

衝突する原子

東 俊行 (Toshiyuki Azuma)

東京都立大学 理学研究科物理学専攻 原子物理

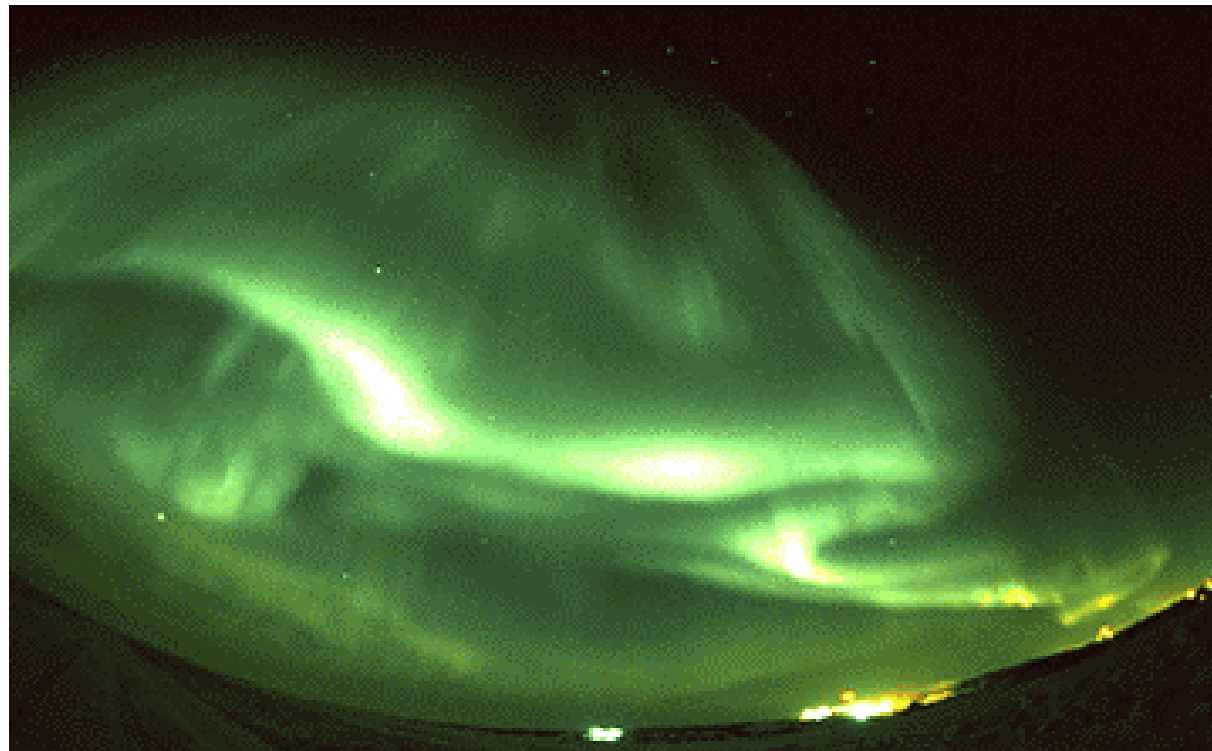
イントロダクション

- 物質というものがすべて、原子核の周りを取り囲む原子から構成されている。自然現象の多くは、**原子や分子と光、電子、イオン**，あるいは原子同士の衝突によって引き起こされる。
- 原子物理学の最前線では、極限状態におけるこれらの衝突現象が研究されています。都立大学の原子物理研究室では、**低エネルギー(ミリ電子ボルト)から高エネルギー(100億電子ボルト)**にわたる**多価イオン**(原子からたくさんの電子をはぎ取ったイオン)と**電子、原子、分子、表面、結晶との衝突実験**，さらに極低温(4 ケルビン)のイオンと原子の衝突から作り出される**クラスターイオンの実験**が進められています。
- これらの研究成果は、新しいレーザー開発，宇宙・核融合プラズマ，宇宙空間での分子生成，イオンビーム工学等の関連分野で応用されています。
- 今回は、その一端を、実験装置がひしめく研究室の見学と併せて、身近な自然現象から宇宙空間での現象を織り交ぜ、わかり易く紹介したいと思います。

オーロラ

プラズマと磁気圏で加速された荷電粒子(電子, 陽子)と N_2 , O_2 , O との衝突

JSTバーチャル科学館
JST Virtual Science Center



ex. $\text{N}_2^+(\text{B}_2 \text{S}_u^+)$ からの発光 427.8nm

原子の構造 (高校で)

2—原子と原子核

ミクロの世界である原子、原子核、素粒子の世界はどうなっているのだろうか。



ボーア

1. 原子の構造

a. [ラザフォードの原子模型] 「物理IB」で学んだように、ラザフォードらの研究によって、原子番号 Z の原子の中心には、正電荷 Ze をもった質量が大きくきわめて小さな原子核があり、そのまわりを Z 個の電子がまわっていることがわかった。

ところが、この原子模型には次のような重大な困難があった。水素原子の場合を考え、質量の大きな陽子は動かないとし、そのまわりを質量 m (kg) の電子が半径 r (m) の円軌道上を速さ v (m/s) で運動するとしよう。運動方程式

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (3\cdot17)$$

から、運動エネルギーと電気力による位置エネルギーの和である電子のエネルギー E (J) は、

$$E = \frac{mv^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r} \quad (3\cdot18)$$

となる。また、円運動の角速度 $\omega = \frac{v}{r}$ [rad/s] は、式3・17から、

$$\omega = \sqrt{\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 mr^3}} \quad (3\cdot19)$$

で与えられる。

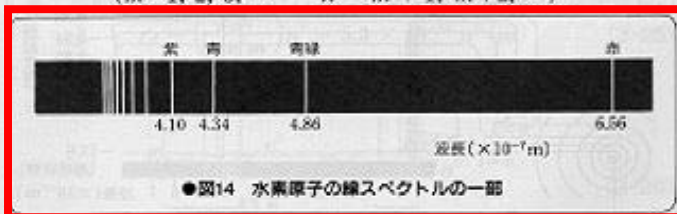
空气中で物体が振動すると、同じ振動数をもった音波が発生すると同じように、電子のような荷電粒子が円運動すると、同じ振動数をもった波、この場合は電磁波が放射される。電磁波の放射でエネルギーを減らした電子の軌道半径 r は、式3・18によりだんだん小さくなり、やがて原子核に落ちこんでしまうことになる。また、式3・19により、放射される光の振動数も変化し、連続スペクトルが観測されるはずである。

しかし、実際の水素原子は、安定で、定まった大きさを持ち、低温の水素は光を出さず、高温の水素が放射する光は線スペクトルである。ラザフォードの原子模型はこのような矛盾を含んでいた。

b. [原子の定常状態] ラザフォードの原子模型がもつ説明困難な点である電磁波の放射による不安定性は、1913年、ボーアによって解決された。このころまでに、バルマー、ライマン、パッシェンらによって、高温の水素の放射する可視光線、紫外線、赤外線、の線スペクトルの波長 λ (m)、振動数 ν (Hz) が、次のような簡単な規則に従うことが知られていた (図14)。

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (3\cdot20)$$

$$(m=1, 2, 3, \dots \quad n=m+1, m+2, \dots)^{1)}$$



●図14 水素原子の線スペクトルの一部

1) 1885年、バルマーは可視光線の線スペクトルの波長が式3・20の $m=2$ の場合に与えられる式で表されることを発見したので、この一連のスペクトルをバルマー系列という。なお、 $m=1$ の系列をライマン系列 (紫外線)、 $m=3$ の系列をパッシェン系列 (赤外線) という。

原子の構造 (高校で)

