

量子ビーム利用の特徴と相補性

量子	質量(MeV)	電荷	エネルギー	物質との相互作用	用途1 : 観る・調べる: 観察・測定		用途2 : 創る・変える: 加工・反応手段		用途3 : 治す: 治療手段		発生源 (例)
					利用例・機能	分解能・精度等	利用例・機能	特徴・加工精度等	利用例・機能	特徴・適用疾患等	
レーザー	0	0	0.1eV ~100 eV(*4)	① 透過	・レーザー顕微鏡 ・レーザーX線顕微鏡 (細胞の生きたままを観察)						<ul style="list-style-type: none"> <li>チタン添加サファイア結晶、半導体、CO<sub>2</sub>ガスなど(*15)の電子エネルギー順位を利用して、電子線や光を照射して発生。</li> <li>自由電子レーザー (FEL) はS極とN極とを交互に配置した磁場中で加速電子を蛇行させてシンクロトロン放射光をだし、この光を光共振器内に閉じ込め、電子ビームと何百回も共鳴的な相互作用をさせることにより光の波長領域のレーザー発振を行う。</li> </ul>
				② 反射、干渉	・材料表面の周期構造 (X線レーザーによる) ・重力波望遠鏡 (マイケルソン干渉計) 測定器						
				③ 励起、電離→原子間結合を切断	・高速の現象 (化学反応、生体での電子や物質の移動現象など) の観測 ・3Dアトムプローブ元素分析 (パルスレーザー照射の補助によって電界蒸発した原子イオンをTOF型質量分析計によってE/M情報付きの電界イオン顕微鏡写真としてとらえる)	・元素分析空間分解能 約5nm	・非熱加工 (リソグラフィ、高精度で飛散物の少ない加工などに利用) (*11) ・レーザーアブレーション加工 (パルスレーザー光を固体表面に照射すると固体構成物質が原子、分子、プラズマ状態となって爆発的に放出される現象を利用して固体表面を加工する方法) (*11)	・金属板の穴あけや切断 ・5nm程度のSiナノ結晶微粒子を製造し、発光素子を作製、	・レーザーメス	・止血効果	
				④ 高強度の場合、ターゲット中で強い電場を誘起、この電場で電子が加速され、さらに電子放出によって強い電界が誘起され陽子や重イオンが加速・放出される					・癌治療用超小型加速器 (レーザー駆動粒子加速)		
				⑤ 物質の波としての性質を利用してレーザー光の波で物質の構造等を操作する (量子制御)	・光散乱法による高分子希薄溶液、分子集合・凝縮系、微粒子分散系などの構造研究、生体分子のサイズ (RMS半径)、分子量、拡散係数、粒子系分布などの測定	・粒子径が数 nm から約 1μm ・100k程度の分子量を持つ生体分子	・特定の化学反応を誘起し、必要な生成物を効率的に得る				
				⑥ 高密度エネルギー輸送			・慣性核融合				
				① 透過	・X線健康診断 ・X線CT (金属中のガスバブルの3次元観測) またはラミノグラフィ (電子基板はんだ接合部のき裂観察) ・屈折コントラストイメージング (有機材料や生体組織のエッジ強調撮像) ・X線吸収量測定から液体密度を決定	分解能: 1μm@SP-8 ビーム径: 5μm@SP-8					
				② 回折	・無機材料の精密構造解析 ・金属の残留応力解析 ・たんぱく質等の構造解析 (C、N、O等の比較的重い元素に敏感; 構造の骨格がわかる。静止水素位置もわかる) ・表面X線回折法、微小角入射X線散乱 (表面構造の解析、薄膜の構造評価) ・X線トポグラフィによる単結晶材料の結晶欠陥観察	エネルギー分解能: ~10 <sup>-4</sup> @SP8 (一般的なビームライン) ・原子位置解析精度: 0.1~0.01pm程度 ・表面又は比較的浅い内部の情報 (残留応力解析では70keV放射光X線により鉄鋼材料深部の観察が可能) ・分子量数万の酸素発生光化学系膜タンパク質に対して分解能1.9Åで構造解析に成功 ・分子量1万程度のHiPIPの場合、分解能は0.48Åに至った。 ・微小角入射X線散乱では数nmの純鉄不導体皮膜の評価を行なった例がある					
				③ 反射	・反射率測定 (膜厚、膜密度や膜構造の解析、表面粗さ測定)						

