

# 星ナビ

3 2018  
March

www.hoshinavi.com

## CONTENTS



### ■今月の表紙

コンパクト赤道儀で星空を撮る  
撮影/北山輝泰  
モデル/松浦かほる  
2017年12月9日22時44分  
Canon EOS6D TAMRON SP 15-30mm F2.8  
Di VC USD A012 ISO6400 18mm f2.8 4秒  
千葉県九十九里浜にて  
コンパクト赤道儀特集ということで、背景に北極星を配置するようにしたいと考えましたが、限られた時間とライティングの兼ね合いで、なかなかうまくいかず苦労しました。

### ■広告さくいん

コニカミニoltaプラネタリウム/表2  
高橋製作所/6  
ユーシートレード/55  
宇宙に命はあるのか/56  
シュミット/58  
ジズコ/60  
中央光学/62  
三菱光学館/70  
アイベル/74~75  
笠井トレーディング/78~83  
ピクセン/112~表3  
五藤光学研究所/表4  
AstroArtsのムック・ソフト/10、20、72、88  
AstroArtsオンラインショップ/84~87

星ナビ2018年3月号  
2018年2月5日発行・発売

## 宇宙の地平線の向こうに

14 ~HORIZONを越えて~

小松英一郎

Vol.3 「ゆらぎ」の正体と原始重力波

新連載 Deepな天体写真 分子雲1

30 分子雲の晴れ間から永遠が見えている

三本松尚雄

# コンパクト赤道儀で 星を撮る

北山輝泰

4機種まとめて比較検討

- ナノ・トラッカー ■
- ECH-630 ■
- ポラリエ ■
- スカイメモT ■

36

撮影/北山輝泰

50 今月の視天 星のウインクにチャレンジ!

3月に好条件の「小惑星による恒星食」×2本 早水 勉

### News Watch

4 お寺で宇宙を見せる「プラネターリウム銀河座」4Kリニューアル 高野美南海

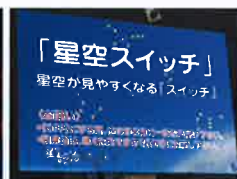
7 ネットでつながる「クラウド天文学」がタビーの星の謎を解く 中野太郎



銀河座4Kリニューアル (p.4)



宇宙の「ゆらぎ」に迫る (p.14)



温泉で星空スイッチON! (p.71)



イプシロンのロケット雲 (p.98)

天体写真の世界 宇宙は美しい 吉田隆行	2	天文台マダムがゆく 梅本真由美	71
NEWS CLIP 石川勝也	8	Observer's NAVI	
由女のゆるゆる星空レポ 星の召すまま	11	●新天体・太陽系小天体 吉本勝己	73
ビジュアル天体図鑑 沼澤茂美+脇屋奈々代	12	金井三男のこだわり天文夜話	76
3月の星空 弘田澄人	21	星ナビひろば	89
3月の月と惑星の動き	24	●ネットよ今夜もありがとう	90
3月の天文現象カレンダー	26	●会誌・会報紹介	93
3月の注目 あさだ考房	27	●やみくも天文同好会 藤井龍二	94
新着情報	54	●飲み星食い月す kay	94
月刊ほんナビ 原 智子	57	ギャラリー応募用紙/投稿案内	95
三鷹の森 渡部潤一	59	バックナンバー・定期購読のご案内/編集後記	96
アクアマリンの誌上演奏会 ミマス	61	オンラインショップ連動 買う買う大作戦	97
ブラック星博士のB級天文学研究室	63	KAGAYA通信	98
天文・宇宙イベント情報 パオナビ	64	星ナビギャラリー	100
天文学とプラネタリウム 高梨直絢&平松正顕	65	銀ノ星 四光子の記憶 飯島 裕	110

# 宇宙の地平線の 向こうに～HORIZONを越えて～

小松英一郎 (こまつ えいいちろう)

