

量子ゼノン効果とその影響

—時間のない物理学について 2—

蔵 琢也¹ 蔵 研也

Abstract (概要) 量子ゼノン効果とは「観察間隔」が量子系の遷移確率に影響を与える効果である。しかし「観察」は自然状態で自動的に起こるものにも当てはまる。このような量子ゼノン効果が現実の世界で大規模に起こっている可能性と、それが現在の物理学の様々な不整合を解決する可能性について論じる。具体的な候補は、中性子や放射性物質の半減期、素粒子の崩壊までの寿命、暗黒物質説の対案である MOND である。

1. 量子ゼノン効果

1. 1 序

本論文は三つの章に分かれる。第一章では量子ゼノン効果の概説と、非自発的観察にもそれが当てはまるとすべきことを説明する。

第二章は、それが現実に行っている現象の候補を列記して、解説していく。

第三章は、宇宙論での暗黒物質説を批判的に概説し、代替理論である MOND (修正ニュートン力学) について量子ゼノン効果からの説明を試みる。

なお、量子力学の記述スタイルは数学式にする。

1. 2 量子ゼノン効果

数学的にみれば古典的な確率は正値 L_1 ノルムで記述され、時間発展もそのほうが自然である。一方、量子力学では原則ユニタリー発展になるので、時間発展の振幅はヒルベルト空間の L_2 ノルムで記述されることになる。しかし双方でノルム形状は違い、正値 L_1 ノルムは直線形なのに対して、 L_2 ノルムは球状なのである。この違いは、多くの場合に重要ではないが、特殊な場合には決定的になる。量子ゼノン効果はこの一つである (註1)。

量子ゼノン効果とは、観測者による頻繁な観察が、放射性元素の崩壊のような稀な現象の生起を抑圧するという効果である (Beskow & Nilsson 1967; Misra & Sudarshan 1977)。代表的な例は、中性子や放射性元素が崩壊するときのように、観察対象が準安定な状態 A にあり、それが時間とともにはっきり区別可能な、もっと安定な状態 B に遷移する場合である。観察がまった

¹淑徳大学総合福祉学部 260-8701 千葉市中央区大巖寺町 200

く存在しないなら、はじめは初期の準安定な状態Aから、ユニタリー発展に従って連続的に両方の状態が混じった状態になって、徐々に安定な状態Bの割合が増えていくのである。ヒルベルト空間のベクトルの向きで考えれば、最初はAの向きに向いているが、連続的にBの向きの成分が増えていくことになる。

数学的に正確に書こう。観察される系の状態空間 H が、状態 A と B でラベルされるヒルベルト空間 H_A と H_B の直和 $H = H_A \oplus H_B$ であるとする。つまり H_A と H_B は直交しており、適切な「観察」によって、各空間に射影される。射影作用素をそれぞれ π_A 、 π_B とおく。ここで $\pi_A + \pi_B = \text{id}$ 。時刻 t の波動関数を φ_t と書くと射影作用素の条件から $\varphi_t = \pi_A(\varphi_t) + \pi_B(\varphi_t)$ である。初期条件は $\varphi_0 \in H_A$ であり、 $|\pi_A(\varphi_0)|^2 = 1$ を満たす。 φ_t は「観察」がなければ連続的に滑らかな時間変化をする。そこで、 $\varphi'_t(s) = \frac{d\varphi_t}{dt}(s)$ と書く。すると初期には、

$$\varphi_t = \varphi_0 + t\varphi'_t(0) + o(t) \tag{1.1}$$

となり、射影作用素の線形性によって、

$$\pi_B(\varphi_t) = t\pi_B(\varphi'_t(0)) + o(t) \tag{1.2}$$

になる。 $\pi_B(\varphi'_t(0)) \equiv h'_B$ と略記すると、 $t=0$ の近傍で φ_t が H_B に属する確率測度 $P_B(t)$ は、

$$P_B(t) = \|\pi_B(\varphi_t)\|^2 = t^2 \|h'_B\|^2 + o(t^2) \tag{1.3}$$

となる。右辺が時間の二乗であることは、巨視的な古典確率空間 L_1 とヒルベルト空間のノルム L_2 の違いに起因していて、量子ゼノン効果を理解するための鍵である。 φ_t の属する二つのヒルベルト空間の割合が同じになる時間を「基礎半減期」と定義し $T_{1/2}$ と書く。これは概ね、真空中で孤立して存在するときの理論的な値である。

実用のために以後、 $\|h'_B\| = \lambda$ と書くと、 H_A より H_B がはるかに広い場合は、指数型になり、

$$P_B(t) = (1 - e^{-\lambda t})^2 + o(t^3) \tag{1.4}$$

とすると、もう一次だけ近似精度があがり、 $T_{1/2} \approx \log 2 / \lambda$ になる。これは B 成分の増え方は λ を変遷しやすさに表す定数として $(1 - e^{-\lambda t})$ で良く近似されるということである (註2)。

ここまでは単なる関数空間での時間変化の考察であったが、「観察」が入るとどうなるのだろうか。

時間 t おける観察は、系の状態 A か状態 B かのどちらかに $P_A(t) : P_B(t)$ の確率で確定を強いることになる。そして確実性の高い観測が半減期 $T_{1/2}$ に比べ十分短い時間で行われる場合状態 B である確率 $P_B(t)$ は(1.3)より $|\lambda t|^2$ である。観察間隔 t を t/n にすると、一回で B になっている確率は $1/n^2$ 倍に下がるが、観察回数は n 倍行えるので、大まかに言えば遷移の総合確率は $1/n$ 程度に低下することになる。つまり頻繁に観察すればするほど、元に状態に留まっている期待値が上がることになる。このような日常の確率の常識から外れた結論から、古典的な「ゼノン

のパラドックス」にちなんで「量子ゼノン効果」と呼ばれたのである（解説として[湯浅 2009]）。

逆に観察をほとんど行わなければ遷移確率は上がるが、確率の上限は1なので、半減期 $T_{1/2}$ 程度の時間では完全に頭打ちになっており、以後、量子ゼノン効果はほとんど無視できるようになる（場合によっては逆ゼノン効果が起こる）。この有効的な上限時間を τ_0 とする。これは系の具体的な詳細に依存していて、一般的な定義を議論することには余り意味はない。むしろこれ以下では量子ゼノン効果が有効になってくるという大まかな時間の桁の基準としよう。

