スーパーカミオカンデにおける 超新星爆発ニュートリノアラート

毛受弘彰 (名大ISEE) for SKコラボレーション





Space-Earth Environmental Research

第12回光赤外天文学大学間連携ワークショップ、2021年11月24-26日、オンライン

スーパーカミオカンデ実験

50,000 t の純水を用いたニュートリノ検出装置



"カミオカンデ"の歴史

ENERGY (MeV) 05 05

10



中性子検出性能の回上 → 超新星ニュートリノの 検出感度向上

SK実験フェーズ



- 検出器の改良(光電子増倍間の位置、読み出し回路など)を
 "S行いながら20年以上観測を続けている eriment after the start of the Gd-loading
- 超新星爆発の観測機会を逃さないために、す可動時間を最小化
- 2020年から硫酸ガドリニウム溶かして真フェーズ: SK-Gdスタート

SKのさまざまな物理

光子





超新星背景ニュートリノの探索

Diffuse Supernova Neutrino Background (DSNB)



宇宙での重元素合成の歴史

超新星爆発ニュートリノバースト



超新星爆発メカニズムの解明
 マルチメッセンジャー観測
 光学観測へのアラート発信

ニュートリノシグナル

ニュートリノ事象例(電子ニュートリノ)

トニュートリノが水中で相互作用







荷電粒子がつくるチェレンコフ光を検出



- ・さまざまなバックグラウンド
 - ▶ 環境中の放射性物質(ラドン)
 - ▶ 宇宙線ミューオン
 - ミューオンによる原子核の破砕核
 - 光電子増倍感ノイズの
 アクシデンタルコインシデンス

グナル(ニュートリノ)とバックグラウンドの弁別が鍵

MeV領域のニュートリノ反応



SK-Gd

- 中性子捕獲断面積が大きいガドリニウムを水中に溶かす。
 - →中性子を捕獲したガドリニウムがだす高エネルギーガンマ線を検出



超新星バーストニュートリノ

- ニュートリノ事象の選別条件
 - E > 7 MeV (低エネルギーバックグラウンドの除去)
 - 宇宙線ミューオンのトラックと付随しない(後述)
- 期待されるイベント数@10 kpc

超新星炸	超新星爆発時のニュートリノフラックスモデル Wilson NK1 No osc. NH IH No osc. NH IH $e^+ + n$ 4923 5667 7587 2076 2399 2745 $v_e + e^-$ 74 130 114 43 56 56				ニュートリノ振動の パラメータ /\				
	Wilson			NK1			NK2		
	No osc.	NH	IH	No osc.	NH	IH	No osc.	NH	IH
$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$	4923	5667	7587	2076	2399	2745	1878	2252	2652
$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$	74	130	114	43	56	56	39	54	54
$\tilde{\nu}_e + e^- ightarrow \tilde{\nu}_e + e^-$	25	29	37	10	12	14	9	11	13
$\nu_{\chi} + e^- \rightarrow \nu_{\chi} + e^-$	41	33	34	17	19	18	17	17	17
$\bar{\nu}_{x} + e^{-} \rightarrow \bar{\nu}_{x} + e^{-}$	34	33	29	14	14	14	13	13	14
$v_e + {}^{16} \text{ O} \rightarrow e^- + X$	8	662	479	22	78	74	16	72	68
$\bar{\nu}_e + {}^{16}\text{O} \rightarrow e^+ + X$	64	196	531	27	48	70	20	41	64
Total	5169	6750	8811	2209	2626	2991	1992	2460	2882

検出数と平均エネルギーの時間発展

ニュートリノフラックスの時間発展、エネルギーの予測はモデルによって様々 → 高統計のデータによって超新星爆発のメカニズムに迫ることができる

SK-Gdでの方向決定の向上

▶ SK-Gdでは逆ベータ崩壊の中性子を検出することで方向決定精度を向上

▶方向決定精度は検出ニュートリノ数にも強く依存

 $\Delta\theta \propto \sqrt{1/N}$ (3.5 deg @10 kpc \rightarrow 0.4 deg @ 1 kpc)

超新星爆発モニターシステム

リアルタイムプロセス (~2 min.)