1974年、兵庫県宝塚市に生まれる。東北大学大学院理学研究科天文学専攻修士。理学博士。小学校5年生の時、図鑑で見たM42の天体写真に魅せられ天文学者を志す。著書に「宇宙の始まり、そして終わり」(川端裕人共著 日本経済新聞出版社)がある。WMAP科学チームのメンバーとして「2018年基礎物理ブレークスルー賞」を受賞。

## Vol.3 「ゆらぎ」の正体と原始重力波

最新の天文学で宇宙の始まりを解き明かす連載も最終回となりました。

Vol.1で、宇宙の始まりの光が「宇宙背景放射」として

今でも地球に届いていることを解説し、

Vol.2ではその光の分布の偏りが、銀河・太陽系・地球・生命…

それらすべてのもととなった「物質のゆらぎ」の存在を示していることを解説しました。

最終回では、その根源的な物質のゆらぎがどこからやってきたのか、

その究極の謎に肉薄します。

解説 ● 小松英一郎 (ドイツ マックス・プランク宇宙物理学研究所所長)

協力・画像制作 ● 有限会社ライブ 上坂浩光

宇宙の地平線…

観測の限界を理論で越える

シミュレーションにより再現した現在から過去へと続く宇宙。それを遮るのは、宇宙背景放射の壁だ。この壁を越えて過去にたどり着くことこそ、宇宙誕生の謎に迫ることに他ならない。そして宇宙論の研究は、正にその壁を越えようとしている。

## 不均一な物質が私たちを作った

私たちは、どこから来たのでしょうか？

138億年前、宇宙は灼熱の火の玉でした。その後、宇宙空間の膨張によって冷えましたが、当時の光は今も地球に降り注いでいます。「火の玉宇宙の残光」や「宇宙の始まりの光」とも呼ばれる、この「宇宙背景放射」の光の強度は、望遠鏡を向ける方向によってわずかに異なります。なぜなら138億年前に光を放った物質の分布は均一ではなく、場所によって量が少しずつ違ったからです。この物質分布の不均一性は途方もない時間をかけて、後に銀河、星、惑星、そして私たちを作りました。

と、僕はまるで見てきたように語りますが、これは天文学者の空想ではなく、何十年もかけて得た緻密な観測データの蓄積と、物理学の法則に基づいて得られた、揺るぎない結論です。

どこにどの銀河ができるかは、宇宙が始まってまもなく、すでに決められていたのです。さらに言えば、どこに太陽ができるか、どこに地球ができるか、そしてそこに生命が誕生することも、すでに決められていたことになりました。

「は？(なに)か、何を言っているの？」と思われた方は、正常です。こんな途方もない結論を、すぐに信じてはいけません。私たち天文学者ができることは、地道に観測データを積み重ね、全てを疑ってかかり、時間をかけて結論を導き、論文を発表し、私たちの研究を支えてくれる皆様にそれを届けることです。僕が言えるのは、この結論は、30年以上にわたって積み重ねられた研究がたどり着いた答えだということです。

僕たちの測定から得られた宇宙の始まりの物質分布を初期条件として、コンピューターを用いて物質分布の発展を計算すれば、どこにどのような銀河ができるかを予測することはできます。そしてそれは、実際に観測された銀河分布と良く一致します。

さらっと言いましたが、これってすごくないですか？ すごすぎるかもしれないので、誤解を招かないように正確に説明させていただきます。現在地球に降り注ぐ宇宙背景放射

は、非常に遠くで138億年前に放たれた光です。その光の強度の不均一性を用いれば、現在地球から遠く離れた場所にどのような銀河ができるかを予測できます。一方、宇宙には特別な場所や方向はないので、地球からはるか遠く離れた場所も地球の周辺も、似たような性質を持つと考えられます。となると、私たちが望遠鏡で観測する銀河の場所や種類を個々に予想することはできないけれど、「どの種類の銀河がどのように密集しているか」などの一般的な統計的分布は、宇宙背景放射の測定データから予測できます。そしてそれは、実際に観測された銀河の統計的分布と驚くほど良く一致するのです。

