

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：82502

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K13728

研究課題名(和文) レーザー駆動爆発的ガンマ線によるレーザー核物理の展開

研究課題名(英文) Perspective for laser nuclear physics using explosive laser-driven gamma-rays

研究代表者

早川 岳人 (Hayakawa, Takehito)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 東海量子ビーム応用研究センター・上席研究員(定常)

研究者番号：70343944

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：我々は高ピーク出力レーザーによって生成されたプラズマからの線パルスを用いた原子核実験を研究した。これらの線パルスは極短、非常に高い強度、連続エネルギーといった優れた特徴を有する。これらは特徴は、新星や超新星爆発などの爆発的要素合成過程の研究に適している。我々は高出力レーザーを用いた線パルスの生成方法及び、天体環境下における核反応を模擬する実験手法を検討した。

研究成果の概要(英文)：We study nuclear experiments using gamma-ray pulses provided from high field plasma generated by high peak power laser. These gamma-ray pulses have excellent features of extremely short pulse, highly intense and continuous energy distribution. These features are suitable for the study of explosive nucleosyntheses in novae and supernovae. We discuss how to generate the suitable gamma-ray pulses using high power laser and experimental methods to simulate nuclear reactions in stellar environments.

研究分野：実験原子核物理学

キーワード：レーザー核物理学 超新星爆発元素合成 放射化カウンタ

1. 研究開始当初の背景

レーザー技術の発展によって、大強度レーザーによってレーザープラズマ中から、 γ 線、中性子、荷電粒子等の様々な量子ビームが生成可能になってきた。これらのエネルギーは MeV から GeV の領域に達しており、原子核物理学や素粒子物理学の実験が視野にはいつてきている。高強度レーザーの発達によって加速器ベースの放射線源に匹敵・凌駕する性能が発揮できる見込みが出来た現在、原子核物理の専門家とレーザー物理の専門家の共同研究による本格的なレーザー核物理というべき分野がスタートしようとしている。

ELI-NP (ルーマニア)における 10PW レーザーの研究課題では、核物理学者の D. Habs が提案した重イオン加速(シース加速)を用いた超新星爆発によるウラン等の重元素生成が、重要な研究課題の一つである。レーザー核融合施設 NIF (ローレンスリバモア研究所: LLNL)でも、爆発的中性子発生を用いた赤色巨星等の中での中性子捕獲反応による元素の生成研究が提案されている。このように、世界的には原子核物理学の専門家の本格的な参加により、レーザー核物理が開発されようとしている。

量子科学技術研究機構・関西光科学研究所(関西研)で大強度レーザーのアップグレードが進められている。PW レーザーで生成されたレーザー光はレーザー輸送管を通して実験室に輸送される。照射チェンバーに入射され、最終的に γ 線生成ターゲット上にフォーカスされる。ガスないし金属薄膜上で直径 1 μm 程度のスポットにフォーカスされたレーザーは、 $10^{21}\text{W}/\text{cm}^2$ 以上の高強度まで集光されることが期待される。この時に、局所的にプラズマが生成される。このプラズマ中で、レーザーの持つ動重力によって電子は数十 MeV 程度まで加速される。関西研では、エネルギー幅(dE/E)が約 20%の準単色電子ビーム生成(160 MeV)が既に実現している。

一方、放射反作用の原理に基づき、高強度レーザーの集光度が $10^{22}\text{W}/\text{cm}^2$ を超えると、1 ショットで最大 30MeV のガンマ線が $10^{12}/\text{shot}$ 生成されることがシミュレーション計算によって予測されている。このような瞬間的に高輝度なガンマ線が実現すれば、超新星爆発の光核反応による元素合成など様々な研究が可能になる。

2. 研究の目的

既に、レーザー駆動量子ビームのうち、重イオン加速、中性子生成においては宇宙核物理実験研究が提案されている。極短パルスのレーザー駆動 γ 線源が実用化されたら、光核物理、宇宙核物理、高強度場物理の研究などに広く応用可能である。特に超新星爆発の光核反応元素合成の研究に適している。超新星爆発では、温度は 10^9K を超えるため光のエ

