CRC タウンミーティング、2012年7月22日

GADZOOKS!: ガドリニウムを用いたスーパーカミオカンデ による反電子ニュートリノの物理



中畑 雅行 東京大学 ICRR/IPMU



- GADZOOKS!とは何か?
- ・ 目指す物理(主として超新星ニュートリノ)
- 超新星ニュートリノ観測の現状
- R&Dの現状
- 今後の予定
- まとめ



VOLUME 93, NUMBER 17

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending 22 OCTOBER 2004

Antineutrino Spectroscopy with Large Water Čerenkov Detectors

John F. Beacom¹ and Mark R. Vagins²

¹NASA/Fermilab Astrophysics Center, Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, Illinois 60510-0500, USA ²Department of Physics and Astronomy, 4129 Reines Hall, University of California, Irvine, California 92697, USA (Received 25 September 2003; published 20 October 2004)

We propose modifying large water Čerenkov detectors by the addition of 0.2% gadolinium trichloride, which is highly soluble, newly inexpensive, and transparent in solution. Since Gd has an enormous cross section for radiative neutron capture, with $\sum E_{\gamma} = 8$ MeV, this would make neutrons visible for the first time in such detectors, allowing antineutrino tagging by the coincidence detection reaction $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ (similarly for $\bar{\nu}_{\mu}$). Taking Super-Kamiokande as a working example, dramatic consequences for reactor neutrino measurements, first observation of the diffuse supernova neutrino background, galactic supernova detection, and other topics are discussed.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.93.171101

PACS numbers: 95.55.Vj, 29.40.Ka

Gadolinium Antineutrino Detector Zealously Outperforming Old Kamiokande, Super!



ガドリニウムは中性子捕獲断面積が大きい物質。 捕獲後、総計8MeVのガンマ線が放出される。





超新星背景ニュートリノ(SRN)の観測

- 未発見のSRNの観測。

- <u>超新星爆発ニュートリノ</u>
 - 電子散乱事象をenhanceすることにより方向決定の向上。
 - $-v_e$ 散乱のみならず、 $v_e + v_x$ のスペクトル測定。
 - Si燃焼過程のニュートリノを捉え、爆発の予知。
- <u>原子炉ニュートリノ</u>
 - 高統計観測による振動パラメータの精密測定。

また、中性子の同定は以下の物理にも役立つ。

• <u>陽子崩壊のバックグラウンドの低減</u>

- 陽子崩壊は中性子を出しにくいが、大気ニュートリノ反応は 中性子を出す。

重力崩壊型超新星の爆発機構

コアを重力崩壊させ、その解放された重力エネルギーで外層を吹き飛ばす。



<u>超新星爆発からのニュートリノ放出</u>



に成功していない。ニュートリノデータのイン プットが必須。



SN1987A: supernova at LMC(50kpc)



<u>超新星背景ニュートリノ</u>

宇宙には10²⁰個の恒星がある。(10¹⁰個の銀河、10¹⁰星/銀河) 全恒星の約0.3%が超新星爆発に至る。 したがって、宇宙の開闢から今までに約10¹⁷回の超新星爆発がおき てきたことになる。それにともなうニュートリノ(超新星背景ニュートリ ノ)は宇宙に満ちている。



<u>超新星背景ニュートリノのスペクトル</u> (理論的な計算)

$$\frac{dF_{\nu}}{dE_{\nu}} = c \int_0^{z_{\text{max}}} R_{\text{SN}}(z) \frac{dN_{\nu}(E_{\nu}')}{dE_{\nu}'} (1+z) \frac{dt}{dz} dz$$

超新星背景ニュートリノ(Supernova Relic Neutrino(SRN))が観測されれば、 大質量星形成の歴史を探ることができ る。

S.Ando et al., Astrophys.J.607:20-31,2004.



<u>超新星の頻度</u>



Horiuchi et al., Ap.J., 738(2011)154.



<u>SRN Flux upper limitの現状</u>

C. Lunardini, astro-ph/0610534



理論予想に迫る結果を出しているのはSuper-Kのみ。

<u>SKでのSRN探索の現状(SK-I, II, IIIの結果)</u>





<u>SRNに対する主要なバックグラウンド</u>



<u>期待される信号と大気ニュートリノB.G.</u>





<u>天の川銀河での超新星までの距離</u>

Mirizzi, Raffelt and Serpico, JCAP 0605,012(2006), astro-ph/0604300

Based on birth location of neutron stars



超新星爆発との方向分布



超新星との方向分布







中性子タグすることによって、方向の精度を2倍近く向上できる。

<u>電子散乱による v_e+v_x スペクトルの測定</u> <u>SN at 10kpc</u>

中性子タグなし 中性子タグあり(80%効率として) events/2MeV 11 1 Spectrum of ve (10kpc) 32kton volume events/2MeV Spectrum of ve (10kpc) 32kt 1/5 v_ep BG -1 error/mean 0 0 1 error/mean -2 **Electron energy (MeV) Electron energy (MeV)** ~20MeVまでスペクトルの測定 測定範囲を30MeVまで伸ばす ことが可能。

Neutrino flux and spectrum from Livermore simulation

<u>中性子化バーストの観測可能性</u>

 $(e^+p \rightarrow n + v_e)$



中性子化信号は0.9イベント程度。v_ep 事象は14程度(そのうち1.4事象が SN方向) 中性子をタグできれば、v_ep の「バックグラウンド」を1/5 以下に減らして、 S/N比を3ぐらいにできる。

