

# PRESENTATION

## ゲージ場のつくる原始重力波

藤田智弘 (京大 天体核)

arXiv:1411.3658, 1608.04216, 1705.01533, 1707.03023,  
1707.03240, 1801.02778, 1802.09284

w/ J.Yokoyama(Tokyo) & S.Yokoyama(Rikkyo); Dimastrogiovanni(CWRU) &  
Fasiello(ICG); Namba(McGill)&Tada(IAP); Agrawal&Komatsu (MPA);  
Thone(Oxford),Hazumi(KEK),Katayama(IPMU),Komatsu(MPA)&Shiraishi(Kagawa);  
Obata, Tanaka(Kyoto) & S.Yokoyama(Rikkyo);  
Agrawal&Komatsu (MPA);



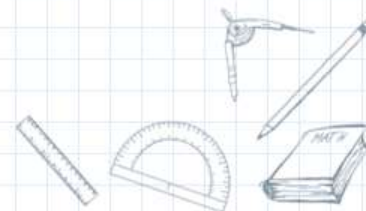
京都大学  
KYOTO UNIVERSITY

4<sup>th</sup>/March/2018 @若手研究会



# Plan of talk

- ① ざっくり何やってるか (5分)
- ② 何故やってるのか (30分)
- ③ ちょっと詳しい話 (5分)



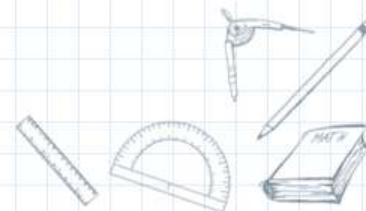


# Plan of talk

① ざっくり何やってるか(5分)

② 何故やってるのか(30分)

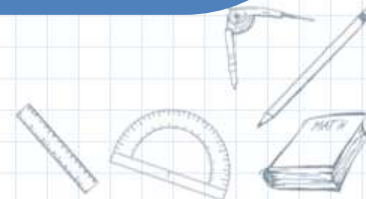
③ ちょっと詳しい話(5分)





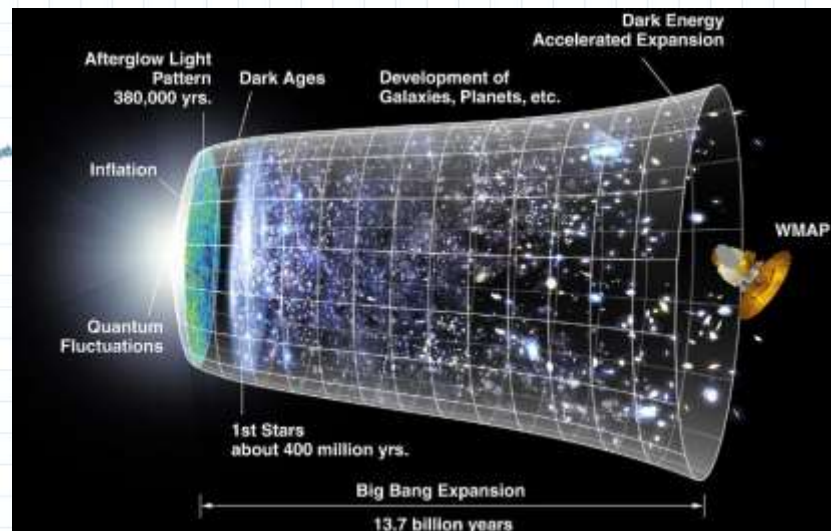
何やってるか

インフレーション中に重力波が生成  
される新しいメカニズムを調べている





# Inflation



- Inflation :  $H \equiv \dot{a}/a \approx \text{const} \longrightarrow a(t) \propto e^{Ht}$

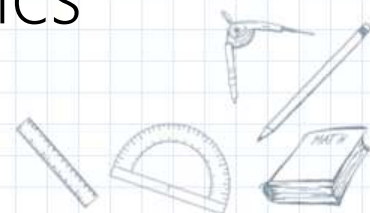
Accelerating expansion era in primordial universe.

- It generates fluctuations seen in CMB/LSS

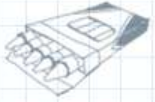
Perturbations of all the light fields are produced.

- Mechanism is unknown = New physics

$\rho_{\text{inf}}$  = energy scale of BSM physics.



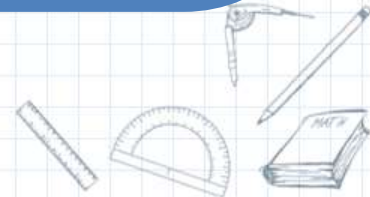




何やってるか

インフレーション中に重力波が生成  
される新しいメカニズムを調べている

ってことは古いメカニズムがある....





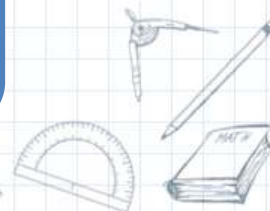
# Vacuum fluctuation

- Inflation generates fluctuations from vacuum

$$\left[ \partial_\tau^2 + k^2 - \frac{2}{\tau^2} \right] ah_k = 0, \quad ah_k = \frac{2}{\sqrt{2k}} \frac{e^{-ik\tau}}{M_{Pl}}.$$

- $\delta\phi$  &  $M_{Pl}h_{ij}$  are produced with amplitude  $\mathcal{O}(H_{\text{inf}})$  because  $H_{\text{inf}}$  is the only dimensionful quantity.

$$\mathcal{P}_h^{\text{vac}} = \frac{2H_{\text{inf}}^2}{\pi^2 M_{Pl}^2} \longrightarrow r \equiv \frac{\mathcal{P}_h}{\mathcal{P}_\zeta} \propto H_{\text{inf}}^2$$

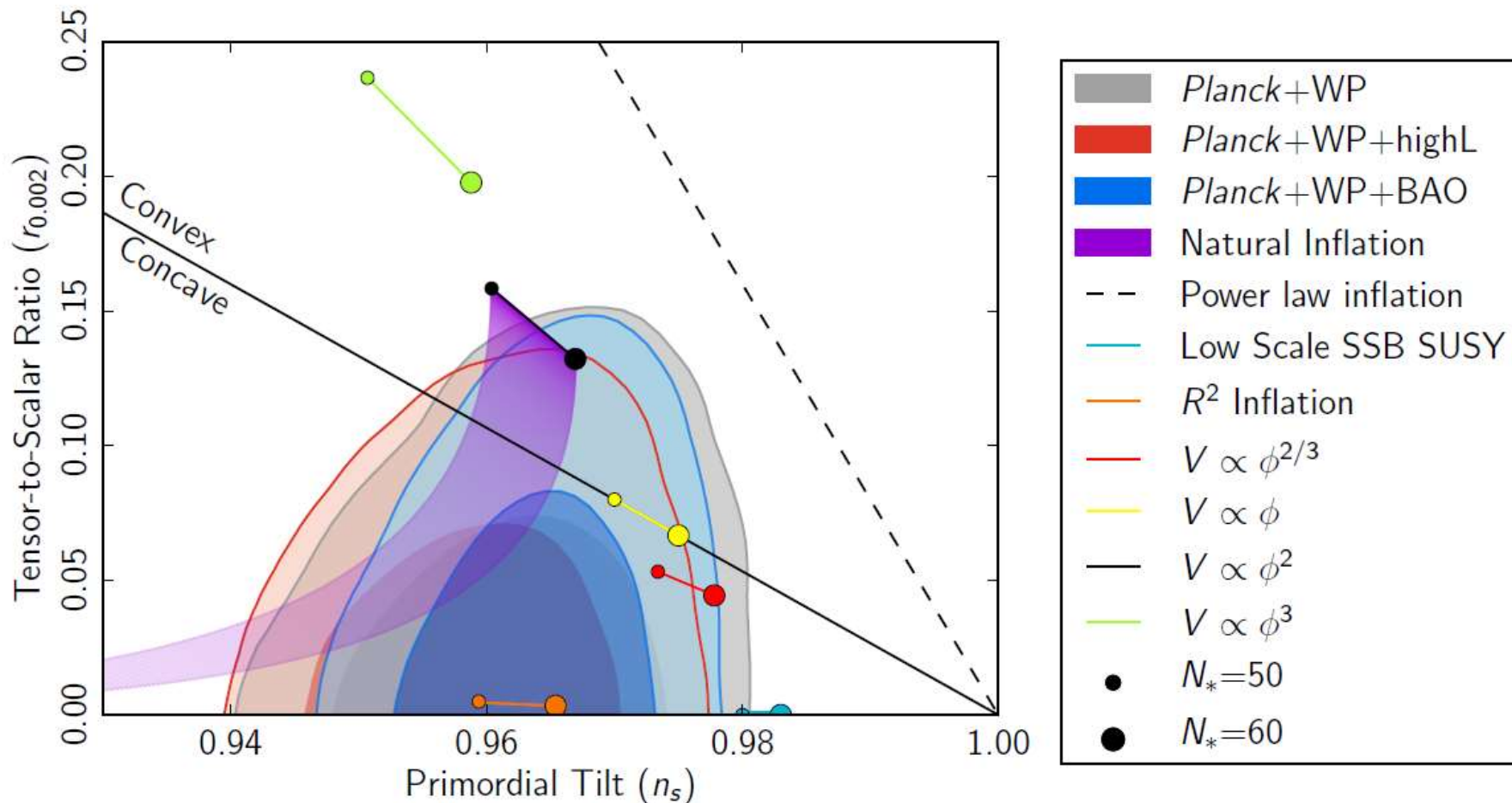




# introduction



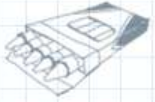
## PRESENTATION







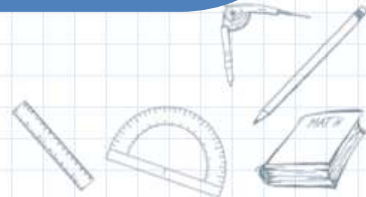
# Message




PRESENTATION

何やってるか

ここまでは教科書に載ってる話



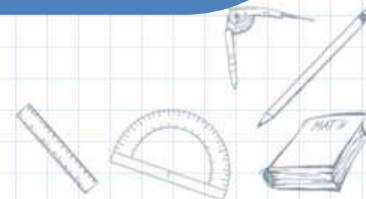
A young child with short hair, wearing a yellow and grey striped shirt, is looking down with a thoughtful expression. The child is standing in front of a wooden structure. A large white speech bubble with a blue border is overlaid on the left side of the image, containing Japanese text. The background is slightly blurred, showing more of the wooden structure and some greenery.

なんか新しい  
ことないの？



何やってるか

インフレーション中に重力波が生成  
される新しいメカニズムを調べている





## PRESENTATION

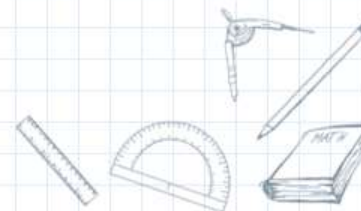
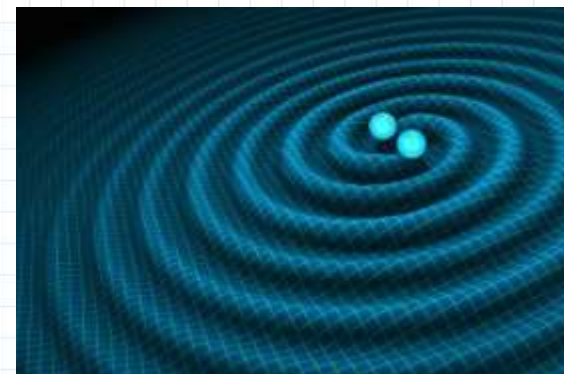
真空揺らぎ重力波は無から作られる



観測された重力波は物質(BH,NS)から作られる



インフレーション中にも  
物質由来の重力波はないのか？

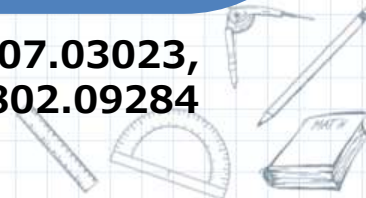




## 結論

インフレ中にゲージ場があれば  
大きな重力波が生成されうる！

arXiv:1411.3658, 1608.04216, 1705.01533, 1707.03023,  
1707.03240, 1801.02778, 1802.09284







# Our scenario

GW version of **Curvaton** mechanism

[Enqvist&Sloth(2002),  
Lyth&Wands(2002),  
Moroi&Takahashi(2002)]

$$\mathcal{L}_{\text{inflaton}} + \mathcal{L}_{\text{spectator}}$$

$$\rho_{\text{inf}} \gg$$

$$\rho_{\text{spec}}$$



$$\mathcal{P}_{\text{GW}}^{\text{vac}} \ll$$

$$\mathcal{P}_{\text{GW}}^{\text{spec}}$$

$\mathcal{L}_{\text{inf}}$  is arbitrary and responsible for  $\zeta$  generation.

$\mathcal{L}_{\text{spec}}$  is added just to produce GW during inf.





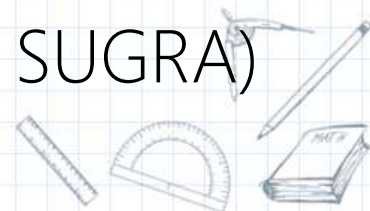
# How's it work?

Adding **axion-SU(2)** gauge spectator sector

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & \mathcal{L}_{\text{inflaton}} \\ & + \frac{1}{2} (\partial\chi)^2 - \mu^4 \left( \cos \frac{\chi}{f} + 1 \right) \\ & - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} - \frac{\lambda}{4f} \chi F_{\mu\nu}^a \tilde{F}^{a\mu\nu}\end{aligned}$$

Very **well motivated terms** in HEP (e.g. String, SUGRA)

[cf. Chromo-natural inflation: Adshead&Wyman(2012)]





# How's it work?

Adding axion-SU(2) gauge spectator sector

$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{inflaton}}$  Inflaton sector

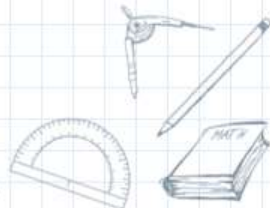
$\longrightarrow \mathcal{P}_\zeta$

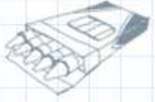
Decoupled

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{2} (\partial\chi)^2 - U(\chi) \\
 & - \frac{1}{4} FF - \frac{\lambda}{4f} \chi F \tilde{F}
 \end{aligned}$$

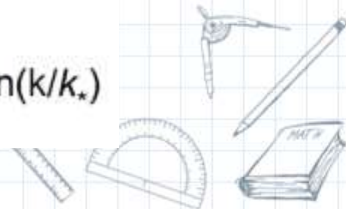
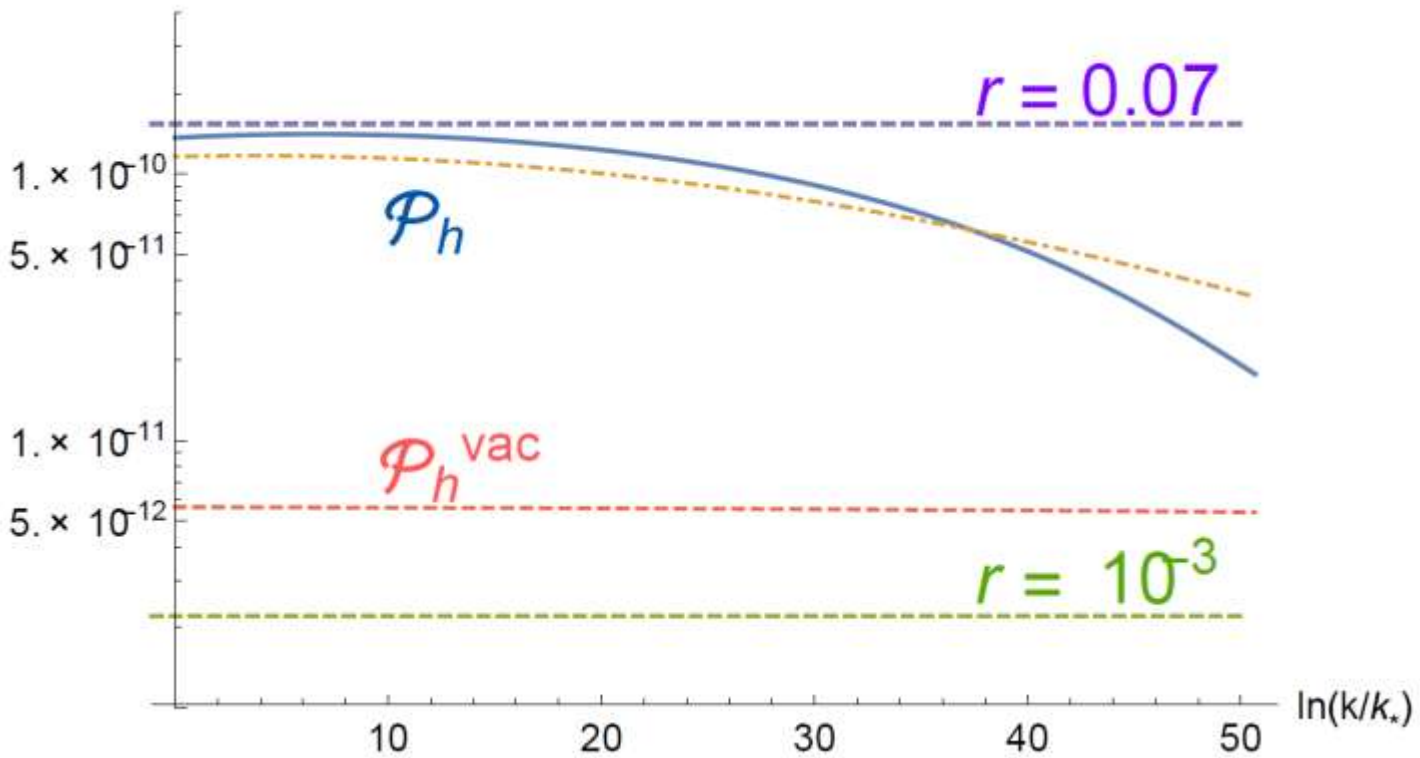
$\longrightarrow \mathcal{P}_{\text{GW}}^{\text{spec}}$

