

状態方程式、パスタ、 ニュートリノ

～現在進行中の研究から～

中里 健一郎（京大理）

お品書き

状態方程式

- ブラックホール形成からのニュートリノ放射
- 高温・高密度状態方程式の依存性

パスタ

- Gyroid 相 + 曲率効果

ニュートリノ

- 超新星ニュートリノデータベースの構築
- 輻射流体計算 + Proto-Neutron Star Cooling

状態方程式

- ブラックホール形成からのニュートリノ放射
- 高温・高密度状態方程式の依存性

中里 健一郎（京大理）

住吉 光介（沼津高専）

鈴木 英之（東理大理工）

山田 章一（早大理工）

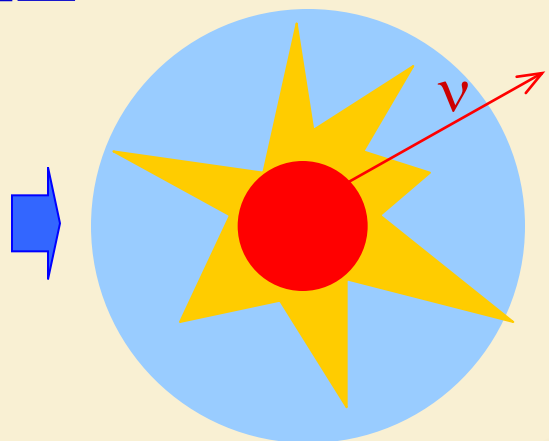
大西 明（京大基研）

重力崩壊 → ブラックホール形成シナリオ

- $40M_{\odot}$ の質量を持つ回転のない星の崩壊
 - 回転がないと、重すぎて超新星爆発を起こせない。
 - とは言っても、いったん核力によるバウンスを起こし、1秒程度ニュートリノを放出してから、ブラックホールになる。

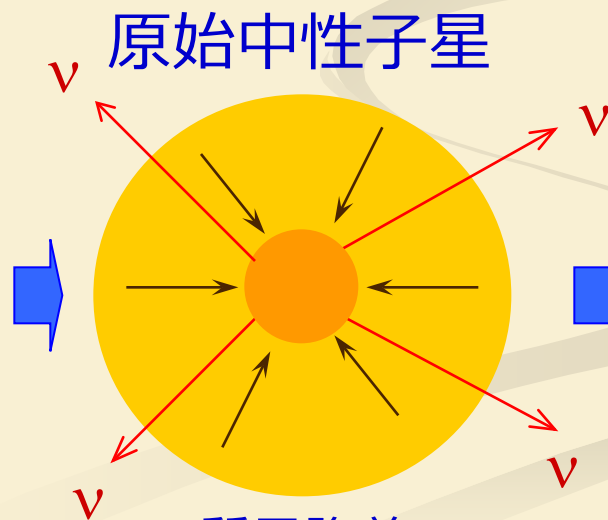
→ 核密度以上の物理の「実験室」

大質量星



重力崩壊

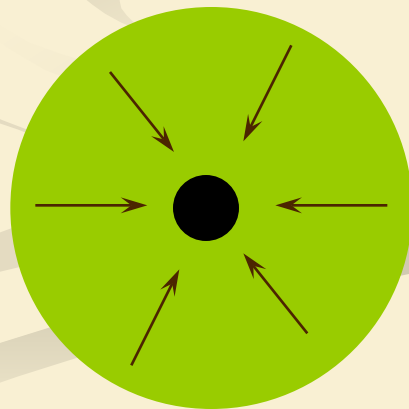
バウンス



原始中性子星

質量降着

ブラックホール



本研究の概略

■ ブラックホール形成の過程をシミュレーション

■ 放出ニュートリノのスペクトル計算

恒星進化のモデル

高温・高密度物質の状態方程式

一般相対論的流体力学

ニュートリノ生成・散乱反応

星内部でのニュートリノ輸送

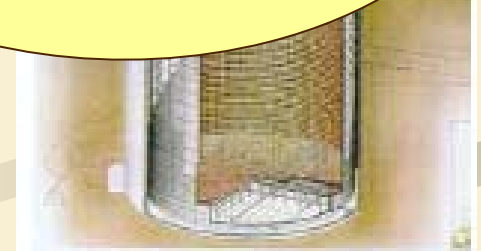
ニュートリノ物質振動

検出器内部での
ニュートリノ反応

検出器の特性
(エネルギー分解能など)

■ 検出器 (SuperKamiokande) での

イベント数を見積もる → サイエンスの議論

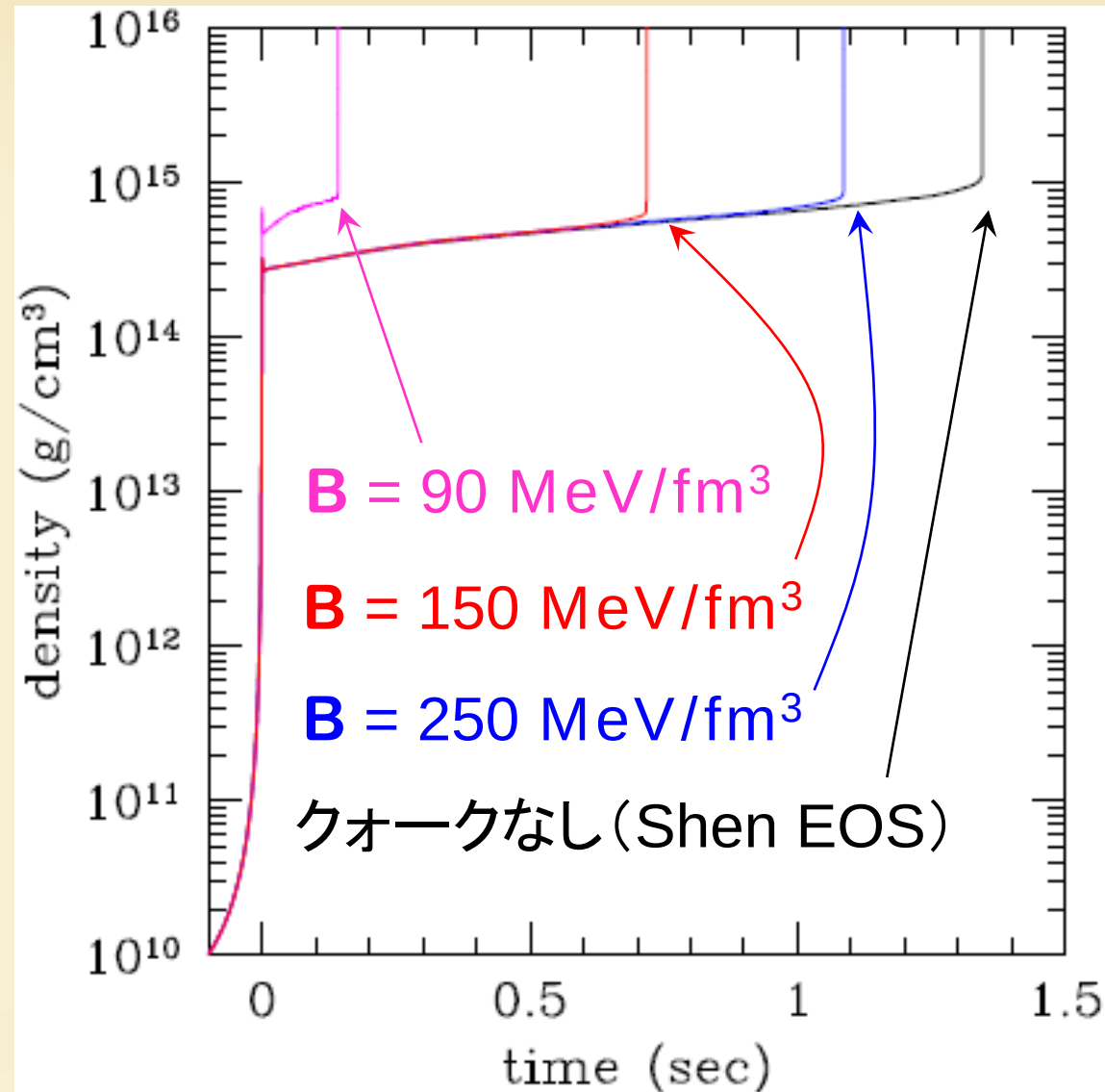


MIT Bag model による quark EOS

- Nakazato et al. (2008)
- ハドロン相では Shen et al. (1998) の EOS
 - 相対論的平均場近似による現実的状态方程式
- クォーク相は MIT Bag model (Chodos et al. 1974)
 - Bag 定数は $\mathbf{B} = \underline{90, 150, 250 \text{ MeV/fm}^3}$
New models!
- 混合相では Gibbs condition を課す。
 - $\mu_n = \mu_u + 2\mu_d$ ・ $\mu_p = 2\mu_u + \mu_d$ ・ $\mu_d = \mu_s$
 - $\mathbf{P_H = P_Q}$

中心密度の時間発展

- Bag 定数が小さいほど、崩壊が早い。
- $B = 90 \text{ MeV/fm}^3$ のモデルはバウンスの時点で、すでに密度が高い。
- 他のモデルでは、BH 形成直前まで差が出ない。

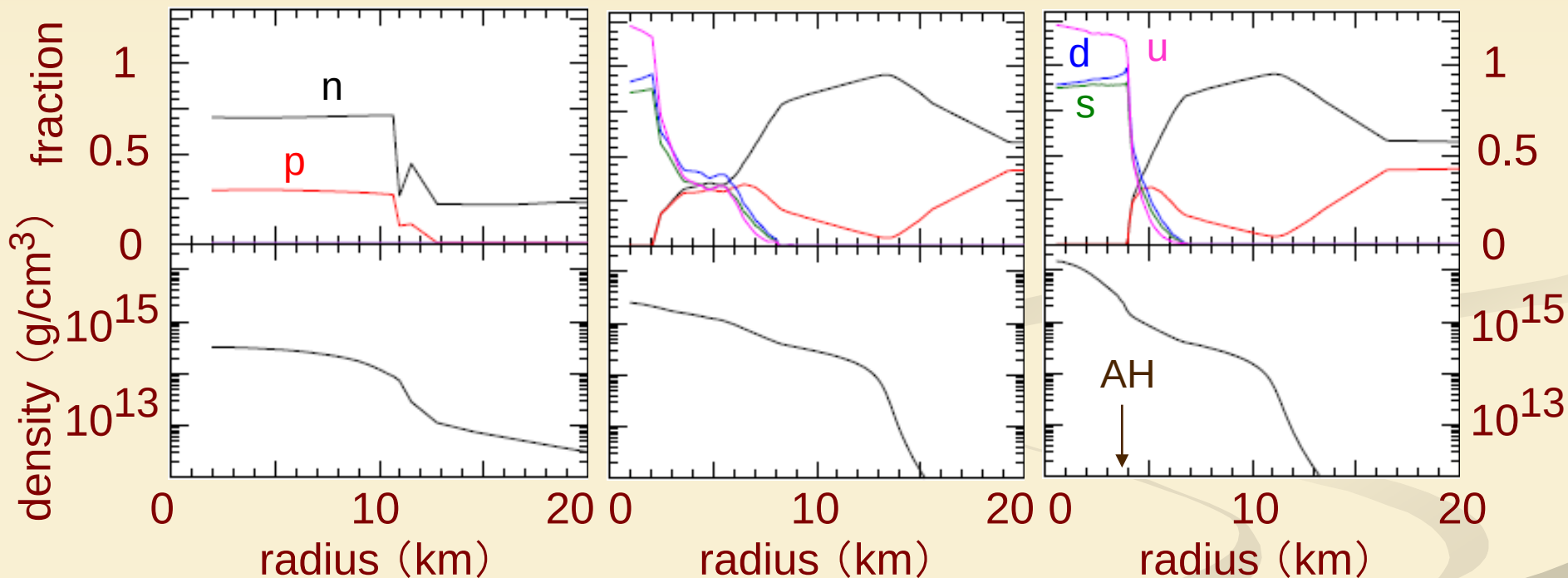


崩壊中の密度・組成分布 ($B = 250 \text{ MeV/fm}^3$)

