

# この広い宇宙いっぱい V 「ビッグバン」

2017年6月24日 2017年10月15日改 別当勉

## プロローグ

夏の風物詩の一つに花火大会がある。最近はいろいろな創意工夫があつて、数千発の華やかな花火の打ち上げに人々は歓声をあげながら、江戸時代から熱狂してきている。昔から打ち上げ場所は河原である。ただ、一番良い席を取ろうと河川敷に殺到して己の蓆とかシートを張って、前日からの席取り合戦はいかかなものか。桜の花見同様、恥ずかしながら日本人の江戸時代からの狂態でもあり、責めようもない単純な大衆乱痴気騒ぎでもある。しかも手作りの弁当開いて酒盛りして、なんとというか、酒神バックスを筆頭にギリシャの神々がディオニソス祭りとして関係ないこの東洋の島国に踊り狂う。

そんな花火大会の場面で皆が驚愕するのは、やはり「尺玉」であろう。お腹にドスンと響く打ち上げ時と上空で炸裂する時の爆発音に加えて満天に拡大するきらびやかなハナビには、冷ややかな目線の私でもさすがに興奮してしまう。



世界最大の四尺玉 <<http://hanabi0.seesaa.net/upload/detail/image/DSC04006-thumbnaill2.jpg.html>>

凄まじい爆裂であり、ビッグバンについてはそんなイメージを私は想像してしまう。しかも、スローモーションで空想すれば、爆発初期の高速で爆裂する無数のデブリが段々と遅くなって膨れ上がる景色は「減速膨張」のようにも見える。また、全体的に破片は一様に平坦に広がっている。これはいわゆる「宇宙の平坦性・等方性」に喩えられるが、尺玉の職人の極め付けの技能が発揮されてきれいに等方に幾何学的に破片玉が積み上げられたことが実際

である。不思議でもある。現代宇宙論では、何故か等方に一様に広がったビッグバンも、その所以としてインフレーションというトリガーが始めにあったのではないかという学説も生まれたのだから。

(破片(デブリ)は尺玉に仕込むとき、花火職人はそれを「星」と呼ぶらしい。)

個々の破片は銀河に見立てても良いだろう。最後は、花火のデブリは空気抵抗で拡大が止まって地上に落ちてくる。これは地球の重力による。無重力の真空の宇宙空間であれば、おそらく無数の破片、宇宙では銀河になるが、それらは止まらずに広がるはずだ。それら破片どうしの距離は伸びるばかりとなる。その破片たる銀河の中にいる太陽系から見れば、みんなが遠のいている。そして、最後はどうなるのだろうか？

逆に、花火爆裂のビデオを撮って巻き戻しをしたら、全部が灼熱の尺玉に集束する。人間らしい想像である。

そして、宇宙は灼熱の原初の一つの原子から始まったとする理論が1931年頃に浮上した。しかしながら、その後しばらくは空想的発想というか、物理的意味が無いとして物理学者などに、特にアインシュタインに扱われたことは、科学の情けない歴史でもある。アインシュタインは、膨張もしない収縮もしない永遠の平衡宇宙という強固な信念をもっていたからである。さすがに世界のトップ・サイエンティストでもあったから精神も真っ直ぐで、内心は認めざるをえないと観念していたらしい。前回で述べたようにハッブルの膨張宇宙の観測を目の当たりにした時、これ幸いとして己の信念「宇宙方程式における平衡宇宙を導くための宇宙項(斥力)」をあっさりと捨て去った。

どこの界限でも先輩たちの知識と経験にあしらわれる仕来りがある。ヤングの奇想天外な活動や革新的なアイデアを軽視どころか否定してしまう老いた人間の悲しい心理動作である。私自身も反省しており、なるべく若い科学者の画期的な学説には耳を傾けてきている。本編では、その醍醐味を存分に解説したい。その中に新進気鋭の若い日本人物理学者が世界を股に活躍しているから、なおさらである。

1931年から始まった宇宙創成説について、1951年、カトリック総本山バチカンの法王は、それこそ、神の創造でこの世が現れたという、カトリック教義に沿うものだとして歓迎した。反面、神学と科学の問題が明るみになった。真実を求める科学の予言が宗教の信者に支援され、あるいは影響されることである。このような支障は双方に蹉跌を招くと、ある最高位聖職者が、即座に法王に神学と科学は分離すべきで、バチカンに真実を究明する科学に言及しないようにと意見具申した。仮に、科学が教義に反する現象を発見した場合、行き場がなくなると。これを当時の法王ピウス12世は素直に認めたという。その最高位聖職者：モンシニョールこそ、原初の原子から宇宙が始まったという学説を唱えた張本人、ベルギーのジョルジュ・ルメートル(1894-1966年)であった。

本シリーズは、私たちに近い天体から始めて、私たちの距離感を段階的に伸ばして醸成しながら進めてきたが、終にこれ以上ないという138億年前に起きたビッグバンにたどり着く。この広い宇宙のはるか彼方には、掬いきれないほどの妙な天体や現象はあるが、一筋にビッグバンに突入してみよう。

## 揺籃期

ビッグバンは破局的なイメージを最初は誰でも抱く。でも、科学者の究明は小さな流れから始まる。あたかも、チェコのスメタナ作曲の交響詩「モルダウ」の如く私は連想してしまう。チョロチョロと小さな湧水がいくつも集まってビッグバン大河になる。

そんな山奥の最初の雪解け水がアインシュタインの宇宙方程式（一般相対論方程式）である。この理論物理学者は20世紀初頭から絶えず注目され、彼の成果は殆どの物理の問題で活用されてきた。特殊相対論に導かれた“ $E=mc^2$ ”を使って、原子核分裂において失われた質量： $m$  が放射線エネルギー： $E$  に変化したことを初めて解き明かしたのは、オーストリアの物理学者リーゼ・マイトナー女史（1878–1968年）である。

また、加速器衝突実験において素粒子の速度が光速に近づくと、時間が遅れて寿命が延びることも、質量が増大することも、量子論では説明できないことまで、見事に特殊相対論が証明した。「神はサイコロを振りたまわず」としてやみくもにあれほど量子論を攻撃したのに、量子論の目覚ましい効能が実証されても、彼の理論は生き続けて、今でも神の思し召しの如く君臨してきている。私自身も、もう勘弁してくれと言いたいのだが、彼を凌駕する宇宙論はその端緒さえ見せてくれない。

身勝手な私見ではあるが、昨今の量子重力論や超弦理論なる怪しげな化学反応みtainな合成理論が現れても提唱者が自ら、アインシュタインのように実証のための現実的な実験・観測手法を提言すらしようともしない。さらに、宇宙が複数あるというマルチバース構想にいたっては、宇宙外宇宙という絶対に観ることができない、連想できない空間にまで波及している。しかも、私たちの宇宙の時空に適用することで産まれた一般相対論方程式から解けるのだという。正に、現代の一部の宇宙物理学者の破廉恥なマンガのような空想ではないか。本来なら、外宇宙があるとすれば、そこに適用できる時空の理論を打ち立てるべきである。100%不可能ではあるが。なお、いかれていない物理学者は外宇宙を無定義と言うかもしれない。

だから、空論過ぎて出来ないのだろう。正確にいうならば、アインシュタインの心中には、理論家の「良心」が確固として存在していたのだ。

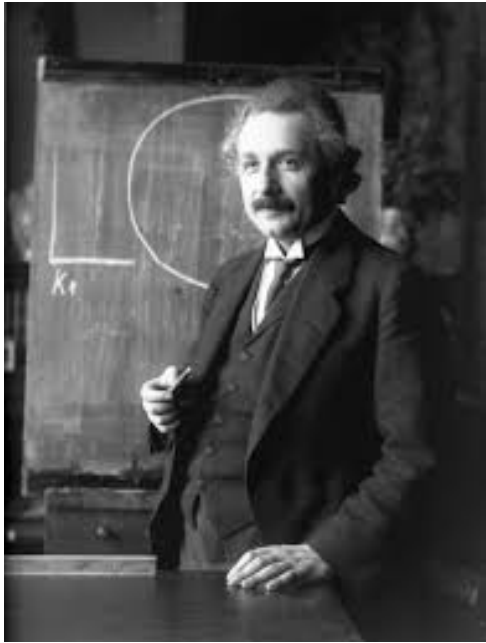
これからの解説では、度々アインシュタインが出てくるが、傍聴者あるいは読者もそのくどさに辟易せず、付き合っほしい。この広い宇宙における彼の理論の永遠性を味わっていただきたい。

## 孵化

1915年から1916年にかけて、アインシュタインは1905年の慣性系における特殊相対性理論の発展形として、重力場に適用する一般相対性理論を構築して発表した。

そして、彼は1917年に「一般相対性理論の宇宙的考察」という論文を表し、宇宙規模での適用を考察した。その発端は、次のとおりである。

まず、宇宙は平坦で等方的ではないか、ということである。星々はおおまかに見て、無造作に散らばっているが、それは宇宙のどこでも同じであろうと仮定した。これは、アインシ



<http://physicstoday.scitation.org/doi/10.1063/PT.5.9085/full/>

ユタインの「宇宙原理」というもので、彼の得意な「思考実験」が頭脳の中を駆け巡った。

すると、宇宙方程式（一般相対論方程式）に基づいて星々は重力により引き合い、やがては一ヶ所に集まって収縮してしまうことに気付いた。最初は人間には感知できないほど緩やかに引き合い、遠い将来における最終段階は勢いがついて一気に爆縮（クランチ）する恐ろしい事態が想像される。無限ともみえる宇宙に散らばる星々は、今は平衡的に重力が釣り合っているが、何らかの乱れが起きれば大収縮が生起してしまう。

彼の不思議さは、己れの理論による惨憺な予測を絶対としながらも、宇宙は永遠にあるという信念には勝てなかったことである。すなわち宗教を嫌いながら自分の宗旨は愛して止まなかった。だから、あれほど確率論に終始する量子論を認めな

かった頑固さも理解できよう。方程式による解は決定的であり、確率しか出てこない理論は信じられない、という彼の宗旨の一つでもあった。

このような頑迷さの中でも随一が「宇宙はおおまかに平坦で静的」であり、これを原点として、そのために宇宙方程式を組み替えた。それが重力に対する反重力ともいべき「斥力」を意味するラムダ項を追加したバージョンである。これに付した宇宙定数（ $\Lambda$ ：ラムダ）なるものを適切に選べば、宇宙は収縮一方にならずに重力と釣り合って、収縮を食い止められると考えた。しかも、何百万年光年というスケールでは効くが、太陽系の規模では無視できるほどに味付けしたから、正に、人為的な小細工であった。にもかかわらず、当時の物理学者には意外に歓迎された。

喩えてみれば、第1回で述べたように天動説を確立したプトレマイオスの「周転円」みたいなものであろうか。

私たちには難解すぎる宇宙方程式で比較すると次のとおりである。

原典宇宙方程式：
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

修正宇宙方程式：
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \overset{\text{ラムダ項=宇宙項}}{\Lambda}g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

原典方程式は、前回に掲げたが、比べると余計なコブがついて折角の美観を損ねている。彼の物理学者としての美意識、つまり“シンプル・イズ・ベスト”については、さすがに妥協してしまったのである。

## ド・ジッター解

1917年に発表された新バージョンの方程式に、即座に反応したオランダのウィレム・ド・ジッター（1872-1934年）という天文学者がいた。静的ブラックホール解を究明したシュバルツシルドと殆ど同時期である。

アインシュタインの論文には、静的宇宙を意図したラムダ項が加わっており、これは球形宇宙モデルをイメージしていることが述べられていた。さっそく、ド・ジッターは宇宙定数： $\Lambda$ の値を選んで、様々な解を研究した。

アインシュタインは、彼の球形宇宙モデルで基本的に

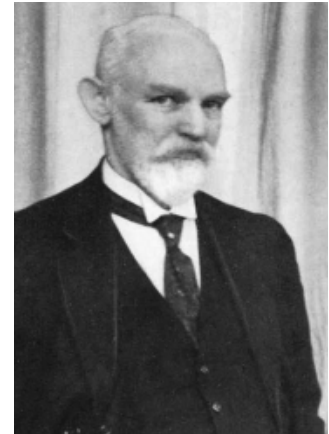
**「物質なくして時空構造はない」**

という立場を表明しようとしたのに対し、

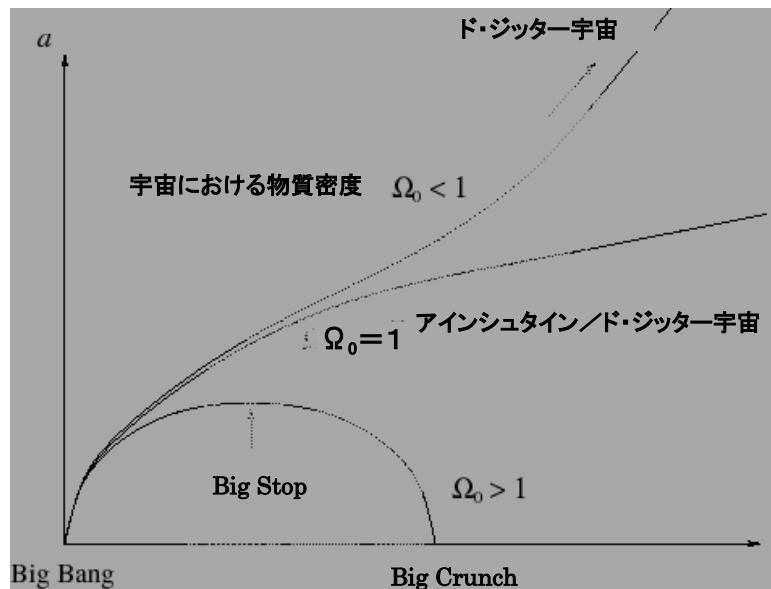
ド・ジッターは

**「物質なしでも（宇宙項があれば）時空構造が生まれる」**

ということを示した。宇宙項を含む修正宇宙方程式に沿って（宇宙の平均物質密度がゼロでも解があることを）示した。そのような時空構造がのちに「ド・ジッター宇宙」と呼ばれることになった彼のモデル、宇宙は指数関数的に急激に膨張していくもの、である。これでは、もう激論になる。二人の間で書簡が行き交い激しく渡り合った結果、「アインシュタイン/ド・ジッター宇宙」というモデルで何となく落ち着いたようだ。



<http://resources.huygens.knaw.nl/bwn1880-2000/lemmata/bwn2/sitter>



<http://tmcocosmos.org/cosmology/cosmology-web/node26.html>

やがて、ド・ジッター宇宙は、物質が無い宇宙創成期直前のインフレーション宇宙論に応用されるのだから、想定外の発展をたどる。当時の巷では一般相対論はド・ジッターの方が深く理解していたのではないかと噂になった。

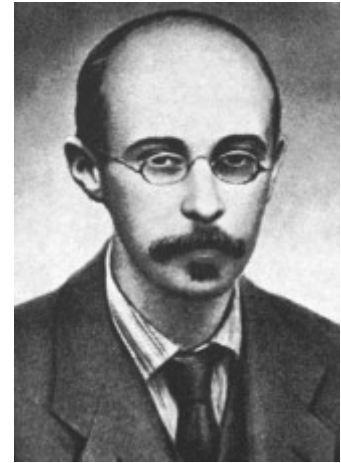


## フリードマン解

帝政ロシアのアレクサンドル・フリードマン(1888 - 1925 年)は、宇宙方程式の新旧二つのバージョンに異論を抱いた。第一次大戦や1917年のロシア革命という修羅の時代を耐え抜いたこの数理物理学者は、西からやってきた宇宙方程式に直面したのである。そして、数学的に美しい原典方程式に魅かれ、修正宇宙方程式には批判的であった。フリードマンは、物理よりも数学に造詣が深かったから、当然ともいえる。

最初は、新バージョンのラムダ項をいじったようで、ラムダ:  $\Lambda$  定数すなわち「宇宙定数」をいろいろと変化させて、宇宙全体の成り行きを調べたようである。そして、 $\Lambda = 0$ にしたとき、つまり旧バージョンの原典方程式からの宇宙解に達した。

ついに、彼は1922年に一遍の論文を発表した。重力の締め付けに対向しながらも膨張を続ける宇宙解である。地球の裏側でハッブルが「銀河は後退している」というハッブルの法則が発見されて発表されたのが1929年であるから、それに見(まみ)えずに1925年に他界してしまった。

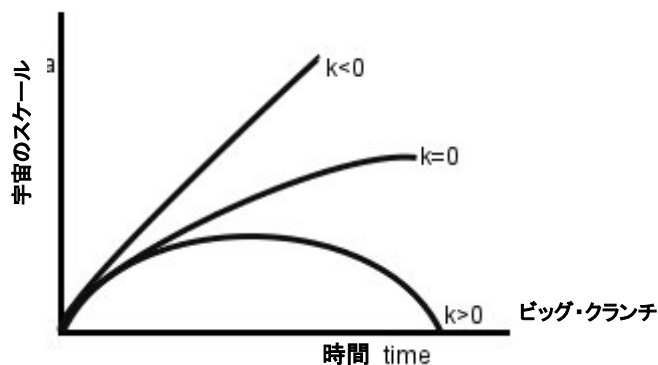


[http://www.physicsoftheuniverse.com/scientists\\_friedmann.html](http://www.physicsoftheuniverse.com/scientists_friedmann.html)

フリードマンの宇宙モデルは、次のとおり三つの条件で分けられた。

- 1)  $k < 0$  : 宇宙の平均密度が低い場合。  
宇宙の膨張は押さえ込まれることなく、どこまでも膨張する。
- 2)  $k = 0$  : 宇宙の平均密度が高くも低くもない場合。  
膨張の度合いにおいて、膨張速度は小さくなるが収縮も無限に膨張することもない。
- 3)  $k > 0$  : 宇宙の平均密度が高く、与えられた体積中の星の数が多い場合。  
星が多ければ重力が初期の膨張が押さええられ、やがては収縮(クランチ)して潰れる。

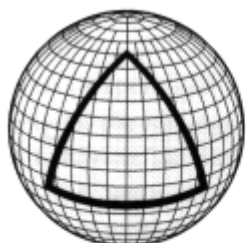
### フリードマンの宇宙モデル



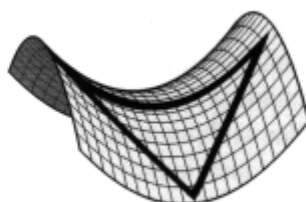
<https://physicsmadeeasy.wordpress.com/physics-made-easy/cosmology-ii/>

さらに、フリードマンの係数： $k$ は、次のように宇宙の曲率に関係する趣旨が内在している。

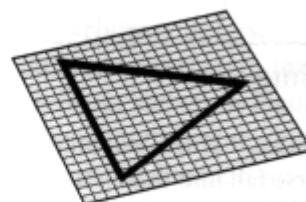
$k > 0$ : 宇宙曲率が正で閉じている。	$k < 0$ : 宇宙曲率が負で開いている。	$k = 0$ : 宇宙曲率がゼロで平坦である。 昨今の観測結果に適合。
----------------------------	----------------------------	--



Positive Curvature



Negative Curvature



Flat Curvature

[http://abyss.uoregon.edu/~js/lectures/cosmo\\_101.html](http://abyss.uoregon.edu/~js/lectures/cosmo_101.html)

問題は、アインシュタインの静的平衡宇宙モデルに叛旗を翻したことであるが、フリードマンの解は原典方程式に真正面から解いた結果なのである。惜しくもハッブルの法則を見ずしてこの世を去ったが。彼が用いた係数： $k$ は、今で言えば宇宙の物質密度オメガ： $\Omega$ に発展していることは、後進の科学者達が敬意を払う以上に、フリードマン解の数学的精度に頭を下げてきたことを私たちは認識すべきである。

さて、アインシュタインは早速その論文掲載学術誌に手紙を送ってクレームを付けた。

「フリードマン氏の研究に含まれている非定常的な世界に関する結果は、私には疑わしく思われます。実際、そこで与えられた解は一般相対論方程式を満たさないことが判明しました。」

やはり、素直に認めなかったが、フリードマンから撤回要請がきて、思い直してフリードマン解を謙虚にレビューした結果、再度、次のような訂正書簡を送った。

「フリードマン氏の結果は正しく、問題を明確にするものであると確信した。彼の解には静的な解に加え、空間的に対称な構造を持ち、時間とともに変化する解もあることを示すものである。」脚注にて（~~この解に物理的意味があると考えるのは極めて困難である。~~）という一文を書き加えたが、取消線が引かれていた。どうしても譲らない頑固さが現れている。

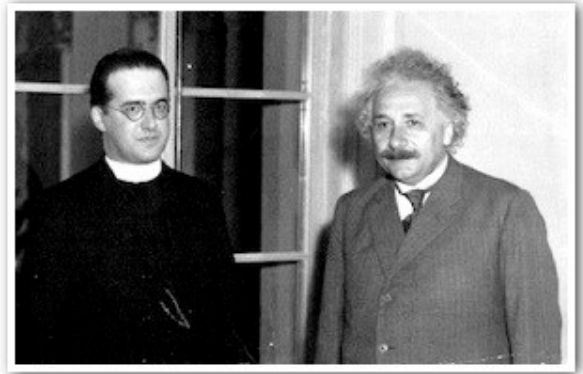
世紀の物理学者アインシュタインでも、科学的な側面外に頑迷すぎる信条があった。フリードマンは傷心しても、めげずに研究を続けたようだが、天命には勝てなかった。

私には、やがてのラムダ項の取り下げなど、アインシュタインに忸怩たる想いがフリードマン解析により根付いたのではないかと思える。一方、これほど真剣に自分の方程式の宇宙解を求めてくれた感謝は消えることなく、心中の毒虫ではなく蚕のように膨らんで行ったものと想像されてしかたない。

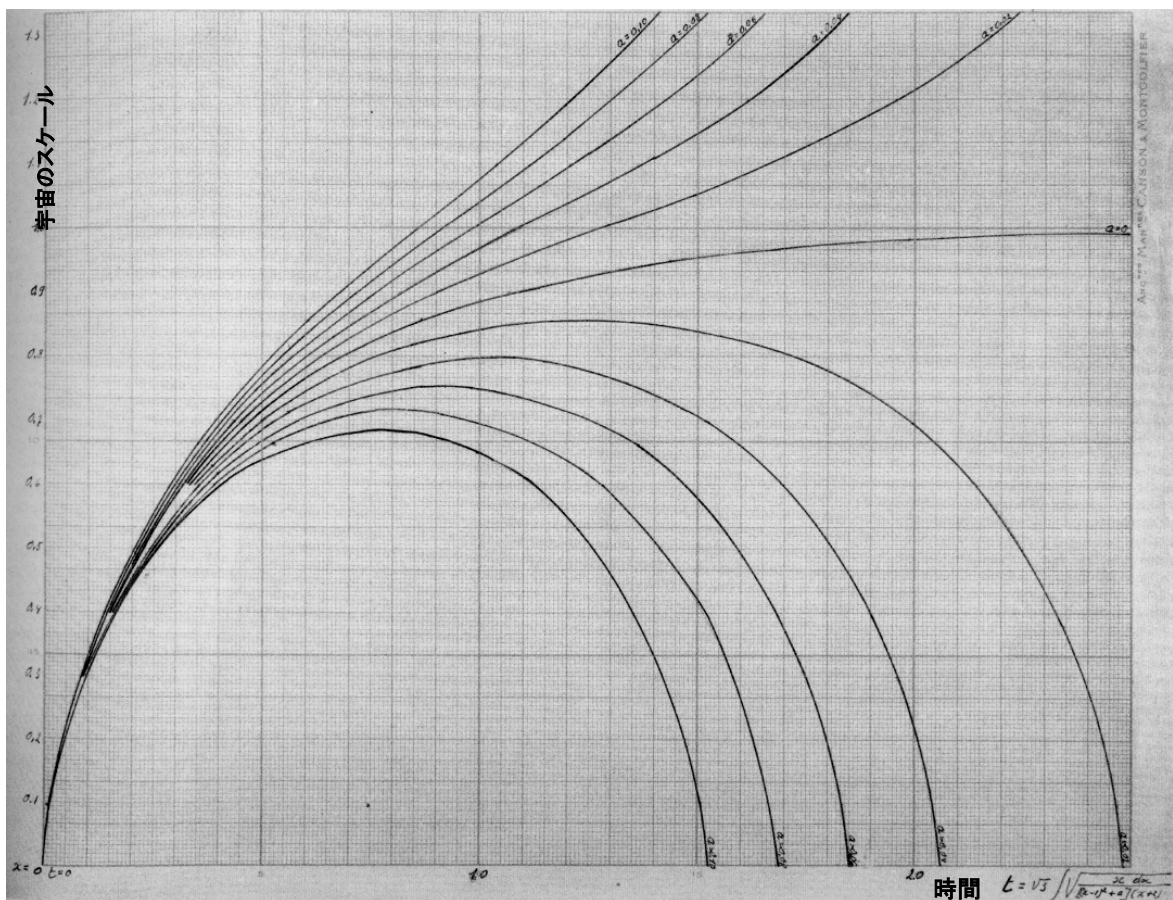
## ルメートル解

ハッブルが膨張宇宙の観測結果を発表する2年前の1927年、ベルギーのカトリック聖職者ジョルジュ・ルメートル(1894-1966年)が一般相対論の独自解を得て発表した。フリードマンとは独立に解明したのだ。彼は神父であったが、数理物理学に没頭し、信じ難いほどの先鋭的な興味を持って宇宙方程式に挑んだのである。

フリードマンと異なる点は、ルメートルの追及は宇宙の創成時期、すなわち「**原初の原子**」に及んだことである。今で言えば「ビッグバン」となるが、彼のイメージは膨張宇宙から収縮宇宙まで全般にまたがる。次図のとおり、その計算結果が克明に記されている。ところがこの宇宙の行く末よりも過去に戻ってどんな場合でも原初は一つの原子から始まったという宇宙創造論(ビッグバン)を展開したのだ。



<http://www.vofoundation.org/blog/priests-science-georges-le-maitre-father-big-bang/>



<http://blogs.futura-sciences.com/e-luminet/2016/10/15/cosmogogenesis-9-the-big-bang/>

ベルギーのルーベン大学に所蔵されているルメートルの日記(1927年)に載っているもの



ルメートルのモデルの核心は、宇宙創造の瞬間が存在したという発想だった。その瞬間から爆発して恒星や惑星に姿を変えていくプロセスにも興味をもった。すなわち、宇宙創造から、進化、歴史に関する理論である。そして、彼の研究は次のように解説された。

「宇宙の進化は、終わったばかりの花火になぞらえることができる。一筋の霧と灰と煙。我々は冷えた燃え殻の上に立ち、衰えていく太陽を見、今は消えてしまった世界の始まりの輝きを思い浮かべようとするのである。」

そして、よせばいいのに、1927年にブラッセルで開かれた「ソルヴェイ会議」に胸一杯に自信たっぷりで参加し、発表した。当然ながら、そこにいた常連の巨頭アインシュタインに冷たくたしなめられた。既に他界していたロシアのフリードマンの業績を述べたうえで、「あなたの計算は正しいが、あなたの物理学は忌まわしいものです。」と。

アインシュタインに却下されたことは、当時は「没」を意味するから、冷水を浴びせられたルメートルの傷心度は推して知るべし。

ところが、このルメートル宇宙論はイギリスのアーサー・エディントン卿を魅了して、彼に引き継がれて磨かれたという。本人もくじけずに、宇宙の始まりがどのような状態であったのか、ということを掘り下げて研究に邁進した。現在では、ビッグバン理論の祖はルメートルと言われているほどである。

アインシュタインは内心、その権威を恥じていたという。かつて、権威に逆らって「権威を馬鹿にした報いで、運命はこの私を権威者にした」と嘆いたそうだ。

こういったアインシュタインの宇宙論にかかる言動行跡は、ド・ジッター、フリードマンそしてルメートルとたどってきたから、ハッブルに見えた時、潔くラムダ項を取り下げたものとうかがえる。つまり、原典宇宙方程式で、彼ら3人の解に加えてハッブルの膨張宇宙の観測、そして己れの平衡宇宙も含めてすべてに適応できることが判ってきたのだから。

しかしながら、ハッブルに会ったとき「人生最大の過ちをおかした」と述懐したのであるが、ラムダ項が再び甦るとは誰が予想し得たであろうか。

## 成長期

激動のソヴィエト連邦の誕生後、1923年、レニングラードへ、フリードマンと一緒に研究したいという抱負の青年ジョージ・ガモフ（1904-1968年）が訪れた。ガモフは、それまでの研究経緯から原子核物理学に興味を深めたが、フリードマンの宇宙論には少なからず触発されたようである。

ただ、新生ソ連のマルクス・レーニン主義の思想、弁証法的唯物論とその強権的発動、そして反論者への血の粛清に恐怖を抱いた。具体的にはマイケルソン＝モーリーの実験とアインシュタインの時空概念で霧消したはずのエーテルの復活であるが、もう馬鹿らしくなり、アメリカ合衆国に亡命するしかないと追い詰められた。1回目は1932年、黒海をカヤックでトルコに渡ろうとして、2回目は極北の海岸から船を漕いでノルウェーに上陸しようと試みたが、いずれも天候悪化で失敗した。今のシリア難民が地中海を渡る様が連想される。しかも、妻と二人での逃避行である。



