The background of the slide features a light blue, grid-like pattern representing spacetime curvature. At the top center, there is a diagram of a gravitational well, which is a circular depression. Inside this well, two dark grey spheres representing black holes are shown in a circular orbit around each other, with white arrows indicating the direction of their motion.

# 重力相互作用しかしない暗黒物質の, 地下極低BG技術を用いた 探索実験の検討

2016年11月22日(火)

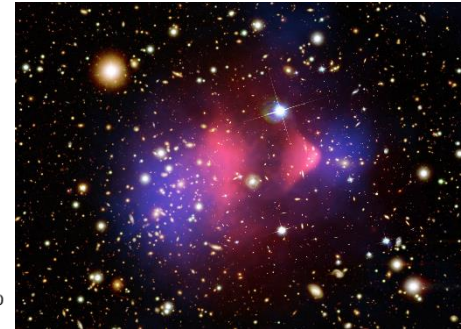
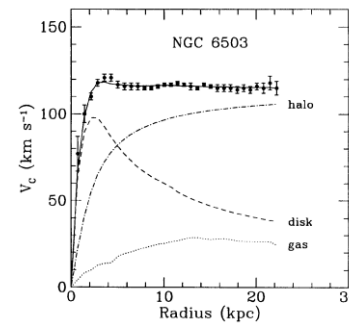
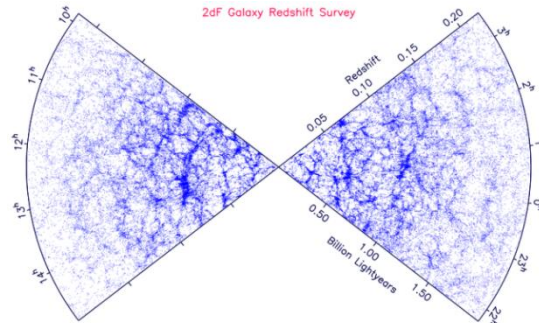
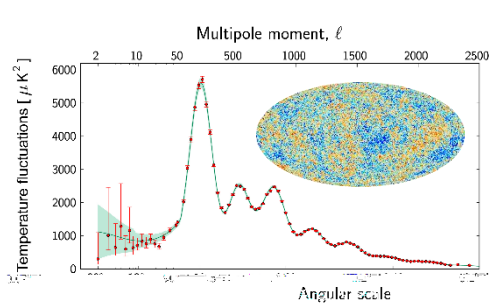
第1回B,E班合同若手研究会

早大D2 鷺見貴生

# 暗黒物質についてわかっていること

## 観測事実

- ✓ 大昔 の頃 からたくさんある
- ✓ 今もその辺にたくさんある
- ✓ 有限の質量を持ち、遅い 非相対論的
- ✓ 重力相互作用をする。電磁相互作用、強い相互作用はしない
- ✓ 粒子である 重力法則の修正ではなく



## 希望的観測

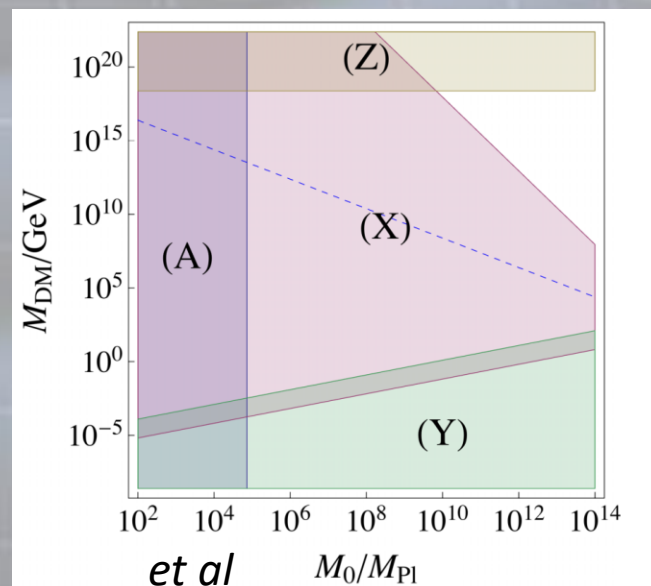
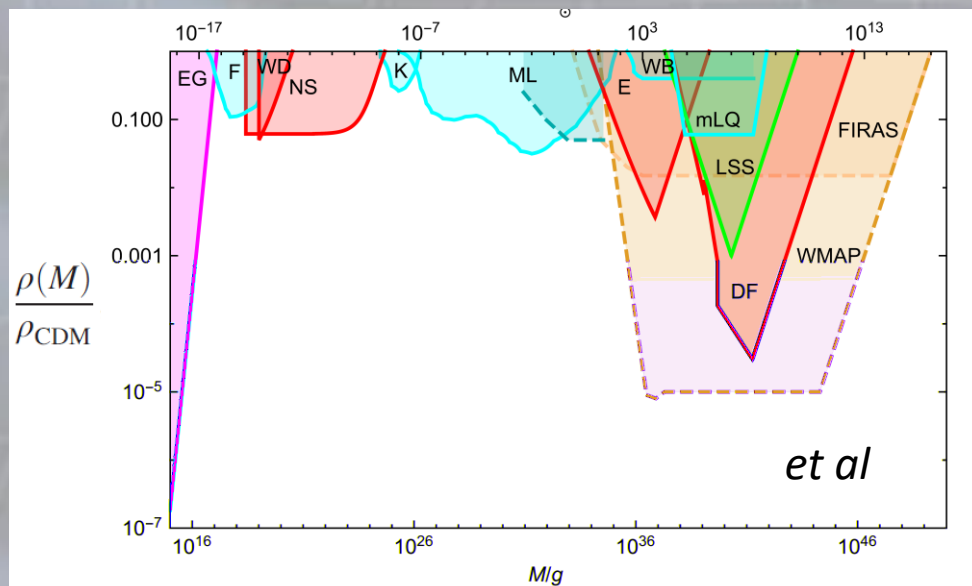
粒子と弱く相互作用するかもしれないしてほしい  
粒子と混合するかもしれないしてほしい  
粒子と転換するかもしれないほしい

実は

粒子とは全く相互作用しないかもしれない

# 重力相互作用しからないDM候補例

天体スケールの  $\rho(M)$  は としては足りない 詳細は第 回 班  
 若手研究会の久野君のトークを参照  
 が だとするシナリオは、生き残っているパラメタ  
 領域も結構ある  
 から が生成されるシナリオも *et al*



# 高周波重力波(HFGW)の放出

重力相互作用しかなしい も、重力波を放出する可能性がある。

天文学的なソースと異なり、

素粒子としての の情報 質量、断面積、 を持っている可能性有

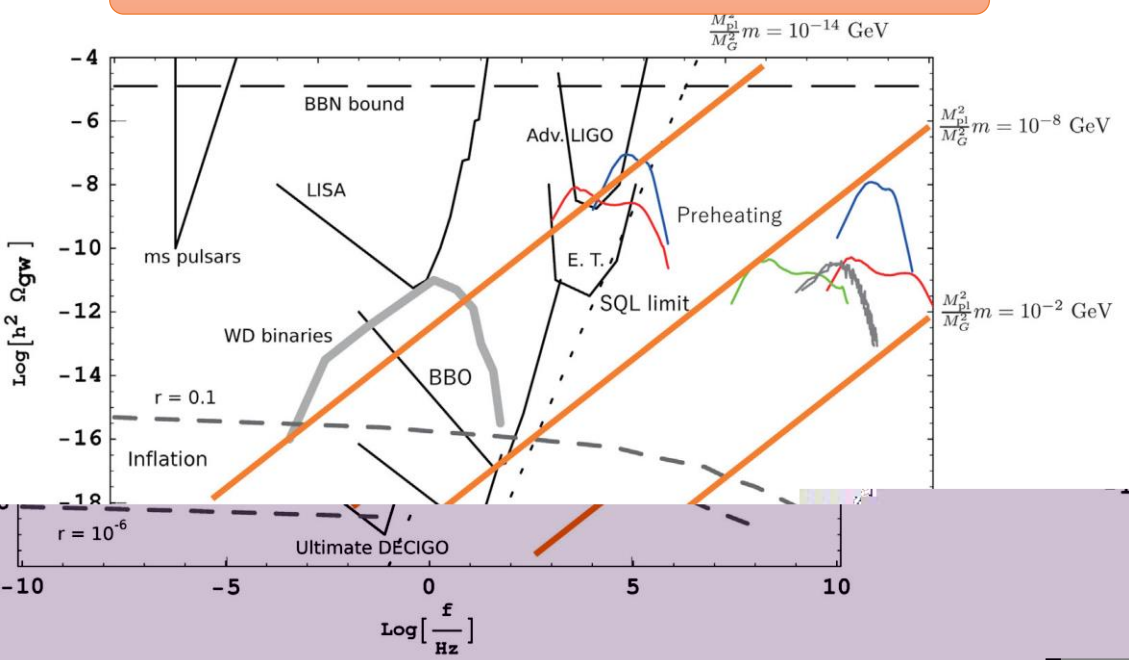
高周波

⇒ レーザー干渉計実験では検出困難

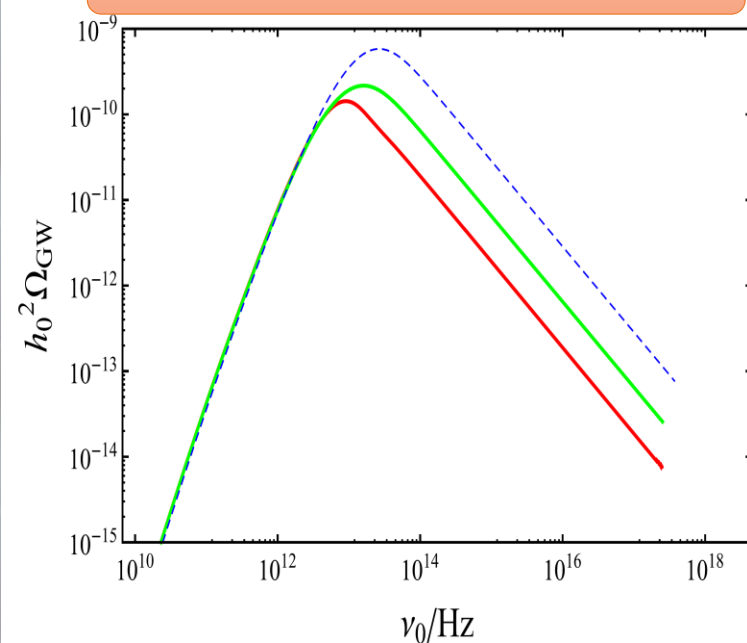
他の

と異なり、見つければ じゃなくても

から *et al.*



から *et al.*



# (inverse-)Gertsenshtein Effect

: 静磁場中での

転換

重力波と並行・反並行方向に同じ周波数の電磁波が出る

原論文:

WAVE RESONANCE OF LIGHT AND GRAVITATIONAL WAVES



[引用] WAVE RESONANCE OF LIGHT AND GRAVITATIONAL WAVES

ME Gertsenshtein - SOVIET PHYSICS JETP- ..., 1962 - AMER INST PHYSICS ...

引用元 92 関連記事 Web of Science: 58 引用 保存 その他

残念ながら見れない。。

## 弱場近似の元で量子化 ファインマンダイアグラム

$$g^{\alpha\beta} = \eta^{\alpha\beta} - 2\lambda(\bar{h}^{\alpha\beta} - \frac{1}{2}\eta^{\alpha\beta}\bar{h}) + O(\lambda^2),$$

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_S + \mathcal{L}_{em} + \mathcal{L}_I,$$

$$\mathcal{L}_S = -(\eta^{\mu\nu}\psi_{,\mu}^*\psi_{,\nu} + M^2\psi^*\psi),$$

$$\mathcal{L}_{em} = -\frac{1}{4}\eta^{\mu\alpha}\eta^{\nu\beta}F_{\mu\nu}F_{\alpha\beta},$$

$$\mathcal{L}_I = -ie\eta^{\mu\nu}(A_{(\mu}\psi_{,\nu)}\psi^* - A_{(\mu}\psi_{,\nu)}^*\psi)$$

$$+ 2\lambda\bar{h}^{\mu\nu}(\psi_{,\mu}^*\psi_{,\nu} + \frac{1}{2}\eta_{\mu\nu}M^2\psi^*\psi)$$

$$+ 2ie\lambda\bar{h}^{\mu\nu}(A_{(\mu}\psi_{,\nu)}\psi^* - A_{(\mu}\psi_{,\nu)}^*\psi)$$

$$+ \lambda(\bar{h}^{\mu\alpha}\eta^{\nu\beta} - \frac{1}{4}\bar{h}\eta^{\mu\alpha}\eta^{\nu\beta})F_{\mu\nu}F_{\alpha\beta} + O(e^2, \lambda^2)$$

(2)

(2)

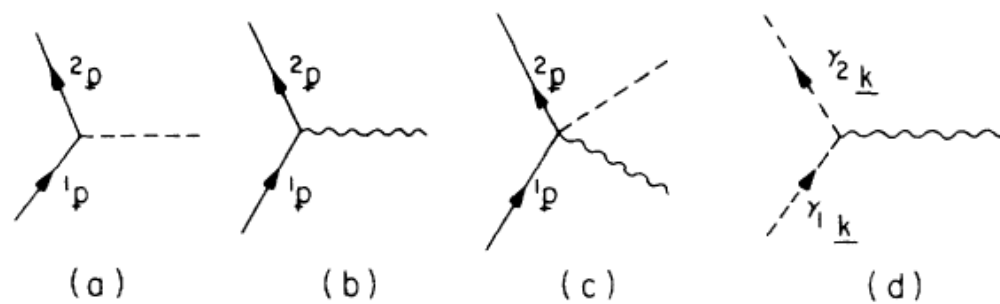


FIG. 1. The Feynman vertices. The solid lines represent scalar quanta, the dashed lines represent photons, the wavy lines represent gravitons.

