宇宙現象を原子核によって調べる 中性子星・元素合成・超新星



大阪大学核物理研究センター

原子核三者若手夏の学校 2017.8.9@白子



原子核の構造・反応の実験研究から、宇宙現象に関わる話題 を中心にお話します。

大阪大学核物理研究センターでの実験を中心にピックアップ しています。

内容

1. イントロ:宇宙と原子核のスケール、中性子星

2. 原子核の世界:その基礎と実験設備

3. 原子核の状態方程式と中性子星

4. 元素合成・ビッグバン・超新星爆発

講義中自由に質問してください

小学生の会話

どのくらい大げさか?



10,000,000,000,000,000,000倍 3

10²²倍

「天文学的数字」

人が「感じられる」スケールの違いは 10~11桁が限界

長さのスケール

髪の毛、紙の厚さ~0.1mm

地球の大きさ~10,000 km





宇宙のスケール 原子核のスケール

宇宙のスケール、原子核のスケール





グラショウのウロボロスの蛇















地球 火星 木星 土星 天王星 海王星





プロキシマ・ケンタウリ

4光年



1光年=10兆 km







宇宙の大規模構造:グレートウォール





観測可能な宇宙





宇宙のスケール、原子核のスケール





グラショウのウロボロスの蛇















原子は、原子核と 電子からできている。

原子の重さの99.9%は 原子核の重さ。

あなたの体重の99.9% は原子核の重さ。



原子核は原子よりも ずっと小さい。

電子に大きさがあるか どうかは分かっていない。





原子核は、陽子と 中性子からできている。

10⁻¹⁴ m

原子核





u,d クォーク



u,d クォーク



陽子や中性子は、3つのクォークからで きている。

しかし、クォーク3つの重さは、陽子 や中性子の重さの1%程度しかない!

残りの99%は?

クォークの運動エネルギー、 **E=mc²** 交換されるグルーオン、 一時的に作られるクォーク・反クォーク対 などのかりそめの存在 (「幽霊」みたいなもの?)。

> あなたの体重の99%はその 幽霊みたいなもの

格子QCD計算

宇宙のスケール、原子核のスケール





グラショウのウロボロスの蛇

中性子星


Langanke and Martinez-Pinedo

Supernova Cycle





Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO Image IBCAO Image Landsat / Copernicus

Google Earth







中性子星って、どんなの?



大きさ: 半径 12km

重さ:太陽くらい

密度: 10億トン/cm³

重力: 地上の6億倍

時間の速度: 地上より20%遅い

温度:100万度

磁場: 108~1016 ガウス

回転速度: 毎秒 0.01~1000 回転

極めて周期的な電磁パルスを 出す天体(パルサー)。

人類の最高精度の時計よりも 正確な天体も!

中性子星って、どんなの?



中性子物質:パスタ構造

中性子星は巨大な原子核







陽子中性子密度分布 中性子スキン





重イオン衝突過程



AMD by A. Ono



http://www.astro.umd.edu/~miller/nstar.html

原子核の世界を探る実験施設

大阪大学 核物理研究センター紹介



大阪大学核物理研究センター 加速器施設





RING Cyclotron (2,200t)

リングサイクロトロン加速器



原子核の顕微鏡「グランドライデン」

Double Arm Spectrometer: Grand Raiden and LAS





原子核をどうやって見るの?

原理は同じ粒子をあてて跳ね返ってくるものを検出する。



小さい世界を見るためには、それに対応するだけの大きなエネ ルギーを持った粒子を使う必要がある。

→加速器が必要



質量欠損(Missing Mass)法-順運動学







Movie...

原子核とは

- •核子(陽子・中性子)からなる量子有限多体系である。
- ・3つの相互作用が競合して働く
 - ・ 強い相互作用 クォーク間力の残滓(中間子交換力)、短距離、10-22 秒
 - ・電磁相互作用 光子の交換、長距離力、10-18~10-15秒
 - •弱い相互作用 W, Zの交換、短距離力、10-2 (~1015) 秒
 - ・重力が働く例外: 星(中性子星)、超新星爆発、超冷中性子
- 形(表面)の始まり
- 自己束縛系である。

