

[宇宙線研究と加速器]

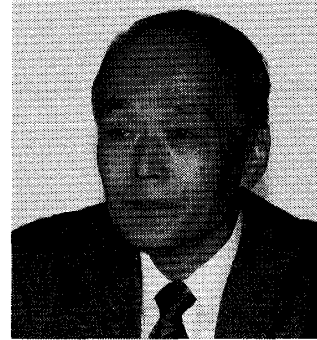
座長: 菅本 晶夫

ニュートリノと宇宙線研究

荒船 次郎

坂東さんからタイトルを頂きましたが、何を話していいかわからなかったので、neutrino と宇宙線に関して過去、現在、それとちょっと未来の話を簡単にしようと思います。宇宙線については、ここに丹生先生がおられますし、私の知っていることは、宇宙線のみなさんの知っていることの 100 分の 1 ぐらいしかないと思います。

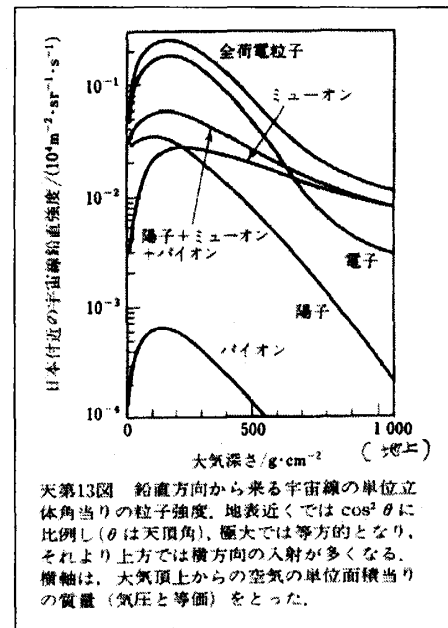
[slide 1,2,3] 最初に宇宙線を見つけたのは、Hess という人です。1911 年から気球を上げているらしいのですが、1912 年に上げた際に 5,000 m まで上がっても、検電器の値、つまりイオンをつくる力が落ちずにむしろ増加することを見つけました。1cm² あたり毎秒何個と数えます。現在で考えれば、宇宙線は二次宇宙線も含めて上空にいくほど増えますから、それに伴って ionization が強くなるのは宇宙線で解釈できるわけです。そういうことで、宇宙線が発見されました。



[Slide 1]



[Slide 2]



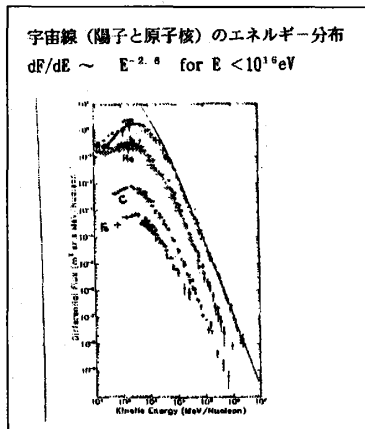
[Slide 3]

若い人が多いなら宇宙線のこととも言ったほうがいいかと思ったのですが、みなさん、宇宙線については私よりも知っている人ばかりなので、一応、簡単なことだけお話しします。

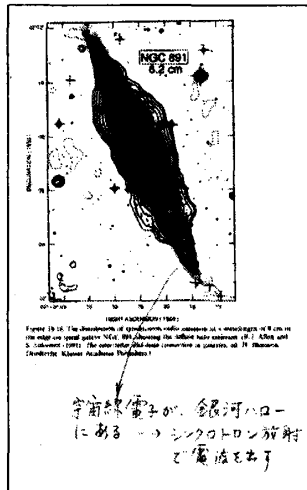
[slide 4] 宇宙線はエネルギーが高くなると、 $E^{-2.6}$ ぐらいで減っていきます。普段は 1cm² あたり 1 分に 1 個ぐらい muon が降ってくるのですが、エネルギーが例えば 10^{20} ぐらいの maximum になると、途中で変わりますが 100km² あたり 1 年に 1 個ぐらいになります。

[slide 5] これは別の銀河、楕円銀河の電波の図です。円盤の上に電波がきているということは、そこに宇宙線の electron が飛んで、シンクロトロン放射をしているということを意味しています。広がっているということです。

[slide 6] 宇宙線のエネルギーは、先ほど $E^{-2.6}$ と大雑把に言いましたが、加速したときは -2 乗で、あと、伝播するとき、-0.6 乗稼ぐと思われています。要するに、銀河系内でエネルギーが高いとすぐいなくなってしまうのです。エネルギーが低いと磁場でぐるぐる回っているからなかなか出ていかないというわけで、エネルギーの -0.6 乗で滞在時間が減り、合わせて -2.6 乗であると考えられています。



[Slide 4]



[Slide 5]

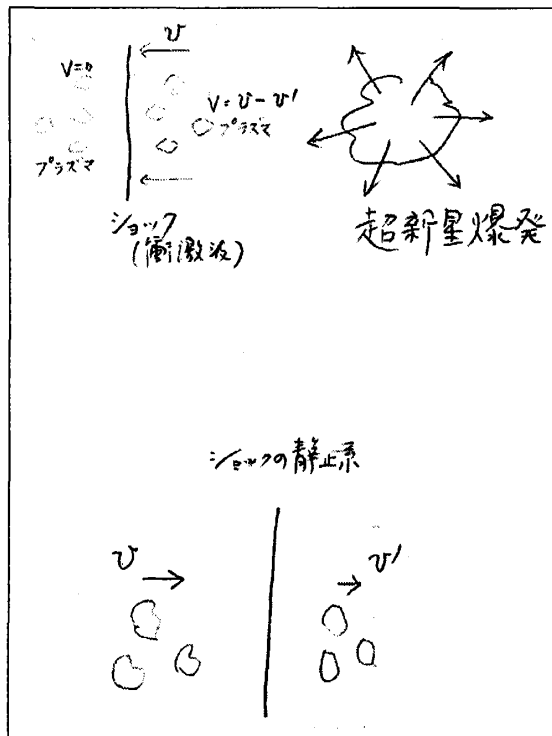
宇宙線

加速 ... ショック加速
 $\frac{dN}{dE} \sim E^{-2}$

伝播 ... $E^{-0.6}$

宇宙線スペクトル
 $\frac{dN}{dE} \sim E^{-2.6}$

[Slide 6]



[Slide 7]

ショックの静止系, $E = E'$ C3

LAB系での加速効率

$$E_i = (E - p v \cos \theta) \gamma$$

$$\approx E - \frac{1}{2} p v$$

$$E_f \approx E + \frac{1}{2} p v$$

$$\therefore \frac{\Delta E}{E} \approx \frac{p v}{E} \approx \frac{v}{c}$$

もれ3率

$$\frac{\Delta N}{N} \approx -\frac{4v'}{c} \quad \left(\begin{array}{l} \lambda \text{ flux } nc \cos \theta \sim \frac{1}{4} nc \\ \mu \text{ flux } nv' \end{array} \right)$$

$$\therefore \frac{dN}{dE} = -\frac{N}{E} \left(\frac{v'}{v} \right)$$

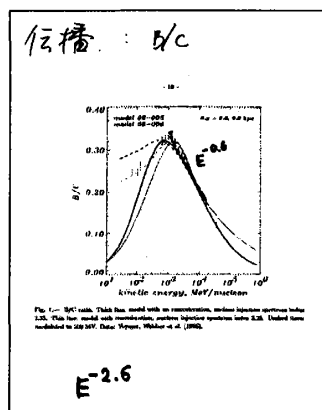
$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-8-1}, \quad \gamma = \frac{4v'}{v} \rightarrow 1 \text{ for strong shock}$$

$$\propto E^{-2} \quad (\text{ショック加速})$$

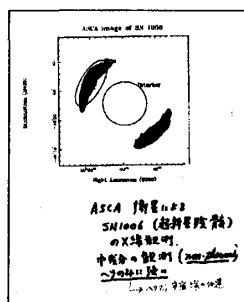
[Slide 8]

[slide 7,8] この加速メカニズムは、たくさんあるので典型的なものを1つだけご紹介します。超新星が爆発するとショックウェーブが走ります。その velocity を v とします。始めに何か宇宙線がないといけませんけれども、それがこのショックで何回も跳ね返されていくうちに加速されてやがてエネルギーが高くなるという、ショック加速というのが考えられています。雲とかプラズマなどショックの止まっている座標系にローレンツ変換して考えると、これはフェルミが最初に考えたのですが、反射するものが静止していれば initial と final でエネルギーは同じだろうということです。だけどローレンツ変換して、これが動いている LAB 系に直して、velocity は光速に比べて二次以上は無視して一次だけとり、角度も平均してしまうと、静止系に比べて velocity は、このぶんだけこっちは減速、こっちは加速します。そうすると、当然ですがエネルギーの増える分は、ショックフロントの velocity の β にちょうど等しい、それだけエネルギーをもらうというわけです。反射ばかりしているわけではな

