

# ビッグバン以前を探る

## ——宇宙マイクロ波背景放射観測プロジェクトの立ち上げ

羽澄昌史

総合研究大学院大学教授 素粒子原子核専攻／高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所教授

宇宙マイクロ波背景放射は原初宇宙の姿を伝えてくれる。

その発見から半世紀、より高精度な観測によって、ビッグバン以前の情報を捉えようと、総研大で生まれたプロジェクトが、素粒子物理学、天文学、デバイス工学、計算機科学などの多分野の協力を得て、国際プロジェクトへと発展していった。

### はじめに

夜空にまたたく星々。なじみ深い可視光で見る宇宙。実はそれは、宇宙の姿のほんの一面にすぎない。可視光は人間の目で直接感じられる光（＝電磁波）だが、それは電磁波のほんの一部にすぎないからである。

可視光よりずっと波長が長いマイクロ波で宇宙を見ることにより、宇宙マイクロ波背景放射（Cosmic Microwave Background : CMB）と呼ばれる「ビッグバンの残光」が発見され、人類がもつ宇宙像は一変した。本稿では、われわれが挑戦する CMB 精密観測の新しい取り組みについて述べる。

### CMBを通して見る宇宙の始まり

宇宙の始まりは熱い火の玉の状態にあり、それがビッグバンとよばれる大爆発を起こした。これがいわゆるビッグバン宇宙理論である。専門家（つまり非常に深いじわんな人たち）の目から見ても、これまでのさまざまな観測結果を定量的に説明できるため、今日この理論を疑うことは難しい。遠方の銀河が遠ざかる速度（ハッブル定数）、宇宙に存在する種々の軽い元素の量、そして本稿のメインテーマである CMB は、すべて定量的にビッグバンを支持している。

ビッグバン宇宙理論を支える物理学の基礎法則は、はがき数枚程度に書けてし

まうほどシンプルだ。それは、20 世紀科学の大輪の花であるアインシュタインの一般相対性理論（時空と重力の基礎法則）と、素粒子標準理論（量子論にもとづいた素粒子の種類と相互作用に関する基礎法則）である。

宇宙の始まりは、われわれ人類もふくめた森羅万象の始まりである。それがはがき数枚程度の「宇宙のルールブック」に基づいている。この真理に人類が到達したのは、20 世紀後半から末にかけてである。素粒子物理学と宇宙物理学が手をたずさえ、かつ、実験・観測・理論が三位一体となって成しとげた知的フロンティアにおける大事件だった。これに関連して、素粒子物理では優に 10 を超えるノーベル物理学賞が与えられ、宇宙物理では CMB 研究だけをとっても 2 つのノーベル物理学賞が与えられている。

ところが、宇宙の始まりについてすべてわかってしまったのかと問われたら、答えはノーである。ビッグバンの前からわからないのだ。熱い火の玉状態を作る仕組み、たとえば風船がパンと割れるのがビッグバンだとすると、その前に、風船に「息を吹き込む人」がどうしても必要なのである。

これまでの宇宙観測で、「風船のふくらみ方」が見えたわけではない。しかし、間接的な情報は得られている。その結果、宇宙観測と折り合う現時点の最有力仮説は衝撃的である。宇宙は、誕生後およそ 0.00000000000000000000000000000000 秒（ $10^{36}$  秒）のころ、一瞬にして 1000 倍（ $10^{28}$  倍）にふくらんだとする。ふくらむ前と後では、たとえるならアメーバと銀河ほども違うのである。この仮説を「宇宙のインフレーション」と呼ぶ。

「風船のふくらみ方」について間接的な情報がある以上、これを「宇宙のルールブック」で説明しようという努力が傾けられるのは当然であろう。ところが、どうやってもこれができそうにない。それはとりもなおさず、20 世紀の叡智の結晶である「一般相対論＋素粒子標準理論」が宇宙の真のルールブックではないことを示唆しているのではないだろうか。

未知なる「宇宙のルールブック」を探り当てる理論的研究はまことに精力的である。研究の方向としては、「一般相対論＋素粒子標準理論」を導出できる究極の理論を探りあて、それを使って「風船をふくらませる」ことに成功すればよい。マイクロの極である素粒子とマクロの極である宇宙が出会う、まことに魅力的な研究領域が存在するのである。

