

Da Teoria Quântica de Campo às Supercordas

Filipe Moura

Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas

Departamento de Física - Universidade de Coimbra

Teorias quânticas de campo

- Interações eletromagnéticas, nucleares fracas e fortes baseadas em **teorias de Yang-Mills**: teorias quânticas de campo com uma simetria contínua, descritas por **partículas de spin 1**.
- Interações eletrofracas: $SU(2) \otimes U(1)$ (Glashow, Salam e Weinberg).
- Interações nucleares fortes: $SU(3)$ (Gell-Mann).

Tipos espertos...



Dualidade

- Dualidade: quando duas teorias físicas diferentes são equivalentes de uma forma não trivial.
- Equações de Maxwell no vácuo: invariantes sobre $\mathbf{E} \rightarrow \mathbf{B}$, $\mathbf{B} \rightarrow -\frac{1}{c^2}\mathbf{E}$;
- Tensor eletromagnético dual: $*F^{\mu\nu} = \frac{1}{2}\epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} F_{\rho\sigma}$
- $F_{\mu\nu} \leftrightarrow *F_{\mu\nu}$ (dualidade eletromagnética).

Teoria das perturbações

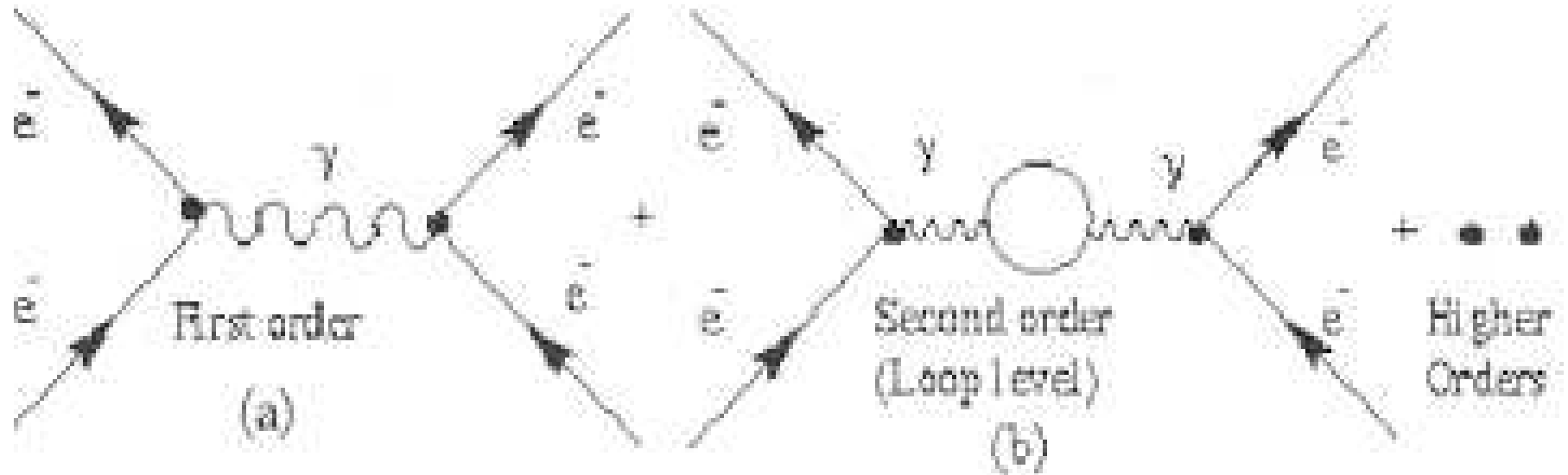
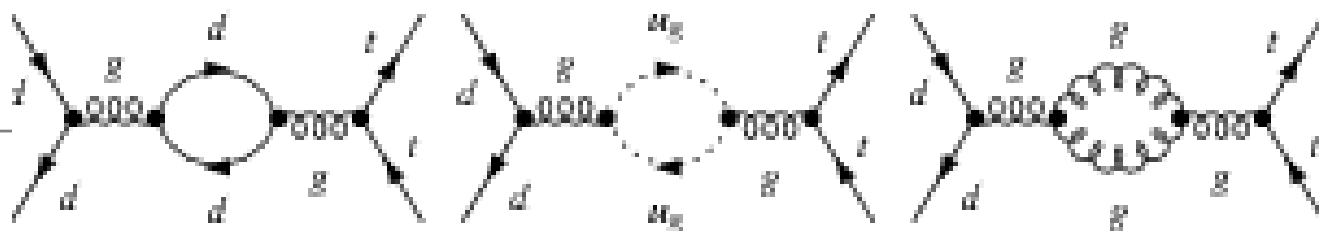
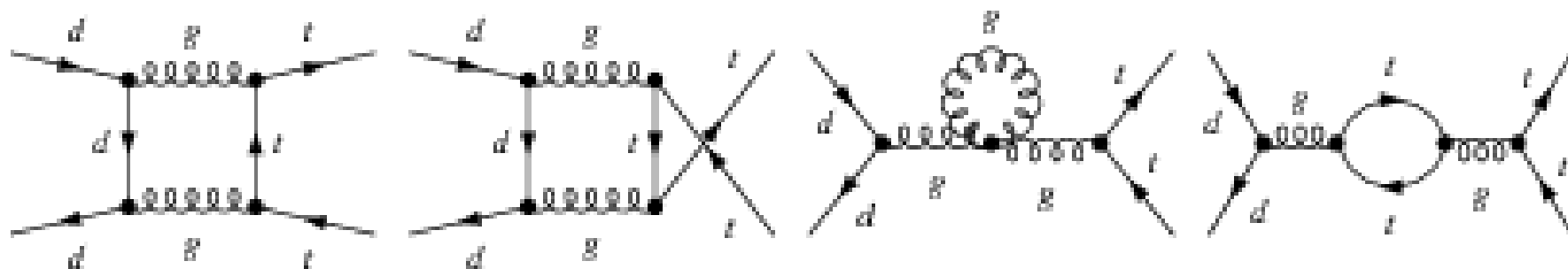
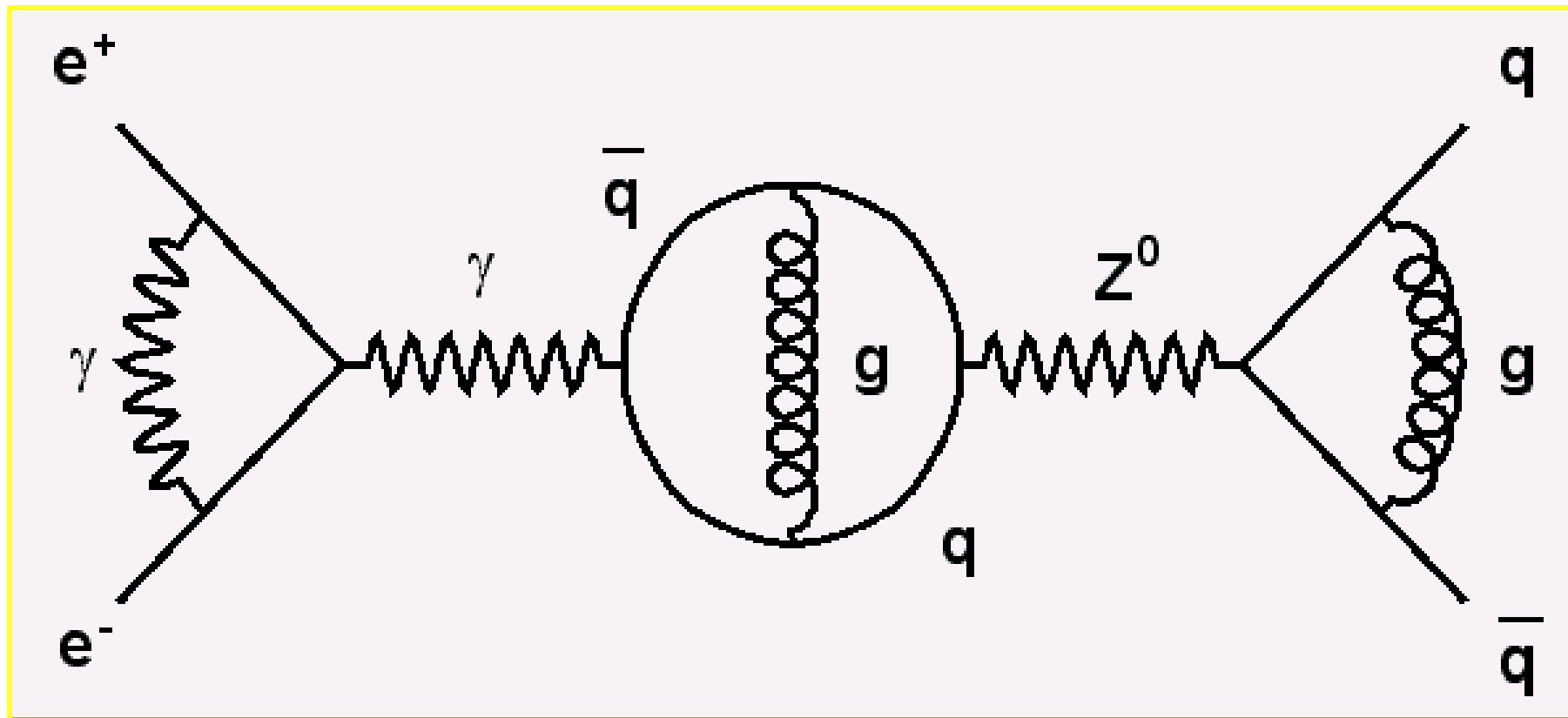