<http://famousastronomers.org/george-gamow/>

彼は、終に1933年、ベルギー・ブラッセルで開かれる「ソルヴェイ会議」に招待されたことから科学者の理屈が立ち、密かに亡命を企んで、会議に出席するとして見事に国外脱出に成功した。このような亡命者の必死さは、たいがいの日本人には永遠に判らない。むかし、満州国に移住した日本人だけは知っている。太平洋戦争の終戦間際、ソ連軍の侵攻に追われて必死の徒歩での逃避行に奔った。一家ともどもで、老父母が行き倒れても、幼い我が子と離れ離れになっても、身命が擦り切れても、2～3カ月間にわたり必死に逃避して餓死寸前で大連港に辿り着いた人々だけが知っている。私は五味川純平の「人間の条件」や山崎豊子の「大地の子」を数回読んで、何とか判ったような気がしているだけである。私の言も多寡が知れている。

国家の生産力、それを支える政治力と防衛力が確固としていない限り、いつまた私たちに襲いかかるかもしれない難儀でもある。闘魂を棚上げしてしまった、のほほん日本人の欠点は正にそこにある。今のおおらかな平和は偏に強力で巨大な生産力を築いてきた多国籍製造業の牽引力によっているが、それを知ってか知らずか当然と思って、かりそめの平穩を満喫している。宇宙すら平靜に見えても膨張している。しかも破局が予想される加速膨張しているらしいのに。

本編では、そのように国を捨てた物理学者ガモフの研究を追跡する。命からがら逃避してきて、かつ、食をつなぐために必死に命の灯を研究に燃やし続けた男である。親戚や友人など誰もいない、当然、妻と身二つで何の財もない、ただ、アメリカ合衆国という大きな寛容だけがあった。ただし、彼はかなりの楽道家でかつ諧謔的な（悪ふざけの）性格を有していたことも見逃せない。それでも一筋の可能性に邁進した人の研究である。ビッグバン妄想と一言で片づけるわけにはいかない。彼が正に初めてビッグバン宇宙創成を理論的に解き明かし、私たち人類の無知の扉を開けて未知へと誘った人なのであるから。

## アイレム

ガモフがアメリカに亡命したのは、1934年であった。ジョージ・ワシントン大学の教授として迎えられ、以後20年間にわたり、原子核物理学の教鞭のかたわらビッグバン宇宙創成の解明に心血を注いだ。

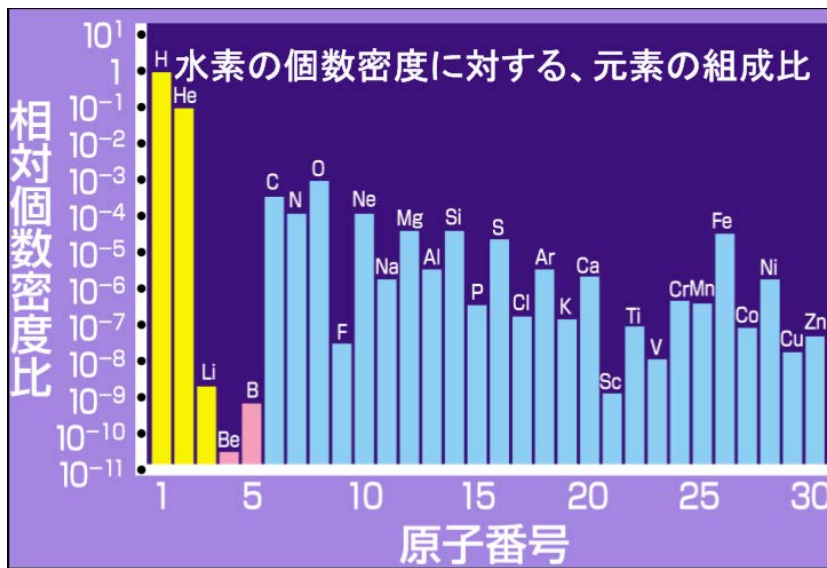
まず、宇宙全体では次のような元素の存在比率が判ってきていることに注目した。

宇宙に存在する元素の比率（炭素を1とする）

元素	水素:H	ヘリウム:He	酸素:O	炭素:C	その他
存在比	10000	1000	2	1	1

[注：現在、宇宙における水素原子は約 $10^{80}$ 個と見積もられている。]

宇宙における元素の存在比 <再掲:「この広い宇宙いっぱいⅢ」より>



その手始めは、彼の得意な原子核物理における「元素合成」であった。当時、天文観測、特にスペクトル観測などから、水素とヘリウムだけで99%も占めることが判ってきた。ヘリウムは水素の1/10である。この原因について、ガモフは宇宙創成期にはこれら二つの元素だらけだったのではないかと考えた。

ルメートルの「原初の原子」説というのは、たった1個の重い原子から始まる。それが何回も二分裂し、その分裂回数は260回も起きたと言う。

$$\log 2^{260} = 260 \times \log 2 \approx 260 \times 0.3 = 78 \Rightarrow 10^{78} \text{ (回)}$$

10進数では、上の計算のように10の78乗となり途方もない数字であるが、何故か水素元素の個数： $10^{80}$ に迫ってくる。素人には及ばない理屈があるのかもしれない。とにかく原初の原子はバラバラに壊れて、今日の微小な原子になった。

ガモフは、このルメートル説とは逆にたどるアプローチを採用した。つまり、原初は水素だけが圧縮されたドロドロのマグマみたいな熱い塊りから始まったという想定である。100%の水素から始まって核融合によりヘリウムなどの元素が出来たとするほうが、現在の水素の存在比に迎合して都合がよい。当時は核分裂による原爆の開発も始まって、水素の核融合という現象も明るみになってきたという背景もあるから、現実的に思われた。

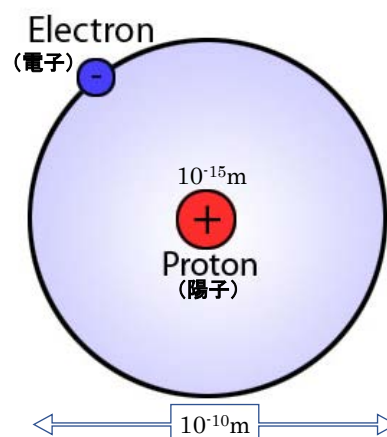
すなわち、水素の陽子と電子が超高温によりばらけてイオンとなり、たくさん集まればプラズマ状態になる。さらに圧縮されると核融合が生じる。

ガモフの原初の想像シナリオは次のとおり

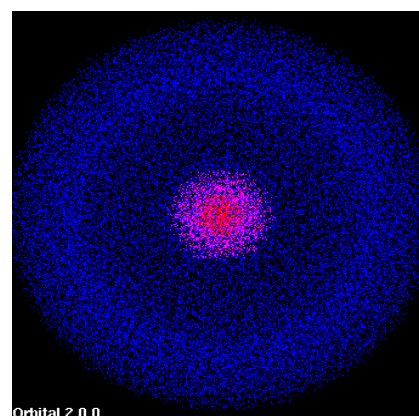
初期の宇宙：超高温・超高密度で全ての物質元素は、素粒子である陽子、中性子、電子にバラバラになっていた。このような素粒子の混合物を彼は「**アイレム**：Ylem」と呼んだ。この言葉は古語で、「元素を形成する原初の物質」という意味らしい。

すべての粒子は自由に高速で飛び回り、おとなしく原子核（陽子）にくっついてはいなかった。光も一番小さい光子として雲霞のようにアイレムの中に閉じ込められていた。

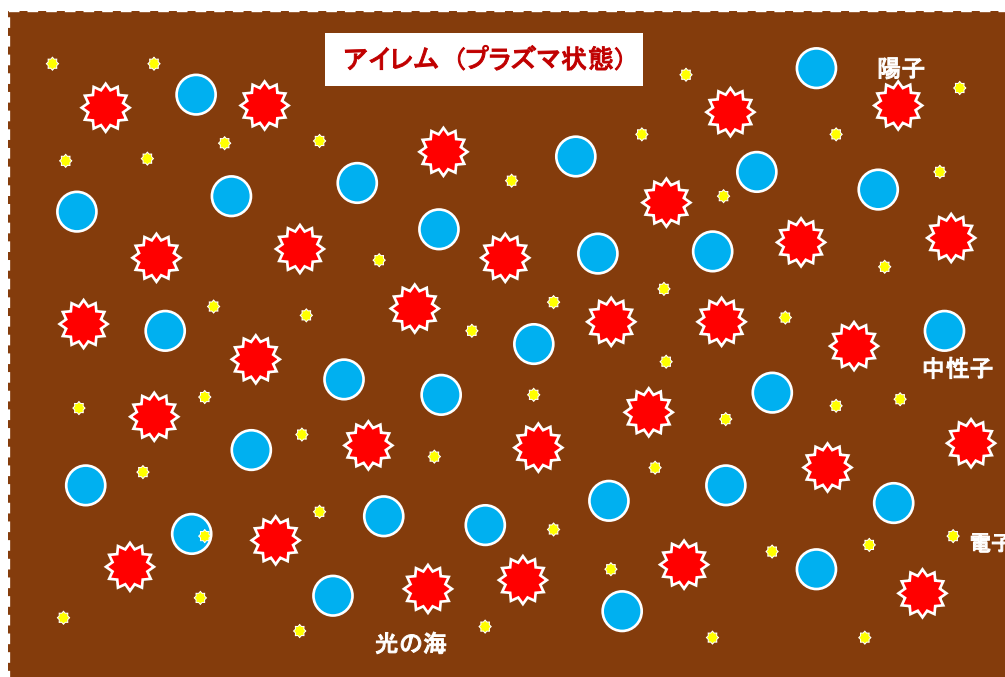
最も単純な元素：水素



量子顕微鏡で見た水素原子



<http://phelafel.technion.ac.il/~joeyfox/Hydrogen/Hydrogen.html>





現在までの観測・実験から水素原子の陽子と電子は、陽子の直径の10万倍ほど離れている。それが間近に迫っているが、超高温でそれぞれがランダムに高速で移動しているからくっつけない。光子も高密度の素粒子に散乱されて圧力鍋の蒸気のように外に出ることはできない。中性子も同様であるが半減期が10分で短い。状況変化には間も無い。

このような激動・激変するアイレムという超高温・超高压のマグマ・スープから出発して時計をスタートさせ、段階的に今日の元素が合成される様子を調べることにした。ゆくゆくは冷え込んで、当初の原子： $H$  が元素となり分子： $H_2$  に結合して水素ガス雲をたなびかせ、その一部が重力収縮して現在の星々や銀河を形成、進化してゆく過程を夢想した。

## アルファー

ガモフの予想は、意外にも数学という難関で座礁した。彼は物理学者であったが、数学は得意でなかった。このため、核融合がどのように起きるか、どのくらい反応が進むか。しかもドロドロのアイレムは膨張して拡がり、温度が次第に下がっていく。ということは、反応度合いが段々と落ちるといふことが想定されるから、余計に難しい。

戦時中は、マンハッタン計画という原爆の開発・製造でワシントン DC 内の物理学者や数学者は全て招集されて空虚であった。ガモフは敵性外国人として外されたことを後で知った。数学に造詣の深い学者を探したがどこにもいない。ようやく 1945 年、第二次大戦の終戦時に、彼が教えていた学生の中に神童と言われた数学の秀才がいた。それがラルフ・アルファー (1921 - 2007 年) というロシア出身の気鋭の青年であった。さっそく、24 歳ぐらいの彼をスカウトし、ガモフの助っ人にした。

彼に与えた課題は、初期宇宙における元素合成の計算であった。それまでのガモフの研究を以下のように紹介しながら。

- ・原初の状態： 1 兆度以下 [ドロドロのアイレム、粒子どうしが暴れまくる]
  - ・元素合成段階： 数億度 [陽子や中性子が融合できる]
  - ・冷却段階： 百万度以下 [核融合が出来なくなる]
- \* 問題は中性子であり、半減期は 10 分ほどしかない。ヘリウムの原子核などにくっつけば安定するが、中性子が核融合にまじわれるのは 1 時間ほどしかない。

ガモフとアルファーは、元素合成の時間がどのくらい続いたかという問題に挑んだ。融合の計算に重要な陽子や中性子の大きさ = 衝突断面積であるが、これが不明だった。調べまくったところ、マンハッタン計画に参画した研究者の一人から陽子と中性子の断面積が

$$10^{-28} \text{ m}^2$$

であるとの情報が得られた。それでも、彼らの計算に 3 年の月日が必要であった。

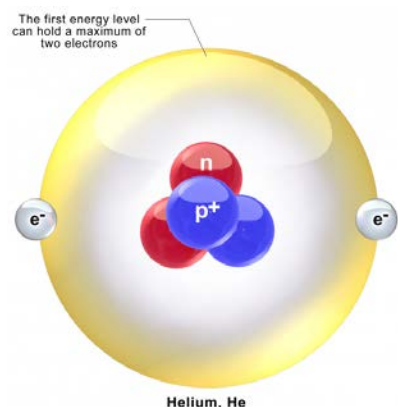
アルファーはついにビッグバンから **5 分後** のヘリウム形成のモデル化を成し遂げた。その結果、10 個の水素原子核つまり陽子に対して 1 個のヘリウム核が合成される計算が出来た。これこそ、

$$\text{水素} : \text{ヘリウム} = 10 : 1$$

ラルフ・アルファー



ヘリウム原子



最も美しい正四面体の原子核で他の元素と化学反応をしない不活性ガスである。

という今日の存在比に相当することに辿り着いた。

なお、恒星の内部で起きている水素の核融合は、ビッグバン時期とは比べられないほど遅いから、大きな比率10：1に影響するほどではない。

<私の計算例>

太陽のヘリウム生産高： $5 \times 10^{26}$  ton（現在までの積算）

宇宙の水素原子数： $10^{80}$  個の  $1/10$  がヘリウム原子数

宇宙のヘリウム原子数： $10^{79}$  個  $\Rightarrow 4 \times 10^{79}$  個（陽子と中性子の個数）

陽子または中性子の質量  $\doteq 1.7 \times 10^{-30}$  ton

宇宙の全ヘリウムの重さ  $\doteq 4 \times 10^{79}$  個  $\times 1.7 \times 10^{-30}$  ton  $\doteq \boxed{7 \times 10^{49} \text{ ton}}$

宇宙の恒星（平均太陽）の数  $\doteq 10^{22}$  個

宇宙の恒星内ヘリウムの質量  $\doteq 5 \times 10^{26}$  ton  $\times 10^{22}$  個 =  $\boxed{5 \times 10^{48} \text{ ton}}$

結果としては、確度はあやしいが、宇宙創成時のヘリウムの1/10以下となる。

ガモフとアルファーは、宇宙創成時における『化学元素の起源』という題名の論文をしたため、米国のフィジカルレビュー誌に投稿した。掲載は1948年4月で、私が1歳のときだった。その要旨は、最初の「**5分間**」でヘリウムが合成されたということである。これが、ビッグバン研究の歴史的な金字塔となって、いまだに輝き続けている。

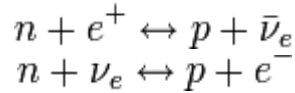
だが、ここでガモフは持ち前の茶目っ気があって、この論文を「 **$\alpha\beta\gamma$ 論文**」という副題にしたくなり、恒星の核物理学者で有名なハンス・ベータを説いて共著者名に勝手に加えてしまった。弱冠26歳のアルファーは自分の名が薄くなるので怒り、激論になったが、アルファー、ベータ、ガモフという著者名の順番だからと宥められて妥協してしまった。

アルファーは、しかしながら、この論文の背景にある計算過程をジョージ・ワシントン大学の博士論文に仕上げ、みごとに Ph.D. 「Doctor of Philosophy」 を獲得した。

\*\*\*\*\*参考(最新理論)\*\*\*\*\*

### 宇宙に存在する元素の起源 - ビッグバン元素合成

始まったばかりの宇宙は、温度は 100 億°C 以上だったと考えられており、光で満ち溢れた世界であった。そのような高温下では、すべての元素は、陽子と中性子の状態で存在していたと考えられている。非常に温度が高いため、陽子や中性子は、光子や電子などと熱平衡状態であり、以下のような反応が起こっていた。

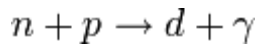


n, p,  $\nu_e$ ,  $e^-$ ,  $e^+$  はそれぞれ、中性子・陽子・ニュートリノ・電子・陽電子を意味している。簡単に言うと、陽子や中性子がお互い入れ替わる現象が起こっている。

やがて宇宙が断熱膨張するとともに温度が下がっていく。温度が 1 億°C程度になると、上に示した反応が起こらなくなる(つまり、陽子と中性子がお互いに入れ替わることができなくなる)。

そのため 陽子と中性子の数が、 $n/p \doteq 1/6$  と、ほぼ固定される。この時の陽子と中性子数の比が、この後、生成される元素の量を決めている。

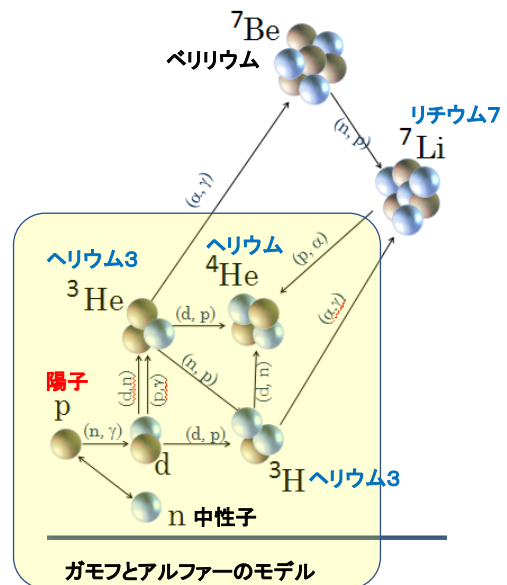
1 億°Cよりも低くなると、陽子と中性子の融合反応



がおこり、重水素(d)が生成さる。その反応を契機として 三重水素、ヘリウム 3、ヘリウム 4、リチウム7などの軽い元素(の原子核)が次々と生成されていく(右図)。これを**ビッグバン元素合成**と呼ばれている現象で、宇宙で最初に元素ができた瞬間である。

実は、宇宙初期で作られる元素はリチウムまで。なぜなら、これ以上重い元素を作るには、物質の密度が薄い。さらに重い元素は、恒星形成の段階で作られるが、それには、さらに数億年待たないとけない。

**ビッグバン元素合成(最新版)**



出典: Astrophys. Lab., Kyushu Univ. <<http://astrog.phys.kyushu-u.ac.jp/index.php/>>

\*\*\*\*\*



## 曇天の紺碧

問題は続いた。ヘリウム4という通常の4核子のヘリウムから前に進めない。5核子の元素が宇宙には無いのである。それを飛び越えて6核子以上の原子形成については、ヘリウム4に陽子と中性子を1個ずつ計2個を吸収させてリチウム6を作ることになるが、この確率はゼロに近い。当時、開発されたばかりのSEACというデジタル・コンピュータを使っても、ヘリウム合成の計算は確認できただけで、リチウム6ができない。そのメカニズムも想定できない。5核子の原子は無い。神の試練というか、深い溝を用意していたのだろうか。

そうこうする悩みの中、アルファーはロバート・ハーマン（1914 - 1997年）という同僚に働きかけて、ビッグバンの別の側面を調べ始めた。都合よく、ハーマンもガモフのプロジェクトに参加したくてウズウズしていたから、渡りに船とばかりに乗り込んできた。

二人は、5核子の元素生成を棚に上げて、もう一度、原初のアイレムからの推移シナリオをレビューした。核融合フェーズを過ぎるとアイレム・プラズマは1億度から百万度あたりまで冷えてくる。つまり、陽子や原子核イオンが電子と離れ離れで自由運動している状態である。しかも、電子が撒き散らす、あるいは核融合で生じる膨大な「光の海」が行き場を失って、というかドロドロの粒子に散乱されてウジウジと彷徨うだけであった。ところがアイレム自体は時を待たず断熱膨張し続けており、冷却がジリジリと進んでいる。

すると、アイレム・プラズマがおおよそ3千度Cほどになってくると、電子は陽子やヘリウム原子核に捉えられて、それぞれ水素原子とヘリウム原子が再結合される。この時までには30万年（現在は38万年）ほどかかることが計算できた。

この結果、ひしめき合う陽子やイオンのほかに電子に邪魔されて溜りに溜まった「光」が、曇天後に晴れ渡った紺碧の空間に一挙に放たれたのである。これを「**ビッグバン宇宙の晴上り**」という。 **$\alpha\beta\gamma$ 論文**の発表後わずか数カ月経った頃である。

その晴上り光の波長は約1/1000mm（1ミクロン）と推定できた。その痕跡は宇宙に残光として化石のように散らばっているはずで、これはハッブルが発見した宇宙膨張のあおりを受けて、おおきな赤方偏移を受け、現在は波長1mmぐらいに伸びているマイクロ波と予測できた。すなわち、これこそビッグバンが原初にあったという動かぬ証拠になる。

それを現在は、

**宇宙マイクロ波背景放射** : CMB; Cosmic Microwave Background radiation

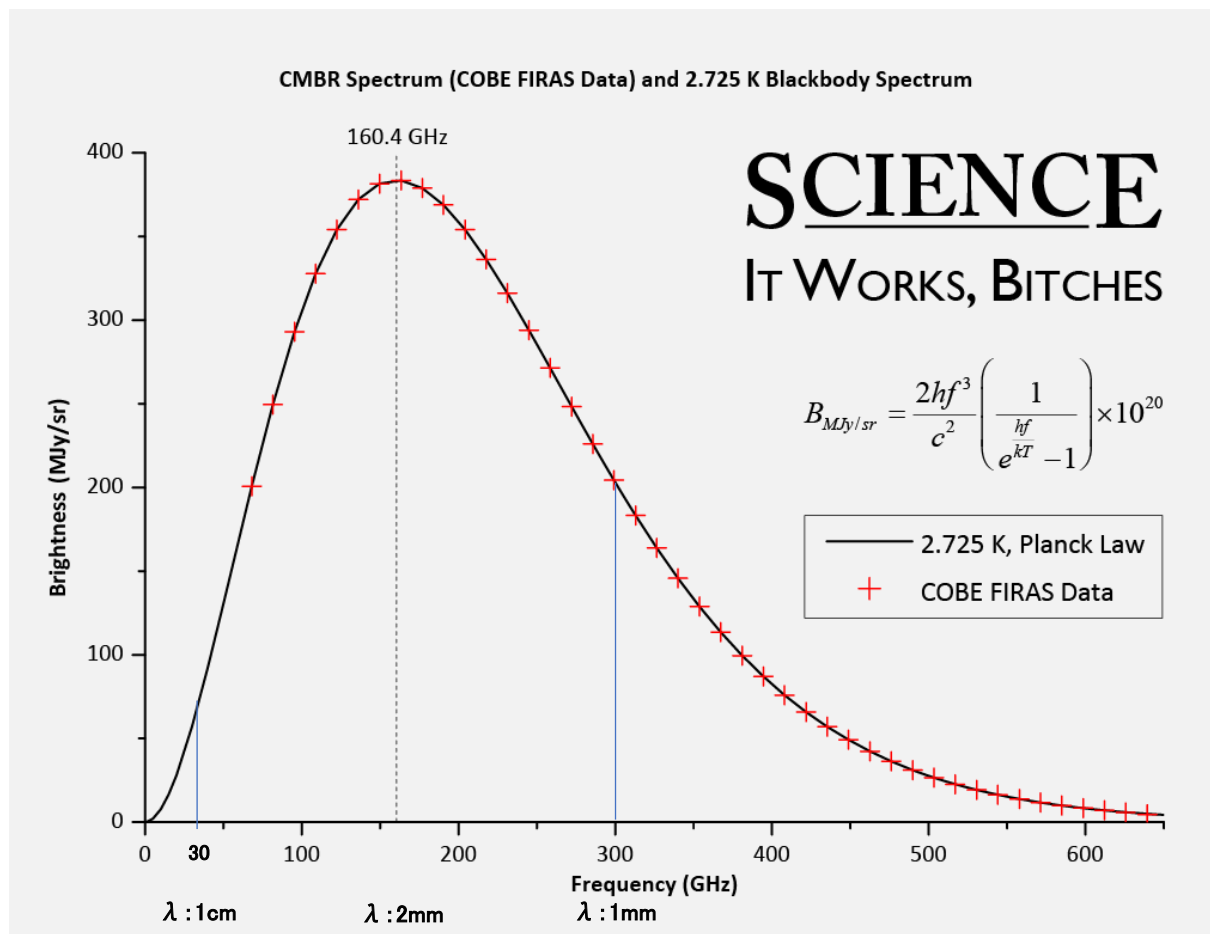
という。

これが観測されれば、これを最初に発見した人は宇宙科学に不朽の名跡を残すことになる。しかし、科学界も世間も冷ややかだった。その理由は単純だった。天文学と宇宙物理学と電波観測技術という三分野にまたがる科学者か技術者は、当時は皆無同然だった。

私は、たまたま国際通信事業の会社にいたから、1940年～1950年代は短波の送受信全盛期でマイクロ波通信はまだ見ぬ通信新技術であったことをまざまざと思い出すことができる。

そんな状況でも、アルファーとハーマンは観測してくれそうな天文学者や技術者を説得することに5年間も尽力したが、1953年に彼ら三人はビッグバン・プロジェクトを解散した。

なお、現在までに明らかになった CMB スペクトルは、参考までに掲げると次図のようである。アルファーとハーマンが予測した波長  $\lambda : 1\text{mm}$  は中心波長  $2\text{mm}$  から少しズレていることが判る。



[http://www.typnet.net/AJ4CO/Cheat\\_Sheets/CMBR\\_Cheat\\_Sheet.htm](http://www.typnet.net/AJ4CO/Cheat_Sheets/CMBR_Cheat_Sheet.htm)

<計算例>

$$\text{周波数} : \nu = c / \lambda = 3 \times 10^8 / 10^{-3} = 300 \times 10^9 = 300\text{GHz}$$

$$\text{波長} : \lambda = c / \nu = 3 \times 10^8 / 160.4 \times 10^9 = 0.00187\text{m} \doteq 2\text{mm}$$

## 定常宇宙論

ガモフらが $\alpha\beta\gamma$ 論文を発表する2年前の1946年に、イギリスのケンブリッジ大学の宇宙論研究グループが「定常宇宙論」をまとめた。そのグループは、フレッド・ホイル(1915-2001年)、トマス・ゴールド及びハーマン・ボンディの3人組で、ボスは傲岸無比かつ歯に衣を着せぬ辛辣な性分で有名なホイルであった。その彼は、天文学に興味を持っていたが、大学では応用数学に才能を開花させた。卒業後は、アーサー・エディントン卿やポール・ディラックなど、おそるべき英才たちとともに研究を深めて、1933年に博士号を取得した。この頃からもつぱら星の進化を研究するようになったという。

1940年を過ぎると第二次大戦が始まり、彼は徴兵されて海軍省通信研究所レーダー部隊に送り込まれたが、レーダーの研究に携わってケンブリッジからの課題研究を続けることができた。この時にボンディやゴールドと知り合って友情を培った。奇しくもアメリカのガモフ三人組と同じようなトリオができたのである。

このトリオは、ともに住んでいたケンブリッジにおいて宇宙論を語り始め、幾度もブレーン・ストーミングを重ねた。その結果、1946年、突如として異様な宇宙モデルが三人の頭脳に浮上した。

それは、膨張宇宙をさかのぼれば宇宙創成の瞬間があったというビッグバン・モデルとは違うものであるが、ハッブルの赤方偏移と後退する銀河の観測を是として、永遠の過去からそれが存在していたという古典的な宇宙観とむすびつくものである。ところが、海の向こうのガモフのビッグバン宇宙論と真っ向から対立することになる。

### ホイル・トリオの宇宙モデル

宇宙はやはり膨張するが、それ以外はビッグバン・モデルには反していた。はるかな過去をたどっても高温高密度の宇宙創造の瞬間はなかったという説である。私たちの周りにあるように、全ての物質の状態は永遠に循環するということであり、いわば仏教の輪廻に近い。しかしながら、膨張宇宙は肯定しているのだから、拡がればそれだけ物質の密度は薄くなることは否定できない。そこで、彼らは「新たに物質が造り出される」という考えに達した。膨張した宇宙には、あらたな星や銀河が補充されるという。

宇宙は進展はするが、変化しないというこの説は、「定常宇宙モデル」と呼ばれた。

アインシュタインの宇宙原理に依れば、この広い宇宙の私たちの局所領域、天の川銀河とその周辺は本質的に他の領域と変わらない、特別な場所ではない。宇宙はどこでも同じである。このような原理を基礎にして、彼らは、1949年に2編の論文を発表するに至った。