宇宙の歴史は重力によって方向づけられた核反応の進化の歴史である。

- ・上(原子)下(クォーク)の階層とかなり明確に分かれている
- 記述する現象に応じていくつかの種類のモデルが存在する。

Territory of Theoretical Models



Technical Words









Words

【 ¹¹B, ¹²C, ¹³N, ¹⁴O, … ─Neutron number (N):一定

isobAr ¹²B, ¹²C, ¹²N, ¹²O, … Mass number (A) :一定







原子核を記述するモデル(大別)



Bertsch G F, Dean D J and Nazarewicz W 2007 SciDAC Rev. 6 42

核子・核子間相互作用 (NN-Interaction)



Ab initio Green Function Monte-Carlo Calculation of Light Nuclei



Figure 1. Binding energies of light nuclei. The experimental values are compared with Green's function Monte Carlo calculations performed with only a two-nucleon potential (AV18, blue/dark gray) and with the addition of a three-nucleon potential (IL7, yellow/light gray) [5].

S. C. Pieper 2011

From N. Kalantar-Nayestanaki, Rep. Prog. Phys. 75, 016301(2012)





 ΔB = 結合エネルギー(実験値) - WBの質量公式

質量公式 (mass formula)

(2)核構造エネルギー

 $B(N,Z) = B_{\text{liquid}}(N,Z) + B_{\text{shell}}(N,Z)$

 $B_{\text{liquid}}(N,Z) = B_{\text{macro}} + B_{\text{pair}}$ 液滴モデルの結合エネルギー



図 58 偶-偶核の第1励起準位エネルギー (丸印中の数値はZの値)



Nuclear Chart Explorer



核種の様々な情報、相関を見るためのプログラムです。

http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~tamii/

からフリーにダウンロードで来ます。

原子核の独立粒子軌道



WS+SOはWSプラススピン軌道結合ポテンシャル)

核構造をどのようにして調べるのか?



K400 ring cyclotron

RCNP Cyclotron Facility



Double arm spectrometer (Grand Raiden & LAS)

Double Arm Spectrometer: Grand Raiden and LAS




質量欠損(Missing Mass)法-順運動学



励起エネルギースペクトル



Counts/Channel

励起エネルギースペクトル



Counts/Channel



1+ state

励起エネルギースペクトル



Counts/Channel

原子核の多様な振動モード:巨大共鳴



杉本・村岡「原子核構造学」

原子核の集団振動状態と巨大共鳴

アイソスカラー

アイソベクター



Dipole $\Delta L = 1$ (GDR)

Quadrupole $\Delta L = 2$ (GQR)

M. Itoh









P. Adrich

アイソスカラー巨大単極子共鳴

(Isoscalar) Giant Monopole Resonance (GMR)



集団励起状態(巨大単極子共鳴 GMR)



図 2.2.14: GMR の有効平均励起エネルキーと Sn 同位体における非対称度 [= (N - Z)/A] の 比較。

T. Li et al., PRC99, 162503(2007)

IV Giant Quadrupole Resonance (IVGQR)



by P. Adrich

集団励起状態(巨大双極子共鳴 GDR)



AT et al., PRL107, 062502 (2011)

和則とは

励起状態への遷移強度を調べることにより、基底状態の 性質を引き出す関係式



全ての励起状態に関する積算(積分値)

対応するオペレータの基底状態の期待値を表す。

$$O: IUE = E \log C$$

 $m_p = \int_0^\infty S(\omega) \omega^p d\omega = \sum_k |\langle k|O|0 \rangle|^2 \omega_k^p$
 $= \sum_k \langle 0|O|k \rangle \langle k|O|0 \rangle \omega_k^p$
 $= \sum_k \langle 0|O|k \rangle \langle k|\omega_k^p O|0 \rangle$
 $= \sum_k \langle 0|O|k \rangle \langle k|(H - E_0)^p O|0 \rangle$
 $= \langle 0|O(H - E_0)^p O|0 \rangle$
Eo:基底状態のIII + Construction

励起状態を全て調べると基底状態の性質が分かる。

第三部

原子核の状態方程式と中性子星





静電気現象: 誘電分極

紙が櫛に引き寄せられる



静磁気現象:磁化

鉄粉が磁界の方向に整列する

静電気現象





正電荷を持つ櫛が近づく → 中性の紙が誘電分極する → 紙が櫛に引き寄せられる → さらに次の紙が分極して引き寄せられる

Photo from *Fundamentals of Physics, Electricity and Magnetism,* Halliday/Resnick/Walker