Fig. 1 Electron-electron scattering through a photon exchange.

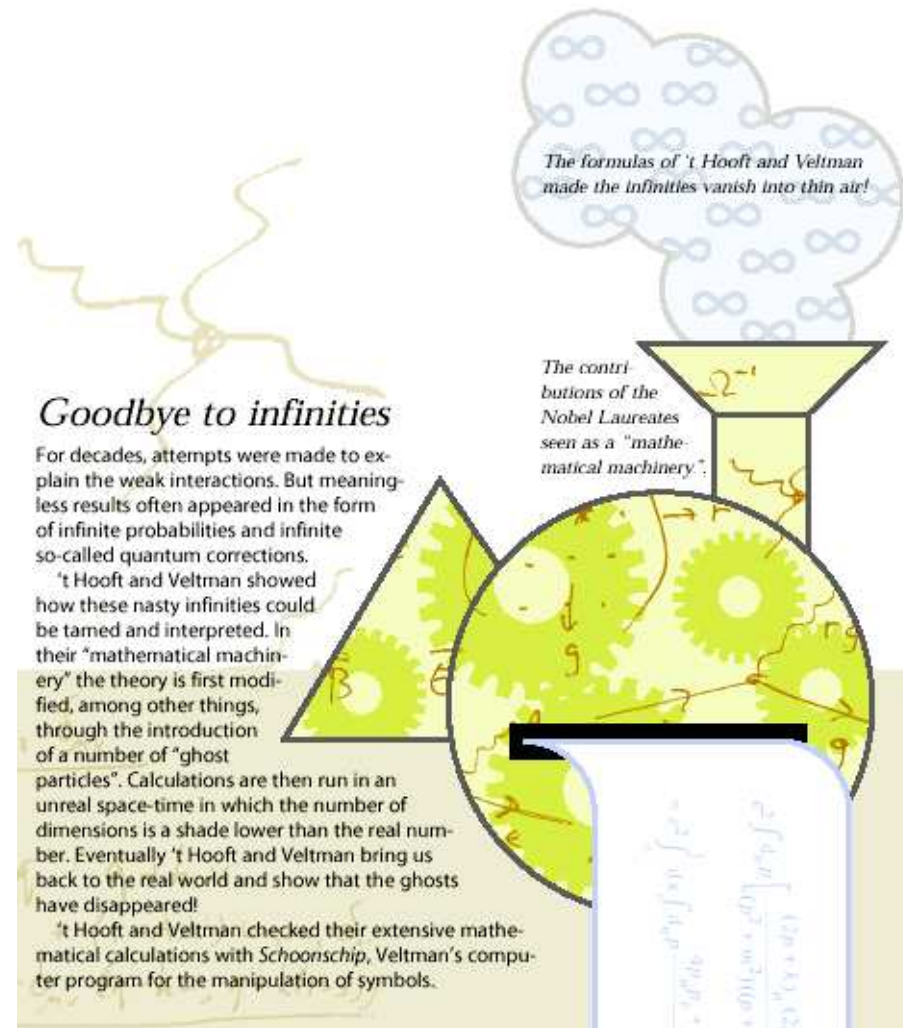
Ordens superiores...



...e ainda superiores (exemplo)



Surgeon infinitos!



