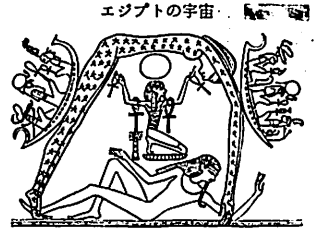


インフレーションモデルの現状

小玉 英雄



§1 始めに

ほんの数年前にむしろ特異な宇宙モデルとして登場したインフレーション宇宙モデルも、今や宇宙初期の進化に対する標準的なシナリオとして定着しつつある。しかし、現在の宇宙の観測的事実を説明する内部矛盾のない宇宙モデルを、適当な素粒子モデルに基づいて具体的に構成する試みは必ずしもうまくいっていない。実際、ここ5年間程の間に10個以上のモデルが提案され、その多くは消えていった。その間、インフレーションモデルは当初予想できなかったほど豊かな内容を持つようになったが、それと同時に基盤となる素粒子モデルはどんどん複雑なものとなり、それが本来持っていた自然さはしだいに失われつつある。本稿ではインフレーションモデルの最近の発展を紹介しながら、このような混迷が生じた背景を探る。

§2 インフレーション宇宙モデル

我々の宇宙はほぼ一様に膨張している。この宇宙膨張のスピードは一般に時間と共に変化する。具体的には、宇宙のサイズを a とすると a の変化はアインシュタイン方程式

$$H^2 \equiv (\dot{a}/a)^2 = (8\pi G/3)\rho - K/a^2 \quad (1)$$

によって決定される。ここで、 ρ は物質の密度、 K は空間の曲率を表す定数、 \dot{a} は a の時間微分を表す。宇宙が膨張すると通常 ρ は a^{-n} ($n \geq 3$) に比例して時間と共に減少する。従って、宇宙が通常物質で満たされている場合には宇宙の膨張スピード H は時間と共に急速に減少し、 a は時

間 t に関して $t^{2/n}$ のように緩やかに増大する。このような宇宙はフリードマン宇宙と呼ばれる。現在の我々の宇宙はこのフリードマン宇宙で良く記述されることが分かっている。

それではなんらかの理由で宇宙が膨張しても ρ が変化しなくなるとするとどうなるであろうか。(1)式の第二項(曲率項)は宇宙膨張と共に急速に小さくなるために、しばらくすると H は一定となり a は e^{Ht} に比例して急激に増大し始め、フリードマン宇宙とは似ても似つかぬ宇宙が実現される。このような宇宙はド・ジッター宇宙と呼ばれる。宇宙進化の初期にこのような特異な膨張(インフレーション)を起こす時期が現れる宇宙モデルがインフレーション宇宙モデルである(図1参照)。

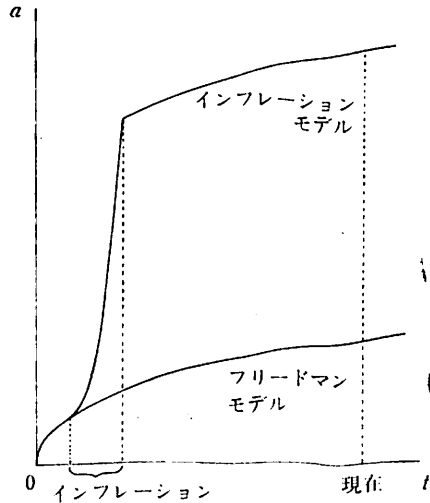


図1

通常の膨張宇宙では宇宙は有限な年齢を持つために、宇宙が生まれてからある時刻迄に光が伝わることのできる距離が有限になる。この距離を半径とする球をホライズンと呼ぶ。光速は可能な最大速度なので、ホライズンより小さな領域は宇宙誕生後の物質の相互作用により一様化される可能性があるが、ホライズンより大きなスケールでは宇宙誕生時の構造が残ることになる。フリードマン宇宙モデルに従うとホライズン半径は時間に比例して増大するので、例えば宇宙の温度が 4000°K の時点では約 2000 Kpc ($1\text{ pc}=3\times 10^{18}\text{ cm}$) となる。ところが、現在約 3°K の黒体放射のスペクトルを持ち、宇宙からはほぼ等方的にやってくる雑音マイクロ波（宇宙背景放射）の観測から、この時点で宇宙は約 10 Mpc のスケールで一様等方であることがわかっている。従って、フリードマンモデルではこの一様等方性を宇宙が誕生時に持っていた特性と考えるしかない。

