

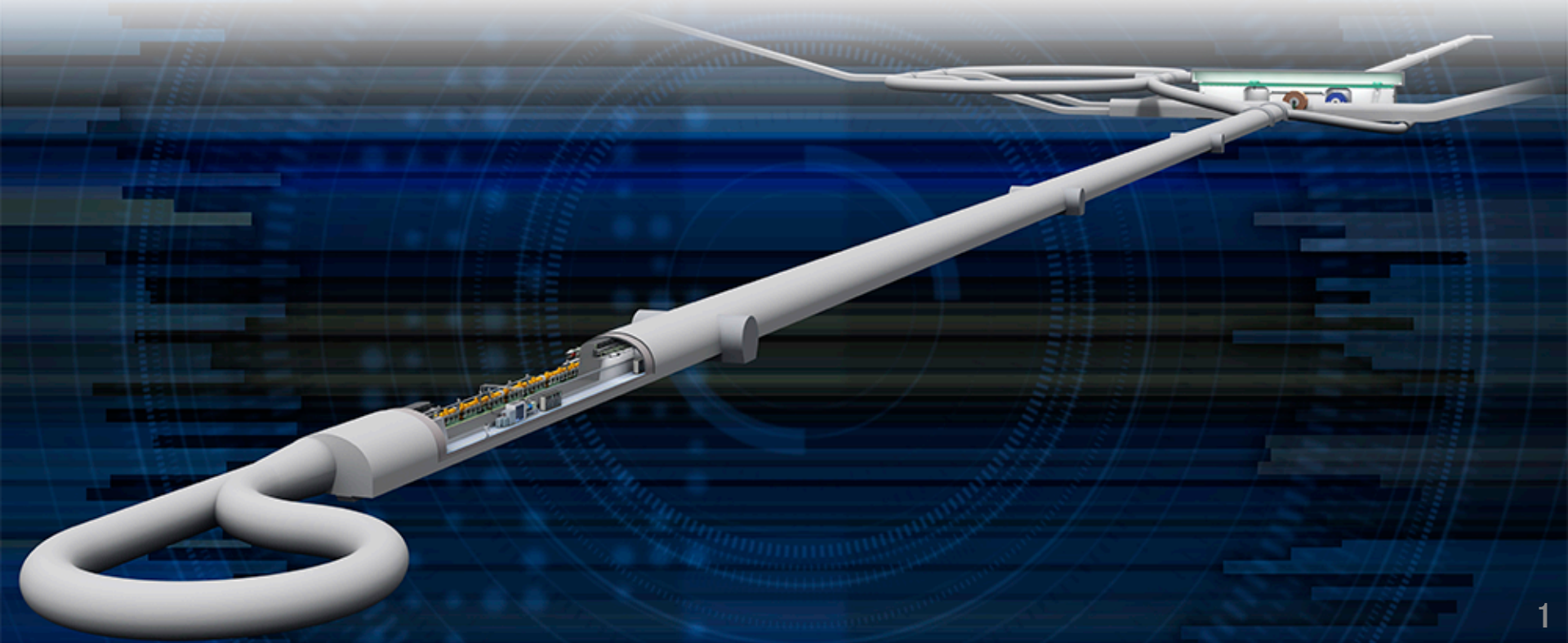
ILC大学連携タスクフォースセミナー
宇宙創成の謎にせまる国際リニアコライダー (ILC)計画

ILCの加速器

京都大学

2017年 4月26日 (水)

ジャクリン ヤン (KEK 素核研)



トークの流れ

加速器実験が目指すもの
～加速器実験の発展の歴史～

リニアコライダーの意義
～リニア vs リング～

ILCの加速器の構成
～生成・加速・収束・衝突～

トークの流れ

加速器実験が目指すもの
～加速器実験の発展の歴史～

リニアコライダーの意義
～リニア vs リング～

ILCの加速器の構成
～生成・加速・収束・衝突～

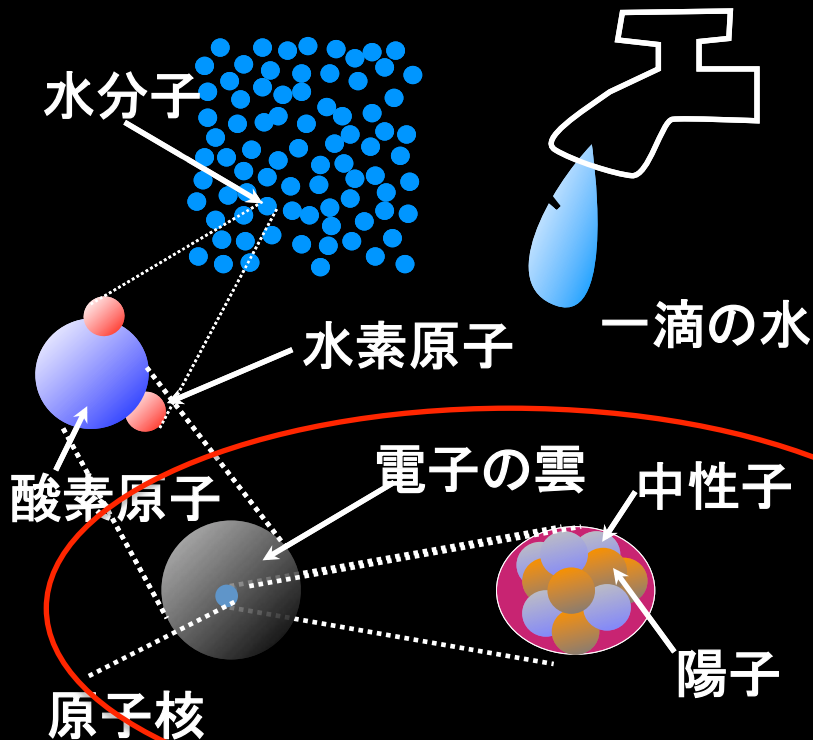
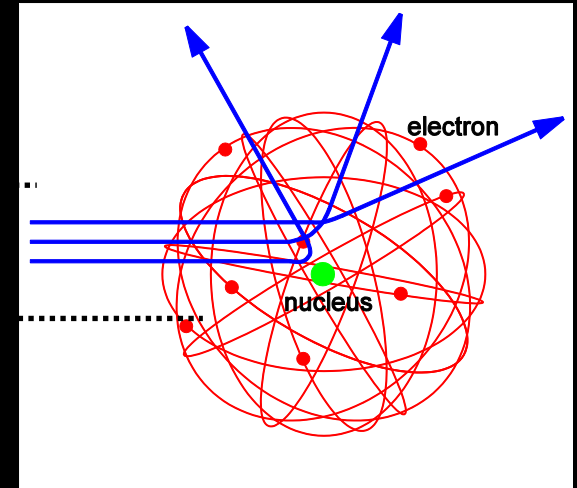
加速器実験が目指してきたもの

「ものは何で出来ているのか？」

周りの物質の構造を実験的に調べる事から始まった

例)ラザフォード散乱 (1911年)

