

観測装置開発におけるニーズ志向とシーズ志向, そして「Engineeringする」ということ - X線天文学の観測装置を例として

満田和久

自然科学研究機構 国立天文台 先端技術センター (NAOJ ATC) 特任教授

高エネルギー加速器研究機構 量子場計測国際拠点 (KEK QUP) 特任教授

&

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 (JAXA ISAS) 名誉教授

2022年8月24日

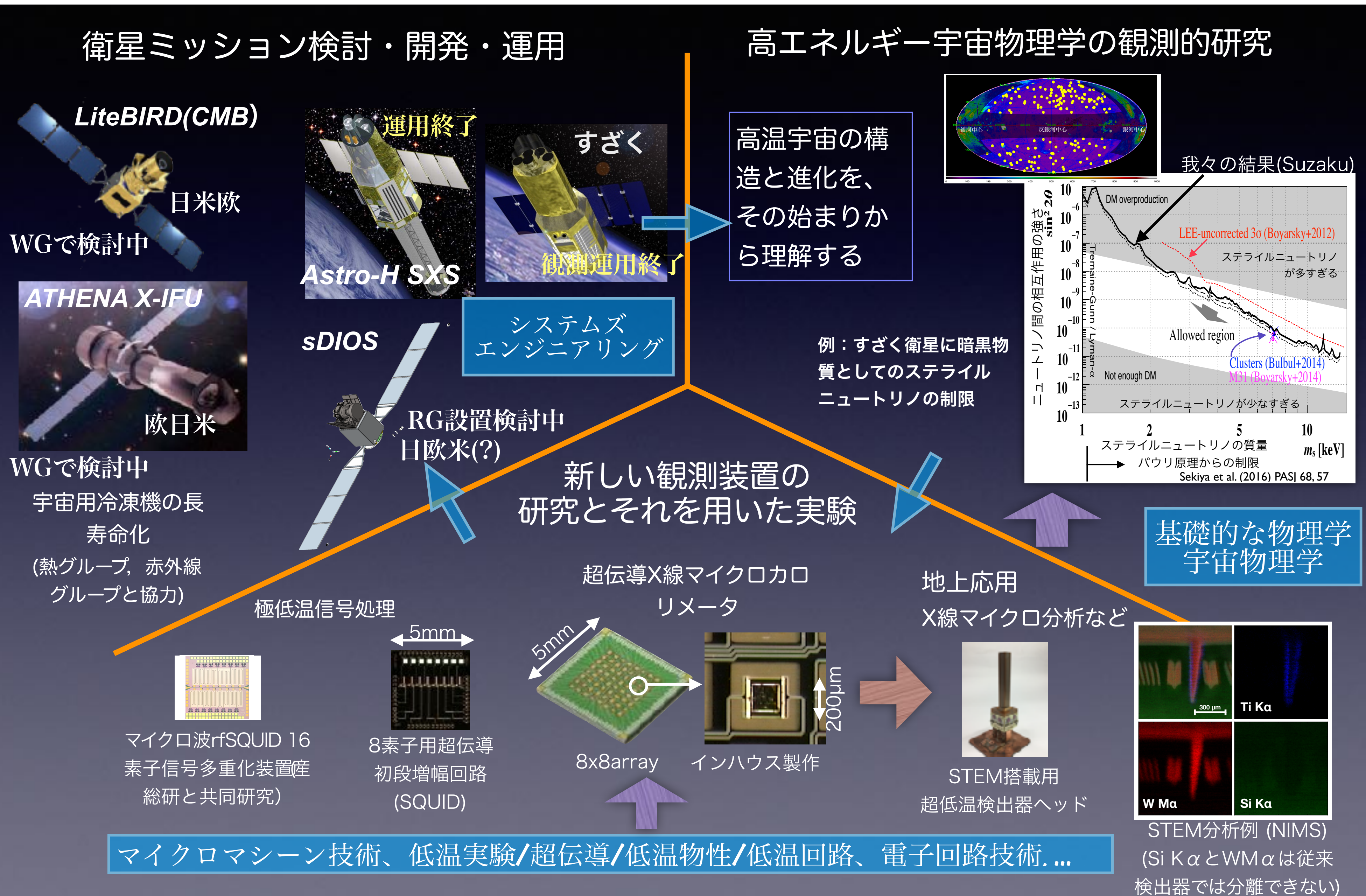
2022年度 天文・天体物理若手夏の学校 観測機器分科会

おおまかな内容

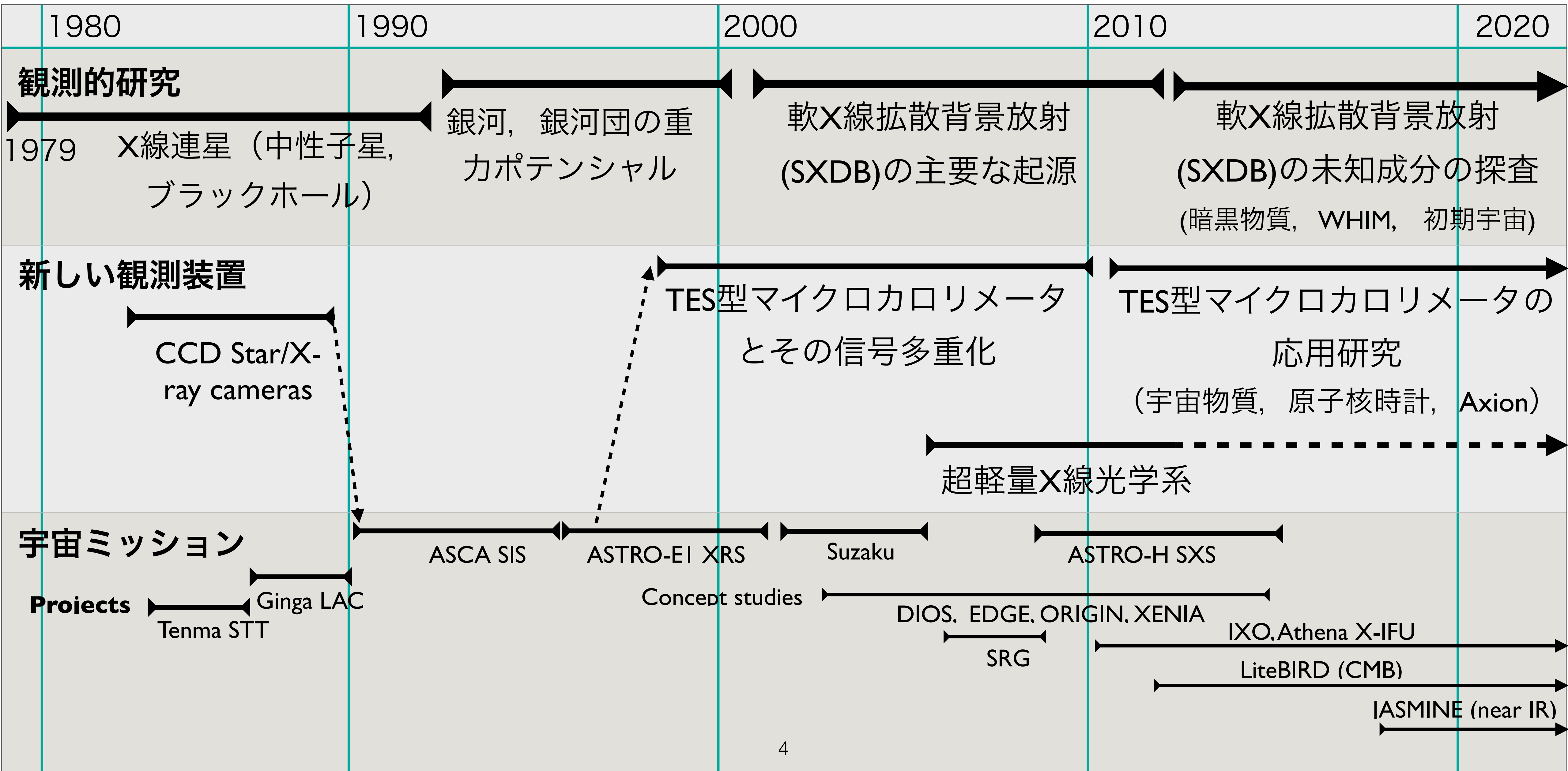
- ・ 自己紹介：これまでの研究
 - ・ スペースからの天文学・宇宙物理学における研究サイクル
- ・ 必要は発明の母か，発明は必要の母か？
- ・ X線天文学分野における発明
 - ・ X線集光撮像光学系
 - ・ X線マイクロカロリメータ
- ・ seedsとneedsの関係
- ・ TechnologyとEngineering
 - ・ 日米欧の研究機関の違い（私見）
- ・ これからの新しい技術の方向性
 - ・ X線分野の例（私見）
- ・ まとめ

自己紹介(1)

JAXA宇宙研時代の研究室の紹介図((2018年日本語版)



自己紹介(2): これまでの研究概要



ニーズ志向とシーズ志向

必要は発明の母

サイエンス目的

needs oriented



必要な技術を開発

発明は必要の母

技術イノベーション

seeds oriented



新しい需要（サイエンス目的）を掘り起こす

科研費の研究調書

様式 S－1 2 研究計画調書（添付ファイル項目）

基盤研究（A）（一般） 1

1 研究目的、研究方法など

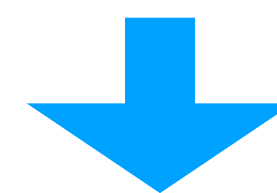
本研究計画調書は「中区分」の審査区分で審査されます。記述に当たっては、「科学研究費助成事業における審査及び評価に関する規程」（公募要領 1 6 頁参照）を参考にする。

本研究の目的と方法などについて、6 頁以内で記述すること。

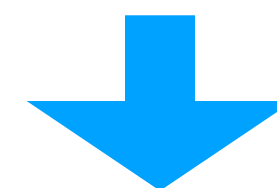
冒頭にその概要を簡潔にまとめて記述し、本文には、(1) 本研究の学術的背景、研究課題の核心をなす学術的「問い」、(2) 本研究の目的及び学術的独自性と創造性、(3) 本研究の着想に至った経緯や、関連する国内外の研究動向と本研究の位置づけ、(4) 本研究で何をどのように、どこまで明らかにしようとするのか、(5) 本研究の目的を達成するための準備状況、について具体的かつ明確に記述すること。

