Monte Carlo -simulaatiot hiukkastörmäyksille LHC:ssä

Lukioiden CERN-tiedeopetusverkoston syysseminaari

Ilkka Helenius

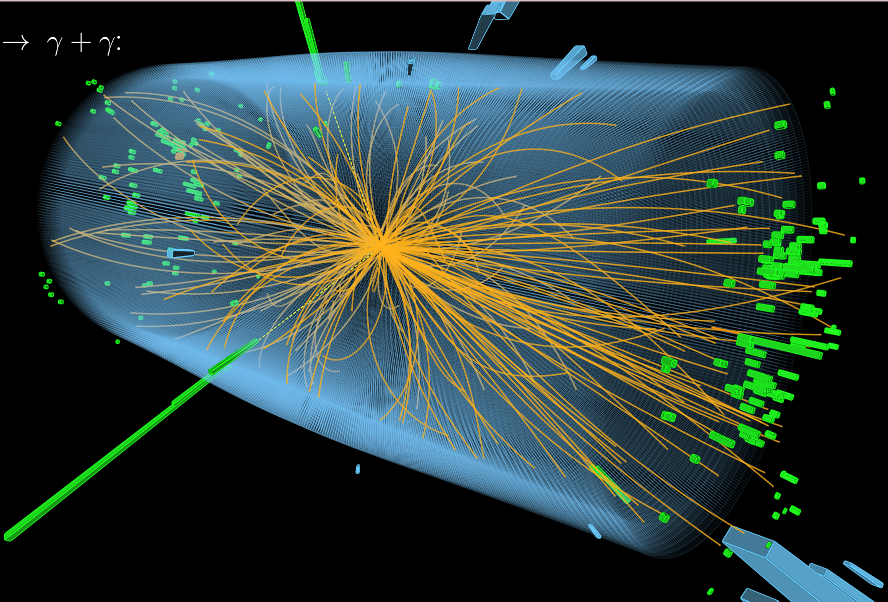
23.08.2019

JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO
UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ

SUOMEN AKATEMIA

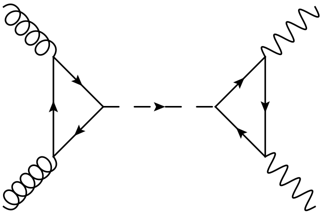
Kokeeliset mittaukset

Higgs $\rightarrow\ \gamma + \gamma$:



Teoria

- Osataan laskea todennäköisyys sironnalle $g + g \to H \to \gamma + \gamma$

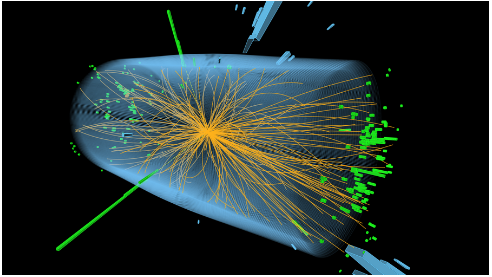


- Yhdessä hiukkastörmäyksessä LHC:ssä voi syntyä satoja hiukkasia
  - Kuinka löytää kiinnostavat tapahtumat taustasta?
  - Kuinka tausta vaikuttaa kiinnostavien hiukkasten jakaumiin?
  - Millaisiksi ilmaisimet pitäisi suunnitella?

$\Rightarrow$ Monte Carlo -simulaatiot

Sisältö

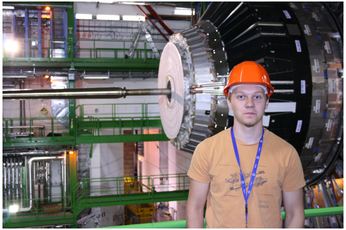
1. Motivaatio Monte Carlo -simulaatioille
2. Monte Carlo -menetelmät
3. Vahva vuorovaikutus ja värivaraus
4. Protoni-protoni törmäykset ja niiden simulointi
5. Yhteenveto



Minä, Monte Carlo ja CERN

Polkuni hiukkasfysiikoksi

- Cygnaeus-lukio (2000-2003)
  - Vierailu CERNiin 2003
- FM@JYFL 2005-2010
  - 2008 kesäharjoittelijana CERNissä (CMS-ryhmä)
  - Monte Carlo -simulaatiota Pythia 6 ohjelmalla
- FT@JYFL 2010-2014
  - Useita vierailuja CERNiin



- Lundissa 2014-2016
  - Pythia 8 kehittäjäksi
- Tübingenissä 2016-2018
- Jyväskylän yliopistossa 2018-

Minä, Monte Carlo ja CERN

Polkuni hiukkasfysiikoksi

- Cygnaeus-lukio (2000-2003)
    - Vierailu CERNiin 2003
- FM@JYFL 2005-2010
    - 2008 kesäharjoittelijana CERNissä (CMS-ryhmä)
    - Monte Carlo -simulaatiota Pythia 6 ohjelmalla
- FT@JYFL 2010-2014
    - Useita vierailuja CERNiin

- Lundissa 2014-2016
    - Pythia 8 kehittäjäksi
- Tübingenissä 2016-2018
- Jyväskylän yliopistossa 2018-