しかし、だからといって天文学者は、明日の地球の天気を正確に予測することはできません。銀河の分布を予測する以上のこと、例えばどの星の周りにどのような惑星ができるかの予測を行うには莫大な計算量を必要とするため、現在のコンピューターの性能では無理なのです。地球の将来の予測となるとなおさら無理です。ですので、天文学者は、地球の究極的な起源を突き止めることはできませんでしたが、その将来を正確に予測することはできないので、安心(?)してください。

## 「ゆらぎ」の正体

さて、私たちの起源が138億年前にあった物質分布の不均一性・偏りであるなら、その偏りはどこから来たのでしょうか？

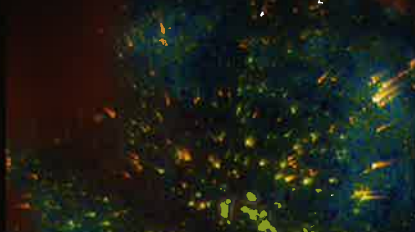
この問いは、現在の宇宙研究の最先端です。大切な問いなので、まずは問いそのものを正確にしましょう。灼熱の火の玉宇宙では、光は電子に頻りに散乱されてまっすぐ進めませんでした。太陽の中心が直接見えないと同様に、この時の宇宙の姿は光では直接見えません。宇宙空間が膨張して火の玉の密度と温度が下がり、絶対温度で約3000度ケルビンになると、今まで光を散乱していた電子は陽子やヘリウム原子核に捕獲され、光はまっすぐ進めるようになります。すると、宇宙は霧が晴れ上がったように、遠くまで見通せるようになります。

宇宙が始まってから、この「宇宙の晴れ

宇宙の始まりは高温高压で火の玉のようだった。



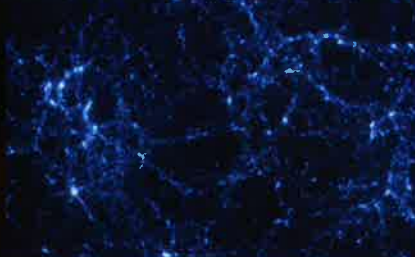
膨張により光が直進できるようになった時の光、それが宇宙背景放射だ。



そこに現れたムラを核にして、水素やヘリウムガスが集まっていく。



そしてそのガスから銀河や星が生まれた。



太陽もそうして生まれた星のひとつ。

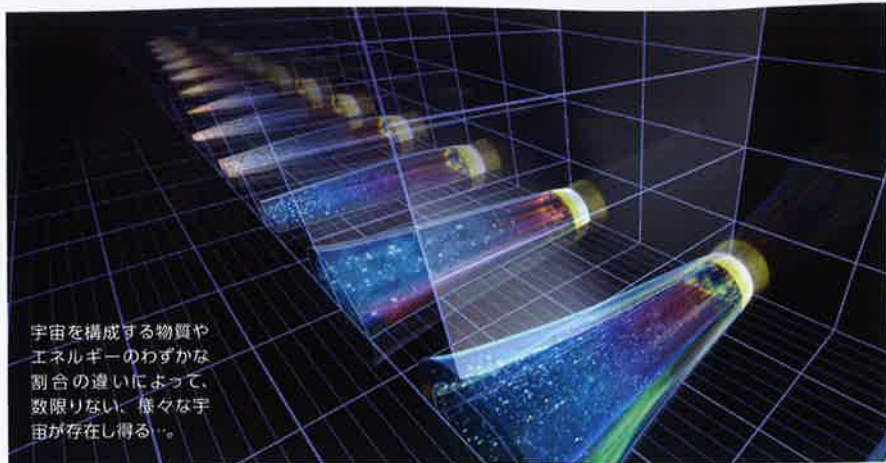


宇宙背景放射のムラは現在の宇宙の物質やエネルギーの分布を決めているのだ。



上がり」までにかかった時間は約38万年。現在地球に降り注ぐ宇宙背景放射は、晴れ上がりの時刻に発せられた光です。現在の宇宙は138億歳なので、それに比べれば十分「宇宙の始まりの時期」といえますが、始まった瞬間ではないのです。なので、より正確な問いは「私たちの起源が宇宙開闢38万年後にあった物質分布の偏りであるなら、その偏りはどこから来たのでしょうか？」となります。