Axion- SU(2) gauge spectator sector



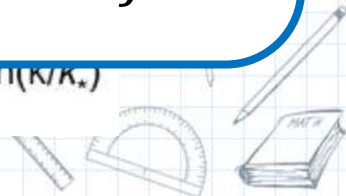
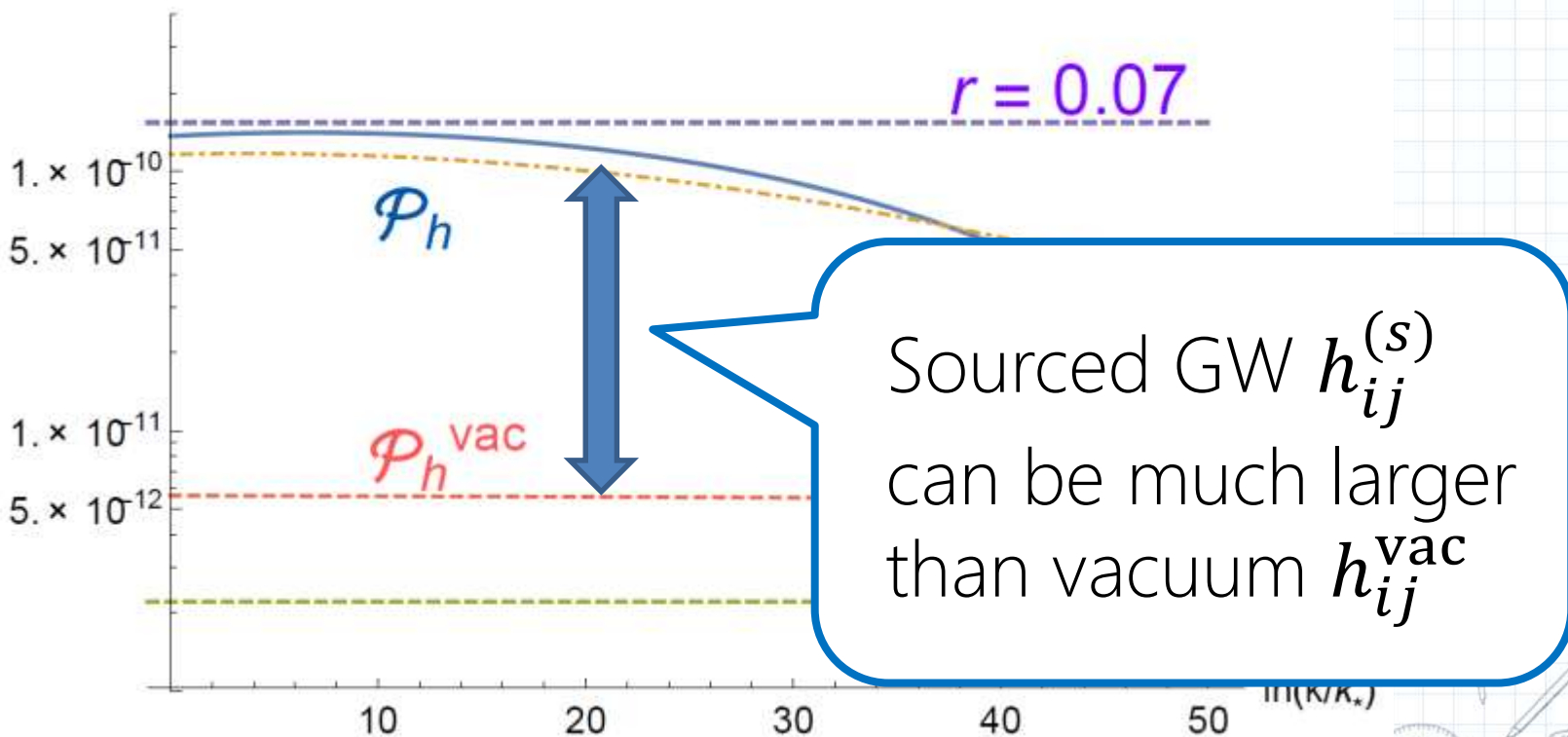


# Result





# Result





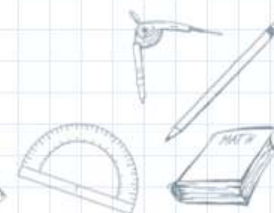
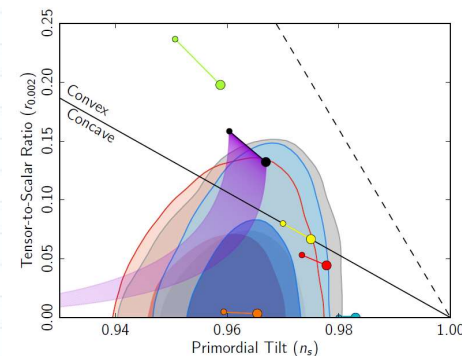


# Axion-SU(2) model

- Larger GW than  $h^{\text{vac}}$  can be produced

$$h_{\text{obs}} = h_{\text{vac}} + h_{\text{mat}}$$

- Distinguishable w/
  - Polarization  $h_R \neq h_L$
  - Non-Gaussianity  $\langle hhh \rangle$
  - Tensor tilt  $n_t$





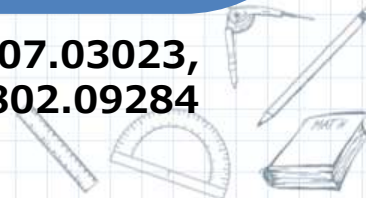
### まとめ

初期重力波で何か新しいことないか探してたら

「**ゲージ場**がいれば大きな**重力波**が**生成**されうる」

ということを見つけた。観測的にも面白い！

arXiv:1411.3658, 1608.04216, 1705.01533, 1707.03023,  
1707.03240, 1801.02778, 1802.09284



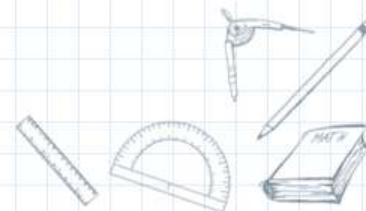


# Plan of talk

① ざっくり何やってるか (5分)

② 何故やってるのか (30分)

③ ちょっと詳しい話 (5分)





# 言い訳の-slide

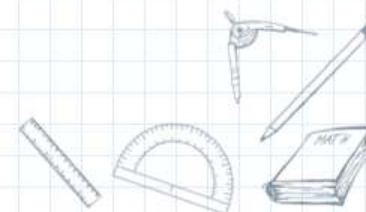


PRESENTATION

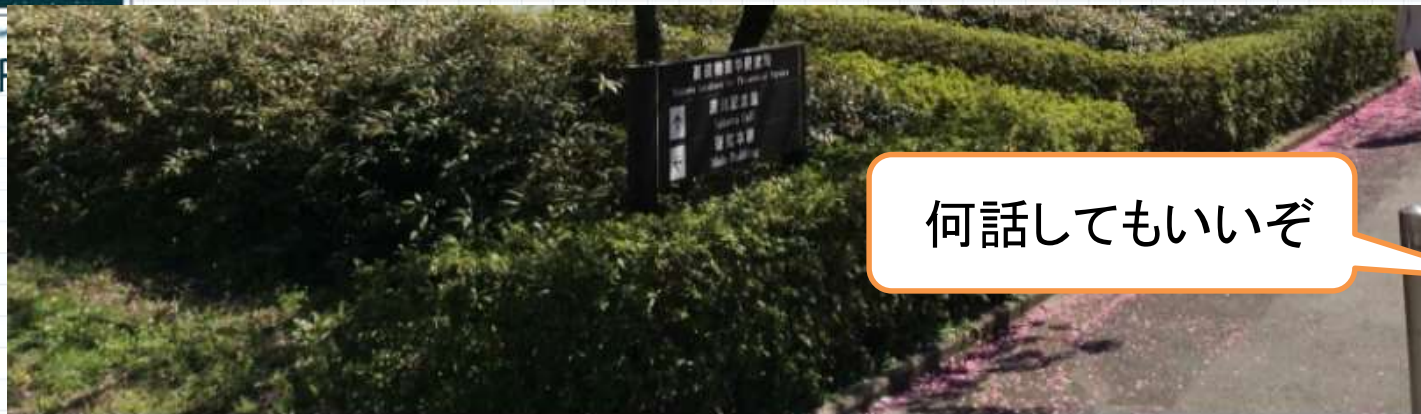
何話してもいいぞ



K. Yamada



# 言い訳のライド



何話してもいいぞ



K. Yamada

## 概要

これまでに地上重力波望遠鏡による6例のブラックホールや中性子星等のコンパクト天体から成る連星から放出された重力波の直接検出が報告されている。この重力波天文学の開闢を以って、ついに重力波を通じた重力理論の検証・探求の時代が到来した。近い将来には、宇宙重力波望遠鏡 (DECIGO, LISA) やSKA などのパルサータイミングアレイ、あるいは宇宙背景放射のBモード偏光を介して、様々な周波数帯における重力波を捉えることが期待される。

このように新たな観測時代において、理論物理学の観点から既存の枠組みにとらわれることなく新たな研究の方向性を開拓していくことが望まれる。そこで、日本の若手研究者が主導し、長期的な視野を持って今後の分野の発展を議論する研究会を設ける。

## 日程


2018年3月3日 (土) ~4日 (日)

## 会場

京都大学基礎物理学研究所 研究棟会議室K206 [\[地図\]](#)







長期的な視野を持って  
今後の分野の発展を  
議論しなきゃ！！！！



PRESENTATION

# 3つの視点

① Physicistとして

② Cosmologistとして

③ GWistとして

E. Komatsu



Big pictureが大切



PRESENTATION

# 3つの視点

① Physicistとして

② Cosmologistとして

③ GWistとして

E. Komatsu



Big pictureが大切



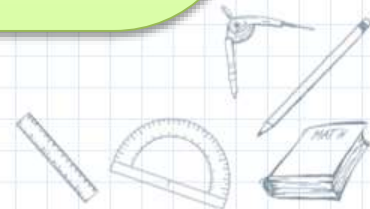
## 物理学の未解決問題

### 理論によって説明されていない未解明の現象

- 加速膨張する宇宙
- バリオン非対称性
- 宇宙定数
- 銀河の回転曲線問題
- ガンマ線バースト
- 高エネルギー宇宙線
- ニュートリノ質量

### 自然において確認されていない問い・予測

- アクシオン
- 宇宙のインフレーション
- 余分な次元
- 超光速
- 磁気単極子
- 量子重力
- 超対称性





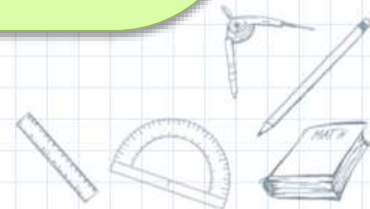
## 物理学の未解決問題

### 理論によって説明されていない未解明の現象

- **加速膨張する宇宙**
- **バリオン非対称性**
- 宇宙定数
- **銀河の回転曲線問題**
- ガンマ線バースト
- 高エネルギー宇宙線
- **ニュートリノ質量**

### 自然において確認されていない問い・予測

- **アクシオン**
- **宇宙のインフレーション**
- 余分な次元
- 超光速
- **磁気単極子**
- **量子重力**
- **超対称性**







## 物理学の未解決問題

### 理論によって説明されていない未解明の現象

- **加速膨張する宇宙**
- **バリオン非対称性**
- 宇宙定数
- **銀河の回転曲線問題**
- ガンマ線バースト
- 高エネルギー宇宙線
- **ニュートリノ質量**

### 自然において確認されていない問い・予測

- **アクシオン**
- **宇宙のインフレーション**
- 余分な次元
- 超光速
- **磁気単極子**
- **量子重力**
- **超対称性**

素粒子物理学に関係の深い問題が多い

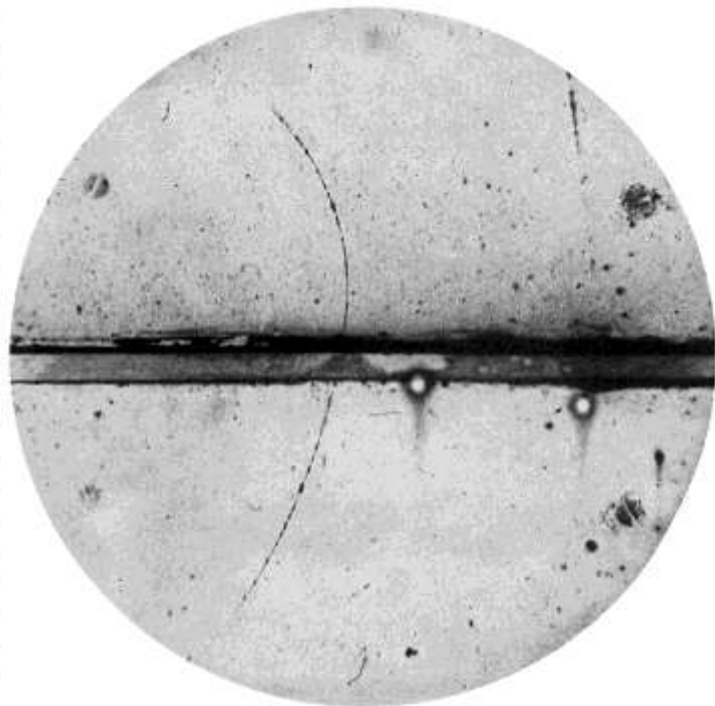




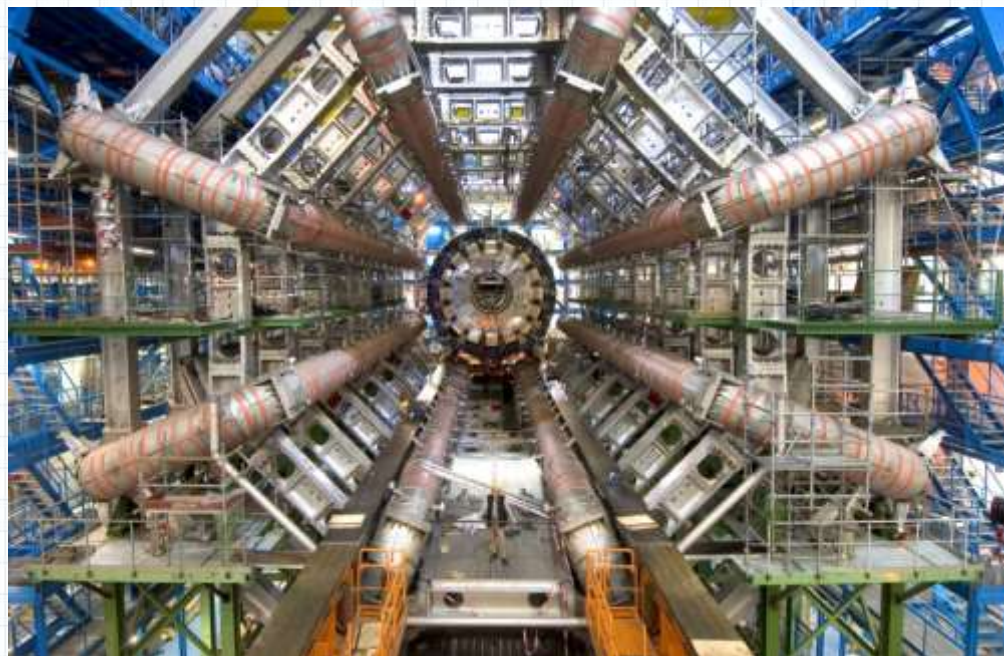
# 素粒子物理の歴史 = 新粒子発見の歴史



PRESENTATION



古くは宇宙線を、最近は加速器によって作り出した粒子を検出することにより、新粒子を発見してきた





# 素粒子標準模型 = 一つの到達点



PRESE

## 物質粒子 matter (fermions)

## ゲージ粒子 gauge bosons

クォーク  
quarks

レプトン  
leptons

	I	II	III
クォーク (quarks)	up	charm	top
	down	strange	bottom
レプトン (leptons)	electron	muon	tau
	electron neutrino	muon neutrino	tau neutrino