インフレーション宇宙モデルの興味深い点は、この現在の宇宙の大域的な一様等方性を宇宙進化の結果として説明する事が可能となることである。この理由は次のように説明される。インフレーションモデルではド・ジッターの時期にホライズンの大きさ自体も指数関数的に増大する。例えば、インフレーションが時間にして $t=10^{-35}$ 秒の頃に起きたとすると、この時点でのホライズンサイズは約 10^{-25} cm となる。従って、インフレーションの時期が 2×10^{-33} 秒間続くだけで、インフレーション終了時のホライズンサイズは 10 Mpc を優に越えてしまうことになる。

§3 古いシナリオ

もっとも、体積が増大しても密度の減らない物質などというものは一見有りそうにもない。ところが、ゲージ理論の成功を背景として登場した、重力を除く素粒子の相互作用の統一理論（大統一理論=GUT）はこのような非常識な物質が存在しうることを示した。

これらの理論では、相互作用の統一を司るものとしてヒグス場と呼ばれる物質場 ϕ が登場する。 ϕ の値がゼロの時は相互作用は統一されているが、 ϕ がゼロでない値を持つようになると相互作用

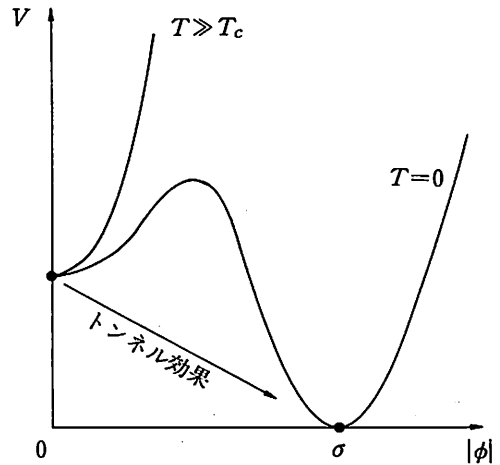


図 2

用は例えば強い相互作用、電磁相互作用、弱い相互作用へと分化する。 ϕ がどのような値を取るかはその力学を支配するポテンシャル $V(\phi)$ が最小になるという条件で決定される。ここでおもしろい事は図2のように、ポテンシャル V が温度によって形を変えることである。このために、宇宙初期の高温の時代には $\phi=0$ が実現され、現在の低温の宇宙では様々な分化している相互作用は一つに統一されることになる。言い替えば、宇宙の膨張にともなって相互作用の分化が起きることになる。

もっとも、相互作用の分化が起きるためには ϕ がゼロから有限な値 σ へと変化しなければならない。ところが、もし温度 $T=0$ における V が図2のように $\phi=0$ と $\phi=\sigma$ の間に山を持っているとこの移行はスムーズには起きず、 ϕ は長い間ゼロの近傍に留まることになる。 V はヒグス場のエネルギー密度を与えるので、このような過冷却現象が起きるとヒグス場のエネルギー密度は宇宙の膨張と無関係に一定 ($V(0)\neq 0$) になり、通常の物質の密度が十分低くなると遂には宇宙はド・ジッター的な膨張を始めることになる。これが Guth 及び佐藤により独立に提案された初期のインフレーションモデルの基本的考え方であった（初期のインフレーションモデルについては文献 1 に詳しい解説がある）。

しかし、このモデルには深刻な問題があることが直ちに明らかになった²⁾。どのようなインフレーションモデルでもいつかはド・ジッター的時代

は終了し、宇宙は現在のフリードマン的時代へと移行しなければならない。この初期のモデルでは、この移行は ϕ が量子論的なトンネル効果により $\phi=\sigma$ の最小点に移移することに依って起きる。ただし、物質の一次相転移と同様に、このような遷移は宇宙全体で一様に起こらず、 $\phi=\sigma$ となった泡状の領域が次々と発生し、それらが次第に膨らんで合体するという形で進行する。ところが、宇宙の膨張が非常に急速なために、この泡の合体がうまく起こらず、その結果宇宙はいつまでたってもド・ジッター宇宙から抜け出せないのである。トンネル効果によって生まれる泡の中はほぼ真空なので、初期のインフレーションモデルの生み出す宇宙は図3に示されているような、全体としてはド・ジッター的膨張を続ける、至るところ穴ぼこだらけの現在の宇宙とは似てもつかぬものになってしまう。

