

宇宙論と基礎物理学

京大・基研 佐藤 文 隆

§ 1 “湯川”と“宇宙”

湯川先生と宇宙との出会いとして、基研創立以前にあった二つの出来事にふれたいと思います。

先生が初めて欧米に出られたのは1939年で、Solvey会議に出席の旅でしたが、ヨーロッパに戦争が迫ったためこの会議自体は中止になりました。¹⁾ 帰国の途中、9月14日にニューヨークに上陸し、10月13日にサンフランシスコから離れるまでの一ヶ月余りにアメリカ各地の大学を訪問し、10月末日本に帰国しました。この機会に核物理学が宇宙の物理学と関連しつつある当時の状況に印象づけられたように思えます。当時、表1に示したように量子力学と核物理の勃興は宇宙の研究に新しい境地を開きつつあり、予定されていたSolvey会議でもそれが一つのテーマでした。²⁾

表1 年 表

		1925	量子力学
		1926	量子統計「白色矮星」
		1928	α 崩壊, Dirac方程式
		1929	「Chandrasekhar 質量」
	湯 川	1932	中性子発見
		1933	「超新星から中性子星へ」
1935	中間子論	1936	「中性子星の理論」
		1938	「熱核反応」
1939	欧米訪問	1939	「相対論的中性子星」
			「重力崩壊とブラックホール」
		1941	「星からのニュートリノ損失」
1945	宇宙物理教室講座の兼担		
1955	基研天体核研究会		

もう一つの“出会い”は偶然におこったものです。敗戦の年の10月、京大理学部宇宙物理学教室の荒木俊馬教授が急に辞職しました。³⁾ そのため、湯川先生がしばらくその講座を兼担することになったのであります。その頃、湯川研究室に入った林忠四郎先生は研究室として元荒木教授室をあてがわれ、湯川先生にも宇宙の研究をすすめられたという。⁴⁾ また、Solvey会議に提出されていた天体核の論文が研究室のゼミで使われたりしていたということである。この出来事は、先に述べた印象を基研創設の頃まで持続させる中継点として重要な役割を果たしたのではないかと思う。

1953年に基研がスタートして、早川幸男先生が就任し、湯川先生の発案で武谷三男先生や早川先生を

プロモーターにして第一回天体核の研究会が開かれるのは1955年の2月でありました。宇宙線の研究が起源の問題を通して、宇宙物理に傾きつつあった頃でもあります。この前後のことについては当事者の証言が多くあるのでここで繰り返すことは省略します。⁵⁾

以上の経過をふまえて「湯川と宇宙」というものを自己流に総括すると次のようになると思います。まず、いわゆる“黄金の30年代”の物理がいかに素早く宇宙の研究に新しい概念を持込んだかを改めて認識する必要があります。当時持込まれた新概念が30～40年して宇宙物理としての一つの大きな分野に成長しているわけで、その種の多くは理論物理屋が播いたものである。すなわち、こういうことは基礎物理学の重要な役目なのである。そうした大きな流れを湯川先生が肌で感ずる機会を得、それを基研の中に正しく植えつけられたといえると思います。