1. 3 「観察間隔」の意味と個数

つぎに量子ゼノン効果で鍵になる「観察間隔」とは具体的にどのような事象を指すかを考察しよう。

「観測者」は、莫大な数とはいえ結局は粒子の複合に過ぎないのだから、この宇宙に明快なではっきりした観察者などはない。それは量子力学初期のシュレディンガーの猫やウィグナーの友人のパラドックスの例で明らかである。観察者の意思の概念は、まったく本質的ではないのである。スリットの干渉縞の問題にしても、量子消しゴムの実験にしても、最終的に観察されるまえの中間の情報が消えてしてしまえば、中間状態を問うのは意味がなく、最終状態に至る各経路の重ねあわせを現す振幅しか意味がなくなる。これらのことに象徴的に現れているように、量子ゼノン効果においての「観察間隔」というのは、特定の観察者が存在して「意図的に」観察するという行為というよりも、観察者と密接に絡んでいる外界に、観察される系の変化が付加逆的で消せないはっきりとした影響を残す時間と考えるべきである。つまり「知的な観察者」などは不要であり、むしろ、状態遷移がいかに早くかつ正確に外界に、はっきりとして消しがたい影響を与えるかが問われているのである。この時間を τ としよう。これは正確には「観察時刻の不定性」と言った方が正しい。だが「事象の生起から観察までの時間」と「観察時刻の不定性」は強く相関するので、以後は代替として前者を主に使用する。

意思のある観測者のかかわりについては、彼らが積極的に観察を実行するという状況は、状態の遷移が素早く小さな誤差で探知できる状況を人為的に作り出すことによって、この時間 τ が短くなるという意味しかない。

ここで重要な点は、積極的な観察は必ずしも必要はなく、自然状態でも自動的にゼノン効果は起こるということである。

これは中性子や放射性元素の崩壊の計算に影響を与える。具体的には、系が完全な真空状態で周囲の物質から離れて孤立した状態よりも、物質中のほうが量子ゼノン効果によって寿命が延びるはずである。

また、類似した状態の同種粒子が近くに大量にある場合、どの粒子が崩壊したのかがはっきりわからない。これは特殊な効果をもたらす可能性がある。識別不可能な粒子が N 個あるとすると、どれか一つが崩壊する時間が約 $1/N$ になる（註2）。これは N 個をまとめて一つの系として半減期を考えた場合である。個々の粒子の寿命に直した場合、単純には相殺して元に戻る。

しかし同種粒子の問題は、識別可能空間をどう設定するか、ボソンの凝集をどう扱うかなど難しい問題である。最大でゼノン効果が $1/N$ 程度に減少する可能性もある。

また、量子ゼノン効果による状態の凍結が、どこまでも短い時間に適応可能かということ必ずしもそうではない。初期状態の用意や観測結果による状態の分岐が完全にはできないなどによって、量子ゼノン効果の現実の運用では適用下限がある。それを τ_0 とする。つまり適用下限 τ_0 と適用上限 τ_∞ の間で、量子ゼノン効果は観測間隔 τ と観察する粒子の不定性 N の積の逆数に近似として表せるということである。つまり、状態 A から状態 B への遷移確率 $P(A;B)$ は、系特有の比例定数を k として、

$$\frac{kT_{1/2}^2}{\tau} \quad (1.5) \quad \text{or} \quad \frac{kT_{1/2}^2}{\tau N} \quad (1.6)$$

が、有効的な式になる。

もう一つ忘れてはならない重要なことは、系の遷移パターンが複数あって、それらの状態が区別される場合は、量子ゼノン効果が起こりにくい崩壊パターンが好まれるということである。つまり、いつ遷移したかわからない経路が好まれることである。

この量子ゼノン効果は、特殊な場合に量子力学と古典力学の違いを示す珍妙な現象とみなされ、ほとんどの物理現象でほぼ全く考慮されてこなかった。しかしながら以降の節で、これが起こっている可能性の候補と実験結果を紹介する。

2. 量子ゼノン効果の候補

2. 1 中性子寿命

自由中性子は真空中において約 15 分弱で β 崩壊する。中性子寿命を計る実験の精度は科学技術の進歩に伴って徐々に上がってきた。しかしながら現在、その精密になってきたはずの実験の間に 1% 程度の見逃せない有意な違いが存在するのである。

886 秒程度の長い寿命を示した実験群と、878 秒程度の短い寿命を示した実験 (Serebrov *et al.* 2005, 2008) が存在するのである。後者では中性子寿命は $878.5 \pm 0.7 \text{ stat} \pm 0.3 \text{ sys}$ 秒であり、それ以前の実験の世界平均 885.7 ± 0.8 秒から 6.5σ だけ、前の正確な実験 (Arzumanov *et al.* 2000) $885.4 \pm 0.9 \pm 0.4$ 秒より 5.6σ だけ離れている。寿命の短い実験のほうが、他の実験から外れているのである。

しかし、短い寿命を示した実験が「失敗実験」だったとは断定しがたい。短い寿命のほうが、他のデータと整合している部分があるからである。たとえば以前の値では中性子崩壊の β -asymmetry について標準模型のユニタリー性の点で矛盾があった (Abele *et al.* 2002)。しかし Serebrov *et al.* (2005, 2008) によれば、彼らの実験値には良く合うという。さらに Mathews *et al.* (2005) によれば、この Serebrov *et al.* (2005) の中性子寿命の結果は、ビッグバンにおける元

素の合成時の陽子・中性子比と元素合成の比率を変化させるが、 ^4He や重水素の存在量は従来の推定よりよく合い、また宇宙背景放射ゆらぎの解析から得られた物質密度パラメーターともより一致するという。ただし、 ^7Li の存在量は従来に引き続いて合わないどころか、中性子が減ったせいで悪くなっている (Cyburt *et al.* 2008)。

それでは、なぜこのような違いが生じるのだろうか。中性子寿命の測定には大まかに二つの方法があり、清水 (2009) によると「一つ目は、崩壊によって生じる粒子を検出して崩壊数を数える方法で、これまではおもに飛行する中性子を用いて行なわれてきた。(中略)、二つ目は、蓄積された中性子の現象(「減少」の誤記)を計測する方法である。中性子の寿命はとても長いため、ほとんど崩壊しない。」前者を〈ビーム実験〉、後者を〈蓄積実験〉と呼ぶと、実際に両者の実験方式で寿命に違いがあるように見える。Pokotilovski (2009) の集計では、前者の実験の平均は 889.2 ± 2.4 秒であり、後者の実験の平均は 881.6 ± 0.6 秒である。そして、短い時間を示した Serebrov *et al.* (2005) の実験は、後者の低エネルギーにした中性子を大量に閉じ込めた蓄積実験なのである。これは、中性子を一定時間、閉じ込めた後に残った数を計り、寿命を計算する方法で、個々の中性子がいつ崩壊したかを全く計っていない。そのうえ、大量の同種粒子が密集している状況では、先に述べたように、どの粒子が崩壊したのかがわからず、量子ゼノン効果の影響は極端に小さくなる。

一般に、Serebrov *et al.* (2005) の出した値を信用しない人々は、蓄積容器からの漏れが重要な系統誤差要因であり、彼らは小さく見積もったと暗に示唆する。確かに漏れが推定より大きければ、中性子数の減少が大きくなるので、寿命が短く出る。しかしながら、標準理論や元素合成との整合を考えれば、短寿命を出した Serebrov *et al.* (2005) の値が本来の真空中の真の値であり、他の実験の値は、弱いレベルの量子ゼノン効果の影響で寿命が伸びた可能性がある。

