【特別推進研究】

集積超伝導分光器技術とデータ科学で切り拓くサブミリ波輝線強度マッピングの新展開

研究代表者	東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・教授 河野　孝太郎（こうの　こうたろう）	研究者番号：80321587
研究課題情報	課題番号：24H00004 キーワード：輝線強度マッピング、集積超伝導分光、疎性モデリング、深層学習、サブミリ波	研究期間：2024年度～2028年度

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

●研究の全体像

138億年にも及ぶ宇宙史の中での星生成活動の変遷と、それを司る物理過程を理解することは、星の中で生成され私たちの世界と生命を構成するに至った元素や物質の起源を知るために極めて重要である。今や宇宙開闢後わずか数億年という初期宇宙での銀河がハッブル宇宙望遠鏡やジェイムズウェブ宇宙望遠鏡(JWST) による可視光から中間赤外線での観測により発見され研究できる時代となった。一方、重元素からなる固体微粒子(ダスト)に隠された星生成活動を探るためには、アルマをはじめとするサブミリ波帯での観測が鍵となる。現在までのところ、個々に検出可能な明るい銀河の詳細な観測に基づく研究は劇的に進展している。しかし、より暗く、より多数存在する銀河、すなわち、より一般的・代表的な銀河において、こうしたダストに隠された星生成活動を広く探ることは、アルマをもってしても容易ではないことが明らかになってきた。このため、宇宙におけるダストに隠された星生成活動の重要性について、観測的な決着はいまだについていない。

●本研究の目的：サブミリ波輝線強度マッピングに基づく隠された星生成と重元素生成・集積過程の解明

この解決の決定打と期待されているのが、「輝線強度マッピング」と呼ばれる手法に基づく、ミリ波サブミリ波帯での広域分光撮像観測である。この手法では、空間方向・奥行き (赤方偏移) 方向に広い範囲での観測を行うことにより、個別には検出が困難な、暗い銀河、すなわち、その時代における一般的で大多数を占める銀河からの信号の重ね合わせを捉える。これは銀河を一つ一つ個別に分解して観測するアルマや宇宙望遠鏡JWSTとは非常に相補的である。本研究は、宇宙最初の約20億年 (赤方偏移が約4から8の時代) の銀河における炭素イオンからの [C II] 158μm輝線に着目した輝線強度マッピングを行い、スペクトル線強度の揺らぎ (パワースペクトル) を測定する。(図1)。その実現のため、大規模化に適した集積超伝導分光器技術に基づく分光撮像カメラTIFUUNの開発 (図2) と、その真価を十分に引き出すためのデータ科学を駆使した観測・解析手法 (図3) の開発を行う。サブミリ波望遠鏡ASTEにTIFUUNを搭載して大規模な観測を実施し、宇宙再電離期を含む宇宙最初の20億年における、炭素イオンの輝線強度揺らぎを検出・測定する。

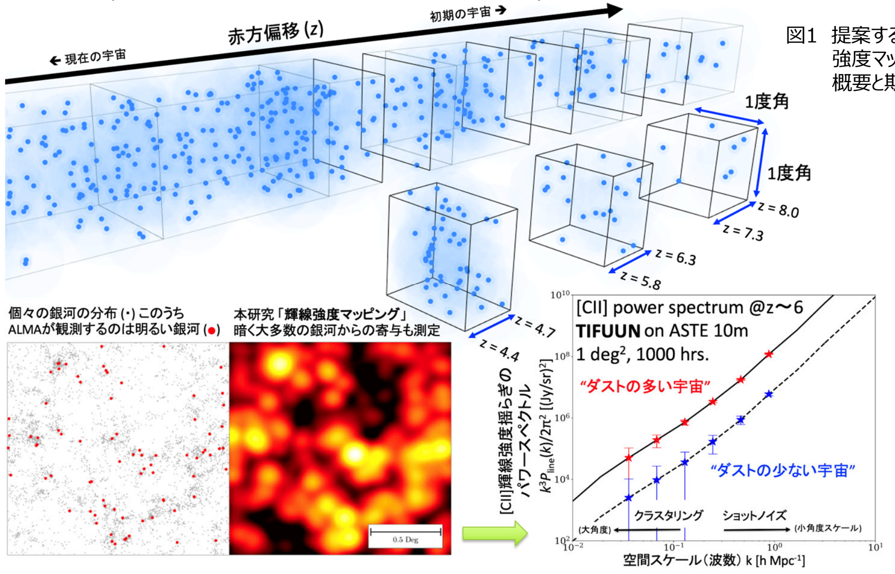

図1　提案するサブミリ波輝線強度マッピング観測の概要と期待する測定量

●集積超伝導分光技術で実現するミリ波サブミリ波分光撮像カメラTIFUUN

我々は、基盤上に超伝導共振器を並べて超広帯域のミリ波サブミリ波帯低分散分光を実現する集積超伝導分光器 (ISS) という概念を世界に先駆け提唱し、その技術実証機DESHIMAの実験室実証及び天体信号の検出に基づく実証にも成功している。こうした成果を踏まえ、分光と撮像を同時に行うカメラ TIFUUN (**T**erahertz **I**ntegral **F**ield **U**nits with **U**niversal **N**anotechnology) を開発する。既存の輝線強度マッピング観測と比較し３桁の性能飛躍が期待される。その概要と実証された要素技術を図2に示す。