§ 2 基研と宇宙

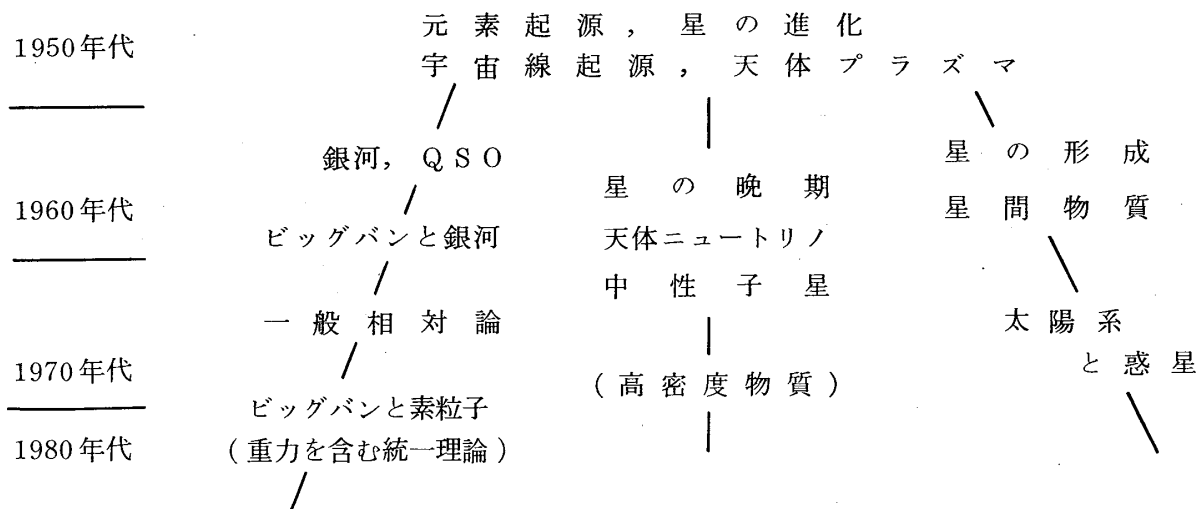
基研での宇宙関係の研究テーマの変遷は表2に示してある。スタート時はいわゆる天体核物理が中心であったが、ある分野は大きく成長して基研でのテーマからはずれていき、現在では宇宙論や一般相対論が中心になっている。高密度物質や重力理論のように宇宙からの興味で始ったものでもその後の研究の推移で、より基礎的問題に変わったものもある。(重力理論、高密度物質、等)今後のことについては現状の延長上に考えるほかないが、次のような二つの面で基研と宇宙とは縁が切れないであろう。

(i) 基礎物理の進展が宇宙の研究に新局面を開く。

(ii) 宇宙を基礎に物理の法則がある。

(i)は“黄金の30年代”が一つの模範であるし、最近の「GUT理論と宇宙初期」もその一例である。(ii)は重力理論、特に量子重力などを通して宇宙を抜きに物理学を考えられなくなるかも知れないということである。

表2 基研と宇宙



§ 3 Hubble 膨張と Big Bang 宇宙

以下では宇宙論の最近の問題点についてふれる。1929 年の Hubble の膨張宇宙の発見は必ずしも宇宙初期が高密度だということの発見だとは受取られていなかった。宇宙項を含む Einstein 方程式に基づく宇宙モデルに引きづられていたからである。宇宙項がなければ密度無限大から膨張が始まることは知られていたが、そのことを真に受けて考えようとしなかった。1948 年の Gamow の Big Bang 元素起源論の大きな意義は初めて密度が 10^{30} も上まわる状態にまでこのモデルを外挿して考えたところにある。S. Weinberg が指摘しているように、理論物理学者は自分の書いている方程式の威力をしばしば過少評価している。⁶⁾ Gamow の大胆さは見習うべきものであろう。実際密度が高かったことを直接確かめたのが 1965 年の 3K 輻射の発見であり、一様、等方といった数学的単純化をしなくても特異点が避けられないことが証明されたのは 1960 年代の後半であった。(Hawking, Penrose, Lifshitz-Khalatnikov, etc)。

宇宙膨張は膨張 factor $a(t)$ と Comoving 座標 χ で記述される。原点 ($\chi = 0$) からの距離は

$$r = a(t) \chi$$

$$\text{故に } V = \dot{r} = \dot{a} \chi = H r, \quad H \equiv \dot{a}/a. \quad (1)$$

Doppler 効果より

$$\Delta \nu = -\frac{V}{c} \nu = -\frac{1}{c} \frac{\dot{a}}{a} (c \Delta t) \nu = -\frac{\Delta a}{a} \nu \quad (2)$$

$$\therefore a(t) \nu(t) = \text{const.}$$

以上は kinematics であるが $a(t)$ の関数形をきめるには Einstein 方程式による dynamics できる。輻射宇宙 ($\rho_r \gg \rho_m$) では、Planck 単位を用いると大体

$$\frac{1}{t^2} \sim T^4 \quad (3)$$

となる。1 sec で $T = 1 \text{ MeV}$ である。

全ての radiation のエネルギーが(2)のように a^{-1} に比例して過去で大きくなるということは温度が $T \propto a(t)^{-1}$ で高かったことを意味する。したがって現在 $a(t_0) \chi_0 = 10^{10} \text{ ly}$ のところの点は GUT 相転移 $T = 10^{15} \text{ GeV}$ の時は

$$a(t_{\text{GUT}}) \chi_0 = 10^{10} \text{ ly} \frac{3\text{K}}{10^{15} \text{ GeV}} \sim 1 \text{ cm}$$