バウンス時

ブラックホール
形成 0.07 ms 前

ブラックホール
形成時



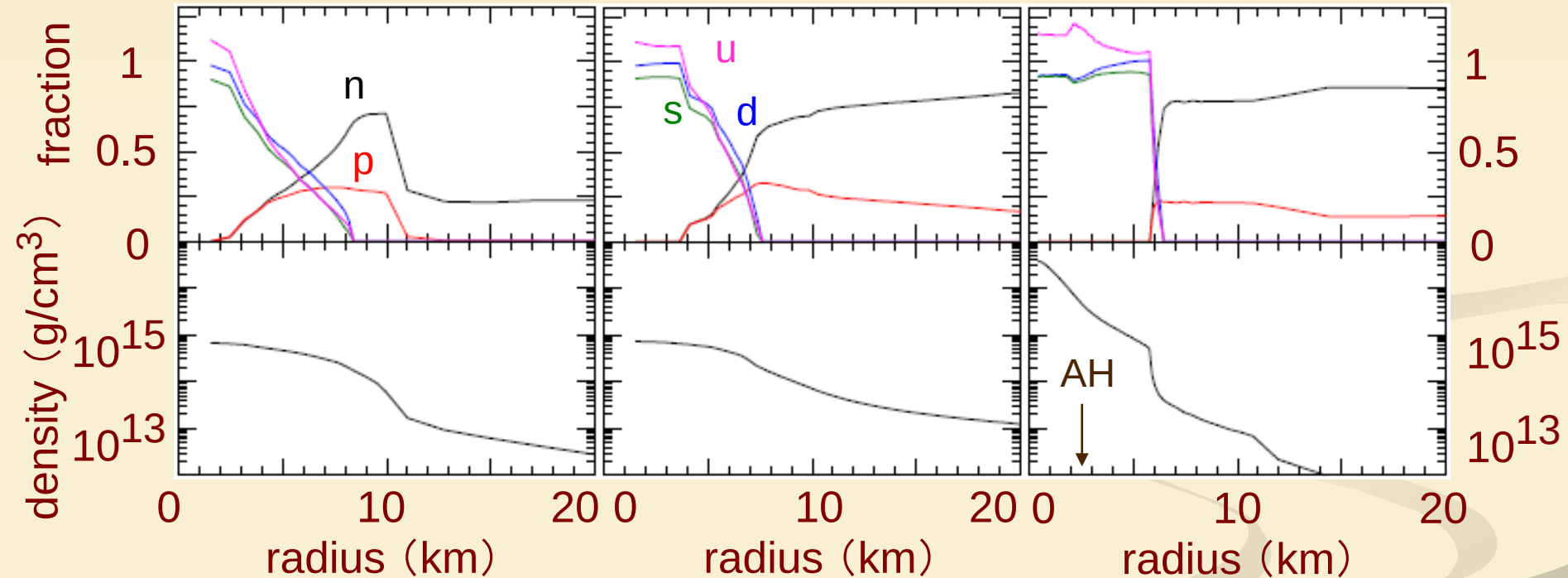
- Bag 定数の値が大きい場合、QCD 相転移が起こるのはブラックホール形成の直前。

崩壊中の密度・組成分布 ($B = 90 \text{ MeV/fm}^3$)

バウンス時

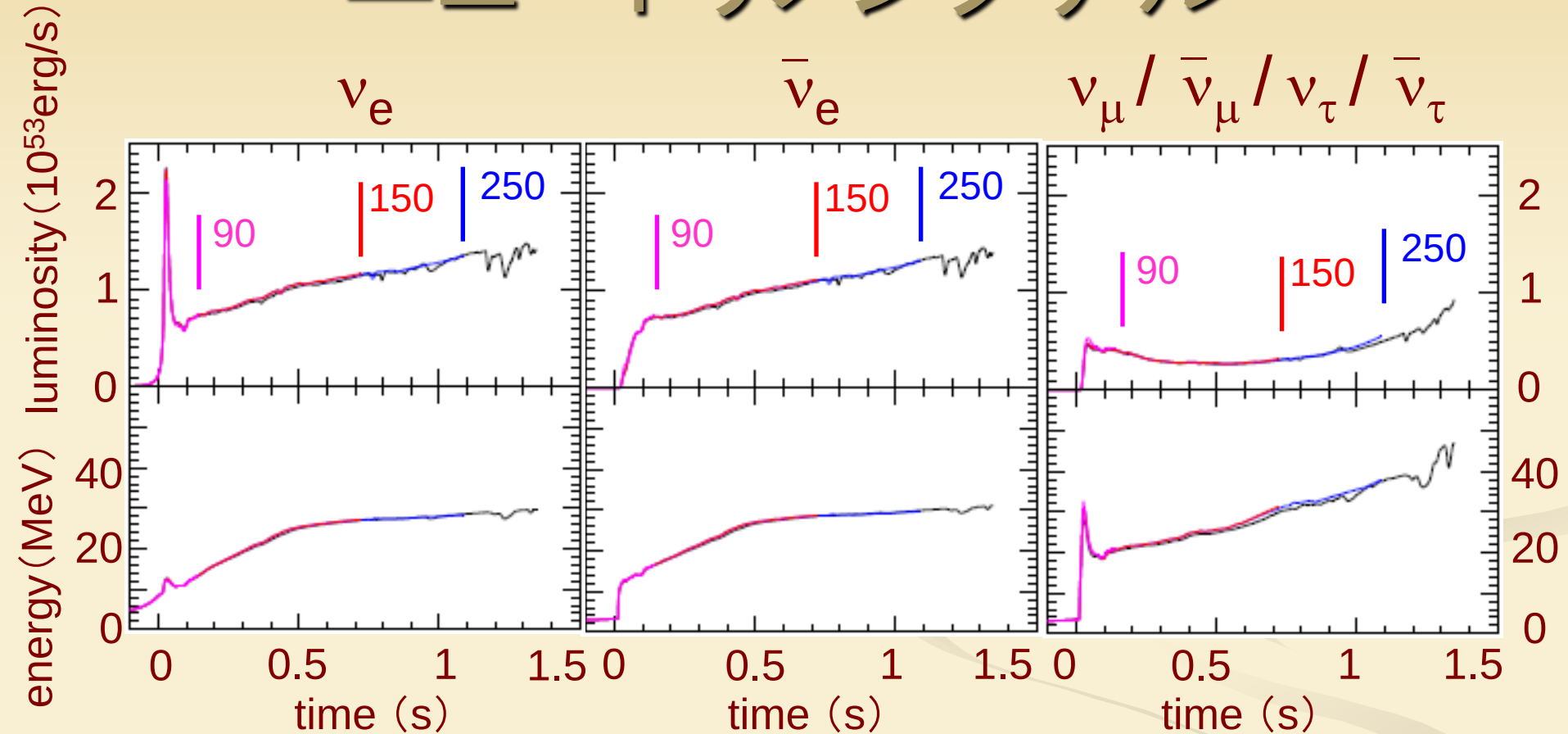
バウンス
100 ms 後

ブラックホール
形成時



- Bag 定数の値が小さい場合、すでにバウンス時に QCD 相転移が起こっている。

ニュートリノシグナル



- $B = 90 \text{ MeV/fm}^3$ の場合も含めて、BH 形成まであまり違いが見られない。
- ニュートリノは外側の領域から放出されるため。

EOS with Hyperon / pion

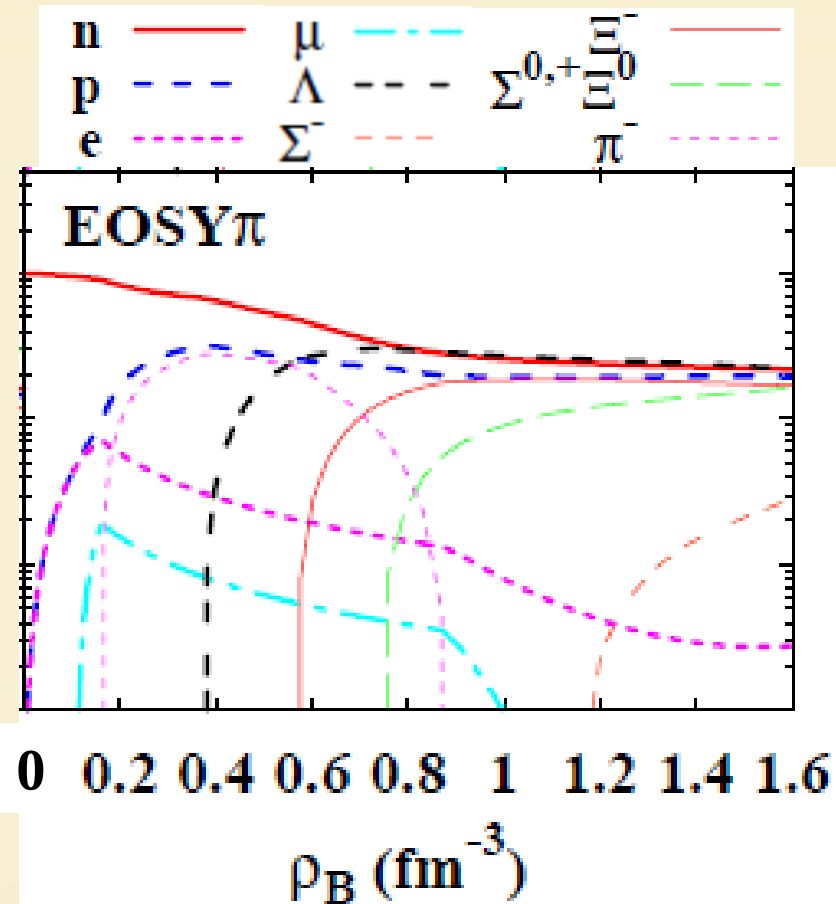
- Ishizuka et al. (2008)
- 相対論的平均場理論 (Shen EOS の拡張)

