

# 中性微子のサブパラダイム

(ニュートリノ科学の進展)

佐 藤 均

Fortschritt der Ansicht nach Neutrino/Müon Wissenschaft

(Mystère de neutrino)

von

Hitoshi Satoh

## §1. はじめに

ここ二三年間しばしば筆者の意識の内にもニュートリノの相互作用や現代的意義について何かもやしたものも存在し続けたのであるが、究明しようとする程とても手に負えない対照だと判り、それについて何か書こうと思ってもしばしば、すくんでしまって気おくれがしてならなかった。すでに西独の物理学者 S. Brandt<sup>1)</sup> は“Kaum etwas ist schwieriger zu fassen als das Neutrino, die geheimnisvollste Teilchen ……”と表現した如く、その属性等に関しては今だに不気味な謎めいた存在なのである。疑いもなくニュートリノは素粒子中でも最も起源が古く原始的なものであろうが特にその意義はマクロの領域つまり宇宙サイエンスで大いに発揮されるに違いない。その莫大な透過性の為に今日でも直接的な捕促検出は至難であろう。その衝突長は1億光年位とされる。

## §2. ニュートリノの属性概略

およそニュートリノであれ又その他の粒子であれ、相互作用無しには絶対に知覚され得ぬものであることは全く当然である。つまりニュートリノ“それ自身”は殆んど意味がないであろう。ニュートリノ $\nu$ に関し確実に我々が云々出来る属性はわずかにスピンとパリティつまり、 $J^p = \frac{1}{2}^+$ であり従って電子と同様 Fermi-Dirac の統計に従う粒子で、完全に中性である事位であろう。それ以外は静止質量や磁気モーメント<sup>②</sup>が厳密に0であるかどうかもこれは大いに論議されてる所だが、今もってはっきりしない。若し質量が0ならば光速で飛びまわると思われ、そうならば重力でとらえることも出来ないであろう。この事は宇宙膨脹論との関連でも大変興味深いものである。超銀河団のスケールでは赤方変位、ドプラー効果でニュートリノに質量をもたせることは不可能ではないと思われる。そこでは十分重力によって捕そくされ巨大

なニュートリノボール形成が考えられる。この質量問題は宇宙を閉じさせるかどうかつまり臨界密度  $\rho_c$  とも関係し理論的には  $\nu_e$  が  $23 \text{ eV}$  もあれば宇宙を閉じさせることが可能とされている。従って今日世界各国できそって  $\nu$  の質量の精密な決定に熱中しているわけである。特にソ連のリュビモフ等の  ${}^3\text{T}$  の  $\beta$ -decay を利用した  $\nu_e$  の質量決定は我々に強い印象を与えたが未だその精度に疑問点がなしとしない。(そこでは飛散性のトリチウムは valine 分子の超薄膜に束縛させている) 中には  $18 \text{ eV}$  位の値もある (スイス)

${}^3\text{T} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e$  なる反応だから正しくは反ニュートリノの質量を間接的に求めたことになる。ただ云えることは実験精度が向上すれば質量下限はどんどん小さくなる事である。

一方光子と  $\pi^0$  中間子を例外としてすべての素粒子には相対論的量子論から反粒子があるべきで  $\nu$  にもその反粒子  $\bar{\nu}$  があるに違いないがこれも  $e^-$  に対する  $e^+$  の相違に比べて今一つ決定的な事が云えない。つまり Dirac 型  $\nu$  では  $\nu \neq \bar{\nu}$  だが Majorana 型  $\nu = \bar{\nu}$  の可能性もダブル  $\beta^-$  崩壊の見地から完全には否定できない。後者では明らかにレプトン数  $l$  は保存されない。しかし  $\nu$  と  $\bar{\nu}$  の反応断面積  $\sigma$ , (これは反応確率に比例するが) の相異の事実は前者つまり Dirac 型の方が有望そうである。少くともその方がすっきりしている。ニュートリノは電子と異なり弱い相互作用しか行わないので逆に弱い相互作用の機構をしらべるにはうってつけである。その反応断面積は極度に小さく  $100 \text{ GeV}$  位のエネルギーで  $\sigma_{\nu} = 10^{-44} \text{ cm}^2$  のオーダーである為恐るべき透過性つまり何者もニュートリノの進路をさえぎることができない様にさせる。つまりニュートリノにとっては完全な真空も天体や物質も区別なく光速で透過することになり我々の人体も無論例外ではないが、我々には全く感じないのである。従って無害な放射線であるといつて良い。超感覚的な存在なのでそれ丈に検出は至難の業である。ただ例外的に中性子黒や核物質の密度ではさすがのニュートリノも吸収されるし又 Black hole にも吸い込まれるであろう。所が現在の、最新鋭の重イオン加速器<sup>④</sup> を使っても、人工的な核物質密度を少しでも安定に作り出すことは不可能である。これが出来ればニュートリノの detector として利用出来る筈であるがそれは無理であろう。一方宇宙線としての超高エネルギーのニュートリノは数は少いが例えば原子核乾板で interaction をすればミューオン  $\mu$  に変身するので比較的検出は楽であるが、太陽をはじめ恒星からのニュートリノは未だ確実に捕えたと云える状況ではないし、ましてニュートリノの黒体輻射,<sup>2) ⑤</sup> (理論的には  $1.9^\circ\text{K}$ ) を観測するなどとても無理である。従って我々はその黒体輻射が観測できれば正に宇宙膨脹論、ビッグバンがいよいよ正しい事を証明したことになるのだが、これ無しでもビッグバン説を受け入れざるを得ないであろう。

さてニュートリノへの理解にはとりわけ、リー, ヤン, ウー<sup>23)</sup> の三氏による空間パリティの破れつまり左右の非対称性, 並びに Gauge 理論の進歩が大いに貢献した。更にイタリア出身の B. Ponte Corvo<sup>⑥</sup> による核化学放射化学を利用したニュートリノの捕かく反応の大提案等もあげなくてはならない。ニュートリノ capture 反応は  $\beta$  decay の逆反応に当るがこれ

は自然にはとても起りにくい反応である。(一方  $\beta$ -decay には  $\beta^-$ ,  $\beta^+$ , EC. = 電子捕かくの三通りがあるがこの  $\beta$  崩壊問題ほど莫大な困難性を物理学者に与えたものも少いであろう。この背景には大へん手強い弱い相互作用の理論がひかえているのである。) さてリー, ヤンの両氏はニュートリノの様な素粒子に空間的に方向づけをするため「ネジクギ」のモデルを与えるよう提案した。我々はニュートリノと反ニュートリノが別物つまり  $\nu \neq \bar{\nu}$  との大前提の下で中性子  $n$  が陽子  $p$  に decay する時つまり  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$  の際には反ニュートリノが放出されそれが右巻き(右らせん)であり, 反対に  $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$  の反応で放出されるのは正ニュートリノで左巻き(左らせん)であることを認めざるを得ない。従って正のニュートリノは  $\nu_L$ , 反ニュートリノは  $\bar{\nu}_R$  しかないことになり,  $\nu_R$ ,  $\bar{\nu}_L$  はどうゆうわけか存在しない。