究極の理論を探る旅は、素粒子物理学の本道である。素粒子物理学から生まれた最有力の究極理論に「スーパーstring 理論」がある。この世は、実は 10 次元時空からなるという一見「非常識」な理論であり、当然、検証不可能といわれていた。ところが驚くべきことに、「風船のふくらみ方」のより直接的な観

# 宇宙マイクロ波背景放射

羽澄昌史

総合研究大学院大学教授 素粒子原子核専攻／高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所教授

宇宙マイクロ波背景放射（CMB）は、1964 年（論文掲載は 1965 年）に米国ベル電話研究所のペンジャス（Arno Allan Penzias）とウィルソン（Robert Woodrow Wilson）によって偶然発見された。2 人はその業績で 1978 年ノーベル物理学賞を受賞した。その現代的解釈は以下のとおりである。

宇宙は、ビッグバンのあと膨張とともに徐々に冷えていった。ビッグバンから約 38 万年たったころ、宇宙は十分に冷えて、それまでプラズマ状態で存在していた電子と陽子が結合し、水素原子となった。光子はそれまで、電子などの荷電粒子と高い頻度で散乱（衝突）していた。しかし散乱する相手が消えたため、光（電磁波）は自由に宇宙空間を伝わるようになった。これが「宇宙の晴れ上がり」である。

この自由に伝わり宇宙に満ちている電磁波の名残りが CMB である。38 万歳の宇宙の温度は約 3000K であり、その時点での CMB の温度も同じであった。ところが現在の観測では約 2.7K である。これは宇宙膨張により CMB の波長が長くなった（赤方偏移した）ためである。

1989 年に COBE（Cosmic Background Explorer）衛星が打ち上がり、地球周回軌道での観測が開始された。大気の影響がなく全天を観測できるという利点を生かし、2 つの驚くべき結果を得た。1 つは、CMB の周波数スペクトルが黒体放射の分布に従うことを示し、CMB の温度をすばらしい精度で決定（ $2.725 \pm 0.002\text{K}$ ）したことである。ビッグバンの決定的な証拠といっ

よい。

もう 1 つは、CMB の温度分布を全天にわたって測定し、約  $30 \mu\text{K}$  の温度ゆらぎ（2.7K の約 10 万分の 1 のゆらぎ）を発見したことである。これらの成果により、2006 年ノーベル物理学賞はマザー（John Cromwell Mather、NASA）とスムート（George Fitzgerald Smoot III、カリフォルニア大バークレー校）に与えられた。

2001 年には、位置分解能で COBE をはるかに凌ぐ WMAP 衛星が打ち上がり、太陽-地球のラグランジュ点の 1 つで観測を開始した（図）。図の右のパワースペクトルは、宇宙誕生に関する情報の宝庫である。宇宙年齢が 137 億年（誤差 2 億年以下）、宇宙のエネルギー密度の中に物質の占める割合がわずか 4% であること、残りは謎のダークマター（23%）とダークエネルギー（73%）であることなどが、ここから得られている。

光（電磁波）には、波長（色）、強度（明るさ）、偏光（振動の方向）の 3 要素がある。現在、CMB 研究のフロンティアは偏光に移りつつある。原始重力波という、ビッグバンの前に放たれた波をとらえることが期待されているからだ。CMB による宇宙誕生の研究は、濁った川面を観察して、川底がどうなっているかを理解するようなものである。川面の色や水かさを見るだけでは、川底の様子はわかりにくい。よどみや渦を含めた流れの方向を知ることで、どこに石があって流れを変えているかなど、直接見えない川底の様子がわかってくるのである。

