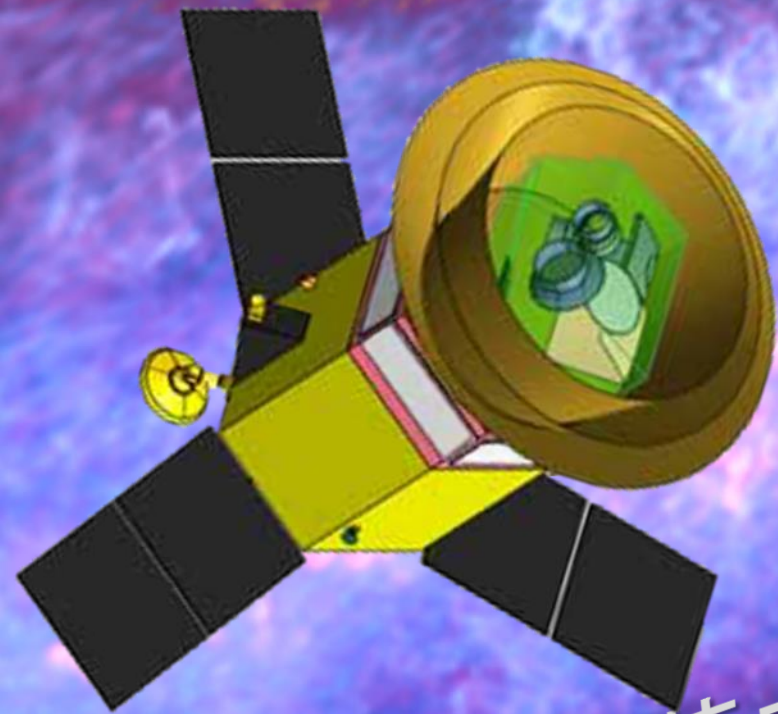


2019年4月13日 @アミューゼ柏 クリスタルホール

宇宙が生まれた時

— 原始重力波が残してくれたプレゼント —



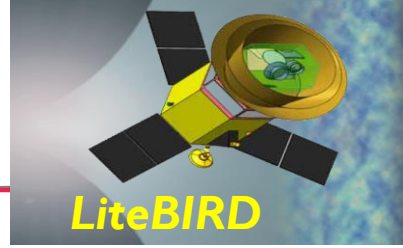
菅井

肇

(東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構(WPI))

背景画像はプランク衛星による

LiteBIRD Joint Study Group (ライトバードチーム)



世界中から約180人の研究者

Y. Sekimoto^{14,37}, P. Ade², K. Arnold⁴⁹, J. Aumont¹², J. Austermann²⁹, C. Baccigalupi¹¹, A. Banday¹², R. Banerji⁵⁶, S. Basak^{7,11}, S. Beckman⁴⁹, M. Bersanelli⁴⁴, J. Borrill²⁰, F. Boulanger⁴, M.L. Brown⁵³, M. Bucher¹, E. Calabrese², F.J. Casas¹⁰, A. Challinor^{50,60,64}, Y. Chinone^{16,47}, F. Columbro⁴⁶, A. Cukierman^{47,36}, D. Curtis⁴⁷, P. de Bernardis⁴⁶, M. de Petris⁴⁶, M. Dobbs²³, T. Dotani^{14,37}, L. Duband³, JM. Duval³, A. Ducout¹⁶, K. Ebisawa¹⁴, T. Elleflot⁴⁹, H. Eriksen⁵⁶, J. Errard¹, R. Flauger⁴⁹, C. Franceschet⁵⁴, U. Fuskeland⁵⁶, K. Ganga¹, J.R. Gao³⁵, T. Ghigna^{16,57}, J. Grain⁹, A. Gruppuso⁶, N. Halverson⁵¹, P. Hargrave², T. Hasebe¹⁴, M. Hasegawa^{5,37}, M. Hattori⁴², M. Hazumi^{5,14,16,37}, S. Henrot-Versille¹⁹, C. Hill^{21,47}, Y. Hirota³⁸, E. Hivon⁶¹, D.T. Hoang^{1,63}, J. Hubmayr²⁹, K. Ichiki²⁴, H. Imada¹⁹, H. Ishino³⁰, G. Jaehnig⁵¹, H. Kanai⁵⁹, S. Kashima²⁵, K. Kataoka³⁰, N. Katayama¹⁶, T. Kawasaki¹⁷, R. Keskitalo^{20,48}, A. Kibayashi³⁰, T. Kikuchi¹⁴, K. Kimura³¹, T. Kisner^{20,48}, Y. Kobayashi³⁹, N. Kogiso³¹, K. Kohri⁵, E. Komatsu²², K. Komatsu³⁰, K. Konishi³⁹, N. Krachmalnicoff¹¹, C.L. Kuo^{34,36}, N. Kurinsky^{34,36}, A. Kushino¹⁸, L. Lamagna⁴⁶, A.T. Lee^{21,47}, E. Linder^{21,48}, B. Maffei⁹, M. Maki⁵, A. Mangilli¹², E. Martinez-Gonzalez¹⁰, S. Masi⁴⁶, T. Matsumura¹⁶, A. Mennella⁵⁴, Y. Minami⁵, K. Mistuda¹⁴, D. Molinari^{52,6}, L. Montier¹², G. Morgante⁶, B. Mot¹², Y. Murata¹⁴, A. Murphy²⁸, M. Nagai²⁵, R. Nagata⁵, S. Nakamura⁵⁹, T. Namikawa²⁷, P. Natoli⁵², T. Nishibori¹⁵, H. Nishino⁵, C. O'Sullivan²⁸, H. Ochi⁵⁹, H. Ogawa³¹, H. Ogawa¹⁴, H. Ohsaki³⁸, I. Ohta⁵⁸, N. Okada³¹, G. Patanchon¹, F. Piacentini⁴⁶, G. Pisano², G. Polenta¹³, D. Poletti¹¹, G. Puglisi³⁶, C. Raun⁴⁷, S. Realini⁵⁴, M. Remazeilles⁵³, H. Sakurai³⁸, Y. Sakurai¹⁶, G. Savini⁴³, B. Sherwin^{50,65,21}, K. Shinozaki¹⁵, M. Shiraishi²⁶, G. Signorelli⁸, G. Smecher⁴¹, R. Stompor¹, H. Sugai¹⁶, S. Sugiyama³², A. Suzuki²¹, J. Suzuki⁵, R. Takaku^{14,40}, H. Takakura^{14,39}, S. Takakura¹⁶, E. Taylor⁴⁸, Y. Terao³⁸, K.L. Thompson^{34,36}, B. Thorne⁵⁷, M. Tomasi⁴⁴, H. Tomida¹⁴, N. Trappe²⁸, M. Tristram¹⁹, M. Tsuji²⁶, M. Tsujimoto¹⁴, S. Uozumi³⁰, S. Utsunomiya¹⁶, N. Vittorio⁴⁵, N. Watanabe¹⁷, I. Wehus⁵⁶, B. Westbrook⁴⁷, B. Winter⁶², R. Yamamoto¹⁴, N.Y. Yamasaki¹⁴, M. Yanagisawa³⁰, T. Yoshida¹⁴, J. Yumoto³⁸, M. Zannoni⁵⁵, A. Zonca³³,

目次

第一章 時間をさかのぼって

0. 生まれたときを知りたい？
1. 光は速い。でも、無限に速くはない。
2. 空間が膨張している！生活していて感じないけど。。
3. 宇宙誕生後4億年のつわもの銀河。
4. “暗黒時代”。いつか脚光を浴びる日がくる。
5. 離ればなれはいやだ。でも、そこから旅が始まる。
6. もっと昔へ。

第二章 もっと昔へ。技術の結集で挑む。

生まれたときを知りたい？



光は1秒間に30万キロメートル進む。

光の速度が無限ではないので、昔へさかのぼれる！

光は速い。でも、無限に速くはない。



1849年アルマン・フィゾー：地上実験で光の速さを測った。歯車の助け。

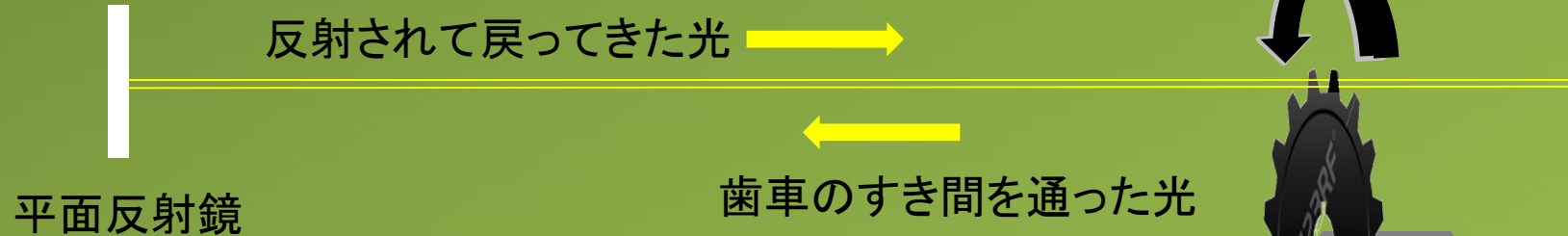
光が無限に速く進むなら、

歯車をどれだけ速く回しても、隙間を通過して行った光はその隙間をぬって返ってくるはず。

実際は

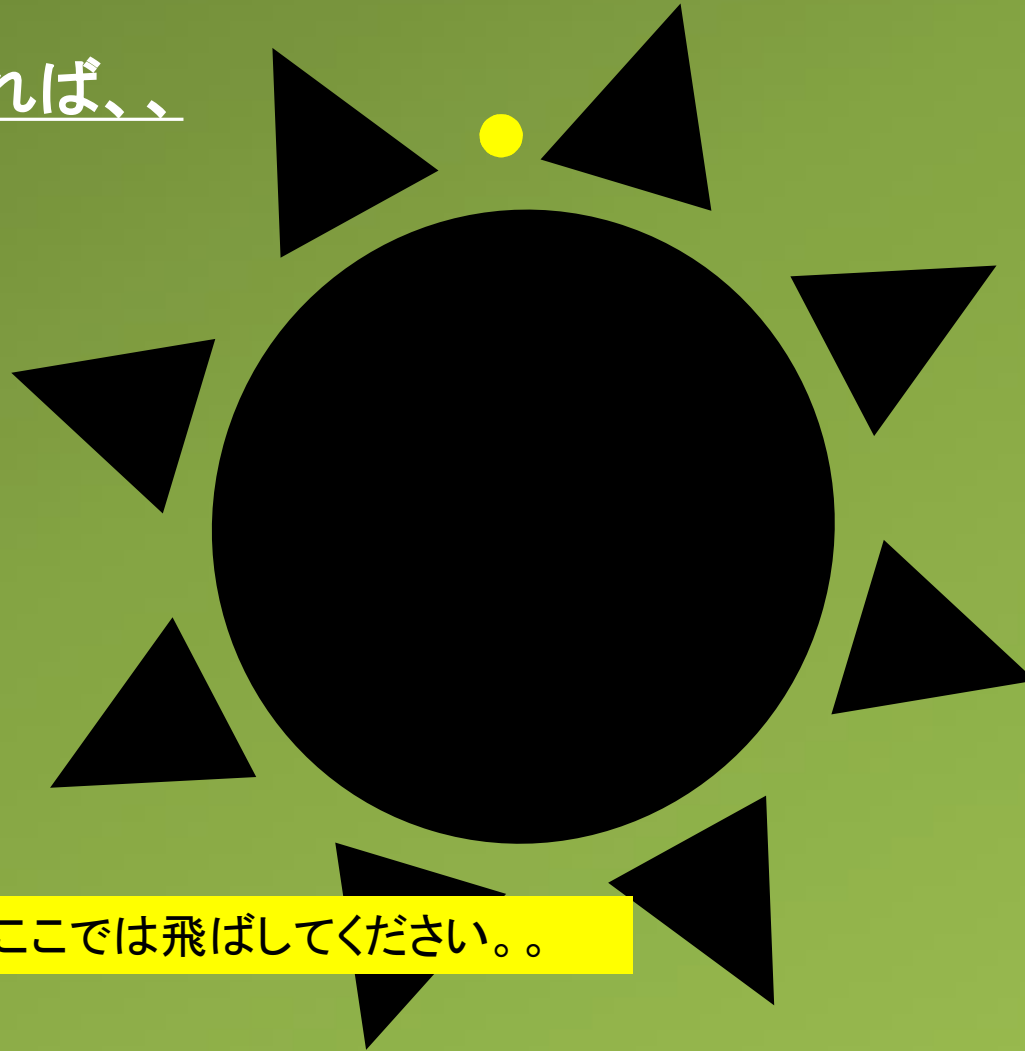
歯車をどんどん速く回すと、暗くなった。

光が返ってくるまで時間がかかって、その間に、歯が光をさえぎるところまで来てしまったということ。



歯車と光の往復の関係をスローモーションで表すと:

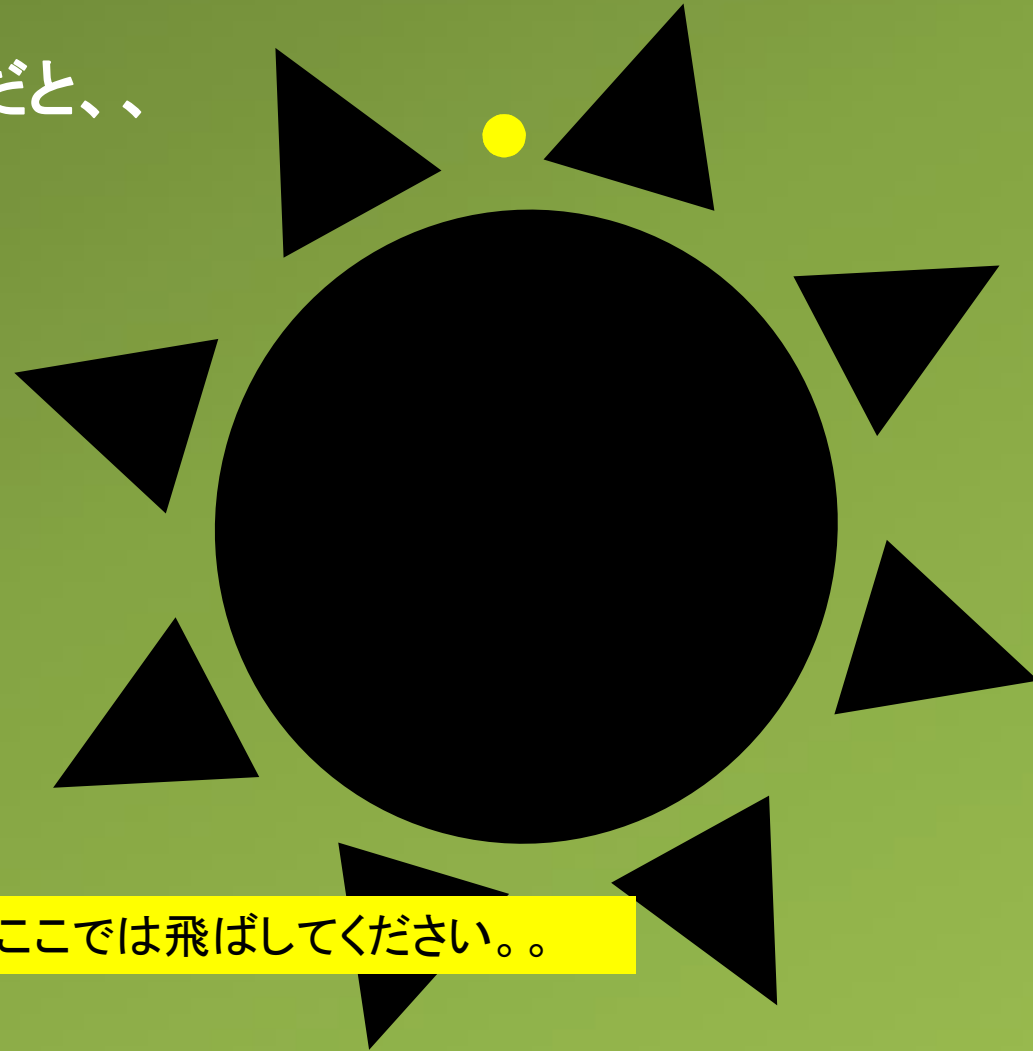
もし、光が無限に速ければ、



講演時はムービーお見せしましたが、ここでは飛ばしてください。。

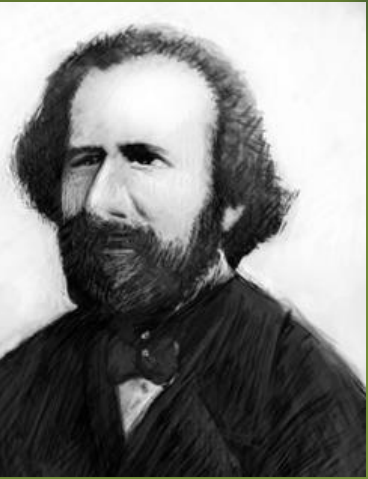
歯車と光の往復の関係をスローモーションで表すと:

もし、光が有限の速さだと、、



講演時はムービーお見せしましたが、ここでは飛ばしてください。。

光は速い。でも、無限に速くはない。



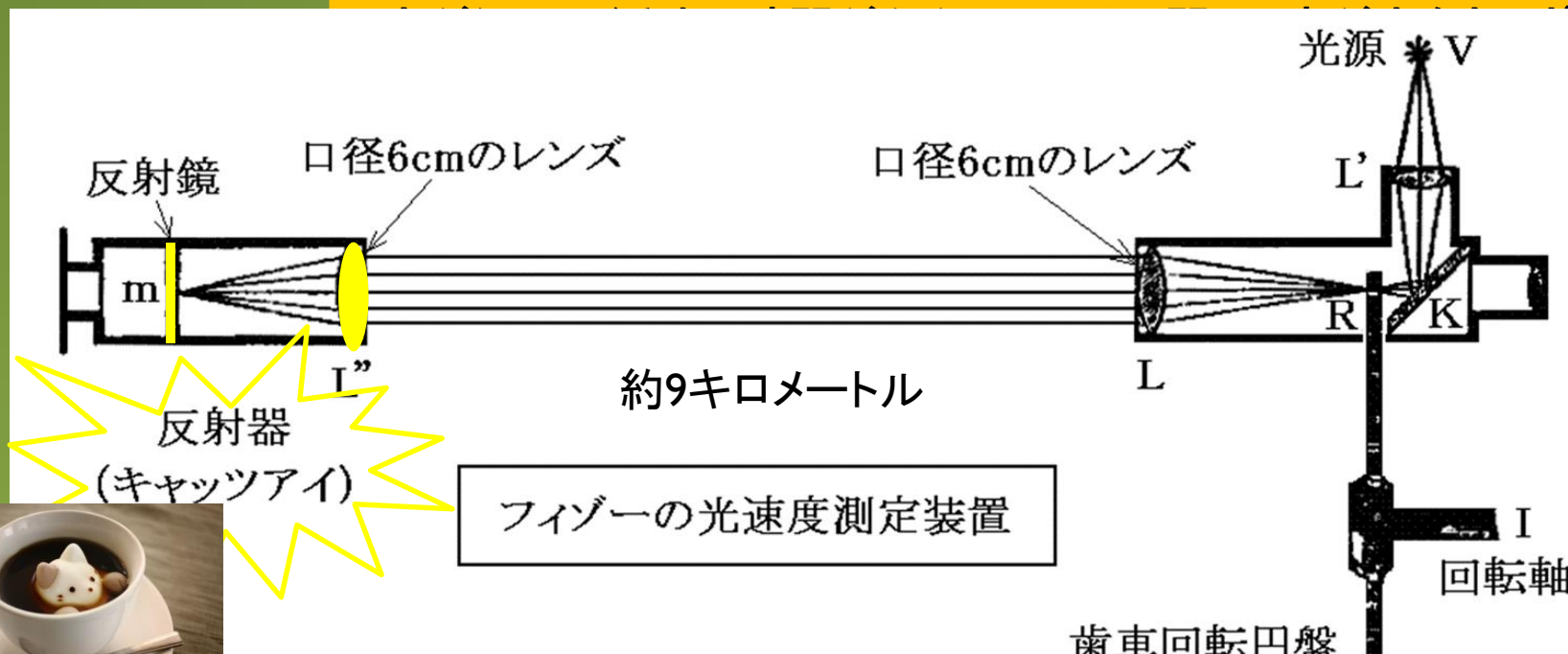
1849年アルマン・フィゾー:地上実験で光の速さを測った。歯車の助け。

光が無限に速く進むなら、
歯車をどれだけ速く回しても、隙間を通過して行った光はその隙間をぬって返ってくるはず。

実際は

歯車をどんどん速く回すと、暗くなった。

ところまで来てしまったということ。

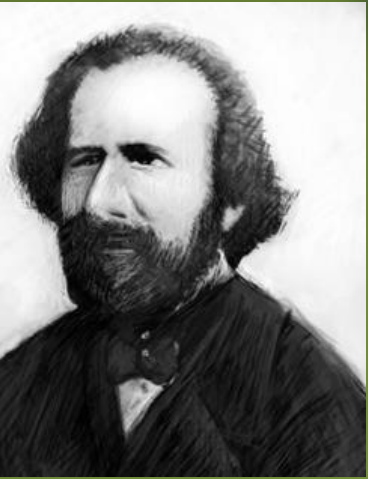


フィゾーの光速度測定装置

・霜田光一著「歴史をかえた物理実験」丸善(1996年刊)
・http://fnorio.com/0129Fizeau_1849/Fizeau_1849.html



光は速い。でも、無限に速くはない。



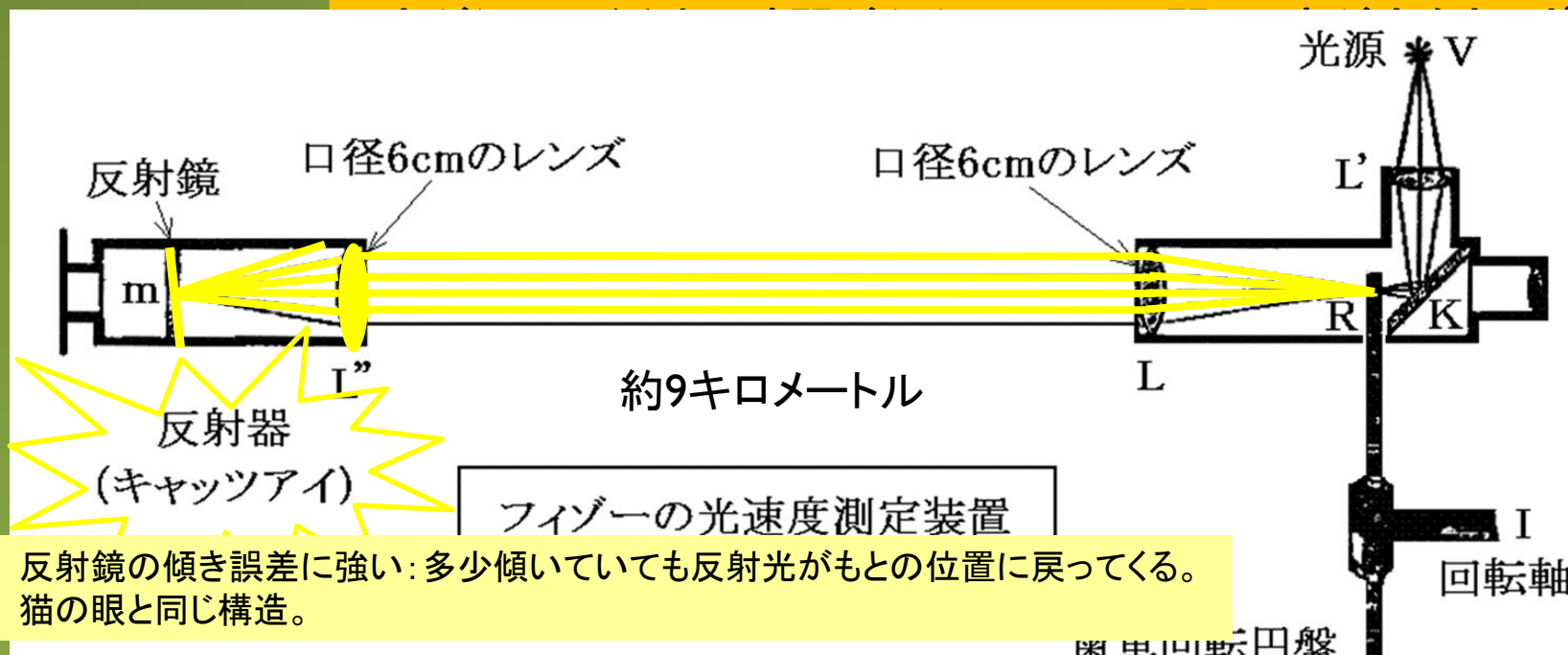
1849年アルマン・フィゾー:地上実験で光の速さを測った。歯車の助け。

光が無限に速く進むなら、
歯車をどれだけ速く回しても、隙間を通過して行った光はその隙間をぬって返ってくるはず。

実際は

歯車をどんどん速く回すと、暗くなった。

ところまで来てしまったということ。



フィゾーの光速度測定装置

反射鏡の傾き誤差に強い: 多少傾いていても反射光がもとの位置に戻ってくる。
猫の眼と同じ構造。

光は速い。でも、無限に速くはない。

光は無限に速くはないので、遠くから今届いた光を見ると、光を発した場所の昔の姿がわかる。

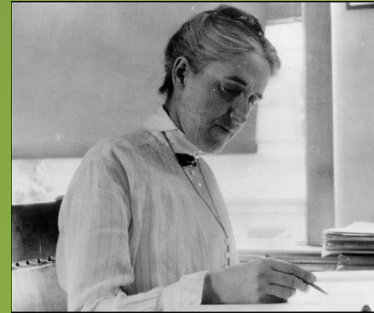
(例:今見ている月は1.3秒前の月の姿。今見ている太陽は8分前の太陽の姿。)

遠くのものほど昔の姿を見ている。

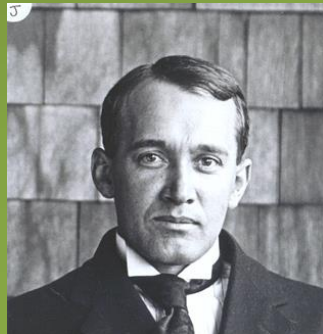
私たちの銀河(天の川銀河)の外にも銀河(恒星の集団)がたくさんある。遠い銀河ほど早く遠ざかっている。

銀河までの距離の測り方:

基準となる決まった絶対的明るさ(光度)を持つ恒星(ヘンリエッタ・リーヴィット1912年)が見かけ上どのぐらいの明るさに見えるかで、その恒星を宿す銀河までの距離がわかる。



<https://ja.wikipedia.org/wiki/ヘンリエッタ・スワン・リービット>



<http://www.wikiwand.com/ja/ヴェスト・スライファー>

銀河の“動き”の測定:

銀河を分光観測すると(ヴェスト・スライファー1912~1917年の5年間)、遠ざかって(赤みがかって)いるものが多かった。(本当の色が同じでも。波長で言うと、光が銀河から発せられたときよりも、私たちが観測する波長は伸びている)。



<https://www.spaceanswers.com/astromony/heroes-of-space-edwin-hubble/>



<https://www.vofoundation.org/blog/priests-science-georges-lemaître-father-big-bang/>

空間が膨張している！ 生活していて感じないけど。。

ハッブル(1929年)=ルメートル(1927年)の法則
遠くの銀河ほど、より速く遠ざかっている。

→(私たちが宇宙の中心にいて特殊な進化をしているというより、)

宇宙が一様等方。

昔ほど空間が小さく、一様等方に膨張して空間が大きくなっている。
(光の波長も伸ばされている。)

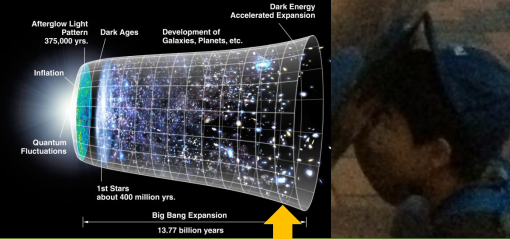
→

遠くを見たときに昔の宇宙の姿(歴史)がわかる。



空間が膨張している！
生活していて感じないけど。。

講演時はムービーお見せしましたが、ここでは飛ばしてください。。



<https://ja.wikipedia.org/wiki/宇宙の年表>

空間が膨張している！ 生活していて感じないけど。。

宇宙が一様等方。

昔ほど空間が小さく、一様等方に膨張して空間が大きくなっている。
(光の波長も伸ばされている。)

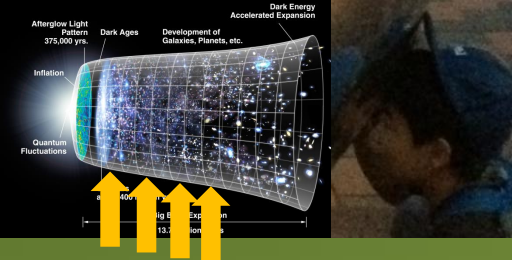
→

遠くを見たときに昔の宇宙の姿(歴史)がわかる。

生活周辺では空間の膨張は無視できる。銀河間サイズ(億光年)ぐらい以上から目立ってくる。

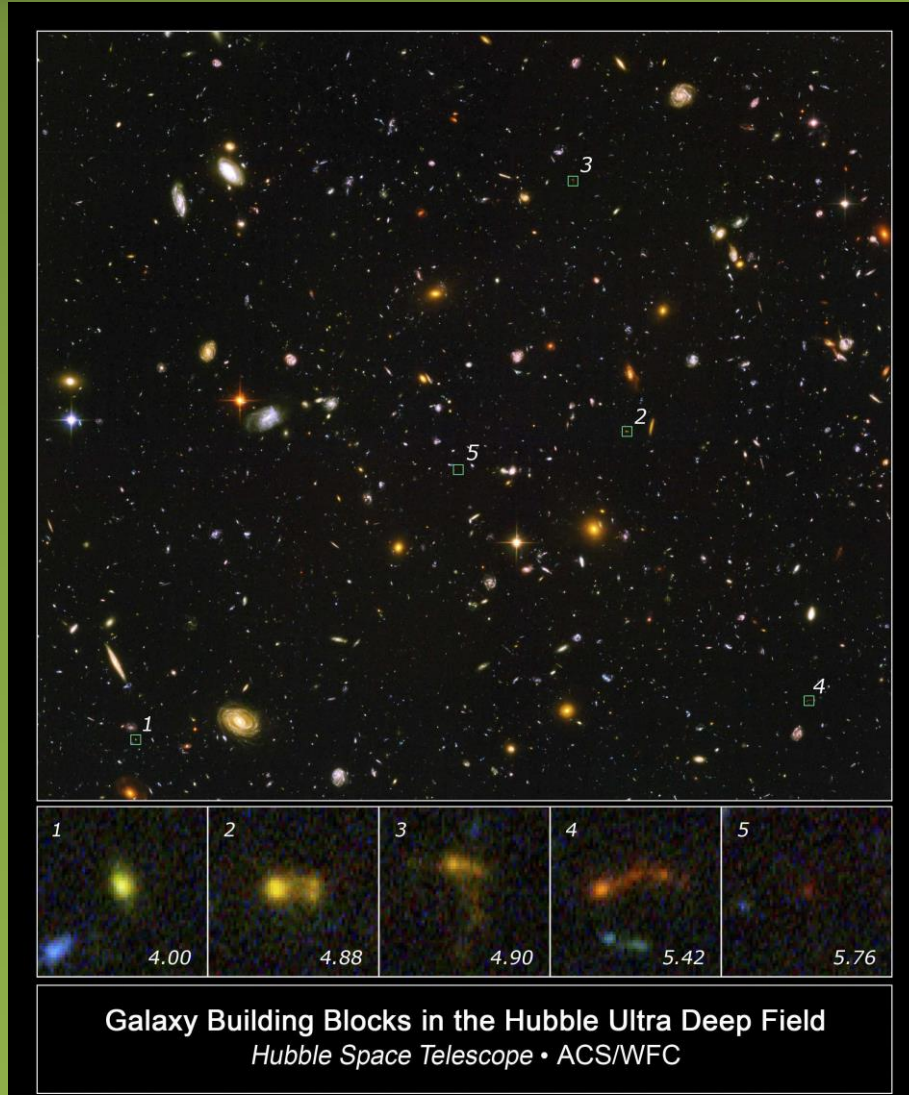
今から数十億年昔にさかのぼってみると、その頃に比べて現在、膨張が加速していることもわかっています(ソウル・パールムッター、ブライアン・シュミット、アダム・リース)。

100億年以上にわたる銀河進化



<https://koyamachuya.com/space/95250/>
image: NASA, ESA

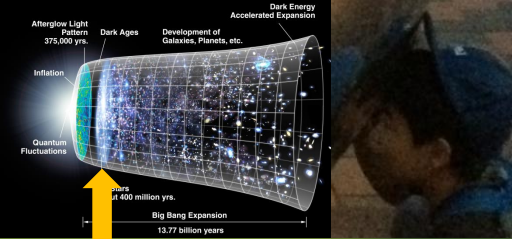
ハッブル宇宙望遠鏡が捕らえた遠方銀河。
宇宙誕生十数億年後の銀河も。
衝突・合体しながら、より大きな銀河に成長していく。



Galaxy Building Blocks in the Hubble Ultra Deep Field
Hubble Space Telescope • ACS/WFC

NASA, ESA, and N. Pirzkal (STScI/ESA) STScI-PRC07-31

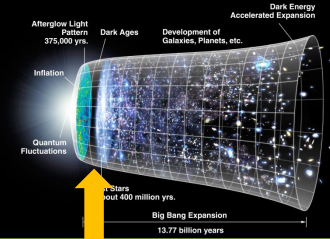
https://apod.nasa.gov/apod/image/0709/galaxylego_hst_big.jpg



宇宙誕生後4億年のつわもの銀河。



<https://www.sciencedaily.com/releases/2016/03/160303133510.htm>



“暗黒時代”。いつか脚光を浴びる日がくる。

宇宙が始まってから数億年後の銀河は観測されるが、それより前にさかのぼると“真っ暗”な状態。

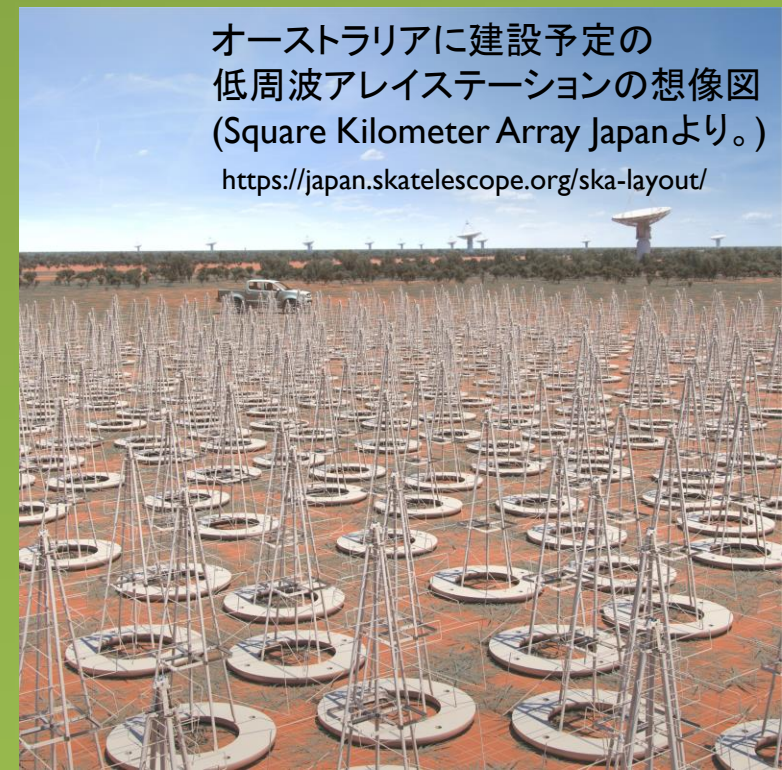
しかし、この“暗黒時代”を破る宇宙で最初にできた星々を探す研究など脚光をあびつつある。

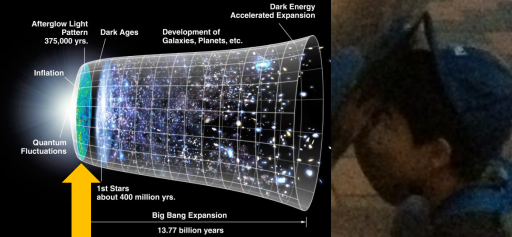
さらには、初代の星々ができる前でも、実は、星の材料となる中性ガスが黙々とうごめき集まりつつある時代だった。

→これらの水素ガスから放射される21cm電波(が引き延ばされたもの)をねらったセンチ波・メートル波プロジェクトも段階的に開始されつつある。

オーストラリアに建設予定の
低周波アレイステーションの想像図
(Square Kilometer Array Japanより。)