静電気現象: 誘電分極 電荷をもつ櫛を近づける → 中性の紙が分極する → 電荷を持つ櫛に引き寄せられる → 分極した紙に他の紙が引き寄せられる



静磁気現象: 磁化 電流が磁界を発生する →鉄粉が磁化(磁気分極)する →磁界の方向に引き寄せられる

104







 $p = \alpha_D E$

p: 電気双極子モーメント

α_D: 誘電分極率 (electric dipole polarizability)



核物質の外電場による変化



中性子と陽子の密度のアンバランスから 来るエネルギー。陽子を中性子に置き換え ればどれだけエネルギーが増えるか = 陽子と中性子の化学ポテンシャルの差



5

原子核の状態方程式:対称エネルギー

陽子中性子密度分布 中性子スキン





重イオン衝突過程



AMD by A. Ono



http://www.astro.umd.edu/~miller/nstar.html

原子核の状態方程式:対称エネルギー





 星の合体、重力波で観測 発生源から光も 米欧グループ 田中誠士、斎藤義浩 小林哲 2017年10月16日23時21分 シェア ツイート ブックマーク スクラップ メール 印刷 146 List 9 朝日新聞2017.10.16



中性子星合体による重力波を観測



地球から1・3億光年離れた二つの「中 性子星」が合体した様子を、重力波と光 で観測することに成功したと、米欧の研究 グループが16日、発表した。宇宙のか なたからやってくる重力波を手がかり に、発生源からの光をとらえたのは世界で 初めて。天文観測の新たな手法として期待 される。米専門誌「フィジカル・レビュ ー・レターズ」などに論文が掲載される。

重力波 は、ブラックホール のような重 い天体が動いた際に生じる時空のゆがみ。 光速でさざ波のように広がるとされる。ア インシュタインが約100年前に存在を予 測し、2015年に初めて検出され、成果 は今年の ノーベル物理学賞 に選ばれた。 観測への応用も期待されていたが、過去4 回検出された 重力波 はいずれも、光を吸

収する ブラックホール 同士の合体で生じたため観測できなかった。

今回とらえた 重力波 は、地球から約1億3千万光年離れたところで、お互いに引き合っていた二つの 中性子星 (質量は太陽の1・2倍~1・6倍) が一つに合体した際に生じた。



http://www.astro.umd.edu/~miller/nstar.html

原子核物質の状態方程式 Equation of State (EOS)

』温度ゼロ

状態方程式 (クーロン力を無視)

$$\frac{E}{A}(\rho,\delta) = \frac{E}{A}(\rho,0) + S(\rho)\delta^{2} + \cdots$$
$$\delta = \frac{\rho_{n} - \rho_{p}}{\rho_{n} + \rho_{p}} \# 対称 \rangle - \mathscr{I}$$
対称エネルギー
$$S(\rho) = \int \frac{D}{3\rho_{0}}(\rho - \rho_{0}) + \cdots$$

原子核

Z≲N

中性子星

Z≪N



中性子星 大部分が中性子からなる巨大な原子核物質

Fundamental Questions: 中性子星の大きさ、堅さははどのくらいか?

中性子の中はどうなっているのか?

陽子や電子はどの程度存在するのか?

その構造は?

中間子凝縮層があるのか?ハイパー核は存 在するのか?

極めて強い磁場を作る機構は?

これらを理解(モデル計算)するために は、原子核の状態方程式に関する正確 な知識が必要。

特に中性子過多(非対称)物質について。





温度

外からの圧力を変えて、体積や温度の 変化を測る

原子核の状態方程式

外からの圧力を変えるのは難しい。

原子核を「たたいて」、膨張圧縮振動を起こす



状態量: 平衡状態毎に一意に決まる値

(モル数、圧力、温度、体積、エントロピー、…)

状態方程式:

系の状態量の間に成り立つ関係式 対象とする物質によって異なる 理想気体の状態方程式: $p = f(n,V,n) = \frac{nRT}{V}$ 系の微小な変化を与える

→ 系の反応(response)を観測する

$$\kappa = -\frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dp} \right)_{s}$$
 : 断熱圧縮率

		+⊿p
<i>V, T</i>	$V + \Delta V$ $T + \Delta T$	

平衡状態



熱力学

系の微小な変化を与える

→ 系の反応(response)を観測する $\kappa = -\frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dp} \right)_{s}$: 断熱圧縮率