Si燃焼からニュートリノによる爆発の予知

A.Odrzywolek, M.Misiaszek, M.Kutschera, astro-ph/0311012



近傍銀河の超新星爆発の感度





<u>R&D項目</u>

◆Gdからのガンマ線はチェレンコフ検出器でどう見えるか?
小さいテスト容器を使ってSKで試験をおこなった。
◆ <u>Gd化合物の選択、腐食性の評価</u>
Gd化合物がタンク構造体、PMT材料を腐食させないかを確認。
◆水の透過率に与える影響
SKでの他の物理に影響を与えないように透過率は十分長くないといけ
ない。
◆ <u>純水装置の改造</u>
現純水装置ではイオンを取り除いてしまうので、ガドリニウムをとらずに
水を純化できるように純水装置を改造しなければならない。
◆ <u>Gdの導入方法/除去方法</u>
どのように溶かすか? どうやって回収するか?
◆環境中性子、U/Thバックグラウンドの評価
太陽ニュートリノ観測への影響、SRNへのバックグラウンド
◆ <u>SKタンクの水漏れ補修</u>
タンクの水漏れ(約2トン/日)を直す必要がある。





<u>中性子のタグ効率とバックグラウンド除去</u>



Total Energy(MeV)

<u>Gd化合物の選択、腐食性の評価</u>

	すきま腐食試験									条件	
塩組成	$Gd_2(SO4)_3$				2wt%GdCl ₃					三チ	+ 适船に
濃度	0.2wt% 2wt%			wt%	+0.02wt%GdF3 +0.02wt%NaF				ニょそ	รมรก	
温度	20°C				20°C				20℃以	下 	△
溶存酸素濃度	0.25ppm				0.25ppm				<u>0.5ppm以下</u> 試 局		央
組織ほか	非鋭敏化	強鋭敏化	非鋭敏化	強鋭敏化	非鋭敏化	強鋭敏化	2 非鋭敏(と 強鋭敏化	非鋭敏 鋭敏(化 と	
時間					-				5年間		
評価	なし	なし	なし	なし	可能性あり) 可能性あ (推定)	り可能性あ	か 可能性あり (推定))		
	応力腐食割れ試験									SK想定条件	
塩組成	$Gd_2(SO4)_3$				2wt%GdCl ₃						
濃度	0.2wt% 2wt%		t%	+0.02wt%GdF3 +0).02wt%NaF				
温度	60°C				$60^{\circ}\mathrm{C}$						20℃以下
溶存酸素濃度	0.25ppm				0.25ppm					_	0.5ppm以下
組織ほか	非鋭敏化	強鋭敏化	非鋭敏化	強鋭敏化	非鋭敏化	鋭敏化	強鋭敏化	非鋭敏化	鋭敏化	強鋭敏化	非鋭敏化 鋭敏化
時間	1ヶ月				1ヶ月						5年間
評価	なし	なし	なし	なし	なし	なし	あり	なし	あり	あり	

<u>ステンレスの応力腐食割れ試験後のサンプル</u>



0.2wt%、2wt%Gd₂(SO₄)₃水溶液



Gd₂(SO₄)₃では腐食 性が見られなかった。 Gd(NO₃)₃でも腐食性 はなかったが350nm 以下で強い光の吸収 があった。

2wt%GdCl₃+0.02wt%GdF₃、2wt%GdCl₃+0.02wt%NaF水溶液

SKで使われている各種部材の腐食試験





室温(20~25℃)で3ヶ月間放置してか らサンプルを溶液から取り出し顕微鏡 で腐食具合を確認

サンプルの表面上での変化は 確認されなかった。

PMTサポート用のゴムを除き、変色は見られな かった。サポート用ゴムについては、定量的な評価 を行い透過率に与える影響は少ないと評価。



Super-Kamiokande SK純水装置 ▶テストタンク用の空洞を掘削(2009年9) -12月) 50m ▶200トンタンク(直径、高さ約6m)を建 attant. 設(2010年4-6月) ≻Gdの純化装置、Gd水循環装置を建 1042 ~ A 10-114.5741 設(2010年9月-2011年2月) ▶Gd水溶液を使った試験を行っている。

地下の坑道図









膜ベースフィルターのテクノロジー





<u>Gd水循環装置</u>

June 2011



<u>EGADSでの試験の現状</u>



■ 15m³プラスチックタンクに0.2%硫酸ガドリニウム溶液を作り、 循環システムを通して水を流し、透過率の変化をモニターして いる。

■ この測定によりガドリニウム水自身の透過率を評価。



—Pure Water in 200 Ton Tank—Pure Water in 15 m3 Tank

—Gd Water on Feb. 1st —SK Water



チェレンコフスペクトル、PMTのQ.E.を考慮して、20mの距離をチェレンコフ光が 走った時に残存する光の割合(「20m残存光量」)を使って評価。(次ページ)

<u>15m³タンク試験での「20m残存光量」(LL_{20m})の変化</u>

Cherenkov Light Left at 20 m for Gd Water in 15 m³ Tank





- SKに0.1%の濃度でGdを溶かすことにより、実りある 反電子ニュートリノ物理が展開できる。
- 200トンの試験用タンクを作り開発研究を行っている。
- 今後の予定
 - 2012年8月: Gd溶解槽(15トンタンク)を使ったGd自身の透 過率の測定終了。
 - 2012年9-10月:200トンSUSタンクを使った循環試験。
 - 2012年12月-2013年2月:光電子増倍管取付。
 - 2013年3月以降: Super-Kを完璧に模擬したテストタンクによる総合試験。
- SKへ導入する具体的な時期については、開発研究終 了後にSK collaborationに提案して議論。