その理由は恐らく宇宙開びゃくのごく当初は  $\nu_R$ ,  $\bar{\nu}_L$  もあったが真空の相転移や自発的対称性の破れによって  $\nu_L$ ,  $\bar{\nu}_R$  の方が今日生き残ったと考えられる。従って我々はニュートリノの波動関数  $\psi_\nu$  を考えた場合  $\psi_\nu = \begin{pmatrix} 0 \\ \nu_L \end{pmatrix}$ ,  $\psi_{\bar{\nu}} = \begin{pmatrix} 0 \\ \bar{\nu}_R \end{pmatrix}$  と表記できる筈だが, より安全性を考えれば,  $\psi_\nu = \begin{pmatrix} \nu_R \\ \nu_L \end{pmatrix}$ ,  $\psi_{\bar{\nu}} = \begin{pmatrix} \bar{\nu}_L \\ \bar{\nu}_R \end{pmatrix}$  と表現したら良いであろう。結局ニュートリノ  $\nu$  は, 左巻きのヘリシテイ<sup>①</sup>をもつと結論されるがこれはヨーロッパ<sup>152</sup>  ${}_{63}\text{Eu}(0^-)$  の電子捕かくの実験<sup>②</sup>等でその様に確定した。その反応は  $e^- + {}_{63}^{152}\text{Eu}(0^-) \rightarrow \nu_e + {}_{62}^{152}\text{Sm}(1^-) \xrightarrow{-\gamma} {}_{62}^{152}\text{Sm}(0^+)$  と表わせる。そして反ニュートリノ  $\bar{\nu}$  は helicity<sup>③</sup>  $[\vec{p}, \vec{s}] > 0$  (+) で右巻きのねじに当ることになる。但し  $\vec{p}$ ,  $\vec{s}$  は夫々運動量とスピンを表わす。この Dirac-Weyl 型の縦偏極ニュートリノの立場は空間パリティを破り, レプトン数  $l$  は完全に保存する。(その逆に, 先述の Majorana<sup>④</sup> 型ではパリティは保存するがレプトン数は保存しないことがわかる)。しかし注意すべきことは現実にはニュートリノが Dirac-Weyl 型か Majorana 型かが完全に決定したわけではない, 我々はむしろその両者の混合型の可能性も考慮に入れなければならないであろう。さて Gauge 原理の先覚者でもある H. Weyl は1929年頃早くも質量ゼロで  $1/2$  のスピンをもつ粒子に対し Dirac の4成分の波動関数のかわりに二成分のそれをもつ相対論的に不変な方程式<sup>⑤</sup>を打出した。すなわち  $\varphi$ ,  $\chi$  をスピノル,  $\sigma$  を Pauli 行列,  $\nabla$  は演算子とすると  $i \partial \varphi / \partial t = -i \sigma \nabla \varphi$  及び  $i \partial \chi / \partial t = i \sigma \nabla \chi$  となり, これは運動量方向に完全に偏極した粒子を見事に記述する。所が当時は Parity 非保存<sup>⑥</sup>の事実が知られてなかったので, 又夫々の方程式が座標反転操作で変化するので学会から拒絶されたが, 今日では上の等式が夫々反ニュートリノ  $\bar{\nu}_R$ , 及びニュートリノ  $\nu_L$  を記述するものであることが判明<sup>⑦</sup>した。この式からはニュートリノの質量と磁気モーメントがゼロであることが演繹される。少くともこの方程式は縦偏極ニュートリノを完全に正しく記述すると思われる。ここに更めて Weyl の天才ぶりにただ驚胆するのである。所が同じ Gauge 原理の一つである大統一理論 GUT 特にその中の標準モデルであるゲージ群の直積であらわされる  $SU(5) \rightarrow SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ <sup>⑧</sup> 理論ではニュートリノに積極的に有限な質量を与えるのである。そればかりか  $\nu_R$  に巨大な質量を与えその為  $\nu_L$  が殆んど観測にかからない程わずかな質量しかないかをも説明するのである。特にニュートリノの質量問

題はかくしてやり切れない程 delicate な難問を我々にぶつけるのである。これはとりわけ宇宙論での「見えざる質量」問題<sup>⑩</sup>とも関係し最も神秘的で魅惑的なテーマの一つでもあろう。宇宙論自身がニュートリノに 50~100 eV 位の質量があることを否定できないと教えている。そして宇宙の見えざる質量の大半はブラックホールでもモノポールやアキシオンや星の死がいと云ったものではなく正にニュートリノであろうと筆者自身も信ずる気になっている。なにしろ光子（フォトン）と並んでニュートリノの総数は実に  $10^{90}$  個にも達することを考えれば尚更であろう。従って全宇宙はくまなくニュートリノ場という大海に満たされておりそのサイズは無限ではないと結論出来ないだろうか？ 但し Big Bang 論をとことん迄信奉しての結論ではあるが。ニュートリノはかくれた「黒子的存在」でありその役割はまことに地味ではあるがその存在理由を少し考えて見よう。先ず放射性物質の  $\beta$ -崩壊<sup>⑪</sup>では Pauli や Fermi が指適した如くミクロ的な保存則を救済する為でこれによって  $\beta$ -スペクトル<sup>⑫</sup>の難解な連続的形態が説明される事である。これによってエネルギー E, 運動量 P, 及びスピンの保存則が救われた。けれども原子核や核子にはじめからニュートリノが入っていたわけでは無論ない。その点では物質世界でのその役割は微々たるものの様に感じられる。しかし太陽をはじめすべての恒星の核融合反応の速度をコントロールしている事を考えれば実に我々生物人間の今日在る遠因とも考えられる。若し弱い相互作用がなかったら太陽の核融合反応は暴発しとても50億年もの間寿命を維持出来ない筈だし我々人間の様な高等生物が進化出現する前に太陽が消滅し去ってしまうと云ったおそまつな事にならない為であろう。今日我々が在り得るのは実に弱い相互作用が燃焼をコントロールしてくれたからである。!! 更に核子 ( $p$  や  $n$ ) や電子が存在するのも何か粒子反粒子, 対称性が破れ, 現実には反物質がなくなり正物質が出現できたのも何か弱い相互作用の働きがあったからに違いない。さもなくばこの世界はフォトンとニュートリノだけであとはすべて対消滅してしまった筈である。とは云ってもニュートリノ (捕かく) 反応は宇宙のごく初期で切れてしまったので今ひとつの positive な理由は不明な点が少くない。生物に対する太陽の無限の恵みもその根元には弱い相互作用によるニュートリノ放出プロセスがあるとしなくてはなるまい。

### §3. 相互作用について

筆者はかつて「原子物理学的世界像」なる論文の付録に相互作用の性質に関する表を掲せたことがあったが今回それに修正を加えつつ, 特に弱い相互作用を数式なしで論評し直してみよう。この一番元の理論は E. Fermi が1934年にはじめて提出したもので翌年 Yukawa は強い相互作用と弱いそれとを統一しようとした。その相対強度つまり結合常数  $G_F$  は強相互作用1に対しほぼ  $10^{-14}$  であり又場の量子は 80~90 GeV の質量をもつ  $W^\pm, Z^0$  でこれは電磁相互作用でのフォトンと同時に Gauge 理論から演繹されいずれも CERN で確認された。そ