- バリオン8重項

- 最新の実験データと
矛盾しないポテンシャル

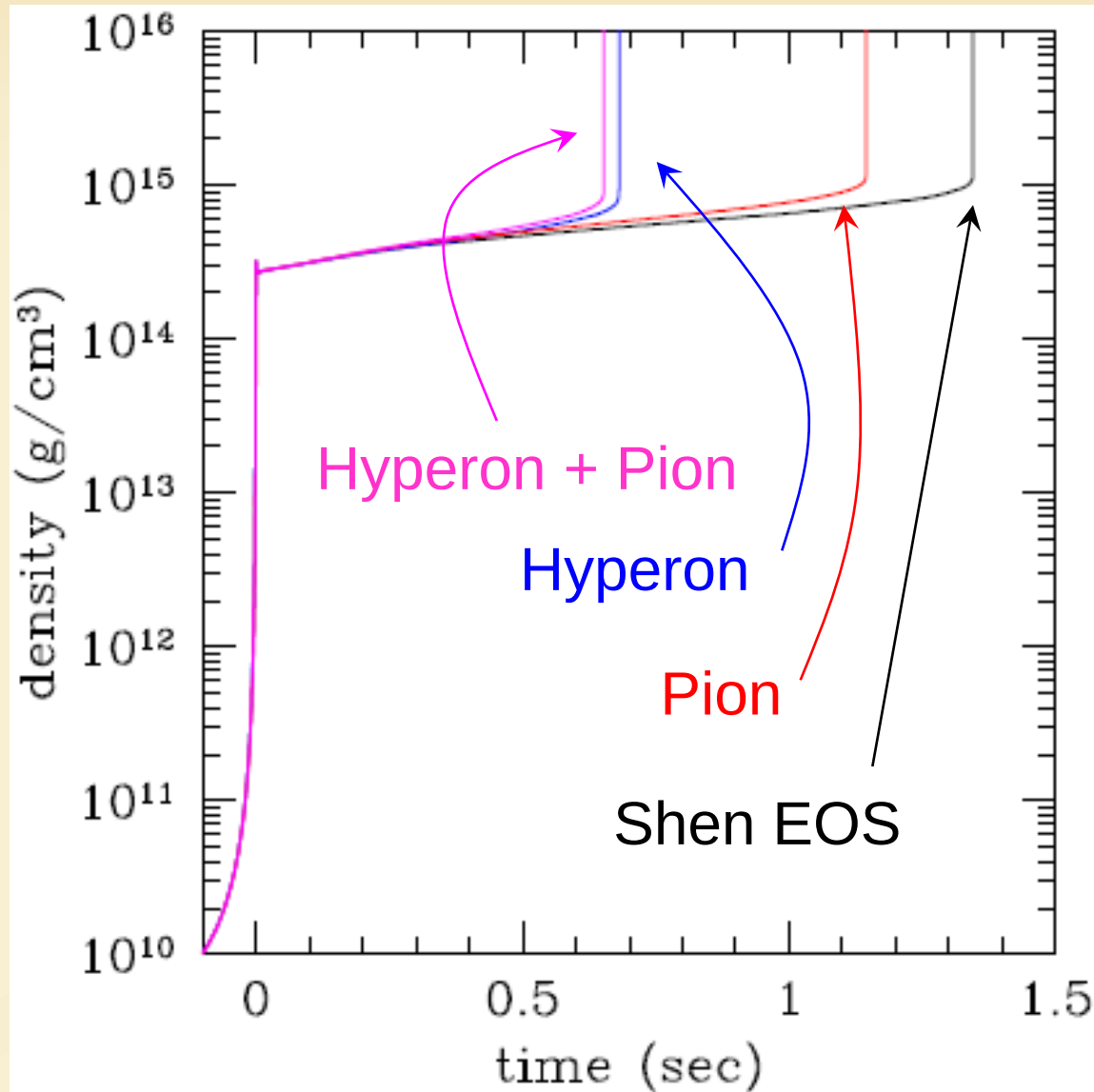
- $U_{\Lambda} = -30 \text{ MeV}$
- $U_{\Sigma} = 30 \text{ MeV}$ (repulsive)
→ 他のパラメータセットもあり。
- $U_{\Xi} = -15 \text{ MeV}$

- Thermal pion の寄与。



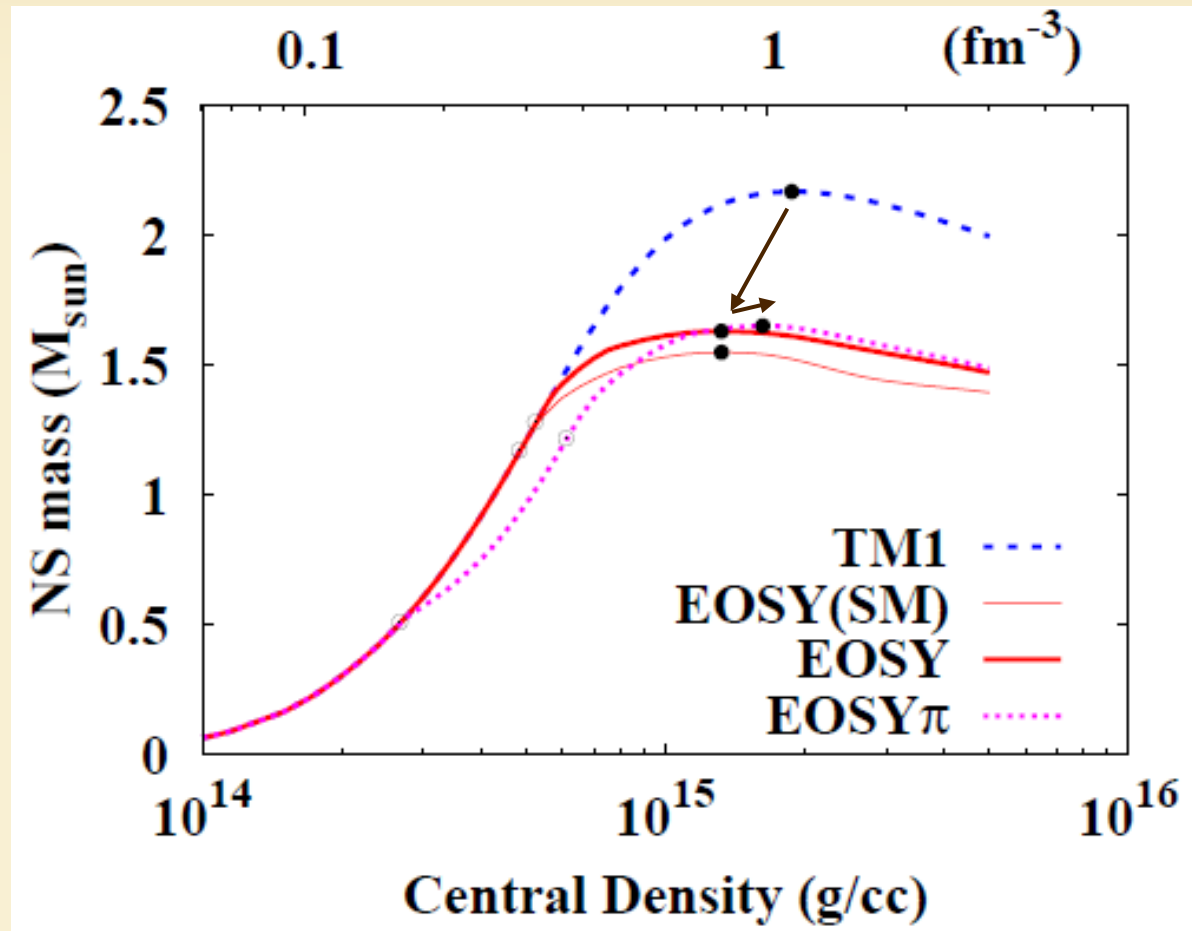
中心密度の時間発展

- Hyperon, pion は 崩壊時間を短縮する。
- Hyperon を入れると大きく変わる (1345 → 682 ms) が、さらに pion を入れてもあまり変わらない。(682 → 653 ms)



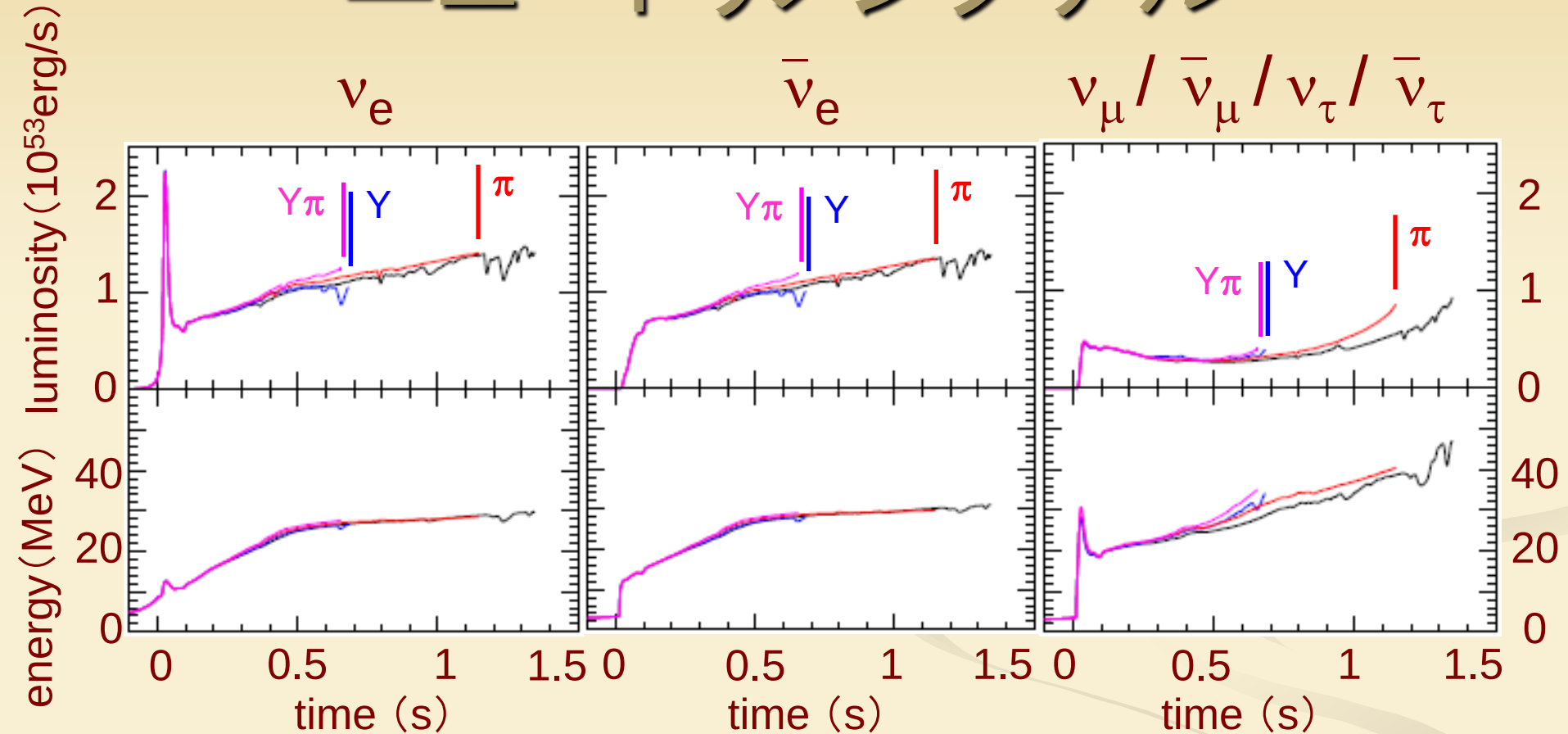
中性子星の最大質量

- Hyperon 入りは大きく違う。
($2.2 \rightarrow 1.6M_{\odot}$)
- さらに Pion を入れてもほぼ違いなし。
→ BH 形成時間の依存性とコンシステント。



Ishizuka et al. (2008)

