

1989年、3月号、64ページ)参照]。もちろん、現存の弱いビーム強度では研究が困難であった標準模型では厳密に禁止されているK中間子の崩壊過程の探索や許容されてはいるが、強く抑制されているK中間子の崩壊過程の研究が進められることになろう。

### ■ K中間子以外のビーム

これらの提案されている中間エネルギー“ハドロン加速器施設”はK中間子を供給するのにとどまるものではない。負の電荷をもつ2次ビームを長い磁気ビームチャネルに通すと、はじめは混在していた中間子はすべて崩壊してしまい、純度の高い反陽子ビームを得ることもできる。CERNにある小型のLEARリングは確率冷却によって運動量のそろった反陽子ビームを供給することができるが、リングが小さいためKAONやロスアラモスで計画されている高性能中間エネルギー加速器で得られる反陽子ビームのエネルギーに比べるとずっと低いエネルギーの反陽子しか加速できない。確率冷却は、ビームの位相空間における広がりを縮めて、質の高いビームをつくり出すが、非常に高価であるので、KAONではいまのところ反陽子ビームの確率冷却は考えていない。

陽子と反陽子を比較することは超重力理論やCPT不変性のテストにとってとくに興味がもたれている。陽子-反陽子消滅過程の研究は、これまで長い間反陽子ビーム束の強度によって制限を受けてきた。KAONで得られる反陽子のエネルギー領域では、反陽子は陽子と消滅してチャームクォークと反チャームクォークとの束縛状態である“チャームモニウム(charmonium)”

をつくることができる。小委員会は反陽子-陽子消滅によって生成されるチャームモニウム状態は陽電子-電子衝突によって生成される光子のスピンドーピティをもつものにかぎられないことを指摘している。このように、提案されているハドロン施設は重いクォークのスペクトロスコピーにとって電子-陽電子衝突型リングに対して相補的で重要な役割を果たすであろう。

KAONで予想されるニュートリノビームの強い粒子束はニュートリノ振動の探索や電弱相互作用理論の中心的なパラメーターであるワインバーグ角度 $\theta_w$ の高精度測定をも可能とする。この測定とCERNとスタンフォードの

新しい電子-陽電子衝突型高エネルギー加速器で来年中には行われることが期待されている中性ベクトルメソン $Z^0$ の質量の精密測定とを比較することにより標準模型の予測についての厳密なテストが可能となるであろう。

KAON小委員会は、バンクーバーのKAON施設の設計を評価しているが、さらにカナダが米国エネルギー省による計画についての技術的検討を受ける用意があると記している。この小委員会の議長であるフェッシュバッハによって述べられているようにこの報告書は原子核助言委員会によって審査された後初めてその見解と勧告が財政機関に報告されることになっている。

## CCDカメラで探る原始銀河

家 正則

### ■ CCDカメラの活躍

1980年代には天体観測の世界でも大きな技術革新がいくつかあった。そのうち最も劇的だったのは、検出器としての写真乾板やフィルムがCCD(電荷結合素子)に置き換わったことであろう。CCDカメラは現在では家庭用ビデオカメラとしてもおなじみになりつつある。だが、天体観測用のCCDカメラには微かな星明かりを捕らえるための特殊な工夫が施されている。

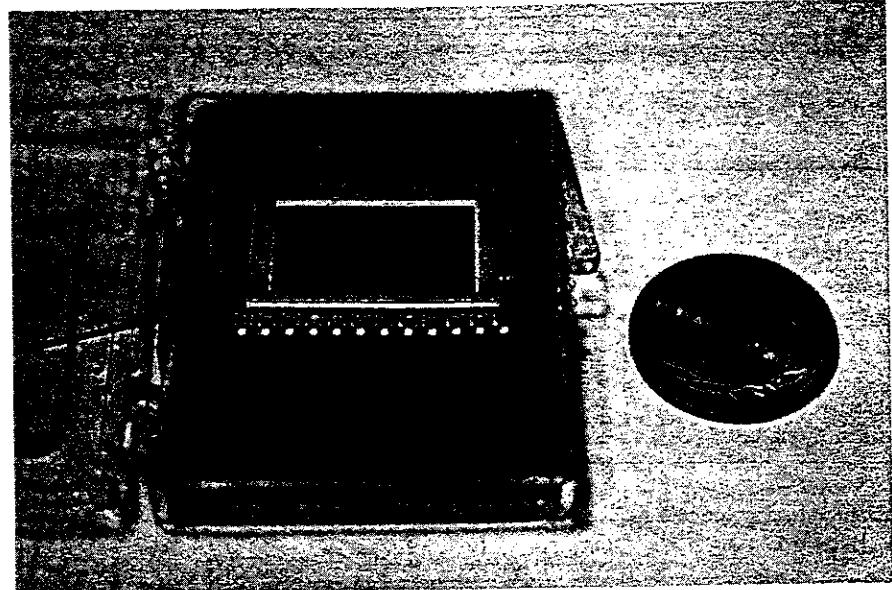
〈図1〉は世界中の天文台で現在最も多用されているCCD素子である。この素子には15マイクロメートル角の画素が $1024 \times 640$ 個ならんでいる。光化学反応を利用した従来の写真乾板やフィルムでは光を捕らえる効率は1%

