

$^3\text{He}-^4\text{He}$ 混合液 と 巨視的量子核形成

東北大・理 高木 伸

[This is a revised and extended version of "Confused Assembly of Thoughts on and off Macroscopic Quantum Nucleation" presented at the spring'94 JPS meeting, which was a condensed version of the talk given at the INS Meeting of 量子力学の新局面(March'94), which in turn was a revised version of the talk given at the Izu Meeting of 多自由度系における量子トンネル現象(November'93). Note that 'と' is a very convenient conjunction; 「A と B」 does not necessarily imply a logical connection between A and B.] [Apologies: My lack of ability has prevented me from presenting a talk with the title "Macroscopic Quantum Tunnelling in Helium Systems" as originally suggested by the organizers of this WS. References marked * comprise an incomplete list of works which should have been mentioned in such a grand review.

Also, I had somewhat misunderstood the intention and atmosphere-to-be of the WS; having heard those scholarly talks given during the first day, I got into panic that I should revise mine, but it was too late.] [Linguistic Policy: Since there were non-local languagespeaking scientists in the audience, my talk was presented in BEINGLISH, formerly called "Broken English" [Casimir, '55], the common tool of communication among global scientific beings (it may or may not sound like English depending on the person who speaks it, and the grammar may be freely improvised on the spot), but is here reproduced in heterodox Japanese.] [Acknowledgements: It was a 40-minute talk, an exceptionally long one in the WS, for Prof. Takeo Satoh kindly allowed me to use the time originally allocated to him. I also owe him much of the experiment-related part of my talk. Theoretical results presented in 破/段 have been worked out by Takashi Nakamura, a PhD student at Tohoku University; without collaboration with him, this talk or my present understanding of the subject itself would not have been possible.]

段 - 1 歴私的回想

§ - 1 - 0 Personal Recollections and Gratitudes

恒藤敏彦先生の京大御退官の折という記念すべき研究会にお招き頂き、世話人諸氏および関係者の皆様に感謝致します。私は大学院生の頃、京大の院生ではありませ

んでしたが、恒藤先生にお願いして（もはや時効になっていて公にしても差し支えないと思いますが、潜りで、と言っても半ば公然と）京大物性理論研究室にしばしば長期滞在させて頂き、先生および研究室諸兄から多くを学びました。今にして思えば、実力もないのに随分と生意気で厚かましい若造であつたろうと何とも恥ずかしい気持ちですが、先生からは普通の物理のみならず、量子力学や統計力学にまつわる歴史的あるいは哲学的なことからについても教えて頂き（天野清['50]やBroda['57]を知ったのも直接あるいは間接的に先生を通してでした）、大変楽しく充実感のある日々を過ごすことができましたこと、感謝に耐えません。

§ - 1 - 1 To Separate or Not To Separate

いわゆる量子液体としてのⅢⅣの物理は Lone Polarison 理論 [Landau & Pomeranchuk, '48; Pomeranchuk, '49] に始まり、 λ 温度の x ($= {}^3\text{He}$ -concentration) 依存性の観測 [Abraham et al, '49] を経て、 $T < 0.8\text{K}$ における二相分離現象の発見 [Walters & Fairbank, '56] で最初のピークを迎えた様です。Goudsmitと共にスピンを理論的に発見した [cf. 朝永, '74]、統計力学の大家でもあるUhlenbeckは、米国物理学会会長職を辞するに当たっての講演で

"... the remarkable fact that liquid ${}^3\text{He}$ and liquid ${}^4\text{He}$ separate into two liquid phases just as oil and water, although the real forces between the various atoms are supposedly the same! It demonstrates ad oculos, so to say, conflict between the Bose and Fermi statistics" [Uhlenbeck, '60]

と述べています。つまり、化学的に区別の無い同位体が相分離する理由が自明でなかった訳です。その5年後、 $T = 0\text{K}$ の極限でも約0.06 程度の溶解度があるらしい、ということが発見され [Edwards et al, '65; Anderson et al, '66]、今度は、絶対零度でも完全には相分離しない理由が問題になりました。この発見によりⅢⅣは、Landau の中性フェルミ液体理論に従う現実の液体の第二の例（第一は云うまでもなくⅢ (= 純粋液体 ${}^3\text{He}$)) として脚光を浴たようです。（以上、私の直接には与り知らぬ時代の出来事で、当時の実際の雰囲気とは異なる印象を記したかも知れません。）

§ - 1 - 2 Dilute Mixture or Diluted Memory

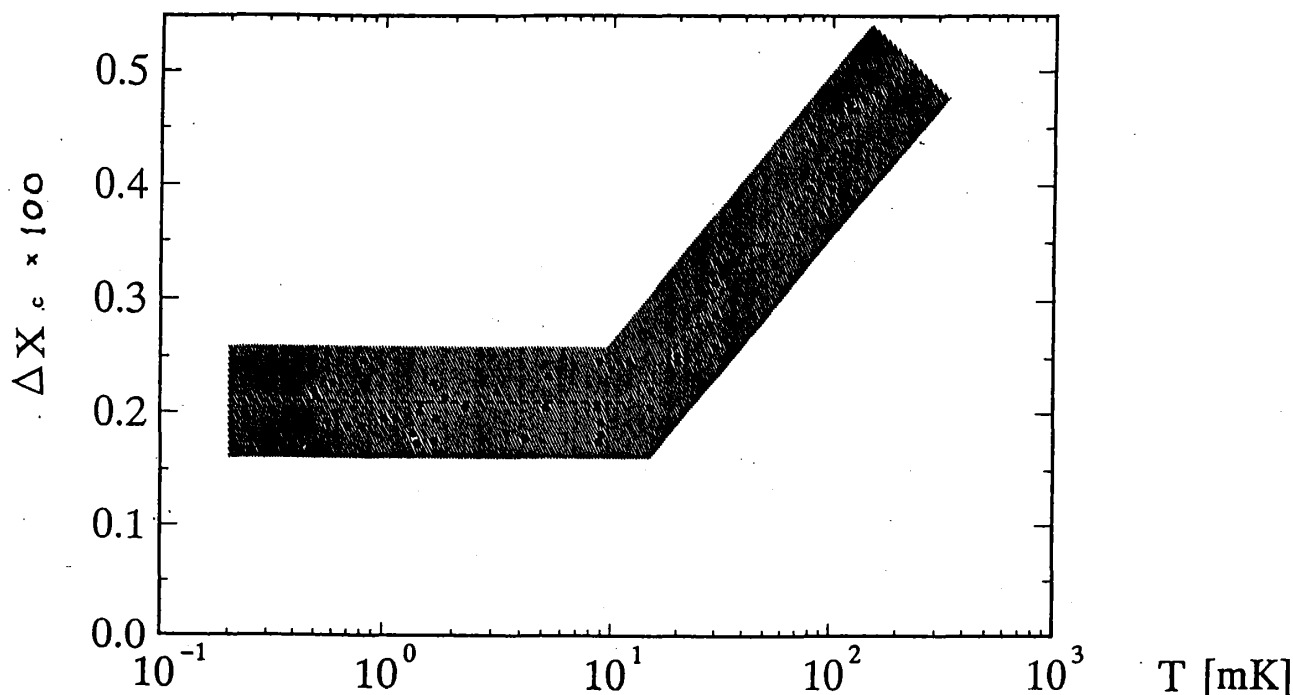
大学院修士当時の私はⅢⅣ ($= {}^3\text{He}$ - ${}^4\text{He}$ 混合液) の二相分離平衡状態に熱中しており、恒藤先生の手かれた解説 ['69] や夏の学校での大見哲巨氏の Bubble-Bubble-Phonon 理論 [Bardeen, Baym & Pines, '67] に関するセミナー等に啓発されました。その頃から既に二十年余り、今日ではⅢⅣは「冷蔵庫もしくはクーラー」として多くの実験室で日常的に使用され、分くるべきや否やなどと悩む人は恐らく居ないことでしょう。隔世の感があります。私自身は、その後ⅢⅣとは長らく御無沙汰しておりましたが、最近再びその相分離（但し今度は非平衡）に関わることになりました。

