

# 物理学特論I (中性子星と原子核物理)

1. 序論: 中性子星とは

2. 中性子星の質量と半径

3. 中性子星に関連する原子核・ハドロン物理学1  
- 原子核の大きさと散乱の量子力学

4. 中性子星に関連する原子核・ハドロン物理学2  
- 原子核の質量と核物質状態方程式

5. 中性子星に関連する原子核・ハドロン物理学3  
- クォークとハドロン

6. 中性子星核物質の状態方程式

7. 中性子星の最近の話題と課題 - 中性子星の最大質量とハイペロンパズル

• セミナー: 最適化問題としての符号問題

# 中性子星の質量観測(1)

## ■ 中性子星を含む連星からのパルス観測

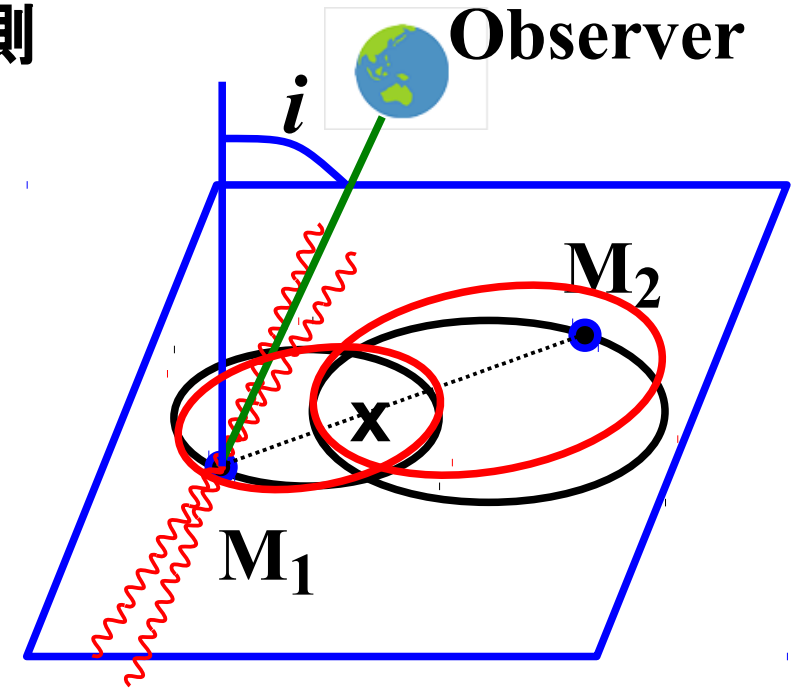
- 中性子星からのパルス間隔から視線速度が分かる。  
( $i$  = 視線と回転面の傾き)

$$K = v \sin i$$

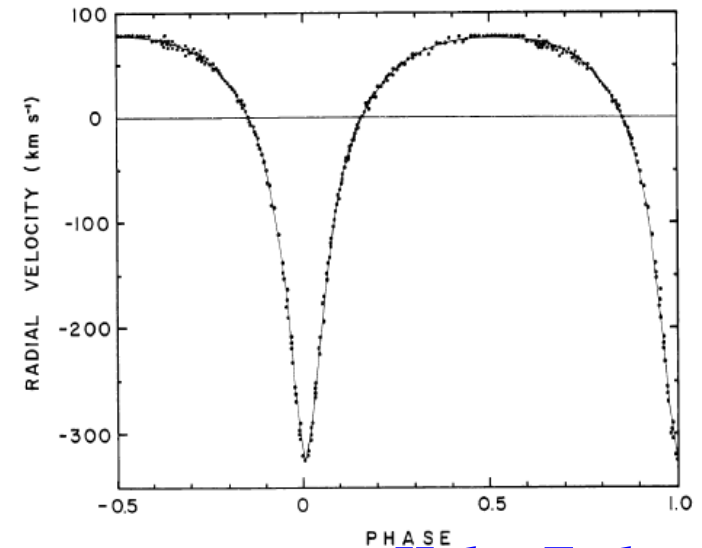
- 視線速度の時間依存性 → 離心率
- ケプラー運動  
→ Mass function (観測可能量)

$$f \equiv \frac{(M_2 \sin i)^3}{M^2} = \frac{K^3 P (1 - e^2)^{3/2}}{2\pi G}$$

( $K = v \sin i$ ,  $M = M_1 + M_2$ )



HULSE AND TAYLOR



*Hulse-Taylor ('75)*

# 中性子星の質量観測(2)

## ■ 一般相対論効果

- 近星点移動 (Perihelion shift)  
質量の和 ( $M=M_1+M_2$ ) に敏感

$$\dot{\omega} = 3 \left( \frac{2\pi}{P} \right)^{5/3} \frac{(GM)^{2/3}}{(1-e^2)c^2}$$

- Einstein delay  
伴星の質量に敏感

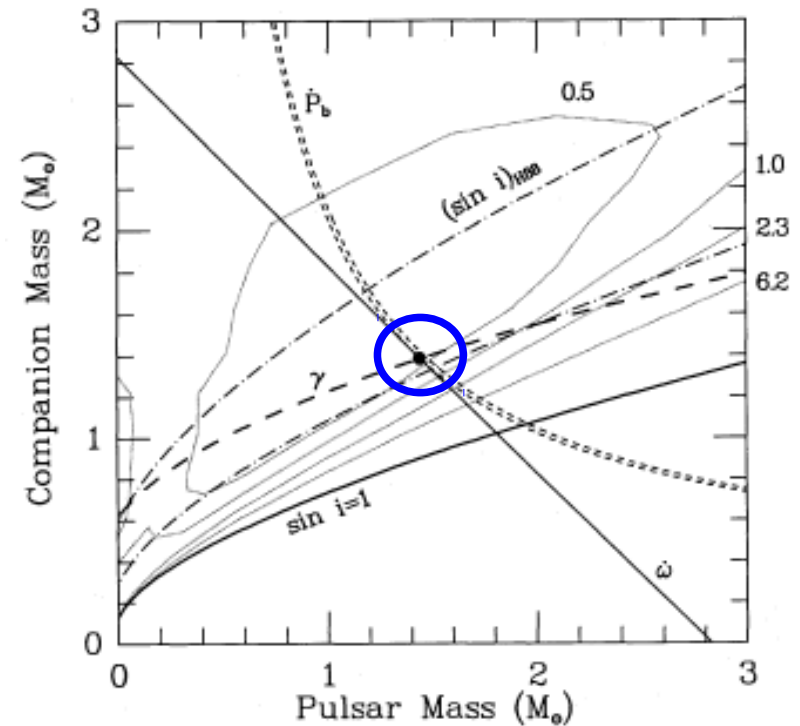
$$\Delta_E = \gamma \sin u$$

( $u$  = eccentric anomaly)

$$\gamma = \frac{eP_b G m_2 (m_1 + 2m_2)}{2\pi c^2 a_R M} \quad \frac{a_R^3}{P_b^2} = \frac{GM}{4\pi^2} \left[ 1 + \left( \frac{m_1 m_2}{M^2} - 9 \right) \frac{GM}{2a_R c^2} \right]^2$$

