

IceCube高エネルギーニュートリノ事象の 可視近赤外線フォローアップ観測

田中康之 (広島大学宇宙科学センター)

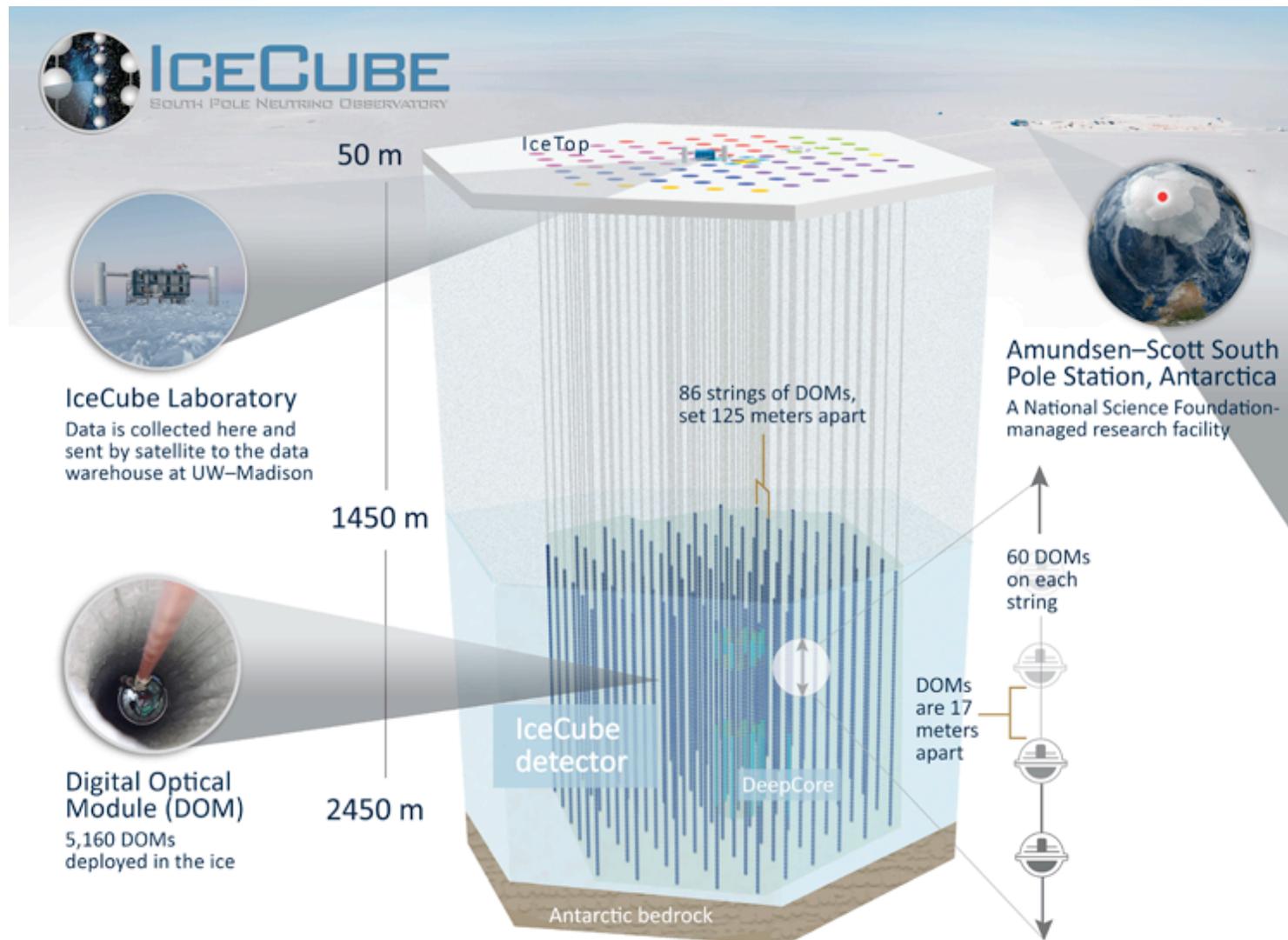
森裕樹、内海洋輔、川端弘治、吉田道利 (広島大)、
伊藤亮介 (東工大)、諸隈智貴 (東大)、田中雅臣 (NAOJ)、
富永望 (甲南大)、井上芳幸 (ISAS/JAXA)、太田耕司 (京大)、
村瀬孔大 (PSU)、Hermann Lee (京大)、長瀧重博 (理研)
吉田滋 (千葉大)

目次

- IceCubeによる高エネルギーニュートリノの観測
- かなたHONIRによるIceCube-161210の観測
- Tomo-e Gozen超新星サーベイへの提案