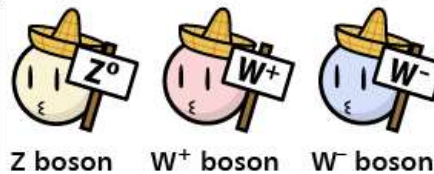
電磁気力  
electromagnetic



強い力  
strong



弱い力  
weak



## ヒッグス粒子 Higgs bosons



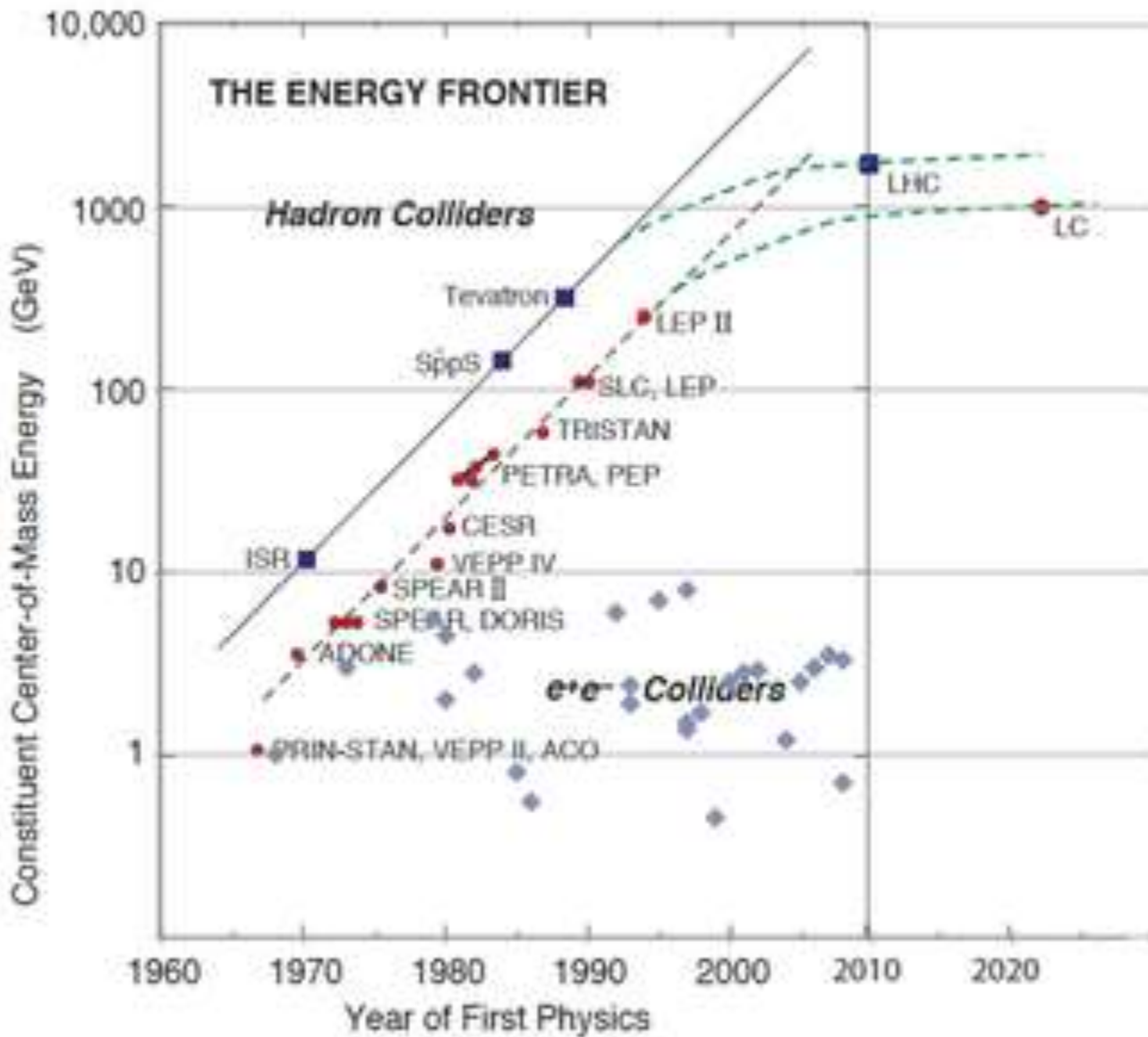




# 加速器の限界



PRESENTATIC

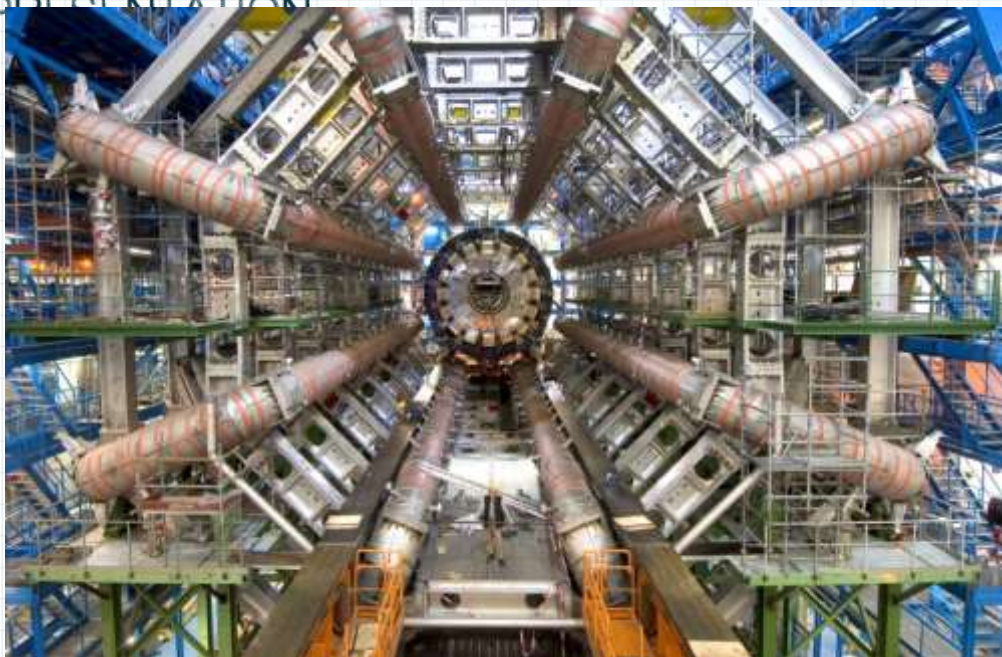




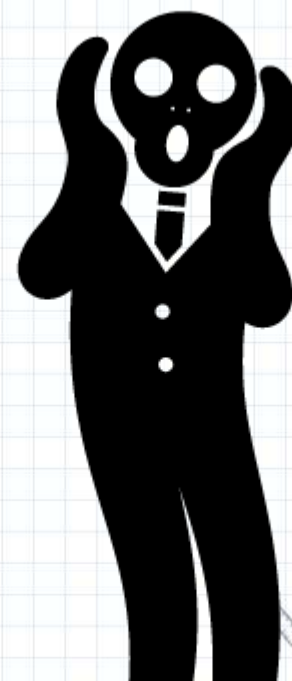
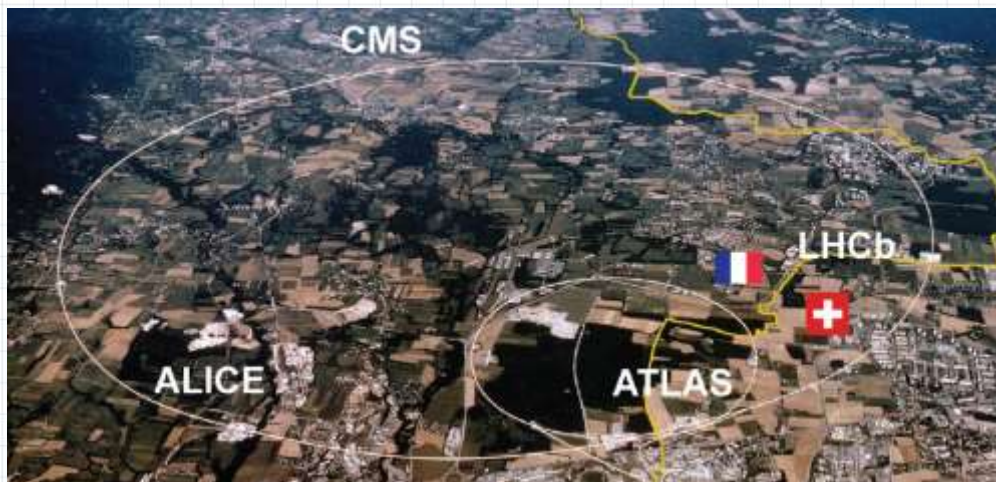
# 加速器の限界 2



PRESENTATION



LCHでも  
標準模型を超える新粒子  
は見つかっていない







# 新しい目としての重力波





### 初期重力波観測＝新しい加速器？

#### 粒子加速器



#### 重力波観測

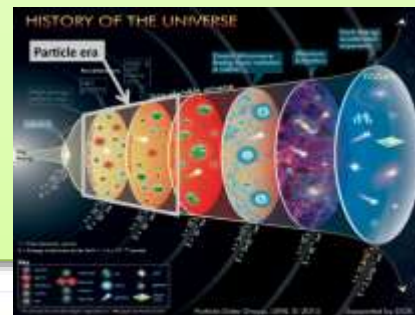
Accelerates particles and produces new ones.

Limited by reachable energy scale for human



Observe PGW from high energy matter existed in early universe.

Limited by highest energy realized in cosmic history.



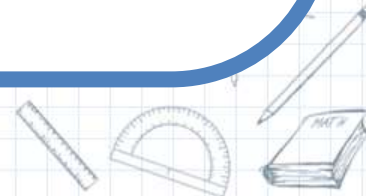


### 具体的にどうするか

初期宇宙に未知の物質(粒子)が存在すると仮定  
粒子ごとに放出する原始重力波の特徴が異なる



重力波と粒子の対応関係が分かっているならば、  
重力波を観測することで新粒子探索が可能！



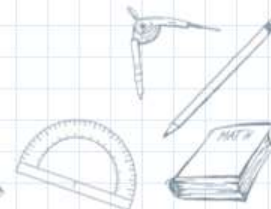
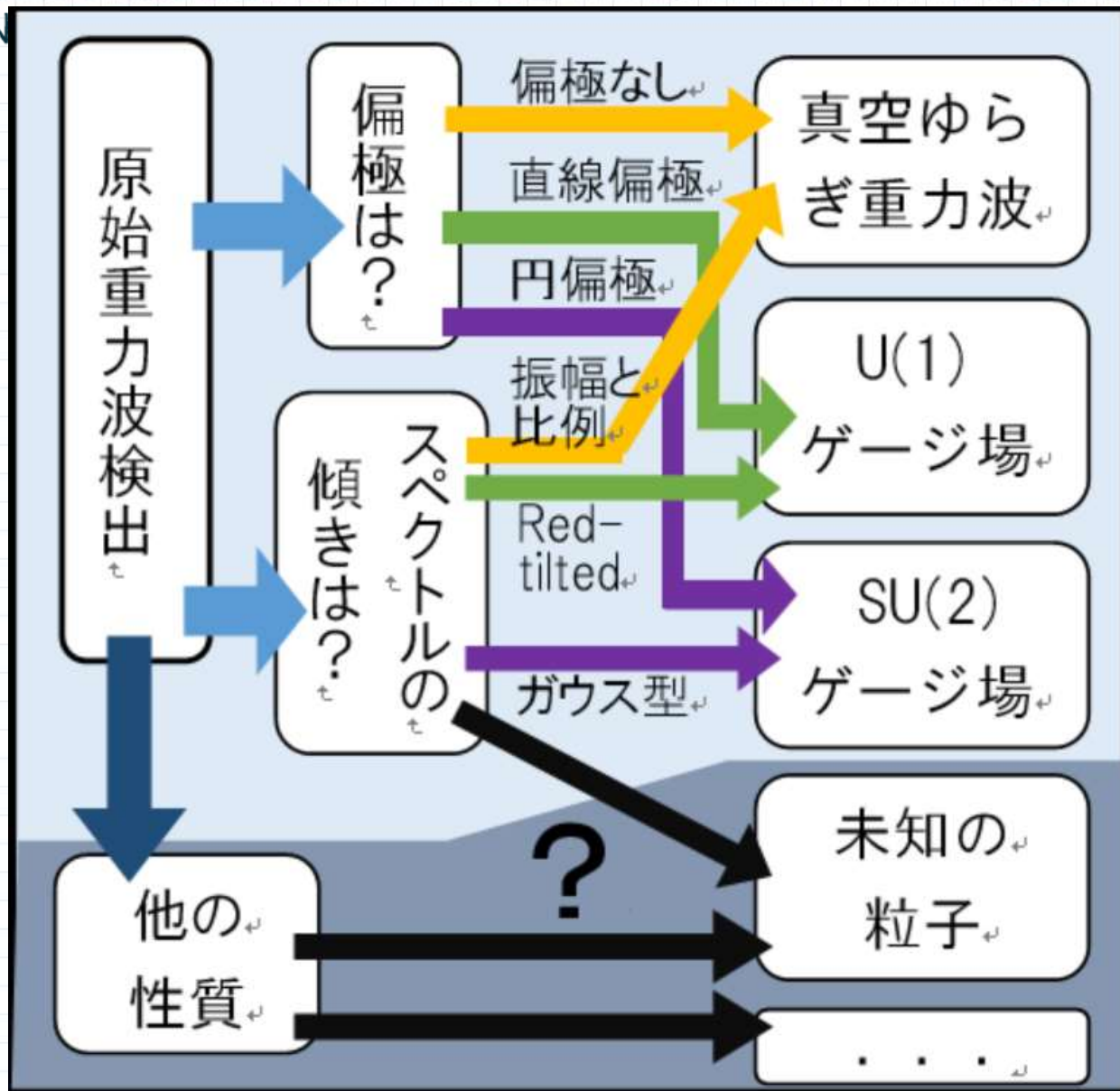