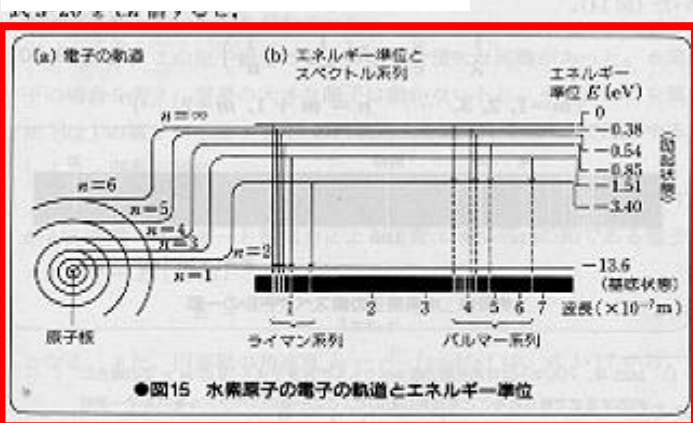
ここで、 R はリュードベリ定数とよばれ、

$$R = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1} \quad (3\cdot21)$$

である。この関係に注目したボーアは、振動数の光が物質によって吸収・放射されるときにはエネルギー $E = h\nu$ の光子として振る舞う事実と、原子と光のエネルギーの和は保存されることから、次のような仮説を提唱した。

- (1) 原子中の電子は、どのような値のエネルギーでももち得るのではなく、**定常状態**という、とびとびのエネルギーの状態だけをとることができる。とびとびのエネルギーの値を**エネルギー準位**とよび、エネルギーが最小の状態を**基底状態**、それ以外の状態を**励起状態**という。
- (2) 電子が一定の定常状態にあるときは、原子は光を放射しない。電子が高いエネルギー準位 E_n から低いエネルギー準位 E_m に移ると放射する (図 15 参照)。

ボーア模型



$$h\nu = \left(-\frac{hcR}{n^2} \right) - \left(-\frac{hcR}{m^2} \right)$$

となるから、式 3・22 と比べて、エネルギー準位は、

$$E_n = -\frac{hcR}{n^2} = -\frac{13.6}{n^2} \text{ (eV)} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (3\cdot23)$$

で与えられる。

- 5) ボーアの理論では、基底状態より低いエネルギーの状態はない。したがって、基底状態にある原子は光を放射できないので安定である。

低いエネルギー E_m の定常状態にある原子は、振動数 $\frac{E_n - E_m}{h}$ の光を吸収して、高いエネルギー E_n の定常状態に移ることができる。この場合には、吸収スペクトルが現れる。

- 10) C. [水素原子のエネルギー準位] ボーアは水素原子のエネルギー準位 (式 3・23) を、以下のような推論で導いた。

- (1) 電子は陽子を中心とする円軌道上を運動する。
- (2) 電子の軌道半径 r と、運動量 $p = mv$ が次の条件を満たすときだけ、定常状態になる。

$$2\pi r = \frac{nh}{p} = \frac{nh}{mv} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (3\cdot24)$$

原子半径: $\sim Z^{-1}n^2 (M/m)^{-1}$

束縛エネルギー: $\sim Z^2(M/m)/n^2$

M: 換算質量

式 3・18 により、量子数 n の軌道にある電子のエネルギーは、

$$E_n = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r_n} = -\frac{mc^2}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2} = -\frac{13.6}{n^2} \text{ (eV)} \quad (3\cdot26)$$

- 1) これは、軌道の円周が後にド・ブロイが提唱した電子波の波長 $\lambda = \frac{h}{p}$ の整数倍になり、円周にそって定常化ができる条件となっている。

光（高校で）

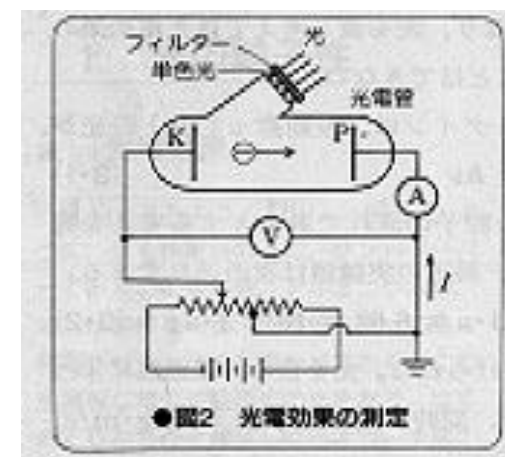
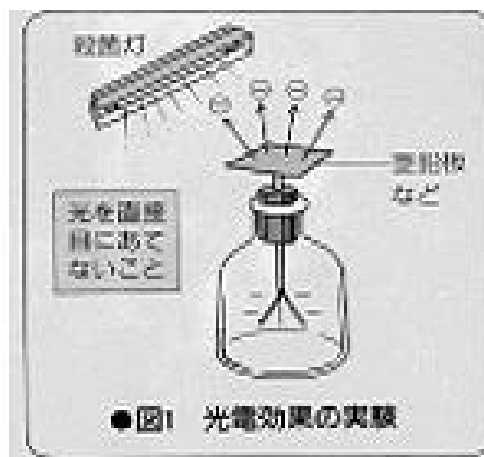
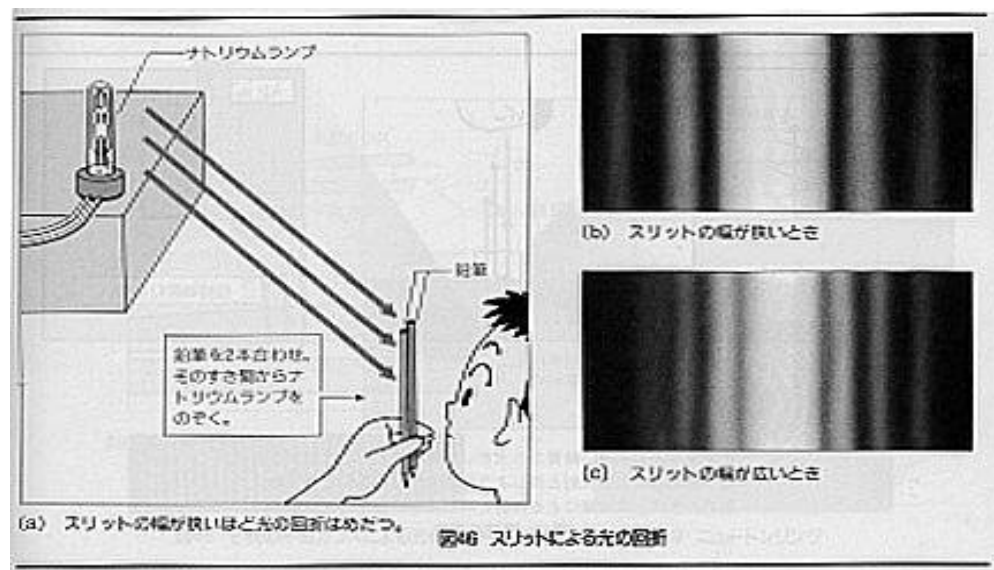
光の二重性

波（電磁波）

- 反射/屈折
- 回折
- 干渉

粒子（光子）

- 光電効果



歴史

電磁気学の完成，量子力学の誕生

- 1871 光の電磁波説 (Maxwell)
- 1885 水素のスペクトル (Balmer)
- 1888 電磁波の確認 (Hertz)
- 1900 プランク定数 (Planck)
- 1905 光量子説 (Einstein)
- 1913 原子模型 (Bohr)
- 1926 波動力学 (Schroedinger)

