آشنایی با فیزیک ذرات

نوید عباسی

۱. چشمه‌های ذرات

ذرات آشنا:

الکترون: گرم کردن فلز

پروتون: یونیزه کردن هیدروژن

ذرات ناآشناتر:

۱. پرتوهای کیهانی

۲. رآکتورهای هسته‌ای

۳. شتاب‌دهنده‌های ذرات

۲. جرم و انرژی

یادآوری: $\Delta U = q\,\Delta V \quad \Rightarrow \quad ۱(ev) = ۱(e) \times ۱(v) = ۱/۶ \times ۱۰^{-۱۹}(J)$

حالا گازی از الکترون‌های تابشی از یک فلز در دمای $T = ۱۰,۰۰۰\ (K)$ را در نظر بگیرید:

انرژی درونی گاز الکترونی

$$U \sim N\,E \sim n\,R\,T = N\,K\,T \quad \Rightarrow \quad E = ۱,۳۸ \times ۱۰^{-۲۳}\left(\frac{J}{K}\right) \times ۱۰,۰۰۰(K) \quad \cong \quad ۱(ev)$$

حال انرژی نسبیتی معادل با جرم یک الکترون را حساب می‌کنیم:

$$E = m\,c^{۲} \quad \Rightarrow \quad E = ۹,۱ \times ۱۰^{-۳۱}\,(Kg) \times (۳ \times ۱۰^{۸}\,\frac{m}{s})^{۲} \quad \cong \quad ۵۰۰,۰۰۰(ev) = \ ۰,۵\ (Mev)$$

انرژی نسبیتی الکترون ساکن $\ll$ انرژی گرمایی الکترون تابشی !!!!!!

۳. وضعیت مشابه

انرژی پتانسیل گرانشی جسمی با جرم m

$$U = -\frac{GM_e m}{R_e + h} \quad \text{یا} \quad U = mgh \quad ؟$$

بسط برای ارتفاع‌های کم در سطح زمین:

$$U = -\frac{GM_e m}{(R_e + h)} = (h \ll R_e)$$

$$= -\frac{GM_e m}{R_e} + \frac{GM_e m}{R_e^2} h$$

$$= -\frac{GM_e m}{R_e} + mgh$$

تمرین۱: جمله‌ی اول و دوم را برای جسمی به جرم ۷۰ کیلوگرم در ارتفاع ۱۰ متری سطح رمین مقایسه کنید.

۴. لزوم نسبیت

سرعت الکترون تابشی:

$$E = \frac{۱}{۲} m v^{۲} \quad \Rightarrow \quad ۱۰^{-۱۹} \sim ۱۰^{-۳۱} v^{۲} \quad \Rightarrow \quad v \sim ۱۰^{۶} \frac{m}{s}$$

احتمالا:

$$E = \frac{۱}{۲} m v^{۲} + m c^{۲}$$

بر طبق نظریه‌ی نسبیت خاص:

تکانه

$$P = \frac{m v}{\sqrt{۱ - (\frac{v}{c})^{۲}}}$$

انرژی

$$E = \frac{m c^{۲}}{\sqrt{۱ - (\frac{v}{c})^{۲}}}$$

$$E = ۱ \ (Mev) \quad \Rightarrow \quad v = ۰,۸۶۶۰۲۵ \ c$$
$$E = ۱۰ \ (Mev) \quad \Rightarrow \quad v = ۰,۹۹۸۷۴۹ \ c$$
$$E = ۳۰ \ (Mev) \quad \Rightarrow \quad v = ۰,۹۹۹۸۶۱ \ c$$

تمرین۱: نشان دهید $E^{۲} = (p c)^{۲} + (m c^{۲})^{۲}$

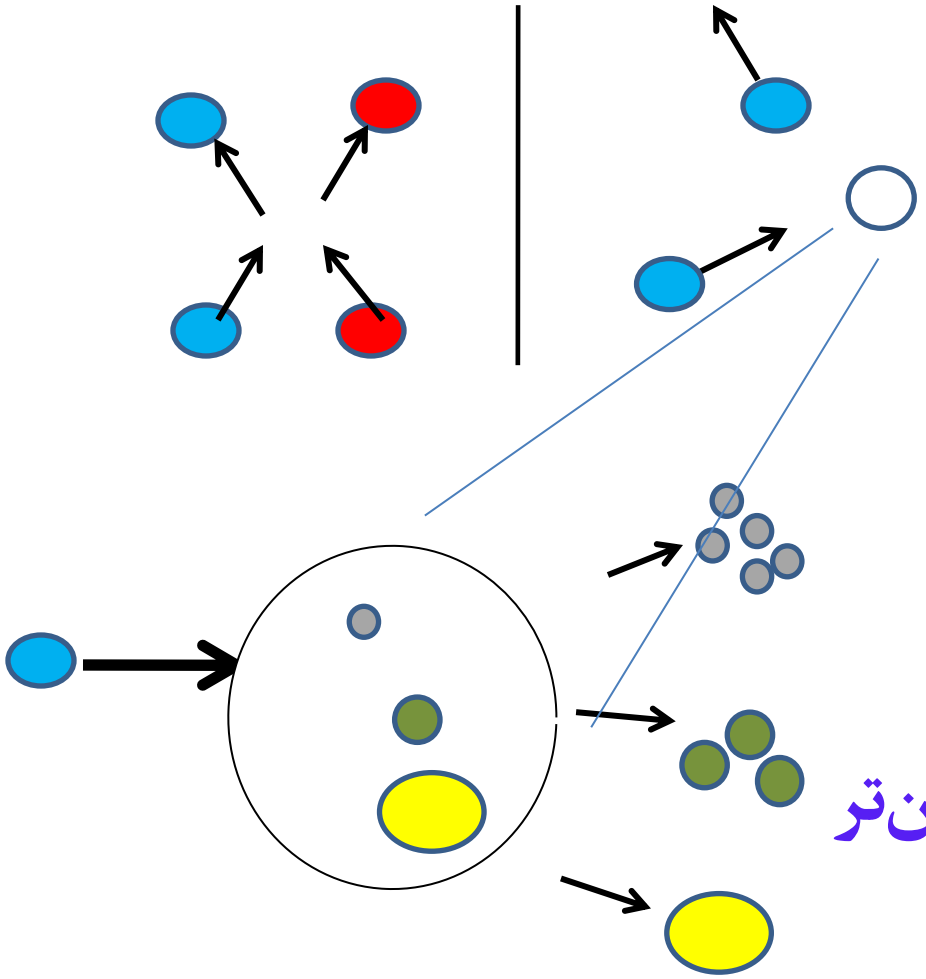
تمرین ۲: نشان دهید اگر $v \ll c$ آنگاه: $E = \frac{p^{۲}}{۲ m} + m c^{۲}$

