

偏極電子ビーム生成

Zachary J. Liptak

OHO'23

2023年9月8日

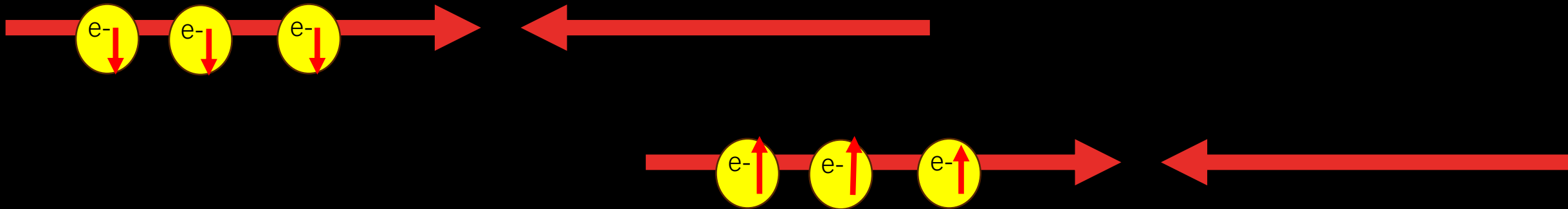


目次

- 電子偏極ビームの概念
- 偏極ビームの履歴
- GaAsカソード
- 偏極電子銃
- レーザーシステム
- 偏極の操作と測定
- 陽電子生成

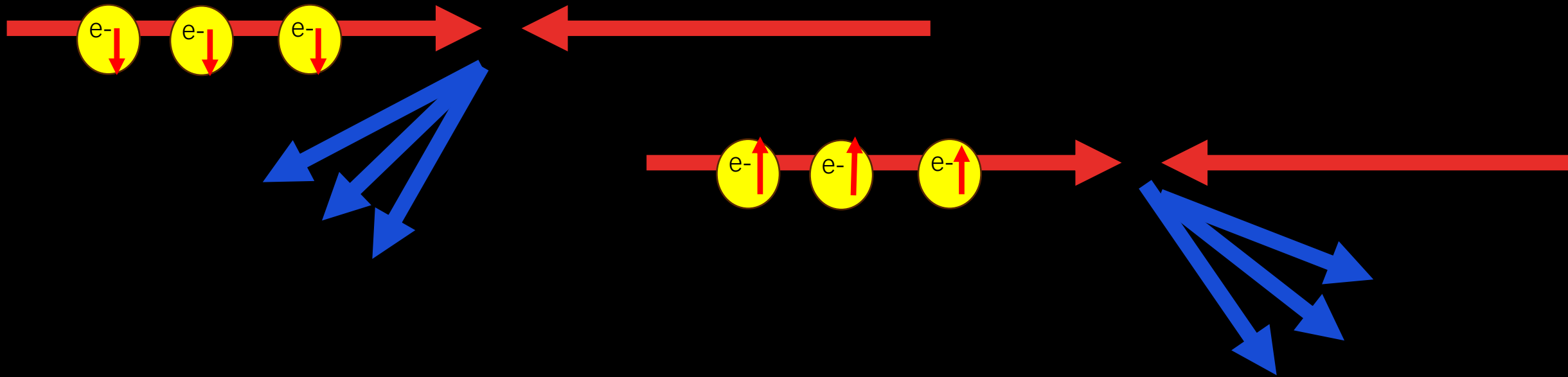
スピン偏極ビームとは

スピン偏極ビームはバンチ内の電子の固有電気モーメント（スピン）状態が優先的に選択されたビームである。核物理や素粒子物理用の加速器を用いる実験はスピン偏極ビームで大幅に物理を精査することができる。



なぜスピン偏極ビーム？

- 加速器を用いる実験では、スピン偏極は「道具」として考えてもいい。
- 素粒子や核物理実験の中にスピン非対称でしか測定できないプロセスがある。偏極ビームを生成したり、測ったりできる場合、実験が模索できる範囲が広がる。



過去の重要結果

最も有名な結果：ワインバーグ＝サラームのモデルを確認し、標準模型の基本となった。

実験名はE122であり、1978年に右の図の論文を出版した。

翌年、
はノハ



Photo courtesy University of Texas

Volume 77B, number 3

PHYSICS LETTERS

14 August 1978

PARITY NON-CONSERVATION IN INELASTIC ELECTRON SCATTERING^{*}

C.Y. PRESCOTT, W.B. ATWOOD, R.L.A. COTTRELL, H. DeSTAEBLER, Edward L. GARWIN, A. GONIDEC¹, R.H. MILLER, L.S. ROCHESTER, T. SATO², D.J. SHERDEN, C.K. SINCLAIR, S. STEIN and R.E. TAYLOR

Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, Stanford, CA 94305, USA

J.E. CLENDENIN, V.W. HUGHES, N. SASAO³ and K.P. SCHÜLER

Yale University, New Haven, CT 06520, USA

M.G. BORGHINI

CERN, Geneva, Switzerland

K. LÜBELSMEYER

Technische Hochschule Aachen, Aachen, West Germany

and

W. JENTSCHKE

II. Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg, Hamburg, West Germany

Received 14 July 1978

We have measured parity violating asymmetries in the inelastic scattering of longitudinally polarized electrons from deuterium and hydrogen. For deuterium near $Q^2 = 1.6 \text{ (GeV}/c)^2$ the asymmetry is $(-9.5 \times 10^{-5})Q^2$ with statistical and systematic uncertainties each about 10%.

We have observed a parity non-conserving asymmetry in the inelastic scattering of longitudinally polarized electrons from an unpolarized deuterium target. In this experiment a polarized electron beam of energy between 1.6 and 1.22 GeV and incident momentum

were momentum analyzed in a magnetic spectrometer at 4° and detected in a counter system instrumented to measure the electron flux, rather than to count individual scattered electrons. The momentum transfer, Q^2 , was varied between 1.6 and 1.22 GeV

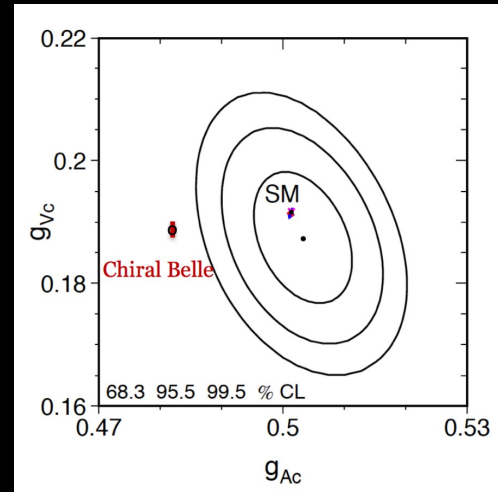
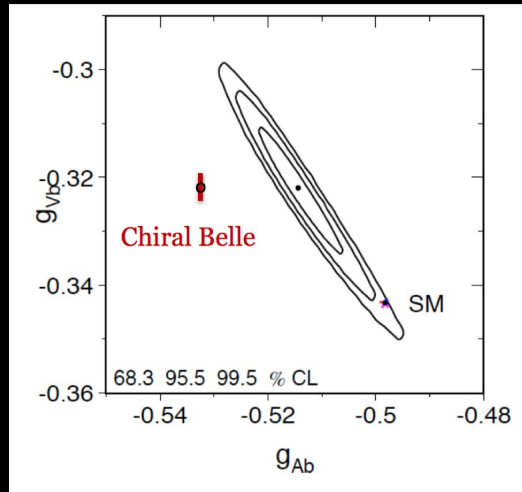
将来へ向かって：標準模型を超える物理を模索

偏極非対称

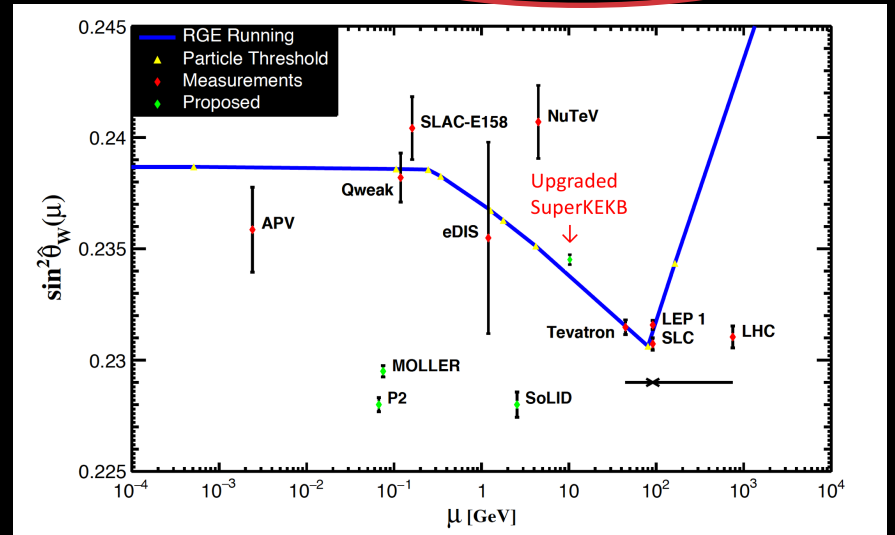
$$A_{LR}^f = \frac{\sigma_L - \sigma_R}{\sigma_L + \sigma_R} = \frac{sG_F}{\sqrt{2}\pi\alpha Q_f} T_3^f g_V^f \langle POL \rangle$$

で電弱角度 θ_W :

$$g_V^f = T_3^f - 2Q_f \sin^2\theta_W$$

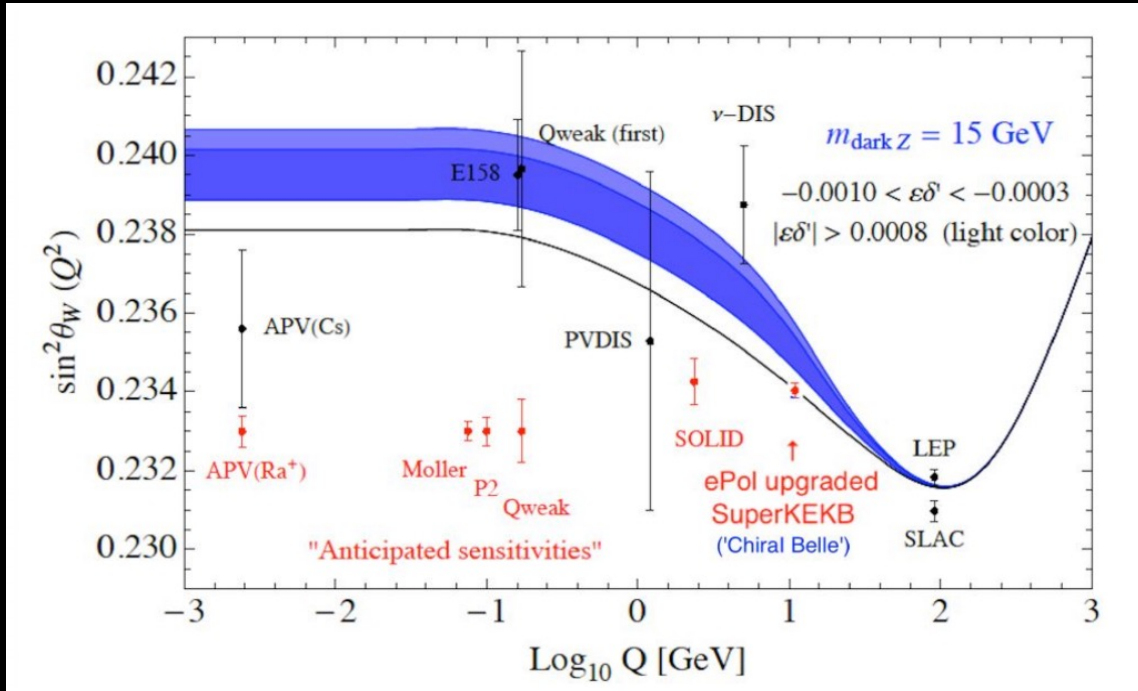


Predicted measurement capability for b, c quark coupling constants (20 ab^{-1})



Possibility for searches in a currently unexplored energy region ($O(10\text{GeV})$)

将来へ向かって：標準模型を超える物理を模索



暗黒Z、思い (TeV) Z'等の粒子でも探せる
その隠れ粒子の交換がある限り分布ズレで現れる

H. Davoudiasl, H.S. Lee and W.J. Marciano
Phys. Rev. D 92, no. 5, 055005 (2015)

次世代のスピンの偏極を用いるビーム

- 次世代の素粒子実験がスピン偏極を使用するつもり素粒子実験がいくつかある。

ILC (日本), CEPC (中国) : スピン偏極電子・陽電子

EIC (米) : スピン偏極電子とスピン偏極イオン

FCC-ee (CERN) : 自然で偏極した電子

そして、SuperKEKBの電子ビームを偏極化する可能性も今検討中。

自然偏極：SOKOLOV-TERNOV効果

- まず、自然の変更ビーム生成方法を紹介する
- 円型ストレージリングに軌道している電子は勝手に自己偏極化する
- 放射光を放出するたびにスピンのフラップされ、磁場に対して逆平行状態は少し確率がたかい

$$P = \frac{8\sqrt{3}}{15} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

$\frac{8\sqrt{3}}{15} \approx 0.924$ は最大偏極度と τ はリラクセーション時間。

リラクセーション時間 τ は

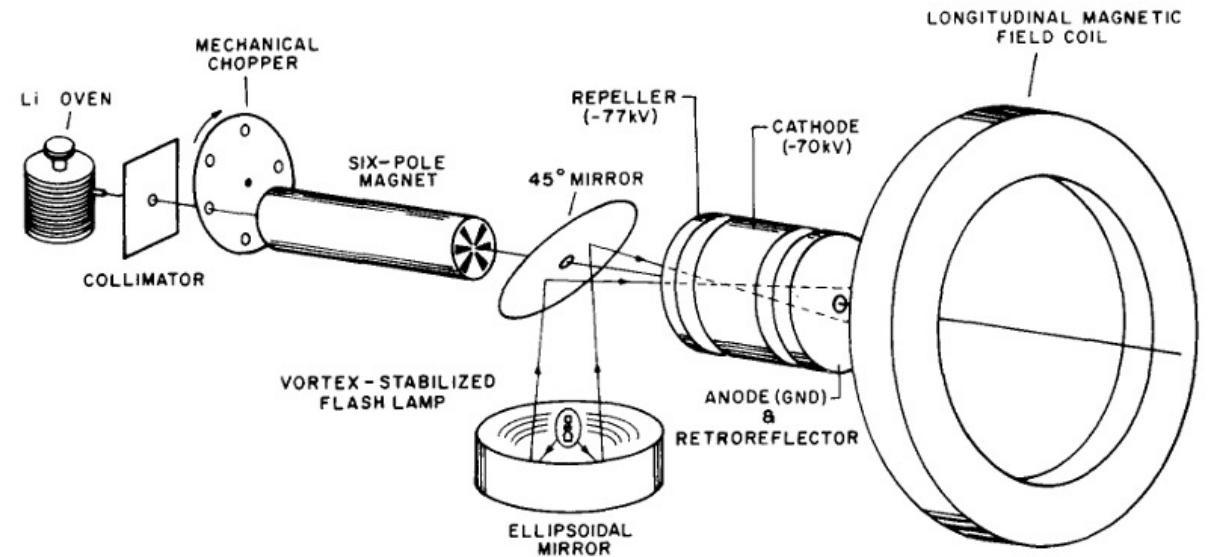
$$\tau = \frac{8\sqrt{3}}{15} \frac{4\pi\epsilon_0\hbar}{mce^2} \left(\frac{mc^2}{E}\right)^2 \left(\frac{H_0}{H}\right)^3$$

H_0 はSchwinger磁場を表す

リラクセーション時間の程度は数分～数時間だから、ストレージリングにしか使えない

偏極ビームの履歴

- 1930年代：偏極電子ソースは提案される
- 1971年に加速器用のスピン偏極電子源が開発され、1974年に出来上がった
 - イェール大学が開発したPEGGYと呼ばれる電子源
 - スピン状態で分けした ${}^6\text{Li}$ 原子ビームから光イオン化した電子生成
- 1974ー1979年の間にSLACにおいて使用された
- 偏極度がかなり高かった (>85%) だがピーク電流は低く、非常に不安定のためデッドタイムは半分以上



PEGGYのイラスト

偏極ビームの履歴

- SLACは1981年からしばらく中止したが、1980-1990年代から偏極電子銃が世界中に普及してきた：

米： MIT、ジェッフアソン国立研究所、SLAC (92年から)

日本： 名古屋大学

独： マインツ大学、ボン国立研究所

加速器実験に限らず、電子銃・カソードを改善する研究も多かった

特に、偏極度と耐久性の期限を克服するため

21世紀にも互り、現在でも改善するような研究が行われている

新しい生成方法：GAAS半導体

- 1974年: GaAsという半導体から偏極電子を出せる可能性が述べられた
- すぐ後、実験で行った。珍しく、理論より実験結果の偏極度が高かった
- 実験に用いられるように、SLACがGaAsを元にしたDC銃を開発し始め、1978年に実用化した

現在、偏極ビーム生成
はほとんどGaAs電子源

カソードの性能パラメータ

カソードの性能を具体的に説明すると、3つのスペックを求める：

① 量子効率

(何個の電子を放出できる？)

② 偏極度

(何割は同じ偏極？)

③ 耐久性

(どれぐらい長く使える？)

← 説明は少し後

偏極度と量子効率 (QE)

まずは量子効率：与えられた光子の数による、電子何個が出る。

この値を量子効率と呼び、 η で書くようにする。だとしたら、その比率は

$$\eta = \frac{N_e}{N_\gamma}$$

放出する電流 I で表すなら、

$$I = e\eta N_\gamma$$

- この値を直接測定するのはあまり現実的ではないため、実際に測れる値にしなければならぬ。光電効果によるビーム電荷 Q で定義すると、

$$Q = \frac{\eta e P_L \lambda_L}{hc}$$

P_L はレーザーのパワー (出力)
 λ_L はレーザーの波長



$$Q[nC] = 8.08 \times 10^{-3} \eta[\%] P_L[\mu J] \lambda_L[nm]$$

偏極度と量子効率 (QE)

- 電子数だけでなく、放出した電子の何割のスピンのベクトルが同じのも定義する (偏極度)
- 偏極度は、↑と↓の2つのスピン状態、 N_{\uparrow} (N_{\downarrow}) は↑ (↓) 状態の電子数を用いながら、

$$P = \frac{N_{\uparrow} - N_{\downarrow}}{N_{\uparrow} + N_{\downarrow}}$$

- で定義する。その式を鑑みて、↑も↓も丁度同じ数がある場合、偏極度が0
- 逆に一つの状態 (↑又は↓) しか存在しない場合、偏極度は1 (即ち100%) となる
- バルク (ドーピングなし) GaAsは理論的に50%より越せない

