

■ 研究紹介

余剰次元探索を目指した近距離重力実験

立教大学理学部

村田 次郎

jiro@rikkyo.ac.jp

田中 佐季, 二宮 一史, 村上 遥菜

2014年2月12日

1 はじめに

素粒子物理学実験において、まったくのダークホースであった重力というキーワードが一躍前面に躍り出たのは、おそらく ADD による大きな余剰次元模型によって素粒子現象に重力が貢献する可能性が指摘されたときであろう [1]。今では広く一般にも知られることになった高エネルギー加速器による余剰次元探索であるが、筆者は原子核物理研究者として別のアプローチで初期から実験を行ってきた。すなわち、余剰次元の強い証拠となる重力の逆二乗則の破れの実験室における直接探索である。本稿では原子核実験のために開発した位置校正システム的应用という形でスタートした、このミリメートルスケールでの近距離重力実験について紹介する。

2 重力検証の背景

いうまでもなく重力は四つの相互作用の中でもっとも謎めいた相互作用であり、それがほかの三つの相互作用と同じ意味での力と呼んでよいのかすらも疑問の対象たりうるであろう。実際、基本定数中で万有引力定数は

$$G_N = 6.67384(80) \times 10^{-11} \text{ m}^3 / (\text{kg} \cdot \text{s}^2)$$

と (PDG2013 の値より), 10^{-4} の相対精度で決定されているに過ぎないことがそれを物語っている。現在でも万有引力定数はキャベンディッシュのねじれ秤を用いた実験によるほかに計測方法はなく、質量のわかっている物体間に働くわずかな重力を、系統誤差を排除しながら計測する困難な測定が求められる。万有引力定数はその宇宙論的スケールでの時間変化や異方性の可能性など、それ自身で現在も興味を引き続けている。

さて、万有引力定数は重力の逆二乗則、即ち万有引力の法則の比例定数であるが、これが真に定数であるのかは宇宙論的スケールではなく実験室での実験でも大いに疑問が残っている。即ち、この定数は本当に「万有」、つまり **universality** を持っているのか。あるいは、測定距離によらず、一定といえるのか。

万有引力定数の物質非依存性は自由落下の一様性をその根拠とする。素粒子・原子核物理学者がいう質量とは通常「慣性質量」のことであり、重力の **charge** としての「重力質量」とは本来無関係である。従って、慣性質量がわかっている物体、粒子に対して重力を計測しない限りそれらの等価性、即ち等価原理は実験室スケールでは確認できていないことになる。一方、万有引力定数の距離依存性は逆二乗則の破れという形で検証される。質量に結合し、有限の到達距離を持つ新たな相互作用を加えると、修正された重力ポテンシャルは

$$V = -G_N \frac{Mm}{r} \left(1 + \alpha \cdot e^{-r/\lambda} \right)$$

である。特定のモデルに依存せず逆二乗則のテストの精度を比較できるため、実験検証の比較に多用されている。逆二乗則の破れの兆候がない段階ではこの表現で十分であるが、実際には少々混乱の元となる場合もある。さて、現在の実験状況をまとめたものが図 1 である [2]。湯川レンジ λ に対し、結合定数 α の上限値を図示してある。横軸は湯川ポテンシャルのレンジのパラメーター λ であって、測定距離 r ではないことに注意が必要である。

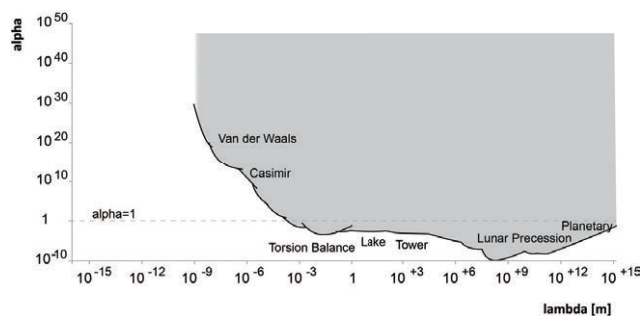


図 1: 通称 α - λ プロット、重力の逆二乗則の検証領域を示す。

逆二乗則はアポロ 11 号が設置した、月面レーザー反射計による 20 年間以上の月軌道観測 [3] により、実に相対精度 10^{-10} という驚異的な精度で確認されている。一方で、太陽系を超える大きなスケール、もしくは実験室よりも小さなスケールでは急激に精度が悪化していることがわかる。こ

ここで、 α の大きさがそのままニュートン重力の検証相対精度を表すと考えてよい。つまり、 $\alpha > 1$ の領域では、精密検証どころか重力が存在するのかどうかさえ確認されていないのである。10 ミクロン程度以下の小さな距離では今でも誰も重力を見たことがないし、ナノメートルではニュートン重力より20桁も強い未知の力が働いているとしても、それを否定できないのである。

3 余剰次元

大きな余剰次元 (ADD: Alkani-Hamed, Dimopoulos, Dvali) 模型 [1] は実験的に未検証の近距離領域において逆二乗則が変更を受けるという考え方であり、もっとも単純に表現すると以下の形で書ける。

$$V_{ADD} = \begin{cases} -G_N \frac{Mm}{r} & (r > \Lambda) \\ -G_N \Lambda^d \frac{Mm}{r^{1+d}} & (r < \Lambda) \end{cases}$$

