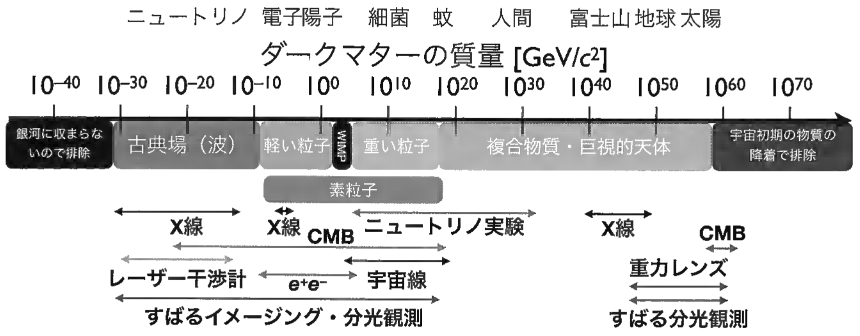


図 3—ダークマター質量探索の範囲
CMB：宇宙マイクロ波背景放射（ビッグバン直後の宇宙からの電波），e^+e^-：電子・陽電子衝突型加速器（SuperKEKB 加速器など）。

この特集では，このチャンスをつかもうとする研究者のグループを紹介したい。図 3 にある通り，非常に重い場合は天体として振る舞うが，非常に軽い場合は粒子でありながら量子力学の効果で波として振る舞う。中間的な場合はミクロな粒子として考えられる。それぞれの可能性を調べるために，日本が誇る世界最先端の既存の研究施設を活用し，短期間で結果を出すことを目指している。

例えば東京大学宇宙線研究所が建設した重力波望遠鏡 KAGRA は，ブラックホールの合体などの天体現象を調べるのが主目的だが，装置に偏光板を入れると，アクシオンという波として振る舞うダークマターを探索できる。国立天文台が建設したすばる望遠鏡は遠くの銀河の進化などを調べてきたが，大口径と広視野を生かしカメラと分光器を組み合わせて世界最大のダークマターの 3 次元地図をつくり，銀河系や近所の矮小銀河の中での星の運動から間接的に粒子的なダークマター同士の相互作用を調べることができる。JAXA が今年打ち上げる予定の X 線観測衛星 XRISM では超新星の残骸などの観測が主眼だが，検出器の高精度を生かして銀河内に集まるダークマターがたまに崩壊して X 線を出す可能性を探索できる。KEK が建設した世界でもっとも明るいビームをもつ SuperKEKB 加速器では，電子とその反物質である陽電子を対消滅させることで，ごくごく弱くしか相互作用しないダークマターがまれに生成される現象を探索できる。そして宇宙の始まりにあったと考えられているインフレーション中に出された重力波を観測しようと国際チームが建設したサイモンズ天文台などの望遠鏡を使うと，アクシオンにより起こる光の複屈折の証拠を探すこともできる。実はこの最後の手法では，ダークマターによるものかもしれない兆候が見えてきている。

こうした既存施設を活用したユニークな探索に加えて，波，粒子，天体として振る舞うダークマターの理論的な側面をそれぞれ研究し，新たな仮説や探索方法を提案する。さらに理論からきちんと観測へつなげるための詳細な構造形成のシミュレーションを行なう一方，究極の物理理論と考えられている量子重力理論の立場からもダークマターの候補を絞っていく。これが我々のチームの構想である。特に頭の柔らかい若い研究者が多く集まった。

ダークマター研究の新しい展開について興味をもっていただければ幸いである。

（協力：学術変革領域研究 20H05850）

宇宙は左右を区別するか？

小松英一郎
こまつ えいいちろう
マックス・プランク宇宙物理学研究所（宇宙物理学・宇宙論）

宇宙には特別な場所や方向はないと考えられている。一方，原子核の崩壊を記述する弱い相互作用は，左右を区別することが知られている。それでは，宇宙も左右を区別するのだろうか？　この問いに答えるには，空間座標をすべて反転させる「パリティ変換」に対し，物理学の法則がどう変わるかを調べればよい。とりわけ，宇宙論の未解決問題であるダークマターやダークエネルギーを記述する物理学の法則は，パリティ変換に対して不変なのだろうか？　近年，宇宙マイクロ波背景放射の偏光の観測から，パリティ対称性が破れている可能性が報告されている。もしこれが確認されれば，ダークマターやダークエネルギーを解明する鍵となるはずだ。