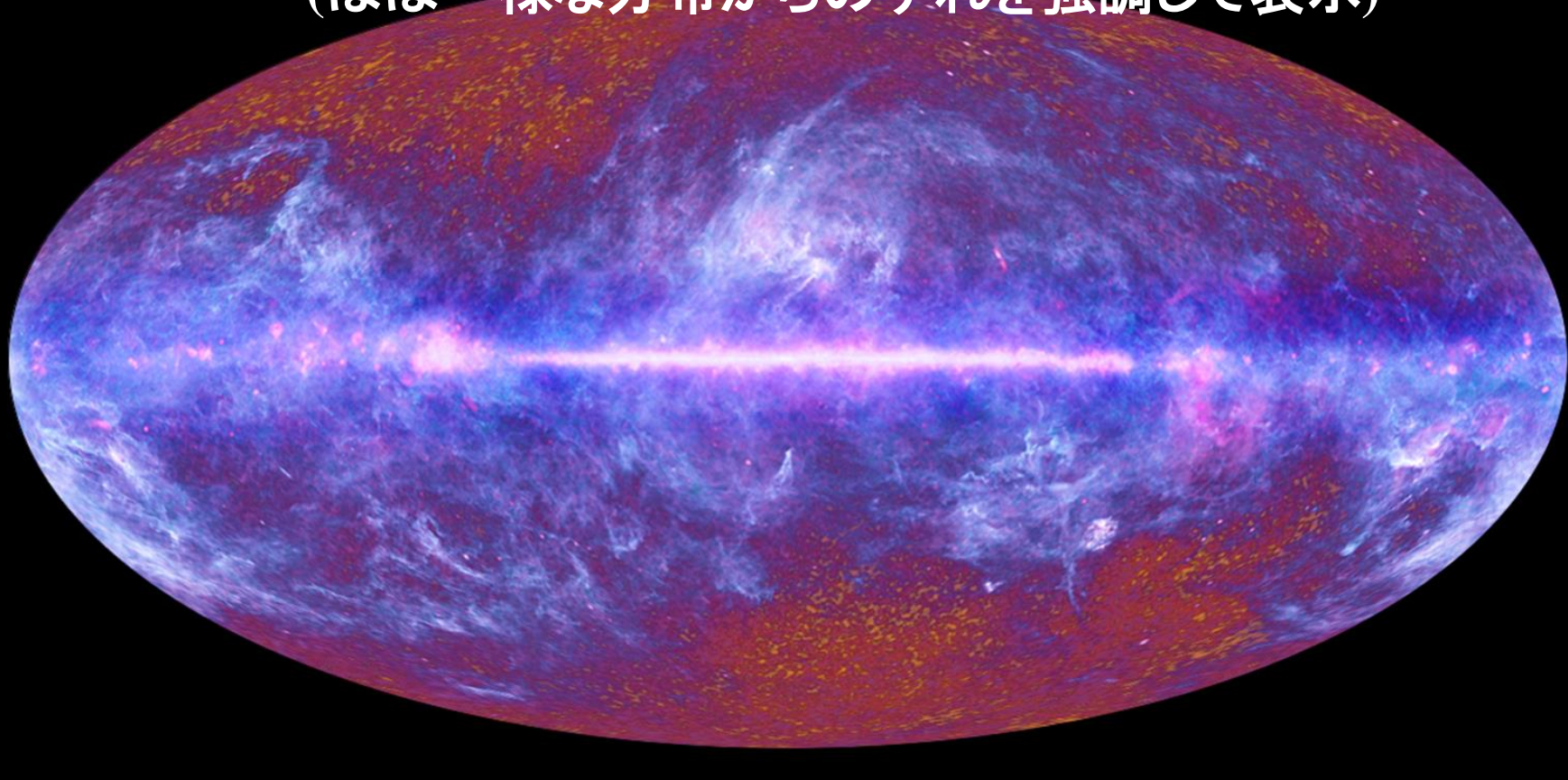
<https://japan.skatelescope.org/ska-layout/>



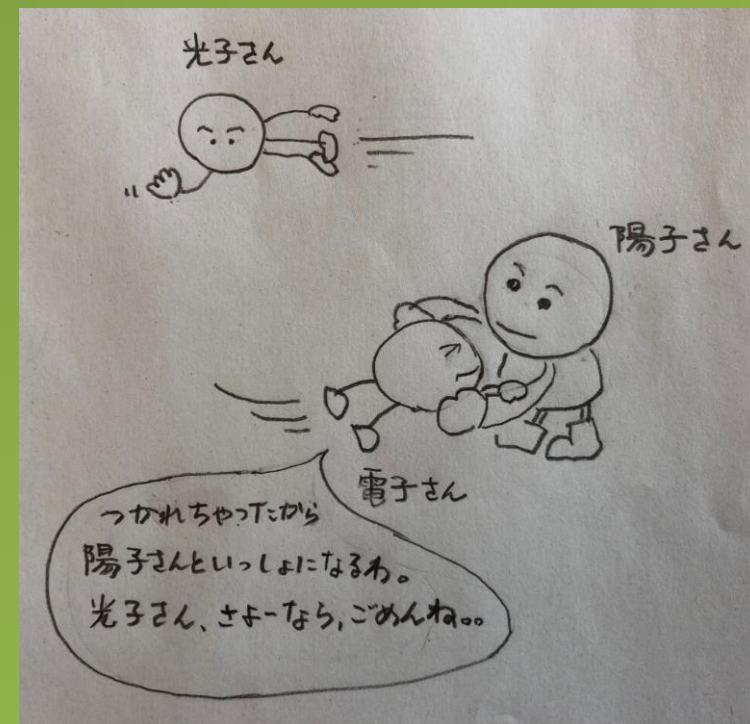


光子さん「離ればなれはいやだ。」
でも、そこから旅が始まる。

プランク衛星による宇宙背景放射(熱いビッグバンの名残り)全天マップ
(ほぼ一様な分布からのずれを強調して表示)



宇宙が38万歳のとき



2.73K(-270.4°C)でほぼ一定。

わずかな違いを強調すると。

CMB Dipole

$\Delta T = 3.358 \text{ mK}$

太陽(地球)の動きの
影響を差し引くと。

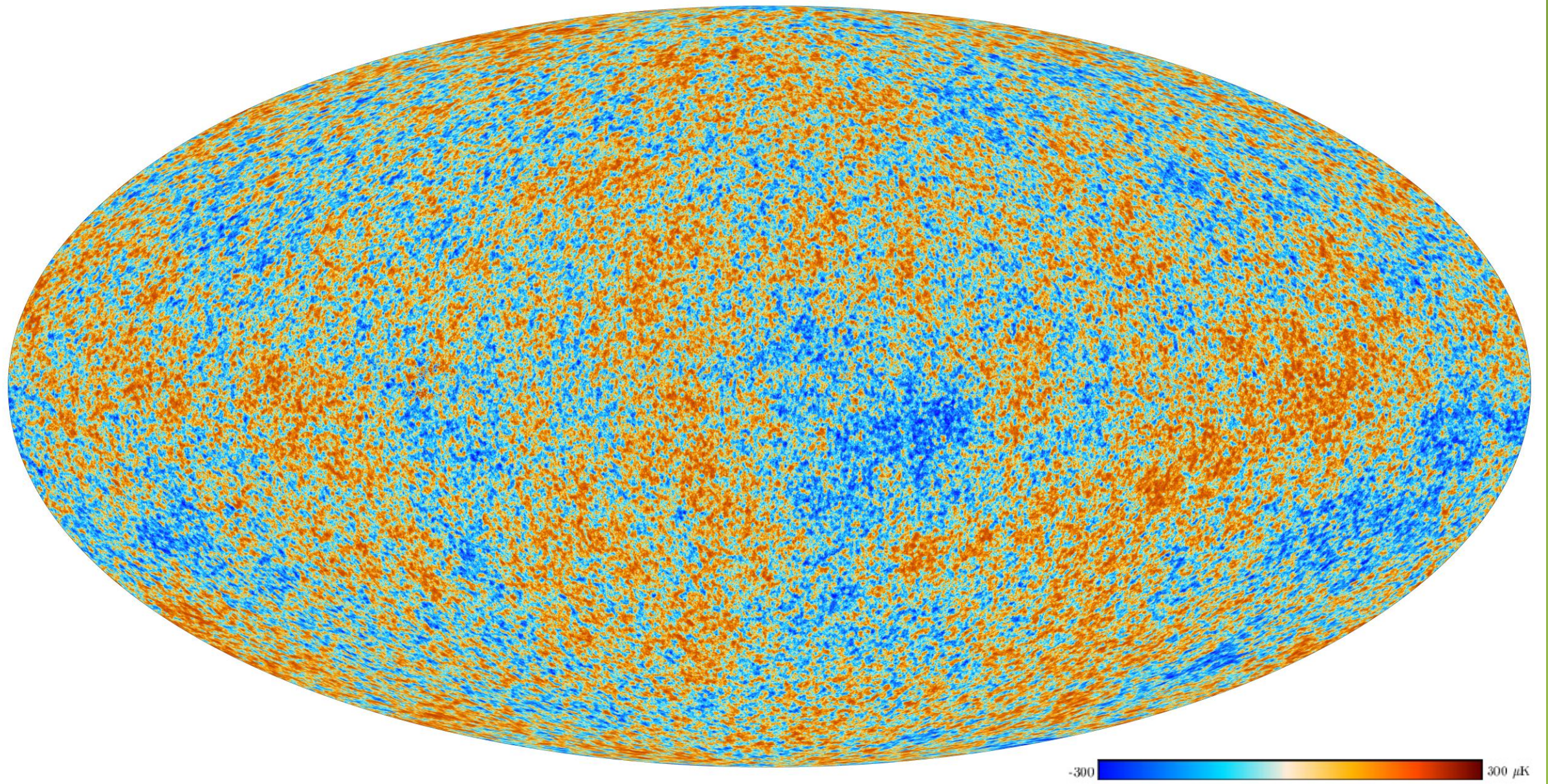
天の川銀河を
差し引くと、、

$V_{\text{sun w.r.t CMB}}$:

369 km/s towards
 $l=264^\circ, b=+48^\circ$

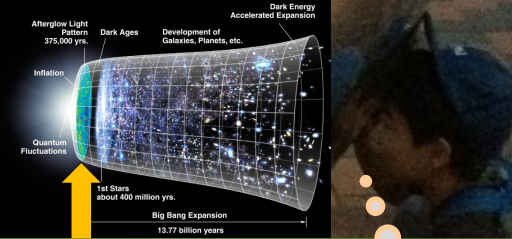
Motion of the Local Group:

$V = 627 \text{ km/s}$ towards
 $l = 276^\circ, b = +30^\circ$



プランク衛星による宇宙背景放射(熱いビッグバンの名残り)マップ
(ほぼ一様な分布からのずれを強調して表示)

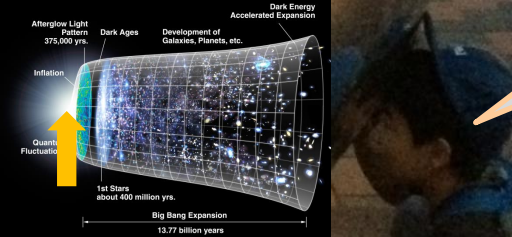
<http://planck.cf.ac.uk/all-sky-images>



もっと昔へ。

もう限界かな？。。

さらに昔の光(電磁波)は私たちまで届かない。ジ・エンド(終了)か。。



おっ?!

もっと昔へ。

理論家の予測(佐藤勝彦、アラン・グース):

熱いビッグバン(高温高密度状態から始まった)の前に
インフレーションと呼ばれる宇宙の急激な加速膨張の時期があった。

インフレーションが必要な理由(熱いビッグバンの“矛盾”を解決するため):

宇宙が一様すぎるという問題点など(平坦すぎるという問題も)。

→もともと関係があった空間が

光速を超えるような加速膨張によって引き離された。

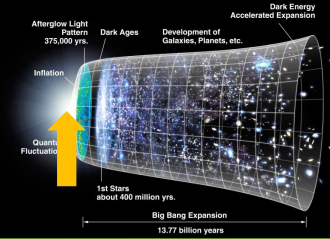
でも、インフレーションは実証できるの？

→インフレーション起源の原始重力波が鍵。

空間(時空)の揺らぎが引き延ばされる。

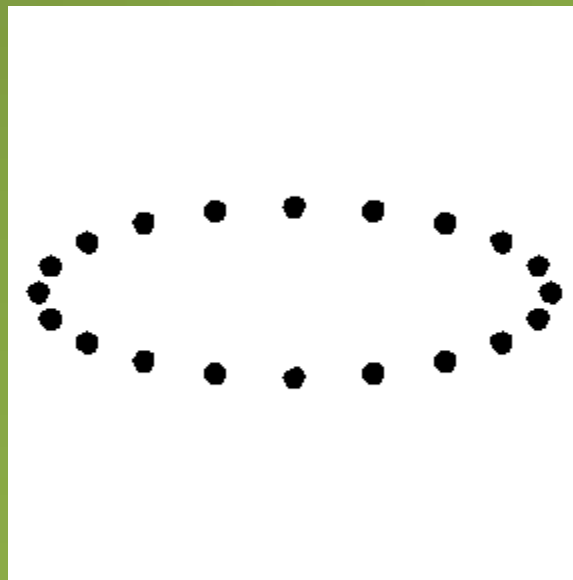
重力波＝光速で伝わる時空のさざ波

観測された宇宙背景放射は全天において“ほぼ”一定。
放射された時代までに情報がやり取りできる領域は、
現在の天空においては、1.6° ぐらいしかないのに。



もっと昔へ。 原始重力波が残してくれたプレゼントを拾いに。

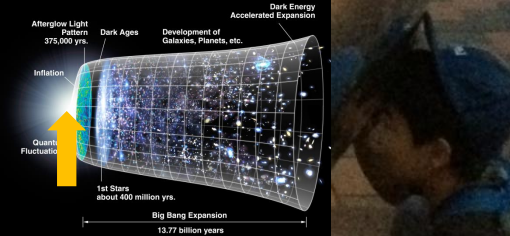
原始重力波が宇宙背景放射に残してくれた痕跡を求めて。
インフレーション時に引き延ばされいったん凍結した時空のゆらぎから、
原始重力波が生じたはず。
原始重力波は(何とも相互作用をせず)生き延びてくれる。



+モードに偏極した重力波の
リング状にある粒子に及ぼす影響



×モードに偏極した重力波の
リング状にある粒子に及ぼす影響



もっと昔へ。
原始重力波が残してくれたプレゼントを拾いに。

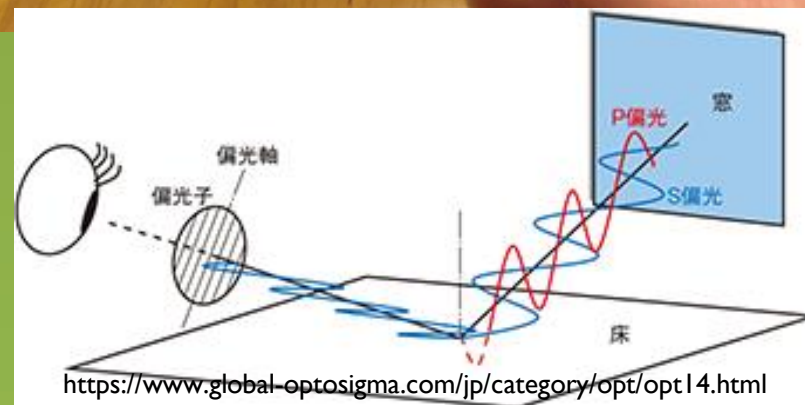
原始重力波そのものを観測するのは今のところ難しい(波長が数十億光年と長すぎる)。

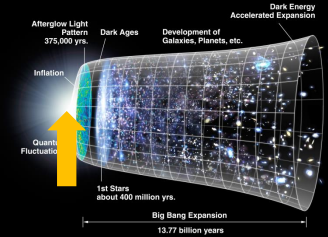
私たちライトバードチームは、原始重力波が宇宙背景放射の偏光成分に残してくれた痕跡をねらう。

もっと昔へ。
原始重力波が残してくれたプレゼントを拾いに。

偏光とは、電場(および磁場)が特定の方向にのみ振動する光のこと。

例えば、無偏光の自然光について、入射面に直交する(電場の)振動面を持った偏光が特に反射される。

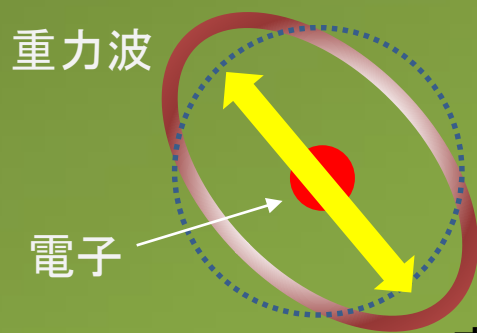




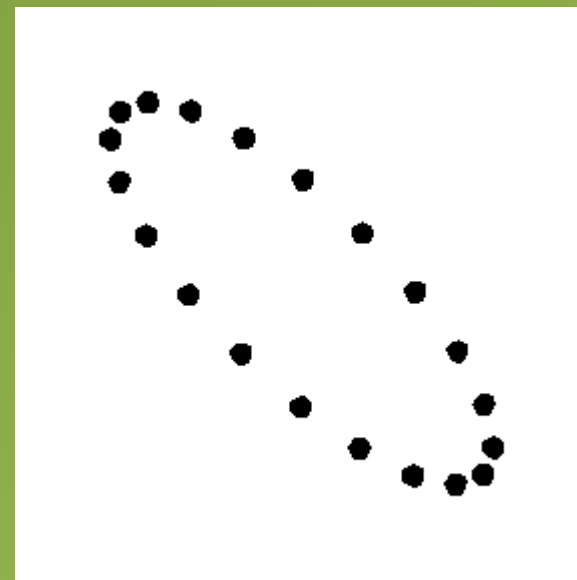
もっと昔へ。 原始重力波が残してくれたプレゼントを拾いに。

原始重力波があると、その部分に、宇宙背景光の強さ(波長/色/温度)の違いが生じる。

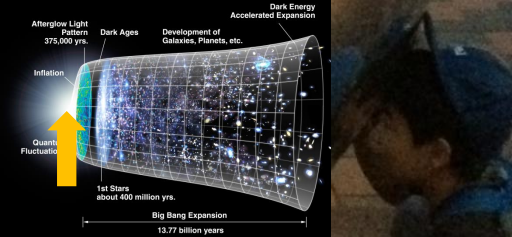
このとき光を散乱する電子があると、周囲の光のアンバランスにより、散乱光に偏光成分が生まれる。



空間が伸びる
→光の波長が伸びる
→温度が下がる

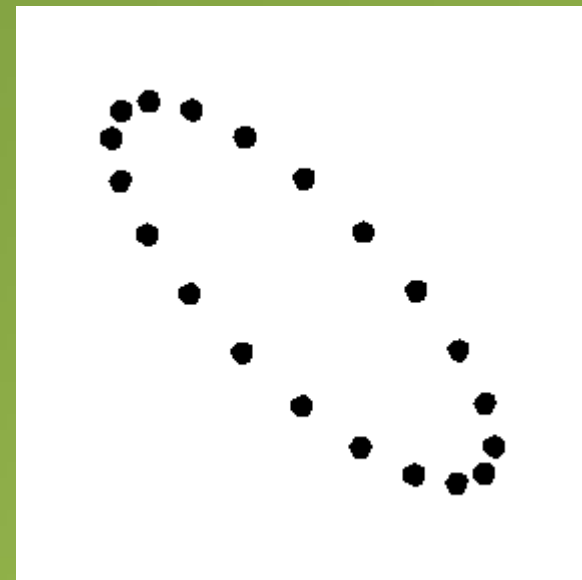
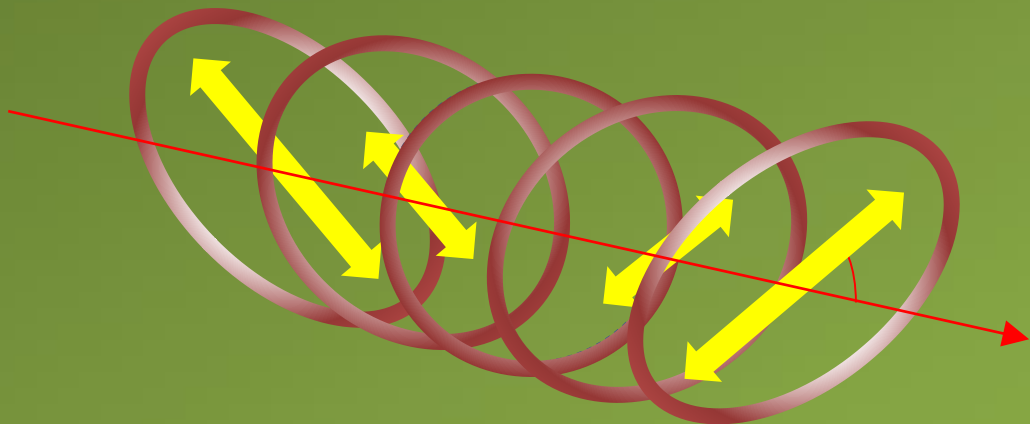