た。と言いますのも、東北大学の私の仕事部屋から50メートルと隔たらぬ所で、ご存知の通り、佐藤武郎氏のグループにより注目すべき実験が行われているからです[佐藤, 森下 & 小方, '90]。(この実験を記念して新字  [ST, '993] を提案します。) 従って懐古的回想に耽けてばかりいる訳にはいかなくなりました。それにしても、あれほど熱中していた事柄の細部を綺麗さっぱり忘れてしまった自分の記憶の頼りなさを慨嘆する今日この頃です。

段 0 序

§ 0-0 Tohoku Supersaturation Collaboration

[Prof. T. Satoh & Company peacefully engaged in depressurization without being depressed by the Restless[Born, '35] Disturbing[Dyson, '81] University in the days of economic depression] IV(=液体 ^4He) 中での ^3He の溶解度は P_0 (=約10気圧="一万ヘクトパスカル") 以下で圧力とともに増加します。従って、 P_0 以下の圧力で用意した適当な III IV (二相に分離した状態) に、スーパーリークを通して超流動の IV を注入すること (pressurization) により、 ^3He を完全に溶かし込むことが出来ます。こうして得られた不飽和状態から、スーパーリークを通して IV を今度は吸引すること (depressurization) により、飽和状態を乗り越えて準安定過飽和状態が実現できます。しかも吸引の程度に応じて過飽和度 Δx の異なる準安定状態となる筈です。佐藤氏のグループは、この巧妙な方法を用いて $160\text{mK} > T > 0.4\text{mK}$ の温度領域で実際に過飽和状態を作ることに成功し、かつ、 Δx が或る臨界値 Δx_c に達したときに III が析出して溶液が二相に分離することを確認しました。しかも約10mK 以下では Δx_c が T に依らずほぼ一定の値になることを発見しました。実験データを図[Satoh et al, '92, '93]に示します。



§ 0-1 Nucle'n is as hard as New Creation(Dajare in Jaenglish[古場,'000])
二相分離現象は一次相転移の一つの典型であり、核形成が相転移の引金になると考えられます。一般に核形成は、容器の壁や不純物と云った外的要因の介在になることが多く、また理論的にも単純でなく、なかなか悪名高き現象です。教科書や解説書にも

"It should be borne in mind that the described mechanism for the creation of a new phase can occur actually, only for a sufficiently pure substance.

In practice such centres for the appearance of the new phase are usually various sorts of "impurities", dust particles, ions etc." [Landau & Lifshitz'58] とか、

" . . . there is one spectacular case, involving the superfluid phases of liquid ^3He . . . , in which the discrepancy between the predicted lifetime of the metastable state --many times the lifetime of the universe-- and the observed lifetime --less than five minutes-- is so striking . . . that one is seriously forced to wonder whether the whole statistical-mechanical basis of . . . nucleation process isn't in need of drastic revision." [Leggett'87]など

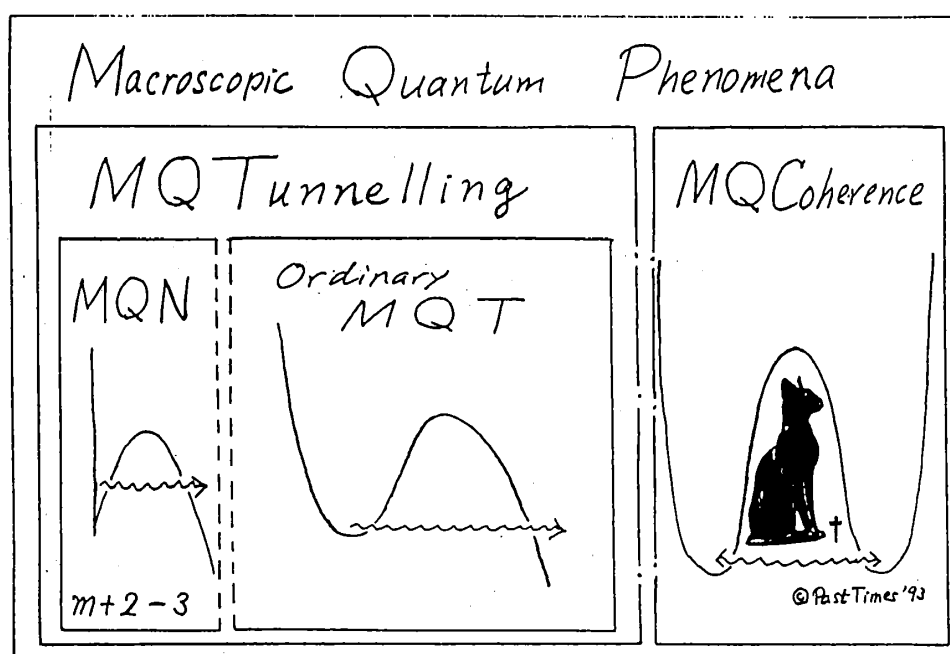
とあります。これらの文章は、いずれも古典的（即ち熱励起による）核形成を念頭に置いたものですが、量子的な核形成となれば尚更その困難は増すことでしょう。

§ 0-2 MQN observed by T S C?[Physico-Philosophical Significance]
然るに佐藤氏のグループにより少なくとも実験上の困難は克服されつつあります（もしくは既に克服されたと云えるかも知れません）。何故なら、ⅢⅣは不純物を全く含まないと言っても差し支えない清浄な系であり、また容器の壁は（ ^3He より ^4He の方が質量が大きい）自動的に ^4He の膜で覆われてしまい核形成に影響しないと考えられます。（この点、同じヘリウム系でも、結晶[Tsymbalenko,'92] や気泡[Maris et al,'93] もしくは渦[Avenel et al,'93] の核形成に比べ、ⅢⅣの相分離は格段に有利と考えられます。）その他の外的要因も排除し得るかどうか、即断は禁物ですが、佐藤氏のグループによって観測された二相分離現象が内在的な核形成によるものである可能性は大きいと思われます。しかも実験結果は「核形成率が低温域（ $T < 10\text{mK}$ ）で温度に依らない」ことを強く示唆しています。もしそうならば、この低温域での核形成は量子トンネル効果によって引き起こされた、つまり量子核形成 Quantum Nucleation が観測された、と推測されます。しかも、それが（準）巨視的尺度の現象（巨視的量子核形成 Macroscopic QN）である可能性もあります[破/段参照]。これは「えらいこと」です。（巨視的）量子核形成現象は、物性物

理に限らず宇宙・素粒子物理も含めて様々な分野で理論的に考えられてきており、非常に普遍的な現象であろうと思われますが、未だ検証された例はなく、もし検証することができれば物理全体にとって大きな意義を有するからです。宇宙創成の「機構」に関する純理論的思弁 (= speculation = 空論 [vacuous theory]? = theory of vacua [宙論]?) にも間接的に実体的支持基盤を与え得るやも知れず、逆に、そのようにして宇宙の素性が解明されれば、地上の実験家も、宇宙年齢の10ppb. にも満たぬ泡の如き人生の哲学的意味に思い惑うことなく、心静かに研究に専念できることでしょう。と云う訳で、東北の片隅でのんびりと冬眠していた私も

怠生の眠りを醒ますへり実験 発(泡)った四三で夜も眠れず [量場醒酔, '993]

ということになり
なり今日も寝
ばけ眼で参上
した次第です。



段 1 破

§ 1-0

Location
of MQN
右図参照

* adapted from © Leggett '84c

† (MQCat = Egyptian cat = BAST = Goddess of joy, fertility and love.)