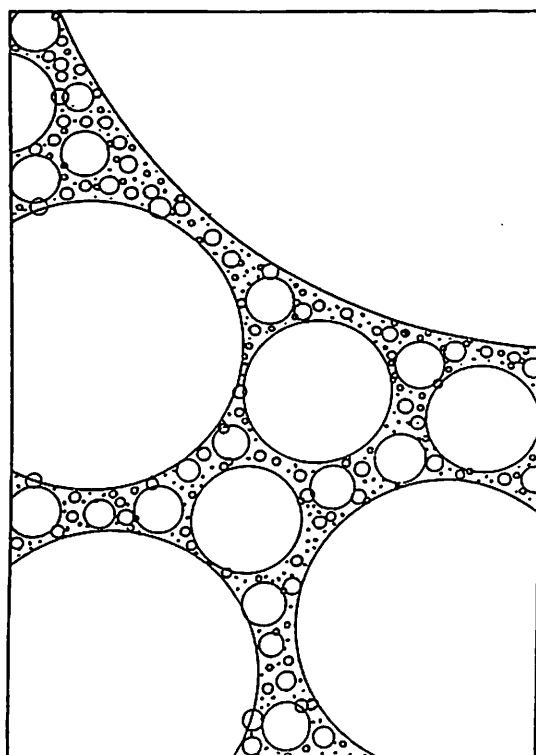


図3

§4 新しいシナリオ

この初期のモデルの困難を回避するために Albrecht-Steinhardt と Linde は独立に次のような新しいモデルを提案した³⁾。まず、図2のようなポテンシャルの代わりに温度がゼロの時のポテンシャルとして図4のような山のない非常に平らなものを考える。宇宙の温度が非常に高い時代には、図2の場合と同様に $\phi=0$ の近傍に山が存在するために ϕ はゼロとなって相互作用は統一されている。今度の場合の新しい点は、宇宙の温度がある臨界値より低くなるとこの障害となる山は急速に消え失せ非常に平らなポテンシャルが残さ

れる点である。このため ϕ はトンネル効果によって一挙に $\phi=\sigma$ に飛ぶのではなく、 $\phi\approx 0$ から出発して緩やかにポテンシャルを $\phi=\sigma$ まで転がり落ちることになる。この間、 $\phi=\sigma$ の近傍を除いて $V(\phi)$ はほぼ一定になるために宇宙はド・ジッター的な膨張を起こすことになる。

この新しいモデルの大きな特徴は古いモデルのようにたくさんの泡が合体して現在の宇宙を作るのではなく、一つの泡がインフレーションを起こして現在我々が観測している領域をすっぽり含む

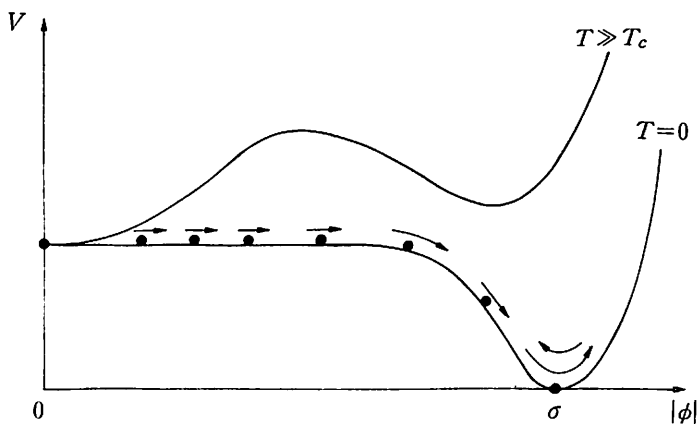


図4

ほど大きくなる点である。しかも、今度はヒグス場のエネルギーが泡の中を一樣に満たして、 $\phi \approx \sigma$ に達すると ϕ は激しい振動を始め、このエネルギーが通常の物質へと転化するの、古いモデルのように泡の中が真空になることはない。従って、宇宙はスムーズにフリードマン宇宙へと移行し、あとには一樣で等方的な世界が残される。勿論、別の泡はインフレーションによりまた別の一樣等方な世界を生み出し、宇宙は全体としては部分的に一樣等方な小宇宙の集合体となる。しかし、当面は他の小宇宙は我々の観測の外にある。