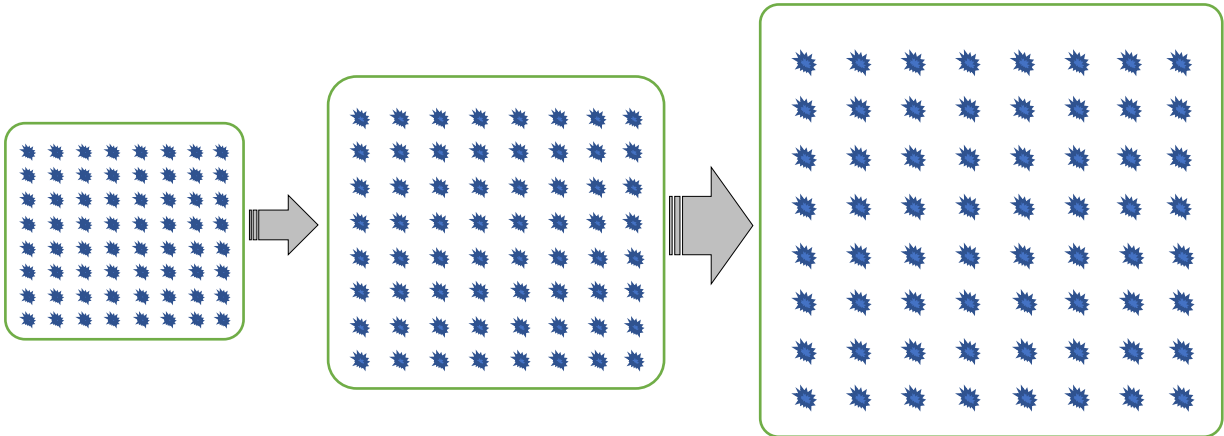
1950年代のフレッド・ホイル



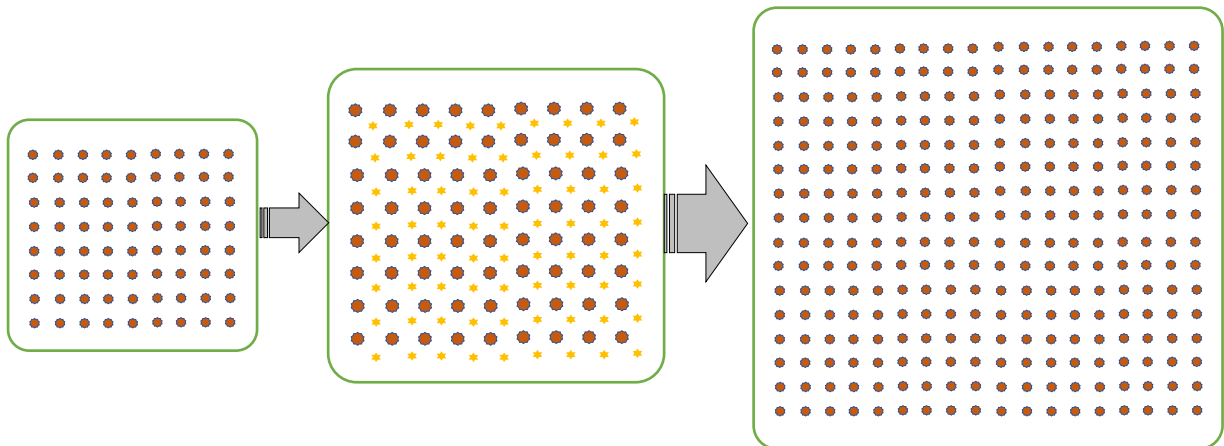
<https://www.english.cam.ac.uk/cmt/?p=1331>

彼らのモデルを図に表すと次のようになる。

### ビッグバン宇宙論の模式



### 定常宇宙論の模式



定常宇宙論の膨張では、宇宙の小部分の面積が倍々になっていくが、古い銀河の間に新しい銀河が現れる。銀河の種は成長して一人前の銀河になり、右端の図では宇宙は最初のものと同じに見える。これを批判する人は、宇宙の密度は信じて、宇宙は4倍の大きさになったのだから変化しているのではないかと言うかもしれない。しかし、もし宇宙が無限なら、無限を4倍してもやはり無限である。したがって無限の宇宙では膨張で生じたギャップが新しい銀河で埋められるならば、膨張しながらも不変に留まれる。

[サイモン・シン「宇宙創成」青木薫訳(新潮文庫 2009年)より]

### 問題の解明

この定常宇宙モデルには、問題が二つあった。

- ★ 生成される物質はどこに存在するのか？
- ★ その物質はどこから生じるのか？

エンパイヤ・ステート・ビルほどの体積の中で原子1個が1世紀の間で生じるのだから、



人間には判別つかないほどであり、宇宙には C (Creation) 場も仮想的に想定される、などとホイルは応えた。また、ベビー銀河も生まれているはずであり、いずれ、将来の強力な望遠鏡により天文学者に発見されるだろう。

「真空の空間から物質が生じる」という空想的妄想は、実は、1980年代から始まるインフレーション宇宙論の主役となるのである。当時は想像だにされていなかった。科学という世界は妄想でも頭に浮かべば理論に発展するという信じられない現象があり、ホイルたちの定常宇宙論はまさにその典型かもしれない。

しばらくして、ホイルは様々な星を調べる研究に数年間も打ち込んだ。恒星内部においては、極端な高圧と高温で様々な元素の原子核ができるという決定的な事実を明らかにした。これは、本シリーズの第3回「超新星」で述べているがホイルには言及していなかった。ホイルは巨星の最後に爆発して重いめずらしい原子核が作られることも示した。これらのおり、ホイルは自前の宇宙論最大の「物質が生じる」という謎をほとんど解き明かした。

ところが、一つの未解決問題が残された。

水素がヘリウムになり

ヘリウムが炭素原子核12になり、(★未解決)

炭素が基になって他の重元素を造る。

彼は、ヘリウムが炭素になる経路が見いだせなかった。ガモフらがぶつかった障壁と同じ底深いクレパスの前で途方に暮れた。

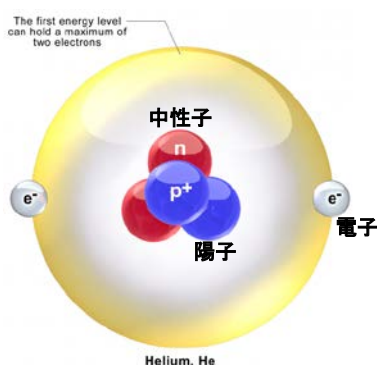
ヘリウム原子核に水素原子(陽子)をくっつけば不安定なリチウム5になる。

ヘリウム原子核二つを合わせれば、やはり不安定なベリリウム8になる。

自然は、ヘリウム原子核から炭素原子核につながる道を閉ざしているかのようだ。

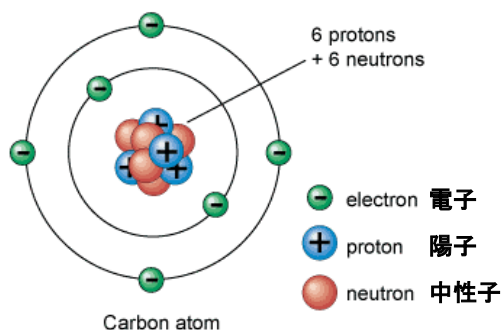
ガモフらは、このクレパスを棚上げしてしまったが、ホイルは持論の定常宇宙説からしても執拗だった。彼の思考は飛躍的である。二つのヘリウム4から不安定なベリリウム8が出来て、それが瞬間でもう一つのヘリウム4がくっついて炭素12ができる経路に執着した。その結果、出来上がる炭素12は励起状態、つまり少し重い元素であるが、これが安定したクラスター構造の炭素原子核に変化するという仮説を抱いた。

### ヘリウム4原子



<https://www.universetoday.com/53563/who-discovered-helium/>

### 炭素12原子



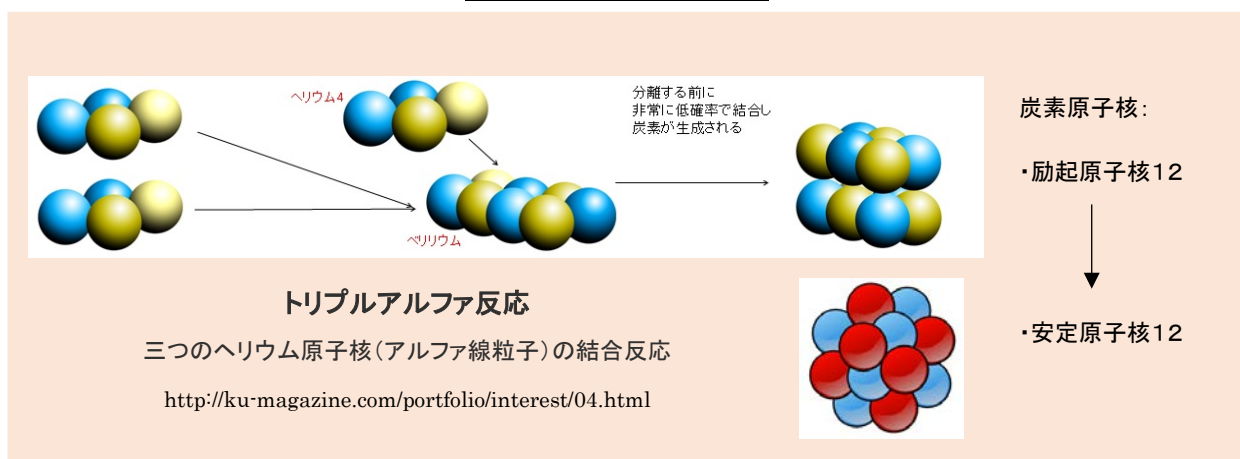
<https://edublogns.files.wordpress.com/2013/04/fig-12.gif>

ホイルの計算によれば、励起状態の炭素は安定炭素原子核より 7.65MeV (メガ電子ボルト) だけ余分な質量を持つと推定できた。まもなくして、1953年に彼はカリフォルニア工科大学にサバティカル研修として招かれた。そこには原子核物理学で高名なウィリアム・アルフレッド・ファウラー (1911 - 1995 年) がいて、とんでもない我武者羅なホイルの餌食となり、ほとんど無理強い炭素 12 原子核の励起状態の調査を説得されてしまった。プラス 7.65MeV という予測値を提示されたこともあって、やむなく、それまで溜めていた大量の実験データをファウラー配下のチームに調べさせた結果、ぴたりと一致する励起状態の炭素原子核データが見つけた。

ついに、ホイルはヘリウムから炭素ができる過程を明らかにしたのである。ガモフらが諦めた元素生成過程の初期の壁をブレイクスルーしたのだ。

その結果、次図のような炭素原子核の形成経路が判明した。今では当然のように理解されているが、最初はドラマになるほどの苦労や予期せぬ発想が積みあがって出来上がったのだ。

### 炭素原子核12の形成経路



このようなエピソードはめずらしいけれども、ホイルの慧眼以上に彼の正直な真摯な姿勢を評価すべき事例ではないだろうか。その後、ホイルとファウラーは10年以上の歳月を経て、ウランまでの元素合成の全ての過程を調べ尽くして、実験担当のバービッジ夫妻ともども100頁余りの「B<sup>2</sup>FH 論文 (星の元素合成)」を著わした。これは原子核物理学の教本としても有名になり、1983年にはホイルに無理強いされたファウラーがノーベル物理学賞に輝いた。

彼の貢献は、前回述べたように、ライバルのガモフ・トリオへも期せずしてエールを贈ってしまった。それは1950年の出来事である。イギリスの放送局 BBC のラジオ番組でインタビューされた時に、ガモフらの研究に対して「ビッグバン」というフレーズを軽蔑的に用いた。これが世界の科学界で常用されることになる。もともとは「宇宙創成期における力学的進化モデル」という面倒な題名をガモフ自身が使っていたが、とたんにビッグバン一言で通じるようになったのである。

## CMBの痕跡

発明・発見の歴史は、第3回に掲げたジョスリン・ベルの脉冲星発見を挙げるまでもなく、いつも予期せぬ出来事により刻まれる。誰も期待していない、本人も予想だにしていない。目標を絞って探したり試みたりするが、ターゲットに辿り着けず、獲物を掴まえないまま、無駄な努力に明け暮れる。「犬も歩けば棒に当たる」のごとくありきたりの結果で終わる。ただし、その棒が純金かチタンか、それともただの棒きれか、犬は分別つかないし、それさえも犬は期待すらしていない。

ビッグバン騒ぎがおさまった1960年代にそれが起きた。

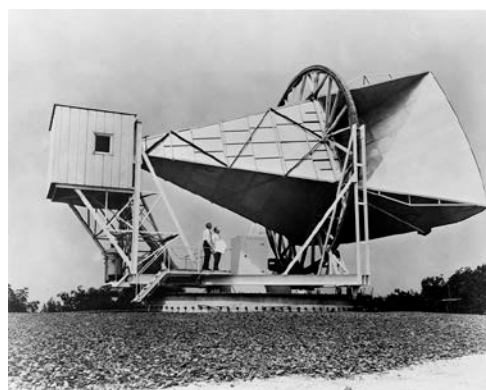
ケネディ大統領が暗殺された1963年には、マイクロ波衛星通信にて初めて太平洋横断でTVニュース画像が中継された。ぼやけたモノクロ映像ではあるが、非常に生々しい印象であったことが強烈に脳裏に焼き付いている。私は国際通信キャリアに入社した1972年当時、最新技術の静止衛星通信が始まっており、ミュンヘン・オリンピックの衛星カラーTV中継を当然のようにテレビ観戦した。1960年代とは、マイクロ波通信技術を衛星通信に応用するための実験・開発が各国で競い合うように行われ始めていた時代なのである。特に送受信を担うどでかい30m級パラボラ・アンテナが、各国の特に開発途上国の国際通信キャリアたちにとっては、垂涎の的でもあった。

そんな華やかなパラボラ・アンテナによる衛星通信は、1960年初頭のお粗末なホーン・リフレクター・アンテナ（口径6m四方）から始まったのである。マイクロ波というのは、だいたい3GHzから30GHzまでの帯域で波長では10cm～1cmとなる。商用衛星通信では、大気に反射または吸収されない4～6GHz帯域が使われてきた。当然ながらホーン・リフレクター・アンテナもそのような周波数帯に適したものにちがいない。

米国のAT&Tベル研究所の二人の若い技術者が、1963年頃、廃材寸前のホーン・リフレクター・アンテナを利用して宇宙の電波源探索という研究調査を始めた。その中古アンテナこそ「犬が当たった棒きれ」だったのである。

なお、電波源とは電波星とか銀河中心からの電波の観測であるが、特に電波星は口径数10メートルのパラボラ・アンテナの受信感度を測定するために重要な電波源としての役割を果たしていたことを、入

ベル研のホーン・リフレクター・アンテナ



<https://ja.wikipedia.org/wiki/>

パラボラ・アンテナ



JAXA 勝浦宇宙通信所

社当初の研修にて、とある研究室長から教わったことが忘れられない。つまり、巨大パラボラ・アンテナの受信性能を実験して測定するための相手の送信アンテナが容易に設定できないのだ。静止衛星からの受信を正確に模擬するとしたら、電波星が最適なのであった。

### ペンジアスとウィルソン

二人の研究者とは、アーノ・ペンジウアス（1933年～）とロバート・ウィルソン（1936年～）であった。彼らは宇宙からの電波源探索のために、廃材同様のホーン・リフレクター・アンテナを活用しようとしたが、作動させたところ雑音が多すぎて気になり出した。どうもこのコンビはきれい好きという点で性格が似ており、先ず受信機の回路を分解して劣化部品の取替によりオーバーホールを行った。次にマイクロ波の導波管ないしは同軸ケーブルなど、特に接合部を磨いたりして、雑音や損失が生じやすい箇所を取り除くことに集中した。また、アンテナ開口部における鳩の巣を取り除き、糞の掃除も行って電波干渉になりそうな障害物を取り除いた。鳩は再度巣作りを始めたので、罾を用意して鳩を捉えることまで行った。

そうして、ようやく電波の観測を行ったが、雑音は消えてくれない。このため、結果として掃天観測になるほど全天にアンテナを振り向けてみてデータを取ったところ、雑音レベルがどの方向でも全く同じであることが判った。

具体的には、彼らの1965年の論文（後掲）によれば、

**“3.5°K／4.08GHz”**

の熱雑音であった。どうも、二人の性格は徹底、緻密、追及という三つの点で一致しており、何故、どこから来るのか、について脳裏から離れなかった。そして、カナダで開かれた天文学の専門家会議に出席したときにMIT（マサチューセッツ工科大学）の知人に質問を投げかけた。

その知人から、さっそく電話連絡をうけたところ「それはビッグバン名残りのCMB放射で、全天から降ってくる波長1mmの電波であろう。」ということが判った。というのは、プリンストン大学のディッケとピーブルズらが推進しているプロジェクトがあり、CMB実測の計画中有るということであった。連絡を受けた彼らは「先を越された」として地団駄ふんだが、ペンジアス&ウィルソンと直接話をして、まさに「それはCMBの証拠だ」と結論できた。

ペンジアス&ウィルソンは、論文を取りまとめ1965年にアストロフィジカル・ジャーナル誌に投稿して、緻密な二人は一件落着させ、他の研究課題に移行した。その論文は、たったの2頁で淡々と測定方法と結果を述べただけだった。CMBなど一言も触れていない。潔

ペンジアス(左)&ウィルソン(右)



<http://www.embedded.com/electronics-news/4430361/Bell-Labs-is-back->



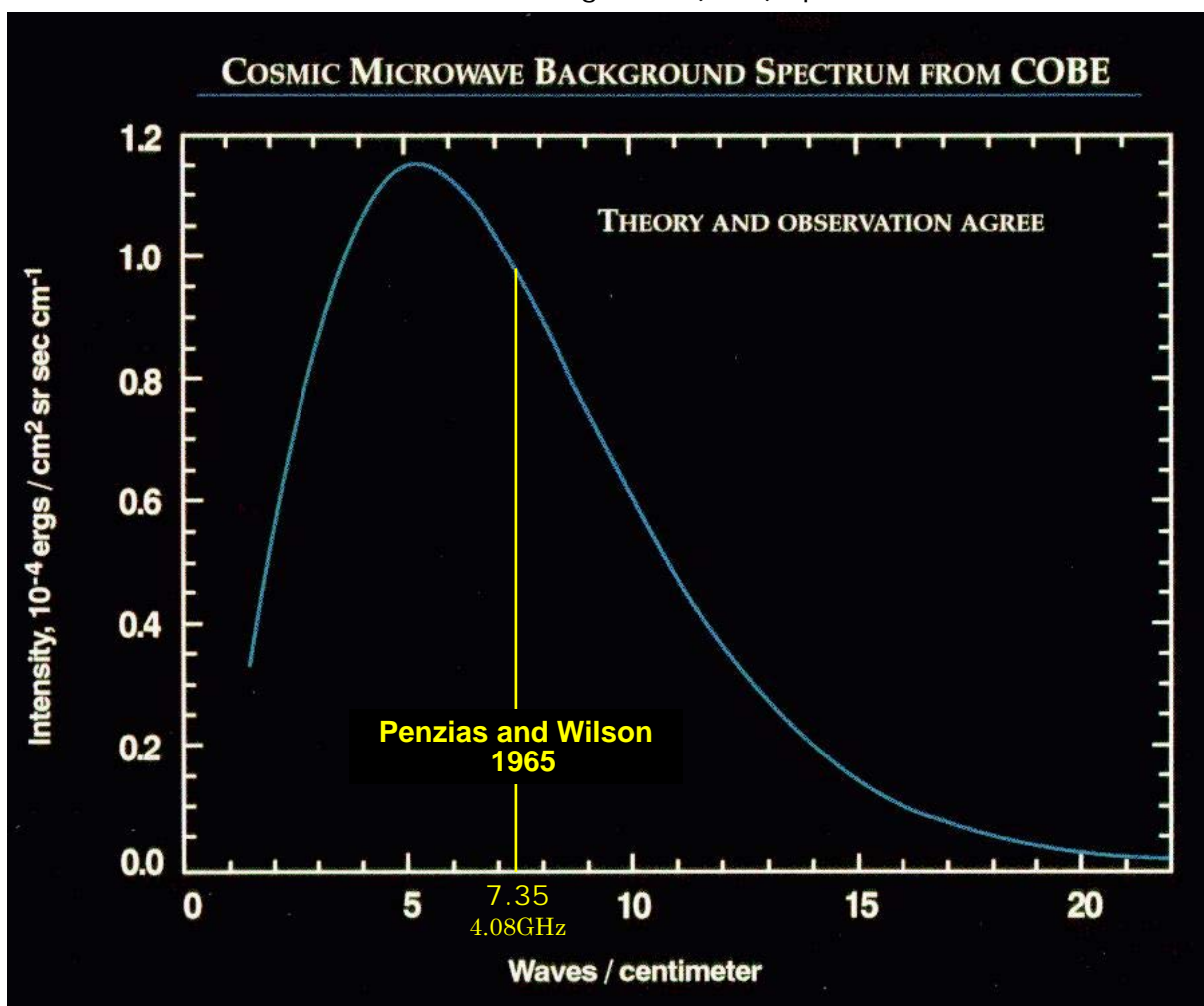
癖症の二人の本性が現れた。

しかしながら、この小さな論文は米国天文学界をにぎわせ、新聞も大きく取り上げて著名評論家の絶賛記事を書せたが、付属してディッケらの CMB 予測の手柄も報じられ、肝心要のガモフとアルファー達は無視されてしまった。1948年、CMB を最初に予言したのは彼らである。特にアルファーは怒り狂った。それを遠くで聴いたペンジラス&ウィルソンは、さすがに真摯であった。ガモフとアルファーを訪問して、CMB 予測の詳細をヒアリングして、それに応えて丁寧に観測経緯を説明したところ、アルファーは次第に怒気をおさめたという。その後は、ことあるごとにペンジラス&ウィルソンは $\alpha\beta\gamma$ 論文を引合いに出したと言われている。

一方、本編冒頭より述べてきた膨張宇宙に係る予測に貢献した科学者たち、アインシュタイン、ド・ジッター、フリードマン、ハッブルはみな他界しており、ルメートルだけが70歳の高齢で病床についていたけれども、この CMB 発見のニュースを聞いたそうである。

ちなみに、現在までに明らかになった CMB スペクトルにおいてペンジラス&ウィルソンの計測値を載せてみると、次図のようになる。

Cosmic Microwave Background (CMB) spectrum



[https://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/firas\\_image.cfm](https://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/firas_image.cfm)



定常宇宙論のホイルは諦めきれずに、「純定常宇宙論」なる修正版を構えなおして、絶滅寸前の危機に瀕しながらも、それでもビッグバン宇宙論を嘲笑し続け、生涯を閉じるまで自論に執着していたという。そんな諦めの悪い傲岸無比の彼であったが、後輩に対して面倒見がよかつたらしい。ちなみに、第3回で述べたジョスリン・ベルのパルサー発見で彼女がノーベル賞を逸したことについて、隠密の選考委員らを暴いてやいのやいのとクレームつけたのはホイルだったのだ。

CMB 発見からしばらくして、1978年にペンジラス&ウィルソンはノーベル物理学賞に輝いた。二人の誠心は、その受賞講演でガモフ、アルファー、ハーマンの予言を採り上げてその功績を讃えたというから、まさに疑いが微塵もない誠実な二人であった。

「犬も歩けば棒に当たる」どころか、とんでもない財宝＝宇宙の秘密に当たってしまった。天文学界、宇宙物理学界を揺るがす大事件である。以後、

コピー COBE (1989/NASA)、ダブルマップ WMAP (2001/NASA)、プランク PLANCK (2009/ESA)

など CMB 観測衛星を打ち上げて、計数千億円のプロジェクトを推進させた原動力になったのであるが。この二人は、惜しみなく関係なく、ベル研を辞めて他の企業に転職して自己のやりたい研究に進んだようである。

なお、ペンジラス&ウィルソンの清廉さに脱帽すると、どうしても、それまでのノーベル賞における、出し抜けと裏切りの暗い歴史を思い出してしまう。特に、キューリー夫人の娘夫婦が発見した変な粒子の記事をパクって中性子発見の実験論文を仕上げたノーベル賞を単独受賞したイギリスのチャドウィックがその一人。次に、リーゼ・マイトナーの核分裂における失われた質量の計算レポートを勝手に己の論文に混ぜ込んでノーベル賞をとってしまったドイツのオットー・ハーンの抜け目なさ。朝永振一郎の繰込み理論論文を査読依頼された原爆開発のオッペンハイマーが黙ってコピーを友人に渡して同時に別誌に投稿させてノーベル賞共同受賞になってしまった件など。薄汚い科学者の暗躍が目立った時代でもあった。昨今では、インフレーション宇宙開闢（かいびやく）について欧米で俄かに有名になった米国のアラン・グースが、半年前にあるイギリスの科学誌に掲載された佐藤勝彦の論文をパクったのではないかという疑惑は消えていない。

そういった意味では、ペンジラス&ウィルソンは誠に清廉潔癖であり、私たちは忘却せずにいつまでも後輩たちに伝えていかねばならないと思う。

The Astrophysical Journal 1965

アンテナ雑音温度を超える信号(4.08GHz)の計測  
(ペンジマス&ウィルソン)

和訳: 別当勉

ニュー・ジャージー州ホルムデル、クローフォード・ヒルにおける20フィート(約 6m)・ホーン・リフレクター・アンテナ(クローフォード、ホッグそしてハント1961年)の有効天頂雑音温度の計測により、期待値より約 **3.5° K** 高い値が得られた。この過剰温度は、我々の観測範囲内ではあるが、等方的(全方向性)で無極性であり、かつ四季によって変化しない(1964年7月~1965年4月)。その過剰雑音温度についての可能となる説明は、関連レターにおいてディッケ、ピーブルズ、ロールとウィルキンソン(1965年)により述べられている。

天頂方向で測定された全アンテナ温度は、大気圏吸収による2.3° K分を含む6.7° Kである。アンテナ内部と背面屈曲の影響における純抵抗損失による計算結果は0.9° Kである。

(訳者注:  $6.7 - 2.3 - 0.9 = 3.5^\circ \text{K}$ )

この調査における使用電波計は他のところでも述べられてきたものである(ペンジマス&ウィルソン;1965)。スイッチに比較して低損失(0.027 dB)の進行波メーザー、そして冷却液体ヘリウムの標準終端を実装している(ペンジマス;1965)。計測は、アンテナ入力と冷却液体ヘリウムの標準終端間を手動で切り替えて行われた。アンテナ、標準終端および電波計は、55dB以上の反射波の損失が計測器全体を通して存在していたために、細心にマッチングされている。このように、インピーダンス不整合による有効温度の計測における誤差は無視できる。総合アンテナ温度の計測値における誤差の見積は、0.3° K であり、これは主に、標準終端の絶対的な調整における不確定性から発生している。

大気の吸収によるアンテナ温度への影響は、アンテナ仰角と正割法則(the secant law:  $1/\cos \theta$ )の採用をもってアンテナ温度の変化を記録することにより得られた。その結果  $2.3 \pm 0.3^\circ \text{K}$  は公表されている値にかなり近かった(Hogg 1959, Hogg, Ohm and Scovil 1959; Ohm 1961)。

直流抵抗のアンテナ温度への影響は、 $0.8 \pm 0.4^\circ \text{K}$  と計算された。この算出にて、我々はアンテナを三つのパートに分けた。

- (1) 二つの一様でない計1mほどの末広の形状部分;2.125 インチの丸い出力導波管と6 インチの四角いアンテナ吸込み口との間で変換連結されるもの
- (2) これらの二つの末広形状部分の間をつなぐ二重にひねった回転ジョイント
- (3) アンテナ本体

これらの中で構造的に損失が余り増大しないように、綺麗にすることと直線連携に注意を払った。肝心のテストは、回転ジョイントでの漏洩と損失がマイナスになるようにして行われた。

想定される不完全性によるアンテナの損失の可能性は、テーピング・テスト方法により抹消された。取込み口付近の部分における繋ぎ目全部と他のほとんどにアルミ・テープでテーピングすることでアンテナ温度において観測可能な変化は生じなかった。

地面放射に対する(アンテナ指向性における(訳者))バックローブ特性は、次の二つの理由により  $0.1^\circ \text{K}$  より低く得られる。

- (1) 地面近くに置いた小型送信機に対してのアンテナ特性の計測は、バックローブ・レベルが等方的特性で 30dB を下回ることを示している。ホーン・リフレクター・アンテナは、これらの計測で天頂に

向けた。そして、完全なアジマス(横振り)回転は水平・垂直の送信偏波送信機を用いて10の場所それぞれにおいて行われた。

(2) 平坦なアンテナ特性域で間欠電波測定装置を用いて、これらの研究所における比較的小型ホーン・リフレクター・アンテナの計測では、絶えずバックローブ・レベルが等方的特性で30dBを下回ることが見えた。我々の大型アンテナは同様な低いバックローブ・レベルであることが期待できる。

以上の連携から、我々は残る見込み外のアンテナ雑音温度を **4.08GHz にて  $3.5 \pm 1.0^\circ \text{K}$**  と算出した。この結果に関連して、デグラッセ等(1959)やオーム(1961)が5.65GHzと2.39GHzのそれぞれで全システム雑音温度を示していることを記しておかねばならない。これらから、それらの周波数で背景雑音温度に対する上限を推定できる。