この問いに答えるため、僕たちは宇宙望遠鏡 WMAP (ダブリュ・マップ) から得られた宇宙背景放射の強度分布のデータを、物理学の理論と組み合わせて解釈しました。灼熱の火の玉宇宙は、不透明なスープのような状態でした。前回紹介したように、このスープの現在の組成は、70%が暗黒エネルギー、25%が暗黒物質、そしてわずか5%が私たちの認識できる通常物質でできていることがわかっています。そのスープを揺らすと波が発生し、波は宇宙全体に伝わり



宇宙を構成する物質やエネルギーのわずかな割合の違いによって、数限りない、無数の宇宙が存在し得る…

ます。波の山は宇宙背景放射の強度が大きいところ、谷は低いところ。WMAPを用いて僕たちが測定したのは、宇宙が晴れあがった時刻の波の分布です。そこで、コンピューターを用い、晴れ上がり時刻以前の「宇宙スープ」にどのような衝撃・揺れを与えるとWMAPのデータを再現できるか調べます。

この作業をしていると、不思議な感覚を覚えます。

現在地球に降り注ぐ宇宙背景放射は、地球からとても遠い場所で、宇宙開闢38万年後に発せられた光です。この光は138億年かけて、今やっと地球に届いたのです。宇宙背景放射は地球にあらゆる方向から降り注ぐので、私たちは光り輝く「光の壁」にぐるっと取り囲まれています。そして、今やろうとしている作業は、その光の壁を超えて、より宇宙の始まりに迫ることなのです。ここからは、物理学の法則が大切な羅針盤となります。物理学を羅針盤に、光の壁の中に入っていく感覚。しっかりと、迷わないようにしなければなりません。

「これが、全ての始まり…この小さなムラ(不均一性)が種になり、銀河を、そして僕たちを作ったってことか…。だとしたら、全てがこの瞬間に決められていたってことだ…」HORIZON内での宇宙の果ての探求は、光の壁を越えて宇宙の始まりに触れ、この印象深いセリフで終わります。でもせっかくですから、本稿ではより先に進みましょう。

宇宙スープに与えられた衝撃。小さなムラの起源。それは、量子力学的なゆらぎでした。

あ、今、この記事を読むのをやめようとした星ナビの読者の皆さん、待ってください！読者を置いてきぼりにするつもりはありません。もう理解の限界だ、難しすぎる、やっぱり小松はいい加減なことを言っているのではないか。いろんな意見があろうかと思いますが、よろしければ、あと少しだけお付き合いください。



宇宙背景放射の壁の向こう側、宇宙の始まった瞬間にたどり着くと、そこには不均一なムラ、量子ゆらぎが現れた。このゆらぎが全ての起源だったのだ。

ここにたどり着いたのだろうか…

僕は本当に自分の意思で

## 「量子力学」の理解と言語化

量子力学は、原子や原子核などの極微の世界を記述する物理法則です。そこでは、日常の常識では想像できない不思議なことが起こっています。「量子ゆらぎ」はその一例です。一見何も無いように見える空間（真空）でも、極微の世界では、粒子が現れたり消えたりします。真空からエネルギーが生じるように見えるのです。そして、そのエネルギーの生じ方は場所ごとにランダムにばらばらしています。一体全体、どういうことでしょうか。

量子力学を、誰にでも理解できるように説明するのは大変難しいです。なぜなら、あえて誤解を恐れずに言えば、誰も理解はしていないからです。量子力学の法則は、方程式で曖昧さなく表されます。その方程式から導き出される現象は、原子や原子核の振る舞いの測定データと良く一致します。ですから、物理学者は量子力学が正しく極微の世界を記述することは知っていますが、なぜ極微の世界がそのようになっているのかは理解できていないのです。

