



**Branduolių ir
elementariųjų
dalelių fizikos
centras**



**Lietuvos
dalelių fizikos
konsorciūmas**

Dalelių fizika ir medicina

Marijus Ambrozas

marijus.ambrozas@ff.vu.lt

Tarptautinės hadronų terapijos meistriškumo dirbtuvės

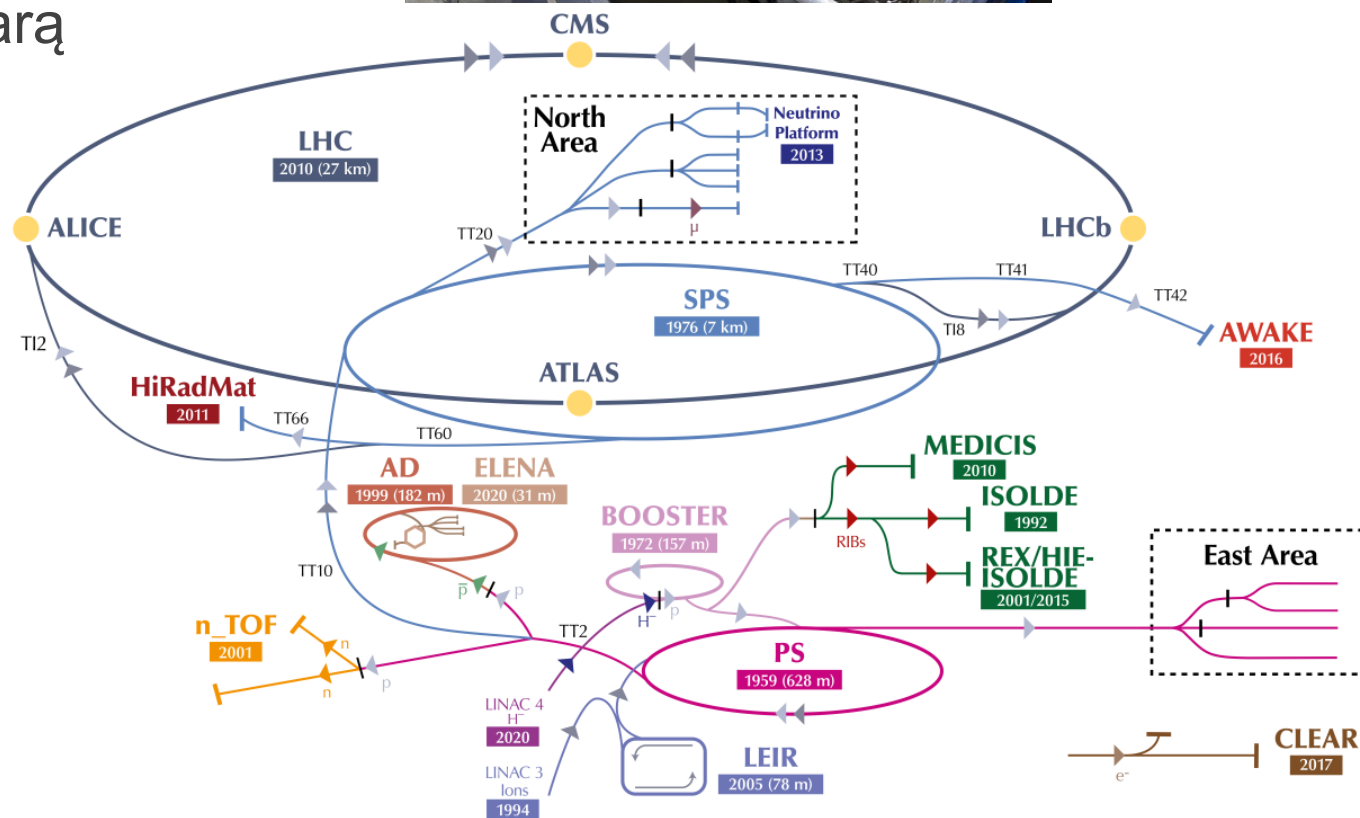
2025-02-27



Dalelių fizika

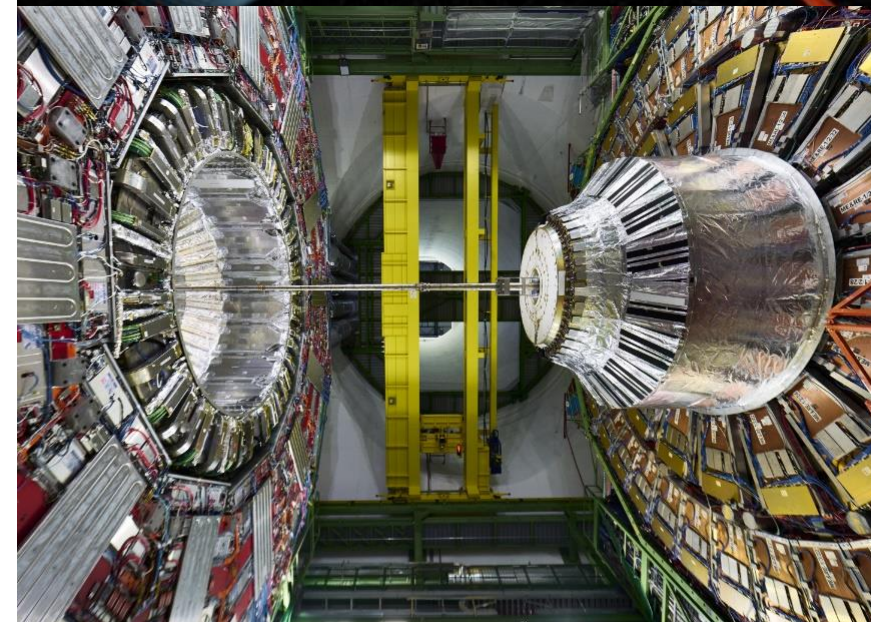
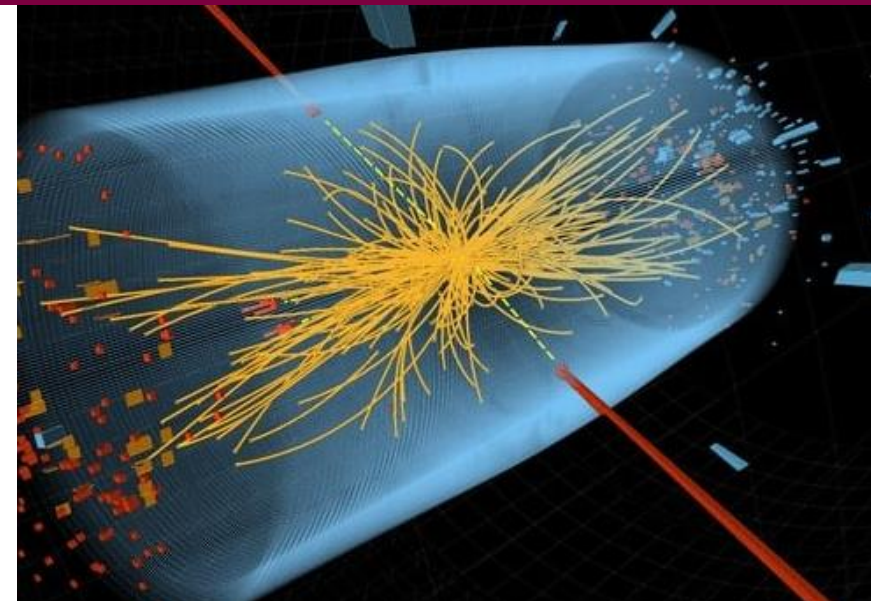
CERN Dalelių greitintuvų kompleksas

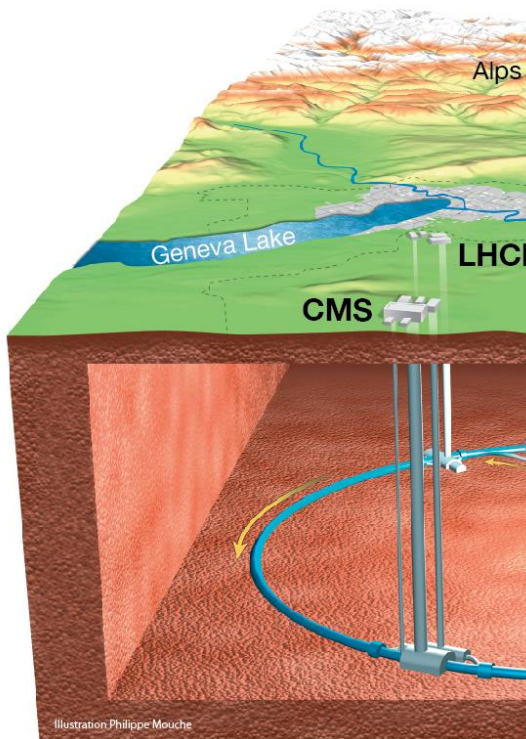
- CERN – Europos „branduolinių“ mokslinių tyrimų organizacija
- CERN – didžiausia dalelių fizikos laboratorija pasaulyje
- CERN misija – išsiaiškinti Visatos sandarą ir plėsti žmonijos žinias
- LHC – galingiausias pasaulyje dalelių greitintuvas
- Greitintuvas veikia ekstremaliomis sąlygomis:
 - ~8T magnetinis laukas
 - 1.9 K temperatūra
 - Greitinama $\sim 2800 \times 10^{11}$ protonų
 - Protonų energija – 6.8 TeV
- Viso to reikia tam, kad įvyktų...



Energingi dalelių susidūrimai

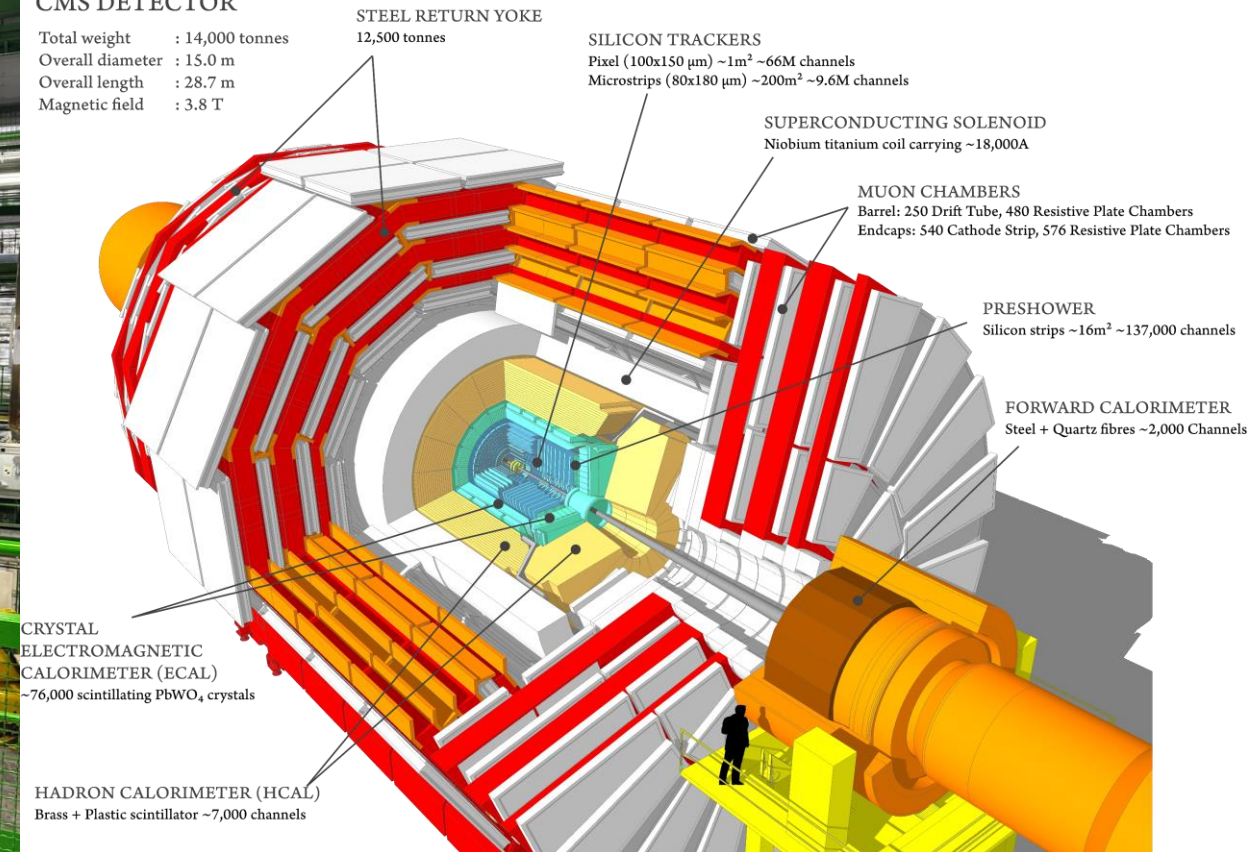
- Susidūrimų metu atsiranda daugybė naujų dalelių
- Jas „gaudo“ dalelių detektoriai
- Susidūrimų „nuotraukose“ galime rasti atsakymus į mums rūpimus klausimus apie visatą
- Dalelių detektoriai ne mažiau įspūdingi už patį greitintuvą
- Pvz., CMS detektorius:
 - $15 \times 15 \times 21 \text{ m}^3$
 - ~14000 t masė
 - 3.8 T magnetinis laukas
 - 40 mln. „nuotraukų“ per sekundę
 - ~100 Tb/s duomenų srautas





CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 28.7 m
Magnetic field : 3.8 T

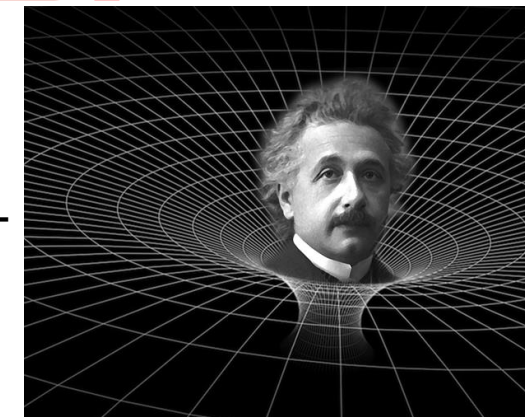


Mūsų dabartinis gamtos supratimas

- Mums žinomos elementariosios dalelės sudaro Standartinį modelį
- Turime medžiagos sektorių
 - Leptonai ir kvarkai
- Jėgų sektorių
 - Gliuonai, W ir Z bozonai, fotonas
- Higso sektorių
 - Higso bozonas
- Elementariosios dalelės + jėgos = Visata!
- Gravitacija – atskira tema, kurios standartinis modelis neaprašo
 - Gravitaciją kol kas aprašo tik Bendroji reliatyvumo teorija
- Taip pat visatoje yra mums nežinomos medžiagos
 - Tamsioji medžiaga (~25%)
 - Tamsioji energija (~70%)
- Suprantame tik ~5% visatos!

	masė → $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
	krūvis → 2/3	2/3	2/3	0	0
	sukinys → 1/2	1/2	1/2	1	0
	u kylantysis	c žavusis	t viršūninis	g gliuonas	H Higso bozonas
KVARKAI	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d krintantysis	s keistasis	b gelminis	γ fotonas	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	0	$91.2 \text{ GeV}/c^2$
	-1	-1	-1	0	1
	1/2	1/2	1/2	1	
	e elektronas	μ miuonas	τ taonas	Z Z bozonas	
LEPTONAI	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	± 1	$80.4 \text{ GeV}/c^2$
	0	0	0	1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e elektroninis neutrinas	ν_μ miuoninis neutrinas	ν_τ tau neutrinas	W W bozonas	BOZONAI

Medžiaga + medžiaga + sąveikos = 16 + 1 +

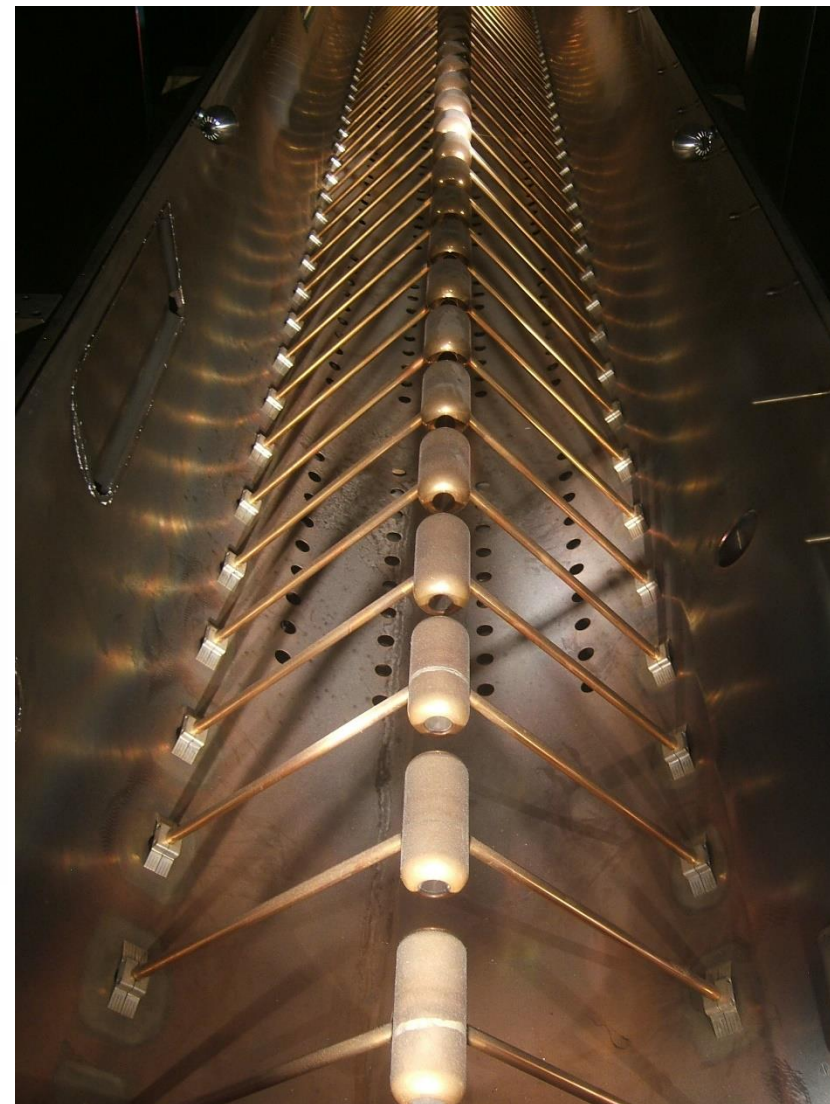
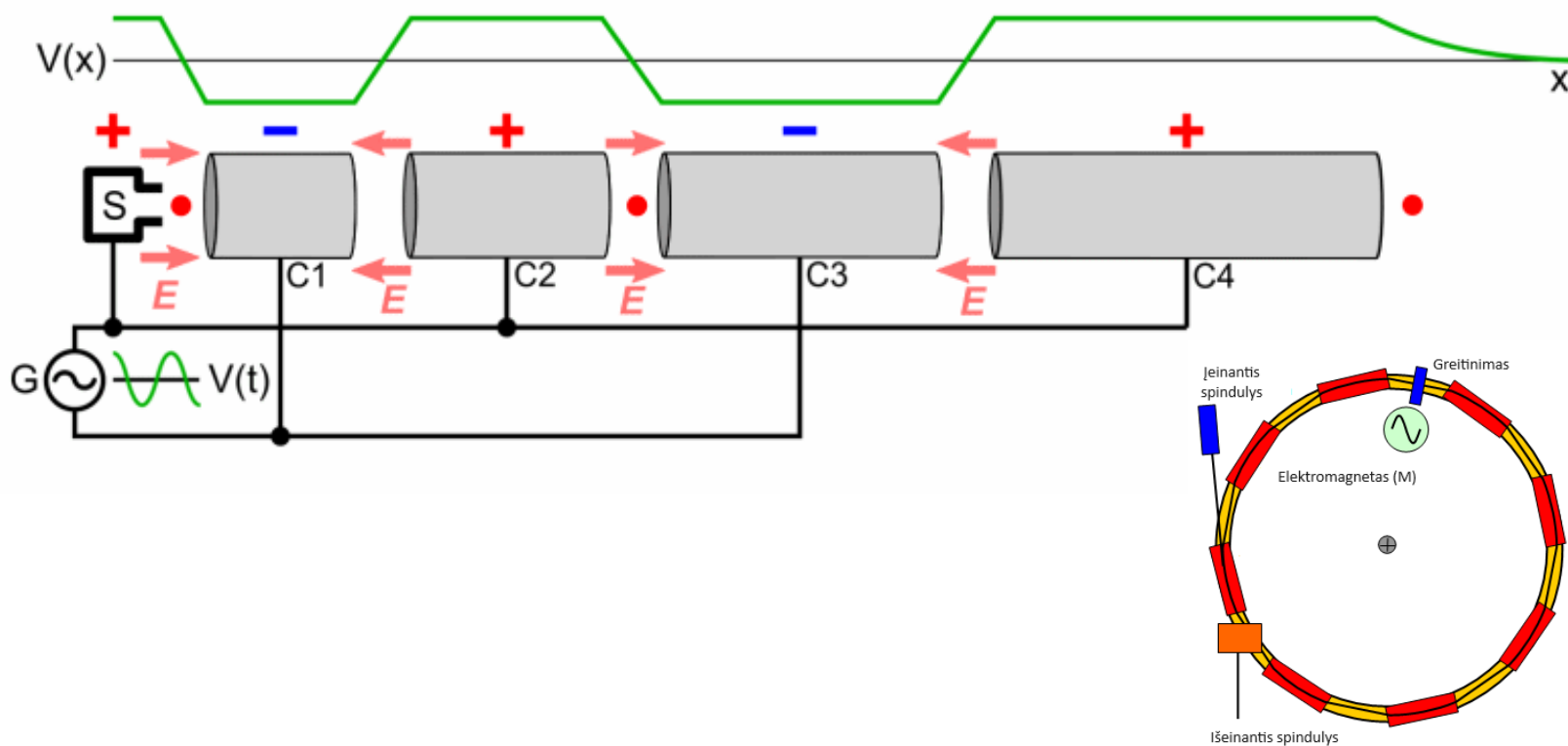




