

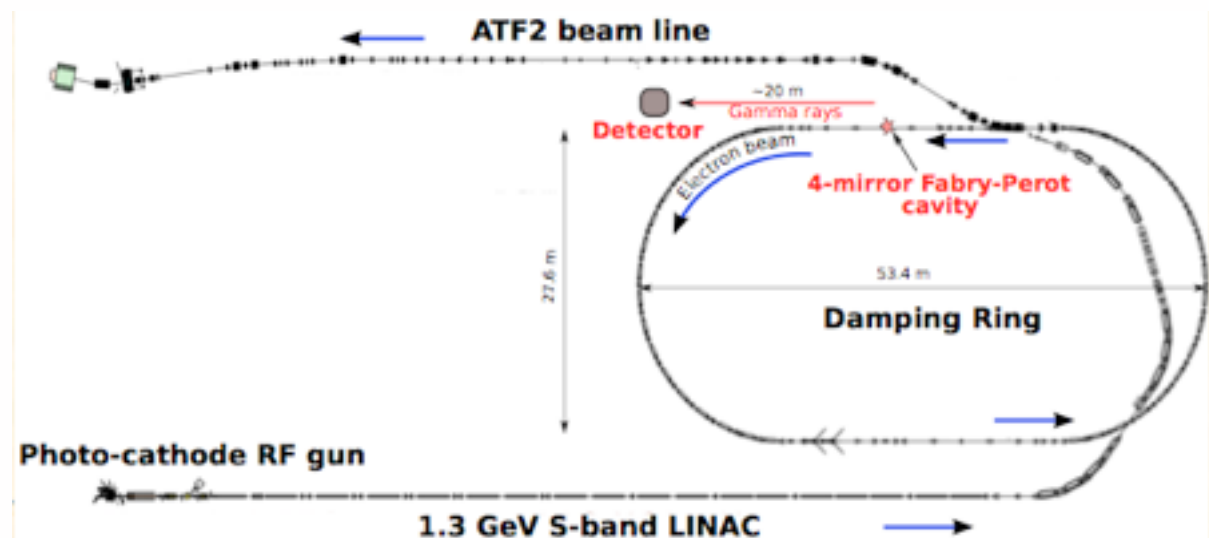
ERL技術のガンマファクトリへの応用

2017.5.9
ERL検討会
本田

- 重イオン蓄積リングによるガンマファクトリについて検討中
- VUV-ERL-FELで励起光を作ろうかという案が出ている
- ERLの出口戦略の一つになるか

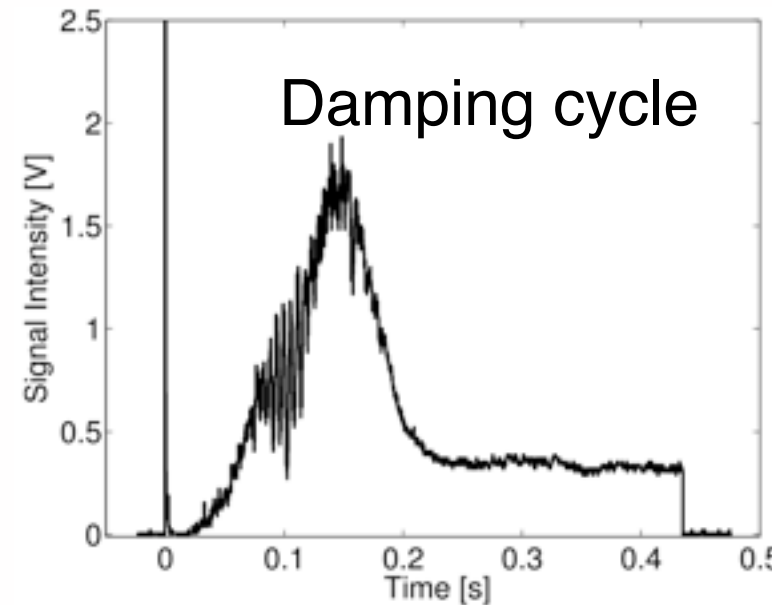
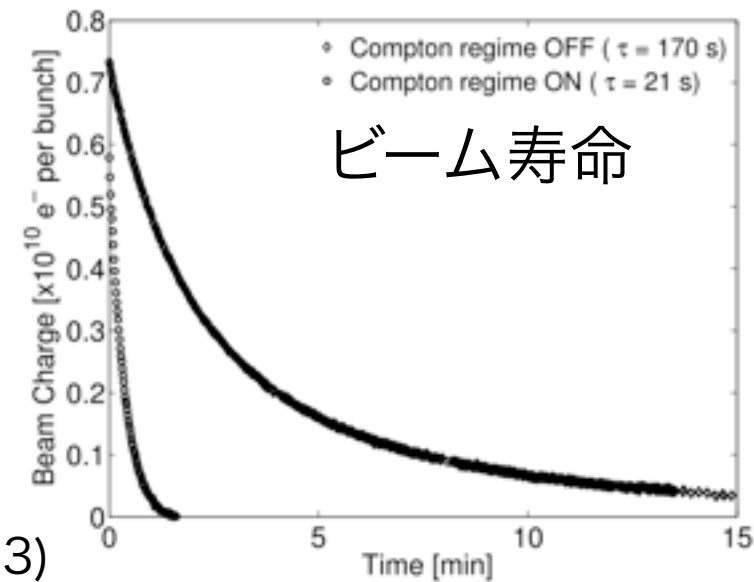
ガンマ線源の現状

