



異次元空間へのいざない

大阪市立大学大学院理学研究科 丸 信人

読者のみなさんは「異次元空間」と聞いてどのようなイメージを持たれるでしょうか？タイムマシンや宇宙戦艦ヤマトのワープといったSFチックなものをイメージしませんか？

ここでは、異次元空間について物理学者(図1)が考えていることについてご紹介します。



図1 異次元空間の研究会に集まった物理学者。2013年3月大阪大学。

1. 次元とは？

異次元空間という言葉の中で「次元」という言葉はわかりにくいかもしれませんが。まず始めに次元とは何か考えてみましょう。私たちが運動できる方向はいくつありますか？前後、左右、上下の3方向です。これらは空間の動ける自由度で3次元空間といいます。もう1つ過去から未来へ時間方向に運動しています。アインシュタインの相対性理論では空間と時間は同等なので、空間と時間をひとまとめにして時空、つまり私たちの住んでいる世界は4次元時空と考えます。ですから、異次元空間とは私たちの4次元時空とは異なる空間です。

4次元以外の空間なんて言われてもわけがわからないと思う方もいるかもしれ

ません。しかし、異次元空間は低い次元の世界を想像すると容易に理解できます。例えば、サーカスの綱渡りを想像します(図2)。綱を渡っている人は前か後ろしか動けないので1次元空間に住んでいます。次に、綱の上にアリが這っているとします。アリにとっては綱が伸

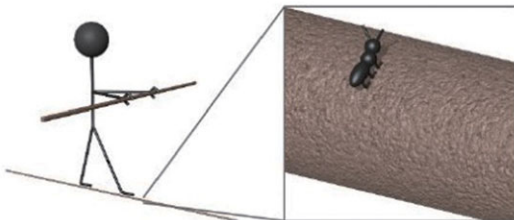


図2 綱渡りとアリの例

びている方向だけでなく、それと垂直な綱を巻く方向にも動けます。ですから、アリは2次元空間に住んでいます。綱を渡る人にとって1次元しか見えないのは、綱の伸びている方向と垂直な方向が小さく丸まっているためです。この垂直な方向が綱を渡る人にとっての異次元空間になります。これと同じことを私たちの4次元時空で想像するのは簡単です。例えば5次元時空の場合、5番目の空間が小さく丸まっていれば、私たちに4次元時空に住んでいるように見えます。図3にあるように4次元時空の各点に5番目の空間が丸まっているというイメージです。物理学者は、5番目以降の異次元空間が小さく丸まっていた日常生活では感じることができませんが、そのような異次元空間があると思って証拠を探しています。以降では、それについて解説したいと思います。

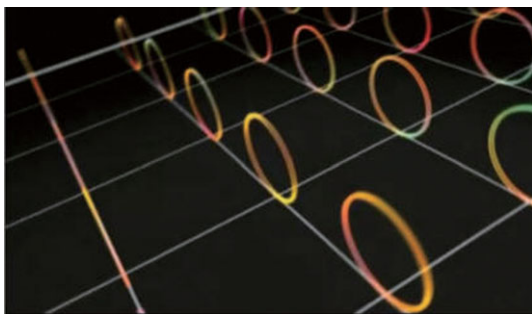


図3 5次元時空の概念図

2. 異次元空間を考える理由

次に、異次元空間を考える理由を振り返ります。1920年代に数学者カルツァが最初に異次元空間の存在を提唱し、その理論を物理学者クラインが修正、発展させ、「カルツァ・クライン理論」として知られるようになりました。この理論の狙いは、アインシュタインの長年の夢であった統一理論の実現です。アインシュタインは晩年、当時知られていた電磁気力と重力を1つの理論で記述しようと試みましたが、成功しませんでした。ところが、カルツァ・クライン理論では5次元重力理論の5番目の空間を小さく丸めると、異次元空間の重力が4次元時空における電磁気力になることがわかりました。4次元時空の重力と電磁気力の統一が5次元重力として統一されたのです。しかし、この理論は現実と矛盾します。重力は電磁気力に比べて非常に弱い(重力の1兆分の1兆分の1兆分の100分の1の強さ) ですが、カルツァ・クライン理論では同じ強さになってしまい、しばらく忘れ去られました。