- 原子の構造を調べるために、金箔に α 線を当てた
- 中心に重い塊(原子核)があることがわかった



小さな粒子同士を高速で衝突させると
物質の究極の構造が分かる

科学の歴史に残る大発見

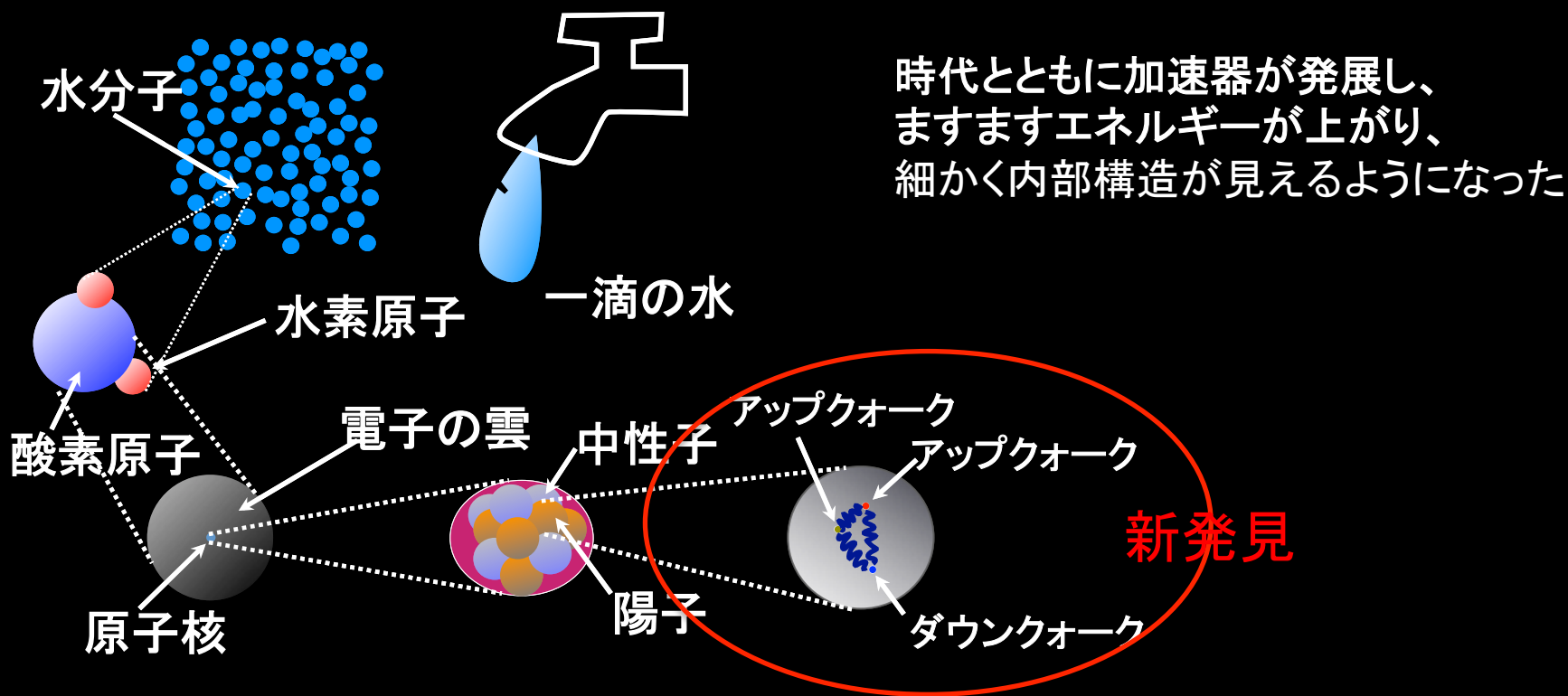
新発見

当時は「自然の加速器」である
放射性原子核(α 線)を利用した

加速器実験が目指してきたもの

- 更に奥を覗く為には原子核の中まで入るより高いエネルギーの粒子が必要
高いエネルギーの粒子、短波長の波（光学顕微鏡→電子顕微鏡）

加速器：電気の力を使って粒子にエネルギーを与える装置



- 更にエネルギーを上げていくと、宇宙初期の状態を再現できる
宇宙創成の謎に迫ることができる（物理のトーク）

物理の
新発見



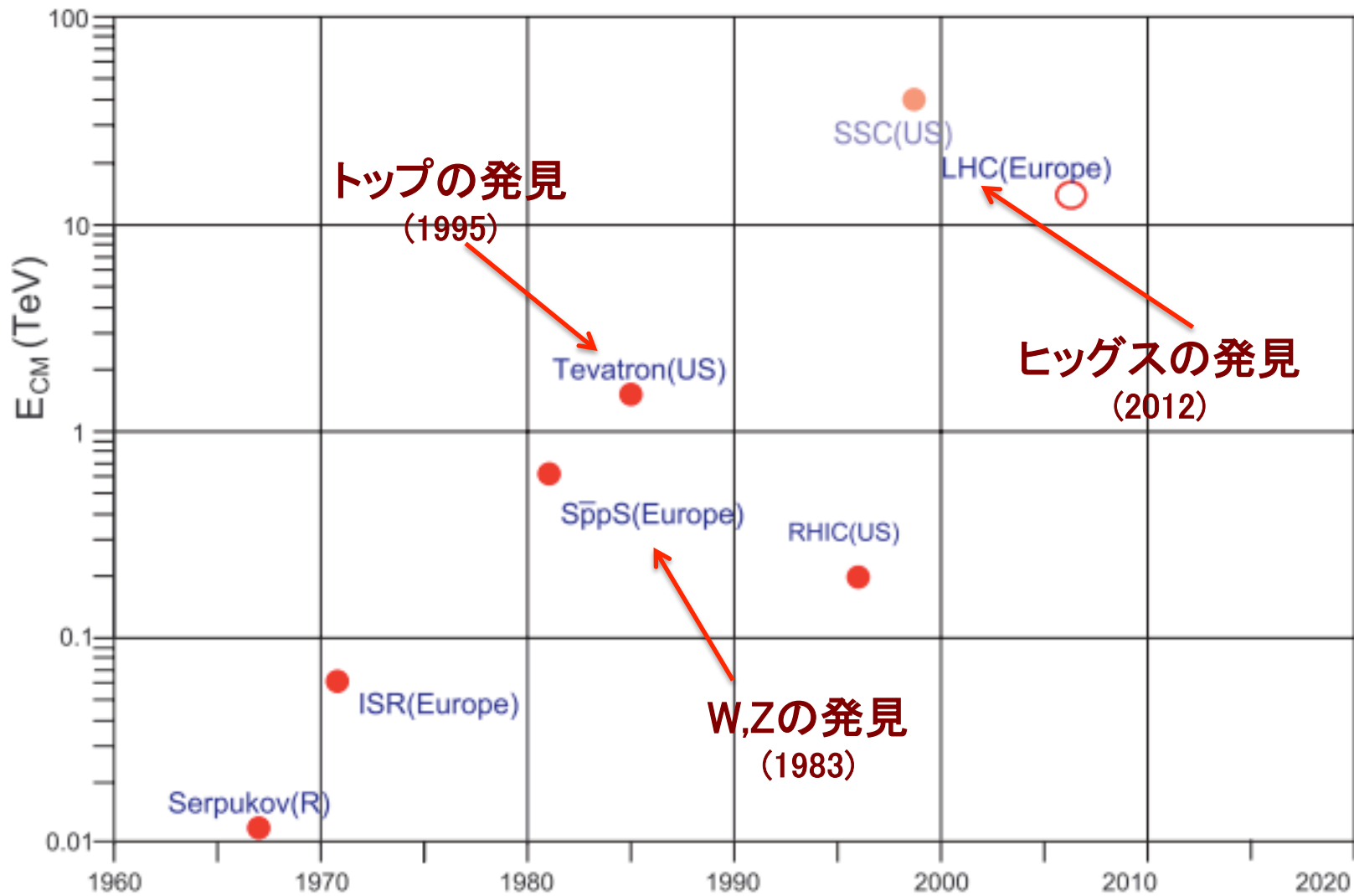
相互に
絡み合う

加速器技術
の新発見



加速器技術の急速な発展
及び
ますます多くの新物理の発見

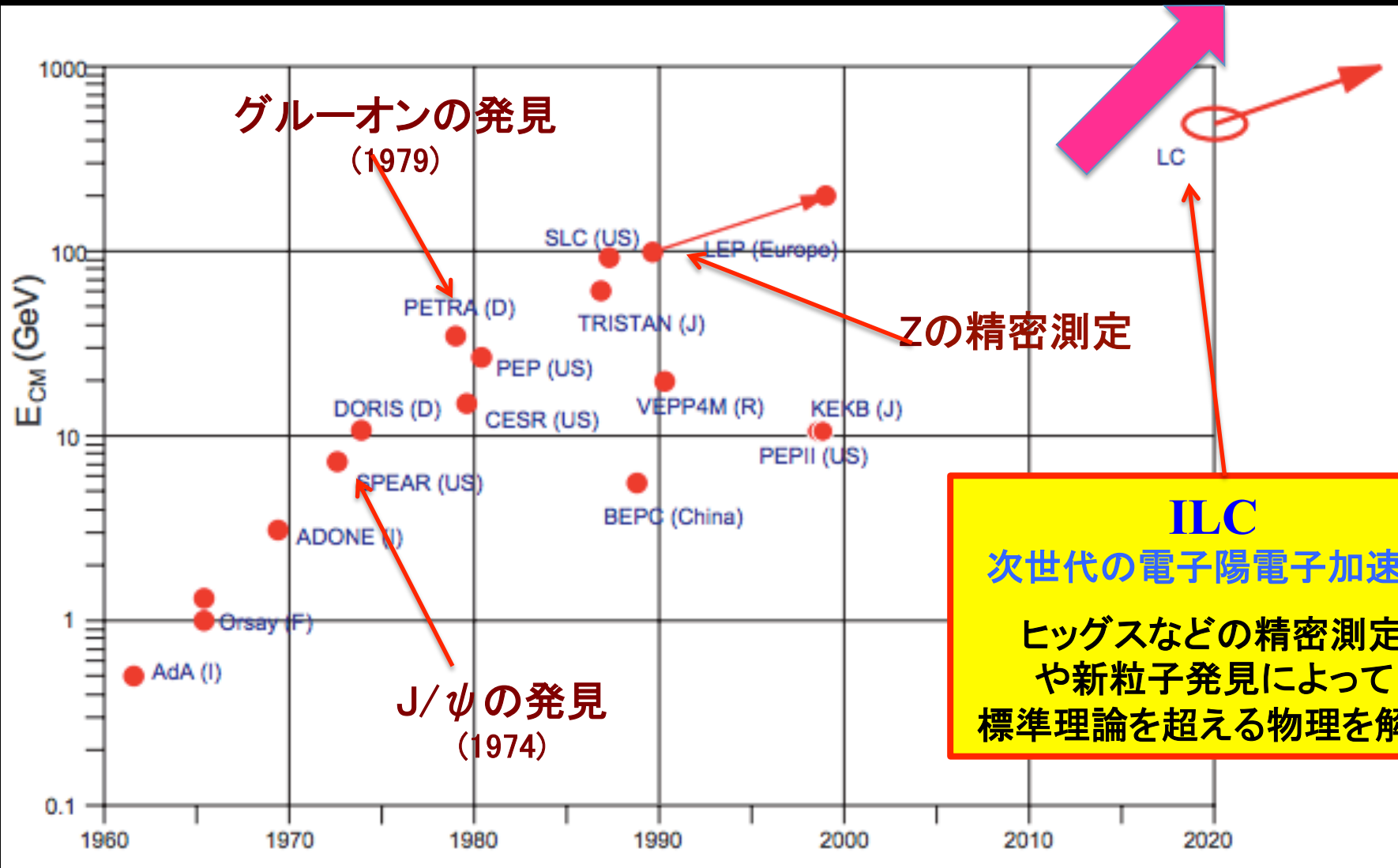
陽子・反陽子加速器の歴史



電子・陽電子加速器の歴史

数TeV領域へ

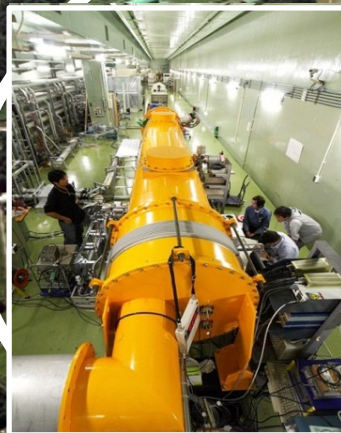
新物理の発見能力が
ますます高まる



日本のKEKには多数の加速器がある

STFとATFはILC加速器開発の為の加速器

KEKB加速器



STF



ATF

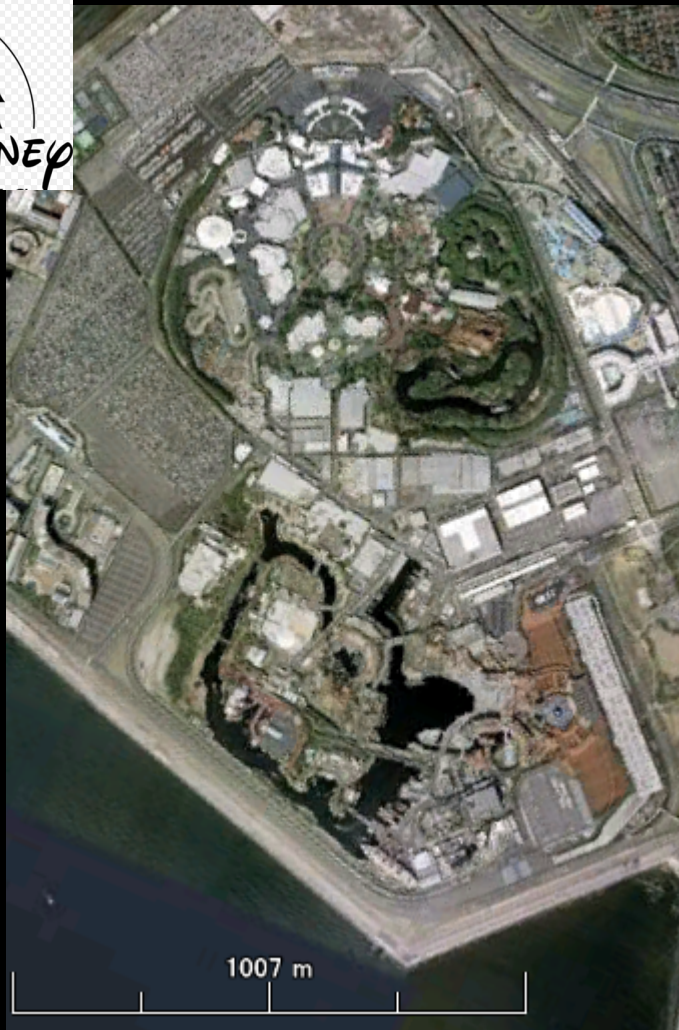
直径1km



KEKB実験室

KEKBリング

東京ディズニーリゾートとKEK



東京ディズニーリゾート



こっちの方が
楽しいですよ

KEK

トークの流れ

加速器実験が目指すもの
～加速器実験の発展の歴史～

リニアコライダーの意義
～リニア vs リング～

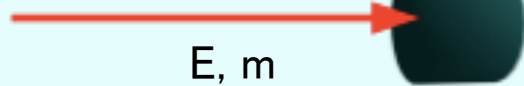
ILCの加速器の構成
～生成・加速・収束・衝突～

高エネルギー加速器実験にとって重要なもの

重心系エネルギー

新物理発見のリーチを決める

Fixed target



VS

Collider



$$E_{CM} = \sqrt{2mE}$$

$$E_{CM} = 2E$$

E_{CM} : 重心系エネルギー

E : ビームエネルギー

m : 粒子質量

コライダーはビームエネルギーをフル活用する偉大な発明

GeV 以上のビームエネルギーでは、
コライダーは固定標的に比べて圧倒的に有利

コライダーにとって重要なもの

物理解析の命は統計量 (= 単位時間あたりの反応数)

$$N [s^{-1}] = L [cm^{-2} s^{-1}] \times \sigma [cm^2]$$

L : Luminosity (輝度)

行き違う粒子の密度レート

$$L = \frac{fN^2}{4\pi\sigma_x\sigma_y}$$

f: 加速器の繰り返し周波数

N: ビームバンチ内の粒子数

σ_x (σ_y): 横(縦)方向ビームサイズ

σ : 反応断面積

~ 反応が生じる有効面積

神様が決める



コライダーの性能
はLuminosity
= 単位断面積あ
たりの反応数



コライダーにとって重要なもの

物理解析の命は統計量 (= 単位時間あたりの反応数)

L を工夫することにより
コライダーの性能を上げる！

cm^2]

L : Luminosity (輝度)

行き違う粒子の密度レート

$$L = \frac{fN^2}{4\pi\sigma_x\sigma_y}$$

f: 加速器の繰り返し周波数
N: ビームバンチ内の粒子数
 σ_x (σ_y): 横(縦)方向ビームサイズ

σ : 反応断面積

~ 反応が生じる有効面積

神様が決める



コライダーの性能
はLuminosity
= 単位断面積あ
たりの反応数



今まで建設されたコライダーの殆ど全てがリング型

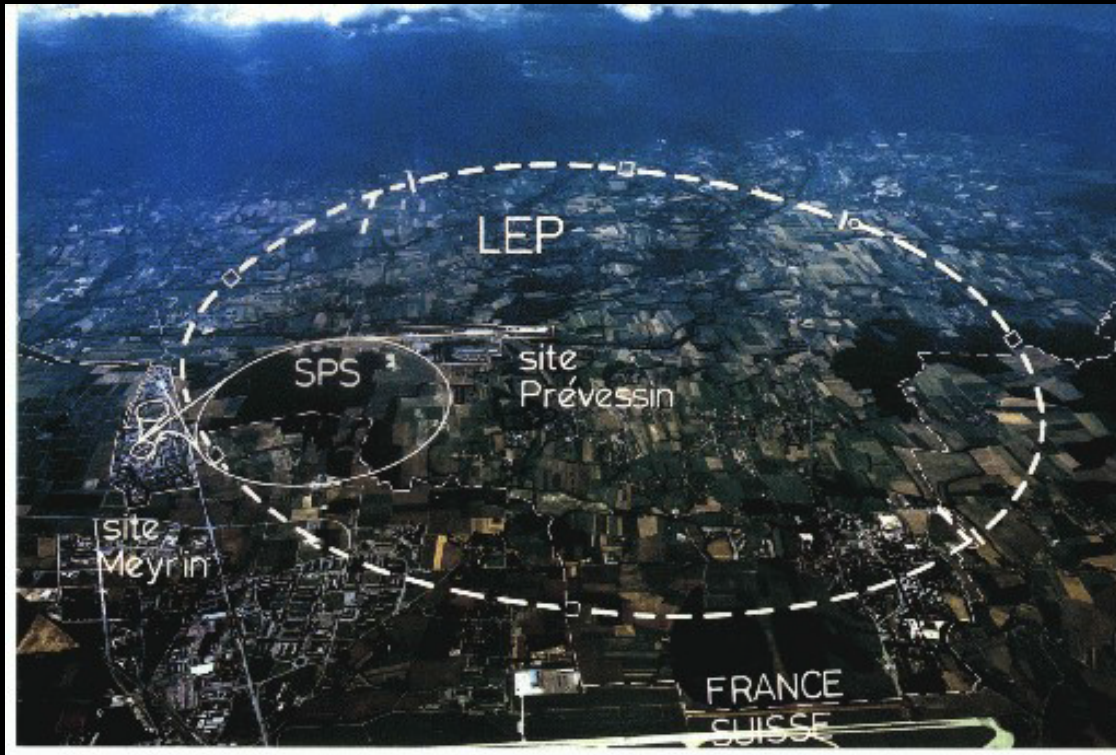
なぜ線形加速器を作るのか？

LEP加速器

- 周長~27km、史上最大の円形 e^+e^- コライダー (1989-2000)
- CERNに建設され、運転終了後にトンネルをLHC加速器に使用
- Zボソンの精密測定などが主な成果
- 最高エネルギー $\sqrt{s} = 209 \text{ GeV}$ (104 GeV x 104 GeV)

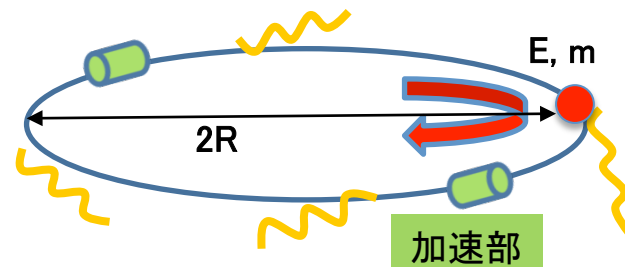
なぜ209GeVで止めたのか？

もう少しエネルギーを増やせば125 GeV ヒッグスが見えたのに…
(ZH生成閾値: 215 GeV)