平衡状態

原子核物質の状態方程式

外場により微小変化を与える

システムの状態変化を観測する

nuclear response



原子核の膨張圧縮振動





Wavelength



陽子散乱で原子核の電気的応答を測る

陽子散乱で原子核の電気的応答を測る



大阪大学核物理研究センター 加速器施設





RING Cyclotron (2,200t)

リングサイクロトロン加速器



原子核の顕微鏡「グランドライデン」



Coulomb Excitation by Proton Scattering

High resolution of 20-30 keV: D2 dispersion matching. MP Proton scattering at very forward angles DSR at RCNP, Osaka Univ. Q1-F.C. **Focal Plane Detectors** (GR=2.5, 4.5° Scattering Q 12 m Chamber ²⁰⁸Pb target: 5.2 mg/cm² Dump-Q Intensity : 1-8 nA Grand Raiden (GR) 0 deg. Beam Dump **Polarized Proton** (GR = 0 deg.)Beam at 295 MeV 11 120 3m 2 AT et al., NIMA605, 326 (2009)






Grazing Angle = 3.0 deg 123

$$\theta_p = \gamma \left(\frac{g}{2} - 1\right)\theta_b$$

 θ_p : precession angle with respect to the beam direction θ_b : bending angle of the beam g: Lande's g-factor γ : gamma in special relativity





(γ,γ'), (γ,xn)実験との比較



²⁰⁸Pbの電気双極子遷移強度B(E1)と電気分極率 α_D



AT et al., PRL107, 062502(2011)

電気分極率: 208Pb, 120Sn

E



対称エネルギーの許容範囲の決定



対称エネルギーの許容範囲



AT et al., EPJA**50**, 28 (2014). M.B. Tsang *et al.*, PRC**86**, 015803 (2012) C.J. Horowitz et al., JPG41, 093001 (2014)

DP: Dipole Polarizability HIC: Heavy Ion Collision PDR: Pygmy Dipole Resonance IAS: Isobaric Analogue State FRDM: Finite Range Droplet Model (nuclear mass analysis) n-star: Neutron Star Observation xEFT: Chiral Effective Field Theory

QMC: S. Gandolfi, EPJA50, 10(2014).

I. Tews et al., PRL110, 032504 (2013)

After Subtraction of the quasi-*d* contribution.



A.W. Steiner et al., AJL 765, L5(2013) 中性子星の観測の解析

中性子星の大きさ





田中誠士、斎藤義浩 小林哲 2017年10月16日23時21分

シェア	ツイート	プックマーク	スクラップ	メール	印刷
146	list	9			



中性子星合体による重力波を観測



続きから読む

地球から1・3億光年離れた二つの「<u>中</u> <u>性子星</u>」が合体した様子を、<u>重力波</u>と光 で観測することに成功したと、米欧の研究 グループが16日、発表した。<u>宇宙</u>のか なたからやってくる<u>重力波</u>を手がかり に、発生源からの光をとらえたのは世界で 初めて。天文観測の新たな手法として期待 される。米専門誌「フィジカル・レビュ ー・レターズ」などに論文が掲載される。

重力波 は、 ブラックホール のような重 い天体が動いた際に生じる時空のゆがみ。 光速でさざ波のように広がるとされる。ア インシュタインが約100年前に存在を予 測し、2015年に初めて検出され、成果 は今年の ノーベル物理学賞 に選ばれた。 観測への応用も期待されていたが、過去4 回検出された 重力波 はいずれも、光を吸

収する ブラックホール 同士の合体で生じたため観測できなかった。

今回とらえた 重力波 は、地球から約1億3千万光年離れたところで、お互いに引き合っていた二つの 中性子星 (質量は太陽の1・2倍~1・6倍)が一つに合体した際に生



h₊ at 20 Mpc

GW







Neutron Star Merger GW



中性子星連星合体重力波イベントの 解析は、半径12km程度の中性子星 半径とコンシステント。

→今後の観測の増加に期待!







原子核の磁気的応答: スピン磁化率



- •核物質の磁化率のスピン成分
- •強磁場中の核物質の応答(マグネターなど)
- 超新星爆発コア中でのニュートリノ閉じ込め・透過度
- •中性子星の強磁性体状態発現の可能性





マグネター 10¹⁴⁻¹⁶ Gauss

Energy spectra at 0-degrees



IS/IV-spin-M1 distribution



スピンM1遷移行列要素

H. Matsubara et al., PRL115, 102501 (2015)



スピンM1遷移行列要素

H. Matsubara et al., PRL115, 102501 (2015)



スピンM1遷移行列要素

H. Matsubara et al., PRL115, 102501 (2015)



スピン磁化率



ピグミー双極共鳴



Universal Existence of PDR in Nuclei with A > ~90?



