

# X線観測で探る中性子星の内部構造

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

堂谷忠靖

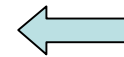
# 目次

- 中性子星とは何か
- なぜ内部構造か
- 内部構造を探る方法
- 観測されている中性子星の分類
- 過去の観測：電波パルサー
- X線観測：なぜX線か、どういう観測が可能か
- 次期X線天文衛星ASTRO-H
- 中性子星の重力赤方偏移
- ミリ秒パルサーのパルス波形
- NICER：Neutron star Interior Composition ExploreR

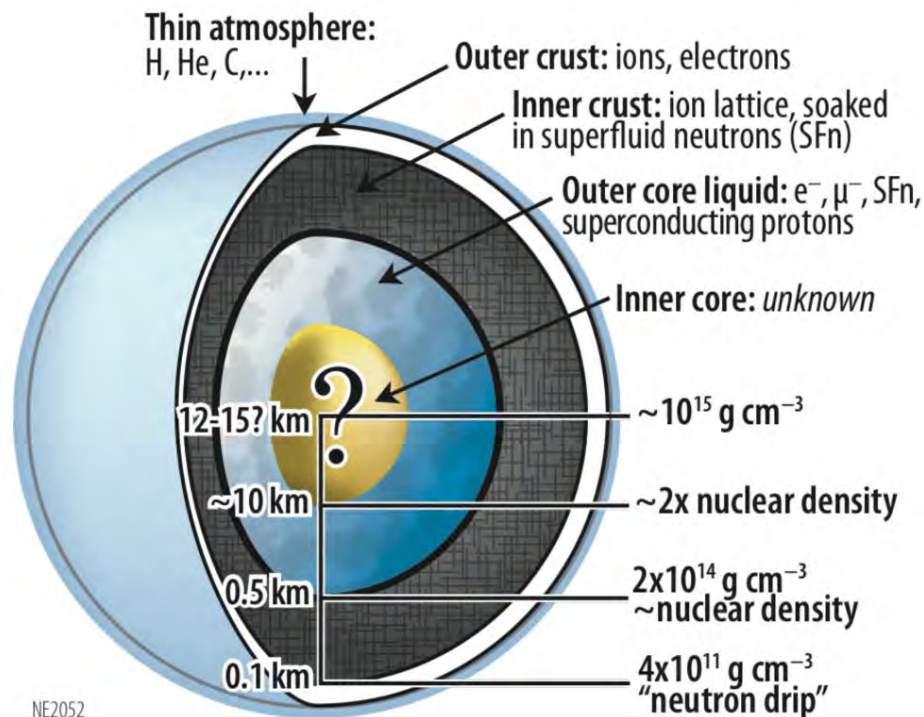
# 中性子星の概要

## What is a neutron star?

中性子の縮退圧で支えられた星



大質量星の超新星爆発(II型)で誕生



質量: 1-2  $M_{\odot}$   
半径:  $\sim 10 \text{ km}$

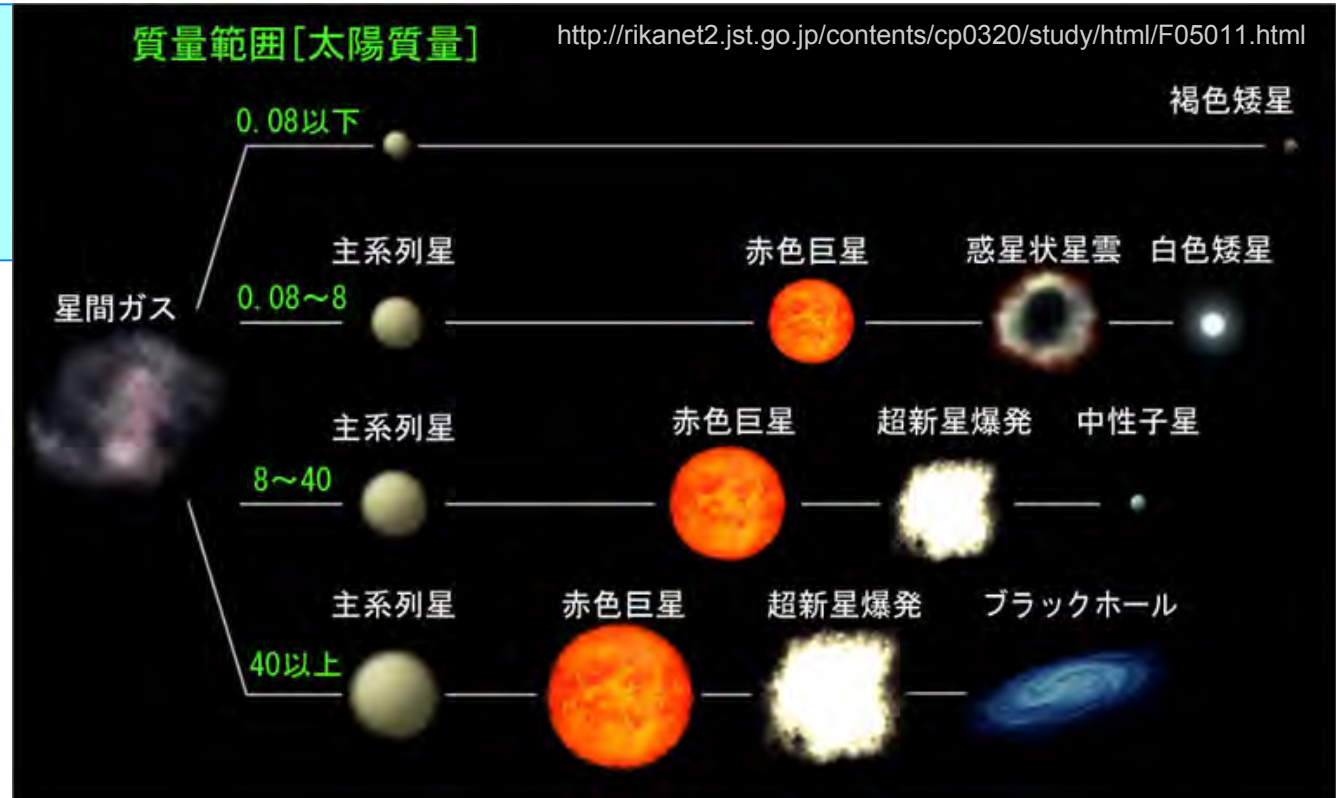


- 密度は原子核の密度にほぼ同じ
- 半径は、シュワルツシルト半径の3倍に過ぎない。

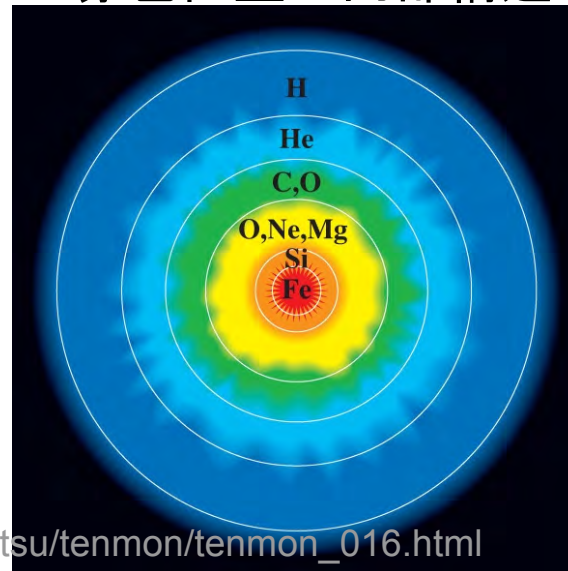
# 中性子星の誕生

## Formation of a neutron star

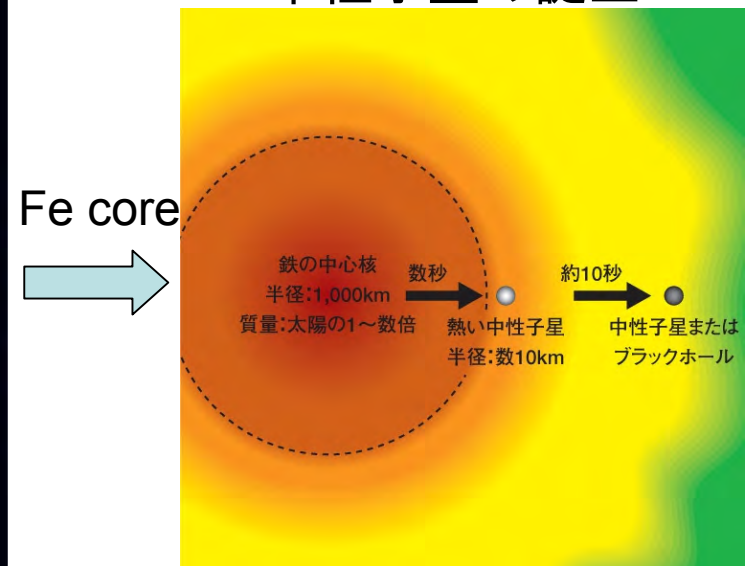
8M<sub>☉</sub>より重い星が一生の終わりに超新星爆発を起こし、中性子星が形成される(ことがある)。



赤色巨星の内部構造



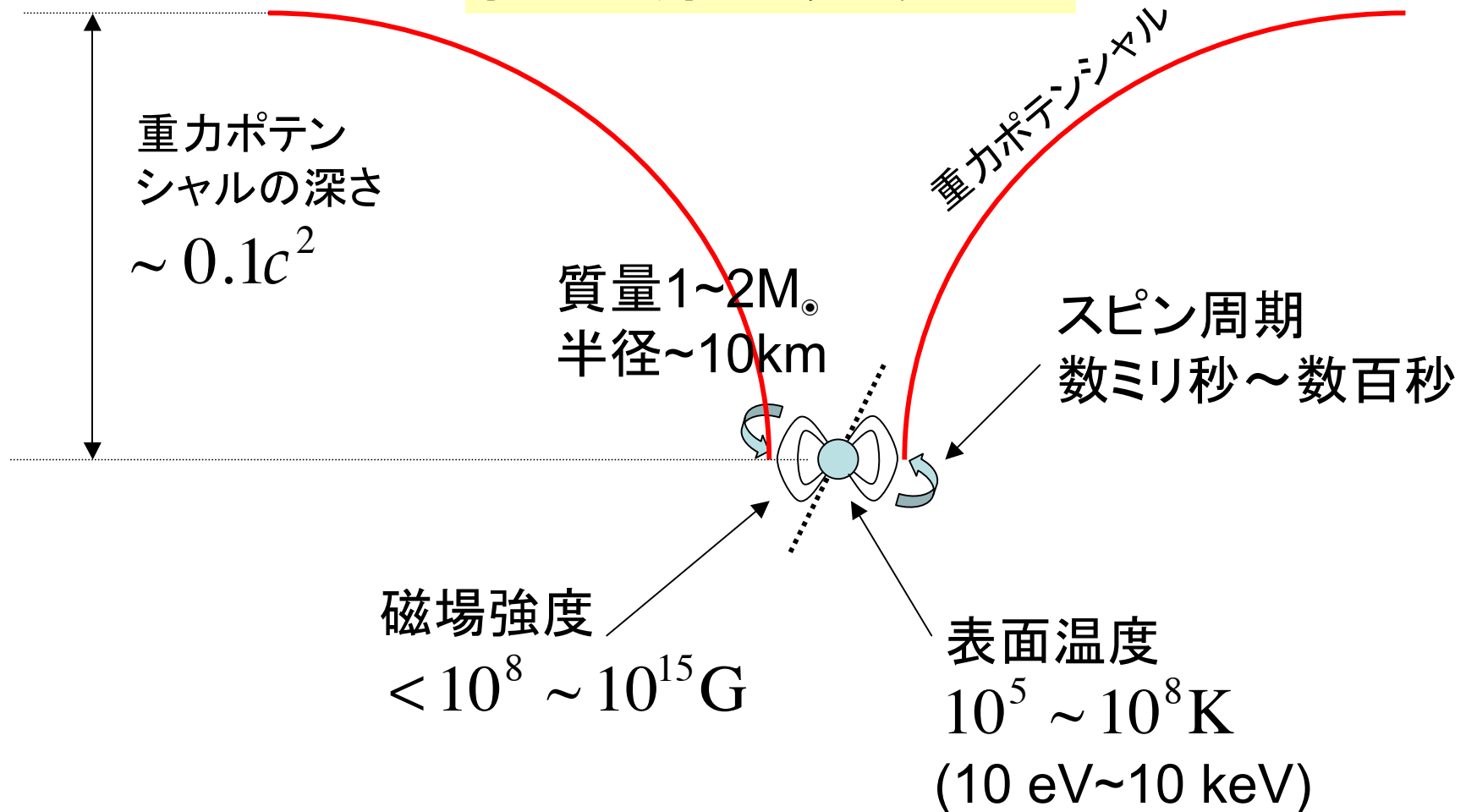
中性子星の誕生



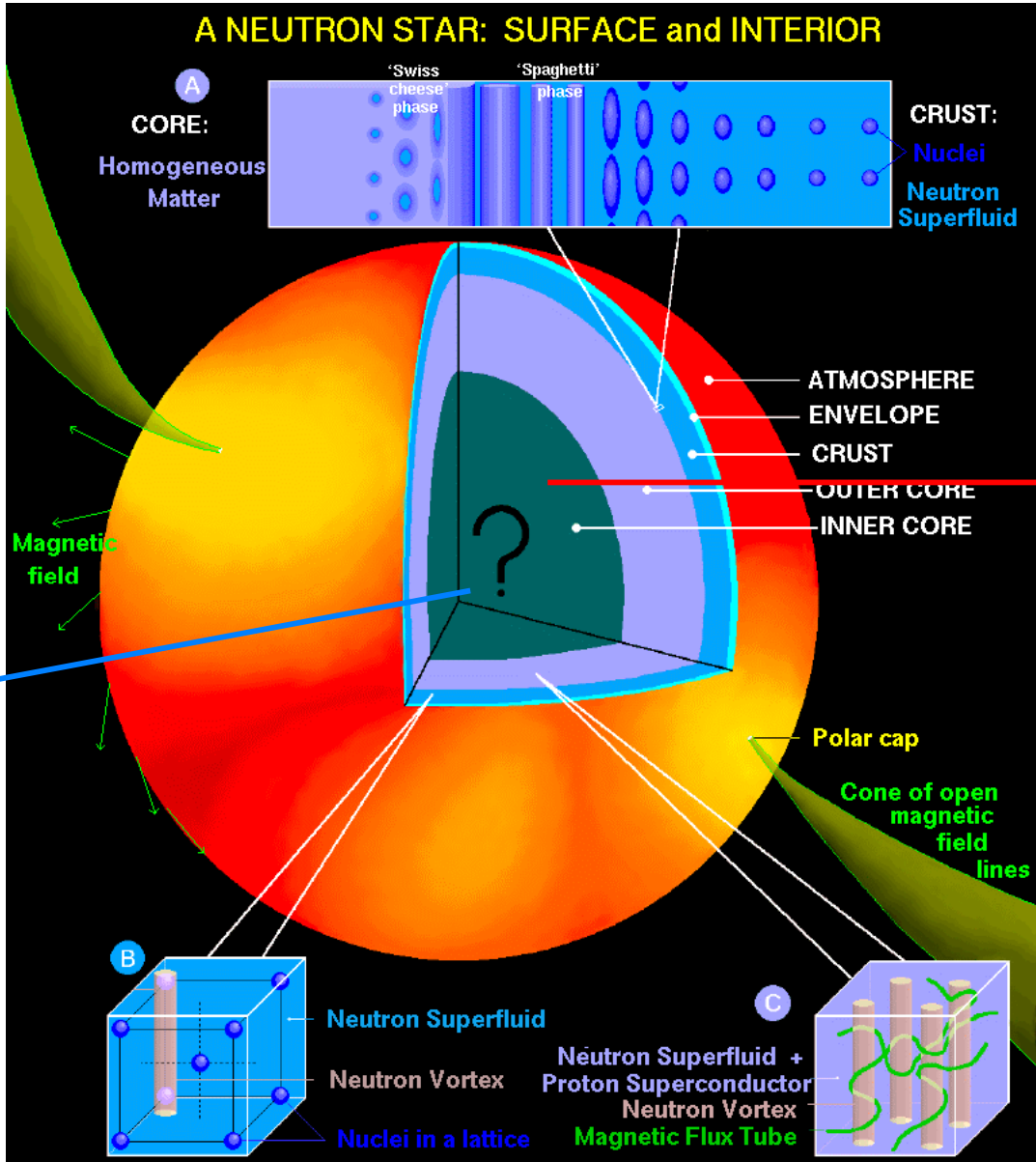
# 中性子星の典型的パラメータ

## Typical parameters of a neutron star

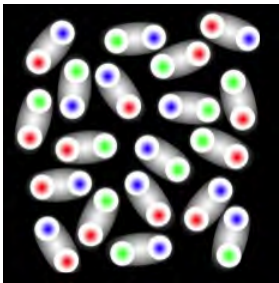
### 強重力、強磁場の実験室



# 中性子星の内部構造(想像図)

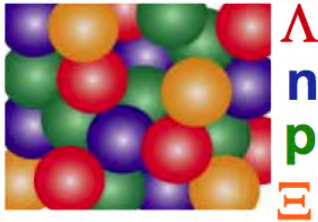


純クォーク物質？



ストレンジ・ハドロン物質？

ハイペロンを含む  
高密度核物質



Dany Page (UNAM) の図に、田村裕和さん (東北大) の図を追加。

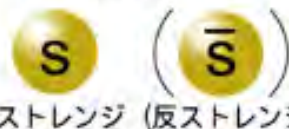
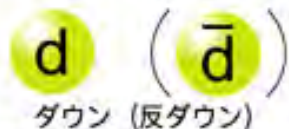


