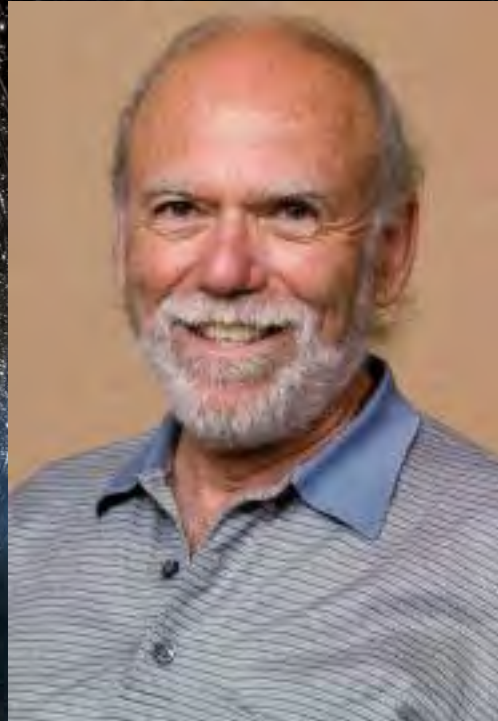


Barry C. Barish 教授の紹介



2017 ノーベル物理学賞受賞：重力波の初観測
(キップ・ソーン教授、ライナー・ワイス教授とともに)

賞の数々

2002: Klopsteg Memorial Award of the American Association of Physics Teachers

2006: University of Bologna honorary doctorate

2007: University of Florida honorary doctorate

2007: the Van Vleck lectures at the University of Minnesota

2013: University of Glasgow honorary degree of science

2016: Titan of Physics in the On the Shoulders of Giants series at the World Science Festival

2016, Enrico Fermi Prize (LIGO)

2016: Smithsonian magazine's American Ingenuity Award in the Physical Science category

2017: Henry Draper Medal from the National Academy of Sciences (LIGO)

2017: Giuseppe and Vanna Cocconi Prize of the European Physical Society

(LIGO, jointly with Kip Thorne and Rainer Weiss)

2017: Fudan-Zhongzhi Science Award (LIGO, jointly with Kip Thorne and Rainer Weiss)

2017: Nobel Prize in Physics (jointly with Rainer Weiss and Kip Thorne)

"for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves"

2018: Alumnus of the year, the University of California, Berkeley

2018: Southern Methodist University honorary doctorate

2018: Sofia University St. Kliment Ohridski, Honorary Degree Doctor Honoris Causa

Has been elected to and held fellowship at the following organizations:

the American Academy of Arts and Sciences (AAAS)

the National Academy of Sciences (NAS)

the National Science Board (NSB)

Fellow of American Physical Society (APS) (President 2011)

Fellow of American Association for the Advancement of Science (AAAS)

(1962) 博士号：カリフォルニア大学バークレー校

(1963~) カリフォルニア工科大学

研究員、助教授、准教授、そして教授として

(1991~) リンデ記念物理学教授

ブルックヘブン研究所(ニューヨーク州)、スタンフォード線形加速器センター、
フェルミ国立研究所(イリノイ州)などで研究

(1970) フェルミ国立研究所(イリノイ州)におけるニュートリノ実験

フランク・スカリ教授とともに提案/構築

素粒子標準理論で予言されていた弱い相互作用の中性カレントの初観測

(~1975) コーネル大学電子陽電子衝突機でのCLEO実験において、当時発見されたばかりの

タウ・レプトンの研究を提案/構築

デルコ実験に参加 (~1978)

スタンフォード線形加速器センター 電子陽電子衝突器PEP

チャーム・クォークの生成と崩壊
の研究（私[山本]の博士研究テーマ、
指導教官 Barry C. Barish）

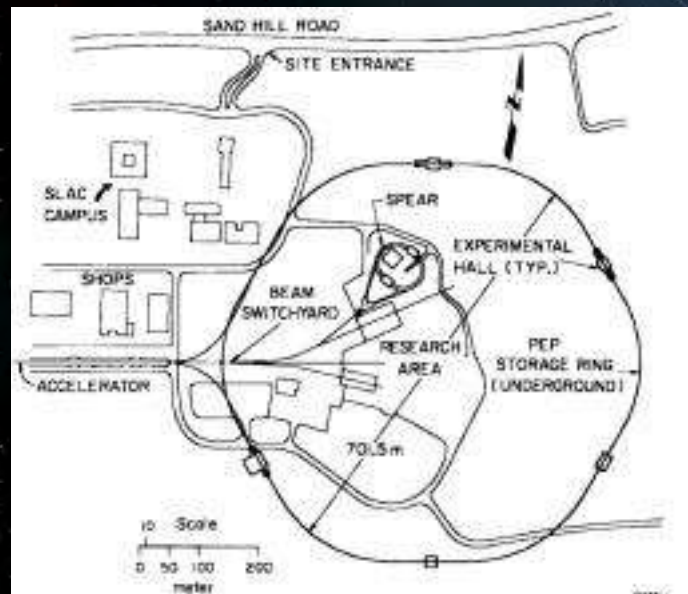
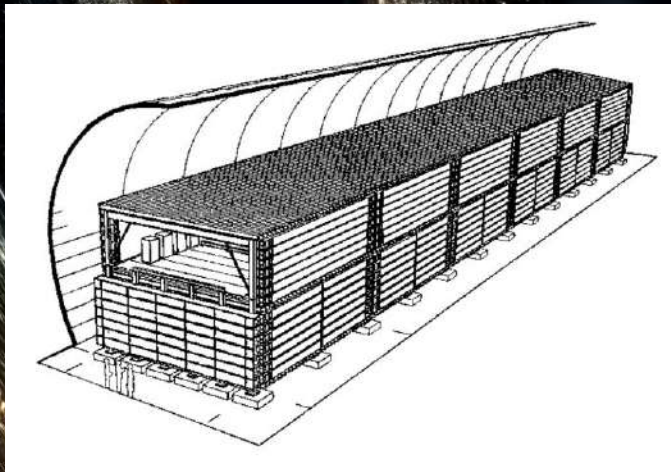


Fig. 1. Layout of the PEP ring superimposed on an aerial view of the SLAC site.



MACRO実験をリード

イタリア グラン・サソ地下研究所



1986: 実験提案

1989: データ所得開始

1990: 検出器完成

2000: データ取得終了

目的:

磁荷を持つ粒子の探索

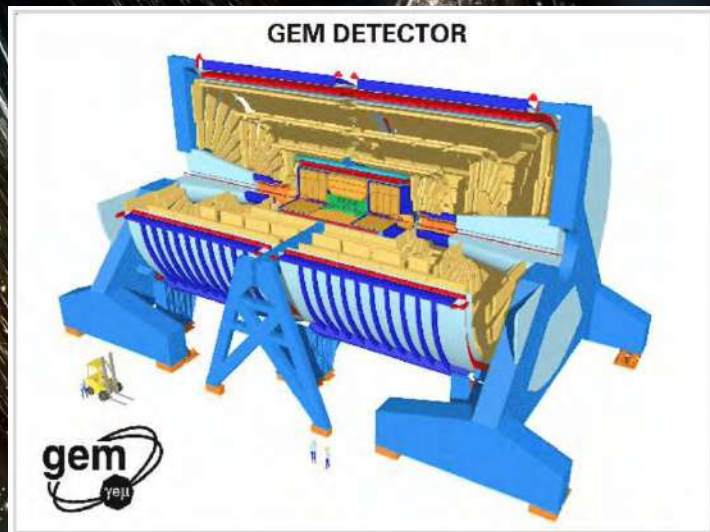
その他ニュートリノ物理など



GEM実験計画をリード

1991~1993

GEM: SSC (Superconducting Super Collider)のために計画された測定器の一つ
1993:SSCプロジェクトは残念ながら米国政府によってキャンセル



SSC: 巨大計画に関する大きな教訓

SSC: 周長87km

LIGO重力波実験を救済/牽引

米国ハンフォード(ワシントン州) & リビングストン(ルイジアナ州)



ハンフォード施設



リビングストン施設

1980: kmサイズの干渉計の可能性が確率
~1994: 十分な研究資金が確保されず

1994: Barry BarishがLIGOの代表に就任
約400億円承認

1997: 二つの施設ほぼ完成

2002: データ取得開始

2004: LIGO増強計画開始 (~600億円)

2015: 増強されたLIGOによるデータ取得開始

2016年2月11日: 重力波の初観測発表

国際リニアコライダー(ILC)研究開発を牽引

次世代線形電子陽電子衝突器 (ヒッグスファクトリー候補の一つ)



2005~2013: ILC国際設計チームのディレクター

ILC工学設計書ドラフト完成式



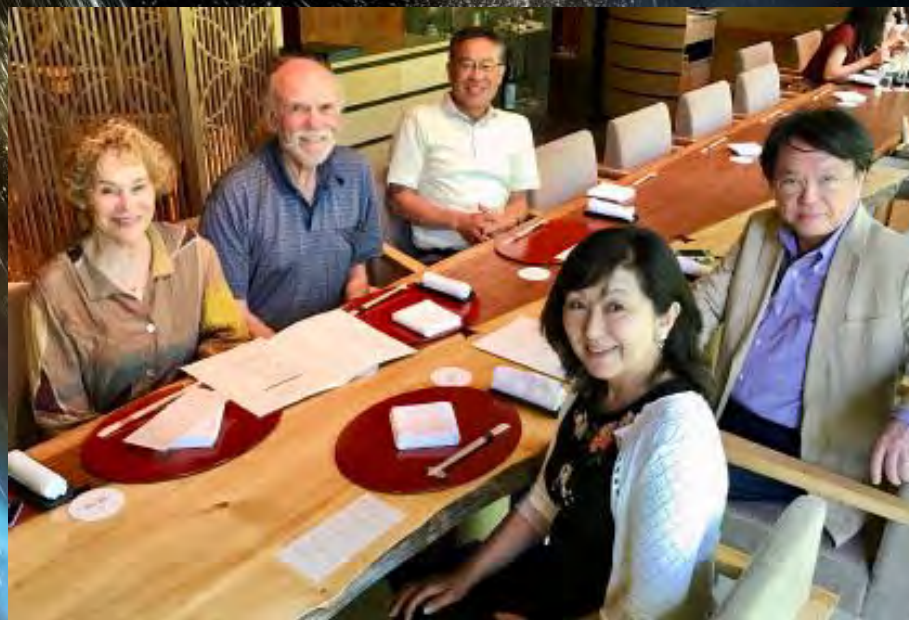
Barry Barish

物理測定器
Sakue Yamada

Jim Brau (北米)
Juan Fuster (欧州)
Hitoshi Yamamoto (アジア)

2012年12月15日
秋葉原UDX

工学設計書のドラフトがILC運営委員会議長のジョン・バガーに手渡された。
ILCは技術的には原則いつでも計画開始出来る段階に。



八芳園(東京白金台)にて(2017年4月、ノーベル賞発表の半年前)

ヒッグス粒子で宇宙創生を解明する

山本 均
東北大学名誉教授
バレンシア大学客員教授

2022年3月5日

東北大学知のフォーラム、Junior Research Program「重力波宇宙論の幕開けと重力理論」

CERN(セルン)研究所 モンブラン

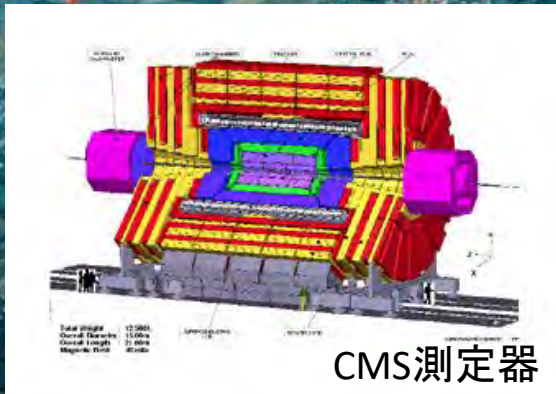
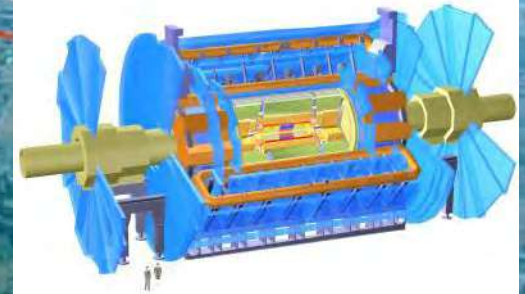
レマン湖