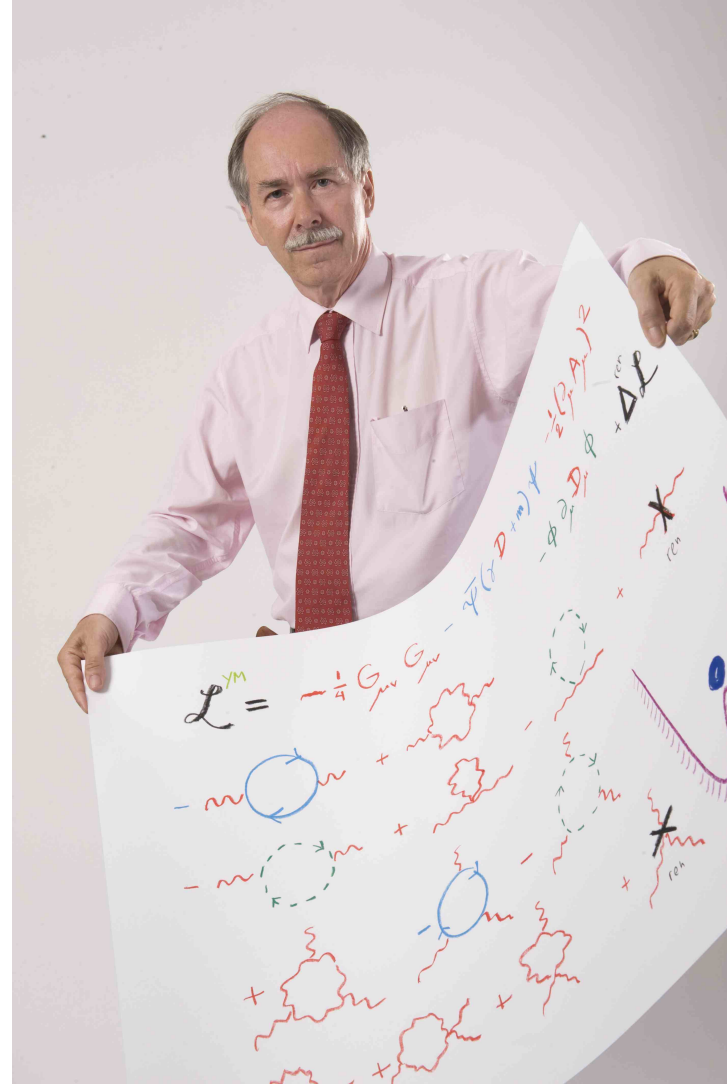
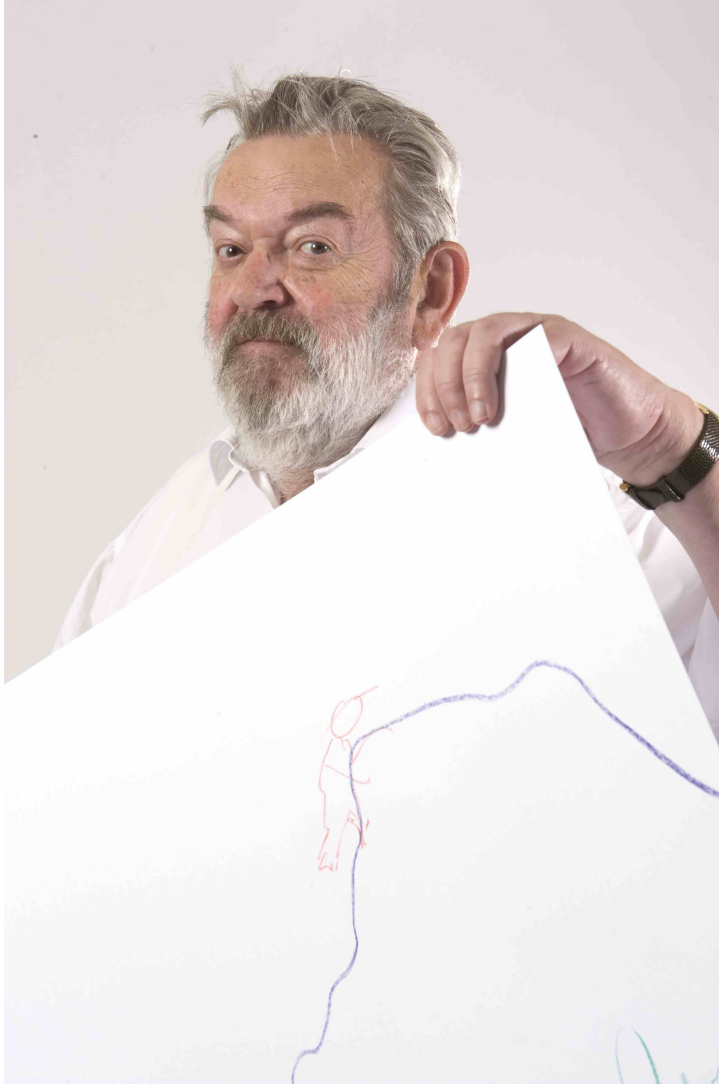
Renormalizabilidade

- Solução para os infinitos: redefinir os parâmetros físicos da teoria (massas, constante de acoplamento, etc.);
- Teorias renormalizáveis: o número de diagramas divergentes não é superior ao número de parâmetros da teoria - renormalização é consistente, sem introduzir parâmetros novos a cada ordem;
- Relacionado com as dimensões físicas das constantes de acoplamento.
- As teorias de Yang-Mills são renormalizáveis!

Anomalias

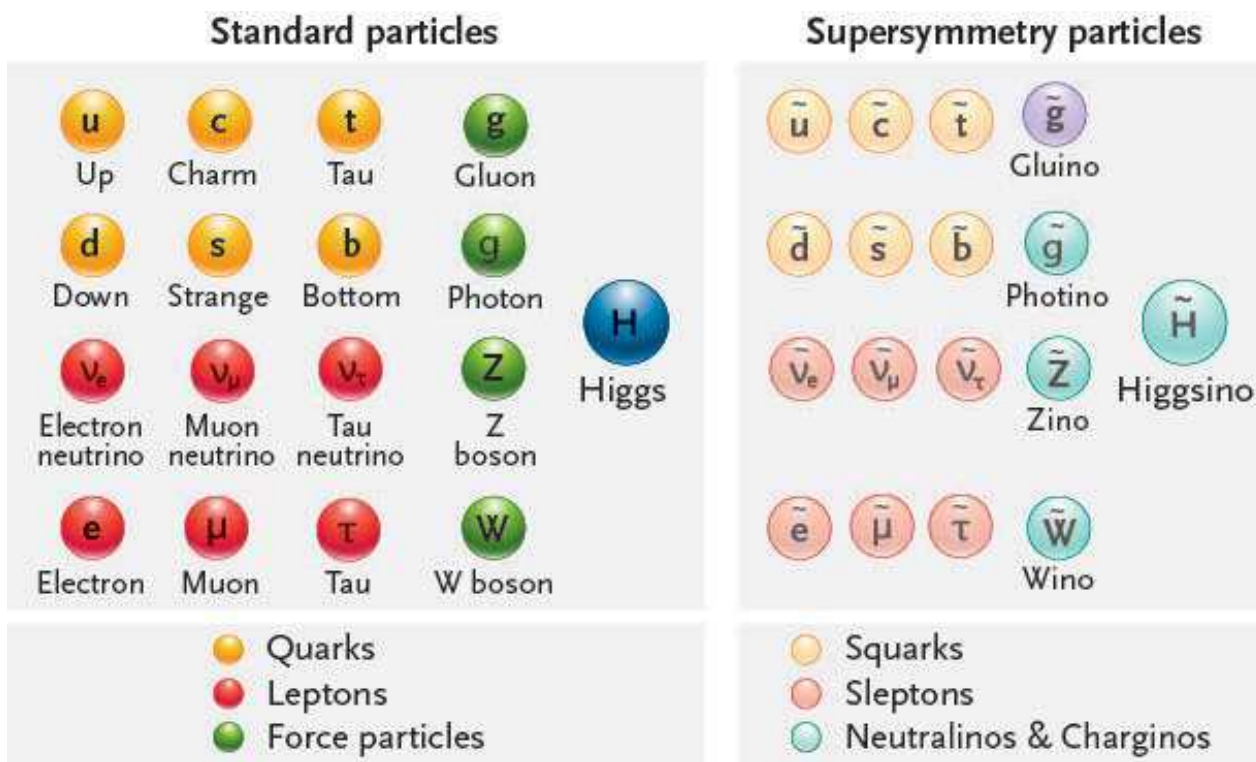
- Simetrias clássicas não preservadas na teoria quântica;
- Anomalias em teorias de gauge destroem renormalizabilidade e/ou unitariedade.
- Cancelamento de anomalias necessário para eliminar graus de liberdade não físicos removidos pela simetria de gauge.
- Anomalias surgem associadas a diagramas de Feynman em loops com **fermiões quirais** externos (**invariância da medida** em integrais de caminho).
- O Modelo Padrão é livre de anomalias!
(Para cada geração, $\sum Q = -1 + 3 \times \left(\frac{2}{3} - \frac{1}{3}\right) = 0.$)
- Teorias para além do MP: cancelamento de anomalias introduz constrangimentos (conteúdo de partículas, grupo de gauge...).