本研究を研究分担者とともに行う場合は、研究代表者、研究分担者の具体的な役割を記述すること。

提案する研究の核心をなす，研究が答えようとする学術的問い ＝研究の究極的な目的



提案する研究は，何を，どこまで明らかにしようとするのか ＝研究の目的



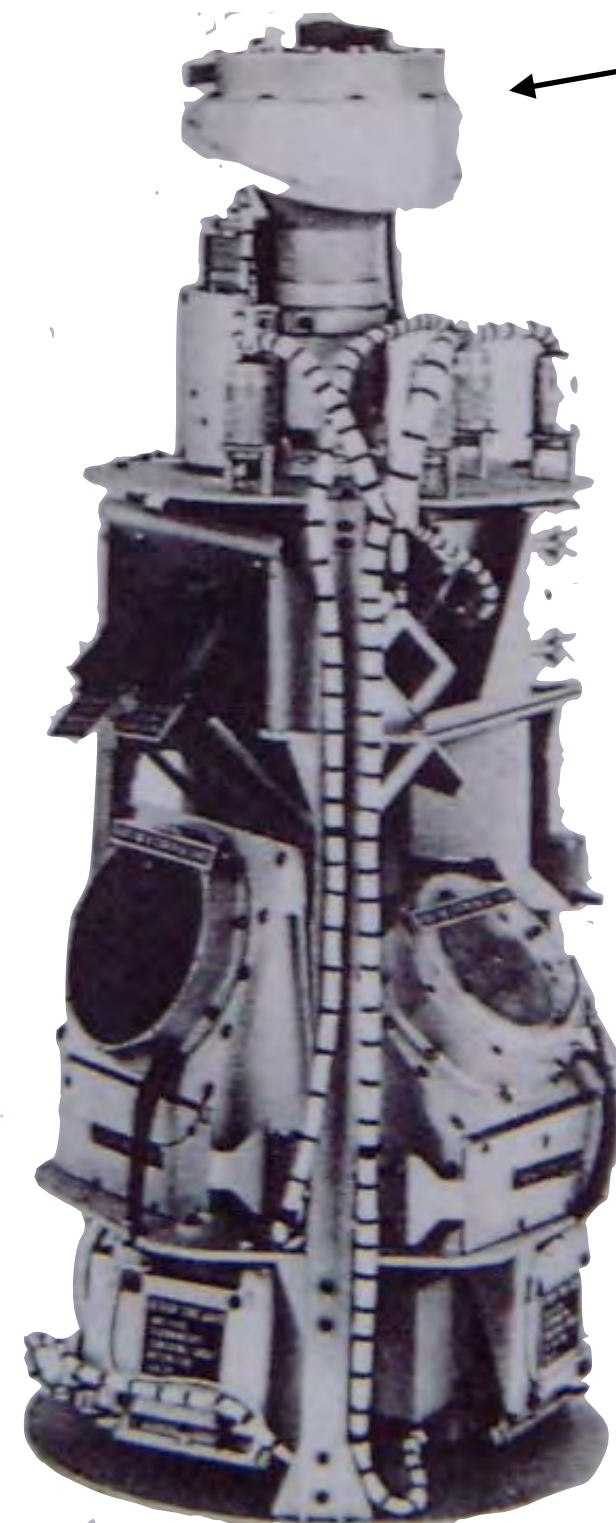
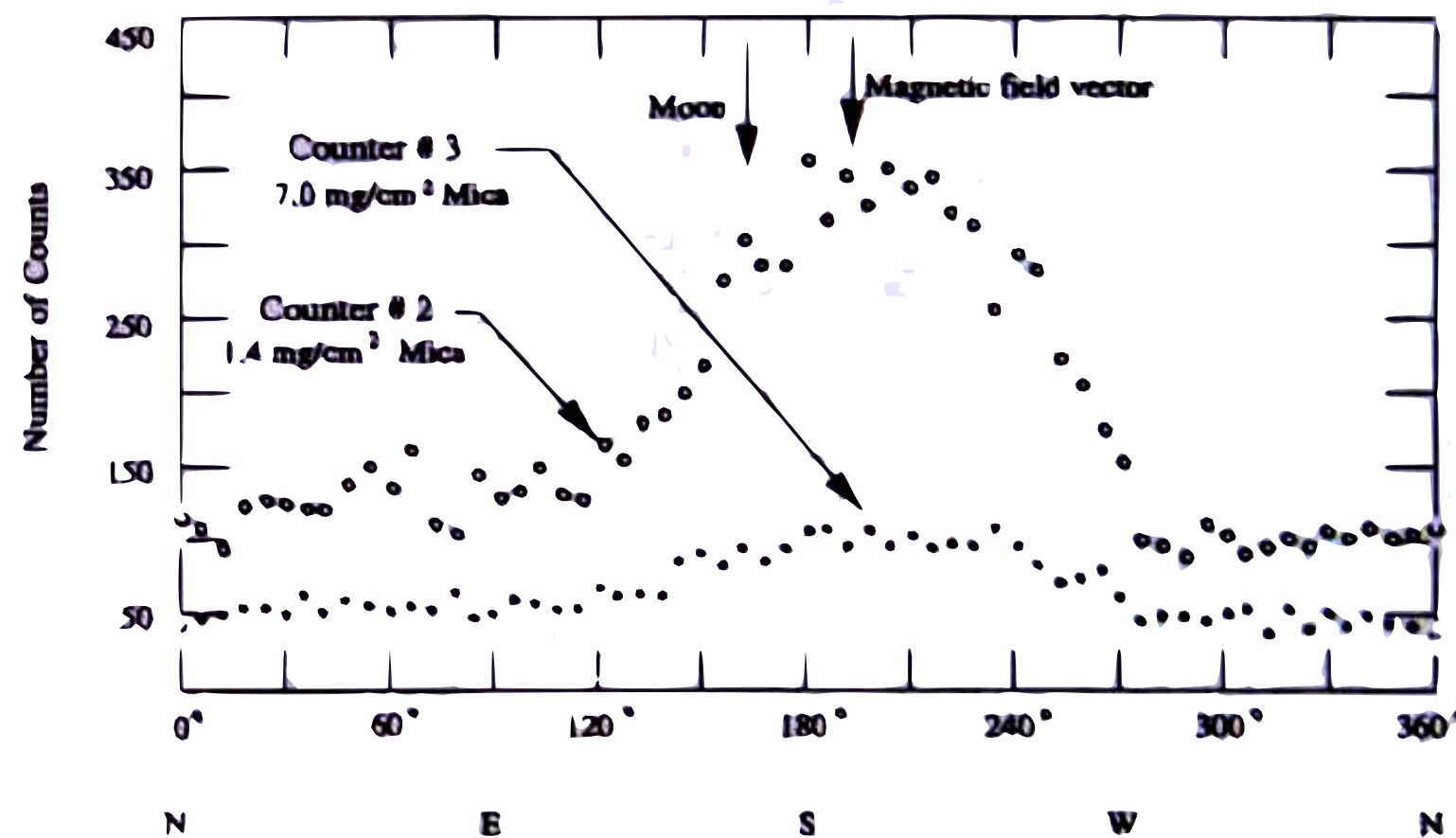
提案する研究は，どのように明らかにしようとするのか ＝具体的に何をするのか

ここから，新しい技術が生まれれば，必要は発明の母

X線天文学の始まり

Milestones of X-ray astronomy in early era

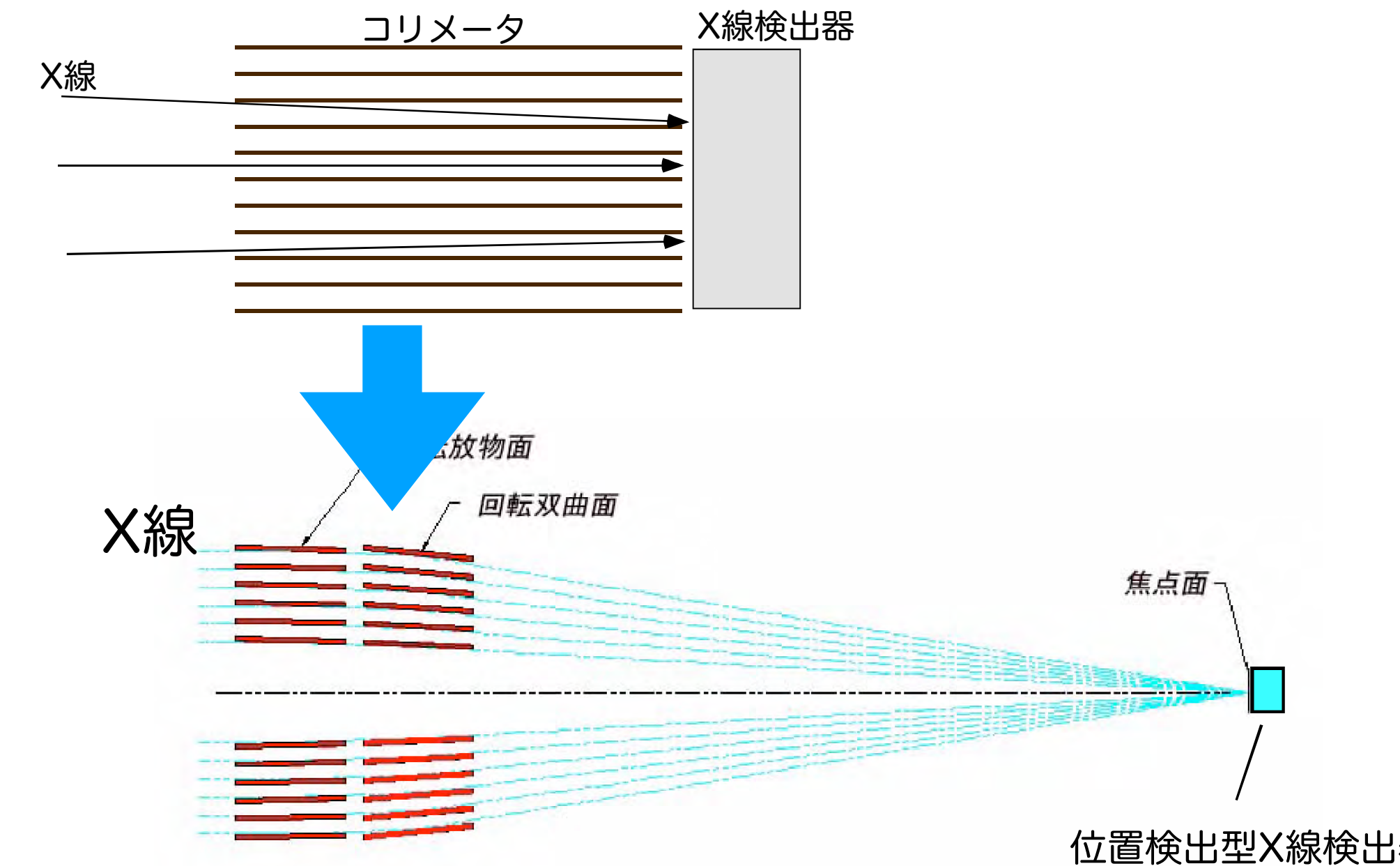
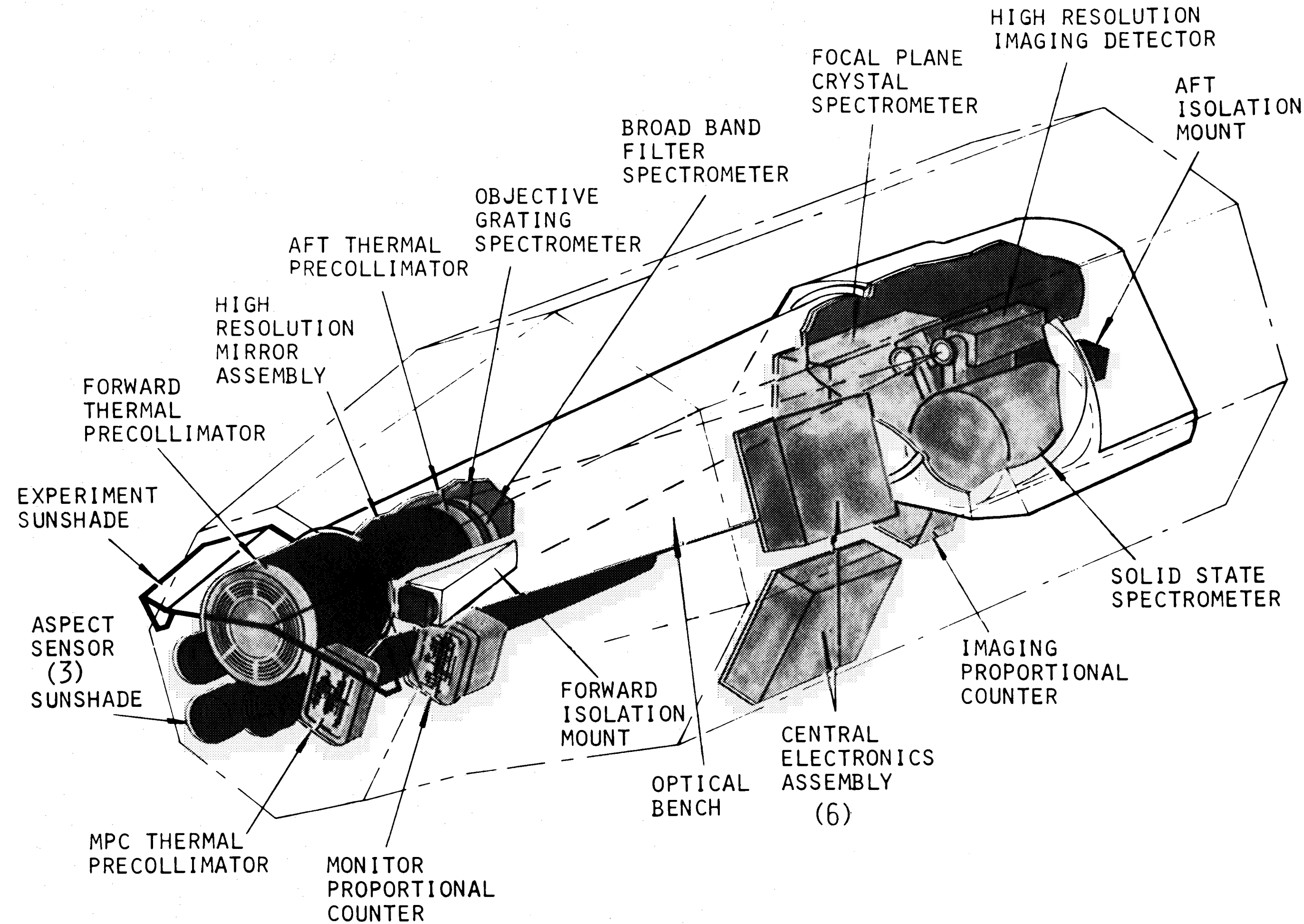
- Sounding Rocket experiment lead by B. Rossi and R. Giacconi (1962)
- The nature is more imaginative than human beings (Rossi)



