

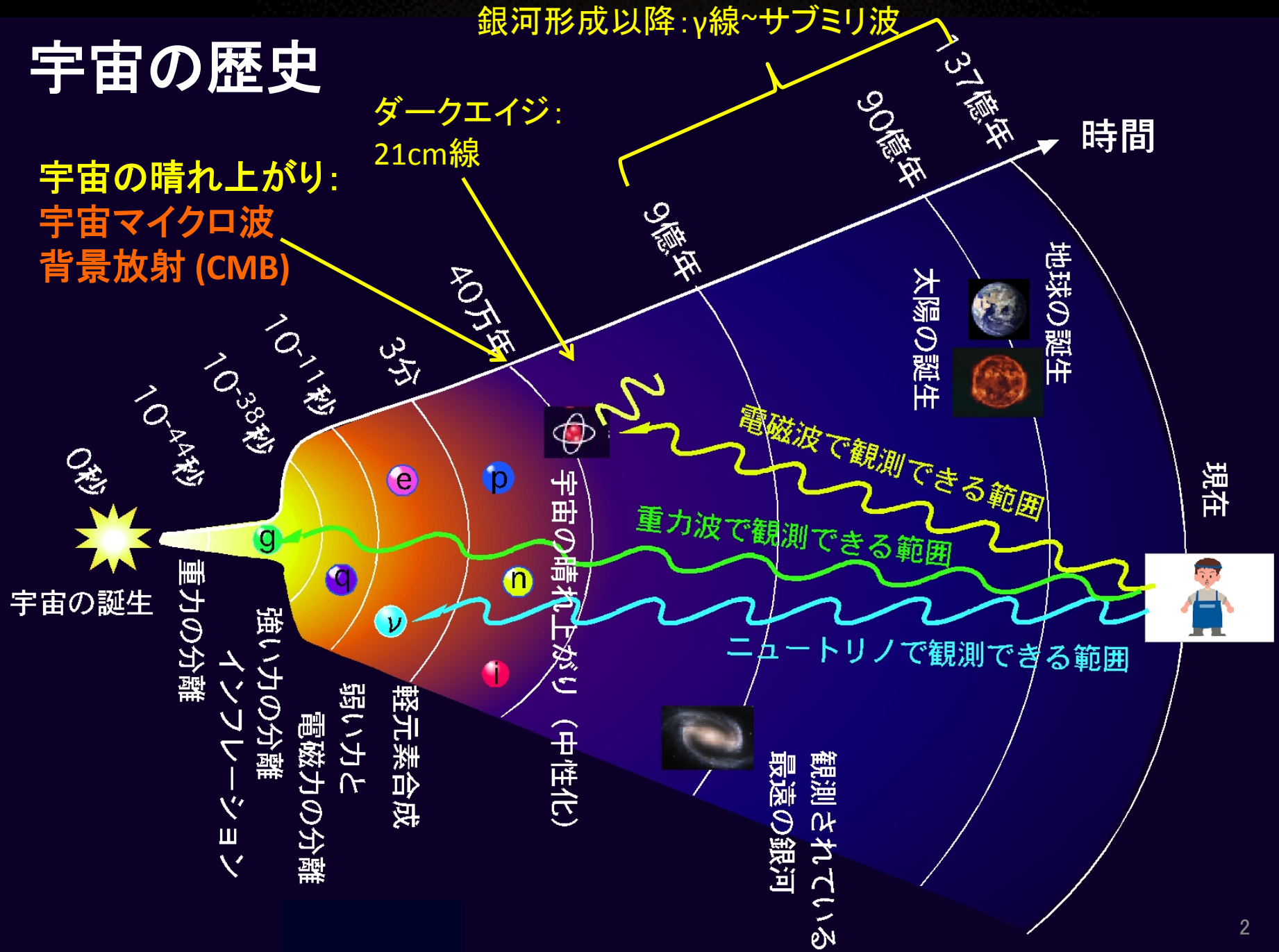
宇宙マイクロ波 背景放射偏光望遠鏡 の先進テクノロジー

天文・天体物理若手夏の学校 in 宮城蔵王

2013. 7. 31

高エネ研 都丸 隆行

宇宙の歴史

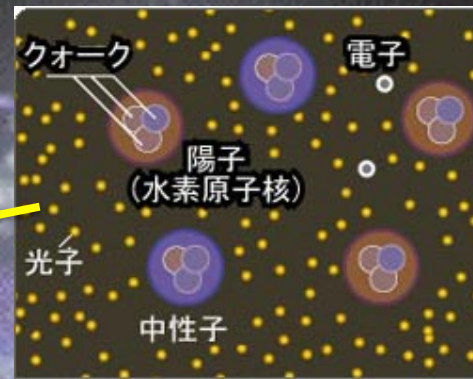
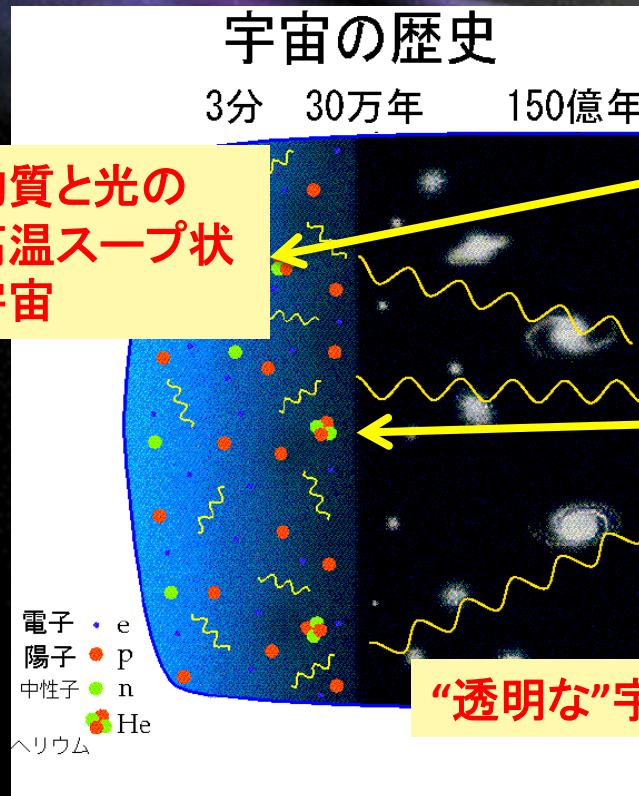


1.宇宙マイクロ波背景放射(CMB)

ビッグバン宇宙論 (ガモフ、1948)

宇宙に存在する物質の73 wt%は水素、24 wt%はヘリウム、これより重い元素はわずか3 wt%である。なぜ？

→ 宇宙初期に高温の火の玉状態が存在すれば、核反応で効率よく軽元素を合成できる。(αβγ理論)



光が直進出来るようになる

宇宙の晴れ上がり

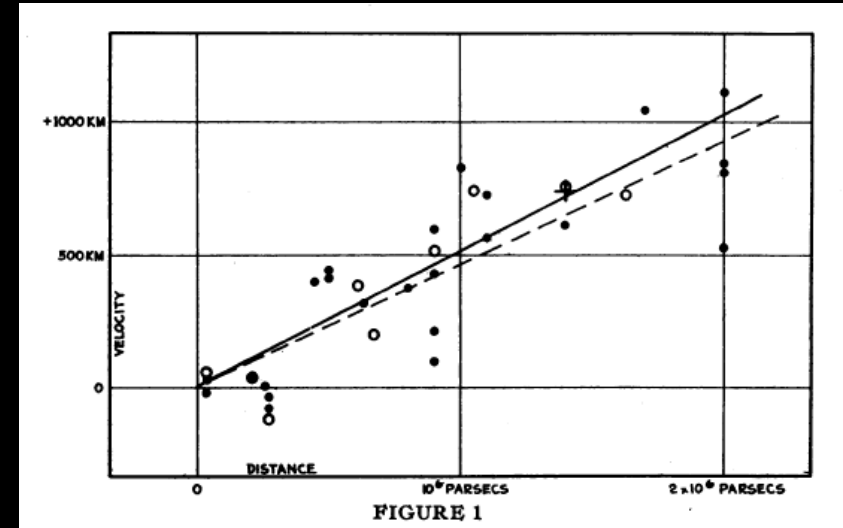
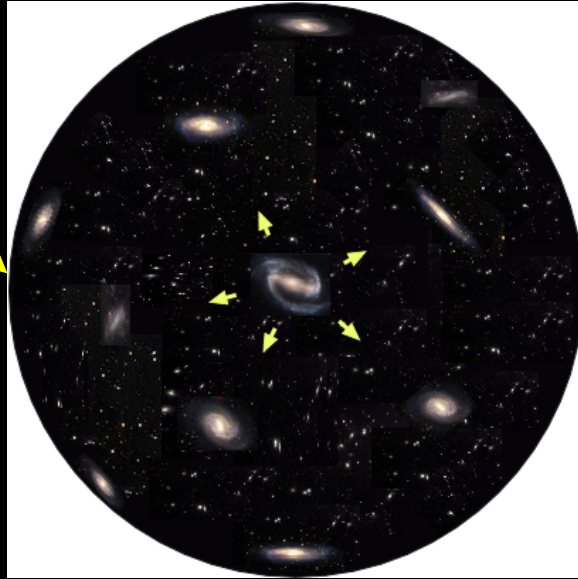
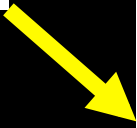
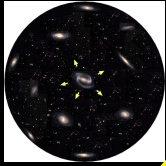
宇宙膨張

→ $T = 3000\text{K}$

宇宙誕生から38万年後

“透明な”宇宙





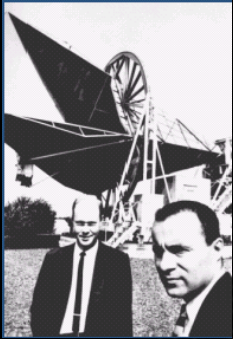
E. Hubble, PNAS, 15 (1929), 168.

宇宙膨張は銀河系外の星雲の観測データから1929年にハッブルにより発見された。

T=3000Kで黒体放射された電磁波($\lambda \sim 5\mu\text{m}$)は、宇宙膨張と共に波長が引き延ばされ、現在は数K ($\lambda \sim \text{mm}$)の黒体になっているはず!

ビッグバン宇宙論の3つの柱

- 宇宙膨張
- 元素存在比
- マイクロ波の黒体放射

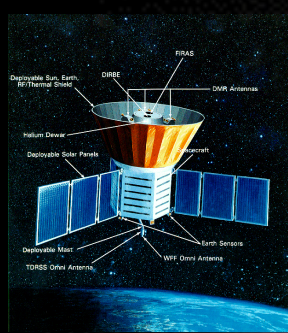
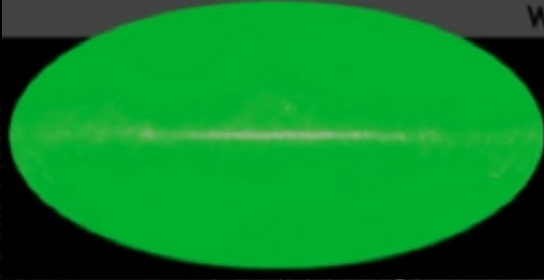


1965年 ペンジアスとウィルソンによりCMB発見

ビックバン宇宙論を支持

宇宙は3Kの一様等方だった

→ 1978年ノーベル物理学賞

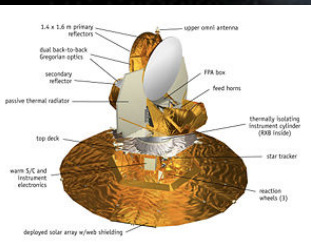
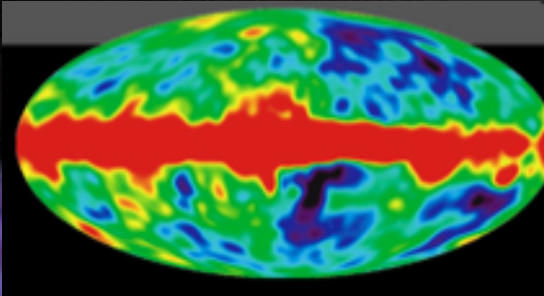


1989年 COBE衛星

2.725Kの黒体

1/100,000の非一様性を発見

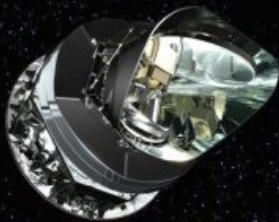
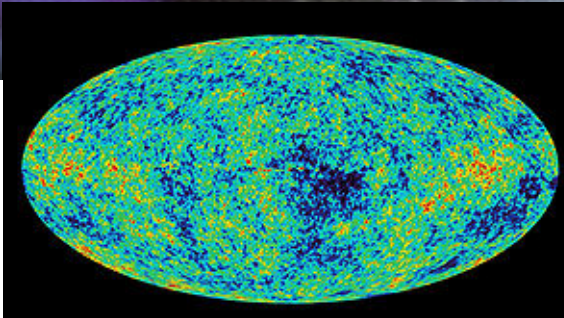
→ 2006年ノーベル物理学賞



2001 WMAP衛星

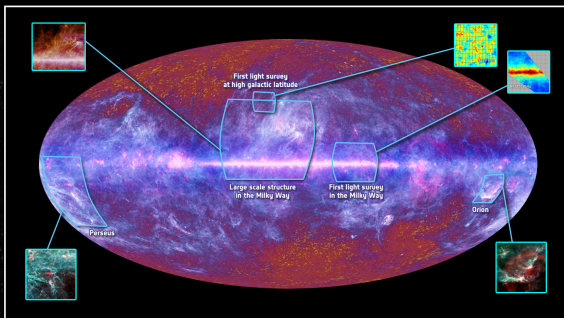
種々の宇宙論パラメータが明らかに

→ 宇宙の精密計測時代の幕開け



2009 Planck

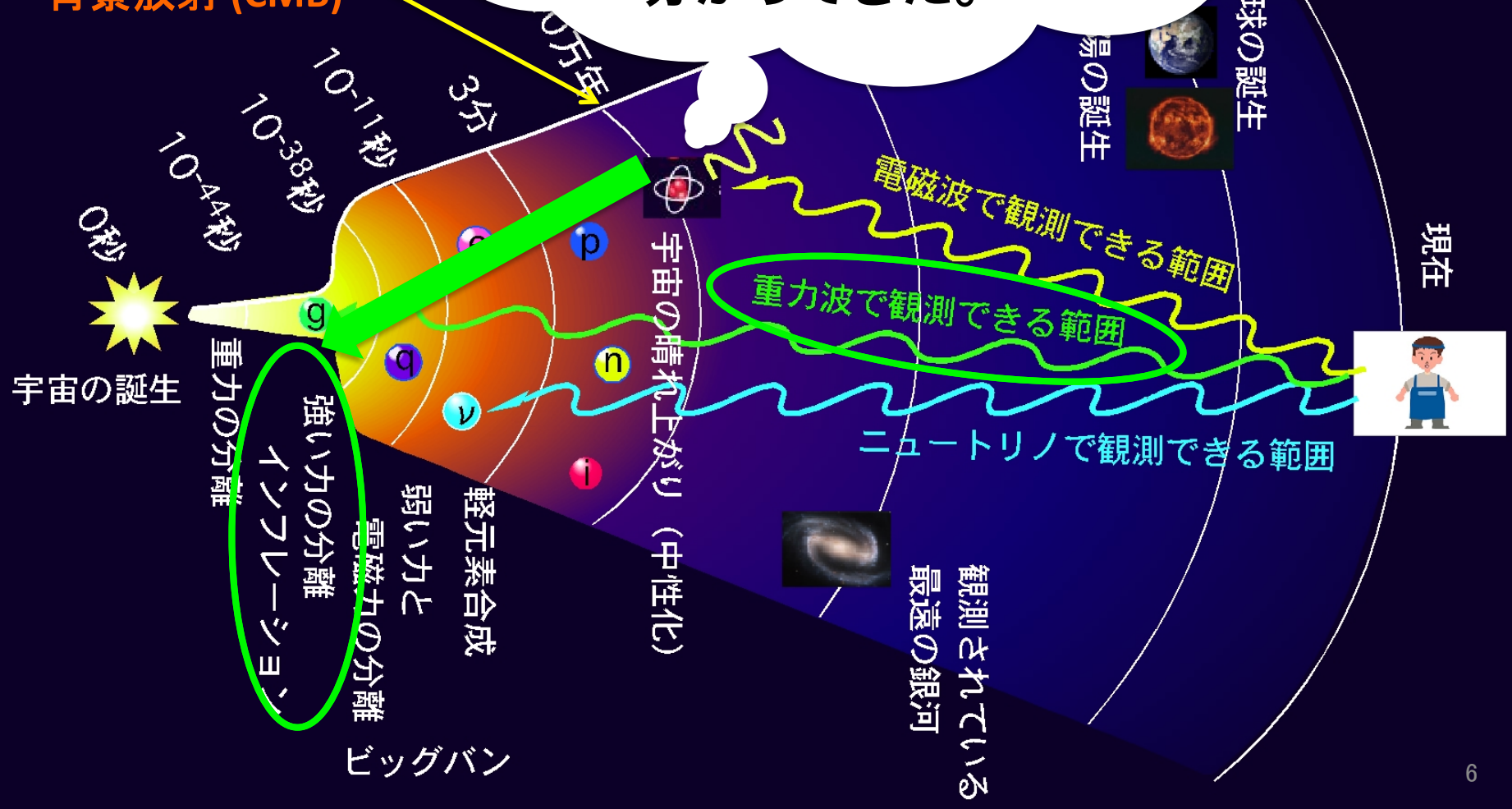
Foreground等さらに多くの情報が得られると期待。



宇宙の歴史

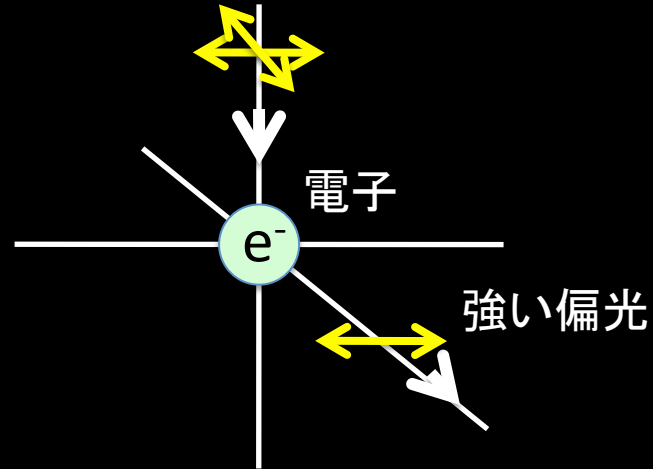
宇宙の晴れ上がり:
宇宙マイクロ波
背景放射 (CMB)

CMBの偏光分布から、
インフレーション
期を探索できることが
分かってきた。

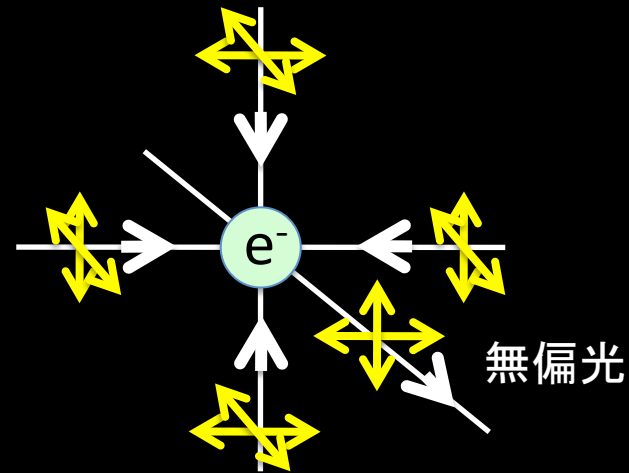


CMBが偏光を獲得するメカニズム：Thomson散乱

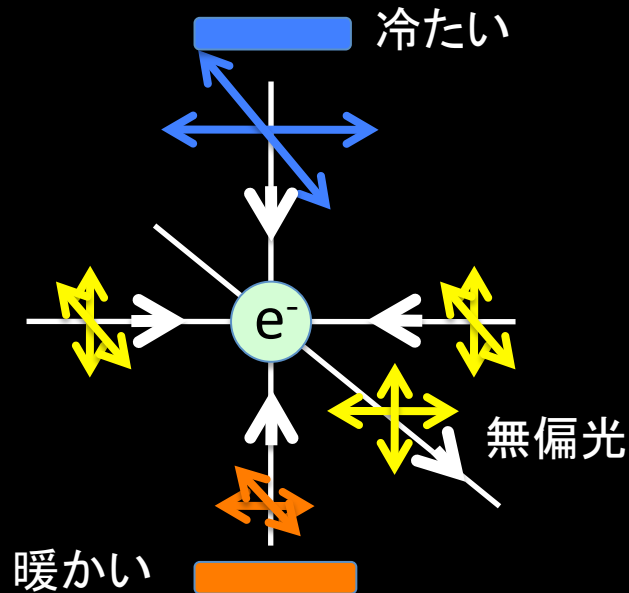
Single photonの場合



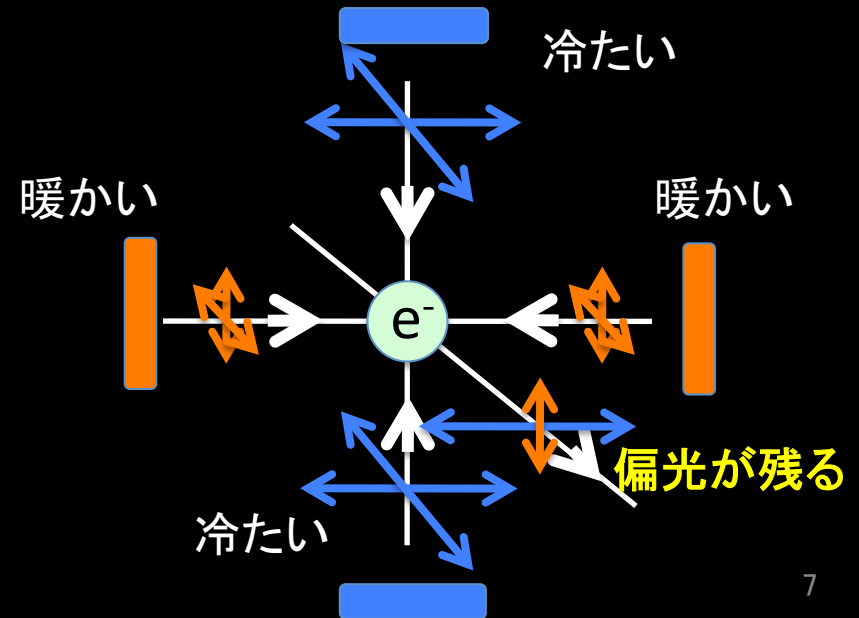
完全等方 (Monopole) の場合



Dipole 非等方性の場合

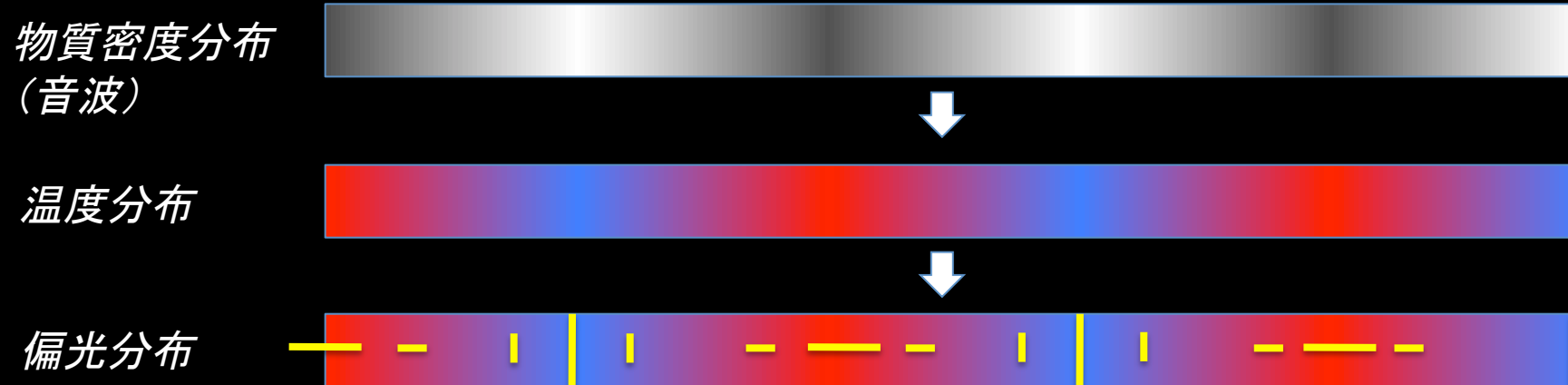


Quadrupole 非等方性の場合



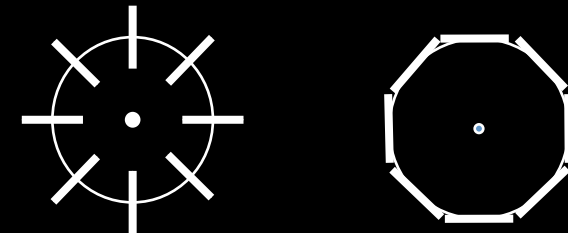
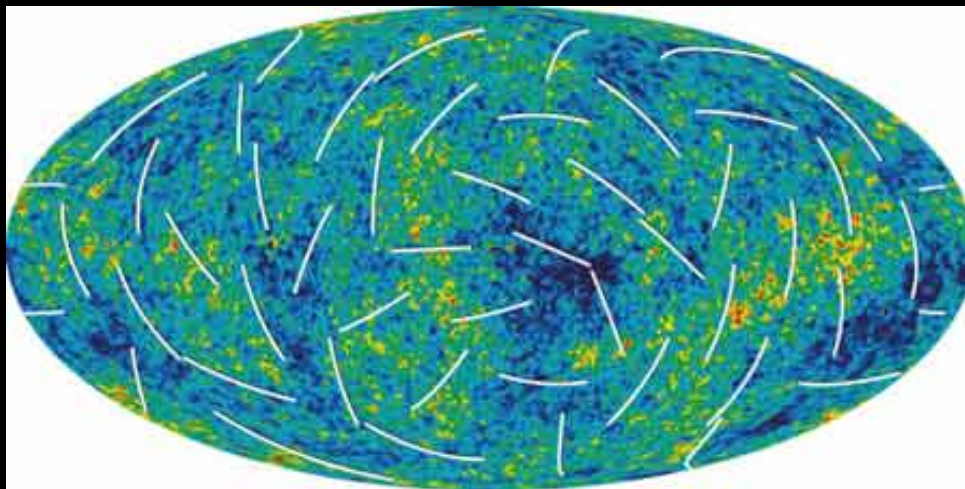
温度のQuadrupole分布を生じるメカニズム 1: 密度揺らぎ

