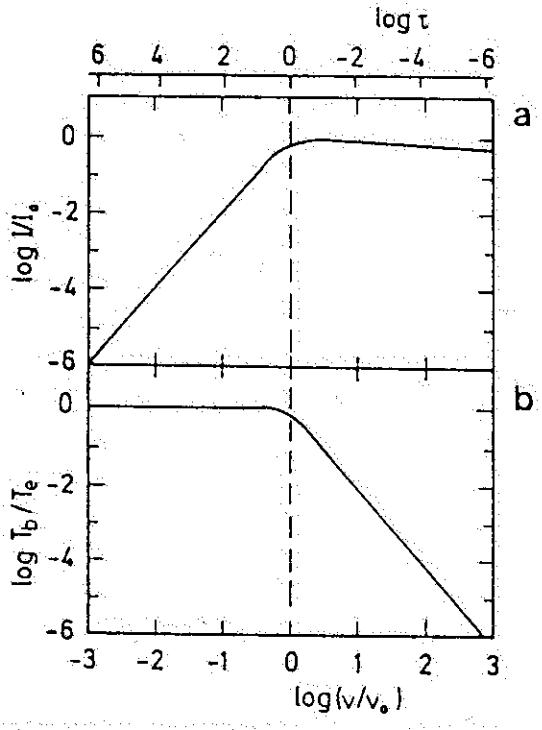
Analizirajući ovu relaciju primećujemo da sa porastom veličine SNR-a raste i njegov površinski sjaj što je i opravdano za slučaj optički retke sredine. Samim tim moramo proveriti da li je za određenu frekvenciju (1 GHz) na kojoj se konstruišu $\Sigma - D$ relacije, sredina prozračna.

Teorija termalnog zračenja ionizovanog gasnog oblaka daje spektar koji je prikazan na slici 5.3.

Sa slike se jasno vidi da postoji granična frekvencija na kojoj sredina postaje optički retka za zračenje veće učestanosti. Na toj frekvenciji je optička dubina $\tau = 1$. Za HII regije na te frekvenciji je baš u okolini 1 GHz, na kojoj mi izučavamo $\Sigma - D$ relacije. Izraz (Rohlf & Wilson, 1996) za određivanje ove učestanosti na kojoj se spektar "lomi" ima oblik

$$\nu_0 = 0.3045 T_e^{-0.643} (a(\nu, T) \text{EM})^{0.476}, \quad (5.4)$$

gde je ν_0 u GHz-ima, T_e – elektronska temperatura, korekcioni faktor $a(\nu, T) \approx 1$, a EM (mera emisije) = $\int N_e^2 ds$ gde je N_e u cm^{-3} , a s u parsecima.



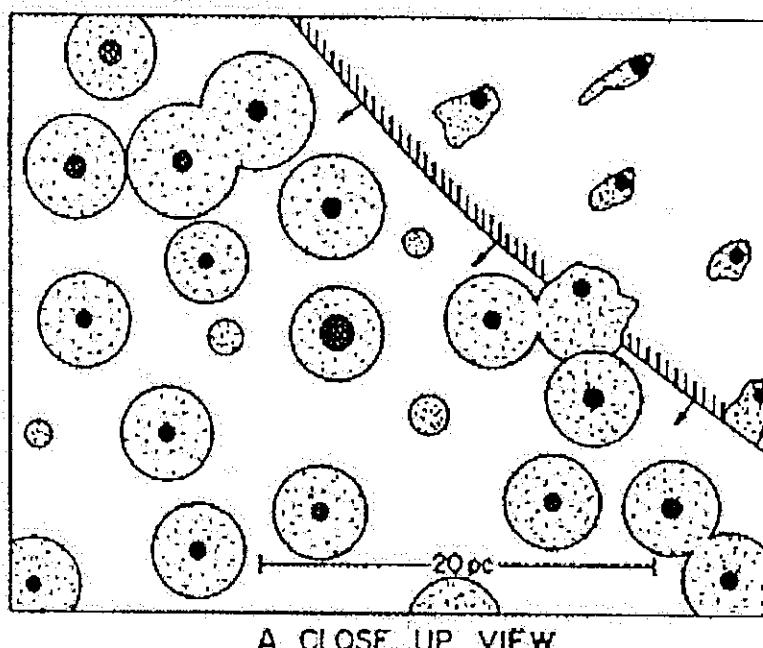
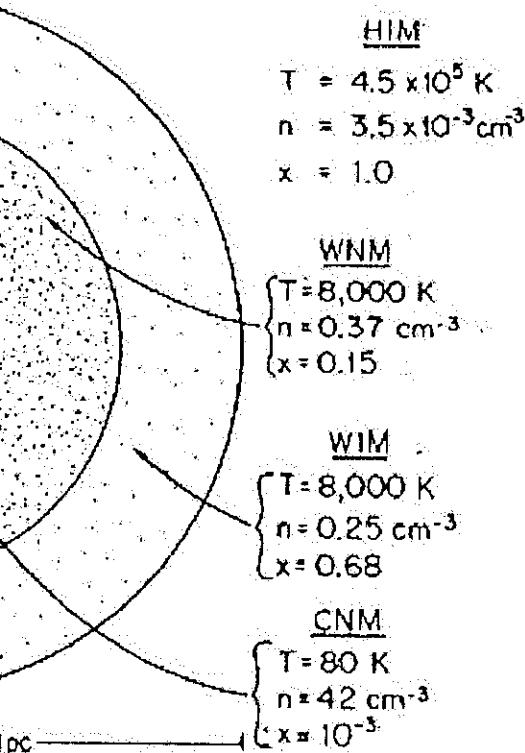
Slika 5.3a,b. Termalno zračenje ionizovanog gasnog oblaka. (a) Spektralna raspodela intenziteta. (b) Spektralna raspodela temperature po sjaju (Rohlf & Wilson, 1996).

Koristeći model međuzvezdane sredine (McKee & Ostriker, 1977) kreirane od strane udarnih talasa supernovnih eksplozija (vidi sliku 5.4), izvršićemo analizu u smislu prozračnosti sredine u odnosu na zračanje od 1 GHz uz pomoć relacije (5.4). Za sredinu koju definišu već navedeni parametri za takozvani vredi međuzvezdani medijum (HIM) ($T \approx 4.5 \times 10^5 \text{ K}$, $n \approx 3.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$) vrednost ν_0 pada u kilohercno područje. Za topli neutralni medijum (WNM) ($T \approx 8000 \text{ K}$, $n \approx 0.37 \text{ cm}^{-3}$) ν_0 je na oko 3 MHz. Za topli ionizovani medijum (WIM) ($T \approx 8000 \text{ K}$, $n \approx 0.25 \text{ cm}^{-3}$) dobijena vrednost za ν_0 je oko 2 MHz. Hladna jezgra malih međuzvezdanih oblaka sa temperaturama $T \approx 80 \text{ K}$ i

koncentracijama $n \approx 42 \text{ cm}^{-3}$ imaju "prelom" u spektru na frekvenciji od oko 5 GHz. Iz prethodnog razmatranja sledi da je SNR prozračan za zračenje od 1 GHz (sem za slučaj hladnih jezgara malih međuzvezdanih oblaka), te da možemo primiti radio zračenje na ovoj frekvenciji iz unutrašnjosti ostatka i da sa povećanjem objekta moramo očekivati i povećanje fluksa termalnog zračenja iz optički retke unutrašnjosti.

Po teoriji Mekija i Ostrajkera međuzvezdani oblaci isparavaju u vreloj sredini koju je stvorio udarni talas. U unutrašnjosti ostatka ostaju samo hladna jezgra. Slika 5.4 nam prikazuje strukturu međuzvezdanog oblaka i deo međuzvezdane sredine koju prelazi udarni talas SNR-a.

A SMALL CLOUD



Slika 5.4 (levo). Presek prosečnog malog međuzvezdanog oblaka. Centralni deo predstavlja hladno jezgro (CNM) oblaka. Sledeći sloj je topli neutralni medijum (WNM). Spoljni omotač predstavlja topli jonizovani medijum (WIM). Koncentracije i temperature za svaku od ovih sredina su date na slici.

(Desno). Oblast međuzvezdane sredine veličine 30×40 parseka. Udarni talas supernove se širi iz gornjeg desnog ugla slike. Radijusi hladnih jezgara (crne oblasti) su od 0.4 do 1 pc. Svi oblaci sa jezgrom poseduju tople omotače (tačkasti regioni) radijusa oko 2.1 pc. Neki od oblaka su suviše mali da bi imali hladna jezgra. Omotači oblaka unutar SNR-a su kompresovani i uništeni. (McKee & Ostriker, 1977).

Ovakav model međuzvezdane materije navodi na zaključak da uglavnom hladna jezgra mogu apsorbovati zračenje na radio-frekvencijama na kojima se posmatra, te da raspored ovih jezgara između objekta i posmatrača može biti razlog tome što se SNR-ovi ne vide uvek u celini.

5.4. $\Sigma - D$ relacija za sinhrotronsko zračenje zajedno sa termalnim zračenjem ionizovanog gasnog oblaka (slučaj konstantne temperature i koncentracije)

U dosadašnjem izlaganju je pominjan matematički metod kojim se može opisati dejstvo jedne funkcionalne zavisnosti na neku drugu – metod konvolucije. Konvolucija dve funkcije $f(x)$ i $g(x)$ je funkcija $h(t)$ koja se definiše integralima

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)g(t-x)dx = \int_{-\infty}^{\infty} f(t-x)g(x)dx, \quad (5.5)$$

ili simbolički

$$h(t) = f(x) * g(x). \quad (5.6)$$

Krajnji rezultat teorije Šklovskog je relacija (2.29) ($\Sigma \propto R^{-6}$). Ako tu relaciju normiramo tako što ćemo je podeliti maksimalnom vrednošću površinskog sjaja koji supernova zvezda dosegne (od tog momenta sjaj opada) i počinje evolucija SNR-а, dobijemo izraz

$$\Sigma_{\text{norm}} = \text{const}_1 \frac{1}{\Sigma_{\max}} R^{-6}. \quad (5.7)$$

Površinski sjaj Σ_{\max} je definisan, prirodno, za minimalan radijus SNR-a, R_{\min} . Maksimalni radijus R_{\max} ostatak dosegne za minimalne vrednosti površinskog sjaja pri kojima je ostatak na granici da se totalno raspe i sjedini sa okolnom međuzvezdanom sredinom.

Ako relaciju (5.3) ($\Sigma = \text{const}_2 R$) konvoluiramo relacijom (5.7) u granicama od R_{\min} do R_{\max} (sto je fizički opravdano jer je radijus SNR-a uvek pozitivna veličina koja neprekidno raste) dobijamo

$$\Sigma(t) = \frac{\text{const}_1 \text{const}_2}{\Sigma_{\max}} \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \frac{R}{(t-R)^6} dR. \quad (5.8)$$

Pošto SNR počinje svoj razvoj kao eksplodirajuća zvezda koja je za nas tačkasta i u smislu površinskog sjaja (intenziteta) i doseže ogromne razmere do više stotina parseka, a za totalnu disipaciju u međuzvezdani medijum kao granični uslov možemo uzeti i beskonačnost, za kvalitativne zaključke možemo prihvatići da je prethodni integral približno jednak

$$\Sigma(t) \approx \frac{\text{const}_1 \text{const}_2}{\Sigma_{\max}} \int_0^{\infty} \frac{R}{(t-R)^6} dR. \quad (5.9)$$

Ovaj integral može se rešiti sменом $t-R = x$ i dobija se rezultat

$$\Sigma(t) \propto \int_0^{\infty} \frac{R}{(t-R)^6} dR = \frac{1}{20} t^{-4}. \quad (5.10)$$

Odatle direktno možemo izvesti zaključak da relacija dobijena sprezanjem rezultata teorije Šklovskog sa rezultatom dobijenim u prethodnom poglavljiju ima oblik

$$\Sigma_\nu \propto D^{-4}, \quad (5.11)$$

Iz relacije (5.11) se vidi da uvedenjem termalnog člana relacija Šklovskog poprima oblik koji je bliži empiriji.

Na ovom mestu moramo primetiti da ako zamenimo mesta funkcijama $f(x) = x$ i $g(x) = x^{-6}$ u konvolucionom integralu (5.5) nećemo dobiti isto rešenje zbog toga što funkcija $f(x)$ nije definisana za $x = \infty$, a funkcija $g(x)$ nije definisana za $x = 0$. Samim tim funkcije koje se konvoluiraju ne ispunjavaju uslove za konvoluciju – da moraju biti definisane u celom domenu integracije. Odatle, rezultat integraljenja (5.10) predstavlja približno rešenje i strogo matematički gledano nije rezultat konvolucije u smislu definicije (5.5). Ako bismo uzeli ove dve funkcije ograničene na interval između koliko god želimo bliske vrednosti nuli (pozitivna vrednost koja nikada nije jednaka nuli) i koliko god želimo bliske vrednosti beskonačnosti (ali da nikad ne bude beskonačna) dobićemo u oba slučaja integraljenja iste rezultate. Odatle rešenje (5.10) predstavlja granično aproksimativno rešenje ove konvolucije.

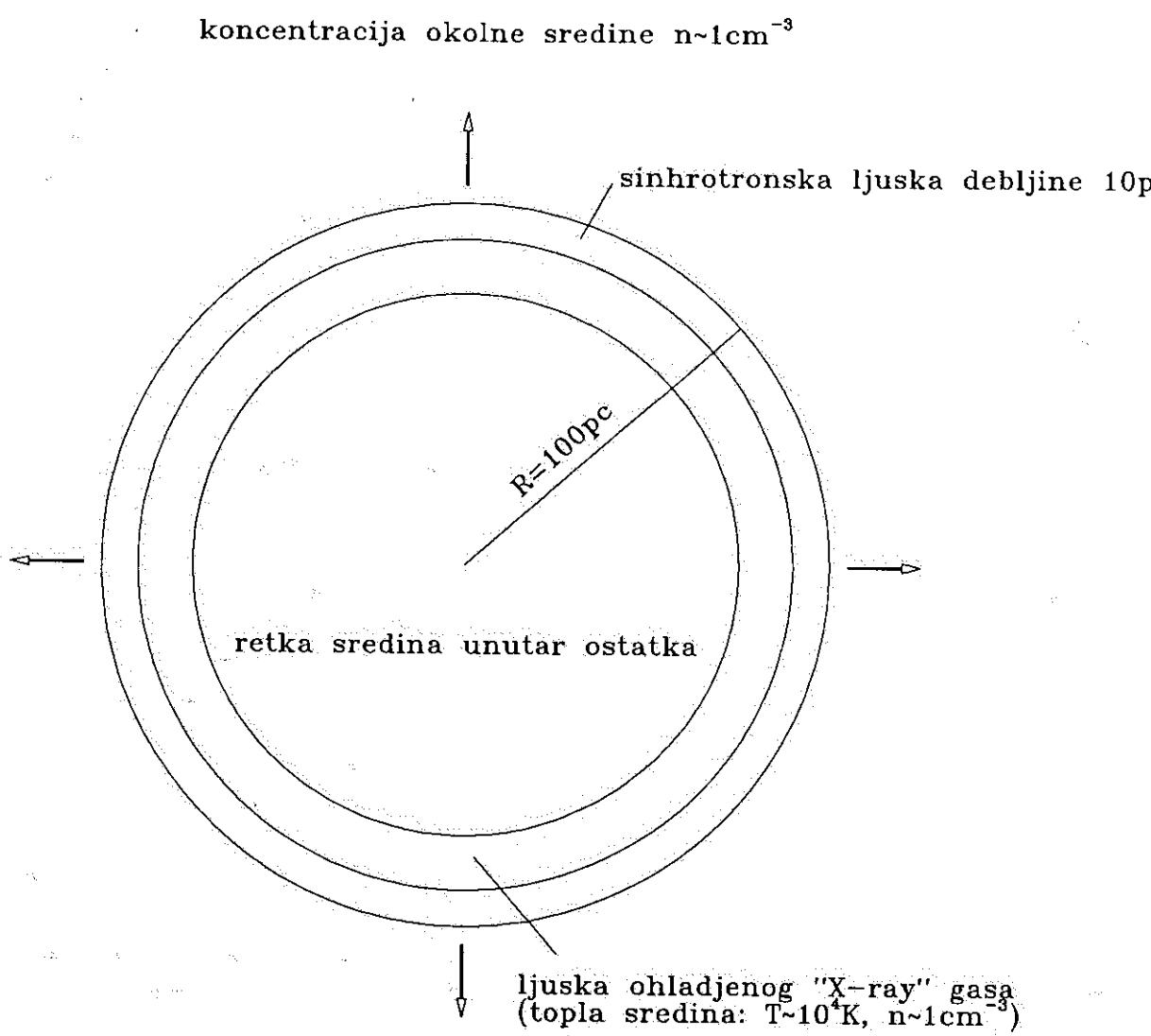
Teorijski model kod koga ljudska ostaje konstantne debljine (Kesteven, 1968), daje za rezultat relaciju oblika $\Sigma \propto D^{-4.5}$ (veza 2.51). Pod pretpostavkom da ljudska zrači isključivo sinhrotronski možemo očekivati termalni fluks sa unutrašnje ivice ljudske gde se kod starijih SNR-ova koji evoluiraju u gušćoj sredini nalazi sve deblji sloj ohlađenog "X-ray" gasa (slučaj toplog medijuma $T \sim 10^4 \text{ K}$, $n \sim 1 \text{ cm}^{-3}$) – vidi sliku 5.5. Fluks iz vrele unutrašnjosti u ovom slučaju možemo saneariti jer je koncentracija čestica u ljudski i u sloju ohlađenog "X-ray" gasa veća, a temperatura niža, pa je samim tim veća efikasnost termalnog zračenja ionizovanog gasnog oblaka (j-va 5.1). Konvolucioni integral za ovaj slučaj je

$$\Sigma(t) \propto \int_0^\infty \frac{R}{(t-R)^{4.5}} dR = \frac{4}{35} t^{-2.5}. \quad (5.12)$$

Analogno prethodnom slučaju konvolucije dobijamo relaciju

$$\Sigma_\nu \propto D^{-2.5}. \quad (5.13)$$

Ova relacija daje najbliži koeficijent β najnovijim empirijskim $\Sigma - D$ relacijama (videti relacije 3.101, 4.4, 4.7, 4.13) za prosečnu vrednost spektralnog indeksa $\alpha = 0.5$.



Slika 5.5. Dvodimenzionalni model starog SNR-a koji se siri kroz gusču sredinu ($n \sim 1 \text{ cm}^{-3}$), radijusa $R = 100 \text{ pc}$ sa debljinom ljudske 10 pc (koja sinhrotronski zrači). Ovakav ostatak bi trebalo da ima značajan fluks termalnog porekla. Ispod sloja koji zrači sinhrotronski nalazi se ljudska ohlađenog "X-ray" gasa koja uz deo termalnog zračenja iz sinhrotronske ljudske obezbeđuje ukupan termalni fluks SNR-a. Ljudske su na temperaturi $T \sim 10^4 \text{ K}$ dok im je koncentracija $n \sim 1 \text{ cm}^{-3}$. Unutar ostatka je oblast razređenijeg gasa na višoj temperaturi.

Ako konvoluiramo relaciju (5.3) sa relacijom (2.68) dobijamo zavisnost oblika

$$\Sigma_\nu \propto D^{-1.5}. \quad (5.14)$$

Modifikovanom modelu Đurića i Šikvista su najblže novoizvedene relacije za M31 i M33 (poglavlja 4.3, 4.4). Koeficijent β uzima vrednosti od 1.68 do 1.82 za ove dve galaksije te se ovim empirijskim relacijama može podržati modifikacija relacije Đurića i Šikvista.

Za relaciju Povede i Voltjera se dobija zavisnost $\Sigma \propto D^{-1}$.

Modifikovana prvobitna teorija Šklovskog približno zauzima mesto nemodifikovanog modela Đurića i Sivista, a modifikovani modeli Kestevena i Đurića i Sivista daju najbolja slaganja sa empirijom.

Na ovom mestu moramo naglasiti da je odstupanje relacije Kejsa i Batačarije (3.101) u odnosu na relaciju (2.68) Đurića i Sivista, kojom su podržali svoju empirijsku relaciju, približno isto kao i odstupanje iste relacije (3.101) od modifikovanog modela Đurića i Sivista ($\beta = 1.5$). Samim tim najnovija teorijska relacija je ostala na otprilike istom nivou neslaganja sa empirijom što se galaktičkih ostataka tiče, dok su one prvobitne relacije drastično poboljšane. Modifikovanu relaciju Đurića i Sivista dobro podržavaju testovi empirijskih relacija iz M31 i M33.

5.5. $\Sigma - D$ relacija za termalno zračenje ionizovanog gasnog oblaka (slučaj konstantne koncentracije)

Analogno postupku iz poglavlja 5.2, izvećemo $\Sigma - D$ relaciju za termalno zračenje ionizovanog gasnog oblaka korišćenjem drugačijih polaznih prepostavki. Osnovna prepostavka u poglavlju 5.2 je da sa širenjem ostatka i koncentracija i temperatura unutar njega ostaju nepromenjene. Sada ćemo prepostaviti da se temperatura menja sa adijabatskim širenjem ostatka, a da koncentracija ostaje konstantna. Za na ovaj način izvedenu $\Sigma - D$ relaciju ostatak mora biti u adijabatskoj fazi evolucije. Opravdanje za konstantnu koncentraciju, uprkos promeni temperature sa širenjem, nalazimo u činjenici da ostatak sa širenjem postaje sve masivniji kako front udanog talasa obuhvata sve veću količinu međuzvezdane materije. Inače dinamikom SNR-a u adijabatskoj fazi rukovodi prebrisan međuzvezdani medijum, a ne materija izbačena samom eksplozijom (Woltjer, 1972). Ako prepostavimo da je raspodela mase kroz koju ostatak prolazi homogena (homogeno su rasporedjeni mali međuzvezdani oblaci), i ako sa porastom zapremine ostatka na isti način raste masa ostatka, onda će gustina unutar njega ostati konstantna u smislu modela Mekija i Ostrajkera. Ovo bi bio nekakav proces adijabatskog širenja u kojem se stalnim porastom mase sistema obezbeđuje ista gustina, a sistem se zbog širenja ipak adijabatski hlađi (udarni talas slab, samim tim se temperatura smanjuje). U prirodi nigde ne postoji idealan adijabatski proces, tj. proces pri kom sistem absolutno ne interaguje sa okolinom. Ostatak supernove je u adijabatskoj fazi dok se polovina njegove ukupne energije ne potroši na zračenje (Woltjer, 1972). Adijabatsku aproksimaciju opravdava to što su u ovoj fazi evolucije gubici zračenjem zanemarljivi u odnosu na ukupnu energiju ostatka, mada faza traje dok se ipak značajna količina energije ne potroši zračenjem. Baš u tom delu adijabatske faze (pozna faza) gde počinju značajniji gubici u energiji putem zračenja pa do kraja faze, može se očekivati značajniji termalni fluks iz sredine koja bi trebalo da bude topla (10^4K) i dovoljno gusta (1cm^{-3}).

Sada se vraćamo izvođenju $\Sigma - D$ relacije za SNR u adijabatskoj fazi sa prethodno opisanim prepostavkama. Zamenom relacije 5.1 u relaciju 5.2 dobijamo:

$$I_\nu = \frac{R}{4\pi} \frac{4}{3} \frac{Z^2 e^6}{c^3} \frac{N_i N_e}{m^2} \left(\frac{2m}{\pi k T} \right)^{\frac{1}{2}} \ln \frac{p_2}{p_1}. \quad (5.15)$$

Pošto se koncentracija čestica ne menja sa udaljenjem od centra objekta (model Mekija

i Ojstrajkera), samim tim i sudarni parametar ne zavisi od radiusa. Pošto razmatramo SNR u adijabatskoj fazi (ostatak se adijabatski hlađi širenjem), počićemo od jednačine adijabate

$$TV^{\gamma-1} = \text{const}, \quad (5.16)$$

gde je V zapremina, a $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$. Ako prepostavimo da je materijal unutrašnjosti SNR-a idealan gas za koji je $\gamma = \frac{5}{3}$, iz prethodne jednačine za slučaj sfernog objekta dobijamo zavisnost

$$T \propto R^{-2}. \quad (5.17)$$

Zamenom izraza (5.17) u jednačinu (5.15) i vodeći računa o definiciji gustine fluksa (2.9) pod pretpostavkom da je intenzitet zračenja objekta izotropan dobijamo

$$F_\nu \propto R^3 (R^{-2})^{-1/2} = R^4. \quad (5.18)$$

Shodno relacijama (2.12) i (2.13) dobijamo relaciju

$$\Sigma_\nu \propto R^2. \quad (5.19)$$

Kako znamo da u ostacima supernovih zvezda ima relativističkih elektrona koji su neophodni za sinhrotronski mehanizam, možemo dobiti još jedan granični oblik zavisnosti površinskog sjaja od radiusa za slučaj relativističkih čestica. Ovde tim postuliramo da ljuška ostatka koja emituje sinhrotronski istovremeno zrači termalno. Ako je ukupna energija čestice mnogo veća od energije definisane masom mirovanja iste čestice onda je možemo aproksimirati slučajem čestice bez mase mirovanja tj. fotonom. Na isti način kao za idealan gas, zanemarujući relativističku korekciju emisivnosti zakočnog zračenja za $T \leq 10^6 \text{ K}$ (videti monografiju Rabikija i Lajtmana (Rybicki & Lightman, 1979), a koristeći vrednost za $\gamma = \frac{4}{3}$ dobijamo sledeću zavisnost

$$\Sigma_\nu \propto R^{1.5}. \quad (5.20)$$

Iz relacija (5.19) i (5.20) dobijamo $\Sigma - D$ relaciju za termalno zračenje SNR-a

$$\Sigma_\nu \propto D^{1.5 \leq -\beta \leq 2.0}. \quad (5.21)$$

5.6. $\Sigma - D$ relacija za sinhrotronsko zračenje zajedno sa termalnim zračenjem ionizovanog gasnog oblaka (slučaj konstantne koncentracije)

Analogno postupku definisanom u poglavlju 5.3, u ovom poglavlju ćemo izvesti $\Sigma - D$ relacije za sinhrotronsko zračenje zajedno sa termalnim zračenjem ionizovanog gasnog oblaka, s tim što ćemo koristiti rezultate poglavlja 5.4. Kao i prošli put krenućemo od modifikacije relacije Šklovskog. Relaciju (5.19) ($\Sigma \propto D^2$) konvoluiramo sa relacijom (2.29) i dobijamo integral oblika

$$\Sigma(t) \propto \int_0^\infty \frac{R^2}{(t-R)^6} dR. \quad (5.22)$$

Na isti način kao i u poglavlju 5.3 dobijamo

$$\Sigma(t) \propto t^{-3}. \quad (5.23)$$

Odavde direktno možemo izvesti zaključak da relacija dobijena sprezanjem rezultata teorije Šklovskog sa rezultatom dobijenim u prethodnom poglavlju ima oblik

$$\Sigma_\nu \propto D^{-3}, \quad (5.24)$$

Iz relacije (5.24) se vidi da uvođenjem termalnog člana relacija Šklovskog poprima oblik koji je drastično bliži empiriji.

Ako bismo pretpostavili slučaj relativističkog gasa konvoluirali bismo funkciju $R^{1.5}$ sa funkcijom R^{-6} i dobili bismo

$$\Sigma(t) \propto \int_0^\infty \frac{R^{1.5}}{(t-R)^6} dR \propto t^{-3.5}. \quad (5.25)$$

Odavde sledi relacija oblika:

$$\Sigma_\nu \propto D^{-3.5}. \quad (5.26)$$

Prelazimo na modifikaciju teorijskog modela Kestevena. Uz iste komentare kao u poglavlju 5.3, i uz to da relativističke čestice koje se nalaze u ljusci i verovatno u sloju ohlađenog "X-ray" gasa daju doprinos (preko termalnog člana) ukupnom površinskom sjaju, shodno vezi (5.20), dobijamo

$$\Sigma(t) \propto \int_0^\infty \frac{R^{1.5}}{(t-R)^{4.5}} dR \propto t^{-2}. \quad (5.27)$$

Analogno prethodnom slučaju konvolucije dobijamo relaciju

$$\Sigma_\nu \propto D^{-2}. \quad (5.28)$$

Ova relacija daje najbliži koeficijent β najnovijim empirijskim $\Sigma - D$ relacijama (videti relacije 3.95, 3.96, 3.102, 4.1, 4.2, 4.8, 4.10, 4.11, 4.14, 4.17, 4.20, 4.22, 4.25, 4.26, 4.28, 4.29, 4.32, 4.38, 4.40, 4.41). Naročito je bitno da gotovo sve empirijske relacije koje u sebi sadrže radio-petlje teže vrednosti $\beta \approx 2$. Ovde još jednom navodimo da su petlje izgleda vrlo važni i najverovatnije nedostajući ostaci za kalibraciju valjane $\Sigma - D$ zavisnosti.

Lošije $\Sigma - D$ relacije u smislu slaganja sa empirijskim relacijama daju modeli Povede i Voltjera (poglavlje 2.4) i Đurića i Sivista (poglavlje 2.6) konvoluirani sa verzijom modela $\Sigma - D$ relacije za ionizovani gasni oblak definisanom u poglavlju 5.4. Na ovaj način dobijene relacije imaju jako blag nagib. Na primer konvolucijom relacije (5.20) sa relacijom (2.68)

dobijamo zavisnost oblika $\Sigma \propto D^{-1}$. Analogno za relaciju Povede i Voltjera se dobija zavisnost $\Sigma \propto D^{-0.5}$.

Relacija (5.28) sa svojim kvadratnim opadanjem površinskog sjaja sa radijusom ostatka je ujedno i rešenje za sferno širenje objekta pri čemu luminoznost objekta ostaje konstantna. Ovaj efekat nezavisnosti luminoznosti od dijametra SNR-a je već u više navrata primećen (npr. Mills, 1983; Mills et al., 1984; Case & Bhattacharya, 1998). Relacija (3.1) uz $D \propto \theta d$ (gde je d udaljenost ostatka) i $L_\nu \propto F_\nu d^2$ (L_ν predstavlja radio-luminoznost ostatka u jediničnom frekventnom intervalu) poprima oblik

$$\Sigma_\nu \propto L_\nu D^{-2}, \quad (5.29)$$

što za slučaj nezavisnosti luminoznosti od dijametra daje vezu (5.28).

Odavde se mogu izvući u skladu sa empirijom (empirija daje vrednost za koeficijent $\beta \approx 2$) dva zaključka:

1. Teorijska $\Sigma - D$ relacija (u smislu jednačina druge i ove glave) ne postoji jer se trivijalni oblik teorijske relacije opravdava empirijskom sa $\beta \approx 2$ u kojoj radio-petlje zauzimaju značajno mesto.
2. Teorijska $\Sigma - D$ relacija postoji i igrom slučaja se empirija i složena teorija poklapaju na vrednosti $\beta = 2$.

Dalja istraživanja empirijske $\Sigma - D$ relacije mogu da potvrde jedno od ovih rešenja.

5.7. Teorijska $\Sigma - D$ relacija za radio-petlje

Pošto smo u trećoj i četvrtoj glavi ove disertacije pokazali da glavne petlje mogu biti pridružene skupu kalibratora empirijskih $\Sigma - D$ relacija, pa samim tim i da su vrlo stari supernovi ostaci, u ovom poglavlju ćemo pokušati da odredimo teorijsku $\Sigma - D$ relaciju koja bi trebalo da predstavlja evolucioni put radio-petlji.

Analizirajmo najnoviju teorijsku $\Sigma - D$ relaciju Đurića i Sikvista iz 1986. godine. Ako relaciju (2.66) napišemo u sledećoj formi:

$$\Sigma_\nu \propto D^{-(\delta + \delta\alpha + 3\alpha - 1)}, \quad (5.30)$$

i uzmememo da je $\delta = 2$ (što i sami autori ovog rada uzimaju za izvođenje finalne relacije (2.68)) dobijamo

$$\Sigma_\nu \propto D^{-(5\alpha + 1)}. \quad (5.31)$$

Pošto 3 glavne radio-petlje imaju spektralne indekse $\alpha \approx 0.7$ (za Petlju III je $\alpha = 0.55$) (Berkhuijsen, 1973; Milogradov-Turin & Nikolić, 1995) zamenom vrednosti $\alpha = 0.7$ u relaciji (5.31) dobijamo

$$\Sigma_\nu \propto D^{-4.5}. \quad (5.32)$$

Ova relacija je identičnog oblika kao i Kestevenova relacija. Relacija Đurića i Sikvista je izvedena za model ljkastog ostatka. Pošto znamo da se petlje šire u retkoj sredini definisaćemo relaciju na 100 GHz jer će na ovoj frekvenciji uticaj termalne komponente

biti najveći (slika 5.2). Uz to treba pomenuti da su dijametri petlji nezavisni od frekvencije (Milogradov-Turin & Urošević, 1997). Površinski sjaj petlji na 100 GHz je reda veličine $10^{-24} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1} \text{ sr}^{-1}$, za spektralni indeks $\alpha = 0.7$. Ako termalna komponenta stvori 10% od ukupnog zračenja njena zapreminska emisivnost će biti $\varepsilon_{100\text{GHz}} \sim 10^{-41} \frac{\text{erg}}{\text{cm}^3 \text{s}}$. Odavde će se dobiti da bi petlje trebalo da se šire u medijumu gustine $n \sim 0.1 \text{ cm}^{-3}$ da bi obezbedile količinu termalnog zračenja koja bi mogla imati uticaja.

Ponovićemo isti postupak kao i u konvoluciji za slučaj Kestevenovog modela. Konvoluiraćemo funkciju $R^{1.5}$ sa funkcijom $R^{-4.5}$.

$$\Sigma(t) \propto \int_0^\infty \frac{R^{1.5}}{(t-R)^{4.5}} dR \propto t^{-2}. \quad (5.33)$$

Krajnji rezultat je

$$\Sigma_{100\text{GHz}} \propto D^{-2}. \quad (5.34)$$

Prethodna relacija bi trebalo da opisuje evoluciju površinskog sjaja sa porastom dijametra radio-petlji.

Globalno je primećeno (glave 3 i 4) da ako početne relacije imaju $\beta < 2$ dodavanjem radio-petlji β raste, dok u većini slučajeva kod kojih je $\beta > 2$ dodavanjem petlji β opada. Odavde sledi da se ovaj koeficijent ~~uravnotežava~~ na vrednostima $\beta \approx 2$. Ovu vrednost dobijamo modifikovanjem jedne od teorijskih $\Sigma - D$ relacija (Kesteven, 1968).

6. DISKUSIJA (sa posebnim osvrtom na lokalnu međuzvezdanu sredinu)

6.1. Uvod

Rezultati treće i četvrte glave sa teorijskom podrškom iz pete glave ove disertacije su u korist SNR hipoteze radio-petlji. Ako na dalje pretpostavimo da su glavne petlje ostaci supernovih zvezda, zbog svojih ogromnih dimenzija na nebu moraju biti vrlo bliske Suncu. Ako uzmemos u obzir model Mekija i Ostrajkera (McKee & Ostriker, 1977), koji smo već više puta do sada pominjali, moramo očekivati da je neposredno susedstvo Sunca vrlo razredeno i na visokoj temperaturi. Zbog toga ćemo u narednom poglavljju izneti neke modele Lokalne međuzvezdane sredine (Local Interstellar Matter – LISM), jer očekujemo da su glavne petlje skulptori sredine u Sunčevoj okolini.

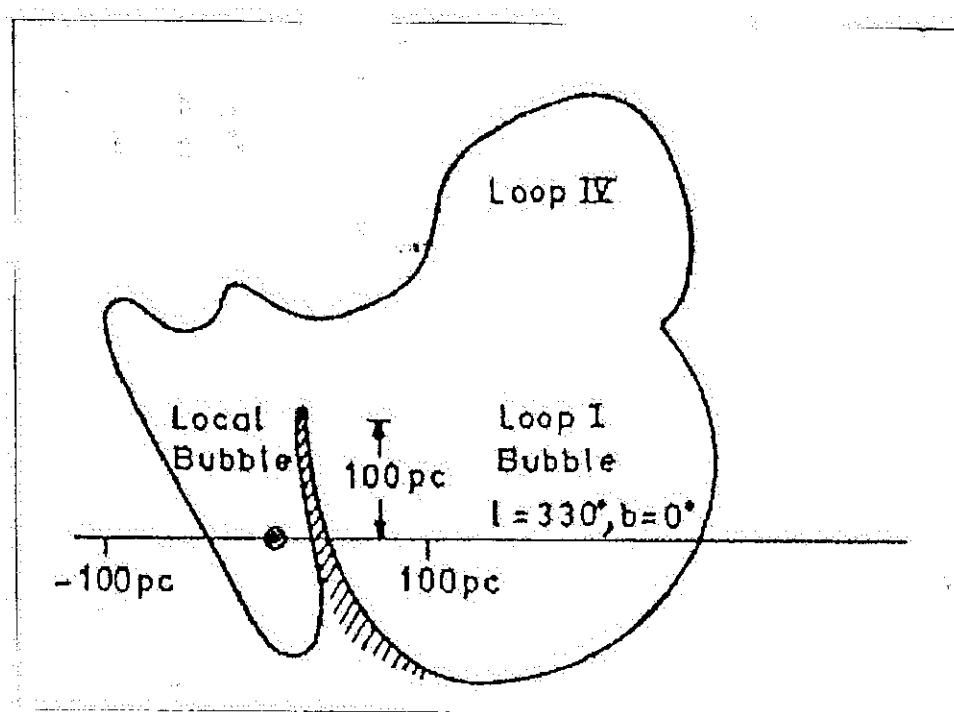
6.2. Modeli LISM

Prvi model LISM-a koji ćemo ovde razmatrati je model Koksa i Rejnoldsa (Cox & Reynolds, 1987). Po ovom modelu Sunce se nalazi u lokalnoj "pahuljici" (Fluff) međuzvezdanog gasa gustine $n \sim 10^{-1} \text{ cm}^{-3}$ i temperature $T \sim 10^4 \text{ K}$. "Pahuljica" je veličine 3-5 parseka i nalazi se unutar kaviteta koji se zove Lokalni "mehur" (Bubble). Gustina Lokalnog "mehura" je $n \sim 4 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$ dok je $T \sim 10^6 \text{ K}$. Lokalni "mehur" je razdvojen od drugog susednog "mehura" (Petlja I) vodoničnim "zidom". Ovaj "zid" je na temperaturi $T \sim 6 \times 10^3 \text{ K}$ i gustine $n \sim 0.03 \text{ cm}^{-3}$ udaljen od Sunca 40 ± 25 parseka u pravcu Sco-Cen asocijacije zvezda i potvrđen je posmatranjima (Centurion & Vladilo, 1991). Šematski prikaz modela LISM-a Koksa i Rejnoldsa dat je na slici 6.1.

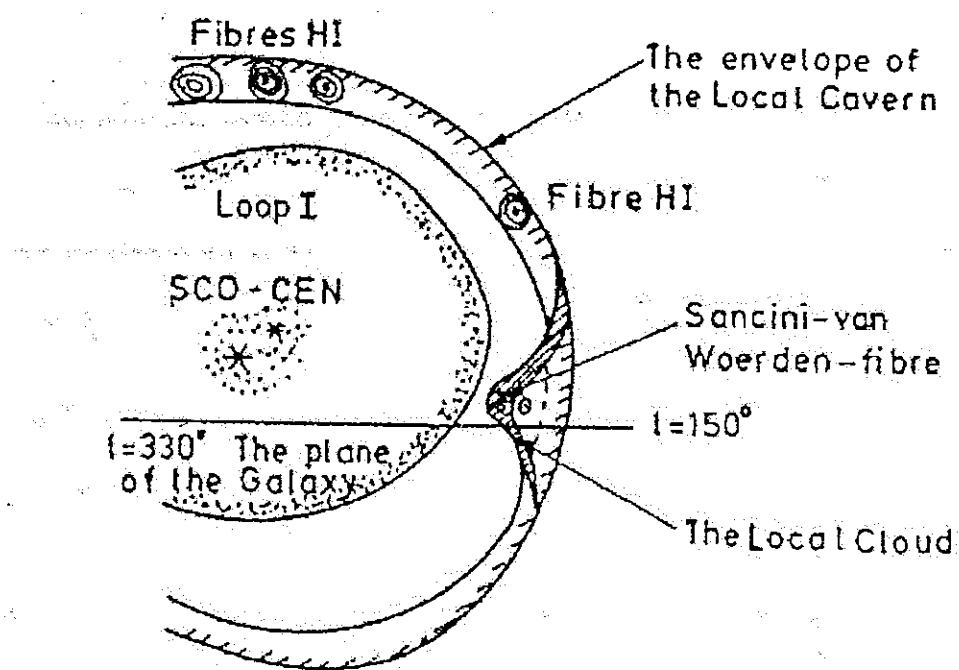
Sledeći važan model LISM-a je model Bočkareva (Bochkarev, 1987, 1990). Po njemu, Sunčev sistem se nalazi u blizini ivice niskogustinskog regiona koji se zove Lokalna "šupljina" (cavern) ($n \sim 10^{-3} - 4 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$, $T \sim 10^6 \text{ K}$). Centar Lokalne "šupljine" je smešten u region Sco-Cen asocijacije zvezda. "Šupljina" je okružena gasnim omotačem koji je končaste strukture i sačinjen je od neutralnog vodonika. Masa ovog omotača je reda $10^6 M_{\odot}$. Rastojanje između centra (Sco-Cen asocijacija) i ivice šupljine je između 150 i 200 parseka. Sunčev sistem je razdvojen od vrelog gasa Lokalne šupljine Lokalnim oblakom neutralnog vodonika koji je na rastojanju 10-20 parseka od Sunca u pravcu Galaktičkog centra. Deo Lokalnog oblaka koji se nalazi na rastojanju 3-10 parseka od Sunca sastoji se od toplog ($T \sim 7000 - 13000 \text{ K}$) gotovo homogenog gasa gustine $n(\text{HI}) \leq 0.2 \text{ cm}^{-3}$. U

centralnom delu Lokalnog oblaka nalaze se guste končaste vodonične strukture nazvane SW končaste strukture (Sancisi – van Woerden (SW) Fibre) (Sancisi & van Woerden, 1970). Ove strukture su debljine oko 1 pc, njihova gustina je $n(\text{HI}) \sim 30 \text{ cm}^{-3}$, a temperatura $T \leq 200 \text{ K}$. Gas koji okružuje Sunce je izgleda topla korona Lokalnog oblaka. Masa SW struktura je oko 20, dok je topli gas oko Sunca ($T \sim 10^4 \text{ K}$) oko 10 Sunčevih masa. Petlja I se širi u prostor Lokalne "šupljine" brzinom od 530-580 km/s. Radijus Petlje I je oko 140 parseka. Centar je takođe u Sco-Cen asocijaciji zvezda. Temperatura gasa u Petlji I je $(3.9\text{-}4.7)\times 10^6 \text{ K}$, dok njegova masa ne prelazi 300 Sunčevih. Šematski prikaz modela LISM-a Bočkareva prikazan je na slici 6.2.

Proširenje modela Bočkareva je izvršeno od strane Kosareva sa saradnicima (Kosarev et al., 1994). Ispitivana je evolucija LISM-a u smislu interakcije Petlje I sa Lokalnim oblakom, SW končastim strukturama, pozadinskim gasom Lokalne "šupljine" i omotačem Lokalne "šupljine" (isparavanje ovih struktura pod uticajem udarnog talasa Petlje I).



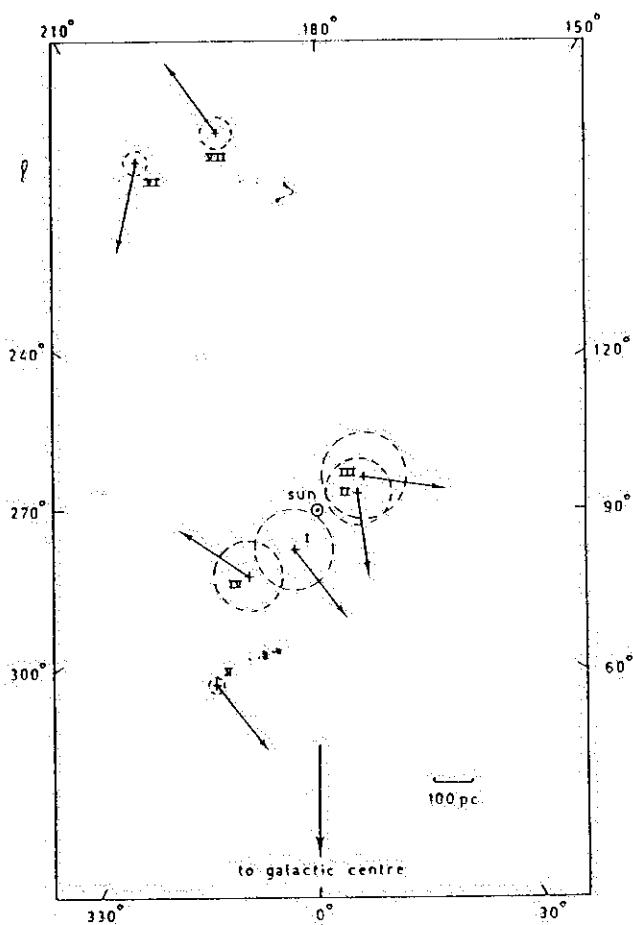
Slika 6.1. Šematski prikazan model LISM-a Koksa i Rejnoldsa (Cox & Reynolds, 1987).



Slika 6.2. Prikaz LISM u skladu sa modelom Bočkareva (Bochkarev, 1987, 1990). Prikazan je presek Lokalne "šupljine" na galaktičkom meridijanu $330^\circ - 150^\circ$. Obeležena je pozicija Sunca (\odot), galaktička ravan i centri u Sco-Cen asocijaciji zvezda (*). Lokalni oblak i omotač Lokalne "šupljine" su osenčeni. Pozicije SW končastih struktura predstavljene su unutar Lokalnog oblaka. Prikazana je i pozicija Petlje I.

6.3. Radio-petlje kao SNR-ovi u kontekstu novijih otkrića vezanih za LISM

Rezultati dobijeni u glavama 3, 4 i 5 potvrđuju SNR poreklo radio-petlji. Iza tih rezultata стоји teorija evolucije SNR-ova koja dovodi do $\Sigma - D$ relacije. Shodno tome prodiskutovaćemo na ovom mestu najnovije posmatračke rezultate vezane za glavne petlje i LISM. Da bismo bolje uvideli kako su petlje raspoređene u odnosu na Sunce oslonićemo se na rad Spolstre iz 1973. godine (Spoelstra, 1973). Na slici 6.3 se vidi kako izgledaju projekcije glavnih petlji na galaktičku ravan (Spoelstra, 1973). Sa slike se još može zaključiti da su centri prve tri petlje udaljeni od nas nešto više od 100 pc, dok je centar Petlje IV udaljen oko 250 pc. Ljuska Petlje I na slici skoro da dodiruje Sunce. Utvrđeno je da se ceo Sunčev sistem nalazi u struci međuzvezdanog vodonika koja se kreće od pravca sazvežđa Kentaura ka Kasiopeji. Zbog toga postoje nagoveštaji da ljuska Petlje I prelazi preko Sunčevog sistema (Fahr, 1974; Thomas, 1978).



Slika 6.3. Prostorna orijentacija 4 glavne galaktičke petlje i tri SNR-a velikih dijаметара пројектованих на галактичку рavan. Petlje su označene rimskim brojevima pored odgovarajućih centara. V-oznaka za Lupus petljу, VI-za Monoceros petljу i VII-за Origem petljу. Strelice označavaju pravac magnetnog polja za svaku petljу (Spoelstra, 1973).

Sada ćemo preći na novije potvrde SNR porekla radio-petlji putem posmatranja, a samim tim i do potvrda modela LISM-a koji su u skladu sa SNR poreklom radio-petlji.

Bejts sa saradnicima (Bates et al., 1983) je odredio brzinu širenja Petlje II ($V \approx 100$ km/s) iz crvenog pomaka gasa koji je u njenoj okolini. Ovi oblaci gasa su manje asocijacije vezane za hipotetički ogromni "mehur". Posmatranja su vršena u UV oblasti satelitom

IUE—International Ultraviolet Explorer. Primećena je sličnost između koncentracije i debljine ovog gasa koji je vezan za Petlju II i gasa koji ima plavi pomak a vezan je za SNR S147. Visoko brzinska gasna komponenta se nalazi blizu preseka Petlje II i Petlje III i na tim mestima se vidi varijacija linijske gustine gase što je izgleda uzrokovano interakcijom dva "mehura". Ovaj model je podržan modelom Vivera (Weaver, 1979) u kojem ove dve petlje formiraju dvosnopnu (Bi-lobed) strukturu uzrokovana supernovom eksplozijom u α -Per asocijaciji zvezda koja se širila u nehomogenom meduzvezdanom gasu.

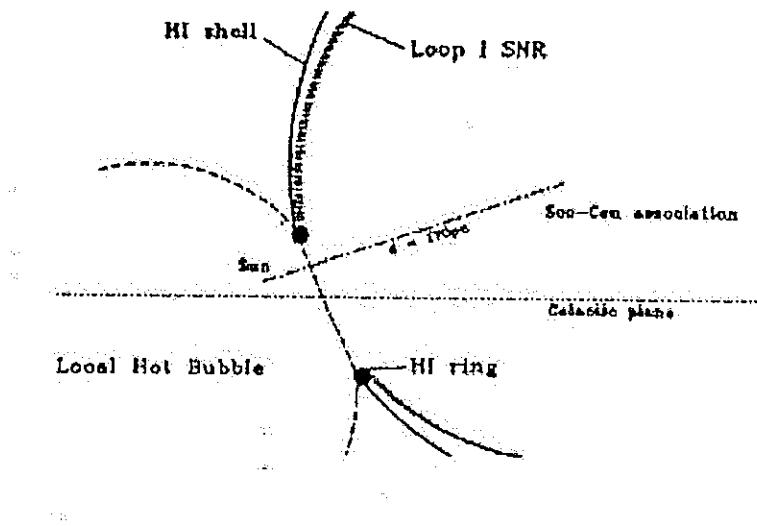
Već 1985. godine Džons i Mibern (Jones & Meaburn, 1985) određuju gornju granicu sopstvenog kretanja optičkih filamenata vezanih za Petlju II. Ove filamente autori porede sa filamentima uočenim kod SNR-a u sazvežđu Labuda (Cygnus petlja). Ovakvo kretanje filamenata ($V < 37$ km/s) pokazuje da ako je supernova eksplodirala u centru sadašnje Petlje II, eksplozija se desila pre $T > 1.3 \times 10^6$ godina, radijus Petlje je $R = 43 - 160$ pc, dok je energija oslobođena eksplozijom $E = 10^{50} - 3.5 \times 10^{52}$ erga.

U poglavlju 6.2 je pomenut članak (Centurion & Vladilo, 1991) u kome su posmatrani potvrđeni neki elementi modela LISM-a Koksa i Rejnoldsa. Analizirani su optički i UV spektri bliskih zvezda (na udaljenostima manjim od 200 pc). Odredena je granica Lokalnog "mehura". Udaljena je od Sunca 40 ± 25 parseka. Ocjenjene su vrednosti fizičkih parametara na graniči dva kaviteta (Lokalni "mehur" i Petlja I) – videti poglavlje 6.2.

U radu Kosareva sa saradnicima (poglavlje 6.2) iz 1994. godine se razmatra pored ostalog i evolucija Petlje I. Interpretirali su Petlju I kao SNR koji potiče od eksplozije koja se dogodila pre oko 5×10^4 godina. Energija oslobođena prilikom eksplozije je $E_0 \geq 10^{51}$ erga. Za izračunavanje ovih vrednosti korišćen je model u kome su uzeti u obzir i termalni neravnotežni procesi između elektronskog i jonskog gasa. SNR evoluira u razređenoj sredini Lokalne "šupljine" ($n \sim 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$, $T \sim 10^6$ K) i po ovom modelu ima radijus od 140 parseka.

Tot sa saradnicima (Toth et al., 1995) otkriva "kometarni" molekularni oblak koji se najverovatnije kreće tako što ga goni udarni talas Petlje I.

Eger i Ašenbah (Egger & Aschenbach, 1995, 1996) otkrivaju "senku" u X -području, u oblasti Petlje I koristeći ROSAT-ov pregled neba. Rastojanje, veličina, geometrijske karakteristike i spektralni podaci navode da ovoj X "senci" odgovara prstenasta struktura neutralnog gasa koji je formiran u interakciji "mehura" Petlje I i Lokalnog "mehura" (LHB – Local Hot Bubble) u smislu modela Koksa i Rejnoldsa. Ovo je prva potvrda posmatranih regiona sudara dva meduzvezdana "mehura", a rezultati su u skladu sa teorijom o sudarima sferičnih udarnih talasa (Yoshioka & Ikeuchi, 1990). Na slici 6.4 je šematski prikazana oblast interakcije Petlje I i Lokalnog "mehura". Naglašene su oblasti sudara udarnih talasa u kojima se javlja neutralni vodonik.



Slika 6.4. Šematisirani vertikalni presek (normalan na galaktičku ravan) oblasti interakcije Petlje I i Lokalnog "mehura" (Egger & Aschenbach, 1995).

Posmatranja u velikom opsegu talasnih dužina (ROSAT, IRAS, 21 cm, NaID) vezana za Petlju I, analizirana od strane Nišikide i Barousa (Nishikida & Burrows, 1997) potvrđuju model supernove eksplozije u prethodno stvorenom "mehuru" drugom drevnjom eksplozijom (eksplozijama) ili zvezdanim vетrom zvezde koja je eksplodiravši stvorila Petlju I. Postoji i mogućnost da je zvezdanim vetrovima više supermasivnih zvezda u Sco-Cen OB asocijaciji zvezda stvoren kavitet u kojem je eksplodirala supernova i u kojoj se Petlja I širi.