- Shapiro delay (伴星の重力による遅れ)  
傾きが大きい場合に顕著

$$\Delta_S = -2m \left[ \ln \frac{r}{a} + \ln (1 - \sin i \sin \phi) \right]$$



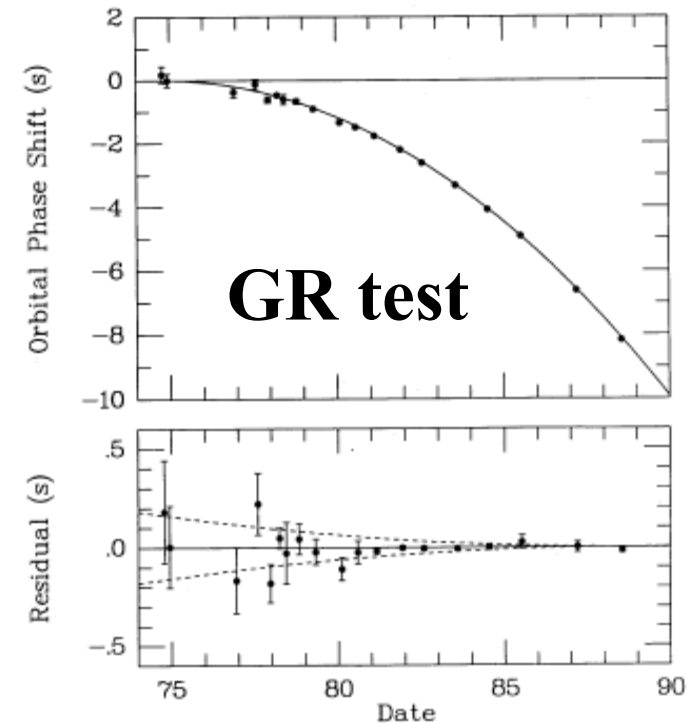
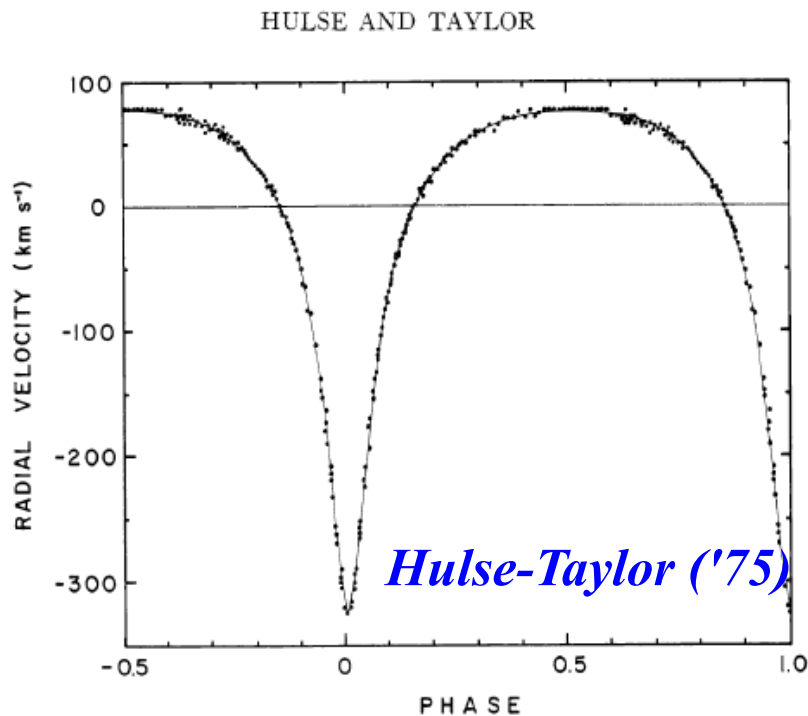
Taylor, Weisenberg ('89)

# ハルス・テラー・パルサー (PSR 1913+16)

- パルスが正確に測られている連星中性子星 (1993 Nobel prize to Hulse & Taylor)  
→ 中性子星質量の正確な測定 & 重力波放出の間接的証拠

$$m_1 = 1.442 \pm 0.003 M_{\text{sun}}$$

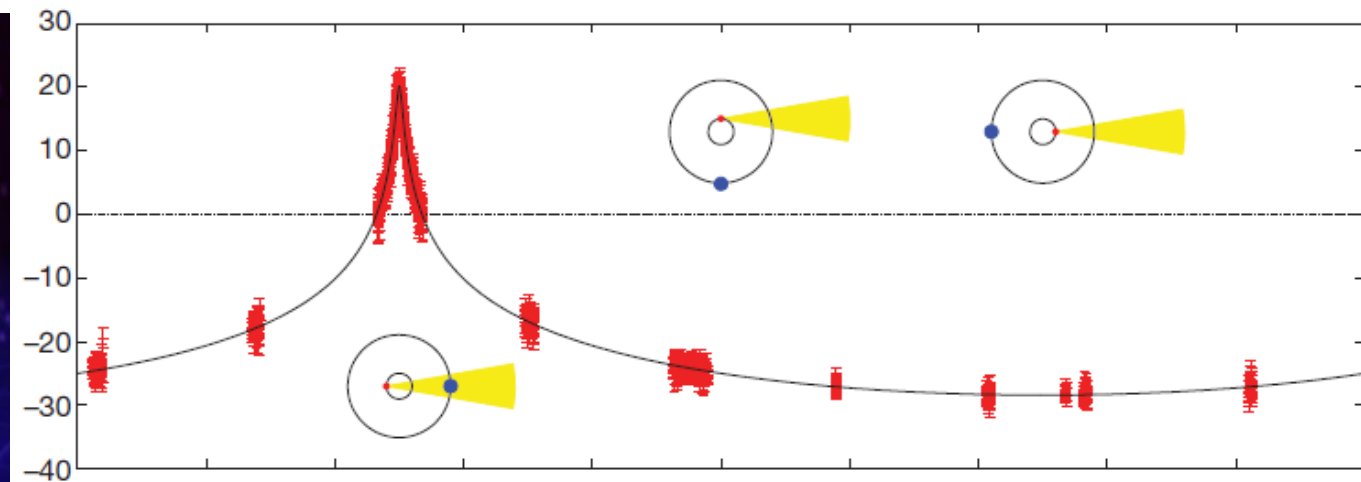
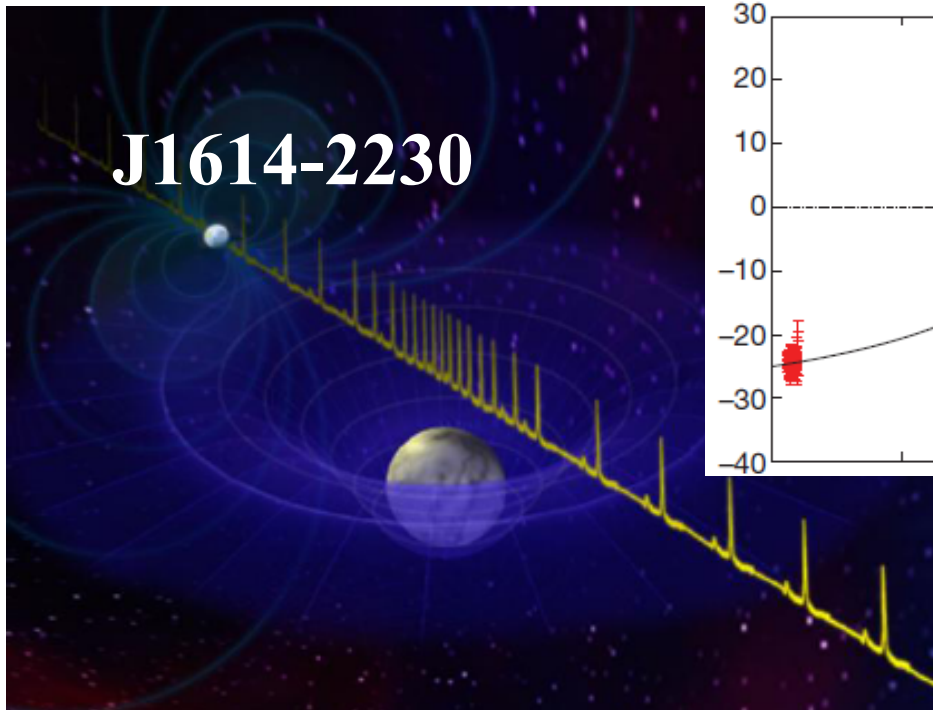
$$m_2 = 1.386 \pm 0.003 M_{\text{sun}}$$



