

ニュートリノ天体追観測における変動天体の自動検出に関する研究

広島大学理学部物理科学科 B141723 山崎優衣奈

指導教員 深沢泰司

主査 川端弘治

副査 杉立徹

2017年2月28日

概要

一昨年、南極の氷床中に建設された IceCube ニュートリノ観測所から検出アラートが発信されるようになったことで、高エネルギーニュートリノの母天体の探索が可能となった。広島大学かなた望遠鏡でも可視光と近赤外線での探索観測を行なっているが、そのような突発天体の観測では対応天体をすばやく同定して観測体制を敷くことが必要であり、自動化が急がれる。

本研究では、かなた望遠鏡で得た超新星やブレーザーが写り込んだ画像をサンプル画像とし、過去に取られたカタログ画像と比較することで変動天体として検出する手法について研究を行った。検出の際には両者を畳み込みとスケールリングによりマッチさせて差し引くが、観測条件によって天体の誤検出や取りこぼしが発生する。そこで、どのような原因でこれらが発生するのかを系統的に調査して、より良い検出条件を考察した。

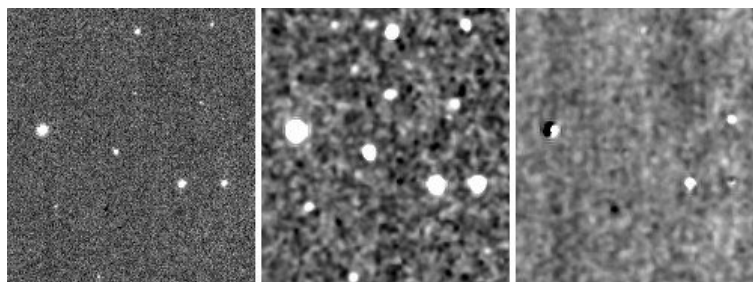


図 1: (左) かなた望遠鏡で取得した画像、(中) カタログ画像、(右) 両者をマッチして差分をとった画像

目次

第 1 章	背景と目的	5
1.1	ニュートリノ天体	5
1.2	IceCube	5
1.3	広島大学かなた望遠鏡による突発天体観測	6
1.4	ニュートリノ天体の可視対応天体の検出	7
1.5	本研究の目的	7
第 2 章	観測とデータリダクション	8
2.1	かなた望遠鏡と HONIR	8
2.1.1	かなた望遠鏡	8
2.1.2	可視近赤外線同時カメラ HONIR	8
2.2	サンプルデータ	10
2.2.1	HONIR による超新星、ブレーザー同定画像	10
2.2.2	カタログ画像 SDSS,2MASS	11
2.3	データリダクション	11
2.3.1	画像処理タスクとパラメータ IRAF,SEXTRACTOR,hotpants	11
2.3.2	生データの一次処理	13
2.3.3	背景スカイ成分の差し引き	14
2.3.4	画像の重ねあわせ	15
2.3.5	テンプレート画像差し引き	15
2.3.6	自動天体検出	15
2.4	変動天体の自動検出法	16
2.4.1	検出済天体カタログでの比較	16
2.4.2	テンプレート画像差し引き画像での検出	16
第 3 章	変動天体の自動検出	17
3.1	変動天体検出に用いるパラメータ	17
3.2	サンプルデータのカテゴリ分け	17
3.3	収差の視野内依存性とシーイング	19
3.4	テンプレート画像差し引き法による自動検出	25
3.4.1	自動検出の結果	25
3.4.2	自動検出に用いたパラメータの条件設定	26
3.5	考察	29

3.5.1	誤検出例の除去 1 : オブジェクト座標と差分画像で検出した座標のずれの評価 . . .	29
3.5.2	誤検出例の除去 2 : オブジェクト座標とかなた画像で検出した座標のずれの評価 . .	30
3.5.3	各画像の判定結果の考察	34
3.5.4	自動検出条件に関する考察	42
第 4 章	まとめと今後	43

目次

1	(左) かなた望遠鏡で取得した画像、(中) カタログ画像、(右) 両者をマッチして差分をとった画像	1
1.1	IceCube ニュートリノ観測所 [1]	6
1.2	IceCube の検出器 [2]	6
2.1	東広島天文台	9
2.2	かなた望遠鏡と HONIR	10
2.3	可視光画像の一次処理 (左から生データ、オーバースキャン補正後、バイアス補正後、フラット補正後)	14
2.4	近赤外線画像の一次処理 (左から生データ、オーバースキャン補正後、ダーク補正後、フラット補正後、スカイ補正後、パッドピクセル補正後)	14
2.5	一次処理に用いるフレーム ((上) 可視光のバイアス画像、フラット画像、(下) 近赤外線のダーク画像、フラット画像)	15
3.1	可視、良シーイングでの、視野を 9 等分したそれぞれの領域内での平均 FWHM とその標準偏差	20
3.2	可視、平均シーイングでの、視野を 9 等分したそれぞれの領域内での平均 FWHM とその標準偏差	20
3.3	可視、悪シーイングでの、視野を 9 等分したそれぞれの領域内での平均 FWHM とその標準偏差	21
3.4	近赤外、良シーイングでの、視野を 9 等分したそれぞれの領域内での平均 FWHM とその標準偏差	21
3.5	近赤外、平均シーイングでの、視野を 9 等分したそれぞれの領域内での平均 FWHM とその標準偏差	21
3.6	近赤外、悪シーイングでの、視野を 9 等分したそれぞれの領域内での平均 FWHM とその標準偏差	22
3.7	可視光のシーイングが良い画像、平均的な画像、悪い画像の x 座標と FWHM の関係	22
3.8	可視光のシーイングが良い画像、平均的な画像、悪い画像の y 座標と FWHM の関係。シーイングが悪い時は分布が一様だが、シーイングが良い時は y の値が小さい方と大きい方で FWHM の値が異なる傾向がみられる。	23
3.9	近赤外線のシーイングが良い画像、平均的な画像、悪い画像の x 座標と FWHM の関係	24
3.10	近赤外線のシーイングが良い画像、平均的な画像、悪い画像の y 座標と FWHM の関係	24
3.11	J050926 R バンド	29

3.12 PSNinIC1776 R バンド	30
3.13 PSNinNGC7653 R バンド	30
3.14 (左) かなた画像、(右) 差分画像。緑色円が差分画像で、ピンク色円がかなた画像で検出した天体を示している。差分画像ではオブジェクトを検出できているが、かなた画像では銀河自体を検出してしまっている。	31
3.15 PSN2016cok H バンド	31
3.16 PSN2017cjb H バンド	32
3.17 PSN2017czd I バンド	32
3.18 PSNinIC1776 H バンド	33
3.19 PSNinIC1776 J バンド	33
3.20 J050926 J バンド	34
3.21 PSN2016b H バンド	34
3.22 PSN2016b I バンド	35
3.23 PSN2016b J バンド	35
3.24 PSN2016bkv H バンド	36
3.25 PSN2016bkv I バンド	36
3.26 PSN2016cok I バンド	37
3.27 PSN2017cjb I バンド	37
3.28 PSN2017czd H バンド	38
3.29 PSNJ0059 J バンド	38
3.30 PSNJ0059 R バンド	39
3.31 PSNinNGC7653 J バンド	39
3.32 SN2016bau J バンド	40
3.33 SN2016bau R バンド	40
3.34 iPTF15eqv J バンド	41
3.35 iPTF15eqv R バンド	41
3.36 緑のマークがされているのが周辺星として検出されたサンプル。宇宙線イベントや歪んだ星像、暗い星像も検出されている。	42

第1章 背景と目的

1.1 ニュートリノ天体

近年、様々な波長の電磁波での宇宙観測に加えて、ニュートリノでの宇宙観測が試みられている。ニュートリノは素粒子のレプトンの一種で、電子ニュートリノ (ν_e)、 μ ニュートリノ (ν_μ)、 τ ニュートリノ (ν_τ) の3種類が存在する。ニュートリノは弱い力のみで相互作用するため、物質との相互作用の断面積が非常に小さい。また電氣的に中性であるので、宇宙空間の磁場で進行方向が曲げられることがない。これらの特徴から、電磁波を通さない高密度、高温の物質や放射場を通り抜けることができるため、ニュートリノを観測することで電磁波では観測できなかった銀河系外の高エネルギー現象や、天体内部での爆発的要素合成等の情報を得ることが出来ると期待される。

これまで観測されてきたニュートリノの母天体は太陽やごく近傍で発生した超新星である。太陽ニュートリノ観測では中心部で起こっている核融合の様子の解明が進んだ。これらの天体からのニュートリノのエネルギーは MeV (10^6 eV) の領域であるが、更に高エネルギーの TeV (10^{12} eV)、PeV (10^{15} eV) のエネルギー領域のニュートリノも観測されるようになった。高エネルギーニュートリノの生成には高エネルギー宇宙線が密接に関わるため高エネルギー宇宙線の起源が解明されることが期待される。高エネルギー宇宙線の主成分である陽子が光子と光パイオン生成過程を介して衝突する反応

$$\gamma p \rightarrow \pi^\pm X \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu \rightarrow e^\pm \nu_e \nu_\mu$$

が高エネルギーニュートリノの生成過程であると考えられている。この高エネルギーニュートリノの起源天体は明らかではないが、有力候補として銀河系外のブレーザーなどの高エネルギー現象が考えられている。

1.2 IceCube

IceCube ニュートリノ観測所は南極のアムゼン・スコット基地に設立された世界最大のニュートリノ観測施設である。2005年から建設が開始され、2010年に建設完了、2011年4月から全ての検出器を用いた観測が開始された。プロジェクトを率いるのはウィスコンシン大学マディソン校である。2017年11月現在、12カ国の49機関、約300名の研究者がIceCube Collaborationとして参加している。主要の資金源は米国のNational Science Foundation(NSF)である。検出器は南極の氷床中に86本の縦穴を120m間隔に掘削し、それぞれの穴の深さ1450mから2450mに60個の光検出器モジュール(DOM; Digital Optical Module)を17m間隔で配置して埋め込んでいる。合計5160個のDOMが体積 1km^3 に配置されているという、3次元の広がりを持った巨大な検出器である。

ニュートリノが検出器に入射して、氷と相互作用すると、荷電粒子が放出される。この荷電粒子が、氷中を氷中の光速より速く走る際に放射される光(チェレンコフ光)を、DOMで検出する。

ニュートリノと氷の相互作用

荷電カレントニュートリノ核子相互作用

$$\nu + N \rightarrow l + X, l = e, \mu, \tau \quad (1.1)$$

から生成される電荷レプトン l が出すチェレンコフ光を検出する。 N は核子 (陽子や中性子) を示す。 X は核子の終状態を示しておりパイ中間子など複数の高エネルギーハドロン粒子からなる。

ニュートリノの中でも最高エネルギーの TeV–PeV 領域のニュートリノを観測することを目的としている。

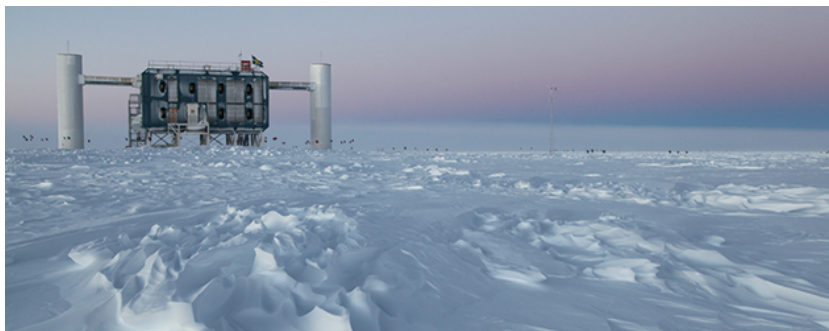


図 1.1: IceCube ニュートリノ観測所 [1]

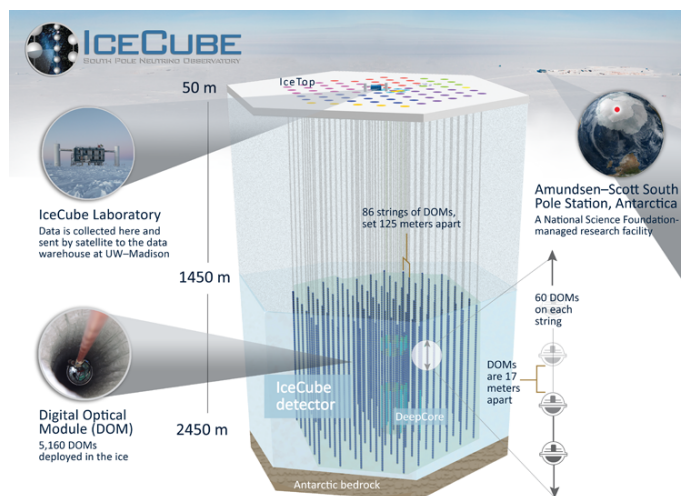


図 1.2: IceCube の検出器 [2]

1.3 広島大学かなた望遠鏡による突発天体観測

短時間に明るさや色が大きく変動する天体のことを突発天体と呼ぶ。超新星爆発やガンマ線バーストなど一度に巨大なエネルギーが放出される現象が突発天体として観測される。上で述べた高エネルギーニュー