- 1962 Discovery of the extra-solar X-ray source, Sco X-1, and the cosmic X-ray background (Rossi, Giacconi et al.)
- 1966 Identification of Sco X-1 with an optical object (Oda, Jugaku, et al., Sandage et al. 1966)
The X-ray source was an astronomical object = establishment of X-ray astronomy
- 1970 The first X-ray astronomy satellite, UHURU
The first catalog of X-ray sources
Discovery of X-ray pulsars; *establishment of X-ray binaries*
Discovery of extragalactic X-ray sources
Active galactic nuclei, e.g. M87
Clusters of galaxies, e.g. Coma cluster (1971)
discovery of hot ICM as a significant form of present baryonic matter
- Milli-sec time variations from Cyg X-1; black hole hypothesis (Oda et al.)
- 1971 Identification of Cyg X-1 with an optical/radio object
Lower limit of mass which is higher than the upper limit of neutron star mass = black hole candidate

宇宙X線の検出感度を飛躍的に向上させた技術

HEAO-B, Einstein衛星



荷電粒子バックグラウンドに対するS/Nが飛躍的に向上

検出するX線photon数 $\propto$ 集光面積

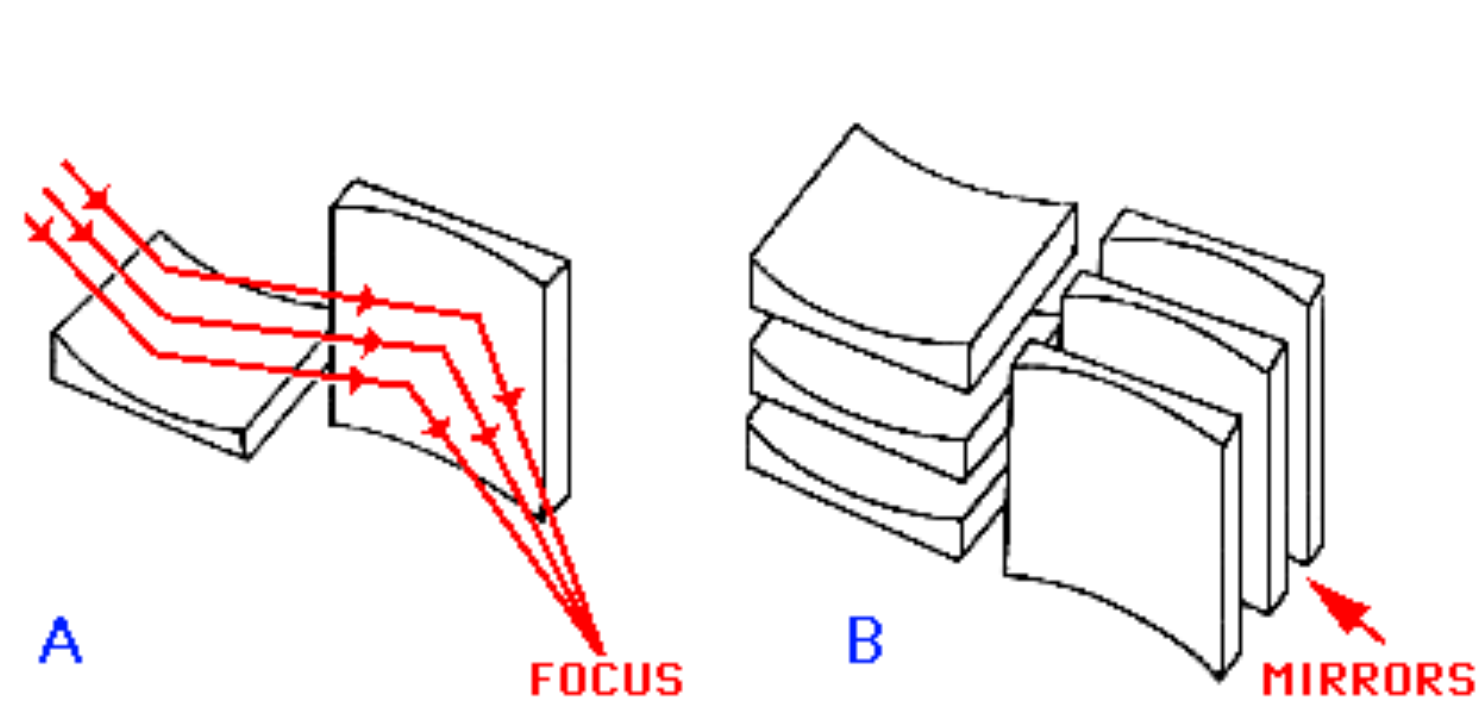
荷電粒子バックグラウンド数 $\propto$ 検出器体積

X線点源の検出感度もX線背景放射の低減により大幅に向上

X線背景放射の量 $\propto$ 観測立体角

Giacconi et al. (1979) ApJ 230, 540

X線集光撮像鏡のSeedsは既にあった

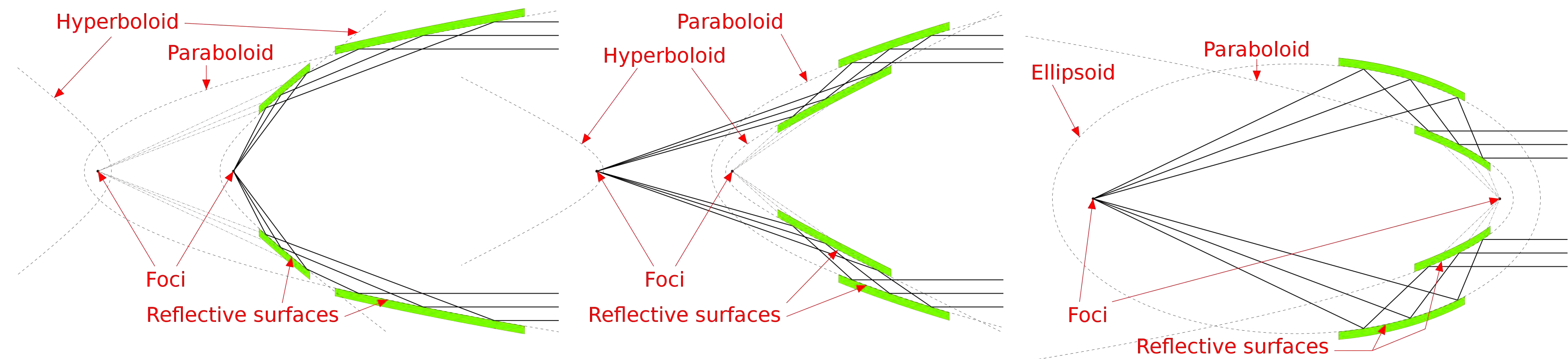


Kirkpatrick-Baez optics

Kirkpatrick, P.; Baez, A. V. (1948). "Formation of optical images by x-rays". Journal of the Optical Society of America. 38 (9): 766–74. doi:10.1364/JOSA.38.000766.

いずれもX線顕微鏡をneedsとする発明

(図はWikipedia から)



Wolter type I optics

Wolter type II

Wolter type III

Wolter, Hans (1952). "Glancing incidence mirror systems as imaging optics for X-rays". Annalen der Physik. 10: 94. doi:10.1002/andp.19524450108

Giacconiらは、Wolter type I を宇宙X線望遠鏡に適した光学系として選択し、nestingする（同心円上状に並べる）ことで、有効面積を増やした。

宇宙望遠鏡として実現するためには、鏡材の選択と加工・保持機構等の多数の開発要素に、協力的な**Engineering**が必要だったと推測できる。

軟X線拡散背景放射 (Soft X-ray Diffuse Background: SXDB)

1970年代

1980年代

1990年代

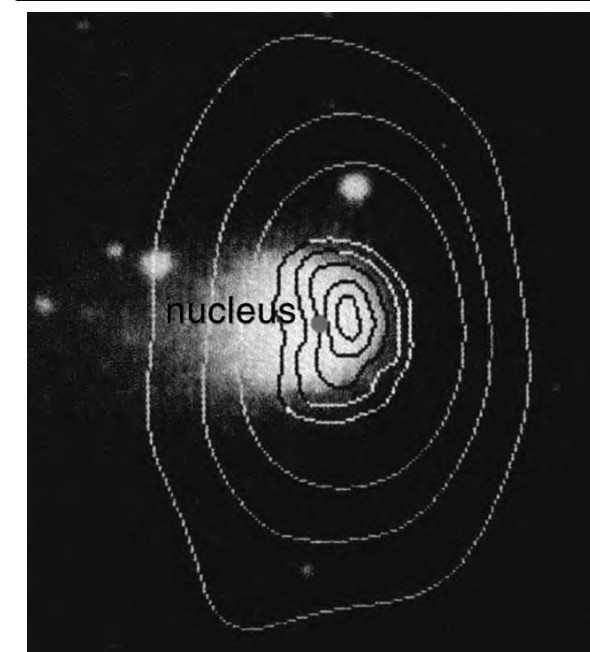
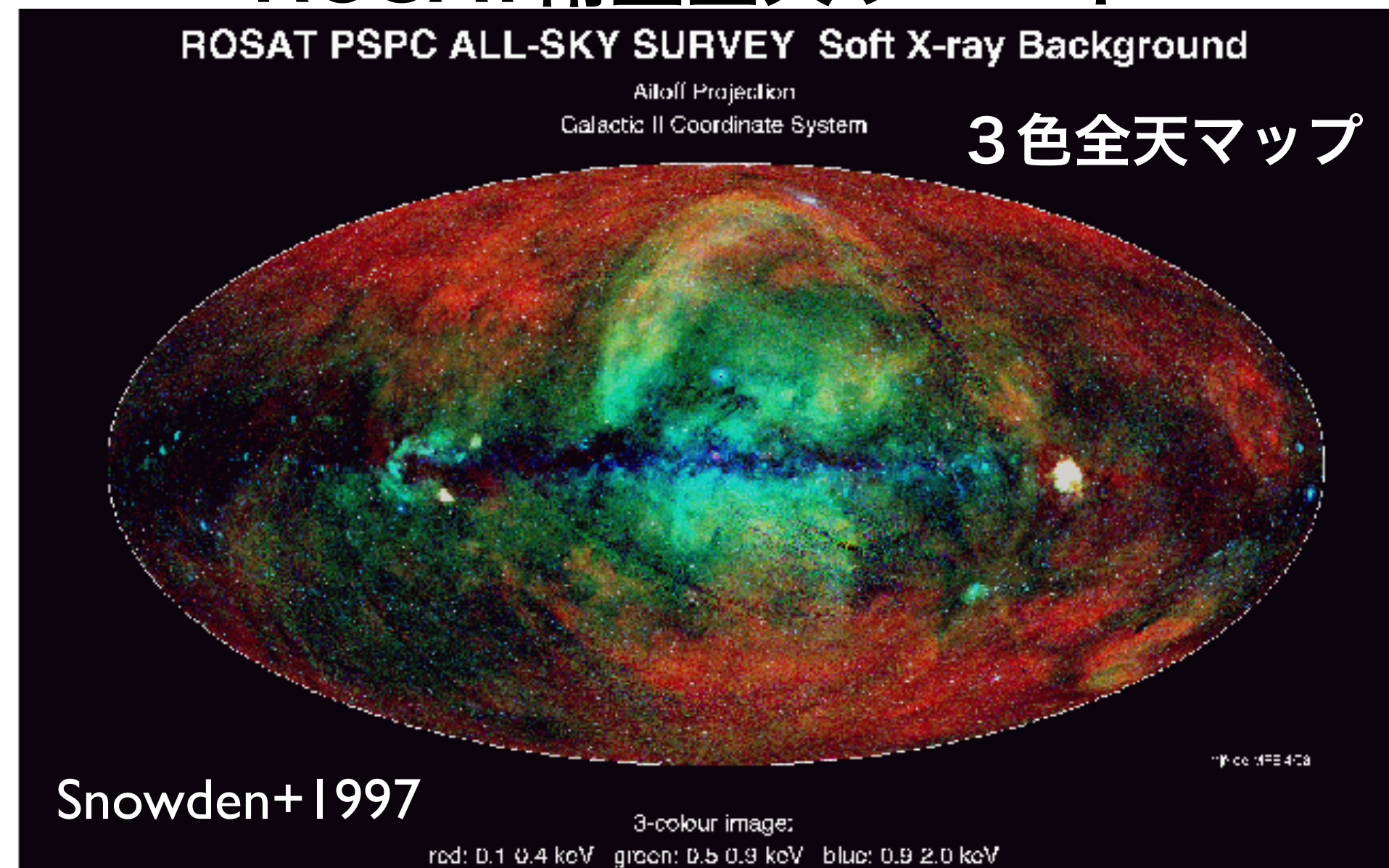
2000年以降