§ 1-1 虚実皮膜論[近松, '9?] Thin-Wall Approximation

一般に核形成の描像として最も判りやすいのは、一様な準安定相(false vacuum)の中に安定相(true vacuum)の泡ができる、即ち「虚」の状態と「実」の状態が薄膜を隔てて接する状況が出現する、と云うものであろう。こう云った概念は既に江戸時代から考えられており、非常に単純な描像であるが、まずはこの様な最単純模型に基づく現象論的考察によって凡その見当を付け直観を養うのが得策であらう。(ⅢⅣの様に、微視的理論の確立していない系を扱うときには尚更そうであり、また、仮に、いきなり微視的理論(highbrow sophisticated field theory)が出来たとしても、それが実験結果の意味するところの直観的理解に結び付くには現象論の仲

介が必要であろう。現象論は微視的理論の内容を総合的に把握する際の reference frame として不可欠である。) 実際、Landau-Lifshitz の教科書では核形成の節は表面の章に入っており、Coleman でさえ素粒子論の俊秀に真空の運命を説くに当たって気泡を引合いに出している；

"... it is easy to understand the qualitative features of the decay of the false vacuum. The decay closely parallels the nucleation processes of statistical physics, like the crystallization of a supersaturated solution or the boiling of superheated fluid. . . . The false vacuum corresponds to the superheated fluid phase and the true vacuum to the vapor phase. Thermodynamic fluctuations are continually causing bubbles of vapor to materialize in the fluid. If the bubble is too small, the gain in volume energy caused by the materialization of the bubble is more than compensated for by the loss in surface energy, and the bubble shrinks to nothing. However once in a while a bubble is formed large enough so that it is energetically favorable for the bubble to grow. Once this occurs, there is no need to worry about fluctuations any more; the bubble expands until it converts the available fluid to vapor (or coalesces with another bubble). . . . An identical picture describes the decay of the false vacuum, with quantum fluctuations replacing thermodynamic ones." [Coleman, '77]

まさしく、

"Most of the physics of metastable state is contained in the simplest form of the droplet model. In a sense, the weakness of the model is that it contains too much physics; it seems too detailed, too special an approximation to be used as a basis for a truly fundamental statistical theory of nucleation. But it is unquestionably the best place to begin any discussion of metastability." [Langer, '80]

と云うことであろう。

§ 1-2 Single-Collective-Degree-of-Freedom Standard Model of MQN
虚実皮膜論とは、基本要素として

R = virtual-bubble radius

$M(R)$ = Bubble Effective (inertial) Mass = $4\pi R^3 \rho_b$

$U(R)$ = Bubble Formation Energy = $4\pi R^{d-1} \sigma_b - 4\pi R^d \varepsilon_b / 3$

の三者が登場し、 R を集団座標とするラグランジュアン

$$L = (1/2) M(R) (dR/dt)^2 - U(R)$$

によって記述される模型である。各項の符号と R のべきに着目して $m + (d-1) - d$ 模型と呼ぶことにする。三次元空間における流体系という典型的な場合には、 $d = 3$ であり、かつ次元解析から $m = 3$ となることも明かである。虚実皮膜論に立つ限り、次元を持つ量は密度と R 以外にないからである。(流体系でも $d (> 3)$ 次元空間なら $m = d$ となり ($d < 3$ の場合はいささか微妙)、流体から二次元的に結晶が析出する場合には $M(R)$ が $R \ln R$ などとなることもある[Uwaha, '83]。) そこで $m = d = 3$ の場合の上述の模型を核形成の(散逸効果を見捨てた単一集団座標記述の範囲での)標準模型と云ってよかろう。この模型は Rayleigh['17] 等により泡の古典的崩壊(但し表面張力項を見捨て)を論ずるのに用いられたという由緒正しきものである。Rayleigh の論文から55年後、標準模型の量子論的取扱が LK、即ち Lifshitz (Landau-Lifshitz シリーズの Lifshitz, E.M. の兄) 及び Kagan 両大家になる MQN 元祖論文['72] に於てなされ、核形成率(もしくは準安定状態の寿命 $= 1/(\text{核形成率})$) の表式 Γ_{LK} (ibid., Eq(2.17), too long and complicated to be quoted here) が導かれた。(以下、核形成率もしくは寿命は一個の核について云うものとする。) この段階で $3 + 2 - 3$ 模型は MQN の標準模型(pre-Caldeira-Leggett Standard Model of MQN) となったと言えよう。古典核形成の議論においては $U(R)$ だけで話の済むことが多い(無論、基礎から理論を構築しようとするとは本当はそうは行かないが)ので、標準模型がその真価を発揮し得る舞台は量子的核形成である。そこでは慣性質量 $M(R)$ が本質的役割を果たす。慣性項なくしてトンネル効果は生じ得ないからである。

§ 1-§ Confession of a Sloppy Theoretician

私がこの論文を初めて読んだのは PostDoc として Sussex 大学にいた1976年の秋で、超流動 III の過冷 A 相から B 相への一次相転移が MQN によって起こる可能性についての議論の中で Leggett 氏から教わった時でした。A B 界面エネルギーが大きすぎて MQN はどうやら絶望的らしいということで(尤も、計算機の使えない Leggett 氏と私は界面エネルギーを手で大雑把に見積ただけですが)、またその後 Coleman['77] の論文が出て、それを A B 転移に応用した Sussex 大学の Bailin と Love['80] の計算結果も絶望的な値(寿命 $\exp(2 \times 10^4)$ sec)を与えたこともあって、以来 LK 論文とは御無沙汰していました。同じ頃ロシアでは Lifshitz, Poleskii & Khokhlov(LPK)['78] が Γ_{LK} を III IV に適用して MQN の可能性を論じていました。また最近では、Caldeira & Leggett['81] の枠組を応用して Γ_{LK} に量子摩擦効果を現象論的に取り入れた理論[Burmistrov & Dubovskii, '87] も発表されています。従って、「理論は既に整備されており、基本的には Γ_{LK} に具体的実験状況に即した数値を代入する BOEC(=back-of-envelope calculation) だけで事足りよう」とい

うのが、T S Cのデータを見せて頂いたときの私の反応でした。Ⅲ A Bのときは予言を目指して結局あきらめた訳ですが、今度のⅢ IVの場合は核形成が現実に観測されているのだから特に問題はなかろう、そう思って、実験結果の重要性は認識しつつも、理論屋として自分に出る幕はないものと、サボって居ました。しかし去年の夏、研究会でのレビューを頼まれたのをきっかけに、15年物のポケット計算機で一応計算と数値を当たってみて底無の泥沼に陥りました。標準模型に含まれる empirical constants $\{\rho_b, \sigma_b, \varepsilon_b\}$ として適当に見積もられた値を使って Γ_{LK} を算出したら、 $10^{-5426}/\text{sec}$ などという値が出てきてしまったからです。これではⅢ A Bの場合の二の舞で、「T S Cが量子核形成を観測した」という仮説は完全に否定されることになります。これは大変というので、empirical constants の値を洗い直しました。 ρ_b は非圧縮性流体に質量保存則を適用して得られる表式から、 σ_b はⅢ IVとⅢの間の巨視的界面エネルギーから、 ε_b は Burmistrov et al['93] によって導かれた熱力学的表式から、それぞれ見積もられていた訳ですが、実際は、各々の値にかなりの不定性があり、特に、 ε_b は殆ど見積不能ということが判りました。 $(\varepsilon_b$ はⅢ IVとⅢの particular volume (= volume per particle; a terminology recommended to those who, like myself, are not at home with moles) の差等で表されていますが、これら基礎的データ [Watson et al, '69; Yoroazu et al, '92] の精度が不十分で、数値が桁落ちしてしまうからです。「xの絶対値の測定が困難なため、この精度を上げるのは現状では相当難しい」[福山, '94]ようです。)と云う訳で、三ヶ月余りが混乱の内に過ぎ去りました。

§ 1-3 Standard Model in Bubbly Units

L K(もしくはL P K)の核形成率公式は $\{\rho_b, \sigma_b, \varepsilon_b\}$ という empirical constants (いずれも標準模型に含まれるパラメータであるが、後で導入する physical parameters と区別すべく、こう呼んでおく) を代入すればよいように書かれているが、前節で述べた通り、少なくともⅢ IVの場合、この直接法は用いることが出来ないのが現状である。その上、そもそも empirical constants の表式として、巨視的(熱力学的流体力学的)考察から導かれたものが量子核形成にも使えるか、という本質的問題がある。従って、本節以下§ 1-7 までは、empirical constants の物理的起源は不問に付し、それらの値の如何に拘らぬ議論を行いたい。そのためにはL Kの取扱を整理し直す必要があるので、まず最初に physical parameters $\{R_o, U_o, \tau_o\}$ を導入する。