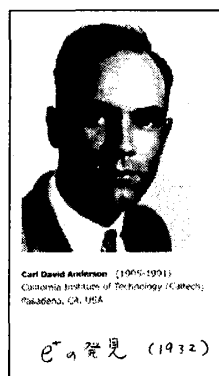
くて、中にはフロントの右側にいつて戻ってこないものもあります。それはショックの静止系でプラズマの velocity を v とすると、密度 $\times v$ が漏れたプラズマです。入射の角度の平均を取って漏れる確率を計算すると、高速で入ってきてある角度があるけれども v で逃げていきます。加速する率と漏れる率と合わせるとこういう方程式になって、この係数は strong shock、ショックのスピードが速い limit で 1 になります。この微分方程式を解くと N はエネルギーに逆比例して、微分すると 2 乗に反比例する、そういうのがショック加速の理論で先ほどの -2 乗、伝播で -0.6 乗という実験と割に合う一つの模型になります。



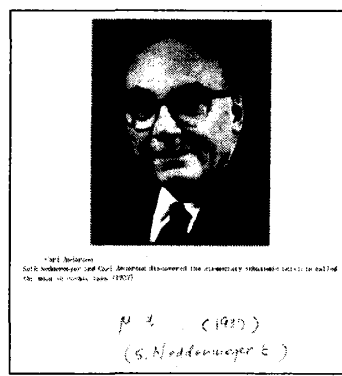
[Slide 9]



[Slide 10]



[Slide 11]



[Slide 12]

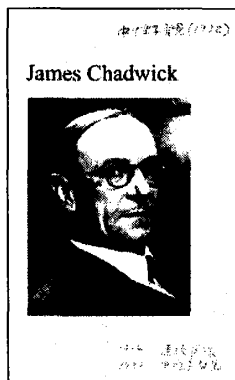
[slide 9] 伝播で -0.6 乗が何から結論されているかというと、例えば primary のカーボンが入ってきて星間ガスとぶつかって Boron になる場合、宇宙線の Carbon のところの比を取るとエネルギーの -0.5 乗とか -0.6 乗で減少している、エネルギーが高いほど衝突確率が少なく、早く銀河系から出ていってしまうと考えて、滞在確率が 0.6 乗で減るということでそれを合わせているというわけです。おおよそはそんなことで、超新星のエネルギーが宇宙線に巡り巡って賦与されているのだらうと考えられています。

[slide 10] これはそれを裏付ける京都の小山さん達の実験です。超新星残骸で、電波の強い外のほうで X 線が幕で減っているような領域があったというデータです。X 線が幕で減っているというのは、宇宙線の電子がシンクロトロン輻射をしているからであろうと仮定すると、その電子がこんな X 線を出すためには、100TeV くらいの相当高いエネルギーの宇宙線の電子がなければいけないということを示唆するという仕事をされました。しかし、shock front で加速するのだということはどうやら electron に関しては確からしいのです。まだ proton のソースというのは、ちゃんとは見つかってはいません。そうやって宇宙線物理が始まりました。素粒子は最初のうちは、宇宙線で見つけられました。

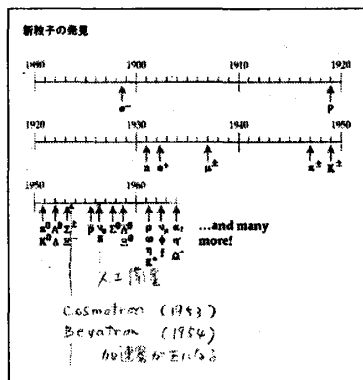
[Slide 11,12] 左は Anderson が若いときで、positron を発見した頃です。それから右は、Anderson がだいぶ歳を取って、Neddermeyer と一緒に muon も発見した頃です。これは若い人はあまり知らないんですけど、1937 年に Neddermeyer、Anderson が muon を見つけたとき、その論文には、ミューオンの質量は electron よりうんと重く、proton よりうんと軽いとしか書いていないのですけれども、同じ年に書かれた仁科先生たちの論文には、muon の mass を非常に正確に、proton mass の 1/7~1/10 であったということをやっています。

[slide 13] 1932 年に戻りますが、Chadwick が中性子を発見しました。そのあと、いろいろな hyperon、V particle とか、K meson とか Λ などが見つかるわけですが、このへんまでは霧箱ですが、ここから先は、原子核乾板といいますか、emulsion になります。

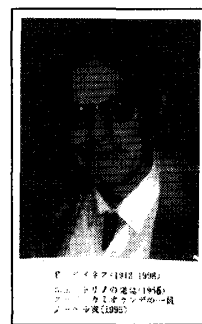
[slide 14] 1953 年のあたりで Cosmotron という加速器が Brookhaven にできて、翌年、Bevatron ができて、このへんから新しい粒子が加速器でつくられるようになりますので、宇宙線の役割はこういう通常の粒子を探すことではなく、何か変わった現象を見るということかそれとも宇宙物理をやるかということになっていきます。このあと新粒子は丹生先生のチャーム粒子まで、たぶん、宇宙線で見つけた新粒子というのは出てこないのではないかと思います。ですから、1953 年西島・Gell-Mann の法則は、宇宙線データを基につくられたと考えていいのではないかと思います。加速器データは、1953 年、1954 年以降ですから。



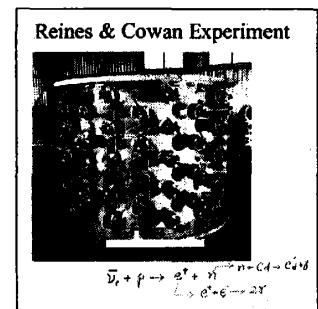
[Slide 13]



[Slide 14]



[Slide 15]

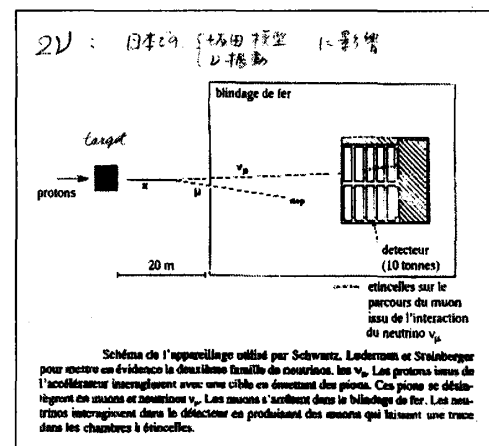


[Slide 16]

[slide 15,16] 宇宙線は、Reines さんが neutrino を最初は原子炉で見つけます。それはカミオカンデとよく似ていますが、円筒形のタンクの外側に放電管がいっぱい付いていて、大きさは人間の大きさぐらいですけれども、anti-neutrino が proton、水の hydrogen にぶつかって positron と中性子をつくり、これが消滅した γ と、neutron が溶けているカドミウムに吸収されて γ 線を出すという、incidence の実験をやって anti-neutrino を観測しました。

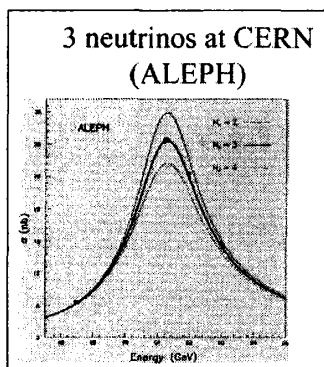


[Slide 17]

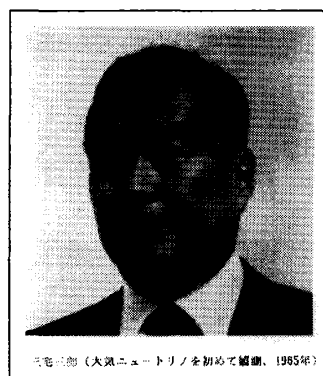


[Slide 18]

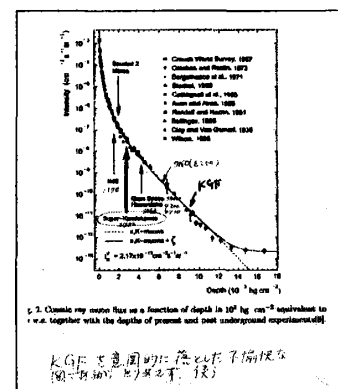
slide[17,18,19] それから、有名な Schwartz、Steinberger、Lederman たちが Brookhaven で π から decay した neutrino は electron をつくらない、muon しかつくらないということを確認して two-neutrino というのを発表しますが、磯先生によるとそれは非常に早く日本にも伝わって坂田模型の4つ目の粒子、あるいは中川、牧等の neutrino 振動の提案にも結びついているだろうということです。最近、neutrino は3種類しかないよだということは、LEP で確認されています。



[Slide 19]