我々は、公表に先立ってそれらの結果について実り豊かな討論ができたことで R. H. ディッケと彼の関係者に感謝する。また我々は、この測定にまつわる諸問題に関連して A. B. クロフォード、D. C. ホッグそして E. A. オームから有用なコメントや助言に対しての謝意を呈する。

追記一 これまで天空の背景放射が測定されてきた最高周波数は 0.404GHz であった(ポーリニー=トスとシャクスシャフト;1962)。その周波数で最小温度は  $16^\circ \text{K}$  が観測された。我々の結果とこの値を組み合わせると、この周波数帯域にわたる背景放射の平均スペクトルは、 $\lambda^{07}$  より急勾配ではありえないことを我々は見つけた。これは、観測した放射が存在するよく知られているラジオ源による可能性を明らかに抹消している。この案件以来、そのスペクトルはもっと急勾配であらねばならないだろう。

A. A. Penzias

R. W. Wilson

May 13, 1965

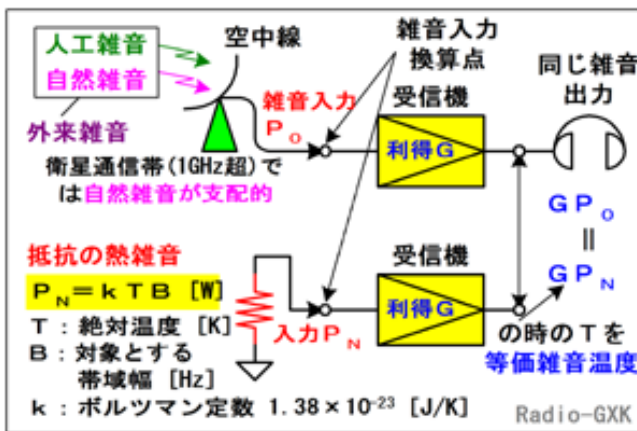
Bell Telephone Laboratories, Inc

Crawford Hill, Holmdel, New Jersey

===== American Astronomical Society • Provided by the NASA Astrophysics Data System =====

[http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-iarticle\\_query?1965ApJ...142..419P&amp;data\\_type=PDF\\_HIGH&amp;whole\\_paper=YES&type=PRINTER&filetype=.pdf](http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-iarticle_query?1965ApJ...142..419P&amp;data_type=PDF_HIGH&amp;whole_paper=YES&type=PRINTER&filetype=.pdf)

[参考]



<http://www.gxk.jp/elec/musen/1ama/H19/html/H1908A16.html>

等価雑音温度を使ったノイズの評価

衛星通信の場合、宇宙から飛んでくるノイズも、地面の熱雑音もプリアンプの発するノイズも、みんな一からげにして「抵抗から発生しているとしたら、その抵抗は何[K]に相当するだろう」という評価の仕方。

普通、我々が受信機のノイズ、というとき S/N 比を指標とするが、「比」ではなくノイズの「絶対量」で比較できるのがこの方法。

## インフレーション宇宙論

このインフレーションとは、物価上昇のインフレではない。もともとは膨れ上がるという意味であり、物価が上がって通貨が安くなるという現象で使われ始めたことは、戦後の混乱期やオイルショックやドルショックなど私たちは嫌というほど知っている。現在の緩やかなデフレ傾向を何とかしたいと焦っている我が国の政府も、インフレにしたいとは本気では考えていないにちがいない。つまり、インフレは始まると止まらない性向があるので危険であるからだ。ロシアのルーブルや韓国のウォンが地獄の通貨安にあがいており、韓国の場合、我が国外務省に泣きついて「円／ウォン通貨スワップ協定」にすがってきた窮状は如何ともし難い。(2015年には停止された。その後、中国元とのスワップに切り替えられたが、それも中国側に切られる脅迫を受けているという。) 自国の問題では隣国にすがって、隣国の問題は知らんふりだから。これほど人間宇宙の摂理「仁義礼智信忠孝悌」が忘却されると、開いた口が塞がらない。米国にあれほど散々に叩きのめされた日本人なのに、戦後、怨恨を抱かずに素直に米国から学んで電子立国、自動車立国など世界トップレベルの工業立国を成し遂げてきた。この小さな島国の発展の原動力「心」を見ようとしめない。昨今では、世界一傲慢な米国すら、忸怩たる気持ちを抑えて、広島原爆慰霊祭に大統領が来て花束を捧げたのに。

この広い宇宙ではそんなことはない。宇宙の摂理はどこでも一様で伶俐である。始まったらとまらない。それが前章で述べた「宇宙の始まり＝ビッグバン」である。ビッグバンの前にビッグバンがあったというのが、インフレーション宇宙開闢(かいびやく)論である。

最初に唱えたのが、なんと我が国の佐藤勝彦東大名誉教授(1945年～)であった。1981年のことである。半年後に米国のアラン・グース(1947年～)が、いまだきの大学生の卒業論文で問題になった“コピー(Copy & Paste)”もどきで疑われてもしょうがないほど、同様な論文を公表した。その名が「インフレーション理論」だから語呂が良すぎて、世界中の宇宙物理学者に広まった。しかも、あのスティーヴン・ホーキング博士も自らの解説書で採り上げるのはグースの功績だけであり、佐藤勝彦の名はイニシャルすらあらわれない。

グースのPRが余りにも功を奏したからとも言われている。しかしながら、キャッチ・フレーズの普及性能がこれほど発揮された例を、私は他に知らない。ちなみに、佐藤勝彦の論文における用語は『再加熱を伴った指数関数的膨張宇宙モデル』であるから、半年ぐらい早くても敵うはずがない。問題は、理論の妥当性と画期的かどうかである。ホーキング博士でも、実は知っているのに知らんふりしているのかもしれない。私としては、前章で述べたようにペンジアス&ウィルソンの清廉潔癖さは、ホーキング博士のような世界のサイエンス・プロパガンダの筆頭たる人々は当然として、全ての科学界の信義として定着して欲しいと願うだけであるが。

佐藤勝彦とアラン・グース



<https://sites.google.com/a/mytougane.com/tontororinohorigotoa/you-zhou/3-yu-zhou-li-lun/3-9-yu-zhouha1miaode-chu-laita-infureshon-li-lun?tmpl=%2Fsystem%2Fapp%2Ftemplates%2Fprint%2F&showPrintDialog=1>

いずれにしても、私もなびいてインフレーション宇宙論という流行語を使うが、この理論は半分ほどが空想かもしれないと、私は思い続けている。先に触れたように、ビッグバン以前は、この広い宇宙の外側にあるような宇宙に近づくからである。それでも、述べなければならないのは、半分ほどつらい。その証拠が見つかる可能性は僅かであろうが、何故か、インフレーション宇宙論に関する書籍など物凄い人気がある。半分空想だから、私も興味津々で何冊も買って読んできたが、多分、もっと真相をみたいという期待には勝てなかったであろう。

そんな人気最高の理論に重い腰を引きずって分け入ってみる。

**出生** —参考:佐藤勝彦の「宇宙96%の謎」—

ビッグバン理論は、いまや宇宙の進化を考えるときの標準的なものである。ところがビッグバンが始まった時の灼熱の火の玉発生について語ってくれていない。そうした所に、インフレーション宇宙論が登場して、一つの説明を与えたのだ。

私たちがこれまで観察してきたビッグバン理論で説明されていない問題は次のとおり。

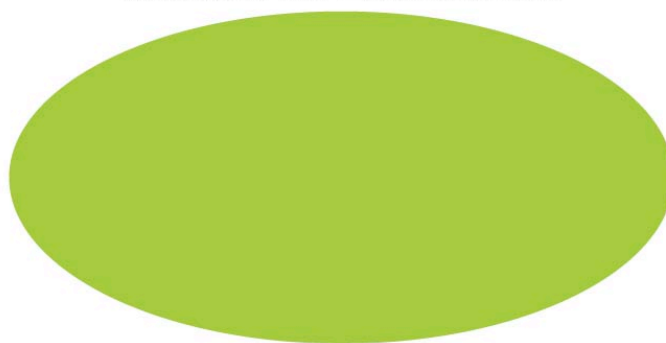
- |             |  |
|-------------|--|
| ① 銀河のまばら    | 銀河、銀河団、超銀河団などの大規模構造の種を宇宙創成期に作るため、ビッグバン地平線を越えた揺らぎはあったのか |
| ② 宇宙の一様性    | まばらであっても、宇宙はどうしてどこ観ても一樣なのか                             |
| ③ 宇宙の平坦性    | 宇宙は観測でわかったようにどうして平坦なのか                                 |
| ④ ビッグバンの始まり | 宇宙はどうしてビッグバンで創成されたのか                                   |

①と②の宇宙の地平線とは、それを越えた向こうが見えない。すなわちビッグバンの先を言うが、ペンジラス&ウィルソンが発見した3 K 宇宙背景放射：CMB はビッグバン開始から30万年経った「晴れ上がり」である。

ところが、この CMB は次図のように全天どこからでも同じ電波強度でやってくる。

電波望遠鏡による観測での CMB の一様性:NASA

**ISOTROPY OF THE COSMIC  
MICROWAVE BACKGROUND**



MAP990004

[https://map.gsfc.nasa.gov/universe/bb\\_tests\\_cmb.html](https://map.gsfc.nasa.gov/universe/bb_tests_cmb.html)



この測定では3桁つまり千分の一の精度で行われたが、「揺らぎ」は全く見えない。だが、それはあるはずとして万分の一の精度での計測が COBE で行われ、僅かにそれが見いだされた。これについては、後述する。

③の平坦性であるが、この広い宇宙の全体曲率がゼロとみなしてよいほど平なのか。このためには、宇宙が始まってから  $10^{-44}$  秒の頃に、宇宙にあるエネルギー量を  $120$  桁ぐらゐまで正確に決めないと平坦に膨張させることは出来ないという。  $10^{-44}$  秒とはプランク時間と呼ばれるものである。これも、ビッグバン理論では説明できないらしい。

#### 四つの力

力は、この広い宇宙に、そもそも4種類しかない。

重力： これはニュートンにより明らかになった万有引力であるが、遠心力など慣性力もあり分別がつかなかった。これをアインシュタインが等価原理と称するもので、万有引力も慣性力も種類の質量で重力に統一した。慣性力は物体が運動しないと現れないが、重力と同じく質量に比例する。

重力は、私たちの体重で実感できる。月が地球の重力で回るように遠隔で作用する。しかも、無限遠からでも届き、最も影響範囲が広く、遮蔽するものがないから、この広い宇宙を形作る根本的な力でもある。ただし、一番弱い。

電磁力： 磁石の引きあう磁力は誰でも感覚がある。電気力は、むかし子供のころに下敷きを腋でこすって髪の毛に近づけると毛が引かれることで思い出せる。電磁力も遠隔で作用し無限遠に届くが、遮蔽物には弱い。力の度合いは、重力の  $10^{38}$  倍ほど強い。

なお、ガムテープの粘着力はこの電気力に拠っている。岩石などの無機物、生物などの有機体の元素をしっかりと結びつけるのも、DNA を構成するのも電気力であり、これらの性質を解明する科学が化学と呼ばれてきている。一方、地磁気は磁力の典型であり、地球内部でマントル内の荷電物体が（地球の自転で）回転しているから磁気が生じるのである。逆に磁気が回転すると電気を生み出すのが発電機であり、私たちの愛用する自動車のオルタネーターに使われている。結果としては、全ての電気製品や電気機器において応用されている最も一般的な力である。

強い力： これは私たちにとってなじみが無い。原爆開発に携わった科学者は身の毛もよだつほど知っている。すなわち、原子核における陽子どうし、陽子と中性子、中性子どうしを密着させる「力」であり、我が国の偉大な物理学者：湯川秀樹が理論的に予測した中間子により媒介されている力である。四つの力では最も強いが、陽子サイズ： $10^{-15}$  m以下の近接でしか作用しない。

昨今の素粒子標準理論では、さらに細分化されてグルーオン（糊の粒子）なるものが取って代わっているが、クォークなど誰も見たこともない最終的粒

子をくっつける力を媒介すると言われている。これは50%ほど怪しい。  
問題は、クォーク三つで出来ているという陽子がいまだに崩壊していないことである。中性子は陽子に電子がくっついて出来ているから、この広い宇宙の素粒子は始めから陽子と電子しかなかったのではないだろうか。

弱い力： これは、中性子が陽子と電子にβ崩壊することにおいて、導き出された力であり、第3回で述べたように微粒子ニュートリノも出てくる。電磁力ほどではないが、それに一番近い強さを持っている。強い力とおなじで近接でしか働かない。

#### 四つの力の比較

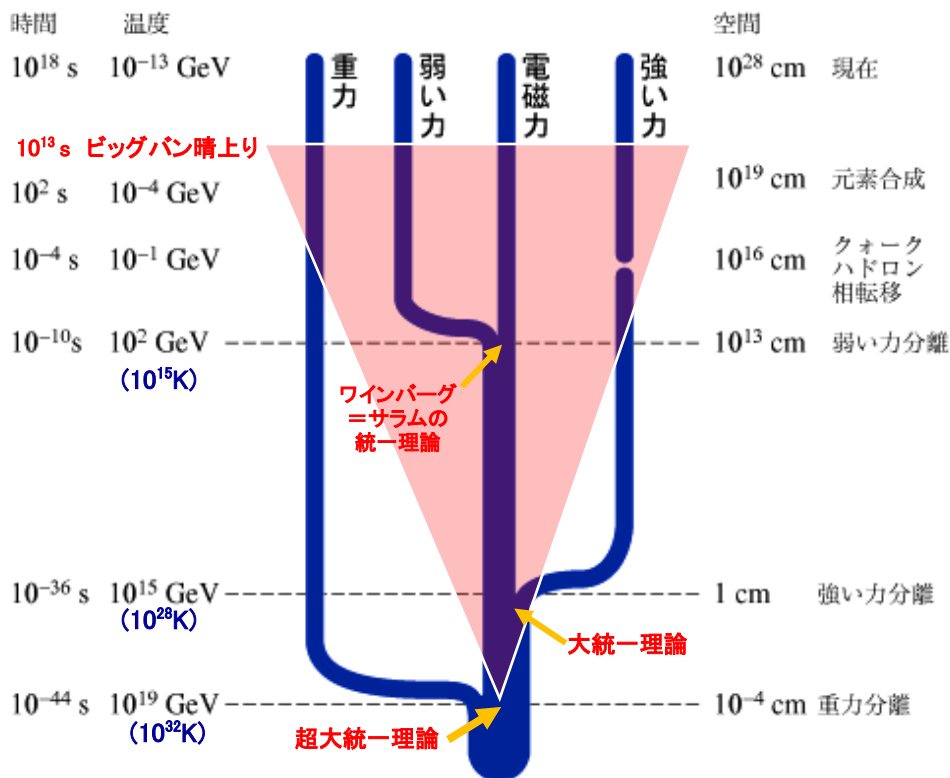
名称	相対的な強さ	作用距離(m)
強い力	$10^{40}$	$10^{-15}$
電磁力	$10^{38}$	無限大 (強さは $1/r^2$ に比例)
弱い力	$10^{15}$	$10^{-18}$
重力	1	無限大 (強さは $1/r^2$ に比例)

これら四つの力は、統一されていたのではないかという疑問が宇宙物理学者の間で長年の宿題があった。そこで生まれたのが1970年代から始まる未完の

#### 「大統一理論」(grand unified theory, GUT)

である。四つの力が全部一緒であったときが次図のとおりビッグバン初期であろうと予想されたが、まだ見ぬ夢である。

#### 統一理論が予想する「力の分化系統図」



<http://w3.kcuu.ac.jp/~fujiwara/cosmos/cosmology/cosmology.html>

### 磁気単極子 (モノポール)

理論物理学の世界では、磁石がS極とN極が分れて磁気単極子が生まれる可能性があって、それが発見されると、そこで力が枝分かれした証拠になるという。旧来のビッグバン理論によれば、磁気単極子がどれくらい作られるか計算したら、とんでもないほど大量になるようだが、全く観測されていない。

このモノポール自体、電磁気学をかじった私としては信じ難い。例えば、棒磁石を無理やり二つに切ると、二つともS極とN極が生じてしまい同じ棒磁石が二つできる。なんどやっても同じである。つまり磁気は電気がなければ生まれない。磁石の中に小さい原子レベルのS・N磁石=ダイポールがあって、それが一方向に整然と並んでいるからである。

結局、磁気双極子自体でも単独で観測できないのだから、モノポールなどあり得ない。磁気を帯びた物体があればその中で必ず荷電粒子が回転しているのが常である。百歩ゆずって、磁荷をもつ素粒子があったとしよう。そうすると、その磁荷粒子が回転すると電界が生じてプラスとマイナスの荷電粒子が発生することになる。すなわち陽子と電子が生まれる。いや陽子[+]と反陽子[-]あるいは電子[-]と陽電子[+]になろう。これを説明できるのであろうか。(陽電子を予言したポール・ディラック (1902 - 1984 年) によるのかもしれない。)

反陽子と陽電子は確かに存在し、CERN (欧州原子核研究機構) の実験で、特に反陽子についてはシンクロトロンからの  $26\text{GeV}/c$  の陽子ビームをイリジウム標的に衝突させて生成している。しかも、反陽子を減速させて捕捉し、なんと、反陽子と陽電子が合成されて反水素が作られたことは事実である。映画「天使と悪魔」にも出てくる。実証には私も弱い。

そして、物理学者は、電気がプラスとマイナスが存在するのだから、対称性として磁気も N と S が別々に存在すべきであると言い張る。しいては、電荷に対する磁荷もあるはずだと強弁して止まない。しかも、ビッグバンの初期に起きたというから、困ったものである（解説する私にとって）。

### 真空の相転移

モノポール問題を解決しようとして、佐藤勝彦は、インフレーション理論を考え始めるきっかけになったと言っている。

真空の相転移というのがあって、それが原因だと言われている。

何も無いのが「真空」であるが、氷水に満たされた冷たいガラスの外側にいつのまにか水滴が付く、ガラスを冷凍して表に出せば霜が付く、これらが空気の中の水蒸気の相転移というのは解る。空っぽの空間もエネルギーがあって、それがポット出るといふ。つまり大気内の水蒸気みたいに真空の中にエネルギーがあり、それが、真空が変容するとポット出るといふように、理解できるような気がする。

その時期がビッグバン初期のインフレーションにおいて膨大な量の物質が現れる、ということである。量子論により、いつのまにかそのような真空のエネルギーが見込まれてきた。エネルギー自体は、アインシュタインの特殊相対論で導かれる  $E=mc^2$  により、物質に変われると言う。逆に物質がエネルギーに変容することは、核分裂と核融合における失われた質量でまざまざと見せつけられてきた。すなわち、エネルギーと物質は同等なのである。これには疑問をはさめない。

ホーキング博士が言っていた。この広い宇宙には、空間と物質とエネルギーの三つしかないが、物質とエネルギーが同等だから、結局は、「空間」と「エネルギー」の二つで成り立っていると。意味深である。

空間とエネルギーの変換則が見つかれば、宇宙は**空間**一つで構成されていることになる。

### インフレーション夢想

佐藤勝彦が自ら語っている面白い逸話がある。彼は先輩から冷たく指摘されたようである。

「真空の相転移は、統一理論を作るための方便として作った理論で、一度、統一理論が出来上がってしまえば、そのタネ、道具に使った真空の相転移は忘れてよい。あなた方は真空が相転移を起こすようなイメージで宇宙に応用したりしているけれど、宇宙論屋さんの素粒子を知らないゆえの誤解だ。」

この話は、いくつかの疑問符が浮かぶ。最初は、理論物理学者というのはいいい加減だ、ということである。次に、テリトリー外の人には冷酷である。最後に、やはり夢想ではないかに尽きる。

ただし、問題は空想でも夢想でも、何かの理論的土台が必須であり、かつ未来という指向性がなければタダの漫画になってしまう。漫画でも、宮崎駿作「ナウシカ」や白土三平作「カ

ムイ伝」の如く切迫するような醍醐味があると、私たちは子供も大人も抵抗なく呑み込まれる。それらには、人間の究極の良心が筋を通していているから、たといそれらの信者となっても盲目には決してならない。人間の中に住む素直な心根に共鳴するのだから。

そして、また、アインシュタインの一般相対性理論が現れる。恐ろしいほど人間理屈の真髄を貫いている。

つまり、物質があれば時空が曲がるということであり、時空が歪んでおればそこにダークマターのような物質があるという。ひいては真空エネルギーが時空構造を決定するということである。相転移の前にエネルギーがあると、指数関数的に空間が急激に膨張するという。しかも、全ての作用は光速を越えることができない特殊相対論の理（ことわり）を破って超光速で膨れると言う。しかして、

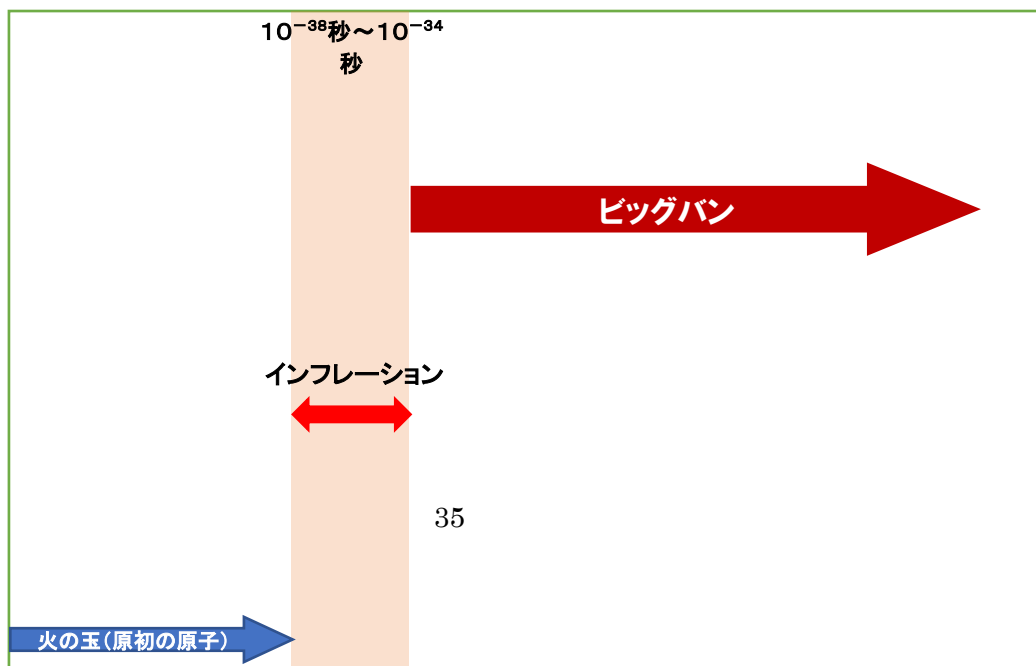
### インフレーション

と、グースはそれを名付けた。（勝彦は忸怩たる想いが治まらない。）

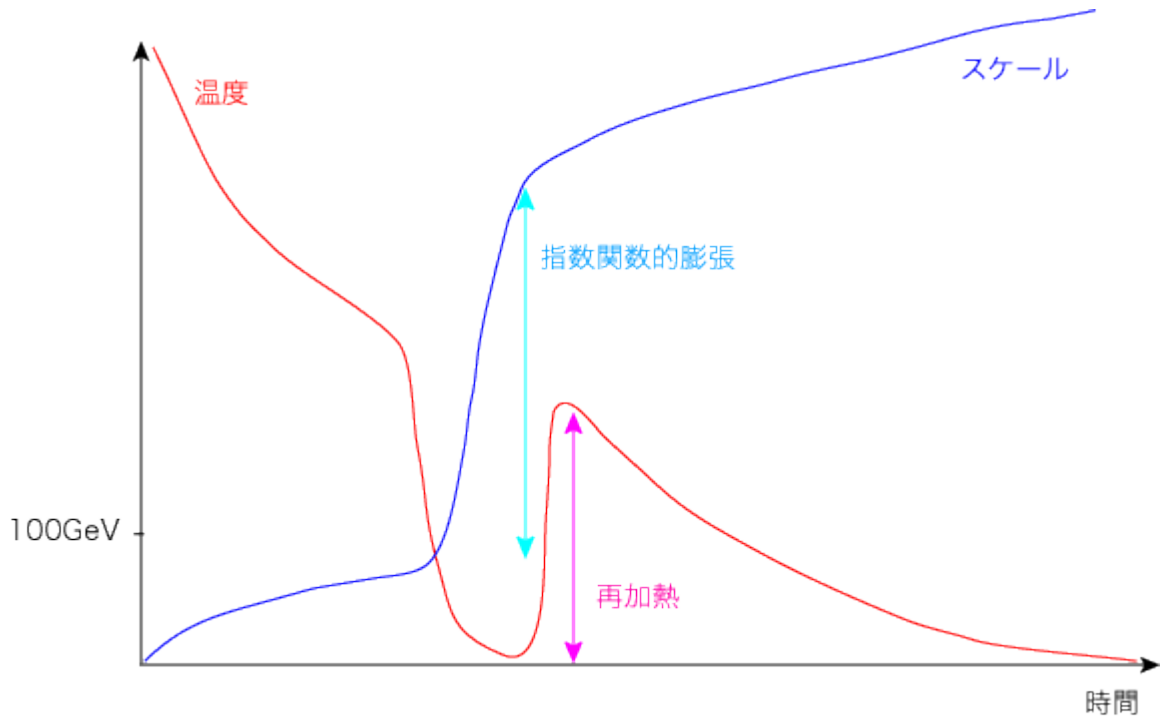
あつという間のプロセスは、次のとおり。

- (1) 宇宙は火の玉から始まった、ルメートルの原初の原子のように、と想定する。  
時刻がゼロに近づけば近づくほど、光のエネルギーは温度の4乗に比例して上昇。  
つまり時が進めば、光のエネルギーは下がり真空のエネルギーが空間を占める。
- (2) 1次の相転移が始まる。水が氷になるように。潜熱という真空のエネルギーが一挙に放出され、小さな出来たばかりの宇宙は急激に加速膨張する。いわゆる、 $10^{-38}$ 秒で起きる倍加が100回も起きる。 $2^{100} \approx 1000^{10} = 10^{30}$ 倍にもなる。  
これが断熱膨張で起きるから急激に温度が下がる。
- (3) インフレーションの最後は、熱い火の玉に変わり、宇宙の温度が上昇する。これを再加熱という。その後宇宙はビッグバンとして比較的ゆっくりと膨張する。すなわち、インフレーションは瞬間的に宇宙を巨大化させエネルギー＝物質に満ち溢れさせる。
- (4) インフレーション生起の時間は、なんと、宇宙創成から $10^{-38}$ 秒～ $10^{-34}$ 秒の間に、 $10^{50}$ 倍の大きさに超光速で広がる。

### インフレーションの模式図







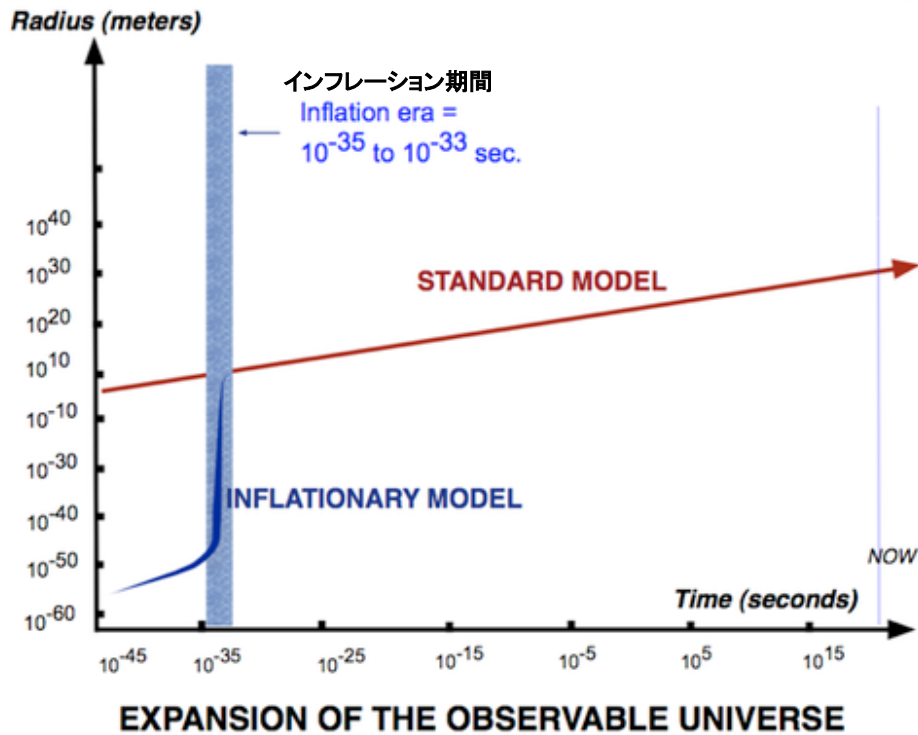
<http://astr.phys.saga-u.ac.jp/~funakubo/BAU/chapter6/chapter6-7.html>