トリノを放射する天体も突発天体として観測されると期待される。広島大学かなた望遠鏡は、高い機動力や2波長帯で同時撮像が可能であるなどの特性を生かし、突発天体の観測を重点的に行なっている。かなた望遠鏡での突発天体観測の流れは以下のとおりである。

1. 突発天体の情報を受け取る
2. 観測する領域、順番を決定する
3. 観測を実施する
4. (突発天体の正確な位置がわかっていない場合) 観測データから変動天体を検出する
5. 観測結果をしかるべき団体や新天体サーバーへ報告する
6. 追跡観測をする

1.4 ニュートリノ天体の可視対応天体の検出

2016年4月から、IceCube ニュートリノ観測所で宇宙ニュートリノが検出されると、アラートが配信されるようになった。ニュートリノ観測では位置精度が悪く、母天体の特定は容易ではないが、その位置誤差円内に電磁波で変動している天体があれば、高確率でニュートリノの母天体であると考えられるため、電磁波による母天体探索と追跡観測は重要である。かなた望遠鏡でも可視光と近赤外線に対応天体の探索観測を行なっている。IceCube アラートの方向の誤差範囲は典型的に約 1.3° であり、その範囲内を観測する必要がある。

変動天体の発見は、取得した画像と過去に取得された同じ領域の画像(テンプレート画像)とを比較し、明るさが変化している天体を探す手法が通常用いられるが、その自動化は容易ではなく、手動で時間をかけて行われることも多い。

その手法を詳しく述べると、取得画像とテンプレート画像をスケージングと畳み込みを行った後、両者の差し引きを行い差分画像を作成する。差分画像に残っている天体を増光天体として検出するが、その際ノイズなどの影響で変動天体以外のものも多数検出されるため、検出した天体について取得画像とテンプレート画像で検出条件を課して確認を行い、変動天体といえるものを判定する必要がある。

1.5 本研究の目的

IceCube アラートに応じた追跡観測では、素早く対応天体を同定し報告することが求められるため、自動化が必須である。変動天体の検出は、画像によって観測条件が異なるため、検出条件を一意に決めることが難しく、自動化へのハードルが残っている。本研究では現行の検出条件で、どのような場合に誤検出や取りこぼしが発生するのかを調査することで、変動天体検出の自動化を目指し検出条件の見直しを行うことを目的とする。

第2章 観測とデータリダクション

2.1 かなた望遠鏡と HONIR

2.1.1 かなた望遠鏡

かなた望遠鏡は、広島大学宇宙科学センター附属東広島天文台に設置されている光学赤外線望遠鏡である。主鏡の有効径は 1.5m で、国内有数の大きさである。高い機動力を持ち、すばやく観測を開始できるため、突発天体の即時観測に有効である。表にかなた望遠鏡の仕様を示す。

表 2.1: かなた望遠鏡の仕様

項目	仕様
光学系	リッチー・クレティアン光学系
主鏡の有効径	1540mm
焦点モード	カセグレン焦点・ナスミス焦点
分解能	1"FWHM
視野	直径 15 分角
最大駆動速度	方位軸 5/sec・高度軸 2/sec
最大加速度	1/sec ²
架台	経緯台

2.1.2 可視近赤外線同時カメラ HONIR

かなた望遠鏡のカセグレン焦点には可視赤外線同時カメラ HONIR(Hiroshima Optical Near-InfraRed camera) が取り付けられている。HONIR は可視 1 バンド、近赤外 2 バンドの 3 バンドで同時に観測が可能な撮像装置である。撮像モード、分光モード、偏光撮像・偏光分光モードを有しており、その全てで可視光と近赤外線の同時観測が可能である。同時観測により一度の観測で波長依存性がわかるので、即時性が求められる突発天体観測に有効な特長であると言える。

表 2.2: HONIR の性能

項目	可視バンド	赤外バンド
波長範囲 [μm]	0.4-1.0	1.15-2.4
フィルター	B,V,Rc,Ic,Y	Y,J,H,Ks
視野	10' \times 10'	10' \times 10'
検出器	CCD	HgCdTe(VIRGO)
検出器のピクセル数	2048 \times 4096	2048 \times 2048
ピクセルサイズ [秒/pix]	0.294	0.295
検出器サイズ [mm]	3.72 \times 61.44	40.96 \times 40.96



図 2.1: 東広島天文台



図 2.2: かなた望遠鏡と HONIR

2.2 サンプルデータ

2.2.1 HONIR による超新星、ブレーザー同定画像

本研究ではかなた望遠鏡の HONIR で取得した、変動天体である超新星やブレーザーの写り込んだ 24 枚の撮像画像を変動天体のサンプルデータとして用いた。

表 2.3: サンプルデータ

天体	バンド	観測日
J050926	J,R	2017/9/23
PSN2016b	H,J,I	2016/5/12
PSN2016bkv	H,I	2016/4/11
PSN2016cok	H,I	2016/6/2
PSN2017cjb	H,I	2017/4/18
PSN2017czd	H,I	2017/4/14
PSNJ0059	J,R	2014/12/5
PSNinIC1776	H,J,R	2015/11/29
PSNinNGC7653	J,R	2016/1/6
SN2016bau	J,R	2016/3/28
iPTFeqv	J,R	2015/11/3

2.2.2 カタログ画像 SDSS,2MASS

本研究では差分画像を作成する際に用いるテンプレート画像として、以下の公開されている天体カタログを用いた。

SDSS

SDSS(Sloan Digital Sky Survey) は可視光領域で全天の 4 分の 1 にわたる領域の天体を観測し、カタログ化したプロジェクトである。観測はアメリカ、ニューメキシコ州にあるアパッチポイント天文台 (APO) の望遠鏡で行われている。用いられているフィルターは u',g',r',i',z' の 5 つである。

2MASS

2MASS(Two Micron All-Sky Survey) は近赤外線領域での全天サーベイを目的としたプロジェクトである。観測は北半球はアメリカ、アリゾナ州の Fred Lawrence Whipple 天文台、南半球はチリの Cerro Tololo Inter-American Observatory の望遠鏡で行われた。用いられたフィルターは J,H,K_s の 3 つである。

2.3 データリダクション

2.3.1 画像処理タスクとパラメータ IRAF,SEextractor,hotpants

画像処理には以下のソフトウェアを用いた。

IRAF

IRAF(Image Reduction and Analysis Facility) は NOAO(アメリカ国立光学天文台) で開発された画像解析ソフトウェアである。本研究では、生データの一次処理と解析のスカイカウントを求める際に使用した。以下、使用したタスクを表にまとめる。

表 2.4: IRAF のタスクとパラメータ

タスク名	機能
imcopy	画像のコピーや、一部切り貼り
imcombine	複数の画像の合成 (平均化等)
imarith	画像の和、差などの算術計算
imstatistics	領域内のピクセルの統計量を出す
imreplace	画像中のピクセルのカウントを決められた値で置き換える

SExtractor

SExtractor は画像から天体を検出して解析を行うソフトウェアである。検出した個々の星に対し指定したパラメータを出力する。

多数の入力パラメータがあるが、今回は標準的なもののみを用いた。以下は標準パラメータファイルで指定するパラメータである。

表 2.5: SExtractor の指定した初期条件

パラメータ	説明
DETECT_MINAREA	星として検出する最小のピクセル数
PHOT_APERTURES	測光の際のアパーチャー直径
SATUR_LEVEL	検出器が飽和するカウントレベル
MAG_ZEROPOINT	ゼロ等級

表 2.6 に解析に用いた出力パラメータをまとめる。

表 2.6: SExtractor で求めるパラメータ

パラメータ	説明
MAG_APER	アパーチャー内等級
BACKGROUND	スカイ成分の平均カウント
X_IMAGE, Y_IMAGE	検出した星の座標
ELLIPTICITY	星像の楕円率
FWHM_IMAGE	星像の半値幅
FLAGS	星像周囲に余計なものが存在するか等のフラグ

hotpants

hotpants は 2 枚の画像において星像のカウント分布が同じになるように畳み込み法により画像変換を施して差し引くソフトウェアである。取得画像とテンプレート画像の差し引きを行う際に用いた。用いたパラメータを表 2.7 に示す。

表 2.7: hotpants のパラメータ

パラメータ	説明
uthresh	PSF カーネルの作成に用いる最大カウント
lthresh	PSF カーネルの作成に用いる最小カウント
gain	検出器のゲイン (ADU/e ⁻)
rdnoise	検出器の読み出しノイズ (ADU)

2.3.2 生データの一次処理

取得した生データには様々なノイズや補正すべき非一様性が含まれ、そのままでは解析に用いることができない。IRAF を用いてこれらのノイズを取り除く「一次処理」と呼ばれる一連の処理を行った。

オーバースキャン領域補正

検出器から電荷を読み出す際に、実際の有感画素数以上に余分に読み出した部分にあたる、画像の黒い帯状の領域をオーバースキャン領域という。ここには下で述べるバイアスカウントの短時間変動の成分が載っており、その補正に用いる。その処理が済んだ後は、これを切り取り、画像をつなぎ合わせる処理を行う。検出器ごとに全ての画像でオーバースキャン領域は同じなので、決まった座標で切り取りを行えばよい。可視画像では、IRAF を用いて HONIR 用に開発されたタスクの「hnttrimccd」を、近赤外線画像では「hnttrimvirgo」を使用した。

バイアス補正

バイアスとは検出器から電荷を読み出す際に必ず付加されるカウントである。上記のオーバースキャン領域のカウントの差し引きと、露出時間 0s で取得した画像を引くことを併用して補正を行う。

ダーク補正

ダークとはピクセル中で発生する暗電流のカウントである。シャッターを閉じた状態で処理したいデータと同じ露出時間で取得した画像を引くことで補正を行う。この補正はダークの影響が無視できない赤外線画像のみに行う。ダークにバイアスも含まれるので、ダーク補正を行うことでバイアス補正も同時に行われることになる。

フラット補正

ピクセルの感度は個々に少しずつ異なる。それに加え望遠鏡の鏡についた埃や、光学的収差の影響などで、全てのピクセルに一樣な光を入射させた場合でも、ピクセルごとに異なった値が出力されることになる。この差異を補正するのがフラット割りである。フラット画像はドーム内に一樣の光を当て取得した画像にバイアス補正をし規格化して作成する。このフラット画像で割り算をすることで補正を行う。

バッドピクセル補正

感度が著しく低いピクセルや、ダーク値が異常に高いピクセルは測定に用いることができないため、カウントを周囲のピクセルを内挿した値に置き換える補正を行う。バッドピクセルが特に多い近赤外線画像に

のみ行う。IRAF を用いて HONIR 用に開発されたタスクの「hnbpfixvirgo」を使用した。

2.3.3 背景スカイ成分の差し引き

大気で散乱された市街光や上空大気の輝線光の影響により背景に広がって載っているカウントをスカイ成分という。同じ天体を観測するとき位置をわざと少しずつずらして観測するディザリング観測を行った複数枚の画像で各ピクセルごとに中央値をとることで、天体によるカウントが取り除かれたスカイ画像を作成することができる。このスカイ画像を引くことでスカイ成分を差し引く。

SExtractor の出力タイプ「CHECKIMAGE」で「-BACKGROUND」を指定すると、スカイ成分を差し引いた画像が出力される。

可視光、近赤外線それぞれの一次処理の過程の画像を示す。生画像、バイアス画像は 2017 年 9 月 25 日の J050926 の撮像画像、フラット画像は 9 月 22 日のものを用いている。

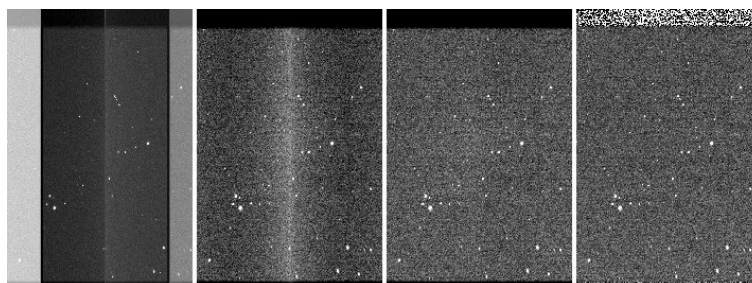


図 2.3: 可視光画像の一次処理 (左から生データ、オーバースキャン補正後、バイアス補正後、フラット補正後)

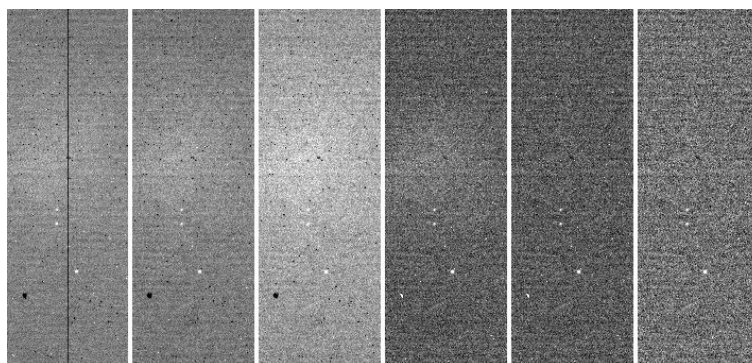


図 2.4: 近赤外線画像の一次処理 (左から生データ、オーバースキャン補正後、ダーク補正後、フラット補正後、スカイ補正後、パッドピクセル補正後)