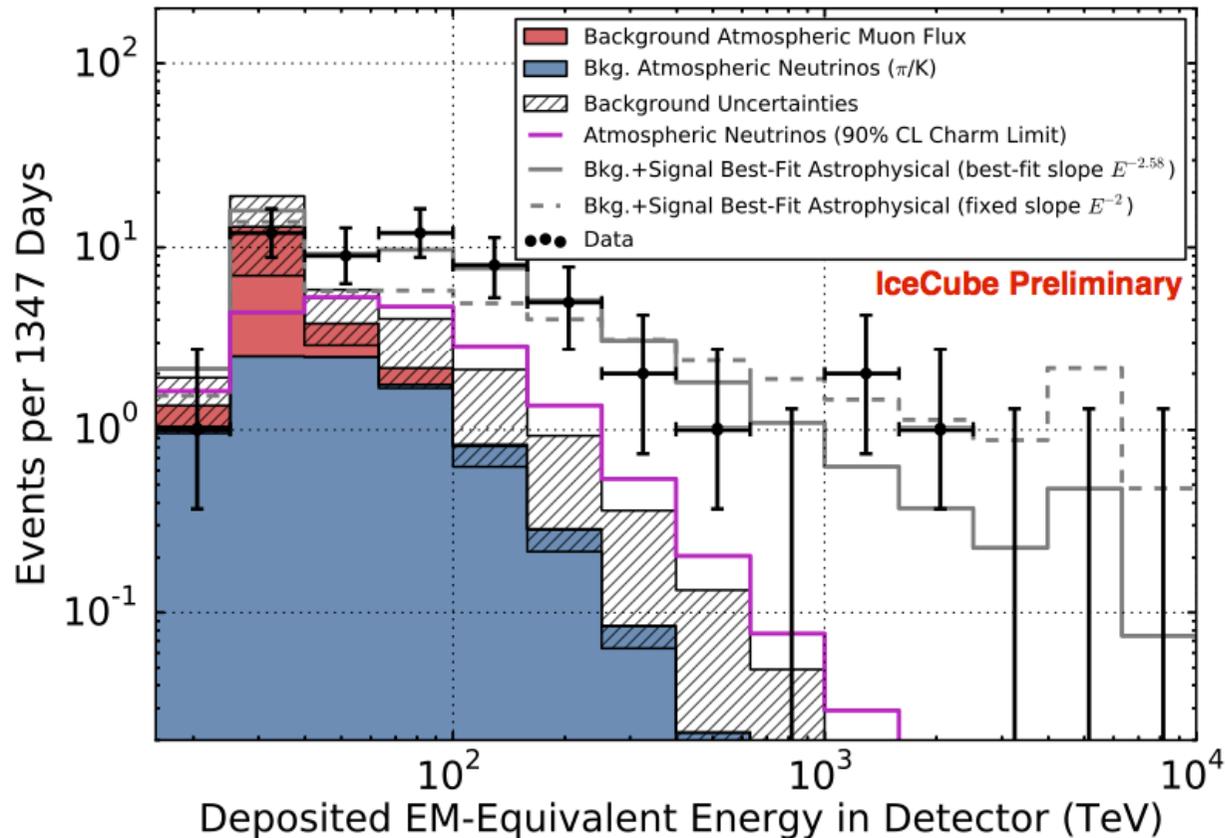
IceCube実験

南極の氷河を用いた巨大ニュートリノ検出器



<https://icecube.wisc.edu/science/icecube/detector>

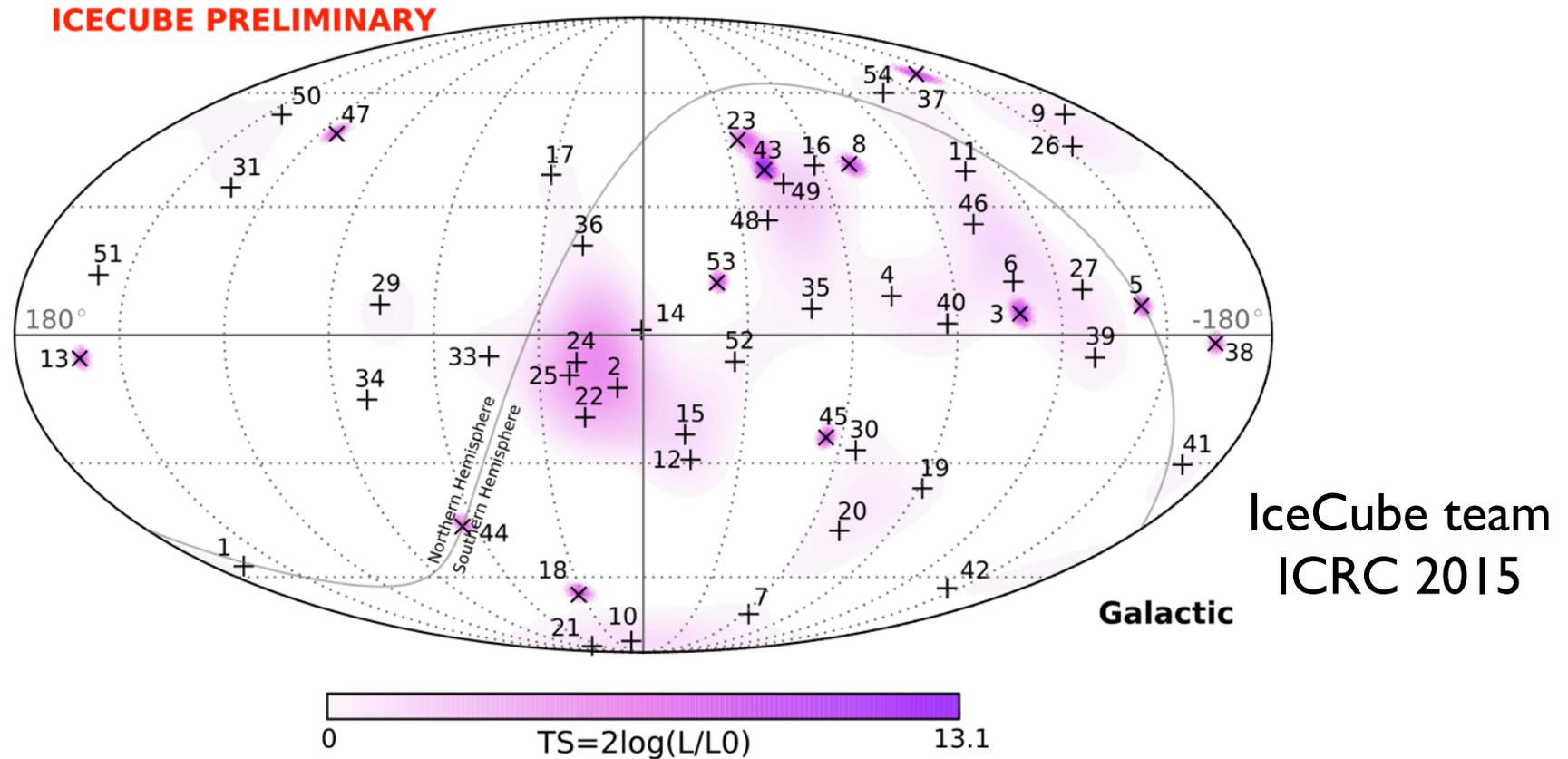
Sub-PeV~PeVニュートリノの検出



IceCube team
ICRC 2015

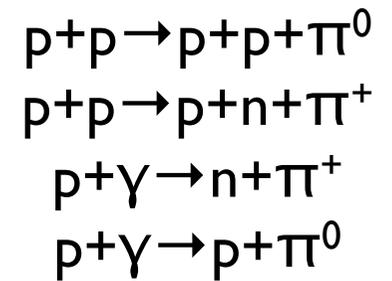
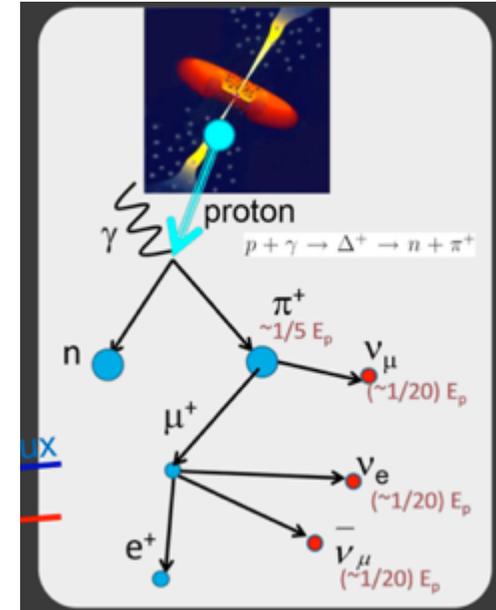
