

KAMIOKANDE と SN 1987A からのニュートリノの検出

戸 塚 洋 二*

岐阜県神岡町にある実験装置 KAMIOKANDE は 2 月 23 日, 11 個の反応からなるニュートリノバーストを記録していた。最初の 2 例は大マゼラン星雲を向いており, 大マゼラン星雲で起きた超新星 SN 1987A に関係していることは確実であった。このニュートリノバーストは太陽系外天体ニュートリノの史上はじめての観測である。

1. はじめに

突然 KAMIOKANDE という訳のわからない言葉が出てきて驚かれた方も多いと思う。最初の KAMIOKA の意味は岐阜県吉城郡神岡町のことで, うしろの NDE は Nucleon Decay Experiment の略である。Nucleon とは原子核を構成している核子を表す英語で, 陽子と中性子の 2 種類がある。従って KAMIOKANDE とは日本語で神岡陽子崩壊実験を意味する。陽子は宇宙や我々自体の基本構成物質であるから, 未来永劫にわたって安定であると考えられてきた。しかし最新の素粒子物理学が最も力を入れている電磁力, 弱い力, 強い力それに重力を統一する大統一理論はこの未来永劫の安定性を否定している。KAMIOKANDE はまさにこの大統一理論を検証するための実験なのである。

陽子の崩壊というのは宇宙論にも重大な影響を持っているのはご存知のことと思う。我々の住んでいる宇宙は物質でできており, 反物質はない。この物質, 反物質の非対称性を説明するためには陽子が崩壊することが必要である。

KAMIOKANDE の実験は 1983 年 7 月に開始され現在に至っている。残念ながら陽子崩壊の証拠は得られず, 陽子の寿命は 10^{32} 年以上という結果に現在のところなっている。

それでは KAMIOKANDE とともに標題にある超新星からのニュートリノと一体どういう関係があるのかと疑問に思われることと思う。KAMIOKANDE の実験を始めてすぐ, 我々の測定器は少し改造を加えれば実は非常に優秀な低エネルギー (約 10 MeV 程度, MeV は 100 万電子ボルトのこと) のニュートリノ検出器であることがわかったのである。世の中には天然放射性物質がうようよしていて, 低エネルギーニュートリノ検出の大変な邪魔になる。この邪魔物 (バックグラウンド) を落とさない限り, ニュートリノの検出はできない。装置の改造とは, 出来る限りこのバックグラウンドを減らすための

ものである。工事は 1985 年に始まり, 1987 年の現在も続いている。2 年もかかってまだ終わらないかと思われるかも知れないが, それほど放射性物質のバックグラウンド落しは困難なのである。

1987 年 2 月の時点では, 改造はちょっと一段落し, 1985 年の時点と比較するとバックグラウンドを数 1000 分の 1 に落とすことに成功していた。装置の最低検出エネルギーは 7.5 MeV にセットされてデータの取得が行われていた。その時に, はるか 16 万光年離れた大マゼラン星雲の中で起きた超新星の影響の第一波が地球を通過したのである。それは星の重力崩壊とその後の中性子星の冷却に起因する莫大な量のニュートリノバーストである。ほとんどすべてのニュートリノは地球を貫通して行ってしまうが, そのうちのたった 11 個が KAMIOKANDE の測定器中に足跡を残してくれたのであった。

2. ニュートリノと宇宙, 天体

ニュートリノのことをここで少し紹介することにした。ニュートリノは素粒子の一種である。現在の素粒子物理学でいう素粒子とはクォークとレプトンに分類される。クォークは陽子や中性子など強い相互作用をする粒子を構成している基本粒子であって, 電気を帯びている。レプトンは強い相互作用をしない粒子で, 2 つの組, すなわち電子とニュートリノからなっている。ご存知のように電子は負に帯電している。ところがニュートリノの電荷は正確にゼロと考えられているので, 電磁力ははたらかない。弱い相互作用は両者にはたらき, 例えばニュートリノは弱い相互作用で電子に変換され, またその逆も起る。いってみればニュートリノは電子から電気をはぎとった裸の素粒子と考えてよい。

レプトンは上に述べたような負の電荷の粒子と中性粒子のペアであるが, 世の中にはこのペアが 3 つある。負電荷の粒子は電子, ミューオン, タウレプトンと呼ばれ, 省略記号は e, μ, τ である。中性の方は電子ニュートリノというようにニュートリノの前にそれぞれ電子, ミュー, タウという名前をつける。記号で書くとそれぞれ