宇宙の一様等方性

宇宙には，特別な場所や方向はあるのだろうか？

今年は，コペルニクス生誕 550 周年である。彼の地動説により，地球は宇宙の中心ではなくなった。現在，この考え方は宇宙空間全体に広げられ，大局的に見れば，宇宙には特別な場所も方向もないとされている。

そこに住む人類にとって地球は「特別な」存在かもしれないが，視点を高くして観測可能な宇宙空間を俯瞰すれば，そこには特別な場所も方向もない，ということだ。すなわち，大局的に見れば宇宙は一様であり，等方である。

もちろん，このような仮定は観測データで検証されねばならないが，これまでに，宇宙には特別な場所も方向も見つかっていない。例えば，宇宙空間を一様に貫く磁場があれば，それは一様ではあるが非等方である。もちろん，そのような磁場は見つかっていない。どの方向を見ても空間は同じ割合で等方的に膨張し，1 億光年くらいの大きさで平均すればあらゆる場所の物質密度はほぼ一様に等しい。

「ほぼ一様に等しい」というのは，1 億光年くらいの大きさで平均しても，ダークマターなどの物質の分布にはわずかな不均一性（ゆらぎ）が存在するからだ。もし物質密度分布が完全に一様であれば，銀河も，星も，惑星も，生命も誕生しない。

一方，ゆらぎの統計的な性質も一様で等方的である。すなわち，宇宙空間の各点のゆらぎが従う確率分布は，場所にも方向にもよらない。宇宙の一様等方性とは，ゆらぎの統計的な一様等方性も含む概念である。

物理学と対称性：ネーターの定理

以前，「科学の探究は，あなたの世界観にどのような影響を与えたか？」という質問を受けたので，「最も大きな衝撃は，地球上でも宇宙空間でも同じ物理法則が働いていることを知ったことだろう」と答えたことがある。

ニュートンは，地球上の物体の運動の法則は太陽系の物体の運動にも当てはまることを示した。現在我々は，観測可能な宇宙は測定誤差の範囲内で同じ物理学の法則に従うことを知っている。それは何を意味するのだろうか？

粒子の運動などの物理学の現象を扱う際，我々は便宜的に座標を用いる。時間座標を t と書き，デカルト座標を用いて空間座標を $\mathbf{x}=(x, y, z)$ と書こう。もちろん，物理学の現象は座標のとり方にはよらない。我々がどのような座標系を用いても，粒子は物理学の法則に従って運動する。異なる座標系を用いると粒子の運動は見かけ上変化するが，本質は変わらない。

ある座標系 $\mathbf{x}$ から別の座標系 $\mathbf{x}'$ へ移ることを座標変換と呼ぶ。面白いことに，粒子の運動などの物理現象が，見かけ上座標変換に対してどのように変化するかを調べると，その現象の本質について深い洞察が得られることがある。

宇宙空間のどこでも同じ運動の法則が当てはまるならば，それは空間座標を定数だけずらす「並進変換」に対して不変である。すなわち，任意の定数ベクトルを $\mathbf{c}$ と書けば，運動の法則は $\mathbf{x}\to\mathbf{x}'=\mathbf{x}+\mathbf{c}$ という連続的な座標変換に対して不変である。例えば，ニュートンの万有引力の法則によれば，2つの質点の間に働く引力は2点間の距離にしかよらず，これは空間座標の並進変換に対して不変だ。

2点間の距離は空間座標の「回転変換」に対しても不変である。3次元の回転行列を R と書けば，万有引力の法則は $\mathbf{x}\to\mathbf{x}'=R\mathbf{x}$ という連続的な座標変換に対しても不変だ。