ある短い距離 Λ より小さい距離でべき乗則が変更されるといふ考えは、この距離程度にコンパクト化された余剰空間次元を仮定することで自然に帰結される。意外だったのは、このスケール Λ の許される領域が実験的には図1のように、実験室スケールまで大きく広がっていることであった。ADD 模型の出た時点では、せいぜい1mm までしか重力の存在も確認されていなかった。余剰次元模型の検証という際に常に検証距離だけで語られる場合が多いが、検証精度を指定しなければ測定距離だけに着目しても実は意味がない。ADD 模型はべき乗則があからさまに変更される模型であり、 $r \sim \Lambda$ の距離で測定すればニュートン重力の大きさの程度の影響が出る。従って、 $\alpha > 1$ を排除できる距離領域を目安とするのがよい。これが、1mm 程度だった訳である。

ADD 模型の面白いところは、その具体的な予言にある。べき乗則が変更されて重力が近距離で急激に強まり、TeV スケールでほかの三つの相互作用と同程度の強さに増幅されると考える。その結果、どのスケールからべき乗則を破らなければならないかが決まる。それが $d=2$ 、つまり、5次元空間の場合、 $\Lambda = 0.1\text{mm}$ だった。空間次元数がさらに多い場合はスケールがずっと小さくなり、 $\alpha \approx 1$ の精度での実験検証は絶望的であるが、5次元空間というあり得そうな状況の際には、実際にすぐに手の届きそうな場所に破れがあってもおかしくないのである。

図2は、素粒子間に働く力の強さを距離の関数として表現したもので、力の統一をイメージしやすい。筆者が拙著 [4] のために一般向けに考案した図である。ADD 模型の考え方を端的に表すことが出来て、あるスケール Λ より内側で重力のべき乗則が逆四乗に切り替わると、1TeV 程度のスケールでほかの三つの相互作用と合流する様子がよくわかる。

近距離で万有引力定数が修正を受けるならば、それに伴ってプランクエネルギーが修正される。

$$E_{4+d}^{pl} = \left(10^{32-19d} \left[\frac{m}{\Lambda} \right]^d \right)^{\frac{1}{2+d}} \text{TeV}$$

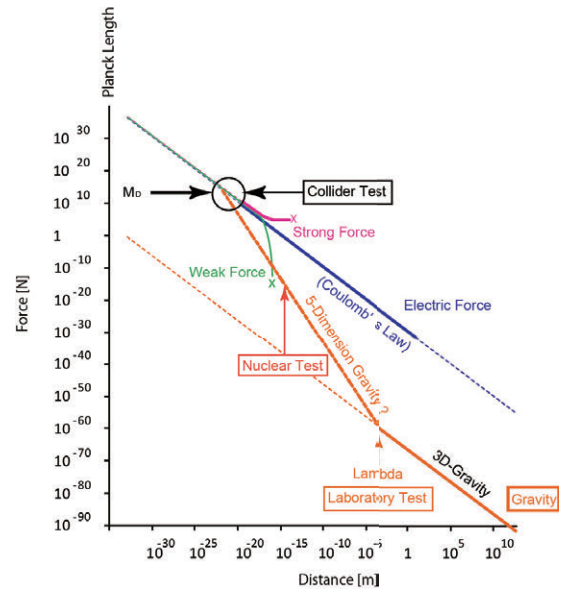


図2：素粒子間の力のスケール [4]

この高次元プランクエネルギーの式を Λ に関して解けば、パラメータとしての高次元プランクエネルギーと切り替えのスケール Λ の関係が明確になり、

$$\Lambda = \left(\frac{E_{4+d}^{pl}}{\text{TeV}} \right)^{\frac{2}{d}-1} \times 10^{\frac{32-19}{d}} \text{m}$$

が得られる。加速器実験では高次元プランクエネルギーに達するエネルギーを供給することで、ニュートン重力では起こりえない重力起源の新現象が期待できる。それは、ADD 模型で翻訳するならば、あるスケール Λ での逆二乗則の破れを探索することと同値である。たとえば LHC で得られている高次元プランク質量の下限値 $M_D > 2.3\text{TeV}$ ($d=2$ の場合) は、5次元空間では逆二乗則の破れのスケールの上限距離 $\Lambda < 92\mu\text{m}$ を与える [5]。逆に、2007年のワシントン大のねじれ秤実験で得られた $\Lambda < 44\mu\text{m}$ という上限距離は、 $M_D > 3.2\text{TeV}$ ($d=2$ の場合) に換算が可能である [6]。こうして、近距離重力実験と TeV スケールの物理が直結していることがわかる。この換算関係は想定する空間次元数に大きく依存することには注意が必要である。また、重力定数の取り方でも多少、値が変わる。

この関係は図3で直接、比較が可能である。加速器実験は高次元プランクエネルギー、即ちこの図の縦軸にアクセスし、一方の近距離重力実験は横軸からアプローチしている。近距離重力実験が加速器実験に勝ち目があるのは $d=2$

の場合に限られることがよくわかる。ただし、高次元プランクエネルギーが加速器のエネルギーを超える場合、加速器実験では急激に感度を失うのに対し、重力実験は技術革新によってまだまだ近距離まで探索を伸ばすことは可能であると期待出来るため、一長一短である。