半導体カードの構成

フェルミとボーズ分布

- 量子力学による、フェルミ粒子(1/2 整数スピン)とボーズ粒子(整数スピン)は異なるbehaviorがある。そのため、状態方程式と分布が異なる：

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-\mu)/kT} + 1}$$

Fermi-Dirac 分布

$$f(E) = \frac{1}{e^{E/kT} - 1}$$

Bose-Einstein 分布

Where:

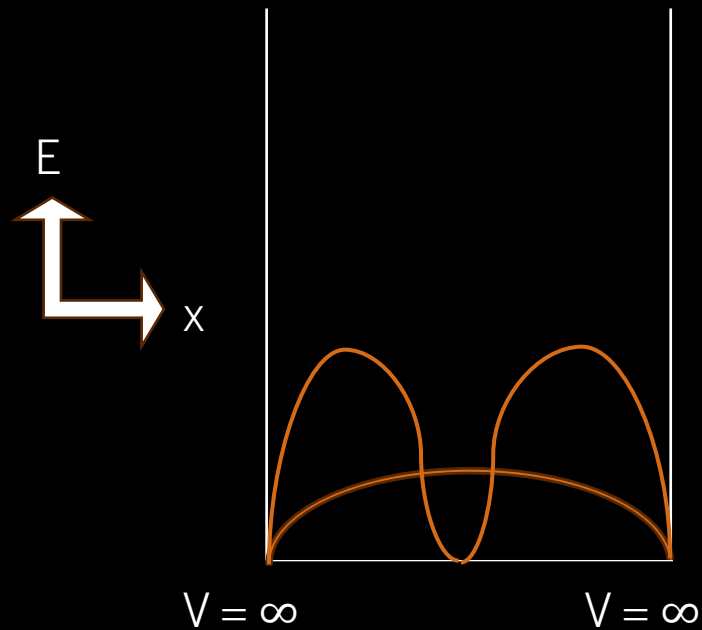
E: Energy

T: Temperature

k: Boltzmann constant

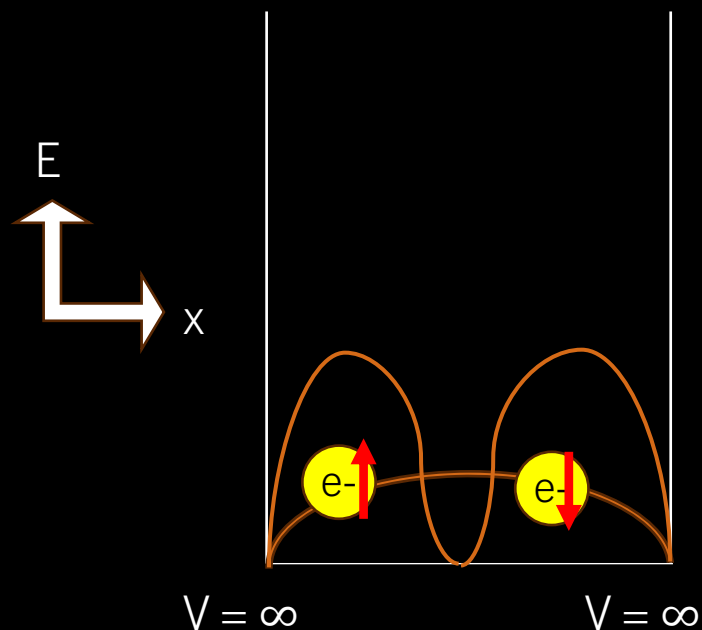
μ : Chemical potential

ポテンシャルウェルにあるフェルミ粒子



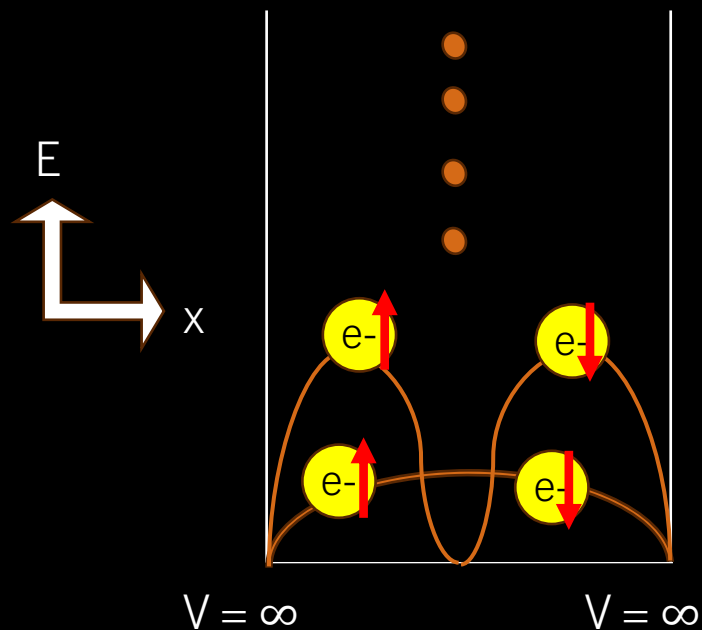
- Potential Wellに拘束されたフェルミ粒子は Schrödinger方式を満たすエネルギー準位を作る
- 左の図に例が表してある

ポテンシャルウェルにあるフェルミ粒子



- Potential Wellに拘束されたフェルミ粒子は Schrödinger方式を満たすエネルギー準位を作る
- 左の図に例が表してある
- Pauli Exclusion Principleによる、フェルミ粒子は同じ状態を持ってないから順位ずつ電子2つしか入れない

ポテンシャルウェルにあるフェルミ粒子

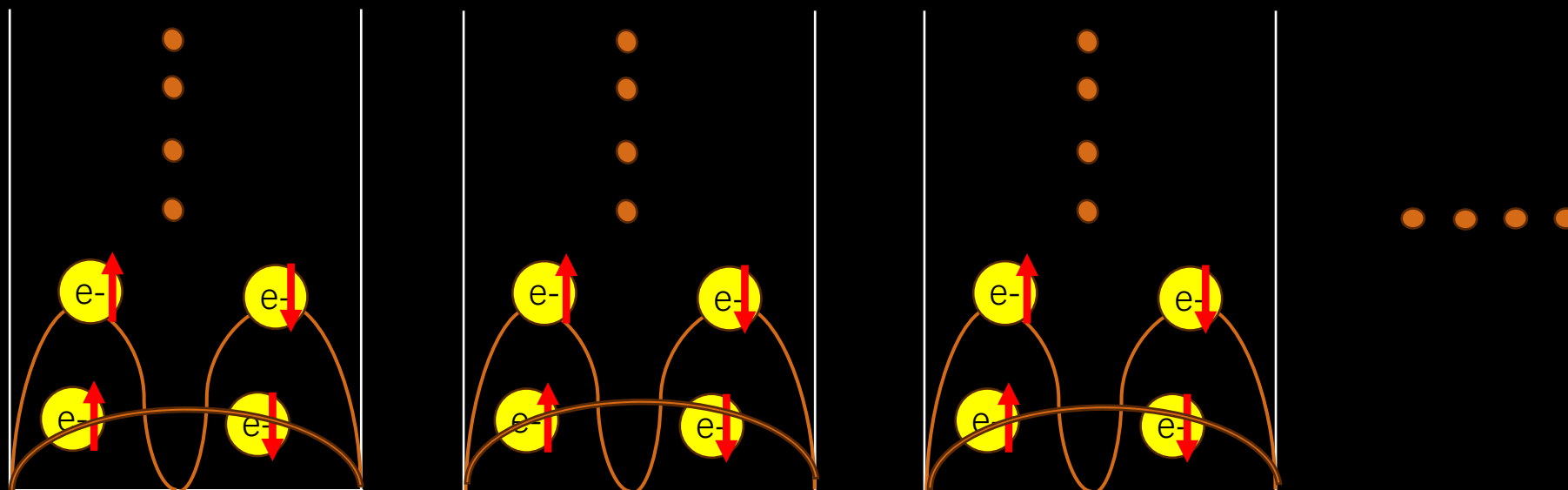


- Potential Wellに拘束されたフェルミ粒子は Schrödinger方式を満たすエネルギー準位を作る
- 左の図に例が表してある
- Pauli Exclusion Principleによる、フェルミ粒子は同じ状態を持ってないから順位ずつ電子2つしか入れない
- $T=0$ でも高エネルギー準位が満たされる

バンド構造

- 個体物質を鑑み、核は一つ一つPotential Wellになるから無限のPotential Wellの格子で考えられる。

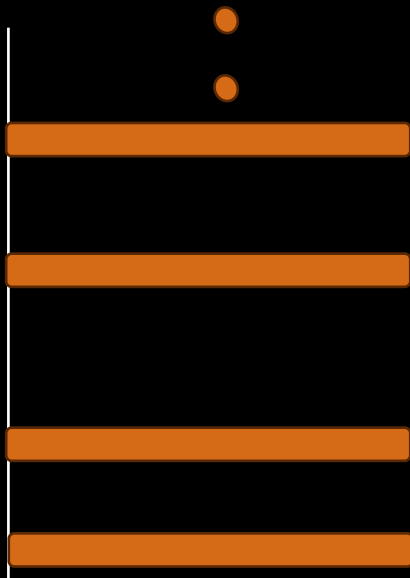
各々の核の順位構成が重なる



バンド構造

- 個体物質を鑑み、核は一つ一つPotential Wellになるから無限のPotential Wellの格子で考えられる。

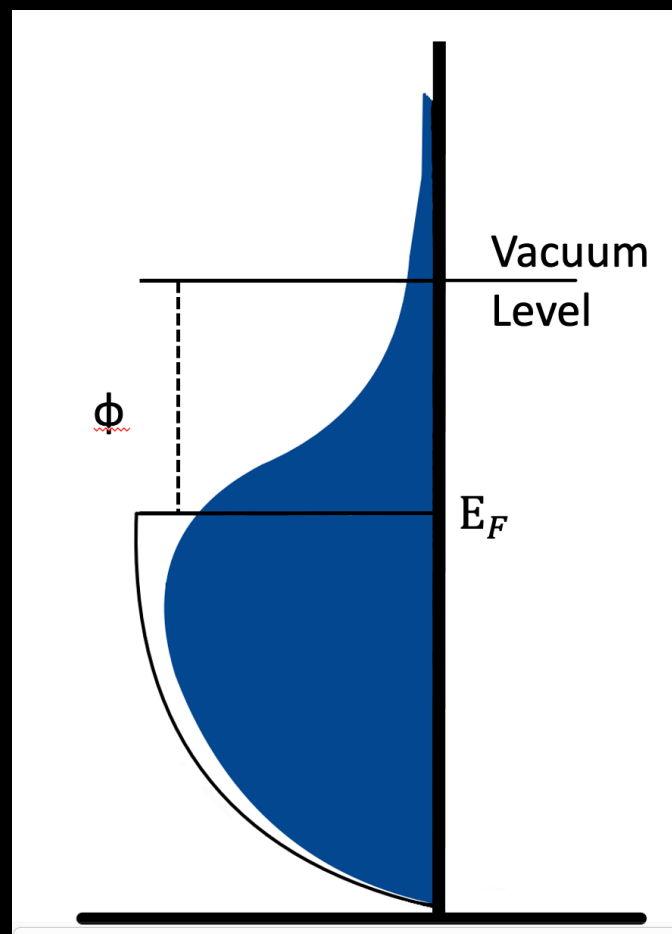
各々の核の順位構成が重なる



その重なっている順位はバンドになる。低エネルギーから電子が入り、だんだん高エネルギーバンドで依存する。

すべての電子が入った状態で、最高の電子が入っているレベルはフェルミ準位と呼ばれる。

バンド構造：フェルミ準位



$$f(E) = \frac{1}{e^{(E - \mu)/kT} + 1}$$

$T > 0$ だと、フェルミ・ディラック分布に従って左の図のようなエネルギーを持つ

E_F はフェルミ準位と ϕ は仕事関数を定義する

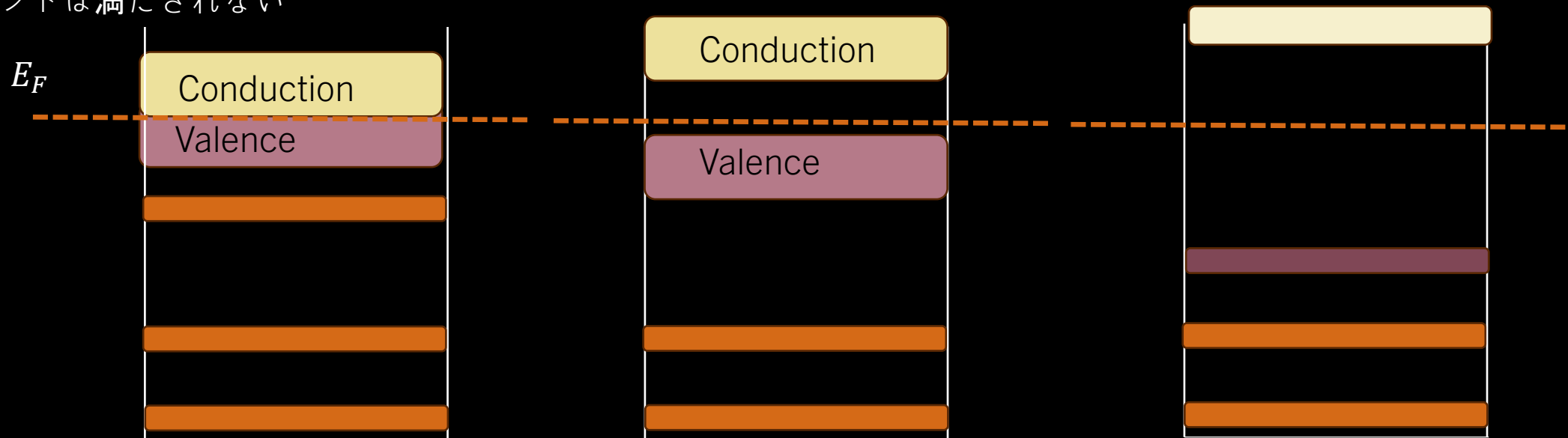
APPLICATION TO MATERIALS: BAND STRUCTURE

物質のバンド構成による、その物質は導体、半導体、又はInsulatorである。

導体：
 E_F はバンドの中に入っている
伝導帯と価電子帯が重なる
このバンドは満たされない

半導体：
 E_F はバンドとバンドの間が、一つに近い
価電子帯は満たされる

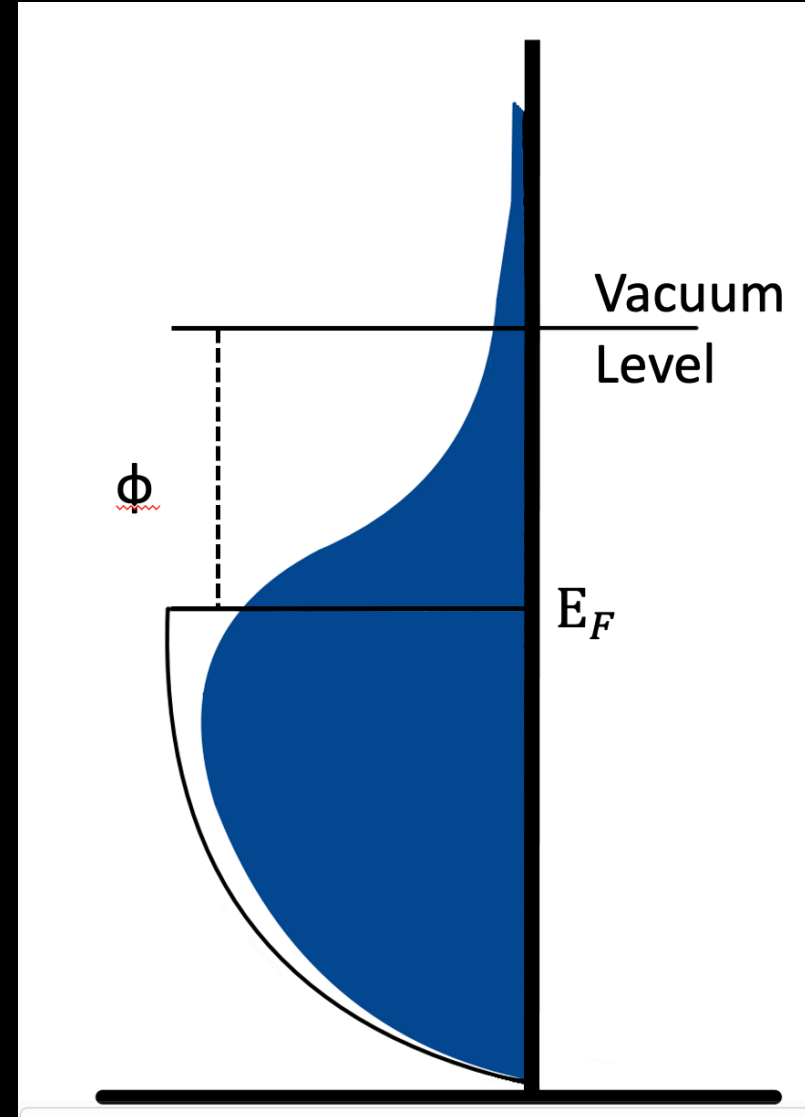
Insulator：
伝導帯と価電子帯は遠いかつフェルミ準位は両方から遠い。



価電子帯と伝導帯の間にエネルギー準位は存在できない。これはバンドギャップと呼ばれる。しかし、励起された電子はバンドギャップを越せ、伝導帯へ入れる。

光電効果による電子放出

- 光子の源を用いて、エネルギーを与えて伝導帯へ励起することできる。
- それから、真空へ放出させてビームを生成する。真空へ放出するエネルギーは真空の順位とフェルミ準位の差であり。この値は仕事関数と呼ばれ、 ϕ で定義される。



光電効果による放出

- 光電効果にて電子放出を出すには、 ϕ よりエネルギーが高い光子が必要:

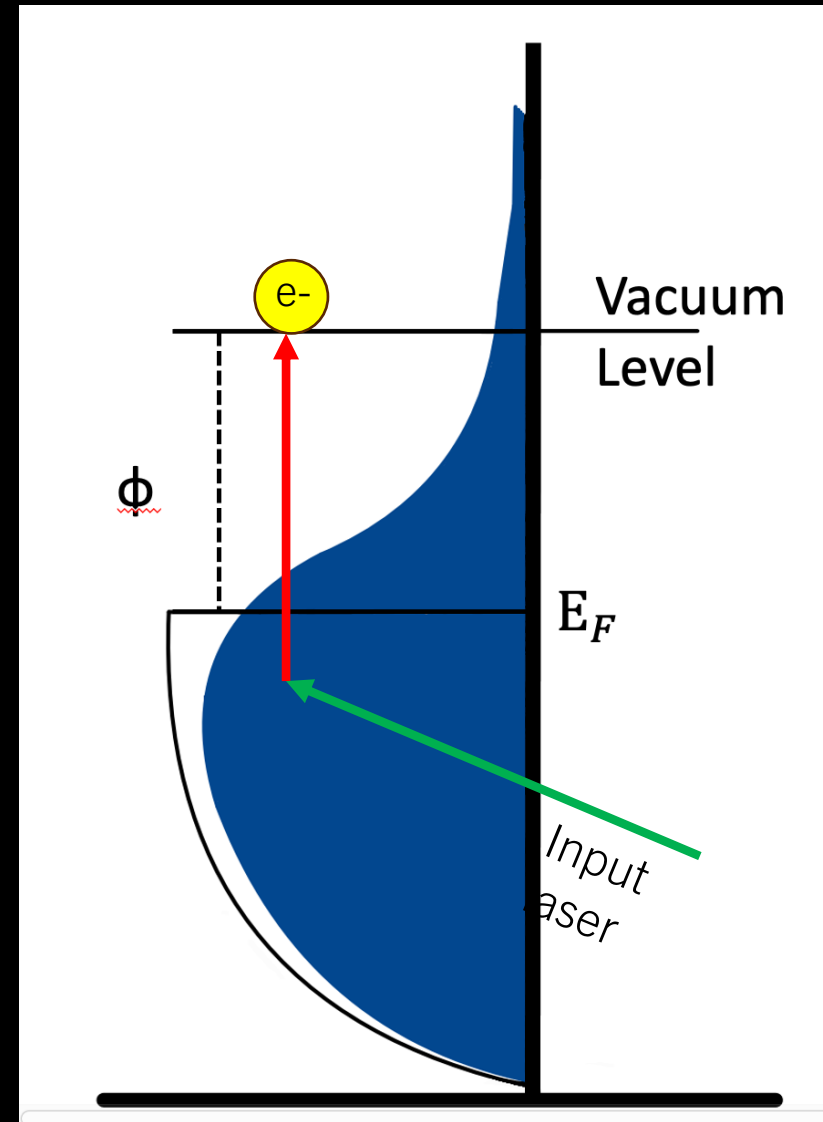
$$e > h\nu_0 = \phi$$

又は波長 λ で定義すると,

$$\lambda < \frac{c}{\nu_0} = \frac{hc}{\phi}$$

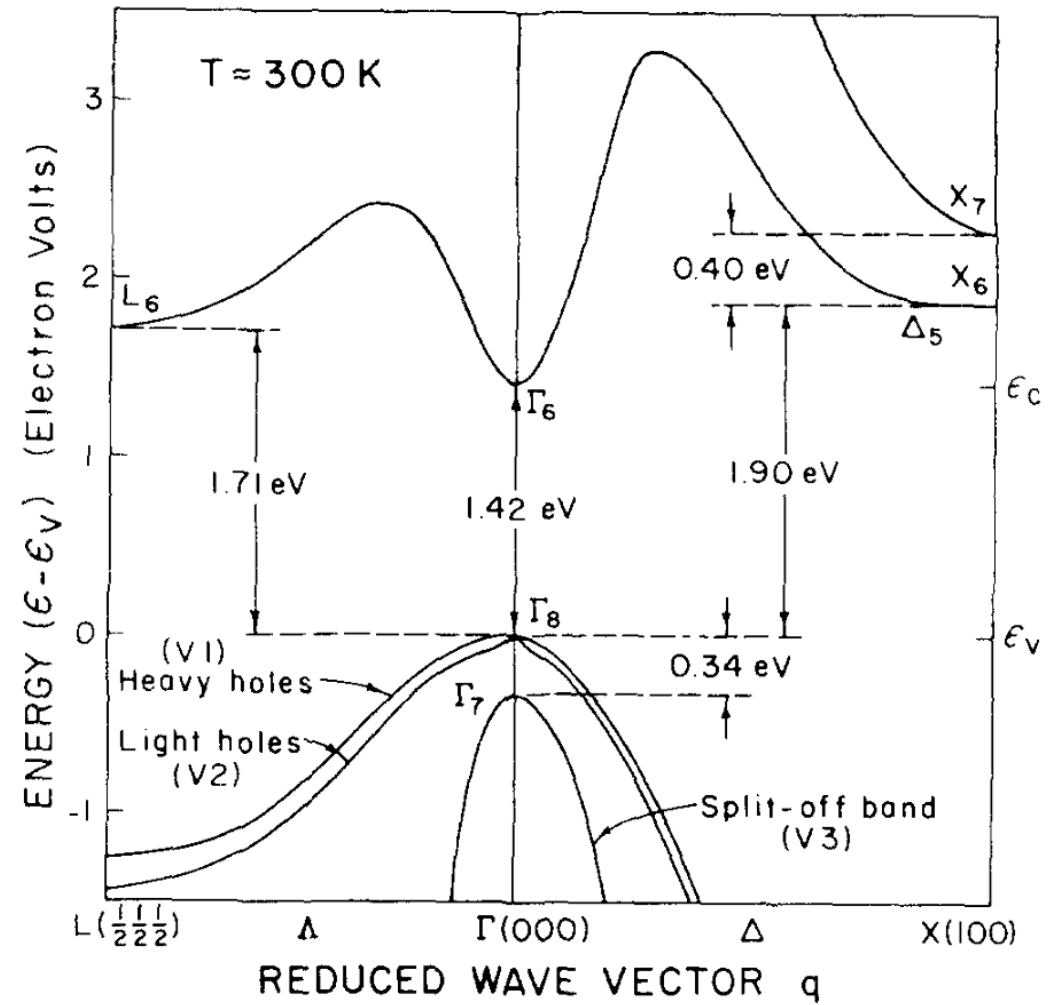
この効果による総合電流は:

$$J = \frac{4\pi emkT}{h^3} P \int_{E_0-h\nu}^{\infty} \ln\left[1 + e^{\frac{\mu - \epsilon_z}{kT}}\right] d\epsilon_z$$



GAASのバンド構造

- GaAsは Γ 点で価電子帯と伝導帯の間に1.42eVバンドギャップがある
- 価電子帯のマックスと伝導帯のミニмумは同じ点に現れる→「直接遷移型半導体」と呼ばれる

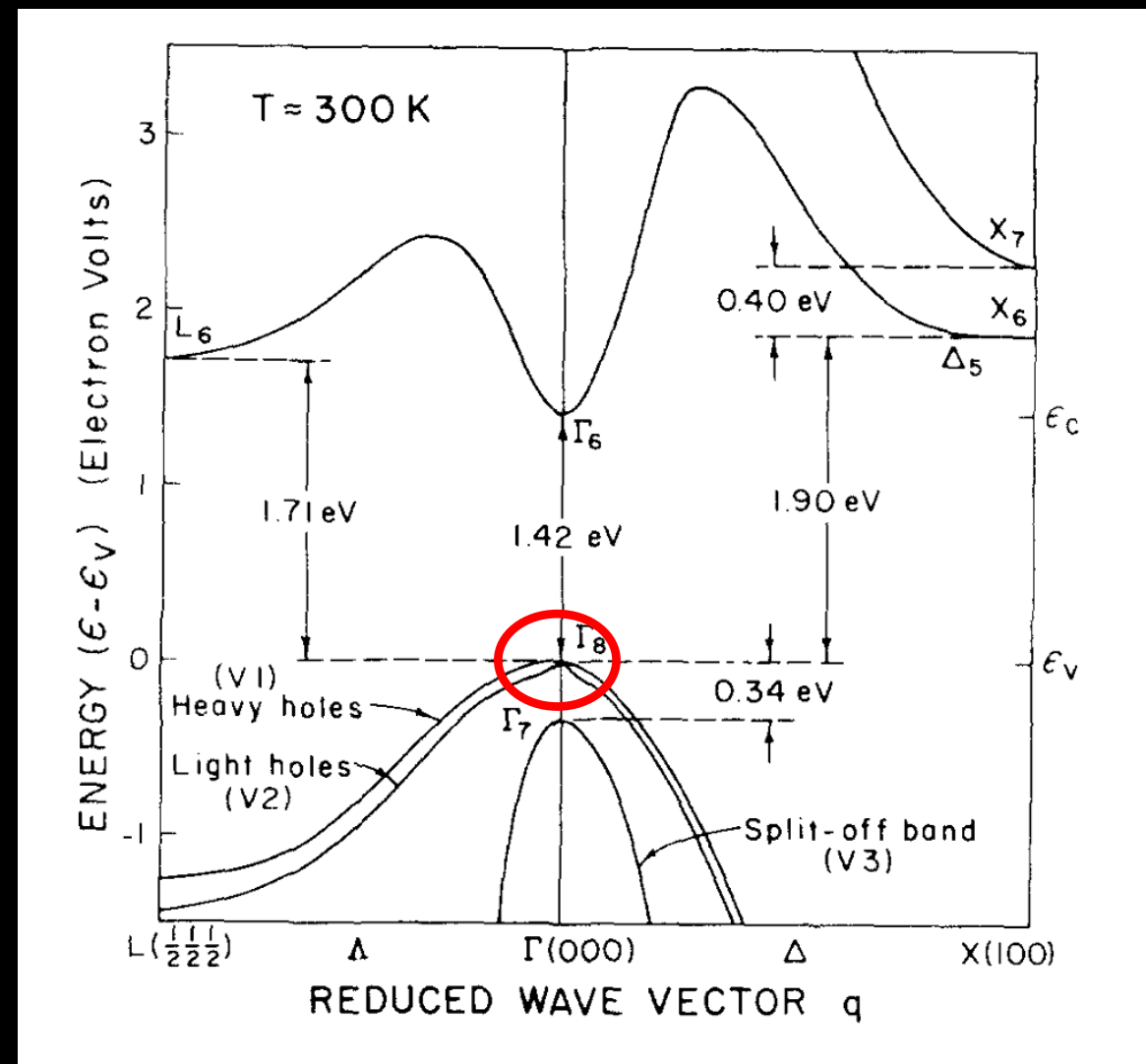


GAASのバンド構造

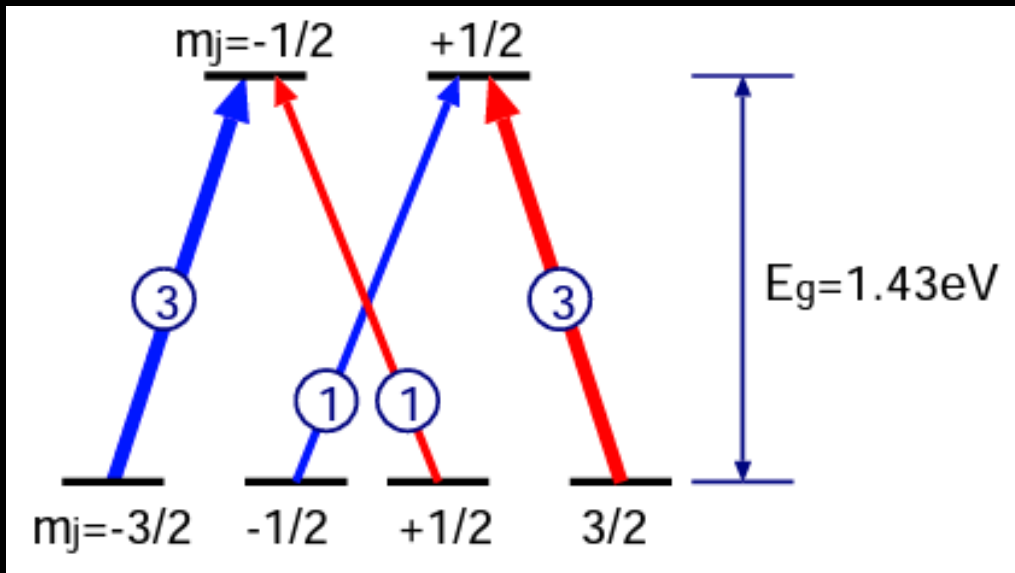
重なっているバンドの m 状態が問題となる。
 Heavy Holeは $m = \pm 3/2$ を持ち、Light Holeは $m = \pm 1/2$ を持つ。量子力学に従って、遷移確率を計算すると

$$m = \pm 3/2 \rightarrow \pm 1/2 : 3/2$$

$$m = \pm 1/2 \rightarrow \mp 1/2 : 1/2$$



価電子帯の縮退状態



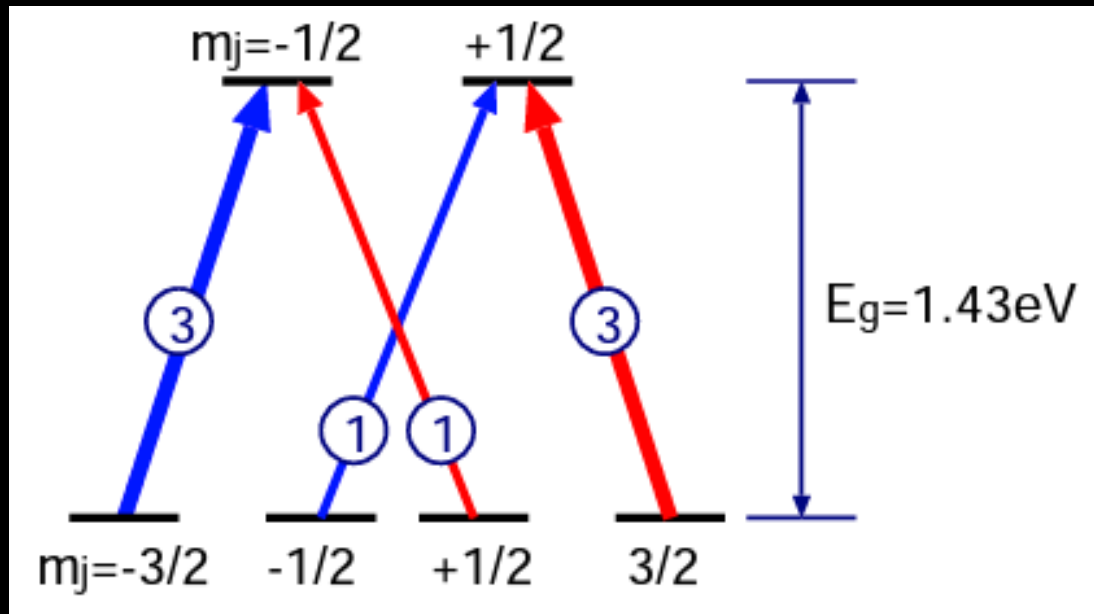
GaAsの Γ ポイントのバンド構造。厚い線は効率の高い遷移、細いのは効率の少ない方。

縮退状態のため、求めるバンドを優先的に選択できない

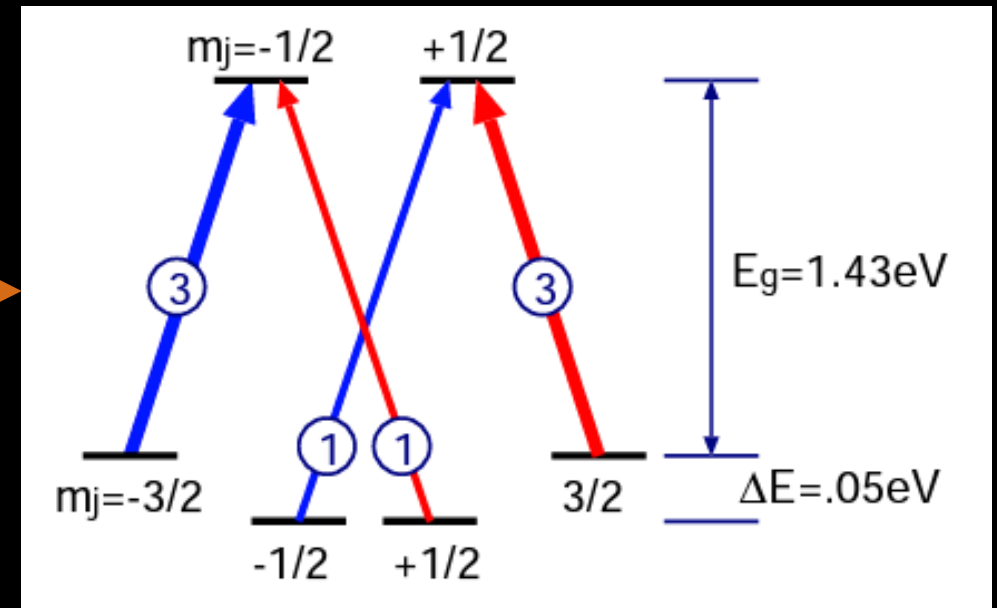
→ 偏極度の期限はその邪魔の故

偏極度を上げる研究はこの縮退状態を克服することを狙った

価電子帯の縮退状態



縮退状態
を解ける



縮退状態をなくすと $\sim 0.05\text{eV}$ ギャップを誘導する。それさえあれば、 $\pm 1/2$ 状態の邪魔を回避して偏極度を改善できる

縮退状態をなくす手動

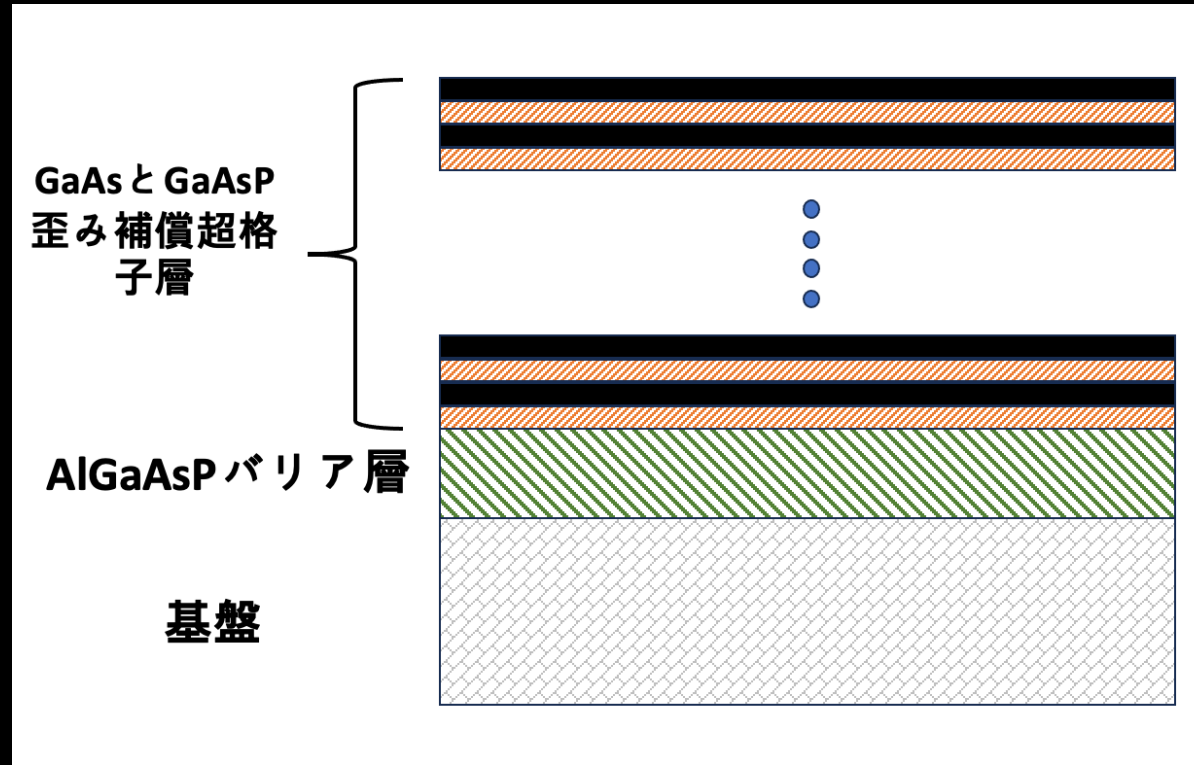
GaAsの結晶の性能を高める方法がある：

- ドーピング：～100 ppm程度でPなどを格子に入れる
→ フェルミ準位を下げる
- 格子を歪める：ドーピングが異なる層を重ねる（歪み格子）
→ GaAsP、GaAsAl等を交互で作る
- 特別厚い層をベースにする（歪み超格子）