Greitintuvų veikimo principai

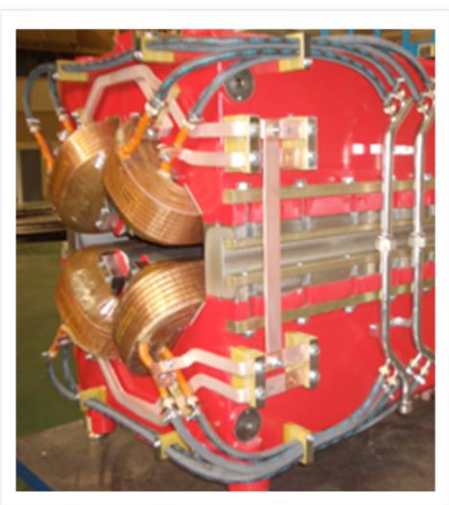
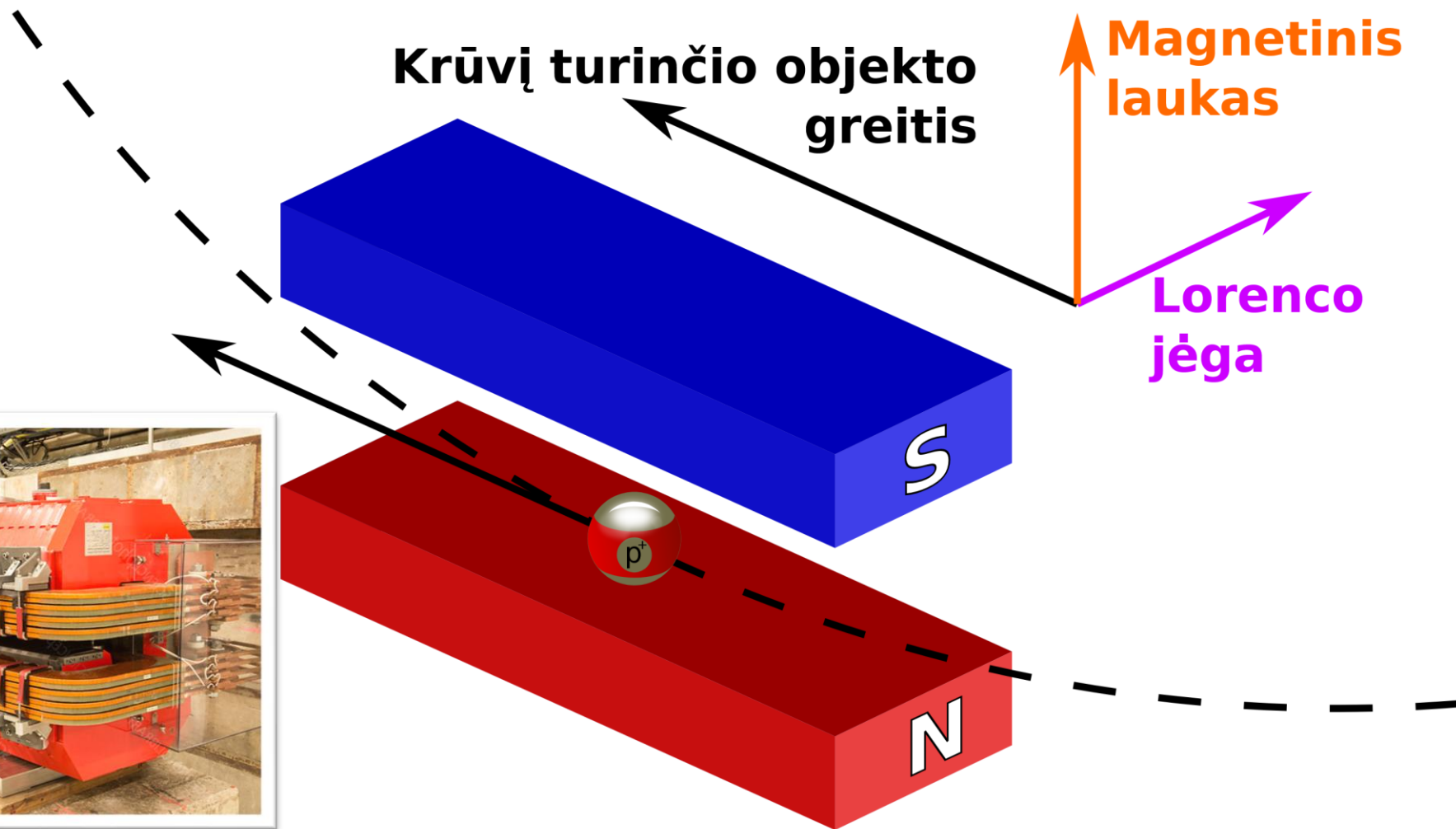
Dalelių greitinimas

- Kintamas **elektrinis** laukas greitina krūvį turinčias daleles
- Jeigu daleles sugebėtume priversti judėti ratu, galėtume tą patį greitinimo elementą panaudoti kelis kartus ir dalelėms suteikti daugiau energijos
 - Tiesiniai vs. žiediniai greitintuvai



Dalelių „vairavimas“

- Daleles galime priversti „daryti posūkius“ veikdami jas magnetiniu lauku
- Taip pat magnetinį lauką galime panaudoti dalelių pluošto „fokusavimui“
 - Tam reikalingi kvadrupoliniai magnetai



Dalelių fizikos technologijų pritaikymas medicinoje

Medicina (dalelių) fiziko akimis

- Įprastai medicinoje galimi du darbo režimai:
 - 1. Stebėjimas**
 - Stengiamės paciento būsenos nepakeisti, bet nustatyti, kas negerai (minimalus poveikis)
 - **Diagnostika**
 - 2. Poveikis**
 - Stengiamės paciento būseną pakeisti į geresnę (bet koks didesnis poveikis)
 - **Terapija/intervencija**
 - Chirurginė
 - Cheminė / medikamentinė / genų
 - Spindulinė
 - ...
- Gydymas gali būti:
 - „Niekio nedarymas“ (pasveikstama „natūraliai“)
 - Aktyvus darant poveikį
- (Dalelių) fizika gali pasitarnauti tiek stebėjimo, tiek poveikio režimuose



- Svarbiausias terminas – **detektoriai**
 - Dominuoja „elektromagnetiniai“ (fotonus sugeriantys) detektoriai
 - Yra daug vietos progresui (pvz., miuonai, kitos dalelės)
- Diagnostikos metodai/sistemos:
 - Fotoninė „klasika“:
 - Regimieji fotonai (įprasta šviesa)
 - Didelės energijos fotonai (rentgenas/gama spinduliai)
 - Rentgeno nuotraukos
 - Skenavimas (kompiuterinė tomografija)
 - Magnetiniai metodai:
 - Branduolių magnetinio rezonanso tomografija
 - Garso bangos
 - Ultragarsas
 - Cheminiai metodai
 - Stebimos mėginių (pvz., kraujo) cheminės savybės
 - Elektra
 - Elektrokardiogramos
 - Hibridiniai/kombinuoti metodai:
 - Pozitronų emisijos tomografija (detektorius galų gale registruoja fotonus)
 - Kitos kombinacijos



■ Terapijos/intervencijos metodai:

■ Išimamas/įdedamas/pakeičiamas „komponentas“

➤ **Sudėtinga** „prieiti“, **lengva** „nusitaikyti“

- Chirurgija („mechanika“)

■ Chemiškai paveikiama biosistema

➤ **Lengva** „prieiti“, **sunku** „nusitaikyti“

- Vaistai, antibiotikai, chemoterapija ir pan.

■ Spindulinė (dalelių terapija)

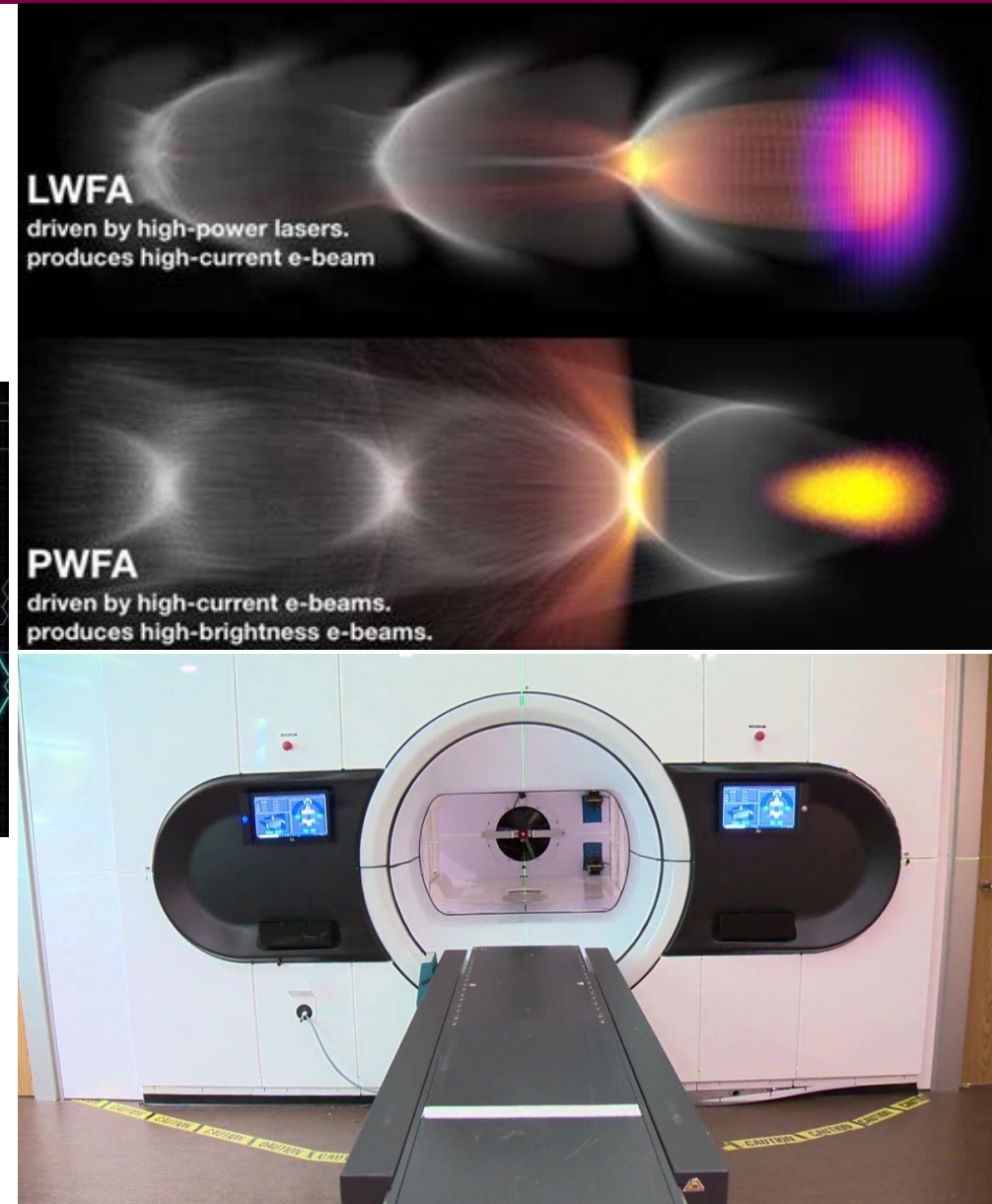
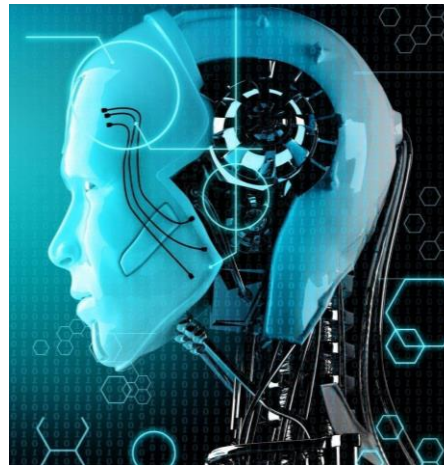
➤ **Lengva** „prieiti“, **lengva** „nusitaikyti“
(bet **sunku** nusitaikyti labai tiksliai)

- Fotonai (radioterapija)
- Elektronų terapija
- Hadronų terapija (protonai, sunkesni branduoliai)
- Ateityje – galbūt daugiau dalelių
- Pagrindė skirta tik naikinti (darinius, auglius)
- Taikinyis apgadinamas, organizmas pribaigia



Medicina fiziko akimis: terapija

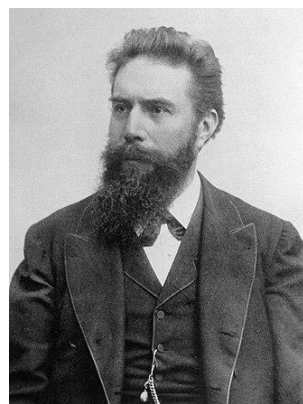
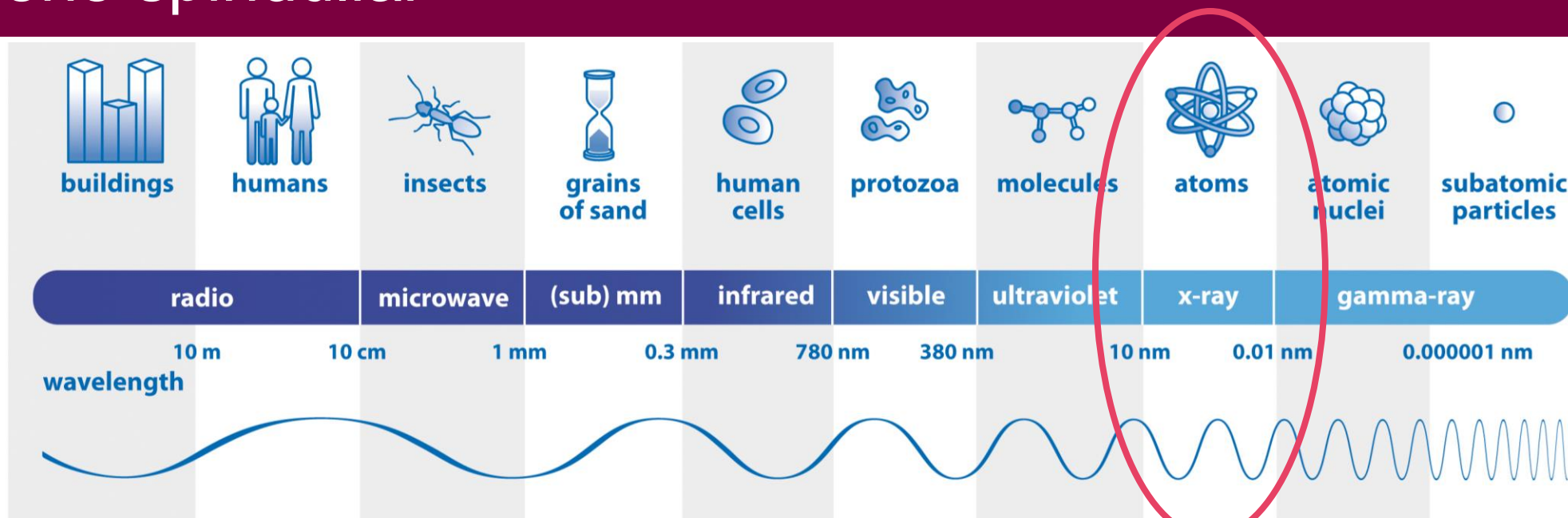
- Ateityje:
 - Daugiau hibridinių/kombinuotų metodų
 - Įvairiomis dalelėmis į taikinį
 - Daug spindulių
 - Fotonai jau naudojami labai plačiai
 - Elektronai jau taip pat plačiai naudojami
 - Hadronai naudojami daug rečiau (Europoje iš viso 35 centrai)
 - Protonai ir anglies branduoliai
 - Kitos dalelės išvis kol kas nenaudojamos
 - Mažesni dalelių greitintuvai
 - Plazmos, lazerių naudojimas greitiniui
 - Superlaidinkai gali leisti dar labiau sumažinti prietaisus
 - Diagnostika + terapija vienu metu
 - Labai svarbūs detektoriai realiu laiku
 - Stebėti neapsiribojant fotonais
 - Dirbtinis intelektas
 - Gydomo planų kūrimui, adaptyviai terapijai
 - Automatiniam taikinio ir gyvybiškai svarbių organų lokacijų nustatymui
- CERN yra kuriami įvairių rūšių dalelių spinduliai ir detektoriai (ir intensyviai naudojamas DI)