Monte Carlo -simulaatiot

Menetelmä

- Perustuu numeeriseen mallintamiseen hyödyntäen todennäköisyyslaskentaa
- Tuotetaan tunnettujen jakaumien mukaisia yksittäisiä tapahtumia (eventtejä) satunnaislukujen avulla

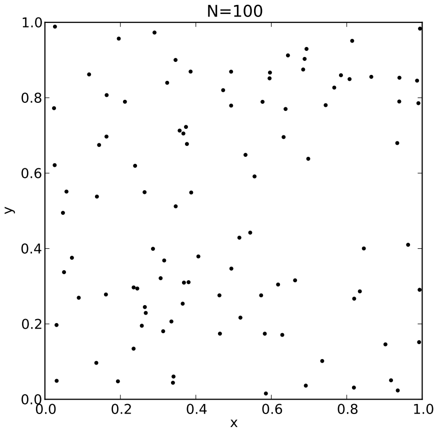
Hyödyllinen kun

- Jakaumat vaikeita käsitellä analyyttisesti (kynä & paperi)
- Jakaumat monidimensioisia

Esimerkki: Piin likiarvo

Monte Carlo -algoritmi (Hit and miss)

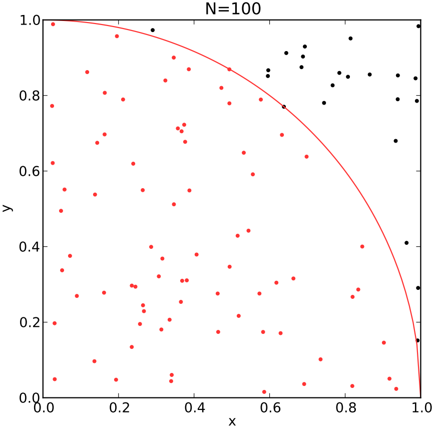
1. Arvotaan N kappaletta (x, y) satunnaislukupareja väliltä [0,1[



Esimerkki: Piin likiarvo

Monte Carlo -algoritmi (Hit and miss)

1. Arvotaan N kappaletta (x, y) satunnaislukupareja väliltä [0,1[
2. Lasketaan pisteet neljännesympyrän sisällä $x^2 + y^2 < 1$

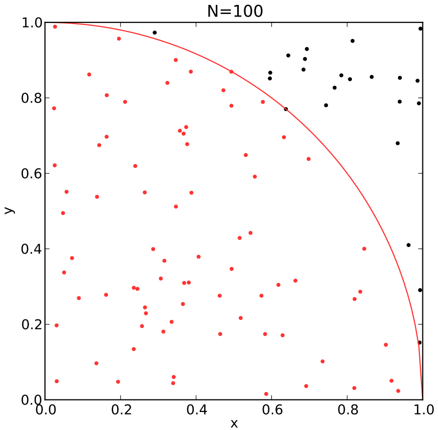


Esimerkki: Piin likiarvo

Monte Carlo -algoritmi (Hit and miss)

1. Arvotaan N kappaletta (x, y) satunnaislukupareja väliltä [0,1[
2. Lasketaan pisteet neljännesympyrän sisällä $x^2 + y^2 < 1$
3. Likiarvo $= 4 * N_{\text{sisäpuolella}} / N_{\text{kaikki}}$

N	likiarvo	virhe
100	3.08	0.0616

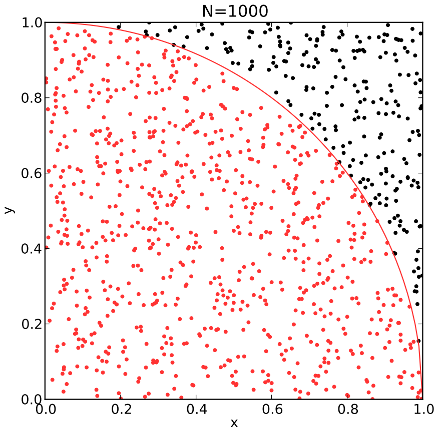


Esimerkki: Piin likiarvo

Monte Carlo -algoritmi (Hit and miss)

1. Arvotaan N kappaletta (x, y) satunnaislukupareja väliltä [0,1[
2. Lasketaan pisteet neljännesympyrän sisällä $x^2 + y^2 < 1$
3. Likiarvo $= 4 * N_{\text{sisäpuolella}} / N_{\text{kaikki}}$

N	likiarvo	virhe
100	3.08	0.0616
1000	3.092	0.0496

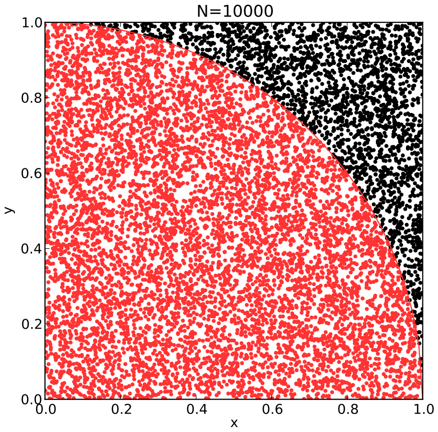


Esimerkki: Piin likiarvo

Monte Carlo -algoritmi (Hit and miss)

1. Arvotaan N kappaletta (x, y) satunnaislukupareja väliltä [0,1[
2. Lasketaan pisteet neljännesympyrän sisällä $x^2 + y^2 < 1$
3. Likiarvo $= 4 * N_{\text{sisäpuolella}} / N_{\text{kaikki}}$