# ハドロンの仲間とクォーク

ハドロンを構成する素粒子

クォーク (それぞれのクォークには対応する反クォークがある)

グルーオン

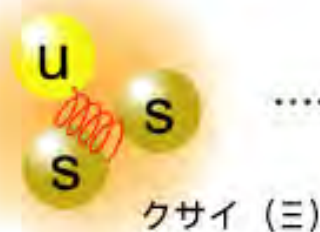


ハドロンの仲間たち



陽子と中性子をまとめて「核子」

バリオン



..... ハイペロン



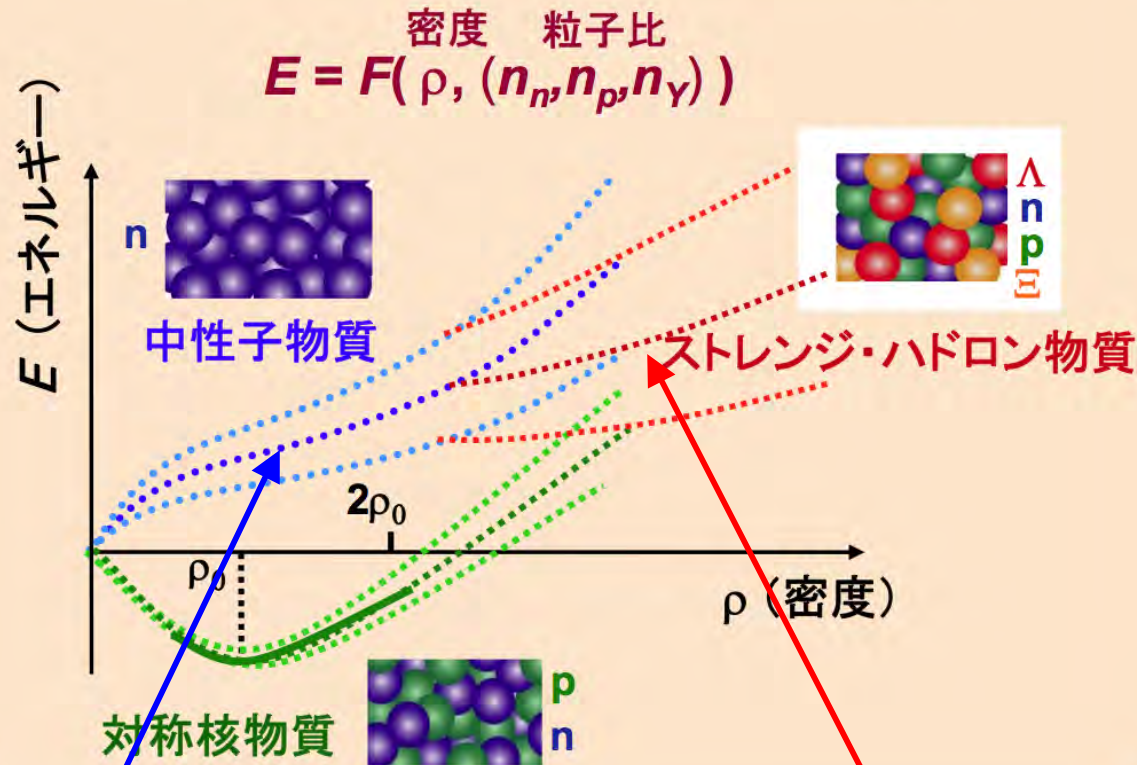
..... メソン 中間子

News@KEK  
より引用

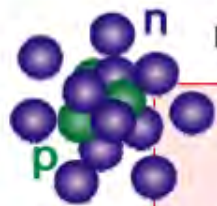


# 核物質の状態方程式 (EOS)

田村裕和さん(東北大)のプレゼンより引用



<http://www-conf.kek.jp/past/hadron1/JPARC-hadsalon/Slides/6th/JPARC-HadSalon-Tamura.pdf>