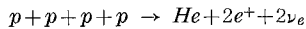
* 東大理 Yoji Tozuka: KAMIOKANDE and Detection of Neutrino Burst from SN 1987A

れ ν_e, ν_μ, ν_τ となる。3つのペアは相互作用が全く同じで、各ペアの違いは e, μ, τ の質量の違いでしかなく、なぜ自然が3組のペアを必要としているのかよくわかっていない。 ν_e, ν_μ, ν_τ の質量は完全にゼロか、あったとしても非常に小さく、ニュートリノの微小質量は素粒子物理学の大きな謎の一つである。

話はさらに複雑になるが、各粒子にはその反粒子がある。 e, μ, τ レプトンにはその反粒子 e^+, μ^+, τ^+ があり、特に電子の反粒子 e^+ は陽電子と呼ばれる。 ν_e, ν_μ, ν_τ にも反粒子があって記号では $\bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau$ と上に棒を引いて区別している。

前にも述べたようにニュートリノは中性なレプトンであるから、弱い力しか作用しない。このため相互作用の平均自由行程はベラボールに長く、10 MeV の ν_e と水中の電子との散乱では、実に 3×10^{19} cm にもなる。地球の直径は約 10^9 cm であるから、 10^{10} 個のニュートリノのうち地球の内部で反応するのは高々1個しかない。あとは全部突き抜けてしまう。太陽だってニュートリノにはほとんど完全に透明なのである。

このように奇妙な素粒子ニュートリノは宇宙や天体に何か関わりを持っているのだろうか。実は大ありなのである。太陽の中心では陽子 (p) 4個が融合して1個のヘリウム原子核になる核融合反応を大規模に行い、あの膨大な熱を出している。式で書くと



となって必ず ν_e が発生する。この ν_e を精度よく測定すれば、我々は太陽の中心の情報を直接得る（すなわちニュートリノで見る）ことができるのである。実は KAMIOKANDE 改造の最も大きな目的はこの太陽ニュートリノの観測にある。上に述べたように太陽の中心で発生したニュートリノは太陽の物質中を易々と突き抜けて地球まで到達するから、それをつかまえればよい。実は太陽ニュートリノには一つの大きな問題があり、我々のような素粒子物理屋が測定に熱を上げている訳であるが、長くなるのでまたの機会にゆずろう。

II型の超新星は巨星の中心にできた太陽質量程度の鉄の芯が重力崩壊を起し、開放された重力エネルギーによって巨星が粉々に吹き飛ばす現象と考えられている。よく知られているように、この場合にもニュートリノは本質的な役割を演じている。鉄の芯が半径約 10 km の中性子星になったとすると、約 10^{53} erg の重力エネルギーが放出される。これがすべて爆発のエネルギーになれば目出たのだが、実際に観測された爆発エネルギーは 10^{51} erg に過ぎない。それでは残りの 99% のエネルギーはどうしてしまったのか。ニュートリノが持ち出したのである、と理論家は強調する。詳しい計算によると、 $\nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$ の6種類の(反)ニュートリノが大体

同じエネルギーを持ち出すらしい。また放出されるニュートリノのエネルギーはニュートリノの種類によって少し違うが、10~20 MeV 位である。ニュートリノの放出時間はどうかというと、これは出来たての中性子星の冷却時間で約 10 秒位だろうと言われている。もし超新星からのニュートリノが測定できれば、我々は重力崩壊に関する以上のような情報が手に入るはずである。いわばニュートリノによって巨星の半径約 10 km でのふるまいを直接観測出来るはずである。

他にもビッグバン後の宇宙の進化にもニュートリノは大変重要な役目を荷っているはずであるが、その話もまたの機会にゆずりたい。

3. ニュートリノを捕らえる測定器

まずニュートリノ測定器として必要なのは標的として使う大量の物質である。これは前にも述べたようにニュートリノの相互作用の力が大変に弱いからで、実際 KAMIOKANDE の測定器は 2140 トンの水を標的として使っている。

次にニュートリノ測定器は深い地下に設置されねばならない。光学測定器とは全く異り、我々は地の中から星の中心を観測する。KAMIOKANDE は神岡茂住鉱山の地下 1000 m に建設された。理由は宇宙線のバックグラウンドを取り除くためである。地上では 1 cm^2 に毎分1個の割合で宇宙線ミューオンが降ってくるが、地下 1000 m までもぐると、 150 m^2 の KAMIOKANDE で3秒に1発しかミューオンが入ってこない。