کاهش فاصله ←

افزایش سرعت ↓

فیزیک کلاسیک	مکانیک کوانتومی QM
نسبیت خاص SR	نظریه‌ی میدان‌های کوانتومی QFT

۵. پراکندگی و کشف ذرات جدید

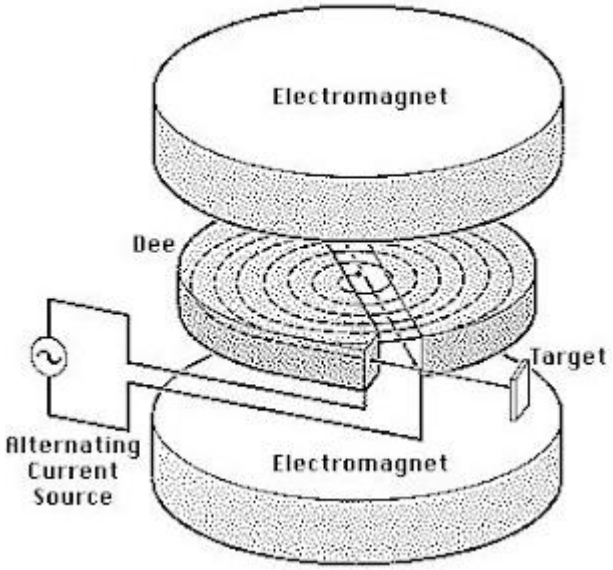


برخوردهای کم سرعت

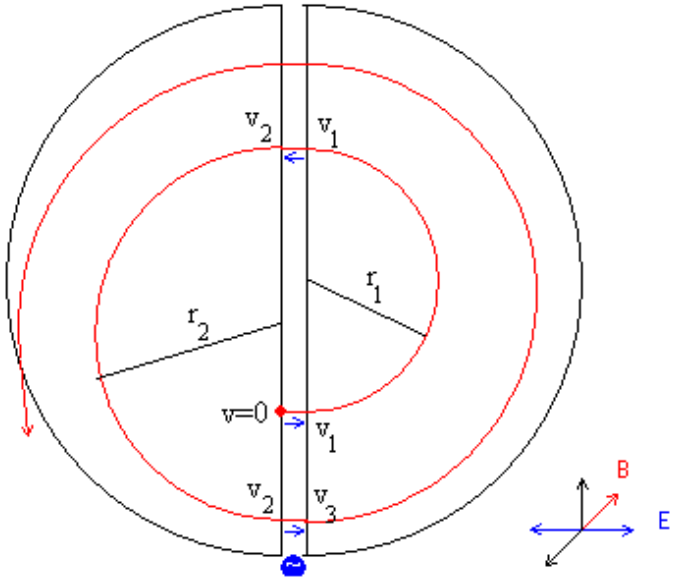
برخوردهای پر سرعت (پرانرژی)

ازلحاظ تاریخی، ذرات سنگین‌تر دیرترکشف شدند

۶. تهیه‌ی پرتوی پرانرژی



سیکلوترون(شتاب‌دهنده‌ی دایره‌ای)



$$a = \frac{F}{m} = \frac{Eq}{m} = \frac{\Delta V\, q}{d\ m} \quad \rightarrow \quad v = at + v_o \quad \rightarrow \quad qvB = \frac{m\,v^2}{R} \quad \rightarrow \quad v = \frac{qBR}{m}$$

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{q^2B^2R^2}{2m}$$

$$B = 1{,}5\ (T) \qquad R = 1\ (m) \qquad \Rightarrow \qquad E \sim 40\ (Mev)$$

۷. کشف ذرات بنیادی(دوران کلاسیک)

۱۸۹۷: کشف الکترون توسط **تامسون** ($\frac{e}{m}$ بزرگ)