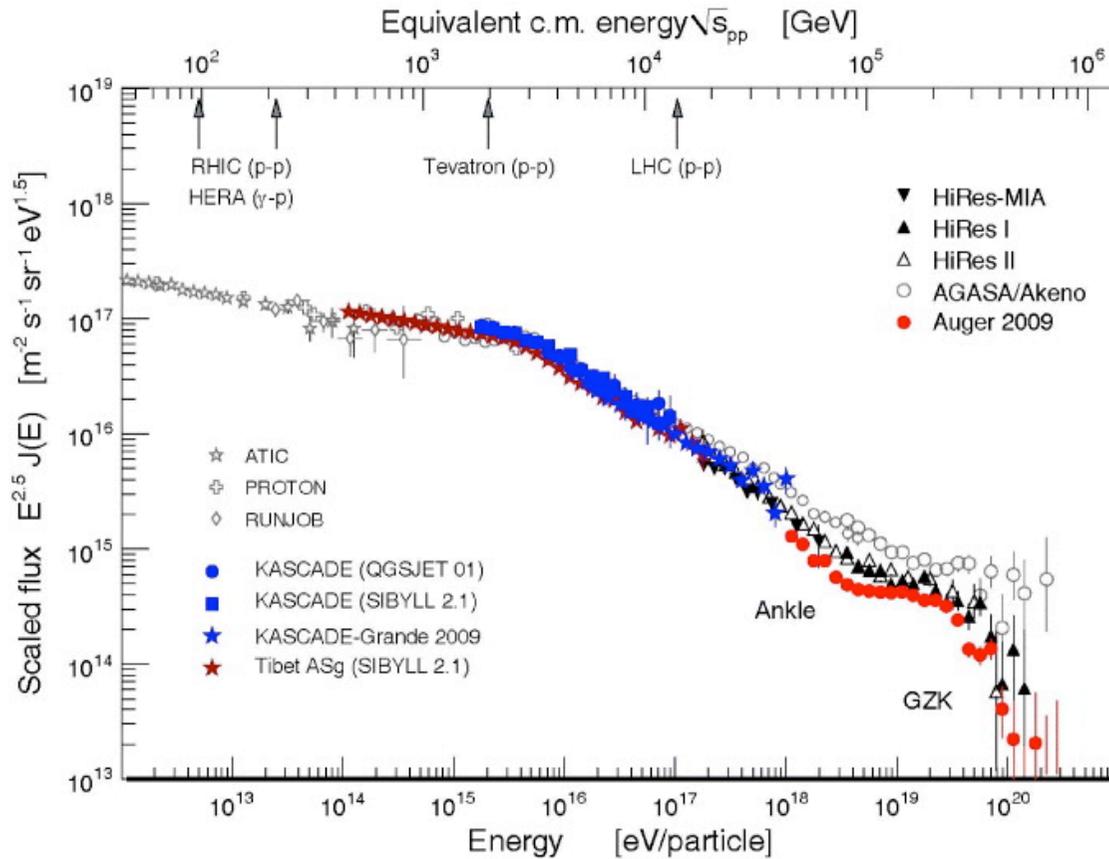
- 2010年～2014年の1347日のデータから計54イベントを検出
- 2つのPeVイベント (IceCube collaboration, 2013)
- $E > \sim 50$ TeV以上で、大気ニュートリノフラックスを超える $E^{-2.58 \pm 0.25}$ の power-law 成分を検出

イベント到来方向の分布



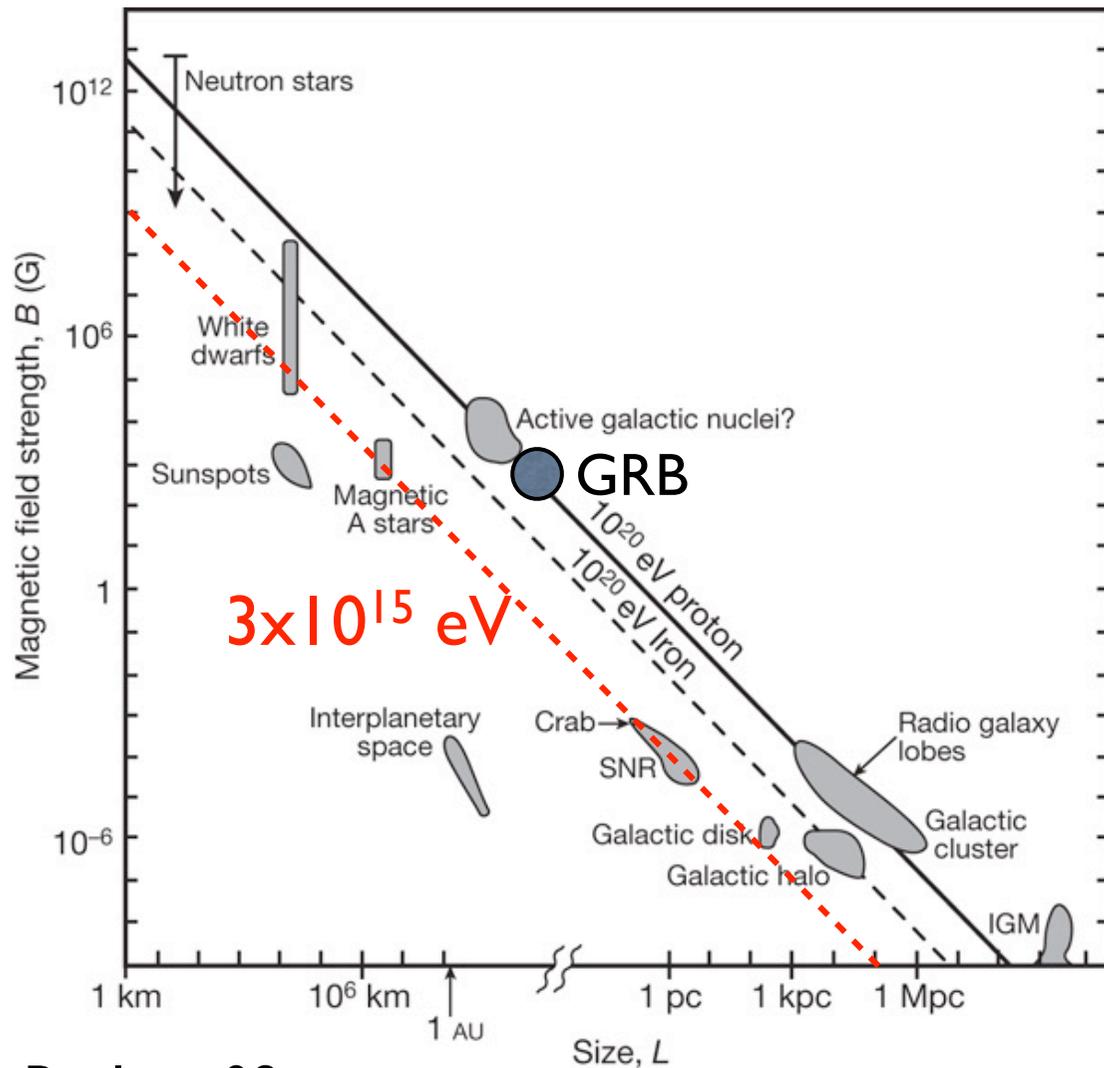
- ShowerイベントとTrackイベント (~1 deg)
- 銀河面や特定方向へのクラスタリングは見られず、等方
- 放射源が系外起源であることを示唆