中性子物質のEOS決定

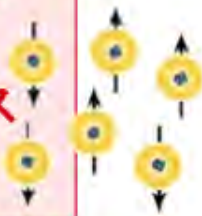
中性子過剰核@RIBF

+

極低温フェルミ原子ガス

で実験的に調べる

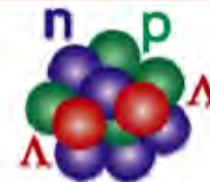
B班



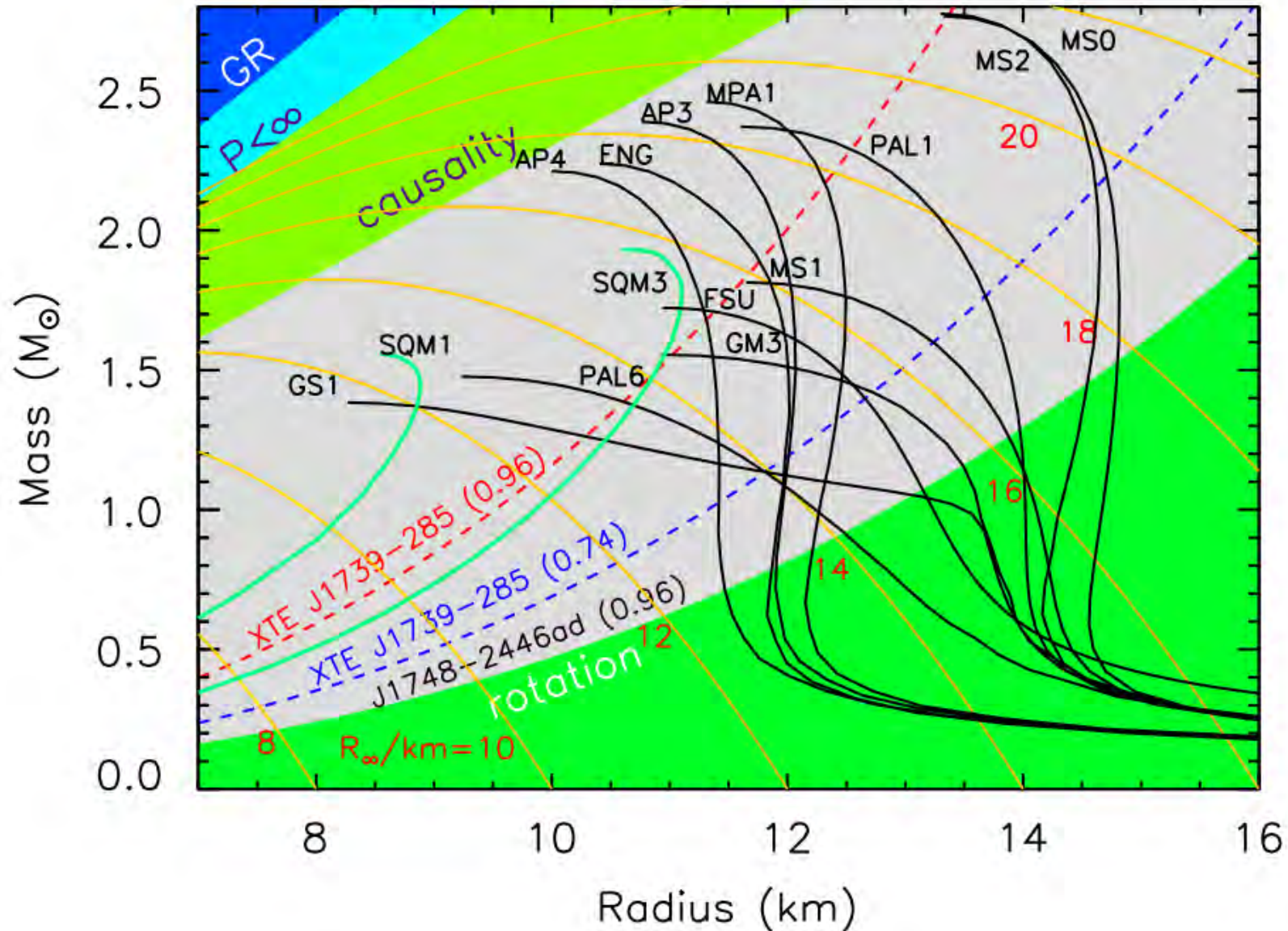
粒子間相互作用を測定、EOSのinputに

ハイパー核で実験的に調べる@J-PARC

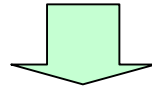
A班



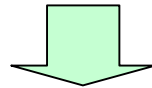
# EOSと中性子星の質量半径



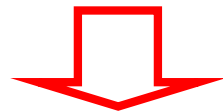
中性子星の内部構造を探るには？



核物質の状態方程式が決められれば良い



核物質の状態方程式を決めるには、中性子星の質量と半径を求めれば良い



どのような中性子星をターゲットとして、どのような観測を行えば良いか？

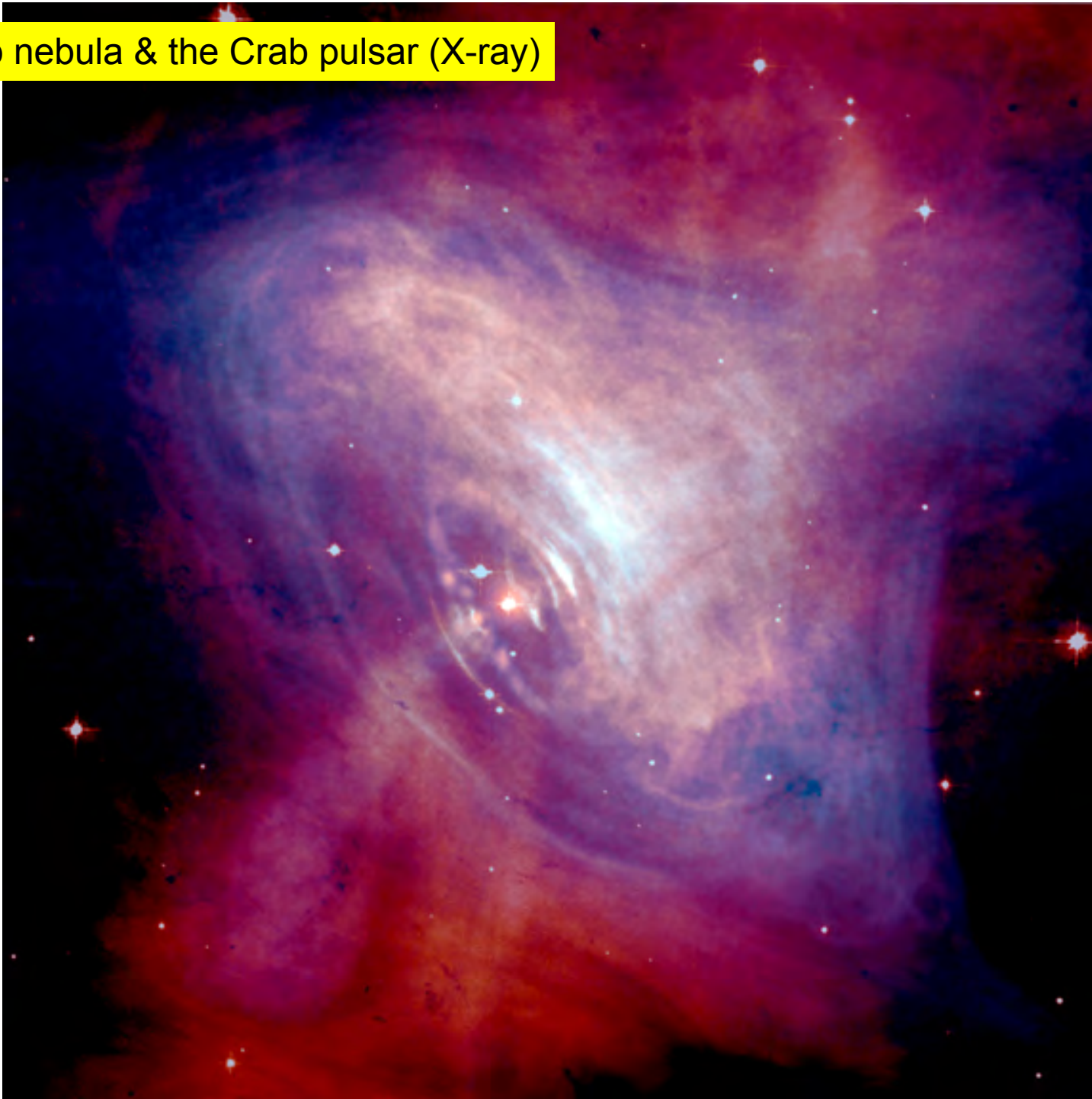
# 多様な中性子星

- すべての種類の中性子星が発見されているかどうかは不明。
- エネルギー源にしたがって分類するのが便利。

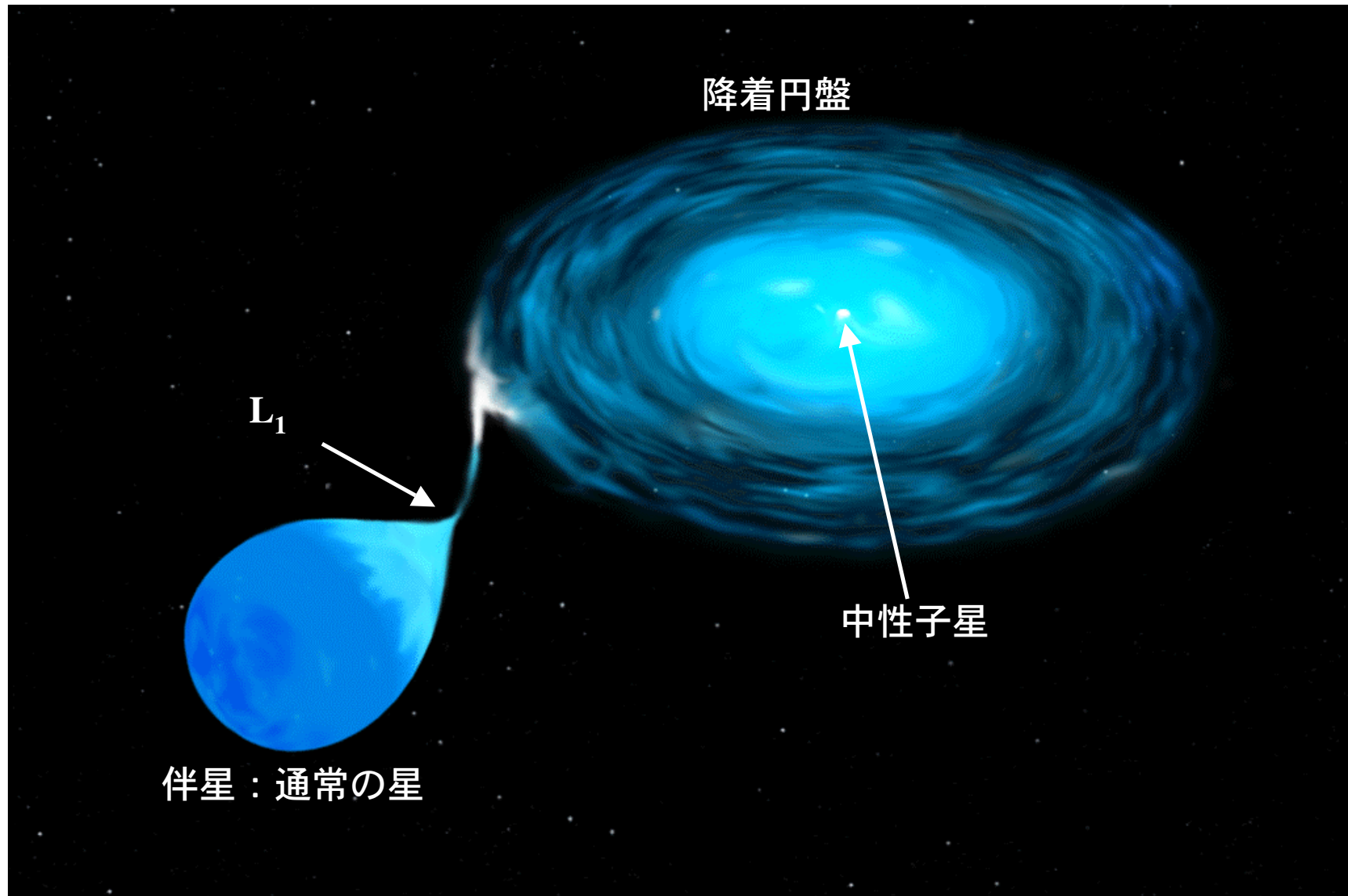
	回転エネルギー	重力/熱エネルギー	磁気エネルギー
単独星	電波パルサー (ミリ秒パルサー)	CCO (Central Compact Object) XDINS (X-ray Dim Isolated Neutron Star)	マグネター SGR (Soft $\gamma$ -ray Repeater) AXP (Anomalous X-ray Pulsar)
連星	(ミリ秒パルサー)	X線パルサー 低質量X線連星(X線バースト源)	

注:ミリ秒パルサーは、電波パルサーの一種

The Crab nebula & the Crab pulsar (X-ray)



# 低質量X線連星 (Low-mass X-ray binaries)



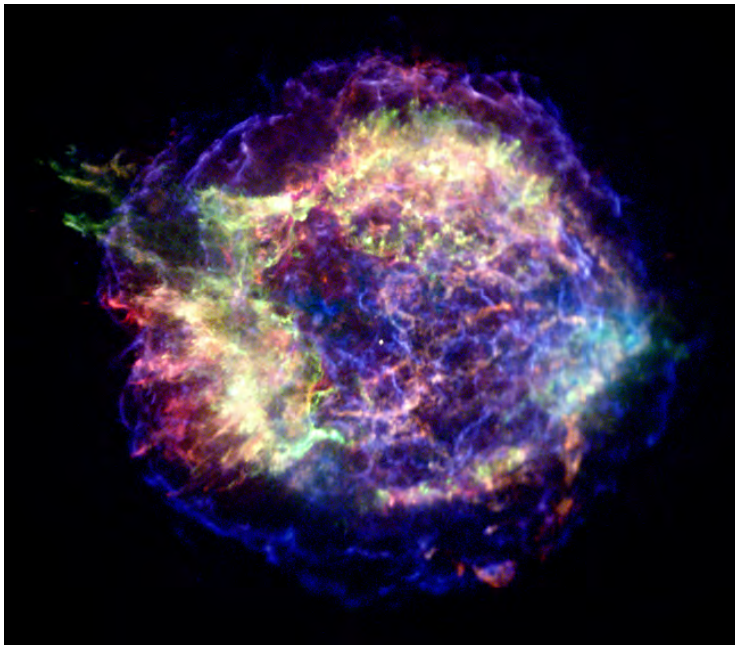
# 超新星残骸中の中性子星 Central Compact Object (CCO)

1999年発見

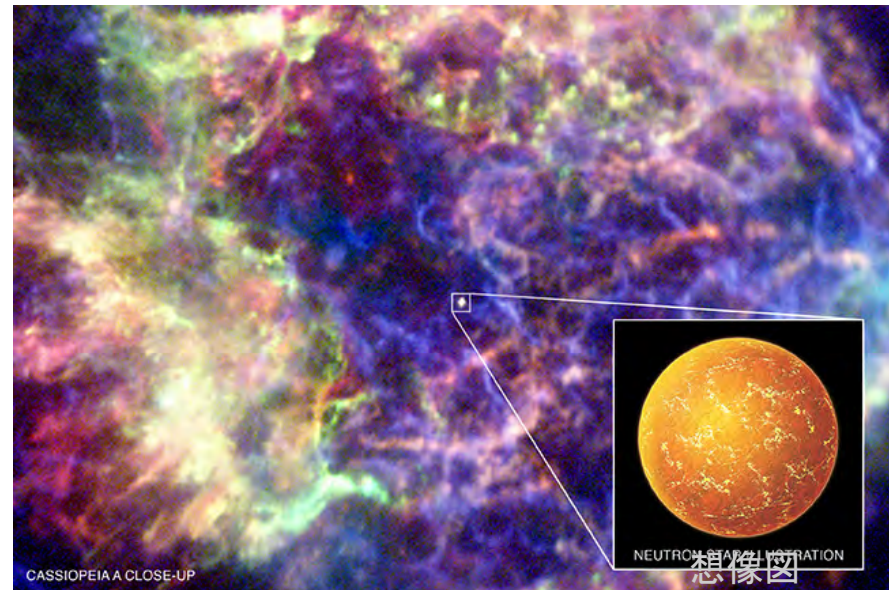
Chandra衛星のfirst lightで、超新星残骸カシオペアAの中心に暗い点源 ( $5 \times 10^{33}$  erg/s)を発見(Tananbaum, H. 1999, IAU Circ., 7246, 1)。

➡ カニパルサーとは全く異なる中性子星か？

カシオペアA



中心付近の拡大



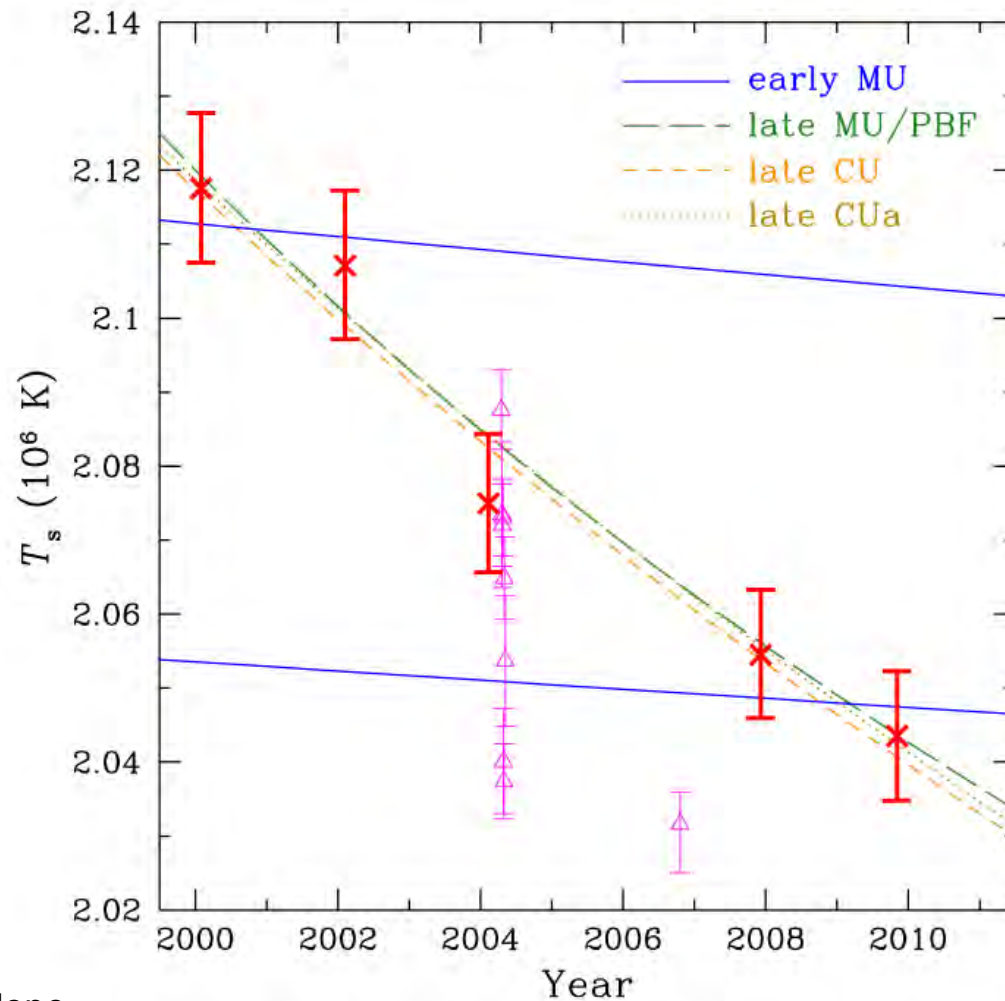
# Cas A中の中性子星の冷却

もっとも若い中性子星  
年齢～330年

Chandraによる観測

- $\Delta T/t \sim 3.6\%/10 \text{ yr}$
- 冷却の特徴的タイムスケール～280年

MU: modified Urca  
PBF: pair breaking & formation  
CU: Condensate Urca with an iron envelope  
CUa: Condensate Urca with a fully accreted light-element envelope





$P - \dot{P}$  diagram

# 中性子星の分類

スピン周期と磁場強度  
で分類するのが便利

マグネター

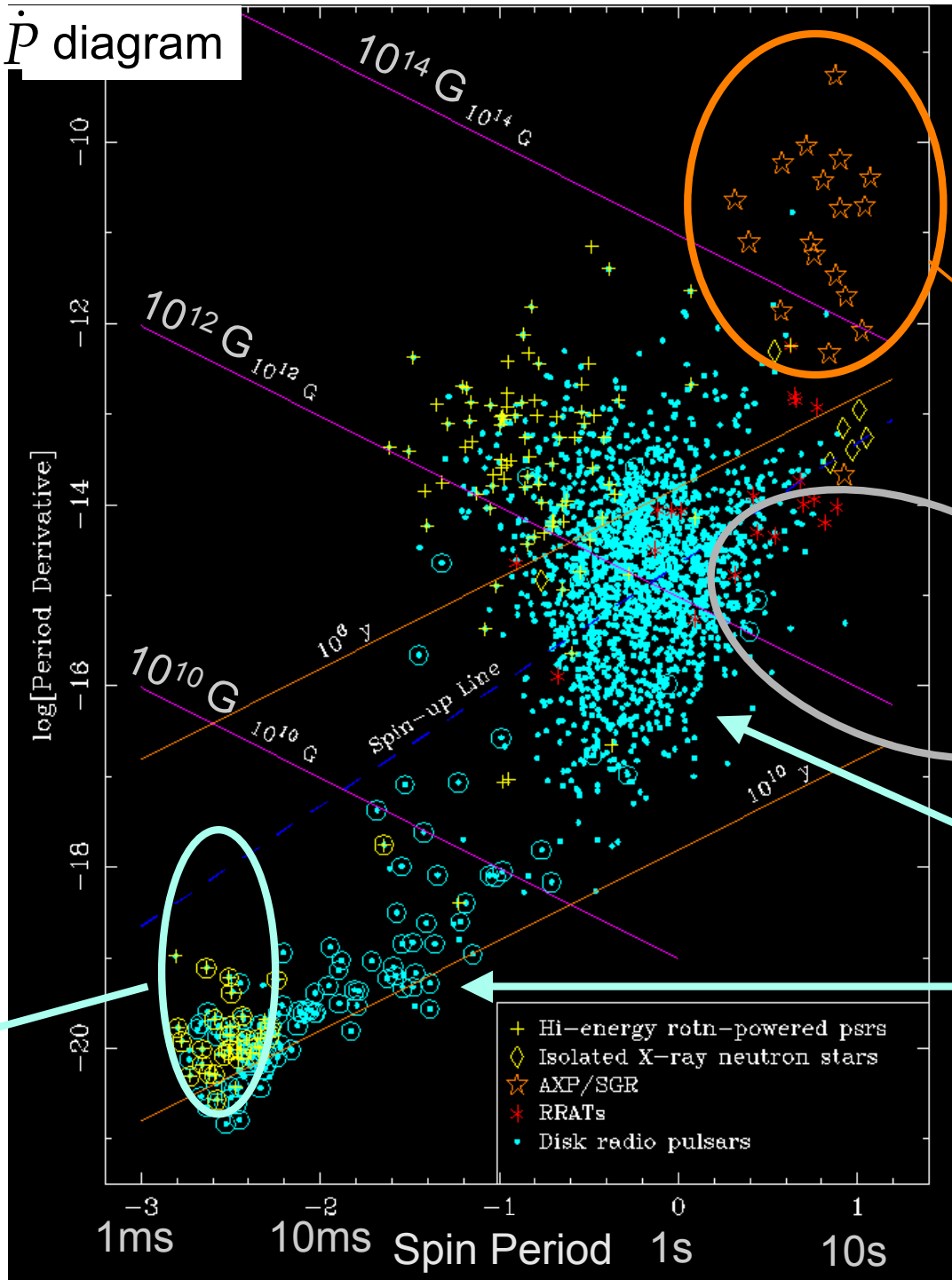
X線パルサー

電波パルサー

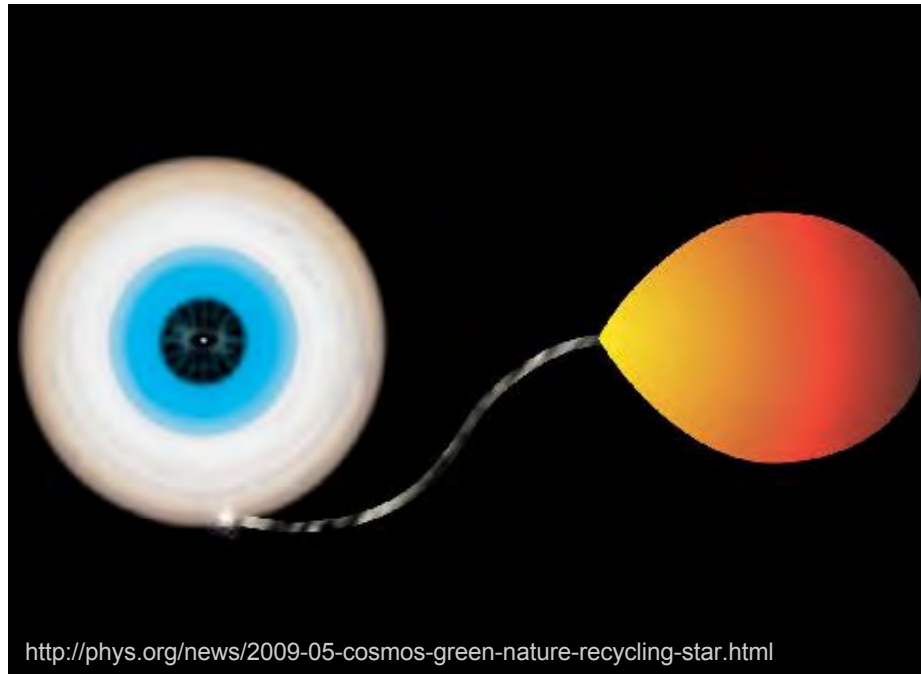
ミリ秒パルサー

( $\odot$ は連星系を示す)