Tipos espertos...



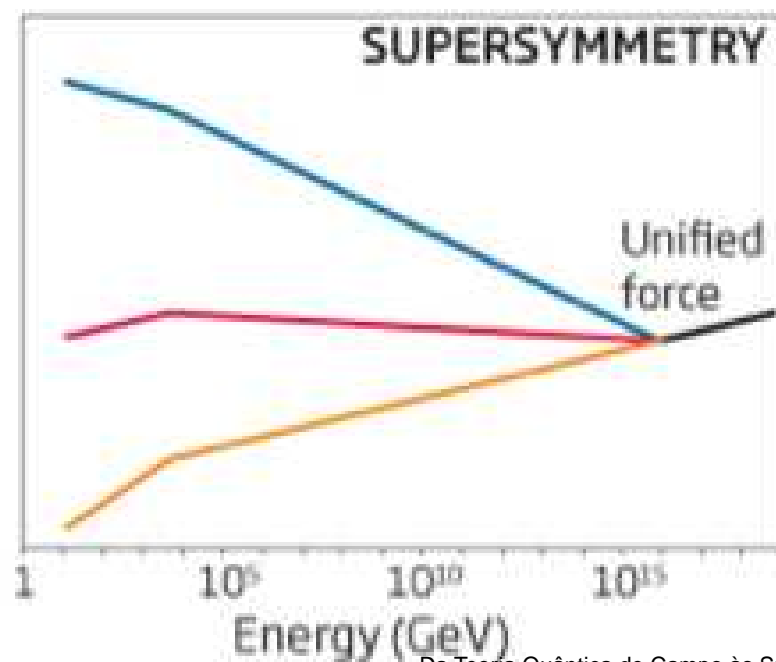
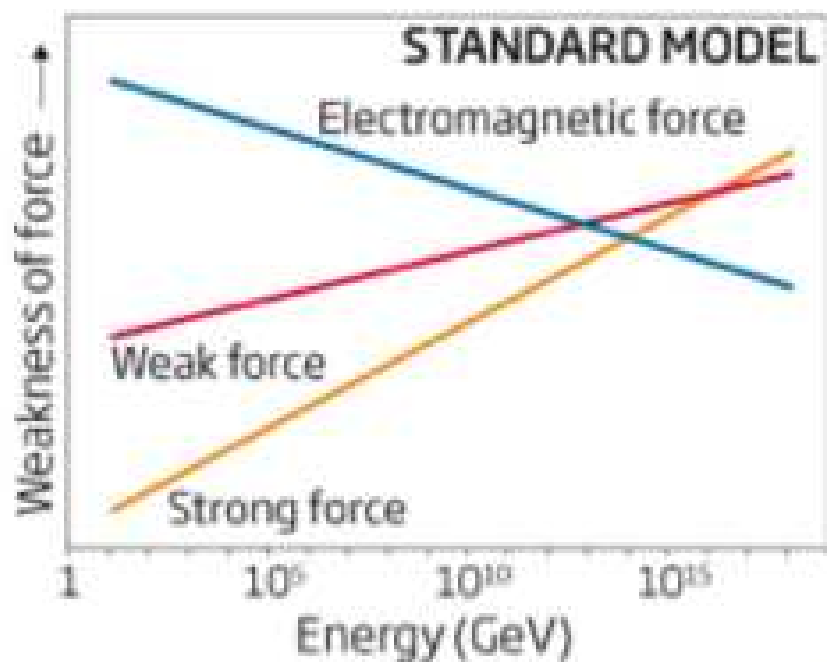
Supersimetria

- Simetria no espaço-tempo em que cada partícula tem um parceiro supersimétrico de spin diferente.
- Bosões \leftrightarrow fermiões.



Motivações teóricas para a supersimetria

- Melhor comportamento quântico a muito altas energias (problema da hierarquia);
- Parceiros supersimétricos candidatos a matéria escura;
- Unificação das constantes de acoplamento à **escala de grande unificação**: 10^{16} GeV ($1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$).



Gravidade

- Não há partículas neutras (todas sentem os efeitos desta interação);
- É uma interação fundamental;
- Descrita classicamente pela Teoria da Relatividade Geral de Einstein;
- Descrita enquanto teoria de campo por uma partícula de spin 2 (o gravitão);
- Como será a sua descrição quântica?

Gravitação quântica

- **Comprimento de Planck:** $\ell_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = 1,6 \times 10^{-35} \text{m};$
- **Massa de Planck:**
 $M_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 2,18 \times 10^8 \text{kg} = 1,22 \times 10^{19} \text{GeV}/c^2;$
- (Só para comparação, a energia do LHC é cerca de 14000 GeV.)
- Para tornar todos os diagramas de Feynman de uma teoria de gravidade finitos, teríamos de introduzir um **número infinito** de parâmetros (constantes de acoplamento);
- A gravidade não é renormalizável! (Tem a ver com as dimensões físicas da constante de Newton.)
- (Fim dos factos incontornáveis...)

Supergravidade

- Extensão supersimétrica da Teoria da Relatividade Geral;
- O gravitão tem um (ou mais) parceiro supersimétrico de spin $3/2$ (o gravitino);
- Descritas por um número inteiro \mathcal{N} (número de supersimetrias = número de parceiros) em diversas dimensões;
- Tem melhor comportamento quântico que a gravitação não supersimétrica, mas ainda não é renormalizável.

Tipos espertos...