この を つ つ 数えれば、 の 直接検出

# graviton -> photon 轉換効率

轉換効率

$$\Gamma_{\text{forward}} = \frac{8\pi GB^2L^2}{c^3} \sum_{ijk} ((\overline{K}_{\text{gw}} \times \overline{N}_B) \cdot \overline{e}^i \cdot \overline{\varepsilon}^{jk})^2,$$

磁場中の  
磁場

重力波の波数ベクトル  
静磁場の方向ベクトル

重力波の偏光テンソル  
電磁波の偏光ベクトル

$$\Gamma_{\text{backward}} = \Gamma_{\text{forward}} \text{Sinc}^2(\omega L\pi)$$

無次元振幅 の の

$$F = \frac{c^2}{16\pi G} \omega^2 h^2 \frac{1}{\hbar\omega}$$

轉換された の 単位系

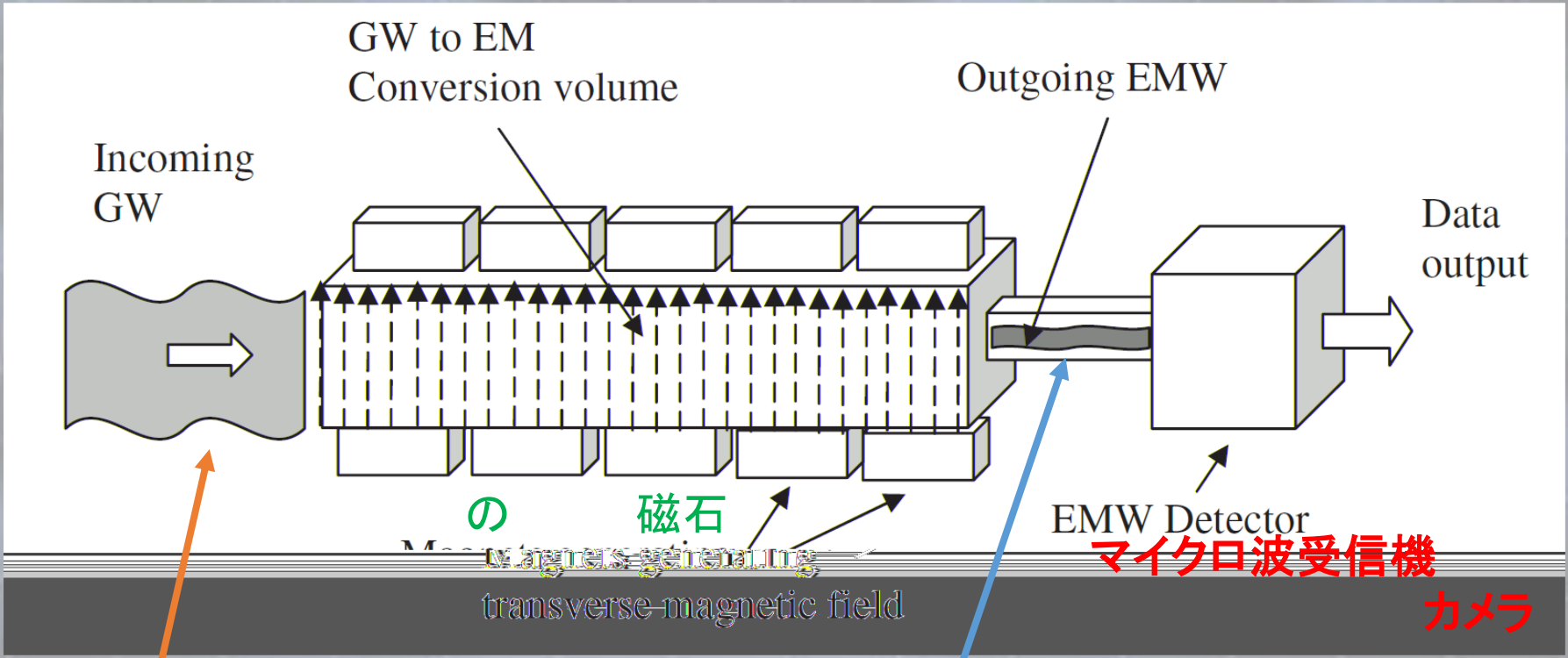
$$P = \frac{1}{8\mu_0} B^2 L^2 K_{\text{gw}}^2 h^2 c \text{Sin}^2(\alpha) \text{ W/M}^2$$

ワット メートル

重力波と静磁場の角度

# プロトタイプ検出器 @ Birmingham 大学

銀河中心からの  $\text{GW}$  を観測する。  
磁石の列の間に  $\text{GW}$  が通るにつに分かれていて、片方はマイクロ波、  
もう片方は可視光用になっている



赤道儀に固定されていて常に銀河中心を向くようになっている

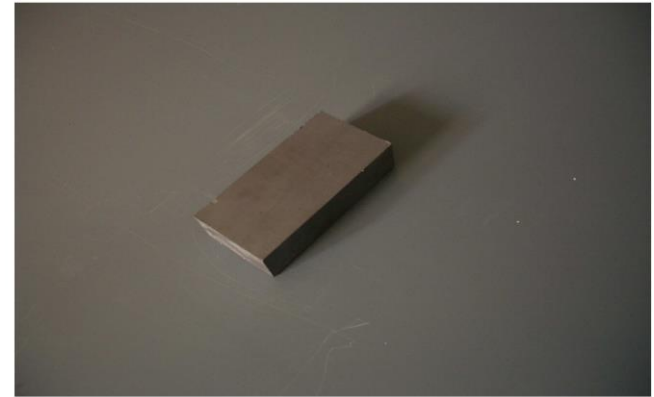
銅の × ×

# プロトタイプ検出器 @ Birmingham 大学

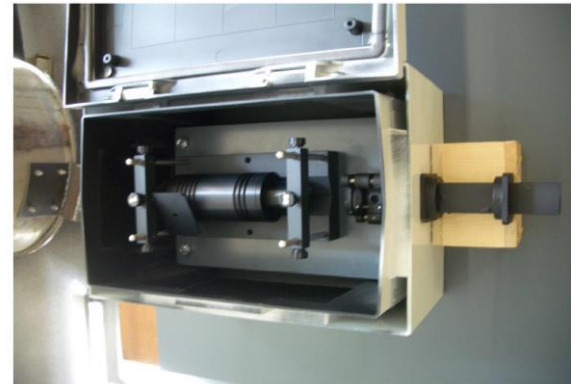


## The Potential for Very High Frequency Gravitational Wave Science

Mike Cruise  
University of Birmingham  
GPhyS 2010  
[In memory of P.Tourenco]

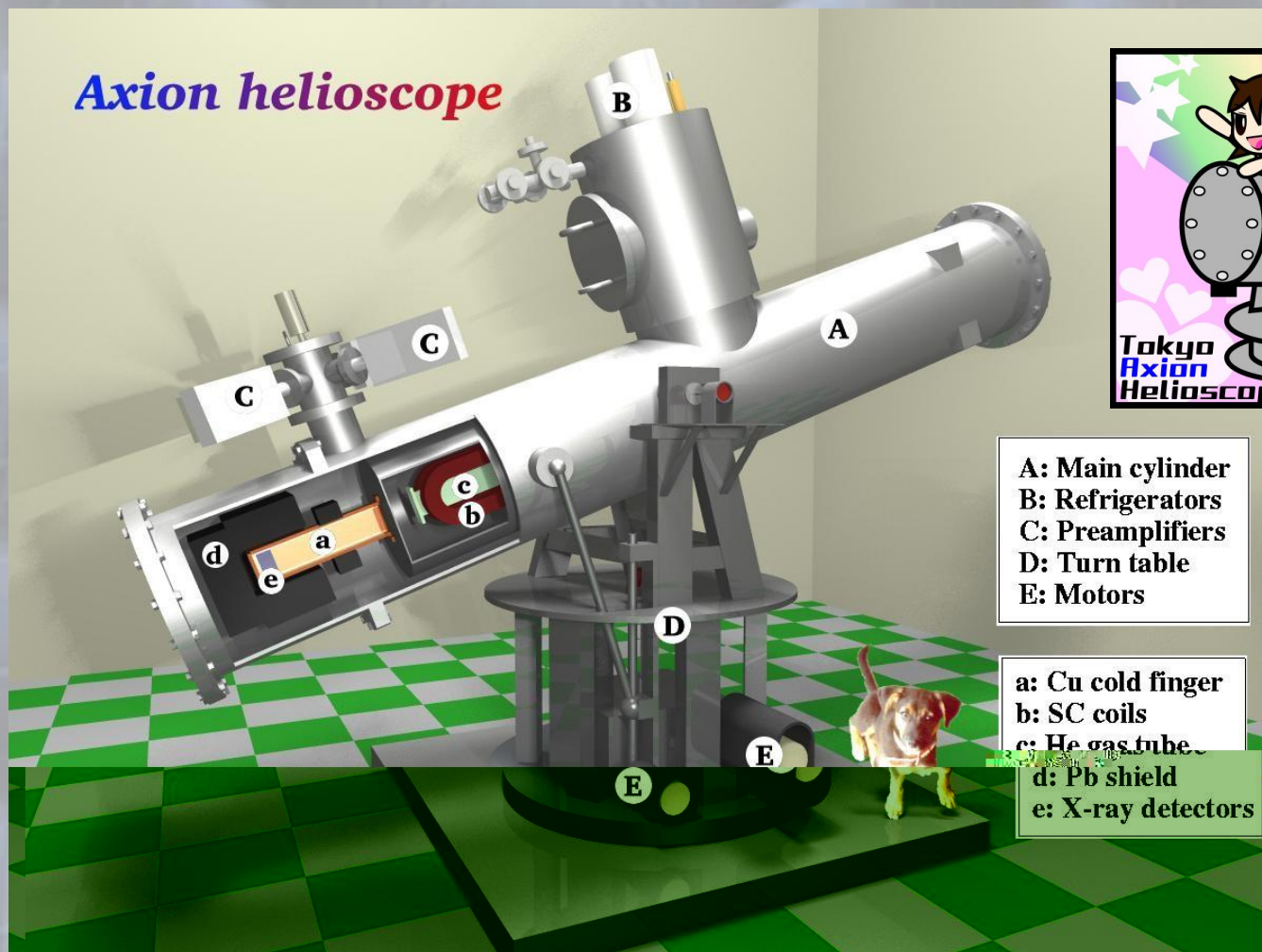


## Optical Detector





# なんか見覚えある検出器だなあ。。。。



基本的には同じ。本質的な違いは見る方向 銀河中心 太陽

# 探索感度

マイクロ波検出機の場合: アンプと鏡の熱ノイズで制限される

$$h_{\min} = \sqrt{\left( \frac{8K \Delta T_{\min} \mu_0}{B^2 K_{\text{gw}}^2 L^2 A c} \right)}$$

