様　式　C－19、F－19－1、Z－19　（共通）

科研費 KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　元 年　 6 月 26 日現在

機関番号：８２５０２

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：１６Ｋ１７６８６

研究課題名（和文）X線天体の謎を解き明かす高分解能検出器を用いた水素原子中の阻止能計測

研究課題名（英文）Measurement of the ion stopping power of hydrogen atoms using a high resolution spectrometer for x-ray astronomy

研究代表者

近藤　康太郎（KONDO, Kotaro）

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究所　光量子科学研究部・主任研究員（定常）

研究者番号：８０５８２５９３

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,100,000円

研究成果の概要（和文）：解離した中性水素原子標的の形成が可能な電磁衝撃波管を構築するとともに，衝撃波管内の電極構造を工夫し，これまで課題であった放電電流の一様性を改善させた．このことから，一様な解離した水素原子標的形成の基盤構築ができた．また，偏向電磁石を用いた高分解能エネルギー検出器の基礎的な特性評価を行った．また，パルスで形成される中性水素原子標的と加速器から供給される粒子ビームとの時間同期のためにレーザーを用いた方法を開発した．最終的に解離した中性水素原子標的と粒子ビームとの相互作用実験にまでは至らなかったが，相互作用実験に必要な見通しを得ることができた．

研究成果の学術的意義や社会的意義
観測と理論モデルで整合が取れていないHI領域から観測されたX線天体や宇宙線の起源を明らかにするためには，そのX線生成量の見積が大変重要である．Thick Target モデルから高い精度を持つX線生成量の見積りには，低いエネルギー領域での高い精度をもつ水素原子中の阻止能の定量評価が必要である．理論モデルによれば，水素分子に比べて水素原子の阻止断面積は20%程度の増大が示されているものの，中性水素原子に対する信頼できる実験データは存在していない．本研究で目指す解離した中性水素原子に対する粒子ビームの阻止能を実験的に評価することはX線天文学，宇宙物理，原子物理において重要な意義をもつ．

研究成果の概要（英文）：Measurement of the ion stopping power of dissociated hydrogen atoms is important for precise estimation of the x-ray yield from the HI region of the interstellar medium, which is of significance to x-ray astronomy.
We developed an electromagnetic shock tube for the creation of a dissociated hydrogen atom medium, which was used as a target for a charged ions. The electrode structures in the shock tube were improved to obtain a uniform discharge plasma. A bending magnet, used in a high resolution spectrometer, was characterized to allow estimation of the energy loss of the charged particle beams after the interaction with the hydrogen atoms. Synchronization between the pulsed dissociated hydrogen medium and the charged particle beam was achieved using the onset of the diffraction of an incident laser beam by the hydrogen medium to indicate the transit of the medium along the shock tube. Therefore, a platform to measure the ion stopping power of dissociated hydrogen atoms was established.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：宇宙物理　原子物理　阻止能　パルスパワー　衝撃波　量子ビーム

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９、ＣＫ－１９（共通）

１．研究開始当初の背景

観測と理論モデルで整合が取れていない HI 領域（中性水素原子で構成される星間雲）から観測されたＸ線天体や宇宙線の起源を明らかにするためには，そのＸ線生成量の見積りが大変重要である．Thick Target モデルから高い精度を持つＸ線生成量の見積りには，低いエネルギー領域での高い精度をもつ水素原子中の阻止能の定量評価が必要である．水素原子と水素分子の電子状態を考慮した理論モデルによれば，水素分子に比べて水素原子の阻止断面積は 20% 程度の増大が示されている．一方で，標的が常温で固体・ 液体・気体標的の場合は，その阻止能がある程度体系的にまとめられているものの，解離した中性水素原子に対する信頼できる実験データはまだ存在していない．

２．研究の目的

本研究では，高い信頼性をもつよく定義された解離した中性水素原子標的を形成することができる同軸型電磁駆動衝撃波型管を用い，かつ高分解能エネルギー検出器を用いて，解離した中性水素原子中の阻止能を計測することを目的とする．

３．研究の方法

本研究で提案する電磁駆動衝撃波管において，過去行われた対向電極型電磁衝撃波管では衝撃波圧縮加熱領域（標的領域）の維持時間が入射イオンビームのパルス幅に比べて短かったために，それらの相互作用実験で信頼性の高い結果が得られなかった．一般に，維持時間を伸ばすためには衝撃波管の伝播距離を長くすることで実現されることから，これまでの実験結果と相互作用実験に必要な標的維持時間(μs 程度)を考慮して，電極および衝撃波管を設計・製作する．阻止能計測実験を行うためには，エネルギー損失を検出するためのエネルギー分解能等を考慮すると水素原子標的として密度が 10^{18} cm^{-3} 程度が求められるため，初期水素封入圧力は 1000 Pa 程度に設定する．また，純度の高い解離した水素原子標的を得るためには，既に過去開発した状態方程式と流体の保存則を基にした数値計算コードから衝撃波速度は 30 km/s 程度が必要になることがわかっている．電磁衝撃波管への入力エネルギーを変えたときに，高速度カメラによって測定される衝撃波速度との関係を明らかにする．一方で，従来より大容量の標的を形成させるために計画通りに解離に必要な速度を得ることができない可能性がある．そこで衝撃波管内の電極形状の工夫により一様なプラズマ電流シートを形成させる．これによって，水素ガスは効率よく電磁加速を受けることが期待され，目的の解離水素条件を達成させることが可能となる．

粒子ビームと解離水素標的相互作用実験では，相互作用後粒子ビームを偏向磁石で軌道を曲げ，敏感型位置検出器へ入射させ，その位置の変化からエネルギー損失量を見積もる．偏向電磁石の特性評価および高分解能エネルギー検出器の開発を進める．