宇宙線スペクトル



- ベキ型のスペクトル。最もエネルギーの高い宇宙線は 10^{20} eVにも達する
- kneeとよばれる 3×10^{15} eVまでの宇宙線はおそらく超新星残骸が起源だが、それ以上のエネルギーについては謎
- ニュートリノはppもしくはp γ 反応によって生成される

ニュートリノ放射の候補天体

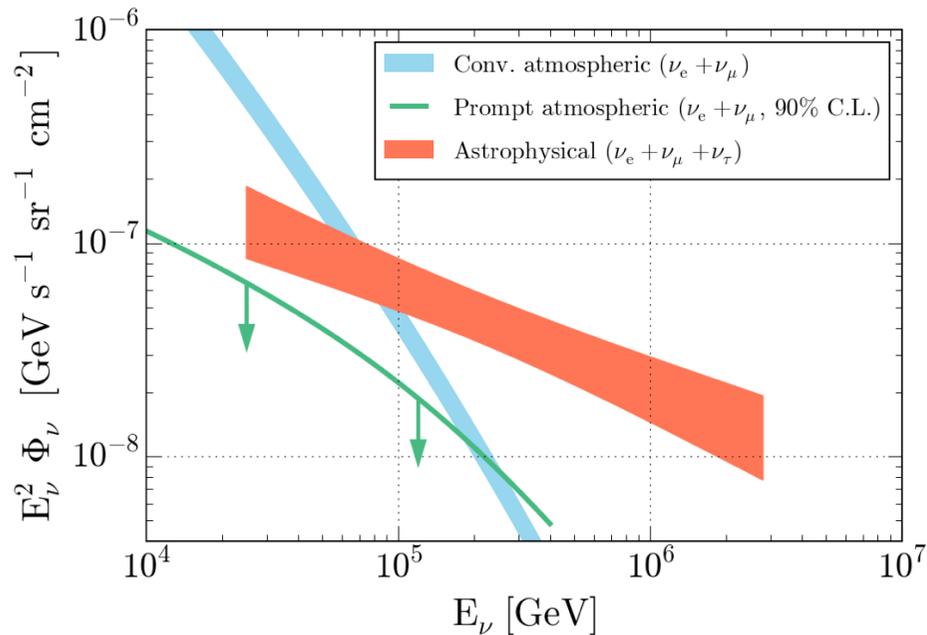


Bauleo+09

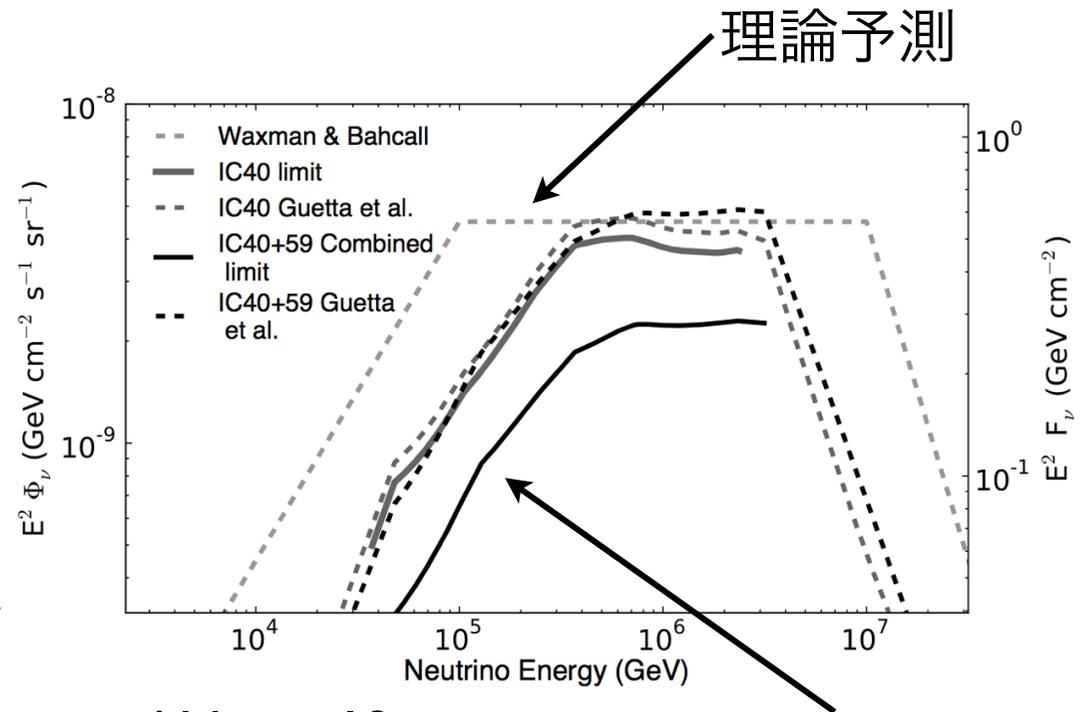
- sub-PeV neutrinoをつくるためには高エネルギー宇宙線が必要
 - 1 PeV ニュートリノの生成には 20 PeV 陽子
 - 各天体で加速できる
上限: $E < \sim ZeBL$
- ✓ AGN core
 - ✓ AGN jet
 - ✓ Radio lobe
 - ✓ GRB