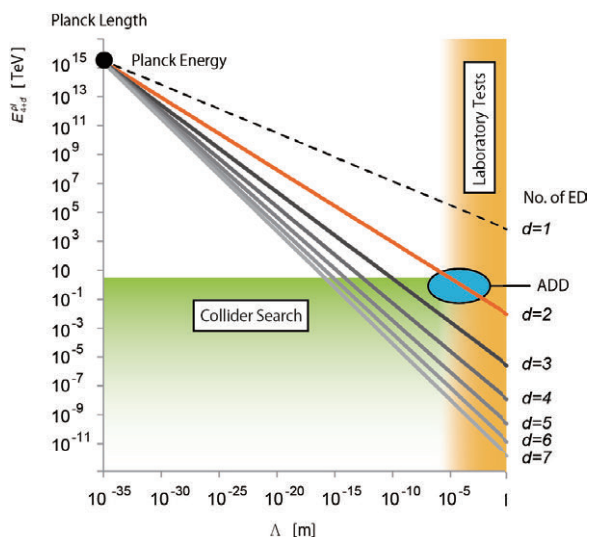


図3：加速器実験と重力実験の関係（ADDを仮定）[4]

以上より、mm以下のスケールでの重力の逆二乗則の直接検証は実験的に未探索の領域を開拓する意義と共に、余剰次元をキーワードにTeVの物理と深く関係する重要な研究であることがわかる。また、近距離重力実験は近距離で重力が逆に弱くなる場合も検証することができるのも面白い点である。

4 立教大での近距離重力実験

筆者はBNLのRHIC加速器で行われているPHENIX実験のミュオン飛跡検出器の開発と建設に携わった。その際に位置検出の分解能を100ミクロン以下に抑えるため、1999年頃にチェンバーの位置を25ミクロン以下の要求精度で較正する光学式アラインメントシステムを開発・建設した。図4のように、光学ビームをCCDカメラで監視する装置である。

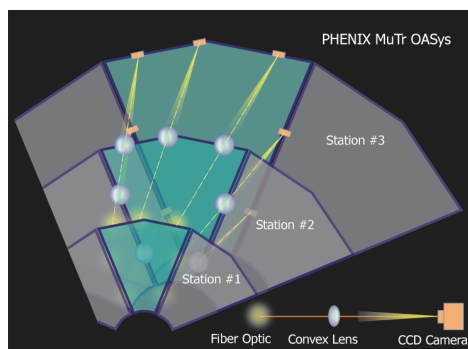


図4：PHENIX Optical Alignment System [7]

これは画像統計処理を行った結果、要求精度を大きく上回る50nmの統計精度を達成することができた[7]。放射線計測での位置分解能は1イベントを取得する際の不確実性で決まるため、それらの多数回サンプルの標準偏差で評価される。一方、光学ビームを用いた光軸位置計測の場合は光子取得事象の統計平均の誤差が形状決定精度を与えるという違いを意識しただけのことだったのだが、光学分解能やCCDのピクセル分解能を軽々と超えてナノ計測が可能になったのには少々驚いた。ときは折しもADD模型登場直後であり、この「画像処理型変位計」技術を転用して近距離重力実験を始めることとした。きっかけは、2003年に理研より立教大に異動し、学部学生の卒業研究のテーマを提供する必要があったことだったのだが、この画像処理型変位計にはその後、10年にわたって楽しませてもらうことになった。

近距離重力実験では、重力場を変化させた際に観測対象の物体が重力を感じていることを計測する原理として、その空間変位の測定が求められる。変位が起きないように重力場とつり合う電場を発生させてその電場の強さを評価する方法や圧力計の応用などもあるが、筆者は技術転用によって直ちに開始できるという意味で変位計を用いた計測からスタートすることとした。変位計を用いる計測では、変位が重力の指標となるよう、なんらかの弾性体の変形を利用することが必要になる。ねじれ秤はその代表格である。重力場を変化させるためには、環境の質量分布を変化させなければならない。図5のように、観測対象をTarget、重力場の供給源としての質量をAttractorと呼ぶ。

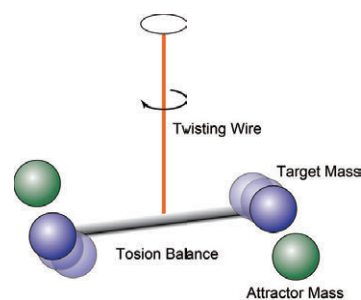


図5：ねじれ秤の原理

さて、このようなねじれ秤は重力実験で多用されていることがわかったのだが、筆者は当初、これの信頼性に不安を持った。研究を開始するにあたり、伝統的なこの手法が将来的に超えられない系統誤差の原因となると考えたのである。実際、トルクと角度変位が比例するというフックの法則の精密検証にはその後、何年も要したし、ワイヤーの熱雑音が測定精度を悪化させるのも事実である。そこで、弾性体ではなく地球の重力場を利用した振り子の傾斜角の測定を行うことにして、とにかくにも実験を行ってみた。2003年のことである。

図6のように、Attractor (図中の Source Mass) を振り子に近づけることで、振り子のつり合い位置が変化するのを見るシンプルな実験である。計算上、重力の変化は10nN程度あり、振り子位置の変化は1mm程度を期待できた。このときには顕微鏡を組み合わせることで、位置分解能は既にピコ精度を達成出来るようになっていたため、重力は簡単に見えると思っていた。