ジュネーブ空港

ジュネーブ市街

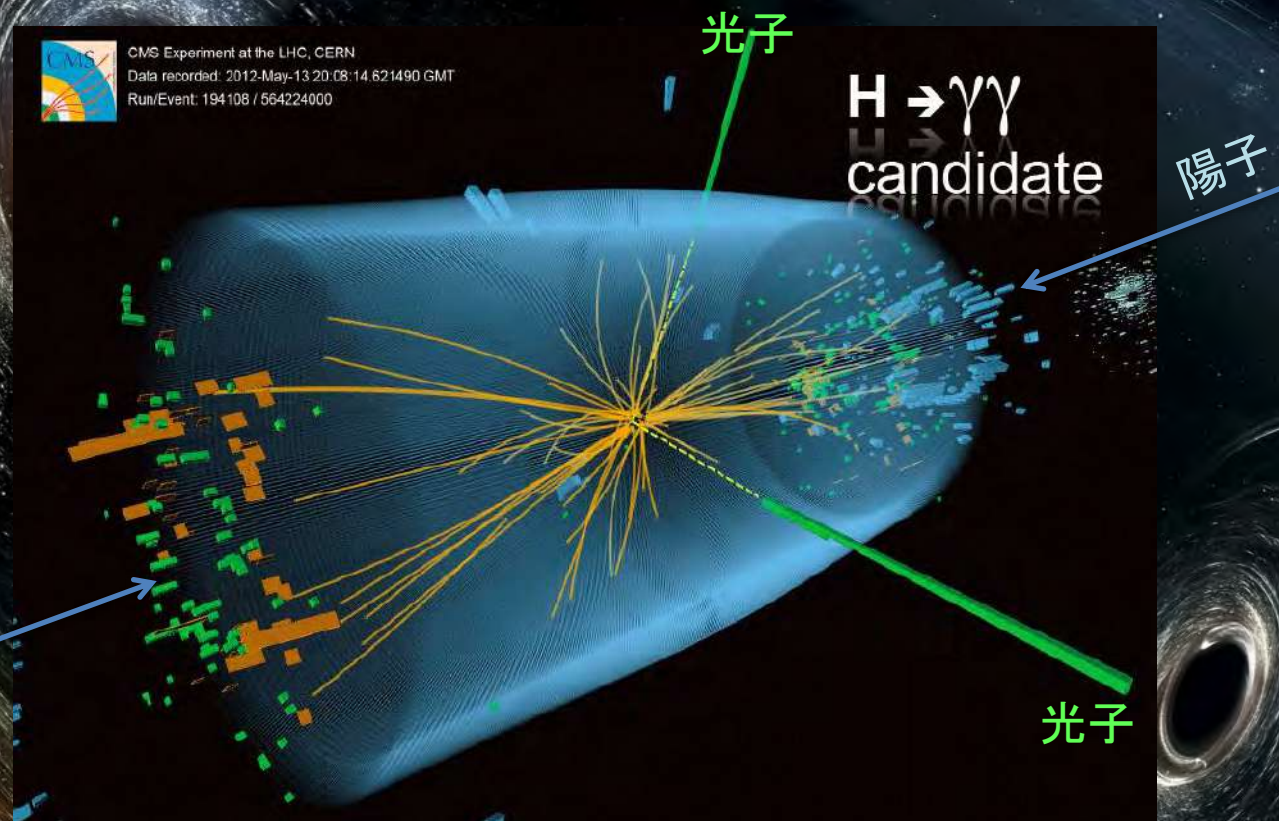
LHC (Large Hadron Collider)
陽子-陽子衝突器
周長約30 km

アトラス測定器



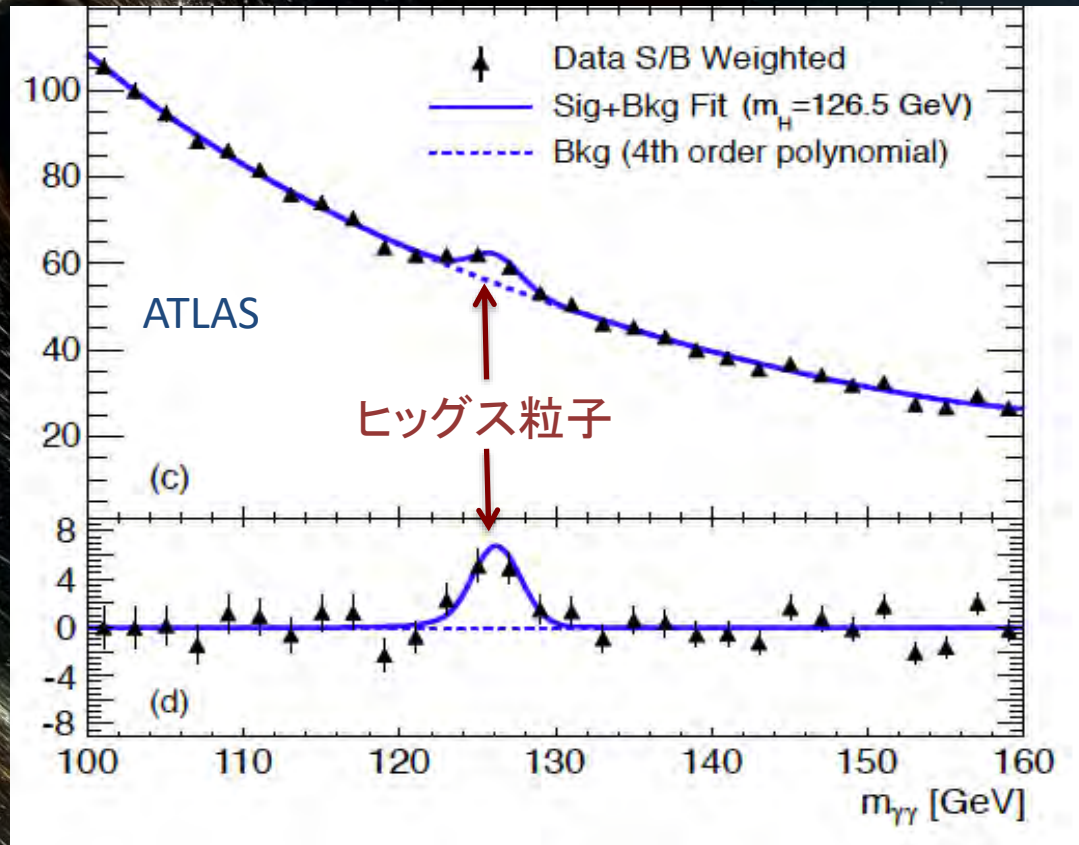
CMS測定器

ヒッグス粒子の発見 2012年7月4日



- ▶ 陽子と陽子の衝突でヒッグス粒子が生成
- ▶ ヒッグス粒子は(このイベントでは)ただちに2つの光子に崩壊
- ▶ 2つの光子をとらえて新粒子を再構成 (他の崩壊パターンも)
- ▶ 陽子の質量の約130倍にヒッグス粒子発見。

ヒッグス粒子のシグナル



◆ 再構成した親粒子の質量の分布

新粒子発見記者会見

2012年7月4日



世界中から記者が殺到

アンダレール教授

2012年7月4日



ヒッグス教授

2013年ノーベル物理学賞
ピーター・ヒッグス (エジンバラ大学名誉教授)
フランソワ・アンダレール (ブリュッセル自由大学)

ヒッグスは「素粒子の標準理論」の最後の未発見粒子
全ての素粒子の質量の起源

素粒子:これ以上分けられない粒子

標準理論の素粒子たち

物質の粒子

レプトン

- (ν_e, e) 電子
- (ν_μ, μ) ミュー粒子
- (ν_τ, τ) タウ粒子

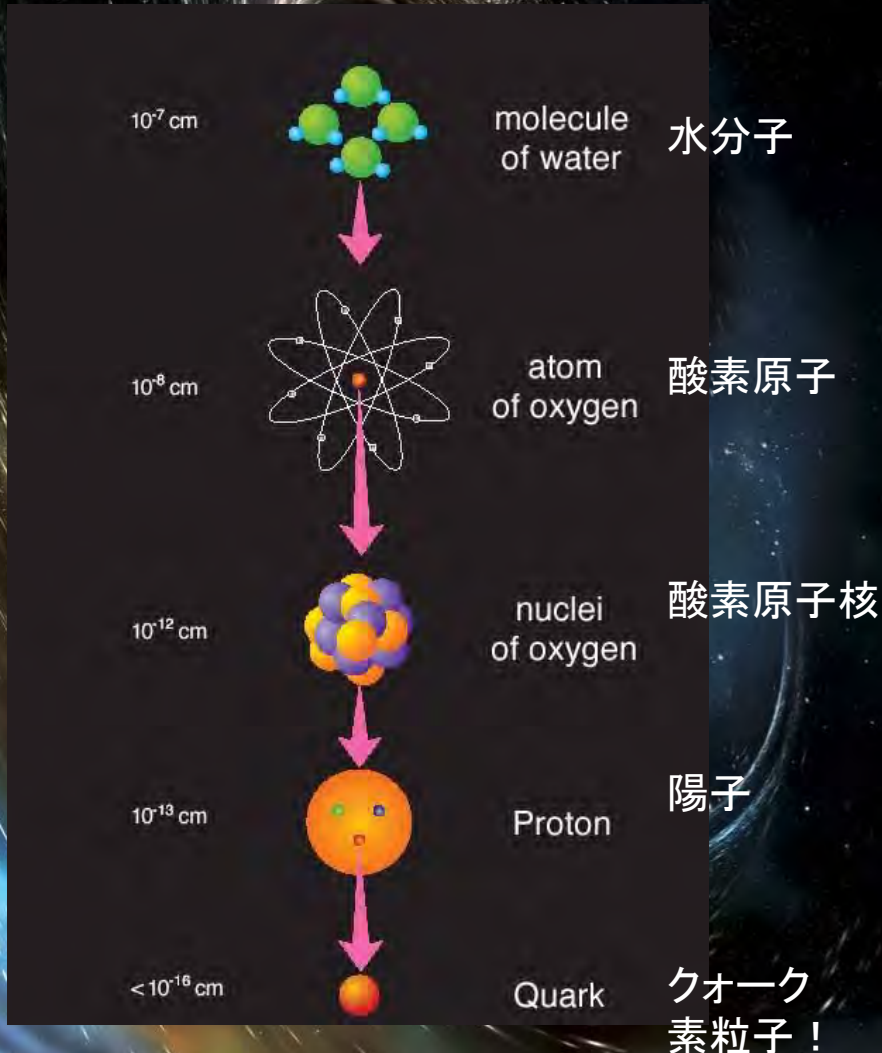
クォーク

- (u, d)
- (c, s)
- (t, b)

ゲージ粒子 (力の粒子)

- 光子 (電磁気力)
- W、Z (弱い力)
- グルーオン (強い力)

ヒッグス粒子 (質量のもと)



標準理論の原理

- ゲージ原理
 - 粒子間の反応の仕方を規定
 - 自然界の反応を見事に説明！

問題：一般にすべての素粒子は質量ゼロでないという理論が成り立たない。でも多くの素粒子は現実には質量を持つ(電子、クォーク、W,Z...)

- ヒッグス機構
 - 素粒子に質量を与える(ゲージ原理を壊さずに)

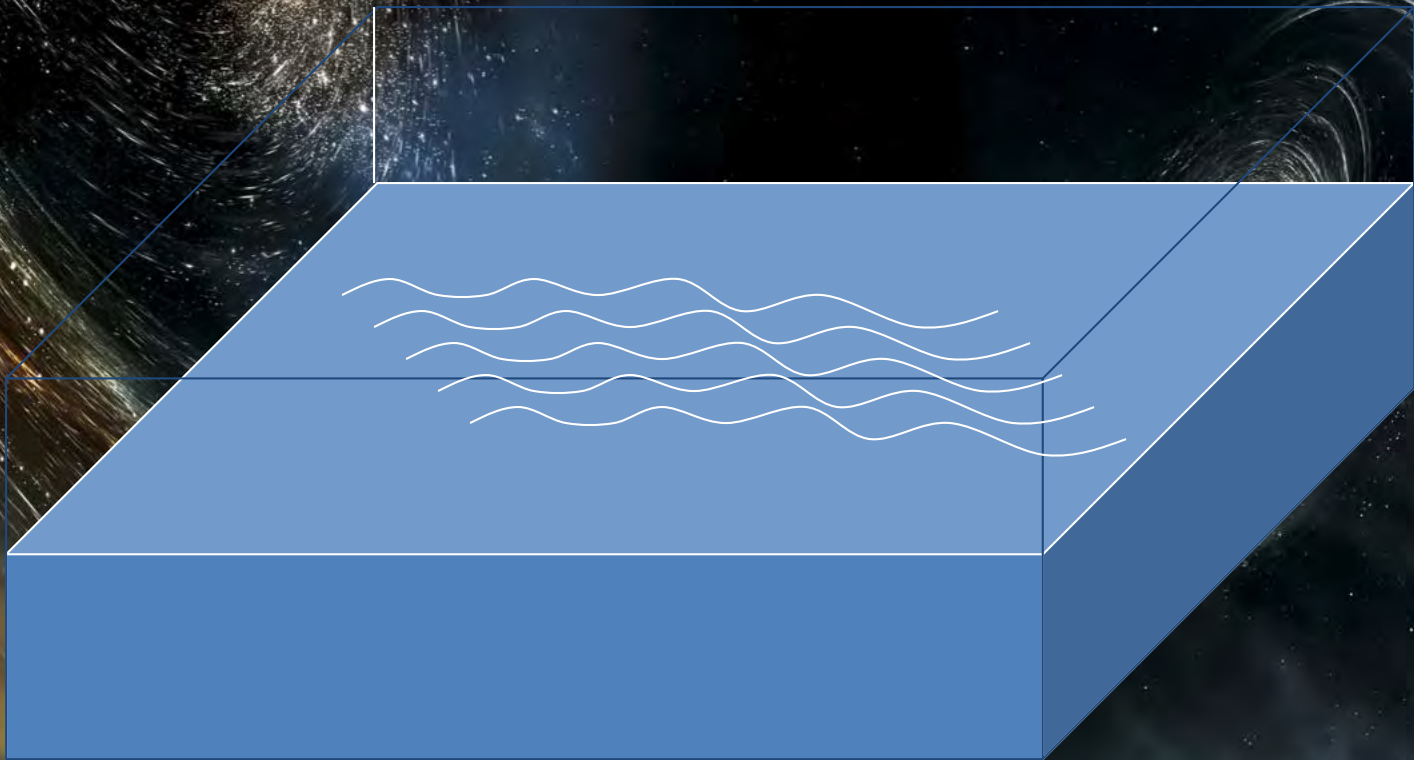
ヒッグス機構

(ヒッグス粒子が素粒子に質量を与える仕組み)