N	likiarvo	virhe
100	3.08	0.0616
1000	3.092	0.0496
10000	3.118	0.0236

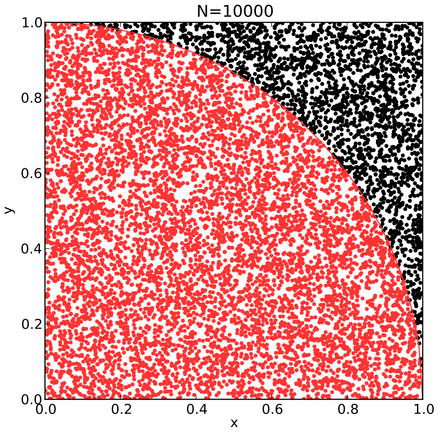


Esimerkki: Piin likiarvo

Monte Carlo -algoritmi (Hit and miss)

1. Arvotaan N kappaletta (x, y) satunnaislukupareja väliltä [0,1[
2. Lasketaan pisteet neljännesympyrän sisällä $x^2 + y^2 < 1$
3. Likiarvo $= 4 * N_{\text{sisäpuolella}} / N_{\text{kaikki}}$

N	likiarvo	virhe
100	3.08	0.0616
1000	3.092	0.0496
10000	3.118	0.0236
100000	3.14752	0.00593

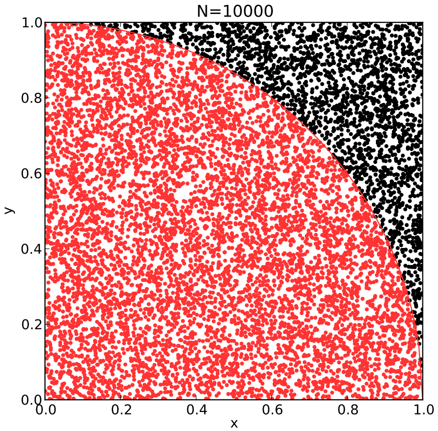


Esimerkki: Piin likiarvo

Monte Carlo -algoritmi (Hit and miss)

1. Arvotaan N kappaletta (x, y) satunnaislukupareja väliltä [0,1[
2. Lasketaan pisteet neljännesympyrän sisällä $x^2 + y^2 < 1$
3. Likiarvo $= 4 * N_{\text{sisäpuolella}} / N_{\text{kaikki}}$

N	likiarvo	virhe
100	3.08	0.0616
1000	3.092	0.0496
10000	3.118	0.0236
100000	3.14752	0.00593
1000000	3.14208	0.000487



Yleinen menetelmä

Analyyttinen ratkaisu

- Olkoon $f(x)$ 1-ulotteinen todennäköisyysjakauma
- Kun $x_{\text{min}} < x < x_{\text{max}}$ on olemassa $0 < R < 1$ siten, että

$$\int_{x_{\text{min}}}^{x} f(x')\mathrm{d}x' = R \int_{x_{\text{min}}}^{x_{\text{max}}} f(x')\mathrm{d}x'$$

- Jos f:n integraali $F(x)$ tunnettu ja sillä käänteisfunktio $F^{-1}(x)$

$$x = F^{-1}(F(x_{\text{min}}) + R(F(x_{\text{max}}) - F(x_{\text{min}})))$$

missä R satunnaisluku $[0, 1[$

Yleinen menetelmä

Analyyttinen ratkaisu

- Olkoon $f(x)$ 1-ulotteinen todennäköisyysjakauma
- Kun $x_{\text{min}} < x < x_{\text{max}}$ on olemassa $0 < R < 1$ siten, että

$$\int_{x_{\text{min}}}^{x} f(x')\mathrm{d}x' = R \int_{x_{\text{min}}}^{x_{\text{max}}} f(x')\mathrm{d}x'$$

- Jos f:n integraali $F(x)$ tunnettu ja sillä käänteisfunktio $F^{-1}(x)$

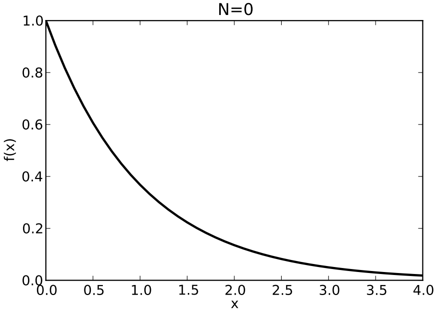
$$x = F^{-1}(F(x_{\text{min}}) + R(F(x_{\text{max}}) - F(x_{\text{min}})))$$

missä R satunnaisluku $[0, 1[$

Esimerkki: $f(x) = e^{-x}, \quad 0 < x < \infty$

- $F(x) = 1 - e^{-x}$
- $F^{-1}(x) = -\log(1 - x)$

$\Rightarrow$ $x = -\log(R)$



Yleinen menetelmä

Analyyttinen ratkaisu

- Olkoon $f(x)$ 1-ulotteinen todennäköisyysjakauma
- Kun $x_{\min} < x < x_{\max}$ on olemassa $0 < R < 1$ siten, että

$$\int_{x_{\min}}^{x} f(x')\mathrm{d}x' = R \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} f(x')\mathrm{d}x'$$