次に6種類の(反)ニュートリノがすべて区別して捕えられれば理想的であるが、残念ながら現在の技術ではそこまでは行っていない。反電子ニュートリノが最も捕らえ易く、次に大分難しいが電子ニュートリノがある程度可能である。 ν_μ, ν_τ やその反粒子の検出は不可能で次世代の検出器の建設を待たねばならない。 $\bar{\nu}_e$ は水中の陽子 (p) と反応して e^+ を生じ、 p は中性子 (n) に変換される。この時 e^+ の放出は等方的になる。 ν_e は水中の電子 (e) と弾性散乱を起し、 e を反跳させる。電子の質量はたったの 0.5 MeV であるので 10 MeV 程度の ν_e による散乱では、反跳 e は前方 10° 以内に散乱される。従って角分布を見れば $\bar{\nu}_e$ の反応か ν_e の反応かがわかる。ただし $\bar{\nu}_e p$ の反応断面積は $\nu_e e$ に比べて約 100 倍も大きい。水中には分子1個あたり電子が陽子よりも5倍多く含まれているから、反応頻度は $\bar{\nu}_e p$ が $\nu_e e$ より 20 倍多いことになる。このため $\bar{\nu}_e$ の方が ν_e よりも圧倒的に見やすいことになるのである。 ν_μ, ν_τ はどうかというと、 ν_e と同じように e との弾性散乱を行うが、その断面積は $\nu_e e$ のさらに6分の1程度で、それを捕らえるのは非常に難しい。

