

マクロ物理学の思想と世界観

佐 藤 均

Preliminary study on macrocosmic perspectives

Anfangsgründe der moderne Kosmogonie unter Berücksichtigung
der allgemeine Relativitätstheorie und Machsches Prinzip

von. Hitoshi Sato

アリストテレスは宇宙が無限の過去から始ったとしても又有限のそれから始ったとしても説明は可能だがそのいずれかは定められないと主張した。又中世のスコラ哲学者や Newton すらも聖書年代学で創世記の記述が正しいことを証明しようとした。ラプラスは脱出速度の考えから Schwarzschild 重力半径を見出していた。20世紀後半の今日我々は驚くべき多くの物理学的理論とりわけ相対論, 量子論, 超低温等の物性論, クォーク迄含めた素粒子理論を手にしており一方あらゆる電磁波やレーダーそして検出装置も手にしており急速に宇宙論が自然哲学から真の科学へと塗りかえられつつある。すべての天体は宇宙初期のマイクロな密度のゆらぎがいわば偽真空の異常インフレーションによって引きのばされたと考えられている。他方時間の刻みは例えば地球自転速度が大昔には今よりはるかに大きかった事から太古へ行く程つまっていると考えることもでき, つまり時間は不可逆的, 非対称的, 非等間隔的に経過すると思われそれによって宇宙のはじまりとか特異点が避けられると考える人々も居たが結局, Big-Bang 宇宙論つまり相対論的宇宙論では裸の特異点を回避することはできなかった。

しかしゼロとは云わない迄も無限小の空間にたとえ大きさのない素粒子でも全部入っていることがどうして出来たのか, 数年前だったら狂気としか云いようのない考えであった。

西欧人は我々と異なり「宇宙原理」や「完全宇宙原理」をそのまま原理そのものと信じているらしく, 決して万有引力場方程式を解く為の便義的手段等とは考えていないと聞く。一般相対性理論は実に長い間うそか本当かわからないきわものと考えられた時期があったが, 最近では 10^{-13} cm はおろか実に 10^{-33} cm 迄も成り立つと考えられ益々信頼されてきている様である。完全宇宙原理とは時間空間の一様性等方性を主張するもので, 三つの保存則をマクロの世界に引き延ばしたのものであろう。(E. ネーターの原理, 1918年)。時間については意外に我々は知り得ない。何しろ大哲学者等が生涯とり込んでももてあます代物である。その物理学的説明は若干は出来るのだがそれですっかり時間問題がわかったとするのは大きな錯覚かも知れな

い。普通は Newton の絶対時間を我々の常識的時間と思われている。Einstein に多大の影響を与えた Mach の原理も仲々のくせものであり、その適用をあやまれば危ないことになりかねない。(英国の Sciama は Mach の原理として $m_I = m_G \epsilon$, ここで $\epsilon = GM/RC^2$ を与えており M と R は宇宙全体の質量と半径, ϵ は重力の強さを示す重要な parameter で m_I , m_G は慣性質量と重力質量を示す。これは等価原理も同時に表わしている。つまり宇宙全体では、(Blackhole も) $\epsilon=1$ となり $m_I = m_G$ が導けるからである。)。終りに重力についてだがこれは常識的にはマクロ現象にのみその効果が現われると思われ昔から多くの天才等の頭をなやました *απορία* であった。特に二つの古典場たる重力場と電磁場との統一に致っては Faraday, Crooks, 否 Einstein 自身ですら首尾よい結果を与えなかった程である。だから統一理論なんか長い間「きわもの」と思われて来たのも無理はない。それが最近では Gauge 理論の復活に伴って四つの相互作用の統一可能性が考えられる様になったのは驚くべき進歩と云わなくてはならない。とにかくこの統一思考は何か物理学者の本能とも云えよう。 C_0 , G , h 等の物理定数は後々の生命起源にも左右するに違いなく、宇宙の初期から不変な筈で又不変でないで困る事が色々出てくる。しかし物理法則は開びゃく初期と今とは大変違う。つまり進化したと考えられる。恐らく物理法則が定常になったのは、輻射有勢から物質有勢に切り換った時からではあるまいか。時間経過の刻みも当然今よりはるかにせわしかつたに違いない。重力も地球ですら昔程強かったのである。尚ブラックホールとか膨脹宇宙を知る現代人から見れば 19 C. の R. Clausius の熱の死滅とエントロピー極大化の想定は単純すぎると云うより、むしろ誤りであることは当然である。膨脹することによって不断に熱的平衡に達するのが妨げられるからである。Blackhole の形成は information のそう失、つまりエントロピーが大きくなることを意味する。「情報量たる毛が脱落して二本*しか残らなくなる」とユーモア的に表現される故である。(*質量と角運動量)

科学革命以来 3 世紀間でデカルト流の Plenum による渦動の宇宙進化論から今日の相対論的膨脹宇宙論へと飛躍的に前進したのである。

◇ I. 宇宙は永久機関か？

太陽系や地球が出来てから 46 億年たち太陽は後 50 億年位は輝きつづけると云う。若し時間が永久ならとうに銀河、銀河団の星々は消滅しており、宇宙はその残骸で満たされている筈である。大宇宙の物理学の理論は一般相対論以上の理論は未だない。現在の宇宙は一見定常宇宙らしく感じられ、又物理法則も永久不変であるかに見える。銀河や原子もレプトンもハドロンも更には最近のクォークも永遠の太古からある様に感じられるが、最近の進化論的宇宙論 Big-Bang 説はその見解を見事否定する。ハドロンすら入り得ない程小さな宇宙が現にあったのである。それなら時間や空間もある一時期に生じたらうと急に気が大きくなる。Big-Bang の原

