2019/03/14 14pK202-5

ニュートリノ中性カレント反応精密測定の ための核子・酸素原子核反応に関する研究

岡大理,京大理^A, Padova University^B, Toronto University^C, TRIUMF^D, Stanford University^E, RCNP^F

蓬莱明日,小汐由介,芦田洋輔A,中家 剛A,WENDELL RogerA,森正光A,

COLLAZUOL Gianmaria^B, IACOB Fabio^B, NANTAIS Corina^C,

KONAKA Akira^D, TANAKA Hiro^E, 嶋 達志^F

イントロダクション

ニュートリノ中性カレント反応

大気ニュートリノ由来の中性カレント準弾性散乱反応 (NCQE)

スーパーカミオカンデにガドリニウムを溶かしたSK-Gd計画での

超新星背景ニュートリノ(SRN)探索において主要なバックグラウンドに なると考えられている



どちらもe+/e-, neutronが観測されるため 識別が不可能

→NCQE反応の理解が重要



J-PARCからSKに向かってニュートリノビームを打ち込む実験

ニュートリノ振動パラメーターの測定が目的



4

様々な実験での大気ニュートリノフラックス (DOI: 10.1103)





	Signal	Background		
	NCQE	NC non-QE $$	CC	Unrel.
Fraction of Sample	68%	26%	4%	2%
Flux	11%	10%	12%	-
Cross sections	-	18%	24%	-
Primary γ production	15%	3%	9%	-
Secondary γ production	13%	13%	7.6%	-
Detector response	2.2%	2.2%	2.2%	-
Oscillation Parameters	-	-	10%	-
Total Systematic Error	23%	25%	31%	0.8%

チェレンコフ角再構成 arXiv:1403.3140 シミュレーションの不定性 arXiv:1403.3140

- ・シミュレーションと実データが不一致
- ・90°の再構成は2次ガンマ線に起因
- ・2次ガンマ線の不定性が大きい
- →中性子・酸素原子核反応で放出される ガンマ線を理解し不定性を小さくする





中性子ビーム実験



大阪大学核物理研究センター(RCNP)にて実験を行った

7



2つのサイクロトロンで陽子を加速し、7Li(p,n)7Be反応により 準単色中性子ビームを作り出す 水ターゲットに中性子を照射し、ガンマ線を測定する

前回実験の結果

 $\sigma_{\gamma(6.13 MeV)} = 4.2 \pm 0.1(stat.) \pm 0.9(sys.) \ mb^{-16}O(n, n')^{16}O^*$

 $\sigma_{\gamma(5.27\ MeV)} = 6.4 \pm 0.1(stat.) \pm 2.2(sys.)\ mb^{-16}O^* \rightarrow^{15}N^* + p,\ or\ {}^{16}O(n,np)^{15}N^*,\ or\ {}^{16}O(n,d)^{15}N^*$

 $\sigma_{\gamma(4.44\ MeV)} = 8.3 \pm 0.1(stat.) \pm 1.6(sys.)\ mb^{-16}O^* \rightarrow^{12}C^* + \alpha, \ or\ {}^{16}O(n,n\alpha)^{12}C^*$



データ点を増やすために30 MeV, 250 MeVでも実験を行なった

30 MeV実験



9

先行実験と同様なピークを確認

本公演では系統誤差になりうる中性子ビームの理解について発表する



入射粒子弁別: Pulse Shape Discrimination(PSD)手法を用いる

中性子運動エネルギー:γ線と中性子のTOF分布より求める

LqSの検出効率:シミュレーションを用いる

入射粒子によって出力される波形が異なることを利用



$$PSD \ par = \frac{Q(T_2) - Q(T_1)}{Q(T_2)}$$

Q(T₁): T₀からT₁までの積分値 Q(T₂): T₀からT₂までの積分値

本実験の場合PSD parが大きいほど 中性子イベント

入射粒子弁別能力を確認

中性子の運動エネルギー



SCINFUL QMD MC

有機液体シンチレータの検出効率をエネルギーbinごとに計算



性子フラックス

TOFから求めた運動エネルギー分布を検出効率で割ったもの

立体角,ファラデーカップの電流値で規格化





- ・NCQE反応はSK-GdでのSRN探索において背景事象となりうる
- ・現在のNCQEシミュレーションは実データを再現しない
- ・不定性削減のため2次ガンマ線に焦点を当てた実験を行なった
- ・現在は準単色中性子ビームについての理解を進めている
- ・断面積の解析を今後行なっていく