これは、「言語化の問題」と捉えても良いかもしれません。量子力学の方程式に曖昧さはありませんが、研究者たちは、それをまだ数学以外の言葉で言語化できていないのです。半導体は、量子力学の法則に基づいて働きます。半導体を用いたパソコンや携帯電話が動くのですから、量子力学が正しいことは間違いないのですが、なぜ極微の世界がそうなっているのかを言語化するのは難しいのです。量子力学が誕生してから100年近くになります。当時は風変わりな理論だった量子力学は、今や、それに基づいた技術が生活に欠かせないものとなりました。

僕が伝えたいのは、世の中には、まだ十分に言語化できていない現象があるということです。中には、現象があまりにも突拍子もなく、物理学を学んだことのない方はびっくりしてしまい、理解不能に陥るものもたくさんあります。相対性理論もそのひとつでしょう。これはひとえに、研究者が方程式を言語化できていないせいです。量子力学も相対性理論も、誕生から100年も経

数学的概念の映像化。それを具現化するために、小松さんと上坂監督は綿密なやりとりを行ってきた。完成間近のスタジオで、2人は何を思ったのだろうか…。

撮影/飯島 裕

つのに、本当に申し訳ないです。

しかし言語化できていないからといって、研究者が何も理解していないわけではありません。むしろその逆で、方程式と望遠鏡を自在に操って、宇宙の始まりにまで迫っているのです。ですから、宇宙の研究を支えてくださる納税者の皆さん、どうか安心してください。私たち宇宙研究のプロ集団は、皆さんが理解できるような言語化はまだできていなくても、宇宙のかなりの部分を解き明かしてきました。数学という言葉は、一般の方が理解する言葉ではないかもしれませんが、それを理解する集団は存在していて、日々宇宙の理解を深めているのです。一般社会には馴染めないかもしれませんが、温かく見守っていただければ幸いです。

研究に勤しむ一方で、得られた知見を、数学以外の言葉にする作業にも、ベストを尽くしています。この記事もその試みのひとつですし、星ナビのような科学雑誌が研究成果の言語化に果たす役割は大きいのです。そして今、私たちには「フルドーム映像」という強力な方法があります。言語化はできなくても、映像化はできるかもしれない。全周映像作品「HORIZON -宇宙の果てにあるもの-」が、宇宙の始まりと私たちの起源についての最先端の理解を、皆さんに届けられますように。



平たく言うと、スूपに与えられた最初の衝撃は、ランダムなものだったのです。宇宙開闢の刹那、どこにどの銀河ができるかはすでに決められていたのですが、決められた過程はランダムでした。

量子力学は、極微の世界を記述する物理学の法則です。パソコンやラジオ、携帯電話のような、生活に密着した家電に欠かせないトランジスタなどの半導体は、量子力学の原理で動きます。この原理によると、極微の世界では粒子の位置やエネルギーは完全に決まらず、ランダムにばらばら

います。これを量子ゆらぎと呼びます。

WMAPのデータから得られた結果は、宇宙が始まってすぐ、量子ゆらぎによって真空からランダムにエネルギーが生じ、スूपが揺れたことを示していました。なぜそんなことがわかったのか？これはもう、僕の説明能力の限界なので、専門的な言葉を使うことをお許しください。量子ゆらぎによって生成された真空のエネルギーのランダムな分布は、「正規分布（あるいはガウス分布）」と呼ばれる、決まった分布に従います。WMAPのデータから得られた宇宙

背景放射の強度分布は、まさにその正規分布を示していました。また、WMAPのデータを元にコンピューター計算で再現した、スूपを揺らしたゆらぎの振幅は波長に関わらずほぼ一定でした（専門用語では、「ほぼスケール不変なゆらぎ」と呼びます）。これも、量子ゆらぎから予測される性質と一致していたのです。この2つの観測的証拠を根拠として、銀河や私たちの起源である物質分布の偏りのそのまた起源は、宇宙開闢の刹那に生じた量子ゆらぎであった、と結論づけたのです。