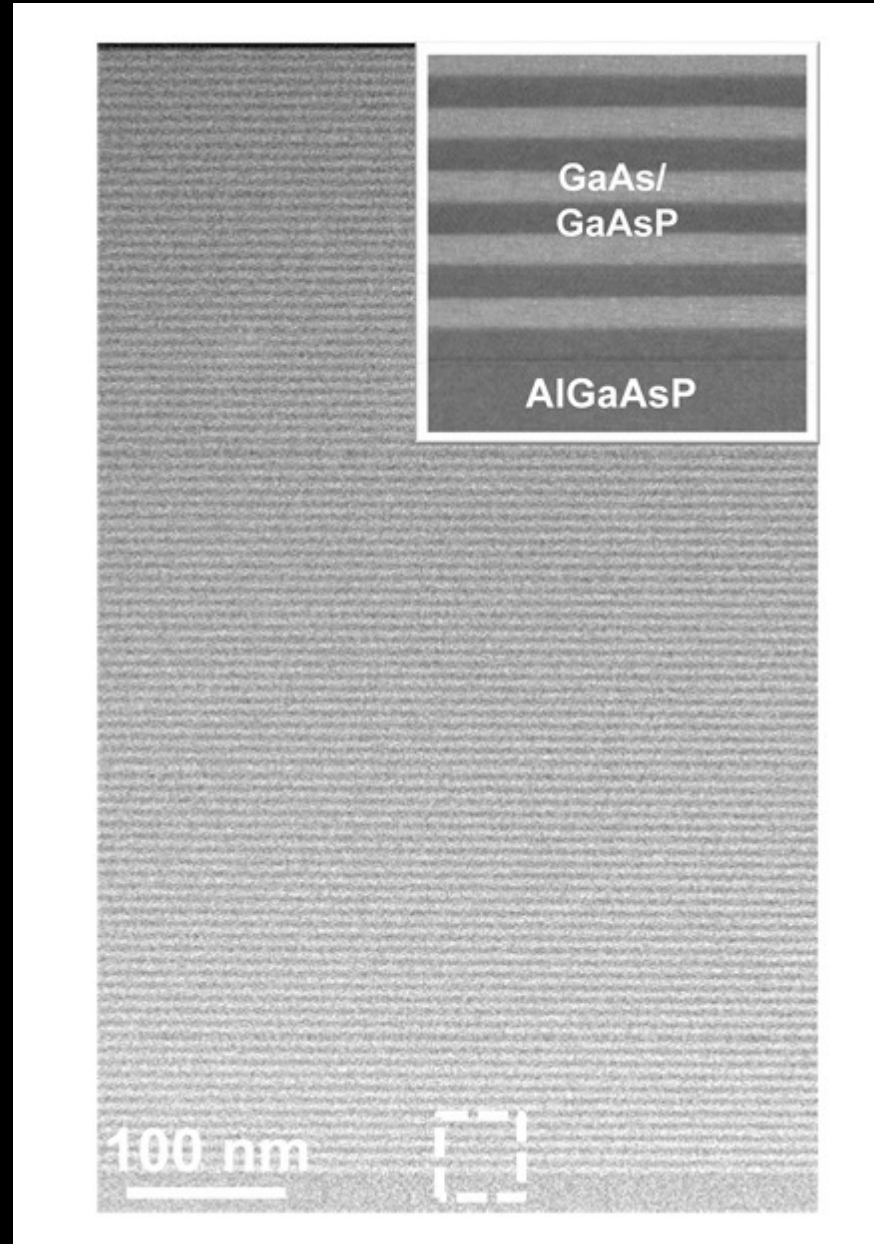
縮退状態をなくす：歪み超格子と歪み補償型超格子

- 歪み超格子の層が増えれば増えるほど、歪みが緩和されるからバリア層のしたに基盤に置いて固く補償できる

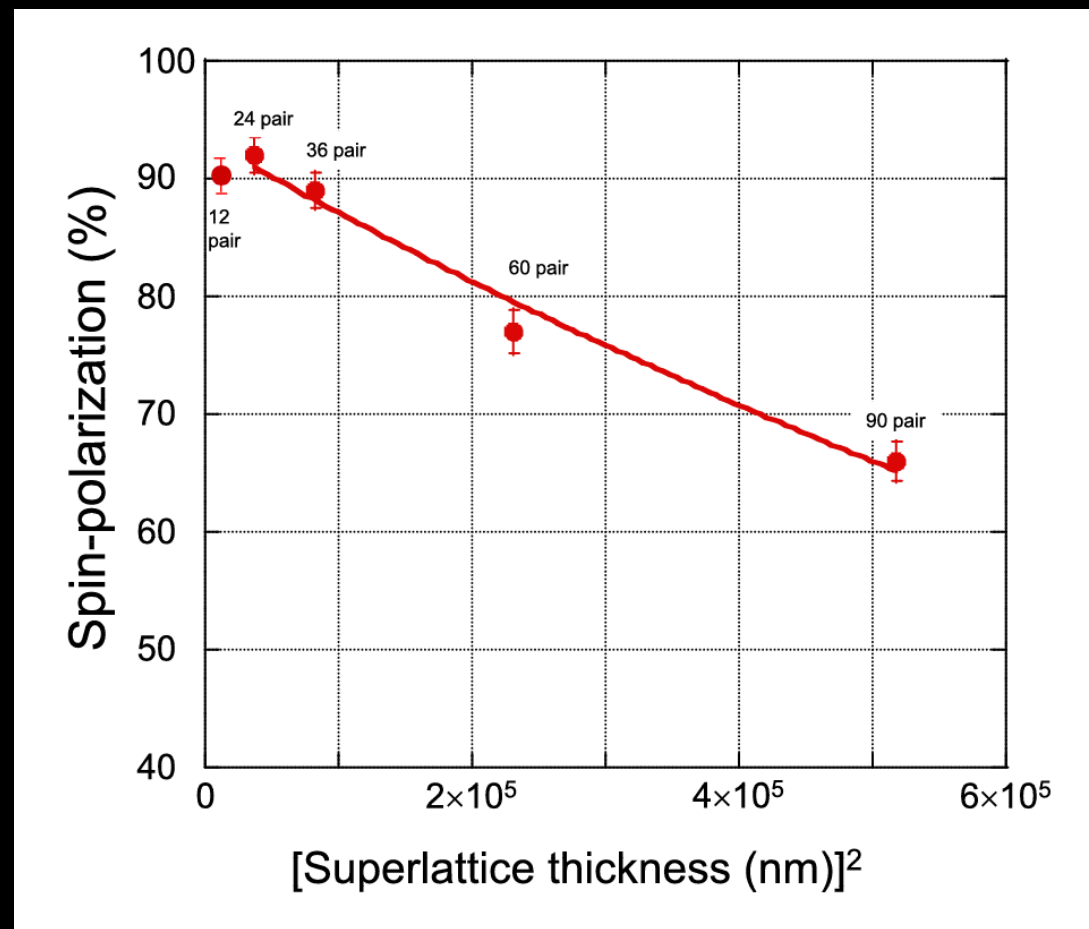
→歪み補償型超格子



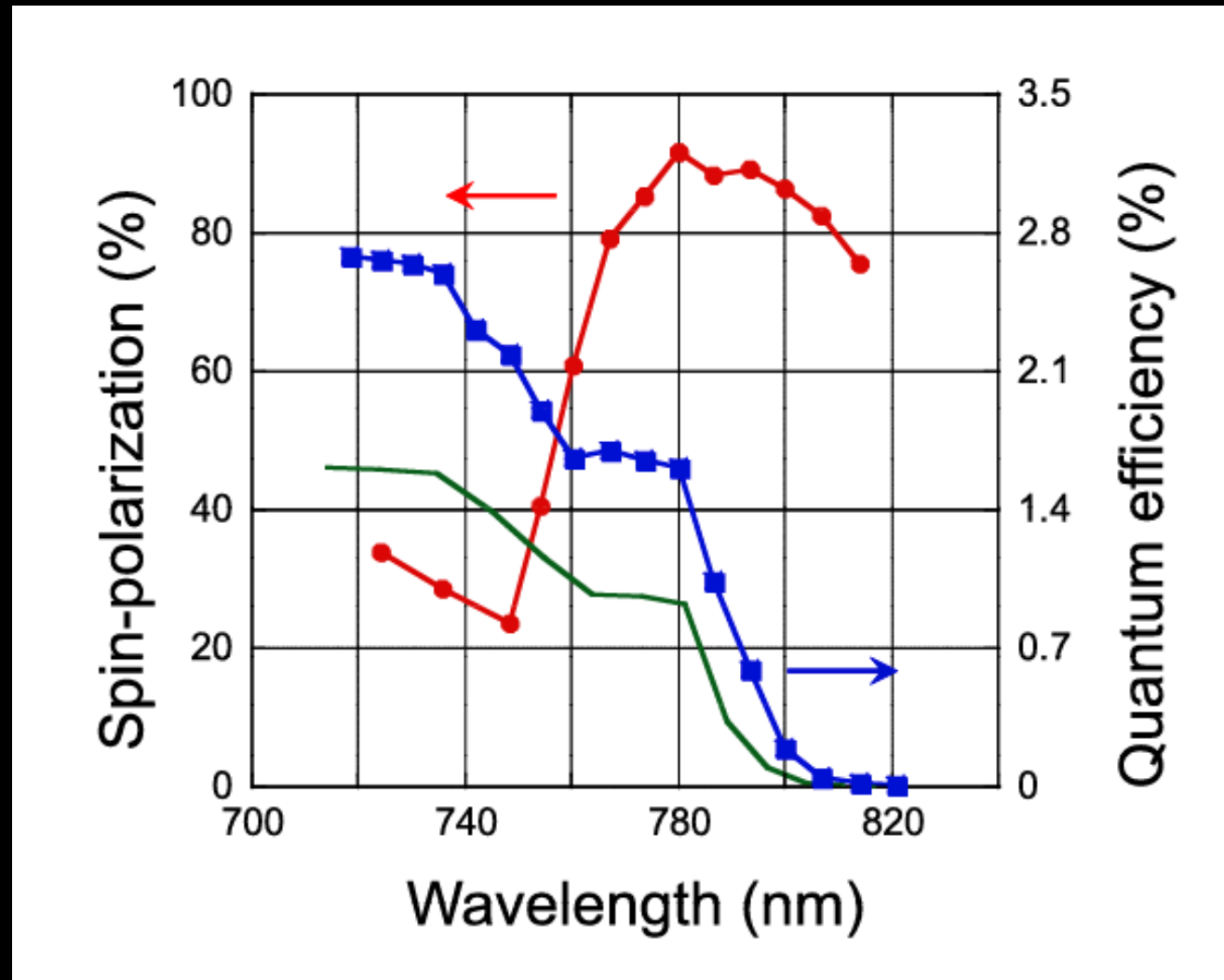
歪み補償超格子の構成：電子顕微鏡



歪み超格子を最適化する



歪み超格子を最適化する

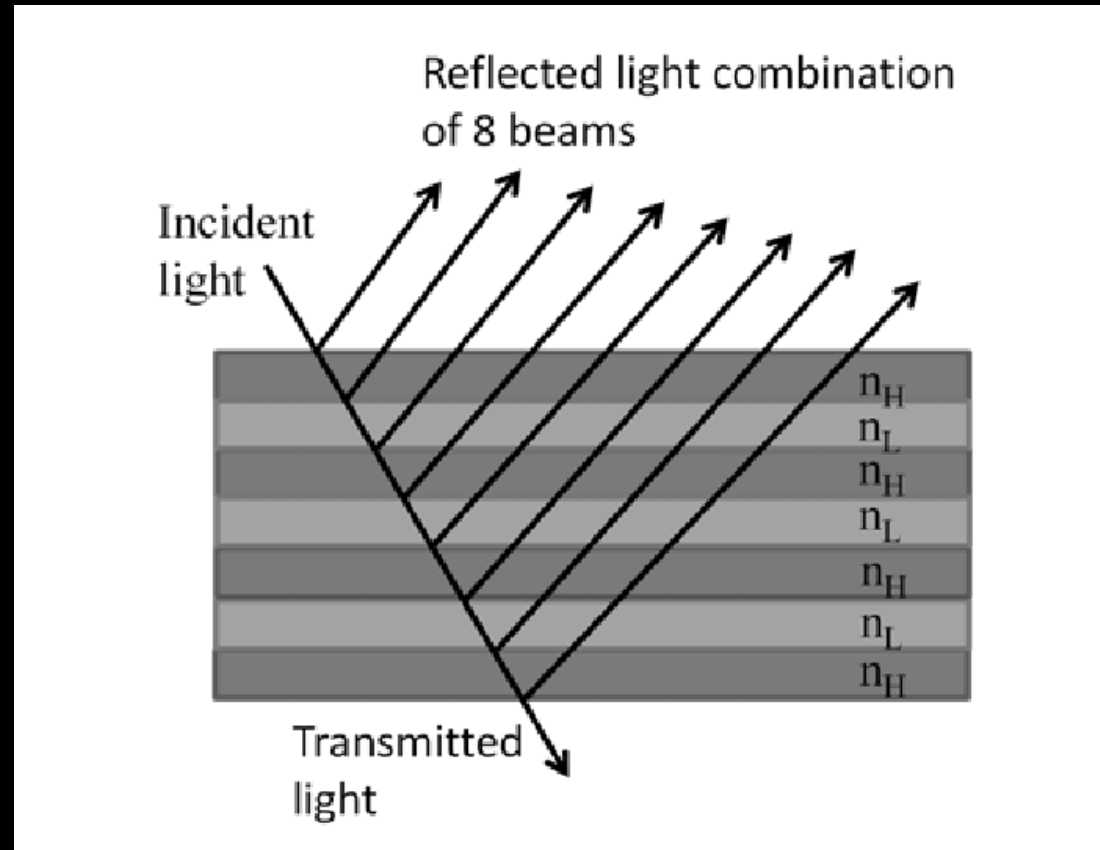


格子の種類と比較

陰極類	偏極度 (%)	量子効率 (%)
Str. GaAs on GaAsP	~85	~0.1
Str. GaAs w/ DBR	~85	~1.0
Superlattice (GaAs-AlGaAs)	~70	~1.0
Strained layer superlattice (InGaAs-GaAs)	~90	~0.05
Strained Layer superlattice (InGaAs-AlGaAs)	75-85	0.1-0.5
Strained layer superlattice (GaAs-GaAsP)	~80	~0.3

DISTRIBUTED BRAGG REFLECTOR

- カソード表面に Distributed Bragg reflector をつけるとレーザー光子が結晶に再反射され、更に電子を励起する



参考 : *Butt, Ali & Fomchenkov, Sergey & Khonina, Svetlana. (2017).*

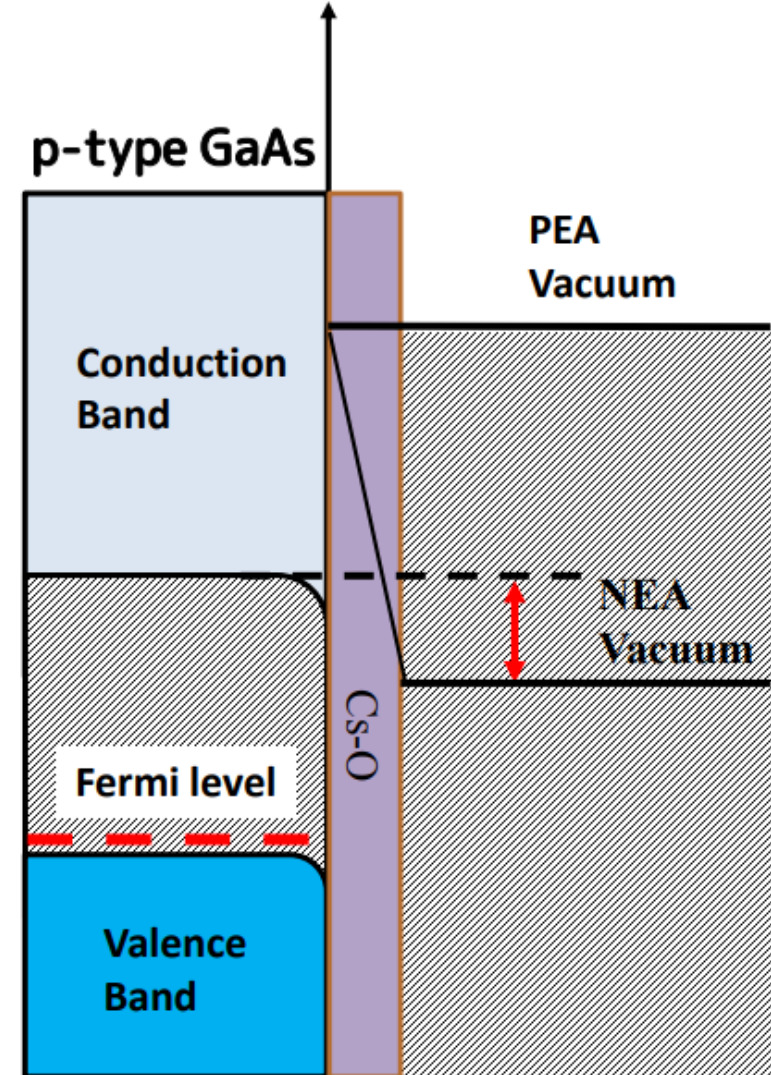
DBRの例。 n_H と n_L の屈折率が異なる故、全内部反射が増える

QEを高くする：NEA薄膜

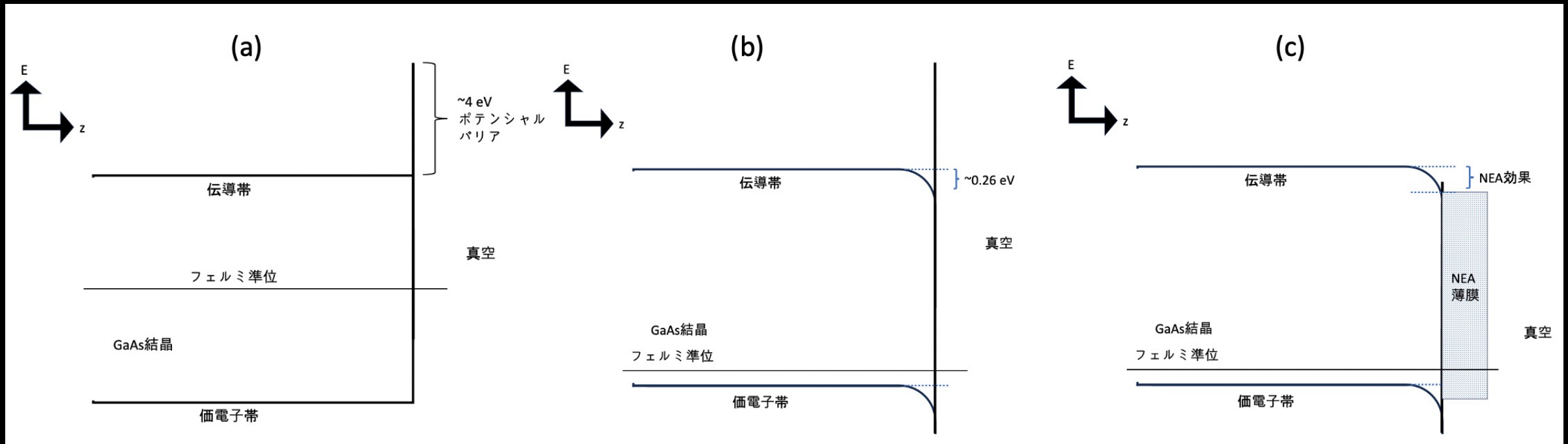
GaAsカソードは歪み補償超格子で作られる場合、偏極度が9割以上にいけるものの量子効率が低い（～1%）