*Taylor, Weisenberg ('89)*

# 重い中性子星 ( $M \sim 2 M_{\odot}$ )

- 一般相対論効果による Time delay
  - Einstein delay : パルサーの運動による遅れ
  - Shapiro delay : 伴星の重力場による遅れ
- 重い中性子星の発見 (J1614-2230)
  - Shapiro delay による質量の評価  $M = 1.97 \pm 0.04 M_{\odot}$   
Demorest et al. (2010)



$$\Delta_S = -2m \left[ \ln \frac{r}{a} + \ln (1 - \sin i \sin \phi) \right]$$

*Demorest et al., Nature 467 (2010) 1081.*

# 中性子星の質量

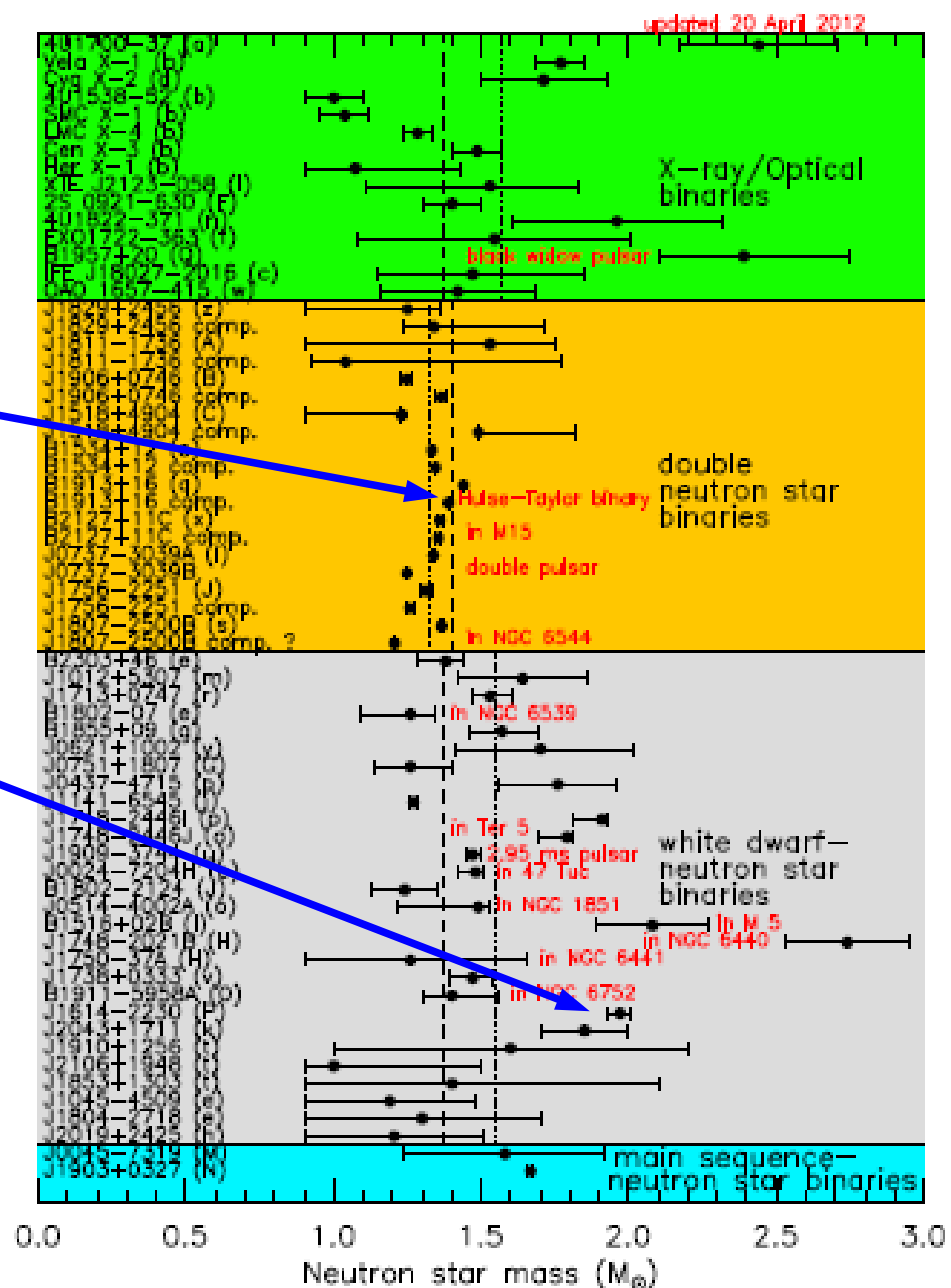
## ■ 連星をなす中性子星の質量は GR 効果を使って正確に求まる

- Perihelion shift+Einstein delay  
 $\rightarrow M = 1.442 \pm 0.003 M_{\odot}$   
 (Hulse-Taylor pulsar)  
*Taylor, Weisenberg ('89)*
- Shapiro delay  
 $\rightarrow M = 1.97 \pm 0.04 M_{\odot}$   
*Demorest et al. ('10)*
- Another obs.:  $M = 2.01 \pm 0.04 M_{\odot}$   
*Antoniadis et al. ('13)*

*Neutron Star Mass*

$$M = (1-2) M_{\odot}$$

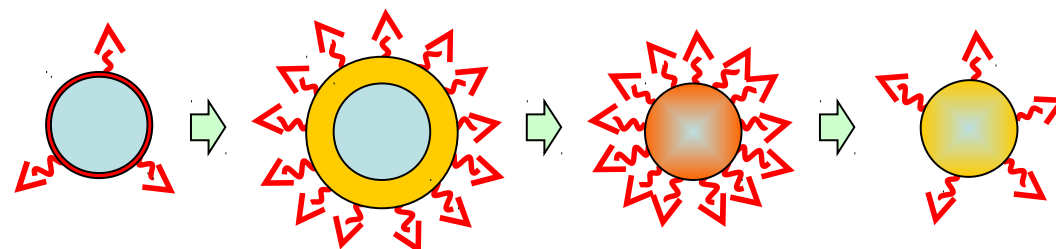
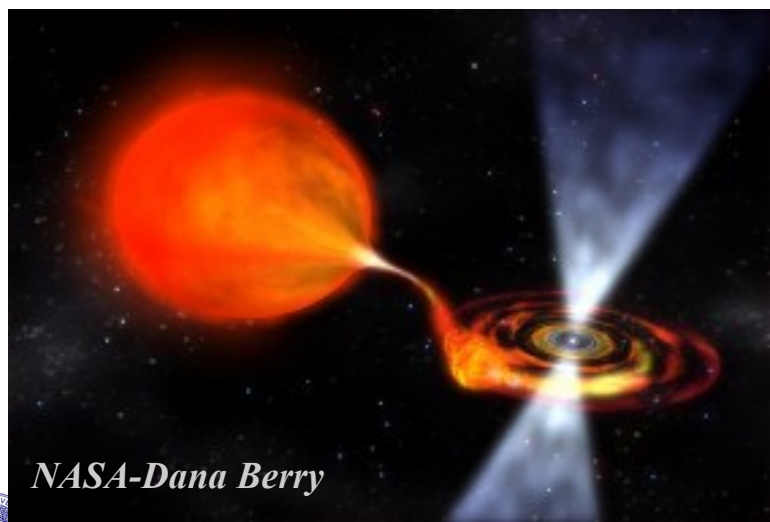
*Canonical value = 1.4 M<sub>⊙</sub>*



*Lattimer (2013)*

# 中性子星の半径測定

- 1万~10万光年離れた10km程度の半径をどうやって測るか？
  - 銀河の大きさ  $\sim 3 \times 10^{14}$  km ( $\sim 10$  kpc  $\sim 3 \times 10^4$  light year)
- 模型に依存する解析が必要
- X-ray burster
  - 伴星からの降着によって時々水素・ヘリウム燃焼を起こす
  - 高温になり、中性子星が明るく輝く！
  - 中性子星の半径を測る3つの方法



Ignition

Touch  
down

*Nakazato*

# How can we measure the radius of a star ?

## ■ Two photon intensity correlation

*Hanbury Brown & Twiss, Nature 10 (1956), 1047.*

- Simultaneous two photon observation probability is enhanced from independent emission cases  
→ angular diameter of Sirius=0.0063”

A TEST OF A NEW TYPE OF STELLAR INTERFEROMETER ON SIRIUS

By R. HANBURY BROWN

Jodrell Bank Experimental Station, University of Manchester

AND

DR. R. Q. TWISS

Services Electronics Research Laboratory, Baldock

NATURE November 10, 1956 Vol. 178

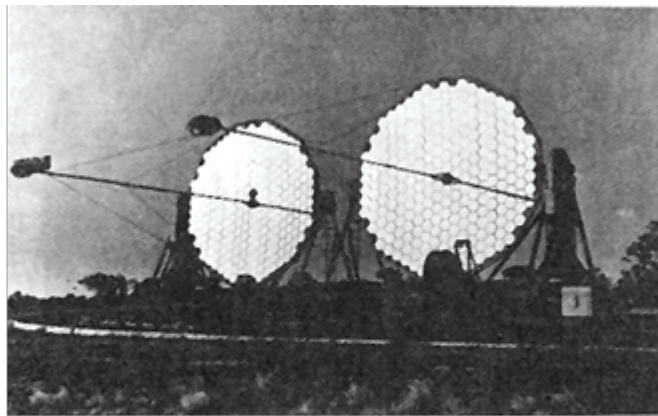


Figure 2. Picture of the two telescopes used in the HBT experiments. The figure was extracted from Ref.[1].