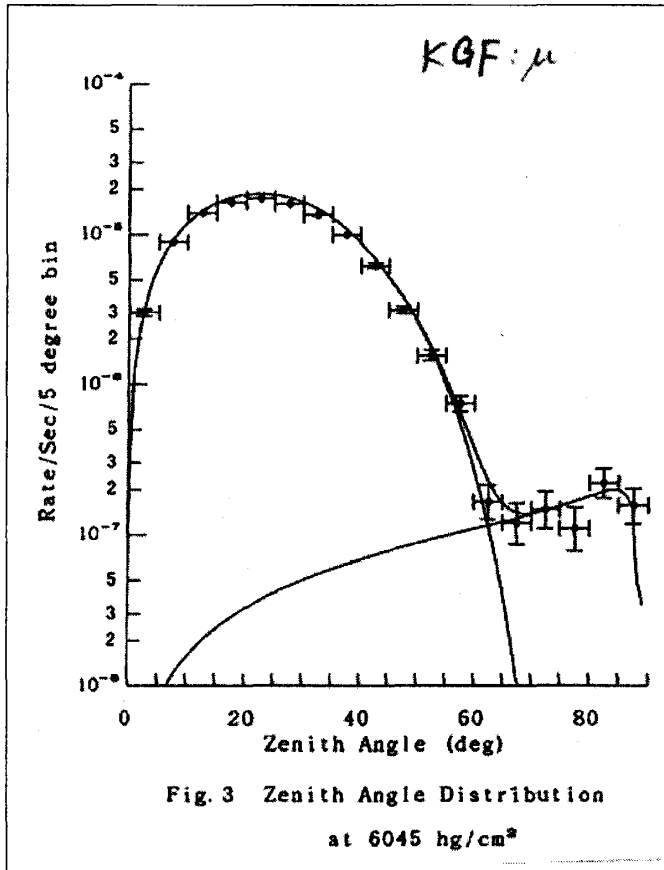
[Slide 20]



[Slide 21]

[slide 20,21] タイトルの「宇宙線とニュートリノ」ですけれども、宇宙線の neutrino を最初に観

測したのは三宅先生です。このグラフは KGF というインドの非常に地下深いところで、深くなると宇宙線の muon がものすごい速度で減っていく様子を表しています。加速器ができてからは、宇宙線の素粒子的研究というのは深い地下に行くか高い空に行くかどちらかになります。Air shower という地上でやる実験もあるのですが、直接見るとのはそういう方向になって三宅さんたちは地下に潜っていったのです。



[Slide 22]

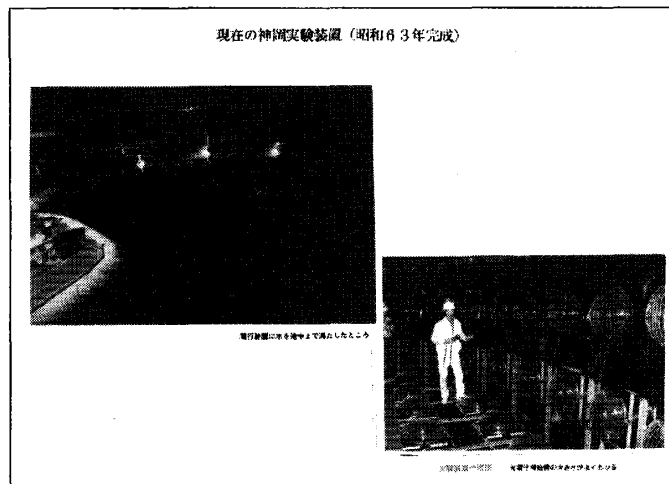
[slide 22] これは三宅さんたちのずっとあとの実験の図ですけれども、分かり易いために後の実験を持ってきました。角度が大きくなると、この場合だと 70 度、深さにもよるのですけれども、2000 m ぐらいの深さのところで、70 度から先は neutrino が起源の muon になります。それより上からくる方は、大気で作られた μ が直接地下までやってきます。Large angle を斜めに入ってくるやつは、地面を非常に長い距離走らなければいけないので、muon はエネルギーを失って止まってしまいます。だから、斜め横からくるやつは neutrino です。もちろん下からくるやつは、明らかに neutrino ですが、横からくるやつも neutrino になってくるということです。それで三宅さんたちは、横からくる muon を観測して、neutrino を観測したわけです。それが 1965 年です。Reines も同じような実験を南アフリカでやっていて、それより 2 週間ぐらい三宅さんの方が早かったのです。

[slide 23,24] 宇宙線と neutrino という、一挙に飛びましてカミオカンデにいつてしまうのですが、1983 年から実験が始まりました。カミオカンデは超新星 neutrino を運よく発見しました。それから大気

neutrino に異常があるということで、neutrino 振動を非常に強く示唆しました。太陽 neutrino にも異常があるということで、このときはまだ、振動によるのか、太陽模型が悪いのかというような議論がありました。

Kamiokande
 { SN 2
 ν_{atm} 異常
 ν_{sol} 異常
 Super Kamiokande
 { ν_{atm} 振動
 ν_{sol} 振動
 (陽子崩壊はまだ!)

[Slide 23]



[Slide 24]

昭和57年度

科学研究費特定研究領域申請書

(案)

研究領域名

素粒子の大統一理論の検証

研究目的

本研究の目的は、素粒子の大統一理論が予測する核子崩壊現象を直接実験することにより検証すること、その崩壊モードを詳しく調べることが主要課題とし、更に理論的研究と協力しつつ、より究極的統一理論が左右対称か否かを検定するため、ニュートリノ振動現象の有無を実験的に探索すること、また大統一理論が必然的に予測する磁気単極子など質量の大きい粒子を探索することにある。

昭和56年1月

[Slide 25]

[slide 25,26,27] カミオカンデは、みなさんもよくご存じのと通りの、3,000 トン、Fiducial の方はもっと小さいのですけれども、3,000 トンの水タンクです。予算が通ったのは1982年、建設が始まったのは1983年からですが、当時の大型科研費を要求しました。特定研究というのです。当時は特別推進研究というのはなかったものですから、特定研究というのにアプライしました。そうしたら特定研究のお世話をしている久保亮五先生が、特定研究というのは特定な領域を支援するみんなでやる科研費なので、こういう一点突破的なプロジェクトには向かないと言われました。

でもそういう予算が必要であることは確かだということで、1年目は通らなかったのですが、2年目に特定が特定1、特定2に分かれまして、いまで言う特別推進研究と特定研究領域の2つに分かれてその第1号として通りました。そのときに書かれた申請書のなかには、大気 neutrino の振動も観測できるかもしれないとか、あるいは星の重力崩壊、超新星爆発ですけれども、で放出される10MeV程度のエネルギーの neutrino バーストの検出も出来る可能性があるとか、陽子崩壊を主目的とした装置ですけれどもいろいろな野心的なことを書いています。

[slide 28] これは2年後に開所するときに配ったパンフレットですけれども、そのパンフレットにも neutrino 振動も観測できるかもしれない、それから超新星爆発に伴う neutrino も使うかもしれないという希望を述べていますから、人によってはまったく予想しなかった偶然ではないかとおっしゃるかもしれませんが、そうではなくて、あればいいなということでは言っていました。

この式から分かるように実験的に観測可能な L , E の範囲、 Δm^2 の大きさの関係は次のようになる。

Neutrino 源	E_ν (MeV)	L (m)	$\Delta m^2 ((\text{eV})^2)$
原子炉	1	10^3	3×10^3
中間子ファクトリー	10	10^3	3×10^3
高エネルギー加速器	10^3	10^3	3×10^3
宇宙線	$10^3 \sim 10^4$	$\sim 10^7$	$\sim 10^3$
太陽	0.1	1.5×10^{11}	4×10^{-11}

現在、実験的におさえられている値は、Davis 達の太陽ニュートリノアータ (1.6 ± 0.6) SNU に対して、期待される計算値 (4.7 ± 2) SNU からのずれを有意とした場合、 $m_\nu \geq 10^3 \text{ eV}$ となる。ごく最近の Reines 達の原子炉の実験では予想的に $0.7 \text{ eV}^2 \leq \Delta m^2 \leq 10 \text{ eV}^2$ という値が出されているがまだ不確定である。

さて、先の表に見られるように宇宙線ニュートリノで得られる Δm^2 は $10^3 (\text{eV})^2$ 程度である。SO(10)などの予想する Δm^2 の範囲に近い。

その $\Delta m^2 \sim 10^3 (\text{eV})^2$ の可能性を検証する実験方法は次のようなものである。

この特定研究で考えている実験装置でとらえられるニュートリノ反応の頻度は1000トンの物質で約200/年である。この数は ν_e によるものと $\bar{\nu}_e$ によるものの全方向からの総和である。換言して ν_e を含む現象と $\bar{\nu}_e$ を含む現象の相対比率を計算するとニュートリノ振動が起っていない場合、

$$\frac{\nu + N \rightarrow e + X}{\bar{\nu} + N \rightarrow \mu + X} = 0.40.$$

振動が起っていて振動の波長が、地球の半径より充分短い場合、地下の方向から来るニュートリノについては

-5-

[Slide 26]

命だが、数mの飛程で崩壊するような粒子や、特異な電子カスケード時に崩壊するような未知粒子など、ニュートリノによる特異な現象を探し調べる。

- 4) 将来の更に大規模な実験、特に天体ニュートリノで、 10^3 MeV 以上のニュートリノ検出や、星の重力崩壊で放出される10MeV程度のエネルギーのニュートリノ・バーストの検出方法の研究などもこの実験の経路を通して準備してゆく。特に後者の場合、もし超ればそのフラックスは大きく、1000トン程度の装置で検出できる。水チェレンコフ検出器などは光電子増倍管のノイズをあと少し改良すれば充分使える可能性がある。