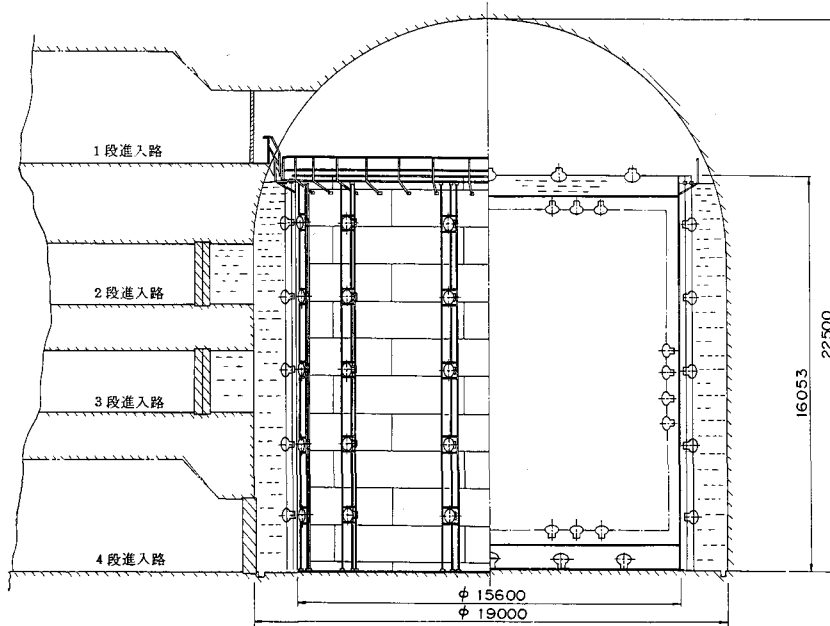


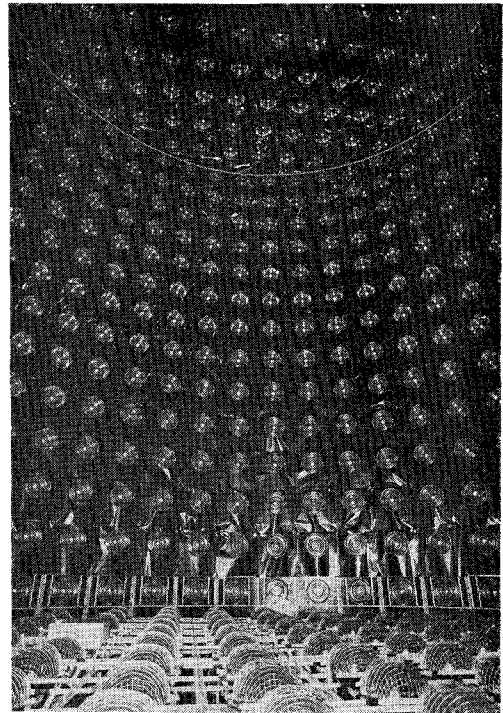
図1 KAMIOKANDE 測定器

▼ KAMIOKANDE 測定器内部にとりつけられた光電子増倍管群

KAMIOKANDE 測定器は $\bar{\nu}_e p$ や $\nu_e e$ 反応で生じた e^+ や e^- を観測し、そのエネルギー、発生方向を精度よく測定する。具体的には e^+ や e^- が発生するチェレンコフ光を観測する。チェレンコフ光は、荷電粒子の速度が水中の光速よりも速くなった時荷電粒子が発する光のことで、青い波長の方にずれた光である。チェレンコフ光は水中では粒子の進行方向に対し約 42° の半角を持つ円錐状に放出されるから、壁に多数の光電子増倍管 (PMT) を取り付けおけば、ドーナツ型の像を観測することができる。

KAMIOKANDE は図1のような断面を持つ測定器である。15.6m ϕ ×16mh の円筒型タンクの内壁に一様に取り付けられた948本の PMT が e^+ や e^- からチェレンコフ光を捕らえる。10 MeV 程度の低エネルギーだと光を捕らえる PMT の数 (NHIT) は約20本位で、 e^+ や e^- のエネルギーを E (単位 MeV) とすると、 $NHIT=2.62E$ の線形の関係式が良く成り立っている。この式から E を決定する。 E の精度は NHIT の統計精度、すなわち \sqrt{NHIT} で与えられる。 e^+ や e^- の発生方向は各 PMT が受けるチェレンコフ光の到達時間を1ナノ秒の精度まで測定し、各 PMT 到達時間の微妙な違いから、発生点の座標 x, y, z と発生方向 θ, ϕ を未知数としてフィットする。発生方向の精度は10 MeV e^+, e^- で約 28° である。

図1でタンクの上下部分および側壁の外側はいくつかの PMT がつきたいわゆる外水槽になっている。外水槽は外部から入射する宇宙線ミューオンを検知して排除するとともに、岩盤から大量に発生しているガンマ線や中



性子を吸収している。

タンク内の水は透明度のよい純水で、かつウランやラジウムなどの自然放射性元素を自然水の1000分の1まで落としている。

KAMIOKANDE の検出効率も2月の時点で次のようであった。効率は6 MeV 近辺から立上り、8.5 MeV で50%になり、14 MeV で90%になる。自然放射能か

らのバックグラウンドは 3 MeV 近辺の低エネルギーにしかないが、装置のエネルギー分解能が有限なために上方までしみ込んでくる。しかし 7.5 MeV 以上になると毎秒 0.02 カウント位の低いレベルに抑えられていた。

4. SN 1987A からのニュートリノバースト

いよいよニュートリノバーストの観測に話を進めよう。我々の測定器が超新星用に最適化されていたならば、当然オンライン解析を行って世界に先がけて超新星の発見を告げることができたであろう。残念ながらオンライン解析は行われておらず、データの解析は東京大学理学部でオフラインにて行われていた。というわけで、光学的に超新星が見つかったというニュースが 2 月 25 日に入った時にはデータを収録した磁気テープはまだ神岡にあった。直ちに神岡に連絡をとり、2 月 21 日から 2 月 24 日までのデータを取り込んだ磁気テープを東京に送るよう頼んだ。普通だと磁気テープの輸送やその他のために約 1 週間の遅れがでる。今回はこの遅れを出来る限り縮めねばならない。磁気テープは無事 2 月 27 日に到着した。2 月 25, 26 日も遊んでいたわけではない。何しろ超新星のニュートリノなど頭の中にはあっても実際に起るとは夢にも思っていなかったの、その解析プログラムが全く準備できていなかった。解析プログラムの作成と、それを既存のデータにかけてうまく動くかどうかのチェックがこの両日にわたって行われた。

理論によれば、ニュートリノは約 10 秒のバーストでくるとははずだから、横軸に時間の経過を、そして縦軸にエネルギーをとってイベントを図上に点で表示してみる。すると水中の自然放射能からのバックグラウンドが低エネルギー（約 7 MeV 以下）のところに点々と印を残すはずである。理論の予想するところでは、特に超新星からの $\bar{\nu}_e$ の平均エネルギーは 15 MeV 程度であるから、もし超新星からのニュートリノバーストがあれば高エネルギー側、すなわち図の上方に点が集中して目で見てすぐ発見できるに違いない。