原始重力波の観測を目的に、2020年代半ばの打ち上げを目指して検討が行われている LiteBIRD (ライトバード) 衛星の概念図。  
©JAXA 宇宙科学研究所

青い海の宇宙港

<春夏篇>1,512円 <秋冬篇>1,620円  
●川端裕人 著 ●早川書房  
ISBN 978-4152096302  
ロケット発射場のある島を舞台に、ロケット競技会への参加をめざす小学生たちの成長が描かれる。作者の川端裕人さんは、小松さんの著書『宇宙の始まり、そして終わり』の共著者でもある。



量子ゆらぎの証拠をとらえる

私たちの究極的な起源は、宇宙開闢直後にランダムに発生した量子ゆらぎだったのです。

なぜこんな話を信じなければならいのでしょうか？ もちろん信じる必要はありません。そもそも科学は信じる、信じないの問題ではないのですから。天文学者の仕事は、地道に測定を積み重ね、証拠を増やすことです。「私たちの起源は量子ゆらぎ。」そんな途方もない結論を、上の2つの観測的証拠だけで確実なものと思っはなりません。そう、僕たちは、すでに次のステップに進んでいます。

WMAP から得た結論は全て、欧州宇宙機関 (ESA) が2009年に打ち上げたプランク探査機によって確認されました。プランクは、WMAP よりも10倍感度が良い観測装置を積んでいました。そして今、より決定的な新しい証拠を見つけようと、世界中

の研究者がしのぎを削っています。日本では、まだ正式には採択されていませんが、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が2020年代半ばに LiteBIRD (ライトバード) という宇宙背景放射の探査機を打ち上げようとしています。これは、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の羽澄昌史教授がリーダーとなって推進するプロジェクトで、プランクよりもさらに10倍感度が良い観測装置を搭載します。僕も微力ながら協力させていただいています。2016年発売の川端裕人さんによる長編小説『青い海の宇宙港』では、ライトバードは「コ

ズミックバード」という名前で、一足先に打ち上げられました (笑)。

「決定的な新しい証拠」とは何でしょう？ それは、原始重力波です。

WMAP が測定したのは光、電子、陽子、ヘリウム原子核が絡まりあったスープに立った波でしたが、重力波は空間そのものに生じる波です。これも、宇宙開闢直後に量子力学の原理に従ってランダムに発生すること

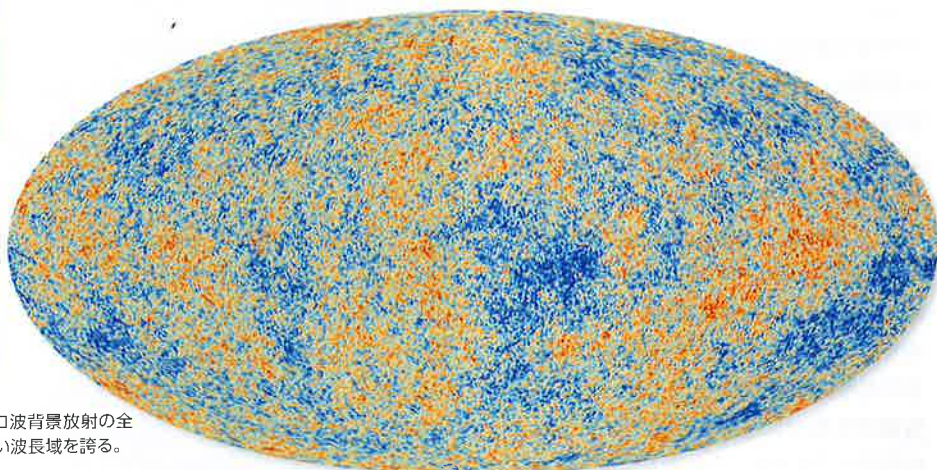
が予想されていて、宇宙の始まりからやって来る重力波という意味で「原始」重力波と呼ばれています。これを見つければ、宇宙初期の量子ゆらぎの存在は決定的となります。