LEP加速器

- 周長~27km、史上最大の円形 e^+e^- コリダクター
- CERNに建設され、運転終了後にトンネル



SR輻射で失ったエネルギーを加速部分で追加しなければいけない

209 GeVはLEPの限界だった

リング型の e^+e^- 加速器はシンクロトロン輻射(SR)による損失が大きいため、高い衝突エネルギーへ行けない

LEPでは、104 GeVのビームが1周する間にエネルギーが約2 GeV低下

$\sqrt{s} = 500$ GeVなら1周あたり100 GeV程度も損失する

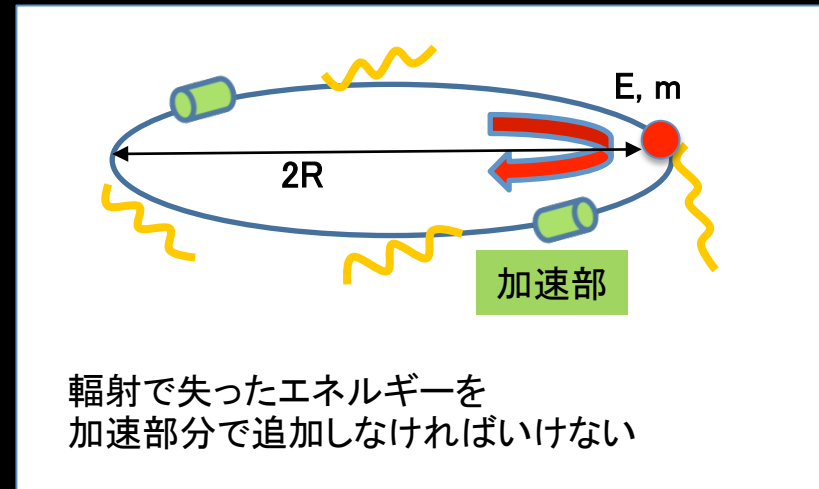
なぜ線形加速か？

1周あたりのSRによるエネルギー損失

$$P \propto (E/m)^4 / R$$

E 粒子エネルギー
m 粒子質量
R リング半径

エネルギー2倍 → 損失16倍



より高エネルギー衝突を目指すためには

1. 重い粒子を加速する → LHC ($M_p / M_e = 1900$) しかし e^+e^- マシンの方が精密
2. 軌道半径を大きくする → 場所の制限
3. 線形加速する → リニアコライダー ILC ($R \rightarrow \infty$)

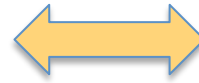


- 線形加速は、電子陽電子衝突で500 GeV以上を到達できる唯一の方法
- もうひとつの利点: エネルギー拡張性

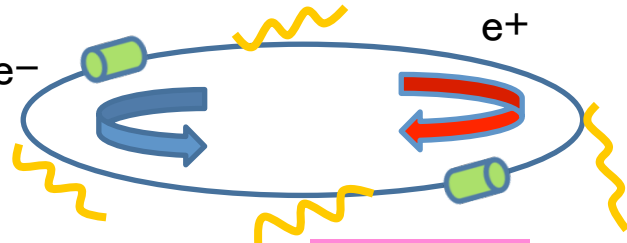
リニアコライダーがエネルギーフロンティアを引き継ぐ！

リング vs リニア: Luminosity作戦

リング: ビームを周回させる

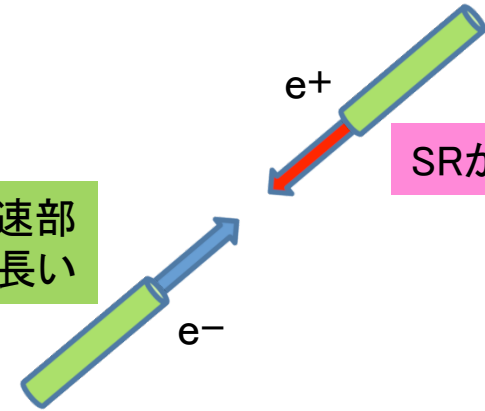


リニア: ビームを一度だけぶつける



加速部
が短い

SRが多い



加速部
が長い

SRが無い

繰り返し加速可能

- 加速部は短くて良い
- 繰り返し周波数とビーム電流を大きくできる

ビームビーム効果のために
ビームサイズを小さくしにくい

$$L = \frac{fN^2}{4\pi\sigma_x\sigma_y}$$

繰り返し加速できない

- 長い加速部が必要
- 電力効率の点からビーム電流が制限される

ビームビーム効果の許容が緩く、
ビームサイズを小さくできる

ビームビーム効果: 衝突点で相手ビームの磁場の影響により、ビームが乱されたり、絞れなかったりすること

トークの流れ

加速器実験が目指すもの
～加速器実験の発展の歴史～

リニアコライダーの意義
～リニア vs リング～

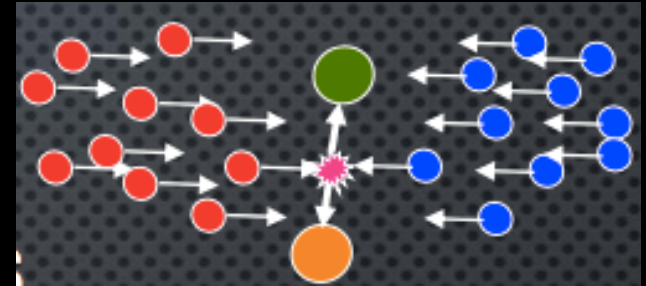
ILCの加速器の構成
～生成・加速・収束・衝突～

ILC 加速器の技術

高い luminosity を実現するために

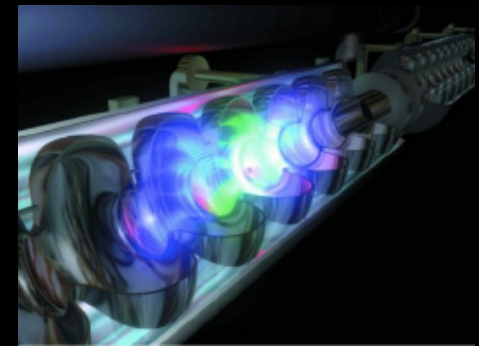
- 粒子ビームの生成

- 偏極電子と陽電子の生成
- 多くのバンチ (10¹⁰個の粒子の塊)