このインフレーション理論により、先に掲げた地平線問題における「一様性」や「平坦性」が解決される。いや、逆も可なりかもしれない。この問題は、私たちの身の回りで喩えれば、食パンをイメージすると良いかもしれない。食パンをスライスした断面は、見事にきれいに膨らんでバラツキが無い。これは、小麦粉とパンの酵素をこねるときに、十分すぎるほど行っているから「一様に」混ぜ合わせられている所以であろう。だから、膨れても「一様に」広がるのだ。ただし、食パンはせいぜい15cm程度ぐらいまでの膨張であるが、宇宙のインフレーションは太陽系：半径100億kmほどに膨張したという。原初の原子サイズが微小で一様だったから、そのまま膨れて巨大なスケールで「一様に」広がったのだ、というのがインフレーション論者の説明である。

さらに、銀河がまばらにあることは、インフレーションの初期が量子論になるから、「揺らぎ」が発生する。これは、後述するWMAPの計測結果から明らかになった。

下図は、縦軸が宇宙の大きさ：mで、横軸が時間：秒で表現されている。インフレーション期間については、前図とズレているが期間とは言ってはいけないほど、極めて短い時間なのでベキ乗のオーダーだけ理解する方がよい。

注目すべきは、ミクロの宇宙とはいえ $10^{50}$ 倍も膨張して、原初の宇宙が太陽系（半径100億km）ほどにも達していることである。



<http://palaeos.com/cosmos/primordial/veryearlyuniverse.html>

宇宙の拡がり: 137億光年  $\approx 10^{16}\text{m} \times 10^{10} = 10^{26}\text{m}$

宇宙の晴上り: 30万年  $\approx 3 \times 10^7 \times 3 \times 10^5 \approx 10^{13}$ 秒:seconds

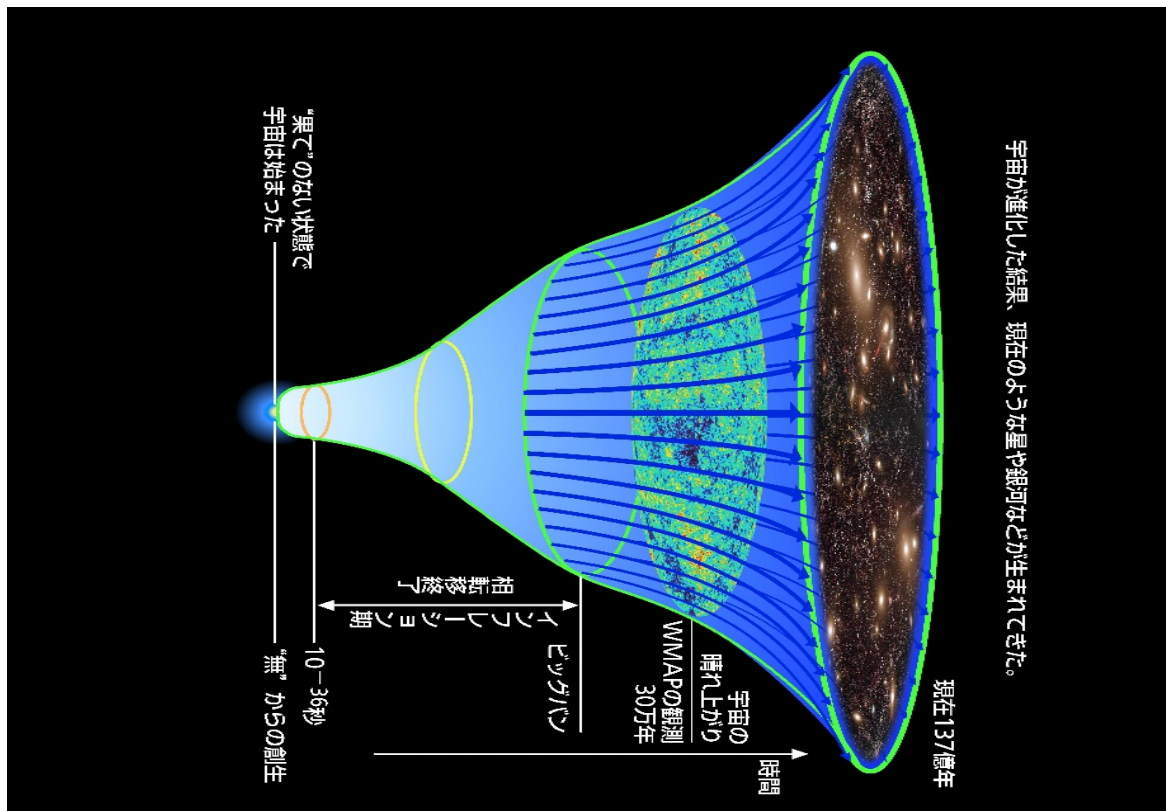
**【参考: 佐藤勝彦とアラン・グースの論文投稿時期】**

佐藤論文の方が投稿時期は半年早い、出版時期は2カ月遅い。

1. **K. Sato**, "First-order phase transition of a vacuum and the expansion of the Universe", Monthly Notices of Royal Astronomical Society, 195, 467, (1981).  
 Received 1980 September 9, in original from February 21  
 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol. 195, May 1981, p. 467-479
2. **A. H. Guth**, "The Inflationary Universe: A Possible Solution to the Horizon and Flatness Problems", Phys. Rev. D 23, 347 (1981).  
 Received 11 August 1980  
 Physical Review D (Particles and Fields), Volume 23, Issue 2, 15 January 1981, pp.347-356

インフレーションから始まってビッグバンにつながる、宇宙の膨張過程を現在までイメージすると次のようになる。誇張して播り鉢形をしているが、2段階で反り返っているのは、左端のインフレーション瞬間と右側の跳ね上がりはダークエネルギーによる現在までの加速膨張を表している。その曲線は、これまで掲げたグラフから連想できる。

ダークエネルギーについては、この後に述べる。



<https://www.nins.jp/~sato/index-j.htm>

## ダークエネルギー

1980年代に、第4回に掲げたベラ・ルービンに始まるダークマターの観測が宇宙物理学界をにぎわした。しかし、いまだに各国の研究機関がこぞって掴まえようとしてきても「それが何か」見つけられていない。これは物理学者を悩ませる以上に、ムキにさせていることは面白い。ブラックホールと同じく、あと何百年も科学者たちは追及して行くにちがいない。

もともと膨張宇宙を発見したハッブルが、これらのフリーク学者らに火を点けたのだ。いまの勇ましく雄々しく賢く育ってきているアンダー20の物理学の雛鳥たちも、やがては狂ったようにこれらのコスミック・ワールドカップに参戦していくのだろう。そして、アイガー北壁のような絶壁の前で悶え苦しむ。頼もしいが、絶対に変化球のような弾道を歩んで欲しくない。つまり、解けない謎をさらりと解く昭和30年代の七色仮面でもなく、空想のありきたりの合成理論をデッチあげる理論家でもなく、どこまでも真っ直ぐに探求する科学者に育って欲しい。第3回に述べた小柴昌俊先生を目標として。

さて、本編は70%ほどフィクションがいっぱい。だから、素人の私にも語れるチャンスが多いのでワクワクしてくる。

ダークマターもどきに名付けてダークエネルギーとしたが、正体不明で、ダークマターのような本籍もどこにあるのかさえ観測にかかっている。ただ、重力に反発する斥力エネルギーにより、いまの宇宙が緩やかに加速膨張しているということだけである。批判的な見方ではあるが、宇宙原初のインフレーションの再現みたいな「真空のエネルギー」が合流しているけれども、一般相対論に拠って指数函数的に膨らむとしながら、特殊相対論を無視して超光速で膨張するという事は、どうも納得がいかない。

ただし、アインシュタインが捨て去った宇宙項(ラムダ項)が復活してしまったことだけが救いとなろう。やがて重力により宇宙が収縮してしまうことに、惧れを抱いた彼が、宇宙項を1917年に導入したのだが、いまは、加速膨張を理論付けすることに使われている。キリストの復活は夢物語か希望的空想であったか知らないが、宇宙項こそは現実である。

空想や夢想が多くなるということは、人類が手にする観測情報が限られていることを意味する。すなわち、膨張宇宙の解明では、古代ギリシャ時代に戻りつつあり、科学者はあらゆる手段を尽くして阿修羅のごとく新たな理論と観測に邁進している。ユークリッド幾何学を適用したエラトステネス流か、星に等級を付けた地道なヒッパルコス流か、それとも観念論で天動説を唱えたアリストテレス流かは判らない。宇宙物理学者それぞれであろう。

でも、つじつまだらけの「アルマゲスト」を編纂したプトレマイオスだけは、二度と現れて欲しくない。

## 加速膨張

2011年のノーベル物理学賞は「遠方超新星の観測による加速膨張宇宙の発見(1998年)」という功績により、

米国ローレンス・バークレー国立研究所のサウル・パールムッター(Saul Perlmutter),  
オーストラリア国立大学のブライアン・シュミット (Brian P. Schmidt),  
米国ジョンズ・ホプキンス大学のアダム・リース (Adam G. Riess)  
たちが受賞した。

パールムッターは、いち早く Ia 型超新星の重要性に着目して

Supernova Cosmology Project : 超新星宇宙論プロジェクト  
を主導し、1992年には遠方の Ia 型超新星の検出に成功した。

一方、シュミットはこの成功に刺激され、

High-z Supernova Search Team : 高 z 超新星探索チーム  
を立ち上げて独立に観測を始め、これに数理物理学の俊英アダム・リースが加わって距離計算の精度を極め、決定的な加速膨張のデータをまとめ上げた。なお“z”は、赤方偏移度を表す変数であり、第4回に掲げたものである。

$$z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0 \quad (\text{赤方偏移した波長} - \text{元の波長}) / \text{元の波長}$$

左よりパールムッター氏(Saul Perlmutter)、シュミット氏 (Brian P. Schmidt)、リース氏(Adam G. Riess)



<https://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Highlights/20111216160000/>

もともと、宇宙論における膨張宇宙の実態を探ろうとしたパールムッターの活力に依るところが大きい。それまでの数億光年程度の距離における銀河の観測ではなく、数十億光年先の銀河の後退速度を赤方偏移で極めようとした。

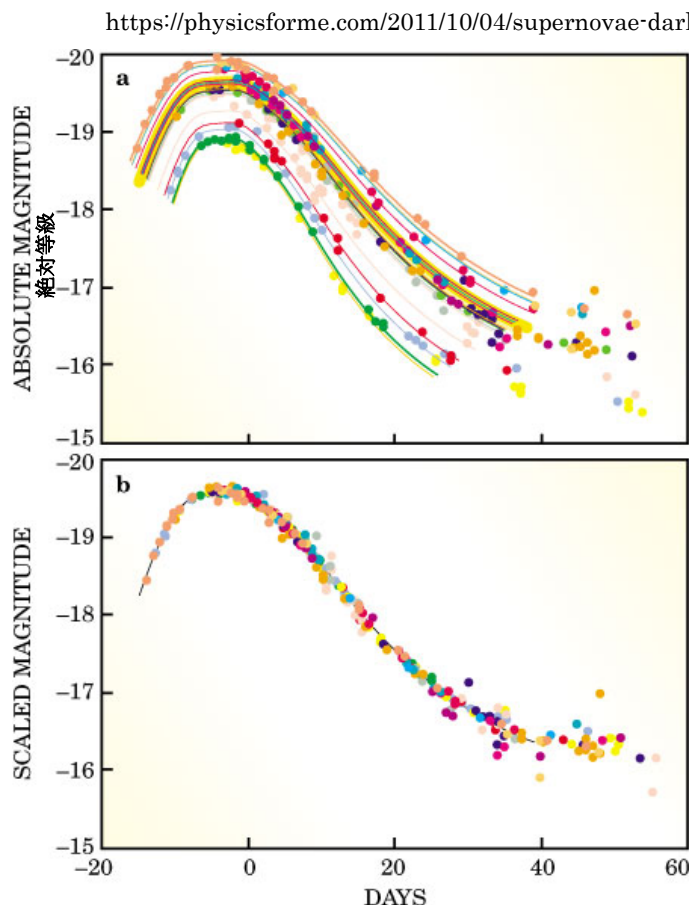
そのためには、距離計測の標準灯となりうる Ia 型超新星に着目したのであった。第3回「超新星」で述べたとおり、Ia型には次のような特徴がある。

- (1) どの Ia 型でも絶対光度のピークが -19.5 等級ほどで同じである。
- (2) どの Ia 型でも光度曲線が約 40 日間で減衰するが、同じ曲線に重なる。
- (3) 一つの銀河でだいたい 1 回 / 100 年の頻度で発生する。



特徴(3)から、数万個の銀河を対象にすれば、毎年数百の Ia 型超新星が観測できることに気付いた。これは観測に最適であり、研究期間を数年とみても魅力は大きい。(1)と(2)は強力な距離測定のための物差しである。

[再掲: 第3回「超新星」より]



a) 絶対光度、固有輝度の逆対数計測は、ピーク光度の前後に（星の名残の炎の中に）プロットされている。大部分（全てではない）が黄色バンドの上か近くにきっかりと落ちていく。この図は、相対的に稀に外れた点、つまりピーク輝度と継続時間が明らかに規準より離れている点を強調。光度曲線の鳥の巣のような重なりは、時間的に外れた点の固有輝度を推定できることを、提示する。一番輝く超新星は、一番暗いカーブよりも緩やかに増減する。

b) 単純に、それぞれの光度曲線を基準に合わせて時間軸を引き伸ばして、必要な時間軸で決められる幅だけ輝度レベルを調整すれば、全ての Ia 型に当てはまる光度曲線が得られる。

ただし、どうやって発見するか？ いきなり光り出す超新星については掃天観測が必須であり、地上望遠鏡ではほぼ不可能である。都合のいいことに超新星ハンターなどアマチュアも混じって世界中で超新星ウォッチがあり、結果として掃天になる。国際天文学連合電報中央局が発行する電子速報にて発見ニュースが通知され、国際的には国際天文学連合回報で知らされる。そのほとんどがピークを過ぎてはいるが、数日は明るく光っているから、赤経・赤緯が判った観測は地上望遠鏡で容易に可能となる。現在は CCD カメラで広範囲の天空を3週間程度の間をおいて二度撮影し、映像の引き算をすると残った光る天体が超新星である。結構なアイディアにより見つけることも出来るようになった。

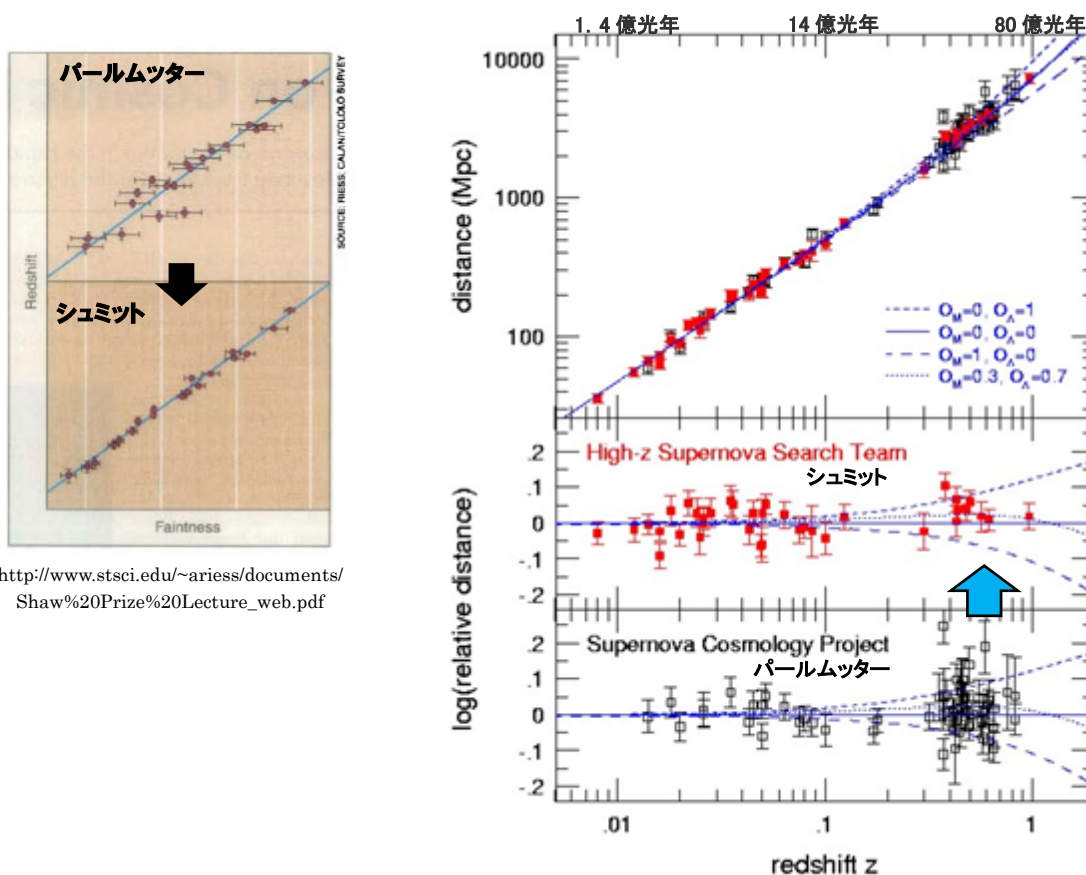
1992年ごろから、地道に観測を始めたがどうもぼやけた画像で精度が上がらない。そこで、パールムッターは持ち前の強引かつ執拗な観測要請をハッブル宇宙望遠鏡：HSTの運用監理を行っている NASA に何度も申し込んだ。余りにもうるさい要望に NASA は辟易して、その都度断ったようだが、調べてみるとオーストラリアのシュミット・チームも同じような観

測を推進していることに気付いた。そして、ついに共同申込みなら受け付けることになった。ライバルを出し抜くつもりのパールムッターとしては苦虫を噛み潰して、シュミットらと共同で申し込み、本格的に Ia 型超新星の HST 観測が始まったのである。

この NASA の判断こそ、米国の鉄の精神 “Public Interest (公益)” に基づいているのである。現在の新大統領と側近たちは忘却しているが。

やはり、数理解物理学に長けたリースの数値解析が、ボヤケの原因である「宇宙塵」の影響を取り除いてかなり精緻な赤方偏移をたたき出した貢献（下図）は見逃し難い。パールムッターの SCP は多くの超新星観測データを溜め込んで、シュミットの HSST を圧倒していたが、共同戦線を組んでからはデータ共有が図られ、リースのメスが入ることとなった。これで「加速膨張」のデータが精選されたのである。

アダム・リースの数値解析の貢献



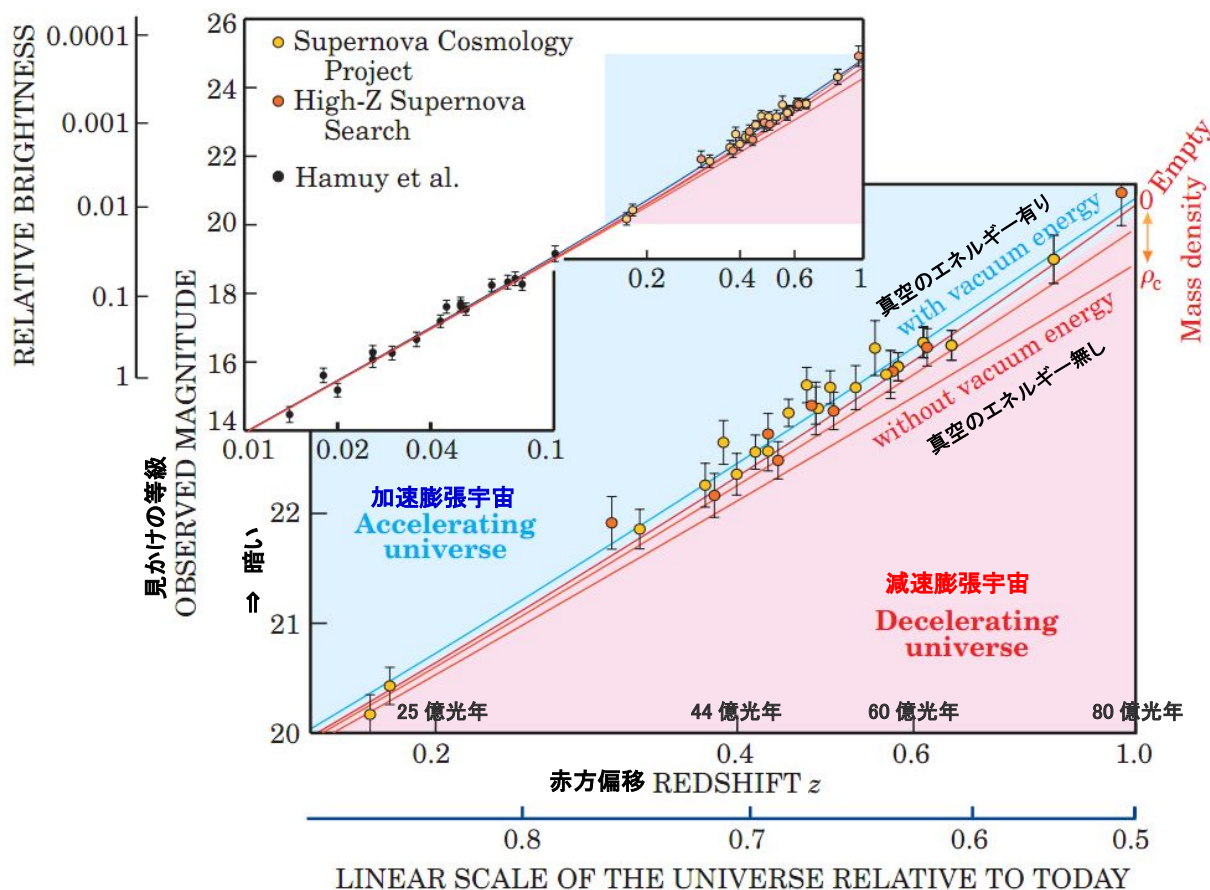
[http://www.stsci.edu/~ariess/documents/Shaw%20Prize%20Lecture\\_web.pdf](http://www.stsci.edu/~ariess/documents/Shaw%20Prize%20Lecture_web.pdf)

<https://www.eso.org/~bleibund/papers/EPN/epn.html>

そして、1998年にこれら二つのチームは共同して成果を発表した。この結果、次図のような「加速膨張」の事実が披露されたのである。

### 超新星の赤方偏移と見かけの等級

<https://physicsforme.files.wordpress.com/2011/10/perlmutter3.jpg>



二つのチームが共同で発表した「加速膨張」は上図のとおりグラフにて示された。これまで、減速膨張宇宙をおおまかに信じていた科学者らは驚嘆した。すなわち、アインシュタインに限らず私たちも含めて人類は、減速膨張から次第に平衡宇宙に落ち着くであろうと希望的願望を持っており、この結果には信じたくないという気持ちが消えてくれない。

冷酷な宇宙物理学者は、数千億年後に「**ビッグ・リップ** (剥離)」という宇宙の天体や物質がバラバラに離れ離れなるだろうと、言い切っている。

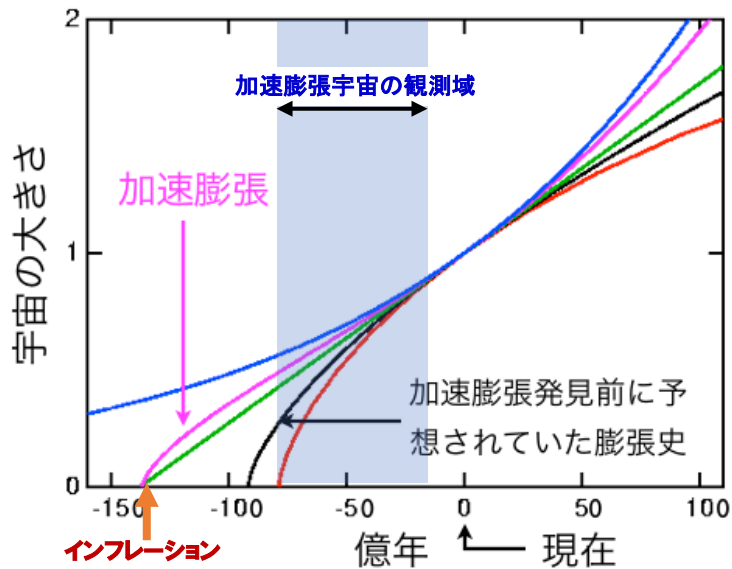
つまり、ダーク・エネルギー (斥力) が、次第に

- ・大きく重力を上回って近隣銀河が見えなくなるほど拡がり、
- ・恒星どうしも惑星も離散する。
- ・果ては電磁力を上回ると、岩石も生物も原子に分解されて散り散りになる。

というような宇宙全体の破局現象である。

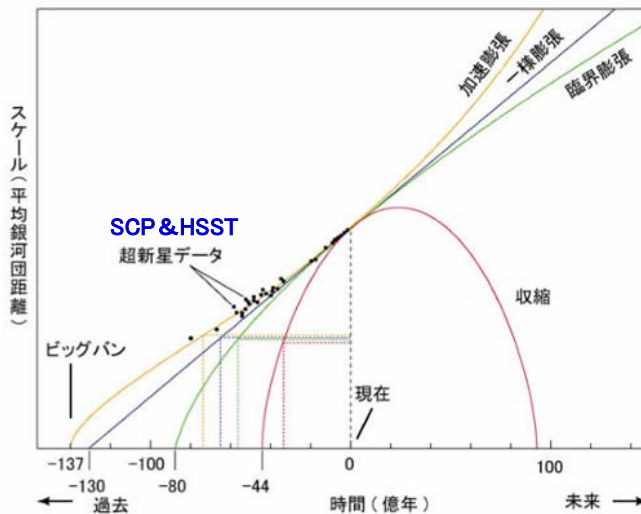
発表された加速膨張の観測図は、右方が過去になるが、私たちの理解どおり左方にもって  
 いて右方は未来とすると次図のようになる。

なお、本編の始めに述べたように、宇宙原初のインフレーションは加速膨張であり、かつ、  
 $10^{-34}$ 秒間に原子の領域が超光速で太陽系（半径100億km）ほどに膨れた現象である。  
 その要因が真空（バキューム）エネルギーと言われており、現在の加速膨張もそれが原因で  
 あると予言者は語っている。



[https://www.subarutelescope.org/Projects/HSC/j\\_research.html](https://www.subarutelescope.org/Projects/HSC/j_research.html)

さらに、フリードマン方程式による数値計算による加速膨張ほかのグラフは、次のとおり  
 になると報告されている。



### 宇宙スケールの時間依存性

一様膨張は膨張速度が時間によらずに一定の場合で  $\Omega_m = 0$  に相当。  
 臨界膨張が  $\Omega_m = 1, \Omega_\Lambda = 0$ 、  
 収縮が  $\Omega_m > 1, \Omega_\Lambda = 0$  であり、  
 観測値は  $\Omega_m \approx 0.26, \Omega_\Lambda \approx 0.74, \Omega_k = 0$  の加速膨張である。  
 宇宙項が存在すると最初は減速膨張でもいずれは加速膨張となる。

<http://osksn2.hep.sci.osaka-u.ac.jp/~naga/kogi/handai-honor07/6-DE.pdf>

阪大物理学オナーセミナー

(担当: 久野、長島): Note 4

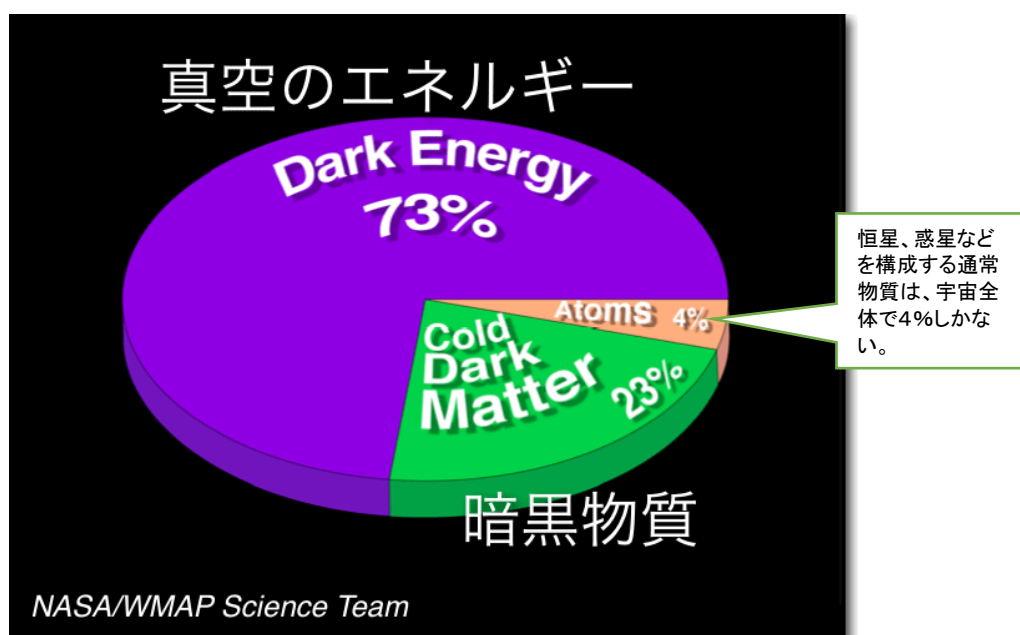
平成 19 年(2007 年) 11 月 22 日 より

## ダークエネルギーとは

既に、何度も登場してきた「ダークエネルギー」とは正体が不明であり、今でも最前線の研究・観測課題でもある。どうも、パールムッターとシュミットらが明るみにした加速膨張宇宙の証拠から、そのようなものがなければならなくなった。