GRBはmain sourceではなさそう

IceCube spectrum



Aartsen+15

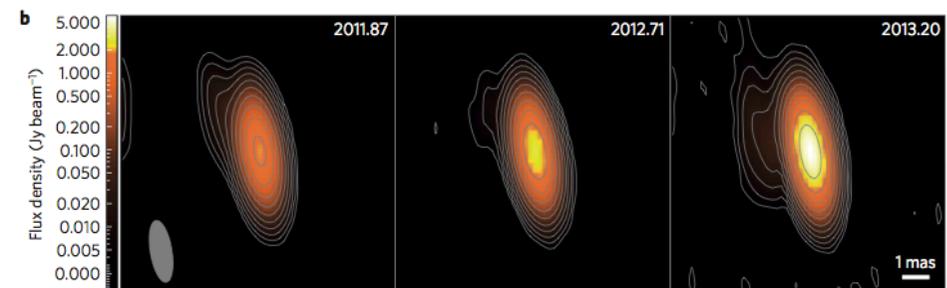
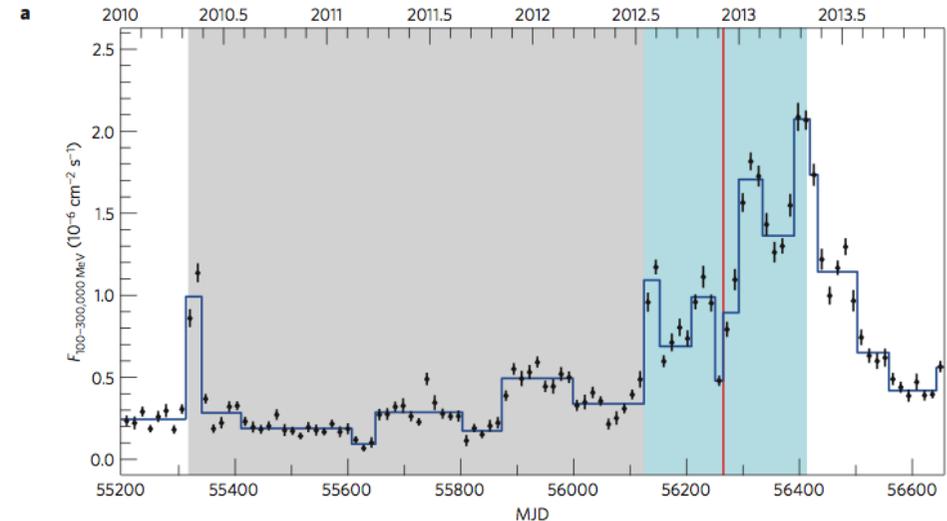
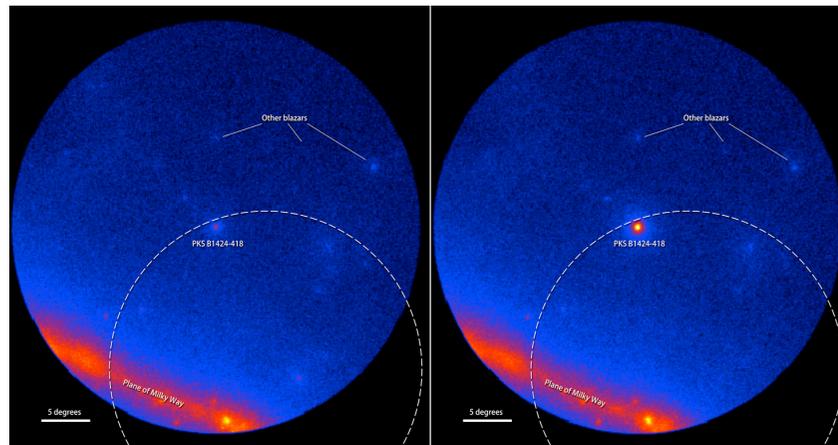
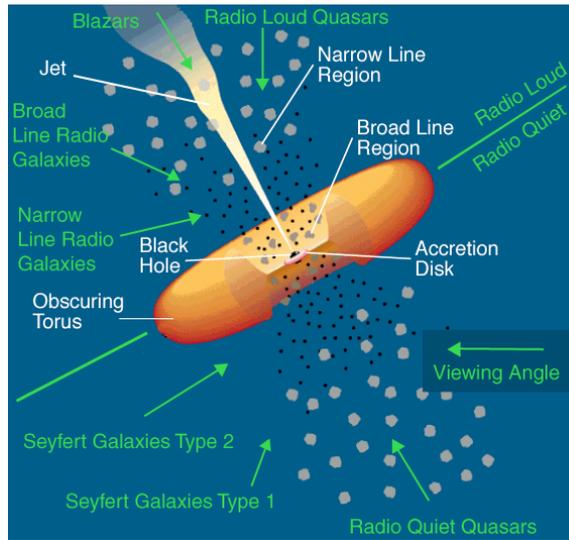


Abbasi+12

GRBからの寄与の
上限値

- 2008年~2010年の190個のGRBに対しての解析
- ガンマ線放射時間, +/- 1 dayの期間について、ニュートリノを探索
- 506個のGRBに対するIceCube4年データを用いた最新の制限だと、IceCube observed fluxに対するGRBの寄与は1%以下 (Aartsen+16)

フレア中のブレーザーが起源？



Kadler+15

- IceCubeは2 PeVイベントを2012 Dec. 4に検出
- 誤差円内に明るいGeVブレーザーPKS 1424-418が存在
- $F_{\nu} = F_{IC}$
- ただし、chance probability $\sim 5\%$

本研究の目的

- IceCubeチームは2016年4月から、Astrophysical neutrinoを検出するとアラートを配信するようになった
- IceCubeニュートリノのアラートを受信するとTOO観測を行い、電磁波対応天体を探索する
- Sub-PeV~PeVニュートリノの放射天体を明らかにし、kneeエネルギーを超える宇宙線の起源を解明する
- IceCube アラートの誤差円半径は1度程度で、重力波カウンターパートサーチよりも探索領域はずっと小さい
- とは言っても広い領域の観測になるため、木曾の広視野カメラが不可欠。（提案を採択して頂きありがとうございます）