ニュートリノシグナル



- Hyperon, pion はニュートリノ光度、平均エネルギーを上げるが、違いはそれほど大きくない。

パスタ

- Gyroid 相十曲率効果

中里 健一郎（京大理）

親松 和浩（愛知淑徳大）

飯田 圭（高知大理）

山田 章一（早大理工）

原子核パスタとは何か？

- 核密度以下 ($0.1 - 0.9\rho_0$) で「原子核」が変形する。

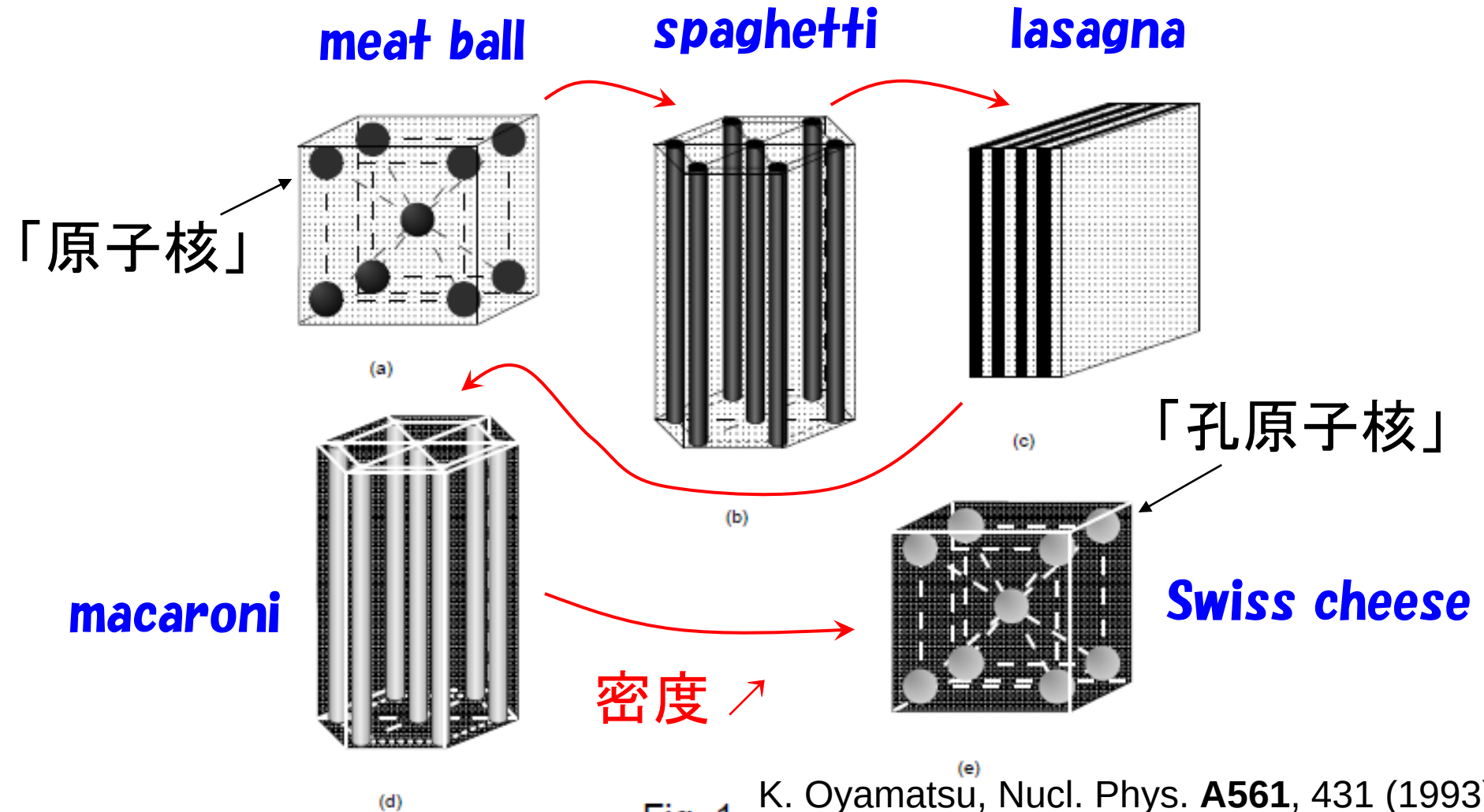


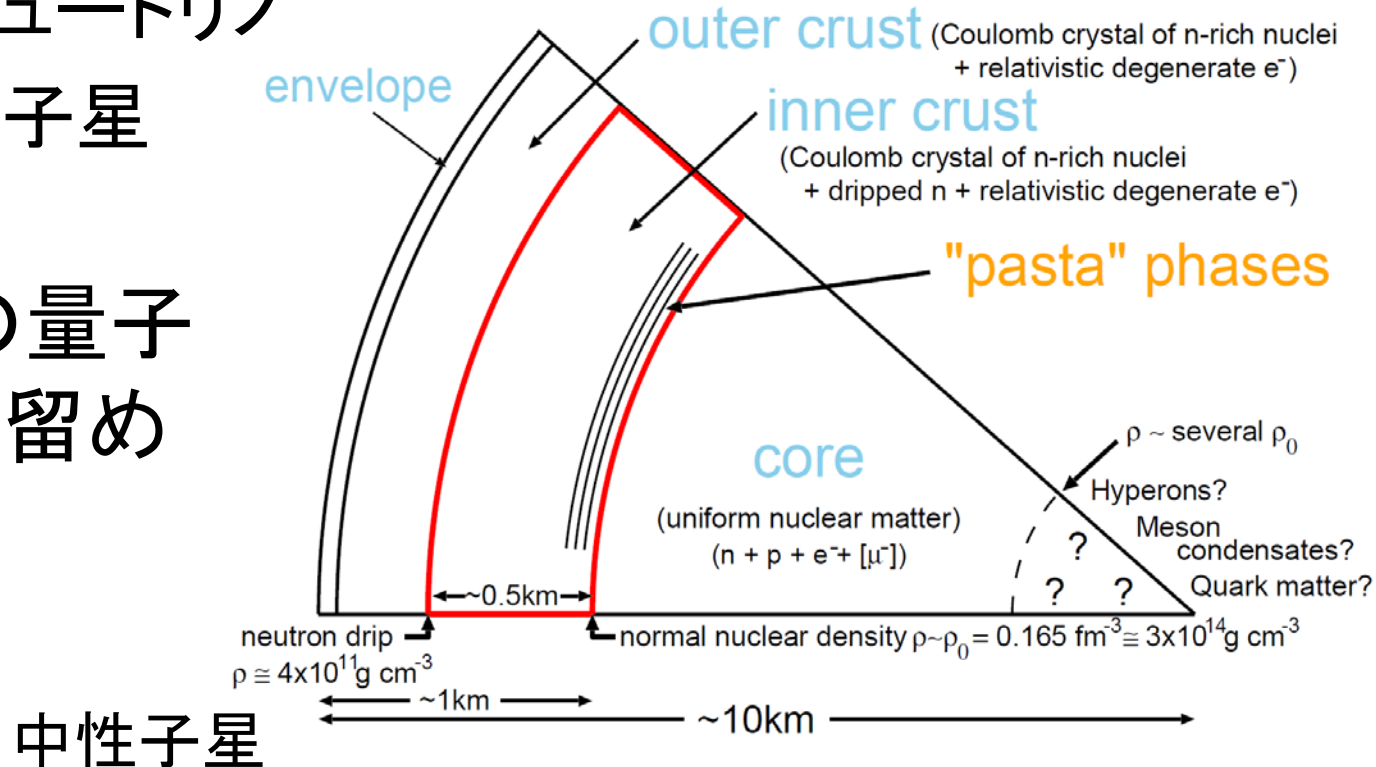
Fig. 1

K. Oyamatsu, Nucl. Phys. **A561**, 431 (1993)

原子核パスタと天体現象

- 高密度状態方程式
 - 超新星メカニズム
- ニュートリノ反応率
 - 超新星ニュートリノ
 - 原子中性子星冷却
- 超流体中の量子渦糸のピン留め
 - パルサーグリッジ

超新星爆発

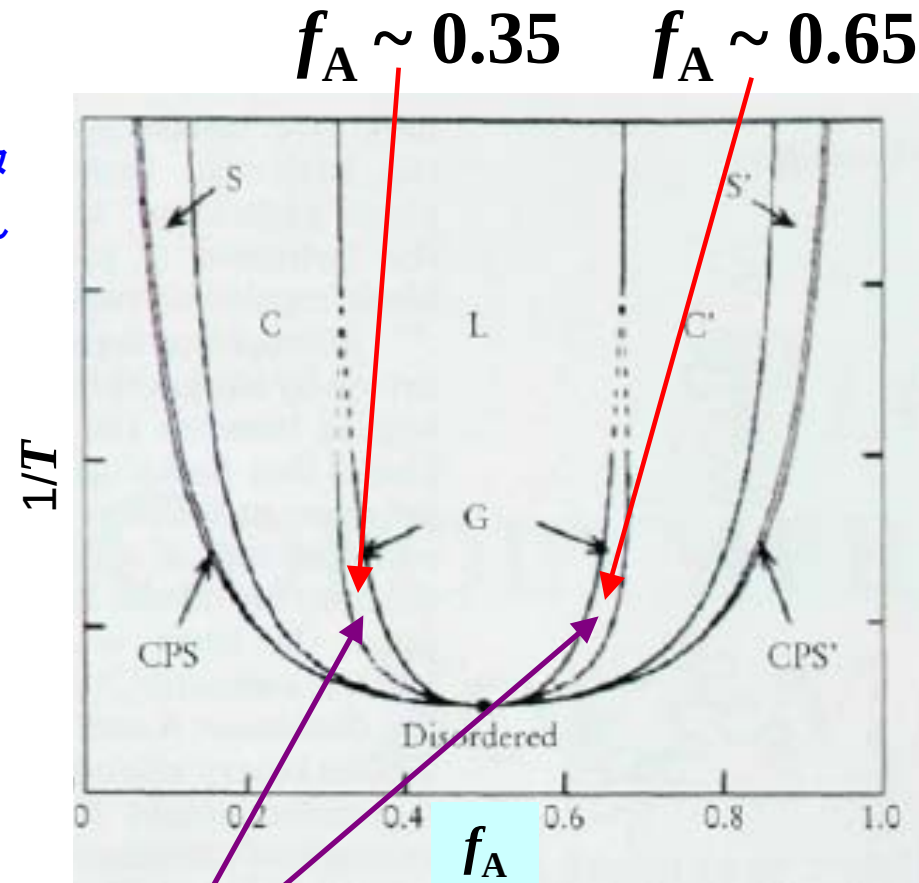
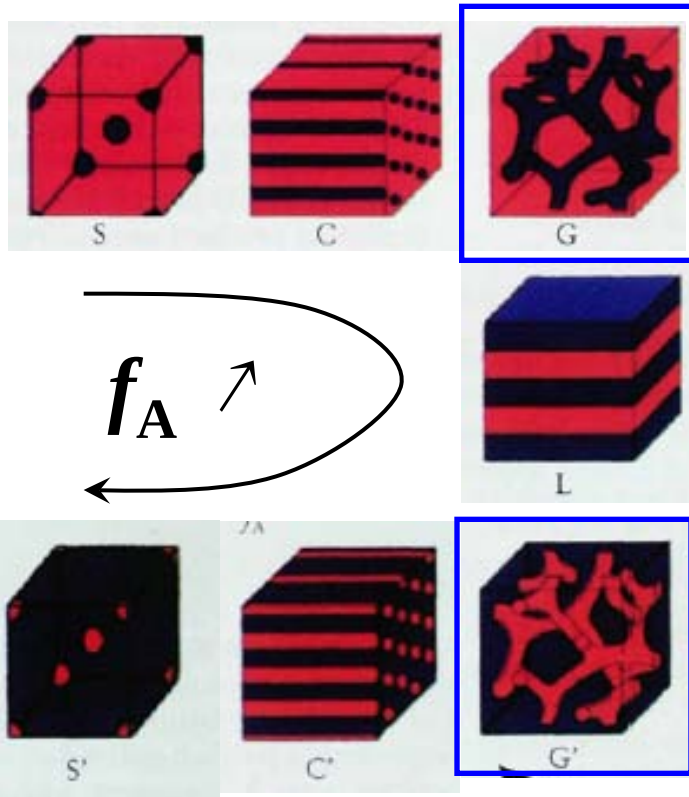