$R_o =$ (量子揺らぎ[virtual]としてでなく)現実[real]に形成された途端の核の半径; $U(R_o) = 0$

$U_o =$ ポテンシャル障壁の高さ $= U(2 R_o/3)$

$$\tau_0 = \text{標準模型の特性時間}; M(R_0) (R_0/\tau_0)^2 = U_0$$

{所謂「トンネル時間」の一種(Euclidean Barrier Traversal Time)だが、この言葉に現実的意味を付与し得るか否かについては議論の余地あり[cf. 高木, '93]}

無論これらは empirical constants $\{\rho_b, \sigma_b, \varepsilon_b\}$ を組み直したものである。以下、physical parameters を {長さ、エネルギー、時間} の単位として採用する。これがこの模型における自然単位系であり、泡だら系(bubbly units)と称す。作用の泡だら単位は $U_0\tau_0$ であり、これで プランク定数 $h/2\pi$ を割って無次元化したものを h と書く。すると、(時間に依存する) シュレーディンガー方程式は独立なパラメータとして h のみを含む、即ちこの模型は単一パラメータ理論である、ことが判る。独立パラメータを、この様に h の形で残したのは、我々 (=中村と筆者) が古人類に属し、量子論がどこに顔を出しているのか、常に明白に知りたいからである。(この点において我々は Wheeler に習うものである。あらゆる量を cm で測る彼の geometrized units に於て $h/2\pi$ は "1" とされずに残されている[see, e. g., Misner et al, '73, p.36]。) Q人類に属する人ならば、 h の代わりに "coupling constant g " 等を残すであろう。(理論の内容は notation invariant の筈だが、人間の理解(連想(Association)・思考の分岐(Bifurcation)・伝達(Communication))はこの不変性を破っている(Sociologically Broken Notation Invariance)。従って、「最適切notation 探索」は思考の重要な要素であり、相当に時間もかかる作業である。コンピュータソフト等の著作権が以前にも増して話題になる昨今だが、他人の 非標準notation を無断で使用して無頓着という理論家さんが無きにしも非ず、というのは如何なものであろうか。)

§ 1-4 Classic Authoritative Treatment by L K

L Kは標準模型を二つの基本仮定に基づいて取り扱った。

{仮定1} 核が現実形成される以前の系の状態(シュレーディンガー方程式を解く際に採用すべき初期状態)は、ポテンシャルの谷底付近に局在した波束で表される状態(virtual ground state(VGS))である。

{仮定2} 状況は準古典的である、即ち、 $h \ll 1$ 。

これらの仮定の下に導出された核形成率の L K 公式を整理して書くと

$$\Gamma_{LK} = (\text{const}) \exp(-2S(0)/h)$$

但し、 $S(0)$ は「零エネルギーの障壁内作用(sub-barrier action)」、今様に云えば「バウンス作用」(の1/2)、であり、その値は約1である。ここで零エネルギーの作用が登場しているが、その訳は、L Kが特に断わることなく実は第三の仮定を用いたからである；

{仮定3} VGSのエネルギー E_0 はポテンシャル障壁の高さ(= 1 in bubbly units)に比して非常に小さい、即ち、 $E_0 \ll 1$ 。

多分、次のようなコメントが出ることであろう。「 h が小さければ、零点エネルギーたる E_0 も小さい筈、故に、仮定3は仮定2の当然の帰結である」と。然り。しかし、その小ささの程度が重要なのである。これについて以下三節で論じよう。

§ 1-6 Universal Tearing Machine (鼎軽重計)

UTM processes a Fictitious Scenario by itself or in conjunction with a Solemn Fact by establishing a Quasi Exact Domain [or exact inequality] for consistency in a p -dimensional parameter space. FS with Theoretical Assumptions & Confusions and SF with Experimental Uncertainties & Constraints are Confronted And Tested through UTM, which tears Collectively almost-All Theories apart, thereby rendering not only Crazy Absurd Theoreticians but also Crude Approximate Theoreticians as well as most Computer Aided Theoreticians in tears. (Help to tearful theoreticians: Escape to a $(p+1)$ -dimensional parameter space.) This machine, which is an important and frequently invoked tool in making a conclusive decision on the validity of theories, should not remain nameless, hence hereafter to be called UTM. It's conscious use is indispensable in problems of nucleation, where assessment of a theory is liable to be very subjective.

§ 1-5 UTM-processing of CAT

LKの仮定3に従えば、せめて $E_0 < 0.2$ であるべきだろう。 E_0 は h の函数(単一パラメータ理論なので h だけの函数)であるから、この不等式は $h < 10^{-3}$ と翻訳でき、従って、 $\Gamma_{LK}^{-1} > 10^{350}$ 年 となる。つまり、LK公式が適用できるのは、一個の核の形成に関わる寿命が 10^{350} 年以上の現象に限られる。仮に寿命 10^{350} 年の現象を液体ヘリウムで観測しようとする、スーパーカミオカ ($< [40 \text{ M-ton}]^3$) を借り切っても無理で、現宇宙にして約 10^{240} 杯分の液体が要ることになる。(ちなみに、Dyson['79]の発表した「終末論」においては 10^{76} 乗年という寿命の現象が、恐らく「非真面目に」[森, '84]、論じられており、LK公式は謂わばその先駆者である。)と云う訳で、LK公式は“通常の”実験の解析には適用できない。

この結論は、理論式の適用限界を全く理論の枠内で調べて得られたもので、対象とすべき実験の如何に拘らぬということを強調しておきたい。

§ 1-6 What Went Wrong With C A T

前節の結論は、標準模型自体が通常の現象に適用できぬ、ということの意味する訳ではない。L Kの仮定3を吟味する必要がある。ポテンシャル $U(R)$ のもとではほぼ $E_0 = h/2$ というのが普通の直観であるが、それは質量が定数の場合の結果に基づいている。いま考えている問題では質量が R^3 に比例し、その結果、 E_0 は h の函数として上に凸となり、詳しく計算してみると、 $E_0(h=0.09)=1$ となってしまう。つまり h が 0.1 程度まで増大しただけで準束縛状態は存在しなくなってしまう。逆に言えば、「仮定2が“通常の意味で”満たされても仮定3は満たされない」という状況が出現し得る訳で、計算結果の一例を挙げれば、 $E_0(h=0.016)=0.5$ である。この事情は核形成率に甚大な影響を及ぼす。仮定2の意味で準古典的な状況であっても、VGS エネルギーが小さくなければトンネル確率は何十倍も大きくなり得るからである。§ 1-0 の図は、質量が定数となるように変換した変数で見たポテンシャルを用いて、この事情を象徴的に示した積りのものである。

次のようなコメントが発せられるかも知れない。「標準模型は”どうせ” R が大きいときに有効な漸近的なものに過ぎないから、 $M(R)$ の $R=0$ 付近での振舞を気にしても仕方がない。大雑把かも知れぬが L K の公式で充分ではないか。」一理あるコメントだが、我々の立場は次の通りである。(i) 模型は確かに「いい加減」である。だからと言って、その理論的取扱も「いい加減」では、得られた結果は(「いい加減」)² となり、何等の結論も引き出せない。実際、現実の実験状況に対応すると考えられる h の領域に於て L K 公式の与える核形成率は正確な値と30桁以上も異なる(次節参照)、つまり L K 公式の予言をもって標準模型の予言とすることはできない。理論的扱いを出来るだけ正確にすることにより、いずれ模型自体の適用限界を見極める、という方針を採るのが建設的であろう。(ii) そうは言っても、模型の $R=0$ での特徴が結果を決定的に左右するのではやはり気持ちが悪い。しかし、この点は、L K の仮定3を取り除くことにより、むしろ改善される。何故なら、VGS の波動函数は E_0 が大きいほど拡がりが大きく、その分だけ、 $R=0$ 付近からの影響は相対的に減少するからである。