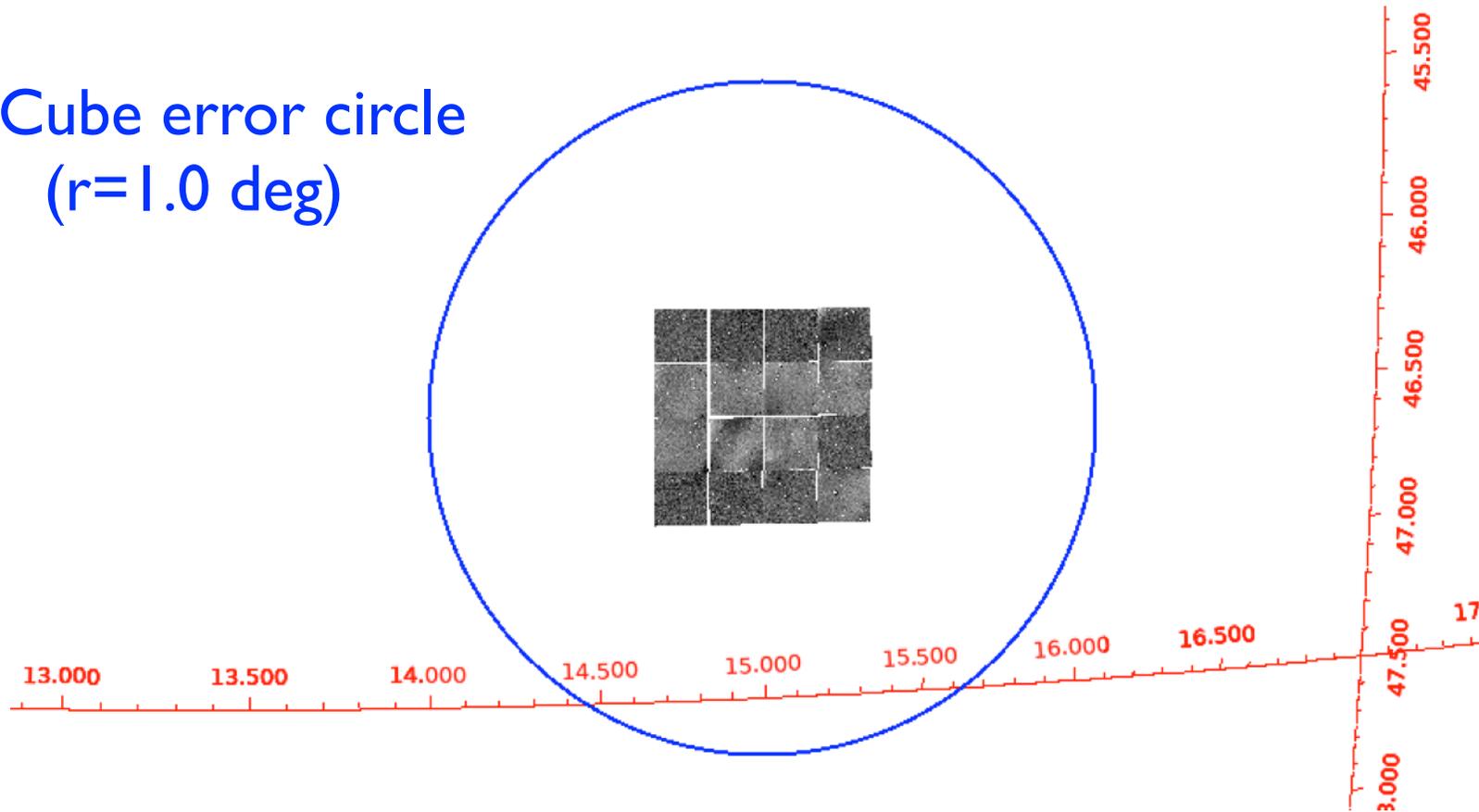
かなたHONIRによる IceCube-161210のTOO観測

- IceCube-161210
- 2016年12月10日, UT 20:06:40.31
- RA=46.58, Dec=14.98, 誤差円半径は1度(50% C.L., systematic error included)
- 1.5m かなた望遠鏡@東広島
- HONIRの視野: 10'x10'
- J, Rバンドによる同時撮像観測
- 1フレーム60秒 (J), 75秒 (R)
- 5点dithtering
- HONIRの視野: 10'x10'
- 誤差円内の中央領域を、4x4タイル観測 (16 pointingsで計2時間程度)



HONIRによるJ-bandタイル観測

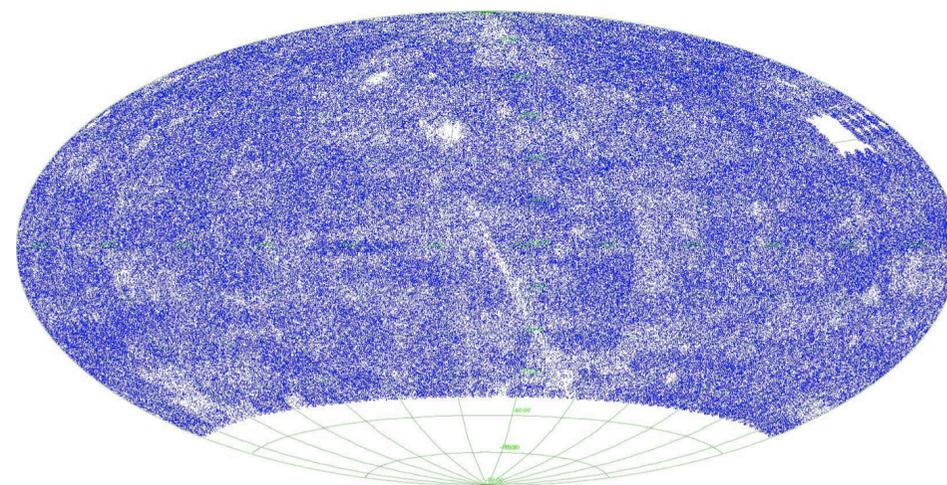
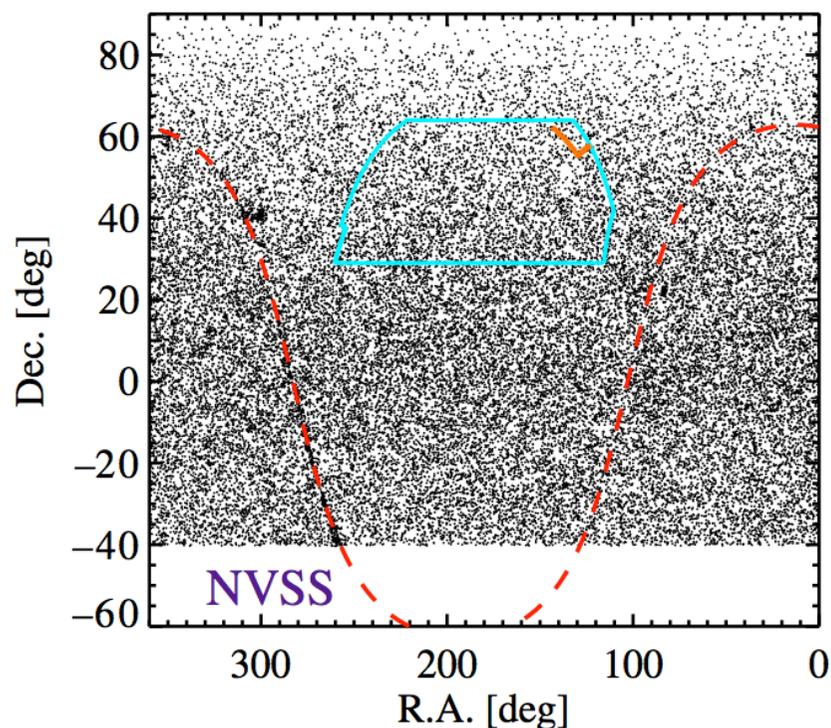
IceCube error circle
($r=1.0$ deg)