高分子における「パスタ」構造

- 2種の高分子の混合物(ブロック共重合体)の相分離

f_A : 高分子A(黒)
の混合比

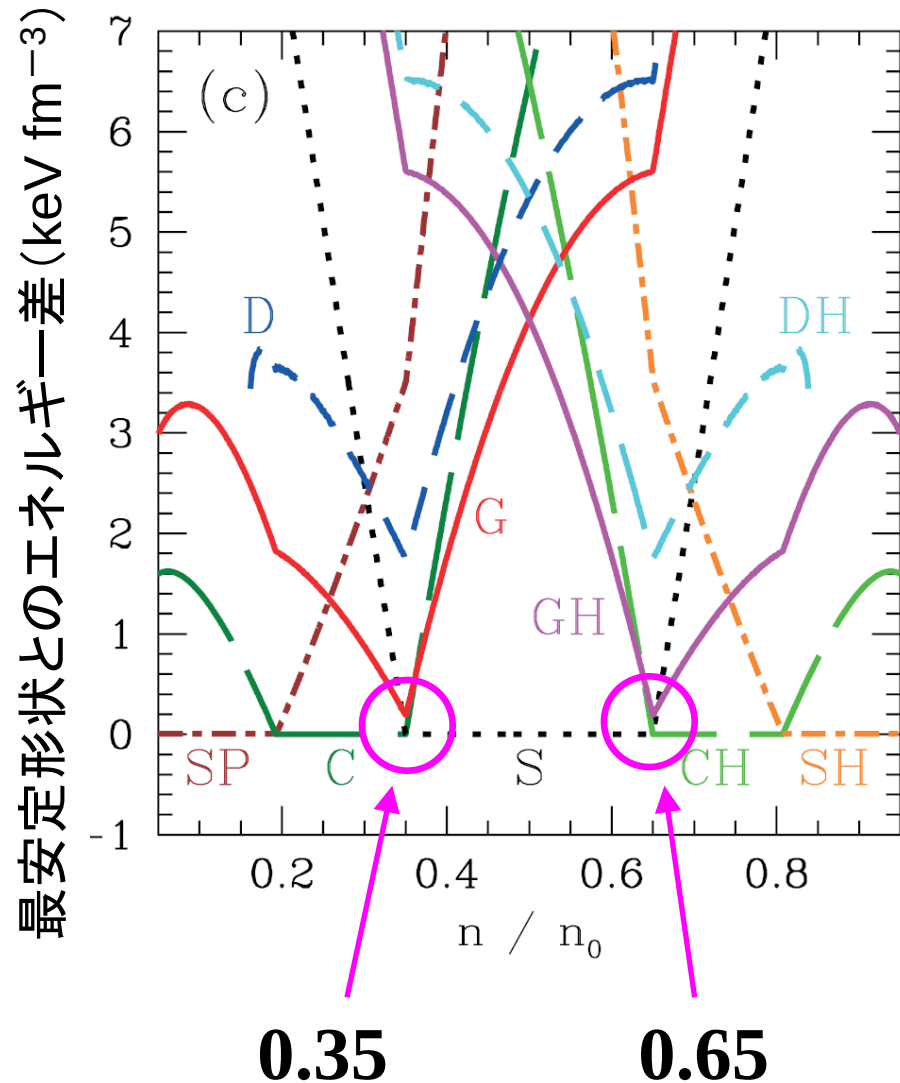
原子核パスタ
では考慮され
ていない



共連結構造

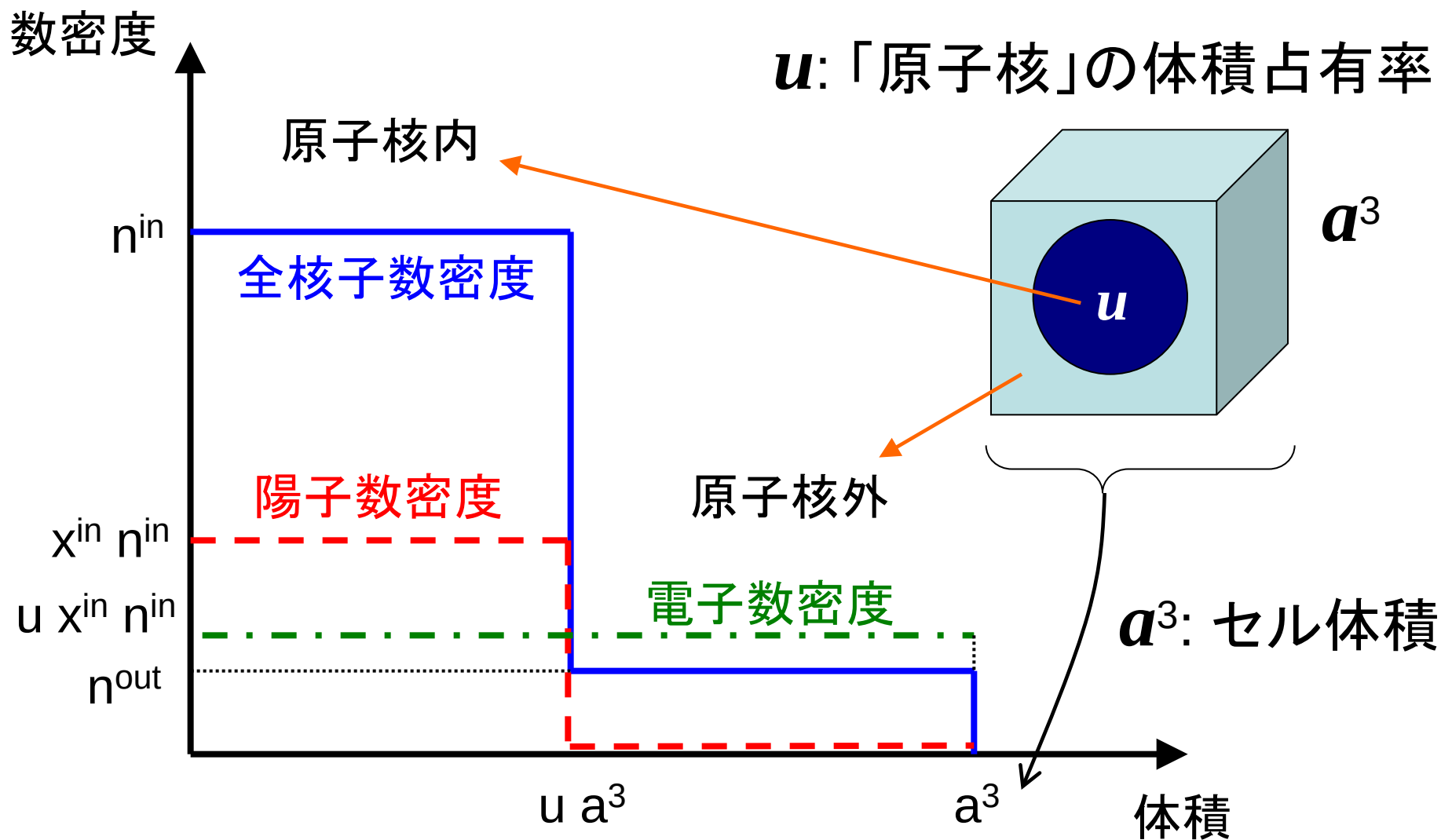
前回までのあらすじ

- Gyroid が最安定となる密度はない。
- ただし、 $n/n_0 = 0.35$, 0.65 で非常に惜しい。
→ ブロック共重合体の場合と一致!?
- エネルギー差
 $\sim 0.2 \text{ keV fm}^{-3}$
 $\sim 3 \text{ keV / nucleon}$
(for $u = 0.35$)



液滴模型によるパスタ構造の計算

- Compressible Liquid Drop Model (CLDM)



エネルギー表式(1)

- 質量公式

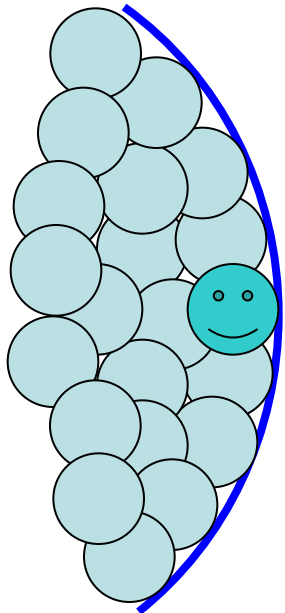
$$E_{\text{tot}} = E_v + E_s + E_c + E_{\text{Coul}} \quad x = Z/A$$
$$= \underbrace{a_v A}_{\text{体積項}} + \underbrace{a_s A^{2/3}}_{\text{表面項}} + \underbrace{a_c A^{1/3}}_{\text{曲率項}} + \underbrace{a_{\text{Coul}} x^2 A^{5/3}}_{\text{クーロン項}},$$

- 液滴模型

$$W = \underbrace{W_b}_{\propto a^3} + \underbrace{W_s}_{\propto a^2} + \underbrace{W_c}_{\propto a} + \underbrace{W_{\text{Coul}}}_{\propto a^5}$$

曲率効果とは？

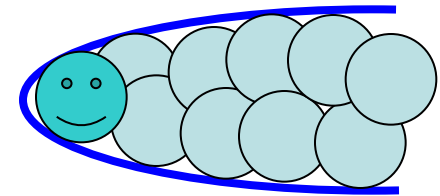
- 表面項



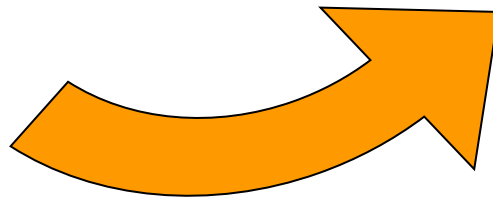
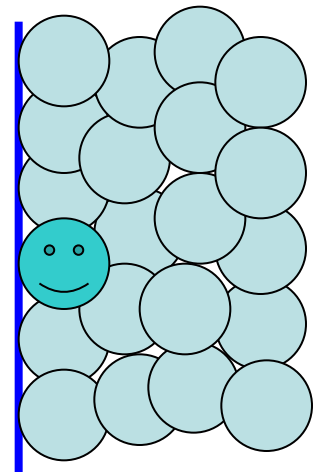
相互作用
する核子
がまわりに
あまりいな
い。損し
た！

- 曲率項

うんと
損した！



あんまり
損してない。



高次補正

エネルギー表式(2)

$$W = W_b + W_s + W_c + W_{\text{Coul}}$$

(バルク) $W_b = w_b(u, x^{\text{in}}, n^{\text{in}}, n^{\text{out}})a^3$

(表面) $W_s = \sigma(x^{\text{in}}, n^{\text{in}}, n^{\text{out}})g(u, \text{shape})a^2$

(曲率) $W_c = \omega(x^{\text{in}}, n^{\text{in}}, n^{\text{out}})h(u, \text{shape})a$

(クーロン) $W_{\text{Coul}} = (ex^{\text{in}}n^{\text{in}})^2 w_{\text{Coul}}(u, \text{shape})a^5$

$g(u, \text{shape})$: 規格化表面積

$$h(u, \text{shape}) = \frac{1}{a} \int_{S(u, \text{shape})} \frac{H(x, y, z) dS}{\text{平均曲率}}$$

サイズ平衡(1)

$$\frac{\partial}{\partial a} \left(\frac{W}{a^3} \right) = -\frac{\sigma g}{a^2} - \frac{2\omega h}{a^3} + 2 \left(ex^{\text{in}} n^{\text{in}} \right)^2 w_{\text{Coul}} a = 0.$$

曲率項は小さいので、まずは $\omega = 0$ として、

$$a_0 = \left(\frac{\sigma g}{2(ex^{\text{in}} n^{\text{in}})^2 w_{\text{Coul}}} \right)^{1/3}$$

$\omega h \ll \sigma g a_0$ のとき

$$a = a_0 \left(1 + \frac{2\omega h}{3\sigma g a_0} \right)$$

サイズ平衡(2)

$$\left(\frac{W}{a^3}\right) = w_b + \frac{3}{\sqrt[3]{4}} (ex^{\text{in}} n^{\text{in}} \sigma)^{2/3} \boxed{g^{2/3} w_{\text{Coul}}^{1/3}} \\ + \underbrace{\sqrt[3]{4} \left[\frac{(ex^{\text{in}} n^{\text{in}})^4 \omega^3}{\sigma^2} \right]^{1/3} \boxed{\frac{w_{\text{Coul}}^{2/3} h}{g^{2/3}}}}_{\text{曲率効果}}$$