因は不明だが何か量子的ゆらぎによる偶然で始まったと考えられる。ごく初期では時間を計る時計は μ 中間子位しかない。今回はそう云うマクロの物理学を取り上げて論じて見たい。それは最も根元的な諸問題である。

◇Ⅱ. キリスト教思想と相通じた現代宇宙観

時間や宇宙の起源と云ったテーマはあまりにも根元的で primitive な性格を有し、それを物理学的にのみ論ずるのはもったいないのではあるがごく限られた期間で論ずるにはこれしかないであろう。周知の如くキリスト教的時間とはその期間が無限ではなく明らかに創造から始まり、それ以前には何も無く又その終りは最後の審判迄と云う事になっている。しかも時間経過はギリシヤ以前の円環的なそれではなく、直線状に進行しいわば不可逆な時間である。直線的時間はデカルトをへて Newton の絶対時間(ついでに列挙すれば絶対空間)へと発展して行ったのである。絶対空間とは独立したこの絶対時間の概念は相対性原理を知る現代人においてすらなお物理学の健全な常識となって定着していると云えよう。同じく時間経過の一方性、不可逆性も19世紀の熱力学の確立とともにゆるぎないものとなった。従ってキリスト教も時間概念の形成にそれなりの役をになったと云えよう。創造から最後の審判迄と時間を限定し無限大の量を避けるこの傾向は確かに素っ気ない単純な感じを与えるのであるが、これはまさしく今日の最先端を行くと思われる相対論的宇宙論で云う所の Big-Bang 宇宙論の考えと相通じる所が無いであろうか。

つまり Big-Bang (正準大爆発)の瞬間が宇宙の創造時点に対応する。それ以前は時間も空間も粒子も無いのである。数学用語ではこれを裸の特異点(特異性)と呼びそこでは Einstein の一般相対性理論自体が崩れると考えられる。特異点ですべての物理的因果律も、切断されてしまうので(それ以前の世界は仮にあったとしても)問題にしないと突き離なすのである。 $\kappa\rho\nu\nu\sigma\varsigma$ の神は宇宙開びゃくと同時に生れたことになる。ともかく宇宙開びゃくの瞬間 t があった事は間違いないが、これが今から約 160 億年位と考えられ決して無限の過去ではない事だけは確かである。現代物理学は又すべての物質・素粒子も将来崩壊することを予言している。陽子崩壊実験等は正に今最も sensational な問題であろう。さて一方空間つまり宇宙のはての問題は昔から際限のない Aporia と考えられて来た。中世西欧の宇宙観ではその宇宙のはては明らかに恒星のちりばめられた天球により仕切られ、その外側はやはり問題にされなかった、ブルーノやガリレイによって天球構造は打ちやぶられ再び無限の宇宙にされてしまった。現代宇宙論ではそれにどの様に対処するのだろうか。かつて Einstein は未だ膨脹宇宙や光の Doppler effect による red shift が発見される以前に、彼の創った一般相対論に基づき、その幾何学はリーマン幾何学だが、正の曲率をもつ閉じた四次元的球のアイディアにより半径が約 770 億光年と算出した。今日から見れば過大な数値ではあるが、ともかく有限値を得たこと

は驚くべきことである。先刻宇宙開びゃくが今から約 160 億年位と云ったが元来この数値は、Hubble 実数 H_0 の逆数から求めたもので常に 2~3 割の誤差を含んでいる為、例えば地球の年令が 46 億年と考えられるがこの数値程は確かでない。ともかく仮りに 160 億年とすればこの事は地平線（正しくは粒子の地平線）が実在し、その大きさが 160 億年であることを意味する。現在は減速期にあっても尚膨脹プロセスにあるのだから、時間が経つと地平線迄の大きさも当然ふえつつける。しかし光や電磁波で交信できるつまり物理的作用の及ぶ範囲は現時点で 160 億光年をそれ程オーバーすることはない。従ってある意味では物理的宇宙が有限の大きさを持つと主張することは、地面線問題を考慮すれば間違っていない。

特に 1965 年の宇宙黒体背景輻射 (3°K) の発見は Hubble の膨脹則以上に強力に Big-Bang モデルを支持するものとして我々の記憶に新しい。

この光子の黒体背景輻射は宇宙が今より $1/1000$ 位小さくプラズマが中性化され宇宙が晴れわたり、透明化し原子が形成された時分に開放された光の残照であり、いわば地平線の存在に対応する。その地面線の所にいわば不透明な黒体輻射のカーテンがありそれ以遠は原理的に見えないのだと云っても良い。尚この発見は宇宙原理つまり大宇宙の物質分布が大局的に一様で且等方的であることを物理的に実証したとも見られる。すなわち 3°K の光子の輻射は不思議な程一様に全空間から入射されるのである。昔からある宇宙に、はてがあるかどうかの際限ない Aporia はこの地平線問題で首尾よく回避されることになったわけである。

膨脹が続く限り多くの地平線から逃げ出し遠ざかった少数の銀河や銀河団もあるに違いないがそれは観測にかからない、物理学では原理的に観測にかからないものは問題にしないと云う具合に突っぱねるのである。哲学者が考える全宇宙と物理学者の扱う全宇宙がそのサイズに於いて一致しなくても一向にかまわないことになる。