名古屋-Leiden ロケット実験

Wisconsin ロケット実験

- ・ 軟X線～ 0.1- 2keV (キロ電子ボルト)
- ・ 2 keV以上のX線背景放射 (=微弱な点源の重ね合わせ) の延長とは異なる放射 (1968年頃既に認識されていた)
- ・ 1977年の Tanaka & Bleekerで以下が示唆されていた。
- ・ 太陽系は温度約100万度の希薄な高温物質に囲まれている(**Local Bubble**)
- ・ 加えて温度約300万度の高温物質からの放射が存在する

ROSAT衛星全天サーベイ



百武彗星からのX線放射の発見 (Lisse+1996)
太陽圏(Heliosphere)からSXDBへの寄与の可能性

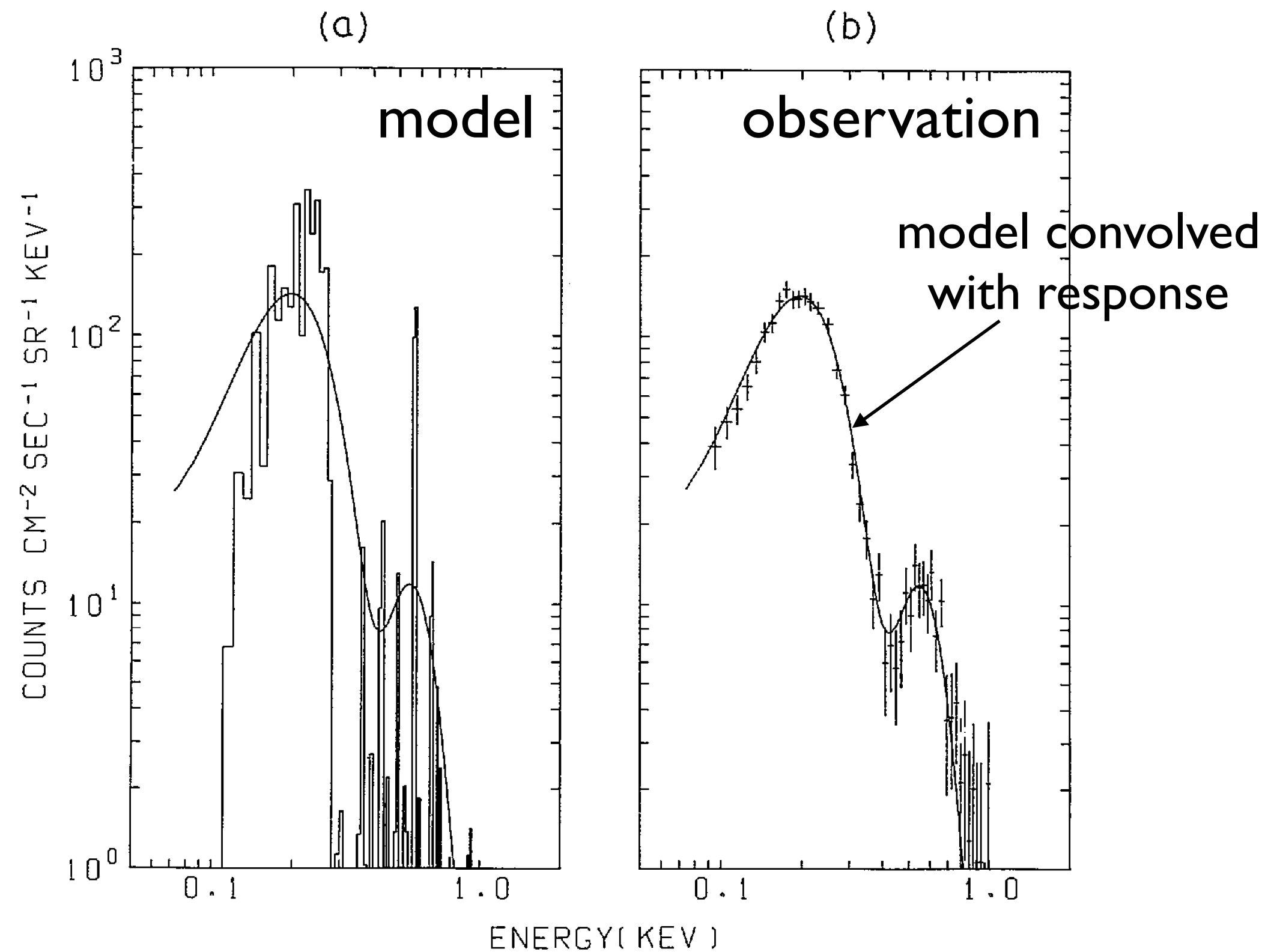
Local Bubbleは必要ない？

Suzaku,
XMM-
Newton
(ESA),
Chandra
(NASA) 各衛星によるスペクトル観測

McCammon+
2002 のカロリメータ
ロケット実験

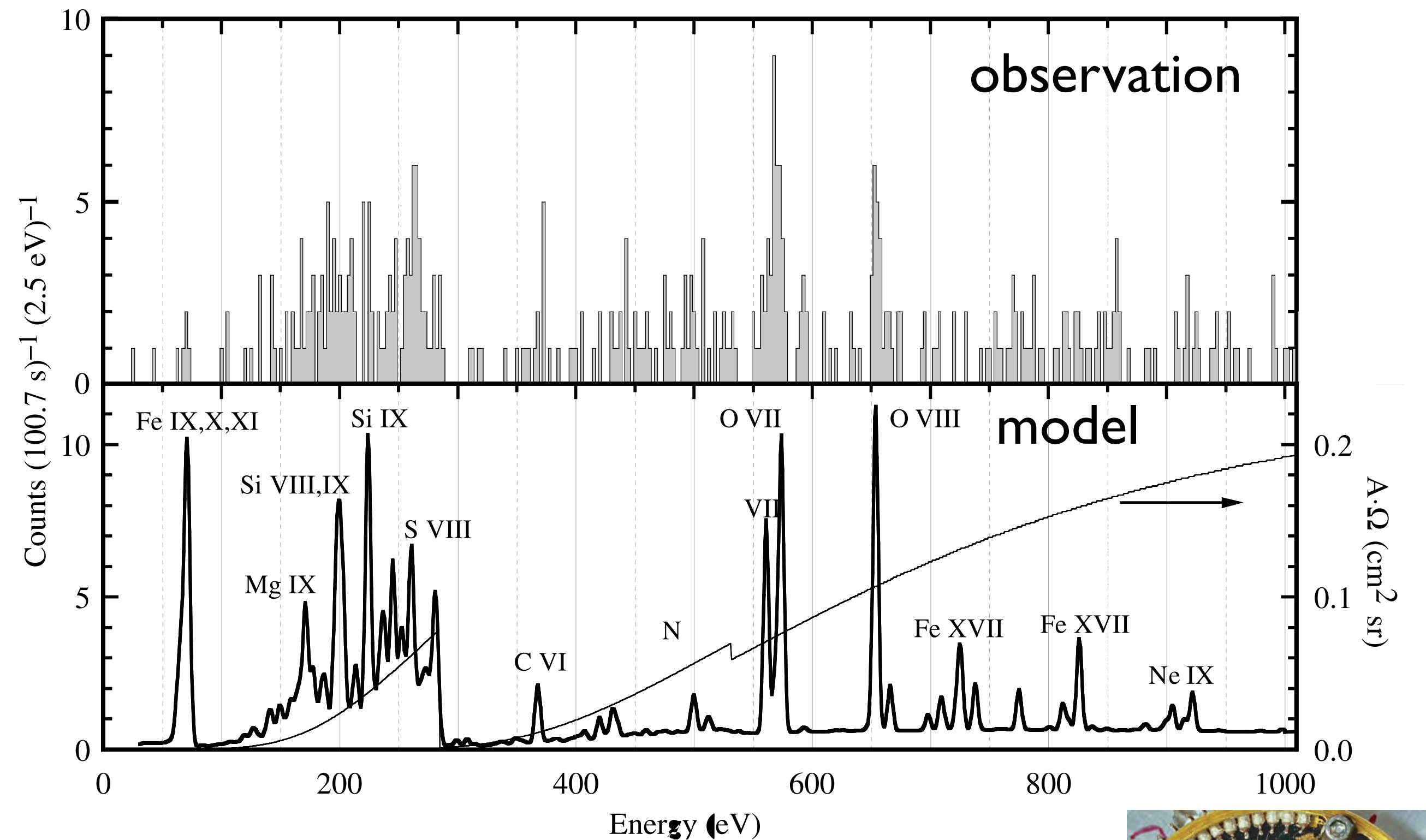
SXDBのエネルギースペクトル

1990年台までのbest spectrum

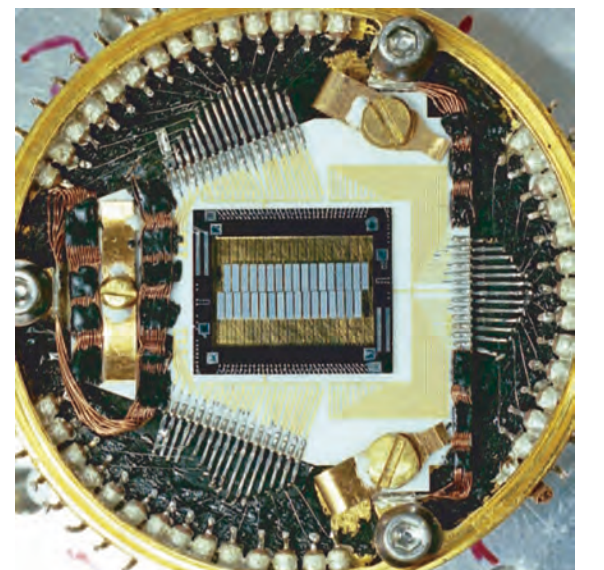


ガス蛍光比例計数管 (GSPC) を用いたロ
ケット実験
Inoue+ (1979)

X-ray microcalorimeterによる breakthrough (2002年)



X線マイクロカロリメータを用いた
ロケット実験McCammon et al.
(2002).



SXDBとX線マイクロカロリメータ

1970年代

1980年代

1990年代

2000年以降

名古屋-Leiden ロケット実験

Wisconsin ロケット実験

Wisconsin ロケット実験のリーダー

赤外線天文学の観測的研究者

COBE衛星のCMB研究でノーベル賞

S. H. Moseley, J. C. Mather & D. McCammon

Thermal detectors as x-ray spectrometers

J. App. Phys. 56, 1257 (1984),

doi:10.1063/1.334129

McCammon+ 2002 のカロリメータ ロケット実験

仮説

- ・ 太陽系は温度約100万度の希薄な高温物質に囲まれている
- ・ 加えて温度約300万度の高温物質からの放射が存在する

観測で仮説を証明するには、高いエネルギー分解能のスペクトル観測が必要
空間的に広がっているので、回折格子などの分散系分光器は使えない。

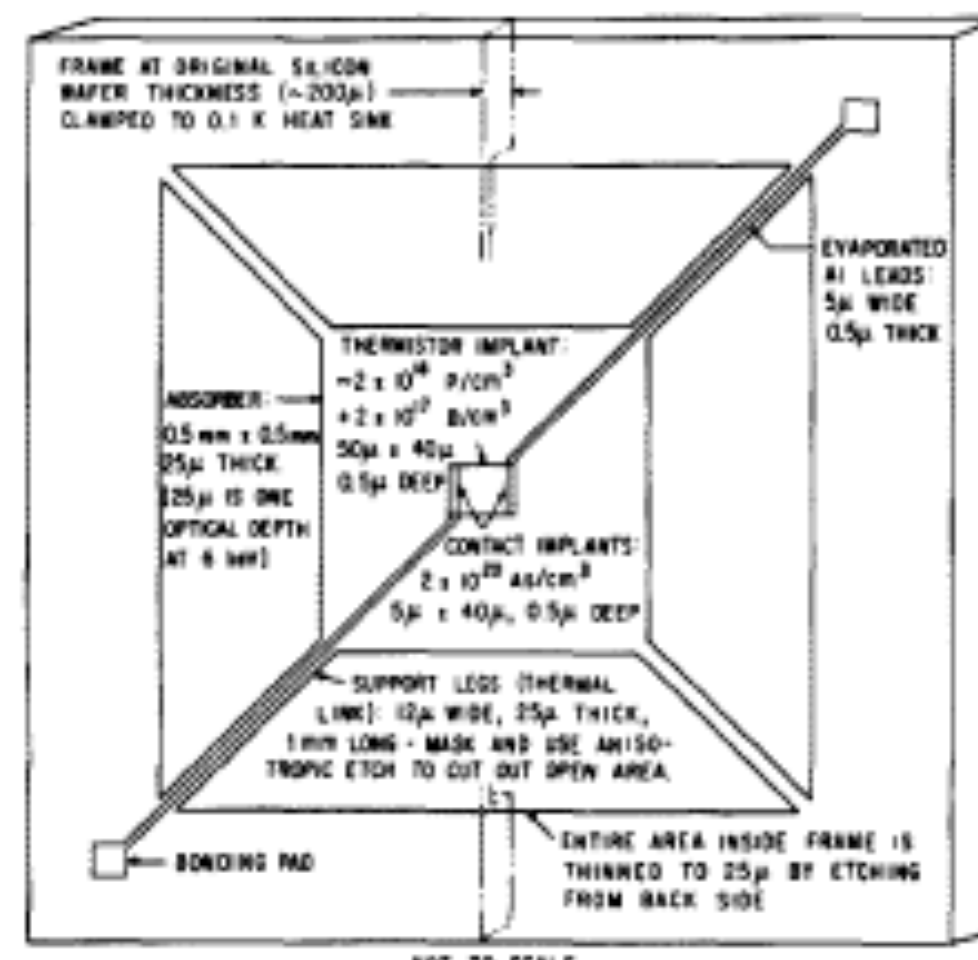


FIG. 1. Concept for 1.1-eV FWHM spectrometer. Heat capacities of component materials are listed in Table I. The design of the device is similar to devices described in Ref. 1, which gives a detailed discussion of the fabrication procedure.