- 粒子ビームの加速

- 高い加速勾配を実現する超伝導加速空洞

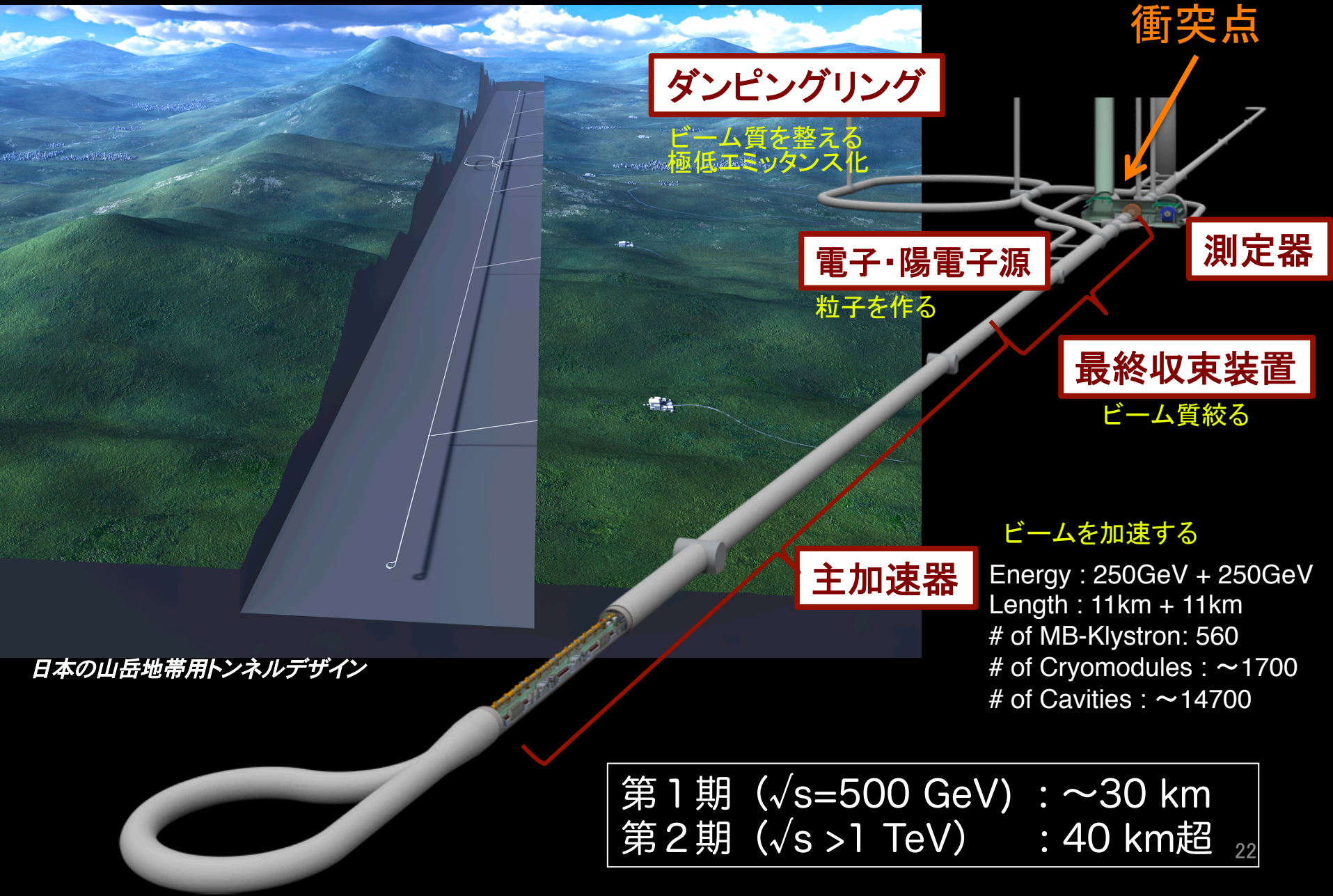


- 粒子ビームの収束

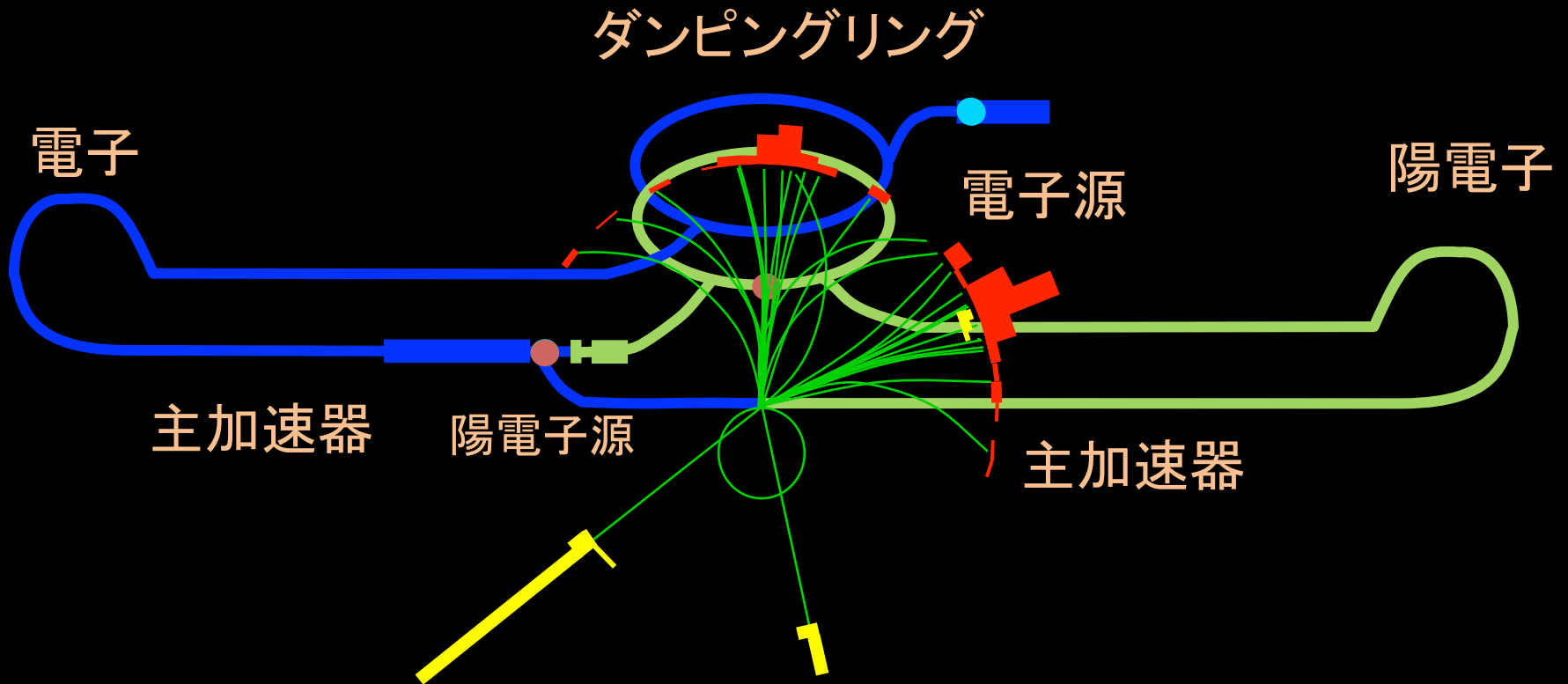
- ビームを超平行に整える
- 衝突点でビームを数nmまで絞る



ILC 加速器の鳥瞰図



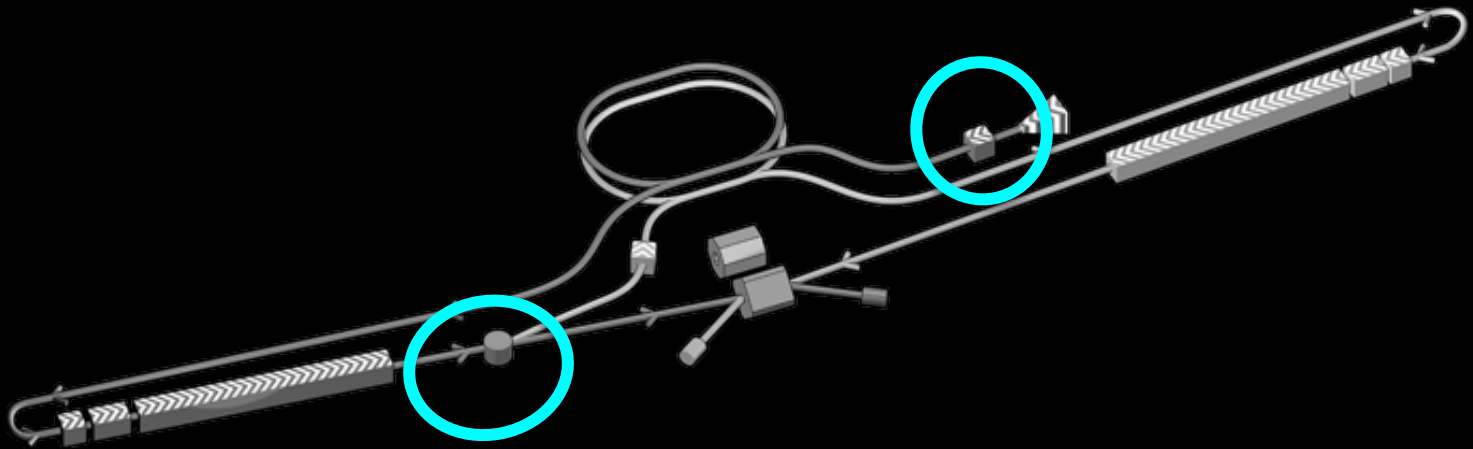
ILC加速器の構成



粒子の生成

まずは電子と陽電子を作らないといけない

新物理探索のために**偏極ビーム**にしたい

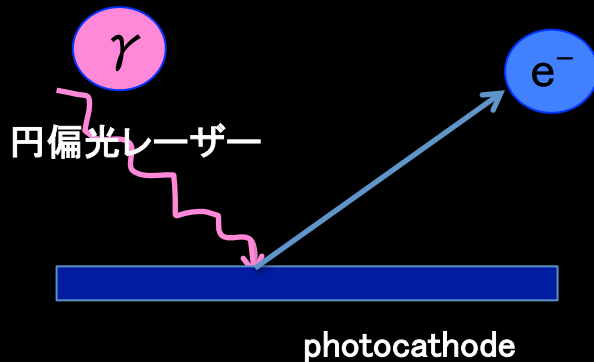


電子と陽電子の偏極ビーム

世界の対称性が大きく破れているため、反物質は存在しない

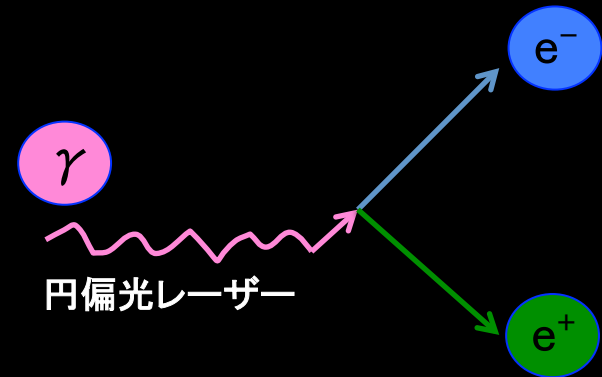
電子

レーザーを物質に当てて取り出す
(光電効果)



陽電子

真空中にエネルギーを与えて作る
(ガンマ線の e^+e^- 対生成反応)

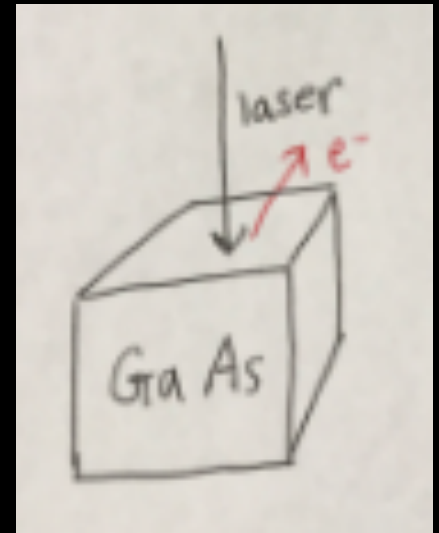


ILCの物理にとって**ビーム偏極**は極めて重要
偏極度 は電子が80%以上、陽電子が30%以上 (期待値)

電子源

- 高い偏極度を実現したい
- 従来のフォトカソードは偏極度が最大で50%

従来のGaAs格子



$$\left(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\right) = \frac{\sqrt{3}}{2} (1,1) \left(\frac{3}{2}, -\frac{3}{2}\right) + \frac{1}{2} (1,-1) \left(\frac{3}{2}, \frac{1}{2}\right)$$

$$\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) = \frac{\sqrt{3}}{2} (1,-1) \left(\frac{3}{2}, \frac{3}{2}\right) + \frac{1}{2} (1,1) \left(\frac{3}{2}, -\frac{1}{2}\right)$$

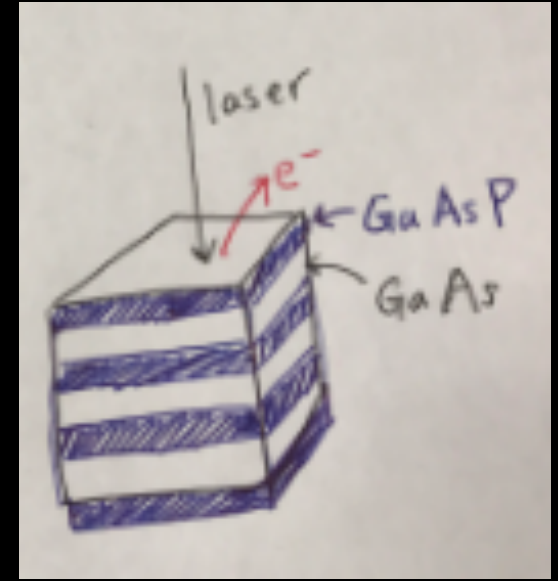
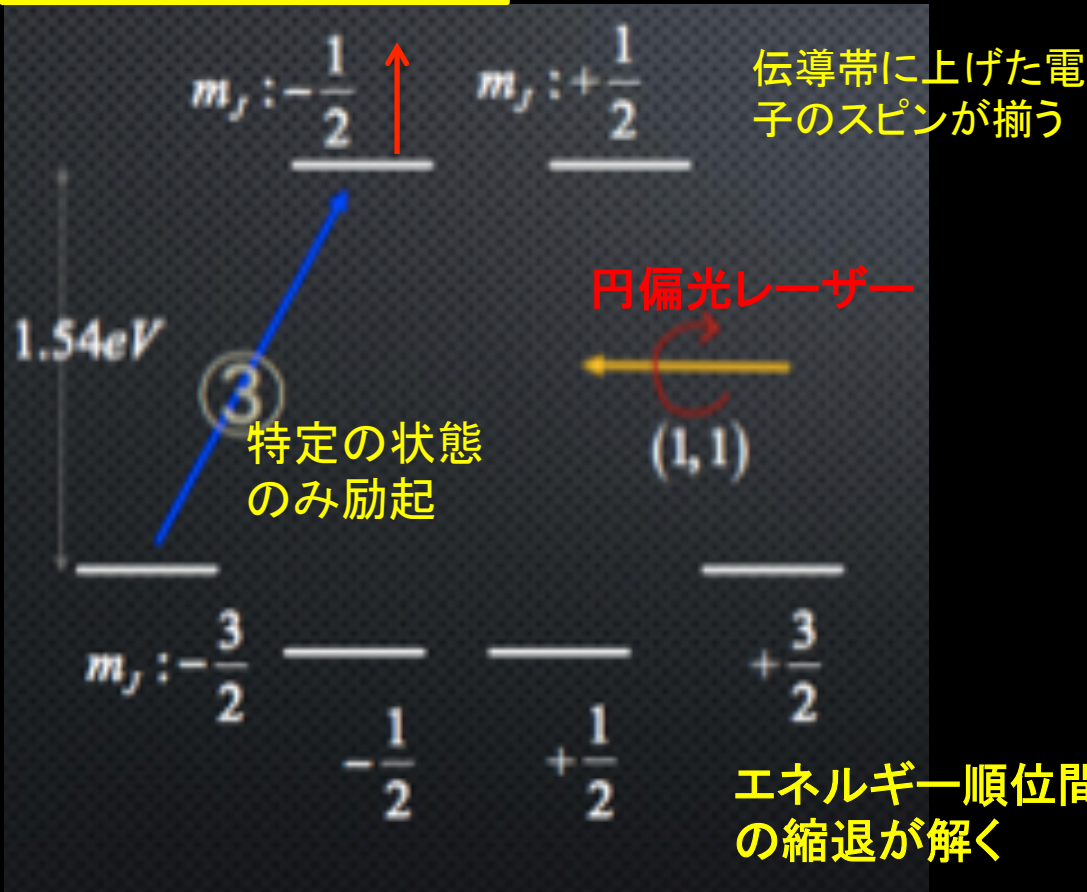
$$P_{\max} = \frac{3-1}{3+1} = 0.5$$

電子源

ILCでは、現時点で唯一偏極度>80%を実現できる
GaAs/GaAsP超格子フォトカソードを採用

KEK-名大-NECで世界初の成功

GaAs/GaAsPの超格子



$$\left(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\right) = \frac{\sqrt{3}}{2}(1,1)\left(\frac{3}{2}, -\frac{3}{2}\right) + \frac{1}{2}(1,-1)\left(\frac{3}{2}, \frac{1}{2}\right)$$

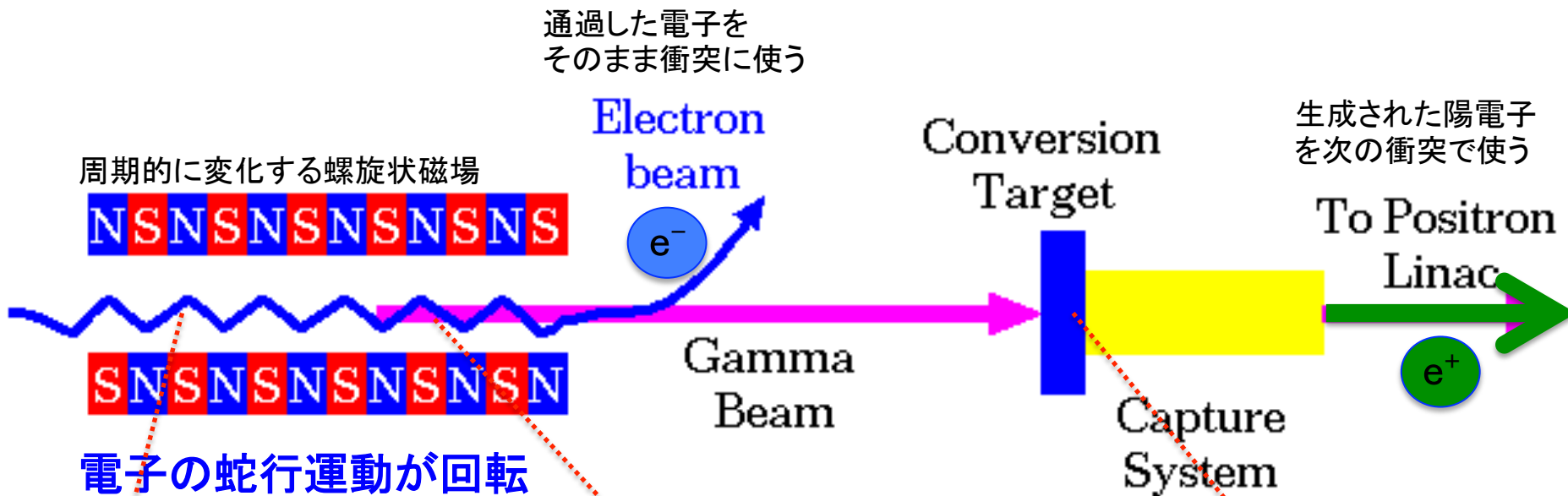
$$\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) = \frac{\sqrt{3}}{2}(1,-1)\left(\frac{3}{2}, \frac{3}{2}\right) + \frac{1}{2}(1,1)\left(\frac{3}{2}, -\frac{1}{2}\right)$$

$$P_{\max} = 1$$

偏極度92%を実現可能

陽電子源

ILCでは**ヘリカルアンジュレーター**で陽電子を作る



物理実験用に作った電子ビームを通す

円偏光 γ 線を生成 ($>10\text{MeV}$)