Supergravidade em Stony Brook



Supercordas

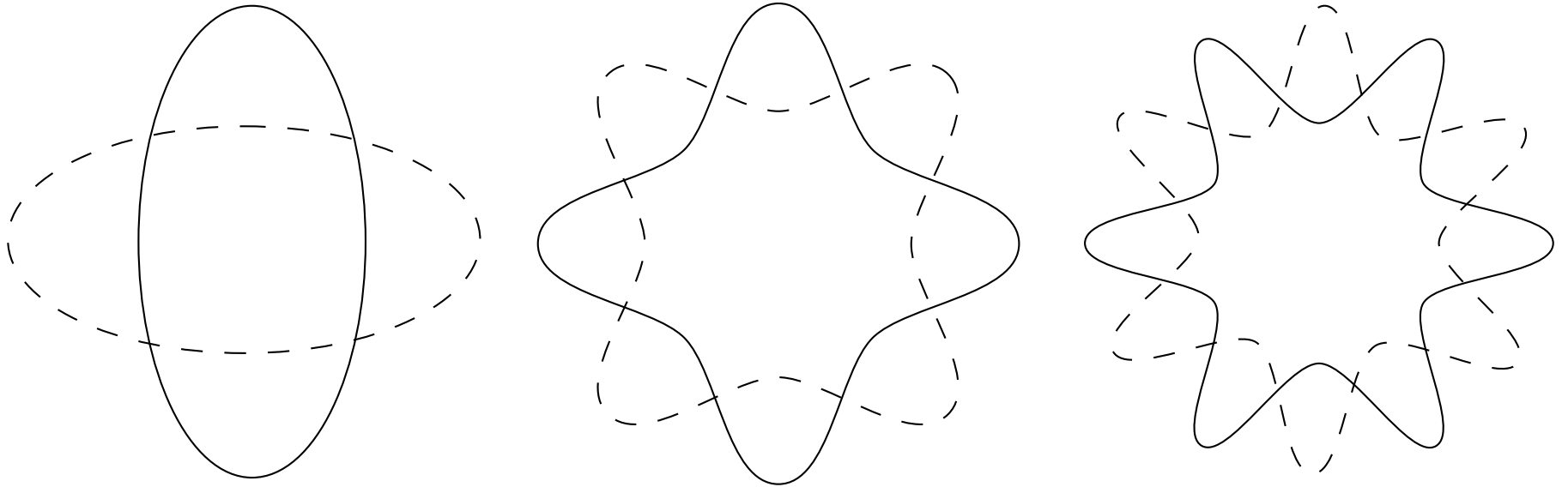


Fig. 1.1. Different particles are different vibrational modes of a string.

Interações entre supercordas

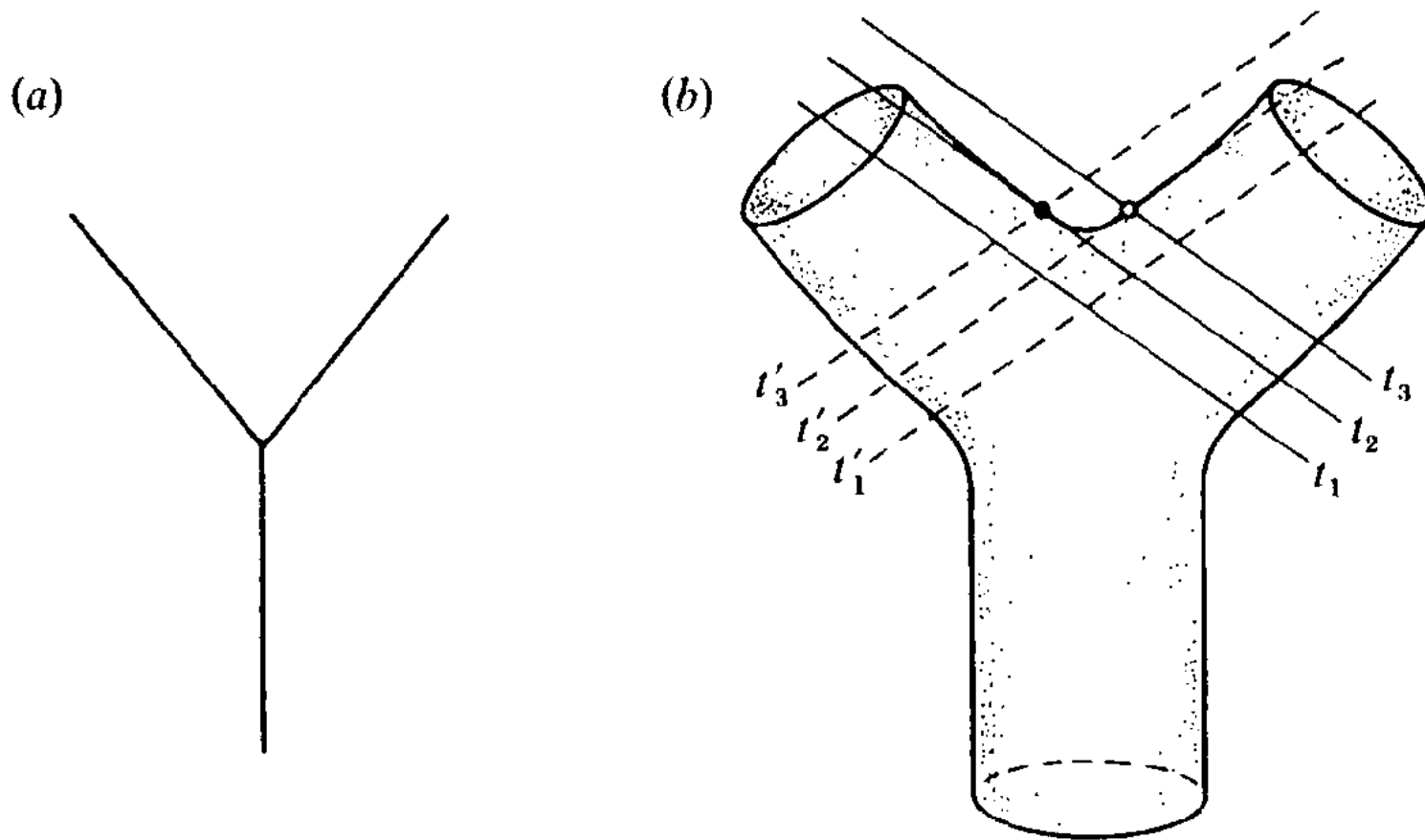


Figure 1.6. Interaction vertices in field theory and in string theory: in (a) a point particle splits into two; in (b) a closed string splits into two. In (b) the surfaces of constant time in two different Lorentz frames 1 and 2 are indicated with solid and dashed lines respectively.