: ボルツマン定数  
: 熱ノイズ  
: 光収集面の面積

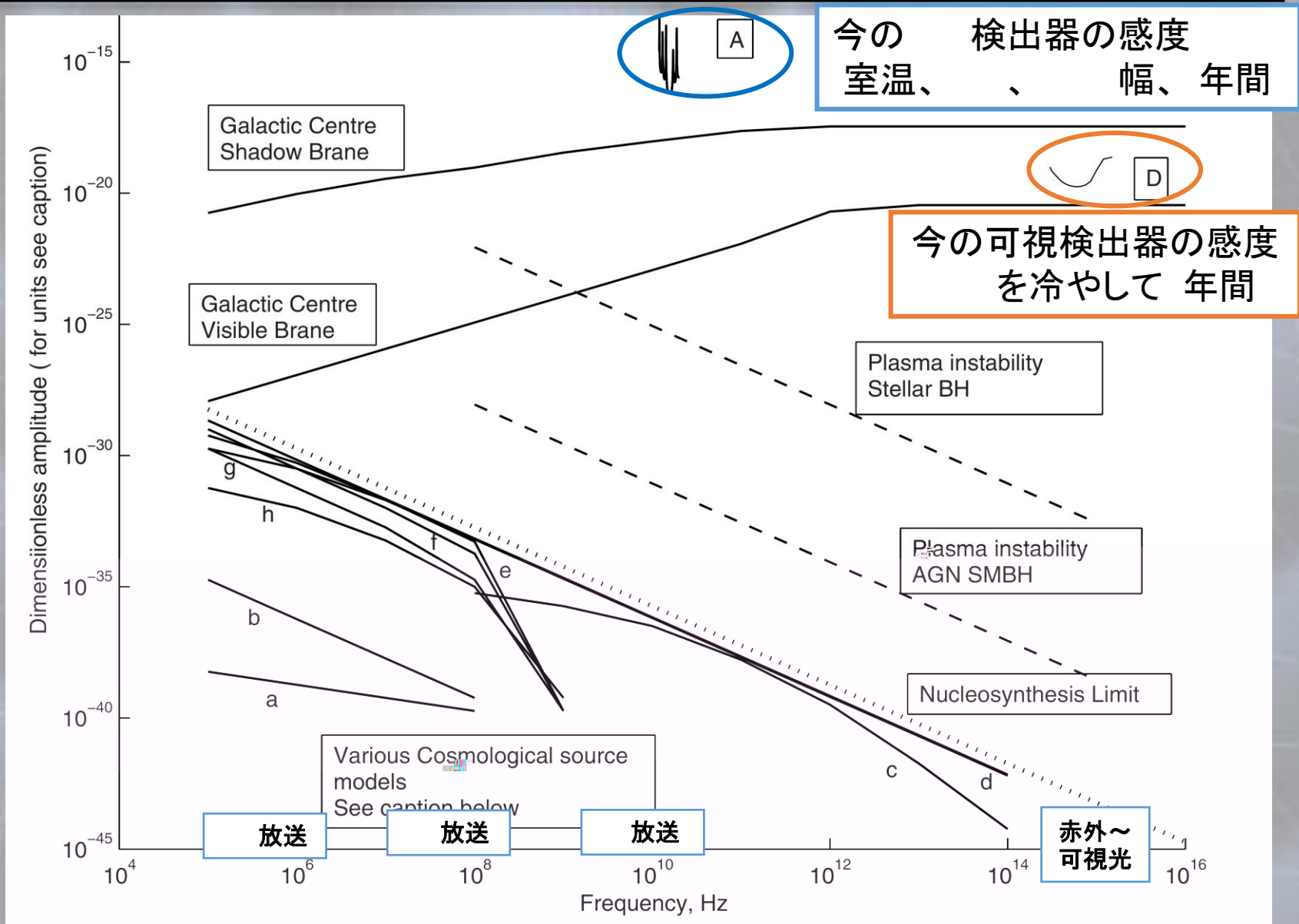
の場合: カウントレートで制限される  
おそらくここで気にしてるのはダークカウント

$$h_{\min} = \sqrt{\left( \frac{8\mu_0 \sqrt{b} h \nu}{K_{\text{gw}}^2 L^2 B^2 c \varepsilon A} \right)}$$

: レート  
: 量子効率

$c_f$  探索 は磁石と検出器を冷却しており、  
放射性不純物による内部 で される

# プロトタイプ検出器の感度見積もり



# 地下極低BG技術を活用できるか？

---

◆ 低温技術

◆ 地下実験・シールド・部材

◆ 円筒形 検出器

銀河中心や太陽など特定の方向に絞らず広い範囲を観測  
“ ”の確保

◆

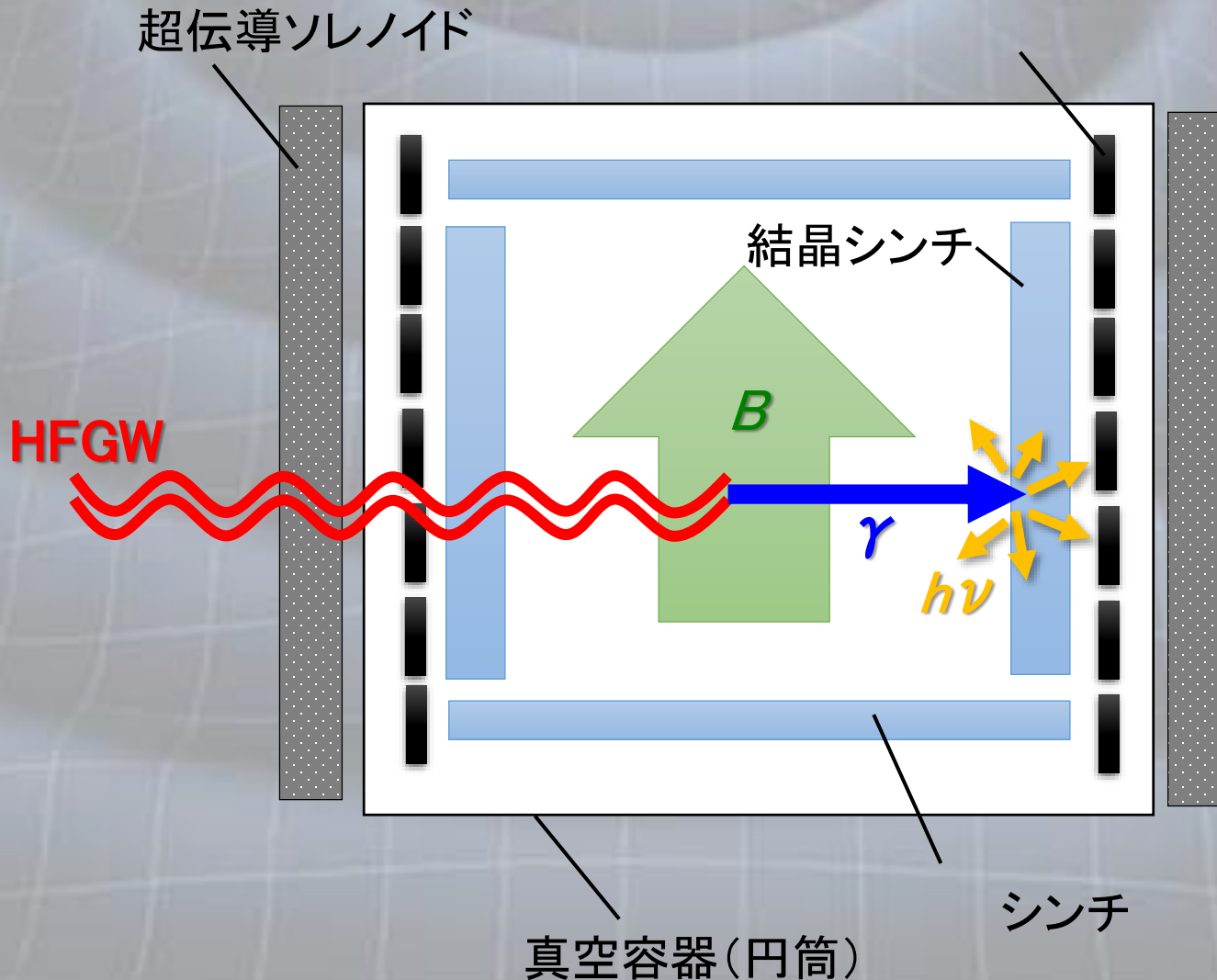
やマイクロ波受信機のように一定期間の積分量を測る  
のではなく、 に したい ロマン

赤外 超伝導検出器

近赤外 真空紫外

紫外 線 シンチレーター

# 地下極低BG技術を活用できるか？



# まとめ

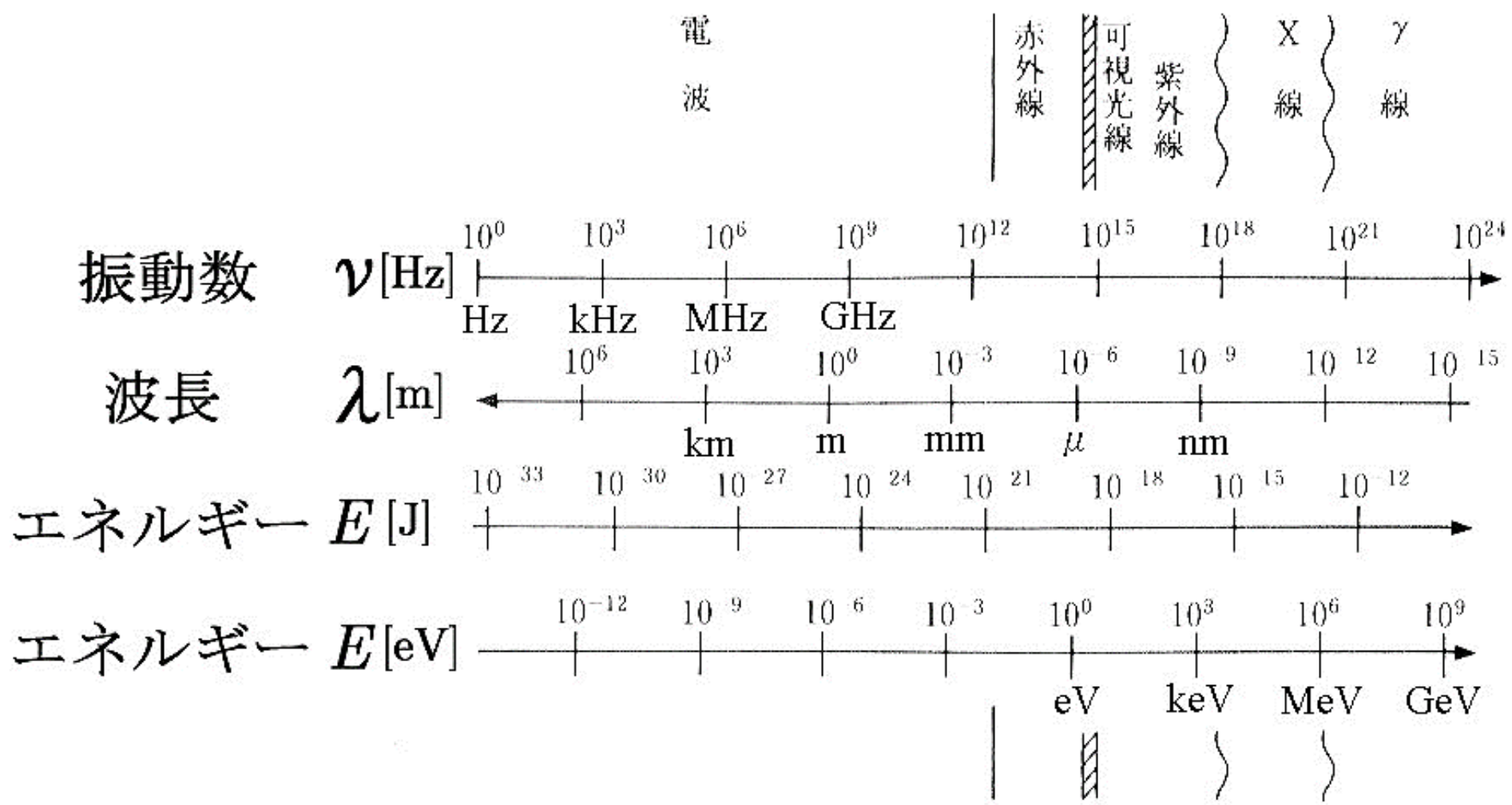
---

は重力相互作用しかしないかもしれない  
そういう場合でも を放出するかもしれない  
転換を利用した 検出器が  
考案されている  
地下極低 を使って何かできるかもしれない

