

話 題 (V)

国際ワークショップ

“天体核物理学に於ける不安定原子核”報告

- International Workshop on “Unstable Nuclei in Astrophysics” -

(東京工業大学理学部) 永井 泰樹

原子核物理をさらに飛躍的に発展させるために、不安定核ビーム(短寿命放射核ビーム)を加速する装置の建設計画が、世界各地で立案されている。(我国では東京大学原子核研究所が中心になって計画されている)。その様なおり、この計画で研究上の柱の一つである天体核物理学に関する会議が1991年7月7日、8日の2日間東京都立大学において開催された。八王子の新キャンパスは、都内の大学とは思えない程にゆったりとした敷地に、特徴ある校舎が建てられており、周囲の緑とあいまって研究・教育を実践していくには素晴らしい環境であるとの印象を持った。実際、駅から大学までの道並はヨーロッパの風情を漂わせ、会議が行われた国際交流会館もなかなか立派であった。以下にこの会議の講演の中から幾つかをセッション毎にピックアップして紹介する。但し、このワークショップのプロシーディングスが World Scientific Pub. から出版予定であるので詳細はそれをご覧頂きたい。本稿の最後に会議のプログラムを示す。

超新星での爆発的要素合成のセッション

原子番号が34以上の元素で陽子過剰側にある同位体はp-過程核と呼ばれる。これらの元素は、高度に進化した大質量星の酸素/ネオン層から、例えばII型の超新星として爆発する際等に生成されると考えるのが自然と思われている。Arnouldはこれらp-過程核がII型の超新星の酸素/ネオン層で生成される量を、超新星に成る前の星の進化及び爆発時の物理条件についてモデルを作り詳細な計算を行った。その結果p-過程核の約半分についてはうまくその量を再現できた。しかし全体的に過剰生成であり、またMo領域では生成量が少なすぎるといふ問題がある。次にHeの発火についてであるが、一般にそれは 3α 反応が小質量星の芯で始まった時に起こると考えられている。しかしHashimotoはHeの発火前の星の芯の状態を調べた結果、小質量のPOP IIの星の芯では、 $^{14}\text{N}(e^-, \nu)^{14}\text{C}(\alpha, \gamma)^{18}\text{O}(\text{NCO})$ 反応がHe発火に重要な役割をしている事を指摘した。そしてかなりの ^{18}O が生成される結果、 $^{18}\text{O}(\alpha, \gamma)^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ 反応でs-過程による元素合成用の中性子を作る事を指摘した。

He 燃焼、CNOサイクル及びrp過程のセッション

$^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反応は、He燃焼後に芯の中にあるHeと ^{12}C の相対量が星の進化を決める上で重要であるので、この反応断面積の精度良い値が不可欠だがまだ不正確な値しか無い。

そこでGaiは、この反応断面積の情報を得るため進行中の ^{13}N のベータ遅延 α 放出測定実験について述べた。ところで主系列の星の水素燃焼はp-pチェーンと通常のコールドCNOサイクルで支配される。しかしこのサイクルをバイパスするホットCNOサイクルと呼ばれる反応サイクルの内 $^{13}\text{N}(p, \gamma)^{14}\text{O}$ 反応断面積の値は、星の種々の条件を決める上で特に重要でその測定が待たれていた。ルーバン(ベルギー)ではこの実験を行うために、かねてより不安定核 ^{13}N を加速する加速器(サイクロトロンを二段直結する)を建設していたが、それが完成してこの実験を行った。30 MeV、500 μA の陽子ビームを用い $^{13}\text{C}(p, n)^{13}\text{N}$ で生成した ^{13}N ビーム(50 particle pA)を水素標的に照射して上記断面積を測定した。不安定核ビームを用いた初めての見事な実験である。一方早い陽子捕獲過程による元素合成の議論を行うには、proton drip lineに沿っての原子核の性質を知ることが必要である。Morrisseyはこれら原子核(^{68}Ga -- ^{78}Sr)がミシガン州立大学の新しいサイクロトロンで発見された事を報告した。