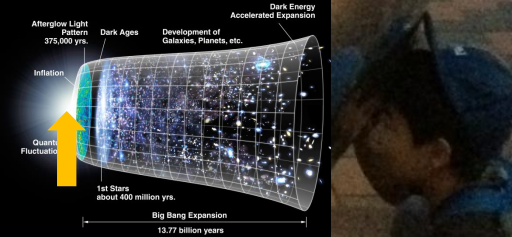
原始重力波が生む偏光成分は(密度ゆらぎによるものに比べ)小さいが、天空上に渦巻きパターンの偏光分布を生む。



もっと昔へ。
原始重力波が残してくれたプレゼントを拾いに。

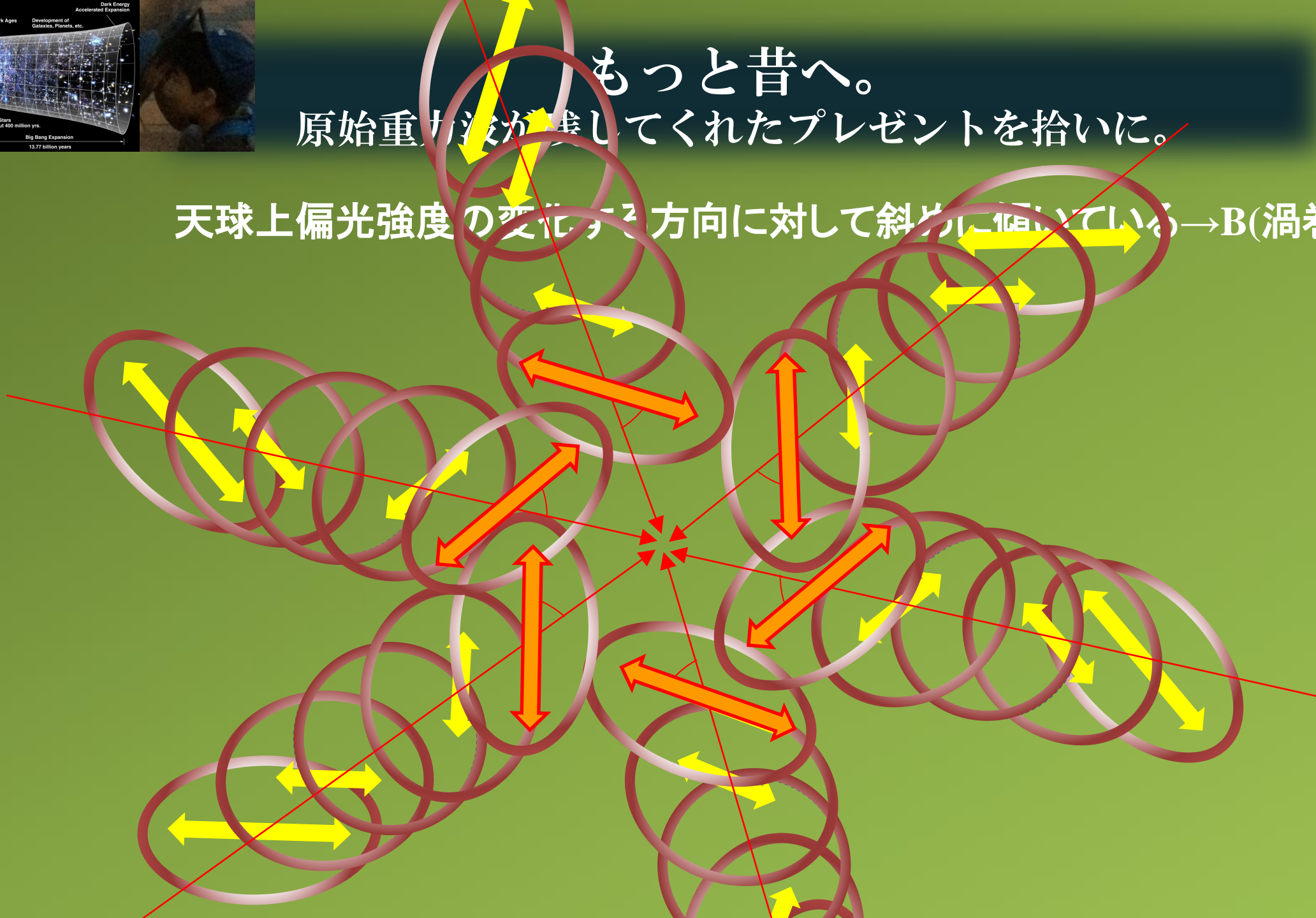
天球上偏光強度の変化する方向に対して斜めに傾いている→B(渦巻)モード



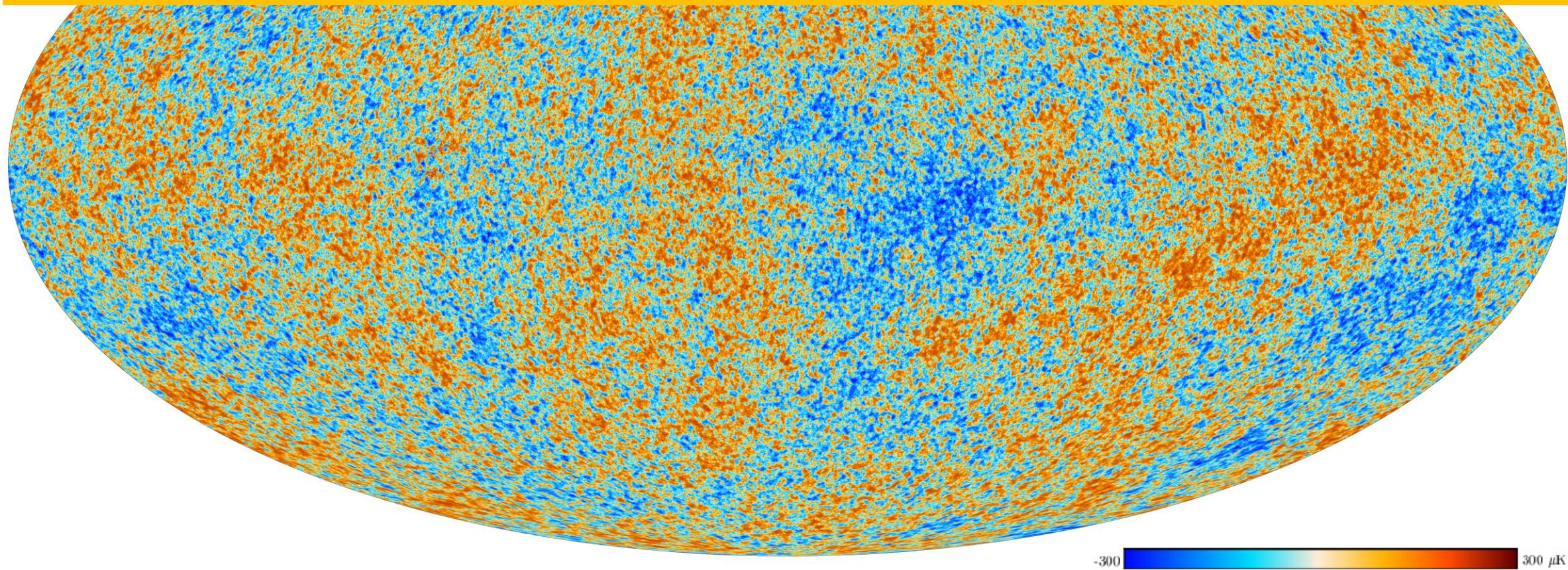


もっと昔へ。
原始重力波が残してくれたプレゼントを拾いに。

天球上偏光強度の変化する方向に対して斜めに傾いている→B(渦巻)モード



宇宙の生まれた時を知るために
宇宙背景放射の偏光を詳細に調べよう！
インフレーションによって生じる原始重力波の痕跡(渦巻模様)があるはず。



プランク衛星による宇宙背景放射(熱いビッグバンの名残り)マップ
(ほぼ一様な分布からのずれを強調して表示)

<http://planck.cf.ac.uk/all-sky-images>

目次

第一章 時間をさかのぼって

0. 生まれたときを知りたい？
1. 光は速い。でも、無限に速くはない。
2. 空間が膨張している！生活していて感じないけど。。
3. 宇宙誕生後4億年のつわもの銀河。
4. “暗黒時代”。いつか脚光を浴びる日がくる。
5. 離ればなれはいやだ。でも、そこから旅が始まる。
6. もっと昔へ。

第二章 もっと昔へ。技術の結集で挑む。

LiteBIRD(ライトバード)衛星の5W1H

Who (だれが?)

ライトバード衛星が。(日本・合衆国・カナダ・ヨーロッパによる国際チームによる。)

When (いつ?)

2027年頃にH3ロケットで打ち上げ予定。3年間の観測。

Where (どこで?)

宇宙から観測。太陽-地球系ラグランジアンポイントL2にて。
なぜ宇宙に行くのか? (地上でもがんばっているが。)

- 地上だと大気の影響を受けてしまう。**酸素分子・水蒸気による吸収・放射。**
- 地上1か所からは**全天**を観測できない。大角度が重要。

What (何を?)

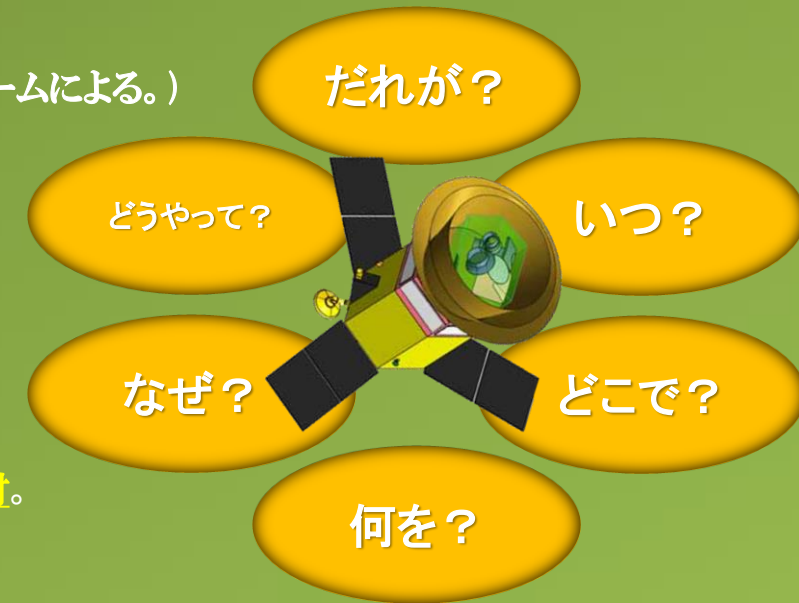
ミリ波の電波偏光を全天にわたって観測する。

Why (なぜ?)

宇宙背景ミリ波放射偏光の中に、
宇宙が生まれたとき(インフレーション期)に源を持つ原始重力波の痕跡を発見するため。

How (どうやって?)

冷却望遠鏡・高感度検出器・偏光変調器を用いて。



LiteBIRD(ライトバード)衛星の5W1H

Who (だれが?)

ライトバード衛星が。(日本・合衆国・カナダ・ヨーロッパによる国際チームによる。)

When (いつ?)

2027年頃にH3ロケットで打ち上げ予定。3年間の観測。

Where (どこで?)

宇宙から観測。太陽-地球系ラグランジアンポイントL2にて。
なぜ宇宙に行くのか? (地上でもがんばっているが。)

- 地上だと大気の影響を受けてしまう。酸素分子・水蒸気による吸収・放射。
- 地上1か所からは全天を観測できない。大角度が重要。

What (何を?)

ミリ波の電波偏光を全天にわたって観測する。

Why (なぜ?)

宇宙背景ミリ波放射偏光の中に、
宇宙が生まれたとき(インフレーション期)に源を持つ原始重力波の痕跡を発見するため。

How (どうやって?)

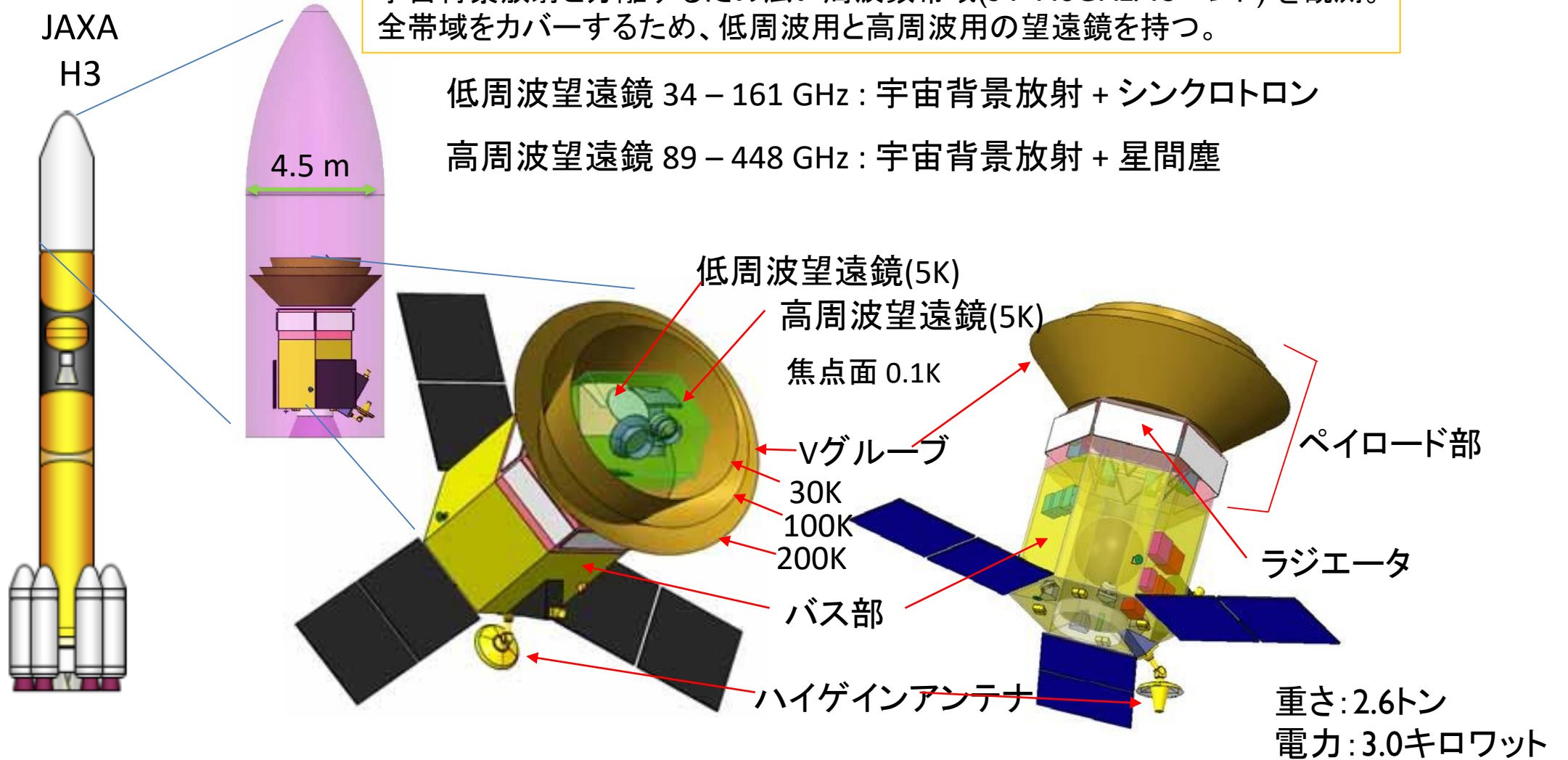
冷却望遠鏡・高感度検出器・偏光変調器を用いて。



LiteBIRD(ライトバード)衛星



銀河系内からの前景放射(シンクロトロンや星間塵)をスペクトル形状をもとに宇宙背景放射と分離するため広い周波数帯域(34-448GHz: 15バンド)を観測。全帯域をカバーするため、低周波用と高周波用の望遠鏡を持つ。



LiteBIRD(ライトバード)衛星の5W1H

Who (だれが?)

ライトバード衛星が。(日本・合衆国・カナダ・ヨーロッパによる国際チームによる。)

When (いつ?)

2027年頃にH3ロケットで打ち上げ予定。3年間の観測。

Where (どこで?)

宇宙から観測。太陽-地球系ラグランジアンポイントL2にて。
なぜ宇宙に行くのか? (地上でもがんばっているが。)

- 地上だと大気の影響を受けてしまう。**酸素分子・水蒸気による吸収・放射。**
- 地上1か所からは**全天**を観測できない。大角度が重要。

What (何を?)

ミリ波の電波偏光を全天にわたって観測する。

Why (なぜ?)