◇ III. 宇宙論の意義と人間

最近では一般相対性重力理論に基づく進化宇宙論 Cosmogony 又は Big-Bang 宇宙論が定常宇宙論にとって変った感がある。それはともかく宇宙論は我々に人間が全宇宙でどの様ないわれによって生じたか又人間のその中での位置を認識するのを助けてくれる。予想以上に人間学と連なる点があろう。プロタゴラスの言の如く人間は万物の尺度であらう。マクロの大宇宙とミクロの素粒子、クォークの両方を認識するのに最適なサイズのものこれが人間であらう。人間を 1 の大きさとすれば大宇宙は約 10^{45} に又サブ粒子 (lepton, quark 等) は 10^{-35} 程度にならうか。桁数で実に 10^{80} もの違いの両世界を人間は考えることができる。そして一般相対性理論は宇宙開びゃく直後の無限小のサイズから今日の約 100 億光年迄成立つと云ったとほうもない理論であり、これも人間の創作なのである。この最も壮大で審美性にあふれた理論も物理学的に実証することは現在でも至難であるが連星系や blackhole の様な「強い重力場」

でもその真価が発揮されると期待される。その理論はあらゆる天体、物質世界が老化消滅することを予言するのみならず時空もなめらかな状態からほころびたものへ老化することを示している。宇宙論的時間の矢が存在する。

◇Ⅳ. 四系統の素粒子と宇宙（現在のエンペドクレス）

前回の原子物理学的世界像の終りにゲージ理論によって四種の相互作用に統一される表をのせたが現在数百にもものぼる粒子も四つの系統に整理できることは興味深いものがある。

周知の如くスピンと統計の考えからフェルミオンとボゾンに分けられることは誰にも異議はなかろう。前者は lepton クォーク（つまり meson, hadron は quark ヰ分子々々と見做される）に又後者は ^{ゲージ}gauge boson と Higgs boson に分けられる。gauge boson はスピンが1で質量は元来0の糊粒子と考えられ、Higgs boson は有限な質量を生じさせる機構をもつ。大統一理論 GUT でも quark より下の ^{サブ}sub quark ^{クォーク}迄は考える必要がない様である。quark は決して単離されないが恐らく量子色力学 QCD がその理由を説明するであろう。勿論上述の四系統の分類には重力子（グラビトン）は、独立の素粒子としてみとめない立場である。これを入れると五系統になってしまう。グラビトンの存在のきざしは全くなく、何か純粋に、数学的 fiction の様にも思える。そもそも重力を量子化するとはどうゆう意味なのかも定かでない。大宇宙は素粒子の場と重力場によって充満されており、その意味では新たなエーテル（黒体輻射）に満ちていると云える。星、星間物質、宇宙線以外に lepton 族たるニュートリノや boson であるフォトンの存在領域が大宇宙と考えられる。ニュートリノは宇宙の運命をも直接左右する程重要な働きがあると最近考えられ、その個数は陽子をはるかに上まわり 10^{90} のオーダーと見られる。（弱い相互作用にのみ関係する）。

大統一理論 GUT ではニュートリノに有限の質量を許しもしこれが本当なら「見えざる大質量」として又宇宙膨脹速度にも影響を与え宇宙を閉じさせると思われる。現時点でニュートリノは ν_e, ν_μ, ν_τ の三種とそれぞれの反粒子を入れれば全部で6つあるがその間で共鳴（振動）していると考えられる。若し 10 eV の質量がニュートリノに与えられれば全宇宙の総質量の実に9割にも達すると算定される。しかも銀河団、超銀河団とスケールが大きくなる程ニュートリノの作用は著しく、重力に利いて来る。この粒子は慣通力が殆んど無限大で何者もその進路をはばむことはできないとされており、又電子より更に本元的原物質的存在であるが決して仮想粒子ではない。いわば電子から電荷を抜き取ったものと表現できる。H. Wyle が早くからニュートリノの従う方程式を提示しており明瞭に「カイラリティ」があることを示したものである。しかもニュートリノと反ニュートリノが消滅することなく共存できる事は全く不思議なことであり、最も謎めいた存在で更に宇宙初期では H/He の生成比にも決定的に影響を与えたと思われられる。重水素 D と He のみは Big-Bang 後数分以内に宇宙で創られたと

見做される。これは当然後の化学進化プロセスを運命づける意味をもつ。ひいては間接的ながら生命の存在にも影響する筈であろう。ともかく今のこの世界の实在こそ GUT の正しさを云わば証明するものであり、その理論は又何故これ迄にニュートリノの質量が感じられない程小さいつまり 0 であったかをも説明できると思われる。31 eV の上限値がニュートリノに与えられたとの CERN のレポートを読んだことがあるが今では特に不思議ではない。又 20 eV と云う上限値も報告されている。今年の正月にやはり GUT を証明する為の、神岡鉱山での proton-decay の話題でにぎわったが地下 1000 m の岩盤でもニュートリノの noise はものすごいものがあるであろう。proton の半減期 $\tau_{1/2}$ も 10^{31} 年より多少長い様である。proton-decay は元来 X-boson の巨大な質量の為凍結されたプロセスと考えざるを得ないがこれも大変興味深く意義深いニュースであった。この凍結がいわば質量保存則を我々の日常生活で保障してくれて物質崩壊を大きく遅らせていると考えざるを得ない。

「凍結」とは禁止程きつい要請ではないが宇宙のごく初期では破れた対称性が回復され重たい X・ボゾンが出現したであろうと想定されるのだが、「事実上禁止される」と云う意味であろう。換言すればすべて probability の問題であり、無視し得る程度の確率でしか起らないと云えるだろう。従って例えば十万人の内一人位は一生に 2~3 個の陽子崩壊を受けたとしても驚くには当たらないだろうしその chance はあろう。(ちなみに 50 kg の人体は $10^{26} \sim 10^{27}$ 個の proton があると計算されている) X- 粒子はバクテリアより重い!