各イベントの発生点、方向、エネルギーを求めるコンピュータ解析プログラム、それに時間経過-エネルギーの 2 次元プロットを作るプログラムが 2 月 26 日に完成して、別の日のデータを解析にかけてうまく動くことが確かめられた。2 月 27 日夕刻に着いた磁気テープは早速大型コンピュータにかけられ、当日の夜を徹して大学院生の諸君によって解析が行われた。

数 100 ページにのぼるプリントアウトのスクリーンは簡単である。2 月 28 日の午前すぐに図 2 のようなプロットを拾い出した。図の時刻 0 は日本時間 2 月 23 日 16 時 35 分 35 秒を示す。縦軸は光を受けた PMT の数 $NHIT$ で、エネルギーに比例していることは既に述べた。

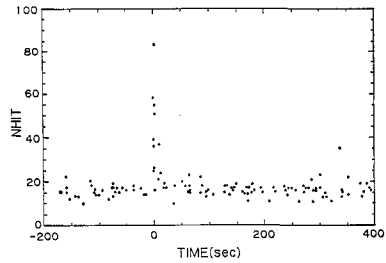


図 2 時刻 0 にニュートリノバーストを発見。横軸は時間経過を、縦軸は $NHIT$ を表わす。 $NHIT$ が 20 以下のイベントは自然放射能によるバックグラウンドである。

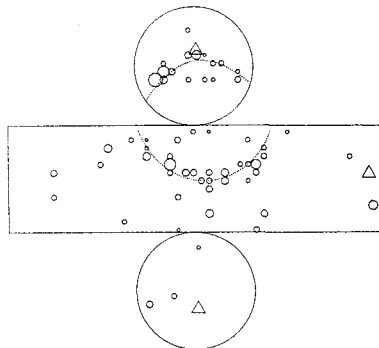


図 3 第 9 番目のニュートリノイベントの展開図。図中小円はチェレンコフ光を受けた PMT を示し、小円の面積は光量に比例する。ドーナツ状のチェレンコフパターンがよくわかる。

$NHIT$ が 20 以上になるとバックグラウンドは 10 秒に 0.2 イベントとなり十分に低い。ところが時刻 0 から 13 秒の間に $NHIT$ が 20 以上のイベントが 11 個入っている。このようなバースト状イベントは 2 月 21 日から 2 月 24 日の間にただ 1 回起っていた。

バックグラウンドのイベントがたまたまこのような形に高エネルギー側にかたまると起る確率は大変に小さく完全に無視できる（確率 $\sim 10^{-16}$ ）。すなわち、この 11 例は $\bar{\nu}_e$ または ν_e によって引き起された反応でなければならぬ。コンピュータは直ちに 11 イベントの方向、エネルギーを打ち出してきて、表 1 にその結果を実験誤差をも含めて示す。0.1 秒以内に来ている最初の 2 例が大マゼラン星雲中の SN 1987A を実験誤差の範囲内で指し示している。これで間違いない、この 11 例は SN 1987A から飛来したニュートリノによる反応なのである。

数日遅れてアメリカの IMB のグループが我々の時間を知って解析をやり直したところ、8 例のニュートリノバーストを発見し、我々の結果を裏付けてくれた。

図 3 に 11 例のうちの第 9 番目のイベントのコンピュータディスプレイを示す。これは円筒状測定器を切り開いて展開した図で、図中の小さい円はチェレンコフ光を

受けた PMT を表わし、小円の面積は光量に比例している。光がドーナツ状に集まっていることがよくわかる。これは典型的な(陽)電子による像である。

5. 何がわかったか

11 個の観測例から何がわかるだろうか。まずイベントの継続時間は 13 秒であった。これはまさに理論の予言する約 10 秒にぴったりであり、最初はやれやれと安心したものである。しかし表 1 をもう一度見て欲しい。イベント 8 と 9 の間には実は 7 秒のギャップがある。これはどういうことなのだろうか。最後の 3 例に関わるニュートリノエネルギーは決して無視できる量ではない。勿論 KAMIOKANDE 装置がこの間休止していたなどとは考えられない。この問題は今回のニュートリノバーストの観測にみられる典型的な点で、大筋では理論にピッタリなのだが、細かく見ていくと謎が浮かび出てくる例が多い。継続時間でもう一つ興味深いのは、表 1 をよく見るともう一つの時間ギャップが 0.5 秒と 1.5 秒の間にあるように見えることである。勿論統計が少いので有意ではないがこれも謎の一つである。