小松さんの説明より



Thomson散乱による偏光は、天空に必ず対称な分布パターンを作る。

-> **E-mode** と呼ばれる。

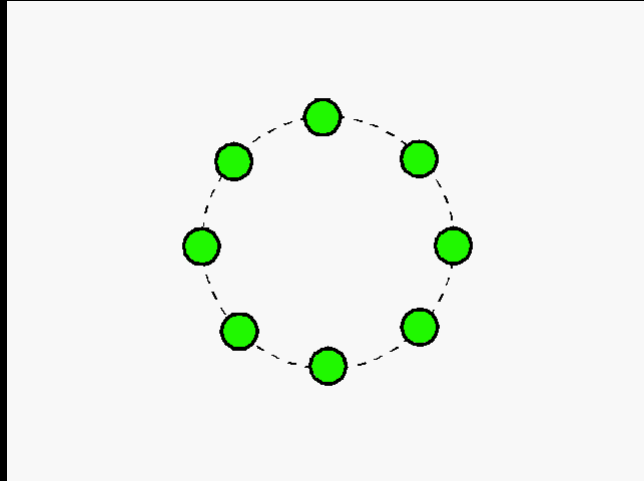


WMAPによるE-mode偏光のマップ

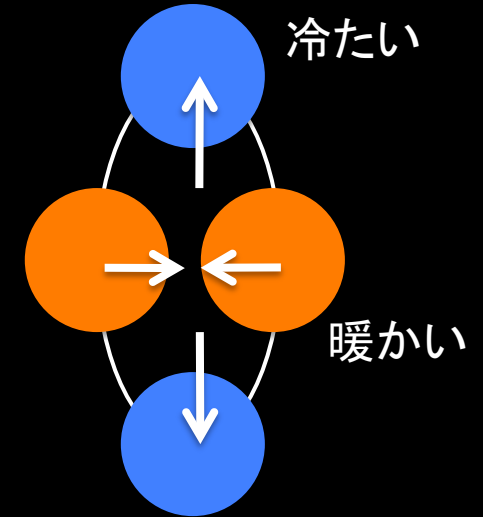
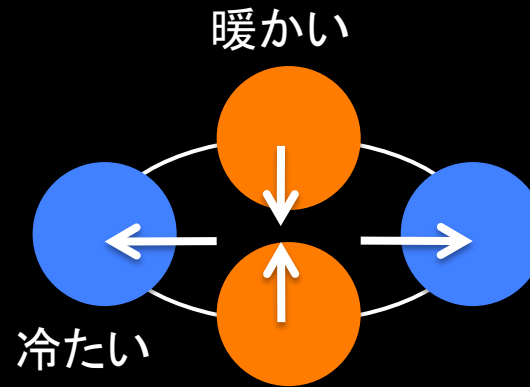
E-modeはすでに検出されており、Thomson散乱によるメカニズムを支持している。 8

温度のQuadrupole分布を生じるメカニズム 2: 重力波

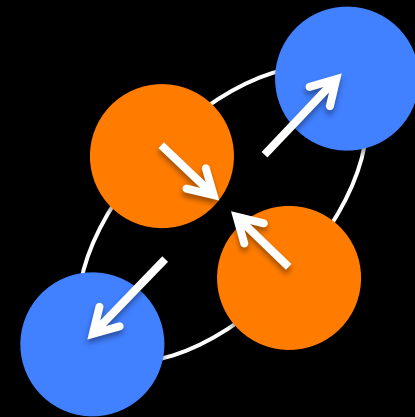
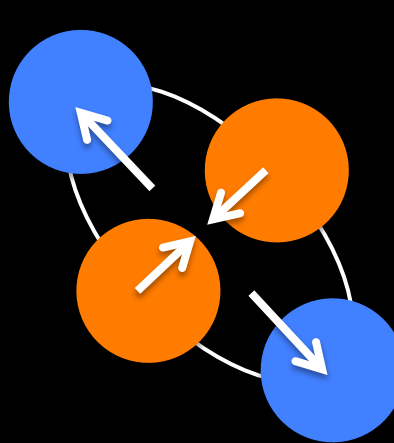
重力波による質点の運動



重力波の + mode (h_+)

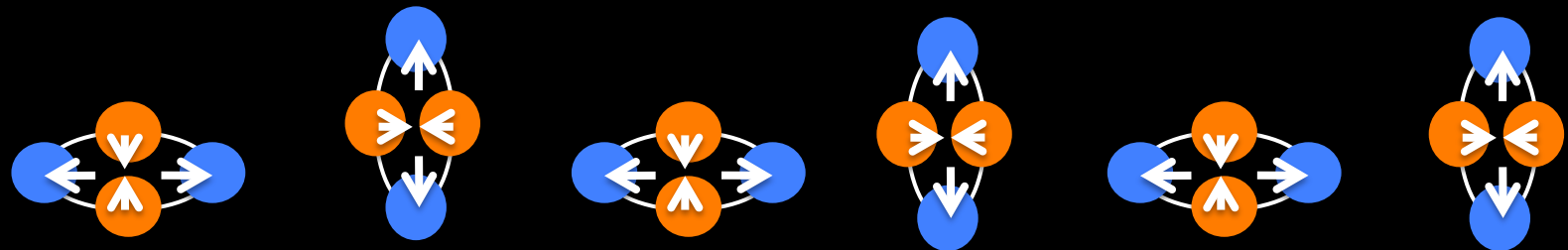


重力波の X mode (h_x)



重力波には45°ずれた
2つの偏光がある。

重力波の + mode (h_+) の場合



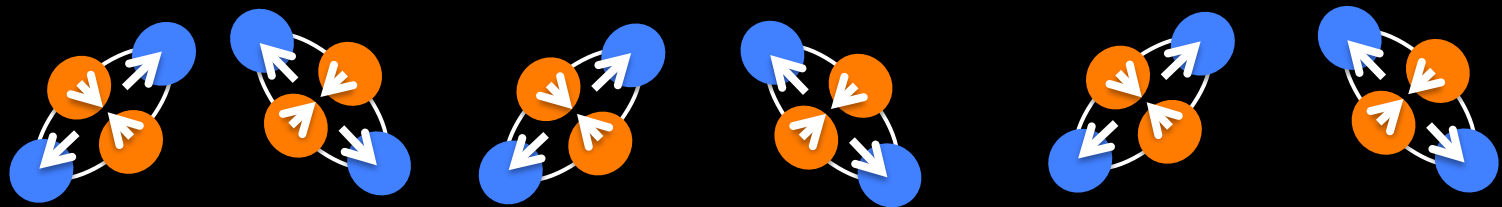
温度分布



偏光分布



重力波の X mode (h_x) の場合



つまり

重力波 + mode は通常の音波による密度揺らぎと同じ。

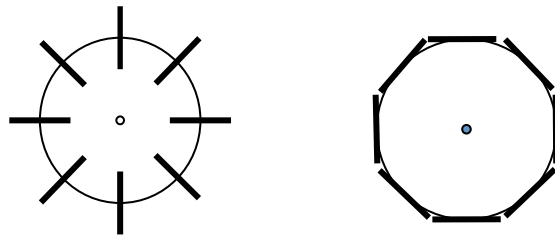
-> E-mode (対称な分布; Parity保存)

重力波 X mode は E-mode と異なるねじれた分布。

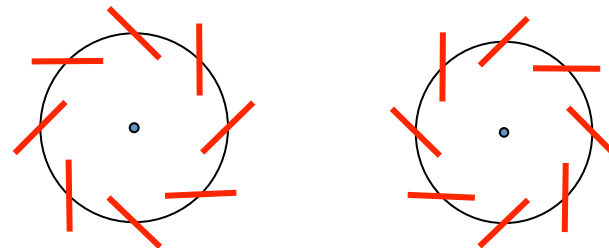
-> **B-mode** と呼ばれる。(非対称な分布; Parity非保存)

天球におけるCMB偏光の分布パターン

トムソン散乱 (Eモード)

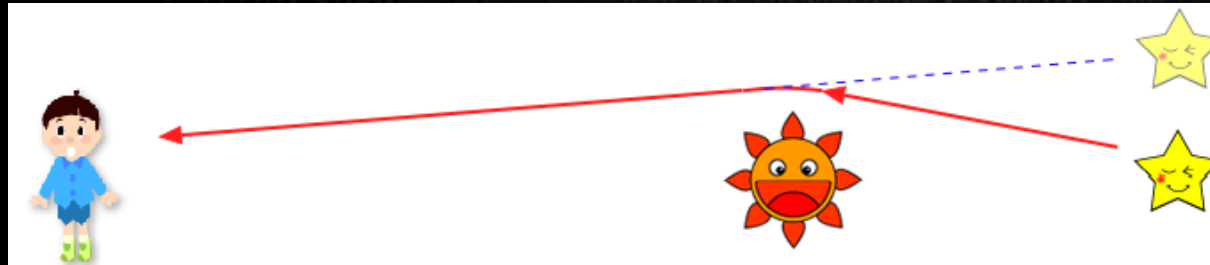


重力波 (Bモード)



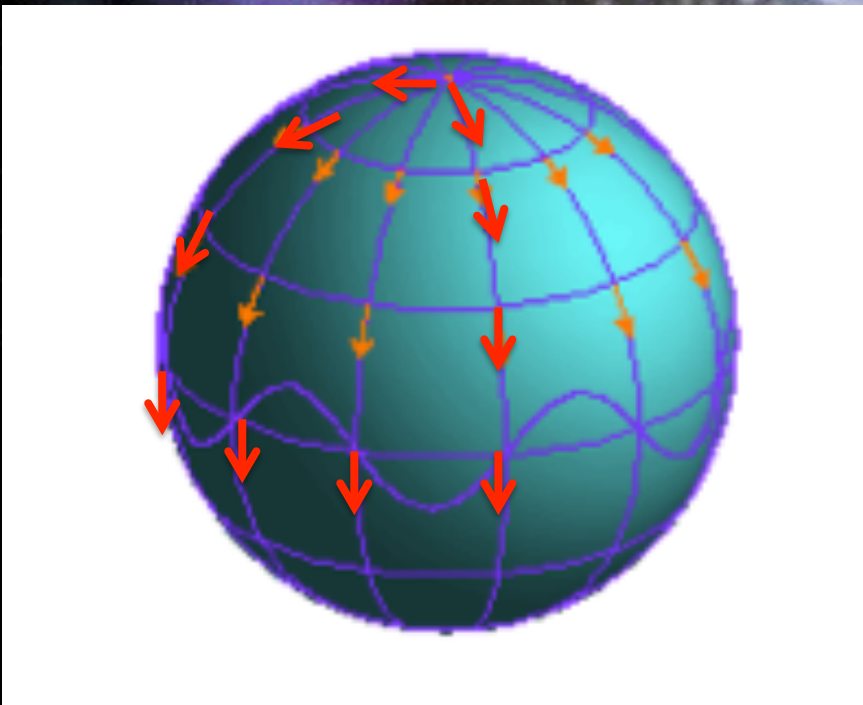
このような、B-mode パターンは、
現在のところ**重力**からしか考えられない。

もう1つの B-mode: 重力レンズ



強い重力場により
レンズのように光の軌跡
が曲げられる現象。

1919年エディントン(英)は太陽背後の星の光が太陽近傍で曲がることを発見し、
一般相対論を初めて実証した。

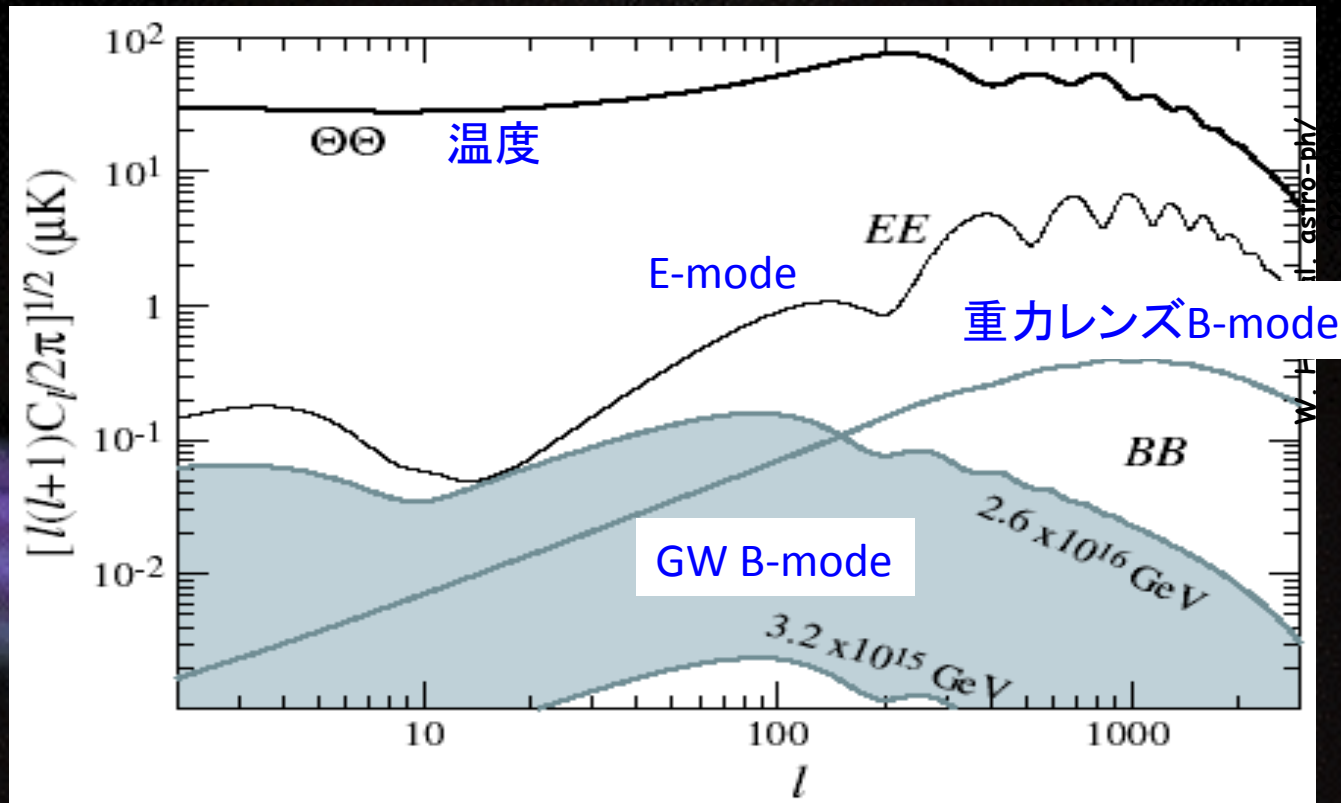


一般相対論より、曲がった
時空を平行移動するベクトルは、
一周すると異なる方向を向く。

E-mode 偏光したCMBは、重力レンズ
を受けるとねじれてしまう。

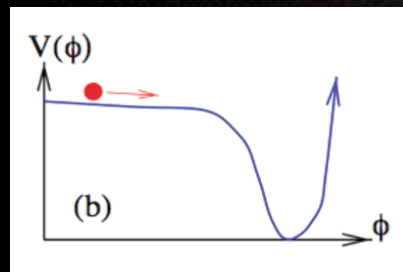
-> **B-mode** を生じる

しかし、B-modeは非常に小さい効果。



原始重力波の大きさは、テンソル-スカラー比で表現する。 $r \equiv (Tensor)/(Scalar)$

r の大きさにより、インフレーションのポテンシャルを決められる。



$$V^{1/4} = 3.3 \times 10^{16} \times r^{1/4} \text{ GeV}$$

Laser Interferometric Gravitational Wave Detector in Space

Ground Base Interferometer: LIGO, VIRGO, LCGT

Frequency Range: 10 – 1000Hz



Astronomical Source: NS-NS binary coalescence,
Super Nova, Pulsars, ...



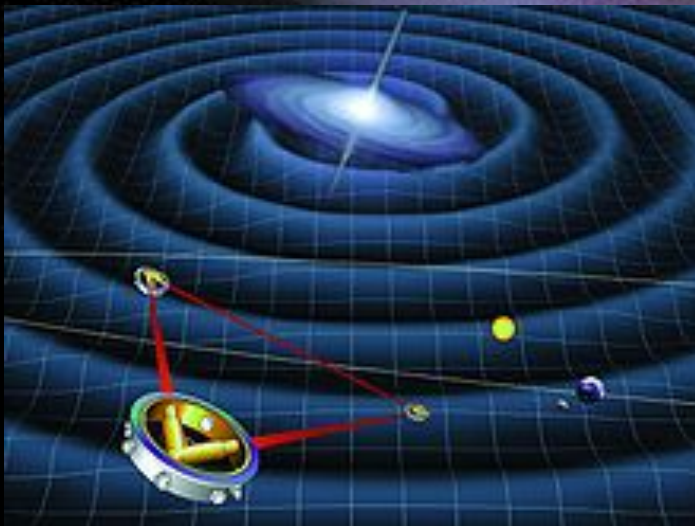
Space Base Interferometer: LISA, DECIGO

Frequency Range: sub mHz – 1Hz



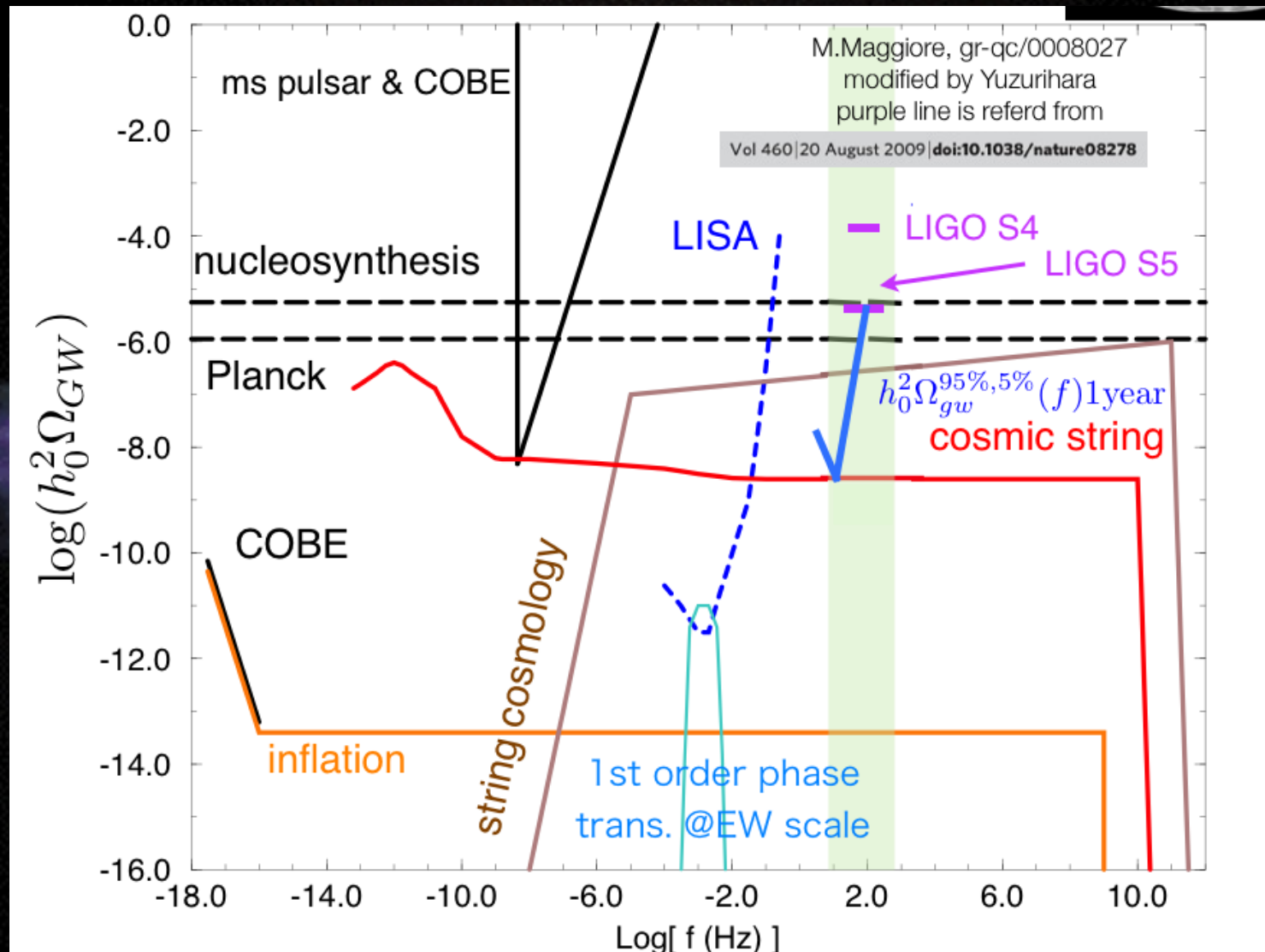
Astronomical Source: Merger of Black Hole,
Merger of compact stars,
Pulsars ...

Cosmological Source: Primordial Gravitational Wave
due to Inflation, Cosmic String...



These need very future technologies.

Sensitivities for Cosmological Gravitational Wave Detection



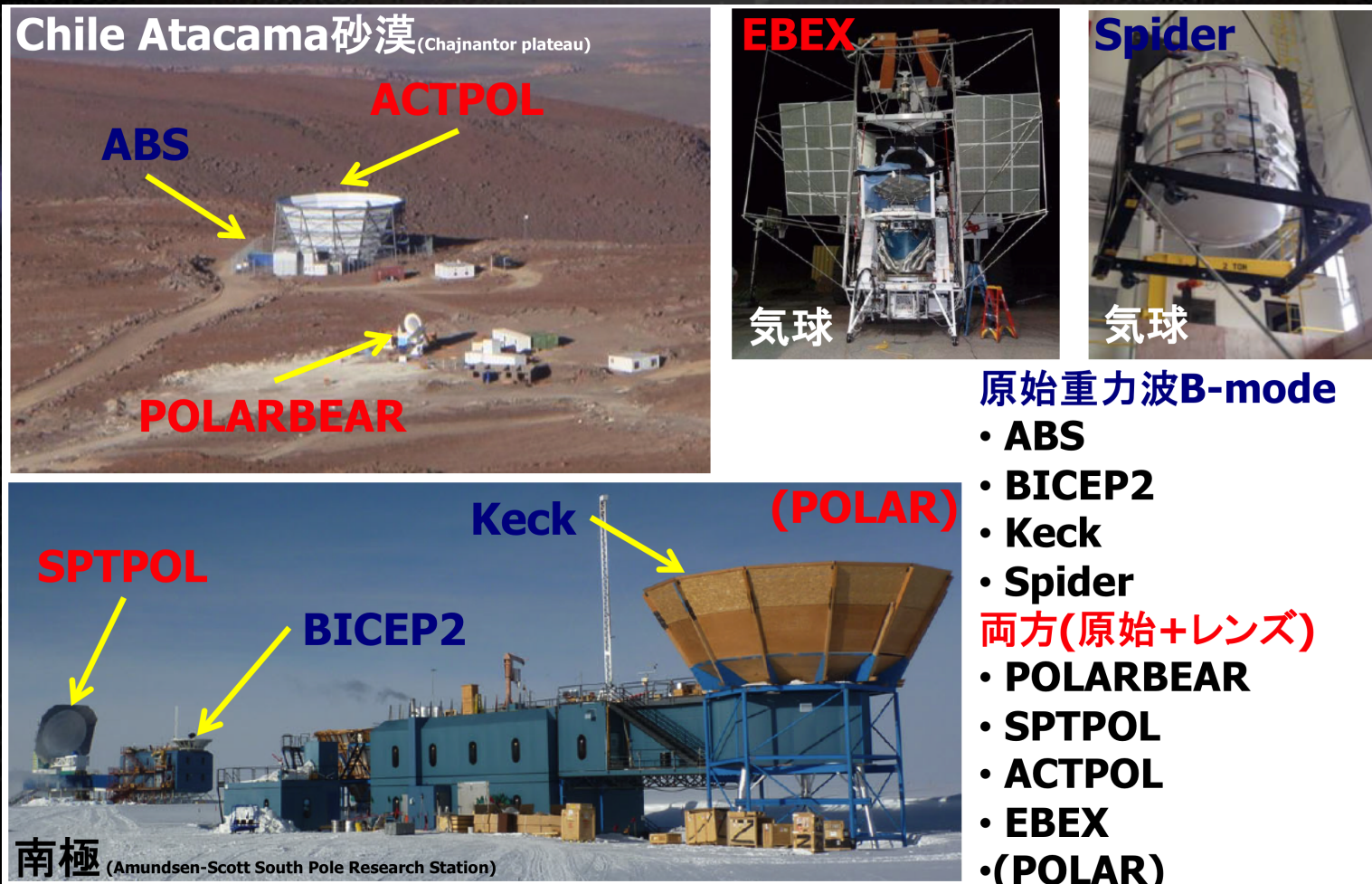
CMB observation, especially for polarization measurement, is very sensitive for primordial GW. And the observation technology is simple extend from present technology.