ところが、超弦理論の登場によってカルツァ・クライン理論は復活します。超弦理論では、これ以上分割できない最小構成単位は粒子ではなく非常に小さな「ひも」であり、すべての素粒子をひもの異なる振動の仕方ですべての力、構成粒子を統一する「究極理論」の最有力候補として注目されています。これは重力と電磁気力を統一したカルツァ・クライン理論を重力と電磁気力を含めたすべての力に拡張したものになっています。その超弦理論が数学



的に矛盾のない理論であるためには、時空が10次元であることがグリーンとシュワルツの研究によって明らかになりました。私たちが住んでいるのは4次元時空なので、6個の異次元空間は小さく丸まっていなければいけません。どのくらい小さく丸めるのでしょうか？カルツァ・クライン理論や超弦理論では、異次元空間は「プランク長」(1兆分の1兆分の1億分の1ミリメートル！)という非常に小さいサイズに丸まっていると考えます。このように極端に小さく丸まっていたら、現在知られているどんな高性能の顕微鏡をもってしても異次元空間を観測できません。自然界のすべての力、構成粒子を統一する「究極理論」を完成するには異次元空間が必要不可欠ですが、観測にかからないために物理学者の頭を悩ませ続けました。

3. 異次元空間を観測できるか？

世紀末も押し迫った1998年、1本の注目すべき論文が出ました。アルカニ・ハット、ディモプロス、ドヴァリらによると、異次元空間が0.1ミリメートルくらいの大きなサイズに丸まっても、当時知られていた観測事実は何ら矛盾しないと主張したのです！0.1ミリメートルくらいの異次元空間なら肉眼でも見えそうな気がしますよね？現在の加速器実験(加速された2つの粒子を正面衝突させて新しい粒子を生成する実験)などで異次元空間を観測にかかるかどうかを見積もると次のようになります。4次元時空では1000兆×1兆電子ボルト(電子ボルト:1ボルトで電子を加速したときのエネルギー)という非常に大きなエネルギーで、重力が強くなります。この重力が強くなるエネルギーをプランクスケールと言います。そのプランクスケールは異次元空間の数とその大きさによって異なります。ひょっとすると異次元空間が存在して、プランクスケール、つまり重力が強くなるのを加速器実験などで観測できるかもしれません。

そこで、加速器実験のエネルギーをプランクスケールとして異次元空間のサイズを見積もってみましょう。異次元空間の数が1つのとき、異次元空間のサイズは100億キロメートルと計算できます。太陽から最も遠い海王星までの距離が約45億キロメートルですから、すでに異次元空間が見えているはずで、明らかに現実と矛盾します。図1で言えば、45億キロメートルの太さのロープに相当し、異次元空間を認識できます。異次元空間の数が2つのとき、異次元空間のサイズは0.1ミリメートルほどになります。超弦理論から示唆されるように異次元空間の数をもっと増やしていくと、異次元空間のサイズはもっと小さくなり、観測するのはさらに難しくなります。ということは、超弦理論が観測にかからないかということ、そうではありません。ここで述べたことは、重力が強くなるプランクスケールを加速器のエネルギーにした場合であって、加速器のエネルギーより大きい場合も考えられます。そのような場合、0.1ミリメートルより小さい異次元空間をもつ超弦理論

の証拠になる可能性はいつでも残されています。

4. 異次元空間の探索

ここまで異次元空間を考える理由と観測にかかる可能性について述べました。つまり、加速器実験のエネルギーで重力が強くなるときに、異次元空間の大きさが0.1ミリメートルほどになります。言っているだけではいけませんので、現在まで提案されている異次元空間探索実験についていくつか紹介します。

1つ目は、ニュートンの万有引力の法則に関する実験で、「逆2乗則の破れ」の検証です。2つの物体の間に働く引力は、それぞれの物体の質量に比例し物体間距離の2乗に反比例します。これを逆2乗則と言います。物体間距離を2倍、3倍、…に引き延ばすと引力は1/4倍、1/9倍、…と小さくなります。この逆2乗則は異次元空間がない場合に成り立つ法則で、異次元空間が存在するときには変更を受けます。2個の異次元空間がある場合を例にとると、物体間距離が0.1ミリメートルより大きいとき、2つの異次元空間は小さく丸まっていて私たちには見えませんから、引力は私たちの住んでいる世界と同様に物体間距離の2乗に反比例します。ところが、物体間距離が0.1ミリメートルより小さいときには網の上のアーリのように2つの異次元空間を感じるができますので、物体間距離の(2乗ではなく)4乗に反比例します。