宇宙背景ミリ波放射偏光の中に、

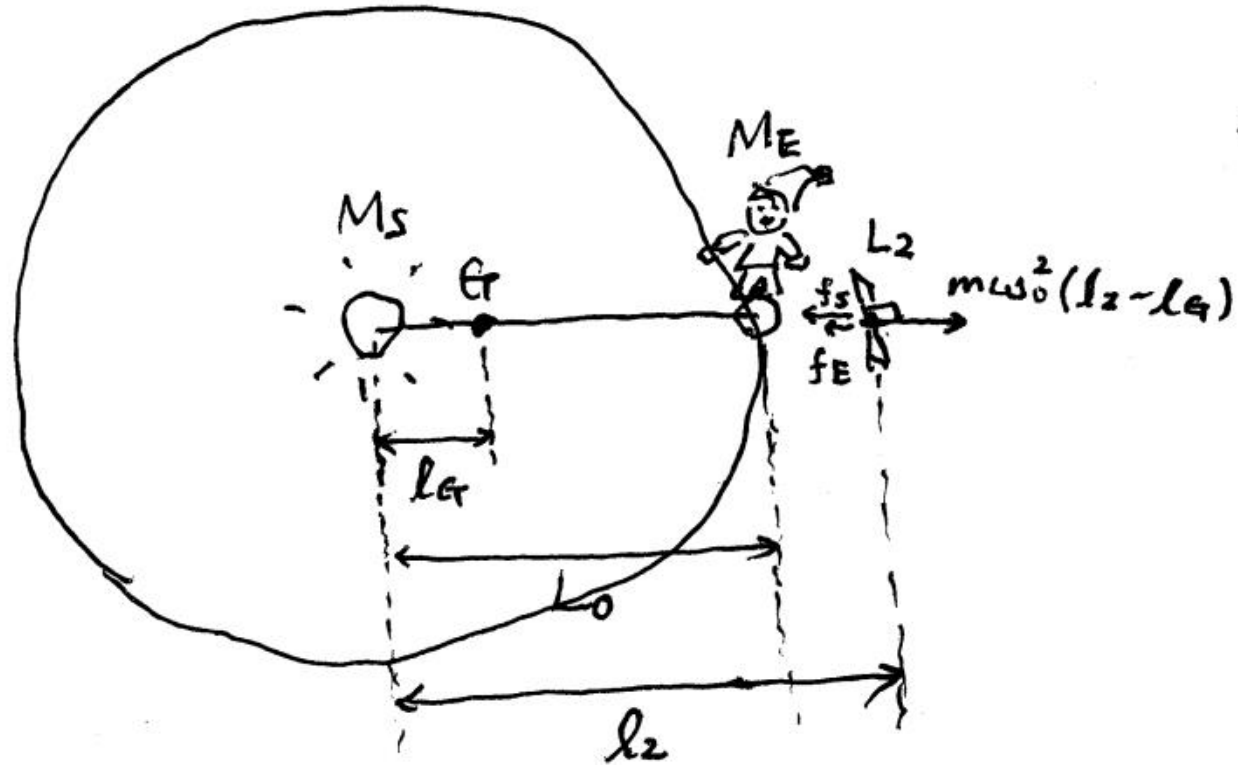
宇宙が生まれたとき(インフレーション期)に源を持つ原始重力波の痕跡を発見するため。

How (どうやって?)

冷却望遠鏡・高感度検出器・偏光変調器を用いて。



L2の図



$$f_S + f_E = m\omega_0^2(l_2 - l_E)$$

$$\begin{aligned} \therefore \frac{GmM_S}{l_2^2} + \frac{GmM_E}{(l_2 - l_0)^2} \\ = \frac{mG(M_S + M_E)}{L_0^3} \left(l_2 - \frac{M_E}{M_S + M_E} L_0 \right) \end{aligned}$$

$$\frac{M_E}{M_S} = 3.0 \times 10^{-6} \text{ ㉟}$$

$$l_2 = 1.010 L_0$$

$$\therefore l_2 - L_0 = 0.010 L_0 = 1.5 \times 10^6 \text{ km}$$

L2から見ると、太陽と地球が同じ方向・向きにあるので、太陽・地球からの光・熱の遮断が容易!

LiteBIRD(ライトバード)衛星の5W1H

Who (だれが?)

ライトバード衛星が。(日本・合衆国・カナダ・ヨーロッパによる国際チームによる。)

When (いつ?)

2027年頃にH3ロケットで打ち上げ予定。3年間の観測。

Where (どこで?)

宇宙から観測。太陽-地球系ラグランジアンポイントL2にて。

なぜ宇宙に行くのか? (地上でもがんばっているが。)

- 地上だと大気の影響を受けてしまう。酸素分子・水蒸気による吸収・放射。
- 地上1か所からは全天を観測できない。大角度が重要。

What (何を?)

ミリ波の電波偏光を全天にわたって観測する。

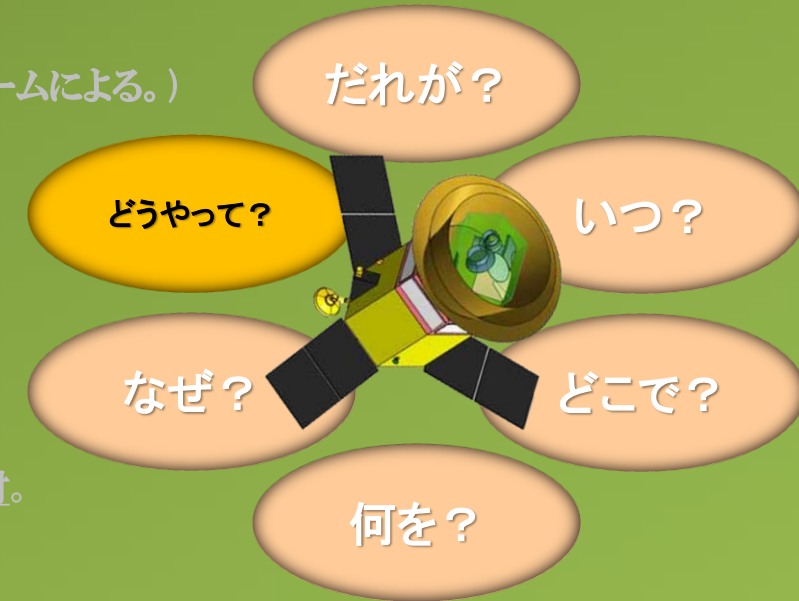
Why (なぜ?)

宇宙背景ミリ波放射偏光の中に、

宇宙が生まれたとき(インフレーション期)に源を持つ原始重力波の痕跡を発見するため。

How (どうやって?)

冷却望遠鏡・高感度検出器・偏光変調器を用いて。



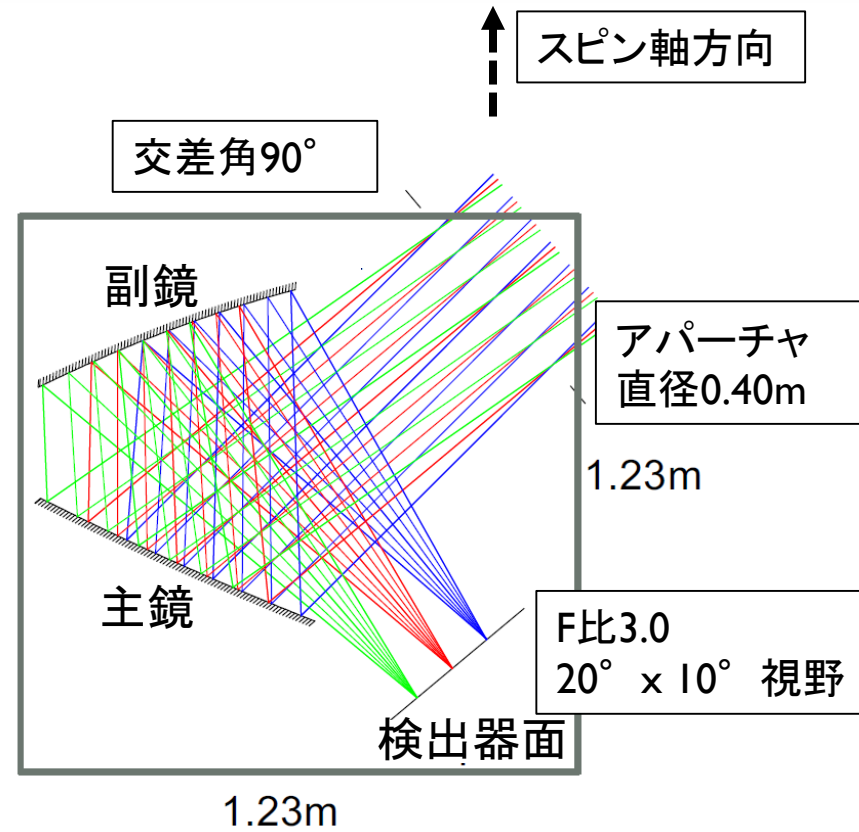
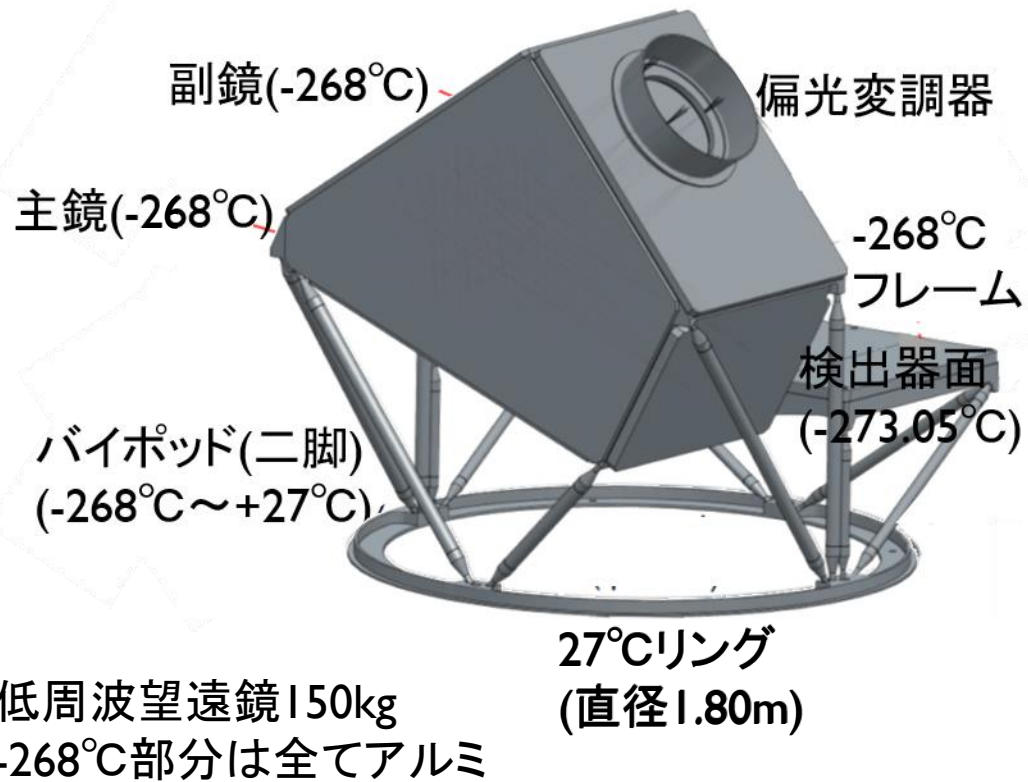
もっと昔へ。技術の結集で挑む。

 技術1: 広い視野を！

広視野電波望遠鏡で効率良く観測を進める。

さらに、熱雑音を抑えるために、望遠鏡も冷却する。

低周波用望遠鏡 (クロス・ドラゴン光学系)



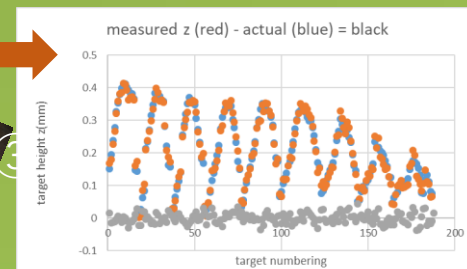
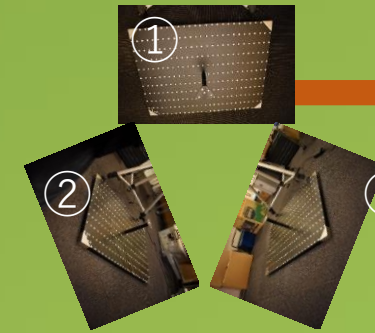
広視野に有効なクロス・ドラゴン光学系を採用。
 鏡面を複雑な形状にすることにより収差をおさえる。
 迷光を抑えることが鍵。



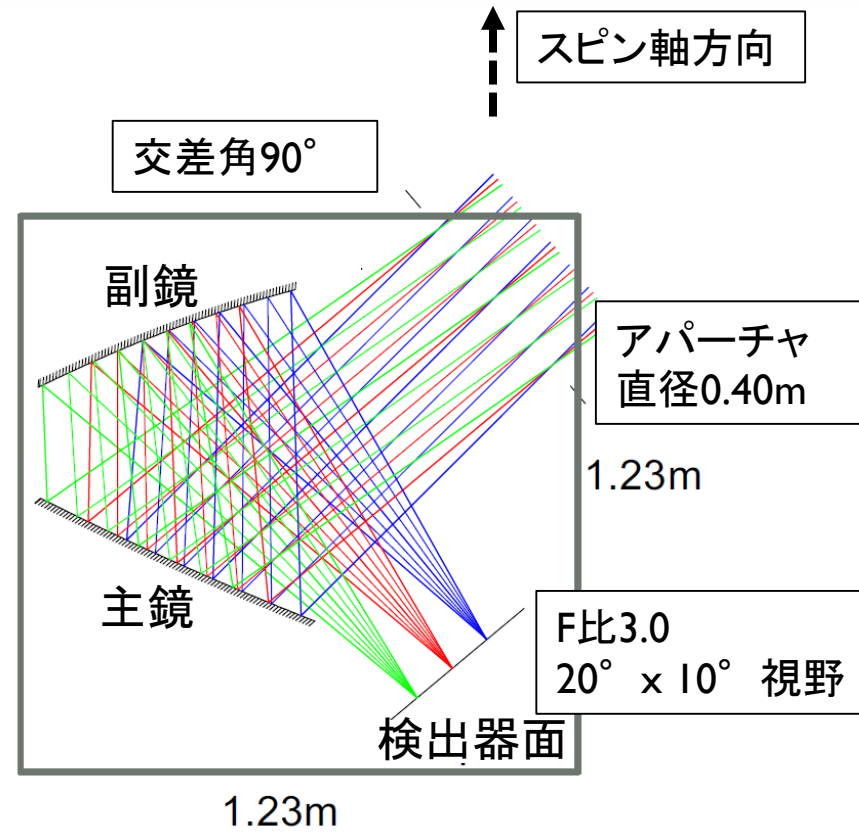
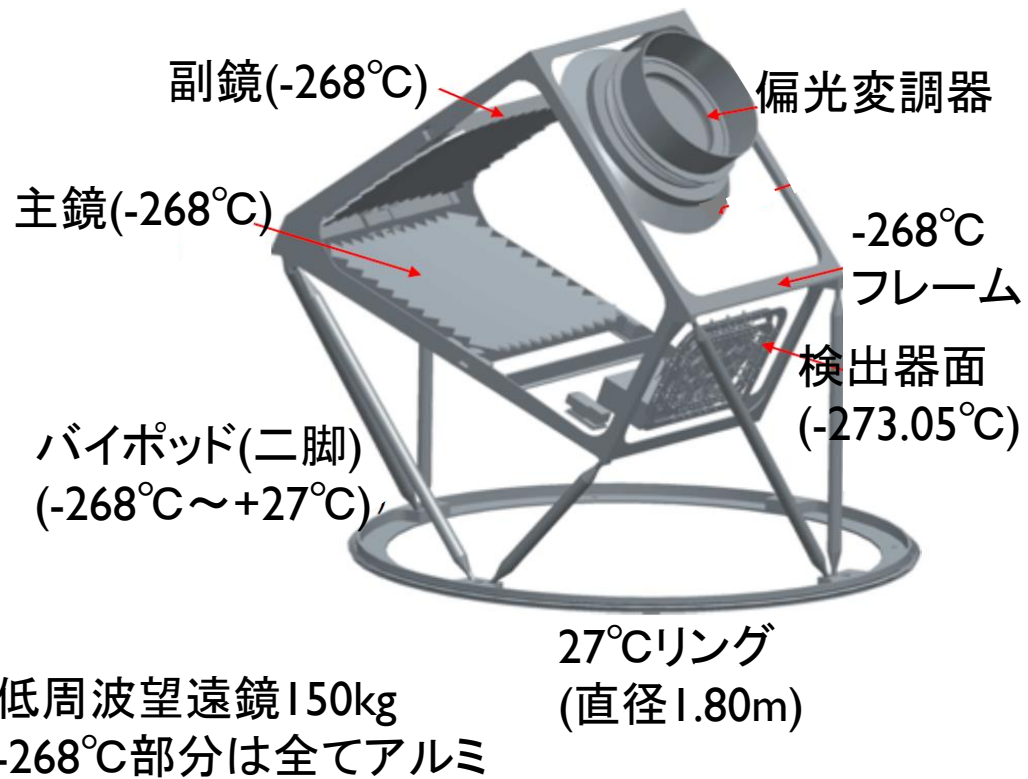
...



冷却時の鏡形状測定も重要。



低周波用望遠鏡 (クロス・ドラゴン光学系)



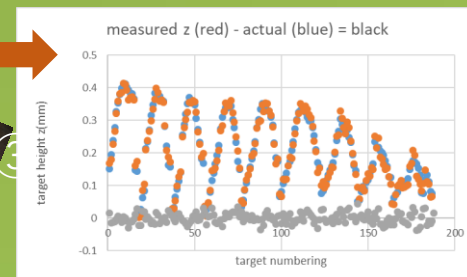
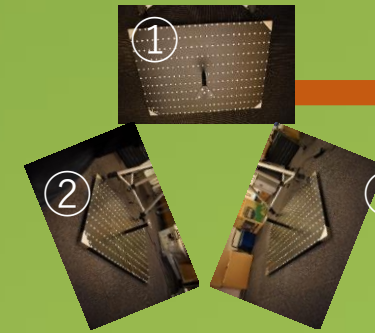
広視野に有効なクロス・ドラゴン光学系を採用。
 鏡面を複雑な形状にすることにより収差をおさえる。
 迷光を抑えることが鍵。



...



冷却時の鏡形状測定も重要。



もっと昔へ。技術の結集で挑む。

 技術2: 必要な信号をきれいに拾い出せ!