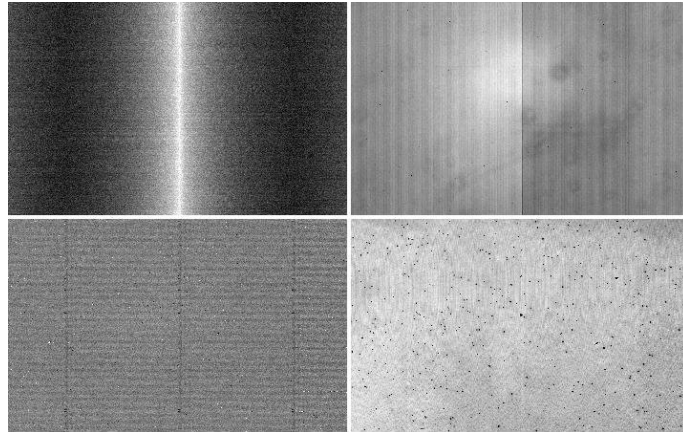


図 2.5: 一次処理に用いるフレーム ((上) 可視光のバイアス画像、フラット画像、(下) 近赤外線のダーク画像、フラット画像)

2.3.4 画像の重ねあわせ

画像中のノイズの影響を小さくするため、画像を複数枚重ねる場合がある。これにより S/N 比が向上し、ノイズに埋もれていた暗い天体まで検出できるようになる。

2.3.5 テンプレート画像差し引き

取得した画像から、過去に取られたテンプレート画像を差し引いた差分画像を作成する。増光天体がある場合、差分画像に正のカウントを持つ天体として残るので、変動天体候補の発見が容易になるはずである。

1. 取得画像の WCS(World Coordinate System) を貼る
2. 同じ領域のカatalog画像を取得する
3. PSF 合わせ (畳み込み)
4. カウント合わせ
5. テンプレートの差し引き

2.3.6 自動天体検出

SExtractor を用いて自動天体検出と測光を行う。

アパーチャー測光

アパーチャー測光は、指定した開口 (アパーチャー) 内のカウント C_{obs} の総和から背景のカウント平均 C_{sky}/N_{sky} のアパーチャー内のピクセル数 N_a 分引いたものをその星のカウント C_{star} として測定する測光方法である。

$$C_{star} = \sum C_{obs} - \frac{\sum C_{sky}}{N_{sky}} N_a$$

2.4 変動天体の自動検出法

2.4.1 検出済天体カタログでの比較

観測画像とテンプレート画像をそれぞれ SExtractor にかけて全天体を検出し、それをつき合わせることで、テンプレートに写っていない、又はテンプレートより大きくカウントが変動したものを抽出する方法である。しかし、後述するように、背景銀河が存在する場合は淡い天体を検出することが難しい。

2.4.2 テンプレート画像差し引き画像での検出

テンプレート画像を差し引いた画像 (差分画像,sub) を SExtractor にかける。差分画像上に残った天体を検出する。引き続き SExtractor のダブルイメージモードを用いることで、差分画像で検出した天体の座標及び天体サイズを強制的に用いてかなた画像、カタログ画像それぞれ測光を行い、比較に用いることも出来る。また、シングルイメージモードでかなた画像、カタログ画像それぞれ測光した結果から、差分画像で検出した座標と最も近い星像の結果を抽出して、さらなる比較に用いることも出来る。

これらの計 5 つの測光結果を用いて、ノイズによって差分画像に書き込んだものなど不要なエントリーを取り除き変動天体を見出す。そのための条件の最適化を試みる。

第3章 変動天体の自動検出

3.1 変動天体検出に用いるパラメータ

差分画像で検出された領域について、変動天体ではないものを除外するために、変動天体が満たすべきと考えられるパラメータの必要条件を課して判定を行う。変動天体たる条件には、以下の7項目を考案した。

1. 星像の形が他と同等か (星らしい像か？宇宙線イベント等のゴミではないか？)
2. 明るさがカタログと大きくずれているか (変動性はあるか？)
3. かなたと差分画像で星像の形が同等か (星らしい像か？)
4. 星像周囲に余計なものがないか (きちんとした星らしい像か？)
5. 限界等級より明るい (ノイズではない優位な星像か？)
6. 星像重心が同じか
7. 測光に失敗していないか (SExtractor の測光フラグは有効か？)

3.2 サンプルデータのカテゴリ分け

画像の観測条件が判定結果に及ぼす影響を後々考察することになると考えられることから、表 2.3 に挙げたサンプルデータを以下の観測条件を表すパラメータでカテゴリ分けする。

シーイングサイズ

シーイングサイズとは星像の大きさのことであり、カウント分布の半値幅 (FWHM) であらわす。星像の広がりは地球大気を透過する際に大気の熱的乱流の影響で起こる。シーイングサイズが小さいほどよい観測条件であると言える。シーイングサイズが周辺に写り込んでいる多数の星像に比べ、大きすぎるあるいは小さすぎると星ではないと判断できる。今回は SExtractor で検出された一つ一つの星の FWHM の平均値を計算し、その画像でのシーイングサイズの代表値とした。その際、FWHM があり得ないほど小さい又は大きいもの (3 以下または 15 以上のもの) は除外して、標準偏差 を計算した。それでも外れ値が多いことから中央値から ± 1.5 より外れるものを除外した上で平均値を計算し直した。

スカイの平均値

スカイは大気による散乱の影響のノイズのカウントであり、スカイの値が大きいと暗い星がそのゆらぎに埋もれて検出されなくなることから重要なパラメータとなると考えられる。今回は SExtractor で星一つ一つに対して出力されたスカイカウントの平均を計算した (スカイ SE)。

また、SExtractor で求めたスカイが我々が欲しい値となっていることを確認するため、IRAF で画像の星像以外の領域のカウントの平均を出した (スカイ IR)。画像の星像の領域のみのカウントを残した画像を SExtractor の出力タイプ「CHECKIMAGE」の「OBJECTS」で作成し、IRAF の imreplace でカウントを元の画像ではありえないような大きい値に置き換え、この画像を元の画像から imarith で引くことで、星像の部分のみが著しく小さい値になった天体マスク画像が出来る。IRAF の imstatistics でカウントの下限値を指定して実行することで、星像以外の領域のみを対象にした各種統計値が出力される。このようにして得られた平均の値を用いている。

スカイゆらぎ

一般にスカイの値が大きいとゆらぎも大きくなる。ここではスカイカウントの空間的な標準偏差をスカイゆらぎとして採用する。スカイの平均値と同様に星像を除いた領域で、IRAF の imstatistics で出力された STDDEV の値を用いている。

限界等級

限界等級とは、その画像で星と判別できる最も暗い星の等級である。それよりも暗い星はノイズに埋もれている。スカイゆらぎのカウントの 5 倍の値を限界等級のカウントとし、下式を用いて等級を計算した。

$$-2.5\log_{10}F = M + M_z$$

その際に用いた測光原点 M_z は、画像の 1 カウントが何等級に相当するかという値である。

写り込んでいる星の数

星の多寡により検出が容易ないし難しくなるという事が考えられる。ここでは SExtractor で検出された星の数をを用いた。

10 番目に明るい星の等級

画像の領域で検出された星の中で 10 番目に明るい星の等級を出した。その領域内に明るい星が多いのかどうかという事がわかる。明るい星が多いと、その雄大なカウント分布が周囲の暗い星の検出に何らかの悪影響を及ぼし、検出が難しくなると考えられる。

表 3.1: 観測条件

band	image	星数 (個)	10 番目 の等級	FWHM (pix)	スカイ SE (count)	スカイ IR (count)	ゆらぎ (count)	限界等級
H	PSN2016b	29	16.04	8.57	1.31	1.32	42.69	19.59
	PSN2016bkv	13	12.77	12.57	0.12	-1.44	29.51	18.68
	PSN2016cok	23	14.26	10.98	-0.66	0.025	37.5	17.69
	PSN2017cjb	39	14.92	9.85	-0.28	-0.070	59.69	17.95
	PSN2017czd	29	15.05	9.75	1.42	-0.30	60.32	17.73
	PSNinIC1776	26	15.80	10.34	0.13	-0.77	32.17	20.05
J	J050926	124	17.03	6.91	-0.034	-0.078	4.17	18.70
	PSN2016b	28	16.84	9.55	0.77	0.89	43.1	19.80
	PSNJ0059	23	14.76	9.56	0.11	-0.022	119.	15.58
	PSNinIC1776	26	16.30	9.72	-0.70	-0.98	17.36	20.58
	PSNinNGC7653	12	12.59	13.47	-1.19	-1.49	16.9	19.60
	SN2016bau	42	17.26	8.97	-1.49	-2.24	60.38	19.04
	iPTF15eqv	41	17.24	8.93	-4.41	-3.83	17.45	21.19
I	PSN2016b	80	17.78	10.09	254.91	254.5	10.75	21.63
	PSN2016bkv	37	15.76	10.07	92.41	91.59	9.56	20.46
	PSN2016cok	57	17.57	10.85	226.71	225.3	18.55	20.95
	PSN2017cjb	70	16.56	10.25	224.56	224.7	11.17	20.63
	PSN2017czd	60	16.34	10.62	422.01	422.4	15.22	21.06
R	J050926	150	19.11	9.39	0.0054	0.0076	1.12	23.02
	PSNJ0059	26	14.92	8.85	1030.33	1027.	28.34	19.03
	PSNinIC1776	61	16.18	10.48	447.49	447.5	16.49	20.78
	PSNinNGC7653	36	15.01	8.43	453.34	456.	15.79	19.67
	SN2016bau	58	18.01	9.63	57.60	57.49	6.26	21.96
	iPTF15eqv	90	17.91	10.12	192.52	192.5	9.71	22.04

3.3 収差の視野内依存性とシーイング

収差とは光学系における理想的な結像からのズレのことで、画像内の像の歪みとしてあらわれる。星像が歪むとその星の FWHM の値は概して大きくなる。シーイングの良い、平均的、悪い画像のそれぞれで、画像を 9 等分し、各領域の FWHM を調べることで、収差の視野内依存性とシーイングの関係を調査した(図 3.1-3.6)。今回は J050926 の可視光 (R バンド) と近赤外線 (J バンド) の、シーイングが良い画像、平均的な画像、悪い画像を一枚ずつ用いた。

図 3.7-3.10 に半値幅の空間方向の依存性についてプロットしているが、図 3.1 などから明らかのように、シーイングが良い場合には視野内の位置によって半値幅の大きさが異なる傾向が見られる。これはこの後に述べる画像の畳み込みを用いる PSF(点像広がり関数) のカーネルを領域ごとに作成する必要性を示唆する。

表 3.2: 使用した画像

		平均 FWHM(pix)	取得日
可視光	良い	8.09	2017/9/24
	平均	10.29	2017/10/26
	悪い	12.19	2017/10/29
近赤外	良い	6.08	2017/10/26
	平均	9.12	2017/10/26
	悪い	11.11	2017/9/29

図 3.1: 可視、良シーイングでの、視野を 9 等分したそれぞれの領域内での平均 FWHM とその標準偏差

6.3 (0.9)	6.0 (0.7)	7.9 (0.9)
8.4 (1.4)	7.89 (0.9)	9.56 (0.9)
10.1 (1.2)	10.15 (0.5)	9.56 (1.3)

図 3.2: 可視、平均シーイングでの、視野を 9 等分したそれぞれの領域内での平均 FWHM とその標準偏差

10.1 (1.1)	9.4 (1.4)	11.1 (0.9)
9.3 (1.0)	9.6 (0.9)	11.5 (1.5)
11.9 (1.0)	11.9 (0.9)	11.3 (0.6)

図 3.3: 可視、悪シーイングでの、視野を 9 等分したそれぞれの領域内での平均 FWHM とその標準偏差

13.2 (1.1)	12.6 (1.4)	11.7 (0.9)
12.4 (1.0)	12.9 (0.9)	12.7 (1.5)
13.08 (1.3)	13.50 (0.9)	13.14 (0.6)

図 3.4: 近赤外、良 シーイングでの、視野を 9 等分したそれぞれの領域内での平均 FWHM とその標準偏差

7.4 (1.2)	7.1 (1.4)	6.0 (1.2)
6.8 (1.4)	4.9 (1.5)	5.5 (1.5)
6.1 (1.0)	5.5 (1.1)	7.9 (1.7)

図 3.5: 近赤外、平均シーイングでの、視野を 9 等分したそれぞれの領域内での平均 FWHM とその標準偏差

8.9 (1.4)	9.9 (1.1)	9.3 (1.5)
10.3 (1.3)	8.5 (1.5)	7.9 (1.1)
8.7 (0.5)	9.5 (1.2)	9.7 (1.5)