- ATF Damping ringでレーザー蓄積共振器で行った実験が (ある意味)現在の世界最高記録
 - I.Chaikovska et al., Scientific Reports 6, 36569 (2016)
 - 24MeV γ 線が、 $3.5 \times 10^8 \gamma/s$, 400 $\gamma/collision$
- 加速器
 - demonstrationのため、加速器はこの為に最適化されてはいない
 - 1nC/bunch, 1-bunch operation
 - 1.08MHzでのcrossing (harmonic number 奇数のため、2周に1回当たる)
 - 衝突点はとくに絞っていない
 - 垂直エミッタンス良すぎてIBSでバンチ長伸びている
 - DR cycle duty 0.62
- レーザー
 - 繰り返し178.5MHz, 波長1034nm, パワー50Wを入力、共振器内で35kW



ガンマ線源の現状

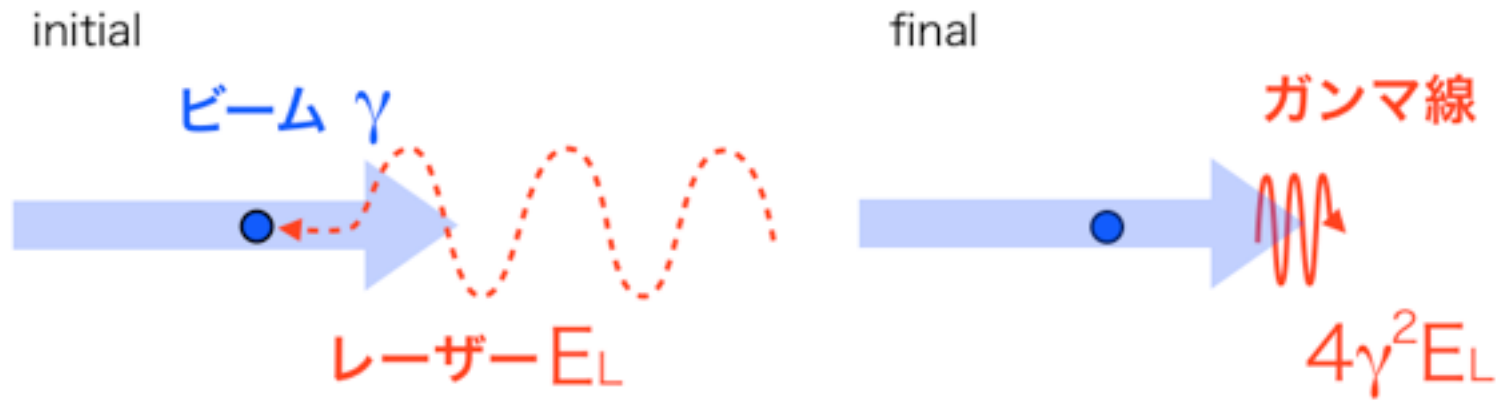
- 素朴なスケーリングだけで、 $1.5 \times 10^{11} \text{ } \gamma / \text{s}$
 - ビームを1bunch \rightarrow 10 bunch x 3 train (30倍)
 - レーザーを35kW \rightarrow 500kW (14倍)
 - ビーム寿命とかは成立する。
- もっと最適化したらきっと、 $\sim 1 \times 10^{12}$
 - 衝突点、垂直エミッタンス、入射繰り返しなど。
- 次世代のproposalのがだいたいそのくらい ($10^{12} \sim 10^{13}$)
 - HI γ S2
 - DA Φ NE
 - ERL-LCS
- 次々世代を考えるなら
 - $> 10^{15} \text{ } \gamma / \text{s}$ を目標にしたいところ
 - コンプトン散乱では限界か



コンプトン散乱

- ローレンツ因子 γ の効果が2回掛かるおかげで、入力光のエネルギーが $4\gamma^2$ 倍になる。
- おかげで、500MeVの電子ビーム ($\gamma=1000$) で、1eV程度のレーザー光でMeV領域になる。

実験室系

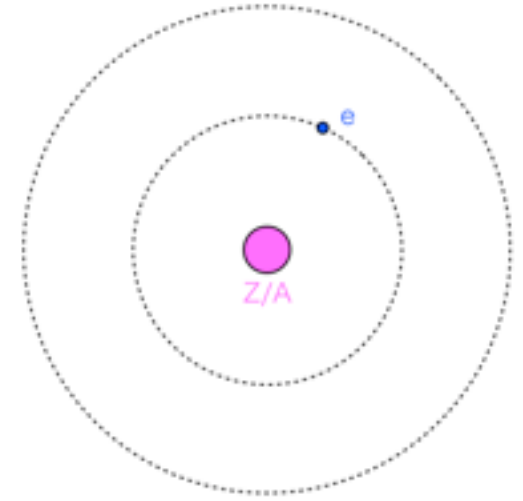


運動系(ビームの静止系)