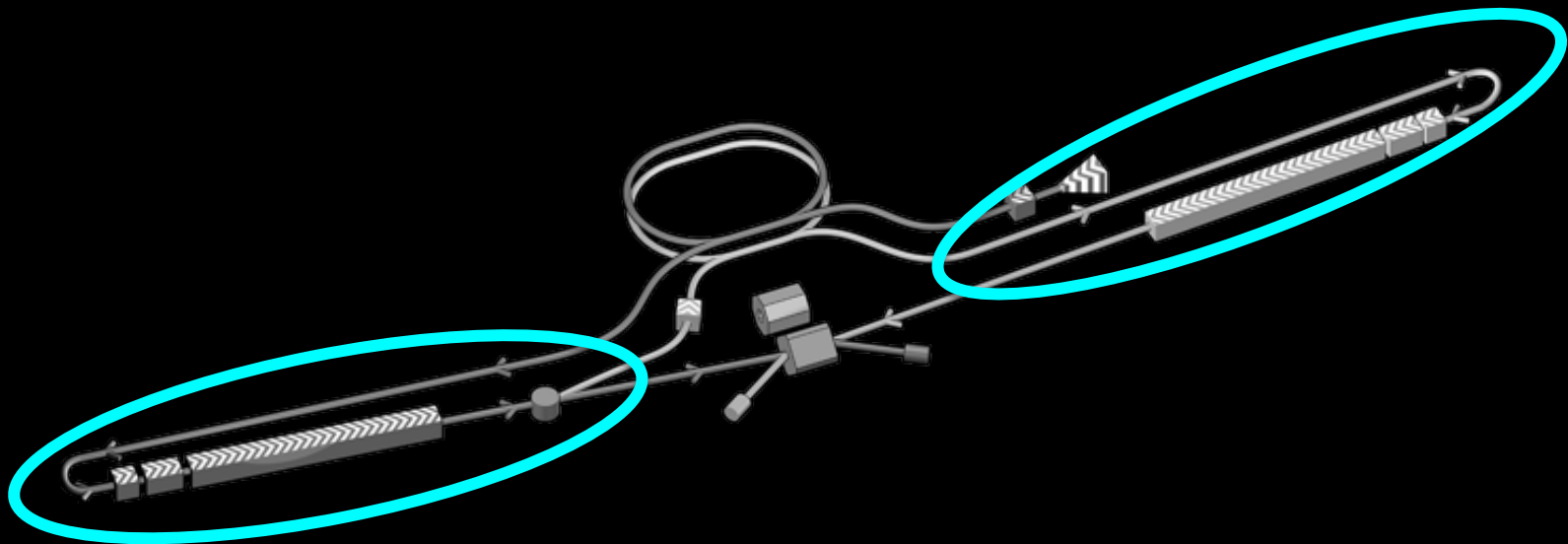
γ 線の対生成反応により偏極陽電子を生成

ビームの加速

物理探索は
粒子エネルギー
で決まる

リニアコライダーでは
加速勾配
が非常に重要

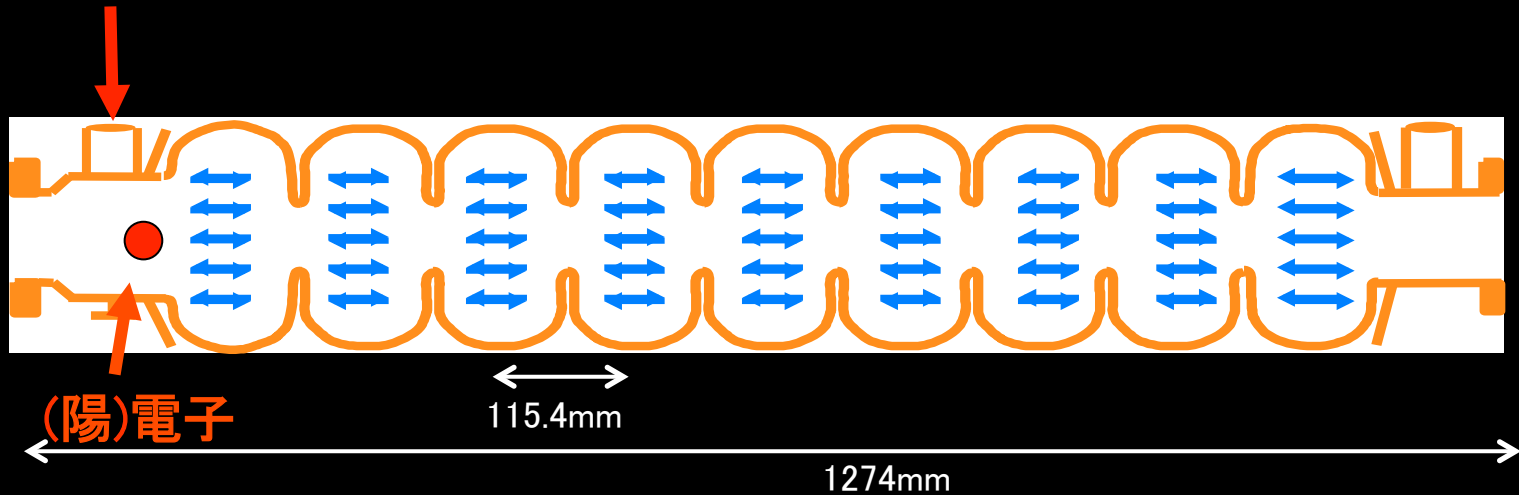
ILCでは
超伝導加速空洞
を用いる



加速の方法

マイクロ波を入れる空洞内に加速電場が生成される

高周波電力 Lバンド(1.3 GHz)



軸上の電場の向きはRF周波数で変動する
(粒子が常に加速されるように)

超伝導加速空洞



ILCの空洞は純ニオブ製

ほぼ電気抵抗ゼロの超伝導状態で粒子ビームを実験に必要なエネルギーまで加速させる

BCS resistance

$$R_{BCS} = A \frac{\omega^2}{T} \exp\left(-\frac{\Delta}{k_B T}\right)$$

ILC: $\omega = 1.3$ GHz (c.f. KEKB: $\omega = 500$ MHz)
一層低温に冷やす必要がある

- 空洞壁での損失を最小化し、効率よくRFパワーをビームに伝達するために、超流動液体ヘリウムで-271度(2K)に冷却
- 運転時の平均勾配(目標): **31.5 MV/m**

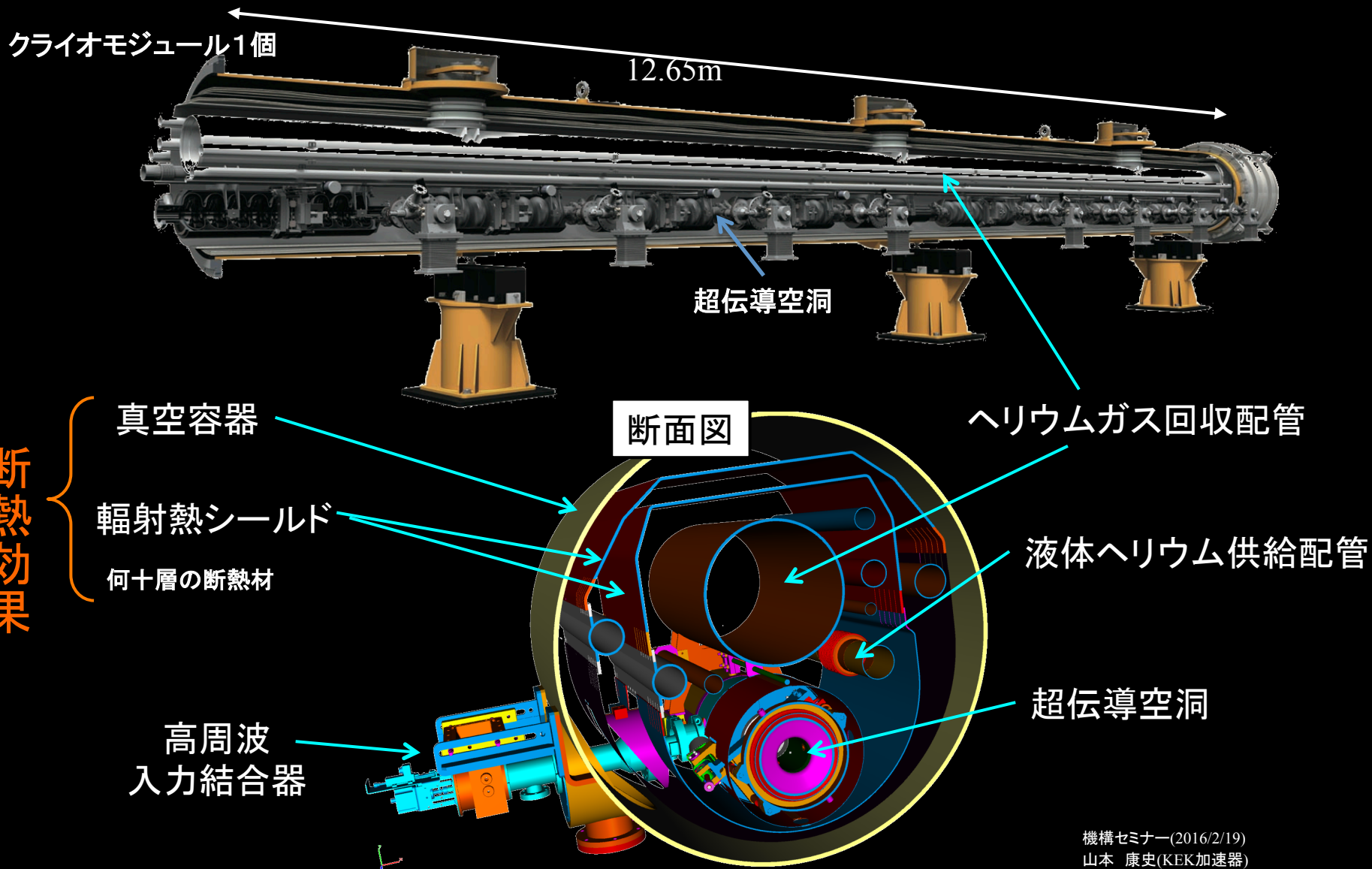
- 超伝導を保つ為に、断熱した冷凍容器内に設置

表面をツルツルにするために電解研磨を施す **性能基準が厳しい!**

- 空洞1つ: 机ほどの面積の1カ所に30 μ m以上の傷は×
- ILC全空洞: サッカー場ほどの面積の1カ所に30 μ m以上の傷は×

クライオモジュール

超伝導空洞が収納される断熱真空容器



超伝導空洞の大量生産・品質管理、コストダウン の検討がILCの実現に極めて重要

計画通りに空洞を製造できるか (5 yrで > 31.5MV、> **17000台**) ?

ILCのコストは約半分がmain linac ! (トンネルの値段込み)

品質管理、コストダウン: European XFEL @DESY (放射光施設)

ILCのと同様な超伝導空洞からなる世界最長の線形加速器

ILCの1/20スケール (全長3 km、17GeV、空洞 800 台)

性能試験の結果より、既にILCの要求加速勾配を上回っている

大量生産: XFELで証明された大量生産方式を導入し、北米、欧州、アジアの
3地域で共同生産を行えばILCの第一期計画が実現可能

総合試験: 各国で作られた装置を1つの
システムとして日本(KEK)で組み合わせる

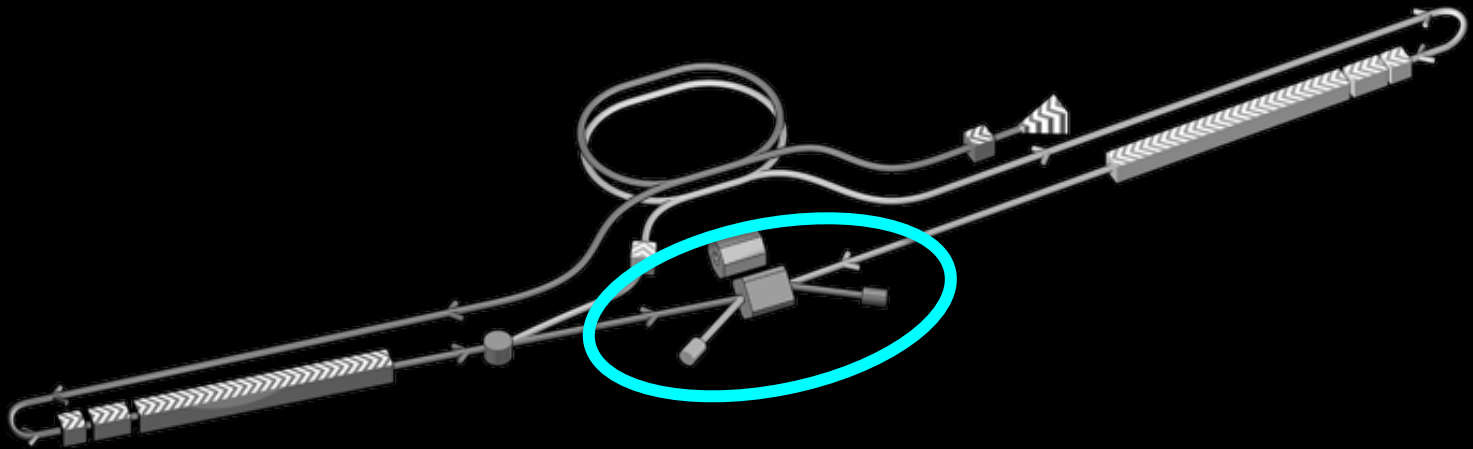


ビームの収束

luminosity (衝突確率) を高めたい

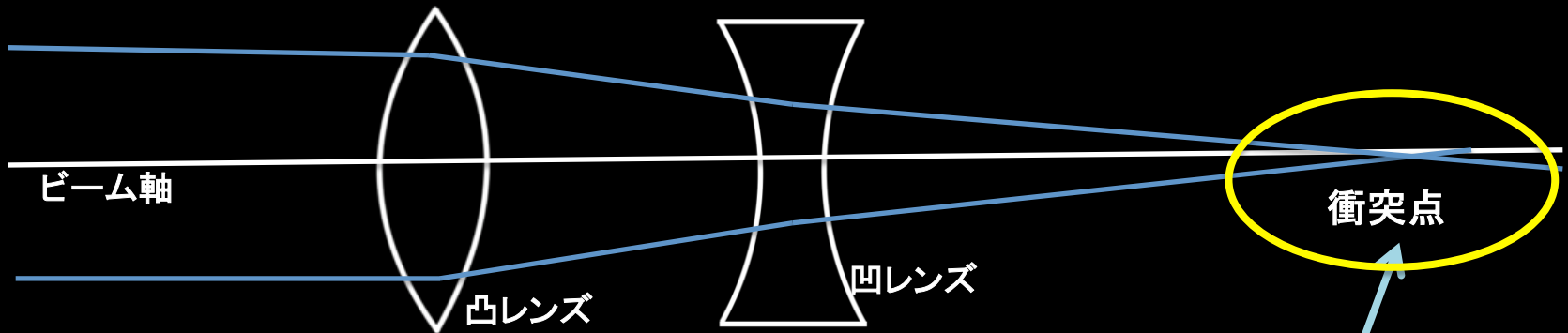


ビームを**極小**に絞る



最終収束系

- 加速後、衝突点で**極小ビームサイズ**にする
- ビーム収束は四重極磁場のペアで行う



Q: Luminosityを大きくするために、衝突点ではどのようなビームの形状にすればよいのか？

ヒント

- Luminosityを上げる為に **断面積 $\sigma_x \cdot \sigma_y$ を小さく** したい
- ビームビーム効果を抑える為に **周長 $(\sigma_x + \sigma_y)$ を大きく** したい