[Slide 27]

4. 解 説

大統一理論と陽子の崩壊

素粒子の種類として次の粒子が今の所、基本的な粒子であると考えられている。

物質を作っているもの

- (1) クォーク u, d, s, c, b 等
- (2) レプトン ν_e, ν_μ, ν_τ 等
 e, μ, τ 等

物質の相互作用を媒介するもの

- (a) 重力子 g (重力を伝える)
- (b) 光子 γ (電磁気力を伝える)
- (c) グルオン $g_1, g_2, \dots, g_8$ (強い相互作用を伝える)
- (d) W/Z ボソン W^+, W^-, Z^0 (弱い相互作用を伝える)

(1)と(2)は互に良く似ており、(a), (b), (c)も互に良く似ている。ここで假定しているものをまとめて、同じ仲間と考えるのが大統一理論と呼ばれている。同じ原因から生じている相互作用なのに低いエネルギーの世界では完全に強さが異なるが、もっとはるかに高いエネルギーでは、全部の力は同じくらいであったと考えられる(図7a)。

どのような高エネルギーであればよいかと考えると単純には低いエネルギーを外推して、 10^{16} GeV という値が得られる。このエネルギーに相当した高温ではクォークもレプトンも区別がなくなり、クォークとレプトンが互に転換して陽子崩壊と同様の相互作用を起しても不思議ではない。低いエネルギーでは、このような確率は少ないので陽子の寿命は非常に長くなり現在の評価では $10^{31} \sim 10^{34}$ 年くらいになる。

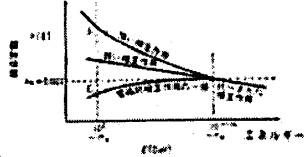


図7a 結合定数のエネルギー依存性

ニュートリノ振動

ニュートリノには質量があると予測する理論がある。するとニュートリノ ν_e は飛行中に振動して ν_μ あるいは反粒子になる場合があり得る。地球はとて大きいので、地球の裏側で生じたニュートリノが地球の反対側に達するまでには時間がかかり、その間に振動して種類が変化する可能性がある。種類の变化は電子に衝突した時に生じる荷電を持ったレプトンの種類で分る。(図7b)。地球を用いたこのような実験は陽子崩壊観測のための水タンクでも可能であると考えられている。

また、この他に、超新星の爆発に伴う天体ニュートリノも、この装置で受けられる可能性もある。

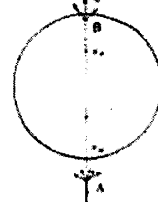


図7b ニュートリノ振動。Aで生じたニュートリノの反対側に行く間に ν_e になる場合。

世界の陽子崩壊実験

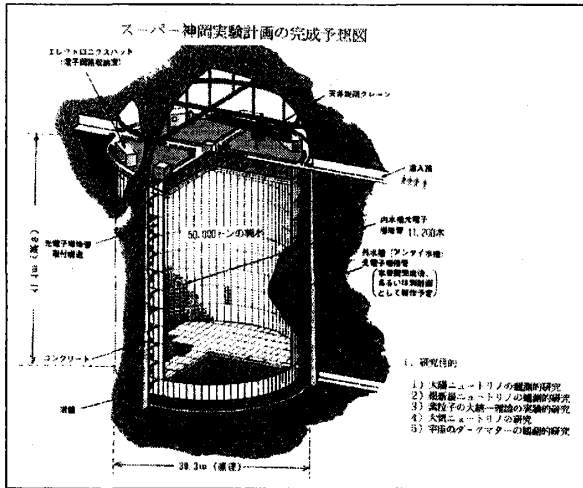
陽子崩壊の本格的実験はインドのTIFRに於ける日印共同研究に始まり、現在は米国のIMBグループの水チェレンコフ実験と日本の神岡の水チェレンコフ実験が最も大規模なものである。IMBグループのものは大口径光子増倍管による高いエネルギー検定と検出効率の良さが特徴である。

表3. 世界の主な陽子崩壊実験

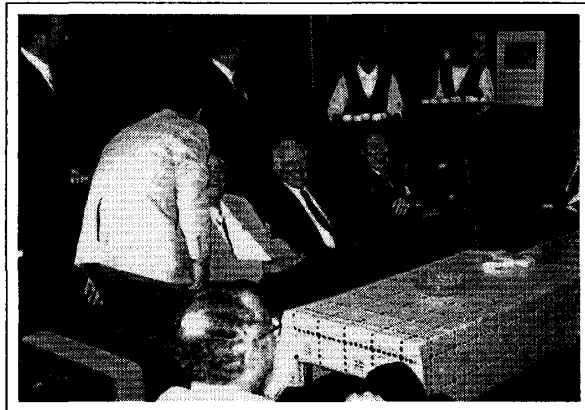
名称と所在地(水タンク)	伊勢グループ	検 出 器	特 徴 点	建設開始
KGF(インド) 7,600t	インド(アムリタ)	140トン	比放射線	1982
IMB(アメリカ) 3,870t	140トン	水 1,000トン	光子増倍管	1982
KAMIOKANDE(日本) 2,700t	日本(高知) 2,700t	水 1,000トン	光子増倍管	1987
NAUSEA(カナダ) 3,000t	カナダ(オンタリオ)	150トン	ストリーマー	1982
HOUSTON(アメリカ) 8,400t	アメリカ(テキサス)	300トン	光子増倍管	
BAKSAN(ロシア) 200t	ロシア(バシコフ)	100トン	光子増倍管	
SOLARIS(アメリカ) 1,200t	アメリカ(アリゾナ)	100トン	光子増倍管	1987
IPNS(アメリカ) 1,700t	アメリカ(イリノイ)	1,000トン	光子増倍管	1987
FOCAL(フランス) 1,500t	フランス(ピレネー)	1,500トン	光子増倍管	1987

- 6 -

[Slide 28]



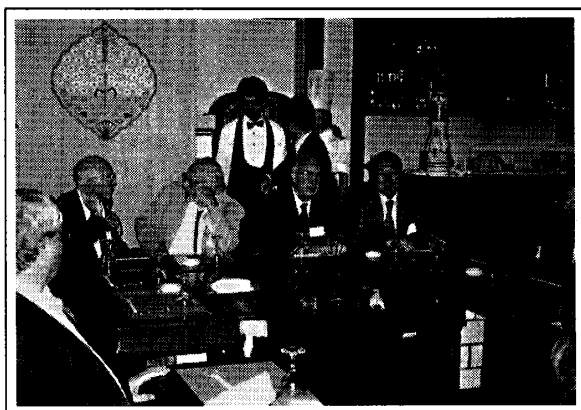
[Slide 29]



[Slide 30]

[slide 29,30,31,32] その後それをもっときちんと実験しようということで、スーパーカミオカンデがつけられます。1991年に建設が始まって、1996年に完成します。これは5万トンの水タンクです。途中、1992年だったと思うのですが、高山と神岡で国際会議を開いた時の写真です。カラーにすればよかったのですが、ゼロックスが間に合いませんでした。これが南部先生でこれはマクドナルドじゃないかと思ひます。これがライネスで、これがデービス。みなさんで歓談しているところであります。小柴先生の写真もあるので省略します。佐藤文隆先生が真ん中におられます。

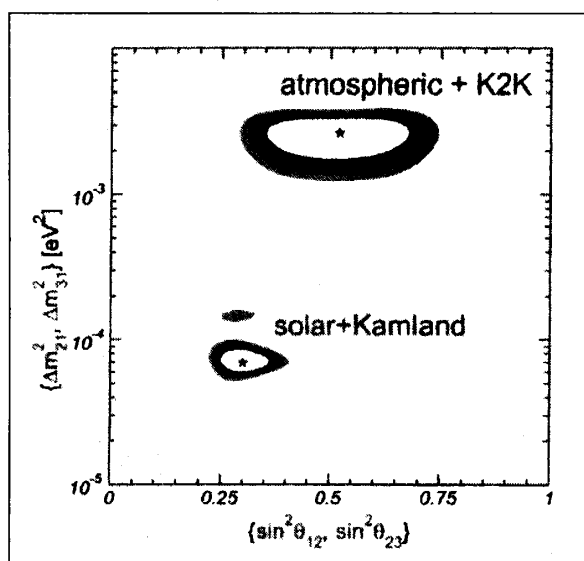
[slide 33] 大気 neutrino については、スーパーカミオカンデを経て確定していくわけです。これは太陽 neutrino と大気 neutrino、両方同じ図に書いてありますが、ミキシングが 0.5 というのが maximum で、maximum mixing に近いということです。それから質量は $2 \times 10^{-3} \text{eV}$ の 2 乗程度の差があると。solar neutrino のほうは、Kamland が大活躍して、質量が非常にいい精度で決まったわ