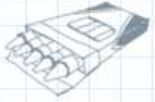


# 新しい目としての重力波 3



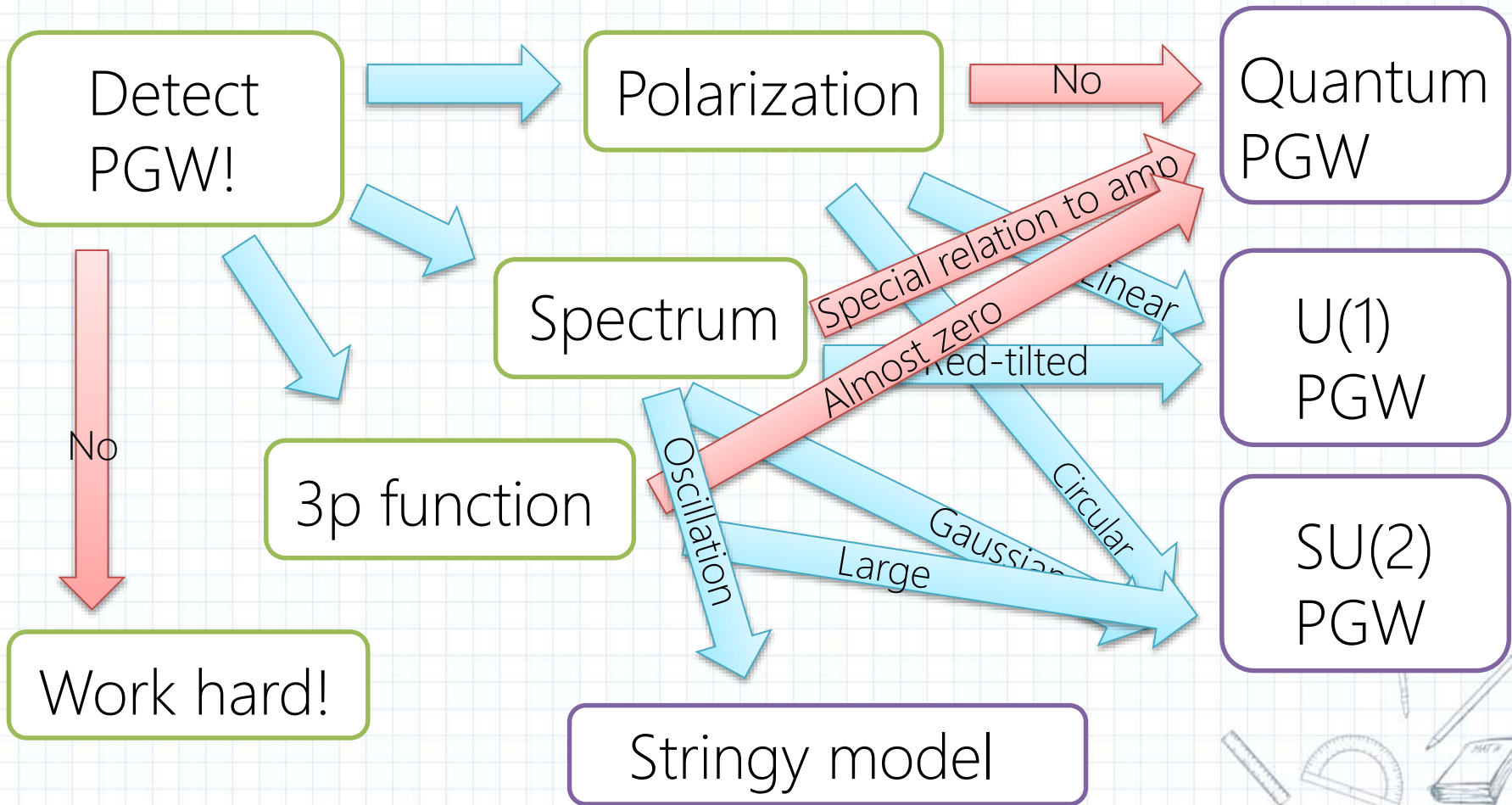
PRESENTATION





PRESENTATION

# PGW as new particle probe

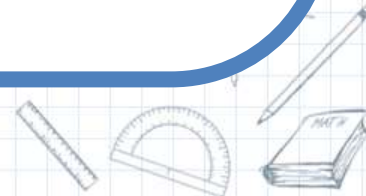






## 原始重力波の重要性

原始重力波を通じて新粒子探索を行うことで、  
宇宙論のみならず素粒子物理学の発展に寄与し  
未解決問題の解消に繋がる可能性がある





PRESENTATION

# 3つの視点

① Physicistとして

② Cosmologistとして

③ GWistとして

E. Komatsu

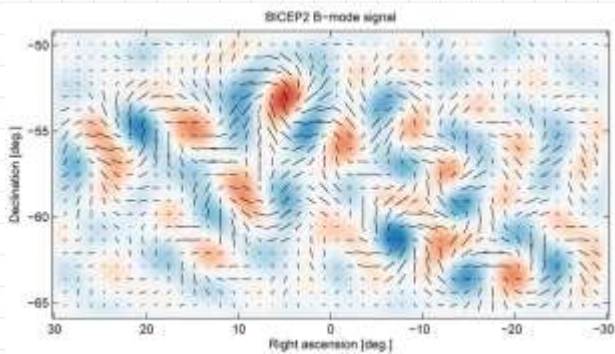


Big pictureが大切

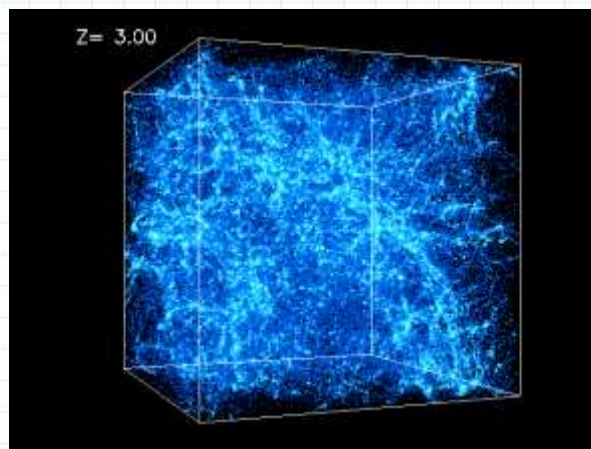


PRESENTATION

# 3つの大きなトピック



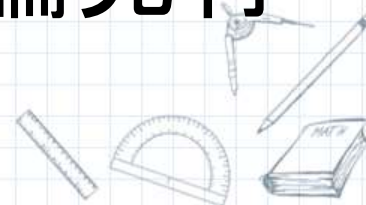
**CMB偏光**



**大規模構造**

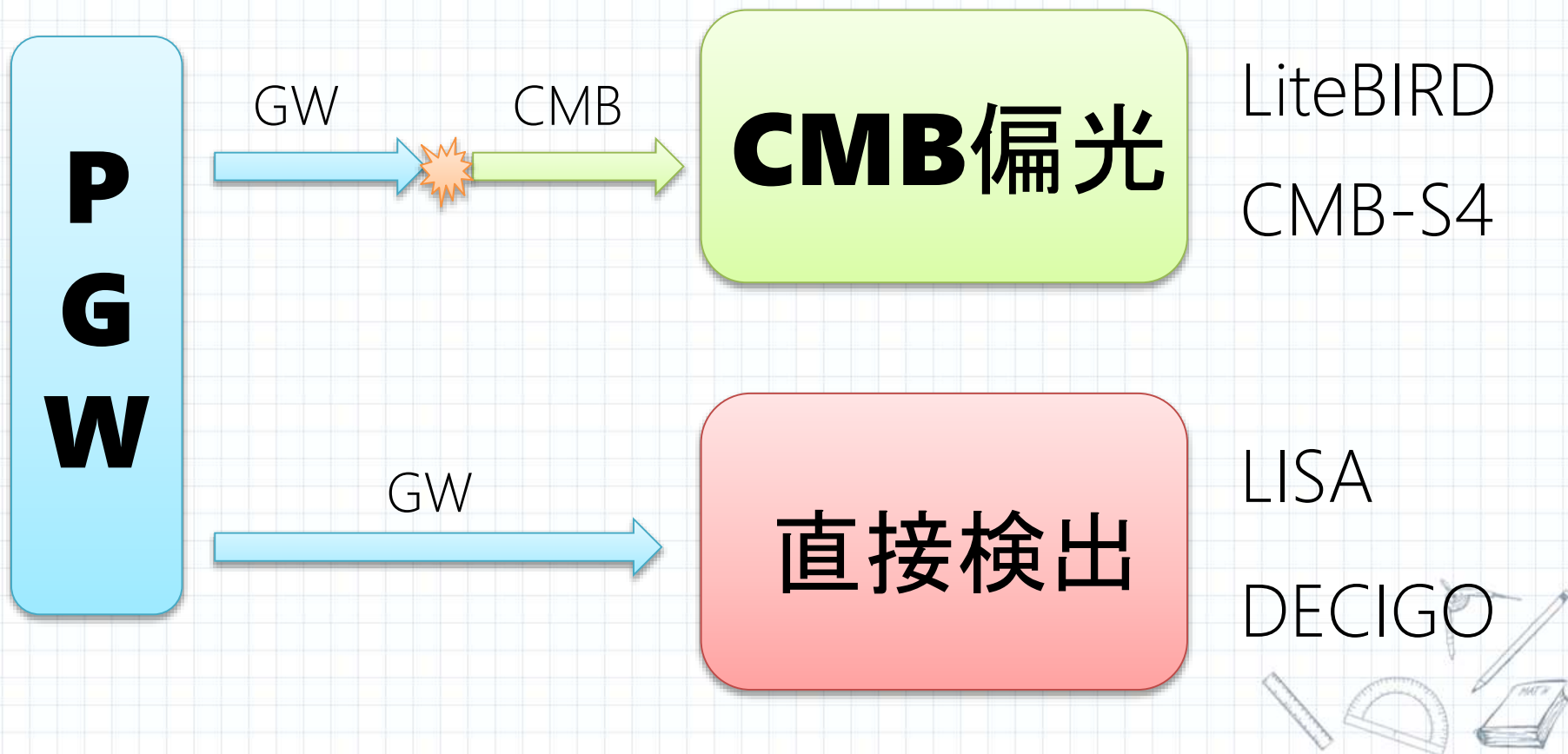


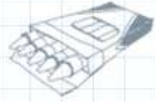
**理論先行**





# CMB偏光で原始重力波が見える

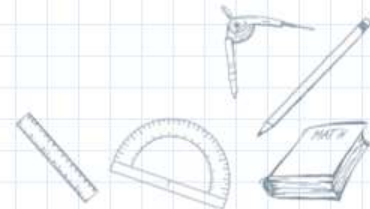




# LiteBIRD



- CMB satellite mission
- Will be launched in 2026
- Aims to detect  $r \geq 10^{-3}$

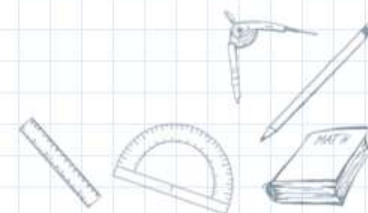






# CMB-S4

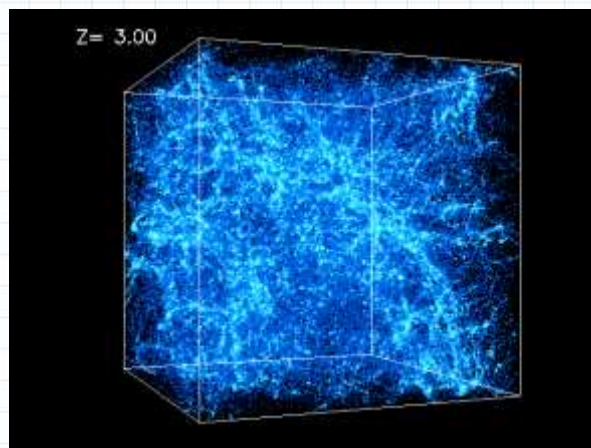
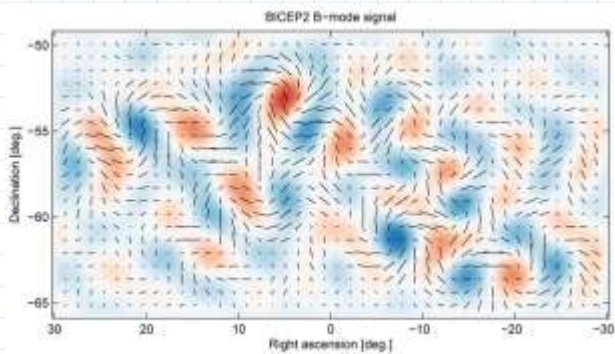
- Ground-base mission
- Completed in 2020s(?)
- Aims to detect  $r \geq 10^{-3}$





PRESENTATION

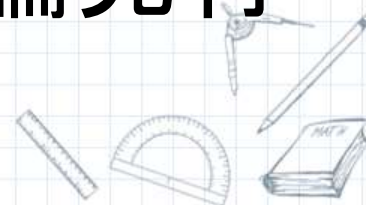
# 3つの大きなトピック



**CMB**偏光

大規模構造

理論先行



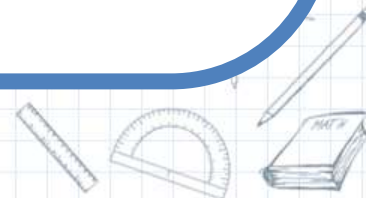


## ざっくりLSSとは？

Inflation, CMBから密度揺らぎの初期条件は分かる

DMの密度揺らぎ $\delta$ の発展を解き、 $P_{\delta\delta}$ 等を計算

観測で見える銀河分布等と比べる (バイアスの不定性)





## ざっくりLSSとは？

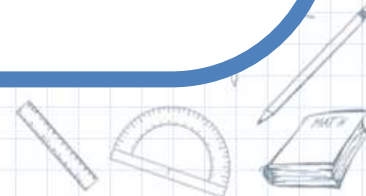
Inflation, CMBから密度揺らぎの初期条件は分かる

モデルによって初期条件が変わる

DMの密度揺らぎ $\delta$ の発展を解き、 $P_{\delta\delta}$ 等を計算

宇宙膨張史, 重力理論によって発展が変わる

観測で見える銀河分布等と比べる (バイアスの不定性)





# 沢山のサーベイ計画

かつてない観測データが得られることは間違いない

ただし、それによって宇宙論が進展するかは別問題...





Fight against

# Nonlinearity

---

©Dark Sky Simulations

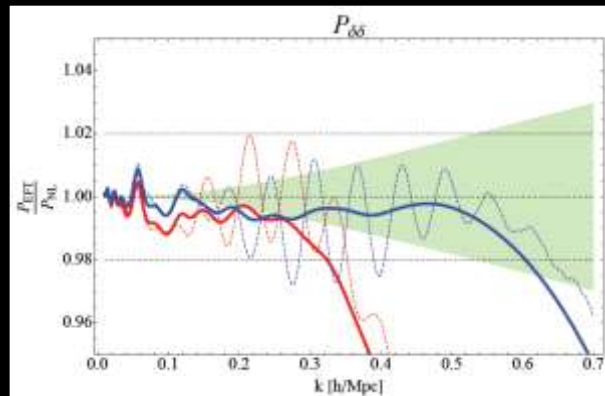
CMB: OK with  
linear pert.

LSS:  $\delta$  grows  
on small scale



**We need a theory to deal with Nonlinearity**

シミュレーション (N体とか)  
をやる気がなければ、非線形が効く  
小スケールはやめといた方がいい



例：  
EFTofLSS

かと言って大スケールの標準的な話はすでにやられている (SPT)

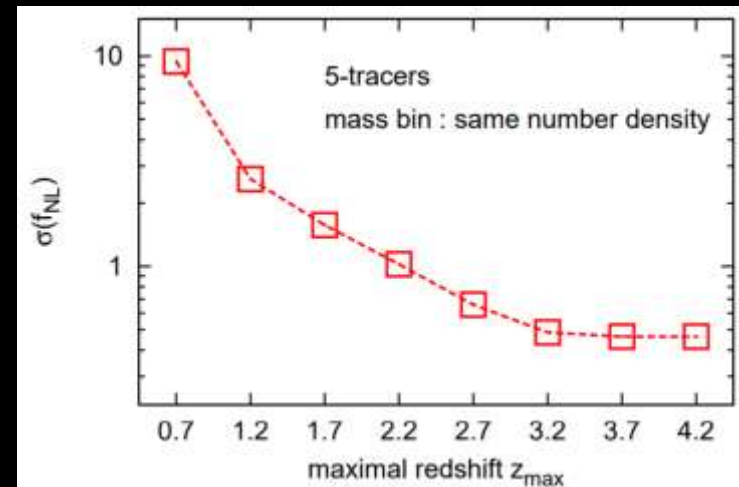
線形摂動の大規模構造

+ 何か新しい要素

を考えるのがCosmologistにはよさそう

+ 21cm線 by 山内さん

+ 修正重力 by 立教グループ

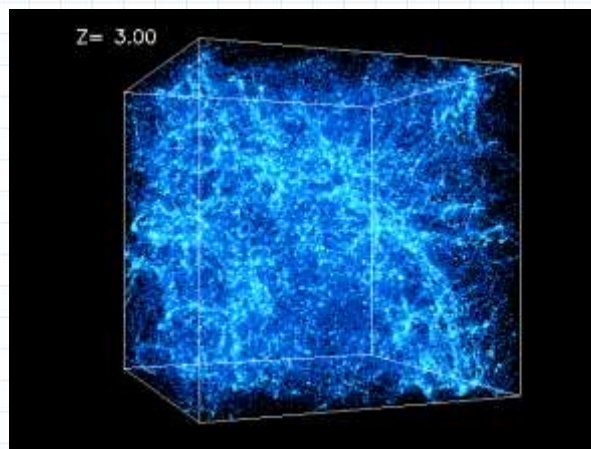
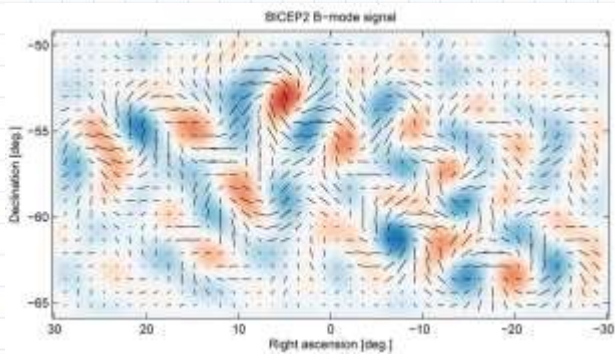


Yamauchi et al.[1407.5453]



PRESENTATION

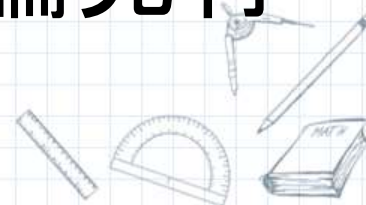
# 3つの大きなトピック



**CMB**偏光

大規模構造

理論先行

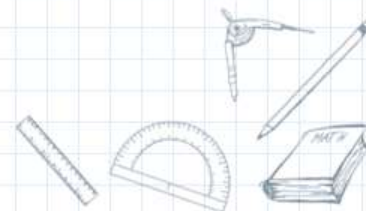






PRESENTATION

# 理論先行型の研究も大事！





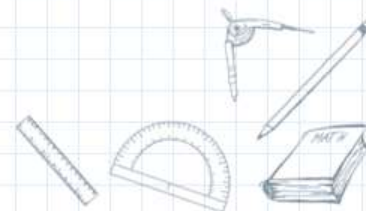
PRESENTATION

# 理論先行型の研究も大事！

楽しくなければ研究じゃない



職がなければ研究者じゃない





PRESENTATION

# 理論先行型の研究も大事！

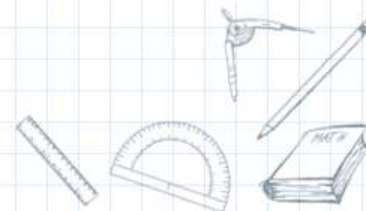
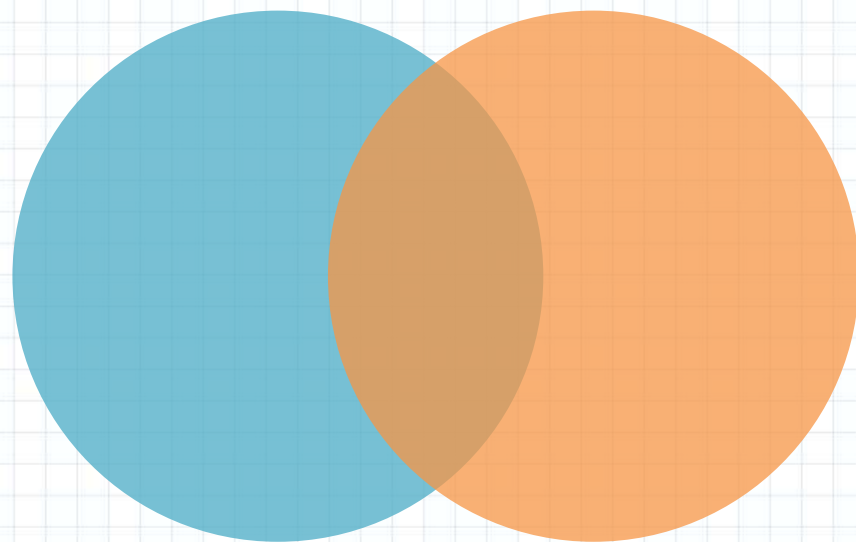
楽しくなければ研究じゃない



職がなければ研究者じゃない

理論

実験





PRESENTATION

# 理論先行型の研究も大事！

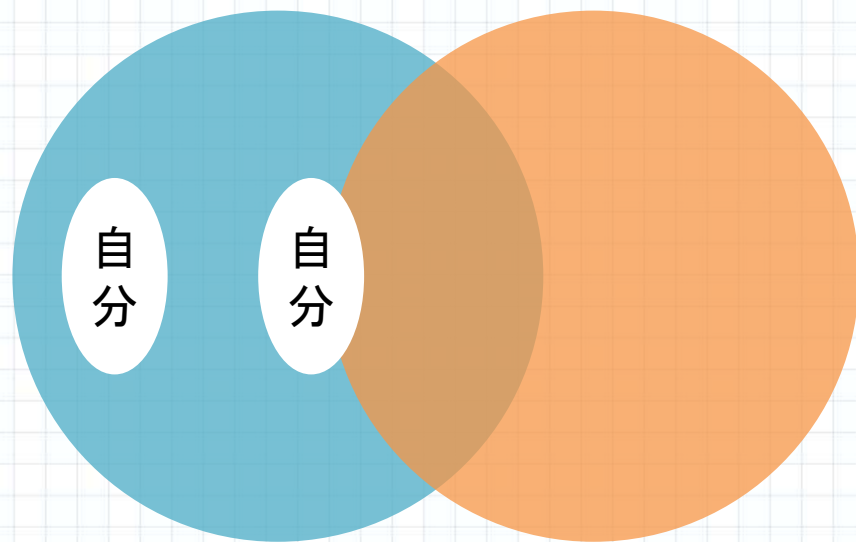
楽しくなければ研究じゃない



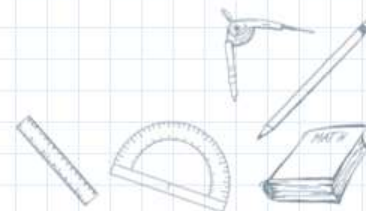
職がなければ研究者じゃない

理論

実験



2つの円は常に動いている。  
動静を見て自分の円を考える







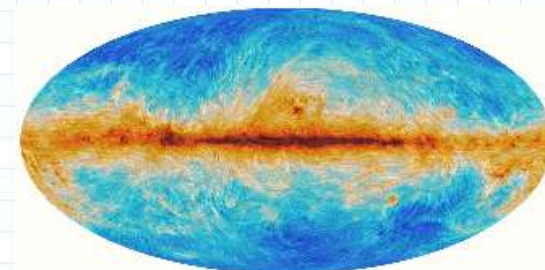
PRESENTATION

# その他の観測関連の宇宙論トピック

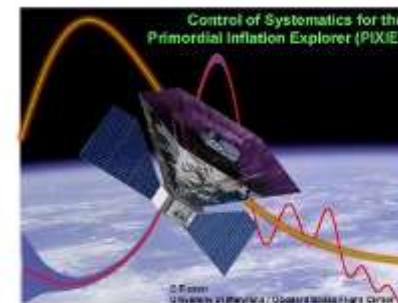
• **PBH** ← **BBH, SMBH**



• **磁場** ← **CTA, SKA**



• **CMB distorsion** ← **PIXIE**



• **etc...**



## Cosmologyのこれから

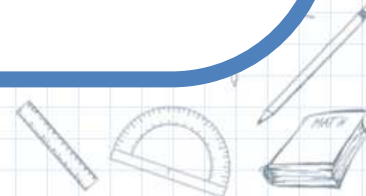
CMB偏光と大規模構造について大型実験が予定

CMB偏光 : PGW(B-mode)  $n_s$ 制限(E-mode)