最終収束系

ビームビーム効果 ($\propto \frac{1}{\sigma_x + \sigma_y}$) を抑えると同時に

luminosity ($\propto \frac{1}{\sigma_x \sigma_y}$) を大きくするための作戦は

扁平ビーム

横方向

$$\sigma_y = 500 \text{ nm}$$

縦方向

$$\sigma_y = 6 \text{ nm}$$

水素原子10個分

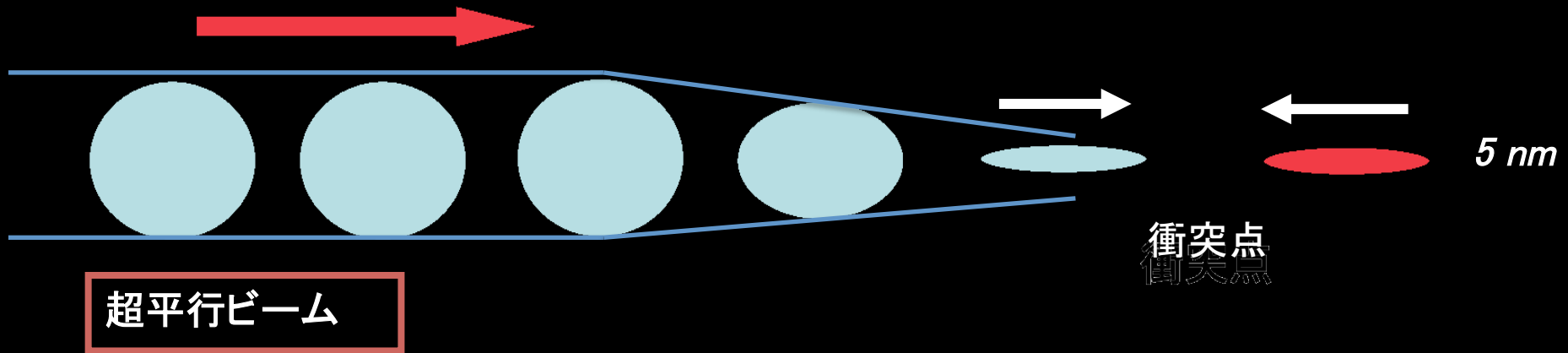
インフルエンザウィルスの1/10以下

バンチ長

$$\sigma_z = 300 \text{ } \mu\text{m}$$

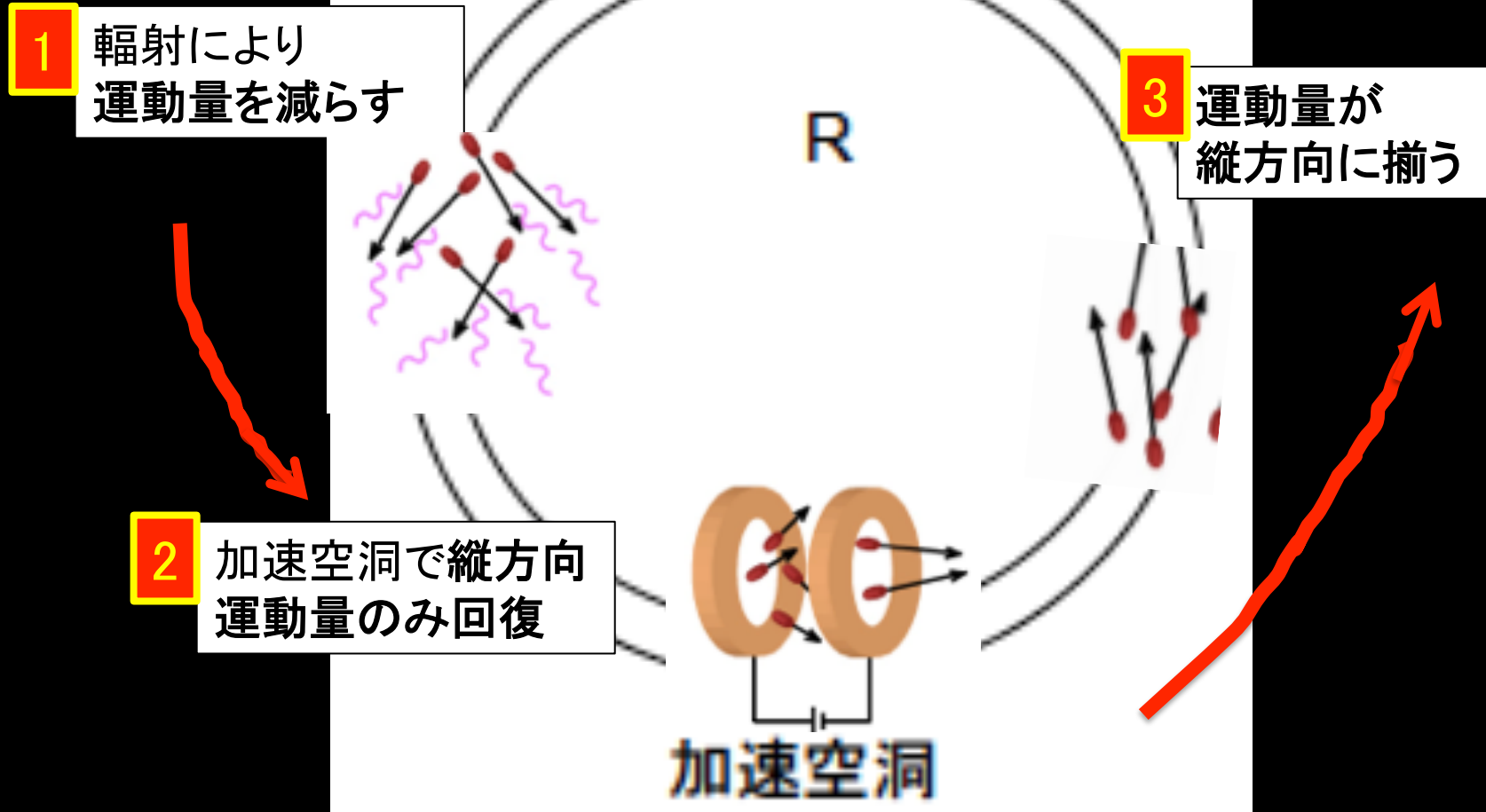
超平行ビーム

衝突点でビームを小さく絞る前に、
まずは**究極的に平行なビーム**を作る必要がある



月まで行っても1mしか広がらない
(レーザーの1万倍も平行)

超平行ビームとダンピングリング



周回しているうちに、ビームが平行になる

ナビームの実現: ATF/ATF2@KEK

ATF2 (2007~) ILCのための最終収束系の試験施設
ILCと同じ光学系設計でビーム収束手法の検証に成功

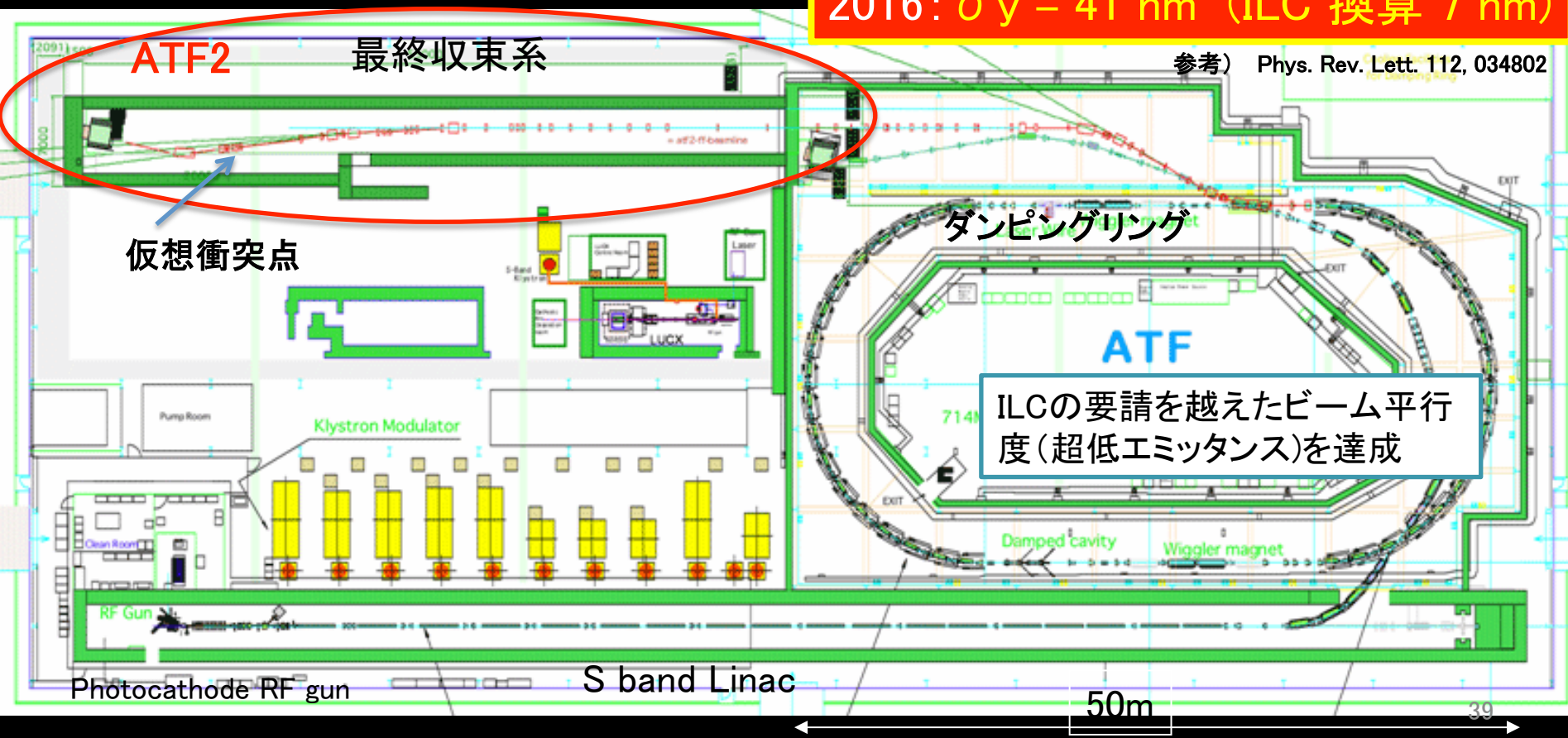
Goal : 37 nm ↔ ILC 6 nm
(ATF: 1.3 GeV ILC: 250 GeV)
ビームエネルギーでスケール

公表最小記録:

2014: $\sigma_y = 44 \text{ nm}$

2016: $\sigma_y = 41 \text{ nm}$ (ILC 換算 7 nm)