خنثی بودن اتم ⟵ ارایه‌ی مدل‌های اتمی

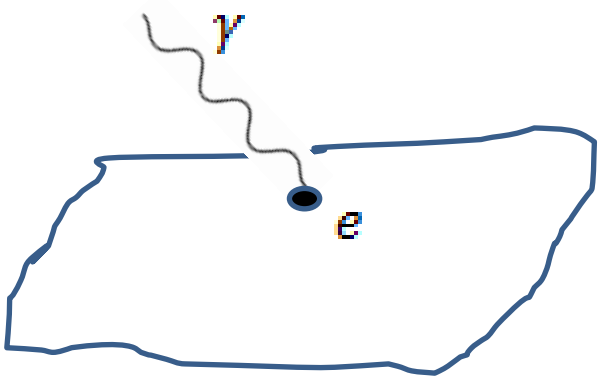
رادرفورد: هسته‌ی سبک‌ترین اتم: پروتون

۱۹۱۴: مدل اتمی **بوهر** (توصیف هیدروژن)

اتم بعدی که کشف شد: هلیوم (۲ الکترونی ولی $m = {}^{4}m_H$!)

۱۹۳۲: کشف نوترون **چادویک** **آخرین دستاورد دوران کلاسیک**

۸. فوتون؛ میراثی از دوران کلاسیک



۱۹۰۰: مساله‌ی جسم سیاه **(پلانک)**

۱۹۰۵: اثر فوتوالکتریک **(اینشتین)**

انگار الکترون با فوتون برهم‌کنش کرده

بعدها الکترودینامیک کوانتومی نشان داد:

$$F = \frac{K\, e\, e}{r^2}$$

فوتون = واسطه‌ی انتقال نیروی الکتریکی

به طور مشابه برای گرانش:

$$F = \frac{G\, m\, m}{r^2}$$

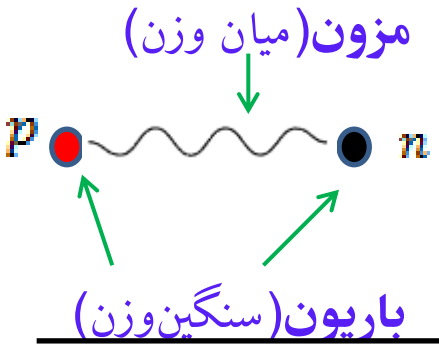
گراویتون = واسطه‌ی انتقال نیروی گرانشی

وجه مشترک فوتون و گرویتون: **بی‌جرم و با برد بی‌نهایت**

---

۹. شروع عصر طلایی: مزون؛ واسطه‌ای جرم‌دار

چرا اجرای هسته به هم پیوند خورده‌اند؟



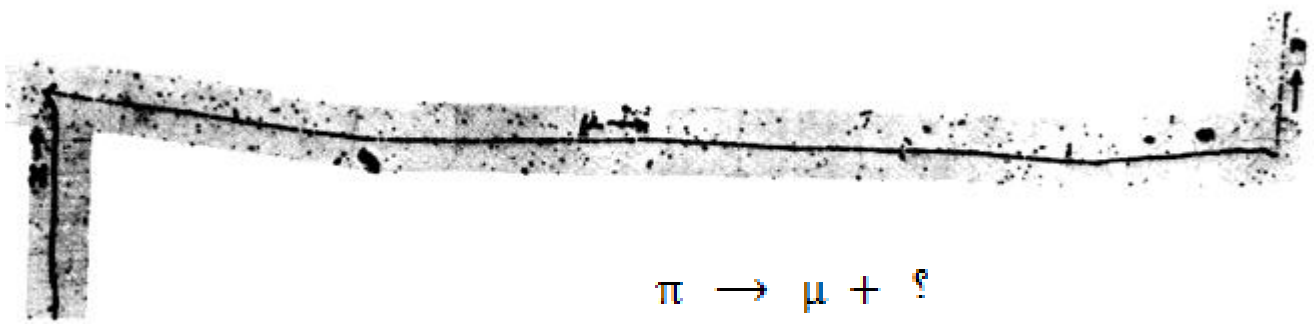
۱۹۳۴: یوکاوا

$m_p = ۱\ (\mathrm{GeV})$ $\quad m_\pi \approx ۱۳۰\ (\mathrm{MeV})$ $\quad m_e = ۰,۵\ (\mathrm{MeV})$

۱۹۳۷: پیدا شدن ناگهانی ذراتی شبیه به مزون یوکاوا در پرتوهای کیهانی **(اندرسون)**

بر خلاف انتظار اولیه‌ی یوکاوا: ذرات به‌دست‌آمده سبک بودند **(لپتون)**

۱۹۴۹: پاول



۱۰. عصر طلایی: پادذرات

علامت منفی دردسرساز در مکانیک کوانتومی نسبیتی: $E = \pm\sqrt{(pc)^2 + (m\,c^2)^2}$

فاینمن و استاکلبرگ: انرژی‌های منفی الکترون، انرژی‌های مثبت ذره‌ای دیگر به نام **پوزیترون (پاد الکترون)** هستند.