大規模構造 : 線形理論 + 新要素がオススメ

他にも磁場とかPBHとか

あとは勿論、自分の好きな理論研究で開拓する！





PRESENTATION

# 3つの視点

① Physicistとして

② Cosmologistとして

③ GWistとして

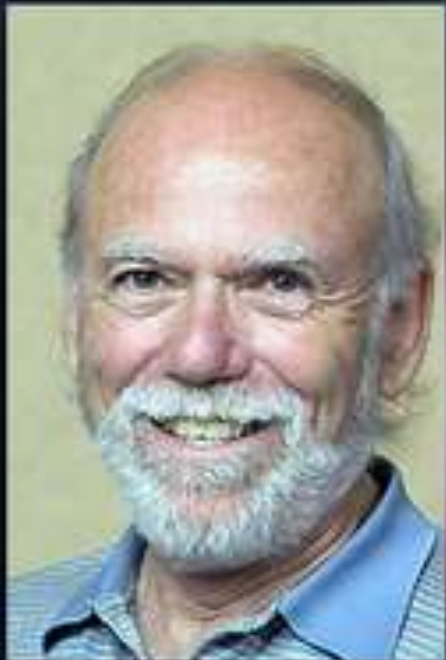
E. Komatsu



Big pictureが大切



# Gravitational waves



Barry C. Barish (Caltech)



Kip S. Thorne (Caltech)



Rainer Weiss (MIT)



## 2017 Nobel Prize in Physics





PRESENTATION

# 日本の3つの重力波実験



**KAGRA**

2020~



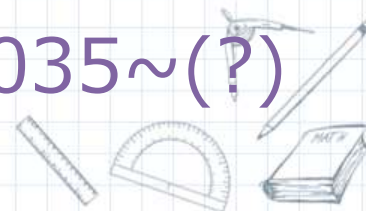
**LiteBIRD**

2026~



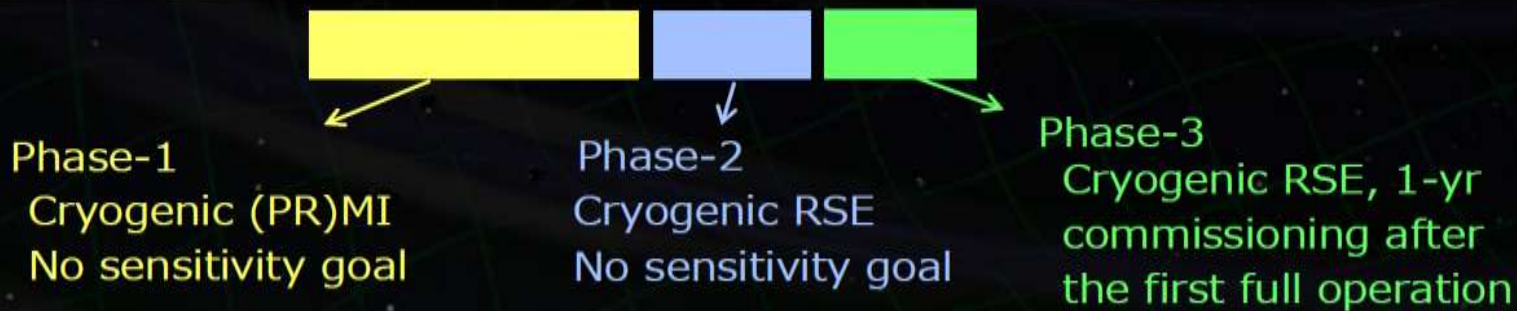
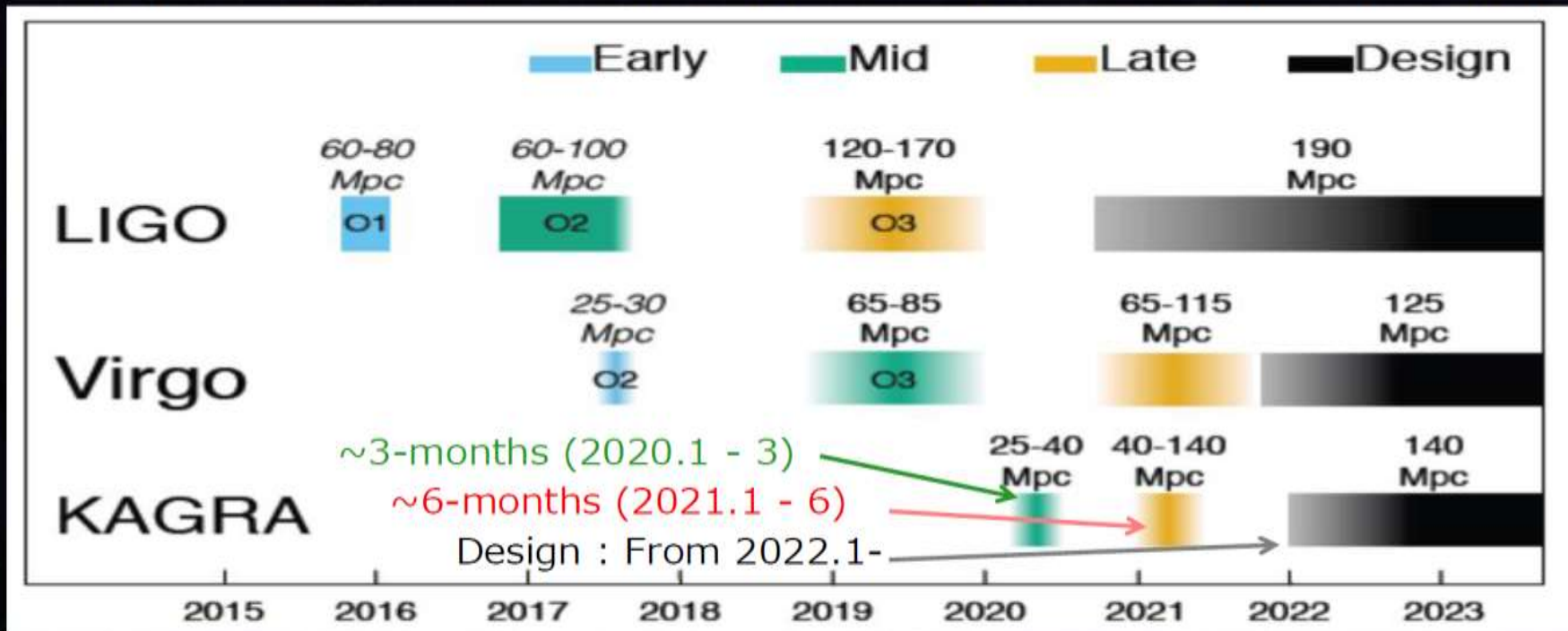
**DECIGO**

2035~(?)

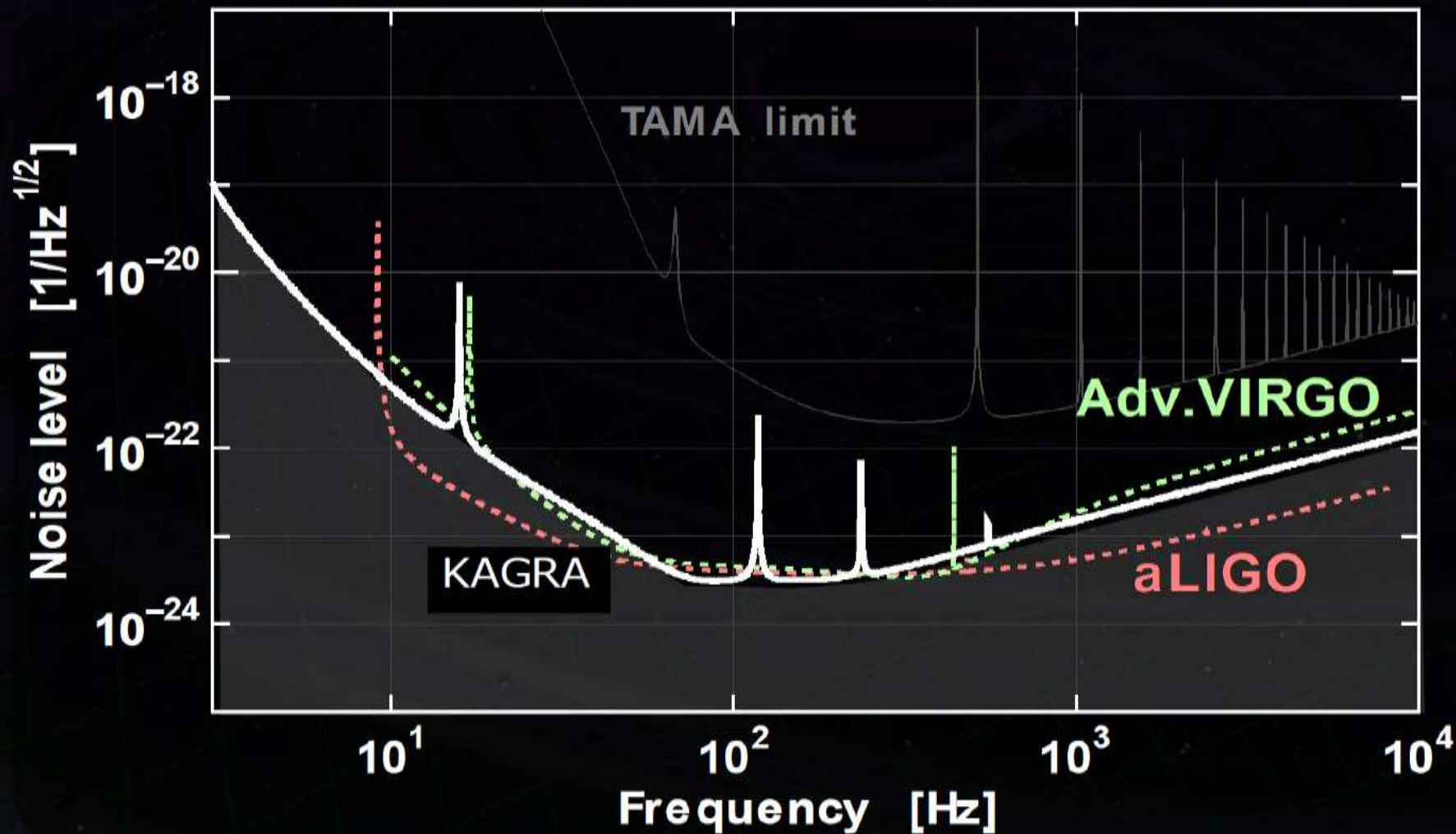


# Observation Scenario

KAGRA Collaboration, LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration: arXiv:1304.0670, Submitted to LLR (2017)



# Sensitivity Comparison



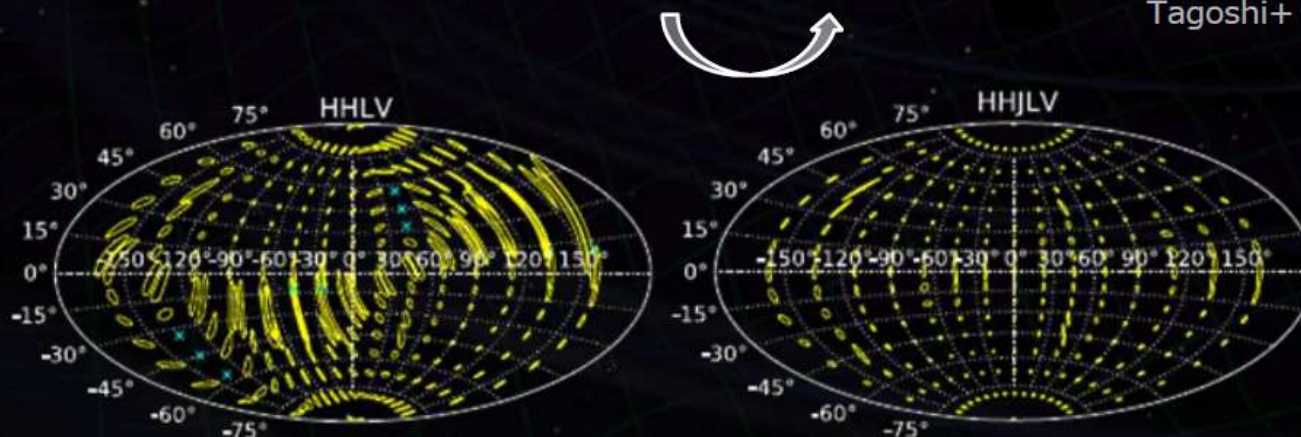


# 重力波源の方向特定精度

NS-NS coalescence @180Mpc (95%CI)		
(1.4,1.4)Msun	LHV	LHV <b>K</b>
median of $\delta\Omega$ [Deg <sup>2</sup> ]	30.25	9.5

H: LIGO--Hanford  
L: LIGO--Livingston  
V: Virgo,  
K: KAGRA  
I: LIGO-Indea

From presentation by H. Tagoshi  
J.Veitch+, PRD85, 104045 (2012)  
Tagoshi+ (2014)



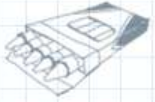
S.Fairhurst  
CQG 28(2011)  
105021

観測ネットワークに **KAGRA** が加わる (aLIGO + adv. VIRGO)

→ 角度分解能が 3-4 倍向上.

干渉計稼働率 80%程度 → 4台目以降の存在も非常に重要.





PRESENTATION

# 日本の3つの重力波実験



## KAGRA

2020~



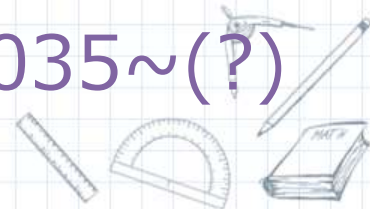
## LiteBIRD

2026~



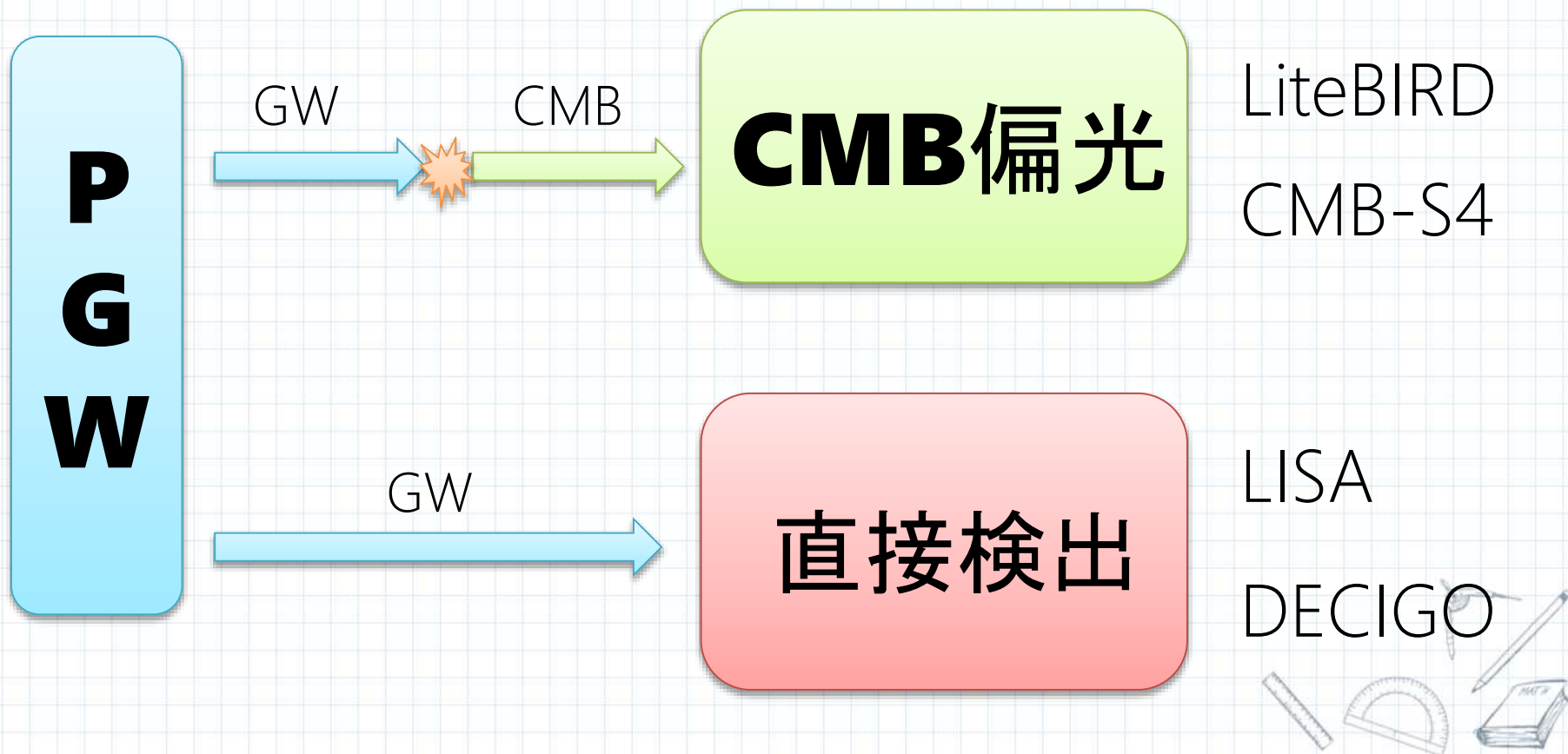
## DECIGO

2035~(?)