X線 放射光	0	0	数eV ~100 keV	④ 弾性散乱	<ul style="list-style-type: none"> <li>・小角散乱による高分子の構造解析</li> <li>・X線光子相関分光法（誘電体ドメインゆらぎなど材料の構造の運動性を評価）</li> <li>・2体相関分布関数（PDF）法（短～中距離（約1~200 Å程度）レンジの構造解析</li> <li>・X線タイコグラフィ（XPG）（薄い試料や生体軟組織の内部構造イメージング）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・例えば、5 μmビームを使って直径50 μm毛髪をスキャンし、得られた小角散乱データから毛髪構成タンパクフィラメントの配列を研究した例がある。</li> <li>・高分解能XPGでは分解能10nm程度@SP8</li> </ul>					<ul style="list-style-type: none"> <li>・X線は、一般に電子を金属ターゲットに照射して発生。</li> <li>・放射光は光速に近い速度を持つ電子の軌道が磁場で曲げられる時に発生</li> <li>・光共振器が使えないX線自由電子レーザー（XFEL）ではシングルショットでレーザー増幅利得が得られるよう、低エミッタンスで高輝度の電子ビームと十分な長さのアンジュレータ（S極とN極とを交互に配置した磁場）を用いる。LCLS, SACLAなど。</li> <li>・X線レーザーは高出力レーザーを金属表面に照射して発生。</li> <li>・ERLによる電子バンチとレーザー光の逆コンプトン散乱によるX線発生も研究されている。</li> </ul>
				⑤ 非弾性散乱	<ul style="list-style-type: none"> <li>・コンプトン散乱（固体中の電子運動量分布の測定）</li> <li>・磁気コンプトン散乱（スピン磁気モーメントの定量測定）</li> <li>・共鳴非弾性X線散乱（RIXS：電子励起や電子状態の観測）</li> <li>・非弾性X線散乱（IXS：電子励起、結合状態、フォノンや物質の動的構造の観測）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・コンプトン散乱や磁気コンプトン散乱では100keV以上の高エネルギーX線を利用</li> <li>・エネルギー分解能は放射光ビームラインや装置による。SP8では最高でmeVオーダー</li> </ul>					
				⑥ 光電離、光電効果	<ul style="list-style-type: none"> <li>・光電子分光（元素の電子構造）</li> <li>・光電子イメージング（光電子ホログラフィや光電子顕微鏡；物質中の原子の結合状態を3次元的に観測）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・硬X線光電子分光（HAXPES）では固体内部の電子状態の観測が可能</li> <li>・角度分解光電子分光（ARPES）ではバンド構造やフェルミ面の詳細を測定</li> <li>・光電子顕微鏡（PEEM）はスピンの向きを空間分布を調べられる。空間分解能は20数nm@SP8</li> </ul>	・リソグラフィ	解像度70nm			
				⑦ 励起、吸収（元素に特有：元素の種類に応じて異なるエネルギーのX線などを放出）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・微量元素分析（XRF蛍光X線分析）</li> <li>・EDS（X線誘起特性X線分光）による数cmバルク元素分析</li> <li>・X線吸収微細構造解析（XAFS）による着目元素の局所構造（EXAFS）や価数、配位構造等（XANES）の決定</li> <li>・磁気円二色性測定（MCD）による元素選択的磁気状態研究</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Lab. X線なら、0.1%程度の組成を分析可能、1~2mm程度のビーム径</li> <li>・SRなら、非破壊的にppm以下の微量元素を分析、μm以下の領域</li> <li>・SRではマイクロビーム（&lt;1 μm）を用いた走査型X線顕微鏡により、左記情報の空間分布が得られる。100nm以下のナノビームによる観測も可能@SP8</li> </ul>					
				⑧ 励起、電離→原子間結合を切断			・軟X線「分子メス」（内殻電子励起）によるサイト選択的な化学結合切断			<ul style="list-style-type: none"> <li>・バリアン社では1.3mLINACで加速した電子（4~23MeV）をターゲットに照射し、X線（4~22MeV）を発生させる。三菱重工業ではCバンド小型電子リニアック（長さ：30cm、重量10kg）を使って、O-ring型ガントリーを実現し、患者を動かすことなく強度変調放射線治療、動物追尾、X線線照射精度誤差0.1mmを達成。</li> </ul>	
				⑨ 核励起	<ul style="list-style-type: none"> <li>・放射光メスbauer分光法（放射性同位元素の利用が困難な元素に対するメスbauer分光）</li> <li>・核共鳴非弾性散乱（物質の格子振動と電子状態の観察）</li> </ul>						