۱۹۳۱: کشف پوزیترون **(اندرسون)**

۱۹۵۵: کشف پاد پروتون **(چمبرلین)**

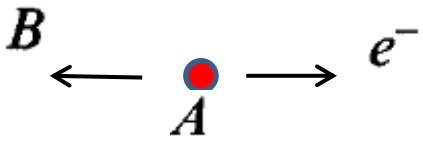
نسبیت خاص + مکانیک کوانتومی = وجود ذره و پادذره

سوال هیجان‌انگیز: **baryon asymmetry** problem

۱۱. عصر طلایی: نوترینو

مشاهده‌ای عجیب در واپاشی بتازا:

$$A \rightarrow B + e^-$$



$${}^{64}_{29}\mathrm{Cu} \rightarrow {}^{64}_{30}\mathrm{Zn}$$
$${}^{40}_{19}\mathrm{K} \rightarrow {}^{40}_{20}\mathrm{Ca}$$

محاسبه نشان می‌دهد: $E = \left(\frac{m_A^2 - m_B^2 + m_e^2}{2m_A}\right)c^2$ =انرژی الکترون

۱۹۳۰: درحالی‌که هنوز نوترون کشف نشده بود، **پاولی** گفت باید ذره‌ی دیگری به نام نوترون!!!! همراه الکترون تابش شده باشدکه انرژی گم شده را همراه دارد.

با کشف نوترون توسط چادویک در ۱۹۳۲، این ذره خنثی، **نوترینو** نام گرفت.

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}$$

مزونهای یوکاوا را به یاد آورید.

$$\pi \rightarrow \mu + \nu$$

۱۲. جدول لپتون‌ها در سال ۱۹۶۲:

خانواده‌ی لپتون‌ها دارای ۸ عضو بود:

	Lepton number	Electron number	Muon number
Leptons			
e^-	1	1	0
ν_e	1	1	0
μ^-	1	0	1
ν_μ	1	0	1
Antileptons			
e^+	−1	−1	0
$\bar{\nu}_e$	−1	−1	0
μ^+	−1	0	−1
$\bar{\nu}_\mu$	−1	0	−1

۱۳. ذرات شگفت

۱۹۵۲: شتاب‌دهنده‌ی **بروکهیون**

کشف ذره‌ای بسیار سنگین‌تر از پروتون: **لامبدا** $\Lambda \rightarrow p^{+} + \pi^{-}$

چرا شگفت؟

تولید = $۱۰^{-۲۳}(s)$

واپاشی = $۱۰^{-۱۰}(s)$

آهنگ تولید یا واپاشی در **الکترومغناطیس** = $۱۰^{-۲۰}(s)$

وجود دو نیروی دیگر:

نیروی قوی > نیروی الکترومغناطیس > نیروی ضعیف

۱۴. گلمان؛ مندلیف فیزیک

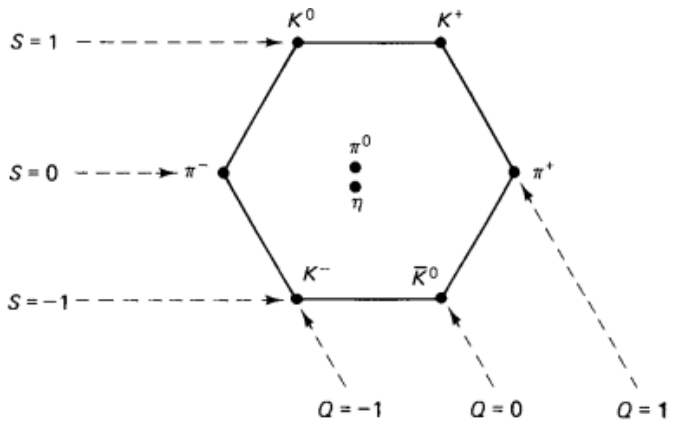
گلمان ادعا کرد:

همان‌طور که در الکترومعناطیس بار الکتریکی پایسته است

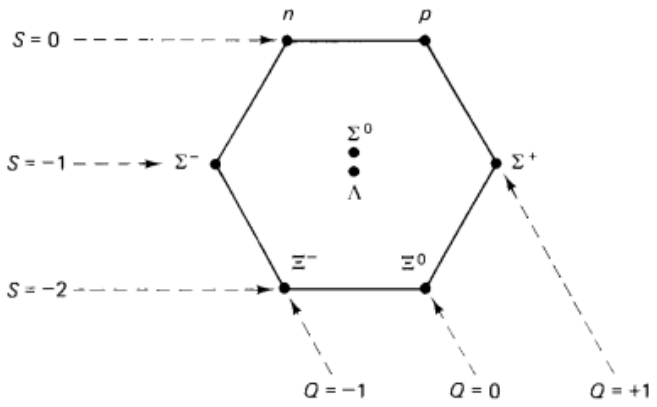
در حضور نیروی قوی، شگفتی پایسته است و به ذرات شگفتی نسبت داد

$$\pi^- + p^+ \rightarrow K^+ + \Sigma^- \qquad \pi^- + p^+ \not\rightarrow \pi^+ + \Sigma^-$$