Diagnostika fotonais

Rentgeno spinduliai



1895-11-08

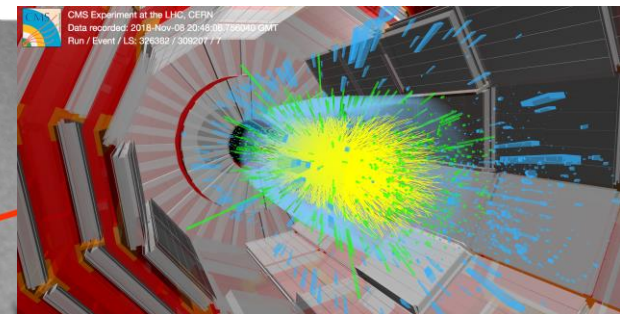
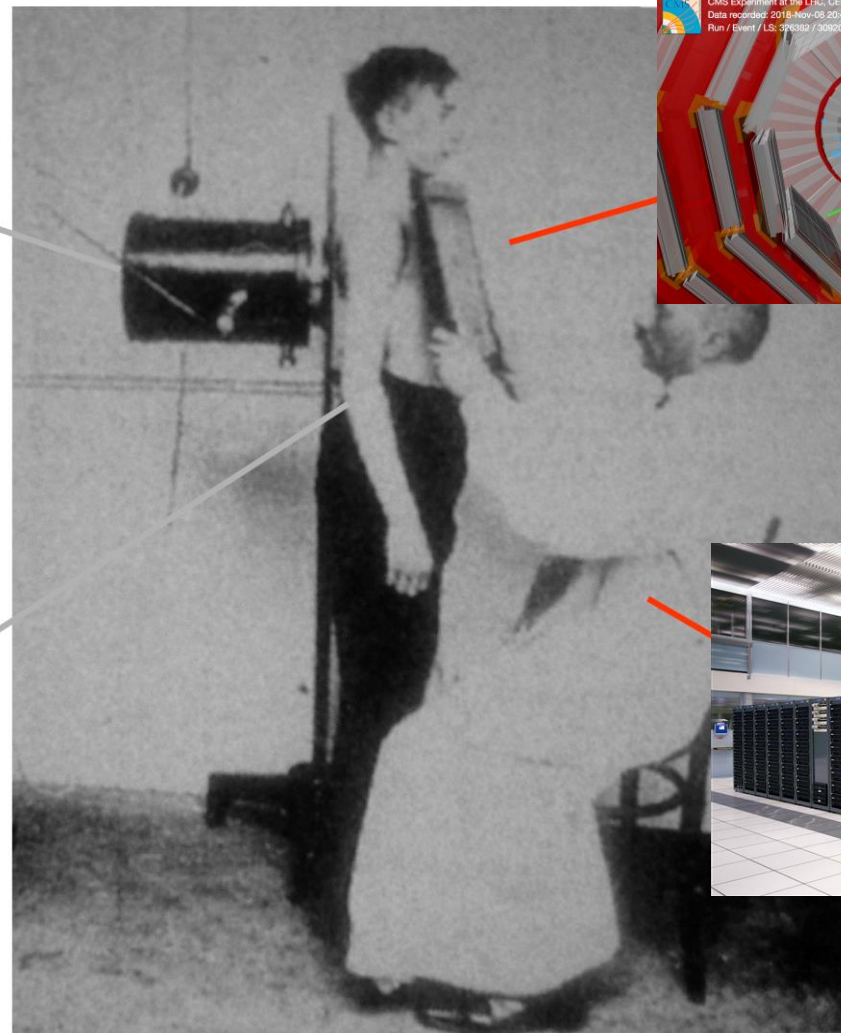


1895-12-22



1901

Rentgeno spinduliai



- Pradžioje rentgeno spinduliai diagnostikai buvo naudojami taip...
- Bet technologijos tobulėja...

Tyrimo objektas

■ Veikimo principas:

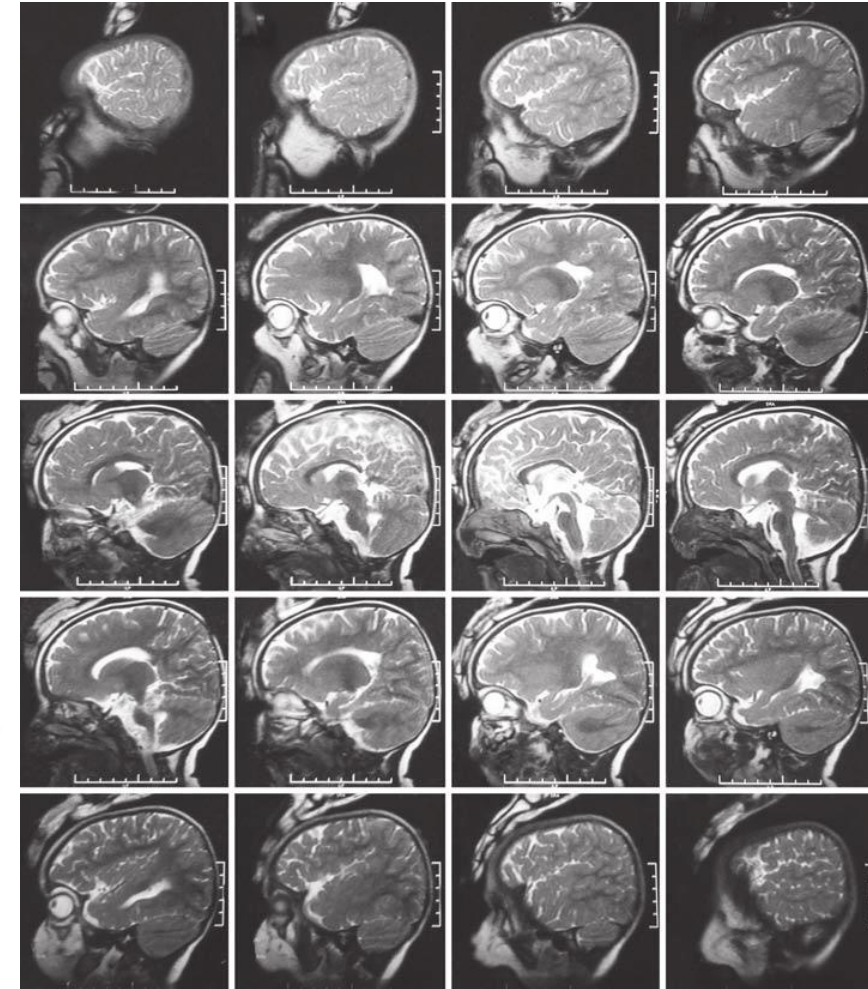
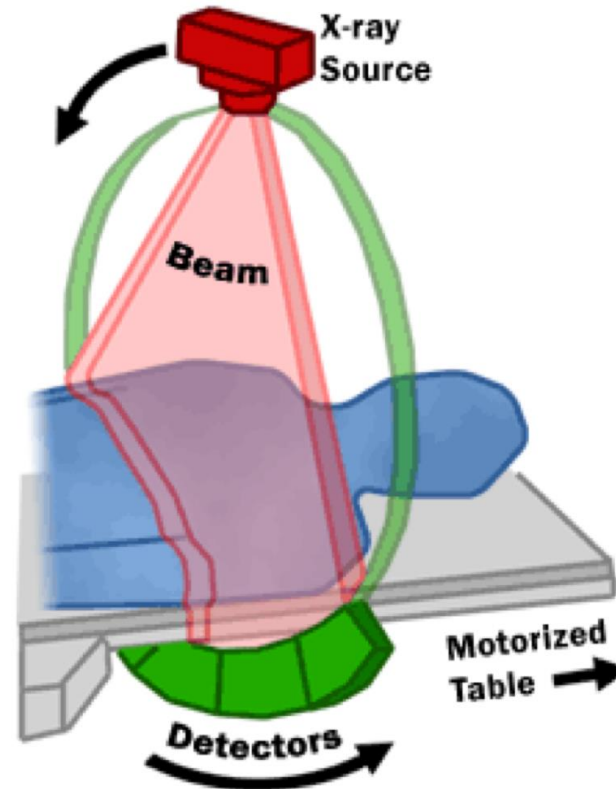
- Vienoje pusėje Rentgeno spindulių šaltinis – kitoje detektorius
- Abu šie komponentai sukasi ratu
- Taip žmogaus kūnas „peršviečiamas“ iš visų pusių
 - Padaromas vienas „pjūvis“
- Kūnas vėliau šiek tiek paslenkamas ir skenuojamas naujas pjūvis
- Taip kartojama tol, kol atvaizduojama visa dominanti sritis

■ Privalumai:

- Greita, (sąlyginai) pigu
- Gerai matosi kieti kūno „komponentai“ (pvz., kaulai)
- Galima naudoti žmonėms su metaliniais implantais

■ Trūkumai:

- Žmogus apšvitinamas radiacija
- Sunku atskirti minkštuosius audinius



Branduolių magnetinio rezonanso tomografija

■ Veikimo principas:

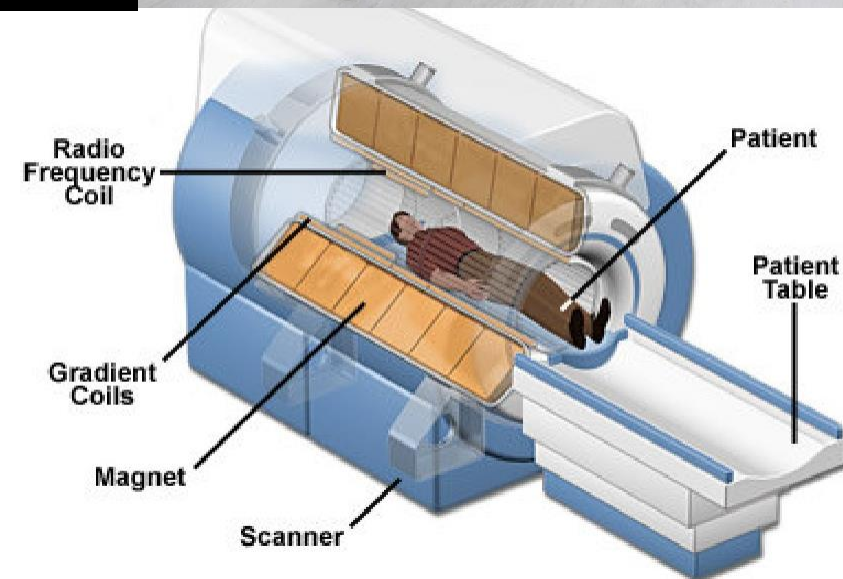
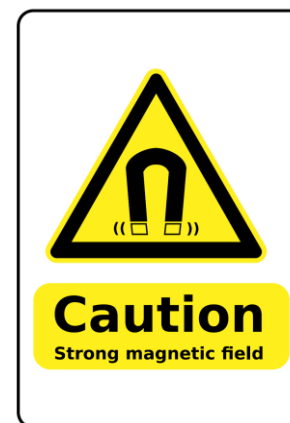
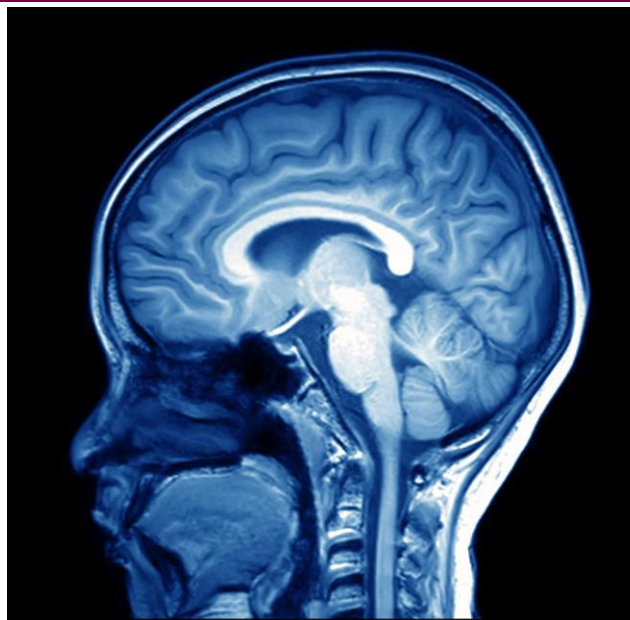
- Stiprus magnetinis laukas priverčia vandenilio atomus kūne „atsisukti į tą pačią pusę“
 - (atomai yra tarsi maži kompasai)
- Generuojamos radijo dažnio bangos, kurios priverčia atomus šiek tiek sukstis aplink pusiausvyros padėtį
- Išjungus radijo bangas atomai vėl išsilygiuoja ir tuo metu patys išspinduliuoja radijo bangas
- Šias radijo bangas aparatas užfiksuoja ir nustato, iš kur jos atlėkė
- Galų gale nustatomas kūne esančių vandenilio atomų „žemėlapis“

■ Privalumai:

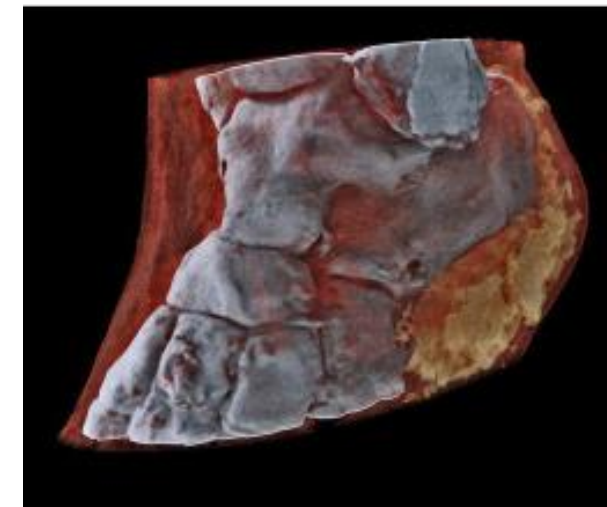
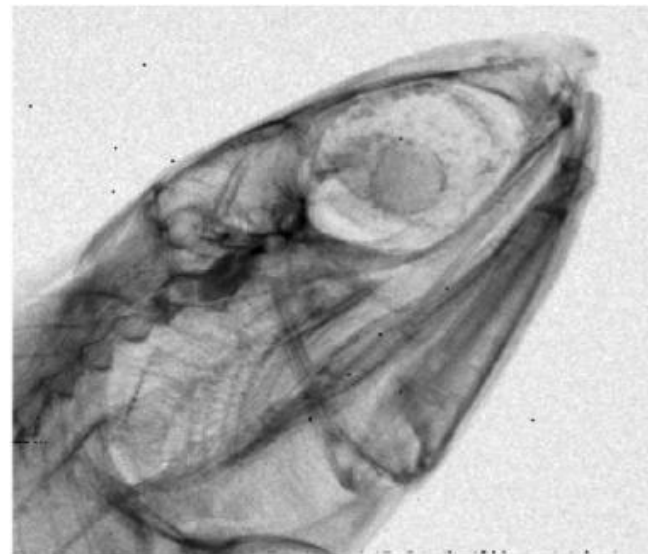
- Nėra radiacijos
- Geriau matosi minkštieji audiniai, nei KT
- Didesnis tikslumas, nei KT

■ Trūkumai:

- Ilgai trunka, brangu, nepatogu
- Netinka pacientams su metaliniais implantais ir pan.

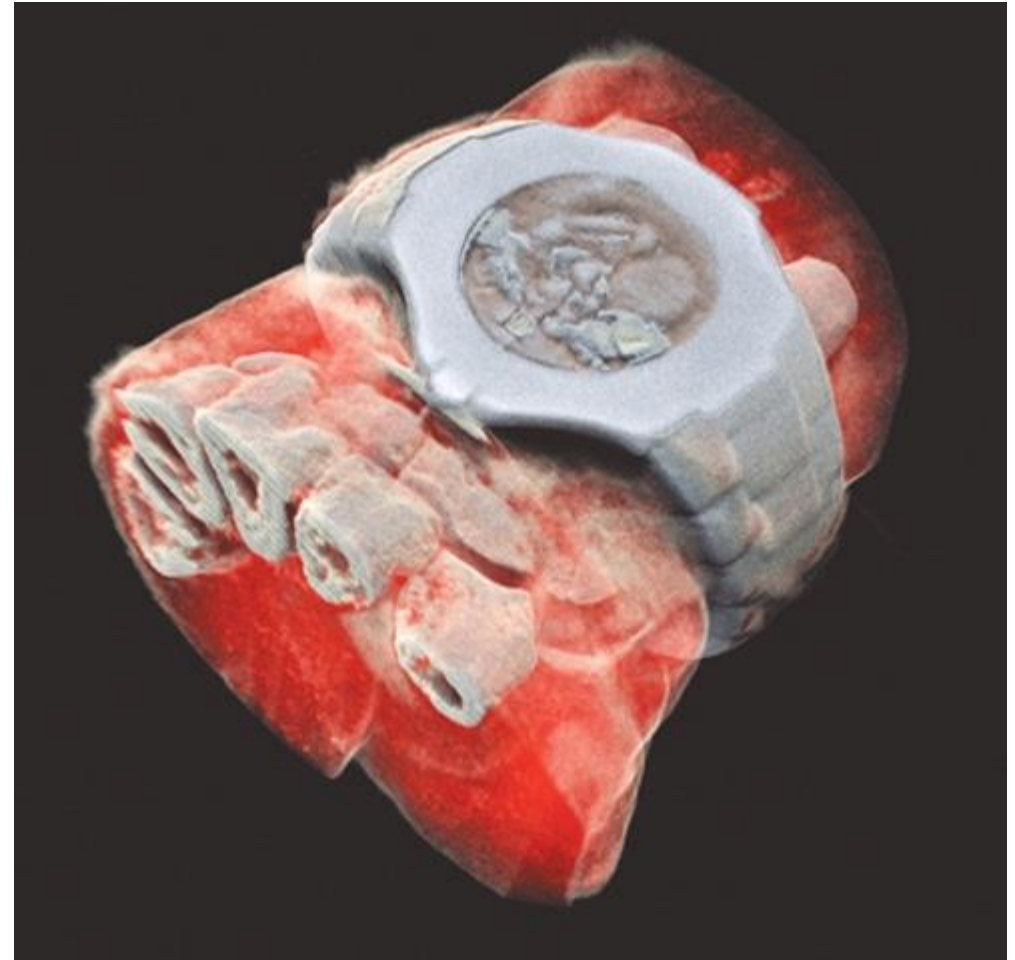


- Medipix yra didelės raiškos Rentgeno spindulių detektorius, sukurtas CERN
- Jo veikimas paremtas CERN esančių pikselinių dalelių detektorių technologija
- Veikia kaip rentgeno spindulius detektuojanti fotokamera:
 - Gali užregistruoti pavienius fotonus ir iš jų sudėlioti didelės raiškos vaizdą
 - Naudoja puslaidininkinius pikselinius sensorius – kiekvienas pikselis kaip atskiras detektorius
 - Priešingai, nei įprastiniai Rentgeno spindulių detektoriai, Medipix gali atpažinti skirtingas Rentgeno fotonų energijas (mato Rentgeno „spalvas“)
- Kodėl tai svarbu?
 - Galime gauti geresnės kokybės vaizdą
 - Pacientas gali gauti mažiau radiacijos (kokybiškam vaizdui gauti)
 - Skirtingos spindulių „spalvos“ leidžia geriau atskirti skirtingus kūno audinius
 - Gali būti panaudoti ne tik medicinoje, medžiagų moksle, kosmoso tyrinėjimuose, ar bagažo skenavimui oro uostuose ir t.t...



„Spalvotas“ Rentgenas

- MARS Bioimaging – viena iš daugelio kompanijų, įkurtų CERN darbuotojų ir naudojančių CERN technologijas
- Ši kompanija dalyvauja ir Medipix projekte bei savo prietaisuose naudoja Medpix detektorius
- Pagrindinė kompanijos veiklos sritis – „spalvota“ Rentgeno tomografija



Hibridinė/kompleksinė diagnostika

Pozitronų emisijos tomografija

■ Veikimo principas:

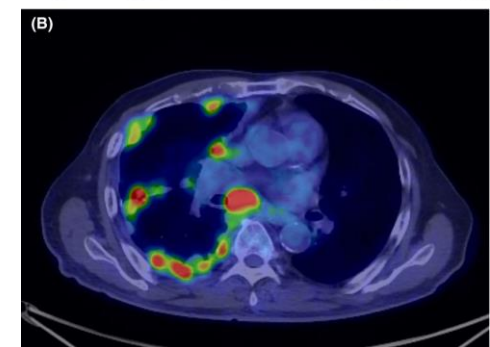
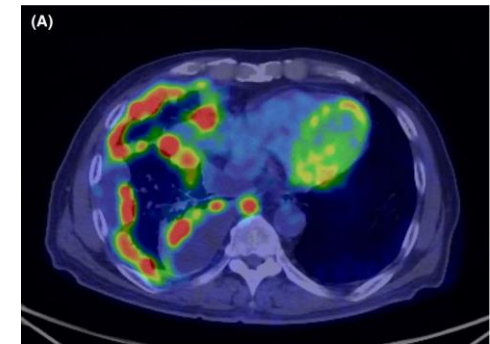
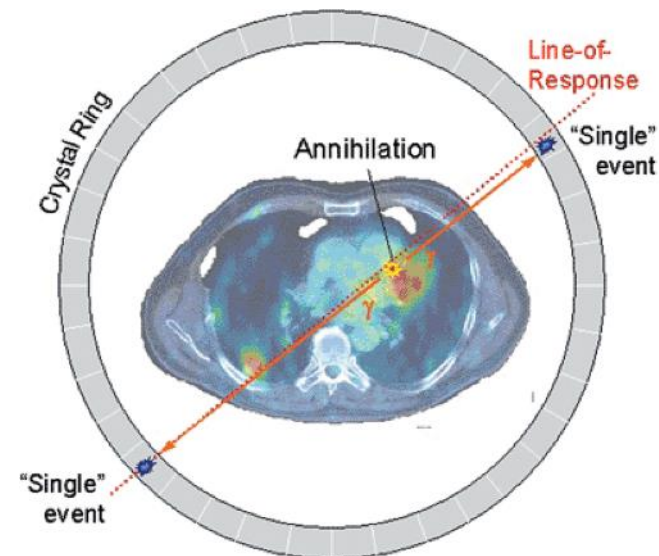
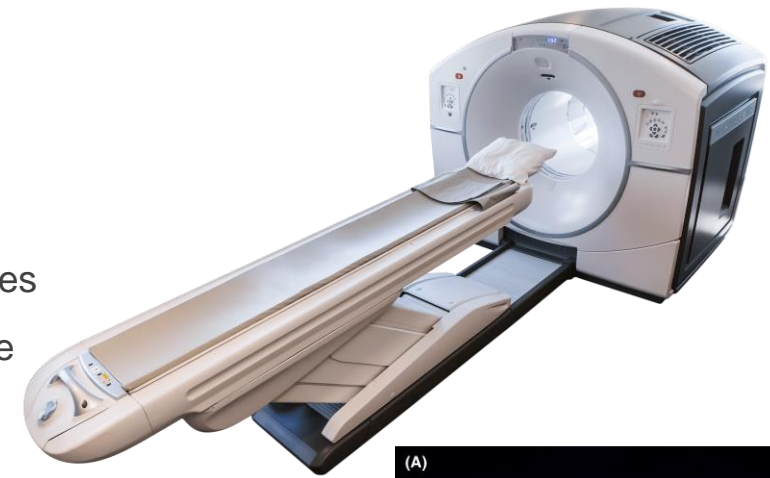
- Pacientui suleidžiama šiek tiek (β^+) radioaktyvios medžiagos
- Ši medžiaga per kraują nukeliauja iki metaboliškai aktyvių organų (pvz., naviko)
- Radioaktyvi medžiaga skyla ir sukuria pozitronus (antielektronus)
- Pozitronas, sutikęs elektroną, anihiliuoja ir išspinduliuoja du gama fotonus į priešingas puses
- Aplink pastatytas detektorius užregistruoja du tuo pačiu metu atlėkusius fotonus skirtingose vietose
- Kompiuteris apskaičiuoja, iš kurios vietos atskrido fotonai
- Surinkus pakankamai tokių signal nupiešiamas detalus radioaktyvios medžiagos pasiskirstymo kūne vaizdas