の到達距離はごく短かいが0ではなく  $10^{-17}$  cm 位で、この实例は  $\beta^-$  崩壊や  $\mu$  崩壊、ハイペロン崩壊であり恒星の pp 核融合反応を制御することはすでに述べた。反応断面積は強い相互作用の  $10^{-12}$  倍つまりほぼ  $10^{-48}$  cm<sup>2</sup> 内外であり、反応速度としての平均寿命は  $10^{-10}$  秒と、強い相互作用にくらべて  $10^{13}$  倍も遅い。対称性は最大限に破れておりその点では、他の相互作用よりはるかに複雑で数学的にも美しさに欠ける。<sup>9)</sup> 多くの内部量子数に関する保存も破れている。従って弱い相互作用は「傾いた枠組」を持つといわれる故縁である。イタリアの Cabbibo ははじめてカビボ角  $\theta_c$  をその理論に導入した。それより以前に当然の事だが、ハドロン粒子はクォークによって例外なく分類され得ることが判明していた。例えば  $\Lambda$  粒子は  $(d, u, s)$  の三つのクォークがグルオンによって束縛されている等々である。

従って弱い相互作用は variety があって複雑だがいずれもレプトン対 (例えば  $\nu_e, e^-$ ) とクォーク対 (例えば  $u, d$ ) の間の変遷でこれが弱ボゾン  $W^\pm$  等によって反応が媒介されることがいよいよはっきりした。電子以上にニュートリノは核子 ( $p, n$ ) の非弾性散乱のテストに適していることは疑いない。電磁バリヤーに感じず核子の中に深く入り込める為である。そればかりでなくニュートリノ  $\nu_\mu$  は  $u d s \dots$  等のクォークの香りつまり種類迄判別できるので、クォークとニュートリノは互いに他を研究する大事な関係にあることが益々認識されるに至った。これによりクォークは確かに実在する対照物となった。ニュートリノ  $\nu_\mu$  により、それ以外にもクォークとそれらをしばるひも状のグルオンをも識別可能になった。グルオンは、ゲージ粒子だが「色」にのみ感じ「香り」には感じないが、クォークの方は「色と香り」の両方に感じるからである。一方  $\pi$  中間子や  $K$  中間子は陽子から造られる時は強い相互作用により造られ、崩かいするときは当然弱い相互作用により decay する事により高エネルギーのニュートリノビーム  $\nu_\mu$  が創られる。すなわち  $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$  及び  $K^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$  と  $\beta$  崩かいに似て  $\mu$ -decay をするのでこれが水素の巨大泡箱やその他の detector へと送られる。 $\nu_\mu$  のエネルギーが高い程反応断面積つまり反応確率はどんどん増加し続ける。 $\nu_\mu$  は核子と反応を起せば直ちに  $\mu$  に変身し電荷をかくとくするので強磁場のかかった液体水素中で明瞭なトラックをつくりニュートリノ反応が確認されたことになる。変身した  $\mu$  は  $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_e + \nu_\mu$  と崩かいしその低エネルギーの  $\nu_\mu$  は今度は何物とも相互作用して多分宇宙のはて迄直進するに違いない。この原理は何も泡箱に限らずスパークチェンバーや液体シンチレーター等でも共通にあてはまる。CERN から頂戴した水素泡箱のニュートリノ実験のネガフィルム(70ミリ)をけいさいする。詳細は不明としても、いかにニュートリノ捕かく反応が“very rare event”であるかはこれからも伺えよう。そのテストの目的は不思議な「ニュートリノ振動」問題のチェックつまり  $\nu_\mu$  がごくわずか  $\nu_e$  に相互に変身する可能性を調べることにあった。これは混合場の理論に基づく坂田グループや Ponte Corvo 等が始めて考えついたので弱ニュートリノに質量が有限で  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  等の混合があればニュートリノ振動現象が生ずると思われる。CERN の  $\nu_\mu$  beam 中には予想外に  $\nu_e$  がわずかながら混入しているとされているがこれも

ひよっとしたら振動によるのではないだろうか。

$\nu_e$  や  $\nu_\mu$  を weak neutrino とすれば坂田型では  $\nu_e = \cos \theta \nu_1 - \sin \theta \nu_2$ ,  $\nu_\mu = \sin \theta \nu_1 + \cos \theta \nu_2$  と表わされ,  $\nu_1 \nu_2$  は true neutrino<sup>2)</sup> を表わし, 他方 Ponte Corvo 型の第二種の混合では  $\nu_e$  と  $\bar{\nu}_e$  は質量のある  $\eta_1$  と  $\eta_2$  の混合として次式で表わされる。

$$\frac{1}{2}(1+\gamma_5)\nu_e = \frac{1}{2}(1+\gamma_5) \times [\cos \theta' \eta_1 - \sin \theta' \eta_2]$$

$$\left\{ \left( \frac{1}{2} \right) (1+\gamma_5)\nu_e \right\}^c = \left( \frac{1}{2} \right) (1-\gamma_5) \times [\sin \theta' \eta_1 + \cos \theta' \eta_2]$$

$\gamma_5$  は chirality を定義する行列で  $\gamma_5 = -\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ 。  $\frac{1}{2}(1+\gamma_5)$  はいわゆる射影演算子である。ニュートリノ振動は理論的にありそうであるが未だ未確認である。しかしそれによって例えば太陽の核融合反応  $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$  で放出される管の  $\nu_e$  が理論値に比べて観測値が少なすぎる事への少くとも一つの理由付けともなろう。もしこの理由付けでも説明が十分でないとしたらその事態は深刻になろう。<sup>3)</sup> 何らかの理由で  $4p \rightarrow {}^4\text{He} + e^+ + \nu_e$  の反応が現在休止状態にあり太陽は余熱でエネルギーをまかなっているともしなくてはならないからである。

