

宇宙の加速膨張：宇宙定数か，ダークエネルギーか

Keyword: ダークエネルギー

1. 相対観測と絶対観測

2012年のヒッグス粒子の発見をもって，いわゆる素粒子の標準模型が実験的にも確立した．地球上に存在するすべての物質を，クォークとレプトン，力を媒介するゲージ粒子，そしてヒッグス粒子という“素粒子”の集合によって記述するこの成果は物理学の歴史における一つの大きなマイルストーンである．しかし，これで本当にすべてなのだろうか？ 世界を構成する物質階層をめぐるこの疑問は無限ループに陥る可能性をはらむものの，危険かつ魅力的な問いかけでもある．

その観測の手がかりは，天文学においてはすでに1970年代に広く認識されていた．いわゆるダークマターである．ダークマターは光を発することはないが，その重力の影響を受けている天体（例えば，星や銀河など）の運動の詳細な解析により，空間的非一様分布を通じてその存在が突き止められた．ダークマターのある場所とない場所を比較するという意味において，これは相対的な観測といえる．このダークマターは，標準模型を超えた“素粒子”の存在を示唆する観測的証拠の一つであると解釈されている．

ではさらに進めて，宇宙のあらゆる場所を一様に満たしているものがある場合，果たしてその存在を知ることが可能なのだろうか？ すべての観測あるいは認識を突き詰めればそれは必ず相対的な比較という作業に帰着するのではないだろうか？ 仮にそうであるならば，宇宙の主成分が空間的に一様な何物かである場合，我々は決して宇宙が何からできているかという「正解」にはたどり着けないことになる．言い換えれば，絶対的な観測が不可能であるならば，この世界を構成する物質階層を科学的に突き詰めるという営みは原理的な限界をもつことになる．

何やらいたずらに哲学的な問いかけをしてしまった感は否めない．しかし実はこれこそが，今や宇宙の7割近くを占める主成分であると考えられているにもかかわらず，20世紀末までその存在が観測的には認められていなかったダークエネルギーの本質そのものなのだ．

空間を完全に一様に満たしている物質による重力ポテンシャルをニュートン力学にしたがって計算すれば発散する．しかしそれはあくまで定数であるから，その中に存在する物体には力は及ぼさない．この意味において，一様に分布する物質の存在を相対観測から推測することは不可能である．

しかし皮肉にも，一般「相対」論では事情が異なる．宇宙論の講義で最初に登場する一様等方宇宙モデルでは，一様に分布する物質の存在は，物体間には力を及ぼさずとも，

宇宙そのものを膨張させることを学ぶ．実際，アインシュタイン方程式を一様等方宇宙の場合に書き下すと，宇宙の膨張則が宇宙の平均密度そのものの値（平均密度からのずれではなく）によって決まることがわかる．¹⁾ ある時刻の観測をただけではわからないのだが，異なる時刻における宇宙膨張の速度（あるいはそこまでの距離）を測定し，それらの時間変化を理論予言と比べれば，空間的一様成分の存在の有無とその性質を突き止められる．時間軸に沿った「差」を相対的に検出できれば，空間的に一様分布する物質の「絶対的」存在を知ることが可能となるというわけだ．

2. 宇宙項と宇宙膨張，宇宙定数と加速膨張

アルバート・アインシュタインは，一般相対論の提案直後に，それを宇宙そのものに適用すると，宇宙は膨張するか収縮するかのいずれかであることに気づいた．しかし彼はそのような動的宇宙を受け入れられず，むしろ自分の導いた方程式に不備があるためだと考えた．そこで，単純化のためだけに無視していたある項，すなわち宇宙項 Λ を付け加えた．しかし，1929年のエドウィン・ハッブルの発見を受けて，²⁾ アインシュタインも1931年に宇宙が膨張していることを認め，宇宙項の導入を撤回している．つまり，宇宙項は宇宙膨張を止めることに失敗したわけだ．

ところが，1980年代後半から再び宇宙項が理論的に注目されるようになる．これは宇宙の距離測定の信頼度が向上したために，宇宙の膨張速度から予想される宇宙年齢よりも，宇宙でもっとも古い天体だと考えられている球状星団の年齢のほうが大きいという矛盾が取りざたされるようになったためである．この頃からなぜか，宇宙項というよりも宇宙定数という呼び方が一般的になった．そして，宇宙定数の観測可能性やあるいは当時の観測的制限を議論する理論論文が数多く出版された．その結果，1990年代になると少なくとも理論的には宇宙定数が存在した方が都合が良いというのが，観測的宇宙論研究者の間の共通理解になっていた．

そのような背景のもとで，決定的な観測データと考えられたのが1998年に発表された超新星を用いた宇宙の加速膨張の発見だったのだ．これは，絶対的な明るさがどれもほぼ同じだと考えられるIa型超新星の見かけの明るさ，したがって，それまでの距離，を時間の関数として精密に観測し，それから宇宙の距離の時間変化の2階微分，すなわち加速度を推定したものである．通常の重力，すなわち万有引力を考える限り，この加速度は負となるはずである