ガンマ線	0	0	数10 keV ~2.4 GeV(*5)	① 透過	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 厚み計 (紙、フィルム等)</li> <li>・ 非破壊検査 (溶接部検査、航空機エンジン検査、建築物など)</li> <li>・ 核医学診断 (ガンマカメラ、SPECT、PETなど)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ <math>^{60}\text{Co}</math>, <math>^{125}\text{Ra}</math>などの線源から出るガンマ線または加速器から得られるガンマ線を照射して試験体の透過像を撮る。分解能：約</li> <li>・ 患部に集積した<math>^{99\text{m}}\text{Tc}</math>などから放射されるガンマ線をガンマカメラ、SPECTで計測して画像診断に利用</li> <li>・ <math>^{18}\text{F}</math>-BPA, <math>^{18}\text{F}</math>-FDGを使ったPET診断では<math>^{18}\text{F}</math>の陽子が中性子に変わり陽電子と電子ニュートリノを放出し、陽電子はまわりの陰電子と対消滅してガンマ線を2個180度方向に放出したものを検出。</li> </ul>						<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 原子炉または陽子サイクロトンなどによって製造された放射線核種自身からγ線を出す。</li> <li>・ 加速器により6 MV, 9 MVのエネルギーを持つγ線を出してCT解析に提供する企業もある。</li> </ul>
				② 励起、電離→原子間結合を切断	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 半導体素子や高分子材料等の劣化評価 (原子力、核融合、宇宙用)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 高分子合成・架橋と崩壊 (燃料電池膜、有用・有害金属捕集材、生分解性プラスチック、ラジアルタイヤゴム等)(*12)</li> <li>・ 品種改良 (イネ等；ガンマフィールド)</li> <li>・ 食品照射 (ジャガイモの芽止めなど)</li> <li>・ 医薬品の滅菌</li> <li>・ 害虫駆除 (ウリミバエの不妊化等)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 原子炉で製造した<math>^{60}\text{Co}</math>線源などを使う。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 癌治療・検査 (医療用RI線源)</li> <li>・ 脳腫瘍等の治療 (ガンマナイフ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ <math>^{131}\text{I}</math>(甲状腺癌治療)、<math>^{99\text{m}}\text{Mo}</math>崩壊生成物の<math>^{99\text{m}}\text{Tc}</math>(骨・がん・心筋検査), <math>^{81}\text{Rb}</math>崩壊生成物<math>^{81\text{m}}\text{Kr}</math>(肺換気検査)、<math>^{201}\text{Tl}</math>(心筋血流検査)等を利用。<math>^{99\text{m}}\text{Tc}</math>-MDP, <math>^{99\text{m}}\text{Tc}</math>-HMDP, <math>^{99\text{m}}\text{Tc}</math>-sestaMIBIのような患部に結合する薬剤開発が重要。<math>^{192}\text{Ir}</math>を封入して低線量率の針状線源とし、口腔内、舌、咽頭、食道などにできたがん治療に利用。</li> <li>・ 200程度の<math>^{60}\text{Co}</math>の線源を頭の形状に並べ、これらの線源を精密に制御して脳病変部にピンポイントでガンマ線を集中照射する (精度：0.2~0.5mm程度)。個々の線源からのガンマ線は細く弱い。病変部は大きな線量となり、効果を上げることができる。</li> </ul>			
				③ 光核反応 (逆コンプトンγ線の場合)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 素粒子の内部構造(*5)</li> </ul>							
ニュートリノ (ν)	?	0	数MeV ~数GeV	① 透過	ほとんど相互作用をしないで物質を透過。						<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 加速器 (陽子) ターゲットからの2次粒子として；超新星の爆発</li> </ul>	
				② 種々の崩壊様式	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ニュートリノ振動(νμ→ντ)を観測→νに質量があるか？ (質量、宇宙創生の起源の探索、素粒子物理の標準理論の見直し)</li> </ul>							
電子(e)	0.511	-e	数eV ~101 GeV(*6)	① 反射、透過	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 電子顕微鏡</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ TEM, SEM</li> <li>・ 空間分解能：XX nm</li> </ul>					<ul style="list-style-type: none"> <li>・ フィラメントからの熱電子放出</li> </ul>	
				② 回折	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 表面原子配列</li> <li>・ 結晶構造解析：回折パターンによる結晶対称性の解析、</li> <li>・ EBSDによ結晶粒の精密結晶方位解析、結晶粒界解析、結晶相分布解析 (材料の塑性加工特性の研究、応力腐食割れ感受性の研究などへの利用)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ EBSDによる結晶粒サイズ：10nm程度</li> </ul>						
				③ 弾性散乱、非弾性散乱	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ EELS (電子の非弾性散乱) による電子構造や結合の解析表面電子状態</li> </ul>	エネルギー分解能：						
				④ 励起、電離 (元素に特有：元素の種類に応じて異なるエネルギーのX線などを放出)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ EDS (電子線誘起特性X線分光) による10μm表面元素分析,</li> <li>・ AES(電子誘起オージェ電子分光)による表面元素分析,</li> </ul>							
				⑤ 励起、電離→原子間結合を切断	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 半導体素子や高分子材料等の劣化評価 (原子力、核融合、宇宙用)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ リソグラフィ、集積回路製造 (電子ビーム描画)</li> <li>・ 高分子合成・架橋と崩壊 (燃料電池膜、有用・有害金属捕集材、生分解性プラスチック、ラジアルタイヤゴム等)(*12)</li> <li>・ 電子線不融化 (SiC繊維、マイクロチューブ製造)</li> <li>・ 有害物質分解除去 (排煙中の硫黄・窒素酸化物、ダイオキシン等)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 癌治療 (電子線をターゲットに照射しX線に変換して用いる)</li> </ul>					
				⑥ 電子-陽電子衝突	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 素粒子物理</li> </ul>							