# CMB偏光で原始重力波が見える

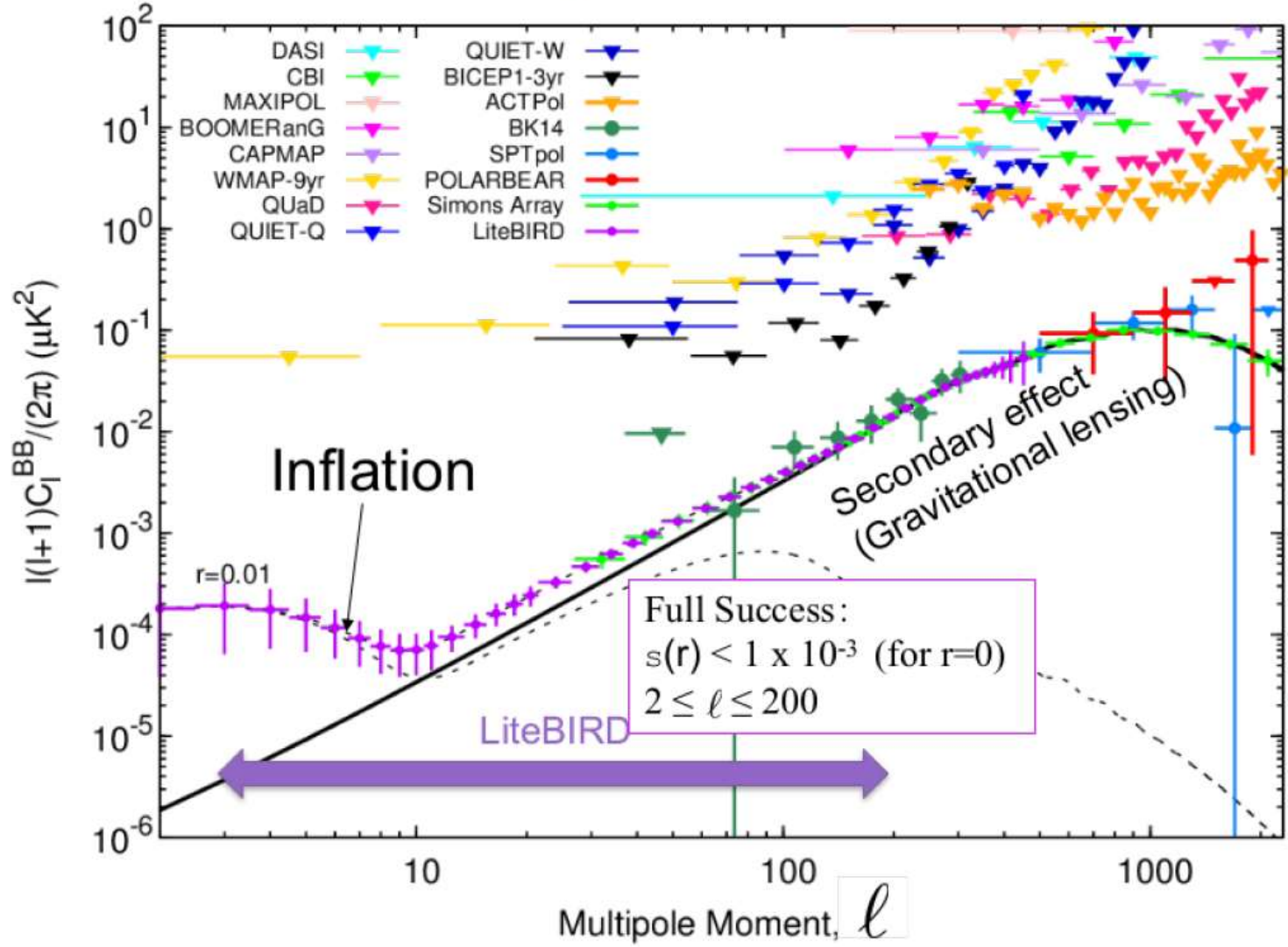


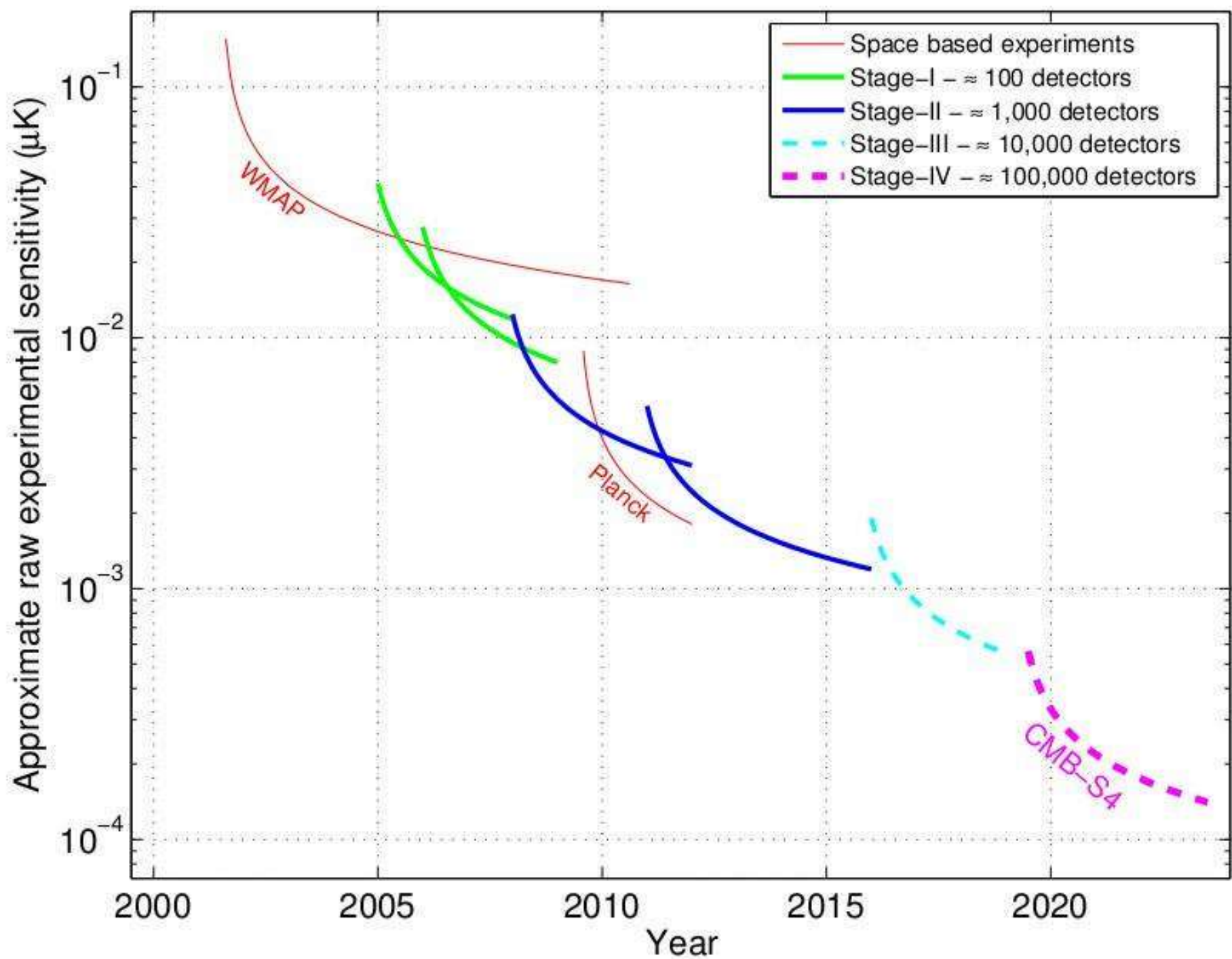


1. Project 2. Technology 3. Transient Search

# Mission Objective

Created by JEROME SOMMET from Noua Project

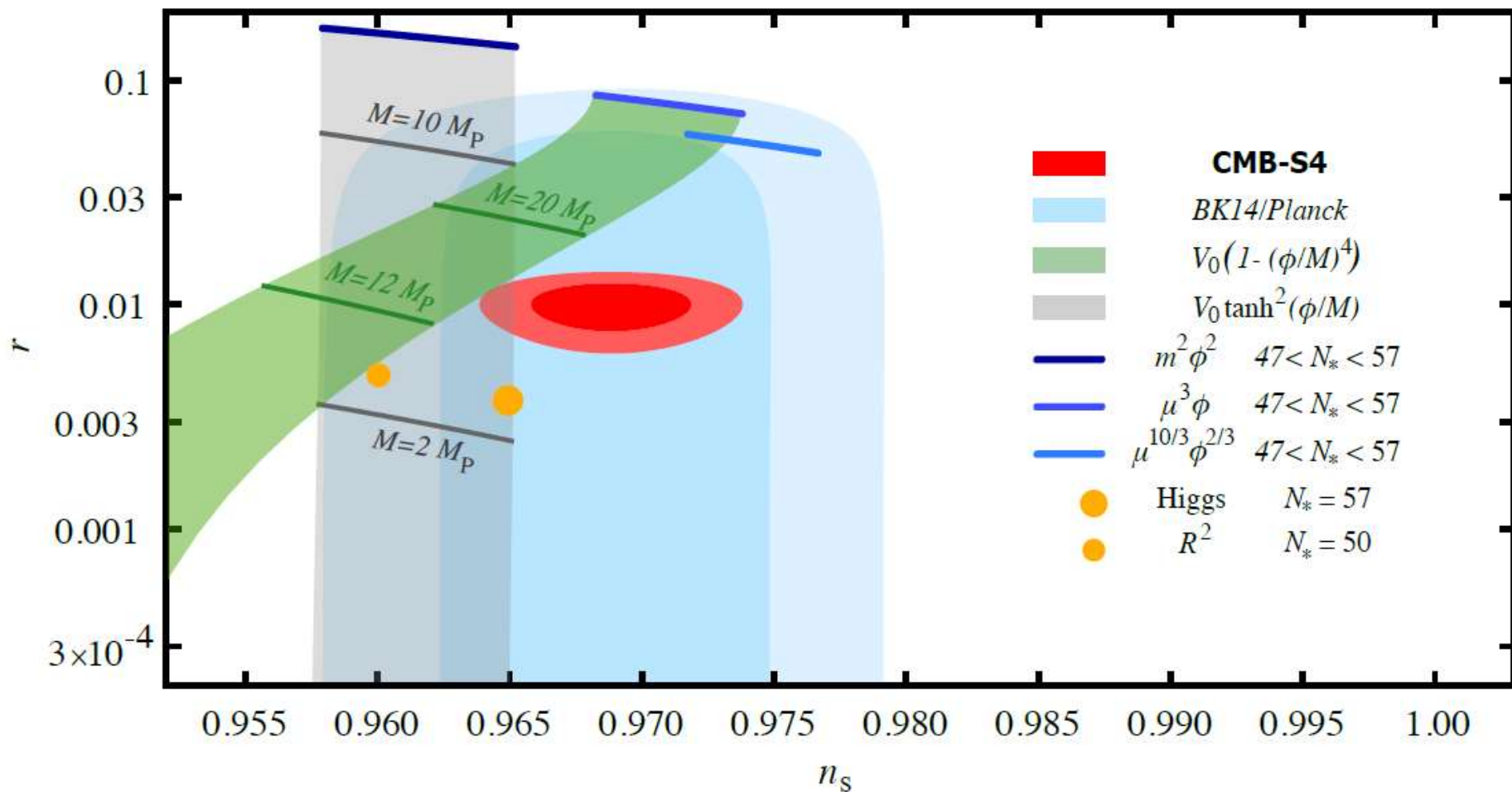






## PRESENTATION

PGWが見えたらこんな感じになる





# 1. Project 2. Technology 3. Transient Search Status and Schedule



Created by JEROME SOMMET from Noun Project



**LiteBIRD**

◆ MDR  
 ◆ Down Select  
 ◆ SRR  
 ◆ SDR  
 ◆ PDR

◆ CDR

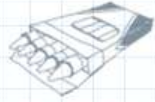
◆ Launch  
 w. H3

**Observation (3 yrs)**

**SKA**

CDR

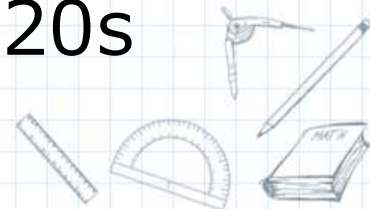
SKA1 Observation



# LiteBIRD vs CMB-S4



Aims to detect  $r \geq 10^{-3}$  in mid 2020s



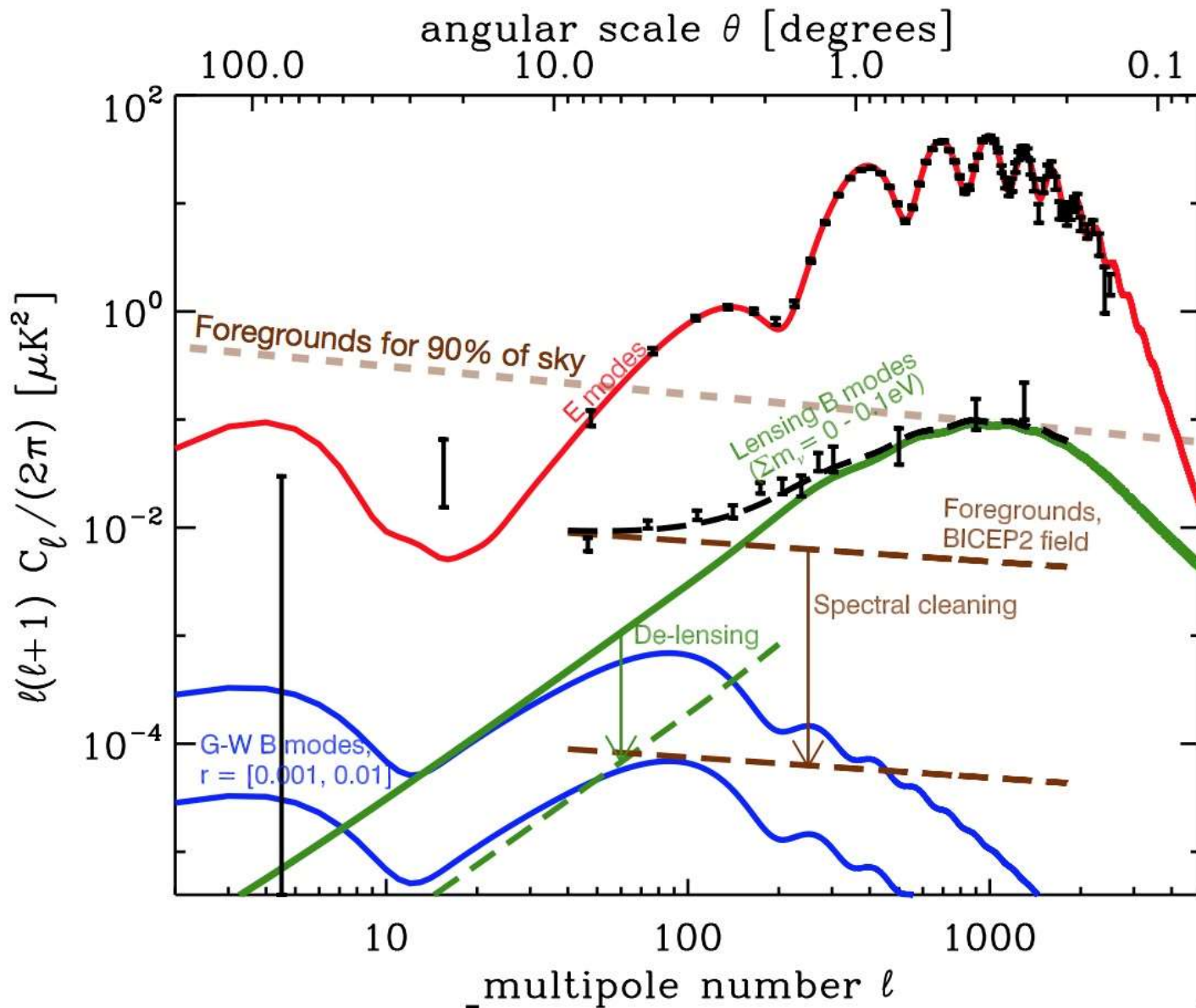




# Satellite vs Ground



PRESE







PRESENTATION

# 日本の3つの重力波実験



**KAGRA**

2020~



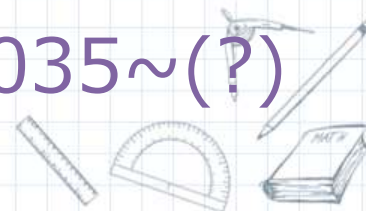
**LiteBIRD**

2026~



**DECIGO**

2035~(?)



# LISA:

## Opens the low-frequency gravitational universe !

**Selected! June 20, 2017! ESA-L3!**

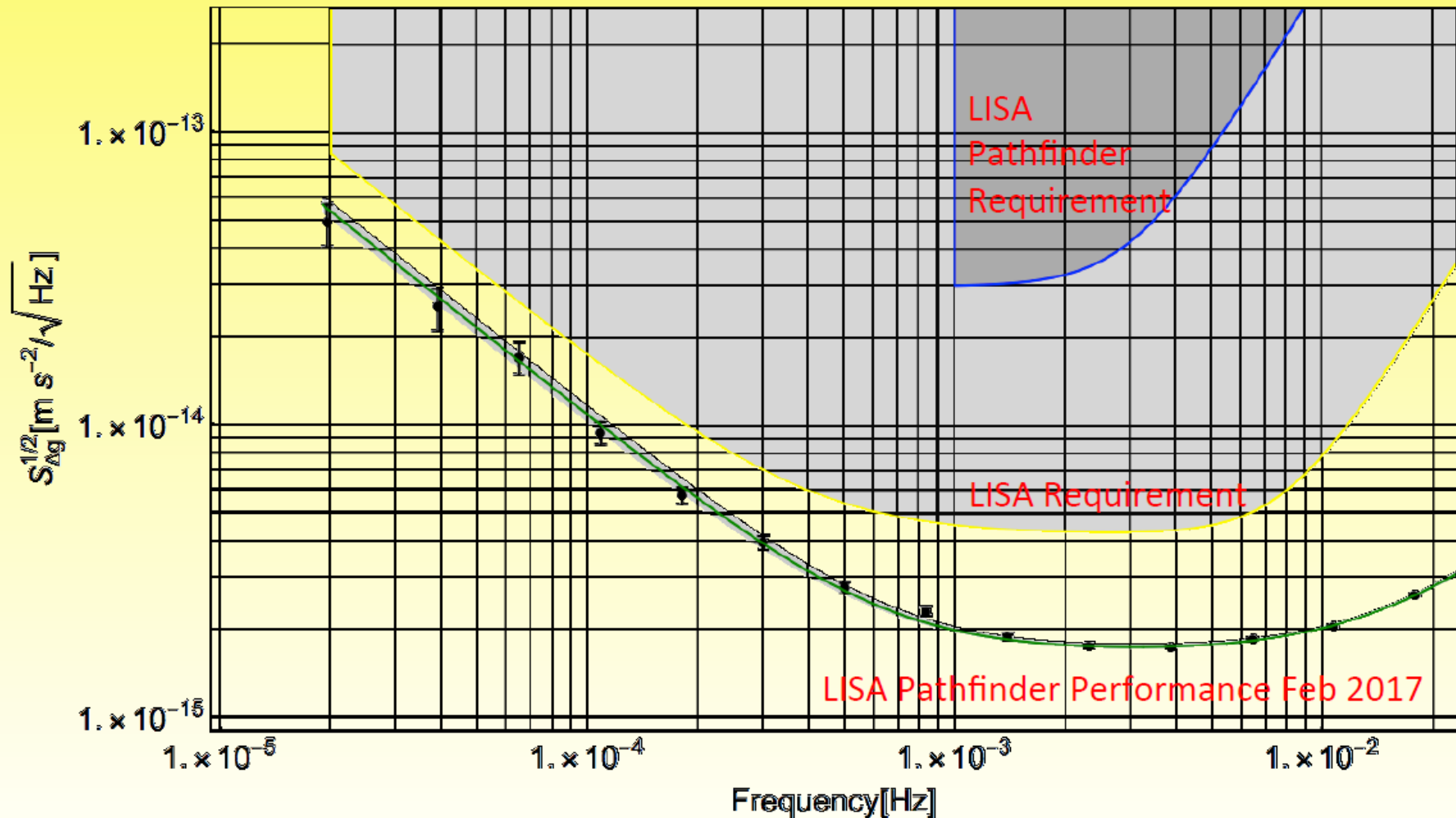




17 years later!  
September  
2015:  
Spacecraft is  
completed!