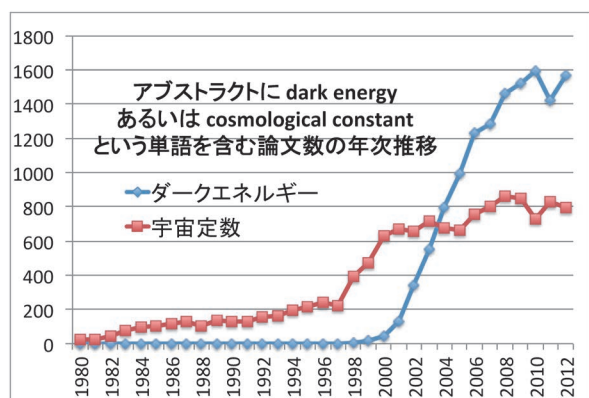


図1 宇宙定数とダークエネルギーに関する論文数の“加速膨張”。

にもかかわらず、データは正であることを示していた。これは実効的には引力ではなく、斥力が働いており宇宙膨張が加速されていることを意味する。そして、それはまさに宇宙定数が宇宙を占めている場合の予想と一致する。^{3,4)}

この当時の状況をさして「全く予想外の観測データに宇宙論研究者達が驚愕した」といった記述を見かけることがあるが、それは正しくない。私の主観ではなく、より定量的に示すべく、アブストラクトに cosmological constant あるいは dark energy という単語を含む論文数の年次推移を調べてみた(図1)。ダークエネルギーという単語は1998年にシカゴ大学のマイク・ターナーが命名したとされているので、それ以前には存在しない。しかし、ダークエネルギーの最有力候補と考えられている宇宙定数は、1980年頃から研究が盛んになり(これは、インフレーション宇宙論の影響であろう)、1990年代前半にはすでに毎年200編程度の関連論文が出版されていたのである。

3. 宇宙定数か、ダークエネルギーか

アインシュタインは、宇宙項(=宇宙定数)をアインシュタイン方程式の左辺におき、時空自身が内在する幾何学的性質だと解釈した。しかし現在では、それを右辺に移項させることで一般的にダークエネルギーという存在を考え、その典型例が宇宙定数だ、と位置づけることが多い。

物質の巨視的性質は、そのエネルギー密度 ρ と圧力 p によって特徴付けられる。宇宙定数は $p=-\rho$ という奇妙な状態方程式に従う。それを一般化したダークエネルギーは、現象論的に $p=w\rho$ という負の圧力をもつ状態方程式でパラメータ化される。正の圧力をもつ通常の物質中を運動する物体にとって、圧力は運動を妨害する方向に働く。負の圧力という状況は想像しがたいが、この逆であるから運動が促進される、すなわち斥力を受けて加速されるものと予想

できる(ちなみに宇宙の加速膨張を説明するためには $w<-1/3$ という条件が必要。また w は定数とされることが多いが、必ずしもその必要はない)。

この実効的な斥力のためにダークエネルギーは空間的に(ほぼ)一様分布することは、直感的にも理解できよう。ダークマター間には引力(=重力)が働くため密度が高い領域はより引力が強くなり、ますます密度が高くなる。このように、引力のもとでは物質密度の非一様性は一般に増幅される(重力不安定)。逆に、斥力が働くダークエネルギーの場合には、その密度は空間的に一様化される。

2013年時点での観測データからは、⁵⁾現在の宇宙の組成は通常の物質(元素)が4.9%、ダークマターが26.8%、そしてダークエネルギーが68.3%と推定されている。また、状態方程式パラメータ w を定数だと仮定した場合、95%の信頼区間で $w=-1.13^{+0.24}_{-0.25}$ という制限が得られている($w=-1$ である宇宙定数は依然としてダークエネルギーの有力候補である)。

これらの数値の驚くべき精度にもかかわらず、ダークマターとダークエネルギーの正体はいずれも謎のままである。ダークマターに関しては、天文学的観測から物理学的直接検出実験へとバトンが渡されつつある。理論的にはすでに有力候補と考えられる素粒子が数多く提案されており、今後10年スケールで実験的にダークマターが直接検出される可能性も夢ではない。

一方、ダークエネルギーについては、理論モデルすらまともなものは存在しない。ましてや実験的直接検出などはるか先の話である。現時点では未知の存在にダークエネルギーという名前を付けただけに過ぎず、確実な研究手段は天文学観測なのである。このためダークエネルギーの正体の解明は、世界中の次世代天文プロジェクトの最優先課題の一つとなっている。日本のすばる望遠鏡でごく最近開始された宇宙論的銀河撮像サーベイと計画中の分光サーベイは、国際的なダークエネルギー研究においていずれも中心的役割を果たすことが期待されている。⁶⁾

参考文献

- 1) 須藤 靖: 日本物理学会誌 **67** (2012) 311.
- 2) 須藤 靖, 高田昌広, 相原博昭: 日本物理学会誌 **62** (2007) 83.
- 3) 須藤 靖: 『ものの大きさ: 自然の階層・宇宙の階層』(東京大学出版会, 2006).
- 4) 須藤 靖: 『主役はダーク: 宇宙究極の謎に迫る』(毎日新聞社, 2013).
- 5) Planck Collaboration: Astron. Astrophys. in press, arXiv: 1303.5076.
- 6) M. Takada, et al.: Pub. Astron. Soc. Jpn. **66** (2014) R1.

須藤 靖(東京大学大学院理学系研究科)

(2013年10月31日原稿受付)