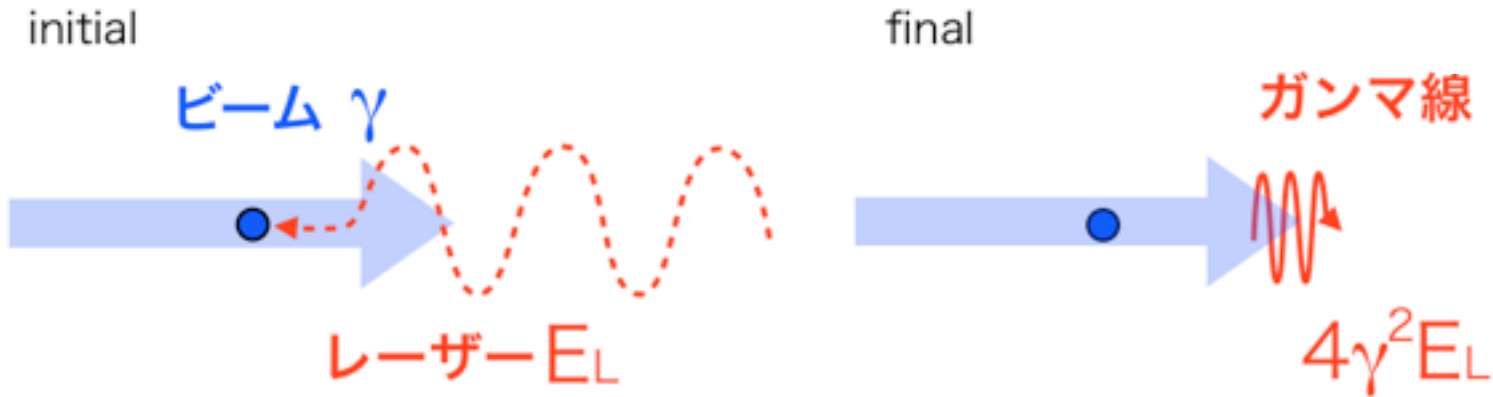


イオンの共鳴散乱

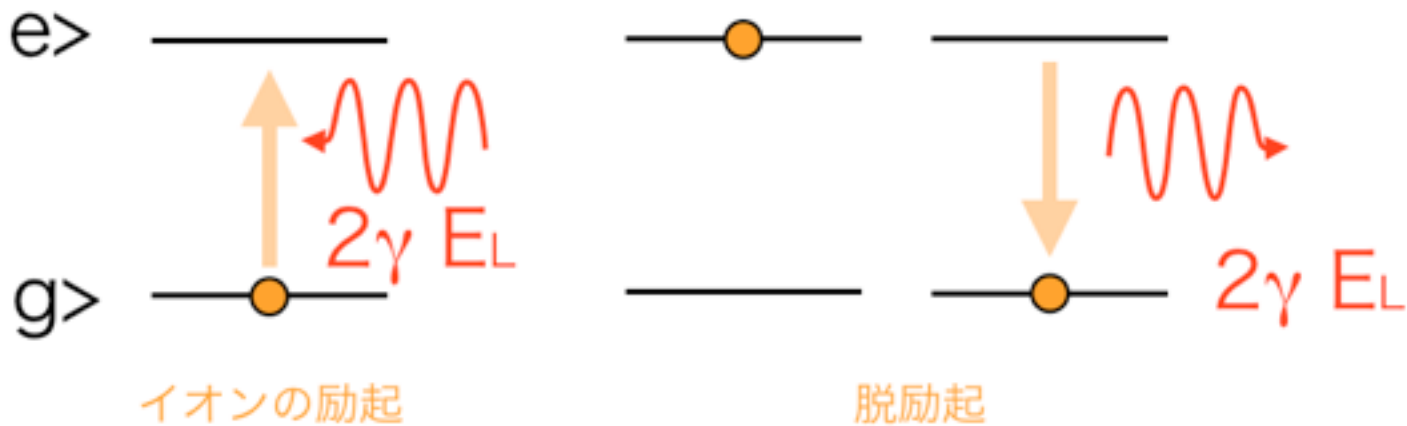
- イオンの励起準位の場合でも同じことになる。
- ローレンツ因子の効果でガンマ線を生成できる。