Diagramas de Feynman em supercordas

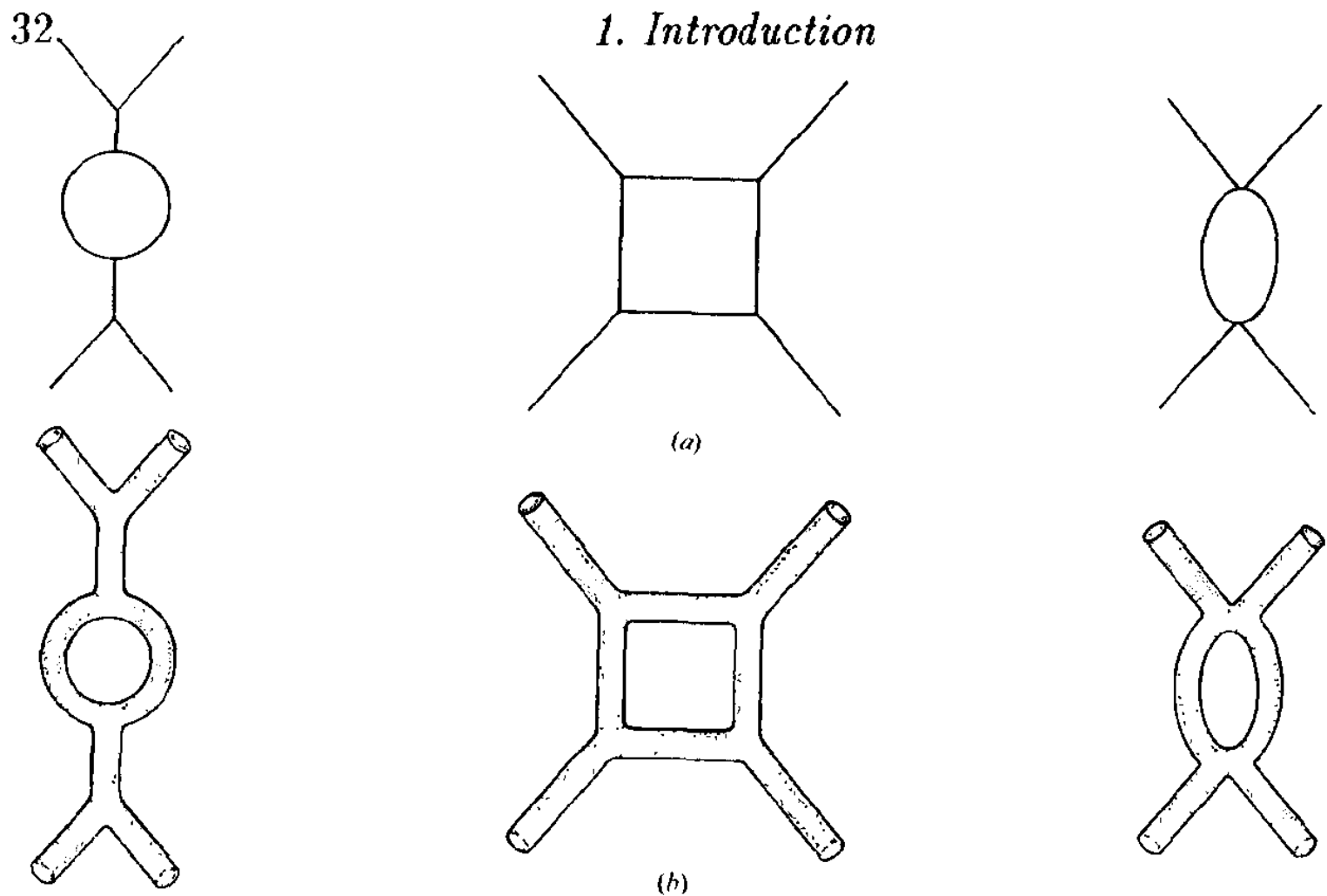


Figure 1.9. Several distinct field-theory diagrams may become isomorphic as string diagrams. In (a) we show several Feynman diagrams that in field theory represent one-loop corrections to a four-particle amplitude; in (b) we show the corresponding

Diagramas de Feynman em supercordas

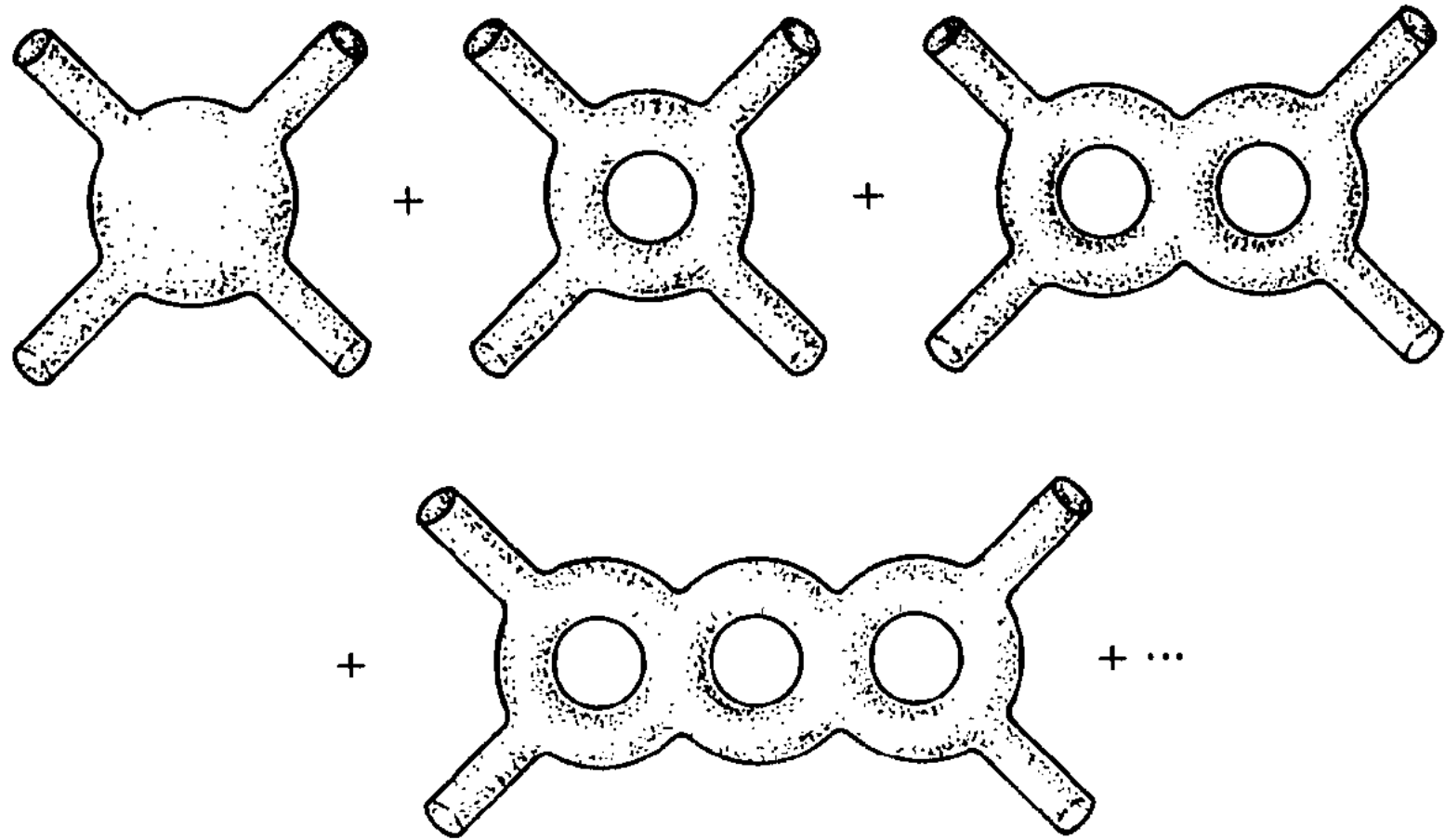


Figure 1.8. Here we sketch *all* of the closed-string diagrams that contribute to the four-particle amplitude; there is one and only one diagram in each order of perturbation theory.

Cinco soluções consistentes

- **Tipo IIA e Tipo IIB** (cordas fechadas, supersimetria $\mathcal{N} = 2$);
- **Tipo I** (cordas abertas e fechadas, supersimetria $\mathcal{N} = 1$);
- **Heterótica SO(32), Heterótica E8 × E8** (cordas fechadas, supersimetria $\mathcal{N} = 1$);
- Para estas teorias serem consistentes ao nível quântico, têm de estar definidas em $d = 10$ dimensões - requerem a presença de **dimensões extra!**
- **Supersimetria** necessária para haver campos fermiônicos.
- Espectros diferentes, mas sempre com um gravitão (cordas fechadas) e campos de gauge.