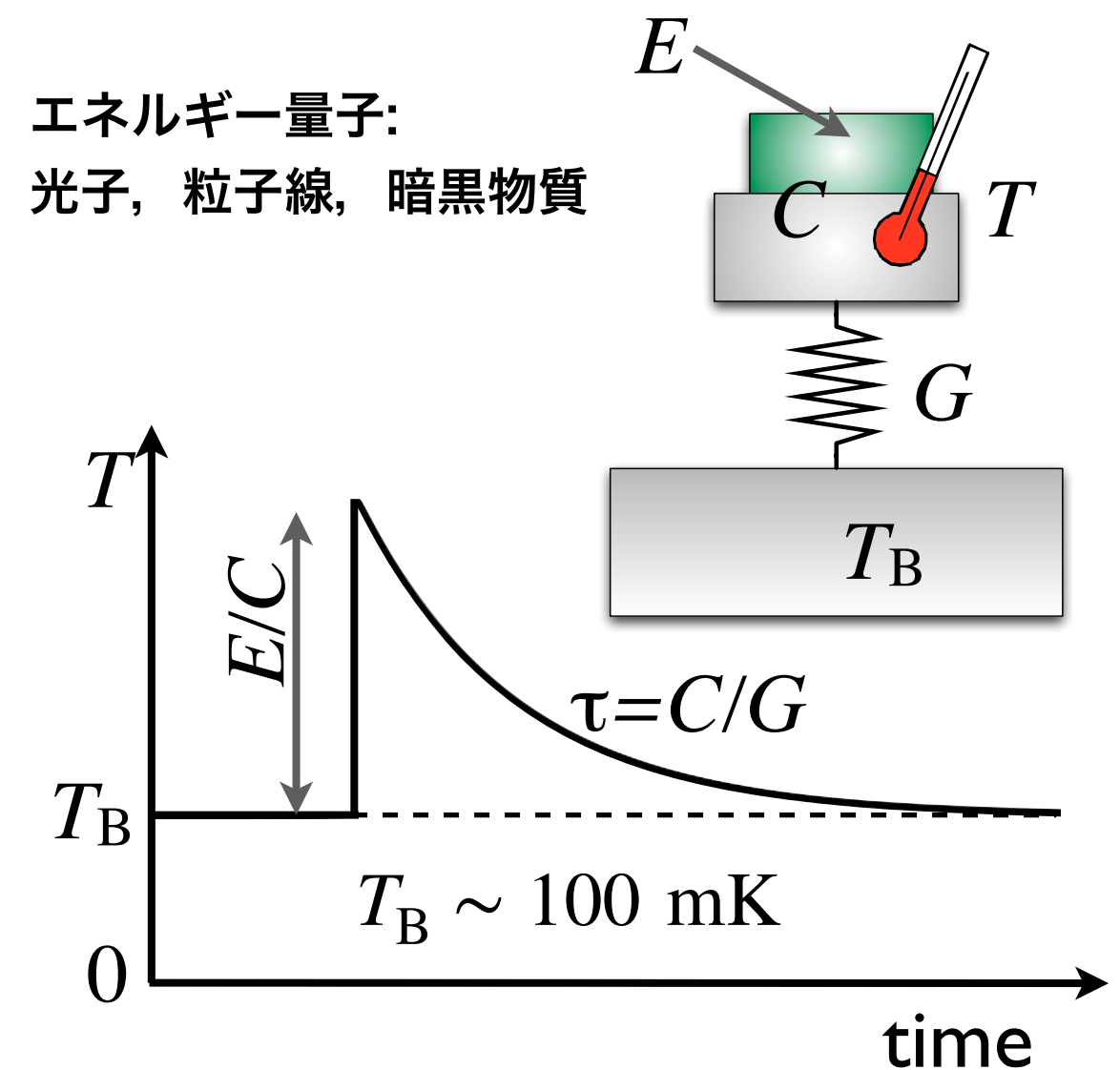
赤外線ボロメータ
(seeds)

X線マイクロカロリメータ

X線光子信号に適した信号処理も提案

エネルギー量子 (quantum)

エネルギー量子:
光子, 粒子線, 暗黒物質



SXDBとX線マイクロカロリメータ

1970年代

1980年代

1990年代

2000年以降

名古屋-Leiden ロケット実験

Wisconsin ロケット実験

Wisconsin ロケット実験のリーダー

赤外線天文学の観測的研究者

COBE衛星のCMB研究でノーベル賞

S. H. Moseley, J. C. Mather & D. McCammon

Thermal detectors as x-ray spectrometers

J. App. Phys. 56, 1257 (1984),

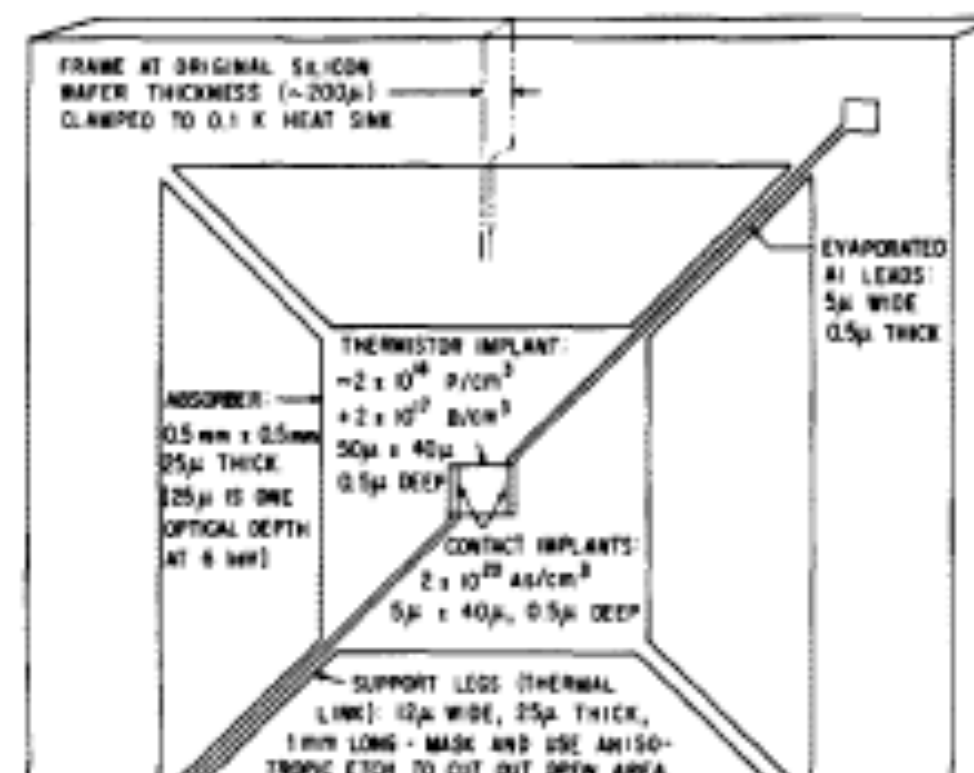
doi:10.1063/1.334129

McCammon+ 2002 のカロリメータ ロケット実験

仮説

- ・ 太陽系は温度約100万度の希薄な高温物質に囲まれている
- ・ 加えて温度約300万度の高温物質からの放射が存在する

観測で仮説を証明するには、高いエネルギー分解能のスペクトル観測が必要
空間的に広がっているので、回折格子などの分散系分光器は使えない。

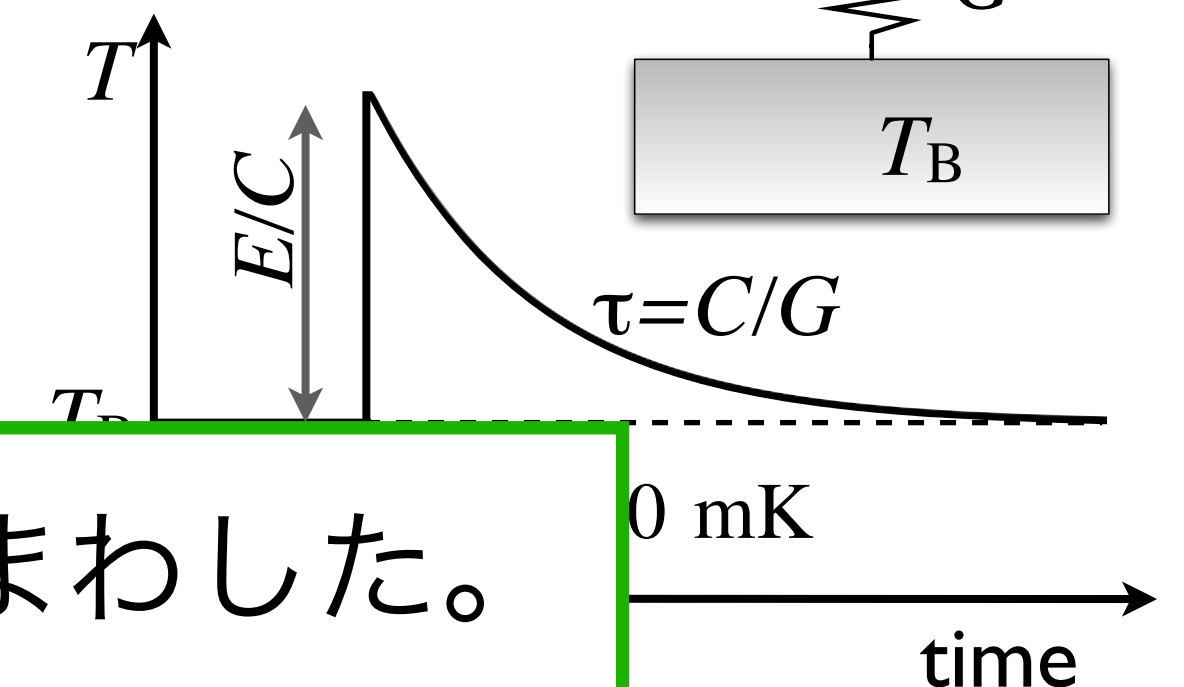
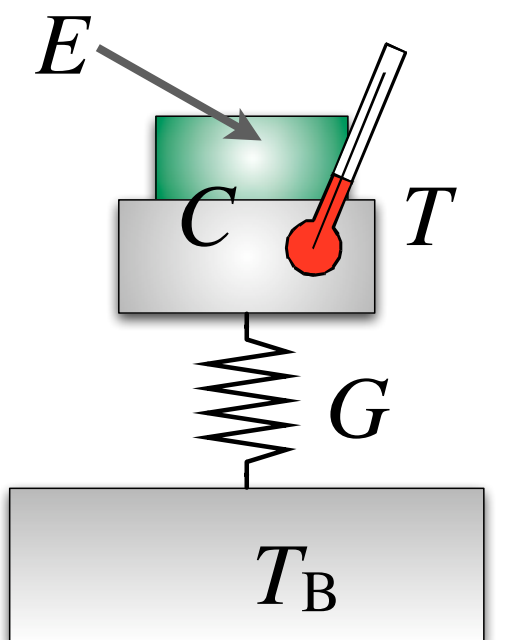


赤外線ボロメータ
(seeds)

X線マイクロカロリメータ

エネルギー量子 (quantum)