■ Privalumai:

- Aiškiau parodo organų ir audinių (metabolinę) veiklą, galima sekti, kaip medžiaga keliauja kūnu
- Galima pakitimus aptikti anksčiau nei su KT ar BMR

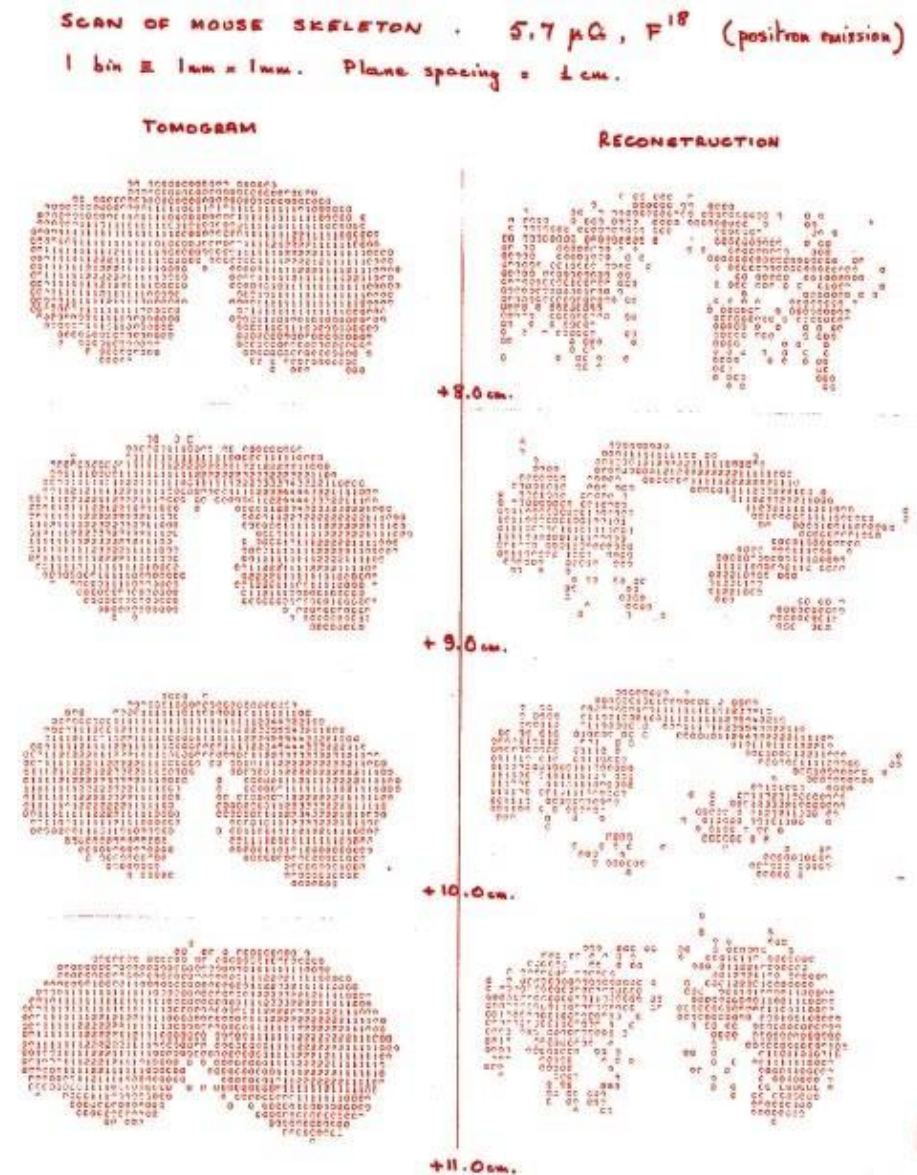
■ Trūkumai:

- (Nedidelis) apšvitinimas radiacija
- Mažiau detalūs vaizdai, lyginant su KT ar BMR
- Brangu, nepatogu



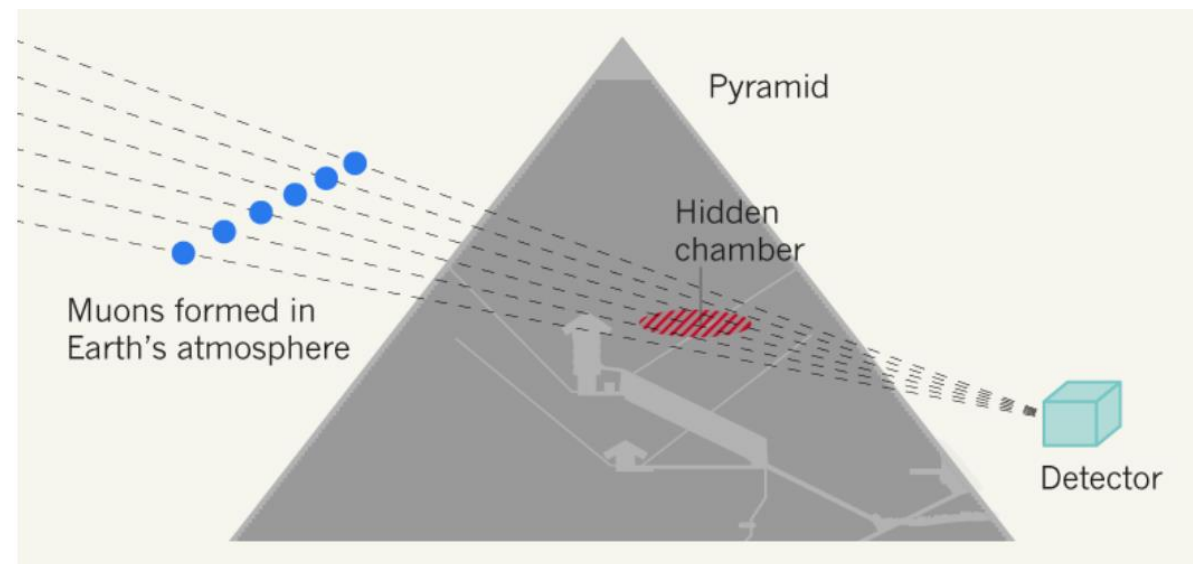
Prie PET technologijos prisidėjo ir CERN

- Pirmasis PET aparatas buvo sukurtas Amerikoje 1973 metais
- CERN mokslininkai D. Townsend ir A. Jeavons pritakė naują detektorių technologiją PET skenavimui bei sukūrė naują programinę įrangą vaizdų atkūrimui
- 1977 metais jie paskelbė savo pirmą detalią (tam laikotarpiui) pelės PET nuotrauką
- Vėliau D. Townsend prisidėjo sukuriant PET aparatą Ženevos ligoninei
- D. Townsend toliau dirbo su diagnostikos technologijomis bei dirbdamas kartu su R. Nutt apjungė PET ir KT technologijas į vieną, taip gaudamas dar detalesnius vaizdus
 - Tai buvo didelis proveržis vėžio diagnostikoje



(Tolimos) ateities diagnostika panaudojant daleles

- Iš dangaus nuolat į mus krenta kosminiai miuonai
 - Miuonas – į elektroną panaši, bet 200 kartų už jį sunkesnė dalelė
 - Kas sekundę į 1 m² „nukrenta“ apie 10 miuonų
- Palaikius detektorių po kokiu nors objektu, gaunamas jo „šešėlis“
- Stumdant/sukiojant detektorių arba objektą galima gauti detalų jo struktūros vaizdą
- Kol kas ši technologija pritaikoma tik labai dideliems objektams skenuoti
- Vis dėlto, teoriškai tai galėtų būdas atlikti diagnostika su minimalia apšvita
 - Tiesa, tam reiktų greičiausiai jau ne kosminių miuonų