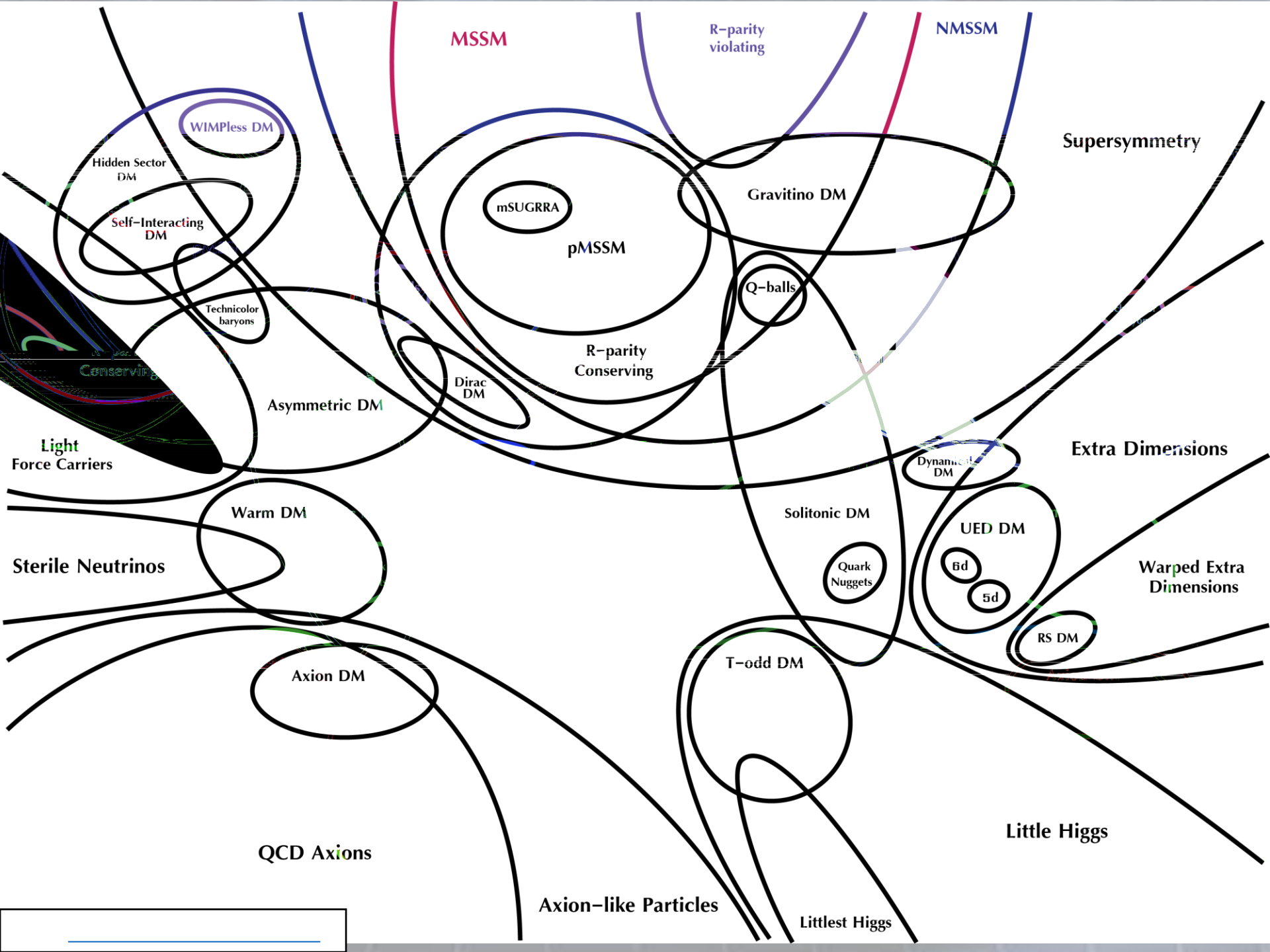


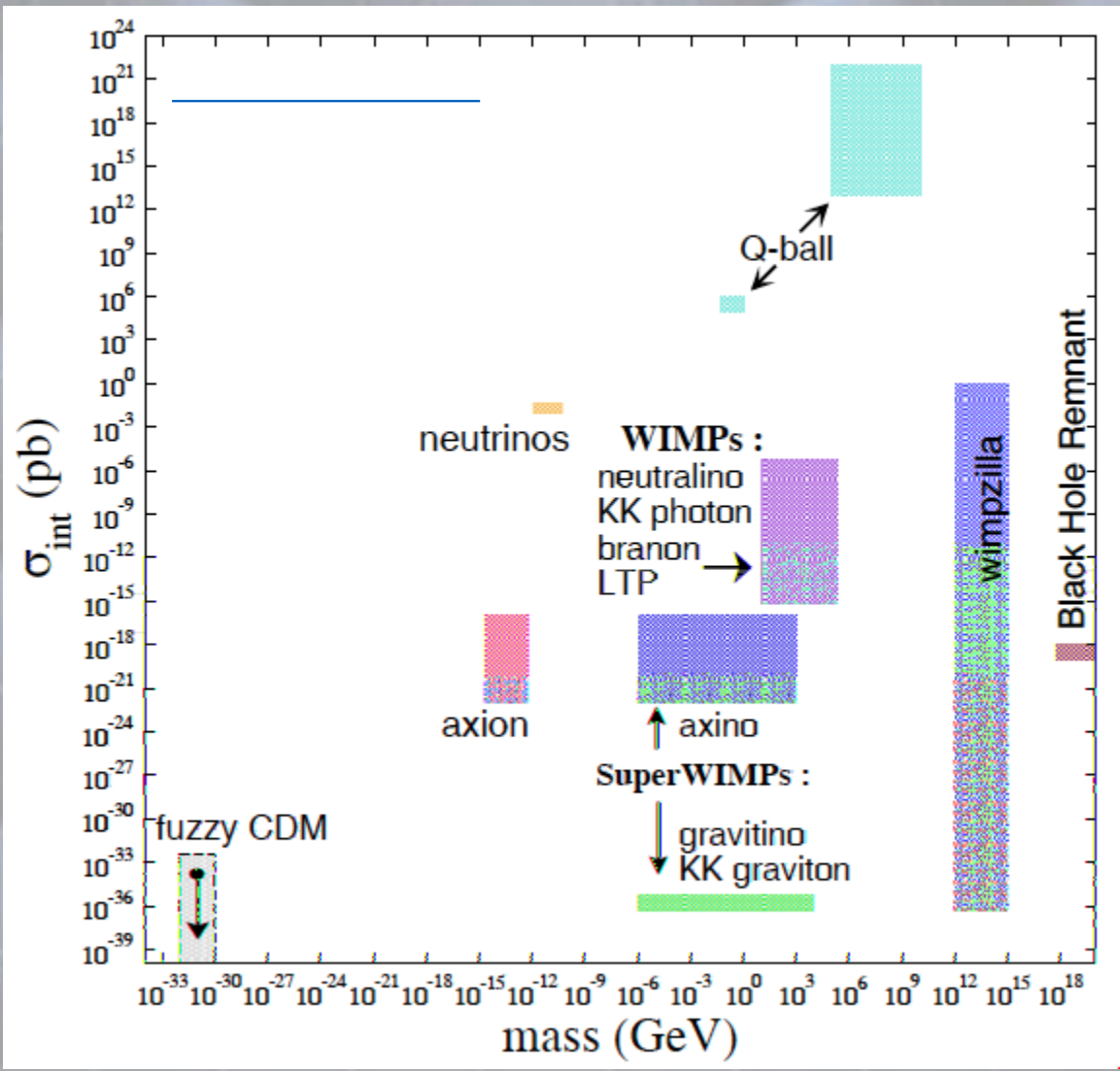
Backup

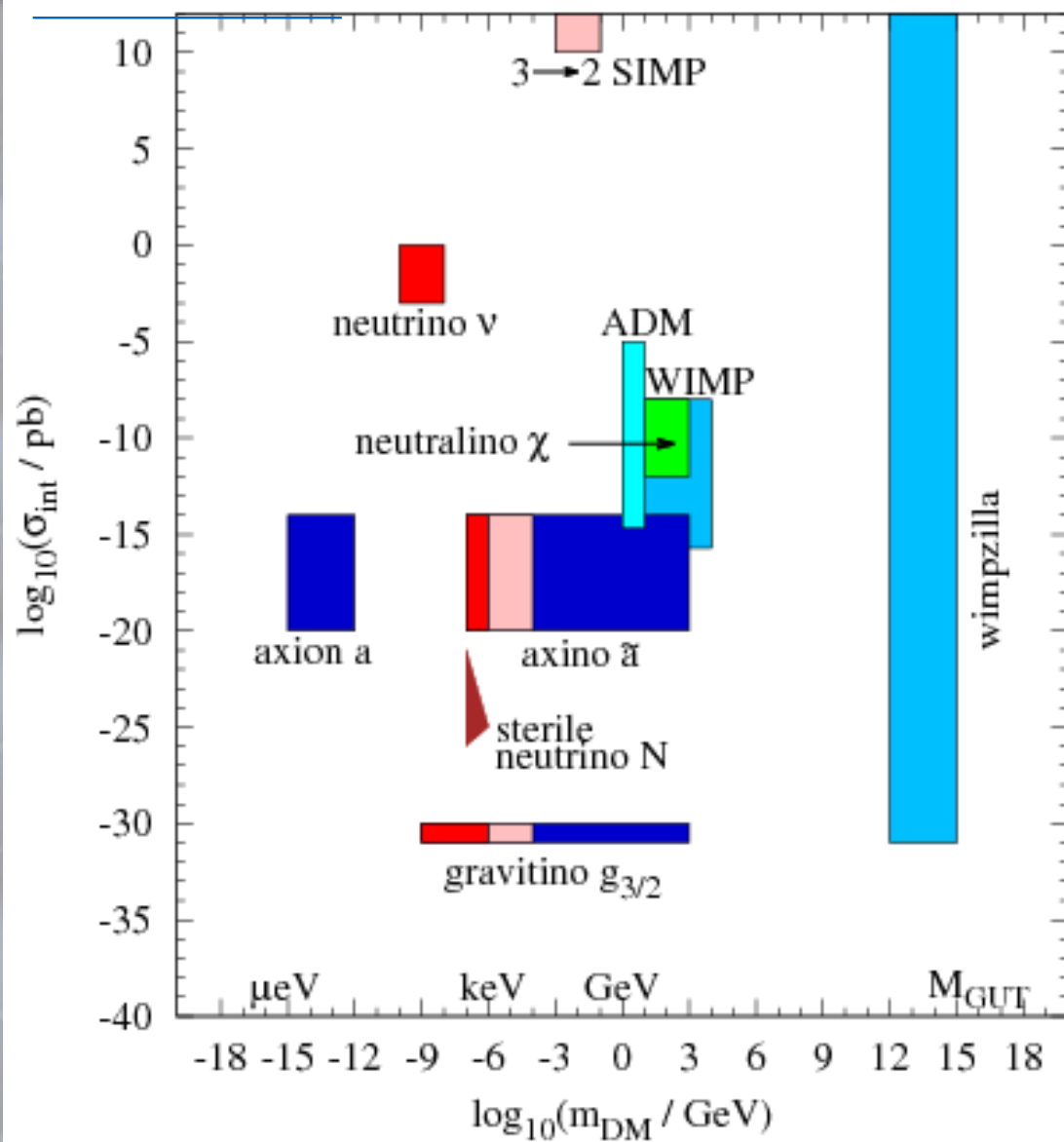
# 早見表





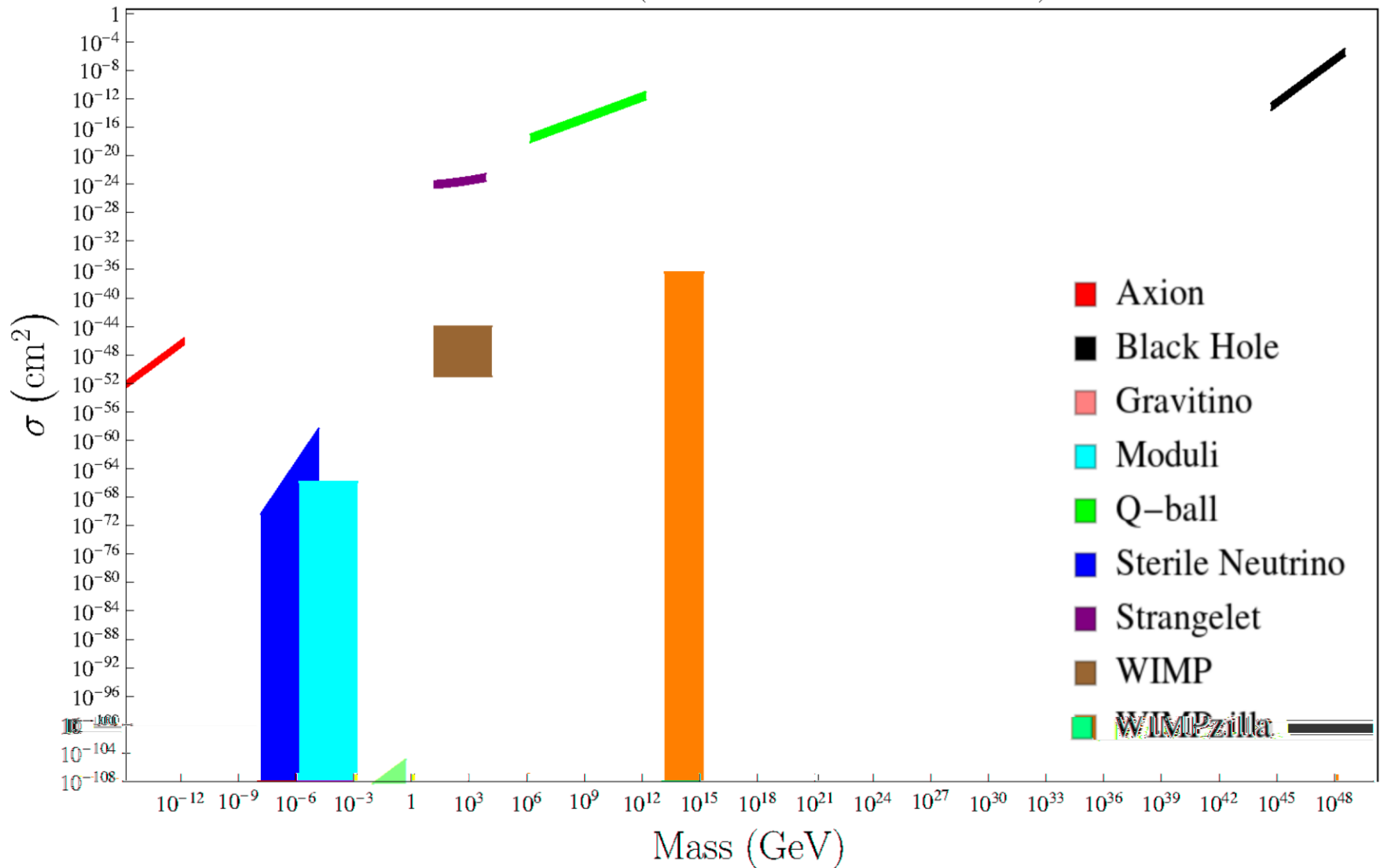






a

## Cross Section (Xenon for Reference)

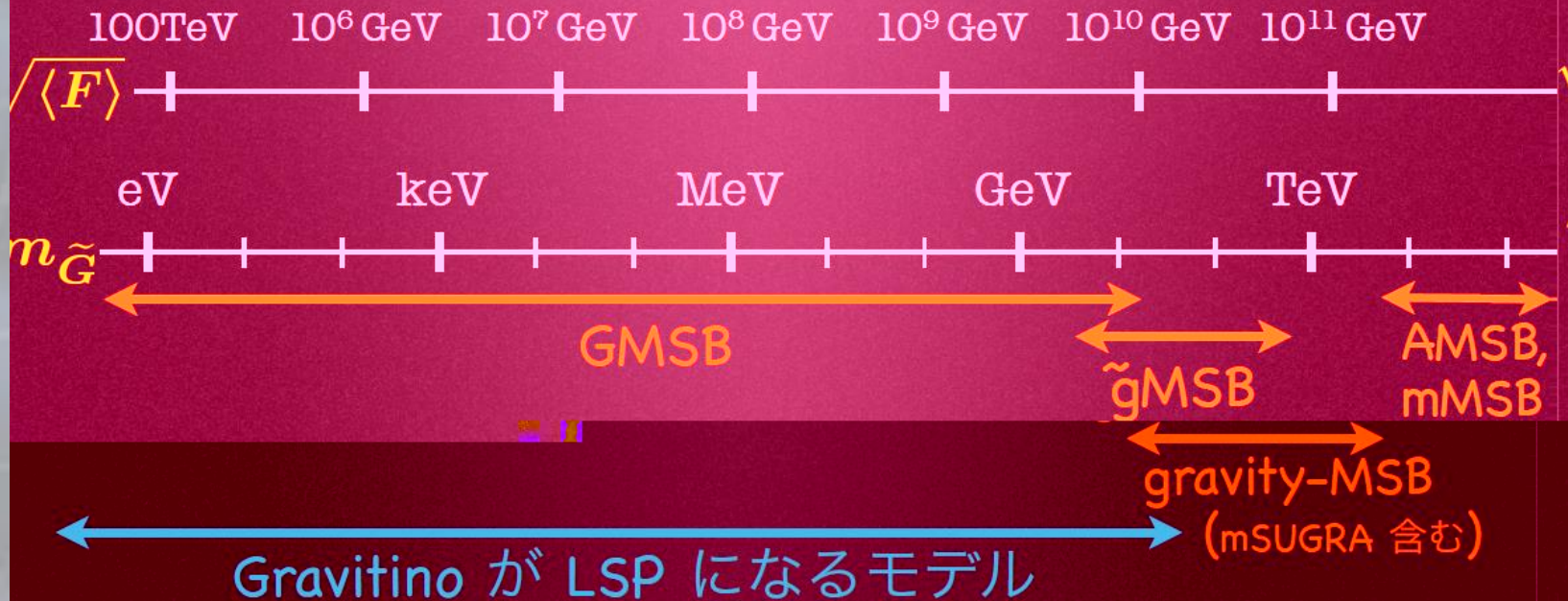


# Gravitino

- Gravitino Interaction: extremely weak

suppressed by  $\sim \frac{1}{M_P}$  (or  $\sim \frac{1}{F} \sim \frac{1}{M_P m_{\tilde{G}}}$ )

- Gravitino Mass  $m_{\tilde{G}} = \frac{1}{\sqrt{3}M_P} \langle F \rangle$  : model dependent





# Gravitino Problems



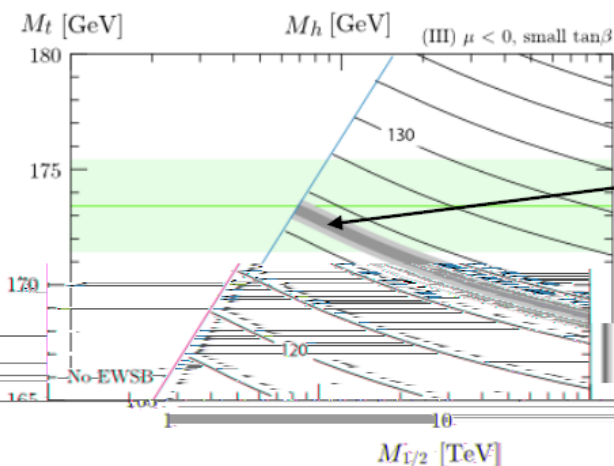
(Menzies, 2008; see also [http://arxiv.org/abs/hep-ph/0605188](#) for the updated plot)

Sorry, I drop references.

# グラビティーノ

CMSSMで $M_0=0$ シナリオが実はアリ。

[RK, Motono, Nagai '16]



$\mu < 0$ に2つ目の解

$M_{1/2} \sim 10 \text{ TeV}$

stauが3.5TeVぐらい

$M_{3/2} \sim 100 \text{ GeV}$

ココ

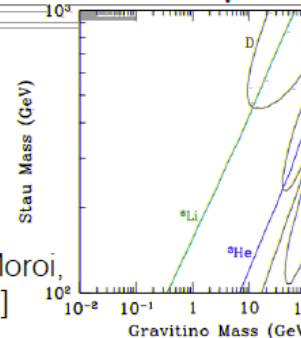


BBN大丈夫。

100TeV colliderか？

[Feng, Iwamoto, Shadmi, Tarem '15]

[Kawasaki, Kohri, Moroi, Yotsuyanagi '08]



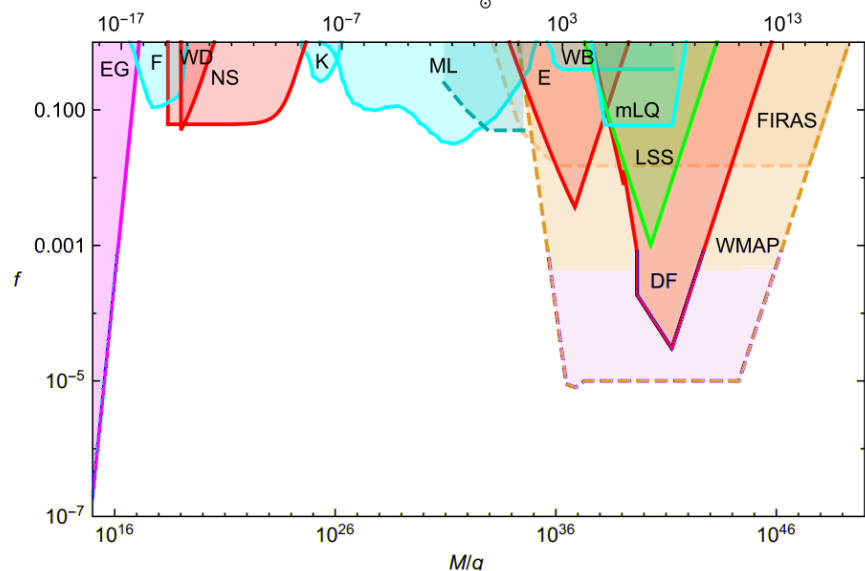


FIG. 3. Constraints on  $f(M)$  for a variety of evaporation (magenta), dynamical (red), lensing (cyan), large-scale structure (green) and accretion (orange) effects associated with PBHs. The effects are extragalactic  $\gamma$ -rays from evaporation (EG) [11], femtolensing of  $\gamma$ -ray bursts (F) [187], white-dwarf explosions (WD) [188], neutron-star capture constraints (NS) [36], Kepler microlensing of stars (K) [189], MACHO/EROS/OGLE