図 3.6: 近赤外、悪シーイングでの、視野を 9 等分したそれぞれの領域内での平均 FWHM とその標準偏差

9.8 (1.8)	11.6 (-)	11.1 (1.8)
11.6 (2.2)	12.5 (1.5)	10.5 (1.3)
11.0 (1.8)	9.8 (1.9)	9.8 (1.1)

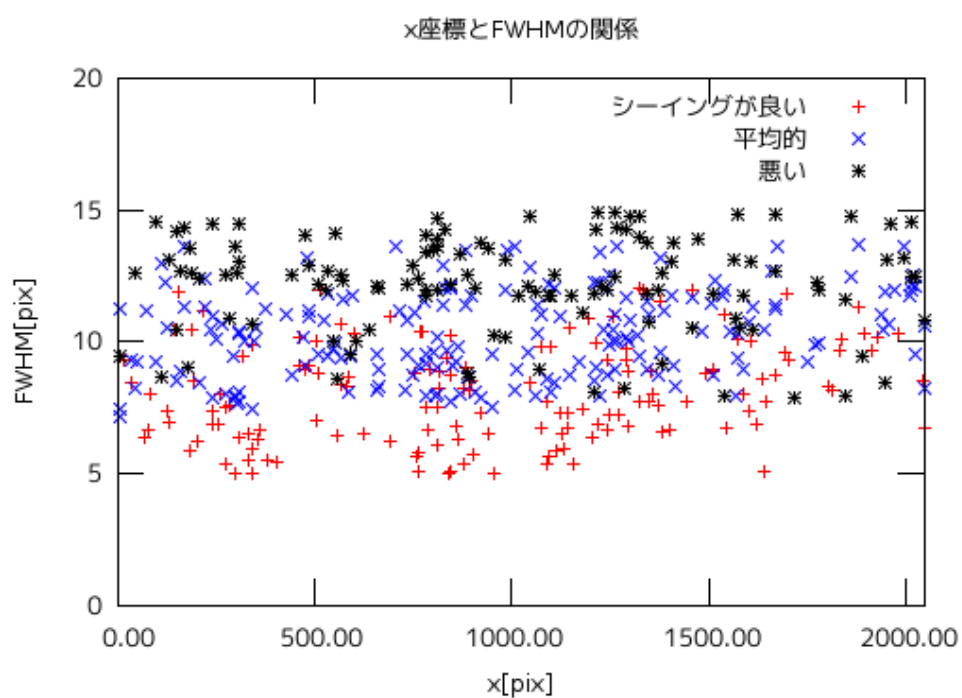


図 3.7: 可視光のシーイングが良い画像、平均的な画像、悪い画像の x 座標と FWHM の関係

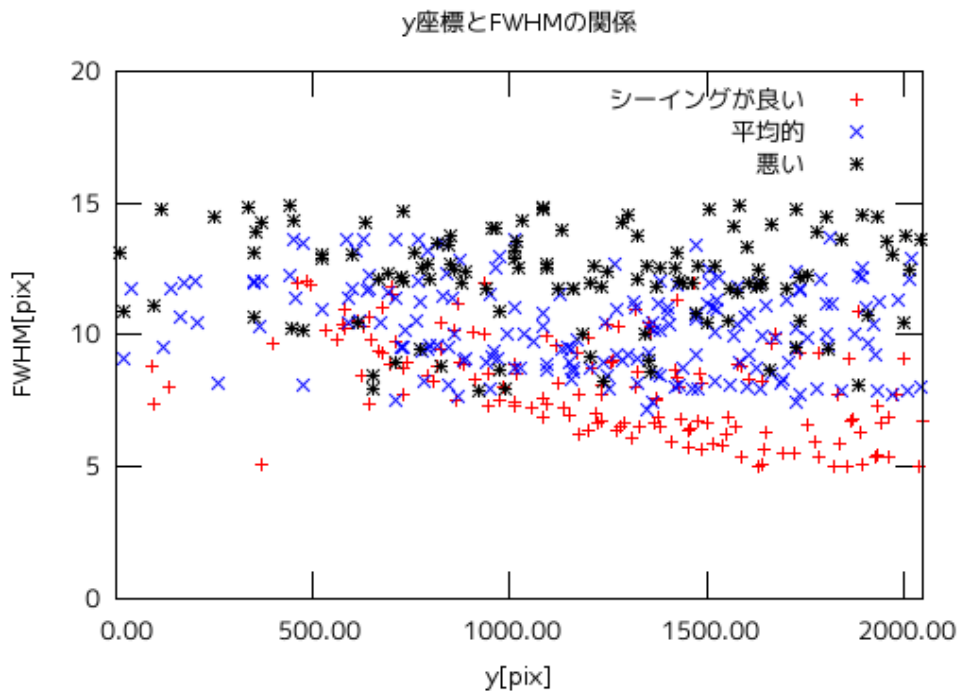


図 3.8: 可視光のシーイングが良い画像、平均的な画像、悪い画像の y 座標と FWHM の関係。シーイングが悪い時は分布が一樣だが、シーイングが良い時は y の値が小さい方と大きい方で FWHM の値が異なる傾向がみられる。

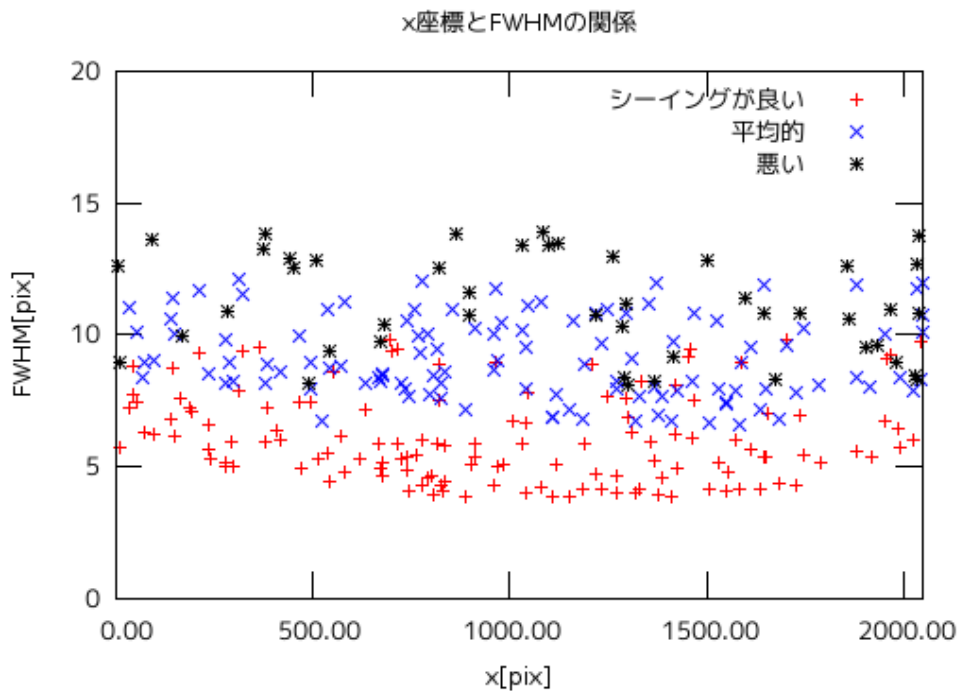


図 3.9: 近赤外線の見え方がよい画像、平均的な画像、悪い画像の x 座標と FWHM の関係

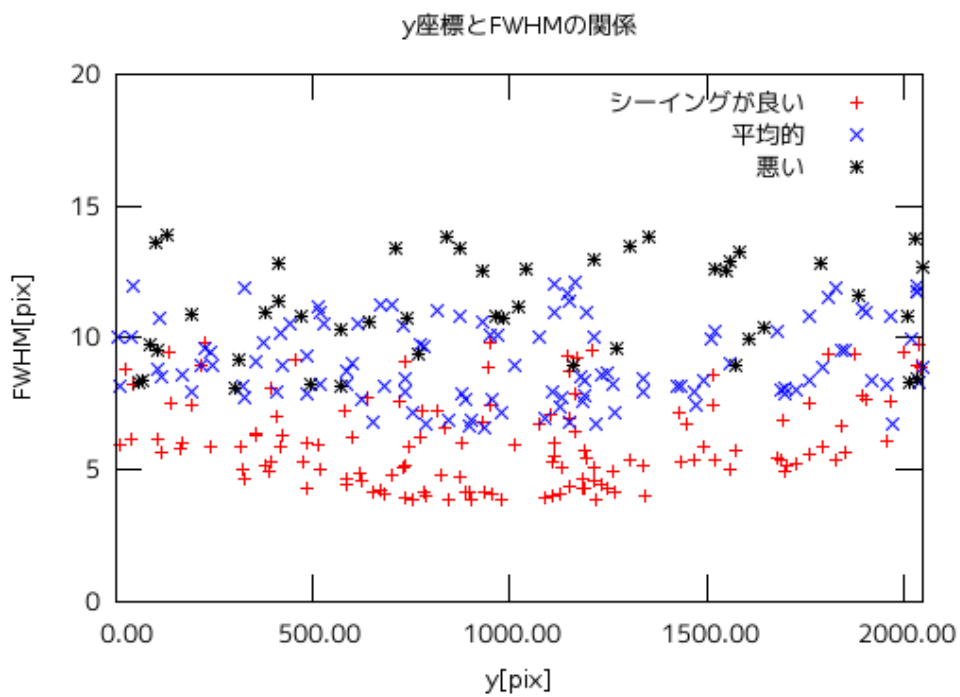


図 3.10: 近赤外線の見え方がよい画像、平均的な画像、悪い画像の y 座標と FWHM の関係

3.4 テンプレート画像差し引き法による自動検出

3.4.1 自動検出の結果

表 2.3 のサンプルデータ 24 フレームを用いて変動天体の自動検出テストを行った。

今回は検出したい変動天体 (オブジェクト) が既知であるため、オブジェクトの座標と、かなた画像で検出した座標、差分画像で検出した座標を 3.3 に、オブジェクト座標とかなた画像、差分画像で検出した座標それぞれのずれを 3.4 にまとめた。

表 3.3: 星像の座標

天体	バンド	オブジェクト座標		かなた画像で検出した座標		差分画像で検出した座標	
		ra(deg)	dec(deg)	ra(deg)	dec(deg)	ra(deg)	dec(deg)
J050926	J	77.358192	5.6930672	77.3581781	5.6931387	77.3581085	5.6931979
J050926	R	77.358192	5.6930672	77.3581944	5.6931713	77.3100581	5.653241
PSN2016b	H	178.76747	1.7186452	178.7672563	1.7184669	178.7672639	1.7184972
PSN2016b	J	178.76747	1.7186452	178.7673609	1.718526	178.7673227	1.7185392
PSN2016b	I	178.76747	1.7186452	178.7673023	1.7184345	178.7672768	1.718696
PSN2016bkv	H	154.58052	41.427573	154.580629	41.4276353	154.5807594	41.4277622
PSN2016bkv	I	154.58052	41.427573	154.5805018	41.4275969	154.5804127	41.4275488
PSN2016cok	H	170.07931	12.982624	170.0695527	12.9780191	170.0791318	12.9824917
PSN2016cok	I	170.07931	12.982624	170.0792588	12.9824559	170.0792337	12.9824644
PSN2017cjb	H	193.46011	9.7049535	193.4618555	9.7100656	193.4600805	9.7049747
PSN2017cjb	I	193.46011	9.7049535	193.4601295	9.7049812	193.4600851	9.7049846
PSN2017czd	H	222.94602	43.644841	222.945553	43.6446922	222.9456465	43.6449108
PSN2017czd	I	222.94602	43.644841	222.9444744	43.6445779	222.9460154	43.6441857
PSNJ0059	J	14.949569	-7.5721851	14.9494366	-7.5723724	14.9494614	-7.5723699
PSNJ0059	R	14.949569	-7.5721851	14.949224	-7.5718329	14.9492351	-7.5718319
PSNinIC1776	H	31.304935	6.1025947	31.3128133	6.1058262	31.3049998	6.1025901
PSNinIC1776	J	31.304935	6.1025947	31.3127508	6.1056907	31.3007599	6.1037237
PSNinIC1776	R	31.304935	6.1025947	31.2914424	6.0999233	31.2914424	6.0999233
PSNinNGC7653	J	351.20417	15.281046	351.2042662	15.2809661	351.2042391	15.2811091
PSNinNGC7653	R	351.20417	15.281046	351.204305	15.281158	351.2043227	15.2819681
SN2016bau	J	170.24596	53.173674	170.2458387	53.1737329	170.2457488	53.173698
SN2016bau	R	170.24596	53.173674	170.2459568	53.1738428	170.2459443	53.1738391
iPTF15eqv	J	163.03478	32.944578	163.0347144	32.9446305	163.0348143	32.9444951
iPTF15eqv	R	163.03478	32.944578	163.0345972	32.9449263	163.0344356	32.9448271

表 3.4: かなた画像、差分画像それぞれのオブジェクト座標とのずれ (秒角)