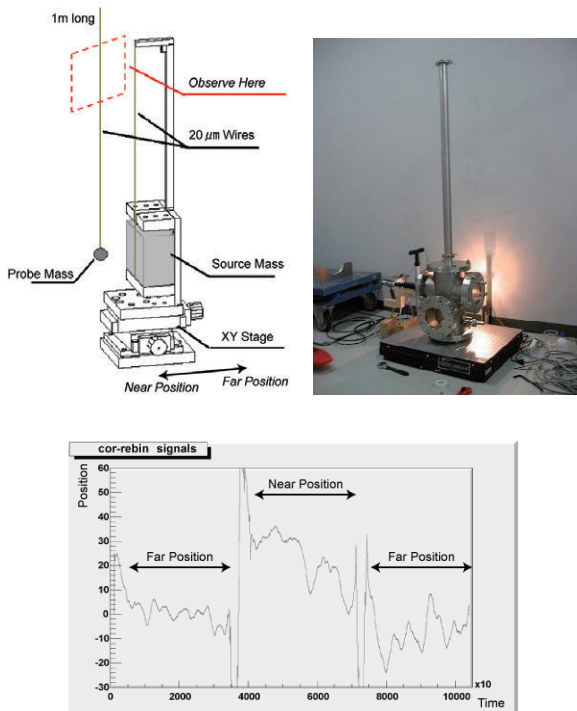


図6：立教大重力実験初号機（2003）

初めての実験で試行錯誤をした末に何とかデータを取れる状態になり、Attractor 位置を変えてみた。Attractor 位置変更に伴い、想定程度の大きさの振り子の位置の変化が図6のように観測された。重力の観測に成功か、と大いに喜びかけたのだが、大きな問題があった。変位の符号が逆だったのである。つまり、われわれは斥力を観測していた。もちろん、これが反重力であるはずもなく、静電気力、残留磁性、そして Attractor 移動に伴う重心移動による装置の傾斜などの系統性が効いていることがわかった。初年度にしてわれわれは学んだ。言うは易く行うは難し。重力実験は統計精度では決まらない。圧倒的な系統誤差を相手にしなければならない。そこで、まずは実績のあるねじれ秤から再出発する作戦に切り替えることとした。

5 Newton シリーズの開始

初年度は分解能の性能追求に気を取られて系統誤差の抑制に手が回らなかったという教訓を受けて、まずはきちんと重力を観測できるようになろう、ということでねじれ秤式から始めることにした。ニュートンの万有引力の法則の検証ということに因んで、1秒で適当に付けた名前が

Newton-I号であり、ねじれ秤式に変更した最初の年には数cmのスケールの実験で重力の兆候が見え始め、プロジェクト開始3-4年目には確固たる重力の観測ができるようになった。この間に、位置変位計として開発した画像処理型変位計を、ねじれ秤のねじれ角度抽出に特化した形で進化させ角度分解能に磨きをかけていた。Newton-I号では、図7のようなねじれ秤を上部より市販のビデオカメラで撮像しオフライン動画解析でねじれ秤の位置、角度を求めていた。その角度分解能は概ね動画の1フレームあたり 10^{-6} rad程度であり、これを毎秒30フレーム取得することでさらに統計精度が高まるため、cmスケールの重力信号を捉えるには統計精度は十分すぎる性能に到達していた。家電量販店で購入した安価な家庭用普及型ビデオカメラと高速処理が可能になった普通のPCの賜物である。

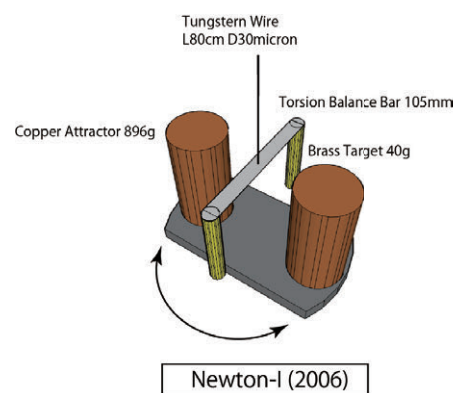


図7：Newton シリーズ初号機，Newton-I号

Newton-I号の典型的なデータは図8である。ねじれ秤に対する Attractor の位置関係を時間と共に段階的に変化させると、それに伴って、ねじれ秤のつり合い角度が変化していることがわかる。この系においてねじれ秤は自由運動を行うため、振動中心がジャンプした後は振動状態を継続し、ワイヤーの摩擦と空気抵抗によって減衰する。また、再現性も確認され、かつ、ニュートン重力を用いた数値計算結果とも10%以下の精度で絶対値が一致した。

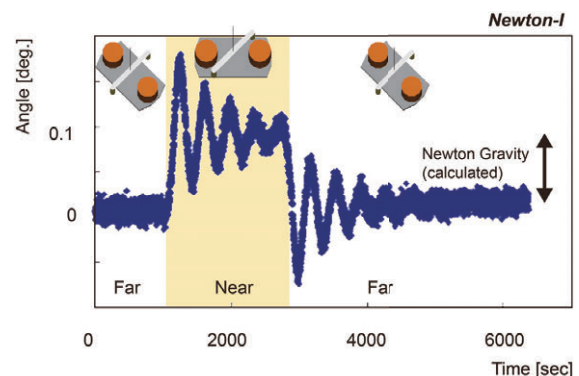


図8：Newton-I号のデータ

今度こそ間違いなく、引力であり、その大きさはニュートン重力の予測と誤差の範囲内で矛盾しない。しかし、偶然残留磁性などによってこの効果が見えている可能性を考え、Attractorの素材を変更し鉛、銅、アルミニウムで同形のものを用いて検証した結果、これらの質量密度を再現することがわかった。これは2006年頃であり、プロジェクト開始から4年目に至って、ついに重力を間違いなく観測しているという確信が得られた。なお、静電気の効果は導体遮蔽体を実際にはAttractorとTargetの間に挟んでおり、人為的に発生させた高電場によるねじれ秤への遮蔽を越えた影響を評価した。残留磁性についても同様な評価を行い、結果の数%程度の磁性による系統誤差が残ることがわかった。