2. CMB 偏光望遠鏡 POLARBEAR

CMB B-modeの検出はビックサイエンス。

しかも、地上望遠鏡で届く可能性有り。

→ 世界中で熾烈な競争が繰り広げられている。



Chile Atacama 砂漠 (Chajnantor plateau)

ABS

ACTPOL

POLARBEAR

EBEX

Spider

気球

気球

原始重力波B-mode

- ABS
- BICEP2
- Keck
- Spider

両方(原始+レンズ)

- POLARBEAR
- SPTPOL
- ACTPOL
- EBEX
- (POLAR)

南極 (Amundsen-Scott South Pole Research Station)

SPTPOL

BICEP2

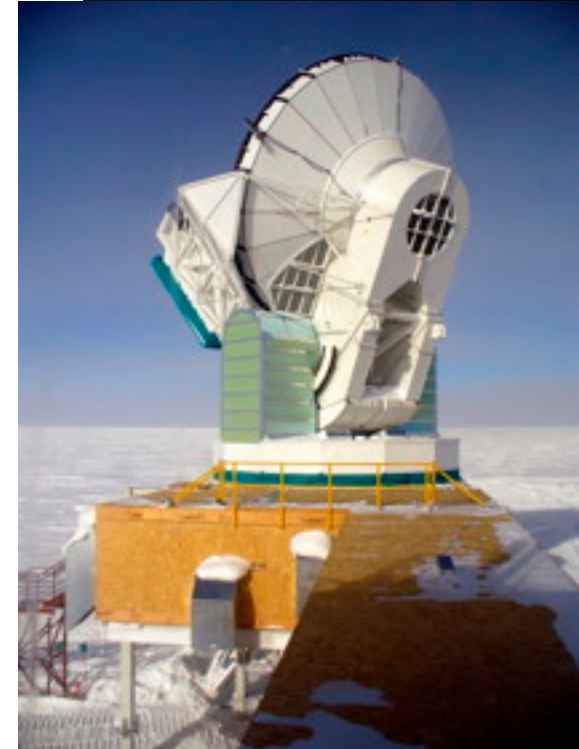
Keck

(POLAR)

Detection of B -mode Polarization in the Cosmic Microwave Background with Data from the South Pole Telescope

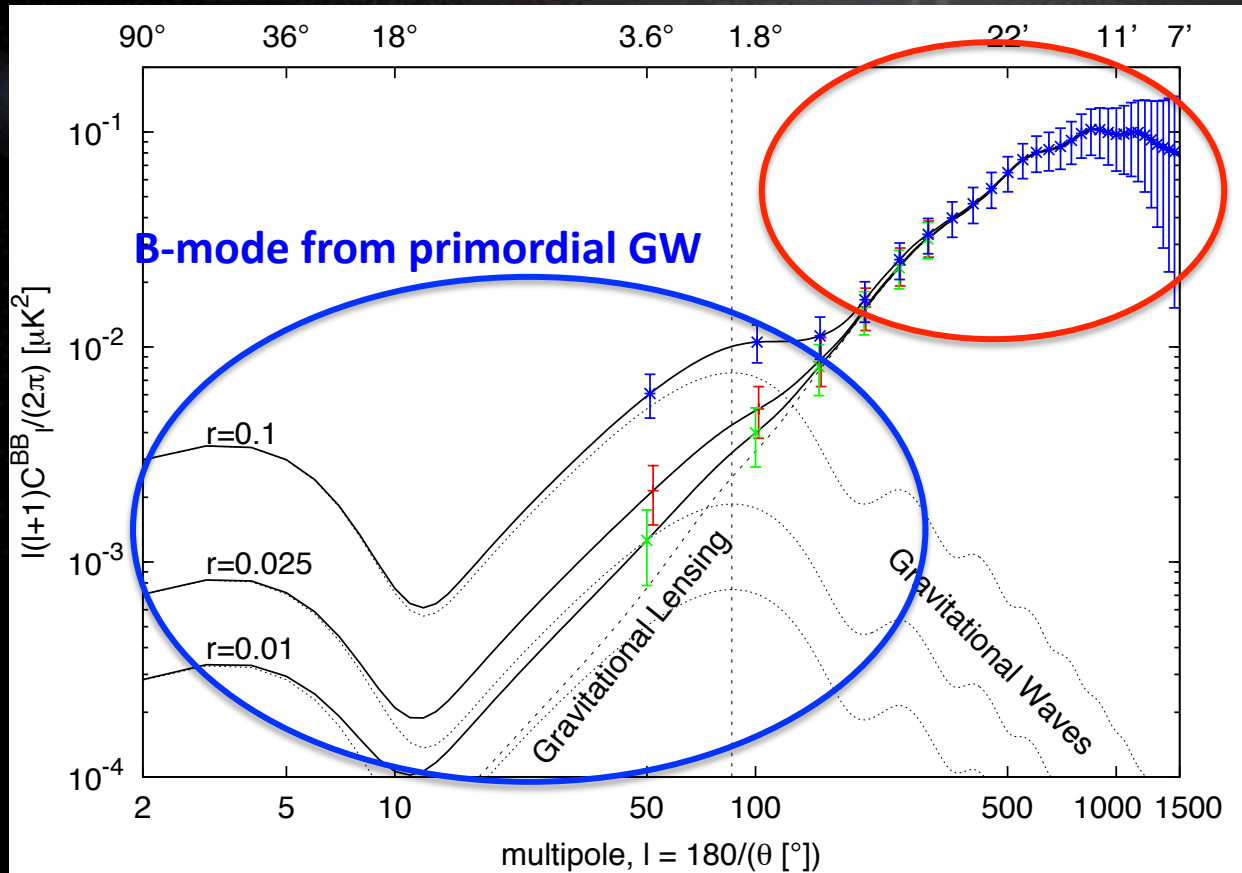
- D. Hanson,¹ S. Hoover,^{2,3} A. Crites,^{2,4} P. A. R. Ade,⁵ K. A. Aird,⁶ J. E. Austermann,⁷ J. A. Beall,⁸
 A. N. Bender,¹ B. A. Benson,^{2,3} L. E. Bleem,^{2,9} J. J. Bock,^{10,11} J. E. Carlstrom,^{2,3,4,9,12} C. L. Chang,^{12,2,3}
 H. C. Chiang,^{2,13} H.-M. Cho,^{8,7} A. Conley,⁷ T. M. Crawford,^{2,4} T. de Haan,¹ M. A. Dobbs,¹ W. Everett,⁷
 J. Gallicchio,² J. Gao,⁸ E. M. George,¹⁴ N. W. Halverson,^{7,15} N. Harrington,¹⁴ J. W. Henning,⁷
 G. C. Hilton,⁸ G. P. Holder,¹ W. L. Holzapfel,¹⁴ J. D. Hrubes,⁶ N. Huang,¹⁴ J. Hubmayr,⁸ K. D. Irwin,⁸
 R. Keisler,^{2,9} L. Knox,¹⁶ A. T. Lee,¹⁴ E. Leitch,^{2,4} D. Li,⁸ C. Liang,^{2,4} D. Luong-Van,² G. Marsden,¹⁷
 J. J. McMahon,¹⁸ J. Mehl,^{2,12} S. S. Meyer,^{2,9,3,4} L. Mocuano,^{2,4} T. E. Montroy,¹⁹ T. Natoli,^{2,9} J. P. Nibarger,⁸
 V. Novosad,²⁰ S. Padin,¹⁰ C. Pryke,²¹ C. L. Reichardt,¹⁴ J. E. Ruhl,¹⁹ B. R. Saliwanchik,¹⁹ J. T. Sayre,¹⁹
 K. K. Schaffer,^{2,22} B. Schulz,^{10,23} G. Smecher,¹ A. A. Stark,²⁴ K. Story,^{2,9} C. Tucker,⁵ K. Vanderlinde,^{1,25,26}
 J. D. Vieira,¹⁰ M. P. Viero,¹⁰ G. Wang,¹² V. Yefremenko,^{12,20} O. Zahn,²⁷ and M. Zemcov^{10,11}
- ¹Department of Physics, McGill University, Montreal, QC, Canada H3A 2T8
²Kaoli Institute for Cosmological Physics, University of Chicago, Chicago, IL, USA 60637
³Enrico Fermi Institute, University of Chicago, Chicago, IL, USA 60637
⁴Department of Astronomy and Astrophysics, University of Chicago, Chicago, IL, USA 60637
⁵School of Physics and Astronomy, Cardiff University, CF24 3YB, UK
⁶University of Chicago, Chicago, IL, USA 60637
⁷CASA, Department of Astrophysical and Planetary Sciences, University of Colorado, 389 UCB, Boulder, CO, USA 80309
⁸National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO, USA 80305
⁹Department of Physics, University of Chicago, Chicago, IL, USA 60637
¹⁰California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA 91125
¹¹Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, USA 91109
¹²High Energy Physics Division, Argonne National Laboratory, Argonne, IL, USA 60439
¹³School of Mathematics, Statistics & Computer Science, University of KwaZulu-Natal, Durban, South Africa
¹⁴Department of Physics, University of California, Berkeley, CA, USA 94720
¹⁵Department of Physics, University of Colorado, Boulder, CO, USA 80309
¹⁶Department of Physics, University of California, Davis, CA, USA 95616
¹⁷Department of Physics and Astronomy, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada V6T 1Z1
¹⁸Department of Physics, University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA 48109
¹⁹Physics Department, Case Western Reserve University, Cleveland, OH, USA 44106
²⁰Materials Science Division, Argonne National Laboratory, Argonne, IL, USA 60439
²¹Department of Physics, University of Minnesota, Minneapolis, MN, USA 55455
²²Liberal Arts Department, School of the Art Institute of Chicago, Chicago, IL, USA 60603
²³Infrared Processing and Analysis Center, California Institute of Technology, JPL, Pasadena, CA USA 91125
²⁴Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA, USA 02138
²⁵Dunlap Institute for Astronomy and Astrophysics, University of Toronto, 50 St George St, Toronto, ON, Canada, M5S 3H4
²⁶Department of Astronomy and Astrophysics, University of Toronto, 50 St George St, Toronto, ON, Canada, M5S 3H4
²⁷Berkeley Center for Cosmological Physics, Department of Physics, University of California, and Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA 94720
- (Dated: July 22, 2013)

Gravitational lensing of the cosmic microwave background generates a curl pattern in the observed polarization. This “ B -mode” signal provides a measure of the projected mass distribution over the entire observable Universe and also acts as a contaminant for the measurement of primordial gravity-wave signals. In this letter we present the first detection of gravitational lensing B modes, using first-season data from the polarization-sensitive receiver on the South Pole Telescope (SPTpol). We construct a template for the lensing B -mode signal by combining E -mode polarization measured by SPTpol with estimates of the lensing potential from a *Herschel*-SPIRE map of the cosmic infrared background. We compare this template to the B modes measured directly by SPTpol, finding a non-zero correlation at 7.7σ significance. The correlation has an amplitude and scale-dependence consistent with theoretical expectations, is robust with respect to analysis choices, and constitutes the first measurement of a powerful cosmological observable.



Unique Point of POLARBEAR

- Primary Mirror: $\phi 3.5$ m
 (High Precision area $\phi 2.5$ m)
- ➔ Angular Resolution: $4'$ @150GHz ($2.7'$ @220GHz)
 (Sun & Moon $\sim 30'$, Venus $\sim 10''$ - $58''$)



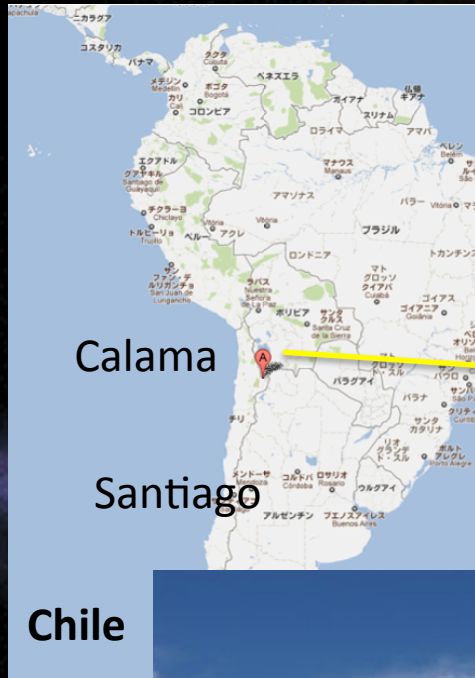
Huan Tran Telescope

B-mode from gravity lensing

Search for CMB B-mode from gravity lensing is suitable to ground-base telescope

PB is a project to aim first detection of CMB B-mode

POLARBEARのサイト -チリ・アタカマ高原-



乗り継ぎ含めて約40時間



標高: 5200m



気圧は半分。酸素ポンベは必需品



地上で最も乾燥した土地・・・のはず



ALMAのゴージャスなOSF(中腹施設)



POLARBEARの粗末なコンテナハウス



問題: 標高5000mの高地では、
トイレはどうするでしょう？

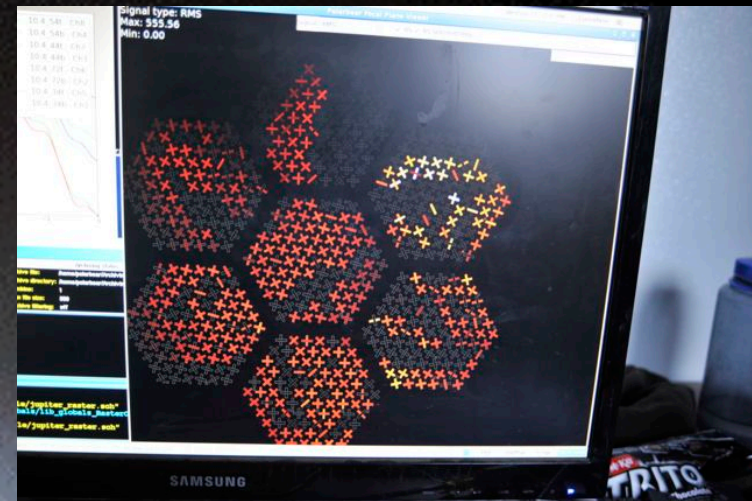
正解: 燃やしてしまう





First Light

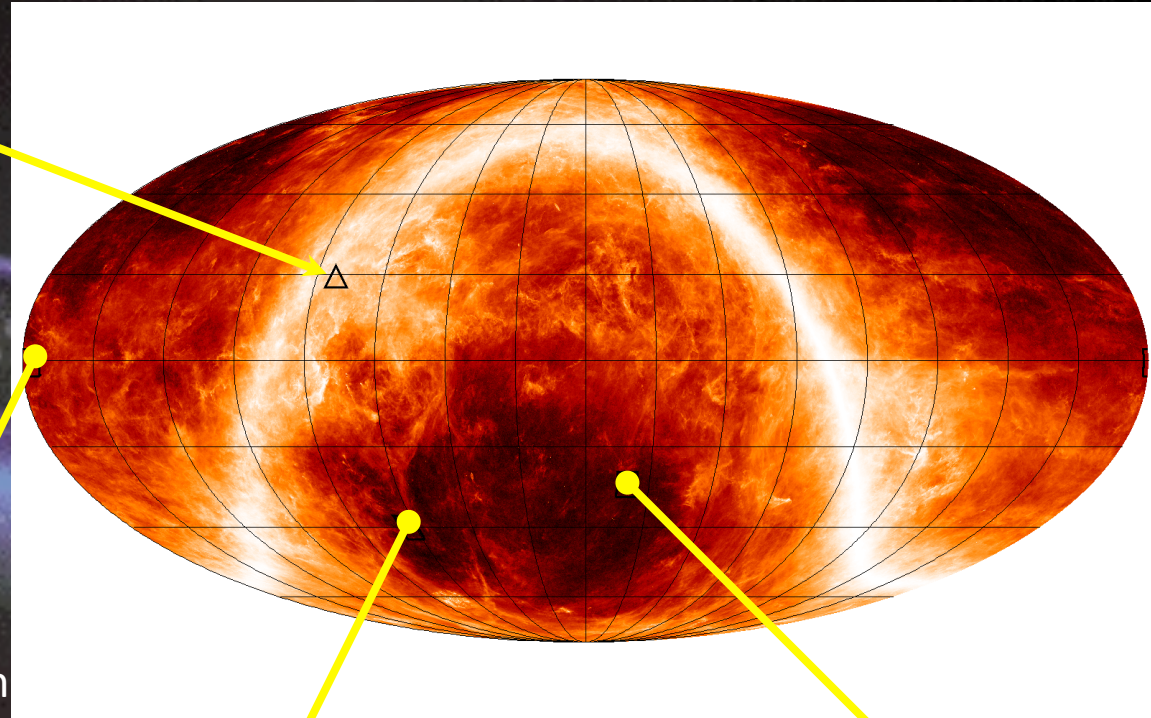
Jan. 10, 2012



Observation Patch

TauA

- Measured by several instruments
- Can be used as a polarization angle calibrator



PB1RA12HAB

- Overlap w/ Herschel

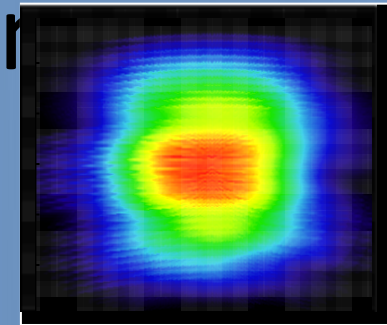
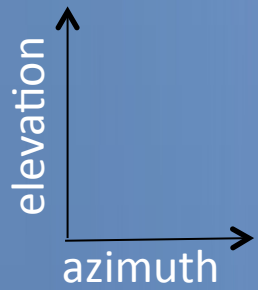
PB1LST4p5

- Overlap w/ QUIET
- Overlap w/ Herschel Atlas

PB1RA23HAB

- Overlap w/ QUIET

First Season Observation



exposure map
for one patch

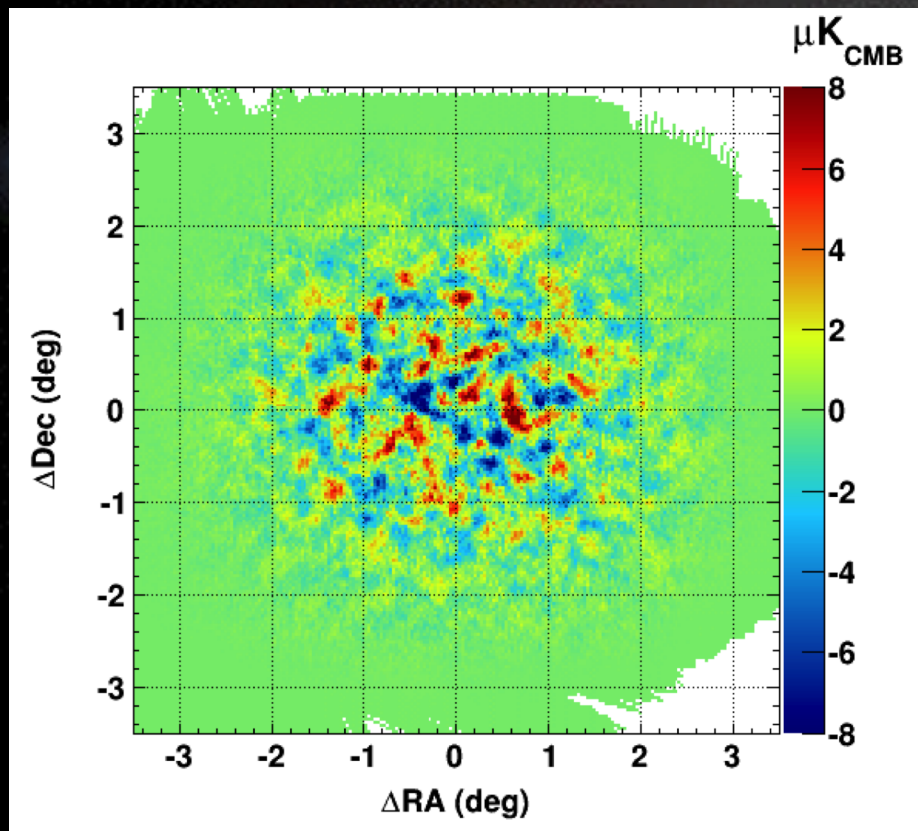
- Uniform exposure time
- Nice attack angle
- Deep map as you want



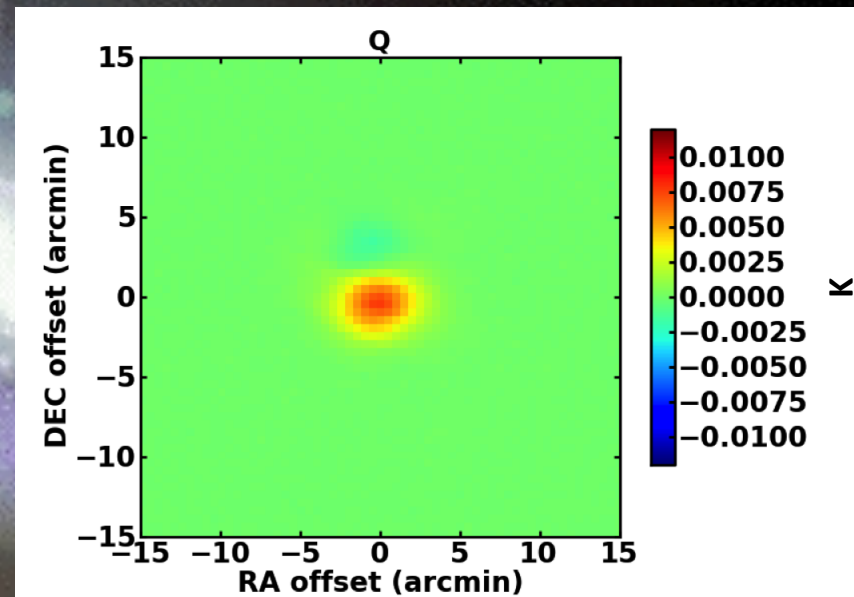
POLARBEAR-1

(First year of data)

E-mode polarization

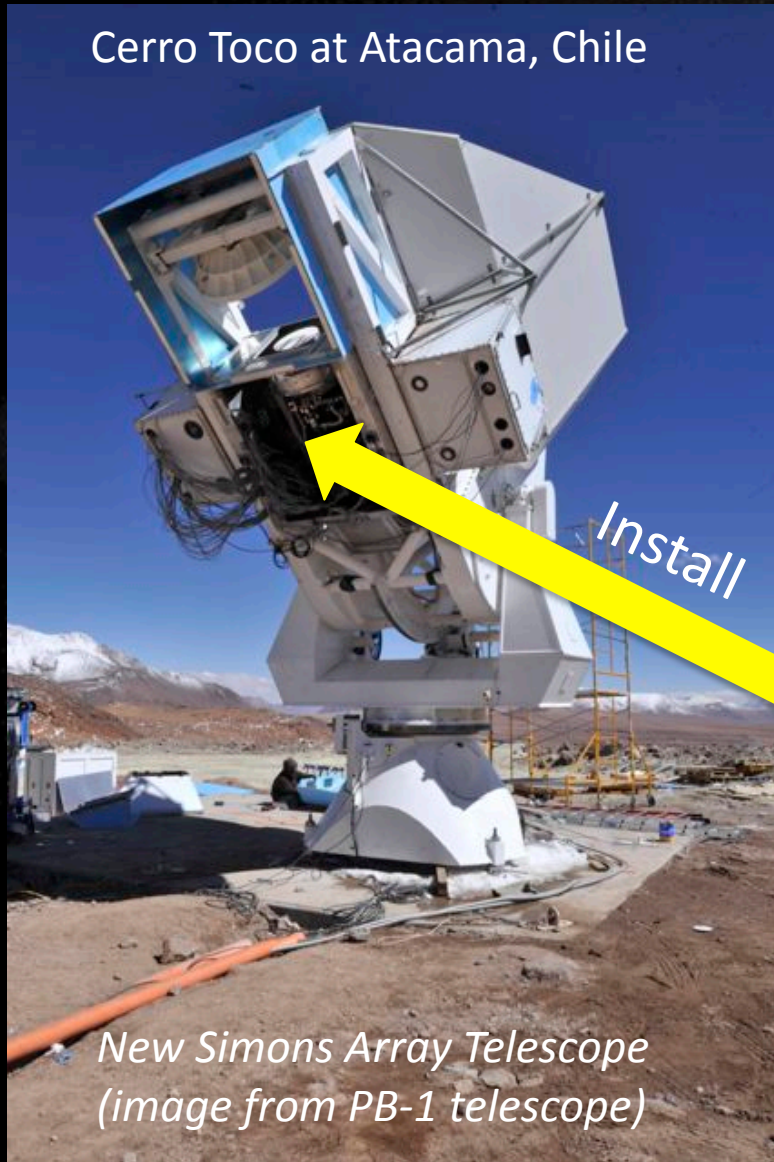


TauA Polarization Angle

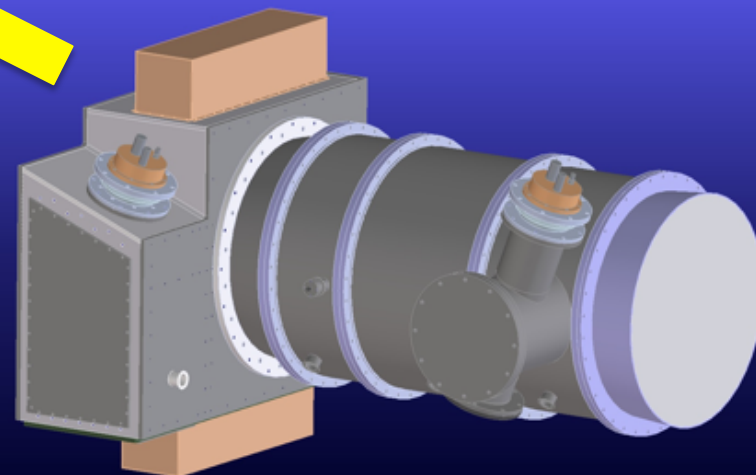
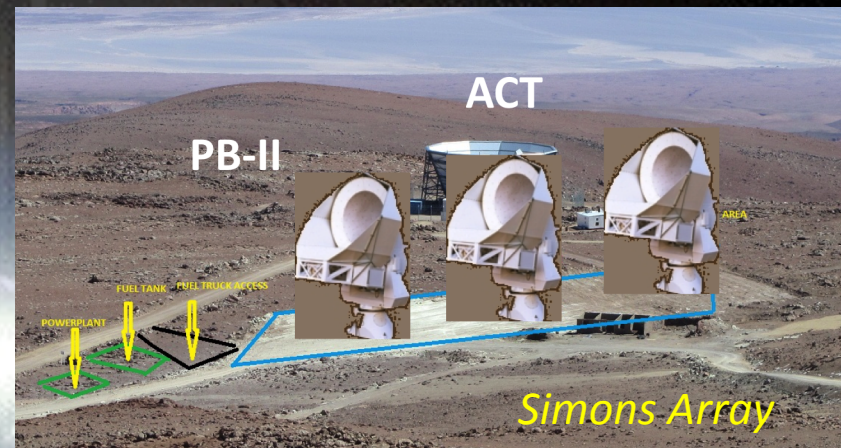


POLARBEAR-2

Cerro Toco at Atacama, Chile



POLARBEAR-2 (PB-2) is a project with a **new receiver system**, will be deployed in 2014



Collaborators

High Energy Accelerator Research Organization

(KEK)



Masashi Hazumi (PB-2, PI)

Takayuki Tomaru

Yoshiki Akiba

Yuji Chinone

Masaya Hasegawa

Kaori Hattori

Yasuto Hori

Yuki Inoue

Tomotake Matsumura

Hideki Morii

Takahiro Okamura

Jun-ichi Suzuki

Hiroshi Yamaguchi

NIFS



Suguru Takada

IPMU, Univ. Tokyo

Nobuhiko Katayama

Haruki Nishino



Osaka Univ.



Satoru Takakura

University of California, Berkeley



Adrian T. Lee (PB, PI)

Ari Cukierman

William L. Holzapfel

Michael J. Myers

Christian L. Reichardt

Paul L. Richards

Michael Sholl

Aritoki Suzuki

Oliver Zahn

University of Colorado, Boulder



Nils Halverson

Greg Jaehnig

Laboratoire

Astroparticule & Cosmologie

(APC)



Radek Stompor

Giulio Fabbian

Cardiff University



Peter Ade

William Grainger

University of California, San Diego



Brian Keating (SA, PI)

Kam S. Arnold

Darcy Barron

Guangyuan Feng

Frederick Matsuda

Stephanie Moyerman

Praween Siritanasak

Nathan Stebor



Dalhousie University

Scott Chapman

Colin Ross

Peter Smith

McGill University



Matt Dobbs

Adam Gilbert

Graeme Smecher

Princeton Univ.



Zigmund Kermish

LBNL



Julian Borrill

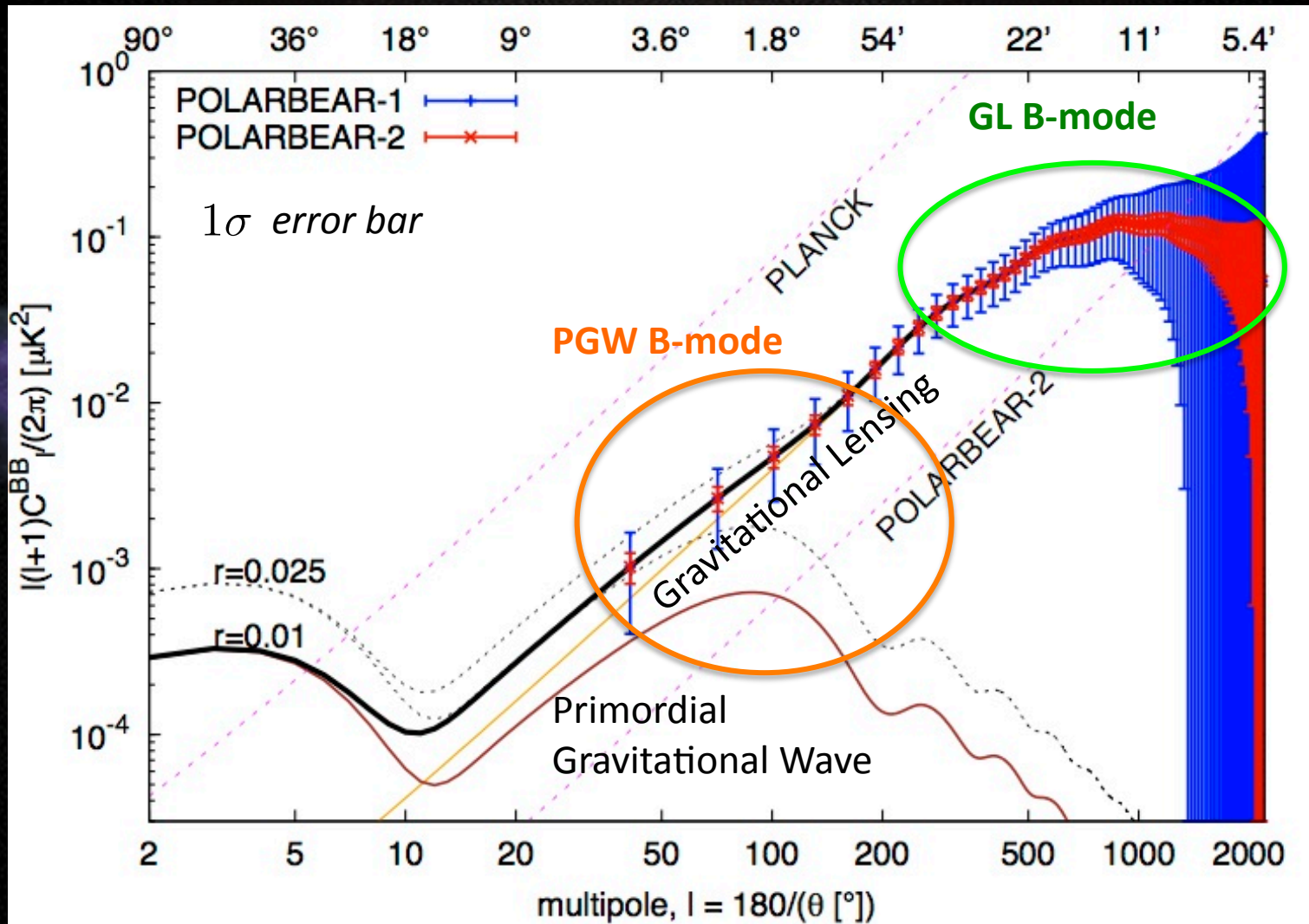
Ted Kisner

Josquin Errard

PB-2 Science

Good sensitivity between $l = 50 - 2000$

Improvement from PB-1 to PB-2



We can reach $r = 0.01$ @95% C. L.