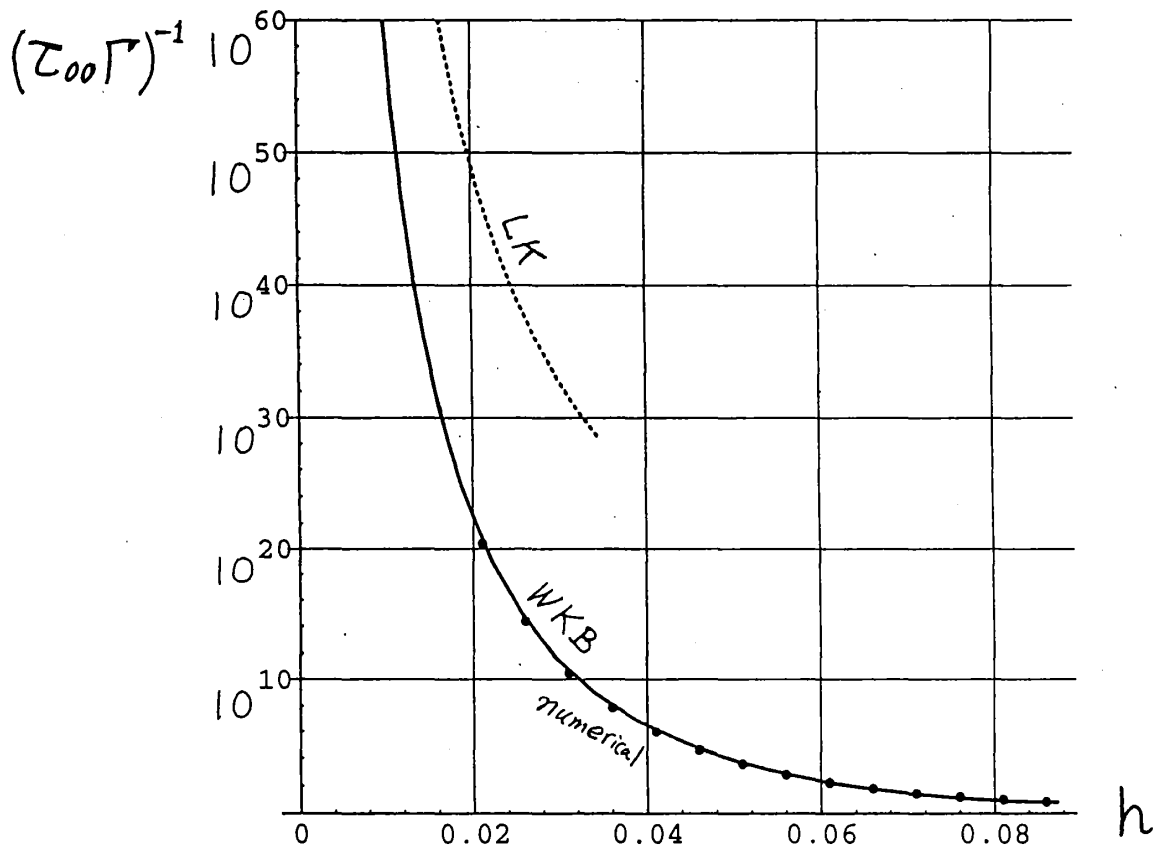
§ 1-7 Beyond C A T

[Remove assumption 3, Return to Orthodox WKB, Recompute nucleation rate]
 仮定1及び2の下で、正統的WKB近似によって予言される核形成率は

$$\Gamma_{\text{WKB}} = \nu(E_0(h)) \exp(-2S(E_0(h))/h)。$$

従って、一般のエネルギー E に於ける sub-barrier action $S(E)$ 及び attempt frequency $\nu(E)$ を計算し、それらに $E_0(h)$ の計算値を代入することにより、WKB近似に基づく核形成率を h の函数として得ることができる。図に結果を

$(\tau_{00}\Gamma_{\text{WKB}})^{-1}$ という寿命に焼き直して実線で示す(τ_{00} は $\tau = \tau_{00}h^{-4/7}$ で定義される物質固有の特性時間で、 h に依らない定数)。同図の破線は L K 公式を外挿したものである。(後者が $h=0.035$ で途切れているのは、L K の V G S エネルギーの外挿値がそこで 1 になることを示す。) 図示した h の領域で両者に 30 桁程度の



違いがあることに注意されたい。ところで、これ程の差異が生ずるとなると、果して WKB の結果自体がどこまで信頼に足るか、いささか心配になる。それで念のため、シュレーディンガー方程式を数値的に解いて Γ を求めてみた[Nakamura et al, '94] ところ、 $h > 0.02$ の領域での計算結果(図の黒点)は図の尺度では WKB の結果と全く区別出来ないことが判った。それ以下の h では精度のよい計算は困難であるが、 $\Gamma_{\text{WKB}}/\Gamma$ の $h=0$ への外挿値は約 4 と見積られた。即ち、WKB の結果は 1 の程度の因子を除いて正確な値を与えることが確認された。

§ 1-8 UTM-processing of Standard Model: physical parameters

T S C 実験で観測された核形成が標準模型で記述されると仮定して、実験状況に対応する h の値を評価してみよう。独立な nucleation centres の個数を N 、準安定状態を用意してから核形成が観測されるまでの待ち時間を τ_{obs} とする。 Γ は h に対して非常に鋭敏であるから、

$$N \tau_{\text{obs}} \Gamma = 1, \quad \text{即ち} \quad (\tau_{00}\Gamma)^{-1} = N_0 \quad \{\text{但し、} N_0 = N \tau_{\text{obs}}/\tau_{00}\}$$

が核形成観測の必要充分条件であると考えて良からう[Lifshitz et al., '78]。実験は約 1 cm^3 の III-IV を用いているので、 N の値としてアヴォガドロ数程度が考えられよう。 τ_{obs} は、よく判らぬが、秒の程度であろう。一方 τ_{oo} は、empirical constants の内の二つ $\{\rho_b$ と $\sigma_b\}$ だけで定まり、大雑把に見積ると 10 psec ($= 10^{-11}\text{ sec}$) 程度となる。仮にこれらの数値を信用すれば、 $N_0 = 10^{33}$ を得る。そこで、この値に5桁の余裕を与えた $10^{30} < N_0 < 10^{35}$ を作業仮設として採用してみよう。すると、上述の条件から $0.0165 > h > 0.0148$ と評価され、また副産物として、 $0.510 > E_0 > 0.484$ が得られる。

以上の解析は TSC の実験と直接的には殆ど関係がない。用いた実験データは、TSC の面々の寿命の尽きぬ内に核形成が観測された、という事実だけである。この事実と、観測された核形成が標準模型で記述される MQN であるという仮定、及び N_0 の値についての作業仮設、この三材料のみに基づく解析であった。もっと進んで、実験状況に対応する physical parameters の値を評価するには、当然のことながら empirical constants に関する情報が要る。そこで physical parameters を次の様を書く。

$$R_0 = R_{00} h^{-2/7}, \quad U_0 = U_{00} h^{-3/7}, \quad \tau_0 = \tau_{00} h^{-4/7}$$

この表現の利点は、 $\{R_{00}, U_{00}, \tau_{00}\}$ が empirical constants の内の二つ $\{\rho_b, \sigma_b\}$ のみで定まり、現状で最も不定性の大きい ε_b に依らぬ、ということである (ε_b は h に吸収されている)。試みに $\{\rho_b, \sigma_b\} = \{0.01\text{ g/cm}^3, 0.02\text{ erg/cm}^2\}$ なる値を採用すると、

$$\{R_{00}, U_{00}, \tau_{00}\} = \{5.48\text{ A(ongstroem)}, 0.810\text{ K}, 9.42\text{ psec}\}$$

となるので、これを先に得た h の上下限と組合わせて

$17.7 < R_0 < 18.3\text{ A}$ 、 $8.47 < U_0 < 9.00\text{ K}$ 、 $54.8 < \tau_0 < 57.4\text{ psec}$ を得る。(既に § 1-6 で述べたように、 ρ_b 及び σ_b の値については複数の説があり、且つ、それらが正しいかどうか判らぬが、これらの値を変えても R_{00} (従って R_0) は余り変わらない [R_{00} は $(\rho_b \sigma_b)^{-1/7}$ に比例する]。さて、TSC 実験の最低温度は 0.4 mK であり、上の U_0 の値を使えば、これは泡だら単位で $T = 10^{-5}$ に相当する。従って、 $T/E_0 = 10^{-4}$ となって当初の仮定 1 が満たされ、理論的内部矛盾はない。(我々はもはや WKB 近似には頼っていないから、仮定 2 は論理的に不要である。但し、およそ $h = 0.015$ となったから、結果的に仮定 2 も満たされてはいる。)

§ 1-9 Macro ?