۸تایه‌ی مزونی

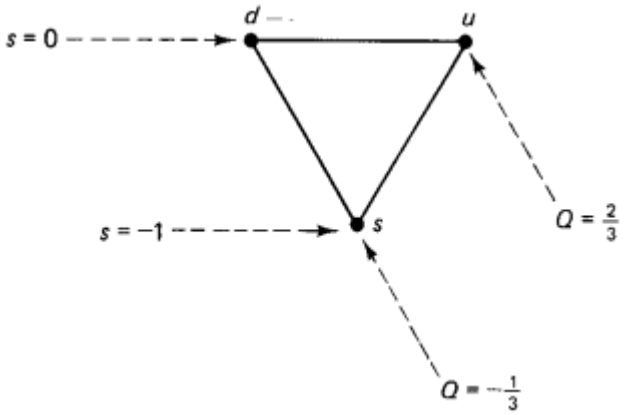


۸تایه‌ی باریونی



۱۵. مدل کوارک ۱۹۶۴: گلمان و زویگ

هادرون‌ها (باریون‌ها و مزون‌ها) از ذرات بنیادی‌تر ساخته شده‌اند: کوارک



۱- هر باریون از سه کوارک تشکیل شده

۲- هر مزون از یک کوارک و یک پادکوارک تشکیل شده

۱۶. دو مشکل مدل کوارک

۱-پیدا نشدن **کوارک تک** در آزمایشگاه

۲-تناقض بین **وجود باریونی مانند** uuu با **اصل طرد پاولی**

۱۹۶۴: پیشنهاد گرینبرگ:

۳- هریک از سه طعم کوارک خود می‌تواند در سه رنگ آبی قرمز و سبز موجود باشد

۴- تمام ذرات موجود در طبیعت بی‌رنگ هستند؛

یعنی یا مقدارکل هر رنگ صفر است یا هر سه رنگ به مقدار مساوی وجود دارد

پرسش: ذرات مجاز؟

۱۷. انقلاب نوامبر ۱۹۷۳

کشف مزونی سه برابر جرمی پروتون: J/ψ

(تینگ و **ریشتر)**

بازگشت به ایده قدیمی **بیورکن-گلاشو:** **وجود کوارک چهارم (افسون)**

Leptons: e, ν_e, μ, ν_μ

Quarks: d, u, s

۱۹۷۵: کشف لپتون سوم **(تاو)** τ

۱۹۷۷: کشف کوارک پنجم **(زیبایی)** b

و احتمالا کوارک ششم (سر)! t کشف در ۱۹۹۸

۱۸. مدل استاندارد ذرات ۱۹۸۳

سلام-واینبرگ-گلاشو

۳۶ کوارک + ۱۲ لپتون

LEPTON CLASSIFICATION

l	Q	L_e	L_μ	L_τ
e	−1	1	0	0
ν_e	0	1	0	0
μ	−1	0	1	0
ν_μ	0	0	1	0
τ	−1	0	0	1
ν_τ	0	0	0	1

QUARK CLASSIFICATION

q	Q	D	U	S	C	B	T
d	$-\frac{1}{3}$	−1	0	0	0	0	0
u	$\frac{2}{3}$	0	1	0	0	0	0
s	$-\frac{1}{3}$	0	0	−1	0	0	0
c	$\frac{2}{3}$	0	0	0	1	0	0
b	$-\frac{1}{3}$	0	0	0	0	−1	0
t	$\frac{2}{3}$	0	0	0	0	0	1

۱۹. مقدمه‌ای بر دینامیک ذرات؛ سیستم واحدها در فیزیک ذرات

در فیزیک ذرات علاقه داریم همه‌ی کمیت‌ها را در واحدهایی از GeV اندازه‌گیری کنیم: انرژی، جرم، تکانه، طول و.....!!!!!!!

با انتخاب $c=1$ ،جرم m ، تکانه mc و انرژی mc^2 با GeV بیان می‌شوند.

تمرین: مقادیر زیر را در SI حساب کنید:

تکانه‌ی 1GeV ، انرژی 1GeV و جرم 1GeV .

با انتخاب $\hbar = 1$ ، طول $\hbar/mc$ و زمان $\hbar/mc^2$ نیز بر حسب GeV^{-1} داده می‌شود.

تمرین: زمان $1\mathrm{GeV}^{-1}$، طول $1\mathrm{GeV}^{-1}$.

۲۰. قدرت نیروها

می‌خواهیم یک کمیت بی بعد نشان دهنده‌ی شدت برهمکنش بیابیم با الکترومغناطیس شروع می‌کنیم:

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{qq}{r} \quad \rightarrow \quad \alpha_{em} = \frac{\frac{1}{4\pi}\frac{e^2}{\hbar/mc}}{mc^2} = \frac{e^2}{4\pi\hbar c} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{137}}$$

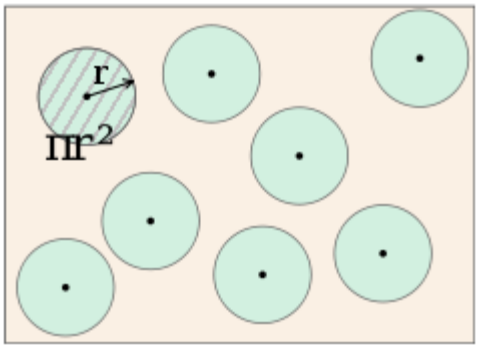
نیرو	شدت α	نظریه	واسطه
قوی	10	Chromodynamics	Gluon
الکترومغناطیس	10^{-2}	Electrodynamics	Photon
ضعیف	10^{-13}	Flavordynamics	*W* and *Z*
گرانش	10^{-42}	Geometrodynamics	Graviton

۲۱. محاسبه۱ در فیریک ذرات: سطح مقطع پراکندگی

$$\sigma = \frac{1}{nAI}\frac{dN}{dx}$$

شار ذرات فرودی: $\boldsymbol{I}\left(\frac{\text{particle}}{m^2 s}\right)$

چگالی ذرات هدف: $\boldsymbol{n}\left(\frac{\text{particle in targert}}{m^3}\right)$