どちらが真の値にしる、今までのどの実験でも量子ゼノン効果は全く考慮されていないが、影響している可能性があるのである(註3)

2. 2 他の放射性元素の例

不安定原子核の半減期も、また量子ゼノン効果の影響をうけるかもしれない。質量数の大きな不安定原子核の半減期は、その複雑性ゆえに理論から精度よく予想することはできない。もっぱら実験で決めているが、概して原子番号が大きくなると実験数も少なくなる。また、原子核は中性子と違って電荷をもっており、他の原子核や電子との相互作用は大きく、中性子よりも位置がはっきり決まり、したがってその崩壊も隠しがたいという性質をもつはずである。

実験の例を見てみよう。山内 (2000) は、加速器質量分析法による ^{60}Fe 、 ^{32}Si 等の半減期測定を解説している。この方法で得られた半減期はそれぞれ 1.49×10^6 年、108 年であった。 ^{60}Fe の半減期は、別の実験から得られた 1×10^5 年と 1 桁程度も異なる値であり、 ^{32}Si についての半減期 108 年は、別の実験の 133 年とは 2 割ぐらい異なっている。もっと遡れば Kutschera *et al.* (1980) の実験では 101 年であり、その前は 300 年だった。このように、各実験で原因不明の

大きなばらつきがあるのである。

トリチュームのような簡単な不安定同位体では多くの実験が行われているが（総説 Lucas & Unterweger 2000）、中性子と状況は似ていて、昔の実験は大きくばらつくが、近年になるほど、値は収束してくる傾向にある。これは必ずしも技術レベルが上がったことによる効果だけでなく、測定手法が「確立され標準化」されて類似してくると、量子ゼノンの効果も類似するので、同じような値に収束する可能性がある。理論的な重要性が低いほとんどの物質では、中性子のような1%程度の小さな誤差は重要ではなく、普通は注目されない。見過ごされている可能性や完全な失敗実験として出版されない可能性もある。

量子ゼノン効果による崩壊率の変化は、素粒子や天文学だけではなく、考古学や地質学、古生物学などで重要な元素の半減期にも少なからぬ影響を与えている可能性がある（註4）。

2. 3 SU(5) は否定されたのか。

量子ゼノン効果は素粒子系の実験、たとえば陽子崩壊にも大きな影響を与える。大統一理論の最も簡単な模型であるSU(5)はGeorgi & Glashow (1974)によって理論化された。Georgi (1981)はこのモデルに大変な自信があり、「ほかのものに勝る多くの美点を備えている (numerous advantages that distinguish form all the others)」さらに「著者は、これが自然界の完全対称性を表すものと信じている (I believe it may be the full symmetry of the nature.)」と述べ (p.50)、既知の素粒子がぴったり収まることなどの奇跡を強調していた。この評価には理論家のみならず、実験家も大いに納得し、核子の崩壊を観測するために大量の核子を集めて観測する、高価で大きな実験設備が建設された、たとえばカミオカンデである。SU(5)は $10^{28\pm 2}$ 年、最大限 10^{31} 年以下の陽子の寿命を理論から予測したが、今に至るまで核子の崩壊は一例も観察されず、SU(5)は否定された。現在、核子の寿命は 10^{33} 年を超えているとされる (Super-Kamiokande Collaboration 2009)。

しかしながら、この予測値は孤立した理想的な真空中での値である。核子の寿命の計算は、基本的に大統一理論で新たに出てくる新粒子、例えば X ボソンや Y ボソンの質量から計算されている。量子ゼノン効果は全く考慮されていない。

核子の寿命が大変長いのに対して、カミオカンデのような装置では核子崩壊から観測までの時間とその不確定性は短い。陽子が崩壊すると、直ちに観測される。このようなケースは、量子ゼノン効果が大規模に現れる絶好の状況である。ゼノン効果の詳細な推定は難しいが、最大限どのくらいの効果があるか、大雑把に計算してみよう。

陽子崩壊実験のような同種粒子を大量に使う実験では、どの陽子が崩壊したかは正確にはわからない。過去の履歴は重ね合わさって、原理的に完全には復元できないのである。とりあえず、その不定性を1モル程度の桁 10^{24} としよう。カミオカンデは、直径15.6メートル、高さ16メートルでチェレンコフ光を検出するようにできていた。仮に10メートルの行程で検出されるとしよう。光速は約秒速30万キロメートル $=3\times 10^8$ メートルであるから、 3.3×10^{-8} 秒 \approx 約 10^{-15}

年で観測される（ここまで短いと、実際に大きな効果を及ぼすのは、光電管が反応してから電子機器に記録するまでの遅延かもしれない）。よって式(1.6)を使うと、量子ゼノンの効果を加えた大雑把な崩壊時間の桁は、 $(28+28+15-24)=47$ になる。つまりSU(5)が正しいとして、量子ゼノン効果を考慮した崩壊時間は約 10^{47} 年に一度になる。これは現在の限界 10^{34} 年より遥かに長い。同種効果を考慮しない式(1.5)ではさらに長く 10^{71} 年という寿命になる。これは粗雑な計算ではあるが、量子ゼノン効果が決定的な効果をもたらすかもしれない、かりに多少の効果であっても数桁程度は影響しえる。このような意味でSU(5)は否定されていない可能性がある。

同じことは他の実験、たとえば重力波観測にも当てはまりえる。重力波の観測は、宇宙に広大に広がっている重力波が観測装置と相互作用をして「収縮」し、実験装置の状態を変化させるとともに新しい状態に変わることである。一つの重力波を見るとその遷移の確率は非常に低く、一箇所に存在する重力波の密度も薄い。さらにおおむね実験装置の感度は高く、即座に観測されて記録される。重力波はボソンであり、同じ状態で数多くの重力子が凝集していて区別がつかない可能性もある。この状況はやはり量子ゼノン効果が発揮される絶好の機会である。21世紀に入ってから世界中で高価な重力波の観測装置が建設・運用され始めたが、期待に反して今のところ重力波はまったく発見されていない。

補足すると、この逆過程の重力波を発信する過程では、一つの重力波のエネルギーや角運動量は小さいので、いつ発信したかが正確にわからず、ゼノン効果は無視できる。

一般的に、これらの考察が示唆するのは、実験装置の時間感度を上げれば上げるだけよいわけではないということである。それが量子ゼノン効果を引き起こして、逆効果になる場合がありうる。

2. 4 トンネル通過確率の増大(蔵&蔵 [2004] の補足)

量子ゼノン効果において本質的なのは、系の状態の変化が即座に外部の世界の状態に消しがい変化を与える場合に、それが「系の波動関数の収縮」と「観測」になってしまうので、変化が抑圧されることである。しかし、このような「観測」の影響は、単に狭義の「量子ゼノン効果」に限らない。