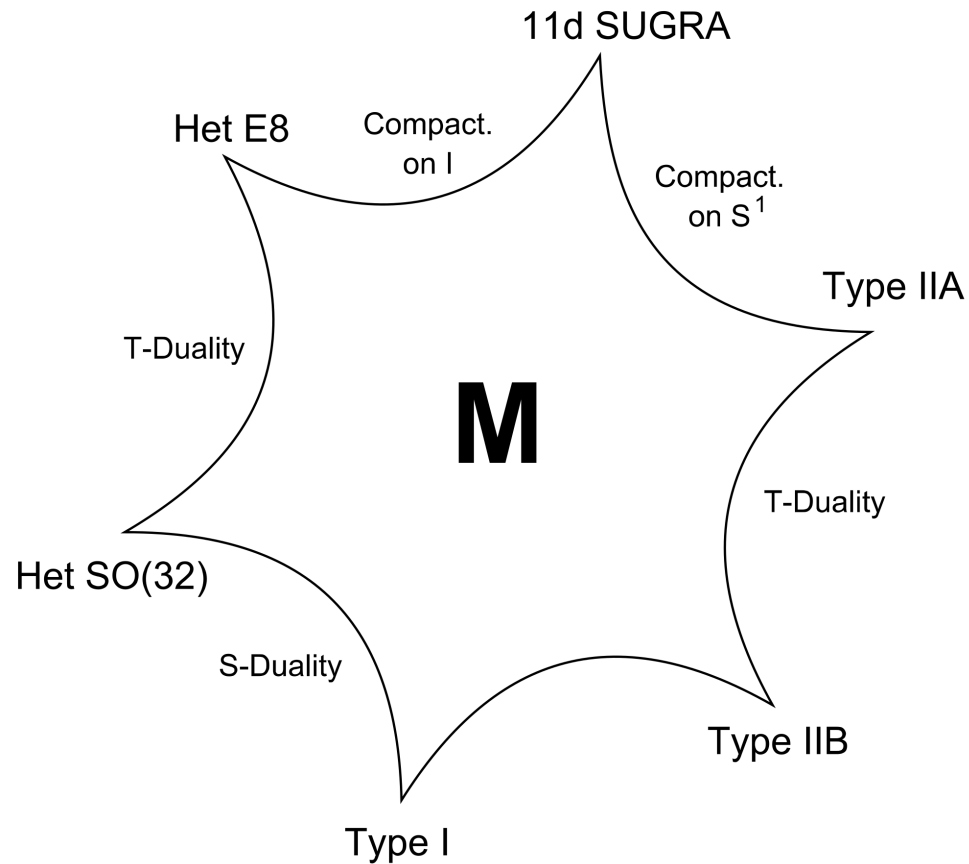
Supercordas livres de anomalias!

- Tipo IIA: teoria não quirial;
- Tipo IIB: cancelamento não trivial (Alvarez-Gaumé, Witten);
- Tipo I SO(32), Heterótica SO(32), Heterótica $E_8 \times E_8$: implica a escolha de um grupo de gauge (Green, Schwarz).
- Permitem a construção de modelos fenomenológicos (de grande unificação) em $d = 4$.

Dualidades em supercordas

- Quantização do momento de uma corda fechada numa direção compacta: $\dot{x} = n/R$;
- $X = x + mRt + \dots$, $H = \dot{X}^2 = m^2 R^2 + \frac{n^2}{R^2}$.
- Dualidade T: $m \leftrightarrow n$, $R \leftrightarrow \frac{1}{R}$.
- Dualidade T em cordas abertas: **D-branas**.
- Constante de acoplamento $g_S = e^\phi$;
- Dualidade S: $g_S \leftrightarrow \frac{1}{g_S}$, ou $\phi \leftrightarrow -\phi$.
- Todas as teorias relacionadas por dualidades - vácuos de uma única teoria em $d = 11$ (Witten).

Teia de dualidades



Tipos espertos...



Vantagens das supercordas

- São naturalmente quânticas;
- São naturalmente supersimétricas;
- Incluem naturalmente a gravidade (aliás, **requerem** a sua presença), bem como as outras interações;
- Tratam naturalmente as interações da mesma maneira;
- São livres de infinitos;
- A solução em $d = 11$ dimensões é **única** (Teoria M).