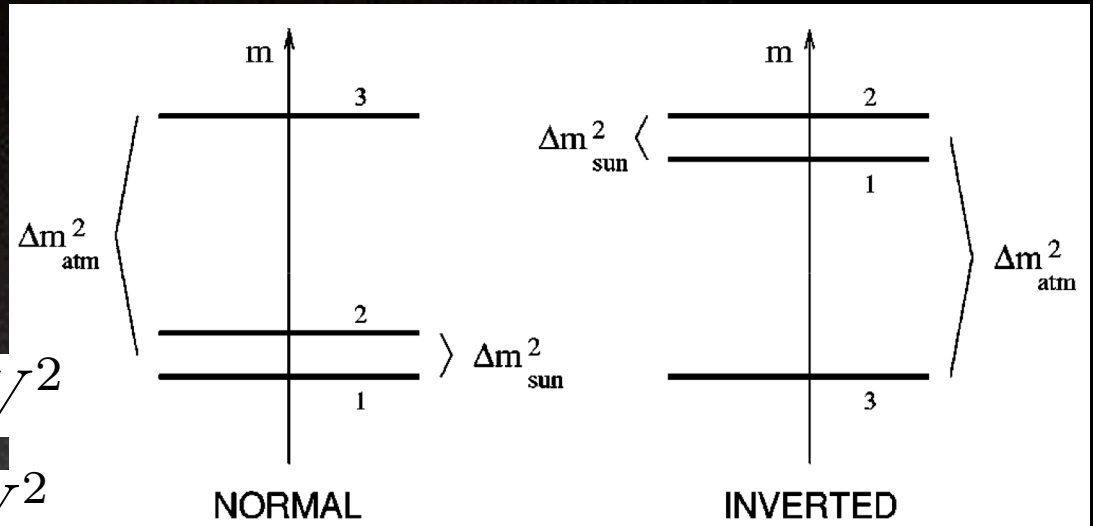
Yuji Chinone, KEK

PB-2 Science

GL → Constraint on Sum of Neutrino Masses

$$\Delta m_{21}^2 = 7.5 \times 10^{-5} eV^2$$

$$|\Delta m_{32}^2| = 2.3 \times 10^{-3} eV^2$$



→ It is important to reach sensitivity of

$$\sigma(\Sigma m_\nu) < 100 meV \text{ for Inverted}$$

$$\sigma(\Sigma m_\nu) < 50 meV \text{ for Normal}$$

PB-2 sensitivity

(Fisher forecast)

by Josquin Errard, Giulio Fabbian

$$\sigma(\Sigma m_\nu) = 90 meV$$

with PB-2 alone

$$\sigma(\Sigma m_\nu) = 65 meV$$

with PB-2 + Planck

68% C. L.

$$\sigma(\Sigma m_\mu) = 150 meV$$

with Planck alone

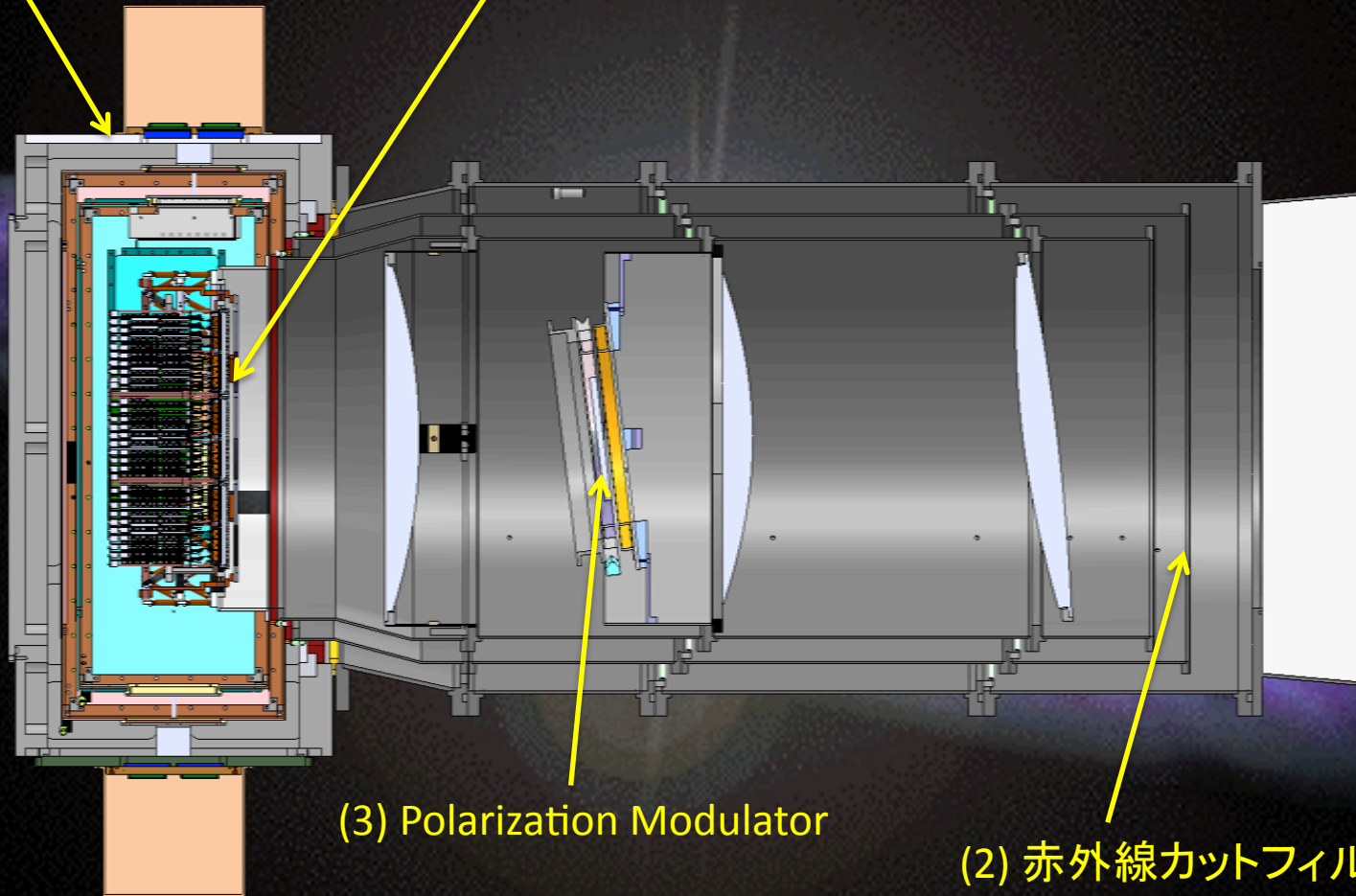
Assuming $f_{sky} = 20\%$ and neutrino energy density of

TT, TE, EE and BB are used.

3. CMB望遠鏡の先進テクノロジー

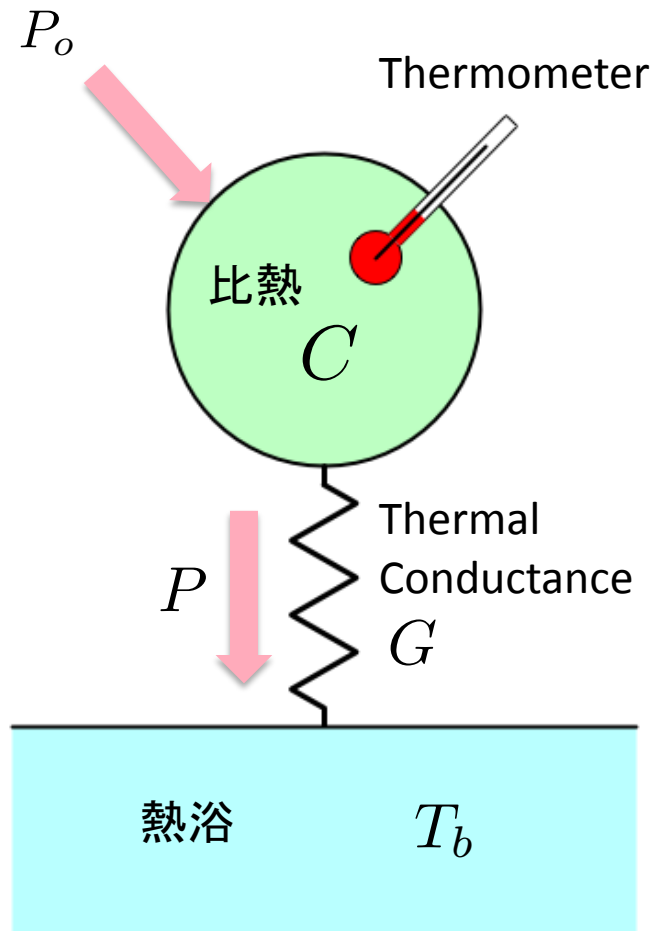
(4) 超低温冷凍

(1) 超伝導TESボロメータ



(1) 超伝導Transition Edge Sensor ボロメータ

ボロメータ式計測の基本レイアウト



超伝導体は T_c 付近で
急激に電気抵抗が0になる

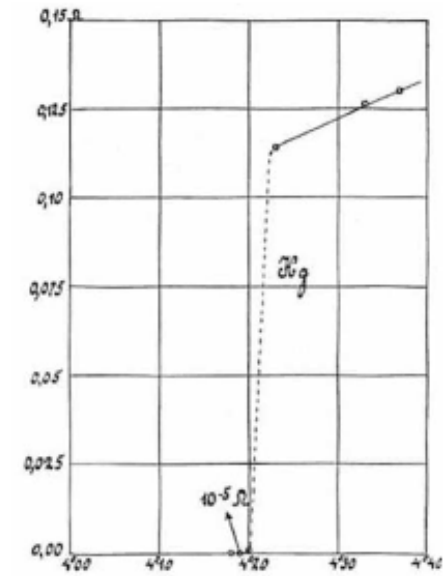


極めて高感度の温度計として
利用出来る。

1940年代にはすでに提案された。

しかし、実用化せず。

Onnessの超伝導の発見
のグラフ



トリビア

ボロメータ？

or

カロリメータ？



電磁波検出素子

エネルギー検出素子

ミリ波、赤外線、可視光

X線、 γ 線、中性子線

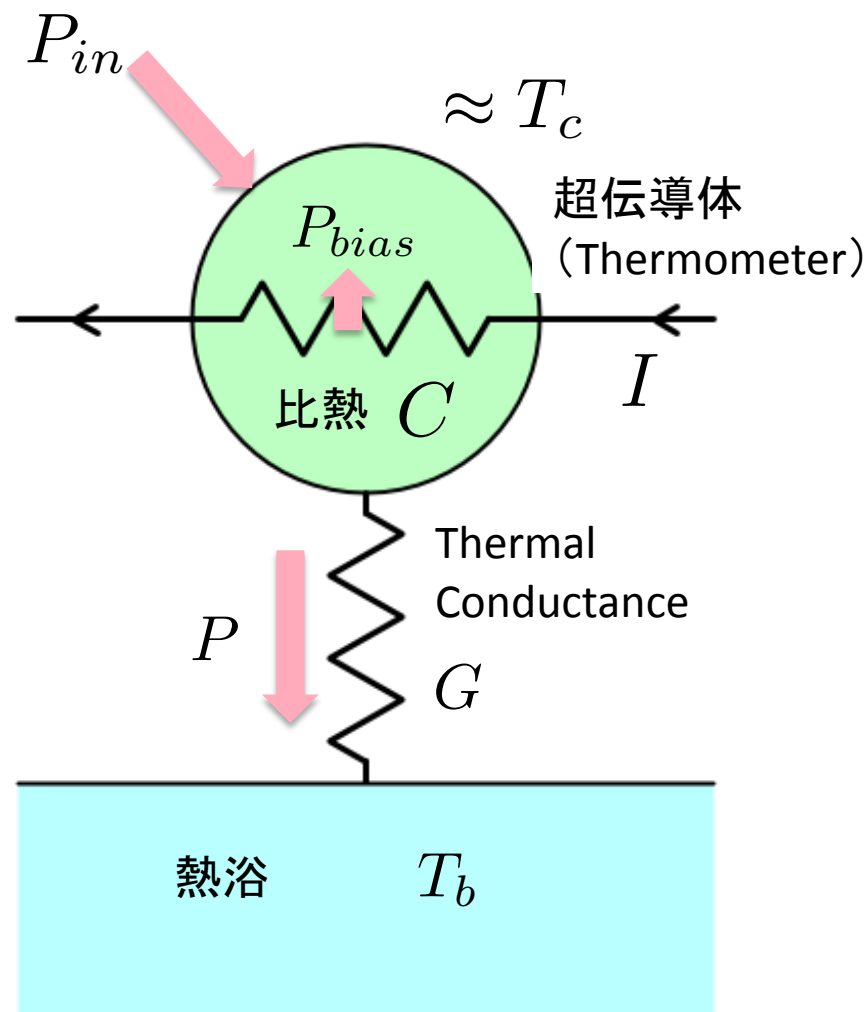
ダークマター検出器などはボロメータと呼んでいる。まあ、広義には同じ。

また、TES -> Transition edgeを使っているモノ全て

なので、TES Bolometer というのはおかしくないそう

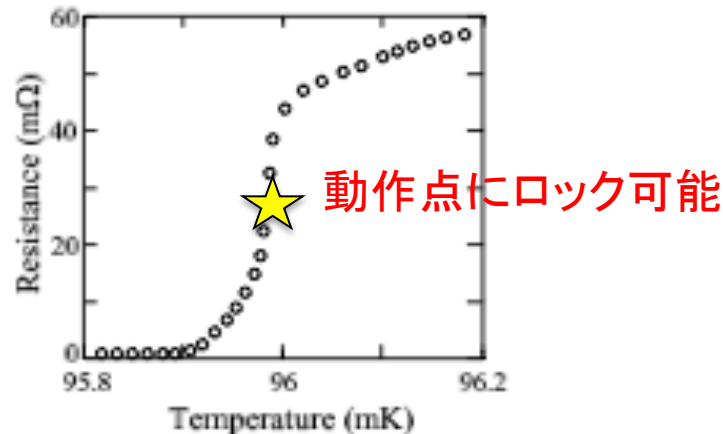
1990年代によく実用化

電熱フィードバック法



電気-熱複合系を考え、バイアスのジュール熱でTransition Edge上の適当な点を動作点とする

- 入射するパワーが増加した時
→ 温度が上昇
→ 導体の電気抵抗が増加
→ バイアス電流が低下
→ ジュール熱が減少
- 入射するパワーが減少した時
→ 温度が低下
→ 導体の電気抵抗が減少
→ バイアス電流が増加
→ ジュール熱が増加



① 電熱フィードバックの原理

- 入力パワー変化による温度の変化

パワーの釣り合い $P_{in} = P - P_{bias}$



$$\frac{\partial P_{in}}{\partial T} = \frac{\partial P}{\partial T} - \frac{\partial P_{bias}}{\partial T}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial P}{\partial T} \equiv G \\ \frac{\partial P_{bias}}{\partial T} = -\frac{\alpha V_{bias}^2}{TR} \end{array} \right.$$

$$P_{bias} = \frac{V_{bias}^2}{R}$$

$$\frac{\partial P_{bias}}{\partial T} = -\frac{V_{bias}^2}{R^2} \frac{\partial R}{\partial T}$$

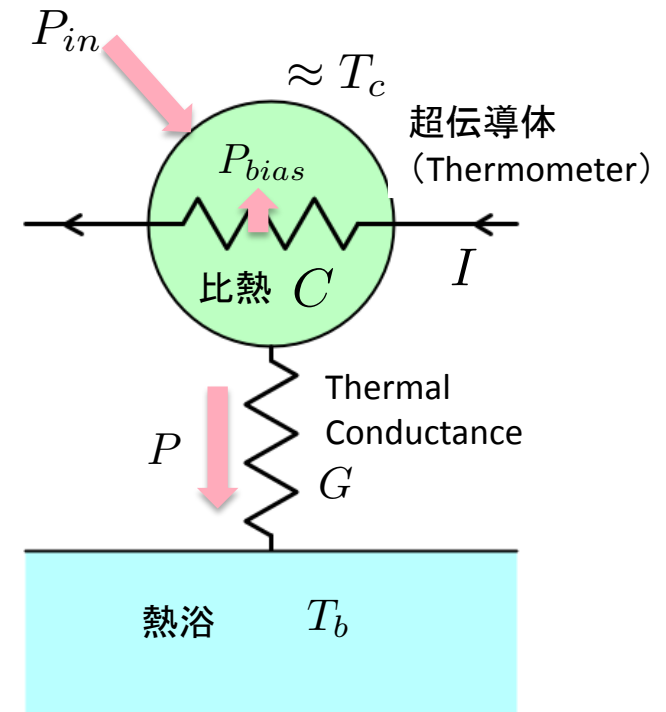
$$\alpha \equiv \frac{T}{R} \frac{\partial R}{\partial T}$$

$$\alpha = 10 - 1000$$



$$\frac{\partial P_{in}}{\partial T} = G + \frac{\alpha V_{bias}^2}{TR} \equiv G(1 + \mathcal{L})$$

$$\mathcal{L} \equiv \frac{\alpha V_{bias}^2}{TRG}$$



• バイアス電流変化による温度の変化

$$I_{bias} = \frac{V_{bias}}{R}$$

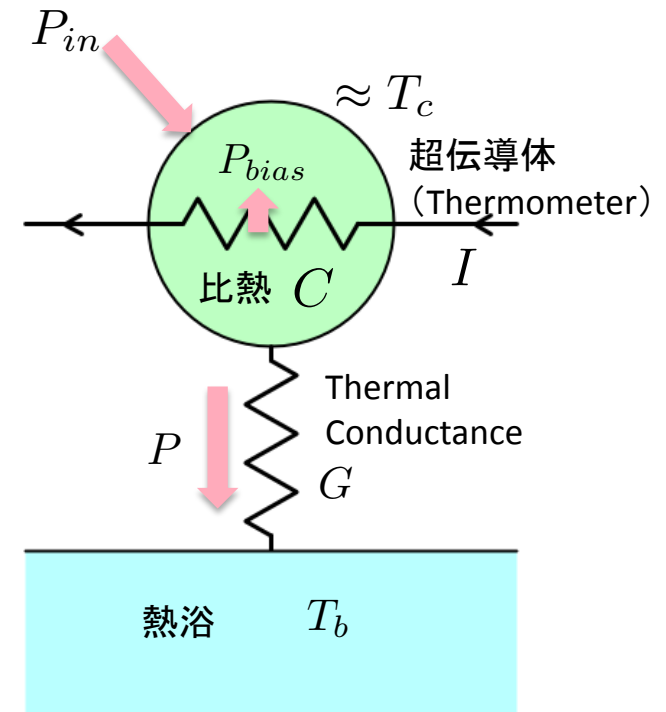
$$\rightarrow \frac{\partial I_{bias}}{\partial T} = -\frac{\alpha V_{bias}}{TR} = -\frac{\mathcal{L}G}{V_{bias}}$$

以上より、入力パワー P_{in} の変化によるバイアス電流の変化を表す式は、

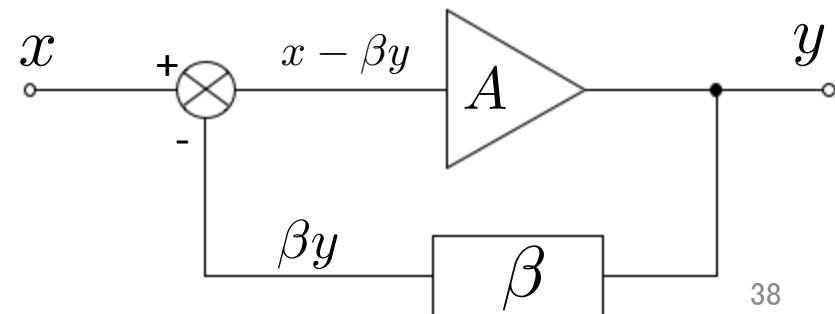
$$\frac{\partial I}{\partial P_{in}} = \frac{\partial I}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial P_{in}} = -\frac{1}{V_{bias}} \frac{\mathcal{L}}{1 + \mathcal{L}}$$

これはopen loop gain $A = \mathcal{L}/V_b$ 、
 帰還率 $\beta = V_b$ の negative feedbackと同じ。
 \mathcal{L} はLoop gainと呼ばれる。

Closed loop gain $\frac{A}{1 + \beta A}$



: current responsivity S_I

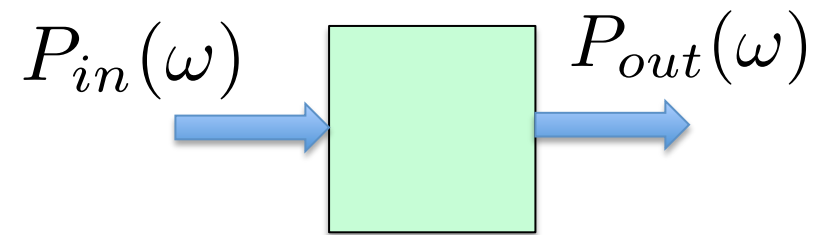


② TES Bolometer のノイズ

Power Spectrum Density (PSD)の定義

$$F(t)^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\tilde{\omega})^2 e^{i\omega t} d\omega$$

$$PSD \equiv F(\tilde{\omega})^2$$



Noise Equivalent Powerの定義

Responsivity
(Transfer function)

$$s(\omega) \equiv \frac{P_{out}(\omega)}{P_{in}(\omega)}$$

ノイズのPSD: PSD_{noise} W^2/Hz


$$NEP \equiv \sqrt{\frac{PSD_{noise}}{s(\omega)}} \quad W/\sqrt{Hz}$$

• Thermal Carrier Noise

フォノン1つのエネルギー $\varepsilon = k_B T$

温度 T の物体のエネルギー $E = CT$

フォノン数は



$$N_{ph} = \frac{E}{\varepsilon} = \frac{C}{k_B}$$

Phononは十分な数があるから、

フォノン数の揺らぎ

$$\langle \Delta N_{ph} \rangle = \frac{1}{\sqrt{N_{ph}}} = \sqrt{\frac{k_B}{C}}$$

エネルギーの揺らぎ


$$\langle \Delta E^2 \rangle = \left(N_{ph} k_B T \frac{1}{\sqrt{N_{ph}}} \right)^2 = k_B C T^2$$

温度の揺らぎ

$$\langle \Delta T^2 \rangle = \frac{k_B T^2}{C}$$

温度揺らぎ ΔT と等価な熱負荷 ΔP を考える

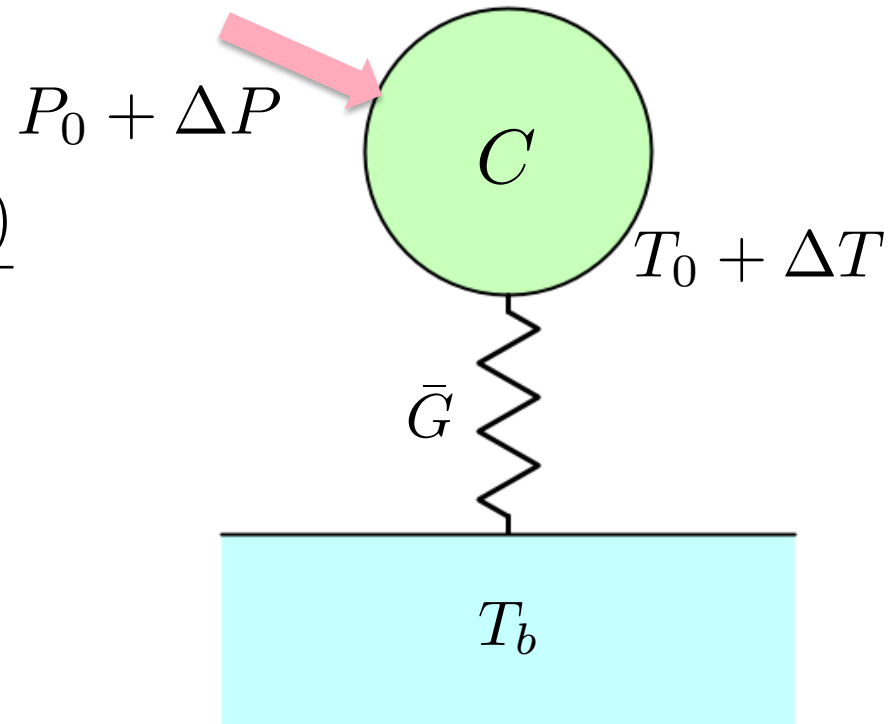
$$\Delta P(t) - \bar{G}\Delta T(t) = C \frac{d\Delta T(t)}{dt}$$



$$\tilde{\Delta P} = (\bar{G} + i\omega C)\tilde{\Delta T}$$

$$\omega_0 \equiv \frac{G}{C} \quad \text{として書き下すと}$$

$$\tilde{\Delta T}^2 = \frac{\tilde{\Delta P}^2}{G^2[1 + (\omega/\omega_0)^2]}$$



$T_0 \approx T_b$ を仮定

パーセバルの定理より

$$\langle \Delta T^2 \rangle = \frac{k_B T^2}{C} = \frac{1}{2\pi} \int T(\tilde{\omega})^2 d\omega = \frac{1}{2\pi} \int \frac{NEP^2}{G^2[1 + (\omega/\omega_0)^2]} d\omega$$



$$NEP^2 = 4k_B T^2 \bar{G} \quad \text{W}^2/\text{Hz}$$

$T_0 \approx T_b$ の元、 $\bar{G} = \frac{P}{T_c - T_b}$ として書き下すと

$$NEP = \sqrt{4k_B P \frac{T_c^2}{T_c - T_b}}$$

これが**最小**になる時のセッティングは $T_c = 2T_b$

$T_0 \approx T_b$ と矛盾している。

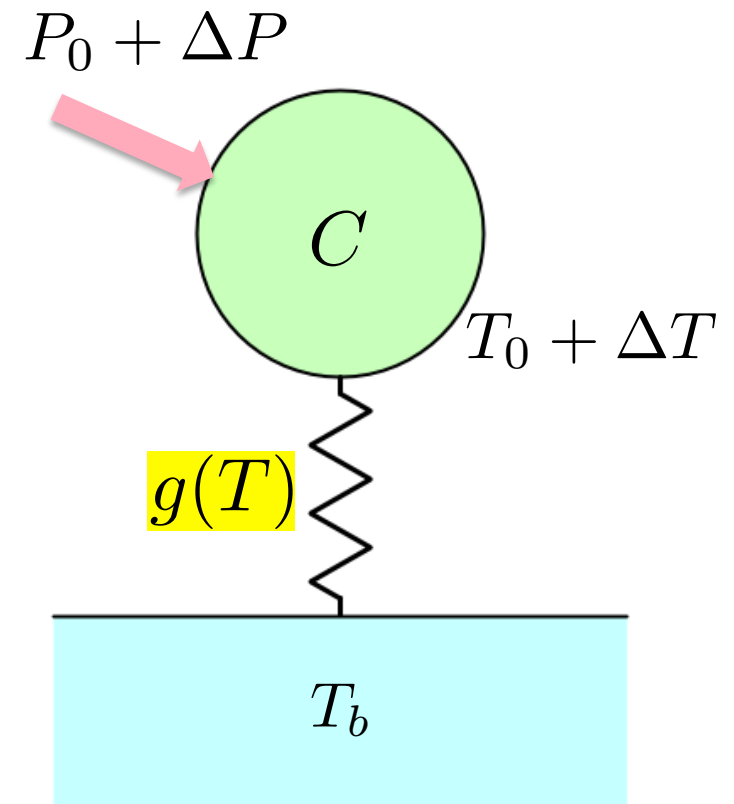
より正確には $g(T)$ を考えなければならない。

そこで、

$$NEP = \sqrt{\gamma 4k_B T_c^2 g(T)}$$

$$\gamma = \frac{\int_{T_b}^{T_c} \left(\frac{T g(T)}{T_c g(T_c)} \right)^2 dT}{\int_{T_b}^{T_c} \left(\frac{g(T)}{g(T_c)} \right)^2 dT}$$

$$g(T) = g_0 T^n$$



として、ゴチャゴチャ計算すると、

$$NEP = \sqrt{4k_B P T_b} \sqrt{\frac{(n+1)^2}{2n+3} \frac{(T_c/T_b)^{2n+3} - 1}{((T_c/T_b)^{n+1} - 1)^2}}$$

n	T_c/T_b	$NEP/\sqrt{4k_B P T_b}$
0 (virtual)	2.732	1.468
1 (electron)	2.143	1.655
3 (phonon)	1.705	1.967