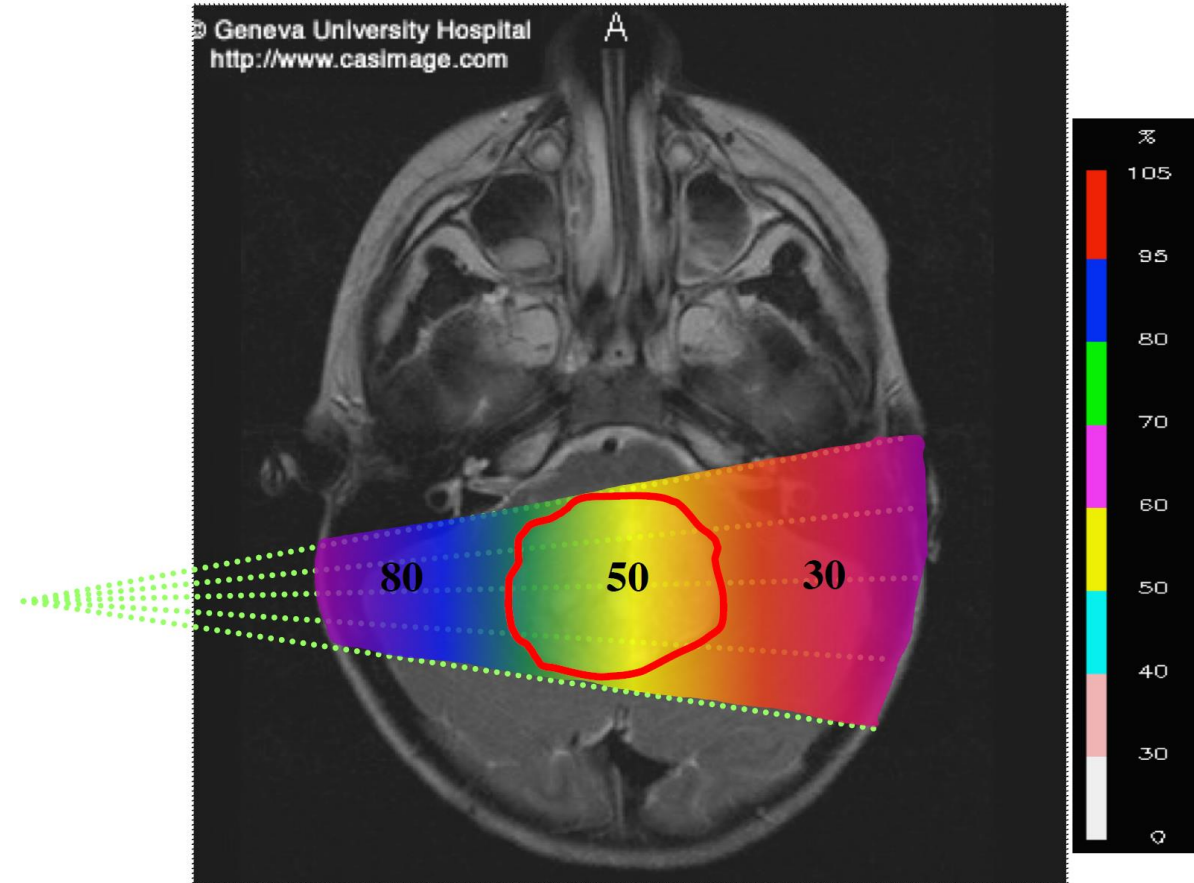




Terapija fotonais

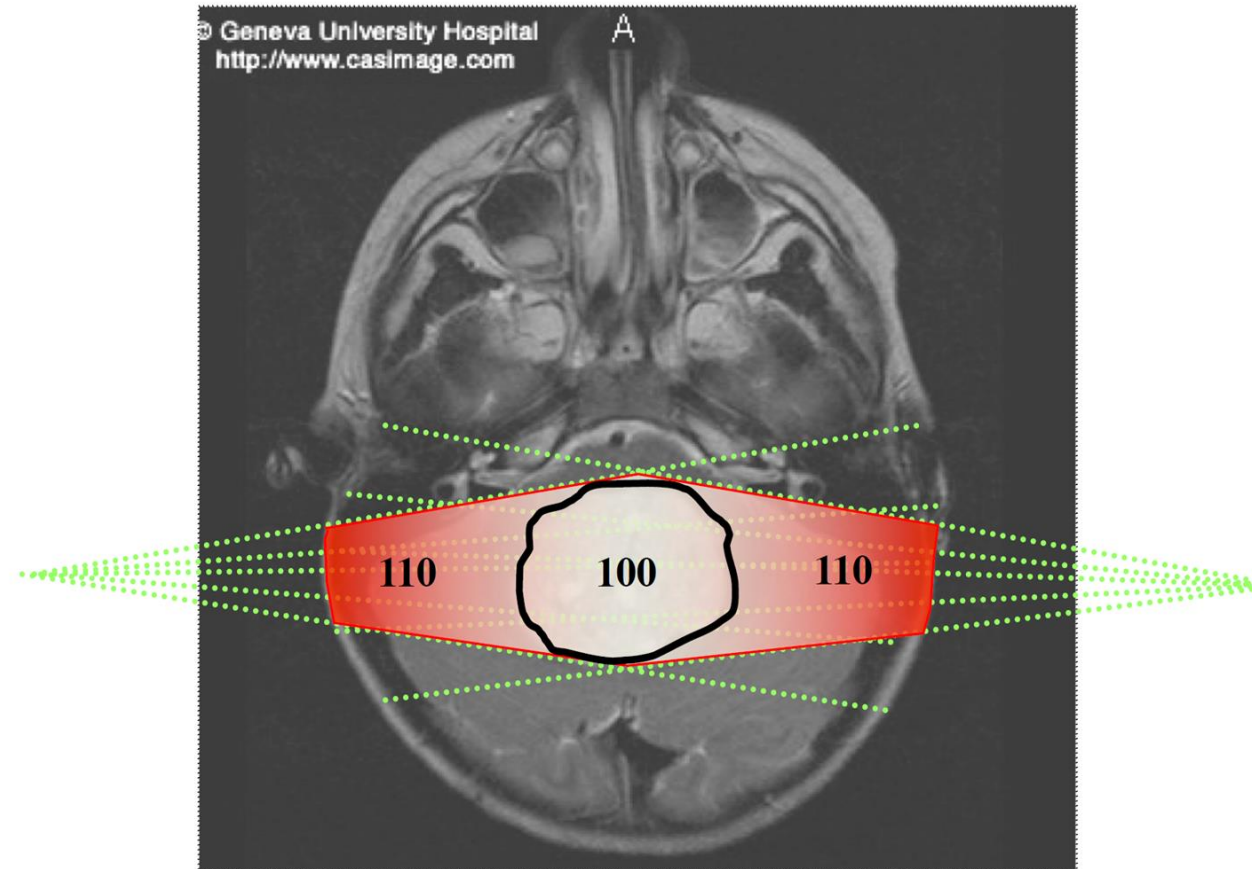
Gama peilis

- Gama spinduliai yra labai skvarbūs ir žmogaus kūnu gali nukeliauti toli
- Vis dėlto, didžiausią radiacijos dozę gauna arčiausiai paviršiaus esantys audiniai
- Radiacijos dozė su įsiskverbimo gyliu mažėja

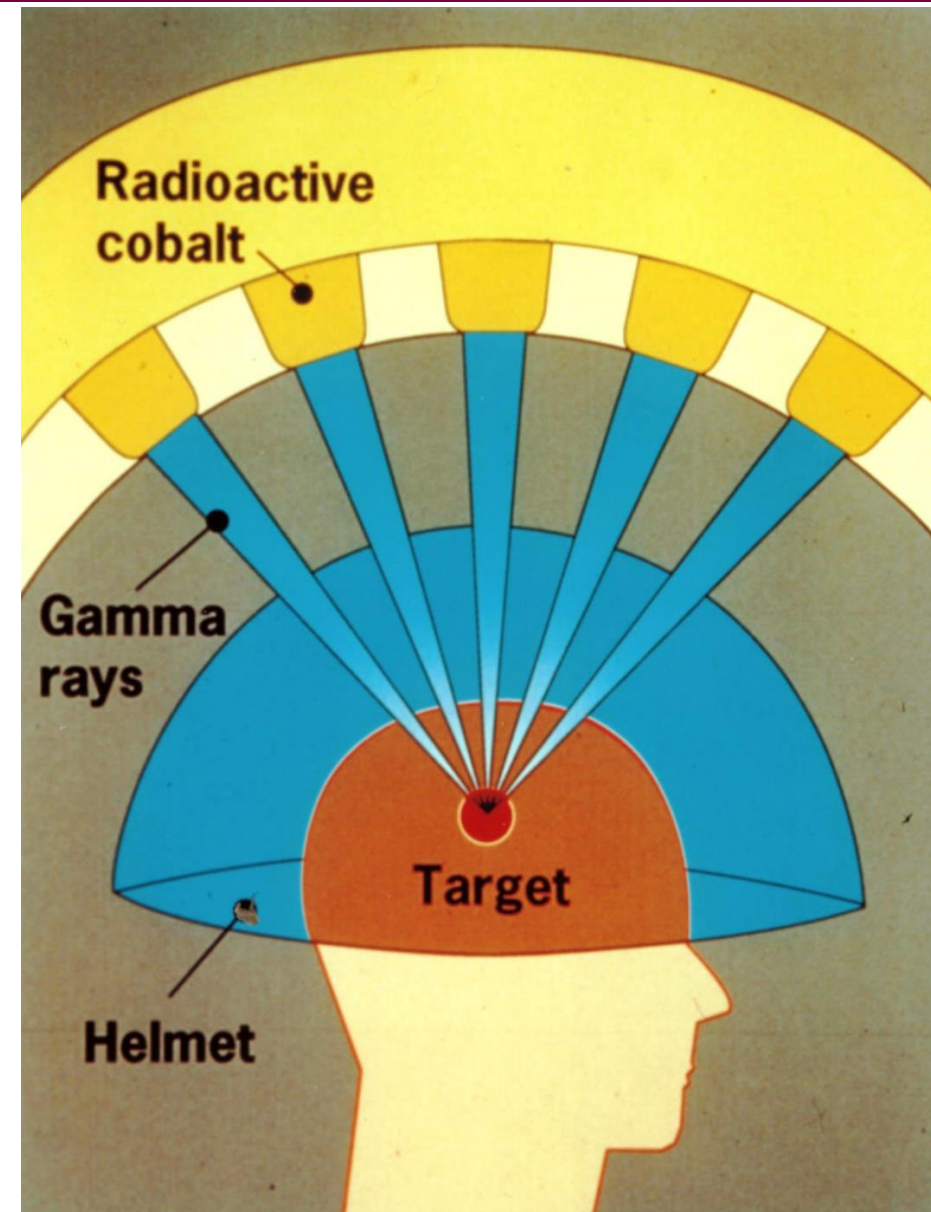


Gama peilis

- Gama spinduliai yra labai skvarbūs ir žmogaus kūnu gali nukeliauti toli
- Vis dėlto, didžiausią radiacijos dozę gauna arčiausiai paviršiaus esantys audiniai
- Radiacijos dozė su įsiskverbimo gyliu mažėja
- Jei taikinys yra giliai, jį galima apšvitinti iš kelių pusių
 - Tada bendra taikinio pažaida didėja, o svarbūs audiniai pažeidžiami mažiau



- Gama spinduliai yra labai skvarbūs ir žmogaus kūnu gali nukeliauti toli
- Vis dėlto, didžiausią radiacijos dozę gauna arčiausiai paviršiaus esantys audiniai
- Radiacijos dozė su įsiskverbimo gyliu mažėja
- Jei taikiny yra giliai, jį galima apšvitinti iš kelių pusių
 - Tada bendra taikinio pažaida didėja, o svarbūs audiniai pažeidžiami mažiau
- Idealu, jei taikinį apšviečiame iš labai daug skirtingų pusių
- Pirmasis toks prietaisas buvo panaudotas 1967 m. Švedijoje
- Daug metų tikslesnį procedūros planavimą riboja skaičiavimo galimybės
- Dabar su kompiuterių pagalba galimas apšvitinimas iš daugybės skirtingų kampų