§5 GUT インフレーションモデルの困難

このように非常に有望に見えた新しいインフレーションモデルも、提案されてほんの一年ほどで大幅な変更が必要であることが明らかになった^{2),4)}。その理由を説明するために、インフレーションモデルを少し一般的な視点から見てみよう。

現在の宇宙は、観測できる最大のスケールでは一樣等方であるが、細かく見ると決して一樣ではない。最も身近な所では我々の存在自体一種の非一樣性であるし、宇宙的スケールでは惑星があり、恒星がある。これらは更に集まって銀河を作っており、更に銀河は集まって銀河団を作っている。このような宇宙の構造の起源を説明できないかぎり、幾ら一樣性や等方性を説明したところで無意味である。従って、いかなるインフレーションモデルも現実的な宇宙モデルとして受け入れられるためにはまず次のような宇宙の構造に関するふたつの条件を満たさねばならない。

C1. 宇宙の一樣等方性及び平坦性を説明するのに十分なインフレーションが起きる。

C2. 宇宙の構造の起源を説明できる。

そこで、これらの条件がインフレーションを支配するヒグス場に対してどのような制限を課すか見てみよう。

C1の条件は比較的簡単である。既に述べたように、現在の宇宙の一樣等方性を説明するには、宇宙の温度が $T = T_R \sim 4000^\circ\text{K}$ の時点でのホライズンサイズが 10 Mpc より十分大きければ良い。インフレーション終了時の宇宙の温度 T を T_{rh} とすると $T = T_R$ の時点での 10 Mpc は $T = T_{rh}$

で約 $10 (T_{rh}/10^{15} \text{ GeV})^{-1} \text{ cm}$ となる。一方、インフレーション時に宇宙の膨張率 H がほぼ一定とすると、インフレーションが始まるときのホライズンサイズは $H^{-1} \sim M_{pl}/T_{rh} \sim 10^{-35} (T_{rh}/10^{15} \text{ GeV})^{-2} \text{ cm}$ となる ($M_{pl} = (hc/G)^{1/2} \sim 10^{19} \text{ GeV}$)。従って、ド・ジッター膨張の時代に宇宙が $10^{36} (T_{rh}/10^{15} \text{ GeV})$ 倍以上に膨張すればよいことになる。

この条件は GUT に基づく新しいインフレーションモデルで現れるコールマン=ワインバーグポテンシャルと呼ばれるヒグス場のポテンシャル

$$V = B\phi^4[\ln(\phi/\sigma)^2 - 1/2] + B\phi^4/2 \quad (2)$$

に対して、次のような条件を課す：

$$\lambda(H_0) < 6 \times 10^{-3} : \lambda(\phi) \equiv B \ln(\phi/\sigma)^2 \quad (3)$$

ここで H_0 はインフレーションが始まるときの H の値である。ところが、 $\lambda(H_0)$ の値は GUT では現在の素粒子理論から決定され 1/4 程度となることが示される。従って、GUT に基づくインフレーションモデルでは十分なインフレーションが起こらないことになる⁴⁾。

C2の条件は GUT インフレーションモデルに対して更に追い打ちをかける。それを見るにはまず、なぜインフレーションモデルで宇宙の構造の起源が説明できるのかという問いに答えねばならない。量子論に従うと全ての物理量には量子論的なゆらぎが伴っている。インフレーションを支配するヒグス場も例外ではない。実は、このヒグス場のミクロスケールでの空間的量子ゆらぎが、インフレーションによりマクロのスケールに引き延ばされ宇宙の大域的な構造の起源となると考えるのである。この問題の詳細に関しては本特集に佐々木氏による解説があるのでそれを参照して頂きたい。この考え方に従うと、ヒグス場から生み出される宇宙の物質密度のホライズンスケールでのゆらぎの大きさは、 $T = T_R$ の時点で

$$(\delta\rho/\rho)_H \sim 4\lambda^{1/2} N^{1/2} \quad (4)$$

となる。ここで、インフレーション終了時のゆらぎのスケールを L 、宇宙の膨張率を H として、 $N = \ln(LH)$ である。現在の銀河に対応するスケールに対して $N \sim 50$ となる。宇宙背景放射の観測及び、銀河形成の理論から密度ゆらぎの大きさは $(\delta\rho/\rho)_H \sim 10^{-4}$ 程度でないといけないことが分