ドイツ南部のバイエルン州出身の数学者エミー・ネーターは，1918年の論文[1]で，その後の物理学に大きな影響を与える定理を発表した。ネーターの定理によれば，物理系がある連続的な変換に対して不変であれば，すなわち系に何らかの対称性があれば，それに対応する保存則が存在する。例えば，空間座標の並進変換に対する対称性は運動量の保存則を与え，回転変換に対する対称性は角運動量の保存則を与える。これは相当に深い洞察ではないか！

我々が知る限り，一様等方な宇宙では，物理学の法則は並進変換と回転変換に対して対称であり，ゆらぎが従う確率分布も同様に対称である。宇宙はそんなに単純なのだろうか？

右手系と左手系：パリティ変換

これより本題に入る。座標変換として，「パリティ変換」とも呼ばれる空間反転 $\mathbf{x}\to\mathbf{x}'=-\mathbf{x}$ を考えよう。これは連続的な変換ではないため，ネーターの定理の適用外だ。

パリティ変換は，しばしば「鏡に映す変換」として説明されるが，これは直観的なわかりやすさを優先したために正しさが犠牲になった例である。なぜなら，鏡に映す変換は (x, y, z) のどれか1つを反転させるものとして説明されるが，パリティ変換はすべてを反転させるからだ。

パリティ変換を行列で書けば，$\mathbf{x}\to\mathbf{x}'=P\mathbf{x}=-\mathbf{x}$ なので

$$P=\begin{pmatrix}-1 & 0 & 0\\ 0 & -1 & 0\\ 0 & 0 & -1\end{pmatrix} \tag{1}$$

である。行列 P の行列式は -1 だが，回転行列 R の行列式は $+1$ なので，パリティ変換と回転変換は大きく異なる。

パリティ変換を想像するのは，それほどたやすいことではない。理解を助ける1つの方法は，パリティ変換を「鏡に映す変換」と2次元平面の回転とに分割することだ。例えば $z\to z'=-z$ とした後，xy 平面上で2次元座標 (x, y) を z 軸周りに180度回転させれば，P を得られる。

実演してみよう。右手系の座標系を用意し，$(x, y, z)=$(親指，人差し指，中指)とする(図1(a))。$z\to z'=-z$ を実現するには，右手系から左手系に移らねばならない(図1(b))。その後，左手の中指を軸として親指と人差し指を180度回転させれば，パリティ変換を実現できる(図1(c))。

右手だけでは図1(c)を再現できない。右手の手首をいくら回しても，それは3次元の回転変換であり，パリティ変換ではないからだ。したがって，パリティ変換は右手系から左手系へ移る変換，あるいはその逆と考えればよい。物理学の法則がパリティ変換に対して不変であれば，それは左右を区別しない。

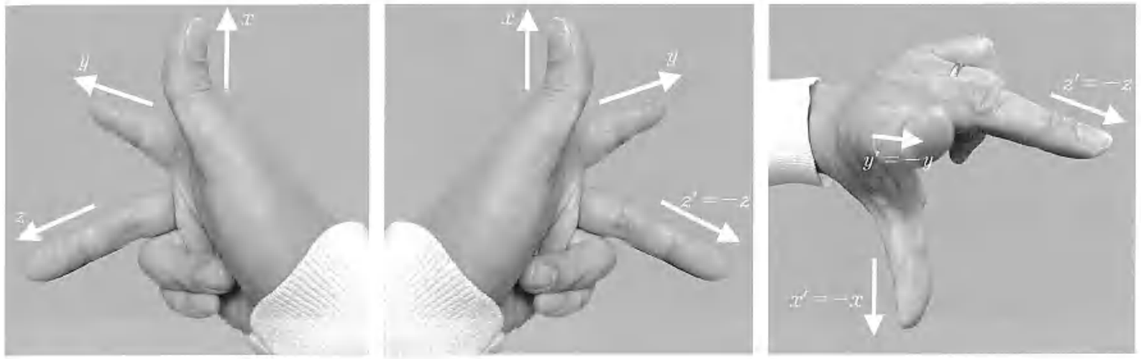


図1—パリティ変換
右手系の座標系を(a)のように定義すれば，反転 $z\to z'=-z$ によって左手系の座標系(b)へ移る。xy 平面を180度回転させれば，パリティ変換後の座標系(c)を得る。