天体	バンド	かなた画像	差分画像
J050926	J	0.262219	0.558345
J050926	R	0.37486	224.906
PSN2016b	H	1.00193	0.913444
PSN2016b	J	0.581725	0.653311
PSN2016b	I	0.969449	0.719161
PSN2016bkv	H	0.451973	1.0985
PSN2016bkv	I	0.108147	0.395982
PSN2016cok	H	38.8416	0.798993
PSN2016cok	I	0.632608	0.636842
PSN2017cjb	H	19.4468	0.130779
PSN2017cjb	I	0.121951	0.143424
PSN2017czd	H	1.76448	1.36788
PSN2017czd	I	5.6442	2.35914
PSNJ0059	J	0.825736	0.769835
PSNJ0059	R	1.77488	1.74976
PSNinIC1776	H	30.6551	0.233867
PSNinIC1776	J	30.264	15.5702
PSNinIC1776	R	49.5162	49.5162
PSNinNGC7653	J	0.450194	0.336873
PSNinNGC7653	R	0.631479	3.36477
SN2016bau	J	0.485438	0.765213
SN2016bau	R	0.607789	0.597041
iPTF15eqv	J	0.302477	0.322976
iPTF15eqv	R	1.41608	1.53016

3.4.2 自動検出に用いたパラメータの条件設定

変動天体たる条件の 7 項目について、今回は条件を具体的に以下のように設定した。

用いる測定値はかなた望遠鏡で取得した画像 (K)、リファレンス画像 (ref)、差分画像 (sub) で検出し測定したものと、差分画像で検出した位置で測定を行うダブルイメージモードで測定したかなた画像 (K2) とリファレンス画像 (ref2) について測定したものである。

1. 星像サイズが他と同等か

かなた画像でのオブジェクトの $FWHM_K$ の値が、同じ画像で検出された他の星像の平均から 3 以内にある。

2. 明るさの変化が大きいか

かなた画像とリファレンス画像のフラックスの比 $FLUX_{ref2}/FLUX_{K2}$ が、画像内の平均から 3

から外れている。

3. 星像の形が同等か

かなた画像と差分画像で星像の楕円率の比 $ELLIPTICITY_{sub}/ELLIPTICITY_K$ が 0.9 - 1.1

4. 星像周辺に余計なものがないかかなた画像と差分画像でそれぞれ $FLAGS_K=0, FLAGS_{sub} = 0$

5. 限界等級より明るいか

かなた画像 mag_K が背景スカイゆらぎの 5 倍以上のカウントで定義した限界等級より明るいか

6. 星像重心の位置がかなた画像と差分画像で同じか

かなた画像と差分画像で重心位置のずれが、星像の半値幅 2 秒角以内であるか

7. 測光に失敗していないか

かなた画像での等級 mag_K が 99 になっていないか (測光失敗フラグ)

表 3.5: 判定結果と値。一行目に条件を満たす場合に、満たさない場合に×の判定結果を載せており、二行目に各値、三行目にその条件を数値で示している。

天体	バンド	星像サイズ 大きいか FWHM _K 3 内	明るさの変化 他より大きいか FLUX 比 3 外	星像の形 同等か ELLIPTICITY 比 0.9-1.1	余計なもの ないか FLAGS 0,0	限界等級より 明るい mag _K < mag _{lim}	星像重心 同じか < 2	測光は 成功か mag _K ≠ 99
J050926	J	×	×	×	0,0	12.47	0.32	12.47
		4.87 1.98-10.52	0.15 <0.119,0.277<	1.51 -	- -	<16.87	-	-
J050926	R	×	×	×	2,2	14.24	225.15	14.24
		7.31 3.06-13.82	16394435.33 <171.786,285.973<	10.01 -	- -	<19.92	-	-
PSN2016b	H	×	×	×	0,0	14.88	0.11	14.88
		8.71 4.05-10.99	0.00 <0.002,0.006<	0.46 -	- -	<16.59	-	-
PSN2016b	J	×	×	×	0,0	15.30	0.15	15.30
		8.32 2.55-14.31	0.00 <0.002,0.008<	1.13 -	- -	<17.28	-	-
PSN2016b	I	×	×	×	0,0	16.20	0.95	16.20
		8.56 1.87-17.68	0.00 <-0.004,0.020<	1.10 -	- -	<19.36	-	-
PSN2016bkv	H	×	×	×	0,0	14.22	0.66	14.22
		18.10 11.56-14.10	0.00 <0.004,0.012<	0.97 -	- -	<15.48	-	-
PSN2016bkv	I	×	×	×	0,0	15.11	0.36	15.11
		17.34 1.92-18.50	0.00 <-0.011,0.030<	2.99 -	- -	<18.88	-	-
PSN2016cok	H	×	×	×	0,0	13.28	38.06	13.28
		49.76 3.21-15.76	0.00 <-0.024,0.064<	0.77 -	- -	<14.27	-	-
PSN2016cok	I	×	×	×	0,0	16.50	0.09	16.50
		9.62 6.50-14.20	<0.00 <-0.005,0.020<	0.57 -	- -	<19.02	-	-
PSN2017cjb	H	×	×	×	0,0	12.23	19.41	12.23
		14.04 0.45-16.66	0.01 <-0.012,0.034<	1.63 -	- -	<14.39	-	-
PSN2017cjb	I	×	×	×	0,0	15.24	0.16	15.24
		11.10 2.91-17.87	0.02 <-0.010,0.034<	0.54 -	- -	<18.30	-	-
PSN2017czd	H	×	×	×	0,0	14.03	0.09	14.03
		16.87 4.71-15.37	0.01 <-0.004,0.036<	1.30 -	- -	<14.58	-	-
PSN2017czd	I	×	×	×	0,0	15.08	5.72	15.08
		60.25 6.24-15.74	0.02 <-0.006,0.020<	0.58 -	- -	<18.60	-	-
PSNJ0059	J	×	×	×	0,0	13.58	0.09	13.58
		21.77 2.28-26.05	0.00 <-0.021,0.086<	0.81 -	- -	<15.58	-	-
PSNJ0059	R	×	×	×	0,0	14.67	0.04	14.67
		19.30 -2.97-17.01	0.00 <-0.026,0.058<	0.98 -	- -	<17.80	-	-
PSNinIC1776	H	×	×	×	0,0	14.78	30.45	14.78
		43.19 5.86-11.88	0.00 <0.001,0.006<	3.73 -	- -	<16.91	-	-
PSNinIC1776	J	×	×	×	0,0	15.47	43.74	15.47
		55.05 4.84-13.74	0.06 <0.003,0.009<	1.34 -	- -	<17.43	-	-
PSNinIC1776	R	×	×	×	2,2	16.15	0.00	16.15
		10.14 4.20-16.97	-0.00 <-0.011,0.033<	1.00 -	- -	<18.76	-	-
PSNinNGC7653	J	×	×	×	0,0	14.62	0.52	14.62
		21.85 11.30-14.90	0.00 <0.004,0.011<	1.44 -	- -	<16.42	-	-
PSNinNGC7653	R	×	×	×	2,2	15.81	2.91	15.81
		18.73 0.59-18.15	0.03 <-0.033,0.044<	2.33 -	- -	<18.10	-	-
SN2016bau	J	×	×	×	0,0	14.80	0.34	14.80
		6.38 3.62-12.59	0.00 <0.003,0.016<	0.10 -	- -	<17.40	-	-
SN2016bau	R	×	×	×	0,0	15.05	0.05	15.05
		7.04 0.86-16.24	0.00 <-0.009,0.036<	1.05 -	- -	<19.70	-	-
iPTF15eqv	J	×	×	×	0,0	16.48	0.60	16.48
		7.28 1.49-14.09	0.00 <-0.000,0.010<	1.15 -	- -	<17.66	-	-
iPTF15eqv	R	×	×	×	0,0	17.18	0.68	17.18
		10.23 2.53-19.15	0.00 <-0.005,0.014<	1.33 -	- -	<19.63	-	-

3.5 考察

表 3.5 をもとに判定結果を考察する。その際、各画像を目視して判定結果の整合性を確認していくことにする。その図は図 3.11 以下に示しており、それぞれ左から、かなた画像、カタログ画像、差分画像となっている。それぞれの画像でオブジェクトと認識され検出された天体を色円で囲っている。同じ色の円は同一天体であることを示している。

3.5.1 誤検出例の除去 1 : オブジェクト座標と差分画像で検出した座標のずれの評価

表 3.4 に掲載しているオブジェクト座標と差分画像で検出した座標のずれの値が 2 秒以下のものが同じ天体であるという基準で判定した。かなた画像の星像の平均シーイングサイズが 2 秒程度であることがその根拠である。

判定を行うと、4 枚の画像が条件を満たさなかった。そのうち 3 画像は、差分画像でオブジェクトの検出に失敗し、他の天体やノイズをオブジェクトと誤認識していたことが分かった。

これらの差分画像をよく見ると、すべての画像で差分画像作成の際の引き過ぎが発生しており、オブジェクトの像が差分画像に残っていないあるいは検出できないほど暗くなっていることが検出失敗の原因であった。

以下にこの例に当てはまる天体を個別に見ていく。

J050926 R バンド

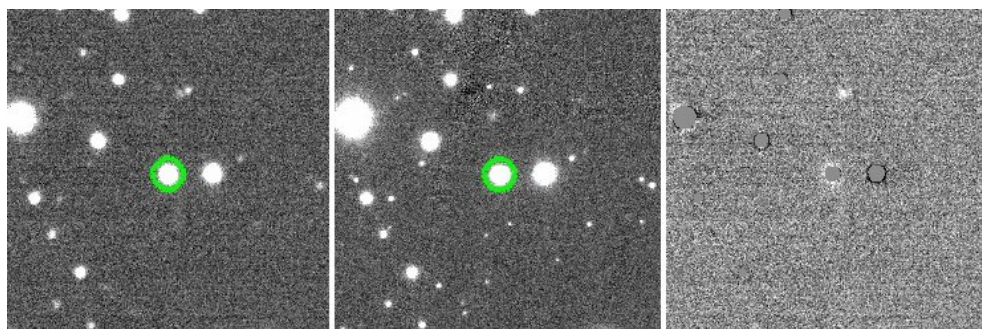


図 3.11: J050926 R バンド

誤検出の原因は、差分画像の作成の際の引き過ぎである。差分画像に像が負のカウントとして残っている。別の天体をオブジェクトとして認識している。

PSNinIC1776 R バンド

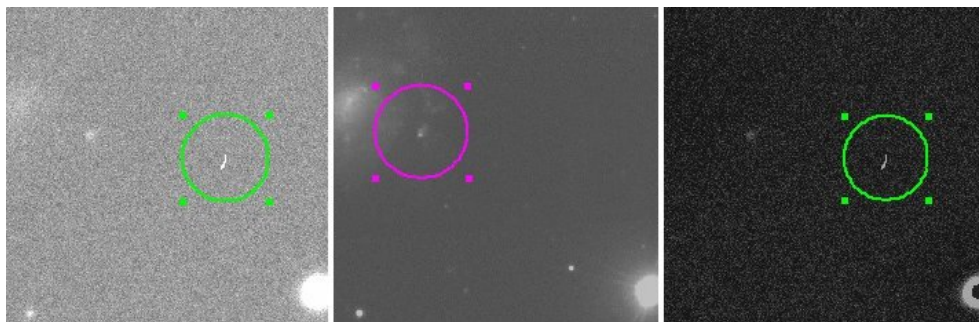


図 3.12: PSNinIC1776 R バンド

差分画像に像は残っているように見えるが暗すぎて検出できていない。差分画像作成の際の引き過ぎも起こっている。宇宙線イベントをオブジェクトとして誤検出している。

PSNinNGC7653 R バンド

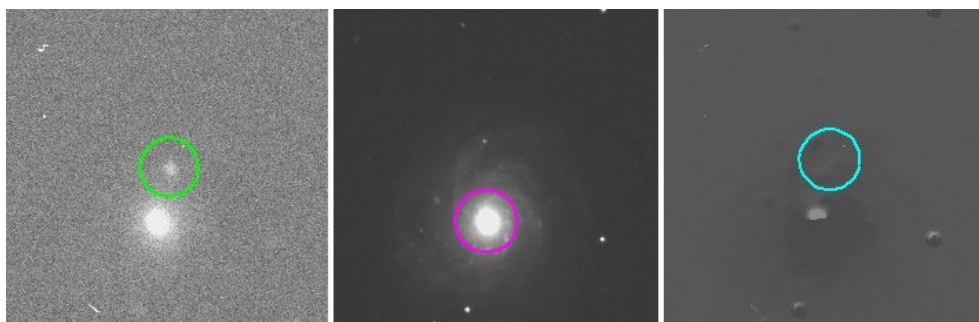


図 3.13: PSNinNGC7653 R バンド

誤検出の原因は差分画像作成の際の引き過ぎである。差分画像においてノイズのカウントの高い部分がオブジェクトとして検出されている。

3.5.2 誤検出例の除去 2 : オブジェクト座標とかなた画像で検出した座標のずれの評価

表 3.4 オブジェクト座標とかなた画像で検出した座標のずれの値が 2 秒以下のものが同じ天体であるという基準で判定した。差分画像の方法と同様にかなた画像の星像の平均シーイングサイズが 2 秒程度であることがその根拠である。判定の結果、以下の 5 枚の画像が条件を満たさなかった。これらすべての画像で、オブジェクトの検出に失敗し、別の天体をオブジェクトとして検出していた。これらの画像にはオブジェクトの近くに銀河の像が写っており、うち 4 枚は図 3.14 のように銀河自体を、1 枚では別の天体をオブジェクトとして認識し検出していた。銀河の近くの天体は、背景銀河を消去した差分画像でないと検出が