- Jos f:n integraali $F(x)$ tunnettu ja sillä käänteisfunktio $F^{-1}(x)$

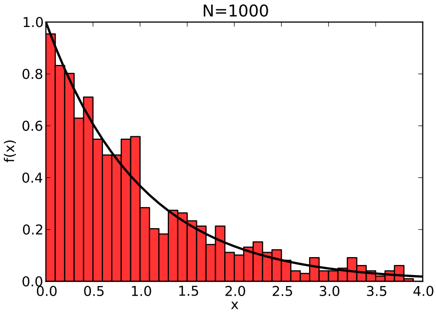
$$x = F^{-1}(F(x_{\min}) + R(F(x_{\max}) - F(x_{\min})))$$

missä R satunnaisluku $[0, 1[$

Esimerkki: $f(x) = e^{-x}, \quad 0 < x < \infty$

- $F(x) = 1 - e^{-x}$
- $F^{-1}(x) = -\log(1 - x)$

$\Rightarrow \quad x = -\log(R)$



Yleinen menetelmä

Analyyttinen ratkaisu

- Olkoon $f(x)$ 1-ulotteinen todennäköisyysjakauma
- Kun $x_{\min} < x < x_{\max}$ on olemassa $0 < R < 1$ siten, että

$$\int_{x_{\min}}^{x} f(x')\mathrm{d}x' = R \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} f(x')\mathrm{d}x'$$

- Jos f:n integraali $F(x)$ tunnettu ja sillä käänteisfunktio $F^{-1}(x)$

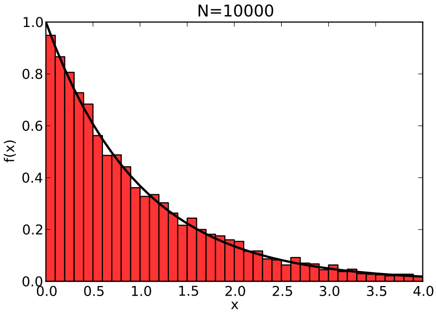
$$x = F^{-1}(F(x_{\min}) + R(F(x_{\max}) - F(x_{\min})))$$

missä R satunnaisluku $[0, 1[$

Esimerkki: $f(x) = e^{-x}, \quad 0 < x < \infty$

- $F(x) = 1 - e^{-x}$
- $F^{-1}(x) = -\log(1 - x)$

$\Rightarrow \; x = -\log(R)$



Yleinen menetelmä

Analyyttinen ratkaisu

- Olkoon $f(x)$ 1-ulotteinen todennäköisyysjakauma
- Kun $x_{\min} < x < x_{\max}$ on olemassa $0 < R < 1$ siten, että

$$\int_{x_{\min}}^{x} f(x')\mathrm{d}x' = R \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} f(x')\mathrm{d}x'$$

- Jos f:n integraali $F(x)$ tunnettu ja sillä käänteisfunktio $F^{-1}(x)$

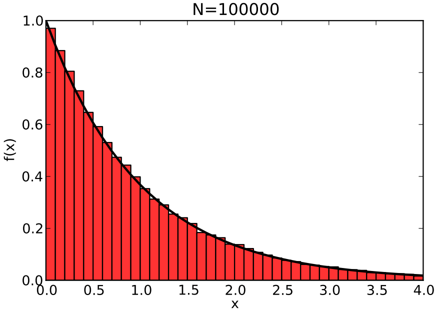
$$x = F^{-1}(F(x_{\min}) + R(F(x_{\max}) - F(x_{\min})))$$

missä R satunnaisluku $[0, 1[$

Esimerkki: $f(x) = e^{-x}, \quad 0 < x < \infty$

- $F(x) = 1 - e^{-x}$
- $F^{-1}(x) = -\log(1 - x)$

$\Rightarrow \; x = -\log(R)$



Large Hadron Collider (LHC), Suuri hadronitörmäytin

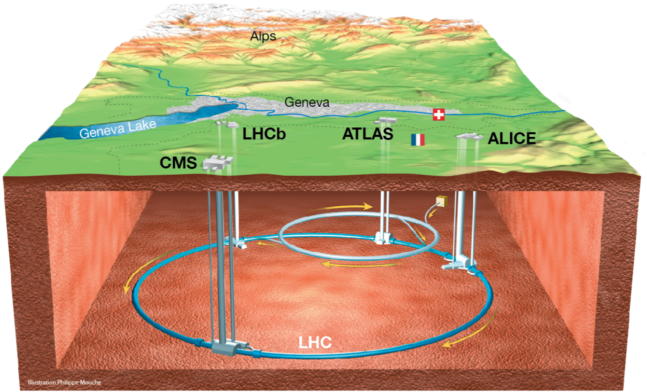
Hadronit

- Kvarkeista ja gluoneista muodostuva sidottu tila
- Ei alkeishiukkasia (toisin kuin esim. elektronit)

LHC

- Suurin hiukkaskiihdytin tähän mennessä
- Kykenee törmäyttämään protonien lisäksi myös raskaita ytimiä
- Neljä ilmaisinkoetta

[Kuva: CERN]



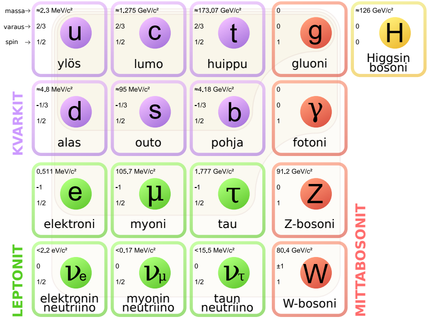
Kvanttiväridynamiikka (=Vahva vuorovaikutus)

Miksi LHC:n törmäyksissä syntyy paljon hiukkasia?