陽電子(e <sup>+</sup> )	0.511	+e	meV ~101 GeV(*6)	① 反射、透過 ・ 結晶構造解析 (透過型陽電子顕微鏡、陽電子チャネリング) ・ 表面欠陥解析 (陽電子再放出顕微鏡) ・ 元素組成・化学結合状態解析 (PELS:陽電子エネルギー損失分光)							
				② 回折 ・ 表面第1層の原子配列決定 (TRHEPD: 全反射高速陽電子回折、ポジトロニウム回折) ・ 表面の原子配列決定 (LEPD: 低速陽電子回折)							
				③ 電子と対消滅 ・ 欠陥構造解析* (PALS: 陽電子寿命測定) [*:原子空孔 (結晶格子から原子が抜けた孔)、ナノ欠陥、転位、自由体積、微量元素、活性種など] ・ 電子構造解析* (2D-ACAR: 2次元消滅γ線角度相関測定、CDB: 陽電子消滅同時計数ドップラー拡がり測定) [*:電子運動量密度分布、バンド構造、フェルミ面、微量元素による構造欠陥など] ・ 表面第1層の元素分析 (PAES: 陽電子消滅誘起オージェ電子分光) ・ 高分子などの構造解析 (陽電子励起質量分析*) [*:対消滅及びポジトロニウム形成により低エネルギーでイオン化・切断ができる] ・ PET (ポジトロン・エミッション・トモグラフィ)	・ 欠陥解析では、原子1個の抜けた孔からナノサイズの構造欠陥まで検出可能。また、ppb以下の微量欠陥、微量元素を検出可能。(原子炉圧力容器脆化機構の解明等に利用) ・ 表面解析では、最表面 (表面第1層) の原子配列決定、電子状態解析、元素分析が可能。 ・ <sup>18</sup> F-BPA, <sup>18</sup> F-FDGを使ったPET診断など( <sup>18</sup> Fの陽子が中性子に変わり陽電子と電子ニュートリノを放出。陽電子はまわりの陰電子と対消滅して光子を2個180度方向に放出。) 検出位置分解能: 1mm程度	・ 突然変異機構解明など (低速陽電子照射によるDNA切断)	・ 対消滅を利用して低エネルギーで原子・分子をイオン化できる (~meV)。	・ β+エミッターによる診断 (消滅γ線による患部位置検出)・治療 (β線によるDNA切断) 同時利用	・ 腫瘍、がん	・ 市販線源 ( <sup>22</sup> Na等) のβ <sup>+</sup> 崩壊 ・ 加速器 (電子) ターゲットでの電子・陽電子対生成 ・ サイクロトロンや原子炉等を用いて生成したβ <sup>+</sup> エミッターのその場利用	
				④ 電子-陽電子衝突 ・ 素粒子物理 (対称性の破れなど) ・ 宇宙物理 (ビッグバン模擬)							
				⑤ 水素様原子形成 ・ 素粒子物理 (反水素*創生、量子電磁力学検証) [*:反陽子-陽電子] ・ 最表面電子状態解析 (Ps-TOF: ポジトロニウム*飛行時間分光) [*:電子-陽電子]							
ミュオン	105.66	±e	・ 0.2eV ~50 MeV(加速器) ・ 数GeV(宇宙線)	① 透過 ・ 宇宙線ミュオンラジオグラフィ (ピラミッドの内部、溶鉱炉の内部、火山内部、福島第1原発の溶融核燃料の計測など)	分解能: 最小10cm程度						
				② 回折 ・ 透過型顕微鏡 (開発中)							
				③ 磁気的相互作用 (スピン偏極ミュオンの利用 (μSR法)) ・ 静的および動的磁性 ・ 局所磁場の大きさとゆらぎ ・ 超伝導状態の解明 (磁場侵入長、時間反転対称性の破れ、スピン対称性、磁性との共存融合) ・ 一次元鎖における電子伝達	・ 磁場1μT-10T ・ ゼロ磁場測定可能 ・ 観測時間窓MHz-GHz ・ 打ち込み深さ可変 (表面近傍でnm分解能)						・ 地表に届く宇宙線の中に多く存在 ・ 加速器 (陽子) のグラファイトターゲットから出るπ中間子が崩壊して生成されるので、2次粒子として取り出す
				④ 水素様原子形成 ・ 半導体や誘電体での水素不純物による性能劣化機構解明							
				④ 負ミュオン原子形成 ・ ミュオン特性X線による非破壊元素分析	・ 非破壊で内部の分析 ・ 打ち込み深さ可変 (分解能μm)	・ ミュオン触媒核融合によるエネルギー生産	・ 低温でも起こる核融合 ・ 実用化に向けての研究が進行	・ 骨粗鬆症の診断等の試みがある。			
				⑤ 種々の崩壊様式 ・ 素粒子物理 (稀崩壊の探索と超対称性)							
				⑥ 素粒子としてのミュオン ・ 素粒子物理 (異常g-2値、超微細構造定数、EDM探索など)							