ネルギーは MeV 領域になる。MeV のエネルギーの γ 線は原子核と (γ, n) 反応で、新しい同位体を生成する。この時、 γ 線のエネルギー分布はプランク分布にしたがって連続であり、連続エネルギーであるレーザー駆動 γ 線を用いて、従来の加速器では不可能だった「積分反応断面積」の直接計測が可能となる。そこで、レーザー駆動量子ビームのうち、特に γ 線生成に着目して、レーザー駆動 γ 線パルスにおける宇宙核物理研究の可能性を探ると同時に必要な実験技術を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

レーザー駆動量子ビームは、(準単色であっても)広いエネルギー分布、極短パルスという特徴があり、加速器で可能な原子核実験を置き換えることは困難である。しかし、爆発的な現象の研究には適している。そのような現象の一つが、超新星爆発の光核反応による元素合成過程である。太陽系に存在する約 290 種類の原子核のうち、約 27 核種が超新星光核反応で生成された証拠は発見されている。その理論計算で鍵となる物理量の一つが、光核反応断面積である。これまで、光核反応断面積は、レーザーコンプトン散乱 γ 線を用いて γ 線のエネルギーの関数として測定されていた。しかし、プランク分布に近い連続エネルギーの γ 線源があれば、実際の超新星爆発の反応率に直結した積分断面積を直接求めることが可能になる。積分断面積の直接測定は、中性子では行われてきたが適切な線源が存在しなかったため γ 線では行われていなかった。

そこで、宇宙核物理研究に必要なレーザー駆動爆発的 γ 線パルスの発生条件を、理論計算及び、シミュレーションによって求める。特に、超新星爆発の光核反応元素合成過程の研究に必要な物理パラメーターを求めるために必要な条件および、実験手法を検討する。また、レーザープラズマの持続時間が超新星爆発の天体環境のシミュレーションに必要な条件である。また、 γ 線のエネルギースペクトルにおいて、(γ, n)反応断面積や、基底状態から核異性体への遷移確率を求めるために必要な条件を求める。

本研究では、個々のショットのエネルギースペクトル計測が重要である。 γ 線はエネルギーに関係なく光速で飛翔するため、飛行時間測定法を用いることができず、極短パルス γ 線のエネルギースペクトル計測は困難である。これまで、放射化法が主に用いられていたが、解析まで時間がかかるという問題があった。しかし、高繰り返し(最大 0.1Hz)実験には、放射化法より解析が早い手法が必要である。そこで、レーザーショット後、数十秒から数分で解析可能な γ 線放射化カウンタを試作する。元々は極短パルスで発生した中性子フラックス計測のために開発され

た手法である。しかし、これまで適当な極短パルス・高輝度線源が存在しなかったため、線放射化カウンタは開発されなかったと思われる。

4. 研究成果

レーザー駆動線の発生メカニズムの候補の一つが放射反作用である。放射反作用とは、荷電粒子が急速に加速運動を行う際に放出する線である。制動放射は良く知られており、加速器で加速した電子ビームの制動放射線源は実用化されている。同様に、荷電粒子が急加速した場合にも放射線を放出するが、現在の加速器の加速勾配はこのような現象が無視できるくらい緩やかである。しかし、プラズマ中の電子加速では、電場勾配が通常の線形加速器に比べて3桁以上高いために、プラズマ・レーザー加速において顕在化する物理現象である。