Log(period derivative)  
低質量X線連星



# Recycle scenario (再生シナリオ)

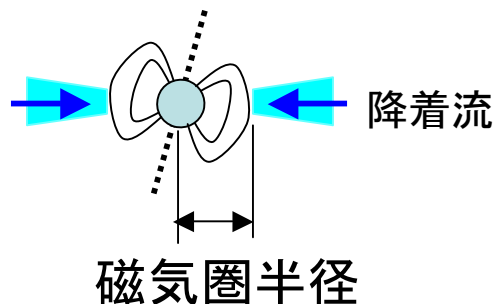


1、中性子星が若い(あまり質量降着を受けていない)時

- 中性子星磁場が強い
- 磁気圏半径が大きい
- ケプラー速度が遅い
- 中性子星の自転が遅い

2、中性子星が年老いた(質量降着が進んだ)時

- 中性子星磁場が弱い
- 磁気圏半径が小さい
- ケプラー速度が早い(<1ms)
- 中性子星の自転が早い(<1ms)



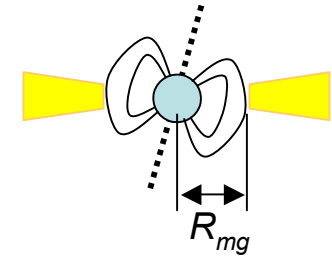
3、質量降着が止まると

中性子星がミリ秒パルサーになる。  
ミリ秒パルサーからの輻射で、伴星が蒸発。  
最終的には単独のミリ秒パルサーになる。

# 中性子星のspin-up

## 前提

磁気圏半径で降着物質が磁場にfrozen-inしてケプラー運動



## ケプラー運動の周期

$$P_{eq} = 2\pi \left( R_{mg}^3 / GM \right)^{1/2}$$

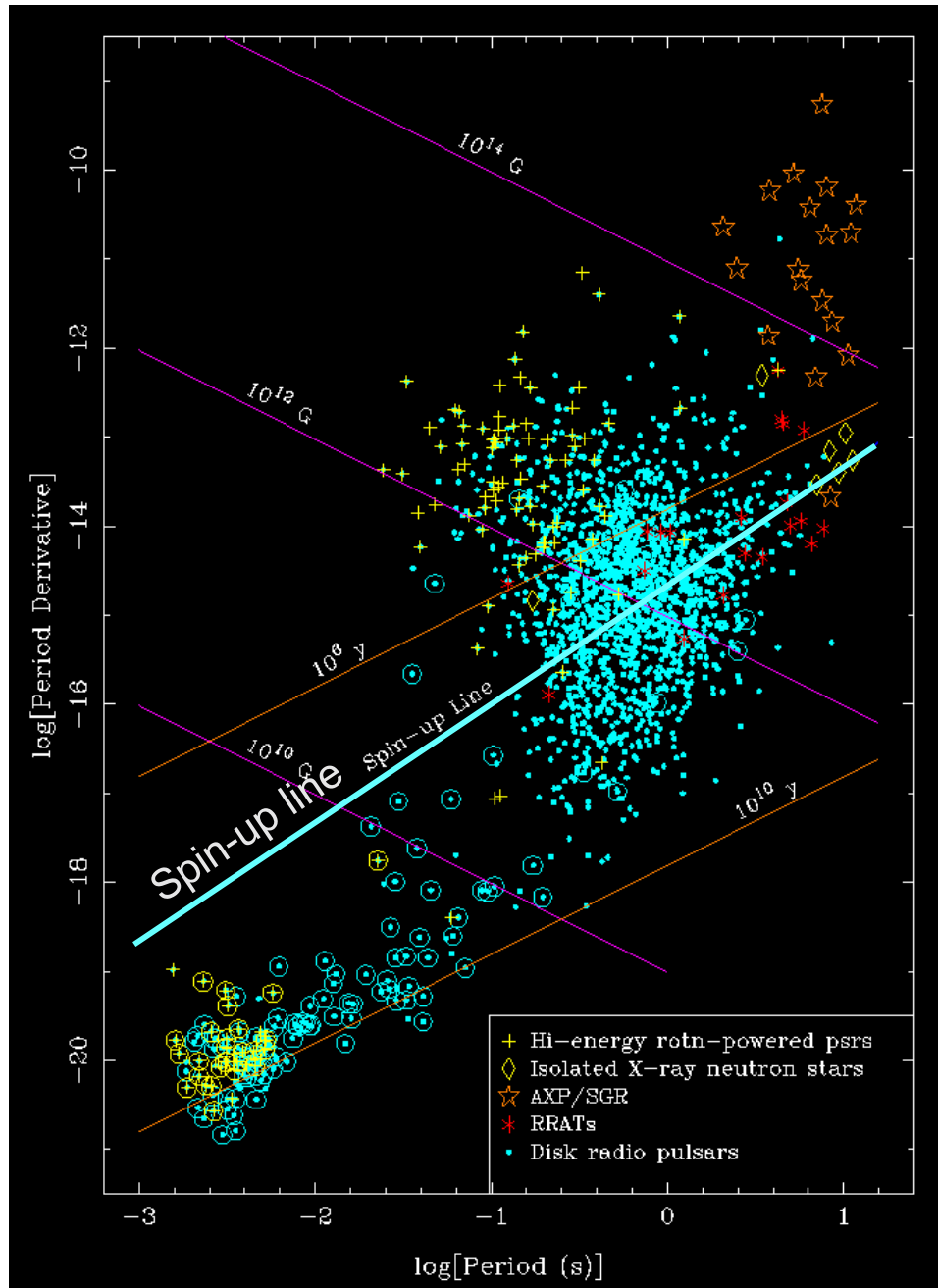
## 磁気圏半径

磁気圧と降着物質のラム圧がバランス

$$R_{mg} = \left( \frac{B_n^2 R_n^6}{\dot{M} \sqrt{2GM}} \right)^{2/7}$$

## スピン周期

$$P_{eq} = 1.9 \times B_9^{6/7} \left( \dot{M} / M_{Ed} \right)^{-3/7} \text{ ms}$$

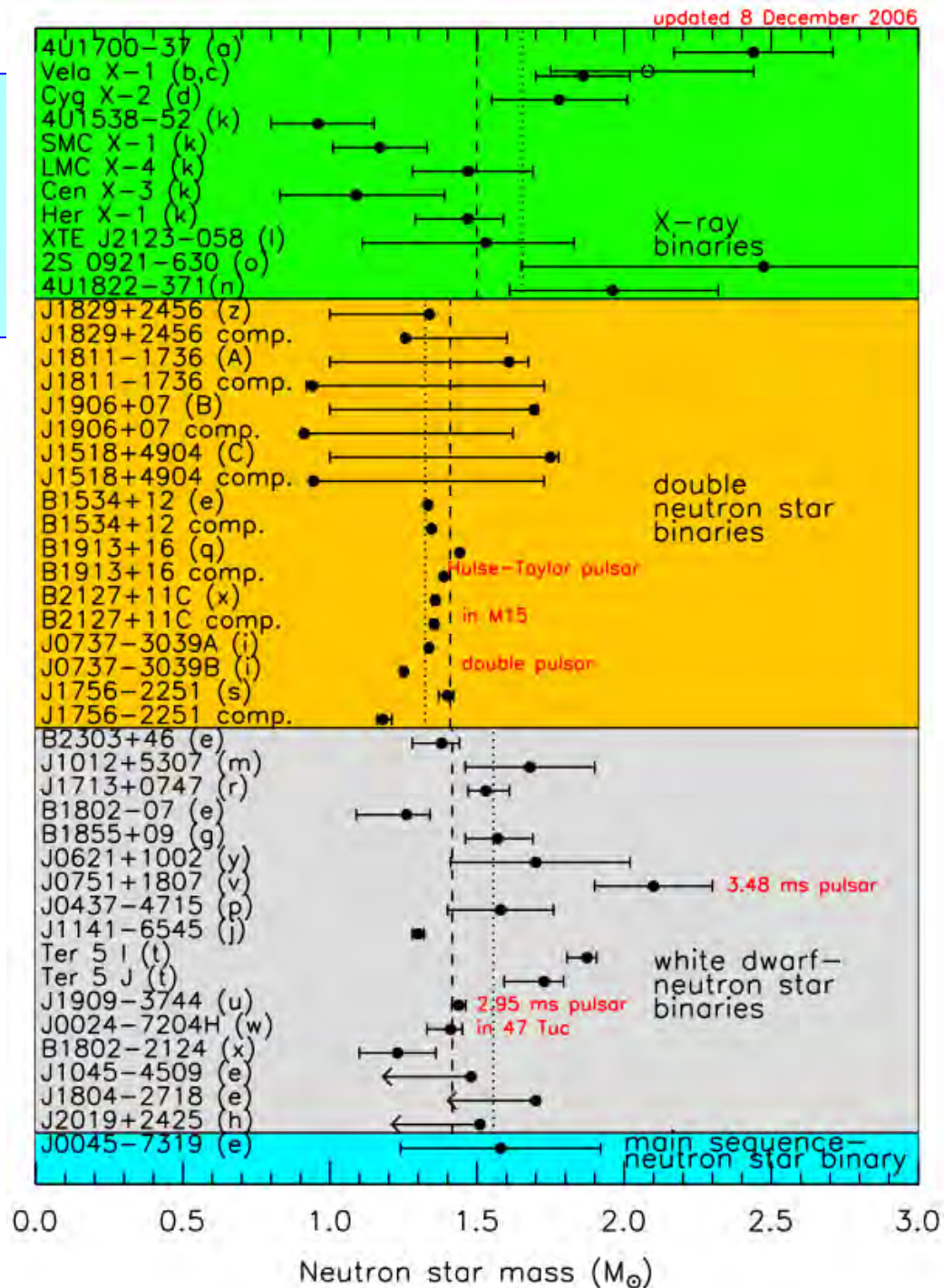


# これまでの中性子星の質量測定 (as of Dec. 2006)

## 電波パルサー

連星運動の解析等の手法により、正確な質量測定結果が得られている。ただし、半径に関する情報は無い。

Lattimer & Prakash, 2007,  
Physics Reports, 442, 109



# 2太陽質量の中性子星の発見

## PSR J1614-2230

Demorest et al. 2010, Nature, 467, 1081

1.97 $\pm$ 0.04 solar mass

Radio pulsar (3.2ms) / white dwarf

Method: Shapiro delay

## PSR J0348+0432

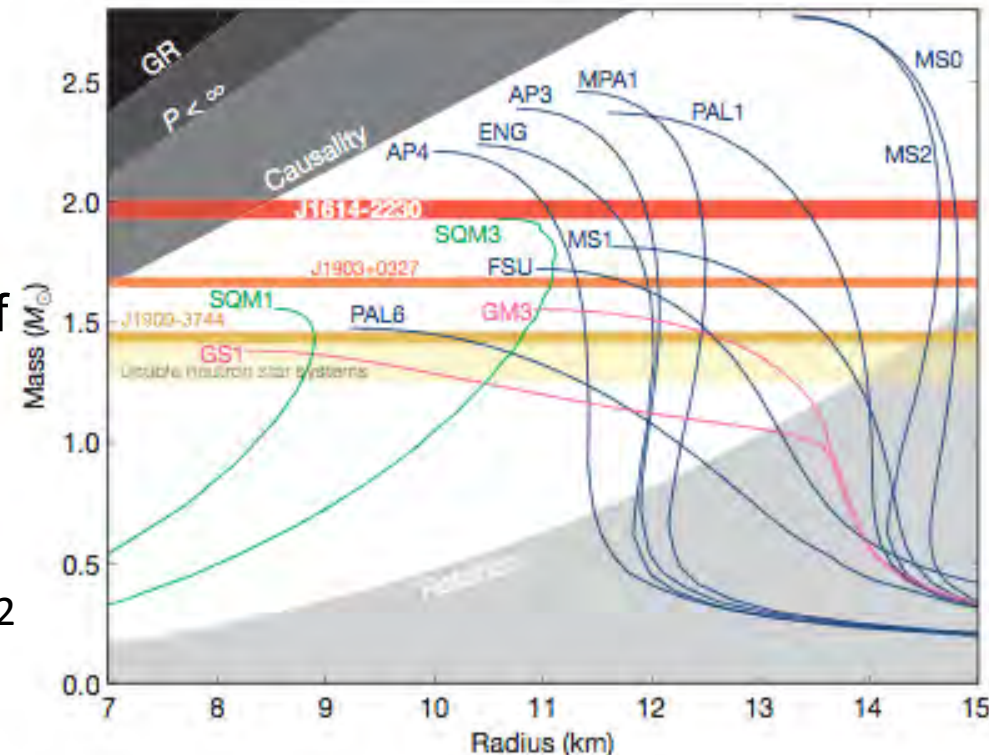
Antoniadis et al. 2013, Science, 340, 1233232