Excess Neutron Oscillation of the PDR



D. Bianco et al., PRC 86 (2012) 044327

Equation of Motion Phonon Method

Courtesy of A. Zilges

Experimental hints on the structure of the PDR

- Universal existence for nuclei with A~90?
- Splitting of the PDR strengths $(\alpha, \alpha') \Leftrightarrow (\gamma, \gamma')$
- Large cross section for surface sensitive probes
- Different angular distribution in (p,p') at forward angle?
- Splitting of PDR in deformed nuclei?
- Larger strength (in TRK) in neutron rich nuclei



MDA of the E1 excitations



Compton Array Gamma-ray spectrometer at **RCNP/RIBF for Advanced studies - CAGRA**

E. Ideguchi and M. Carpenter

16 Compton suppressed clover Ge from ANL, Tohoku U., ARL and IMP (supported by DOE and clover-share in US)

Discussions from 2008 Physics Runs from 2015













Construction of GRAF

GR前方モードビームライン(GRAF)

2012.12-2013.1提案、議論2013.4.4GRAF Project @ P-PACFY2013GRAF 設計・建設2013.11.28-29GRAF Symposium2014.7Physics Runs

三木、橋本、永山、森信、松田、 藤田(裕)、<mark>岩本</mark>、吉田、井手口、 青井、畑中、民井



GRAF under construction, March 17, 2014



Design of the CAGRA+GR frame 2014 Jan. - 2016 June

K. Nagayama, H.P. Yoshida, C. Iwamoto, T. Hashimoto, S. Noji, E. Ideguchi, N. Aoi, A. Tamii and Ref-tech Company



Discussions, 2014.9.14



Target Chamber designed by C. Iwamoto







Installation at RCNP, 2016.7.14

Equipped with the detectors 151 2016.9.29



Inspection at Ref-Tech, 2016.6.30

CAGRA+GR Setup

2016 July - September











CAGRA+GR Setup

2016 July - September



CAGRA+GR Setup

2016 July - September



Completion with the full-configuration 2016.9.29

CAGRA

E. Ideguchi and M. Carpenter

12 Clovers from ANL, Tohoku, ARL and IMP4 large volume LaBr₃ from Milano



CAGRA+GR Campaign Exp. Oct-Dec 2016

LAS at 61 deg

1. Structure of the PDR *1 $(\alpha, \alpha' \gamma)$ and $(p, p' \gamma)$ on ⁶⁴Ni, ^{90,94}Zr, ^{120,124}Sn, ^{206, 208}Pb



3. Super-deformed states, high-spin states

*1 A. Bracco, F. Crespi, V. Derya, M.N. Harakeh, T. Hashimoto, C. Iwamoto, P. von Neumann-Cosel, N. Pietralla, D. Savran, A. Tamii, V. Werner, and A. Zilges *et al.*



CAGRA+GR Campaign Exps. in Oct-Dec 2016

Participants from abroad

Mike Carpenter Agnieszka Czeszumska Dimiter Balabanski Shumpei Noji Denis Savran Maria Kmiecik Mateusz Krzysiek Michal Lukasz Ciemala Adam Maj Barbara Wasilewska Sandrine Courtin Guillaume Fruet Daniele Montanari Simon Glvnn Pickstone Mark Spieker Julius Wilhelmy Muhsin Harakeh Nives Blasi Angela Bracco Franco Camera Fabio Crespi Oliver Wieland Daniel Basin Juan Carlos Zamora Cardona Samuel Israel Lipschutz Jaclyn Marie Schmitt Chris Sullivan **Rachel Charlotte Taverner Titus** Remco Godfried Theo Zegers Carol Guess Emily Hudson Charles Kacir Sergej Bassauer **Tobias Klaus** Peter von Neumann-Cosel Gerhart Steinhilber Volker Werner Lindsay Donaldson Adam Sebastian Brown **David Jenkins** Paul John Davies Luke Morris