◇ V. あっけない物理進化のプロセス

前述の様に宇宙開びゃくのごく初期では現在のいかなる高エネルギー物理学でも創れないエネルギーが例えば $10^{16} \text{ GeV} \sim 10^{20} \text{ GeV}$ でも易々と存在し得たのだった。それに反し人工的には将来も高々 $10^2 \sim 10^3 \text{ GeV}$ 程度でしかない。(1 GeV = 10^9 eV)

進化論と云うと普通は数億年から数百万年の間にゆっくりと進む生物進化を思い出すがそのプロセスが実験室で再現できないのでしばしば科学の仲間にかぞえるのに反対の意見も多い様ではあるがこの見解には同意できない。確かに進化論は再現できないが厳然として science であり決して形而上哲学等ではあり得ない。生物進化以前はやはりじわじわと進んだであろう化学進化、地球化学的進化があった筈だしそこではある程度 process を実験室的に再現できるがそれに反して宇宙初期の所謂物理進化となるともう手が出ない。物理進化は何んとあっけない過程であろうか。何しろ我々の感覚では殆んど一瞬の内に四種の相転移(正しくは真空の相転移)により対称性が破れ四つの力つまり相互作用が分化し終ってしまい宇宙開びゃくの数分以内に基本的粒子は勿論、宇宙の運命をになり水素、重水素、ヘリウムが形成してしまうのであるからである。Li, Be 元素は定かでないが炭素より重い元素は恒星内の核融合反応で形成され超重元素は新星大爆発寸前に中性子の補給を得て一ぺんに形成された。我々人間も考えて

見れば超新星爆発後に宇宙にまきさらされたチリから出来たのだが別に不思議ではない。しかしもっと不可解なのは今から約 170 億年位の宇宙の始まりでは全宇宙の諸々の物質（素粒子）が無小と云わない迄もたった $10^{-26} \sim 10^{-33}$ cm のサイズの中にすっぽり入っていた事実で、これは正に狂気としか云いようのない状態である。尤もその当時は銀河、原子はおろかハドロンさへ存在し得ず又時空が極端に曲がっていたことを考慮しても尚そうである。

そんな時期では物理法則自体が今とはおよそ違ったものであった筈だ。何しろ重力すらも他の三つの力（相互作用）と区別がつかず、いはば一神教的統一の完全な対称の時期で先述のニュートリノさへ他の粒子例えば光子と相互作用していた不透明な世界であり、およそ単調な世界であったろう。無論時空の曲率は無限大で Planck 時期つまり 10^{-44} 秒そこではサイズは 10^{-33} cm であるが超々高温で密度はゆくに 10^{100} g/cm³ をこえていた。それ以前は一般相対論が成立たなくなり、先述の裸の特異点では完全に破綻する。物理的因果関係の終点である。

◇ VI. 宇宙は無（重い真空）から生じたか

ゴムの厚板の様な弾性体を曲げた後手を離すと復元するが、強く曲げられた物体にはエネルギーが貯えられる。それと同様に極端に曲った時空は時間とともに、エネルギーを解放しつつ復元すると考えられる。所が場の量子論ではエネルギーと粒子は一体である。これは何もない所から素粒子が発生することを意味している。又場の量子論で云う真空では仮想プロセスではあるが、粒子対の生成消滅が絶えず繰返していると考えられる。それでは宇宙は一体何処から生じたのだろうか、何か「有」からであろうか。それならその有はどこから生じたのか……と又際限のないアポリアにぶつかってしまう。それなら一そう思い切って「無」つまり真空から生じたとする方が簡単である。ただしその過程が物理的に無矛盾のないように説明理由付けが可能としての話である。Newton 時代の真空とは文字通り何も無い事を意味したのでそれ以上真空の属性を云々するのは全くナンセンスであったが、今日場の量子論での真空にはきわめて豊かな属性がみとめられており、少くとも二通りの真空の定義ができる。

すなわちその一つは文字通り何も粒子のない状態を、又他の一つは粒子があってもそれが基底状態にある場合である。元々素粒子と云っても又場と云っても同じ事である。宇宙のごく初期の真空はエネルギーの高い対称性の高い状態でこれを偽真空（false vacuum）と云うがこれが GUT の時期つまり 10^{-35} 秒の時に確かに相転移を起こし「真の真空」に変化したと考えられる。つまりこれにより、自発的対称性の破れ（spontaneous break down of symmetry）が起り相互作用の分化が始まり次第に素粒子場の種類もふえ秩序が発生し物理法則も変容したと思われる。真空の相転移は確実にあったのである。結局何もない時空のエネルギーがじわじわと素粒子に転化したことになり宇宙が無から生じたと云ってもうそではないことになる。Higgs 粒子がぎっしりつまった状態が場の量子論で云う真空でもあるがこれが本当

なら無から有を生じる機構も決して無理ではないであろう。勿論現在の真空は（ハドロンの内側を除いては）対称性の破れた方の「真の真空」である。物性論で云う所の超低温超伝導の真空と云っても良いであろう。現在の宇宙の地平線内つまり物理的作用の及ぶ範囲では偽真空はも早ないと断言できる。つまりとっくの大昔に偽の真空はすっかり真真空で塗りかえられてしまったのである。その相転移の際当然の事ながら莫大な潜熱，エントロピーが放出されたがその量が又宇宙進化の運命を左右する。その量は約 10^{90} と概算されるがその様な莫大な数であればこそ我々が問題にし得る大宇宙に進化し得たのである。偽真空は重い真空とも云へる。