microlensing of stars [27] and quasar microlensing (broken line) [190] (ML), survival of a star cluster in Eridanus II (F) [191], wide binary disruption (WB) [37], dynamical friction on halo objects (DF) [33], millilensing of quasars (mLQ) [32], generation of large-scale structure through Poisson fluctuations (LSS) [14] and accretion effects (WMAP and FIRAS) [15]. Only the strongest constraint is usually included in each mass range, but the accretion limits are shown with broken lines since they are highly model dependent. Where a constraint depends on some extra parameter which is not well known, we use a typical value. Most constraints cut off at high  $M$  due to the incredulity limit. See the original references for more details of details for these constraints.



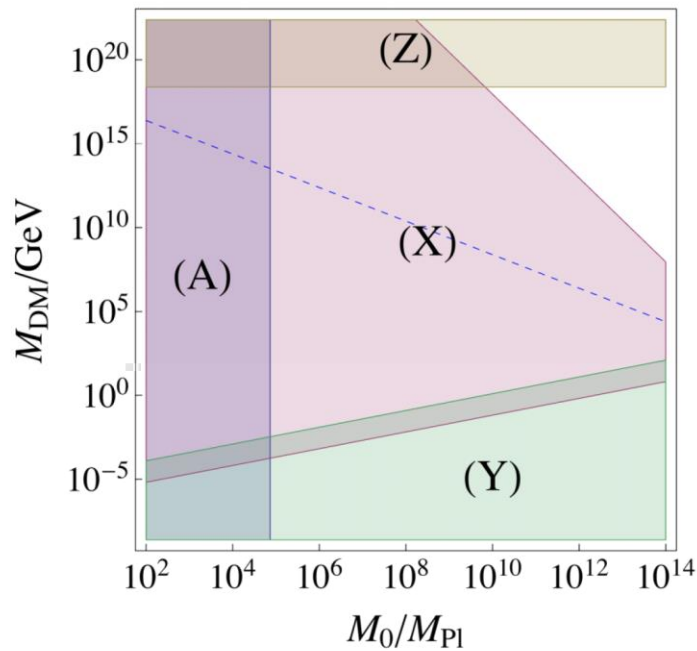


FIG. 2 (color online). Constraints on the initial PBH mass  $M_0$  and the DM mass  $M_{\text{DM}}$ . The region (A) is excluded by the constraint on the Hubble scale during inflation from Planck observations [Eq. (2.2)]. The region (X) is excluded because  $\Omega_{\text{DM}}$  exceeds the observed density parameter of dark matter [Eq. (4.4)]. On the boundary of (X), the observed dark matter density is obtained. The region (Y) is excluded due to the upper bound on the velocity of dark matter [Eq. (4.8)]. The region (Z) is shaded because  $M_{\text{DM}} > M_{\text{Pl}}$  and a reliable computation is difficult. The blue dashed line denotes  $M_{\text{DM}} = T_0$ , the boundary of the two cases.