程度でしかなかった。半導体内部での光電効果を利用したCCDは、入射光子の約80%を捕らえて電子に変換することができる。おのおのの画素には発生した電子を数10万個まで蓄えられる電気的なバケツがついている。

きわめて暗い天体を観測するには、シャッターを開放にしてCCDの各画素に光電子を蓄積し、露出終了後に各画素にたまつた電子をバケツリレー(電荷転送)して読み出す。CCD内部で発生する熱電子がまぎれ込まないように、CCDは真空容器の中で-120°C程度に冷却して用いる。

〈図2〉は東京大学木曾観測所の105センチメートルシュミット望遠鏡に取り付けたCCDカメラの写真である。夜空の暗い木曾観測所の場合、赤色域

図1 RCA社製の1024×640画素のCCD素子



で透過波長幅1000オングストロームのフィルターを用いると、10分間ほどで空からの光電子数が約1万個/画素となる。光電子数がこの程度になれば、光電子の統計的なポアソン雑音以外はほぼ無視できる。

国立天文台岡山天体物理観測所ではCCDカメラ技術の枠を凝らすことによって、読みだし雑音が電子6個相当の極低雑音カメラが完成している<sup>1)</sup>。光電子の数を6個程度の誤差で数え上げられるという超高感度カメラである。

### ■ 見えてきた微光天体

図3はこのようなCCDカメラの威力を示す例である。上図は天体写真集の最高傑作と言われるパロマー掃天写真図。下図はわれわれが木曾観測所でCCDカメラを用いて撮影した同じ天域である。パロマーの方が気流の乱れが小さくて星像がシャープなため、検出器が同じならより暗い天体まで見えるはずである。不利な条件にもかかわらず、CCDのほうが写真乾板よりも圧倒的に良く写ることがよくわかる。これは光に対する感度が良いうえに、その再現性がきわめて良いためである。写真の場合、乳剤粒子に起因するムラは再現性がないが、CCDの感度ムラは良い再現性がある。この違いが大きいのである。

街明かりがまったく届かないところでも、夜空は真っ暗ではない。地球の上層大気中の分子や原子が放つ“大気光”，惑星の公転軌道面上に散在する微小な塵が太陽光を散乱して光る“黄道光”，それに個々には識別できないほどの暗い星々や遠くの銀河からの“背景星野光”によって、夜空はほぼ一様に

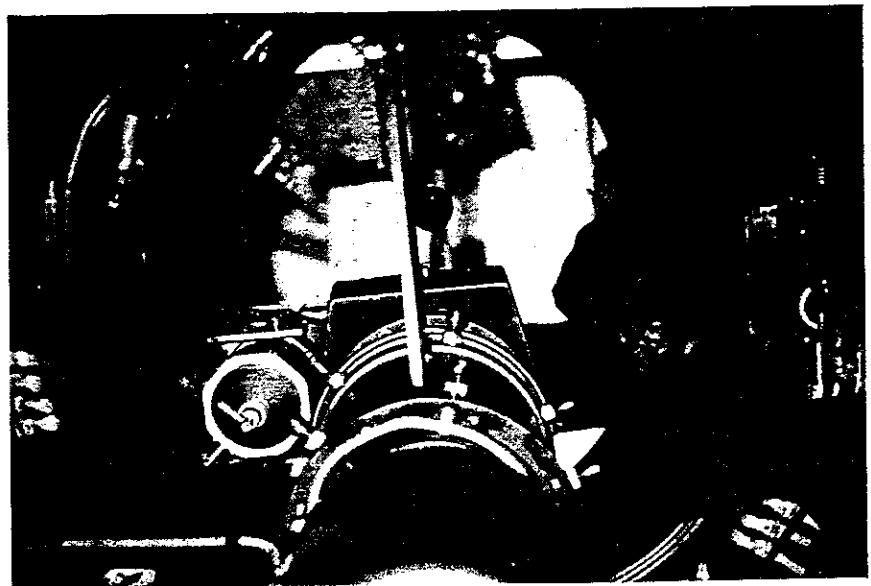


図2 東京大学木曾観測所のシュミット望遠鏡に設置した液体窒素冷却型CCDカメラ(金色デュワー)