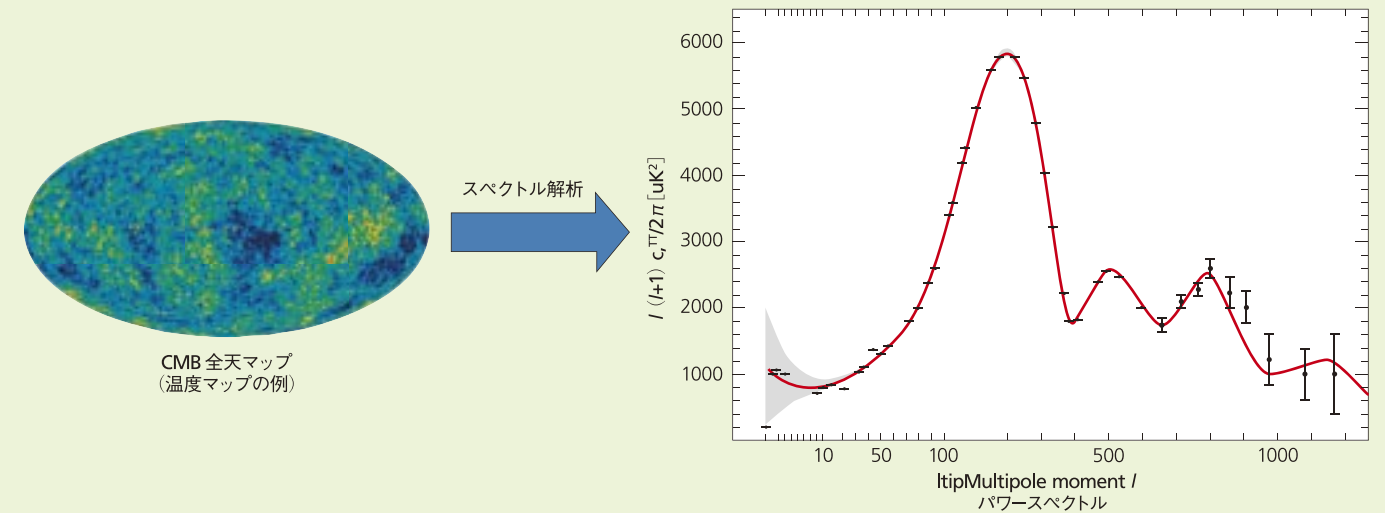


図 7 年間のデータを蓄積した WMAP の CMB 全天温度マップ（左）とパワースペクトル（右）。パワースペクトルのデータ点と理論曲線が驚くべき一致を示している。





図1 チリ・アタカマ高地に立つCMB望遠鏡

測があれば、この理論も検証できることがわかってきた。

では、「風船のふくらみ方」というとてつもないものを、観測できるのだろうか？ 幸運なことに、答えはイエスである。インフレーションという空間の急激な加速膨張にともなって、時空に「さざなみ」が立つからである。

原始重力波と呼ばれるこのさざなみは、ビッグバンの前に生成され、ビッグ

バン後の宇宙に満ちわたる。当然CMBが生成された太古の宇宙にも存在し、全天にわたるCMBの偏光パターンに特徴ある痕跡を残した。つまり、CMB偏光度を精密に測定すれば、原始重力波を発見することができるのである。