- LHC:ssä suuri törmäysenergia mahdollistaa uusien hiukkasten synnyn
- Koska kvarkkien ja gluonien välinen vuorovaikutus on vahva

Kvanttiväridynamiikka

- Kuvaa kvarkkien ja gluonien (partonien) välisiä vuorovaikutuksia
- Vahvoin tunnetuista perusvuorovaikutuksista, kymmeniä kertoja sähköistä vuorovaikutusta vahvempi

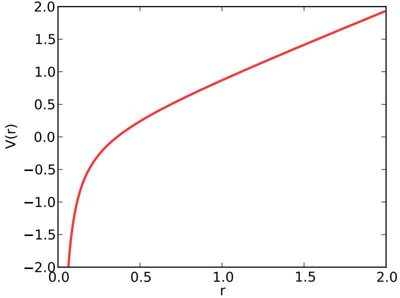


[Kuva: Wikipedia]

Värivaraus

- Kvarkeilla ”värivaraus”, kolme väriä (r, g, b) ja antivärit ($\bar{r}$, $\bar{g}$, $\bar{b}$)
- Analoginen sähkövarauksen kanssa missä vain + ja -
- Värivoiman aiheuttama potentiaali kasvaa etäisyyden funktiona
  - $\Rightarrow$ Etäisyyden kasvaessa syntyy uusia kvarkki-antikvarkki -pareja
  - $\Rightarrow$ Suoraan havaittavat (pitkäikäiset) hadronit aina värineutraaleja
  - $\Rightarrow$ Värivoima vaikuttaa vain hyvin lyhyillä etäisyyksillä

Kahden kvarkin välinen potentiaali:



Värivuorovaikutus

Gluonit

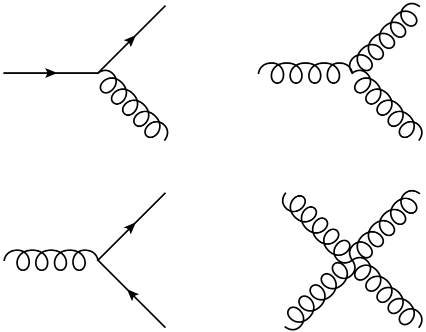
- Myös gluoneilla värivaraus (fotoneilla ei sähkövarausta)
  - $\Rightarrow$ Gluonit voivat vuorovaikuttaa toisten gluonien kanssa
  - $\Rightarrow$ Gluoneja syntyy törmäyksissä paljon

$\Rightarrow$ Tarkat teoreettiset laskut vaikeaita

Diagrammit

- Kvarkki (q): 
- Antikvarkki ($\bar{q}$): 
- Gluoni (g): 

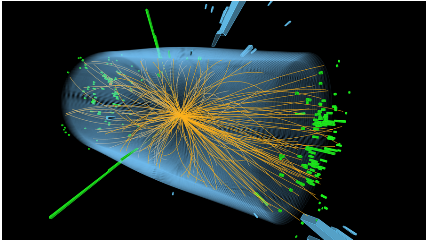
Mahdolliset vuorovaikutukset



Protoni-protoni törmäykset LHC:ssä

Protonit koostuu partoneista

- Sirontaprosessit partonien välillä
- Vahva vuorovaikutus vaikuttaa kaikkiin sirontaprosesseihin LHC:ssä, myös Higgs $\rightarrow \gamma + \gamma$



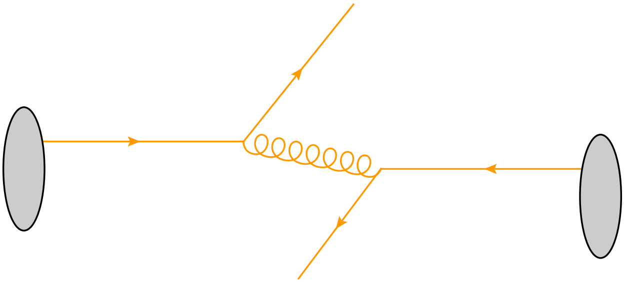
Ongelma: Pystytään laskemaan vain muutaman hiukkasen lopputilan sirontoja

Ratkaisu: Hajota ja hallitse

- Jaotellaan sirontaprosessi eri energiaskaaloilla tapahtuviin osa-alueisiin
- Simuloidaan eri osa-alueet riippumattomasti
- Mallinnetaan ne osa-alueet mitä ei pystytä laskemaan suoraan teoriasta