Sembah sa saradnicima (Sembach et al., 1997) iz posmatranja pozadinskih objekata u UV oblasti u pravcu Petlje I i Petlje IV utvrđuje postojanje ionizovanog gasa visokog stepena jonizacije u oblasti ove dve petlje. Daljom analizom kretanja ovog gasa dobijena je brzina širenja ljske Petlje IV ($V = 16 \text{ km/s}$). Predložen je model po kome se kreira gas sa visokim stepenom jonizacije u Petlji IV. Ovaj model se zasniva na turbulentnom mešanju slojeva gasa na dodirnim mestima Petlje I i Petlje IV.

Iz prethodno navedenih doprinosova razumevanju LISM-a i objašnjenja karakteristika radio-petlji možemo doći do zaključka da su petlje nezaobilazni činioci lokalne međuzvezdane sredine (naročito Petlja I). Okolina Sunca je razredena i na visokoj temperaturi. Po teoriji Mekija i Ostrajkera supernove eksplozije kreiraju ovaku sredinu. Drugih kandidata za bliske SNR-ove sem glavnih petlji nema, te sa te strane SNR hipoteza radio-petlji je maksimalno opravdana. Po istom modelu međuzvezdani oblaci isparavaju na udarnim talasima. Supermasivne zvezde (npr. u Sco-Cen ili u α -Per asocijaciji zvezda) najverovatnije imaju jake zvezdane vetrove koji mogu da stvore udarne talase i samim tim ostave

kavitet ispunjen vrelim gasom. Pošto bi trebalo da supermasivne zvezde završavaju svoju evoluciju eksplozijom, ostatak bi se širio u unapred stvorenom kavitetu koji je ispunjen vrelim gasom i trebalo bi da dosegne ogromne dijametre. Samim tim stari SNR izgleda kao ogromni "mehur" (bubble). LISM je globalno gledano sastavljen iz "mehurova" (Egger, 1998). Ovakav model potvrđuju i najnoviji pregledni članci (Frisch, 1995; McKee, 1998).

Ako se osvrnemo na rad Bejtsa sa saradnicima iz 1983. godine (Bates et al., 1983) primetićemo da se oblaci gasa koje su otkrili nalaze u oblasti preseka Petlje II i Petlje III. U to vreme se nije znalo da teorija interakcije dva sferna udarna talasa (Yoshioka & Ikeuchi, 1990) predviđa neutralnu sredinu u oblasti sudara. Možda su ovi oblaci gasa analogni oblacima koje su otkrili Eger i Ašenbah (Egger & Aschenbach, 1995, 1996). Sa te tačke gledišta, a u skladu sa slikom 6.3 možemo primetiti da se Sunčev sistem nalazi između dva para interagujućih mehurova (što je u skladu sa modelom LISM-a Bočkareva (Bochkarev, 1987, 1990)). Ako pretpostavimo da "senka" Egera i Ašenbaha oslikava sudar Petlje I i Petlje IV, onda možda Sunce pripada "mehuru" Petlje I ili možda Petlje II? Model Koksa i Rejnoldsa (Cox & Reynolds, 1987) i slika 6.3 na prvi pogled nisu u skladu, mada možda i LHB može da egzistira između glavnih petlji? Ovo su pitanja koja traže detaljna razmatranja i mogu biti tema nekog budućeg istraživanja.

Diskusija u ovoj glavi je u skladu sa rezultatima treće, četvrte i pete glave ove disertacije i zajedno sa njima predstavlja potvrdu SNR porekla radio-petlji.

7. ZAKLJUČAK

Razmatrajući i teorijsku i empirijsku $\Sigma - D$ relaciju tokom najvećeg dela ove disertacije i testirajući ih za slučaj radio-petlji došli smo do zaključka da je opravdano smatrati da su radio-petlje supernovi ostaci. Vrlo je važno istaći da je ovakav zaključak izведен iz razmatranja relacije koja je neposredan rezultat teorijskih izvođenja vezanih za zračenje supernovih ostataka u oblasti radio frekvencija. Usvajajući model SNR-a i međuzvezdane sredine Mekija i Ostrajkera (McKee & Ostriker, 1977) radio-petlje predstavljaju normalne starije ostatke – "mehurove" u adijabatskoj fazi. Adijabatska aproksimacija inače dovodi do $\Sigma - D$ relacije. Radio-petlje najverovatnije predstavljaju nedostajuće niskosjajne i velikodijametarske ostatke na empirijskim $\Sigma - D$ dijagramima (treća i četvrta glava). Modifikacijom teorijske $\Sigma - D$ relacije Šklovskog (Shklovsky, 1960a) uvođenjem termalnog člana dobijeno je novo rešenje koje je u skladu sa SNR poreklom petlji (petnaesta glava). Globalno gledano, ovakav scenario se slaže i sa najmodernijim shvatanjima Lokalne međuzvezdane sredine (LISM) (šesta glava).

Doprinosi ovog rada su sledeći (redosled nije po važnosti već odražava redosled izlaganja u disertaciji):

- a) Napravljen je celokupan pregled teorijskih i empirijskih $\Sigma - D$ relacija (glave: 2, 3 i 4). Empirijske relacije su izvedene korišćenjem iste metodologije (poglavlje 3.1) za galaktičke kao i za vangalaktičke SNR-ove. Samim tim je u ovom radu prikazan celokupan istorijski razvoj $\Sigma - D$ relacije i zaključak je da sve galaktičke relacije pre relacije koju su definisali Kejs i Batačarija (Case & Bhattacharya, 1998) nisu pouzdane, mada je i ova relacija pouzdanija kada joj se dodaju radio-petlje.
- b) Testirane su empirijske $\Sigma - D$ relacije, i dobijene su potvrde da radio-petlje predstavljaju starije niskosjajne i velike SNR-ove (glave: 3 i 4). Veliki dijametri petlji ne predstavljaju više nepremostiv problem jer SNR može imati veliki dijametar i dalje biti u adijabatskoj fazi (McKee & Ostriker, 1977). Mi vidimo petlje zato što su bliske uprkos tome što su niskosjajne.
- c) Pokazano je da empirijske $\Sigma - D$ relacije zajedno sa radio-petljama dobijaju oblik koji je pouzdaniji nego bez njih (glave: 3 i 4). Samim tim radio-petlje predstavljaju baš one ostatke koji još uvek gotovo da ne mogu da se identifikuju u našoj galaksiji, a još je teža njihova identifikacija u drugim galaksijama. Ovakvi ostaci nedostaju, te je samim tim sa njima $\Sigma - D$ relacija kompletnija. Dodavanjem petlji relacije postaju

pouzdanije, sa koeficijentom $\beta \approx 2$. Ovaj nagib rezultujuće relacije dovodi do toga da teorijska $\Sigma - D$ relacija može biti pod znakom pitanja (diskusija poglavlja 5.5).

- d) Izvedene su po prvi put empirijske $\Sigma - D$ relacije korišćenjem najnovijih radio pregleda SNR-ova u galaksijama M31 (Braun & Walterbos, 1993) i M33 (Gordon et al., 1999) (poglavlja: 4.3 i 4.4). Nagibi ovih relacija su $\beta < 2$. Zajedno sa kalibratorima iz naše galaksije i Magelanovih oblaka konstruisana je relacija sa do sada najvećim brojem pouzdano određenih kalibratora (157 ostataka) i dobijena je vrednost za koeficijent $\beta = 2.07 \pm 0.13$ (poglavlje 4.6). Sa ostacima iz galaksije M82 broj kalibratora raste na 168, a rezultujuća relacija je strmijeg nagiba $\beta \approx 3$ (poglavlje 4.6).
- e) Po prvi put se detaljno razmatra mogućnost da SNR može stvoriti značajne količine zračenja termalnog porekla. Definisan je model starog SNR-a koji se širi u gušćoj sredini $n \sim 1 \text{ cm}^{-3}$ (slika 5.5) i koji bi trebalo da ima jak fluks termalne komponente (poglavlje 5.2).
- f) Izvedene su modifikovane teorijske $\Sigma - D$ relacije za stare ostatke (u poznoj adiabatskoj fazi (McKee & Ostriker, 1977)) shodno modelu uvedenom u ovoj disertaciji. Definisane su $\Sigma - D$ relacije za zakočno zračenje ionizovanog gasnog oblaka (poglavlja: 5.3 i 5.5). Zatim su izvedene relacije za sinhrotronsko zajedno sa termalnim zračenjem (poglavlja: 5.4 i 5.6). Modifikacija relacija dovodi do toga da se početna teorija Šklovskog svodi na oblik mnogo bliži rezultatima dobijenim ispitivanjima empirijskih $\Sigma - D$ relacija. Modifikovani model Kestevena (Kesteven, 1968) daje najbliže rezultate empiriji, dok modifikovani model Durića i Sikvista (Duric & Seaquist, 1986) daje najbolju relaciju za radio-petlje i novoizvedene empirijske relacije za galaksije M31 i M33.
- g) Predložena je mogućnost modela LISM-a u kojem značajno mesto zauzimaju Petlja II i Petlja III (poglavlje 6.3).

I dalje ostaje nekoliko nerešenih problema vezanih za SNR hipotezu radio-petlji. Neki od njih su:

- a) Nepostojanje petlji u optičkom delu spektra.
- b) Globalno gledano postoji malo identifikovanih SNR-ova, a u okolini Sunca ih je četiri.

Sugestije za dalja istraživanja:

- a) Uticaj termalnih na netermalne mehanizme zračenja (i obrnuto) i teorijski razvoj modela koji u sebi nose više komponenata zračenja, sa naglaskom na primeni numeričkih metoda.
- b) Pošto se petlje vide uprkos tome što su niskosajne, (zbog toga što su bliske) trebalo bi (koristeći nagli razvoj posmatračke tehnologije) intenzivnije tragati za niskosajnjim SNR-ovima, jer su daljina i apsorpcija u međuzvezdanom prostoru razlog teške identifikacije ovakvih objekata. Autor ove disertacije je misljenja da je međuzvezdani prostor naše i drugih nama bliskih galaksija (Magelanovi oblaci, M31, M33) prepun "mehurova" – starih SNR-ova koji se šire u retkoj sredini, a ne vide se zbog svoje udaljenosti. Samim tim je moguće vrlo lako prevazići prethodno navedeni problem (b). Detekcijom većeg broja starih ostataka tipa petlji u drugim galaksijama, moći će da se proveri teorijska $\Sigma - D$ relacija (diskusija u poglavlju 5.5) i konstruišu najpouzdanije vangalaktičke relacije koje će možda na kraju dobiti približno isti oblik kao galaktička relacija (diskusija u poglavlju 4.4). Ovakav razvoj dogadaja će najverovatnije "spasiti"

egzistenciju teorijske $\Sigma - D$ relacije.

- c) Analiza $\Sigma - D$ relacije u X -oblasti spektra i njena primena na radio-petlje. Značajno je naglasiti da je X -zračenje SNR-ova terminalne prirode, te bi takva analiza dopunila zaključke iz ovog rada vezane za terminalno zračenje SNR-ova u radio-području i najverovatnije još bolje razjasnila poreklo radio-petlji.
- d) U skladu sa SNR hipotezom glavnih petlji razvijati model LISM-a u kojem će eventualno sve četiri glavne petlje biti razmatrane.

Zahvalnica

Najiskrenije se zahvaljujem svom mentoru prof. dr Jeleni Milogradov-Turin na pažljivom čitanju rukopisa. Sve njene primedbe i sugestije umnogome su poboljšale ovu disertaciju. Najviše joj zahvalnosti dugujem zbog toga što sam prva radio-astronomска znanja usvojio od nje, kao i zato što je vođenjem mog magistarskog rada i kroz zajedničke naučne radove probudila u meni interes za radio-petlje, pa samim tim bez njenog uticaja na mene ne bi bilo ni ove disertacije. Najsrdačnije se zahvaljujem prof. dr Nebojši Đuriću jer je svojim primedbama i sugestijama aktivno učestvovao u izradi ove doktorske disertacije, čime je deo svog znanja i istraživačkog duha preneo na mene. U svakom trenutku je bio spremjan da mi maksimalno pomogne, na čemu mu se još jednom duboko zahvaljujem. Na kraju, hteto bih da se zahvalim svim kolegama sa Katedre za astronomiju Matematičkog fakulteta u Beogradu na podršci pruženoj tokom izrade ovog rada, a posebno doc. dr Olgi Atanacković-Vukmanović i prof. dr Trajku Angelovu koji su pažljivo pročitali rukopis i samim tim svojim primedbama i sugestijama unapredili ovu disertaciju i zajedno sa mnom doveli je do finalnog oblika. Oni, kao i prof. dr Mike Kuzmanoski su mi krajnje prijateljski pritekli u pomoć kad god je to bilo potrebno i imali uvek vremena da se sa mnom kroz priču pozabave problematikom ove disertacije.

LITERATURA

- Allakhverdiyev, A.O., Amnuel, P.R., Guseinov, O.H., Kasumov, F.K.: 1983a, *Ap&SS* **97**, 261.
- Allakhverdiyev, A.O., Guseinov, O.H., Kasumov, F.K., Yusifov, I.M.: 1983b, *Ap&SS* **97**, 287.
- Allakhverdiyev, A.O., Guseinov, O.H., Kasumov, F.K.: 1986a, *Astrofizika* **24**, 397.
- Allakhverdiyev, A.O., Guseinov, O.H., Kasumov, F.K., Yusifov, I.M.: 1986b, *Ap&SS* **121**, 21.
- Bates, B., Brown-Kerr, W., Keenan, F.P., Giaretta, D.L.: 1983, *A&A* **122**, 64.
- Bell, A.R.: 1978a, *MNRAS* **182**, 147.
- Bell, A.R.: 1978b, *MNRAS* **182**, 443.
- Berkhuijsen, E.M.: 1973, *A&A* **24**, 143.
- Berkhuijsen, E.M.: 1983, *A&A* **120**, 147.
- Berkhuijsen, E.M.: 1986, *A&A* **166**, 257.
- Berkhuijsen, E.M., Haslam, C.G.T., Salter, C.J.: 1971, *A&A* **14**, 252.
- Bingham, R.G.: 1967, *MNRAS* **137**, 157.
- Bochkarev, N.G.: 1987, *Ap&SS* **138**, 229.
- Bochkarev, N.G.: 1990, *The Local Interstellar medium*, Nauka, Moscow.
- Borken, R.J., Iwan, D.C.: 1977, *ApJ* **218**, 511.
- Brandt, J.C., Maran, S.P.: 1972, *Nature* **235**, 38.
- Braun, R., Walterbos, R.A.M.: 1993, *A&AS* **98**, 327.
- Brown, R.H., Davies, R.D., Hazard, C.: 1960, *Observatory* **80**, 191.
- Bunner, A.N., Coleman, P.L., Kraushaar, W.L., McCammon, D.: 1972, *ApJ* **172**, L67.
- Case, G.L., Bhattacharya, D.: 1995, *BAAS* **187**, 78.04.
- Case, G.L., Bhattacharya, D.: 1996, *A&AS* **120**, 437.
- Case, G.L., Bhattacharya, D.: 1998, *ApJ* **504**, 761.
- Caswell, J.L.: 1985, *AJ* **90**, 1076.
- Caswell, J.L., Lerche, I.: 1979, *MNRAS* **187**, 201.
- Centurion, M., Vladilo, G.: 1991, *ApJ* **372**, 494.
- Chevalier, R.A.: 1974, *ApJ* **188**, 501.
- Chevalier, R.A.: 1977, *ARA&A* **15**, 175.
- Clark, D.H., Caswell, J.L.: 1976, *MNRAS* **174**, 267.
- Clube, S.V.M.: 1968, *Observatory* **88**, 243.
- Cox, D.P., Reynolds, R.J.: 1987, *ARA&A* **25**, 303.
- Cruddace, R.G., Friedman, H., Fritz, G., Shulman, S.: 1976, *ApJ* **207**, 888.
- Davelaar, J., Bleeker, J.A.M., Deerenberg, A.J.M.: 1980, *A&A* **92**, 231.
- Downes, D.: 1971, *AJ* **76**, 305.
- Duric, N., Seaquist, E.R.: 1986, *ApJ* **301**, 308.
- Egger, R.J., Aschenbach, B.: 1995, *A&A* **294**, L25.
- Egger, R.J., Aschenbach, B.: 1996, *MPE Report* **263**, 249.

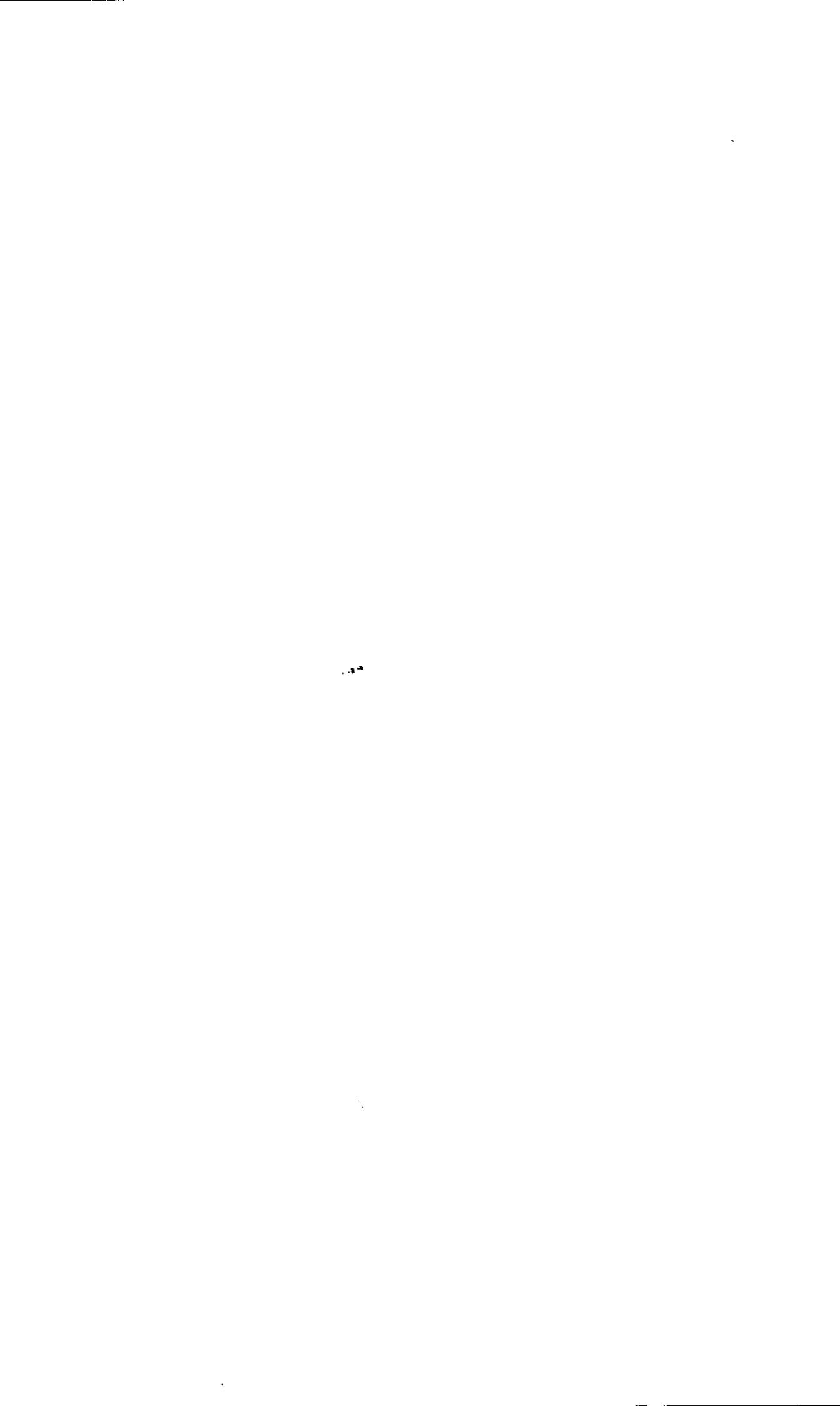
- Egger, R.J.: 1998, LNP vol. 506, IAU Colloquium No. 166, *The Local Bubble and Beyond*, ed. D. Breitschwerdt, M.J. Freyberg and J. Truemper, (Springer – Verlag: Berlin, Heidelberg, New York), p. 287.
- Fahr, H.J.: 1974, *Space Sciences Reviews* **15**(4), 483.
- Fedorenko, V.N.: 1983, in IAU Symposium 101 *Supernova Remnants and their X-ray Emission*, ed. J. Danziger and P. Gorenstein (Dordrecht: Reidel), p. 183.
- Frisch, P.C.: 1995, *Space Sciences Reviews* **72**, 499.
- Ginzburg, V.L., Pikel'ner, S.B., Shklovsky, I.S.: 1955, *Astron. Ž.* **32**, 503.
- Gobel, W., Hirth, W., Fuirst, E.: 1981, *A&A* **93**, 43.
- Gordon, S.M., Kirshner, R.P., Long, K.S., Blair, W.P., Duric, N., Smith, R.C.: 1998, *ApJS* **117**, 89.
- Gordon, S.M., Duric, N., Kirshner, R.P., Goss, W.M., Viallefond, F.: 1999, *ApJS* **120**, 247.
- Green, D.A.: 1984, *MNRAS* **209**, 449.
- Green, D.A.: 1988, *Ap&SS* **148**, 3.
- Green, D.A.: 1991, *PASP* **103**, 209.
- Green, D.A.: 1998, *A Catalog of Galactic Supernova Remnants (September 1998 version)*, Mullard Radio Astronomy Observatory, Cambridge, United Kingdom (available on the World Wide Web at: <http://www.mrao.cam.ac.uk/surveys/snrs/index.html>).
- Gull, S.F.: 1973, *MNRAS* **161**, 47.
- Hayakawa, S., Kato, T., Nagase, F., Yamashita, K., Murakami, T., Tanaka, Y.: 1977, *ApJ* **213**, L109.
- Heiles, C., Jenkins, E.B.: 1976, *A&A* **46**, 333.
- Heiles, C., Chu, Y., Reynolds, R.J., Yegingil, I., Troland, T.H.: 1980, *ApJ* **242**, 533.
- Huang, Y.-L., Thaddeus, P.: 1985, *ApJ* **295**, L13.
- Huang, Z.P., Thuan, T.X., Chevalier, R.A., Condon, J.J., Yin, Q.F.: 1994, *ApJ* **424**, 114.
- Ilovaisky, S.A., Lequeux, J.: 1972, *A&A* **18**, 169.
- Iwan, D.C.: 1980, *ApJ* **239**, 316.
- Johnson, H.M.: 1957, *PASP* **69**, 130.
- Jones, A.W., Meaburn, J.: 1985, *MNRAS* **213**, 711.
- Kafatos, M.C., Morrison, P.: 1973, *A&A* **26**, 71.
- Kesteven, M.J.L.: 1968, *Aust. J. Phys.* **21**, 739.
- Kosarev, L.B., Loseva, T.V., Nemtchinov, I.V., Popel, S.I.: 1994, *A&A* **287**, 470.
- Lequeux, J.: 1962, *Ann. D'Astrophys.* **25**(4), 221.
- Li, Z.W., Wheeler, J.C.: 1984, *BAAS* **16**, 334.
- Lozinskaya, T.A.: 1980a, *A&A* **84**, 26.
- Lozinskaya, T.A.: 1980b, *Astron. Ž.* **57**, 707.
- Lozinskaya, T.A.: 1981, *Pis'ma Astron. Ž.* **7**, 29.
- Magnier, E.A., Prins, S., van Paradijs, J., Lewin, W.H.G., Supper, R., Hasinger, G., Pietsch, W., Trümper, J.: 1995, *A&AS* **114**, 215.
- Mathewson, D.S.: 1968, *ApJ* **153**, L47.
- Mathewson, D.S., Clarke, J.N.: 1973, *ApJ* **180**, 725.

- Mathewson, D.S., Ford, V.L., Dopita, M.A., Tuohy, I.R., Long, K.S., Helfand, D.J.: 1983, *ApJS* **51**, 345.
- McKee, C.F., Ostriker, J.P.: 1977, *ApJ* **218**, 148.
- McKee, C.F.: 1998, LNP vol. 506, IAU Colloquium No. 166, *The Local Bubble and Beyond*, ed. D. Breitschwerdt, M.J. Freyberg and J. Truemper, (Springer – Verlag: Berlin, Heidelberg, New York), p. 565.
- Mills, B.Y.: 1983, in IAU Symposium 101 *Supernova Remnants and their X-ray Emission*, ed. J. Danziger and P. Gorenstein (Dordrecht: Reidel), p. 551.
- Mills, B.Y., Turtle, A.J., Little, A.G., Durdin, J.M.: 1984, *Aust. J. Phys.* **37**, 321.
- Milne, D.K.: 1970, *Aust. J. Phys.* **23**, 425.
- Milne, D.K.: 1979, *Aust. J. Phys.* **32**, 83.
- Milne, D.K., Caswell, J.L., Haynes, R.F.: 1980, *MNRAS* **191**, 469.
- Milogradov-Turin, J.: 1972, *MNRAS* **157**, 1P.
- Milogradov-Turin, J., Nikolić, S.: 1995, *Bull. Astron. Belgrade No 151*, 7.
- Milogradov-Turin, J., Urošević, D.: 1997, *Bull. Astron. Belgrade No 155*, 41.
- Muxlow, T.W.B., Pedlar, A., Wilkinson, P.N., Axon, D.J., Sanders, E.M., De Bruyn, A.G.: 1994, *MNRAS* **266**, 455.
- Nishikida, K., Burrows, D.N.: 1997, *BAAS* **191**, 5111.
- Oda, M., Hasegawa, H.: 1962, *Phys. Lett.* **1**, 239.
- Pacholczyk, A.G.: 1970, *Radio Astrophysics (nonthermal processes in galactic and extragalactic sources)*, W.H. Freeman and Company, San Francisco.
- Parker, E.N.: 1965, *ApJ* **142**, 584.
- Poveda, A., Woltjer, L.: 1968, *AJ* **73**(2), 65.
- Quigley, M.J.S., Haslam, C.G.T.: 1965, *Nature* **208**, 741.
- Reich, W., Berkhuijsen, E.M., Sofue, Y.: 1979, *A&A* **72**, 270.
- Rohlfs, K., Wilson, T.L.: 1996, *Tools of Radio Astronomy (second completely revised and enlarged edition)*, Springer, Heidelberg.
- Rougoor, G.W.: 1966, *ApJ* **144**, 852.
- Routledge, D., Landecker, T.L., Vaneldik, J.F.: 1986, *MNRAS* **221**, 809.
- Rybicki, G.B. & Lightman A.P.: 1979, *Radiative Processes in Astrophysics*, John Wiley & Sons, New York.
- Sabbadin, F.: 1977, *A&A* **54**, 915.
- Sakhibov, F.Kh., Smirnov, M.A.: 1982, *Pis'ma Astron. Ž.* **8**, 281 (*Sov. Astron. Lett.* **8**(3), 150).
- Salter, C.J.: 1970, *Ph.D. Thesis*, Manchester.
- Salter, C.J.: 1983, *Bull. Astr. Soc. India* **11**, 1.
- Sancisi, R., Van Woerden, H.: 1970, *A&A* **5**, 135.
- Seaquist, E.R.: 1968, *Observatory* **88**, 269.
- Sedov, L.I.: 1959, *Similarity and Dimensional Methods in Mechanics*, Academic Press, New York.
- Sembach, K.R., Savage, B.D., Tripp, T.D.: 1997, *ApJ* **480**, 216.
- Shklovsky, I.S.: 1960a, *Astron. Ž.* **37**(2), 256.
- Shklovsky, I.S.: 1960b, *Astron. Ž.* **37**(3), 369.
- Shklovsky, I.S.: 1968, *Supernovae*, John Wiley & Sons, New York, London.

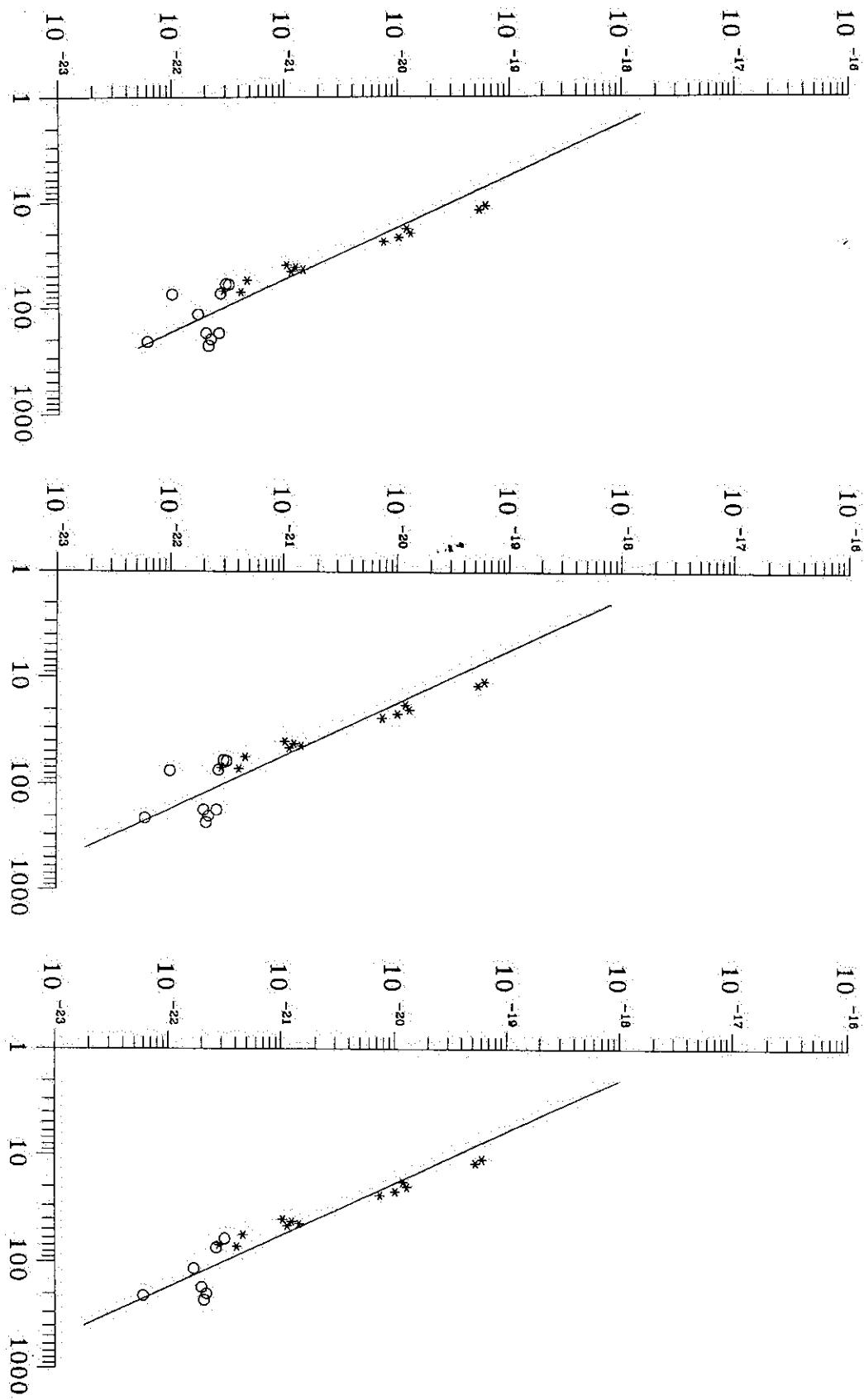
- Shklovsky, I.S., Sheffer, E.K.: 1971, *Nature* **231**, 173.
- Shu, F.H.: 1991, *The Physics of Astrophysics (Vol. I: Radiation)*, University Science Books, Mill Valley, California.
- Sofue, Y.: 1973, *Publ. Astr. Soc. Japan* **25**, 207.
- Sofue, Y.: 1976, *A&A* **48**, 1.
- Sofue, Y.: 1977, *A&A* **60**, 327.
- Sofue, Y.: 1994, *ApJ* **431**, 91.
- Sofue, Y., Reich, W.: 1979, *A&AS* **38**, 251.
- Spoelstra, T.A.Th.: 1972, *A&A* **21**, 61.
- Spoelstra, T.A.Th.: 1973, *A&A* **24**, 149.
- Thomas, G.E.: 1978, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **6**, 173.
- Toth, L.V., Haikala, L.K., Liljestroem, T., Mattila, K.: 1995, *A&A* **295**, 755.
- Tunmer, H.: 1958, *Phil. Mag.* **3**, 370.
- Urošević, D.: 1996, *M.Sc. Thesis*, Belgrade.
- van der Laan, H.: 1962a, *MNRAS* **124**, 125.
- van der Laan, H.: 1962b, *MNRAS* **124**, 179.
- Vladimirskiy, V.V.: 1948, *ZhETF* **18**, 393.
- Weaver, H.: 1979, in IAU Symposium 84 *The Large-Scale Characteristics of the Galaxy*, ed. W.B. Burton (Dordrecht: Reidel), p. 295.
- Woltjer, L.: 1972, *ARA&A* **10**, 129.
- Yoshioka, S., Ikeuchi, S.: 1990, *ApJ* **360**, 352.
- Zuzak, W.W.: 1971, *A&A* **15**, 95.

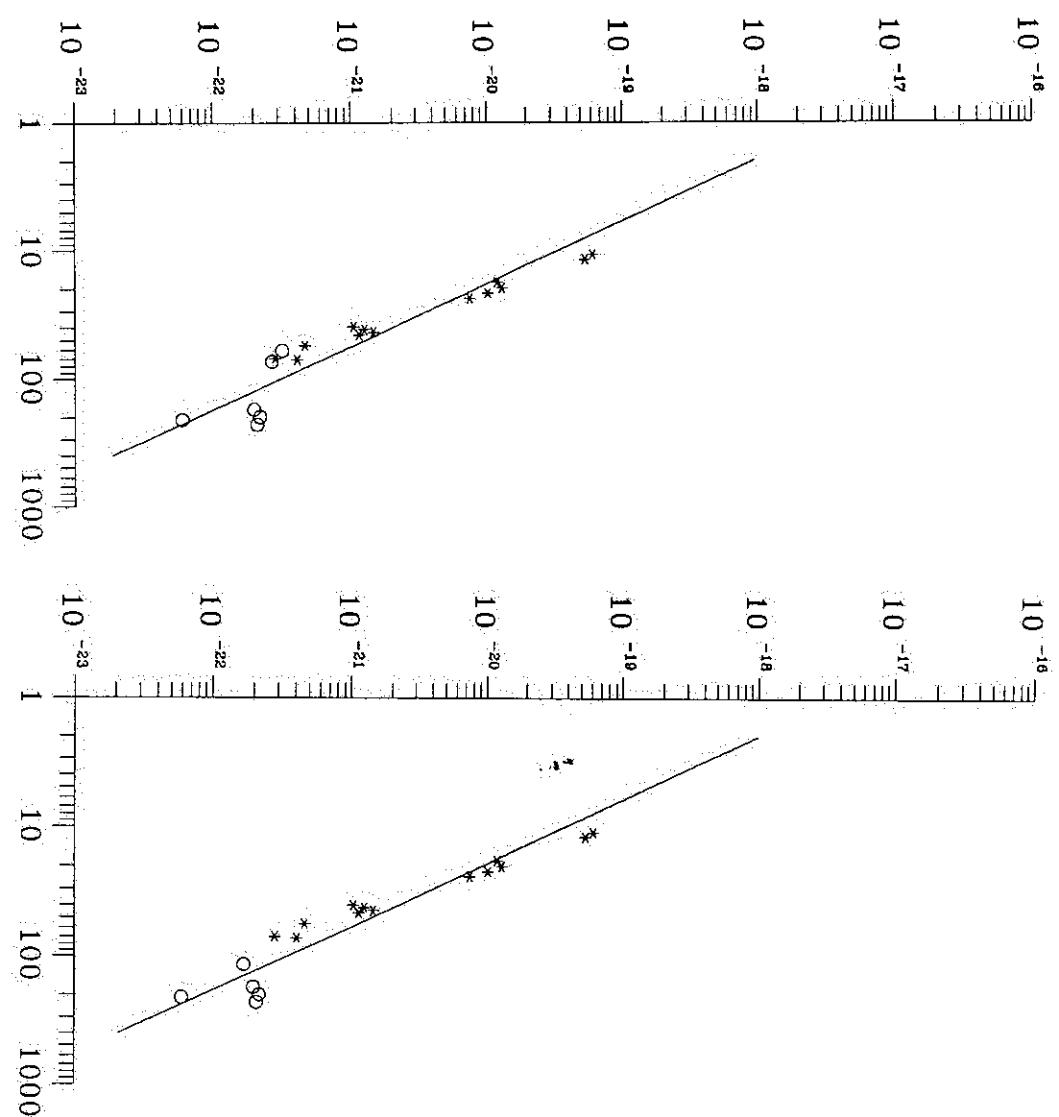
PRILOG

U prilogu ove disertacije (kao što je u poglavlju 3.1 već navedeno) prikazani su $\Sigma - D$ dijagrami za slučajeve testiranja početnih relacija pridruživanjem: 10, 9, 7, 6 i na kraju 5 kalibracionih petlji, dok su u trećoj i četvrtoj glavi prikazani dijagrami za slučajeve testiranja početnih relacija pridruživanjem 4 glavne petlje koje su i glavni objekti istraživanja tokom celog rada. Ako u početnom setu kalibratora kojem se pridružuje ovih 10 objekata postoji kalibrator koji je istovremeno i kalibraciona petlja, on će biti izbačen iz seta kalibracionih petlji. Svi naredni $\Sigma - D$ dijagrami su dati za površinski sjaj na 1 GHz u $\text{W m}^{-2} \text{Hz}^{-1} \text{sr}^{-1}$ (Y-ose) i dijametre u parsecima (X-ose). Početni kalibratori su označeni zvezdicama, a kalibracione petlje kružićima. Poslednja tri seta dijagrama u ovom prilogu predstavljaju testove relacija za ostatke iz naše galaksije zajedno sa ostacima iz drugih galaksija. Na ovim dijagramima zvezdice predstavljaju galaktičke kalibratore, kružići kalibracione petlje, tačke kalibratore iz Magelanovih oblaka, plusići kalibracione ostatke iz galaksija M31 i M33 i krstići predstavljaju kalibratore iz galaksije M82.

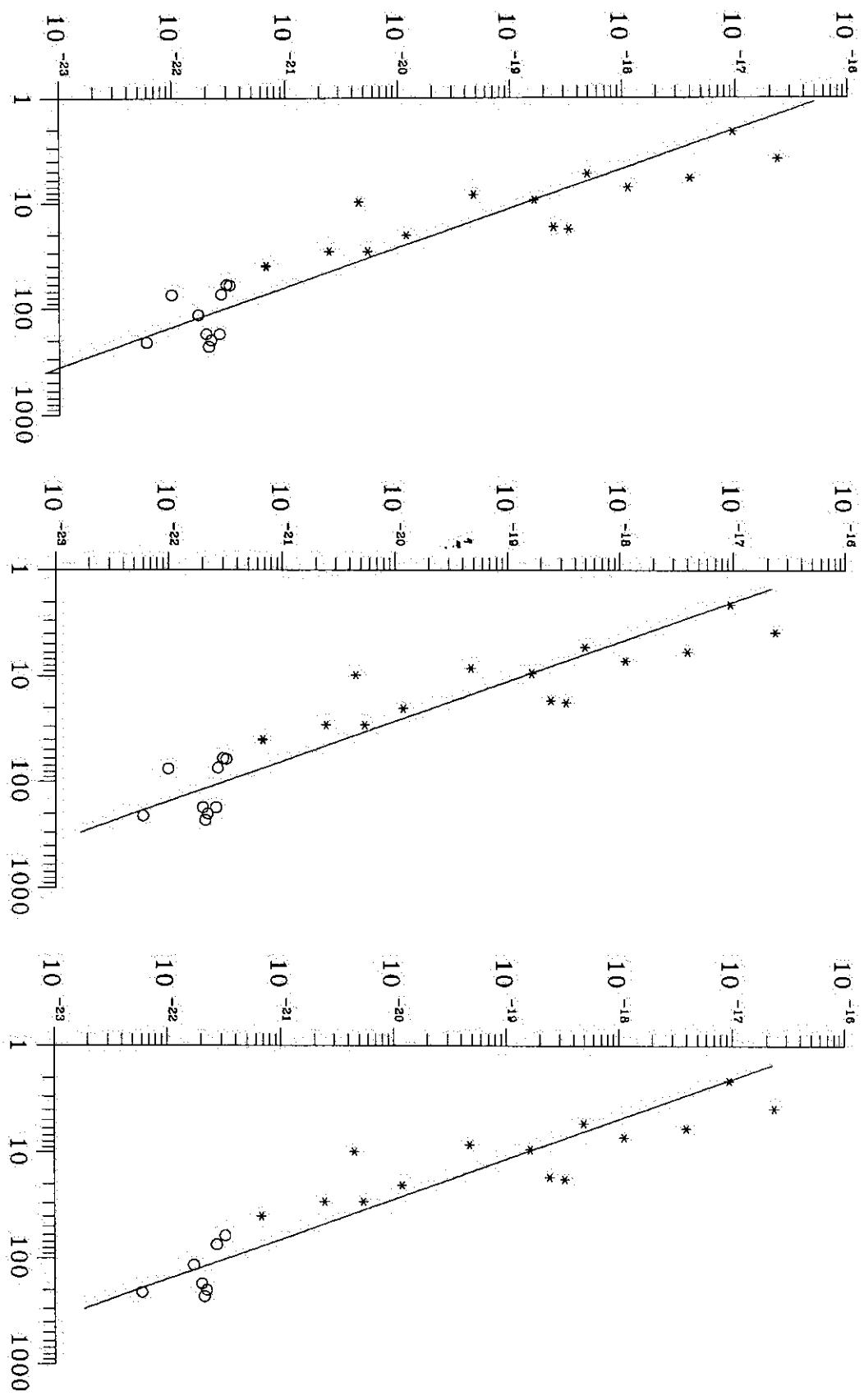


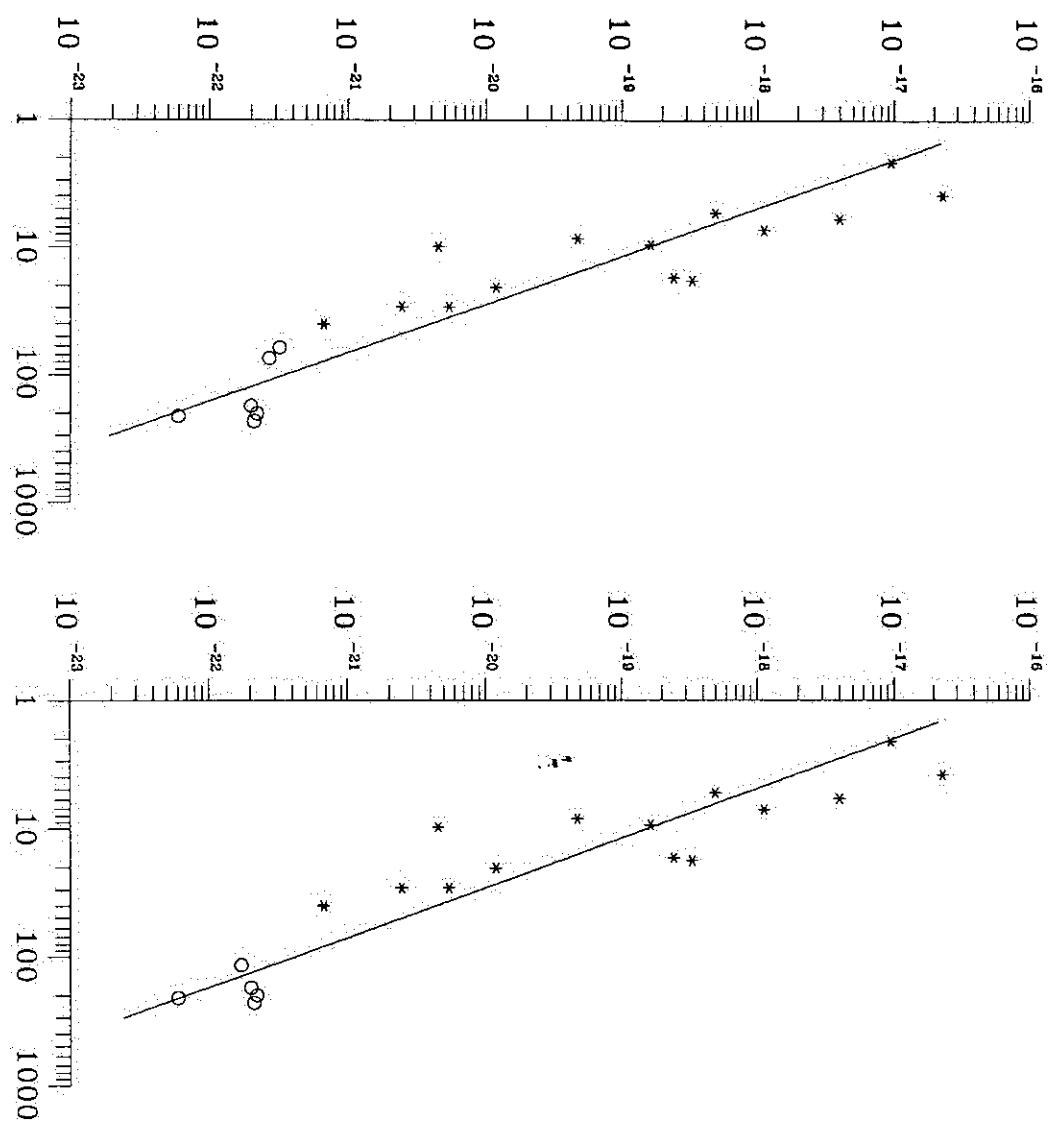
Test $\Sigma - D$ relacije Povede i Voltjera (Poveda & Woltjer, 1968)



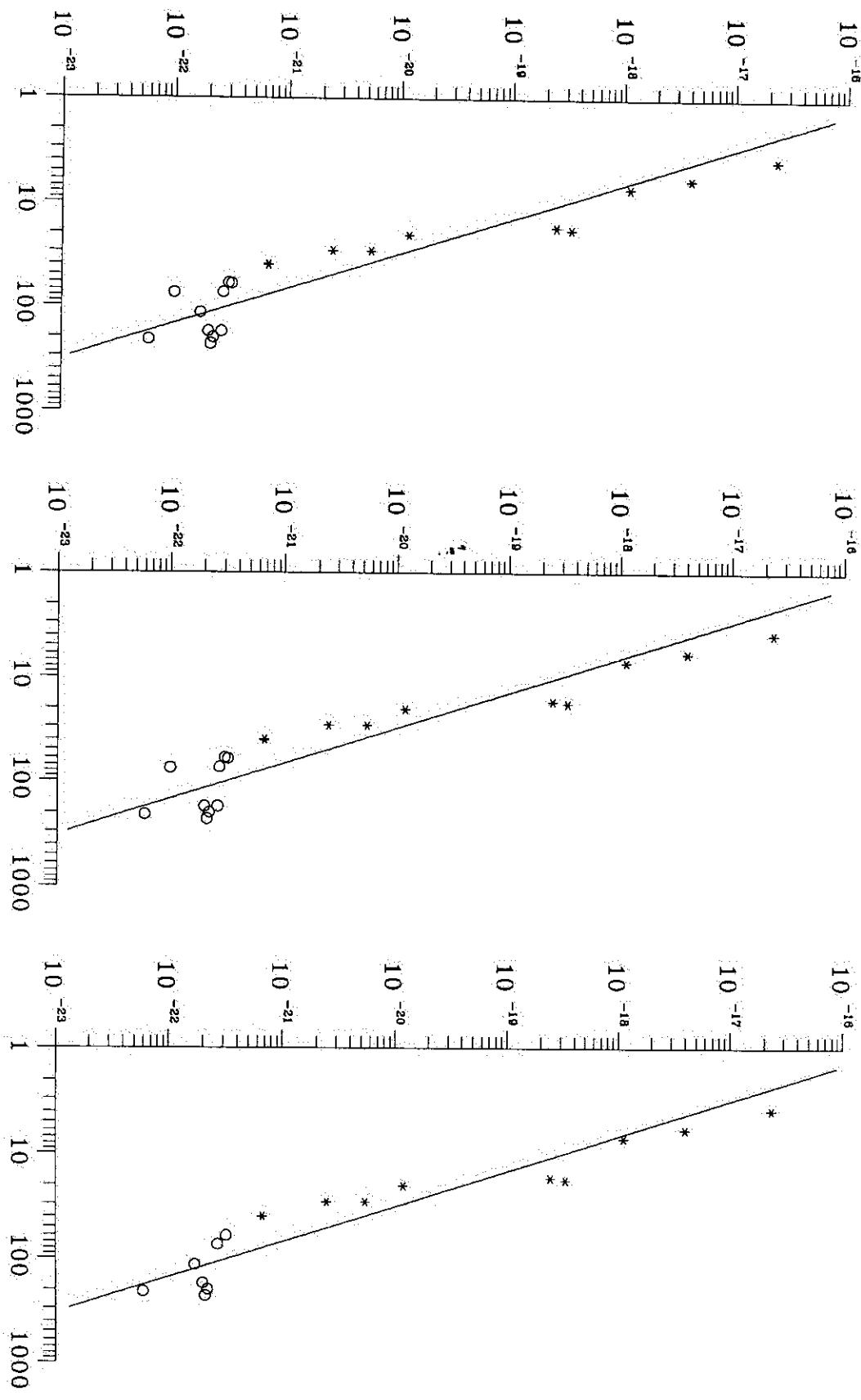


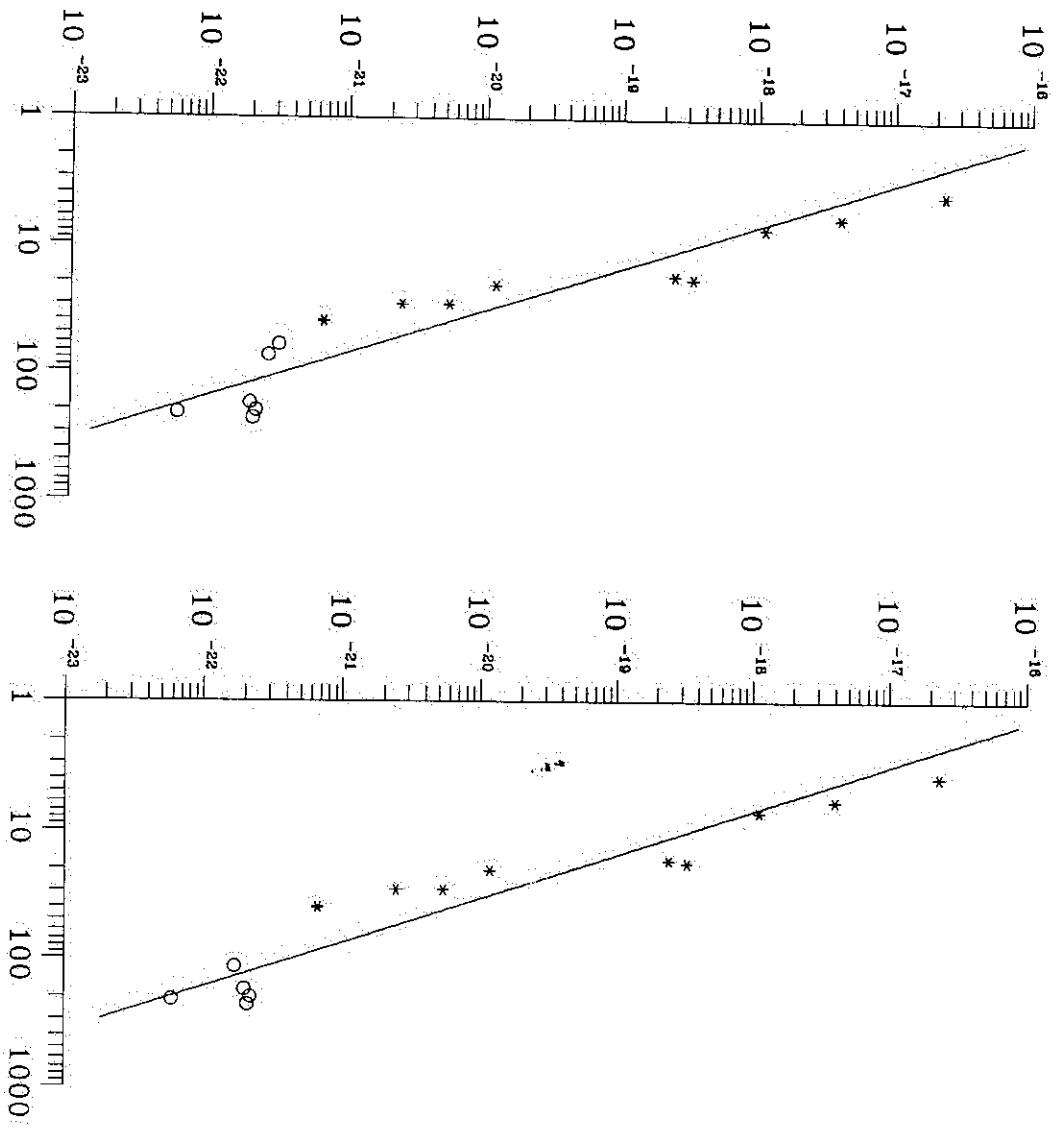
Test Milnove (Milne, 1970) $\Sigma - D$ relacije za svih 15 kalibratora