実験室系

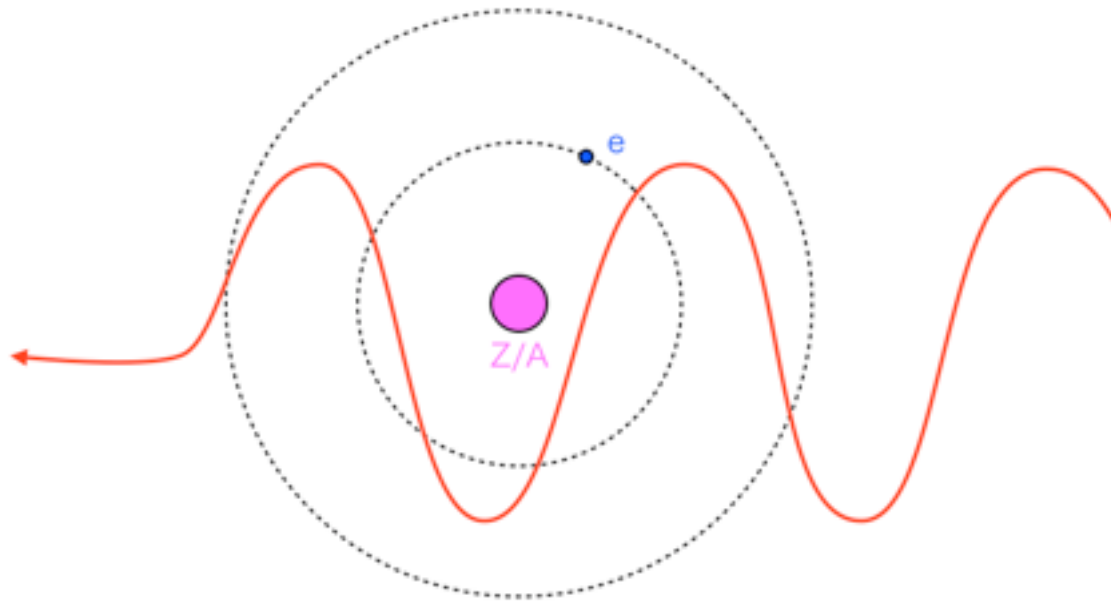


運動系(ビームの静止系)



イオンにして何が得か

- 散乱断面積
 - 電子の場合、電子の古典半径程度で決まる。
 - イオンの場合、原子のボーア半径(水素のボーア半径/ Z)程度で決まる。
- 散乱確率は10桁くらい得。コンプトン散乱の限界を超えられる。



$$\sigma_{\text{Thomson}} = \frac{8\pi}{3} r_e^2$$

$$\sigma_{\text{Resonance}} = \frac{1}{2\pi} \lambda_{\text{res}}^2$$

$$\frac{\sigma_{\text{Resonance}}}{\sigma_{\text{Thomson}}} \sim \frac{\lambda_{\text{res}}^2}{r_e^2} \sim 10^{10}$$

目標エネルギー

- ガンマ線のエネルギーとして、いくらを狙うのが妥当か？
 - あんまり低いと意義が無い。
 - 一般にコンプトン散乱で考えられていた応用の延長
 - 「次世代レーザーコンプトン散乱ガンマ線源とその利用」大垣ほか(2013)
 - 2.3MeVをひとつの目標とする。
 - $D(\gamma, n)p$ による中性子源。低速、単色。
 - (もう少し上だと、核廃棄物処理?)
- LHCでの計画
 - $\gamma = 2887$
 - The Gamma Factory proposal for CERN
 - (Krasny, arXiv:1511.07794v1 [hep-ex])
 - $< 400\text{MeV}$ の γ 線を 10^{17} γ/s

Scenario 1 (muon production threshold):

FEL: 104.4 nm, Pb^{80+} ion, $\gamma_L = 2887$, $n=1 \rightarrow 2$,
 $E_\gamma(\text{max}) = 396 \text{ MeV}$

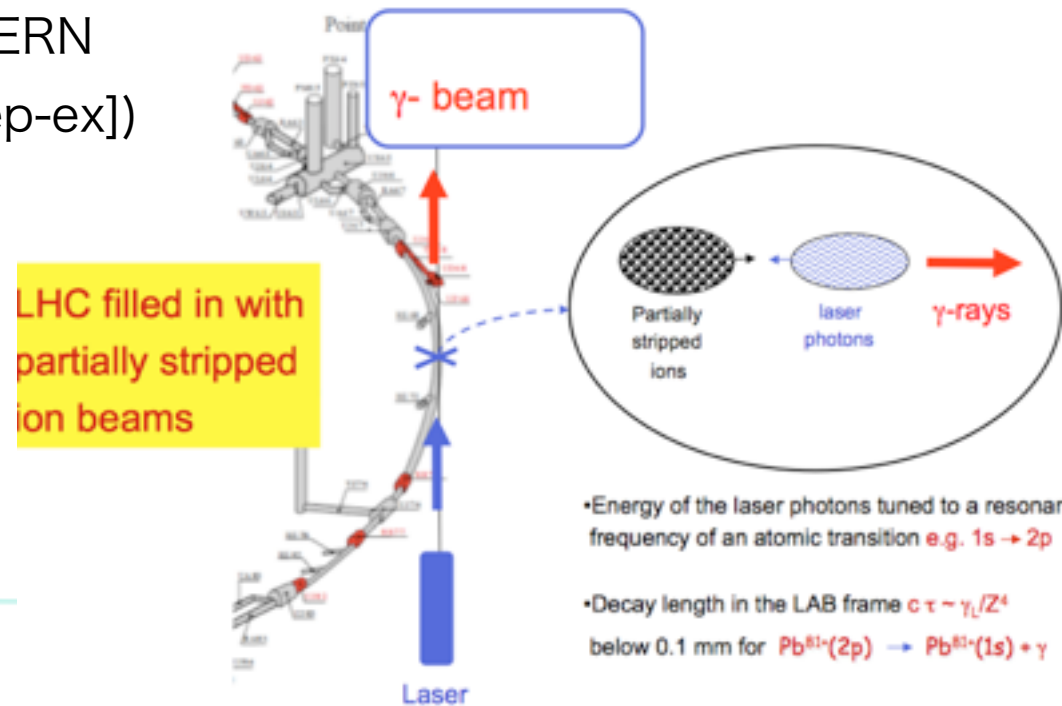
Scenario 2 (nuclear physics application):