*HBP telescope (from Goldhaber, ('91))*

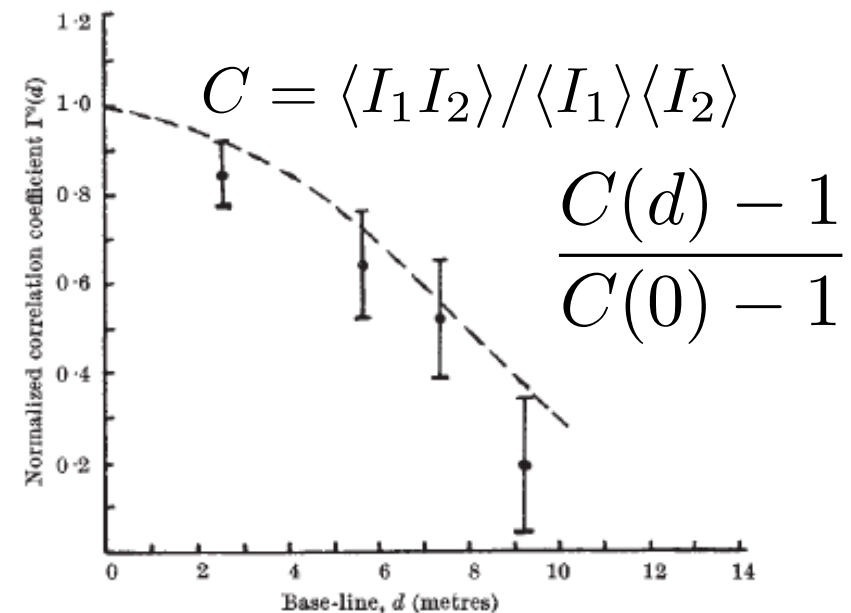


Fig. 2. Comparison between the values of the normalized correlation coefficient  $\Gamma^2(d)$  observed from Sirius and the theoretical values for a star of angular diameter 0.0063". The errors shown are the probable errors of the observations

*HBT ('56)*



# Two particle intensity correlation

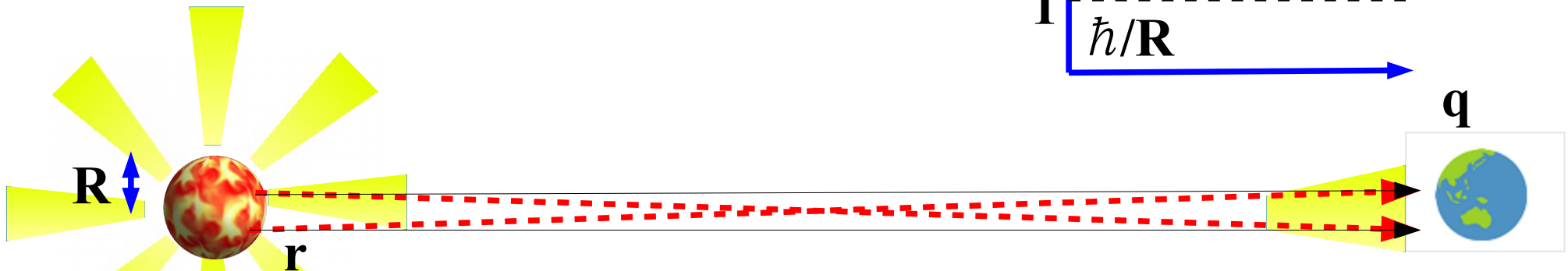
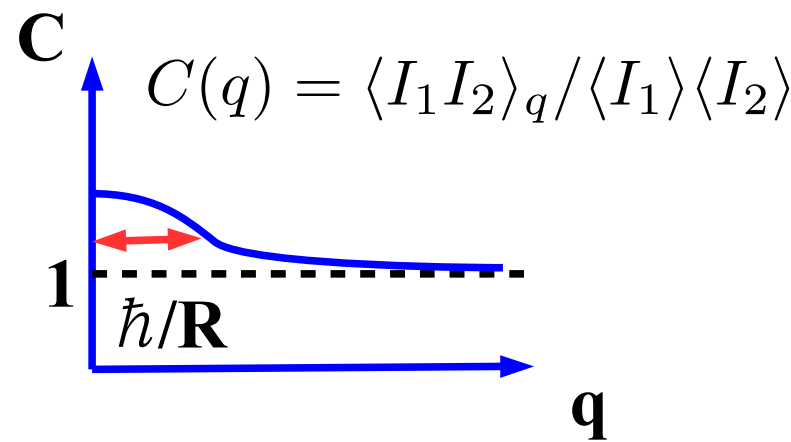
## Wave function symmetrization from quantum statistics

$$C(\mathbf{q}) = \int d^3r S(\mathbf{q}, \mathbf{r}) \left| \frac{1}{\sqrt{2}} (e^{i\mathbf{q}\cdot\mathbf{r}} + e^{-i\mathbf{q}\cdot\mathbf{r}}) \right|^2 \simeq \underline{1 + \exp(-4q^2 R^2)}$$

Source fn.  
( $\mathbf{r}$ =relative coordinate)  
(symmetrized w.f.)<sup>2</sup>

Static spherical source case

→ Small relative momenta are favored due to symmetrization of the relative wave function.



中性子星の半径は  
小さすぎて測れない....

Momentum  
 $\mathbf{q} = (\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2) / 2$

# 中性子星の半径測定(1)

## ■ 表面からの黒体輻射

- ステファン・ボルツマン則を仮定  
→ フラックス・温度・距離から  
中性子星半径が推定可能

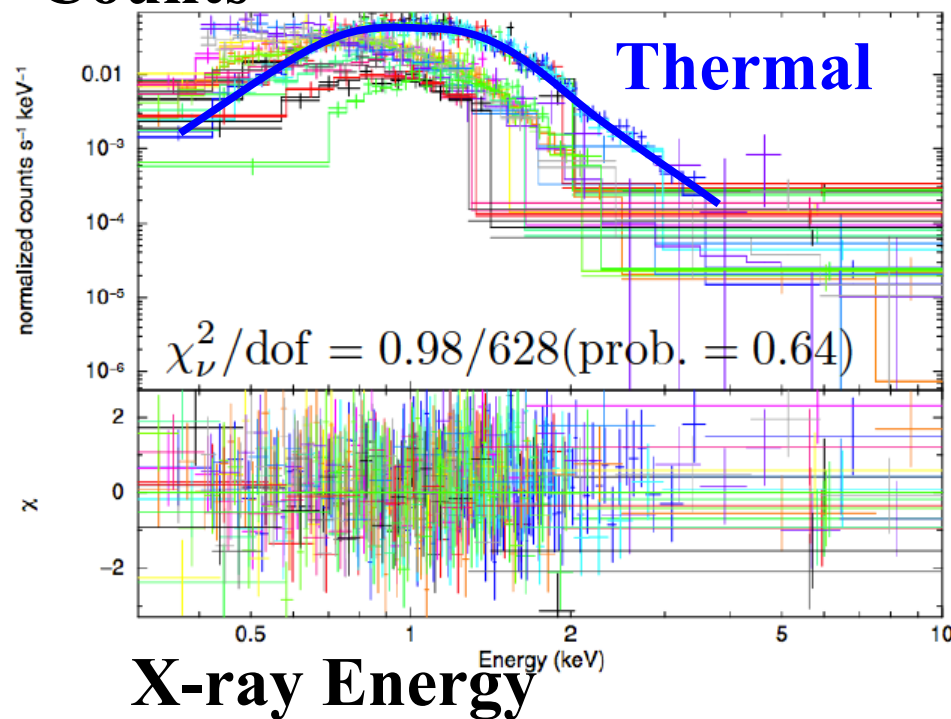
$$L = 4\pi R_{\infty}^2 \sigma_{\text{SB}} T^4, \quad F = \frac{L}{4\pi D^2}$$

$$\rightarrow R = \sqrt{\frac{F D^2}{\sigma_{\text{SB}} T^4} \left(1 - \frac{2GM}{Rc^2}\right)^{1/2}}$$