- ノイズが一番小さいのはvirtual carrierの時
- 偶然だが、electron carrierの時は、先の $T_0 \approx T_b$ 近似の時と大体一致している。



以上のような理由で、(典型的には)バスの温度 T_b はソーブション冷凍機で到達出来る**0.27K程度**、ボロメータの T_c は**0.5K程度**に設計される。

- Johnson ノイズ (抵抗の熱雑音)

$$\langle \Delta V^2 \rangle = 4k_B T R d\nu$$

$$NEI = \frac{1}{R_{loop}} \sqrt{4k_B T_c R}$$

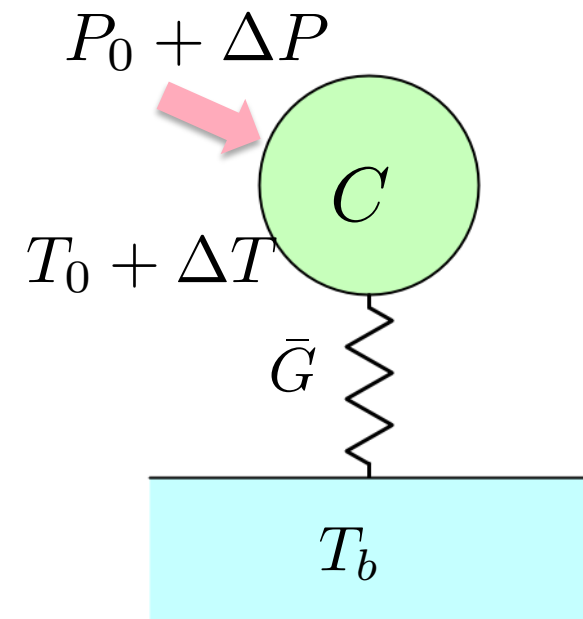
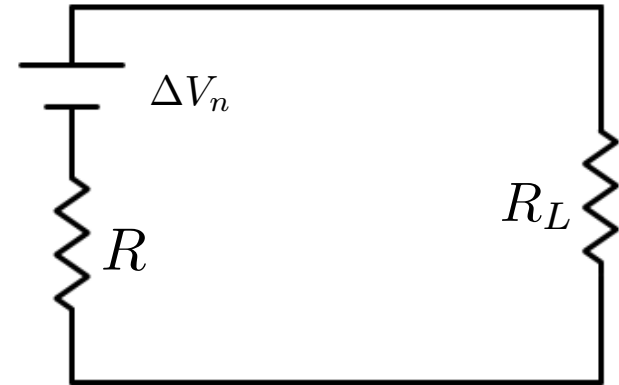
$$\frac{\partial I}{\partial P_{in}} = -\frac{1}{V_{bias}} \frac{\mathcal{L}}{1 + \mathcal{L}} \quad \text{より、}$$

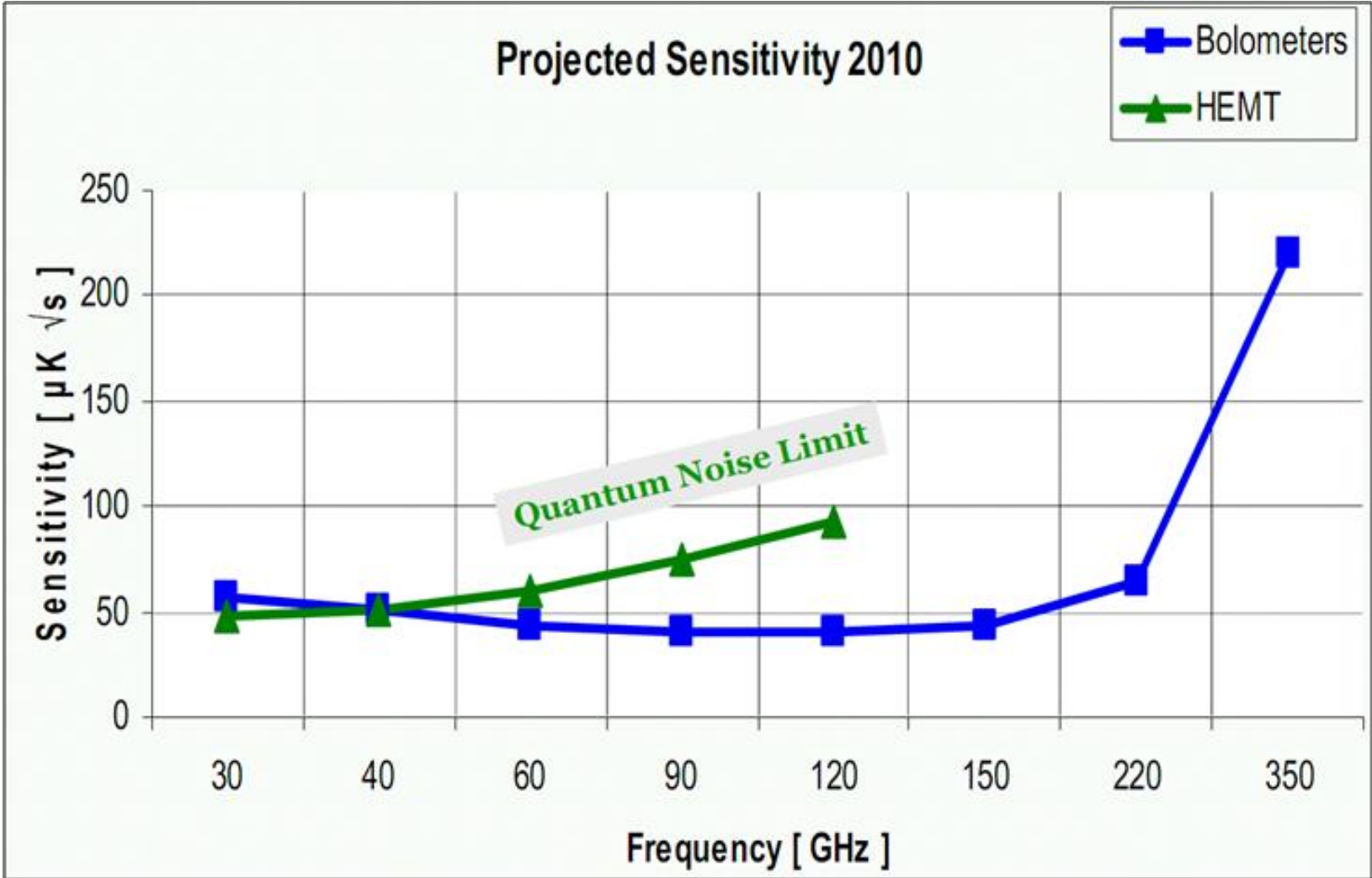
$$NEP = \frac{\mathcal{L} + 1}{\mathcal{L}} \sqrt{k_b T_c P}$$

- Photon ノイズ

inputのフラックスが統計的に揺らいている場合。
特にphotonの場合は

$$NEP = \sqrt{2 \left(h\nu_0 P_\gamma + \frac{P_\gamma^2}{\Delta\nu} \right)}$$





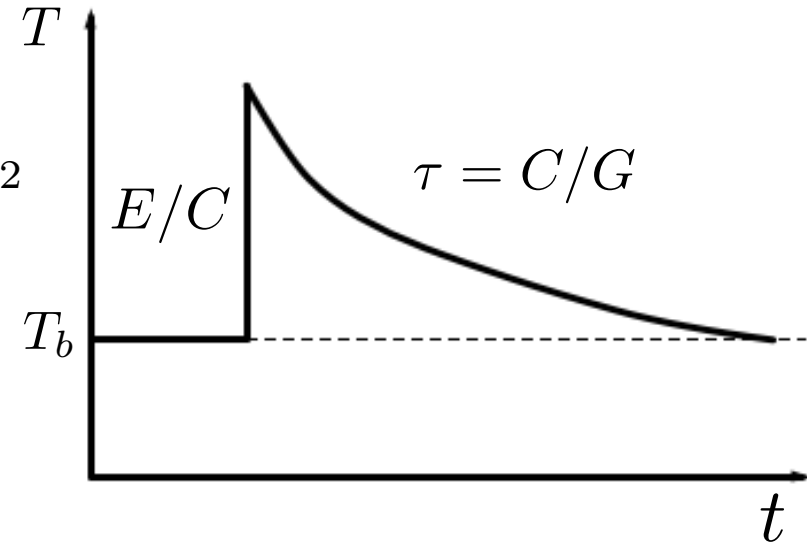
③ カロリメータとしてのエネルギー分解能

先ほどのThermal Carrier Noiseは

$$\langle \Delta E^2 \rangle = \left(N_{ph} k_B T \frac{1}{\sqrt{N_{ph}}} \right)^2 = k_B C T^2$$



$$\Delta E \approx 2.35 \sqrt{k_B T^2 C}$$



典型的なX線absorber(数100um角くらい)だと、 $C \approx 1 \text{ pJ/K}$ @100mK



$$\text{FWHM} = 5.4 \text{ eV}$$

これは1keVのX線による0.1mKの温度変化を0.5uKの精度で計測することに相当

従来の半導体検出器より30倍良い分解能。

雑談:「猫用トイレ問題」

米国とメキシコ・カナダ国境では、テロリストによる高濃縮ウランの密輸阻止のため、厳しいチェックが行われている。

ウラン235から放射される185.7keVのガンマ線を半導体センサーで探査。

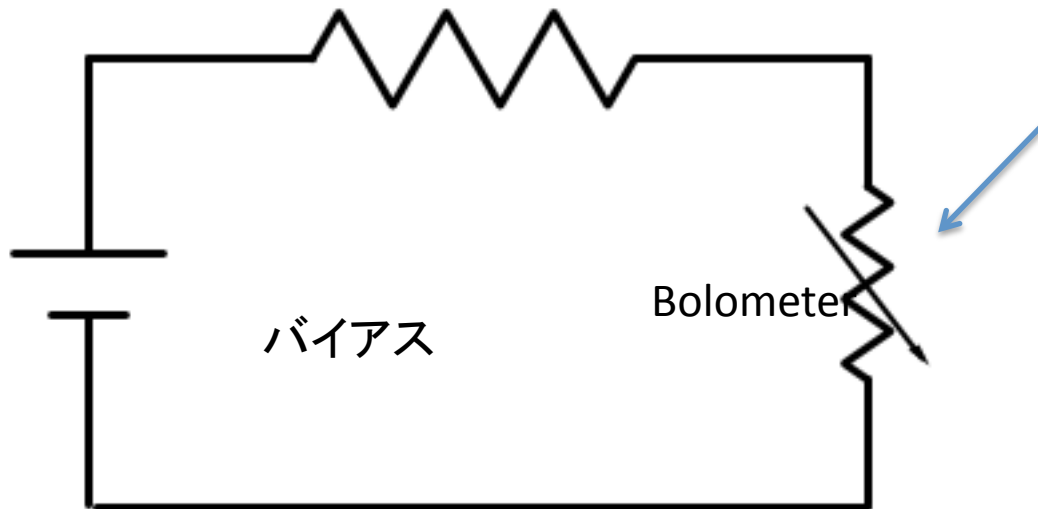


しかし、猫用トイレの材料の粘土に含まれるラジウム226が放射する186.1keVのガンマ線との識別ができず、国境警備に頭を悩ませている。

超伝導センサーの普及により、国境警備隊は猫が好きになれるかもしれない。 47

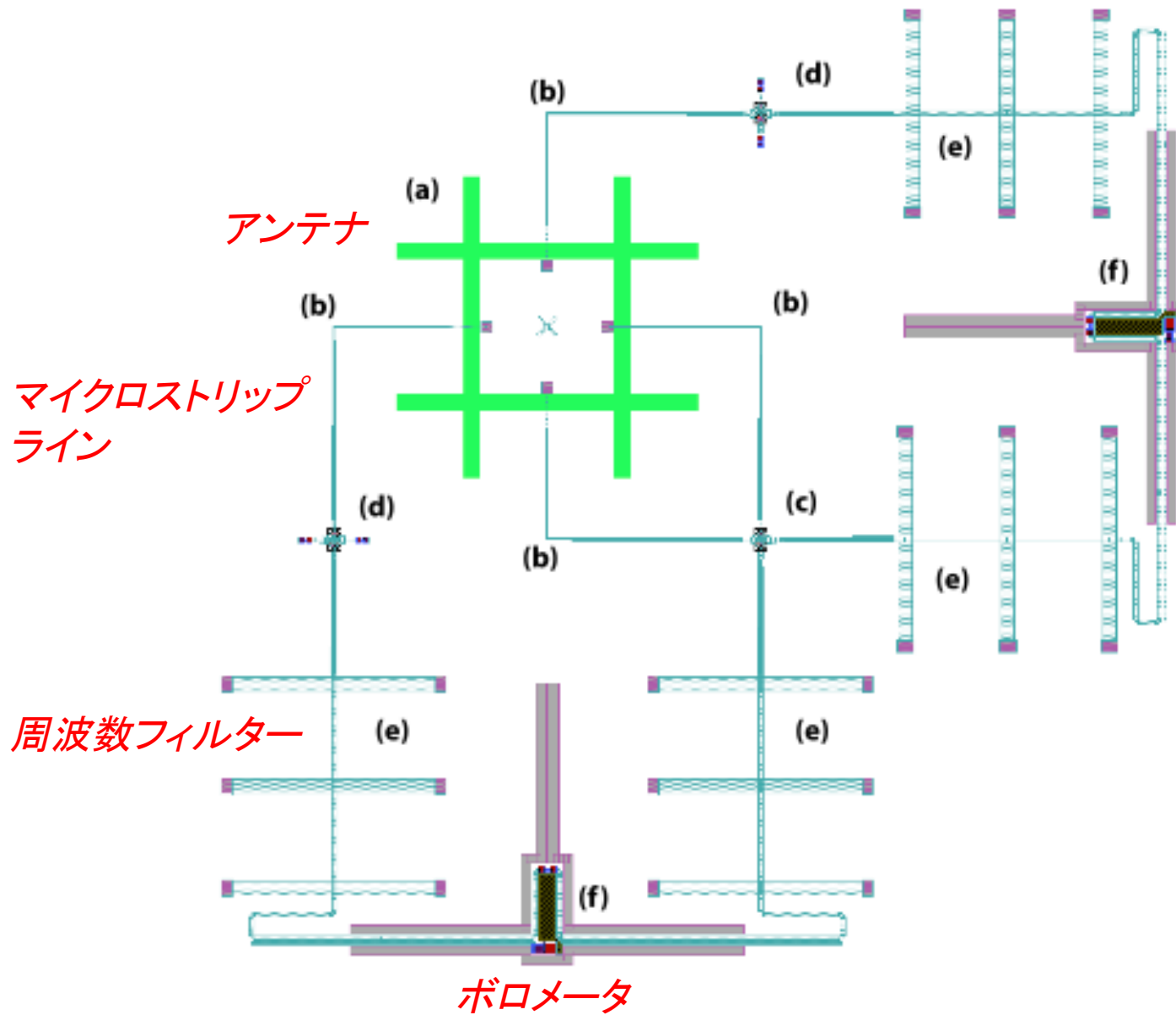
③ 実際のTES Bolometer型ディテクタ

Bolometerは、パワー → 温度 の変換素子を指すので、物理実験で利用出来る「**ディテクタ**」とするには、さらに色々な工夫が要る。



- どんな材料がよいか？
- どうやってパワー/エネルギーを受け取るか？
- どうやって読み出すか？

POLARBEAR-1の構成例

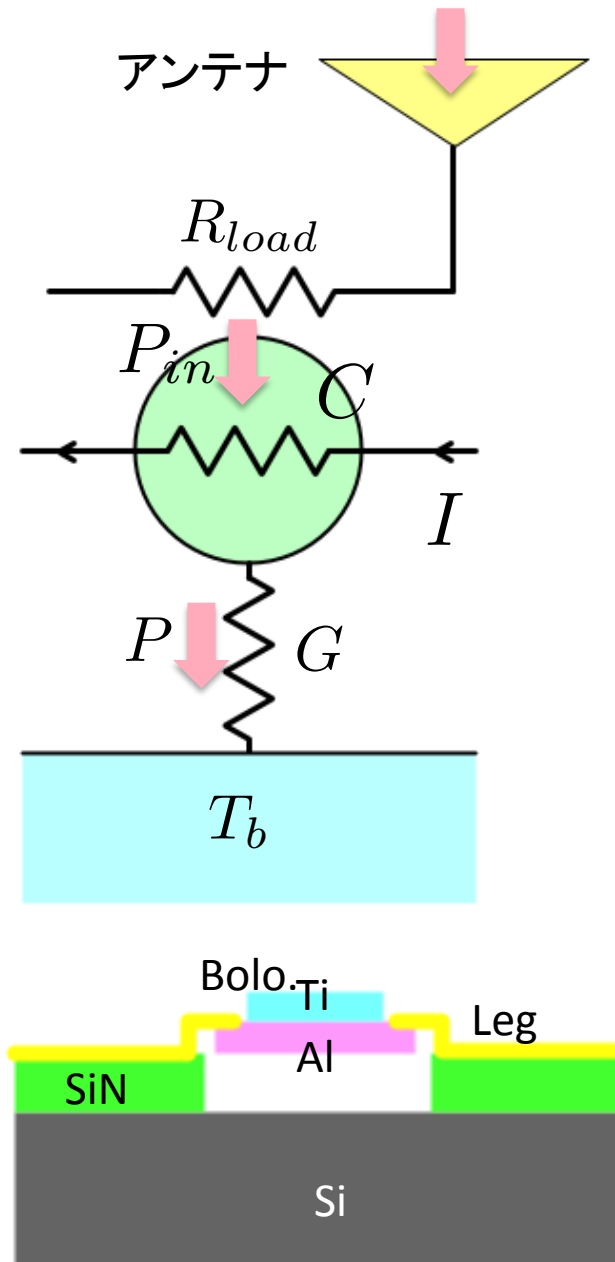


● さまざまなボロメータ材料

2K以下では基本的に Al, Ti, Mo, W, Ir 系材料がベース。
Tcの調節方法で、Bilayer 型とDope型がある。

材料	Tc	達成感度	Developer	特徴
Al	~1.2K		-	Optical testに使用する
Ir-Au bilayer	20-100mK			最初の超伝導近接効果応用
Al-Ti bilayer	~0.5K	~ 10^{-17} W/rHz	UCB	PBで使用
Ti-Au bilayer	~0.1K		ISAS	
Mo-Cu bilayer	~10mK		GSFC	
W: Fe doped				~100ppm
Mo: Fe doped				~100ppm
Ti: Mn doped	~1/5 Tc			~200ppm
Al: Mn doped	~1/5 Tc			~1000ppm 磁場耐性

● Power/Energyの受信



PB-1の構成

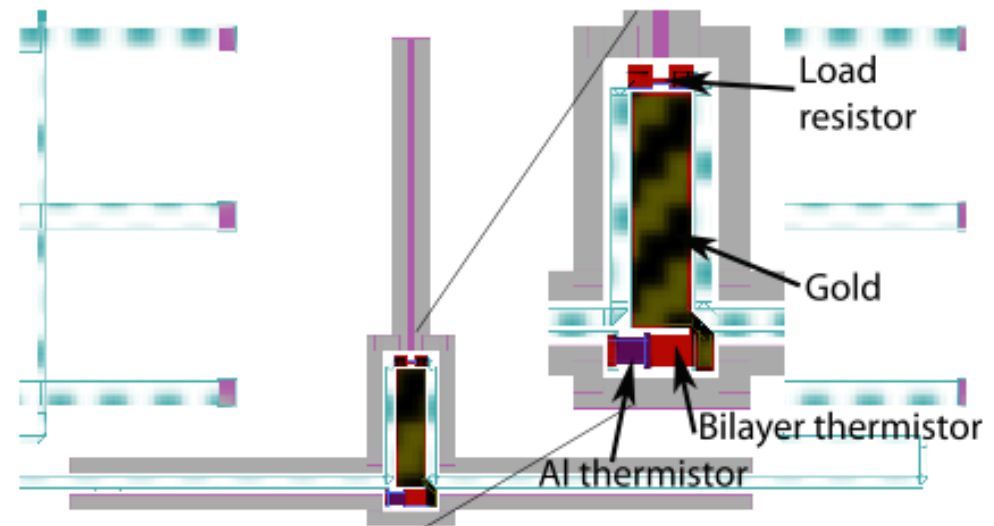
$$R_{load} \approx 1 \Omega$$

Al-Ti bilayer $\rightarrow T_c \sim 0.57K (T_b \sim 0.27K)$

Al-Ti bolometerはものすごく高感度で、
実験室で普通に受光しようとする
すぐにサチってしまう。

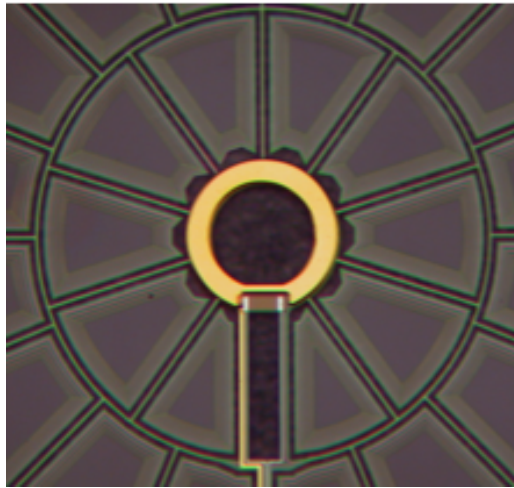


実験室でのテスト用に、よりハンドリングの良い
(感度の悪い) Al bolo.を直列に接続

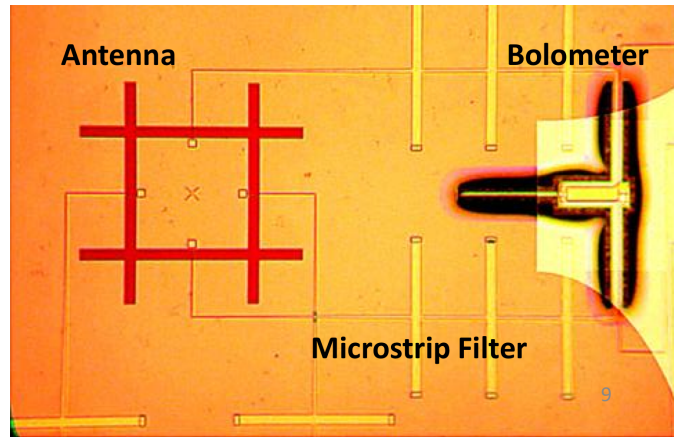


様々なアンテナ形状

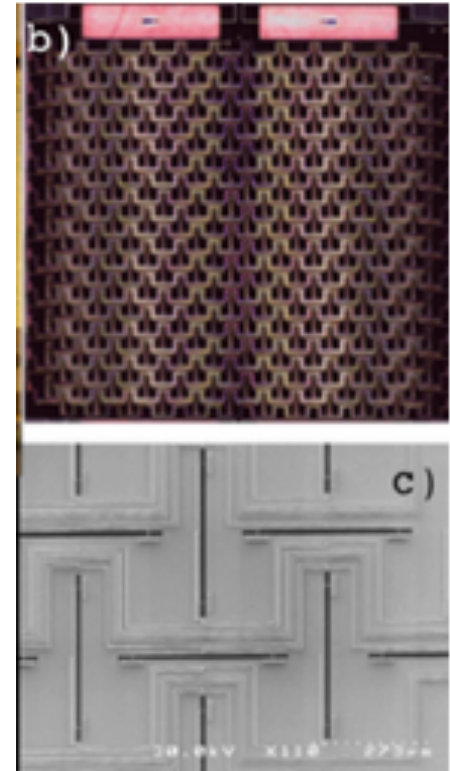
Spider web @APEX-SZ, SPT
→ Energy detection