中間子 (K <sup>±</sup> )	493.68	±e	220 MeV ~1.6 GeV	① 種々の崩壊様式	<ul style="list-style-type: none"> <li>CP対称性の破れ（なぜ粒子と反粒子の数に大差があるのか？）の検証</li> <li>質量、宇宙創生の起源の探索</li> </ul>				<ul style="list-style-type: none"> <li>バイ中間子による癌治療が検討されたことがある</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>加速器（陽子）ターゲットからの2次粒子として</li> </ul>	
中間子 (B <sup>±</sup> )	5279	±e	数GeV	① 種々の崩壊様式	<ul style="list-style-type: none"> <li>CP対称性の破れ（なぜ粒子と反粒子の数に大差があるのか？）の検証（B<sup>+</sup>とB<sup>-</sup>の崩壊時間の差を検出）①</li> </ul>					<ul style="list-style-type: none"> <li>エネルギーの異なる高エネルギー電子と陽電子との衝突</li> </ul>	
陽子	938.27	+e	keV ~0.98 TeV(*7)	① 透過	<ul style="list-style-type: none"> <li>結晶構造解析（チャネリング）(*10)</li> <li>陽子線ラジオグラフィ</li> <li>表面近傍元素の深さ分布（RBS：ラザフォード後方散乱）(*10)</li> </ul>					<ul style="list-style-type: none"> <li>水素ガスを電離させて発生させた水素イオンを加速</li> </ul>	
				② 弾性散乱、非弾性散乱	<ul style="list-style-type: none"> <li>陽子線ラジオグラフィ</li> <li>表面元素分析（SIMS：2次イオン質量分析）(*10)</li> <li>表面近傍元素の深さ分布（RBS：ラザフォード後方散乱）(*10)</li> </ul>						
				③ 励起、電離（元素に特有：元素の種類に応じて異なるエネルギーのX線などを放出）	<ul style="list-style-type: none"> <li>細胞等の微小な領域の微量元素分布（PIXE：粒子線誘起X線放出）(*10)</li> </ul>						
				④ 励起、電離、弾き出し	<ul style="list-style-type: none"> <li>半導体素子の劣化評価（宇宙用、地上用）</li> <li>材料損傷評価</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>癌治療（ブラッグピークの活用によって体内病変部に集中的にエネルギーを放出し、病変部細胞を殺す）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>イオン源装置で水素分子から陽子を取り出し、シンクロトロンで光速の60%程度まで加速し、治療部（ガントリー）で患者の腫瘍に合わせて360°どの方向からも陽子線を当てることができる。</li> </ul>		
				⑤ 核反応	<ul style="list-style-type: none"> <li>半導体素子の劣化評価（宇宙用、地上用）</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>ADS：加速器駆動核変換（長寿命核種の短寿命化）(*13)</li> <li>PET診断用RIや放射性薬剤等の製造(*14)</li> </ul>				
				⑥ 陽子-（反）陽子衝突	<ul style="list-style-type: none"> <li>素粒子物理</li> </ul>						