# LISA Pathfinder shows: LISA Works!





## • 地上望遠鏡 (10 Hz-数 kHz)

- \*2015年 : aLIGOによる重力波初観測.
- \*2016年- : 第2世代望遠鏡 AdVIRGO, KAGRAによる国際観測網. 電磁波望遠鏡との同時観測.
- \*2022年頃 : LIGO-India の稼働.  
第3世代望遠鏡 ET, CE の稼働.

## • 宇宙望遠鏡 (0.1-10 Hz)

- \*2025/26年 : Pre-DECIGOによる重力波観測.
- \*その後 : DECIGOによる初期宇宙からの重力波観測.

## • 宇宙望遠鏡 (0.1 – 100 mHz)

- \*2015年 : LISA Pathfinder打ち上げ.
- \*2034年 : eLISAの打ち上げ. 低周波数重力波の観測.



# Space GW Observatory: B-DECIGO

※ We changed the name: Pre-DECIGO → B-DECIGO

## • B-DECIGO

- Space-borne GW antenna formed by three S/C
- Target Sensitivity for GW :  $2 \times 10^{-23} \text{ Hz}^{-1/2}$  at 0.1Hz.

## • Sciences of B-DECIGO

- (1) Compact binaries.
- (2) IMBH merger.
- (3) Info. of foregrounds for DECIGO.

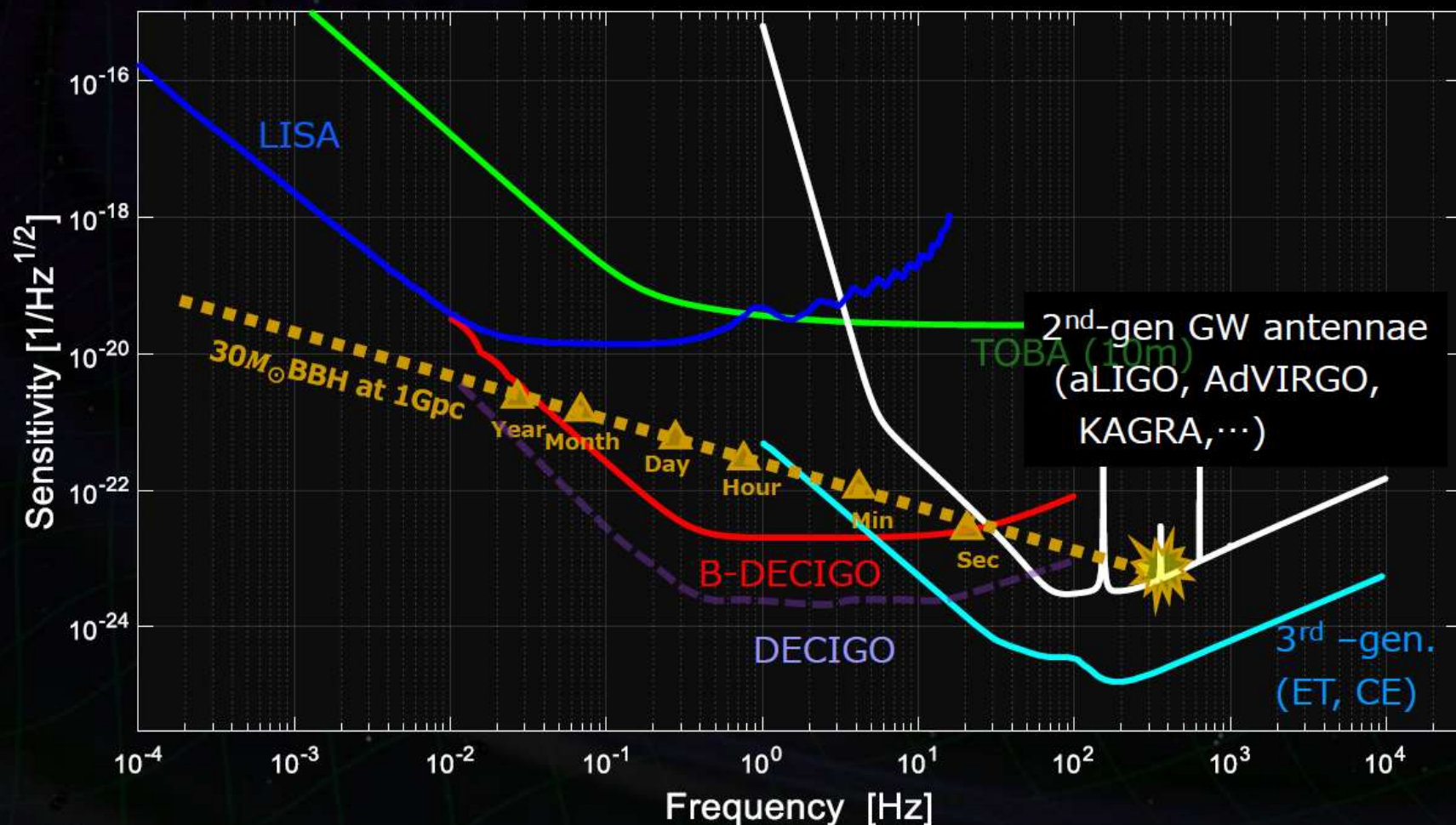


Fig. by S.Sato

Target: JAXA Strategic Medium-scale mission (2020s).

# Sensitivity Curves

T. Nakamura et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 093E01 (2016)







# 長期的な視野を持った今後の分野の発展についての議論



2017 Nobel Prize in Physics

## LIGO



### KAGRA

2020~



## CMB-S4



## LiteBIRD

2026~

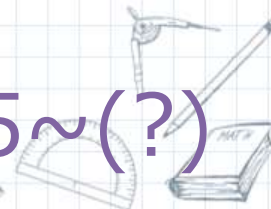


## LISA



### DECIGO

2035~(?)







PRESENTATION

# 3つの視点

## ① Physicistとして

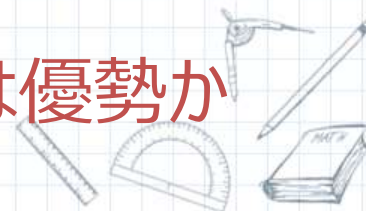
PGWで新粒子探査！新加速器としてのGW観測

## ② Cosmologistとして

CMB Pol & LSS が大規模。他にもPBH, MFとか

## ③ GWistとして

KAGRA, DECIGOと海外勢。LiteBIRDは優勢か



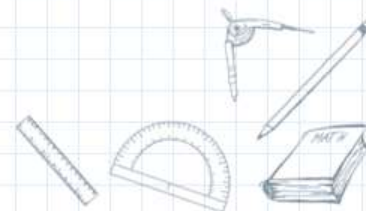


# Plan of talk

① ざっくり何やってるか (5分)

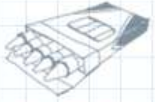
② 何故やってるのか (30分)

③ ちょっと詳しい話 (5分)





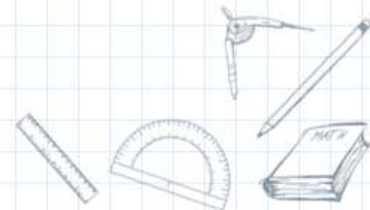
Model

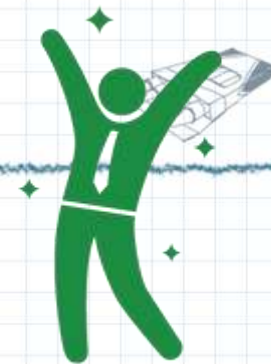


PRESENTATION

# Axion-SU(2) model

[Dimastrogiovanni, Fasiello & Fujita (2016)]



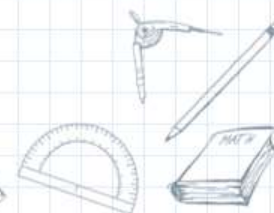
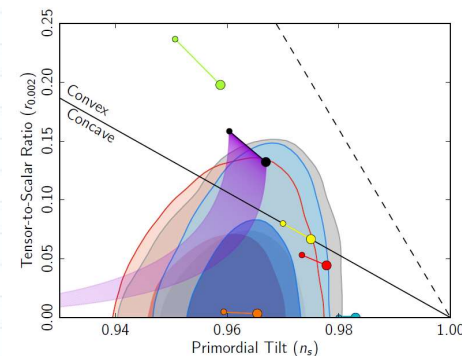


# Axion-SU(2) model

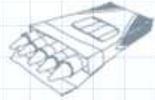
- Larger GW than  $h^{\text{vac}}$  can be produced

$$h_{\text{obs}} = h_{\text{vac}} + h_{\text{mat}}$$

- Distinguishable w/
  - Polarization  $h_R \neq h_L$
  - Non-Gaussianity  $\langle hhh \rangle$
  - Tensor tilt  $n_t$

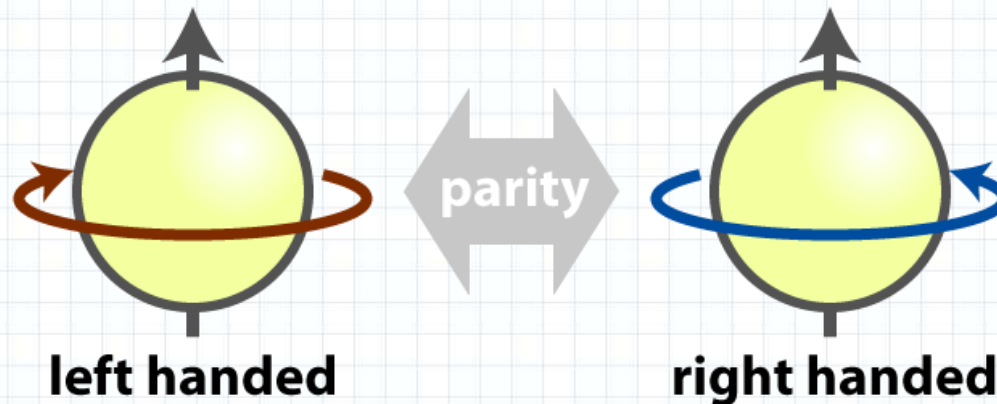






# Parity-breaking

Parity symmetry is spontaneously broken while  $\chi$  is rolling



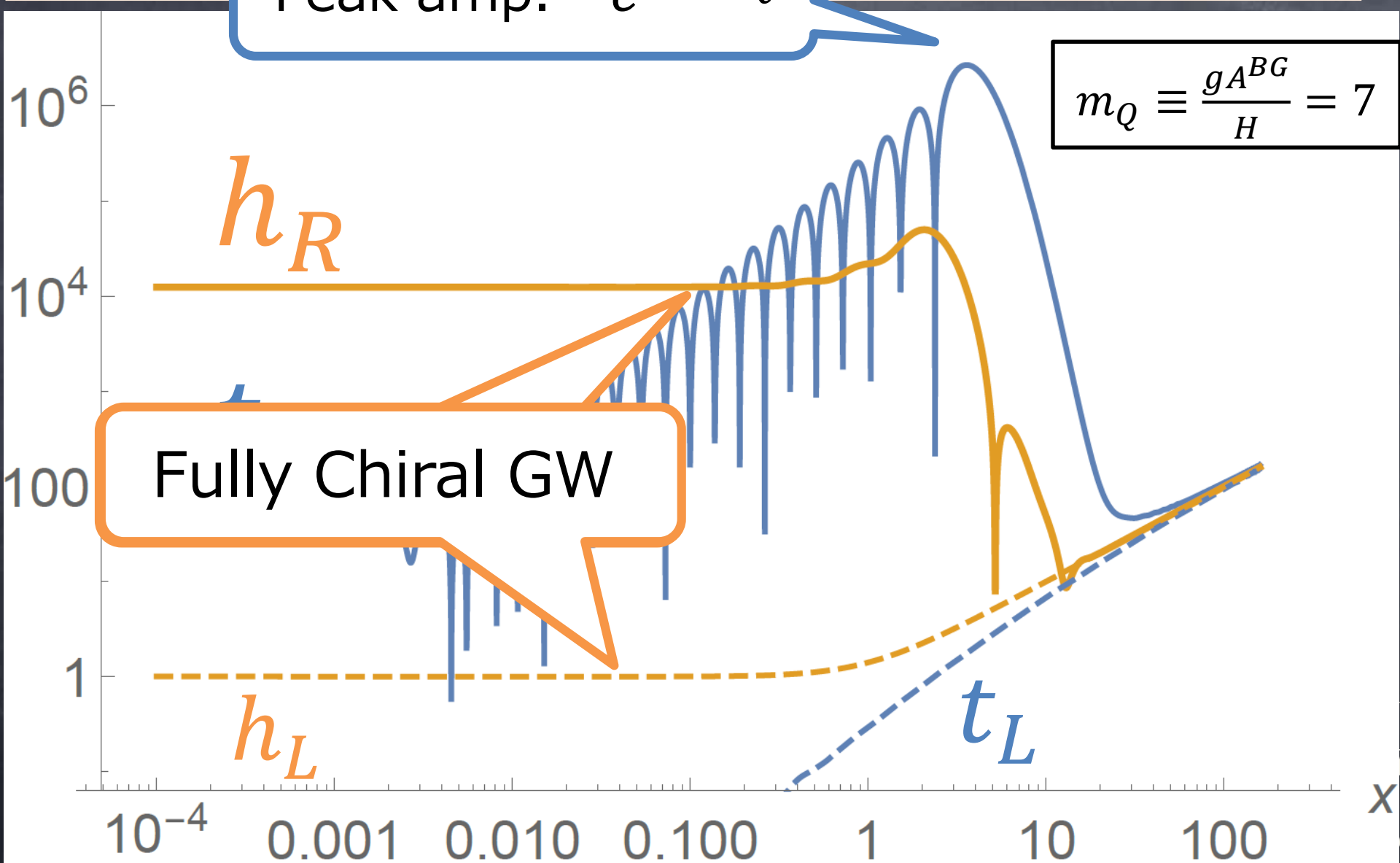
Either one of two circular polarization of GW is amplified

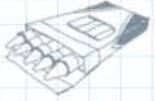


Insta

Peak amp.  $\sim e^{1.8m_Q}$

nsor



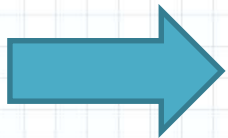


# TB, EB correlation

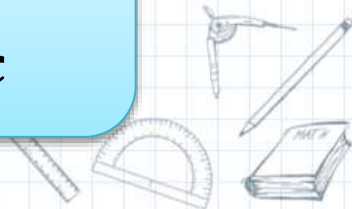
Chiral GW induces TB & EB cross correlations

$$\langle TT \rangle, \langle TE \rangle, \langle EE \rangle, \langle BB \rangle \propto \langle h_R h_R \rangle + \langle h_L h_L \rangle$$

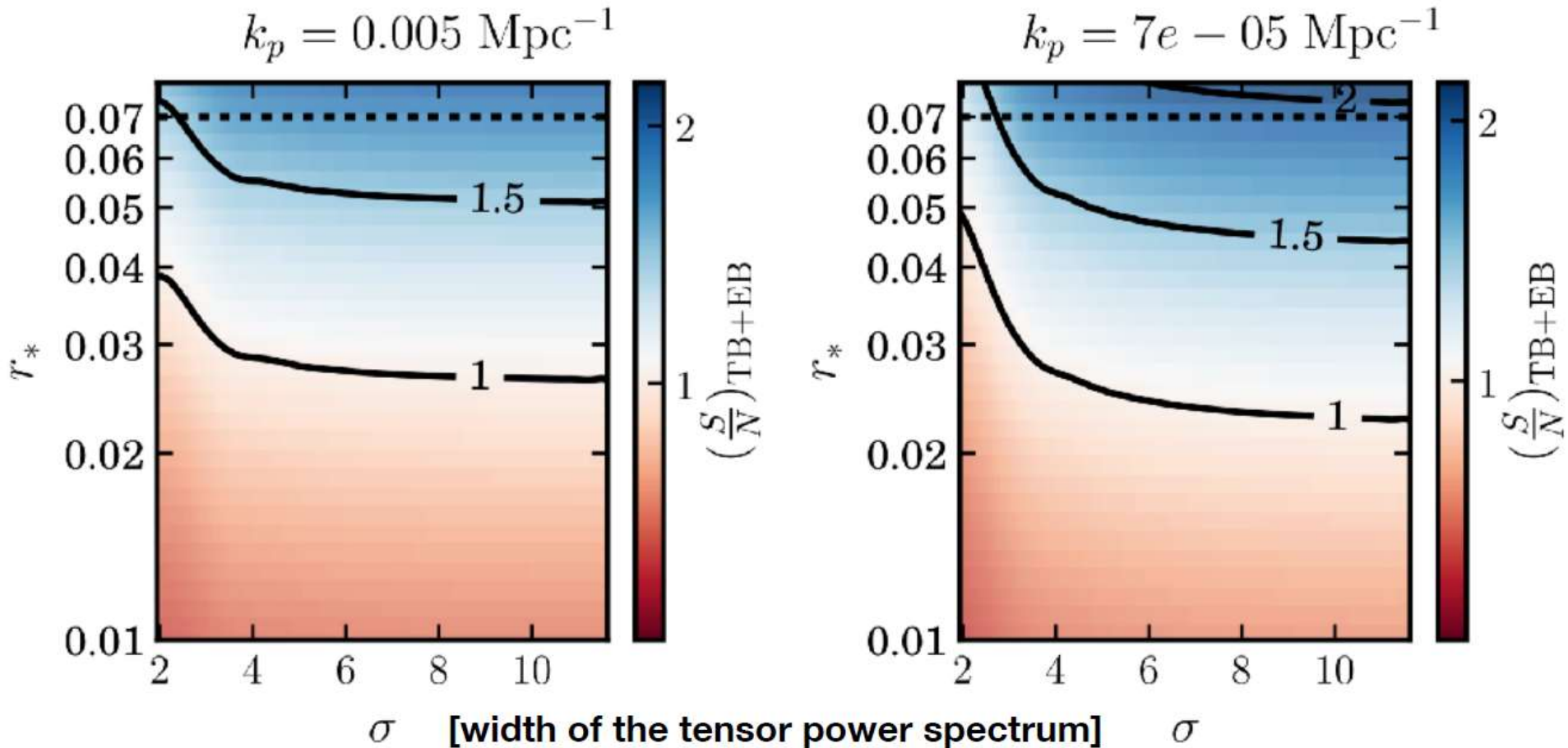
$$\langle TB \rangle, \langle EB \rangle \propto \langle h_R h_R \rangle - \langle h_L h_L \rangle$$



By detecting TB & EB correlations,  
we can distinguish  $h^{(s)}$  from  $h_{\text{vac}}$



# Signal-to-noise [LiteBIRD]



- $S/N \sim$  a couple for the peak  $r_*$  of 0.07. It's something!