Backup

超新星背景ニュートリノ(SRN)

これまでの超新星爆発によって放出されたニュートリノの重ね合わせ スーパーカミオカンデにて以下の反応をもとにチェレンコフ光を検出する



Super Kamiokande with Gadolinium (SK-Gd) ガドリニウムの熱中性子捕獲から放出されるガンマ線を 利用してSRN事象と背景事象を識別



SK-Gd計画

Super Kamiokande with Gadolinium ガドリニウムの熱中性子捕獲の情報を用いてSRN事象と背景事象を識別 できるようにする

$$\overline{\nu_e} + p \rightarrow e^+ + n \qquad n + {}^{155}Gd \rightarrow {}^{156}Gd^* \rightarrow {}^{156}Gd + \gamma's$$
$$n + {}^{157}Gd \rightarrow {}^{158}Gd^* \rightarrow {}^{158}Gd + \gamma's$$



多くの背景事象と識別すること が可能になる

水チェレンコフ検出器

水中で荷電粒子が放出するチェレンコフ光を観測する検出器 (スーパーカミオカンデなど)

チェレンコフ光:

荷電粒子が媒質中での光速(c/n)を超えて走る際に放出される光



ニュートリノの中性カレント反応

ニュートリノがZ⁰粒子の交換を通して起こす反応のこと

 $\nu + N \rightarrow \nu + N$ $\nu + N \rightarrow \nu + N^*$ $\nu + N \rightarrow \nu + N^* + n$



21

ターゲットが酸素原子核の場合以下のような反応が起こる(一例) $\nu + {}^{16}O \rightarrow \nu + {}^{15}O^* + n$

脱励起でガンマ線を放出

ニュートリノの中性カレント反応







中性カレント反応による問題



信号のあったPMTから3つを 同時に複数発生した場合

取り出しチェレンコフリングの チェレンコフ光の区別はできない

再構成を行う

これを全ての組み合わせで行い

中央値をその信号の角度とする

リングが実際よりも大きい値に再構成される

陽子ビームのエネルギーを 変えて2度実験 (30 MeV, 250 MeV) このデータをもとにガンマ線の 生成断面積を求める HPGe: 半導体検出器 LqS: 有機液体シンチレータ CsI: 無機シンチレータ アクリル容器: 直径20 cm

24

高さ26 cm

Flash-ADCでデータ取得 →波形解析を行う

中性子ビーム実験

<u>Flash-ADC (CAEN DT5725)</u> 4 ns毎にデータ取得可能 検出器からの波形データを そのまま保存する



<u>MCA</u>

HPGeの信号からリアルタイムで エネルギー分布を作成する データがおかしくないかを その場で確認するために使用



ガンマ線の生成断面積は以下の式で求められる

$$\sigma_{\gamma} = \frac{N_{sig} - N_{bkg}}{\phi_n \epsilon_{\gamma} T} \qquad \begin{array}{c} N_{sig} : 信号領域のイベント数 & -\text{HPG} \\ N_{bkg} : 信号領域のバックグラウンド数 & -\text{CsI, no water run} \\ \hline \phi_n : 中性子フラックス & -\text{LqS} \\ \hline \epsilon_{\gamma} : \text{HPGeのガンマ線検出効率} & -\text{Simulation, experiment} \\ T : ターゲット中の酸素原子核の数 & -\text{Calculate} \\ &= 8.3546 * 10^{23} [/cm^3] \end{array}$$