中性子	939.57	0	meV (冷中性子) ~数100MeV (高速中性子) (*8)	① 透過	<ul style="list-style-type: none"> <li>中性子ラジオグラフィ（植物内の物質移動や燃料電池等機器・エンジン内部の構造・動作状況の非破壊観察）</li> </ul>	空間分解能：30μm@JRR-3 100μm@J-PARC 動画時間分解能：0.5ms@JRR-3				<ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉内でのウラン核分裂による中性子、加速器（陽子、重陽子、イオン）ターゲット（Li, Be, Hgなど）からの2次粒子としての中性子、<sup>252</sup>Cf, <sup>124</sup>Sb-Beからの自発核分裂中性子や<sup>241</sup>Am-Beでの(α, n)反応による中性子</li> </ul>	
				② 回折	<ul style="list-style-type: none"> <li>たんぱく質、メタンハイドレート、燃料電池材料等の構造解析や他の分子との結合場所の同定（Hやプロトンの位置に敏感。Li等の比較的軽い元素に敏感。）</li> <li>リチウムイオン電池材料の構造解析（Li原子位置やMo, Co, Ni原子の混合状態に敏感。）</li> <li>構造物の残留応力解析</li> <li>水素吸蔵合金の水素結合状態解明</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>分解能：0.01nm程度、単性格子長：a,b,c=最大13.5nm程度</li> <li>Δd/d=0.016%@SHRPD</li> <li>応力分解能：30MPa(Fe), 10Pa(Al)、空間分解能：約1mm<sup>3</sup></li> </ul>					
				③ 小角散乱・全散乱	<ul style="list-style-type: none"> <li>小角散乱S(q)測定による高分子の構造解析</li> <li>全散乱S(q)測定による結晶構造の乱れや非晶質構造の解析</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>空間スケール：1nm-10μm、波数分解能：Δq/q=10%程度</li> <li>PDF解析によって原子間距離、配位数を解析。</li> </ul>					
				④ 反射	<ul style="list-style-type: none"> <li>反射率測定による膜構造解析・界面構造解析</li> </ul>						
				⑤ 準弾性散乱、非弾性散乱	<ul style="list-style-type: none"> <li>格子振動、磁気励起、結晶場等の動的解析</li> <li>超伝導等の機構解明（磁気的ゆらぎ観測・エネルギーギャップ観測）</li> <li>半導体磁気デバイス構造解明</li> <li>水素吸蔵合金の水素結合状態解明</li> <li>高分子・生体構造等の動的観察</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>エネルギー分解能：約0.1meV</li> <li>振動モード解析による水素結合相手元素の同定</li> <li>エネルギー分解能：約neV</li> </ul>					
				⑥ 磁気的相互作用	<ul style="list-style-type: none"> <li>磁性体の磁気スピン構造と相関運動の解明</li> <li>超伝導等の機構解明（磁気的ゆらぎ観測）</li> <li>半導体磁気デバイス構造解明</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>500meV程度の鉄マグノン励起測定からmeV程度の励起</li> </ul>					
				⑦ 弾き出し	<ul style="list-style-type: none"> <li>半導体素子の劣化評価（宇宙用、地上用）</li> <li>材料照射（原子力材料損傷評価）</li> </ul>						