Dipole-slot antenna @PB-1
→ 偏光



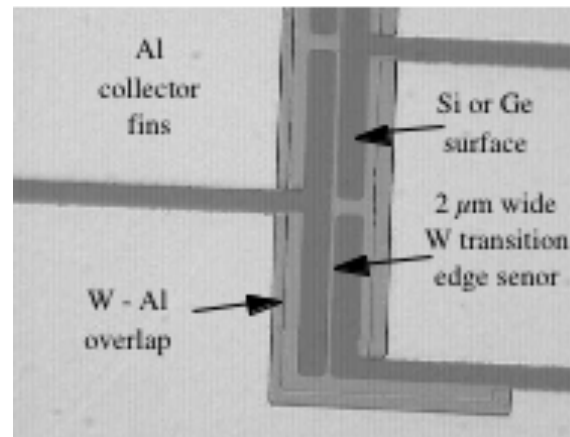
@ Bicep2, Keck, SPIDER
→ 偏光



Sinuuous Antenna @PB-2
→ 偏光, 多色

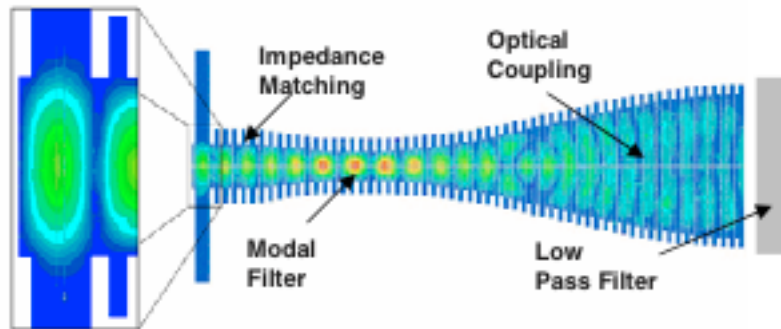


for CDM @Stanford

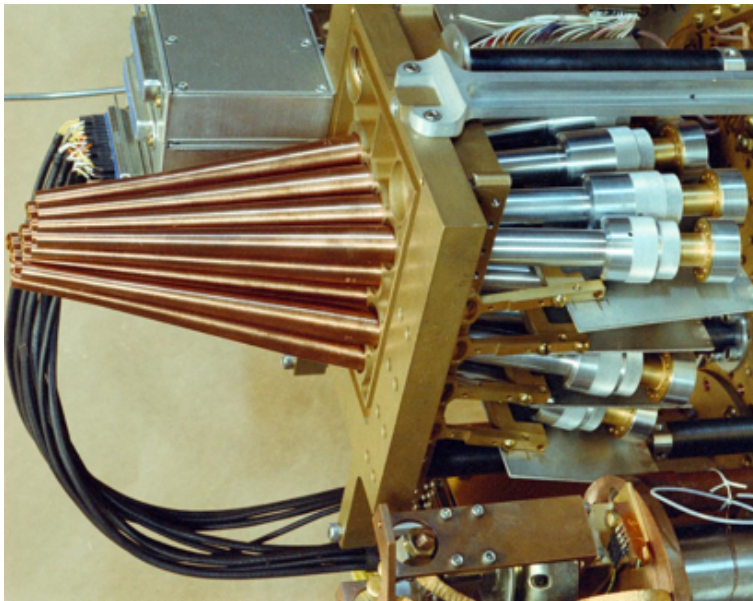
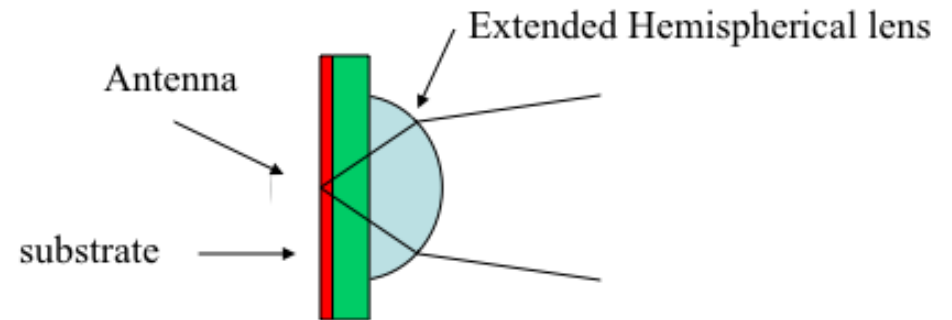


アンテナとのカップリング

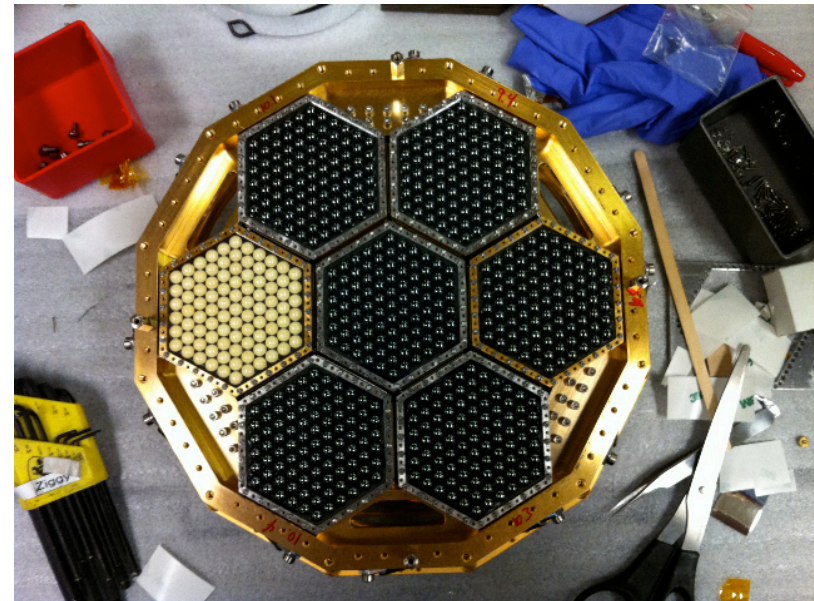
Horn coupling



Lenslet



MAXIMA

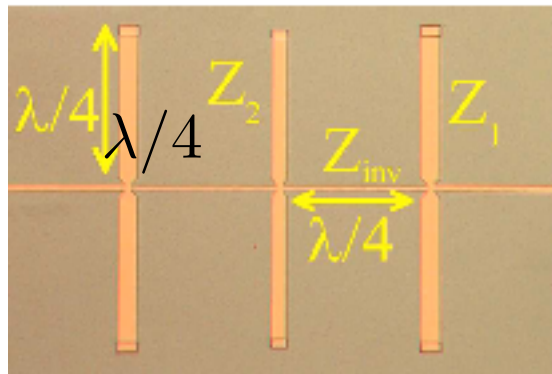


PB-1

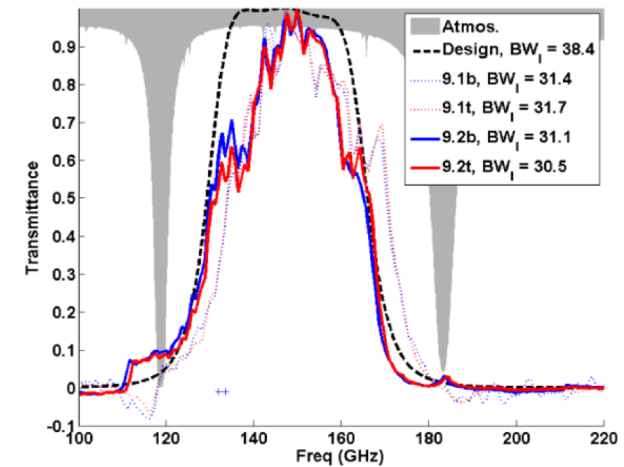
● Readout

① Microstrip Filter

TESはものすごく高感度なので、
ちょっとした負荷ですぐにサチル。



ミリ波帯の大気の窓

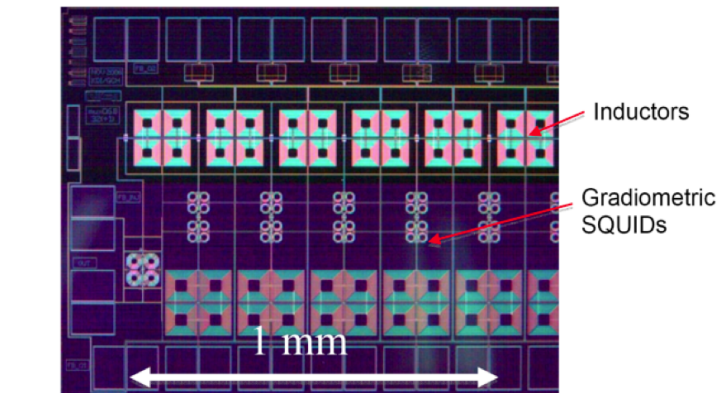
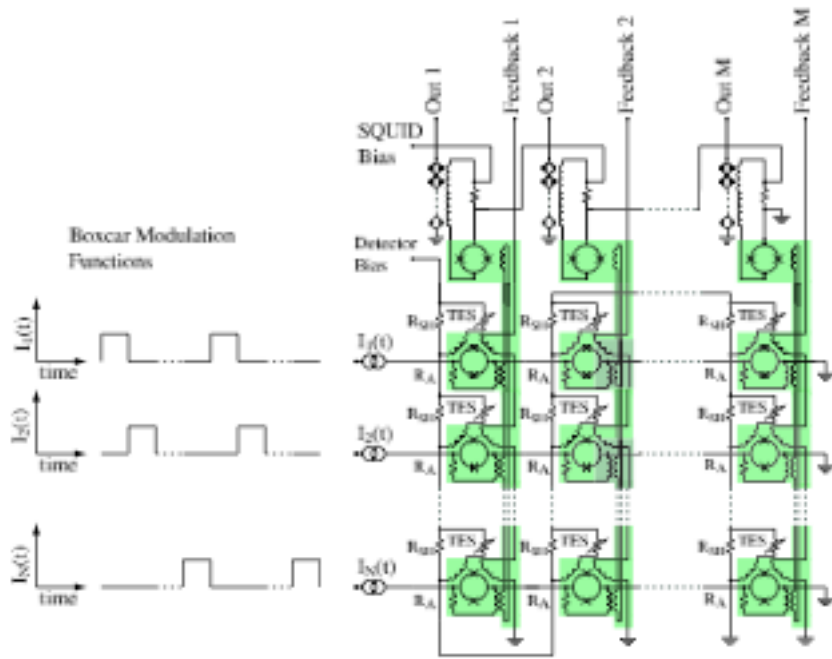


必要な周波数帯域のみを取り出すように、
の共振長さを持つ、microstrip lineで
不必要な信号を除去(BPF)。

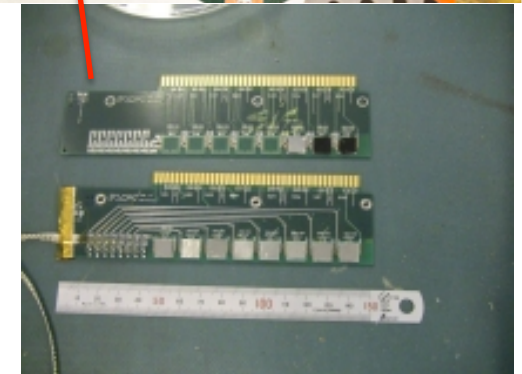
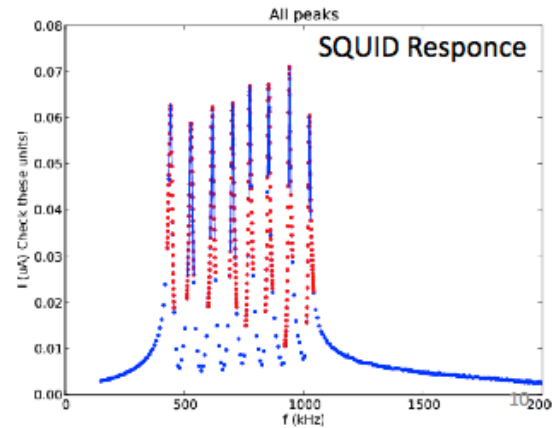
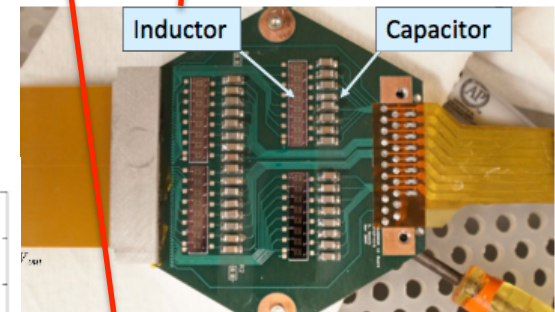
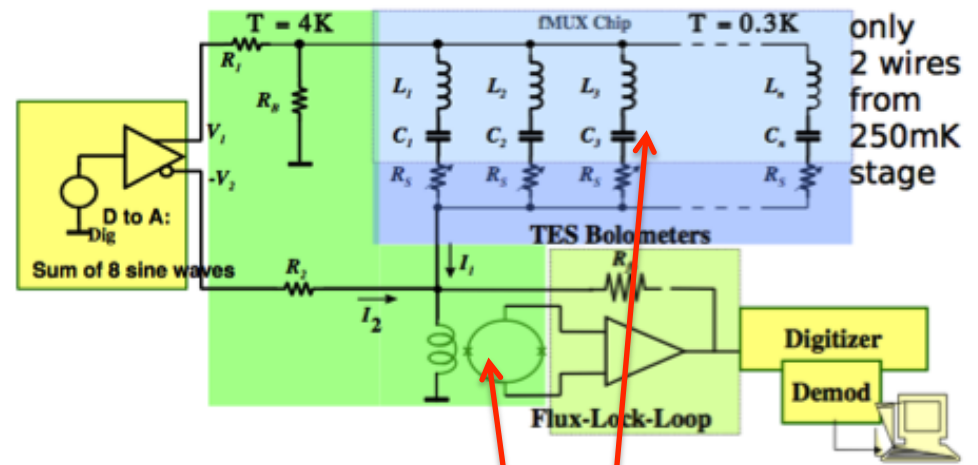
② エレクトロニクスとMultiplexing

- TESはlow impedance deviceなので、SQUIDでの読み出しに向いている。
- たくさんのTES信号を読み出すのに、Multiplexingが必須。

Time Domain



Frequency Domain



どちらも最新で16MUXくらい。

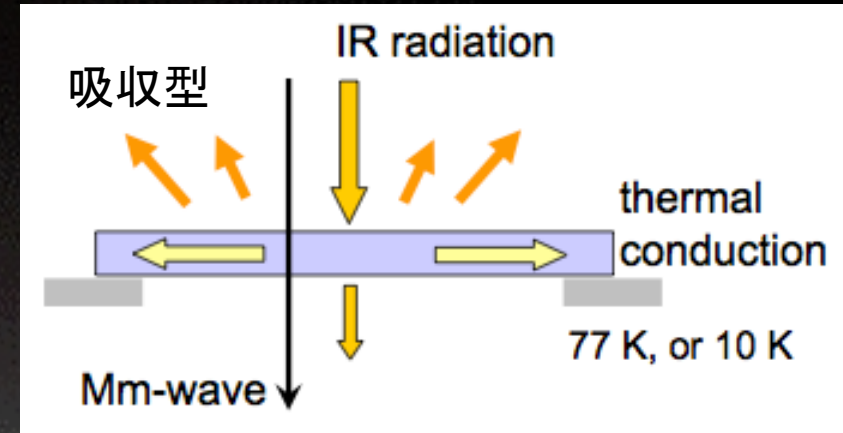
(2) 赤外線カットフィルター

① 吸収型フィルター

ミリ波は透過し、IRは吸収する材料を使う。

ミリ波に対する屈折率(表面反射率)が小さい事も重要。

高分子材料が多い。

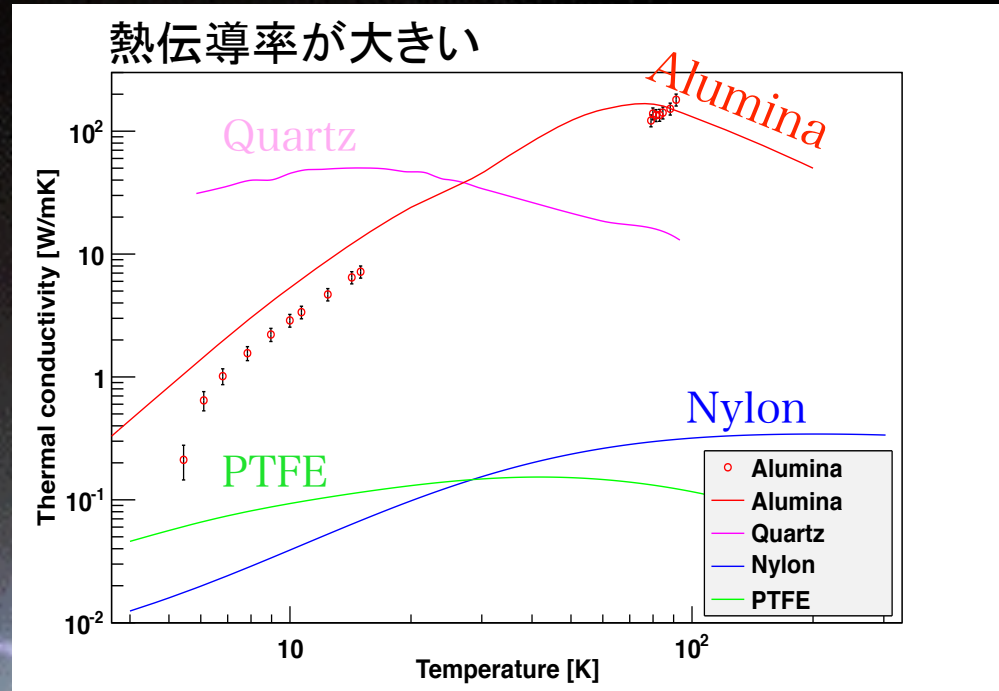
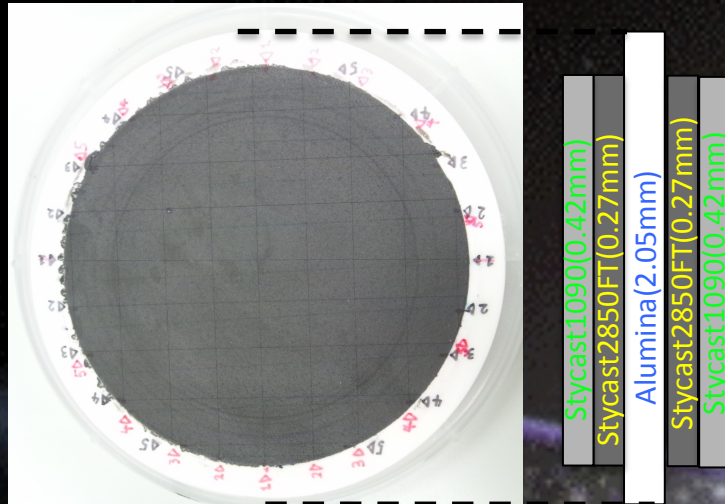


Kuoのプレゼンより

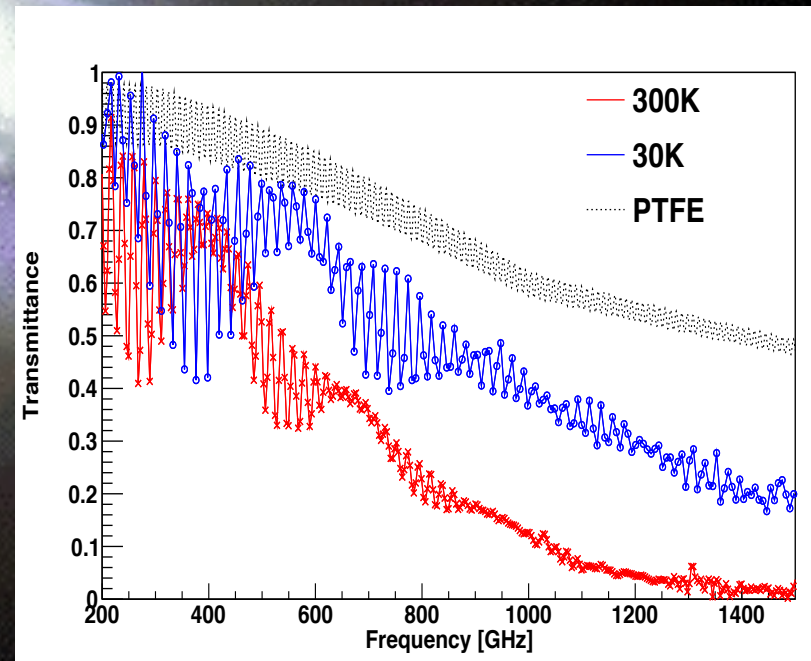
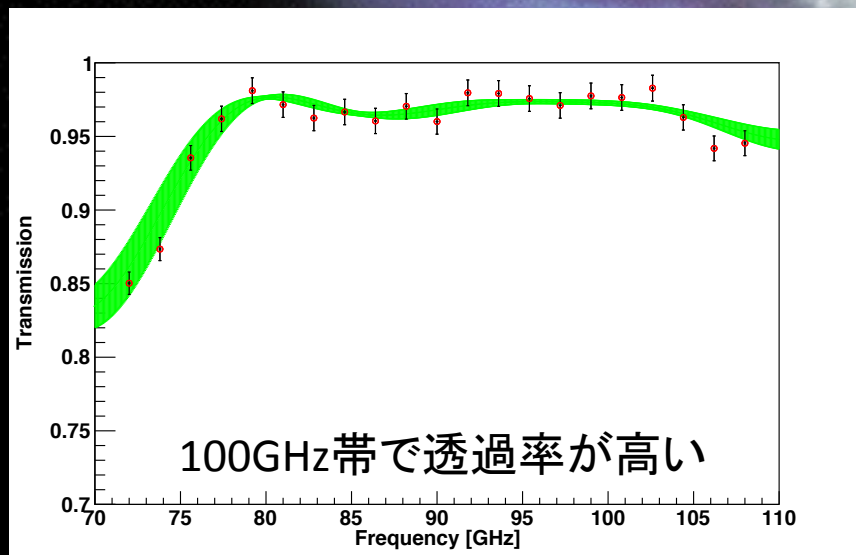
Material properties	Index of refraction	Absorption at 150GHz Nepers cm ⁻¹	Reflective loss per interface	Absorption at 3000GHz Nepers cm ⁻¹	Thermal conductivity mW cm ⁻¹ K ⁻¹
Expanded PTFE (ZITEX, Mupor)	1.2	small	0.83%	~100 for thin sheets	
PTFE (Teflon)	1.44	0.015	3.3%	3.0	2.2 (80 K) 1.4 (20 K)
Glass-filled PTFE (Fluorogold)	1.65	0.16	6.0%	>30	
Fused quartz	1.9	0.05-0.07	9.6%	large	5.3 (80 K) 1.4 (20 K)

アルミナフィルター

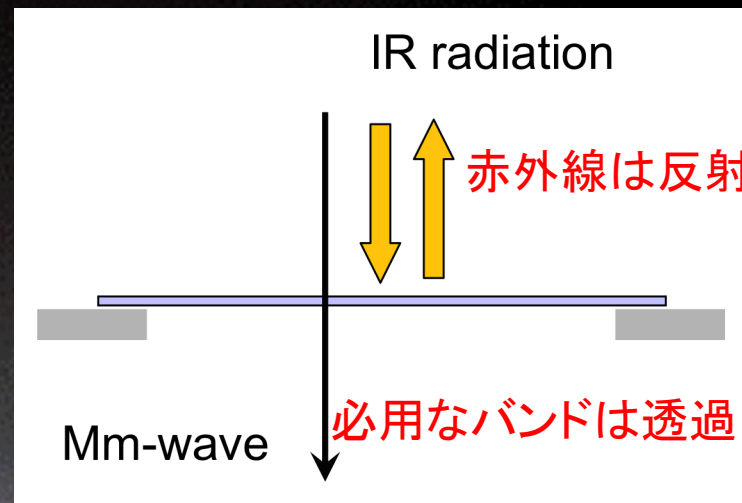
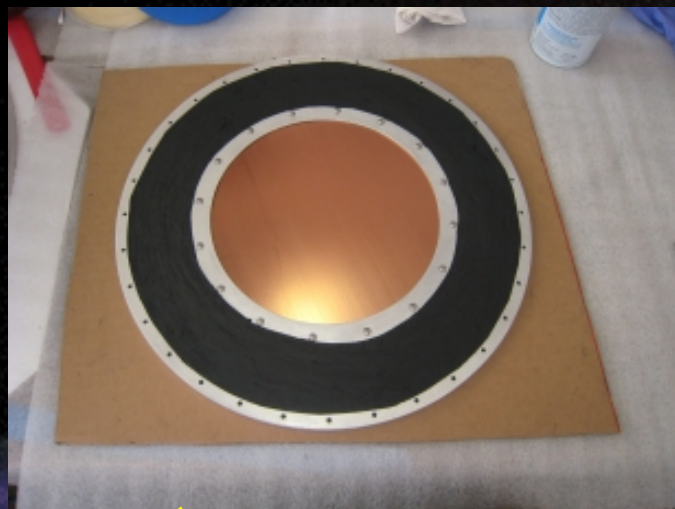
by Yuki Inoue