# 重力波の基礎知識

重力 時空の歪み  $\equiv$  計量テンソル

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

ミンコフスキー空間 平らな時空 の場合は

$$ds^2 = \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = -dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$$

$$[\eta_{\mu\nu}] = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

素粒子のときと符号  
が逆なので注意！

アインシュタイン方程式

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

マクスウェル方程式

$$\longleftrightarrow F^{\mu\nu},_{\nu} = qj^{\mu}$$

# 重力波の基礎知識

弱場近似  $h_{\mu\nu} = g_{\mu\nu} - \eta_{\mu\nu}, \quad |h_{\mu\nu}| \ll 1$

アインシュタイン方程式を線形化

$$2G_{\mu\nu} = 2R_{\mu\nu} - Rg_{\mu\nu}$$

$$\begin{aligned} &\simeq h_{\mu\alpha,\nu}{}^\alpha + h_{\nu\alpha,\mu}{}^\alpha - h_{\mu\nu,\alpha}{}^\alpha - h_{,\mu\nu} - \eta_{\mu\nu}(h_{\alpha\beta}{}^{\alpha\beta} - h_{\beta}{}^{\beta}) \\ &= -\bar{h}_{\mu\nu,\alpha}{}^\alpha - \eta_{\mu\nu}\bar{h}_{\alpha\beta}{}^{\alpha\beta} + \bar{h}_{\mu\alpha,\nu}{}^\alpha + \bar{h}_{\nu\alpha,\mu}{}^\alpha \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{h}_{\mu\nu} &= h_{\mu\nu} - \frac{1}{2}h \\ \bar{h} &= \bar{h}^\mu{}_\mu \end{aligned}$$

さらに次のゲージ条件式をつを課す

$$\bar{h}^{\mu\alpha}{}_{,\alpha} = 0$$

すると

$$-\square\bar{h}_{\mu\nu} = 16\pi GT_{\mu\nu}$$

ローレンツゲージ

$$A^\alpha{}_{,\alpha} = 0$$

$$\square A_\mu = -qj_\mu$$

おまけにエネルギー保存と確立保存も書くと

$$T^{\mu\nu}{}_{,\mu} = 0$$

$$j^\mu{}_{,\mu} = 0$$

# 重力波の基礎知識

真空中を伝搬する重力波

$$\square \bar{h}_{\mu\nu} = 0$$



平面波解

$$\bar{h}_{\mu\nu} = \underbrace{\varepsilon_{\mu\nu}}_{\text{偏光テンソル}} e^{ik_\alpha x^\alpha}$$

$$k_\alpha k^\alpha = 0$$

まだ残っているゲージ自由度 定ベクトル の 成分分

$$\varepsilon_{\mu\nu} \rightarrow \varepsilon_{\mu\nu} - c_\mu k_\nu - c_\nu k_\mu + \eta_{\mu\nu} c^\alpha k_\alpha$$

及びさっきのゲージ固定式 対称テンソルなので、 の自由度は

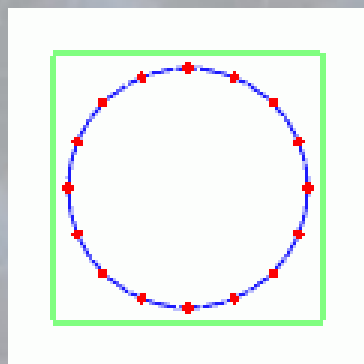


モードとモード ゲージ

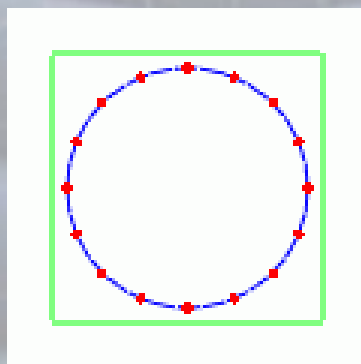
$$[\varepsilon_{\mu\nu}] = \varepsilon^+ \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + \varepsilon^\times \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

# 重力波の基礎知識

モード



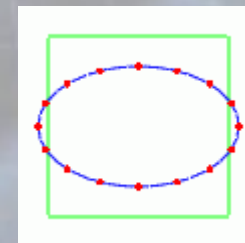
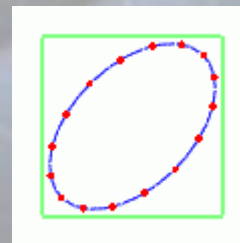
モード



位相を

ずらして重ねる

円偏光



重力波はテンソル波 スピン （量子化の描像は必要ない）  
度回すと元に戻る。 度回すとマイナスが付く。  
何かを揺さぶって 受信するには 本の軸が必要

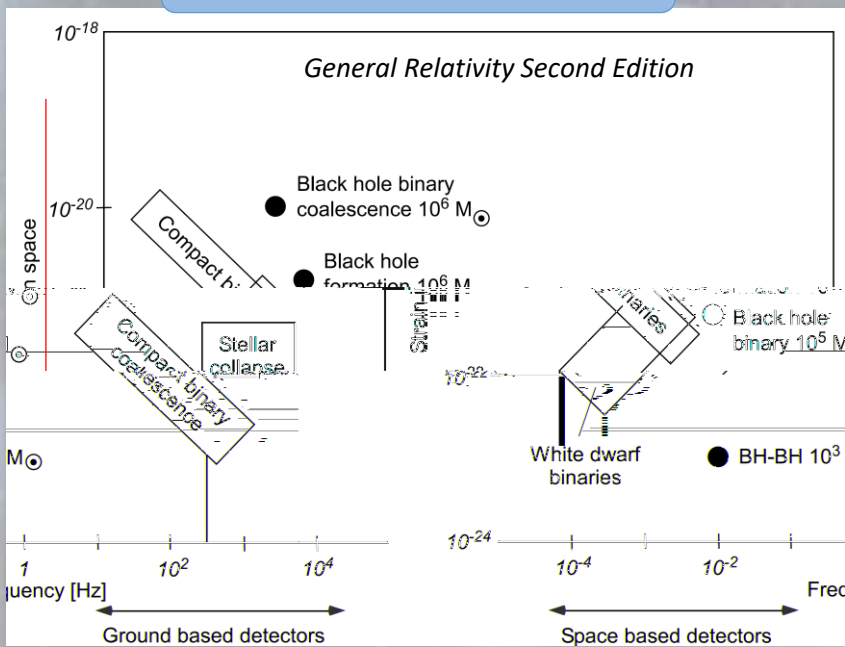
電磁波はベクトル波 スピン

度回すと元に戻る。 度回すとマイナスが付く。  
受信するには 本の軸が必要 ラジオのアンテナ

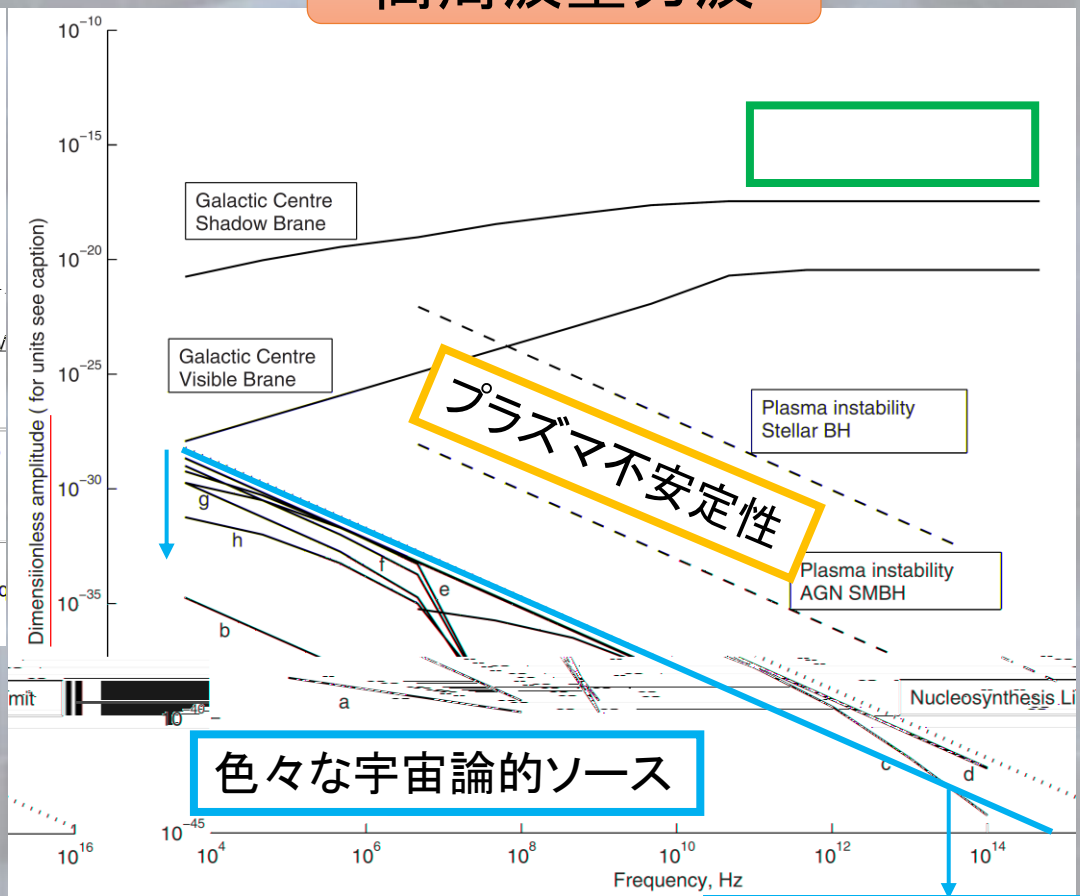


# 重力波源と周波数

## 「普通の」重力波



## 高周波重力波



コンパクト連星  
 白色矮星連星  
 の崩壊・形成・連星・合体  
 コンパクト連星の崩壊  
 恒星の重力崩壊

からの制限

# 超高周波重力波源の候補

## 離散ソース

星からの熱的重力波放射

静的な場での と の相互転換

極軽原子ブラックホールのホーキング放射

## 極初期宇宙由来

インフレーションの初期揺らぎの増幅によって引き起こされる

元素合成から上限があるため、**あったとしても見つけれられる可能性は低い**

## モデル

一次相転移のバブルの衝突

ループ量子重力理論のモデル

宇宙ひもの崩壊

など

銀河中心ブラックホールの 次元への影響

と

電磁波 + 静磁場 重力波

**観測するうえで  
現実的な候補**

# 重力波源と周波数

## 超高周波数帯に予言される重力波源

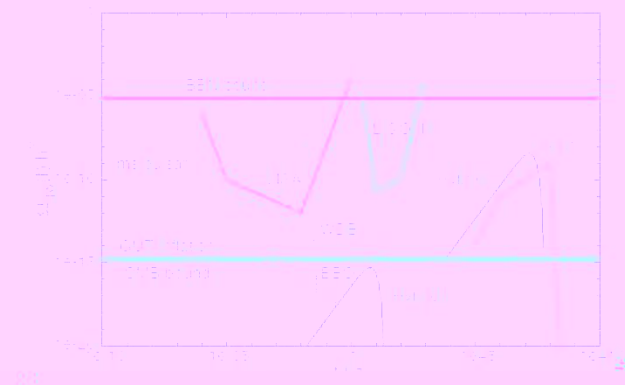
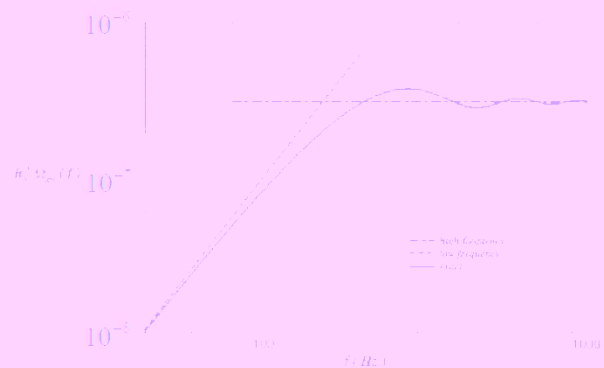
### 宇宙論起源の背景重力波

- quintessential inflation  
[ M.Giovaninni (1999) ]



- preheating  
[ J. Garcia-Bellido & Figueroa (2007) ]

- pre-big-bang モデル  
[ A. Buonanno et al. (1997) ]





# 重力波源と周波数

## 超高周波数帯に予言される重力波源

### 天体起源の点波源

- **原始ブラックホール** [ T.Nakamura et al. (1997), K.loka et al. (1998) ]