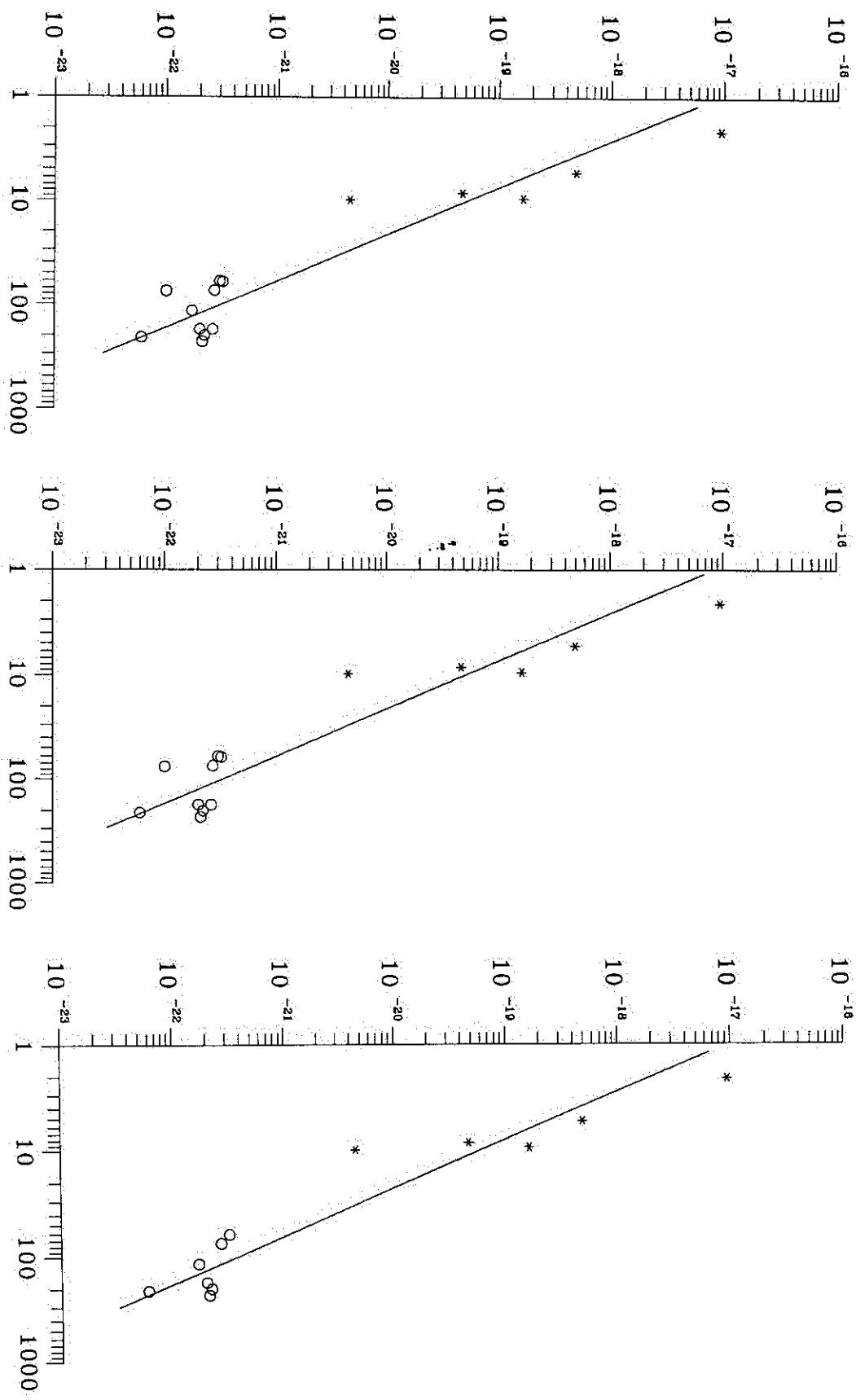


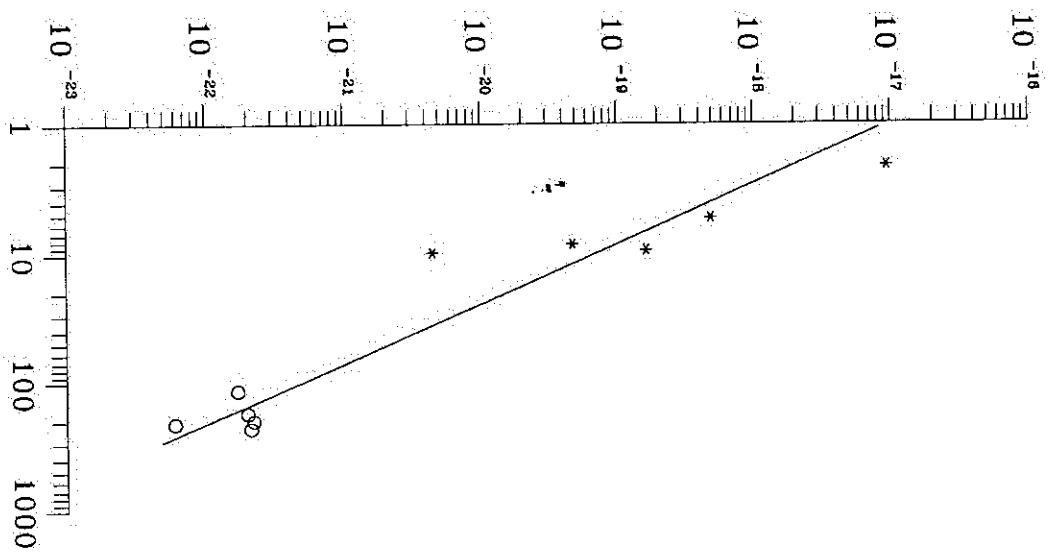
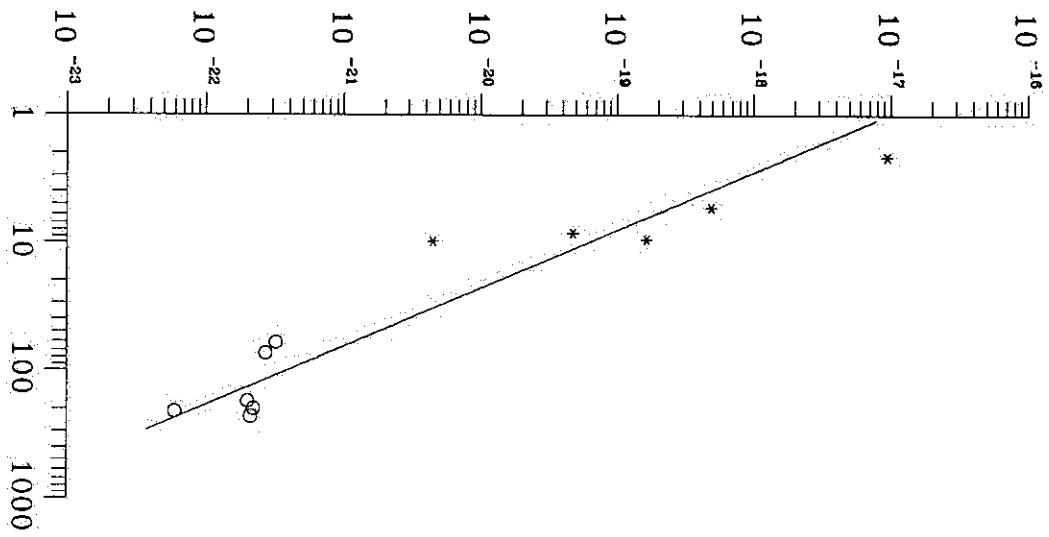
Test Milnove (Milne, 1970) $\Sigma - D$ relacije za 10 kalibratora tipa II



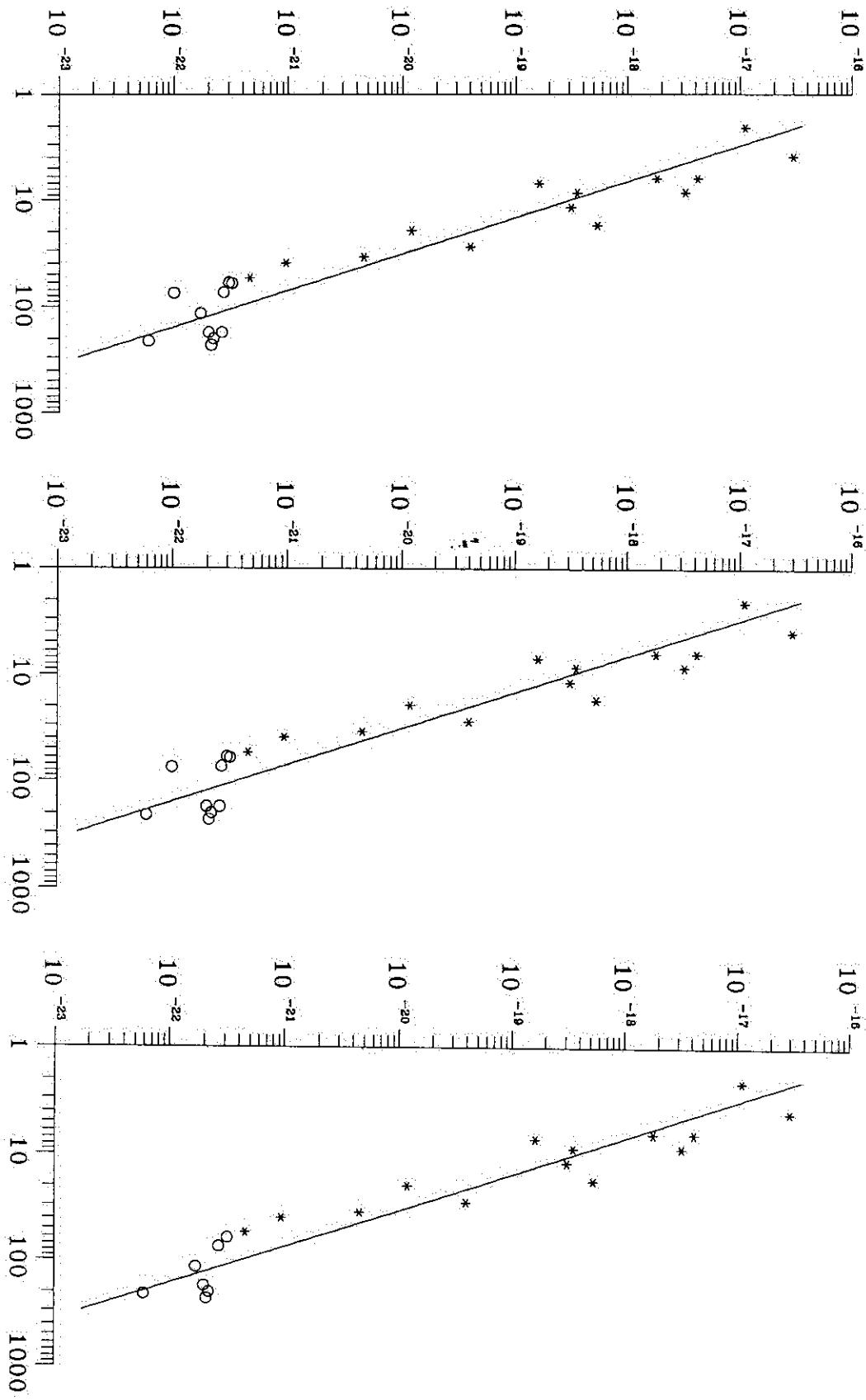


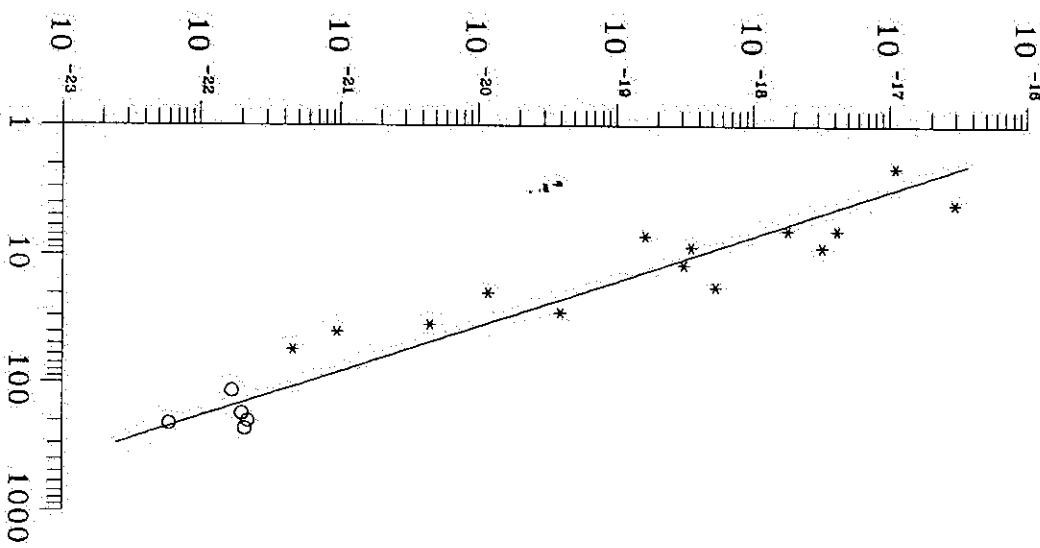
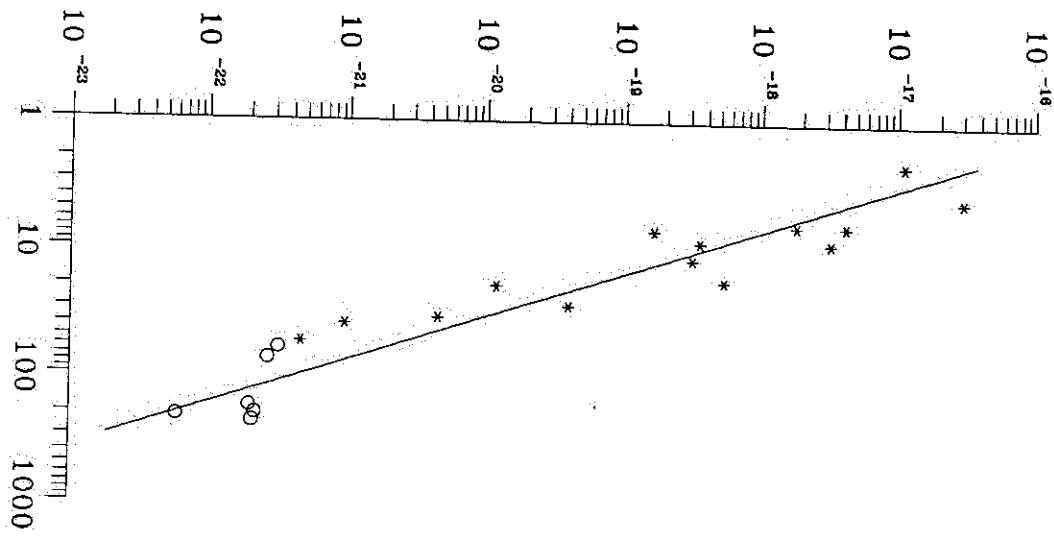
Test Milnove (Milne, 1970) $\Sigma - D$ relacije za 5 kalibratora tipa I



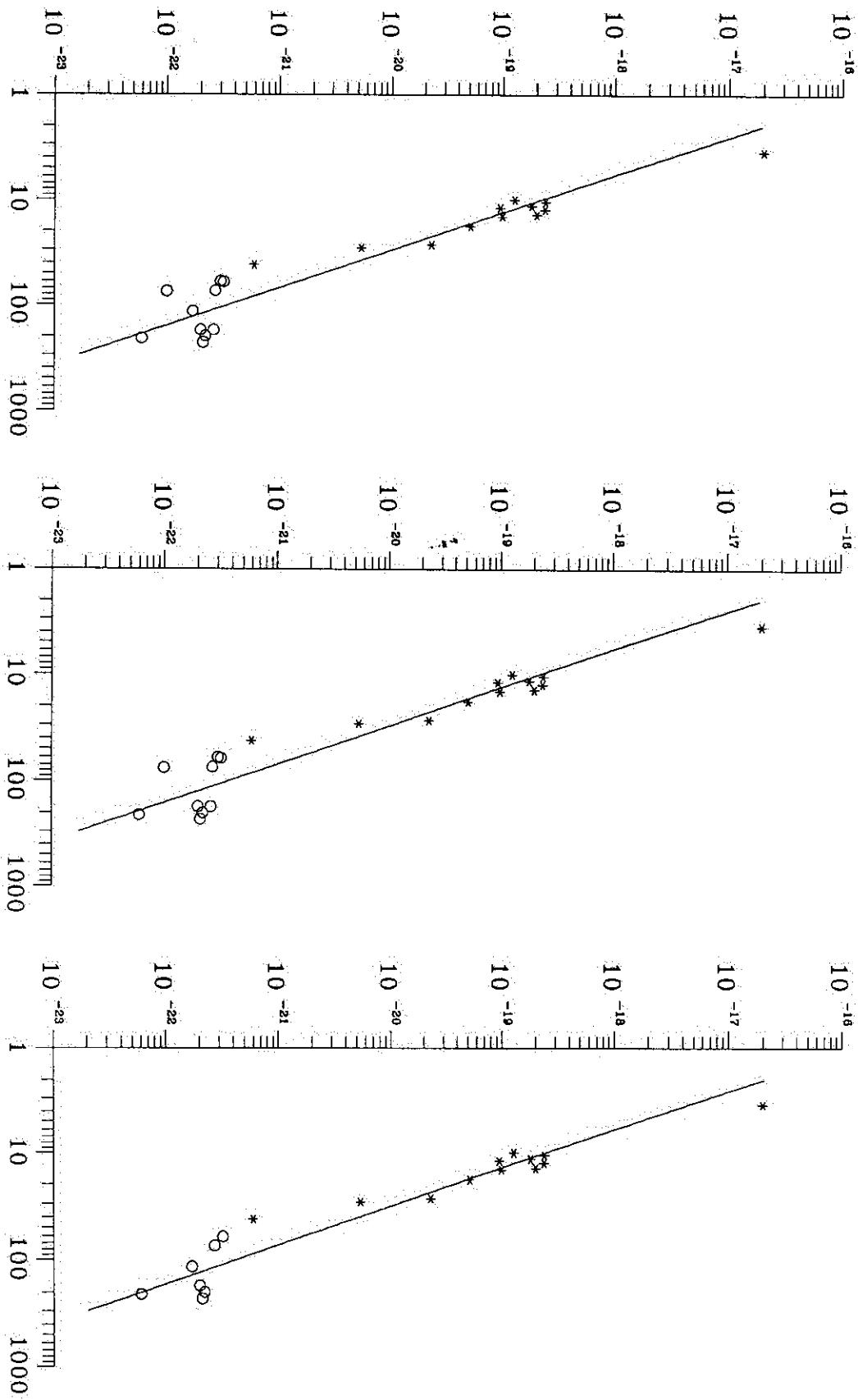


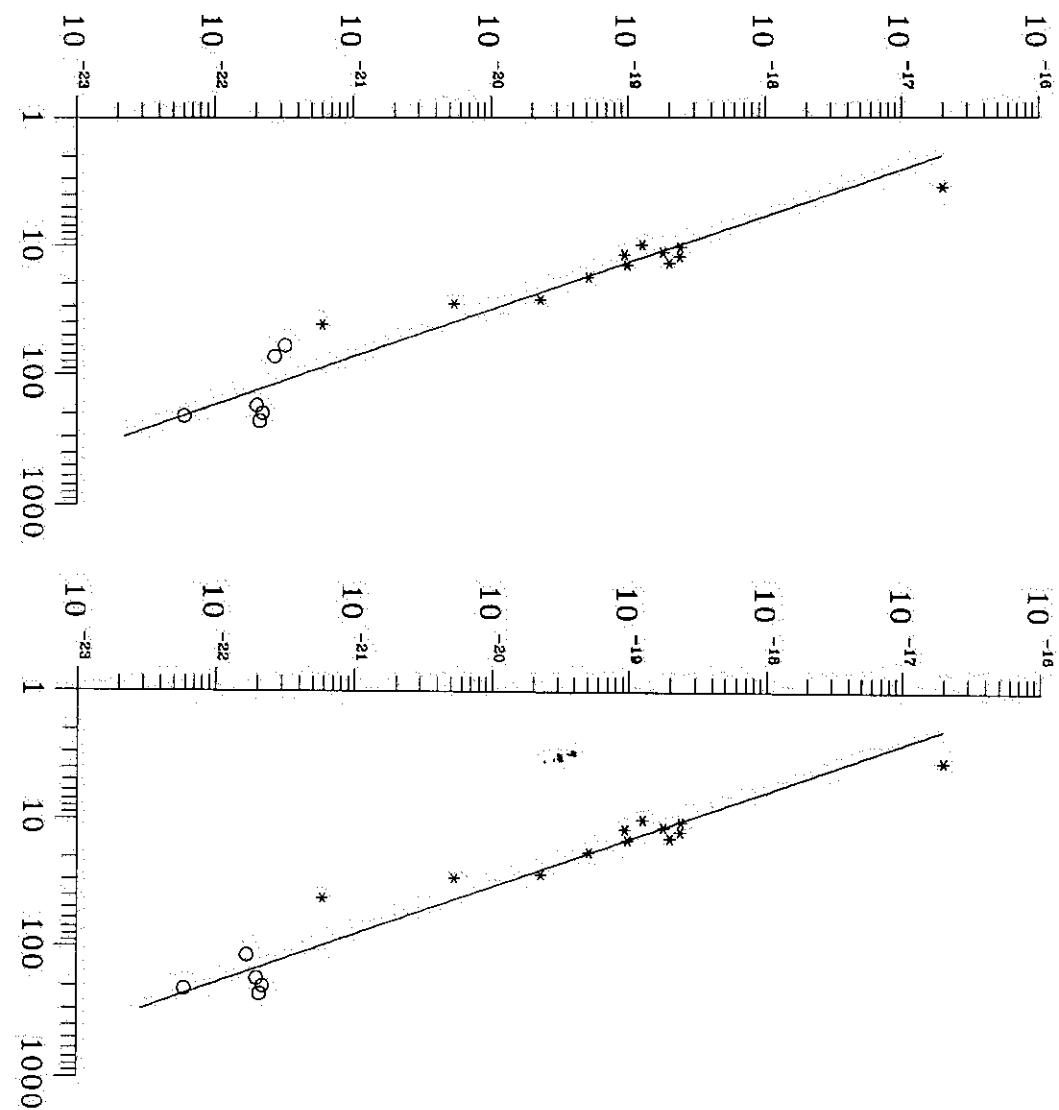
Test Daunsove (Downes, 1971) $\Sigma - D$ relacije



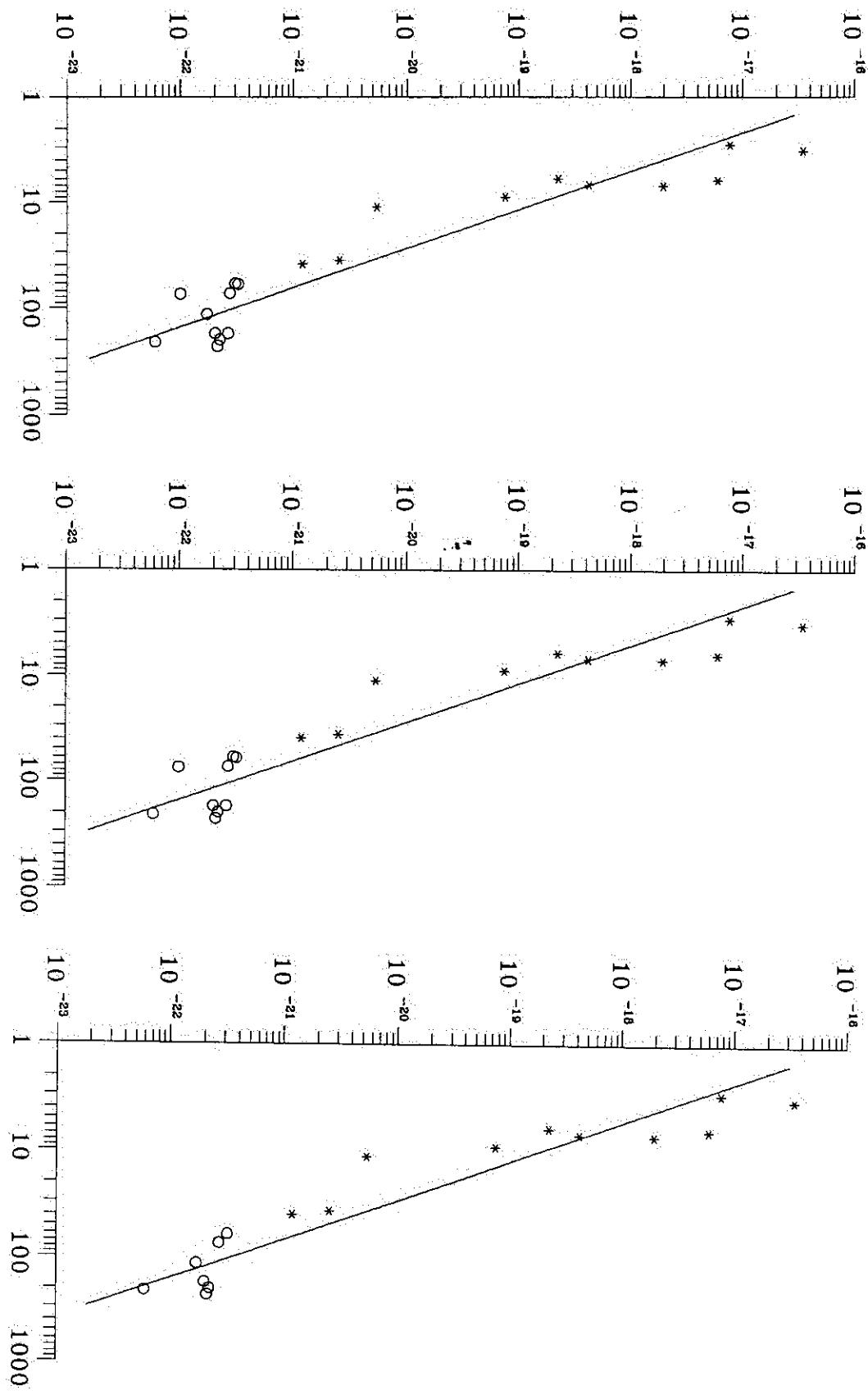


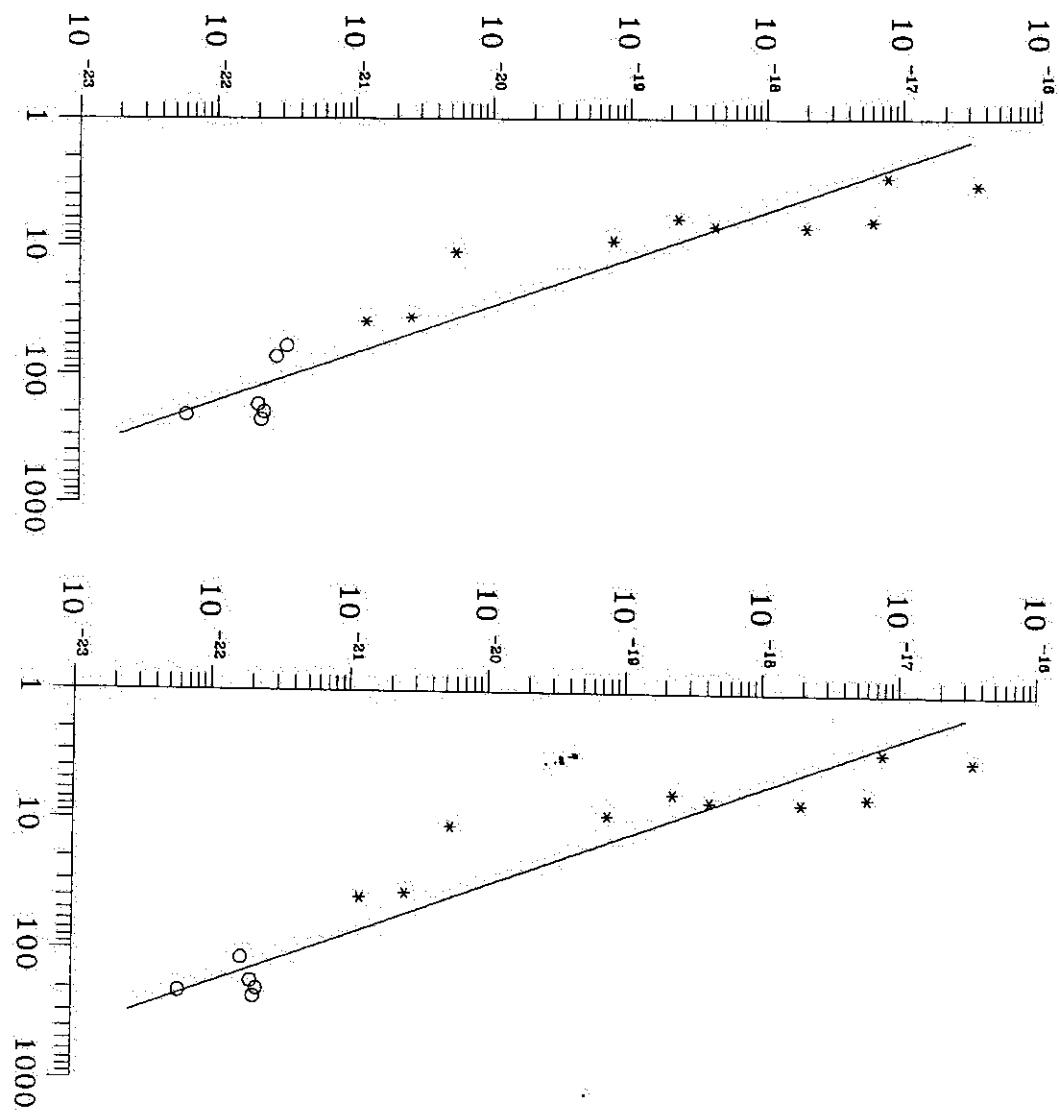
Test $\Sigma - D$ relacije Ilovaiskog i Lekea (Ilovaisky & Lequeux, 1972)



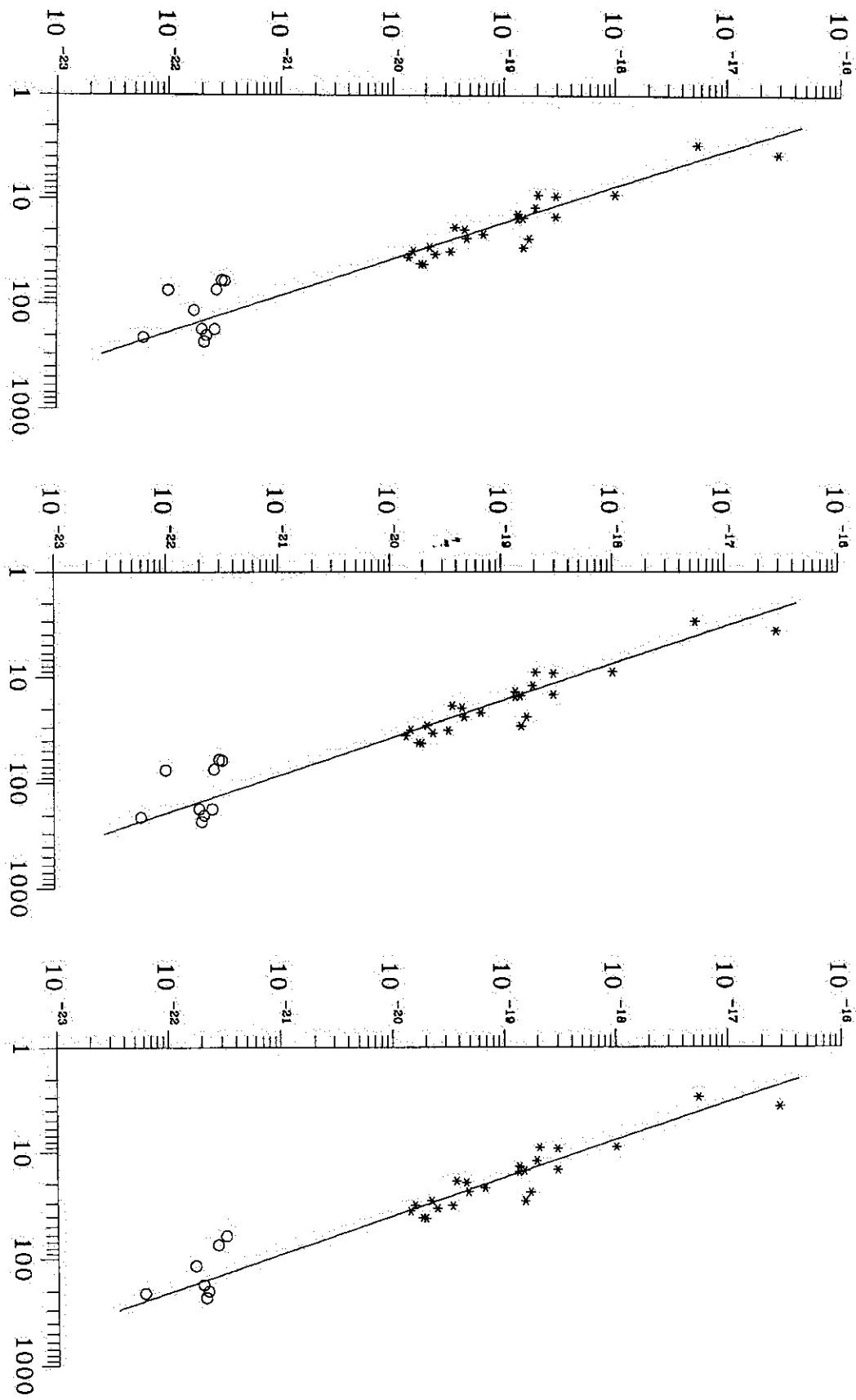


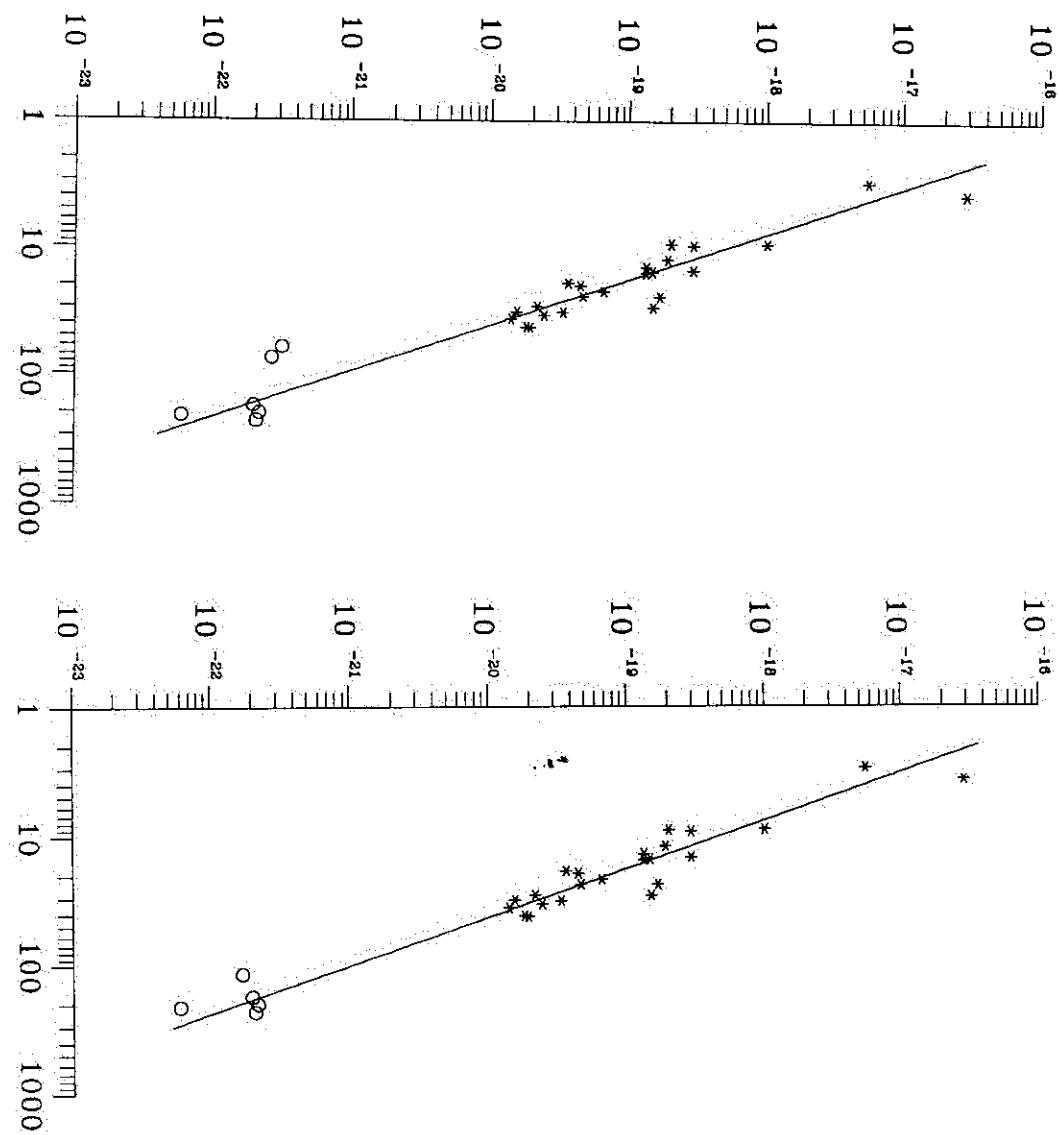
Test Voltjerove (Woltjer, 1972) $\Sigma - D$ relacije



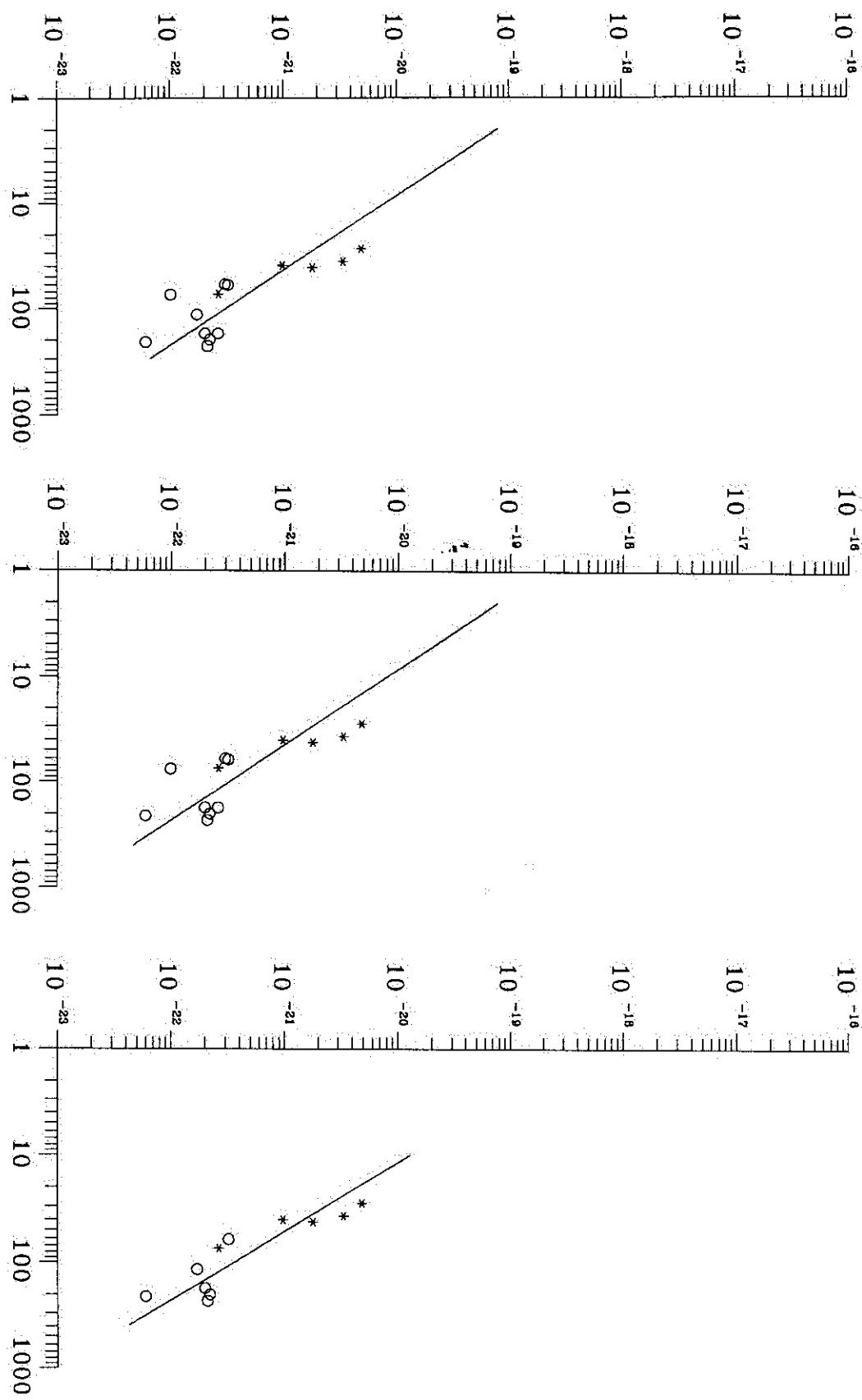


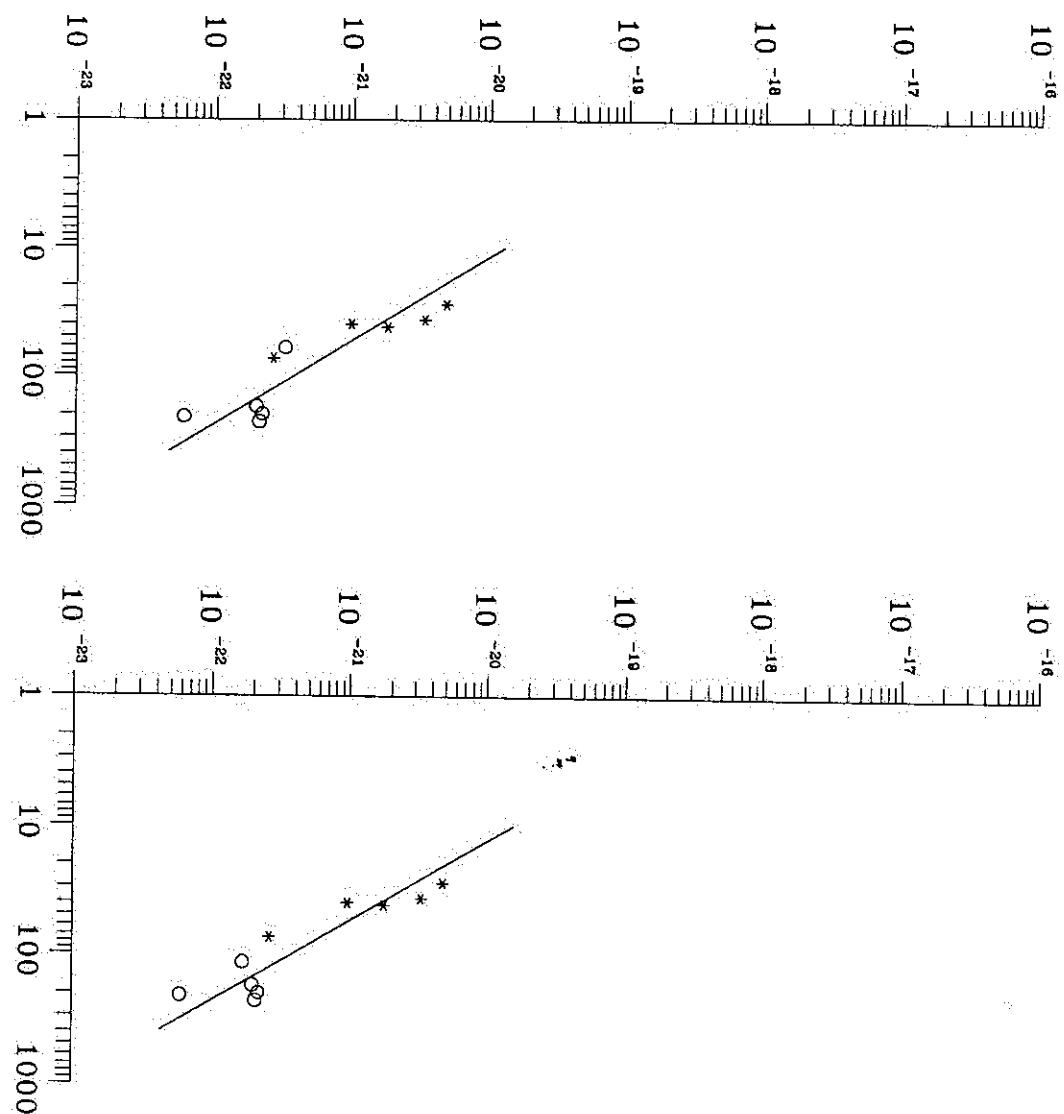
Test $\Sigma - D$ relacije Klarka i Kasvela (Clark & Caswell, 1976) za 23 kalibratora k



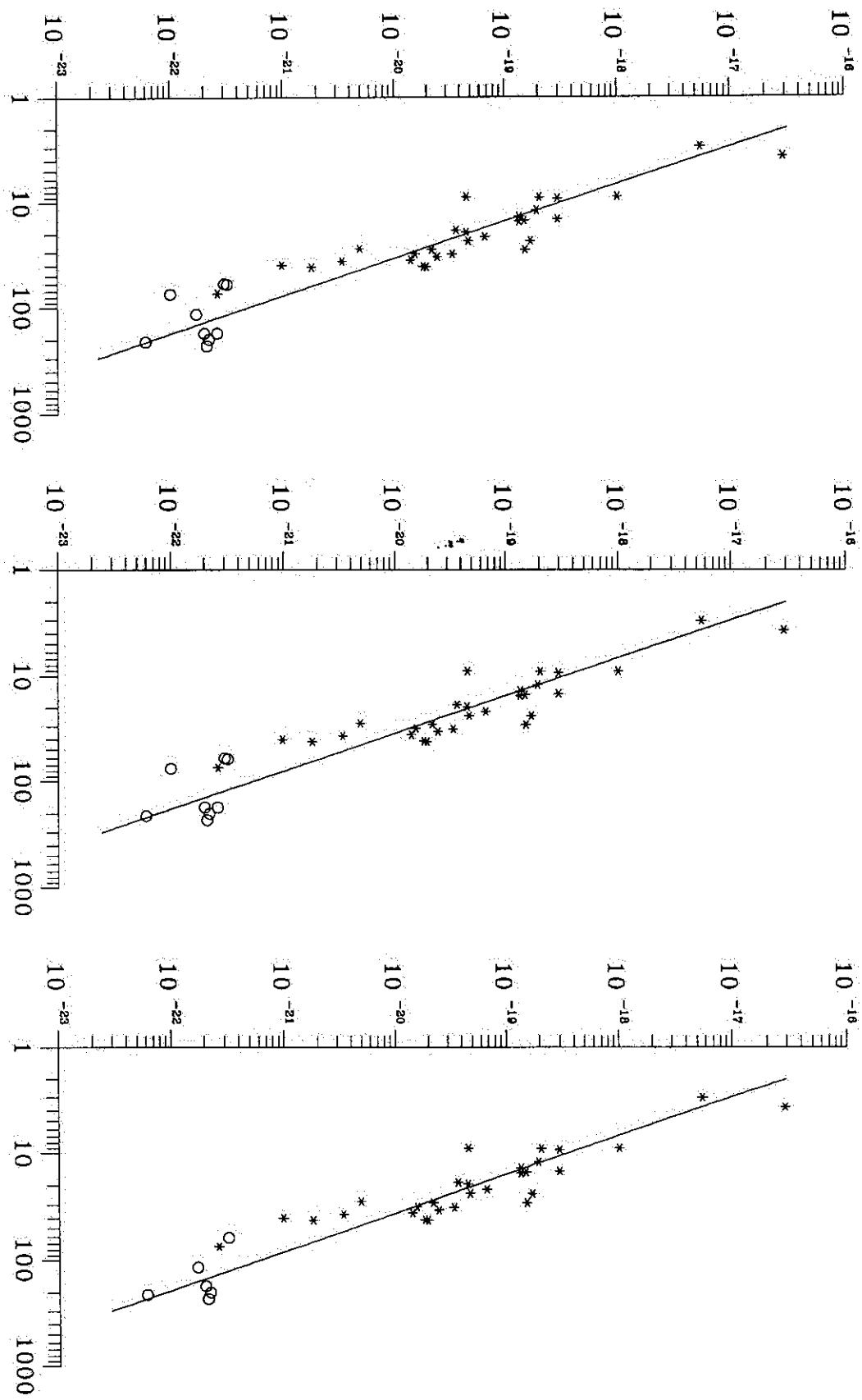


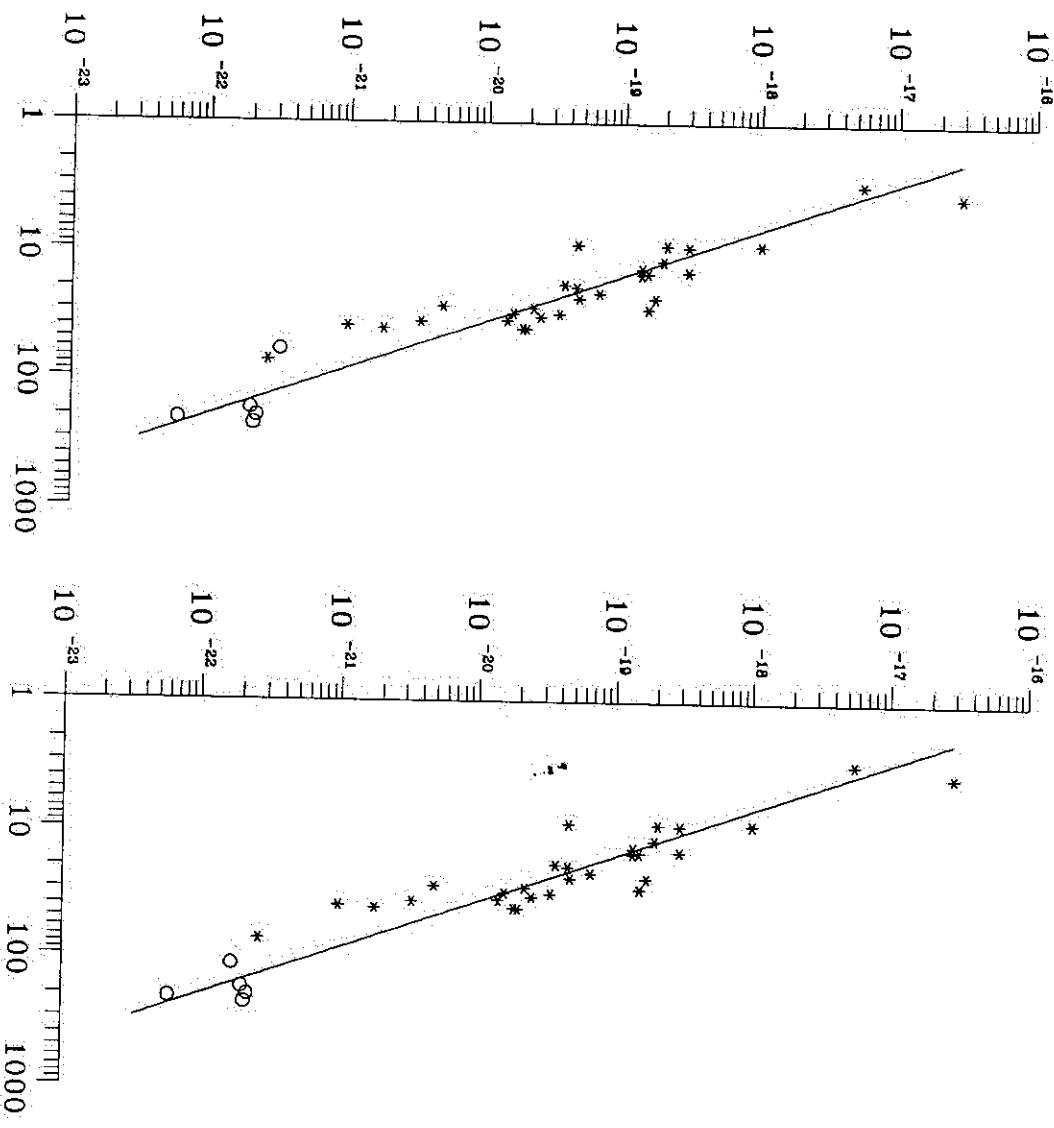
Test $\Sigma - D$ relacije Klarka i Kasvela (Clark & Caswell, 1976) za 5 kalibratora kl.