驚くべきことに，原子核の崩壊を記述する弱い相互作用の法則はパリティ対称性を破ることが，1957年に実験的に示されている[2]。ならば，宇宙論の未解決問題であるダークマターやダークエネルギーを記述する物理学の法則も，パリティ対称性を破るのではないか？　これが本稿の主題である。

パリティ対称性の破れ

物理学の法則が左右を区別することは，誰も予想していなかった。

1957年の実験が行なわれるきっかけとなった，弱い相互作用におけるパリティ対称性の破れの可能性を論じた理論的論文[3]を読んだヴォルフガング・パウリは，同僚のヴィクター・ワイスコフへ宛てた手紙の中で「私は，主が弱い左利きだとは思わない。(Ich glaube aber nicht, daß der Herrgott ein schwacher Linkshänder ist.)」と述べたそうだ。

しかし，実験で確認された以上は事実であり，「信じる」「信じない」の問題ではない。これが科学の痛快なところである。

ダークマターやダークエネルギーを記述する物理学の法則がパリティ対称性を破ると考える研究者は，ほとんどいない。一方，本稿で紹介するように，宇宙マイクロ波背景放射の偏光の観測データには，パリティ対称性のわずかな破れの兆候が見えつつある[4,5]。

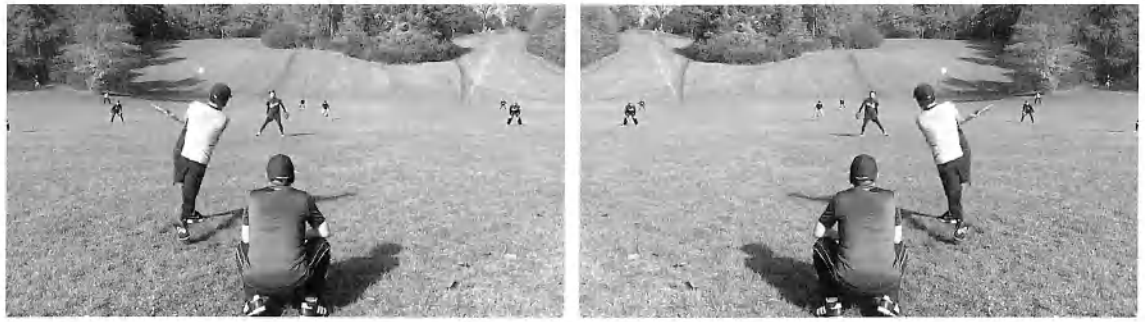
筆者がこの結果を研究会で発表すると，きまって「あなたはその結果を信じているのですか？」と聞かれるので，「私は科学をやっているので，何かを信じるのではなく，観測データを使って示したいのです」と答えている。

パリティ対称性の破れを理解するのはたやすくないので，身近な例を挙げよう。図2(a)は，ミュンヘンで行なわれたソフトボールの試合の様子で，図2(b)は左右を反転させたものである*1。ソフトボールを記述する法則(ルール)のパリティ対称性が破れていなければ，オリジナルの写真を反転したものも，同じ確率で現実に起こるはずだ。

ソフトボールの知識がない人が2つの写真を見比べても，どちらが反転したものかはわからないだろう。図2は打者がヒットを打つ瞬間を捉えたものだが，この後の展開を見せれば，オリジナルでも反転したものでも，ボールはニュートンの法則に従って放物線を描くことに気づくだろう。そうすれば，パリティ対称性は破れていないと結論するかもしれない。

より注意深い人は，図2(b)では打者は左打ちで，野手はグラブを右手にはめた左投げの人が多すぎることに気づくかもしれない。また，図2

*1—左右の方向を x 軸とすれば，パリティ変換では左右反転後に yz 平面を180度回転させねばならないが，ここでは無視する。



(a) (b)

図 2—ソフトボールとパリティ対称性
オリジナルの写真(a)を左右反転した(b)は，同じ確率で現実に起こるだろうか？

(a)のその後の展開では打者がヒットを打った後に右側へ走り出すが，図 2(b)では左側へ走り出す。するとソフトボールの知識がある人は，図 2(b)は反転したもので，それは現実には起こりえないことに気づくだろう。