さて、肝心の逆二乗則の検証であるが、Attractorの設置角度を変化させてねじれ秤の角度変位をプロットしたものが図9である。右肩上がりの傾向は、引力が観測されたこと、また、図の中心から離れるほど縦軸の絶対値が大きくなる傾向は、近距離ほど引力が強いことを反映している。そして、この変位をニュートン重力の計算と比較するとデータと誤差の範囲で一致することがわかった。ここまで強調していなかったが、このプロジェクトはこの時点まですべて学部生が卒業研究で出したものであることは驚くべきこととあってよいだろう。つまり、再検証とはいえ、cmのスケールで余剰次元が広がっているということはない、という強いstatementを学部生の実験でいえる結果が得られたのである [8]。

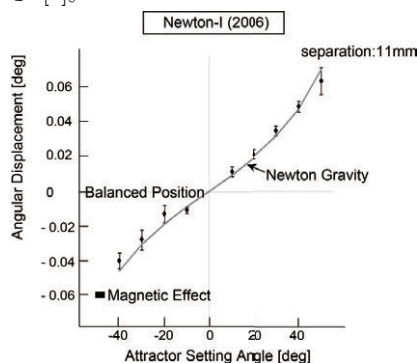


図9：Newton-I号による距離依存性

この10%精度達成の成功を受けて、さらに精度を迫するために調整が容易で長期間計測可能なNewton-SC号(名前の由来は、この頃に演習課題を担当しはじめたKEKのサマーチャレンジに因んでいる)を新たに建設した。

図10に示すNewton-SC号は、ドリフトと呼ばれるワイヤーの時間変動を容易に補正・調整しながら計測が可能になっており、さらに、それまでのカメラでの動画撮影、オフライン解析のシステムを改良してビデオキャプチャボードで受けた画像データをFPGAを用いてオンラインで画像解析させるハードウェア画像処理型変位計を搭載している。

それによって大量のビデオ情報をオンラインで処理できるようになり、圧倒的な統計精度を達成できるようになった。その結果を図11に示す。この計測は物体の中心間距離が45mm–85mmのレンジで行われ、検証精度は1%に達した。 α - λ プロットで言うと、 $\alpha < 10^{-2}$ ($\lambda \sim \text{cm}$)の検証を行ったことに相当する。図11から分かるように、データは見事にニュートン重力の計算を再現しており、最近接部分、即ちグラフの両端でのずれは観測されなかった。つまり、逆二乗則はやはり破れてはいなかった [9]。

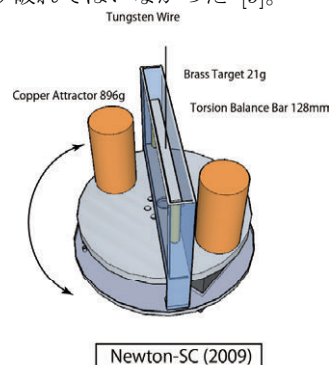


図10：Newton-SC号

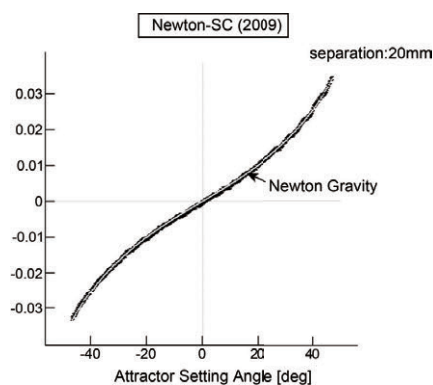


図11：Newton-SC号による距離依存性

6 等価原理の検証

当初、この測定が本当に重力を観測しているのかどうかを確認するために行っていたAttractorの質量密度依存性の計測であるが、考え方を逆転させると万有引力定数の物質依存性を近距離でテストしていると考えられることに気づいた。実際、実はcmスケールでの等価原理の検証はこれまで行われていなかったのである。遠距離の重力に対する慣性質量と重力質量の等価性、或いは自由落下の一樣性は 10^{-13} の精度で検証されている [10] が、近距離の重力に関しては測定の難しさから、cmスケールでの検証は皆無であったのである。そこで、少し矛先を転じて、等価原理の検証に特化したNewton-II号を建設することにした。これは、二種類のAttractorを同時に搭載して計測することで、物質依存性を攻略すべく製作されたものである。こ

の測定データの図 12 に示されている。Newton-I 号同様に、時系列データとして美しく重力が観測され、かつ、物質依存性が再現されていることがわかる。この装置は、ねじれ秤の外周を 4 本の Attractor が一定の角速度でゆっくり回転し続けることができるようになっている。