この「逆2乗則の破れ」を検証する実験が図4にあるような「ねじれ秤」を使って行われています。このねじれ秤はもともとキャベンディッシュが地球の質量を計った装置として有名です。原理は非常に簡単です。大小2つの鉛球に働くわずかな

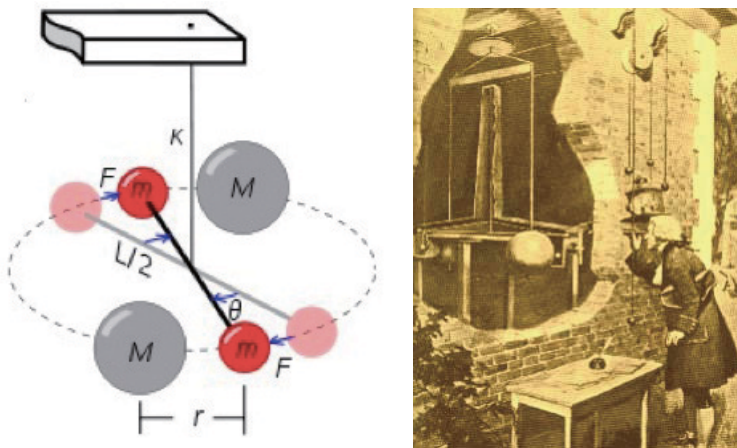


図4 キャベンディッシュの実験概念図(左図) と観測しているキャベンディッシュ(右図)



引力がワイアのねじれ角を測ることによってわかる仕組みです。1798年にキャベンディッシュが行った実験では、長さ186センチメートルの木製の竿の両端に730グラムの小鉛球をつけ、160キログラムの大鉛球との距離22.5センチメートルで働く引力を測定しました。その引力は非常に弱く、小鉛球が感じる重力のおよそ5000万分の1というものでした。近年行われた実験で注目に値する実験はワシントン大グループによるものです。実験装置は図5にあるように、穴の開いた円盤状のねじれ秤とおもりを用いました。下側の円盤を回転させて上側の円盤の応答を観測し、引力を測定します。その装置の大きさがわずか5センチメートルというのにも驚かされます。余談ですが、キャベンディッシュ型のねじれ秤の実験装置は、上野にあります国立科学博物館に展示されています。興味のある方は足を運ばれてはいかがでしょうか？

2001年には、0.2ミリメートルの距離まで逆2乗則が成り立っていることを確認し、2007年には更に精度を上げて0.055ミリメートルの距離まで逆2乗則と矛盾がないことを実証しました。この結果によって、加速器のエネルギーで重力が強くなる場合の異次元空間の存在が否定されましたが、加速器エネルギーより大きいエネルギーで重力が強くなる場合の異次元空間は、0.1ミリメートルより小さくなり、その存在は否定されていません。将来の観測技術の発展を考えれば、まだまだ異次元空間の観測は期待できます。

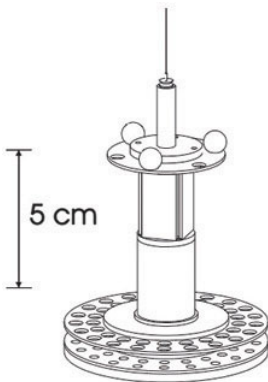


図5 ワシントン大グループの実験装置の図面と写真

ねじれ秤の仕組みは簡単ですが、0.1ミリメートルより短い距離で引力を測定するのは至難の業です。重力自体が大変弱いので様々なノイズ(温度、振動など)を受けないように測定する工夫が必要です。現在でも日本を含め世界の様々な研究グループがねじれ秤を用いた検証実験を行っていますが、逆2乗則の破れ、つまり異次元空間の存在は残念ながら報告されていません。

次に挙げる2つの試みは加速器実験による検証です。加速器実験とは2つの電荷をもつ粒子を電圧を架けて高速に加速し、正面衝突させることによって新しい素粒子を生成する実験です。最初の実験は、異次元空間に染み出す重力を直接検証するもので、電子と陽電子を加速して正面衝突させる線形加速器実験です。陽電子とは正の電荷をもち、その他の性質は電子と全く同じ粒子のことです。電子と陽電子が衝突すると光子と重力を伝える素粒子「重力子」が生成されます。電子、陽電子、光子は4次元時空の膜の上でしか伝播できませんが、重力子は異次元空間も伝播できます(図6)。重力子が異次元空間に染み出す際にエネルギーを持ち去るので、反応の前後でエネルギー収支が合わなくなります。光子のエネルギーが電子と陽電子のエネルギーの合計より少なくなります。このような現象は異次元空間の数や反応エネルギーを変えると、反応の頻度が変化します。その変化の様子を詳しく調べると、異次元空間の存在を確かめるだけでなく、その数までわかります。例えば、今年のヒッグス粒子発見で注目されている加速器実験LHCで異次元空間の存在および数が発見できるものと期待されています。