しかし，同様のことをサッカーでやれば，果たしてオリジナルと反転したものを区別できるだろうか？　筆者にはサッカーの経験が乏しいので，オリジナルと反転したものを見分けられない気がする。つまり，筆者の知識の範囲内では，サッカーを記述する法則はパリティ対称性を破らないと結論しそうだ。

このように，対象となる物理現象に関する知識があってこそ，パリティ対称性を判別できるのである。1956 年の理論的論文[3]と翌年の実験[2]では，原子核のスピン角運動量と電子の運動量がパリティ変換に対して異なる振る舞いを示すことが用いられた。

ベクトルと擬ベクトル

粒子の運動量ベクトル $\mathbf{p}$ と角運動量ベクトル $\mathbf{L}$ は，回転変換に対しては同様に振る舞うが，パリティ変換に対しては異なる振る舞いを示す。

まず，$\mathbf{p}$ の成分はパリティ変換に対して符号を変える。すなわち，$\mathbf{p}=(p_x, p_y, p_z)\to(p'_x, p'_y, p'_z)=(-p_x, -p_y, -p_z)$ である。この性質をもつベクトルを「極性ベクトル」と呼ぶ。

一方，$\mathbf{L}$ の成分 (L_x, L_y, L_z) はパリティ変換に対して不変で，この性質をもつベクトルを「軸性ベクトル」，あるいは「擬ベクトル(pseudovector)」と呼ぶ。本稿では極性ベクトルを単に「ベクトル」，軸性ベクトルを「擬ベクトル」と呼ぶことにする。

$\mathbf{L}$ を理解しよう。角運動量擬ベクトルは粒子の位置ベクトル $\mathbf{r}$ と $\mathbf{p}$ の外積 $\mathbf{L}=\mathbf{r}\times\mathbf{p}$ で与えられる。位置ベクトルの成分を $\mathbf{r}=(X, Y, Z)$ と書けば，$(L_x, L_y, L_z)=(Yp_z-Zp_y, Zp_x-Xp_z, Xp_y-Yp_x)$ である。$\mathbf{p}$ と同様に $\mathbf{r}$ も極性ベクトルなので，パリティ変換によって $\mathbf{r}$ の成分は符号を変える。結局，$\mathbf{r}$ と $\mathbf{p}$ の成分はすべて符号を変えるため，$\mathbf{L}$ の成分は変わらない。

さて，2 つのベクトルのドット積はスカラー量で，回転変換に対して不変である。同じ粒子の $\mathbf{p}$ と $\mathbf{L}$ のドット積はゼロ($\mathbf{p}\cdot\mathbf{L}=0$)だが，異なる粒子に対してはゼロではない。例えば，粒子 1 の運動量 $\mathbf{p}_1$ と粒子 2 の角運動量 $\mathbf{L}_2$ のドット積 $\mathbf{p}_1\cdot\mathbf{L}_2$ はゼロではなく，これはパリティ変換によって符号を変える。この性質をもつスカラー量を「擬スカラー(pseudoscalar)」と呼ぶ。

ある物理現象がパリティ変換に対して対称であるならば，正と負の符号をもつ擬スカラーは同じ確率で現れるはずだ。よって，パリティ対称性を調べる 1 つの方法は，測定可能な量(例えば粒子の運動量と角運動量)から擬スカラーを作り，測定を繰り返すことで正と負の符号が同じ確率で出現することを確認すればよい。例えば，擬スカラーの平均値はゼロとなるだろう。