そればかりか核融合反応の大枠を見直さなくてはならぬ事になりかねない。同上の反応では  $\nu_e$  のしきい値の平均値が  $\langle E_\nu \rangle = 0.26 \text{ MeV}$  と低いので現在はなるべくしきい値の高い  $\text{B}^8 \rightarrow \text{Be}^8 + e^+ + \nu_e$ ,  $\langle E_\nu \rangle = 7.2 \text{ MeV}$  反応からの  $\nu_e$  の検出に努力が払われている。それでも未だ理論値に比べて、はるかに少量の  $\nu_e$  しか検出されてないのである。さて, B. Ponte Corvo<sup>4)</sup> は  $\nu_e$  捕かく反応として核化学反応を利用すべきことを提言し  ${}^{37}_{17}\text{Cl}$  を含む四塩化炭素等の使用を考えた。それによって原子炉や巨大加速器からの  $\nu$ ,  $\bar{\nu}$  の検出捕そくの成功へと導いた。これは逆  $\beta^-$  崩壊のプロセスでもあるが次式の様になる:  $\nu_e + {}^{37}_{17}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}_{18}\text{Ar} + e^-$  及び  $\bar{\nu}_e + {}^{37}_{17}\text{Cl} \rightarrow {}^{36}_{16}\text{S} + e^+$  つまり, 電子捕かく反応の逆を強引に行わせたことにもなる。Pauli, Fermi の予言によるニュートリノはこれによりやっと25年後に実証されたことになる。同反応は夫々  $\nu_e + n \rightarrow p + e^-$ ,  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$  と同一視できる。更にクォークレベルでは  $\nu_e + d \rightarrow p + e^-$  及び  $\bar{\nu}_e + u \rightarrow n + e^+$  と書けるが同一内容である。先刻の反応は  ${}^{37}_{17}\text{Cl}(\nu, e^-){}^{37}_{18}\text{Ar}$  と略記でき半減期  $t_{1/2} = 35$  日でしきい値は 814 KeV である。太陽ニュートリノ捕そくの可能性のあるものはこれ以外に  ${}^7_3\text{Li}(\nu, e^-){}^7_4\text{Be}$ , 862 KeV,  ${}^{51}_{23}\text{V}(\nu, e^-){}^{51}_{24}\text{Cr}$ , 752 KeV,  ${}^{55}_{25}\text{Mn}(\nu, e^-){}^{55}_{26}\text{Fe}$ , 231 KeV 等があるがいずれも 50 ton も標的物質を集めないとだめだから大変高価につくだろう。例えば  ${}^{71}_{31}\text{Ga}(\nu, e^-){}^{71}_{32}\text{Ge}$ , 233 KeV には 30 ton 入用との事である。なるべくしきい値の低いものにタリウム  ${}^{205}_{81}\text{Tl}$  が知られてるが, これは 45 KeV である。ユーゴスラビア産の Lorandite  $\text{TlAsS}_2$ <sup>5)</sup> にのみ含まれると云う。反応式は,  $\nu_e + {}^{205}_{81}\text{Tl} \rightleftharpoons {}^{205}_{82}\text{Pb}^* + e^-$  と平衡反応が成立する。生じた鉛は電子捕かくによって Tl へ一部もどってしまふ。通常の小規模な  $\nu_e$  放出反応として次に炭素・ホウ素反応をしらべてみよう。

${}^{11}_6\text{C}$  は電子捕かく又は  $\beta^+$  崩かいのいずれかによって  ${}^{11}_5\text{B}$  になるがその際  $\nu_e$  検出は低エネルギーの為無理で X-ray か Auger 電子をとらえることによって間接的に証明するしかない。それらは  ${}^{11}_6\text{C} \rightarrow {}^{11}_5\text{B} + \text{X-線} + \nu_e$ ,  ${}^{11}_6\text{C} + e^- \rightarrow {}^{11}_5\text{B} + \nu_e$ ,  ${}^{11}_6\text{C} \rightarrow ({}^{11}_5\text{B} + e^-) + e^+ + \nu_e$  等である。これもその根底には  $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$  がある。

#### §4. 哲学的諸見解

さて次に著者のやや主観的で身勝手ではあるが、ニュートリノへの見解をのべることにしよう。 $\beta$ 崩かい等ニュートリノの関与する反応の背景には左利きの弱い相互作用があり、左右のつまり空間 parity が極度に破れていることに言及したが我々はこの事と、日常に見られるよりマクロの現象例えばアサガオは右巻き RNA も右巻きとか生物のアミノ酸は L 型のみとか水晶の様な鉱物の左水晶とかいった左右の対称性の破れとは直接何にも関係がない事である。云う迄もなく弱相互作用の到達距離が  $10^{-16}$  cm 以下で、とうてい日常的な非対称現象にはその作用がおよばないからであろう。従ってホップ (植物) が左巻きしかないことを弱い相互作用に帰因させることはできないだろう。化合物や生物での非対称は初期条件による全く偶然的なものと考えざるを得ない。

次に手ごわい「時間」問題に移ろう。時間の非可逆性である。大概の物理法則をあらわす方程式は  $t \rightarrow -t$  の変換に対し不変であることは周知の事だが現実の世界では時間の矢つまり一方向的であるのは何故かとの問題である。

「時間そのもの、(それ自身)」と云うのはおよそ無意味であり H. ワイルのとなえた様に時間、空間、物質 (素粒子) の少くとも三者をエコロジカルに捉えなくてはならない。今素粒子の代表者としてニュートリノをとることにしよう。そのエネルギーを  $E_\nu$  とすれば、この相対論的なエネルギーは  $E_\nu = c_0 \sqrt{p^2 + m_\nu c_0^2}$ , ( $c_0$  は光速) となりこれは常に正であろう。 $E_\nu > 0$ , この事は時間の矢を示しているのではないだろうか。ニュートリノ capture の反応の平衡定数は 0 に無限に近いだろう。Big Bang 以来膨脹がつづく限りは。そして全宇宙の見えざる質量の大半がニュートリノであることはほぼ間違いないとすれば、宇宙の進むべき運命も大部分がそれがなう筈である。宇宙開びやくからわずか 1 秒以内はニュートリノは電子を仲介としてフォトン  $\gamma$  と相互作用していた。すなわち  $\nu_e + \bar{\nu}_e \leftrightarrow e^- + e^+ \leftrightarrow 2\gamma$ ,  $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu \leftrightarrow \mu^+ + \mu^- \leftrightarrow 2\gamma$  の反応である。大宇宙の寿命はニュートリノがにぎっていると云える。GUT の理論では陽子すら永遠に存続出来ないと云う。そこではレプトン数すら破れその主要な崩かいモードには  $p \rightarrow e^+ + \pi^0$  以外にニュートリノ放出の  $p \rightarrow \bar{\nu} + K^+$  のモードがより有望視されている。R. クラウジウスはかつて熱力学第二法則で宇宙もエントロピー  $S$  の最大化に向くと表明したが今日ではこれには疑念の余地はある。所がである、フォトンやニュートリノの総数が  $10^{90}$  のオーダーであること、そして全宇宙のエントロピー\*もやはり  $10^{90}$  であることを考えれば何か偶然の一

値以外の理由があるのかも知れない。この様にニュートリノ問題はごつい問題を提起し、その故科学者のみならず哲学者が取り上げても充分手ごたえのある問題となろう。一つの結論としてニュートリノ捕かく反応が有勢になることはまず無いであろうが、仮にあるとすればそれは宇宙が膨張から収縮へ転ずる時であろう。当然時間の流れの矢も逆転するだろう。かくして古代ギリシャ哲学の「自然は真空を嫌い」のテーゼ及び「エーテル( $\alpha\theta\eta\rho$ ) 説」はまがりまがって 19C 末に一度否定されはしたが今世紀後半に復活したとも云える。つまり宇宙空間は一見真空だがその実、重力場、光子場とりわけニュートリノ場によって充満されつくしているからである。 $\alpha\theta\eta\rho$  には「永遠に走る」意味もあり正に $\nu$ はその様にふるまうのである。何者にも進路を妨害されずにである。逆に真空すらエネルギーさえ十分与えれば物質化すると見られている。一見言葉のあやの様だが時空のゆらぎ、真空のゆらぎは素粒子と益々同一視されて来たのである。従ってニュートリノが他の粒子に比べてきわだってわずかな質量しか持たないかの理由はおそらくごく低目のエネルギーが真空に与えられただけで、他のものよりも容易に対発生し容易に対消滅するからではないだろうか。それ故事実上ニュートリノは真空と、長い間区別がつかなかったのだろう。極度な検出困難性の原因であろう。太陽ニュートリノですら検出至難であるのはこの為の違いない。