その後どうなった？

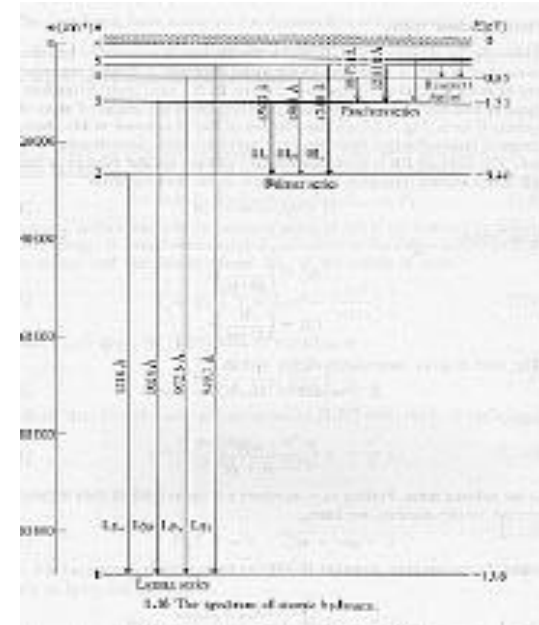
原子物理の2つの顔 粒子間の電磁相互作用

分光 (静) spectroscopy

基本的相互作用を調べる

働く力

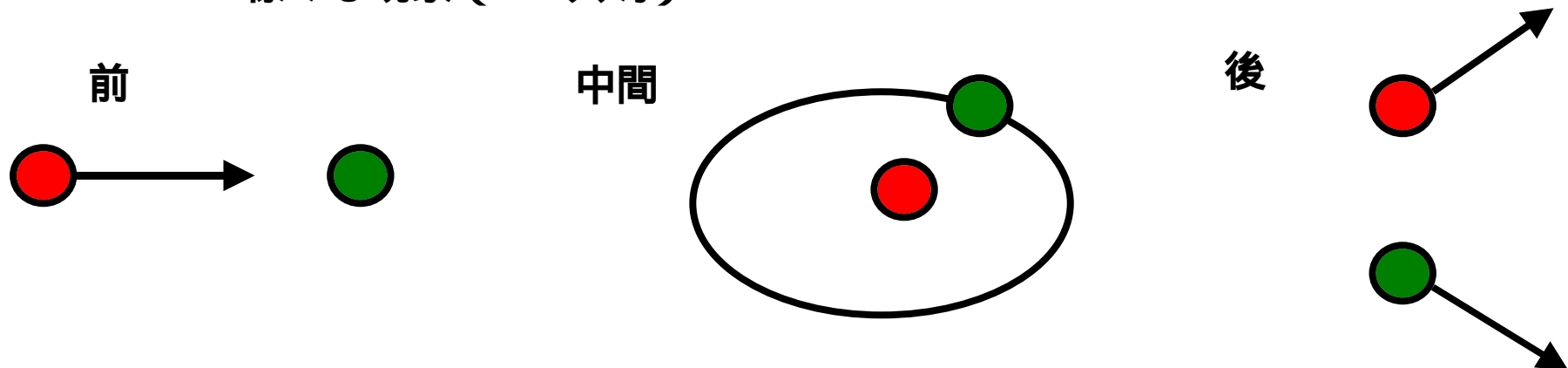
多体問題 (ex. 3 体問題)



衝突 (動) collision

既知の力のもとでの振る舞い

様々な現象 (ex. 共鳴)



原子物理 *up-to-date*

新しいエキゾチックな系

- 陽電子
- ミュー中間子・パイ中間子
- 反陽子
- 重イオン (多価イオン)
- クラスター

- 光子(高強度レーザー・SOR光/アンジュレーター光)

極限のエネルギー

- 低エネルギー (nK $1\text{K}=8.6\times 10^{-5}\text{eV}$)
- 光エネルギー (TeV)

20桁以上を同じ土俵で扱う

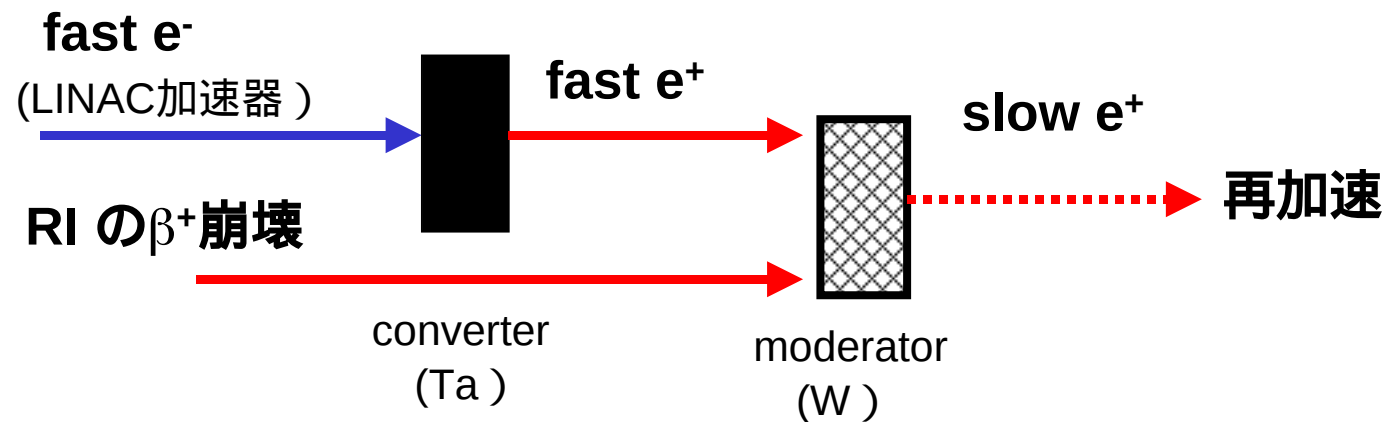
陽電子 e^+

- e^+ 陽電子 (電荷 +1, 質量 電子と同じ, 寿命 無限大)

電子と出会うと光子を出して(2光子)対消滅

mono-energetic e^+ beam: (1990~)

- RI の β^+ 崩壊あるいは, γ 線からの対生成によってできた高エネルギー e^+ を一度金属へ入射。
- 再びしみ出してきた(仕事関数が負)低エネルギーでエネルギー幅の狭い e^+ を再加速してエネルギーの揃ったビームとする。



物質の電子状態や構造のプローブ

陽電子 e^+

(EX) $e^+ \longrightarrow H$ (原子水素)

e^+ ビームの入射エネルギーを変え、通り抜ける e^+ の割合を調べる

1) 10eV以上では e^+ と e^- は
ほぼ同じ振る舞い

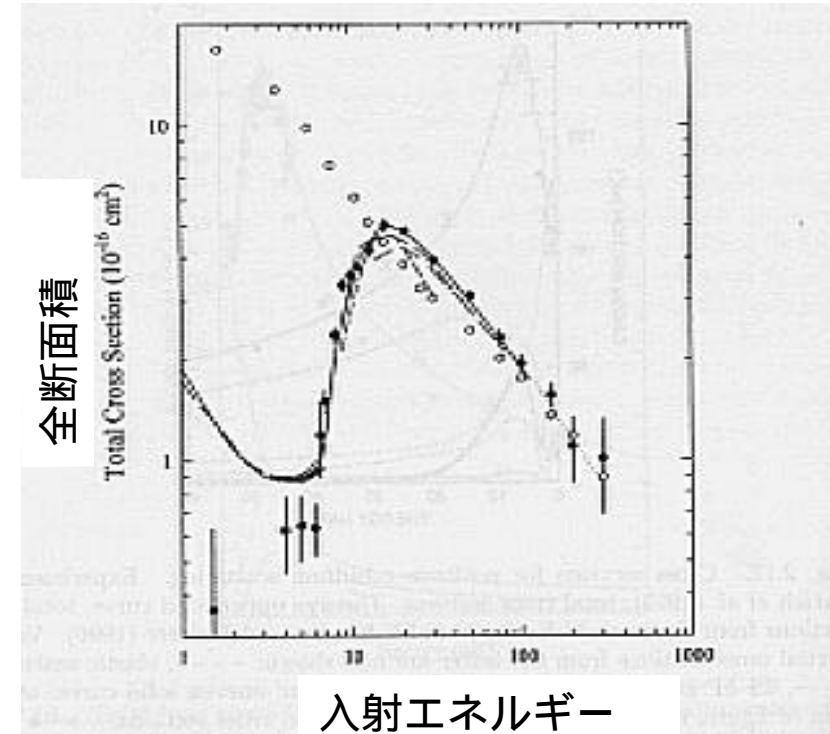
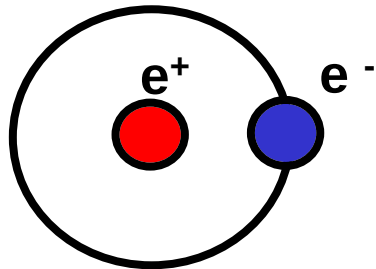
z^2 に比例

2) 10eV以下で e^+ は減少

Ps ポジトロニウム (1951)