偏光変調器

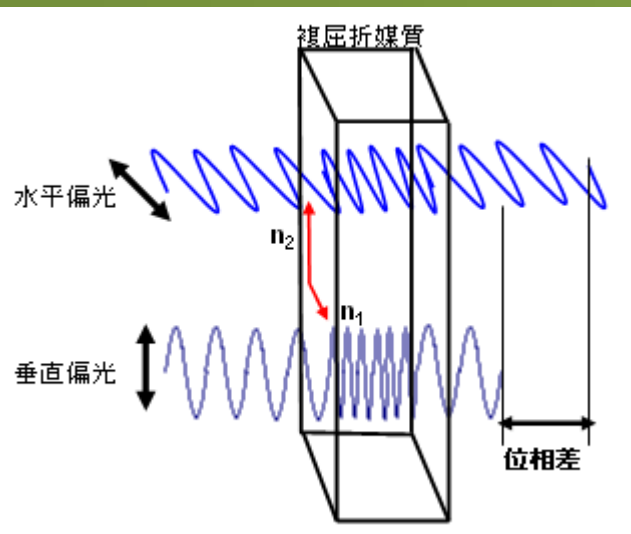
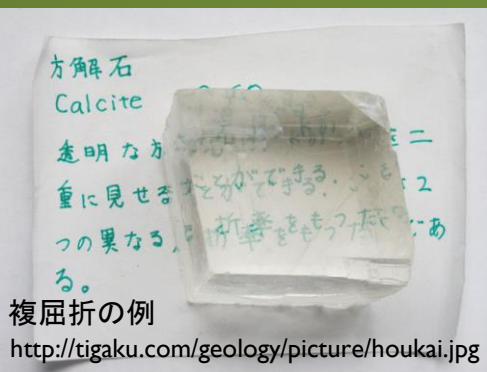
(目的1) 空からの電波偏光信号と、
望遠鏡/装置からの人工的な電波偏光を分離するため。

(目的2) 空からの電波偏光が検出器などのf分の1雑音に
うずもれないようにする。

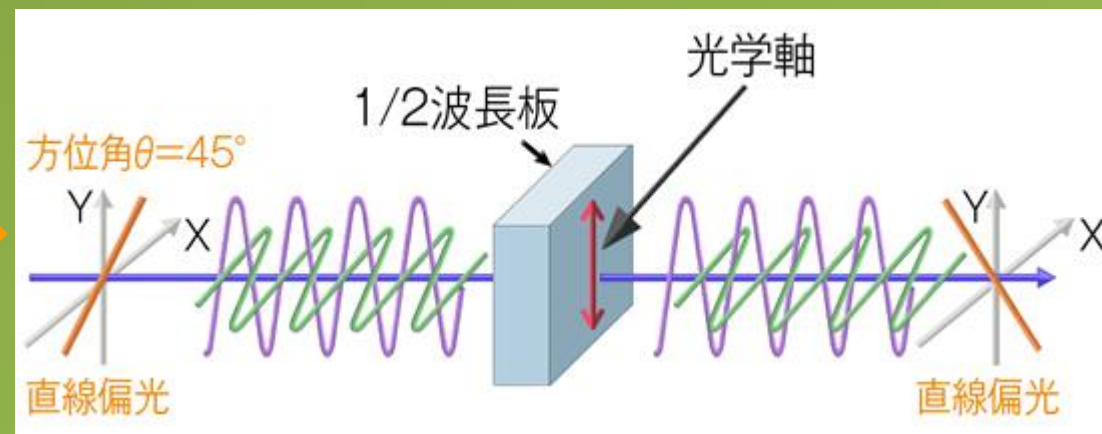
もっと昔へ。技術の結集で挑む。

技術2: 必要な信号をきれいに拾い出せ! 偏光変調器

方法: サファイヤの光学特性(複屈折率)を利用する。



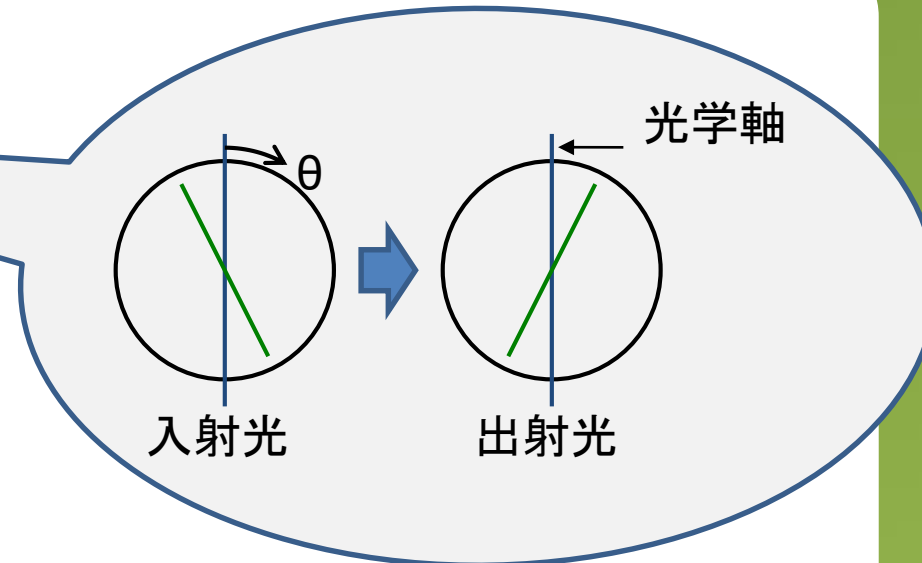
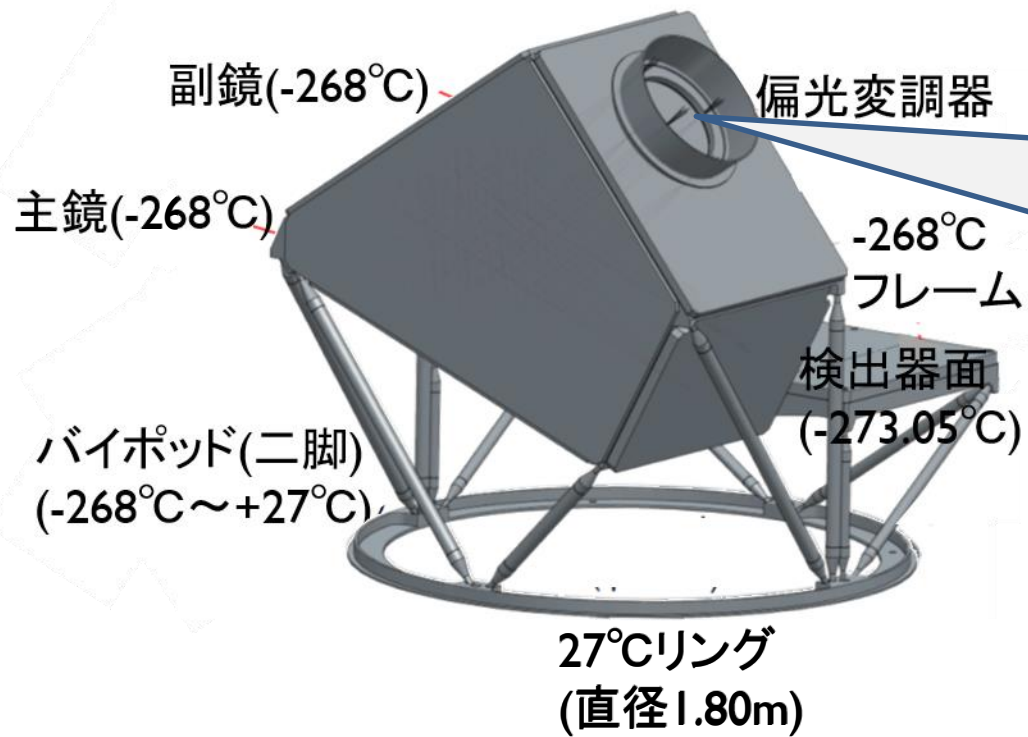
ちょうど波長の半分だけずれるような厚さにすると、



<https://www.kogakugiken.co.jp/products/retardation01.html>

偏光面が光学軸(光が分けない方向)の反対側に回転。

低周波用望遠鏡 (クロス・ドラゴン光学系)



サファイヤ板を回転させると、
偏光面が効率よく回る。

講演時はムービーお見せしましたが、
ここでは動かず申し訳ありません。。

信号をつかみやすく！

模式図

信号



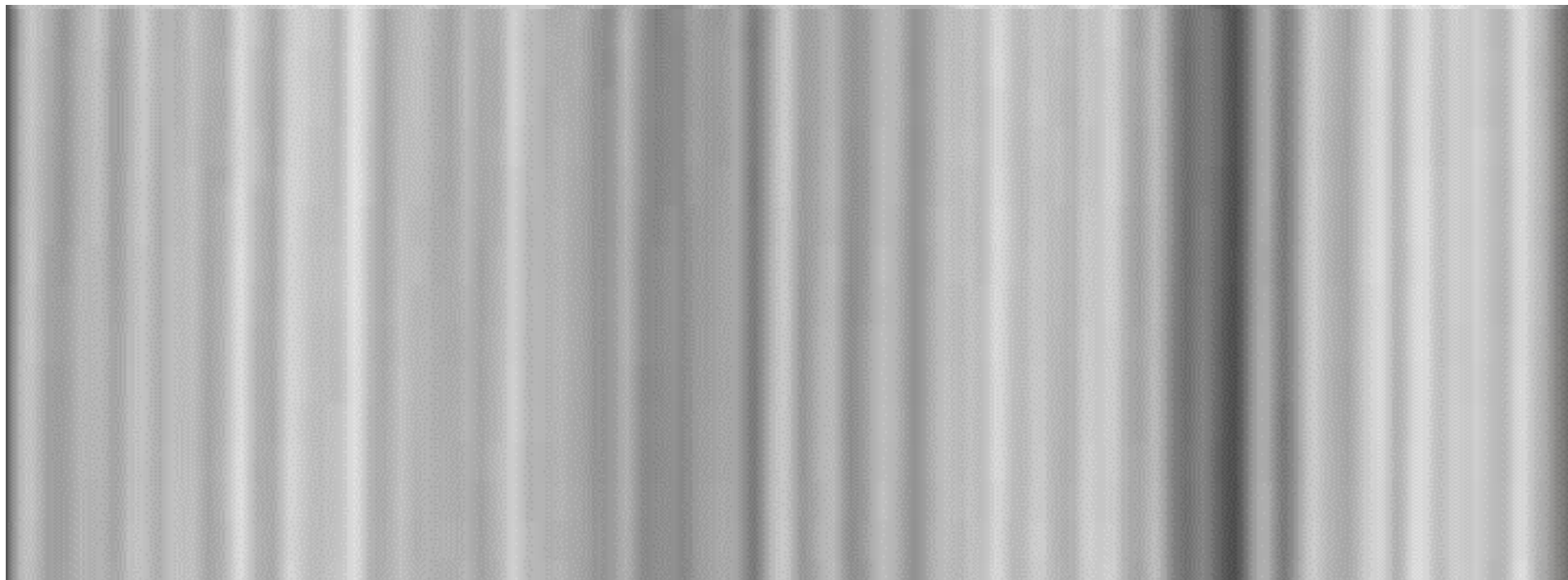
混ぜるとどうなる？



1/f雑音

信号をつかみやすく！

混ぜると、信号があるのかどうかよくわからない。



信号をつかみやすく！

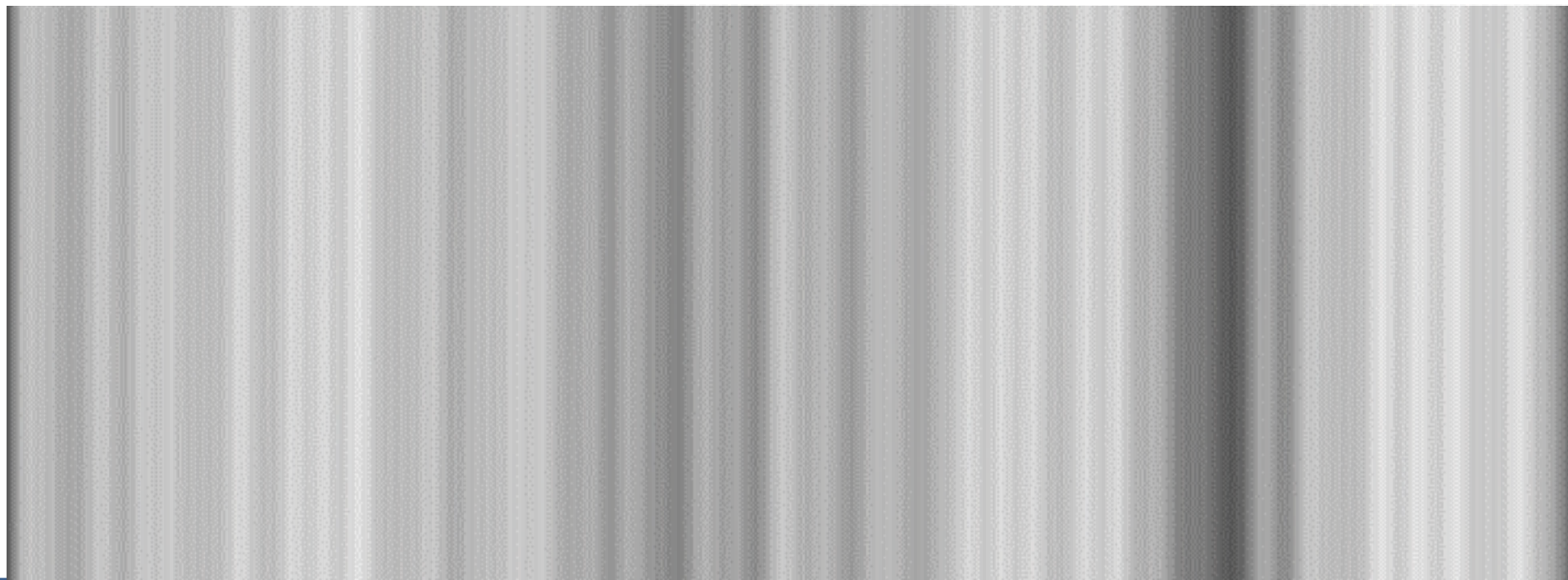
信号に変調を加えて速く刻むと、

1/f雑音



信号をつかみやすく！

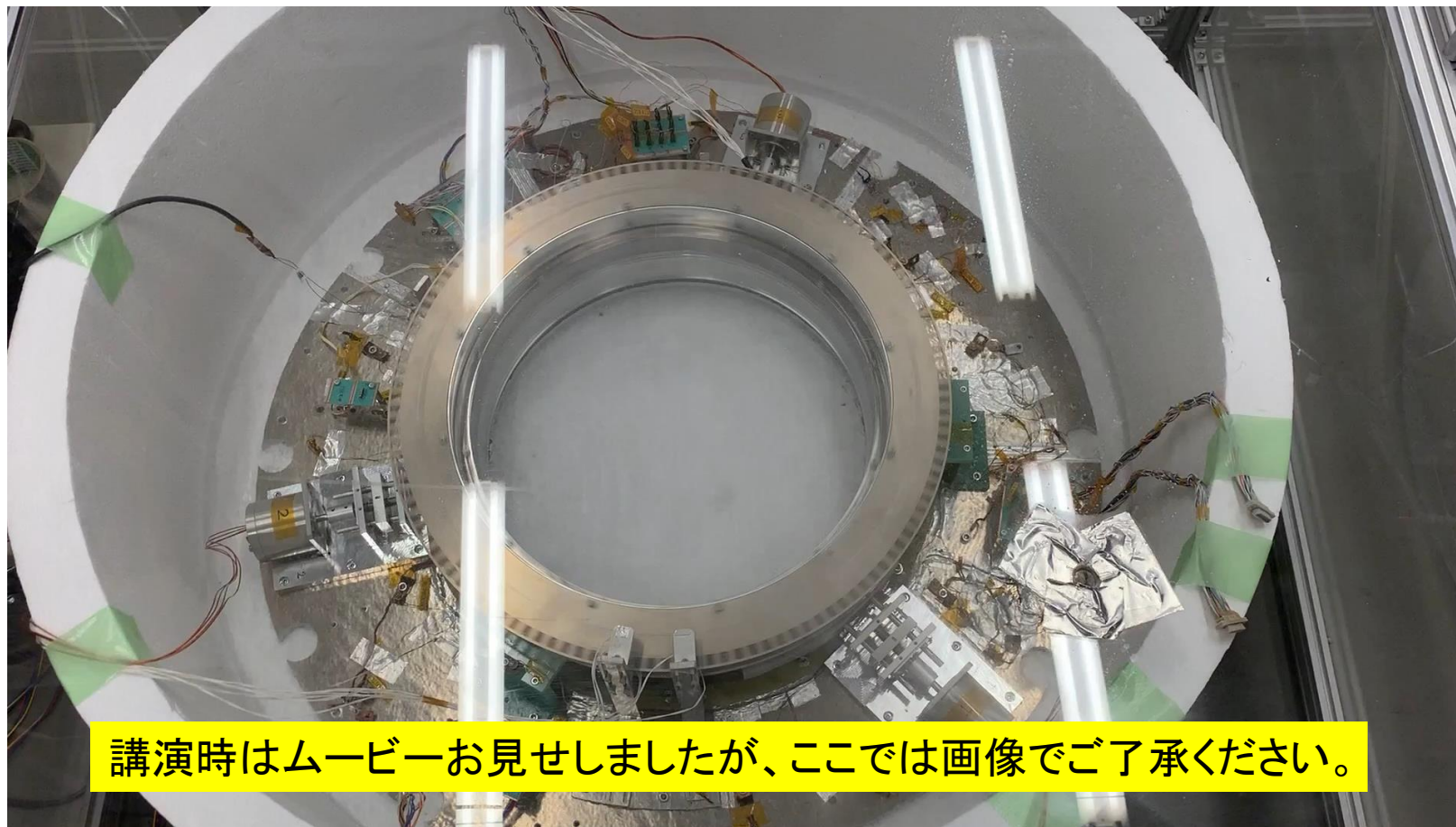
混ぜても、細かい刻みの信号を感じ取ることができる。



低周波望遠鏡用偏光変調器 (直径~450mm)



滑らかな安定した回転。ムービーは液体窒素(-196°C)での実験だが、
-269°Cクライオスタット中での安定な回転も確認済み。



講演時はムービーお見せしましたが、ここでは画像でご了承ください。

ミリワット程度の排熱しか許されない。
→
超電導磁気ベアリングを用いて、
永久磁石リング+サファイヤを
浮かせて滑らかに回転させる。

もっと昔へ。技術の結集で挑む。

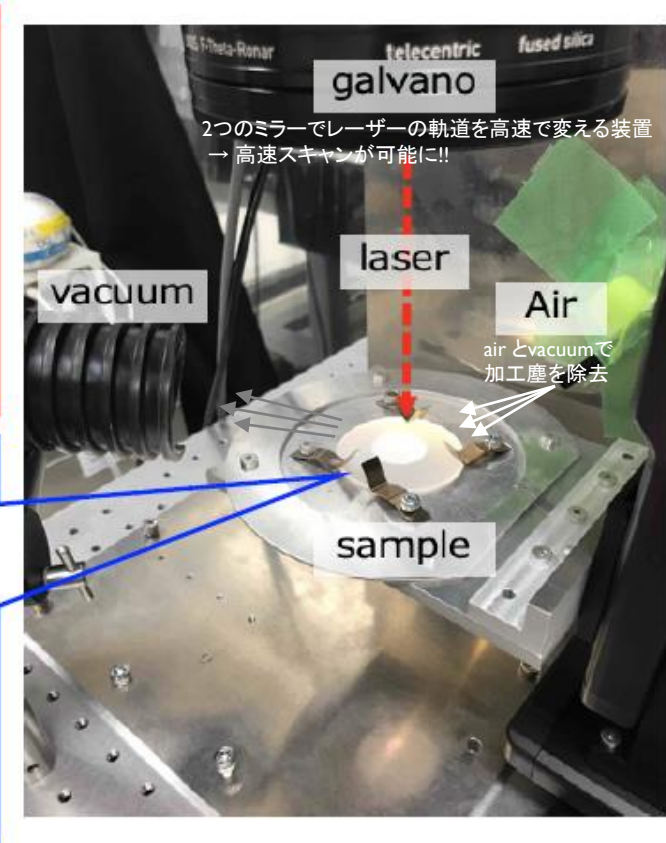
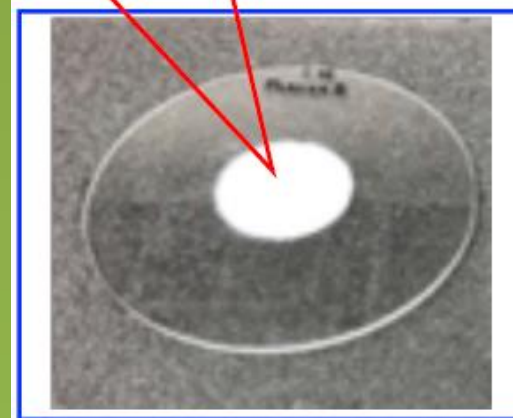
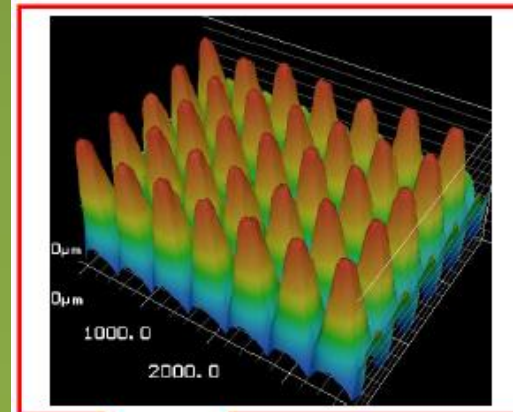
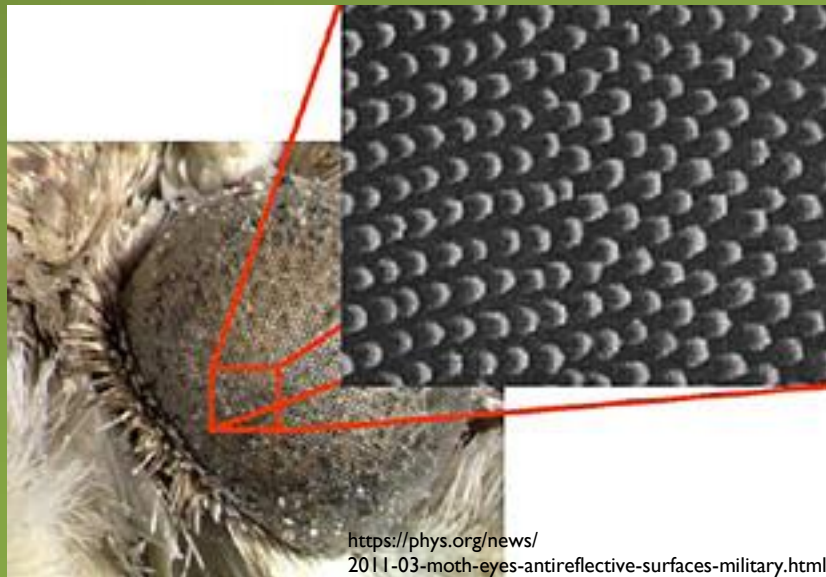
技術3 高い効率を (& 光学性能をぐちゃぐちゃにしないで) !