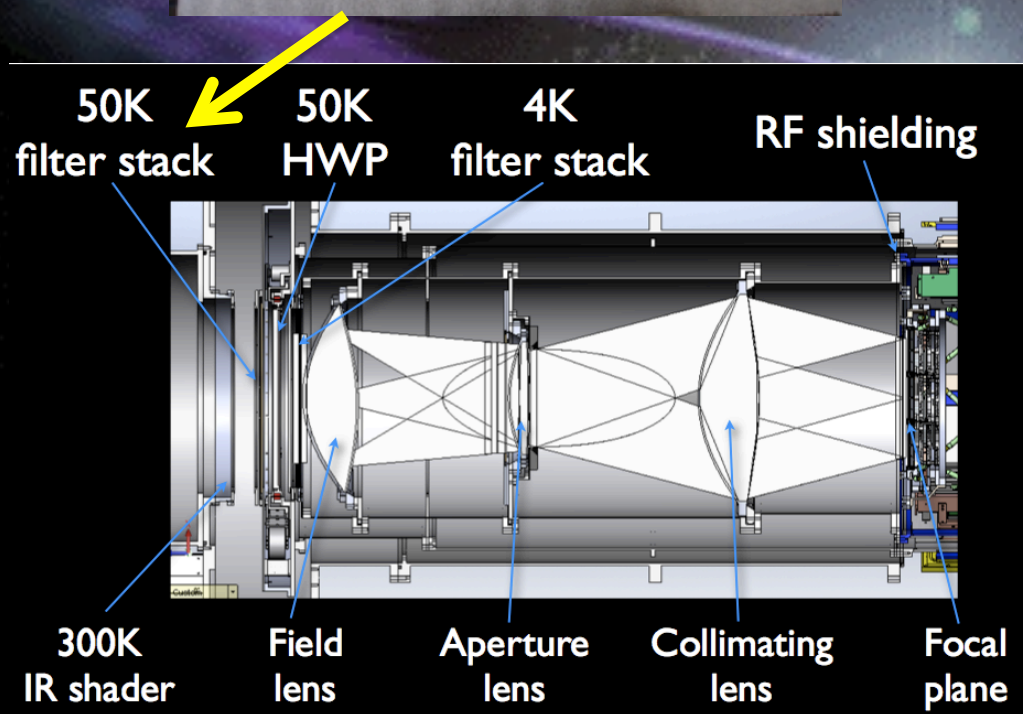
ARコーティングを必用とする



① 反射型フィルター



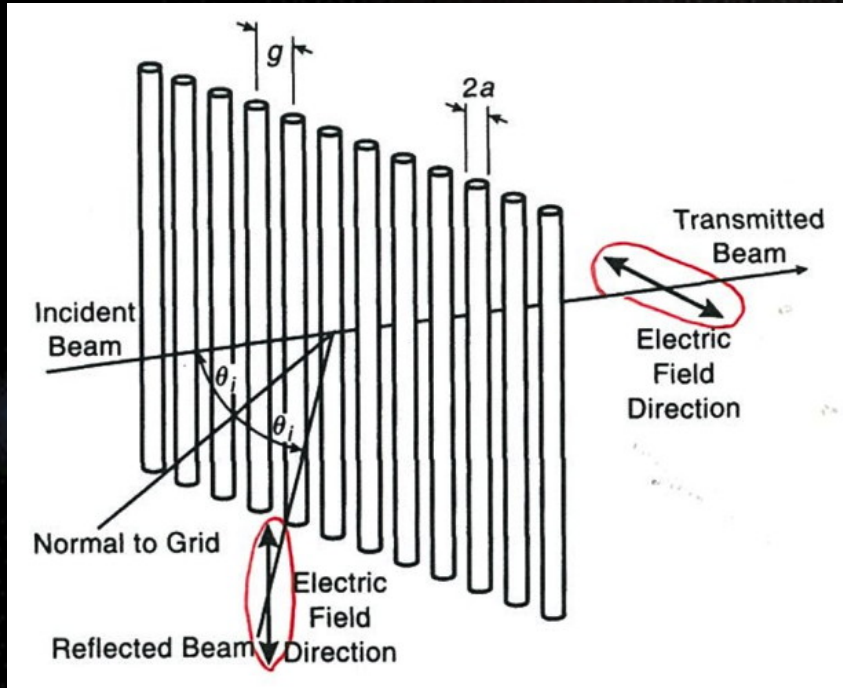
熱を外へ打ち返した方が
余分な熱負荷を生じず、
フィルターとしては望ましい。



IR フィルターの積層により輻射熱侵入は大幅に低減出来るが、
フィルター自身の冷却が難しい
という課題がある。

基本原理 → Wiregrid

Quasioptical Systems, P. F. Goldsmith



振幅反射率 $r = \frac{-1}{1 + 2Z_g/Z_0}$

振幅透過率 $t = \frac{1}{1 + Z_0/(2Z_g)}$

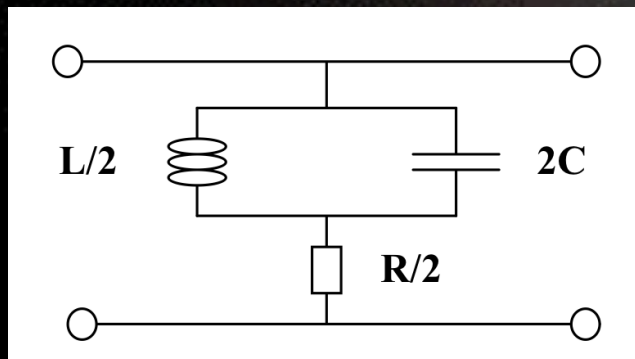
正確に解くのは難しい。

wiregridのインピーダンス Z_g は、
 $g \ll \lambda/2$, $2a < g$ の時

$$Z_g = i \omega \ln\left(\frac{g}{2\pi a}\right) Z_0$$

$$\omega \equiv \frac{g}{\lambda}$$

等価回路

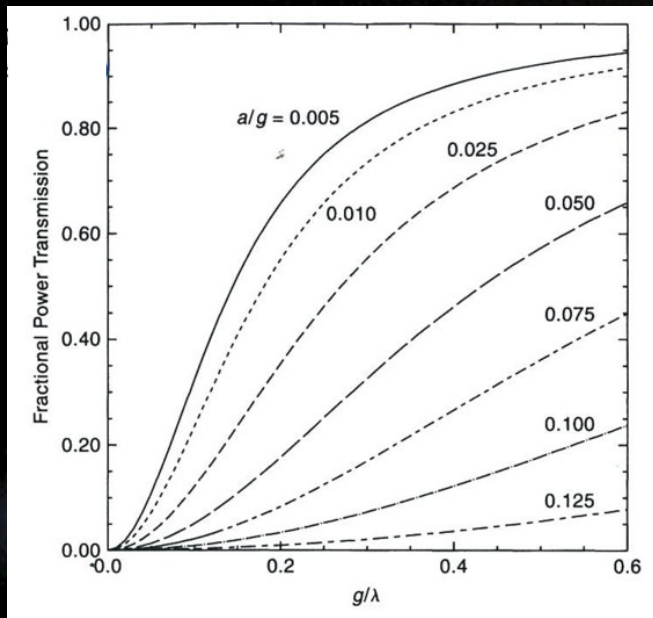


共振を含む記述では、半定性的に

$$Z_g = -i \omega_0 \ln\left(\frac{g}{2\pi a}\right) \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^{-1} Z_0$$

$$\omega_0 \approx 0.85$$

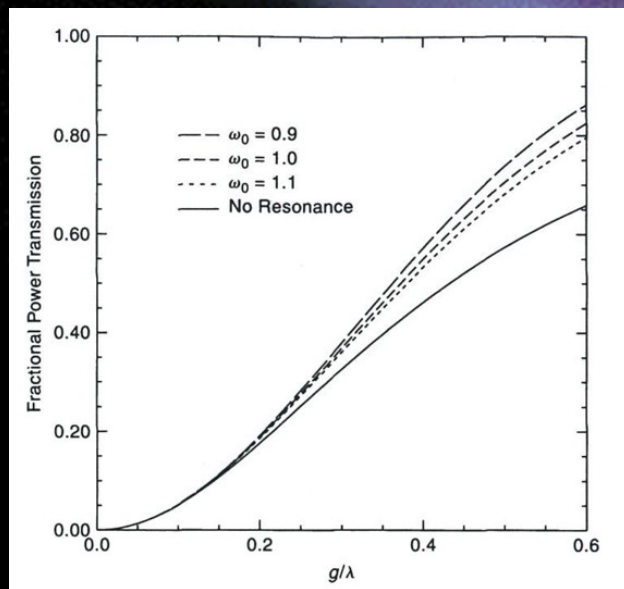
Wiregridの透過特性

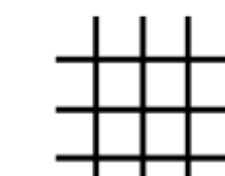


2次元に拡張



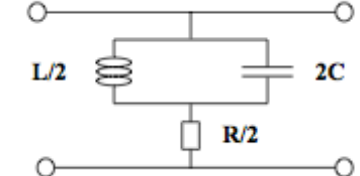
共振の効果を検討した場合

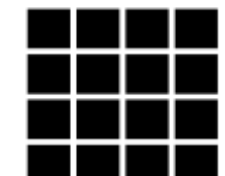




Grid period = 1/frequency

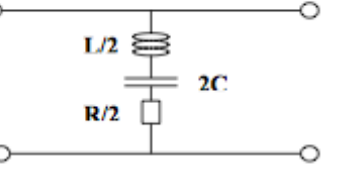
HPF

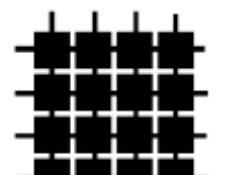




Grid period = 1/frequency

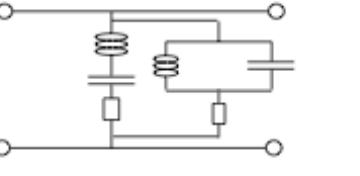
LPF





Grid period = 1/frequency

BPF



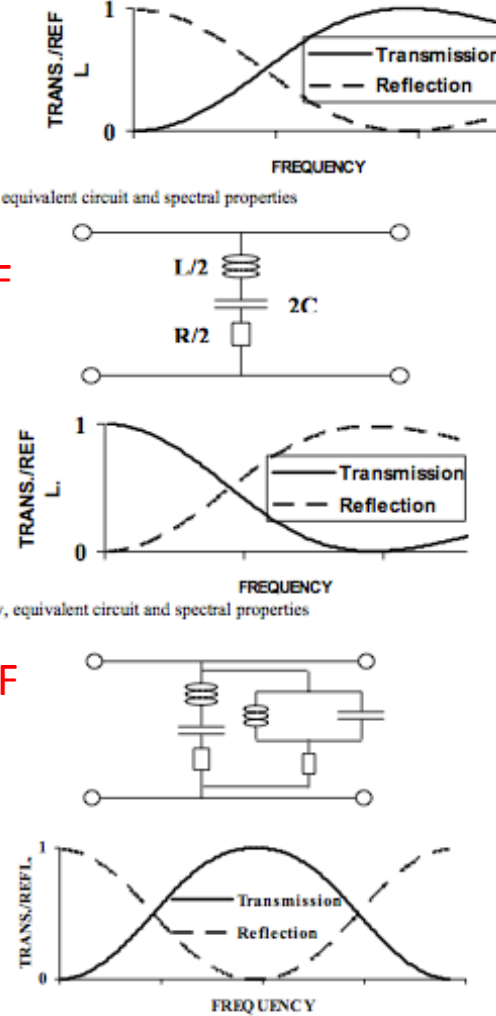


Figure 1a: Inductive grid geometry, equivalent circuit and spectral properties

Figure 1b: Capacitive grid geometry, equivalent circuit and spectral properties

Figure 2: Resonant grid geometry, equivalent circuit and spectral properties

実際のMetal Mesh Filter

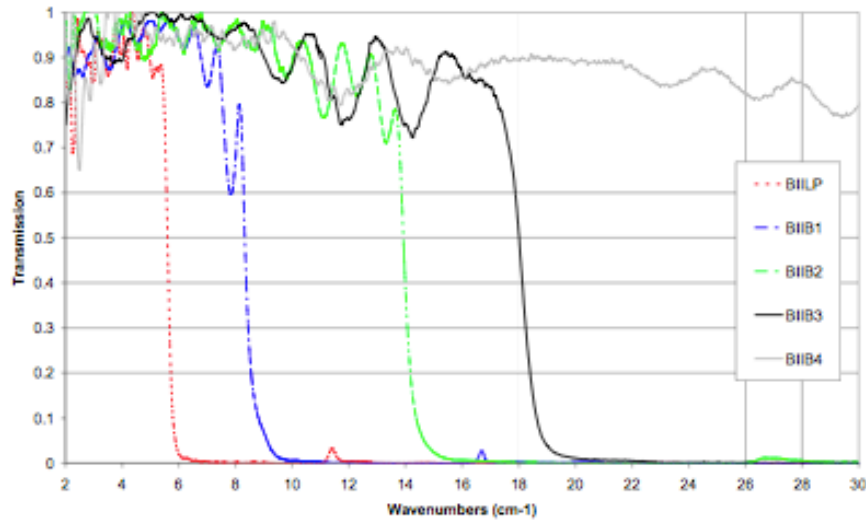


Figure 3a Spectral transmission of the individual components of the Planck HFI 143GHz optical filtering. Each successive element is designed to block any harmonic leaks arising from the previous and is tuned to have maximum transmission in the pass band.

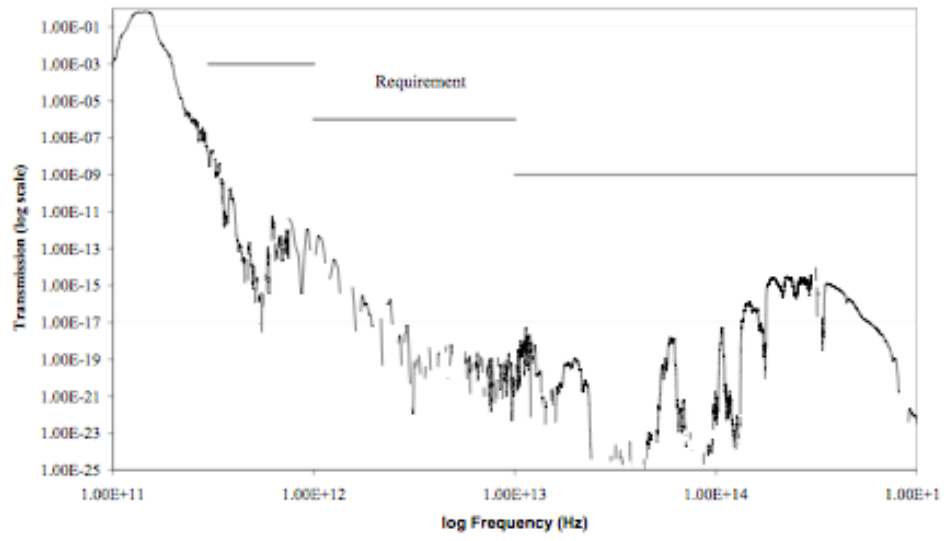
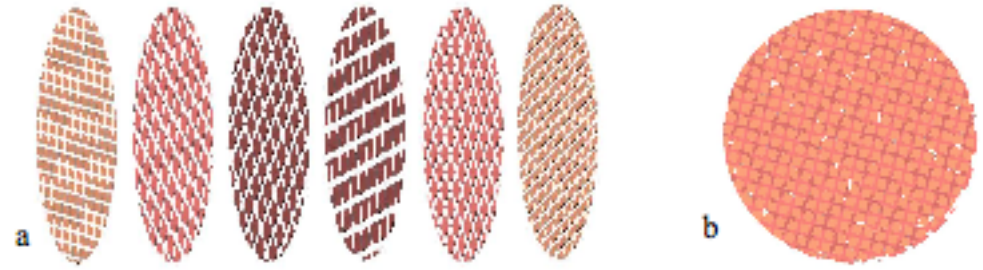
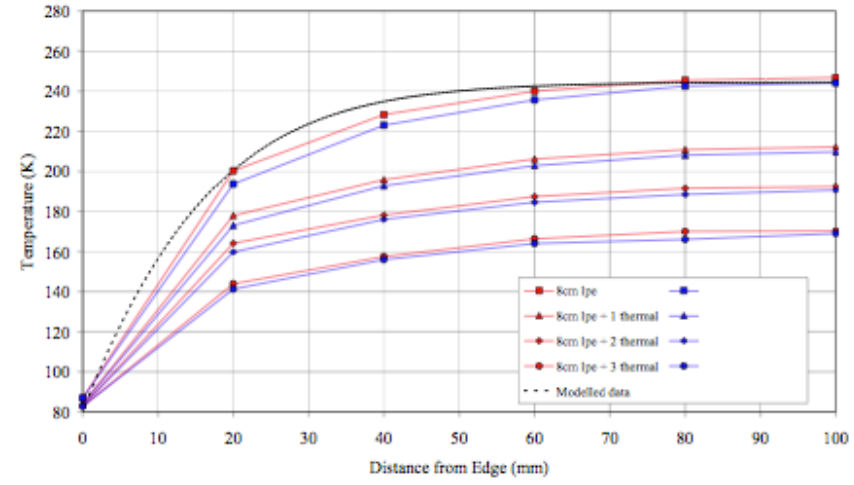


Figure 3b Total spectral transmission of the Planck HFI 143GHz filter stack. The thicker horizontal lines indicate the science requirement on the level of blocking.



ポリプロピレン等の基材にMetal Meshをつけ、
 適当な性能のフィルターを複数積層させて
 つくるらしい。

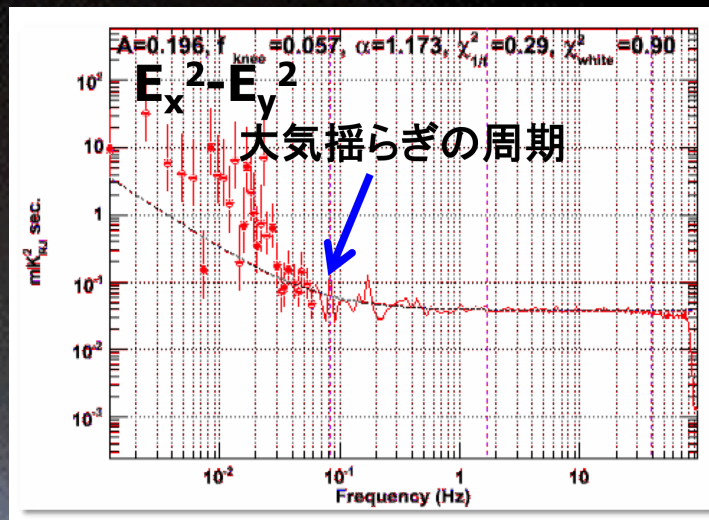
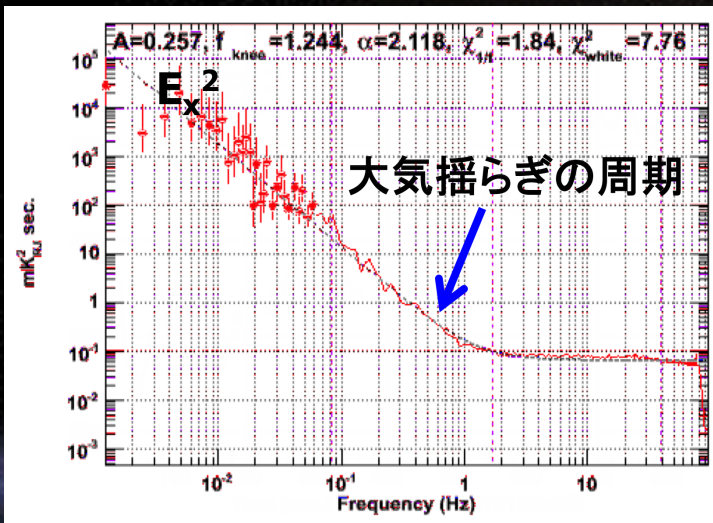


高分子薄膜を母材としているので、
 熱伝導率はかなり悪い。

-> フィルターセンターと端で
 かなりの温度差がつく

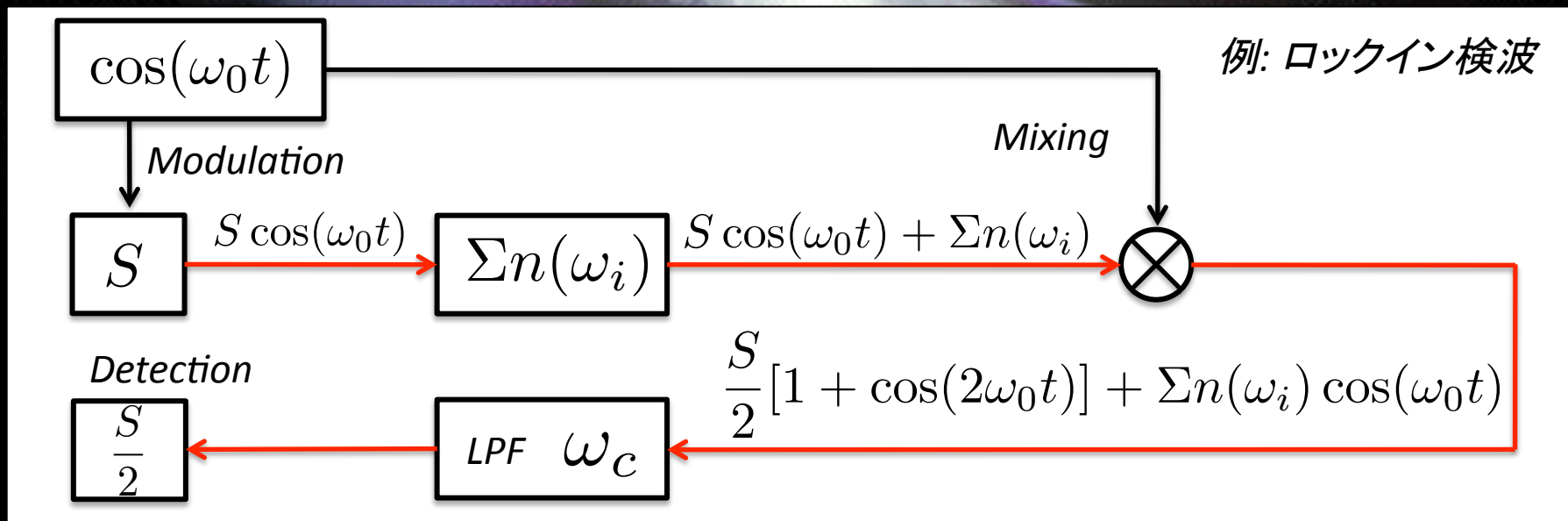
(3) Polarization Modulator

偏光の場合は差し引きでcut offが低周波側に持って行ける。

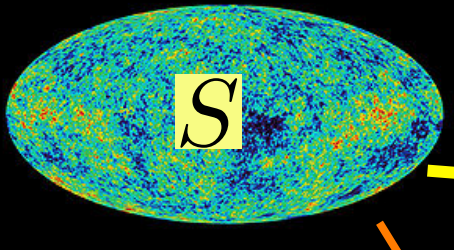


変調法

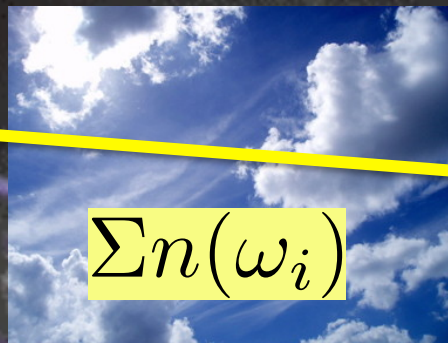
: 微小信号を検出するのに良く使われるテクニック



偏光成分を
持っている



無偏光



偏光変調は効果
がある



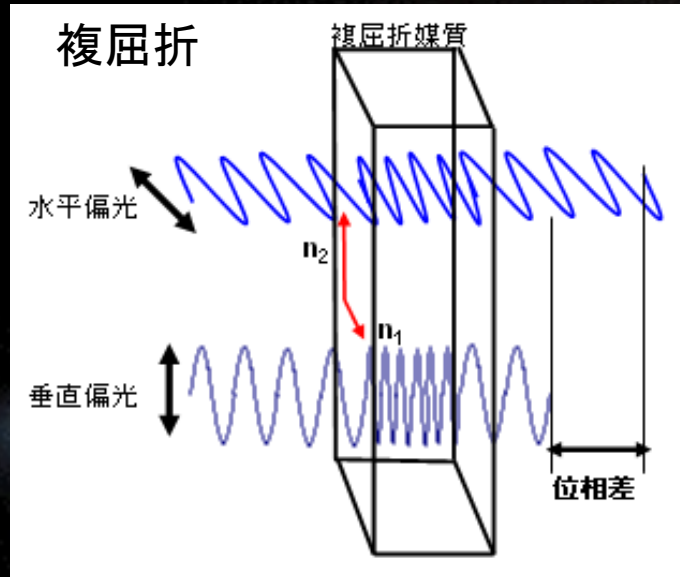
~~cos(\omega_0 t)~~

本来ココで
変調されるべき

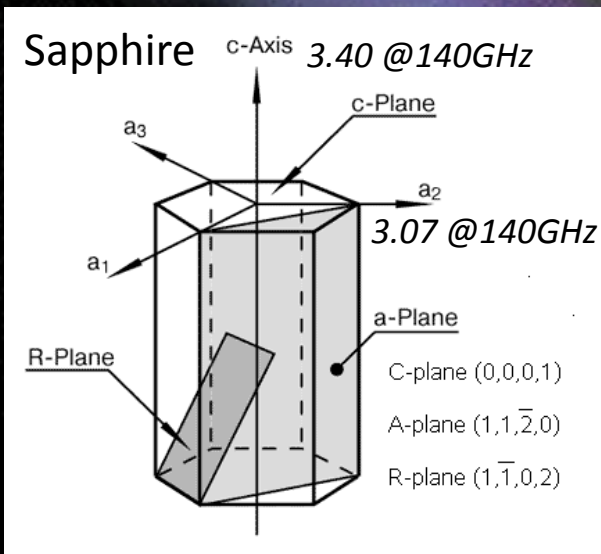
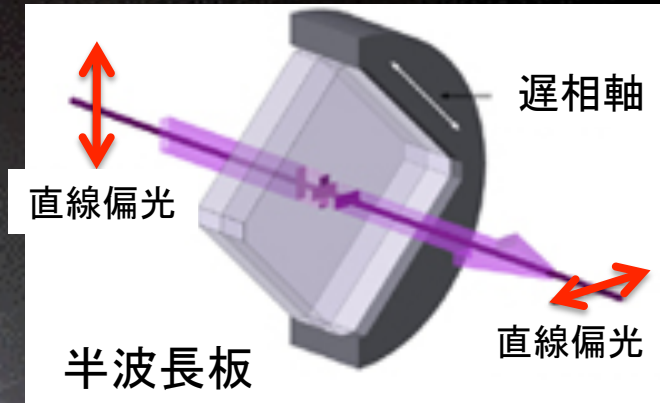
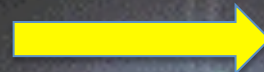
cos(\omega_0 t)

せいぜいココで
しか変調できない

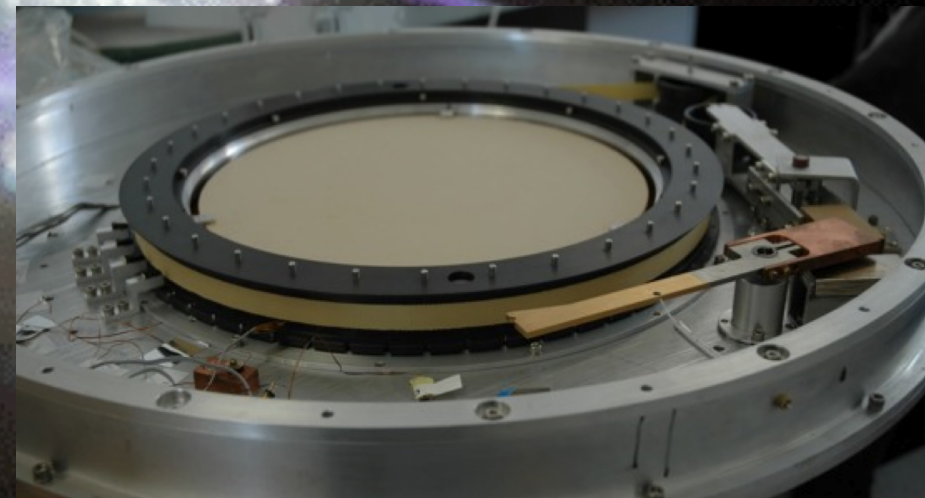
回転半波長板による偏光変調



位相差がちょうど
 π の時



回転サファイアHWP



(4) 超低温冷凍

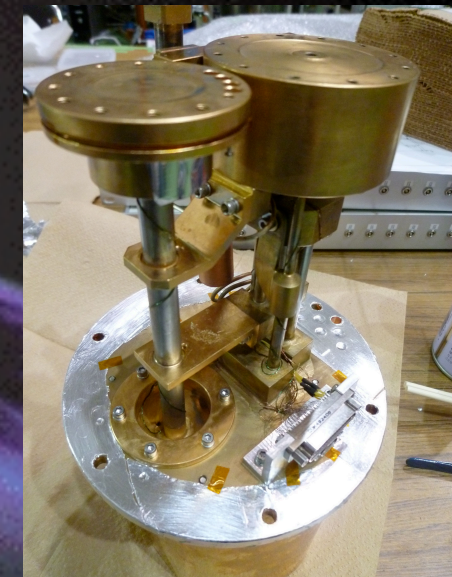
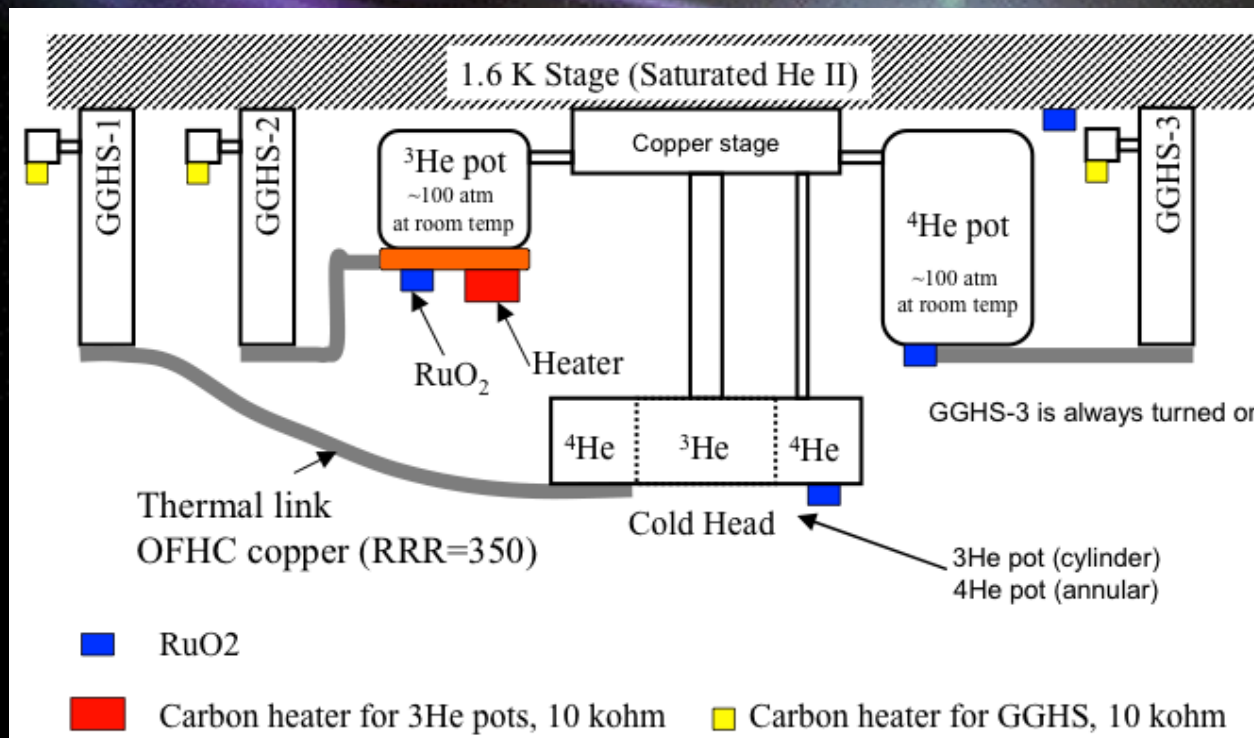
① ソープション冷凍機