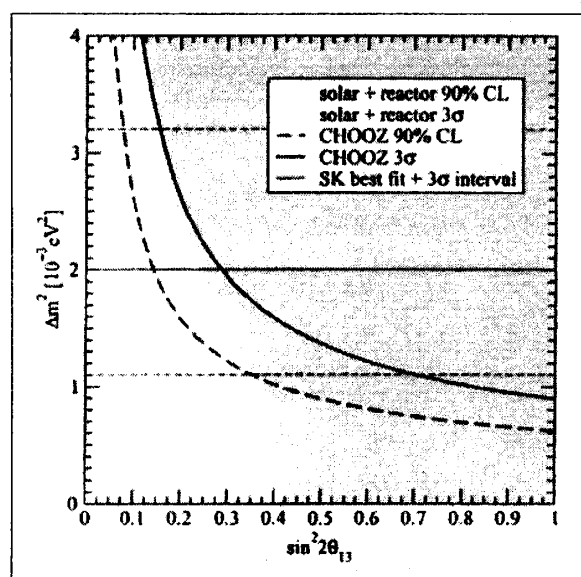
[Slide 31]



[Slide 32]



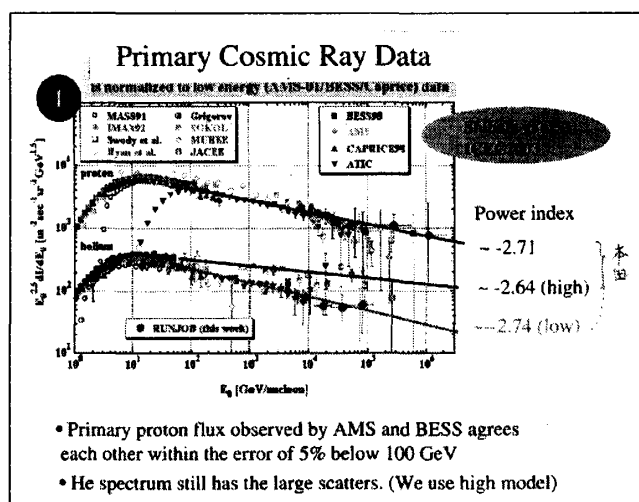
[Slide 33]



[Slide 34]

けですが、 $8 \times 10^{-5} \text{eV}$ の 2 乗ぐらいで、ミキシングは maximum まではいかないけれどもけっこう大きいということがわかっています。

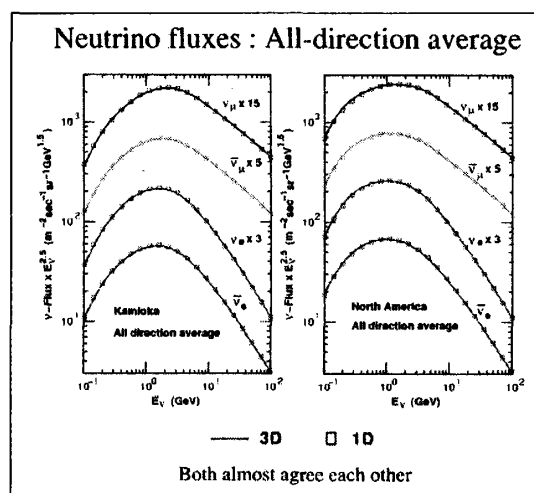
[slide 34] θ_{13} というのは、まだ上限しかわかっていなくて、これをちゃんと見つけるのは、今後の課題になっています。



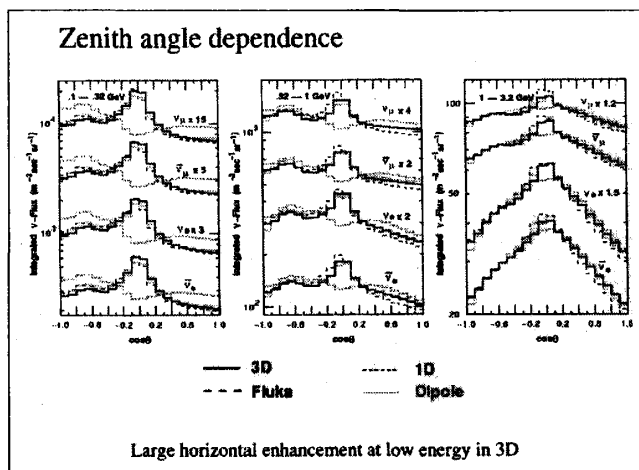
[Slide 35]

[slide 35] このカミオカンデの大気 neutrino の解析というのは、日本で本田さん、笠原さん、緑川さん、梶田さんたちが非常に精力的にやられて、アメリカではガイサーたちがけっこうやられました。本田さんたちの苦労の一端をご紹介します。Primary Cosmic Ray のデータというのは、そもそも非常にばらつきがあります。例えば α 線の場合は、こっちを取るのかあっちを取るのかというようなことがまだよくわからないのです。AMS という人口衛星の測定がこのへんまでですから、まだ先には不定性もあります。ですからその不定性を含めて、幅を持たせて計算をするという、非常にたいへんな仕事をしています。

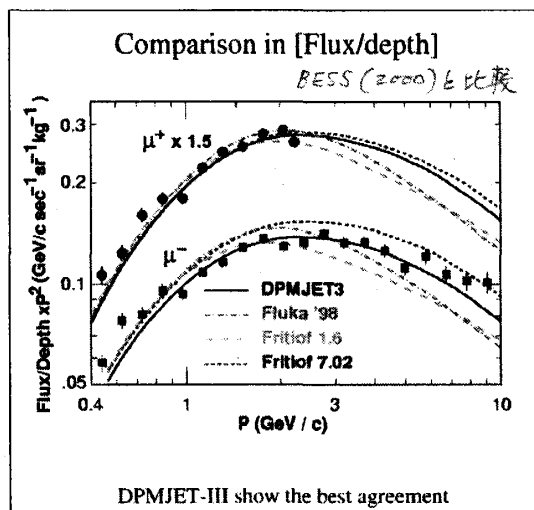
[slide 36] 宇宙線に計算機シミュレーションを使うというのはいまでは常識ですが、非常に本格的にやったのは、日本の笠原さんが最初です。もとは笠原さんのシミュレーションのプログラムを使って、それを neutrino の実験に合うようにいろいろと工夫をして精度を上げていったものです。



[Slide 36]



[Slide 37]

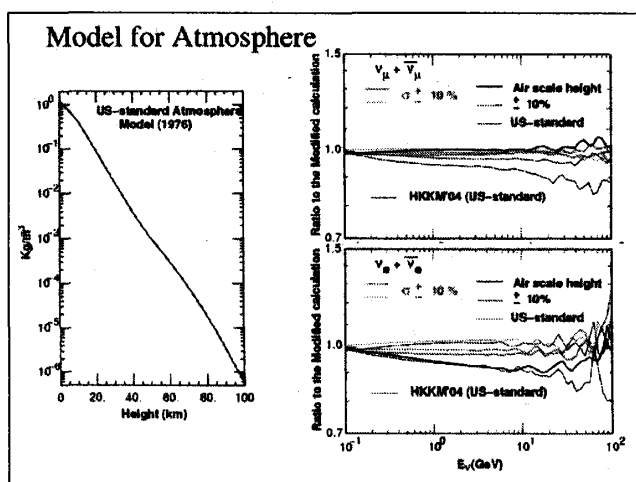


[Slide 38]

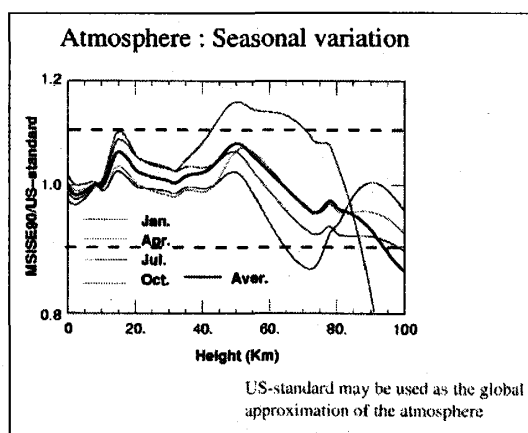
[slide 37] Neutrino fluxes について、最近、本田さんたちは 3 次元計算をやっています。幸いに 1 次元計算と、わりによく合っていますから、いままでの計算で、そう悪くなかったのですが、低いエネルギーでの横からくる neutrino については、3 次元と 1 次元で多少の差は出てきています。

[slide 38] それから、亡くなった折戸さん、それからいまは山本さんたちの BESS 実験で、muon を精密に測ったデータがありますが、それとよく合っていますが、muon で合わせないと neutrino 実験が信用できないので muon でもよく合わせています。ただ、この時は、相互作用の模型によっていろいろな色がついていますが、DPMJET3 というのがよく合うということでした。

[slide 39,40] こんなものも問題になるのだというのは、大気密度は、US-standard というのがあるのだそうですが、実際には standard から日本の大気は deviate します。そうすると、flux が変