2.01 $\pm$ 0.04 solar mass

Radio pulsar (39ms) / white dwarf

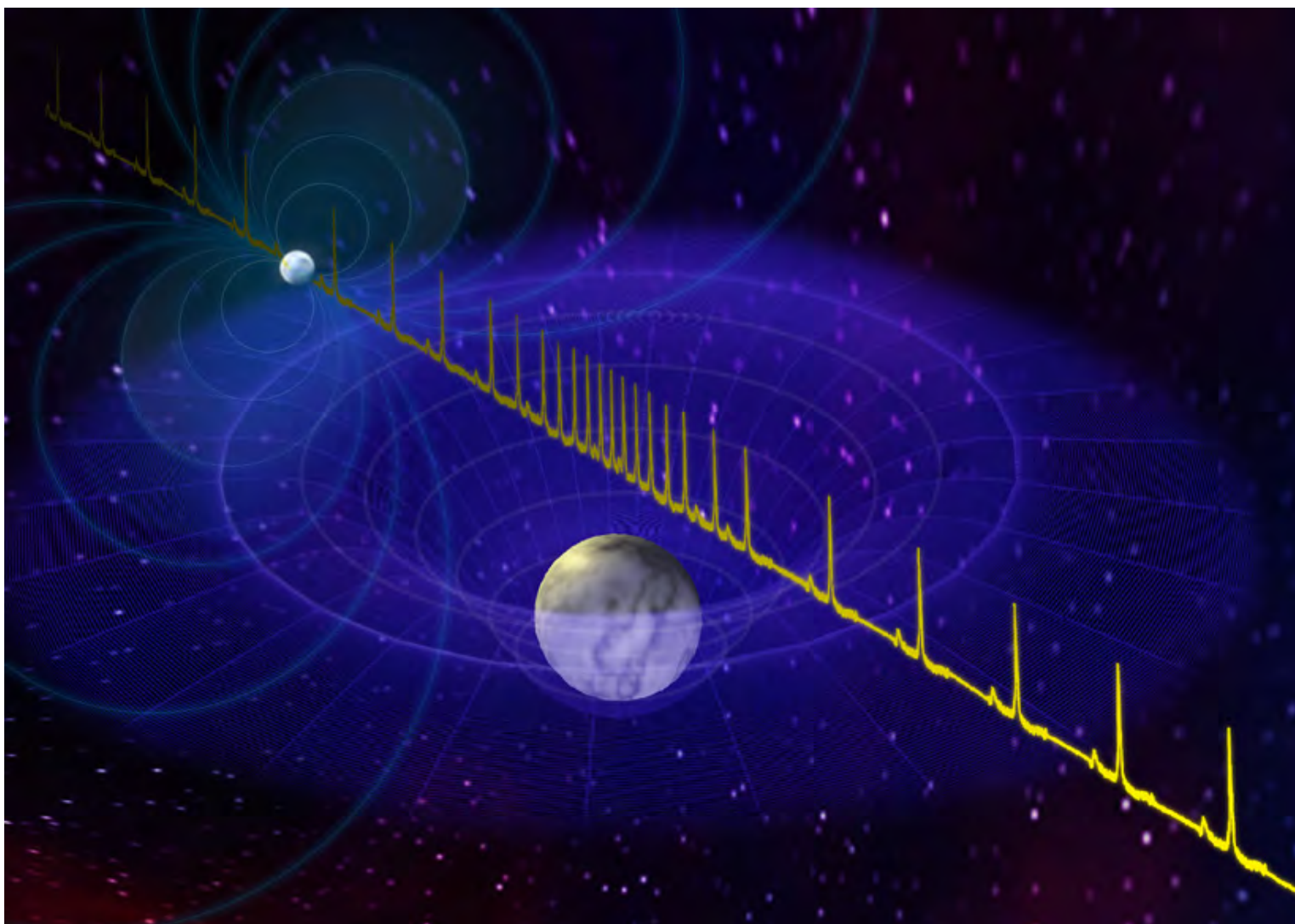
Method: Radio timing observations

Phase-resolved optical spectroscopy



# Shapiro Delayによる中性子星の質量測定

PSR J1614-2230:  $1.97 \pm 0.04$  solar mass

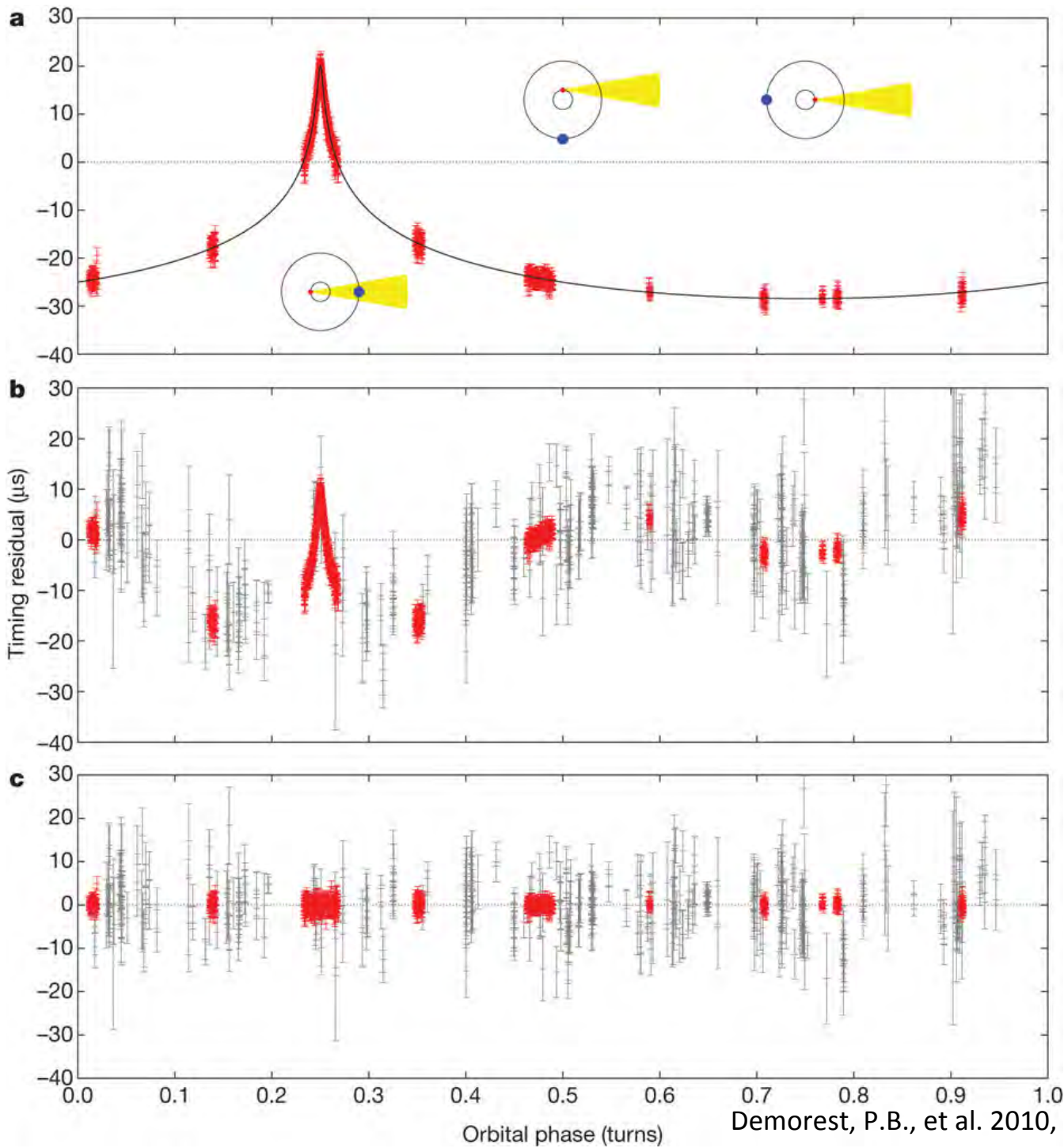


<http://news.discovery.com/space/neutron-star-largest-ever.html>

一般相対論的効果  
を含まないbest-fit  
model

Full-relativistic  
timing model

Shapiro delayによる  
timing residual



# 中性子星と放射波長帯

	回転エネルギー	重力/熱エネルギー	磁気エネルギー
単独星	電波パルサー (ミリ秒パルサー)	CCO (Central Compact Object) XDINS (X-ray Dim Isolated Neutron Star)	マグネター SGR (Soft $\gamma$ -ray Repeater) AXP (Anomalous X-ray Pulsar)
連星	(ミリ秒パルサー)	X線パルサー 低質量X線連星(X線バースト源)	

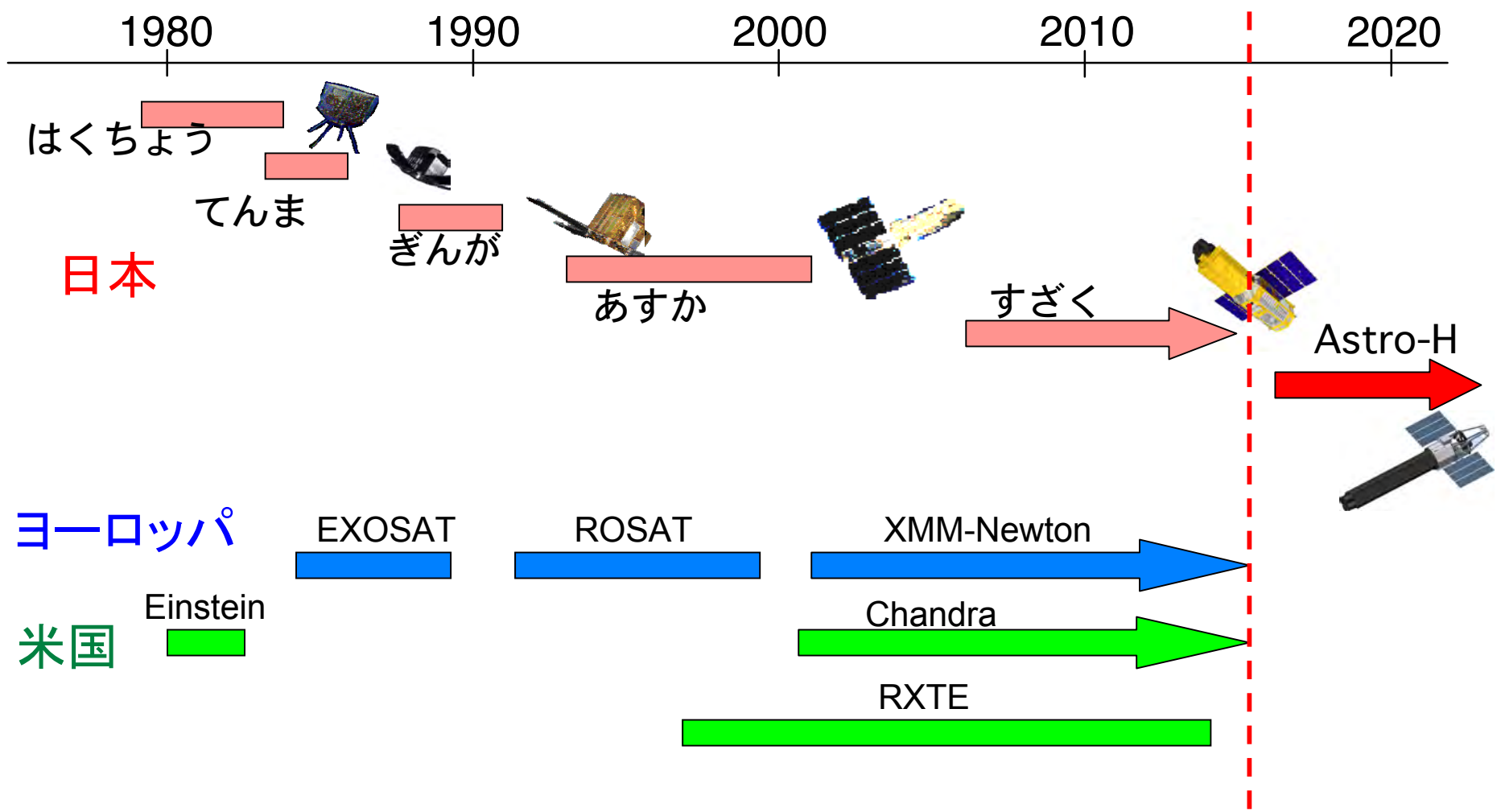
電波

X線

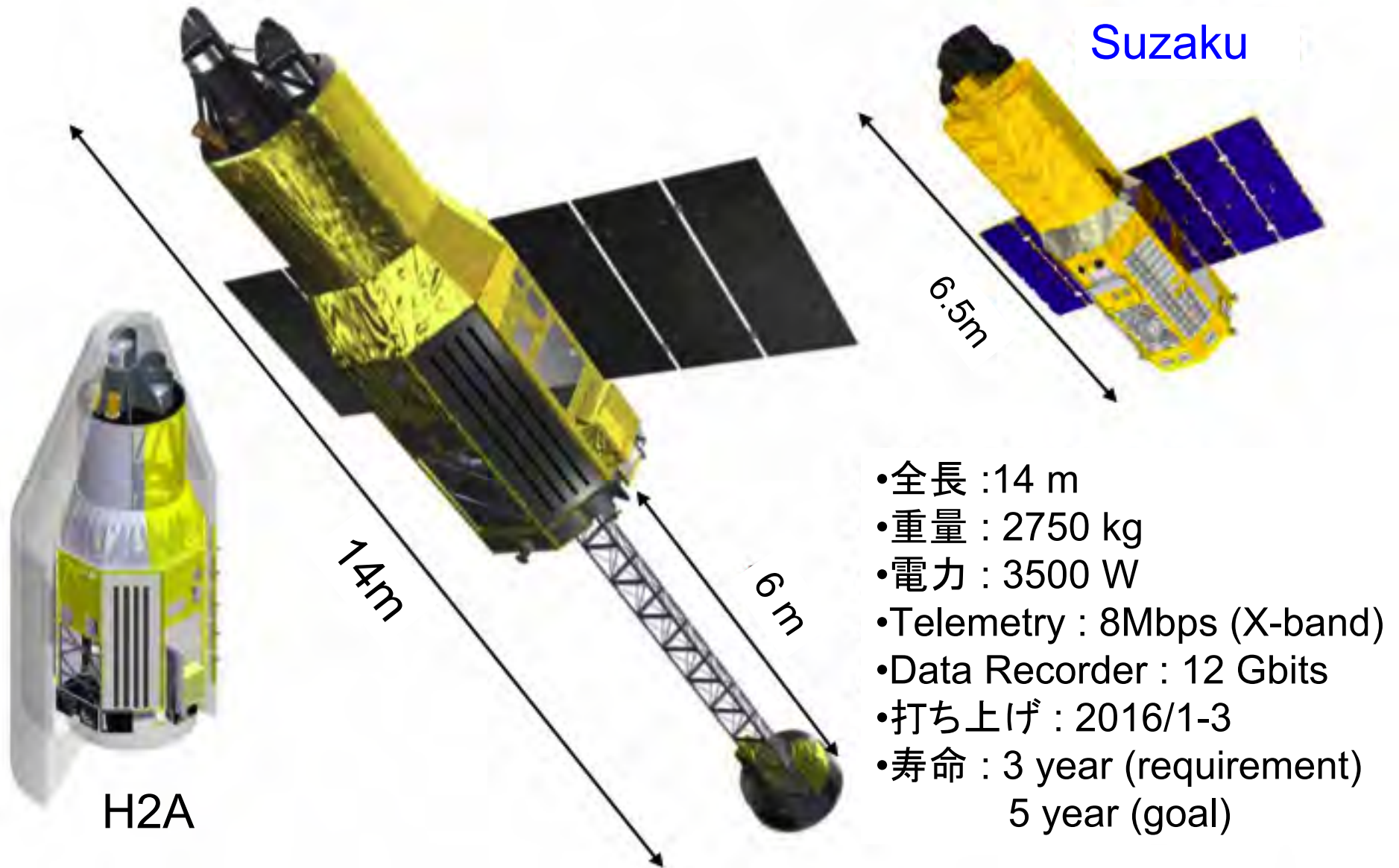
ガンマ線



# X線天文衛星



# ASTRO-H



## Cutting-edge Instruments



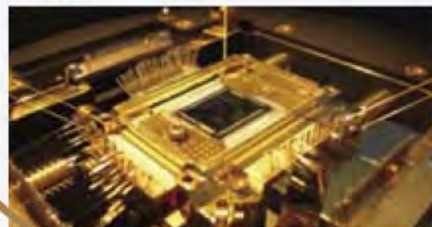
Close-up view of the aperture.