かつて偉大な先駆者達例えば L. de Broglie<sup>®</sup> は光のニュートリノ説つまり $\nu\bar{\nu}$  対からフォトンができるのではないかとし又彼の物質波の考えからフォトンの静止質量に  $<10^{-50}$  gr を与えたことすらあった。 $(\nu_0 = m_0 c/h)$  更に量子力学の大家の Bohr も重力子とニュートリノとの関連について論じ又 G. Gamov は $\nu\bar{\nu}$  対こそスピンの2になり重力子の代替になるのではないかとの大胆な示唆をした。大いに謎めいている。(\*エントロピ S はおよそ  $kN\nu$ )

## §5. ニュートリノ反応

弱い相互作用の selection rule は内部量子数たる S とアイソスピン<sup>®</sup> I により  $4S = \pm 1$ , (0) 及び  $|4I| = 1/2$ , (0) になる。さてニュートリノの関与する反応は  $\beta$  崩壊やニュートリノ捕獲反応  $\nu + n \rightarrow p + e^-$ ,  $\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+$  以外に次の諸反応が考えられる。<sup>4)</sup>  $\mu$  捕獲  $\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$ , K 崩壊として  $K \rightarrow \pi + \mu + \nu$  と  $K \rightarrow \pi + e + \nu$ ,  $\pi \rightarrow \mu$  崩壊, ハイペロン重核子の  $\beta$ -decay 例えば  $\Lambda \rightarrow p + e^- + \nu$ ,  $\Sigma^- \rightarrow n + e^- + \nu$ , きわめて稀な  $\pi^\pm \rightarrow e^\pm + \nu$ ,  $\pi^\pm \rightarrow \pi^0 + e^\pm + \nu$  の崩壊等である。 $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ ,  $K^- \rightarrow \mu^- + \nu_\mu$  はすでに言及した。 $\Lambda$  崩壊いは  $\Lambda \rightarrow p + e^- + \nu_e$  か  $\Lambda \rightarrow p + \mu^- + \nu_\mu$  のいずれかである。他方禁止プロセス<sup>4)</sup> としては,  $\nu_\mu + p \rightarrow e^+ + n$ ,  $\nu_\mu + n \rightarrow e^- + p$  は起らない。レプトン数  $l_e \neq l_\mu$  は事実だから  $\mu^+ \rightarrow e^+ + e^- + e^+$ ,  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \gamma$ ,  $\mu^- + Z \rightarrow e^- + Z'$ ,  $\Lambda \rightarrow n + \mu^+ + e^-$  はいずれも起り得ない。(しかしこれら禁止課程でもニュートリノ捕獲反応よりは反応確率は高いのではなからうか)。 $\nu_e + {}^{37}_{17}\text{Cl} \rightarrow e^- + {}^{37}_{18}\text{A}$  すなはち  $\nu_e + n \rightarrow e^- + p$  は禁止されるのでこのことか  $\nu_e \neq \bar{\nu}_e$  らが結論され Majorana のモデルは不利になる。 $\nu_\mu \neq$



$\bar{\nu}_\mu$  も正しいであろう。 $\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$  の如き電荷移行のない中性プロセスでは  $Z^0$  ボゾンの仲介があるべきことが弱いゲージ理論から予言され実際に見つかりその上にくり込み可能性<sup>11)</sup> がオランダの t'Hooft により証明されたため弱い相互作用の理論は電磁的相互作用と同じ位信頼される理論となった。 $Z^0$  ボゾンによる中性カレントは又宇宙論でも大きな力を発揮し従来の理論を変更するに到った。弱い相互作用は大変ヴァリエティがあって一見秩序性が欠けてるかの如く感じられる。Parity は極度に破れ空間パリティも荷電パリティも破れており更に CP のパリティすらたまに破れておる。又 K 中間子崩壊の  $\theta-\tau$  の謎<sup>9)</sup> も我々の記憶に新しいであろう。その数学的繁雑さから弱相互作用は決して基本的なものではないと主張する学者も少なくない。いかなる秩序性が存るのだろうか？

電磁的相互作用を手本として、弱い相互作用の理論は Fermi の  $\beta$  崩壊時の  $e^-$ ,  $\nu_e$  対発生に対しこれが空間の一点で接触型の相互作用として扱ったのが最初で、はじめからくりこみ不能の理論であった。普遍結合定数の存在と極性ベクトル型 (V) が想定された、ガモフとテラーはもう一つの軸性ベクトル型 (A) を追加し1957年頃には V と A のほぼ等量の混合、つまり V+A ではなく V-A の理論<sup>⑧⑨</sup> が確立した。V-A 理論はすべてのクォーク対やレプトン対に拡張することが出来ることがわかり、弱い相互作用の本質が判りかけて来た。例えば  $\mu$  捕獲  $\mu + n \rightarrow p + \nu_\mu$  は  $(u, d) \times (\mu, \nu_\mu)$  によって理解出来る。強い相互作用に対し弱いそれは傾斜しており、2種のクォーク間の混合角がカビボ角、3種の混合が小林、益川<sup>⑩</sup> 角であるが後者の方が自由度がふえて K 中間子の崩壊等の CP 重複変換の破れすら説明できる様になったのはすばらしい事であった。先述のくりこみ不能の理論では弱ボゾン  $W^\pm$  等の質量は  $\infty$  になってしまうのでまづいし  $E_\nu$  が大きくなるにつれて断面積  $\sigma_\nu$  もどんどんふえてしまい矛盾することになる。ユニタリ制限があるべきでそれは  $5 \times 10^{13}$  eV 当りと考えられそれに対応する距離はほぼ  $10^{-17}$  cm となる。

そうゆう理由で Yukawa 型の方が本質的に正しい事になった。中間ベクトルボゾンは有限値を持つことが CERN で実証されたからである。弱相互作用は湯川型<sup>10)</sup> の方が Fermi 型より、より電磁相互作用との対応性が優れていることがわかる。更に、中性カレントすなわち  $\nu_\mu e^- \rightarrow \nu_\mu e^-$  では  $Z^0$  ボゾンのみが仲介に関与し他方  $\nu_e e^- \rightarrow \nu_e e^-$  反応では  $W^-$  でも仲介が行われることは印象的である。終末期の星のニュートリノ放出は N を核子として  $\nu + N \rightarrow \nu + N$  の中性カレント相互作用が生じることが1973年の CERN の Gargamell 装置<sup>11)</sup> で確認されて、一般に認められ欧州の面目が一新されたのだった。弱相互作用が電磁的相互作用並みに信用されるに致ったことは先述の通りである。