2016年2月、米国の「LIGO (ライゴ)」と呼ばれる観測装置が、2つのブラックホールが衝突して放出された重力波を測定したと発表し、大騒ぎになりました (2016年5月号参照)。これは世界で初めて重力波が直接的に測定された例であり、その科学的な重要性から、2017年に早くもノーベル物

©Caltech/MIT/LIGO Lab



アメリカのレーザー干渉計型重力波検出器「LIGO」は、ワシントン州とルイジアナ州に計2器設置されている。写真はルイジアナ州リビングストンの検出器。



プランク探査機が観測した、宇宙マイクロ波背景放射の全天図。従来より高い感度と角分解能、広い波長域を誇る。  
©ESA and the Planck Collaboration

理学賞が与えられたほどです。しかし、ライゴが測定した重力波は宇宙の始まりからのものではありません。ライゴは波長が数千kmの重力波を測定できますが、僕たちが見つけたい重力波の波長は、宇宙空間の膨張のために、数十億光年以上の長さ引き伸ばされています。そんな長波長の重力波は、宇宙の始まりにできたもの以外に考えられないのです。

重力波が伝わると、空間は伸び縮みします。空間が伸びるとそこを伝わる宇宙背景放射の光の波長も伸び、空間が縮むと光

の波長も縮みます。この効果の発見がライトバードの目的です。すぐにも見つけたくしょうがありません。WMAPのデータから量子ゆらぎの存在の証拠を掴んだ時もドキドキしましたが、もし原始重力波が発見されたら、研究者はどうなるのでしょうか。

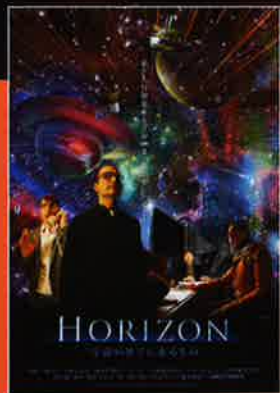
実は、その予行演習が2014年3月にありました。BICEP2という米国の研究チームが、宇宙背景放射に原始重力波の痕跡を発見した、と発表したのです(2014年6月号参照)。このニュースは世界中を瞬く間に駆け巡り、そのあまりの衝撃に、その後の

5日間で僕は体重を2kg減らし、発熱して体調を崩してしまいました。後にこの結果は、銀河系内の星間物質による放射を原始重力波の効果だと見誤った、初歩的なミスであったことがわかったのですが、おかげで原始重力波が発見されるとどうなるかを、世界中の研究者だけでなく宇宙ファンも疑似体験することとなりました。とんだりハーサルでした。ライトバードチームは現在、2018年度末に控える、プロジェクトの採択を決めるJAXAの審査へ向けて研究開発を頑張っています。応援よろしく願い致します!

人の思考する力は時間と空間を超越し、宇宙の始まりに迫ろうとしている。私たちはこれからも、人がこの宇宙に生まれた訳を追い続けるに違いない。

## 宇宙の地平線の向こうに 人はいつか必ずたどり着ける

最後は、妄想で締めくくりましょう。時は2040年。ライトバードなどによる原始重力波の発見以降、宇宙研究は大いに発展し、天文学者はついに、宇宙開闢直後の量子ゆらぎを起源とし、銀河、星、惑星、そして生命がどのように生まれたかを明らかにした。中学校の理科の授業では、全ての究極の起源は宇宙初期の量子ゆらぎであったと教えられている。ある日、ある中学校の理科の授業で、生徒が素朴な疑問を発した。「先生、じゃあ、その量子ゆらぎはどこから来たのですか?」研究は続く。



全天周映像作品  
「HORIZON -宇宙の果てにあるもの-」

監督・脚本：上坂浩光 音楽：酒井義久

監修：小松英一郎

<http://www.live-net.co.jp/horizon/>

■制作 有限会社ライブ

■配給 株式会社五藤光学研究所

■上映館・多摩六都科学館(東京都)上映中

・仙台市天文台(宮城県)上映中

・鹿児島市立科学館(4月1日より)

・府中市郷土の森博物館(12月15日より)