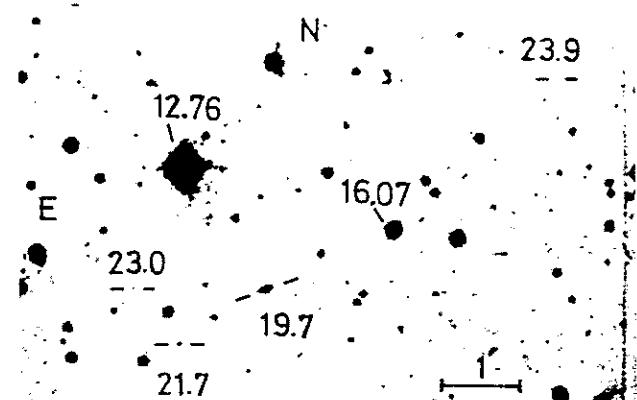
ほのかに輝いている。その明るさは1平方秒角あたり青色域で22等星1つ程度、赤色域では20等星1つ程度に相当する。星の像は地上では空気のゆらぎのため、およそ1平方秒角程度に広がってしまう。5等級の差はちょうど100倍に相当するから、青色域で27等級の天体があるとき、そこでは夜空の明るさが周囲に比べてほんの1%だけ増えることになる。どれだけ暗い天体が見えるかは、夜空の明るさをどれだけ精度良く測れるかにかかっている。

図3のCCD画像は、写野中心をわざとわずかにずらして撮影した9枚

のCCD画像を、コンピューター処理して感度ムラの補正を行い、重ね合わせたものである。赤色域では約24等級の天体が見えているが、これは青色域では約25.5等級に相当する。総積分時間2時間のこの観測の精度は0.3%であった。国内の観測所では残念ながら非常に良い星像に恵まれる機会が少ないので、星像が1秒角以下になれば、この精度での限界等級は27等に至るはずである。

星像の良いチリの天文台の4メートル望遠鏡にCCDカメラを取り付けて銀河系南極方向などの観測を続けているタイソン(J.A.Tyson)(パリティ

〈図3〉星数が少なく遠い宇宙を見るのに適した銀河系北極方向の乳剤写真画像(上:パロマー撮天写真星図)とCCD画像(下:木曾観測所にて撮影)



Vol. 2 No. 10 参照<sup>2)</sup>)は、総積分時間 16 時間に及ぶ 100 枚近い CCD 画像をコンピューター処理して重ね合わせることにより、青色域で 28 等級までの天体を検出することに成功したと最近報告している<sup>3)</sup>。限界等級ぎりぎりの天体は色が青く、数秒角に広がっていて、1 平方分角あたり平均して約 35 個程度もあり、互いに重なり合うほどにひしめいて見えるという。

#### ■ 微光銀河の正体

天体観測への CCD の応用によって見えてきたこのような暗い天体の正体はなんであろうか。約 22 等級よりも暗い天体はその大部分が遠方の銀河であると考えられている。遠い天体の距離を表すのに天文学では赤方偏移  $z$  という量を用いる。一様に膨張する宇宙では、遠い天体ほど高速度で遠ざかっている。遠ざかっている天体からの光は、ドップラー効果のため波長が長くなる。波長の長くなった割合を赤方偏移

$z$  という。赤方偏移  $z$  はスペクトル観測を行えば直接求められるが、このような暗い天体の光を分散させてスペクトルを撮るのは困難である。タイソンが発見した 26 等級より暗いこれらの天体は、その色や大きさからおおむね  $1 < z < 3$  程度の銀河と推定される。

$z$  の大きい銀河は遠い銀河である。宇宙の果て近くにある遠い銀河はとりも直さず宇宙の始まりのころの若い銀河である。このような生まれたての銀河(原始銀河)の研究が今脚光を浴びている。