蔵&蔵(2004)では、トンネル障壁が一次元の場合に、粒子がトンネルする場合を考察した。通常の解法では、障壁ポテンシャルを矩形近似で分割によって近似し、分割の細分を極限に持っていく。すると定常状態の波動関数が、真の解に弱収束することが示せる。この解は、おおむね障壁の「面積」 S の負の指数 e^{-S} に比例して減衰するタイプの解である。この解は数学的には完全に正しいが、障壁内での片方向反射のみ許す解といえる(蔵&蔵, 2004、図3)。これを〈片側反射型〉と呼ぼう。

しかし、これは障壁の通過の途中で「観測」が入らない場合である。障壁を通過している途中でも粒子の存在確率は厳然と存在するので、通過中に観測が入ると波束が収束することが起こり、確率は全く違ってくる。通過中に十分に数多くの「観測」が入るなら、その極限

で障壁面積に反比例する確率 ($1/S$) のタイプまで増大しうることを、蔵&蔵 (2004) ではハール測度を使って示した。この場合のほうが古典的であり、障壁内での両方向反射を考える古典的な解であり、普通の確率に帰着して理解できるのである (蔵&蔵 2004, 図 2 b)。これを対比して〈両側反射型〉と呼ぼう。

現実の物理的状況において、障壁のポテンシャルは電磁的なものであることが多い。このときの「観察」とは、障壁通過中の粒子が、障壁を押ししたり引いたりすることが、ポテンシャルを構成する電荷の源に伝達されることに意味する。粒子の接近が電荷源に観察されるということである。とりわけ障壁に跳ね返されるときには、その位置と時間は光速でその電荷源に伝達され「観測」されるので、状況によっては片側反射より、両側反射型に近い場合がありうる。負の指数と反比例では大きく異なるので、トンネル確率にも大きな違いがでてくる。具体的な例として、電荷源が一つの粒子と見なせる巨大原子核の構成する正電荷のポテンシャルを、低速の陽子や α 線が通過する場合である。

これを示唆する実験はかなり実在する。低速 (つまり低エネルギー) の粒子が原子核近傍の電磁的な障壁を通過する確率は、既存の計算よりも顕著に増大するのである。総説として滝川&木村 (2003) があるので引用しよう。

「最初に実験を行った Rolfs らを始め多くの研究者が、反応断面積の大きな増幅を、標的核の束縛電子による遮蔽効果の観点から説明しようと試みた。奇妙なことは、あとで述べるように、実験データにみられる反応断面積の大きな増幅度は、通常の理論的考察からは、遮蔽効果として説明するには大き過ぎることである。」

つまり滝川&木村 (2003) の結論は、低エネルギー粒子の核反応率は、静電遮蔽では説明できないということである。実際、低エネルギーでの核反応の増大の研究例として滝川&木村 (2003) の挙げているもののほか、Yuki *et al.* (1998, 2000) がある。

2. 5 他の候補

量子ゼノン効果は、物性物理の対象でも存在して重要な働きをしても、見落とされている可能性がある。たとえば、高温超伝導の分野である。温度が上がると凝集したクーパー対が熱振動によって壊れることによって超伝導は消えるが、このクーパー対の崩壊に量子ゼノン効果は適用できる。とりわけ、クーパー対の崩壊に鋭敏で、それを非可逆的に記録する部分が媒体にあれば、量子ゼノン効果が効果的に発揮される。

古典的な超伝導物質は重い金属であるのに対し、1980 年代から見つかった高温超伝導物質は、結晶構造で軽い原子である酸素 (あるいはホウ素) を含んでいるものが多い。そして臨界電流が小さい。

量子ゼノン効果に鋭敏な部分は、もっとも軽い原子である酸素である。そして酸素のみに顕著な同位体効果が見つかっている (Sato *et al.* 2009)。同種粒子が多いほどゼノン効果は減るので、粒子の凝集に強い制限があるが、温度が上がっても直ぐに全なくなることはない。こ

のように量子ゼノン効果は、高温超伝導体の性質の一部は説明している可能性がある。

3. 暗黒物質とMOND

3. 1 暗黒物質

銀河や銀河団の運動は観察されている物質からでは説明できない。たとえば、渦巻銀河の光って見える質量は中心部に集中していて、辺縁部にはほとんど重量がない。ニュートン力学からすると、中心部からの重力場がほとんどすべてであり、中心からの距離の二乗に反比例して重力場は弱くなる。遠心力は半径に反比例するので、結局、距離にちょうど反比例して速度が下がるはずである。しかし、銀河をまわる球状星団や銀河円盤の速度の観測では、それらは銀河の中心からの距離によらず、概ね一定の速度でまわっている (Begeman 1991)。これはニュートン力学の予測とは異なっている。一般相対性理論の効果は、長距離では小さすぎて無視できる。この矛盾を解消するために導入されたのが、見えない「暗黒物質 (ダークマター)」である。

この説は1980年代以来、関連する分野での圧倒的な多数意見になった。さらに暗黒物質を加えても、宇宙の平坦性を説明できず、宇宙の加速膨張が確認されたことから、ダークエネルギーも導入された。全体の比率は、物質ではバリオンがほとんどで4.6%、暗黒物質が23%、残りの71.3%がダークエネルギーと推定された (Kowalski *et al.* 2008)。とはいってもダークエネルギーは銀河や銀河団のような距離では大した影響を与えない。

暗黒物質の正体も、普通の物質でできた単に暗い天体 (MACHO) であるという説や、ニュートリノで説明できるという考えが否定されてから、おおむね未発見の物質 (超対称粒子、アクシオン等) で構成されていると考えられるようになった。現在、各国でこれを直接観察する高価な実験機器が建設され運用され始めている。しかしながら、暗黒物質説には大きな三つの欠点がある。

- (1) 分布の問題、とりわけ尖ったハロー問題 (Cuspy halo problem)
 - (2) 暗黒物質と通常物質の割合
 - (3) 理論的な根拠の曖昧さと、未発見の現実
- これらを順に考察していこう。

3. 2 なぜ球状星団に似ていないのか?