研究分担者の中村准教授等が行った計算では、放射反作用線はレーザー偏光面で強くレーザー照射方向に強い指向性を持つのに対し、制動放射線はレーザー照射軸の周りに対称に放出される。これらのことから、ガンマ線の時間分布あるいは空間分布を測定することで放射反作用による線発生を検証することが可能となる。しかし、線のピコ秒とフェムト秒の識別は困難であり、角度分布を計測する方が容易である。しかし、様々なレーザー条件における計算結果において、エネルギースペクトルの観点からは、超新星爆発中のプランク分布からは遠い結果しか得られなかった。放射反作用ではエネルギーが増加した場合のフラックスの低下の仕方が不十分なためである。相対的に高いエネルギーにおいて高いフラックスを有するのが特徴であるが、超新星爆発のシミュレーションの観点からはマイナスに働くことが判った。

一方、制動放射では、プラズマ中で加速された電子がプラズマやその他の物質と相互作用してX線を生成する。出力は小さいが、電子が衝突緩和によりエネルギーを失うまでピコ秒程度にわたり放出される。単色の電子ビームの制動放射X線はエネルギー分布が $1/E$ の形を持っており、それ単体では超新星爆発中のエネルギースペクトルとは大きく異なる。レーザープラズマによって、準単色の電子ビーム加速の研究が精力的にすすめられているが、特にレーザーやターゲットを最適化しない場合には、連続エネルギーを有することが判明している。そこで、この連続エネルギーを有する電子ビームを第二の制動放射X線ターゲットに照射する場合について、シミュレーション計算を行った結果、適当な条件でX線のエネルギーが図1に示すように、プランク分布を近似できることが判明した。

図1の青線がレーザープラズマで生成さ

れた電子ビームのエネルギースペクトルである。電子エネルギーは $kT=500\text{keV}$ に対応する。この電子から生成された制動放射X線のエネルギースペクトルが、黒の実線である。赤の実線は $kT=360\text{keV}$ のプランク分布を示す補助線である。この図が示すように、電子のエネルギーと制動放射線X線生成用ターゲットの厚さを調整することで、超新星爆発の天体環境内の温度分布を模擬できることが判明した。

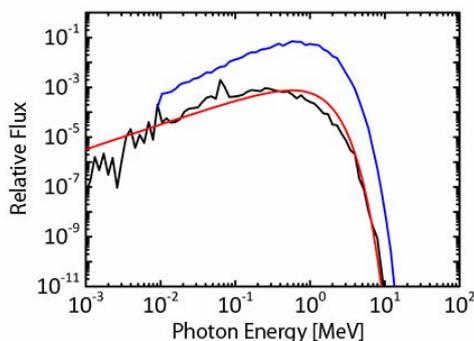


図1 レーザー駆動電子ビームのエネルギースペクトル(青線)とその電子によって生じる制動放射X線のエネルギースペクトル(黒線)。青線は $kT=350\text{keV}$ に相当するプランク分布を示す。

もう一つ、レーザーの短パルス性を生かした実験手法は、励起した原子核の積分反応断面積計測である。レーザーで生成したレーザープラズマ中で原子核は原理的に熱輻射で励起する。励起した原子核に対して、冷却する前にレーザーの極短パルス性を生かして、レーザー駆動線を照射して、励起した原子核の反応断面積が計測可能である。まず、考えられるのが、1レーザーから2パルスに分割して、タイミングを変えて照射する2パルス法である。しかし、陽イオンと電子の集合体であるプラズマではクーロン力による斥力が働き寿命が短い。恒星の中ではこの斥力に対して、重量がバランスすることでプラズマが安定できる。しかし、レーザープラズマ実験では、重力が働かないためクーロン力によってプラズマの寿命が短い。例えば、パルスエネルギーが 10J のレーザーを $8.5\mu\text{m}$ まで集光すると、平均エネルギーは 100keV に達し、超新星爆発の環境を局所的に模擬できる。この場合、プラズマの平均寿命は 170fs と短い。図2に、研究対象となる原子核の部分的な励起状態を示す。原子核の励起状態の半減期は高励起状態は fs のオーダーになるが、低励起状態では ps から ns のオーダーである。そのため、 170fs のプラズマ寿命では原子核が熱平衡状態に達するには短い。そこで、レーザー核融合研究などのために開発された数 100ps 以上のパルス幅を持つレーザーでレーザープラズマを生成し、原子核を励起させる。次に極短高ピーク出力レーザーで