- ヒッグスという粒子を仮定する
 - 宇宙の真空はヒッグス粒子がビッシリ満たしている状態と仮定する
 - 粒子は真空のヒッグス場との反応によって質量を得る

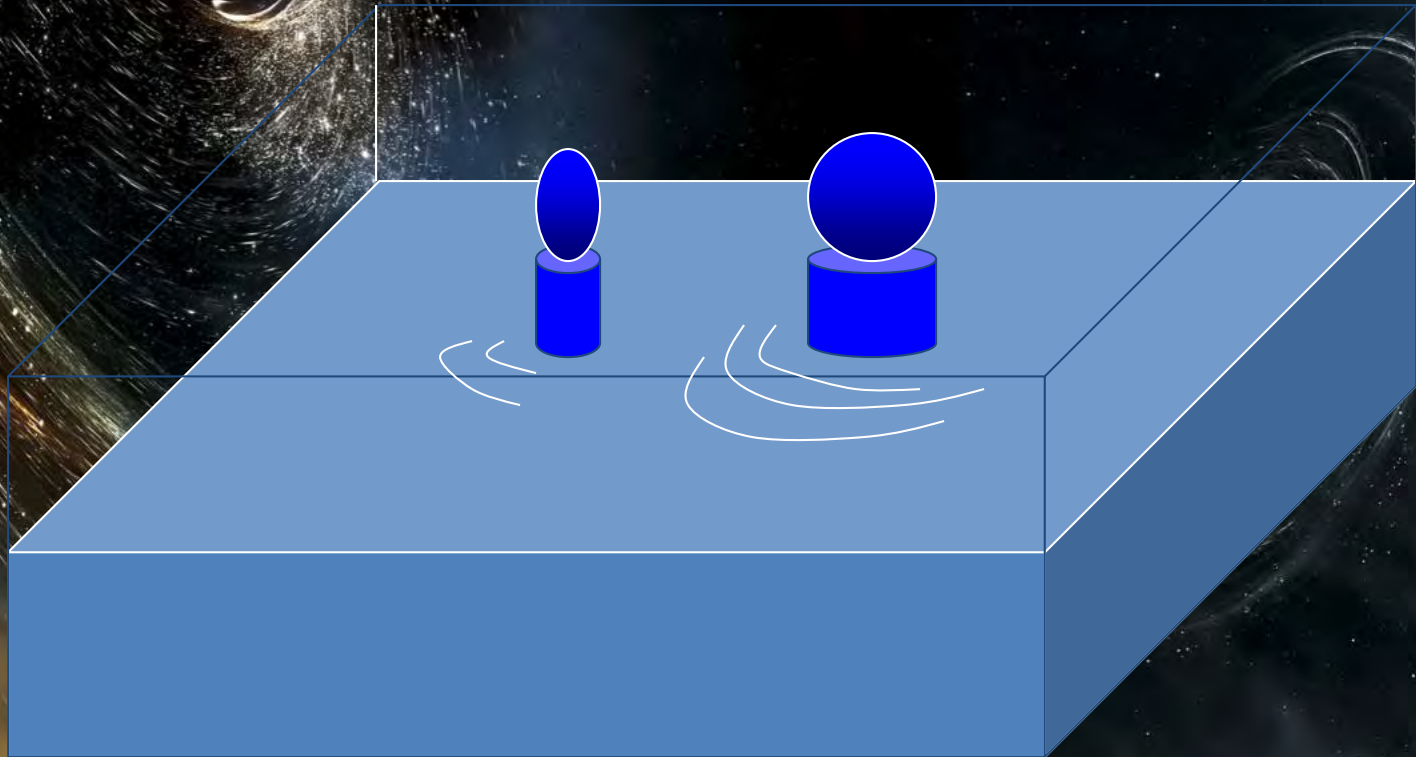
ヒッグス：プールのアナロジー

- 水の深さ＝宇宙を満たすヒッグス場の値
- 波のない状態＝宇宙の真空
- 表面の波＝観測可能なヒッグス粒子



ヒッグスが質量を生む

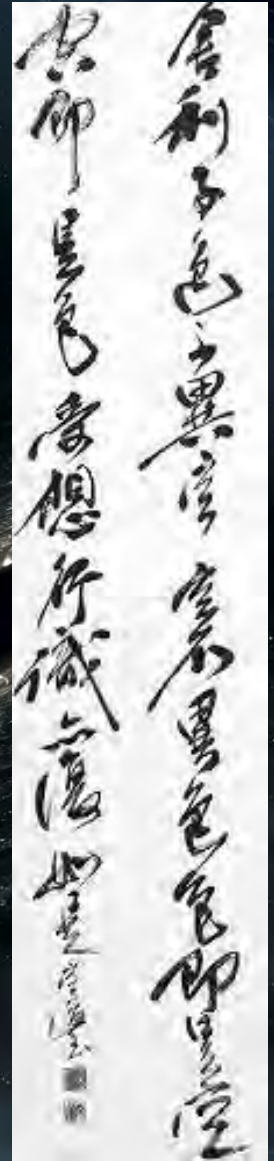
- もともと質量のない「痩せた人」と「太った人」が水の中を歩いている
- 力を加えた時の動きにくさ: 質量
- 太った人のほうが水の抵抗が大きく足が重い = 水との反応によって得る「質量」が大きい



仏教とヒッグス

- 宇宙の真空はヒッグス粒子の場で満たされている:
 - 有ることは無いこと、無いことは有ること
 - 「色即是空、空即是色」(般若心経)
 - 「無」

法隆寺127世管長
栞田秀山「無」



標準理論の問題: ヒッグスの質量

- ヒッグスの質量がおかしい!
 - ヒッグスにまわりつく粒子の雲の質量
 - 標準理論で計算できる。
 - 計算すると、観測されたヒッグスの質量の～100兆倍!
 - 毛皮のコートを来た人の全体の重さが100kgで、毛皮のコートの重さを計算すると10兆トンだったというようなもの: おかしい
 - 解決する新理論
 - 超対称性理論
 - 余剰次元理論、など

ポイント1: それらの理論にはヒッグス粒子に似ているが少し性質の異なる粒子がある



標準理論の問題：暗黒物質

宇宙のエネルギー/質量(相対性理論)

- 2/3は未知の「暗黒エネルギー」
- 残り(1/3)は「質量」

- 我々の知っている「物質」(陽子など)は「質量」の2割程度にすぎない
- 残りの質量は未知の「暗黒物質(ダークマター)」

暗黒物質の実験的証拠：

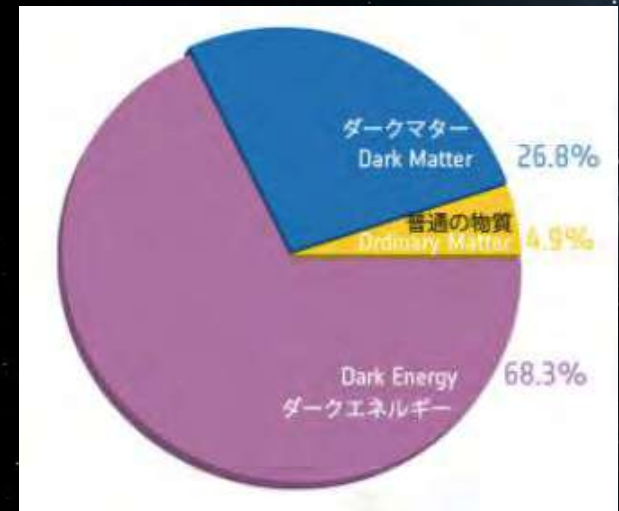
銀河内の恒星の速度

中心からの距離にほぼ依存しない

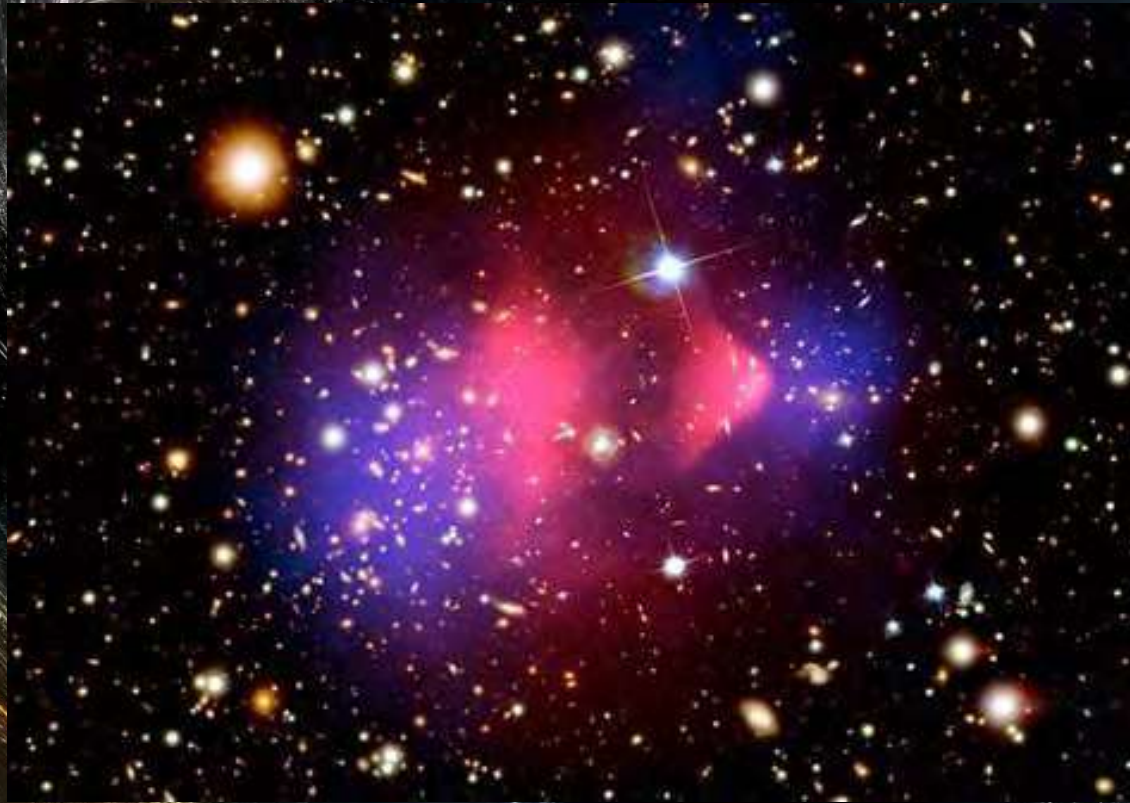
銀河団内の銀河の速度

中心からの距離にほぼ依存しない

銀河団の衝突(「弾丸銀河団」)