防反射構造(レーザー加工でサファイヤ表面に凹凸構造を作り、
表面での屈折率変化をゆるやかにする。)



→

蛾(が)の眼の表面構造と似ている。



コーヒーフレイク



http://www.maniado.jp/community/neta.php?NETA_ID=19198

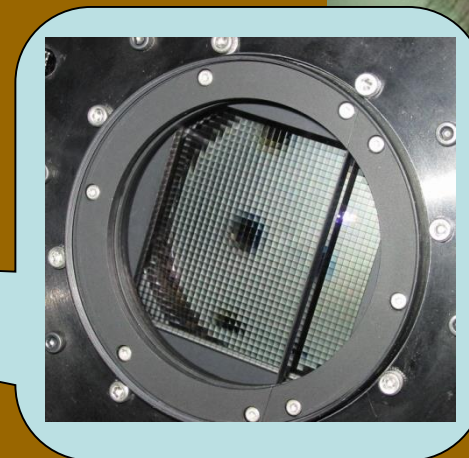
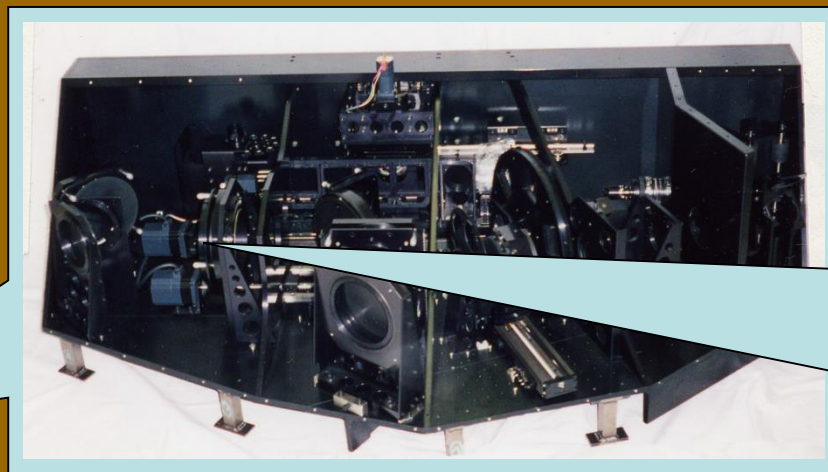
眼の話：光学素子と生物の眼 —以前の研究時より(1)—

すばる望遠鏡(ハワイ山頂口径8.2メートル)用
京都三次元分光器第2号機面分光モードの
空間分割用レンズアレイ

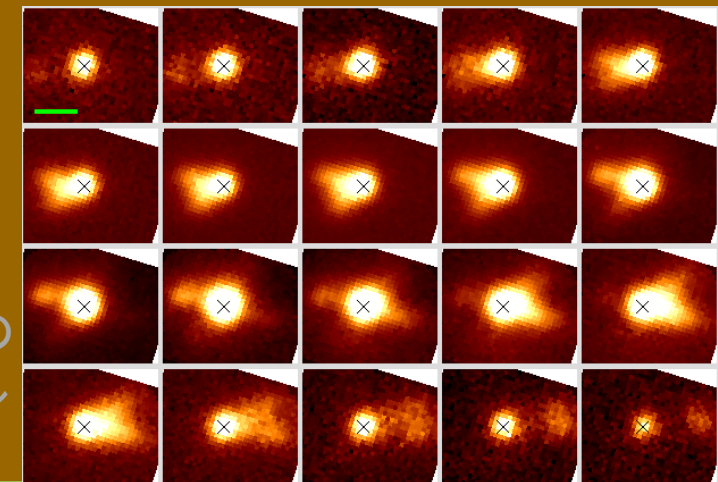
→

昆虫の複眼と構造が似ている。

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9a/Dragonfly_eye_3811.jpg



銀河NGC1052中心の
超巨大ブラックホール
周りのガスの噴出





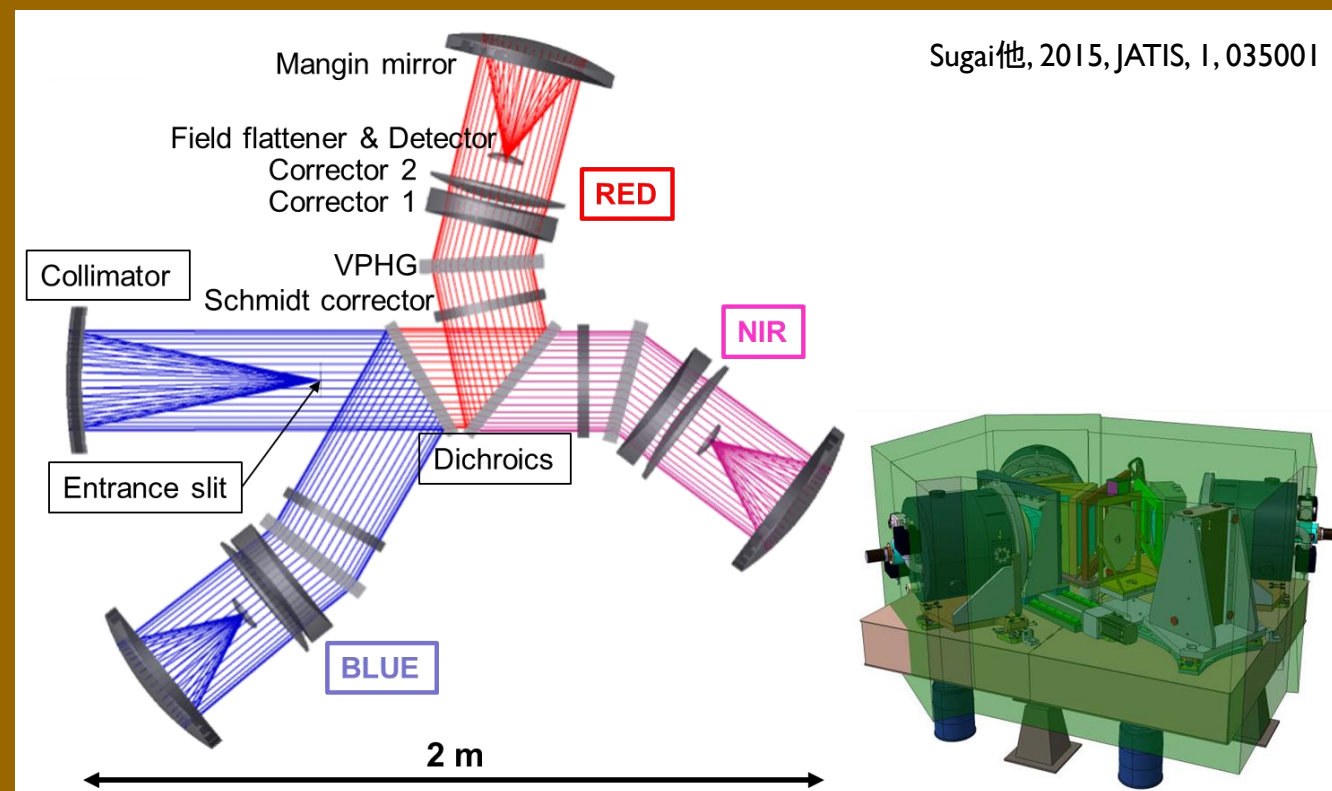
http://www.maniado.jp/community/neta.php?NETA_ID=19198

眼の話：光学素子と生物の眼 — 以前の研究時より (2) —

すばる望遠鏡(ハワイ山頂口径8.2メートル)用
主焦点ファイバ多天体分光器PFSの広視野用シュミット補正レンズ

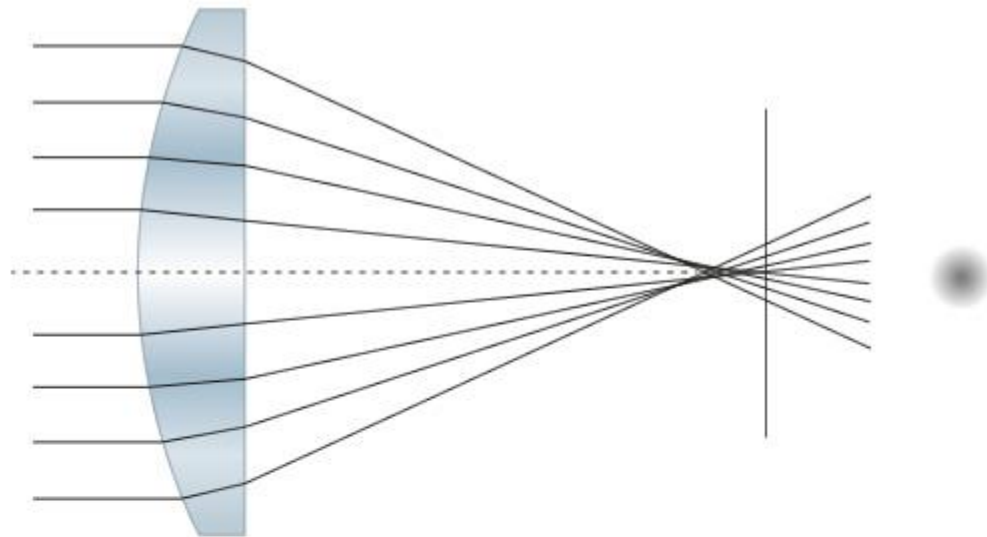
→

貝の眼の構造と同じ。

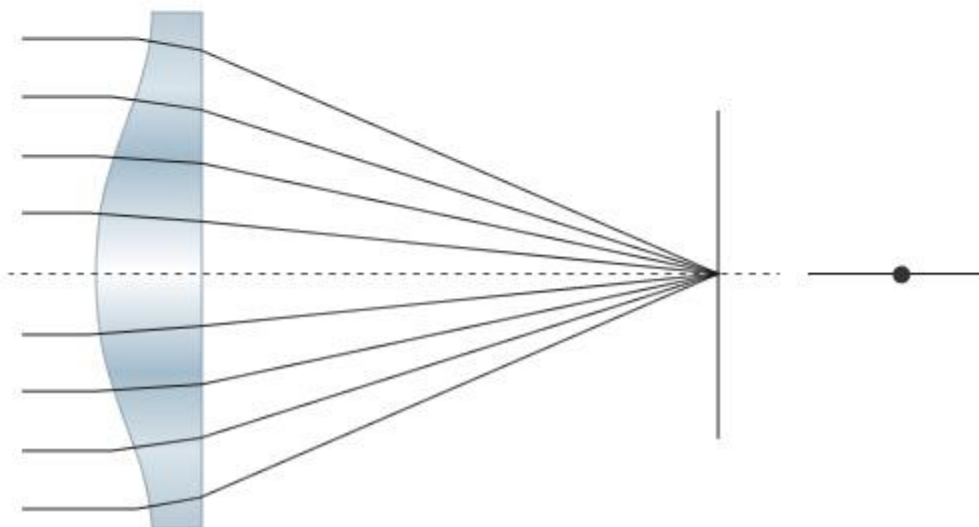


■球面収差の補正（例）

●球面レンズ

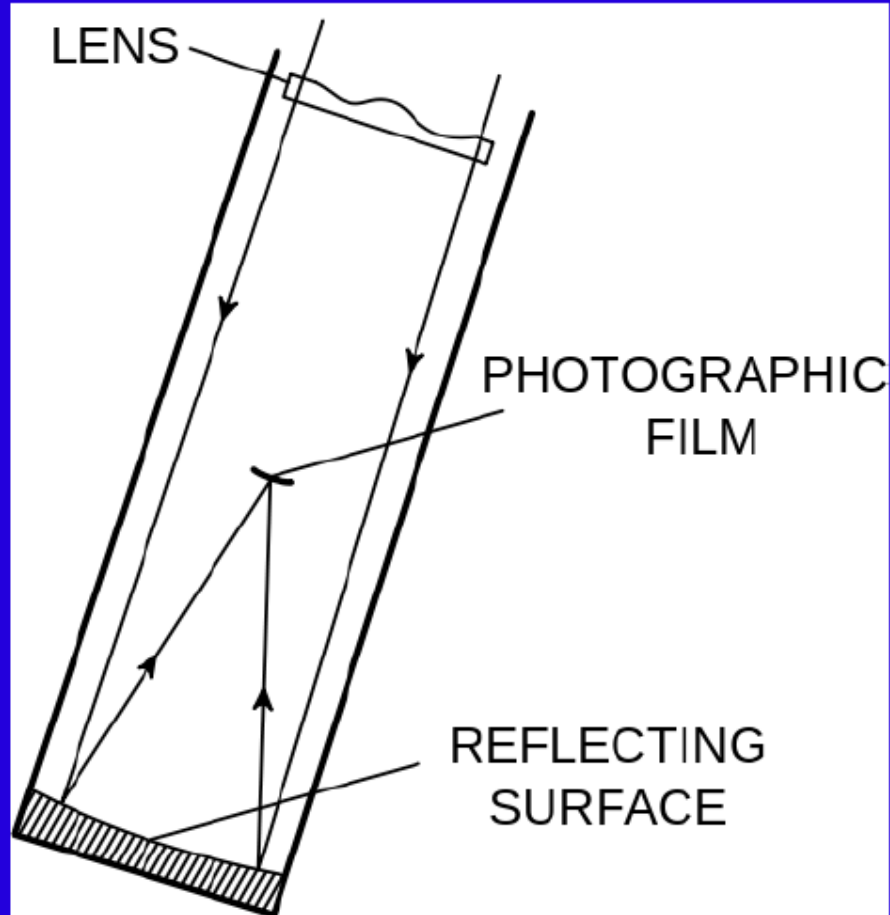


●非球面レンズ



Catadioptric systems; the Schmidt camera

It is possible to combine reflecting and refracting systems; usually the idea is to let the mirror do most of the `work' forming the image, and to use lenses only to correct the aberrations of the mirror. The simplest



and most beautiful of these is the Schmidt camera, which uses a spherical mirror (which by itself has ghastly spherical aberration-- but remember that spherical is field-independent) with a thin fourth-order aspheric corrector plate at the center of curvature of the mirror whose sole role is to correct the spherical aberration of the spherical primary. Since it is at the center of curvature and its power does not change much with field angle, the result is excellent imaging over huge (many degree) fields with very fast optics.