◇Ⅶ. 物理学の幾何学化の問題点

重力や重力場があまねく存在する限り幾何学的空間は物理空間と引き離して考えるわけには行かない。地上の我々の空間が厳密にユークリッド空間つまり曲率0のそれであるとはも早考えられないし又その保障は無い。しかし実生活においてユークリッド空間として扱える事実の理由は普通の物質の密度がそう大したことなく（ちなみに原子核密度は 10^{18} g/cm³ と莫大だが）又きわめて弱い重力しか働かないので非ユークリッド幾何との偏差が測定できない程小さいと考えざるを得ない。実際先駆者のガウスは実測したがその偏差を検出することは勿論できなかった。ユークリッド幾何学での公理定理は殆んどことごとく非ユークリッド幾何学で破綻することを我々は知っている。むしろ非ユークリッドの方がより普遍的で特殊な case としてユークリッド幾何学がその中におさまっている感じすら受けるし、実際うそなのである。二点間の最短距離が直線であるとの常識は非ユークリッド幾何学では、も早妥当しないことは明白である。幾何化学に時間を持ちこんで動力学化したものが物理学であろう。そこで結論を急げばユークリッド幾何学は正に Newton 力学に対応し、非ユークリッド (Riemann の) 幾何学が一般相対性理論に対応し又特殊相対性理論(ミンコフスキーの四次元時空)は擬ユークリッド幾何学に対応すると主張することができる。或いはピタゴラスの定理 $a^2 \pm b^2 = c^2$ で + がユークリッドに又 - が非ユークリッド又は擬ユークリッドに相当すると云えるかも知れない。($s^2 = l^2 - c^2 t^2$) 相対性理論では時間と空間が一応対等な資格で融合させてあるがその二つのものを結びつけるものは何んであろうか。実は光つまり電磁波なのである。従って天体望遠鏡は「時間鏡」でもある、つまり遠くを眺める程過去の世界を見ることになるからである。そこでは一符号のピタゴラス定理 $s^2 = l^2 - C_0^2 t^2$ が成立つ。右辺第二項は $iC_0 t$ を自乗したから和ではなく差のピタゴラス定理になった。($i = \sqrt{-1}$)。この事から推察されることは時間と空間 (又は距離) とは完全には対等ではあり得ない事である。相対論でも時間が空間に又その逆に空間が時間に易々と化けることはないことを物語るものである。(若し完全に両者が対等なら四次元距離 s^2 は $s^2 = l^2 + C_0^2 t^2$ とならなくてはならない。) $iC_0 t$ 中での虚数 i はだからぜひ必要なのである。

◇VIII. 弱い等価原理と強い等価原理

特殊相対性原理の質量とエネルギーの同等性を表わす式 $E=mc_0^2$ は今日の核エネルギー時代を象徴するものとして現代人の常識となったが一方一般相対性理論の出発点としての等価原理はそれに比べてなじみが薄い。重力質量 m_g と慣性質量 m_I は実に 10^{-12} の誤差で同等であるがこれを弱い等価原理と呼び、他方加速度と局所重力の同等性を強い等価原理と呼ぶ。ガリレイの落下実験は正に弱い等価原理を実証する意味をもつ。後者はいはば宇宙時代の物理に密接に関係し、局所重力は加速度運動で自由に消したり又逆に創ったり出来ることを意味している。特に強い等価原理の成立つ空間は曲がった空間つまり非ユークリッド空間を要請する。その等価原理は時間的にも空間的にも局所的にだけ成立する。近代物理学の一つの著しい特徴は局所的法則と相対化を求める所にある。Newton は大局的絶対慣性系の存在を主張しそれに反し Einstein は局所的慣性系へと変えてしまった。Newton にとっては回転運動こそ絶対運動であったが Mach や Einstein はそれすらも相対運動としてしまった。

そして真の力と見掛けの力（例えば遠心力、転向力）の区別もとりはらってしまった。極端に云えば若しも大局的慣性系が無くなると昔から論ぜられて来た地動説と天動説の区別すら相対化の為に消えてしまうのである。当然この点には異論もあるが Einstein の高い立場から云うとそうゆう事になるのである。

◇IX. 占星術の近代版たる Mach の原理

国家や個人の運命がはるかかなたの星々によって影響されると云う考えが占星術なのだがそれ自身は勿論サイエンスではない。所が地上の局所的物理法則が宇宙の大局的法則により支配され相互規定されると云う考えを Mach はいだいたが、これを Mach の原理と呼び現在一部ながら Sciama 等により証明されている。これを大担に拡張するとミクロの物理法則とマクロのそれが相互に規定される、とすることが可能である。実に驚くべき考えであるがこれが結構宇宙論に利用可能な事を Einstein は気がついた。

これがきっかけで一般相対性理論の重力場の方程式が出来上ったのである。Mach 原理の最も壮大な例はニュートリノの質量と超銀河国のサイズの関係とか同じくニュートリノの質量によって宇宙の形態と進化をどう変え得るかの議論をあげることができよう。全く異ったと思える二つのものを強引に因縁づけるこの危ない考えは Mach 原理と占星術に共通するのかも知れない。

その原理は未だ確証はされていないので、ある人々は「Mach の主張」と呼ぶべきだと提言している。この考えは全く狂気とも天才とも云える類のものであろう。

◇ X. マツハの原理と一般相対論

何事にも悟りの世界はある様である。およそ浅学な筆者が重力場の方程式を云々するのははばかれる様に思へる。実は今から約10年前に Gerholm の物理哲学史を translate しようと試みたがその原書にはどこを見てもその方程式は書いてなかった。あわてた筆者は図書館に駆け込んでその式を探し求めた、つまり私にもその世界は全く未知だったのであった。アインシュタイン全集を調べてもあまり多くの数式が羅列してあり、どの等式を選んで書くべきかもすっかり迷ってしまった。やっとの事で探り求めた式は何んと $G_{ik} = \kappa T_{ik}$ であることが判明した。こんな簡単そうな式に全物理学的世界が秘められているとはとうてい信じられなかった。何んとか悟ろうとこの式を拝んで見たのだがあわれにも徒労に終わった。