この用語は、誰が聞いてもダークマターの類推になるが、宇宙論研究者のマイケル・ターナーが1998年に初めて作った言葉とされている。現在観測されている宇宙の加速膨張や、宇宙の大半の質量が正体不明であるという観測事実を説明するためにも、宇宙論の標準的な理論にダークエネルギーの効果を加えるのが適当ということだ。

もともとは、アインシュタインの“ $E=mc^2$ ”に拠っている。すなわち、この広い宇宙全体の物質密度は、観測から推定しても30%に満たない。この後に述べる WMAP の観測結果に基づくと、物質の割合はNASAにより次図のとおり見積もられている。



[http://www-jlc.kek.jp/ilcphys/hep\\_intro/darkmatter](http://www-jlc.kek.jp/ilcphys/hep_intro/darkmatter)

物質とエネルギーを混ぜて考えることは、“ $E=mc^2$ ”でそれらは等価であるということであるから。宇宙全体の物質をみる場合、27%しか本物の物質は観測できていない。ダークマターは、ベラ・ルービンの功績により観測にかかり、その後に重力レンズ効果でかなりの確度で推測されてきた（第4回「銀河」参照）。

**$E=mc^2$  の実際：** 核分裂や核融合で失われた質量が実は核エネルギー量と同等なことは何度も実証されてきた。もっと身近でいえば、塩酸と水酸化ナトリウムを混ぜると、つまり化学反応させると熱が出て塩ができる。これを精密に計算すると、出た熱量と微量の失われた質量が同等であることも精密実験で実証されてきた。石炭を燃やしても同じようなことが再現される。こうして、全科学者たちは、「物質=エネルギー」という観念を抱いている。私たちには、「ほんとかな？」という疑問は消えていないが、これだけは信じてよいと言える。



だから、残りは全部ダークエネルギーとしてしまった、というのが真実である。いい加減極まりないが、現代の科学者もプロパガンダと流行という人間社会のマクロな伝搬メディアのダークエネルギーには弱いということが窺える。したがって、真面目に考えることはないが、宇宙物理学者たちはアインシュタインの宇宙方程式や、それに基づくフリードマンの方程式など持ち出されると、これまた、なびいて探求にいそしむのだから不思議でもある。

幻の修正宇宙方程式：
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} + \overset{\text{ラムダ項=宇宙項}}{\Lambda} g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

そして、宇宙方程式から消えたはずの宇宙項が70年ぶりに復活したのである。宇宙定数： $\Lambda$ は、今では不可欠の定数になってしまった。この $\Lambda$ が、いわばダークエネルギーの代名詞になり、住所不定難民だったのに、本籍を得て住民票すら登録され、アインシュタインの方程式に再び座り込んでいるのだから始末に終えない。

なお、加速膨張に関する計算上は、ダークエネルギーの存在は必要となるが、あくまでも理論というかアインシュタインの方程式に導かれるものに拠るしかないのだから、理論家の限界がうかがわれるのも仕方がない。

## WMAP

いよいよ本命である。宇宙背景放射：CMBについては、1945年頃にアルファードとハーマンが予測した。ビッグバン開始後30万年経過後に、「宇宙の晴上り」として波長1マイクロン( $\mu\text{m}$ )の猛烈な光が開放されて、現在、地球には波長1mm前後のマイクロ波が届いているということであった。つまり波長が1,000倍も長くなっている(赤方偏移している)。

宇宙物理学者たちは興味を持ったが、1940年代はマイクロ波を使ったレーダーの開発こそ第二次大戦真っただ中で進んでいたけれども、電波天文学はその名すら現れていない。さらに、電波工学と天文学にまたがる専門家は皆無であったから、忘れ去られてしまった。

ようやく1960年代に、広帯域通信や衛星通信に応用できるマイクロ波通信技術が開花し、AT&Tベル研究所のペンジラス&ウィルソンがたまたまCMBを発見して、またしても一時的に賑やかにはなった。それでも、ビッグバンという空想的な予言については天文学者も軽視していた。

一方、超新星、ブラックホールなど、この広い宇宙の問題を物理学で解析するという、いわば宇宙物理学者が現れ始めた。その典型が佐藤勝彦らの「インフレーション宇宙論」であったことは既に述べたとおり。

科学の歴史は、直進的研究に偶然の発見が合流し、そして本格的探究という大樹に育っていく。不可思議な現象に彩られるものなのかもしれない。この広い宇宙のアラベスクを追ってきた私には感慨深いものが残る。“犬も歩けば棒に当る”という「いろは歌留多」の一番目を引合いに、ペンジラス&ウィルソンの発見を喩えたが。おそらく、コペルニクスの地動説の提唱においてもそういったイベントがあったのではないだろうか。

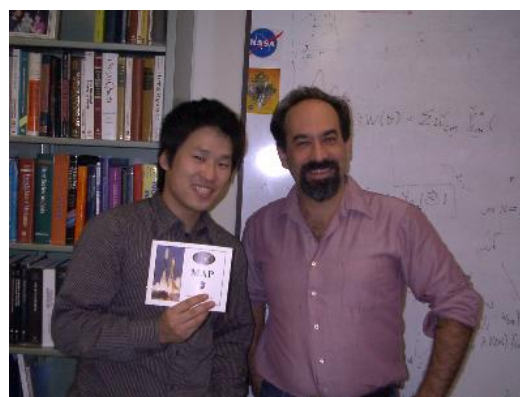
アインシュタインは、そのような偶然の外部刺激を「思考実験」という軽いもので求めたとも言える。例えば、路面電車の最後部に乗って後方の時計台を見て、電車を光速で走るという想定をしたら、なんと時計台の時計が止まってしまう。さらに、次第に光速に近づいたら時計台の時計は段々と遅れて行くではないか。これが、特殊相対論の発想の原点の一つになっているという。

ダブルマップ：WMAP

(ウィルキンソン・マイクロ波異方性探査：Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)

でもそんな類いの外部刺激を求めたのではないかと想像してしまう。全く関係ない新しい若い頭脳を募集した。それで選ばれたのが、応募してきた東北大学の博士課程の学生(当時25歳)であった。その彼こそ小松英一郎であり、選んだのはプロジェクトのサイエンス担当のデーヴィッド・スパークルである。スパークルの慧眼は当たった。例えば、小松英一郎が、CMBの揺らぎ解析に音響工学を用いたことがその一つである。音

小松英一郎とデーヴィッド・スパークル



<https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/~komatsu/pi.cs.html>

響は媒体がある領域で適用される。まさか宇宙空間に適用できるとは誰も気付かなかった。小松英一郎がそのような偶然の刺激をもたらしたということよりも、彼の数値解析の腕が見込まれたと思うのが正しい。スパーゲルは、たぶん「加速膨張」研究におけるアダム・リース的な存在を求めたのかもしれない。

私たちの胸が湧き上がるのは、日本人の科学者がアメリカという激烈な競争社会の環境で採用されて活躍したことである。しかも、WMAP 論文三つのうちの二つを小松英一郎が主筆したのであるから、それを知れば、必ず私たちの感激はひとしおとなろう。しかも、アメリカの第一線の宇宙物理学者たちを引き連れて。

### WMAP チーム・メンバー(現在と過去)

Current WMAP Science Team	
Member	Current Institution
Charles L. Bennett (PI)	Johns Hopkins University
Joanna Dunkley	University of Oxford
Michael Greason	NASA Goddard Space Flight Center
Ben Gold	Johns Hopkins University
Mark Halpern	University of British Columbia
Robert Hill	NASA Goddard Space Flight Center
Gary Hinshaw	University of British Columbia
Norman Jarosik	Princeton University
Al Kogut	NASA Goddard Space Flight Center
<b>Eiichiro Komatsu</b>	<b>Univ. of Texas, Austin</b>
David Larson	Johns Hopkins University
Michele Limon	Columbia University
Stephan Meyer	University of Chicago
Michael Nolta	University of Toronto
Nils Odegard	NASA Goddard Space Flight Center
Lyman Page	Princeton University
Kendrick Smith	Princeton University
<b>David N. Spergel</b>	<b>Princeton University</b>
Greg Tucker	Brown University
Janet Weiland	NASA Goddard Space Flight Center
Ed Wollack	NASA Goddard Space Flight Center
Edward L. (Ned) Wright	University of California- Los Angeles

Past WMAP Team Members	
Member	Current Institution
Chris Barnes	Princeton University
Rachel Bean	Cornell University
Olivier Doré	JPL/California Institute of Technology
Hiranya Peiris	University College London
Licia Verde	University of Barcelona
<u>Dave Wilkinson</u>	Princeton University

<https://map.gsfc.nasa.gov/mission/team.html>

## COBE

宇宙背景放射探査機 (Cosmic Background Explorer, **COBE**) は、CMB 観測を目的として初めて打ち上げられた人工衛星であり、そのままプロジェクト名となった。

1989年にNASAが打ち上げて1993年に運用停止した。1998年にパールムッターとシュミットによって「加速膨張の観測結果」が発表されたことは既に述べてしまった。そしてダークエネルギーが予見される前である。これらは数十億光年先の超新星の赤方偏移観測に端を発していたが、COBE プロジェクトはあくまでも大気の影響がない地上を離れた宇宙空間でのCMB観測を目標とした。

カリフォルニア大学バークレイ校の天体物理学者ジョージ・スムート (1945年～) は、「CMB放射の揺らぎ」の発見に憑りつかれた男である。最初は、気球による実験・観測から始まったが、1970年頃には諦めてしまった。1976年には、高高度を飛べるU-2偵察機に新たに開発した高精度CMB検出機器を積んだ実験・観測に発展した。

「放射の揺らぎ発見」は、ビッグバン後しばらくしてから銀河が形成されることの証拠に結びつく。「揺らぎ」があったから、その空間の濃淡によって、今まばらに分布する銀河が出来たのだという説は多くの宇宙物理学者に信じられてきた。すなわち、放射揺らぎは宇宙形成の種とも言われている。U-2実験では、東西で1/1000の違いが検出されて嬉しむしたが、これは地球の自転が原因と間を置かずして判明した。やはり、巨費を必要とする人工衛星に拠るしかないと思いはじめた。

そんな時に、NASAがCOBE衛星実験計画を進め始めた。共同研究の募集である。最初は、実験計画の作成という準備段階であり、資金提供もありスムートにとっては魅力的な話で、気球観測との二股をかけながら、応募した。集まった121件の提案のうち、次の三つのグループが残り、NASAはこれらを統合して推進することとした。

### 1. **DMR** : 差分マイクロ波ラジオメータ (Differential microwave radiometer)

CMBのマッピング観測を行い、CMBに含まれる非等方性＝揺らぎを検出する。

主任研究者はジョージ・スムート。カリフォルニア大学バークレイ校の物理学教授で、天体物理学者。

### 2. **FIRAS** : 遠赤外絶対分光測光計 (Far-infrared absolute spectrophotometer)

CMBのスペクトルを測定し、黒体放射との違いがあるかどうかを調べる。

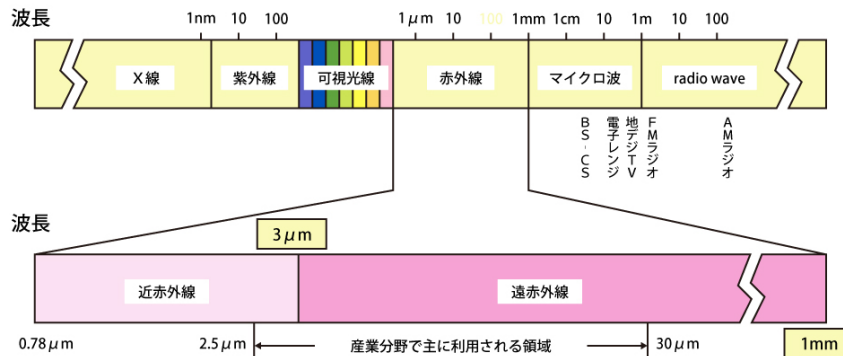
主任研究者はジョン・C・マザー。NASAゴダード宇宙飛行センターの天体物理学者で、メリーランド大学の准教授。

### 3. **DIRBE** : 拡散赤外背景放射実験装置 (Diffuse Infrared background experiment)

宇宙初期の赤外銀河を検出する。

主任研究者は、マイク・ハウザー。ゴダード宇宙飛行センターの天体物理学者。

[参考] 近赤外線と遠赤外線 <<http://www.enseki.or.jp/ippo.php>>



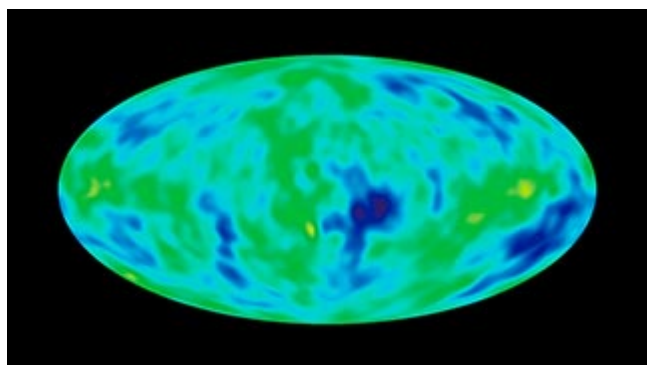
実行開始は1982年で、1988年のスペース・シャトル飛行計画で打ち上げることとなったが、1986年のチャレンジャー号の打ち上げ直後の爆発事故で、大幅に遅れた。その結果、焦ったリーダー達は他のロケットを探し、結局、スターウォーズ計画の撃ち落とし用で残ったオンボロのデルタ・ロケットを使うこととしたが、打上げ積載能力がCOBE衛星重量の5トンもなく、半分であった。このため、3年内で、軽量化のため一から設計・製造を変更して再度の汗を流したのである。あれから15年経ってようやく1989年にカリフォルニアの空軍基地から打ち上げられた。

なんと、スムートたちはCMBを最初に予測した「アルファートハーマン」を打上げ日に空軍基地に招待した。

このCOBE衛星の軌道は極周回、つまり北極と南極を結ぶ地上900kmを12回/日で周回することにした。これは、地球の自転で自然に東西に振り回されるから、衛星のアンテナは子午線方向に振るだけで「掃天」観測ができるが、のっぺらぼうのCBRの観測精度にどうしても太陽や月の影響が出る。当時の目標精度は、どうも千分の一〜万分の一だったらしい。

各種の雑音と闘いながら、やっと「揺らいでいる」観測結果が求められ、1992年に米国のアストロフィジカル・ジャーナル誌に投稿できた。

すみやかにアメリカ物理学会での発表に漕ぎ着けたのである。その揺らぎ図が右のとおり。



<https://wmap.gsfc.nasa.gov/media/030653/index.html>

実は、DMR検出器などから発生するノイズは完全に除去できず、それらが揺らぎの信号レベルに重畳されていると言われている。どうも、10万分の一レベル以下に雑音を抑えないといけなかったようである。この問題は検出器の雑音発生抑制と、太陽光線と地球からの反射光の遮蔽が不十分であることに起因していることが推測された。次のWMAPの第一の



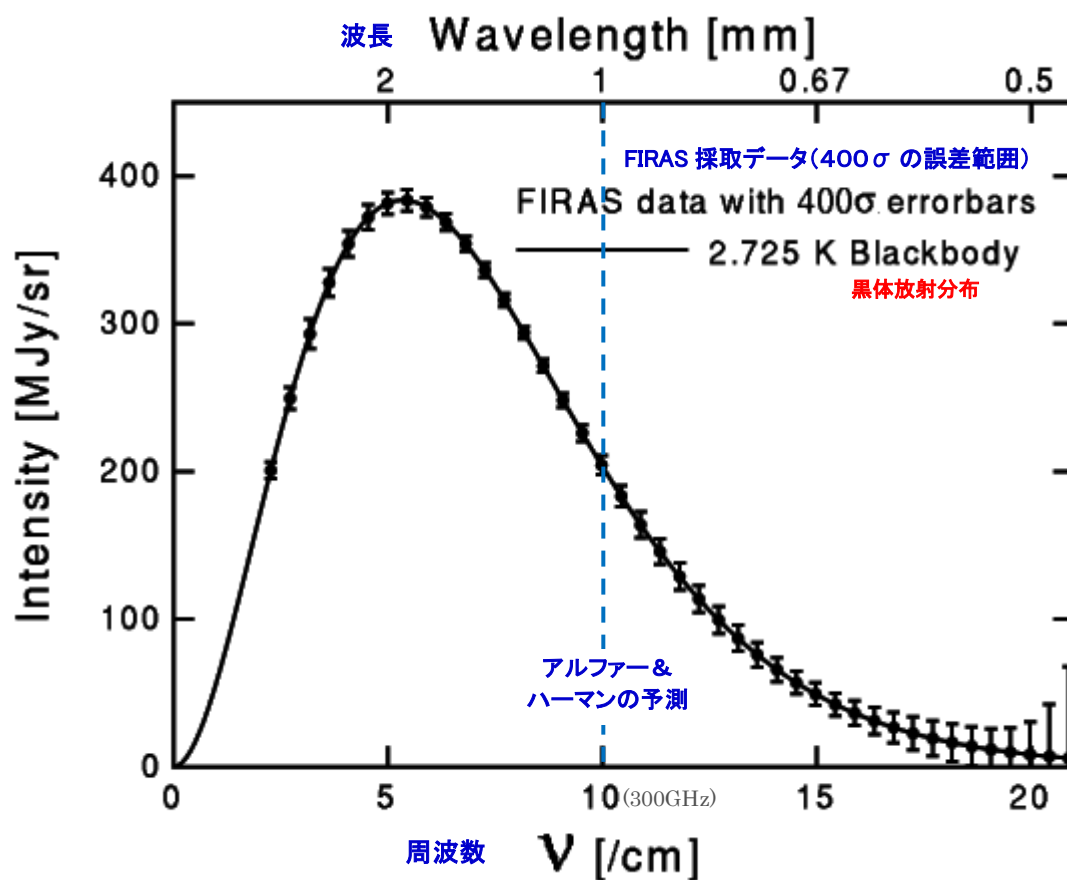
必要条件に引き継がれ、大きな役割を果たしたと言ってもよい。

しかしながら、科学界も世間も新聞もこれで大いに賑わったということである。

「神の筆跡」と銘打ってニューズウィーク誌はドラマティックに報道した。

次の成果は、CMB のスペクトルであり、FIRAS チームのジョン・マザーがとりまとめた。次図のようにプランクの黒体放射どおりであった。

<https://thecuriousastronomer.wordpress.com/tag/firas/>



2006年には、ノーベル物理学賞が、NASAの天体物理学者ジョン・マザーと米カリフォルニア大学のジョージ・スムート教授の2名に贈られた。マザーとスムートの受賞理由は「宇宙マイクロ波背景放射が黒体放射に一致することと、非等方であることを発見した」功績である。この非等方性が「揺らぎ」である。

## WMAP プロジェクト

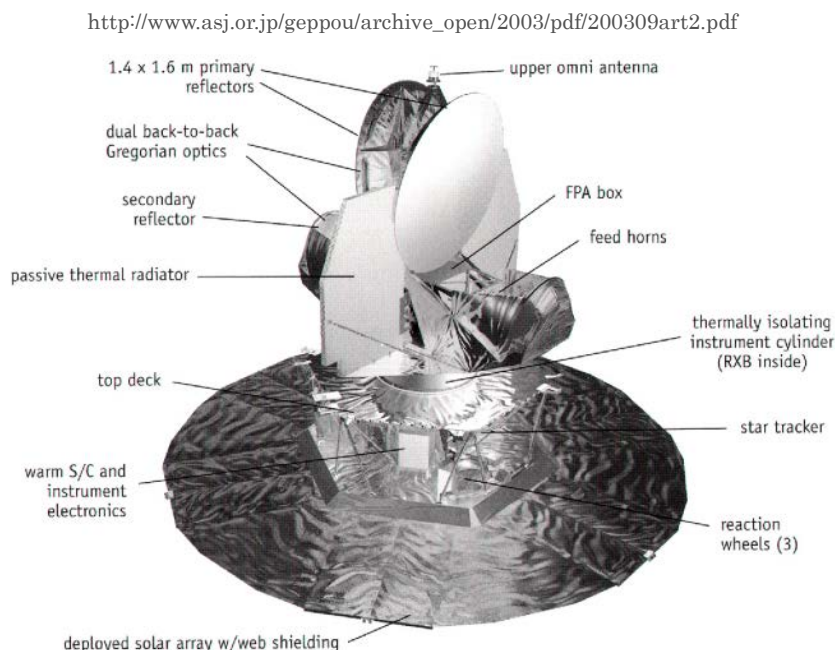
既に述べたように、1965年にペンジラス&ウィルソンが発見したビッグバンの名残である CMB: 宇宙マイクロ波背景放射については、ワシントンのプリンストン大学のチームが観測計画を立てていた。その時のメンバーは、

ロバート・ディッケ  
ジム・ピーブルズ &  
デーヴィッド・ウィルキンソン (1935 - 2002 年)  
ピーター・ロール

の4人組であった。彼らは、「先を越された」と言って地団駄踏んだことは記憶に新しいと思う。そして、それぞれが諦めたように見えたが、COBE 観測衛星の成功により刺激を受け、プリンストン大学のウィルキンソンだけは熱心に次の観測衛星のアイデアを練っていた。

それが、彼が主導した“MAP”である。COBE の観測結果はそれなりに成果を挙げたが、その角分解能は7度程度で大きすぎた。ゆらぎの状況を精密に測るには精度を上げないといけないということで、MAPはさらなる分解能として20倍以上の0.3度の分解能が要求され、設計された。

そして、NASA により MAP 観測衛星が2001年6月に打上げられた。その観測が開始されて間もなくウィルキンソンは惜しくも2002年9月、急逝してしまった。これを嘆いたメンバーは、彼の功績を冠して“WMAP”観測衛星とした。



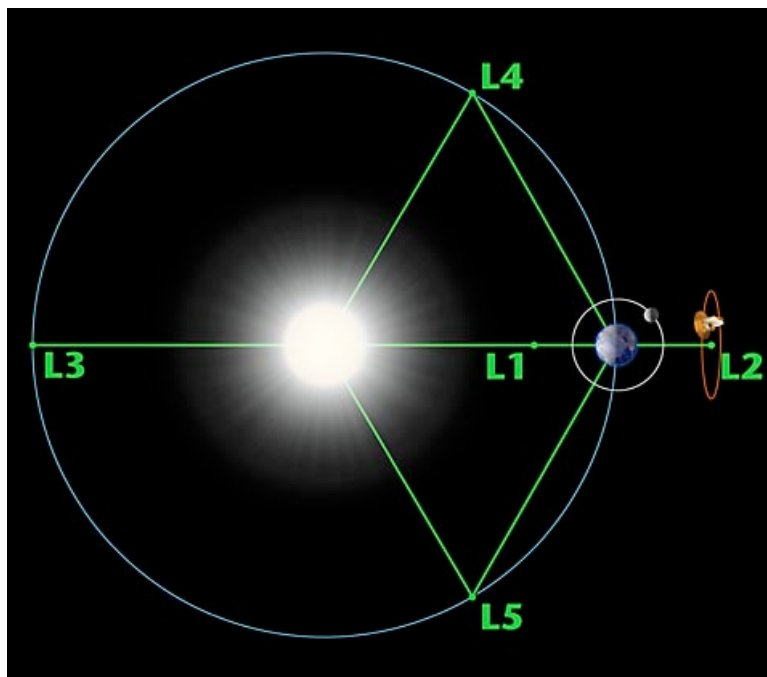
WMAP 衛星：二つの望遠鏡を搭載 (primary reflectors)。下の円形パネルは、太陽電池兼太陽や地球からの放射を遮蔽するシールドで、この部分は300K (27°C)と温かいが、検出器のある部分は放射冷却で90K (-183°C)まで冷えており、冷却装置なしで宇宙背景放射に十分な感度を達成している。このため寿命は半永久的である。

## 第2ラグランジュ点：L2

WMAP 衛星は、第2ラグランジュ点：L2 という宇宙空間の特別な一等席に打ち上げられて、運用された。L2 は、太陽光線や地球からの反射光などを衛星の後方にして「みかけの静止」をすることができるポイントである。その距離は、太陽から地球を結ぶ直線上に位置し、地球からの距離は、その後方約 150 万 km であり、月までの距離：38 万 km のだいたい 4 倍と憶えればよい。

COBE 観測が宇宙からのノイズにかなり影響を受けてそれらを除去しきれなかったことがウィルキンソンらに、L2 を狙わせたのであろう。このため、衛星は後方に太陽電池を兼ねたスカートが大きく広げて影をつくり、太陽と地球からの光を遮って最小にする構造とした。さらに、L2 においては 90K (-183°C) だから、冷却装置なしで宇宙背景放射に十分な感度を達成できた。凄いものである。科学者の考える力は、私たちの想像をはるかに超える。

一般に、質量が太陽や惑星よりきわめて小さい物体（この場合、人工衛星）が他の質量の大きい2天体（この場合、太陽と地球）からの引力を受け、惑星と同じ周期で太陽のまわりを周回運動し得る位置は5箇所あることが知られている。これらの点をラグランジュ点といい、それぞれ L1、L2、・・・、L5 などと呼ばれる（次図のとおり）。そのうち L1～L3 は2天体（この場合は太陽と地球）を結ぶ直線上にあり、L4 と L5 は2天体とちょうど正三角形をなす位置にあります。L1～L3 は不安定で、この位置から少しでもずれるとずれがますます大きくなっていくのに対して、L4 と L5 はきわめて安定なつりあい点で、多少のずれが生じても復元力が作用し、この位置から大きくずれていくことはないという。木星の軌道の上にトロヤ群という小惑星が回っており、これらが L4 と L5 点である。



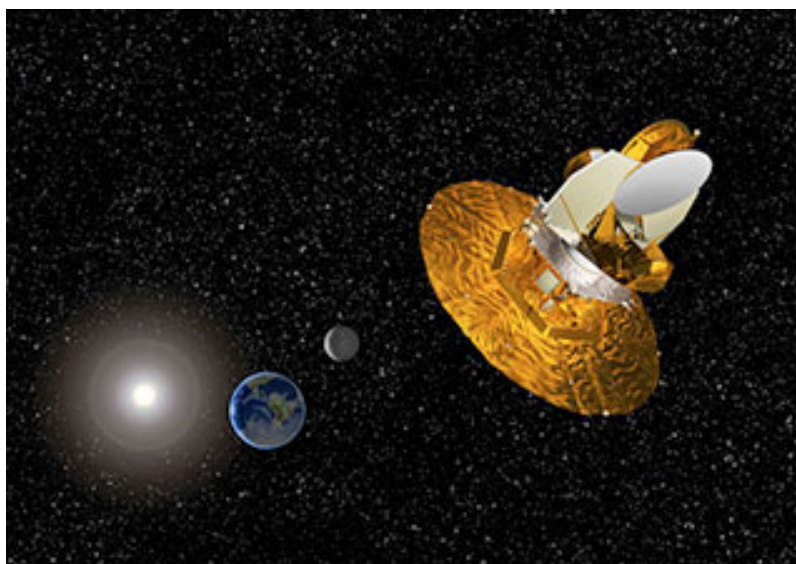
<http://blackshadow.seesaa.net/990528b.jpg>

1760年頃、オイラーが制限三体問題の解として、主星（太陽）と従星（惑星）を結ぶ直線上にある  $L_1$  から  $L_3$  までの解（オイラーの直線解）を発見、その後ラグランジュが 1772 年に主星・従星を一辺とする正三角形の頂点（ $L_4$ 、 $L_5$ ）も解であることを発見した。ラグランジュ点のなかでも  $L_4$  と  $L_5$  が比較的安定で、軌道が多少ずれても復元力が働く。

ジョゼフ＝ルイ・ラグランジュ（1736 - 1813 年）は、イタリアのトリノで生まれフランスで活動した数学者、天文学者であり、オイラーと並んで 18 世紀最大の数学者といわれる。