始源的元素合成のセッション

^4He 、 ^7Li 等の軽元素はビッグバン直後の宇宙初期に始源的に元素合成されたと考えられている。そしてこれら元素の合成量がバリオン密度一様の標準模型で計算されているが、その値は観測値と良く一致している。ところが、最近この始源的元素合成がバリオン密度非一様宇宙で行われたとする非一様模型が注目されている。この模型では、クリティカルバリオン密度 ρ_c (宇宙を閉じるに足る物質エネルギー密度)で上記軽元素の観測量が説明できる可能性があるとしている。そのためインフレーション理論の要請を満たすものとしてきわめて興味深い模型である。非一様模型の観点から精力的な研究を続けているKajinoは、この模型の大きな問題点である ^7Li の過剰生成が、陽子過剰な高密度領域での流体力学的均質化のために抑えられることを指摘した。ところで、宇宙に存在する ^4He の量は、従来標準模型を支持する有力な観測結果であるとみなされてきた。しかし、Boydはこの ^4He の量を推定するに従来と異なる視点から解析した。そして標準模型が予言する値より小さい値を得、その結果は $\rho_c = 0.20$ として非一様模型で説明できる事を指摘した。又Kajinoらの非一様模型では、始源的元素合成で ^{28}Si までの中重核が主に非一様宇宙の内、中性子が過剰な領域で合成されることを予言している。これは、始源的元素合成では主に ^7Li までの元素しか合成されないとする標準模型とは全く異なる。この中重核を合成する主な反応系列の中、Boydは理研で行った $^4\text{He}(^7\text{Li}, n)^{11}\text{B}$ 反応の測定結果について述べた。Kubonoは、この $^7\text{Li}(\alpha, n)^{11}\text{B}$ 反応に関して $^9\text{Be}(\alpha, p)^{12}\text{B}^*(n)^{11}\text{B}$ 反応を調べ ^{11}B の励起状態への中性子崩壊がかなり大きい事を指摘し、逆反応より求めた上記反応断面積が更に大きくなることを指摘した。Nagaiは東工大ベレットロン加速器を用いて行ったkeV中性子捕獲反応断面積測定結果について報告した。即発 γ 線検出法による捕獲率測定は、きわめて感度の高い測定方法であることを数 μ バーンの小さい断面積を精度良く測定して印象付けた。Boyd、Kubono及びNagaiらの得た結果は中重核元素がより合成される可能性を示している。

中性子過剰核の構造のセッション

最近、天然に T_c が存在する可能性があるとする大変興味深い指摘がある。そこで Naka haraは T_c の同位体のうち、長半減期と報告されている $^{87}T_c$ と $^{98}T_c$ の半減期を見直すべく開始した実験を紹介した。結論がでるまでに1年はかかるとのことである。

元素量と s 及び r 過程のセッション

元素合成量の計算に当たっては核の質量を知ることが重要である。軽核についてはproton drip line 及びneutron drip line が決定されてきたが、重い核については各々のdrip lineを決定できていない。そのため質量公式に依らねばならないことをUnoは指摘し、最近彼らが開発した質量公式及び β 崩壊に対する大局的理論を用いr-過程により合成される元素量の計算結果を述べた。

天体核物理研究の新しい実験法のセッション

不安定核ビームによる原子核反応をクローン破砕反応でシミュレートしようとする新しい実験方法が開発された。先に述べた様に $^{13}N(p, \gamma)^{14}O$ はホットCNOサイクルで重要な反応であるがMotobayashiはこの反応を ^{14}O のクローン破砕反応 $^{208}Pb(^{14}O, ^{13}Np)^{208}Pb$ で調べた。ここでは核子当り91 MeVの ^{14}O を ^{208}Pb に衝突させ、破砕反応で生じた ^{13}N とprotonを多重検出器で検出した。こうして得た結果は、不安定核 ^{13}N を用いて行ったDelbarの結果と良く一致している。この破砕反応を利用することを提唱したBauerが、この方法の問題点を議論した。ところで不安定核ビームを用いて天体核物理を研究していくに当り不安定核ビームの生成量が重要であるが、Tribbleはテキサス大学の新しい加速器を用いて行っている二次ビーム(不安定核)生成量についての研究を紹介した。