また，パルス的に形成される水素原子標的に対する入射粒子ビームの同期が高精度な阻止能の計測には欠かすことができない．後方に解離水素標的を伴う衝撃波が粒子ビームとの相互作用部に到達する時間を高精度に計測する手法の開発を進める．高速応答する高価で洗練された機器を電磁衝撃波管によって発生する強い電磁ノイズ発生環境下で用いることなく，小型レーザーを衝撃波管の横方向から照射し，衝撃波の密度変化に伴う屈折を計測する手法を確立し，安価でありながら高精度な同期法の構築を目指した．

４．研究成果

まず,解離した中性水素原子標的の形成に向けてドライバーある電磁駆動衝撃波管の開発を進めた．電磁駆動衝撃波管に関しては特段工夫のない同軸型電極を用いた場合，衝撃波を駆動する

電流シートの方位角方向の分布に非一様性が生じ，あらかじめ封入されている水素分子ガスを解離させるために必要な衝撃波速度が得られないことがわかった．そこで，中心電極にスリーブ絶縁体を取り付けることで，軸方向と径方向に積極的な放電プラズマの形成を促し，電流シート一様性の改善が期待されることから，そのスリーブ形状を変更しながら，放電プラズマの自発光の時間変化を高速フレーミング・ストリークカメラで撮影を行った．その結果，電流シートの方位角方向の一様性および放電プラズマの軸方向の速度の改善が確認され，解離水素標的のドライバー開発の基盤を構築した．

また高分解能エネルギー検出器で使用する偏向磁石の性能評価を行った．^{241}Amからのアルファ線を用いて較正された炭素薄膜に陽子線を通過させ，エネルギー損失に伴うビームシフトを偏向磁石出口に設置されたプラスチックシンチレーターからの発光により計測した．この結果よりエネルギー損失とビームシフトとの関係が分かり，高分解能エネルギー検出器の構築の見通しを得た．

パルスで形成される中性水素原子標的に粒子ビームを照射させるためには，高精度な解離標的の位置情報が必要不可欠である．プローブレーザーを衝撃波管の横方向から照射し，衝撃波の密度変化に伴う屈折によるレーザーの光量変化を計測することで，標的位置を特定する手法を開発していた．しかし，これまで電磁衝撃波管は衝撃波生成とともに非常に大きな電磁ノイズを伴うため，その計測上の問題を抱えていた．電磁ノイズ遮蔽を施し，衝撃波管から十分に距離をとった位置でプローブレーザーの計測を行うことでその問題を回避し，解離標的の位置計測に成功した．

また，MeV 級の粒子ビームを発生させる手法の一つである高強度レーザー駆動重イオン加速法の粒子ビーム加速効率の高度化について検討を行った．

粒子ビームと相互作用させるためには，解離中性水素原子標的の実効的な大きさを十分取る必要がある．限られた入力エネルギーではその達成が困難であり，抜本的な衝撃波管形状の変更を検討し，その基礎実験を行った．実験結果から，実効的に十分な大きさをもつ解離標的を得るための条件が確立された．最終的に解離した中性水素原子標的と粒子ビームとの相互作用実験にまでは至らなかったが，相互作用実験に必要な見通しを得ることができた．

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 0 件）

〔学会発表〕（計 5 件）

① 近藤 康太郎，西内 満美子，榊 泰直，ドーバー ニコラス，ロウ ヘーゼル，宮原 巧，渡辺幸信，ティグラー ティム，ツアイル カー ル，シュラム ウーリ，ディーター エマ，ヒッグズ ジョージ，エッティンガー オリバー，ナジュムディン ゾフカ，桐山 博光，神門 正 城，近藤 公伯，“レーザー駆動イオン加速実験における CWレーザーによる標的表面の洗浄効果” 日本物理学会 第74回年次大会、九州大学，2019年3月14日~17日，国内学会．

② 近藤 康太郎，西内 満美子，榊 泰直，ドーバー ニコラス ピーター，桐山 博光，橋田 昌樹，草場 光博，神門 正城，近藤 公伯，“レーザー駆動重イオン加速に向けたCWレーザーを用いた薄膜標的の表面洗浄・改質” 第15回日本加速器学会年会，長岡，2018年8月7～10日，国内学会．

③ Kotaro Kondo, Mamiko Nishiuchi, Hironao Sakaki, Nicholas P. Dover, Hiromitsu Kiriyama, Masahiko Ishino, Takumi Miyahara, Yukinobu Watanabe, Masaki Hashida, Mitsuhiro Kusaba, Masaki Kando, Kiminori Kondo, "Surface Cleaning and Modification of Thin Target Films by CW laser for Laser-driven Heavy Ion Acceleration" The 7th Advanced Lasers and Photon Sources (Yokohama, Japan, 2018/04/24-27, 国際学会)

④ Kotaro Kondo, Kohei Kawauchi, Hiroki Kurita, Tomoya Takahashi, Yoshiyuki Oguri, "Role of insulator sleeves in the electro-magnetic shock tube to produce well-defined dissociated-hydrogen targets for beam interaction experiment", 10th International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (Saint Malo, France, 2017/09/11-15, 国際学会)

⑤ Kotaro Kondo, Kohei Kawauchi, Hiroki Kurita, Tomoya Takahashi, Yoshiyuki Oguri, "Development and fabrication of electro-magnetic shock tube with high resolution spectrometer for stopping power measurement in atomic hydrogen gas", 21st International Symposium on Heavy Ion Fusion (Astana, Kazakhstan, 2016/07/18-22, 国際学会)

〔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：
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：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

６．研究組織

(1)研究分担者
研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：
研究者番号（８桁）：

(2)研究協力者
研究協力者氏名：
ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。