

Entwicklung eines vollrelativistischen dreidimensionalen PiC-Codes

Thomas Burkart

Uni Würzburg, Insitut für theoretische Physik und Astrophysik

10.10.2007



Übersicht

1 Der Particle-in-Cell-Code ACRONYM

- Charge Assignment
- Maxwellgleichungen
- Lorentzkraft
- Force Interpolation

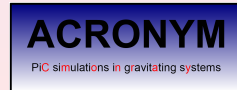
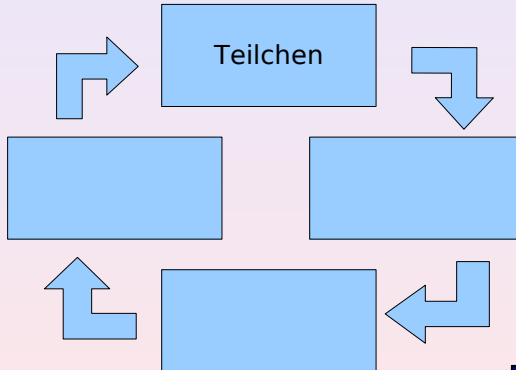
2 Simulation

- Weibel-Instabilität
- Simulationsaufbau
- Ergebnisse der Simulation

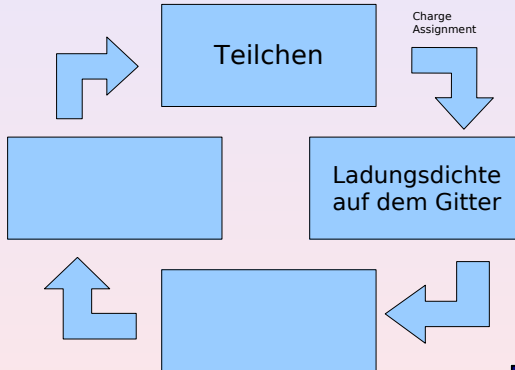
3 Zusammenfassung und Ausblick



Ein PiC-Code funktioniert folgendermaßen:



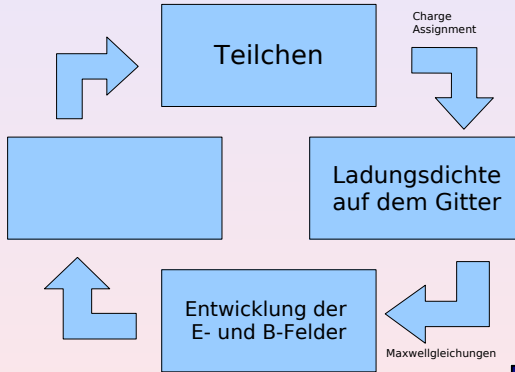
Ein PiC-Code funktioniert folgendermaßen:



ACRONYM

PiC simulations in gravitating systems

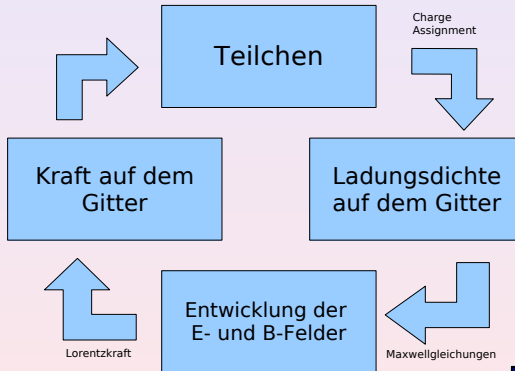
Ein PiC-Code funktioniert folgendermaßen:



ACRONYM

PiC simulations in gravitating systems

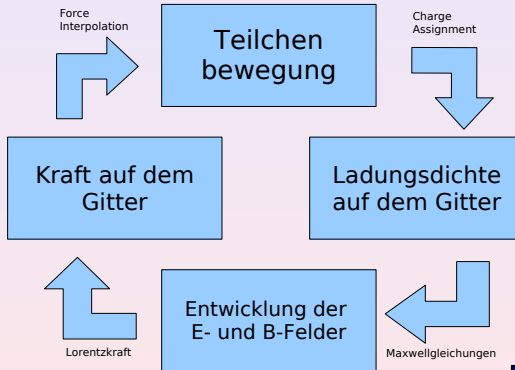
Ein PiC-Code funktioniert folgendermaßen:



ACRONYM

PiC simulations in gravitating systems

Ein PiC-Code funktioniert folgendermaßen:



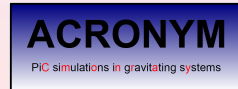
ACRONYM

PiC simulations in gravitating systems

Charge Assignment

Um aus der Teilchenverteilung die Ladungsdichte auf dem Gitter zu erhalten, müssen einige Bedingungen erfüllt werden:

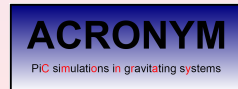
- keine sprunghafte Änderung der Kräfte



Charge Assignment

Um aus der Teilchenverteilung die Ladungsdichte auf dem Gitter zu erhalten, müssen einige Bedingungen erfüllt werden:

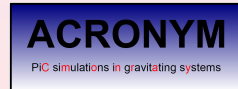
- keine sprunghafte Änderung der Kräfte
- keine Selbstkräfte



Charge Assignment

Um aus der Teilchenverteilung die Ladungsdichte auf dem Gitter zu erhalten, müssen einige Bedingungen erfüllt werden:

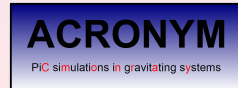
- keine sprunghafte Änderung der Kräfte
- keine Selbstkräfte
- actio = reactio



Charge Assignment

Um aus der Teilchenverteilung die Ladungsdichte auf dem Gitter zu erhalten, müssen einige Bedingungen erfüllt werden:

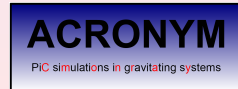
- keine sprunghafte Änderung der Kräfte
- keine Selbstkräfte
- $\text{actio} = \text{reactio}$
- Erhaltung des Gesamtimpulses



Charge Assignment

Um aus der Teilchenverteilung die Ladungsdichte auf dem Gitter zu erhalten, müssen einige Bedingungen erfüllt werden:

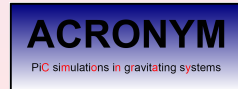
- keine sprunghafte Änderung der Kräfte
- keine Selbstkräfte
- actio = reactio
- Erhaltung des Gesamtimpulses
- $\Rightarrow$ **T**riangular **S**haped **C**loud



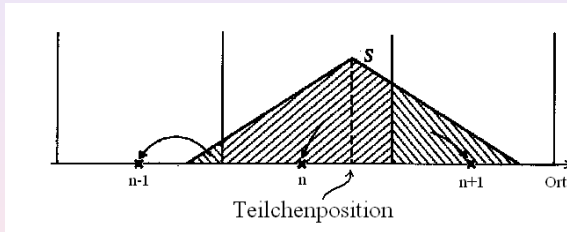
Charge Assignment

Um aus der Teilchenverteilung die Ladungsdichte auf dem Gitter zu erhalten, müssen einige Bedingungen erfüllt werden:

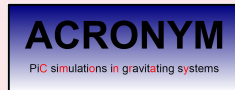
- keine sprunghafte Änderung der Kräfte
- keine Selbstkräfte
- actio = reactio
- Erhaltung des Gesamtimpulses
- $\Rightarrow$ **T**riangular **S**haped **C**loud