銀河団の衝突と暗黒物質

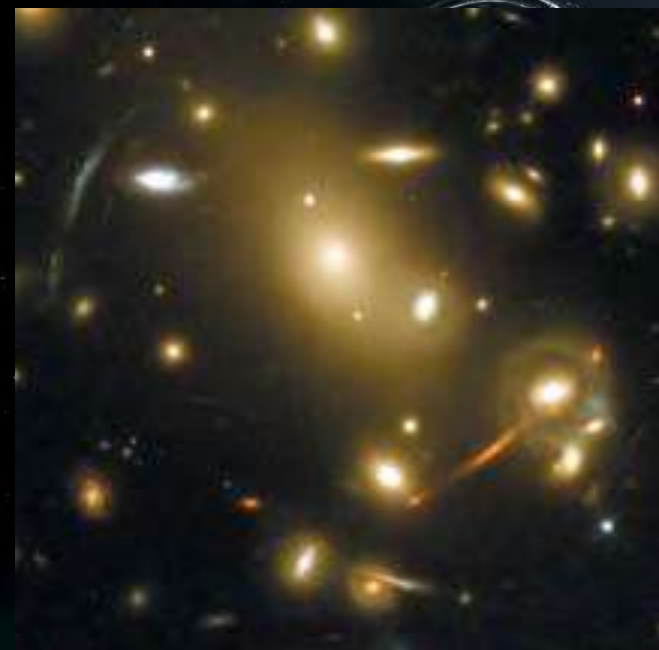
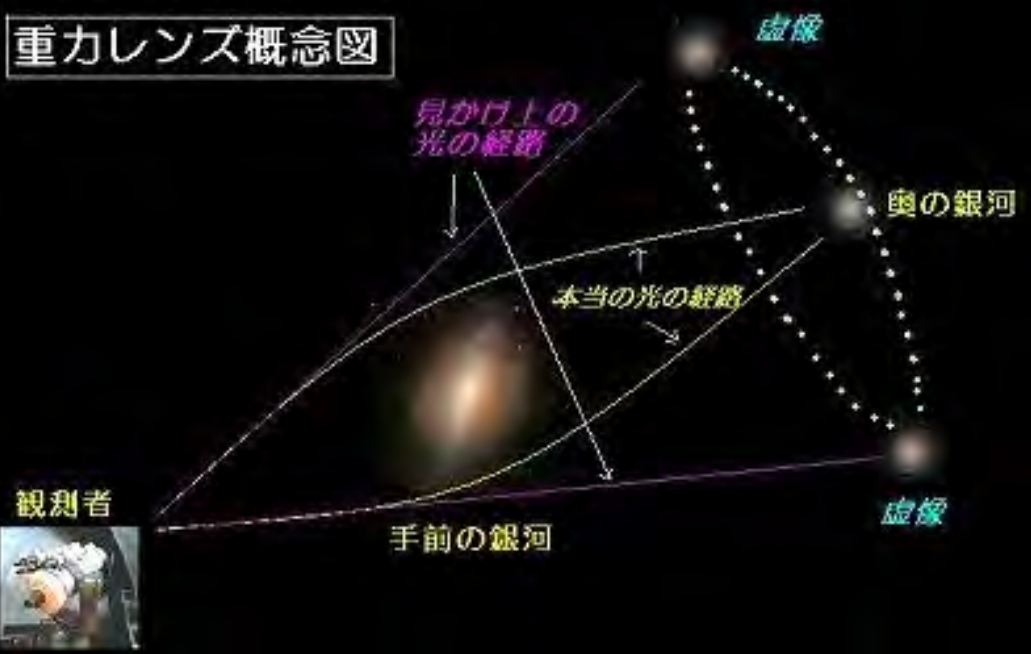


- 銀河: 光学写真
- ピンク: X線観測 (星間物質: ガス)
- 青: 「重力レンズ」による質量分布 → 暗黒物質

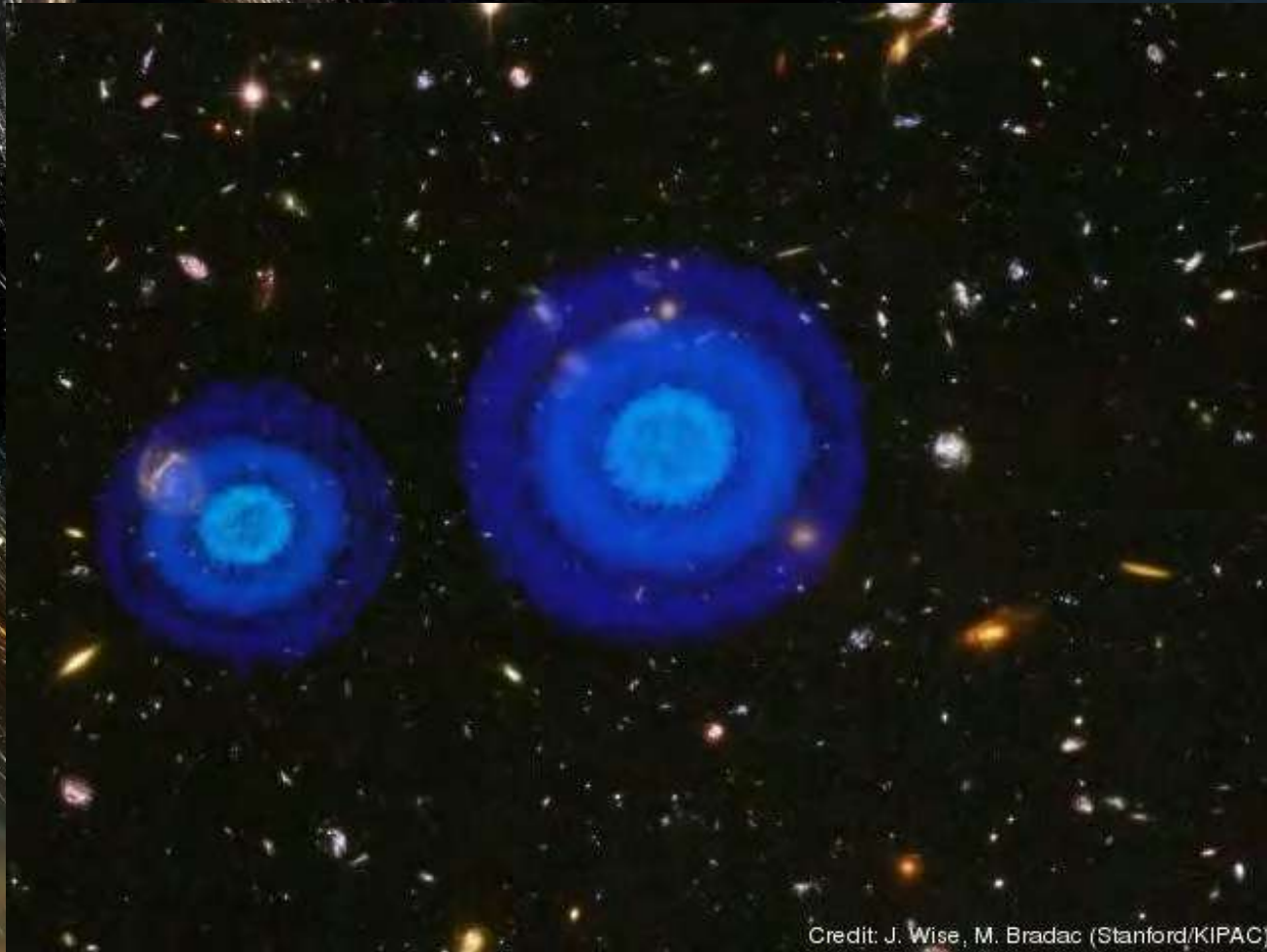
重力レンズ

光は重力で曲げられる
大きな質量の後ろにある銀河がひしゃげて見える

重力レンズ概念図



2つの銀河集団の衝突 (コンピュータ・シミュレーション)



Credit: J. Wise, M. Bradac (Stanford/KIPAC)

標準理論と暗黒物質

- 暗黒物質の性質:

電荷はゼロ

寿命が長い(>137億年)

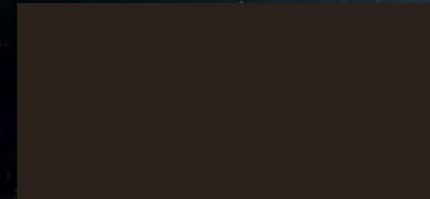
軽すぎない(銀河形成)

標準理論に暗黒物質の候補がない!

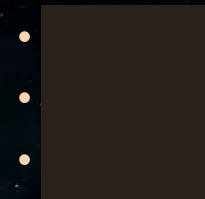
ポイント2:ヒッグスの雲の問題を解決する新理論の中にはには暗黒物質の候補がある

- 物質の粒子(spin1/2)

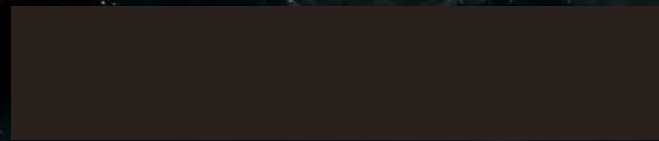
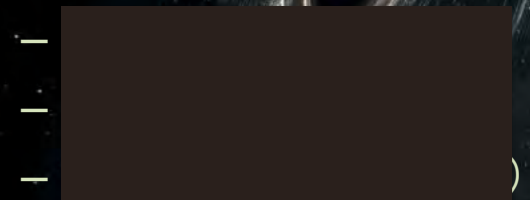
- レプトン



- クォーク



- ゲージ粒子 (spin1)

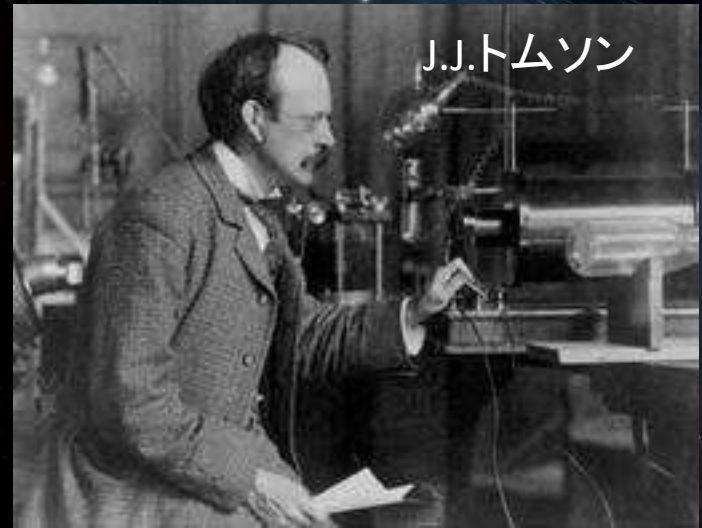


ヒッグス粒子発見の意義

- 標準理論の最後の粒子が見つかり、これでおしまいではない
 - ヒッグス質量の矛盾が現実のものとなった
 - 暗黒物質や他の新粒子探索が喫緊の課題
- 20世紀初頭：物理学の新時代の幕開け
 - J.J.トムソンによる電子の発見(1897)、
 - ラザフォードによる原子核の発見(1909)、

ヒッグス粒子の発見は
これらに匹敵する大発見と言っていい！

→ 素粒子物理学新時代の幕開け



J.J.トムソン

ラザフォード



世界の素粒子物理学戦略

欧州

- European Strategy for Particle Physics (2020 update)
(欧州素粒子物理学戦略)

‘An electron-positron Higgs factory is the highest-priority next collider.’

(「電子陽電子ヒッグスファクトリーが最優先の次期コライダーである」)

米国

- US Department of Energy High-energy Advisory Panel
(米国エネルギー省高エネルギー物理学諮問委員会)
P5 Report (Particle Physics Projects Prioritization Panel) (2014)

冒頭に: ‘Use Higgs as New Tool for Discovery’

(「ヒッグス粒子を発見のための新しい道具として使うべし」)

→ 大量のヒッグス粒子を生成する電子陽電子衝突器
(ヒッグスファクトリー) が最優先

ヒッグスファクトリーの4つの候補

全て電子陽電子衝突器

国際リニアコライダー(ILC) - 日+米欧

- 線形 超電導加速、全長20km
- 概念設計 2007, 工学設計 2012-13



ILC

Compact Linear Collider (CLIC) - 欧州(CERN)

- 線形 2ビーム加速、全長~13 km
- 概念設計 2012

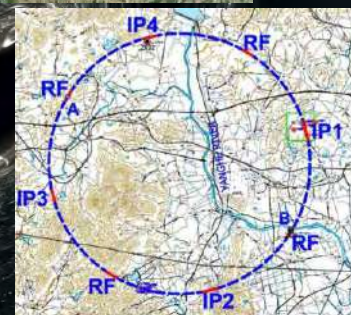
CLIC



Circular Electron Positron Collider (CEPC) - 中国

- 円形 周長100 km
- 準概念設計 2015

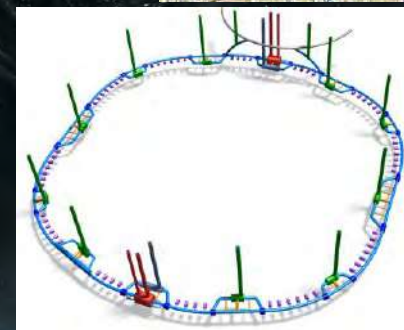
CEPC



Future Circular Collider-ee (FCCee) - 欧州(CERN)

- 円形 周長100 km
- 概念設計 2018-19

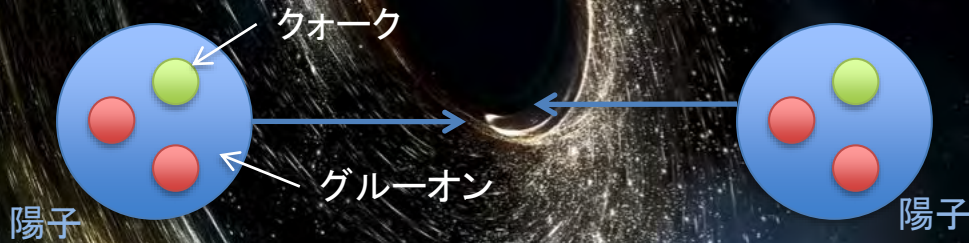
FCCee



なぜ電子用電子衝突器？

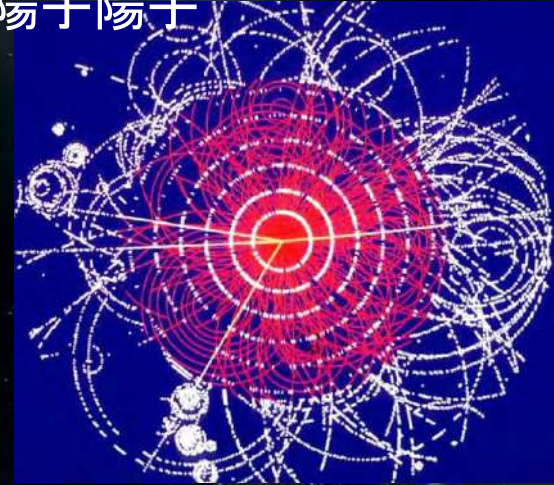
陽子陽子衝突 (LHC CERN研究所)