#### ■ 原始銀河とは

ビッグバン宇宙では、高温の宇宙が冷えてきてプラズマが中性化した後、物質密度のゆらぎが著しくなると、やがて重力的に独立した原始銀河ができる。そのような原始銀河ができた時期  $z_f$  は、宇宙モデルに依存するが、最近では  $3 < z_f < 30$  の時代と考えられている。 $z_f$  に近い銀河の発見は銀河誕生の

ドラマの解明だけではなく、どの宇宙モデルが正しいかを検証する上でもきわめて重要なである。

銀河が誕生したころはまだ物質の大部分は水素とヘリウムとからなり、炭素、窒素、酸素やそれ以上の重元素はほとんどなかった。このため、現在とは星の生まれ方が少し違っていて、質量の比較的大きい星が一度にたくさん生まれた可能性がある。大質量の星ほど高温で明るく、寿命が短い。つまり原始銀河は、始めに大質量の明るい星が輝くため、現在の銀河に比べて 100 倍ほども明るい可能性があるとパートリッジ(R. B. Partridge)とピーブルズ(P. J. E. Peebles)は予想した<sup>4)</sup>。そのような原始銀河のスペクトルは高温度星からの紫外線連続光と、紫外線で電離した星間ガスが放つ輝線(とくに水素原子のライマン  $\alpha$  輝線)が強いはずである。

#### ■ 銀河系外背景光

そのような原子銀河を探す第一歩として、銀河系の外の宇宙の果てからやってくる光(銀河系外背景光)が全体としてどれだけあるかが問題となった。さまざまな観測から、現在のところ銀河系外背景光の強さは 5 000 オングストローム域で 27.8 等級/平方秒角より弱いとされている。パートリッジらの予測よりだいぶ暗いようなのである。

われわれは〈図3〉のデータをもとに、銀河系外背景光に 10~60 秒角スケールでの空間的なゆらぎがないかどうかを調べた。銀河の大きさは遠いほど小さく見えるが、原始銀河ほどの距離ともなると、宇宙膨張のため見かけ上かえって大きく見えるようになる。したがって、今までの観測では銀河系

外背景光のこのスケールでのムラムラを見落としていた可能性があると考えたのである。結果としては、 $4.3 < z < 4.9$  のライマン  $\alpha$  輝線銀河に相当する空間的なゆらぎが存在する可能性が捨て切れないものの、CCD 観測による新しい上限値を得たのに止どまった<sup>5)</sup>。こういう一般的な撮像観測では、目印がないため原始銀河の候補を特定することはむずかしい。なかなか、これこそ原始銀河という決定打が打てないのである。

### ■ 最も遠いクエーサーと銀河

現在確認されている最も遠い天体は、赤色域で 20 等級の“クエーサー” Q0051-279 であり、 $z=4.43$ (光速の 93%) で遠ざかっている<sup>6)</sup>。これはハッブル定数  $H_0=50 \text{ km/sec/Mpc}$ 、減速定数  $q_0=0.5$  の宇宙モデルによると、宇宙誕生後約 10 億年、宇宙年齢の 7.7% の時代の天体であり、120 億光年の距離にある(図 4)。Q0051-279 は、視野の広いシュミット望遠鏡にプリズムをつけて、銀河系の南極方向を探しているうちに輝線スペクトルをもつ天体として見つかったものである。クエーサーはこのような遠方でも観測できるほどの莫大なエネルギーを放射しているが、それはクエーサーの中心にある底なしのブラックホールにガスが落ち込むためであると考えられている。 $z > 4$  のクエーサーは今までに 10 数個発見されているが、これらのクエーサーが原始銀河の中心核であるという証拠はまだ上がってない。クエーサー PKS1614+051 の近くにはライマン  $\alpha$  輝線天体( $z=3.2$ )が発見されたが<sup>7)</sup>、生まれたての星があれば強いはずの紫外線連続光が弱いため、これは原始銀河