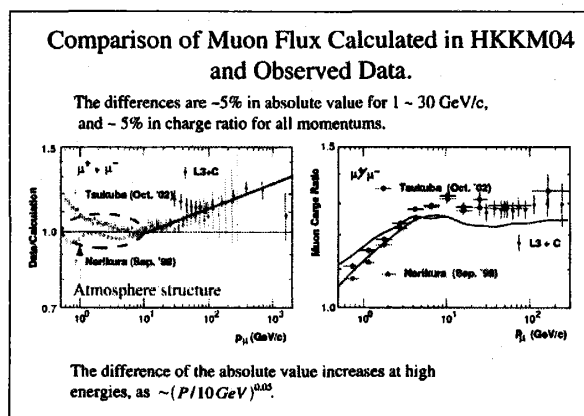


[Slide 39]

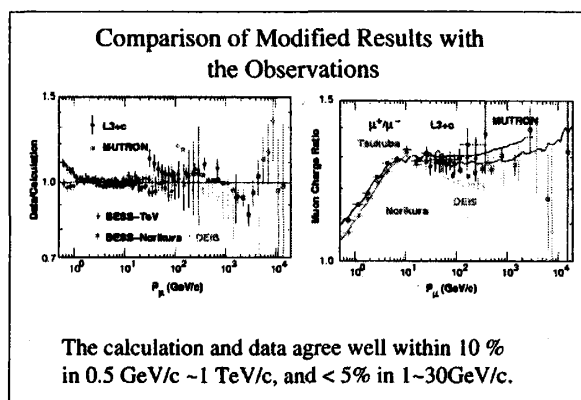


[Slide 40]

わからないかというのも、彼らは真面目に計算しています。その結果、neutrino は違いがありますけれども、数パーセントに留まっています。しかし、muon は、この大気の変化する密度を大きく受ける可能性があるけれども、許される範囲に留まっているということも、チェックしているということです。

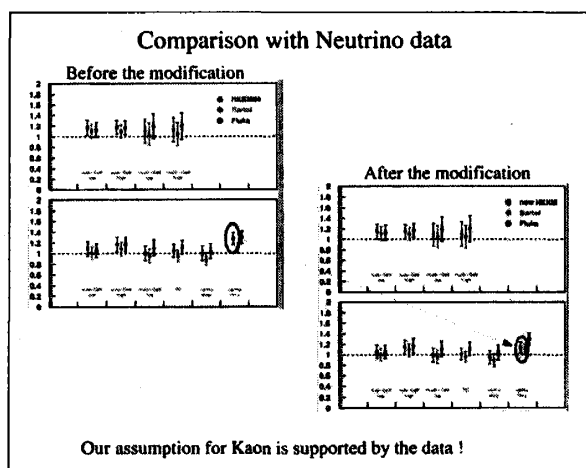


[Slide 41]

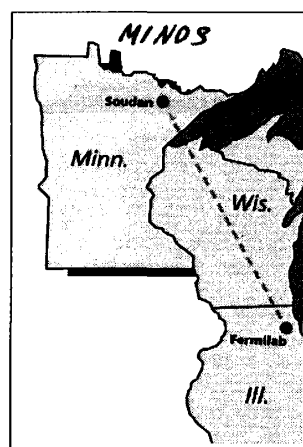


[Slide 42]

[slide 41,42,43] それから、実験と計算はよく合うように見えて、これを見るとよく合っているのですが、非常に精密に見ると部分的には数パーセント合わないのです。そういうことも、彼らは非常に心を痛めているのです。しかしこれは、**primary** を変えても直らないので、相互作用を変えなければいけないのですが、加速器データには矛盾しない範囲で **K-meson** の **production** を少し増やすという修正をしてやるとよく合うので、本当はこちらが良いのだと。もっと精密な実験をしないといけないのでしょうけれども、**muon** に合わせるとするとこうだということです。**neutrino** はどうなるかという、この修正によって、前は本田さんたちとカミオカンデのデータがずれていたのが、よく合うようになっているということです。これは本田さんたちが非常に精力的に計算をしている、苦勞をしていらっしゃる一端にすぎません。



[Slide 43]



[Slide 44]

[slide 44] これからは加速器が近づいてきて、MINOS : Fermilab から Soudan Minn. までの実験が始まって精密なデータを出すでしょう。それから、丹生先生とそのお弟子さんたちがやっていらっしゃるオペラ実験も、もうじき結果を出すでしょう。 τ neutrino とか、neutrino parameter の精密化もおこなわれると思います。

「宇宙線とニュートリノ」というタイトルなので、宇宙線と neutrino の、これから期待されることをご紹介します。

アメリカのクローニンが中心になって、Auger 実験というのがアルゼンチンでもうすぐ完成します。これは日本のアケノ実験の宇宙線の 10^{20} eV までのデータと、これが落ちずに伸びていったわけですが、それからアメリカのフライズアイがちょっと落ちている感じなのですが、HiRes 実験というのですが、これは矛盾しています。どちらが正しいのか、わからないのですが、理論的に普通の平凡な予想をすると、このへんから落ち始めます。というのは、宇宙線は宇宙の 3 度 K 輻射と相互作用をして、3-3 resonance をつくります。そのために pi-on にエネルギーを食われて、proton のエネルギーは小さくなります。だから 10^{20} eV よりもエネルギーの大きな宇宙線は、ほとんどないというのが Zatsepin・Greisen・Kuzmin : ZGK cutoff と呼ばれているものですが、アケノデータは、それを越えて出ているのでこれが本当ならたいへん面白いことだというのが、非常に大きなモチベーションですが、それが Auger 実験の大きな motivation でアケノ実験の 30 倍の面積を持った装置をいま建設中でもうじき出来上がります。

その装置では、neutrino は単なる副産物ですが、副産物としてもたいへん面白いです。例えば ν_τ が入ってきて、地面をかすって、横向きに空気シャワーをつくれます。 τ は岩石のなかをあまり energy loss しないで、ionization energy loss ぐらいで飛んでくるわけですが、 τ は寿命がありまますから崩壊します。エネルギーが非常に高い場合は、何キロか飛んでから崩壊します。そしてここで air shower をつくるのです。そういうことが起これば、非常に観測しやすいのです。

ν_e 、 ν_μ に比べて、 ν_τ のほうが感度がいいということですが、そういう実験も計画されています。ここで TD と書いてあるのは、topological defect、もし宇宙にストリングとか何か、monopole は見つかりませんが、そういうものから普通の粒子に何か、例えばストリング同士がぶつかる地点で、そういう粒子を発生するんじゃないかとか、そういう夢のあるような実験ができるかもしれないということです。

[slide 45,46] 現在はずでに観測しているのは AMANDA という南極につくった装置で、これはハワイの DUMAND という海底に作ろうとしていたのが、メカニカルにうまくいなくて、南極の氷のなかは安定がいいので作りやすくうまくいったわけです。そこでは 3,000 例ぐらいの neutrino を捕まえています。彼らが 3,000 例ぐらい捕まえた detection efficiency というのは、もしもマルカニアン 501 という非常に活発な活動銀河の γ 線というのは、KeV γ 線というのですが、これまで日本でもアメリカでもヨーロッパでも観測されていますけれども、 γ 線を出すのなら、electron がいるのだから、electron が加速されているのなら、proton も加速されているだろう。そうしたら proton は γ 線を出す代わりに、どこかとぶつかったら、pi オンをつかって neutrino を出すだろう。マルカニアン 501 の出した γ 線と同じ程度の neutrino が放出されていれば、この AMANDA2 で観測できる

AMANDA

AMANDA
29th International Cosmic Ray Conference Pune (2005) IC22.5 68, 101-104
Search for high energy neutrino point sources in the northern hemisphere with the AMANDA-II neutrino telescope
M. Ackermann, E. Bernardini, T. Hauschild for the IceCube Collaboration
(at DESY Zeuthen, Plattenaustr. 6 D-15738 Zeuthen, Germany
(at Bartol Research Institute University of Delaware, 217 Sharp Lab Newark, DE 19716, USA
Presenter: M. Ackermann (Markus.Ackermann@desy.de), ger-ackermann-M-0502-0925-poster

ABSTRACT
In this paper we report the most recent survey of the northern sky to search for neutrino point sources using the AMANDA-II telescope. A search for astrophysical neutrinos of energies above a few tens of GeV was performed on the data collected between the years 2000 and 2003 for a total live-time of 807 days. Thanks to a higher reconstruction accuracy and background rejection power compared to past analyses, together with a longer exposure time, a noticeable improvement has been achieved in the sensitivity of the telescope. The sensitivity to individual point sources, assuming a signal energy spectrum proportional to $d\Phi/dE \propto E^{-\alpha}$ with a spectral index of 2, is $E^2 d\Phi/dE \leq 6 \times 10^{-6} \text{ GeV/cm}^2 \text{ sec}$, weakly dependent on declination. We have obtained a large sample of neutrino candidates with high reconstructed track quality, consisting of 3329 selected upgoing events. We searched this sample for a signal from point sources. Individual potential neutrino sources belonging to a catalogue of 33 preselected objects were scanned together with the complete northern sky. We report the outcomes of the individual observations and the signal-to-noise map of the northern sky.