まず銀河周辺の運動の例で、暗黒物質を考えてみよう。

よく知られているように、球対称分布の物質に由来する重力をニュートン力学から計算すると、その半径より内部の物質を、すべて中心に集めた重力に等しくなる。逆に外部は相殺して全く寄与しない。観察結果のように軌道半径によらず一定の速度でまわるには、遠心力と相殺するべく、距離に反比例した重力が必要である。すると、一つの銀河周辺では、距離

r 以内のダークマターの総質量は距離に比例していて、表面積で割ると、その密度は距離 r の二乗に反比例する分布になる。これには中心部で密度が高くなる例外は認められない。密度の例外があると、それは中心に集中した質点と同じになるので、距離の逆二乗の成分が出てくるからである。

だが、銀河周辺の暗黒物質のこのような分布は、どうやって形成されるのだろうか。そしてこれは「自然」なのだろうか。

暗黒物質は広く薄く銀河や銀河団にまわりつくように分布しているが、暗黒物質のほうがバリオンより質量が多いので、暗黒物質が中心でバリオンが引き寄せられたという方が正確である。よって、はじめに暗黒物質に密度の強弱ができ、濃い部分の重力が強くなって、まわりの物質を集めていったと想定されている（註5）。

しかし、ここで問題が起こる。物質が重力で凝集するには位置エネルギーおよび運動エネルギーを失って、密度の高い部分に集まっていくしかない。極めて多くの粒子の集まりが重力のみで集まるとすると、その数多さのために球対称の定ポテンシャルとほとんど変わらなくなり、各粒子はそのポテンシャル中の運動と見なせる。しかし、これでは何時までたっても同じ準位のところを、楕円形をひねった花びら型のように動くだけで、一向にエネルギーを失わない。これだけでは凝集しないのだ。粒子同士が直接ぶつかるか、近接して定ポテンシャルで記述できない重力相互作用をしないとエネルギー交換が行われないからである。これはニュートン力学からの一般的な帰結である。

簡単なモデルではダークマターは、重力で束縛し合った系とされる。そして、似たような系として球状星団がある。

球状星団は、数百万から数千程度の古い恒星がほぼ球対称状にあつまった星団である。概ね古い星団が多く、その年齢は宇宙の寿命と同程度であり、宇宙の年齢の下限に強い制限を与えている。そして、その分布は20世紀後半から研究されている。球状星団の中心部で、平均重力ポテンシャルでは書けない粒子同士の近接が起こったとき、エネルギーや角運動量の交換をして、一部の星が脱出速度を超えて蒸発していき、残った星のエネルギーが低下して、より凝集するという過程をとる（キング 1985）。その結果、星の数は星団中心において膨大な星からなる「等温核」があり、それから周辺部で急速に減っていく分布になるのである。理論やシミュレーションによる具体的な密度は、核内では余り変わらず、ハローで $r^{-7/2}$ 、蒸散部で r^{-2} になる（有本 1982）。蒸散部では、確かにダークマターと類似した分布になるが、中心に密度が極めて大きな部分が必要なのである。その中心部分において、ほとんどすべてのエネルギーや角運動量の交換が起こっていることになる。

また、構成する「粒子」同士の相互作用が弱いほど、凝集する時間が長くなる。ところが肝心の中心部の割合が多いと、周辺の軌道は中心の高密度部分を質点と見た場合の単なる楕円運動に近くなってしまふ。実際、球状星団ではそうなっている。

ダークマターでシミュレーションをしてみても、同じことが起こる。凝集の中心部に質量

が集中した部分ができてしまい、すると重力は普通の $1/r^2$ に近くなるのである。これでは銀河の周辺部の運動は説明できない。さらに観察結果ではこのような凝集核は発見されておらず、これを尖ったハロー問題 (Cuspy halo problem) という (de Blok 2010)。

また、ダークマターの相互作用も弱いという問題もある。銀河団どうしが衝突した弾丸銀河団 1ES 0657-558 では、重力レンズの強度の推定から、ダークマターが銀河間ガスではなく、銀河と一緒に移動しており、ダークマター説の対案である MOND (修正ニュートン力学) を否定したとされる (Clowe *et al.* 2006)。しかし同時にダークマター同士の相互作用も大変に弱いことが判り、やはり大きな矛盾が出ている。それに対して Abel520 銀河団の観測では、逆に銀河より銀河間のガスと一緒にダークマターが存在するという正反対の結果が出ている (Mahdavi *et al.* 2007)。

これを回避するために、ダークマターの種類を増やし、複雑な構造を仮定しようという試みが流行しつつある (註6)。しかし、相互作用が大きく多様で複雑な暗黒物質からなる場合は、銀河や原始太陽系のように降着円盤型になりかねず、これも観測とは異なる。

要約すると、ダークマターの分布は球状星団とも、銀河のような膠着円盤型とも似ておらず、ニュートン的な運動によって粒子が凝集したというモデルでは説明がしにくいのである。

3. 3 通常物質と暗黒物質の割合が近いのはなぜか？

暗黒物質とバリオン由来の質量の比率は 6 : 1 ぐらいであり、一桁も違ってない。反対に自然界では起源や構造が似ていない限り、大きさや質量あるいは総質量の違いは大きく、桁のレベルで全く違うのが普通である。

しかし、想定されている暗黒物質の候補である未発見粒子とバリオンは全く由来が異なり、重さも大きく異なるはずである。たとえば、陽子や中性子が 1 GeV 弱、電子が 0.5 MeV 程度なのに対し、ダークマターの候補である超対称粒子や「カルツァー・クライン」粒子では最低 100 GeV はあり、それ以下では発見されていない。逆にアクシオンも今までの探索で見つからないので 1 eV 以下と推定されるようになった。比べると桁が 2 桁から 10 桁ぐらい違う。

さらに見える物質の主体バリオンがどのように生成されたかの伝統的な説明を考えてみよう。ビッグバンの初期、物質と反物質は微妙に存在量が違っていた。それは現在の光子・バリオン比からすると 10 億分の 1 程度である。9 桁も違う。宇宙が冷えてくると、物質と反物質が対消滅してわずかな物質だけが残って、現在の宇宙のバリオンになった。光子は静止質量をもたないので、対消滅した光子は宇宙膨張のおかげで間延びし、ほとんどエネルギーを失い、現在の宇宙の質量に余り寄与しなくなったのである。そして大きな静止質量をもったバリオンのみの寄与が残った。ニュートリノの質量も微弱であり、ほとんどが運動エネルギーだったので、やはり間延びして寄与は激減した。

暗黒物質と物質の現在の総質量への寄与は、ビッグバンの前後のシナリオの詳細に依存して、数桁以上も変わってくる。物質、反物質、光子、ニュートリノが平衡状態にあった程度のエネ

ルギーでは、最有力候補とされる超対称物質は作れていないことからすると、分化はそれより遙か以前の段階だと想定される。その最終結果が、都合良く1桁の精度で収まるのだろうか。

3. 4 理論の曖昧さと未発見であること

最後に、なんと言っても暗黒物質を基礎付ける理論が（無限にありすぎて）はっきりしないことと、今までの熱心な探索にもかかわらず見つかっていないことは、実証科学としての暗黒物質説の決定的な弱さである。

逆に、太陽系近傍の天体の動きを詳細に調べたが、暗黒物質の証拠を全く発見できなかったという研究もある (Moni Bidin *et al.* 2010, 2012)。この研究の解説記事は “Serious blow to dark matter theories?” (<http://www.eso.org/public/news/eso1217/>) であり、理論からの推定では地球の体積あたり 0.4 - 1.0 kg の暗黒物質があるはずだったが、この研究では 0.00 ± 0.07 kg しかないという結果だった。そして、今まで地球上の実験で暗黒物質は検出されていないが、あまりに少ないので、

“The new results also mean that attempts to detect dark matter on Earth by trying to spot the rare interactions between dark matter particles and “normal” matter are unlikely to be successful.”