$10^{-4} M_{\odot}$  のBH が存在する系が連星を形成し、その合体直前で  
100MHz の重力波を放出する。

$$h_s = 3 \times 10^{-25} [\sqrt{\text{Hz}}] \left( \frac{M}{10^{-4} M_{\odot}} \right)^{5/6} \left( \frac{\nu}{100 \text{MHz}} \right)^{-2/3} \left( \frac{r}{10 \text{kpc}} \right)^{-1}$$

- **Randall-Sundrum モデルにおけるブラックストリング**  
[ S.S.Seahra et al. (2005), C. Clarkson & S. S. Seahra (2007) ]

一方のプレーン上で星が BH 周りを回っている場合、KK - Graviton が  
励起される。

$$h_{\max} \sim \mathcal{A} \left( \frac{M_p}{M_{\odot}} \right) \left( \frac{r}{\text{kpc}} \right)^{-1} \left( \frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-1/2} \left( \frac{\ell}{0.1 \text{mm}} \right)^{1/2}$$

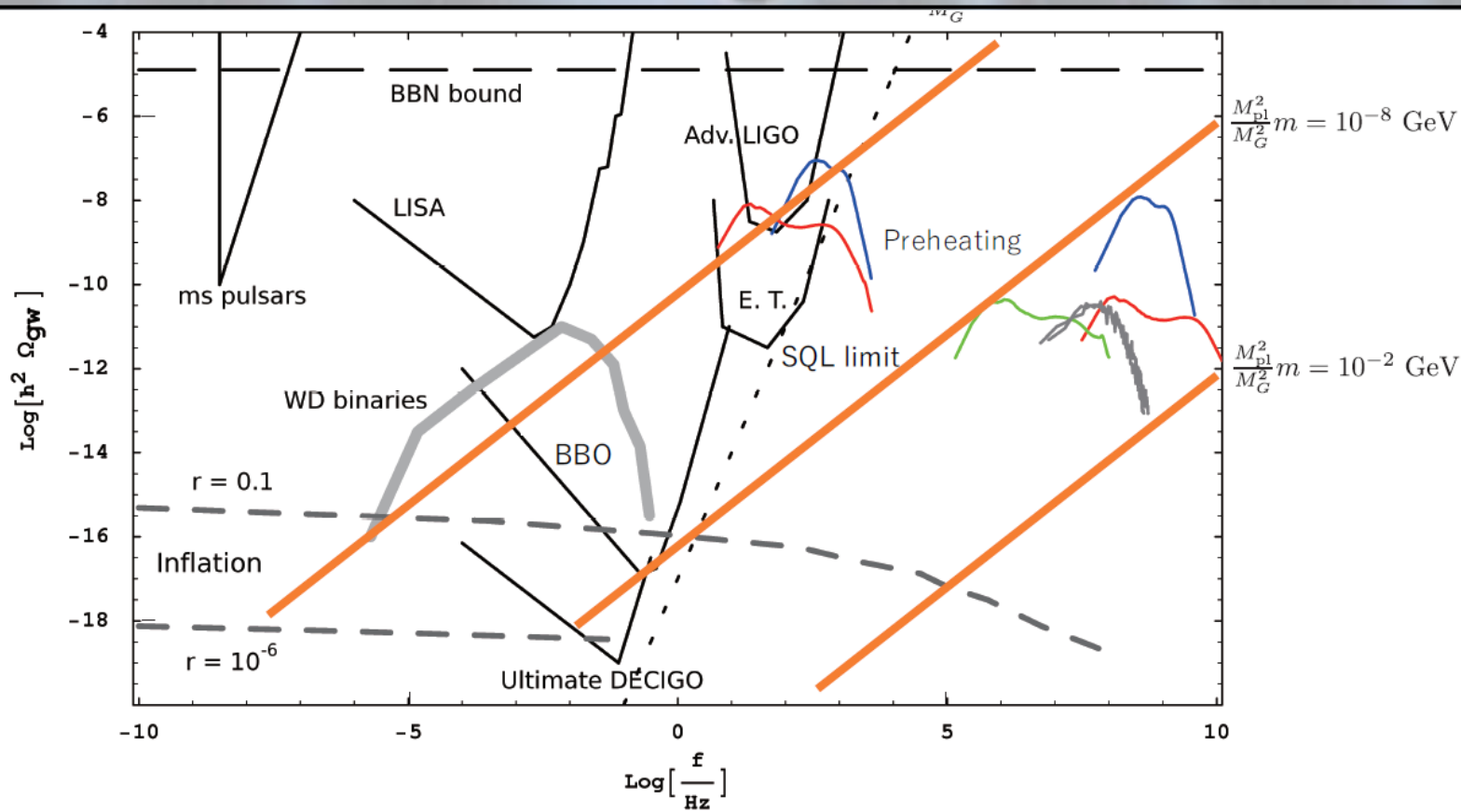


FIG. 2. The sensitivities of gravitational wave detectors and the expected gravitational wave spectra from the preheating (red, blue, green and gray curves at the right), adopted from [30]. The orange lines then represent expected frequency and amplitude of the gravitational wave background corresponding to the massive graviton  $(M_{\text{pl}}/M_G)^2 \times m = 10^{-14} \text{ GeV}$  and  $10^{-2} \text{ GeV}$ . The massive graviton background can be detected by LIGO for  $(M_{\text{pl}}/M_G)^2 \times m \sim 10^{-14} \text{ GeV}$ . In particular, some of gravitational wave spectra are detectable thus detected by LIGO, for which the massive graviton can be the dominant component of dark matter when  $(M_{\text{pl}}/M_G)^2 \times m \sim 10^{-14} \text{ GeV}$ .



FUJITA *et al.*

PHYSICAL REVIEW D **89**, 103501 (2014)

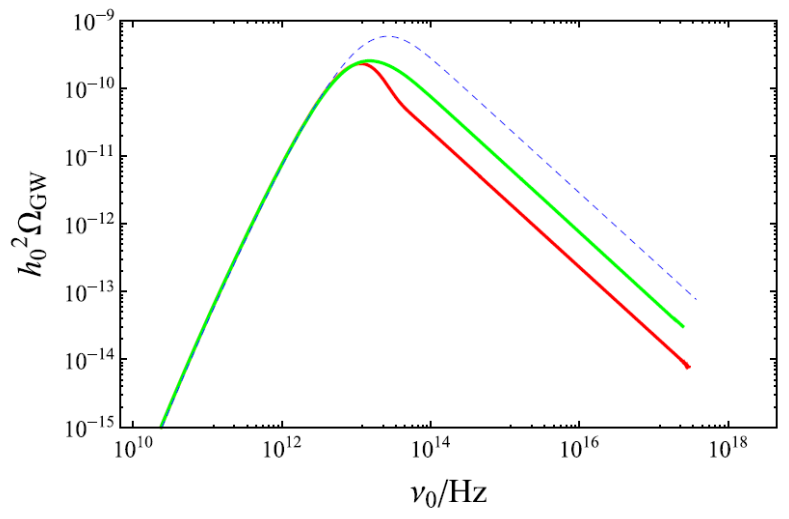
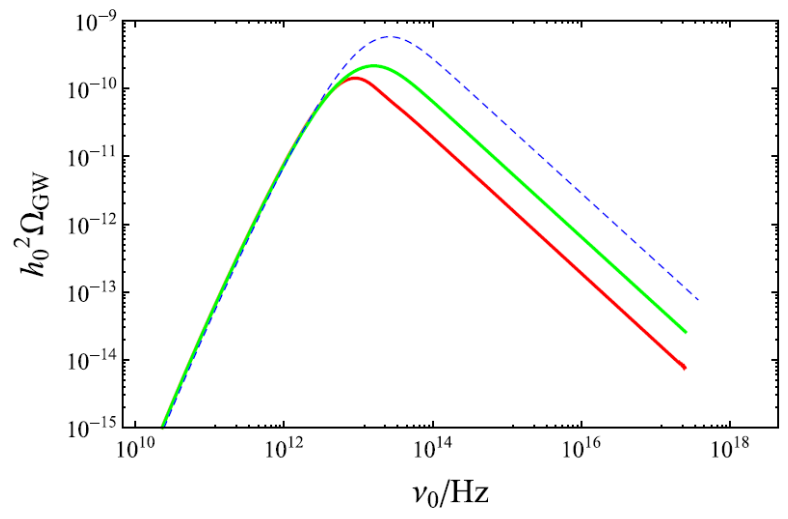


FIG. 6 (color online). The present spectral energy density of gravitational waves  $\Omega_{\text{GW}}(\nu_0)$  that are generated by the Hawking radiation

# abstract

IOP PUBLISHING

CLASSICAL AND QUANTUM GRAVITY

Class. Quantum Grav. **29** (2012) 095003 (12pp)

[doi:10.1088/0264-9381/29/9/095003](https://doi.org/10.1088/0264-9381/29/9/095003)

## **The potential for very high-frequency gravitational wave detection**

A M Cruise

### **Abstract**

The science case for observing gravitational waves at frequencies in the millihertz–kilohertz range using LIGO, VIRGO, GEO600 or LISA is very strong and the first results are expected at these frequencies. However, as gravitational wave astronomy progresses beyond the first detections, other frequency bands may be worth exploring. Early predictions of gravitational wave emission from discrete sources at very much higher frequencies (megahertz and above) have been published and more recent studies of cosmological signals from inflation, Kaluza–Klein modes from gravitational interactions in brane worlds and plasma instabilities surrounding violent astrophysical events, are all possible sources. This communication examines current observational possibilities and the detector technology required to make meaningful observations at these frequencies.

# 著者 : Adrian Michael Cruise

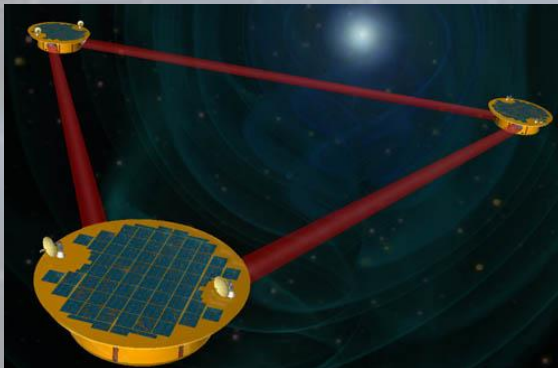
---

---

---



**Emeritus Professor of Astrophysics and Space Research, University of Birmingham**



# データ取得

## マイクロ波

主なノイズはフロントエンドのアンプ中の熱雑音

### マイクロ波受信機

電磁場の成分を捉えて、局所的に増幅して適切な形式に変換する。

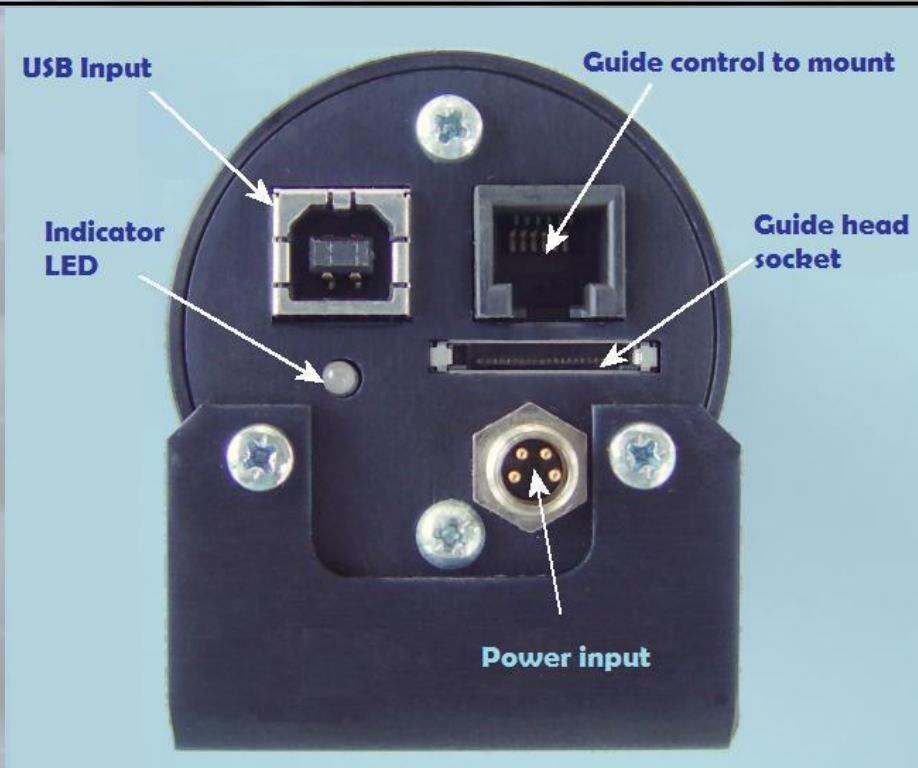
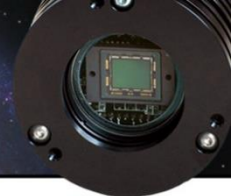
ゲインの不安定性を減らすために  $\frac{1}{\sqrt{B}}$  を使用。  
 $\frac{1}{\sqrt{B}}$  はロックインアンプを使って 秒ごとに  
積分値をデジタイズする。  
秒ごとに  $\frac{1}{\sqrt{B}}$  の広いスペクトルでも測定する。

## 可視光

主なノイズは  $\frac{1}{\sqrt{B}}$  の電氣的読み出しノイズ  
および宇宙線によって貯まる電荷。

焦点距離  $\frac{1}{\sqrt{B}}$  の集光レンズ付き。  
色感度は無いが、位置情報は保存  $\frac{1}{\sqrt{B}}$  が来た方向がわかる。  
秒ごとに読みだされる。

# CCD: SXVF-M5



Compact sized medium resolution 'SuperHAD' CCD chip, with 290,000, 9.8 x 6.3 $\mu$ m pixels in a 4.9 x 3.65mm array.