先ほどのソフトボールの例を考えよう。打者はヒットを打った後，1 塁，2 塁，3 塁へと進む。地面から空へ向かう方向を z 軸とする右手系座標では走者の動きは反時計回りで，走者のもつ角運動量擬ベクトルは z 軸方向である。すなわち，$\mathbf{L}=(0, 0, L_z)$ で $L_z>0$ である。次に，重力が働く方向を表わすベクトル $\mathbf{g}=(0, 0, g_z)$ を考えると，これは z 軸とは逆方向なので $g_z<0$ である。したがって，擬スカラーは $\mathbf{g}\cdot\mathbf{L}=g_zL_z<0$ である。図 1(b)のように左右反転すると，ヒットを打った後の走者の動きは時計回りで，擬スカラーは $\mathbf{g}\cdot\mathbf{L}>0$ となる。しかし，ソフトボールのルールではこれは現実には起こらない[*2]。ソフトボールの試合を何度行なっても測定される $\mathbf{g}\cdot\mathbf{L}$ は負で，平均値はゼロではない。

ウーの実験

リー・チョンタオ(李政道)とヤン・チェンニン(楊振寧)は，1956 年の論文[3]で弱い相互作用がパリティ対称性を破る可能性を指摘し，原子核の崩壊を用いてそれを検証する方法を提案した。

これに着想を得たウー・チェンシュン(呉健雄)は，コバルト原子核のスピン角運動量擬ベクトル $\mathbf{J}$ の方向に対して，コバルトがニッケルに崩壊する過程で放出された電子の運動量ベクトル $\mathbf{p}_e$ がどのように分布するかを調べた。これらのドット積 $\mathbf{p}_e\cdot\mathbf{J}$ は擬スカラーである。

驚くべきことに，測定を繰り返して得られた $\mathbf{p}_e\cdot\mathbf{J}$ の平均値の符号は負であった。すなわち，コバルト原子核の崩壊では，電子は原子核のスピンの方向と逆向きに放出されていることが発見されたのだ[2]。ここまで読み進めてきた読者には，この結果がパリティ対称性を破ることを理解していただけるだろうか。

＊2—脚注 1 で述べたように，これは左右反転であって，パリティ変換ではない。yz 平面を 180 度回転させてパリティ変換を完成させれば，$\mathbf{L}$ の成分はパリティ変換で変化せず走者の L_z は正のままだが，重力のベクトル $\mathbf{g}$ の成分は反転し，やはり擬スカラーは符号を変えて正となる。

この実験から，弱い相互作用はいわゆる「左巻き」の粒子にしか作用しないことが明らかとなった。それが意味することの詳細には立ち入らないが，物理学の法則の中には，左右を区別するものが存在するのだ。それならば，特別な場所や方向がない宇宙が，左右を区別することもあり得るのではないだろうか？

宇宙マイクロ波背景放射の偏光

宇宙はかつて，灼熱の火の玉であった。灼熱の宇宙を満たしていた光は消え去ることなく，今も宇宙を満たしている。

この「火の玉宇宙の残光」は，適当な観測装置を用いて捕らえることができる。ただし，人間の目で見える可視光の波長領域では捕らえられない。宇宙空間が刻一刻と広がっているためである。灼熱の宇宙は 138 億年という途方もない時間をかけて広がり，冷えた。

今日の宇宙をほぼ一様に満たす火の玉宇宙の残光の温度は，絶対温度で 2.725 ケルビンである。これほどの低温の光を捕らえるには，可視光より 1000 倍から 1 万倍ほど波長の長いマイクロ波での測定が必要である。そのため，研究者は火の玉宇宙の残光を宇宙マイクロ波背景放射と呼ぶ。

全天にわたって測定された宇宙マイクロ波背景放射は，望遠鏡を向ける方向によらずにほぼ同じ温度をもつ。これは宇宙の一様等方性を支持する結果である。一方，平均温度の 10 万分の 1 程度の「温度ゆらぎ」も存在する。このゆらぎは宇宙の物質分布を反映しており，銀河，星，惑星，ひいては生命の起源となった。

宇宙マイクロ波背景放射は偏光している。光は横波で，進行方向と直交する向きに振動する電場と磁場から成る。偏光とは，電場や磁場の振動方向に偏りがある状態を指す。特に，ある特定の向きに振動する電場や磁場の振幅が他の振動方向に比べて大きく，振動の位相は振動方向によらず等しい状態を直線偏光と呼ぶ。