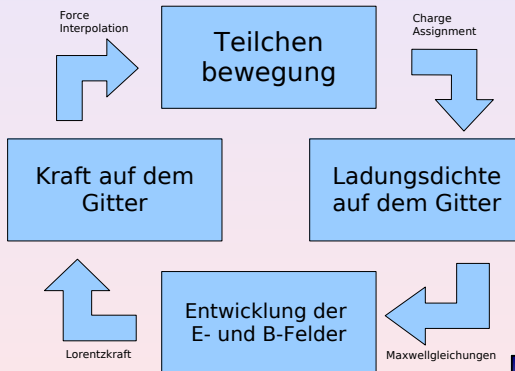
Charge Assignment



die "Form" der Teilchen beim Triangular Shaped Cloud-Verfahren



PiC-Simulation



ACRONYM

PiC simulations in gravitating systems

Entwickeln der E- und B-Felder

Maxwell-Gleichungen

$$\nabla \vec{E} = 4\pi\rho$$

$$\nabla \vec{B} = 0$$

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \nabla \times \vec{E} = 0$$

$$-\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \nabla \times \vec{B} = \frac{4\pi}{c} \vec{j}$$

Entwickeln der E- und B-Felder

Maxwell-Gleichungen

$$\nabla \vec{E} = 4\pi\rho$$

$$\nabla \vec{B} = 0$$

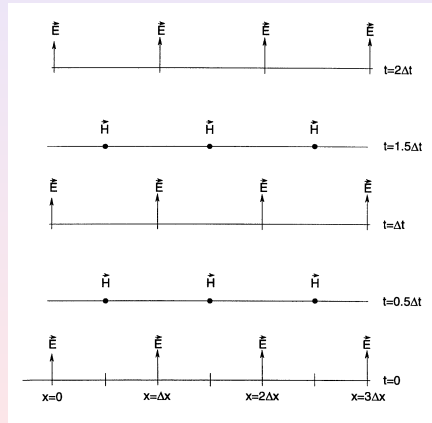
$$\begin{aligned}\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \nabla \times \vec{E} &= 0 \\ -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \nabla \times \vec{B} &= \frac{4\pi}{c} \vec{j}\end{aligned}$$

Entwickeln der E- und B-Felder

Leapfrog-Verfahren
in der Zeit

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \nabla \times \vec{E} = 0$$

$$-\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \nabla \times \vec{B} = \frac{4\pi}{c} \vec{j}$$

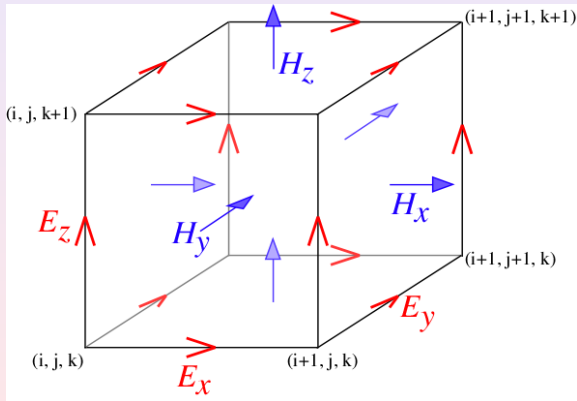


PIC simulations in gravitating systems

NYM

Entwickeln der E- und B-Felder

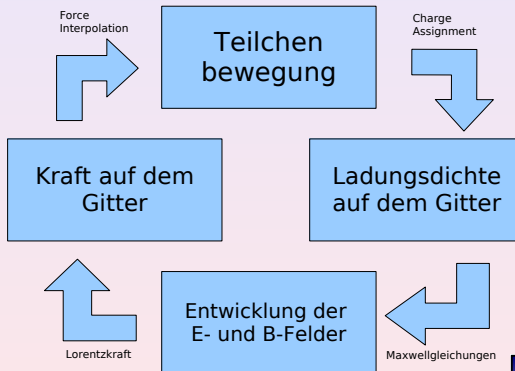
Yee-Gitter im Ort:



CRONYM

PiC simulations in gravitating systems

PiC-Simulation



ACRONYM

PiC simulations in gravitating systems

Lorentzkraft

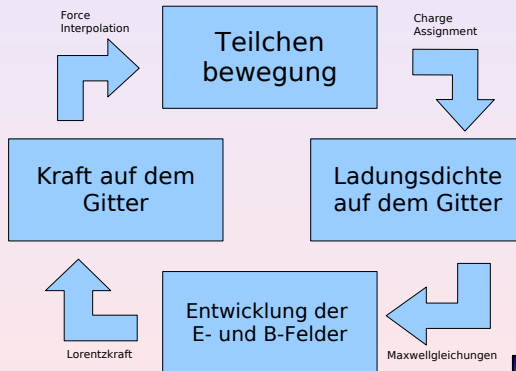
Lorentzkraft

$$\vec{F} = q \left(\vec{E} + \frac{\vec{v}}{c} \times \vec{B} \right)$$

ACRONYM

PiC simulations in gravitating systems

PiC-Simulation



ACRONYM

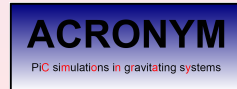
PiC simulations in gravitating systems

Force Interpolation

Kraft $\vec{F}$ an den Gitterpunkten

↓ Force Interpolation (auch hier wieder TSC)

Kraft $\vec{F}$ an den Teilchenpositionen

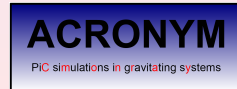


Force Interpolation

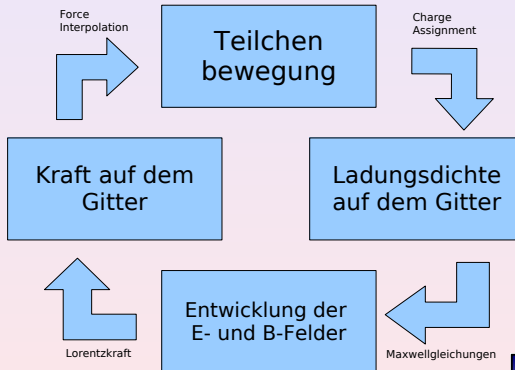
Kraft $\vec{F}$ an den Gitterpunkten

⇓ Force Interpolation (auch hier wieder TSC)

Kraft $\vec{F}$ an den Teilchenpositionen



PiC-Simulation



ACRONYM

PiC simulations in gravitating systems

Übersicht

1 Der Particle-in-Cell-Code ACRONYM

- Charge Assignment
- Maxwellgleichungen
- Lorentzkraft
- Force Interpolation

2 Simulation

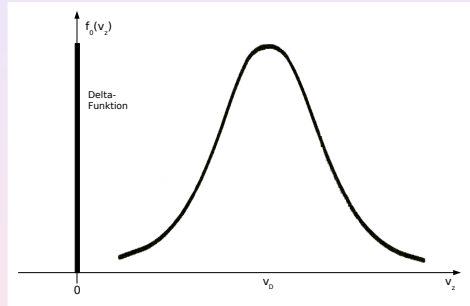
- Weibel-Instabilität
- Simulationsaufbau
- Ergebnisse der Simulation

3 Zusammenfassung und Ausblick



Weibel-Instabilität

Eine mögliche
Verteilungsfunktion der
Teilchen zur
Triggerung einer
Weibel-Instabilität
lautet



$$f_0(\vec{v}) = \frac{1}{2} \left(n_0 \cdot \delta(v_x) \delta(v_y) \delta(v_z) + n_{jet} \cdot e^{\frac{m_e v^2}{2k_B T}} \right)$$



Setup

- 25 Millionen Makroteilchen, jedes repräsentiert 10^{14} reale Teilchen (Elektronen, Protonen, Positronen, ...)
- $m_p/m_e \approx 1 - 20$
(mit echter Ratio: statischer Protonenhintergrund)