曲率効果

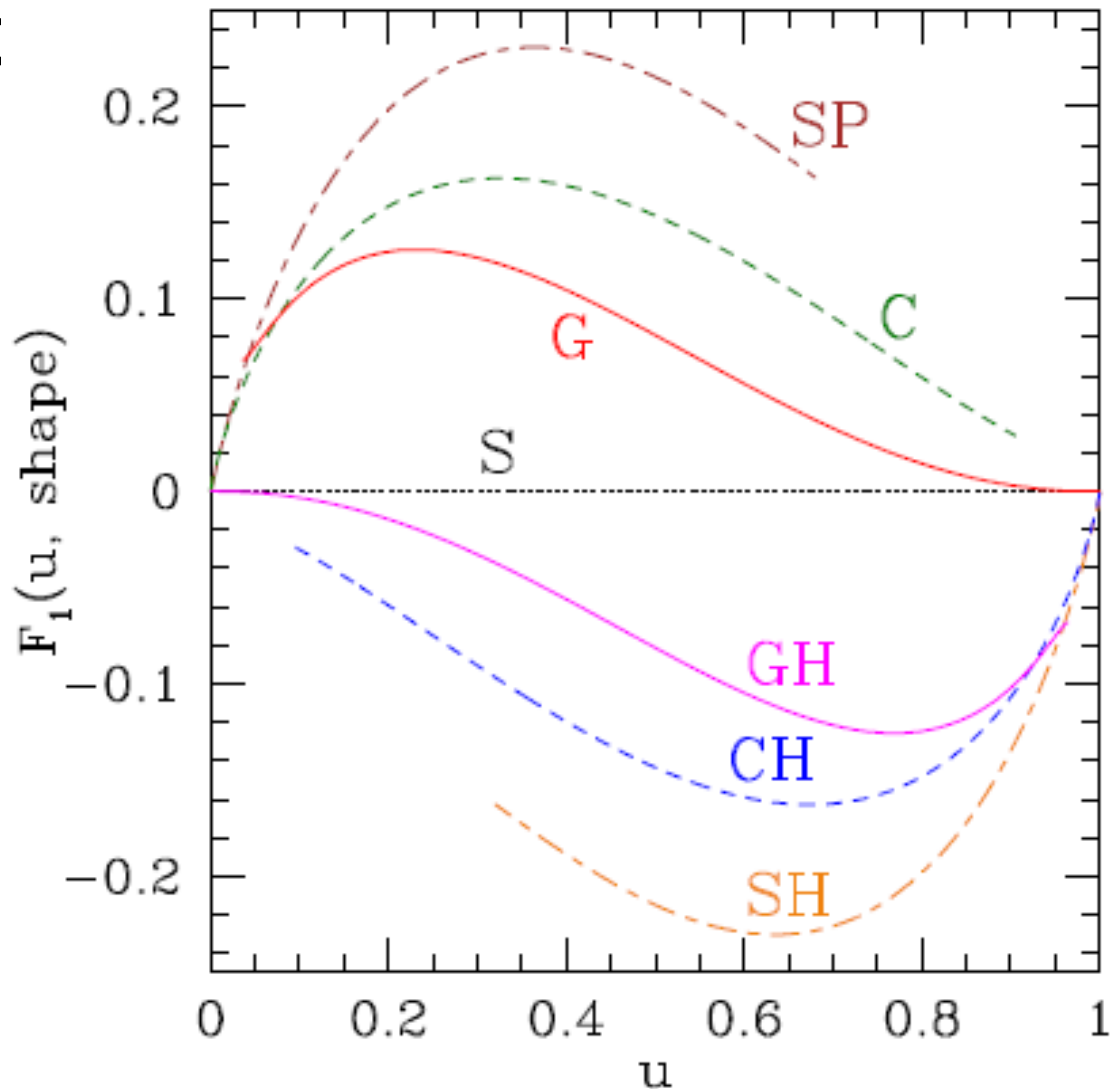
geometry のみで決まる部分を抜き出す。

$$F_0(u, \text{shape}) = g(u, \text{shape})^{2/3} w_{\text{Coul}}(u, \text{shape})^{1/3},$$

$$F_1(u, \text{shape}) = \frac{w_{\text{Coul}}(u, \text{shape})^{2/3} h(u, \text{shape})}{g(u, \text{shape})^{2/3}}.$$

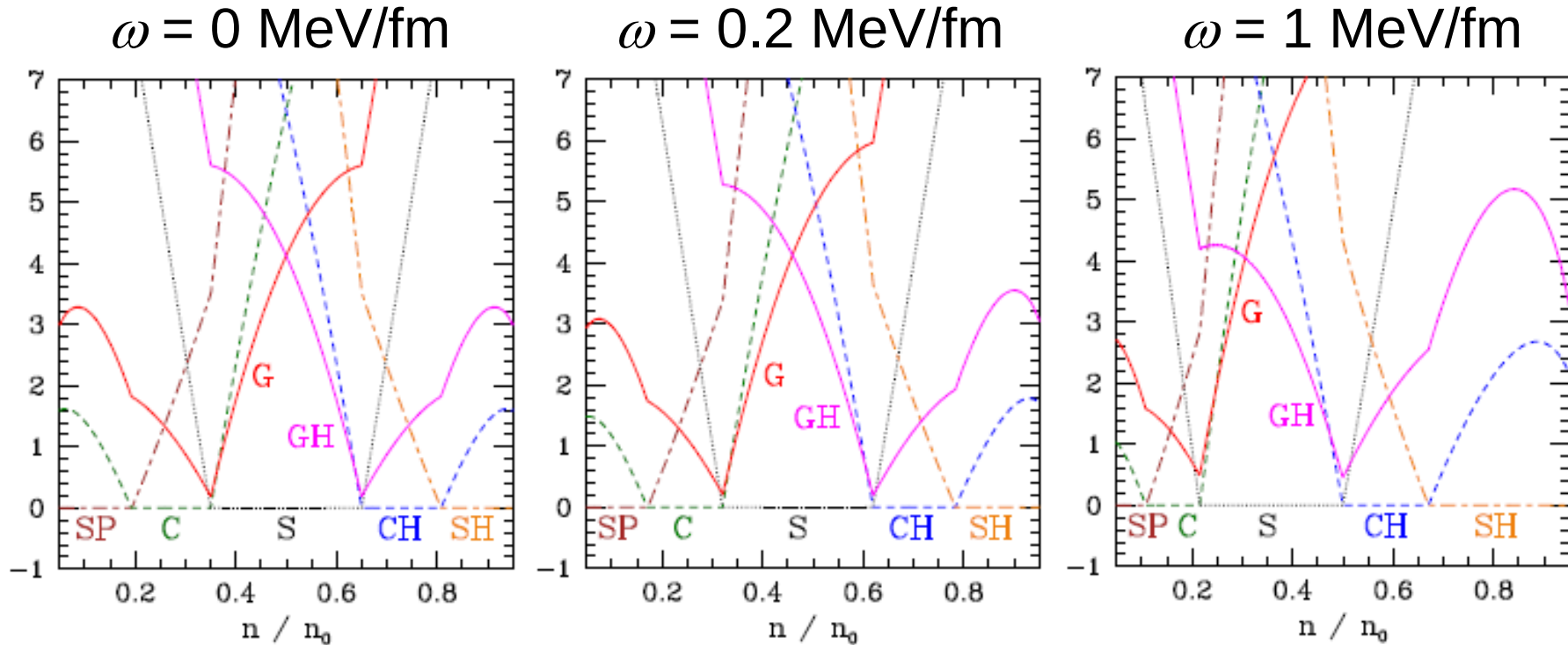
曲率効果の形状依存性

- 通常のパスタでは
 $SP > C > S = 0$
- Gyroid は円柱と板の間。
- 孔原子核では符号が逆になる。



Gyroid はどこへ消えた？

最安定形状とのエネルギー差 (keV fm^{-3})



- $\chi^{\text{in}} = 0.3$, $\mathbf{n}^{\text{in}} = \mathbf{n}_0$, $\mathbf{n}^{\text{out}} = 0$, $\sigma = 0.73 \text{ MeV/fm}^2$
- G は C には強いが S には弱いので、低密度側にシフトする形になるが、やっぱり出ない (;_;)

ニュートリノ

- 超新星ニュートリノデータベースの構築
- 流体計算 + Proto-Neutron Star Cooling

中里 健一郎（京大理）

鈴木 英之（東理大理工）

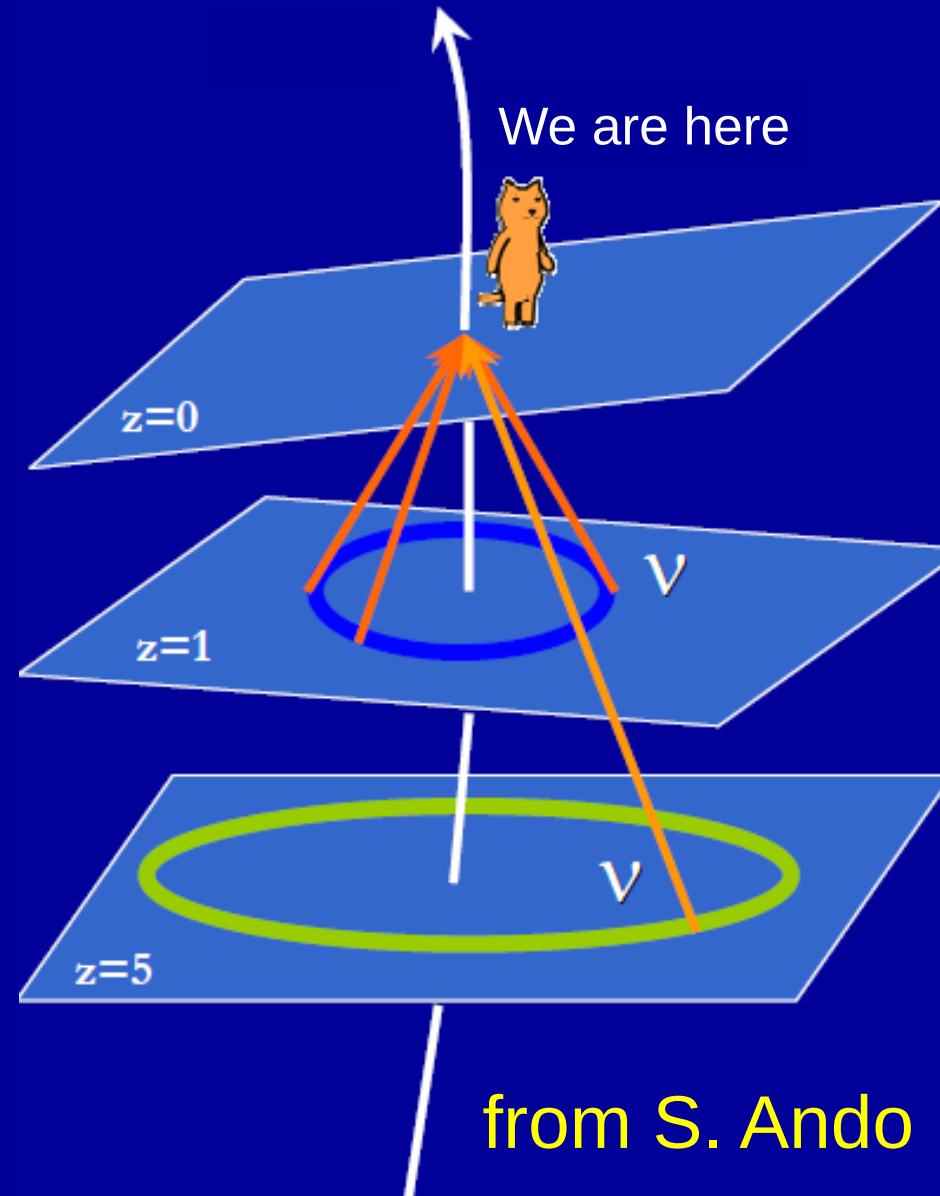
戸谷 友則（京大理）

梅田 秀之（東大理）

住吉 光介（沼津高専）

超新星背景ニュートリノ

- 過去の超新星から放出されたニュートリノは重ね合わさって、バックグラウンドとして宇宙を満たしている。
- 超新星そのものだけでなく、星形成率、IMFやニュートリノの物理を探る上でも重要。