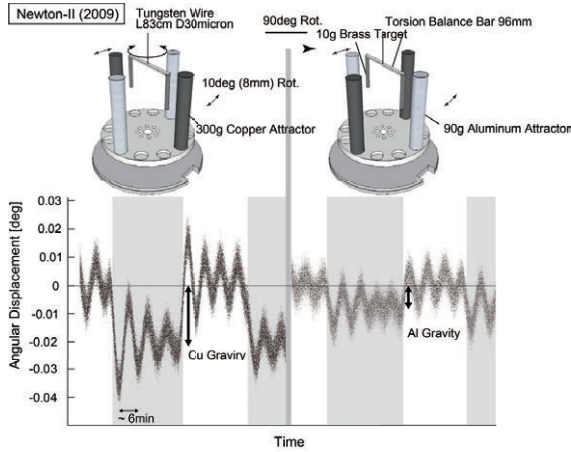


図 12 : Newton-II 号による、物質依存性

Newton-I 号から行ってきた、段階的に Attractor 位置を変化させる方法ではなく固有振動の周期よりも十分長い回転周期を持つ一定の角速度で変化させることで、ねじれ秤を振動させずに外場の変化に追従させた状態でつり合い位置を変化させることが可能となる。

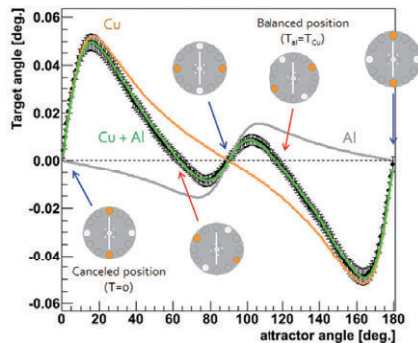


図 13 : Newton-II の結果 [9]

図 13 は Newton-II 号による、銅とアルミニウムの Attractor からの信号が重ねあわされた重力信号を表している。大きな山・谷は銅の、小さな山・谷はアルミニウムの寄与である。このように、この測定は同じセットのデータから、物質依存性をこれらの寄与の比として得ることで、系統誤差の抑制に成功している。データの対称性から、角度のゼロ点や、時系列の位相の自由度を独立した計測なしに決定することができることも効果的に系統性の抑制に効いている。さて、この結果は 1cm の距離スケールにおいて、

$$\frac{G_{Al-W}}{G_{Cu-W}} - 1 = (0.9 \pm 1.1_{sta} \pm 4.8_{sys}) \times 10^{-2}$$

$$\frac{G_{Cu-W}}{G_N} - 1 = (0.2 \pm 0.9_{sta} \pm 2.1_{sys}) \times 10^{-2}$$

とまとめられた [9]。ここで、 G_{Al-W} はアルミニウムとタングステンの間の万有引力定数、 G_{Cu-W} は銅とタングステンの間の万有引力定数を表している。タングステンは、ねじれ秤の両端につけられた Target の物質である。

7 最近の状況と今後の見通し

Newton-I, SC, II 号の着実な進展を受けて、次の目標としてわれわれは距離スケールをまずは一桁落とすことに挑戦することとした。これは、残留磁性などの系統性から、Newton-SC 号で達成した $\alpha < 10^{-2}$ の精度を向上させて、 $\alpha < 10^{-3}$ に至ることが非常に困難であると考えたからである。また、本来の目的である、余剰次元の兆候を探索するという意味では、0.1% というあまりに小さなずれの探索を目指すことは有効ではないとも考えられるからである。距離スケールを一桁下げるとは容易ではない。重力は距離が短くなることで 100 倍になるが、物体の大きさの制限から実は質量が 1000 分の 1 になる。つまり、実験的には 10 倍感度を向上させる必要がある。

この目的の下、1mm どころかマイクロスケールまでを視野に入れた自由落下方式という計測原理を考案し Newton-III 号として開発した。これは、それまでの外場の変化に対してのつり合い位置の変化の計測という原理自身を見直し、物体からの局所的な重力場の中でねじれ秤が振動運動を行う際の運行を観測することで、ねじれ秤の感じている外場 = 加速度を計測するのである。これは時系列計測に優れた動画ベースの変位計の長所を生かした、よいアイデアであると思われた。実際、この新しい方式で重力の観測は行うことができたのだが、100 ミクロンを切る辺りから非常に強い引力が観測された。この強い引力は物質依存性がほとんどなく、おそらくカシミール力であると考えられたが、定量的には説明がつかず頭を悩ますこととなった。そもそも、この研究を開始するにあたっては強いカシミール力の到達距離には及ばない、重力以外の力を排除できる環境での計測を志向していたこともありカシミール力の精密検証というまったく別のテーマに移行するのではなく、本来の重力計測に集中することにした。

また、Newton-III 号と並行して、やはり自由落下方式と同じ計測原理を応用すれば宇宙ステーションの微小重力環境を用いた計測で全く新しい近距離重力実験が可能になると思ひ至り、きぼうの実験ユニットを利用した新規実験提案を行ったが、これは残念ながら不採択となった。

そこで、実績を積んでいたねじれ秤式の装置をスケールダウンする方針で、Newton-IV 号を建設した。これは、それまで cm スケールだった Target, Attractor を mm スケールに落とした高精度装置である。そもそも画像処理型変位計は二次元幾何学形状の取得をすることで望まない振動モードなどと独立に欲しい重力信号を選択的に抽出しやす