と今後の検出実験も不成功に終わるだろうと予想している。さらに第一著者の Moni Bidin は、“Our results contradict the currently accepted models.” とし、別の仮説を探す必要があるとしている。

太陽系の近傍に暗黒物質がほとんどないという彼らの結果は、天の川銀河の重力源は、見かけのバリオンと同様、銀河中央に集中しているとしか考えられないことを意味しているので、さまざまな暗黒物質説よりも、長距離での重力の効き方を変える諸説のほうに有利である。

仮に宇宙に未知の物質はあったとしても、すでに多くのパラメーター領域は調べられていて、暗黒物質を説明できるほど十分多量には存在しないのではないだろうか (註7)。

3. 5 修正ニュートン力学

ダークマター理論には、一部にカルト的な人気のある対案がある。それはミログラムによって1983年に提唱されたMOND(修正ニュートン力学)と呼ばれるものである(Milgrom 1983)。MONDは暗黒物質の代わりに、ニュートン力学の第二法則である力と加速度の線形的関係を変えることによって、物質の重力場での振る舞いを変えるというものである。具体的には、加速度の次元を持つミログラム定数 a_0 (約 $1.2 \times 10^{10} \text{ m/s}^2$) があって、重力加速度がそれを下回ると、力の及ぼす加速度が大きくなって、重力が強くなるのと同様な効果が得られるとする。この理論はTully-Fisher則をうまく説明するなど、有効理論として大きな成功を収めている(ミログラム 2002; 批判的な総説として、Aguirre *et al.* 2001; 註8)。

しかしながらMONDは、常識的な物理学者や天文学者の支持をほとんど得ていない。まずこの理論は、かなり変わった理論である。普通の場の理論を弄って長距離の振る舞いを変えよ

うとすると、どうしても基本は距離によって振る舞いを変えることになる。修正の余地は多くない。ところが、距離によって重力の振る舞いを変えるのは観察とあっていない。一方、ミログラム定数は加速度の次元なのである。さらに、力と加速度の法則を壊すので、エネルギーと運動量の保存則を明示的に壊すように見えて、既存の物理の上に建設しがたいのである。超弦理論に批判的であり、代わりに新しい物理を探していたスモーリン（2006）でさえ、MONDが宇宙論の謎を部分的に説明していることに驚いているが、「MONDは物理学者にとってあまり意味をなさないp.280」と言っている。対してMilgrom（1999）は、重力下において零点輻射の分布が変形して最低温度が変わるウンルー効果から説明できるとしているが、ウンルー効果との類似点はどちらも加速度が本質的なパラメーターになっているだけであり、関係は謎のままである。

また、MONDを安直に適用すると長距離でずっと重力が $1/r$ になってしまい、見かけの「ダークマター」の重量は発散することになる。しかし実際には発散していない。むしろ超長距離で弱まるようにも見える。

3. 6 量子ゼノン効果からの仮説

以下に我々は量子ゼノン効果からMONDを導くことを試みる。その鍵になるのは、物体が重力によって引かれて、向きを変えることが「観察」に相当することである。

重力とは重力源から発せられた重力子が、遠く離れた別の粒子に吸収されることであり、重力子の吸収は、方向を変えるという意味で状態遷移の一種である。吸収されたという情報はおよそ光速で重力源に伝わる。この場合、重力源からの距離は「観察間隔」と同じものとはいえなくても、それに「比例する基準」と見なしうる。量子ゼノン効果はこの吸収される遷移を抑圧するように働く。しかし、遠く離れている物質間の重力は長い時間間隔が必要であり、かつどの重力源からやってきたのかが、はっきり区別できない。また量子ゼノン効果には適用下限 τ_0 と適用上限 τ_∞ がある。以上のことを踏まえた我々のシナリオは以下の通りである。

- 1 「観察時間」は、重力源から、引きつけられる粒子までの距離に比例する。
- 2 近距離では、重力子の過剰によって適用下限 τ_0 を下回り、量子ゼノン効果が飽和する。
- 3 中距離では、量子ゼノン効果が線形的に表れる。
- 4 長距離では、観察時間が適用上限 τ_∞ より長くなり、量子ゼノン効果が消失する。
- 5 ミログラム定数からのズレの原因は重力源の角密度や、重力源の構成する粒子の相互作用の強さである。

順に説明しよう。加速度の単位を持つミログラム定数 a_0 は、ある源から発する仮想重力子の密度が一定以下になる閾値のことに等しい。密度がそれより多くなる、つまり重力源から近くなる近距離では、同種粒子の数 N が増えて、量子ゼノン効果が効かなくなる。中距離では普通

に量子ゼノン効果が働き、観察時間である距離 r に比例して効果が弱まっていく。それは r に比例して重力子の吸収率が上がるということであり、その結果 $1/r$ に比例する力が働くように見える。長距離では、量子ゼノン効果の適応上限を超えて、また $1/r^2$ にもどる。

MOND が当たっていないように見えるケースがある。特に銀河団、特に中心部でズレが大きく、銀河団は MOND の予測より大きな重力効果をもたらしている。矮小銀河の場合にも強い場合があり、球状星団では逆に予測より弱い場合もある。さらに銀河団のガスと銀河たちが分離した場合の挙動もはっきりしない (Clowe *et al.* 2006 ; Mahdavi *et al.* 2007 ; 註 8)。

この食い違いを説明する一つの案は、物質の密度の方向的な分布に依存するということである。一様に分布しているよりも、物質が局在した方が、どの物質から出た重力子なのか明確にわからず、量子ゼノン効果が生じにくくなるはずである。また重力源の粒子の相互作用の大きさが大きいほど、どの粒子由来かが分からなくなることにより、観測に影響を与えるだろう。

つまり、MOND の下限 r_0 は、角方向の平均密度と、それを構成する物質のつながりの強さできまる。密度が重いと、同じ方向からくる重力子が多くなり、どの粒子から来たのか識別できないからである。

MOND の適応範囲は量子ゼノン効果の有効範囲になる。観測間隔は重力源と作用する粒子間の距離で決まり、重力定数は実はもっと大きく、ゼノン効果による低減を経て、現在の値に見える。つまり、このシナリオでは、重力定数は本来、一桁ぐらい強いことになる。ちょうど通常物質と暗黒物質をあわせた質量の発する重力程度の強さである。それがゼノン効果で弱まり、現在の強さに見えると考える。

とはいえ、本論文でミログラム定数を他の値から具体的に導けてはいないことは、暗黒物質説と同様に、この説明の不十分な点である。

さて先の 3.1 節で上げた暗黒物質に対する 3 つの疑問について、我々の回答は次のとおりである。

(1) なぜ、球状星団に似ていないのか？

MOND では暗黒物質説と違って相互作用が盛んに起こる中心核がいない。

(2) 通常物質と暗黒物質の割合が近いのはなぜか？

MOND では、物質の真の重力効果とニュートン力学からのずれを、暗黒物質があるように誤認していると考える。それは物質の重力に由来しているので、物質の影のようなものであり、桁が大きく違うことはない。