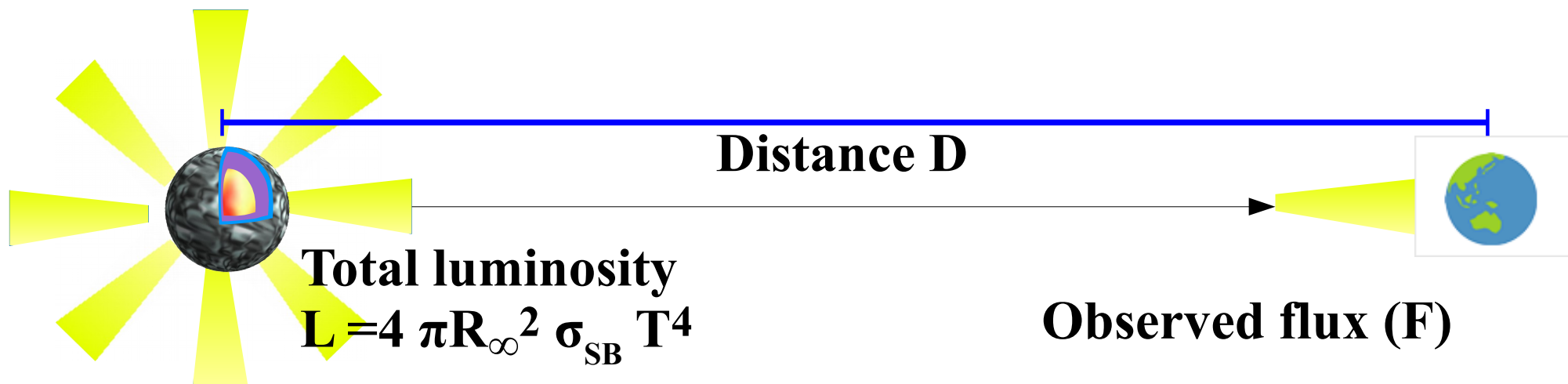
$$(R_{\infty} = R(1 - 2GM/Rc^2)^{-1/2})$$

Counts

The Radius of Neutron Stars



*Guillot et al. (2013)*



# 中性子星の半径測定(2)

## ■ エディントン限界

- 輻射圧 = 重力

$$\frac{4\pi r^2 \sigma_{\text{SB}} T^4}{4\pi r^2 c} \cdot N_e \cdot \sigma_{\text{T}}$$

$$= \frac{GM}{r^2} \cdot N_N \cdot m_N$$

$$\rightarrow R_{\infty}^2 = \frac{2GMcm_N}{\sigma_{\text{T}}\sigma_{\text{SB}}T^4} \frac{N_N}{N_e}$$

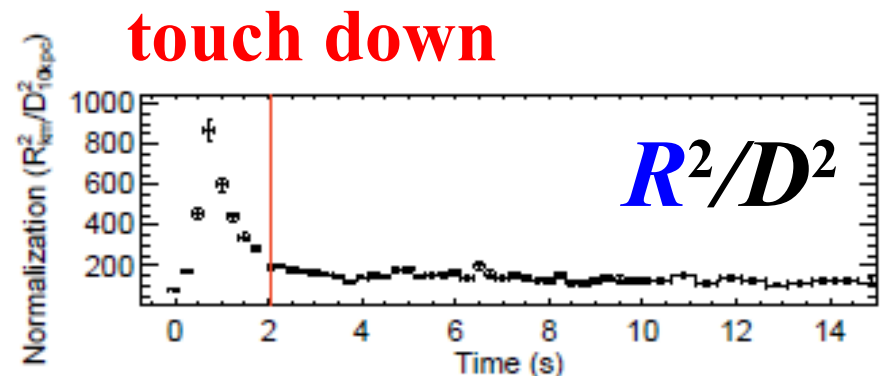
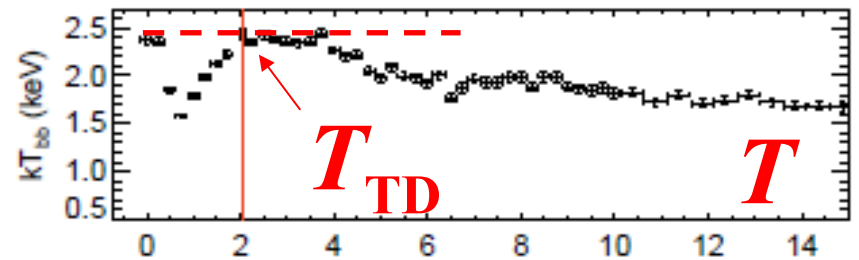
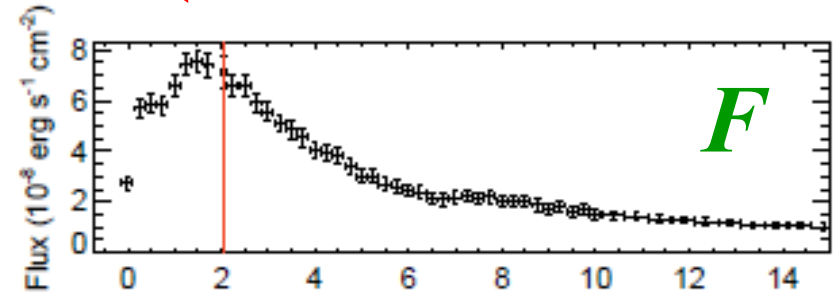
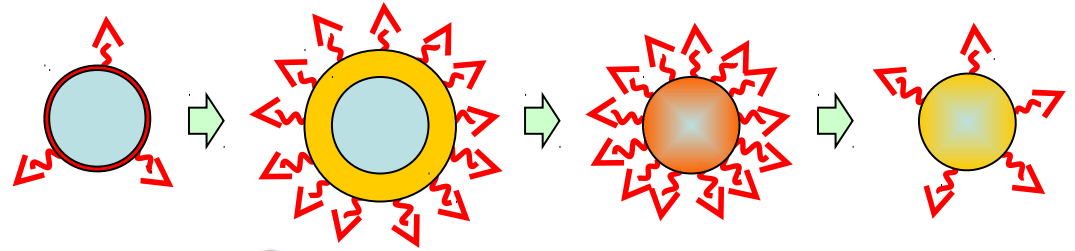
- タッチダウンでエディントン限界が達成されると仮定

- 電子・核子数比

$$N_e/N_N = (1+X)/2$$

(水素大気では  $X=1$   
軽元素大気では  $X=0$ )