できない場合があるという事が分かった。この場合には差分画像の検出位置で強制的に測光を行うダブルイメージモードを用いてかなた画像の測定を行う必要がある。

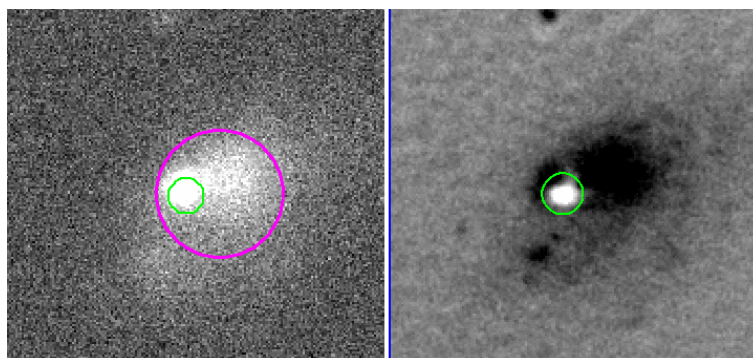


図 3.14: (左) かなた画像、(右) 差分画像。緑色円が差分画像で、ピンク色円がかなた画像で検出した天体を示している。差分画像ではオブジェクトを検出できているが、かなた画像では銀河自体を検出してしまっている。

PSN2016cok H バンド

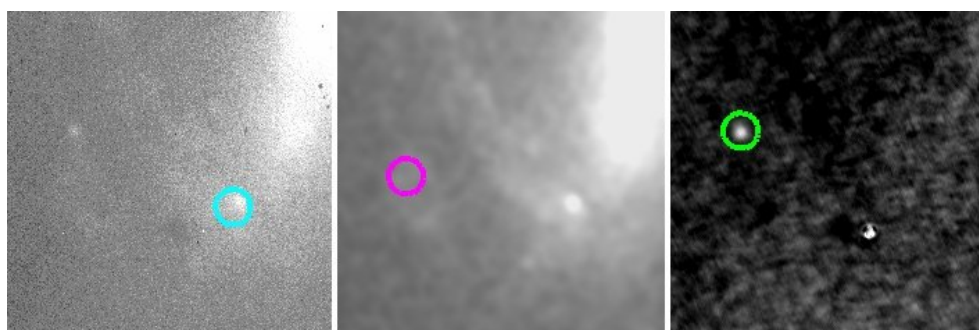


図 3.15: PSN2016cok H バンド

オブジェクトが銀河中 (銀河中心と星像の距離 68.16 秒角、銀河の大きさ約 546.0 秒角、銀河の積分等級 9.65mag) にある。かなた画像ではオブジェクトの像がぼやけていて検出できず、別の星をオブジェクトとして検出している。銀河が背景にあるため像が検出できなかったと考えられる。

PSN2017cjb H バンド

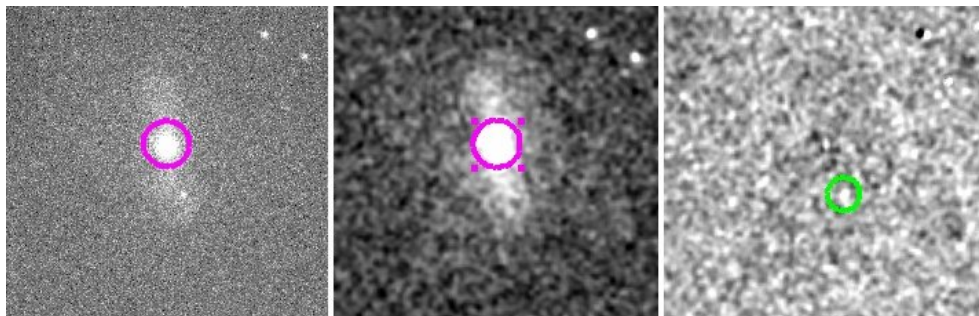


図 3.16: PSN2017cjb H バンド

オブジェクトの星像が銀河中(銀河中心と星像の距離 19.04 秒角、銀河の大きさ約 126.0 秒角、銀河の積分等級 13.19mag)にある。そのためかなた画像ではこの銀河を天体として検出し、その中にあるオブジェクト(超新星)は見逃してしまっている。

PSN2017czd I バンド

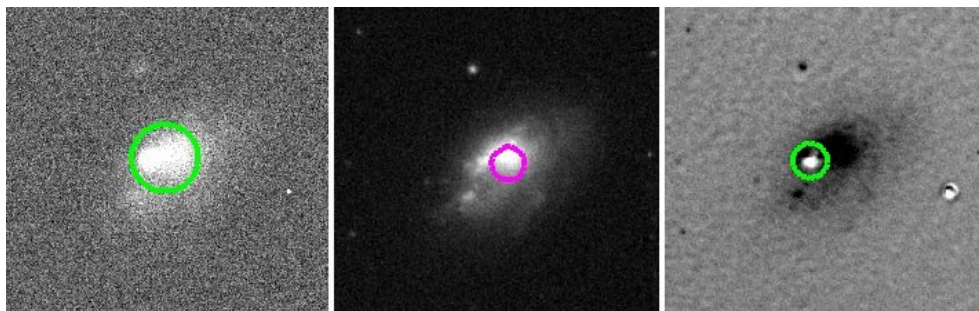


図 3.17: PSN2017czd I バンド

星像の大きさ、明るさの変化、星像の形の条件を満たさず判定から漏れていた。

星像が銀河内(銀河中心と星像の距離 7.05 秒角、銀河の大きさ約 60 秒角、銀河の積分等級 14.81mag)にある。上の PSN2017cjb(H バンド)と同様にかた画像では銀河を天体として検出し、オブジェクトを見逃している。

PSNinIC1776 H バンド

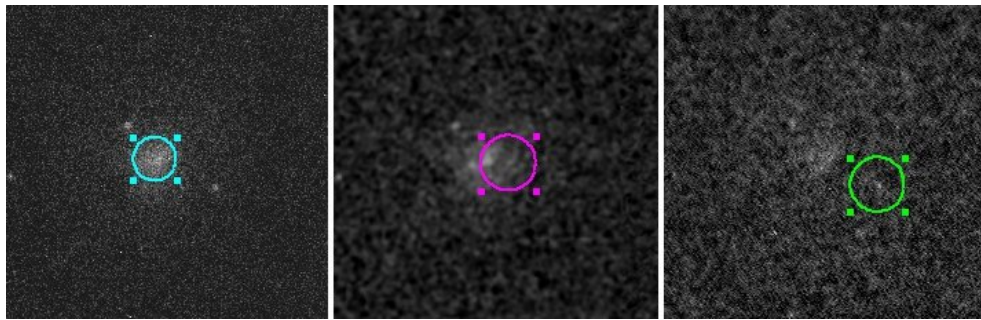


図 3.18: PSNinIC1776 H バンド

近くに銀河 (銀河中心と星像の距離 32.73 秒角、銀河の大きさ約 114.0 秒角、銀河の積分等級 13.81mag)がある。上の 2 天体と同様にかなた画像では銀河を天体として検出し、オブジェクトは見逃している。

PSNinIC1776 J バンド

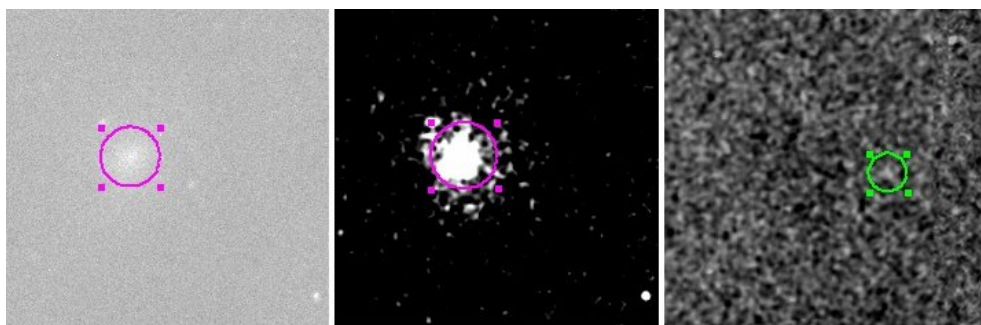


図 3.19: PSNinIC1776 J バンド

同天体の H バンドと同様にかなた画像ではオブジェクトを見逃している。

3.5.3 各画像の判定結果の考察

J050926 J バンド

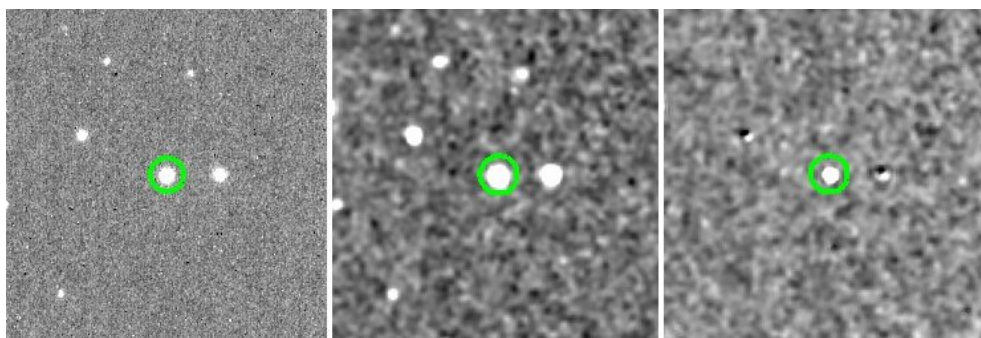


図 3.20: J050926 J バンド

この画像では明るさの変化と星像の形の判定が条件を満たさなかった。

このオブジェクトは既知のブレーザーのフレア（突発的な増光）であるので、カタログ画像でも同じ天体が検出されている。星が多い領域といえるが、目立って明るい星や銀河はない。かなた画像と差分画像の ELLIPTICITY 比が 1.51 倍となっている。差分画像では引き過ぎが発生しているが、オブジェクトはきれいに残っていて問題がないように見える。SExtractor で測定する際の重心位置とオブジェクト座標のずれがかなた画像で 0.26 秒角、差分画像で 0.55 秒角であり、差分画像が 2 倍程度ずれた位置を重心として測定している。これが原因で像の歪みが大きいと判断された可能性が考えられる。周辺星から求めた FWHM の標準偏差 (σ) が FWHM 平均値の 45% にも達しており、許容範囲が大きすぎる。

PSN2016b H バンド

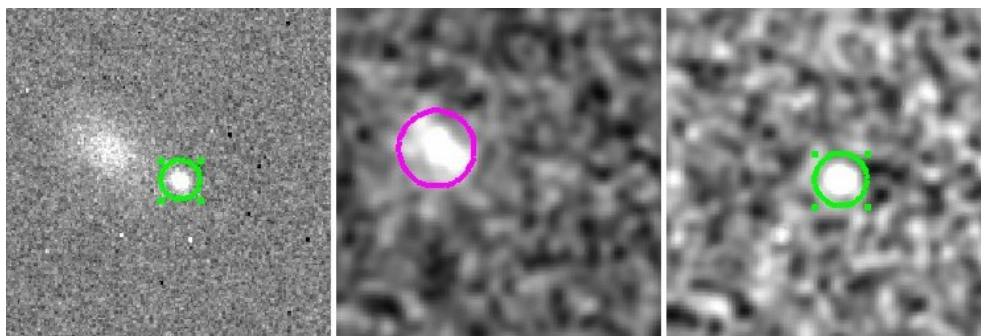


図 3.21: PSN2016b H バンド

この画像では星像の形のみが条件を満たさなかった。近くに銀河（銀河中心と星像の距離 10.85 秒角、大きさ 35.4 秒角、銀河の積分等級 15.2mag）がある。ELLIPTICITY 比が 0.45 でかなた画像のほうが歪みがかなり大きく、条件である > 0.9 からかなり外れてしまっている。隣の銀河がかなた画像の星像の測定に影響している可能性がある。