パラ : 125ps 2光子消滅

オルソ : 140ns 3光子消滅

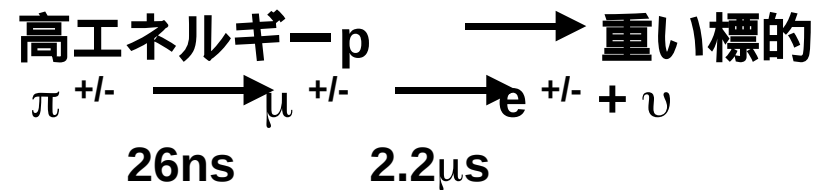


$$E_{\text{ion}} - 6.8\text{eV} < E < E_{\text{exc}}$$

$Ps^- (e^+ e^- e^-)$ も存在

ミュー中間子 $\mu^+ \cdot \mu^-$

- μ^+ 正ミュー中間子 (電荷 +1, 質量 陽子の1/8, 寿命 $2.2\mu\text{s}$) 軽い陽子
- μ^- 負ミュー中間子 (電荷 -1, 質量 陽子の1/8, 寿命 $2.2\mu\text{s}$) 重い電子

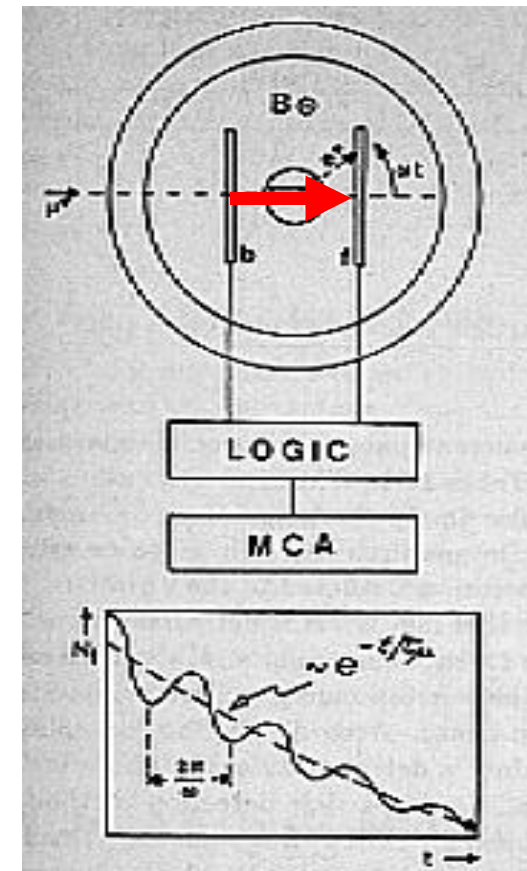


meson factory: KEK(JPN), TRIUMF(CAN),
PSI(SWI), Rutherford(UK)

物質のスピン(磁場環境)のプロープ

スピン=1/2

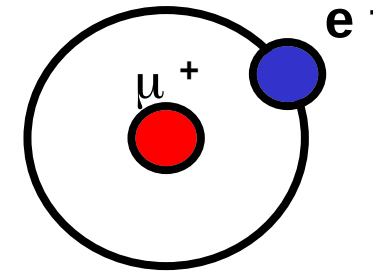
- 1) 初めスピンは進行方向にすべて平行
- 2) 崩壊して飛び出す陽電子の方向とそのときのスピンは同じ方向



ミュー中間子 $\mu^+ \cdot \mu^-$

Mu ミュオニウム (1960) 水素同位体：軽い水素

気体，金属以外の固体，有機液体中に存在

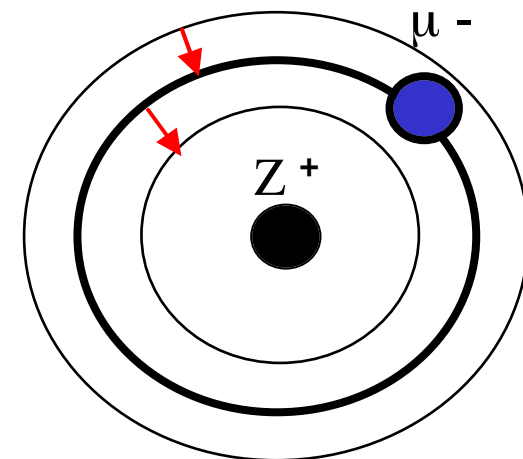


ミュオニック原子

原子半径: $\sim Z^{-1}n^2 (M/m)^{-1}$

束縛エネルギー: $\sim Z^2(M/m)/n^2$
M:換算質量

- 電子との質量比から軌道半径が
 $1/(1840/8)=1/230$, 束縛エネルギー 230倍になる
- 外殻軌道から内殻軌道へ次々 X線を出しながら落ちてゆき，最終的に核に捕まる



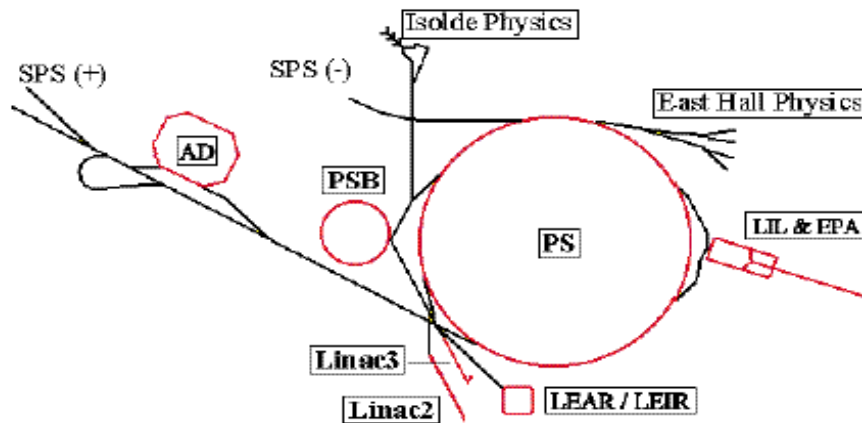
放出X線から元素同定

反陽子 p^-

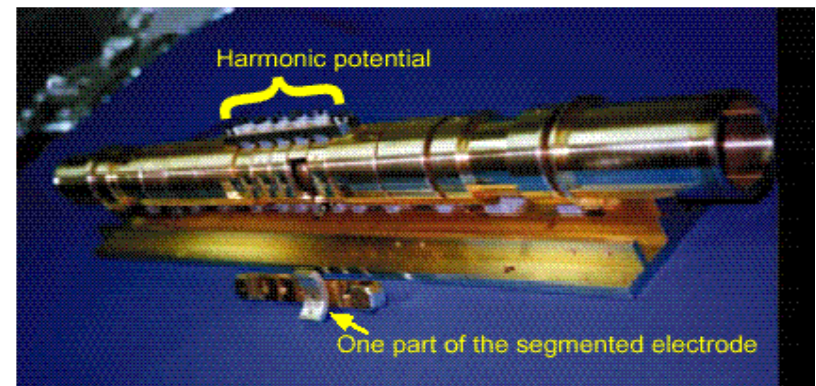
- $\bar{p}$ 反陽子 (電荷 -1, 質量 陽子と同じ, 寿命 無限)

高エネルギー(26GeV) p — 重い標的
蓄積リングで冷却減速 — 減速器で減速 — trapに蓄積(1eV)

pbar factory: CERN-AD(SWI)



