

## スタートアップ入門：量子ビーム入門

寺田靖子

### 1 量子ビームとは

量子ビームという呼び名が筆者らの接する分野でよく使われるようになってきたのは2000年前後あたりからと思われる。しかしながら、“量子”と“ビーム”の別個の単語としてはなじみがあると思うが、量子ビームとあわせると頭に疑問符が浮かぶ人も少なくないであろう。この名称の起源は日本と考えられ、放射線という言葉の社会的な負のイメージを避けることと、粒子線や放射線の発生技術の向上が加わったことで生まれた呼称であると推察される。ここで述べる量子ビームでいうところの量子とは、原子そのものやそれを構成している電子や原子核、これを構成する陽子・中性子のほか、光子や電子、ニュートリノ、クォークなどといった素粒子を指している。また、ビームとは指向性と平行性の極めて高い物質の流れのことだとすると、量子ビームとは前述した量子を細く、平行にそろったビームに整えたものであり、幅広い波長を取り扱う各エネルギー線の総称と言える。

本稿では、量子ビームについて非常に簡単ではあるが紹介するとともに、その用途や運用施設などについて概説する。

### 2 量子ビームの種類と日本の量子ビーム施設

前項で述べたように量子ビームとはそれ単体の何かではなく、各種電磁波や粒子線をまとめたものである。それぞれの発生原理や特徴について以下に列記する。

レーザー：レーザー発信器を用いて指向性と収束性に優れたコヒーレント（可干渉性）光を発生させる。可視光はもとより、X線・紫外線などの短波長から赤外線のような長波長の領域においてほぼ単一波長のレーザー光が得られる。

放射光：光速近くまで加速された荷電粒子のシンクロトロン放射によって発生する電磁波である。赤外線からX線～ガンマ線までの幅広いエネルギー領域の電磁波を利用できる。

中性子線：主な線源として、原子炉からの定常中性子線を利用する場合と、陽子ビーム加速器からのパルス中性子線源が挙げられる。

陽子線：陽子すなわち水素イオン（ $^1\text{H}^+$ ）を線形加速器などで加速することにより得られる。高エネルギー

（数 GeV）領域の陽子線は素粒子物理学や中性子の発生源として、中エネルギー（250 MeV 程度）領域ではガン治療などの医学利用に、低エネルギー（数 MeV）領域ではベータ崩壊による放射性核種の生成に利用されている。

イオンビーム：中性粒子から電子を剥ぎ取り+に帯電させたイオンを、電場によって加速させることでビーム化したものである。

重粒子線：一般的には重粒子線とは電子より重いすべての粒子線を指すが、量子ビームの範疇では医学利用に関して重粒子線と呼ぶ場合が多い。炭素、シリコン、アルゴンなどの原子をイオン化し、加速することで重粒子線ビームを生成する。

電子線：陰極となる金属などから熱電子放出により電子を発生させ、電場により加速させることで電子ビームを得る。

ミュオン：500 MeV まで加速した陽子を原子核ターゲットにあててパイ中間子を発生させる。次に、ソレノイド磁石や四重極電磁石でパイ中間子を集める。集められたパイ中間子はミュオンとニュートリノに崩壊するので、このミュオンをビームとして取り出す。

RI ビーム：原子核ビームの中でも、不安定な原子核をビームとして利用するもの。加速した重イオンビームをターゲットとなる原子核に照射して核破砕反応により不安定核を作り、これを選別・分離することで RI ビームを生成する。

このように、量子ビームと呼ばれるものには様々な種類があるが、線源となる粒子線を加速する加速器の存在が不可欠であり、目的とする量子ビームの高エネルギー化や高輝度化を求めていくと、より大型の加速器施設が必要となってくる。そのため敷地面積や予算措置、さらには法令上の観点からも全国各地の大学や研究所などが個別に量子ビーム施設を持つのは困難である。表1は日本の主要な量子ビーム施設の一覧である。この表は文部科学省の Web ページ<sup>1)</sup>を参考にして作成したものである。この表にある通り量子ビームを取り扱う施設は全国に点在しており、ほとんどの施設は共同利用施設として日本あるいは海外の研究者へと開かれた利用形態をとっている。