本公演では中性子フラックスについての結果を述べる

77 MeVの中性子照射実験



6.13*MeV* $|^{16}O(n,n')^{16}O^*$ 5.27*MeV* $|^{16}O(n,n')^{16}O^*$ then ${}^{16}O^* \to {}^{15}N^* + p$, or ${}^{16}O(n,np)^{15}N^*$, or ${}^{16}O(n,d)^{15}N^*$ 4.44*MeV* $|^{16}O(n,n')^{16}O^*$ then ${}^{16}O^* \to {}^{12}C^* + \alpha$, or ${}^{16}O(n,n\alpha)^{12}C^*$

LqSデータ解析

中性子フラックスを求めるためにはFADCで取得した生データから

・入射粒子の弁別

— Pulse shape discrimination (PSD) を使用

・中性子エネルギーの再構成(信号領域の中性子イベントを取り出すため)

を行う必要がある



LqSデータ解析

中性子フラックスを求めるためにはFADCで取得した生データから

- ・入射粒子の弁別
 - Pulse shape discrimination (PSD) を使用
- ・中性子エネルギーの再構成(信号領域の中性子イベントを取り出すため)

を行う必要がある



Pulse shape discrimination (PSD)

検出器の出力波形が入射粒子の種類で異なることを利用した粒子弁別技術

30

本実験で使用したLqSの場合中性子の波形は減衰に時間がかかり

尾を引くような形になる



Pulse shape discrimination (PSD)



LqSのPSD性能

30 MeV Run data



LqSデータ解析

中性子フラックスを求めるためにはFADCで取得した生データから

・入射粒子の弁別

— Pulse shape discrimination (PSD) を使用

・中性子エネルギーの再構成(信号領域の中性子イベントを取り出すため)

を行う必要がある



TOF分布



熱中性子化するまでキャプチャーはされない 途中でどんどんエネルギーを落としていき、熱化



スーパーカミオカンデの時間分解能1.3 μs

SK-Gd計画



BGの削減により、世界初のSRN観測を目指す



核爆発型:軽いため途中で核融合がストップ。Feまで作られない

電子の縮退圧と重力が釣り合っている

実は徐々に核融合が起こっている

重力崩壊型:核融合で鉄まで作られる(それ以上は作られない) 中心部の密度がどんどん上がる

衝撃波跳ね返る

スーパーカミオカンデ (SK)



補修工事が終わり今月末から

38

運転再開予定



LqSのPSD性能





-> Optimize the T1 from histogram

T1



FOM



32 ns is best point

FOM



T₂



図 8.5

異種放射線で励起したスチル ベン中のシンチレーションパ ルスの時間特性(時間0で同 じ強度に規格化) (Bollinger and Thomas⁶⁰⁾ によ る)

Energy distribution



Energy distribution (241Am:Be)























チェレンコフ角再構成



有機シンチレータ 発光過程



図: π電子構造を持つ有機分子のエネルギー準位

放射線によりS1に励起 大部分はSiからSoへ 光子を放出(蛍光) 系間遷移を経てTiへ移ることも T₁からS₀でも光子を放出(燐光) 熱的励起によりT₁からS₁へ戻りS₀ へ落ちることもある(遅発蛍光)