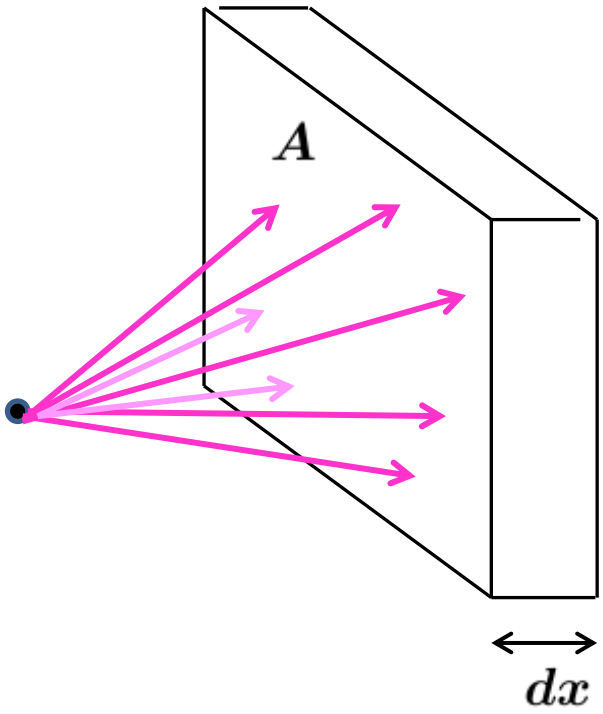


سطح مقطع مشترک هدف و پرتو فرودی: $\boldsymbol{A}(m^2)$

آهنگ زمانی تعداد رویدادهادر واحد طول عمق هدف:

$$\frac{\boldsymbol{dN}}{\boldsymbol{dx}}\left(\frac{\text{event(particle-particle)}}{ms}\right)$$

۲۲. سطح مقطع دیفرانسیلی



سطح مقطع بر واحد زاویه‌ی فضایی

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{\mathcal{L}} \frac{dN}{d\Omega}$$

$$d\sigma = \frac{1}{\mathcal{L}} \left(\frac{dN}{d\Omega} \right) d\Omega$$

احتمال رویداد

شار فرودی

تعداد حالت‌های نهایی

۲۳. محاسبه۲ در فیریک ذرات: آهنگ واپاشی

احتمال در واحد زمان واپاشی یک ذره:

$$dN = -\Gamma N\, dt$$

$$N(t) = N(0)e^{-\Gamma t}$$

طول عمر $\tau = \frac{1}{\Gamma}$

رابطه‌ی $d\Gamma$ شبیه $d\sigma$ است:

$$d\Gamma \sim \frac{1}{m_0}\left(\frac{dN}{d\Omega}\right) d\Omega$$

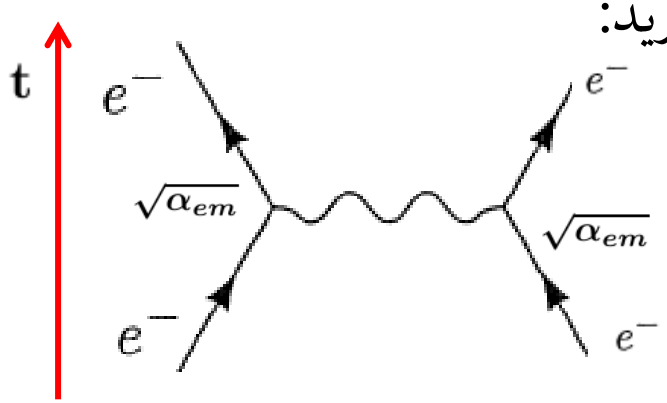
احتمال رویداد

تعداد حالت‌های نهایی

جرم ذره‌ی واپاشنده

۲۴. محاسبه دامنه‌ی رویداد (نمودارهای فاینمن)

مثال ساده‌ی برهم‌کنش کولنی را در نظربگیرید:

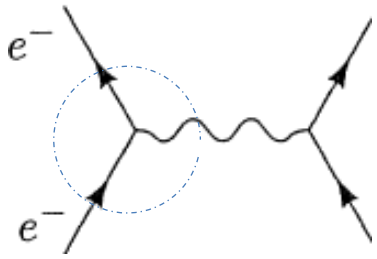


پتانسیل متناسب است با دامنه احتمال

دامنه‌ی احتمال متناسب است با: $\sqrt{\alpha_{em}}\sqrt{\alpha_{em}} = \alpha_{em}$