### Reflecting X-ray Telescopes (SXT/HXT)

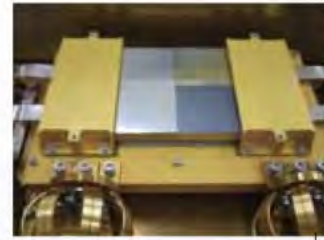
This instrument focuses X-rays from celestial objects onto the detectors. Unlike the single lenses and mirrors usually used for visible light, this X-ray reflecting telescope is made up of over one thousand reflector-coated aluminum foils stacked into concentric circles.

### Soft X-ray Spectrometer (SXS)

Specialized detector elements are cooled down to near absolute zero (-273 degrees Celsius) using a series of refrigeration units. When an X-ray hits a detector element, its temperature slightly rises. This increase in "heat" is measured, and from this the energy of the incident X-ray can be estimated to a higher degree of accuracy than any achieved to date. Researchers from around the world have great expectations for this instrument, the centerpiece of ASTRO-H.



Close-up view of the main sensor part.



### Soft X-ray Imager (SXI)

This is a wide field-of-view X-ray camera using an array of four large-format X-ray CCD chips. It provides simultaneous imaging and spectroscopic data in the energy range of 0.5 keV to 12 keV. The detector will be placed in the main body of the satellite.



### Soft Gamma-ray Detector (SGD)

Many layers of semiconductor sensors are stacked to optimize the sensitivity of the gamma-ray spectrometer. Since gamma-rays have a higher penetrating power than X-rays, this instrument plays an important role investigating astronomical objects surrounded by dense gas.



X-ray sensor and signal-processing electronics

### Hard X-ray Imager (HXI)

This produces images of objects in the hard X-rays above 5 keV using a combination of silicon and cadmium telluride semi-conductors. Since this imaging telescope has a 12-meter focal length, this sensor will be placed at the end of a boom which will be extended in orbit.

# Soft X-Ray Spectrometer (SXS)



## Soft X-Ray Telescope

5.6 m focal length – *fixed optical bench*

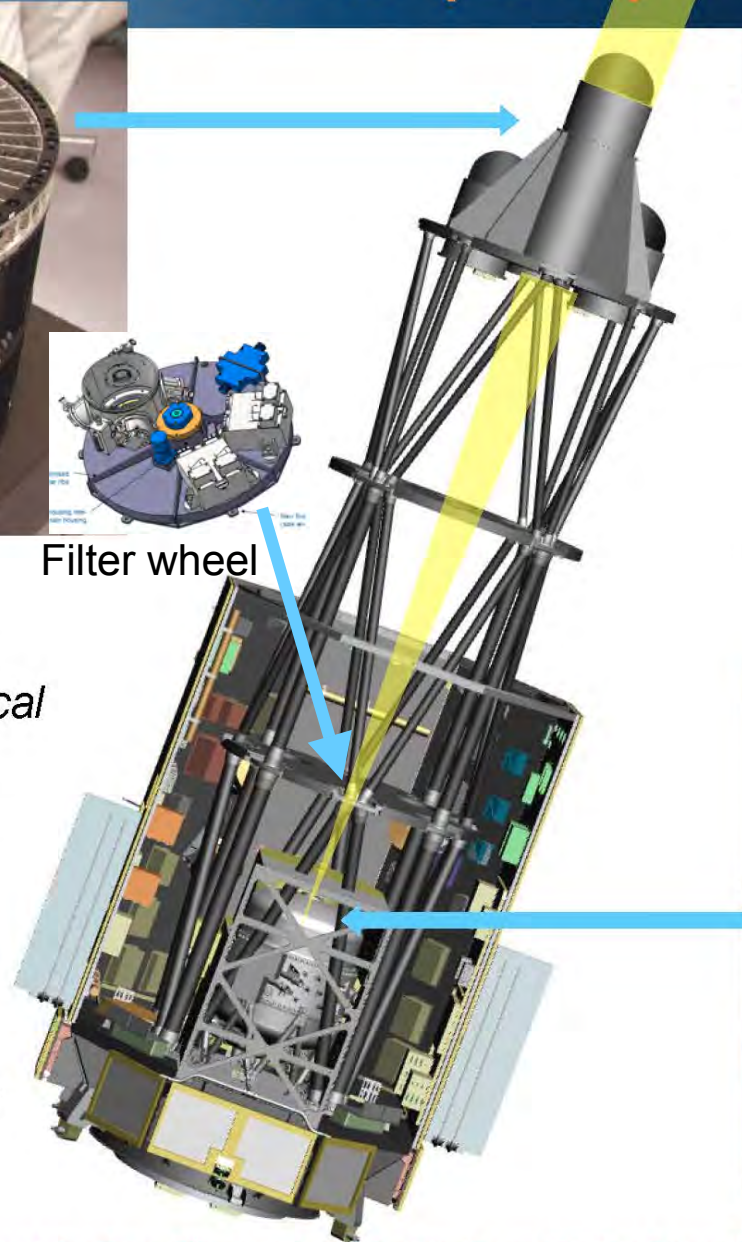
203 concentric shells (1624 individual reflectors)

Outer Diameter: 45 cm

Mass: CBE = 46 kg

Half-Power Diameter of better than 1.7 arcmin

ASTRO-H/SXS

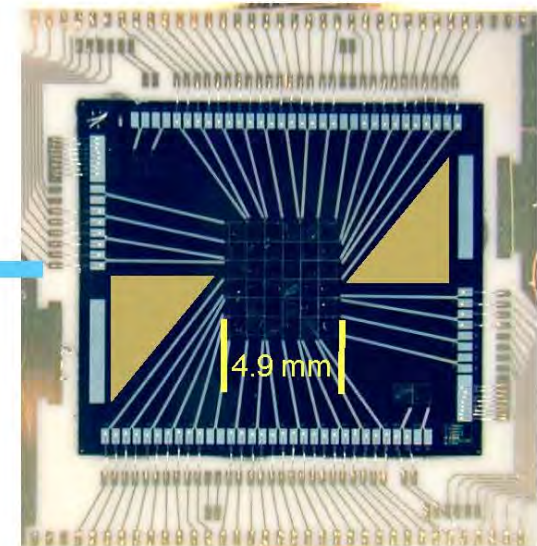


Filter wheel

## X-ray Calorimeter Spectrometer

SXS – energy resolution better than 7 eV at system level

6 x 6 array of 30" x 30" pixels (3 arcmin field of view)



Goddard Space Flight Center

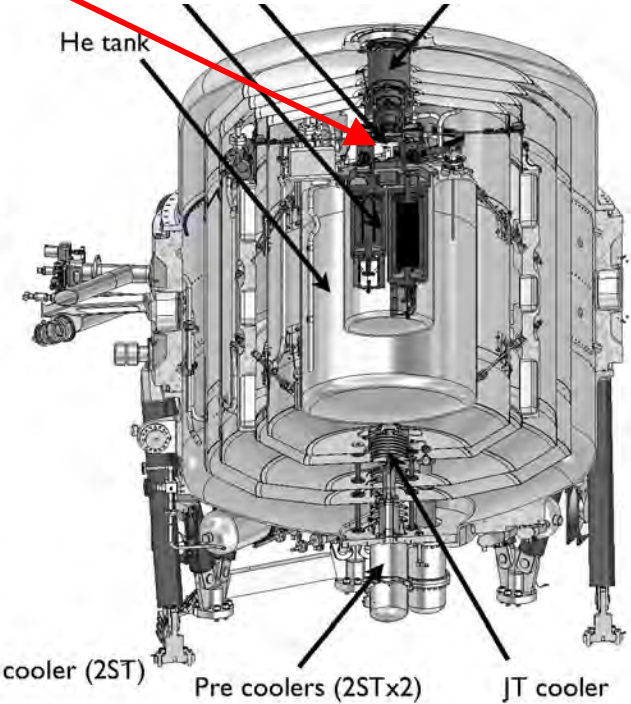
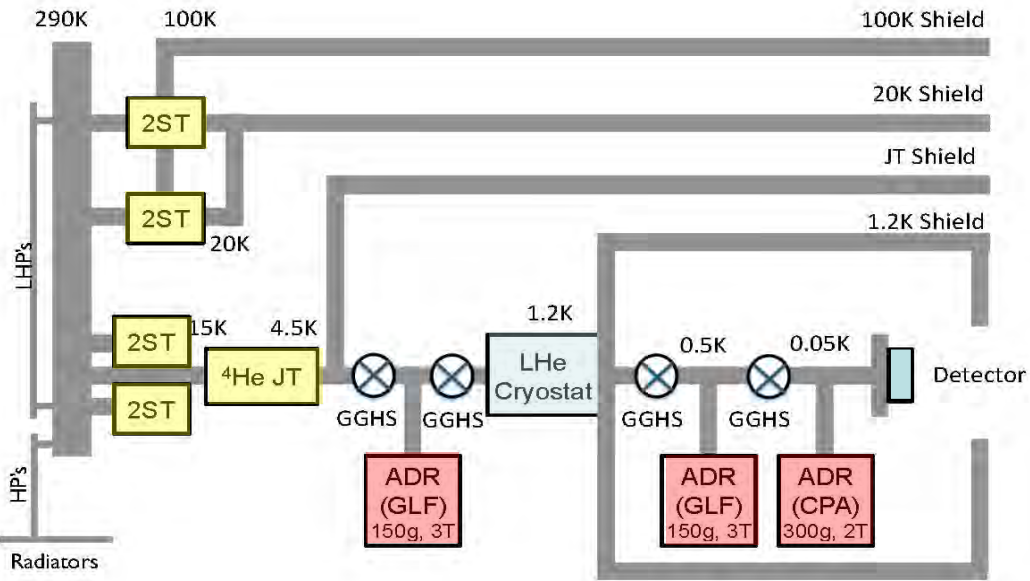
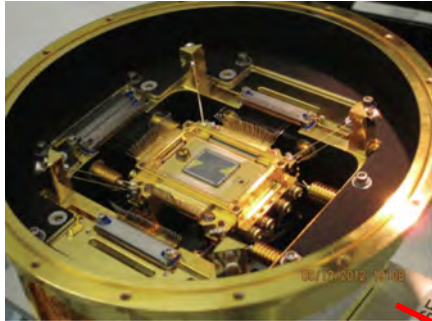
# SXS: cooling chain