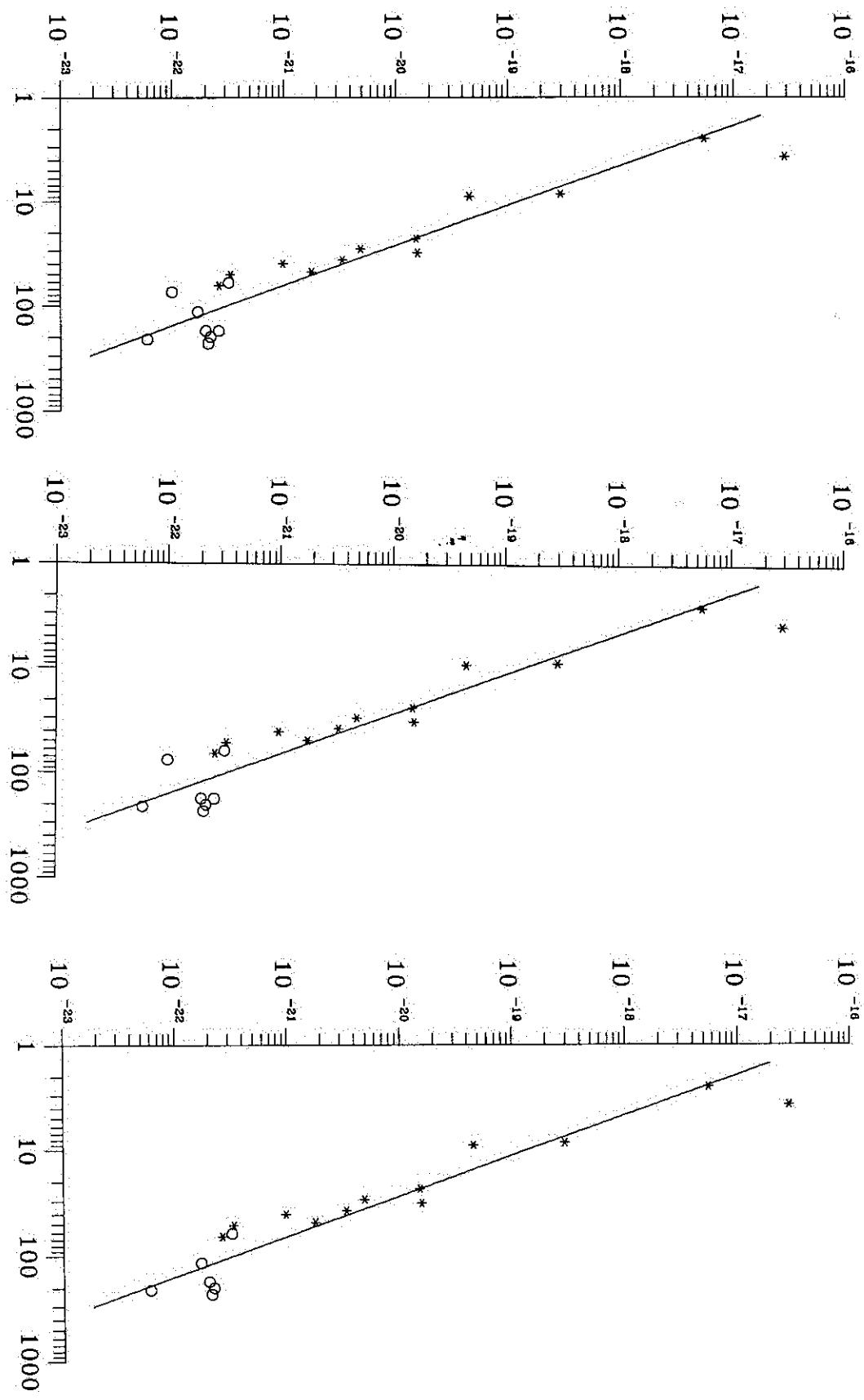


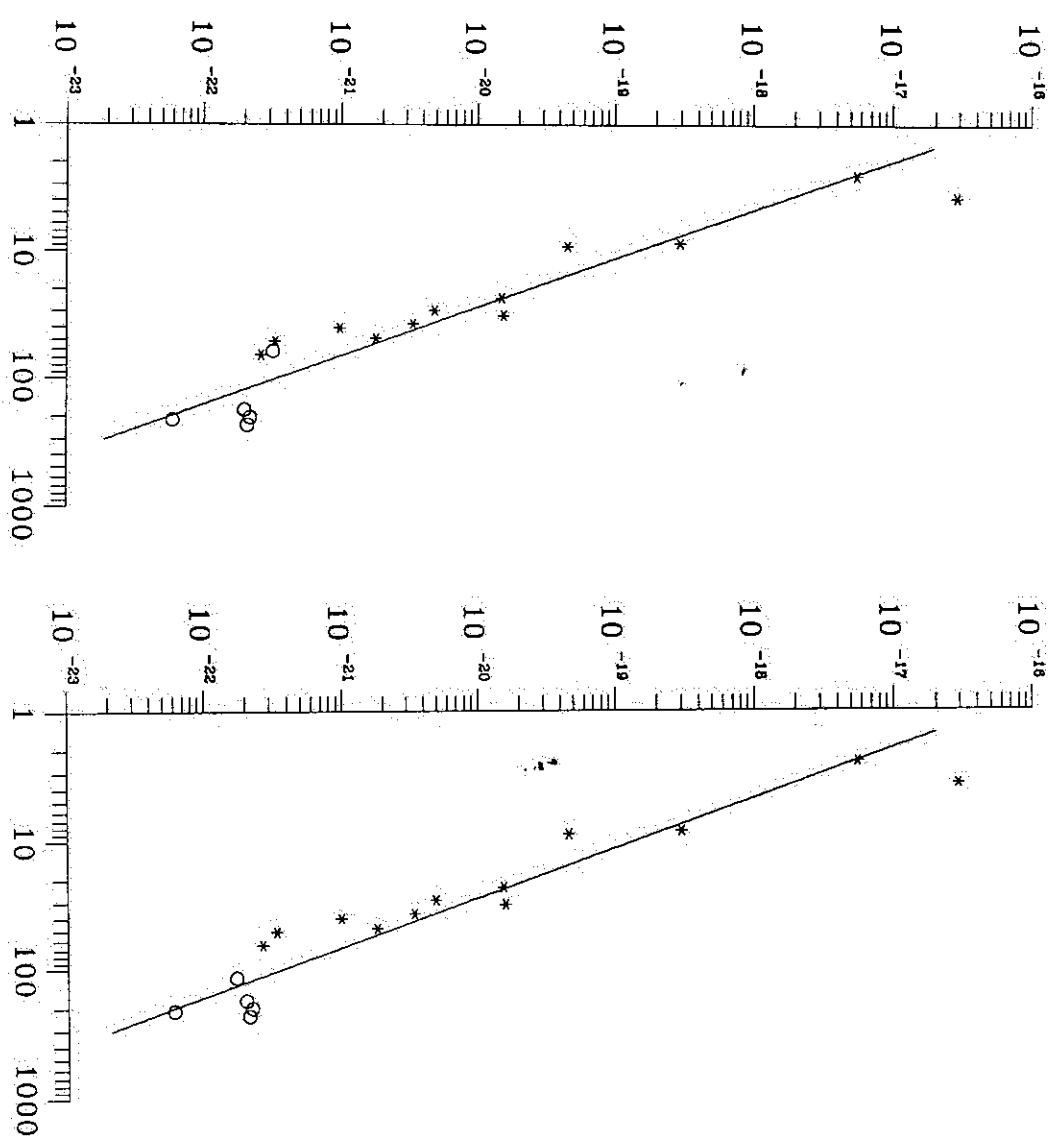
Test $\Sigma - D$ relacije Klarka i Kasvela (Clark & Caswell, 1976) za 29 kalibratora obe



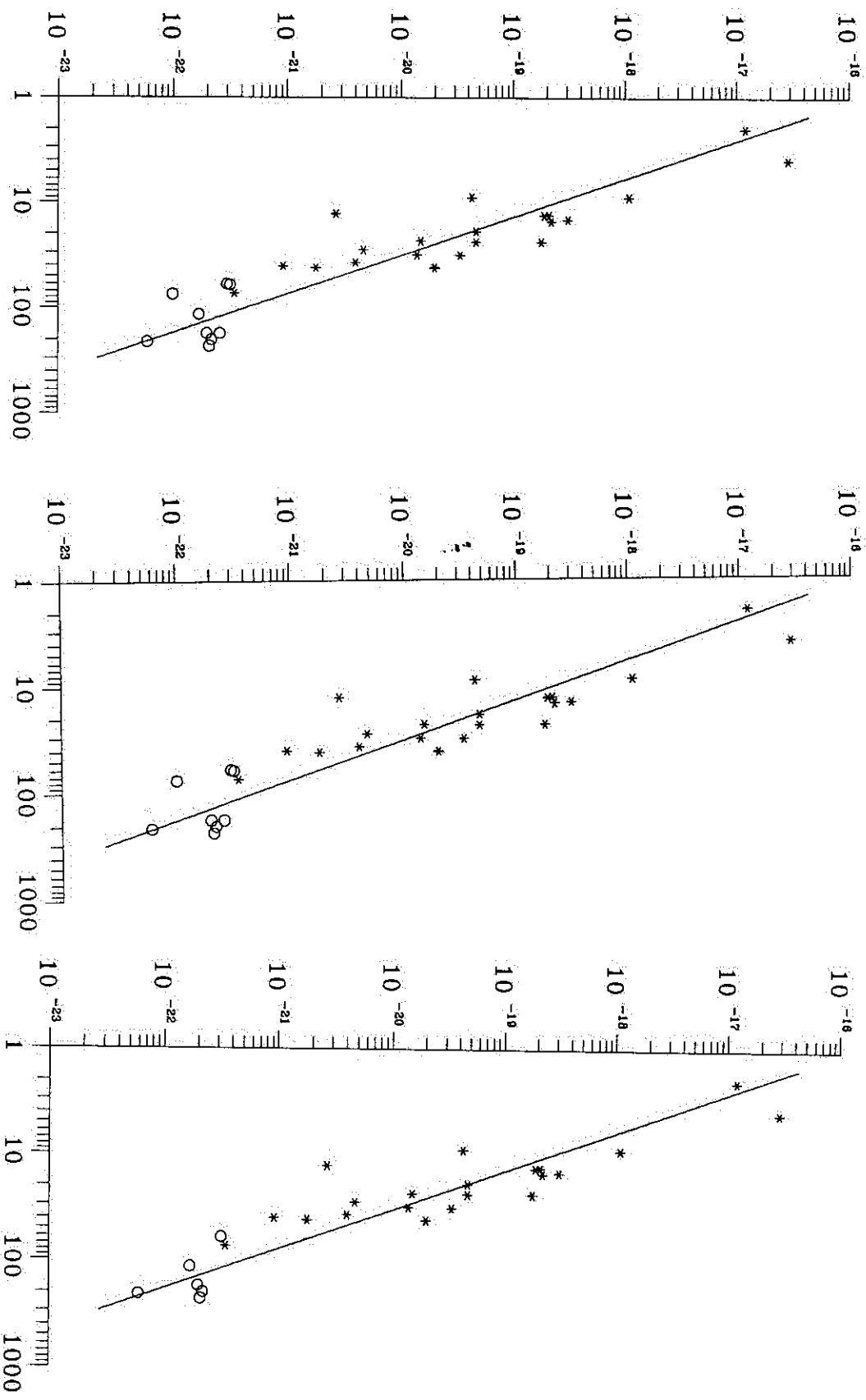


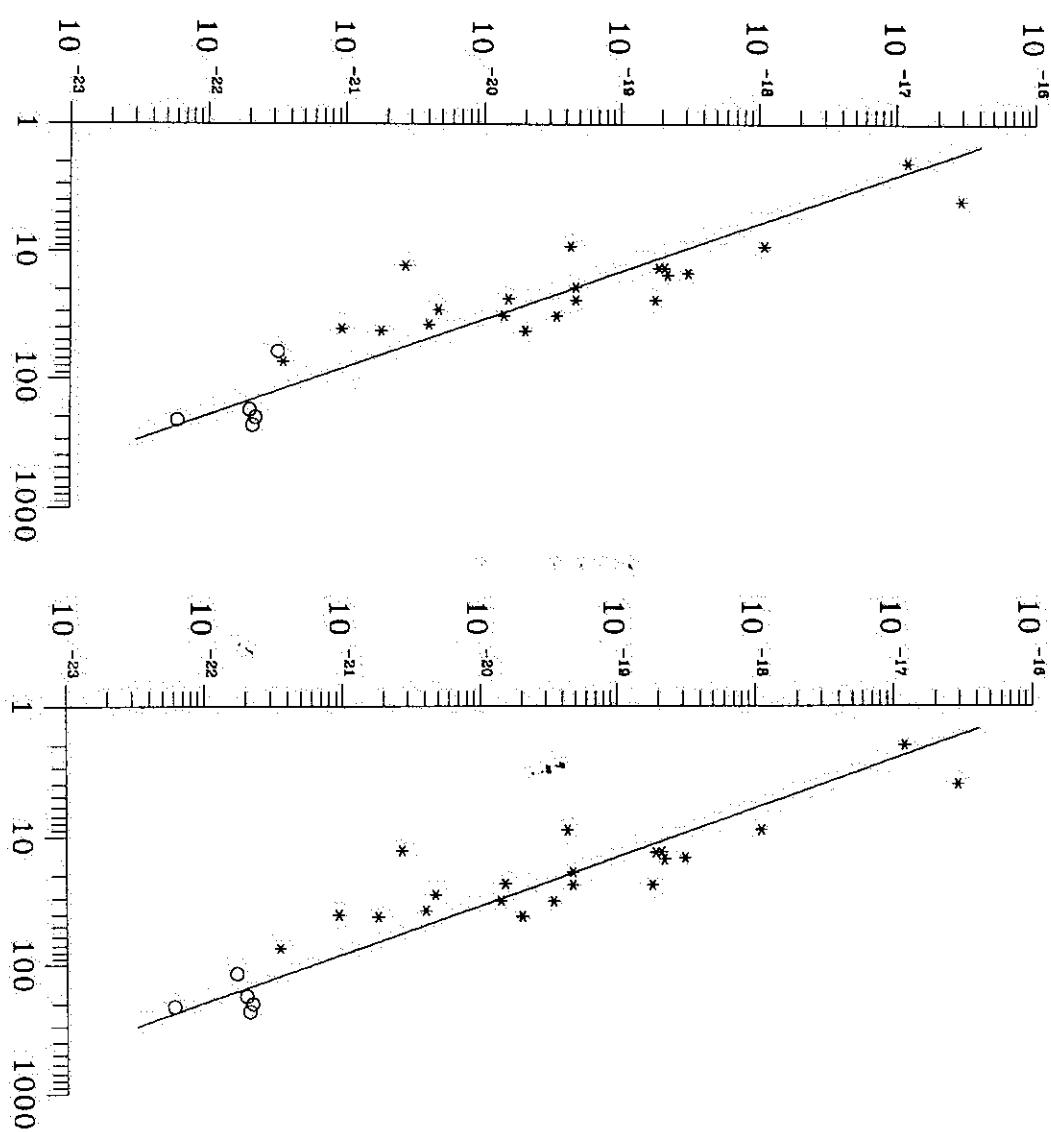
Test Sabadinove (Sabadin, 1977) $\Sigma - D$ relacije



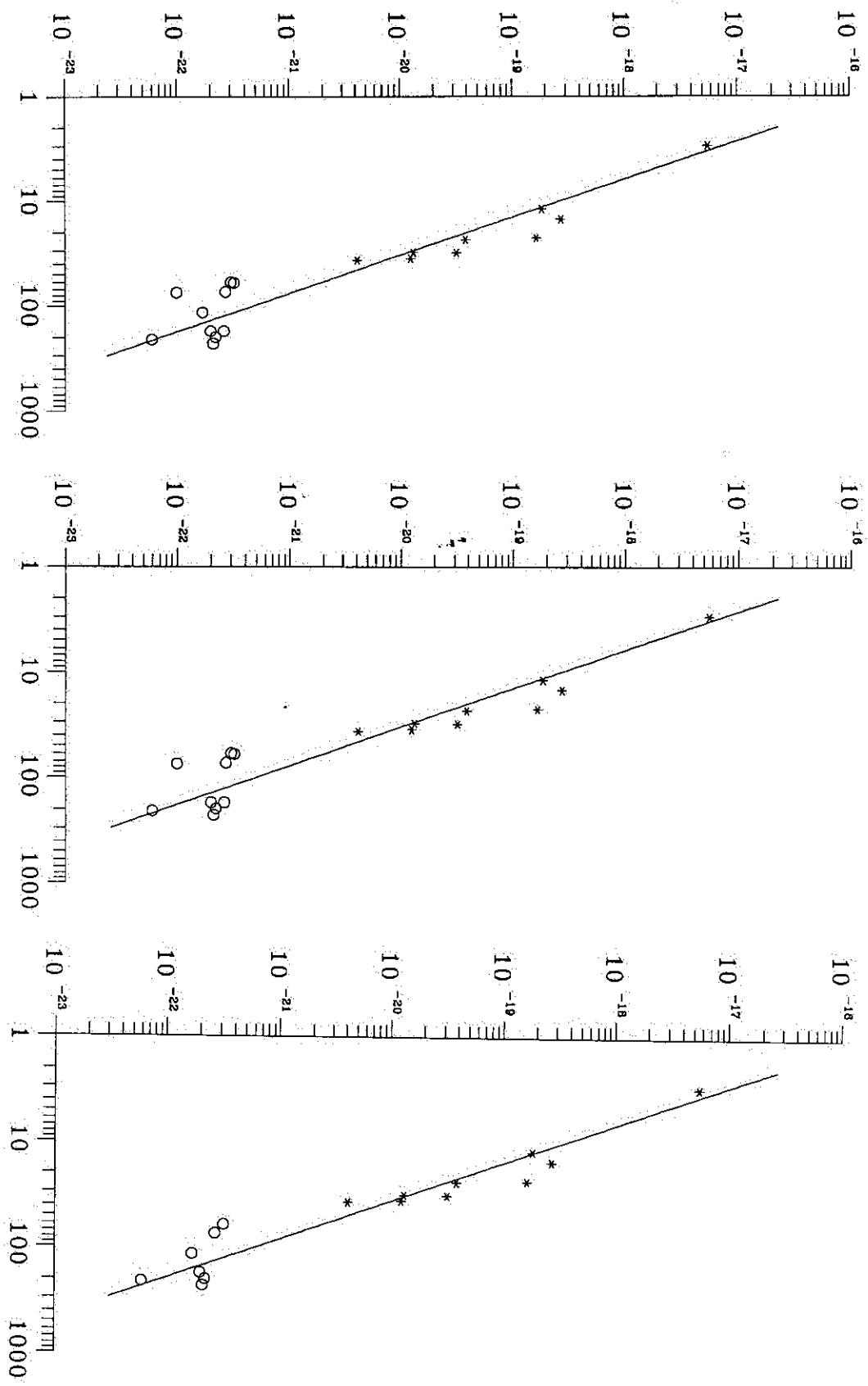


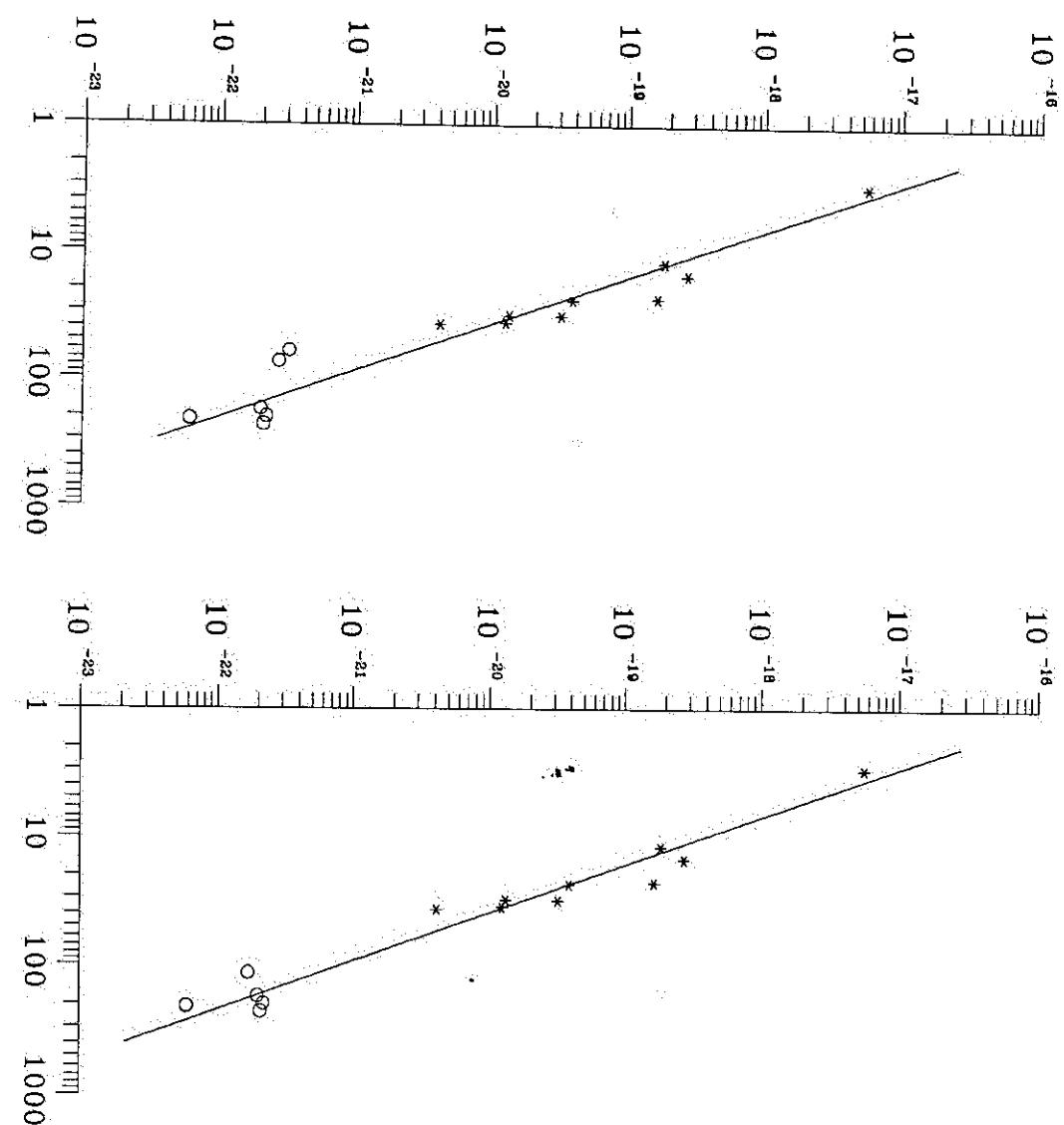
Test Milnove (Milne, 1979) $\Sigma - D$ relacije



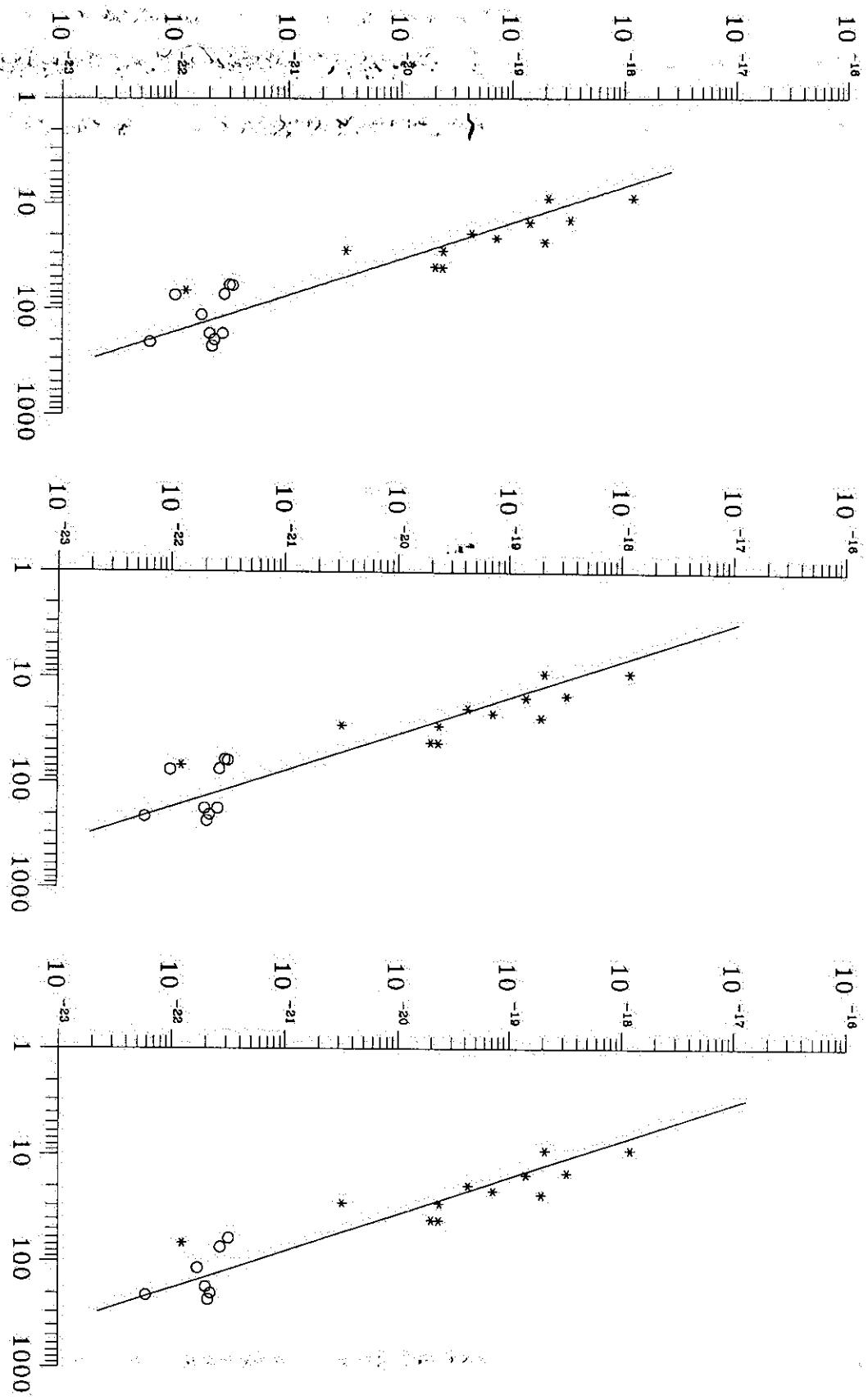


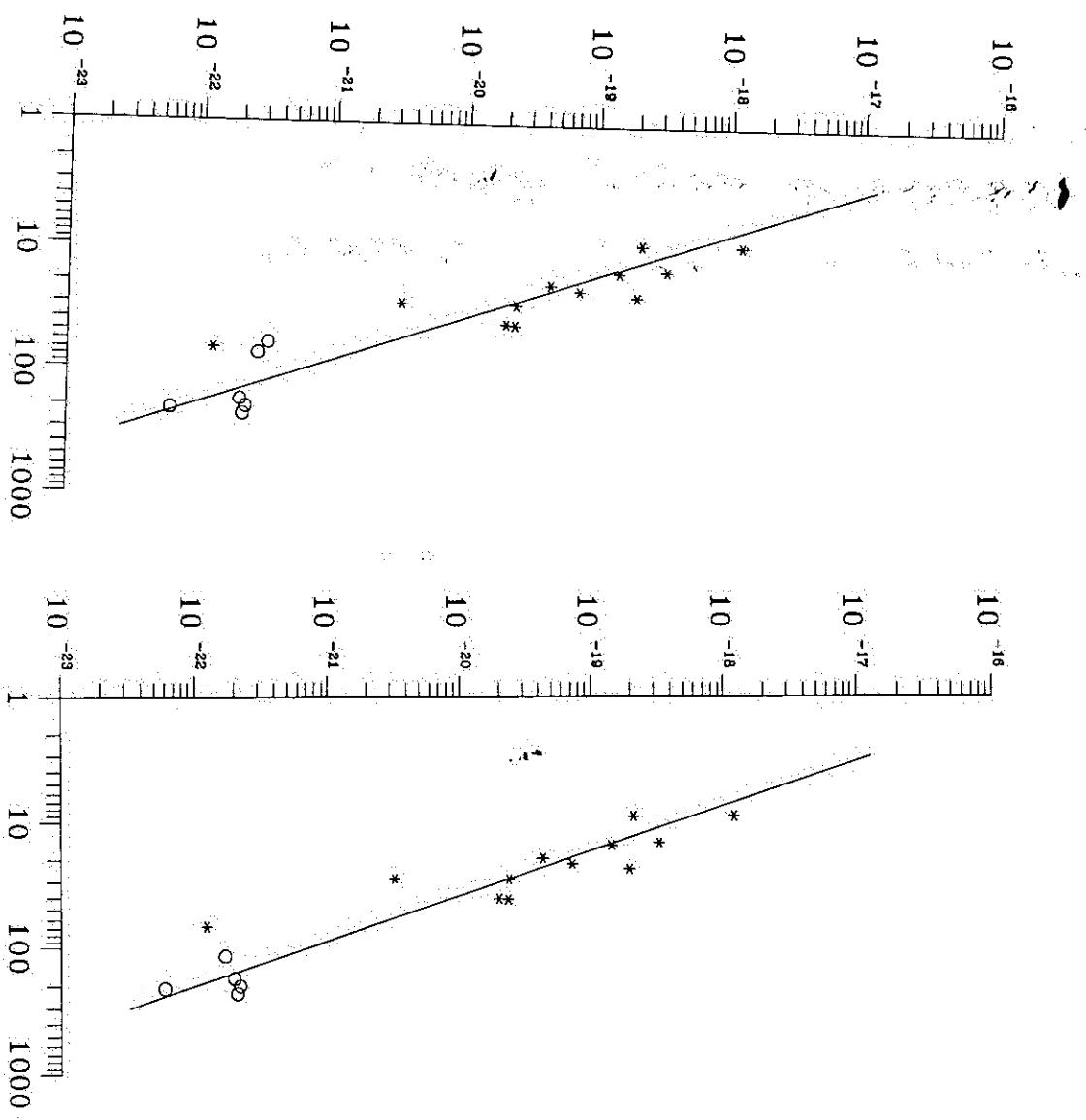
Test $\Sigma - D$ relacije Gebela sa saradnicima (Göbel et al. 1981) za 9 kalibratora g



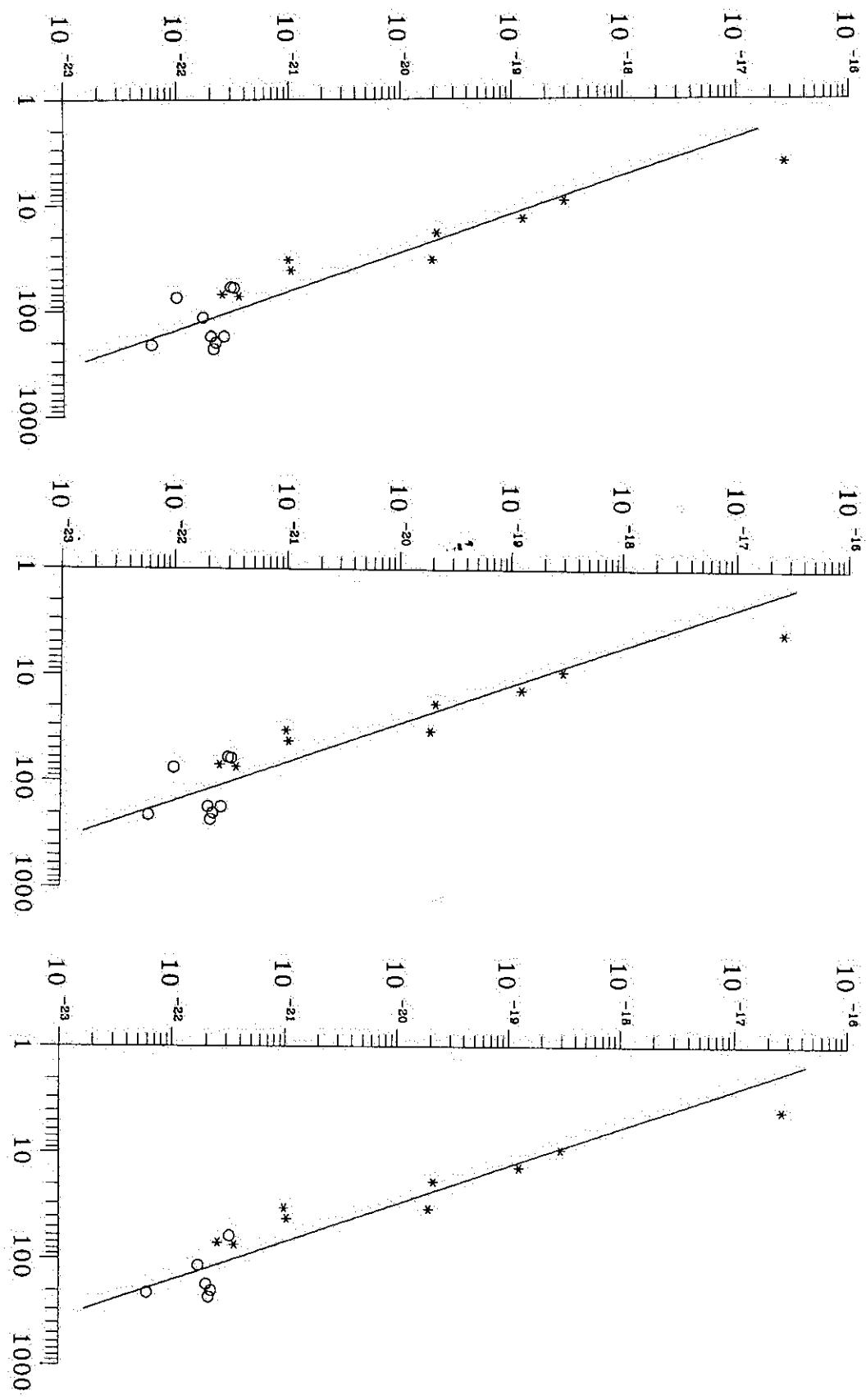


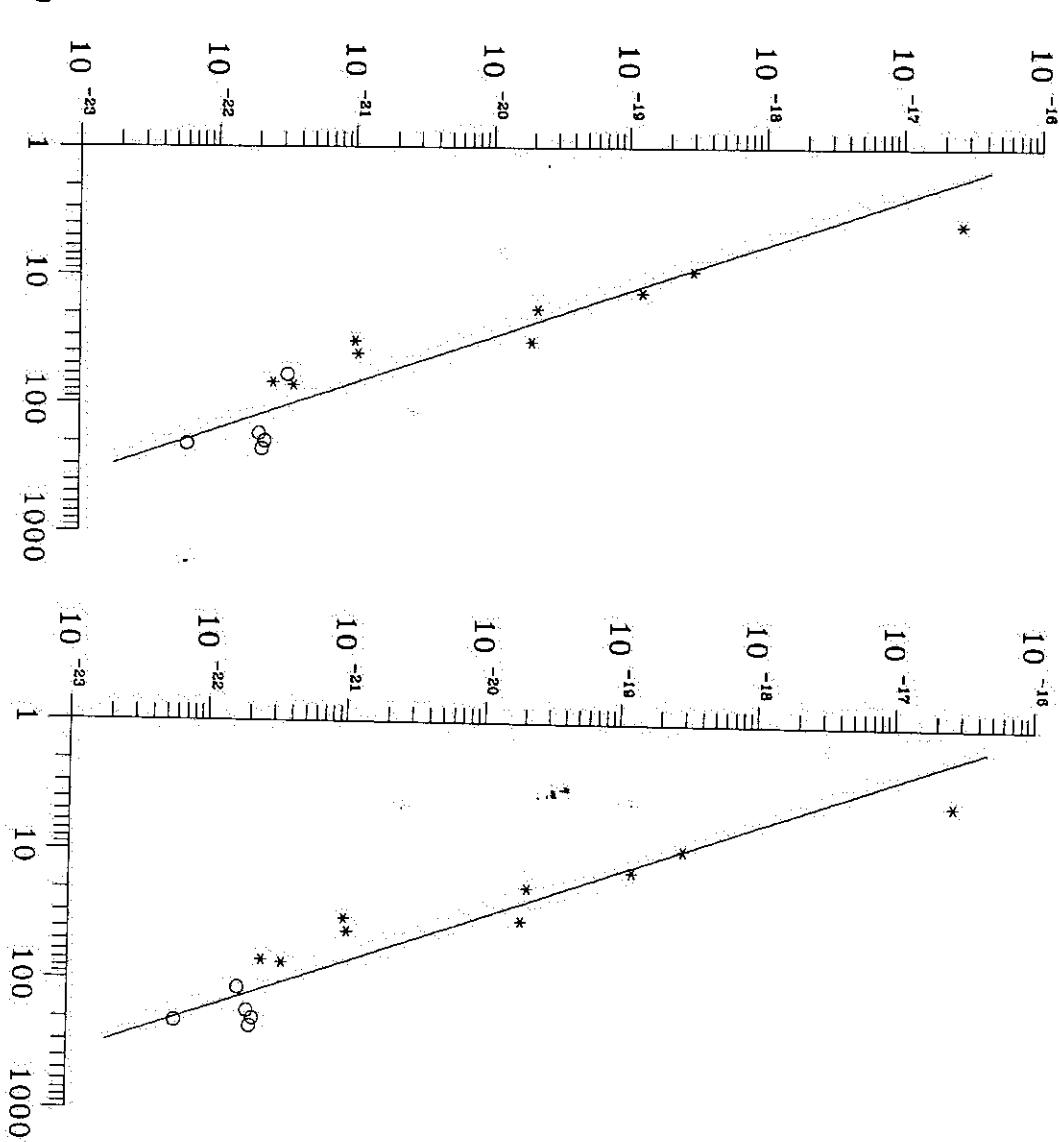
Test $\Sigma - D$ relacije Gebela sa saradnicima (Göbel et al. 1981) za 12 kalibratora grupi



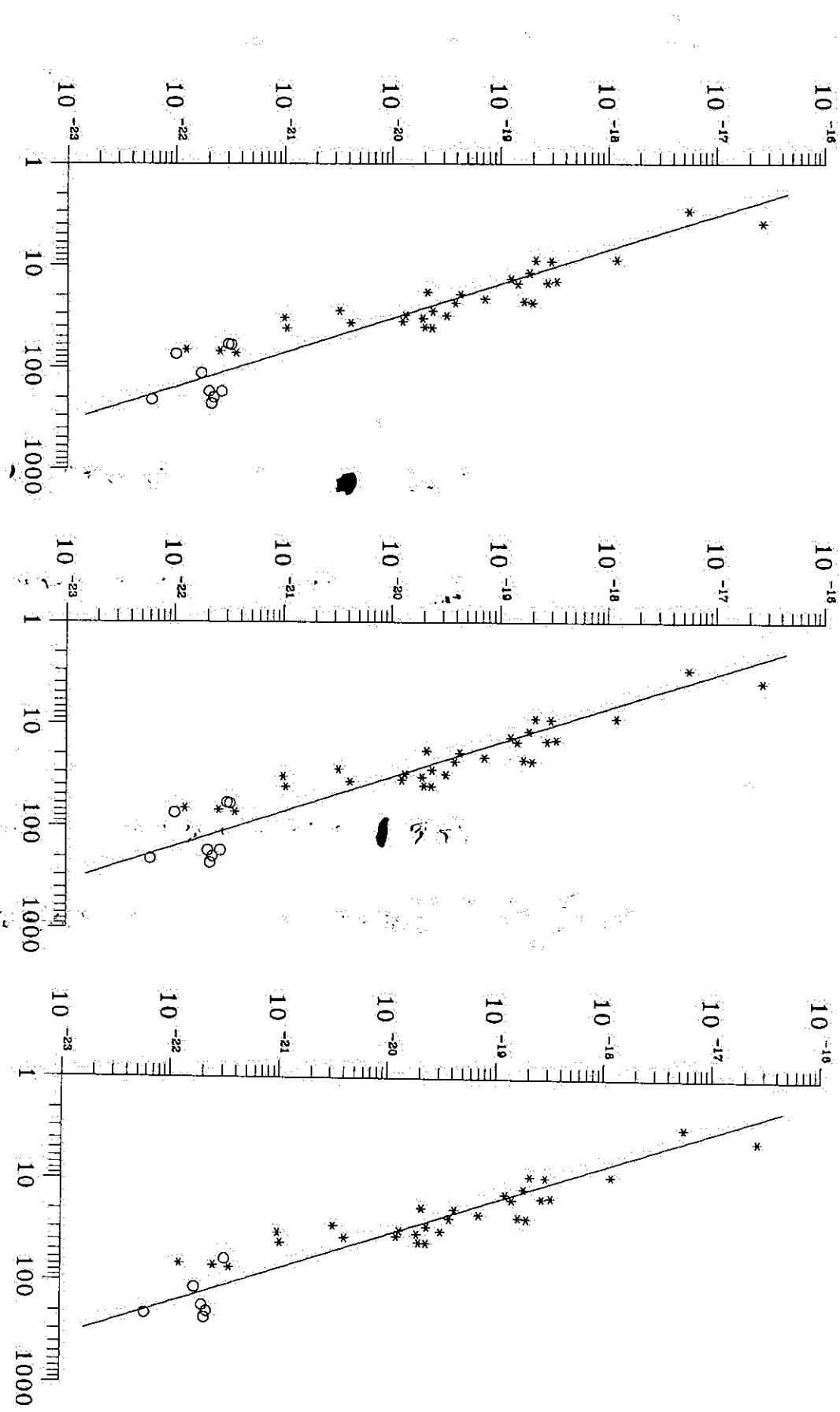


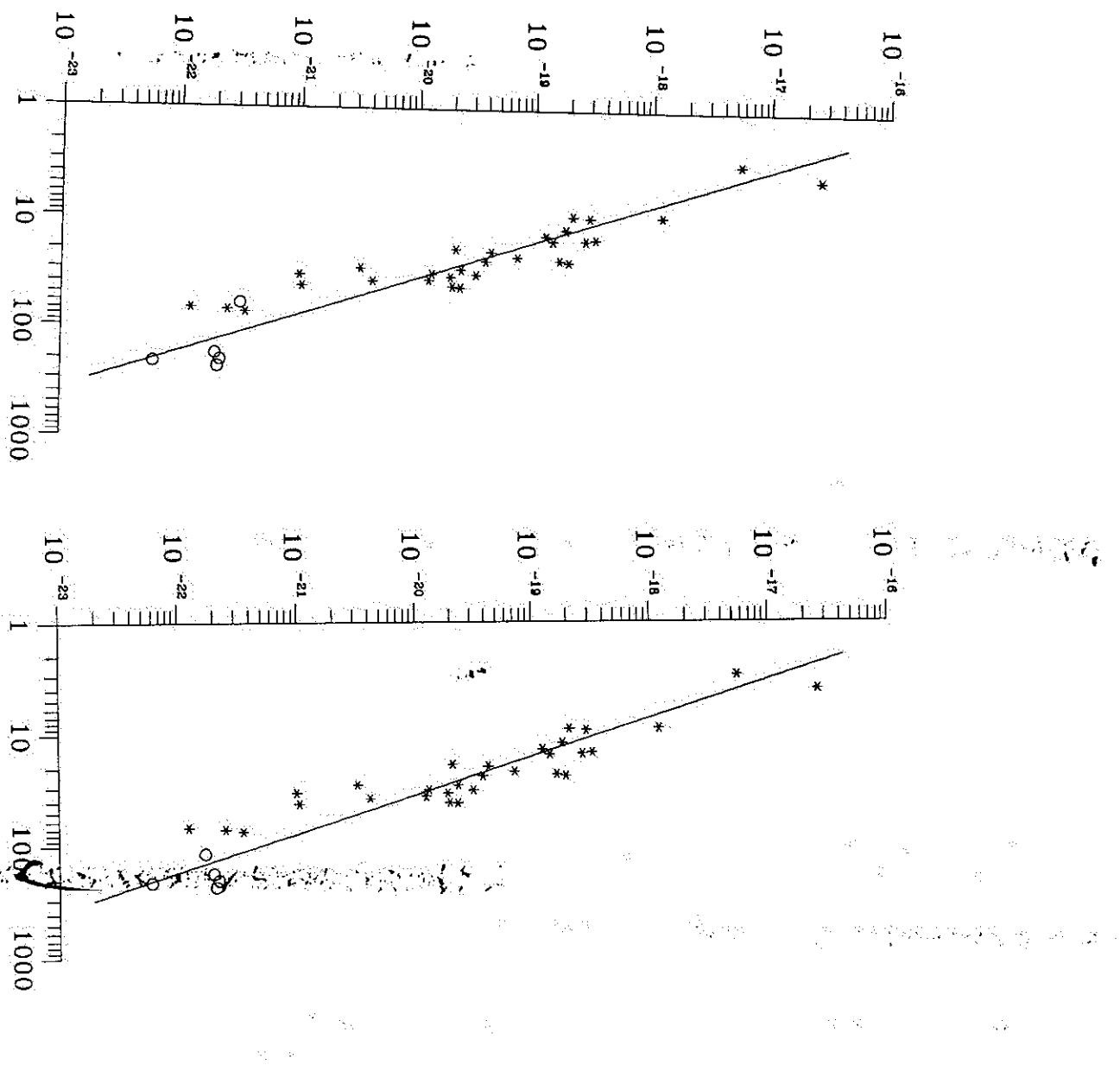
Test $\Sigma - D$ relacije Gebela sa saradnicima (Göbel et al. 1981) za 9 kalibratora grupa



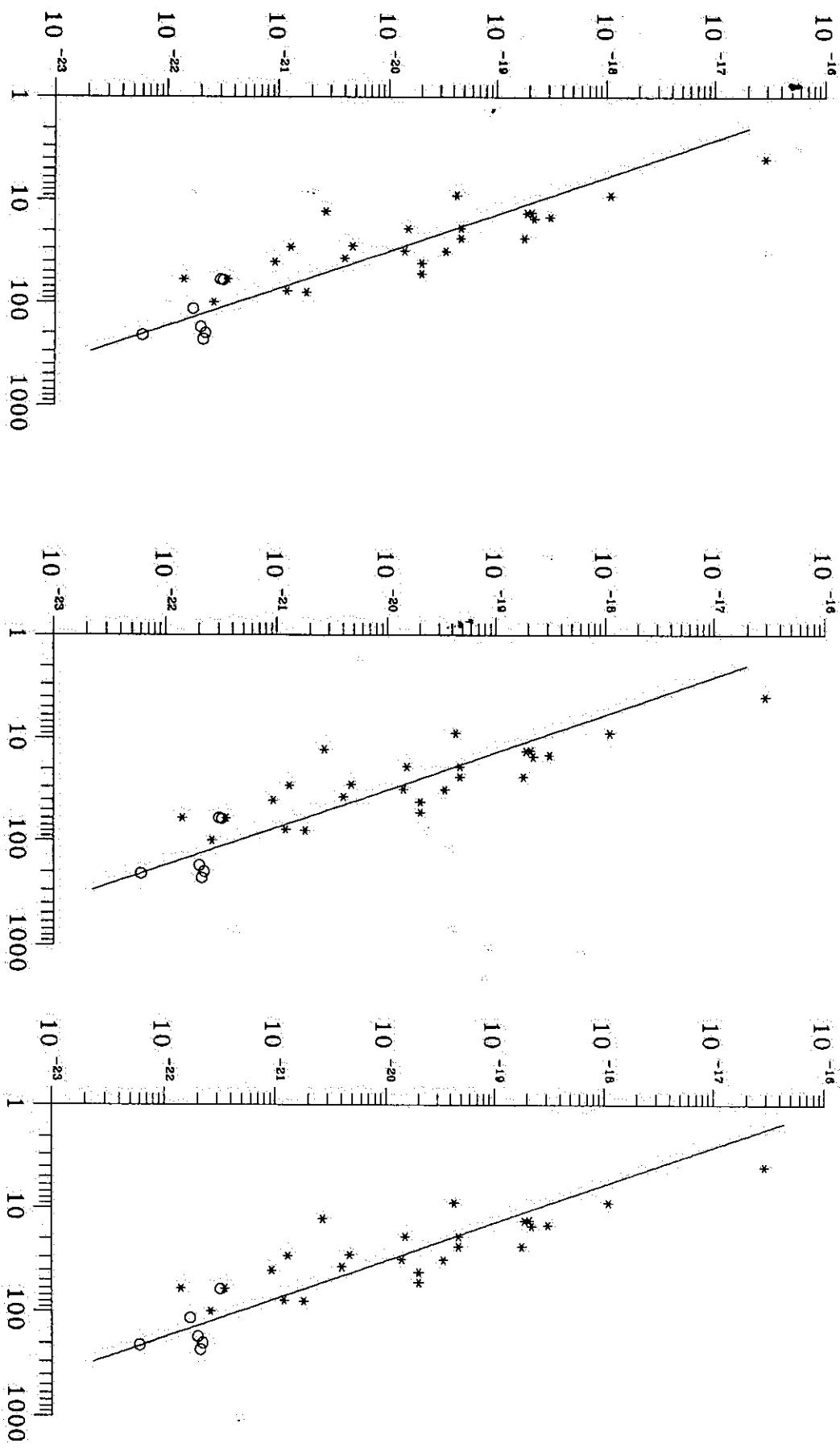


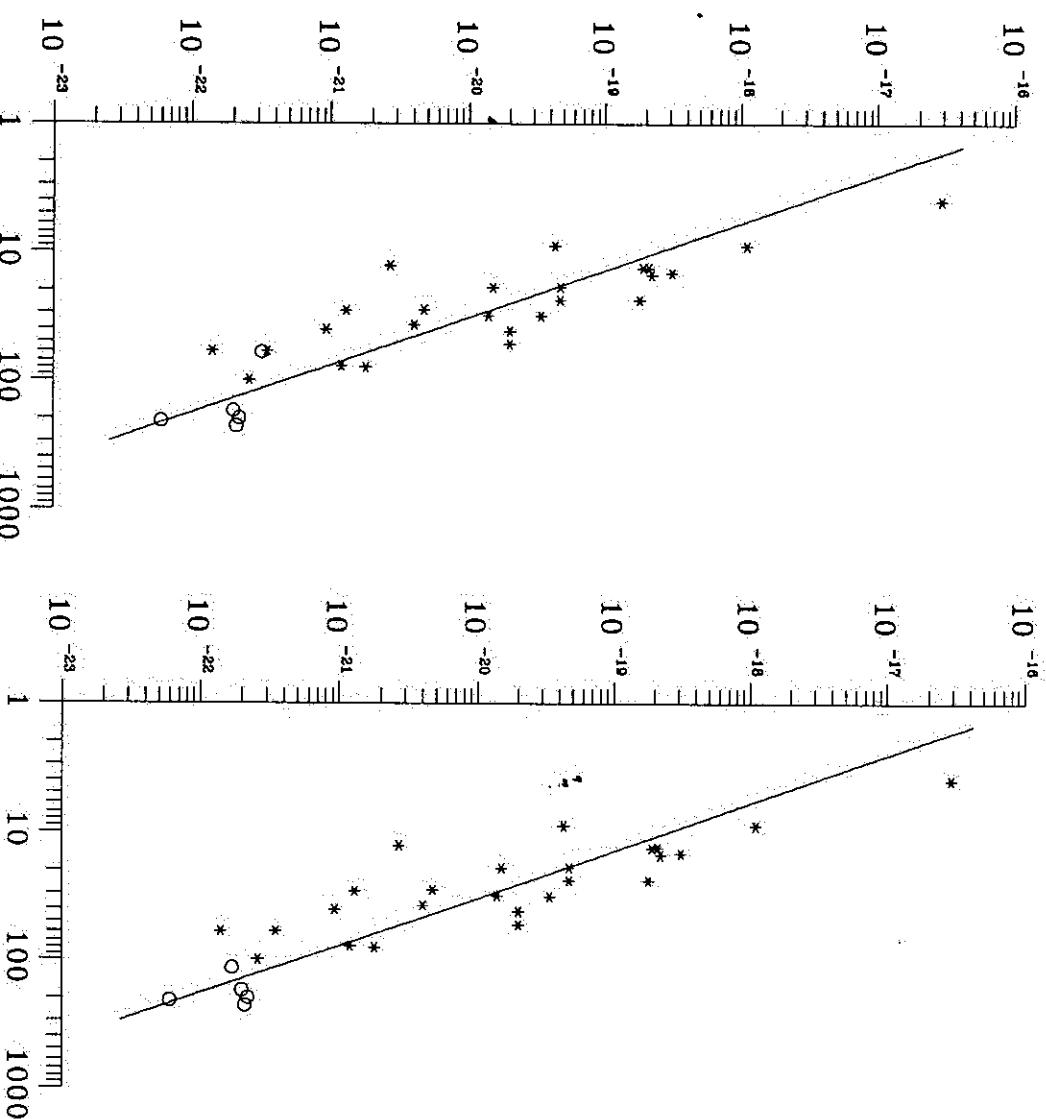
Test $\Sigma - D$ relacije Gebela sa saradnicima (Göbel et al. 1981) za svih 30 kalibr.