- 半径の下限値を与える！



*Guver et al., ApJ 747 (2012) 47*

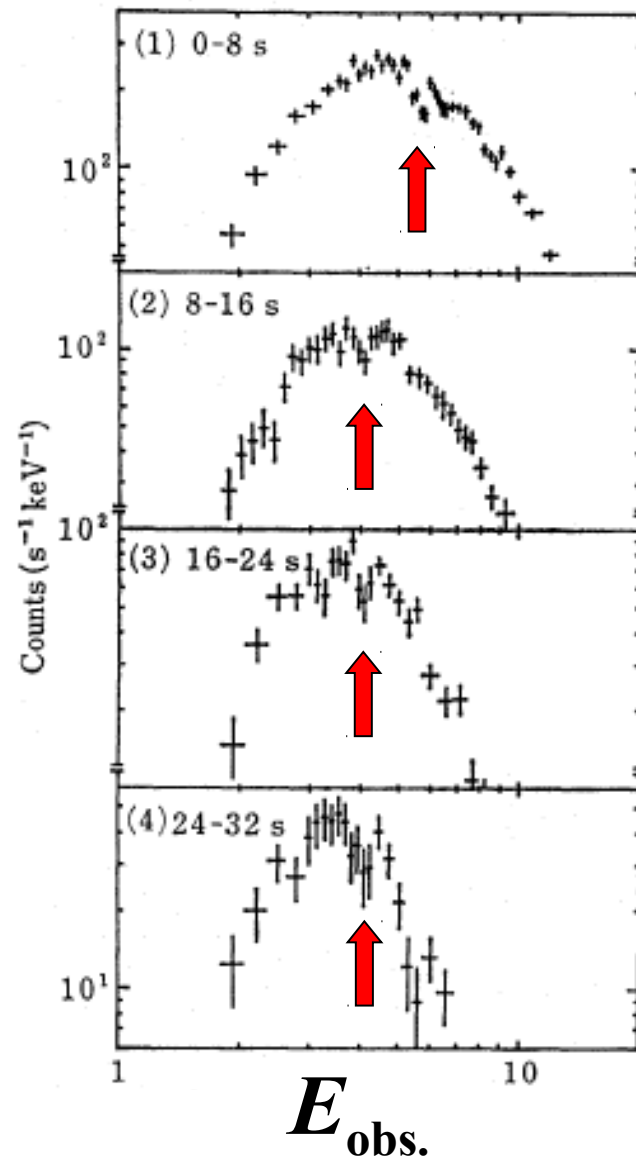
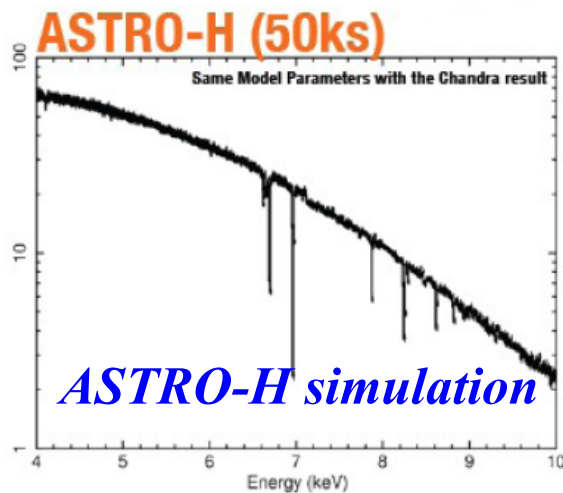
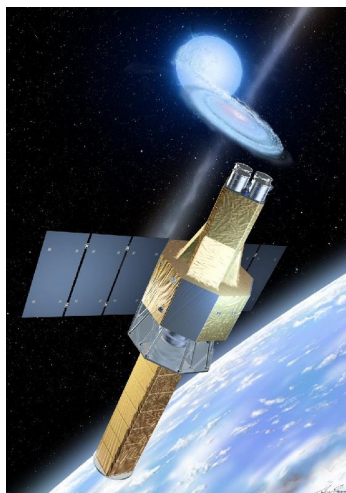
# 中性子星の半径測定(3)

## ■ 吸収線の赤方偏移

- 中性子星表面は鉄を含む
- 鉄の吸収線の赤方偏移  
～ R/M の直接測定

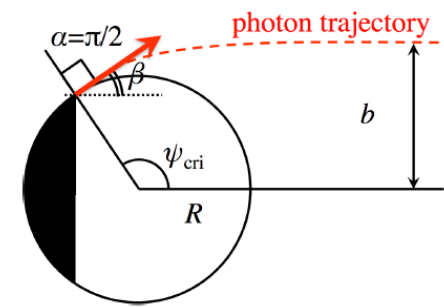
$$E_{\text{obs}} = E_{\text{surf}} \sqrt{1 - \frac{2GM}{Rc^2}}$$

- ASTRO-H (Hitomi) によって鉄の吸収線から M/R が 1% の精度で測定されるはずであった。  
→ 新しい人工衛星 XARM へ引き継ぎ



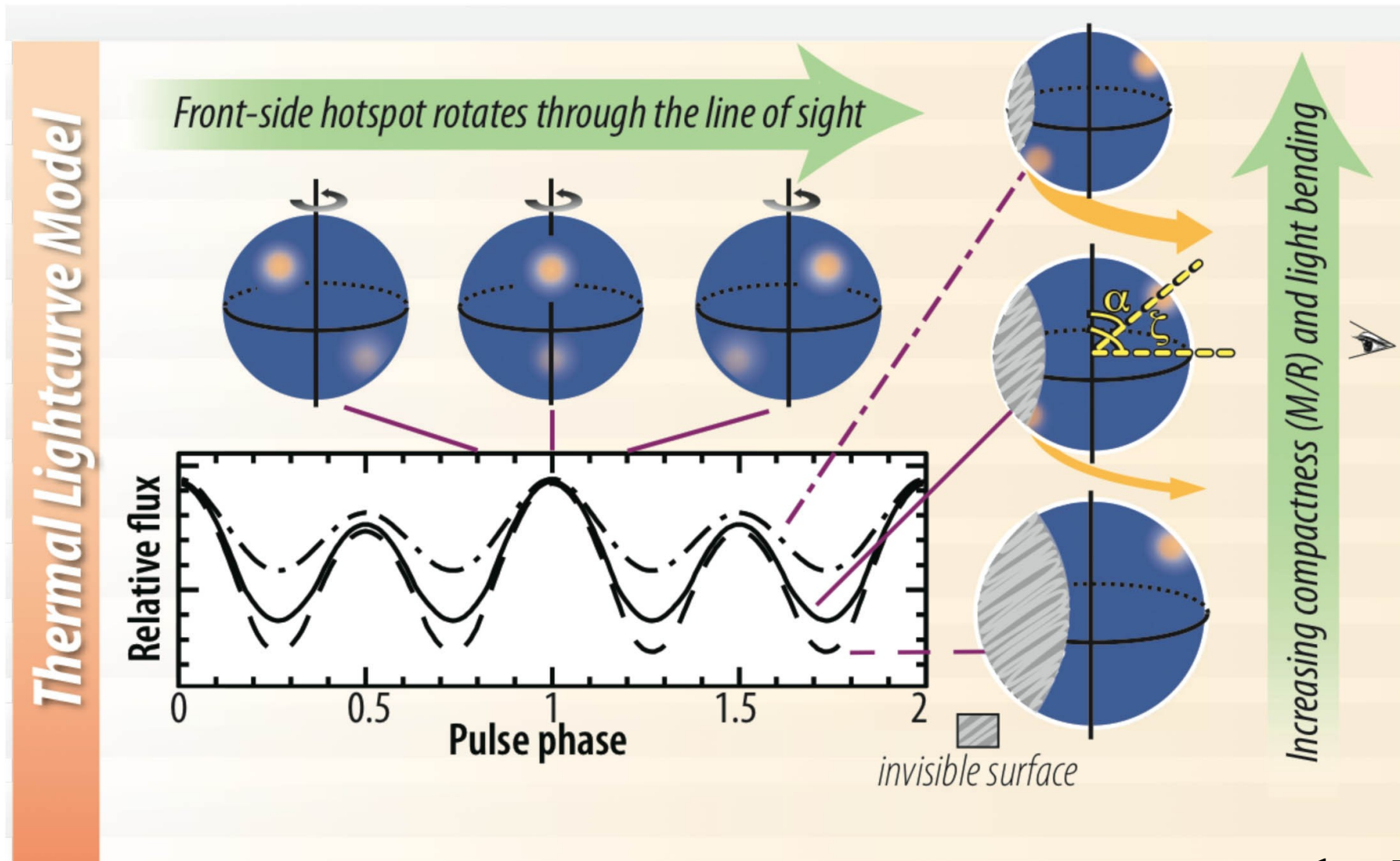
*Waki et al.,  
PASJ36('84)819*

# NICER (Neutron star Interior Composition ExploreR)



Sotani & Miyamoto (2017)

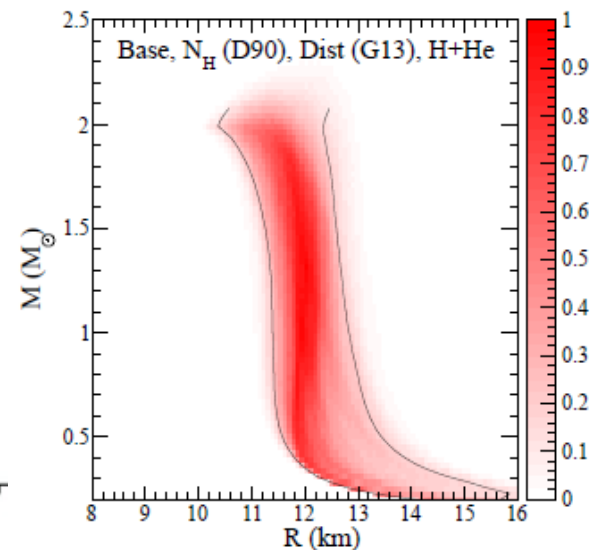
## Deducing $M/R$ from light curves of msec pulsars