Erbium doped glass laser: 1540 nm, Ar^{16+} ion, $\gamma_L = 2068$,
 $n=1 \rightarrow 2$, $E_\gamma(\text{max}) = 13.8 \text{ MeV}$

Scenario 3 (SPS initial feasibility studies):

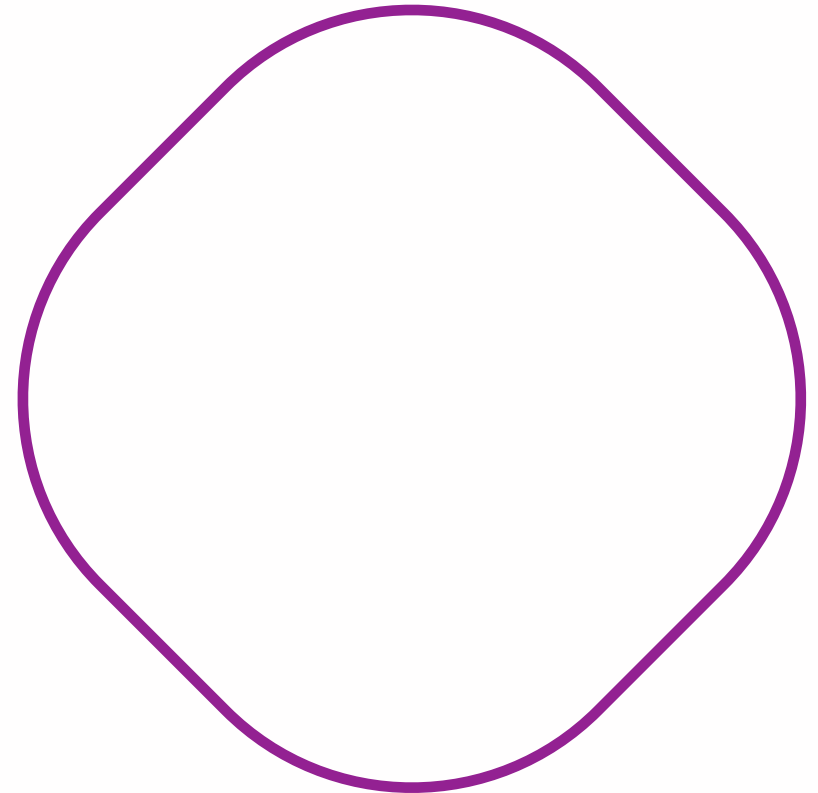
Krypton laser: 647 nm, Xe^{47+} ion, $\gamma_L = 162$ (SPS), $4S_{3/2} \rightarrow 4P_{3/2}$
 $E_\gamma(\text{max}) = 0.196 \text{ MeV}$

LHC as a frequency converter of $O(1 - 10 \text{ eV})$ photons into
 $O(1 - 400 \text{ MeV})$ γ -rays