1. Project 2. Technology 3. Transient Search

# Domestic Community

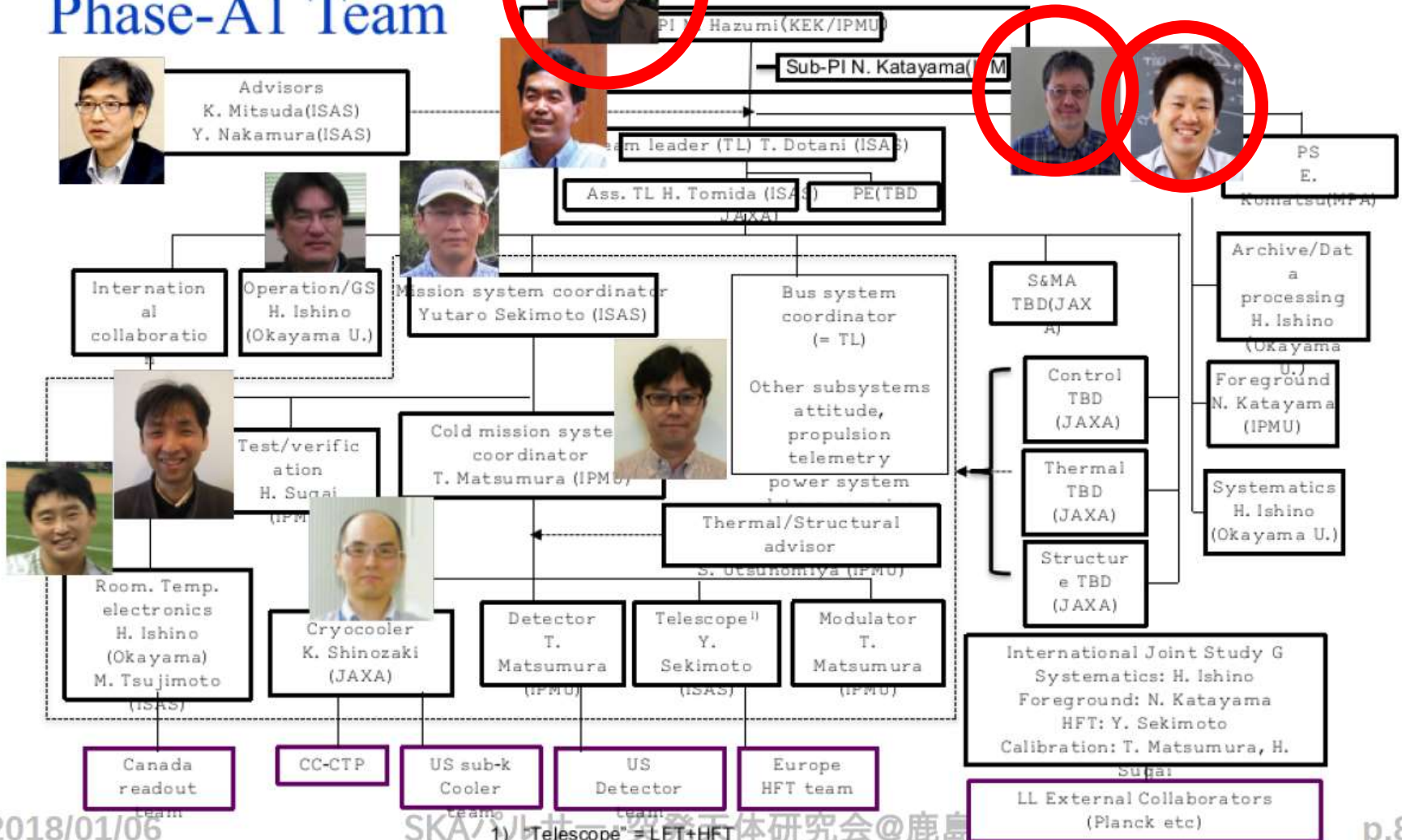
ver. 2017.11.02

Created by JEROME SOMMET from Nour Project

## ISAS/JAXA

### Phase-A1 Team

Experience: X-ray satellites, CMB exp., Large-scale projects (HEP, ALMA)



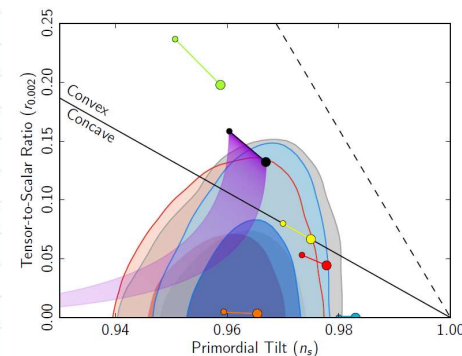


# Axion-SU(2) model

- Larger GW than  $h^{\text{vac}}$  can be produced

$$h_{\text{obs}} = h_{\text{vac}} + h_{\text{mat}}$$

- Distinguishable w/
  - Polarization  $h_R \neq h_L$
  - Non-Gaussianity  $\langle hhh \rangle$
  - Tensor tilt  $n_t$



# Large bispectrum in GW from SU(2) fields



Aniket Agrawal  
(MPA)

$$\frac{B_h^{RRRR}(k, k, k)}{P_h^2(k)} \approx \frac{25}{\Omega_A}$$



Tomo Fujita  
(Kyoto)

$$\langle \hat{h}_R(\mathbf{k}_1) \hat{h}_R(\mathbf{k}_2) \hat{h}_R(\mathbf{k}_3) \rangle = (2\pi)^3 \delta \left( \sum_{i=1}^3 \mathbf{k}_i \right) B_h^{RRRR}(k_1, k_2, k_3)$$

- $\Omega_A \ll 1$  is the energy density fraction of the gauge field
- $B_h/P_h^2$  is of order unity for the vacuum contribution  
[Maldacena (2003); Maldacena & Pimentel (2011)]
- *Gaussianity offers a powerful test of whether the detected GW comes from the vacuum or sources*



# NG generated at the tree level

$$L_3^{(i)} = c^{(i)} \left[ \epsilon^{abc} t_{ai} t_{bj} \left( \partial_i t_{cj} - \frac{m_Q^2 + 1}{3m_Q \tau} \epsilon^{ijk} t_{ck} \right) \right.$$

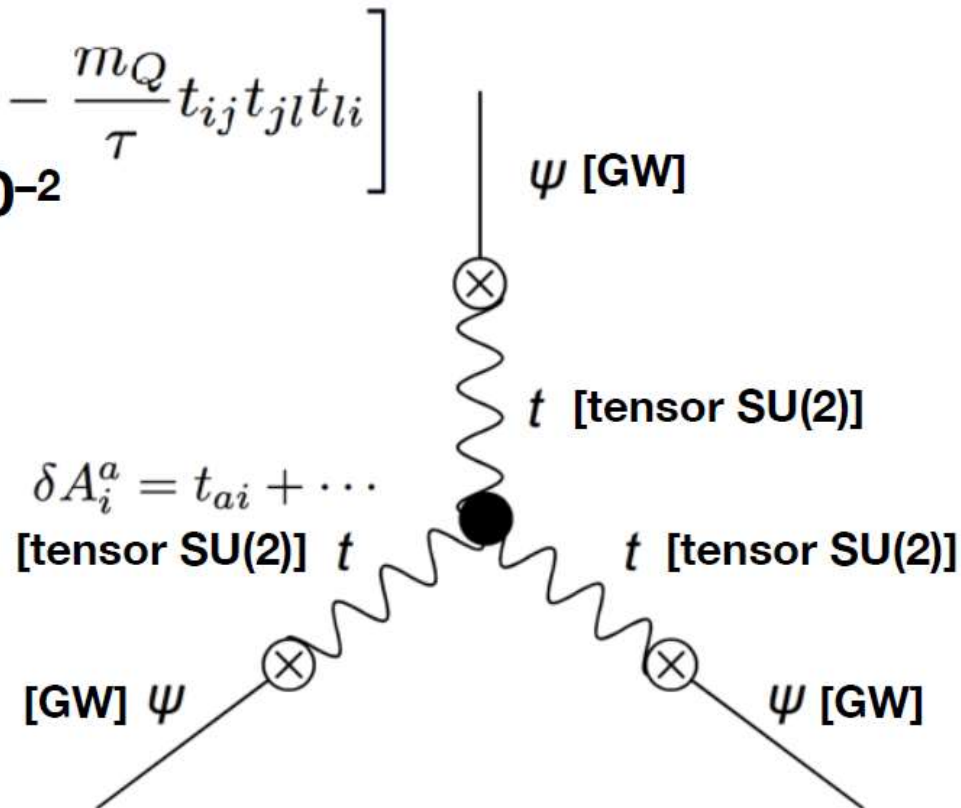
$$\left. - \frac{m_Q}{\tau} t_{ij} t_{jl} t_{li} \right]$$

$$c^{(i)} = g = m_Q^2 H / \sqrt{\epsilon_B} M_{\text{Pl}} \sim 10^{-2}$$

$$\epsilon_B \equiv \frac{g^2 Q^4}{H^2 M_{\text{Pl}}^2} \simeq \frac{2\Omega_A}{1 + m_Q^{-2}} \ll 1$$

$$m_Q \equiv gQ/H \quad [m_Q \sim \text{a few}]$$

- This diagram generates second-order equation of motion for GW





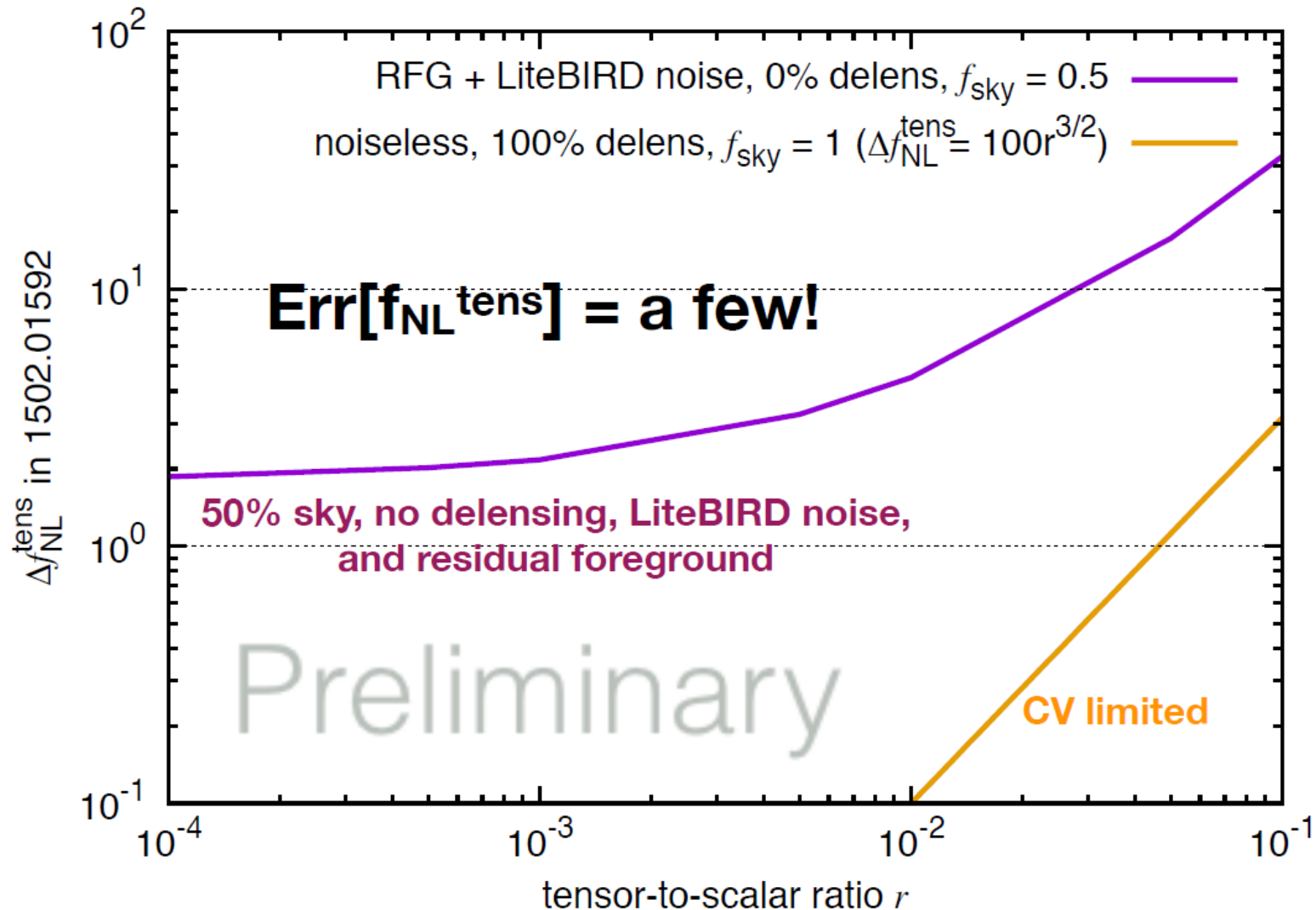
# Current Limit on Tensor NG

- The Planck team reported a limit on the tensor bispectrum in the following form:

$$f_{\text{NL}}^{\text{tens}} \equiv \frac{B_h^{+++}(k, k, k)}{F_{\text{scalar}}^{\text{equil.}}(k, k, k)}$$

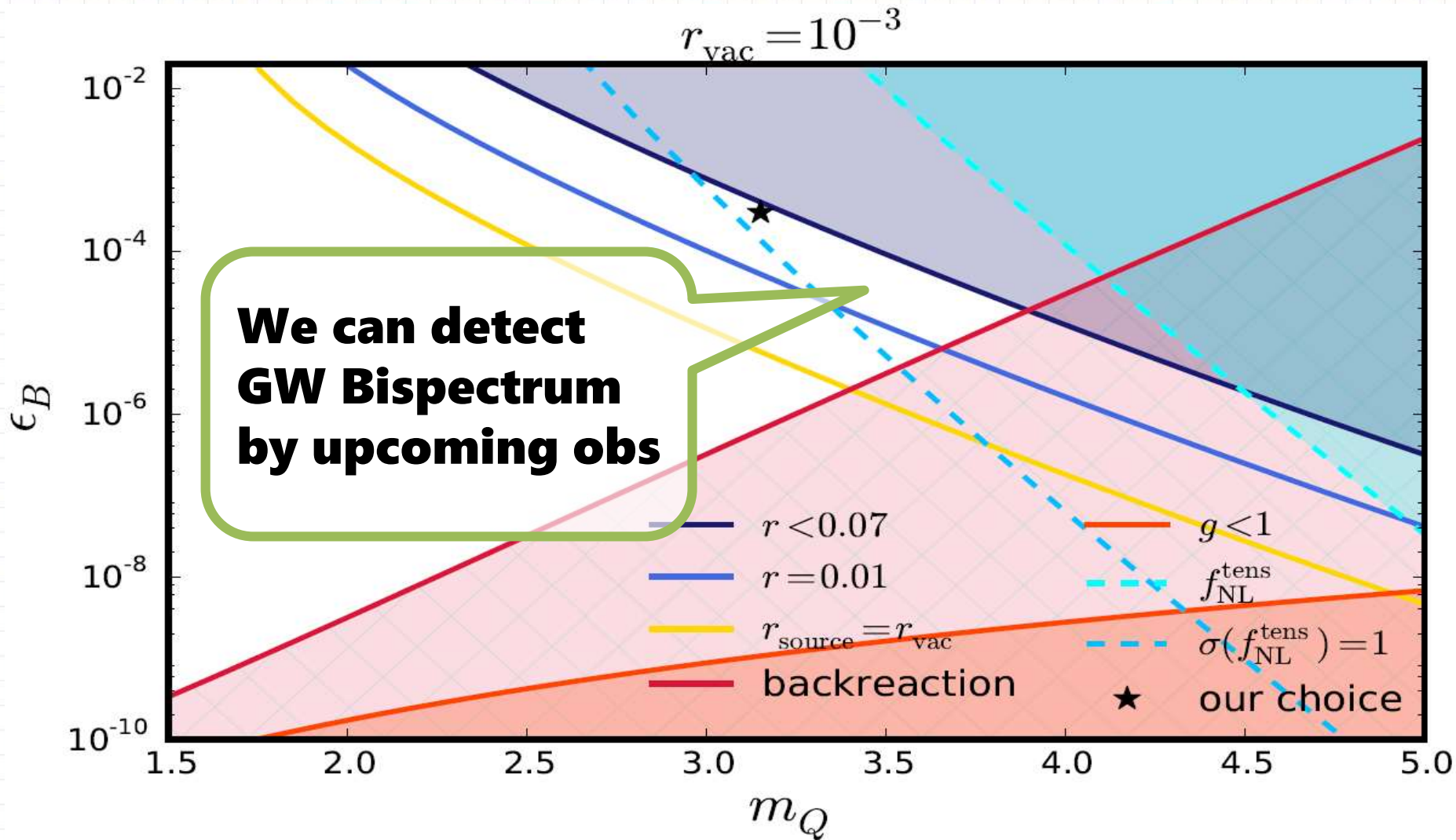
- The denominator is the **scalar** equilateral bispectrum template, giving  $F_{\text{scalar}}^{\text{equil.}}(k, k, k) = (18/5)P_{\text{scalar}}^2(k)$
- The current 68%CL constraint is  $f_{\text{NL}}^{\text{tens}} = 400 \pm 1500$

# LiteBIRD would nail it!





# Observation

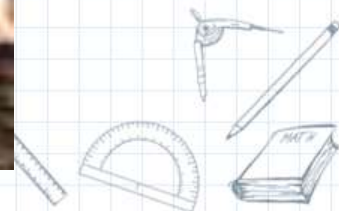




## PRESENTATION



原始重力波をやれば  
人生ウハウハ!







まとめ

実験を含めた周辺状況を気に  
しながら自分が好きな研究をやろう！