ANL Berklev ELI-NP FRIB GSI IFJ-PAN, Krakow IFJ-PAN, Krakow IFJ-PAN, Krakow IFJ-PAN, Krakow IFJ-PAN, Krakow IPHC - CNRS, Strasbourg IPHC - CNRS, Strasbourg IPHC - CNRS, Strasbourg Koeln Koeln Koeln KVI Univ. Milano, INFN NSCL NSCL NSCL NSCL NSCL NSCL NSCL Swarthmore College Swarthmore College Swarthmore College **TU-Darmstadt** TU-Darmstadt TU-Darmstadt **TU-Darmstadt** TU-Darmstadt Univ. Witwatersrand Univ. York Univ. York Univ. York Univ. York

Participants from Japan

RCNP	
RCNP	
Tohoku Univ.	
Tokyo Univ.	
CNS	

Contributors in commissioning experiments.

Calem Hoffman ANL Satoru Terashima Beihang Univ. Beihang Univ. Lei Yu Motonobu Takaki CNS Masatoshi Itoh CYRIC Takashi Hashimoto IBS Hiroyuki Fujioka Kyoto Univ. Takahiro Kawabata Kyoto Univ. Noritsugu Nakatsuka Kyoto Univ. Akane Sakaura Kyoto Univ. Yassid Avvad LBNL Okayama Univ. Ou Iwa Makoto Sakuda Okayama Univ. Osaka Univ. Atsuko Odahara Shinnosuke Yoshida Osaka Univ.

Technical Staff

Hidetomo P. Yoshida RCNP Keiichi Nagayama RCNP Michio Uraki RCNP Phaik Ying Chan RCNP **Guillaume Gev** RCNP Gaku Isago RCNP Takeshi Ito RCNP Masaki Miura RCNP Hirotaka Suzuki RCNP Tomokazu Suzuki RCNP Mana Tanaka RCNP Hidetada Baba RIKEN Natsumi Ichige Tohoku Univ. Kenjiro Miki Tohoku Univ. Hirokazu Tamura Tohoku Univ. Tomoyuki Ozaki Tokyo Inst. Tech. Yasuhiro Togano Tokyo Inst. Tech.

We gratefully appreciate the support from RCNP and the accelerator group.

集団運動の微細構造と準位密度


GDRの微細構造



キリマンジャロの氷柱 ©Jone Reader in Chaos and Fractrals

GDRの微細構造



GDRの微細構造



原子核の準位密度



集団運動の減衰機構 (GDRのγ崩壊測定)

 γ_0 : gamma-decay to the ground state

$$B_{\gamma_0} = \frac{\Gamma_{\gamma_0}}{\Gamma} \qquad \Gamma_{\gamma_0} = \frac{2J_0 + 1}{2J + 1} E_x^3 B(E1) \uparrow$$

measured by γ -decay measured by (Coulomb) excitation

Characteristic width Γ can be studied across the IVGDR



Fine Structure of GDR and its direct g.s. gamma decay (experiment running now)











第四部

宇宙の元素合成



最初の元素はビッグバンの後数10分間に作られた。

太陽系の元素組成



宇宙の火の玉モデル=ビッグバン



「宇宙の元素は宇宙誕生時の高温の中で作られたに違いない。」

ジョージ・ガモフ



「宇宙が火の玉(ビッグバン) だったなんて...」

169

リチウムまでの元素はビッグバンで作られた



http://courses.atlas.illinois.edu/spring2010/ASTR/ASTR596/Lectures/Lect24.html

鉄までの元素は太陽(恒星)の中で作られた

太陽のエネルギーは、核融合反応で作られている。 水素(陽子1つ)からヘリウム(陽子2,中性子2)が作られる。

太陽が歳をとると、ヘリウムからさらに

炭素、酸素、ネオンなどを作りながら

複雑な過程を経て燃焼を続けていく。

Wanajo et al.