のところにあった。

1 cm のところから光が直進してきても何故 10^{10} 年もやってくるのに時間がかかるかに疑問を持つ方は図 1 の説明を参照されたい。また、膨張によって同じ体積 (Comoving Volume) にある物質のエネルギーが

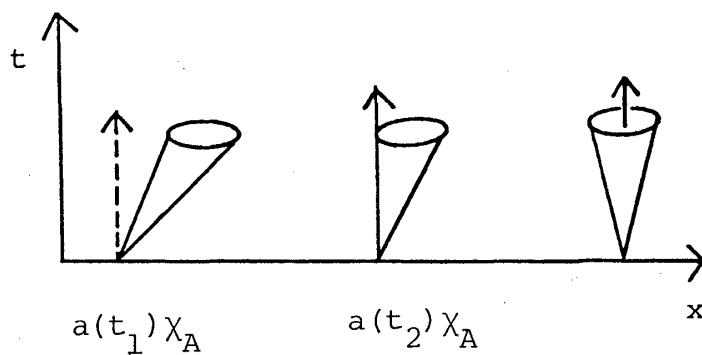
$$E \sim \rho_r a^3 \propto \frac{1}{a^4} a^3 \propto \frac{1}{a}$$

図1 O点($x=0$)とともに動く系(t, x)とA点($x=\chi_A$)とともに動く系(t', x')の間の変換(一般座標変換)

$$x' = x - a(t)\chi_A, \quad t' = t$$

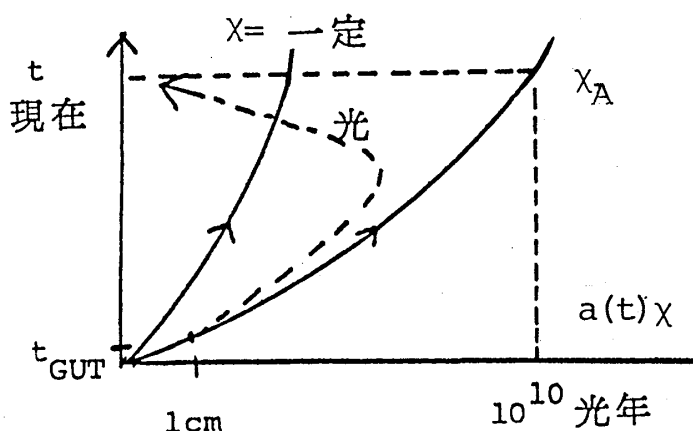
A点での light cone をO系で見ると

$$\frac{1}{c} \frac{dx}{dt} = \pm 1 + \frac{\dot{a}}{c} \chi_A. \quad \text{これを図示すれば。}$$



$$t_1 < t_2$$

故に光は図のようにいったん遠方に行って再び近づく。



のように減る。これは“減少”というより、座標系をそう見えるように変えていくといってもよい。宇宙黒体輻射が等方的にみえる座標系というのは各点で一つ definiteにきまり、その特殊な系について温度を定義しているからこういうことになるのである。Lorentz不変性は破れている。

§ 4 ニュートリノ天体の形成⁷⁾

相互作用の大統一理論(GUT)は考えるエネルギー領域を 10^{15} GeV まで大きくした。1974年以前では(3)の式は分っていても誰も $T \sim 1$ GeV 以上にさかのぼって考えなかった。しかし、最近では Planck エネルギー 10^{19} GeV まで抵抗なしに考えるようになった。GUTが持ち込む新しい概念と宇宙の方で要求されている現象のリストは表3のようであり、お互いに関連づける多くの研究がされている。GUTによるバリオン数生成説はこの分野全体の活性化に大きな役割を果たした。以下では私のやっているニュートリノ