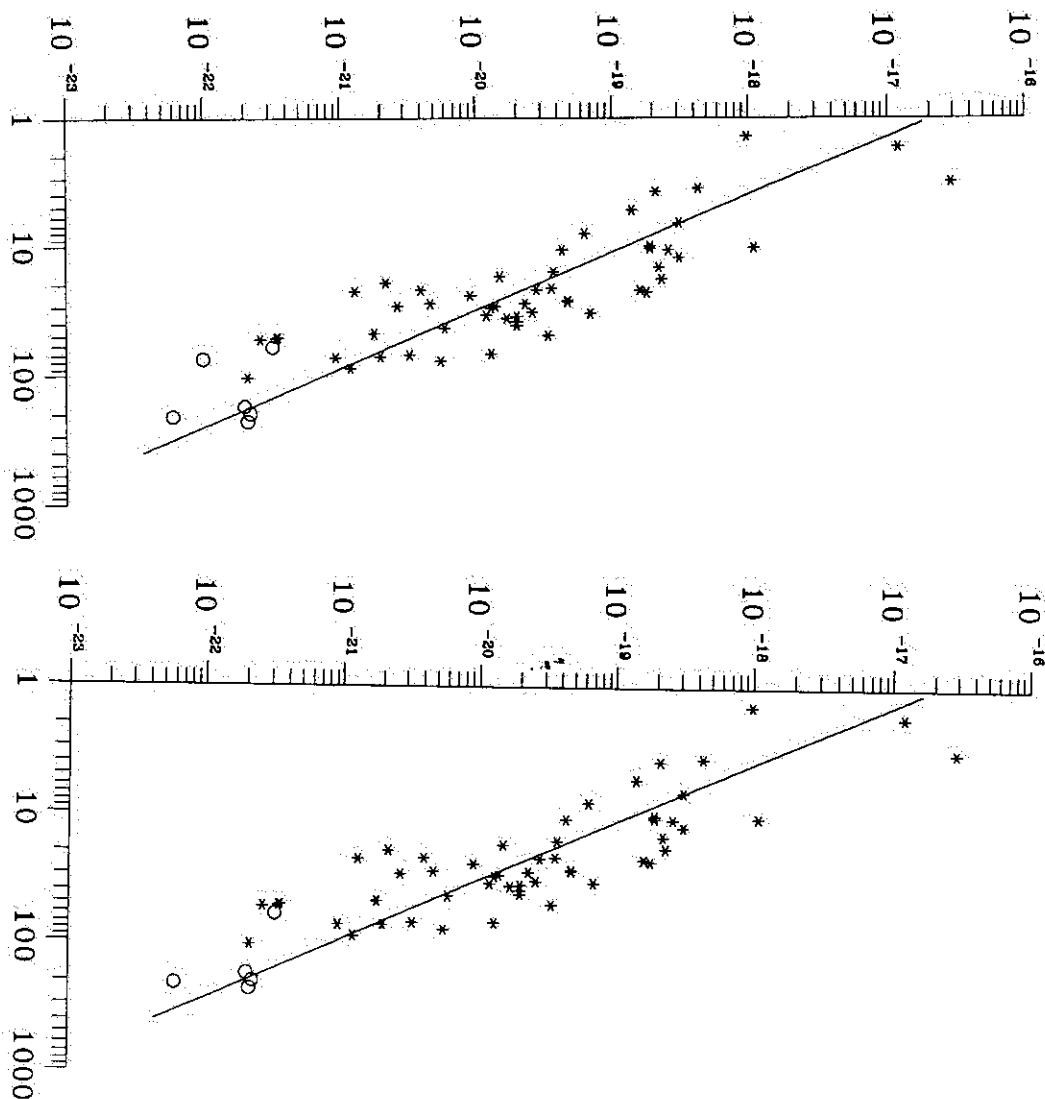


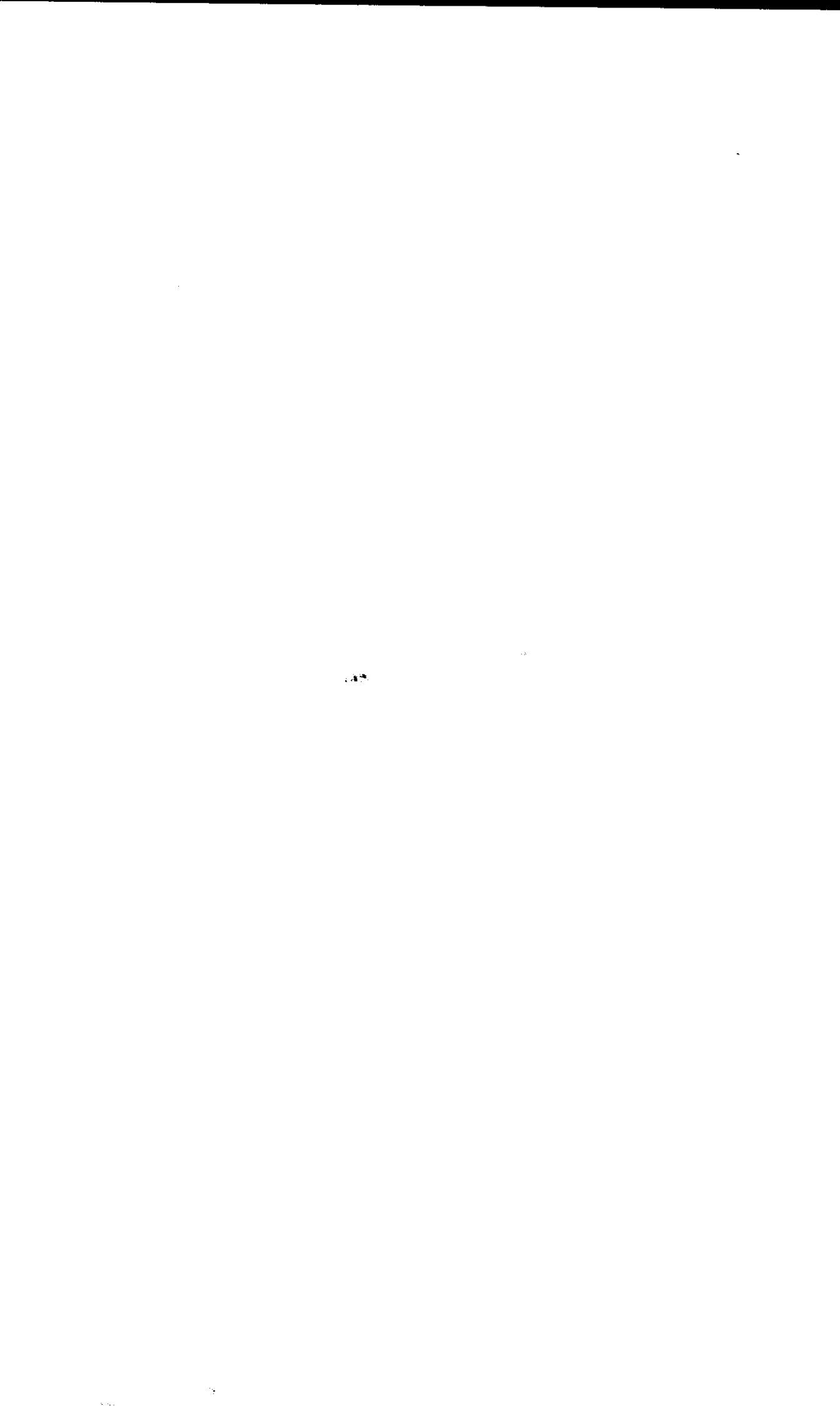
Test $\Sigma - D$ relacije Lozinske (Lozinskaya, 1981)



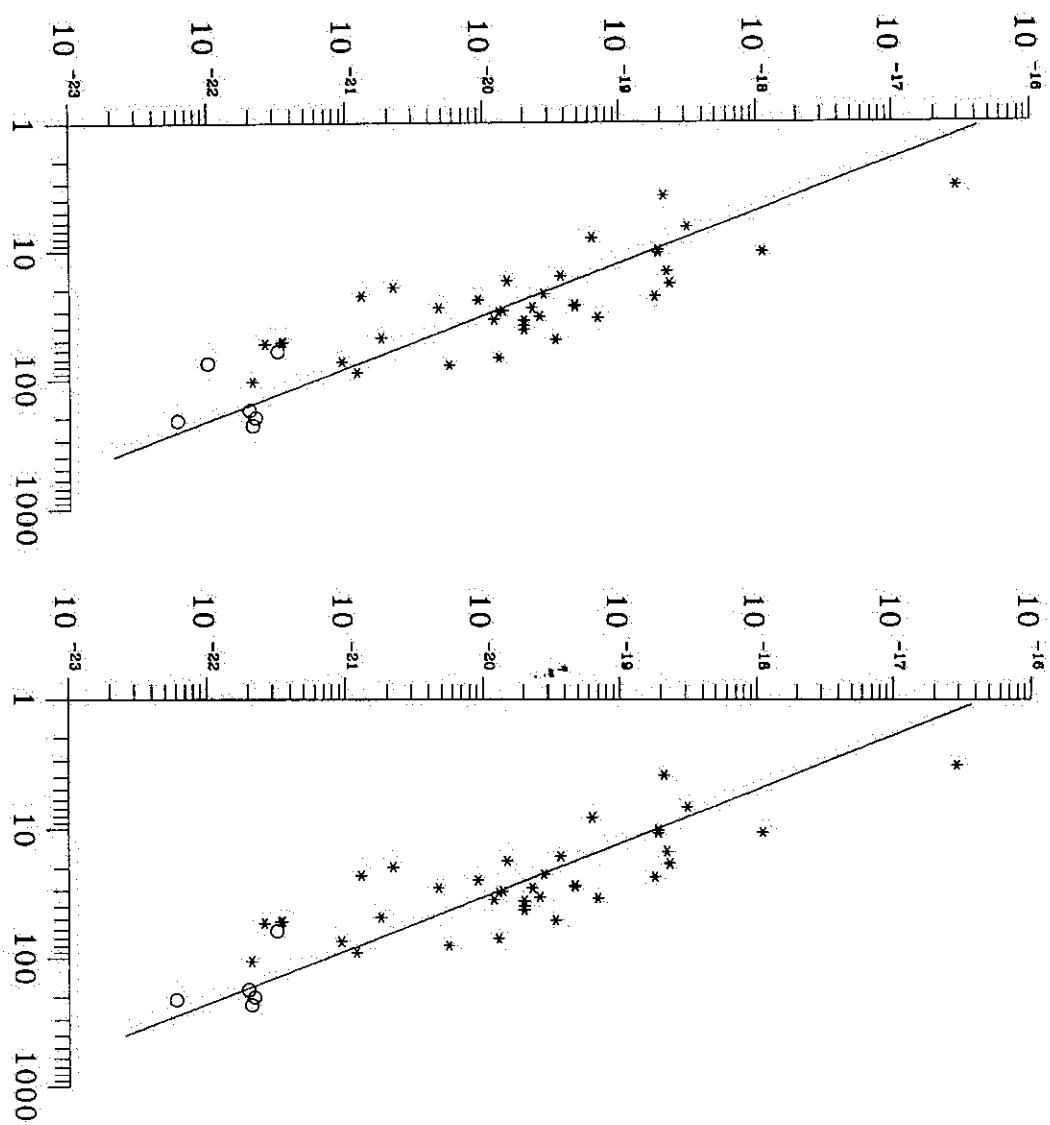


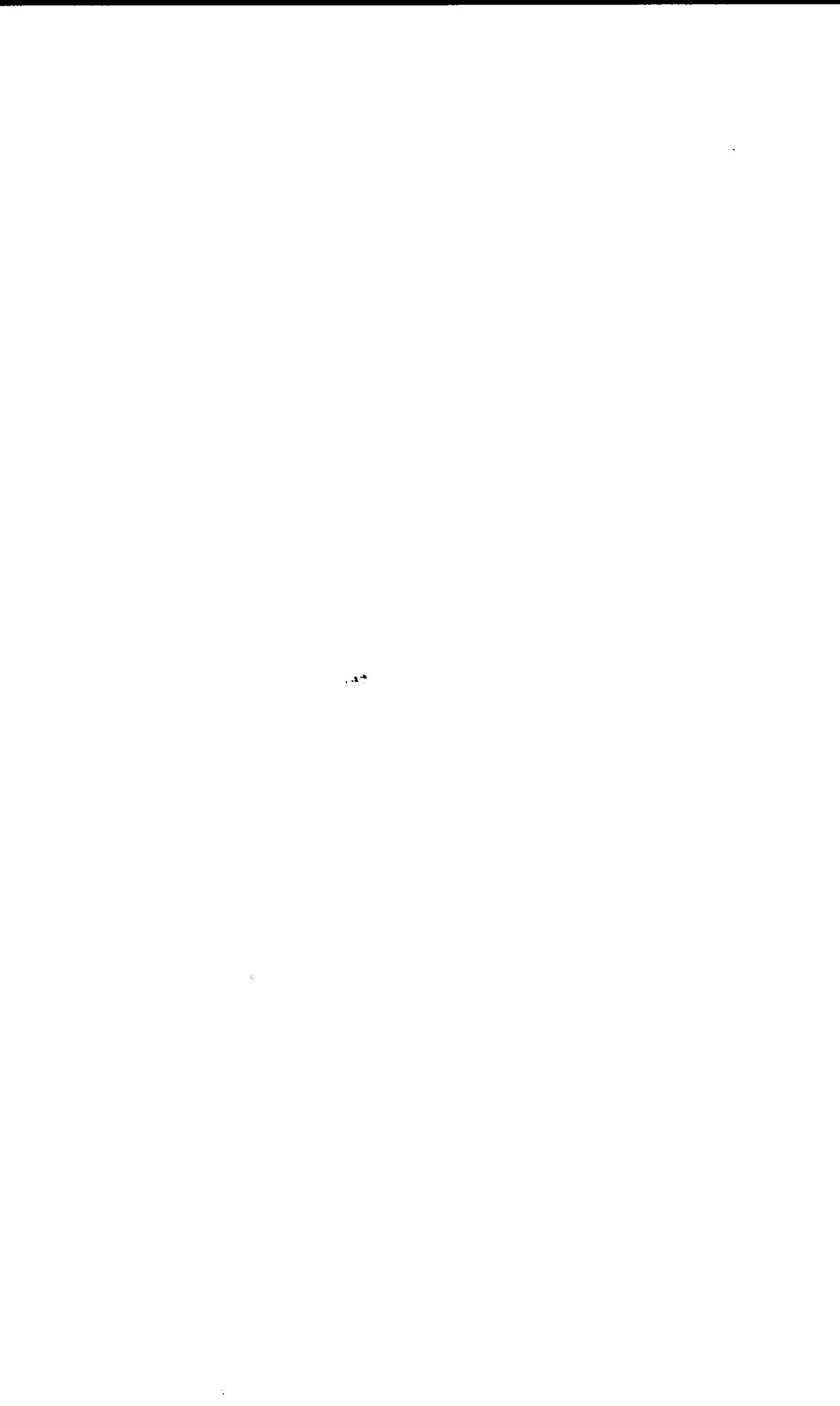
Test $\Sigma - D$ relacije Sakhibova i Smirnova (Sakhibov & Smirnov, 1982) za 53 kalibra



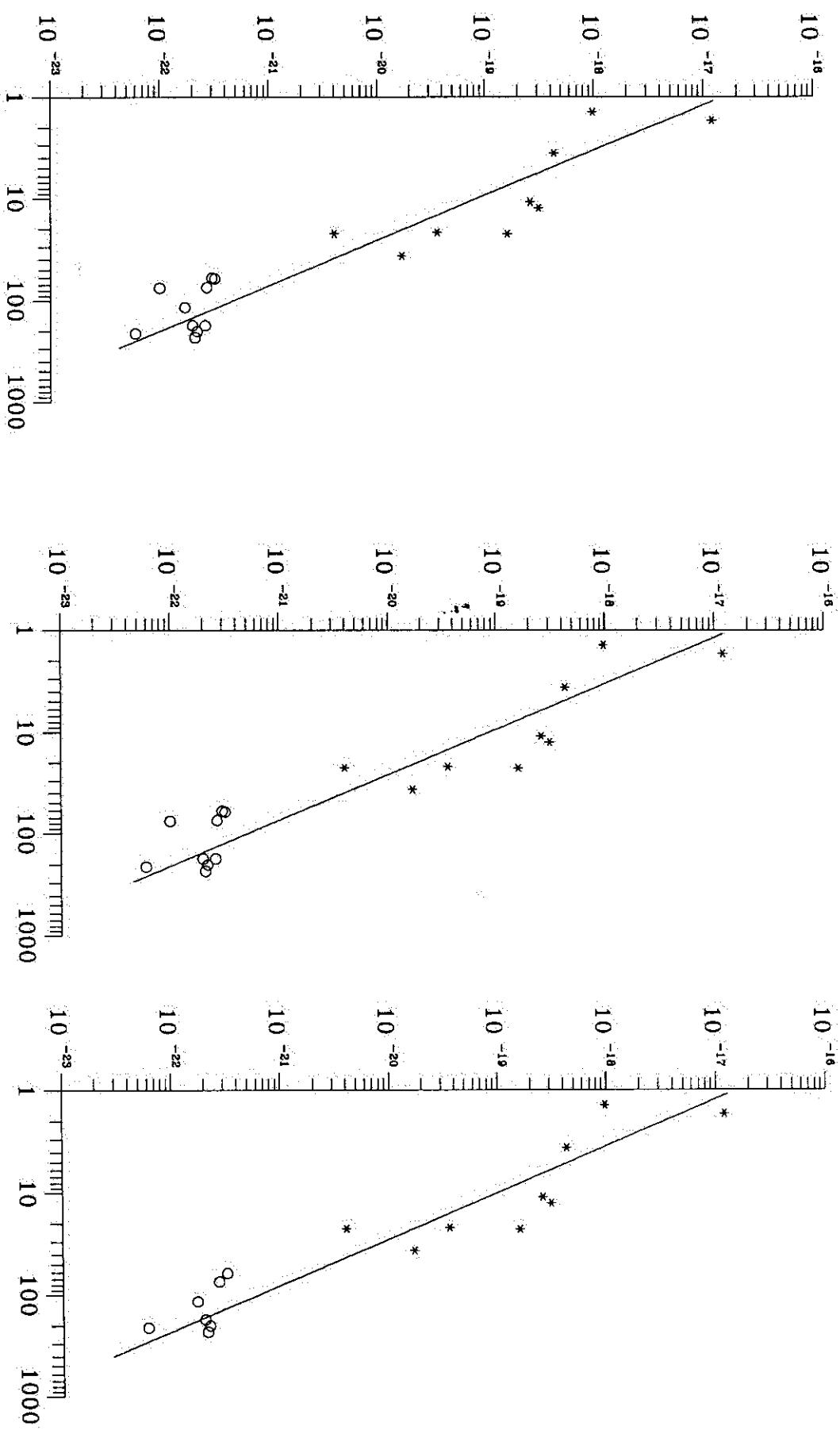


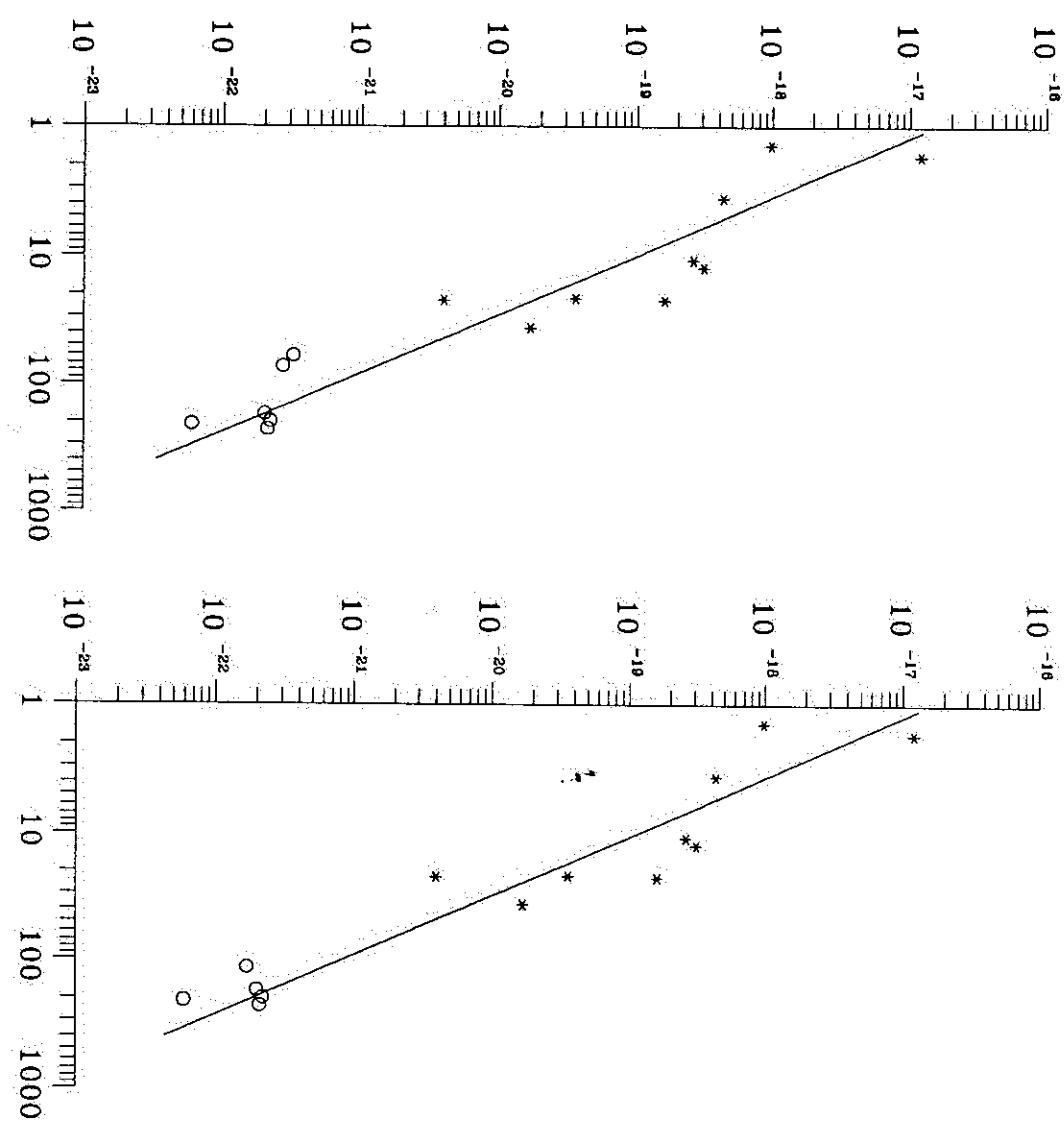
Test $\Sigma - D$ relacije Sakhibova i Smirnova (Sakhibov & Smirnov, 1982) za ljuskaste os



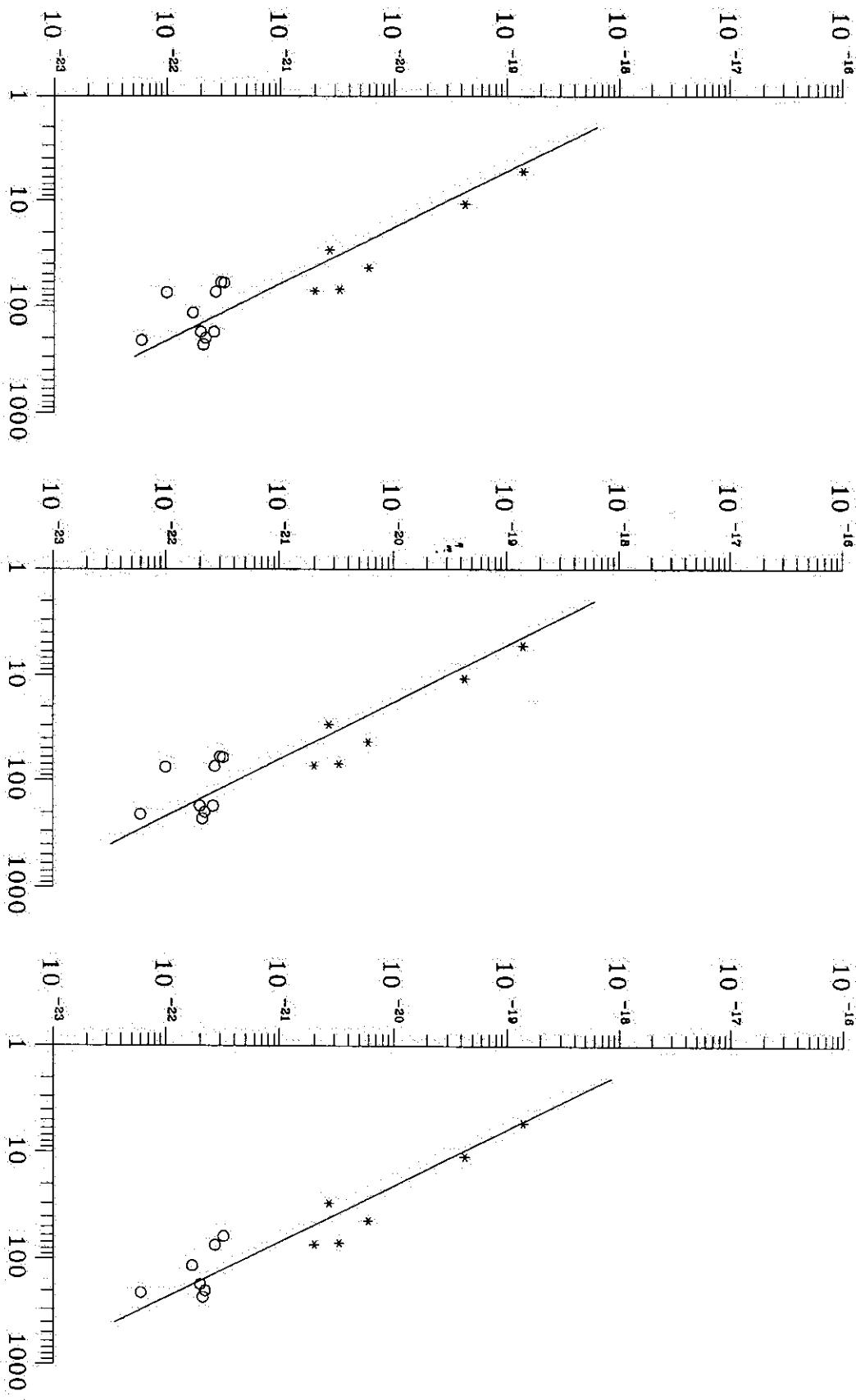


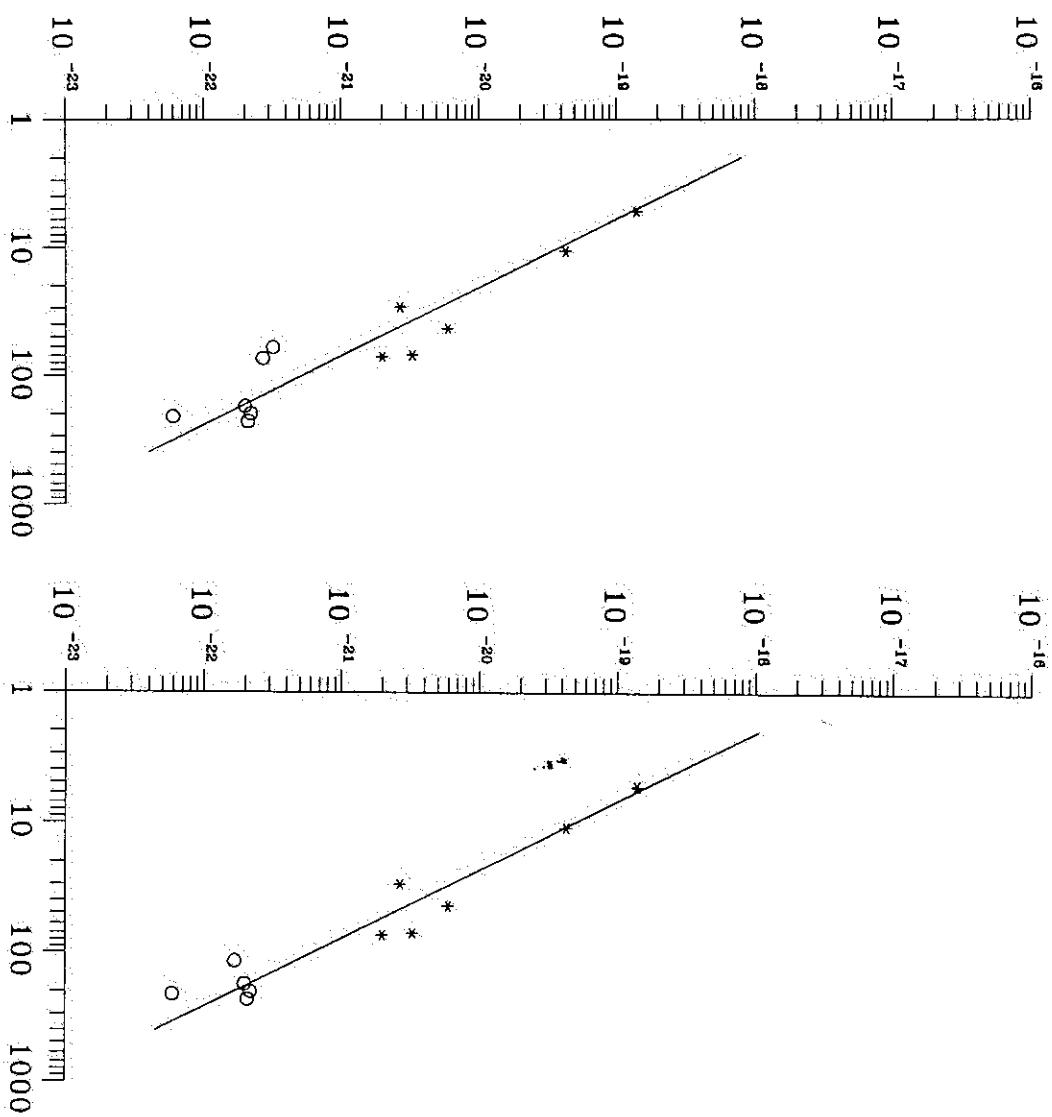
Test $\Sigma - D$ relacije Sakhibova i Smirnova (Sakhibov & Smirnov, 1982) za 9 plerion



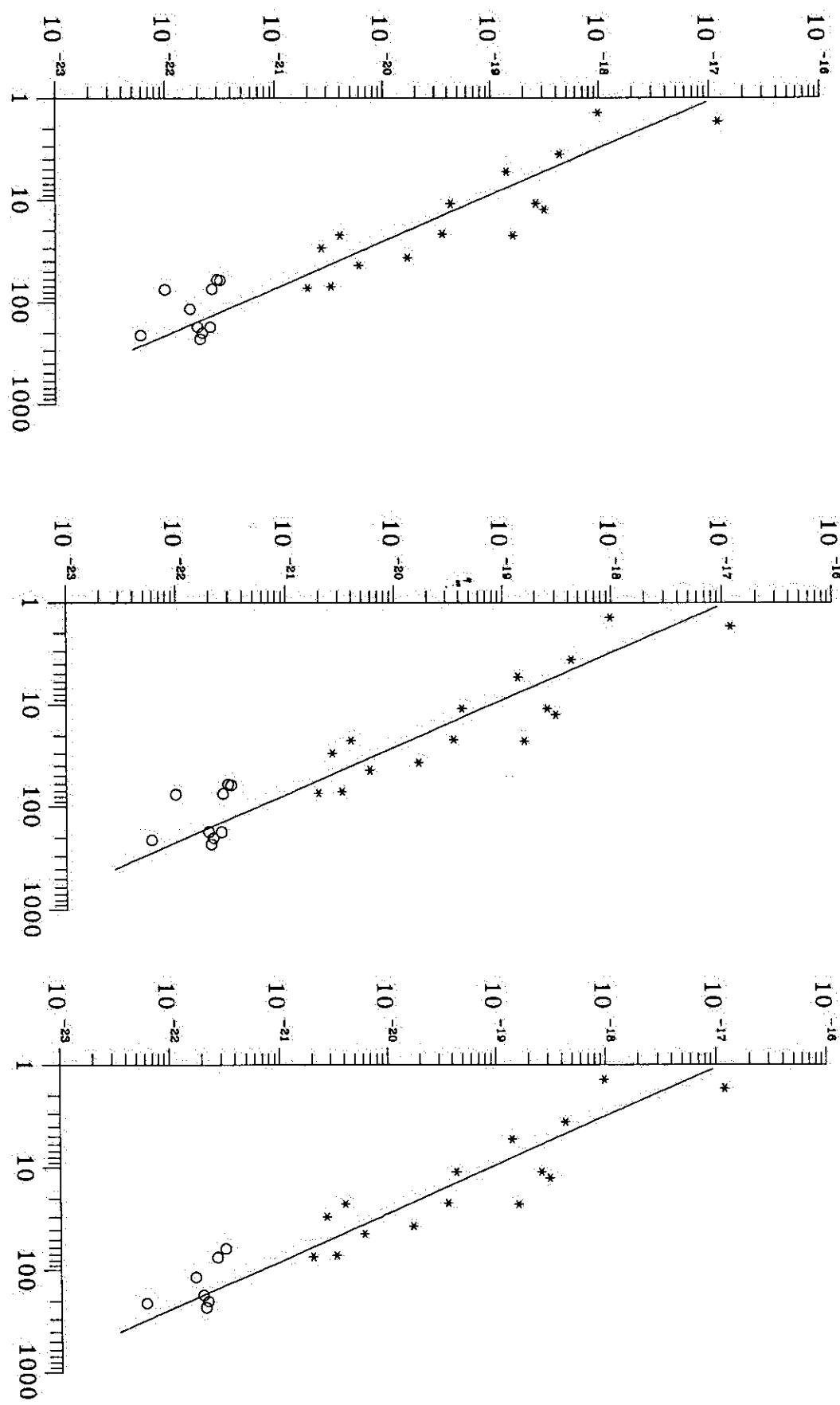


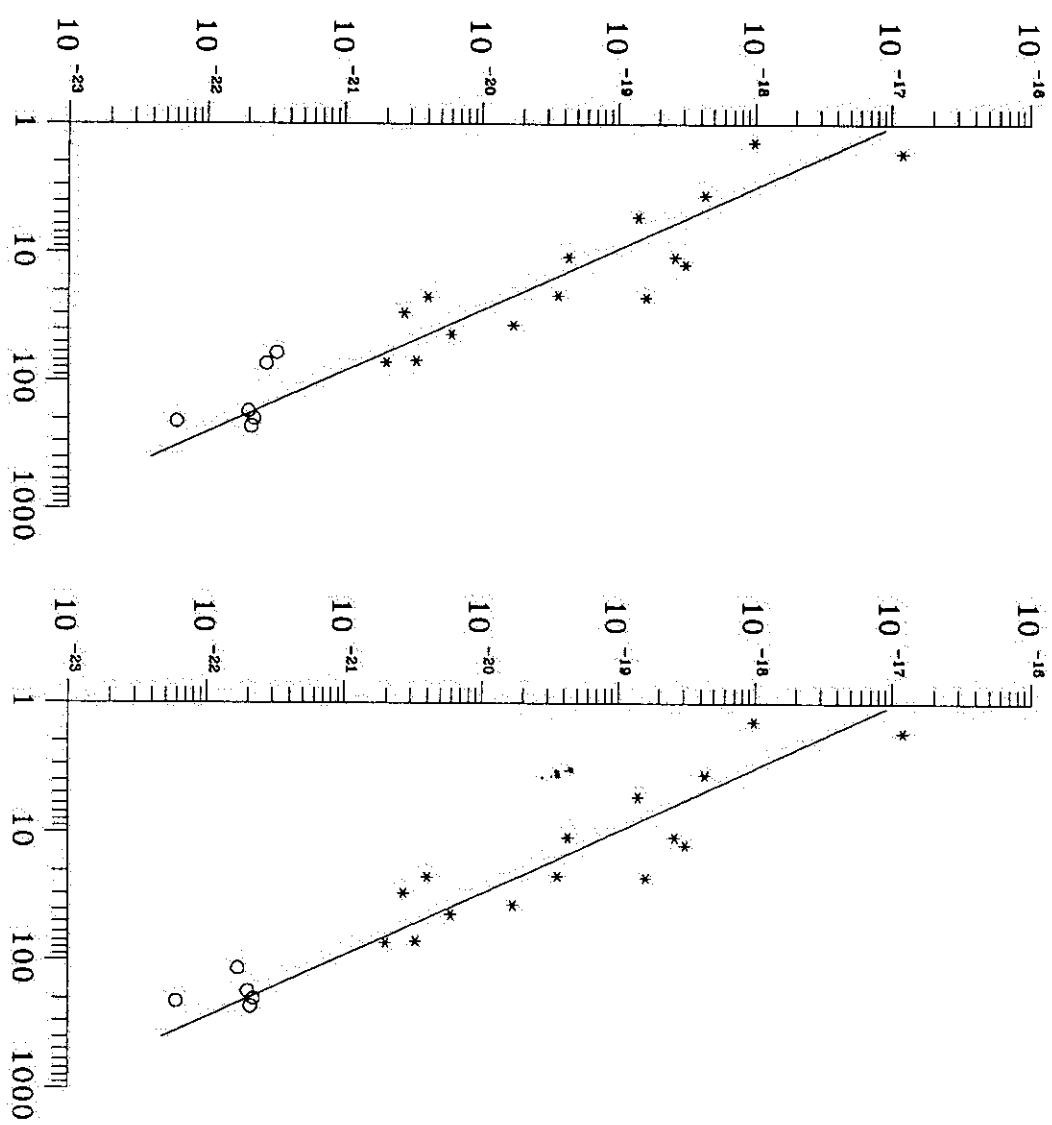
Test $\Sigma - D$ relacije Sakhibova i Smirnova (Sakhibov & Smirnov, 1982) za
6 ljudskastih ostataka sa centralnim izvorom



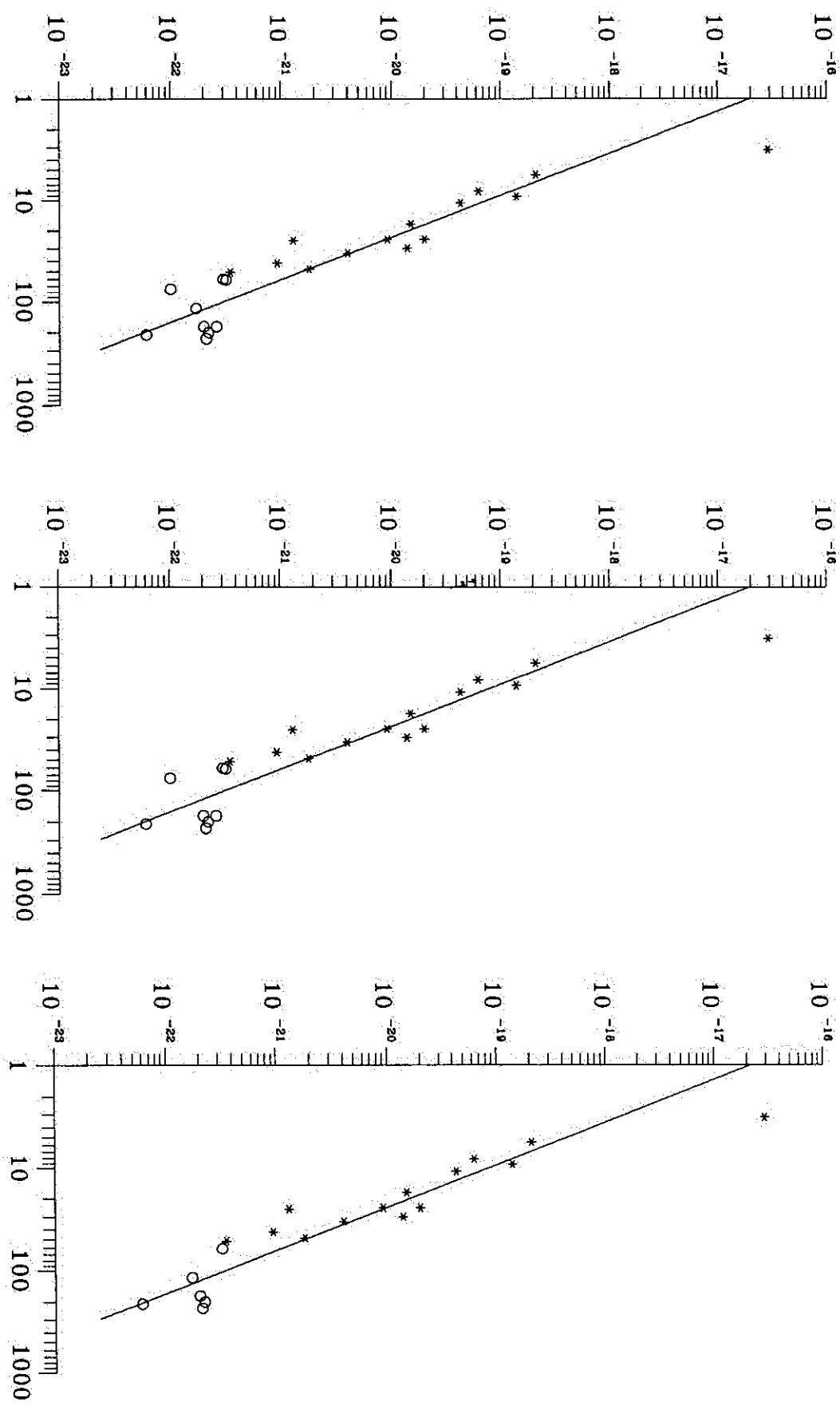


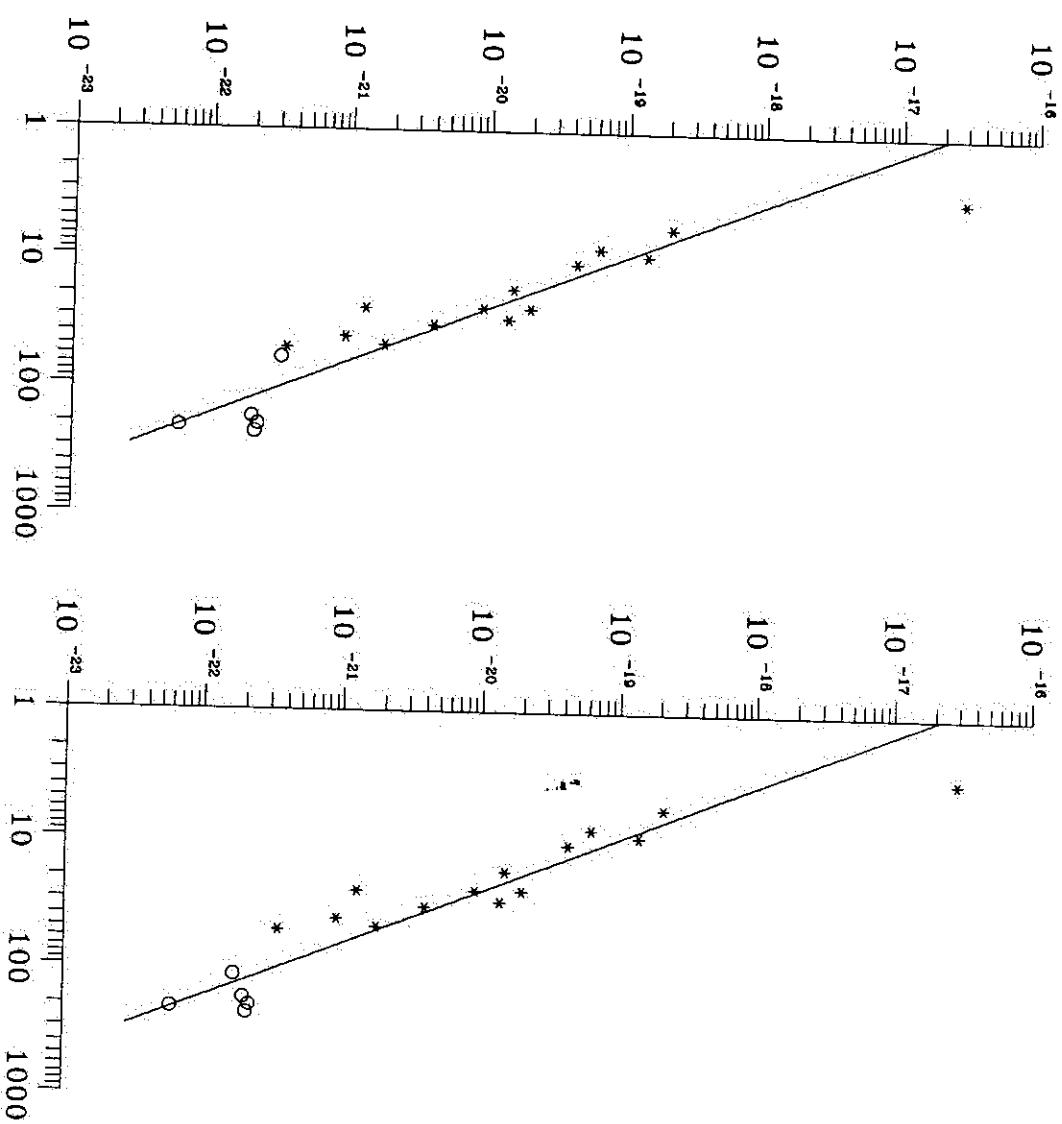
Test $\Sigma - D$ relacije Sakhibova i Smirnova (Sakhibov & Smirnov, 1982) za plerione i ljuskaste ostatke sa centralnim izvorom



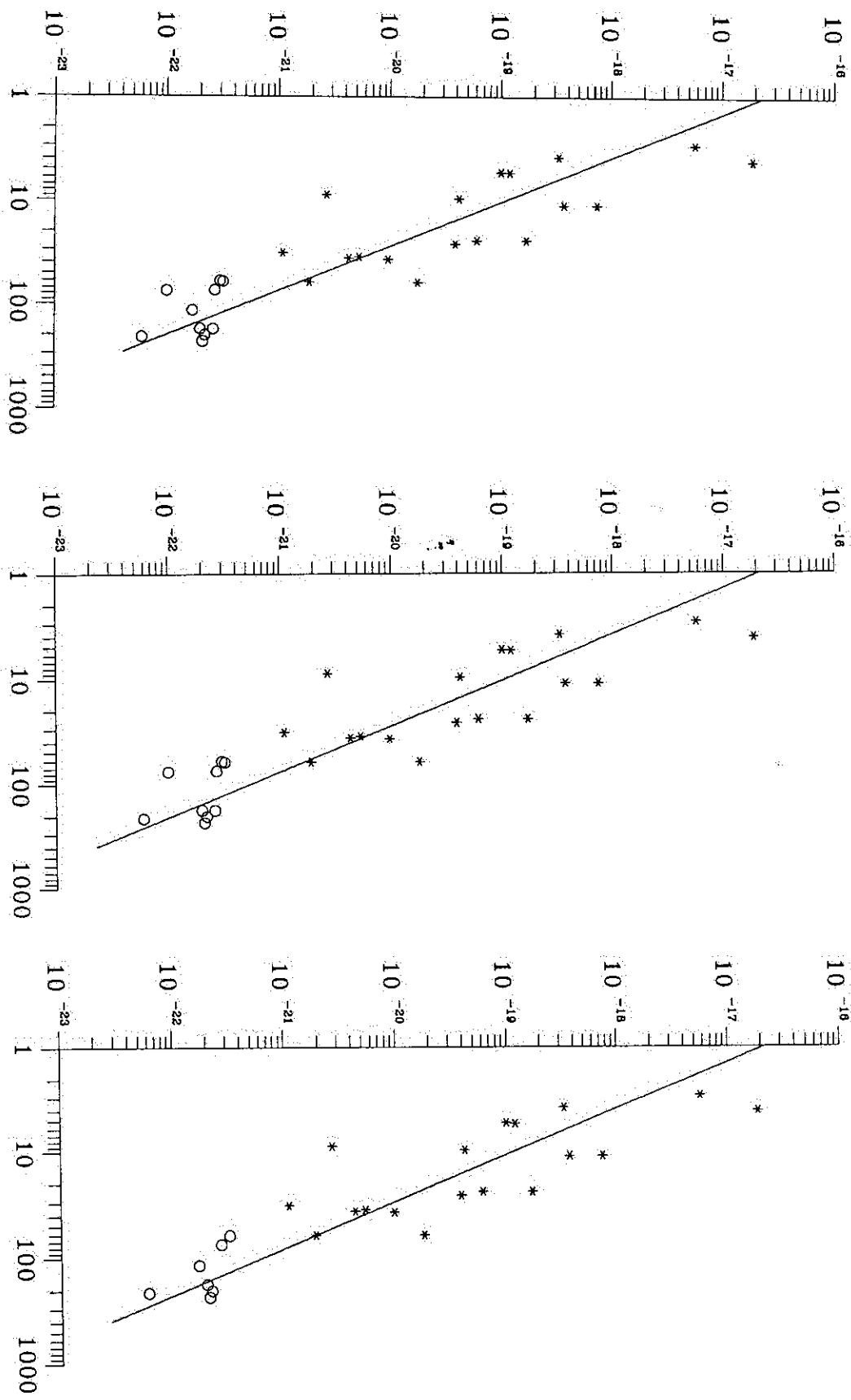


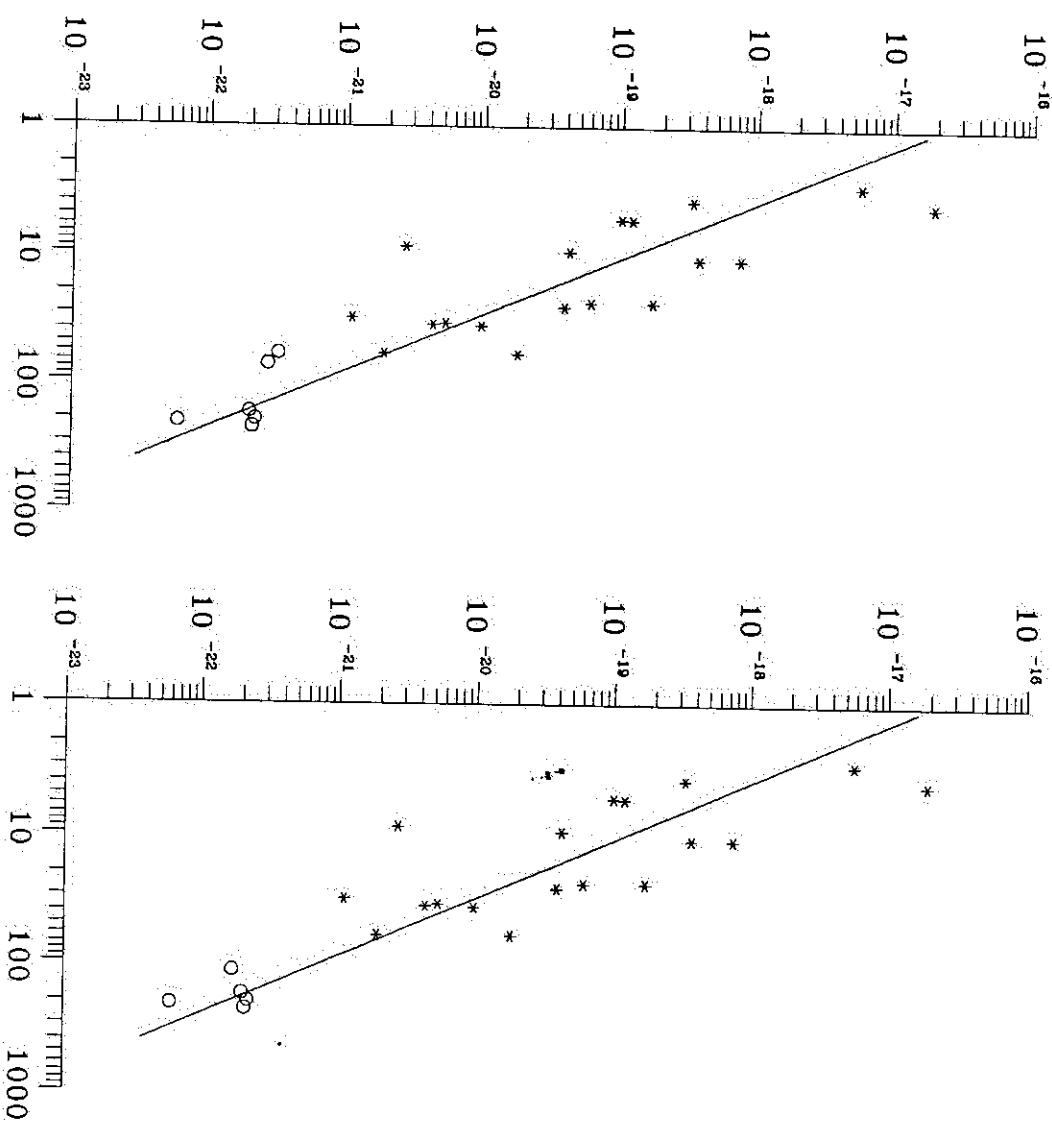
Test $\Sigma - D$ relacije Alahverdijeva sa saradnicima (Allakhverdiyev et al. 1983) za
14 ljkuskastih ostataka