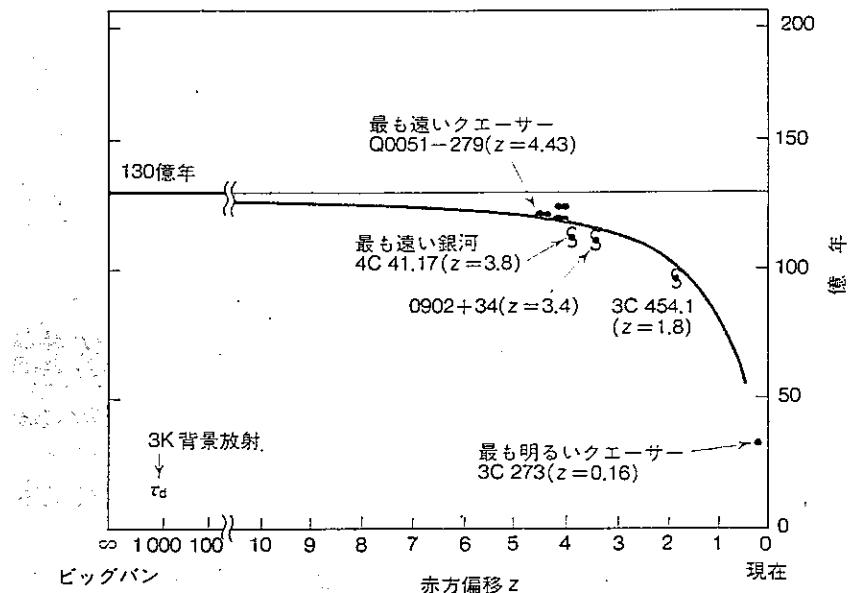


図 4 赤方偏移  $z$  と経過時間  $t$ (過去へ遡って測った時間)

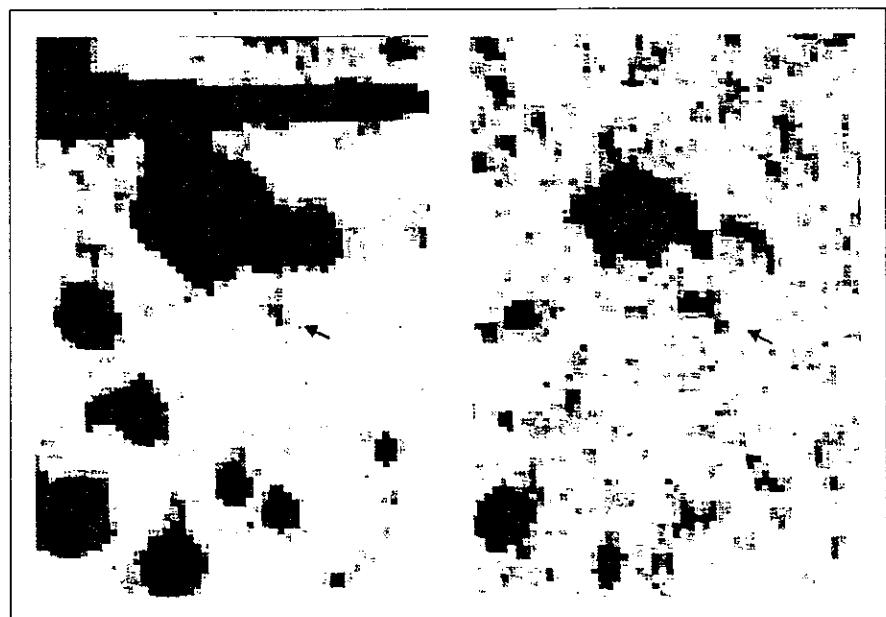
これに対して、確認されている最も遠い銀河はチャンバース(K.Chambers)とマイリー(G.Miley)ら<sup>8)</sup>が新しく発見した 4C41.17 という名前の“電波銀河”で  $z=3.8$  である。宇宙の年齢を 130 億年とすると、われわれは約 118 億年前のこの銀河の姿を見ているわけである。言いかえると、4C41.17 は宇宙が始まってからほんの 12 億年後には一人前の銀河になっていたことになる。それまでのレコードホルダーだ

図 4 赤方偏移  $z$  と経過時間  $t$ (過去へ遡って測った時間)

最も遠いクエーサーと銀河の  $z$  と  $t$  の関係を、 $H_0=50 \text{ km/sec/Mpc}$ ,  $q_0=0.5$  の宇宙モデルの場合について示す。 $H_0$  と  $q_0$  の値が異なる宇宙モデルでは別の曲線となる。

図 5 木曾観測所で発見した  $z=3.18$  の原始銀河候補(矢印)

他の天体に比べてライマン  $\alpha$  輝線像(右)が連続光像(左)より明るい。クエーサー Q0636+63( $z=3.18$ )の周辺で矢印のような輝線天体が数個発見された。