JIM BLYNNE, RDX 1996



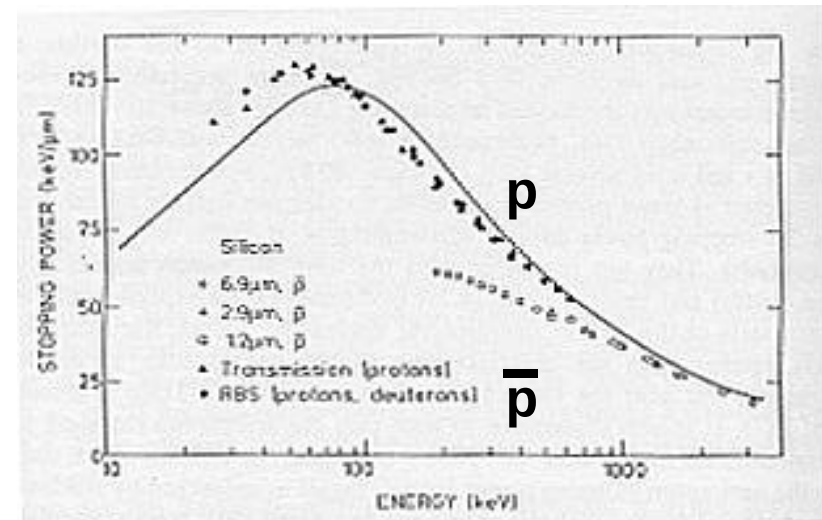
反陽子 p^-

Barkas効果

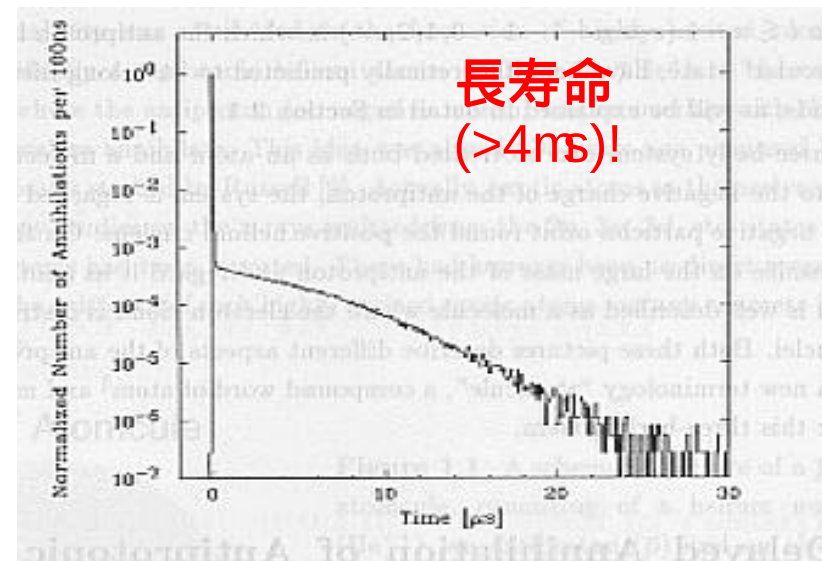
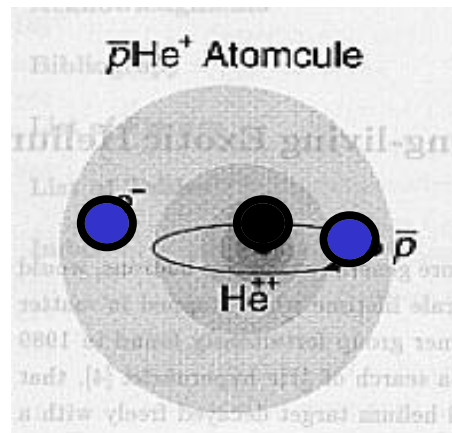
速い衝突: Born 近似

$$\text{阻止能} = L_1 Z^2 + (L_2 Z^3 + L_3 Z^4 + \dots)$$

阻止能: 物質中を粒子が走る際に単位長さあたり物質に与えるエネルギー



$\bar{p}\text{He}^+$ 反陽子ヘリウム $p^- + \text{He}^{2+} + e^-$ “Atomcule”
日本人の発見



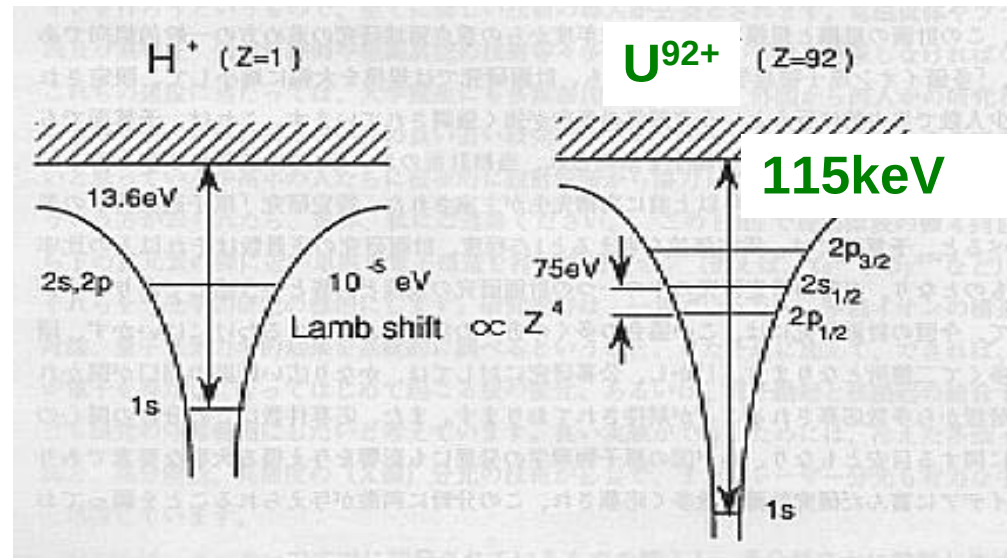
多価イオン：何が面白い？

M^{q+} 多価イオン：原子核のまわりの電子を多数剥ぎ取ったイオン
(実は) **新しい原子** (最近まで作れなかった)

構造：大きい**内部エネルギー**
大きい**相対論効果**
原子核への影響

物質との相互作用：
大きい吸引ポテンシャルの効果

静電的ブラックホール？

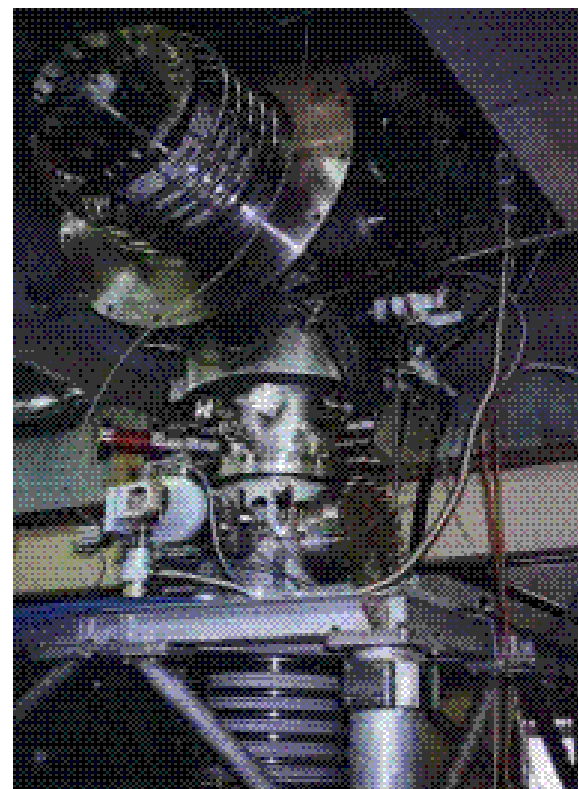
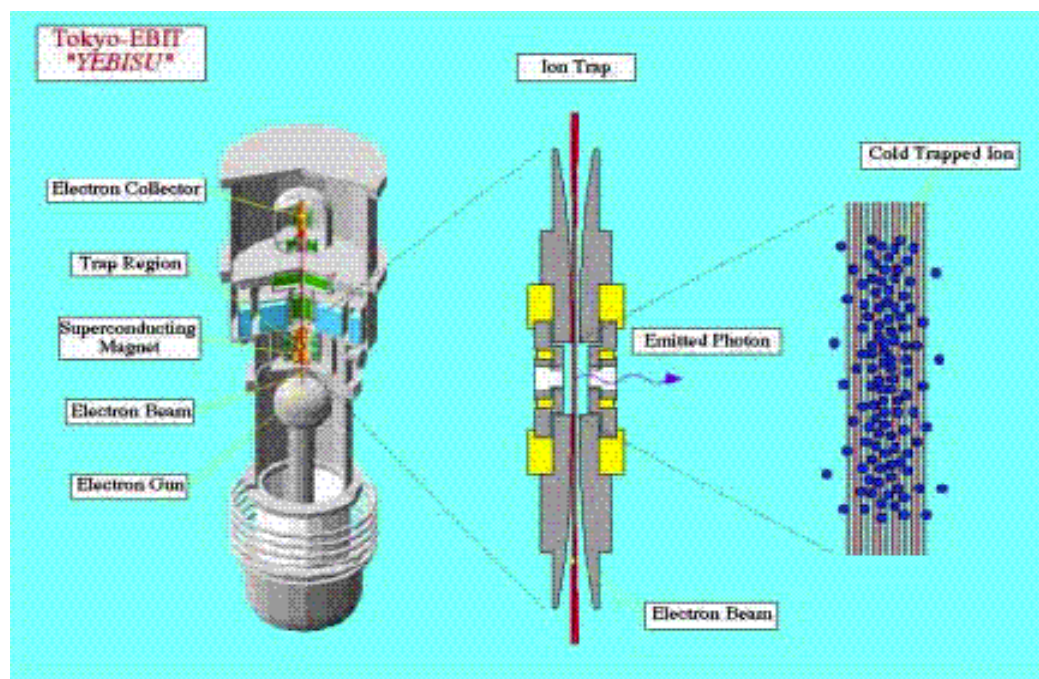