高電流ビームを生成するため、なるべく量子効率を高くするがいい

真空のポテンシャルバリアを和らぐために、アルカリ素をカソード表面に蒸発する

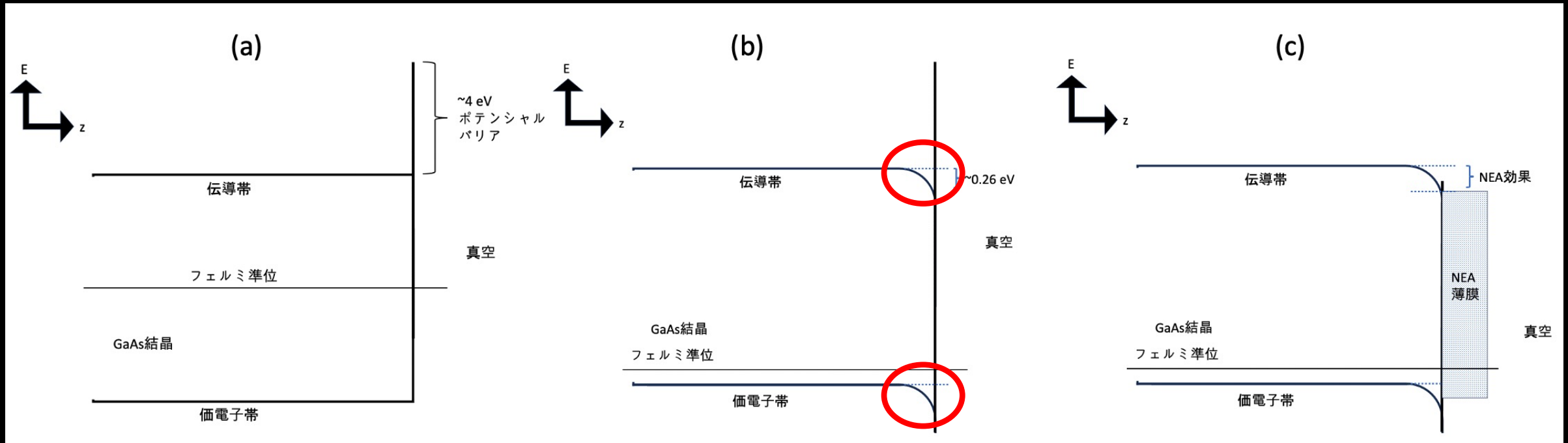


NEAの素過程



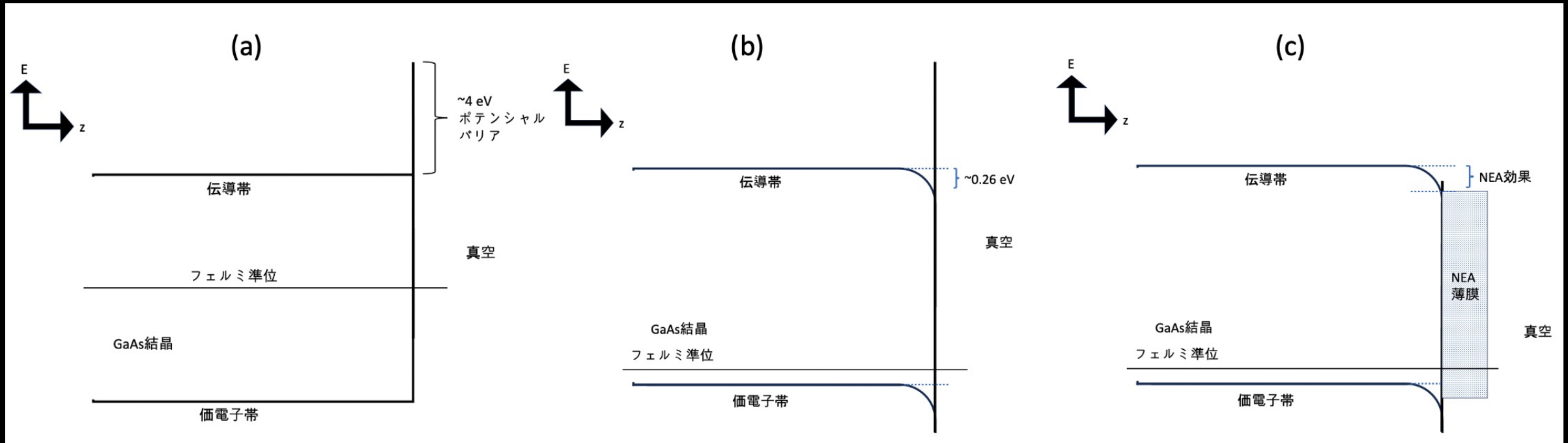
(a)の図に普通のGaAs結晶を表す。電子がGaAsから真空へ進行すると4 eVのポテンシャルバリアに臨む。

NEAの素過程



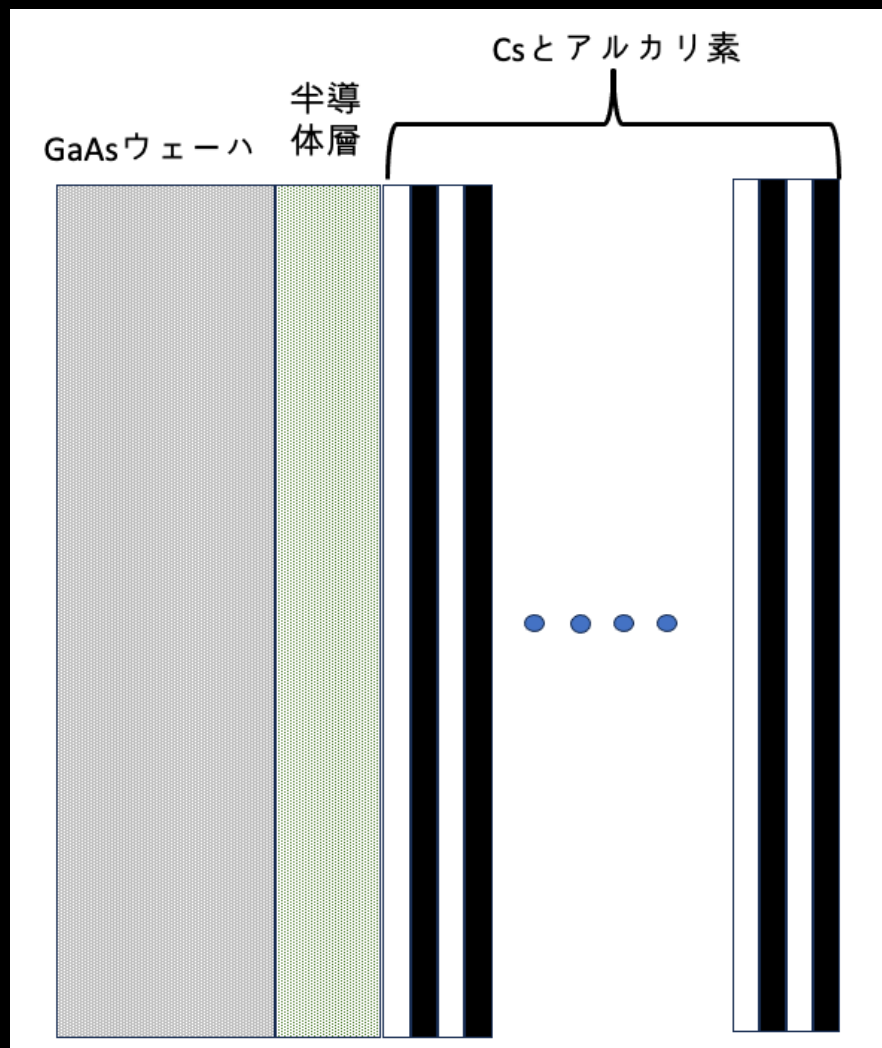
(b) には歪み格子で生成され、フェルミ準位が低くされ、バンドの端が 0.26eVで低くされた。しかし、ポテンシャルバリアが残る。

NEAの素過程



(c) にNEA薄膜がつけられ、ポテンシャルバリアをなくした。この効果にて、結晶バルクより簡単に電子が真空へ放出される。

量子効率を上昇：NEA薄膜



基本的に、NEA薄膜はアルカリ素とCsが薄く（ 100\AA 程度）つけられる

実験による、直接つけるより半導体（例えばSb）の層をGaAsにもつけると効果が高められる

その上、交互にCsとアルカリ素が蒸着される。最終の形はミルフィーユみたい。一層は数 \AA 程度である

カソードの作成

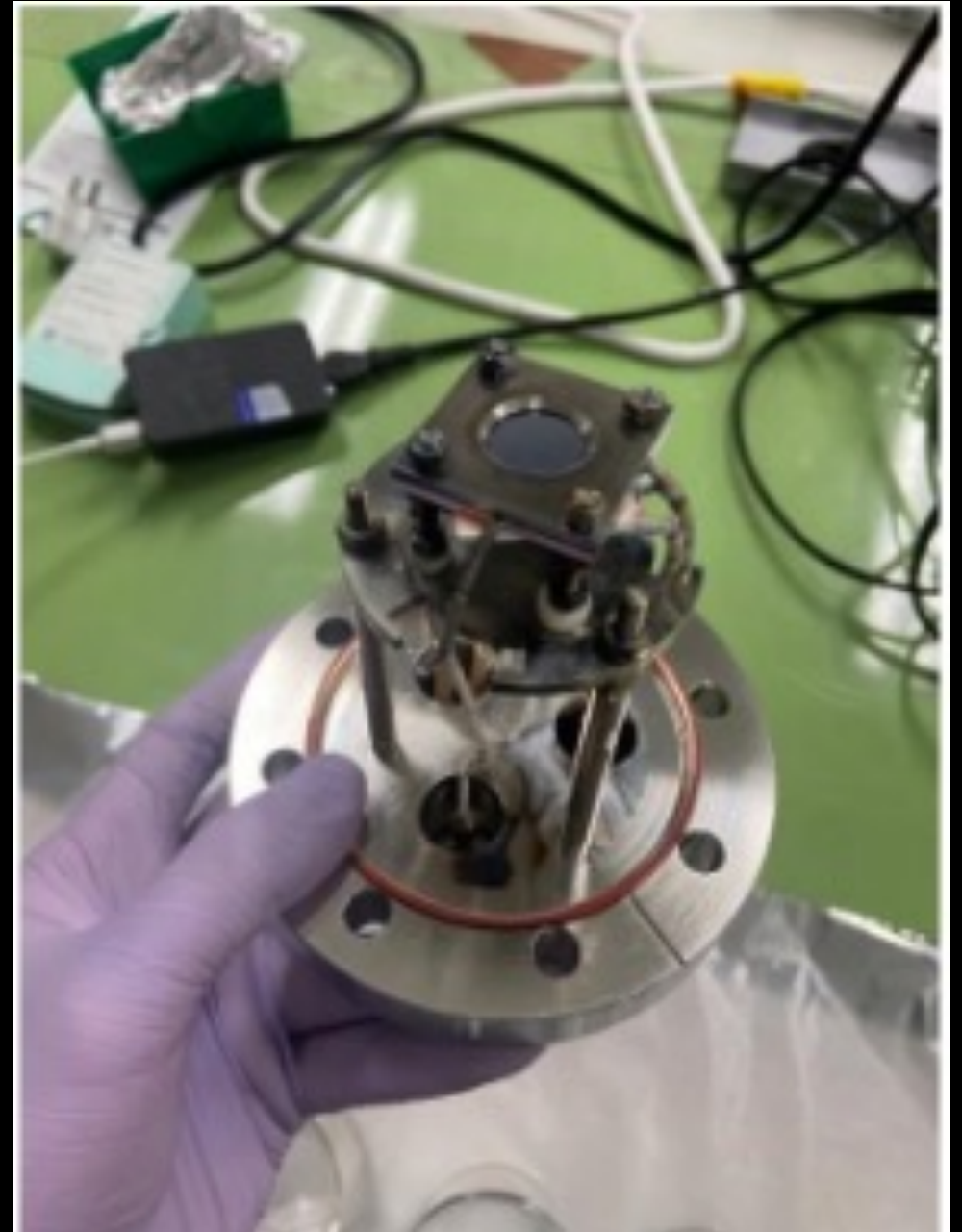
偏極電子ビームを作る時、4つの材料が必須：

- ① ピュアGaAs結晶
- ② 高い真空
- ③ レーザーシステム
- ④ 放出用のDC電場



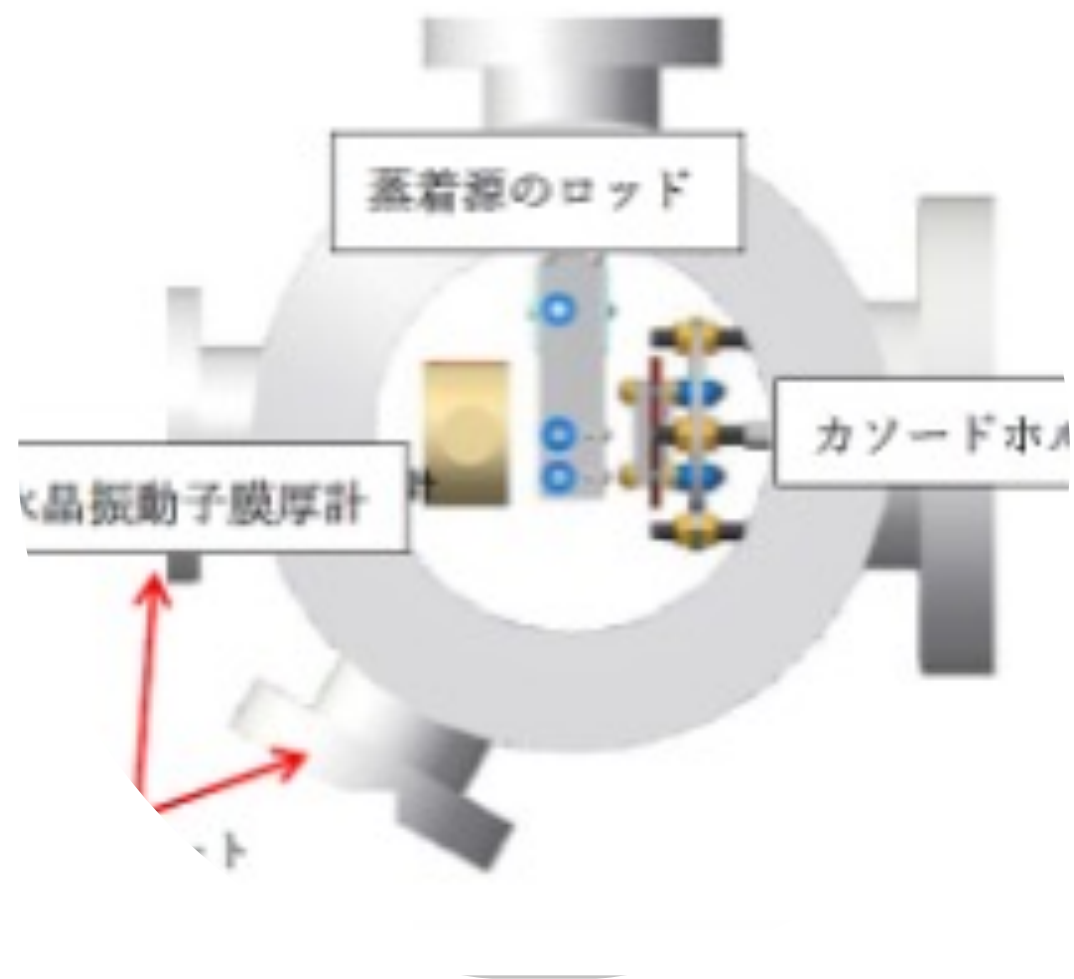
カソードの作成

- GaAsウェーハは企業から購入できるが、使えるサイズと形に切断しないとイケない
→できるだけ表面を汚さずに切るのが注意ポイント
- 表面から汚染・異物を抜かすために洗浄する
- In等で台に半田で接着
- 表面の上にマスクをつける
- 真空チェンバーに入れる



カソード活性化

- 真空に入れてから活性化を行える
- 例の真空チェンバーは右に表される
- カソードホルダーと薄膜コントローラーの間に蒸着源が設置してある
- 蒸着源に電流をかけて蒸発させる。対象に漂い、表面にもコントローラーの結晶に蒸着する