超新星が放出したニュートリノバーストの全エネルギーおよびニュートリノ球(中性子星)の温度は、フェルミディラック分布の仮定を置けば、検出効率、イベントのエネルギー、 $\bar{\nu}_e$ の反応断面積を考慮して求めることができる。前にも述べたように反応頻度は圧倒的に ν_e が大きいので、すべてのイベントを $\bar{\nu}_e$ によるものとしても大した誤差はないだろう。結果は全 $\bar{\nu}_e$ エネルギーが 5×10^{52} erg, 温度が 3 MeV (3×10^{10} K), $\bar{\nu}_e$ の平均エネルギーは 9 MeV となる¹⁾。全ニュートリノエネルギーは $\bar{\nu}_e$ のそれを 6 倍して 3×10^{53} erg, これはまさに理論の予言するニュートリノバーストのエネルギーにぴったり一致する。実に目出たいことである。 $\bar{\nu}_e$ の平均エネルギーは理論よりも少々低めだが、まあ良い一致と

表 1 ニュートリノバーストの発生時間, NHIT, 電子エネルギー, SN 1987A とのなす角

イベント番号	時間 (秒)	NHIT	電子エネルギー (MeV)	なす角 (度)
1	0	58	20.0±2.9	18±18
2	0.107	36	13.5±3.2	15±27
3	0.303	25	7.5±2.0	108±32
4	0.324	26	9.2±2.7	70±30
5	0.507	39	12.8±2.9	135±23
6	1.541	83	35.4±8.0	32±16
7	1.728	54	21.0±4.2	30±18
8	1.915	51	19.8±3.2	38±22
9	9.219	21	8.6±2.7	122±30
10	10.433	37	13.0±2.6	49±26
11	12.439	24	8.9±1.9	91±39

考えてよいであろう。それでは最初の 2 イベントはどう考えたらよいのだろうか。2 例は明らかに前方散乱と考えられ ν_e の反応のように見える。勿論統計が少いので、それらが $\bar{\nu}_e$ である確率はまだ数 % 残っているが、 ν_e であると考えたと理論でいうところの中性子化によるバーストと考えたくなる。ところが $\nu_e e$ の散乱断面積は小さいので反対に 2 例を含む ν_e バーストの全エネルギーは膨大なものになり (2×10^{53} erg)¹⁾、中性子化バーストとは考えにくい。また 2 例が 0.1 秒の間に来ていて、理論の予想する 0.01 秒とは大きな開きがある。実験屋のあてにならないカンではどうも ν_e イベントのような気がするが、いずれにせよこれも謎の一つである。

6. 将来計画

今回のニュートリノバーストは重力崩壊の予言を大筋で見事に検証した。しかしながら 11 例という少い統計では詳細な解析は不可能で、このため上に述べたようにいくつかの謎が残ってしまった。

いずれにせよ今回のニュートリノバーストの一番大きな成果は、天体ニュートリノが確かに観測にかかり、定量的な結果が出せることを示した点にあると思う。詳細な重力崩壊の解析には是非とも第 2 の超新星爆発が我々の銀河系で起ることが必要である。銀河中心と大マゼラン星雲では距離が 5 倍違うので、銀河中心で超新星が爆発すると、今回よりも 25 倍のイベントが期待される。 $25 \times 11 = 275$ イベント。これでは詳細な解析にはイベント数がまだ少な過ぎる。

現在我々は KAMIOKANDE の次期計画として SUPER-KAMIOKANDE の計画を立案しているところである。次期計画は 32000 トンの水チェレンコフ型検出器で、現 KAMIOKANDE 同様陽子崩壊が第一の目的となるが、それと同時に超新星ニュートリノの検出器用としてもさらに改良が加えられている。この装置を用いれば、次回の銀河中心での超新星爆発から期待されるイベント数は 4000 となる。中性子化ニュートリノバーストも勿論観測可能で、またエネルギーの違いを利用して ν_μ , ν_τ の検出までが可能となろう。SUPER-KAMIOKANDE 計画は既に研究者間では認められており、あと 5~6 年後に完成すべく現在努力が続けられている。次の超新星爆発が 10 年以内に起ることを期待しつつ筆を置く。

文献

- 1) K. Sato, H. Suzuki, *Phys. Rev. Lett.* **58**, 2722 (1987).