多価イオン：どうやってつくる？

イオン源

EBIS/EBIT (electron beam ion source/trap)

電子による逐次電離



電通大

多価イオン：どうやってつくる？

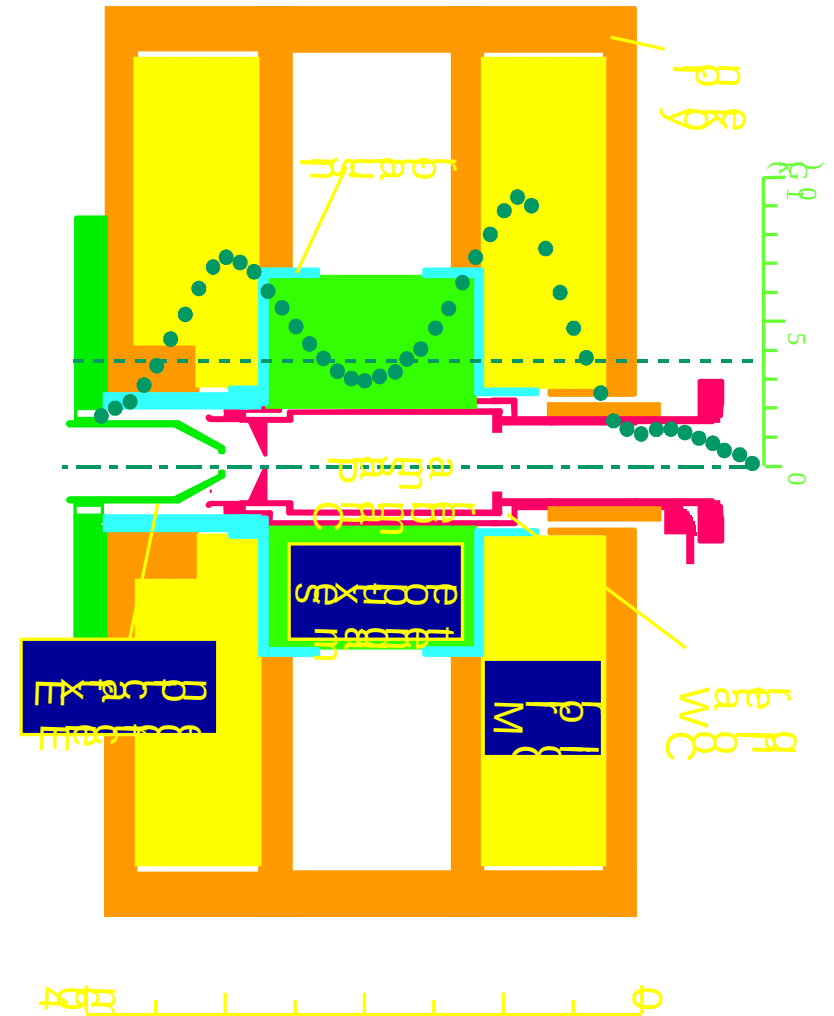
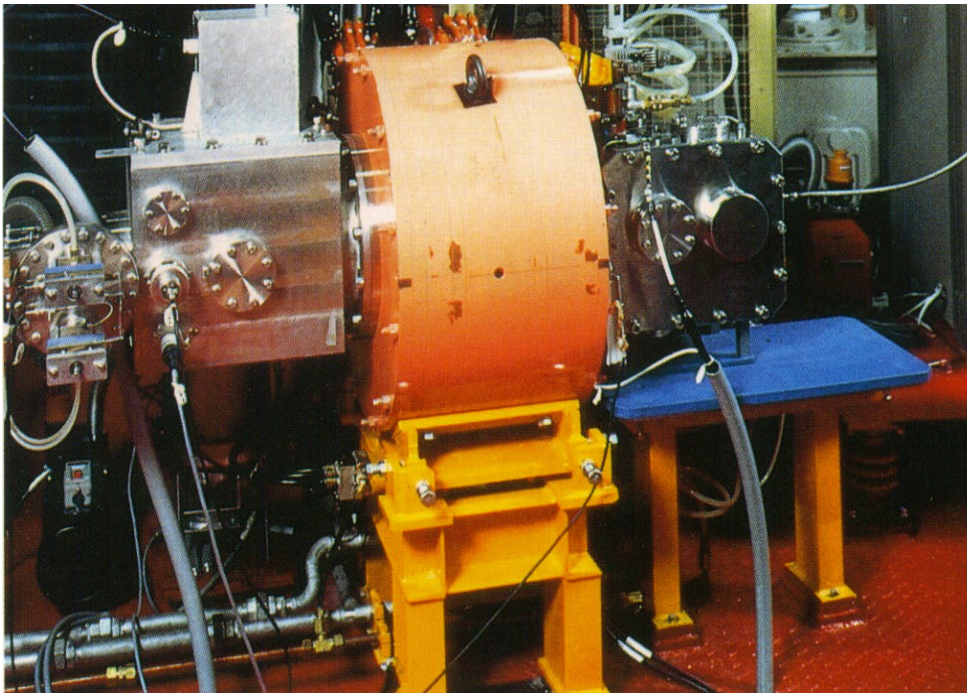
ECR (electron cyclotron resonance) 電子レンジ

10 GHz microwave (ECR at 3.6 kG)

Simple minimum B structure

- Mirror field: 9.3 kG / 7.6 kG
- Axial field: 8.0 kG

Extraction voltage: 25kV max.



多価イオン：どうやってつくる？

ECR

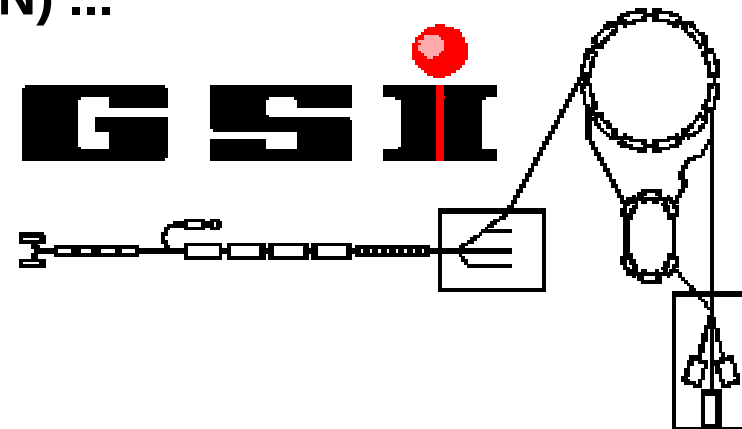
+ 重イオン加速器 (LINAC+サイクロトロン/シンクロトロン)

+ 蓄積リング 100MeV/核子

途中でstripper-foilを通してより多くの電子を剥がす

(良) ドップラーシフトがない (悪)
数が少ない

GSI(GER), GANIL(FRA), RIKEN(JPN) ...