NEAカソードの寿命

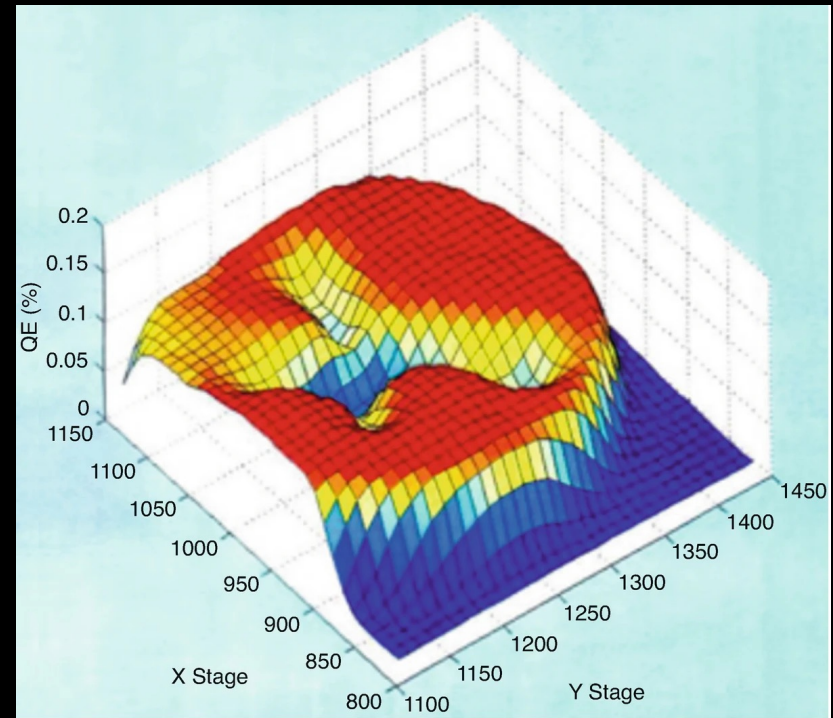
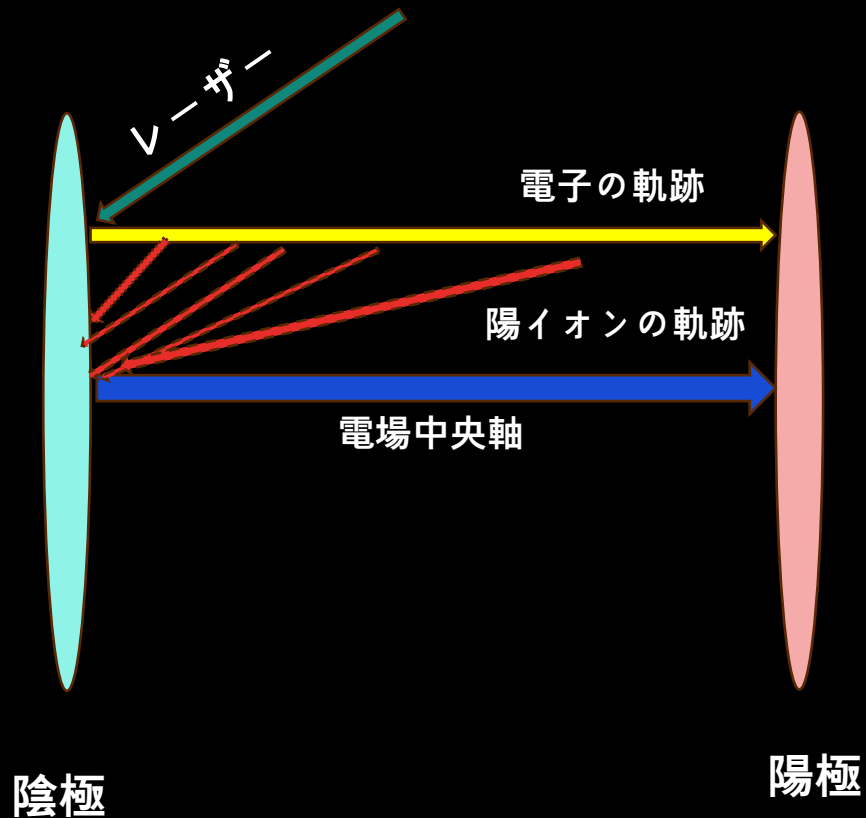
カソードを使えば使うほど、様々な原因でダメージを被って衰えてしまう。その劣化が進む度、量子効率や偏極度が下がり、効果を悪化させる。最終的には加速器のパラメーターを満たせなくなり、カソードを交換するか再びNEAをアクティブ化しないといけないことになる。

主に量子効率を劣化させる過程は3つある：

- 陽イオンの逆流 (ion back-bombardment)
- 熱脱離 (thermal desorption)
- 残留ガスの吸収 (chemical poisoning)

陽イオンの逆流

- 真空容器に残っているガスがイオン化され、電場でカソードへ逆流する
- 電場の中央軸へ漂うけど、質量による電子ほど遠く動かない
- 電子の放出点（レーザー照射スポット）と電場中央をつなぐ線あたり、「溝」を作る



使用済みカソードの量子効率スキャン。陽イオンの逆流の溝が明らかに見える。
(米・Jefferson National Lab)

陽イオン逆流の素過程

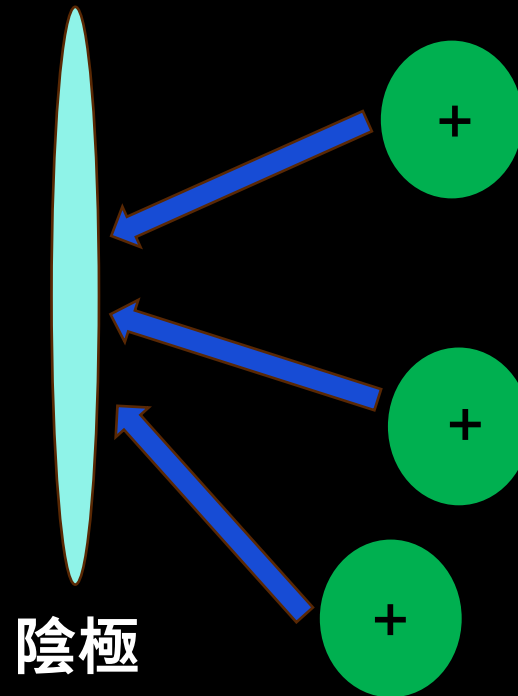
- 運動量による、陽イオンの逆流は様々な方法で量子効率を劣化させる
 - 高エネルギーイオン (>5 keV) : GaAs結晶の原子を動かして格子にダメージを与える
 - 中エネルギー (500 eV - 5 keV) : 表面の原子と衝突してNEA層を飛ばす(sputtering)
 - 低エネルギーイオン (<500 eV) : カソード表面を歪ませ、電子放出を妨げる

3つのプロセスの詳細や比率はまだ未確定であり、研究がし続けられている。

ガス吸収

NEA表面が真空容器に残っているガスと科学的に反応するプロセスである。そのプロセスが進む度、NEA薄膜の効果が劣化する。

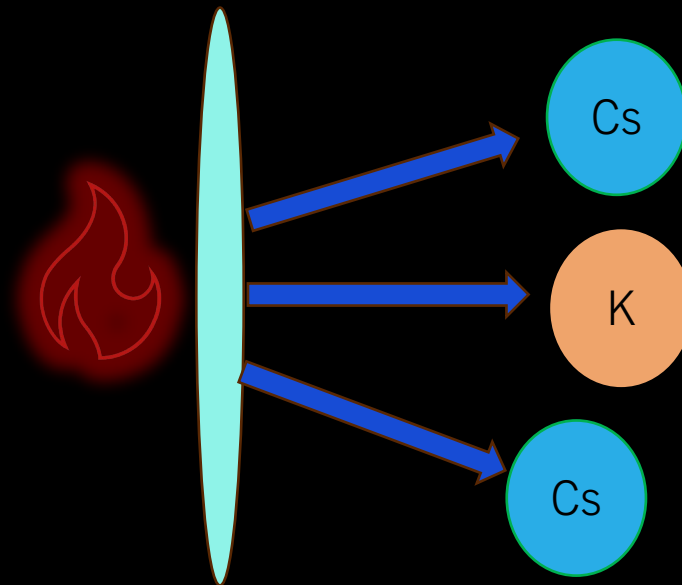
陽イオンの逆流も残留ガスの吸収もどちらも真空容器にあるガスに正比例するから、容器の真空を維持することは非常に重要である。



熱脱離

カソードの劣化にて量子効率が下がるけど、同じ電流を保つには更にレーザーの出力が必要となる。

照射している光子は熱へ転換され、カソードの温度を上げてNEA表面の原子を外してしまうと思われている。それは熱脱離というプロセスである。



カソードの寿命を延長

- ビームを止まらず、無駄なタイムロスを与えられないようにカソードの寿命をなるべく延長するのが重要

① 耐久性を上げる：NEA薄膜が崩れないように、新たな蒸着源や作り方を開発する

NEA材質	寿命 (10^{-3} Pa·s)
Cs-O	0.29 ± 0.03 [21]
Cs-O	0.40 ± 0.02 [22]
Cs-K-Te	6.50 ± 0.01

新たな蒸着源を使用すると更に高める可能性もある

カソードの寿命を延長

- ビームを止まらず、無駄なタイムロスを与えられないようにカソードの寿命をなるべく延長するのが重要
- ① 耐久性を上げる：NEA薄膜が崩れないように、新たな蒸着源や作り方を開発する
- ② 陽イオンの逆流を防ぐ