表3 GUTとbig bang

GUT		big bang
generation	→	元素
q-1 対称性 (陽子崩壊)	→	baryon数生成
ν 質量	→	密度分布 数+Mpc 以上一様 それ以下デコボコ
相転移 (一次 or 二次) (monopole)	→	等方性
“Vacuum”	→	宇宙項小さい
θ-Vacuum	→	flatness (地平線 ≪ 曲率半径)
axion	→	
CP 破れ	→	
energy	→	
超対称性	→	
・		・
・		・
・		・

天体の形成について述べる。

ν も高温・高密度では熱平衡にあったが、 $T \sim 1 \text{ MeV}$ のあたりで他の成分との平衡が成立しなくなり、その時にあった黒体輻射ニュートリノは全て自由ニュートリノになり、膨張とともにエネルギーを減らしていく。自由なのになぜエネルギーが減るかという問いの答えは赤方変移と本質的に同じである。質量を持つ粒子の場合は次のようになる。 $V \ll c$ として Lorentz 変換より

$$p' \simeq p \left(1 - \frac{V}{v}\right) \simeq p \left(1 - \frac{H}{v} v \Delta t\right) \simeq p \left(1 - \frac{\Delta a}{a}\right)$$

$$\therefore pa = \text{const.}$$

ともかく運動量 p が a^{-1} で減少し、あるところで nonrelativistic な速度になる。ν の質量はまだよく分っていないが 1 eV 以上なら、宇宙の平均質量密度では核子のそれより ν のそれの方が勝ってくる。核子数密度は $\sim 10^{-7} \text{ cm}^{-3}$ だが ν は一種類で 110 cm^{-3} もあり、 $m_\nu / m_N \ll 1$ でも勝ってくるわけである。

以下、そういう ν の質量が優越している宇宙を考える。nonrelativistic になった ν は重力にゆらぎがあればそれに把えられて凝集しはじめる。その大きさは non-rela になる時刻 t_{nr} での地平線の大きさより少し小さい程度となる。そしてこれを現在の時点に引き延ばしたのが大きさ（平均間隔）となる。それは次のように与えられる。(3)より

$$m_\nu \sim t_{\text{nr}}^{-1/2} \quad \therefore r = t_{\text{nr}} \frac{a(t_0)}{a(t_{\text{nr}})} \sim t_{\text{nr}} \frac{m_\nu}{T_0} \sim \lambda_0 \frac{T_{\text{pl}}}{m_\nu c^2}$$

$T_0 = 3\text{K}$, λ_0 はそのピーク波長, $T_{\text{pl}} = 10^{19}\text{ GeV}$ は Planck エネルギー。 $m_\nu = 10\text{ eV}$ オーダーとすると

$$r = \frac{10^{19}\text{ GeV}}{10\text{ eV}} 10^{-1}\text{ cm} = 10^2\text{ MPC}。$$

これは超銀河団の大きさである 30 MPC のスケールを与えている。微視的量 m_ν が急に天文的量になるところがおもしろい。

実際の銀河の分布は図 2 のように細胞状になっていると考えられている。⁸⁾ 平板状の超銀河団に囲まれて大きな間隙 (hole 又は Void) がある。こういう構造の特徴的長さは m_ν と結びついて決っている。ニュートリノ天体の質量に