エネルギー量子:
光子, 粒子線, 暗黒物質



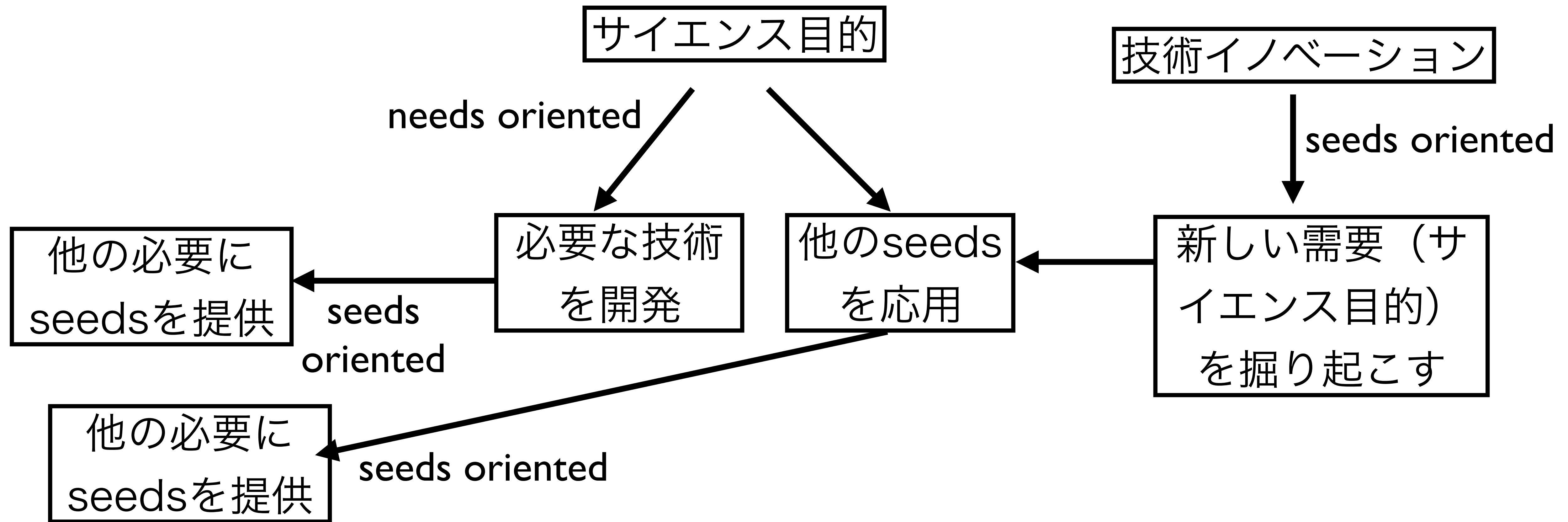
Dan McCammonは30年かけて研究の1サイクルをまわした。

devices described in Ref. 1, which gives a detailed discussion of the fabrication procedure.