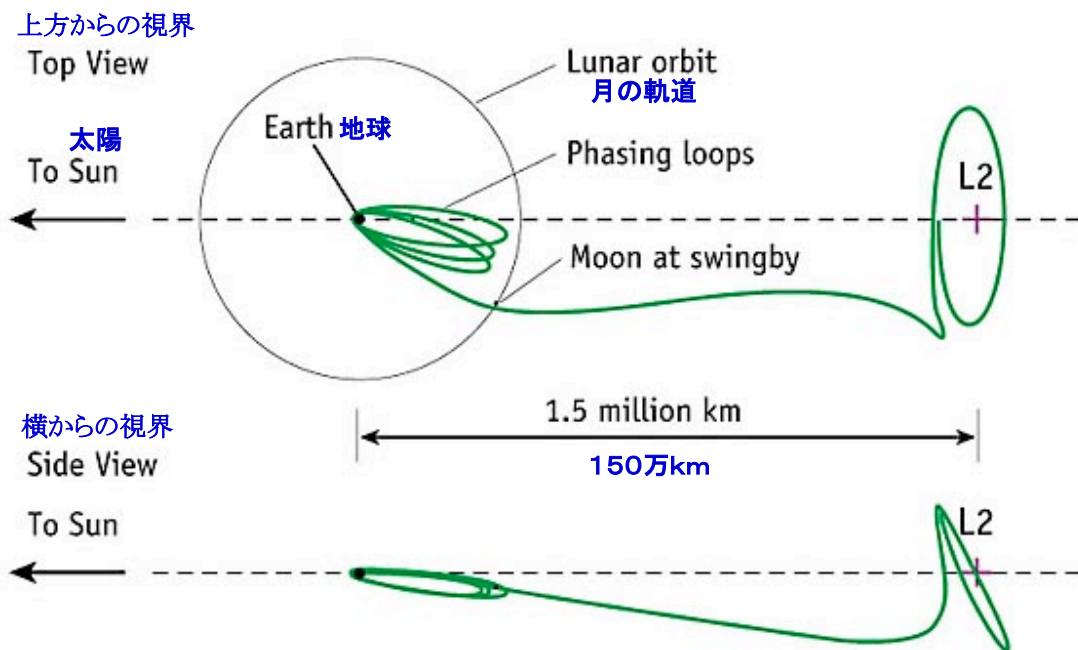
むかし、アポロ 13 号がエンジン故障して惰性で月を周回して月の裏側に回った時、クルー 3 人はとんでもないほど煌びやかな宇宙の星々を見て唾然としたそうだ。たまたま、太陽も地球も月が遮って邪魔な光線をすべて隠したから、そのように燦然と輝く宇宙を観ることになったのであろう。地球上の都会はもちろん田舎の真っ暗の夜と比べても、輝きが星の色がすべて格段に鮮やかに見えると言う。私も、やがては月の裏側に望遠鏡を設置する 때가来るだろうと思ったが、その時は  $L_2$  という絶好ポイントを知らなかった。この三人は奇跡の瞬間に出会ったのであるから、神々の祝福を受けたのかもしれない。 $L_2$  はまさにそのような絶好の観測環境を、常時、提供してくれるのである。また、地球と同期して太陽を周回するから WMAP の掃天観測は受信アンテナを縦に振るだけで済むことになると思像できるが、実際にそうしたかは確認できない。

WMAP 衛星の位置（想像）



<https://wmap.gsfc.nasa.gov/media/990387/index.html>

## MAP の飛行軌道



WMAP 任務は1995年に提案され2001年に開始された。そして、運用は2010年に完了した。宇宙ロケットは、中量級デルタII 7425-10 で、太陽-地球 L2 釣合点に向けて月の引力を利用した軌道に乗るよう打ち上げられた。それに27ヶ月(L2 までの3ヶ月の飛行と24ヶ月の定着試行)を要した。任務は、次いでに、飛行データを収集することまで拡張された。総運搬重量の限度は830kg であった。WMAP 機器は、低めの熱雑音を抑えるため宇宙船により太陽、地球、月から絶えず隠れるようになっている。WMAP は2010年8月19日に科学的データの採集を終えた。



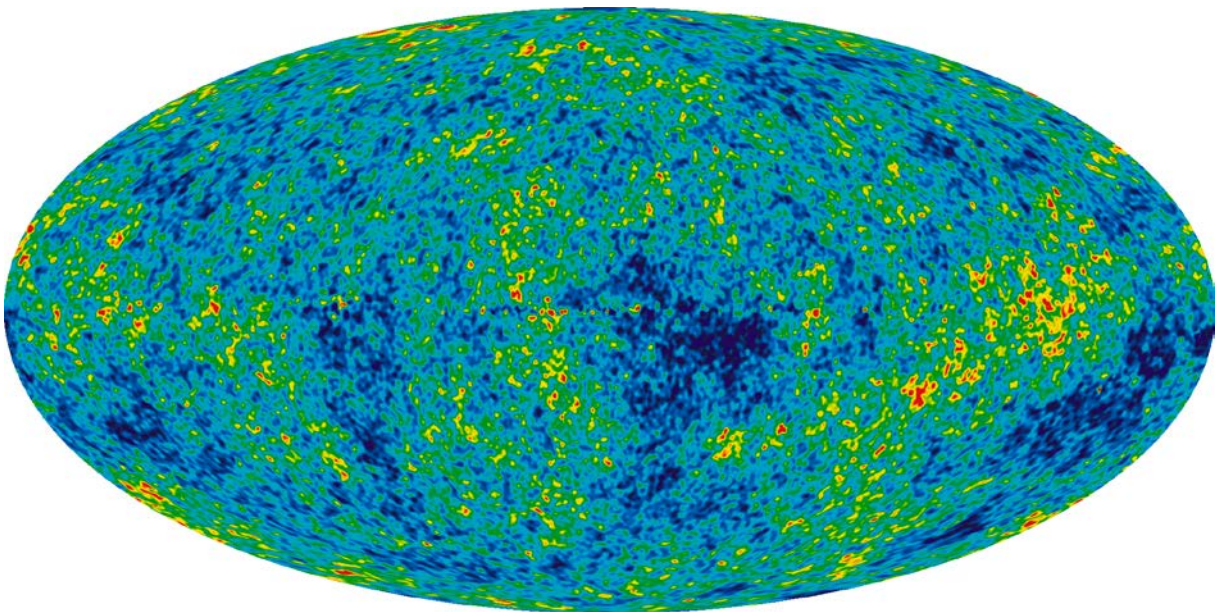
## WMAP : CMB 画像

宇宙背景放射 CMB の画像が見事に映された。しかも、たしかにインフレーション理論で予言された「揺らぎ」が確認され、計測されたという。この揺らぎこそ、銀河がバラついて銀河団などの塊りができた所以（ゆえん）となる。すなわち、太陽系ほどに広がったビッグバン初期の大問題である。宇宙全体の一様性には、小さなうちに一様であることが瞬時に情報として伝わらなければならない。量子論的揺らぎも瞬く間に生じて広がらないと、いまの銀河のバラツキが生じないのである。

それらの分析結果の NASA の報告は、次のとおり。

..... <https://map.gsfc.nasa.gov/news/index.html> .....

### WMAP が最後の2年間のデータで計測結果を改良した



Credit: NASA/WMAP Science Team [冷たい◆～熱い◆]

WMAP 科学チームは、宇宙の年齢だけでなく原子の密度についても、高い確度と精度にまで決定した。原子でないその他の物質の密度や、最初の恒星が輝いたときのエポック、宇宙のデコボコ（バラツキ）、そしてそのデコボコがどのように規模の大きさによってきたか。いわば、ほかの計測がなくて単独で用いられるとき、WMAP の観測は、全部で 68,000 の要因によってこれらの六つの数字情報を改善した。

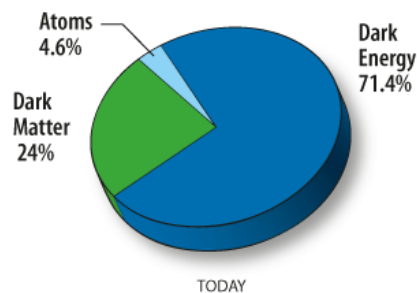
WMAP の「幼児宇宙の写真」は、熱く若い宇宙の晴上りを描いている。たった 37.5 万歳の時であり、137.7 億年経った現在の年齢からするとほんの一時であった時である。この幼児宇宙の画像におけるパターンは、何が初期に起き得たのか、そしてその時期から何十億年の間に何が起きたのかについて限定することに用いられてきた。若い宇宙は熱くて濃密であって、これまで膨張して冷却してきたと断言する、宇宙科学の（間違っただけで名付けられた）ビッグバンの枠組みは、いまや、WMAP によりがっちりと支持されている。

WMAP の観測は、宇宙の一番最初に起きた、ビッグバン枠組みに入れるべき付加事項も支持している。それは「インフレーション」であるが、理論的には、宇宙がドラマティックなほど早期に膨張が進行していたという。

それは、一兆分の一兆分の1秒よりも短い時間に、1兆倍の1兆倍より大きく膨張した。ちいさな揺らぎは、この膨張の間に生じられ、やがて銀河に成長していくものである。

際立つものとして、WMAPの揺らぎに関する特定情報の精細計測は、インフレーションの最も基本的なバージョンについての特定の予言を確認してきた。揺らぎは、天空を横切る特定情報によるベル型曲線のとおりである。それらは、画像の熱いスポットと冷たいスポットの数に等しい。WMAPは、宇宙の大規模なスケールでの密度における変化の振幅も、より小さな規模より若干大きめであるはずという予言を確認した。また、宇宙はユークリッド幾何学の法則に従っている、つまり三角形の内角の和は180度であった。

宇宙は、たった4.6%の原子(バリオン=通常物質)しか含まない。さらに大きい割合:宇宙の24%は、重力はあるが光らない、すなわちダークマターという異種の物質である。現在の宇宙を形成する最大の割合を占める、71%は、宇宙膨張を加速させている反重力の源となる(ときたまダークエネルギーと呼ばれる)ものである。



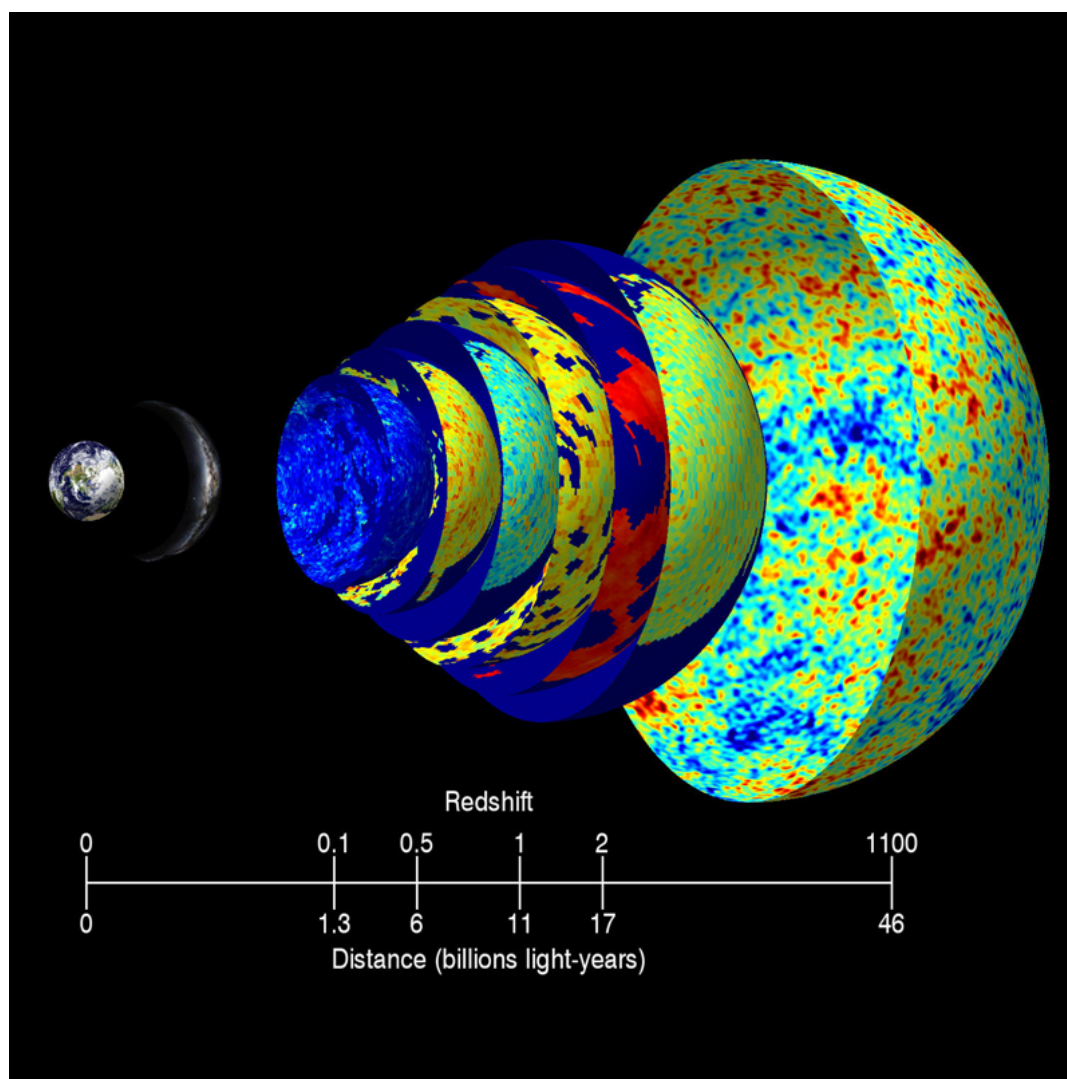
Credit: NASA/WMAP Science Team

WMAPはまた、宇宙が約4億歳だった時代に、最初の恒星が光り出した出来事のタイミングを提供してくれる。やがてのジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡は、その時期の研究のために特別に設計されている。その署名をWMAP観測に付した。

..... <https://map.gsfc.nasa.gov/news/index.html> .....

WMAP 観測 CMB 画像は、全天を見上げた風景であるが、実際は丸まっている。プラネタリウムの天井に貼り付いていると想像するほうがよい。とりあえず紙の上では、その参考絵図は次のようなものが一番であろう。

<https://www.astroarts.co.jp/news/2012/09/18darkenergy/index-j.shtml>



銀河分布とCMBの分布の観測データを殻状に視覚化したもの。右図中、左から右へ行くほど、時間をさかのぼる。より銀河の集まっている密度の高い領域は赤、より密度の低い領域は青で示されている。  
(提供: NASA/BlueEarth; Milky Way: ESO/S. Brunier; CMB: NASA/WMAP)

**物質密度：Ω**

これまで何度か出てきてしまった宇宙の物質密度：オメガΩについては、第二の WMAP ミッションである。

\*\*\*\*\*

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Astro/denpar.html>

**物質密度パラメータ：Ω <和訳:筆者>**

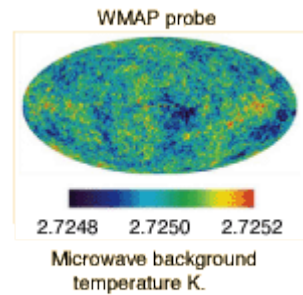
数多の銀河はそれらの赤方偏移によって明らかなように、地球から全方向に向かって遠のいて見える。ハッブルの法則はそれらの拡張を示している。その拡張割合の研究によって、顕著に、宇宙は永遠に膨張していく原因となる臨界密度  $\rho_{critical}$  にかなり近づいていることが明らかになってきている。

密度  $\rho$  は限界条件の基での密度  $\rho_{critical}$  の比で表されるのが常である。すなわち、

$$\text{パラメータ: } \Omega = \rho / \rho_{critical}$$

したがって、 $\Omega = 1$  は臨界密度の条件を表す。

宇宙の膨張はいくつかの方法で究明されてきたが、2003年に完了したWMAPミッションにより確度において大いなる前進が得られ、本文で引用される結果はほとんどがWMAPからである。



$\Omega = \Omega_m + \Omega_{rel} + \Omega_\Lambda$			
①	②	③	④
① 総密度 $\Omega = \rho / \rho_c$ $\Omega = 1$ 臨界密度	② 質量密度 通常物質(バリオン類)、 ダークマター	③ 有効質量密度 相対論的素粒子; 光子、ニュートリノ	④ 有効質量密度 ダークエネルギー (宇宙定数として 記述されるべきもの)

訳者注: バリオン(baryon)とは、3つのクォークから構成される亜原子粒子で、陽子や中性子などを指す。素粒子物理学の標準モデルでは、ハドロンの一種である。重粒子とも言う。

現時点でこれらの量の記号に属数0を付することは一般的な理解手段である。

(属数：0とは多分に「現在」を意味している。: 訳者注)

$\Omega_{m,0}$	現在の質量密度は、WMAPによれば、 $\Omega_{m,0} = 0.27 \pm 0.04.$ しかしながら、通常物質あるいはバリオン物質の推定評価は $0.044 \pm 0.004$ しかなかった。そして、バリオン物質は宇宙全体の物質の $17\%$
----------------	---

	であり、残りがダークマターとして区別された。
$\Omega_{rel,0}$	電磁的エネルギー（光子）とニュートリノにもとづく相対論的素粒子の等価質量密度は、WMAPにより次のとおりと評価されている。 $\Omega_{rel,0} = 0.0000824$ これは、物質の質量比較において、現代では放射を超えて物質質量が圧倒して支配的であることを示している。宇宙の初期には、放射が物質質量とダークエネルギーを超えて支配的であった。
$\Omega_{\Lambda,0}$	ダークエネルギーに帰する宇宙の有効質量の割合、または <b>宇宙定数</b> は次のとおり。 $\Omega_{\Lambda,0} = 0.73 \pm 0.04$ 今の時代における宇宙膨張への影響は73%であり、これでダークエネルギーが膨張における支配的な影響を及ぼしていることがみてとれる。昔のビッグバンの歴史は、最初に放射が圧倒し、それから物質が占めて、今ではダークエネルギーが支配している時代を通過している。

現在の総密度： $\Omega_0$ への寄与を合計すると次のとおりである。

$$\Omega_0 = 1.02 \pm 0.02$$

これは、宇宙が臨界密度パラメータ： $\Omega = 1$ に極めて近いことを示している。

実際に宇宙の臨界密度： $\rho_{c,0}$ は次のように計算される。

$$\rho_{c,0} = 9.47 \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3$$

この臨界密度から、通常物質（バリオン物質）はたったの  
約4%

しかないことが考えられる。このバリオン物質は、宇宙空間で平均して

$$1 \text{ 水素原子} / 4 \text{ m}^3$$

程度の割合に等しい。（だいたい3畳の部屋に1個の陽子：訳者注）

\*\*\*\*\*



【参考】 <http://www.astroarts.co.jp/news/2008/03/17wmap/index-j.shtml>

## WMAP の最新全天マップ公開、宇宙の 10% はニュートリノだった

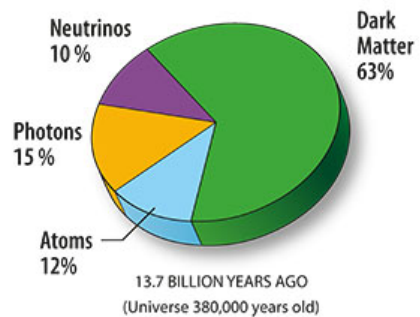
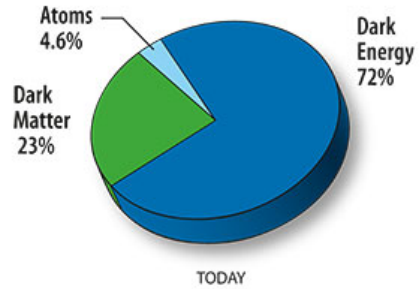
【2008 年 3 月 17 日 [NASA](#)】

NASA はマイクロ波観測衛星 WMAP が 5 年間で得た全天マップの最新版を公開した。宇宙年齢 38 万歳の宇宙では、宇宙ニュートリノが 10% を占めていたことなどが示された。これから仮説の淘汰が進むなど、宇宙論はますます熱くなりそうだ。

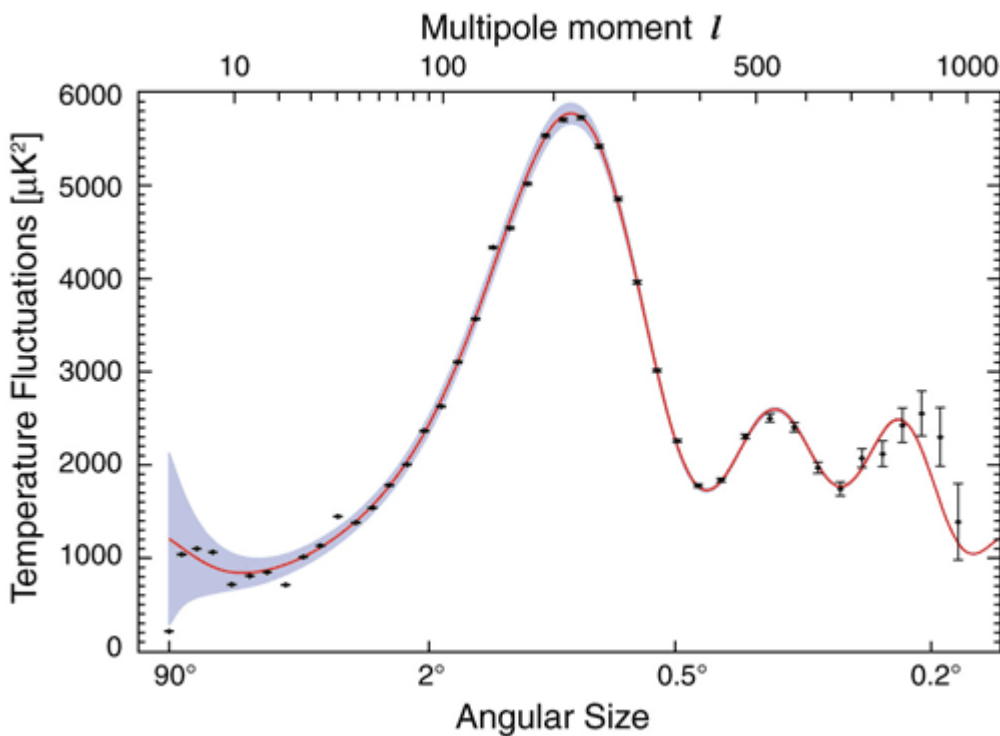
<右図> 宇宙の組成比、上は現在、下は宇宙誕生 38 万年の時点の組成比。

<次図> 温度ゆらぎの空間分布パターンを分析した結果。マップに含まれるまだら模様の大ささ(天球上の離角)と、模様の明るさ(温度変化の極端さ)を表している。第 2 と第 3 のピークは大きな第 1 ピークの倍音にあたる。第 3 のピークは今回のデータからはっきりした。実線は、観測結果に一番近い理論曲線。

Content of the Universe - Pie Chart



<https://map.gsfc.nasa.gov/media/080998/index.html>



WMAP（ウィルキンソン・マイクロ波異方性探査機）が5年間で得た観測データが米国東部時間2008年3月7日に公開された。初期宇宙の密度ゆらぎを反映した全天の温度分布マップが最新版に更新され、研究者の間では最新データにもとづく新たな議論が始まっている。

私たちのもとに到達する宇宙最古の光は、宇宙年齢38万歳（光子が電子に邪魔されずに進めるようになった「宇宙の晴上り」の時点）における温度約3000K（2727℃）の放射であるが、その後の宇宙膨張によって現在では平均2.725K（-270.425℃）の宇宙マイクロ波背景放射として観測される。WMAPは宇宙のあらゆる方向における宇宙マイクロ波背景放射の強度を精密に測定し、方向によるごくわずかな異方性（温度ゆらぎ）をとらえ、「宇宙の晴上り」の時点における宇宙の姿を明らかにしてきた。3年間分の観測データからは、宇宙年齢が137億歳と精度良く求まった。NASAは、今回新たに公開された5年間分の観測データから、少なくとも3つの新しい知見がもたらされるとしている。

一つ目は、宇宙年齢38万歳の時点において、宇宙ニュートリノが宇宙の組成の10%を占めていたということだ。当時の宇宙の組成はこの他に、原子12%、光子15%、ダークマター（暗黒物質）63%だったということが示された。

温度ゆらぎの空間分布パターンは、宇宙の幾何学的性質、宇宙の組成、密度ゆらぎの初期分布などを反映したものであり、宇宙論パラメータの観測的な証拠となるものだ。パターンを分析すると、楽器の弦をはじいたときのように、初期の宇宙に「固有の音階」が強くこだましていることがわかっている。5年間分のデータからは、初めてその第3倍音にあたるピークがはっきりととらえられた。このことは、初期宇宙の宇宙ニュートリノに関する情報をもたらしている。

二つ目の知見は、宇宙の暗黒時代が終わった時期が示唆されることだ。電子が自由を奪われ光子が直進できるようになった「宇宙の晴上り」の時点から、宇宙最初の世代の星が誕生しその放射により周囲の原子から電子が再び自由になって「宇宙の霧」となるまでには、4～5億年はかかったようだ。

三つ目は、急激な加速膨張で宇宙の平坦性などを説明するインフレーション宇宙モデルに関して、今回のデータから制約条件を課すことができるということだ。現在仮説として乱立しているさまざまな理論は淘汰が進み、今後整理されていくことになりそうだ。

WMAPの観測データは、現在の宇宙の大半を占めているダークマターやダークエネルギーの正体を解き明かす上で貴重な鍵となる。宇宙はどのように生まれそして現在の姿になったのか。人類による宇宙最大の謎解きはこれからも続いていく。

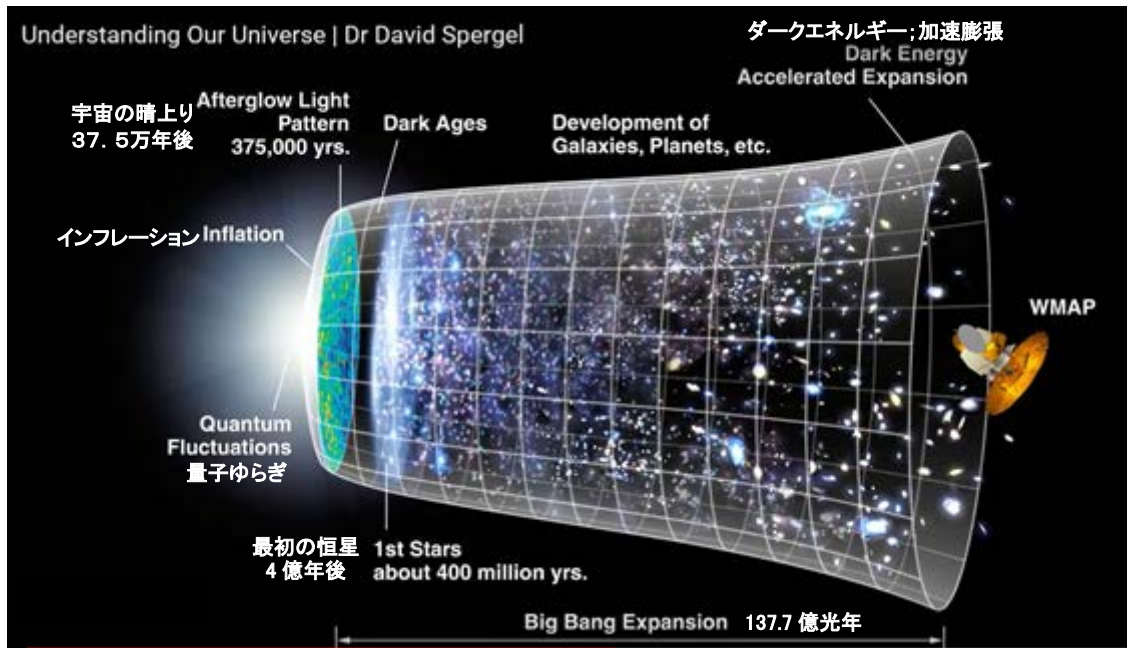
（補足）K（ケルビン）は絶対温度の単位。摂氏温度に約273.15を加えた数値になる。

## ビッグバン宇宙像

これまでに掲げたビッグバン宇宙にまつわるいろいろな説をまとめると、次図のようである。デーヴィッド・スパーゲルによって模式図にされたものである。

左端のインフレーションから始まり、ビッグバン膨張時代を経て晴上り CMB が放射され、定速膨張からいつのまにか80億年前ごろに加速膨張ステージに移り、現在に至る。最後の曲線は少し跳ね上がっているのが判る。

これまで掲げたビッグバンの拡がりのグラフの曲線が、ちょうど次画像の包絡線と似たような感覚が得られよう。

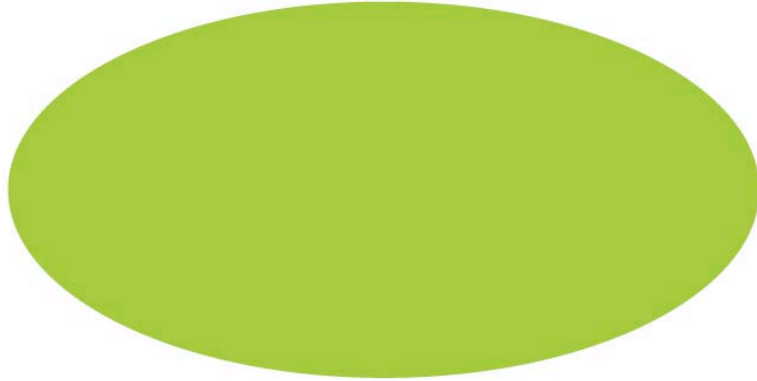


[https://wn.com/david\\_spergel](https://wn.com/david_spergel)