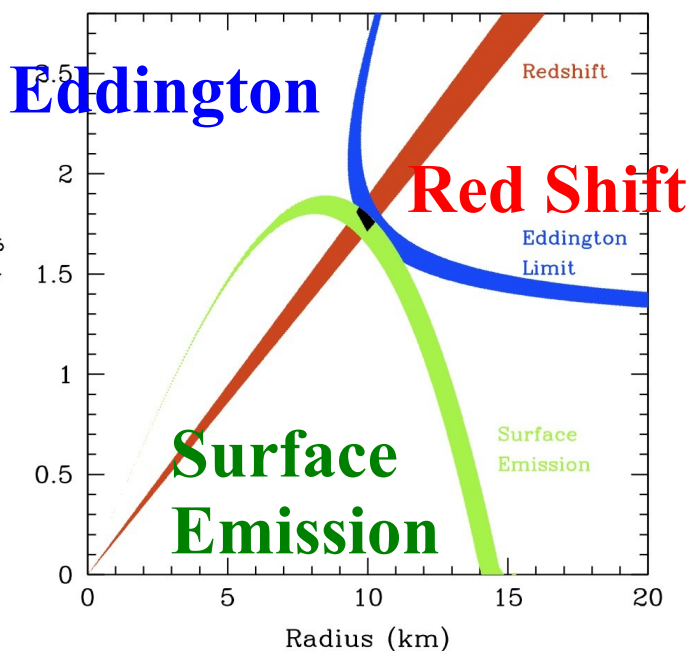
# 中性子星半径

## ■ さて、3つの方法は同じ半径を与えるか？

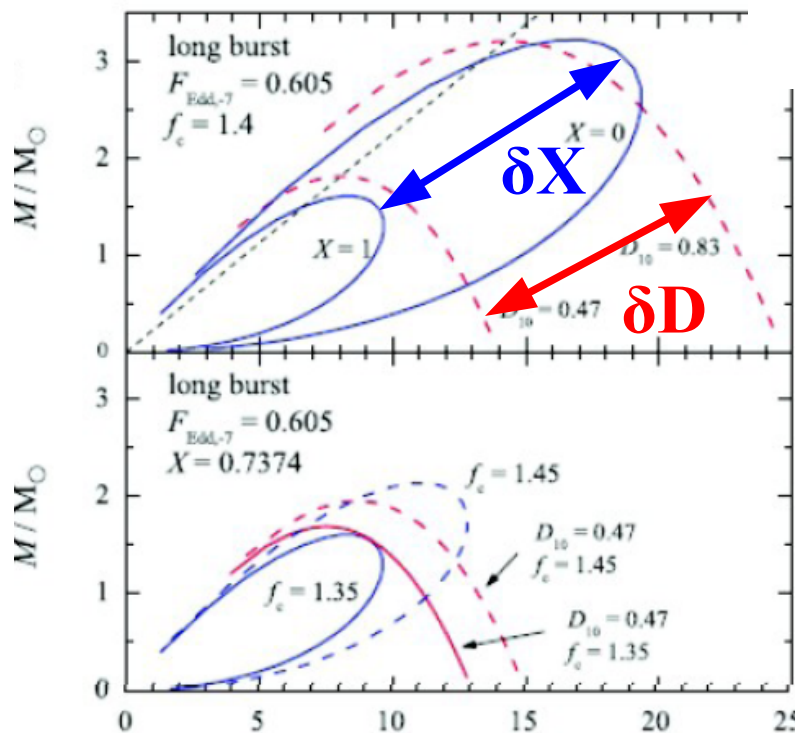
- 表面黒体放射とエディントン限界 (仮定) は距離、組成 (& 仮定) に大きな不定性をもつ。
- Eddington limit を示す関数形？



*Lattimer, Steiner (2014).*



*Ozel et al.*

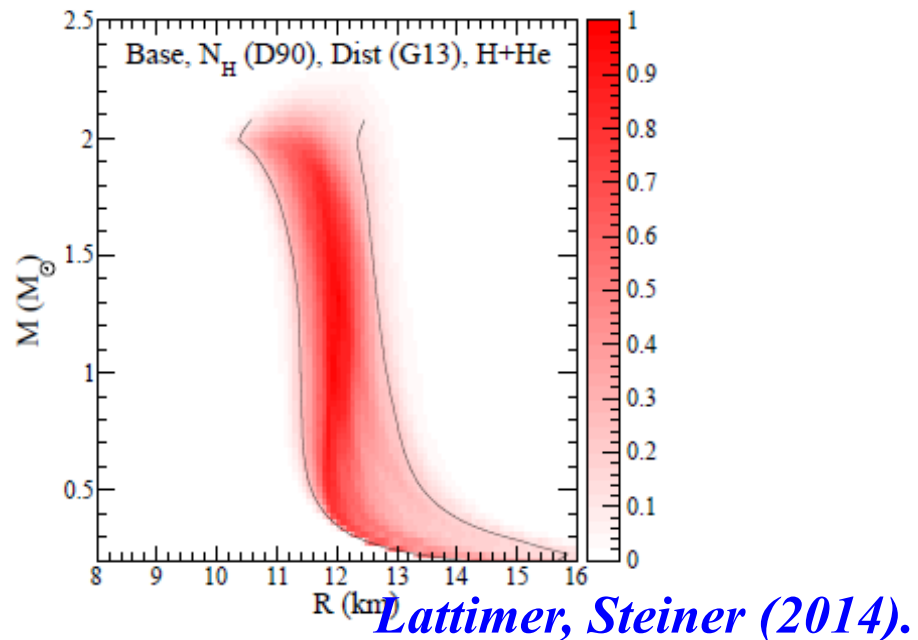
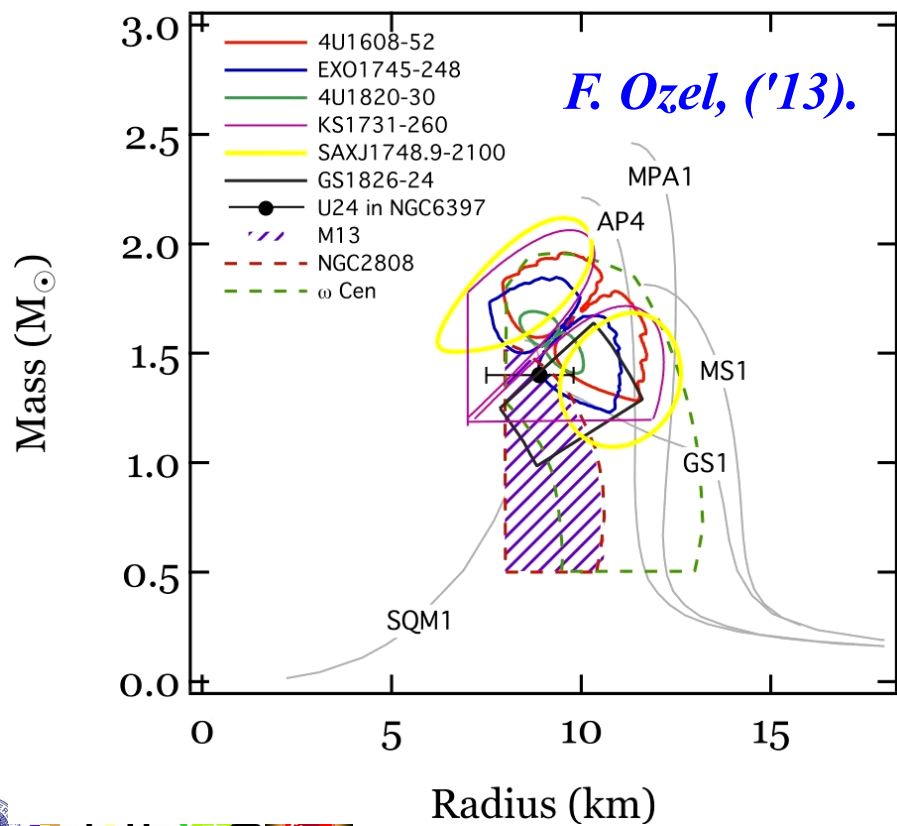
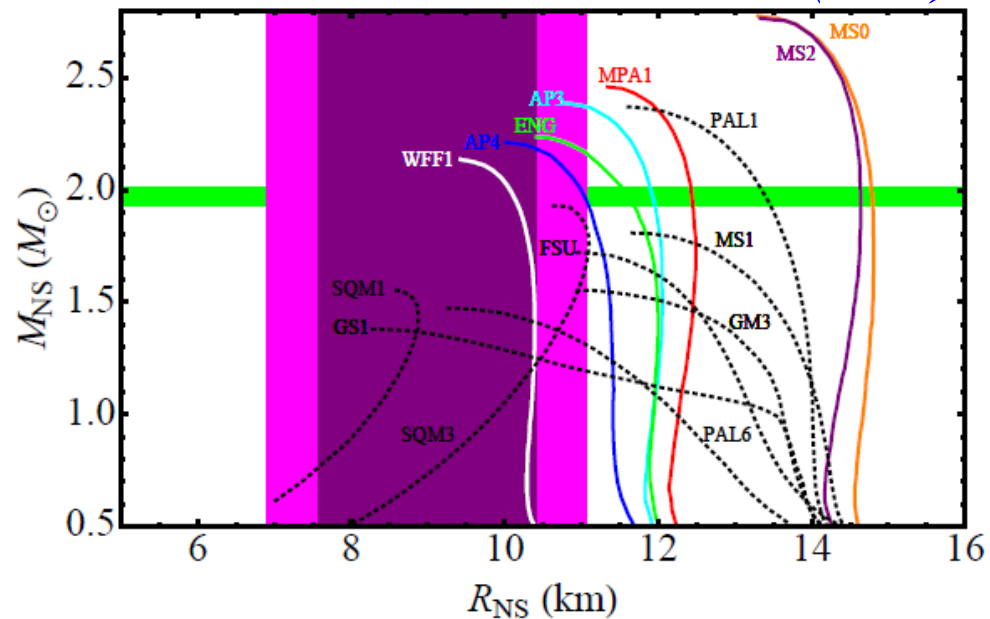