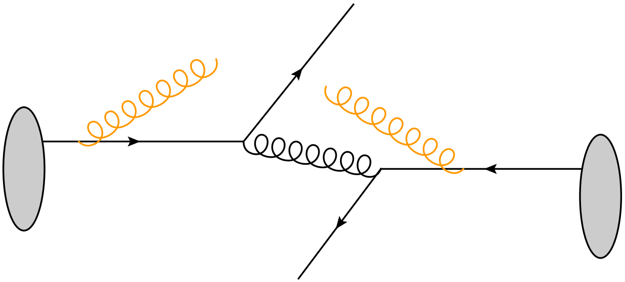
$\Rightarrow$ Monte Carlo -simulaatiot

Protoni-protoni törmäyksien simulointi



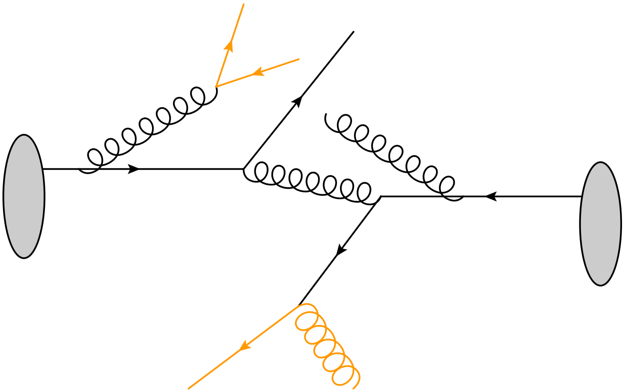
- Arvotaan kiinnostava prosessi
  - Esim. Higgs $\to \gamma + \gamma$
    (kuvassa $q + q \to q + q$)

Protoni-protoni törmäyksien simulointi



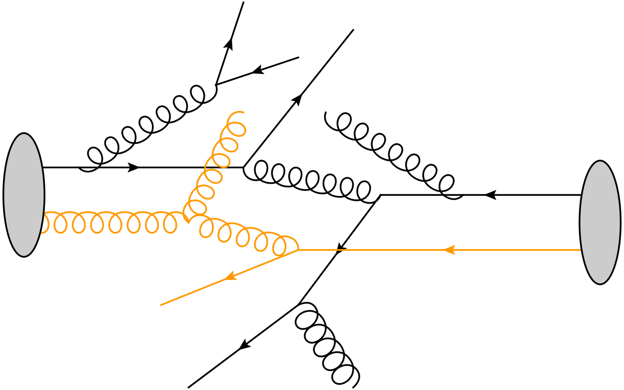
- Muodostetaan alkutilan partonien säteilemät hiukkaset

Protoni-protoni törmäyksien simulointi



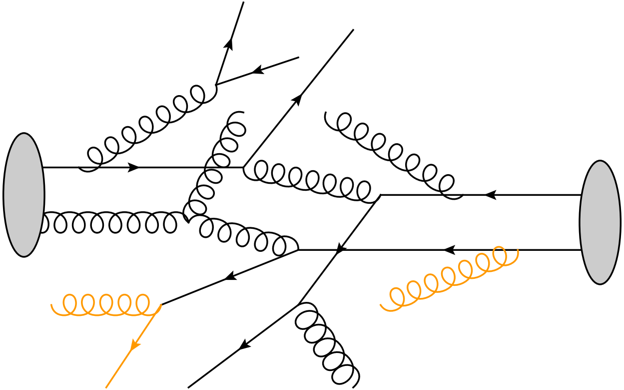
- Muodostetaan lopputilan partonien säteilemät hiukkaset
    - Sisältäen myös alkutilan partonien emissiot

Protoni-protoni törmäyksien simulointi



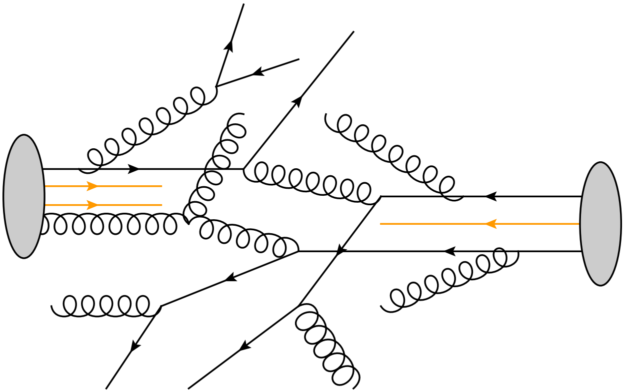
- Samassa eventissä voi olla useita partonisia vuorovaikutuksia

Protoni-protoni törmäyksien simulointi



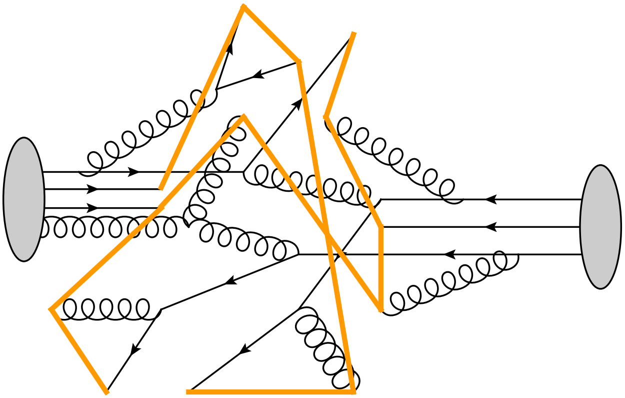
- Samassa eventissä voi olla useita partonisia vuorovaikutuksia
  - Myös emissiot näistä partoneista täytyy huomioida