宇宙背景放射：CMB 画像の歴史

1965年  
ペンジアス&ウィルソン  
の観測

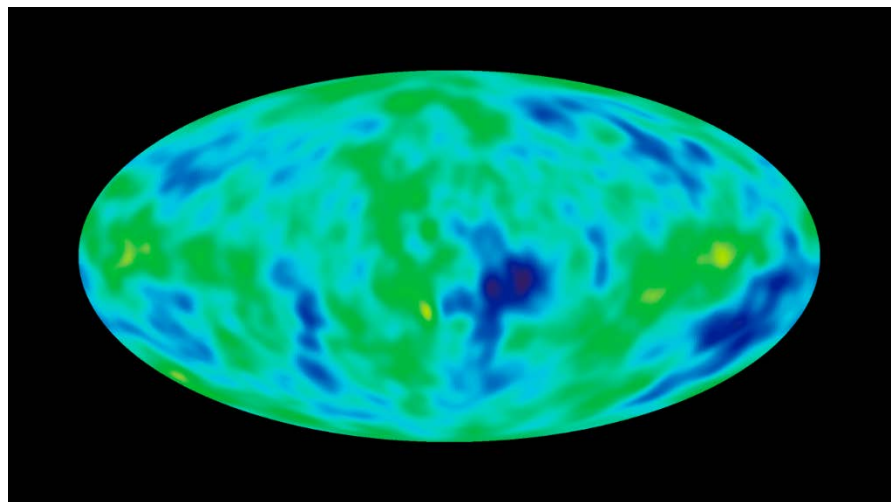
**ISOTROPY OF THE COSMIC  
MICROWAVE BACKGROUND**



MAP990004

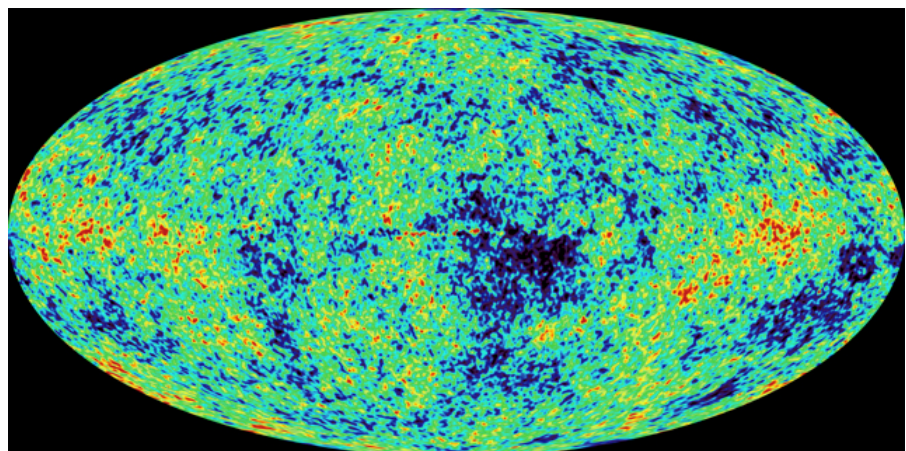
<https://map.gsfc.nasa.gov/media/ContentMedia/990004b.jpg>

2001年  
COBE の観測  
(精度: 1~10万分の1)



<https://wmap.gsfc.nasa.gov/media/030653/index.html>

2010年  
WMAP の観測  
(精度: 10~100万分の1)



<https://wmap.gsfc.nasa.gov/media/030653/index.html>

## 数理解析：パワースペクトル

参考：小松英一郎・川端裕人「宇宙の始まり、そして終わり」

「」内は小松英一郎氏の談話引用。

### インフレーションの名残り

「宇宙が始まってすぐにインフレーションがあって、その最中に生み出された揺らぎによる衝撃が音波として広がっていった。インフレーションの最中には揺らぎが作り続けられており、一撃だけでカーンと打ったようなイメージではなく、実はカンカン、カンカンと何度も起きた。インフレーションが終わったあとも、それが流体の中の音波として響き続けて、38万年後の最後の瞬間の状態を保存しているのが宇宙背景放射というわけである。」

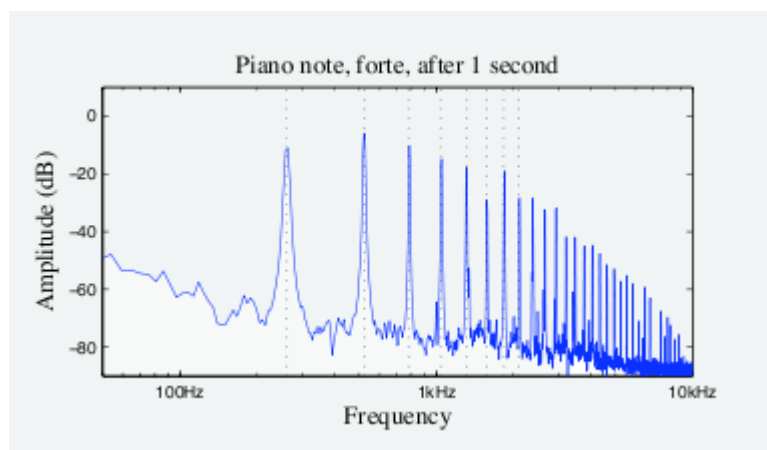
「たとえば、味噌汁に刻んだ豆腐をバンバン落としまくって後から後から波が来て、しかも、味噌汁の器自体がインフレーションでどんどん大きくなっていく。それが、その頃の宇宙の描像である。インフレーション初期に落とした豆腐が作った波は、器＝宇宙が膨張するのと一緒にすごく広がって大きな角度で見える。インフレーション後期に落とした豆腐でできた波は、それに比べると小さく見える。」

「インフレーションの最中に量子揺らぎが何度も起きて音波のもとになって、それが引き延ばされて宇宙に響いていた。最初のころにできた量子揺らぎは大きな波長として観測され、後にできた量子揺らぎは小さな波長として観測される。様々な波長の音波が重なり合って、青の模様を作っている。」

### パワースペクトル

「そこで出てくるのがパワースペクトルである。これも特別なことではない。テキサス大学の音響学のセミナーで、WMAPのCMB画像を見せたら即座にスペクトル解析という答えが返ってきた。」

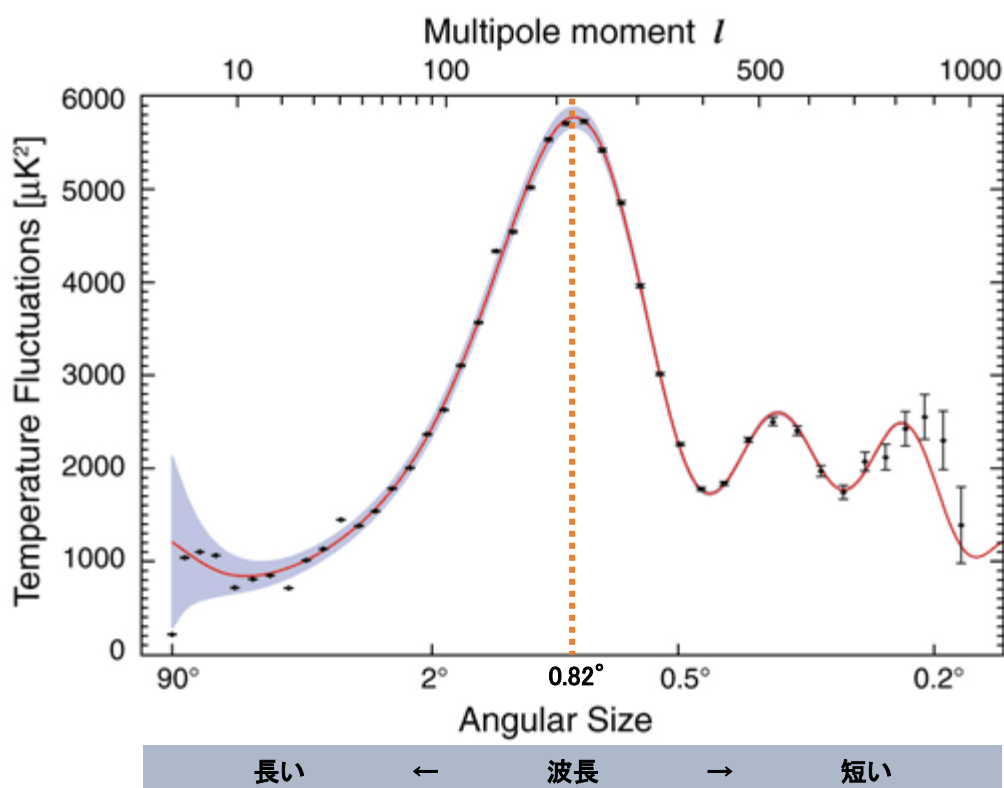
ちなみに、ピアノの音一つを周波数アナライザーにかけた画像の一例は次のとおり。いろんな周波数が並んでいる。高域にいくほど倍音が重なってくる。



<http://www.met-lab.org/magnetic-resonator-piano/>



WMAP の CMB 画像を解析すると次のようなパワースペクトル（再掲）が現れた。



「マルチポール・モーメント： $l$  とは、天球上にある 2 点間の見込み角度（我々から見た視直径）を  $\theta$  として、 $l = 180^\circ / \theta$  に相当するもの。下部の見込み角度の表示があるので、それを見た方が物理学的な意味が、直感的に解りやすい。」

WMAP の分解能は 0.2 度が限界である。そういえば、COBE が 7 度だから上図のようなスペクトルは描けない。

そして、この『見込み角度』は波長に対応するという。

「実は、90 年代の COBE は見込み角度にして 7 度角以上に存在する構造を検出した。WMAP は一気に 0.2 度角の分解能で見えるようになった。この分解能のおかげで、見込み角度にして 1 度のところ、もう少し正確には 0.82 度 ( $\theta$ ) にある最初のピークが見えているのが判るであろう。」

縦軸は、温度ゆらぎの強度、実際は、 $\mu\text{K}$ （百万分の 1 K：ケルビン）の 2 乗である。

## 宇宙年齢の決め方

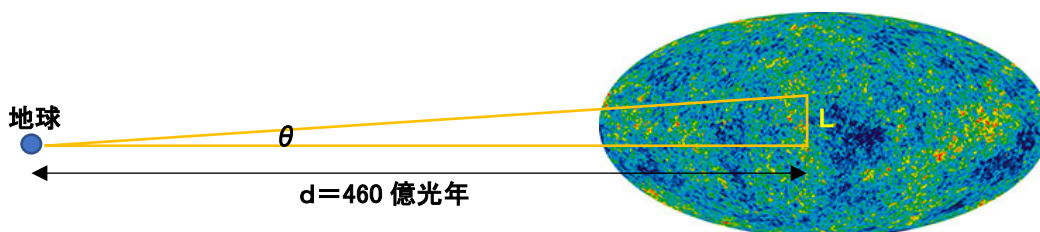
「宇宙の年齢を計算するために、まず距離を測った。これまで天文学的な観測で宇宙の年齢は、100億年の桁だろうと言われてきた。WMAPの9年間の観測データから割り出した宇宙年齢は、137.4億年で、誤差は1億年。これはすごい精度なのだが、従来の天文学とは違うアプローチをしたから出来た。従来は、古い星や古い銀河を見つけて、そこから宇宙年齢を推定してきた。一方、WMAPでは宇宙背景放射が放たれてから、現在までに光が旅した距離を測ったのだ。その距離を光が旅する時間を求めればおのずと宇宙の年齢になる。」

パワースペクトルに基づいてコスミック三角法を適用した。

「宇宙の晴上りまで38万年間、流体中を音波が響いていた。この流体の中の音速は、光速の $\sqrt{3}$ 分の1くらい(約58%)なので、インフレーションのときにできた量子揺らぎのさざ波が、38万年間に伝わった距離が求まる。これは既知の量、大文字のLとする。

一方、我々が観測できるのは見込み角度： $\theta$ である。Lに対する見込み角度というのが、パワースペクトルのピークに相当する。だから、見込み角度 $\theta$ も既知となる。」

これらの論理的過程で、CBMまでの距離dが**460億光年**と計算できた。



$\theta$ は、パワースペクトルの第1ピークの0.82度である。次に、Lの値の求め方は、詳しく説明されていないが、かなりのノウハウがあるものと想定されるので、特許権あるいは知的所有権として確保されているのではないだろうか。

「宇宙が膨張しているせいで、光が旅した距離は[光速×宇宙年齢:d]よりも大きくなっている。どれくらい大きいかは宇宙にある物質や放射光の密度で変わってくる。現在の我々の宇宙では3倍よりも少し大きい。」

この話により、宇宙年齢の計算式は次のようになる。

$$\text{宇宙年齢} = [\text{d:460億光年}] / [\text{光速:}3 \times 10^8 \text{m}] / [\text{宇宙膨張の効果:0.89}]$$

\* 宇宙膨張の効果の値は137億年から逆算したもの：筆者註

「実は一つ目のピークだけでなく、他のピークも使えばもっと精度が良くなる。WMAPの1年目は第1ピークだけを使って宇宙の年齢を134億年と算出した。誤差も $\pm 3$ 億年。その後、データが集積されて他のピークの値も使えるようになって、7年目の時点で**137 $\pm$ 1**億年。2013年にPLANCK探査機が出したデータでは、9個ぐらいピークを使ってびしっと決めて、138億年ということになった。2015年の結果では、**138.1 $\pm$ 0.4**億年となった。」

## 宇宙の物質組成の算定

物質の組成とは、既に WMAP 成果として掲げてきたもの（右図）である。

「これもパワースペクトルを見ることで解る。宇宙背景放射の揺らぎの情報は、これでほぼ尽くされている。この宇宙の既知の物質（バリオン）の質量密度は、1番目と2番目のピークの高さの比から判る。正確には、奇数番目と偶数番目の比。そして全物質（バリオン+ダークマター）の質量密度は1番目と他のピークの高さの比から求められる。その差をとれば暗黒物質の質量密度。」

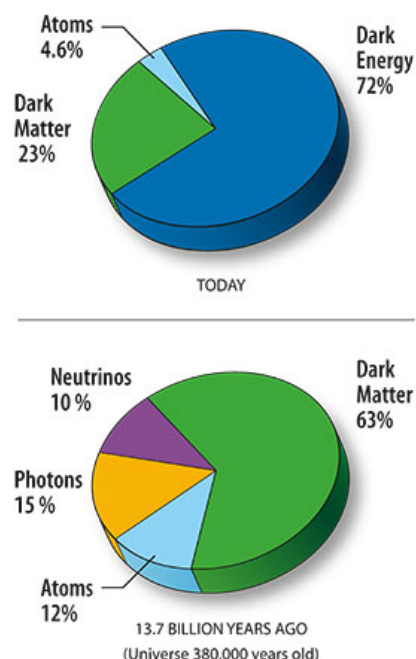
「宇宙背景放射のさざ波は、実はコサイン波である。これだけでは、パワースペクトルには似ていない。でも、音波の性質で変わってくる。粗密波、伝搬媒体の密度が高くなったり低くなったりして伝わる。つまり、さざ波の振幅ごとに密度の高低が生まれる。

こういう単純な振動は、高校ではバネの振動として勉強する。バリオンがあるとバネに余分な錘がついていると想定する。物質が密になると質量が集まる。その辺りでは重力ポテンシャルが深いことになる。そこにバリオンの重みで光-バリオン流体がより引き込まれる。結果として、密の部分では波の振幅が大きくなる方向に引っ張られる。疎の方はそんなに影響を受けない。」

コサインの2乗でマイナスがなくなってパワーは決まる。コサインの密な部分が重くなると下方に沈む。これが2乗すると奇数振幅が高く、偶数振幅が低く変化する。単純な類推であるが、実際は全体的に右方に減衰し、かつ、いろんな周波数が混ざっている。

「そう、パワースペクトルがもともとコサイン波というのはそういうことである。だから、パワースペクトルの奇数番目のピークと偶数番目のピークに差が出てくる。奇数番目のピークで、光-バリオンの流体が重力ポテンシャルに引きずりこまれるが、偶数番目にはその影響がない。それらを比べるとバリオン密度が推定できる。」

宇宙の物質組成(再掲)



## ダークマターの割合

「全物質（バリオン+ダークマター）の質量密度が、パワースペクトルの1番目と他の山の高さの比から求められる。バリオン密度が解かったから、それとの差が暗黒物質の質量密度となる。

宇宙の年齢は単純に宇宙の幾何学であり、バリオンの影響は古典的な流体力学で理解できる。ダークマターは重力を通してのみバリオンや放射光と相互作用するので、結局、一般相対性理論（重力理論）を用いて理解しなければならない。一応、次のように式で書くと温度揺らぎが時間とともにどう変化していくか示すもの。」

$$\delta = 2 \int dt (\partial \Psi / \partial t) / e^{\tau}$$

$\delta$  : 温度揺らぎ

$\Psi$  : 重力ポテンシャル

$\tau$  : トムソン散乱の光学的厚さ（電子が光を散乱する割合）

### 【 $\tau$ （タウ）は、トムソン散乱の光学的厚さ】

宇宙最初の頃は、光は次から次へと電子にぶつかって飛び出せない。この状態を「散乱が大きい」つまり光学的に厚いという。ビッグバン宇宙が晴れ上がると光は電子にぶつからず、「散乱が小さく」なる。晴上り前、 $\tau$ は大きく、晴上り時点で $\tau$ は1に近づく。晴上りの後、 $\tau$ は小さくなり、晴れ上がってしまえばほぼゼロになる。

この式での役割は、 $1 / e^{\tau}$ の中に組み込まれている。 $\tau$ は基本的に時間とともに小さくなるので、 $1 / e^{\tau}$ は時間がたつほど大きくなる。これがそのまま温度揺らぎ $\delta$ を大きくする。

### 【重力井戸の深さ： $\Psi$ （プサイ）】

暗黒物質でも、通常物質でも集まると深くなる。

$\partial \Psi / \partial t$ という時間変化を表す式の中に出てくる。重力井戸の深さが時間変化して温度揺らぎに寄与する。前のコサイン波に錘をつける効果をもたらした。ダークマターは光とも作用しないから、一緒に流体となって運動することもない。なお、この $\Psi$ は通常物質も合わさるので、「全物質による重力井戸の深さ」となる。

「宇宙が超高温で平衡状態にあった初期、放射エネルギーはビッグバン宇宙のエネルギー密度の大半を担っていた。それが放射優勢の時期という。その時期に、暗黒物質と通常物質が散らばり、重力ポテンシャルも浅く小さくなっていくので時間的に変化する。後々、膨張して冷えると放射優勢から物質優勢かになって、バラバラになった暗黒物質が集まりだし、揺らぎが成長する。重力ポテンシャルが深まる場所が出てくる。膨張と釣り合うと、重力ポテンシャルの時間変化が温度揺らぎに影響しなくなる。」

そもそも、 $E = mc^2$ のとおり、宇宙には基本的にはエネルギーの在り方が二種類あって、放射光か物質であるかである。宇宙初期は放射優勢で、現在は物質優勢と言える。

【宇宙の組成が判明】

1 番目のピークと他のピークの高さの比から、求められる暗黒物質を含む全物質の密度は、現在の宇宙の 27%であった。WMAP が割り出したバリオン密度は 4%なので、残る 23%がダークマターとなる。

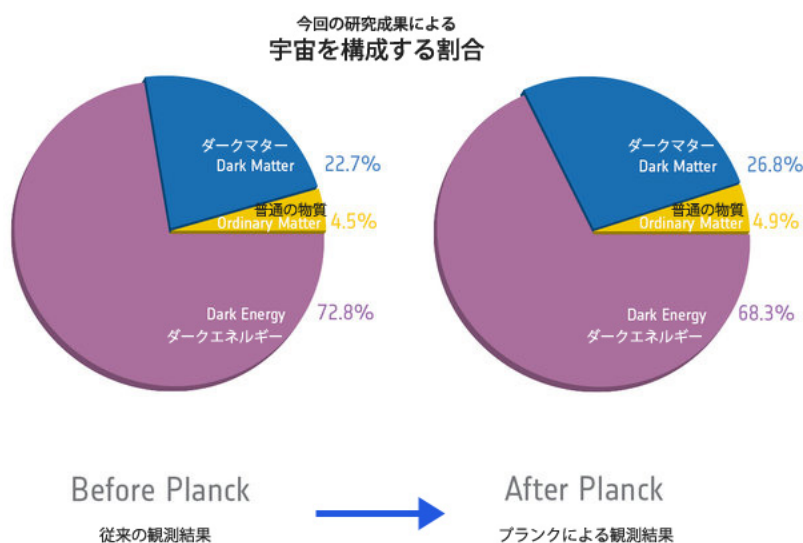
「バリオンと暗黒物質が分れば残りは暗黒エネルギーとなる。ただし、物質以外の何かがこの宇宙を満たしていることを、それを暗黒エネルギーと呼んでいる。」

WMAP 観測とデータ解析の結果として、次のような組成比率になった。

		PLANCK : 2013
通常物質	5%	4.9%
ダークマター	27%	26.8%
ダークエネルギー	68%	68.3%

なお、これらの値は WMAP の観測から得られたものであるが、そのデータの集積と分析の推移で変化している、最新は、下図のとおり PLANCK 衛星の観測データが精度を上げてきている。

<http://www.astroarts.co.jp/news/2013/03/22planck/index-j.shtml>





### 【ハッブル定数】

「ハッブル宇宙望遠鏡のキープロジェクトが既にある、その測定が当時は一番信頼できるものとされてきた。

$$H_0 = 72 \pm 8 \text{ km/s/Mpc}$$

という見事な測定であった。

WMAP では、やはりパワースペクトルから割り出して、

$$H_0 = 70 \pm 2 \text{ km/s/Mpc.}$$

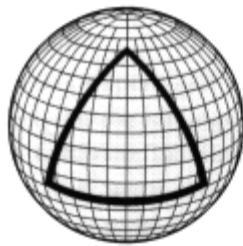
全く違う方法を使っているのに、けっこうなクロスチェックになっている。数値と同じく誤差も減らしている。」

### 【宇宙の平坦性】

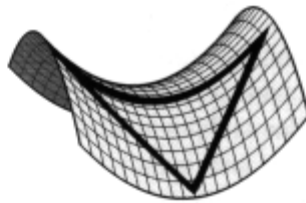
これもパワースペクトルから求められる。

「宇宙の曲率は宇宙のエネルギー密度にかかわる問題なので、密度パラメータ  $\Omega$  という量で表すが、 $\Omega = 1$  が平坦な宇宙である。光の軌跡を使って宇宙に壮大な三角形を描くことを想像してみる。平坦な宇宙では、中学校で習った幾何のように三角形の内角の和が 180 度になる。平坦でなければ違ってくる。

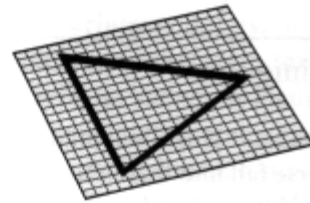
でも、もし空間が球のように正の曲率をもっていれば、光はちょうど地球を回る飛行機のように膨らんだ曲線を描いて飛ぶ。三角形の内角の和は 180 度を超える。逆に、馬の鞍のように負の曲率を持たれば、引き締まった軌跡になって三角形の内角の和は 180 度より小さくなる。」



Positive Curvature



Negative Curvature



Flat Curvature

WMAP の 9 年間の観測データから、 $\Omega = 1.003 \pm 0.004$  と高精度の結果が得られた。

「実は、ビッグバン理論では説明できない課題の一つだった。 $\Omega$  が 1 より大きすぎると、宇宙が始まったらすぐ潰れてしまい、1 より小さいと速く膨張して星や銀河もできる余地がないという問題である。宇宙は平坦でなければ、そもそも長続きしないということで、許される幅が狭い。なぜ、宇宙はこんなふうによくできているのか、ファイン・チューニング問題、微調整問題とかいう。インフレーション理論が本当なら解決できる。宇宙の始まりの時点でどんな空間の曲率を持っていたとしても、インフレーションで引き延ばされてしまえば、限りなく平坦になってしまうから。」

## エピソード

数字とは便利で厄介なものである。私たちの生活においては、メートルという長さの数字のおかげで助かっている。それに基づいて重さや時間が定義され、物理学的には MKS 単位系という。すなわち、メートル、キログラム、セコンド（秒）の三つで熱量や光度などの単位も導かれるようだ。

一方、この広い宇宙は、138億光年の彼方から始まった。その大きさは膨張しているから460億光年もあるという。メートルで表現するとおおむね $10^{26}$ mとなる。これでは余計に見当がつかない。インフレーション宇宙創成は、微小な点から始まったらしい。その小ささは $10^{-35}$ mというプランク長の単位でしか見積もれない。陽子のサイズは $10^{-15}$ mだから、とんでもないマイクロな点から始まった。「点とは部分が無いものを言う。」と定義したのは、ユークリッドであるが、小さな点にさらに微かな点があるとは気付かなかったのであろうか。でも、数学はその点があるから記述できており、位置も線も面積も体積も順次、計算できる。太陽を公転する地球は、運動方程式においては「質量を持った点」として扱われ、見事に地球の軌道を線の楕円として描くことができることは、さらに驚嘆する。半径約6,400kmもある地球も、その百倍ほどの太陽も方程式においては「部分が無い点」で扱われながら、計算結果は正確きわまりない。

こんなことに拘るのは、物凄い宇宙の広さと微小な点みたいな量子が、いつのまにか、ビッグバンひいてはインフレーション宇宙論において合流してしまうからである。ブラックホールにおいても同じようなことが言えるであろう。私は、量子論が苦手というか興味が薄い。アインシュタインは死ぬまで譲らなかったが、だから、宇宙に対しては余計に親密感を抱いてきたのに、あらゆる要所で量子論とか素粒子論を引用して言及せざるを得なかった。興味は実感を蓄える。だから、素人として感覚的に語るとしてもオブジェクト（素材）が多くないので、傍聴者や読者に理解が余り浸透しなかったかもしれない。

しかしながら、この広い宇宙はあの細かい素粒子を扱わないと拒否してくる。ところが、数学においては、マクロもマイクロも関係ない。それを認知しながらも私たちは忘れてしまう。だから、今回の私の宇宙探索は、それが私自身を洗いなおしてくれたものと思っている。同じようなことが、現代の宇宙物理学者や素粒子論研究者にも片棒かついだために起きているにちがいない。つまりアインシュタインのような我儘はもう許されないのである。

今回は最終回になるが、そんな愛すべき「許されざる天才」について述べたい。NHKの「ダーウィンが来た」における“ヒゲ爺”のごとく、彼は宇宙のエポック・メイキングな話題の随所に現れてくる。しかしながら、彼の相対論構築に至る、彼の観察眼や発想をスキップしてきてしまった。いや、そうせざるを得なかったから、彼の人間離れした発想の機微を語って私なりに理解している「なるほど」感を披露すべきと思う。そうすれば、この広い宇宙いっぱいの謎についての理解がさらに行き届くであろう。

別当 勉

<betobetoven@mail2.accsnet.ne.jp>

<参考図書等>

No.	題名	著者	発行元
1	宇宙創成(上下)	サイモン・シン(青木薫訳)	新潮社
2	宇宙の始まり、そして終わり	小松英一郎、川端裕人	日本経済新聞出版社
3	宇宙「96%の謎」	佐藤勝彦	角川文庫
4	アインシュタインの宇宙	佐藤勝彦	角川文庫
5	アインシュタインを超える	ミチオ・カク、ジェニファー・トンブソン (久志本克己訳)	ブルーバックス
6	20世紀物理はアインシュタインとともに	中村誠太郎	ブルーバックス
7	現代の宇宙像	佐藤文隆	講談社
8	量子宇宙をのぞく	佐藤文隆	ブルーバックス
9	ビッグバン 宇宙からのこだま	マイケル・レモニック(木幡尙士)	日本評論社
10	繰り返される宇宙	マーチン・ボジョワルド	白揚社
11	宇宙の始まりと終わり	スティーヴン・ホーキング	青志社
12	ホーキング、宇宙を語る	スティーヴン・ホーキング	早川書房
13	宇宙への秘密の鍵	ルーシー&スティーヴン・ホーキング	岩崎書店

<放送コンテンツ>

101	コスミック・フロント next 「ダークエネルギー」	NHK-BSプレミアム 2017.5.18	NHK
102	宇宙とその進化 第9～14回	放送大学専門科目 2016.12～2017.1	放送大学

<インターネット・サイト>

201	宇宙に存在する元素の起源 -ビッグバン元素合成 <a href="http://astrog.phys.kyushu-u.ac.jp/index.php/">http://astrog.phys.kyushu-u.ac.jp/index.php/</a>		
202	アンテナ雑音温度を超える信号(4.08GHz)の計測(ペンジアス&ウィルソン) <a href="http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-iarticle_query?1965ApJ...142..419P&amp;data_type=PDF_HIGH&amp;whole_paper=YES&amp;type=PRINTER&amp;filetype=.pdf">http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-iarticle_query?1965ApJ...142..419P&amp;data_type=PDF_HIGH&amp;whole_paper=YES&amp;type=PRINTER&amp;filetype=.pdf</a>		
203	物質密度パラメータ: $\Omega$ <a href="http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Astro/denpar.html">http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Astro/denpar.html</a>		