*4U 1724-307, Suleimanov et al., ApJ742('11),122*

# 中性子星の質量と半径

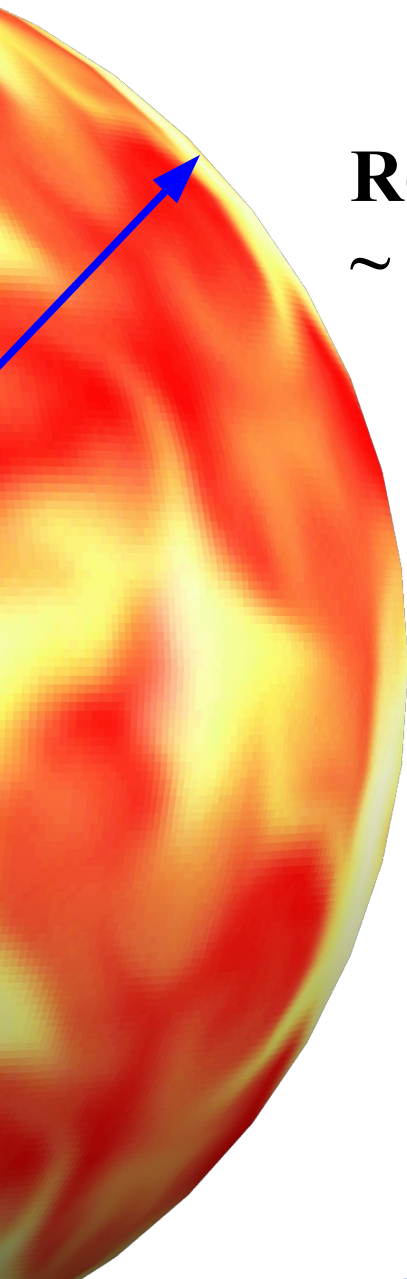
- 中性子星の半径は分析するグループにより大きく異なる  
**Ozel et al. / Guillot et al.  $R \sim 9\text{km}$**   
**Suleimanov+,  $R_{1.4} > 13.9\text{ km}$**   
**Lattimer+,  $R_{1.4} = 12 \pm 1.4\text{ km}$**

Guillot et al. (2013)

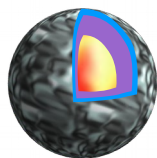


Lattimer, Steiner (2014).

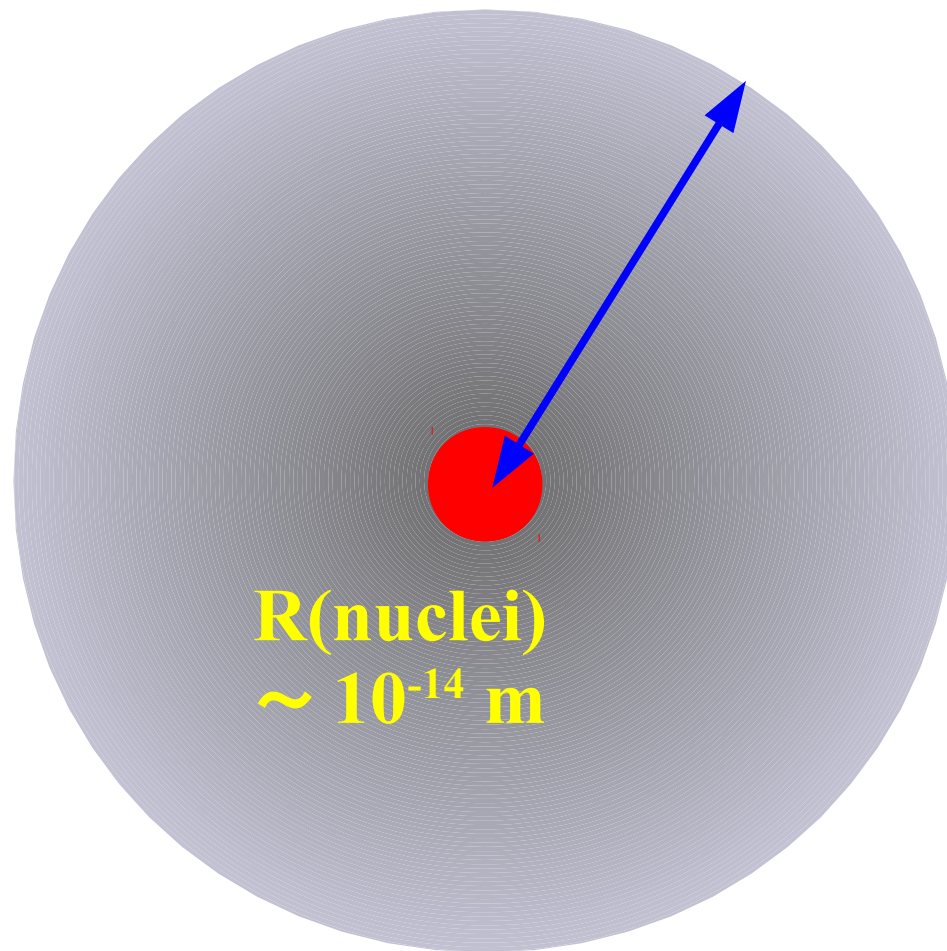
# 中性子星の密度



**R(Sun)**  
**~ 700,000 km**



**R(NS)~ 12 km**  
**M(NS)~1.4 M<sub>⊙</sub>**



**R(atom)**  
**~ 10<sup>-10</sup> m**

**R(nuclei)**  
**~ 10<sup>-14</sup> m**

**とても高い密度！**

$$m_N \rho(NS) \sim (2-7) \times 10^{14} \text{ g/cm}^3 \sim (1-3) m_N \rho_0$$



# 中性子星は核力 (強い相互作用) で支えられている!

- 中性子星の平均密度  $\sim (1-3) \rho_0$ , 最大密度  $\sim (5-10) \rho_0$   
→ 核力 (強い相互作用) によって支えられる。  
(c.f. 白色矮星は電子の圧力で支えられている)

## ■ 核力

- 長距離:  $\pi$  交換

*Yukawa (1935)*

- 中間レンジの引力

2  $\pi$  exchange,  $\sigma$  exchange, ....

*Nambu, Jona-Lasinio (1961)*

- 短距離斥力

Vector meson exchange,  
Pauli blocking btw. quarks  
Gluon exchange

*Neudatchin, Smirnov, Tamagaki;*

*Oka, Yazaki; Aoki, Hatsuda, Ishii*