Protoni-protoni törmäyksien simulointi



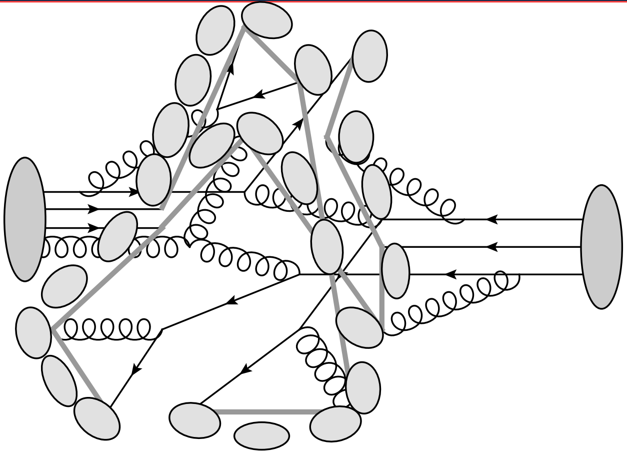
- Lisätään protonin partonit mitkä eivät ole vuorovaikuttaneet säilyttäen
  - Värivaraus
  - Liikemäärä

Protoni-protoni törmäyksien simulointi



- Yhdistetään partonit värineutraaleiksi säikeiksi

Protoni-protoni törmäyksien simulointi



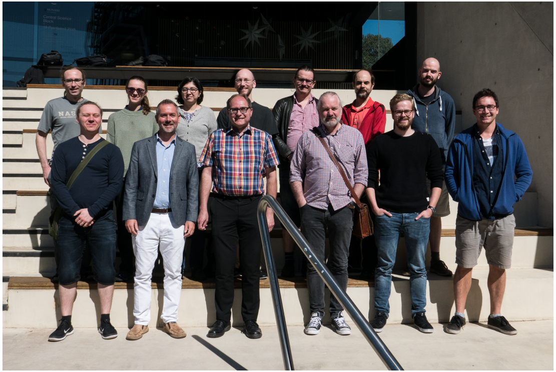
- Säikeet pirstaloituvat värineutraaleiksi hadroneiksi
- Lyhytikäiset hadronit hajoavat stabiileiksi hiukkasiksi jotka havaitaan hiukkasilmaisimissa

Pythia simulointiohjelmisto

- Yleisimmin käytetty ohjelmistopaketti LHC-törmäysten simulointiin
- Noin kymmenen hengen kansainvälinen kehittäjätiimi, jäseniä Euroopassa, Pohjois-Amerikassa, Intiassa ja Australiassa

Ohjemisto

- Koodattu `C++` kielellä
- Noin 150 000 riviä koodia
- Avoin lähdekoodi, kaikkien saatavissa
- $>$ 100 erilaista mahdollista prosessia
- Uusin version 8.243



Pythia simulointiohjelmisto

- Yleisimmin käytetty ohjelmistopaketti LHC-törmäysten simulointiin
- Noin kymmenen hengen kansainvälinen kehittäjätiimi, jäseniä Euroopassa, Pohjois-Amerikassa, Intiassa ja Australiassa

Ohjemisto

- Koodattu `C++` kielellä
- Noin 150 000 riviä koodia
- Avoin lähdekoodi, kaikkien saatavissa
- $>$ 100 erilaista mahdollista prosessia
- Uusin version 8.243

Esimerkki I: Varattujen hiukkasten lukumäärä

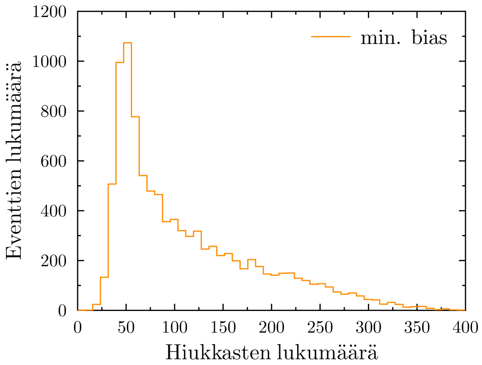
Pythia-pääohjelma:

```
#include "Pythia8/Pythia.h"

using namespace Pythia8;

int main() {
  // Generator. Process selection. LHC initialization. Histogram.
  Pythia pythia;
  pythia.readString("Beams:eCM = 13000.");
  pythia.readString("SoftQCD:nonDiffractive = on");
  //pythia.readString("HiggsSM:all = on");
  pythia.init();
  Hist mult("charged multiplicity", 50, -0.5, 399.5);

  int nEvent = 10000;
  // Begin event loop. Generate event. Skip if error. List first one.
  for (int iEvent = 0; iEvent < nEvent; ++iEvent) {
    if (!pythia.next()) continue;
    // Find number of all final charged particles and fill histogram.
    int nCharged = 0;
    for (int i = 0; i < pythia.event.size(); ++i)
      if (pythia.event[i].isFinal() && pythia.event[i].isCharged())
        ++nCharged;
    mult.fill( nCharged );
  // End of event loop. Statistics. Histogram. Done.
  }
  pythia.stat();
  mult.table("plots/chargedMB.dat");
  return 0;
}
```