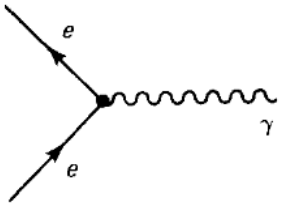
پس احتمال متناسب است با: α_{em}^2

$$\sigma = \frac{\pi \alpha_{em}^2}{3m_e^2}$$

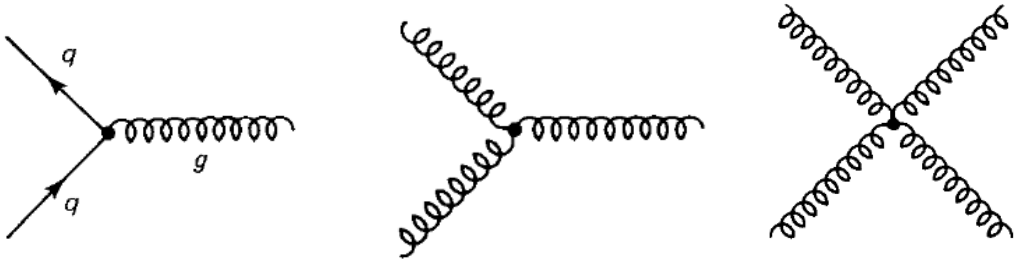


۲۵. راس‌ها در مدل استاندارد

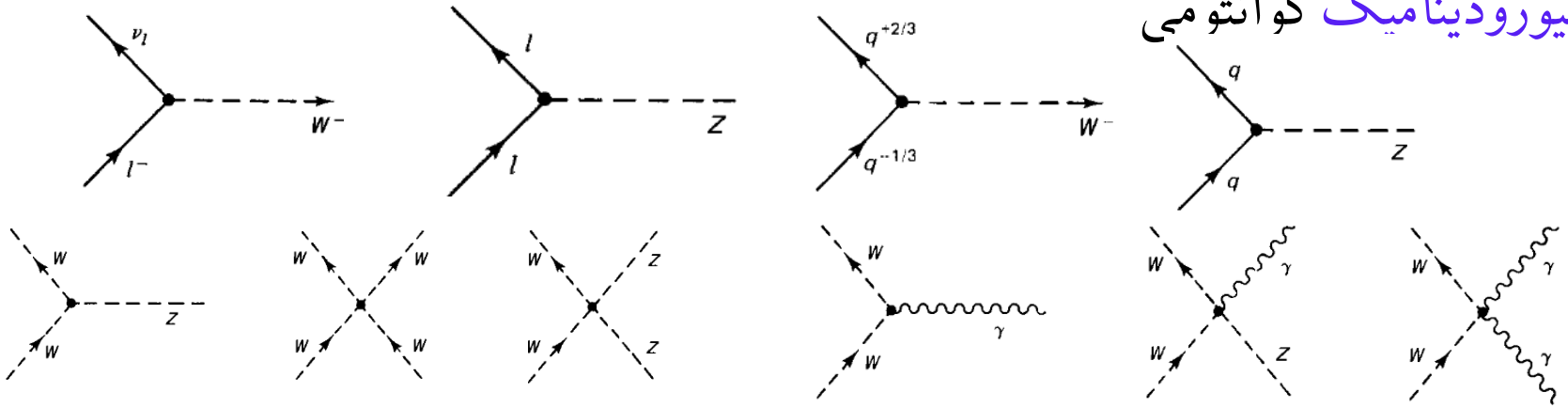
الکترودینامیک کوانتومی



کرومودینامیک کوانتومی



فلیورودینامیک کوانتومی

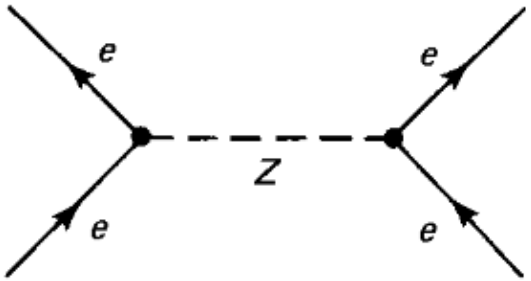


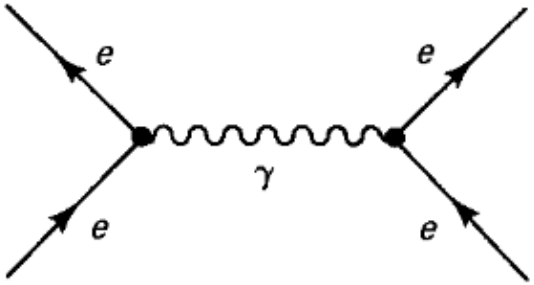
۲۶. چند مثال

۱. پراکندگی $ee \to ee$

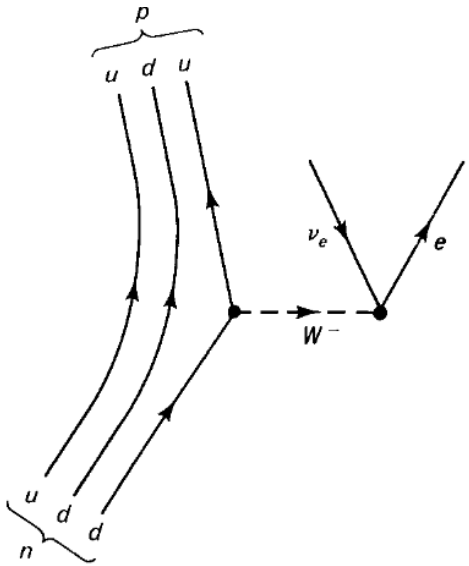
۲۶. چند مثال

۱. پراکندگی $ee \to ee$





۲. پراکندگی $n \to p^+ + e^- + \bar{\nu}$



۲۷. جدول ذرات

۱۲ لپتون

۳۶ کوارک

۱ فوتون (واسطه)

۱ Z (واسطه)

۲ $W^{\pm}$ (واسطه)

؟ گلوئون

۲۷. جدول ذرات

۱۲ لپتون

۳۶ کوارک

۱ فوتون (واسطه)

۱ Z (واسطه)

۲ $W^{\pm}$ (واسطه)