トリスタントンネル

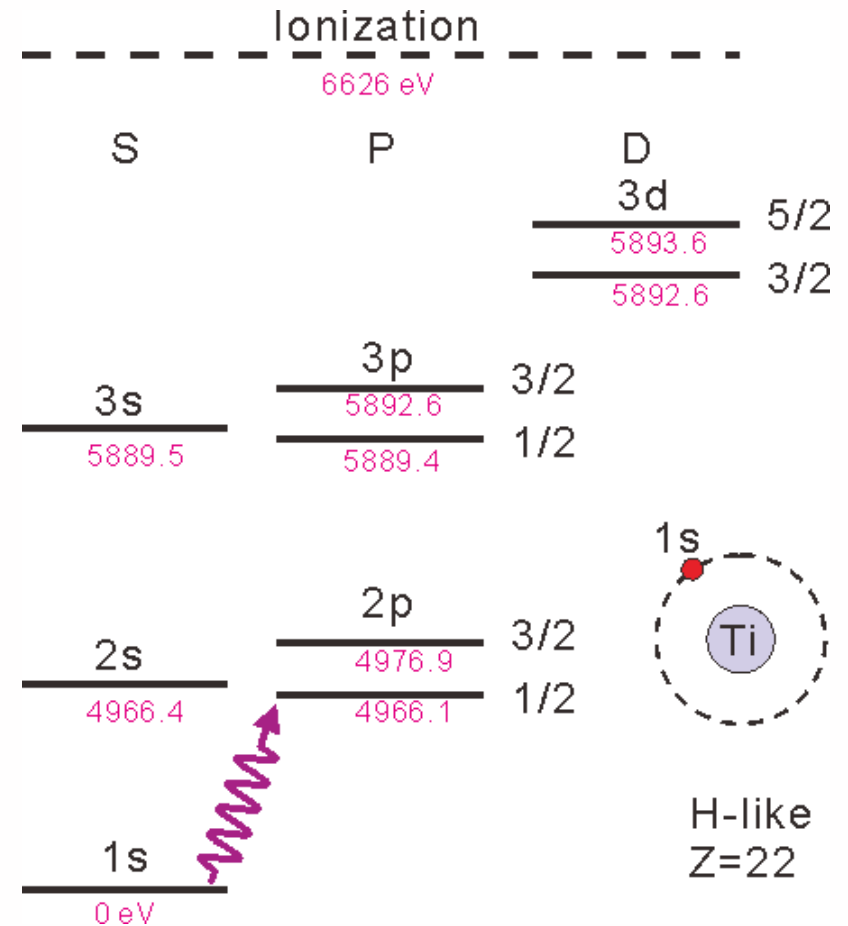
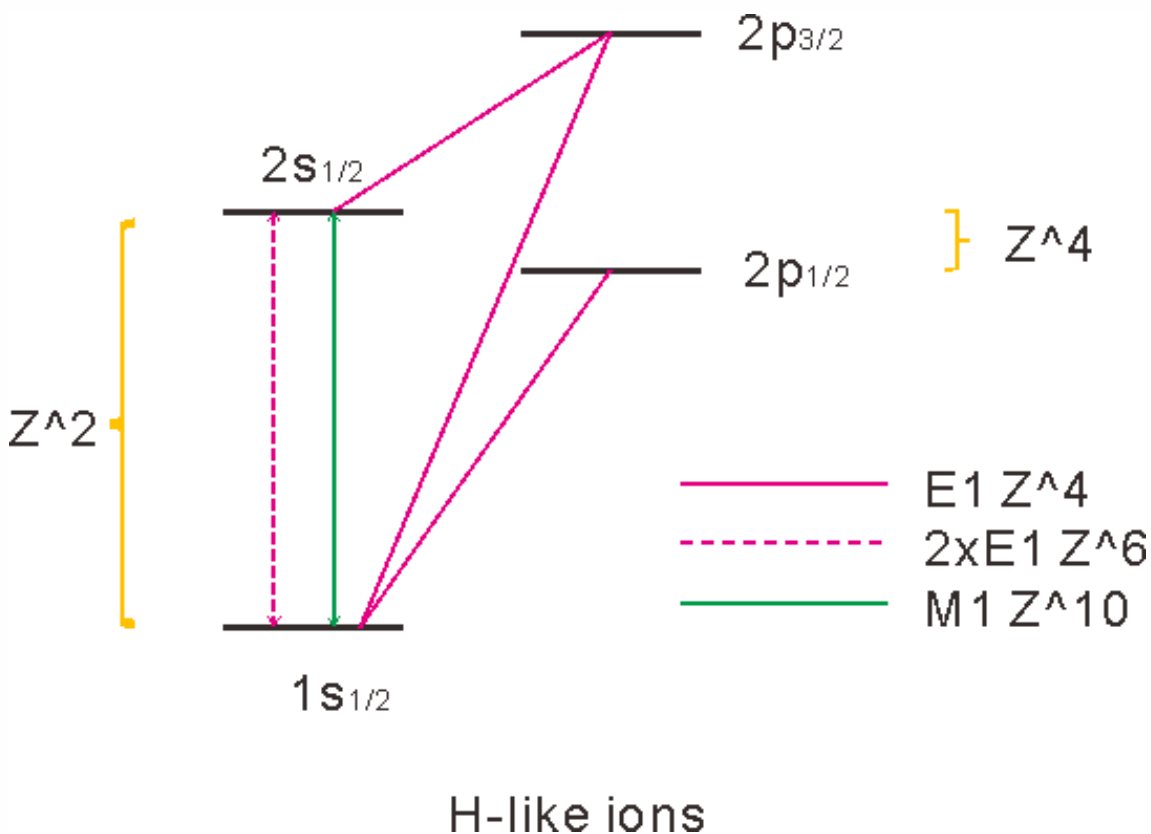
- KEKでやろうとすると
 - イオンの弱点：曲げにくい。サイズが物を言う。
- トンネルサイズ
 - 1周3kmだけど、アーク部だけで考えると1周2.2km(550m x 4)相当。
 - その60%がベンド磁場に使えるとして、実効的な曲率半径は $\rho=210\text{m}$
- 磁場
 - LHC相当の偏向電磁石を想定して、 $B=8.33\text{T}$
 - (HL-LHCのものを想定して、 $B=13\text{T}$)
- リジディティ
 - $R=B\rho=1750\text{Tm}$ (2730Tm)
- イオン
 - 質量数A、価数Z
 - 電子を1個残して剥ぎ取る(H-like)とする
 - $Z/A\sim 1/2$
- ローレンツ因子 γ
 - このリジディティでいけそうなブースト量
 - $\gamma=262$ (410)



$$\gamma = \frac{1}{A} \sqrt{A^2 + (Z R c)^2 \left(\frac{e}{m_p c^2}\right)^2} \sim \frac{Z}{A} \cdot R c \cdot \frac{e}{m_p c^2}$$

イオンの選択

- $\gamma = 250$ で 2.5 MeV を出そうと思うと
- 共鳴エネルギー 5 keV のイオンを選択する必要がある。
- 励起光は、(1光子励起とすると) 10 eV。
- イオンは価数 Z の様々なものがありえる。とくに H-like (電子1個) の場合は計算できる。
- 遷移確率 (A 係数) が Z^4 に依存し、大きい。
- 例えば、Ti ($Z=22$, $A=48$) の 1s-2p