かっている。これより λ に対して次の制限を得る。

$$\lambda \sim 7.5 \times 10^{-15} (N/50)^{-3} \quad (5)$$

これはヒグス場の相互作用が異常に弱くなければならないことを示している。言い替えれば、GUT に基づくインフレーションモデルでは当初の予想に反して、異常に不均質な宇宙が生み出されるのである。

§6 Primordial inflation

この新しいインフレーションモデルの挫折に対して多くの人々の選んだ道は、インフレーションをその生みの親である GUT から切り放すことであつた。即ち、相互作用の分化を司るヒグス場とは独立に、通常のゲージ相互作用を全くせず、インフレーションを引き起こす役割のみを担うスカラ場（インフレーション場）を導入しようというのである。そうすれば、スカラ場のダイナミクスが GUT の制限を受けることはなくなり、幾らでも弱い相互作用を考えることができるので、C1, C2 の条件を満たすモデルを作ることが可能であろうというわけである。

実際に、前節で得た結論は一般のインフレーション場に対してもほぼ変わらない。例えば、インフレーション場のポテンシャルが $V = \lambda \sigma^4 f(\phi/\sigma)$ ($f(x)$ は $x=0$ で最大値 1, $x=1$ で最小値 0 を取り、係数が $O(1)$ の多項式) という形をしている場合には、C1 及び C2 の条件は

$$\lambda < \lambda_c \sim 10^{-15} \quad (6)$$

$$\sigma = M_{Pl} g(\lambda/\lambda_c) \quad (7)$$

と表され、やはり非常に弱い自己相互作用を要求する⁵⁾。ここで $g(x)$ は $g(1) \sim 1$ となる関数でその形は $f(x)$ に依存する。ただし、大きな違いが一つある。それは(7)式が示すように GUT 特有のコールマン＝ワインバーグ型ポテンシャルと違い、今度は σ がプランクエネルギー M_{Pl} 程度の大きさであることが要求されることである。これは、宇宙の時空構造が古典的に振舞うようになるのと同じ頃、言い替えれば、宇宙の誕生とほぼ同時にインフレーションが起きることを意味している。そこで、これらの GUT から分離されたインフレーションモデルは Primordial inflation model

と呼ばれている⁶⁾。

ただし、GUT から分離すれば全てうまくゆくわけではない。既に述べたように、ド・ジッター的膨張の時代には通常の物質の密度は急速に減少しインフレーション場のエネルギーが宇宙を支配するようになる。従って、インフレーションモデルでは現在の宇宙に存在する物質は全てインフレーション終了時にインフレーション場から生成されることになる。即ち、インフレーションモデルは物質の起源そのものを説明しなければならないわけである。

具体的には、まず現在の宇宙の物質の構成の最も基本的な特徴である物質と反物質の非対称性を説明しなければならない。GUT の宇宙論における大きな魅力はこの非対称性を宇宙初期におけるバリオン数非保存反応の結果として定量的に説明する可能性を与えた点にある。従って、GUT の持つこの利点を旨く取り込まないといけな

もちろん、物質と反物質の非対称性を説明するだけでは十分ではない。現在の宇宙の物質は様々な元素からできている。この元素の存在比も説明しなければならない。宇宙全体で見るとこの存在比は、約75%が水素、約25%がヘリウムで、残り1%未満が重い元素となっている。これらの内、重い元素は全て恒星による元素合成によって説明できるが、ヘリウムの量はそれではどうしても説明できない。実は、このヘリウムの起源を宇宙の温度が 10^9 K の頃の原子核反応の結果として定量的に説明することに成功したことが標準宇宙モデルの最大の成果であったのである。従って、インフレーションはこの宇宙論的要素合成の十分前に終了していなければならない。