宇宙観測の最先端では、いまやビッグバンの前に何が起きたのかを科学の目で捉えようとしている。ただ、これを実現するには、とてつもなく感度の良い検出

器を必要とする。われわれの目標はここにある。

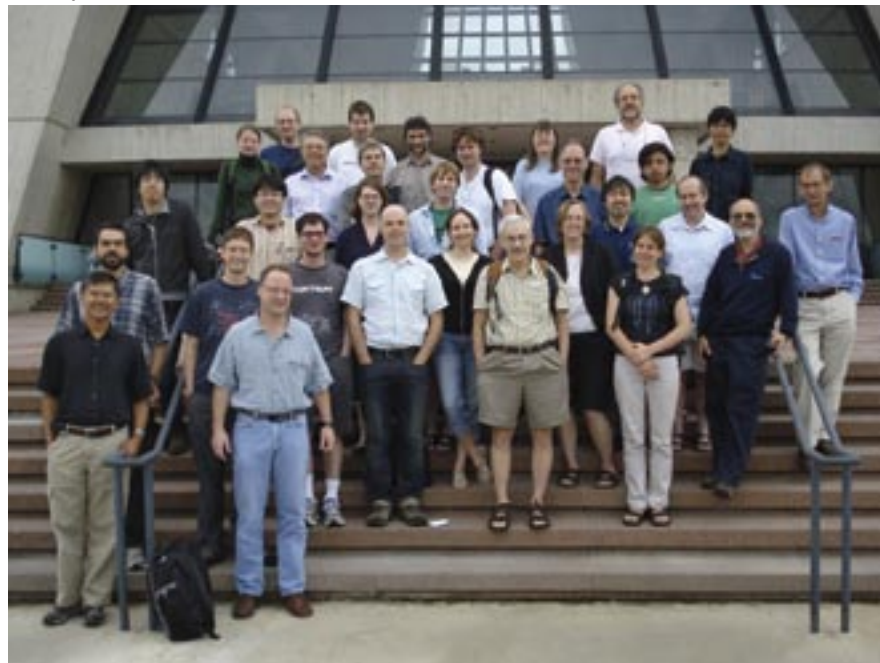
#### 宇宙マイクロ波背景放射研究を開始する

私が所属する総研大・素粒子原子核専攻は、高エネルギー加速器研究機構(KEK)を本拠地としている。私がKEKでCMBの実験的研究を本格的に始めたのは約2年前である。それまでは、加速器を用いた素粒子物理の実験にたずさわってきた。

ところが、あるときCMBの実験・観測分野が日本では手薄になっていることを知った。私は、最先端技術のかたまりである大型加速器実験装置の開発で培った技術を有効利用できると直感し、42歳の厄年を過ぎてから異なる分野に飛び込んだのである。

かなりの勇気が必要だったが、今のところまったく後悔していない。ドキドキしながら実験プロジェクトを進める毎日である。かつて、鈴木厚人KEK機構長は年頭挨拶でこう語った。「良い研究成果をあげるためには、3種の“者”が必要だ。それは、若者、よそ者、そしてバカ者である」と。それを聞いて、バカ者になってもいいじゃないか、と思った。また、スタンフォード大学の卒業式に招かれたスティーブ・ジョブズ(アッ

図2 QUIET コラボレーションメンバー



プル社の共同設立者の一人)のスピーチをたまたまウェブで見つけた。若者を鼓舞する感動的なスピーチだった。最後の一言“Stay hungry, stay foolish.”に私も鼓舞された。

これらの言葉との出会いが、背中を押してくれた。自然科学も人間の営みであり情緒に左右されて当然である。新しいことをゼロから始めるために、良い言葉との出会いは意外に大事なことだった。

しかし、気持ちだけではプロジェクトは動かない。私が最初の小さな一歩を踏みだせたのは、総研大・葉山高等研究センター研究プロジェクト「新領域」のお

かけである。2007年度に、研究課題名「宇宙マイクロ波背景放射(CMB)偏光測定の前準備研究」が認められてすべてが始まった。これは、CMBをいままでにない精度で観測するために、よりすぐれた“目”として超伝導カメラを開発するものであった。

これをきっかけに、鈴木機構長、高崎史彦・素粒子原子核研究所長(当時)、KEK測定器開発室の方々にサポートしていただき、KEK-CMBプロジェクトチームの本格的立ち上げにつなげることができた。CMB研究の蓄積がゼロだった私を信頼してチャンスを与えてくれた池内了先生、菅原寛孝先生をはじめとする「新領域」関係者に深く感謝する次第である。

気持ち、予算に加えて重要なのは人材である。「若者の不眠不休の努力だけが、科学の現場で奇跡を起こせる」。これまで私は、ドイツ、米国、そして日本で大型国際協力実験に携わってきたが、仲間の研究者は異口同音にそう言う。幸いにして、KEK-CMBプロジェクトには、優秀な若手が集まっていた。とある国際研究会で私は「参加している研究者が、全員私よりかしこい(smart)ことが誇りだ」と述べたほどである。

#### メインプロジェクトQUIET実験

図1は、KEK-CMBグループの現在のメインプロジェクトであるQUIET実

験(Q/U Imaging Experiment)のCMB望遠鏡である。チリ・アタカマ高地の標高5080mに設置されている。白い筒状の部分とその下の箱型の部分は、周囲から来るマイクロ波を遮蔽している。内部には主鏡、副鏡、そして心臓部である偏光計が収められている。