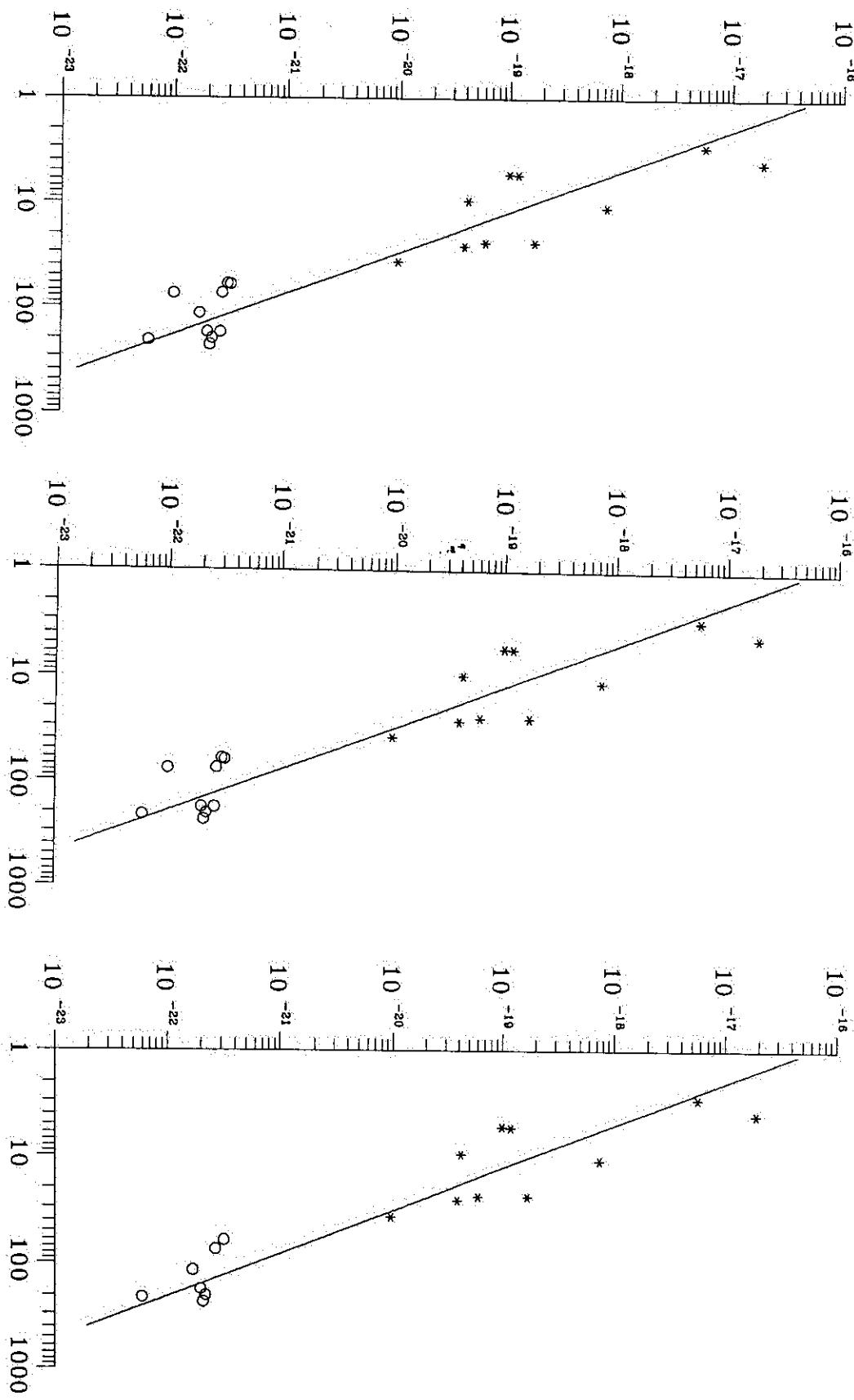


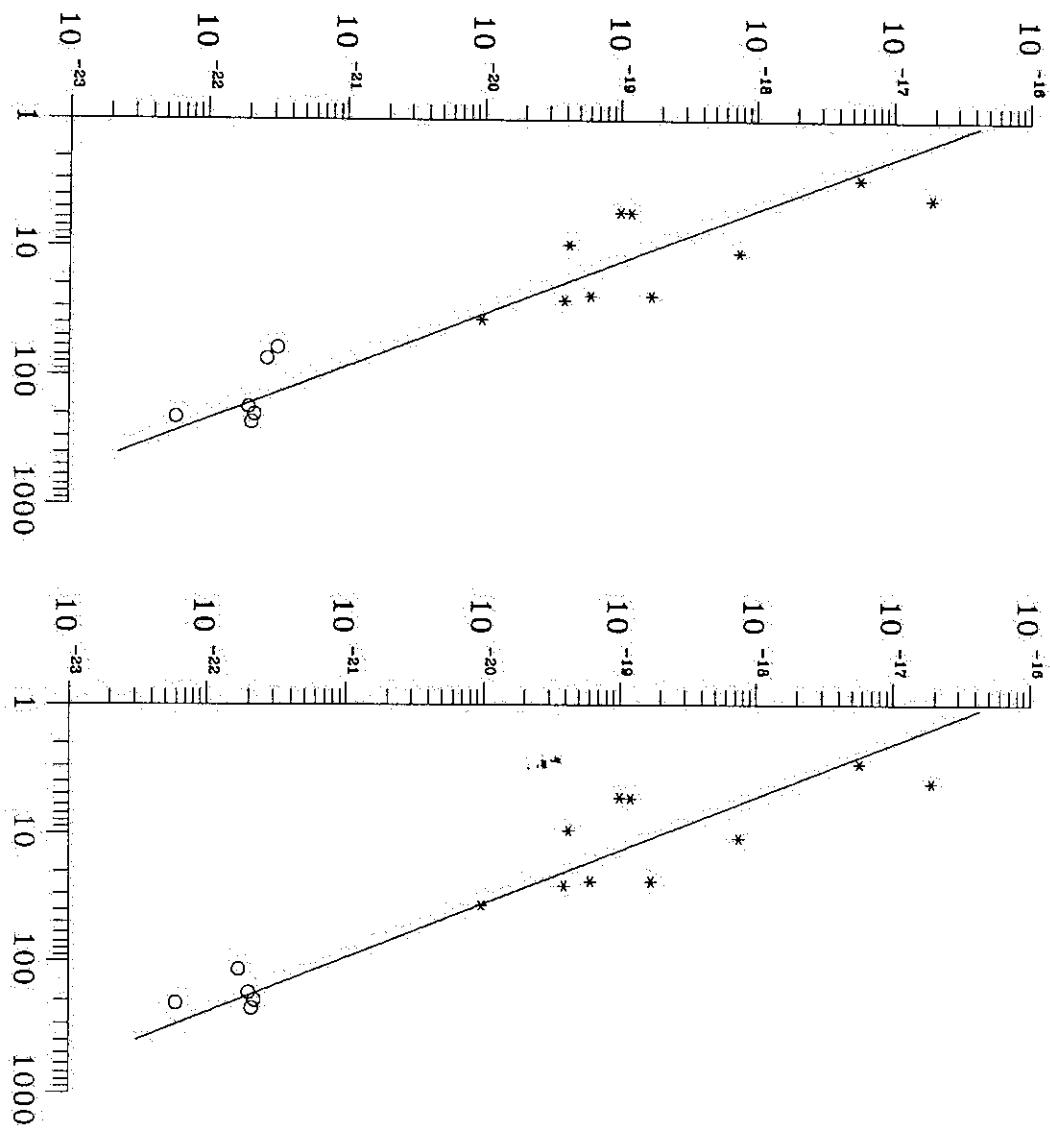
Test Grinove (Green, 1984) $\Sigma - D$ relacije za svih 18 kalibratora



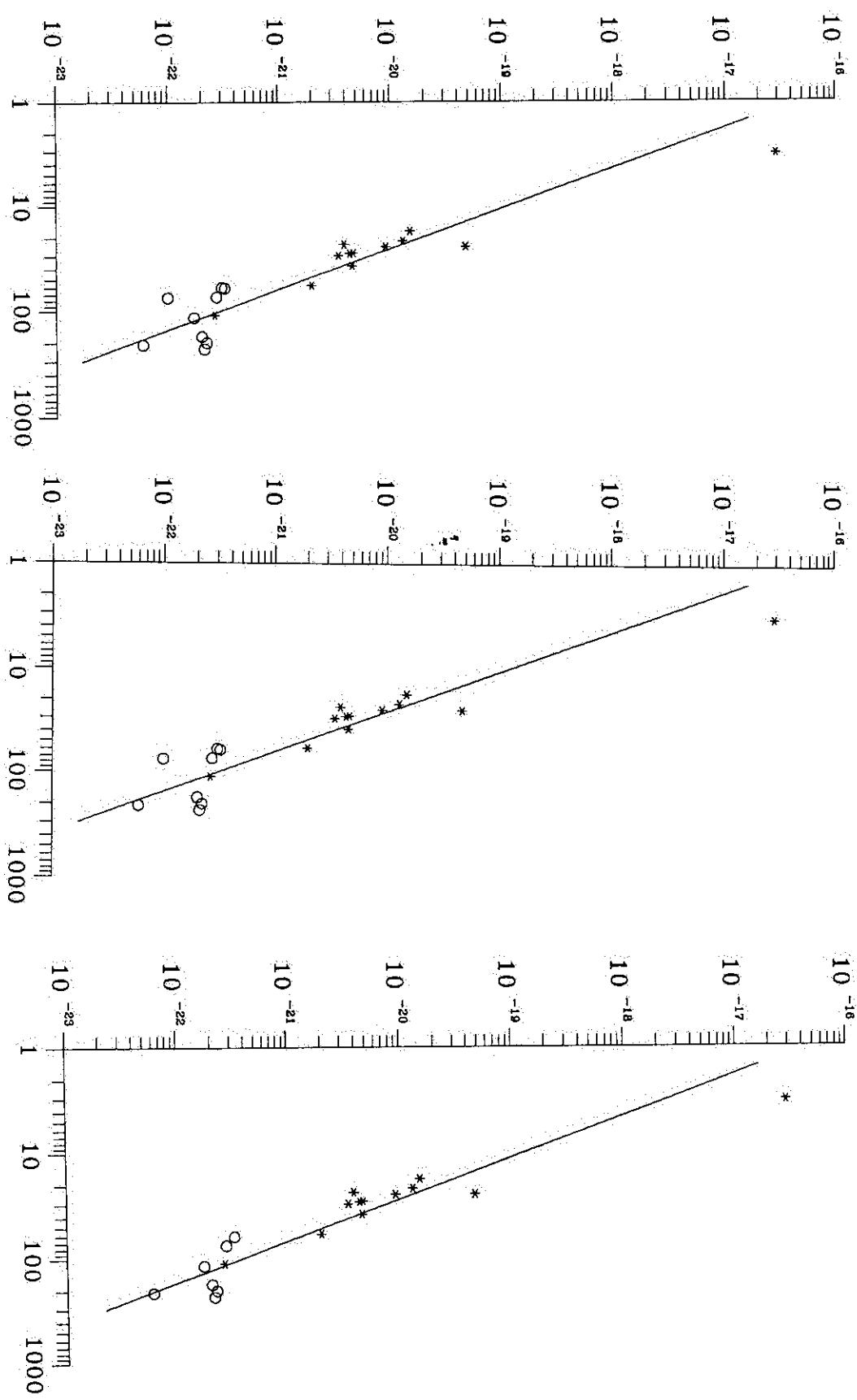


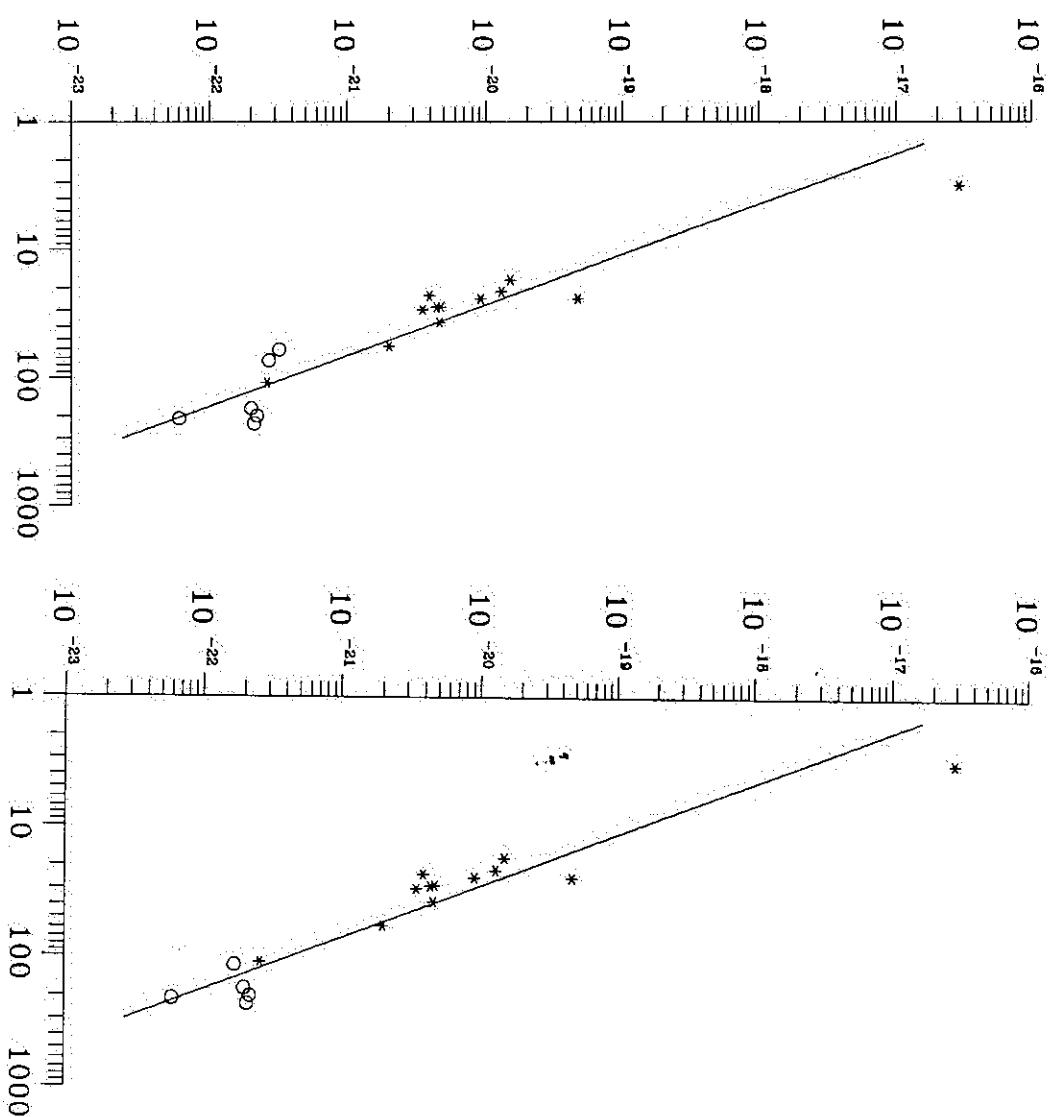
Test Grinove (Green, 1984) $\Sigma - D$ relacije za najboljih 10 kalibratora



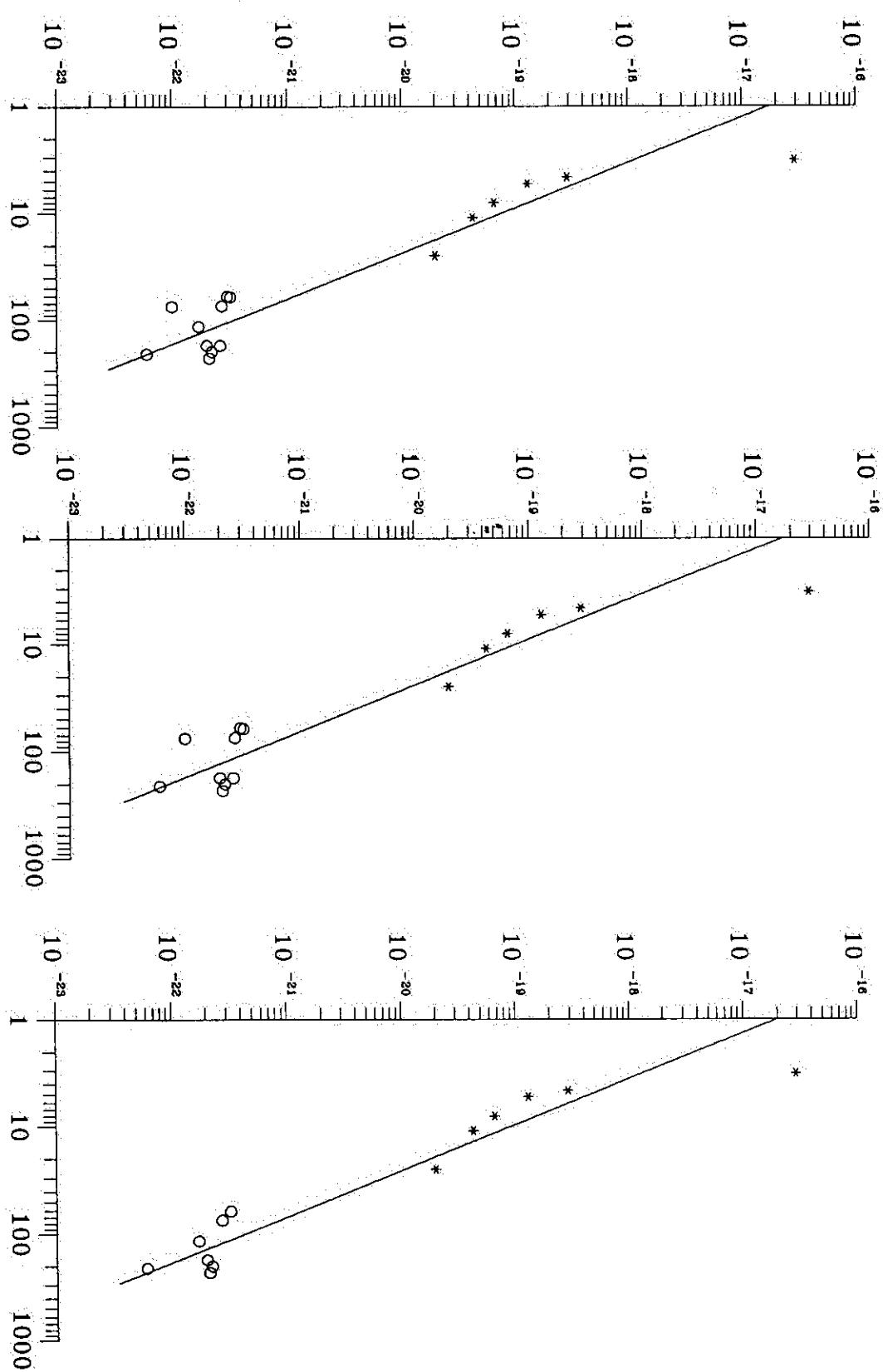


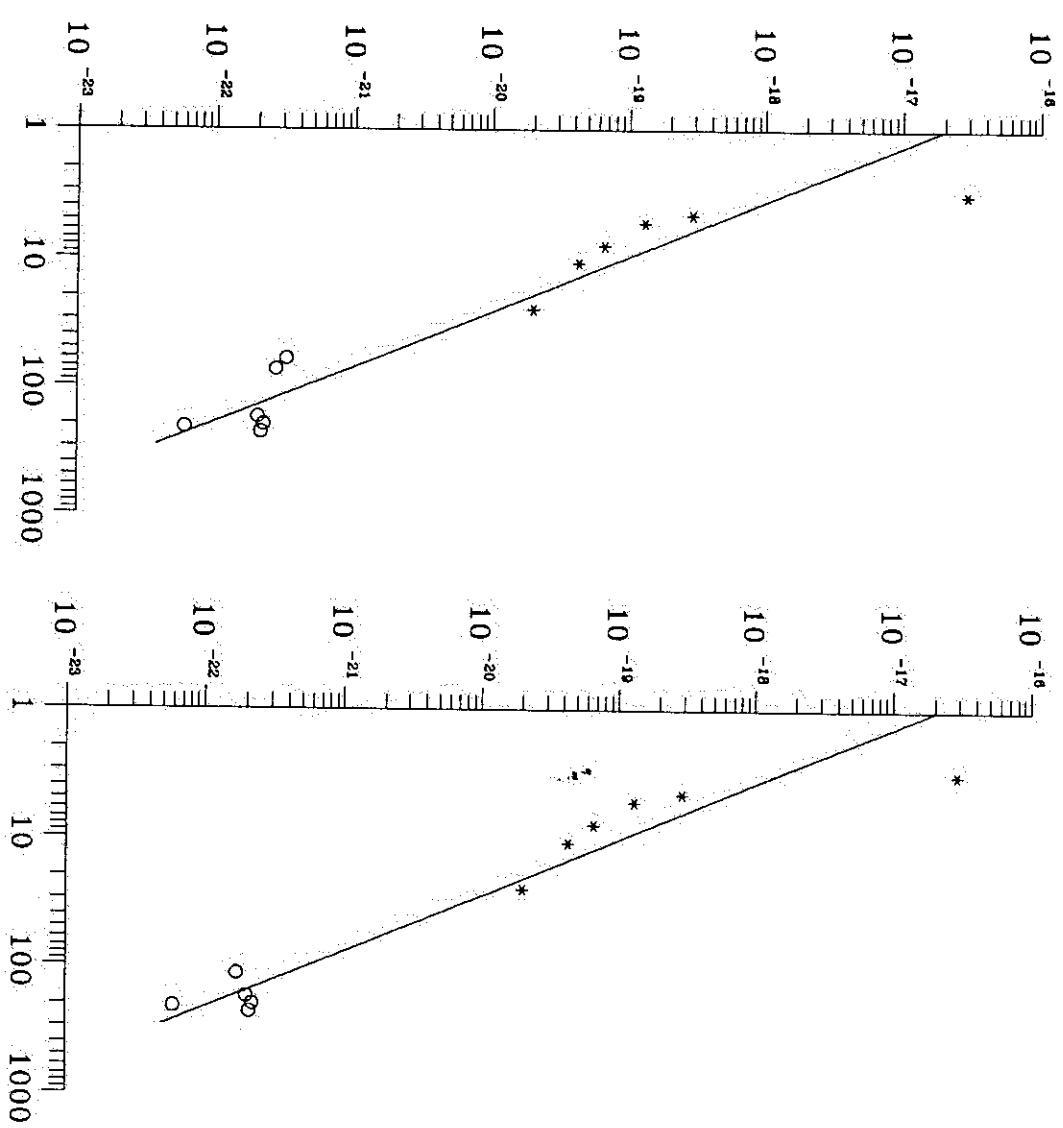
Test $\Sigma - D$ relacije Huanga i Tadeuša (Huang & Thaddeus, 1985)



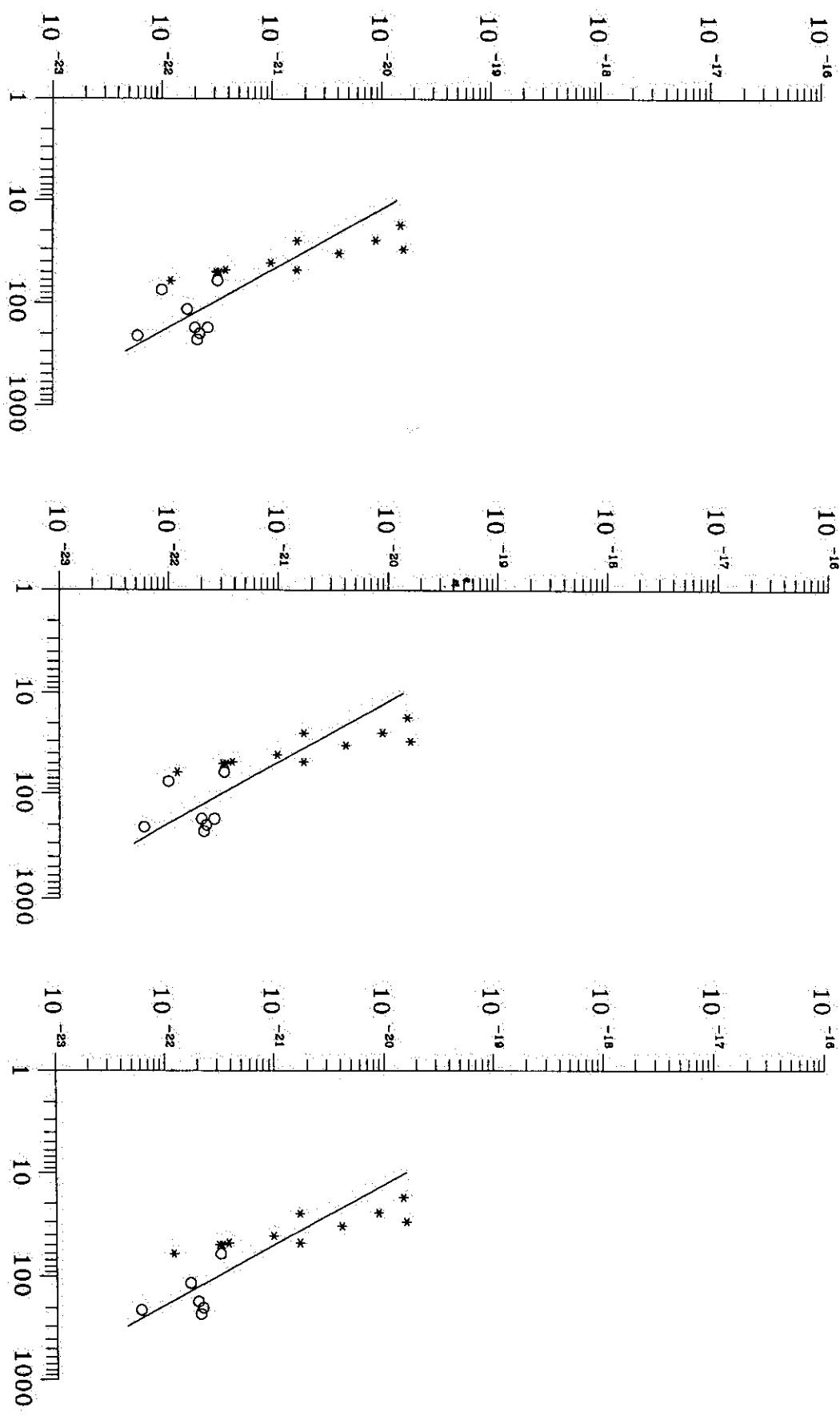


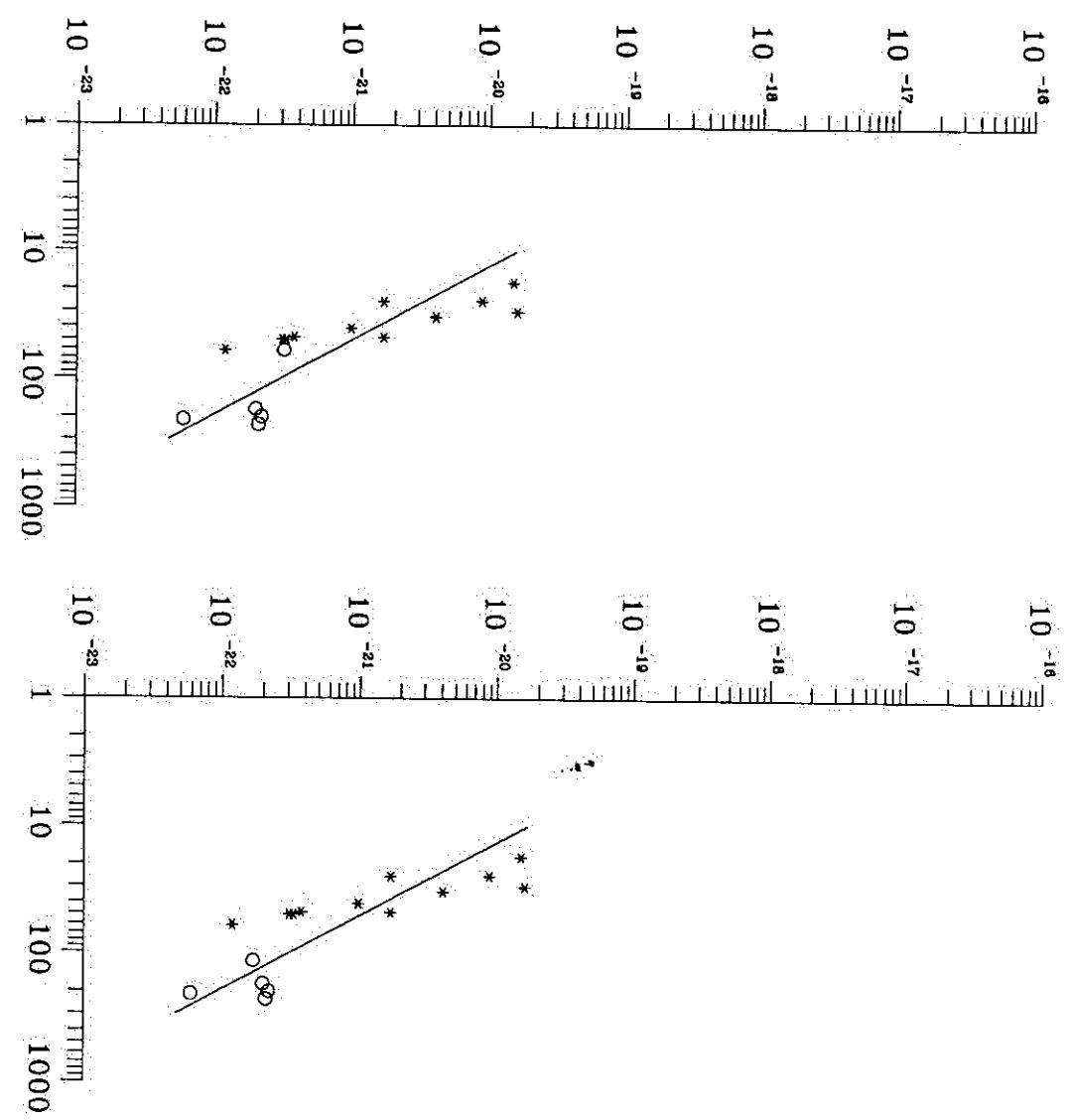
Test $\Sigma - D$ relacije Alahverdijeva sa saradnicima (Allakhverdiyev et al. 1986) za
ostatke većeg sjaja



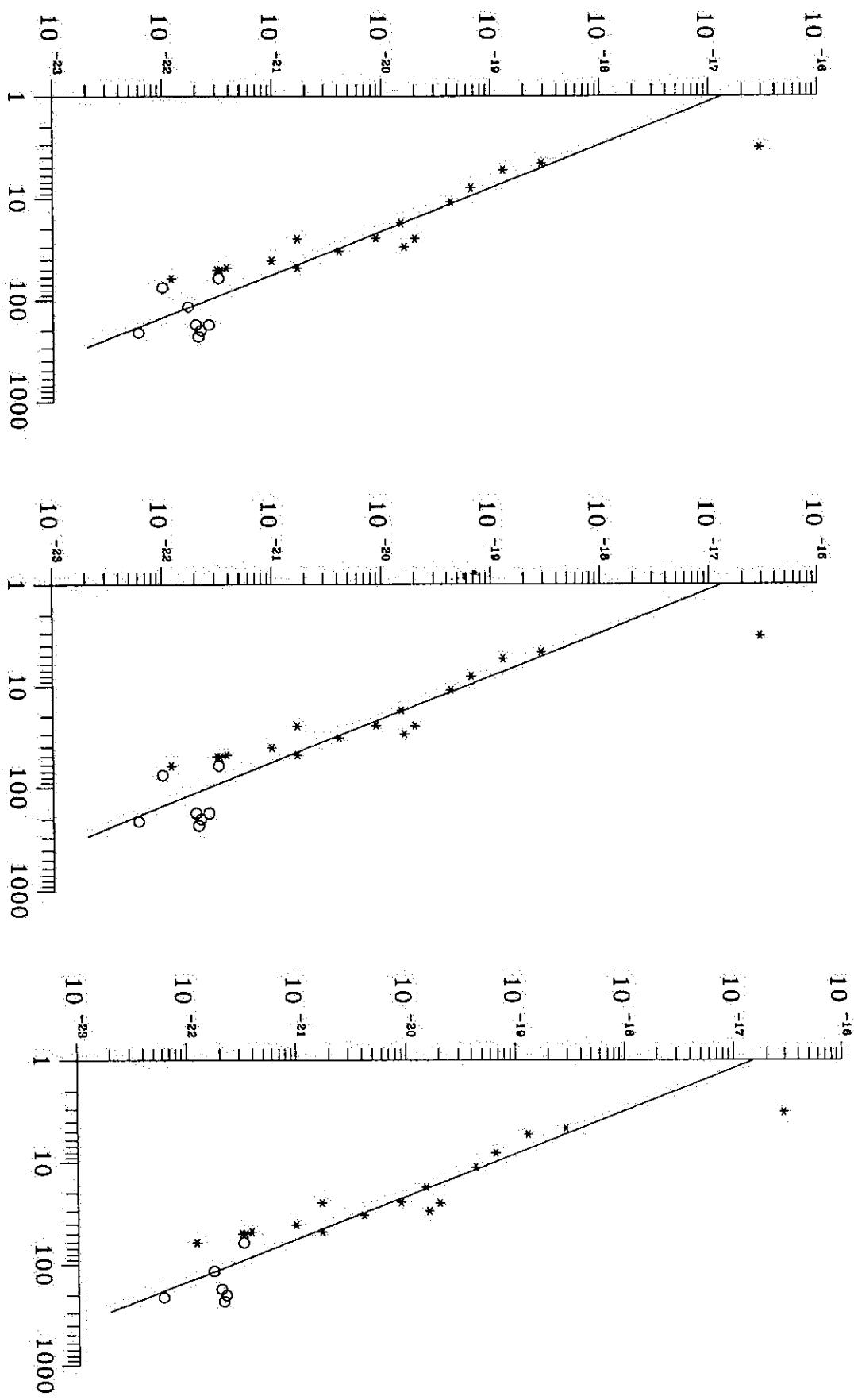


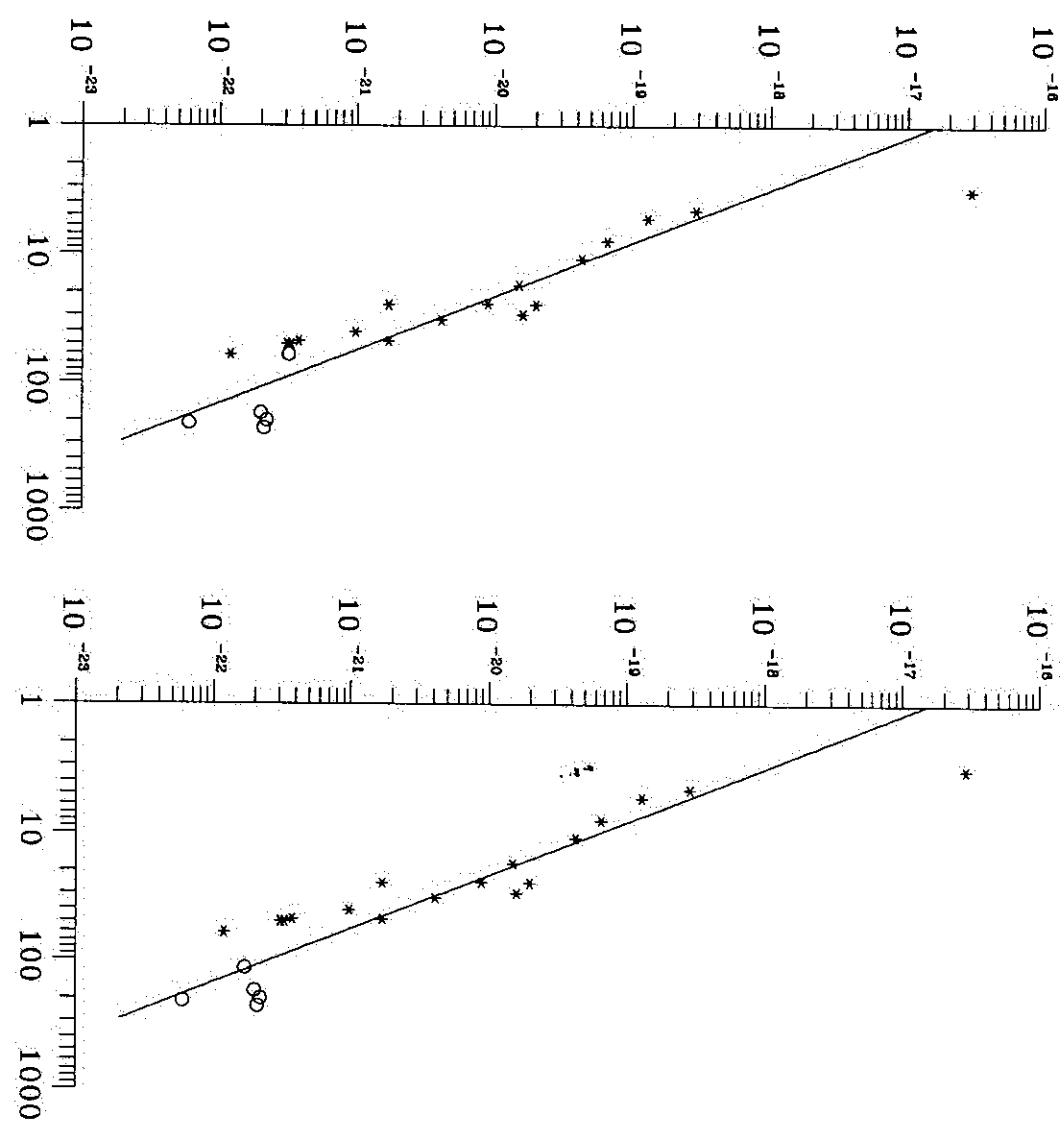
Test $\Sigma - D$ relacije Alahverdijeva sa saradnicima (Allakhverdiyev et al. 1986) za
ostatke manjeg sjaja



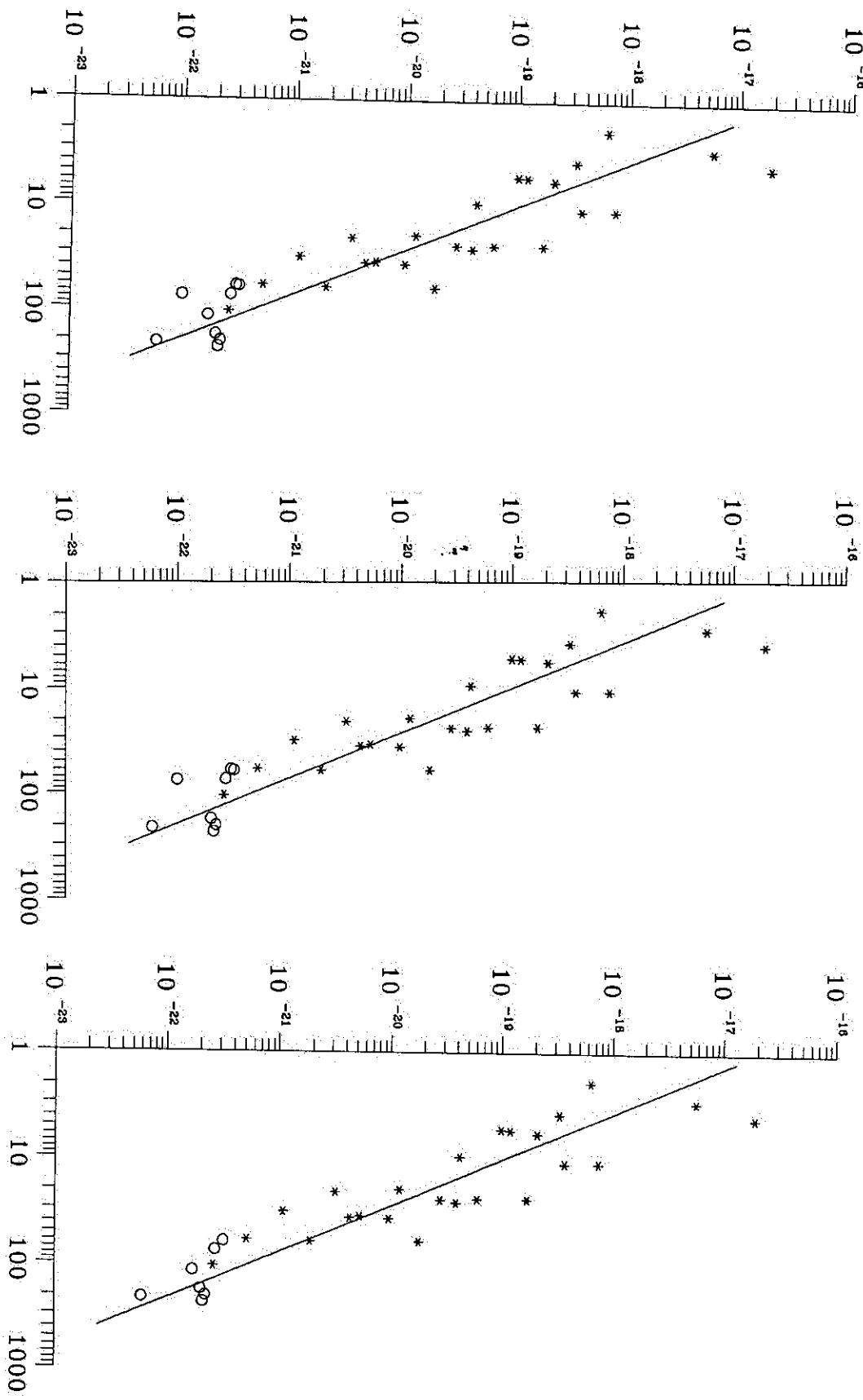


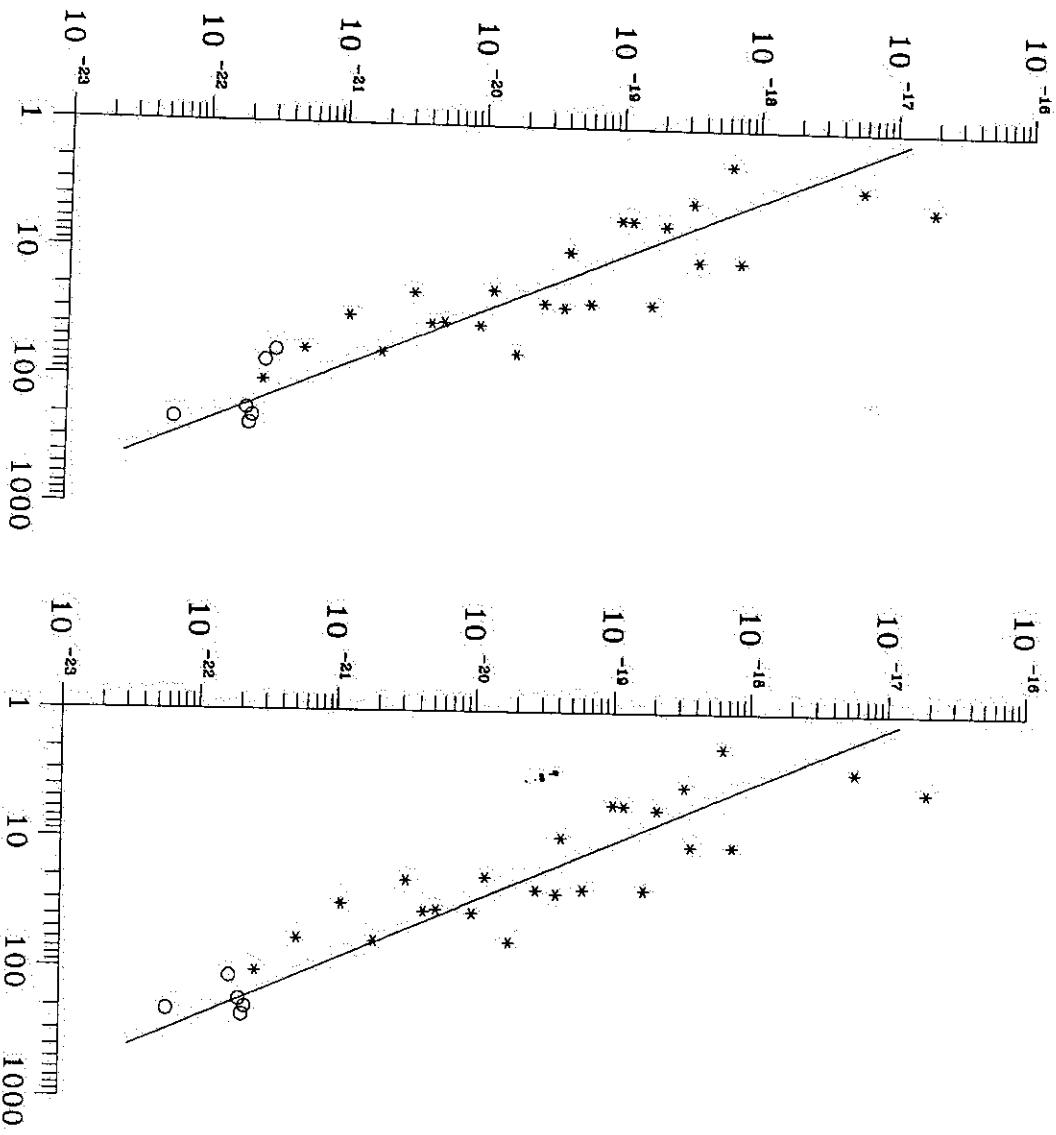
Test $\Sigma - D$ relacije Alahverdijeva sa saradnicima (Allakhverdiyev et al. 1986) za svih 17 kalibratora



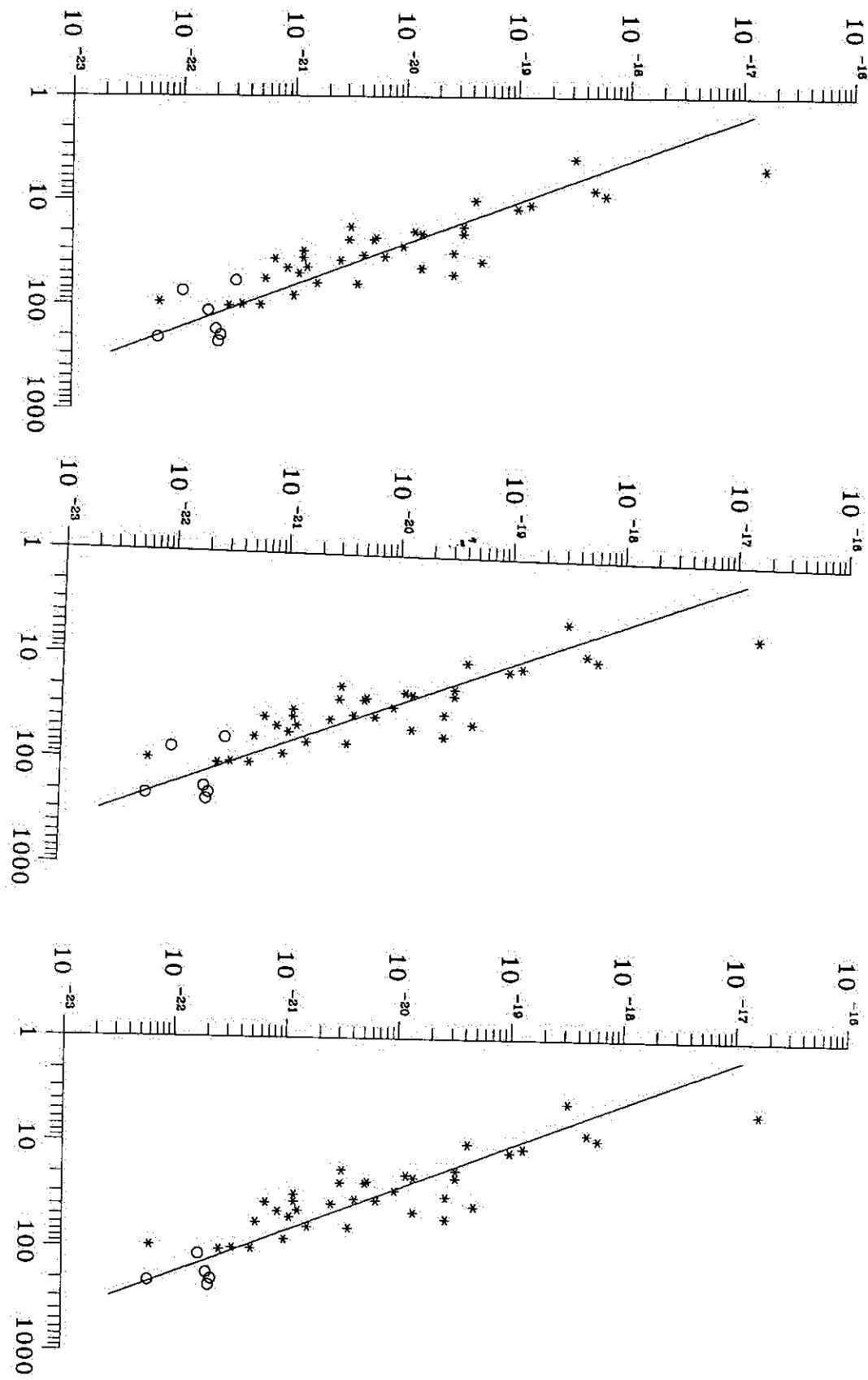


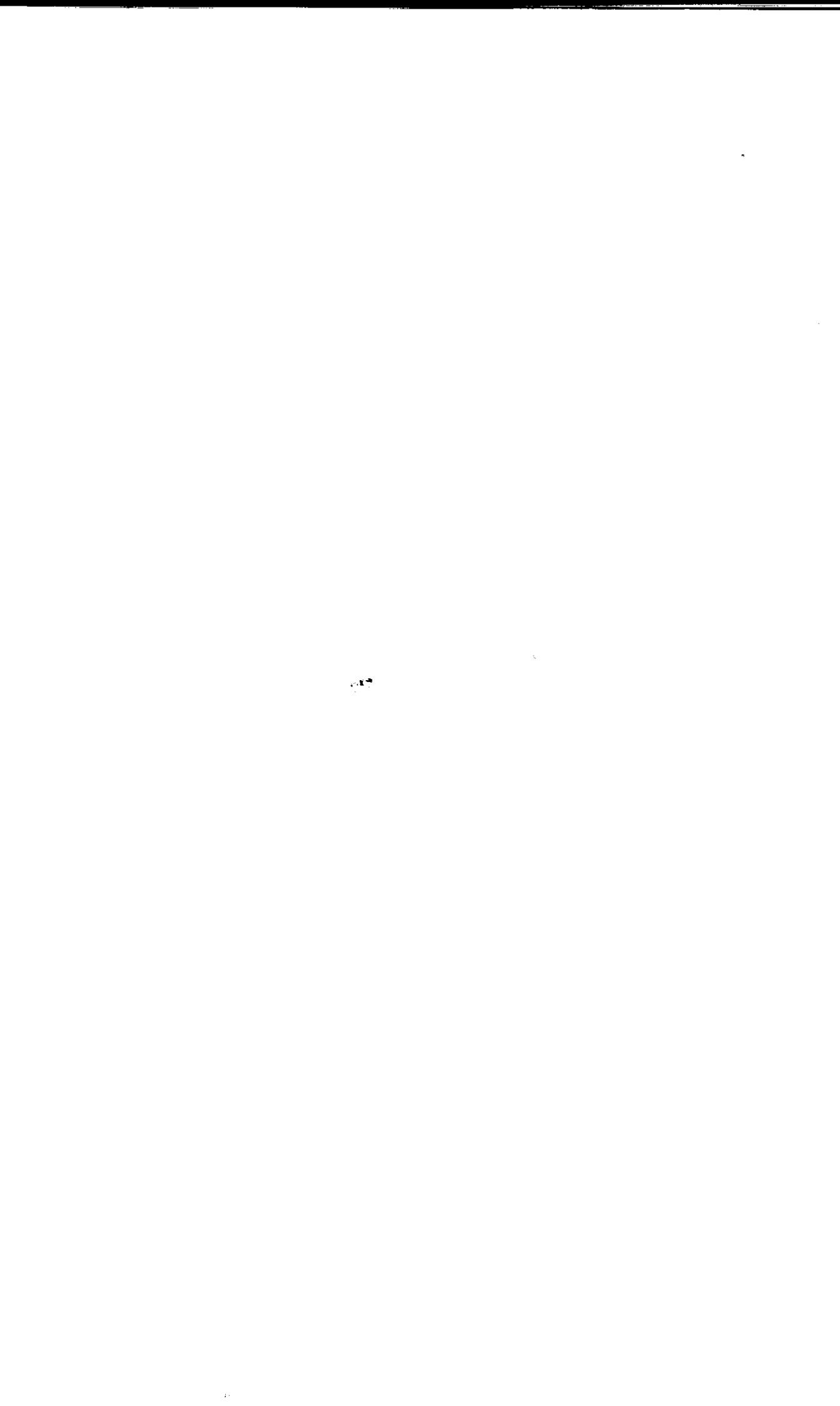
Test Grinove (Green, 1991) $\Sigma - D$ relacije