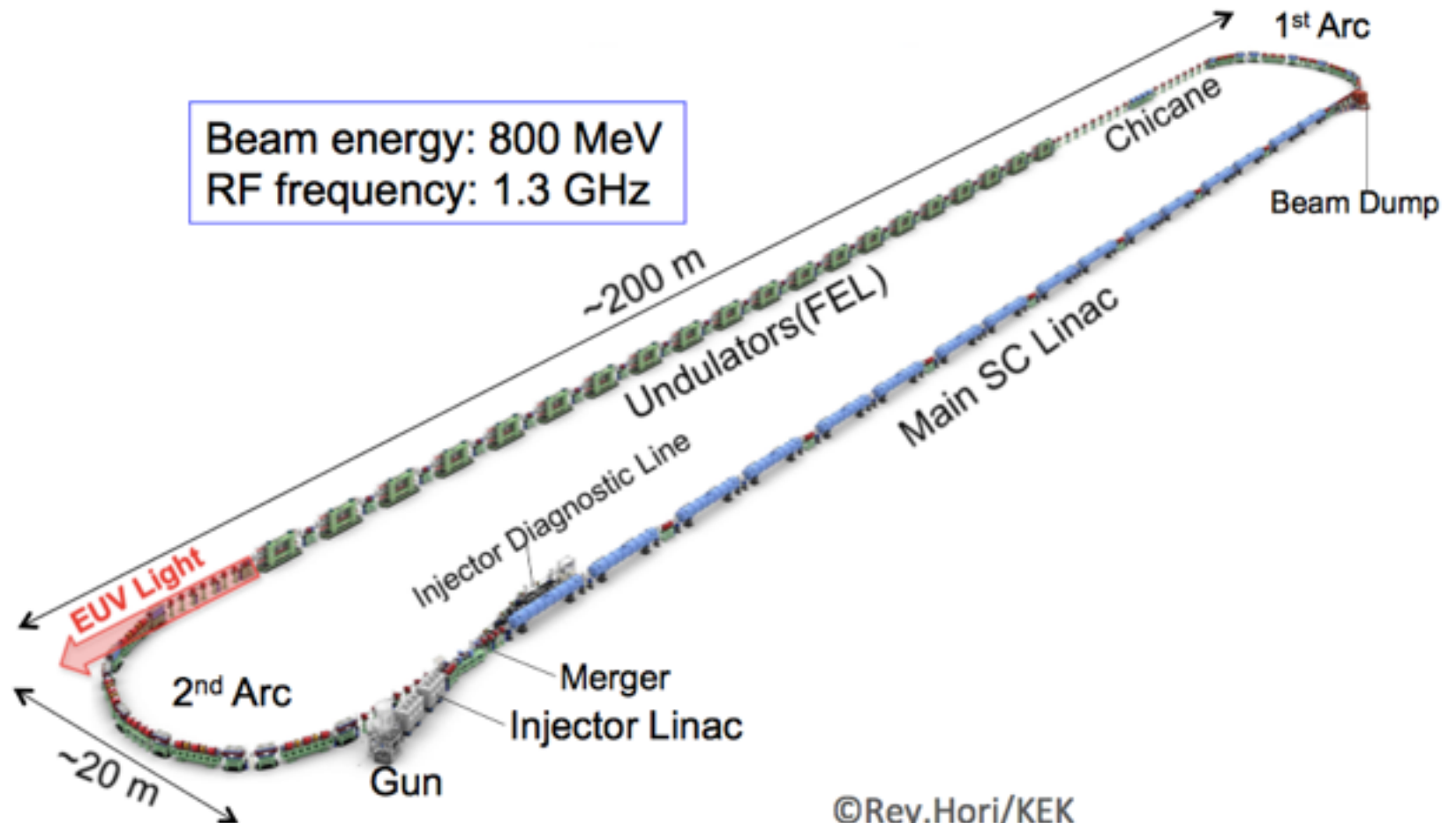


フラックス

- イオンビーム
 - Ti ($Z=22$, $A=48$), H-like
 - $\gamma=250$ (12TeV)
 - 10^9 ions/bunch, 10MHz
 - beamsize 0.3mm, energy spread 5×10^{-3}
 - ガンマ線を出す事で放射冷却される (Bessonov et al., PRL 76, 431(1995))
- 励起レーザー
 - 10eV (波長100nm) (1光子励起として)
 - イオンビーム程度に絞る
 - 平均パワー12kWで、 $I/I_s \sim 5 \times 10^{-4}$ (I_s は飽和パワー)
 - 飽和パワーまでは上げる余地がある。(イオン化損失などの別の問題もあり得る。)
- ガンマ線
 - 2.5MeV (準単色)
 - $1/\gamma$ の発散
 - $10^{17} \gamma/s$