天体核物理における電弱相互作用のセッション

銀河系にある安定元素のうち質量数が一つしか異ならないにも関わらずその存在量が大きく異なるものがある。例えば ^{19}F は ^{20}Ne の約0.03%しか無い。これは ^{20}Ne が生成された場所で ^{19}F を生成する効率が ^{20}Ne の0.03%であることを意味する。この顕著な差を説明するのに、Haxtonはニュートリノにより誘起された元素合成という次のアイデアを紹介した。即ちコア崩壊をする超新星から放出されたニュートリノが、外層の原子核を非弾性的に励起し中性子を含む核子を放出する。この核子が原子核と反応して新たな原子核を作ると言うものである。 ^{19}F と ^{20}Ne に関しては放出されたニュートリノが ^{20}Ne と反応して質量数19の元素を先ず生成する。この時質量数19の元素は ^{20}Ne の約0.3%あるが、ニュートリノの後からくる衝撃波により質量数19の元素は破壊され、結果として ^{19}F は ^{20}Ne の0.03%になるというものである。そしてもしこの考えが正しいとすると、両者の存在比は超新星爆発で放出されるミューやタウニュートリノの温度(エネルギー)を与える良い温度計と考えられると言

う面白い説を述べた。Haxtonはこの考えで ^{138}La と ^{139}La 及び ^{180}Ta と ^{181}Ta の存在比も説明できないかと検討中であることを述べた。

中性子星と状態方程式のセッション

超新星物質と呼ばれる物質から作られる誕生直後の熱中性子星は、極端条件下で核物質がどのような新しい現象を示すかを見る観点からも興味深い。Takatsukaは、通常の核物質の数倍の密度と10~50 MeVの温度を持つ超新星物質の特徴的性質を調べ、冷中性子星との違いを論じた。

プログラム

*Explosive nucleosynthesis in supernovae and novae:

1. Explosive nucleosynthesis in supernovae: K.Nomoto
2. The p-process in type-II supernovae; new results: M. Arnould
3. R-process in supernovae: B. Meyer
4. The role of ^{14}C in the red giant branch: M. Hashimoto

*He burning, CNO cycle and rp-process:

5. The $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ cross section at low energies: F. Barker
6. Beta delayed alpha emission from $^{16,18}\text{N}$ and the nucleosynthesis of α - $^{12,14}\text{C}$: M. Gai
7. Measurement of the $^1\text{H}(^{13}\text{N}, \gamma)^{14}\text{O}$ cross section and determination of the $^{14}\text{O}(1^-, T=1, E_{\text{exc}}=5.17 \text{ MeV}) \gamma$ -width: T. Delbar
8. Production of nuclei on the proton drip line for $31 < Z < 37$: D. Morrissey

*Primordial nucleosynthesis:

9. Signatures of inhomogeneous cosmologies; intermediate-mass nucleosynthesis and radioactive beams: T. Kajino
10. Some recent experimental and theoretical advances in primordial nucleosynthesis: R. Boyd
11. Key resonant states in the $^6\text{Li}(\alpha, n)^{11}\text{B}$ reaction in the inhomogeneous big-bang models: S. Kubono
12. Capture rates of the $^7\text{Li}(n, \gamma)^8\text{Li}$ and $^{12}\text{C}(n, \gamma)^{13}\text{C}$ reactions by prompt γ -ray detection: Y. Nagai

*Structure of neutron-rich nuclei:

13. Fermion dynamical symmetries, nuclear masses and their astrophysical implications: D. Feng
14. Shell model study of the $N=20$ neutron-rich nuclei and its astrophysical implication: N. Fukunishi
15. Half lives of long-lived T. isotopes: H. Nakahara

*Elemental abundances, and s- and r-processes:

16. Elemental abundances of our solar system: M. Ebihara
17. New generation calculations of beta decay far from stability and astrophysics: H. Klapdor
18. Nuclear masses far from stability and their relation to r-process calculations: T. Uno

*New method in nuclear astrophysics:

19. Experimental study on Coulomb breakup of ^{16}O : T. Motobayashi
20. Astrophysical information for capture reactions by Coulomb dissociation of a radioactive beam: G. Baur
21. Some new techniques in polarization of radioactive beams: S. Hanna
22. Radioactive ion beam rates from inverse kinematics reaction yields at 0 degree: R. E. Tribble

*Electroweak processes in astrophysics:

23. Neutrino process in supernovae: W. Haxton
24. Diffusion of neutrinos through the outer layers of a presupernova star: B. Banerjee
25. Multigroup simulation of protoneutron star, cooling and neutrino spectra: H. Suzuki

*Neutron stars and equations of state:

26. Properties of dense supernova matter and neutron stars at the birth: T. Takatsuka
27. Impact of the nuclear equation of state on models of rotating neutron stars: F. Weber
28. Supernovae and neutron stars with equations of state in relativistic field theory constrained by unstable nuclei: H. Toki