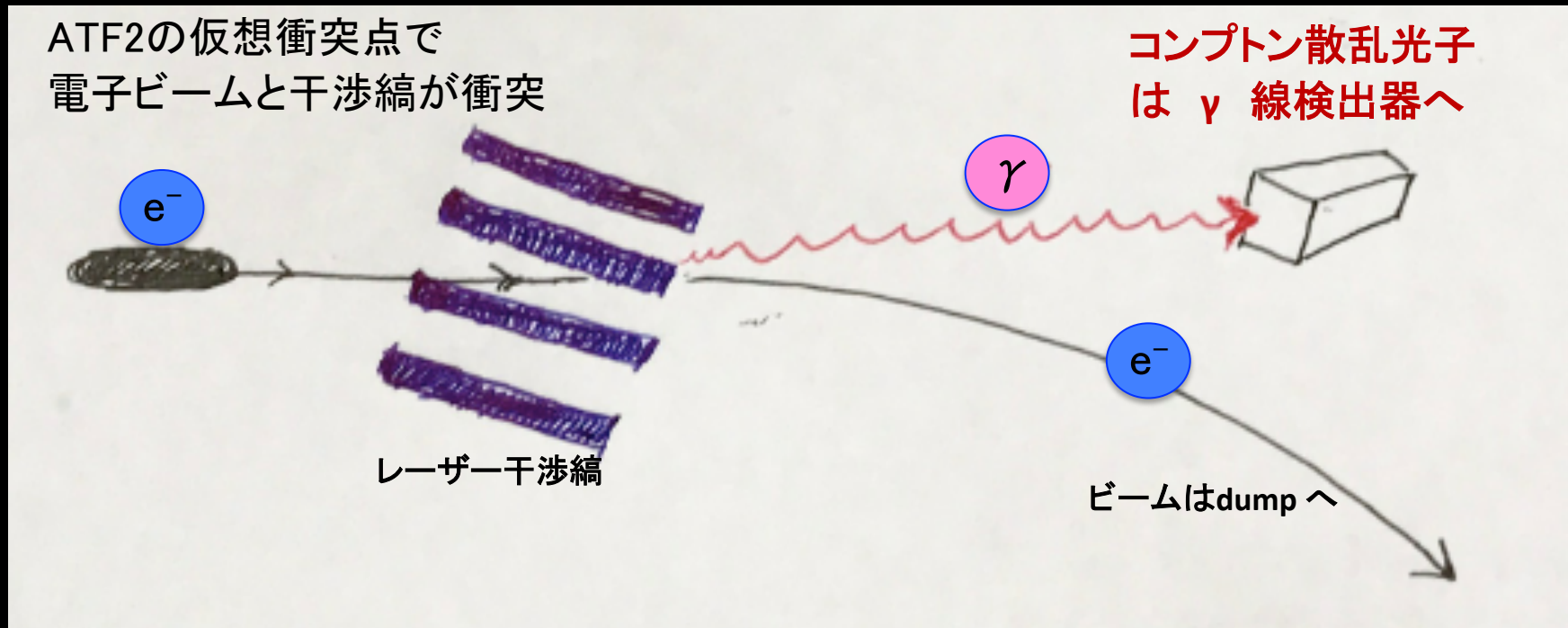
参考) Phys. Rev. Lett. 112, 034802



(余談) 新竹モニター

ATF2にて東大・KEKでの共同開発

現時点で **数十nm** のビームサイズを測定できる **唯一のデバイス**
レーザー干渉縞と電子ビームのコンプトン散乱を使用



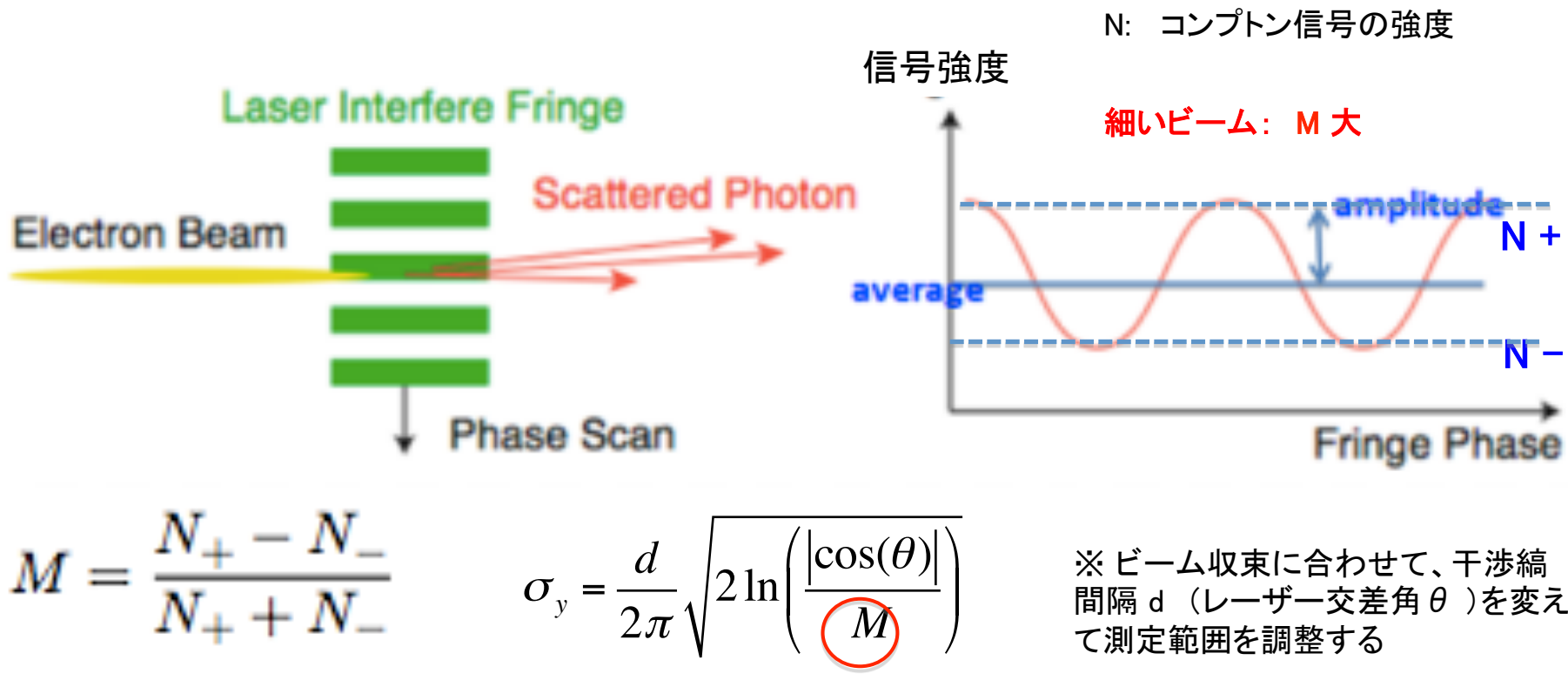
コンプトン信号の **変調度** を測定し、ビームサイズを算出

→ 干渉縞位相に対する信号強度の変化量

(余談) 新竹モニター

コンプトン信号の **変調度** を測定し、ビームサイズを算出

→ 干渉縞位相に対する信号強度の変化量



実際、ATF2では σ_y が目標値37nm以下まで絞れていた可能性がある

41 nmは σ_y の上限値であり、新竹モニターに由来する系統誤差が σ_y を過大評価させる

系統誤差の参考: J.Yan et al: Nucl. Instrum. and Meth. In Phys, Research A740 (2014) 131-137

J. Yan, Doctoral Thesis, The University of Tokyo, 2015

加速器のまとめ

- 加速器の技術の飛躍的向上と新物理の発見がお互いを後押ししてきた
- シンクロトン放射の無い、電子陽電子リニアコライダー
ILCが高エネルギー素粒子物理の最前線を引き継ぐ
- 新物理探索のために高いluminosityを稼ぐ
- ILCの加速器の各部分の研究開発は着々と進んでいる

粒子源

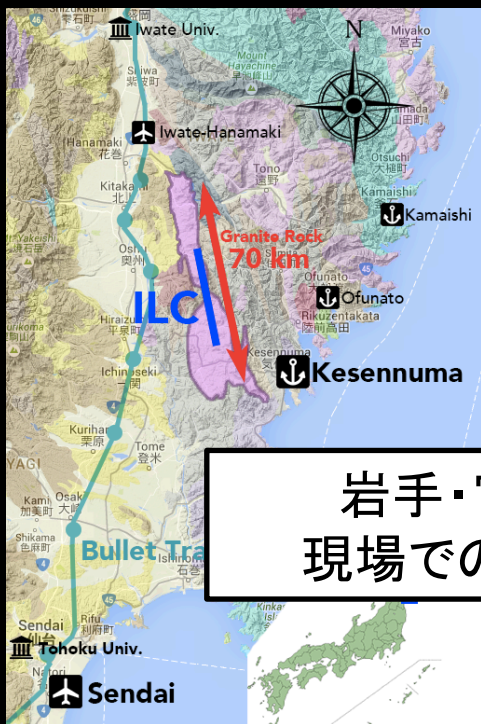
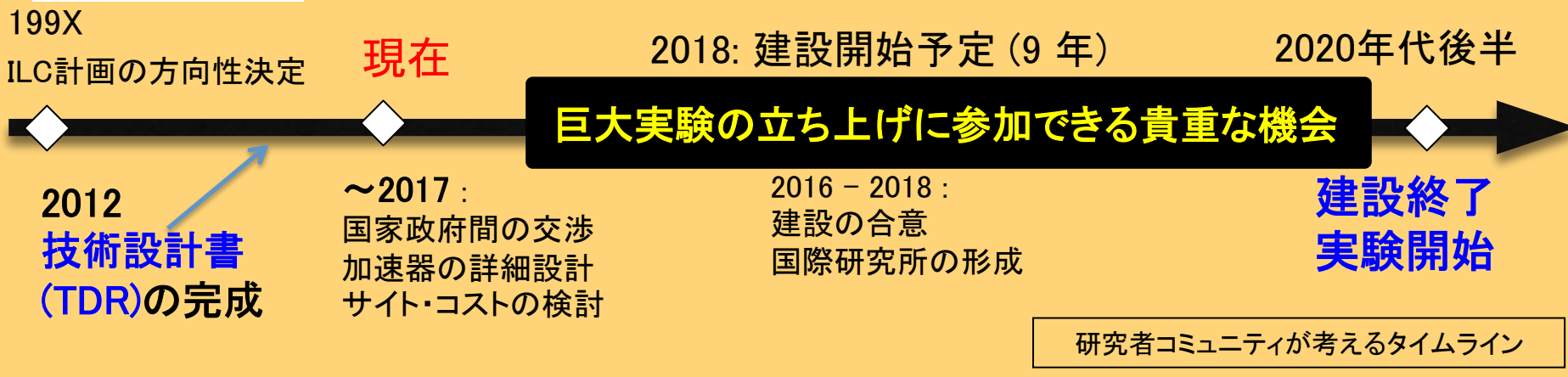
高い変極度
を実現

加速空洞

高い勾配を持つ超伝導空洞
と実現に向けての大量生産

ビーム収束

ナノビームの実現
によりビーム収束
手法を実証



今後、政府の決定(予想1 - 2年)があれば:
準備期間4年程度 + 建設期間10年程度で完成

岩手・宮城県の北上山地
現場での技術設計が進行中

LCWS 2016 @ 盛岡

<http://lcws2016.sgk.iwate-u.ac.jp/index.html>



**本講義の最後に
持ち帰っていただきたい
メッセージが2つあります**

メッセージ その1

我々の宇宙の究極な理解を目指して、
ILCは前代未聞の高精度な物理を提供する

メッセージ その2

このトークを聞いて、ILCに興味を持ち始める方々へ

ILCは**若手研究者の力を必要**としている

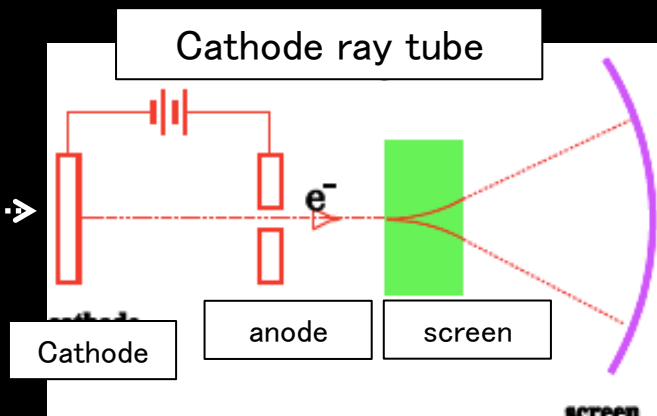
最先端の大規模な国際的高エネルギー実験
にその立ち上げから関わる事ができる！

ILCを是非
一緒に実現させましょう！

BACKUP

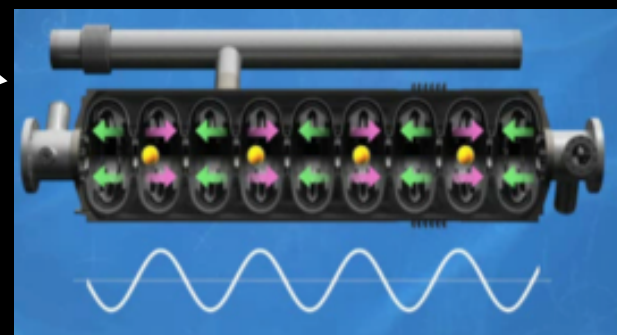
加速器史上最大の発明: RF加速

- 初期の加速器は静電加速器
直流型: 放電による限界 (~2 MeVまで)