中性子連星合体

物質の中性子への転換→超新星爆発

原子

星が燃え尽きた時: **全ての物質が中性子に変わって**いく (チャンドラセカール限界)

超新星爆発 SN1987A

超新星爆発は数秒の時間に起きる。

太陽が一生に放出する全エネルギーと同程 度のエネルギーを、瞬間的に放出する。

中心に中性子星かブラックホールが残る。

トルマン・オッペンハイマー・ ヴォルコフ限界

Prompt Explosion

シミュレーションでは爆発は起きない。

破線はshock waveの位置

EOS: Shen et al. Lattimer & Swesty EOSでも同様

Delayed Explosion

R_v: neutrino sphere radius R_g: gain surface R_s: shock radius

R_gより外側の物質が コアから放出される ニュートリノによって 加熱され(neutrinoheating)、shock wave の拡大を支える。

Figure 9. Sketch of the stellar core during the shock revival phase. R_{ν} is the radius of neutrino sphere, from which neutrinos are emitted freely, R_{ns} is the radius of the protoneutron star, R_g is the gain radius (see text) and R_s is the radius of the stalled shock. The shock expansion is impeded by mass infall to the shock front at R_s by the mass infall at a rate \dot{M} . This figure is taken from Janka [168]. Kotake 2006, pp. 987.

ニュートリノによるエネルギー放出 (~10⁵³erg)の1%を星内物質に落とすこ とができれば超新星は爆発する

Delayed Explosion

1D 109 1.665 108 R 107 10 る -0.2 -0.1 0 0.1 0.2 0.3 0.5 0.6 0.7 0.8 0.4

TIME

ニュートリノによるエ ネルギー放出 (~10⁵³erg)の1%を星内 物質に落とすことがで きれば超新星は爆発す る

Figure 8. Successful delayed explosion taken from [382]. The *x* and *y* axes represent time in units of second measured from core bounce and radius from the stellar centre in units of centimetre, respectively. Lines are trajectories of selected mass zones. The dashed line represents the shock front. In the figure 1.665 M_{\odot} shows the mass point which is expelled outwards by the second shock produced by the neutrino heating of the matter behind the stalled shock wave. Due to the neutrino-heating mechanism, the shock wave once weakened at ~500 ms revives and then successfully propagates to the surface of the iron core.

delayed explosion の成功例, J.R. Wilson, Numerical Astrophysics, 1985 しかし、近年のよりモダンな計算では、delayed explosion は 成功していない。

2D-Simulation

s11.2 etc
... model mass in solar
mass
rot
... rotating model
32, 64
... number of grids in θ

近年2Dや3Dの計算が精力的に進められている。

ここ2-3年で3Dのシミュレーションで爆発が起きる様になっ てきた。ただし爆発のエネルギーはまだ観測の~1/10。

超新星爆発シミュレーション

図2 大質量星の重力崩壊の模式図. 左から右に (a), (b), (c) と時間発展を表す. (a)「重力崩壊開始」(中心密度がおよそ10¹⁰ g/cm³). 中心に鉄のコアができ ており,ケイ素層,酸素層とたまねぎ状に組成が分布している. 鉄の光分解と電子捕獲で重力崩壊が進んでいく様子を表している. 青い矢印は物質の速度を 表し,中心に向かってつぶれていることを表している. 黒い波矢印はニュートリノ (v)の伝搬を意味する. なお,最近の星の多次元進化計算の進展として,⁹⁾ケ イ素 (図ではオレンジ色)層と酸素 (図では青色)層は核融合と対流の影響で非一様な分布になっていることが指摘されており,それも反映させた. (b)「ニュー トリノの閉じ込め」(中心密度がおよそ10¹² g/cm³). ニュートリノ球の内側では、ニュートリノは拡散によってランダムウォークを繰り返しながら徐々に外向 きに進んでいき (ジグザグの黒線),ニュートリノ球に到達するや物質との反応が切れ,外層部に向かって自由伝搬していく. (c)「コアバウンス」(中心密度が およそ3×10¹⁴ g/cm³). 中心に一様核物質ができ始め,中心の圧力が急激に増すため外側の物質がはじき返され,外に向かう衝撃波が形成される. (d)コアバ ウンス時に形成された衝撃波が100-200 kmで失速する.

図3 図2に続く大質量星の重力崩壊の模式図. 左から右に (e),(f)と時間 発展を表す.(e)ニュートリノ加熱により衝撃波が復活して,鉄コアを抜 け星の外層部に向かって伝搬していく.(f)伝搬していく衝撃波の中でニッ ケルをはじめとする重元素が合成される.

図8 「京」を用いた3Dシミュレーション計算の一例(親星は11*M*_☉モデ ル、³⁹⁾ 詳細は本文参照). それぞれのパネルでパウンスから測った時刻を右 上に、右下の600 km は一辺の空間スケールを表す.