QUIET偏光計は、日常生活で使われる高周波の電波に対する受信機(無線LANやBS放送の受信機など)と同じ原理に基づいている。ただし、とてつもない感度を達成するために、偏光計を20K(-253℃)で使用して熱雑音を減らすとともに、多数の偏光計からなるアレイを使って統計誤差を減らしている。衛星にはまだ搭載できない最新の偏光計を地上観測に使用することで、衛星観測をしのぐ感度を達成している。そのため今後5年間に於いては、地上観測が衛星をしのぐと期待されている。

QUIET実験は2008年9月より予備観測をはじめ、順調に稼働を続けている。近い将来、初期結果を論文投稿できると思う。2011年末には偏光計の数を現在の91から1600程度に増やし、本格的観測を開始する予定である。2014年ごろには超精密測定の結果が出てくると予想される。

QUIETは国際協力実験であり、シカゴ大、カリフォルニア工科大、NASAジェット推進研究所、プリンストン大、コロニア大、KEK、オスロ大などが

図3 POLARBEAR 検出器を搭載するHTT望遠鏡

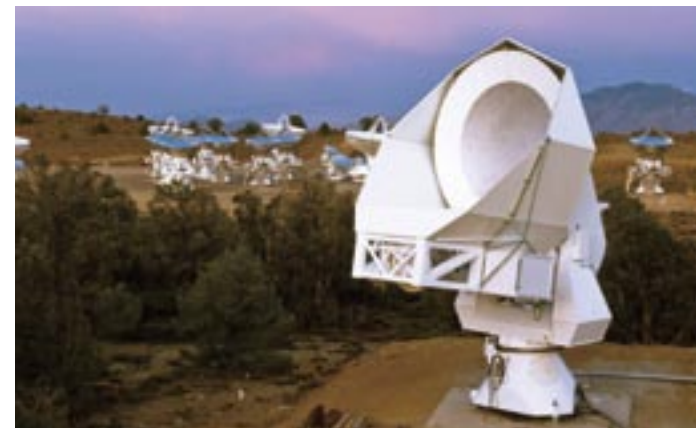


図4 POLARBEAR 検出器の試験。左は中心メンバーのKEK超伝導低温工学センター・都丸隆助教。カリフォルニア大学バークレー校にて。





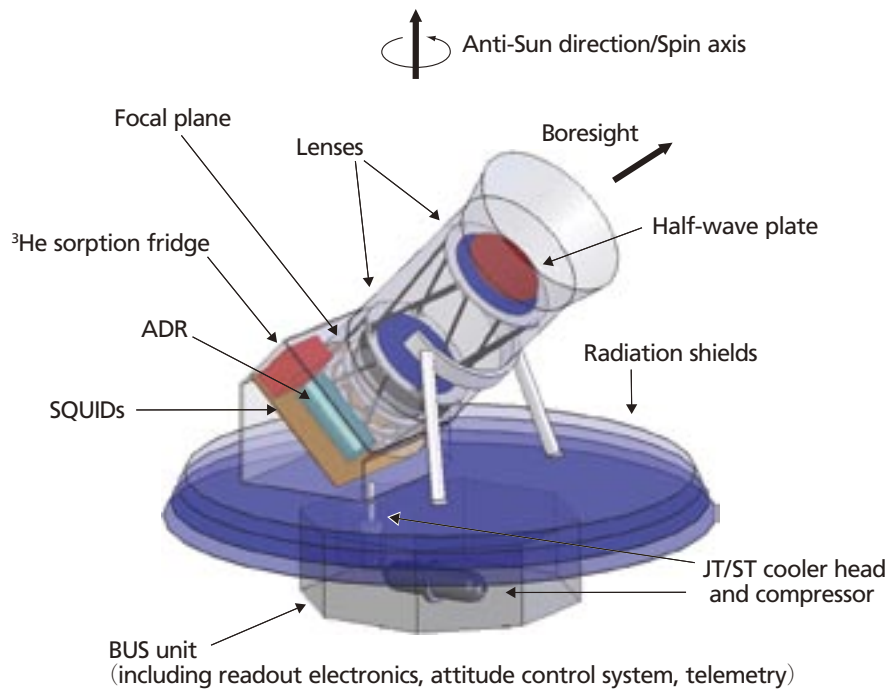


図5 小型CMB偏光観測衛星 LiteBIRDの概念図

参加している(図2)。CMB観測は天文学科より物理学科のプロジェクトとして進めている研究機関が多く、QUIETも高エネルギー実験、重力実験などの多彩なバックグラウンドをもった物理・天文・計算科学の混成部隊である。

WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe: ウィルキンソン・マイクロ波異方性探査機、コラム参照) メンバーの一部も参加している。

このうち KEK は、予備観測のデータ解析、データマネージメント、受信機の試験などに貢献しつつ、本観測のためのデータ読み出しシステムの設計製作、受信機の試験と設置、データ解析に主導的な役割を果たす。

#### POLARBEAR実験

KEK-CMBグループのもう1つの柱は、カリフォルニア大学バークレー校などと共同で準備中のPOLARBEAR実験

である(図3)。POLARBEAR 検出器の特徴は、バークレーで開発した先進的な超伝導転移端センサーが用いられていることである。ウェストコーストのチャレンジ精神が満載されたデザインといっただろう。

POLARBEARは、QUIETと同時期に同じ空域を共同観測する予定である。QUIETは低い周波数、POLARBEARは高い周波数のCMBに感度があるため、2つを統合することにより、今後5年間の地上実験でもっとも広い周波数をカバーできることになる。広い周波数をカバーすることは、銀河や宇宙塵に由来するマイクロ波をCMBからうまく分離する上で決定的に重要となる。KEKは、現在試験中の検出器1号機(図4)の後継となる2号機の製作、試験を担当することになり、設計を開始したところである。

#### 地上観測の次は科学衛星

地上では観測できる空域がかぎられること、大気の影響を除去した究極の測定が必要となることを考慮すると、QUIET、POLARBEARの後には科学衛星が必須となる。KEK-CMBグループでは、日本が主導し世界に先駆けて小型CMB偏光観測衛星 LiteBIRDを打ち上げる構想を提案し、2008年9月にワーキンググループ申請を宇宙航空研究開発機構(JAXA)に提案し、認められた(図5)。

現在、KEK、JAXA、国立天文台、理化学研究所、岡山大、東北大、近畿大、テキサス大オースティン校、カリフォルニア大バークレー校、カリフォルニア工科大などから総勢40名程度の研究者が LiteBIRD ワーキンググループに参加して、基本設計に従事している。これまで KEK、国立天文台、JAXA がこのような形で協力したプロジェクトは例がないと思う。