まるで密教の秘儀を悟るのに似た困難さを感じたのだった。つらい数学的修業が必要だった。それはともかくその等式の左辺は時空の容器を示す Einstein の対称テンソルを、又右辺の T_{ik} は中味である物質のエネルギー運動量テンソルを、又 κ は Einstein の重力定数を示す事だけはすぐわかったが問題はそれからだった。突き進むにつれその唯一の等式が実は非線型二階偏微分方程式の10元連立方程式の組と云う恐ろしいものであることが判った。第一、非線型偏、微分方程式などは数学的に解けないと云うよりはその為の公式等存在しないから大変である。左辺は実は $G_{ik} \equiv R_{ik} - \frac{1}{2}g_{ik}R$ なのだが重力が g_{ik} と云う二階対称テンソルの場で記述されることがきわめて重要である。

真の重力がある為の条件はリーマンの曲率テンソルが $R_{ik} \equiv 0$ であり、このことは空間が曲がることを意味し、相対性理論は重力を幾何学での曲率と同定したことになる。その理論では重力ポテンシャルが $S_{ik}(i, k=0, 1, 2, 3)$ と云う10個の関数を使わなくてはならずそれより節約は出来ない。だから測地線たる不変量 S^2 はピタゴラスの定量で合成されるが通常10個の項から成ることになる。「曲がり」と云っても文字通りに目で見えるわけではない。非ユークリッド幾何学では曲率とは変換移動によってどのようにゲージが変形されるかを示す一つのパラメータにすぎない。 $R_{ik} - \frac{1}{2}g_{ik}R = \kappa T_{ik}$ の式で左辺は時空の曲がりの度合を数学的に表わしたもので右辺は現象論的に見た物体の運動状態を意味し、この式はどの様に物体が非ユークリッドの計量により四次元の時空を測地線のカーブに沿って動くかをあらわす。Newton のゲージは剛体に近い物指しだが Einstein のは何か軟体物質の様にしなやかな巻尺であり、これをよく「アインシュタインの軟体動物」と云って物理学者の間でも気味悪がられている。つまり四次元連続体の計量での軟体基準系が考えられている。(この考えは、時空の各点で任意に座標がとれることを主張する Gauge 理論を生むことになるに違いない。H. Wyle は実際先刻の等式を詳しく吟味した際 Gauge 理論の先駆的考えに達した。その理論は素粒子に、局所ゲージ変換をしても観測量は、不変であることを主張する大変高尚な理論である)。さて先述の

Einstein の場の方程式で常数 k を省けば $G_{ik}=T_{ik}$, $i, k=0, 1, 2, 3$ と表わされるがこれはマクロとミクロの世界を直かに連結するので疑いもなく Mach の原理を具体化したことになる。だが完全に Mach 原理を再現してるかと云うと必ずしもそうではない。何故なら一般相対性理論は空間構造が物質（素粒子）の分布できまると定式化したわけだが、それは出来上ったものは偏微分方程式で表現されそれを解く時は初期条件が必要だから空間（容器）の構造は物質（素粒子）の分布だけでは決定できないからである。今日コンピューターが万能視されてはいるが、上述の等式だけはプログラムの作り様がなく解くことは不可能であると考えられる。それ程難解なのである。戦後では Kerr 解と京大の T.S. 解があるだけである。（厳密解の存在）。しかし我々にとって救いなことには、かつて H. Poincaré が指適した様に上の難解な等式も宇宙原理を仮定すれば Newton 的ユークリッド的に書き直せる事実である。それは保存則の形でも表わせる。格好な代用物があると云ってもよい。そこでは時空やかはり時間と空間に separate される。その一例は、光速 $C_0=1$ と取れば次の様である。

$$\frac{1}{2}\left(\frac{da}{dt}\right)^2 - \frac{GM}{a} - \frac{\Lambda}{6}a^2 = -\frac{k}{2} \quad \text{①, ここで } G \text{ は Newton の万有引力定数, } M \text{ は宇宙半径 } a \text{ に含まれる総質量, } \Lambda \text{ は宇宙定数, そして } k \text{ は } 0 \text{ 又は } \pm 1 \text{ である。左辺第 3 項は宇宙項である。}$$

代用式は色んなものが考えられるが、 $\left(\frac{da}{dt}\right)^2 - \frac{8\pi G}{3}\rho a^2 = k$ ②, なんかでも良いだろう。 ρ は密度で $M=(4\pi/3)\rho r^3$ の関係がある。更に Hubble 定数 H_0 や critical density ρ_c を使った式 $\ddot{a} = -\frac{1}{2}\frac{\rho}{\rho_c}H_0^2 a$ ③, でもよいがとにかく変種が色々考えられる。これらの代用式なら比較的容易に宇宙膨脹運動のイメージと結びつけることが出来事実、時間と膨脹率の関係を色々な宇宙モデルに対して一義的に画くことが可能になる。確かに Poincaré の program は正当であった。ついでに云えば「相対性原理」とか「ローレンツ変換」の用語も彼が命名した。Einstein の偉大な先輩である。「特殊相対性原理」も Poincaré と Einstein がほぼ同時に且独立に発見したと見做される。一般相対論は勿論 Einstein のみの孤高の理論で、Newton 力学から特殊相対論（平坦時空の）への飛躍よりもむしろ特殊相対論から一般相対論へのそれははるかに大きなものであろう。要するに後者は計量テンソル g_{ik} とその微分からつくられる曲率テンソル（Ricci の）はマクロな容器であり、一方物質（素粒子）のエネルギー運動量密度をあらわす対称テンソルは、ミクロ的なもので中味であるが、この容器は Newton 力学での受働的なものではなくもっと能動的な役をし、中味の状態によって容器たる時空の構造も影響されると云った大きな思想である。両者の相互作用の為に微分方程式も非線型になると云うわけである。先刻の京大の T-S 解は裸の特異点を出現させ因果律にふれるものとも考えられるが哲学的には大変面白い。何故なら空間的にも時間的にも閉じた世界線になり特に後者では未来へ進むと過去へ行くことをも意味し、これは正にギリシヤ時代の円環的時間の現代版ともなると思われるからである。又 Blackhole が、周囲の空間をひきずりまわす考えも重要で興味深い。アインシュタインの方程式自体、時間的に閉じた因果律に抵触する解をも許すことを意味している。結局 Einstein は、エレア学派の伝統を現代化したと云う