— 複合粒子(陽子)の衝突



- 複雑な反応、ヒッグスが生成されても見える粒子のごく一部がヒッグス

陽子陽子



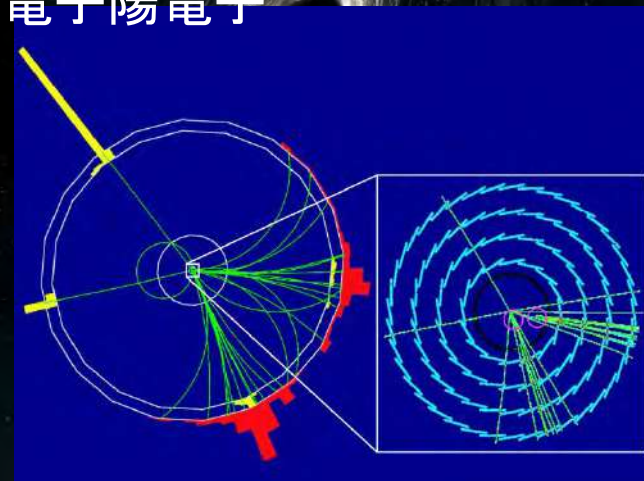
電子陽電子衝突

— 「素粒子」どうしの衝突



- 事象がクリーン
- ヒッグスがあれば見える粒子のほとんどがヒッグスの崩壊からきている

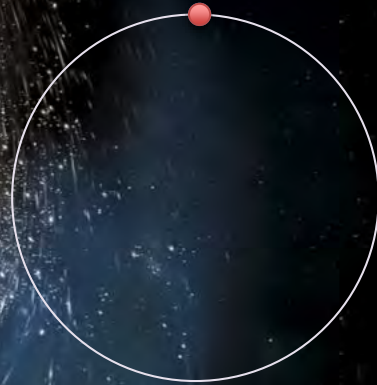
電子陽電子



電子用電子衝突器：円形 vs 線形

円形

- 同じ粒子が何度も衝突の機会がある
- 曲げる時電子が放射光を大量に放出してエネルギーを失う
- 低エネルギーで高性能



線形

- 曲げない：放射光を出してエネルギーを失わない
- 加速した粒子の衝突は一発勝負
- 高エネルギーへ拡張可能



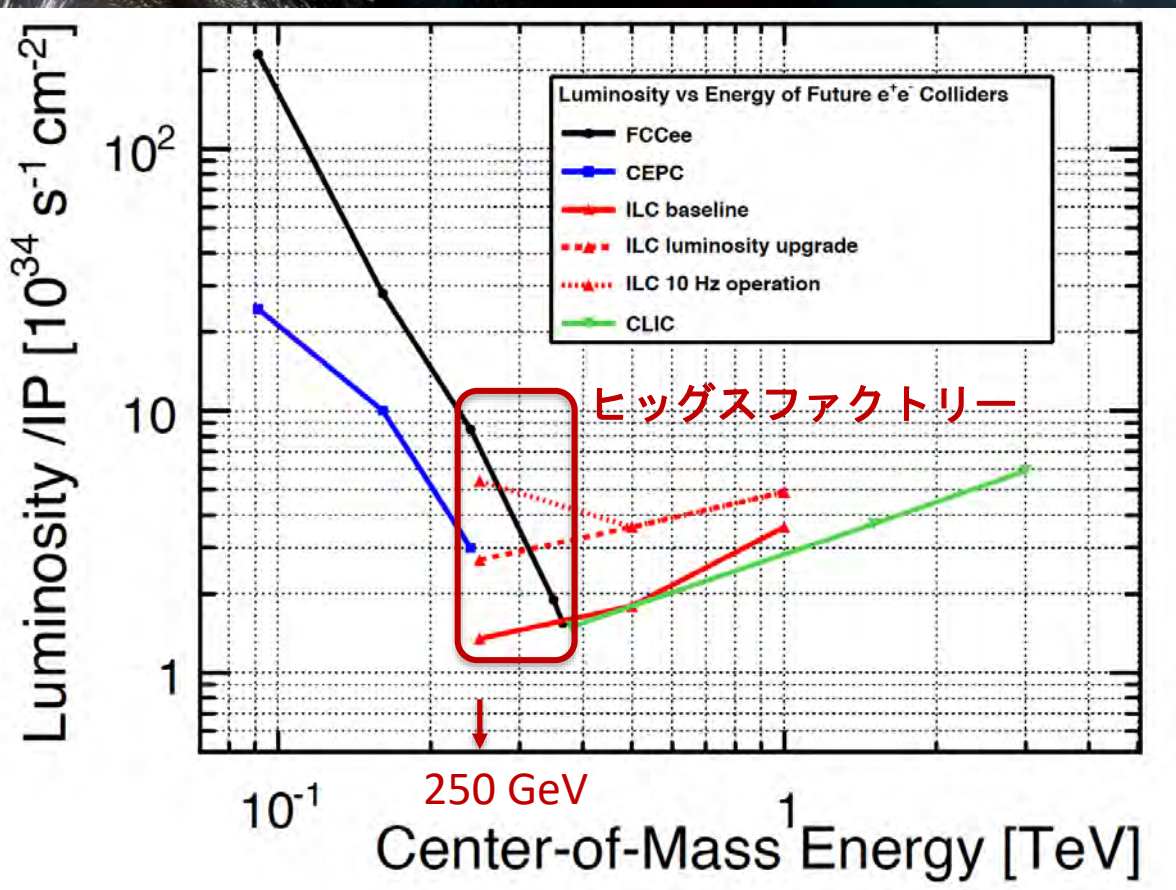
粒子をより多く衝突させるためビームを絞る

粒子のビームはバンチ(群れ)になっている
群れの大きさを小さくする(ビームを絞る)と衝突が起こりやすい

線形では特にビームを絞ることが必要

ヒッグスファクトリーの性能比較

粒子生成数/年

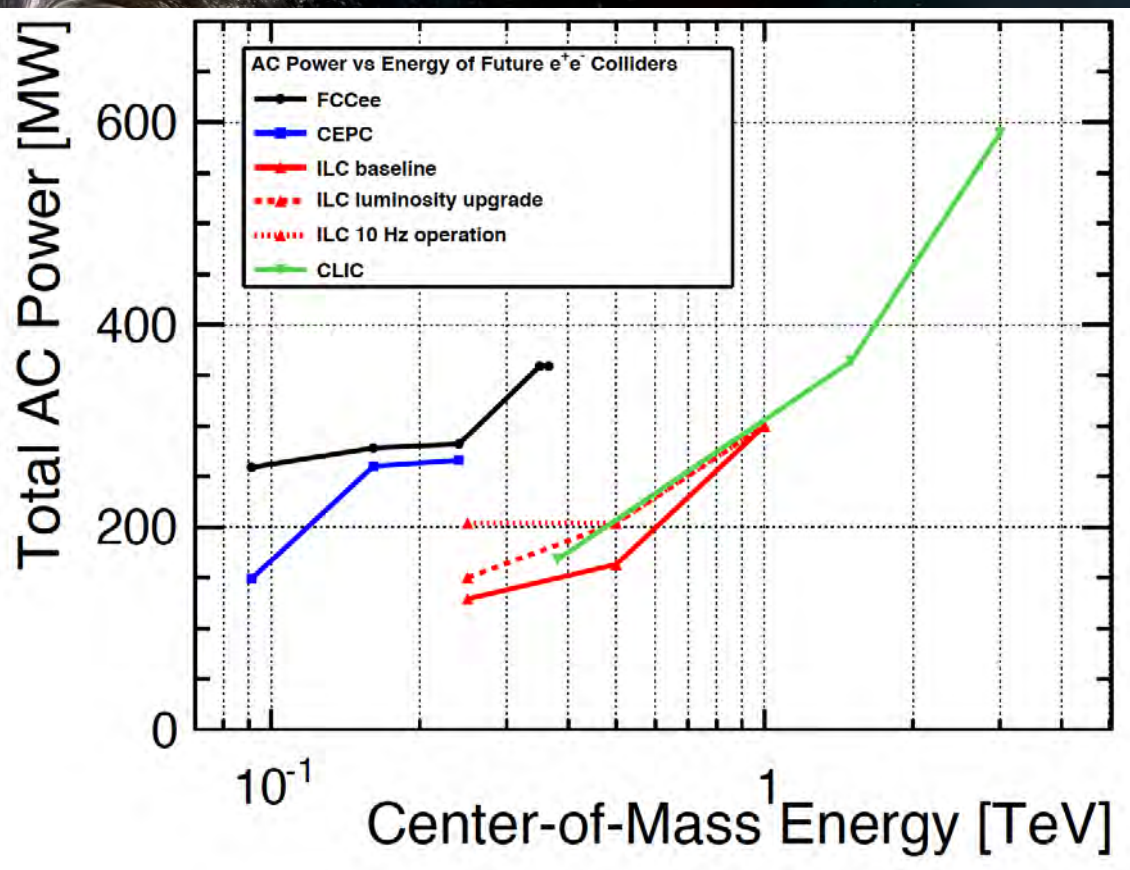


衝突エネルギー

4つのヒッグスファクトリーは“ほぼ”同等の性能
コスト？ 成熟度？

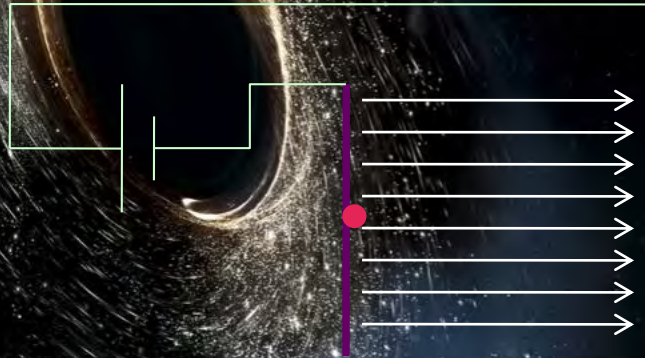
ヒッグスファクトリーの消費電力

消費電力



衝突エネルギー

粒子加速の原理

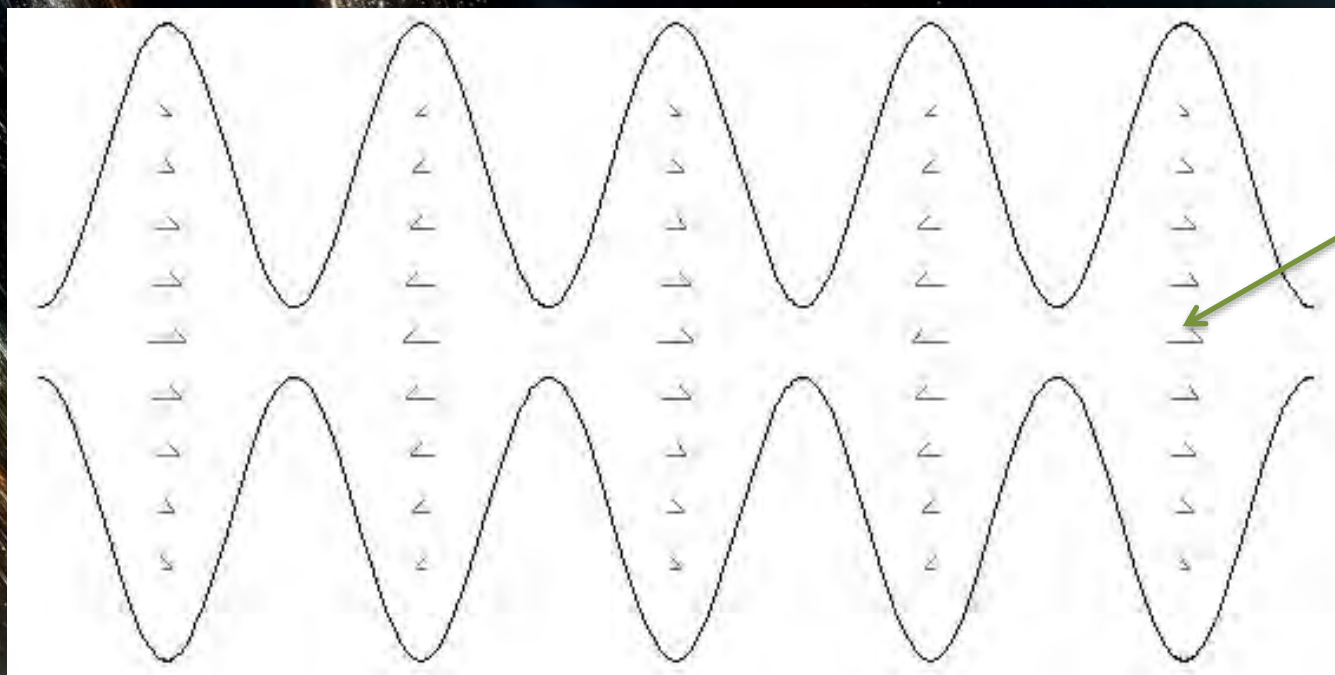


- 金属平行版に電圧をかけ、電場を作る。
- 荷電粒子は電場から力を受け加速する。
- 電子が1Vの電圧で得るエネルギー = 1 eV (電子ボルト)
- ヒッグスファクトリーに必要な電圧 = 1250億ボルト