MQN という言葉を使ってきたが、果して上の結果は Macroscopic QN を意味するのであろうか。先ず、一般に MQP と言うとき (§ 1-0 参照) の M とは何か、これは

例えば次の文章に見られる如く必ずしも自明な概念ではない；

"One can, of course, argue ad nauseam about the precise meaning of the phrase "macroscopically distinct". . . . A sweeping objection is that any phenomenon which involves quantum interference effects can by definition not occur "at the macroscopic level". One can no more argue with this view than with the claim that the mere fact that a certain kind of behavior can be programmed into a computer ipso facto disqualifies it from being "intelligent". For our present purpose it is adequate that the "disconnectivity" . . . of the superposition of "left" and "right" states is of the order of the total number of electrons in the device(10^{15} - 10^{23})" [Leggett & Garg, '85]

ここに出てきた D (=disconnectivity)とは、プログレスの久保亮五氏還暦記念特集号に寄せられた Leggett['80] の論文で提唱された概念で、

"Crudely speaking, . . . a measure of the subtlety of the correlations we need to measure to distinguish a linear superposition from a mixture"、つまり純正量子論的意味に於ける巨視性の程度を測る目安である。70年代前半までの所謂「巨視的量子現象」(超流動・超伝導)は $D = 1$ または 2 なる現象であり、 $D \gg 1$ で特徴づけられる今日のMQPには属さない。(筆者らの世代は、学生時代に「巨視的量子現象」という言葉に騙されたという感じがしないでもない。) TSC実験において、 $R_0 = 18 \text{ A}$ という前節の評価が正しいとすれば、これだけの半径の安定相(Ⅲ)の出現に際しては、半径約45 Aの範囲の準安定相(ⅢIV [$x = 0.06$])が関与していることになり、Dはこの範囲に含まれるヘリウム原子の個数程度、即ち 10^4 程度、と推量してよからう。とすれば、Macro とはいかぬまでも Meso ("mesoscopic system" という際の正式の意味でなく、単にサイズの意味に於て)と云えることになるだろうか。

段 2 窮 すなはち 休

前段で得られた描像は Not (Very)" Absurd (n = natural number dependent on subjective evaluation)と言って良く、これで急/段、大団円となってめでたしめでたしと行きたい所ですが、「§1-10 Further UTM-processing of Standard Model: empirical constants」を完了せずして、そうはいきません。つまり、physical parameters に対して得られた上下限がTSC実験と整合するかどうか、WSの席上で恒藤先生からも質問されました通り、この点を吟味しないと、MQNが観測された

とは結論できません。つまり、前段の話は特にⅢⅣに限らないMQNの一般論でしたが、最終的にはⅢⅣ-specific features に立向かわねばなりません。empirical constants の値が計算出来るかどうか、正確に計算できないまでも上下限を押さえ得るか、あるいは何等かの独立な実験と関連づけることにより間接的に評価できるか、等々のことを理論的にきちんと詰める必要があります。さらに標準模型自体も微視的（場の理論的）観点から批判的に検討すべきです。破/段は八方破れです。

以上ではMQTの部分類としてのMQNの理論を、その特質に焦点を当てて述べましたが、当然、MQT一般に共通の問題、即ち散逸（所謂量子摩擦）効果、も考慮せねばなりません。散逸効果は基本的には Caldeira & Leggett['81] の枠組で扱って良かろうと考えられます（但し、 $\Gamma = -\text{Im } F$ なる「魔法公式」の基礎に関して全く問題が無い訳ではないようです[Leggett, '93]）。しかし、この枠組をMQNの標準模型に形式的に応用した理論[Burmistrov & Dubovskii, '87]の結果は、LK公式に散逸効果を付加した形になっており、LK公式の適用できる現象よりも寿命の長い現象にしか適用できません、つまり現実の実験に適用する訳にはいきませんが、“通常”、散逸効果は延命作用を有します。この点に関して些か混乱があるようですが、“通常”という言葉の意味も含めて詳しくは Caldeira & Leggett['83] 及び Leggett['93] を参照）。従って、散逸効果の扱いについても再考を要します。但し、散逸効果が強く利いて寿命が延び過ぎると核形成が観測にかからぬことになります。TSCがMQNを観測したと仮定すれば、散逸効果の影響は、恐らく、寿命を高々数桁延ばしているに過ぎないでしょう。とすれば、前段で散逸を無視して評価した physical parameters の値も全般的な外れではなかろうと希望的に観測されはします。

MQNの検証を確立するには、実験的に制御できるパラメータを考えて、それについての系統的研究を行うことが不可欠です。自明な制御パラメータは温度であり、これについては既に実験データが存在しています。TSCでは準安定状態の初期圧力を変えることや磁場をかけることなども計画されており、これらに対応する理論が緊急に求められています。

いずれにせよ、真に実験と突き合わせ得る理論への道のり未だ遠く、目下窮して休、急がず慌てず（LK論文の内容を看破するのに結局17年もかかった[破/段 § 1-§ 参照]訳で、これが私の研究の時定数、核形成の寿命に比べれば短いのがせめてもの慰めと言うべきでしょうか）、雪国の古井戸[渡辺, '9?]から洩れ来る曙光を求めトンネルの闇中にて虚々実々の方策を模索中[川端文学研究会, '79] と云った処です。

段 3 心象風景 久遠多夢波羅醒^霧と超低温物理([Quantum, Paradigm]_± and Ultra Low Temperature Physics)

超低温は砂漠ではないか、という声を耳にすることがあります。これは、理論家もしくは理論を盲信する人の傲慢だと思います。(同時に、砂漠に対する侮辱だと思います。砂漠は人間(特に「文明人」)にとって都合の悪い環境かもしれませんが、それは砂漠の存在意義を損なうものではありません。)超流動Ⅲの示す顕著な磁氣的振舞を予見した理論家はいませんでしたし、その様な例は枚挙に暇がありません。未知への好奇心にかられてひたすらにより低い温度の実現を目指す地道な努力は支持されて然るべきだと思います。LT、VeryLT、UltraLTと進んできた流れは、TremendouslyLT, SupremelyLT, . . . と澱むことなく続くでしょう。それに、超低温はそれ自体として意味があるだけではありません。§1.9で引用したLeggett論文は、MQCへの道程を見据えてのMQT研究の重要性を指摘して今日の謂わば流行的ともいえる状況を作り出した仕掛論文ですが、その題名が". . . and Quantum Theory of Measurement"となっていることに注意を喚起したいと思います。この論文の技術的側面を扱ったCaldeira & Leggett ['81]が頻繁に引用されるのに比して、この論文もしくは関連文献[Leggett, '84a; '87]で表明されている「量子力学に対する根本的疑義、即ち、現在の量子力学の枠組は所詮近似的なものに過ぎず、対象とする系の複雑性(complexity)が増大するにつれて量子力学の破れが顕在化するのではないか、という予想」は、いわばjokeと見なされているようで殆ど引用されることがありません。これは大多数の物理学者の「健全さ」を示すものかも知れません。しかし、私の観測する(むしろしない)ところ、Leggett氏自身は $|AJL\rangle = |Authentic L\rangle + |Joking L\rangle$ という状態にあるようです。冗句かも知れぬが「真剣な冗句」ということです。WS第一日の講演で鈴木治彦氏も強調されましたように、純粹で清浄な系は殆どが超低温にして初めて用意できるものです。将来、仮に「複雑性に起因した量子力学の破れ」が発見されるとしたら、その為のかけがえなき舞台を超低温は提供してくれる筈だと思います。超低温、就中、その立役者たるHeに敬意を表して一首捧げます。