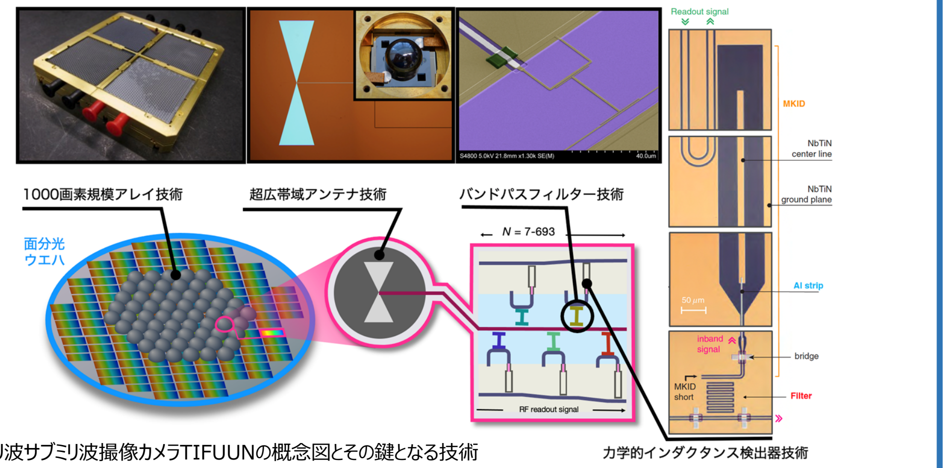

図2 ミリ波サブミリ波撮像カメラTIFUUNの概念図とその鍵となる技術

●データ科学の手法を導入した観測および解析の手法

集積超伝導分光技術で実現されるTIFUUNの性能飛躍を活かすためには、地上での観測に基づく輝線強度マッピングの実用化において課題となる大気放射と天体信号の分離手法、および、目的とする赤方偏移に存在する銀河・輝線と、その前景に存在する銀河・輝線との分離手法を実装する必要がある。我々は、疎性モデリングを活用した信号分解（図3）や、深層学習を駆使した前景信号の分離手法の研究ですでに成果をあげており、これをTIFUUNの観測でもたらされる膨大な3次元データに応用するための開発を進める。

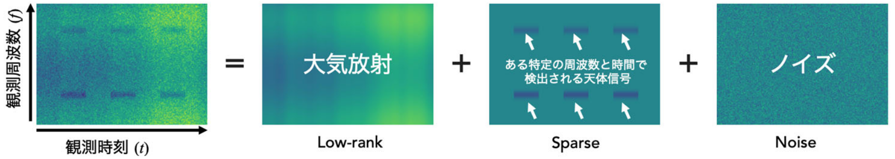

図3 疎性モデリングを使ったミリ波サブミリ波分光観測における天体信号と大気放射および雑音の成分分解の概念図

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●本研究の5つの柱

(1) 大規模化に適した集積超伝導分光技術に基づく分光撮像カメラTIFUUNの開発。(2) データ科学的手法を駆使したTIFUUNの性能を活かし切る観測法および解析法の開発。(3) サブミリ波輝線強度マッピングの理論的研究。(4) サブミリ波望遠鏡ASTEへの搭載・評価・科学観測の実施と解析。(5) アルマ・JWST等の個別観測もあわせた解釈、そして隠された星生成活動と重元素生成・集積過程の解明。

●本研究の意義と期待されるブレークスルー、社会へのインパクト

独自に提唱・実証を進めてきた集積超伝導分光技術とデータ科学的手法との融合は、サブミリ波輝線強度マッピングという期待の観測手法の実用化を飛躍的に加速して大きなブレークスルーをもたらすと期待される。そこで得られる知見は、銀河の形成・進化の分野にとどまらず、重元素の生成史、ひいては宇宙論まで、新たな展開につながるという意義がある。本研究により、私たちの身体や社会の中で最も重要かつ根源的な重元素の一つである炭素が、宇宙の歴史の中で、いかに生成され、集積されてきたか、その過程を明らかにすることは、基礎科学への興味を喚起するなどの社会的なインパクトがあると期待される。

ホームページ等	https://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/~kkohno/ https://sites.google.com/view/sublime-tifuun/home