 $^{\prime}Li(p,n)^{\prime}Be(g.s. + 0.43MeV)$

生成される7Beの基底状態は半減期53.3dの不安定な核

電子捕獲による崩壊

その10.3%が7Liの励起エネルギー0.478MeVの第一励起状態に遷移

この励起状態が7Liの基底状態に遷る際に0.478MeVのガンマ線を放出

Hole	Residual	States	(k)	E_{γ}	E_p	E_n	$\boldsymbol{B}(k)$
$(p_{1/2})_p^{-1}$	g.s.	$\frac{1}{2}$ -	¹⁵ N	0	0	0	0.25
$(p_{3/2})_p^{-1}$	6.32	$\frac{3}{2}$ -	¹⁵ N	6.32	0	0	0.41
/ - /	9.93	$\frac{3}{2}$ -	¹⁵ N	9.93	0	0	0.03
10.70	10.70	$\frac{3}{2}$ -	¹⁵ N	0	0.5	0	0.03
$(s_{1/2})_p^{-1}$	g.s.	1 ⁺	¹⁴ N	0	0	~ 20	0.02
1/2 1	7.03	2+	¹⁴ N	7.03	0	~13	0.02
	g.s.	$\frac{1}{2}$ -	¹³ C	0	1.6	~11	0.01
	g.s.	\tilde{o}^+	^{14}C	0	~21	0	0.02
	7.01	2+	^{14}C	7.01	~14	0	0.02
	g.s.	$\frac{1}{2}$ -	^{13}C	0	~11	~2	0.03
$(j)_{p}^{-1}$	others	-	many states	$\leq 3-4$			0.16
$(p_{1/2})_n^{-1}$	g.s.	$\frac{1}{2}$ -	¹⁵ O	0	0	0	0.25
$(p_{3/2})_n^{-1}$	6.18	$\frac{3}{2}$ -	¹⁵ O	6.18	0	0	0.44
$(s_{1/2})_n^{-1}$	g.s.	1+	^{14}N	0	~24	0	0.02
	7.03	2+	^{14}N	7.03	~17	0	0.02
	g.s.	$\frac{1}{2}$ -	¹³ C	0	$\sim 14.5 + 1.6$	0	0.01
	g.s.	$\tilde{0}^+$	14 O	0	0	~18	0.02
	g.s.	$\frac{1}{2}$ -	¹³ N	0	2.0	~11.5	0.02
$(j)_{n}^{-1}$	others	-	many states	\leq 3–4			0.22

. . .

.

.

. . .

.

. .

. . . .

. .

. .

. .

.

. . . .

.

.

. .

. . .

. .

.

. .

(a) 6.13 MeV from ¹⁶O(3⁻):

 $^{16}O(n,n')^{16}O^*$, then $^{16}O^* \rightarrow ^{16}O + gamma$

(b) 5.27 MeV from ¹⁵N(5/2⁺): (*)

 $^{16}O(n,n')^{16}O^*$, then $^{16}O^* \rightarrow ^{15}N^* + p$, then $^{15}N^* \rightarrow ^{15}N + gamma$ (p-emission)

(c) 6.32 MeV from ¹⁵N(3/2⁻): (*)

 $^{16}O(n,np)^{15}N^*$, then $^{15}N^* \rightarrow ^{15}N + gamma$

(d) 4.44 MeV from ¹²C(2⁺):

 $^{16}O(n,n')^{16}O^*$, then $^{16}O^* \rightarrow ^{12}C^* + alpha$, then $^{12}C^* \rightarrow ^{12}C + gamma$ (alpha-emission)

(e) 3.84 MeV from 170(5/2-):

¹⁷O creation (neutron capture by ¹⁶O or inelastic scattering with ¹⁷O?), then ¹⁷O^{*} \rightarrow ¹⁷O + gamma

(f) 3.68 MeV from ¹³C(5/2⁺):

 $^{16}O(n,alpha)^{13}C^*$, then $^{13}C^* \rightarrow ^{13}C + gamma$

大気ニュートリノ



 $Fe + \gamma \rightarrow 13He + 4n$

 $He \rightarrow 2p + 2n$

 $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$ 電子捕獲

SRN flux



Raw data



これまでの立ち上がり決定法

LqS

baseline, rmsを計算

baseline - raw が5*rmsを超えた



RF - *gate*

baselineはほぼ8200

LqSの立ち上がりよりも左側で

60

立ち下がる点を採用



dt, neutron energy



61

dtは良さそう エネルギー再構成が変

LqS

- Baseline raw > 5*rms
- ・その次の点
- の2点でpol1でFit

得られた関数とbaselineの

交点を立ち上がりとする



RF_gate

立ち上がりは8ns以内に終了 2点を取ることが難しいため

使用せず