コーヒーフレイク終了

...true of Bernh
Schmidt cam
camera; som

The eye o



certainly
ted the
e Schmidt

<http://subseaobservers.com/scallops/>

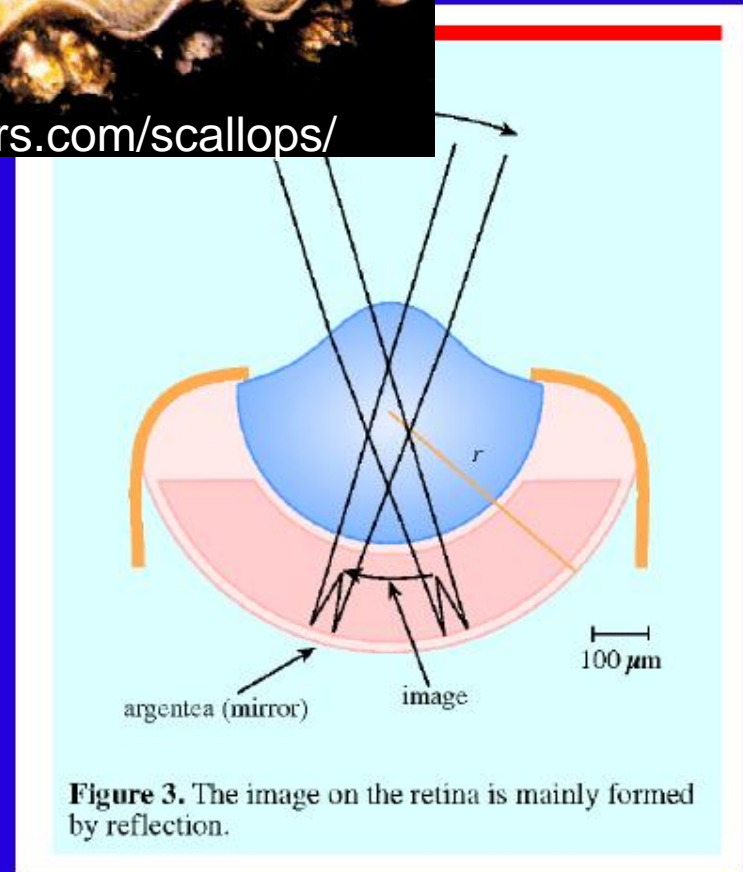
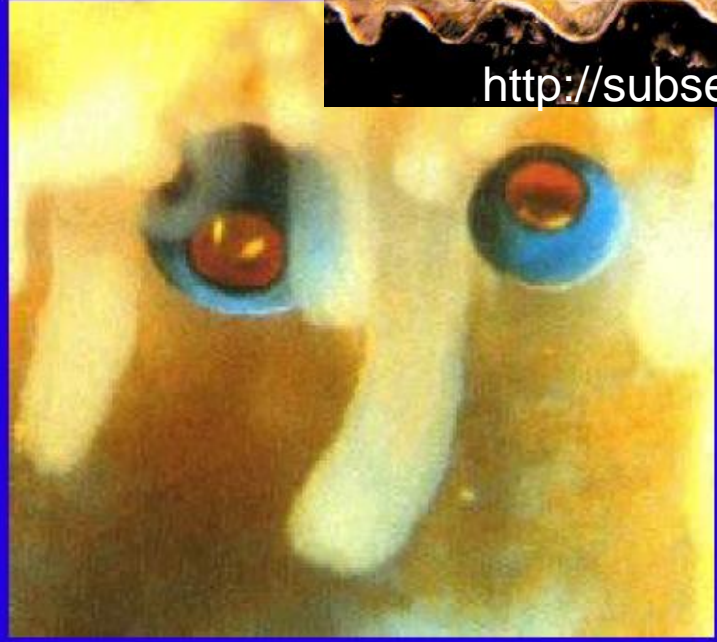
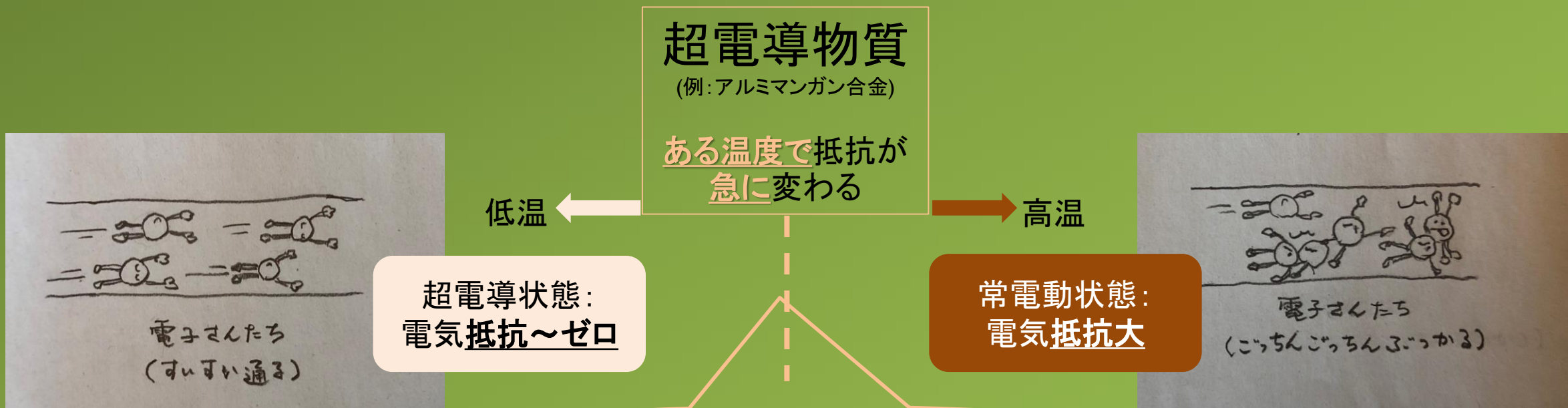


Figure 3. The image on the retina is mainly formed by reflection.

もっと昔へ。技術の結集で挑む。

技術4: 高感度を!

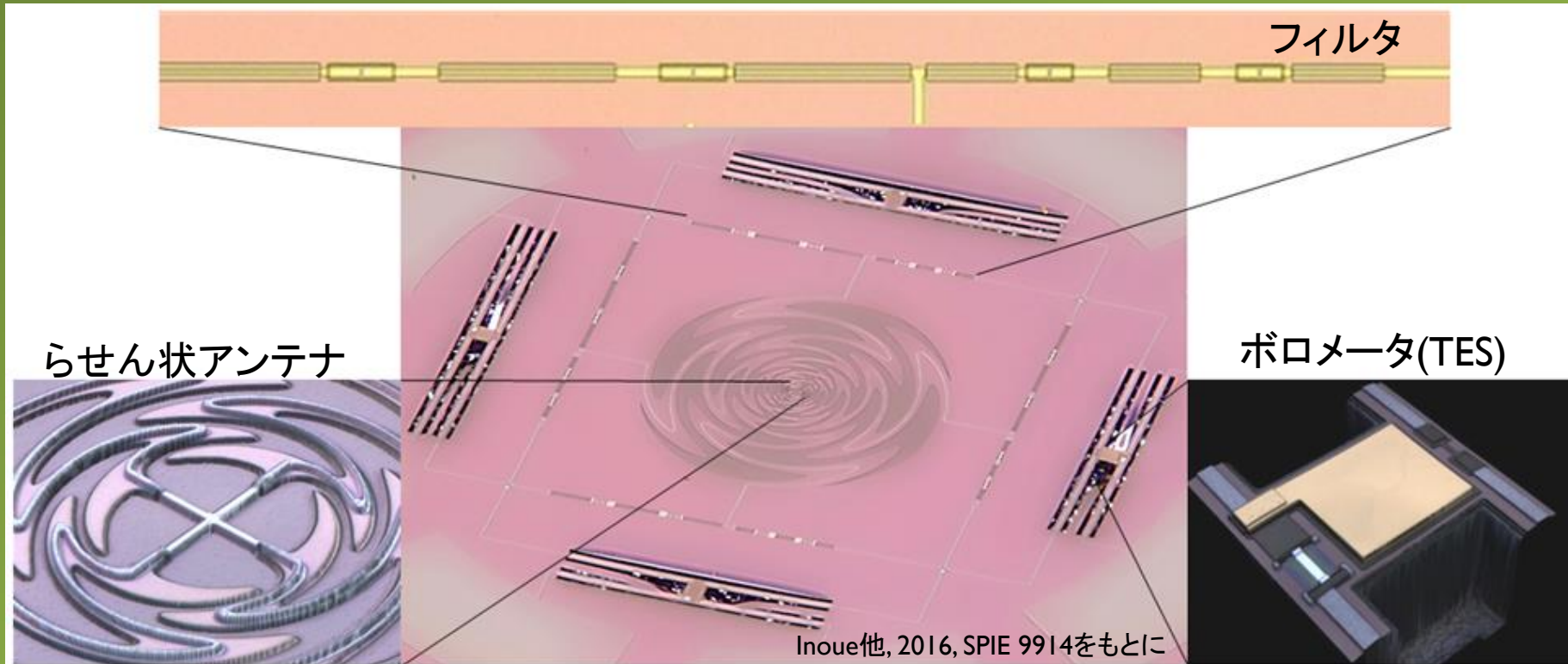
超電導遷移端検出器(TES)の原理



この辺の温度に調整しておく(例: 0.1ケルビン=-273.05°C)。
電波信号が少しでも届いたら温度がちょっと上がっただけでも、抵抗が急に増加するので気が付く(検出できる)!

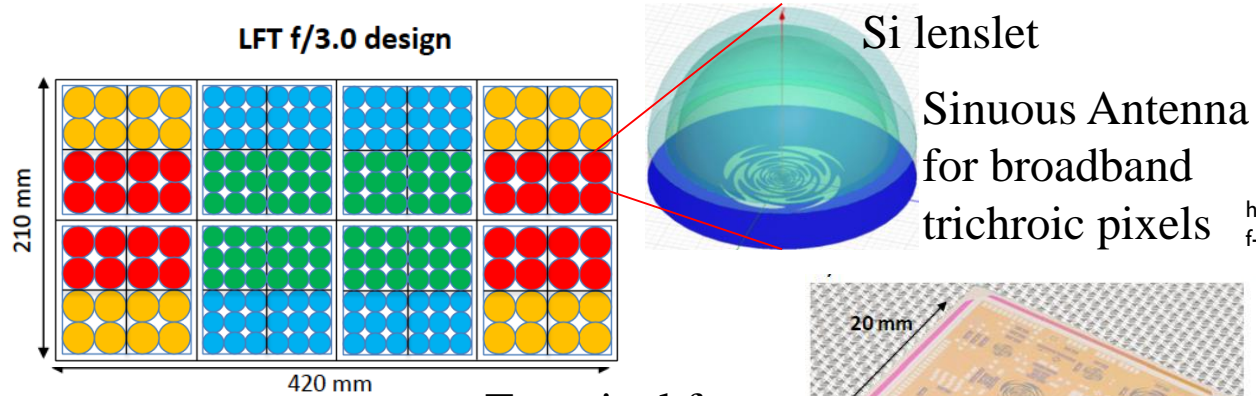
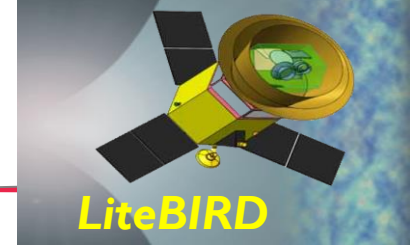
もっと昔へ。技術の結集で挑む。

技術4: 高感度を！
超電導遷移端検出器(TES)



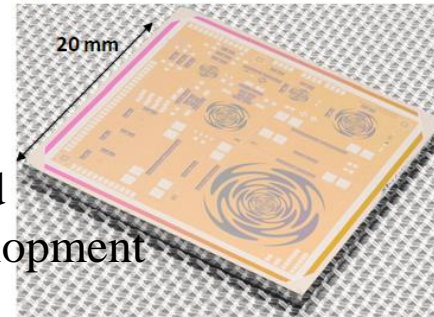
例: ポーラーベア2用超電導遷移端検出器(カリフォルニア大学バークレイ校)
らせん状アンテナサイズが2ミリメートル。

TESアレイ



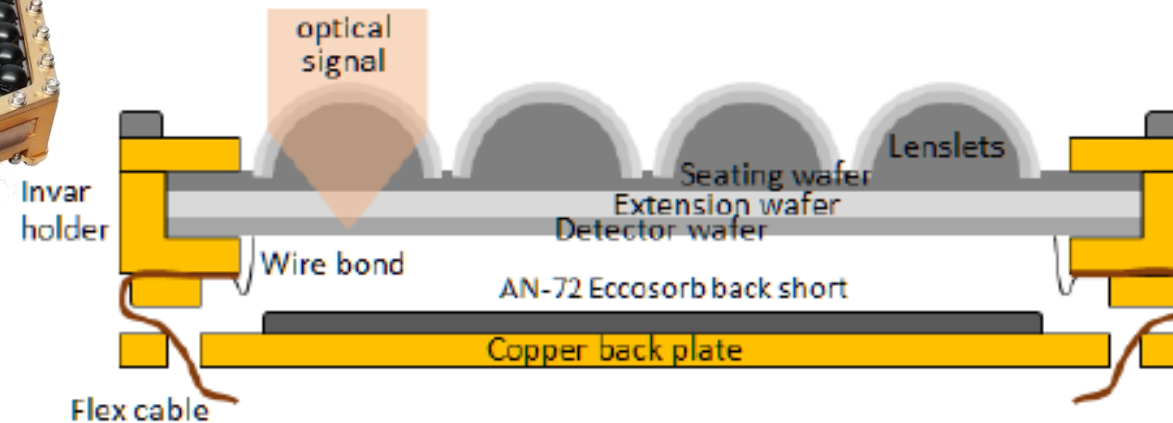
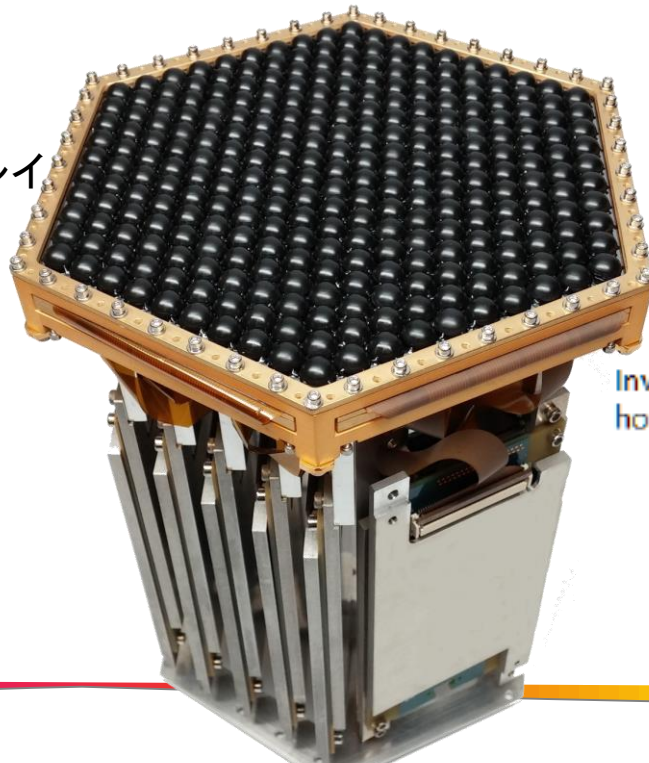
http://www-x.phys.se.tmu.ac.jp/ltd17/ltd17upload/html/files/f-27-52-9373385_2017_07_20_LTD17_Suzuki_LiteBIRD.pdf

Test pixel for space-optimized bolometer development



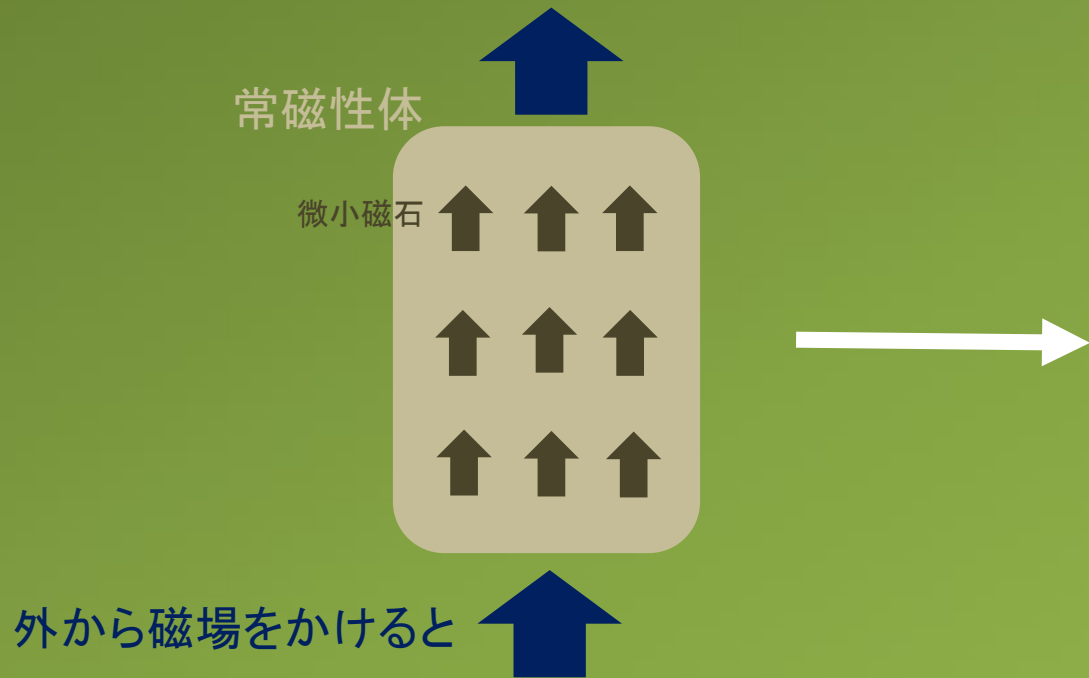
Westbrook他, 2015, Journal of Low Temperature Physics, A52108BW

地上実験で実用化されているTESアレイ



もっと昔へ。技術の結集で挑む。

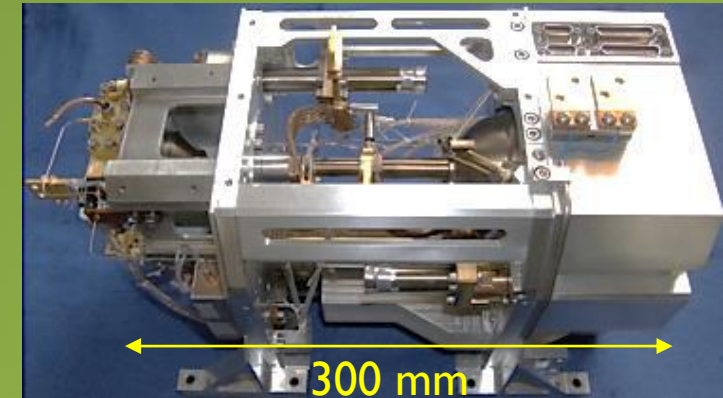
技術5：超電導遷移端検出器を0.1ケルビン=-273.05℃まで冷やさなきゃ！
断熱消磁冷凍機の原理



外から磁場をかけると

微小磁石の向きがそろおう。
エネルギーは低い状態。

外からの磁界を無くすと、
微小磁石はばらばらの向きに戻る。
このとき、周りから熱を奪って、周りを冷やす。



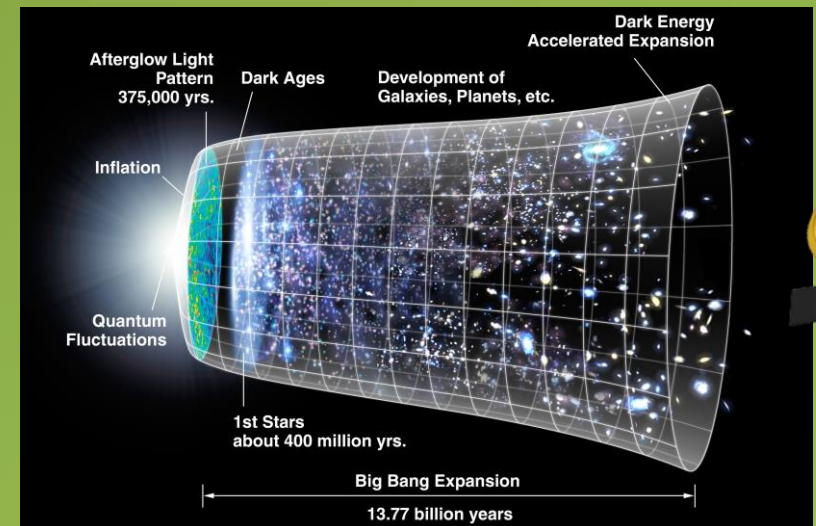
Suzuki他,2018, Journal of Low Temperature Physics, 193,1048

目次

第一章 時間をさかのぼって

0. 生まれたときを知りたい？
1. 光は速い。でも、無限に速くはない。
2. 空間が膨張している！生活していて感じないけど。。
3. 宇宙誕生後4億年のつわもの銀河。
4. “暗黒時代”。いつか脚光を浴びる日がくる。
5. 離ればなれはいやだ。でも、そこから旅が始まる。
6. もっと昔へ。

第二章 もっと昔へ。技術の結集で挑む。



原始重力波を通したインフレーション検証にかかわる者としての望み

「宇宙が誕生時に震えていたという最初の鼓動を感じたい」

(長谷川雅也さん：

クローズアップ科学 (産経新聞 sankei.com) の記事の中で)