AMANDA II
19 strings
677 PMTs
 $\Delta\theta \leq 2-2.5^\circ$

sensitivity for neutrinos with the same intensity as TeV gammas for M87 flare in 1997

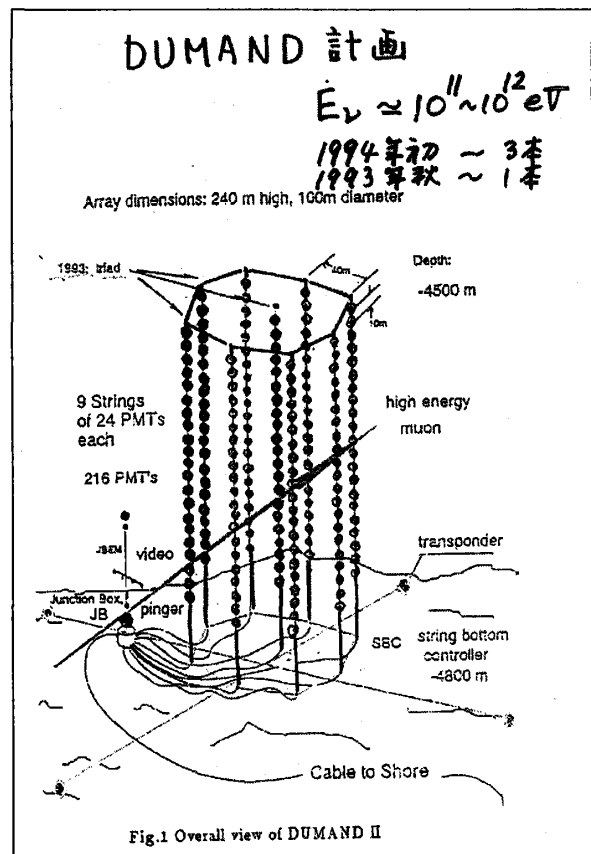
VOLUME 92, NUMBER 7 PHYSICAL REVIEW LETTERS 30 FEBRUARY 2004

Search for Extraterrestrial Point Sources of Neutrinos with AMANDA-II

J. Ahrens,¹ X. Bai,¹ S.W. Barwick,¹⁰ T. Becker,¹ I.K. Becker,² E. Bernardini,¹ D. Bertrand,² E. Blum,² A. Biron,¹

We present the results of a search for point sources of high-energy neutrinos in the northern hemisphere using AMANDA-II data collected in the year 2000. Included are the limits on several active-galactic-nuclei blazars, microquasars, magnetars, and other candidate neutrino sources. A search for resonant above a random background of cosmic-ray induced atmospheric neutrinos and reconstructed downgoing cosmic-ray muons reveals no statistically significant neutrino point sources. We show that AMANDA-II has achieved the sensitivity required to probe known TeV p -ray sources such as the blazar Markarian 501 in its 1997 flaring state at a level where neutrinos and γ -ray flares are equal.

[Slide 45]



[Slide 46]

ディテクション、能力、sensitivity まで上がりましたということを報告しています。

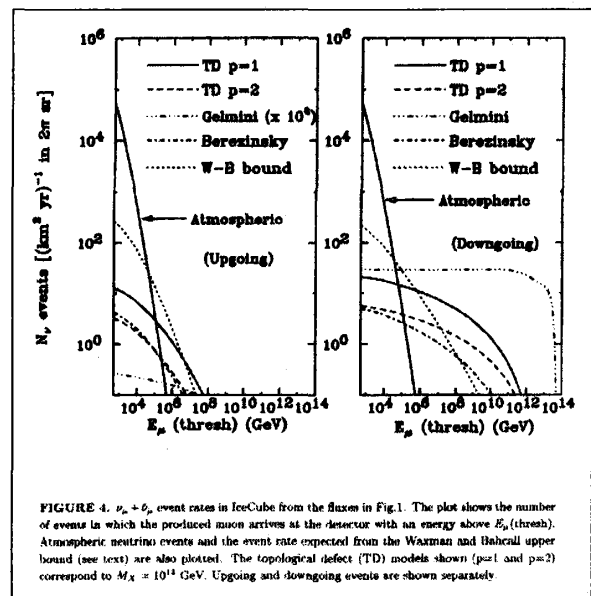
TABLE 1. Comparison of neutrino event rates for three representative neutrino fluxes for OWL [6] and IceCube [13].

	Volume	Eff. Area	Threshold
OWL	10^{13} ton	10^6 km^2	$3 \times 10^{10} \text{ eV}$
IceCube	10^9 ton	1 km^2	10^{15} eV^*

	Events per Year		
	TD	Z_{burst}	$p_{72.7}$
OWL ν_e	16	9	5
IceCube ν_μ	11	30	1.5

*actual threshold $\sim 100 \text{ GeV}$; requiring $>1 \text{ PeV}$ eliminates atmospheric ν background.

[Slide 47]

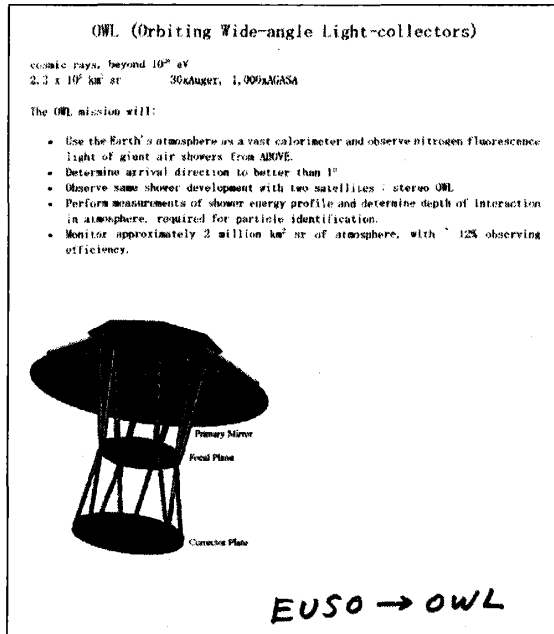


[Slide 48]

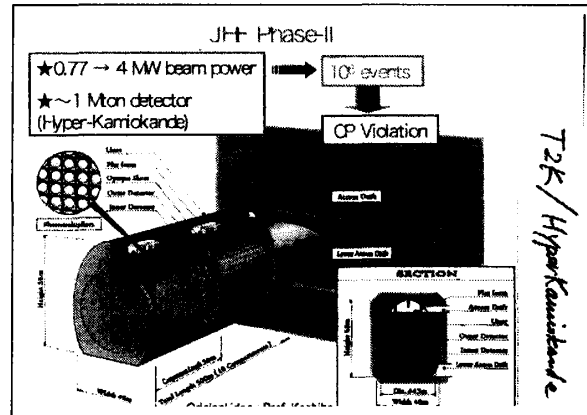
[slide 47] それが観測されれば、proton の、例えば初めて proton が星で加速されて、一定のことがわかるかもしれないのですが、将来的にはそれをさらに大きくして「IceCube」という名前の装置にしよう。そうすれば、neutrino の観測能力は、何桁も大きくなるわけです。そうすると、やはり topological defect とかそういうものも観測したいということです。

[slide 48] これが IceCube の測定能力です。大部分は大気 neutrino で、大気 neutrino に関しては、

ものすごい数のイベントが見つかるのですけれども、それを越すようなシグナルがあれば、観測できるだろうということです。



[Slide 49]



[Slide 50]

[slide 49] だからそこで比較している、OWL というのがありますが、OWL というのは人工衛星です。人工衛星から地球を見下ろすと、夜見ないといけなしのしょうけれども、見下ろすここに宇宙線が入ってきて空気中でシャワーをつくります。シャワーがつくったシンチレーション光を上から眺めてやれば、しかも 400 キロとかという非常に高いところで飛ばせば、カバーできる領域はものすごく大きくて 100 万 km² もあるという実験が計画されていて、その前段階として EUSO というものがすでに準備されています。そういうものだと、neutrino も相当に観測できるかもしれません。

[slide 50,51,52] それから、加速器とそのカミオカンデで将来、これは相当野心的なのでしょうけれども、J パークの加速器をパワーアップして、かつ標的をハイパーカミオカンデで 1 メガトンという非常に大きな体積にした場合には、いままで見つけられなかったいろいろな、区別できなかったいろいろな ambiguity を越えて、副産物として neutrino のミキシングが決定できます。今まで、neutrino のパラメーターを決めるには、いろいろな ambiguity があつたのだそうで、Barger et al は、Eight-Fold Ambiguity と言っていますが、CP の破れのパラメーターと、小さい角 θ_{13} という、同じ実験をしても 2 つチョイスがあるということです。あるいは mass 2 乗の 13 というのが、1 が軽いのか 3 が軽いのか、hierarchy が normal か inverted かという ambiguity、あるいは θ_{23} が maximum で $\pi/4$ に近いのだけれども、 $\pi/4$ より大きいのか小さいのかというのは 2 乗をしたのではわからない、その ambiguity など加速器実験をやっただけではなかなかほぐしにくいと言われていますが、ハイパーカミオカンデを大気 neutrino の実験と両方を兼ねてやれば、そういう ambiguity は解けるのです。この場合だと、ambiguity が 2 つあるのですけれども、大気 neutrino の実験と合わせれば一方に決まるかもしれません。

そういう図がたくさん書いてあつたうちの 2 つだけ持ってきたのですけれども、これは縦軸は ΔCP ですが、大気 neutrino で測った確定領域が赤で、青が long baseline 方式実験の場合です。両方組み合わせると、ずっと精度がよくなるというわけで、将来、加速器で、long baseline の実験をどこかでやることになるでしょうけれども、その場合も、大気 neutrino の、宇宙線 neutrino 実験は、やはり欠かせないようです。以上、とりとめなかったかもしれませんが、終わらせていただきます。

討論

菅本：ありがとうございました。ご質問等々をお願いいたします。坂東さん。

坂東：宇宙線実験はたぶん 1980 年代にはあまり信用されなかったと言ったら変ですけども、uncontrollable で、1970 年代から 80 年代にかけては、むしろ私なんかチャーム発見のときの

8-fold Ambiguity ?

