重力逆二乗則の実験検証

村 田 次 郎

立教大学理学部

jiro@rikkyo.ac.jp

万有引力の法則は近代科学の出発点に位置する物理学の金字塔であり，一般相対論による修正が必要となる極端な状況を除いて，現在でも観測と一致し続ける有効理論である．一方，重力の逆二乗則が高精度で検証されているのは惑星スケールであり，太陽系の外側あるいは近距離での検証状況は貧弱である．例えば地球と月の距離では検証精度は 10^{-10} にも達するが，センチメートル距離では 10^{-4} に悪化し，さらに 10 μm では精度が 100% をはるかに超える．つまり重力の存在自身が未確認となる．誰も重力現象を 10 μm 以下の世界で観測したことがないのである．一方プランク長は $L_{\rm pl}=\sqrt{\hbar G/c^3}\sim 1.6\times 10^{-35}$ m であり，万有引力定数 G を用いてこのとてつもなく小さな距離を算出している．これは，この距離まで万有引力定数が一定であること，すなわち逆二乗則が成立し続けることを仮定したもので，実験で確認されている領域からの実に 30 桁以上にものぼる大胆な外挿の結果であることには注意が必要である．

逆に，逆二乗則が実験で確認されていない mm から μm スケールより短距離で変更を受けると考えることは理論的に自由である．簡単なのは質量をもった新しい粒子交換力を考えることで，コンプトン波長を到達距離にもつ湯川型となる．最も有名な例が 1998 年のアルカニハメドらによる「大きな余剰次元模型」であり，mm スケールまで拡がった 4 次元以上の空間次元（余剰次元）の存在により実験未検証の近距離で，べき乗則そのものがガウスの法則により変更を受けるというものである．4 つの力のうち重力だけが極端に「弱い」謎を，本来は素粒子スケールでは同程度の強さだったものが余剰次元方向への薄まりにより mm スケール以降では現在観測されている「弱さ」になる，と自然に理解できる魅力的なアイディアである．

その象徴的な予言は「0.1 mm 程度で逆 4 乗に切り替わる」というもので，実験ですぐ手が届きそうな領域に大発見が待ち受けているかも知れず，工夫を凝らした実験が多く行われることとなった．筆者もその一人であり，加速器実験の検出器位置較正技術を応用した実験を進めてきた．筆者らの実験室実験では直接，小物体間にはたらく重力の強さを検証する．この予言の面白い点は，重力の強まりにより加速器実験でも探索が可能という点である．実際，衝突型加速器である LHC においても検証が行われてきた．予言から既に 20 年が経過し，結果として 0.1 mm での破れは実験で否定された．だが，まだまだ 10 μm 以下では可能性は残されている．

重力の逆二乗則は以前より検証のブームが繰り返し訪れ，精度が向上してきた．それらの経緯を踏まえて，実験検証は湯川型のパラメターで語られる．しかし大きな余剰次元模型はべき乗型であるから，直接の比較が難しい．どの実験が最も感度をもつのかがわかりにくい．とりわけ LHC での重力現象の探索も定性的には感度をもつが，実験室実験との関係が湯川型では定量的には不明瞭である．実験室実験と LHC の結果を同じパラメター空間で比較することで，べき乗型の模型に対しては LHC と mm スケールの実験の両者が拮抗し，他の領域に比べて最も強い感度をもつことが明らかとなった．余剰次元が 2 次元の場合，ねじれ秤による実験室実験の与える 23 μm が最も強い，余剰次元空間の大きさの上限となっている．

—Keywords—

余剰次元：
通常の 4 次元時空を構成する 3 次元空間を超えた，4 次元以上の空間次元をいう．実験的な証拠はないが，理論的には存在する可能性が指摘されている．4 つの相互作用のうち重力だけが余剰次元方向へ伝搬できるとも考えられている．

大きな余剰次元模型：
余剰次元があったとしても観測不可能なほど広がりが小さいものと考えられる．その広がりはプランク長程度と考えられてきたが，それがミリメートル程度まで広がっていると仮定する模型．プランク長に比べて非常に大きいため，この名が付いている．

LHC：
CERN 研究所にある大型ハドロン衝突型加速器（Large Hadron Collider）の略．現時点で最高エネルギーでの陽子同士の衝突実験が行われている．局所的にエネルギーが集中するため，もし重力が近距離で非常に強まるのであれば重力現象が観測される可能性がある．

©2018 日本物理学会