とてもそんな高電圧は作れない

→ 高周波加速空洞

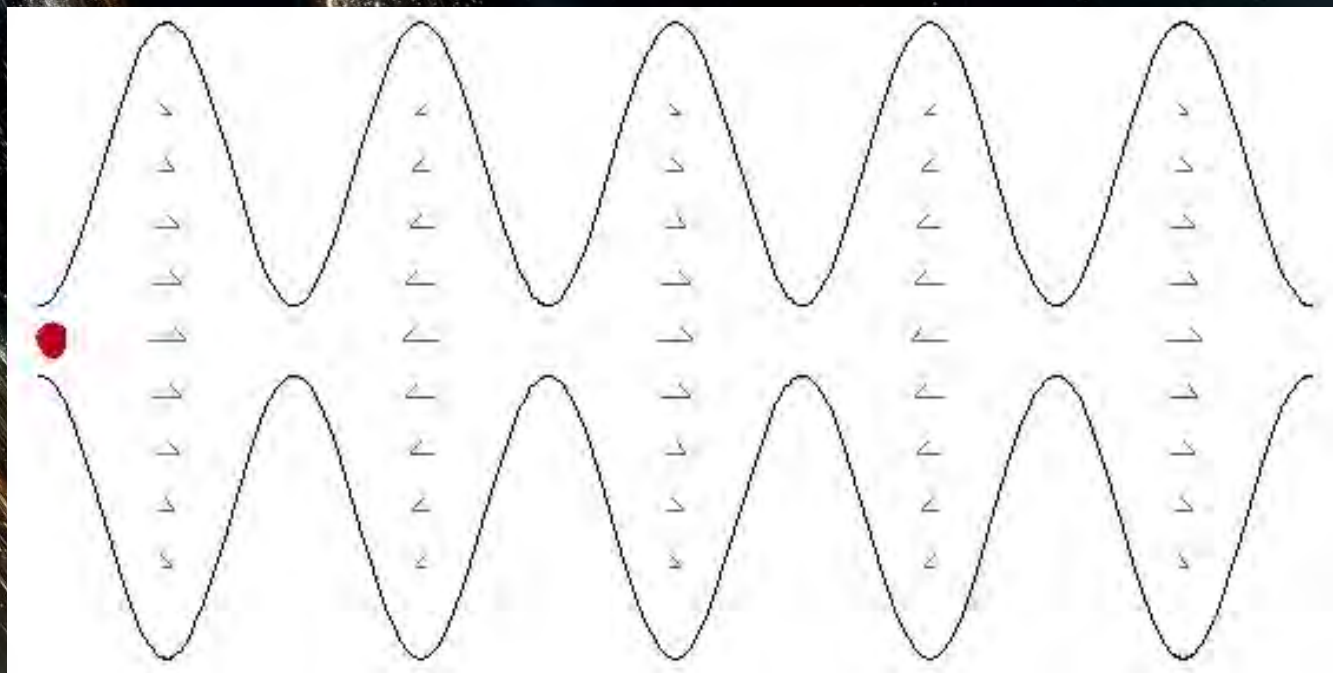
高周波加速空洞



電場

空洞内に電場の定常波を作る(電場が振動)

高周波空洞による粒子加速



粒子が通る時、電場はいつも前を向いている

これをたくさん繋いでいけば高エネルギー粒子を得る

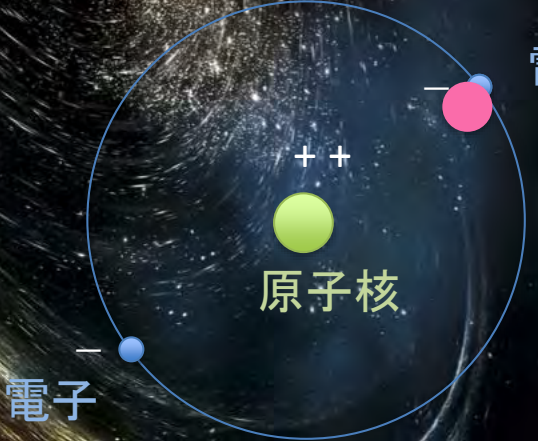
粒子測定の実験

電荷を持った粒子(電子、陽子など)



粒子の測定

荷電粒子



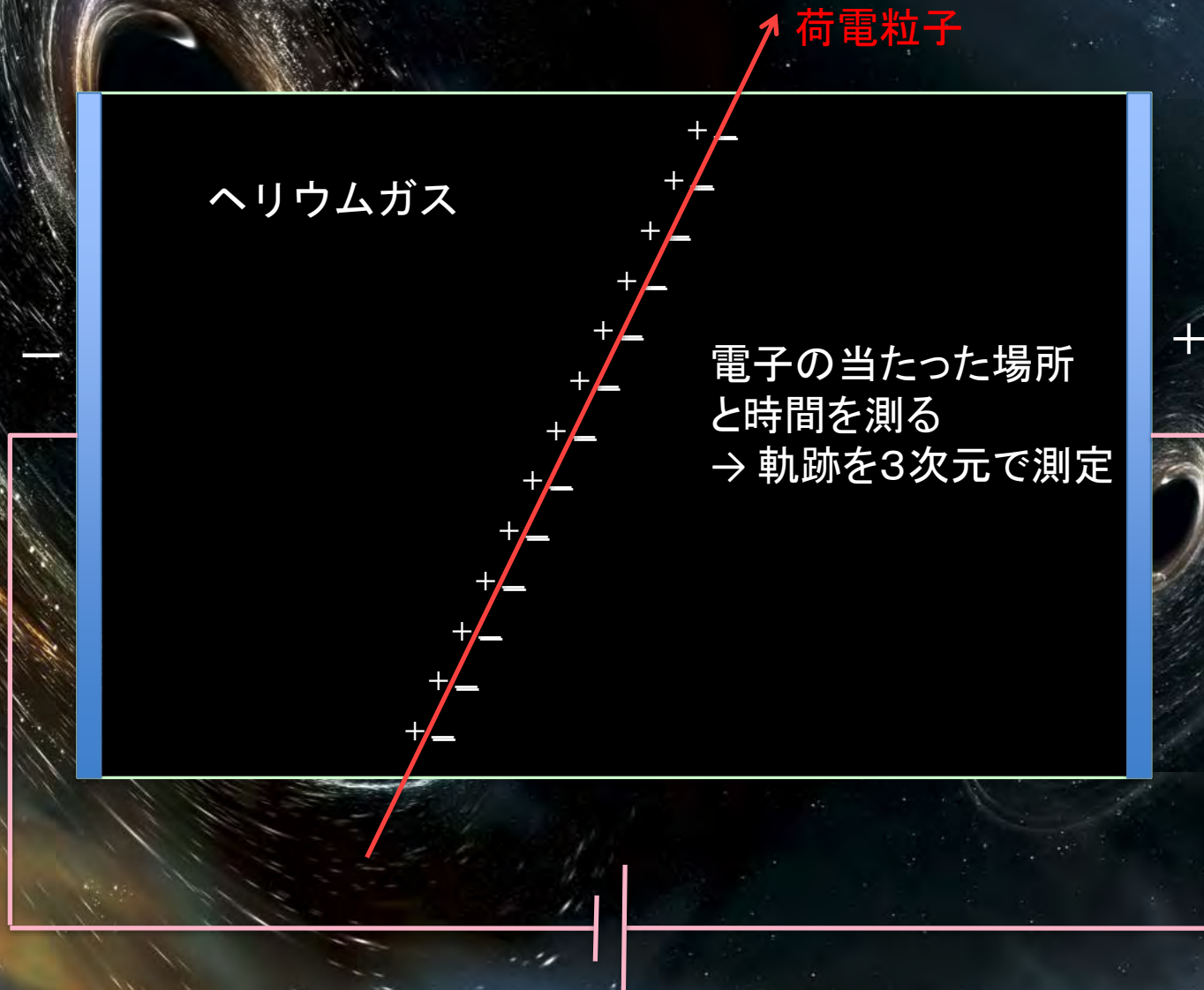
電子

ヘリウム原子
(電氣的に中性)