総研大の視点で見ると、ほとんど学内

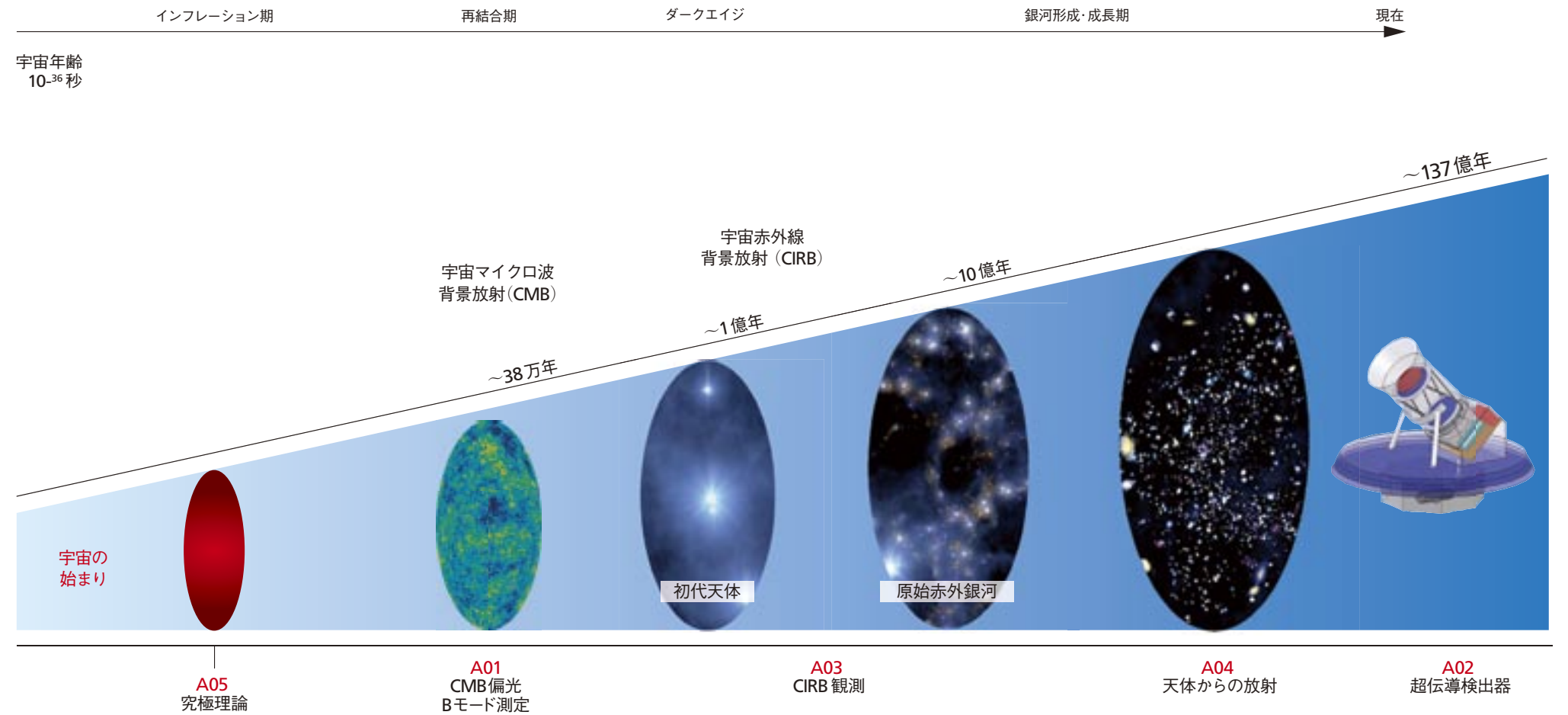


図6 科学研究費補助金新学術領域研究「背景放射で拓く宇宙創成の物理」概念図

プロジェクトに思えるほど総研大の教官が多い。宇宙と素粒子の研究については、まだまだこれから総研大の枠を進める方法があるように思う。今後の課題である。

#### 新しい学術領域の形成をめざして

このような研究の輪は、CMBにとどまらず、さらに広がりを見せている。2009年度から私が領域代表を務める新たな科研費(新学術領域研究)「背景放射で拓く宇宙創成の物理」が採択され、5年間の研究がスタートした(図6)。これまで述べてきたKEKを中心とするCMB偏光観測は、5つある計画研究の1つとして位置づけられている。

これに加えて、宇宙を見る新しい「目」(検出器)の開発、ダークエイジ(図6参照)の終わりを探る赤外線背景放射観測、天文学と計算科学の知見を総動員してCMBと前景放射の分離に挑む研究、究極理論を探る、といったアプロー

チにより、インフレーションからダークエイジの終わりまでを解明することが目標である。わが国の宇宙、素粒子、天文、超伝導デバイス関連の研究者が、これまでにない規模の共同研究を立ち上げ、新学術領域を創成してこれらのプロジェクトを推進していく予定である。くわしくは領域ウェブページ(<http://cbr.kek.jp/>)を参照されたい。

さて、この探求のゆくえはどのようなだろう。正直な答えは「わからない」である。わからないからこそ面白いし、実験屋の血が騒ぐというものである。この世の始まりには何があったのか。この究極の問いに答えるにはインフレーションの解明が不可欠である。それこそが、現在人類に課せられた最大の知的挑戦といっても過言ではない。



羽澄昌史(はずみ・まさし) 素粒子と時空の根本法則を求めて実験・観測のアイデアを出し、プロジェクトを立ち上げて実行し、科学論文を書く毎日。Bファクトリーなど加速器を用いた素粒子実験を経て、現在は米国などのグループと共同で、CMBの偏光観測を推進している。物理学者の感性で、宇宙を実験室に“遊んで”いる。