$$M \sim \frac{m_{\text{pl}}^3}{m_\nu^2}$$

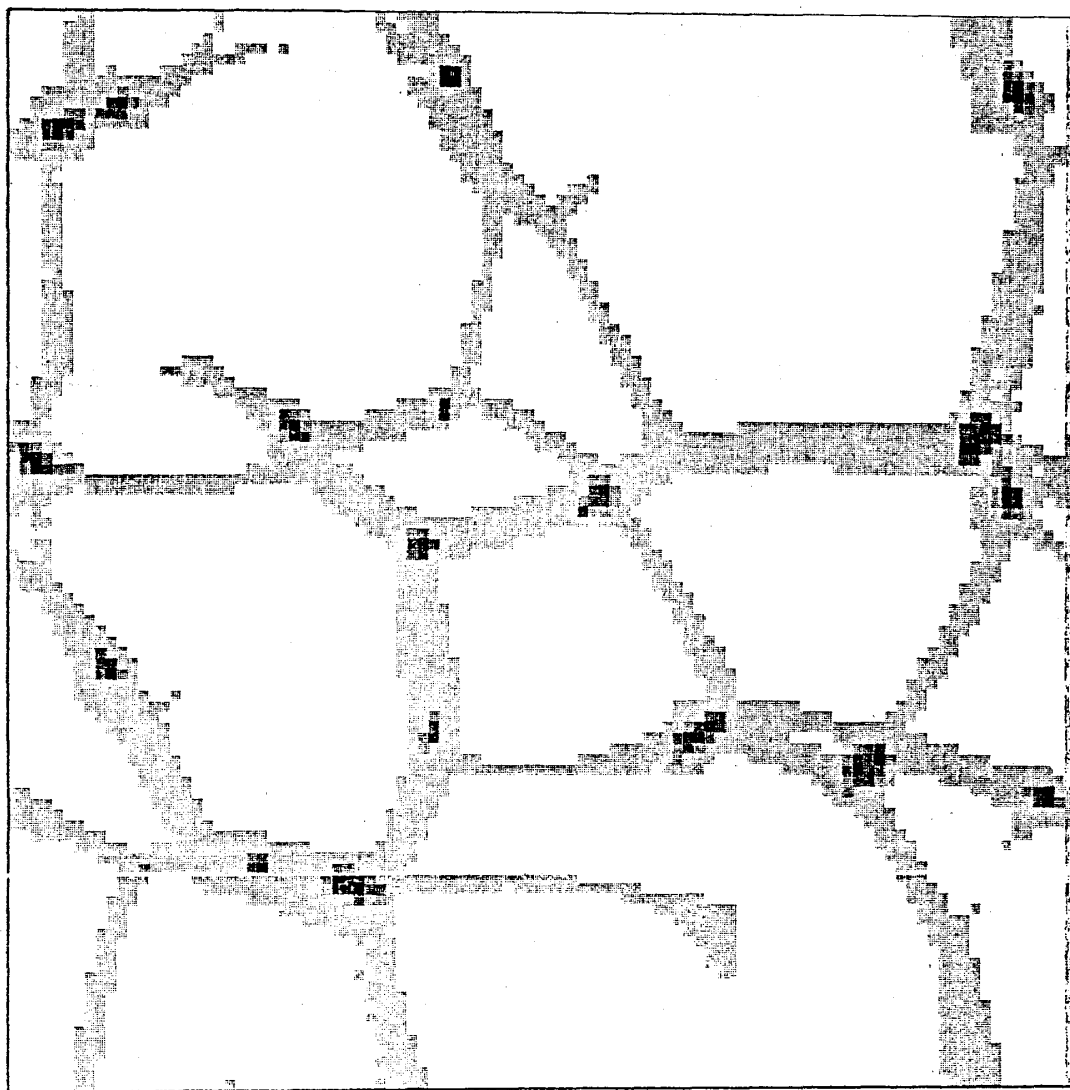


図 2 銀河は図のような斜線の領域に分布すると考えられる。この図は二次元の場合の数値計算の例であり、現実のものではない。

で決っている。半径が小さく縮まない理由は ν が Collisionless 粒子であるからである。この性質のため上の長さ以下のゆらぎは Phase mixing で消されてしまう。(Landau damping)

m_ν は超銀河団と関係していると考えられるが、天体構造のもう一つの重要な単位である個々の銀河が何で決ったかについては先天説と後天説の二つの考え方がある。銀河内での星の形成は誰でも後天的だと思ひ、超銀河団発生ゆらぎの原因は相当過去 (GUT 時) までさかのぼる先天説を皆考えている。銀河はどちらに入るのかの分れ目にあたる。先天説ならバリオン数の非一様を考えるのが自然であろう。非一様形成の原因としては soft CP Violation と非一様な膨張宇宙モデルの 2 通りある。これとは別に GUT 相転移時の地平線を越えるスケールでのランダムさがエネルギー密度のゆらぎ発生を引き起こすという考えもある。銀河が分布している現在の宇宙の天体的構造の起源は遠く GUT 相転移時の高エネルギー現象にあるのかも知れない。