い、系統性に強い測定方法である。初期のデータが学部四年生の短期間の実験でも出せたのは、重力実験で悩まされる様々な振動モードが自動的に除去されるシステムになっていたことによる。一方で、その利点を活かすためには統計精度を犠牲にしている面がある。角度分解能だけを追求するならば、もっと方法はほかにあるのである。Newton-IV号では、ここを少し切込み、系統性の抑制は機械部分の信頼性を向上させることとなるべく行い、変位計の分解能を向上させることにした。具体的には、複数台のカメラの同時撮像で感度を高めた代わりに、撮像領域を犠牲にした。得られた角度分解能は1フレーム 10^{-8} rad程度である。

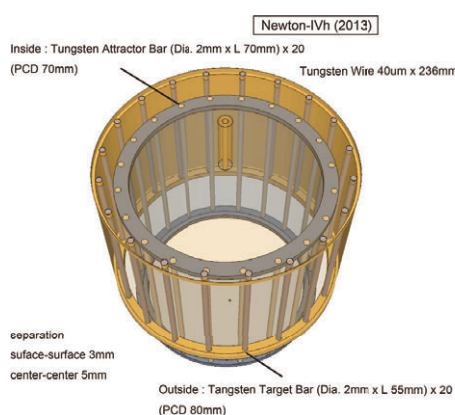


図 14 : Newton-IVh 号

Newton-IV 号は、当初、直径1mmの物体表面間距離0.8mm，中心間距離2.8mmにて製作を行ったが、その狭いギャップに50ミクロン厚の静電シールドを挿入する際の設置精度に問題が残し、位置調整が非常に困難であることがわかった。そこで、少しスケールに関しては譲歩して、直径2mmの物体表面間距離3mm，中心間距離5mmの測定から始めることにした。それでもNewton-II号以前の測定より距離が一桁小さい測定である。

2013年度にこのNewton-IVh号と名付けられた、図14に示す最新鋭機を用いたミリメートルスケールでの重力実験をついにを行った。主目標をミリメートルに移行して以来、久々の物理計測である。そして2013年12月、ついにわれわれとしては初めて、ミリメートルスケールでの重力の観測に成功した。 $\lambda \sim 1\text{mm}$ にて、 $\alpha < 10^{-1}$ 程度の精度でニュートン重力が確認された [11]。図15は角度変位の時系列データの周波数スペクトルである。ニュートン重力の計算による予想通りの高さのピークが基本振動，2倍振動共に明瞭に確認された。この計測の誤差解析はまだこれからであるが、現状で10%程度の系統誤差と1%程度の統計精度が確認されている。

実は、この距離での逆二乗則の計測は通常、逆二乗則が正しければ信号が相殺されるよう設計された、ヌル実験を行うことで精度を上げるのが常道である。

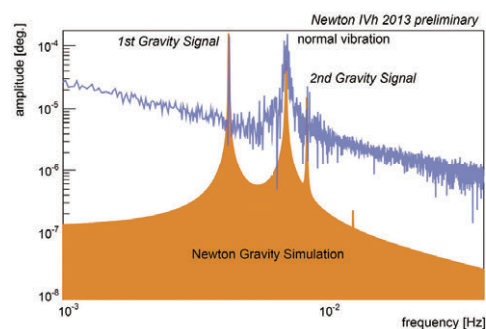


図 15 : Newton-IVh 号の周波数スペクトル [11]

従って、万有引力定数の絶対値がキャンセルするよう計測が行われる。われわれは、ヌルのセットアップにはまだ移行していないため、逆に現段階で、10%未満の精度で万有引力定数の絶対値をミリメートルスケールで計測された値として提供することが可能となっている。Newton-IVh号は初めからヌル実験への移行を想定した設計となっており、現在の Attractor に加えて遠方に相当する第二の Attractor 一式をさらに内部に加えるアップグレードを行うことで、逆二乗則の破れに対する感度を上げた測定が2014年度に取り組むべき次段階として予定されている。

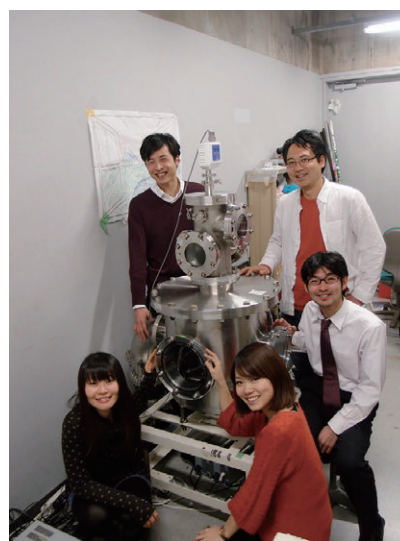


図 16 : Newton-IVh 2014 collaboration

ねじれ秤の実験はNewton-IVh号が当分、精度を向上させながらデータを出し続ける予定である。合わせて、さらに近距離、即ち100ミクロン、10ミクロンにて10%の精度を目標に新しいアイデアに基づく新規開発を進めつつある。これらは、図16のような大学院生を中心とした少人数、小規模実験にて引き続き推進する。

一方、重力に関連して筆者が Spokesperson をつとめる研究プロジェクトである、TRIUMF 研究所における MTV 実験 (偏極 ^8Li 核を用いた時間反転対称性の破れ探索実験) [12] を応用した、原子核スケールでの重力検証も2011年