ニーズ志向とシーズ志向はこんな風になっている？

必要は発明の母

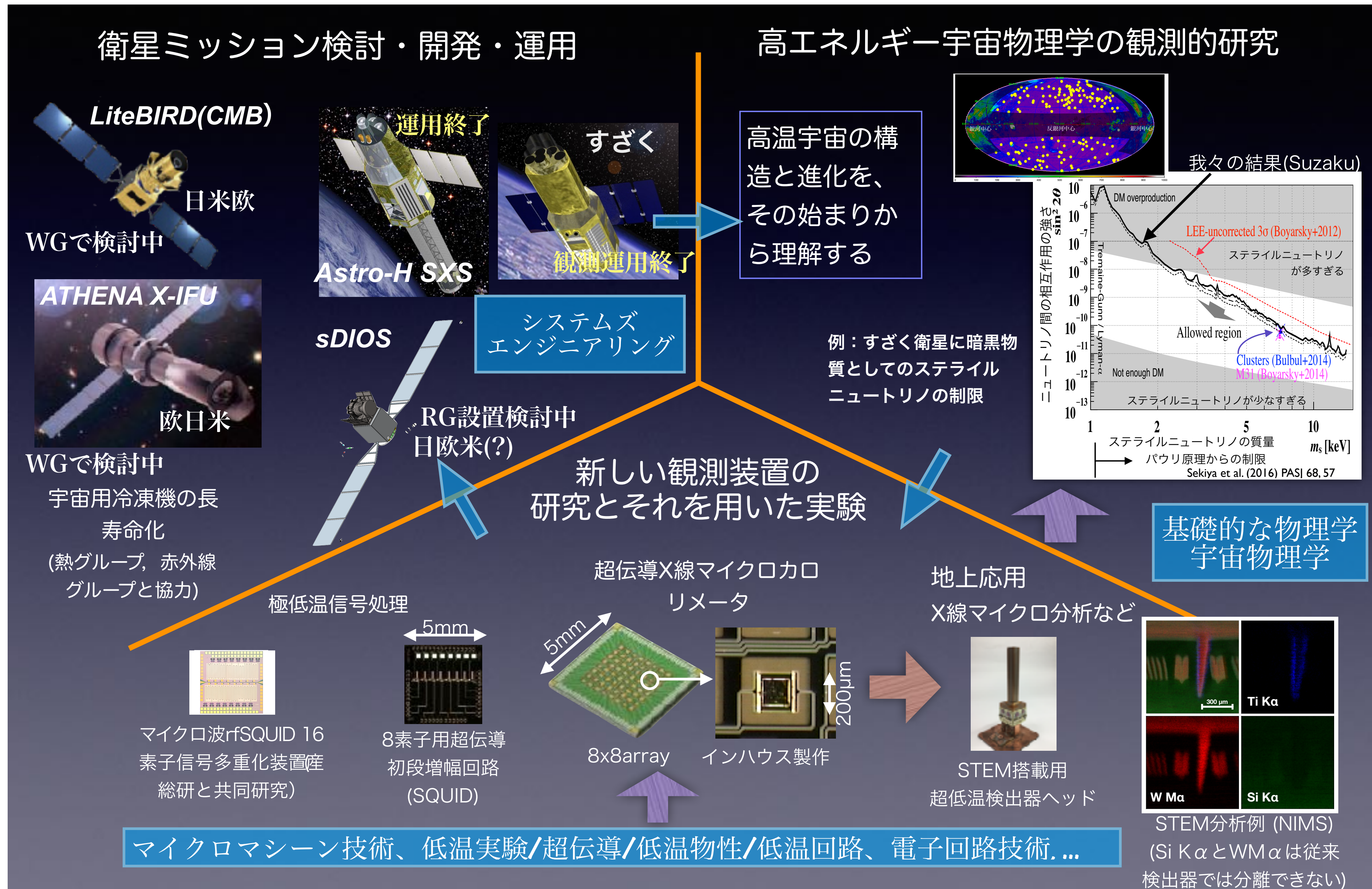
発明は必要の母



使えそうな技術(technology)をresearchすると同時に, seedsの提供先にも常に気を配ることが大事

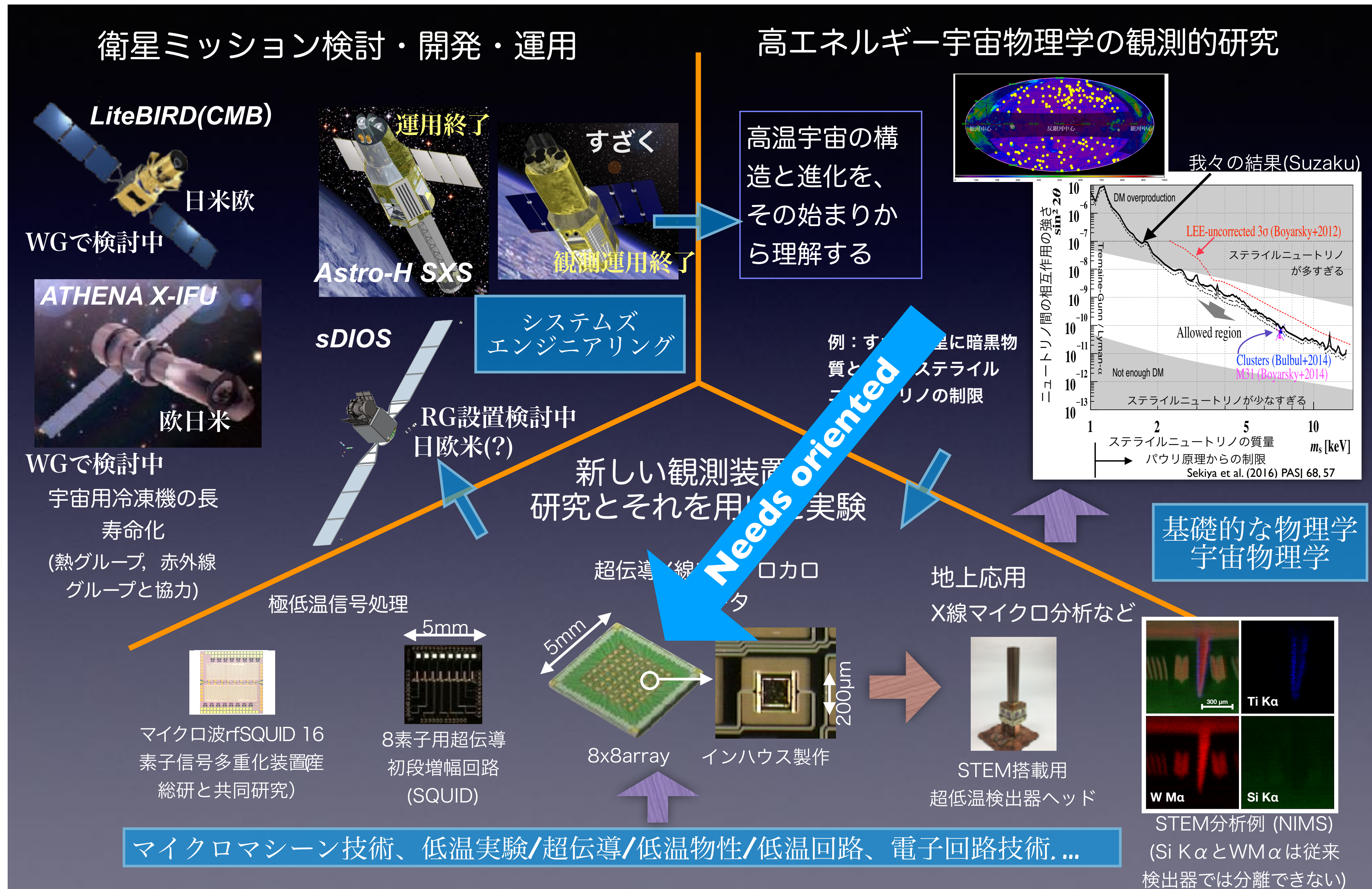
自己紹介 その1

JAXA宇宙研時代の研究室（満田山崎研）の紹介図



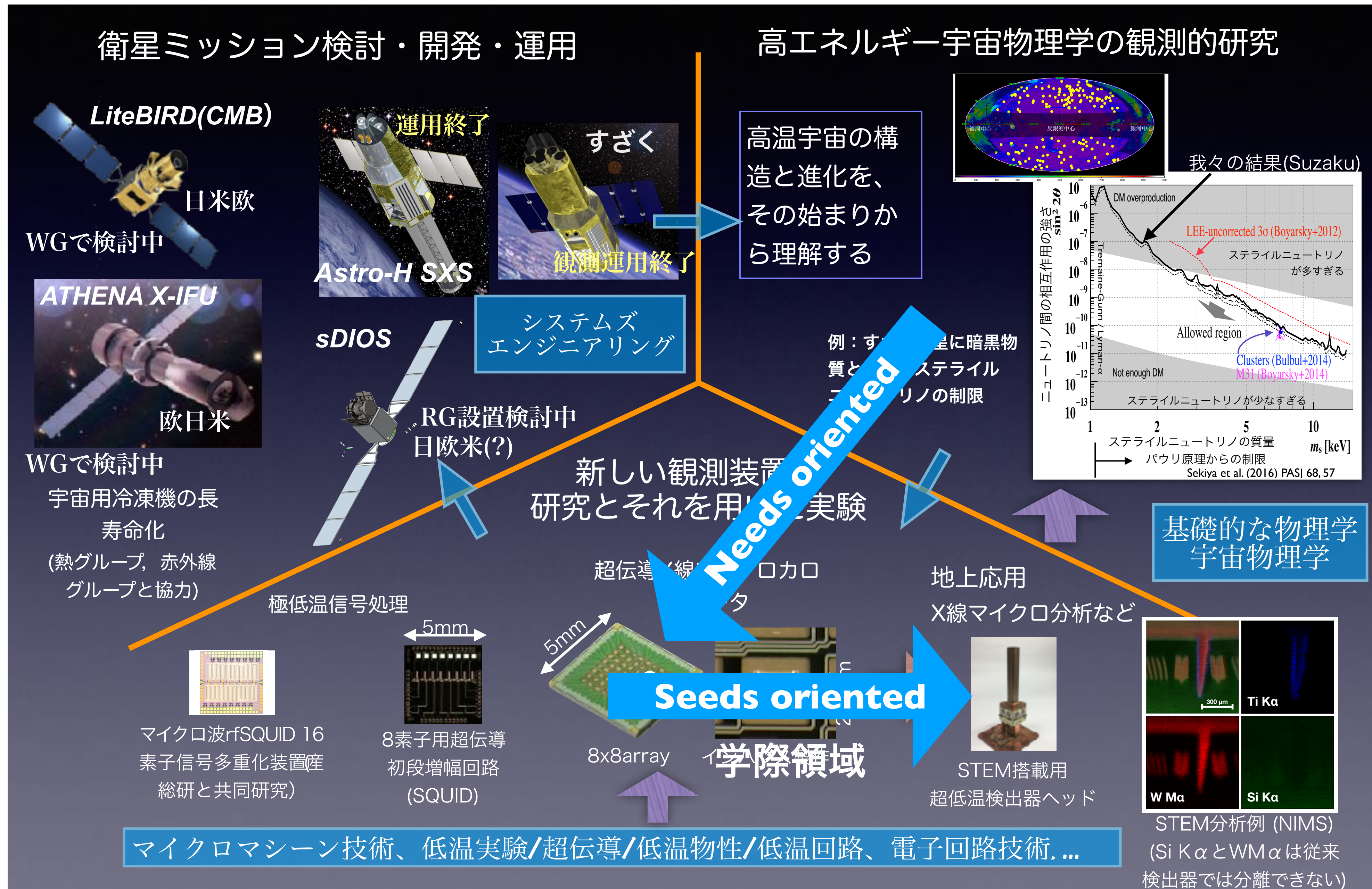
自己紹介 その1

JAXA宇宙研時代の研究室（満田山崎研）の紹介図



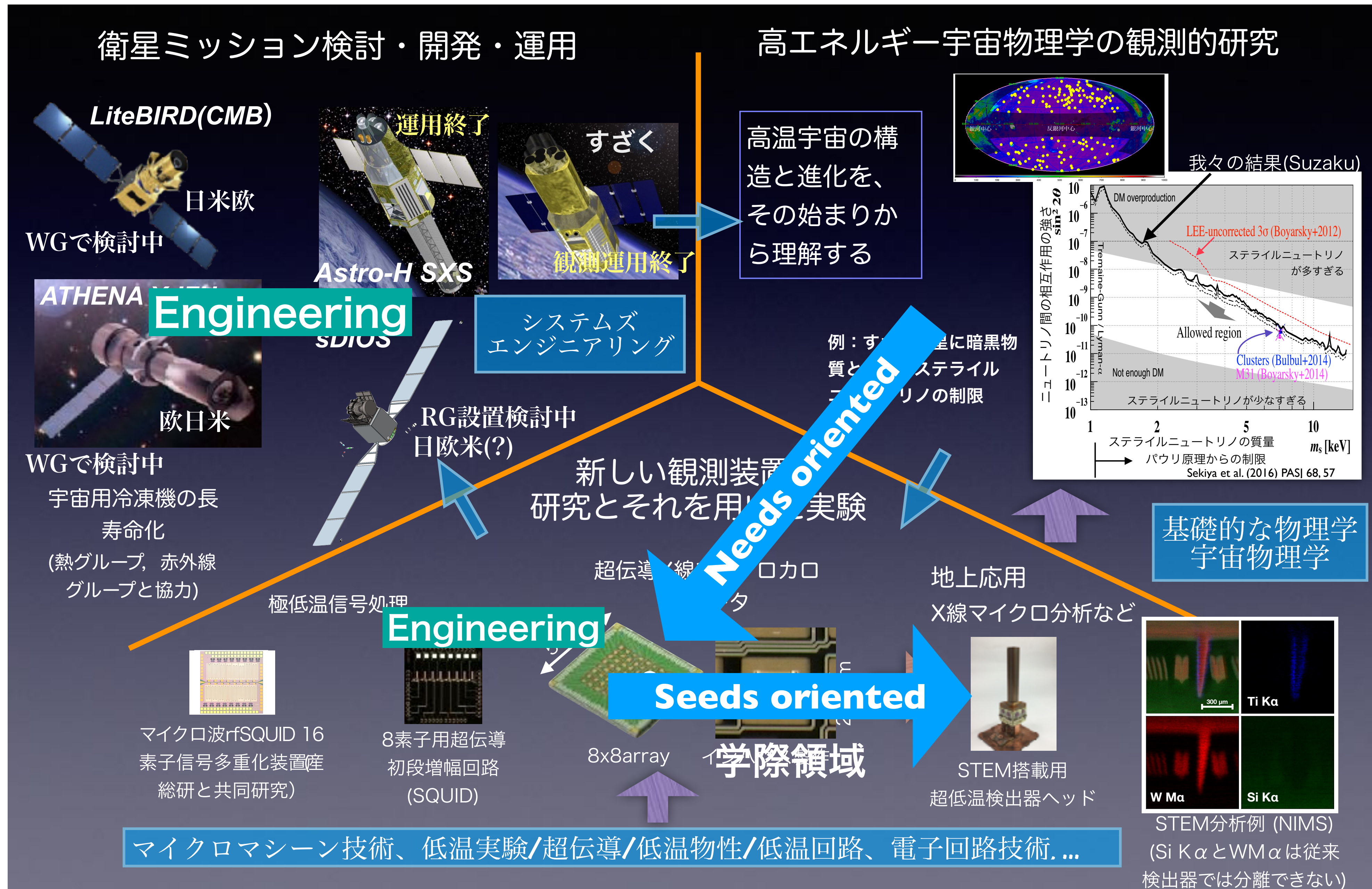
自己紹介 その1

JAXA宇宙研時代の研究室（満田山崎研）の紹介図



自己紹介 その1

JAXA宇宙研時代の研究室（満田山崎研）の紹介図



Engineeringする

- 「Engineering ができているか？」という表現をきいたことがありますか？
 - 実験がうまくゆかない時, その理由として, Technologyはよくても, Engineeringができていない場合が多い。

Technology と Engineering

Technology:

1. scientific knowledge used in practical ways in industry, for example in designing new machines
2. machines or equipment designed using technology

(from Oxford Learner's Dictionary)

訳語は1.2.とも技術

Technology は物理法則に従う世界

Engineering

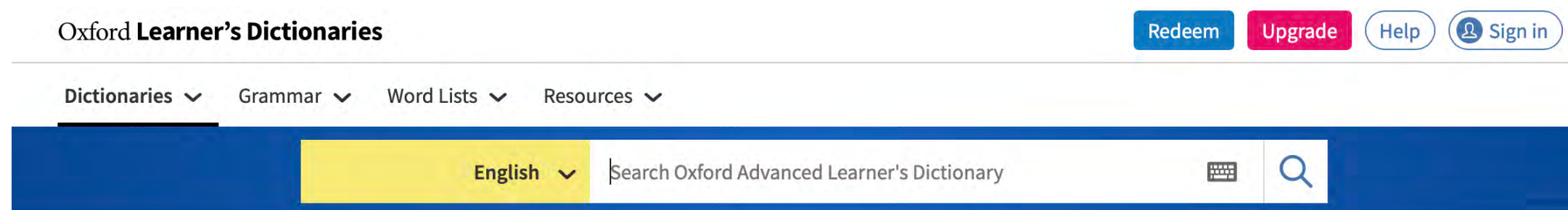
1. the activity of applying scientific knowledge to the design, building and control of machines, roads, bridges, electrical equipment, etc.
2. (also engineering science) the study of engineering as a subject

訳語は1.は技術 又は工学, 2 は工学

Engineeringは, 人によるもの作り／コト作り

・Engineeringは物理法則だけでなく, 作りたいコトの特性, 人間の特性, 使用可能なtechnologyや工業水準にも依存する。経験則や経験値も重要になる。

・コトの中には, 技術開発(Technology R&D), イノベーションや科学研究も含まれるEngineeringはこれらにおいても有用。例: 研究をengineeringする。



(Oxford Learner's Dictionary online)

ヒトによるコト作りの側面が特に強い例

Engineering Judge

- ・ものづくり（e.g. 衛星プロジェクト）の世界にいると、しばしば、Engineering judge という概念に出会う。

標準化されているEngineering judgeの例

- ・設計検証を目的とする試験でかける負荷(QT level)と、製品検証を目的とする試験でかける負荷(AT level) の関係
 - ・宇宙機ではQTは負荷と時間を2倍にとるのが標準
- ・最大負荷時に、使用する材料内部で発生する最大応力と、材料が耐える最大応力との関係（Margin of safty）
 - ・宇宙機では金属であれば、1.25（地上の装置に比べると小さい値でよいとされている）

標準化されていない特別な場合にjudgeが必要になることもよく発生する。そこでは**経験値**が重要。

Systems engineering

- ・システムズエンジニアリングとは、実現に必要な複数分野の専門家を束ねて、Engineered システムを実現するためのアプローチ（成功確率を高める考え方と手段）。
 - ・ここでEngineered システムとは、定義された目的を成し遂げるために、相互作用する複数の要素を組み合わせ、ヒトが実現しようとするもの／コト。
- ・システムの実現には、アーキテクチャ設計の**経験値**が必要
- ・研究もヒトが実現しようとするコトの一つなので、対象になり得る。
 - ➡ KEK QUP システムロギー支援セクションの目的の一つ。

日米欧の宇宙物理・天文学の研究機関の私的印象

- 日本は、（分野を絞ることで）Science と Technologyでは互角、あるいはそれ以上にやれている。
- しかし、Engineeringでは日本が圧倒的に負けている。
 - 私の付き合いのある、米国 MIT (Center for space research) と NASA/ GSFC, オランダ SRON が比較範囲であるが。。
 - このままでは、大型の装置が自前で作れなくなる。
- 海外の機関との共同開発で、彼らのEngineeringを実感することは、機器開発研究者をめざすなら有用な経験になる。
 - 海外機関との共同開発の経験とその深さで、その人の研究開発のアプローチに違いがある、という印象を持っている。
- そんな中で、国立天文台の先端技術センター(ATC)は、Technologyだけでなく、Engineeringもちゃんとやることをめざしている。
 - 先端技術センターの「技術」はTechnologyの「技術」であるが。。。