重力崩壊型超新星の爆発メカニズム 日本物理学会誌2015年3月号

超新星爆発の中の元素合成

超新星爆発

超新星爆発中の元素合成

滝脇、他

しかし爆発のエネルギーはまだ観測の~1/10。 まだまだ重要な要素が欠けている?

リチウムまでの元素はビッグバンで作られた

⁷Be(*d*, *p*)⁸Be

⁷Be(*d*, *p*)⁸Be \checkmark It is suggested that $(5/2^{+})$ 16.71the cross section increases 220 keV **0**9B by the reaction through $^{7}\text{Be} + d$ the resonance state. Energy [MeV] [Cyburt & Pospelov(2012)] **Big Bang Nucleosynthesis** Temperature: \sim 0.8 GK Energy: 100 – 400 keV 3/2-0.00 \rightarrow The (5/2+) state at 16.71 MeV 9**B** $^{8}\text{Be} + p$ in 9B is located in this energy region. Q value of $^{7}Be(d, p)^{8}Be: 16.7 \text{ MeV}$

Background Purpose Experiment Analysis Result Summary

Host target: Ag 20µm

Phase-I First Measurement ⁷Be(d,p)⁸Be RCNP-CNS-JAEA Collaboration ビッグバン元素合成での⁷Li生成問題

Q value = +16.7 MeV, $T_{1/2}$ = 53 days ⁷Be implantation at CRIB ... 2×10⁸ pps/22 mm² ~ 1×10⁷ pps/mm² 1.2 days of implantation $\rightarrow 10^{12}$ /mm² ⁷Be(d,p) at JAEA Tandem Cross Section: 8-400 mb = \sim 0.6-32 mb/sr S-factor (MeV barn) Solid Angle ~ 10 msr Yield = 0.4 - 20 cpm

Primary target

⁷Be target production: Activation

Result

Cross section of ⁷Be(*d*, *p*)⁸Be

恒星内元素合成

太陽はどうやって燃えているのだろうか

太陽はほとんど水素からできていて、酸素はほとんどない。

なので、普通の意味で燃えている(酸化反応)わけではない。

水素の原子核からヘリウム原子核を作る核融合反応によって燃えている。

しかし、水素の原子核は陽子が1つなのに、ヘリウムの原子核は陽子2中性子2 だ。

どうやってヘリウムを作るの?

pp-chain →

太陽が歳をとると、ヘリウムからさらに 炭素、酸素、ネオンなどを作りながら 複雑な過程を経て燃焼を続けていく。

He-Burning and Carbon Synthesis in Stars

Asymptotic Giant Branch (AGB) stars:

C/O core, He-Shell Flash

Central Temperature Range: 107-108 K

Surface Temperature (K)

Hertzsprung-Russell (HR) Diagram

He-Burning and Carbon Synthesis in Stars

Central Temperature Range:

107-108 K

Surface Temperature (K)

Hertzsprung-Russell (HR) Diagram

http://outreach.atnf.csiro.au/education/senior/astrophysics/stellarevolution_postmain.html

宇宙の炭素合成: 非共鳴トリプルアルファ反応

p T > a few 10⁸ K: resonant capture

p T < 108 K: nonresonant capture (Ternary Fusion Process)

The $\alpha\alpha\alpha$ threshold is at 7.275 MeV.
恒星中のトリプルアルファ反応率



from K.Ogata, M. Kan, and M. Kamimura, Prog. Theor. Phys. 122, 1055 (2009);

赤色巨星存亡の危機!?

従来の ヘリウム×3→炭素 の反応率の 計算は"全く"間違っていた!

従来の天体計算理論では、赤色巨星は 存在できなくなる。







どうやって測定するのか?



E0 Transition Strength to the Three- α Continuum



¹²C g.s. wave function from M. Kamimura et al.,

The $\alpha\alpha\alpha$ threshold is at 7.275 MeV.



Test Data: ¹³C(p,d) at 0 degree

2012.1.30 in RCNP-E365

Achromatic Mode, 23 keV 60 minutes at 150 nA



T. Ito et al.,

まとめ

原子核の構造・反応の実験研究から、宇宙現象に関わる話題 を中心にお話しました。

イントロ:宇宙と原子核のスケール、中性子星
原子核の世界:その基礎と実験設備
原子核の状態方程式と中性子星
元素合成・ビッグバン・超新星爆発

最後まで参加どうもありがとうございます。