PSN2016b I バンド

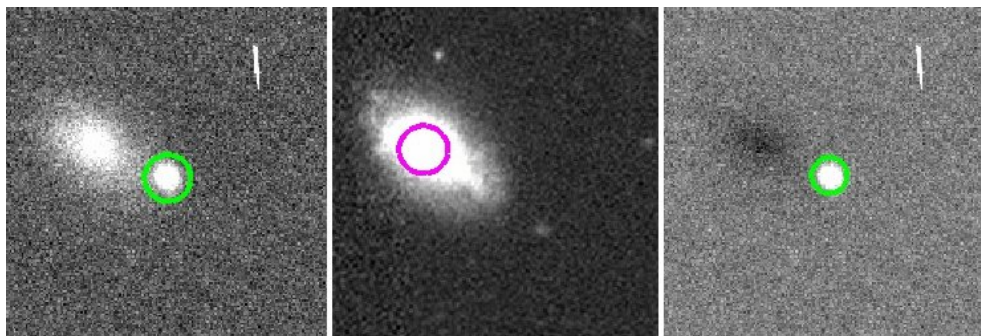


図 3.22: PSN2016b I バンド

この画像では明るさの変化がほとんどないと判定されて候補から外れてしまっている。

明るさの変化が他と同等と判定される FLUX 比の条件が 0 をまたくほどゆるくなっているため、FLUX の変化なしと判定されてしまっている。これは周囲の星で求めたフラックス比のばらつきが大きいことが考えられる。実際、表 3.1 を見ると I バンドの画像の中で 10 番目に明るい星の等級が最も暗いが、星の数が多く、暗い星の多い領域であることがわかる。近くに銀河 (銀河中心と星像の距離 10.85 秒角、大きさ 35.4 秒角、銀河の積分等級 15mag) がある。かなた画像に宇宙線が多く写り込んでいる。

PSN2016b J バンド

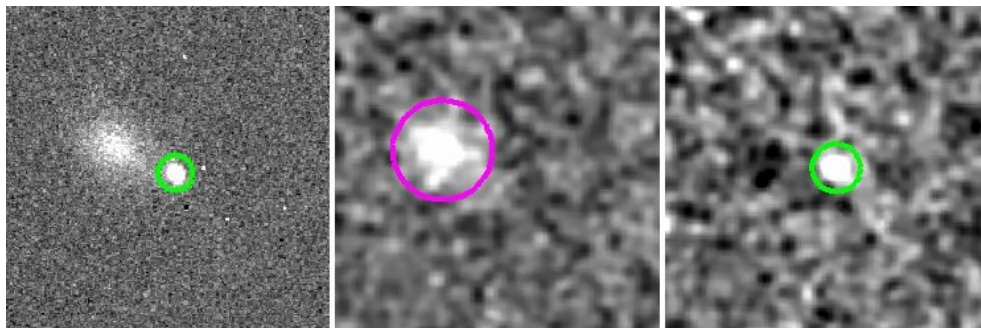


図 3.23: PSN2016b J バンド

この画像は星像の形のみが条件を満たさず検出に失敗している。

銀河 (中心との距離 10.85 秒角、銀河の大きさ約 35.4 秒角、銀河の積分等級 15mag) がある。ELLIPTICITY 比が 1.13 で、かなた画像と比べ差分画像での歪みが大きいと判断されているが、条件からの外れ方はわずかである。

PSN2016bkv H バンド

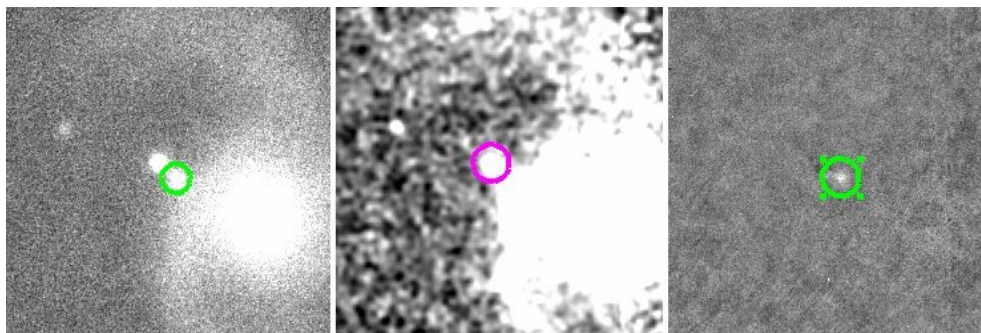


図 3.24: PSN2016bkv H バンド

この画像は星像の大きさが他と同等でない判断され検出に失敗している。

すぐ北東 (8 秒角) に明るい星があり、逆側に銀河 (銀河中心と星像の距離 39.61 秒角、銀河の大きさ約 444 秒角、銀河の積分等級 10.3mag) がある。表 3.1 から H バンドの中で最も星像サイズが大きいことがわかる。実際に周辺の星も星像サイズが大きいとそのばらつきは小さく、満たす条件範囲が狭めでオブジェクトの星像サイズが画像内の平均から 12σ も外れている。すぐ隣の星や銀河の影響でかなた画像の星像サイズが大きく算出されたのではないか。

PSN2016bkv I バンド

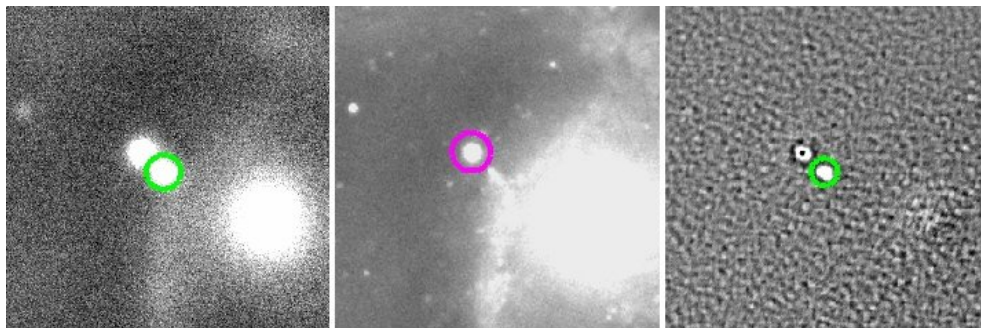


図 3.25: PSN2016bkv I バンド

この画像は明るさの変化と星像の形の条件で×になっている。

すぐ北東 (8 秒角) に明るい星があり、逆側に銀河 (銀河中心と星像の距離 39.61 秒角、銀河の大きさ約 444 秒角、銀河の積分等級 10.3mag) がある。

周辺星から求められる FLUX の変化が他と同等とされる条件の範囲が、0 をまたぐほど広がっているため、明るさの変化が無いと判断されてしまっている。ELLIPTICITY 比は 2.99 で、かなた画像と比べ差分画像での歪みが大きいと判断されている。差分画像を確認したところ、隣にある変動していない星像が消えていないなど、差分画像に不備があった。

PSN2016cok Iバンド

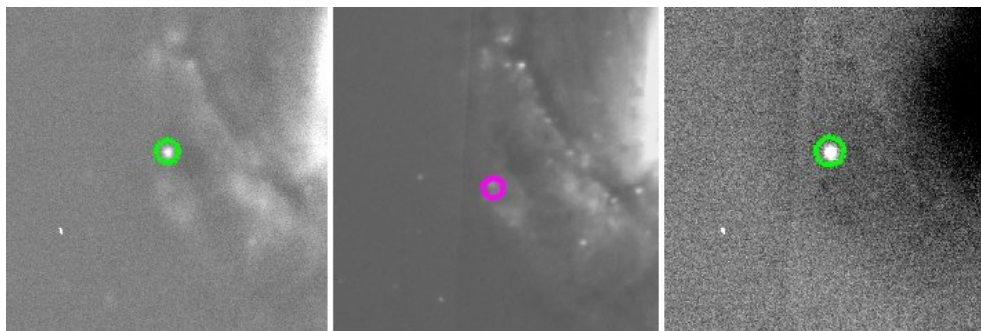


図 3.26: PSN2016cok Iバンド

この画像は明るさの変化と、星の形の条件が満たされなかった。

星像が銀河内(銀河中心と星像の距離 68.16 秒角、銀河の大きさ約 546 秒角、銀河の積分等級 9.65mag)にある。明るさの変化が他と同等と判定される FLUX 比の条件が 0 をまたぐほどゆるくなっているため、FLUX の変化なしと判定されてしまっている。ELLIPTICITY 比が 0.57 で差分画像に比べかなた画像の星像の歪みが大きいと判断されている。銀河に影響され歪んで検出されているのではないかと考えられる。

PSN2017cjb Iバンド

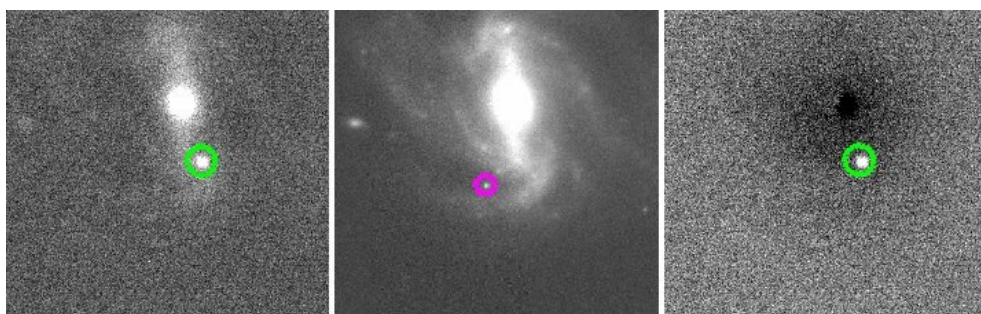


図 3.27: PSN2017cjb Iバンド

この画像は明るさの変化と星像の形の条件が満たされなかった。

星像が銀河内(銀河中心と星像の距離 19.04 秒角、銀河の大きさ約 126 秒角、銀河の積分等級 13.19mag)にある。明るさの変化が他と同等と判定される FLUX 比の条件が 0 をまたぐほどゆるくなっているため、FLUX の変化なしと判定されてしまっている。ELLIPTICITY 比が 0.54 で、差分画像に比べてかなた画像の星像の歪みが大きいと判断されている。かなた画像での測定が銀河に影響されているのではないかと考えられる。

PSN2017czd Hバンド

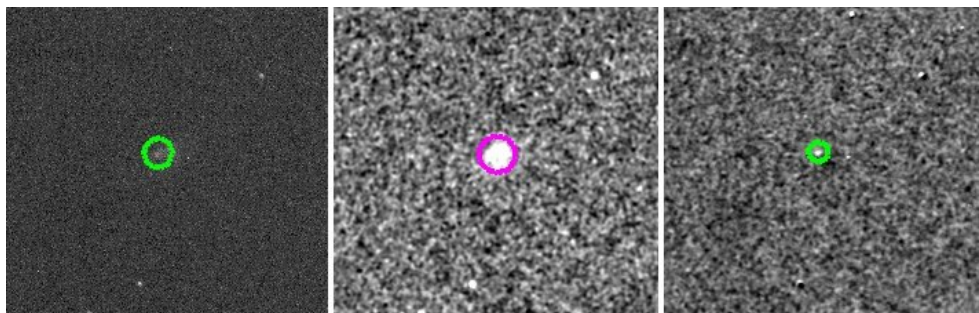


図 3.28: PSN2017czd H バンド

この画像は星像の大きさ、明るさの変化、星像の形の判定が満たされなかった。

星像が銀河内 (銀河中心と星像の距離 7.05 秒角、銀河の大きさ約 60 秒角、銀河の積分等級 14.81mag) にある。FWHM が 3.8σ をとっている。FWHM の σ の値は画像の FWHM の平均値の 35% であり、星像サイズが他と同等と判定される条件の範囲はゆるいが、その範囲からも外れてしまっている。明るさの変化が他と同等と判定される FLUX 比の条件が 0 をまったくほどゆるくなっているため、FLUX の変化なしと判定されてしまっている。ELLIPTICITY 比は 1.30 で、かなた画像に比べ差分画像の星像の歪みが大きく検出されている。

PSNJ0059 J バンド

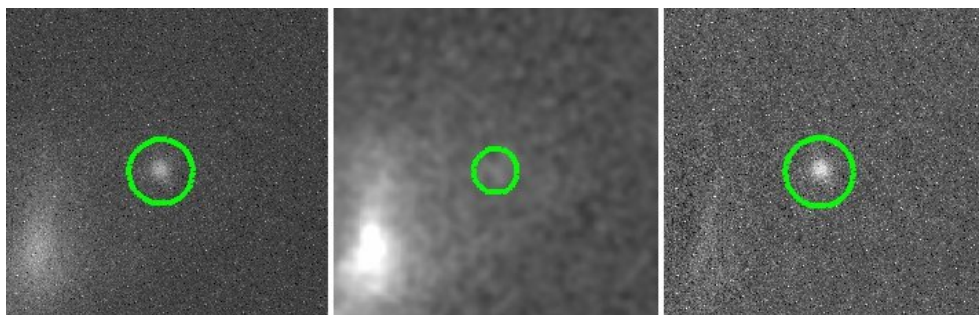


図 3.29: PSNJ0059 J バンド

明るさの変化の判定のみが条件を満たさなかった。

星像が銀河内 (銀河中心と星像の距離 40.76 秒角、銀河の大きさ約 174 秒角、銀河の積分等級 12.46mag) にある。明るさの変化が他と同等と判定される FLUX 比の条件が 0 をまったくほどゆるくなっているため、FLUX の変化なしと判定されてしまっている。