(3) 理論的な根拠の曖昧さと未発見の現実

本論文では MOND の由来を量子ゼノン効果と想定している。暗黒物質が未発見なのは、未知の粒子が存在したとしても、暗黒物質を説明できるほど十分には存在しないか

らである。

このシナリオが最終的に正しいかどうかは別として、MOND は理論と観測の両面から真剣に考察すべき学説である。そして暗黒物質説と MOND では実験的な検証の仕方が異なる。

暗黒物質説では肝心の暗黒物質を検出する装置を作るのに対し、MOND では衛星を打ち上げて、パイオニア・アノマリー (Anderson *et al.* 1998) のような、太陽系の重力異常を探すことになる。もし現在の暗黒物質検出装置で十分な数の粒子が発見されないならば、これを真剣に検討すべきだろう。

註

(註1) 数学的な論理構造は、縦偏光のみの光子からなるレーザーに、偏光板を何枚も少しずつ角度をずらして通過させると、横偏光のみの光子に変換できるのと全く同じである。

(註2) 実際に各種モデルに適応するなら、 $\varphi_i = \pi_A(\varphi_i) + \pi_B(\varphi_i)$ から

$$\begin{aligned} h_X(t) &= \pi_X(\varphi_i), \quad e_X(t) = h_X / \|h_X\|, \quad (X = A, B) \\ \theta_i &= \sin^{-1}(\|h_A(t)\|), \quad (0 \leq \theta_i \leq \frac{\pi}{2}) \end{aligned}$$

とにおいて、単位ベクトルの向きと、混合角への分解

$$\varphi_i = e_A(t) \cos(\theta_i) + e_B(t) \sin(\theta_i) \quad (\text{A. 1})$$

と表記した方が分かりやすい。もっとも簡単な場合は、 $T_{1/2} \approx \pi/4\lambda$ になる。

さらに、数の効果をこれから計算してみよう。一つの粒子の時間 t における崩壊確率は (A.1) と $\|e_B(t)\| = 1$ より、

$$P_B(t) = \sin(\theta_i)^2 = (\lambda t)^2 + o(t^2).$$

逆に崩壊していない確率は

$$P_A(t) = 1 - P_B(t) = 1 - \sin(\theta_i)^2 = 1 - (\lambda t)^2 + o(t^2).$$

N 個の粒子が独立に存在し、有効に区別できないとする。すると全ての粒子が崩壊していない確率を $P_{\cap A}(t)$ と書くと、

$$P_{\cap A}(t) = P_A(t)^N = (1 - (\lambda t)^2 + o(t^2))^N = 1 - N(\lambda t)^2 + o(t^2).$$

である。よって一つでも崩壊する確率は、これを $P_{\cup B}(t)$ と書くと、

$$P_{\cup B}(t) = 1 - P_{\cap A}(t) = N(\lambda t)^2 + o(t^2) \approx NP_B(t) .$$

である。つまり、個数が N 個あると、系の遷移する確率は N 倍になる。

(註3) 固体中で最大でどの程度まで中性子寿命は長くなるのか、粗く計算してみよう。

中性子の β 崩壊では約 0.78 MeV のエネルギーで、電子、陽子、反ニュートリノができる。最も観察容易な現象が、平均約半分 0.4 MeV のエネルギーを持つベータ線とすれば、電子の速度は $v \doteq 4 \times 10^8 \text{ m/s}$ である。平均観察距離を L とすると平均観察時間 $\tau = L/v$ である。平均観察距離の推定は難しいが、最低は固体の物質中の原子間隔の数 \AA (10^{-10} m) のオーダーであり、最大はベータ線の最大平均自由行程(ほとんどの固体で $< 10^{-2}$) であろう。最低の場合 $L \doteq 1 \text{ nm}$ だから、観察時間は $\tau \approx 10^{-18} \text{ s}$ 程度となる。中性子の半減期は 10^3 s 程度なので、式 (1.6) から桁を計算すると $(3+3+18) = 24$ になり、単独の中性子の寿命は 10^{24} s になる。観察時間の最大をとっても $(3+3+2) = 7$ であり、 10^7 s ぐらいいはある。つまり固体中に単独で存在する中性子は量子ゼノン効果によって大きく安定性を増す。もちろん同種粒子が多数集まるほど、この効果は減じられるかもしれないが、かなり多くの中性子が固体中に凝集しえる。ただし、物質中では中性子のエネルギー準位は概して真空中より高く、中性子は軽いので飛び出さなければの話だが。

これは、例えば冷中性子を貯めるのに適したニッケル製ボトル内を真空ではなくて、量子ゼノン効果を起こしやすい別の物質を入れて入れると、多少なりとも寿命が延びるということである。

一方、液体や気体内では、それらの構成粒子の位置に自由度が大きく、確度の高い〈観察〉は起こりがたい。よって、あまり寿命は延びない。

もしも量子ゼノン効果による固体内中性子凝集が存在するとすれば、その工学的応用は計り知れない。また、物質中や星の中心で中性子の寿命が長くなると、メタルの合成も容易になりえる。

(註4) 考古学で重要な ^{14}C の半減期が $5,568 \pm 30$ 年から $5,730 \pm 40$ 年と 3% も変更された件や、 ^{14}C の割合が資料の古さと完全には一致せずには補正が必要な問題は、様々な理由がつけられているが、量子ゼノン効果の影響もあるかもしれない。

(註5) 宇宙ヒモが初期に存在して、重力の中心になったというシナリオなどでも以下の問題点は変わらない。

(註6) フェンとトロッデン (2011) の主張によれば、暗黒物質の様々な候補は、ミラー粒子、

超対称物質、アクシオンなど豊かであり、その模式図 (p.37) は、まるで目に見えない天使の階層の想像図のように込み入ったものである。

(註7) 初期にはアクシオンが暗黒物質の最有力候補だった (例えば [クラウス 1987])。その後、アクシオンには様々な制限がついて、実質的にその存在自体が否定されているという意見もある (Mack & Steinhardt 2009)。続いて超対称粒子が最有力候補になったが、やはり発見されていないので、今世紀に入って実験家を中心に超対称粒子の否定論が広がっていて (Brumfiel 2011)、いまや混沌の状態にある。

(註8) 現在の宇宙では、ビッグバンのときに生じたバリオンの1割程度しか、銀河や銀河団とそのガスとしてみえていない (Bregman 2007 ; Michael *et al.* 2010)。残りは冷たく暗く、観察が難しいガスの状態で、銀河や銀河団の間に存在するようだ。これはダークマターと誤認されやすいだろう。