- ▶データ・フォーマットの変換
- 各事象の再構成
 - ▶ 衝突点(Vertex)
 - ・エネルギー
 - ▶ 方向

超新星爆発アラート

- √オペレーションの確認
 - 通常観測モード (観測時間の98%)
 - キャリブレーション、テスト (~2%) → アラート配信抑制
- ✓クラスタイベント数(N)によるアラートレベル判定
 - Golden alert (N > 60)
 - → 即座にTV会議を開催、データチェック。
 - 本物だとみなされるとアラートの配信
 - Normal alert (N > 25)
 - → 解析エキスパートによるチェック。
 必要に応じてTV会議を開催(↑)
 - Silent warning (N > 13 in 10秒)
 - → 解析エキスパートにメール配信(1日に数回)

自動 Golden alert (N > 60 + 優位なIBD事象数) → リアルタイムプロセスが自動でアラート配信 配信までの時間を数分まで短縮

アラート配信

- ▶ テキスト配信
 - ATel、SNEWS、GCN Circular
- ▶ Machine Readable (2021年4月~)
 - GCN Notice

配信アラート例 (テスト・月1回)

TITLE: GCN/SK_SN NOTICE NOTICE_DATE: Mon 01 Nov 21 00:00:14 UT NOTICE_TYPE: SK_SN_TEST TRIGGER_NUMBER: SK_SN 10030 SRC_RA: 254.4000d {+16h 57m 36s} (J2000), 254.6087d {+16h 58m 26s} (current). 253.9223d {+16h 55m 41s} (1950) +31.2600d {+31d 15' 36"} (J2000). SRC_DEC: +31.2275d {+31d 13' 39"} (current), +31.3360d {+31d 20' 10"} (1950) SRC_ERROR68: 0.64 [deg radius, stat-only, 68% containment] SRC_ERROR90: 0.91 [deg radius, stat-only, 90% containment] SRC_ERROR95: 1.04 [deg radius, stat-only, 95% containment] DISCOVERY_DATE: 19518 TJD; 304 DOY; 21/10/31 (yy/mm/dd) DISCOVERY_TIME: 82816 SOD {23:00:16.74} UT 64124 (Number of detected neutrino events) N_EVENTS: ENERGY_LIMIT: 7.00 [MeV] (Minimum energy of the neutrinos) 10.0 [sec] (Collection duration of the neutrinos) DURATION: DISTANCE: 2.16 - 2.95 [kpc] (low - high as SN1987A like SNe) The position error is statistical only, there is no systematic added. COMMENTS: COMMENTS: All numbers are preliminary. COMMENTS: COMMENTS: NOTE: This is a TEST Notice. COMMENTS:

GCN Noticeのリスト

	ACTIVE	OLD INACTIVE			
Description	Notice Archive	Description	Notice Archive		
<u>IPN</u>		CGRO	n/a		
KONUS	table	BeppoSAX	table		
INTEGRAL	GRBs table	NEAR	table		
INTEGRAL	SPI-ACS table	ALEXIS	table		
Swift	GRBs table	HETE	table		
Swift	GND_ANALYSIS table	MILAGRO	table		
Swift	BAT SubSubThresh table	XTE-PCA, -ASM	table		
Swift	BAT Monitor table	<u>Suzaku</u>	table		
AGILE	GRBs table				
AGILE	MCAL table				
<u>Fermi</u>	GRBs table				
<u>Fermi</u>	GBM Subthresh table				
<u>Fermi</u>	LAT Monitor&Trans table				
MAXI	table				
MOA	table				
SNEWS	table				
SK_SN	table				
CALET	table				
AMON	Gold&Bronze table	AMON	EHE table		
AMON	HAWC table	AMON	HESE table		
AMON	NU_EM table				
AMON	CASCADE table				
LIGO/Virgo	table				
Counterpart	table				
Coincidence	table				
SIMBAD-NED	n/a				

Sensitivity

- ▶ SK-Gd計画の進展
 - 水中のGd濃度を0.1%まで段階的に上げことによって
 中性子捕獲効率を90%まで向上
 - → 超新星爆発天体の方向決定精度の向上
- ▶ Si燃焼期(プレカーサー)のニュートリノ検出
- ハイパーカミオカンデ計画

北シュートッフト (a) NO. 5 0/48 hours FPR equivalent (a) NO. 50/48 hours FPR equivalent Astrophys. J. 885, 133 (2

(pc)

has

ハイパーカミオカンデ(HK)実験

Funatsu Bridge Kamioka Town

Wasabo

SK検出器の近くの山に 新しくHK検出器用のキャビンを作成

ハイパーカミオカンデ実験

Hamamatsu R12860

- ▶ 2020年から建設開始
- ▶ 2027年に観測開始

まとめ

- スーパーカミオカンデ実験は、銀河系と大小マゼラン星雲で発生した重力崩壊型超新星爆発からのニュートリノ観測を目指し、20年以上観測を継続している。
- ガドリウムを純粋にとかしたSK-Gdフェーズが2020年からス タート。高い中性子捕獲性能により、逆ベータ崩壊事象の同定 が可能となり、バックグラウンドとの弁別性能が向上
- 2021年4月から超新星爆発ニュートリノバーストのアラートの GCN Noticeを通した配信を新たに開始。12月からバーストから アラート配信までの遅延時間を数分まで改善。
- SK-GdとHKによって、Si燃焼期を含めた超新星爆発ニュートリノの検出能力が向上。