۸ گلوئون

۶۰

منشا جرم ذرات چیست؟

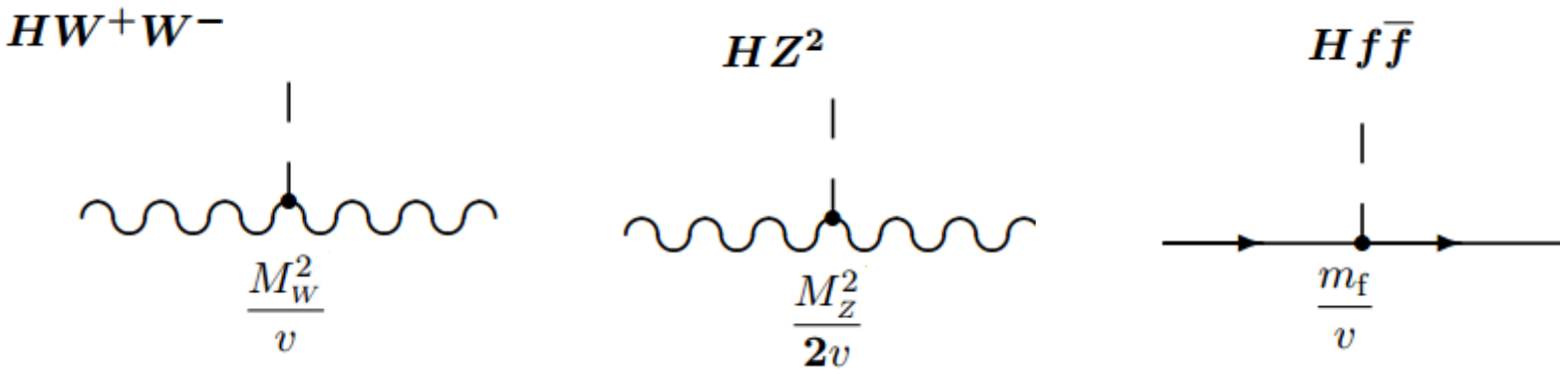
۲۷. جدول ذرات

۱۲ لپتون
۳۶ کوارک
۱ فوتون (واسطه)
۱ Z (واسطه)
۲ $W^{\pm}$ (واسطه)
۸ گلوئون
۶۰

منشا جرم ذرات چیست؟ ۶۱ هیگز

۲۸. راس‌های هیگز

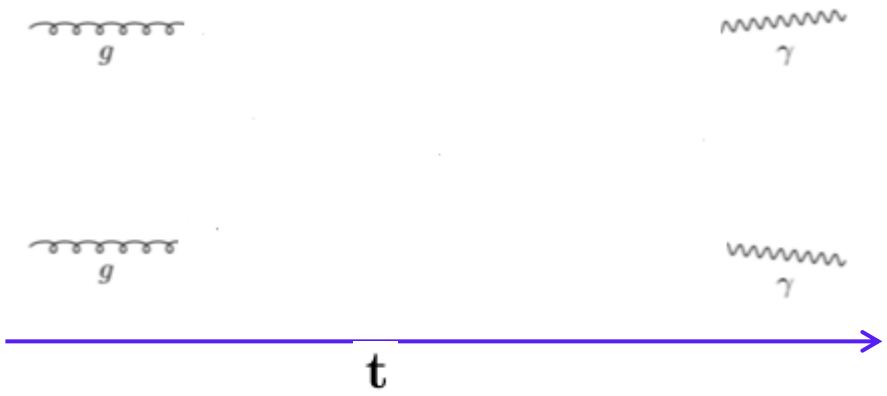
شدت هر راس متناسب است با **جرم ذره**



۲۹. کشف هیگز در سرن ۲۰۱۲

پیش‌بینی تئوری در مورد جرم هیگزدر حدود $120\,GeV$ است

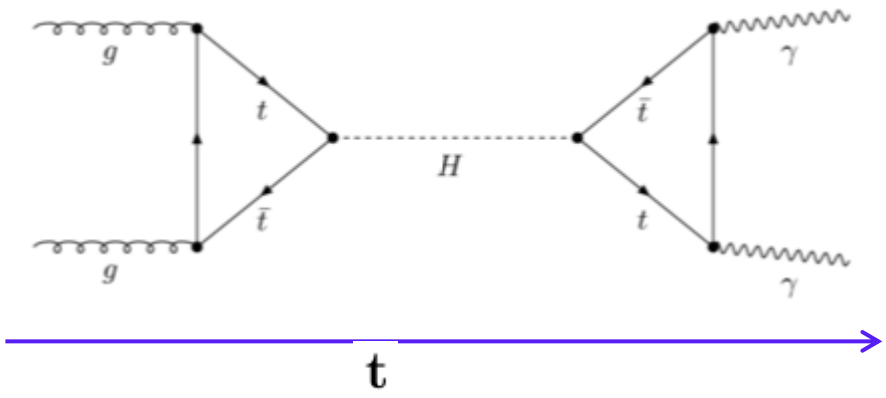
سهم غالب ازنمودار زیر می‌آید:



۲۹. کشف هیگز در سرن ۲۰۱۲

پیش‌بینی تئوری در مورد جرم هیگزدر حدود $120\,GeV$ است

سهم غالب ازنمودار زیر می‌آید:



۳۰. ادامه‌ی راه

انتظار برای کشف ابر تقارن

فرمیون ↔ بوزون

سوپر الکترون

سوپر هیگز

...

به سوی کیهان‌شناسی جهان اولیه.....