## § 6. 根元物質の一つと考えるよいか

ニュートリノは又 de Broglie 等の「スピノル統一場の理論」の為の条件を満たし、物質階

層をクォークとレプトンで終りと考える限り根元的素粒子と考えざるを得ないだろう。本論文では第二世代のニュートリノ  $\nu_e$  と  $\nu_\mu$  迄しか論ずる余裕がなかったがかなり最近の CERN の報告では SPSS 加速器での実験から第七世代迄はあるだろうとのことである。この事から宇宙のごく初期では反粒子迄考えてレプトン、クォークの総数が56個あった事になるのではないか。つまりニュートリノの種類(世代数)が物質粒子の数迄決め得ることになる。そして  $\nu_e$  と  $e^-$  の違いは弱アイソスピンの差<sup>11)</sup>に由来する事つまり電子から電荷が脱落したものが  $\nu_e$  と考えられている。電子に質量があるのは電子場との自己相互作用の結果と解釈され、その限りではニュートリノの質量を0としても一向に矛盾しないだろう。普通の化合物質は第一世代つまりレプトン二重項 ( $\nu_e e^-$ ) とクォーク二重項 ( $u d$ ) のみですべて再現され得ると考えたい。そうすると第二世代以降の存在理由は完全にわからなくなるであろう。尤もクォーク二重項の方は ( $u d'$ ) と世代数のごくわずかに保存しなくなるだろう。 $d'$  はカビボ角回転による混合の為である。ニュートリノの挙動等に関しては尚本質的で言及出来なかったことがあるが、この宇宙を満すメディウムとして又多分根元粒子でもあるニュートリノの謎は尽きない。 $\nu_e$  の質量は0としてもよいが電子の質量の10万分の1位はあることは否定できない。宇宙は1 cm<sup>3</sup> 当りどんなに少く見積っても常に数百ケ<sup>⑥</sup>は下らないだろう。それは正に永遠に時を刻むマイクロの時計でもあろう。Planck の時期ではニュートリノは完全に閉じ込められていたがその時の宇宙球の密度は核密度 10<sup>94</sup> g/cm<sup>3</sup> をはるかに上まわる 10<sup>14</sup> g/cm<sup>3</sup> であったとされ 1/100 秒で  $\nu_\mu$  は他の粒子を作用しなくなって逃げ去ったであろう。尚 $\nu$ はいわゆる CPT 定理も満たしている。

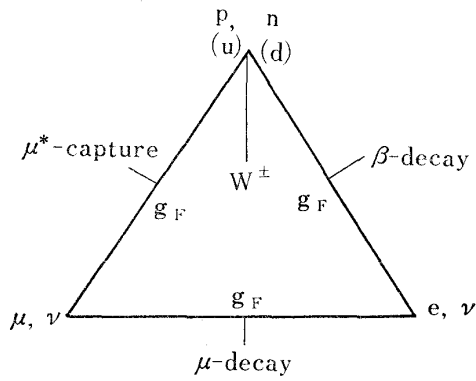
## お わ り に

約25年位以前はレプトン族として ( $e^- \mu^- \nu$ ) が又バリオン族として ( $p, n \Lambda$ ) の三組セットのモデルが考えられたが今日ではいわゆるゲージ群 SU(2n) で整理されると見做される。そこでは「世代数」が良い量子数となる様だ。SU(2n) 群には強弱二種があるが後者に従って表わせば以下の通りになろう。GUT は SU(3)<sub>c</sub> 以外に SU(3)<sub>f</sub> 8重子を想定している。Lは左巻きをヌノはカビボ混合後のクォークを示す。

$$\begin{array}{l} \left( \begin{array}{c} \text{I} \\ u \\ d' \end{array} \right)_L \quad \left( \begin{array}{c} \text{II} \\ c \\ s' \end{array} \right)_L \quad \dots\dots\dots \left. \vphantom{\begin{array}{c} \text{I} \\ u \\ d' \end{array}} \right) \text{弱アイソスピンの差} \\ \left( \begin{array}{c} \nu_e \\ e^- \end{array} \right)_L \quad \left( \begin{array}{c} \nu_\mu \\ \mu^- \end{array} \right)_L \quad \dots\dots\dots \left. \vphantom{\begin{array}{c} \nu_e \\ e^- \end{array}} \right) \quad \prime \end{array}$$

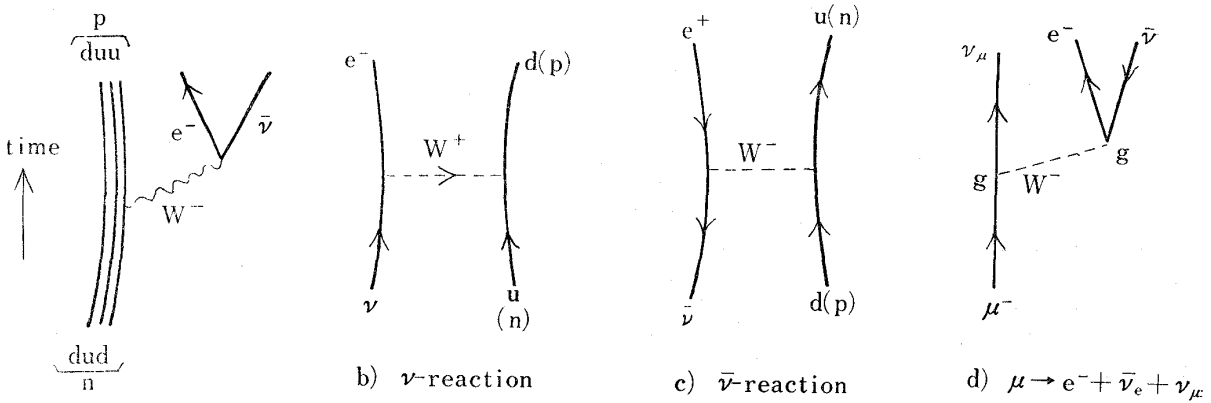
さて強い力がカラーCの滲出しと考えれば弱い力はメタカラーのそれつまり残留力と考えられよう。かくしてニュートリノは光電子と電磁波に次いで第三のパラダイムをきめる基本的粒子と呼んで良いであろう。

—以上—

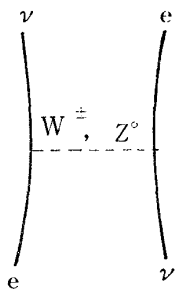


(  $g_F$  は普遍フェルミ定数  
 中央は weak ボゾン  
 核子 p は (u), n は (d) とクォーク表示が可能  
 \*  $\mu$ -capture では,  
 $\mu^- + {}^{12}\text{C}(1) \rightarrow {}^{12}\text{B}(0) + \nu$  等あり。

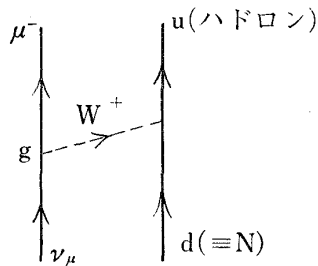
図1 Puppi の三角形 (改良型)