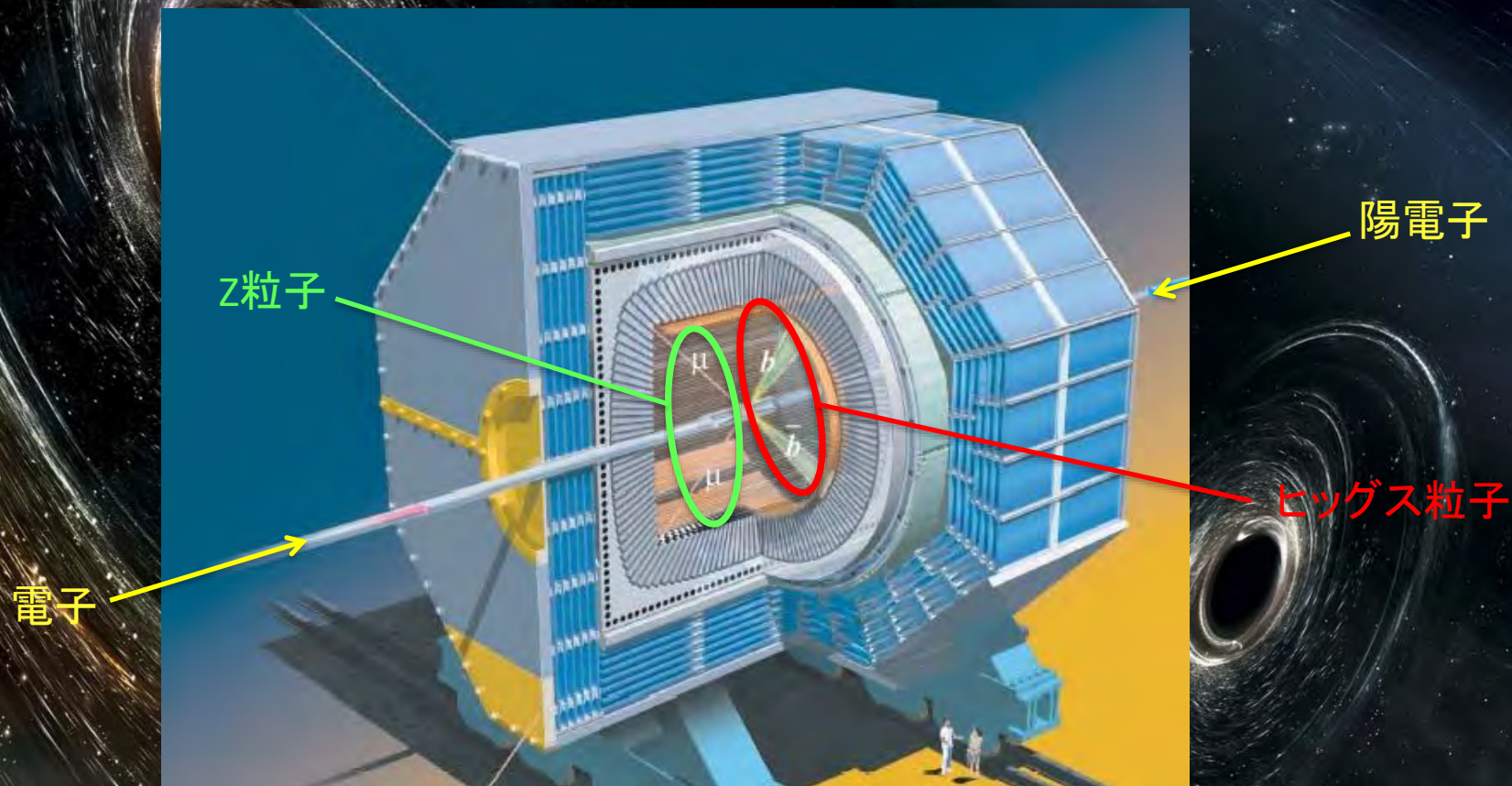
粒子の測定



荷電粒子の軌跡の測定



高分解能測定器



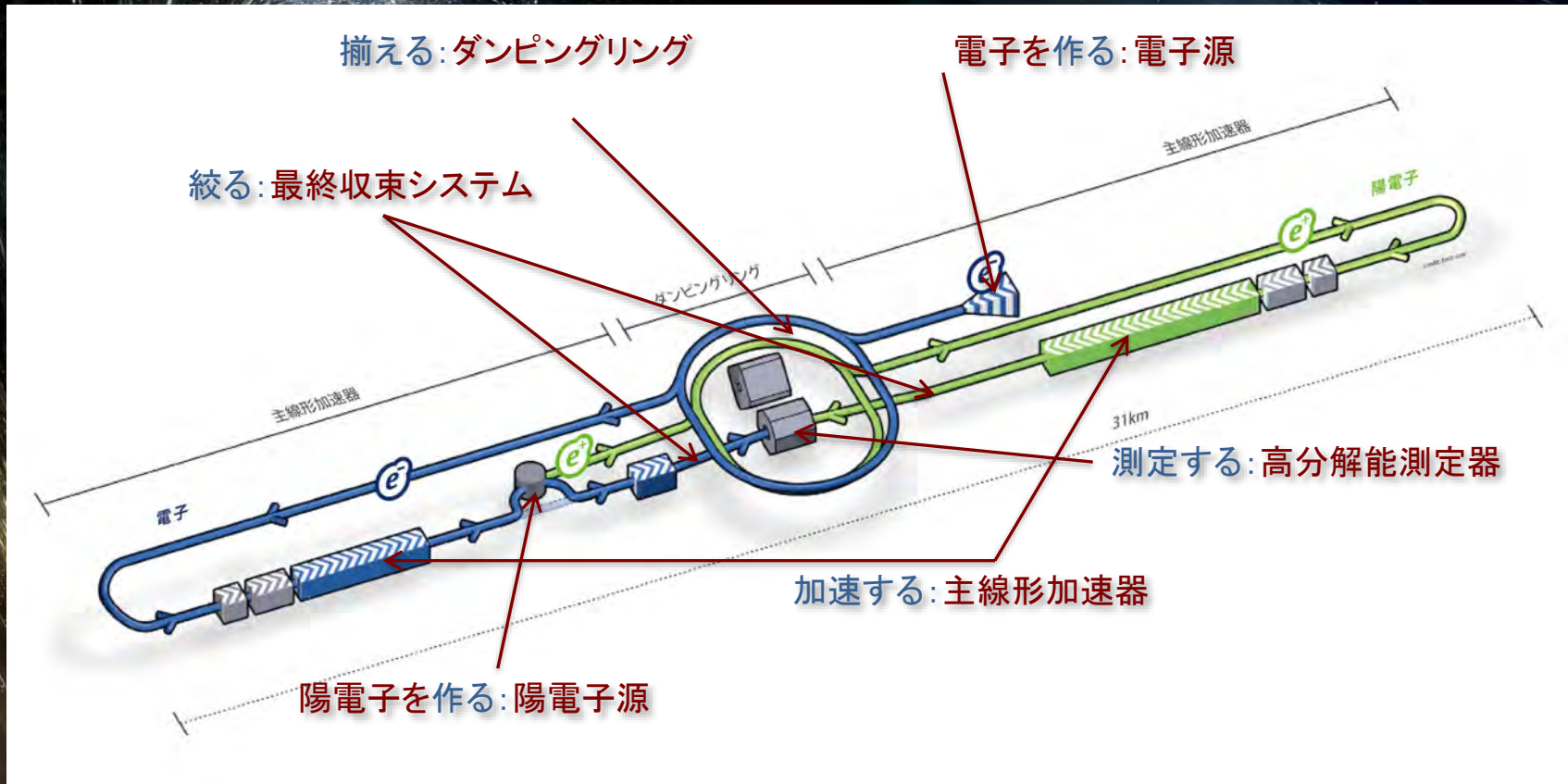
電子 + 陽電子 → ヒッグス粒子 + Z粒子

Z粒 → μ粒子対

ヒッグス粒子 → bクォーク対

bクォーク → 粒子の束(ジェット)

国際リニアコライダー (ILC)



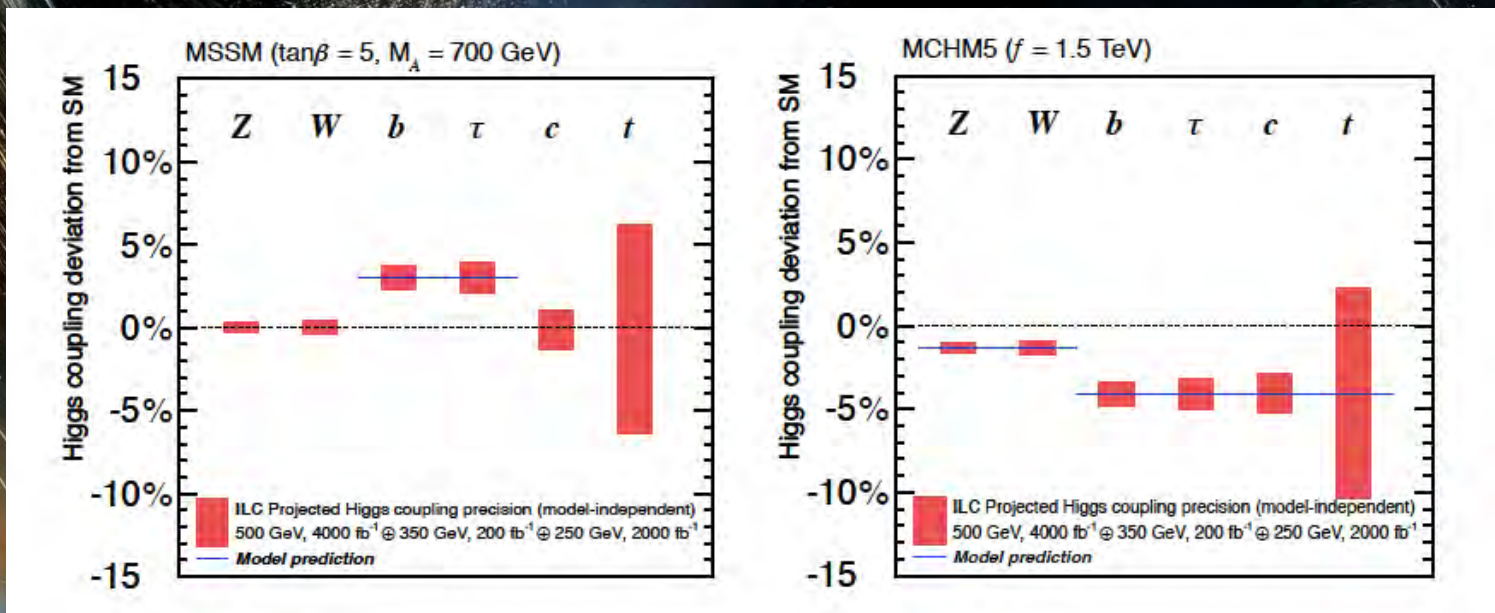
- (作る) 6500 バンチ/秒 (1 バンチ = 約200億個の電子の群れ)
 - 陽電子も同様 (未曾有の陽電子生成量)
- (揃える) 粒子を平行にする
- (加速する) 125 GeVまで加速 (1 GeV ~ 陽子の質量に相当するエネルギー)
- (絞る) 衝突時のバンチの大きさ:
 - 高さ 6 nm (原子数十個程度)、幅 500 nm、長さ 300 μm ,
- (測定する) 高分解能測定器

ヒッグス粒子の精密測定で新理論を特定

- ヒッグス粒子の生成率と様々な粒子への崩壊率を測定
 - 様々な粒子との反応の強さ(反応係数)の標準理論からのズレのパターン
 - どの新理論が正しいかを特定

新理論 1

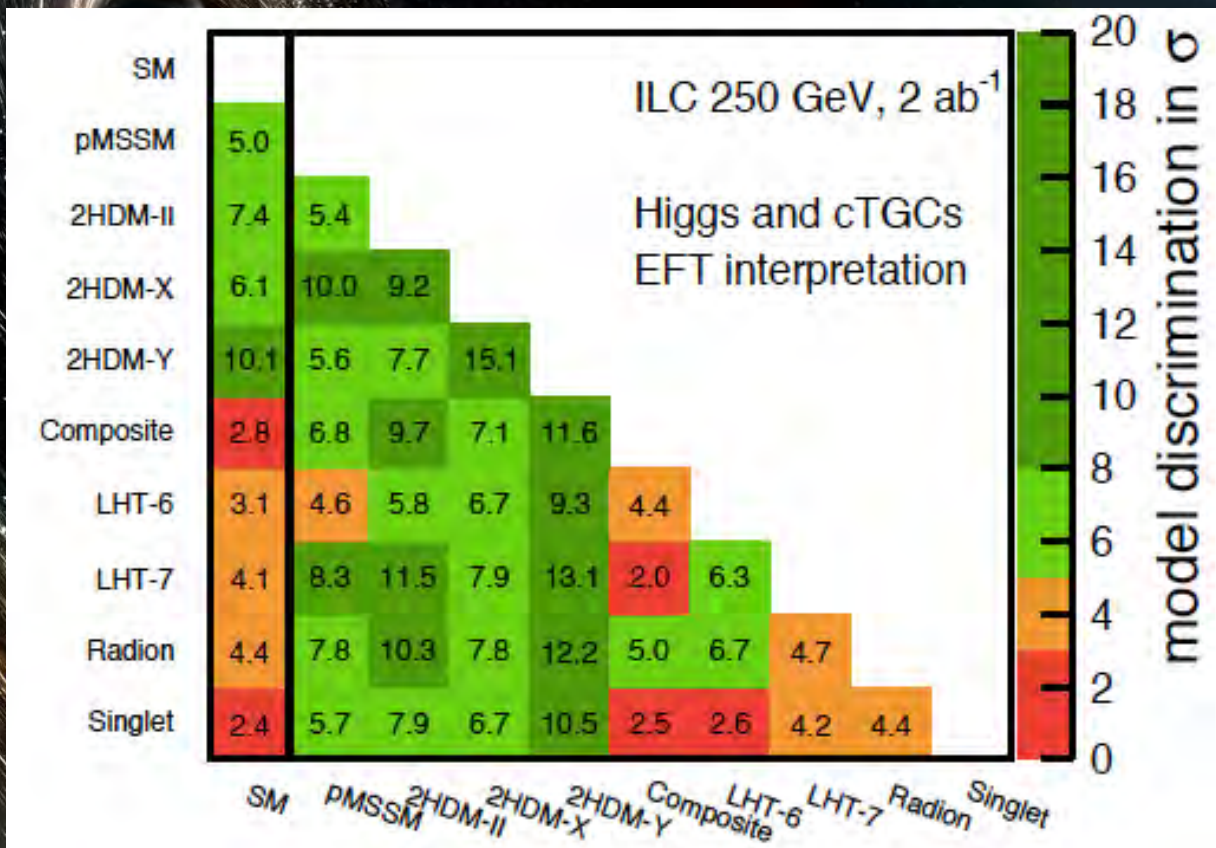
新理論 2



標準理論からのズレ

いろんな新理論を見分ける

例として9の新理論+標準理論(SM) (ILC10年)



濃い緑：非常にはっきり見分けられる

薄い緑：はっきり見分けられる

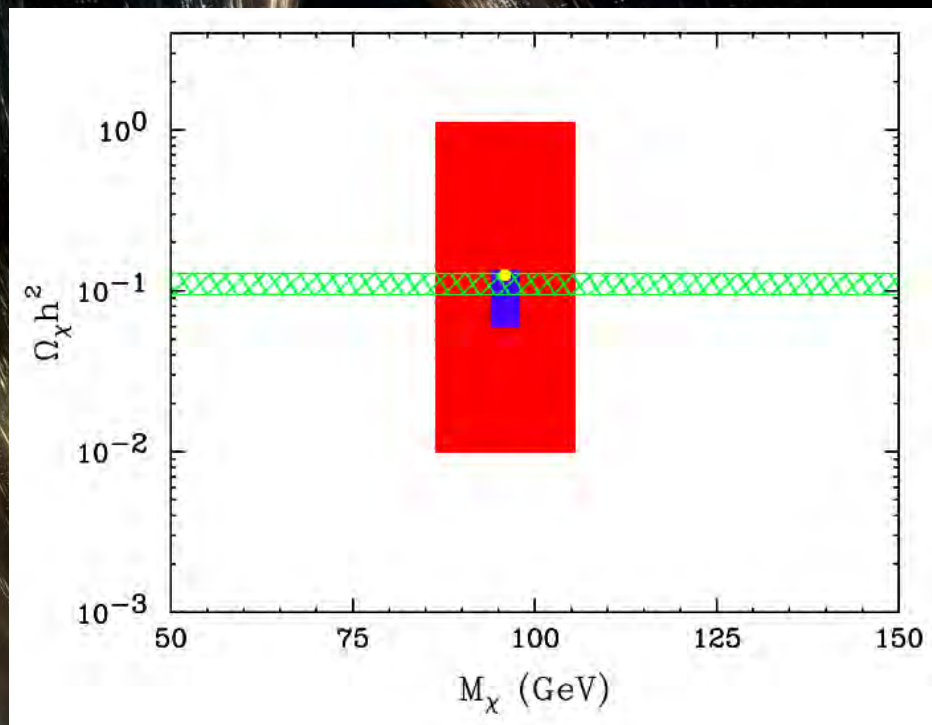
オレンジ：なんとか見分けられる

赤：はっきりしない

ほぼピンポイントで正しい理論を特定
多くの理論は暗黒物質候補を持つ

新粒子発見！暗黒物質か？

現在の暗黒物質の量



暗黒物質の質量に関するパラメータ

緑の帯：宇宙背景放射観測 (WMAP)