DC 偏極電子銃

- RF銃よりDC銃が普通（真空様子）
- 主に種類は2つ：Vent/BakeとLoad/Lock
- 両方は良し悪しある

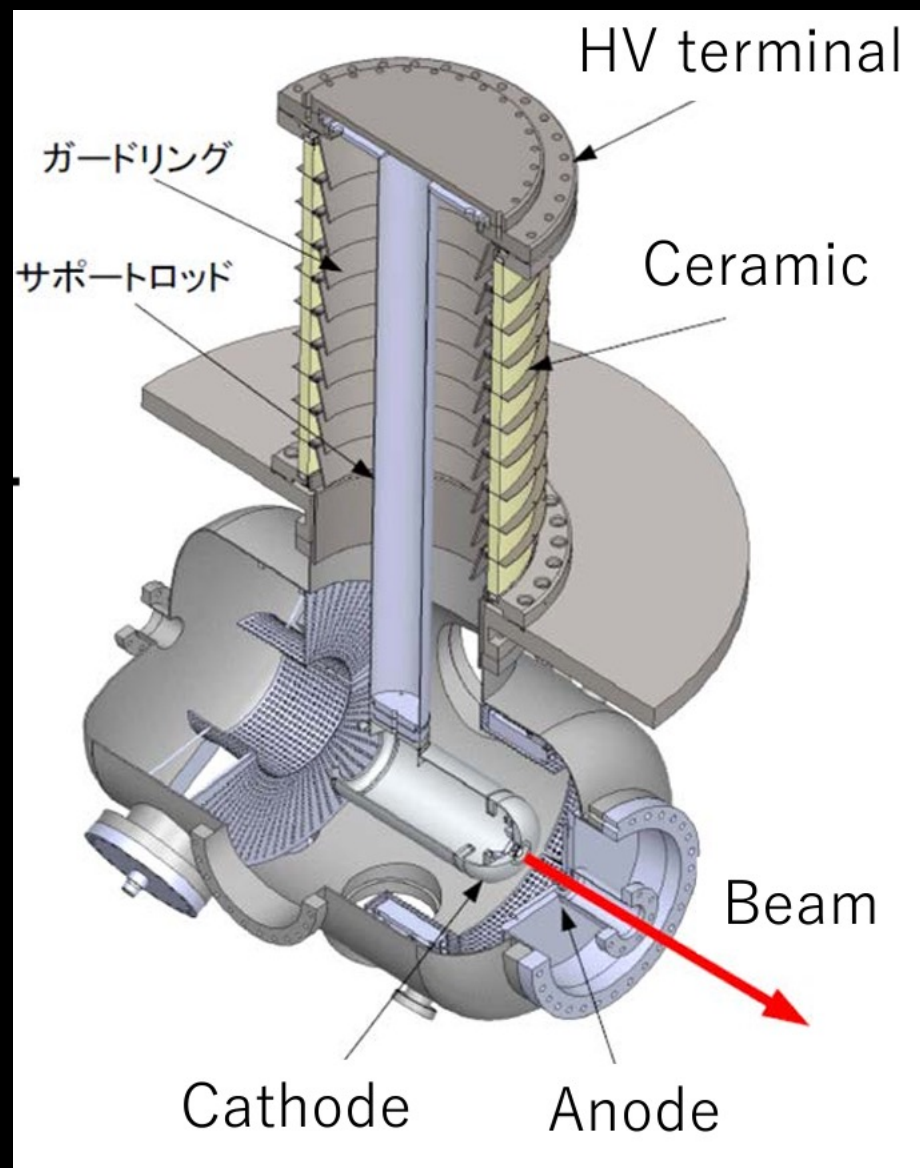
Vent/Bake DC銃

- 簡単
- 作りやすい
- ダウンタイムが多い
- 端子が汚れる→電化放出

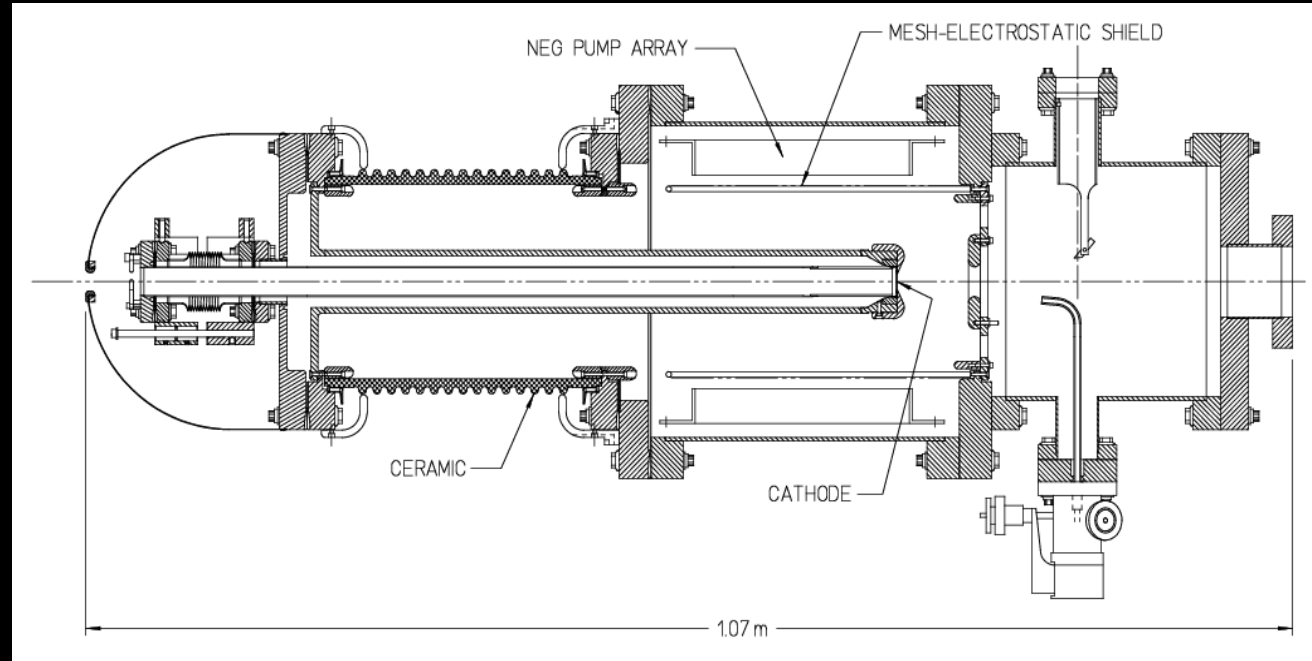
Load/Lock DC銃

- Vent/Bakeの問題を避ける
- 作りにくい
- 特別Equipmentが必須

DC PHOTOGUN



VENT/BAKE電子銃



デザインが簡単：DC銃の真空容器の中に蒸着する

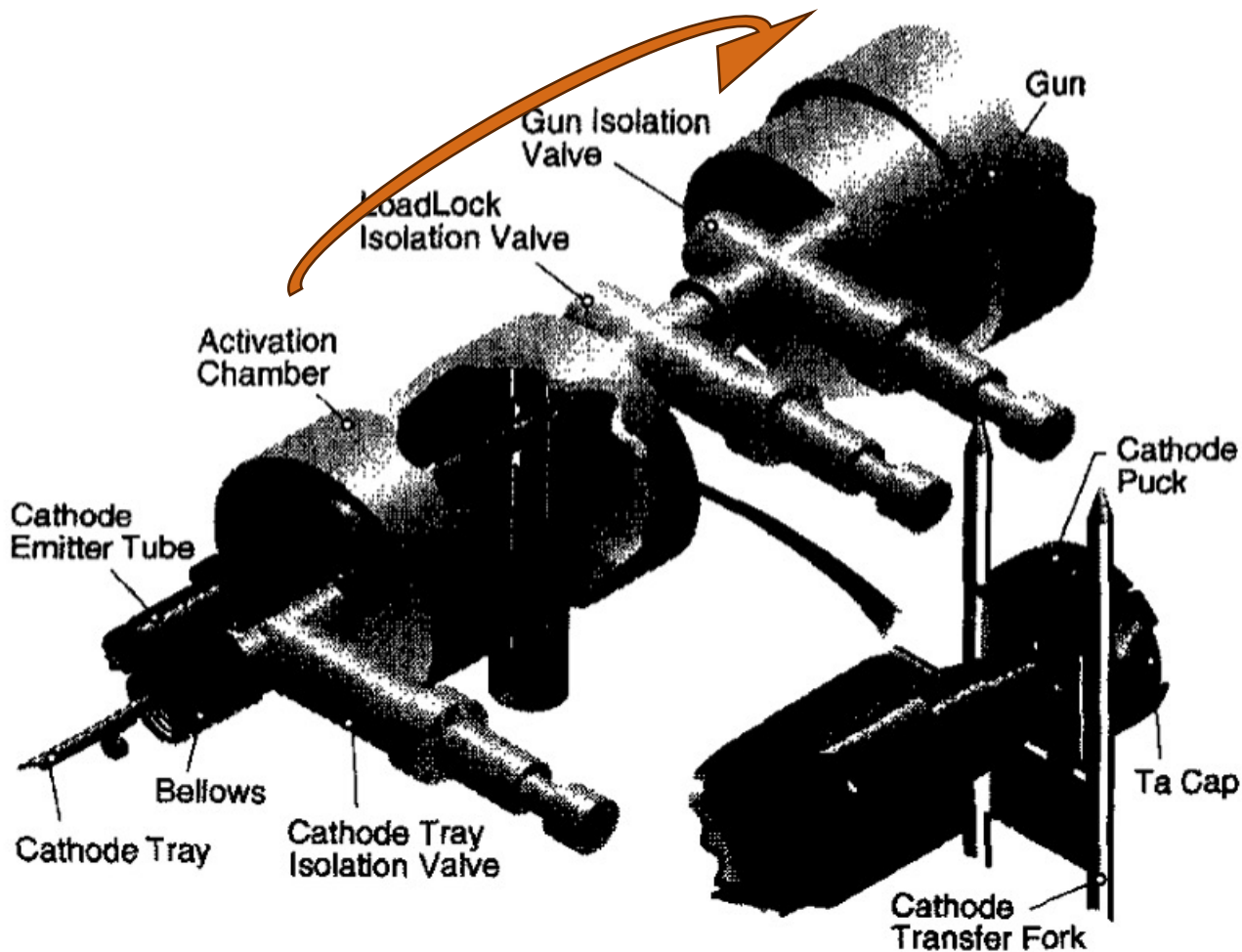
カソードを交換する旅、容器を開ける（Vent）

→ 変換した後、加熱（Bake）しないと

蒸着する時、カソードの表面だけではなく、端子も蒸着材料で汚れる。汚れ過ぎたら電化放出が起きてしまう

→ ディープクリーニングが必要だから、非常に時間がもったいない

LOAD/LOCK電子銃



Vent/Bakeのかわりに、容器いくつかある Load/Lockタイプも存在する。蒸着容器と銃容器がバルブで隔たれる

放出容器と蒸着する容器は別々だから銃エリアの真空を破らない

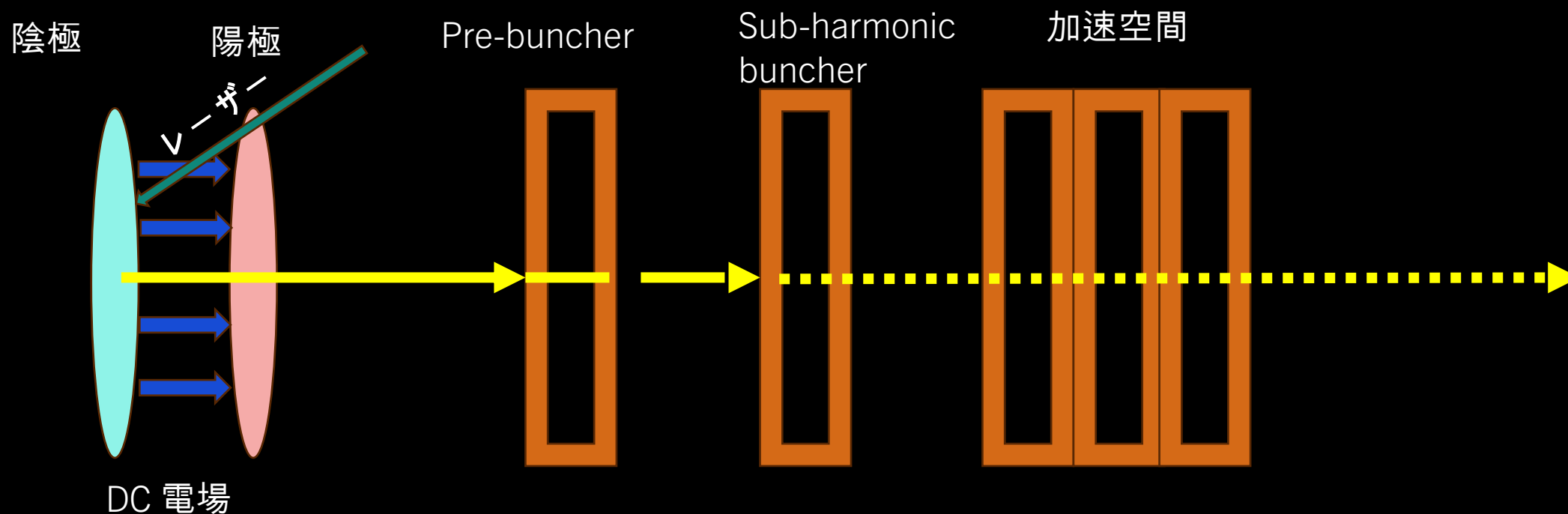
蒸着してから機械でカソードを銃容器へ移動させる

Vent/Bakeの難点を回避するが、作りが複雑

カソード移動装置が必須など

レーザーシステム

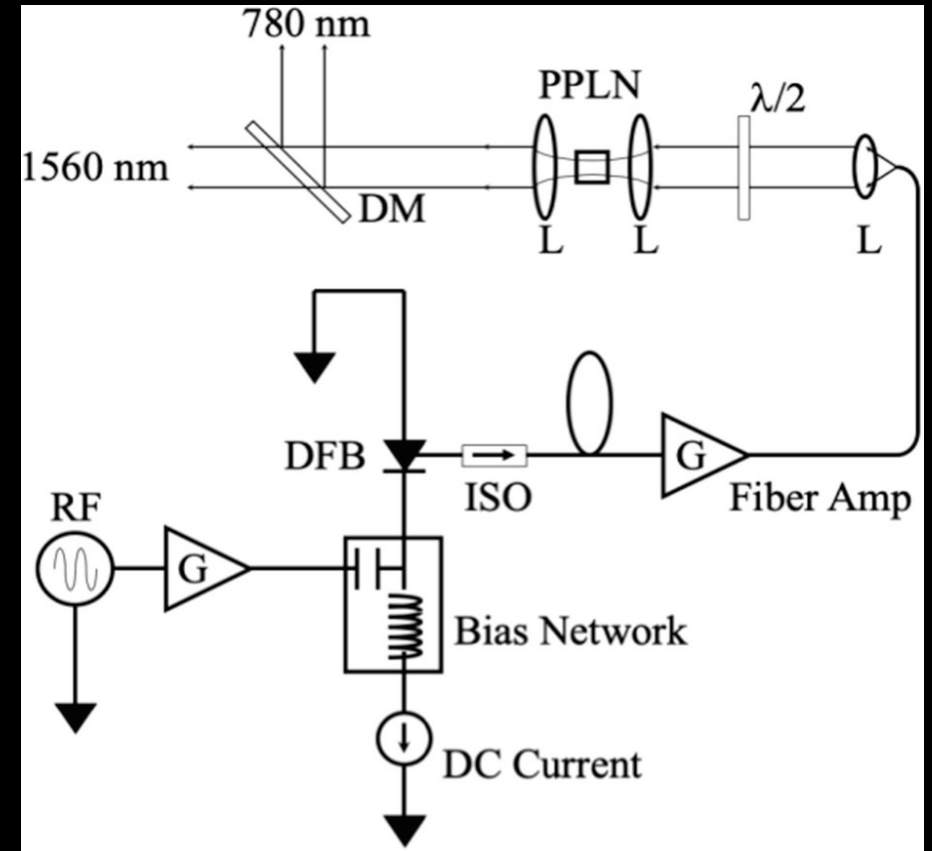
- 電子を放出するために、円偏極レーザーをカソード表面に照射する
- RF電磁場と一致しないとビームロスが勿体ない
- シンプルにDCレーザーを使用するとバンチャーかチョッパーが必須
→エネルギーブレッド(バンチャー)とビームロス(チョッパー)の原因となる



モードロックレーザーシステム

- ダイオードレーザーにサインウェーブをかけてRF頻度と一致するのは簡単だが、90年代までGaAsのレスポンス時間が遅すぎると思われた
- 短いレーザーパルスの反応は結局十分速いから現代のビームはよく使用される
- 簡単にRF頻度と統一できる

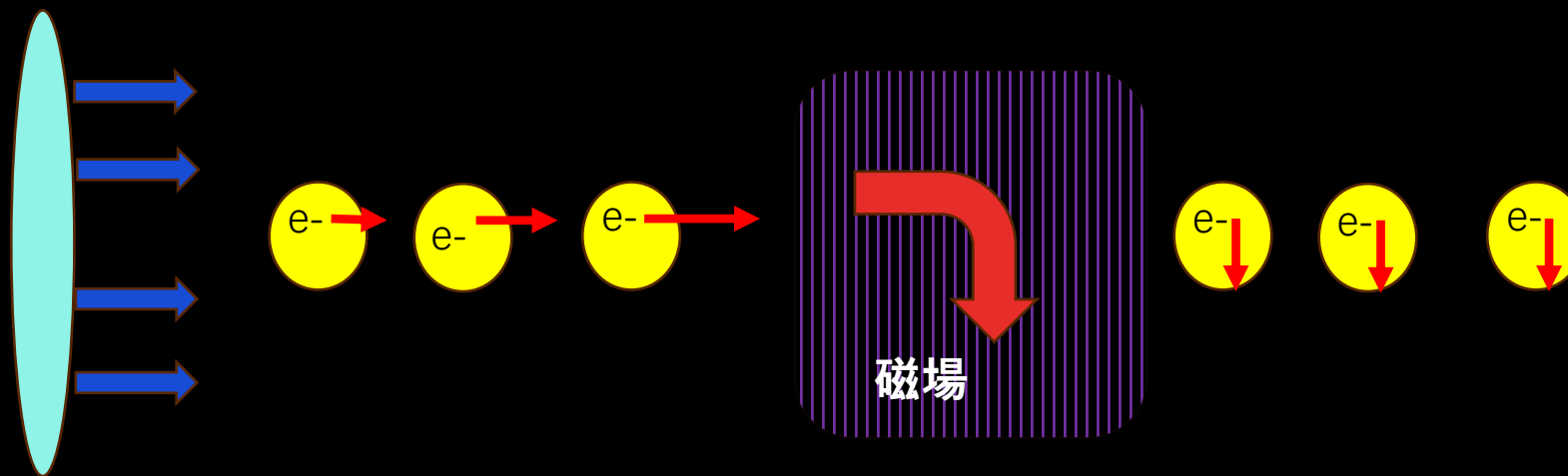
GaAsのバンドギャップ: $1.42 \text{ eV} \approx 870 \text{ nm}$ より短い波長がある
Ti:Saレーザーはよく使用される



CEBAFのGain-Switchedレーザーシステム
(ジェフアソン国立研究所)

スピン偏極方法の操作

- レーザーで励起した電子の偏極ベクトルはビームの方向と（逆）平行のままで生成される
- 一般的に偏極ビームを使う際、指定している方向で送らなければならない。通常、これはビーム運動方向に平行である。
- ビームが加速器のエレメントを通る度に水平面で歳差運動する (precess)。それに、円型加速器のストレージリングを回る場合、ベンディング磁石の磁場に対してスピンベクトルが直角で回転されるので垂直方向で維持され、衝突点の前後へ回転するシステムが必要となる。
- 生成する時、歳差運動をなくすため、一般的にWien Filterという道具が使用される



スピン偏極方法の操作

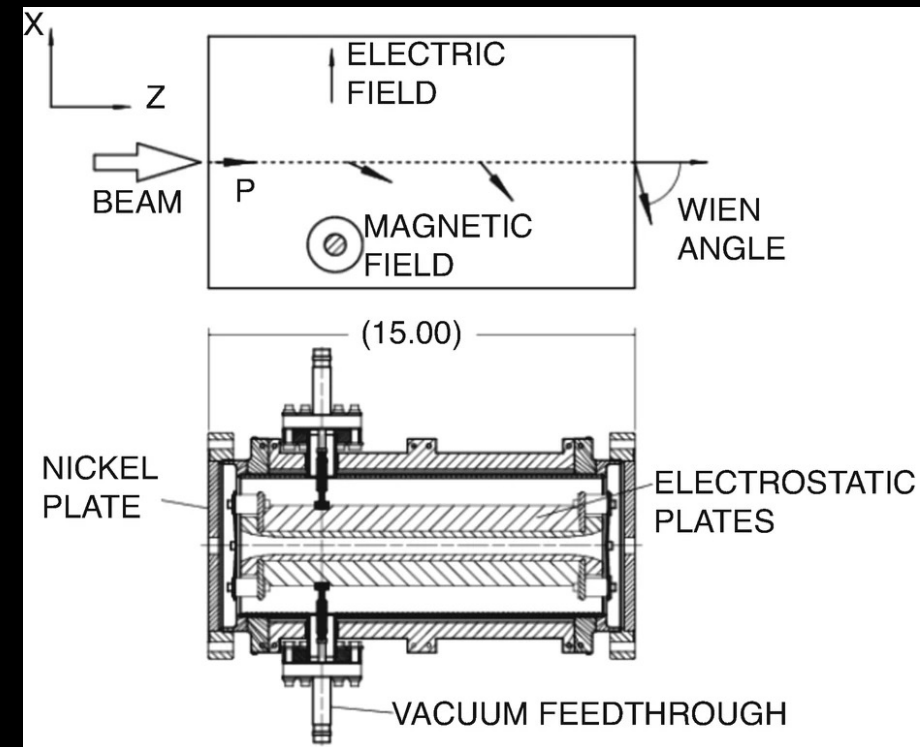
その電磁場の中で、電子はローレンツ力 $\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$ を感じられるが電場と磁場の効果を反対にしてなくすることができる。具体的に、電子の速度を

$$\beta c = E/B$$

で入射するとローレンツ力が0になり、電子の軌道が変更されない

電子の運動が変わらなくても、Wien Filterの中の磁場が電子のスピンを電場の面に回転させる

100 keV電子のスピンベクトルを±110°回転させることができる



CEBAFにあるWien Filterの構造
(磁石が省略される)

スピン偏極方法の操作

ビームが軌道しているうち、垂直で進行しないと磁場で偏極ベクトルが変更されるが、平行で衝突

→ 衝突点の前に90度回転

(円型コライダーの場合、衝突後に垂直状態へ戻す)

螺旋状のダイポール磁石でスピンを回転できる

(図: AGSのSiberian Snake磁石 (BNL))

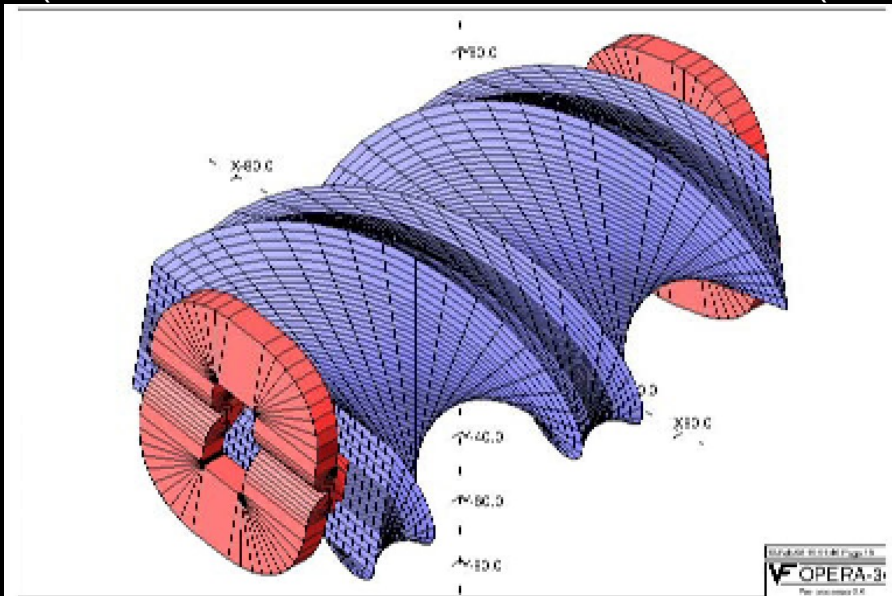


Image courtesy
Brett Parker (BNL)

偏極の検出

- 生成したビームを実験に使うなら、どの割合が偏極しているかを把握しなければならない
- 低エネルギービーム及びビームを生成した時点で偏極度を検出するなら、主にMott電子スピン偏極検出器 (Mott Polarimeter) が使われる

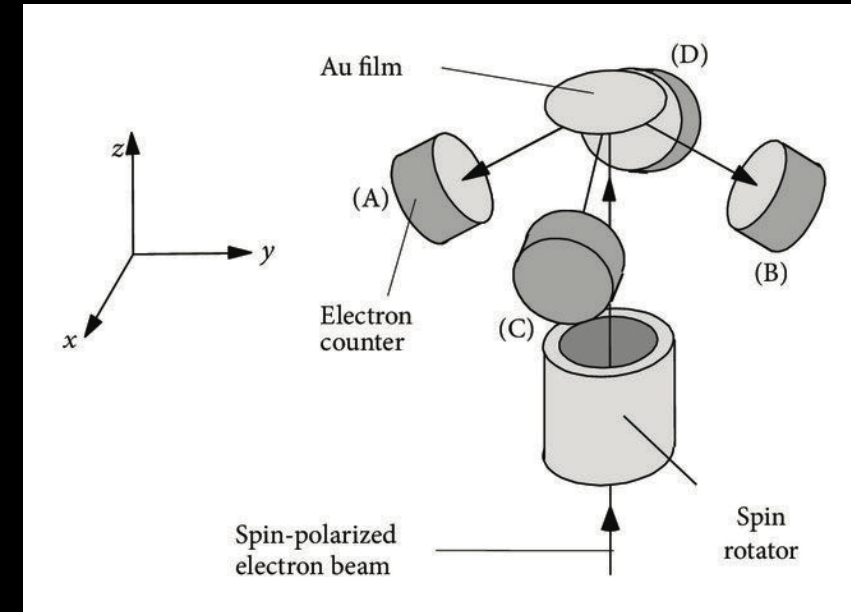
- eV~MeV程度電子対象

- Mott電子偏極度検出器の中のターゲットに電子ビームを入射し、ターゲット膜に背面散乱した電子の非対称を測定する機械である
- ↑と↓の方向で定義をしたら、その非対称は式 (3-1) に関係がある。検出器に測定された電子数を N で定義すると非対称は

$$A = \frac{N_{\uparrow} - N_{\downarrow}}{N_{\uparrow} + N_{\downarrow}} = S_{eff} \times P$$

P はビームの偏極度

S は検出器の構造による関数 (Sherman関数)