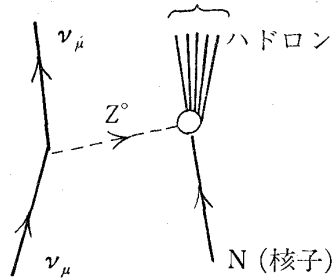
a) 中性子崩壊



e) 弱い力



f) 深非弾性散乱



g) 中性カレントの反応

図2 Feynman Diagram の例 (νがいずれも関与する)

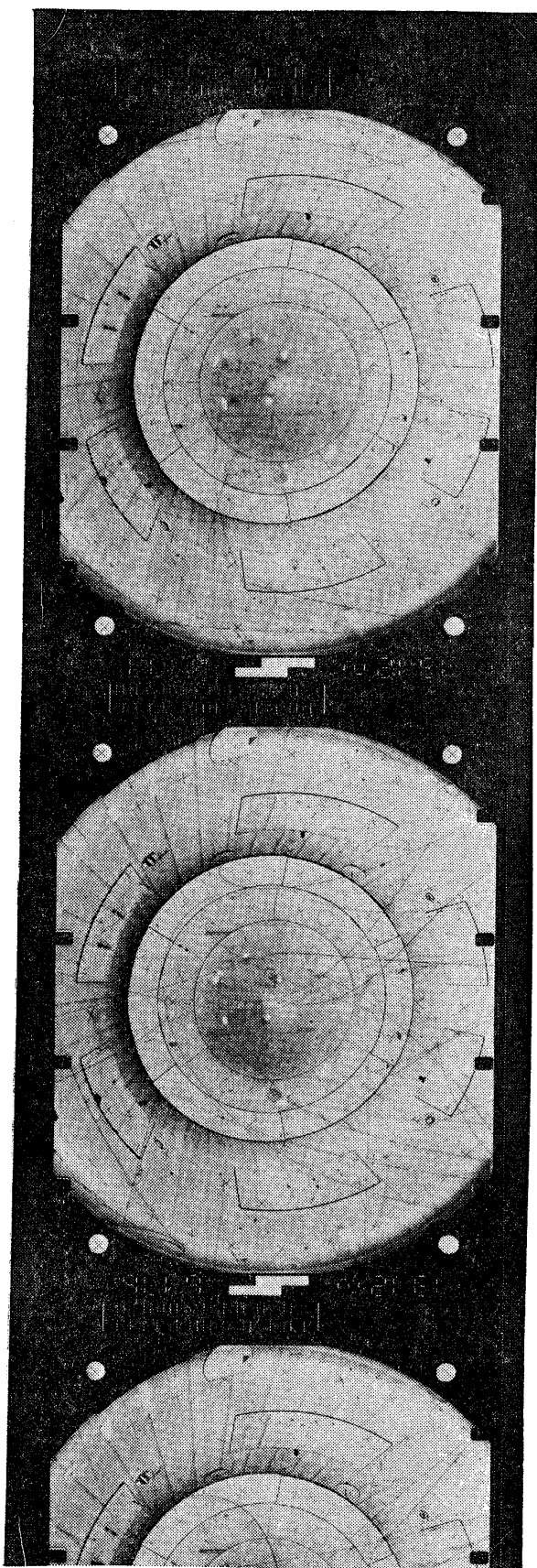


写真 1

有名な BEBC 液体水素泡箱で撮った 70 ミリのネガフィルムで '85年に CERN から恵贈されたもの。その目的はニュートリノ振動  $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$  を探る為との事である。 $\pi \rightarrow \nu_\mu + \mu$  等に於いて荷電中間子の径過もれを示すカーブが所々に見えるがこれは  $\pi$  が高エネルギーの為に伸々部厚い鉄のフィルターでも崩壊せず、径過し切れない為であろう。

その他に 1963 年頃に Brook heaven (米国) で  $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$  の事実が見出され、その直後 CERN (Geneve) でも追試がなされたがその時は Spark chamber を使って確認された事は有名である。

(写真 1 参照)