EBIT-トラップ 静止

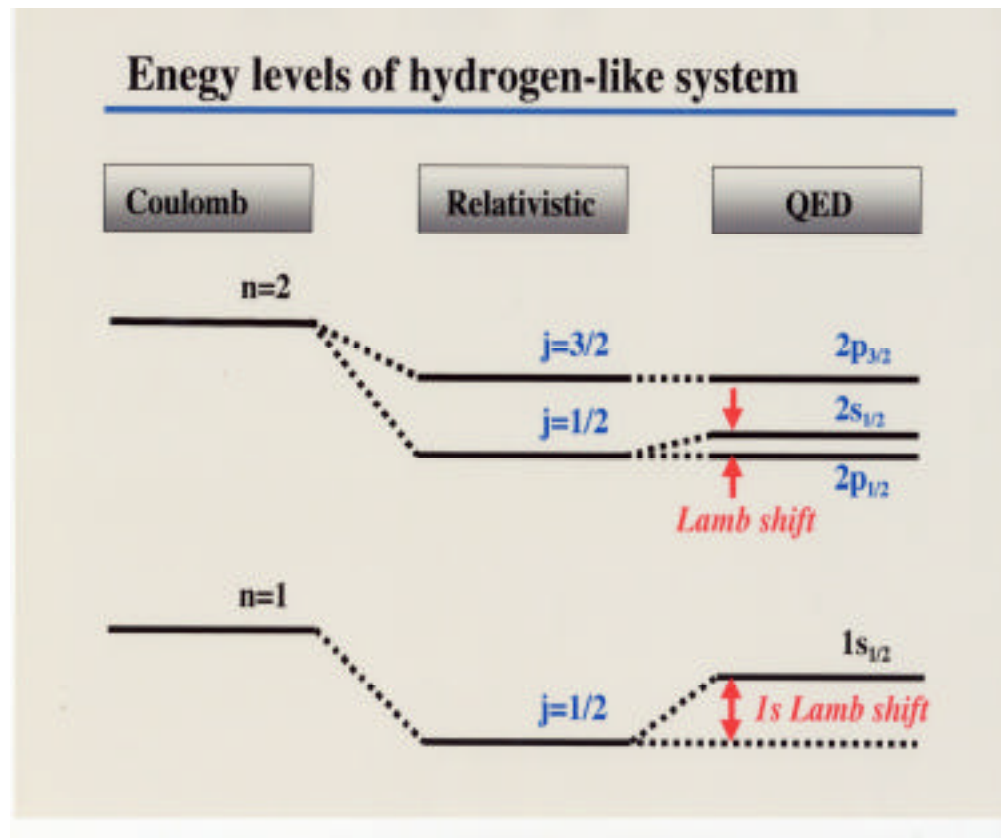
イオン源の中でつくる

(良) ドップラーシフトがある (悪)
数が多い

LBL(US), 電通大, MaxPlanck(GER)

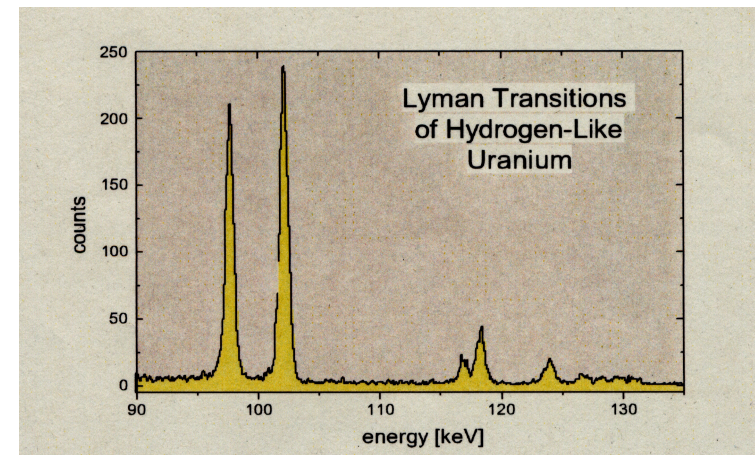
多価イオン：面白い物理

強い電磁場下でのQED (量子電磁気学)



ラムシフト 測定

1s基底状態ラムシフト測定
 U^{92+} 465.8 $\pm$ 12 eV



多価イオン：面白い物理

bound β 崩壊

(β 崩壊 $n \rightarrow p + e + \nu$)

- $^{187}\text{Re}/^{187}\text{Os}$ 母娘核の現在の
相対含有量
- ^{187}Re の寿命 (半減期)
- 銀河系形成時の元素合成比



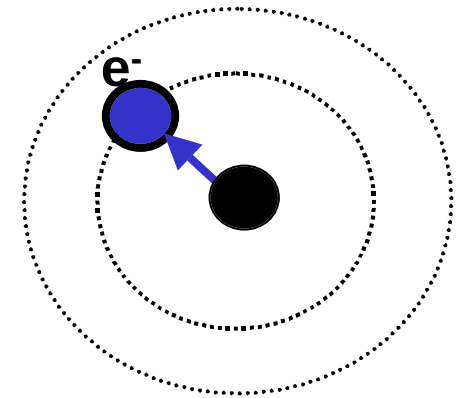
我々の銀河の年齢を知る時計

原子核崩壊の半減期

- 中性原子と束縛電子のない多価イオンで異なる場合がある
 - 中性原子 420 億年
 - 裸(75+)のイオン 14 年

放出された e^- が $n=1$ の軌道に捕まる！

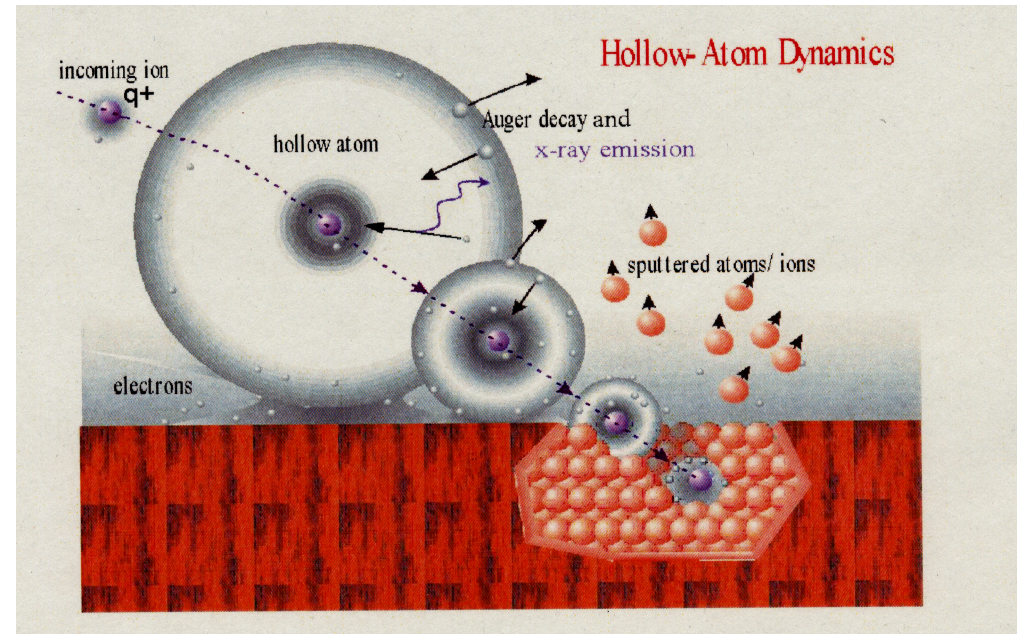
- 星の中では大部分多価イオン
すべての電荷数の密度が分からないとだめ！



多価イオン：面白い物理

ホローアトム

物質表面から電子を多数個捕獲
多電子同時励起原子の生成
(内殻は中空)



クーロン爆発

電子を多数奪われた標的は原子核同士で反発で爆発する

標的分子の爆発的分解 → 解離片の同時計測による分子構造
の決定 (snapshot/顕微鏡)