Setup

- 25 Millionen Makroteilchen, jedes repräsentiert 10^{14} reale Teilchen (Elektronen, Protonen, Positronen, ...)
- $m_p/m_e \approx 1 - 20$
(mit echter Ratio: statischer Protonenhintergrund)
- Driftgeschwindigkeit des Jets $v_D \approx 0.95 \cdot c$



Setup

- 25 Millionen Makroteilchen, jedes repräsentiert 10^{14} reale Teilchen (Elektronen, Protonen, Positronen, ...)
- $m_p/m_e \approx 1 - 20$
(mit echter Ratio: statischer Protonenhintergrund)
- Driftgeschwindigkeit des Jets $v_D \approx 0.95 \cdot c$
- thermische Geschwindigkeit der Teilchen $v_{th} \approx 0.10 \cdot c$

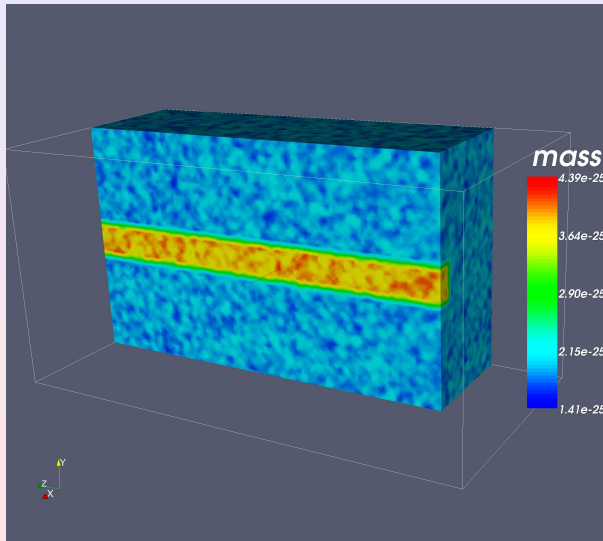


Setup

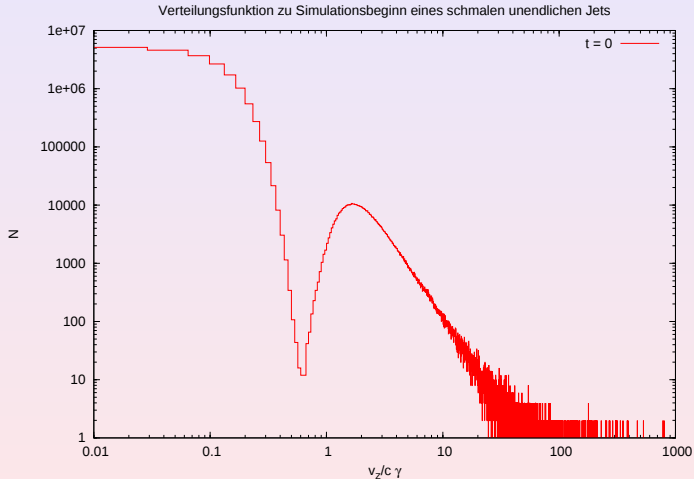
- 25 Millionen Makroteilchen, jedes repräsentiert 10^{14} reale Teilchen (Elektronen, Protonen, Positronen, ...)
- $m_p/m_e \approx 1 - 20$
(mit echter Ratio: statischer Protonenhintergrund)
- Driftgeschwindigkeit des Jets $v_D \approx 0.95 \cdot c$
- thermische Geschwindigkeit der Teilchen $v_{th} \approx 0.10 \cdot c$