- 2MASS画像を用いて、観測領域の差分画像を作成
- 差分画像を目で確認し、トランジェントが検出していないかをチェック
- トランジェントは検出されず、5シグマ限界等級 $J=18.8$ (Mori et al., GCN20263)
- Rバンドの参照画像としてPan-STARRSデータを用いているが、差し引きがうまくいっていない

ブレーザー候補天体の抽出

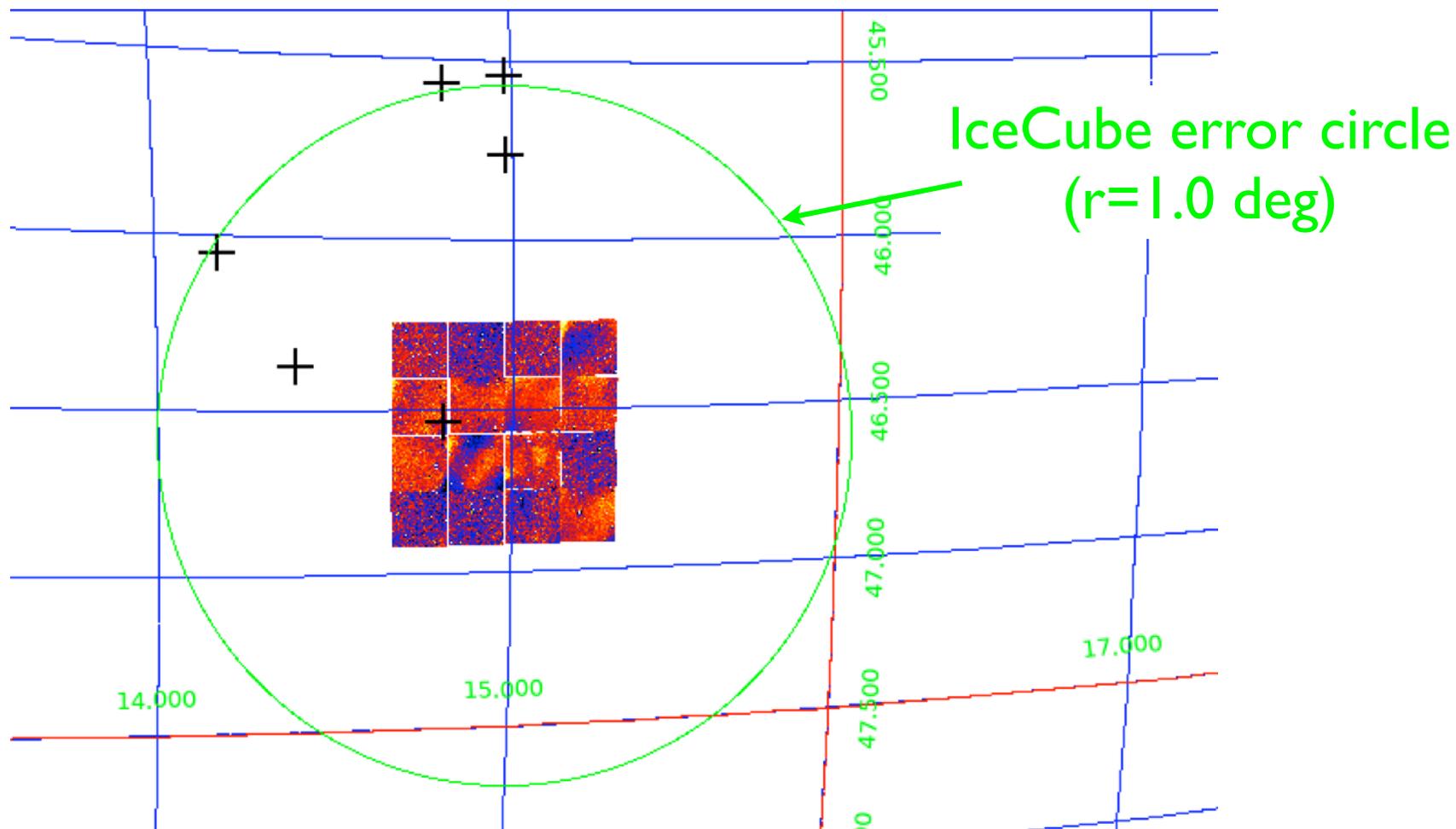
- ブレーザーは電波帯域でフラットなスペクトルを示すことが特徴のひとつ (spectral index $\alpha \sim 0$, $F_\nu \propto \nu^\alpha$)
- ブレーザー候補として、 $\alpha < -0.5$ のフラットな電波スペクトルを示す天体を抽出
 - ✓ NVSS (NRAO VLA Sky Survey) 1.4 GHz catalog (>2.5 mJy, 2 million sources, Condon+98)
 - ✓ TGSS (TIER GMRT Sky Survey) 150 MHz catalog (>3.5 mJy, 0.6 million sources, Intema+16)