図 3 は，欧州宇宙機関(ESA)のプランク衛星が

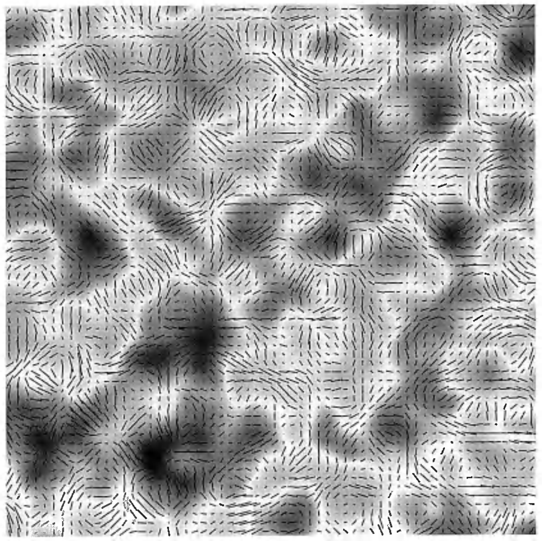


図 3—宇宙マイクロ波背景放射の温度ゆらぎと直線偏光の分布
プランク衛星が測定した全天の分布から，銀河座標で経度 276.4 度，緯度 −29.8 度を中心とする 100 平方度の領域を切り取ったものを示す[6]。背景は温度ゆらぎを表し，線の方向は直線偏光の向き（電場の振動方向の偏りの向き）を，長さは偏りの強度を表わす。

測定した温度ゆらぎと直線偏光の全天分布から，100 平方度の天域を切り取ったものである。温度ゆらぎの図を見たことのある読者はいるかもしれないが，偏光の図を見たことのある読者は皆無ではないだろうか。

パリティ対称性の破れの兆候：EB 相関

天球を表わすには，デカルト座標よりも極座標を用いるのがよい。全天の各視線方向を表わす単位ベクトルを $\hat{n}$ と書こう。天頂から南北方向を極角 θ で表し，方位角を ϕ で表わすと，$\hat{n}=(\cos\phi\sin\theta, \sin\phi\sin\theta, \cos\theta)$ である。

パリティ変換は $\hat{n}\to\hat{n}'=-\hat{n}$ なので，$\theta\to\theta'=\pi-\theta$ および $\phi\to\phi'=\phi+\pi$ に対応する。この座標変換によって，偏光を表わす場の成分は様々に変化する。詳細は文献[7]に譲るが，この場をうまく組み合わせると，「E モード偏光」と「B モード偏光」と呼ばれる，パリティ変換に対して異なる符号をもつ 2 つの新しい場を構築できる。すなわち，これら 2 つの場の積は擬スカラーである！これを研究者は「EB 相関」と呼んでいる[4,5]。

天球を図 3 のような天域に分割し，それぞれにおいて EB 相関を測定したとしよう。パリティ対称性が破れていなければ，異なる天域が与える EB 相関の符号は正と負が同数となるはずだ。すなわち，全天にわたって EB 相関を平均すれば，測定誤差の範囲内でゼロとなるだろう。

2020 年，筆者らは，プランク衛星の偏光データからゼロでない EB 相関を得たことを報告した[8]。全天で平均した結果，EB 相関の符号は正であった。その後のより詳しい解析結果により，EB 相関がゼロである可能性は 99.987% の確率で棄却された[9,10]。ガウス分布を仮定した統計的有意性は 3.6σ である。「発見」と呼ばれる 5σ にはまだ及ばないが，今後の研究で EB 相関の存在が確認されれば，宇宙論研究におけるブレイクスルーとなる。宇宙は左右を区別するかもしれないのだ！

ダークマター解明の鍵となるか？

測定された正の EB 相関は，次のように説明できる。宇宙マイクロ波背景放射の光は，138 億年という途方もない時間をかけて地球に届いた。その間，何らかの物理過程により直線偏光の方向が少しずつ回転し，最終的に角度 β だけ回転した状態で測定されたとする。