Gerholm の主張もここで良くわかる気がする。

◇ その他の諸問題

光子黒体背景輻射以外に若しニュートリノ背景輻射が見つかるなら大変すばらしいことで益々進化宇宙論の正しさを確証することになるろう。なにしろそれは宇宙開びゃく約1秒後で100億度の温度で又現在の大きさとの比で100億分の1の世界が確実にあったことになるからである。更に磁気単極子 (monopole) が少数でも見つければ GUT の 10^{-36} 秒の世界の實在の手がかりになる、がこれは proton-decay の実験より一層困難であろう。GUT 時期では 10^{16} GeV と云う途方もない超高エネルギーだから今のような破れた対称性は回復して monopole のシャワーがあったと予言できるからである。又ハドロンやメソンの素粒子が在る事自体真空の相転移が仮空の考えではなく物理的に意味があることを物語る。ハドロンの内側は偽真空で外側は対称性の破れた真真空である。後者は超低温の超伝導真空と云っても良い。(quark のとじこめ機構)。場の量子論での真空は、観測されることはないが自己相互作用するスカラー粒子 (Higgs スカラー) のびっしりつまったものと呼んでおり普通の化学物質と同様に相転移が許される。CERN でも monopole の検出は不可能だった。t-クォークが CERN で検証された。

◇ 総括と或る予言可能性

人類の様な知性が出現したのは宇宙開びゃく後およそ200億年かそれより少し短い時間たつてからだった。時間の問題は想像以上に困難である。つまり時間はそれ自身では定まらない。空間にしても物質の助けなしには説明し得ない。又素粒子それ自身では無意味でありプラトンの言の如くそれは結局数学的幾何学的形相にすぎない。すなわち素粒子等は共変性条件の関数の概念的担体として現われるものに過ぎない。はたして時間、空間、粒子等は人間の意識の内だけに存在するのか否かも明確ではない。これらは客観的實在たり得るものかどうか。時間に関する物理学は今大戦の当時からそう進んでいない。特に19世紀のエントロピーと時間の矢、量子力学の観測問題そして相対性理論が特に革命的な考えと呼べる。宇宙に関してはそれが物理学的に論じられるのは最近の事で長い間神学、哲学、形而上学の問題であった。宇宙論でダーウインの役を演じたのはロシア生れの G. ガモフであり、又相対論の解明をした同じくロシアの A. フリードマンと云える。当然の事ながら宇宙進化論は20世紀中葉に入っても尚論敵と闘わなくてはならなかった。Hubble 定数 H_0 の最良の観測値も $H_0 = 55 \pm 7 \text{ km/s. Mps}$

(註) Newton の万有引力法則にとって代わる式は $R_{ik} = \lambda g_{ik}$ で Ricci のテンソルが各点でリーマン計量 g_{ik} に比例することになる。

(Mpc=10⁶ pc, 1pc=3.26 光年) と誤差は少くない。だから宇宙年齢は 7,5・10⁹年~19,5・10⁹年の間にあることになる。

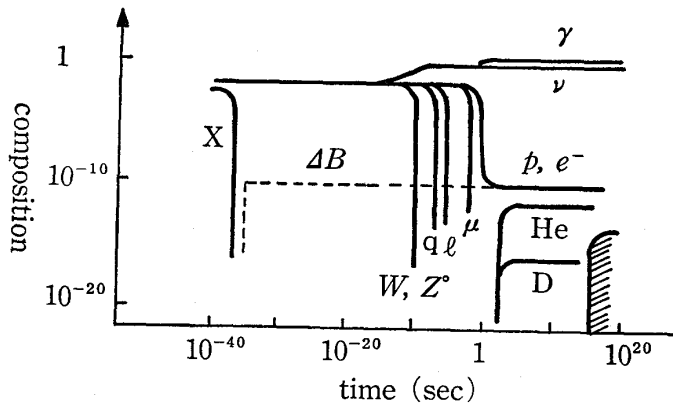
それにしても定常宇宙観にくらべて膨脹宇宙論は何んと多くの事を説明しなくてはならず又説明が可能な事であろうか。その為には又きわめて多くの現代物理学からの基礎知識を借用しなくてはならなかった事を我々はすでに見て来た。宇宙原理も Mach の原理もいや一般相対性理論すらも完全に証明し尽くされたわけではないにも拘わらず現代宇宙論に不可欠である。かようにして、例えば現在の大きさを1として10⁻⁴⁴秒後にサイズが10⁻³³で時空の構造が出来、10⁻³⁵秒で10⁻²³のサイズの時に物質と反物質に差が生じたとか10⁻⁵秒後では、サイズが10⁻¹²でクォークからハドロンが出来たとか、又10³秒後で10⁻³のサイズではH₂, Dが合成され、ついに10万年後でサイズが10⁻³の時に電子の霧がはれて透明化してプラズマから原子がつくれ、10⁸年で今より1/10のサイズで銀河団が形成された等々が面白い様にポンポンと算出することが可能になると云う次第である。同様に相対論的宇宙膨脹論が正しければ莫大な未来についても予言ができよう。例えば10¹⁵年後は星が輝きを失う、10²⁰年後には銀河が崩壊する、10³⁰後には陽子も崩壊が始まる、10⁷⁰年後にはポジトロニウムが形成されるが、10¹¹⁶年後にはそれすらも消失しさびしい世界になる等々である。但しこれは膨脹が続くとしての話で収縮に反転すればどうなるかわからない。その際は振動宇宙となるのかどうか。