青い長方形：ILCありの場合

赤い長方形：ILCなしの場合

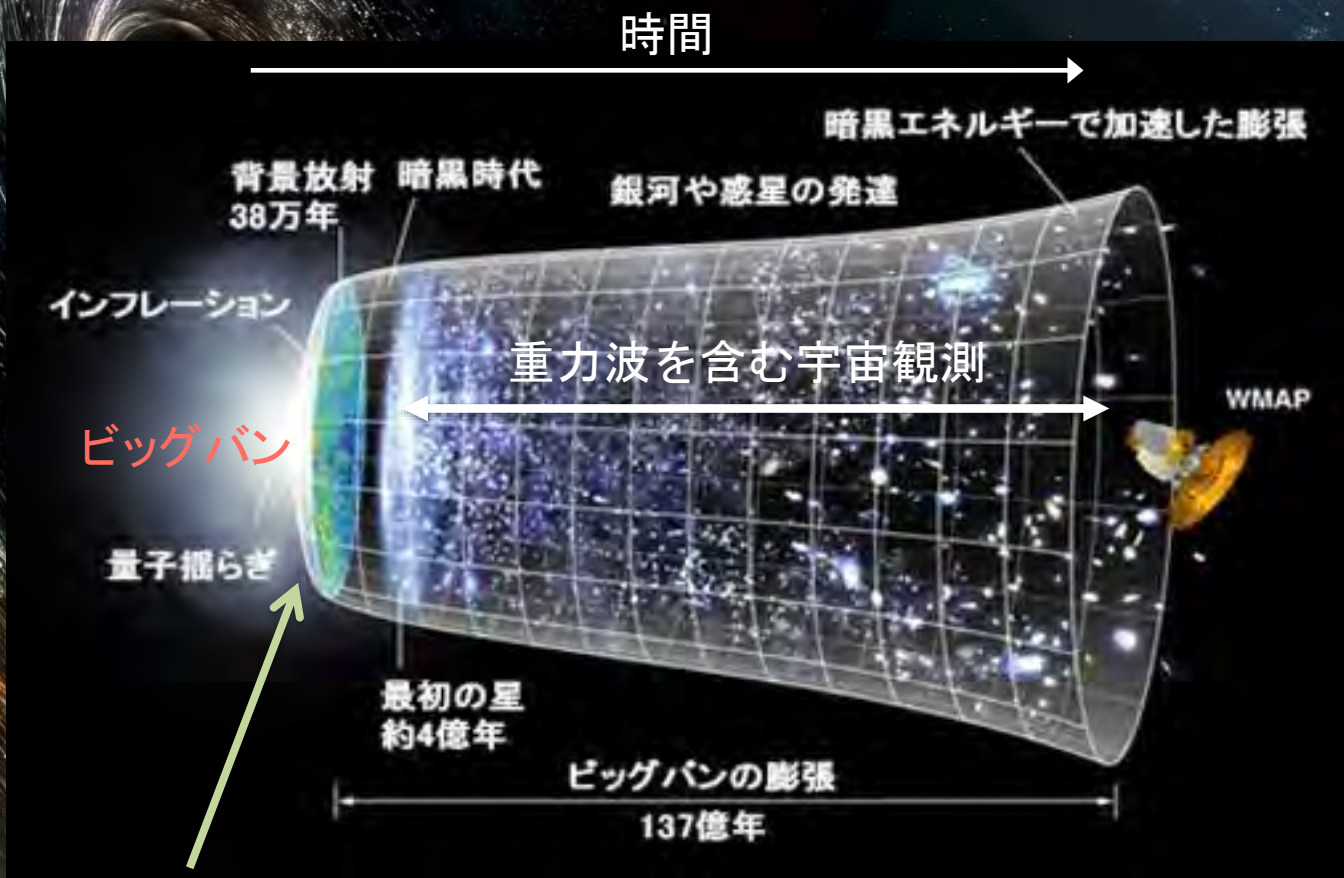
新粒子の性質を測定
質量、量子数、反応係数など

ビッグバンの理論から現在の宇宙に
どれだけ残っているはずかを計算

天文学的測定から予言される
現在の暗黒物質の量と比較

ILC: 500 GeV

宇宙の歴史



量子スープ

ここで何が起きたか？

(ヒッグス粒子と暗黒物質が重要な役割を果たした)

A dramatic space scene featuring two black holes. The larger one on the left has a bright, glowing accretion disk with golden and blue hues. The smaller one on the right is more distant and appears as a dark ring with a white inner edge. The background is a dark, star-filled space with light trails.

BACKUPS

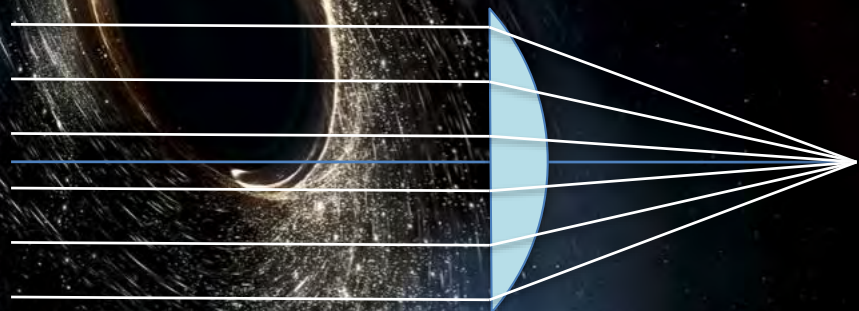
国際リニアコライダー (ILC)

- 分解能・感度がLHCよりはるかに良い
 - ヒッグスの精密測定
 - 将来高度化したLHCの約百倍の統計的パワー
 - ヒッグスが質量の元であることの重要な証拠を得る
 - 高感度: ILCで多くの新発見が期待される
 - ILCの値段はLHCと同程度
 - なぜ最初からILCを作らなかったのか?
 - LHC計画当時にはILCの技術は成熟していなかった

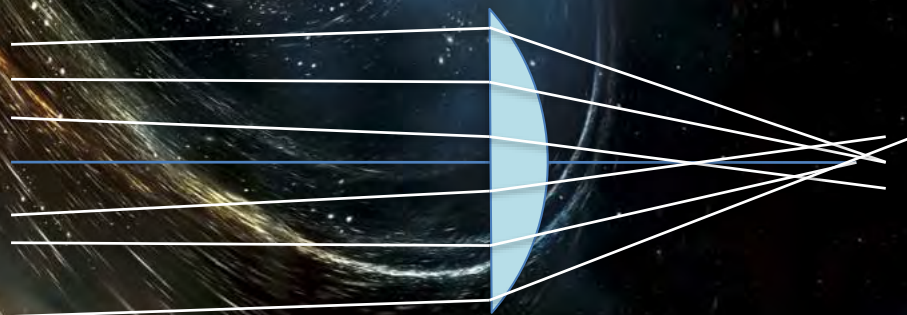


超伝導加速空洞

平行なビームは一点に絞れる



平行な光線はレンズで
1点に絞れる



方向がバラバラな光線は
レンズが完璧でも1点に
絞れない

加速器：レンズ＝磁石

ILC：平行なビームを加速し、衝突点直前で絞り込む

ILC:新粒子発見能力

テバトロン(シカゴ郊外)



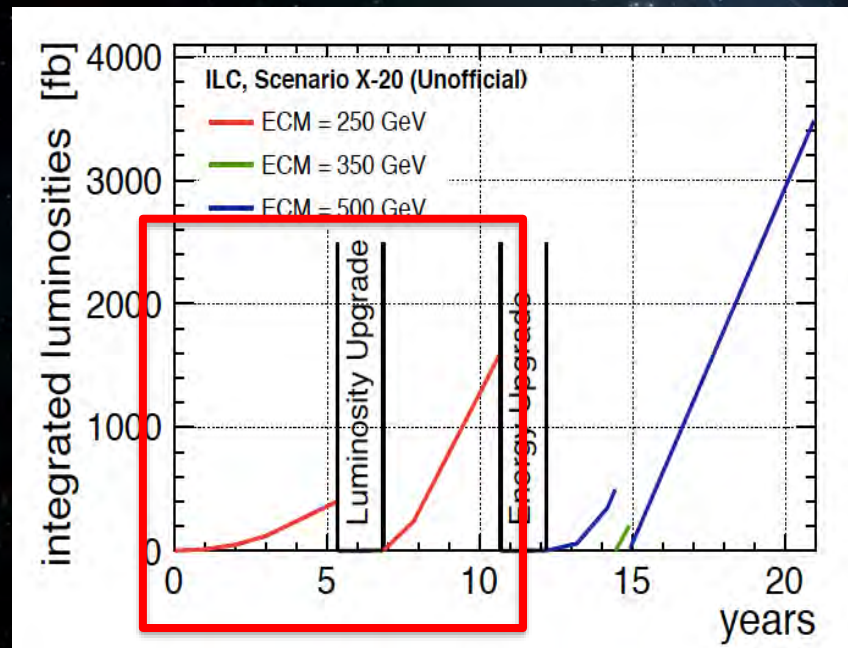
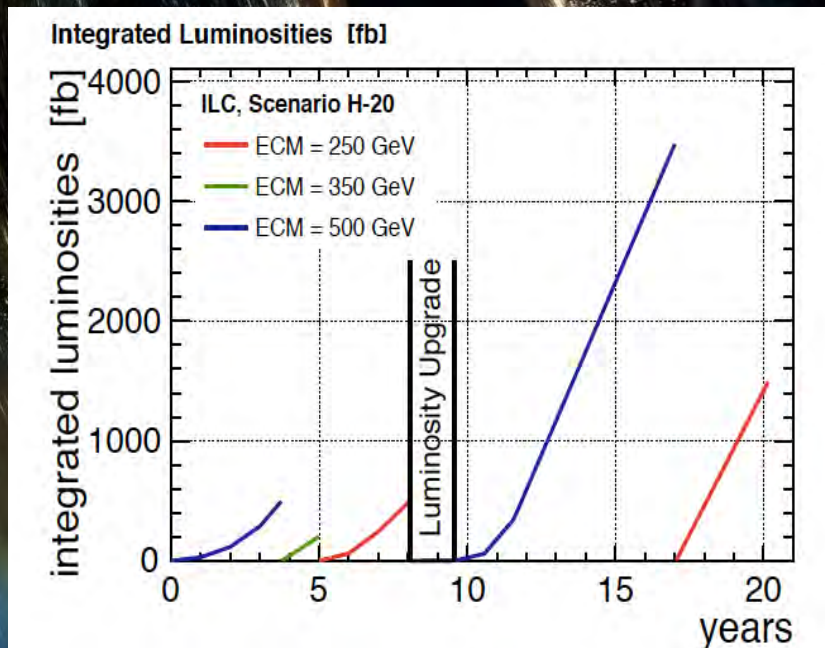
- テバトロン(LHCの弟分) : 運転終了
 - トップクォークの発見など、数々の輝かしい成果
 - ~20000個のヒッグス粒子が生成されたが見つからなかった。
- LHCでは約百万個のヒッグスを生成して発見
- ILCでは一握りのHiggsが生成されれば見つかる
- ILCで新粒子発見の可能性はある

ステージング

Up to Dec. 2016 (LCWS Morioka)
500 GeV start sample scenario

After Dec. 2016

Generally agreed by ILC community
To be formalized this fall



ILC 250 GeV Higgs Factory

まず第一ステージプログラムとしてILC 250 GeV Higgs factoryを建設
コスト: 当初の ILC 500 GeVより ~40% 減
その結果をみて次のエネルギー増強計画を決める

米国 : P5 レポート

P5: エネルギー省の諮問委員会
2014年5月23日 P5 レポート 公表

- ILCの科学的意義について
 - ‘we emphasize most strongly that the scientific justification for the project is compelling’ (我々は、ILCの科学的正当性が圧倒的であることを最大限に強調したい。)
- 米国のILCへの参加貢献について
 - ‘As the physics case is extremely strong, all Scenarios include ILC support at some level through a decision point within the next 5 years’ (ILCの物理的意義は非常に極めて強力であるので、全ての予算シナリオで、これから5年以内にあるであろう決定次期まで何らかの米国の参加が(提言に)含まれている。)
 - 従来 of 枠外から予算が出る場合 : Play a world-leading role in the ILC experimental program and provide critical expertise and components to the accelerator, should this exciting scientific opportunity be realized in Japan. (このエキサイティングは科学的機会が日本において実現するならば、米国はILC計画において世界をリードする役割を果たし、その加速器に必要な専門技術とコンポーネントを提供するべきである。)

欧洲素粒子物理学战略

2020

- An electron-positron Higgs factory is the highest-priority next collider. For the longer term, the European particle physics community has the ambition to operate a proton-proton collider at the highest achievable energy. Accomplishing these compelling goals will require innovation and cutting-edge technology:
 - • the particle physics community should ramp up its R&D effort focused on advanced accelerator technologies, in particular that for high-field superconducting magnets, including high-temperature superconductors;
 - • Europe, together with its international partners, should investigate the technical and financial feasibility of a future hadron collider at CERN with a centre-of-mass energy of at least 100 TeV and with an electron-positron Higgs and electroweak factory as a possible first stage. Such a feasibility study of the colliders and related infrastructure should be established as a global endeavour and be completed on the timescale of the next Strategy update.
- The timely realisation of the electron-positron International Linear Collider (ILC) in Japan would be compatible with this strategy and, in that case, the European particle physics community would wish to collaborate.