頃より新規プロジェクトとして行ってきた。ベータ崩壊に伴って放出される、パリティの破れによって縦偏極した電子が金属薄膜にて散乱される際のスピン歳差運動を精密観測することで、もし ADD 模型が正しければ原子核近傍で非常に強い重力場が出現している兆候が観測されるはずである、という原理に基づいた実験 (MTV-G 実験) である。図 17 のように、歪んだ時空を飛行する自転する粒子は時空の歪みに引きずられて歳差運動 (geodetic precession) を行う、という一般相対論の帰結を利用する。MTV 実験は偏極 ^8Li 核から放出される電子が、時間反転対称性を破る横偏極を持つかどうかを検証する実験であるが、図 18 のようにこの電子横偏極度計をそのまま用いることでこの検証を可能にしている。詳細は [13] に譲り、これまでにわれわれの逆二乗則検証プロジェクトで得られた結果を図 19 の α - λ プロットにまとめた。现阶段で得られた精度はよいとはいえないが、原理的には今回用いたベータ崩壊電子ではなく電子加速器の偏極ビームを用いることで高精度化が可能という見通しは立ったといえる。

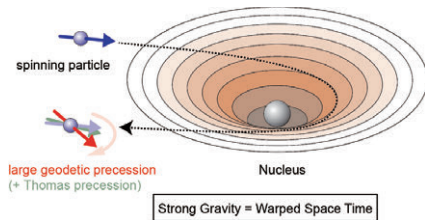


図 17 : MTV-G 実験の原理

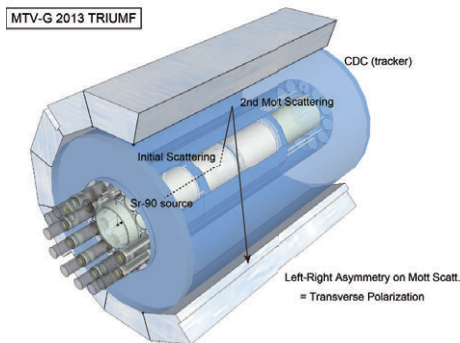


図 18 : MTV-G 実験のセットアップ

図 19 には、われわれ自身の実験データのほかに、水素原子と反陽子ヘリウム原子の分光データ [14] を用いた再解析の結果も載せてある。これは、大量に蓄積された既存のデータの中に、本当に重力の兆候はないのかを探し出すプロジェクトの第一歩として始めた結果の一部である。ねじれ秤の結果はあと一步、世界記録には及んでいないが、この先の一步がいかに困難であるかは予想に難くない。

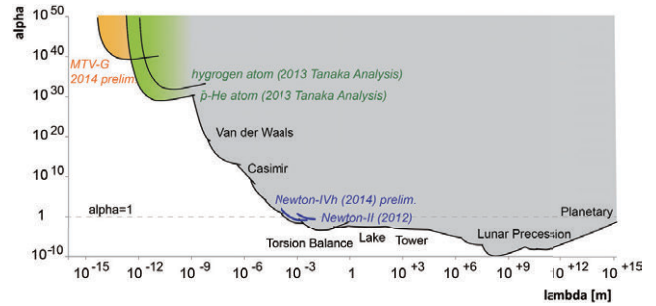


図 19 : 立教大による研究成果のまとめ (preliminary)

8 おわりに

この研究は余剰次元という物理学の根幹に関わる問題に対しアイデア勝負の小規模実験で挑むことから、近年しばしばメディアに取り上げられるようになった [15]。本稿で述べたようにこの研究はようやく準備を終えて結果を出そうという段階に達しつつある状態であり、これからが本番である。気を引き締めて初心を忘れずに邁進すると共に、共感、応援して下さいる皆様に感謝いたします。

参考文献

- [1] N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos, G. Dvali, Phys. Lett. B **429** (1998) 263-272.
- [2] E. Fischbach and C. Talmadge, "The Search for Non-Newtonian Gravity", Springer (1999).
- [3] J. O. Dickey *et al.*, Science **265** (1994) 482.
- [4] 村田次郎, 『『余剰次元』と逆二乗則の破れ』, 講談社ブルーバックス (2011).
- [5] ATLAS Collaboration, Phys. Lett. B **705** (2011) 294-312.
- [6] D. J. Kapner *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98** (2007) 021101.
- [7] J. Murata *et al.*, NIM A **500** (2003) 309; J. Murata *et al.*, IEEE Nucl. Sci. CR675 (2005).
- [8] M. Hata *et al.*, J. Phys. CS **189** (2009) 012019; K. Ninomiya *et al.*, J. Phys. CS **189** (2009) 012026.
- [9] K. Ninomiya *et al.*, J. Phys. CS **453** (2013) 012007.
- [10] S. Schlamminger *et al.*, Phys. Rev. Lett. **100**, (2008) 41101.
- [11] 村上遥菜 立教大学修士論文 (2014).
- [12] J. Murata *et al.*, Hyperfine Interact **225** (2014) 193-196.
- [13] S. Tanaka *et al.*, J. Phys. CS **453** (2013) 012018; 田中佐季 立教大学修士論文 (2014).
- [14] CODATA2010; M. Hori *et al.*, Nature **476** (2011) 484.
- [15] 日経サイエンス 1月号(2013); Newton 7月号(2013); BS フジ・ガリレオ X 「世界は本当に 3 次元か？」 (2013 年 10 月 13 日放映)