現代宇宙論も未だ謎が多すぎ結局パラダイムの中にあるが、しかし決してちやちや「おとぎ話」ではないと思う。又形而上哲学でもない。時間、空間いや素粒子の全体像すら定かでない現在ではあるがこれはれっきとした science なのだと信ずる。古代ギリシヤから発した宇宙の問題は再びギリシヤの考えに帰るのかも知れない。この *aporía* は、はてしなく続くに違いない。最後に結論として一言すれば、時間とは素粒子やその相互作用そのものではないが、素粒子の内部空間たる属性のアドレス番号の一つかも知れない事である、更に宇宙膨脹論では空間そのものの膨脹であり Big-Bang が決して原爆水爆の様に空間内での物質エネルギーの四散ではない事である。要するに Wyle 的表現では時間、空間、物質は互いに他を規定し合うものと思われる。ともかくこの三者は Einstein によって「場の概念」で統一されたと云って良い(場の一元論)。場の無い宇宙空間は無いからである。そして正に 10¹⁹ GeV と云う途方もない温度では時空のゆらぎと素粒子場のゆらぎが混然一体となっていたとしか考えられない。それにしてもニュートリノの黒体輻射は観測されないものだろうか。

文 献

- 1) 教養ゼミ報告書 S-58 佐藤 均
- 2) 本学紀要 No. 18. 〃
- 3) 時間の源流をたずねて D. パーク著
- 4) 物理哲学史 T. R. ゲルホルム
- 5) アインシュタインのたまご 佐藤文隆(朝日出版)

- 6) Newton 1983. 4月 原始宇宙の痕跡を探る 佐藤文隆
- 7) 原子論と宇宙構造 科学 1964. 9 早川幸男
- 8) 時間と宇宙への序説 松下真一 (サイエンス社)
- 9) 科学特集 Einstein と基礎物理学 1979. 4
- 10) ニュートリノの謎 長島順清 (サイエンス社)
- 11) K. Bergqvist CERN Report 69-7. p. 99

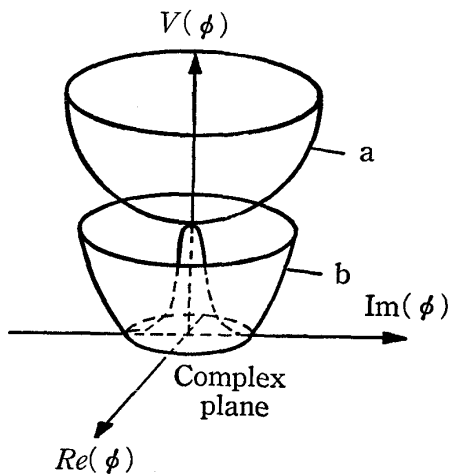


宇宙のごく初期での素粒子の出現秩序とその組成を示す。

- ν , ニュートリノ γ , フォトン
- q, l , クォーク, レプトン
- ΔB , バリオン数
- X , ゲージボゾン
- 斜線内は一般元素 (星内で合成)

W, Z° は GERN で発見

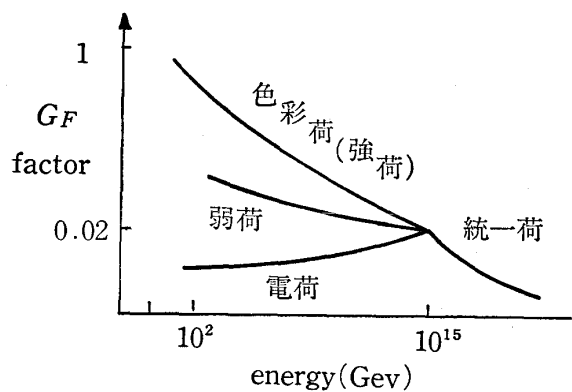
Fig. 1.



複素座標で示した真空の相転位 a が偽真空, b が真真空で, b は自発的対称性の破れを示す。

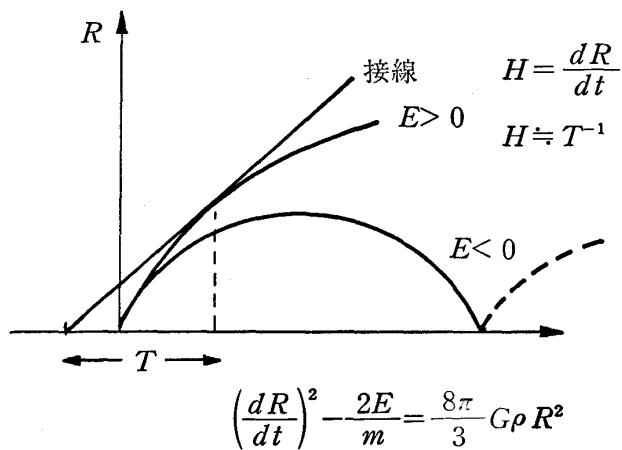
$V(\phi)$ は真空エネルギーのポテンシャル $V(\phi) \sim \phi$ の二次元座標ならば, a はU字型, b はW型ポテンシャルとなる。

Fig. 2.



GUT と Gauge 理論に基づき、ゲージ場との結合の強さ。すなわち、再規格化された荷 G_F のエネルギーによる変化。

Fig. 3.



$$\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 - \frac{2E}{m} = \frac{8\pi}{3} G\rho R^2$$

Fig. 4. 宇宙年齢 T の粗雑な求め方の原理図