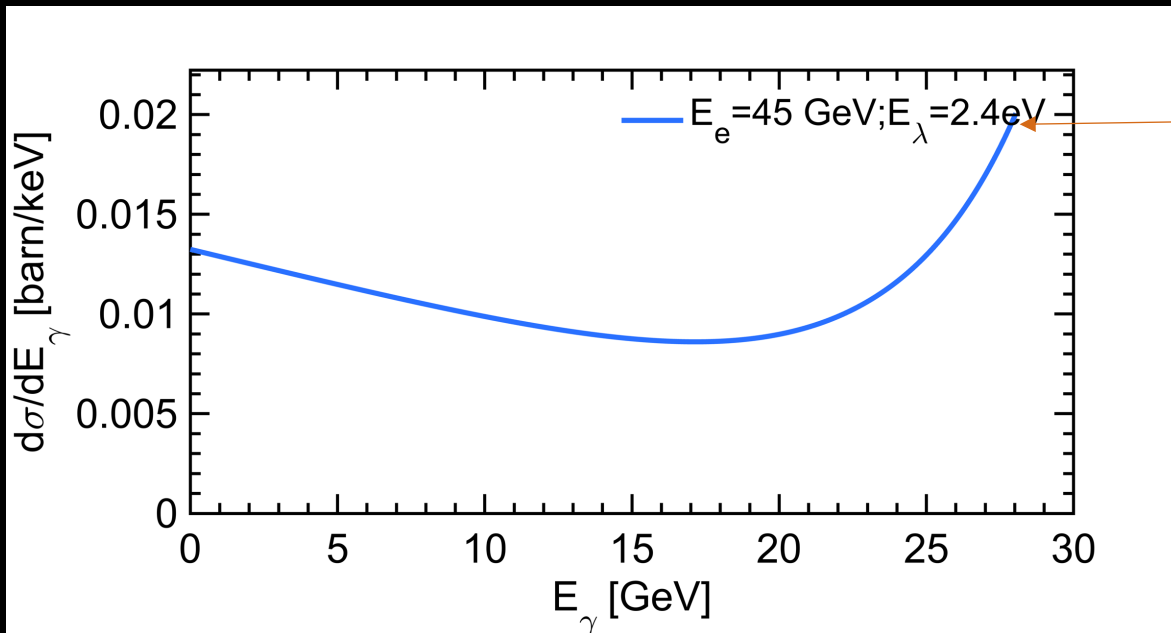
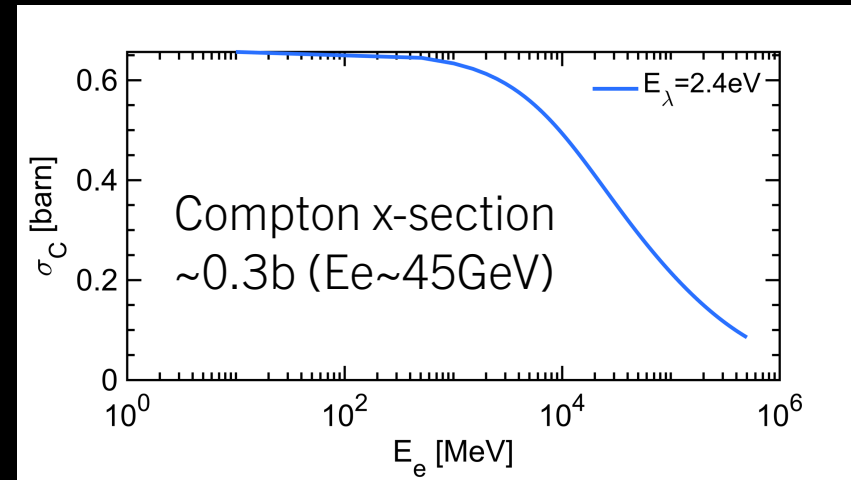
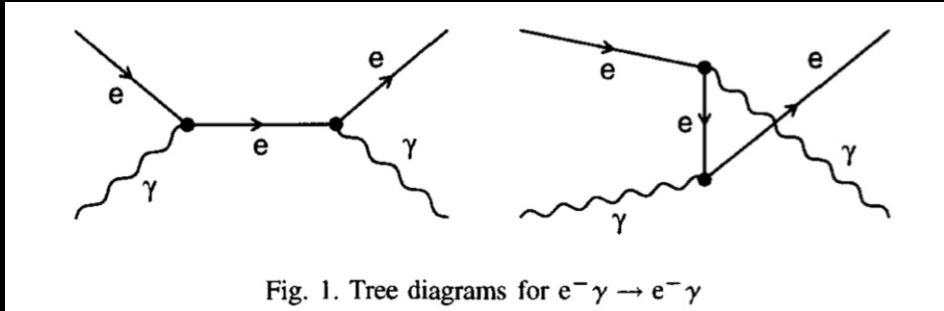
Mott検出器のイラスト。
(T. Kohashi, 2018)

COMPTON POLARIMETER

数MeV程度以上の電子偏極度を検出する機械もある。

高エネルギーコライダーで衝突点周辺の偏極度を検出したい場合、Mott電子偏極検出器に対して運動量が高すぎるので、別の方法を使用しなければならない。その場合、レーザーの光子を直接電子ビームと衝突させ、コンプトン散乱を検出するシステムもある

コンプトン効果



コンプトン効果

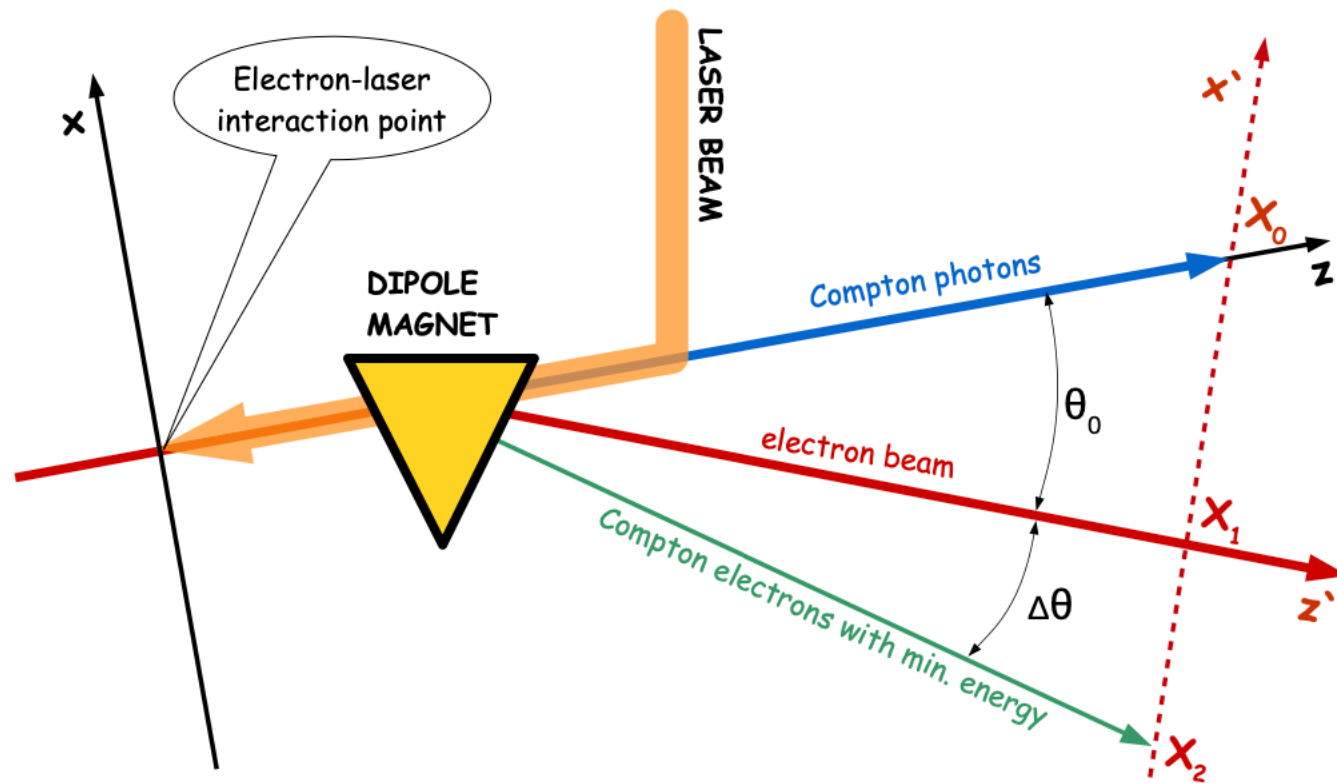
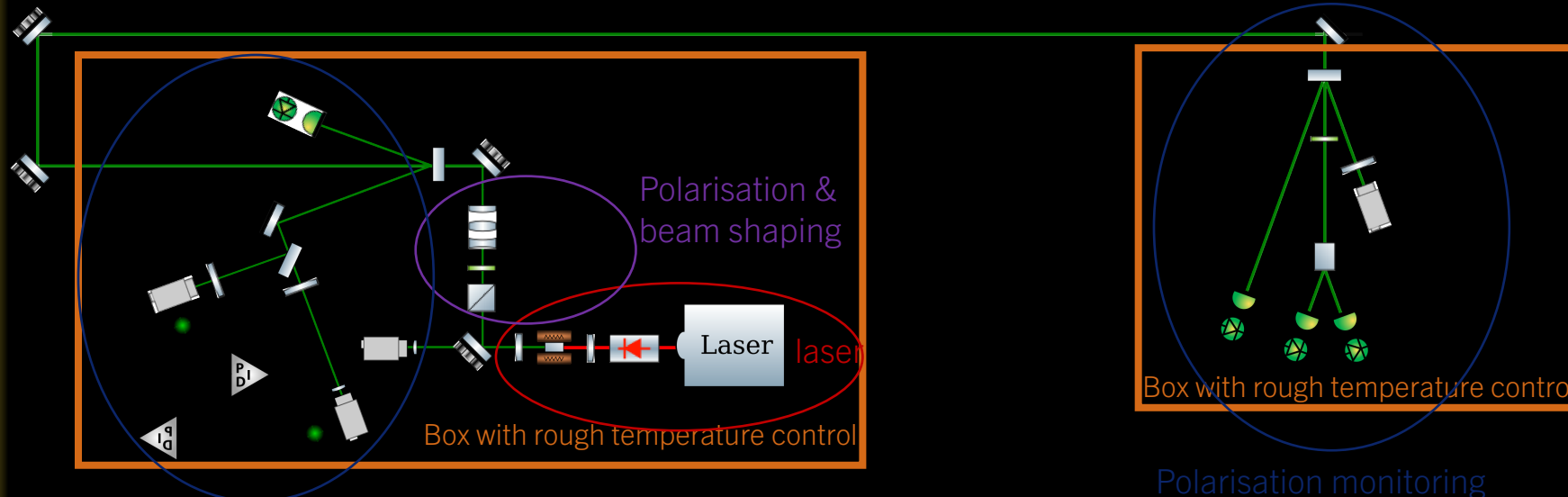


Figure 25. Regular layout of ICS experiments realization.

Material courtesy A. Martens

SCHEMATIC LAYOUT OF LASER SYSTEM

Rough design based on past experience, similar to other polarimeters



Position, pointing control and monitoring
 Polarisation independent intensity monitoring
 Optical spectrum monitoring possible

Polarisation monitoring
 Duplicated at injection
 Add Position and pointing monitoring

24/7 operable laser system, with full monitoring, remote control

Some comments

- usual scheme for polarization control and monitoring rely on DC measurements
- actual figures for beam size are constrained by integration related issues (inputs needed)
- Laser polarization flipping rate ?

Slide courtesy of A. Martens

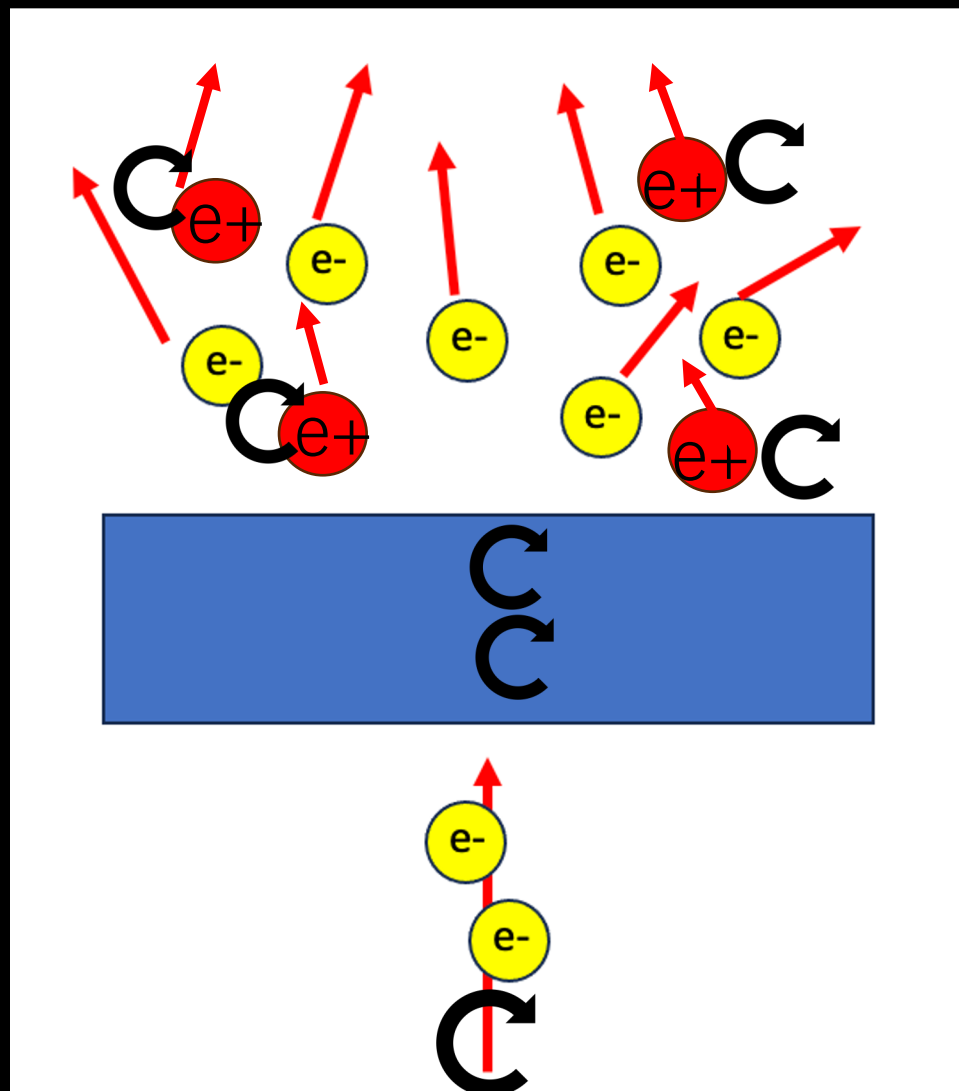
(参考 : <https://indico.belle2.org/event/7500/timetable>)

陽電子生成

- 電子ビームをターゲットに衝突して、シャワーの中に陽電子が生成される

BremsとPair Production由来

- 元の電子ビームが偏極される場合、その偏極が生まれた用紙へ伝わる



参考 : E.A. Kuraev, Y.M. Bystritskiy, M. Shatnev,
E.Tomasi-Gustafsson, PRC 81 (2010) 055208

偏極の継続

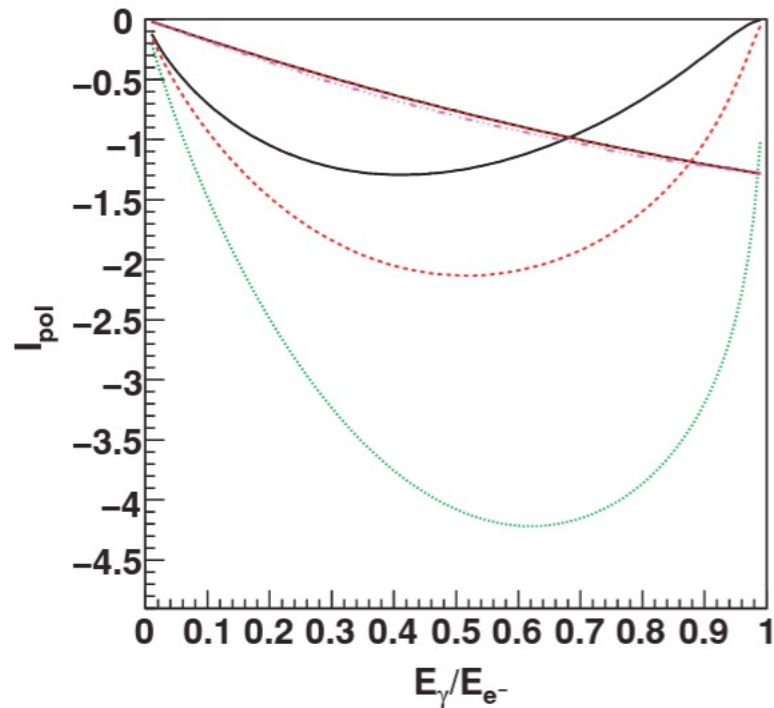


FIG. 2. (Color online) Polarized reduced cross section I_{pol} [see Eq. (45)], for the Bremsstrahlung process. Notations as in Fig. 1.

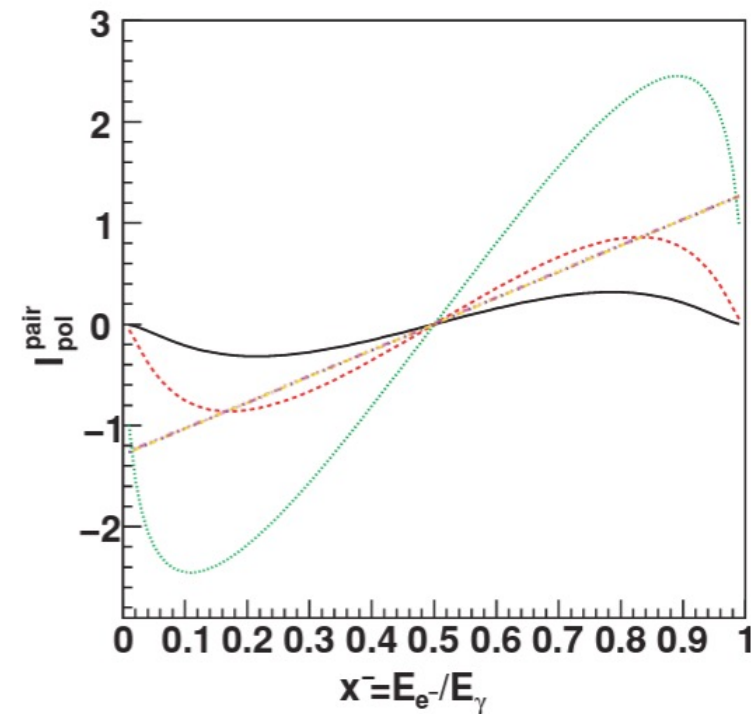


FIG. 5. (Color online) Polarized reduced cross section I_{pol} [see Eq. (52)], for the pair production process. Notations as in Fig. 1.

参考 : E.A. Kuraev, Y.M. Bystritskiy, M. Shatnev, E.Tomasi-Gustafsson, PRC 81 (2010) 055208

アンジュレータ陽電子生成

通常の陽電子生成以上、アンジュレータで高エネルギー光子を生成し、それから陽電子を作成することも可能



2005年のE166実験が5.0 GeV電子を用いて、 \sim MeV程度の偏極陽電子を生成した
Wターゲットで \sim 1%の光子が陽電子へ変換

参考 : A. Schlicke, POSIPOL 2006

ILCはアンジュレータ陽電子源を検討している

まとめ

- 偏極電子ビームはビーム物理の便利なツールである

過去：

- 70年代から現代まで開発されている
- 偏極電子は主にGaAs半導体の陰極で生成される
 - GaAsの格子を歪み補償型超格子、NEA薄膜などで性能を高めた
 - 寿命を延ばすような研究が行われている
- **偏極電子銃は主に2つの種類：**
 - Vent/Bake: デザインが簡単、ライムロスが多い
 - Load/Lock : Vent/bake銃の問題を避ける

まとめ (Ⅱ)

- スピンをターゲットまで送るため、偏極ベクトルを回転する
 - Wien Filter、スピン回転磁石を使用
- 偏極度を測定：
 - 低エネルギー：Mott検出器
 - 高エネルギー：コンプトン検出器
- 陽電子生成も可能
 - 通常：シャワーで電子の偏極をもらう
 - アンジュレータ：アンジュレータ製の円偏光から直接作成

ご視聴してありがとうございました