## 冷却系

- Detector temp : 50 mK
- 2 ADR + LHe/ADR + JT + ST

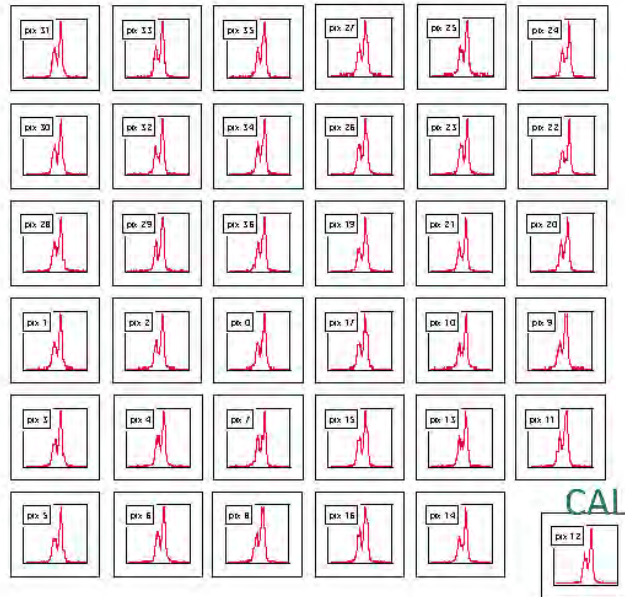
## 寿命

- 3 years with LHe
- >2 more years without LHe



# ASTRO-H SXSの性能

All 36 channels by location

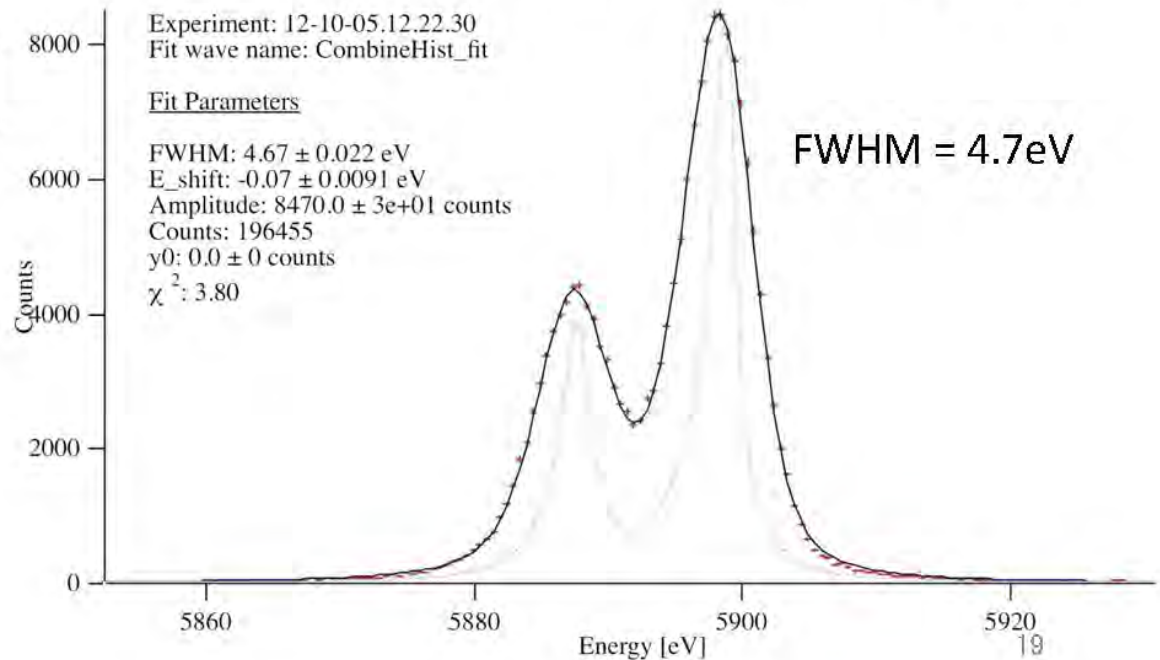


- FM detector system calibration campaign  
Oct 2012 – Feb 2013, GSFC/NASA

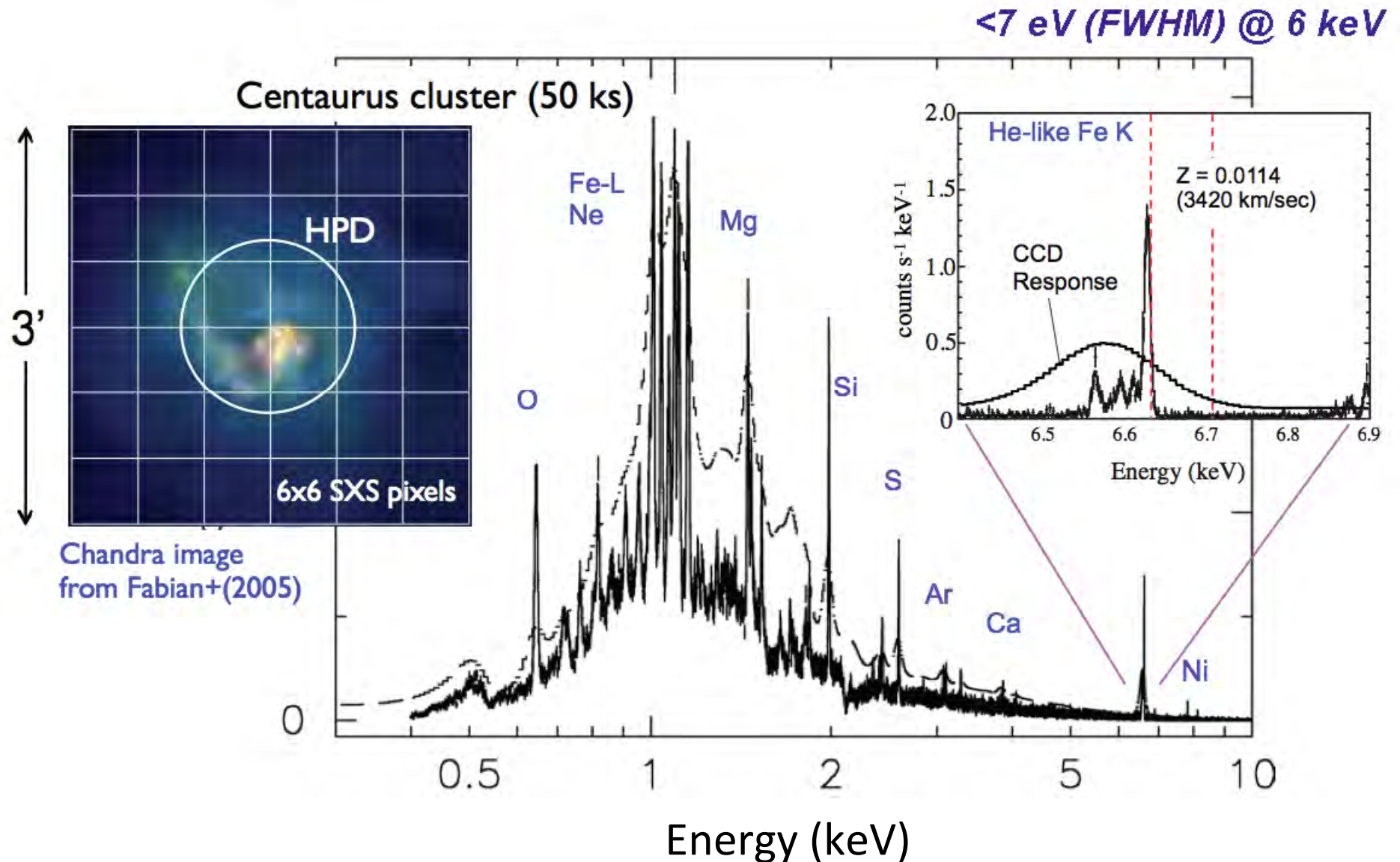
All pixels meet requirement < 7eV

現在、X線望遠鏡の焦点  
面検出器として主流になっ  
ているCCDカメラに比べ  
て、エネルギー分解能が  
20倍ほど良い。

Composite fit to all 36 channels



# ASTRO-H SXSで期待されるスペクトル：銀河団



# ASTRO-H in the JAXA's clean room

## 今後の予定

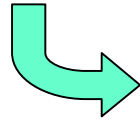
- 熱真空試験: 6-7月終了
- 音響・振動試験: 8-9月
- 打上げ: **early 2016.**





# ASTRO-H observation strategy

ASTRO-Hの高いエネルギー分解能



中性子星表面からのX線放射中の  
輝線／吸収線構造



中性子星の重力赤方偏移(質量半径比)の測定

## Caveat

輝線・吸収線構造がなまってしまう場合がある。

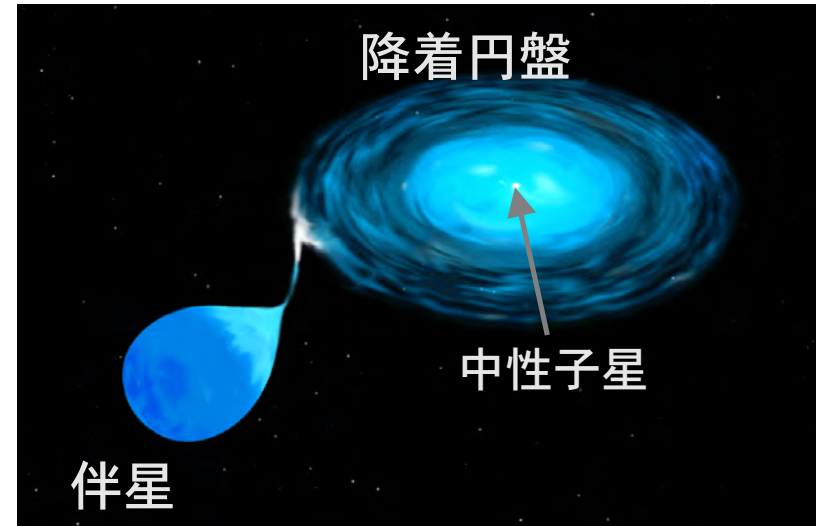
{	磁場	→	ゼーマン効果
	自転	→	ドップラー効果

観測ターゲットの選び方が重要

# 低質量X線連星系(LMXBs)

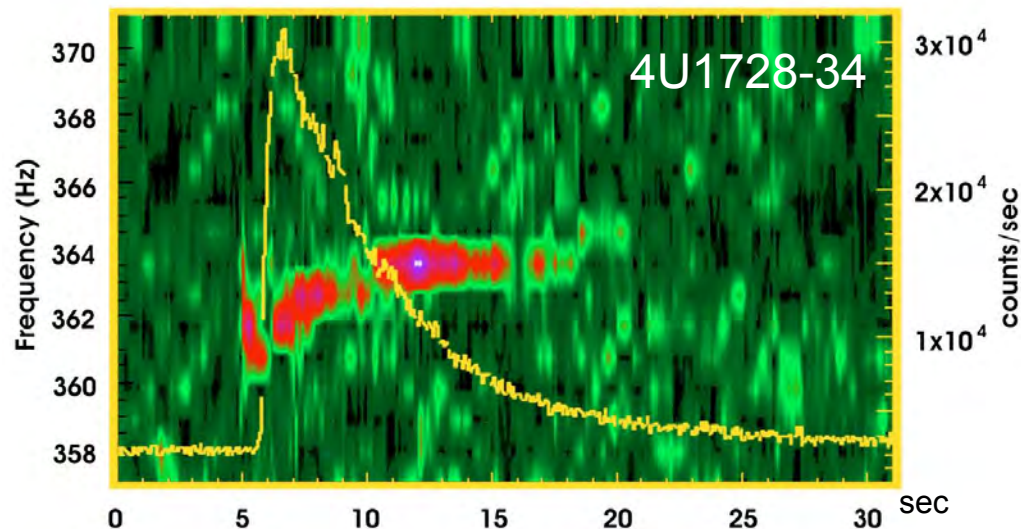
## LMXBs: 中性子星の性質

$$\left\{ \begin{array}{l} B_s < 10^9 - 10^{10} \text{ G} \\ F_{\text{spin}} \sim 200 - 600 \text{ Hz} \\ T_s < 0.1 - 2 \text{ keV} \\ \text{Persistent / Transient} \end{array} \right.$$



## (1型)X線バースト

中性子星表面でのHeの熱核反応の暴走



Duration :  $\sim 10 - 100 \text{ sec}$   
Interval : hours  $\sim$  days  
Luminosity :  $\leq$  Eddington limit  
 $\sim 10^{38} \text{ erg/s}$

Burst oscillation からスピ  
ン周波数の計測が可能

# 中性子星の磁場とスピン

(1) 自転によるドップラー効果

$$\Delta E = 1600 \left( \frac{v_{\text{spin}}}{600\text{Hz}} \right) \left( \frac{R}{10\text{km}} \right) \text{eV}$$

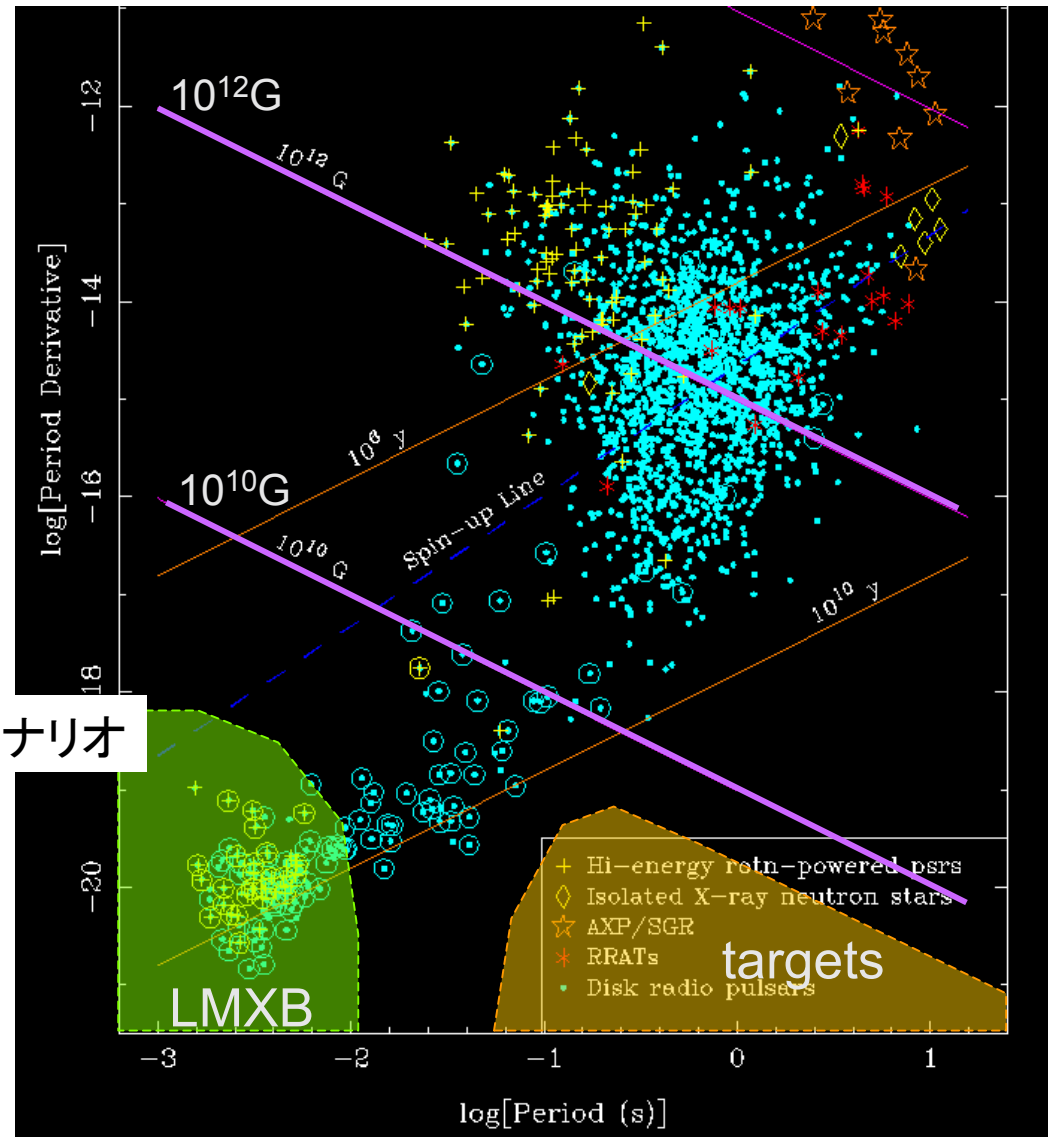
(2) ゼーマン効果

$$\Delta E \approx 12 \left( \frac{B}{10^9\text{G}} \right) \text{eV}$$

バースト振動  
ミリ秒パルサーのリサイクルシナリオ

多くの低質量X線連星(LMXB)は  
早いスピンを持つ: ~200-600 Hz

磁場が弱く、自転が遅い中  
性子星を選ぶ必要がある。



# ユニークなX線バースト天体 : Terzan 5 X2

- 球状星団 Terzan 5 に存在する突発天体
- スピン周波数 : 11 Hz
- 磁場強度 :  $10^9$ - $10^{10}$  G

バースト大気で形成される、細かい吸収線が期待できる。

- Clean and clear results:

天体までの距離、放射の異方性、放射領域の詳細、連続成分のモデル、などに依存しない。

- Caveat

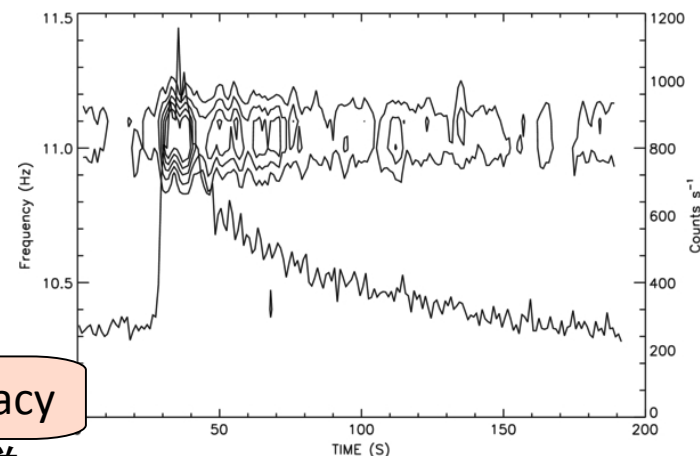
T5X2は、通常暗く、突発的に明るくなる

## 仮定したパラメータ

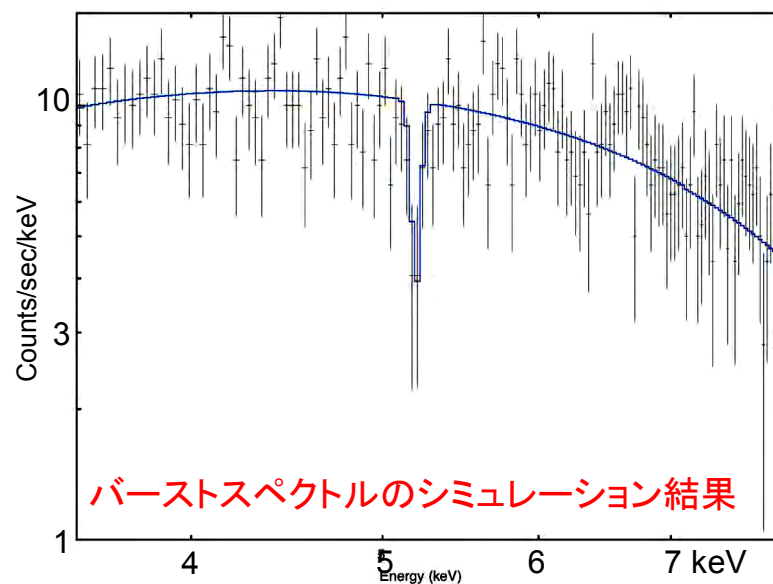
Continuum : 2 keV bbody with  $N_h=1.2E22$  cm<sup>-2</sup>  
SXS count rate : 60 c/s  
Absorption line : 5.2 keV, sigma = 30 eV.  
Equivalent width : 50 eV  
Exposure : 100 sec

数個のバーストのスペクトルを加算すれば、吸収線を検出することが十分可能。

Cavecchi et al. 2011, ApJ, 740, L8



High accuracy



## 他の観測候補天体：GRO J1744-28 & Rapid Burster

両天体ともに、唯一の2型バースト天体であり、共通の性質を持つ可能性が高い。

間欠的な質量降着によって起きる、バースト状の増光

	Bursting pulsar GRO J1744-28	Rapid Burster
Properties	Pulsation Type II bursts	No pulsation Type I & II bursts
Outbursts	1995, 1996, 2014	Every 80-200 days
スピン周波数	2.1 Hz	不明
磁場	Probably $\sim 10^{11}$ G	Probably $\leq 10^{10}$ G