- a few μW @ 220mK
- 60 μW @ 380mK
- Hold time: 48h (24h @ 250mK)
- Re-Condense Time: 1-2h

➡ PB-Iのディテクタシステムでは、
 Holding Time: ~20h, Re-condense time: ~4h

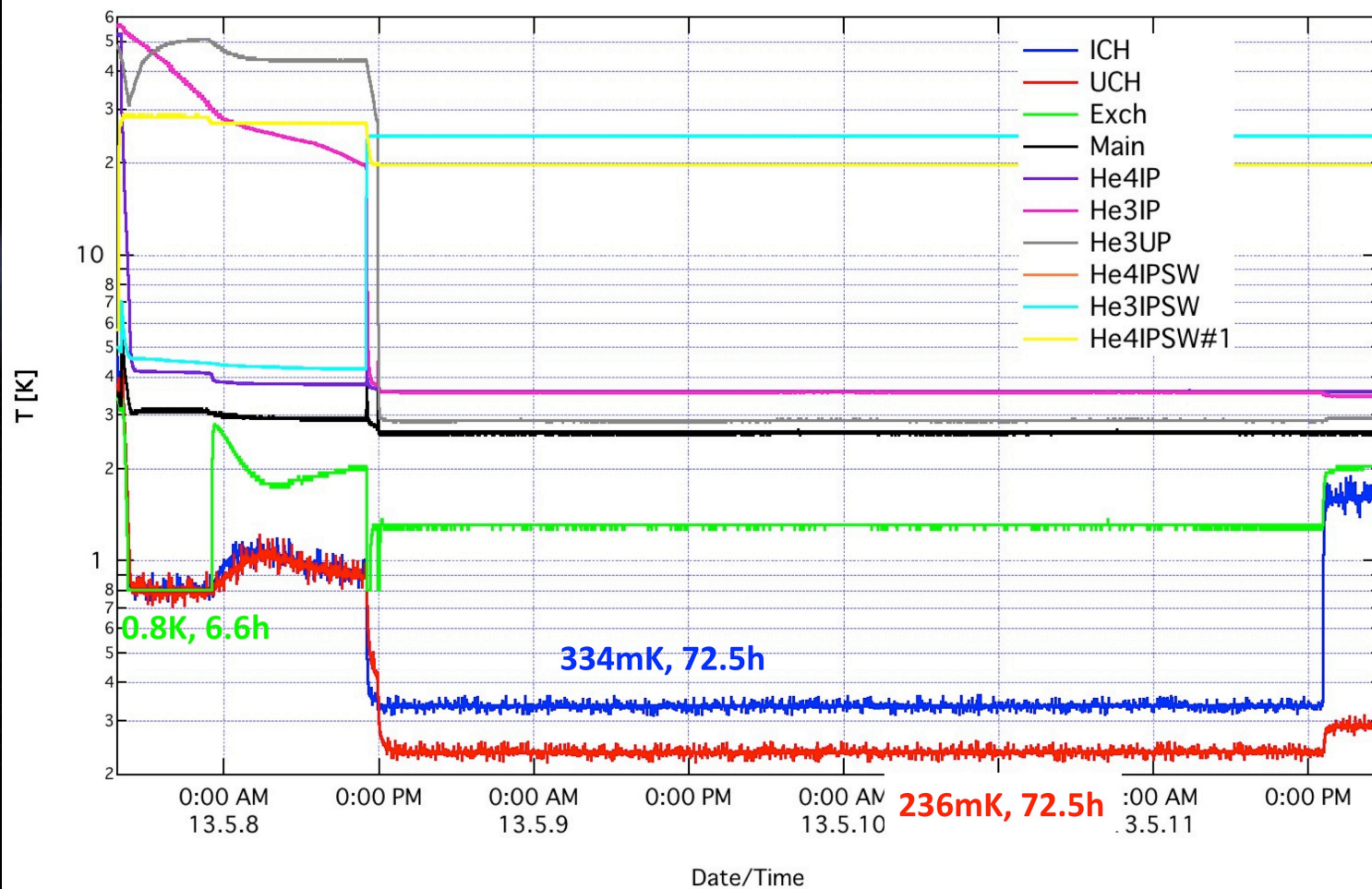
Chase Cryogenics Inc.
 (3段 Sorption 冷凍機)

He-7 (2段冷凍機)タイプの場合の動作メカニズム



PB-2での冷凍テスト結果

Run4-2 Result

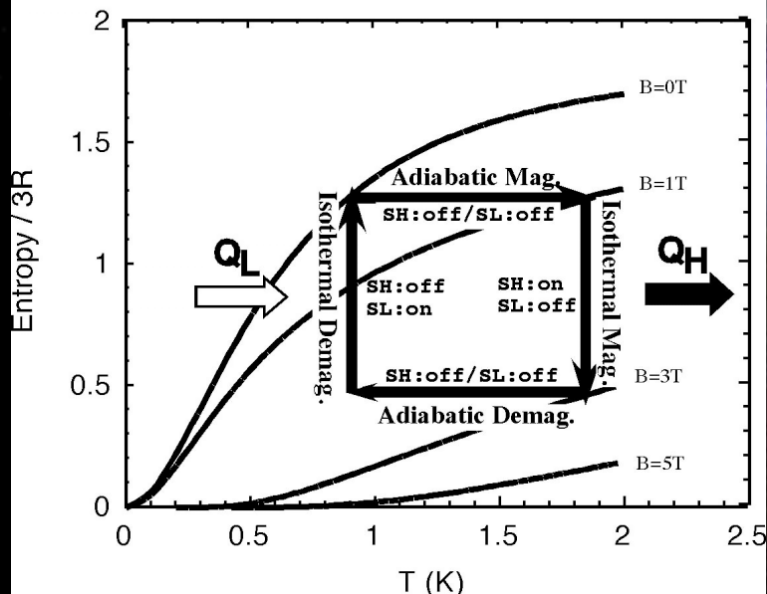
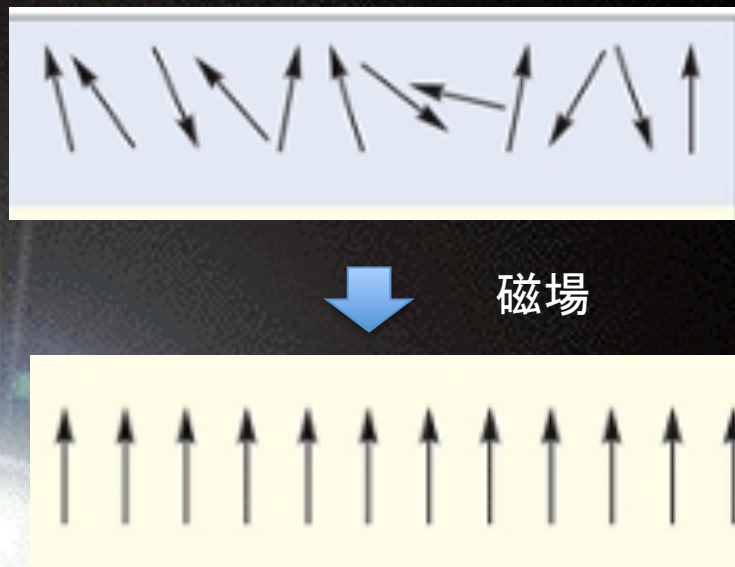
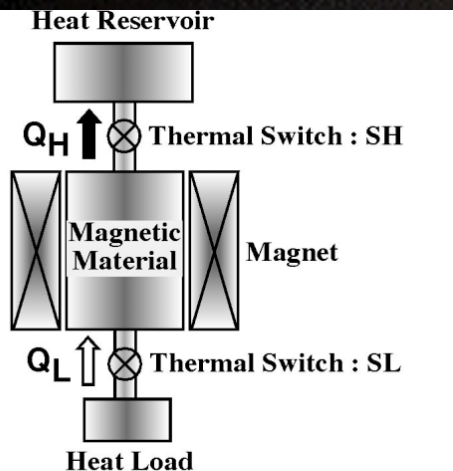


② 断熱消磁冷凍機 (ADR)

100mK以下も到達可能

ADRの原理

常磁性塩の断熱消磁冷凍：電子スピン



カルノーサイクル

気体冷凍

磁気冷凍

温度

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{B_L}{B_H}$$

圧縮

励磁

上昇

膨張

消磁

下降

理想的な効率に近い。

重要な変数：ソルトピルの質量・磁場

SaltPillの種類

CPA ($\text{KCr}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)
 FAA ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$)
 CCA ($\text{CsCr}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)



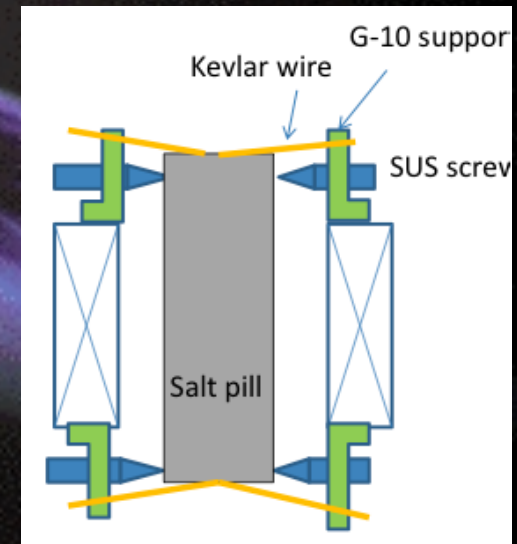
	FAA	CPA	CCA	おおよその値
lowest temperature	40mK	20mK	10mK	
melting point	40°C	89°C	116°C	
heat exchanger	Au	Cu/Au	Au	

エントロピー

FAA > CCA > CPA

FAAがCPA約2倍、
 CCAはCPAの約1.2倍

3T Magnet

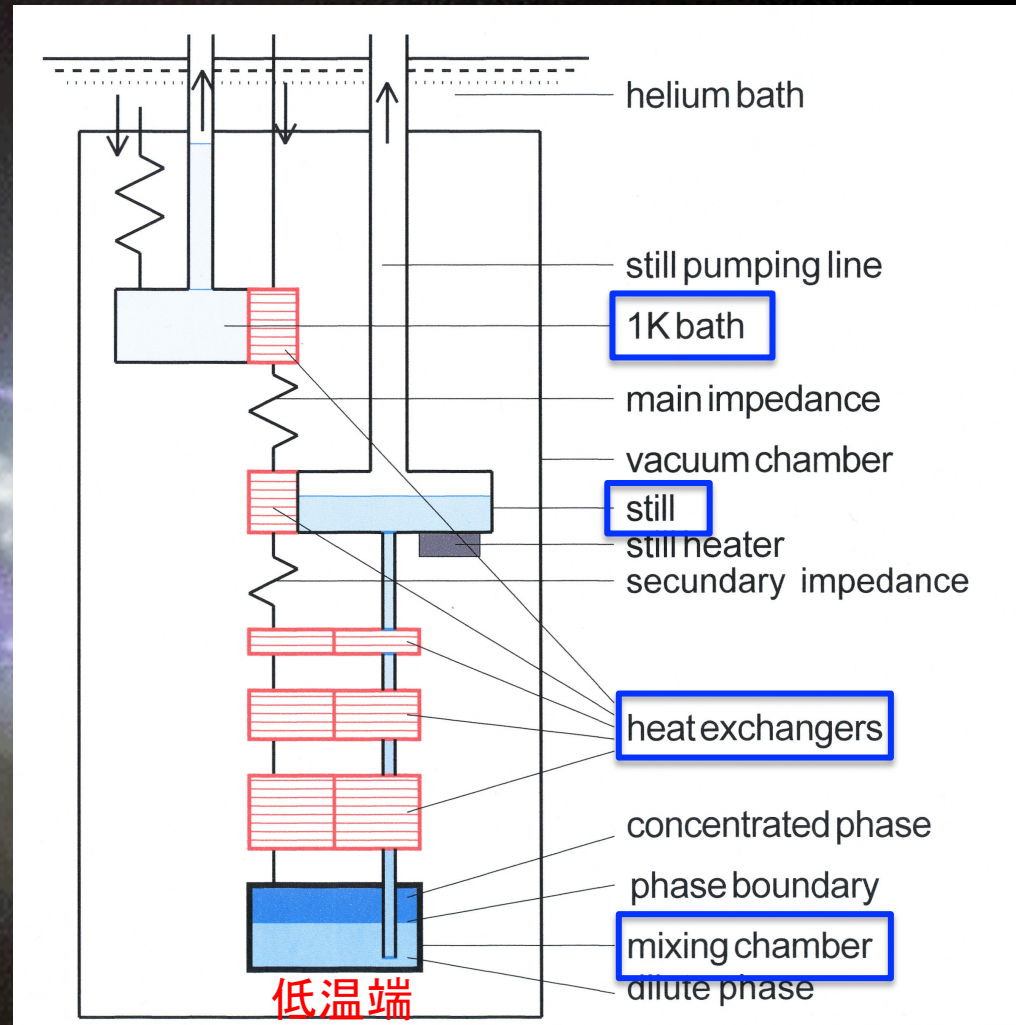
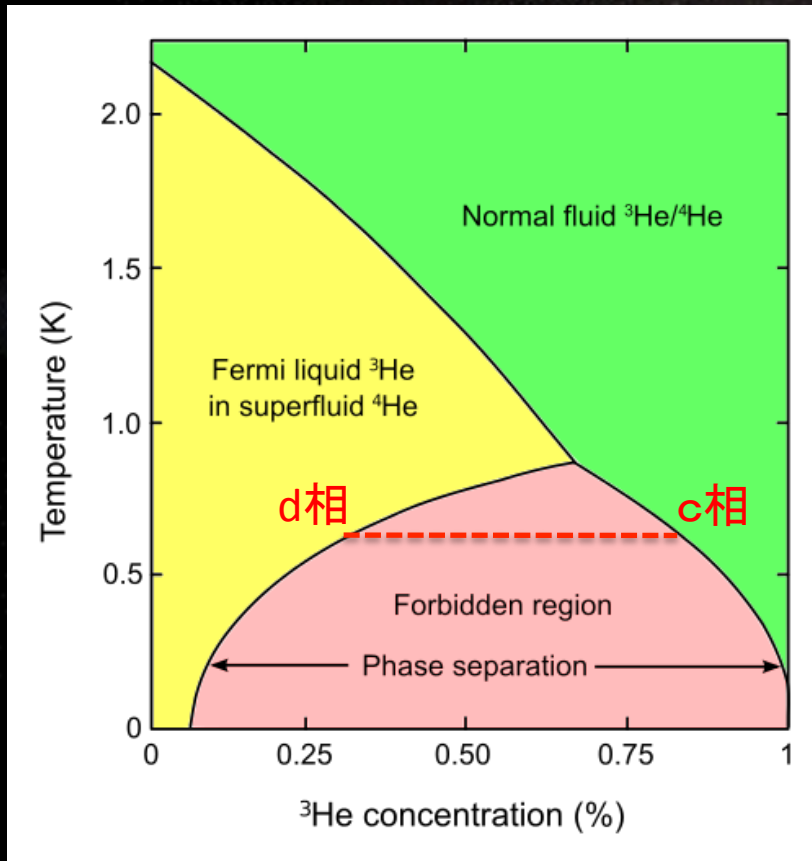


- CPA : 0.606mJ/g → 768.1 g → 419.6 cm³
- FAA: 1.327 mJ/g → 347.2g → 203.1cm³

③ 希釈冷凍機

Atacama Cosmological TelescopeのACTpolレシーバーで採用。X線検出器などでも使われる。

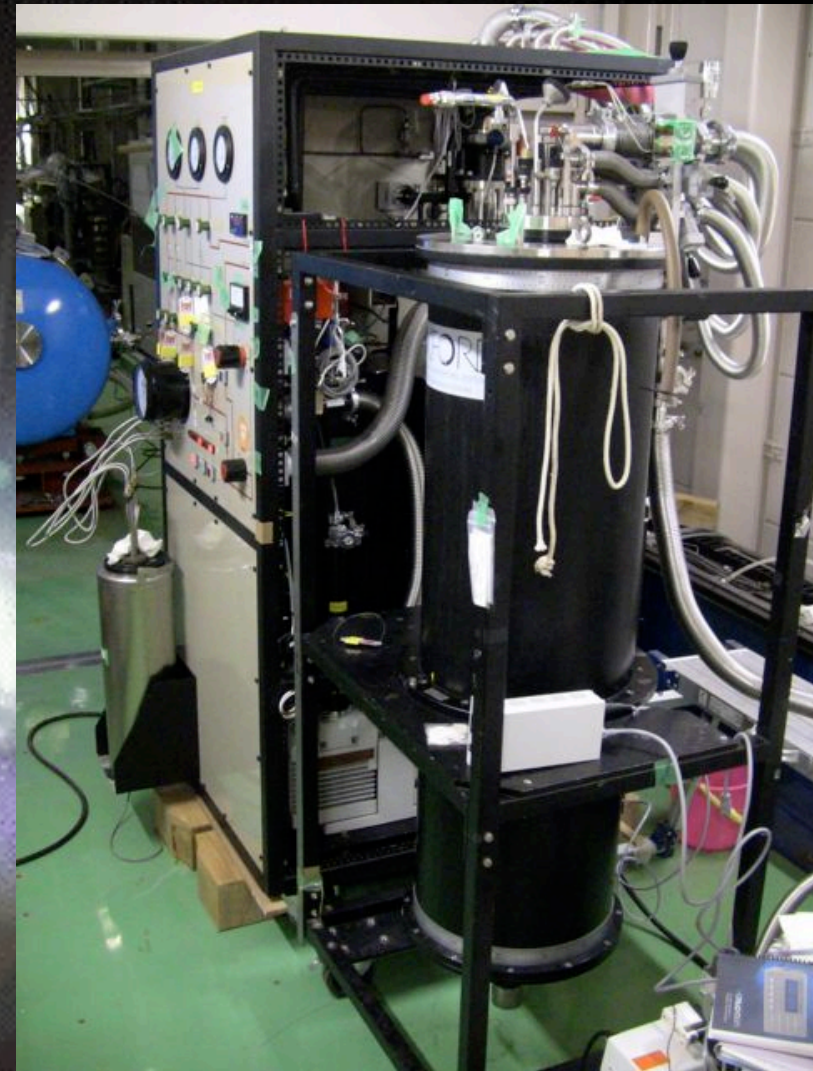
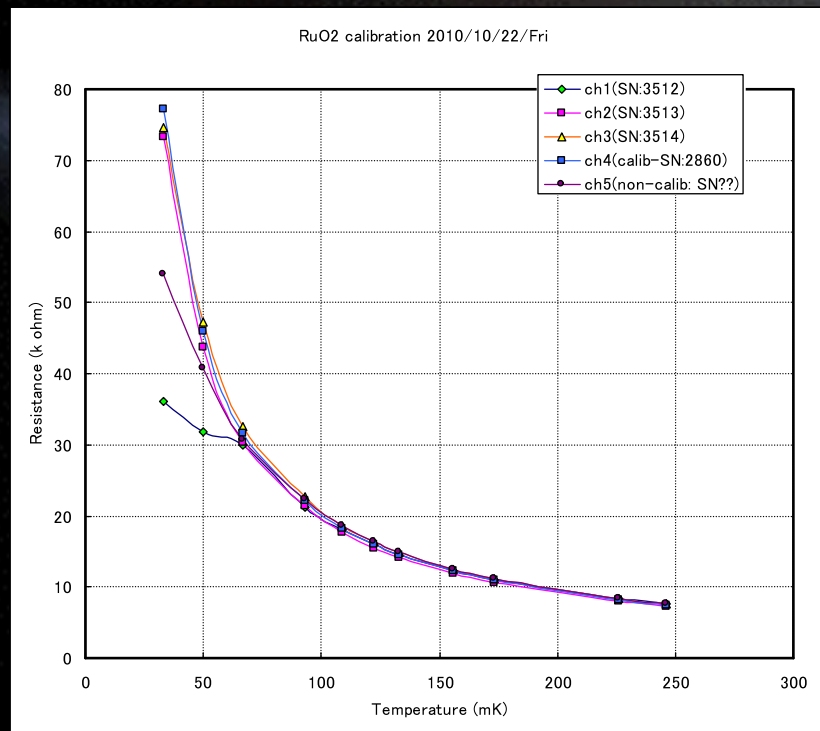
^3He - ^4He 混合液の相図



100mK以下が可能
 冷凍能力が大きい 100uW ~ 1mW

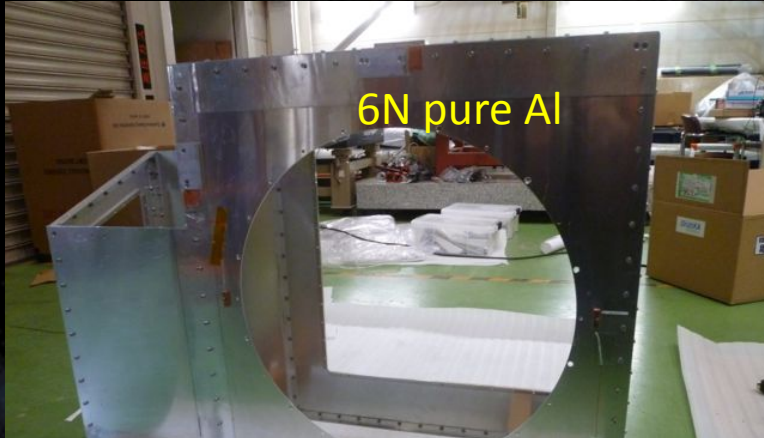
冷凍能力: 100 μ W@100mK
最低到達温度30mK

古い希釈冷凍機を復活させた。

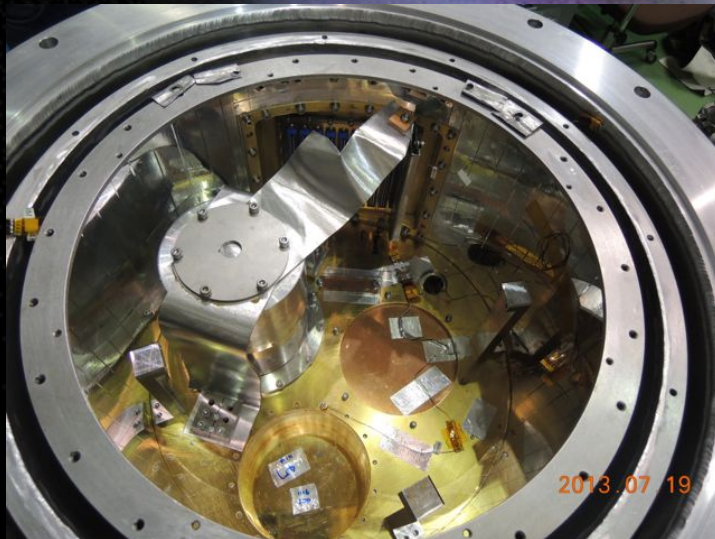


超伝導センサのテストに使用している。

④ 高純度金属ヒートストラップ

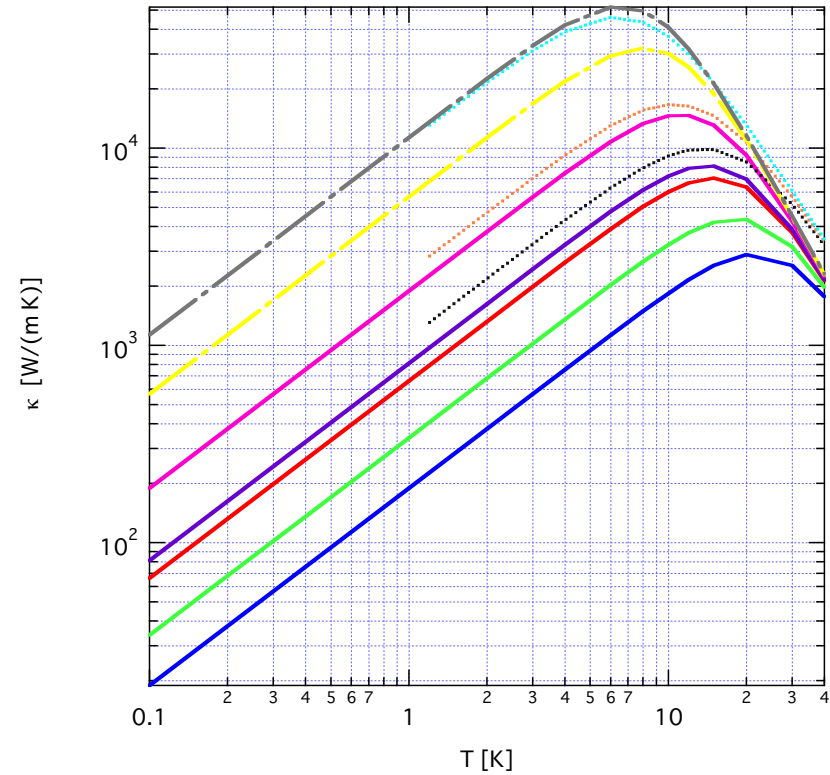


Thermal conductivity:
0.5mm 6N Al = 50mm OFHC



2010/12/28 都丸

CMB用高純度金属 換算熱伝導率



- 日立5N銅燃線 アニール前 RRR100
- 日立5N銅燃線 アニール後、RRR350
- 三菱6N銅平燃線 アニール前 RRR180
- 三菱6N銅平燃線 アニール後 RRR430
- 三菱6N銅丸燃線 アニール前 RRR100
- 三菱6N銅丸燃線 アニール後 RRR1000
- ニラコ5Nアルミ アニール前 RRR1200
- ニラコ5Nアルミ アニール後 RRR2600
- 住化6Nアルミ アニール後 RRR12000
- 三菱6N8Cu RRR3000
- 三菱6N8Cu RRR6000

4. まとめ

- CMBは初期宇宙を探查するのに重要な役割を果たしており、特に最近の技術革新により精密計測が可能となった。
- CMBのB-mode偏光により、インフレーション時に放射された原始重力波探查が可能になる可能性がある。ごく最近、Lensing B-modeが発見された。

- 超伝導TESボロメータ等先進技術が新しい天文・物理を切り開いている。
- 新しいサイエンスを生み出すには、新しい技術がいる。
それは自分自身で開拓しなければならない。
- これから宇宙探查が黄金期を迎えます。
皆さんの手で新しい世界を切り開いてください。