Ode to He

He was the first[>1] to appear in the $\mathcal{U}$ He is the most [>1] to abound in the $\mathcal{U}$

Who is He

He is He

ヘリウム讃歌詩歌

宇宙に最初に現れた

宇宙で一番のさばり屋

それは誰

へっへっ

[Anonymous, '993]

[量場醒醉訳]

($\mathcal{U}$ = Wheeler['80]'s symbol for "Participatory Universe")

段 4 結びに代えて

理論とは一体如何なるものでしょうか。近松['?]' いわく、

「・・兎角その所作[結果]が実事[実験]に似るを上手とす。・・・

似るをもって第一とす、・・・ この論尤のやうなれ共、

芸[理論]といふものの真実のいきかたをしらぬ説也。・・・

芸[理論]といふものは実ヅツと虚リとの皮膜に ϵ の間にあるもの也。・・・

虚にして虚にあらず実にして実にあらず この間に慰みが有たもの也」

それにしても、

A Central Dogma Runs Through It [adapted from Redford, '93];

Quantum Paradigm All the Way

From Down-to-earth to Cosmological

From Creation to Diffuse-end(less, $k \leq 0$)

という物理学の現況に鑑みて、量子論の提起する悩ましき難問は「哲学的問題」などと云って済ませる訳にいかなくなっています。{最終的には Mind(心?;"適訳なし"[恒藤, '90)][Penrose, '89] と如何ように関連する(せぬ)のでしょうか。しかし、そこまで行かずとも、既に「現実的」問題です。} これは、むしろ将来の物理への一つの希望の鍵として、楽観的に捉えるべきものでしょう。統計力学についての下記の見解がそのまま当てはまると思われます。

「ボルツマン等の理論は、・・・ 物理学史上つねにそうであったように ・・・

それが解決したよりももっと多くの、しばしば困難な問題を新しく引き起こし

たのである。・・・ しかし、理論がみせかけの完結性を持たず、新しい問題を

豊富に生み出してゆくことこそ、その生命の現れであり、科学の真の姿なので

ある。」[恒藤, '57: Broda「ボルツマン」への訳者追補Ⅲ]

余段 M's & MM

§ Mumbles of QMecanically-hypnotised half-aSleep Toad

Mixture ?

Questionable;

Collapse ?

Tondemonai;

Nothing but coherence.

Perhaps I am in the state $\int_{\text{醒}}^{\text{醉}} d\sigma \tau | \sigma \tau \rangle.$

§ Meaning of Meaning: A quote from a quotation by

Wheeler[private communication, '84] from D.Foellesdal:

""Meaning is the joint product of all the evidence available

to those who communicate.""

REFERENCES

Abraham, B. M., Weinstock, B. and Osborne, D. W., "Lambda-Temperature of He^3 - He^4 Mixtures", Phys. Rev. 76('49)864.

天野 清, 「量子力学史」 (京都府出版協同組合 '50) [I am grateful to Prof. Toshihiko Tsuneto for acquainting me with this book.]

Anderson, A. C., Roach, W. R., Sarwinski, R. E. and Wheatley, J. C., "Heat Capacity of Dilute Solutions of Liquid He^3 in He^4 at Low Temperatures", Phys. Rev. Lett. 16('66)263.

Anonymous, Mother Helios Rhymes, compiled by Sleepy Toad (to appear in Inter-Galactic J. Jocular Sci., '993)

*Avenel, O., Ihas, G. G. and Varoquaux, E., "The Nucleation of Vortices in Superfluid ^4He : Answers and Questions, JLTP93('93)1031.

*Bailin, D. and Love, A., "Instantons in Superfluid ^3He ", J. Phys. A13('80)L271.

Bardeen, J., Baym, G. and Pines, D., "Effective Interaction of He^3 atoms in Dilute Solutions of He^3 in He^4 at Low Temperatures", Phys. Rev. 156('67)207.

Born, M., The Restless Universe (Blackie & Son, '35) [I am grateful to Dr. Hikaru Araki for acquainting me with this book.]

*Bowley, R. M., "Vortices in 2-D and 3-D Superfluids", JLTP87('92)137.

Broda, E., Ludwig Boltzmann: Mensch · Physiker · Philosoph {「ボルツマン」, 市井三郎・恒藤敏彦訳(みすず書房, '57)}

Burmistrov, S. N. and Dubovskii, L. B., "Effect of Dissipation on the Quantum Kinetics of Phase Transitions at Low Temperatures", Zh. Eksp. Teor. Fiz. 93('87)733 [Sov. Phys. JETP66('87)414]

Burmistrov, S. N., Dubovskii, L. B. and Tsymbalenko, V. L., "Diffusion Mechanism in the Quantum Decay of Metastable ^3He - ^4He Mixtures at Low Temperatures", JLTP('93)363.

Caldeira, A. O. and Leggett, A. J., "Influence of Dissipation on Quantum Tunneling in Macroscopic Systems", Phys. Rev. Lett. 46('81)211.

Caldeira, A. O. and Leggett, A. J., "Quantum Tunnelling in a Dissipative System", Ann. Phys. 149('83)374; Erratum 153('84)445(E).

Casimir, H. B. G., "Broken English", J. Jocular Phys. III('55)14 [Reprinted in Weber('82), p. 2] [I am grateful to Prof. Chris Pethick for kindly sending me

a collection volume FAUST and JOURNAL of JOULAR PHYSICS Volumes, I, II, & III Reprinted on the Occasion of NIELS BOHR'S CENTENARY October 7, 1985.]

Coleman, S., "Fate of the False Vacuum: Semiclassical Theory", Phys.Rev.D15 ('77)2929.

Duncan, R. and Weston-Smith, M., ed., The Encyclopedia of Ignorance(Pergamon, '77)

Dyson, F. J., "Time Without End: Physics and Biology in an Open Universe" alias "Eschatology", Rev.Mod.Phys. 51('79)447.

Dyson, F. J., Disturbing the Universe(Basic, '81) [I am grateful to Prof. Shun-ya Ishioka for acquainting me with this book.]

Eddington, A. S., The nature of the Physical World(CUP., '28)

Edwards, D. O., Brewer, D. F., Seligman, P., Skertic, M. and Yaqub, M., "Solubility of He^3 in Liquid He^4 at 0 K", Phys.Rev.Lett. 15('65)773.

福山 寛, Comment to my talk at spring'94 JPS meeting.

振萬大損, 「終末論」(開宙社, '888, in press)

Garrido, L., ed., Systems Far From Equilibrium: Proc.Sitges Conf.Stat.Mech.'80(Springer, '80)

Hakonen, P. J., Krusius, M., Salomaa, M. M. and Simola, J. T., "Comment on "Nucleation of ^3He -B from the A Phase: A Cosmic-Ray Effect?"", Phys.Rev.Lett. 54('85)245.

穂積以貫(三木平右衛門?) 「浄瑠璃文句評註 難波土産」 {以下より孫引: 森修「近松と浄瑠璃」(塙書房, '90) p.163-200; 鳥越文蔵・内山美樹子・信多純一・井口洋「近松への招待」(岩波書店, '89) p.20-22}

川端文学研究会, 「虚実の皮膜 雪国・高原・牧歌」(教育出版センター, '79)

古場碧頭, 「駄洒落物理学」(河原乞食社, '000)

*Iordanskii, S. V. and Finkel'shtein, A. M., "Effect of Quantum Fluctuations on the Lifetimes of Metastable States in Solids", Zh.Eksp.Teor.Fiz. 62('72)403[Sov.Phys. JETP35('72)215]

*Inoue, T. and Ishikawa, K., "Vortex Nucleation by Negative Ions in Superfluid He^4 ", talk presented at spring'94 JPS meeting.

Lamb, H., Hydrodynamics, Fifth Edition(CUP, '24), § 91A Collapse of a Spherical Bubble, Expansion of a Spherical Cavity, p.114 [This section was inserted in the fifth edition.], § 275 Oscillations of a Bubble, p.448.