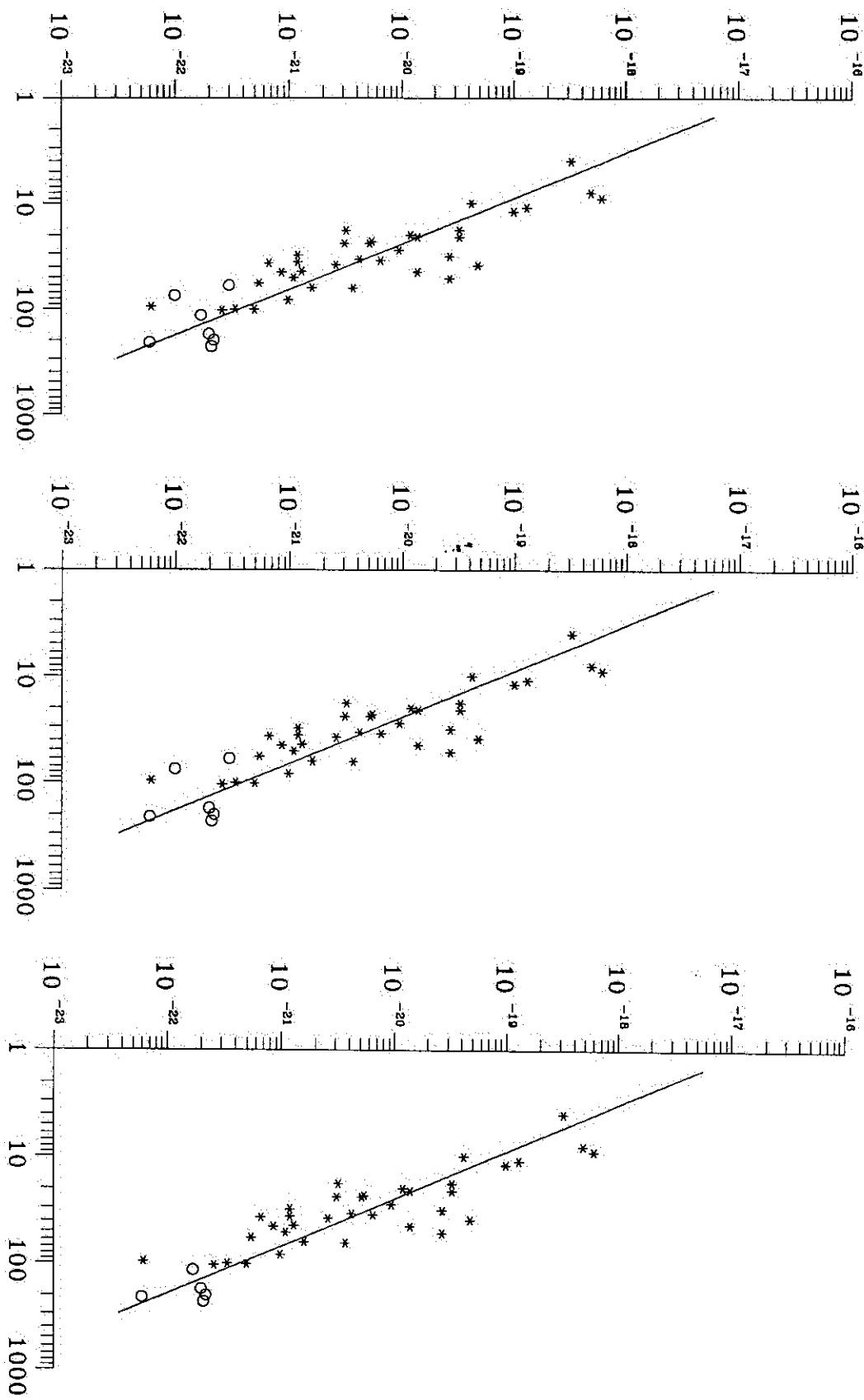


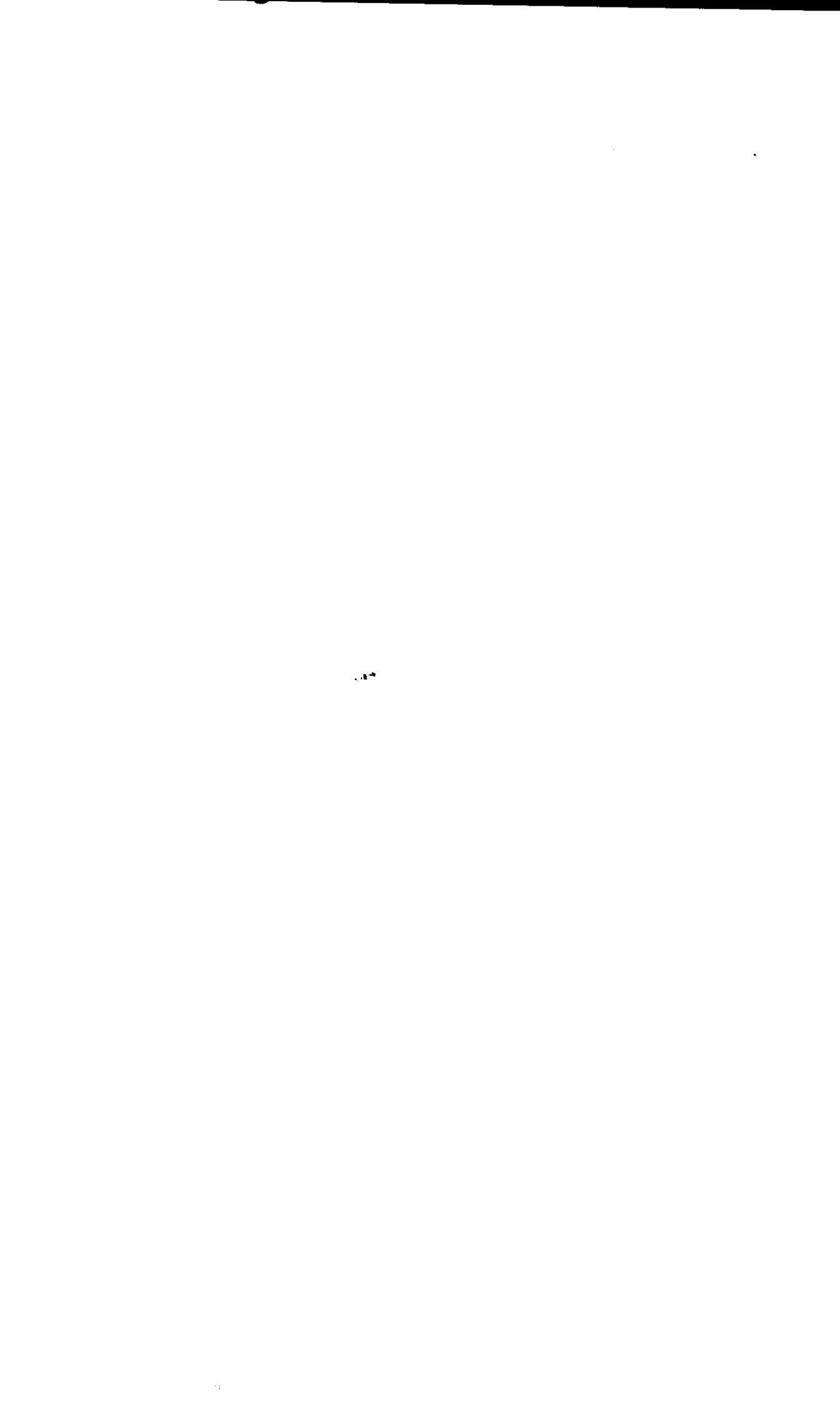
Test $\Sigma - D$ relacije Kejsa i Batačerije (Case & Bhattacharya, 1998) za 37 kalibratora



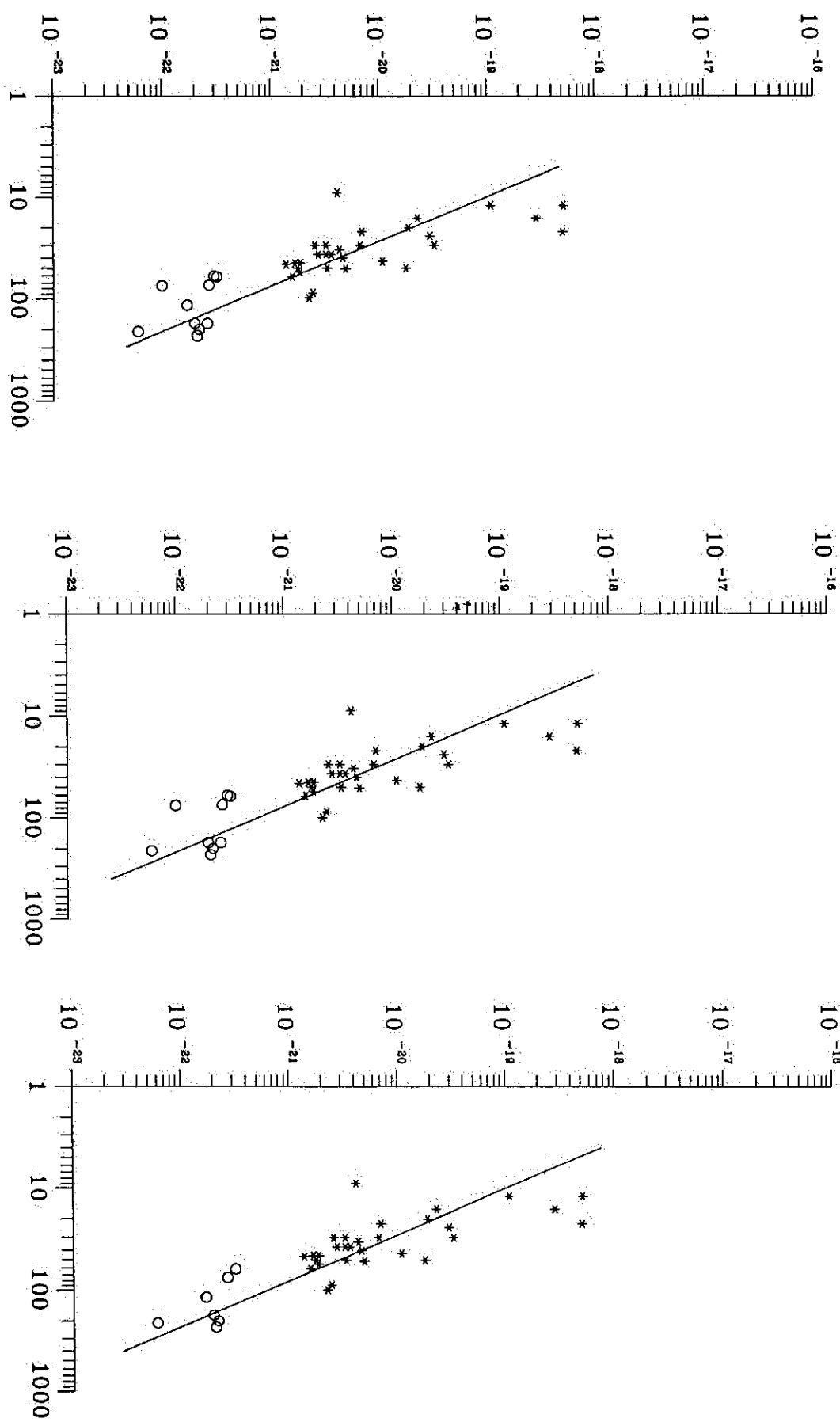


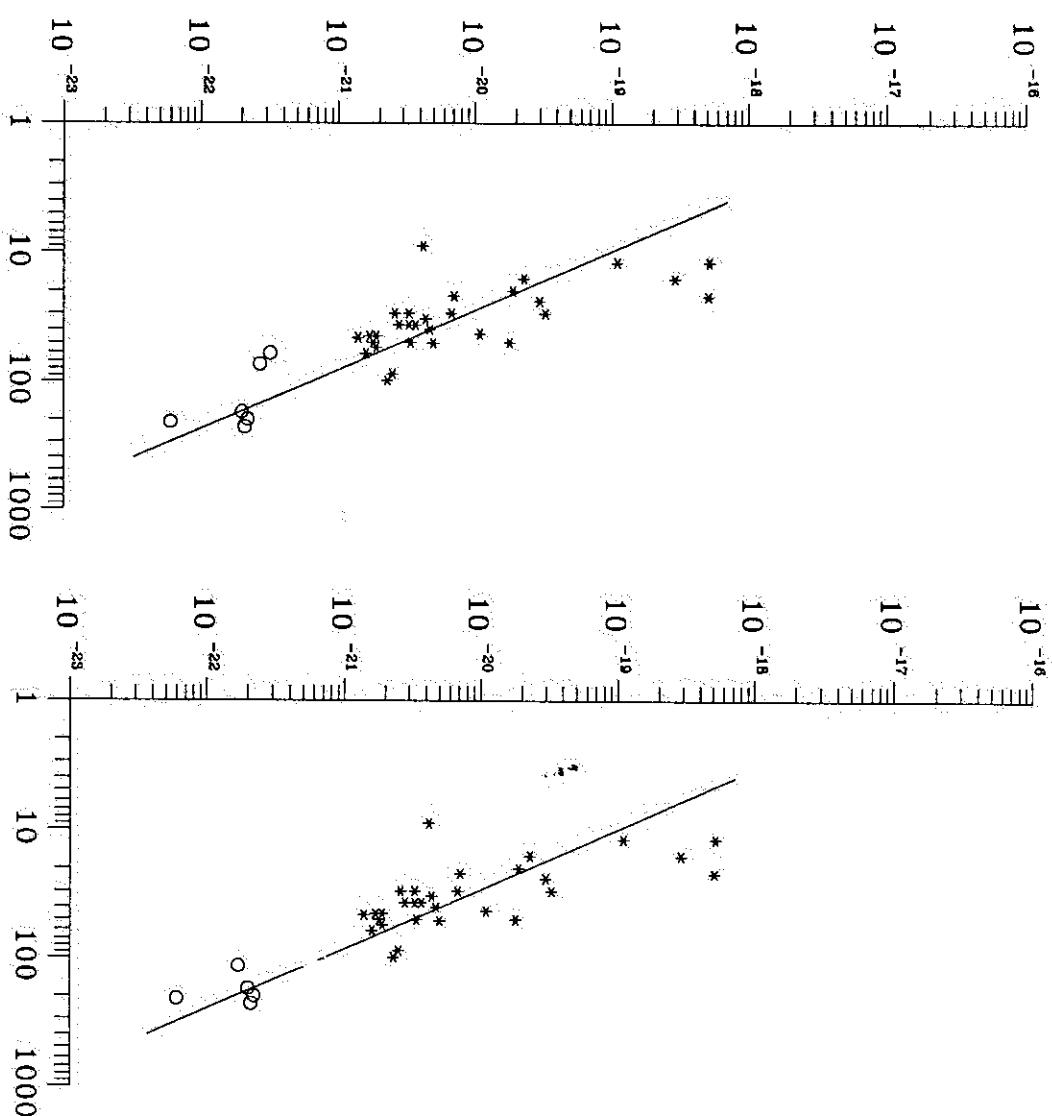
Test $\Sigma - D$ relacije Kejsa i Batačerije (Case & Bhattacharya, 1998) za
36 kalibratora (bez Cas A)



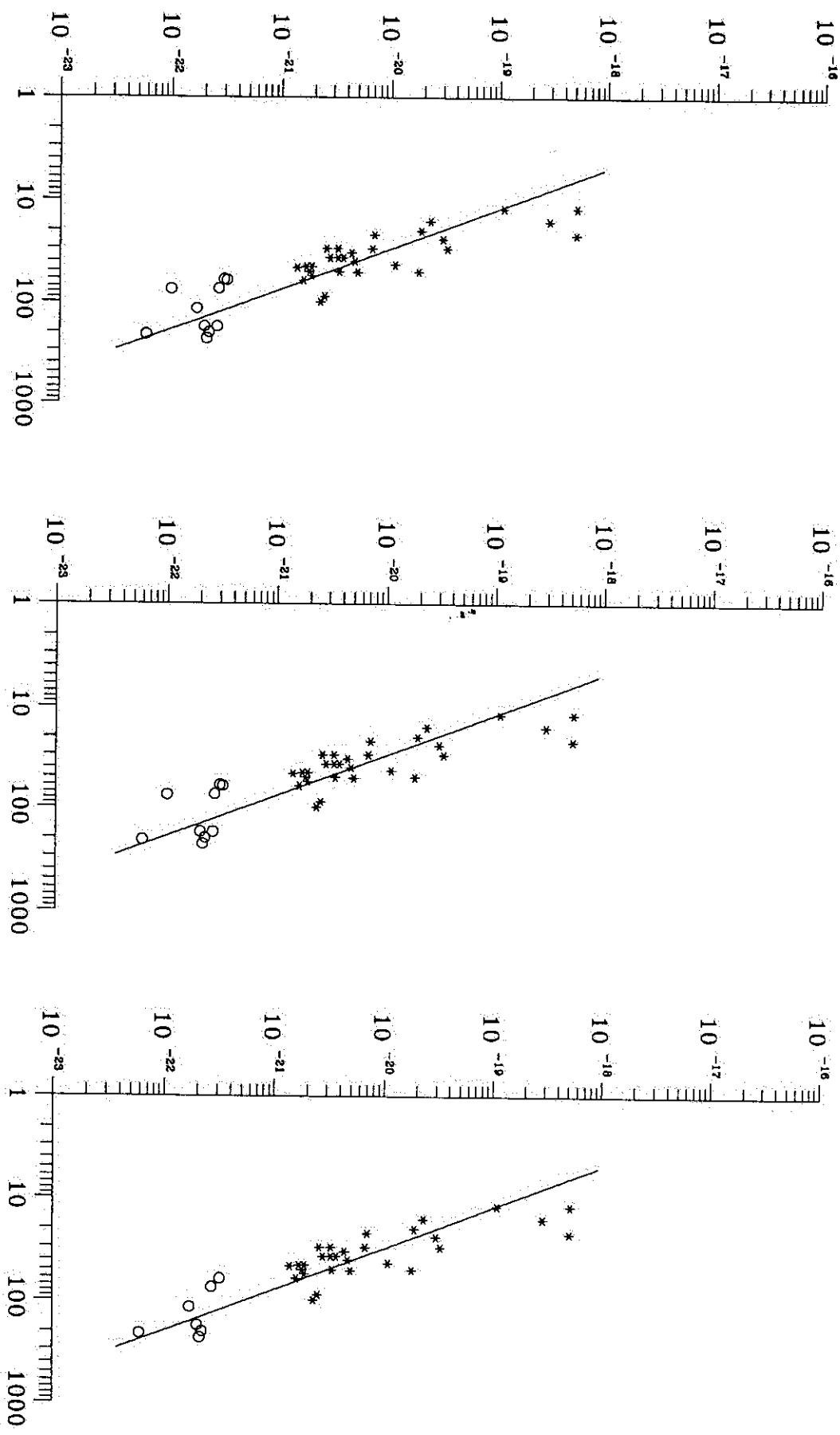


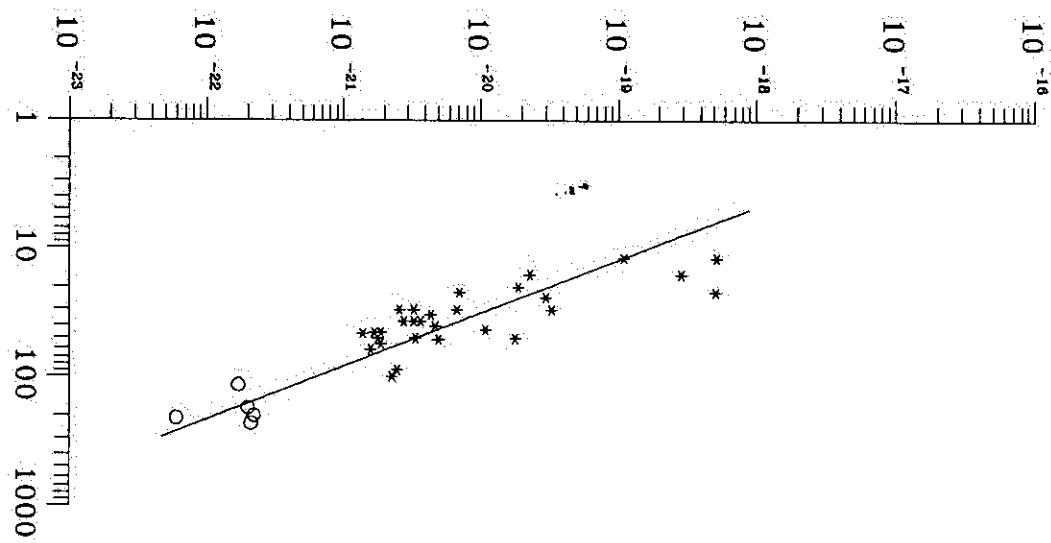
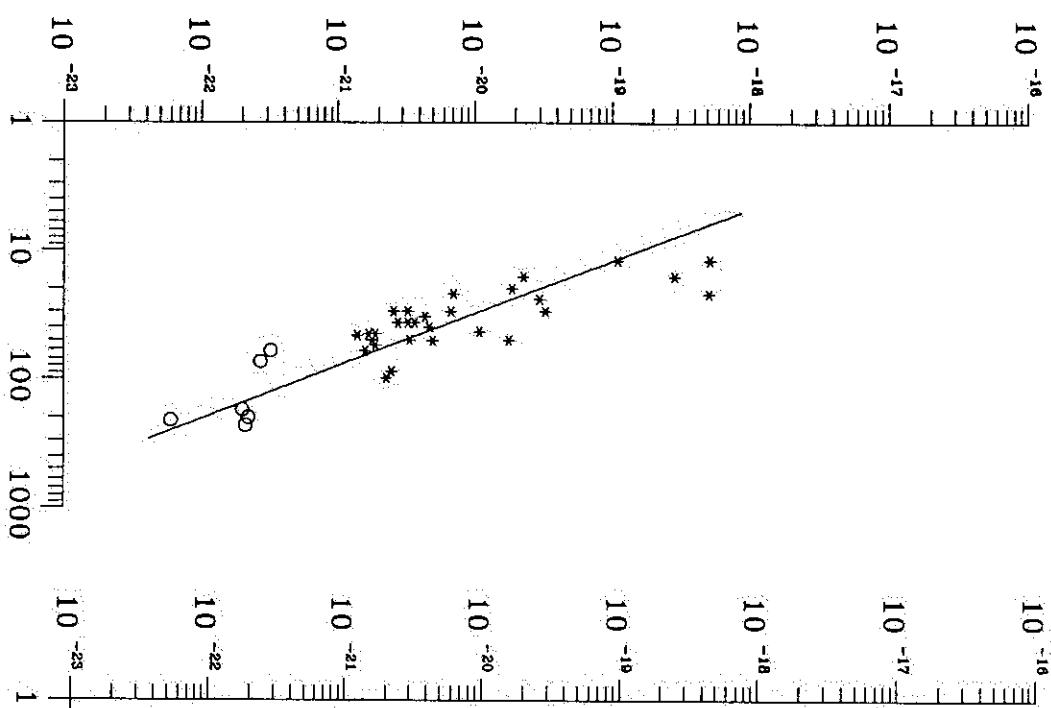
Test $\Sigma - D$ relacije za Veliki Magelanov oblak (30 kalibratora)



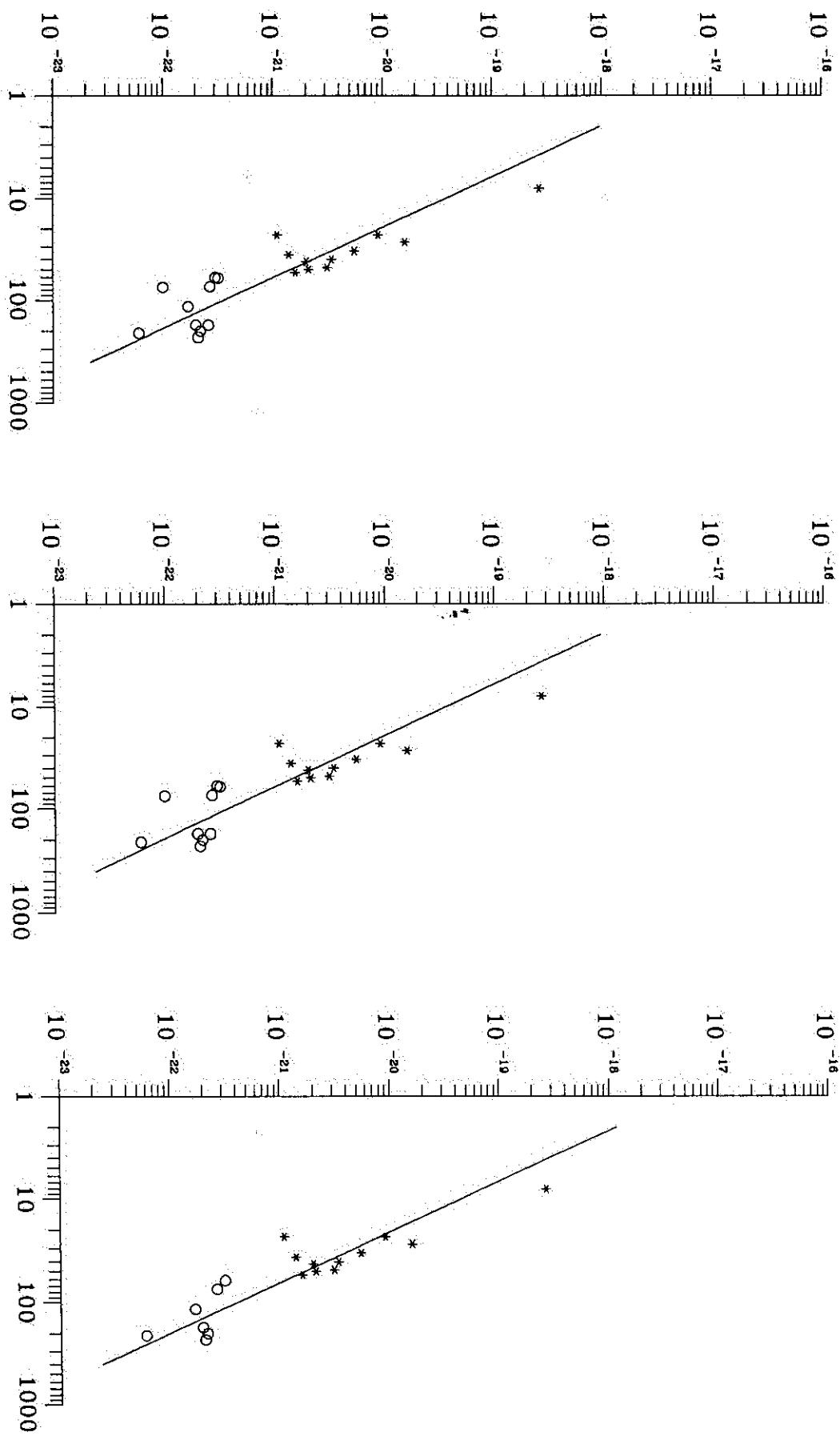


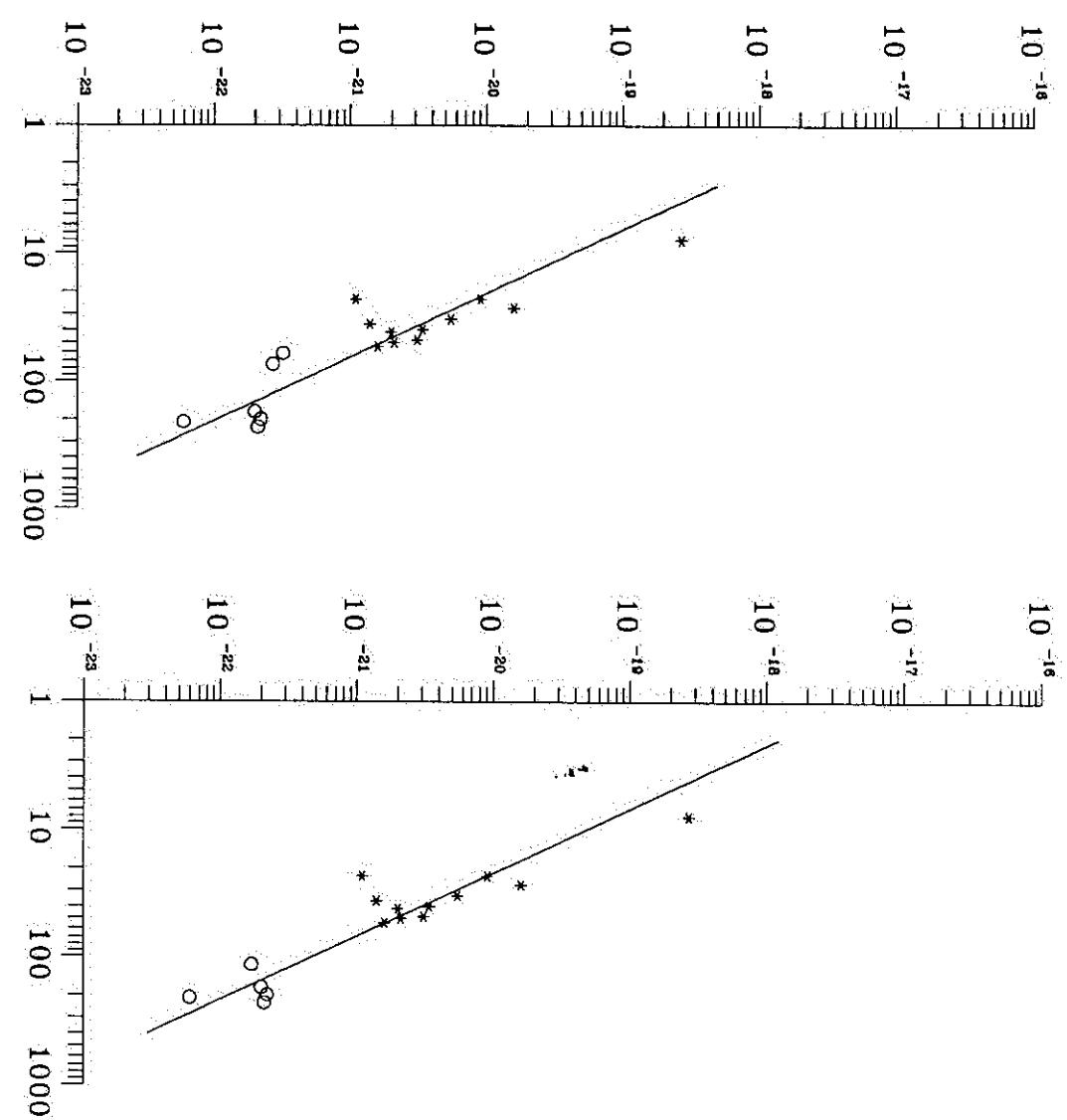
Test $\Sigma - D$ relacije za Veliki Magelanov oblak (29 kalibratora – bez 0505-679)



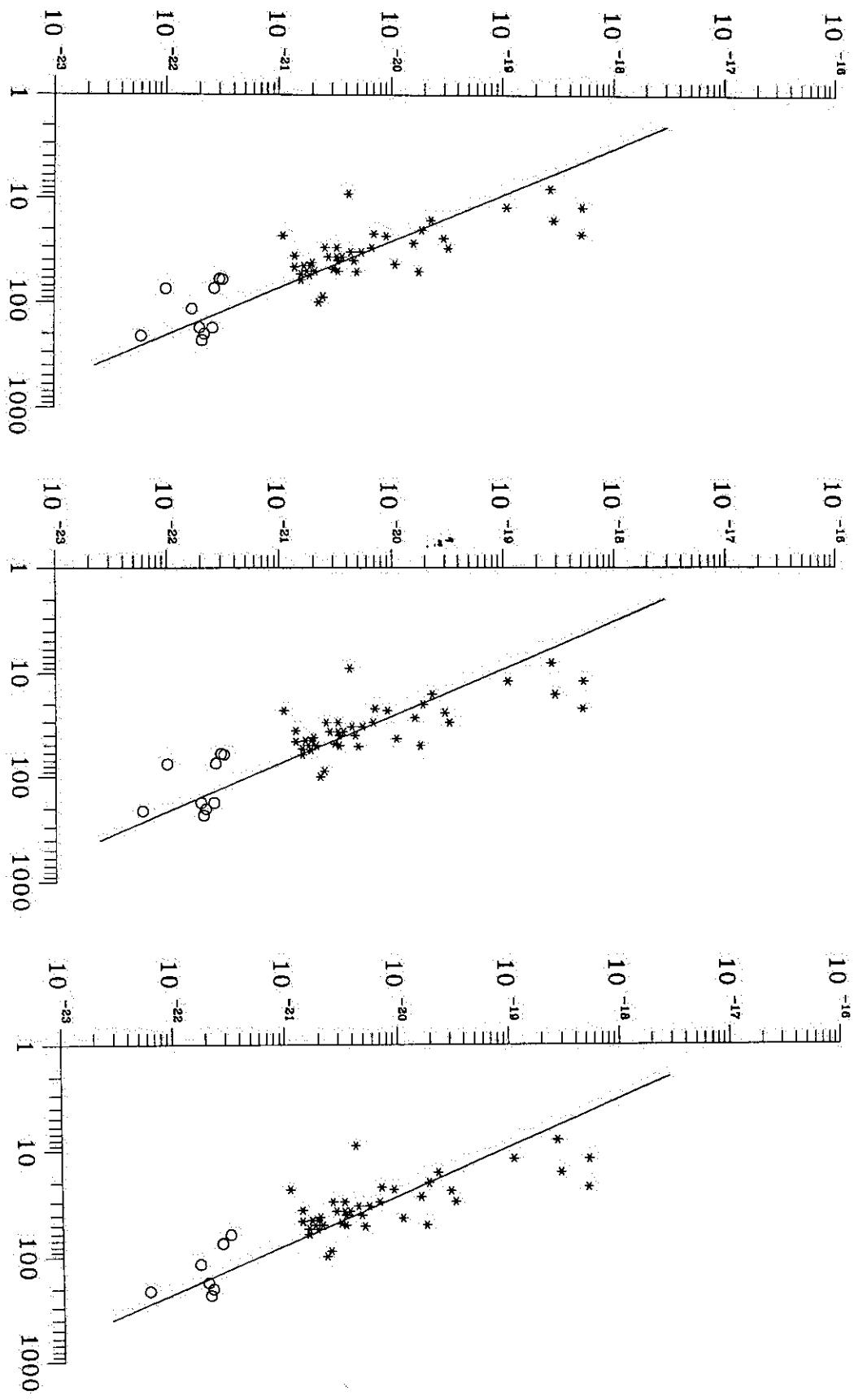


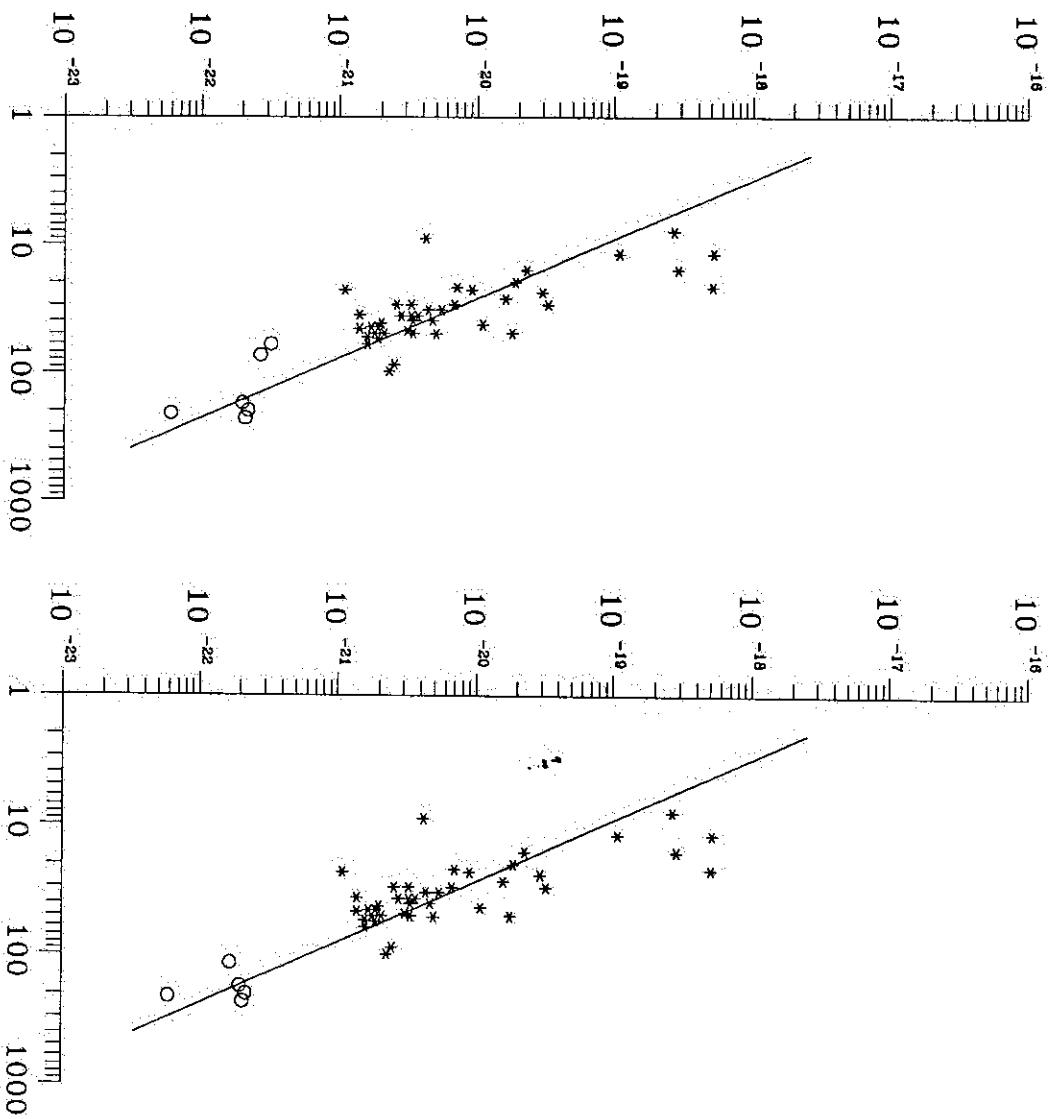
Test $\Sigma - D$ relacije za Mali Magelanov oblak (11 kalibratora)



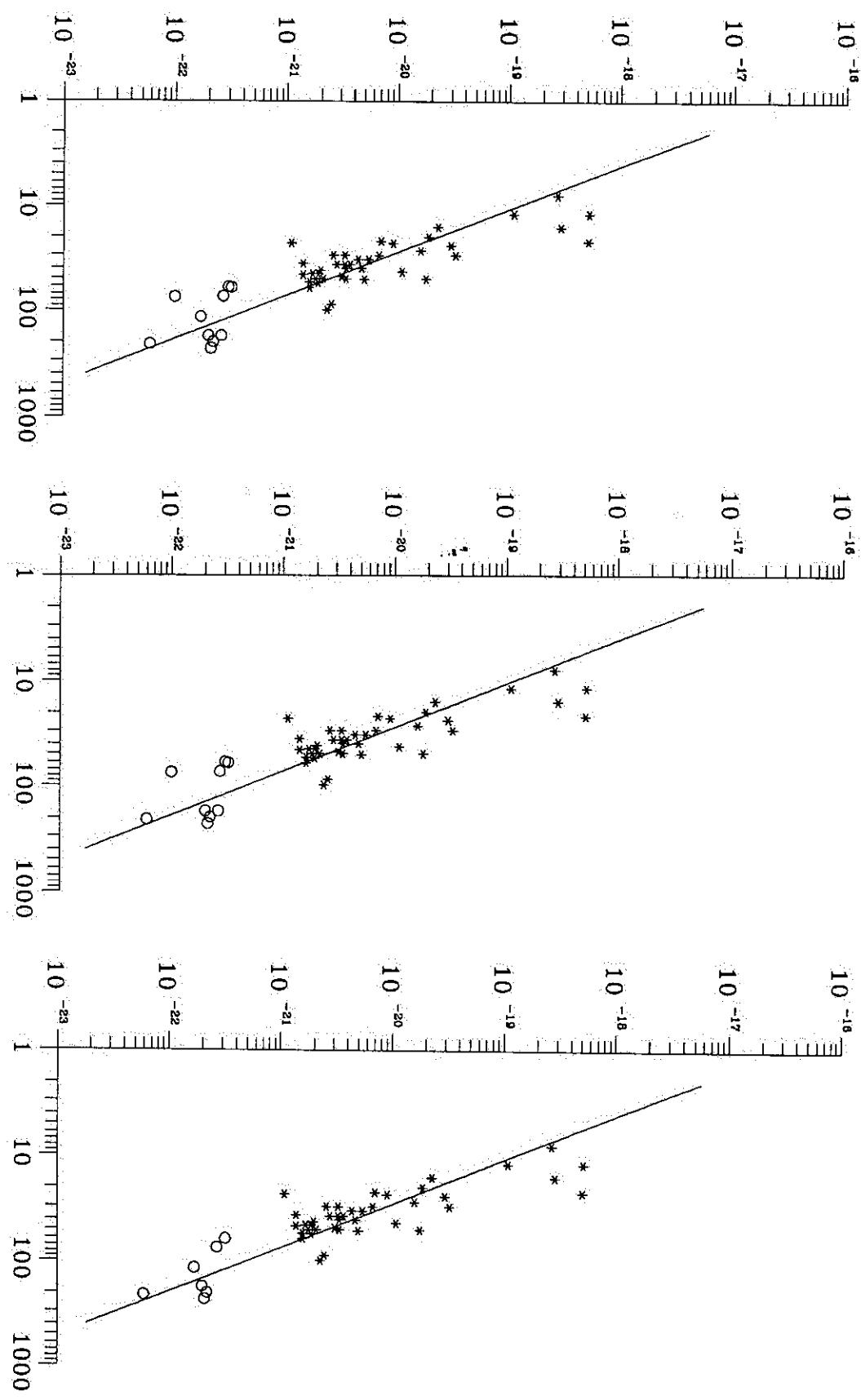


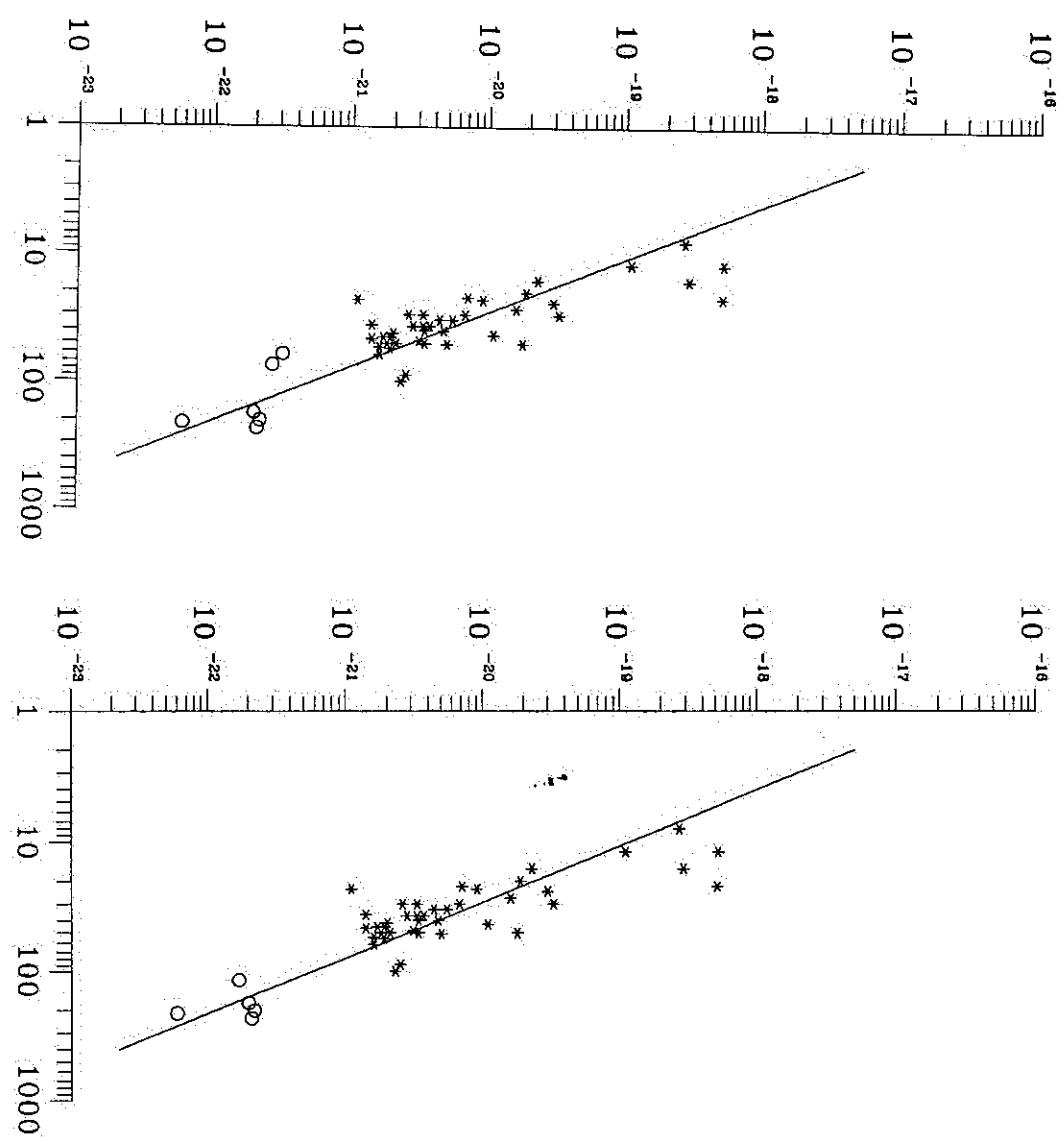
Test $\Sigma - D$ relacije za oba Magelanova oblaka (41 kalibrator)



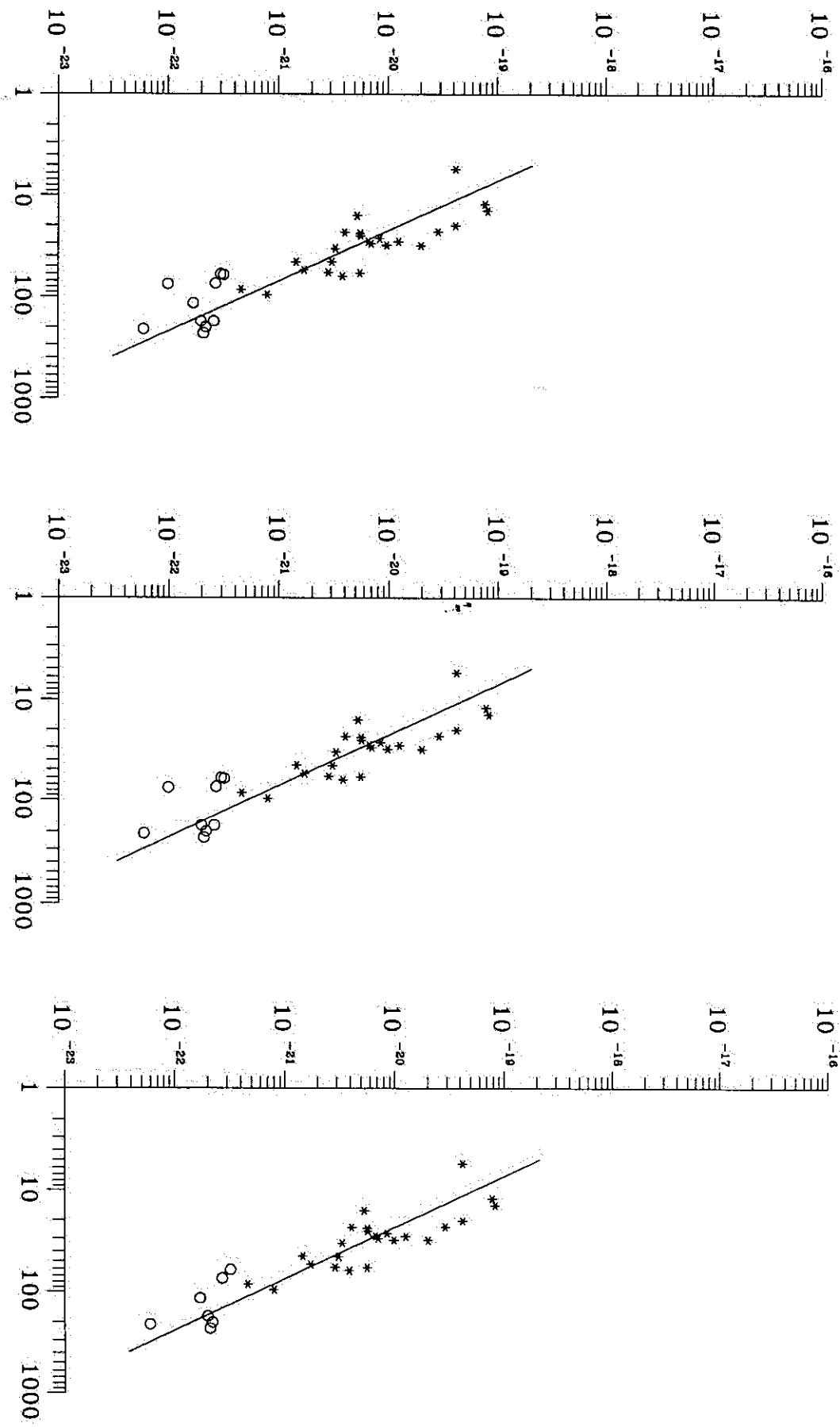


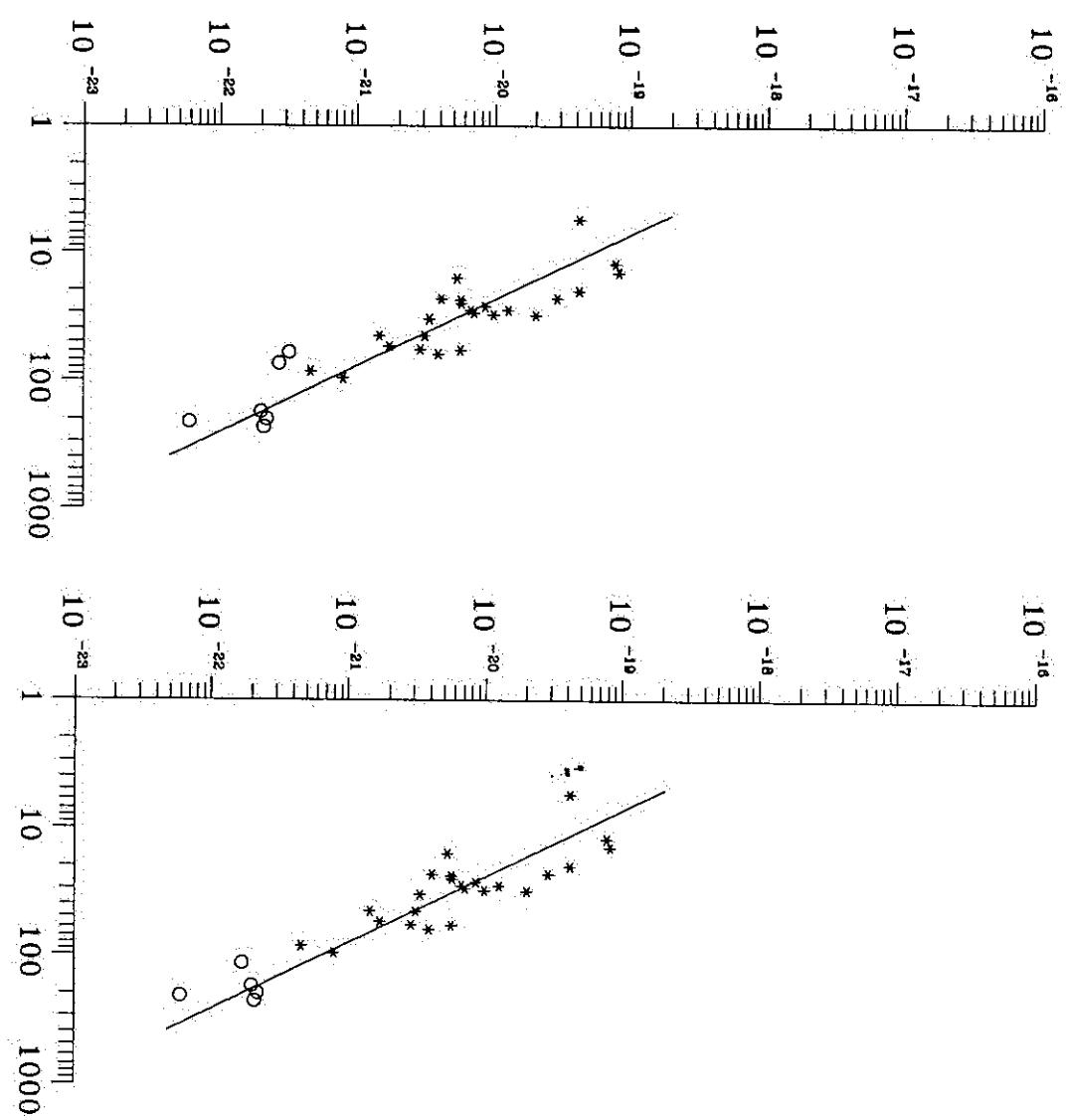
Test $\Sigma - D$ relacije za oba Magelanova oblaka (40 kalibratora – bez 0505-67)