国立天文台(NAOJ) 先端技術センター(ATC)組織図



これからの新しい観測技術の方向性

- ・ 何事も不可能だと思ふ必要はない
- ・ 他分野を含めた技術の進歩が（知らないところで進み），近い将来どうにかなるかもしれない。

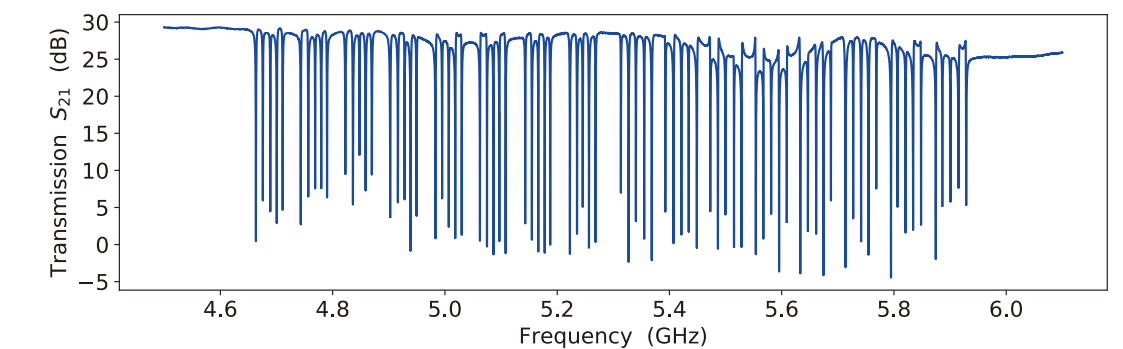
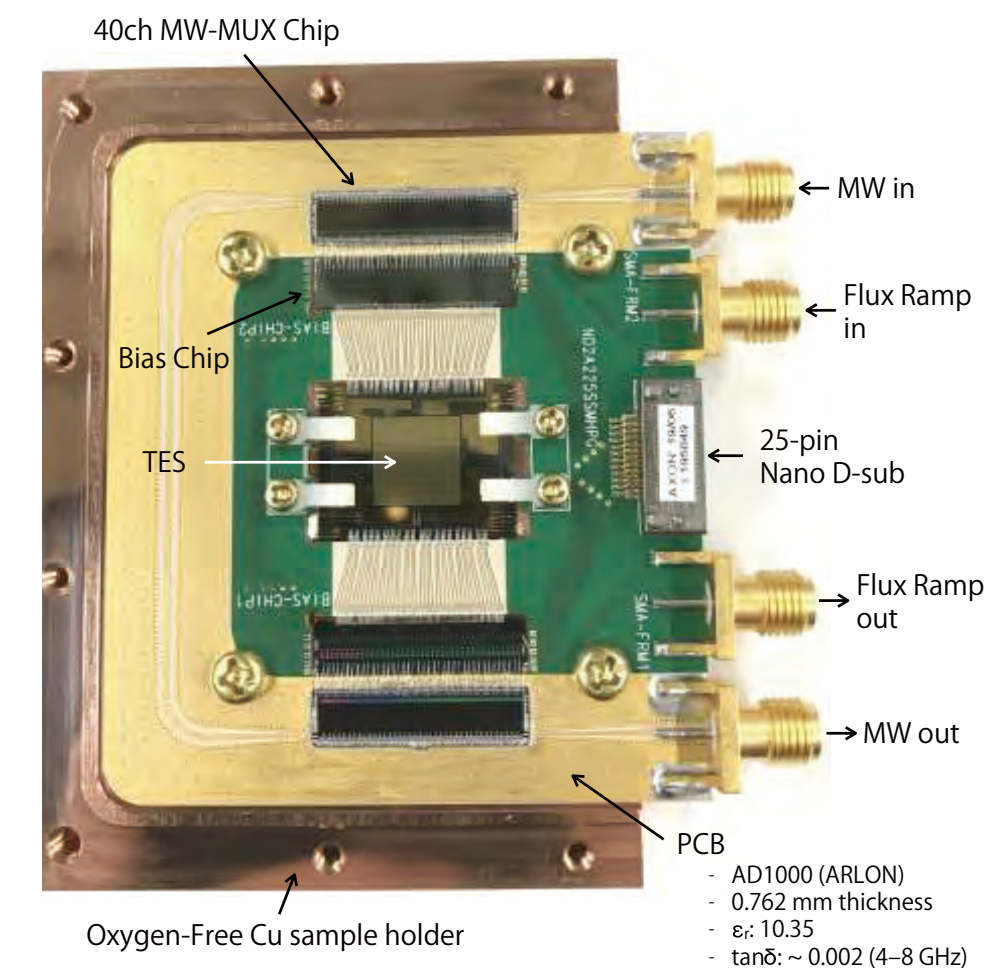
例えば

- ・ ソフトウェアを含めた情報処理技術
 - ・ 電子回路の集積化，省電力化
 - ・ 冷却技術
 - ・
 - ・ 超小型衛星の編隊飛行技術
-
- ・ X線分野の例
 - ・ Full High Definition 相当の画素数と分光能力 >1000 の面分光装置
 - ・ Sub arc secの空間分解能の集光撮像光学系

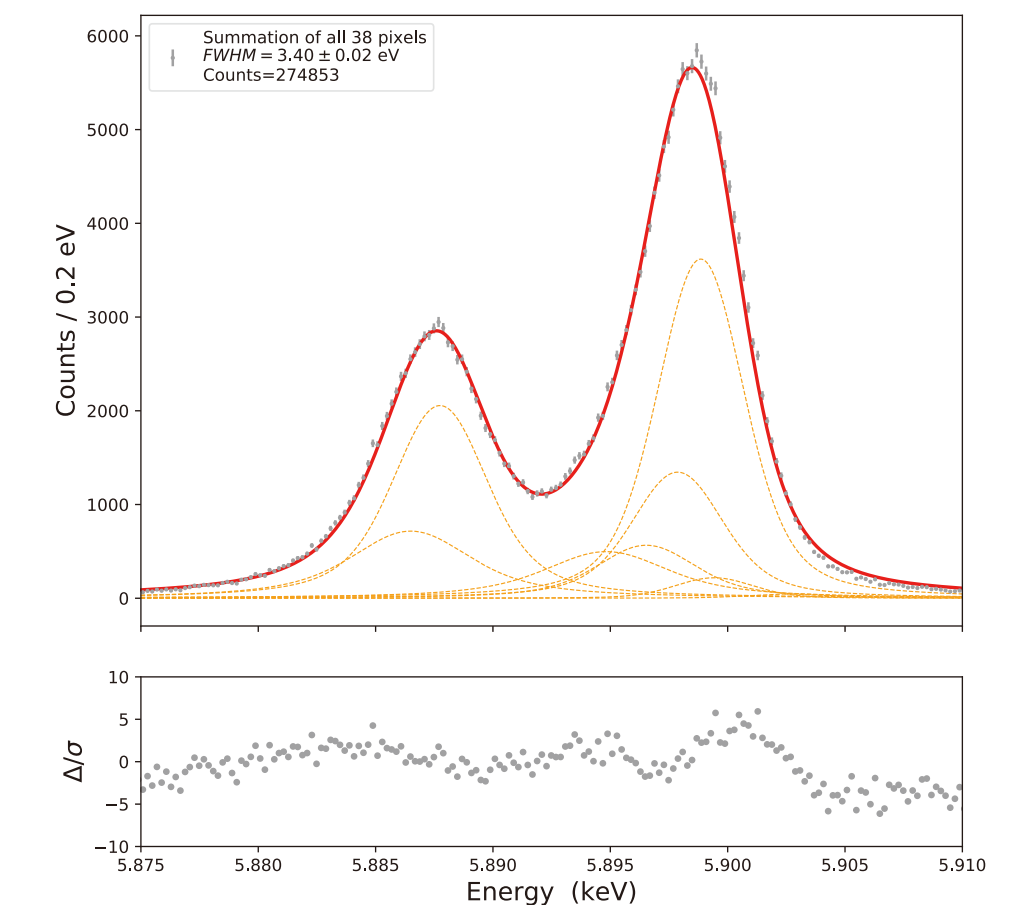
X線分野の例(1)

- Full HDTV相当 (2M) に迫る画素数と、光赤外の面分光装置 (IFU) に匹敵する $R \geq 1000$ の分光能力を持つ面分光装置
- XRISMの 36 pixelsでは面分光とは呼べない。
- 2030年代前半に打ち上げをめざすAthena 衛星搭載の観測装置X-IFU 3k pixels,
 $E/\Delta E = 1000 - 5000$

現状で考えられるのはマイクロカロリメータの延長
例えば, TES型マイクロカロリメータ+マイクロ波
信号多重化



80 Frequency combs



まだ100pixelsのオーダー

$$\Delta E = 3.4\text{eV}@5.9\text{keV}$$

Nakashima+2020

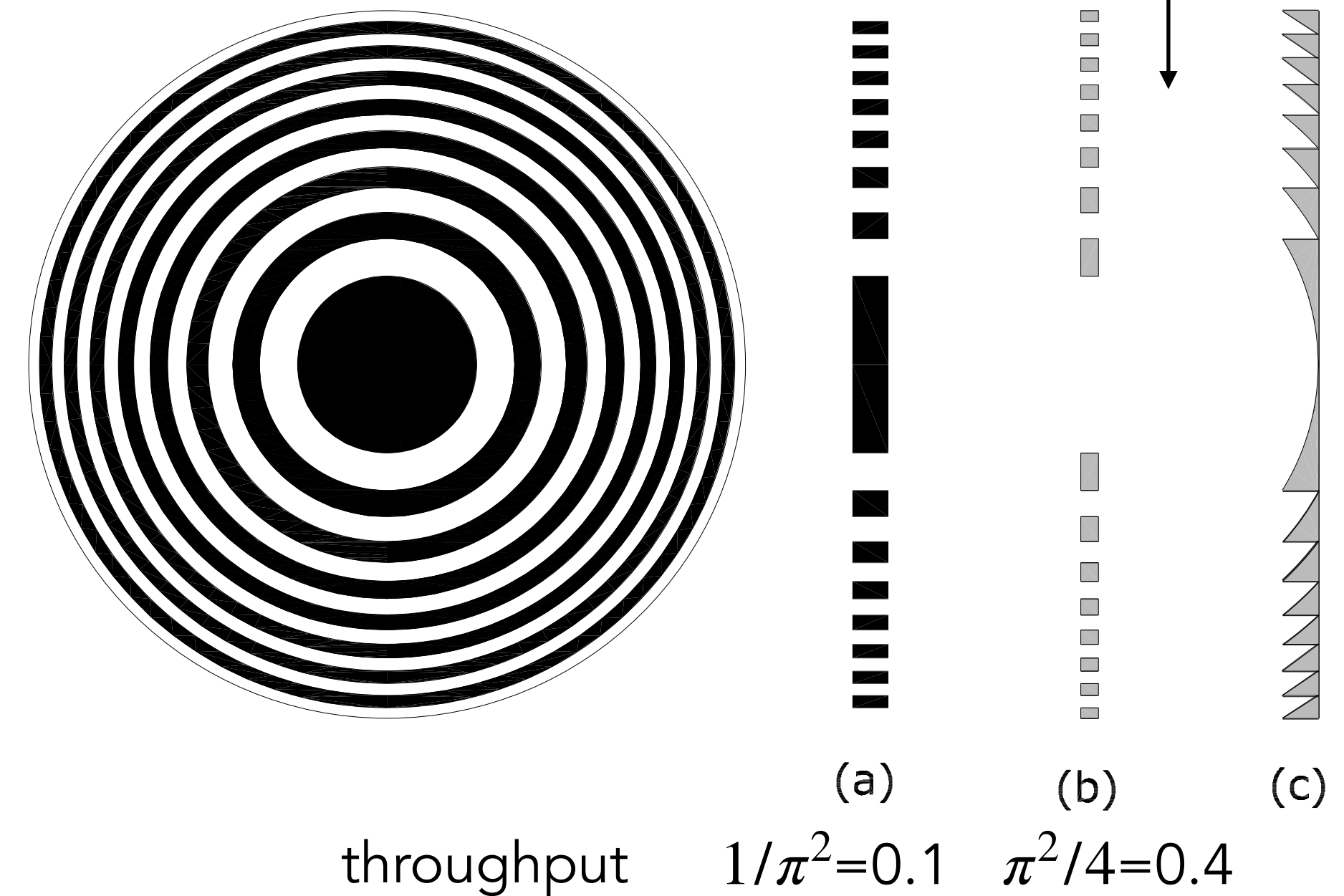
X線分野の例(2)

- sub arc sec 空間分解能の集光撮像光学系
 - これまでのBestは Chandra衛星(1999年打ち上げ)の0.5秒角
 - X線の望遠鏡は回折限界には全く達していない。

候補：回折光学素子 (DOE: Diffractive Optical Element)

- Zone Plate (図のa), Phase Zone plate (b およびbとcの間), Fresnel Lense (c)
- 放射光の分野でzone plateはしばしば使われている。
- めざす空間分解能により, 焦点距離と素子直径に幅広い選択肢。
- 一般に, 視野の狭さと集光面積を大きくできない問題。

Skinner+ 2003



多段のphase shifterを持つ,
(b,c)の間の光学系も可能

- 可視光のDOI光学系はCD/DVDのoptical discのピックアップのレンズとして実用化されている。
- X線に必要なnano scaleの微細構造はChandra衛星のTransmission Gratingで実現している。

まとめ

- 自己紹介：これまでの研究
 - スペースからの天文学・宇宙物理学に必要な3つの研究フェーズ，観測的研究，観測装置研究開発，宇宙ミッションの検討と推進，を同時に進めてきた。
- 必要は発明の母か，発明は必要の母か？
 - X線天文学分野における二つの重大な発明，X線集光撮像光学系，X線マイクロカロリメータどちらもneedsが生じたときに，seedsが既に存在していて，それを「発見した」。
 - needsに対してseedsを十分にresearchすること，逆にseedsにあったneedsをresearchすることが重要。
- TechnologyとEngineering
 - Technologyは，物理法則に従う世界。Engineeringは，ヒトによるコト作りの世界。
 - システムズエンジニアリングはヒトによるコト作り要素が強い例
 - 研究をengineeringする試み (KEK QUP)
 - 日本の研究機関は，米欧の研究機関に比べて Engineeringが弱い（私見）。なんとかしないと，大型の装置が作れなくなる。→ NAOJ ATCのengineeringの取り組み
- これからの新しい技術の方向性
 - 何事も不可能だと思ふ必要はない。他分野を含めた技術(seeds)が知らないところで進んでいる。
 - X線分野の例：Full HDTV 面分光，sub arc secの集光撮像光学系