線パルスを生成し照射することで、原子核の励起状態に対する光核反応断面積の計測が可能である。

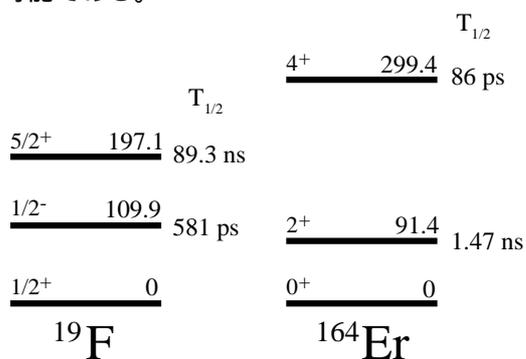


図2 ニュートリノ核種及びガンマ核種の基底状態と低励起状態の例

高繰り返し (最大 0.1Hz) レーザー実験では、ショット毎の照射条件による線生成を確認するため、短時間で分析が行えることが重要である。一般に放射化法が広く使われている。放射化法は金属ターゲットに放射線を照射し、核反応で生成された放射性同位体の崩壊線(線)を計測する手法である。短寿命の放射性同位体が、照射直後に巨大なバックグラウンドを形成するため、通常は適当な冷却時間(数分から数十分)後に計測を行う。そのため、分析結果を得るまで時間がかかるという問題があった。

そのため、核融合実験の爆発的中性子の計測手段として開発された放射化カウンタを線に応用した。本手法では、(, n) 反応で生成された放射性同位体(あるいは、核異性体)が崩壊する数を計測する。一般に、レーザーショット直後では膨大な放射線で検出器が麻痺する。しかし、放射化カウンタはエネルギー分析を行わないため、高検出効率に耐えられるという利点がある。また、崩壊曲線の傾きから目的とする核種の初期量を評価できる点が、放射化カウンタの傑出した利点である。

文献調査で線パルスを計測するための放射化カウンタの事例は発見できなかったため、放射化対象物質やシンチレーターの選択から検討する必要があった。本研究では、(, n) 反応で数十秒から数分の半減期を有する RI 等が生成される元素を選択することが必要である。全元素を簡単に調べたところ、Ca(³⁹Ca, 0.8596s)、Mo(⁹²Mo, 65s)、Pr(¹⁴¹Pr, 3.39m)、Tb(¹⁵⁸Tb, 10.7s)、Er(¹⁶¹Er, 2.269s)、Pb(²⁰⁷Pb, 0.805s)等が候補として見つかった。なお、Er、Tb、Pbは核異性体であり、Tbは110keVの線を放出し、Pbは569keVの線等を放出する。これらの中で、最終的には65sの半減期で659keVの線を放出するMoターゲットを選択した。半減期が短いため、数分程度の測定が可能である。659keVの線は他の候補と比較して、エネルギーが低いために検出効率が上がる。

中性子のための放射化カウンタでは線を計測するためにプラスチックシンチレーターが主に利用されているが、これらの崩壊核種(核異性体)は、比較的エネルギーの高い線を検出するため、中性子のための放射化カウンタとは異なり、高い原子番号と密度を有する無機シンチレーターが適している。多層化することを想定して、厚さ5mmとし、高い応答性能を考慮して、YAPシンチレーターを選択した。YAPの主成分は、Y、Al、Pであり放射化対象元素が含まれないため、Mo、Tb、Pb等の金属板と組み合わせて使うのに適している。本研究では試験のため、金属板1枚とシンチレーター2枚で作製した。