った電波銀河  $0902+34$  ( $z=3.4$ ) にも、可視光から赤外線にかけての色から、15億年程度の年齢の星がすでにかなり多く含まれていることが指摘されている。これらの電波銀河では、星がいつせいに生まれたのではないらしい。 $z>3$  と確認された銀河の数はまだほんの少ししかない。ましてや、“生まれたての” 原始銀河はまだ見つかってはいないのである。

### ■ 原始銀河の候補

図5は、われわれが1988年12月に木曾観測所で原始銀河探しの観測を行い、新しく発見した  $z=3.18$  の原始銀河の候補天体である<sup>9)</sup>。この観測には、東京大学の高遠を中心にして新たに開発したジール-トムソン冷却方式のCCDカメラを用いた。この天体は、 $z=3.18$  のクエーサー Q0636+68 の周囲 12 分角をライマン  $\alpha$  輝線だけを通すフィルター(中心波長 5040 オングストローム、波長幅 100 オングストローム)と連続光を通すフィルター(中心波長 6800 オングストローム、波長幅 800 オングストローム)とで撮影したところ、図中矢印の天体のように、輝線でのみ明るい天体として発見されたものである。この観測で同様の天体が数個見つかった。

これらが、本当に  $z=3.2$  の距離にある生まれたての銀河なのかどうかは、そのスペクトル観測を行うまで確定はできない。だが、今までに確認された  $z>3$  のライマン  $\alpha$  輴線天体が電波銀河そのものかクエーサーのごく近くの電離ガス雲にかぎっていたのに対し、今回発見した天体は若い星の存在をうかがわせる紫外線が見える点と、クエーサーからかなり距離が離れていて

る点で興味深い。残念ながらいまのところ国内の望遠鏡ではスペクトルによる確認観測は不可能である。そこで、われわれは大西洋のカナリー諸島にある英国のラ・パルマ天文台の 4.2 メートル望遠鏡を使って観測する申し込みをしている。

### ■ JNLT 計画

より大きな  $z$  の(より遠く、より昔の)銀河を探すためにさまざまな努力が続けられている。原始銀河は  $z=4$  ぐらいで見えるのだろうか、それとも  $z=20$  ぐらいまで行かないと言えないのだろうか。現在の観測技術では  $z<7$  (光速の 97%， 宇宙誕生後 4.6 億年) くらいまでの銀河の観測は不可能ではない。また、最近 2 次元画像が得られる CCD に似た赤外線用検出器が急激に進歩していることを考えると、 $z<20$  まで観測ができる可能性がある。これらの遠くて暗い天体の正体を明らかにするには、“大口径の望遠鏡”と“赤外線での観測能力”とが決定的に重要である。

国立天文台では、宇宙を観測するのに地球上で最も適しているハワイ島マウナケア山頂に、直径 7.5 メートルの“大型光学赤外線望遠鏡(JNLT)”を建設する計画を練っている。これは薄型鏡を能動光学方式で制御するというまったく新しいタイプの望遠鏡であり、赤外線での精密な観測ができる世界最初の大型望遠鏡である。望遠鏡建設に必要な基礎技術のめども立ち、山頂を管理するハワイ大学側も JNLT のために良い場所をあけて待ってくれている。完成は 1990 年代後半になるだろうが、JNLT はこの分野でも世界で最も活躍する望遠鏡となるはずである。

### 参考文献

- 1) H. Kawakami : 光学赤外線観測天文学シンポジウム第5回 岡山ユーザーズ・ミーティング, p.75, (1988).
- 2) J. A. Tyson : Astron. J., 96, 1, (1988).
- 3) J. A. Tyson : IAU Symp., 139, in press (1989).
- 4) R. B. Partridge, P. J. E. Peebles: Astrophys. J., 147, 868 (1967) ; 148, 377 (1967).
- 5) M. Iye, S. Ichikawa, S. Okamura, N. Takato : in 'Big Bang, Active Galactic Nuclei and Supernovae', S. Hayakawa, K. Sato eds.: University Academy Press Inc., p.187 (1988).
- 6) S. J. Warren, P. C. Hewett, P. S. Osmer, M. J. Irwin : Nature, 330, 453, (1987).
- 7) S. Djorgovski : in 'Nearly Normal Galaxies', S. M. Faber ed. : Springer-Verlag, p. 290 (1987).
- 8) K. Chambers, G. Miley, W. van Breugel : Ap. J., in press (1989).
- 9) N. Takato : 東京大学理学系大学院修士論文, (1989).