両天体が共通の性質を持つとすれば、Rapid Bursterもスピンの遅い可能性が高い。

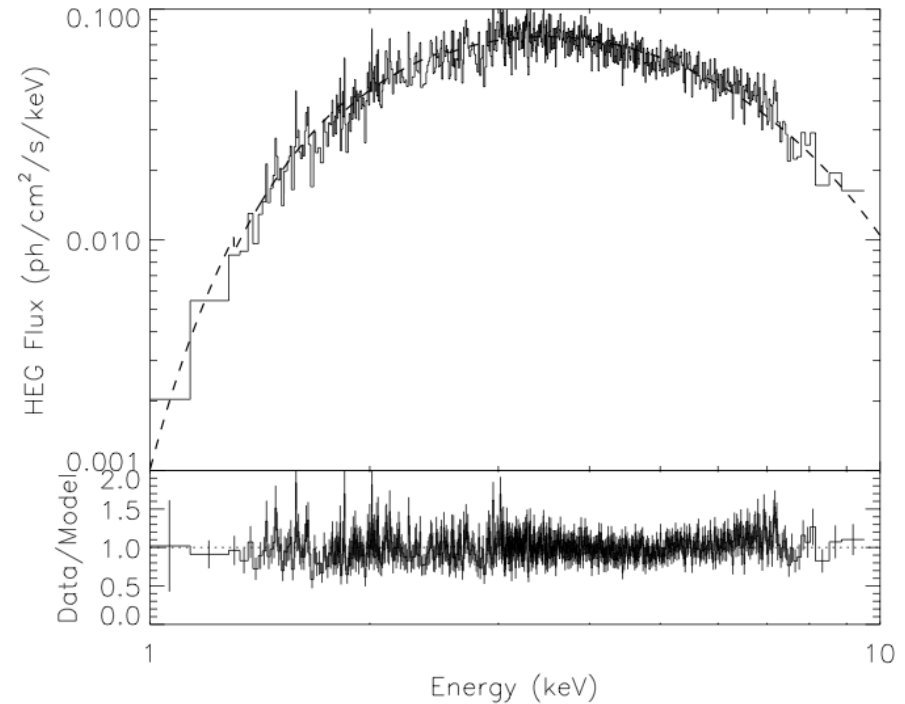
# Rapid BursterのX線観測

## 過去の観測

チャンドラ回折格子による  
定常放射の観測

スペクトル構造なし：  
<10 eV in EW @5 keV

Marshall et al. 2001, AJ, 122, 21



## ASTRO-Hによる観測

### •定常放射

50 ksの観測で、等価幅 2 eV @5 keV の吸収線まで検出可能。

### •バースト中の放射

1型バースト中に、細い吸収線を探すことが始めて可能になる。

# 別の方法：ミリ秒パルサー(MSP)のパルス波形

## 回転駆動型のミリ秒パルサー (MSPs)

磁場が弱く ( $\sim 10^8$ - $10^9$ G)、高速で自転する ( $\leq 30$  ms) 中性子星。低質量X線連星が進化して生まれる。約200のミリ秒パルサーが知られている。

電波：磁気圏からの放射

X線：磁極からの熱放射(中性子星表面)。

磁気圏からのback-flowにより加熱される。

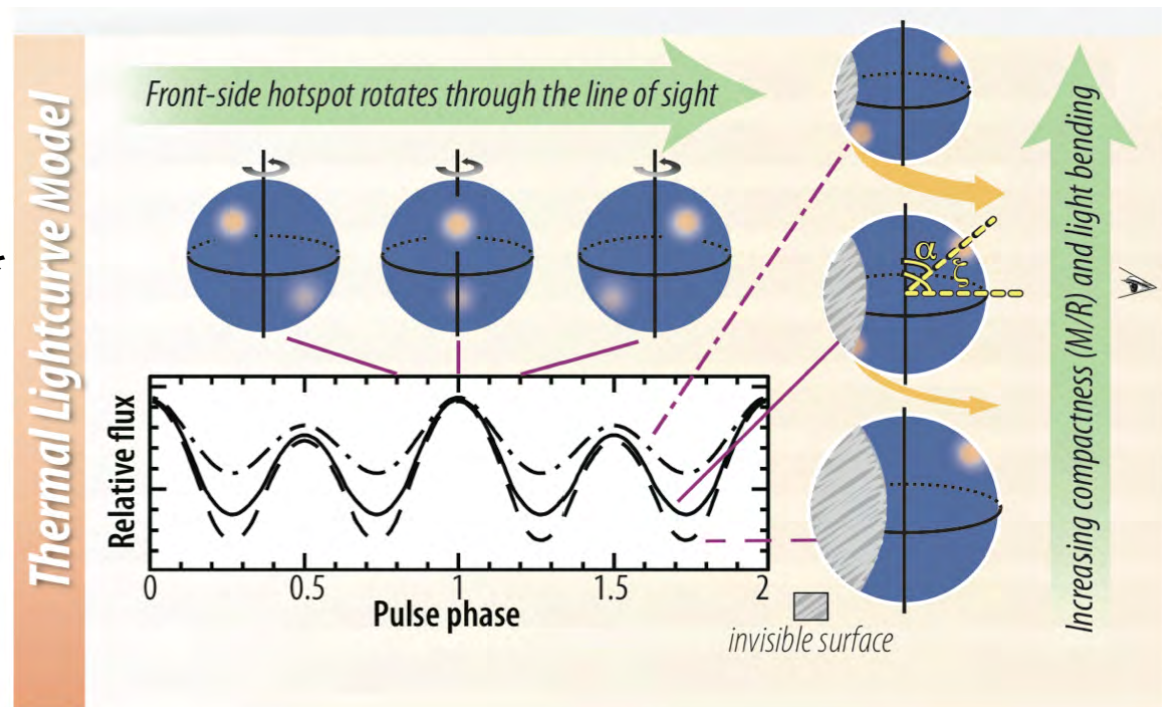
## MSPのX線パルス波形

### •重力場による光路の湾曲 (M/R)

小さい中性子星ほど光が大きく曲がり、裏側がよく見える。パルス振幅が小さくなる。

### •Doppler boosting (R)

相対論的ドップラー効果により、こちらに近づく磁極が遠ざかる磁極よりも明るく見える。パルス波形が歪む。

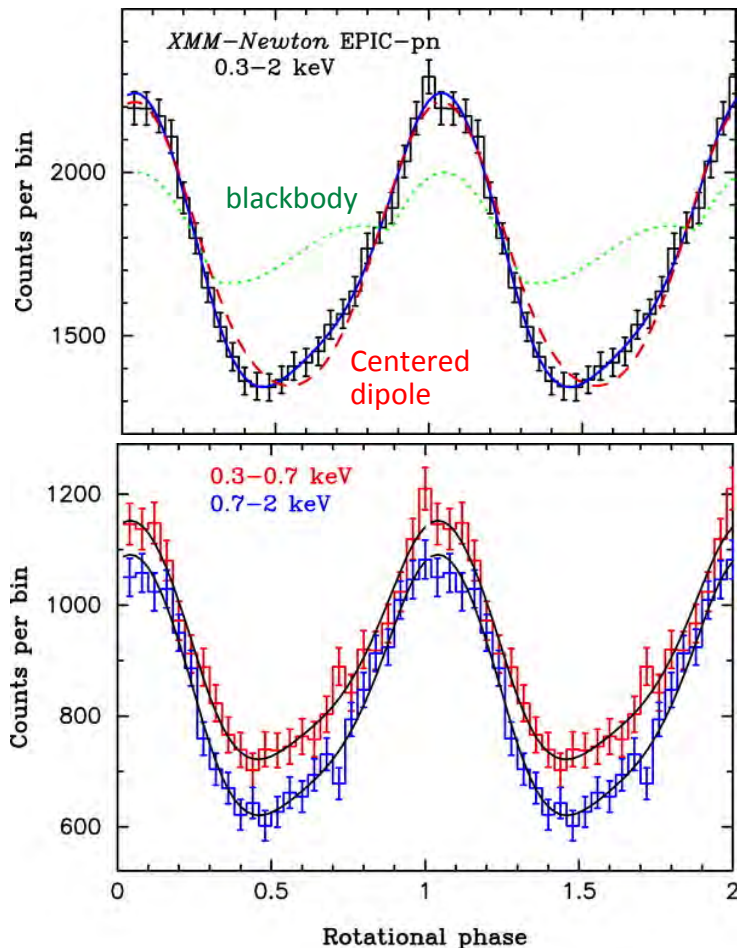


# 最も近いミリ秒パルサー PSR J0437-4715

## XMM-Newtonによる観測

PSR J0437-4715

スピン周期 : 5.76 ms  
距離 : 156 pc



### 解析結果

Spectrum: Hydrogen atmosphere model

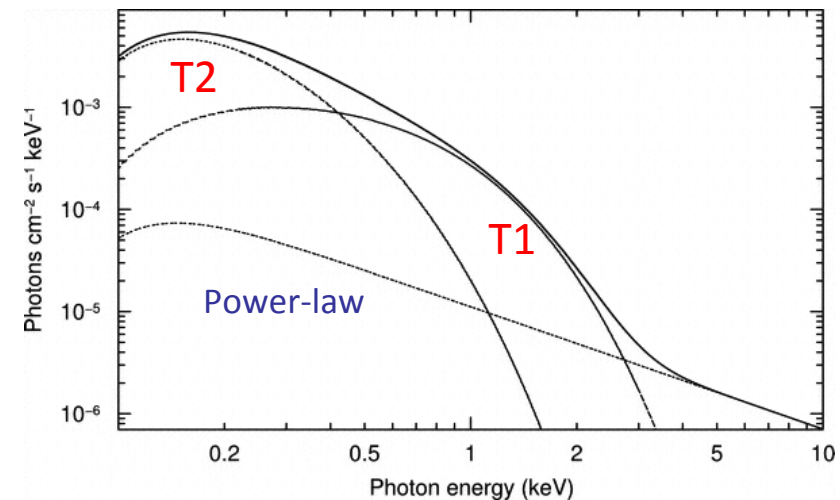
Geometry : off-center dipole

Hot spot1 :  $T_1=1.4-1.85$  MK,  $R_1=0.1-0.36$  km

Hot spot2 :  $T_2=0.4-0.54$  MK,  $R_2=2.0-3.5$  km

Radius : 6.8-13.8 km for  $1.4 M_{\text{solar}}$

XMM-Newton: 時刻精度と較正不足により、意味のある結果が得られなかった。  
ASTRO-H: 時刻精度とスペクトル形状の決定精度の向上が望める。

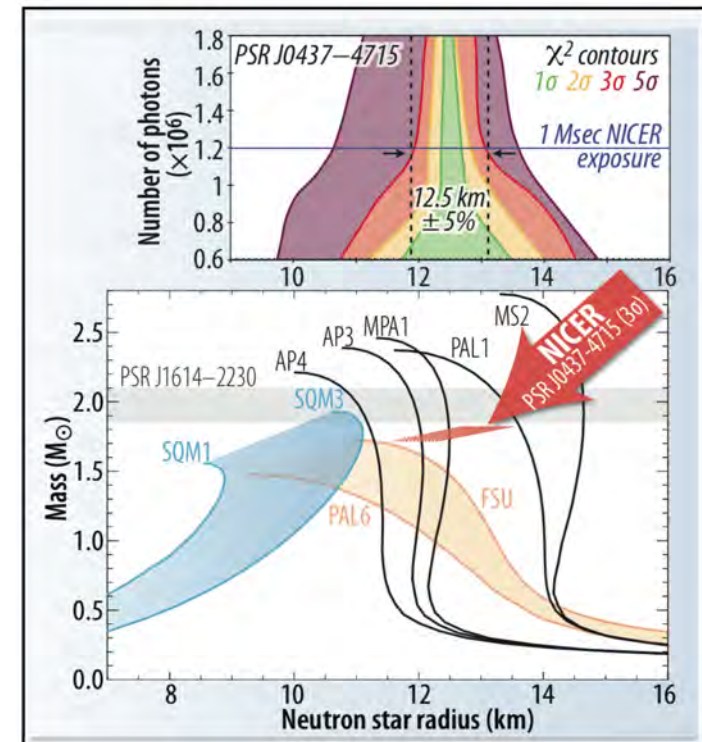
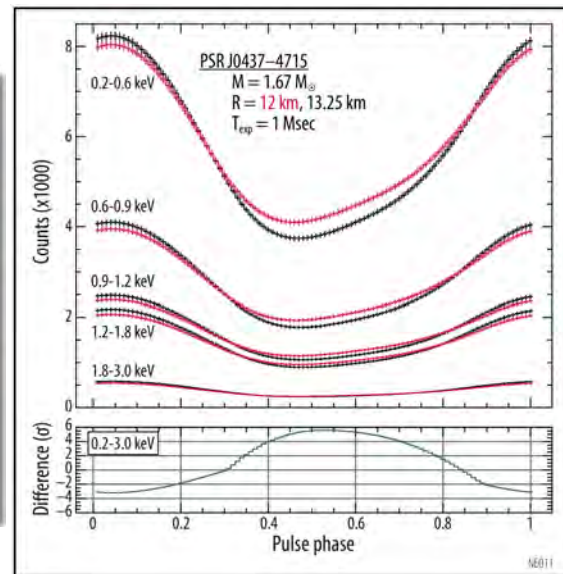
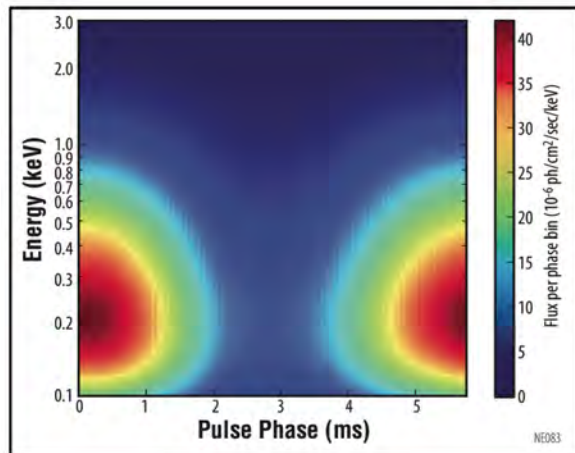




# NICER

## Neutron star Interior Composition ExploreR

- NASA explore MoOとして選定。
- ISSに搭載される、中性子星観測に特化した軟X線望遠鏡。
- 打ち上げ : late 2016
- X線反射鏡+SDD
  - エネルギー範囲 : 0.2-12 keV
  - 有効面積 : >2000cm<sup>2</sup> @ 1.5 keV  
600cm<sup>2</sup> @ 6 keV
  - エネルギー分解能 : 85 eV @ 1 keV  
137 eV @ 6 keV
  - 時刻付け精度 : <300 nsec



# 今後2-3年の展望

## 1. 核物質の状態方程式が決定される

- NICER(とASTRO-H)によるミリ秒パルサーの観測で、質量半径が正確に決まり、核物質の状態方程式が決定できる。

## 2. 低質量X線連星中の中性子星の質量が決まる

- ASTRO-Hによる観測で、重力赤方偏移が決定できる。1で状態方程式が決まっているので、質量が決定できる。それにより、リサイクルシナリオが検証できる。

## 3. 中性子星の磁場の進化が明らかになる

- ミリ秒パルサーの質量と磁場強度の相関を調べることで、質量降着により磁場が減衰するのかが判明する。