まとめると、インフレーションモデルは次の条件を満たすように GUT を旨く取り込んでいなければならない。

C3. 宇宙論的要素合成の時代以前にインフレーションが終了しフリードマン宇宙へ移行する

C4. 物質の起源、特にバリオン-反バリオンの非対称性を説明する

実はこれらの条件を満足させることが非常に困難なのである。

インフレーション終了時の宇宙の温度 T_{rh} は、

インフレーション場のエネルギーが通常の物質に変換される際の単位時間当りの変換率 Γ のみで決まり、次式で与えられる⁵⁾。

$$T_{rh} \sim (\Gamma/10^3 \text{ GeV})^{1/2} \times 10^{10} \text{ GeV} \quad (8)$$

一方、ゲージ相互作用をしない場合、インフレーション場と通常の物質との相互作用の強さは自己相互作用の強さ λ と同程度となるので、 $\Gamma \sim \lambda \sigma$ となる。従って、(6)式より $\Gamma < 10^5 (\sigma/M_{Pl}) \text{ GeV}$ となり、条件C2 はインフレーション終了時の温度が

$$T_{rh} < 10^{11} (\sigma/M_{Pl})^{1/2} \text{ GeV} \quad (9)$$

と非常に低いことを予言する。低いと言っても条件C3 は十分満たされている。しかし、標準的なGUT ではバリオン数を保存しない反応が十分起きるためには最低限 $T_{rh} > 10^{12} \text{ GeV}$ という条件が満たされていなければならないので⁷⁾、条件C4 が満足されるには低過ぎる。従って、通常のGUTモデルとは大きく異なったメカニズムでバリオン非対称性が生み出されるような素粒子モデルを考えない限り、Primordial inflation model では宇宙の物質の起源を説明できないことになる。このような素粒子モデルを

C5. 基礎となる素粒子モデルが低温低密度で現在知られているものと一致する

という条件を満たすように作るとは決して容易でない。特に、陽子の寿命に対する実験的制限 $\tau > 10^{32}$ 年と矛盾しないような、低い温度でのバリオン非対称生成メカニズムを見いだすことは非常に困難である。これまで幾つかのモデルが提案されているが満足のゆくものは今のところないと言ってよい。

§9 終わりに

以上見てきたように、インフレーションモデルの現状は決して楽観できるものではない。特に、宇宙の構造の起源と物質の起源を同時に説明することは至難の技のように見える。勿論、C1~C5に

C6. 異常な物質を大量に生み出さない
を加えた、完全なインフレーションモデルの満たすべき条件を全て満たしていると主張するモデルも存在する。特に、Nanopoulos を中心とする人々

に依って組織的に研究されている、重力を含む統一理論である超重力理論に基づくインフレーションモデルはかなり良い線を行っている⁸⁾。しかし、指導原理の欠如のために、彼らのモデルの基礎にある素粒子理論は今のところ必ずしも自然なものとは言えない。

更に、これまで触れなかった未解決の原理的な問題も存在する。例えば、佐々木氏の解説で詳しく議論されているように、インフレーション場の量子ゆらぎから宇宙の構造が生み出されるという考え方には依然として疑問の余地がある。また、多くのインフレーションモデルでは、インフレーション以前の宇宙の状態がモデルの成否を大きく左右するにもかかわらずそれについて十分な考察がなされていない。これらの問題に答えるためには、量子重力理論に基づく深い研究が必要である。

インフレーション宇宙モデルの成否は重力を含む統一理論の発展に懸かっていると見える。

参考文献

- 1) 佐藤勝彦・小玉英雄, 別冊数理科学「量子力学」10 (1984) 152.
- 2) K. Sato, *Cosmology of the Early Universe*, eds. L. Z. Fang and R. Ruffini (World Scientific, Singapore, 1984) p. 165.
- 3) A. D. Linde, *The Early Universe*, eds. G. W. Gibbons, S. W. Hawking and S. Siklos (Cambridge University Press 1983) p. 205.
- 4) A. D. Linde, *Rep. Prog. Phys.* 47 (1984) 925.
- 5) P. J. Steinhardt and M. S. Turner, *Phys. Rev.* D29 (1984) 2162.
- 6) J. Ellis, D. V. Nanopoulos, K. A. Olive and K. Tamvakis, *Nucl. Phys.* B221 (1983) 524.
- 7) N. Sato, H. Kodama and K. Sato, *Prog. Theor. Phys.* 74 (1985) 405.
- 8) K. Enqvist, D. V. Nanopoulos, M. Quiros and C. Kounnas, *Nucl. Phys.* B262 (1985) 538.

(こだま・ひでお, 東京大学・理学部)