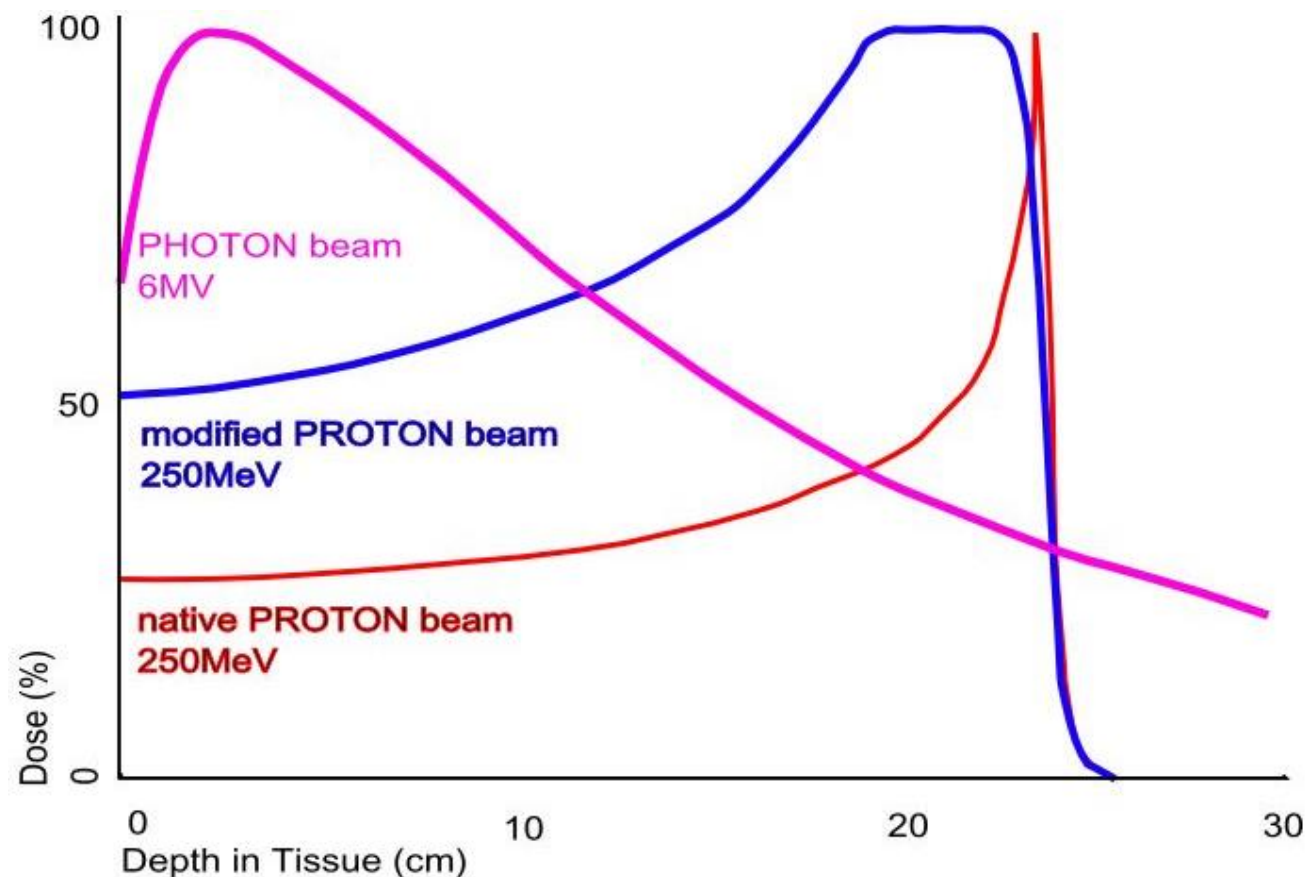




Terapija sunkiomis dalelėmis

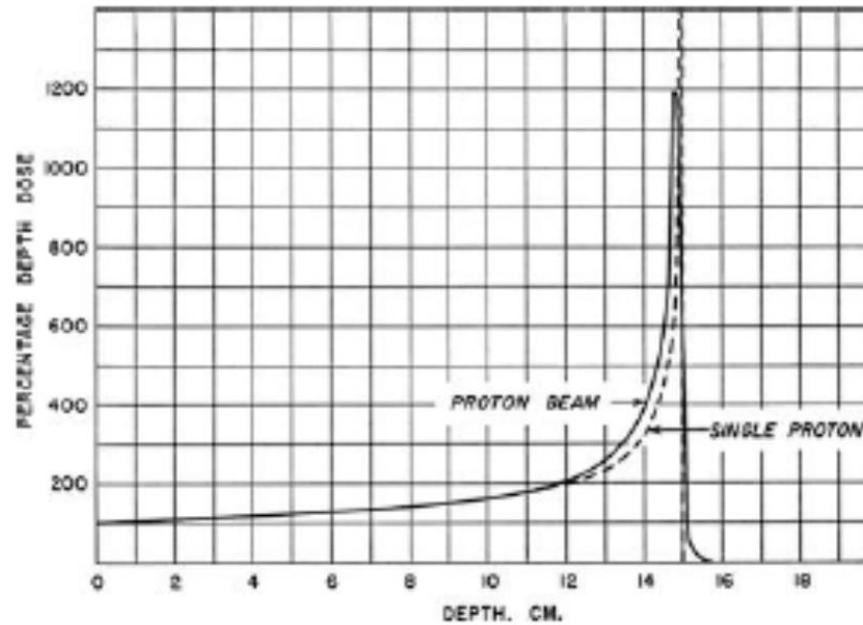
Brego pikas (Bragg peak)

- Masyvios dalelės pasižymi savybe tam tikrame gylyje atiduoti didžiąją dalį savo energijos ir sustoti per labai trumpą laiką
- Skirtingos masės ir energijos dalelės kūne nulekia skirtingą atstumą
- Reguluojant dalelės energiją (greitį) galima reguliuoti, kokiame gylyje norima padaryti didžiausią poveikį



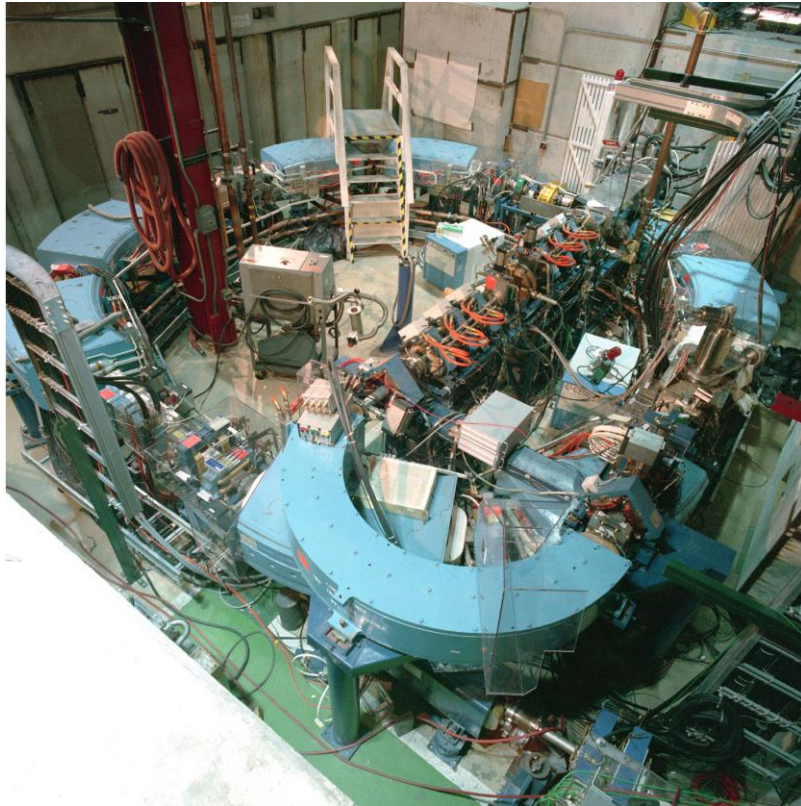
Šiek tiek istorijos

- 1932 – E. Lawrence sukuria pirmąjį ciklotroną
- 1946 – R. Wilsonas pasiūlo protonų terapijos idėją
- 1954 – Berklyje gydomas pirmasis pacientas



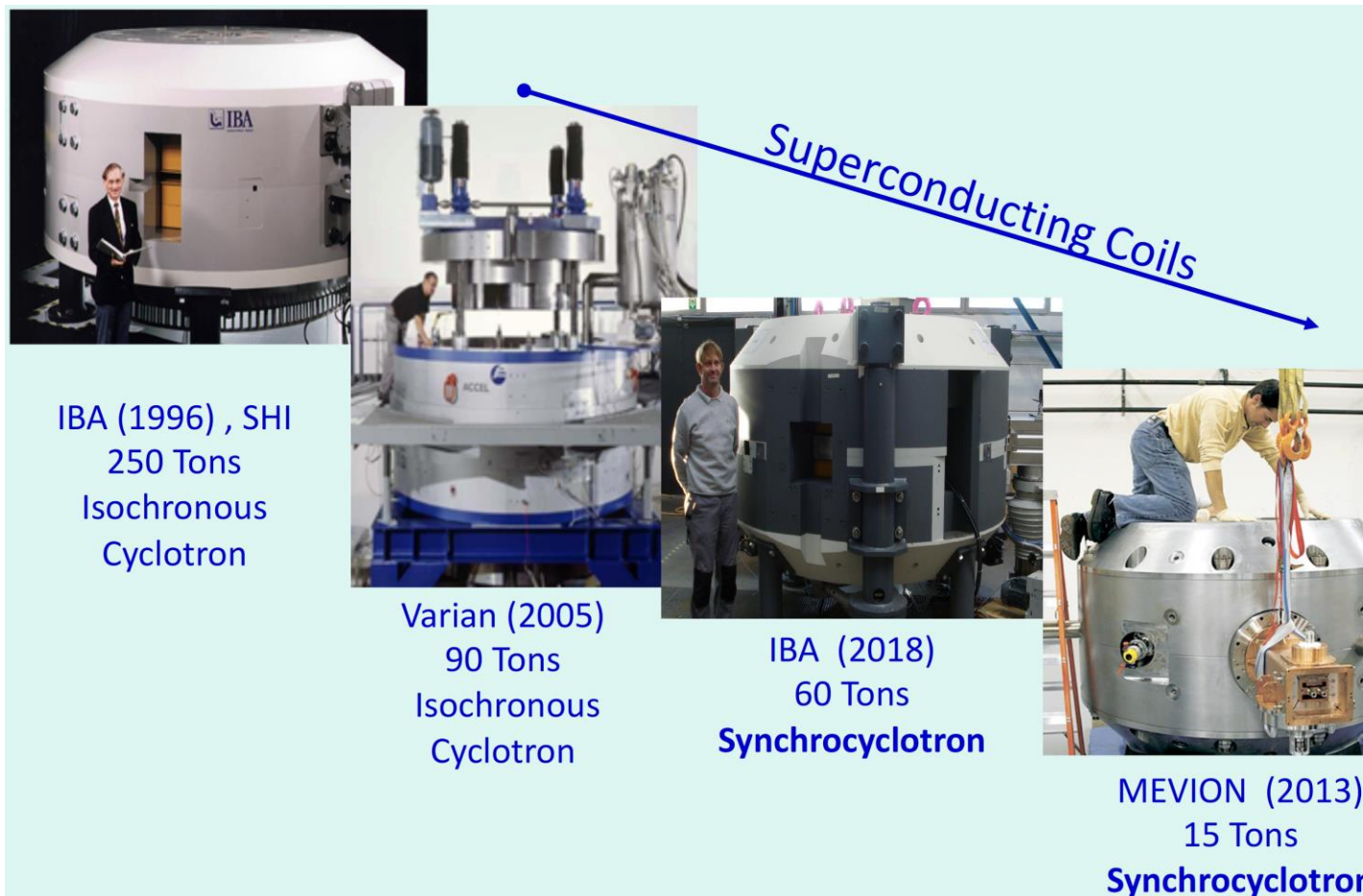
Šiek tiek istorijos

- Kurį laiką technologijos buvo tobulinamos
- 1993 – pirmas vien tik klinikiniam tikslams skirtas gretintuvas Loma Lindoje (JAV)
- 1994 – NIRS, Japonijoje atsiranda pirmasis anglies branduolių terapijos centras HIMAC
- 1997 – GSI, Vokietijoje atsiranda pirmasis anglies branduolių terapijos centras Europoje



Greitintuvų technologijos tobulėja

- Protonų terapijai skirtų ciklotronų technologijos tobulėja
- Greitintuvai darosi mažesni ir lengvesni, vis daugiau naudojami superlaidininkai
- Tampa įmanoma sutalpinti visa sistemą viename kambaryje



IBA (1996) , SHI
250 Tons
Isochronous
Cyclotron

Varian (2005)
90 Tons
Isochronous
Cyclotron

IBA (2018)
60 Tons
Synchrocyclotron

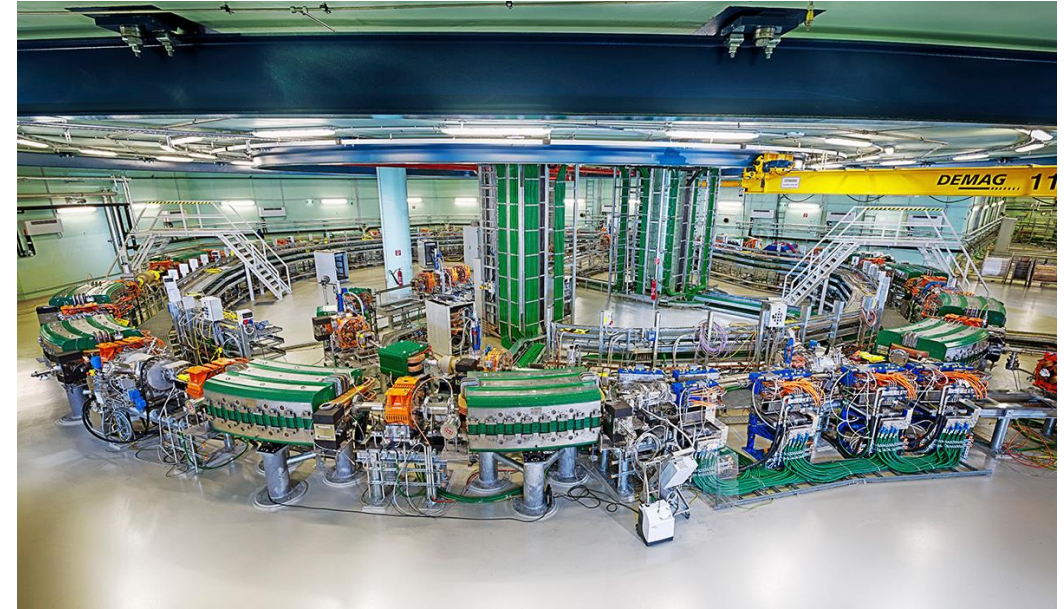
MEVION (2013)
15 Tons
Synchrocyclotron

Superconducting Coils

Hadronų terapija gyva ir auganti

Su CERN susijusios iniciatyvos ir kolaboracijos:

- 1996 Proton Ion Medical Machine Study (PIMMS) grupė
- 2019 Next Ion Medical Machine Study (NIMMS) grupė
- ISOLDE/MEDICIS eksperimentai CERN: nauji izotopai/radioizotopai
- Hadronų terapijos platformos/centrai:
 - MedAustron, veikiantis austrų centras
 - ENLIGHT, Europos dalelių terapijos centrai
 - SESAME, vidurio rytai
 - SEEIIST, Balkanai, su Next Ion Medical Machine Study (NIMMS) platforma
- 2022 CERN Baltijos grupėje inicijuojama dalelių terapijos grupė





Ačiū už dėmesį!