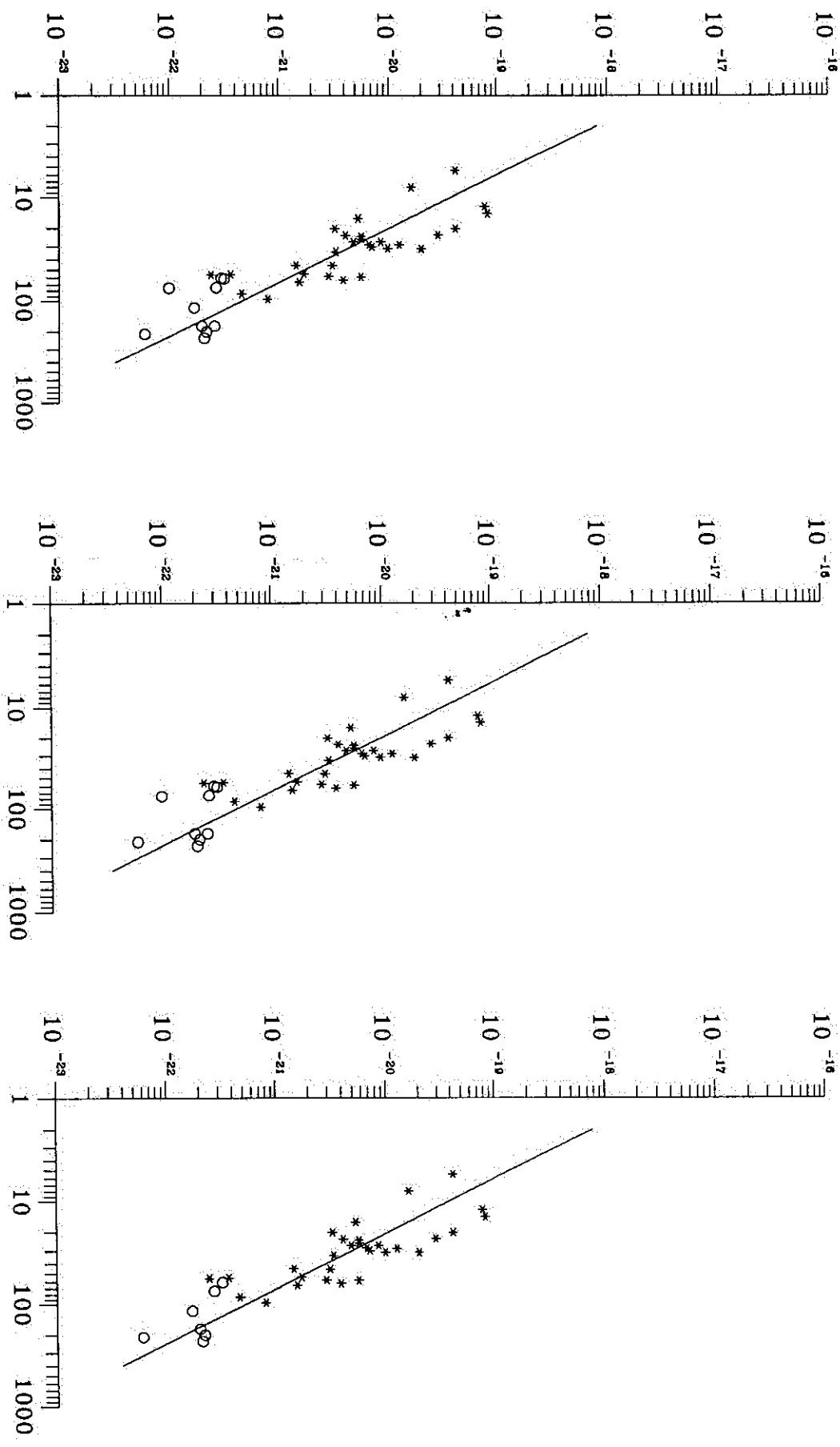


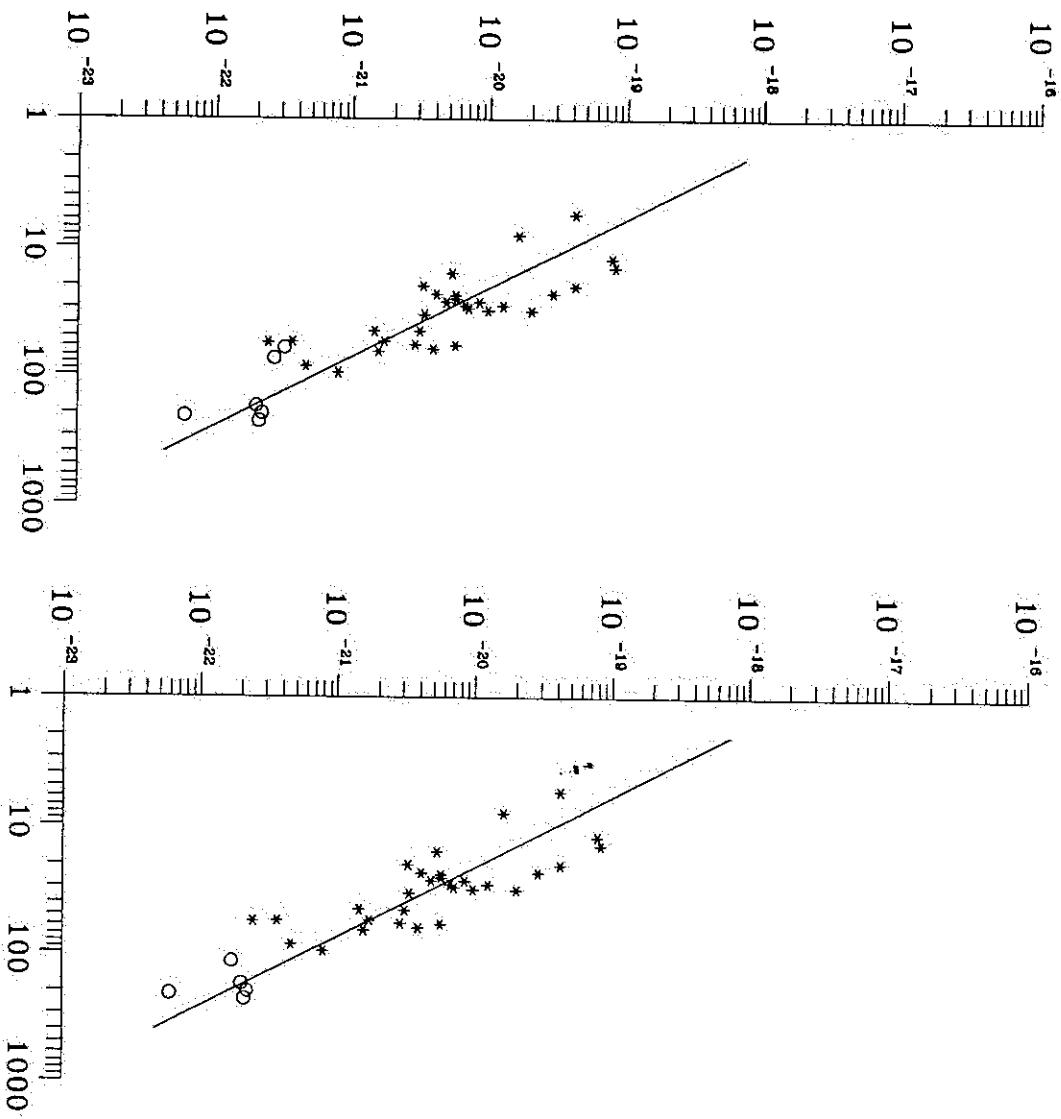
Test $\Sigma - D$ relacije za galaksiju M31 (24 kalibratora)



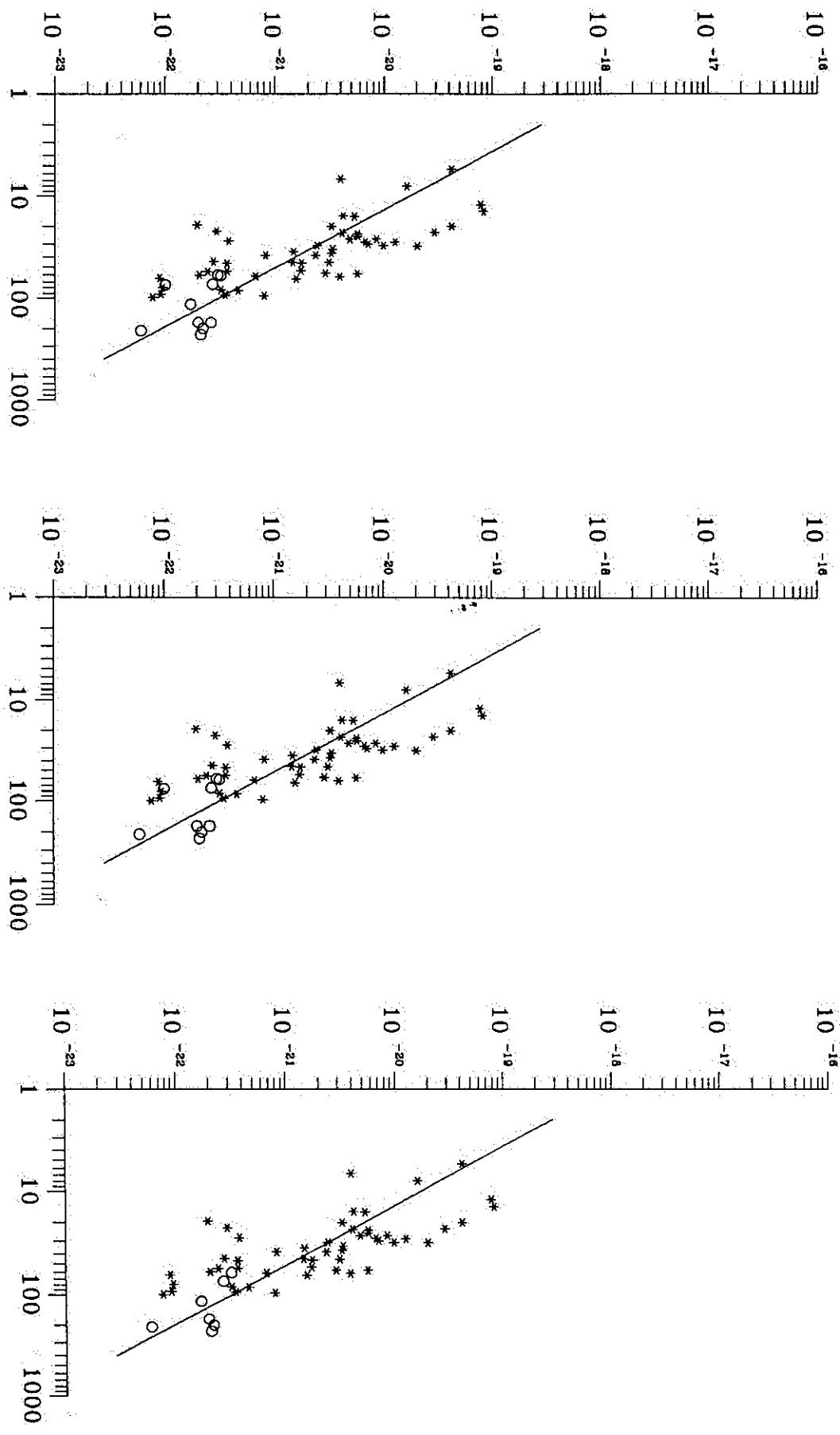


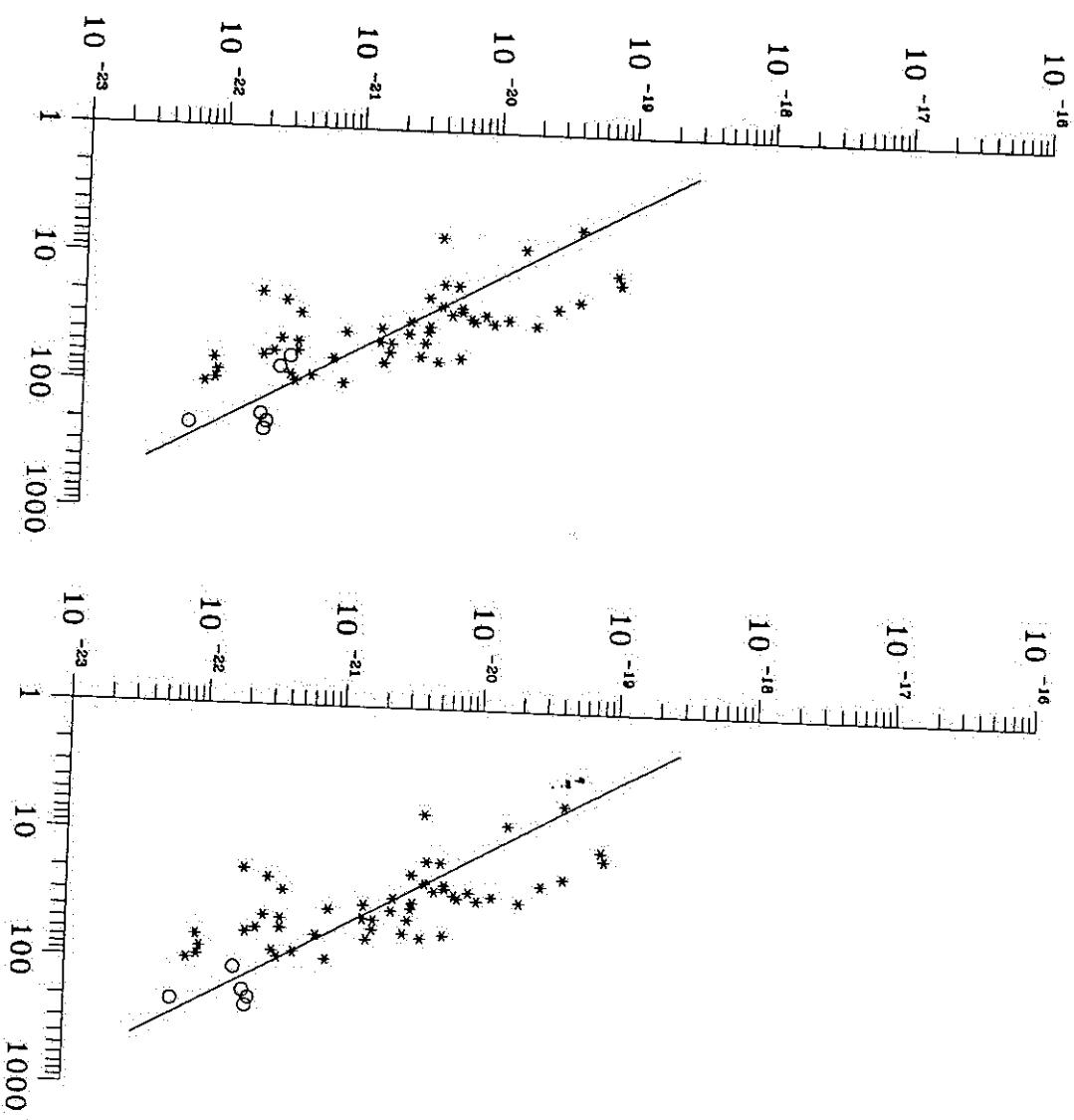
Test $\Sigma - D$ relacije za galaksiju M31 (30 kalibratora)



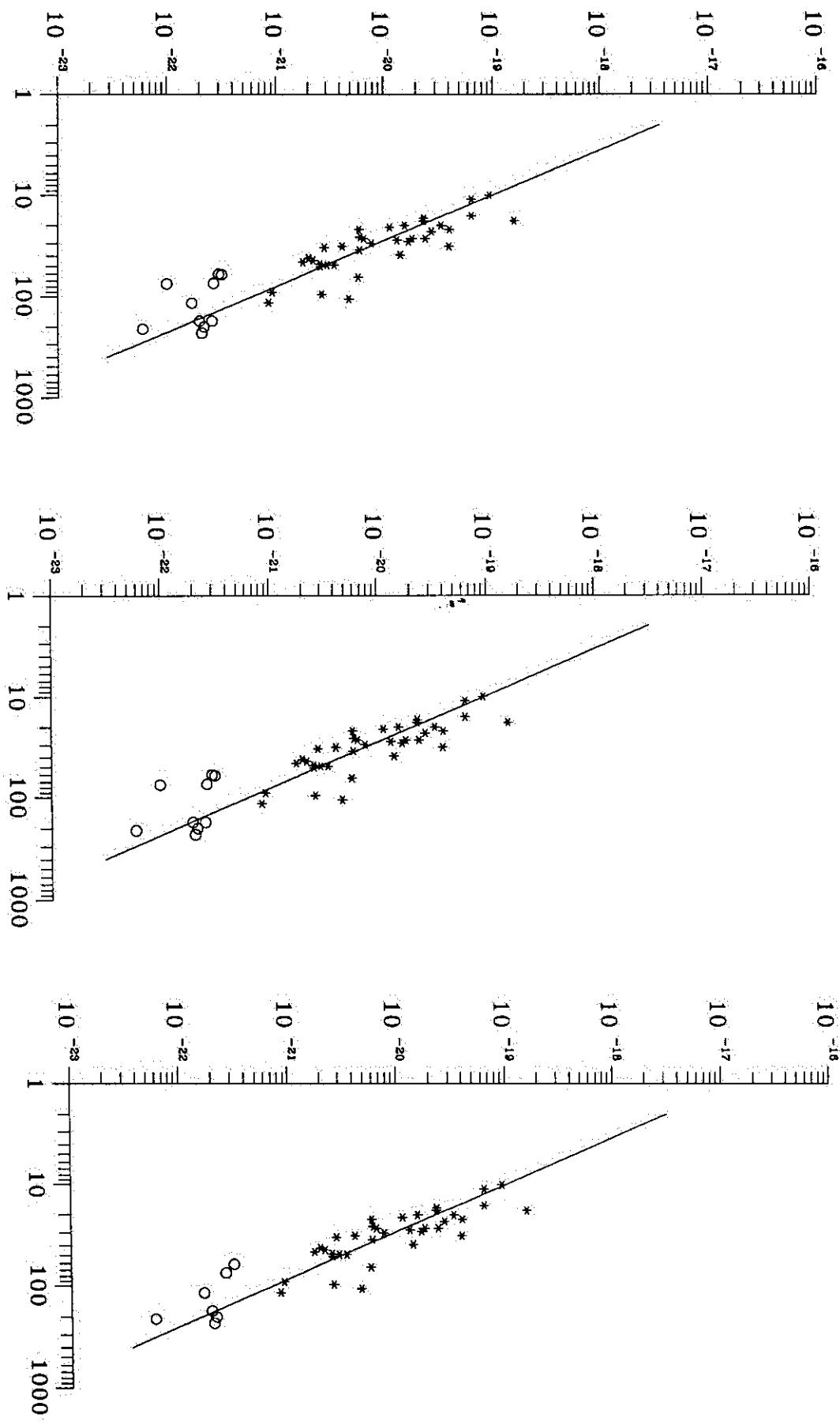


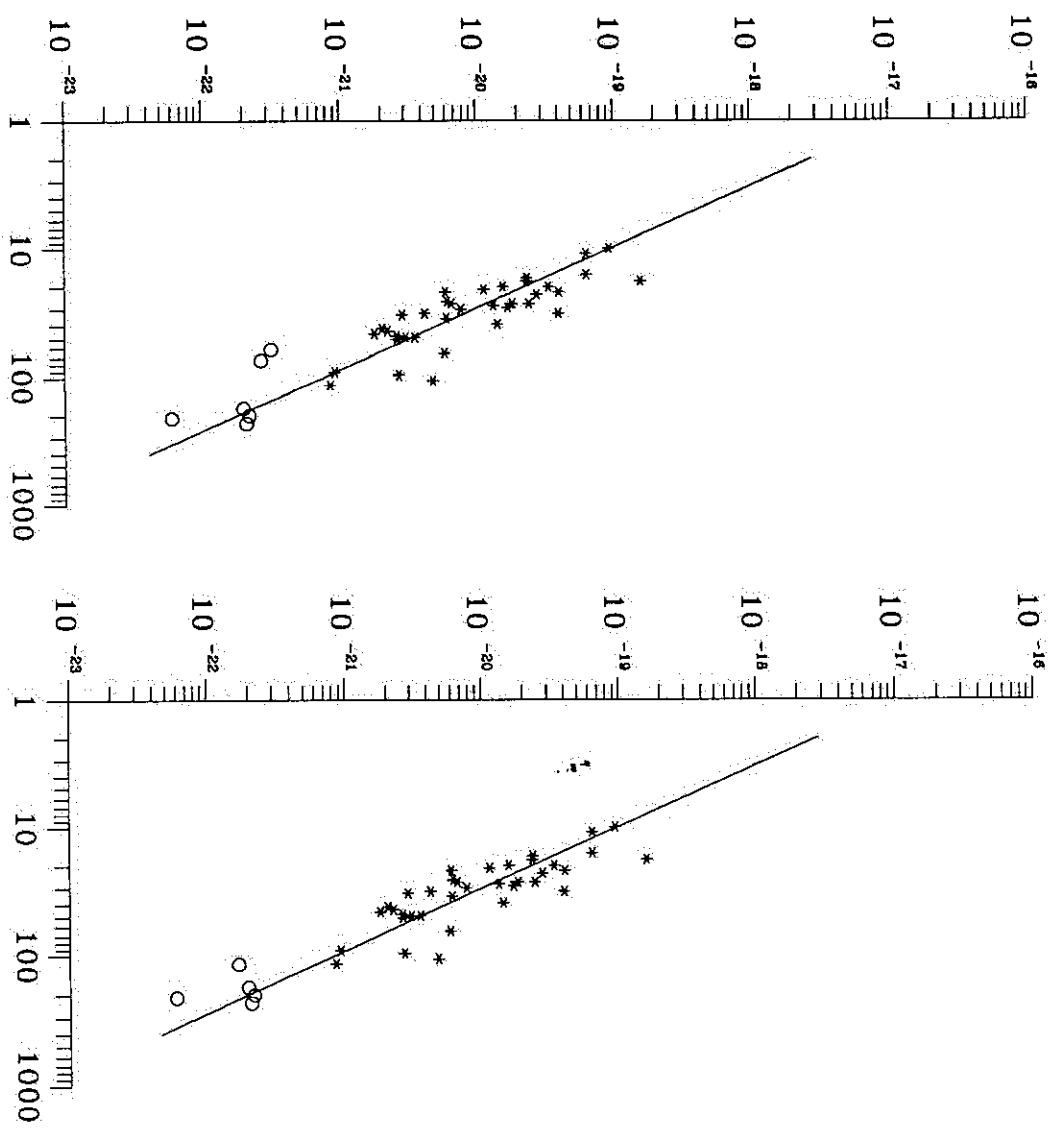
Test $\Sigma - D$ relacije za galaksiju M31 (51 kalibrator)



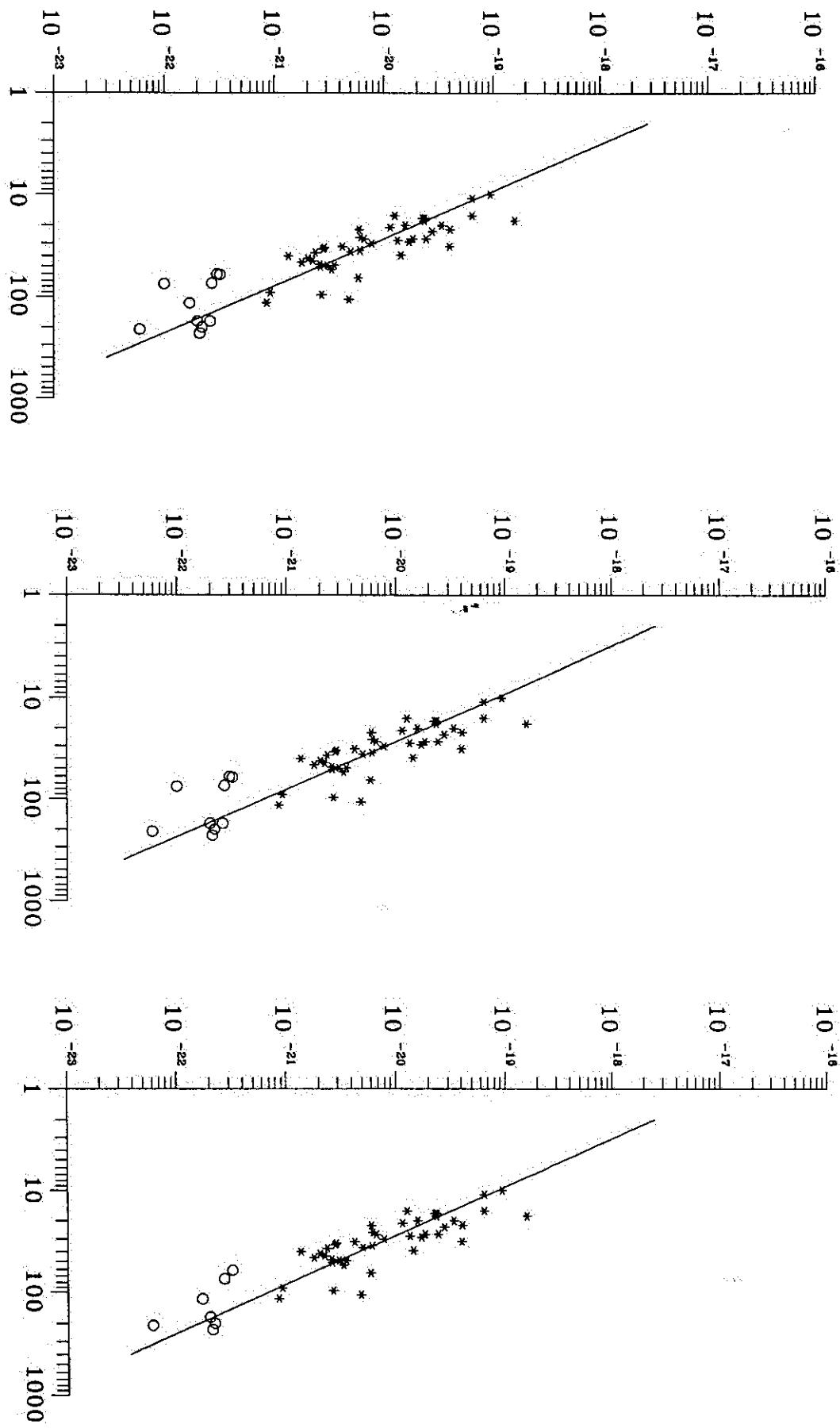


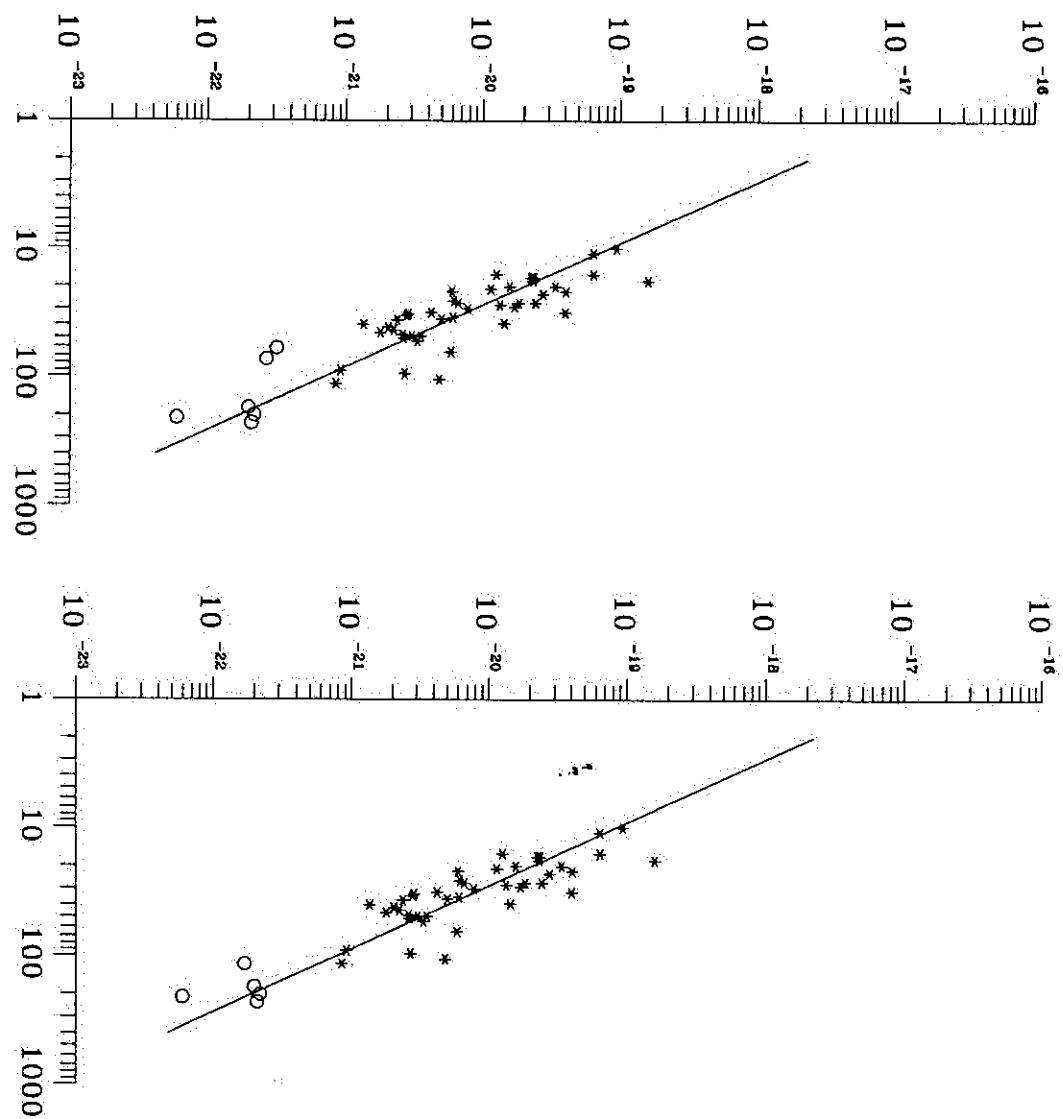
Test $\Sigma - D$ relacije za galaksiju M33 (36 kalibratora)



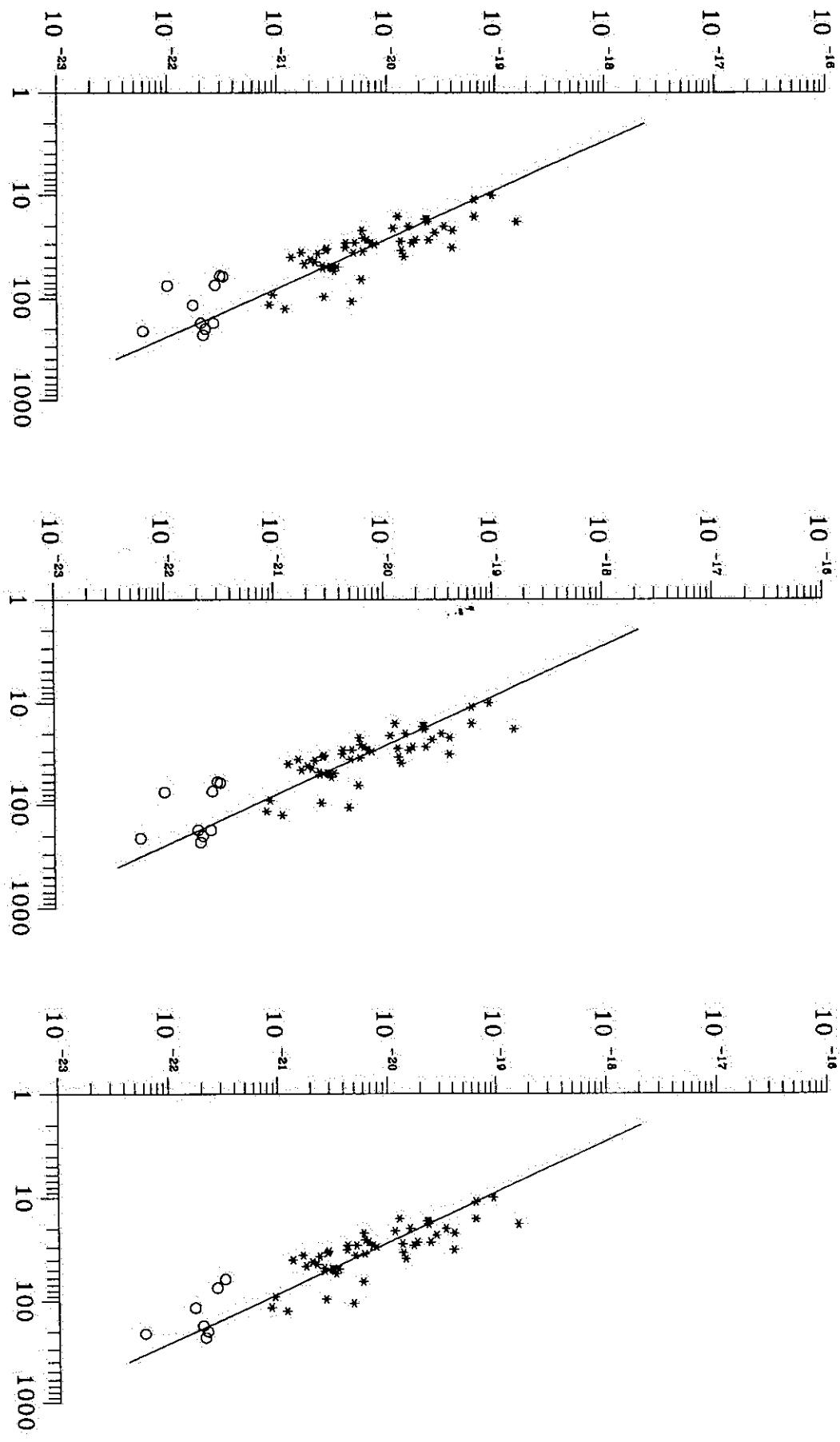


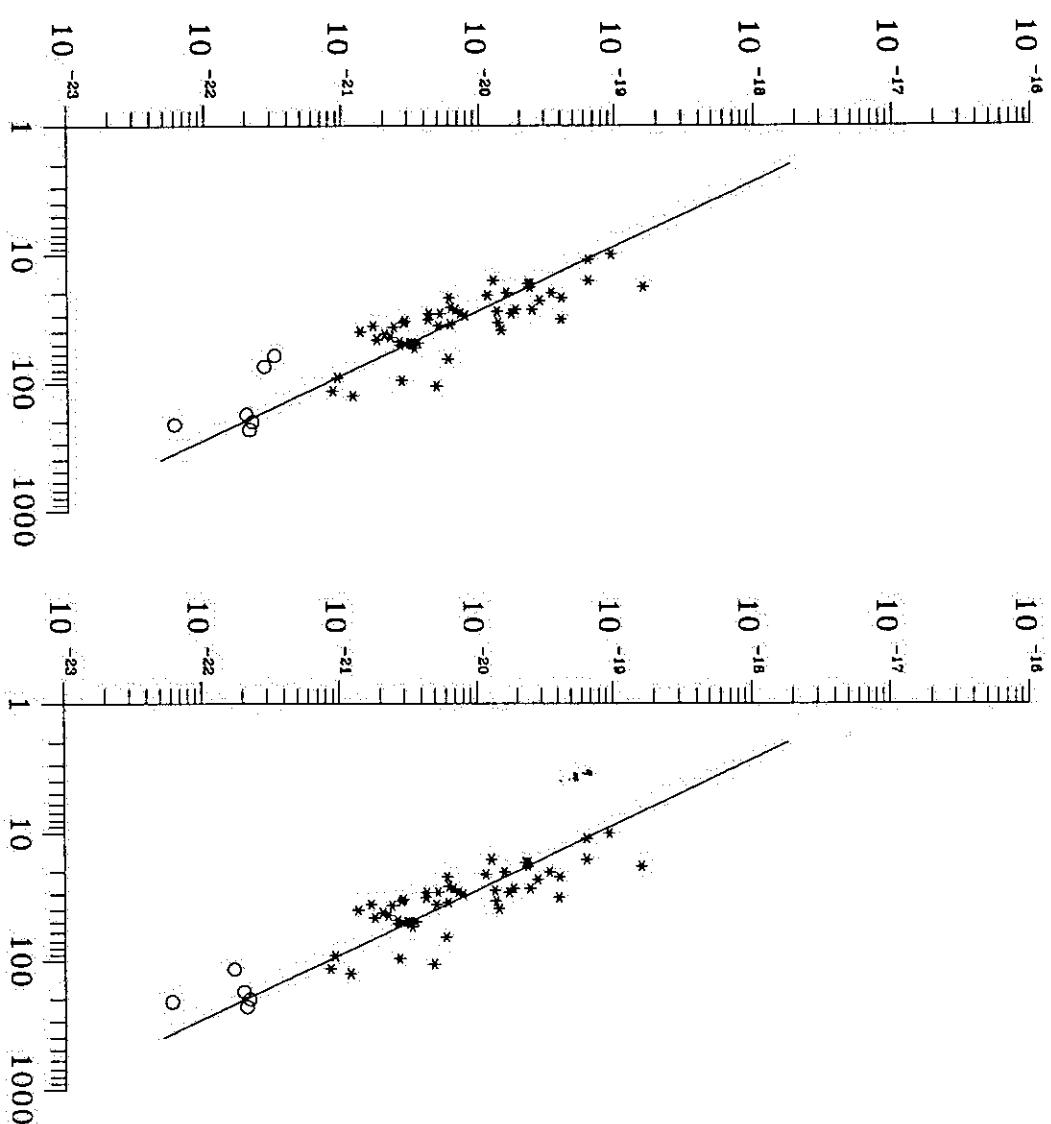
Test $\Sigma - D$ relacije za galaksiju M33 (43 kalibratora)



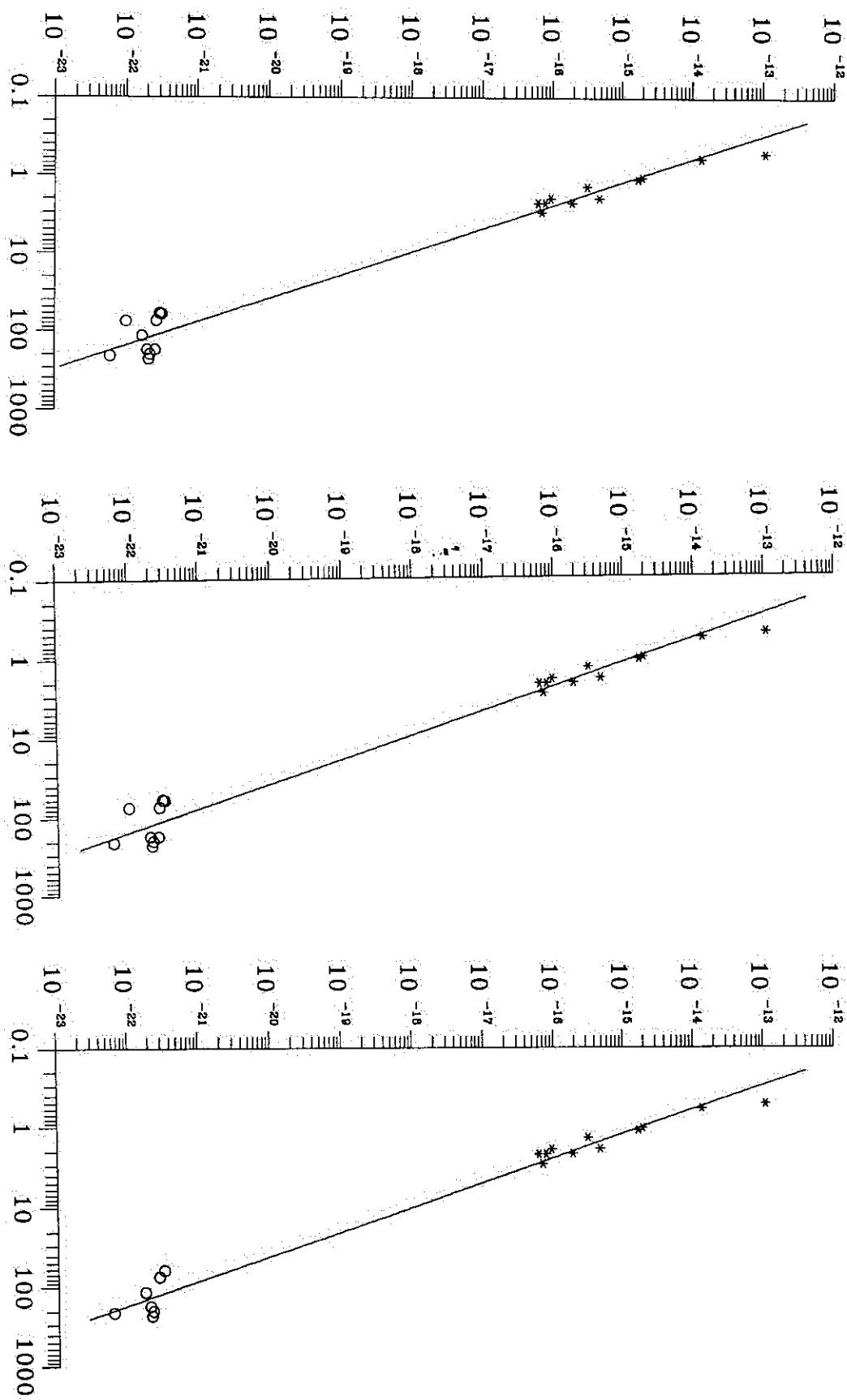


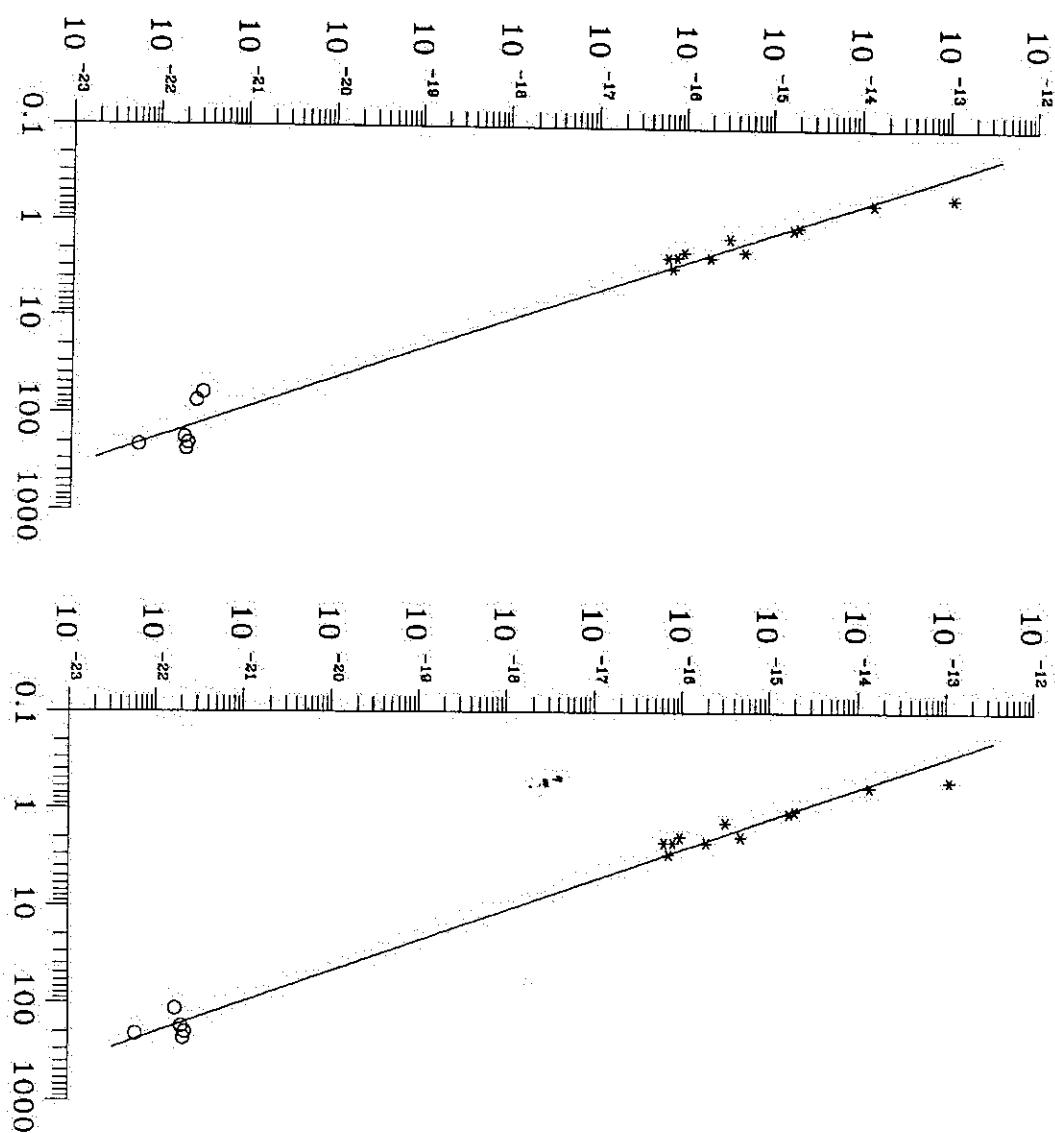
Test $\Sigma - D$ relacije za galaksiju M33 (51 kalibrator)



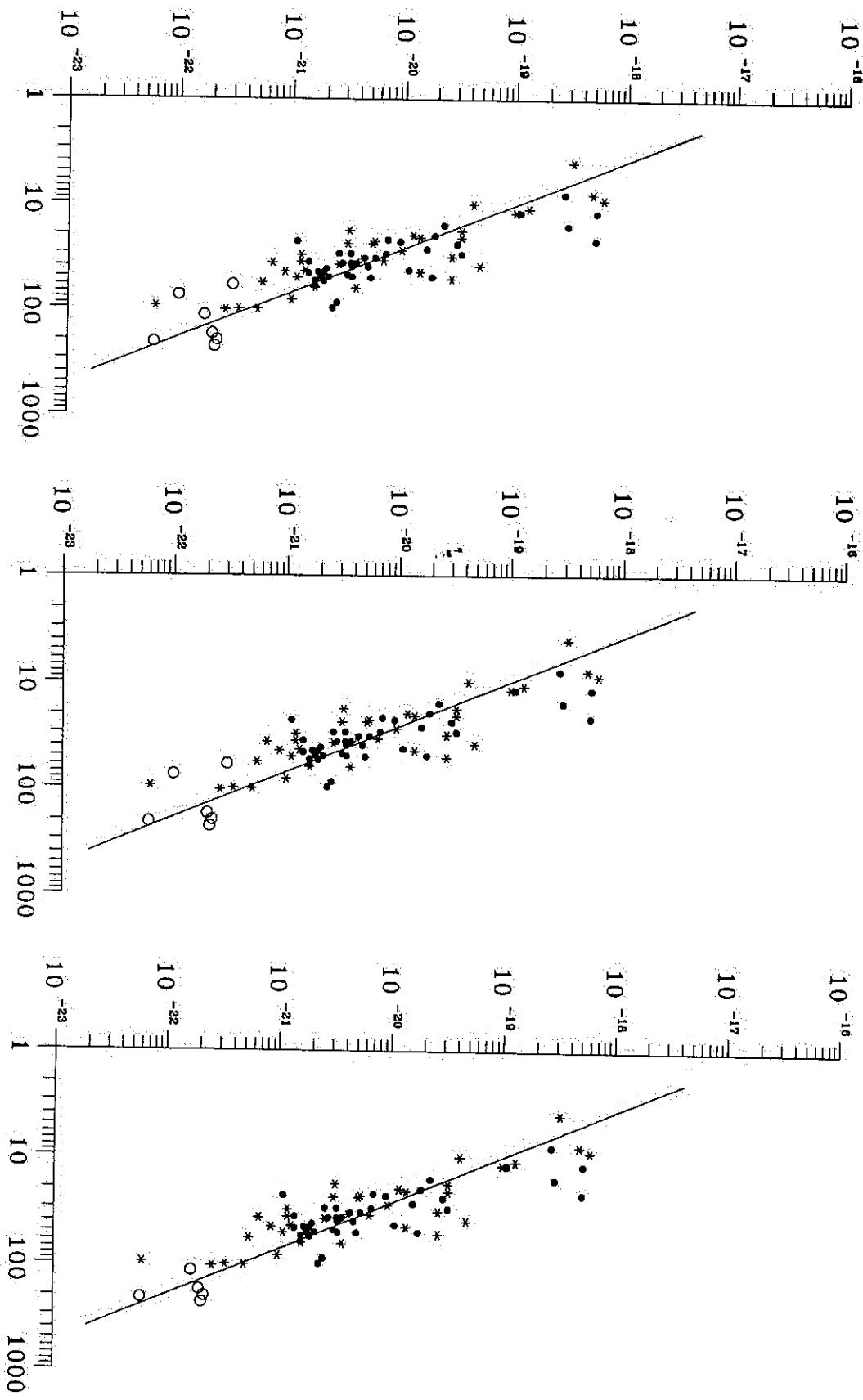


Test $\Sigma - D$ relacije za galaksiju M82 (11 kalibratora)



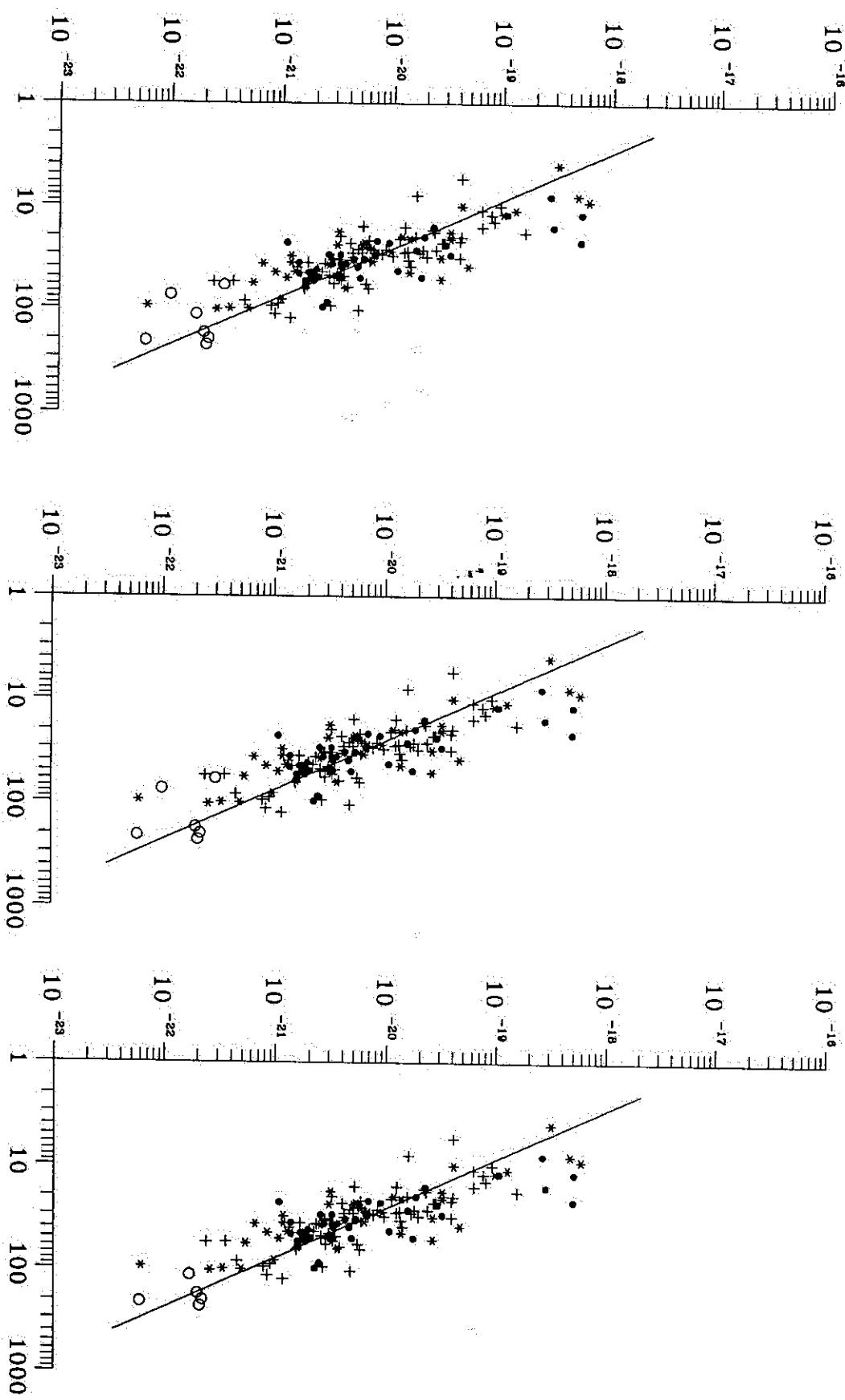


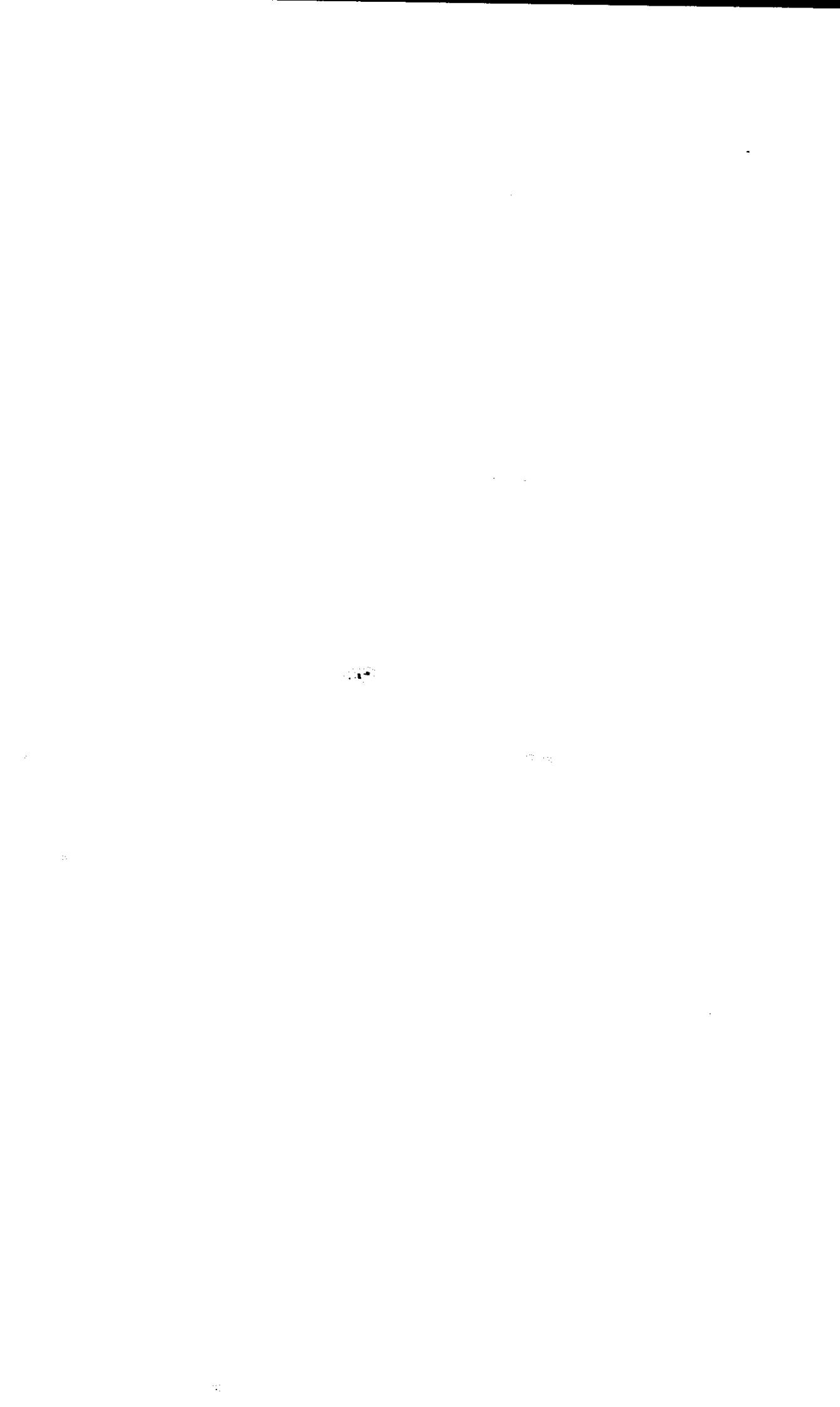
Test $\Sigma - D$ relacije za ostatke iz naše galaksije (zvezdice) – njih 36 (bez Cas Magelanovih oblaka (tačke) – njih 40 (bez 0505-679)





Test $\Sigma - D$ relacije za ostatke iz: naše galaksije (zvezdice) – njih 36 (bez Cas A)
Magelanovih oblaka (tačke) – njih 40 (bez 0505-679) i iz galaksija M31 i M33 –
81 kalibrator (plusiči)





Test $\Sigma - D$ relacije za ostatke iz: naše galaksije (zvezdice) – njih 36 (bez Cas A), Magelanovih oblaka (tačke) – njih 40 (bez 0505-679), galaksija M31 i M33 – 81 kalibrator (plusiči) i iz galaksije M82 – njih 11 (krstići)