偏光面の回転により，回転前に存在していた E モード偏光と B モード偏光は混合し，EB 相関が現れる。その大きさは β に比例する[4,5]。プランク衛星と NASA の WMAP 衛星のデータを合わせて得られた結果は，68% の信頼領域で $\beta=0.34\pm0.09$ 度であった[10]。パリティ対称性が破れていなければ，誤差の範囲内で $\beta=0$ でなければならない。正の β は，天球上では時計回りの回転となる。

もし $\beta>0$ がより高い精度で確認され，それが検出器の系統誤差によるものでなく宇宙マイクロ波背景放射固有の性質であると確定したならば，ダークマターとダークエネルギーの正体を解明する鍵となる可能性がある。

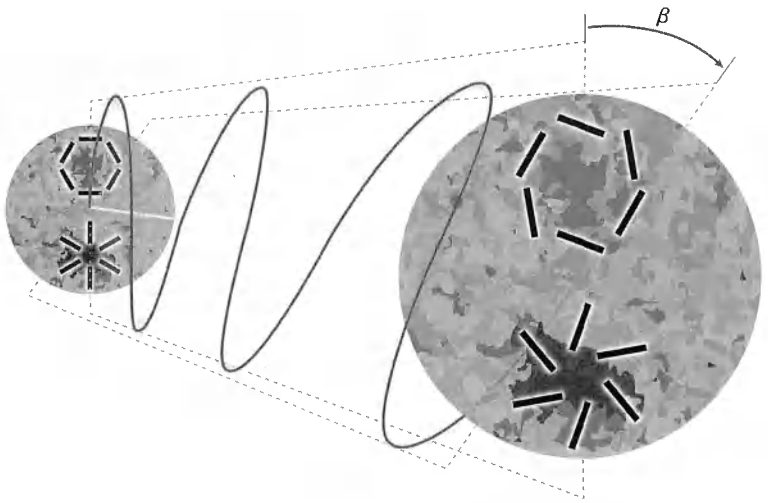


図 4—偏光面の回転
138 億年前に放射された宇宙マイクロ波背景放射（左図）の光の波（波線）の偏光方向は，パリティ対称性を破るダークマターとの相互作用によって角度 β だけ回転し，観測される偏光分布（右図）が変わる。提供：南雄人氏

ダークマターやダークエネルギーは，光子を含む既知の粒子とほとんど相互作用をしないと考えられているが，弱いけれどもゼロではない相互作用をすることは十分考えられる。もしダークマターやダークエネルギーと光子との相互作用が，原子核の崩壊を記述する弱い相互作用のようにパリティ対称性を破るものであるならば，測定された EB 相関を説明できる。

すなわち，ダークマターやダークエネルギーの場が敷き詰められた空間中を宇宙マイクロ波背景放射の光が進むと，パリティ対称性を破る相互作用のために偏光面が回転するのだ（図 4）。

これは，サファイアのような結晶中を，偏光した光が進んだ時に見られる「複屈折（birefringence）」という現象と似ているため，「宇宙複屈折（cosmic birefringence）」と呼ばれる[4,5]。

そのような相互作用の発見は，まだ知られていない新しい物理学の法則の発見であり，長年謎だったダークマターやダークエネルギーの性質を解明する重要な鍵となるだろう。

パウリは 1958 年にこの世を去ったが，もし存命中であれば，なんと言っただろうか。

文献

1—E. Noether: Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, 235 (1918)

2—C. S. Wu et al.: Phys. Rev., **105**, 1413 (1957)

3—T. D. Lee & C. N. Yang: Phys. Rev., **104**, 254 (1956)

4—E. Komatsu: Nature Rev. Phys., **4**, 452 (2022)

5—藤田智弘・南雄人: 日本物理学会誌, **77**, 611 (2022)

6—Planck Collaboration: Astron. Astrophys., **641**, A1 (2020)

7—小松英一郎:『宇宙マイクロ波背景放射（新天文学ライブラリー第 6 巻）』，日本評論社（2019）pp. 254-261

8—Y. Minami & E. Komatsu: Phys. Rev. Lett., **125**, 221301 (2020)

9—P. Diego-Palazuelos et al.: Phys. Rev. Lett., **128**, 091302 (2022)

10—J. R. Eskilt & E. Komatsu: Phys. Rev. D, **106**, 063503 (2022)