Kimball+08

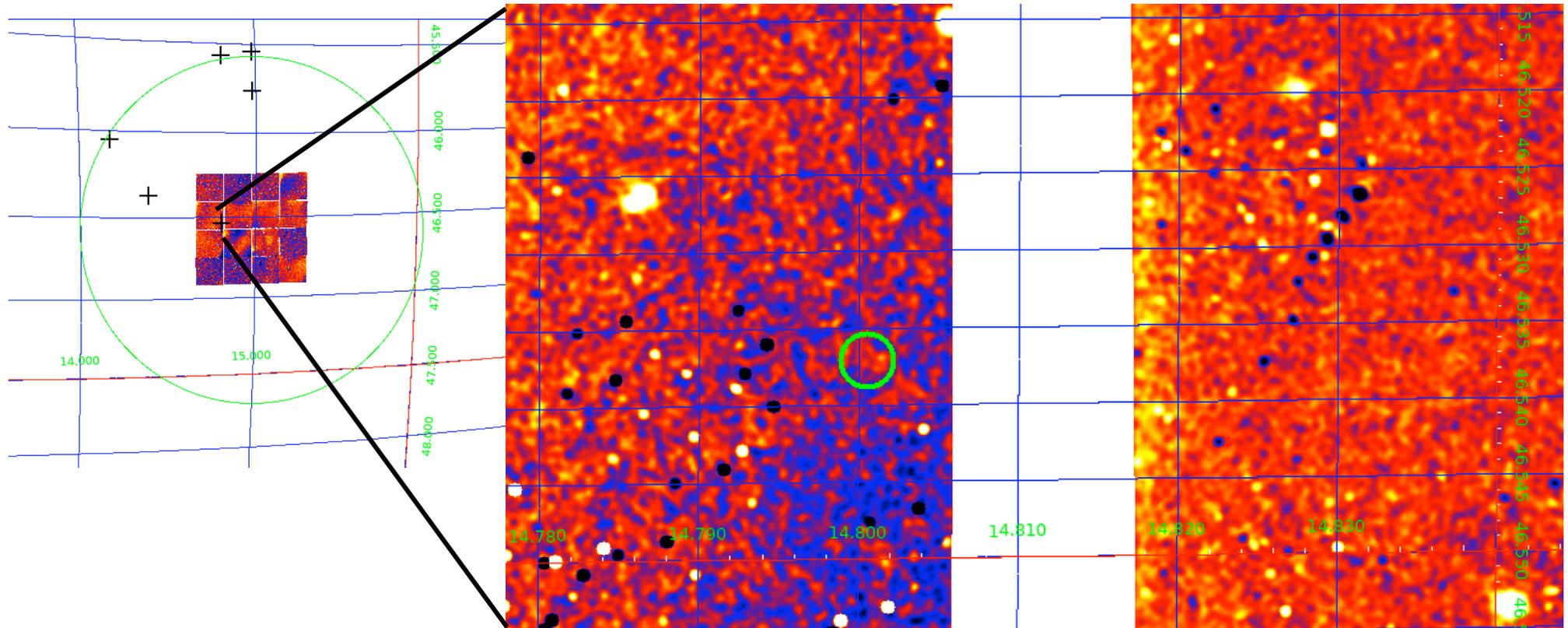
Intema+16

Flat-spectrum radio sourceの位置



- 先の手法により、IceCube誤差円内に6個のflat-spectrum radio sourcesを発見
- (この領域内で全天ブレーザーカタログCRATESソースを探したが1個もなし)
- HONIRの観測領域内では1個のみ

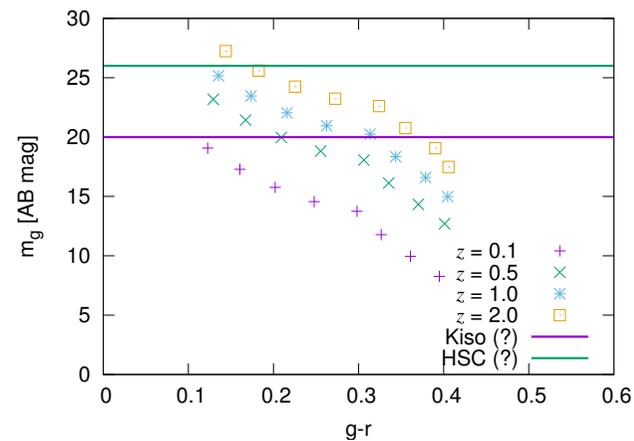
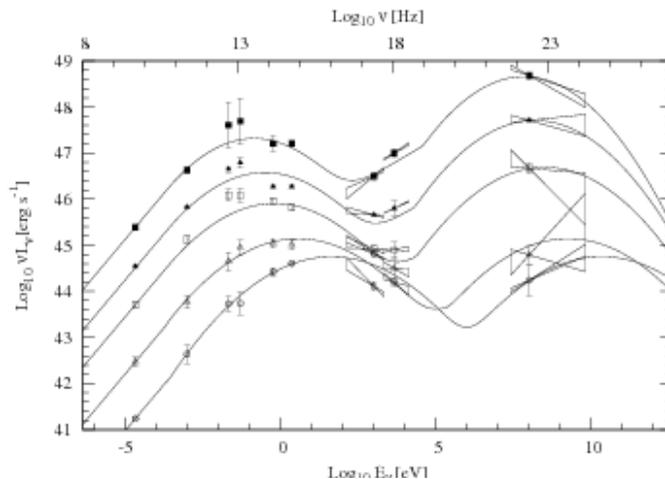
Flat-spectrum radio sourceの対応天体



- 対応天体は見えていない ($J > 18.8$)
- 今後はHONIRではCRATESカタログやflat-spectrum radio sourceなどの天体を含む領域を観測するのがよいだろう (10天体程度?)

Tomo-e Gozenによる 超新星サーベイへの希望・提案

- IceCubeアラートは、年間5-6回出ると予想されている
- Dec.~0度方向が、検出効率が最も高い
- KWFC/Tomo-e Gozenによる広視野観測によって、blazar以外の可能性も探ることが可能になるので、木曾の即時フォローアップ観測の重要度は高い
- No-filter, 2h-cadenceのデータからdaily, weekly ライトカーブを作成し、variability index (reduced chi-square)を算出。変動が大きい天体を抽出し、電波カタログとmatchingからブレーザーを同定
- 3.8m望遠鏡が動きだせば、即時分光によってredshiftを決めたい



Summary

- IceCube実験により、 $E > \sim 100 \text{ TeV}$ の帯域で宇宙ニュートリノが検出されている
- 2016年4月から、astrophysical neutrinoが検出されると自動的にアラートが配信されるようになり、即時電磁波観測が可能になった
- 2016年12月10日のIceCube neutrinoイベントに対して、かなたHONIRによるR,Jバンド撮像観測を行った
- トランジェントは検出されなかった ($J > 18.8$, Rバンドは解析中)
- 誤差円半径は1~2度程度なので、Tomo-e GozenやKWFCのような広視野カメラが不可欠
- 系外ジェット天体、特にフレア中のブレーザーがソースである可能性が高いように思われる (個人的感想)
- かなたHONIRなどの標準的な視野の検出器では、誤差円内のブレーザー候補方向へのpointing観測が有効かもしれない