近年量子ビームの利用が急速に進んだ背景には、表1のような施設数と共に、量子ビーム生成技術の発展が挙

表1 日本国内における主な量子ビーム施設

種類	施設名称	所在地
中性子線・ニュートリノ・ミュオンなど	HUNS	札幌市
	J-PARC	茨城県那珂郡東海村
	JRR-3	茨城県那珂郡東海村
	京都大学複合原子力科学研究所	大阪府泉南郡熊取町
電子線・陽電子線	電子光科学研究センター	宮城県仙台市
	SuperKEKB	茨城県つくば市
陽子線・重粒子線	陽子線医療利用研究センター	茨城県つくば市
	HIMAC	千葉県千葉市
イオンビーム・重イオンビーム	TIARA	群馬県高崎市
	RIBF	埼玉県和光市
	ペレトロン	東京都目黒区
	RCNP	大阪府吹田市
	FFA 加速器	福岡県福岡市
レーザー・X線自由電子レーザー	J-KAREN	京都府木津川市
	激光 XII 号	大阪府吹田市
	SACLA	兵庫県佐用郡佐用町
放射光	PF・PF-AR	茨城県つくば市
	UVSOR	愛知県岡崎市
	AichiSR	愛知県瀬戸市
	立命館大学 SR センター	滋賀県草津市
	New SUBARU	兵庫県佐用郡佐用町
	SPring-8	兵庫県佐用郡佐用町
	HiSOR	広島県東広島市
	SAGA-LS	佐賀県鳥栖市
SLiT-J	宮城県仙台市 (2024 年度稼働予定)	

げられる。その結果、集光素子作製技術の進歩により結像型や走査型などの顕微鏡システムにおいて空間分解能の向上がみられた。フェムト秒レーザーや量子ビームのパルス特性を利用した時分割実験も行われている。放射光での例ではあるが、結像顕微鏡では 150 nm<sup>2)</sup>、X 線を走査するナノプローブスキャナーを用いた X 線顕微鏡では 50 nm<sup>3)</sup> の空間分解能が得られている。これと同時に、量子ビームと試料の相互作用の結果を計測する検出器に関しても高度化が進んでいる。CMOS イメージセンサーのような半導体検出器の登場によりリアルタイムでの 2 次元計測が可能となった。積算型の検出器に関してはダイナミックレンジの向上や検出器後段の計数システムのデジタル化などでミリ秒〜ピコ秒レベルでのデータ取得も実現している。2 次元検出器によるデータ

取得が主流となっていく一方で、限られたマシンタイムにおいて膨大な 2 次元データを転送することがボトルネックになるなど、従来までの量子ビーム実験では起こりえなかった新たな解決していくべき課題もある。

量子ビームの利用は物質の相互作用の結果を調べることだけに限らず、イオンビームを用いた各種微細加工技術による nm レベルでのものづくりや表面改質などに貢献することもできる。また、医学分野では、重粒子線ビームを用いたがん治療も行われている。これは腫瘍組織（がん細胞）で重粒子線の吸収線量が高くなる特性を利用したものである。

このように、非常に簡単ではあるが量子ビームとはどんなものなのかについて言及したつもりである。量子ビームを利用した具体的な研究例については本特集における後続のトピックにお任せしたい。本誌の多くの読者の皆さんは、量子ビーム施設を利用してデータ計測を行っている、あるいは検討していることと思われる。筆者が学位取得に励んでいた 1990 年代後半では量子ビーム（その頃にこの呼称は使われていなかったが）を使うこと自体が貴重であったが、現在では研究遂行のためのツールの一つとなっており量子ビーム利用の拡がりを実感している。今後は複数の量子ビームを用いた実験などでより一層の物理的・化学的事象の解明が進んでいくことであろう。本特集が特に若い研究者の方達にとって、量子ビームの活用へのきっかけとなり、研究の進展に少しでも役に立ってくれることを期待したい。

## 文 献

- 1) 量子ビーム, 文部科学省, [https://www.mext.go.jp/a\\_menu/shinkou/ryoushi/detail/1316008.htm](https://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/ryoushi/detail/1316008.htm), (2021 年 6 月 16 日, 最終確認).
- 2) A. Takeuchi, K. Uesugi, M. Uesugi, H. Toda, K. Hirayama, K. Shimizu, K. Matsuo, T. Nakamura: *Rev. Sci. Instrum.*, **92**, 023701 (2021).
- 3) J. Yamada, I. Inoue, T. Osaka, T. Inoue, S. Matsuyama, K. Yamauchi, M. Yabashi: *IUCr*, **8** (2021), doi: 10.1107/S2052252521007004.



寺田靖子 (Yasuko TERADA)

公益財団法人 高輝度光科学研究センター  
(〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1)。東北大学大学院理学研究科化学専攻博士後期課程修了。博士 (理学)。《現在の研究テーマ》放射光を用いた地球物質史の解明。

E-mail: yterada@spring8.or.jp