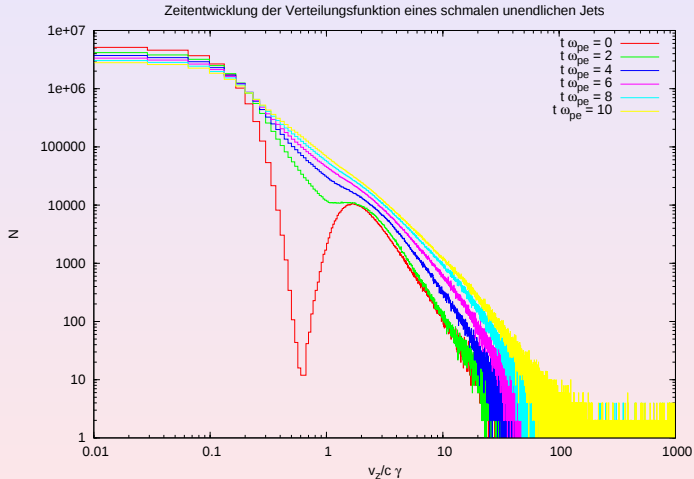
Setup



Setup

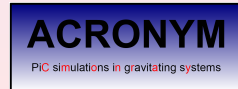


Ergebnisse



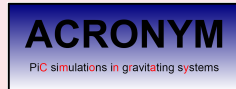
Zusammenfassung

- vollrelativistischer 3D PiC-Code
 - Triangular Shaped Cloud



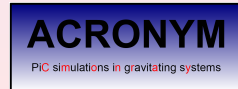
Zusammenfassung

- vollrelativistischer 3D PiC-Code
 - Triangular Shaped Cloud
 - Leapfrog-Verfahren



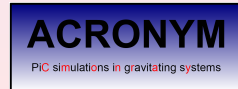
Zusammenfassung

- vollrelativistischer 3D PiC-Code
 - Triangular Shaped Cloud
 - Leapfrog-Verfahren
 - Yee-Gitter



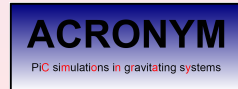
Zusammenfassung

- vollrelativistischer 3D PiC-Code
 - Triangular Shaped Cloud
 - Leapfrog-Verfahren
 - Yee-Gitter
- erste Test vielversprechend



Zusammenfassung

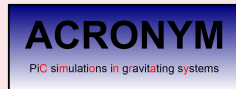
- vollrelativistischer 3D PiC-Code
 - Triangular Shaped Cloud
 - Leapfrog-Verfahren
 - Yee-Gitter
- erste Test vielversprechend



Plan für die Zukunft

- Weiterentwicklung der Performance
- Implementierung einer Allgemeinrelativistischen Formulierung der Maxwellgleichungen

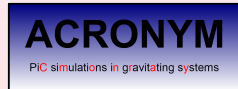
$$\begin{aligned}\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \nabla \times \vec{E} &= 0 \\ -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \nabla \times \vec{B} &= \frac{4\pi}{c} \vec{j}\end{aligned}$$



Plan für die Zukunft

- Weiterentwicklung der Performance
- Implementierung einer Allgemeinrelativistischen Formulierung der Maxwellgleichungen

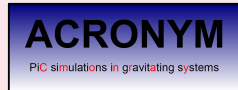
$$\begin{aligned}\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \nabla \times \vec{E} &= 0 \\ -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \nabla \times \vec{B} &= \frac{4\pi}{c} \vec{j}\end{aligned}$$



Plan für die Zukunft

- Weiterentwicklung der Performance
- Implementierung einer Allgemeinrelativistischen Formulierung der Maxwellgleichungen

$$\begin{aligned}\frac{1}{\sqrt{\gamma}c} \frac{\partial \gamma \mathbf{B}}{\partial t} + \nabla \times (\alpha \mathbf{E} + \beta \times \mathbf{B}) &= 0 \\ -\frac{1}{\sqrt{\gamma}c} \frac{\partial \gamma \mathbf{E}}{\partial t} + \nabla \times (\alpha \mathbf{B} + \beta \times \mathbf{E}) &= \frac{4\pi\alpha}{c} \mathbf{J}\end{aligned}$$



Danke für Eure Aufmerksamkeit

ACRONYM

PiC simulations in gravitating systems