もう1つの実験は、今述べましたヒッグス粒子を昨年発見しました加速衝突器LHCによるブラックホール生成の実験です。ブラックホールとは、非常に大きな質量をもつ天体が自分自身の強い重力のために収縮し、ある半径より小さくなると光すらも出てこられなくなる天体のことです。地球も半径1センチメートルぐらいの球に押し込められれば、ブラックホールになります。6ページで述べましたように、重力が1兆電子ボルトで強くなるときに0.1mm程度の異次元空間が存在します。LHC加速器の衝突エネルギーは8兆電子ボルトなので、0.1ミリメートル程度の異次元空間が存在すれば重力が非常に強くなり、ブラックホールが生成される可能性があります。光すら飲み込むブラックホールを加速器で作ったら、私たちが飲み込まれてしまわないか心配されます。実際、実験の差し止め訴訟が起こ

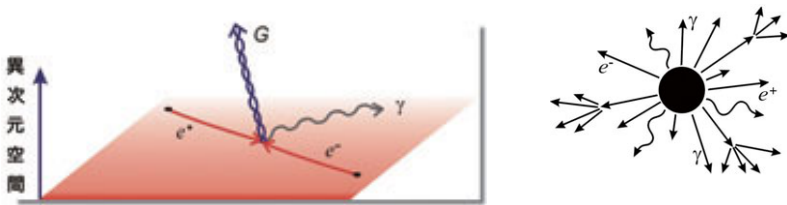


図6 異次元空間の加速器実験探索の例。左図:電子(e^-)と陽電子(e^+)が衝突して光子(γ)と重力子(G)が生成される過程。右図:ブラックホールのホーキング輻射模式図。この例では電子、陽電子、光子が放出されている。



ったり、インドでは少女が絶望のあまり自殺してしまったほどです。しかし、そのような心配は必要ありません。LHCで生成されるブラックホールのサイズは非常に小さい(およそ1億分の1億分の1ミリメートル) ことと、ホーキング放射(図6) と呼ばれる量子力学特有の現象により一瞬にして蒸発してしまうので、地球を飲み込むことはありません。蒸発によりブラックホールは、私たちの身の回りの素粒子に崩壊します。その崩壊頻度は異次元空間の数によって変化するので、実験でチェックしようというわけです(図7)。

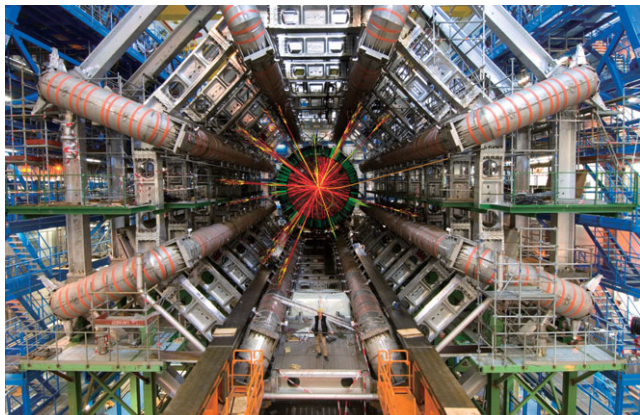


図7 LHCで生成されたブラックホール(想像図)

5. おわりに

この記事を通して異次元空間の存在が少しは馴染み深いものを感じていただけたでしょうか？私たちの身の回りの至る所に異次元空間が小さく丸まっているのかもしれない。昨年はヒッグス粒子の発見に湧いた素粒子物理ですが、そう遠くない将来に異次元空間の痕跡を発見できるかもしれないと思うと、興奮せずにはられません。今後の異次元空間探索実験の動向からますます目が離せません。



著者紹介:丸 信人(マル ノブヒト)

千葉県出身。大阪市立大学大学院 理学研究科 准教授。名大で学位取得後、東工大、東大、理研、ローマ大、神戸大、中央大にて博士研究員、慶應大で助教(有期)を経て、2013年4月より現職。専門は素粒子物理、場の理論。とくに標準模型を超える物理。趣味はサッカー観戦、フットサル。