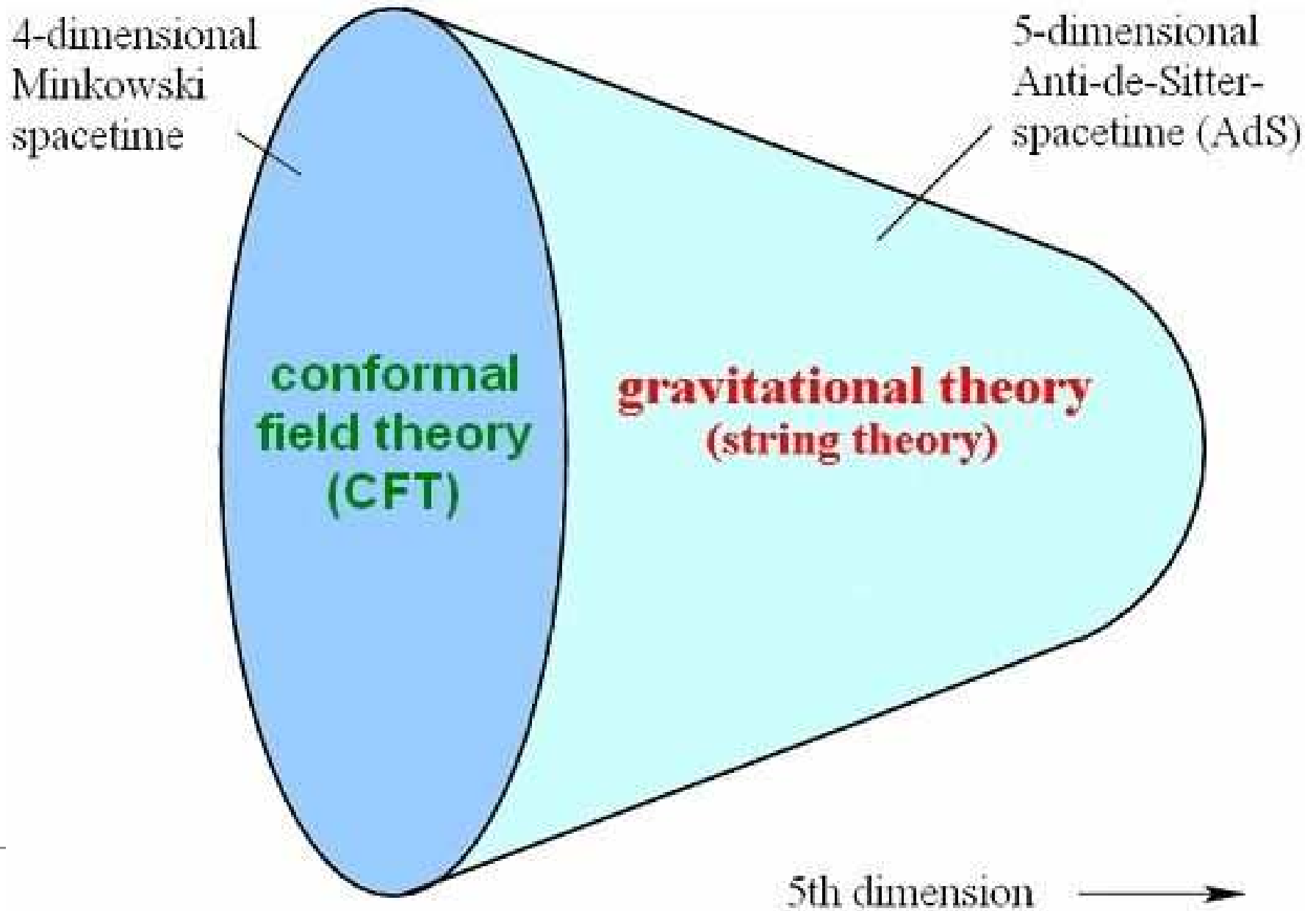
Desvantagens das supercordas

- Há um número enorme de maneiras de passar de $d = 10$ para $d = 4$ dimensões (i.e. de compactificar as dimensões extra);
- Diferentes escolhas dessa maneira de compactificar refletem-se em diferentes propriedades físicas em $d = 4$ dimensões;
- Diferentes espectros, mais e menos realistas, mas sempre com partículas ainda não observadas;
- Não existe uma escolha natural do modo de compactificar;
- Falta de poder previsivo...

Tipos espertos...



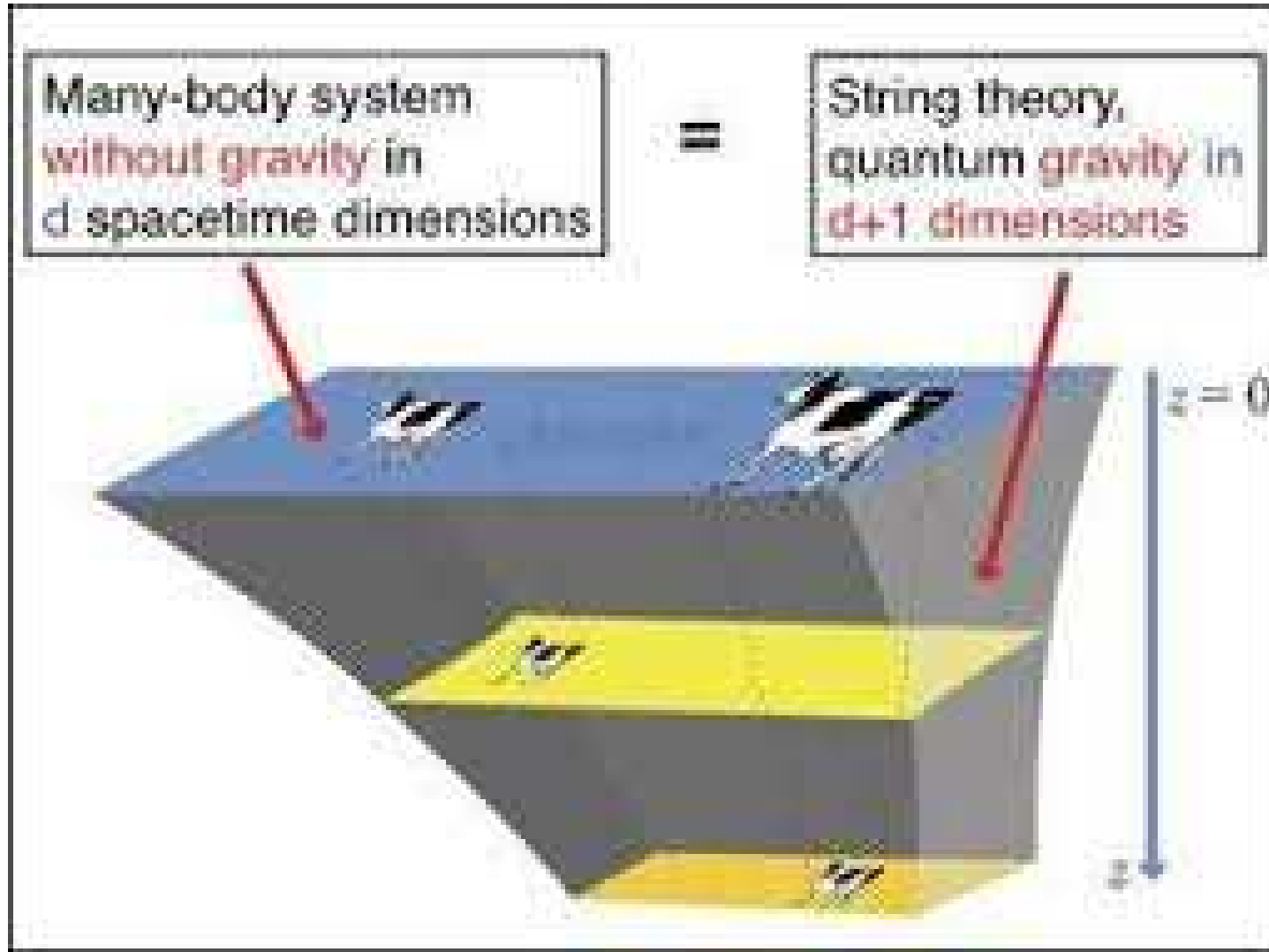
Correspondência AdS/CFT



Correspondência AdS/CFT

- Dualidade entre teorias de gravidade em espaços anti-de Sitter e teorias de campo conformes na sua fronteira.
- Princípio holográfico ('t Hooft, Susskind).
- Primeira realização: supercorda de tipo IIB em $AdS_5 \otimes S^5 \leftrightarrow \text{SYM } \mathcal{N} = 4$ em $d = 4$.
- Subsequentes diversas realizações, correspondentes a diferentes compactificações de supercordas e CFTs.

Correspondência AdS/CFT



Correspondência AdS/CFT

- Dualidade **fraco-forte**: acoplamento forte num regime \leftrightarrow acoplamento fraco no outro.
- Aplicações em QCD - plasma de quarks e glúons modulado por um buraco negro em $d = 5$.
- **limite KSS** para o QGP: $\frac{\eta}{s} = \frac{\hbar}{4\pi k_B}$ observado no RHIC em 2008.
- Aplicações em matéria condensada - transição de fase de supercondutores; condutividade elétrica do grafeno.

...e não falamos de buracos negros!

Em supercordas, equivalência entre a entropia macroscópica e microscópica de buracos negros supersimétricos (Strominger, Vafa).

O que as supercordas não são:

- não requerem nem implicam a presença de **multiversos**;
- não são adversárias do método científico;
- não sugerem nem pretendem dispensar nenhum tipo de confirmação experimental;
- não são “a teoria de tudo” nem o fim da Física.

O que as supercordas são: a mais promissora abordagem para uma teoria unificadora de todas as interações.

Sugestões de leitura

Atas de <http://www.whytrustatheory2015.philosophie.uni-muenchen.de/index.html>:

- Joseph Polchinski, *String theory to the rescue*, arXiv:1512.02477;
- Eva Silverstein, *The dangerous irrelevance of string theory*, arXiv:1706.02790;
- Fernando Quevedo, *Is String Phenomenology an Oxymoron?*, arXiv:1612.01569 [hep-th].

e ainda *A perspective on String Theory* por David Gross, e *Bohemian Gravity* por A Capella Science (no YouTube...).