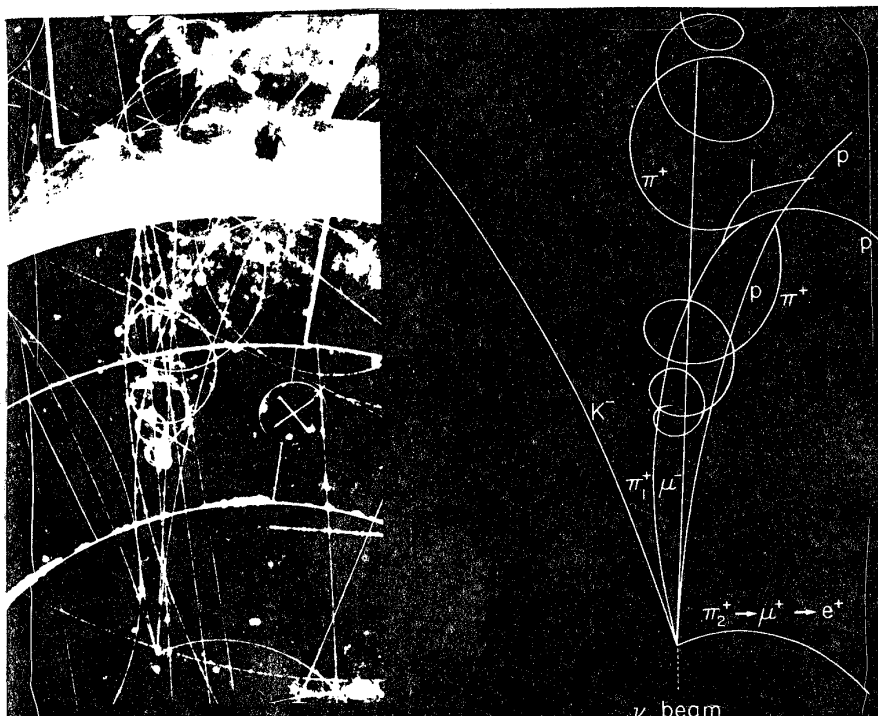


写真2 ニュートリノ反応により“charm”バリオンが崩壊したところ  
(深非弾性散乱実験) CERN より頂く。

〔註と参照事項〕

- ① 中性子は中間子シュレーバをもつ異常磁気能率を、中性であっても、持つがニュートリノは質点と考えられるので恐らく0であろう。
- ② 元来Tすなわち  ${}^3\text{H}$  は原子炉中にて  ${}^6\text{Li} + n(\text{slow}) \rightarrow {}^2\text{He} + {}^3\text{H}$  反応で造られ  ${}^3\text{H}(\text{T})$  の半減期は12年で $\beta$ 崩壊する。人体にきわめて危険。
- ③ 鉛100光年の厚さも軽々透過する。
- ④ 西独のGSI研究所でベバラク加速器によってNb核をNbのフィルムにたたきつけて中性子星と同様な超高密度をごく短時間造ったとのレポート<sup>6)</sup>もある。米国でも同じ試みがある。
- ⑤ 1950年迄米国に居たが同年ソ連に謎の亡命をした。彼地でもニュートリノの指導的役割をつづけている。拡散型霧箱での  $\mu^- + {}^3\text{He} \rightarrow {}^3\text{T} + \nu$  等の研究<sup>4)</sup>を続行した。尚巨大加速器でのニュートリノ実験の可能性を世界最初に提案した。彼が水爆開発に参加したかどうか不明だが興味のある所である。イタリアの名門の出身、ニュートリノ実験の大権威。
- ⑥ Majorana は Fermi の高弟、交換力、交換積分の考えを Heisenberg 等とともに提出した人物、Majorana 粒子とは粒子、反粒子が同じものであるとする立場、これは例えば  ${}_{33}^{76}\text{As}(2^-) \rightarrow {}_{32}^{76}\text{Ge}(0^+) \xrightarrow{\beta\beta} {}_{34}^{76}\text{Se}(2^+) \xrightarrow{\gamma} {}_{34}^{76}\text{Se}(0^+)$  で  $(\beta\beta)_{\text{ov}}$  モード<sup>6)</sup>のある可能性が指適されている。もし存在すれば  $\nu = \bar{\nu}$  とするのが自然に思える。しかし二重 $\beta$ 崩壊の起る確率はとてつもなく小さい。確実にそれを検出したとの報はない。
- ⑦ これは Doppler 効果を利用した  $\gamma$ -線共鳴吸収の実験。( )内は  $J^P$  つまりスピン、パリティ。  
とりわけ、リー、ヤン、サラム、ランダウ等により積極的に支持され復活された。

- ⑨ 理論式としては  $\sigma_\nu = \frac{P_\nu(E)}{c} = \frac{2\pi}{ch} |H_{fi}|^2 \frac{dn}{dE} |H_{fi}|^2 = C_V \int 1^2 + C_A \int \sigma^2$  等で与えられる。 $P_\nu(E)$  は反応 probability である。
- ⑩ index の C はカラー, L は左利きを又 Y' は弱い超電荷を示す。各項が Gauge 群である。
- ⑪ 古典天体力学ではこれは問題にならない。銀河系より大きなスケールでは利いてくる。
- ⑫ 当初彼は  $\nu$  と  $\bar{\nu}$  の平面波の重畳によって光の平面波が合成されるとした。彼は又物質波にも質量を与えた。フランスの貴族。フランス物理学の大ボスでもある。その fusion の説はどうも行きずまったらしい。
- ⑬ 仮想的荷電空間のスピンの中で、ニュートリノでは  $1/2$  の値をもつ。
- ⑭ イプシロン粒子 ( $C\bar{C}$ ) の予言, C はクォークの一種 "charm" である→フォト 2 参照。
- ⑮ 純水, 湖水, 深海の海水もニュートリノの detector となり得る。例えばハワイ沖の DUMAND 計画<sup>11)</sup> では海水を使う。但しノイズの問題は常にさげられない。
- ⑯ 宇宙論では他にも  $\nu$  発生メカニズムがある。例えば星のニュートリノ損失での大切なプロセスに電子対ニュートリノ, 光ニュートリノ, 制動輻射及びプラズマニュートリノ等である。
- ⑰ そのハミルトニアン表式<sup>5)</sup> は  $\beta$  崩壊では,  

$$\sqrt{2}H = [\varphi_p \gamma_\mu (c_V - c_A \gamma_5) \varphi_n] [\varphi_e \gamma_\mu (1 + \gamma_5) \varphi_\nu]$$

$$H = \frac{G}{\sqrt{2}} \{\varphi_p \gamma_\mu [1 - (c_A/c_V) \gamma_5] \varphi_n\} [\varphi_e \gamma_\mu (1 + \gamma_5) \varphi_\nu]$$
- ⑱  $\varphi_\nu \rightarrow \pm \gamma_5 \varphi$  の変換で Dirac 方程式は不変, 今  $\gamma_5 \varphi_i = \pm \varphi_i$  とおくことにより,  
 $E \varphi_\nu = \mp c \sigma \rho \varphi_\nu$  が得られるがこれを Weyl の方程式と云う。従って二成分  $\nu$  の helicity  $h$  は,  
 $h = \frac{\langle \sigma \rho \rangle}{p} = \frac{(\varphi c \sigma \rho \varphi)}{E} = \mp 1$ , 縦偏極の為  $h \neq 0$  でなくてはならない。
- ⑲ Parity の非保存は  $\nu, e$  の角度相関々数  $W(\theta)$  に奇数ベキの項が生ずる, つまり,  
 $W(\theta) = 1 - A_1 J \cdot P + A_2 (J \cdot P)^2 - A_3 (JP)^3 + \dots$  但し  $J \cdot P \equiv \cos \theta$
- ⑳ パラメーターが17個とあまりに多すぎるからである。
- ㉑ 宇宙モデルを決めるパラメーターの一つ。 $\rho_0 = 3H_0^2/8\pi G$   $H_0$  は Hubble 定数
- ㉒  $e^-, e^+$  は原子核のクーロン場の影響を受けるがその時の表式<sup>5)</sup> は,  
 $P(E)dE = G^2/2\pi^3 \int 1^2 F(\pm Z, E) p E (E_0 - E)^2 dE$ ,  $F$  は Fermi 関数,  $PE(E_0 - E)^2 dE$  は統計スペクトルと呼ぶ。
- ㉓ Wu の実験  $^{60}\text{Co}(5) \rightarrow ^{60}\text{Ni}(4) + e^- + \nu$  の GT 遷移。
- ㉔  $\nu + D \rightarrow N + N + e^+$  (Ponte Corvo, Reines の実験)
- ㉕ 個数密度  $n_\nu : n_\nu = g_\nu \int \frac{d^3 p}{(2\pi\hbar)^3} (e^{E/kT_\nu} + 1)^{-1} = \frac{3}{2} \frac{\zeta(3)}{\pi^2} \left(\frac{kT_\nu}{ch}\right)^3$

## (文 献)

- 1) Bild der Wissenschaft 1963 (8月号) Das Neutrino
- 2) 科学 Vol. 51. No. 3. 1981. 3. 中川昌美
- 3) 太陽ニュートリノ 桜井邦朋 Blue Backs
- 4) 物理学事典 ソ連科学アカデミー (USSR)
- 5) ベータ崩壊と弱い相互作用, 藤井昭彦共著 (培風館)
- 6) Parity (physical science magazine), 00, 01, 03, 04号 ('86)
- 7) 本学紀要 15号, 18号, 19号, 20号 (1985) 佐藤均
- 8) ゲージ入門, I. J. R エイチスン著 (講談社, Scientific) 藤井昭彦訳
- 9) Fysiken och människan p. 221~ T. R. Gerholm (AD出版)
- 10) クォーク: 南部陽一郎 (Blue Backs)
- 11) ニュートリノの謎 (素粒子と宇宙の構造をもとめて) 長崎順清 (サイエンス社)
- 12) 光と物質 桜井邦明 東京教学社
- 13) Newton 1982 Febr. Vol. 6. No. 2