				⑧ 核反応・核変換（放射化）	<ul style="list-style-type: none"> <li>放射化元素分析(NAA)</li> <li>即発γ線分析(PGA)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>NAAでは小片にして原子炉炉心を通す必要があるが、ppm~ppt領域の微量元素の分析が可能</li> <li>PGAでは非破壊的にppb~%範囲の微量元素を分析、最小でmm程度の領域</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>シリコンドーピング（パワーデバイス用のシリコン半導体製造）</li> <li>長寿命放射性核種の短寿命化のための核変換</li> <li><sup>99</sup>Mo等の医療・診断用放射線源の製造</li> <li>工業用・医療用アイソトープ（<sup>192</sup>Ir等）の生産</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><sup>30</sup>Si(n,γ)<sup>31</sup>Si、&gt;&gt;<sup>31</sup>P 反応を使い均一で高い濃度制御が可能</li> <li>超寿命核（<sup>99</sup>Tc,<sup>129</sup>I）・MA (Np,Am,Cm)の半減期の万年オーダーを千年オーダーの元素に換える</li> <li>原子炉では<sup>235</sup>U+n→<sup>99</sup>Mo + <sup>137</sup>Sn（核分裂法）、<sup>98</sup>Mo(n,γ)<sup>99</sup>Mo（中性子放射化法）、加速器では<sup>100</sup>Mo(n,2n)<sup>99</sup>Moの反応を利用。崩壊生成物<sup>99m</sup>Tcを骨・がん・心筋検査に利用</li> <li>Irを原子炉で熱中性子照射して<sup>192</sup>Irを製造する。工業用では、放出される0.37MeVのガンマ線を厚みが比較的薄い検査物体のラジオグラフィに利用する。医療用では口腔内、舌、咽頭、食道などにできたがん患部に利用される低線量率の治療用線源として利用。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>がん治療（BNCT：ホウ素中性子捕捉療法による脳腫瘍・皮膚がん等の治療）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>核反応により放出されるアルファ粒子の飛程距離（約10μm）以内にあるがん細胞を損傷する</li> </ul>	
軽イオン～重イオン  (研究分野によって定義が異なる。医学・バイオ分野では炭素以上のイオンを重イオンと分類)	He(A~4) ~ Bi(A~209)  質量は、およそ931.5×(質量数) MeV	-e(*1) ~+e(*2) ~+Ze(*3)	数10 eV ~ 0.1 TeV/核子(*9)	① 透過（直進性が良い）	・ チャネリング、SIMS, RBS, PIXE (*10)		・ 孔あけ（高耐久性水素燃料電池膜等）				
				② 弾性散乱、非弾性散乱	<ul style="list-style-type: none"> <li>チャネリング、SIMS, RBS, PIXE (*10)</li> <li>水素等軽元素の深さ分布解析（ERDA：反跳原子解析）</li> </ul>						
				③ 励起、電離（元素に特有：元素の種類に応じて異なるエネルギーのX線などを放出）	・ チャネリング、SIMS, RBS, PIXE (*10)						
				④ 励起、電離、弾き出し（局所的に大きなエネルギーを付与）	<ul style="list-style-type: none"> <li>半導体素子の劣化評価（宇宙用）</li> <li>年代測定（炭素14原子の崩壊によるベータ線の検出、または加速器質量分析(AMS)による炭素14原子の直接定量分析）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>孔あけ（高耐久性水素燃料電池膜等）</li> <li>新規有用遺伝子資源創出（新品種花卉、環境耐性植物等；突然変異誘発率が高い）</li> <li>DNA二重鎖切断（損傷修復機構解明）</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>癌治療等（ブラグビークの活用によって体内病変部に集中的にエネルギーを放出し、病変部細胞を殺す）(#2)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>イオン源装置で炭素原子をイオン化し、LINACとシンクロトロンで光速の84%程度まで加速し、治療部（ガントリー）で患者に照射できる。炭素イオンエネルギー：130~400MeV、物理線量率：2Gy/min(RBEを考慮すると4.8GyE/min)</li> </ul>		
				⑤ 物質注入（エネルギーを変えることにより、撃ち込む深さを制御できる）			・ イオン注入（半導体製造等）		・ 血管再狭窄予防（ <sup>133</sup> Xeイオン注入ステント）		
				⑥ 核反応（異なる元素に変換）			<ul style="list-style-type: none"> <li>ポジトロン（陽電子）放出核種生成→ポジトロンイメージング（植物中の物質動態解明やPET診断など）</li> <li>超重元素合成(#1)</li> </ul>				