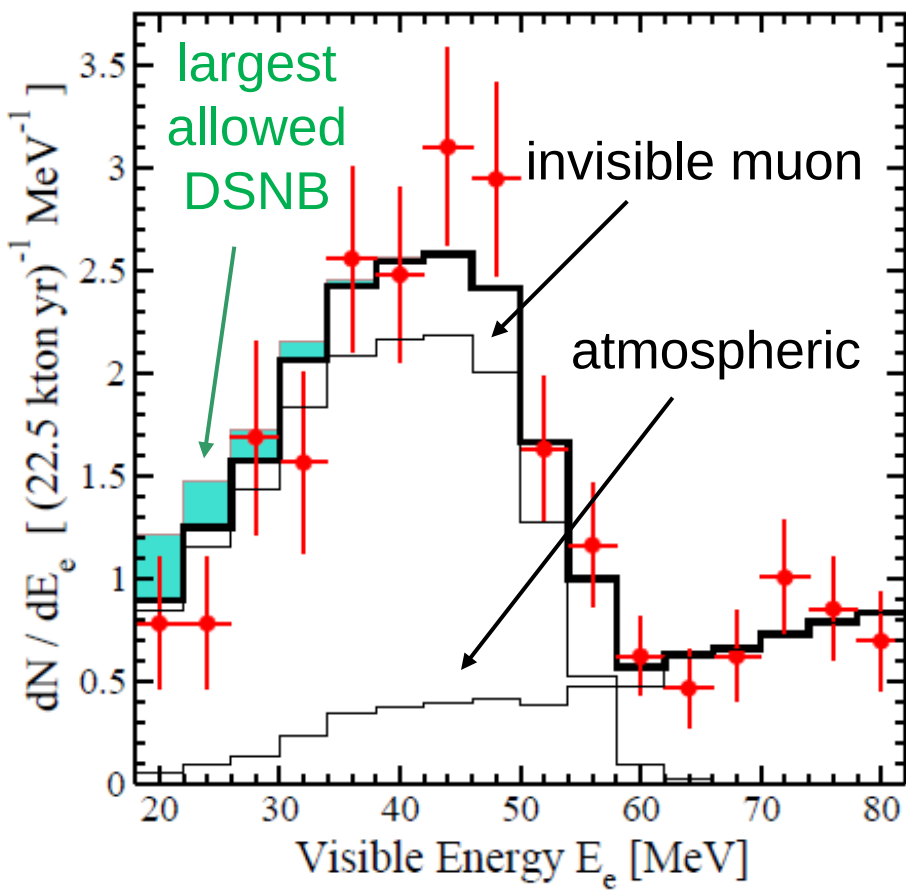


from S. Ando

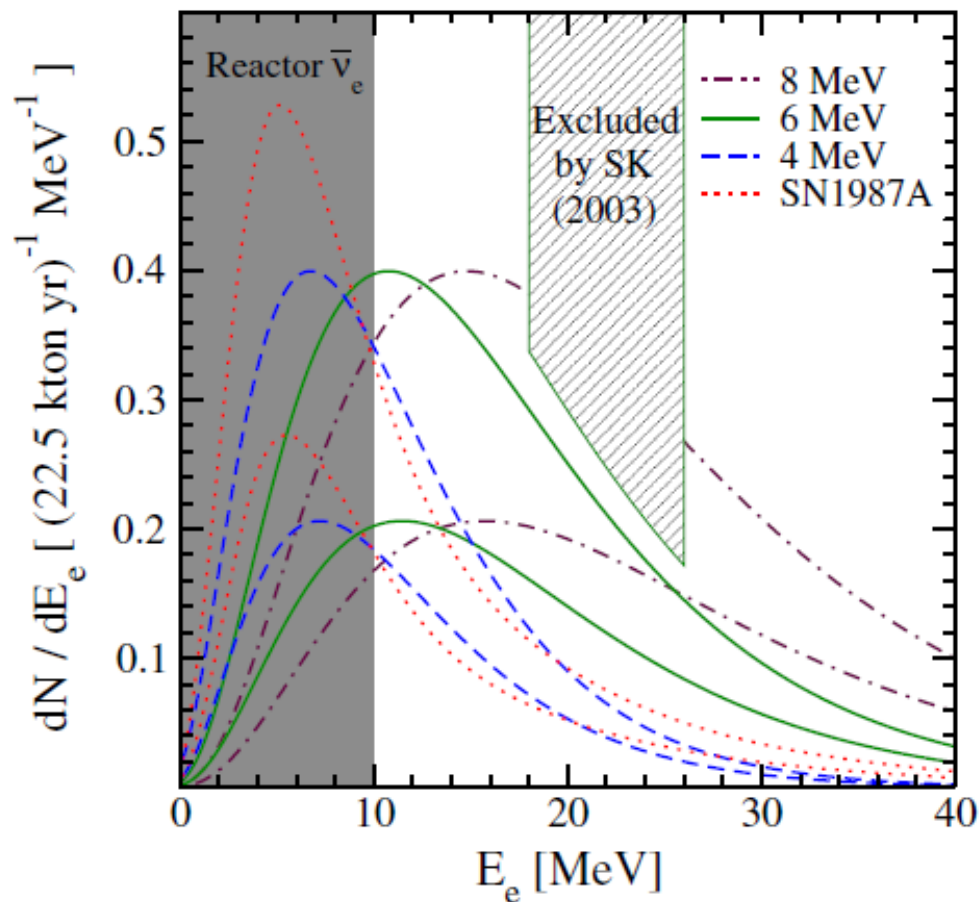
観測の現状

- 上限値が予測値に迫りつつある。

Malek+ (2003)

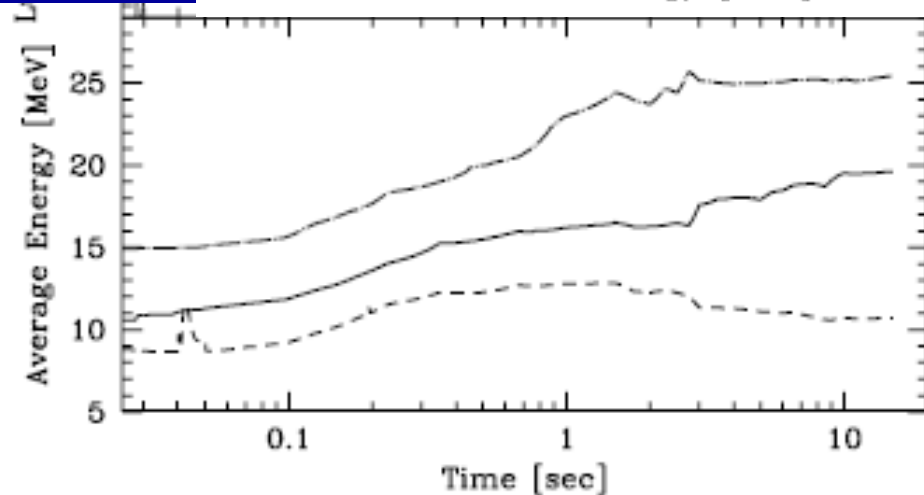
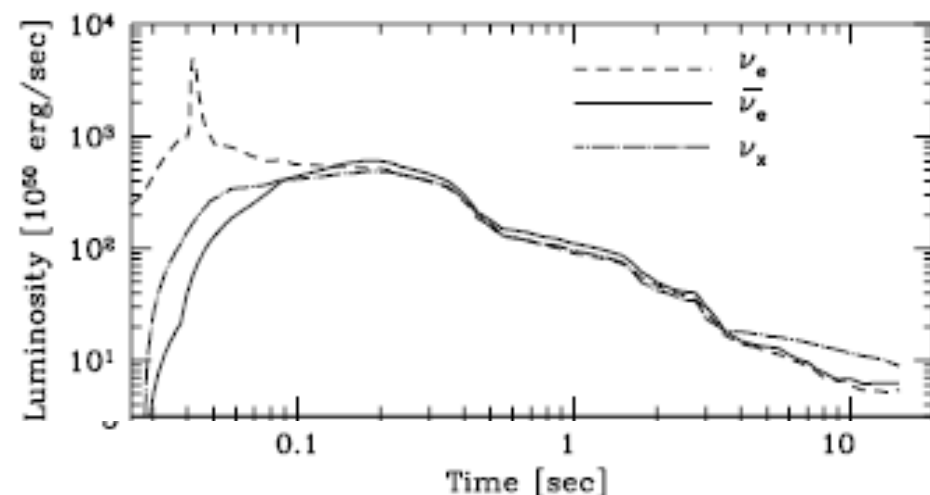
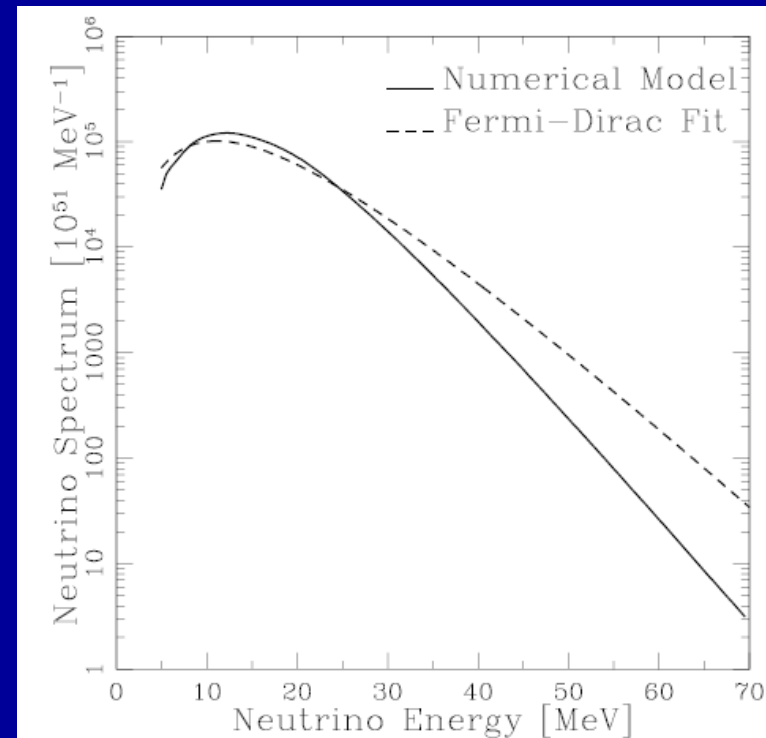


Horiuchi+ (2009)



理論の現状

- 多くの場合、Fermi-Dirac 分布が仮定される。
 - 数値計算とはあわない。
- 長時間発展を追った計算は Totani+ (1998) のみ。
 - It's a magic!



我々は何をしようとしているのか？

- 超新星ニュートリノの包括的なデータベースはぜひとも必要。
 - 背景ニュートリノ放射の予測
 - 実際のイベントにも即応できるテンプレート
- ところが、超新星はメカニズムすら未解明。
 - かといって手をこまねいていて良いのか？
- そこそこ信頼できるモデルを、**現象論的**に構築したい。
 - 「**計算科学**」は重要
 - でもそれだけじゃ厳しい。プラス α が必要。

そもそも何が問題だったか？

- 1次元計算では降着率が高すぎて爆発しない。
 - 対流、回転、磁場などの多次元効果によって降着率は下がる？
- ニュートリノのエネルギーは、降着物質が解放する重力エネルギーと原始中性子星冷却から放出されるエネルギーに由来する。

$$L_\nu(\varepsilon, t) = \underline{\underline{L_\nu^{\text{acc.}}(\varepsilon, t)}} + L_\nu^{\text{cool}}(\varepsilon, t)$$

?

- この場合、降着起源のエネルギーがわからない。

我々の作戦

$$\boxed{L_{\nu}^{\max}(\varepsilon, t)} = L_{\nu}^{\text{acc.}, \max}(\varepsilon, t) + \boxed{L_{\nu}^{\text{cool}}(\varepsilon, t)}$$

From 1D ν radiation hydro simulation.