PSNJ0059 R バンド



図 3.30: PSNJ0059 R バンド

星像サイズと明るさの変化の判定が条件を満たさなかった。

星像が銀河内 (銀河中心と星像の距離 40.76 秒角、銀河の大きさ約 174 秒角、銀河の積分等級 12.46mag) にある。FWHM の値が 19.30 と大きく、画像内の平均から 3.7 σ 外れている。FWHM の σ の値は画像の FWHM の平均値の 90% であり、星像サイズが他と同等と判定される条件の範囲はゆるいが、その範囲からも外れてしまっている。明るさの変化が他と同等と判定される FLUX 比の条件が 0 をまたぐほどゆるくなっている。

PSNinNGC7653 J バンド

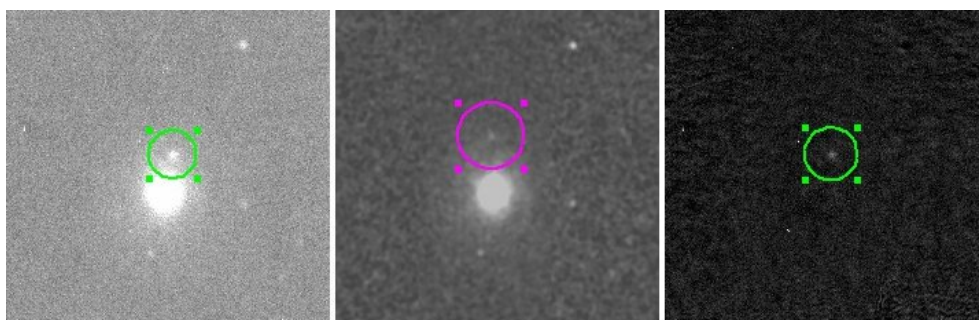


図 3.31: PSNinNGC7653 J バンド

星像サイズと星像の形の判定が条件を満たさなかった。

星像が銀河内 (銀河中心と星像の距離 20.41 秒角、銀河の大きさ約 95.4 秒角、銀河の積分等級 13.4mag) にある。FWHM の値が 21.85 と大きく、画像内の平均から 14 σ 外れている。銀河の影響で大きく検出されたと考えられる。FWHM の σ の値は画像の FWHM の平均値の 9% であり、星像サイズが他と同等と判定される条件の範囲が他の画像よりも厳しめになっている。周辺星としてかなた画像で検出された星の数が少ないが、宇宙線が含まれておらずぼやけている星像も少ないため σ が小さくなったと考えられる。

SN2016bau J バンド



図 3.32: SN2016bau J バンド

星像の形の判定が条件を満たさなかった。

星像が銀河内 (銀河中心と星像の距離 60.25 秒角、銀河の大きさ約 300 秒角、銀河の積分等級 11.01mag) にある。ELLIPTICITY 比は 0.1 で差分画像と比べかなた画像の星像のほうが歪んで検出されている。かなた画像での検出が銀河の影響を受けていると考えられる。

SN2016bau R バンド

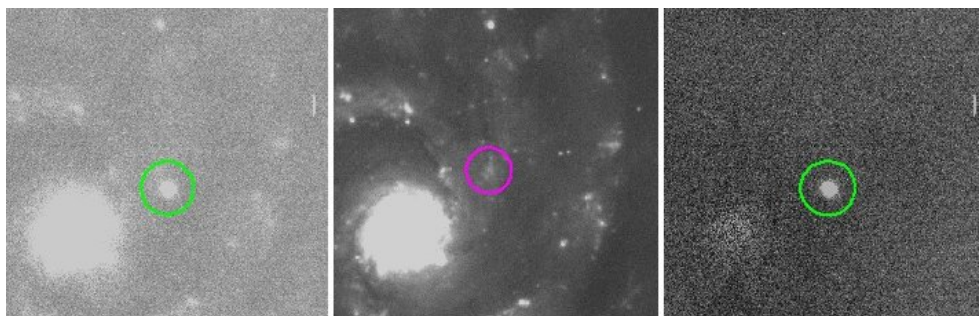


図 3.33: SN2016bau R バンド

明るさの変化の判定のみが条件を満たさなかった。

星像が銀河内 (銀河中心と星像の距離 60.25 秒角、銀河の大きさ約 300 秒角、銀河の積分等級 11.01mag) にある。宇宙線が多く写り込んでいる。明るさの変化が他と同等と判定される FLUX 比の条件が 0 をまたぐほどゆるくなっている。銀河内にあるぼやけた星像や宇宙線が多く周辺星として検出されており、その影響で条件が緩くなったと考えられる。

iPTF15eqv J バンド

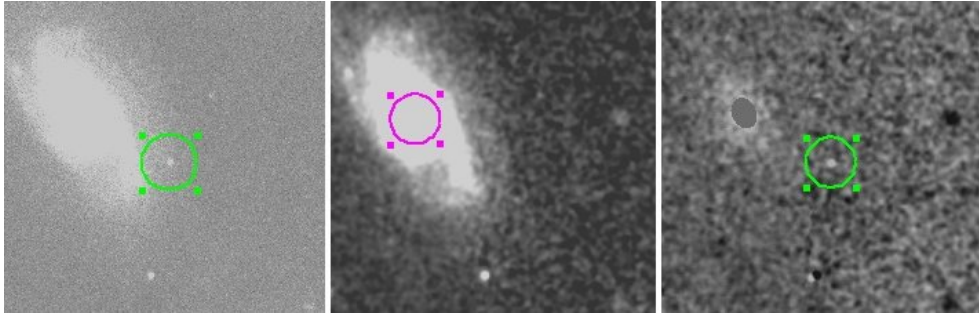


図 3.34: iPTF15eqv J バンド

明るさの変化と星像の形の判定が条件を満たさなかった。

星像が銀河内 (銀河中心と星像の距離 58.52 秒角、銀河の大きさ約 240 秒角、銀河の積分等級 12.2mag) にある。明るさの変化が他と同等と判定される FLUX 比の条件が 0 をまたぐほどゆるくなっているため、FLUX の変化なしと判定されてしまっている。ELLIPTICITY 比は 1.15 でかなた画像に比べ差分画像の星像の歪みが大きく検出されているが、条件からの外れ方はわずかである。

iPTF15eqv R バンド

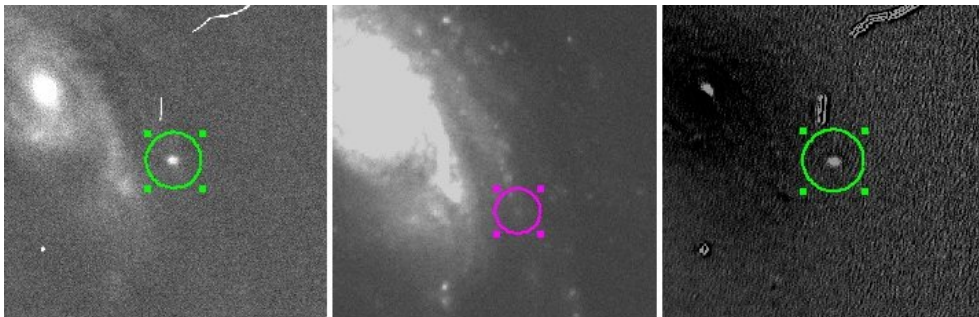


図 3.35: iPTF15eqv R バンド

明るさの変化と星像の形の判定が条件を満たさなかった。

星像が銀河内 (銀河中心と星像の距離 58.52 秒角、銀河の大きさ約 240 秒角、銀河の積分等級 12.2mag) にある。かなた画像に宇宙線が多く写り込んでいる。明るさの変化が他と同等と判定される FLUX 比の条件が 0 を含むほどゆるくなっているため、FLUX の変化なしと判定されてしまっている。ELLIPTICITY 比は 1.33 でかなた画像に比べ差分画像の星像の歪みが大きく検出されている。差分画像を確認すると引き過ぎが起こっており、像の歪みの原因になっていると考えられる。

3.5.4 自動検出条件に関する考察

前節の考察から、検出失敗の原因は主に以下のようにまとめられる。

・差分画像と かなた画像両方 でオブジェクトが正しく検出された 16 フレーム中 11 フレームで明るさの変化の条件を満たさなかった。これらはすべて条件を満たさないと判定される範囲が広すぎるため、オブジェクト自身は十分に増光しているにも関わらず条件を満たさないと判定されていた。これらのフレームでは星像サイズの条件の範囲も広がった。これら 2 つの条件範囲の導出には画像内に検出された全周辺星を用いて、標準偏差を計算しているが、用いている周辺星の像を目視で確認したところ、図 3.36 のように宇宙線や画像端の収差の影響で歪んだ星像、暗い星など、条件の導出に適切でないサンプルが多く含まれていた。これらを除外してから条件を求める工夫が必要である。

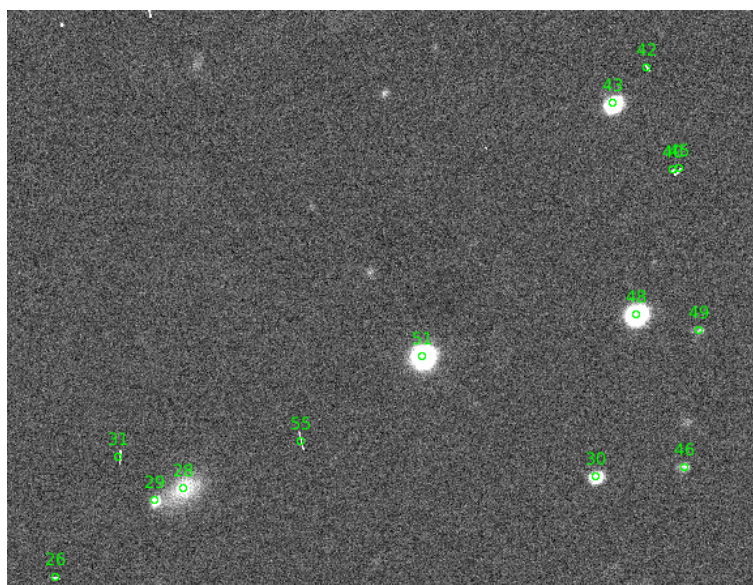


図 3.36: 緑のマークがされているのが周辺星として検出されたサンプル。宇宙線イベントや歪んだ星像、暗い星像も検出されている。

・11 フレームが星像の形の条件を満たさなかった。そのうち 7 フレームで差分画像の星像の歪みが大きく検出され、4 フレームでかなた画像の星像の歪みが大きく検出されていた。差分画像の星像が歪みが大きく検出されたフレームでは、差分画像を確認すると差分画像の作成に不備がある例が多数であった。かなた画像の星像が歪みが大きく検出された全てのフレームで、星像が銀河内にあり、その影響で星像が歪んで検出されたと考えられる。背景銀河があると ELLIPTICITY の値が銀河の影響で大きくなる場合が多いことが分かったが、かなた画像での検出で銀河の影響を除くことは難しいので、背景銀河がある場合、この条件は外すべきと考えられる。背景銀河の有無や差分がうまくいっているかどうかの指標にすることができるかもしれない。

第4章 まとめと今後

—昨年、南極の氷床中に建設された IceCube ニュートリノ観測所から検出アラートが発信されるようになったことで、高エネルギーニュートリノの母天体の探索が可能となった。広島大学かなた望遠鏡でも可視光と近赤外線での探索観測を行なっているが、そのような突発天体の観測では対応天体をすばやく同定する必要があり、自動化が急がれる。

本研究では、かなた望遠鏡で得た超新星やブレーザーが写り込んだ画像をサンプル画像とし、過去に取られたカタログ画像と比較することで変動天体として検出する手法について研究を行った。検出の際には両者を畳み込みとスケールリングによりマッチさせて差し引くが、観測条件によって天体の誤検出や取りこぼしが発生する。そこで、どのような原因でこれらが発生するのかを系統的に調査して、より良い検出条件を考察した。

検出失敗の原因は、差分画像の作成に失敗している、背景銀河が影響して星像を検出できていないまたは歪んで検出されている、検出条件の導出に用いる周辺星に宇宙線や暗い星、ぼやけた星が含まれているなどという事象が挙げられた。

今後は宇宙線や暗い星を除き検出を行う工夫が必要である。また今回用いたサンプル画像では検出結果に背景銀河が大きく影響していると分かったので、背景銀河がある場合に条件を緩めることと、同時に背景銀河がないサンプルを用いて検出条件を改めて探査する必要がある。

謝辞

本論文の作成にあたっては研究室の皆様の様々のご協力をいただきました。森先輩には研究の基礎となる解析手法を一から丁寧にご指導いただきました。ありがとうございました。長嶋先輩には研究の基礎を教えていただき、また本研究の解析でお世話になりました。ありがとうございました。研究室の先生方、先輩方、4年生の皆には研究室での生活を温かく支えていただきました。ありがとうございました。川端先生には熱く指導をいただきました。感謝致します。深沢先生には研究室での全ての活動においてご指導とご支援をいただきました。感謝致します。ありがとうございました。

関連図書

[1] The IceCube Lab at the South Pole in Antarctica. Image: S. Lidstrom/NSF
<http://icecube.wisc.edu/about/overview>

[2] IceCube Detector <http://icecube.wisc.edu/science/icecube/detector>