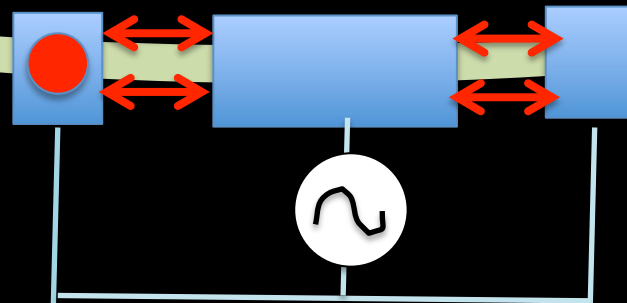


交流(電波)による加速の原理 R. Wideroe, 1928

一回の加速量に限界があっても、
RF空洞 + 周回軌道 の繰り返し加速で
原理的にどこまでも加速可能



高いエネルギーへ到達



高いエネルギー
→ 新物理の発見

超伝導空洞の大量生産： XFELで性能試験

モジュールに組み込んだ後: 31MV/mを達成

単体空洞試験: 平均35 MV/mを上回っている

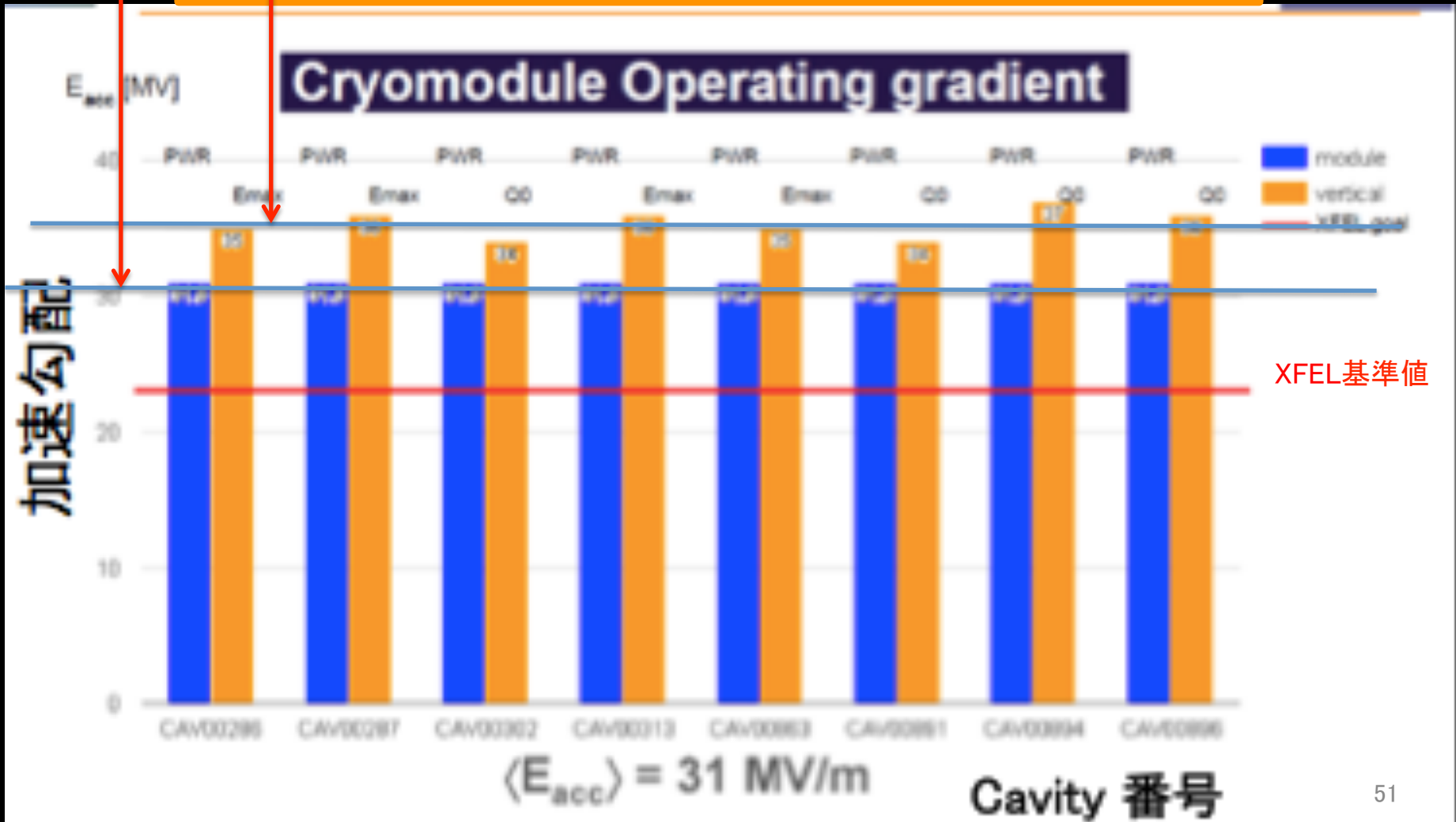
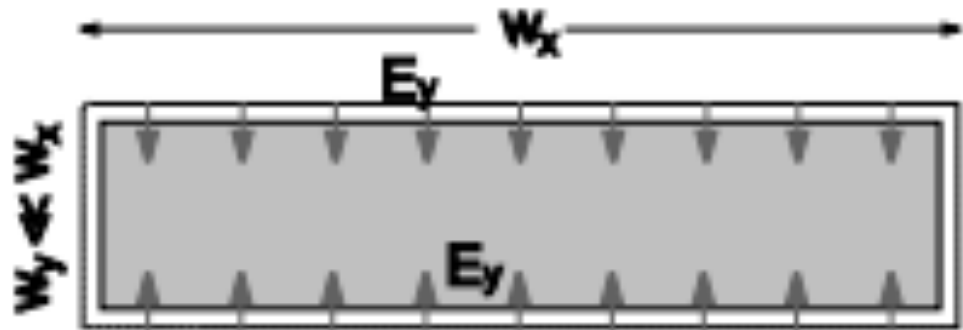
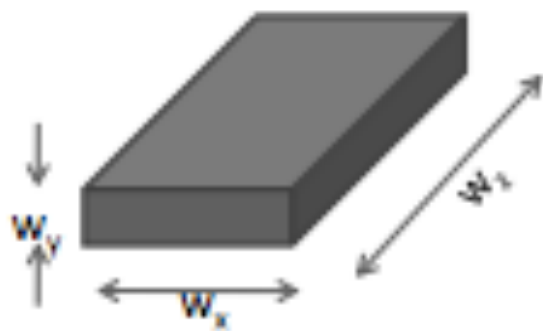


Table 1: ILC Parameters

			Baseline			Luminosity Upgrade	E_{CM} Upgrade	
			500GeV machine				A	B
重心系エネルギー	E_{CM}	GeV	250	350	500	500	1000	1000
衝突点でのビームパルス頻度	f_{rep}	Hz	5	5	5	5	4	4
パルスあたりのバンチ数	n_b		1312	1312	1312	2625	2450	2450
バンチあたり粒子数	N	$\times 10^{10}$	2	2	2	2	1.74	1.74
バンチ間距離	t_b	ns	554	554	554	366	366	366
パルス内のビーム電流	I_{beam}	mA	5.8	5.8	5.8	8.8	7.6	7.6
平均加速勾配		MV/m	14.7	21.4	31.5	31.5	38.2	38.2
平均ビーム電力	P_B	MW	5.9	7.3	10.5	21.0	27.2	27.2
供給電力	P_{AC}	MW	122	121	163	204	300	300
RMS バンチ長 (rms)	σ_z	mm	0.3	0.3	0.3	0.3	0.25	0.225
電子ビームのエネルギー広がり	σ_E/E	%	0.190	0.158	0.124	0.124	0.083	0.085
陽電子ビームのエネルギー広がり	σ_E/E	%	0.152	0.100	0.070	0.070	0.043	0.047
電子偏極	P_{e^-}	%	80	80	80	80	80	80
陽電子偏極	P_{e^+}	%	30	30	30	30	20	20
水平規格化エミッタンス	$\epsilon_{x,n}$	μm	10	10	10	10	10	10
鉛直規格化エミッタンス	$\epsilon_{y,n}$	nm	35	35	35	35	30	30
衝突点でのエネルギー幅 (e^-)	σ_E/E	%	0.190	0.158	0.124	0.124	0.083	0.085
衝突点でのエネルギー幅 (e^+)	σ_E/E	%	0.152	0.100	0.070	0.070	0.043	0.047
衝突点での水平ベータ関数	β_x^*	mm	13	16	11	11	22.6	11
衝突点での鉛直ベータ関数	β_y^*	mm	0.41	0.34	0.48	0.48	0.25	0.23
衝突点での水平ビームサイズ	σ_x^*	nm	729	683.5	474	474	481	335
衝突点での鉛直ビームサイズ	σ_y^*	nm	7.7	5.9	5.9	5.9	2.8	2.7
Disruption parameter (x)	D_x		0.3	0.2	0.3	0.3	0.1	0.2
Disruption parameter (y)	D_y		24.5	24.3	24.6	24.6	18.7	25.1
ルミノシティ	\mathcal{L}	$\times 10^{34}/\text{cm}^2\text{s}$	0.75	1.0	1.8	3.6	3.0	4.9
エネルギー幅 1%以内のルミノシティ	$\mathcal{L}_{0.01}/\mathcal{L}$	%	87.1	77.4	58.3	87.1	59.2	44.5
Υ パラメータ	Υ		0.020	0.030	0.062	0.062	0.127	0.203
平均光子数	n_γ		1.16	1.23	1.72	1.72	1.43	1.97
ビーム輻射による平均エネルギー損失	δ_{BS}	%	0.97	1.9	4.5	4.5	5.6	10.5



ガウスの法則

$$\oint \mathbf{E} \cdot \mathbf{n} dS = Q/\epsilon_0$$

$$\Rightarrow 2w_x w_z E_y \approx eN/\epsilon_0$$

$$E_y \approx \frac{eN}{2\epsilon_0 w_x w_z}$$

beamstrahlung

$$\Upsilon_{avr} \approx \frac{5}{6} \frac{N r_e^2 \gamma}{\alpha \sigma_z (\sigma_x + \sigma_y)}$$

- Direct Transition at Γ point.

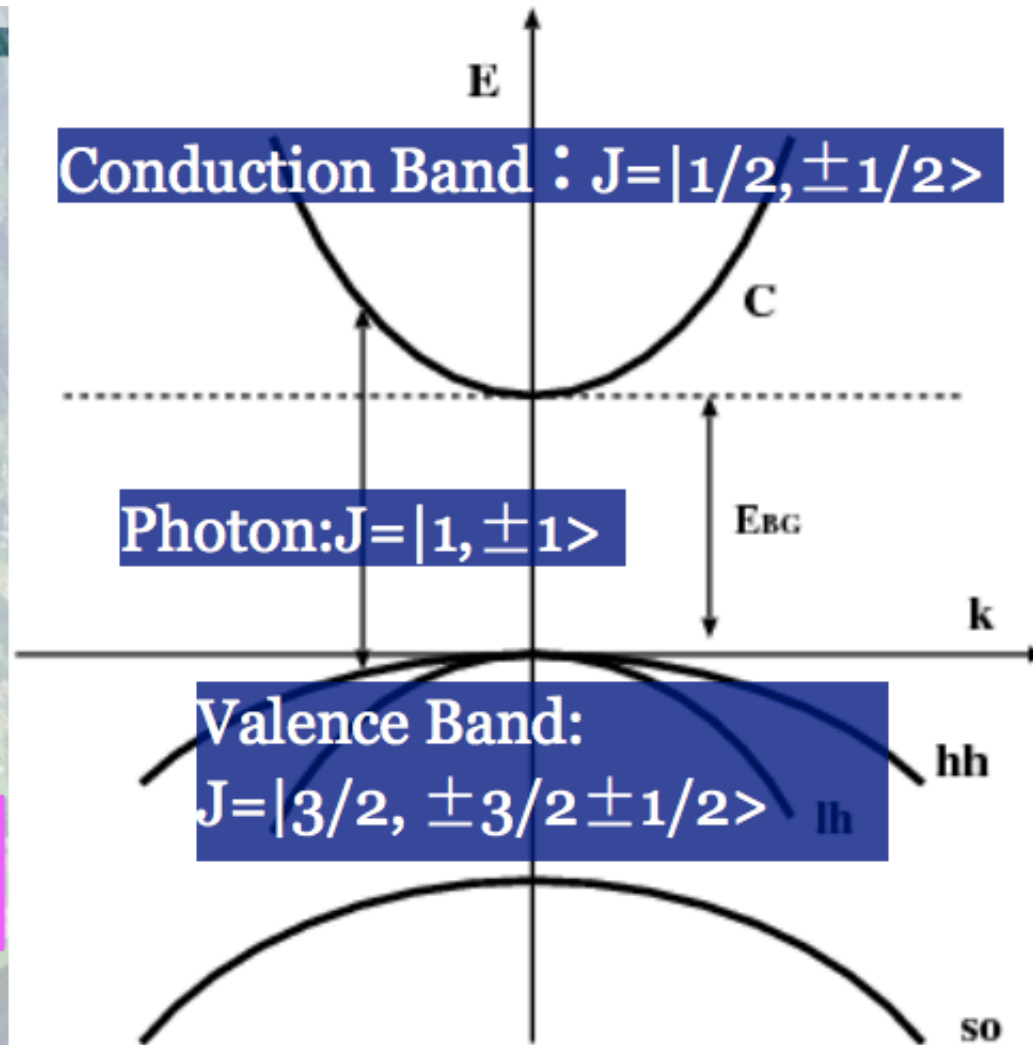
$$W_{i \rightarrow f} = \frac{2\pi}{\hbar} M^2 D(h\omega) f(E)$$

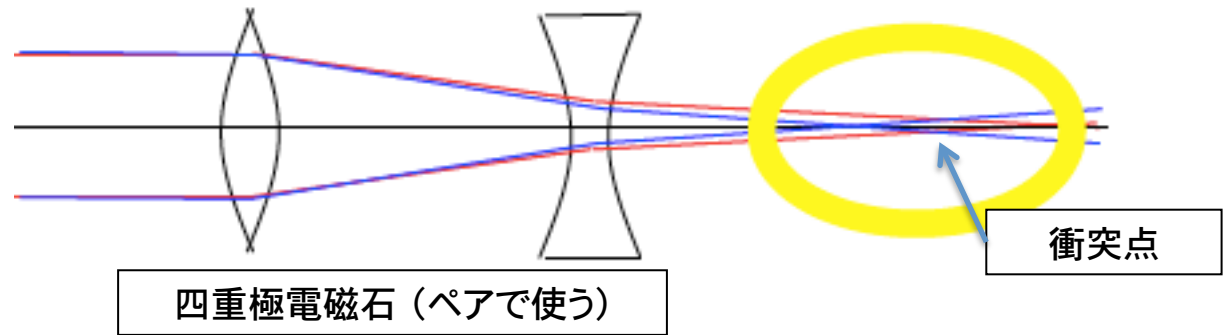
- M: Matrix element.
- D: Combined states of density.
- f: Distribution function.

- M ~ Clebsh-Gordon coeff.

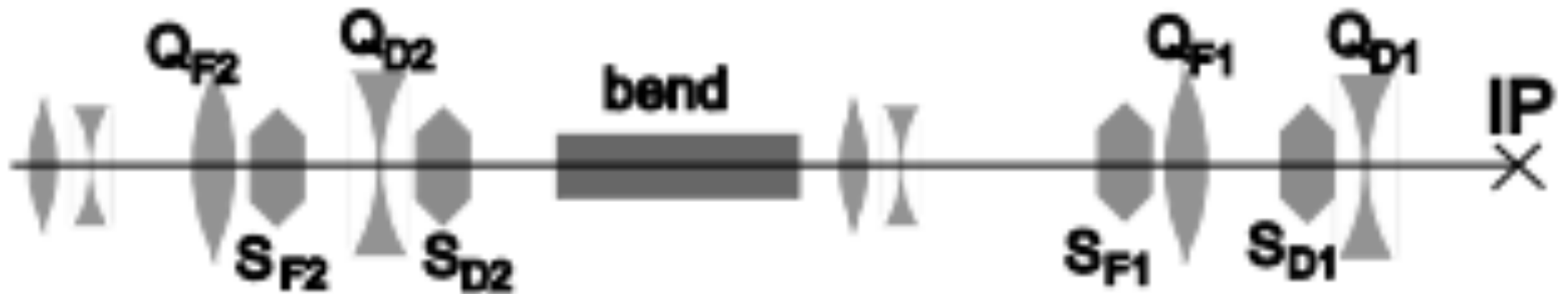
$$\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 2 & 2 \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{2} (1, -1) \begin{pmatrix} 3 & 3 \\ 2 & 2 \end{pmatrix} + \frac{1}{2} (1, 1) \begin{pmatrix} 3 & -1 \\ 2 & -2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 2 & -2 \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{2} (1, 1) \begin{pmatrix} 3 & -3 \\ 2 & -2 \end{pmatrix} + \frac{1}{2} (1, -1) \begin{pmatrix} 3 & 1 \\ 2 & 2 \end{pmatrix}$$





- 色収差(ボケ)の補正



加速器の種類(加速粒子)	加速電場	ビーム軌道	エネルギー領域
コッククロフト・ ウォルトン型加速器 (陽子、イオン)	静電場	直線	2~4 MeV
バンデグラフ型加速器 (陽子、イオン)	静電場	直線	10 MeV
サイクロトロン (陽子、イオン)	高周波	らせん	数十 MeV
ベータトロン(電子)	高周波	円	数十 MeV
シンクロトロン (電子、陽子、イオン)	高周波	円	1 TeV
線形加速器(電子、陽子)	高周波	直線	数十 GeV