§ 5 宇宙の中での物理

かつて Mach らの経験主義者は自然科学は「経験の関係」のみを記述すべきであると主張した。Mach はそれを徹底させて Newton 慣性系の先験性を批判し、慣性系は宇宙の星々に対して相対的に決っているという考えを述べた。原子さえ見ようとせず、宇宙論をも徹底的に嫌っていた Mach の徹底さが逆にとてつもなく speculative な思考に導いたわけである。この考えは宇宙の構造が局所的物理法則を規定しているという発想を述べたもので、慣性系の問題に限らずこういう考え方全体が現在は Mach 原理と呼ばれている。これが § 2 で述べた (ii) の原型である。

1937 年に Dirac が唱えた large number 仮説もこの Mach 原理の一種である。例えば

$$\frac{e^2}{G m_N m_e} \sim \frac{c/H}{e^2/m_e c^2} \sim [n_N (c/H)^3]^{1/2} \sim 10^{40}$$

といった関係に注意する。 H は Hubble 定数、三項目は Hubble 半径内の核子数である。Dirac はこういう large number 間の関係は偶然ではなく、時間が変わっても成立すると考える。その結果、 $H^{-1} \propto t$ のように変化するから、例えば重力定数 G が t^{-1} のように減少するかも知れない。

「経験の関係」を堅苦しくとれば我々の物理はこの宇宙のこの場所での今の時期のものである。しかしまず場所的には一様性を前提にどこでも一緒だと考える。これをコペルニクス原理あるいは宇宙原理と呼んでいる。時間的にもビッグバン初期の研究はある種の経験を我々に与えている。GUT の vacuum の相転移のように確かに時代によって相互作用の様子も変わってくるが、我々はその時は超越して不変な法則を知っている。残るは“この宇宙”という枠を変えれば局所物理法則の内のどの部分が変わるのかである。種々な物理“定数”というのも実は今の宇宙での経験なわけで、そういう経験を越えても不変に止まる原理や定数は何かという問題である。量子重力や重力を含む統一理論ではこうした宇宙論との絡みあいが、本質的になると考えられている。地球物理は地球という偶然的存在を対象としてあるように、物理も我々の宇宙という存在での偶然的法則性であることには変わらない。宇宙と基礎物理の関係はある意味で本質である。

文献と注

- 1) Solvey 会議は10月22～29日に予定されていたが、湯川は9月初めと末にある別の会議での講演依頼が各々 Pauli 及び Heisenberg からきていた。湯川はベルリン滞在中の8月25日に、ナチスのポーランド侵攻が迫って、多くの在独日本人とともにドイツを立退いた。第二次大戦の開戦日は歴史の本では9月3日になっている。この時のことについては、「欧米紀行」(湯川「極微の世界」岩波書店、1942年)にくわしい。
- 2) Solvey 会議のテーマは“Problems of elementary particles and their mutual interactions”であった。予定されていた講演の一つに Weizäcker “astronomical indications concerning the properties of particles”がある。J. Mehra “The Solvay conferences on physics” (D. Reidel Pub. 1975) 参照。

上の「欧米紀行」には特に宇宙のことについてはふれてないが、単行本に載るに際しての「追記」に「尚最近の著しい傾向は、核物理学が一方では天体物理や地球物理に応用されると共に、他方では医療や生物学のみならず、化学や冶金等応用方面の研究にも盛んに使はれ出したことである。」と記している。
- 3) 荒木教授は戦争中「大日本言論報国会」の役員などしていたため感ずるところあって辞表を提出した。当時まだ48才であった。
- 4) この辺の事情は「自然」1980年8月号、26にくわしい。
- 5) 例えば早川幸男「自然 湯川追悼特集号」1981年11月
- 6) S. ワインバーグ「宇宙創成 はじめの三分間」(ダイヤモンド社)、167～168p.
- 7) H. Sato, Doroshbeirich et al “10th Texas Symposium” Ann New York Academy(1982)
佐藤文隆 科学(岩波)1982年7月号
- 8) A. L. Melott, Month, Notice R. A. S.