Landau, L. D. and Lifshitz, E. M., Statistical Physics alias CTAT or 'THE B00

K', translated by E. Peierls and R. F. Peierls (Pergamon, '58) Chap. XV. Surfaces, § 147 The Creation of Nuclei, p. 475FN {「統計物理学」第3版下, 小林他訳(岩波書店, '80), 第15章 界面, § 162 相転移の際の核形成, p. 669脚註.}

Landau, L. D. and Pomeranchuk, I., "On the Motion of Foreign Particles in He II", Doklady Akad. Nauk. (SSSR) 59('48)669 {translated in Collected Papers of L. D. Landau, ed. D. ter Haar (Pergamon '65), p. 469}

Langer, J. S., "Kinetics of Metastable States", in Garrido['80], p. 12.

Leggett, A. J., "The "Arrow of Time" and Quantum Mechanics", in Duncan et al['77], p. 101.

Leggett, A. J., "Macroscopic Quantum Systems and the Quantum Theory of Measurement", Prog. Theor. Phys. Suppl. 69('80)80.

Leggett, A. J., "Schroedinger's Cat and Her Laboratory Cousins", Contemp. Phys. 25('84a)583.

Leggett, A. J., "Nucleation of $^3\text{He-B}$ from the A Phase: A Cosmic-Ray Effect?", Phys. Rev. Lett. 53('84b)1096.

Leggett, A. J., "Some recent Applications of Instanton and Related Techniques in Condensed-Matter Physics", Prog. Theor. Phys. Suppl. 80('84c)10.

Leggett, A. J., The Problems of Physics (OUP, '87) Chap. 4 Physics on a Human Scale, p. 132-133. {「物理学のすすめ」(紀伊國屋書店, '90), 4章 人間規模の物理, p. 180-181.} ; ここで例に挙げられている超流動 ^3He のA相からB相への一次相転移は、その後、放射線(主に宇宙線)という外因によって引き起こされる現象("baked Alaska"[Leggett, '84b])と考えて差し支えないことが、実験的にはほぼ確認されている[Schiffer et al, '92].

Leggett, A. J., "The Effect of Dissipation on Tunneling", JJAP Series 9 ('93): Proc. 4-th ISQM'92, p. 10.

Leggett, A. J. and Garg, A., "Quantum Mechanics versus Macroscopic Realism: Is the Flux There when Nobody Looks?", Phys. Rev. Lett. 54('85)857.

LeGuin, U. K., Catwings (Orchard Books, '88) [deformed, without permission, into Cat Winks by Sleepy Toad]

Lifshitz, I. M. and Kagan, Yu., "Quantum Kinetics of Phase Transitions at Temperatures Close to Absolute Zero", Zh. Eksp. Teor. Fiz. 62('72)385 [Sov. Phys. JETP 35('72)206] [I am grateful to Prof. Tony Leggett for acquainting me with this paper.]

Lifshitz, I. M., Pollesskii, V. N. and Khokhlov, V. A., "Kinetics of Nucleation a

nd Stratification of Dilute He^3 - He^4 Solutions Under Pressure at Low Temperatures", Zh. Eksp. Teor. Fiz. 74('78)268[Sov. Phys. JETP47('78)137]

*Maris, H. J., Balibar, S. and Pettersen, M. S., "Nucleation of Bubbles in Liquid Helium", JLTP93('93)1069.

Misner, C. W., Thorne, K. S. and Wheeler, J. A., Gravitation(Freeman, '73)

森 政弘, 「「非まじめ」のすすめ」(講談社, '84)

Nakamura, T. and Takagi, S., "Macroscopic Quantum Nucleation: WKB Analysis of 3+2-3 Model", preprint('93).

Nakamura, T., Kanno, Y. and Takagi, S., "Single-Collective-Degree-of-Freedom Models of Macroscopic Quantum Nucleation", in preparation('94).

*Onuki, A., "Quantum Nucleation in Helium under High-Frequency Field", JPSJ 63('94)1245.

Penrose, R., The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Law of Physics(OUP, '89) [I am grateful to Prof. Shin-ichi Tadaki for acquainting me with this book.]

Pomeranchuk, I. J., Zh. Eksp. Teor. Fiz. 19('49)42.

Rayleigh, Lord J. W. S., "On the Pressure Developed in a Liquid During the Collapse of a Spherical Cavity", Phil. Mag. xxxiv(July-December'17)94. "When reading O. Reynolds's description of the sounds emitted by water in a kettle as it comes to the boil, . . . I have given a simpler derivation of Besant's result. I have also . . ."

Redford, R., dir., A River Runs Through It(Allied Filmmakers, '92)

量場醒醉 and Sleepy Toad in the Hibernation Hole, 「方々除雪: Off Course de la Virtual-Realistic Methode de Science & Life」(量揺社, '993)

佐藤武郎、森下將史、小方正文, " ^3He - ^4He 混合液過飽和状態からの相分離 -- 1次相転移における量子効果--", 物性研究55-3('90, No. 12)271.

Sato, T., Morishita, M., Ogata, M. and Katoh, S., "Critical Supersaturation of ^3He - ^4He Liquid Mixtures: Decay of Metastable States at Ultralow Temperatures", Phys. Rev. Lett. 69('92)335.

Sato, T., Morishita, M., Katoh, S., Hatakeyama, K. and Takashima, M., "Nucleation in Supersaturated ^3He - ^4He Liquid Mixtures -- Decay of Metastable States at Ultralow Temperatures--", Physica B('93)[invited talk at Proc. LT20], in press.

Schiffer, P., O'Keefe, M. T., Hildreth, M. D., Fukuyama, H. and Osheroff, D. D., "

Strong Supercooling and Stimulation of the A-B Transition in Superfluid ^3He , Phys. Rev. Lett. 69('92)120.

Schindler, S. D., illustrations in Catwings[LeGuin, '88]

$\mathcal{S} := S^T$, which STands for S^T andard(=off-standard) Schizophrenic Terminology of Sleepy Toad alias Slow Theoretician.

Sleepy Toad, ed., 「萬世ヲシイ宙辞苑」 (Physica Galacta(雅楽多出版), '993)

高木 伸, "トンネル時間とは何か", alias "「トンネル時間」に就いての迷想", ハリテイ 08 No.12('93)68.

近松門左衛門 [quoted in 穂積以貫]

恒藤敏彦, "ヘリウムに関する2, 3の問題", 固体物理4, No.12('69)14(652).

恒藤敏彦, "R. Penrose: The Emperor's New Mind", 科学60, No. 7('90)491.

*Tsymbalenko, V. L., "A Possible Observation of Quantum Nucleation in Superfluid He^4 Near Crystallization", JLT88('92)55.

朝永振一郎, 「量子力学の世界像」 (弘文堂, '65)

朝永振一郎, 「スピンはめぐる 成熟期の量子力学」 (中央公論社, '74)

Uhlenbeck, G. E., "Some Recent Progress in Statistical Mechanics", Phys. Today July('60)16.

*Uwaha, M., "Quantum Nucleation of Solids", JLT85('83)15.

Walters, G. K. and Fairbank, W. M., "Phase Separation in He^3 - He^4 Solutions", Letters to the Editor, Phys. Rev. 103('56)262.

渡辺 慧, "井戸堀り論" [quoted in 量場 & STHH['993]]

Watson, G. E., Reppy, J. D. and Richardson, R. C., "Low-Temperature Density and Solubility of He^3 in Liquid He^4 under Pressure", Phys. Rev. 188('69)384.

Weber, R. L., More Random Walks in Science (The Institute of Physics, '82)

Wheeler, J. A., "Beyond the Black Hole", in Woolf['80], p. 341 [partially reprinted in Wheeler['83]]

Wheeler, J. A., "Law Without Law", in Wheeler & Zurek['83], p. 182.

Wheeler, J. A. and Zurek, W. H., ed., QUANTUM: theory and measurement (Princeton, '83)

Woolf, H., ed., Some Strangeness in the Proportion: A Centenary Symposium to Celebrate the Achievements of Albert Einstein (Addison-Wesley, '80)

Yorozu, S., Hiroi, M., Fukuyama, H., Akimoto, H., Ishimoto, H. and Ogawa, S., "Phase Separation Curve of He^3 - He^4 Mixtures Under Pressure", Phys. Rev. B45('92-II)12942.