Eightfold Ambiguity

ニュートリノ振動パラメータ

$$U = \begin{pmatrix} 1 & & & \\ & c_{12} & s_{12} & \\ & s_{12} & c_{12} & \\ & & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & s_{13} & \\ & c_{23} & s_{23} & \\ & -s_{23} & c_{23} & \\ & & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i\delta} & & & \\ & 1 & & \\ & & 1 & \\ & & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \\ \nu_s \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \\ \nu_s \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} \theta_{13} &= \theta_{\text{atm}} \\ \theta_{12} &= \theta_{\text{sol}} \\ \theta_{23} &= \theta_{\text{mix}} \end{aligned}$$

Long Baseline Neutrino Experiment $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau), \bar{P}(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\tau)$
 から、パラメータを決めようとする、 $2^\circ = 8$ 重の不定性がある。
 V. Barger, D. Marfatia, K. Whisnant, PRD65 (2002)

1. (δ_p, θ_{13}) Koike, Ota, Sato (2002); Sato (2000); Barger-Castell et al (2001)
 2. $\delta m^2_{13} < 0$, or $\delta m^2_{13} > 0$
 3. $(\theta_{23}, \pi/2 - \theta_{23})$
- 調べるのにより実験パラメータ E, L , with $\Delta = |\delta m^2_{13}|L/4E \approx (n+1/2)\pi$ を与えている。..... $(\delta_p, \pi - \delta_p)$ 不定性に帰着。

これまで

大気 $\nu + \text{K2K}$ $\delta m^2_{13}, \theta_{13}$

太陽 $\nu + \text{Kamland}$ $\delta m^2_{12}, \theta_{12}$

Chooz, Palo Verde..... θ_{13} 上限

近々

MINOS, ICARUS, OPERA, J-Park ... 精密化と確証 ($\delta m^2_{13}, \theta_{13}$ 精密化, θ_{13} 上限, $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 確証)

MINO $\rightarrow \delta m^2_{13} [10\%], \sin^2 2\theta_{13} \geq 0.06$. J-park will search $\sin^2 2\theta_{13} \geq 0.01$

将来

New reactor experiments?..... DoubleChooz? $\rightarrow \sin^2 2\theta_{13} \geq 0.03$,

others may search $\sin^2 2\theta_{13} \geq 0.01$, J-park will search $\sin^2 2\theta_{13} \geq 0.01$

Superbeam experiments?..... T2K [HyperKamiokande?] $\rightarrow \text{CP}$, if $\sin^2 2\theta_{13} \geq 0.01$

大気ニュートリノ実験も大事!!

Neutrino factory experiments $\rightarrow \sin^2 2\theta_{13} \geq 0.001 / \text{CP}$ if $\sin^2 2\theta_{13} \geq 0.001$

[Slide 51]

Resolving parameter degeneracies in long-baseline experiments by atmospheric neutrino data

Patrick Huber,^{1,2} Michele Maltoni,^{2,1} and Thomas Schwetz^{2,3}

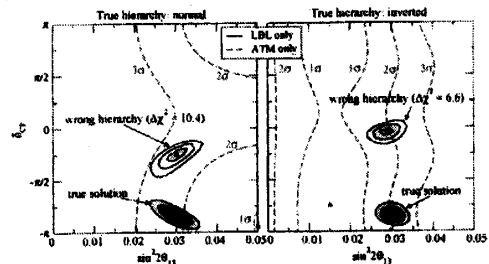


FIG. 4 (color online). Allowed regions in the $(\sin^2 2\theta_{13}, \Delta m^2_{13})$ plane assuming for the true mass spectrum a normal (left) and an inverted (right) hierarchy, and $\delta m^2_{21} = -\delta m^2_{21} = -0.85 \text{ eV}^2$. The true values $\sin^2 2\theta_{13} = 0.03$ and $\delta m^2_{13} = -0.85 \text{ eV}^2$ are marked by a star. The shaded areas and the solid curves correspond to the 1, 2, and 3- σ allowed regions (2 dof) for the true and the significantly-degenerate solutions for LBL + ATM data, respectively. The dashed curves correspond to the $\Delta\chi^2$ contours of ATM data for the wrong sign of Δm^2_{13} , and the best fit point for ATM only with the wrong hierarchy is marked with a triangle. The $\Delta\chi^2$ of the best fit point with the wrong hierarchy for LBL + ATM data is given in the figure and its location is marked by a star.

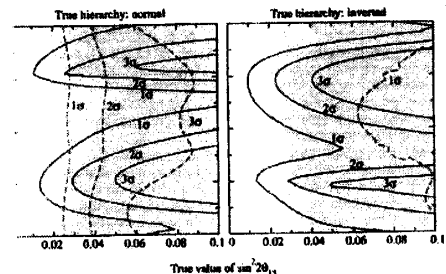


FIG. 5 (color online). Sensitivity to the mass hierarchy as a function of the true values of $\sin^2 2\theta_{13}$ and Δm^2_{13} for $\delta m^2_{21} = -\delta m^2_{21} = -0.85 \text{ eV}^2$. We show the contours of $\Delta\chi^2 = 1, 2, 3$ between the wrong and the true hierarchy, corresponding to a rejection of the wrong hierarchy at the 1- σ , 2- σ , and 3- σ level. (From left to right: LBL only, LBL + ATM only, LBL + ATM combined, solid curves correspond to LBL only, and dashed curves to ATM only.)

[Slide 52]

を覚えているのですが、外国人はほとんどもちろん丹生さんの実験は引用しないし、したとしても Rosner なんか “pre-history” として、uncontrollable な宇宙線の中でたまたま見つけたという評価が非常に強い時代があったのです。それが neutrino とかでは、いまや加速器実験というのはかなりの位置を占めてくるようになったのは、日本がかなり contribute したのではないかと思います。そういうことは、日本の伝統のなかにあったのですか。

荒船：これは丹生先生に聞いていただいた方がいいですね。1953 年にコスモトロンができてからは、新粒子の発見というのは、おもに加速器のほうに移っていきました。宇宙物理も外国では人工衛星がけっこう発達したので、そっちのほうに移っていったのですが、人工衛星も、そう気ままにはつくれないうし、加速器もなかなかつくりにくいというので日本の宇宙線グループというのは、かなり苦しかったと思うのです。非常に新しい現象を追い求めるということをやっている、統計量も少ないから、ambiguity が多い結果が多かったのですが、宇宙線屋さんの内部でも、お互いに相手を信用しないと、そういう人もいたりして、どこを信用していいのかというのは、なかなかわからないところもあったのです。統計量が少なくても、加速器だったら Ω^- などは、たしか一例で泡箱実験で決まっていますよね。だから、きちとしたものなら統計量が少なくてもいいわけなのですが、丹生先生たちの、emulsion を使っているので、そういう意味では、それが確率として、散乱の確率はないのかと言われると、やっぱり統計量を上げて、そういう少ない確率であっても別の可能性を減らさなければいけなかったでしょうけれども、先生たちはそのあと、加速器をやられたのですよね。この間、菅原さんが何かの会で宇宙線なんか信用していなかったんだけど、大気 neutrino の実験は正しかったと言っていました。カミオカンデの人たちは、加速器実験で統計処理とか信頼性とかということには非常に神経を使っています。だから、まだ確かに宇宙線実験で宇宙物理を例えばやった場合に、どこまで信用できるかというのは、私もまだわかりません。

坂東：ようするに、加速器屋さんが入っていて、測定精度を上げたということがあるのですか。よくわからないんですけども。

荒船：simulation をものすごくきちんとやったということです。それから、detector の性能を、加速

器でチェックしながらやったということです。Monte Carlo simulation でこうだと言うだけじゃなくて、水タンクを高エネルギー研につくってそこでテスト実験をして、simulation 通りの結果が出ると、electron と μ の識別というのが、九十何パーセントぴったりできるというのも、実例で確かめてやっているという手法は、宇宙線屋さんだっってやらなければいけないんだけど、加速器の人は、そこは非常に神経質に、simulation だけでなく、実験と比べながらやったようです。

菅本 : 何か質問はございませんでしょうか。じゃあどうもありがとうございました。



ph03

丹生, 菅本, 小沼, 大久保, 荒船, 坂東