$\vee$

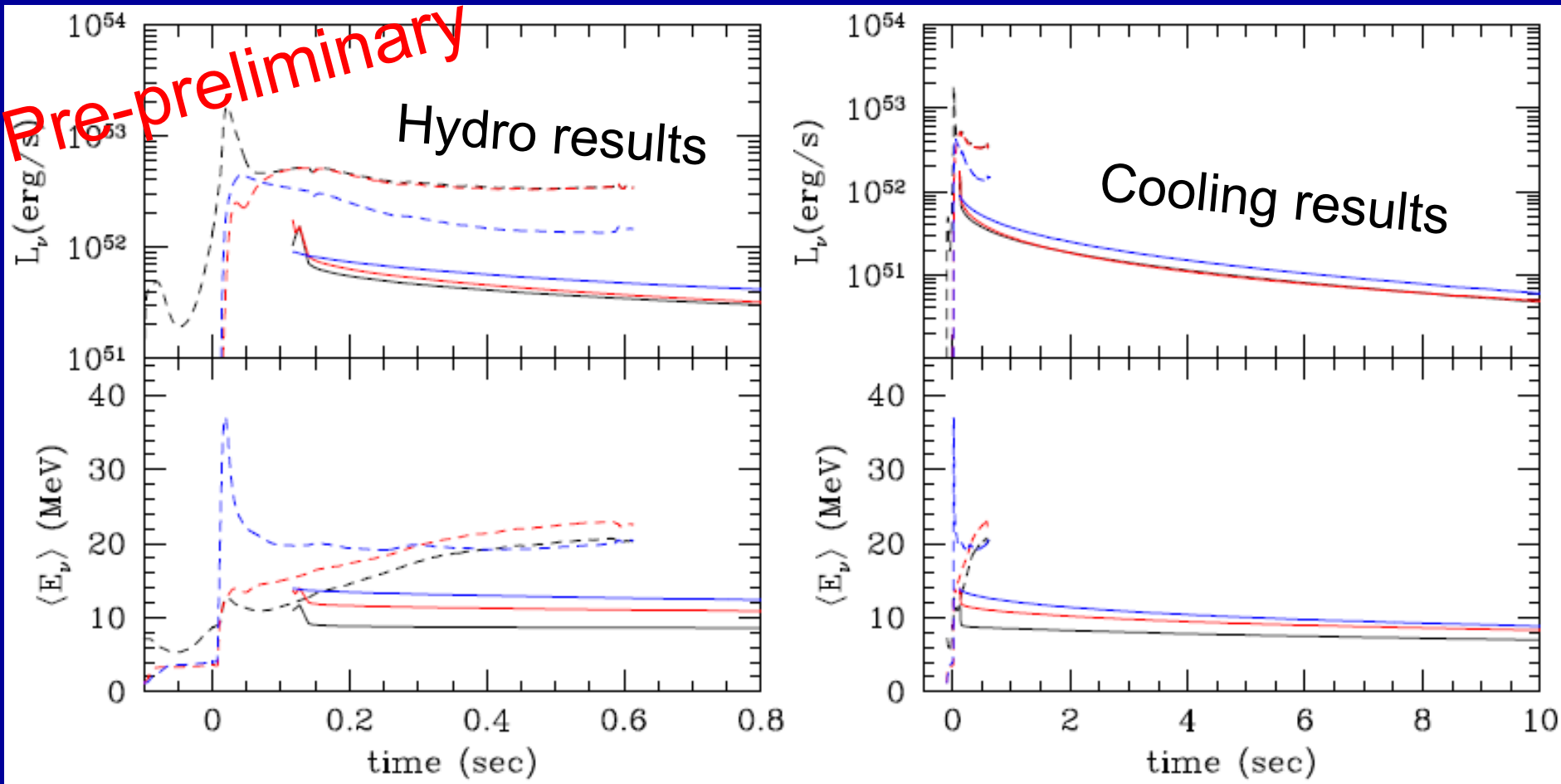
$L_{\nu}^{\text{acc.}}(\varepsilon, t)$

From proto-neutron star cooling simulation.

- 逆に言えば、1次元の流体計算では(爆発はしなくても)降着によるエネルギー放出量の上限は押さえられるということ。
- 原始中性子星冷却に伴って放出されるニュートリノのエネルギーは進化計算によって見積もられる。

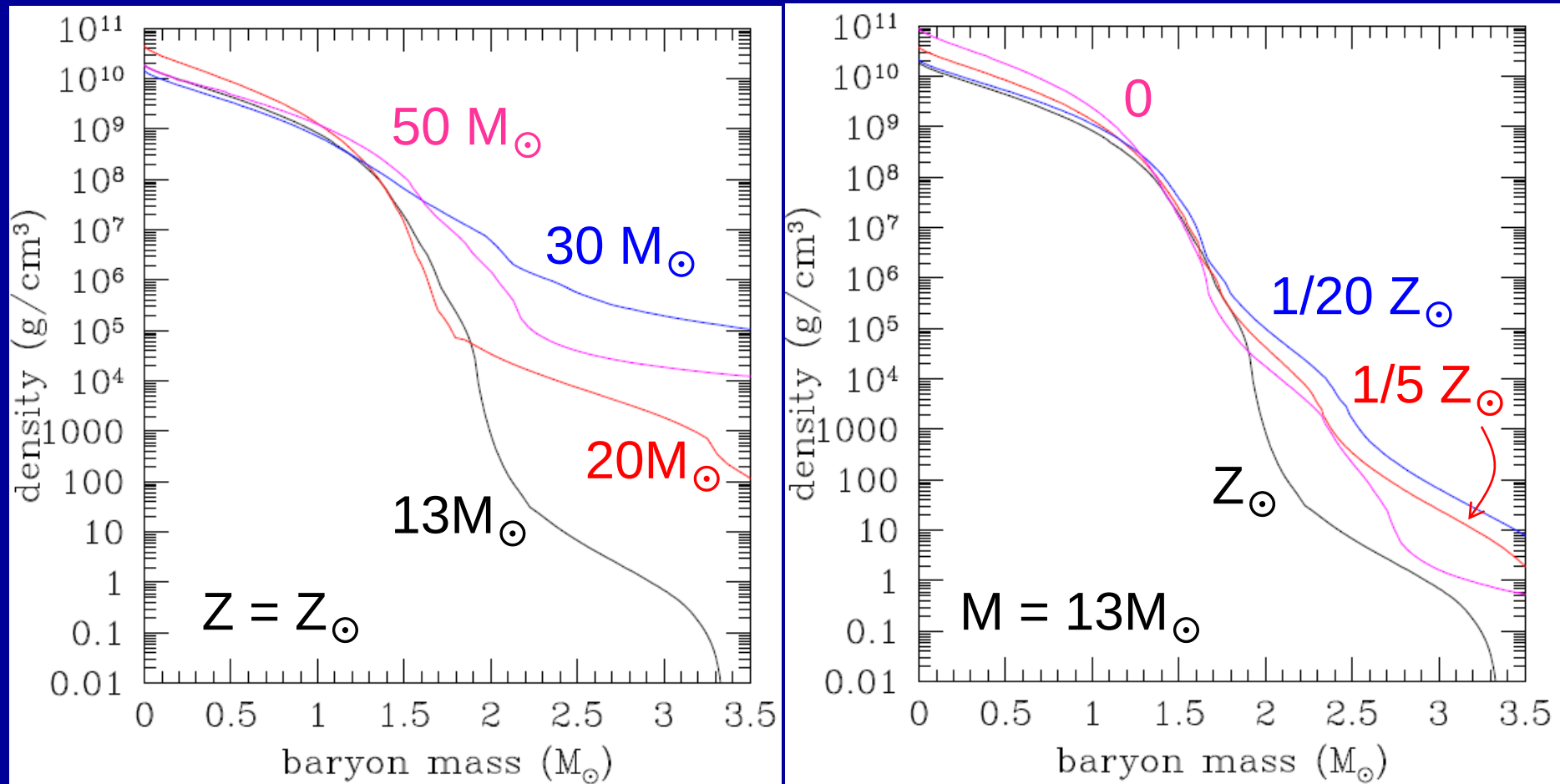
(Nakazato, Suzuki and Totani)

プロジェクトの現状

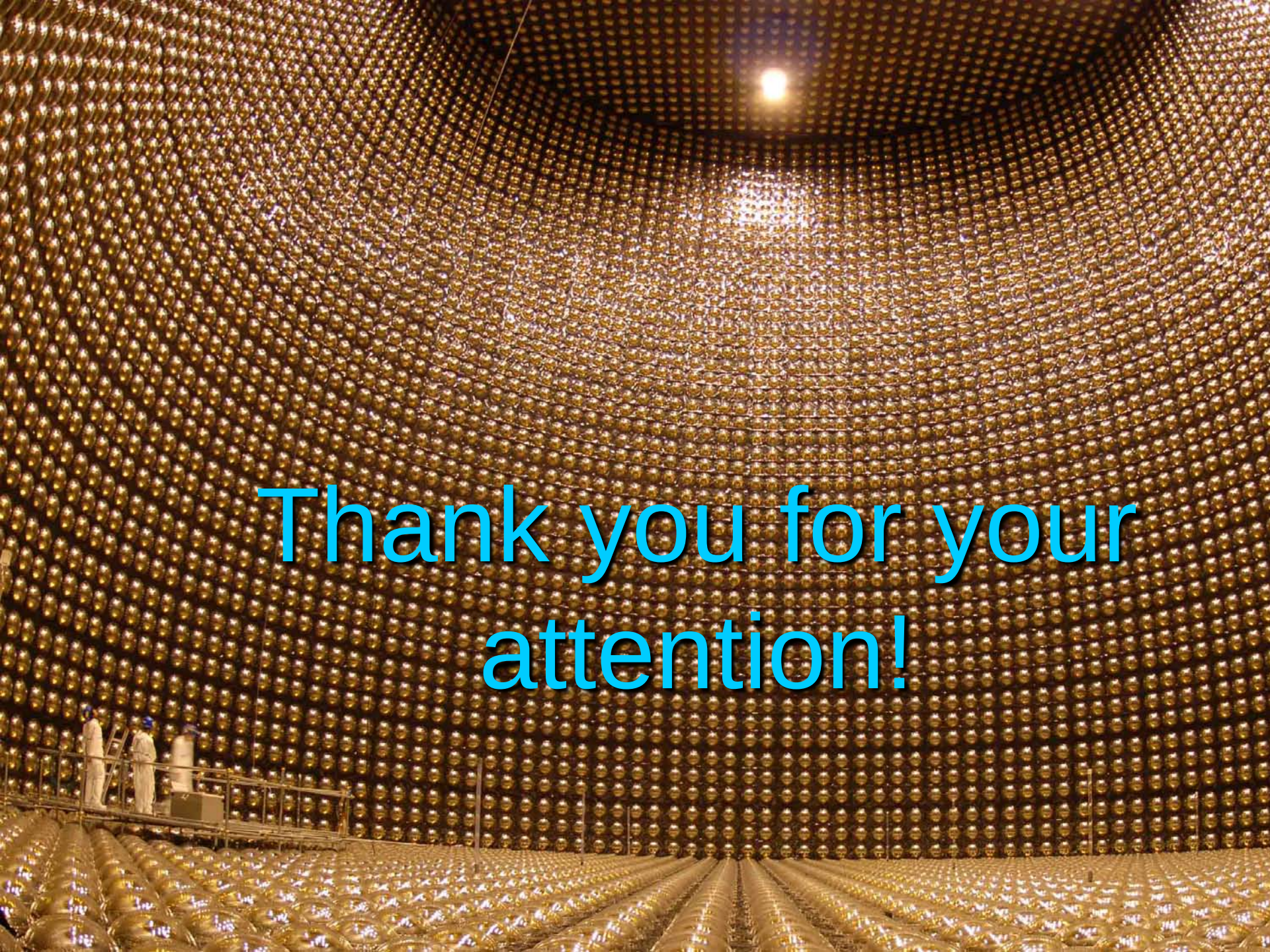


- 時間が重なっている部分は内挿する。

今後の計画



- さまざまな親星にたいして計算を行う。



Thank you for your
attention!