参 考 文 献

- Abele, H. *et al.* (2002) “Is the unitarity of the quark-mixing CKM matrix violated in neutron β -decay?”, *Phys. Rev. Lett.* vol.88, id.211801.
- Aguirre, A. *et al.* (2001) “Problems for modified Newtonian dynamics in clusters and the Ly α forest?”, *Astrophys. J.*, vol.561, pp.550-558.
- 有本信雄『球状星団』地人書館 (1982)
- Arzumanov, A. *et al.* (2000) “Neutron life time value measured by storing ultracold neutrons with detection of inelastically scattered neutrons”, *Phys. Lett. B.* vol.483, pp.15-22.
- Begeman, G. *et al.* (1991) “Extended rotation curves of spiral galaxies: dark haloes and modified dynamics”, *Mon. Not. Roy. astr. Soc.* vol.249, pp.523-537.
- Beskow, A. & J. Nilsson (1967) “Concept of wave function and the irreducible representations of the Poincare group. II. Unstable systems and the exponential decay law.”, *Ark. Fys.* vol.34, pp.561-569.
- Bregman, J. N. (2007) “The Search for the Missing Baryons at Low Redshift”, *Ann.Rev. of Astron. Astrophys.* vol.45 pp.221-259.
- Brumfiel, G. (2011) “Beautiful theory collides with smashing particle data”, *Nature* vol.471, pp.13-14.
- de Blok, W. J. G. (2010) “The core-cusp problem”, *Adv. Astrom.* vol.2010, id.789293.
- L.S.クラウス (1987) 「宇宙の暗黒物質」日経サイエンス Feb. pp.20-33.
- Clowe, D. *et al.* (2006) “A direct empirical proof of the existence of dark matter”, *Astrophys. J. Lett.* vol.648, pp.109–113.
- Cyburt, R. H. *et al.* (2008) “An update on the big bang nucleosynthesis prediction for ${}^7\text{Li}$: the problem worsens”, *JCAP* vol.11, 012.
- フェン&トロッデン (2011) 「暗黒物質がつくる影の宇宙」日経サイエンス Feb, pp.34-43.
- Georgi, H & S. L. Glashow (1974) “Unity of all elementary-particle forces”, *Phys. Rev. Lett.* vol.32, pp.438-441.
- Georgi H. (1981) “A unified theory of elementary particles and force”, *Sci. Amer.* vol.244, pp.40-55.
- John D. *et al.* (1998) “Indication from Pioneer 10/11, Galileo and Ulysses data of an apparent anomalous weak long-range acceleration”, *Phys. Rev. Lett.* vol.81, pp.2858-2861.
- King, I. R. (1981) “The dynamics of globular clusters”, *Q. Jl. R. astr. Soc.* vol.22, pp.227-243.
- キング, I. R. (1985) 「球状星団と宇宙の謎」日経サイエンス, Aug. pp.50-60.
- 蔵琢也 & 蔵研也 (2004) 「巨大障壁でのトンネル確率の挙動」*Review of Economics and Information Studies* vol.5, pp.758-766.
- Kutschera, W. *et al.* (1980) “Measurement of the ${}^{32}\text{Si}$ half-life via accelerator mass spectrometry”, *Phys. Rev. Lett.* vol.45, pp.592–596.
- Lucas, L. L. & M. P. Unterweger (2000) “Comprehensive review and critical evaluation of the half-life of

- tritium”, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* vol.105, pp.541-549.
- Mack, K. J. & P. J. Steinhardt (2009) “Cosmological problems with multiple axion-like fields”,
<http://arxiv.org/abs/0911.0418>
- Mahdavi, A. *et al.* (2007) “A dark core in Abell 520”, *Astrophys. J.* vol.668, pp.806-814.
- Mathews, G. J. *et al.* (2005) “Big bang nucleosynthesis with a new neutron lifetime”, *Phys. Rev. D*, vol.71,
 id.021302 (R)
- Michael, E. *et al.* (2010) “Do hot halos around galaxies contain the missing baryons”, *Astrophys. J.*
 vol.714, pp.320–331.
- Milgrom, M. (1983) “A modification of the newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden
 mass hypothesis” *Astrophys. J.* vol.270, pp.365-370.
- (1999) “The modified dynamics as a vacuum effect”, *Phys. Lett. A*, vol.253, pp.273-279.
- ミログラム, M. (2002) 「本当は存在しない？暗黒物質」日経サイエンス, *Nov.* pp.52-61.
- Misra B. & E. C. G. Sudarshan (1977) “The Zeno's paradox in quantum theory”, *J. Math. Phys.* vol.18,
 pp.756-763.
- Moni Bidin, C. *et al.* (2010) “No evidence for a dark matter disk within 4 kpc from the galactic plane”,
Astrophys. J. Lett. vol. 724, pp.122-126.
- (2012) “Kinematical and chemical vertical structure of the galactic thick disk II. A lack of dark
 matter in the solar neighborhood”, *Astrophys. J. Lett.* vol.751, id.30
- Pokotilovski, Yu. N. (2006) “On the experimental search for neutron→mirror neutron oscillations”, *Phys.*
Lett. B, vol. 639, pp. 214–217.
- Sato, K. *et al.* (2009) “Enhancement of oxygen isotope effect due to out-of-plane disorder in
 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ln}_{0.4}\text{CuO}_{6+\delta}$ superconductors”, *Phys. Rev. B*, vol.80, id.212501.
- Serebrov A. *et al.* (2005) “Measurement of the neutron lifetime using a gravitational trap and a
 low-temperature Fomblin coating”, *Phys. Lett. B*, vol.605, pp.72–78.
- (2008) “Neutron lifetime measurements using gravitationally trapped ultracold neutrons” *Phys. Rev.*
C, vol.78, id035505.
- 清水裕彦 (2009) 「J-PARC における中性子基礎物理」, 高エネルギーニュース, vol.28, pp.88-93.
- スモーリン, L. 『迷走する物理学』ランダムハウス講談社. (2006)
- Super-Kamiokande Collaboration (2009) “Search for proton decay via $p \rightarrow e^+ \pi^0$ and $p \rightarrow \mu^+ \pi^0$ in a
 largewater Cherenkov detector”, *Phys. Rev. Lett.* vol.102, id.141801.
- 滝川昇 & 木村幸恵 (2003) 「実験室での超低エネルギー核反応における遮蔽効果」, *J. Plasma*
Fusion Res. vol.79, pp.891 - 896.
- 山内良磨 (2000) 「加速器質量分析法による放射性核種の半減期の測定」
<http://www.rada.or.jp/database/home4/normal/ht-docs/member/synopsis/040216.html>
- 湯浅一哉 (2009) 「観測による量子系制御」数理科学, no.548, pp.35-40.

Yuki, H. *et al.* (1998) “Anomalous enhancement of DD reaction in Pd and Au/Pd/PdO heterostructure targets under low-energy deuteron bombardment.” *JETP Lett.* vol.68, pp.823-829.

----- (2000) “Strongly enhanced DD fusion reactions at very low energies in solids”, *Res. Rep. Lab. Nucl. Sci.* (Tohoku Univ.) , vol.33, pp.11-18.