固体表面への激しい改質作用 → 固体の内部にダメージを与える
ことなく表面第1層だけを改質
する技術

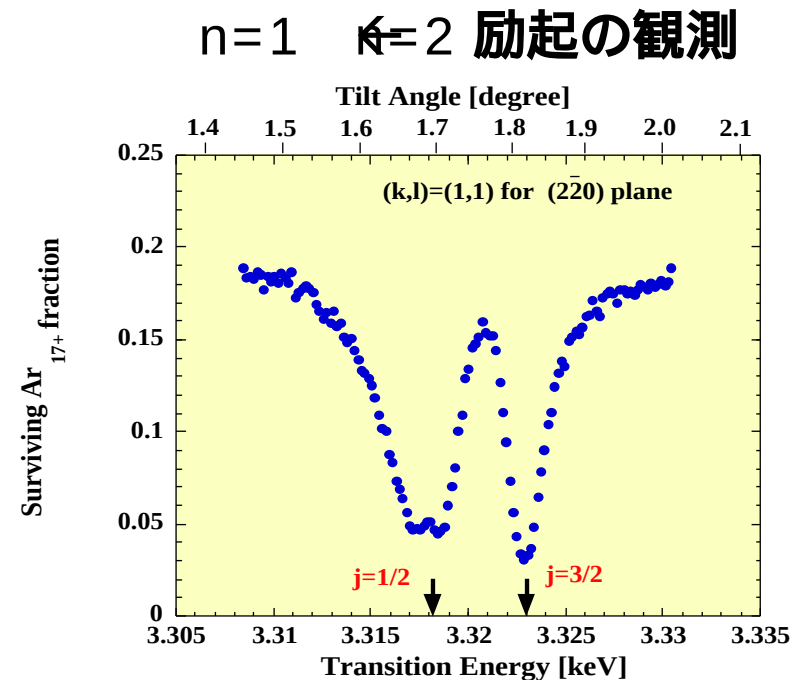
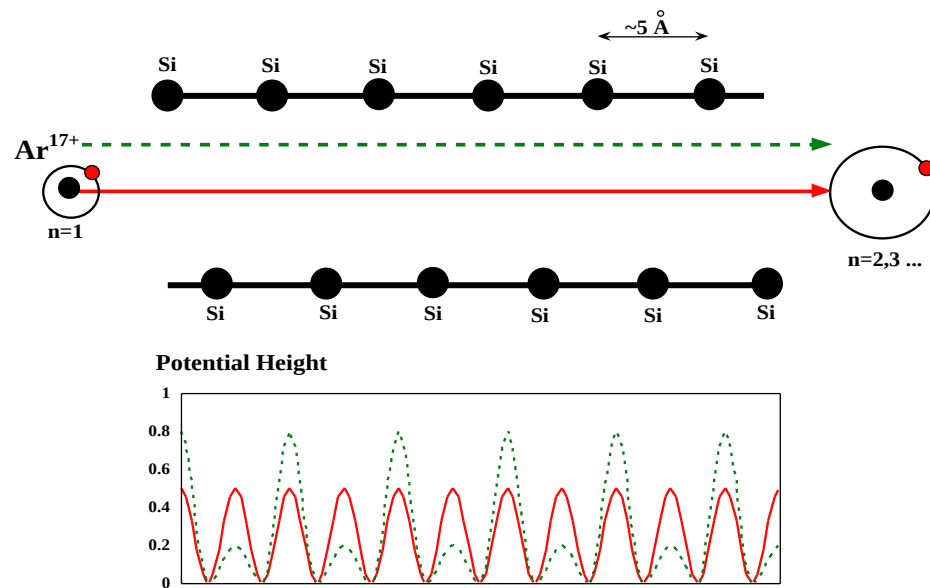
多価イオン：私の今の挑戦！

多価イオンと結晶場の相互作用

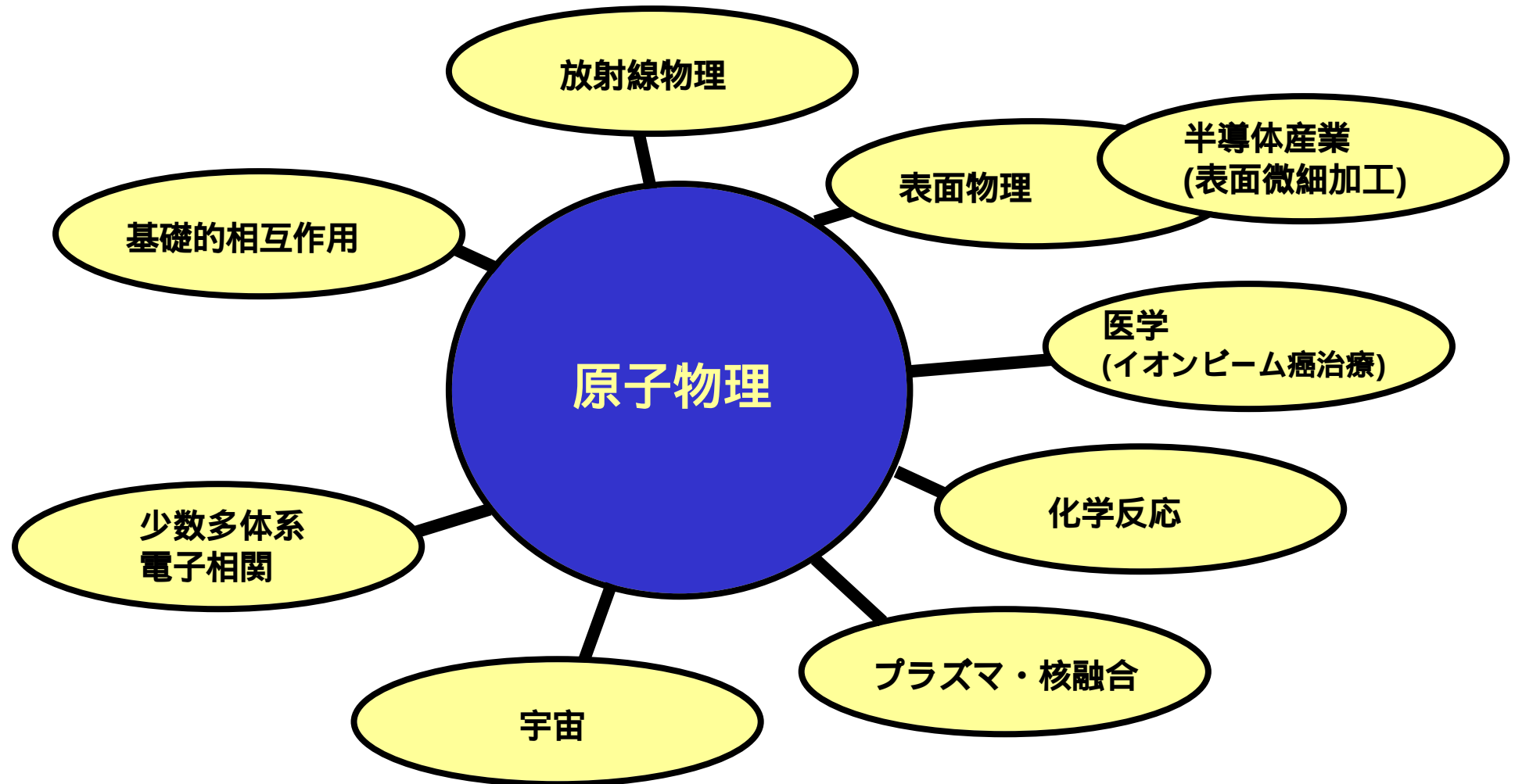
多価イオンが（疑似）光子（電磁場）を吸収して励起する現象

15.6 GeV Ar^{17+} $\rightarrow$ Si結晶 （Channeling）

高コヒーレンス $\rightarrow$ 鋭い共鳴幅
高精度原子分光



相関図：基礎と応用



都立大原子物理研究室の実験

HIMAC (学外) ~10 GeV

- 多価イオン — 結晶場 共鳴励起

ECR ~10 keV

- 多価イオン — 電子 微分散乱
- 多価イオン — 希ガス 可視偏光分光
- 多価イオン — 分子 クーロン爆発
- 多価イオン — 分子 同時放出 Auger-電子

EBIS ~1eV

- 多価イオン — 分子 低エネルギー分子崩壊
- 多価イオン — 原子分子 低エネルギー電子捕獲

SWARM ~meV

- クラスタ
- ヘリウム気体中の移動度測定