超新星爆発では、光子のエネルギー分布はプランク分布に従うが、(, n) 反応に主に寄与するのは中性子離別エネルギーから約+100keVの狭いエネルギー領域である。そのため、超新星爆発における元素合成の模擬には、研究対象となる核種の中性子離別エネルギーに近い値を持つ放射化物質が適している。一方、レーザープラズマで生成された線のエネルギースペクトルは予期しない形状を持っており、その評価には多数の放射化物質から構成される放射化カウンタが必要である。一般の線フラックスがエネルギーに対して比較的緩やかに変化する場合、反応率は核反応断面積とエネルギースペクトルの積分になるが、巨大双極子共鳴のピーク近傍の寄与が主体的になる。そのため、中性子離別エネルギーよりも巨大共鳴のピークエネルギーの多様性が必要である。これらの2つの条件における線測定を1種類の放射化カウンタで行うのは、現実的には無理なのでさらなる検討が必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3 件)

Tatsufumi Nakamura and Takehito Hayakawa, Quasi-monoenergetic positron beam generation from ultra-intense laser-matter interactions, Physics of Plasma, 23, 103109 (2016). 10.1063/1.4965914, 査読あり

Takehito Hayakawa and Tatsufumi Nakamura, Proposal of direct reaction cross section measurements on an excited state to study explosive nucleosyntheses, JPS Conference Proceeding: Proceedings of 14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC2016), 14, 21103 (2017), 10.7566/JSPC.14.02110, 査読あり

Takehito Hayakawa, Tatsufumi Nakamura, Hideyuki Kotaki, Masaki Kando, Toshitaka Kajino, Explosive Nucleosynthesis Study

Using Laser Driven gamma-ray Pulses,
Quantum beam science, 1, 3 (2017).
10.3390/qubs1010003, 査読あり

〔学会発表〕(計 3 件)

T. Hayakawa, T. Nakamura, Proposal of
direct reaction cross section
measurements on an excited state to
study explosive nucleosyntheses, Nuclei
in Cosmos 2016 (国際学会), 2016 年 06 月
19 日 ~ 2016 年 06 月 24 日, Niigata, Japan

T. Hayakawa, Supernova
neutrino-process and sensitivity to
neutrino temperatures, International
Nuclear Physics Conference (国際学会),
2016 年 09 月 11 日 ~ 2016 年 09 月 16 日,
Adelaide, Australia

T. Hayakawa, T. Nakamura, T. Kajino,
Nuclear astrophysics in laser driven
gamma-ray pulse, Light driven
Nuclear-Particle physics and Cosmology
(LNPC '17) (招待講演)(国際学会), 2017 年
4 月、Yokohama, Japan.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

早川 岳人 (HAYAKAWA, Takehito)
量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用
研究所東海量子ビーム応用研究センタ
ー・上席研究員(定常)
研究者番号 : 70343944

(2) 研究分担者

中村 龍史 (NAKAMURA, Tatsufumi)
福岡工業大学・情報工学部・教授
研究者番号 : 40318796

(3) 連携研究者

榊 泰直 (SAKAKI, Naohiro)
量子科学技術研究開発機構・関西光科学研
究所・上席研究員(定常)
研究者番号 : 00354746

(4) 連携研究者

小瀧 秀行 (KOTAKI, Hideyuki)
量子科学技術研究開発機構・関西光科学研
究所・上席研究員(定常)
研究者番号 : 60354974

(5) 連携研究者

神門 正城 (KANDO, Masaki)
量子科学技術研究開発機構・関西光科学研
究所・上席研究員(定常)
研究者番号 : 00354746

(6) 連携研究者

林 由紀雄 (HAYASHI, Yukio)
量子科学技術研究開発機構・関西光科学研
究所・主幹研究員(定常)
研究者番号 : 20360430

(7) 連携研究者

静岡 俊行 (SHIZUMA, Toshiyuki)
量子科学技術研究開発機構・関西光科学研
究所・上席研究員(定常)
研究者番号 : 50282299

(8) 連携研究者

西内 満美子 (NISHIUCHI, Mamiko)
量子科学技術研究開発機構・関西光科学研
究所・上席研究員(定常)
研究者番号 : 70391315