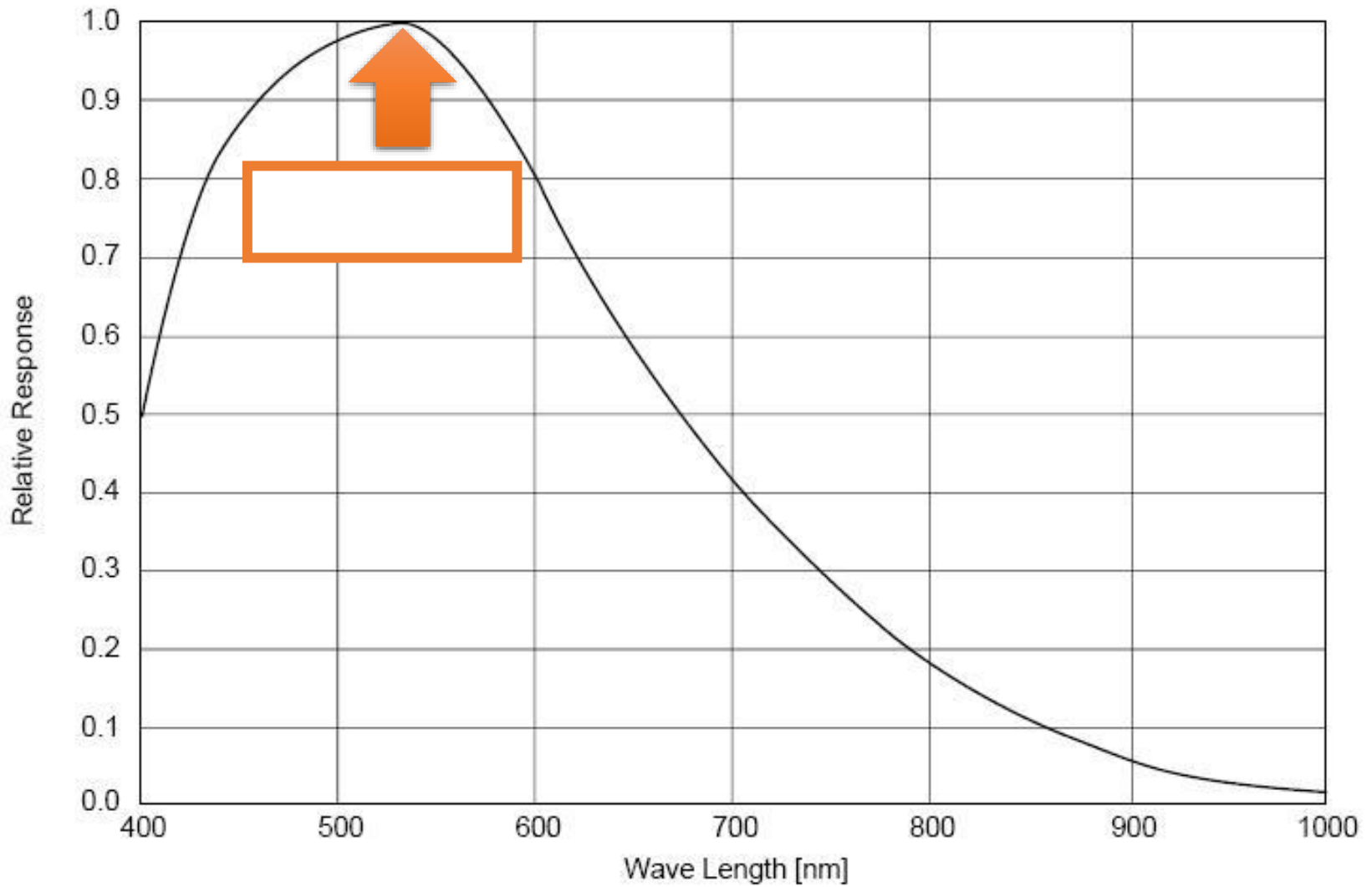
**High QE** over a wide spectral range from near UV to deep IR (次ページ)

Readout Noise: Less than 13 electrons RMS - typically only 11 electrons.

Full-well capacity: Greater than 60,000 e<sup>-</sup> (unbinned)

**Extremely low dark signal** - No dark frames necessary for many deep sky objects

# CCD: SXVF-M5



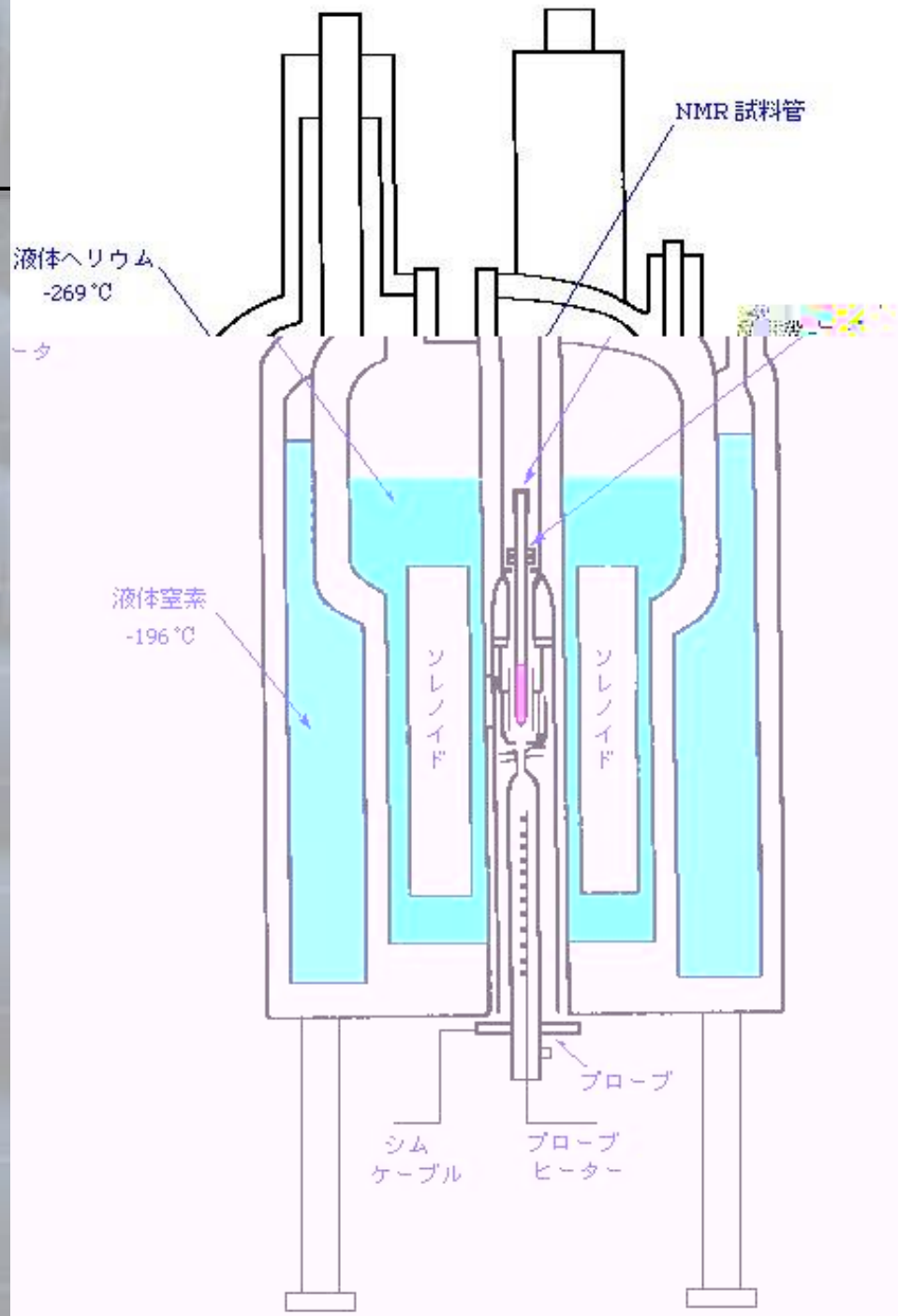


# 磁石



	赤道における地磁気の強さ
	一般的なメモ等を貼るための磁石
	一般的なスピーカーの磁石
	医療用核磁気共鳴画像法
3T	MLF ミューオン 実験
4T	Sumico
5T	実験 最大磁場
	中心磁場 コイル内最大磁場
9T	
	核磁気共鳴(NMR)分光計
	カエルが宙を舞うために必要な磁場
	実験室で作り出すことのできた最大の安定磁場
	中性子星
	マグネター

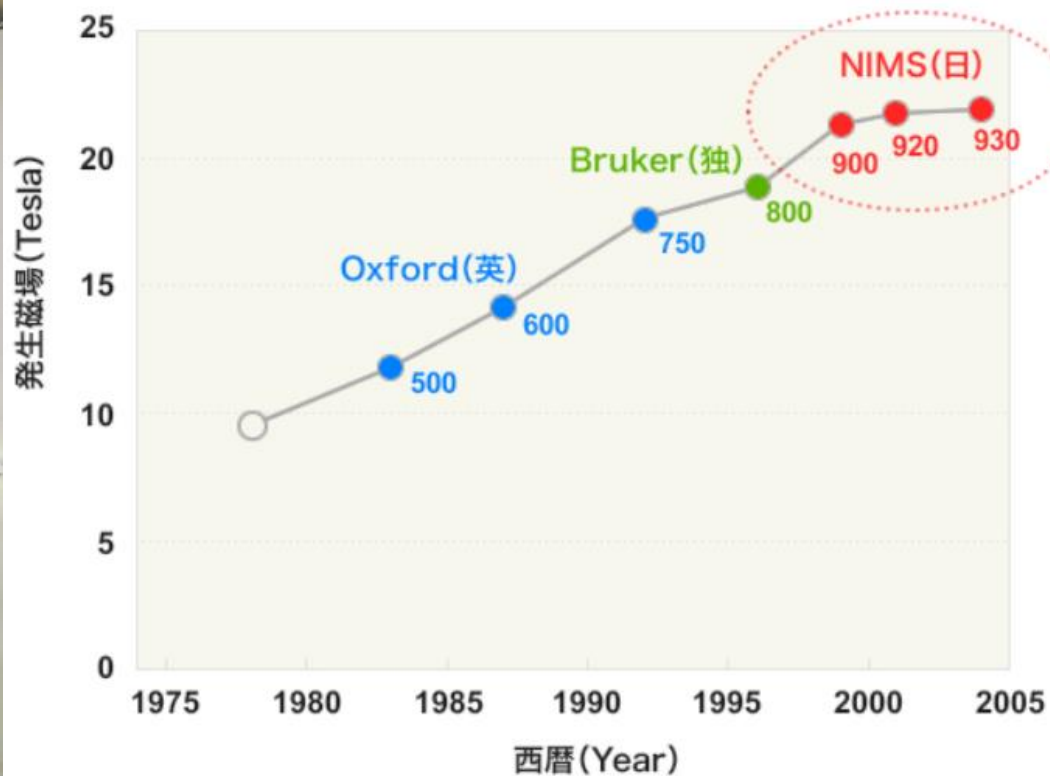
# NMR



# NMR



国立研究開発法人 物質・材料研究機構  
National Institute for Materials Science



# プロトタイプ検出器の感度見積もり