A：原子量、Z：原子番号

\*1：原子に1個電子が付着した状態（負イオン）。\*2：原子から1個電子を剥ぎ取った状態。\*3：原子からすべての電子を剥ぎ取った状態（フルストリップイオン）。

\*4：半導体レーザー等では0.1~数eV、自由電子レーザー(FEL)では~数10 eV、X線レーザーでは~100 eV。

\*5：本来的には原子核から放出される光子をガンマ線と呼び、エネルギーは数MeVまで。ただし、電子と陽電子とが対消滅して放出される光子も消滅γ線と呼び、また、高エネルギー電子とレーザー（光子）を正面衝突させ、光子が電子からエネルギーをもらうことによって得られる高エネルギー光子を逆コンプトンγ線と呼ぶ。SPRING-8を使って得られた2.4 GeVの逆コンプトンγ線を水素を含むターゲットに照射することによって、ペンタクォーク（5つのクォークから成る新素粒子）が発見された。

\*6：101 GeVはCERNのLEPで達成。

\*7：0.98 TeVはFermilabのTEVATRONで達成（2007年にはCERNのLHCで7 TeVを予定）。

\*8：LANLのWNR、(800MeV)あるいはPSIのSINQ（590MeV）で材料照射が実施されている。入射陽子エネルギーと同等の最大中性子エネルギーを有するスペクトル場を形成。

\*9：0.1 TeV/核子はBrookhavenのRHICのAuイオンで達成（2008年にはCERNのLHCのPbイオンで2.76 TeV/核子を予定）。

\*10：Heなどの軽イオンを使うこともある。

\*11：極短パルスであれば蒸発で発生する熱が周囲に伝わるよりも早く加工が終了し、加工させようとしたところ以外に熱の影響を与えない。材料に熱の影響を与えない加工方法。

\*12：γ線や電子線を高分子に照射すると励起・電離により原子間の結合が切れて自由な結合手ができる。側鎖が切れて結合同士が結びつくと架橋（橋かけ）が起こり高分子は硬く強くなる。また、自由な結合手に他の分子が結びつくとグラフト（接木）が起こり新たな機能が付与される。例えば、結びつく分子が導電性の場合には電池用の電解質膜が、金属と親和性のある場合は金属捕集膜ができる。大体において、かさのある材料を対象とする場合は透過性の高いγ線が、薄物や表面だけを対象とする場合は電子線がそれぞれ使われる。主鎖が切れると分子の崩壊に至る。

\*13：陽子を一次粒子として核破砕反応で中性子を生成し、中性子増倍系を形成して中性子核反応による核変換する。

\*14：PET用RIの生成では、<sup>18</sup>O(p,n)<sup>18</sup>F反応によりフッ素18を生成し、FDG（フルオロデオキシグルコース）を標識。

\*15：チタンを極わずが添加したサファイア結晶や半導体、CO2などのガス媒体。

#1：理化学研究所では放射性同位元素(RI)のイオンを加速（RIビームファクトリー）。 #2：放射線医学総合研究所のHIMACなど。

参考：この表は、RADA前理事長の岡田淑平が作表したもの（岡田淑平、原子力eye、Vol.52,No.8(2006)、pp.2-7）を下敷きとし、RADA森井幸生、石井慶信が原表の”物質との相互作用”および”利用例・機能”を再整理したうえで、新項目としてその”分解能・精度等”を追加したものである。その後更に、量子科学技術研究開発機構小西啓之氏、片山芳則氏、綿貫徹氏、日本原子力研究開発機構熊本亘氏、榎千代田テクノル岡田淑平氏、RADA澤井友次氏の協力を得て改訂した。（2017.5-12）