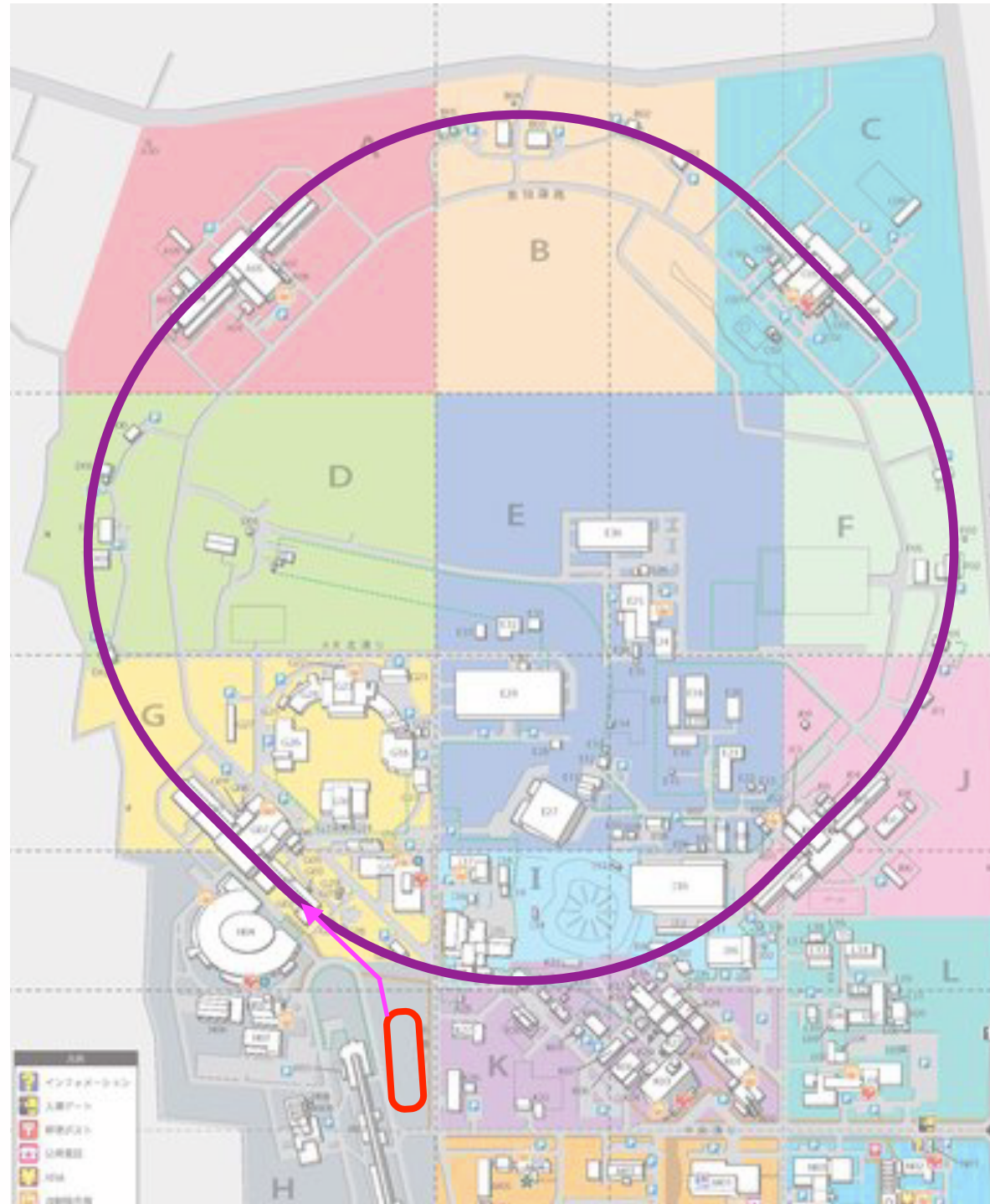
ERL-FEL

- 10eV, 12kWの励起レーザーをどうするか。光学レーザーだとミラーが無い。
- 蓄積リングのアンジュレータ放射
 - 400MeV, 100mAで、50mのアンジュレータで100W
- SASE-FEL
 - 400MeV, 10mAとして、 $\rho=3 \times 10^{-3}$ とすると、12kW。
 - ちょうど、リソグラフィ用のEUV-FELの半分のスケール。



ステージング

- 400MeV ERLでコンプトン散乱
- 1eVのレーザーで2.5MeVが出る。
- 10^{12} r/s
- SKEKB終了後、イオンリングへ
- 電磁石総入れ替え
- AR or PSはブースターに
- ERLをFELに改造
- 10eVの励起光を出す。
- イオンリング直線部に向けて入射
- 10^{17} r/s
- バックアップ
- 蓄積リング光源として10eV
- 10^{15} r/s



Acknowledgment

- Collaboration
 - Okayama: N.Sasao, M.Yoshimura, K.Yoshimura, A.Yoshimi, S.Uetake, T.Masuda, Y.Miyamoto, H.Hara, T.Hiraki
 - KEK: Y.Honda, K.Yokoya, M.Yoshida
 - RIKEN: O.Kamigaito, T.Nakagawa, Y.Kanai, Y.Ichikawa, T.Nagatomo
 - Waseda: K.Sakaue
- JSPS KAKENHI 16H02136 重イオンを用いた新奇光子ビーム生成機構の検証実験