Esimerkki I: Varattujen hiukkasten lukumäärä

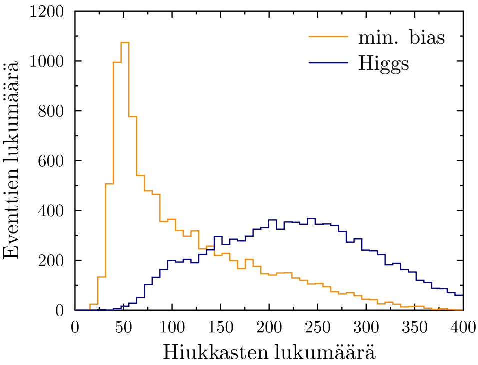
Pythia-pääohjelma:

```
#include "Pythia8/Pythia.h"

using namespace Pythia8;

int main() {
  // Generator. Process selection. LHC initialization. Histogram.
  Pythia pythia;
  pythia.readString("Beams:eCM = 13000.");
  //pythia.readString("SoftQCD:nonDiffractive = on");
  pythia.readString("HiggsSM:all = on");
  pythia.init();
  Hist mult("charged multiplicity", 50, -0.5, 399.5);

  int nEvent = 10000;
  // Begin event loop. Generate event. Skip if error. List first one.
  for (int iEvent = 0; iEvent < nEvent; ++iEvent) {
    if (!pythia.next()) continue;
    // Find number of all final charged particles and fill histogram.
    int nCharged = 0;
    for (int i = 0; i < pythia.event.size(); ++i)
      if (pythia.event[i].isFinal() && pythia.event[i].isCharged())
        ++nCharged;
    mult.fill( nCharged );
  // End of event loop. Statistics. Histogram. Done.
  }
  pythia.stat();
  mult.table("plots/chargedHiggs.dat");
  return 0;
}
```

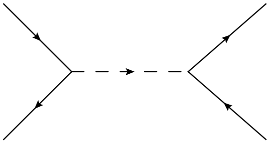


- Enemmän varattuja hiukkasia kun tuotetaan Higgsin bosoni kuin keskimääräisissä törmäyksissä (min. bias)

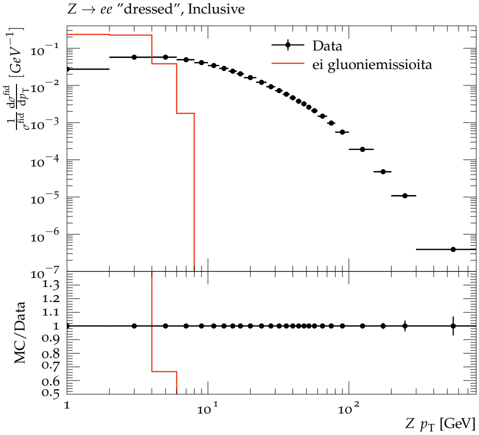
Esimerkki II: Z-bosonin poikittaisliikemäärä

Tarkastellaan prosessia:

$$q + q \to Z \to e^+e^-$$



- Alkutilan kvarkeilla ei poikittaisliikemäärää
  $\Rightarrow$ Z-bosonin poikittaisliikemärä ≈ 0

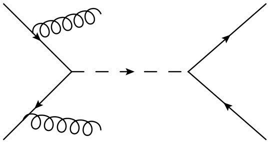


[Data: ATLAS, JHEP 1409 (2014) 112]

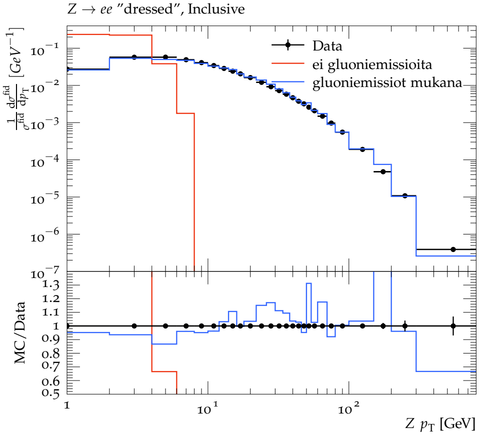
Esimerkki II: Z-bosonin poikittaisliikemäärä

Tarkastellaan prosessia:

$$q + q \to Z \to e^+ e^-$$



- Alkutilan kvarkeilla ei poikittaisliikemäärää
  $\Rightarrow$ Z-bosonin poikittaisliikemärä ≈ 0
- Alkutilan kvarkki säteilee gluonin
  $\Rightarrow$ Z-bosonin poikittaisliikemärä > 0
- Hyvä yhteensopivuus datan kanssa



[Data: ATLAS, JHEP 1409 (2014) 112]

Yhteenveto

Hiukkastörmäykset LHC:ssä

- Tuottaa satoja hiukkasia
  - Koska vuorovaikutus on vahva
  - Koska törmäysenergia on suuri

Törmäyksiä voidaan simuloida Monte Carlo -menetelmillä

- Erotellaan törmäystapahtumien vaiheet eri osa-alueisiin
- Pystytään simuloimaan yksittäisiä törmäyksiä

⇒ Mahdollistaa suoran vertailun kokeellisten havaintojen kanssa